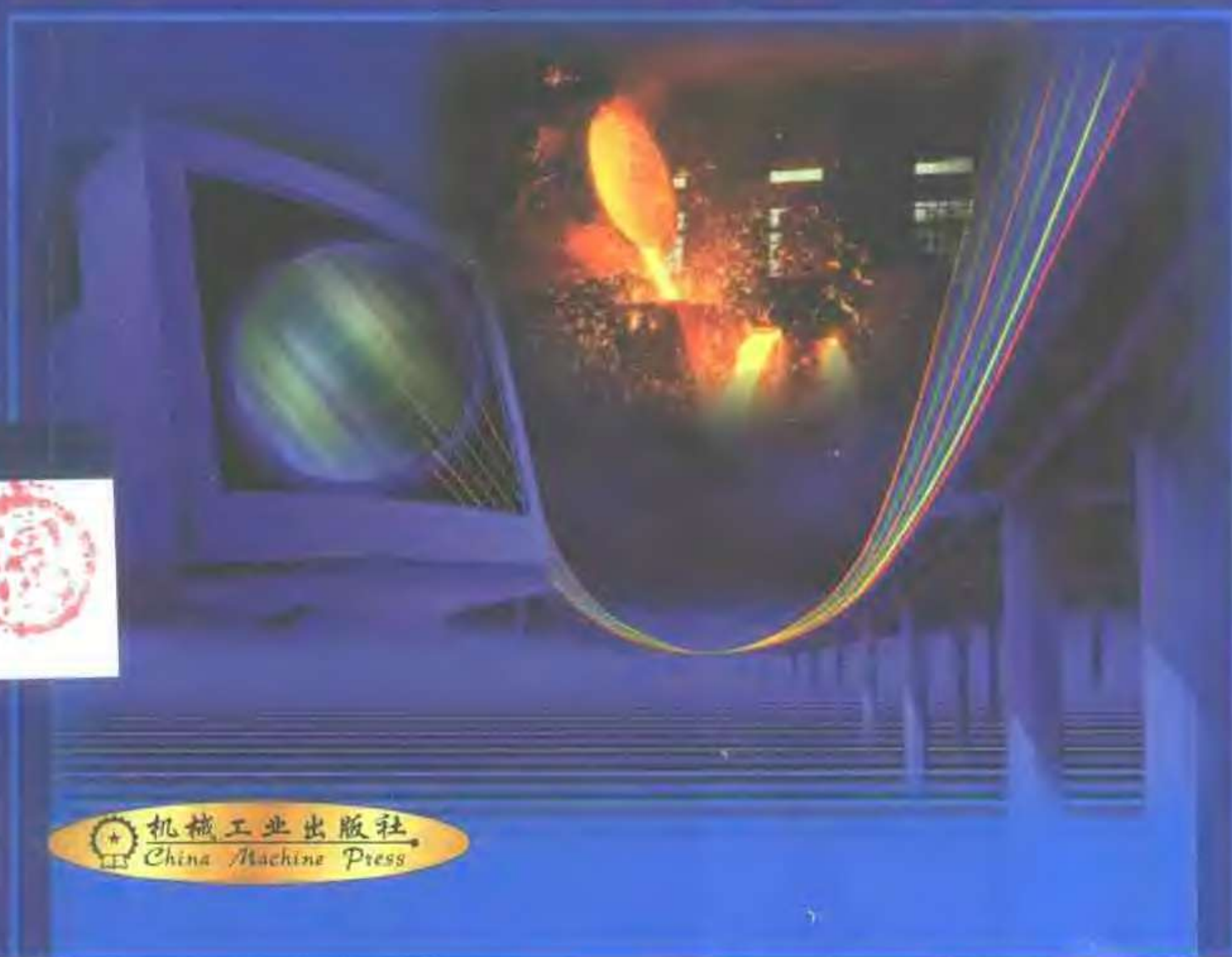


普通高等教育规划教材

计算机在材料热加工 领域中的应用

李英民 崔宝侠 苏仕方 编著



机械工业出版社
China Machine Press

普通高等教育规划教材

计算机在材料热加工 领域中的应用

李英民 崔宝侠 苏仕方 编著



机械工业出版社

本书分别就计算机检测与控制技术、计算机数值模拟技术、专家系统、计算机管理信息系统的基本知识、理论和方法及在材料热加工领域中的应用实例等方面进行了较全面的介绍、论述和展望。本书适于作为材料热加工专业的研究生、本科生学习的教科书,亦可供有关科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

计算机在材料热加工领域中的应用/李英民等编著.

—北京:机械工业出版社,2001.6

ISBN 7-111-08481-0

I. 计… I. 李… II. 计算机应用-金属材料-热加工 N. TG306-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 14660 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:贡克勤 版式设计:冉晓华 责任校对:吴美英

封面设计:方 芬 责任印制:郭景龙

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2001 年 5 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·8.5 印张·207 千字

0 001—2 000 册

定价:13.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

前 言

计算机技术的发展正在改变着世界,对整个人类文明和社会进步产生着极其深刻的影响。利用计算机技术和网络技术等高新技术来改造包括热加工在内的传统产业,已给这些产业带来了革命性的变化,这也是科学技术发展的必然趋势。计算机在热加工领域中的应用范围越来越宽,带来的经济和社会效益也日益显著。

为了进一步推动和促进计算机技术在热加工领域中的应用和实践,我们结合多年教学和科研实践经验,编写了《计算机在材料热加工领域中的应用》一书。本书比较系统地介绍了计算机在材料热加工生产和研究领域的现状、应用实例及发展前景。全书自始至终体现了从理论到实践、达到解决生产实际问题的目的的特点。鉴于此,本书在选材、内容、组织和编排等方面力求做到:

系统性和新颖性:较系统地介绍了有关计算机的基本理论、方法及实现技术。同时,着眼于当前国内外的最新研究成果,使读者掌握新理论、新方法,跟踪各研究领域的新趋势。

实用性和可读性:既注重基础知识的介绍和理论上探讨,又注重在实践中的应用。另外,书中首先介绍的有关知识为后续内容的阅读理解作了铺垫,便于读者掌握和理解。

全书共分5章。沈阳工业大学李英民编写第1、4章并负责全书统稿,沈阳工业大学崔宝侠编写第2、5章,沈阳铸造研究所苏仕方编写第3章。第1章(综述)介绍了计算机技术与热加工工程的关系,计算机技术在热加工生产中的应用范围。第2章(计算机检测与控制技术及在热加工中的应用)介绍了检测与控制的基础知识和理论,计算机检测与控制应用实例分析。第3章(计算机数值模拟技术及在热加工中的应用)介绍了计算机数值模拟技术的现状、研究内容、方法以及在铸造、焊接中的应用。第4章(专家系统及在热加工中的应用)介绍了专家系统的基本概念、结构、实现方式、开发过程及发展趋势,同时还介绍了铸造缺陷分析的专家系统和焊接专家系统的应用情况。第5章(计算机在企业管理信息系统中的应用)介绍了管理信息系统的基本知识、系统开发及开发实例。

由于计算机技术的发展日新月异,新理论、新方法、新应用不断出现,这给我们编写这本书带来一定的困难。虽然我们力求把最新的知识和信息奉献给读者,但本书所介绍的内容和信息还不能涵盖计算机在材料热加工中的所有领域。由于作者学识有限,因此,难免存在不妥之处,诚请广大同行、读者批评指正。

在本书的编辑出版过程中,作者得到了沈阳工业大学有关领导、部门的大力支持。常晶和徐冰同志参加了全书的编排工作,作者在此表示衷心的感谢。

作者

2001年1月于沈阳

目 录

前言

第 1 章 综 述

1.1 计算机技术与热加工工程	1
1.1.1 引言	1
1.1.2 热加工领域的计算机和网络技术	1
1.2 计算机在热加工中的应用	2
1.2.1 计算机辅助设计和集成制造系统	2
1.2.2 计算机检测与控制系统	4
1.2.3 计算机的信息处理系统	5
1.2.4 人工智能与专家系统	6
1.2.5 计算机的数值模拟系统	8
1.3 结束语	10

第 2 章 计算机检测与控制技术及在热加工中的应用

2.1 检测与控制的基本概念	11
2.1.1 信息的检测	11
2.1.2 自动控制技术	11
2.1.3 过程控制技术	12
2.2 检测技术	13
2.2.1 检测与转换技术	13
2.2.2 测量误差	14
2.2.3 传感器	16
2.3 控制仪表与装置	19
2.3.1 控制仪表与装置的分类及发展	19
2.3.2 调节器	21
2.3.3 执行器	24
2.3.4 变送器	25
2.4 自动控制技术	25
2.4.1 控制理论的产生及其发展	25
2.4.2 反馈控制理论	26

2.4.3 模糊控制	28
2.4.4 专家控制系统	31
2.4.5 神经网络控制	32
2.5 过程控制系统	33
2.5.1 过程控制的特点	33
2.5.2 简单控制系统	34
2.5.3 常用高性能过程控制系统	35
2.5.4 实现特殊要求的过程控制系统	36
2.5.5 集散控制系统 DCS (Distribution Control System)	38
2.6 计算机检测与控制系统实例	41
2.6.1 型砂系统质量控制	41
2.6.2 焊接电源的微机控制技术	43
2.6.3 电弧参数的模糊控制技术	44

第 3 章 计算机数值模拟技术及在热加工中的应用

3.1 概述	48
3.1.1 计算机数值模拟技术及在热加工中的作用	48
3.1.2 热加工工艺过程数值模拟的主要内容	48
3.1.3 热加工过程数值模拟的数值计算方法	50
3.1.4 求解条件	51
3.2 数值模拟技术在铸造中的应用	53
3.2.1 铸件充型及凝固过程计算机数值模拟	53
3.2.2 铸造工艺 CAD	64
3.2.3 铸件微观组织模拟	68
3.3 数值模拟技术在焊接中的应用	71
3.3.1 焊接热传导分析	72

3.3.2 焊接熔池中的流体动力学和 传热分析	75
3.3.3 焊接热影响区的相变和 组织性能的预测	78
3.4 热加工领域数值模拟技术的 发展趋势	81

第4章 专家系统及在 热加工中的应用

4.1 概述	83
4.1.1 专家系统的概念	83
4.1.2 专家系统的特点	83
4.1.3 专家系统的应用	83
4.1.4 专家系统的产生与 发展	85
4.2 专家系统的结构	86
4.3 专家系统的实现方式	88
4.3.1 建立专家系统的原则	88
4.3.2 建立专家系统的途径	88
4.4 专家系统的开发	89
4.4.1 开发工具	89
4.4.2 建立专家系统的过程	90
4.5 专家系统应用实例	92
4.5.1 铸件缺陷分析的专家 系统	92
4.5.2 焊接专家系统的应用	98
4.6 专家系统的发展趋势	99

第5章 计算机在企业管理信息 系统中的应用

5.1 管理信息系统的概念	101
5.1.1 管理信息系统的定义	101
5.1.2 管理信息系统的结构	101
5.1.3 管理信息系统在企业管理 中的作用	102
5.2 现代计算机技术	104
5.2.1 计算机硬件系统	104
5.2.2 计算机软件基础	106
5.2.3 计算机网络技术	108
5.3 信息系统技术	109
5.3.1 数据库系统	109
5.3.2 数据库的设计	110
5.3.3 决策支持系统 DSS (Decision Support System)	113
5.4 企业管理信息系统的开发	116
5.4.1 企业管理信息系统的 开发方法	116
5.4.2 需求分析	117
5.4.3 系统分析及系统设计	118
5.4.4 系统实施、评估与运行管理	122
5.5 管理信息系统的开发实例	123
5.5.1 铸造车间的管理信息系统	123
5.5.2 熔模铸造厂的计算机管理 信息系统	125
参考文献	128

第1章 综 述

1.1 计算机技术与热加工工程

1.1.1 引言

电子计算机被公认是 20 世纪最重大的工业革命成果之一。经过半个多世纪的发展,计算机技术日新月异、突飞猛进,大大出乎人们的预料。计算机自问世以来,得到了越来越广泛的应用,有力地推动了国民经济、科学技术和文化事业的发展。尤其在 70 年代初,大规模集成电路技术的发展,微型计算机的出现,为计算机的广泛应用开拓了极其广阔的前景,展示了它在科学技术领域中日益显要的地位。计算机的应用已远不止科学计算,更成为科学技术领域存储、传输、处理、加工数字化信息的工具,已渗透到国民经济、人民生活的各个领域,从而形成新时代的一种文化——计算机文化。

计算机技术在近 30 年里对包括热加工技术在内的机械制造业的发展与变革产生了巨大的推动作用。以现代先进制造技术 AMT (Advanced Manufacturing Technology) 及信息高速公路 (Information Highway) 为代表的技术革命已使机械制造业发生了翻天覆地的变化。目前,机械制造业已将计算机技术应用到产品设计 (CAD)、工艺规划设计 (CAPP)、制造 (CAM)、管理信息系统 (MIS)、办公自动化 (OA) 等领域,将这一系列的计算机辅助技术加以集成统一,就成为所谓的计算机集成制造系统 (CIMS)。

在热加工生产和研究领域,计算机技术的应用也日趋广泛,如铸造、焊接的计算机辅助分析、计算机检测与控制、专家系统、信息处理系统、工艺工装设计的计算机应用等等。在这些方面引入计算机技术,促进了热加工生产过程管理的规范化、标准化,大大提高了生产效率和产品质量,缩短了生产周期,降低了成本,增强了产品在市场中的竞争能力。

1.1.2 热加工领域的计算机和网络技术

计算机和网络技术的发展正在改变着世界,对人类社会正产生着极其深远的影响。利用以计算机为代表的高新技术来促进传统产业的改造与进步,已成为科学技术发展的必然趋势。

目前,已有越来越多的单位和企业建立了计算机网络,科研和工程技术人员可以通过网络传递各种信息。计算机和网络技术已全面进入热加工生产过程,即从订货到加工、直至发货的全部过程的各步骤都可以从计算机和网络中及时地得到必需的信息和进行所有的生产、经营等活动。在机械加工领域中,CIMS 就是围绕数控加工中心的 CAD、CAPP、CAQ、CAM 等的信息集成系统。

因特网是一个国际性的计算机互联网络,它由千百万计相互联接的计算机组成,范围遍及全世界,是现代社会传递信息的重要工具。它对加工制造业的影响是巨大的,目前,国外的先进制造企业 50% 左右的生产信息是通过因特网传递的。一些企业的商务活动已过渡到网上商务时代。国内因特网的发展也非常快,一些组织、企业都已拥有了自己的站点或主页。部分企业的网上电子商务活动也相当活跃。比如铸造模具厂家,通过因特网已实现了异地设计和远程制造。

企业内部网络的建立使企业管理信息和工程技术信息计算机化并通过网络管理起来,从根本上改变了企业传统的管理经营模式。企业领导层和各职能部门可以直接地、及时地通过网络和生产第一线人员交流信息,各种技术文档、资料也可通过网络分发,甚至网上讨论和会议,从而大大提高了效率,减少了企业在经营、管理、设计、生产各环节的脱节现象。

为了形成完整的网络信息系统,已开发出不少成套的软件系统。从管理信息的角度,曾提出的物料需求计划系统 MRP(Materials Requirement Planning),它主要是管理企业的原料、半成品直到产品的物流有关的信息。随后又发展为制造资源计划系统 MRPII(Manufacturing Resource Planning)。这一系统可以将企业中的产、供、销、人、财、物,即各种资源的信息统一管理起来。在此基础上,又发展有企业资源计划 ERP(Enterprise Resource Planning),它扩展了 MRPII 的信息范围。从企业外部来说,包括了供应商、营销网络和客户的信息,从企业内部来说,包括了从设计到生产制造的信息,从而形成一个完整的信息系统。可以说,未来的工厂管理就是建立在计算机网络基础上的数字化工厂管理。

1.2 计算机在热加工中的应用

计算机和网络技术现今已十分普及,不再神秘莫测。除了人们利用计算机进行文字处理、电子表格、一般计算等方面工作外,还可通过网络传输电子邮件、技术资料、产品图样等各种信息。热加工领域中计算机的应用也十分广泛,已渗透到热加工工艺、生产、管理等各个环节和过程。在信息数据处理、检测与控制、生产过程和工艺辅助设计与制造等方面应用最为普遍,如图 1-1 所示。

1.2.1 计算机辅助设计和集成制造系统

计算机辅助设计 CAD (Computer Aided Design)、计算机辅助制造 CAM (Computer Aided Manufacturing)、计算机辅助工程 CAE (Computer Aided Engineering)、计算机辅助工艺规划 CAPP (Computer Aided Process Planning)是当代计算机应用的重要领域。随着计算机硬件和软件技术水平的迅速提高,CAD、CAM、CAE 和 CAPP 技术及其应用一直处于日新月异的发展浪潮之中。

设计是分析与综合相结合的复杂过程,既包含大量的数值计算,参数选择和绘图等繁琐工作,也包含创造性思维,经验运用和判断评价等智能行为。计算机的应用,使得设计人员在设计过程中,能充分发挥计算机的强大运算功能,大容量信息存储与快速信息查找的能力,完成信息管理、数值计算、分析模拟、优化设计和绘图等项任务,而设计人员可集中精力进行有效的创造性思维,从而更好地完成从设计和制造方案的提出、评价、分析模拟与修改到具体实现设计和制造等全过程。这种设计人员和计算机的有机结合,发挥各自特长的设计方法,就是 CAD。目前,CAD 已成为计算机应用的一个十分重要领域。

CAD 技术从根本上改变了传统的手工设计、绘图及制造等的落后状况。CAD 的技术应用可显著提高设计和制造质量,缩短设计周期,实现设计与分析的统一,可轻易地设计出合理的工艺,产生显著的社会经济效益。同时,为 CAE、CAM、CAPP 及计算机集成制造系统 CIMS (Computer Integrated Manufacturing System)的实现准备完备的信息奠定基础。

计算机辅助工程 CAE 是通过建立能够准确描述研究对象某一过程的数学模型,采用合适可行的求解方法,使得计算机模拟仿真出研究的特定过程,分析有关影响因素,预测这一特定过程的可能趋势与结果。铸造过程数值模拟技术便属于典型的 CAE 技术。热加工领域 CAE

技术涉及到热加工技术理论和实践、计算机图形学、多媒体技术、可视化技术、三维造型、传热学、流体力学、弹塑性力学等多种学科,是多学科交叉的前沿领域。国内外都投入大量人力和财力从事这方面的研究,并已取得了大量的研究成果。

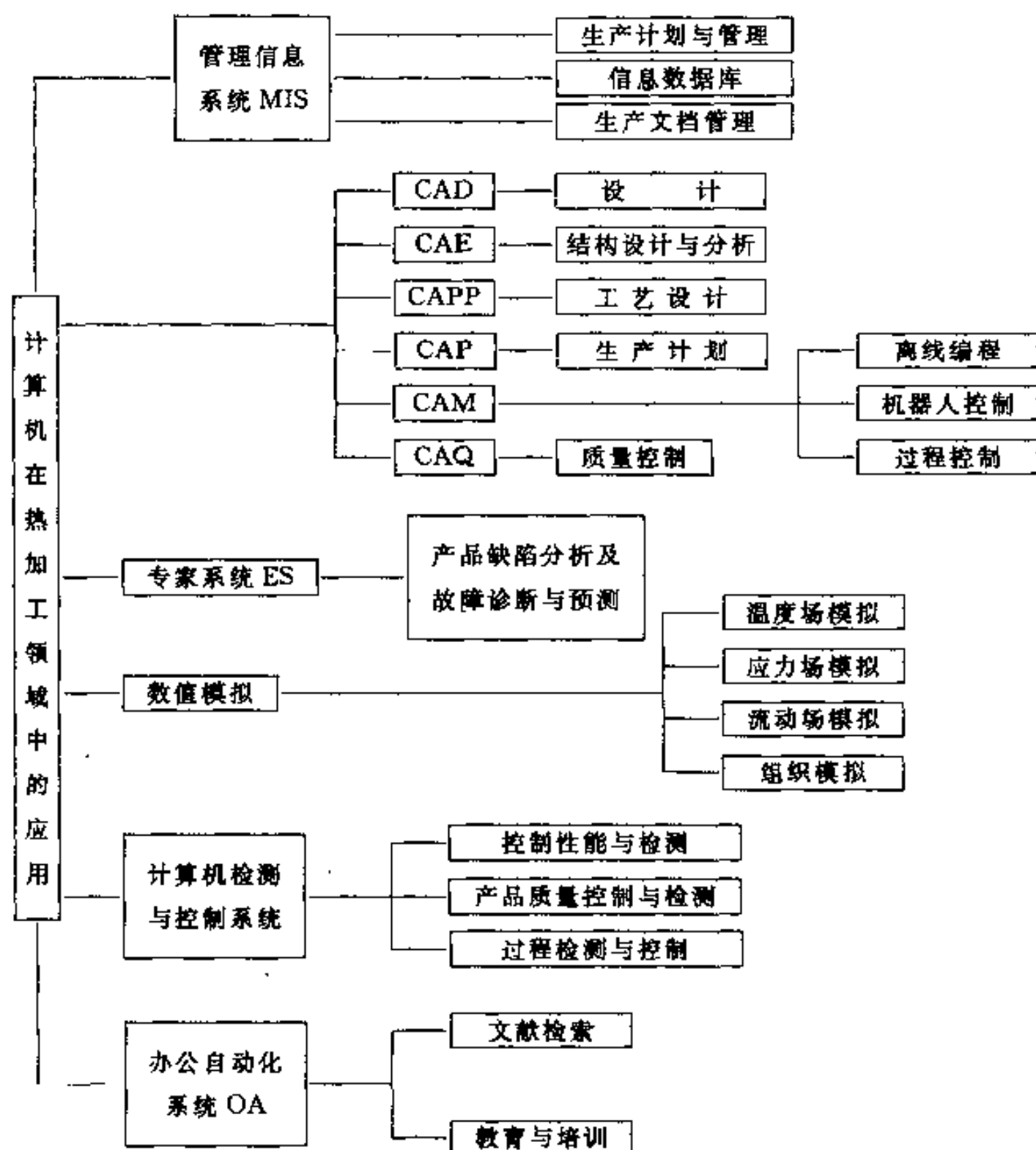


图 1-1 计算机在热加工领域中的应用示意图

CAD 技术的发展趋势:

CAD 技术的发展方向是集成化、智能化、网络化、柔性化、绿色化和虚拟化与并行设计,系统的实用性和使用方便性以及降低价格等等。

集成化 以三维造型为基础的 CAD/CAM/CAPP/CAM 的集成是未来产品设计开发的主要模式。尤其是进一步与快速原型制造 RPM (Rapid Prototyping Manufacturing) 的集成,可以构成一个闭环快速产品开发系统,在并行工程 CE (Concurrent Engineering) 环境下,能对产品设计进行快速评价和修改,以适应市场大规模客户化生产的需要,提高企业的竞争力。

计算机集成制造系统 CIMS 是基于计算机技术和信息技术,将设计、制造和生产管理、经营决策等方面有机地结合成一体,形成物流和信息流的综合,对产品设计、零件加工、整机装配和检测检验的全过程实施计算机控制,从而达到进一步提高效率、柔性、质量和降低成本的目的。

智能化 设计过程需要大量的设计和专家经验。智能化即希望能以更接近自然,也即更接近人类思维表达的方式建模、仿真和制造,将人类智能与人工智能(如 CAPP 专家系统、CAD/

CAM 专家系统)融为一体,实现人机一体化设计。热加工 CAD 的智能化基于 CAE 技术、专家系统和信息处理系统来实现。即采用人工智能技术,运用知识库中的设计知识进行推理、判断和决策,解决以前必须由人类专家解决的复杂问题,使 CAD 技术的发展达到一个新的水平。

网络化或协同化 形成信息高速公路(Information Highway)互联的协同 CAD,实现计算机支持协同工作 CSCW (Computer Supported Cooperation Work),达到远程制造(Remote Manufacturing)的目的。将多台计算机 CAD 工作站联网或将多台计算机 CAD 工作站和工程工作站联网,构成分布式 CAD 系统已成为一种趋势。这种网络系统结构灵活、功能强大、价格较低。每个工作站可单独使用,也可配合使用,实现资源信息共享,也可实现并行设计和协同工作。这种 CAD 网络很适合企业单位的需要。因为企业中的产品设计与制造一般都不是个人行为,而是一个组或一个科室群体有组织有计划进行的工程项目。参加工作的各个成员必须相互配合、协同努力,在规定的权限下共享资源和已有的设计结果,有关负责人还要对各步的设计结果进行审核。CAD 网络的建立以及设计管理和协同设计功能的实现,无疑将大大促进企业经济效益的提高。目前,铸造工装 CAD 的网络化、远程制造的趋势已初见端倪。

绿色化 机械产品的绿色化已成为全球不可抗拒的潮流,也是人类可持续发展的核心内容之一。以铸造 CAD 技术及并行工程为基础的绿色铸造工艺设计技术,在以集成、并行的方式设计产品及其相关过程的同时,利用 CAD 技术优化铸造工艺,减少废品率,使整个铸造生产过程对环境造成的污染程度降低到最小,资源的利用率达到最高。

虚拟化 虚拟技术是以计算机支持的仿真技术为前提,对热加工工艺及过程经过统一建模形成虚拟的环境、虚拟的过程、虚拟的产品,即在虚拟环境下实现整个热加工工艺及生产过程在计算机上制造出数字化的产品。虚拟技术主要包括:①虚拟环境技术;②虚拟设计技术;③虚拟制造技术;④虚拟研究开发中心将异地的各具优势的研究开发力量,通过网络和视像系统联系起来,进行异地开发、网上讨论;⑤虚拟企业为了快速响应某一市场需求,通过信息高速公路,将产品涉及的不同公司临时组建一个没有围墙、超越空间约束的,靠计算机网络联系的,统一指挥的合作经济实体。

虚拟铸造技术以使企业多快好省地生产出高质量铸件,在市场上具有很强的竞争力。美国 1996 年就提出了包括用户、成形过程仿真、模具制造 CAD 及铸造四部分组成的模拟铸造公司的新概念。

1.2.2 计算机检测与控制系统

在热加工生产和研究中,常常使用一些仪表对诸如温度、压力、流量等物理量信号进行实时检测并根据测到的信号由人或仪器作出判断,然后采取相应措施加以控制,然而,这样的检测与控制不能反映瞬间信号的变化和实时控制,因而,不能满足实际生产和科研测试与控制的需要。为此,用计算机系统的快速采样能力和计算分析能力来满足这一需要。

利用计算机实现对生产设备或生产过程进行检测与控制是计算机在热加工生产中应用的重要内容。计算机和检测仪表、控制部件结合即形成计算机检测与控制系统,如图 1-2 所示,可见计算机检测与控制系统的组成及其相互关系。一般地,生产过程中将被测试和控制的信号,如温度、压力、流量等参数,首先通过传感器采集温度、压力、流量等参数,并将这些非电物理量转换成电信号,如电压、电流等;再将信号放大,满足模数转换器(A/D)的要求,放大后把电信号传递给模数转换器,由模数转换器将电信号转为数字信号,经输入输出接口(I/O)输入计算机,再由计算机按事先编好的检测和控制程序进行运算、逻辑判断、比较,将结果再由 I/O 接

口输出。输出的数字信号经数模转换器(D/A)转为模拟信号(如电压、电流信号),经放大器放大后,用于带动相应的执行机构,从而实现对生产过程中的温度、压力、流量等参数的实时检测与控制。

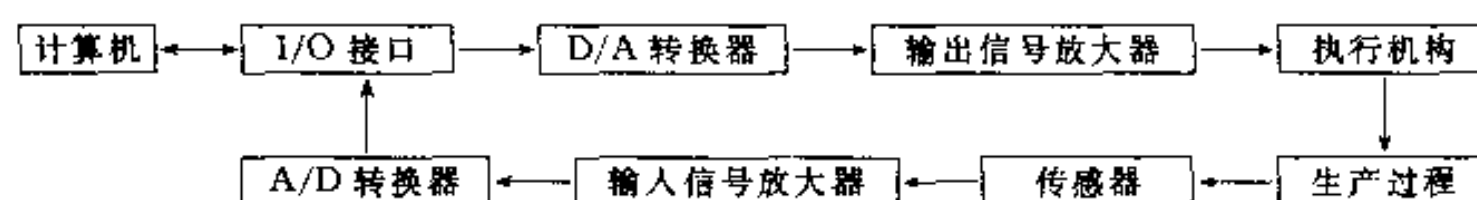


图 1-2 计算机检测与控制系统示意图

近年来,热加工生产中越来越多利用计算机测试各种参数、监视生产状况、控制生产过程,相关设备和装置不断推向市场,从而有效地提高了产品的质量和生产率,降低了生产成本。随着自动控制技术的发展,已进一步将生产过程控制与分布网络通信及管理信息系统相结合,发展成为集散控制系统 DCS (Distribution Control System)。它发挥和综合了仪器仪表的分散控制与信息集中管理的特点,使计算机自动控制的应用提高到一个新的水平。

目前,在热加工生产中运用计算机检测与控制系统有如下一些方面:

- 1) 冲天炉熔炼的计算机检测与控制。包括配料的自动控制、风量调节、冷却水量及温度控制。
- 2) 金属液质量的炉前快速检测及数据处理。包括各元素成分测定、金属液温度、共晶度、孕育效果及力学性能测定等。
- 3) 铸件成形过程的计算机检测与控制。包括金属液流动性检测、铸型性能检测、造型线主辅机工作状态的监控。
- 4) 产品质量的计算机检测。包括检测铸、焊件内部质量,表面粗糙度,以及利用计算机图像识别技术检测产品的尺寸精度。
- 5) 型砂性能及砂处理过程的计算机检测与控制。包括紧实率、抗压强度、抗拉强度、有效粘土含量、透气性及水分的测试。
- 6) 压力铸造过程的控制。

随着计算机的发展和生产要求的不断提高,计算机检测与控制系统将越来越强调在线监控,强调集成化与智能化:

在线化 能够对热加工过程或设备进行在线检测与控制,能够及时准确地反映现场状态,实时控制有关生产设备,从而使热加工过程或设备保持着最佳状态。

集成化 各监控系统能够相互配合、相互协调,构成一个有机整体。

智能化 监控协调现场实际情况,自动发出准确合理的指令控制相关对象。

远程化 利用 Internet 可以实现远程(异地)监控。

1.2.3 计算机的信息处理系统

当今世界信息技术即将成为第一大产业,各种各样的信息处理技术大量涌现、日新月异,特别是信息高速公路的出现,将人类社会带入了一个崭新的时代。在这样的背景下,任何运用高效的管理手段及时准确地分析和处理这些信息和浩瀚的数据是十分重要的。对于企业来讲,企业内部各管理部门之间、管理层和生产部门之间以及企业和外部之间需要传递大量的信息;另一方面,企业内部各部门技术的进步往往会产生一些阻碍信息交流的“孤岛”,一些处理系统如 CAD、CAE、CAM、CAPP 所需要的及所生成的数据彼此差异很大,需要协调管理,才能达到资源共享。根据上述要求,信息处理系统(Information Processing System)应运而生。

企业信息处理系统有别于管理信息系统 MIS (Management Information System) 及产品数据管理 PDM (Product Data Management), 它是一个范围更广、内容更深, 集整个企业所有行为为一体的信息处理系统。以铸造生产为例, 一个铸造厂的信息处理系统应涵盖该厂的所有行为, 包括市场营销、物料进出、生产组织与协调、行政管理、与外界的信息交换等等, 其示意图如图 1-3 所示。目前, 热加工领域信息处理技术研究、开发与应用还处于起步阶段, 与发达国家企业相比, 我国企业信息处理系统的研究开发还比较落后, 没有形成规模、特色, 所采用的技术也不够先进。此外, 信息处理系统的应用范围也比较窄, 主要集中在企业的财务、人事、库料管理等方面, 而现场生产管理很少。

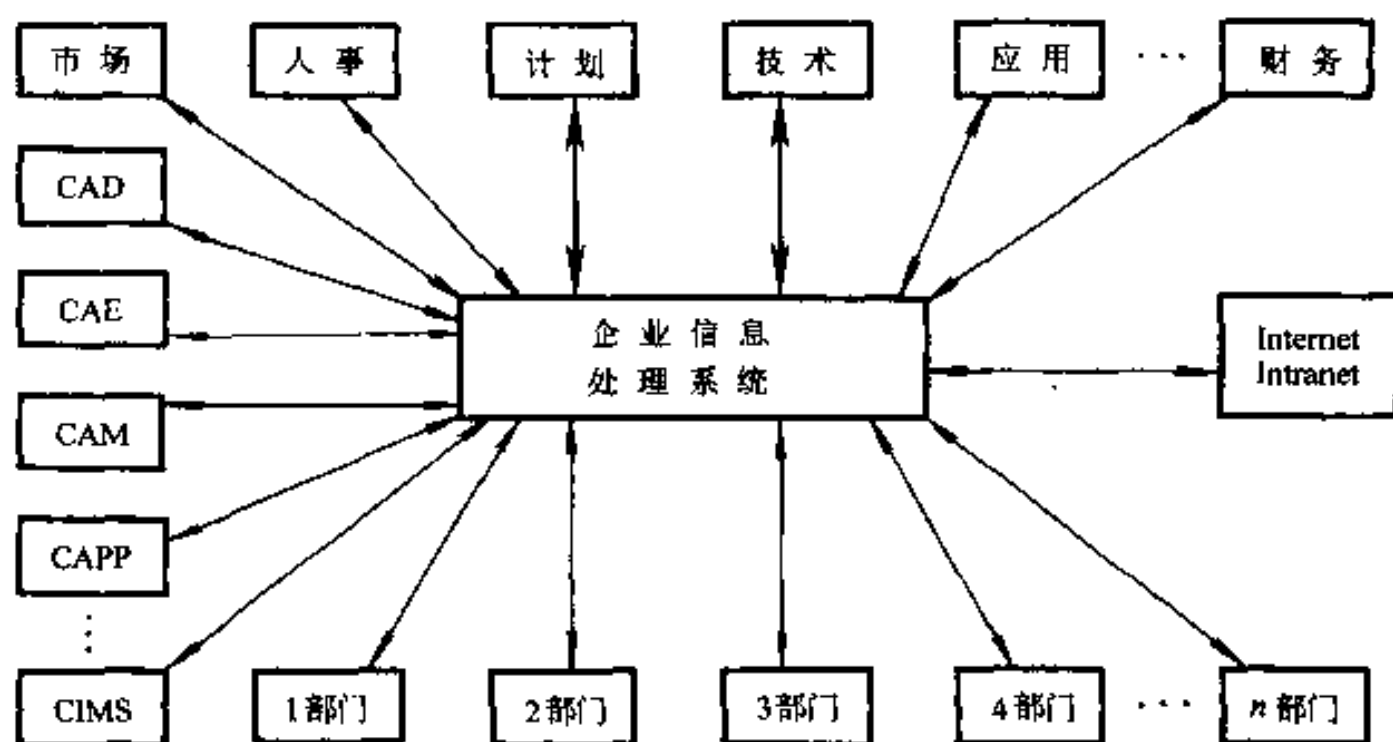


图 1-3 企业信息处理系统示意图

面对信息“爆炸”时代, 还要加强对 Internet/Intranet 在热加工领域应用技术的研究开发。对 Internet/Intranet 的应用要着重从以下几方面进行系统的研究: ①开发 Internet 对热加工产业影响与对策的研究; ②热加工企业网上电子商务的研究与开发; ③热加工产品异地设计远程制造技术的研究与开发; ④分散网络化技术的研究与开发。

1.2.4 人工智能与专家系统

人工智能 AI (Artificial Intelligence) 是当前科学技术发展中的一门新思想、新观念、新理论、新技术不断出现的新兴学科。它是在计算机科学、控制论、信息论、神经心理学、语言学等多学科研究基础上发展起来的, 是一门综合性的边缘学科。

虽然人工智能的研究与开发时间不长, 但它已在许多领域取得了惊人的成就, 获得了迅速的发展和广泛的应用。

人工智能研究的目的是使现有的电子数字计算机更聪明, 更有用, 使它不仅能做一般的数值计算及非数值信息的数据处理, 且能运用知识处理问题, 能模拟人类的部分智能行为。针对这一目标, 人们就要根据现有计算机的特点研究实现智能的有关理论、技术和方法, 建立相应的智能系统。例如目前研究开发的专家系统、机器翻译系统、模式识别系统、机器学习系统、机器人等。

专家系统是近几十年来人工智能研究领域中最具有实用价值的应用领域。它是人类长期以来对智能科学的探索成果和实际问题的求解需要相结合的必然产物。自 1965 年美国斯坦福大学开发的用质谱仪得到的数据来确定一个未知化合物的分子结构的第一个专家系统 DEN-DRAL 问世以来, 专家系统技术和应用得到了飞跃发展。目前, 世界各国已在医疗诊断、化学

工程、资源勘探、工程技术、语音识别、图像处理、金融决策、军事科学等领域中研制了大量的专家系统,不少专家系统宣称在性能上已达到甚至超过了同领域中人类专家的水平,其应用已开始产生巨大的经济效益。专家系统的研究不断向人们提出新的研究课题,促进了人工智能的进一步发展。它将是人工智能当前最重要的研究方向之一。因而,许多发达国家纷纷把专家系统研制列入国家重点科研项目。我国在“七五”规划中就明确要求专家系统的科研项目要达到实用水平。

在实际生产中,比如铸造生产,即使是一个成熟的铸造生产工艺,也会经常出现一些问题,这是因为铸件废品的产生除了受铸造工艺影响外,还与合金熔炼、造型、浇注和清理等各道工序的实际操作和管理因素有关,这些因素一般是随机的、复杂的,很难用数学公式描述出来,只有通过具有丰富经验的铸造工作者或专家的分析、推理才能确定。另一方面,在铸造生产中铸件出现问题时,希望能得到有关专家的亲临指导,但由于种种原因往往不能如愿以偿。人工智能型专家系统正具有这一特点,它能模仿铸造专家系统的思维方式,对各种复杂情况进行诊断和预测,在不确定的信息基础上得出正确的结论。因此,开发和应用专家系统具有非常重要的意义。

建立一个具有较高实用价值的热加工专家系统,其决定因素主要取决于三个方面:

1) 所搜集的知识是否包括了解决某一问题应具备的全部知识,包括理论的、经验的及启发性的知识。

2) 所用的知识表示方法和控制策略是否能完成模仿专家的思维方式,尤其是专家的不确定性判断方法以及启发性的推理过程。

3) 系统人机界面和操作界面环境是否友好、优良,用户操作时是否快速、方便。

热加工有许多领域适合于专家系统的开发,如:

(1) 设计类 热加工生产车间总体布局、设备选择和人员配备、原辅材料选择、最佳方案的选择、实验设计、模具设计等。

(2) 制造类 设备制造、模具制造。

(3) 诊断预测类 产品内、外部缺陷及质量分析。

(4) 监督类 型砂质量控制、熔炼过程控制。

(5) 规划类 制定生产计划。

(6) 教学类 计算机辅助教学系统。

1) 铸造领域专家系统的研究和应用状况。

国内外铸造领域专家系统的研制始于 20 世纪 80 年代。1987 年瑞典开发了一个商品化的铸造专家系统开发工具 Foundry Expert,可用于铸造过程控制、诊断、咨询和规划等领域。用该工具开发的型砂自适应控制系统,可以大大减少型砂的波动以及附加物的加入量。还用其开发了一个具有自学功能的铸件缺陷分析专家系统。

CDAD 是由印度技术学院开发的铸件缺陷分析专家系统,其目的是协助铸造工作者对缺陷进行分类、诊断并提出消除缺陷的措施。该系统采用专家系统外壳 IITMRULE 开发出来,使用规则形式表示知识,不能处理不确定性问题。美国密苏里大学研制了冲天炉控制专家系统,程序通过使用专家系统外壳 NEXPERT 构造出来,知识库中包含下列数据:铁焦比、风量、熔化速度和出炉温度。用户给定熔化速度和出炉温度时,系统给出一个合适的铁焦比和风量;当用户输入铁焦比和风量时,系统也可预测熔化速度和出炉温度。这个系统已被用于直径分别为 54.6cm 和 304.8cm 的冲天炉上。该大学还研制了倾斜浇注系统设计的专家系统,该系统在

AutoCAD 的 Lisp 环境下运行,用 AutoCAD 进行零件的实体造型,通过 Lisp 程序获得几何和拓扑信息,由专家系统给出最佳的结构,最后由 Lisp 程序设计出来。这两个系统的知识库都可以脱离系统进行编辑,输入不同的规则,系统可以用于不同的场合。

另外,Waxpert 是关于熔模铸造蜡模质量控制的专家系统。CDI 可用来识别国际铸件缺陷图谱中的铸件缺陷。CDAP 能区分气体、收缩及型壁移动三个基本因素所产生的内部缺陷,应用于实际生产中已取得了较好的效果。

我国的铸造行业专家系统的研究和应用工作起步较晚。清华大学开发了型砂质量规律专家系统,用来处理下列有关问题:①分析由于型砂质量引起的铸件缺陷,包括气孔、夹砂、粘砂、砂眼、胀砂、冷隔、热裂等铸件缺陷。②分析型砂质量现状,根据当前及以前输入计算机的有关型砂性能数据,分析当前型砂状况及应注意的问题。还开发了球墨铸件缺陷分析专家系统 ACDES,程序由 Turbo Prolog 语言编写而成,可对表面缺陷、孔洞类缺陷和组织类缺陷等 20 余种缺陷进行识别、分析,并提出相应的改进措施。铁道部戚墅堰机车车辆工艺研究所开发了一个完整的铸钢件缺陷分析专家系统 WIS,并构造了一个适合铸造领域的诊断类型的专家系统外壳。系统采用规则形式知识,使用确定性理论来解决知识的不确定性问题,并实现了不精确推理计算公式在知识库中的显示表示,因而能处理实际过程中的各种难以确定的复杂情况,具有很大的实用价值。用户可按照规则形式把本单位的经验输入到知识库中,使系统能很好地处理本单位的问题。该系统已在实际生产过程中投入运行。

内蒙古工业大学研制了铸件孔洞类缺陷分析专家系统 CCDAI 和自硬砂质量分析专家系统 NBS-DA;华南理工大学研制了压铸工艺参数设计及缺陷判断的专家系统;台湾成功大学开发了铸件缺陷诊断计算机系统。

总之,铸造专家系统的研究与应用工作已在许多领域开展,并取得了一定的研究应用成果和经济效益,但总的来说目前还处于初步阶段。

2) 焊接领域专家系统的研究和应用情况。焊接领域的专家系统研究始于 20 世纪 80 年代。最早报道这方面研究的是美国开发的焊接材料选择专家系统(Weldselector)。此后,美国学者开发出了系列焊接专家系统,除了 Weldselector 之外,还包括焊接符号绘制(Weldsymbol)、制定预热与后热规范(Weldheat)、堆焊(Weldhar)、制定焊接工艺(Weldprospec)、计算残余应力(Weldstress)、复合材料连接(Joincompos)等。其中,Weldselector 和 Weldsymple 两个专家系统已实现商品化。欧共体国家学者也十分重视焊接专家系统的研究与开发,他们在企业、政府的大力支持下,进行的尤里卡计划,包括含有十多个不同类型的焊接专家系统,如工艺制定、热处理工艺制定、工艺选择、焊接选择、焊接方法选择、焊工考试项目选择、焊接质量控制、焊接缺陷分析等。日本国学者在焊接专家系统的研究开发中也很有特色,注重实际应用效果。除了上述国家外,诸如德国、法国、葡萄牙、澳大利亚、加拿大、捷克等一些国家也开展了焊接专家系统的研制开发或探索性工作。

我国焊接专家系统研究始于 1988 年,主要集中在大学和研究所。目前的焊接专家系统已涉及到焊接生产的所有主要方面,其成果显著,内容包含焊接方法选择、焊接工艺选择、焊接材料选择、焊接缺陷诊断与预测、焊接结构安全评定等。

1.2.5 计算机的数值模拟系统

1.2.5.1 数值模拟在热加工领域中应用的意义

数值模拟和专家系统是材料科学及热加工工艺研究从“经验”走向“科学”从“定性”走向

“定量分析”的桥梁,是 20 世纪 70 年代以来伴随计算机技术和现代控制理论的发展而在材料科学和工程领域研究方法上的重大突破,其对新材料研制和新工艺开发的巨大推动作用,以及带来的显著经济效益是无法用数字衡量的。

数值模拟是指利用一组控制方程(代数或微分方程)来描述一个过程的基本参数变化关系,采用数值方法求解,以获得该过程(或一个过程的某一方面)的定量认识,即对过程进行动态模拟分析,在此基础上判断工艺或方案的优劣、预测缺陷、优化工艺等。

热加工(包括铸造、焊接、锻压、热处理)是一个涉及在物理、流体、传热、冶金、力学等的复杂过程。要得到一个高质量热加工产品必须要控制这些因素,而这些因素又是相互影响、十分复杂的,单靠传统的方法、工艺、措施和人为经验控制很难满足生产高水平要求。计算机数值模拟最大限度地多快好省地满足了这些高水平要求。通过计算机数值模拟来确定热加工产品设计方案、生产工艺及其相关参数、产品缺陷诊断、预测及质量检验。数值模拟使人们进行大量优化设计、方案筛选,从而节省许多人力、物力和时间,具有很大的经济效益。

1.2.5.2 热加工领域计算机数值模拟

近 20 年来,国内外都对数值模拟技术在铸造、焊接等热加工领域投入了大量的人力和财力,进行了许多方面的研究,也取得了不少的研究成果。

铸造方面计算机数值模拟技术在短短的 20 几年的时间里取得了长足的进步,受到了世界各国的重视,科研成果层出不穷,归纳起来主要有如下几个方面:

- 1) 温度场模拟。利用传热学原理,分析铸件的传热过程,模拟铸件的凝固进程、预测缩孔、缩松等缺陷。
- 2) 流动场模拟。利用流体力学原理,分析铸件的充型过程,可以优化浇注系统、预测卷气、夹渣、冲砂等缺陷。
- 3) 应力场模拟。利用力学原理,在温度场的基础上,分析铸件的应力分布、预测热裂及变形的缺陷。
- 4) 流动与传热耦合计算。利用流体力学原理,在模拟充型的同时,计算传热,可以预测浇不足、冷隔等缺陷。
- 5) 组织模拟。分宏观、微观组织模拟,根据凝固学原理,利用一些数学模型来计算合金液形核数、枝晶生长速度、组织转变、预测铸件性能。

焊接方面计算机数值模拟近些年也取得了不少的研究成果。尤其在焊接传热和热塑性应力分析、三维焊接问题、辅助热源影响焊缝应变规律的数值分析、焊接熔池和电弧物理、焊接组织性能预测和氢扩散的研究等等。总的来说,焊接数值模拟已遍及各个焊接领域,主要研究内容有:

- 1) 焊接的热传导分析。
- 2) 焊接熔池流体动力学和传热分析。
- 3) 电弧物理。
- 4) 焊接冶金和焊接接头组织性能的预测。
- 5) 焊接应力与变形。
- 6) 焊接过程中的氢扩散。
- 7) 特殊焊接过程的数值分析,如电阻点焊、陶瓷金属连接、激光焊接、摩擦焊接和瞬态液相焊接等。

8) 焊接接头的力学行为。

1.3 结束语

人类已步入 21 世纪,世界也将进入信息社会,这会使人类的生产和生活发生根本性的变化。计算机技术和网络技术正影响着每一个人、每一个企业、每一个国家。它既给我们带来了前所未有的机遇,又带来了很大的挑战。计算机技术促使传统的制造业向先进制造技术的发展,带动了并行工程(CE)、敏捷制造(AM)、精良制造(LM)、虚拟制造(VM)技术及计算机集成制造系统(CIMS)的快速发展和进步。这些计算机技术的发展将给热加工领域带来革命性的变化,促进和提高热加工行业的快速进步。面对新的形势,热加工领域的学者和工程技术人员要尽快熟悉和掌握计算机和网络技术,为行业的发展做出贡献。

第2章 计算机检测与控制技术及在热加工中的应用

2.1 检测与控制的基本概念

信息检测技术本身是融信息的采集、调理、处理、输出为一体，形成完整的检测系统及仪器设备。

2.1.1 信息的检测

一个完整的检测过程，一般应包括：

信息的提取：用传感器来完成，一般将被测信息转换成电信号，也就是说把被测信号转换成电压，电流或电路参数（电阻、电感、电容）等电信号输出。

信息的转换存储与传输：用中间转换装置来完成，一般是把信号转换成传输方便、功率足够、可以传输、存储和记录、并具有驱动能力的电压信号。

信息的显示和记录：用显示器、指示器和记录仪完成。

信息的处理和分析：用数据分析仪、频谱分析仪、计算机等来完成，找出被测信息的规律，为研究和鉴定工作提供有效依据，为控制提供信号。

图 2-1 为一个典型的检测系统组成框图。

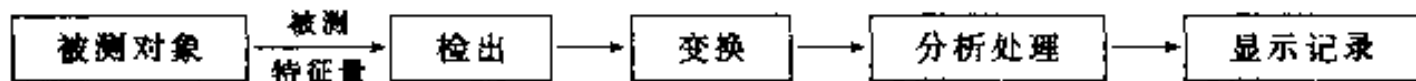


图 2-1 检测系统的组成框图

检测技术是一门综合性技术，现代检测系统常常是集机电于一体的，软硬件相结合的，具有智能化、自动化的系统，它涉及到传感技术、微电子技术、控制技术、计算机技术、数据处理技术、精密机械设计技术等众多技术。

现代科学技术的迅猛发展为检测技术的进步和发展创造了条件。同时，也不断向检测技术提出更新更高的要求，尤其是计算机技术和微电子技术的发展，仪器仪表向智能化、数字化、小型化、网络化、多功能化方向发展。近年来，由于计算机软件和数据处理技术的巨大进步，微型、智能、集成传感器的迅速开发，使仪器仪表的面貌发生很大的变化。检测技术中数据处理能力和在线检测，实时分析的能力大大增强，仪器仪表的功能得以扩大，精度及可靠性有了很大提高，与传统仪器仪表大相径庭的虚拟化仪器也以全新的面目出现。微机械技术的另一个长期期待的新的应用领域——微仪器已初露锋芒。至今已诞生了芯片上的微轮廓仪，芯片上的微血液分析仪的这种发展的总趋势，今后将变得更快更深更广。

2.1.2 自动控制技术

在现代科学技术的许多领域中，自动控制技术起着越来越重要的作用。所谓自动控制，是指在没有人直接参与的情况下，利用外加的设备和装置，使机器、设备或生产过程的某个工作状态或参数自动的按照预定的规律运行。它的发展初期，是以反馈理论为基础的自动调节原理，并主要用于工业控制。第二次世界大战期间，为了设计和制造飞机及船用自动驾驶仪，火炮定位系统，雷达跟踪系统以及其它基于反馈原理的军用装备，进一步促进并完善了自动

控制理论的发展。二战后，已形成完整的自动控制理论体系，这就是以传递函数为基础的經典控制理论，它主要研究单输入—单输出线性定常系统的分析和设计问题。

20 世纪 60 年代初期，随着现代应用数学新成果的推出和电子计算机技术的应用，适应宇航技术的发展，自动控制理论跨入了一个新阶段——现代控制理论，它主要研究具有高性能、高精度的多变量变参数的最优控制问题，采用的方法是以状态为基础的时域法。

自动控制理论是研究自动控制共同规律的技术科学。随着科学技术的快速发展和巨大进步，对系统和控制科学提出了新的更高的要求。自动控制科学正面临新的挑战，传统的反馈控制，近代控制理论和大系统理论在应用中遇到不少的难题，影响到它们的推广应用。首先，这些控制系统的设计和分析都是建立在精确的系统数学模型的基础上的。而实际系统由于存在非线性、不确定性、时变性和不完全性等因素，一般无法获得精确的数学模型。其次研究这些系统时必须提出一些比较苛刻的假设，而这些假设在应用中往往与实际不相吻合。再次，为了提高控制性能，整个控制系统变得较为复杂，增强了设备的初投资，降低了系统的可靠性。因此，多年来自动控制一直在寻找它的出路，而现在的一条出路就是实现控制系统的智能化，或采用传统的和智能的混合控制方式。为解决上述问题。人工智能的发展促进自动控制向智能控制发展，近十年来，随着控制的研究出现一股热潮，各种智能决策系统、专家系统、学习系统和故障诊断系统等已被用于各类工业过程控制系统、智能机器人系统和智能化生产系统。自动控制的发展过程如图 2-2 所示。

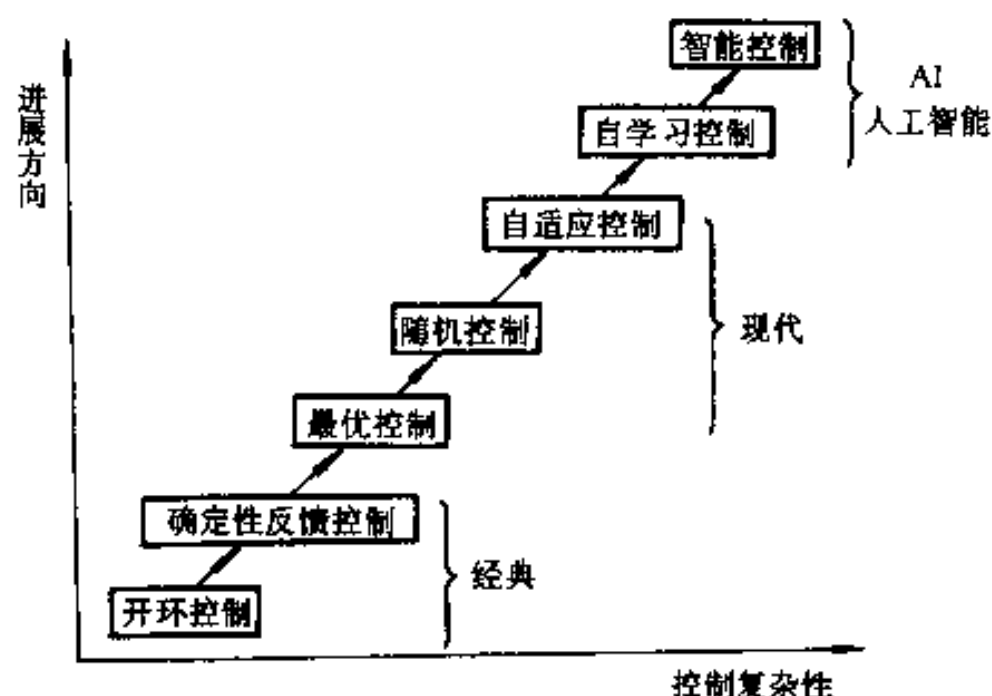


图 2-2 自动控制的发展过程

2.1.3 过程控制技术

过程控制通常是指石油、化工、电力、冶金、轻工、建材、核能等工业生产中连续的或按一定周期程序进行的生产过程自动控制，它是自动化技术的重要组成部分。在现代工业生产过程中，过程控制技术正在为实现各种最优的技术经济指标，提高经济效益和劳动生产率，改善劳动条件，保护生态环境等方面起着越来越大的作用。

20 世纪 50 年代前后，过程控制开始得到发展，一些工厂企业实现了仪表和局部自动化，这个阶段的主要特点是：采用的过程检测控制仪表为基地式仪表和部分单元组合式仪表，而且多数是气动仪表。过程控制系统的结构绝大多数是单输入—单输出系统，被控参数主要是温度、压力、流量和液位四种参数，控制的目的是保持这些参数的稳定、确保生产安全。过程控制系统分析、综合的理论基础是以频率法和根轨迹法为主的经典控制理论。

20 世纪 60 年代，工业生产过程出现了一个车间乃至一个工厂的综合自动化。特点是：大量采用单元组合仪表。与此同时，计算机开始应用于过程控制领域，实现了直接数字控制 (DDC) 和设定值控制 (SPC)，在过程控制系统的结构方案方面，相继出现了各种复杂的控制系统，如串级控制、前馈—反馈复合控制、Smith 预估控制以及比值、均匀、选择性控制等。这一方面提高了控制质量，另一方面也满足了一些特殊的控制要求。过程控制系统的分析与综合的理论基础，由经典控制理论发展到现代控制理论，控制系统由单变量系统转向多变量

系统，以解决生产过程中遇到的更为复杂的问题。

20 世纪 70 年代中期以来，随着现代工业生产的迅猛发展，使过程控制的发展达到了一个新的水平，实现了全车间、全工厂、甚至全企业无人或很少有人参与操作管理、过程控制最优化与现代化的集中调度管理相结合的方式，即全盘自动化的方式。特点是：在新型的自动化技术工具方面，采用以微处理器为核心的智能单元组合仪表（包括可编程序控制器等），在线检测与数据处理的应用日益广泛，模拟调节仪表的品种不断增加，可靠性不断提高，电动仪表也实现了本质安全防爆，适应了各种复杂过程控制的要求。在过程控制系统的结构方面，由单变量控制系统发展到多变量系统，由生产过程的定值控制发展到最优控制、自适应控制，由仪表控制系统发展到计算机分布式控制系统等。

当前，过程控制已进入了计算机时代，进入了所谓计算机集成过程控制系统的时代，利用计算机技术，对整个企业的运作过程进行综合管理和控制，它包括市场营销、生产计划调度、原材料选择、产品分配、成本管理、以及工艺过程的控制、优化和管理等全过程。分布式控制系统、先进过程控制策略以及网络技术、数据库技术等将是实现计算机集成过程控制系统的重要基础。可以预料，过程控制将在我国社会主义现代化建设进程中得到更快的发展。

2.2 检测技术

2.2.1 检测与转换技术

检测与转换技术是自动检测技术和自动转换技术的总称。即是从自然界诸多的被检测与测量量中提取出有用的信息，往往是把非电量提取加工为电信号，为了适应下一单元的需要，对此信息进行转换，即变为标准电信号，如：0~5V 或 0~10mA 等。

从被检测的参量中提取出有用的信息的器件，有时还将它转换成易于传递和处理的电信号，称之为传感器。在检测系统中是离不开传感器的，传感器是由敏感元件和部分的测量电路构成的，它有如图 2-3 所示的几种结构。

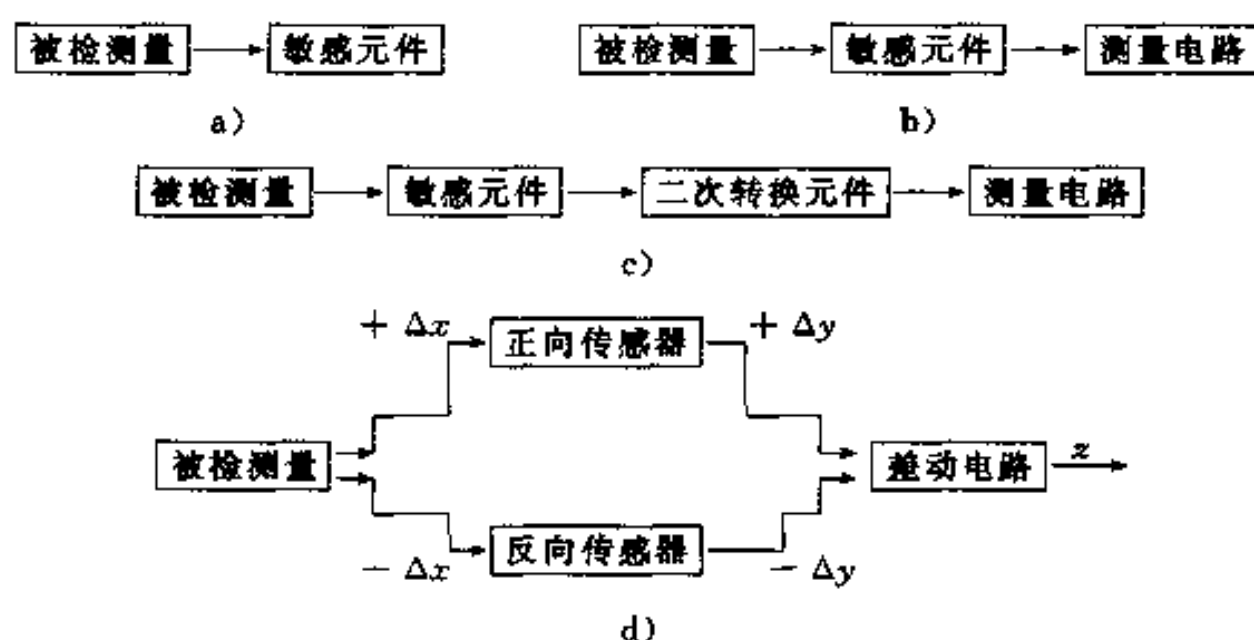


图 2-3 传感器结构类型框图

a) A型 b) B型 c) C型 d) D型

A 型结构传感器：也叫电量传感器，如热电偶传感器、光电池和压电传感器等。

B 型结构传感器：一般是电参数传感器，如热敏电阻传感器、电容传感器、感应同步器、角度编码器等。

C 型结构传感器：有电位器传感器、电阻应变传感器、压磁传感器等。它们也属于电参数传感器。

A、B、C 型结构统称为简单结构型。

D 型结构传感器：它是由两个简单结构型（正向传感器和反向传感器）构成。正向和反向传感器在结构尺寸参数上完全相同，不同的仅是接受被检测量的作用方向，当被检测量变化时，一个接受的是正向增量 $[\Delta x]$ ，另一个接受的是反向增量 $[-\Delta x]$ ，它们的输出（分别为 $+\Delta y$ 和 $-\Delta y$ ）作用到一个差动电路上，得到一个输出量 Z ， Z 就是 D 型结构传感器的输出。因差动电路的作用是取 $+\Delta y$ 和 $-\Delta y$ 之差，故 D 型结构称之为差动结构型。由于在差动结构型传感器中应用了两个简单结构型，故这种结构型传感器具有较简单结构型灵敏度高、抗干扰能力强及线性度好的优点。

虽然 D 型结构具有良好的输出特性，但是，不是对所有被检测量都能组成差动结构型传感器。从对现有传感器原理分析可以看出，只有应用在检测力（压力）或位移等少数几个物理量的电参数传感器才能组成 D 型结构。

2.2.2 测量误差

2.2.2.1 有关测量技术中的部分名词

(1) 等精度测量 在同一条件下所进行的一系列重复测量称为等精度测量。

(2) 非等精度测量 在多次测量中，如对测量结果精确度有影响的一些条件不能完全维持不变，称为非等精度测量。

(3) 真值 被测量本身所具有的真正值称之为真值。量的真值是一个理想的概念，一般是不知道的，但在某些特定情况下，真值又是可知的。例如一个整圆周角为 360° 等。

(4) 实际值 误差理论指出，在排除了系统误差的前提下，对于精度测量，当测量次数为无限多时，测量结果的算术平均值极接近于真值，因而可将它视为被测量的真值，但是测量次数是有限的，故按有限次测量次数得到的算术平均值只是统计平均值的近似值。而且，由于系统误差不可能完全被排除掉，故通常只能把精度更高一级的标准器具所得到的值作为“真值”。为了强调它并非是真的“真值”，故把它称为实际值。

(5) 标称值 测量器具上所标出来的数值。

(6) 示值 由测量器具读数装置所指示出来的被测量的数值。

(7) 测量误差 用器具进行测量时，所测量出来的数值与被测量的实际值之间的差值。

任何自动检测系统的测量结果都有一定的误差，即所谓精度。一般来说，不存在没有误差的测量结果，也不存在没有精度要求的自动检测系统。精度是一项重要技术指标。

2.2.2.2 误差的分类

在测量中由不同因素产生的误差是混合在一起同时出现的。为了便于分析研究误差的性质、特点和消除方法，下面对各种误差进行分类讨论。

1. 按表示方法分类

(1) 绝对误差 绝对误差是示值与被测量真值之间的差值。设被测量的真值为 A ，器具的标称值或示值为 x ，则绝对误差 Δx 为： $\Delta x = x - A$ 。

(2) 相对误差 相对误差是绝对误差 Δx 与被测量的约定值之比，用它较绝对误差更能确切的说明测量质量。在实际测量中，相对误差有下列表示形式：

1) 实际相对误差 实际相对误差 γ_a 是用绝对误差 Δx 与被测量的实际值 A 的百分比值来表示的相对误差，记为： $\gamma_a = \Delta x / A \times 100\%$ 。

2) 示值相对误差 示值相对误差 γ_x 是用绝对误差 Δx 与器具的示值 x 的百分比值来表

示的相对误差，记为： $\gamma_x = \Delta x / x \times 100\%$ 。

3) 满度相对误差 满度相对误差 γ_m 又称满度误差，是用绝对误差 Δx 与器具的满度值 x_m 之比来表示的相对误差，记为 $\gamma_m = \Delta x / x_m \times 100\%$ 。

这是应用最多的表示方法，电工仪表就是按 γ_m 之值进行分级的。例如 1.5 级的电表，就表明其 $\gamma_m \leq 1.5\%$ ，并在其面板上标以 1.5 的符号。

(3) 容许误差 容许误差是根据技术条件的要求，规定某一类器具误差不应超过的最大范围。

2. 按误差出现的规律分类

(1) 系统误差 系统误差是按某种已知的函数规律变化而产生的误差。系统误差又分为恒定系统误差和变值系统误差。恒定系统误差是指在一定条件下，误差的数值及符号都保持不变的系统误差。变值系统误差是指在一定条件下，误差按某一确切规律变化的系统误差。

系统误差主要是由以下几个因素引起：材料、零部件及工艺的缺陷、环境温度、湿度、压力的变化以及其它外界干扰等。系统误差愈小，测量就越准确。

(2) 随机误差 随机误差又称偶然误差。它是由未知变化规律产生的误差。随机误差是由很多复杂因素的微小变化的总和所引起的，因此分析比较困难。但是，随机误差具有随机变量的一切特点，在一定的条件下服从统计规律，因此通过多次测量后，对其总和用统计规律来描述，从而在理论上可估计其对测量结果的影响。

(3) 粗大误差 粗大误差是指在一定的条件下，测量结果显著的偏离其实际值时所对应的误差。从性质上来看，粗大误差并不是单独的类别，它本身既可能具有系统误差的性质，也可能具有随机误差的性质，只不过在一定测量条件下其绝对值特别大而已。

粗大误差是由于测量方法不妥当，各种随机因素的影响以及测量人员粗心所造成的。在测量及数据处理中，当发现某次测量结果所对应的误差特别大时，应认真判断误差是否属于粗大误差，如属于，该值应舍去不用。

3. 按误差来源分类

(1) 工具误差 工具误差是指测量工具本身不完善而引起的误差。主要包括：读数误差及内部噪声引起的误差。读数误差通常是指，检测系统在定标时，用标准器具对其指定的某些定标点进行定标时所产生的误差以及由检测系统分辨率不变所致的误差。内部噪声引起的误差包括各种电子器件产生的闪变噪声、电子元件产生的热噪声、散粒噪声、电流噪声以及因开关或接插件接触不良、继电器动作、电动机转动、电源不稳等噪声引起的误差。

(2) 方法误差 方法误差是指测量时方法不完善，依据的理论不严密以及对被测量定义不明确等因素所产生的误差，有时也称为理论误差。

4. 按被测量随时间变化的速度分类

(1) 静态误差 是指在测量过程中，被测量随时间变化很缓慢或基本保持不变时的测量误差。

(2) 动态误差 是指在被测量随时间变化很快的过程中测量所产生的附加误差。动态误差是由于有惯性、有纯滞后，因而不能让输入信号的所有成分全部通过，或者输入信号中不同频率成分通过时受到不同程度的衰减或延迟而引起的。该误差是在动态测量时产生的。

5. 按使用条件分类

(1) 基本误差 基本误差是检测系统在额定条件下工作所具有的误差，检测系统的精确

度就是由基本误差决定的。

(2) 附加误差 当使用条件偏离规定的标准条件时,除基本误差外还会产生附加误差。例如,由于温度超过标准引起的附加误差,这些附加误差在使用时应叠加到基本误差上去。

6. 按误差与被测量的关系分类

(1) 定值误差 指误差对被测量来说是一个定值,不随被测量变化。这类误差可以是系统误差,如直流测量回路中存在热电动势等。也可以是随机误差,如检测系统中执行电动机的起动引起的电压误差等。

(2) 累积误差 在整个检测系统量程内误差值 Δx 与 x 成比例的变化,即 $\Delta x = \gamma_s \times x$ 式中的 γ_s 为比例常数。由式可见, Δx 随 x 的增大而逐步累积,故称为累积误差。

2.2.3 传感器

2.2.3.1 传感器的静态特性

静态特性表示传感器在被测量各个值处于稳定状态时的输入—输出关系。衡量传感器静态特性的重要指标是:线性度、迟滞性、重复性和灵敏度。

1. 线性度 通常为了方便标定和数据处理,要求传感器的输入—输出关系是线性关系,并能正确无误的反映被测量的真值,但实际上只有在理想情况下传感器的输入—输出静态特性才是线性的。

传感器如果没有迟滞及应变效应,其静态特性就可用下列多项式或代数方程来表示:

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_n x^n$$

式中, x 为输入量; y 为输出量; a_0 为零位输出; a_1 为传感器的灵敏度; a_2, a_3, \cdots, a_n 为非线性项的待定常数。

传感器的静态特性是在静态标准条件下进行标定的,静态标准条件是指没有加速度、振动、冲击、环境温度一般为室温 (20 ± 5) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度不大于 85%,大气压力为 (101 ± 8) kPa 的情况,在这种标准工作状态下,利用一定的等级校准设备,对传感器进行反复循环测试,得到的输入—输出数据,一般用表格列出或画成曲线。对于实际的传感器,测出的输入输出标定曲线与其理论拟合直线之间的偏差,就称为该传感器的非线性误差。

2. 迟滞性 迟滞特性表明传感器在正反行程期间输入—输出曲线重合的程度,也就是说,对应于同一大小的输入信号,传感器正反行程的输出信号大小不相等。

3. 重复性 重复性表示传感器在输入量按同一方向作全量程连续多次变动时所得特性曲线不一致的程度。特性曲线一致,重复性就好,误差也小。

4. 灵敏度 线性传感器静态灵敏度 k 的计算式如下:

$$k = \text{输出量的变化量} / \text{输入量的变化量}$$

2.2.3.2 传感器的动态特性

动态特性是指传感器对于随时间变化的输入量的响应特性。实际被测量随时间变化的形式可能是各种各样的,在研究动态特性时通常根据标准输入特性来考虑传感器的响应特性。标准输入有两种:正弦变化和阶跃变化的输入。传感器的动态特性分析和动态标定都以这两种标准输入状态为依据。对于任一传感器,只要输入量是时间的函数,则其输出量也应是时间的函数。

1. 动态特性的一般数学模型

为了便于分析和处理传感器的动态特性,必须建立数学模型,用数学中的逻辑推理与运

算方法来研究传感器的动态响应。对于线性系统的动态系统响应研究，最广泛使用的数学模型是普通线性常系数微分方程，只要对微分方程求解，就可得到动态性能指标。

对于任意线性系统，下列数学模型——高阶常系数线性微分方程都是成立的。

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \cdots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \cdots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

式中 y 为输出量； x 为输入量； t 为时间； a_0, a_1, \dots, a_n 为常数； b_0, b_1, \dots, b_m 为常数； $\frac{d^n y}{dt^n}$ 为输出量对时间 t 的 n 阶导数； $\frac{d^m x}{dt^m}$ 为输入量对时间 t 的 m 阶导数。

对于此类微分方程式，可用经典的 D 算子方法求解，也可以用拉氏变换方法求解。

2. 传递函数

在分析、设计和应用传感器时，传递函数的概念十分有用。传递函数的定义是在初始条件为零时输出函数拉氏变化对输入函数拉氏变换之比。传感器的传递函数一般可表示为：

$$\frac{y(s)}{x(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \cdots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \cdots + a_1 s + a_0}$$

传递函数的功用之一是：在方块图中用作表示系统的动态特性的图式符号。当组成系统的各个元件或环节的传递函数已知时，就可以用传递函数来确定该系统的动态特性，只要容许忽略连接环节之间的负载影响，便可用单个环节的传递函数乘积表示系统的传递函数。

3. 动态响应

通常输入信号并非任意形状，为了便于研究传感器的动态性能，一般主要分析在正弦输入和阶跃输入这两种标准输入情况下的动态响应，而动态响应是输出信号随时间的变化曲线。

2.2.3.3 常用传感器

1. 温度传感器

温度是一个非常重要的物理参数，是决定一个系统是否与其它系统处于热平衡状态的宏观性质。温度传感器只能比较两个温度是否相等，或确定哪个高哪个低，但不能求得被测量，更不能将温度相加或相减。温度测量的方法总的可以分为两类：

(1) 接触式测温方法 这类测温方法是将测温仪表的敏感元件与被测对象接触来完成温度测量的。因此这种测量比较直观可靠，测量仪表也相对比较简单，但由于敏感元件必须和被测对象接触，在接触过程中就可能破坏被测对象的温度场分布，从而造成测量误差。有的测温元件不能和被测对象充分接触，不能达到充分的热平衡，测温元件和被测对象温度不一致也会带来误差。在接触过程中，有的介质有强烈的腐蚀性，特别在高温时对测温元件的影响更大，从而不能保证测温元件的可靠性和工作寿命，这些均是接触式测温方法的缺点。目前应用最广的接触式测温仪表有：膨胀式温度计、电阻温度计、热电偶温度计等。

(2) 非接触式测温仪表 这类仪表的特点是实现测温仪表和被测物体不直接接触，因此这样的测温方法不破坏原有的温度场，在被测物为运动物体时尤为适用。非接触式测温仪表大多数利用物体的热辐射原理来完成测量，但根据其辐射测量的特点可分为：辐射式温度计、亮度温度计、比色温度计、光导纤维测温技术。

2. 位移传感器

随着工业生产对测量效率和测量精度要求的不断提高以及智能、自动测量仪器的快速发展，位移量的测量越来越普遍，大到长距离的位移测量，小到头发丝的测量，现列举几种常

见的测位移方法：

(1) 高频涡流测厚仪 图 2-4 所示为高频反射式涡流测厚仪，传感器感受的是被测表面与传感器间距离的变化，所以是相对测量仪器。为克服金属表面不够平整或上下振动对测量的影响，在金属板两侧对称安置两个特性相同的传感器 L_1 和 L_2 ，预先通过厚度给定系统移动传感器的位置使 $x_1 = x_2 = x_0$ 。若板厚不变而板材上下移动，则恒有 $x_1 + x_2 = 2x_0$ 。输出电压总和为 $2U_0$ 。若被测厚度变化了 Δh ，则输出电压变为 $2U_0 + \Delta U$ 。通过适当转换即可由偏差指示表指示出厚度的变化量。对非金属板可使用接触式测厚仪，通过上下测头将厚度变化转换成高频涡流差动变压器铝芯的位置变化，从而获得相应的变化电压。

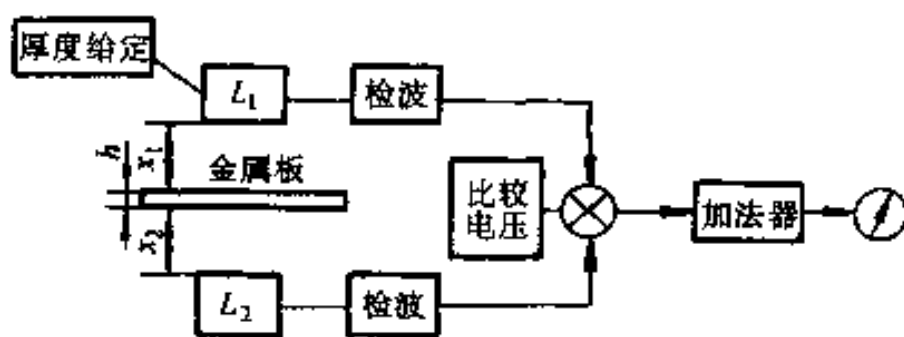


图 2-4 高频涡流测厚仪原理框图

(2) X 射线测厚仪 该测量装置可实现厚度的绝对测量，强度为 I_0 的细束射线穿过被测物体时强度按吸收定律衰减为 I_A ， I_A 与厚度 h 的关系为： $I_A = I_0 e^{-\mu h}$ 。式中的 μ 为衰减系数，它的大小与被辐射物体的原子量以及辐射源的能量有关，当被测物体一定和辐射源一定时，测出 I_A 便可求得被测厚度，但该式仅适用于细束射线，对于宽束射线会出现散射效应，必须用有效衰减系数 $\mu_{eff} < \mu$ 计算。X 射线在被测物体表面反射的强度与被测件的材料有关，且随被测件的厚度的增大而增大，所以也可利用反射原理从单侧测量厚度，如测管道锅炉等的壁厚。

(3) 大位移量的测量 目前最有效的测量方法是激光测量法，现介绍一种脉冲测距法。它是由测量仪器发出一个短脉冲信号，该信号经目标点反射返回，在经过了两倍的被测距离后被测量仪器重新接收，通过测量同一脉冲信号从发出到接收的时间间隔 t ，即可算得被测距离值 $L = ct/2$ 。其中 c 为光速。

3. 角度传感器

我国法定计量单位制中规定的角度计量单位为秒 (")、分 (')、度 (°) 和弧度两种。角度—数字编码器结构最为简单，广泛用于简易数控机械系统中。按工作原理区分，可分为脉冲盘式和码盘式两种。

(1) 脉冲盘式角度—数字编码器 脉冲盘式角度—数字编码器是在一个圆盘的边缘上开有相等角距的缝隙，在开缝圆盘两边分别安装光源及光敏元件。当圆盘随工作轴一起转动时，每转动一个缝隙就发生一次光线的明暗变化，经过光敏元件，就产生一次电信号的变化，再经整形放大，可以得到一定幅度和功率的电脉冲输出信号，脉冲数就等于转过的缝隙数。如将上述脉冲信号送到计数器中去进行计数，则计数器就能反映圆盘转过的角度。

为了判断旋转方向，可以采用两套光电转换装置，它们在空间的相对位置有一定的关系，保证它们产生的信号在相位上相差 $1/4$ 周期。

(2) 码盘式角度—数字编码器 码盘式角度—数字编码器是按角度直接进行编码的传感器，通常把它装在检测轴上。按其结构可把它分为接触式、光电式和电磁式三种。近年来，大部分编码器采用的是光电式结构。

4. 流量的测量——椭圆齿轮流量计

椭圆齿轮流量计是计量流体体积总量的仪表，特别适用于测量粘度较大的纯净液体的总量。这种仪表精度高，但加工复杂，成本高，而且齿轮容易磨损。

椭圆齿轮流量计的工作原理如图 2-5 所示。在仪表的测量室中安装两个互相啮合的椭圆形齿轮，可绕自己轴转动。当被测介质流入仪表时，推动齿轮旋转。两个齿轮处于不同的位置时，分别起着主、从动轮的作用。在图 2-5a 位置时，由于 p_1 大于 p_2 ，轮 I 受到一个顺时针的转矩，而轮 II 虽然受到 p_1 和 p_2 作用，但合力矩为零，此时轮 I 带动轮 II 旋转。于是将外壳与轮 I 之间标准测量室内液体排入下游。当齿轮转至图 2-5b 所示位置时，轮 I 受顺时针力矩，两齿轮在 p_1 和 p_2 作用下继续转动。当齿轮转至图 2-5c 位置时，此时轮 II 为主动轮，轮 I 为从动轮，上游流体又被封入轮 II 形成的测量室内。这样，每转一周，两个齿轮共送出四个标准体积的液体。

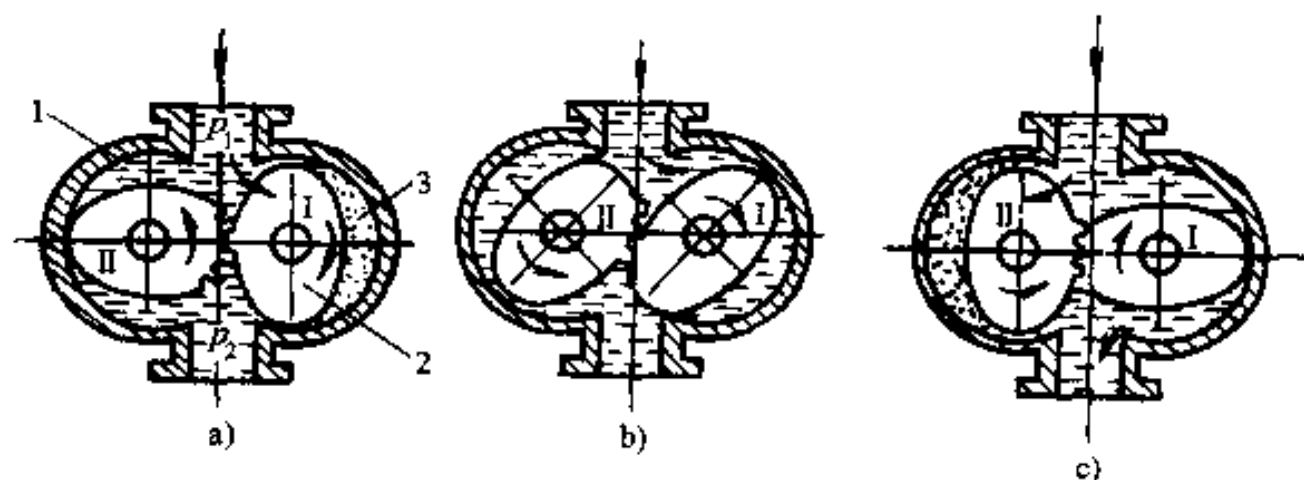


图 2-5 椭圆齿轮流量计原理图

1—外壳 2—椭圆形转子（齿轮） 3—测量室

2.3 控制仪表与装置

控制仪表与装置是实现生产自动化的重要工具，在自动化控制系统中，由检测仪表将生产工艺参数变为电信号或气压信号后，不仅要由显示仪表显示和记录，让人们了解生产过程的情况，还需将信号传送给控制仪表和装置，对生产过程进行自动控制，使工艺参数符合预期要求。

2.3.1 控制仪表与装置的分类及发展

2.3.1.1 控制仪表与装置的分类

按控制仪表与装置所用能源的不同，可以将其分为电动、气动、液动和混合式几大类。其中气动和液动控制仪表和装置发展最早，电动控制仪表与装置发展异常迅速，现已占绝对统治地位。

气动控制仪表的特点是：性能稳定，可靠性高，具有本质安全防爆性能，不受电磁场干扰，结构简单，维护方便。目前气动控制仪表所占领地虽然已十分狭小，但在一些大型装置的主体设备周围，仍有采用基地式气动控制仪表对单一的工艺参数进行就地单回路调节。

随着生产过程自动化的发展，控制系统规模和复杂程度不断增加，尤其是随着微电子技术的发展，过去认为影响电动控制仪表广泛使用的防爆问题，现采用防爆结构、直流低电压、小电流的本质安全型防爆电路及防爆栅等措施，得到了很好的解决，使得电动控制仪表与装置的应用越来越广泛。

电动控制仪表与装置都采用电子技术故称其为电子控制仪表与装置更为确切。它从原理上分又可分为两大类：模拟式控制仪表与装置和数字式控制仪表与装置。

模拟式控制仪表与装置按结构形式可分为基地式、单元组合式、组件组装式三大类。

(1) 基地式控制仪表的结构特点 以指示仪表及记录仪表为中心, 附加一些线路或器件用以完成控制任务。基地式控制仪表一般结构比较简单, 价格低廉, 它不仅能够进行控制, 同时还可指示、记录, 因此适用于小型企业的单机自动控制系统。

(2) 单元组合式控制仪表的结构特点 根据自动检测与控制系统中各组成环节的不同功能和使用要求, 将整套仪表划分为能独立实现一定功能的若干单元, 各单元之间的联系采用统一标准信号。由这些少量的单元经过不同的组合, 就可构成多种多样的, 复杂程度不同的自动检测和控制系统。

(3) 组件组装式控制装置 它是在单元组合式仪表基础上发展起来的成套仪表装置。由于现代化的大型企业要求各种复杂的控制系统及集中的显示操作, 组件组装式控制装置在结构上可分为控制框和显示操作盘两大部分。控制框内插入若干个组件箱, 而若干块组件板又插入组件箱中。显示操作盘则只需占用很小的地方, 也可用一台电子显示屏集中显示操作, 从而大大改善了人机联系。在控制框中各个组件之间的信息联系, 采用矩阵端子接线方式, 接线工作都集中在矩阵端子接线箱里进行。

数字控制仪表与装置是指以微处理器和微型计算机为核心, 实现工业自动化的装置, 可分为以下三大类:

(1) 连续生产过程的控制装置 连续生产过程的特征是以稳定运行为正常工况。即使设定值可能根据工艺要求而变化, 其变化也是相当缓慢的, 而且两次停车的时间间隔是很长的。连续生产过程自动化是生产过程自动化的重要部分, 如温度、压力、流量液位及成分的连续量的闭环自动控制, 在各个工业部门都随处可见。

(2) 断续生产过程的控制装置 断续生产过程的特点是生产过程周期短, 由一个状态变化到另一个状态为快速过程。如机械零件加工, 设备的装配、搬运、检验、包装、入库等都是典型的断续过程, 它们是按照一定的时间顺序或逻辑条件一步一步对电气设备实现一系列通断控制, 即实现的是逻辑控制、顺序控制和条件控制。

自 20 世纪 70 年代中期出现了以微处理器为核心的可编程逻辑控制器以来, 发展十分迅速, 现在已完全取代了继电器逻辑控制装置。

(3) 批量生产过程控制装置 批量生产过程的特征是在每个生产周期同时兼备连续和断续两种生产过程。在批量生产过程中, 原料 (或被加工件) 或是一次投入或是分批投入, 有时也依工艺条件连续投入, 但成品或半成品都一定是分批生产出来的。这类生产过程要求典型的顺序控制或逻辑控制, 工序间的转换是按时间条件或逻辑条件这两种条件的组合进行的, 但在某一个或某几个工序中又有连续生产过程的特点。要求实现回路闭环控制, 有的是一个或几个进行控制, 有的则是进行时间程序给定控制。批量控制装置可由 PLC 中加入 PID 等控制功能来实现。

实际上, 一个典型的生产过程往往包括连续过程、断续过程和批量过程这三种过程。过去是用不同的装置分别实施控制, 这不仅使得控制系统复杂化, 并且将一些相关过程分隔开来, 不能达到高效的要求。随着微电子技术、计算机技术、通信技术及控制技术的高速发展, 各类控制装置都正向着相互渗透的方向发展。如原主要用于连续过程控制的分散控制系统 DCS, 扩充了 PLC 功能和批量控制功能, 而 PLC 也由单纯进行逻辑和顺序控制增加了回路控制功能和批量控制功能。

2.3.1.2 控制仪表与装置的发展

20 世纪 70 年代前,生产过程自动化所用的大多是模拟式的控制仪表和装置。随着生产规模的扩大,生产水平的提高而形成的生产过程的强化,参数间相互关联性的增加,要求控制仪表与装置具有多样的、复杂的控制功能和更高的控制精度及可靠性,进而对大系统进行综合自动化,使企业管理与过程控制相结合,便于利用过程信息较快的作出有利于企业的决策,以适应变化发展的市场要求。显然,模拟控制仪表与装置已不能满足这种要求,数字控制仪表与装置正是适应这种要求而产生与发展起来的。

20 世纪 70 年代中期,PLC 在逻辑运算功能的基础上增加了数值计算、过程控制功能,运算速度提高,输入输出规模扩大,并开始与小型机相连,构成了以 PLC 为基础的初级分散控制系统 DCS,在冶金、轻工等行业中得到广泛的应用。

20 世纪 70 年代末期,PLC 向大规模、高性能等方向发展,形成了多种多样的系列产品,出现了结构紧凑、价格低廉的新一代产品和多种不同性能的分布网络系统,并开发出多种便于工程技术人员使用的编程语言,特别是适用于工艺人员使用的图形语言,大大方便了 PLC 的使用。

20 世纪 80 年代中期,PLC 开始拓展其应用领域,主要用于要求电气控制与过程控制密切结合的场所及批量过程控制中。这就从根本上改变了过去电控由 PLC 承担而过程控制由 DCS 承担的状况,做到了电控和过程控制采用一套 PLC 系统统一控制。

控制仪表与装置涉及的而十分广泛,如 DCS、PLC、新型控制仪表、变送器及执行器等都有自己的发展轨迹,但它们的发展都围绕着实现工厂整体自动化 (FA) 这个总目标,即将自动控制装置用于生产流程的整个操作过程,从开机到停机的全程控制及将控制、生产计划安排和工厂全面管理有机的结合起来,实现工厂整体的自动化、综合化、最佳化。控制仪表与装置的发展趋势是逐步实现全数字式、开放式的 DCS 系统,扩展应用覆盖而,使人工智能、专家系统等在工业生产自动控制中获得广泛应用。

2.3.2 调节器

2.3.2.1 PID 调节规律

在定值自动调节系统中,由于扰动的作用,会使被调节参数偏离给定值,即被调节参数对给定值产生了偏差,偏差等于被调节参数与给定值之差。偏差信号作为输入量送入调节器,在调节器中进行一定规律的运算后,给出输出信号进行调节,以补充扰动的影响,使被调节参数回到给定值。经过多长时间,以什么样的途径回到给定值,即调节过程的品质如何不仅与对象特性有关,也与调节器的特性有关。

近年来,虽然发展了许多类型的调节器,也出现了一些新型调节规律,但是最基本的,工业上用得最普遍的仍然是比例 (P)、积分 (I) 及微分 (D) 三种调节规律。由这三种规律可以组合成比例调节器、比例积分 (PI) 调节器、比例微分 (PD) 调节器以及比例积分微分 (PID) 三作用调节器。因此,有必要对这几种调节规律在自动调节系统中的作用,调节器整定参数的意义及测定方法进行分析。

1. 比例调节器

比例调节器的输出与输入成正比,而输入是设定与反馈之差,偏差一出现,就能及时的产生与之成比例的调节作用,因此调节器构成系统时,则会产生静态偏差也称静差,它系指调节过程终止时,被调节参数测量值与给定值之差。

2. 比例积分调节器

积分作用的特点是：调节器输出与偏差存在的时间有关，只要偏差存在，输出就会随时间不断增长，直到偏差消除，调节器的输出才不再变化。因此，积分作用能消除静差，这是它重要的优点。但积分作用动作缓慢，在偏差刚出现时，调节器作用很弱不能及时克服扰动的影响，致使被调节参数的动态偏差增大，调节过程延长。因此，很少单独使用积分调节器，绝大多数都是将积分作用与比例作用合在一个调节器中形成比例积分调节器 PI。

3. 比例微分调节器

上述的 PI 调节器动作快，又能消除静差，是用得最多的调节器。但当对象有较大的惯性时，用 PI 调节器就不能得到很好的调节品质。由于对象惯性大（如温度对象），即使受到大的扰动，被调节参数开始时变化仍不大，偏差很小，相应的 PI 调节器的调节作用就很弱，但偏差却以一定的速度增大。因此，对于惯性较大的对象，PI 调节器就不能及时克服扰动的影响，以致造成大的动态偏差和长的调节时间。如在调节器中加入微分作用，在偏差值尚不大时，根据偏差变化的趋势，提前给出较大的调节动作，使过程的动态品质得到改善。但是，如微分作用过强，或对象惯性较小时，微分作用反而会使过程品质变坏，甚至使系统不能稳定工作。

微分作用的特点：输出只能反映偏差输入的变化速度，对于一个固定不变的偏差，不管它的数值多大，根本不会有微分作用输出，因此它不能克服静差。当偏差变化很慢，但经长时间积累达到相当大的数值时，微分作用也无能为力。所以在系统中不能使用单独的微分作用，它需要与比例作用配合构成比例微分调节器。

4. 比例微分积分调节器

同时具有比例、积分、微分作用的调节器称 PID 调节器。

从调节规律来讲，PID 调节器是模拟调节器中最完善的调节器，使它的积分时间为无穷大，即得到 PD 调节器。使它的微分预调时间为零，即成为 PI 调节器。同时使积分时间为无穷大，而预调时间为零，则成为 P 调节器。

2.3.2.2 数字式调节器

图 2-6 给出了由数字调节器、检测仪表、执行器和生产过程组成的直接数字控制系统构成图。由图可见，在直接数字控制系统中，除生产过程及现场仪表外的部分即为数字调节器，它由主机、过程通道、键盘及显示器等基本部分构成，当要求与操作站或上位机通信联络时，需配通信接口，当需打印记录信息时需另配打印机接口。

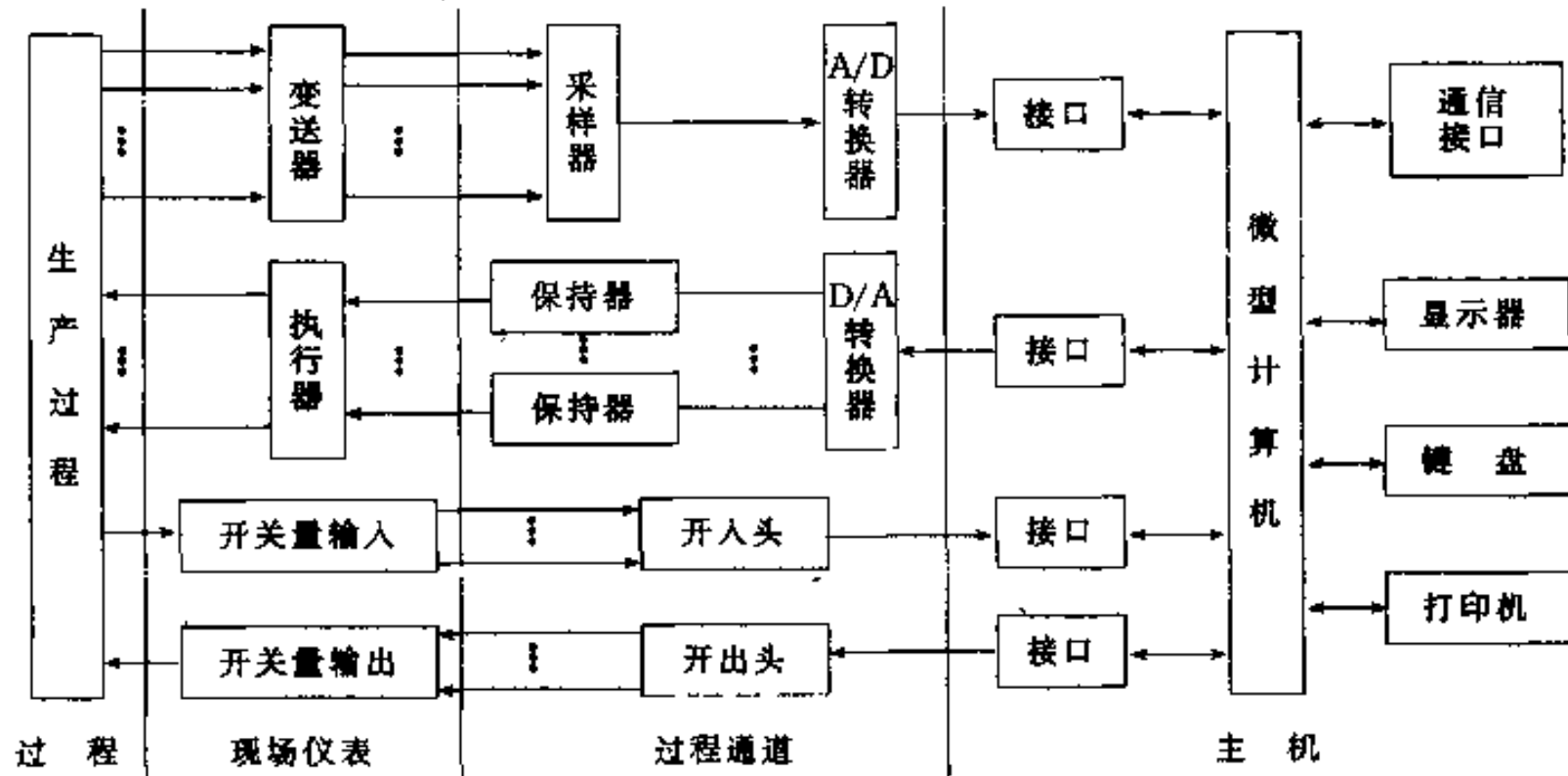


图 2-6 直接数字控制系统构成图

主机是整个数字式调节器的核心，由它存储程序和执行程序，以配合其它硬件组成和程序完成数字调节器的预定功能。采用不同机型的主机，其总体结构，指令系统不同，将会影响数字调节器的构成、功能和性能。

过程通道是数字调节器的重要组成部分，输入通道用于将现场仪表检测到的被控参数变为主机能够识别和接收的信息，以便进行处理。输出通道用于将主机输出的信息变为现场执行器所需的信号形式。输入通道和输出通道又都包括模拟量通道和开关量通道两种类型。在数字调节器中是以模拟量输入/输出通道为主。键盘、显示器也是数字调节器的重要组成部分，它是一种简单的人机接口，通过键盘修改调节器参数和工作状态，显示器可让操作人员了解系统的工作状态。

数字调节器的全部工作都是由微处理器执行程序完成的，数字调节器的软件包括监控管理程序和应用程序两部分。

(1) 监控管理程序 这是一种较简单的系统软件，由它实现对输入输出通道、键盘、显示器及通信等部件的管理以及对调节器各硬件部分和程序进行故障监测及处理等。

(2) 应用程序 根据调节器的应用功能所编的程序。如数据采集、数字滤波、标度变化、数据处理、控制算法、报警及输出等程序。在可编程调节器中，这些应用程序以模块形式给出，用户可用数字调节器的编程语言将这些模块进行组态，构成用户所需系统。

2.3.2.3 可编程数字调节器

一般的数字式PID调节器由于内部装有微处理器，其各种丰富的功能均是在硬件电路的基础上，由执行程序而实现的，用户不需编制程序，操作人员如同使用模拟仪表一样，具有使用方便的优点。其缺点是功能比较局限，只有确定的有限功能，不能灵活组成复杂的控制系统。可编程数字调节器在其内部设计了概念全新的软件包，它将运算功能和控制功能等做成标准的功能软件包——模块，并预先存储在调节器的存储器中。为实现某一控制策略，用户不必更改装置的硬连接，也无需掌握微处理器的知识，只需掌握并运用一定规则，通过编程将这些功能模块进行自由组合，便可实现所需之控制系统。因此，可编程数字调节器具有充分的灵活性与良好的系统扩展性。

可编程数字调节器有如下特点：

1. 以微处理器为核心，功能灵活，性能价格比高

可编程数字调节器具有多种控制和运算功能供选用。一台可编程数字调节器相当于多台模拟调节器和运算器的功能，不仅提高了性能价格比，而且削减了仪表台数，缩小了仪表盘面积，可编程数字调节器可独立构成控制系统，也可与上位机进行通信，构成分级控制系统。

2. 系统组态功能强，操作直观、方便

可编程数字调节器内部存储器中有许多控制与运算软件包，使用者只要具有一般仪表及控制系统知识，不必掌握软件知识即可通过简单的系统组态方便选择这些功能软件包，并根据系统要实现的功能进行自由组合。

3. 可靠性高，维护性好

可编程数字调节器的显示部分采用等离子体、LED显示器或液晶显示器，精度高，监视性能好。操作输出部件具有独立性，在微处理器发生故障时，也能观察PV值进行手动操作，使控制回路可靠运行。可编程数字调节器还具有自诊断功能，便于系统维护。

4. 容易进行系统的扩展

可编程数字调节器可以从单回路扩展到大规模系统,如果采用通信组件及通信控制器,可构成多级系统。

可编程数字调节器的结构按照其作用不同,可分为几大部分:显示操作、编程设定、I/O接口与通信、后备硬手动操作。下面分别来说明各部分的组成及作用:

(1)显示操作面板 以日本富士电机公司的FC系列PMK可编程数字调节器为例。PMK在运行过程中供操作员使用的显示操作板设于正面板。它含有:①三个指示器,分别指示测量值,给定值及操作输出。②一个切换板,共有三个位置分别为自动状态、手动状态及远程状态。③七个按钮和七个指示灯,用来进行软手动操作及显示。

(2)编程设定 可编程数字调节器中程序的编制,修改及对参数的设定可通过编程设定组件,手持编程器和PC编程终端等三种方式进行。

(3)I/O接口与通信 可编程数字调节器通过I/O接口与过程信号相连接。I/O接口一般设于可编程数字调节器的背面,分为螺钉端子和连接器两种类型。螺钉端子用于现场信号的连接,如模拟量的输入输出信号及电源的正负端。连接器主要用于可编程数字调节器与上位机或小型CRT的通信。

(4)后备硬手动操作组件 通常,可编程数字调节器设有硬手动操作组件,它的主要功能是将电流调节信号直接输出到与调节器相连的被控设备,用于实现硬手动操作及切换。

2.3.3 执行器

执行器在生产过程自动化中起着十分重要作用。人们常把它称为实现生产过程自动化的“手足”。因为它在自动控制系统中接受调节器的控制信号,自动改变操作变量,达到对被调参数(如温度、压力、液位等)进行调节的目的,使生产过程按照预定要求正常进行。

执行器根据执行机构使用的工作能源不同可分为三大类:气动执行器、电动执行器、液动执行器。

气动执行器是以压缩空气为能源的执行器。它的主要特点是:结构简单,输出推力大,动作可靠,性能稳定,维护方便,价格便宜,本质安全防爆等。它不仅能与气动调节仪表配套使用,还可通过电/气转换器或电/气阀门定位器与电动调节仪表或工业控制计算机配套使用。因此,广泛用于化工、石油、冶金、电力等工业部门。在目前的实际应用中气动执行器的使用数量约为90%。

电动执行器是以电为能源的执行器,它的主要特点是:能源取用方便,信号传输速度快,传送距离远,便于集中控制,停电时执行器保持原位不动,不影响主设备安全,灵敏度和精度较高,与电动调节仪表配合方便,安装接线简单。缺点是结构复杂,体积较大,推力小,价格贵,平均故障率高于气动执行器。适用于防爆要求不高及缺乏气源和使用数量不太多的场合。

液动执行器使用较少。

随着微电子技术和大规模集成电路以及超大规模集成电路的迅猛发展,微处理器引入到过程控制装置、变送器、调节阀等仪表装置中,使它们智能化,功能多样化,出现了智能执行器,智能调节阀等智能仪表产品。智能仪表不仅改变了传统的实现方式,成为硬件和软件的结合体,仪表的众多功能将由软件来实现,而且为工业仪表自动化及其系统应用向更高层次发展奠定了基础。

智能执行器是智能仪表中的一种。它有电动和气动两类,每类又有多个品种。一般智能

执行器的基本功能是信号驱动和执行,内含调节阀输出特性补偿, PID 控制和运算, 阀门特性自检验和自诊断功能。由于智能执行器备有微机通信接口, 它可与上位调节器、变送器、记录仪等智能化仪表一起联网, 构成控制系统。

2.3.4 变送器

变送器是自动控制系统中的一个重要组成部分, 在各种工业过程自动控制系统中, 变送器对温度、压力、液位、流量、成分等物理量进行测量, 并转换成统一的标准信号。

变送器无论是在过程控制系统中, 还是在集散控制系统中, 都占有独特的地位。变送器将各种物理量转换成统一的标准信号, 信号标准其实是仪表之间的通信协议, 几十年来一直在演变。信号标准的变化代表了过程控制仪表的发展进程, 每一次变化对变送器都带来了新成果。目前带有 4~20mA 的 HART 协议已成为事实上的信号标准。今后相当一段时间内, 变送器的设计生产使用将按此标准展开。同时我们已看到变送器最终将纳入现场总线标准, 现场总线会彻底取代 4~20mA 模拟信号, 它是一种完全数字化双向通信技术, 目前国际上已出现了多种现场总线的变送器, 因此从信号的演变看, 带有微处理器的智能化现场变送器是发展的必然趋势。

随着工业技术的更新, 特别是半导体技术、微电子技术的发展, 使变送器制造技术出现了巨大的变化, 由此使变送器不断升级换代。特别值得注意的是, 智能传感器的普及又加速了智能变送器的进程。从以往观点看, 传感器与变送器是两种不同功能的模块。传感器是借助于敏感元件, 接受物理量形式的信息, 并按一定规律将其转换成同种或另一种物理量形式信息的仪表。而变送器为输出标准信号的传感器。近几年来, 采用微机械加工技术和微电子技术从传统的结构设计转向微机械加工工艺结构设计, 使敏感元件与信号调理电路一体化, 传感与变送功能合一, 并出现了多参数变送器, 这是今后智能变送器的又一发展趋势。

2.4 自动控制技术

2.4.1 控制理论的产生及其发展

自动控制理论作为一门科学, 它的产生可追溯到 18 世纪中叶英国的第一次技术革命。随着技术不断的发展, 控制技术也在不断的发展, 尤其是计算机技术的更新换代, 更加推动了控制理论不断向前发展。控制理论的发展过程一般可分为三个阶段:

(1) 第一阶段 时间为 20 世纪 40~60 年代, 称为“古典控制理论时期”, 古典控制理论主要是解决单输入单输出问题。主要采用传递函数、频率特性、根轨迹为基础的频域分析方法, 所研究的系统多半是线性定常系统, 对非线性系统分析时采用的相平面法一般也不超过两个变量。古典控制理论能够较好的解决生产过程中的单输入单输出问题。

(2) 第二阶段 时间为 20 世纪 60~70 年代, 称为“现代控制理论”时期。这个时期由于计算机的飞速发展, 推动了空间技术的发展。古典控制理论中的高阶常微分方程可转化为一阶微分方程组, 用以描述系统的动态过程, 即所谓状态空间法。这种方法可以解决多输入多输出问题, 系统可以是线性的、定常的, 也可以是非线性的、时变的。

(3) 第三阶段 时间为 20 世纪 70 年代末至今。70 年代末, 控制理论向着“大系统理论”和“智能控制”方向发展, 前者是控制理论在广度上的开拓, 后者是控制理论在深度上的挖掘。“大系统理论”是用控制和信息的观点, 研究各种大系统的结构方案, 总体设计中的分解方法和协调等问题的技术基础理论。而“智能控制”是研究与模拟人类智能活动及其控

制与信息传递过程的规律，研制具有某些仿人工智能的工程控制与信息处理系统。

目前，人工智能中一个广为重视的问题就是用自然语言进行人机对话的研究，而初步应用的典型智能控制系统就是智能机器人。随着社会和生产的发展，控制理论也在不断发展和完善，随着自动控制技术和计算机技术的迅速发展，人们不仅从繁重的体力劳动中解放出来，而且也不断的从复杂的脑力劳动中“解脱”出来，已经深入到家庭生活中的机器人的出现，就是一个有力的说明。

2.4.2 反馈控制理论

为了实现各种复杂的控制任务，首先要将被控对象和控制装置按照一定的方式连接起来，组成一个有机总体，这就是自动控制系统。在自动控制系统中，被控对象的输出量，即被控量是要求严格加以控制的物理量，它可以要求保持为某一恒定值，例如温度、压力、液位等。也可以要求按照某个给定规律运行，例如飞行航迹，记录曲线等。而控制装置则是对被控对象施加控制作用的机构的总体，它可以采用不同的原理和方式对被控对象进行控制，但最基本的一种是基于反馈控制原理组成的反馈控制系统。在反馈控制系统中，控制装置对被控对象施加的控制作用，是取自被控量的反馈信息，用来不断修正被控量的偏差，从而实现对被控对象进行控制的任务，这就是反馈控制的原理。

其实人的一切活动都体现出反馈控制的原理，人本身就是一个具有高度复杂控制能力的反馈控制系统。例如，人用手拿取桌上的书，汽车司机操纵方向盘驾驶汽车沿公路平稳行驶等，这些日常生活中习以为常的平凡动作都渗透着反馈控制的深奥原理。下面，通过解剖手从桌上取书的动作过程，透视一下它所包含的反馈控制机理。在这里，书的位置是手运动的指令信息，一般称为输入信号。取书时，首先人要用眼睛连续目测手相对于书的位置，并将这个信息送入大脑（称为位置反馈信息），然后由大脑判断手与书之间的距离，产生偏差信号，并根据其大小发出控制手臂移动的命令（称控制作用或操纵量）逐渐使手与书之间的距离减小。显然只要这个偏差存在，上述过程就要反复进行，直到偏差减小为零，手便取到了书。可以看出，大脑控制手取书的过程，是一个利用偏差（手与书之间距离）产生控制作用，并不断使偏差减小直至消除的运动过程。同时，为了取得偏差信号，必须要有手位置的反馈信息，两者结合起来，就构成了反馈控制，显然反馈控制实质上就是一个按偏差进行控制的过程，因此，它也称为按偏差控制，反馈控制原理就是按偏差控制的原理。

人取物视为一个反馈控制系统时，手是被控对象，手位置是被控量（即系统的输出量），产生控制作用的机构是眼睛、大脑和手臂，统称为控制装置。

通常我们把取出输出量送回到输入端，并与输入信号相比较产生偏差信号的过程，称为反馈。若反馈的信号是与输入信号相减，使产生的偏差越来越小，则称为负反馈；反之，则称为正反馈。反馈控制就是采用负反馈并利用偏差进行控制的过程。而且由于引入了被控量的反馈信息，整个控制过程称为闭合的，因此反馈控制也称闭环控制。

在工程实践中，为了实现对被控对象的反馈控制，系统中必须配置具有人的眼睛、大脑和手臂功能的设备，以使用来对被控量进行连续的测量、反馈和比较，并按偏差进行控制。这些设备依其功能分别称为测量元件、比较元件和执行元件，并统称为控制装置。

反馈控制系统是由各种结构不同的元部件组成的。从完成“自动控制”这一职能来看，一个系统必须包含被控对象和控制装置两大部分，而控制装置是由具有一定职能的各种基本元部件组成的。在不同的系统中，结构完全不同的元部件却可以具有相同的职能，因此，将组成

系统的元部件按职能分类主要有以下几种：

(1) 测量元件 其职能是检测被控制的物理量，如果这个物理量是非电量的，一般再转化为电量。例如：测速发电机是用来检测电动机轴的速度并转换为电压。

(2) 给定元件 其职能是给出与期望的被控量相对应的系统输入量。

(3) 比较元件 其职能是把测量元件检测的被控量实际值与给定元件给出的参考量进行比较，求出它们之间的偏差。常用的比较元件有差动放大器、机械差动装置、电桥电路等。

(4) 放大元件 其职能是将比较元件给出的偏差信号进行放大，用来推动执行元件去控制被控对象。

(5) 执行器 其职能是直接推动被控对象，使其被控量发生变化。用来作为执行元件的有阀、电动机、液压马达等。

(6) 校正元件 也叫补偿元件，它是结构或参数便于调整的元件，用串联或反馈的方式连接在系统中，以改善系统的性能。最简单的校正元件是由电阻、电容组成的无源或有源网络，复杂的则用计算机完成。

一个典型的反馈控制系统基本组成如图 2-7 所示。

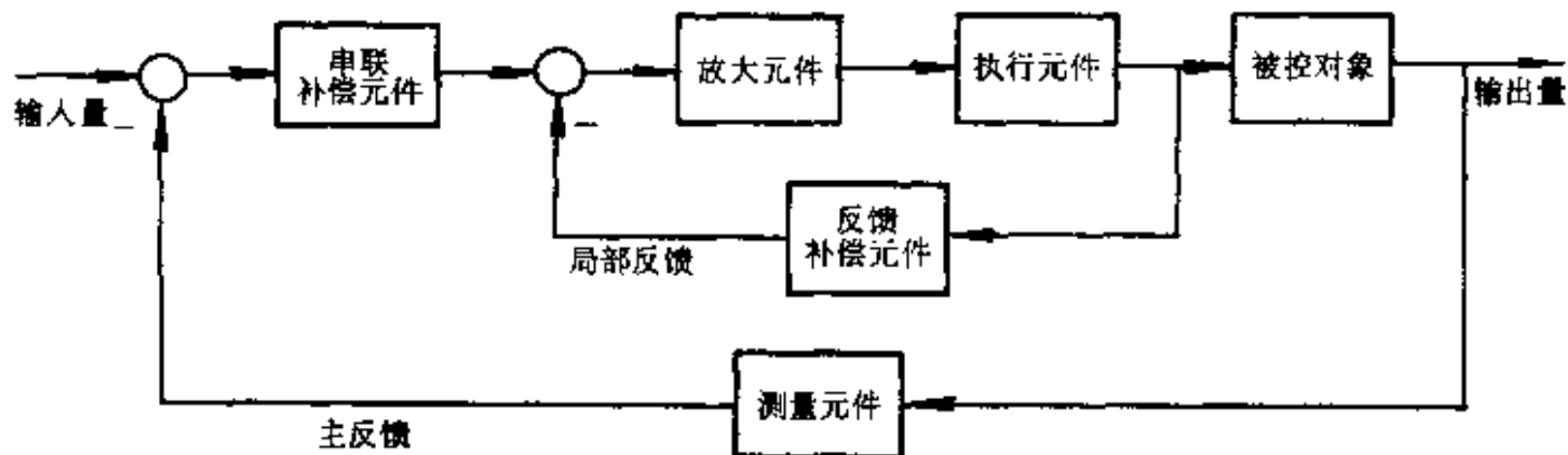


图 2-7 反馈控制系统基本组成

反馈控制是自动控制系统最基本的控制方式，也是应用最广泛的一种控制系统。现举电阻炉微型计算机温度控制系统的例子。

用于工业生产中炉温控制的微型计算机控制系统，具有精度高、功能强、经济性好、无噪声、显示醒目、读数直观、打印存档方便、操作简单、灵活性和适应性好等一系列优点。用微型计算机控制系统代替模拟式控制系统是现代工业过程控制的方向。

图 2-8 为某个厂电阻炉微型计算机温度控制系统原理图。电阻丝通过晶闸管主电路加热，炉温期望值用计算机键盘预先设置，炉温实际值由热电偶检测并转换成电压信号，经放大、滤波后，由 A/D 转换器将模拟量变换为数字量送入计算机中与所设定的温度期望值比较后产生偏差信号，计算机便根据预定的控制算法计算出相应的控制量，再经 D/A 变换器变换成 0~10mA 电流，通过触发器控制晶闸管导通角，从而改变电阻丝中电流大小，达到控制炉温的目的。

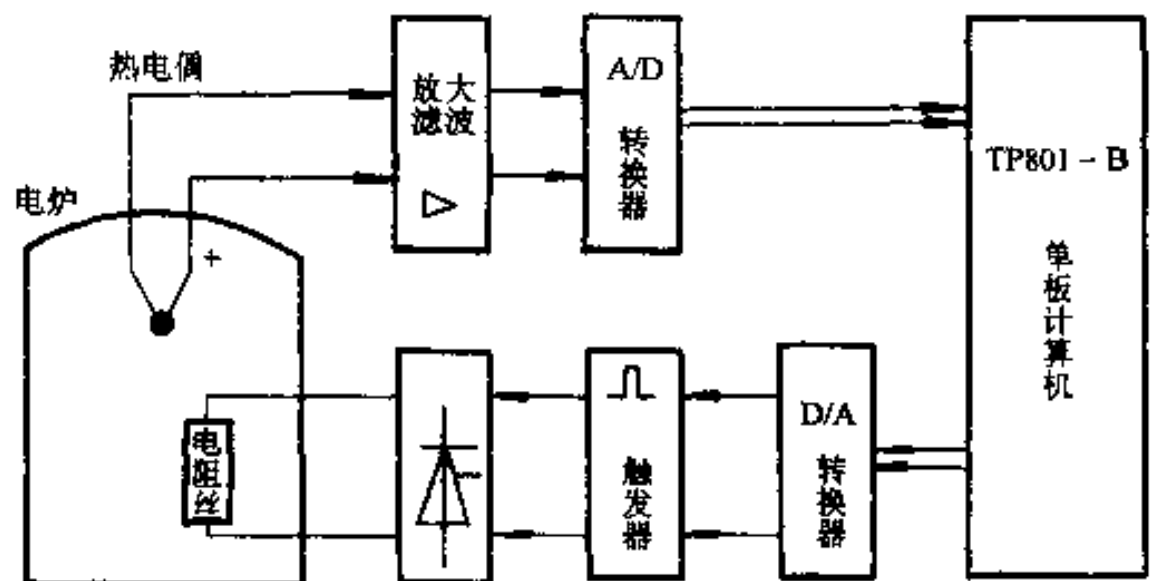


图 2-8 电阻炉微型计算机温度控制系统原理图

2.4.3 模糊控制

模糊自动控制是以模糊集合论、模糊语言变量及模糊逻辑推理为基础的一种计算机数字控制，从线性控制与非线性控制的角度分类，模糊控制是一种非线性控制，从控制器的智能性看，模糊控制属于智能控制的范畴，而且它已成为目前实现智能控制的一种重要而又有效的形式。

经过人们长期研究和实践形成的经典控制理论，对于解决线性定常系统的控制问题是很有效的。然而，经典控制理论对于非线性时变系统难以奏效，基于状态变量描述的现代控制理论对于解决线性或非线性的，定常或时变的多输入多输出系统问题，获得了广泛的应用。但是，无论采用经典控制理论还是现代控制理论设计一个控制系统，都需要事先知道被控对象精确的数学模型，然后根据数学模型以及给定的性能指标，选择适当的控制规律，进行控制系统设计。然而，在许多情况下被控对象（或生产过程）的精确数学模型很难建立。例如有些过程的变量多，各种参数又存在不同程度的时变性，且过程具有非线性、强耦合等特点。因此建立这一类过程的精确数学模型困难很大，甚至是办不到的。下面举一个停车问题的例子。

所谓停车问题是要把汽车停在拥挤的停车场上两辆车之间的一个空隙处。

对于上述问题，从事控制理论研究者的解决方法是：令 ω 记车 C 上的一个固定参考点的位置， θ 记车 C 的方位，于是建立车的状态方程和运动方程分别为：

$$x = f_1(\omega, \theta)$$

$$\dot{x} = f_2(x, \mu)$$

其中， μ 为一个有约束的控制向量，其两个分量分别为前轮的角度 μ_1 和车速 μ_2 ，邻近两辆车定义为 x 执行中的约束，用集合 Ω 表示，而两辆停着的车之间的空隙定义为允许的终端状态的集合 Γ 。这样，停车问题就转化为寻找一个控制 $\mu(t)$ ，使其在满足各种约束的条件下把初始状态转移到终端状态 Γ 中去。

采用精确方法求解上述问题，由于约束条件过多，使得求解过程非常复杂，即使用一台大型计算机也难以胜任。

汽车司机是这样操纵的，先让车向前运动，前轮先向右，后向左，然后使车向后运动，前轮仍先向右然后向左，经过反复多次，车将横向移动一个所需的距离，最后向前开，停车空隙处。这样汽车司机通过一些不精确的观察，执行一些不精确的控制，却达到了准确停车的目的。

在描述控制规则的条件语句中的一些词，如“较大”、“偏高”等都具有一定的模糊性，因此用模糊集合来描述这些模糊条件语句，即组成了所谓的模糊控制器。

模糊控制的基本原理如图 2-9 所示。

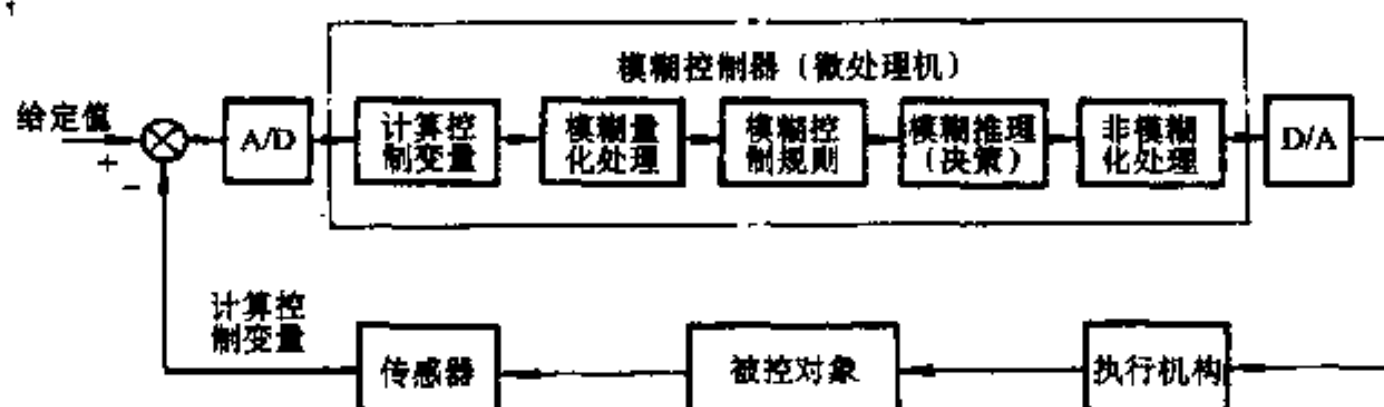


图 2-9 模糊控制原理框图

它的核心部分为模糊控制器，模糊控制器的控制规律由计算机的程序实现，实现一步模糊控制算法的过程是这样的：微机经中断采样获取被控制量的精确值，然后将此量与给定值比较得到误差 E （在此取单位反馈），一般选误差信号 E 作为模糊控制器的一个输入量，把误差信号 E 的精确量进行模糊量化变成模糊量，误差 E 的模糊量可用相应的模糊语言表示。至此，得到了误差 E 的模糊语言集合的一个子集 e （ e 实际上是一个模糊向量）。再由 e 和模糊控制规则 R （模糊关系）根据推理的合成规则进行模糊决策，得到模糊控制量 μ 为：

$$\mu = e \cdot R$$

式中 μ 为一个模糊量，为了对被控对象施加精确的控制，还需要将模糊量 μ 转换为精确量，这一步骤称为非模糊化处理（亦称清晰化）。得到了精确的模拟量送给执行机构，对被控对象进行一步控制，然后，中断等待第二次采样，进行第二步控制……这样循环下去，就实现了被控对象的模糊控制。

为了说明模糊控制系统的工作原理，介绍一个很简单的单输入单输出温控系统。

例如，某电热炉用于对金属零件的热处理。按热处理工艺要求需保持炉温 600°C 恒定不变，因为炉温受被处理零件多少、体积大小以及电网电压波动等因素影响，容易波动，所以设计温控系统取代人工手动控制。

如果电热炉的供电电压是经晶闸管整流电源提供的，它的电压连续可调，当调整晶闸管触发线路中的偏置电压，既改变了晶闸管导通角 α ，于是晶闸管整流电源的电压可根据需要连续可调。当人工手动控制时，根据对炉温的观测值，手动调节电位器旋钮即可调节电热炉供电电压，达到升温或降温的目的。

采用模糊控制炉温时，控制系统的工作原理可分述如下：

1. 模糊控制器的输入变量和输出变量

在此将炉温 600°C 作为给定值 t_0 ，测量得到的炉温记为 $t(k)$ ，则误差 $e(k) = t_0 - t(k)$ 作为模糊控制器的输入变量。模糊控制器的输出变量是触发电压 μ 的变化，该电压直接控制电热炉的供电电压的高低，所以又称输出变量为控制量。

2. 输入变量及输出变量的模糊语言描述

描述输入量及输出变量的语言值的模糊子集为 {负大，负小，0，正小，正大} 通常采用如下简记形式：NB=负大，NS=负小，O=零，PB=正大，其中 N=negative，P=positive，B=big，S=small，O=zero，设误差 e 的论域为 X ，并将误差大小量化为七个等级，分别表示为 $-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3$ ，则有 $X = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ ，选控制量 μ 的论域为 Y ，并同 X 一样也把控制量的大小化为七个等级，即 $Y = \{-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3\}$ ，图 2-

10 给出了语言变量的隶属函数曲线，由此可得到表 2-1 模糊变量 e 及 μ 的赋值表。

3. 模糊控制规则的语言描述

根据手动控制策略，模糊控制规则可归纳如下：

- 1) 若 e 负大，则 μ 正大。

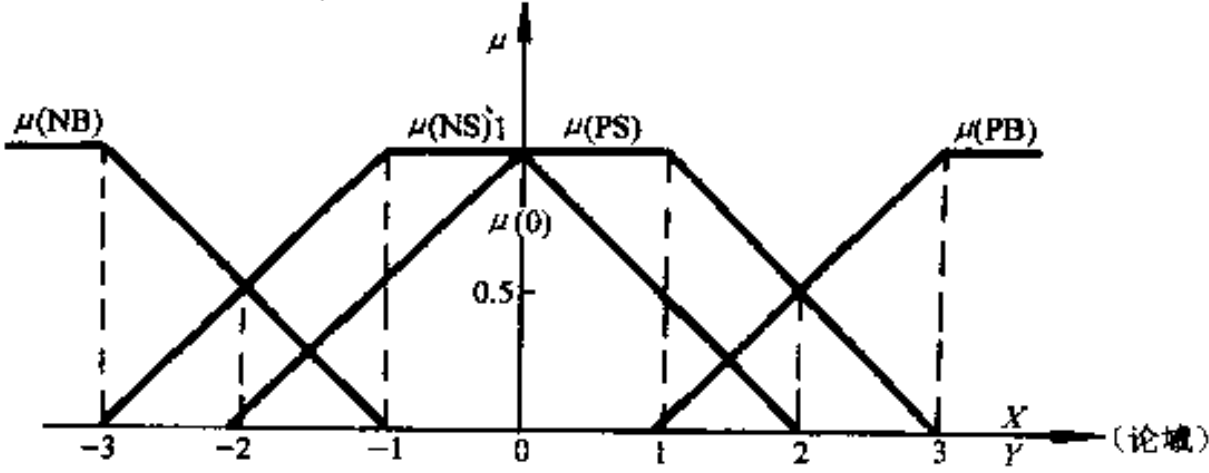


图 2-10 语言变量的隶属函数曲线

表 2-1 模糊变量 (e, μ) 赋值表

隶属度 语言变量		量化等级	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB			0	0	0	0	0	0.5	1
PS			0	0	0	0	1	0.5	0
O			0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS			0	0.5	1	0	0	0	0
NB			1	0.5	0	0	0	0	0

2) 若 e 负小, 则 μ 正小。

3) 若 e 为零, 则 μ 为零。

4) 若 e 正小, 则 μ 负小。

5) 若 e 正大, 则 μ 负大。

上述控制规则也可用英文写成为如下形式:

1) if $e=NB$ then $\mu=PB$ or

2) if $e=NS$ then $\mu=PS$ or

3) if $e=O$ then $\mu=O$ or

4) if $e=PS$ then $\mu=NS$ or

5) if $e=PB$ then $\mu=NB$

4. 模糊控制规则的矩阵形式

模糊控制规则实际上是一组多重条件语句, 它可以表示为从误差论域 X 到控制量论域 Y 的模糊关系 R 。因为当论域是有限时, 模糊关系可以用矩阵来表示, 而论域 X 及 Y 均是有限的 (由于将精确量离散化时, 将其分成有限的几档, 如在此为七档, 每一档对应一个模糊集, 这样可使问题处理简化), 所以模糊关系 R 可以用矩阵表示, 可参看有关书籍。

5. 模糊决策

模糊控制器的控制作用取决于控制量, 而控制量通过 $\mu=e \cdot R$ 进行计算, 控制量 μ 实际上等于误差的模糊向量 e 和模糊关系 R 的合成, 当取 $e=PS$ 时, 则有:

$$\mu = e \cdot R = (0, 0, 0, 0, 1, 0, 5, 0) \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 1 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0.5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.5, 0.5, 1, 0.5, 0.5, 0, 0)$$

6. 控制量的模糊量转化为精确量

上面求得的控制量 μ 为一模糊向量, 它可写为:

$$\mu = (0.5/-3) + (0.5/-2) + (1/-1) + (0.5/0) + (0.5/1) + (0/2) + (0/3)$$

对上式控制量的模糊子集按照隶属度最大原则, 应选取控制量为“-1”级, 即当误差 e

=PS 时, 控制量 μ 为“-1”级, 具体地说当炉温偏高时, 应降低一点电压。

实际控制时,“-1”级电压要变为精确量,“-1”这个等级控制电压的精确值根据事先确定的范围是容易计算得出的, 通过这个精确量去控制电热炉的电压, 使得炉温朝着减小误差方向变化。

7. 模糊控制器的响应表

模糊控制规则可由模糊矩阵 R 来描述, 进一步分析模糊矩阵 R 可以看出, R 矩阵每一行正是对每个非模糊的观测结果所引起的模糊响应。

2.4.4 专家控制系统

专家控制系统是指相当于(领域)专家处理知识和解决问题能力的计算机智能软件系统。专家控制系统不同于离线的专家系统, 它不仅是独立的决策者, 而且是具有获得反馈信息并能实时在线控制的系统。

工业生产过程由于本身的连续性及对产品质量要求高精度等特点, 对专家控制系统提出了一些有别于一般专家系统的特殊要求。

2.4.4.1 专家控制系统的特点

1. 高可靠性及长期运行的连续性

工业过程控制对可靠性要求苛刻和其它领域相比显得更为突出, 工业过程控制往往数十甚至数百小时连续运行, 而不允许间断工作。

2. 在线控制的实时性

工业过程的实时控制, 要求控制系统在控制过程中要能实时的采集数据, 处理数据, 进行推理和决策, 对过程进行及时的控制。

3. 优良的控制性能及抗干扰性

工业控制的被控对象特性复杂, 如非线性、时变性、强干扰等。这就要求专家控制系统具有很强的应变能力, 即自适应和自学习能力, 以保证在复杂多变的各种不确定性因素存在的不利环境下, 获得优良的控制性能。

4. 使用的灵活性及维护的方便性

用户可以灵活方便的设置参数, 修改规则等。在系统出现故障或异常情况时, 系统本身应能采取相应措施或要求引入必要的人工参与。

2.4.4.2 专家控制系统的结构

一般说来, 产生式专家控制系统由以下几部分组成:

(1) 数据库 主要存储事实、证据、假设和目标等。对过程控制而言, 事实包括传感器测量误差、操作阈值、报警水平阈值、操作时序约束、对象成分配置等静态数据。证据包括传感器及仪表的动态测试数据等。假设包括用来丰富现有事实的集合等。目标包括静态目标和动态目标, 静态目标是一个大的性能目标阵列, 动态目标包括在线建立的来自外界命令和程序本身的目标。

(2) 规则库 含有产生式规则, 这种规则的典型描述为“如果(条件), 那么(结果)”其中“条件”表示来源于数据库的事实、证据、假设和目标, “结果”表示控制器的作用是一个估计算法。规则也可以看作是运行状态的函数, 因为数据库中定义的状态要比通常控制理论中的状态概念更加广义。这些产生式规则可以包括操作者的经验和可应用的控制和估计算法, 这些算法的适当特性以及应用时系统监控和诊断等规则。专家控制系统中的规则库相当于一

般专家系统中的知识库。

(3) 推理机 按照不同的策略从当前数据库的内容中, 确定下一条产生式规则。

(4) 人一机接口 产生式专家控制系统的人—机接口包括两部分: 一部分包含更新知识库的规则编辑和修改; 另一部分是运行时用户接口, 它包含一些解释工具, 用以帮助用户询问等, 用户接口还可以跟踪规则的执行。

(5) 规划环节 在控制过程中出现在线错误时, 规划环节给出指令改变产生目标等, 产生一些不干涉动作的调整作用, 以保证控制系统能够随着所需要的操作条件去在线改变控制过程。

2.4.5 神经网络控制

传统的基于模型的控制方式, 是根据被控对象的数学模型来设计控制器, 并对控制规律加以数学解析描述, 模糊控制是基于专家经验和领域知识总结出若干条模糊控制规则, 构成描述具有不确定性复杂对象的模糊关系, 通过被控系统输出误差及误差变化和模糊关系的推理合成获得控制器, 从而对系统进行控制。这两种控制方式都具有显式表达知识的特点, 而神经网络不善于显式表达知识, 但是它具有很强的逼近非线性函数的能力, 即非线性映射能力。把神经网络用于控制正是利用它的这个独特优点。

众所周知, 控制系统的目的在于通过确定适当的控制量输入, 使得系统获得期望的输出特性。设被控制对象的输入 μ 和系统输出 Y 之间满足如下非线性函数关系 $Y=g(\mu)$ 。

控制的目的是确定最佳的控制量输入 μ , 使系统的实际输出 Y 等于期望的输出 Y_d 。在该系统中, 可把神经网络的功能看作输入输出的某种映射, 或称函数变换, 并设它的函数关系为: $\mu=f(Y_d)$, 为了满足系统输出 Y 等于期望的输出 Y_d , 可得 $Y=g[f(Y_d)]$, 显然, 当 $f(0)=g(0)$ 时, 满足 $Y=Y_d$ 的要求。

由于要采用神经网络控制的被控对象一般是复杂的且多具有不确定性, 因此非线性函数 $g(0)$ 是难以建立的。可以利用神经网络具有逼近非线性函数的能力来模拟 $g(0)$, 尽管 $g(0)$ 的形式未知, 但通过系统的实际输出 Y 与期望输出 Y_d 之间的误差来调整神经网络中的连接权重, 即让神经网络学习, 直至误差 $e=Y_d-Y \rightarrow 0$ 的过程, 就是神经网络模拟 $g(0)$ 的过程, 它实际上是对被控对象的一种求逆过程, 由神经网络的学习算法实现这一求逆过程, 就是神经网络实现直接控制的基本思想。

所谓神经网络控制, 是指在控制系统中采用神经网络这一工具对难以精确描述的复杂的非线性对象进行建模、或充当控制器、或优化计算、或进行推理、或故障诊断等, 以及同时兼有上述某些功能的适当组合, 将这样的系统统称为基于神经网络的控制系统, 称这种控制方式为神经网络控制。

神经网络在控制中的作用分为以下几种:

- 1) 在基于精确模型的各种控制结构中充当对象的模型。
- 2) 在反馈控制系统中直接充当控制器的作用。
- 3) 在传统控制系统中起优化计算作用。

4) 在与其它智能控制方法和优化算法, 如模糊控制、专家控制及遗传算法等相融合中, 为其提供非参数化对象模型、优化参数、推理模型及故障诊断等。由于人工智能中的新技术不断出现及其在智能控制中的应用, 神经网络必将在和其它新技术的相融合中, 在智能控制中发挥更大的作用。

神经网络控制的结构和种类划分, 根据不同观点可以有不同的形式, 目前尚无统一的分类标准。

1991 年 Werbos 将神经网络控制划分为学习控制、直接逆动态控制、神经自适应控制、BTT 控制和自适应决策控制五类。

1992 年 Hunt 等人发表长篇综述文章, 将神经网络控制结构分为监督控制、直接逆控制、模型参考控制、内模控制、预测控制、系统辨识、最优决策控制、自适应线性控制、增强学习控制、增益排队论及滤波和预报等。

上述两种分类并无本质差别, 只是后者划分更细一些。神经网络几乎涉及到传统控制、系统辨识滤波和预报等所有方面, 这也间接的反映了随着神经网络理论和应用研究的深入, 将向控制领域、信息领域等进一步渗透。

综上分类, 我们认为神经网络控制的分类应该从它与传统控制和智能控制两大门类的结合上考虑, 可将神经网络控制原则上分为两大类: 即基于神经网络的智能控制和基于传统控制理论的神经控制两大类。

2.5 过程控制系统

2.5.1 过程控制的特点

过程控制的特点大致可归纳如下:

1. 连续生产过程的自动控制

过程控制一般是指连续生产过程的自动控制, 其被控量需定量的控制, 而且应是连续可调的。如控制动作在时间上是离散的 (如采用控制系统等), 但是其被控量需定量控制, 也归入过程控制。

2. 过程控制系统由过程检测及控制仪表组成

过程控制是通过各种检测仪表、控制仪表和电子计算机等自动化技术工具, 对整个生产过程进行自动检测、自动监督和自动控制。

3. 被控过程是多种多样的, 非电量的

在现代工业生产过程中工业过程很复杂。由于生产规模大小不同, 工艺要求各异, 产品品种多样, 因此过程控制中的被控过程是多种多样的。诸如石油化工过程中的精馏塔、化学反应器、流体传输设备; 热工过程中的锅炉、热交换器; 冶金过程中的转炉、平炉; 机械工业中的热处理炉等。它们的动态特性多数具有大惯性、大滞后、非线性特性。有些机理复杂 (如发酵, 生化过程等) 的过程至今尚未被人们所认识, 所以很难用目前过程辨识方法建立其精确的数学模型, 因此设计能适应各种过程的控制系统并非易事。

4. 过程控制的控制过程多属慢过程, 而且多半为参量控制

由于被控过程具有大惯性、大滞后 (大时延) 等特性, 因此决定了过程控制多属慢过程。另外, 在石油、化工、电力、冶金、轻工、建材、制药等工业生产过程中, 往往采用一些物理量和化学量 (如温度、压力、流量、液位、成分、pH 等) 来表征其生产过程是否正常, 因此需要对上述过程参数进行自动检测和自动控制, 故过程控制多半为参量控制。

5. 过程控制方案十分丰富

随着现代工业生产的迅速发展, 工艺条件越来越复杂, 对过程控制的要求越来越高。过程控制系统的设计是以被控过程的特性为依据的。由于工业过程的复杂、多变, 因此其特性

多半属多变量、分布参数、大惯性、大滞后和非线性等等。为了满足上述特点与工艺要求，过程控制中的控制方案是十分丰富的。通常有单变量控制系统，也有多变量控制系统；有仪表过程控制系统，也有计算机集散控制系统；有复杂控制系统，也有满足特定要求的控制系统。

6. 定值控制是过程控制的一种常用形式

在石油、化工、电力、冶金、轻工、环保和原子能等现代工业生产过程中，过程控制的主要目的在于消除或减小外界干扰对被控量的影响，使被控量能稳定控制在给定值上，使工业生产能实现优质高产和低消耗的目标。定值控制仍是目前过程控制的一种常用形式。

2.5.2 简单控制系统

简单控制系统是指只有一个调节器，一个调节阀连同被控过程，只对一个被控参数进行控制的单回路闭环控制系统。

这类控制系统虽然结构很简单，但确是最基本的过程控制系统。即使在高水平的自动化控制方案中，这类系统目前仍占控制回路的绝大多数（约占工业控制系统的80%以上）。而且，复杂控制系统也是在简单系统基础上构成的，一些高级过程控制系统往往是将这类系统作为最底层的控制系统。

实际生产过程形式多样，不同的生产过程需要不同的过程控制参数。因此实际生产中的过程控制方案也多种多样，这里以一个喷雾式干燥设备生产奶粉的过程控制系统设计为例进行说明。

1. 生产工艺情况简介

图2-11所示为乳化物干燥过程示意图。由于乳化物属于胶体物质，激烈搅拌易固化，也不能用泵抽送，故采用高位槽的办法。浓缩的乳液由高位槽流经过滤器A和B，滤去凝结块和其它杂质后，从干燥器顶部由喷嘴喷下。空气由鼓风机送至换热器（用蒸汽加热）加热后，再与来自鼓风机的空气混合，经风管送往干燥器，由下而上吹出，从而蒸发掉乳液中的水分，使之成为奶粉，并随湿空气一起送出进行分离。生产工艺对干燥后的产品质量要求很高，水分含量不能波动太大，因而需要对于干燥的温度进行严格控制。试验证明，若温度波动 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，则产品质量可以符合要求。

2. 系统控制方案设计

(1) 被控参数及控制参数选择 根据上述生产工艺情况，产品质量（水分含量）与干燥温度密切相关。考虑到一般情况下测量水分的仪表精度较低，故选用间接参数，即干燥器的温度为被控参数，水分与温度一一对应。因此必须控制温度在一定值上。

若知道被控过程的数学模型，则可用上述分析方法来选取可控性良好的量为控制参数。现在不知道过程的数学模型，仅就图所示进行分析。影响干燥器温度的因素有乳液流量 $f_1(t)$ ，旁路空气量 $f_2(t)$ ，加热蒸汽量 $f_3(t)$ ，选其中任一变量作为控制参数，均可构成温度控制系统。图中用调节阀位置代表三种控制方案，其框图分别为图2-12～图2-14。按图2-12所示分

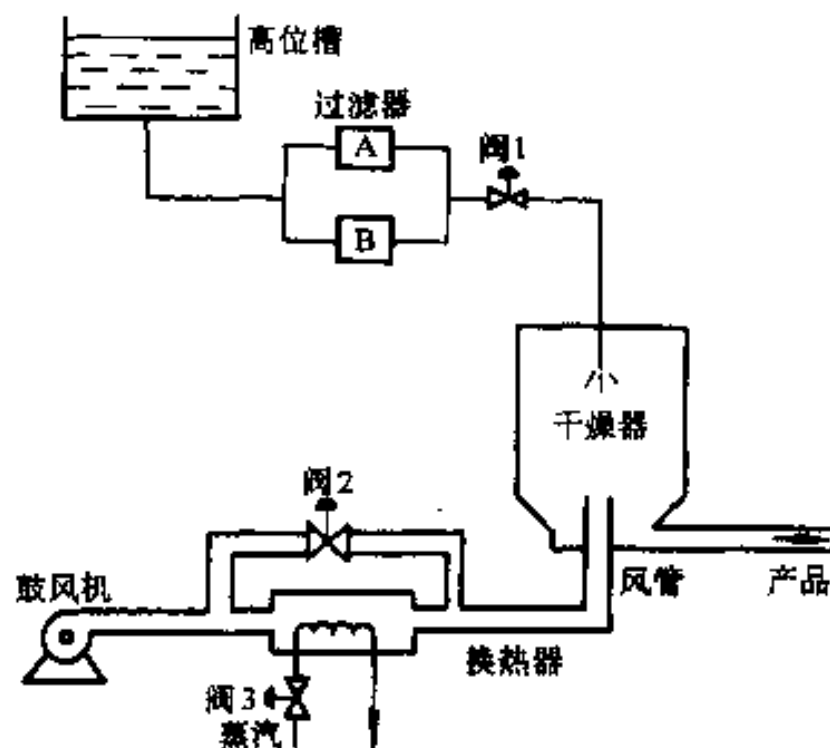


图 2-11 乳化物干燥过程示意图

析可知,乳液直接进入干燥器,滞后最小,对于干燥温度的校正作用最灵敏而且干扰进入位置最靠近调节阀,似乎控制方案最佳。但是,乳液流量是生产负荷,一般要求能保证产量稳定,若作为控制参数,工艺上不合理,所以,不宜选作控制参数。该控制方案不宜选用。

对图 2-13 所示进行分析可知,旁路空气量与热风混合,经风管进入干燥器,它与上一种方案相比,控制通道时延较大,对干燥温度校正灵敏度要差些。

图 2-14 所示蒸汽流量经过换热器的热交换,以改变空气温度,由于换热器的时间常数大,此方案控制通道的时延最大,对干燥温度的校正作用灵敏度最差。

显然,选择旁路空气量为控制参数的方案为最适宜。

(2) 过程检测控制仪表、调节阀及调节器规律选择 根据生产工艺及用户要求,选用常用的电动单元组合仪表,被控温度在 600°C 以下,选用热电阻温度计,为提高检测精度,应用三线制接法,并配用温度变送器。根据生产工艺安全原则及被控介质特点,选气关形式的调节阀。根据过程特性与工艺要求,可选用 PI 或 PID 控制规律。

(3) 调节器参数整定 调节器选好后,可在调试过程中进行参数整定。

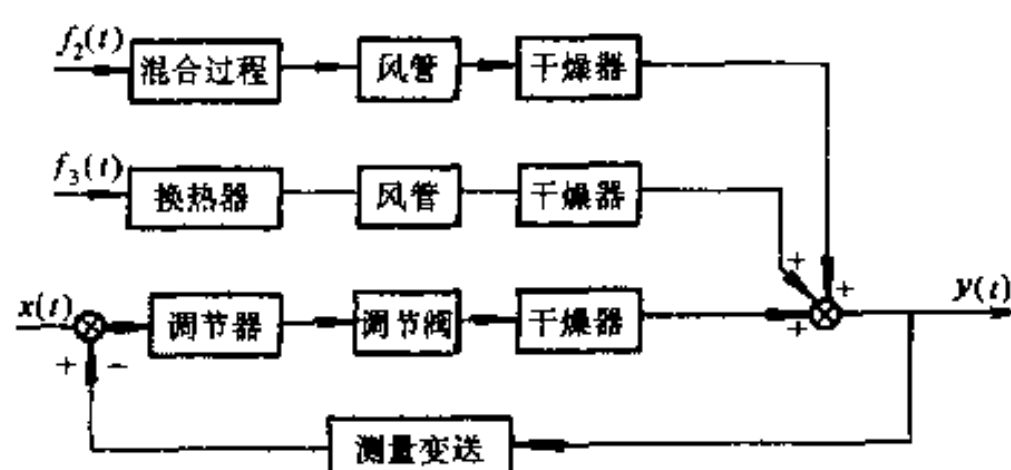


图 2-12 乳液流量为控制参数时的系统框图

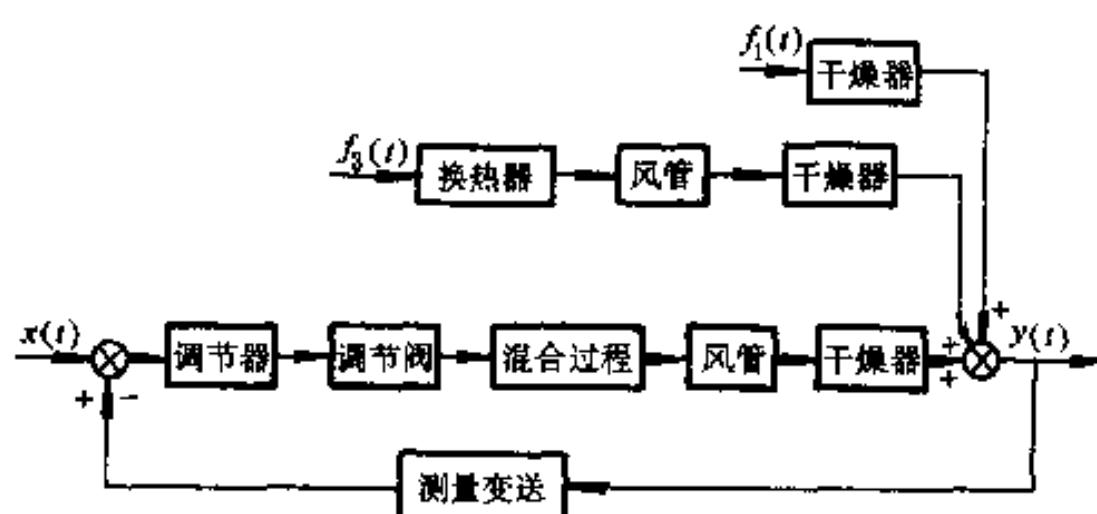


图 2-13 风量为控制参数时系统框图

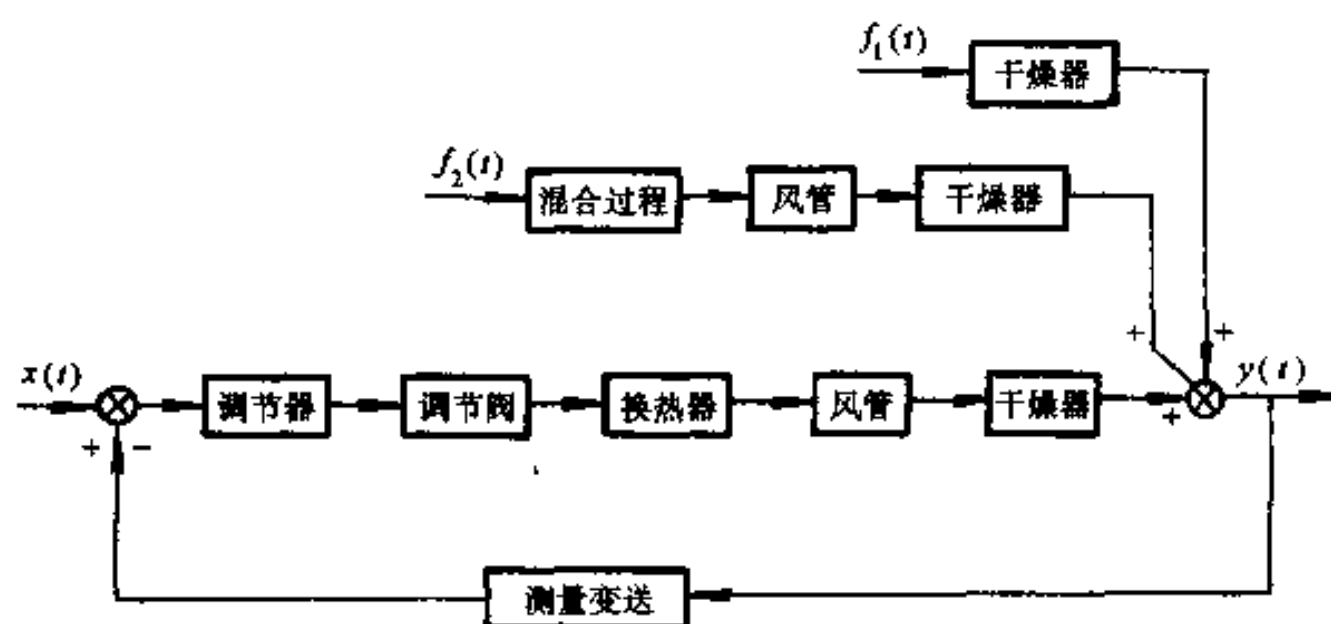


图 2-14 蒸汽量为控制参数时系统框图

2.5.3 常用高性能过程控制系统

2.5.3.1 串级控制系统

串级控制系统与简单控制系统的显著区别是：串级控制系统在结构上形成两个闭环，一个闭环在里面称为副环，它的输出送往调节阀直接控制生产过程。由此可见，串级控制系统比单回路控制系统只多了一个测量变送器和一个调节器，增加的仪表并不多，而控制效果却

得到了显著的改善，能迅速克服进入到回路的干扰，抗干扰能力强，控制质量高。改善了过程的动态特性，提高了系统的工作频率，对负荷和操作条件的变化适应性强。

串级控制系统主要应用于容量滞后较大的过程、纯时延较大的过程、干扰变化激烈而且幅度大的过程、参数互相关联的过程以及非线性过程。

2.5.3.2 前馈控制系统

理想的过程控制要求被控参数在过程特性呈现大纯滞后和多干扰的情况下，持续保持在工艺所要求的数值上。可是，反馈控制永远不能实现这种理想控制，这是因为，调节器只有在输入被控参数与给定值之差之后才发出控制指令，这就是说，系统在控制过程中必然存在偏差，因而不能得到完美的控制效果。

与反馈控制不同，前馈控制直接按干扰大小进行控制，在理论上前馈控制能实现完美的控制。

前馈控制又称干扰补偿，它与反馈控制完全不同，是按照引起被控参数变化的干扰大小进行控制的。在这种控制系统中，当干扰刚刚出现而又能测出时，调节器便发出调节信号使调节参数作相应的变化，使两者相互抵消于被控参数发生偏差之前。因此，前馈调节对于干扰的克服比反馈调节快。

前馈控制是一种开环控制，是按干扰大小进行补偿的控制。它将所干扰的大小，通过前馈控制器和控制通道的作用及时有效的抑制干扰对被控参数的影响，而不是像反馈控制那样，要待被控参数产生偏差之后，再进行控制。前馈控制的调节规律与常规PID调节规律不同，它是由过程特性决定的，它是一个专用控制器，前馈控制只能抑制可测不可控的干扰对被控参数的影响。

前馈控制虽然是减少被控参数动态偏差的一种最有效的方法，但实际上，它却做不到对干扰的完全补充，这是因为在实际工业生产过程中，使被控参数变化的干扰是很多的，不可能针对每一个干扰信号应用一套独立的前馈控制器，对不可测的干扰也无法实现前馈控制。

2.5.3.3 大时延过程的补偿控制系统

在工业生产过程中，被控过程除了具有容积滞后外，往往存在程度不同的纯时延。例如在热交换器中，被控量是被加热物料的出口温度，而控制量是载热介质的流量，对物料出口温度的影响必然要时延一个时间，即介质经管道所需的时间。此外，如化学反应器、管道混合、皮带传送、轧辊传输、多容量多个设备串联以及用分析仪表测量流体的成分等等过程，都存在较大的纯时延。大纯时延过程被公认为较难控制的过程。一是因为控制作用所根据的测量信号提供不及时，在输出发生变化后一段时间，控制器才发出校正作用。二是因为干扰作用不能及时发现。三是因为纯时延的增加会引起开环相频特性相角滞后的增大，从而使闭环系统的稳定程度下降。

为了克服上述种种不利影响，保证控制质量，在工业生产过程中，通常采用史密斯预估控制和改进型史密斯预估控制两种控制方案。

2.5.4 实现特殊要求的过程控制系统

2.5.4.1 比值控制系统

在现代工业生产过程中，常常要求两种或多种物料流量成一定比例关系。如果比例失调，就会影响生产的正常进行，影响产品质量浪费原材料，造成环境污染，甚至产生生产故障。例如，在工业锅炉燃烧过程中，需要自动保持燃料量与空气量按一定比例混合后送入炉膛，又

如，在制药生产过程中要求将药物和注入剂按规定比例混合；再如，在硝酸生产过程中，进入氧化炉的氧气和空气的流量要有合适的比例，如此等等。为了实现上述种种特殊的要求，必须设计一种特殊的过程控制系统，即比值控制系统。由此可见，所谓比值控制系统，简单的说，就是使一种物料按一定比例变化的控制系统。在比值控制系统中，需要保持比值的两种物料，必有一种处于主导地位。这种物料称为主动物料或主流量，用 Q 表示。一般情况下，总的生产中的主要物料的流量作为主流量，或者以不可控物料的流量作为主流量，用 Q_1 表示。另一种物料随主流量的变化而变化，称之为从动流量。用 Q_2 表示。比值控制系统就是要实现副流量和主流量成一定的比例关系。即满足 $Q_2/Q_1=k$ ， k 为副流量和主流量的比值。常见的比值控制系统有如下几种：

- 1) 开环比值控制系统。
- 2) 单闭环比值控制系统。
- 3) 双闭环比值控制系统。
- 4) 变比值控制系统。

2.5.4.2 均匀控制系统

在连续生产过程中，前一设备的出料往往是后一设备的进料。随着生产的不断强化，前后生产过程的联系也越来越紧密，这就迫使我们在设计控制系统时应从全局出发。例如，用精馏方法分离多组分的混合物时，总是有几个塔串联在一起运行。为了保证这些相互串联的塔能正常的连续生产，每个塔的要求进入塔的流量保持在一定的范围内，同时也要求塔底液位不能过高或过低。

均匀控制系统的名称来自系统所能完成的特殊控制任务，它使前后设备在物料供求上相互均匀协调，统筹兼顾，因而归纳起来，有如下三个特点：

1. 结构上无特殊性

同样一个单回路液位控制系统，由于控制作用强弱不一，即可以是单回路定值控制系统，也可以是简单的均匀控制系统。因此均匀控制是指控制目的而言，而不是由控制系统的结构决定的。它可以是一个单回路控制系统，也可以是一个串级控制系统的结构形式，或者是其它结构形式。均匀控制是靠降低控制回路的灵敏度而不是靠结构变化获得的。

2. 参数应变化，而且应缓慢的变化

因为均匀控制是前后设备物料供求之间的均匀，所以表征两个物料的参数都不应是某一固定值。只有两个参数都变化且变化比较缓慢时才是均匀控制。那种试图把两个参数都稳定不变的想法决非均匀控制的目的。此外，还需注意的是，均匀控制在有些场合无需将两个参数平均分配，而是视前后设备的特性及重要性的因素来确定其主次。有时以液位参数为主，有时则以流量参数为主。

3. 参数应限定在允许范围内变化

在均匀控制系统中，被控变量是非单一、非定值的，允许它们在一定的范围内变化。

2.5.4.3 分程控制系统

在一般的反馈控制系统中，通常是一台调节器的输出只控制一个调节阀。但在某些工业生产中，根据工艺要求，需将调节器的输出信号分段，去分别控制两个或两个以上的调节阀，以便使每个调节阀在调节器输出的某段信号范围内作全行程动作，这种控制系统通常称为分程控制系统。

根据调节阀的气开、气关形式和分程信号区段不同,分程控制系统可分为以下两种类型:一是调节阀同向动作的分程控制系统,二是调节阀异向动作的分程控制系统。

分程控制系统的工业应用很广泛,一是用于节能控制。即通过分程控制手段减少能量消耗,提高经济效益。二是用于扩大调节阀的可调范围,改善调节阀的工作特性。三是用于同一被控参数两个不同控制介质的生产过程。

2.5.4.4 选择性控制系统

通常的自动控制系统是在正常情况下,为保证工艺过程的物料平衡,能量平衡和保证产品质量而设计的。但是还应该考虑到在事故状态下的安全生产问题,即当操作条件到达安全极限时,能有保护性措施。如化学反应器的安全操作及锅炉燃烧系统防火问题等。保护性措施大致可分成两类:一类是采用自动报警,然后由人工进行处理,或采用自动连锁停机的方法,这种保护称为硬保护。由于生产的复杂性和快速性,操作人员处理事故的速度往往满足不了需要。或处理过程容易出错。而自动连锁停机的办法又往往造成频繁的设备停机,严重时甚至造成无法开车。所以,一些高度集中控制的大型工厂中,硬保护措施满足不了生产的需要。另一类保护措施称为软保护。选择性控制系统即属于软保护系统。选择性控制是把由工艺生产过程的限制条件所构成的逻辑关系叠加到正常自动控制系统上去的一种控制方法。当生产操作趋向极限条件时,通过选择器,一个用于控制不安全情况的备用控制系统自动取代正常工况下的控制系统,待工况脱离极限条件回到正常工况后,备用的控制系统又通过选择器自动脱离,正常工况下的控制系统又自动投入运行。

2.5.5 集散控制系统 DCS (Distribution Control System)

2.5.5.1 集散控制系统概述

集散控制系统是以微处理器为基础的集中—分散型综合控制系统的简称。由于它在发展初期是以分散控制为主要特征的,因此,国外一般称其为分散控制系统(Distributed Control System)即DCS。在国内,则习惯于称之为集散控制系统。图2-15示出了集散控制系统基本结构的简图。图中的PCU是以微处理器为基础的微机结构的过程控制单元,或称现场控制单元FCU。它们按地理位置分散于现场,控制一个或数个回路。每个控制单元具有几十种甚至上百种运算功能,可独立地对回路进行各种复杂的控制。这样,一个成百上千个回路组成的过程控制系统就被分散为许多现场控制单元,分散独立地控制各现场的所辖回路。有的过程控制单元可以控制几十个甚至上百个回路,这样的控制单元也叫单元控制室。在单元控制室中没有本地操作,全厂范围的中央控制室通过信息系统汇集分散在各过程控制单元控制室的信息,从而实现信息综合与集中管理。集散控制系统一般由三部分组成:分散过程控制装置、操作管理装置、通信系统。

从技术角度看,集散控制系统综合了计算机技术、通信技术、图形显示技术和过程控制技术,采用了多层次分级的结构形式,以适应现代高水平生产控制与管理的需要。它继承和发展了常规仪表控制系统和计算机集中控制系统的优点,又弥补了它们各自的不足。以崭新的结构体系、先进的技术面貌、复杂的信息处理能力和独具风格的控制方式应用于石油、化工、冶金、电力、纺织、造纸、食品和污水处理等各个工业生产领域,它已经成为过程控制系统发展的主流。

集散控制系统最基本的特点之一就是系统实现了分散控制。所谓分散控制是指对过程参数的检测及运算处理,控制策略的实现,控制信息的输出以及过程参数的实时控制等都在现

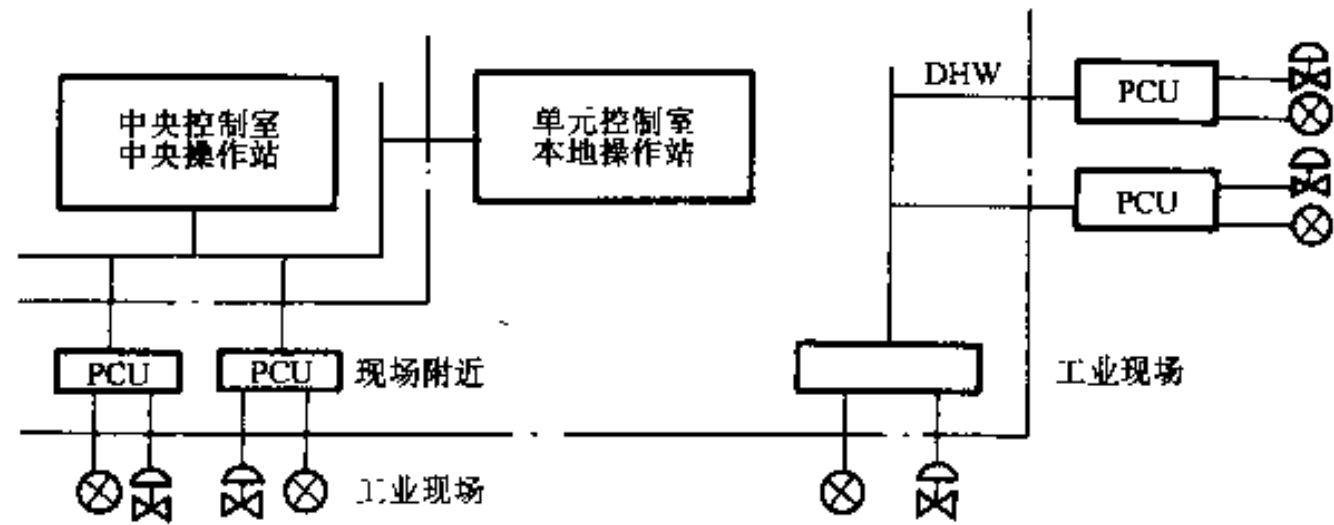


图 2-15 集散控制系统结构框图

场的过程控制单元中有效地、长期可靠地、无人干预地自动进行，从而实现了控制功能的高度分散，其具体内涵又表现在以下几个方面：

(1) 智能分散 由于过程控制单元以微处理器为基础，因此，它将中央控制计算机中大部分控制功能分散出来，它不但具有常规控制、高级过程控制算法，而且还具有优化控制策略以及整定控制功能，从而实现了智能的分散。

(2) 显示分散 显示分散指的是，一方面过程控制单元本身可以与现场的显示装置接口，随时进行实时显示，另一方面中央操作站可以显示任何一个分散过程单元的全部信息。在有的集散系统中，各本地操作站既可以调用其它各地显示操作站的信息，又可以调用中央操作站的信息。因此，无论是中央操作站，还是本地操作站都具有分散显示功能。

(3) 数据库分散 现代集散系统的过程控制单元都设有本地数据库，而每个分散数据库又属全系统所共有，这样就大大增强了系统的分散和综合功能。

(4) 通信分散 现代的通信技术已发展为局部网络，过程控制单元在网络中可以互相通信，享有“平等权利”的通信控制权，使通信功能分散。

(5) 供电分散 由于过程控制单元分散于现场，刺激了分散供电装置的发展，分散于现场的供电装置应用先进的固态电子技术和微处理器技术，比较容易地实现了交一直流转换。

2.5.5.2 集散控制系统的分层结构

集散控制系统多采用分层结构模式，自下而上一般分为过程控制级、过程管理级、生产管理级和经营管理级四级典型功能层次。下面就各级的硬件配置及其功能作一简单介绍。

1. 过程控制级

过程控制级是集散控制系统的基础，是实现生产过程集散控制的关键。过程控制装置直接与生产过程联系，完成现场实时信号的采集处理、变换、输入、控制、运算和输出。它的主要硬件有过程控制单元、过程输入输出单元、信号变换器与备用盘装仪表等。其主要任务是进行数据采集、直接数字控制、对设备进行监控和对系统进行测试与诊断、以及实施安全化冗余化措施等。

集散系统 PCU 的功能特性主要有六列六点：

- 1) 反馈控制功能。
- 2) 顺序控制功能。
- 3) 批量控制功能。
- 4) 数据采集与处理功能。
- 5) 数据通信功能。

6) 本地操作与监视功能。

反馈控制和顺序控制是过程控制单元的最重要功能,它能完成各种控制运算,与CPU有机结合能进行各种复杂高级过程控制,能实现常规仪表不能完成或难以完成的高级控制方案。

在工业生产过程控制中,除了采集生产过程中的各种信息实现反馈控制、顺序控制、批量控制以外,还需采集更多的非控制变量信息。这些非控制量信息被采集后经过各种规范化处理被存储在集散控制系统的数据库中,与此同时,经过上位机或信息综合系统处理的信息以及操作站的信息有时又要直接输出到控制过程。

2. 控制管理级

集散控制系统的控制管理级是为实现集中操作和统一管理而设置的,其重要设备有操作站和通信设备等。操作站用通信电缆把分散于生产现场的过程控制单元(PCU)、过程输入输出单元(PIU)连接起来,不仅成为操作中心,而且是管理PCU和PIU的控制管理中心。操作站是集散系统的人机接口装置。

通常它是放在控制室内的,利用CRT和键盘可对生产过程进行集中操作和监视,实现信息集中和管理集中。通过打印机和拷贝机可进行操作记录打印、报警打印和报表打印等。操作站有操作员操作的键盘和工程师操作的键盘,操作员按键盘上的按键可以在CRT显示器上选择各种操作和监视用的操作画面,信息画面和用户画面。操作员只要按下某一键即可调出相应画面,几乎所有的集散系统的显示器都能实现对输入量、输出量的全景显示、分组显示及细节显示。较大的系统将包括工艺、流程报警明细单、过程变量的趋势等。

控制管理级一般采用总线结构的通信方式构成一个通信网络,进行信息的自动变换,从而实现控制分散,显示操作管理集中的功能。通信网络包括数据高速公路HW、通信指挥器HIO和通信接口。

3. 生产管理级和经营管理级

集散系统的过程控制和控制管理级实现了生产装置或工厂生产过程的集中操作和局部优化控制,而生产管理级和经营管理级则对全厂或公司的生产经营实现最优化管理。

生产管理的任务是根据用户的订货情况、库存情况、能源情况来规划产品结构和规范,并可对产品进行随机的更改,以便适应由于订货情况变化所造成的不可预测事件。此外,生产管理层更可用于对全厂生产状况的观察、产品的监视和产品质量与产品的报告,并同时与上层交互传递数据。有些中小规模系统,生产管理级即为最高一层管理。

集散系统的经营管理级管理的范围包括工程技术、商业事务、人事及其它方面。这些功能都经常集成到管理软件系统中。通常在该层中,通过与公司的经理部、市场部、计划部与人事部等进行对市场的分析、用户信息收集、订货统计分析、合同、接收订货与期限监测、产品制造协调、价格计算、生产与交货期限的监测来实现整个制造系统的最优化。

2.5.5.3 集散控制系统的进一步发展

集散控制系统从1975年至今的20余年中,它在各种生产过程控制领域中占有极为重要的地位,它改变了整个工业控制的面貌。作为一门飞速发展的新技术,它的发展动向、未来预测的确是值得关注的。新的集散控制系统将向如下几个方向发展:

1. 集散控制系统的开放化

推出新的集散控制系统将采用开放系统互连的标准模型,即工厂自动化和办公室自动化的局域网络协议的要求。这样,集散控制系统就能够与其它系统或其它计算机系统相连,方

便地组成多节点的局部网络。

2. 集散控制系统的集成化

新型的集散控制系统将实现控制室集成化, 仪表—电器计算机集成化, 过程自动化, 工厂自动化集成化, 更广范围内的系统集成化以及采用国际标准现场总线达到现场集成化, 信息系统和控制系统集成化等。

3. 集散控制系统的小型化

大多数制造厂将集中精力, 增加投资, 尽最大努力改进小型化集散控制系统, 以满足日趋发展的中小型连续或间歇式操作控制的要求。

4. 集散控制系统的通信网络光缆化

新型集散控制系统在局部网通信网络中将采用光缆, 其优点是传输速度快、传输距离远、容量大、抗核辐射、耐高温、绝缘性好、频带宽、衰减小、重量轻、本质安全防爆等。从而大大改善通信性能。

5. 集散控制系统软件更加完善丰富

集散控制系统软件包括操作系统软件、控制及组态软件、工作站或操作站软件、通信软件 and 用户应用软件等。这些软件将符合国际运用标准, 更加丰富完善。

6. 集散控制系统的可编程化

可编程控制器 (PLC) 发展迅速, 是灵活、可靠、易变更的控制器。利用 PLC 改进结构增强了模拟控制功能, 强化了网络通信功能, 高档 PLC 操作站还有 CRT 动态图形显示、数据库管理、文件生成等。

7. 集散控制系统的现场总线标准化

新的集散控制系统普遍采用智能变送器和智能阀门定位器, 并将采用互通的国际性的现场总线。

8. 集散控制系统与计算机集成制造系统

由于集散控制系统的广泛应用和迅速发展导致更宏大更完善的系统——计算机集成制造系统 (CIMS) 的诞生。CIMS 是以整个企业的一切活动如工程设计、在线过程监视、离线过程监控、产品销售、市场订货、编制生产计划、新产品开发、修改产品设计、经营管理直到用户反馈等组成了闭环动态反馈系统, 企业内部各个环节都高度计算机化、自动化及智能化。CIMS 体现了制造工业控制和过程工业控制的统一, 工厂自动化和办公室自动化的统一, 设计计划、生产、管理自动化的统一, 市场活动计算机管理和生产过程计算机管理的统一。

CIMS 不仅是对生产技术的变革, 也是生产组织和生产方式的变革, 可以毫不夸张地说, CIMS 是工业控制技术划时代的进步, 是工业自动化系统的未来。

2.6 计算机检测与控制系统实例

2.6.1 型砂系统质量控制

铸造是一个工艺流程复杂的生产系统, 其最终目的是要在低成本、高生产率、少污染的条件下得到优质近终形铸件。对于粘土砂湿型生产线来说, 型砂处理工艺的工作状况在很大程度上决定着铸件质量。

随着自动化技术和计算机技术的迅猛发展, 进入 20 世纪 80 年代以后, 型砂质量控制领域中的一个趋势是国际著名的铸造设备制造商纷纷推出可以实现在线实时控制的型砂性能检

测装置。

以水分控制为例，湿型砂控制系统如图 2-16 所示。控制策略在理论上比较简单，无论是采用按扰动量（旧砂温度、湿度）进行顺馈控制，还是按输出量（水分实测值）进行反馈控制，或者两者的结合，只要注意工程实际，就不难取得较满意的控制效果。

然而对于连续式混砂系统，问题就变得比较复杂了，连续式混砂是动态过程，混砂机中不断地有大量的旧砂进入，混好的砂排出。因而在一定的时间内，应该按照混好型砂的性能要求和旧砂的性能变化情况及时调整水、粘土等物料的补加量。按扰动量进行顺馈控制一般不能满足要求，同时，型砂系统具有很强的数学模型，采用传统的反馈控制方法，效果也很有限。因此，有必要将人工智能引入型砂质量实时控制。

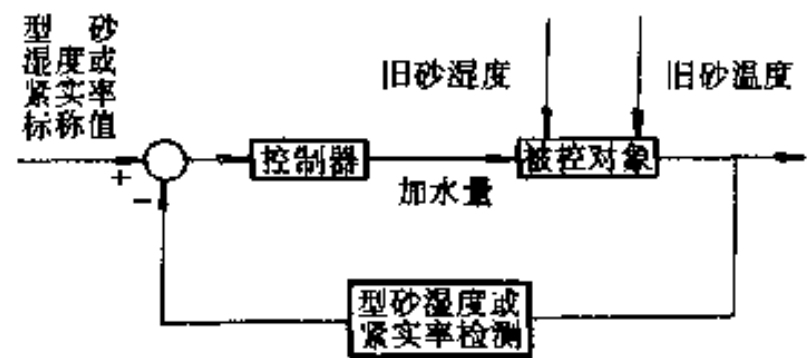


图 2-16 型砂水分控制系统示意图

作为智能控制重要分支的人工神经网络控制，在过程控制中也发挥着越来越重要的作用。美国 Neural Application Corp 与 John Deere Foundry 合作，将这项技术首次引入到型砂质量过程控制。

John Deere Foundry 铸造车间的高压造型线配有两台连续式碾轮混砂机，其最大混砂能力为 230t/h，可供 120 型/h 的用砂要求，生产线实际混砂能力 210t/h，供给 110 型/h。该生产线主要生产中、大型铸件，平均重量约 214kg，最大铸件可达 540kg。

研究开发工作分为三个阶段：

第一阶段，这部分工作的重要目标是验证在型砂控制中使用神经网络的有效性，以及做进一步研究的可能性分析。

研究人员采用该厂原有的 SQL 数据库作为建模的基础。数据库中与型砂性能有关的变量每隔 90s 从两台混砂机采集一组数据，包括湿压强度、紧实率、混砂机电流、旧砂温度等等。神经元模型的输出只有湿压强度、传导率、加水量、粘土加入量、混砂机电流等多项内容进行组合，此外，对于动态系统的控制，除了使用当前的输入输出信号，还要使用过去的输入输出信号，因而在选择动态映射网络的学习方法中，还涉及到系统时间常数分析的问题。

实践表明，尽管许多因素都会影响输出量的变化，但只要抓住重要影响因素，合理选用时间间隔、神经网络动态预测的湿压强度、紧实率与实际检测值之间的偏差就会较小。

第二阶段，建立了一个人工神经网络的型砂性能控制系统，如图 2-17 所示。

John Deere Foundry 有一套 PID 控制器是用来完成水和粘土的加入量控制，该控制器利用按放在混砂机旁边的速取样测试仪（Auto-Lab）每隔 90s 取得的测量值作为反馈信号。

现在在 PID 前端串联了神经元控制器（Neural Controller）。神经元控制器通过在线的动态学习调整权值，可以给出未来 90s 以内的紧实率，湿压强度目标值，从而作为 PID 的前馈控制端。实际上，二者构成了一个随动系统。

与原系统相比，神经网络控制器属于预测型，而非反映型。但是在实际使用中，也暴露了一些问题，比如输出的目标值波动，需要几分钟才能稳定，在砂型中加入水、粘土后，到型砂具有均匀的与该加入量相对应的性能之间，有一定的时间滞后，影响控制效果。为此，对模型进行了修正。

第三阶段，研究人员在如图 2-17 所示的控制系统基础上。新增 Input Validator 的功能是

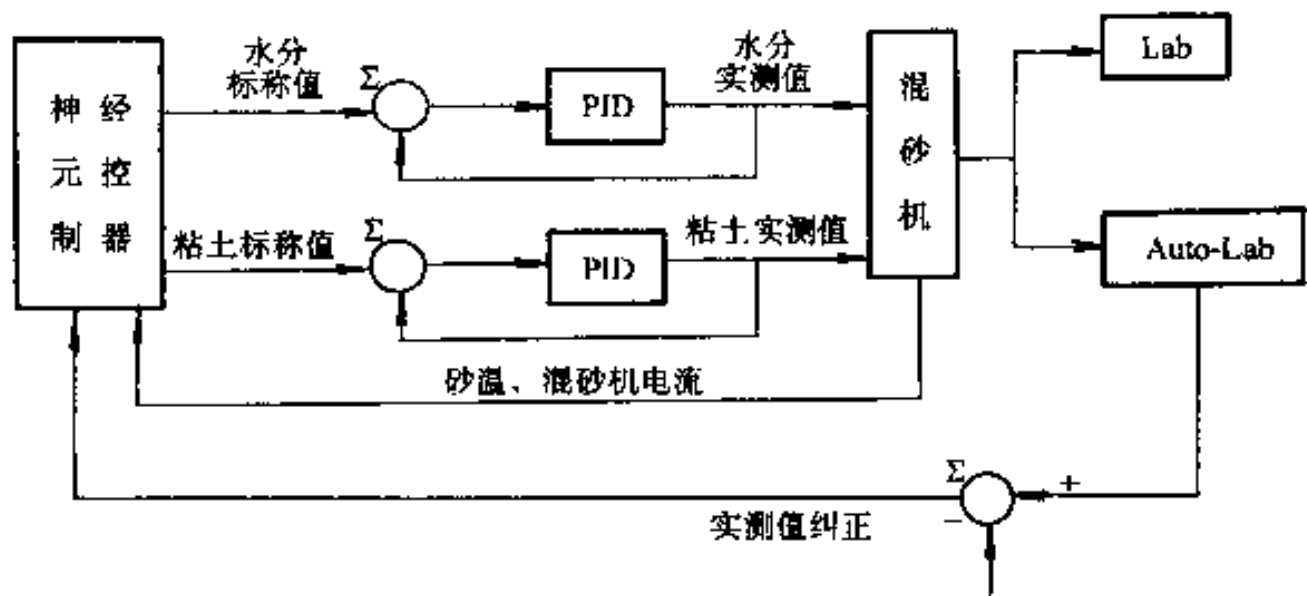


图 2-17 铸造厂型砂性能控制系统

将硬件测试错误导致的不合理数据扔掉。

采用神经元网络控制器以后，对生产过程控制有很大提高，用神经元网络的实时紧实率预测值代替了实测值，因而系统响应时间由 90s 减少到 1s，新的控制器具有自适应功能，可以根据型砂系统的状态变化而变化，新控制器可以根据混碾条件变化而变化，使得对任何偏离紧实率设定值的状态有最快的响应。

2.6.2 焊接电源的微机控制技术

2.6.2.1 硬件系统

对焊接电源进行微机控制的第一步是引入一个微机控制系统来取代焊机中的模拟量控制电路。这个微机控制系统能够实现原来模拟量控制电路的闭环控制作用，即微机控制系统能够实时采集焊接电源的输出电流、电压信号，并在与面板设定的电流值进行比较后输出一个模拟量控制信号 u_k 来实现对焊接电流的闭环控制。这也就是说，焊接电源的微机控制系统组成中，除了有 CPU 芯片，一定的 RAM 与 ROM 存储芯片外，还至少要有三路 A/D 通道来输入焊接电流、电压的采样值及面板上焊接电流设定信号，一路 D/A 用作输出实时控制模拟量信号 u_k ，这样的一个微机系统也就是焊接电源的最小微机控制系统，如图 2-18 所示。

目前，大多数微机控制电源都已采用单片微机系统，如 MCS-51 及 MCS-96 系列单片机系统，结构紧凑、位控指令丰富、抗干扰性能强，是面向工业控制的微机产品。其应用技术自 80 年代来发展迅速，商品化的单片机应用板大量涌现，其价格低廉，约 600 元就可购置一块具有上述最小微机控制系统基本组成的单片机应用板。

在采用商品化的单片机应用板来组成焊接电源的最小微机控制系统时，还应配以信号调理板与高抗干扰的稳压电源。信号调理板主要装有运算放大器，对各种 I/O 信号进行放大或

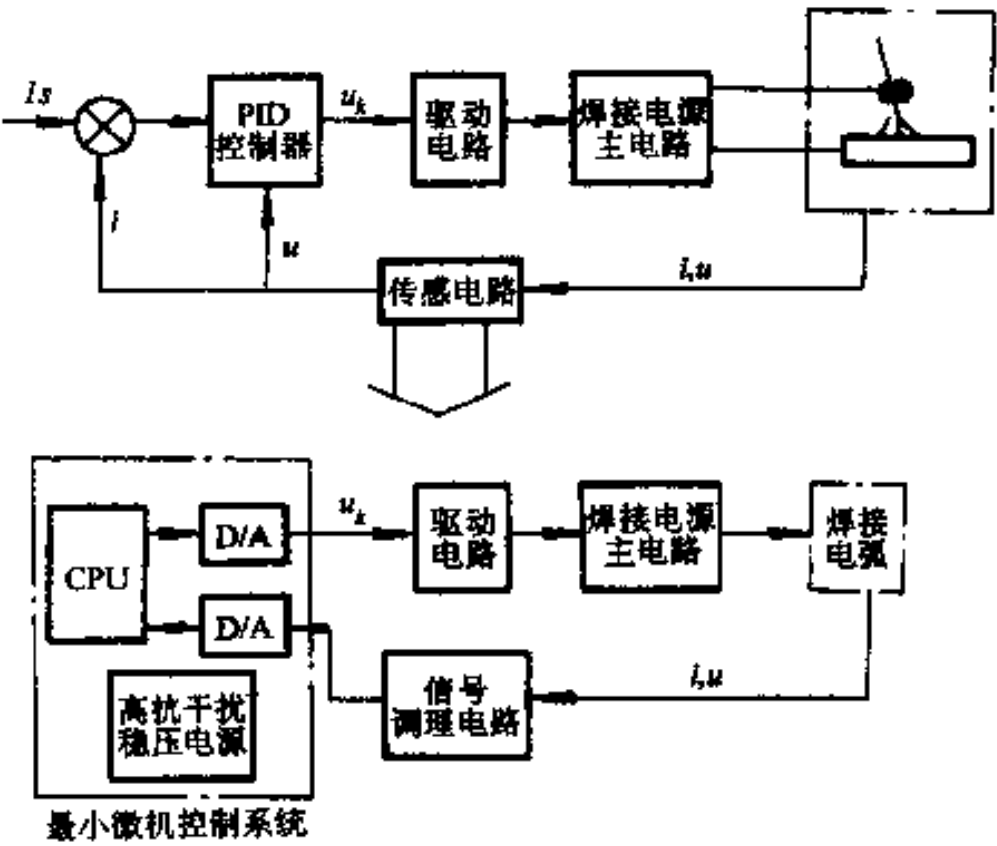


图 2-18 对焊接电源进行微机控制的最小微机控制系统

衰减、偏置等线性处理,使焊接控制系统中其它组成电路与单片机应用板相适配。其主要功能为:

- 1) 将焊机输出电流、电压信号变换成 $0\sim 5V$ 的模拟量信号供应用板采集。
- 2) 将应用板输出的线性模拟量控制信号变换成一定的电压信号送焊接电源主电路的控制端。
- 3) 将控制面板上各电位器及开关输出信号变换成 $0\sim 5V$ 的模拟量信号或开关量信号送入单片机应用板。
- 4) 按应用板输出的开关量状态信号驱动控制面板上的信号指示灯。采用信号调理板可大幅度简化控制电路的接口关系,使控制电路安装调试容易。

2.6.2.2 微机控制流程设计

微机控制焊接电源的基本特点是依靠控制程序来获得优良的外特性动特性与多功能,设计出合理的控制程序是保证焊机质量的关键。焊接电源的微机控制程序要点是:

- 1) 采用定时中断子程序来实时采集焊机的输出电流电压值,采样的周期根据电源主电路的特性而定,一般为 $400\mu s$ 左右。
- 2) 通过确定不同焊机输出电压值 u_k 时的焊接电源实际设定值 I_g ,使焊接电源获得恒流特性、斜特性、斜陡特性乃至恒压特性等各种所需的外特性。
- 3) 采用离散控制系统 PID 或 PI 加电压前馈算法来保证焊接电源在实现所需的外特性同时具有优良的动特性,即控制程序按上述 I_g 值计算实时控制值 u_k 的算法应是有良好动态品质的 PID 等算法。

4) 微机系统始终程序循环运行,在程序初始化以后,循环调用各子程序,其中主要是数字滤波子程序与控制量计算子程序。

按照上述要点设计的微机控制主程序与控制量计算子程序如图 2-19 所示。

2.6.3 电弧参数的模糊控制技术

模糊控制是一种新型的智能控制方法,其特点是:①不需要知道被控对象或过程的数学模型。②易于实现对不确定性系统和强非线性系统进行控制。③对被控过程和对象参数的变化有较强的鲁棒性。④对于干扰有较强的抑制能力。

显然这些特性都适合用来解决焊接过程这种参数多、关系复杂系统的控制问题。

2.6.3.1 模糊控制原理

图 2-20 为一个典型的 i 个输入, n 个输出的模糊控制系统结构图,图中 y_1, y_2, \dots, y_i 为系统对过程的实际精确控制变量; x_1, x_2, \dots, x_n 表示过程的实际输出; v_1, v_2, \dots, v_n 是模糊控制器的输入变量; u_1, u_2, \dots, u_i 是模糊控制器的输出变量。其中,状态接口完成精确量 $x_1, x_2,$

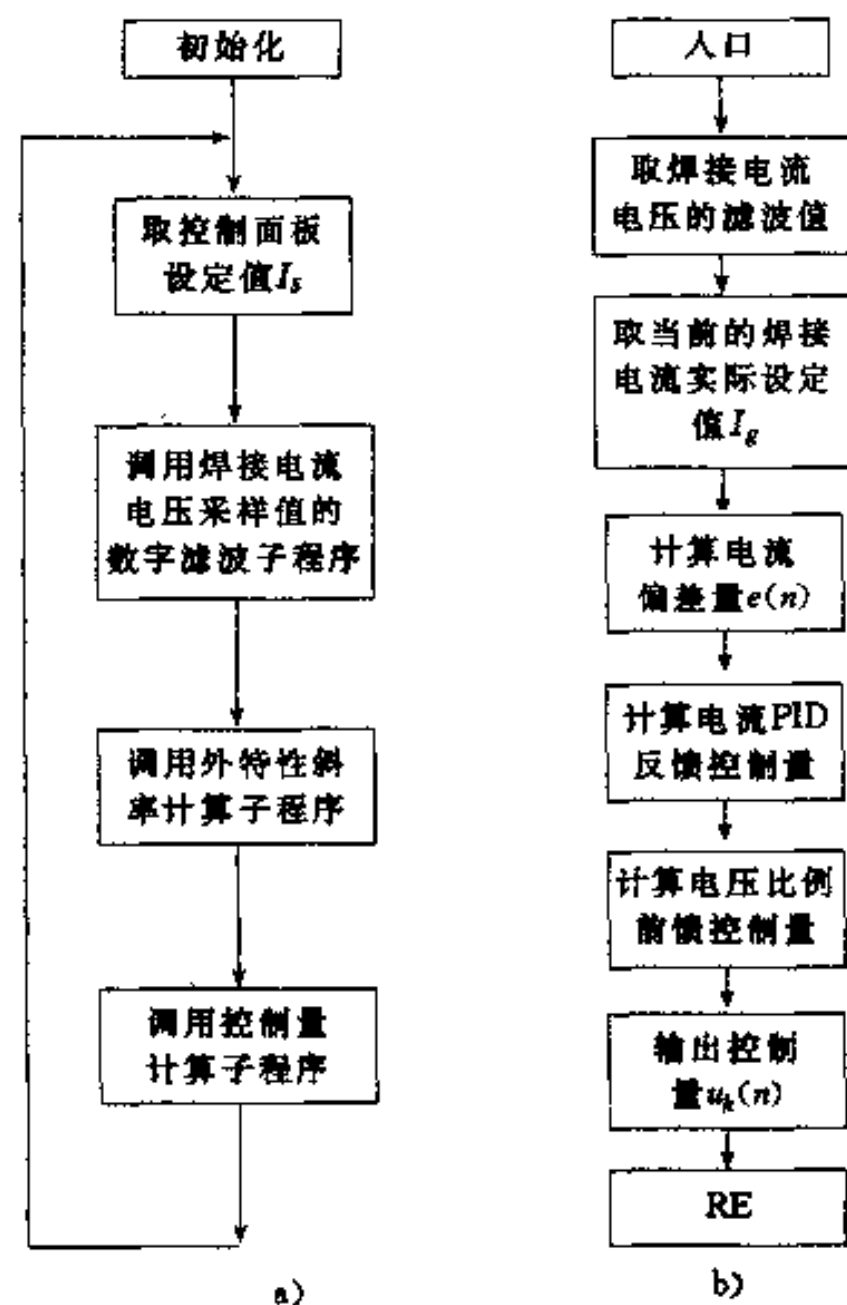


图2-19 焊机电源的微机控制流程图
a) 主程序流程框图 b) 控制量计算子程序流程图

\dots, x_n 至模糊量 u_1, u_2, \dots, u_i 的转换, 控制接口完成模糊量 u_1, u_2, \dots, u_i 至精确量 y_1, y_2, \dots, y_i 的转换。

目前在焊接设备中常用的模糊控制器是双输入单输出模型, 即在控制过程中不仅用被控制量 (电弧参数) 的误差 E 来作为控制信息, 而且还把误差的变化率 EC 作为控制信息, 这样可以获得更好的控制效果, 用这类模糊控制器构成的控制器如图 2-21 所示。

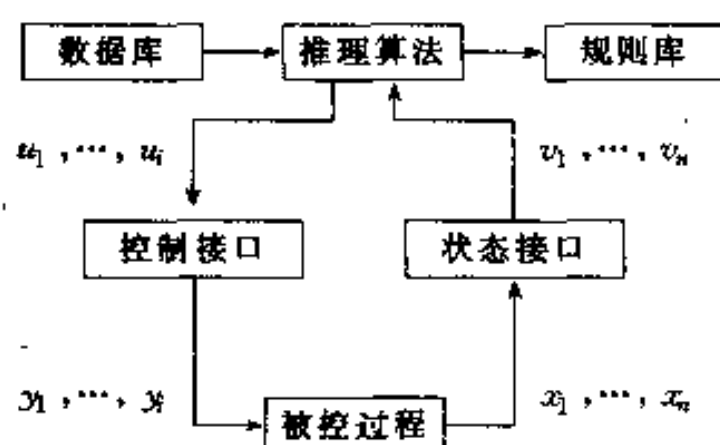


图 2-20 模糊控制系统结构图

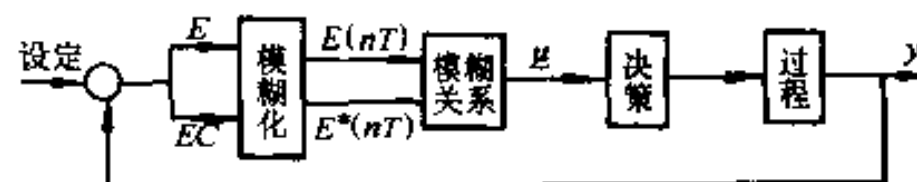


图 2-21 双输入单输出模糊控制系统

模糊控制器的设计与经典数字控制器不同, 它不是建立在对系统的数学分析与建模的基础上, 而是先根据经验来确定它的各个参数和控制规则, 然后在实际系统中进行调整, 其设计要点如下:

1) 确定模糊控制器结构, 这是设计的第一步即确定哪些变量作为控制器的输入和输出变量。一般选取误差以及误差的变化率作为输入变量, 而要控制量作为控制器的输出变量。

2) 建立模糊控制器的控制规则, 控制规则是模糊控制器的核心, 其主要内容为: 选择描述输入和输出变量的词汇—模糊状态, 一般来说, 每个变量可用 2~10 个模糊状态来描述, 如负大、负中、负小、零、正小、正中、正大等等。

3) 定义代表各模糊状态的模糊集。一般在误差较大的范围中采用低分辨率的模糊集, 在误差接近零时采用高分辨率的模糊集。

在实际运用中, 对于误差所对应的语言变量 A , 通常分为 PL、PM、PS、PO、NO、NS、NM 与 NL 八档, 其对应的模糊集 A_1, \dots, A_8 可按下表 2-2 取值。

表 2-2 偏差 E 对应的模糊取值表

		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+0	+1	+2	+3	+4	+5	+6
A_1	PL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1	0.4	0.8	1.0
A_2	PM	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
A_3	PS	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0	0
A_4	PO	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0.6	0.1	0	0	0	0
A_5	NO	0	0	0	0	0.1	0.6	1.0	0	0	0	0	0	0	0
A_6	NS	0	0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0	0	0	0	0	0	0
A_7	NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
A_8	NL	1.0	0.8	0.4	0.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

偏差 E 对应的模糊集取值表, 对于偏差的变化率 EC 所对应的语言变量 B 通常分为七档, 即 PL、PM、PS、O、NS、NM、NL。其对应的模糊集 B_1, \dots, B_7 通常也按与表相似的

方式取值。

4) 确定模糊控制状态表。将人们对过程控制的实际经验写成的推理语言控制规则（即模糊条件语句）简写为一个表，称之为模糊控制状态表。表 2-3 中，同时考虑了误差与误差变化的正负大小情况。如当误差为 NL 时，若误差变化为负，就应取控制量为 PL 以尽快消除误差；若误差变化为 PS，表明误差有减小的趋势，就应取控制量为 PS 等等。

表 2-3 模糊控制状态表示

	负			零/正小		正
	NL	NM	NS	ZE	NL	PM PL
负大 NL	PL			PM		ZE
负中 NL						
负小 NS	P	P	PM	Z	NM	N
零 ZE	M	S		E		S
正大 PS	P	P		Z		N
正中 PM	ZE			NM		NL
正小 PL						

5) 确定控制表。控制量变化的模糊集 U 可通过模糊的合成算法获得： $U = (E \times EC) R$ 。然后，再将 U 这个模糊量转换成可直接去操纵执行器的精确量，即将表中的各档控制量符号转换成具体的数值。

2.6.3.2 微机模糊控制在焊接设备中的应用

在日本，已在熔化极气体保护焊（GMA）设备中用微机对焊丝干伸长度产生的干扰进行模糊控制，其模糊控制系统原理框图如图 2-22 所示。

这种模糊控制系统的特点是：

1) 当焊丝干伸长度变化时能保持焊接熔接不变。当焊丝干伸长度增加时，对于普通的等速送丝式 GMA 焊机，就会产生焊接电流变小乃至焊接熔深减少的不良影响。但在微机模糊控制器作用下，能在检测焊丝干伸长度之后，相应增大焊丝送进速度来保持焊接电流不变，使焊接熔深不变，从而保证焊接质量。

2) 当焊丝干伸长度变化时，还能保持电弧电压稳定不变。当焊丝干伸长度减小时，对于普通 GMA 焊机来说，会由于干焊接电流增加而导致弧长减小。但在微机模糊控制器的作用下，此时焊接电源的外特性能从微降调节成微升特性，从而保证电弧长度不变，焊接过程稳定。

图 2-23 为国内研究的一种 PMIG 焊电弧电压模糊控制系统。此系统采用了典型的双输入单输出的模糊控制器，其输入信息为电弧电压的偏差 e 和偏差变化率 $c(e)$ ，输出量为对送丝电机的控制量 $U_0 e = U_E - U_H$ ，其中 U_E 与 U_H 分别为电弧电压的采样值与给定值。

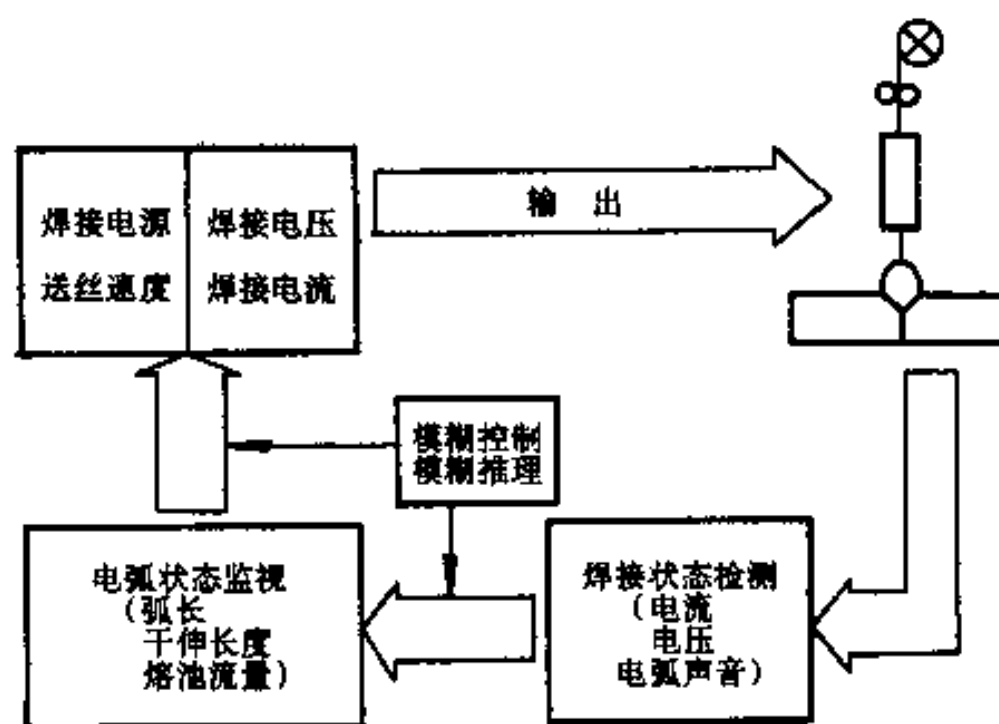


图 2-22 GMA 焊机模糊控制系统原理框图

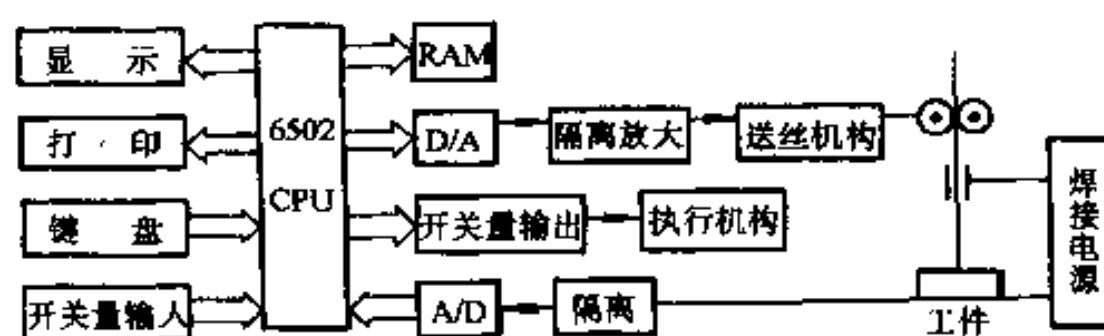


图 2-23 PMIG 焊接模糊控制系统结构框图

根据人们对焊接电弧电压的控制经验和原则可制成模糊控制状态表，如表 2-4 所示。表中包含着 49 条控制规则，如 IF $E=NI$ AND $C=NL$, THEN $U=NL$ (意即，若电弧电压低于约定值，则可减慢送丝速度，此时差值 e 及其变化率 c 大的话，则控制量 U 也应大) 等等。

表 2-4 电弧电压模糊控制状态表

$c \backslash e$	NL	NM	NS	OO	PS	PM	PL
NL	Nl	Nl	nl	nm	oo	oo	oo
NM	Nl	Nl	nm	ns	ns	oo	oo
NS	nl	Nm	ns	oo	oo	oo	oo
OO	nm	Ns	oo	oo	oo	ps	pm
PS	oo	oo	oo	oo	ps	pm	pl
PM	oo	oo	ps	ps	pm	pl	pl
PL	oo	oo	oo	pm	pl	pl	pl

第3章 计算机数值模拟技术及在热加工中的应用

3.1 概述

随着计算机技术的飞速发展和广泛使用,人们已开始采用数值方法来求解复杂的工程问题。利用计算机的计算速度、存储容量、彩色图形等优良功能,对工程中的物理场进行数值计算,找出物理场中一些物理量的变化规律,从而在工程设计中采取可行措施对工程中的物理量加以控制。

3.1.1 计算机数值模拟技术及在热加工中的作用

金属材料热加工过程是十分复杂的高温、动态、瞬时过程,过程开放性差。在这个过程中,材料经过液态流动充型、凝固结晶、固态变形、相变、再结晶和重结晶等多种微观组织变化及缺陷的产生与消失等一系列复杂的物理、化学、冶金变化而最后成为毛坯或构件。材料热加工工艺过程数值模拟技术就是在材料热加工理论指导下,通过数值模拟计算,预测实际工艺条件下,材料经热加工成形后最后所得到的组织、性能和质量,进而实现热加工工艺的优化设计,实现材料热加工由“技艺”走向“科学”,使材料热加工技术水平产生质的飞跃。

通过数值模拟技术在热加工工艺过程可起到如下作用:

- 1) 优化工艺设计,使工艺参数达到最佳,提高产品的质量。
- 2) 可在较短的时间内,对多种工艺方案进行检验,缩短产品开发周期。
- 3) 在计算机上进行工艺模拟试验,降低产品开发费用和对资源的消耗。

3.1.2 热加工工艺过程数值模拟的主要内容

热加工工艺过程模拟的主要内容包括前处理、模拟分析计算和后处理三部分内容。

1. 数值模拟的前处理

前处理的任务是为数值模拟准备一个初始的计算环境及对象。主要包括两部分内容,即:三维造型与网格剖分。

(1) 三维造型 将模拟对象(铸件、锻件、焊接结构件等)几何形状及尺寸以数字化方式输入构成,成为模拟分析软件能够识别的格式。目前已有多种商品化三维几何造型软件,除特殊情况外,一般均可采用这些商品化造型软件,如Pro-E、UG、I-DEAS、AutoCAD、Solid Edge、Solid Work、金银花等,这些造型软件功能齐全,使用方便、快捷,大都提供较为通用的文件格式,因此已经被大量地采用,作为数值模拟的造型软件平台。

(2) 网格剖分 按模拟的功能及精确度要求,将实体划分成由具有一定三维数据的单元所组成的集合体。这些单元的三维数据决定了剖分精度,尤其是边界单元。

2. 模拟分析计算

模拟分析计算是数值模拟的核心技术,按其功能,主要包括以下内容:

(1) 宏观模拟 目的是模拟热加工过程中材料形状、轮廓、尺寸及宏观缺陷(变形、缺肉、皱折、缩孔、缩松、气孔、夹杂等)的演化过程及最终结果。为达到上述目的,需建立并求解以下一些物理场的数理方程。

温度场 是进行热加工过程数值模拟最重要的物理场。可以直接预测铸件的凝固前沿及缩孔缩松的位置及大小,同时它也是其它热过程物理场的计算基础。

对于传热过程来讲,其数理方程表达如下:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + Q$$

在温度场计算中,多采用有限差分方法计算,可以求出在热加工过程中工件的温度变化及各点的温度分布。

应力/应变场一位移场 是建立在弹塑性力学基础上的物理场。主要用于模拟金属材料的塑性成形过程及充不满(缺肉)、皱折、孔洞等缺陷的产生,同时可预测铸件、焊接件的应力分布及变形、裂纹等缺陷。一般采用有限元法求解。

流动场—压力场、速度场 建立在流体力学基础上的流动场(压力场、速度场),是模拟铸件充型过程的重要模型,用于预测铸件的冷隔、卷气、夹杂、冲砂等缺陷,优化浇注系统。

(2) **微观组织及缺陷的模拟** 目的是模拟热加工过程中材料微观组织(枝晶生长、共晶生长、柱状晶到等轴晶的转变、晶粒度、相变等)及微观尺度缺陷(混晶、偏析、氢致裂纹等)的演变过程及结果。描述微观组织及缺陷演变的模型主要有:

随机统计模型 有 Monte Carlo 法和 Cellular Automaton 法,主要用于液→固转变时晶粒组织形成及生长的模拟。

相场方法(Phase Field Method) 通过微分方程反映液→固转变时扩散、有序化势及热力学驱动力的综合作用,可对金属液的凝固过程及组织形式、生长进行真实的模拟。

相变场 是模拟金属热处理过程中组织转变的数理模型。要综合考虑相变与温度(相变潜热)、应力(应力诱发相变、相变应力及相变塑性的发生)的相互关系及影响。

特有缺陷预测模型 如描述热塑性加工过程晶粒度演变的动态再结晶模型(预测大锻件的混晶)、焊接过程局部氢浓度集聚扩散模型(预测氢致裂纹)等。

(3) **多种物理场的耦合计算** 要解决热加工实际问题,必须对上述各种物理场及方法进行局部或系统耦合。首先是宏观模拟层次中各种物理场的耦合,其中温度场是建立其它各种物理场的基础,常见的耦合有:温度场↔应力/应变场、温度场↔流动场。再次是把描述热加工过程宏观现象的连续方程(温度场、应力/应变场、速度场等)与描述微观组织演变的模型进行耦合。如温度场↔相变场、应力/应变场↔相变场、温度场↔统计模型、温度场↔相场、温度场↔应力/应变场↔微观缺陷预测模型等多种宏、微观模型之间耦合。

3. 数值模拟的后处理

数值模拟的结果是以数值形式表达模拟对象的物理状态,这种结果的表达形式所用的数据量大,可读性差,不利于对模拟结果进行分析,尤其是三维模拟结果更是如此。因此,提高模拟结果的可读性,提高模拟结果的表示效果,是数值模拟计算技术中一项重要的研究内容。

模拟结果图形/图像化 是一种能够以色彩变化来表达数值量变化的方法。这种方法通过对数值量进行分级,用不同的色彩代表不同级别的数值量,然后将这些色彩叠加到剖分单元的位置场与属性场的显示图上,便可实现数值结果向彩色图形的映射。

计算机图形学及图形终端技术的发展,为数值向图形映射的处理提供了技术支持,在数值模拟技术中已广泛应用这种处理技术。

后处理的任务是将数值模拟计算中取得的大量繁杂数据转化为用户可以看得见、并且可以看出工程含义、可以用于指导工艺分析的图形、图像和过程动画，即模拟结果的可视化处理。包括将结果图形/图像进行旋转、缩放、剖面显示、选择性显示、输出、制成图形/图像文件等。

3.1.3 热加工过程数值模拟的数值计算方法

在热加工工艺过程中，由于涉及问题多种多样，边界条件十分复杂，用解析方法求解这类微分方程是十分困难的，大多利用计算机的高速度和大容量的特点，采用数值解法来进行求解。数值解法有差分法、有限元法、数值积分法、蒙特卡洛法等。下面简单介绍这些数值计算方法的一些特点，详细解法可查阅有关文献。

1. 差分法

差分法的基础是用差商来代替微商，相应地就把微分方程变为差分方程来求解。为了用差分方程代替微分方程，首先必须对求解区域离散化。这样，微分方程和边界条件的求解就归结为求解一个线性代数方程组，得到数值解。用不同方法定义差商可得一系列的差分格式：向前差分、向后差分、平均差分、中心差分、加列金格式等。不同的差分格式其误差和稳定性各不相同，如向前差分是有条件稳定的；向后差分则是无条件稳定的；而平均差分虽然精度较高，但容易发生振荡等。因此使用差分法时要选择合适的差分格式，合理的网格划分和步长选取，以尽可能减少误差，保证解的精度和稳定性。差分法的优点是对于具有规则的几何特性和均匀的材料特性问题，它的计算程序设计和计算过程较为简单，收敛性较好。差分法的缺点是往往局限于规则的差分网格（正方形、矩形、正三角形等），显得呆板有余而灵活不足。另外，差分法只考虑了节点的作用，而忽视了把节点连接起来的单元的贡献。

2. 有限元法

有限元法起源于结构分析，但是，由于它所依据的理论的普遍性，已经能够成功地用来求解其它工程领域中的许多问题，如传热、电磁场、流体力学等领域的问题，因此可以说有限元几乎适用于求解所有的连续介质和场的问题。

有限元法的第一步是将连续体简化为由有限个单元组成的离散化模型，第二步对离散化模型求出数值解答。有限元法的主要优点是：

1) 概念清晰，容易掌握，可以在不同水平上建立对该法的理解。可以通过直观的物理途径来学习和运用这一方法，也可以建立在严格的数学基础之上。

2) 该法有较强的灵活性和适用性，应用范围极其广泛。它对于各种复杂的因素，如复杂的几何形状、任意的边界条件、不均匀的材料特性、非线性的应力-应变关系等，都能灵活地加以考虑，不会发生处理上的困难。

3) 该法采用矩阵形式表达，便于编制计算机程序，可以充分利用高速计算机所提供的方便。

3. 数值积分法

通常在微积分学中，积分值是通过寻找原函数的办法来得到的。但在许多情况下，寻找原函数往往是相当困难的，许多函数甚至找不到原函数。这时，就可以用数值积分法来求解。最简单的数值积分方法是求积节点（积分点）等距离的两点公式（梯形法则）及三点公式（辛普生法则）。此外，还有五点求积公式及变步长的梯形法则等。还有一种数值积分法是高斯求积法，这种方法求积的节点是不等距的，可以用较少的求积点而达到较高的精度。

4. 蒙特卡洛法

蒙特卡洛法亦称随机模拟法、随机抽样技术或统计试验。所谓蒙特卡洛法是对某一问题作出一个适当的随机过程，把随机过程的参数用随机样本计算出的统计量的值来估计，从而由这个参数找出最初所述问题中包含的未知量的方法。此时，如果作为问题的现象是随机过程，可以原封不动地把它数值化进行模拟。但是，现象为确定的情况也可以适当地设定随机过程而应用这个方法。

上述数值方法在工程应用中常相互交叉和渗透。如在瞬态热传导有限元分析中，在空间域采用有限元方法，而在时间域则采用差分方法，两者结合进行求解。

3.1.4 求解条件

数学方程反映了热加工工艺过程中高温工件的物理场（温度、压力、位移、速度等）与空间位置及时间的关系，反映了支配工件系统内部各种物理量现象的普遍规律。但是它并不能直接用于计算，如计算铸件在凝固过程中的温度场、锻件在受力下的位移场等。要得到这些具体的计算结果，还必须具备能使这些物理量被单一确定下来的各种条件，这些条件通常称为单值性条件。把这些条件也以恰当的数学表达式加以描述，使微分方程加上足够的单值性条件联合求解，才能确定具体工件在某种工艺条件下的物理场。温度场是热加工工艺过程模拟计算的基础，同时也是连接许多物理场的桥梁，在铸造、锻造、焊接和热处理工艺过程的模拟计算中，均涉及温度场的模拟计算，因此，以温度场为例来说明这些条件。

单值性条件通常包括以下四种：

(1) 几何条件 指物体的几何形状与尺度。

(2) 物性条件 指材料的热物性，包括它们是否随温度而变以及是否均匀等条件。

(3) 时间条件 也称为初始条件，指某一指定时间，一般为所研究的系统过程在开始时所求物理量的分布值，在求解温度场时，即为温度分布。

(4) 边界条件 指所求系统中不同介质之间边界上的热交换条件，不同的边界类型，发生着不同的热交换现象，如铸件与铸型之间，铸型与大气之间。

3.1.4.1 初始条件

对于一个热系统的某个物理量来说，一般总是首先有一个初始状态的。如，对凝固过程的温度场，其初始温度分布就是其初始值；对于充型过程的速度场，其浇注速度就是其速度场的初始值；对于锻造过程的位移场，其工件初始位置是其初始值；对于焊接过程的导热温度场，其工件的预热温度就是其温度场的初始值。

在计算机数值模拟技术出现初期，通常对所求的系统物理量的初始值都做了简化处理或假设。如在进行铸件凝固过程数值模拟计算时，其温度初始值假设为浇注温度，这种处理对计算精度有较大影响。因为液态金属在注入型腔时，要经过浇注系统，这期间，金属液与浇注系统的型壁要发生热交换，金属液要通过型壁向铸型传递热量，因此，在铸型充满后，铸型中金属液的温度要比浇注温度要有所下降，下降的程度根据铸型材料的不同而有很大的差别，在砂型中下降的温度要比在金属型中下降的温度小。又由于铸件的型腔不是瞬间充满的，因此，在浇注结束后，铸型中金属液的温度分布也是不均匀的。对于大型铸件来说，由于其浇注时间长，还能出现在浇注尚没有结束，铸件的某些部位就已经凝固了的情况（如靠近冷铁部位、薄壁部位等）。

随着计算机数值模拟技术的发展，人们已可以对比凝固过程模拟计算更为复杂的铸件充

型过程的速度场进行计算，伴随着速度场的计算，同时计算出充填部位的的温度场，在充型过程结束后，所得到的温度场即为凝固过程的温度场的初始值，由此完成了充型与凝固的耦合计算，实现了铸造工艺过程计算机数值模拟计算技术的一次跨越，同时为凝固过程的计算机数值模拟计算提供了较为准确的初始值。

3.1.4.2 边界条件

在理论上，常将系统边界上的换热条件即边界条件分为三类：

第一类边界条件，也称 Dirichlet 条件。该条件给出传热系统不同介质之间边界上各点的温度值 T_w ， T_w 是边界上位置 s 和时间 t 的函数，亦即

$$T_w = T(s, t)$$

第二类边界条件，也称 Neumann 条件，该条件给出传热系统不同介质之间边界上各点的温度沿边界法向 n 的热流率，亦即

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = q(s, t)$$

第三类边界条件：也称 Robin 条件，给出热传导系统不同介质之间边界上各点处的热流率与边界温度的线性关系，亦即

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_w = h_c(T_w - T_\infty)\omega$$

式中， h_c 为边界上的放热系数； T_w 、 T_∞ 分别是边界和环境的温度。

以上三类边界条件的划分主要是从在数学上便于求解的角度出发考虑的，而在实际中发生在系统不同介质之间边界上的换热现象是多种多样的。

3.1.4.3 热物性值

在热加工的计算机数值模拟计算中，从导热方程中可以看出，在方程中用到几个参数，包括材料的比定压热容 c_p 、潜热 L 、热导率 λ 和密度 ρ ，其中除 ρ 可大致看作常数外， c_p 、 λ 、 L 皆是随温度而变化的值，它们都是温度的函数。这种变化反映到数值模拟计算中，对传热的计算有着明显的影响，因为求解导热方程要以已知的热物性值为前提。当前，新材料不断地研究、开发出来，新材料在热加工领域中得到愈来愈广泛的应用，因此，掌握材料的热物性值是热加工工艺模拟技术中的一项重要工作。

除了材料热物性值随温度而变的问题之外，还有一个材料是否各向同性的问题。对于各向异性的材料来说，其热导率以及其它热物性值不再是与方向无关的标量，而成为在不同方向上具有不同值的参数。但在一般的热加工模拟中对材料各向异性的问题不做深入研究，在此只作为一个问题提出，不再详细讨论。

解决材料热物性值问题的途径主要有三种：一是查阅手册；二是进行专门的实测；三是实验与数学处理相结合。材料的热加工工艺过程是在高温下进行的，因此需要材料在高温下的热物性值，但实际上 1200℃ 以上材料的热物性值很难查到，通常只能依靠实测获得。但能测试 1200℃ 以上材料热物性参数的设备由于技术含量高，价格比较昂贵。

目前热物性参数的测试主要有以下几种：

(1) 激光脉冲法 此种方法测量材料的热扩散率 a ，比热容 c ，热导率 λ ，利用瞬间激光光照使试样吸收热量，并通过热电偶或红外线检测法测量试样背表面的温升，然后将结果保存，再通过计算得出随温度变化的 a 、 c 、 λ 值及相应的曲线。

体积函数方程

$$\partial F / \partial t + \partial (Fu) / \partial x + \partial (Fv) / \partial y + \partial (Fw) / \partial z = 0 \quad (3-3)$$

能量守恒方程

$$\begin{aligned} & \partial (\rho c_p T) / \partial t + \partial (\rho c_p u T) / \partial x + \partial (\rho c_p v T) / \partial y + \partial (\rho c_p w T) / \partial z \\ & = \partial (\lambda T / \partial x) / \partial x + \partial (\lambda T / \partial y) / \partial y + \partial (\lambda T / \partial z) / \partial z + q_v \end{aligned} \quad (3-4)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向速度分量; ρ 为金属液密度; t 为时间; p 为金属液体内压力; μ 为金属液分子动力粘度; g_x 、 g_y 、 g_z 为 x 、 y 、 z 方向重力加速度; F 为体积函数, $0 \leq F \leq 1$; c_p 为金属液比定压热容; T 为金属液温度; λ 为金属液热导率; q_v 为热源项。

矢量形式

连续性方程

$$\nabla u = 0$$

动量守恒方程

$$\left. \begin{aligned} \partial (\rho u) / \partial t + u \nabla u &= -\partial p / \partial x + \mu \nabla^2 u + \rho g_x \\ \partial (\rho v) / \partial t + u \nabla v &= -\partial p / \partial y + \mu \nabla^2 v + \rho g_y \\ \partial (\rho w) / \partial t + u \nabla w &= -\partial p / \partial z + \mu \nabla^2 w + \rho g_z \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

体积函数方程

$$\partial F / \partial t + \nabla(Fu) = 0$$

能量守恒方程

$$\partial (\rho c_p T) / \partial t + \nabla(\rho c_p T u) = \lambda \nabla^2 T + q_v$$

式中, u 为速度矢量, $u = ui + vj + wk$; ∇ 为拉普拉斯算子, $\nabla = (\partial/\partial x)i + (\partial/\partial y)j + (\partial/\partial z)k$; ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 = (\partial^2/\partial x^2)i + (\partial^2/\partial y^2)j + (\partial^2/\partial z^2)k$; 余量意义同微分形式方程

张量形式

连续性方程

$$\partial u_j / \partial x_j = 0$$

动量守恒方程

$$\partial (\rho u_i) / \partial t + \partial (\rho u_i u_j) / \partial x_j = -\partial p / \partial x_i + \partial (\mu u_i / \partial x_j) / \partial x_j + \rho g_j$$

体积函数方程

$$\partial F / \partial t + \partial (Fu_j) / \partial x_j = 0$$

能量守恒方程

$$\partial (\rho c_p T) / \partial t + \partial (\rho c_p u_j T) / \partial x_j = \partial (\lambda T / \partial x_j) / \partial x_j + q_v$$

式中, $i=1, 2, 3$, 为速度分量; $j=1, 2, 3$, 为爱因斯坦求和约定, 如 $\partial u_j / \partial x_j = \partial u_1 / \partial x_1 + \partial u_2 / \partial x_2 + \partial u_3 / \partial x_3$; 余量意义同微分形式方程。

统一形式

$$\partial (\rho \phi) / \partial t + \partial (\rho u_j \phi) / \partial x_j = \partial (D_\phi \partial \phi / \partial x_j) / \partial x_j + S_\phi \quad (3-6)$$

式中, ϕ 为计算变量, 当 ϕ 取为 1, u_i , F/ρ 和 T 时, 式 (3-6) 分别代表连续、动量、体积函数和能量方程; D_ϕ 为广义扩散系数; S_ϕ 为源项。

3.2.1.2 实体造型和剖分

欲进行三维充型凝固过程数值模拟, 首先需要铸件的几何信息, 具体地说是要根据二维铸件图形成三维铸件实体, 然后再对铸件实体进行三维网络划分以得到计算所需的网格单元

体积函数方程

$$\partial F / \partial t + \partial (Fu) / \partial x + \partial (Fv) / \partial y + \partial (Fw) / \partial z = 0 \quad (3-3)$$

能量守恒方程

$$\begin{aligned} & \partial (\rho c_p T) / \partial t + \partial (\rho c_p u T) / \partial x + \partial (\rho c_p v T) / \partial y + \partial (\rho c_p w T) / \partial z \\ & = \partial (\lambda T / \partial x) / \partial x + \partial (\lambda T / \partial y) / \partial y + \partial (\lambda T / \partial z) / \partial z + q_v \end{aligned} \quad (3-4)$$

式中, u 、 v 、 w 分别为 x 、 y 、 z 方向速度分量; ρ 为金属液密度; t 为时间; p 为金属液体内压力; μ 为金属液分子动力粘度; g_x 、 g_y 、 g_z 为 x 、 y 、 z 方向重力加速度; F 为体积函数, $0 \leq F \leq 1$; c_p 为金属液比定压热容; T 为金属液温度; λ 为金属液热导率; q_v 为热源项。

矢量形式

连续性方程

$$\nabla u = 0$$

动量守恒方程

$$\left. \begin{aligned} \partial (\rho u) / \partial t + u \nabla u &= -\partial p / \partial x + \mu \nabla^2 u + \rho g_x \\ \partial (\rho v) / \partial t + u \nabla v &= -\partial p / \partial y + \mu \nabla^2 v + \rho g_y \\ \partial (\rho w) / \partial t + u \nabla w &= -\partial p / \partial z + \mu \nabla^2 w + \rho g_z \end{aligned} \right\} \quad (3-5)$$

体积函数方程

$$\partial F / \partial t + \nabla(Fu) = 0$$

能量守恒方程

$$\partial (\rho c_p T) / \partial t + \nabla(\rho c_p T u) = \lambda \nabla^2 T + q_v$$

式中, u 为速度矢量, $u = ui + vj + wk$; ∇ 为拉普拉斯算子, $\nabla = (\partial/\partial x)i + (\partial/\partial y)j + (\partial/\partial z)k$; ∇^2 为拉普拉斯算子, $\nabla^2 = (\partial^2/\partial x^2)i + (\partial^2/\partial y^2)j + (\partial^2/\partial z^2)k$; 余量意义同微分形式方程

张量形式

连续性方程

$$\partial u_j / \partial x_j = 0$$

动量守恒方程

$$\partial (\rho u_i) / \partial t + \partial (\rho u_i u_j) / \partial x_j = -\partial p / \partial x_i + \partial (\mu u_i / \partial x_j) / \partial x_j + \rho g_j$$

体积函数方程

$$\partial F / \partial t + \partial (Fu_j) / \partial x_j = 0$$

能量守恒方程

$$\partial (\rho c_p T) / \partial t + \partial (\rho c_p u_j T) / \partial x_j = \partial (\lambda T / \partial x_j) / \partial x_j + q_v$$

式中, $i=1, 2, 3$, 为速度分量; $j=1, 2, 3$, 为爱因斯坦求和约定, 如 $\partial u_j / \partial x_j = \partial u_1 / \partial x_1 + \partial u_2 / \partial x_2 + \partial u_3 / \partial x_3$; 余量意义同微分形式方程。

统一形式

$$\partial (\rho \phi) / \partial t + \partial (\rho u_j \phi) / \partial x_j = \partial (D_\phi \partial \phi / \partial x_j) / \partial x_j + S_\phi \quad (3-6)$$

式中, ϕ 为计算变量, 当 ϕ 取为 1, u_i , F/ρ 和 T 时, 式 (3-6) 分别代表连续、动量、体积函数和能量方程; D_ϕ 为广义扩散系数; S_ϕ 为源项。

3.2.1.2 实体造型和剖分

欲进行三维充型凝固过程数值模拟, 首先需要铸件的几何信息, 具体地说是要根据二维铸件图形成三维铸件实体, 然后再对铸件实体进行三维网络划分以得到计算所需的网格单元

几何信息。在模拟分析中,多采用商用实体造型软件进行实体造型,这类软件功能较强,能够完成复杂曲面的造型,支持多种数据文件格式,如(Solid work、Solid edge等),所生成的实体文件(如STL格式文件)可用于计算网格的自动剖分。图3-1为一铸件实体造型后所得到的网格剖分的实例。

本节以有限差分方法为主描述铸件充型凝固过程的数值计算方法。在控制方程离散过程中,为解决压强梯度的离散困难及不合理的压强场检测问题,采用交错式网格(Staggered Grid)或称移动网格(Displaced Grid),即将速度分量置于网格单元边界,使之与其它变量(压力、温度等)的网格系统错开,如图3-2所示。

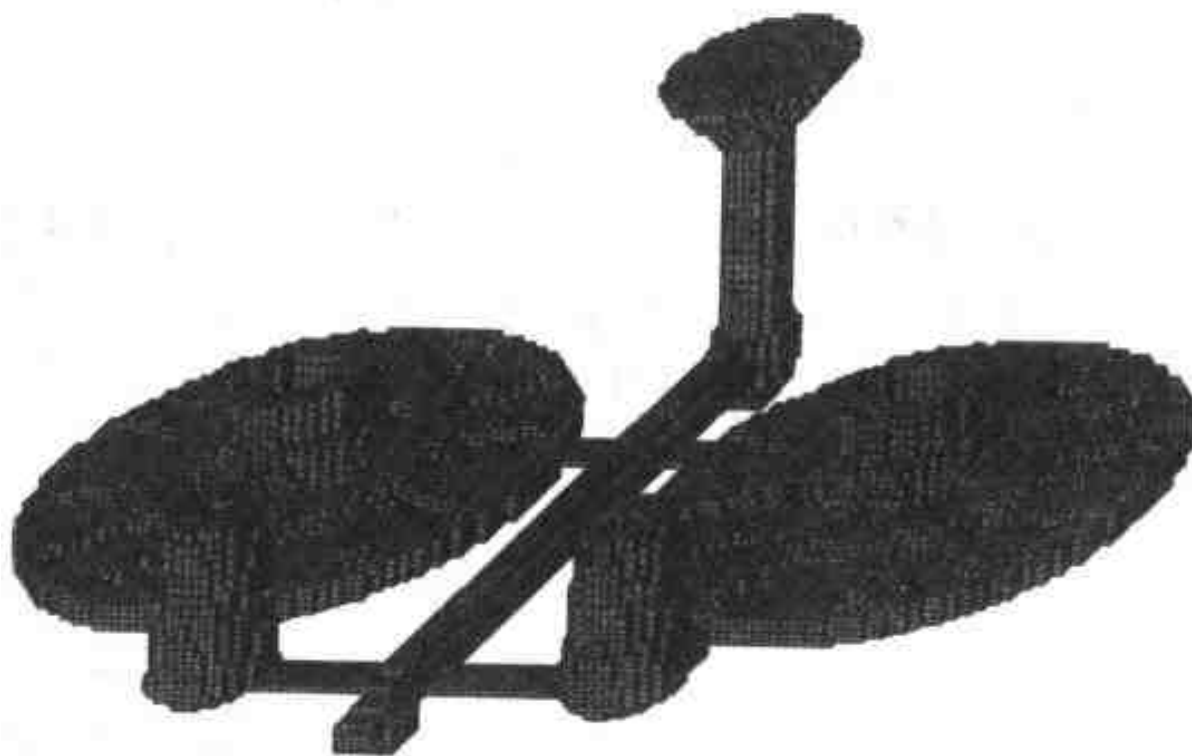


图 3-1 铸件实体剖分结果

(i, j, k) 单元为主控制容积,压力 p 、体积函数 F 、温度 T 位于

其中心,其与相邻单元交界面的中心则为相应速度分量控制容积的中心,速度分量分别为 $u_{i+1/2,j,k}$, $u_{i-1/2,j,k}$, $v_{i,j+1/2,k}$, $v_{i,j-1/2,k}$, $w_{i,j,k+1/2}$, $w_{i,j,k-1/2}$ 。

3.2.1.3 速度场求解

速度场主要是通过连续性方程和动量方程的求解得到的。连续性方程式(3-1)可以采用中心差分格式离散如下:

$$\begin{aligned} D_{ijk}^{n+1} = & (u_{i+1/2,j,k}^{n+1} - u_{i-1/2,j,k}^{n+1})/\delta x_i \\ & + (v_{i,j+1/2,k}^{n+1} - v_{i,j-1/2,k}^{n+1})/\delta y_j \\ & + (w_{i,j,k+1/2}^{n+1} - w_{i,j,k-1/2}^{n+1})/\delta z_k = 0 \end{aligned} \quad (3-7)$$

式中, δx_i 、 δy_j 、 δz_k 为 (i, j, k) 单元在 x 、 y 、 z 方向上的单元步长; $n+1$ 代表新时刻。

在压力迭代过程中,连续性方程被作为迭代是否收敛的一个判别指标,又称质量源,即当 $|D_{i,j,k}| < \epsilon$ (ϵ 为任意小量)时,认为速度已经收敛,可以终止迭代计算。 ϵ 可根据误差大小在 $1.0 \sim 10^{-3}$ 之间选择,为加快计算进度,可取上限。

对动量方程式(3-2)的求解可采用分步法。分步法(Method of Fractional Steps)的基本思想是按微分算子的物理机理(而不是按照空间的方向)将偏微分方程拆为若干部分,在每一个时间步长内,分别求解偏微分方程的不同部分,逐步达到偏微分方程的解。

动量方程可以分为散度自由部分 $F(u_i)$ 和旋度自由部分 $-\partial p / \partial x_i$ 。 $F(u_i)$ 的定义为(张量形式)

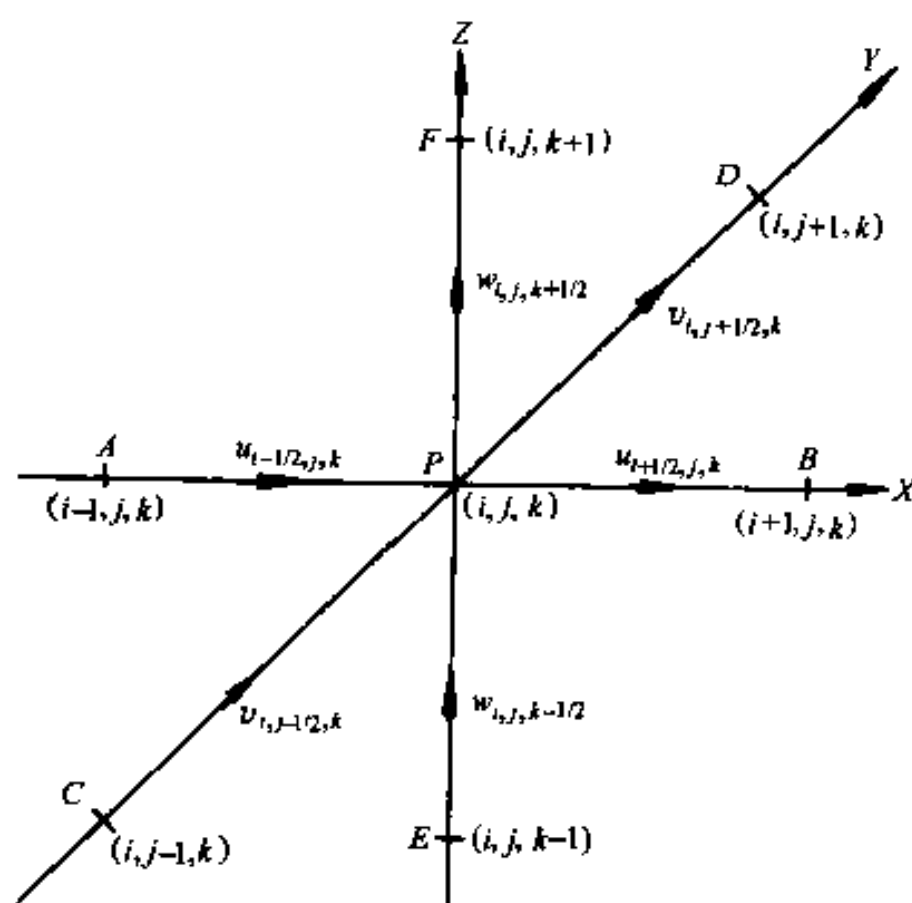


图 3-2 网格单元中变量的分布

$$F(u_i) = -\rho u_i \partial u_i / \partial x_j + \partial (\mu \partial u_i / \partial x_j) / \partial x_j + \rho g_i$$

每一时间步长的运算可以分为两步：先求出辅助流速 u_i^{aux} ，令其含有正确的旋度，但含有不正确的散度，再将 u_i^{aux} 修改，使其含有正确的散度。即第一步求解

$$\partial (\rho u_i^{aux}) / \partial t = [F(u_i)]^n \quad (3-8)$$

第二步求解

$$\partial (\rho u_i^{n+1}) / \partial t = -\partial p^{n+1} / \partial x_i$$

采用幂函数格式对式 (3-5) 进行离散处理，因为这种格式可以很好地平衡控制方程中对流和扩散的作用。以 (i, j, k) 单元速度 $u_{i+1/2, j, k}^{aux}$ 的解法为例，控制单元中心取 $(i+1/2, j, k)$ ，见图 3-2，以 n 代表旧时刻， $n+1$ 代表新时刻， a 代表离散系数，时间经过 δt 之后，辅助速度 $u_{i+1/2, j, k}^{aux}$ 计算式为：

$$\begin{aligned} a_{i+1/2, j, k} u_{i+1/2, j, k}^{aux} &= a_{i+3/2, j, k} u_{i+3/2, j, k}^n + a_{i-1/2, j, k} u_{i-1/2, j, k}^n \\ &+ a_{i+1/2, j+1, k} u_{i+1/2, j+1, k}^n + a_{i+1/2, j-1, k} u_{i+1/2, j-1, k}^n \\ &+ a_{i+1/2, j, k+1} u_{i+1/2, j, k+1}^n + a_{i+1/2, j, k-1} u_{i+1/2, j, k-1}^n + b \\ a_{i+1/2, j, k} &= \rho \delta x_{i+1/2} \delta y_j \delta z_k / \delta t \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= [a_{i+1/2, j, k} - (a_{i+3/2, j, k} + a_{i-1/2, j, k} + a_{i+1/2, j+1, k} + a_{i+1/2, j-1, k} + a_{i+1/2, j, k+1} \\ &+ a_{i+1/2, j, k-1})] u_{i+1/2, j, k}^n + \rho g_x \delta x_{i+1/2} \delta y_j \delta z_k \end{aligned}$$

下述公式中 d 代表传导性， f 代表流量， P 为贝克列 (Peclet) 数， $A(|P|)$ 为幂函数。

$$\begin{aligned} a_{i+3/2, j, k} &= d_{i+1, j, k} A(|P_{i+1, j, k}|) + \max(-f_{i+1, j, k}, 0) \\ a_{i-1/2, j, k} &= d_{i, j, k} A(|P_{i, j, k}|) + \max(f_{i, j, k}, 0) \\ a_{i+1/2, j+1, k} &= d_{i+1/2, j+1/2, k} A(|P_{i+1/2, j+1/2, k}|) + \max(-f_{i+1/2, j+1/2, k}, 0) \\ a_{i+1/2, j-1, k} &= d_{i+1/2, j-1/2, k} A(|P_{i+1/2, j-1/2, k}|) + \max(f_{i+1/2, j-1/2, k}, 0) \\ a_{i+1/2, j, k+1} &= d_{i+1/2, j, k+1/2} A(|P_{i+1/2, j, k+1/2}|) + \max(-f_{i+1/2, j, k+1/2}, 0) \\ a_{i+1/2, j, k-1} &= d_{i+1/2, j, k-1/2} A(|P_{i+1/2, j, k-1/2}|) + \max(f_{i+1/2, j, k-1/2}, 0) \end{aligned}$$

流量 f 和传导性 d 的计算公式如下

$$\begin{aligned} f_{i+1, j, k} &= \rho u_{i+1, j, k}^n \delta y_j \delta z_k \\ d_{i+1, j, k} &= \mu \delta y_j \delta z_k / \delta x_{i+1} \\ f_{i, j, k} &= \rho u_{i, j, k}^n \delta y_j \delta z_k \\ d_{i, j, k} &= \mu \delta y_j \delta z_k / \delta x_i \\ f_{i+1/2, j+1/2, k} &= \rho v_{i+1/2, j+1/2, k}^n \delta x_{i+1/2} \delta z_k \\ d_{i+1/2, j+1/2, k} &= \mu \delta x_{i+1/2} \cdot \delta z_k / \delta y_{j+1/2} \\ f_{i+1/2, j-1/2, k} &= \rho v_{i+1/2, j-1/2, k}^n \delta x_{i+1/2} \delta z_k \\ d_{i+1/2, j-1/2, k} &= \mu \delta x_{i+1/2} \cdot \delta z_k / \delta y_{j-1/2} \\ f_{i+1/2, j, k+1/2} &= \rho w_{i+1/2, j, k+1/2}^n \delta x_{i+1/2} \delta y_j \\ d_{i+1/2, j, k+1/2} &= \mu \delta x_{i+1/2} \cdot \delta y_j / \delta z_{k+1/2} \\ f_{i+1/2, j, k-1/2} &= \rho w_{i+1/2, j, k-1/2}^n \delta x_{i+1/2} \delta y_j \\ d_{i+1/2, j, k-1/2} &= \mu \delta x_{i+1/2} \delta y_j / \delta z_{k-1/2} \end{aligned}$$

贝克列数为

$$P = f/d$$

幂函数公式为

$$A(|P|) = \max[0, (1 - 0.1|P|)^5]$$

上述离散公式中采用了显式计算。实际辅助速度计算时单元界面上的速度 $u_{i+1/2,j,k}$, $u_{i-1/2,j,k}$, $v_{i,j+1/2,k}$, $v_{i,j-1/2,k}$, $w_{i,j,k+1/2}$, $w_{i,j,k-1/2}$ 为计算速度, 其它未知速度可由上述六个速度插值计算获得, 如 $u_{i+1,j,k}$ 未知, 而 $u_{i+1/2,j,k}$ 和 $u_{i+3/2,j,k}$ 已知, 则 $u_{i+1,j,k} = 0.5 \times (u_{i+1/2,j,k} + u_{i+3/2,j,k})$ 。标准的分步法在辅助速度计算时未加入旧时刻压力的影响, 数值试验表明, 在源项中加入或不加入旧时刻压力的影响均可获得收敛的速度场计算结果, 但加入旧时刻压力影响后, 收敛速度加快, 且压力分布结果较为合理。

y 向和 z 向的辅助流速 $v_{i,j+1/2,k}^{aux}$ 和 $w_{i,j,k+1/2}^{aux}$ 的求解与 $u_{i+1/2,j,k}^{aux}$ 的求解同理。

因为压力 p^{n+1} 未知, 为求解式 (3-8), 形成了三种不同的处理方法: 迭代法、压强泊松法和流函数—旋度法。选用迭代法, 简述如下:

每次迭代的压力变化为:

$$\delta p_{i,j,k}^{n+1,m} = -\omega D_{i,j,k}^{n+1,m} / (\partial D_{i,j,k} / \partial p_{i,j,k}) \quad (3-9)$$

式中, ω 为迭代因子, $0 < \omega < 2$; $D_{i,j,k}$ 为质量源, 由式 (3-7) 得到; m 为迭代次数。

$$\begin{aligned} \partial D_{i,j,k} / \partial p_{i,j,k} = & (1/\rho) [(1/\delta x_{i+1/2} + 1/\delta x_{i-1/2}) \delta t / \delta x_i \\ & + (1/\delta y_{j+1/2} + 1/\delta y_{j-1/2}) \delta t / \delta y_j \\ & + (1/\delta z_{k+1/2} + 1/\delta z_{k-1/2}) \delta t / \delta z_k] \end{aligned} \quad (3-10)$$

新时刻压力

$$p_{i,j,k}^{n+1,m} = p_{i,j,k}^{n+1,m-1} + \delta p_{i,j,k}^{n+1,m} \quad (3-11)$$

设 $B = \delta t \delta p_{i,j,k}^{n+1,m} / \rho$, 则新时刻速度的求解为:

$$u_{i+1/2,j,k}^{n+1,m} = u_{i+1/2,j,k}^{n+1,m-1} + B / \delta x_{i+1/2} \quad (3-12)$$

$$u_{i-1/2,j,k}^{n+1,m} = u_{i-1/2,j,k}^{n+1,m-1} - B / \delta x_{i-1/2} \quad (3-13)$$

$$v_{i,j+1/2,k}^{n+1,m} = v_{i,j+1/2,k}^{n+1,m-1} + B / \delta y_{j+1/2} \quad (3-14)$$

$$v_{i,j-1/2,k}^{n+1,m} = v_{i,j-1/2,k}^{n+1,m-1} - B / \delta y_{j-1/2} \quad (3-15)$$

$$w_{i,j,k+1/2}^{n+1,m} = w_{i,j,k+1/2}^{n+1,m-1} + B / \delta z_{k+1/2} \quad (3-16)$$

$$w_{i,j,k-1/2}^{n+1,m} = w_{i,j,k-1/2}^{n+1,m-1} - B / \delta z_{k-1/2} \quad (3-17)$$

当迭代次数 $m=1$ 时, 速度值取辅助速度, 正确的压力和速度通过式 (3-9) ~ 式 (3-17) 迭代计算得到, 迭代计算收敛判据为 $|D_{i,j,k}| < \epsilon$, ϵ 为任意小量。

迭代计算过程只针对充满单元 (体积函数 $F=1.0$), 自由表面单元压力可置为环境压力, 自由表面单元速度由边界条件确定。

为加快迭代计算速度, 采用超松弛迭代方法, 同时, 为了保证迭代过程的绝对收敛, 引入最优化理论中的梯度法思想, 即在每次迭代之前, 先找到绝对值最大的 $D_{i,j,k}$ 值, 并试算一下迭代后的 $D_{i,j,k}$ 值, 比较一下二者的绝对值大小, 若 $|D_{i,j,k}|$ 值是减小的, 则实施此次迭代计算, 若 $|D_{i,j,k}|$ 值增大, 则表明迭代有发散趋向, 此时可将迭代因子 ω 乘以 0.618 之后重复试算过程。虽然这种试算过程增加了迭代计算时间, 但可保证迭代过程不致出现发散现象。压力迭代过程发散与多种因素有关, 对迭代因子 ω 的控制只是一种改进手段。

3.2.1.4 充型过程液态金属速度场计算域确定

充型过程中液态金属自由表面是不断变化的, 每个时间步长对应的计算域均不相同, 新

的计算域的确定是通过求解方程 (3-3) 得到的。普通的数值方法在离散方程 (3-3) 时将造成很大的假扩散问题, 计算结果将出现界面模糊 (Smearing) 现象, 在 $F=1$ 与 $F=0$ 之间存在大量自由表面单元。为了得到清晰的自由表面, 可采用施体-受体 (Donor-Acceptor) 流率近似法或称 DA 法求解方程 (3-3), 如图 3-3a 所示, 设垂直于单元边界的速度为 u , 上游为施体, 下游为受体。单位截面积上穿过网格单元边界的流体体积流量 $V_x = u \cdot \delta t$, 在一个时间步长之内, 穿过单元界面的体积函数 F 量为 δF 乘以网格边界截面积, δF 的求解式为:

$$\delta F = \min[F_{AD}|V_x| + CF, F\delta x_D]$$

$$CF = \max[(1.0 - F_{AD}|V_x|) - (1.0 - F_D)\delta x_D, 0.0]$$

式中, 下标 D 代表施体; 下标 A 代表受体; 下标 AD 可以是 A , 亦可以是 D , 取决于自由表面相对于流动方向的走向。

当自由表面的走向垂直于其本身时, $F_{AD} = F_A$, 否则, 用 $F_{AD} = F_D$, 见图 3-3b、c、d。但当受体全空时, 不管自由表面什么走向, 均取 $F_{AD} = F_A$, 这意味着任何流体在进入下游单元之前, 施体单元必须含有一定量的流体。

公式中 \min 是为了防止超过施体单元本身含有流体量的流动, 图 3-3c 体现了 \min 的作用。公式中 \max 是考虑到流过边界的空隙体积 $(1.0 - F_{AD}|V_x|)$ 超过施体单元的空隙体积 $(1 - F_D)\delta x_D$ 时, 超过的那部分为进入受体单元的额外体积, 应考虑在内, 图 3-3d 体现了 \max 的作用。在应用上述方法时可作两点改进。第一, 采用充型时间重置法减少体积函数对流计算误差, 以增加充型时间计算的准确性。图 3-3 所示的几种情况均为理想状态, 实际上流体界面不可能如此规则, 因此 F 的对流计算误差不可避免。在原算法中, 当 $F < \varepsilon$ 时 (ε 为任意小量), 即令 $F=0$, 而当 $F > 1 - \varepsilon$ 时, 则令 $F=1$, 在对 F 进行圆整过程中产生的误差均被舍弃。这里利用其舍弃的体积函数量, 设某时间步长计算域内体积函数对流计算的累计体积误差为 ΣV , 入口流量为 Q , 则充型时间 t 可作如下调整:

$$t = t + \Sigma V / Q$$

第二, 在应用施体-受体流量法之前, 需对自由表面走向加以判定, 以确定公式中 F_{AD} 是取 F_A 还是取 F_D 。原采用平面几何方法, 通过计算和判断斜率大小确定走向, 三维计算时公式较为繁琐。可采用下述较简单的方法, 所谓压力内插单元或自由表面走向的判定, 实际上就是判断自由表面单元的上游单元。既然可以较准确地计算出速度场和体积函数值, 则自由表面单元的上游单元应为含有金属液 ($F > 0$) 的相邻单元中, 界面速度指向自由表面单元的所有单元中, 界面速度绝对值最大的那个单元。按照这一思路寻找内插单元, 问题变得很容易, 在三维计算中的应用也很方便。

3.2.1.5 温度场求解

温度场计算包括充型过程中液态金属温度场变化以及铸件凝固过程中温度场变化, 均可通过对式 (3-4) 的求解得到。对能量方程 (3-4) 的离散同样采用幂函数方案, 显式求解。控制单元取 (i, j, k) , 单元温度 T_{ijk} 的求解公式如下:

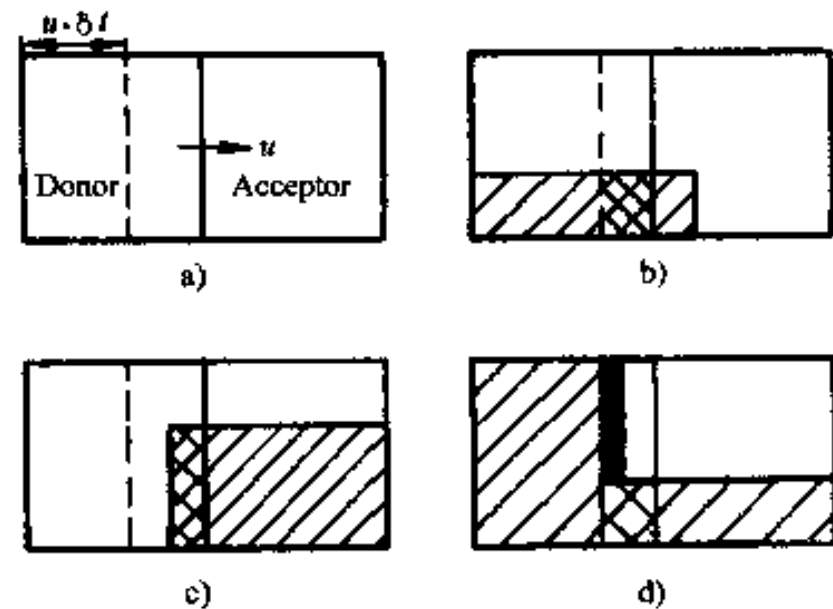


图 3-3 施体-受体流量法

$$a_{i,j,k}T_{i,j,k}^{n+1} = a_{i+1,j,k}T_{i+1,j,k}^n + a_{i-1,j,k}T_{i-1,j,k}^n + a_{i,j+1,k}T_{i,j+1,k}^n \\ + a_{i,j-1,k}T_{i,j-1,k}^n + a_{i,j,k+1}T_{i,j,k+1}^n + a_{i,j,k-1}T_{i,j,k-1}^n + b_{i,j,k} \quad (3-18)$$

式中, a 为离散系数; $n+1$, n 代表新、旧时刻, 其中

$$a_{i,j,k} = \rho \delta x_i \delta y_j \delta z_k / \delta t \quad (3-19)$$

$$b_{i,j,k} = [a_{i,j,k} 2(a_{i+1,j,k} + a_{i-1,j,k} + a_{i,j+1,k} + a_{i,j-1,k} + a_{i,j,k+1} + a_{i,j,k-1})] T_{i,j,k}^n \quad (3-20)$$

式中, ρ 为液态金属密度; δx_i 、 δy_j 、 δz_k 为单元 (i, j, k) 三个方向的步长; δt 为时间步长。

$$a_{i+1,j,k} = d_{i+1/2,j,k} A(|P_{i+1/2,j,k}|) + \max(2f_{i+1/2,j,k}, 0) \quad (3-21)$$

$$a_{i-1,j,k} = d_{i-1/2,j,k} A(|P_{i-1/2,j,k}|) + \max(f_{i-1/2,j,k}, 0) \quad (3-22)$$

$$a_{i,j+1,k} = d_{i,j+1/2,k} A(|P_{i,j+1/2,k}|) + \max(2f_{i,j+1/2,k}, 0) \quad (3-23)$$

$$a_{i,j-1,k} = d_{i,j-1/2,k} A(|P_{i,j-1/2,k}|) + \max(f_{i,j-1/2,k}, 0) \quad (3-24)$$

$$a_{i,j,k+1} = d_{i,j,k+1/2} A(|P_{i,j,k+1/2}|) + \max(2f_{i,j,k+1/2}, 0) \quad (3-25)$$

$$a_{i,j,k-1} = d_{i,j,k-1/2} A(|P_{i,j,k-1/2}|) + \max(f_{i,j,k-1/2}, 0) \quad (3-26)$$

式中, d 为传导性; f 为流量; P 为贝克列数; $A(|P|)$ 为幂函数。

$$f_{i+1/2,j,k} = \rho u_{i+1/2,j,k}^{n+1} \delta y_j \delta z_k \quad (3-27)$$

$$d_{i+1/2,j,k} = \Gamma_{i+1/2,j,k} \delta y_j \delta z_k / \delta x_{i+1/2} \quad (3-28)$$

$$f_{i-1/2,j,k} = \rho u_{i-1/2,j,k}^{n+1} \delta y_j \delta z_k \quad (3-29)$$

$$d_{i-1/2,j,k} = \Gamma_{i-1/2,j,k} \delta y_j \delta z_k / \delta x_{i-1/2} \quad (3-30)$$

$$f_{i,j+1/2,k} = \rho v_{i,j+1/2,k}^{n+1} \delta x_i \delta z_k \quad (3-31)$$

$$d_{i,j+1/2,k} = \Gamma_{i,j+1/2,k} \delta x_i \delta z_k / \delta y_{j+1/2} \quad (3-32)$$

$$f_{i,j-1/2,k} = \rho v_{i,j-1/2,k}^{n+1} \delta x_i \delta z_k \quad (3-33)$$

$$d_{i,j-1/2,k} = \Gamma_{i,j-1/2,k} \delta x_i \delta z_k / \delta y_{j-1/2} \quad (3-34)$$

$$f_{i,j,k+1/2} = \rho w_{i,j,k+1/2}^{n+1} \delta x_i \delta y_j \quad (3-35)$$

$$d_{i,j,k+1/2} = \Gamma_{i,j,k+1/2} \delta x_i \delta y_j / \delta z_{k+1/2} \quad (3-36)$$

$$f_{i,j,k-1/2} = \rho w_{i,j,k-1/2}^{n+1} \delta x_i \delta y_j \quad (3-37)$$

$$d_{i,j,k-1/2} = \Gamma_{i,j,k-1/2} \delta x_i \delta y_j / \delta z_{k-1/2} \quad (3-38)$$

式中, u 、 v 、 w 为单元界面上速度分量; Γ 为广义扩散系数。

$$\Gamma = \lambda / c_p \quad (3-39)$$

式中, λ 为单元热导率; c_p 为单元比定压热容。

贝克列数

$$P = f / d \quad (3-40)$$

幂函数

$$A(|P|) = \max[0, (1 - 0.1|P|)^5] \quad (3-41)$$

充型过程温度场计算, 可在获得液态金属新时刻速度场之后, 根据上一时刻金属和铸型的温度场, 通过式 (3-18) ~ 式 (3-41) 求解新时刻单元温度值。热导率 λ 和比定压热容 c_p 可根据上一时刻单元温度由物性参数与温度的函数关系确定。充型完毕之后, 可将速度分量全部置零, 此时幂函数 $A(|P|) = 1$, 而流量 $f = 0$, 只有扩散在起作用, 凝固开始时铸件和铸型温度取为充型完毕时的计算温度值。

3.2.1.6 边界条件和数值稳定性条件

边界条件包括压力边界、速度边界和传热边界条件。

压力边界条件比较简单，固壁处、自由表面单元压力置零即可，入口单元、出流单元也不必给定压力，同样置零处理。

速度边界包括人流边界、出流边界、固壁边界和自由表面边界。

人流速度边界可选在浇口杯处，亦可选在内浇口处，视铸件形状和计算机速度而定。若计算机速度较快，可将直浇道也包括在计算域内，人流边界可选定在浇口杯处。人流速度计算可根据不同的浇注方法（漏包浇注、倾包浇注、反重力浇注等等）以及浇注系统的类型（封闭式、开放式或半封闭式）采用不同的经验公式。

出流边界速度采用坐标局部单向化方式处理，即假定下游单元对上游单元无影响，在充型计算时出流边界主要分布于冒口或横内浇道上。注意不可将出流边界选在有回流的地方，否则所得解没有意义。

固壁边界速度置零，即采用非滑移边界处理，固壁内单元不再赋予对应流体单元速度的负速度，这样处理对计算精度没有影响，而且可避免固壁内速度处理混乱问题。

自由流体表面单元速度处理较为复杂，简单地采用连续性方程处理将很容易导致速度和压力计算不收敛情况。这里提出一种新的处理方法，基本思想是自由表面单元速度不采用连续性方程求解，而由其上游单元或相邻单元已知速度通过适当插值得到，待自由表面单元充满之后，其真实速度大小和方向变化由压力和速度迭代计算自然给出，这样获得的速度分布较为合理，同时可避免流体遇固壁时及两股流体或多股流体相汇时流体速度计算的失真情况，某些单元始终充不满的现象也基本消失。具体处理方法说明如下，见图 3-4。

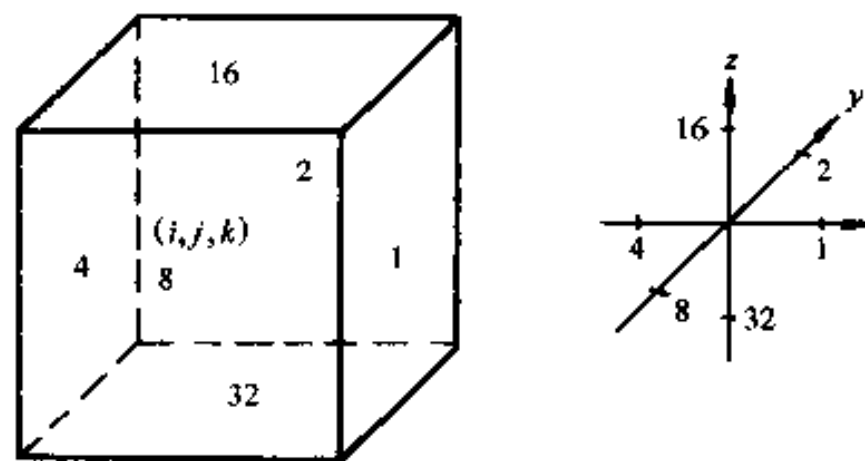


图 3-4 自由表面单元处理速度

首先在计算域内寻找自由表面单元，判断方法是只要 (i, j, k) 单元的相邻单元中有一个为空 ($F=0$)，且有 $F_{i,j,k} < 1.0$ ，则 (i, j, k) 单元为自由表面单元。可用 NF 表示空单元的位置，如当 $F_{i+1,j,k}=0.0$ ，而其它相邻单元的体积函数 $F > 0.0$ 时，取 $NF=1$ ，又当 $F_{i,j,k+1}=0.0$ ， $F_{i,j,k-1}=0.0$ ，而其它相邻单元体积函数 $F > 0.0$ 时，则取 $NF=16+32=48$ ，这样考虑各种情况时，NF 共有 63 个取值，即 $1 \leq NF \leq 63$ 。

为避免对称性方面的问题，处理前先将新速度暂存于临时数组变量中，如可设 $u'=u$ ， $v'=v$ ， $w'=w$ 。然后根据 NF 值确定速度计算方法，共分 9 类情况。篇幅所限，举一例说明如下：

NF=1 (NF=2, 4, 8, 16, 32 同理)

If $u'_{i-1/2,j,k} \neq 0$ then

$$u_{i+1/2,j,k} = u'_{i-1/2,j,k}$$

else

$$u_{i+1/2,j,k} = [\delta y_j (u'_{i+1/2,j+1,k} + u'_{i+1/2,j-1,k}) + \delta z_k (u'_{i+1/2,j,k+1} + u'_{i+1/2,j,k-1})] / (\delta y_{j+1} + \delta y_{j-1} + \delta z_{k+1} + \delta z_{k-1})$$

end if

传热边界包括铸件与铸型、铸件与空气、铸型与空气及铸型与地边界。传热方式主要有对流、扩散和辐射换热。铸件与铸型之间采用实测的复合换热系数，在充型过程传热计算时，由于各边界单元液态金属与铸型壁接触时间不同，因此换热系数也不相同，计算时单独设一变量记录单元充填时间，将单元刚充入金属液的时刻作为零时刻，边界单元的换热系数可根据系数与时间的函数关系求出。铸件与空气及铸型与空气之间的换热系数可采用经验的对流和辐射换热系数公式加以处理，空气取为室温。铸型与地之间可采用一般的扩散传热方法计算，地单元温度取为室温。自由表面单元温度赋予上游单元温度值。一些特殊的边界如保温冒口、电热冒口、绝热边界等，可以采用适当的经验公式加以处理。

数值稳定性条件应考虑流体流动和传热计算问题。对于动量输运过程，一个时间步长内，流体流动不应超过一个单元

$$\delta t \leq a \delta x_i / |u_i|$$

式中， a 为系数， $0 < a < 1$ ，一般取值为 $1/3 \sim 1/4$ 。

一个时间步长内，动量扩散不能超过一个单元

$$\nu \delta t \leq 0.5 \delta x_i^2 \delta y_j^2 \delta z_k^2 / (\delta x_i^2 \delta y_j^2 + \delta y_j^2 \delta z_k^2 + \delta x_i^2 \delta z_k^2)$$

式中， ν 为液态金属运动粘度。

表面张力的影响很小，其对时间步长的影响可以不加考虑。

对于能量输运过程，离散式 (3-18) 中的离散系数应满足正系数法则，由于计算公式的关系，系数 $a_{i+1,j,k}$ 、 $a_{i-1,j,k}$ 、 $a_{i,j+1,k}$ 、 $a_{i,j-1,k}$ 、 $a_{i,j,k+1}$ 、 $a_{i,j,k-1}$ 已自然满足正系数要求。对 δt 的限制主要应使下式成立：

$$a_{i,j,k} - (a_{i+1,j,k} + a_{i-1,j,k} + a_{i,j+1,k} + a_{i,j-1,k} + a_{i,j,k+1} + a_{i,j,k-1}) \geq 0 \quad (3-42)$$

若采用隐式计算，则式 (3-42) 可不考虑。

3.2.1.7 凝固潜热处理

铸件凝固潜热的处理方法较多。考虑到不同合金的凝固特点，对凝固潜热处理采用两种方法。设 T_1 、 T_2 为合金液固相线温度，当合金的结晶范围较窄（取 $T_1 - T_2 \leq 1K$ ）时，采用温度回复法；而当合金的结晶温度范围较宽（ $T_1 - T_2 > 1K$ ）时，采用等价比热法。

上述做法的原因是，在合金等温凝固场合，等价比热法不便采用，因其计算公式中分母项为零。当结晶温度范围较宽时，如果采用温度回复法，对于温度介于 T_1 与 T_2 之间的液态金属，计算时单元温度始终回复到 T_1 ，计算温度不是液态金属的实际温度，不符合实际情况。

温度回复法是采用固相率的增量 Δf_s 代替潜热 L 的释放，其表达式为：

$$\Delta f_s = c_p \Delta T / L$$

式中， c_p 为金属的比定压热容； ΔT 为一个凝固时间步长内的温度降低量。

当固相率的累计值 $\Sigma \Delta f_s = 1$ 时，表明潜热释放结束。

等价比热法是用比热等效凝固潜热 L 的释放，表达式为：

$$c_E = c_p - L \partial f_s / \partial T$$

式中， c_E 为等效比定压热容； f_s 为固相率。

3.2.1.8 数值计算步骤

将带有自由表面的液态金属层流流动与传热数值计算技术用于铸件充型与凝固过程计算时，计算步骤如下：

1) 将铸件和铸型作为计算域，进行实体造型、剖分和单元标识。

2) 给出初始条件、边界条件和金属、铸型的物性参数。

3) 求解体积函数方程得到新时刻流体流动计算域。

4) 求解连续性方程和动量方程, 得到新时刻计算域内流体速度场和压力场。

5) 求解能量方程, 得到铸件和铸型的温度场及液态金属固相份数场。

6) 增加一个时间步长, 重复 3) ~ 6) 步至充型完毕。

7) 计算域内流体流动速度置零, 调整时间步长。

8) 将充型完毕时计算得到的铸件和铸型温度场作为初始温度条件, 求解能量方程至铸件凝固完毕。

9) 计算结果后处理, 进行铸造工艺分析、铸件缺陷预报和工艺参数优化工作。

3.2.1.9 常见铸造缺陷预测方法

对铸件充型和凝固过程进行数值计算的最终目的, 是要将模拟结果与铸造缺陷的判据函数结合起来, 对工艺的实施结果进行预报分析, 从而确定工艺参数的合理性及是否要对工艺参数进行优化和如何优化。下面对常见铸造缺陷采用的判据函数或预报方法进行简单介绍。

1. 气孔

这里所说气孔不是析出性气孔或造型材料发气形成的气孔, 而是指与充型状态有关的卷气气孔。从铸件充型过程速度矢量分布图上可以大致确定是否有可能发生卷气气孔缺陷, 这和用水力模拟实验观察介质充填模型型腔时是否卷入气体的道理一样。如果铸件壁厚尺寸较小, 凝固较快, 则用这种方法判断气孔将十分准确。

2. 夹杂

从液态金属与型壁或液态金属之间相互碰撞之后的形态及液流速度大小上可大致判断金属液在充型过程中是否产生氧化夹杂。实验结果表明, 当液态金属的流速大于 $0.35 \sim 0.5 \text{ m/s}$ 的临界流速时, 金属液中将产生氧化夹杂, 但铸件内是否会产生严重的夹杂缺陷, 还要看这种夹杂是否会在凝固过程中浮于铸件的非零件部位, 如冒口位置。可采用 Stokes 方程近似计算夹杂上浮时间

$$t = 9\mu H / (2r^2(\gamma_1 - \gamma_i))$$

式中, t 为时间 (s); μ 为液体分子动力粘度 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$); H 为夹杂上浮距离 (m); r 为夹杂半径, $r \leq 0.05 \text{ mm}$; γ_1 为金属液重度, N/m^3 ; γ_i 为夹杂重度, N/m^3 。

若夹杂上浮时间大于金属液凝固时间, 则夹杂将滞留于工件部位。

3. 冷隔

在充型过程中, 当液态金属所有前沿单元的固相率均达到临界固相率时, 则金属液停止流动, 铸件产生冷隔。铸钢件的临界固相率为 0.67 左右, 而铝合金的临界固相率可取 0.45 左右。数值计算过程中, 当计算单元固相率大于临界固相率时, 置其为固壁单元, 即设其流动速度为零, 但比定压热容和热导率值仍采用金属的计算公式。当温度升高使金属单元固相率变得小于临界固相率时, 则发生重熔现象, 计算时需重新置其为流体单元。固相率计算可以利用相图中温度与固相率的关系求出, 假设其为线性关系, 则有:

$$f_s = 1 \quad T \leq T_s \quad (3-43)$$

$$f_s = (T_1 - T) / (T_1 - T_s) \quad T_s < T < T_1 \quad (3-44)$$

$$f_s = 0 \quad T \geq T_1 \quad (3-45)$$

式中, T_1 为液相线温度; T_s 为固相线温度。

式(3-43)~式(3-45)在凝固潜热用等价比热法处理时采用,当凝固潜热用温度回复法处理时,固相率计算采用下述公式

$$f_s = \Sigma \Delta f_s$$

$$\Delta f_s = c_p \Delta T / L$$

式中, c_p 为金属比定压热容; ΔT 为一个时间步长之后温度的降低值, $\Delta T = T_1 - T$; L 为凝固潜热。

4. 缩孔与缩松

由于凝固过程数值模拟技术起步较早,与温度场计算有关的缩孔和缩松缺陷的预报方法也得到充分发展,已知的有十几种之多。下面介绍其中常用的两种方法。

等温曲线法 液态金属凝固过程中,当其固相份数达到临界固相率时,液态金属停止流动,失去补充液态收缩的能力,这种特性也可以应用于铸件收缩缺陷预测中。如果铸件凝固过程中液态金属的等临界固相率形成了闭合曲线,则会在闭合区域内产生收缩缺陷。等温曲线法预测收缩缺陷的机理同上。

这种方法简便易行,但有时等临界固相率曲线呈U形而不封闭,实际上补缩困难,用此法无从判断。

临界固相率法 此法不仅取决于合金成分,还与影响凝固形态的工艺因素有关,很难精确测定,一般认为在0.5~0.8之间,铸钢和铸铝可采用预测冷隔缺陷时的推荐值。 G/\sqrt{R} 法是温度梯度法的改良。

G/\sqrt{R} 法

式中, G 为温度梯度 ($^{\circ}\text{C}/\text{cm}$); R 为计算单元的冷却速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。

$$G = \max[(T_i^{t+\Delta t} - T_e^{t+\Delta t})/\Delta L_i]$$

式中, T_e 为计算单元 e 的温度; T_i 为其相邻单元温度; ΔL_i 为 e 单元与 i 单元中心点距离; $t + \Delta t$ 为新时刻。

$$R = (T_e^t - T_e^{t+\Delta t})/\Delta t$$

式中, Δt 为计算时间步长。

G 和 R 的计算是在固相率为1时得到的。也有研究人员指出,取临界固相率时 G 和 R 的计算值可以比较合理地反映液态金属的补缩能力。

该方法的判据为:

$$G/\sqrt{R} \leq K$$

当上式成立时,所包含区域内将产生收缩缺陷。临界值 K 与合金成分有关。对于铸钢件,试验确定 $K = 1^{\circ}\text{C}^{1/2} \cdot \text{min}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

5. 宏观偏析

铸件的宏观偏析分为A偏析和V偏析两种,常见于大型铸件,对铸件质量和使用寿命影响很大。

日本室兰公司制钢所的研究人员曾使用小型钢锭对这两种缺陷的形成规律作过细致的研究,这里引用其部分结论。

A偏析形成的临界条件根据钢种的不同也有所不同,对 $w_C = 0.7\%$ 碳钢,发生A偏析的临界条件为:

$$R^{1.1}\epsilon \leq 8.75$$

式中, R 为凝固速度 (mm/min); ϵ 为冷却速度 ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)。

从实验结果和达西定律出发, 综合考虑各种因素对 V 偏析的影响, 最后找到 V 偏析区域形成条件如下

$$L/H \geq 6$$

L 、 H 的物理意义如图 3-5 所示。公式中凝固速度、冷却速度和固相率份数均可通过凝固过程温度的变化数据计算得到。

3.2.1.10 算例

图 3-6 为铸件充型过程的数值模拟计算结果。图 a 为充型 4.04s 时的结果, 图 b 为充型 9.68s 时的结果。

3.2.2 铸造工艺 CAD

3.2.2.1 铸造工艺 CAD 的特点和内容

铸造工艺 CAD 是利用计算机协助铸造工艺设计者确定铸造方案、分析铸件质量、优化铸造工艺、估计铸造成本及显示并绘制铸造工艺图等, 把计算机的快速、准确与设计人员的思维、综合分析能力结合起来, 可以加快设计进程, 提高设计质量和效率, 加速产品的更新换代, 提高产品的竞争能力。

与传统的铸造工艺设计方法相比, 借助计算机进行铸造工艺设计有如下特点:

- 1) 计算准确、快速, 消除了人为的计算误差。
- 2) 可同时对几个不同的工艺方案进行设计和比较, 从中找出最佳的方案。
- 3) 能够储存并系统利用铸造工作者的经验, 使得使用者不论其经验丰富与否都能设计出较为合理的铸造工艺。

4) 对系列产品, 能够做到参数化设计, 提高设计效率。

5) 计算结果能够形成工艺图和工艺卡等技术文件。

铸造工艺 CAD 的内容如下:

1. 工艺设计与计算

这部分内容包括大量的工艺选择和计算。

- 1) 工艺设计内容及工艺方案确定。
- 2) 工艺设计主要参数有: ①铸件线收缩率。②机械加工余量。③铸孔最小尺寸。④工艺补正量。⑤造型斜度。⑥分型负数。
- 3) 模型及芯盒设计: ①模型种类。②芯盒结构。③芯头尺寸间隙和减量。④芯头斜度。
- 4) 冒口设计参数: ①常用冒口尺寸比例。②典型件冒口补缩距离。③冒口延续度。④模数热节圆计算。⑤冒口尺寸重量模数。⑥铸件收得率。⑦冒口增肉。⑧保温冒口选取。
- 5) 浇注系统设计: ①浇注速度流量计算。②浇口截面计算。③浇注系统设置。④浇注温度。⑤冒口补浇工艺。
- 6) 冷铁及收缩筋: ①外冷铁计算。②通用外冷铁。③专用外冷铁。④内冷铁计算。
- 7) 铸件压铁起吊力: ①压铁重量。②去压铁时间。③起吊力计算。④吊轴标准。
- 8) 铸件清理: ①铸件的保温时间。②冒口的切割。③铸件热处理工艺。
- 9) 铸造工装: ①造型机、标准砂箱规格。②机器造型吃砂量。

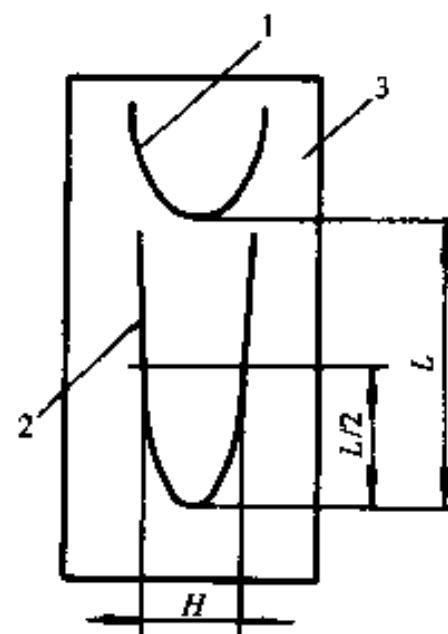


图 3-5 V 偏析预测判据
1— $F_s=0.35$ 2— $f_s=0.67$
3—铜锭

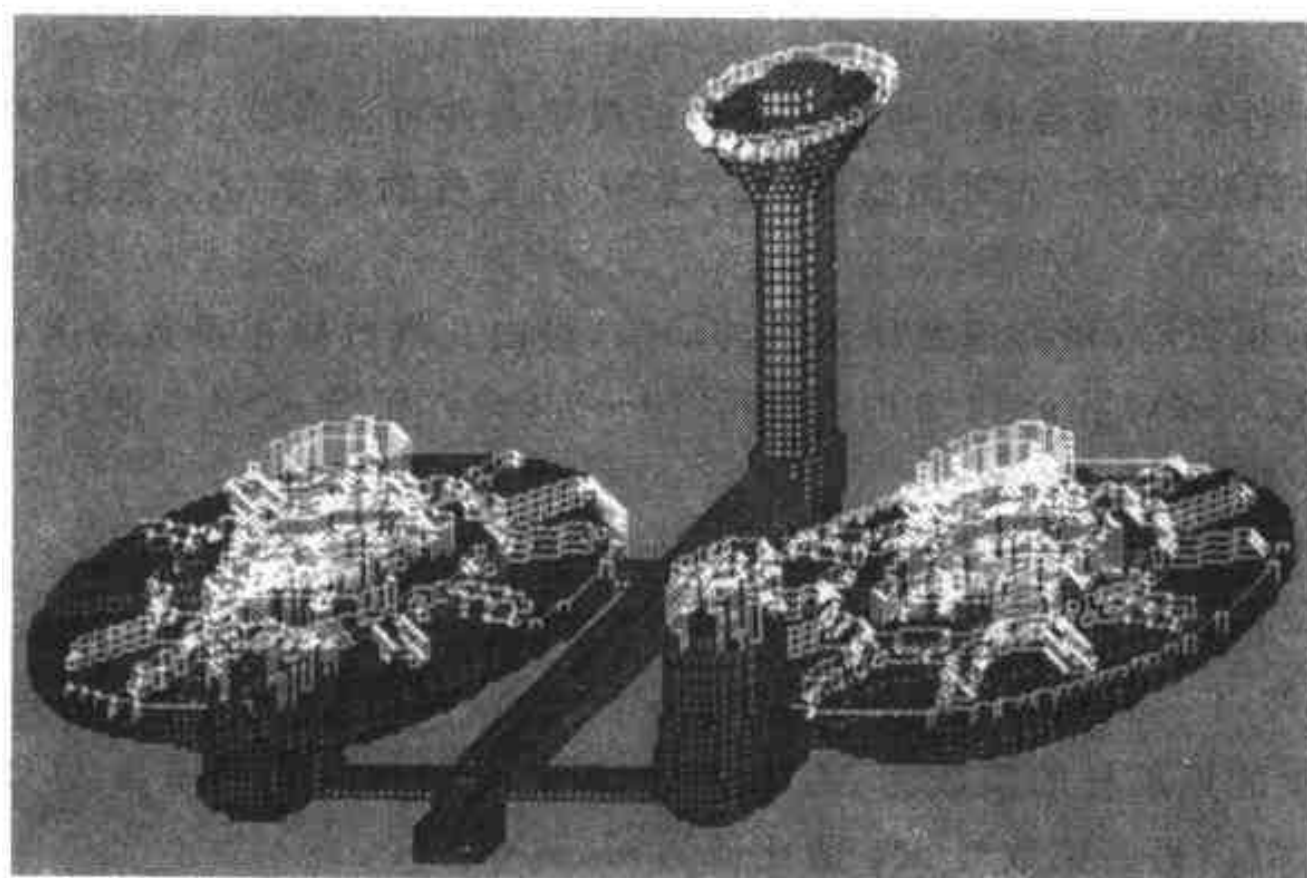
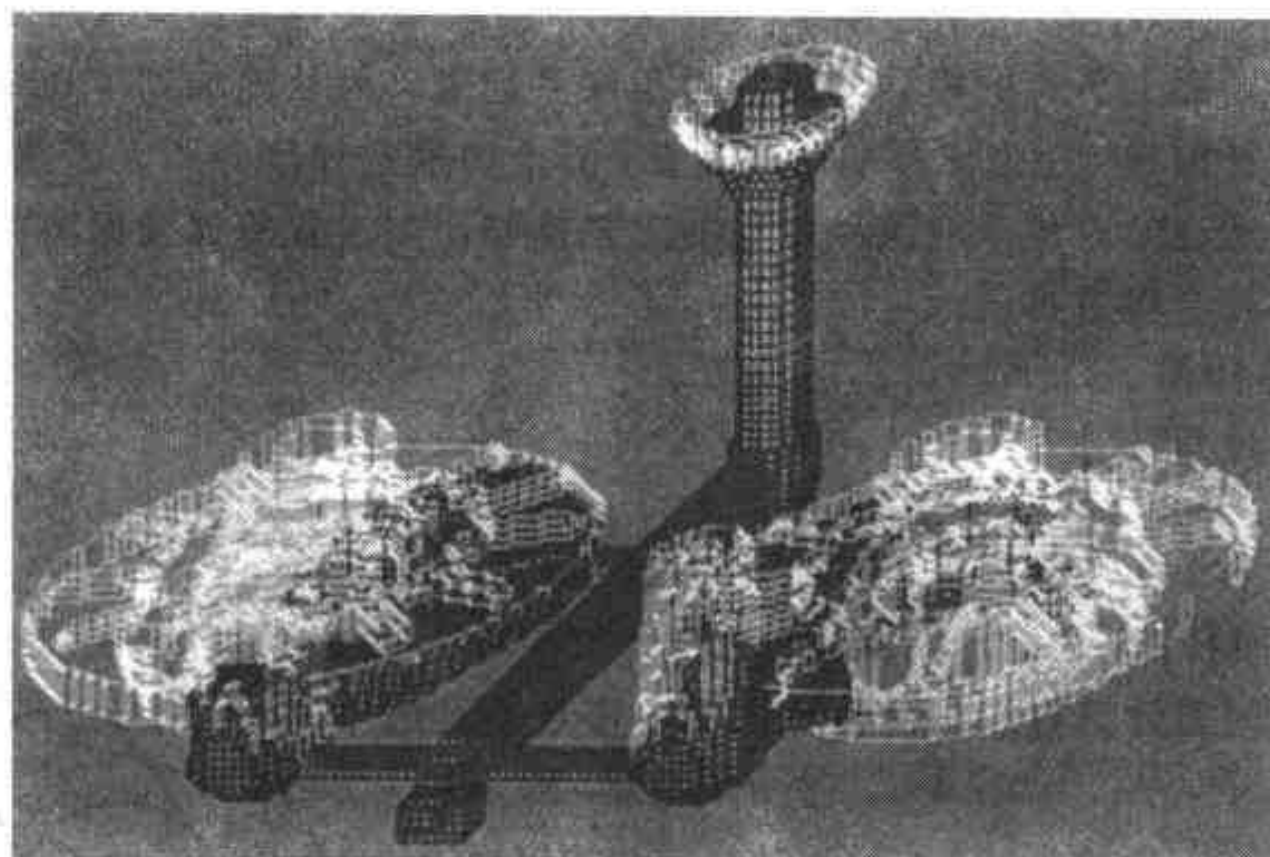


图 3-6 铸件三维剖分结果及充型过程模拟结果

10) 原辅材料：①造型用砂。②粘结剂。③涂料。

2. 工艺文件的设计与绘制

- 1) 铸造工艺卡的设计与绘制。
- 2) 铸件检验卡的设计与绘制。
- 3) 铸造工艺图的绘制。
- 4) 铸件毛坯图的绘制。

3.2.2.2 工艺计算

由上一小节可以看到，铸造工艺 CAD 的内容十分丰富，限于篇幅问题，不能逐一详细介绍，在此只介绍铸钢件工艺设计中凝固补缩工艺参数的计算。

在铸钢工艺设计中，凝固补缩工艺的确定是最重要的环节之一。补缩系统设计方法中，最简单的为经验法。更科学的为梯度法，即补缩参数沿补缩方向保持一定的梯度。梯度可谓温度梯度、凝固时间梯度和模数梯度。在本小节中，采用模数梯度法，引入等效模数（即凝固

模数)的概念,将断面上各点的模数与凝固进程联系起来,而从冷端到冒口端的不同断面的中心点的连线即为补缩通道。为使补缩通道通畅,其上的模数梯度必须大于或等于某临界值。在几何模数梯度不适当时,应采取某种定量的工艺措施,如设置冷铁或保温补贴等,以保证等效模数的变化率符合模数梯度值。

1. 凝固模数的计算

(1) 矩形杆件模数计算

$$M_G = \frac{2abx}{(b+2x)(a+b)}$$

式中, a 为矩形断面长; b 为矩形断面宽; x 为计算点沿中心线到边缘的距离。

对于杆件,有时需计算杆端头激冷范围内的模数。设矩形杆件断面边长比 $n=b/a$, $1 \leq n \leq 5$, 激冷端范围: $X_m = na / (0.368n + 0.158)$, 在与断面距离 $x \leq X_m$ 时, x 点的模数 M_x 为:

$$M_x = nax \times \frac{(0.08e^{2.414/(6.5-n)} + 1.006)}{2(n+1)x + na}$$

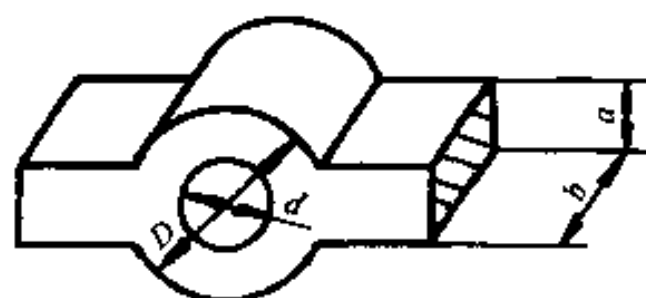


图 3-7 T形连接

(2) 圆筒与杆件的 T 形连接 带孔且无台的横梁构件可视为圆筒与矩形杆的 T 形连接,如图 3-7 所示。计算模数时,先算出圆筒的模数 M_1 和杆件的模数 M_2 ,然后再按 T 形结构计算出热节点的模数。

计算圆筒体的模数时,需考虑封闭内孔的影响,设内孔模数修正系数为 K ,内孔直径与筒壁厚之比 $n=2d/(D-d)$,当 $n \leq 4.5$ 时, $K=1.19 \sim 0.042n$,而当 $n > 4.5$ 时, $K=1$ 。

中心截面最大模数 M_1 为:

$$M_1 = (D-d)K / (2(D-d+2b)) \quad \text{当 } b \leq 2.5(D-d) \text{ 时}$$

$$M_1 = 1.2(D-d)x / (D-d+4x) \quad \text{当 } b > 2.5(D-d), x \leq 1.25(D-d) \text{ 时}$$

$$M_1 = (D-d)K/4 \quad \text{当 } b > 2.5(D-d), x > 1.25(D-d) \text{ 时}$$

与圆筒相连接的矩形杆的模数为 M_2 ,计算 T 形复合结构的最大模数 M_G 时,先取 M_1 与 M_2 中的较大值为 M_{\pm} ,另一模数与 M_{\pm} 的比值为 m ,则有:

$$M_G = (6m^2 + 21m + 1)M_{\pm} / (22m + 1)$$

(3) 平板边缘及角模数的计算 当板的宽厚比 $c/a > 5$, 长厚比 $b/a > 5$ 时为大平板,平板内最大模数为 $a/2$ 。当平板内任意一点的距离 $x \leq 2.5a$, 为边缘激冷范围,其模数按下式计算:

$$M_G = 1.2ax / (a + 2x)$$

L 形结构则用角模数修正系数: $K' = K - (k-1) * \alpha / 180^\circ$, K 为封闭内孔的模数修正系数, α 为开放角度 ($0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$)。

2. 临界模数梯度值计算

根据大量的生产及实验数据,通过分析整理建立的临界梯度值 K_p 的计算方程为:

$$K_p = ae^{bm}$$

a 的取值为:	0.02	垂直补缩杆
	0.025	水平补缩杆
	0.05	水平补缩板
	0.04	垂直补缩板

0.02~0.05 杆板之间的其它件

b 的取值为: 0.0274

3. 工艺模数和等效模数

工艺模数是补缩通道中各点按定向凝固和模数梯度值要求所得出的理想模数。如一个补缩通道的冷端点的模数为 M_1 , 在模数梯度值 K_{pi} 的范围内任一点 i 与冷端点的补缩距离为 L , 则 i 点的工艺模数 M_i 为:

$$M_i = M_1 + LK_{pi}$$

在补缩系统中, 当铸件原有的几何模数分布与工艺模数要求不一致时, 需施以不同的工艺措施, 如放置外冷铁和保温补贴等, 以改变局部的凝固时间, 这时铸件实际具有的模数称为凝固模数或等效模数。

(1) 放置外冷铁时的等效模数 当外冷铁厚度相当于铸件的几何模数时, 放置外冷铁部位的补缩通道上相应点的等效模数可按下式计算:

$$M_w = (\delta_w^a + c)M_G / (bS_w + \delta_w^a + c)$$

式中, M_w 为有外冷铁的等效模数 (cm); S_w 为外冷铁激冷面积与铸件总散热面积之比; δ_w 为外冷铁的挂砂厚度 (mm)。

挂铬铁矿砂: a 为 0.6~1.3; b 为 12~30; c 为 4~12。

挂硅砂时: a 为 0.1~1.0; b 为 0.4~6; c 为 0.15~2。

若使铸件在外冷铁作用下的等效模数等于工艺模数, 即 $M_w = M_i$ 。

$$M_i = (\delta_w^a + c)M_G / (bS_w + \delta_w^a + c)$$

进一步可推导出挂砂层厚度:

$$\delta_w = [bM_iS_R / (M_G - M_i)S_i - c]^{1/a}$$

外冷铁面积为:

$$S_R = (\delta_w^a + c)(M_G - M_i) \times S_i / (bM_i)$$

(2) 放置内冷铁时的等效模数

$$M_N = M_G - 128.2G_N / f_N S_N$$

式中, M_N 为有内冷铁时的等效模数 (cm); G_N 为内冷铁重量 (kg); S_N 为铸件的散热面积 (cm²); f_N 为内冷铁系数, 当采用焊合内冷铁时, $f_N = 0.0203(T - 1492)^{0.42}$, T 为浇注温度。

(3) 保温补贴的等效模数 保温补贴的模数增大系数 E 为:

$$E = 1 + ae^{-bM/8}$$

系数 a 为 0.4~0.9 时, 保温补贴部位的等效模数之比:

$$M_w = M_G / (1 - 1/E) \times S_b$$

式中, S_b 为补贴面积与该部位散热总面积之比。

4. 三次方程法冒口计算

根据著名的 Chvorinov 法则, 根据冒口满足铸件被补缩部位及其本身的收缩的充分必要条件, 可推导出用于冒口计算的三次方程:

$$D^3 - aM_iD^2 - bV_c = 0$$

其中的系数 a 及 b 可由铸件材质、冒口的形状、保温材料的特性及浇注条件等决定。常用冒口形状的系数 a 、 b 值为:

(1) 圆柱形明冒口

$$a = N(1 + 4g)(1 + \beta)/(gE)$$

$$b = 1.2732\beta/g$$

(2) 长圆形明冒口

$$a = N(g_2 - 0.2146 + 1.1416g_1 + 2g_1g_2)(1 + \beta)/((g_2 - 0.2146)g_1E)$$

$$b = \beta/((g_2 - 0.2146)g_1)$$

(3) 矩形明冒口

$$a = N(g_2(g_1 + 1) + g_1(g_2 + 2)) \times (1 + \beta)/(g_1g_2E)$$

$$b = \beta/(g_1g_2)$$

式中, N 为补缩安全系数; $g=H/D$, 为圆形冒口的高径比; $g_1=H/D$, 为矩形、长圆形冒口的高宽比; $g_2=B/D$, 矩形、长圆形冒口的长宽比; β 为铸件金属的凝固收缩值; E 为保温冒口的模数增大系数。

3.2.3 铸件微观组织模拟

铸件质量的好坏, 力学性能的优劣, 取决于铸件在凝固期间所形成的微观组织。有效地控制铸件微观组织的形成过程, 使其达到理想的力学性能, 是获得优质铸件的关键。

铸件充型、凝固过程数值模拟技术的成功应用, 带动了铸件微观组织形成过程数值模拟应用技术的研究。目前, 金属凝固过程微观组织数值模拟的方法主要有: 确定性方法 (Deterministic Method)、随机方法 (Stochastic Method) 及相场法 (Phase-field Method)。下面介绍随机方法。

随机方法考虑了晶粒生长过程中的随机过程, 采用概率理论研究晶粒的形核和长大, 适用于柱状晶组织的形成及生长、柱状晶向等轴晶的转变等过程的数值模拟。

3.2.3.1 宏/微观耦合模型

为了分析铸件微观组织形成过程, 必须求出铸件的温度分布及溶质溶度分布。关于温度分布已经在前面介绍过。

1. 溶质传输模型

忽略溶质在固相中的扩散和由液相流动引起的溶质传输, 并假设微元体内液相成分均匀, 则微元体内的溶质传输方程为:

$$\frac{\partial(\rho C)}{\partial t} = \nabla[\rho_l D_l \nabla(F_l C_l)] \quad (3-46)$$

$$\rho C = \int_0^1 \rho_l C_l dF_l + F_s \rho_s C_s \quad (3-47)$$

式中, ρ 为微元体平均密度 (kg/m^3); C 为微元体内溶质平均浓度; ρ_l 、 ρ_s 分别为液相和固相密度 (kg/m^3); C_l 、 C_s 为微元体内溶质在液相和固相中的平均浓度; F_l 、 F_s 为液相率和固相率, $F_l + F_s = 1$; D_l 为液相扩散系数 (m^2/s)。

将式 (3-47) 代入式 (3-46), 整理后得二元合金凝固过程溶质传输偏微分方程

$$F_l \frac{\partial(\rho_l C_l)}{\partial t} = \nabla[\rho_l D_l \nabla(F_l C_l)] + (\rho_l C_s + \rho_s C_l) \frac{\partial F_l}{\partial t}$$

2. 晶粒形核和生长模型

(1) 非均质形核模型 晶核数量主要取决于凝固过程中的过冷度及活性质点的数量, 其

值可按下式计算:

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T')} d\Delta T'$$

$$\frac{dn}{d(\Delta T)} = \frac{N_s}{\sqrt{2\pi}\Delta T_\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T - \Delta T_N}{\Delta T_\sigma}\right)^2\right]$$

式中, ΔT 为过冷度(K); $\Delta T = T_l - T$, T_l 为液相线温度; $n(\Delta T)$ 为 ΔT 时形成晶核密度(个/ m^3); N_s 为总的初始形核质点密度(个/ m^3); ΔT_N 、 ΔT_σ 为 $dn/d(\Delta T) - \Delta T$ 正态分布曲线中心的过冷度和标准差(K)。

根据连续形核模型, 形核速率 $dn/d(\Delta T)$ 、晶核密度 $n(\Delta T)$ 与过冷度的关系如图 3-8 所示。 $dn/d(\Delta T)$ 相对于 ΔT 呈正态分布; 当 $\Delta T < \Delta T_N$ 时, $dn/d(\Delta T)$ 随 ΔT 的增大而非线性迅速增大; $\Delta T > \Delta T_N$ 时, $dn/d(\Delta T)$ 随 ΔT 的增大而非线性急剧减小; 当 $\Delta T = \Delta T_N$ 时, $dn/d(\Delta T)$ 达到最大值。 ΔT 时的晶核累积密度 $n(\Delta T)$ 则为 $dn/d(\Delta T)$ 在 $0 \sim \Delta T$ 区域的定积分值, 即正态曲线在 $0 \sim \Delta T$ 区间所包含的面积值, 因此 $n(\Delta T)$ 随 ΔT 的增大而以慢→快→慢地持续增大, 若 ΔT 足够大, 则晶核密度可最终达到总的初始形核质点密度 N_s 。但在实际铸造条件下所能达

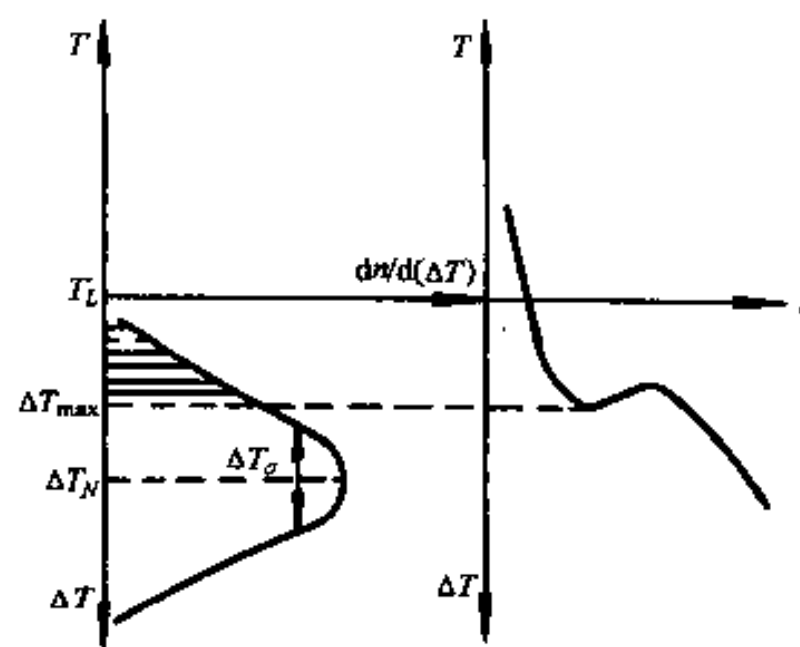


图 3-8 形核速率、晶核密度与过冷度的关系

到的凝固过冷度远小于 N_s 所对应的过冷度值, 且在凝固过程中由于结晶潜热的释放及晶体生长所导致的晶核重熔和并聚现象, 因此晶核密度将远小于 N_s 。

(2) 枝晶尖端生长动力学模型 在枝晶生长过程中, 由于枝晶尖端液相中溶质的富集, 使成分过冷度发生变化, 导致枝晶尖端生长速度也随之改变。过冷度与枝晶尖端生长速度的关系通常采用 KGT 模型描述计算。KGT 模型是针对二元合金的。对于多元合金, 如 Ni-基合金, 其中的高含量组元 (Cr、Mo、Al 等) 都会对过冷度产生影响。对于这类多元合金, 可以把它分解成多个 Ni-i 二元合金 (例如 Ni-Cr、Ni-Mo 和 Ni-Al 合金), 每个二元系合金的液相线斜率 m_i 和溶质 i 的平衡分配系数 K_{α_i} 可由实验或二元合金相图求得。采用等当量法, 即可计算多元合金的溶质初始浓度 $C_0 = \sum C_i$, 液相线斜率 $m = \sum (m_i C_i) / C_0$, 以及溶质平衡系数 $K_0 = \sum (m_i C_i K_{\alpha_i}) / (m C_0)$ 。由此得到扩展的多元合金 KGT 模型为:

$$\Delta T = \Delta T_T + \Delta T_C + \Delta T_R \quad (3-48)$$

$$\Omega = I_v(P_C) \quad (3-49)$$

$$R = 2\pi \sqrt{\frac{\Gamma}{m G_c \zeta_c - G}} \quad (3-50)$$

$$V = 2DP_C/R \quad (3-51)$$

式中, ΔT 为枝晶尖端液相过冷度 (K); ΔT_T 为热过冷度 (K); ΔT_C 为成分过冷度 (K)

$$\Delta T_C = m C_0 \left[1 - \frac{1}{1 - \Omega(1 - K_0)} \right]$$

ΔT_R 为曲率过冷度 (K); $\Delta T_R = 2\Gamma/R$; Ω 为枝晶尖端液相中溶质过饱和度, $\Omega = (C^* - C_0) / [C^* (1 - K_0)]$; C^* 为枝晶尖端液相中溶质浓度, 其值与微元体内液相中平均溶质浓度 C_l 有关; P_C

为溶质浓度的贝克列(Peclet)数; $I_V(P_C)$ 为 P_C 的伊万卓夫(Ivantsov)函数,一阶 $I_V(P_C)=P_C/(1+P_C)$; R 为枝晶尖端半径; Γ 为Gibbs-Thompson系数($\text{m} \cdot \text{K}$); m 为液相线斜度($\text{K}/\text{wt}\%$); G_C 为枝晶尖端液相中溶质浓度梯度($\text{wt}\%/\text{m}$); G 为枝晶尖端液相温度梯度(K/m); ζ_C 为 P_C 的函数,低生长速度时, $\zeta_C \approx 1$; D 为液相中溶质扩散系数(m^2/s); V 为枝晶尖端生长速度(m/s)。

用迭代法解方程组(3-48)~(3-51),即可求得任一时刻的枝晶尖端的半径、生长速度和过冷度。

(3) 柱状晶向等轴晶转变数学模型 当柱状晶生长前沿等轴状枝晶的体积率达到0.49时,或者在柱状生长前沿有尺寸足以阻断柱状晶继续生长的较大等轴晶时,晶粒生长将完全由柱状晶生长方式转为等轴晶生长方式。由此导出柱状晶生长向等轴晶生长转变的判据为:

$$R_c \geq 0.49/[F_i n(\Delta T)]^{1/3}$$

式中, R_c 为柱状晶结晶前沿等轴晶半径; F_i 为等轴晶内固相体积率; $n(\Delta T)$ 为 ΔT 时柱状晶前沿等轴晶核密度。

柱状晶前沿开始出现等轴晶的条件为:

$$G < \eta n^{1/3} \left[1 - \left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_N} \right)^3 \right] \left[-8\Gamma m(1-K_0) \frac{C_0 V}{D} \right]^{1/2}$$

式中, G 为柱状晶生长前沿枝晶尖端温度梯度; η 为与合金有关的柱状晶向等轴晶转变系数; N 为柱状晶前沿液相中晶核密度; ΔT_0 为柱状晶前沿液相过冷度。

因此,固相率 F_i 是将宏观传热、传质模型与微观形核、生长模型连接成整体的桥梁。对于柱状晶生长方式,固相率的变化 ΔF_i 可通过Scheil公式求解;对于等轴晶生长方式, ΔF_i 与形核密度、晶粒尺寸及等轴内固相体积率 F_i 有关。

3. Cellular Automate模型

Cellular Automate模型是在60年代模拟物理现象时引进的。该模型将铸件划分为若干正方形网格,将每个正方形网格又分成若干较小长度的等距离的微观点阵,如图3-9所示。正方形网格为宏观单元,是计算铸件宏观温度场和溶质浓度场的最小计算空间单位。每个宏观单元中的点阵用于描述宏观单元内的形核和生长过程。以某一宏观单元为例,在凝固过程中,若该单元的温度高于合金的液相线,则该单元的形核概率 $P_i=0$;若该单元的温度低于合金的液相线,则该单元的形核概率 $P_i>0$ 。一旦该单元温度低于合金的液相线温度,在一定过冷度 ΔT 下,形核数量为:

$$\Delta n = n[\Delta T + \delta(\Delta T)] - n(\Delta T)$$

Δn 将在单元的微观点阵中随机分配。至于每个点上是否形核,主要取决于 $P_i = \Delta n V_{CA}$,其中 V_{CA} 代表每个晶核微观点在单元内的体积率。使用蒙特卡洛法为每个微观点产生一个随机数 r ($0 < r < 1$),只有形核概率 $P_i \geq r$ 的微观点才能够形核,由液态转为固态。图3-10为由此而得到的活性晶核的随机分布情况。

4. 晶核生长处理方法

1) 资料表明,初始形核质点的半径约为 $0.1 \sim 2 \mu\text{m}$,取晶核初始半径为 $1 \mu\text{m}$ 。

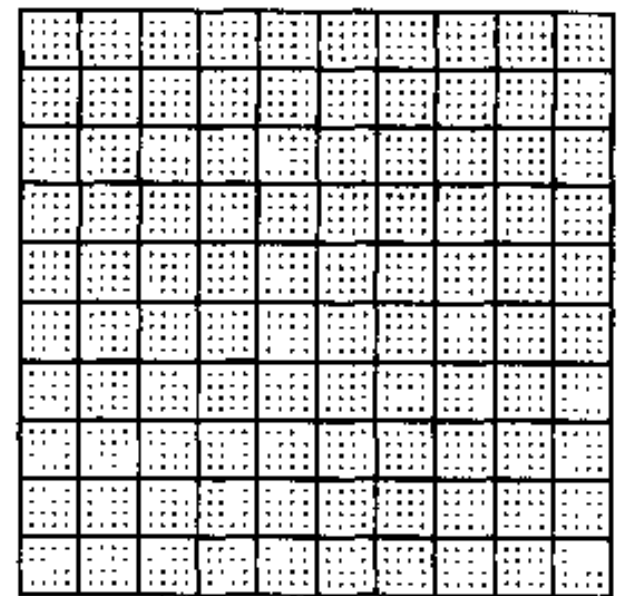


图 3-9 微观点阵

2) 采用枝晶尖端生长数学模型计算柱状晶和等轴晶的生长速度和形态变化。

3) 对于柱状晶组织, 其一次轴长度为: $L_{com} = \int_0^t V dt$, t 为凝固时间。

4) 对于等轴晶组织, 其生长半径为: $R_e = \int_0^t V dt$ 。

5) 在晶核生长过程中, 它将逐步向周围的液相微观点延伸, 并不断吞并这些微观点, 被吞并的微观点由液态转为固态, 并与母晶核保持相同取向; 当母晶核在生长界面与其它生长着的晶核相遇时, 则在相遇处停止生长; 若母晶核在其整个生长界面上处处与其它固态组织接触, 或其所处的宏观单元的温度降至固相线以下时, 该母晶核便停止生长。

6) $\langle 100 \rangle$ 晶向是立方晶系生长的择优晶向, 当 $\langle 100 \rangle$ 晶向与热流方向反向时, 该晶向成为晶体生长的最优方向。对于柱状晶生长方式, 由于热流方向垂直于型壁向外, 因此, 只有垂直于型壁向里的 $\langle 100 \rangle$ 晶向才成为柱状晶的最优生长方式。

7) 当柱状晶生长前沿等轴晶的固相率或生长半径达到临界值时, 生长方式由柱状晶转变为等轴晶生长。

图 3-11 为 Ni-基合金叶片铸件的微观组织模拟结果。

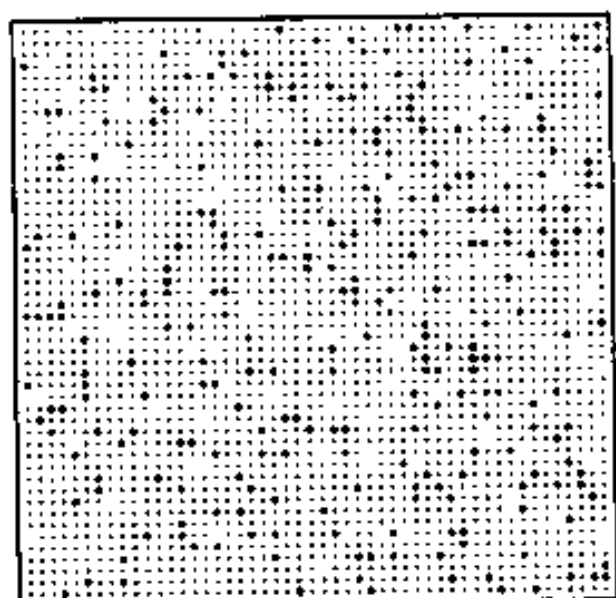


图 3-10 活性晶核的随机分布



图 3-11 Ni-基合金叶片铸件微观组织模拟结果

3.3 数值模拟技术在焊接中的应用

焊接是一个牵涉到电弧物理、传热、冶金和力学的复杂过程。焊接现象包括焊接时的电磁、传热过程、金属的熔化和凝固、冷却时的相变、焊接应力及变形等等, 要得到高质量的焊接结构必须要控制这些因素。采用计算机数值模拟技术对焊接工艺过程进行计算分析, 确定焊接各种结构和材料的最佳工艺方法及工艺参数设计, 是一种新的工艺试验方法, 利用数值计算技术在计算机上进行大量的工艺试验, 大大节省了人力、物力和时间, 具有很好的经济性。因此从 20 世纪 70 年代以来, 数值模拟技术已成为焊接技术领域内的技术前沿, 国内外许多学者都对该技术在焊接中的应用进行了研究。有关焊接数值模拟技术的学术交流也十分活跃。目前, 焊接工艺过程数值模拟技术已遍及焊接的各个领域, 主要研究内容有:

- 1) 焊接热传导分析。
- 2) 焊接熔池流体动力学。
- 3) 电弧物理。
- 4) 焊接冶金和焊接接头组织性能的预测。
- 5) 焊接应力与变形。

6) 焊接过程中的氢扩散。

7) 特殊焊接过程的数值分析, 如电阻点焊、陶瓷金属连接、激光焊接、摩擦焊接和瞬态液相焊接等。

8) 焊接接头的力学行为。

表 3-1 为焊接数值模拟中常遇到的问题、物理现象和数值分析方法。

表 3-1 焊接数值模拟的问题和数值方法

问 题	物理现象	数值方法	问 题	物理现象	数值方法
热 源	电 磁	差分法	残余应力	扩散	
熔 池	传热与传质	有限元法	焊接变形	弹塑性、蠕变	
凝 固	相 变	数值积分法	裂 缝	失 效	
金相组织	化学反应	蒙特卡洛法	焊接结构强度	断 裂	

以下就上述焊接过程数值模拟技术中的部分内容和研究方法分别给予介绍。

3.3.1 焊接热传导分析

3.3.1.1 研究现状

焊接热过程是影响焊接质量和生产率的主要因素之一。焊接热过程的准确计算和测定, 可以说是焊接冶金分析、焊接应力变形分析和对焊接过程进行控制的前提。

经过许多研究人员的努力, 进入 20 世纪 90 年代后, 焊接热传导分析可以说已达到较成熟的地步。随着计算机速度和容量的增长, 三维瞬态焊接温度场的数值分析已不存在困难。虽然差分法和有限元法都可用于焊接热传导的分析, 但目前有限元法的应用有越来越广的趋势。其原因是有限元法更能灵活地满足复杂焊接现象的各种边界条件。在热传导问题中有限元法得到广泛应用的另一个重要原因是: 在实际应用中, 温度场的计算往往服务于热应力场的计算, 例如计算焊接热应力应变的动态过程及最后的残余应力和变形, 首先就是必须进行焊接传热分析。在这种情况下, 采用有限元法便把两者统一起来。

关于焊接热传导的数值分析, 目前尚存在的一些主要问题是:

(1) 材料的热物性参数不足 许多材料的热物性 (比热容、热导率等) 数据在高温特别是在接近熔化态时还是空白, 某些材料仅有室温数据, 这就给非线性计算带来困难。

(2) 热源分布参数的确定 电弧的有效加热半径及热量分布形式与焊接方法和参数有关, 目前也缺乏系统而准确的资料。电弧热流通常采用高斯分布的形式, 对于角焊缝、坡口焊缝、多层焊缝等的热源分布形式也需进一步研究。

(3) 电弧功率有效利用系数的选取 电弧功率有效利用系数的正确选取也是提高计算精度的问题之一, 必须根据实际焊接情况慎重选择。

(4) 焊接熔池的处理 上述焊接热传导分析基于固体导热微分方程式, 没有考虑焊接熔池内部液态金属的对流传热特点。通常这种方法对于焊接冶金分析及焊接力学行为的分析已有足够的精度, 但如要精确的研究熔池的形状和尺寸以及熔池内部的传热过程, 必须进行焊接熔池中的流体动力学状态的分析。

3.3.1.2 数学模型和求解方法

1. 有限元基本方程

焊接温度场分析属于典型的非线性瞬态热传导问题。

非线性瞬态热传导问题的控制方程为：

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \bar{Q}$$

式中， ρ 、 c 和 λ 为材料的密度、比热容和热导率，它们都是温度的函数； \bar{Q} 为内热源强度。

焊接过程通常遇到的是热流和换热边界条件，即第二类和第三类边界条件。

在采用有限元法求解焊接热传导问题时，通常把一个求解微分方程问题转化为求泛函极值的变分问题，然后对计算域进行有限元分割，把变分问题近似地表达成线性方程组，求解该方程组便可得到热传导问题的解。但是对非线性问题有时很难找到相应的泛函，此时，可以采用加权残数法。

首先对计算的空间域进行离散，记形函数为 $[N]$ ，则单元内温度可表示为：

$$T = [N]\{T\}^e$$

采用加列金的加权残数法可求得如下方程：

$$[K]\{T\} + [C] \frac{\partial}{\partial t} \{T\} = \{P\} \quad (3-52)$$

$$[K] = \Sigma([K_1]^e + [K_2]^e)$$

$$[C] = \Sigma[C]^e$$

$$\{P\} = \Sigma(\{P_1\}^e + \{P_2\}^e + \{P_3\}^e)$$

$$[K_1]^e = \int_{\Delta v} \left(\frac{\partial [N]^T}{\partial x} \lambda \frac{\partial [N]}{\partial x} + \frac{\partial [N]^T}{\partial y} \lambda \frac{\partial [N]}{\partial y} + \frac{\partial [N]^T}{\partial z} \lambda \frac{\partial [N]}{\partial z} \right) + dV$$

$$[K_2]^e = \int_{\Delta s} [N]^T \alpha [N] dS$$

$$[C]^e = \int_{\Delta v} [N]^T \rho c [N] dV$$

$$\{P_1\}^e = \int_{\Delta v} [N]^T \bar{Q} dV$$

$$\{P_2\}^e = \int_{\Delta s} [N]^T q dS$$

$$\{P_3\}^e = \int_{\Delta s} [N]^T \alpha T_a dS$$

式(3-52)中的 $[K]$ 、 $[C]$ 、 $\{P\}$ 包括了 α 、 ρ 、 c 、 q 等，都是温度的函数，因而该式是一个非线性的微分方程组。这里采用加权差分法来对时间域进行离散。在每个时间步长 Δt 内，对 $(t+\Delta t)$ 点建立差分格式， θ 是加权系数 ($0 \leq \theta \leq 1$)。由泰勒级数展开式可得：

$$\{T\}^{(t+\theta\Delta t)} = \theta \{T\}^{(t+\Delta t)} + (1-\theta) \{T\}^{(t)} + 0(\Delta t^2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \{T\}^{(t+\theta\Delta t)} = \frac{1}{\Delta t} (\{T\}^{(t+\Delta t)} - \{T\}^{(t)}) + 0(\Delta t^2)$$

将上述二式代入式(3-52)，并对 $\{P\}$ 作同样展开可得：

$$\left(\frac{1}{\Delta t} [C^\theta] + \theta [K^\theta] \right) \{T\}^{(t+\theta\Delta t)} = \left(\frac{1}{\Delta t} [C^\theta] - (1-\theta) [K^\theta] \right) \{T\}^{(t)} + \theta \{P\}^{(t+\theta\Delta t)} + (1-\theta) \{P\}^{(t)} \quad (3-53)$$

式中，上角标 θ 表示矩阵 $[C^\theta]$ 、 $[K^\theta]$ 是根据 $t+\theta\Delta t$ 时刻的温度 $T^{(t+\theta\Delta t)}$ 代入而计算出来的，经过以上步骤，非线性微分方程组就被化为非线性的代数方程组。

在式(3-53)中 θ 取不同的值，可得不同的差分格式：

$$\theta=1 \quad \text{向后差分格式}$$

$$\theta = \frac{1}{2} \quad \text{Crank-Nicolson 格式}$$

$$\theta = \frac{2}{3} \quad \text{加列金格式}$$

通常向后差分格式稳定而且不振荡, 计算时间步长可取得较大, 但计算精度稍差。C-N 格式虽然是稳定的, 计算精度也比较高, 但要求 Δt 值取得比较小, 否则就容易出现衰减振荡。加列金格式介于两者之间, 也是常用的差分格式之一。

式 (3-53) 可以简写为:

$$[H]\{T\} = \{F\}$$

式中, $[H]$ 、 $\{F\}$ 为温度 T 的函数。

2. 非线性方程组解法

求解上述非线性方程组有许多方法, 如直接迭代法、牛顿—拉斐逊法、增量法、极小化法以及变步长外推法等。直接迭代法的优点是简单易行, 它的基本思想是以第 r 次迭代的近似值代到 $[H]$ 、 $\{F\}$ 中, 求得第 $r+1$ 次近似值, 即

$$\{T_{r+1}\} = [H(H_r)]^{-1}\{F(T_r)\}$$

迭代过程直至误差 $\Delta\{T_{r+1}\} = \{T_{r+1}\} - \{T_r\}$ 小于容许值为止。变步长外推法的基本思想是拿已知 $t-\Delta t$ 和 t 时刻的温度 $T^{(n-\omega)}$ 和 $T^{(n)}$ 来推算 $T^{(n+\omega)}$, 求得 $[K^\theta]$ 、 $[C^\theta]$ 和 $\{F^\theta\}$, 再由式 (3-53) 直接求得 $T^{(n+\omega)}$ 。该法的优点是不必进行迭代而保证一定的精度。

3. 热源模型的选取

热源模型选取是否适当, 对瞬态焊接温度场的计算精度, 特别是在靠近热源的地方, 有很大的影响。在电弧焊时, 通常采用高斯分布的热源模型, 此时的热流分布为:

$$q(r) = q_m \exp\left(-3 \frac{r^2}{\bar{r}^2}\right)$$

式中, r 为离开热源中心的距离; \bar{r} 为电弧有效加热半径; q_m 为最大比热流。

在表面堆焊时, 可以采用上述表面热源并沿焊接方向连续移动。然而对于有坡口的焊缝或填角焊缝等, 上述高斯模型难以适用, 此时通常假定热量均匀施加在焊缝单元上, 作内部热源处理。由于焊缝是随着电弧的移动逐步填充上去的, 尚未填充部分的单元假定为虚单元。在虚单元中给以极小的热导率值, 直至填充焊缝转化为实单元为止。

4. 网格划分和时间步长

焊接是一个温度随时间和空间都急剧变化的过程, 温度梯度很大。因此在网格划分时在焊缝及其附近要很细密, 而在远离焊缝的地方网格可以分的较粗。在焊接阶段计算时间步长往往需控制在 0.1s 左右, 当焊件冷却到一定温度后, 才可以考虑变步长的方法, 逐步增大时间步长。要获得一个良好的瞬态焊接温度场, 焊缝处的单元网格最好在 2mm 以下。对于三维问题, 过小的时间步长和过密的网格划分势必需要很大的计算机容量和很长的计算时间, 这对于大型的焊接结构就有一定的困难。而一旦在焊缝处加大计算单元的几何尺寸, 计算精度就必然受到影响, 且极易发生“跃阶”现象, 这是解决三维瞬态焊接温度场问题时所需要注意的。

5. 熔化和固态相变潜热

当材料熔化或凝固时, 将伴随着潜热的吸收或释放。固态相变时也有同样现象, 但潜热要比熔化潜热小得多。处理相变潜热可以采用等效热源法、比热容突变法、等温法等。以温

度控制为例。当材料熔化或凝固时,假定此时温度不变,当潜热全部吸收或放出后,温度再继续上升或降低。设熔化潜热为 Q_L , 此时比热容为 c_L , 则令

$$T_L = Q_L / c_L$$

当在加热过程中,某点的温度开始超过熔点 T_m 后,令该点温度 T 仍降为 T_m , 此时 $\Delta T = |T - T_m|$ 。然后进行下一个时间步长的计算。当 ΔT 的积累达到 $\Sigma \Delta T = T_L$ 时,此后潜热的影响结束。该点温度继续上升。凝固时潜热的释放以同样方法处理。

6. 采用集中质量热容矩阵克服“跃阶”现象

瞬态温度场有限元分析中,在开始起步若干时间内,常会发生数值跳跃,又称“跃阶”现象。为克服该现象宜采用集中质量热容矩阵代替前述表示的协调质量热容矩阵 $[C]^e$ 。即把单元质量离散到各个节点上,此时集中质量的单元热容矩阵可表示为

$$[C]^e = \frac{CM_e}{N_e} [I]_{N_e \times N_e}$$

式中, N_e 为单元节点个数; M_e 为单元质量; $[I]_{N_e \times N_e}$ 为 N_e 阶单位阵。也可按其它方式将单元质量热容分配给各个节点。

采用协调质量热容矩阵,要求较细的单元划分。而采用集中质量热容矩阵克服了“跃阶”现象,从而对单元的要求放宽,这就大大有利于三维瞬态焊接温度场的分析计算。

3.3.2 焊接熔池中的流体动力学和传热分析

3.3.2.1 研究现状

前述的焊接热过程研究工作没有考虑焊接熔池内部液态金属的对流传热特点,把固体的导热微分方程式一起用于液态熔池和熔池外部的固体区域,忽视了高温过热液态金属熔池对传热过程的影响,这就对焊缝及其附近热影响区的温度场计算产生一定的误差。

为了克服上述固体热传导数值模拟的缺点,有人提出利用熔池边界作为一个内部条件,通过在热影响区中求解固体导热方程来计算焊接温度的方法,但其成功与否取决于熔合面方程本身的精度。然而,影响焊接熔池形状的因素是很复杂的,它包括表面张力、电磁力、自然对流等,许多学者对此进行了研究。

还有人研究了电弧固定时 TIG 焊接熔池中的流体对流状态。随着电弧加热时间的延长,熔池体积逐步扩大,并同时求解熔池内外的瞬时温度分布,考虑了电磁力、表面张力梯度和自然对流的影响,考察了电弧作用在熔池表面上的热流密度和电流密度大小对流体流动和传热过程的影响。分析结果表明,流体对流对确定熔池中的传热过程和温度分布起着重要作用,对熔池形状和随后的焊缝结晶过程也有明显影响。有的研究结果认为影响熔池流动的主要因素有:电磁力、浮力、表面张力和气动阻力。

从已进行的研究工作中可以看到一个趋势,即同时考虑熔池中液态金属以对流为主的传热和熔池外部固体金属以导热为主的传热过程。

3.3.2.2 数学模型和求解方法

1. 控制方程组

以运动电弧作用下三维 TIG 熔池中的流体动力学状态和传热过程作为数值分析模型。电弧热量使被焊金属熔化并形成熔池。电弧以恒定速度 u_0 沿 ξ 轴移动。根据温度分布,熔池分为前后两部分。在熔池前部,输入的热量大于散失的热量,所以随着电弧的移动,金属不断熔化。在熔池后部,散失的热量多于输入的热量,所以发生凝固。在熔池内部,则因自然对

流、电磁力和表面张力等的驱动，产生流体对流。

在固定坐标系 (ξ, y, z) 中，热能方程为：

$$\rho c \left(\frac{DT}{Dt} + u \frac{\partial T}{\partial \xi} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-54)$$

式中， ρ 为密度； c 为比热容； λ 为热导率； t 为时间； u 、 v 、 w 分别为 ξ 、 y 、 z 方向的速度分量。

方程 (3-54) 是求解区域包括液态熔池和其周围固体金属。在整个求解域内，这是一个对流与传导问题。由于在固体中流体流速等于零，所以实际上在固体内进行的是一个纯导热问题。求解上述方程可得固体与流体中的温度分布，它们在固液界面上自动吻合。

当一个热流密度 $q(r)$ 的热源以恒定速度 u_0 沿 ξ 轴移动，我们可以根据固定坐标系与动坐标系的关系，将 $x = \xi - u_0 t$ 代入式 (3-54) 中，就可完成从固定坐标到以热源中心为坐标原点的移动坐标的转换，其中 x 为所考察的点到热源中心的距离。

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} - u_0 \frac{\partial T}{\partial x} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

在准稳态时，熔池具有恒定的形状并以和电弧相同的速度沿 x 轴移动，此时的热能方程为：

$$\rho c \left((u - u_0) \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3-55)$$

对于熔池中的流体应满足动量方程

$$\rho \left[(u - u_0) \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] = X - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (3-56)$$

$$\rho \left[(u - u_0) \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] = Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (3-57)$$

$$\rho \left[(u - u_0) \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] = Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (3-58)$$

式中， μ 为粘度； p 为压力； X 、 Y 、 Z 分别为体积力在 x 、 y 、 z 方向上的分量。

此外，流场还应满足一个附加的约束条件，即连续性方程：

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3-59)$$

式 (3-55) ~ 式 (3-59) 就是描述运动着的三维熔池中流场与热场的偏微分方程组。

2. 体积力

电弧焊接时，熔池中的体积力包括电磁力和自然对流项：

$$F_b = (j \times B) - \rho g \beta \Delta T$$

它在 x 、 y 、 z 三个方向上的分量分别为：

$$X = (j \times B)_x$$

$$Y = (j \times B)_y$$

$$Z = (j \times B)_z - \rho g \beta \Delta T$$

式中， j 是电流密度； B 是磁感应强度； β 是体积膨胀系数； g 是重力加速度； ΔT 是温差。

3. 边界条件

方程式 (3-55) 的边界条件为：当 $z=0$ 时

$$q(r) = \frac{\eta IU}{2\pi\sigma_q^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right)$$

式中, I 为焊接电流; U 为电弧电压; σ_q 为热流分布参数; r 为离开电弧中心距离。

上式表示热流以高斯函数形式分布输入表面。

在固液界面上, $T = T_m$, T_m 为材料熔点。

$$\text{当 } z=0 \text{ 或 } z=L \text{ 时} \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_0)$$

表示出了厚度为 L 的焊件上下两表面通过对流与辐射向周围环境放热。

$$\text{当 } y=0 \text{ 时} \quad \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

表示所要求解的温度场关于中心平面 ($x-z$) 面对称。

方程 (3-56) ~ 式 (3-59) 的边界条件如下:

在熔合面上和固体中: $u = -u_0$, $v = w = 0$

$$\text{在熔池表面上: } \mu \frac{\partial V}{\partial z} = -\frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}$$

式中, σ 为表面张力。

上述两式说明在溶池表面上, 表面张力梯度与流体的剪应力相平衡。

4. 求解方程

为了求解热能方程式 (3-55), 首先必须计算出流场。而流体速度的三个分量 u 、 v 、 w 受控于动量方程 (3-56) ~ (3-59), 由于压力梯度构成动量方程中的一项, 而又无一个用来求得压力场的明显方程, 所以计算流体速度场的困难在于未知的压力场。压力场间接地通过连续性方程规定, 当正确的压力场代入动量方程时, 所得到的速度场满足连续性方程。

在二维情况下, 通过交叉微分从两个动量方程中消去压力项, 就可导出一个涡度输运方程, 即采用所谓的“流函数/涡度法”。然而该法难以推广到三维的情况, 因为此时流函数并不存在。为此可先假设已知流体速度场, 将三维热能方程转化为离散形式, 然后将连续性方程中的间接信息转换成用于计算压力的一个直接算法, 通过求解动量方程就可以得出流场。

求解控制方程组的数值方法通常采用差分法, 方程组包含有五个变量 (T , u , v , w , p)。在推导离散化公式时, 动量方程中压力的一阶导数和连续性方程中速度的一阶导数有些麻烦。为此必须使用交错的网格来克服这些困难, 即把速度分量 (u , v , w) 放在其它变量 (T , p) 不同的网格上处理。

综上所述, TIG 熔池流体动力学状态及传热过程的运算步骤为:

- 1) 给出一个初始的速度场。
- 2) 计算动量方程的系数, 暂时在动量方程中略去压力梯度项后求解动量方程, 求得一个近似的速度场。
- 3) 将这个近似的速度场代入压力方程, 求解后得到一个近似的压力场。
- 4) 将这个近似的压力场代入动量方程, 求解动量方程, 得到速度场 u^* 、 v^* 、 w^* 。
- 5) 将 u 、 v 、 w 代入压力修正方程, 求得 p' , 将 p' 代入速度修正公式修正速度场。
- 6) 返回步骤 2), 重复上述过程直至收敛为止。
- 7) 得到收敛的速度场后, 再用迭代法求解热能方程, 直至获得收敛的解。

3.3.3 焊接热影响区的相变和组织性能的预测

3.3.3.1 研究现状

在低合金钢中,焊缝和热影响区的显微组织既和化学成分有关,又和 A_3 转变点冷却速度有关。在做过许多研究工作后,发现存在一个使焊接接头性能最佳化的冷却时间 C_f ,在这个临界冷却时间下,接头有足够的韧性而又不致使强度明显下降。 C_f 可通过实验、材料的碳当量和连续冷却转变曲线 (SH-CCT 图) 等确定。上述临界冷却时间实际上即指 $800 \sim 500^\circ\text{C}$ 的冷却时间。对该冷却时间产生影响的有焊接方法、焊接规范、焊件尺寸等,这些因素可以在传热计算时作为初始参数输入以求得熔合区的冷却时间。适当变化参数便可获得临界冷却时间,从而达到焊接接头强度的最佳化。将相变动力学理论应用于焊接过程,导出适于计算低合金钢热影响区组织与硬度的解析公式,并对含未知常数的计算式采用实测数据点进行标定。利用这些公式可以计算出不同线能量条件下,热影响区中任一点的组织与硬度。

随着研究工作的深入,在焊接、热处理和连续铸造等过程中,温度、相变和热应力之间的耦合效应越来越受到重视。已有人对焊接热影响区传热和组织变化的耦合进行了研究,针对低合金钢,利用状态图和相变动力学的计算公式,结合焊接热传导分析,设计出了瞬态组织预示程序,用于计算接头中瞬态任一点处各组织的体积百分数。

3.3.3.2 固态相变演化规律的应用

所谓相变演化规律实质上即指各相体积比 ξ_i 的发展过程。在金属中发生的固态相变可以分为两类,即扩散型相变和非扩散型的马氏体相变,它们具有不同的演化规律。

(1) 扩散型相变演化规律 一般用 Avrami 方程描述等温状态下扩散型相变 ξ_i 的发展过程,即:

$$\xi_i = 1 - \exp(-c_i t^{n_i}) \quad (i = 1, 2, \dots, N-1)$$

式中, t 为某温度下的等温时间; $(i=1, 2, \dots, N-1)$ 表示扩散型相变的类型; c_i 、 n_i 为对应 ξ_i 相,随温度而变的常数。

由于 Avrami 方程只能计算等温状态下单种组织转变,对于温度连续变化过程中发生的多种组织转变可采用虚拟体积分数时间法,结合等温转变曲线来求解。

等温转变曲线是描述等温状态下相变量 ξ_i 与时间 t 函数关系的实验曲线,通过等温转变曲线可以确定 Avrami 方程中的常数 c_i 、 n_i 。将温度连续变化曲线看成是一系列等温曲线组成,这样在每一等温线段时间范围内,都可用 Avrami 方程求解某相的组织转变量。采用虚拟体积分数将多种转变产物转化为单一转变产物,即在计算 ξ_i 时扣除已转变成其它非母相组织的含量。设在 $t \sim t + \Delta t$ 这段时间中,体积分数由 $\xi_i(t)$ 增加到 $\xi_i(t + \Delta t)$, t 时刻已转变得到的虚拟体积分数定义为:

$$\xi'_i(t) = \frac{\xi_i(t)}{\xi_i(t) + \xi(t)}$$

式中, $\xi(t)$ 表示未发生转变的母相, $\xi(t) = 1 - \sum_{i=1}^{N-1} \xi_i(t)$ 。

为了能在连续冷却条件下适用等温转变曲线,采用虚拟时间的方法。如果从转变开始到 t 时刻这段时间中已得到的虚拟体积分数为 $\xi'_i(t)$,假设这些是在此刻的温度下等温得到的,则为得到这些 $\xi'_i(t)$ 所需的等温时间称为虚拟时间 t' ,这样便把连续转变耗去的时间 t 转化到了等温转变曲线上的时间 t' 。应用 Avrami 方程:

$$t' = \{-\ln[1 - \xi_i(t)]c_i\}^{1/n_i}$$

则 $t + \Delta t$ 时刻的虚拟体积分数为:

$$\xi'_i(t + \Delta t) = 1 - \exp[-c_i(t' + \Delta t)^{n_i}]$$

根据虚拟体积分数的定义可求得各相体积分数 ξ_i 的发展方程:

$$\xi_i(t + \Delta t) = \xi_i(t) \{\exp[c_i(t' + \Delta t)^{n_i}] - 1\}$$

由于应力应变对扩散型相变的影响很小,可忽略该因素。

(2) 马氏体转变的发展方程 与扩散型相变不同,应力对马氏体转变有明显的影响,试验证实应力能够促进甚至诱发马氏体转变。在无应力、单相马氏体转变的条件下,马氏体转变的发展方程为:

$$\xi_M = 1 - \exp[-a(M_s - T)]$$

式中, M_s 为马氏体转变开始温度; a 为常量。

显然这是一个与时间无明显关系的函数。

考虑到应力与马氏体转变量的关系及扩散型相变等因素,马氏体转变的发展方程为:

$$\begin{aligned} \xi_M &= \left(1 - \sum_{i=1}^{N-1} \xi_i\right) \{1 - \exp[-a(M_s - T) - b\text{tr}\sigma - c(\text{tr}\sigma^2)^{1/2}]\} \\ &= \xi \{1 - \exp[-a(M_s - T) - b\text{tr}\sigma - c(\text{tr}\sigma^2)^{1/2}]\} \end{aligned}$$

式中, $\text{tr}\sigma$ 表示真实应力; b 、 c 表示与材料有关的常量。

3.3.3.3 焊接接头组织连续变化的预测模型

为了预测瞬态组织,首先必须准确地进行焊接传热计算。有限元计算中考虑了材料热物理性能参数的温度依赖性和相变潜热因素。

(1) 相变特征温度 对于焊接过程,相变特征温度应由相应的 CCT 图确定。它包括液相线温度 T_L ; 固相线温度 T_s ; 共析线以上铁素体溶解开始温度 T_F ; 奥氏体化温度 A_3 ; 珠光体相变温度 P_s ; 贝氏体相变温度 B_s ; 马氏体相变温度 M_s 。对于低碳低合金钢,有关的特征温度点可由下列经验公式得出:

$$T_s = \frac{B}{A - \lg(C_m^a C_o^b)}$$

$$A_3 = 912 - 203 \sqrt{C} - 15.2\text{Ni} + 44.7\text{Si} + 104\text{V} + 31.5\text{Mo} + 13.1\text{W} - 30\text{Mn}$$

$$- 11\text{Cr} - 20\text{Cu} + 700\text{P} + 400\text{Al} + 120\text{As} + 400\text{Ti}$$

$$P_s = 723 - 10.7\text{Mn} - 16.9\text{Ni} + 29\text{Si} + 16.9\text{Cr} + 290\text{As} + 6.4\text{W}$$

$$T_F = 912 - 8486C$$

$$B_s = 656 - 58C - 35\text{Mn} - 75\text{Si} - 15\text{Ni} - 34\text{Cr} - 41\text{Mo}$$

$$M_s = 561 - 474C - 33\text{Mn} - 17\text{Ni} - 17\text{Cr} - 21\text{Mo}$$

式中, C 为钢中碳含量, 同样其它元素符号也代表其质量百分数; A 、 B 、 a 和 b 为常数, 分别取 3.11、7572、1.0 和 1.0; C_m 和 C_o 为沉积物中金属和非金属的质量百分数。

(2) 连续冷却过程中的奥氏体分解 升温时奥氏体化的过程可近似按平衡相图用杠杆定律来确定。对于连续冷却过程中的奥氏体分解, 其反应速度的一般式可表示为:

$$\frac{dX}{dt} = B(G, T)X^m(1 - X)^p$$

式中, X 为转变产物的体积分数; B 为有效率系数; G 为奥氏体晶粒尺寸; m 和 p 是设置小于 1 的半经验系数, 以保证收敛性。

对于 $\gamma \rightarrow \alpha$ 转变

$$\frac{dX}{dt} = \frac{2^{(G-1)/2} \Delta T^3 X^{2(1-X)/3} (1 - X)^{2X/3}}{59.6\text{Mn} + 1.45\text{Ni} + 67.7\text{Cr} + 24.4\text{Mo}} \exp(-23000/(RT))$$

式中, G 为按 ASTM 计算的奥氏体晶粒尺寸号; $\Delta T = A_s - T$, 为过冷度; $X = X_F / X_{FE}$ 为形成中的铁素体体积分数; X_F 和 X_{FE} 分别是已形成的和平衡时的铁素体含量。

对于 $\gamma \rightarrow P$ 转变

$$\frac{dX}{dt} = \frac{2^{(G-1)/2} \Delta T^2 D X^{2(1-X)/3} (1 - X)^{2X/3}}{1.79 + 5.42(\text{Cr} + \text{Mn} + 4\text{MoNi})}$$

式中, $X = X_P / X_{PE}$ 为珠光体的体积分数; $\Delta T = P_s - T$; D 是扩散参量。

由下式求得:

$$\frac{1}{D} = \frac{1}{\exp(-27500/(RT))} + \frac{0.01\text{C} + 0.52\text{Mo}}{\exp(-37000/(RT))}$$

对于 $\gamma \rightarrow B$ 转变

$$\frac{dX}{dt} = \frac{2^{(G-1)/2} \Delta T^2 X^{2(1-X)/3} (1 - X)^{2X/3}}{(2.34 + 10.1\text{C} + 3.8\text{Cr} + 19\text{Mo})f(X, C_i)} \exp(-27000/(RT))$$

式中, X 为贝氏体的体积分数; $\Delta T = B_s - T$; $f(X, C_i)$ 由下式求得:

$$f(X, C_i) = \exp[X^2(1.9\text{C} + 2.5\text{Mn} + 0.9\text{Ni} + 1.7\text{Cr} + 4\text{Mo} - 2.6)]$$

当指数为负值时, $f(X, C_i)$ 取 1。

对于 $\gamma \rightarrow M$ 转变, 不计算其反应速度, 在温度 T 时形成的马氏体的体积分数由下式确定:

$$X_M = 1 - \exp[k_{1M}(M_s - T)]$$

式中, k_{1M} 为常数。

(3) 升温过程中奥氏体的晶粒长大

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{2g} k \left[\exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \right]$$

式中, g 是晶粒尺寸 (μm); k 是晶粒长大常数 ($\mu\text{m}^2/\text{s}$), 它与钢材成分和温度变化有关; Q 为晶粒长大的活化能 (kJ/mol); R 为气体常数 ($\text{kJ/mol} \cdot \text{K}^{-1}$)。

3.3.3.4 热影响区的硬度计算

热影响区的组织属混合组织, 其硬度可由各组成相的硬度和它们的相对量决定。合金钢中各相硬度的经验公式如下, 各元素均以质量分数代入:

$$H_m = 127 + 949\text{C} + 27\text{Si} + 11\text{Mn} + 8\text{Ni} + 16\text{Cr} + 21\lg T'$$

$$H_b = -323 + 185\text{C} + 330\text{Si} + 153\text{Mn} + 65\text{Ni} + 144\text{Cr} + 191\text{Mo} \\ + (89 + 53\text{C} - 55\text{Si} - 22\text{Mn} - 10\text{Ni} - 20\text{Cr} - 33\text{Mo})\lg T'$$

$$H_{fp} = 42 + 223C + 53Si + 30Mn + 12.6Ni + 7Cr + 19Mo \\ + (10 - 19Si + 4Ni + 8Cr + 130V)\lg T'$$

式中, H_m 为马氏体硬度 (VPN); H_b 为贝氏体硬度 (VPN); H_{fp} 为铁素体—珠光体硬度 (VPN); T' 为 700°C 时的冷却速度 (°C/h)。

求出了各相体积分数和硬度后, 由下式计算硬度:

$$H = H_m \xi_m + H_b \xi_b + H_{fp} \xi_{fp}$$

式中, ξ_m 、 ξ_b 、 ξ_{fp} 分别为马氏体、贝氏体、铁素体+珠光体的体积分数。

应当注意上述公式的适用范围 (质量分数): $0.1\% < C < 0.5\%$, $Si < 1\%$, $Mn < 2\%$, $Ni < 4\%$, $Cr < 3\%$, $Mo < 1\%$, $V < 2\%$, $Cu < 0.5\%$, $Mn + Ni + Mo < 5\%$, $0.01\% < Al < 0.05\%$ 。它们可有保留地用于不添加微量元素 Nb、Ti、Zr 和 B 的低碳钢。

3.4 热加工领域数值模拟技术的发展趋势

1. 宏观→中观→微观

材料热加工工艺模拟的研究工作已普遍由预测形状、尺寸、轮廓的宏观尺度模拟进入到以预测组织、结构、性能为目的的中观尺度模拟及微观尺度模拟阶段, 研究对象涉及结晶、再结晶、重结晶、偏析、扩散、气体析出、相变等微观层次, 甚至达到单个枝晶的尺度。

2. 单一分散→耦合集成

模拟功能已由单一的温度场、流场、应力/应变场、相变场模拟普遍进入几种场的耦合集成模拟计算阶段, 并真实地模拟复杂的实际热加工过程。

3. 共性→特性

由于建立在温度场、流场、应力/应变场数值模拟技术基础上的常规热加工、特别是铸造、冲压、锻造工艺模拟技术的日益成熟及商用软件的出现, 研究工作已由共性问题转向难度更大的专用特性问题, 主要有以下两个方面:

(1) 解决特种热加工工艺模拟及工艺优化问题 如铸造专业中的压铸、低压铸造、金属型铸造、连续铸造、电渣熔铸等; 锻压专业中的液压胀形、楔横轧、辊锻等; 焊接专业中的电阻焊、激光焊等。

(2) 解决热加工工件的缺陷消除问题 应用数值模拟技术, 已解决了大型铸钢件的缩孔、缩松问题, 模锻件的折叠及冲压件的断裂、起皱问题。目前的研究热点集中在铸件的热裂、气孔、偏析, 大型锻件的混晶, 冲压件的回弹, 焊接件的变形、冷裂、热裂, 淬火中的变形等常见缺陷预防和消除方法的研究。

4. 重视提高数值模拟精度和速度的基础性研究

数值模拟是热加工工艺模拟的重要方法, 提高数值模拟的精度和速度是当前数值模拟的研究热点, 为此应重视热加工基础理论、新的数理模型、新的算法、前后处理、精确的基础数据获得与积累等基础性研究。

5. 重视物理模拟及精确测试技术

物理模拟是揭示工艺过程本质, 得到临界判据, 检验、校核数值模拟结果的有力手段, 且越来越引起重视, 并有一些新的动向:

1) 应用高新技术, 设计、开发新型物理模拟实验方法及装置。

2) 正确、合理处理数值模拟与物理模拟(含实验验证)之间的关系:一是根据模拟对象,合理确定两者的应用比例;二是扬长避短,发挥两者的不同特长;三是高度重视基础数据的测试技术,包括工件及模具(或铸型、介质、填充材料等)材料的热物性参数、高温力学参数、几何参数、本构参数、接触、摩擦、界面间隙、气体析出、结晶潜热等各种初始条件、边界条件的数据。

6. 工艺模拟与生产系统其它技术环节实现集成

起初,工艺模拟多是孤立的,其结果只用于优化工艺设计本身,且多用于单件小批量毛坯生产。现已逐步进入大量生产的先进制造系统中,实现以下三种不同方式的集成。

- 1) 与产品、模具 CAD/CAE/CAM 系统集成。
- 2) 与零件加工制造系统集成。
- 3) 与零件的安全可靠性能预测实现集成。

第4章 专家系统及在热加工中的应用

4.1 概述

4.1.1 专家系统的概念

专家系统是人工智能领域中发展较快的一个重要分支。所谓专家系统，实际上是以知识库为核心进行问题求解的计算机程序，即基于知识的智能系统。

专家系统是一种计算机程序，用于从事一些特定、高难的专业工作。由于主要依靠大量知识来发挥专家系统的功能，这些知识均存在知识库中，通过推理机按一定的推理策略去解决问题，故也称其为知识库系统。

专家系统能够模拟人类专家的推理过程，像人类专家一样解决特定领域的复杂问题。它是研究用解决某领域专门问题的专家知识来建立人机系统的方法和技术。

4.1.2 专家系统的特点

专家系统像人类专家一样拥有大量的经验和专家知识，并能够在短时间内对某领域中的复杂问题得出高水平的解答。因此，专家系统以求解那些人类专家才能求解的高难问题为特征。专家系统的另一特点是它主要通过逻辑推理来解决问题。它和传统程序的区别如图4-1所示，即传统程序通过数学算法处理数据以达到有限步骤内解决问题的目的。而专家系统利用知识库、规则 and 如何应用规则的推理机这种产生式结构来解决复杂问题。即以符号处理为主，运用本身所具有的知识、原理、规则、策略对客观事实进行不确定性推理，从而得出问题的解决办法。

专家系统与其它软件系统的另一个区别在于，它把解决问题的过程与解决问题所需要的知识相分离。在问题开始求解后，两者才结合在一起。而传统的软件系统把数据、过程、知识都混合在一起。所以，前者有良好的结构性与自适应性。

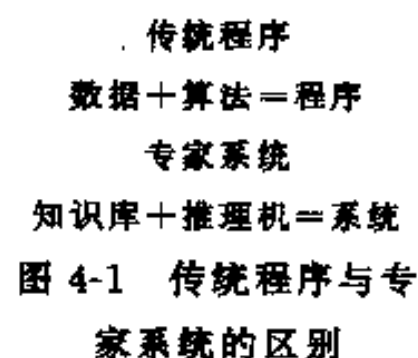


图 4-1 传统程序与专家系统的区别

4.1.3 专家系统的应用

随着专家系统技术的逐步成熟，其应用领域不断扩大，所处理问题的难度也不断增加。目前，专家系统的应用已渗透到农业、工业、医学、地质、气象、交通、数学、物理、化学、生物、政治、经济、军事、法律、环境科学等众多领域，如化学分析、图像处理、过程控制、医疗诊断、地质勘探、故障处理、语言识别等。

专家系统针对不同的应用领域和求解问题的性质可分为以下几种主要类型：

4.1.3.1 解释型系统

它的任务是通过分析输入数据来确定这些数据的含义。属于这类系统的有数据分析、信号解释、图像分析、语言信号理解和化学结构等，这类系统的特点是：

- 1) 能处理不完备信息。
- 2) 当数据出现矛盾时，能假设哪一部分的数据可信，然后再对它作验证。
- 3) 能处理不可靠的数据。

4) 有解释模块, 能对复杂的推理过程作出解释。

4.1.3.2 预测型系统

它的任务是根据过去和现在的模型来预报未来的趋向。属于这类系统的有天气预报、交通预报、人口预报、农业产量估计和军事预测等。这类系统的特点是:

- 1) 能综合不完整的信息。
- 2) 能解释各种可能的未来变化及排序并预测灵敏度。
- 3) 能协调和利用不同的数据源的知识。
- 4) 具有随时间变化不断适应事件的自适应能力。

4.1.3.3 诊断型系统

它的任务是根据观察及测得的数据、推断出系统的故障。属于这类系统的有医疗、机械、电子和软件诊断等。这类系统的特点是:

- 1) 考虑多种故障同时存在的可能性。
- 2) 尽可能地识别诊断设备本身可能的故障。
- 3) 故障可能随机间断出现, 有时需要通过一些强制或诱发措施来进行检测。
- 4) 在遇到难以检测或需花费高代价才能得到信息时, 应能决定采取什么措施。
- 5) 对一些复杂的尚未完全掌握的诊断对象, 系统能用几个局部模型结合起来权衡考虑。

4.1.3.4 规划型系统

它的任务是根据约束条件, 作出行动的安排或调度方案。属于这类系统的有工程规划、机器人行动规划、自动程序设计、通信网规划和军事作战规划等。这类系统的特点是:

- 1) 对复杂的规划问题, 能探索各种可能的计划方案, 并能处理子目标之间的相互作用问题。
- 2) 能处理不确定因素和时间推理。
- 3) 如果规划有多个执行者时, 系统能处理好协调工作。
- 4) 考虑分层规划。

4.1.3.5 设计型系统

它的任务是根据约束条件, 构思出所需的目标方案。这类系统的特点是:

- 1) 能预测并检验某些中间设计结果并随时调整设计方案。
- 2) 协调各项设计, 满足全局要求。
- 3) 在完成或修改各个设计子任务时要考虑到全局要求, 避免子任务之间的相互重叠或冲突。
- 4) 进行有关空间、结构或形状等方面的推理, 而目前对于这些方面还没有成熟的技术。
- 5) 将设计的特征描述形成一个精确、完整的设计方案或图样。

4.1.3.6 监控型系统

它的任务是分析运行过程中的当前状态, 预测可能发生的结果, 并在必要时实行控制。这类系统的范畴很广, 它的关键监控条件常常依赖于系统的当前环境, 故它要求系统能够根据时间和环境的变化来改变所期望的条件, 以防误报、漏报的发生。

4.1.3.7 教学型系统

它的任务是根据学校学生的行为表现, 找出学生存在的问题和解决办法。

除此之外, 还有决策型系统、控制型系统及修理型系统。

上述分类是较典型的。然而在现实世界中,专家所面对的问题性质是千变万化的,很难针对实际的问题去套上述几类,再去找类似的专家系统例子模拟。况且,有的问题常常交叉着两种任务,如机器人规划问题,就包含了规划和预测的特性。有些问题虽然特征相同,但其数据和知识的来源、性质却大不相同。所以,我们考虑一个专家系统的组织,不仅要考虑到任务的特征,还要考虑到解决问题的事实形态和专家推理的思维方式。

对于铸造领域,专家系统已在如下几方面得到应用:

1) 材料与工艺过程的数据分析。如怎样的金属熔炼工艺会导致球墨铸铁组织中共晶石墨的形成?

2) 工艺过程调节的预报。如冲天炉熔炼的专家系统对铁液的化学成分、温度、氧气状况等借助于风量的控制与调节,都能事先进行预报。

3) 建议、咨询类专家系统。如各种合金铸件的化学成分选择、浇冒口确定等。

4) 诊断类专家系统。如铸件缺陷或机器故障的诊断分析。

5) 优化与选择。如一个铸件最合适的铸造方法的选择。

专家系统在焊接领域的应用也日益广泛。按应用特点,可将焊接专家系统分为如下几种:

(1) 工艺选择与工艺制定。这是最主要的焊接专家系统应用领域。焊接工艺涉及母材、焊接材料、接头及坡口、预热与焊后热处理、焊接方法、焊接规范参数等许多因素。

(2) 焊接过程实时控制。这是焊接专家系统的一个重要发展方向,但目前已开发的系统不多,有待进一步拓展。

(3) 焊接缺陷预测与诊断。这类系统可用于诊断焊接缺陷类型、缺陷原因,或进行具体焊接工艺条件下的缺陷预测。

(4) 设备故障诊断。这方面的焊接专家系统比较少,一般用于特定的焊接设备。

(5) 计算机辅助设计。这方面的焊接专家系统不多。

(6) 标准解释。这类软件通常单列,不归入焊接专家系统的范畴。

除以上类型外,专家系统技术在焊接结构安全评估、焊接冶金分析、数控切割、设备配置、焊工考试、焊接定额及成本分析等方面也得到了了一定的应用。

上述表明,焊接专家系统已取得可喜成果,具有广泛的发展和应用前景。

4.1.4 专家系统的产生与发展

专家系统技术的产生和发展大致可分为孕育、形成、基本成熟和发展四个主要阶段。

1965年,美国斯坦福大学计算机系 E. A. Feigenbaum 与遗传学家 J. Lederberg、物理化学家 C. Djerassi 合作研制开发了世界上第一个专家系统,即 DENDRAL 专家系统,它是根据化合物的分子式及其质谱数据,推断分子结构,其能力达到了专家水平。因此,DENDRAL 专家系统标志着专家系统的诞生,称为第一代专家系统。进入 70 年代,随着人工智能(Artificial Intelligence)技术的发展,推动专家系统逐步走向成熟。一批卓有成效的专家系统相继问世,这些系统涉及医学、自然科学、语言、数学、地质等众多领域。随着专家系统技术的逐步完善,其应用领域迅速扩大,至今已进入非计算机专业人员直接建立专家系统的年代。进入 90 年代,专家系统的研究已走向商品化阶段。一些不同类型的铸造专家系统先后推向市场,如冲天炉控制专家系统、铸件缺陷分析专家系统、铸造过程规划、咨询系统、熔模铸造专家系统等,在实际生产中都取得较好的应用效果。

在我国,这一领域的研究开发工作起步较晚,始于 20 世纪 80 年代。但对专家系统的研

究与应用不断深入, 在一些方面也取得了长足进步。进入 20 世纪 90 年代, 已有不少专家系统在生产实际中得到应用, 比如, 铸造型砂体系铸件缺陷分析的专家系统、球墨铸铁缺陷分析专家系统、焊接材料及焊接方法专家系统等。

尽管热加工技术专家系统的研究已在很多领域展开, 并取得了一定的应用效果, 但总的来说目前还处于初始阶段。一些技术及应用环节上的障碍, 如铸造知识类型复杂、知识表达困难、决策空间大、多目标和多重约束、模糊性和不确定性等都有待于进一步解决。

纵观目前的研究应用状况, 可以推断热加工专家系统的发展方向是:

(1) 既分散又集成 形式多样的适应于热加工某局部领域的“子专家系统”, 如设计类、制造类、诊断类、监督类、规划类、预测类、解释类及教学类等将不断研制出来, 并在生产过程中不断改进和完善, 然后向多功能、实用性很强的专家系统发展, 进一步与 CAD/CAI/CAM/CAE/CAPP/集成, 成为现代先进热加工技术的重要组成部分。

(2) 在线专家系统控制 专家系统控制是智能控制的另一个重要分支, 是专家系统应用研究的前沿。在线专家系统控制更是倍受关注, 热加工领域这方面的研究将逐步展开。

4.2 专家系统的结构

一个完整的专家系统包括四个主要模块。即: 知识获取模块、知识库、推理机、用户接口, 其结构如图 4-2 所示。一个基于知识的系统可能少一个或两个部件, 而真正的专家系统一个不少。其中知识库和推理机是专家系统的主要内容。

知识获取模块是专家系统的关键, 是专家系统开发中的主要瓶颈之一。专家系统的知识可能来源于不同的知识源, 如研究报告、实验数据、数据库、领域专家、个人经验等。但是, 当今的专家系统的主要知识来源于领域专家。专家系统有知识获取模块, 可以在运行中不断地学习, 系统的水平不断提高。

知识库是用以存储领域专家提供的专门知识, 它包括事实和规则。事实是可迅速改变的短期信息, 也就是在咨询过程中的信息。规则是关于如何根据当时已知的事实或假设产生新的事实和假设的长期信息。专家系统对问题的求解是运用专家提供的专门领域知识来模拟专家的思维方式进行的。因此, 知识库建造是建造专家系统的关键工作。一方面, 知识工程师与领域专家会晤, 提取专家的知识并进行总结, 这就是知识获取过程; 另一方面, 组织知识并决定在专家系统中怎样表达知识。知识获取过程是一种既费时, 又辛苦且代价昂贵的过程。一般要占专家系统开发总工作量的四分之三左右。通常这一过程称为教育, 有时也称为知识工程, 如图 4-3 所示。

一个专家系统中的知识获取由确定各种知识源如报告、书本、数据库、实例研究及个人经验到系统投入用户使用, 需要经过不同的阶段, 且不同的阶段又需要不同的技术。这些阶段可概括地分为: 知识源的确定、概念化、形式化、实现和完善等五个阶段。各个阶段可能不断地循环往复, 但它们都离不开专家的合作。

目前, 大部分专家系统在知识表示都采用 IF—THEN 形式的产生规则。所谓 IF—THEN 形

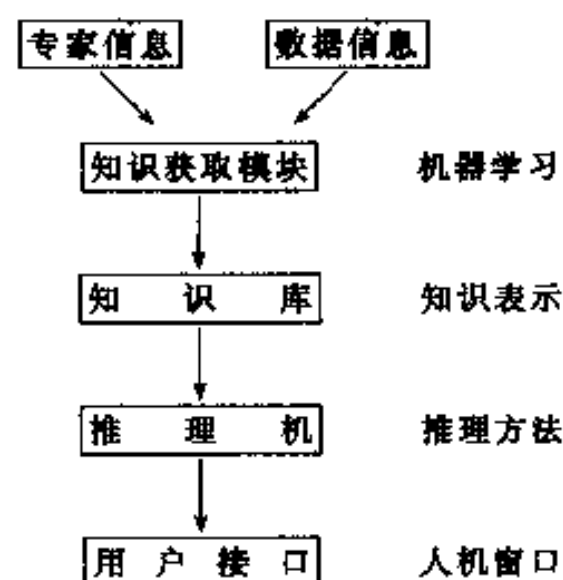


图 4-2 专家系统结构示意图



图 4-3 专家系统知识获取

式产生或规则的模式为：

IF……某一条件成立

THEN……某一结论获得

推理机是在一定的控制策略下，专家系统根据已知问题信息（用户与专家系统交流的信息）及知识库中的知识求解问题的结果，识别、选取、匹配知识库中的产生规则，以得到问题求解结果的一种机制。常用的推理策略有三种，即正向推理、反向推理和混合推理。正向推理一般又称事实驱动的推理，即由条件到结论的推理或由原始数据出发推出结论。反向推理一般又称目标驱动的推理，即从结论到条件的推理，或由目标出发，为验证目标去寻找有用的证据。混合推理，是指推理过程中根据已知信息及推理目标，选取待用知识，确定具体解题路径。推理策略的选择与专家系统求解问题的类型有关，对诸如铸造缺陷等诊断性问题多采用反向推理。

用户接口（即人机窗口）是专家系统的解释接口。将专家和用户的输入信息译成系统可接受的内部形式，同时把系统向用户的输出信息转换成人类易于理解的形式。

专家系统从第一代发展到第二代，其系统中的组成成分有了很大变化。第一代专家系统以领域经验知识作为知识库中的主要成分。所谓经验性知识是指在不同状态下对基本概念、定义、定理的引用时所用的知识。第一代专家系统中的推理技术，也是在这些知识组织基础上建立起来的，其结构如图 4-4 所示。

图中的箭头表示信息流。全局数据区是存放推理的中间结果与最终结论的公用数据区，有时称为全局黑板。而用户界面是系统与用户交互信息的内核，它可以利用全局数据区中的多种信息按一定的形式为用户提供有关求解的状态。知识库管理一般必须兼有知识获取、知识库一致性检查、知识表达等功能，这样才能使

所建立的专家系统利于维护，日趋完善。而推理机则利用知识库中的经验性知识，根据当前状态，得到关于问题的解。解释机制用来回答用户提出的关于求解状态的问题。

在第一代专家系统中，领域中的原理性知识往往被融合在经验性知识中，推理机制在推理时也把它同等看待。所谓原理性知识是指一个特定领域中的基本概念、定义、定理等，在系统中的表现形式往往具有描述性，它们与经验性知识的过程行为有明显的不同。所以在第二代专家系统中把两者分离开来，并引入基于原理性知识的深层推理和基于经验性知识的浅层推理，从而提高了系统运行的强壮性。图 4-5 给出了第二代专家系统的结构。

第二代专家系统在知识表达、推理机制、解释机制、用户界面等方面，与第一代专家系统有明显区别。第一代专家系统的解释机制只能“回溯”已经完成的推理路径，只能对这些路径上的信息作出解释；而第二代专家系统中的解释机制不仅具有第一代专家系统的功能，同时还可按用户要求提供推理不能取得的其它信息，它不再仅仅是对推理路径的“回溯”。

学习机制是第二代专家系统中不可缺少的部分。如果一个专家系统缺乏一定的学习机制，就不可能成为一个开发式的系统，从而缺乏领域适应性。这样，当客观

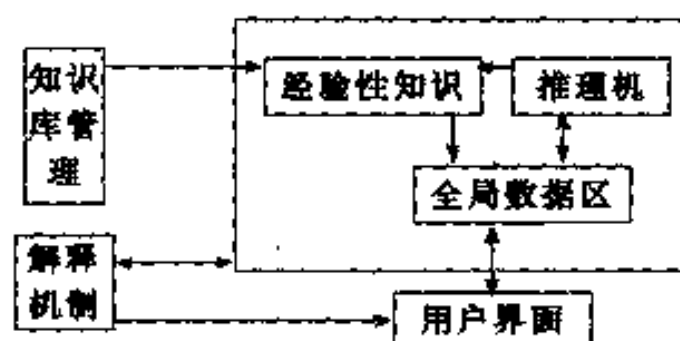


图4-4 第一代专家系统结构

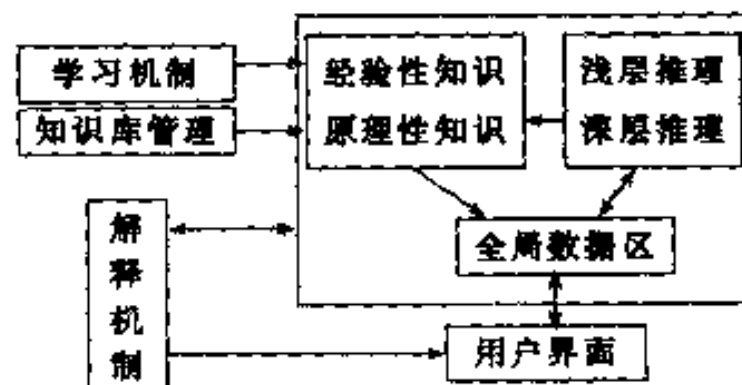


图4-5 第二代专家系统结构

世界发生变化时，系统就不能对新的现象作出相应的处理。学习机制可使专家系统不断在实践中学到新的知识，以适应外界环境的变化。

4.3 专家系统的实现方式

4.3.1 建立专家系统的原则

为有效地实现专家系统，首先要考虑到以下几个因素：

- 1) 建立专家系统的方便性。
- 2) 建立专家系统的时效率。
- 3) 环境提供的知识表达与推理机制的领域适应性。
- 4) 环境提供的知识获取手段和知识库维护手段。
- 5) 专家系统建立后的运行效率。
- 6) 环境与其它软件环境是否有灵活的接口。
- 7) 环境对计算机硬件的要求。

4.3.2 建立专家系统的途径

一般说来，实现专家系统可以通过以下两种途径：

1. 利用专家系统工具或专家系统开发环境建立专家系统。

由于专家系统开发环境一般都提供了现成的知识表达方式、推理机制、解释机制、用户界面及相应的知识获取工具，因而在形式化后，用这些专家系统工具或专家系统开发环境来建立领域专家系统显得特别有效。系统建立者只要按照工具或环境的知识表达的要求，填入相应知识即可。但利用工具或环境建立专家系统时，要考虑以下几个问题：

- 1) 工具或环境提供的各种设施（如知识表达、推理机制、解释机制等）是否符合领域要求。
- 2) 工具或环境自身开锁如何。
- 3) 工具或环境生成的专家系统是否可以与其它软件模型连接。

通常，要提供一个适应于所有领域的通用专家系统或环境，是十分困难的。所以，一般的工具或环境只是对某些领域有效，而对其它领域不十分有效。另外，专家系统工具和环境缺少灵活性，其知识表达与推理控制策略一般都由工具或环境设定，所以较难被知识工程师所改变。

2. 利用人工智能语言或其它算法语言直接构造专家系统

这种方法可以按照系统设计者的意图来构造知识库及推理机的计算机内部形成，使之具有很大的灵活性，其知识表达与推理控制策略可以依据领域特点进行设计或改动。由于人工智能语言（如 LISP、PROLOG）提供了相应的符号处理功能或演绎机制，因而比起其它算法语言来说，在构造一个专家系统时，有较大的方便性。但 LISP 或 PROLOG 语言都在不同程度上存在着如下缺陷：

- 1) 无法容忍的运行时间和内存开销，这影响到被建专家系统的时空效率。
- 2) 维护大容量知识库困难。一些系统由于知识库中的知识不断增大，到了需要重新编制的地步。
- 3) 计算和输入/输出支持能力差，因面对非符号处理显得不十分有效。
- 4) 缺少软件工程支撑工具，虽然有的 LISP 或 PROLOG 版本提供一些支撑工具（如调试

工具),但比起其它语言(如C语言)要逊色得多。

5) 移植造价昂贵。由于人工智能语言对机器的依附性强,因而要从一种版本移植到另一种版本付出的代价太大。

6) 人工智能语言过分地强调描述性,而较忽略过程性。

关于过程性与描述性,其实是人工智能中的一对矛盾,它们所涉及的实质,实际上是符号处理与科学计算问题。虽然,专家系统中的主要任务是进行符号处理(即知识处理),但对大多数领域,还涉及到一些需要过程性方法才能解决的问题。所以,无论是在什么样的环境下建立专家系统,总要解决这一矛盾。这可以从以下几个方面着手:

1) 过程性与描述性融合于同一语言中,如OPS5。但由于过程性与描述性是两种具有很大差异的方法,因而显得很不得力。

2) 在描述性语言中调用过程。如Turbo、Prolog可调用Pascal、C、Fortran和汇编语言,但由于许多大型复杂的产生式系统需要大量的过程,故这种方法显得不够充分。

3) 在过程性语言中调用描述性函数。如OPS83、Rule Master-2等,这种方法提供了良好的描述性过程,显得较为有效。

基于这些原因,如果我们采用有较强过程性的语言,而且其中有调用描述性函数良好、方便的接口或机制,则所建立的专家系统是比较高效的。

4.4 专家系统的开发

专家系统的开发一般是从简单任务到复杂任务逐步地完善系统知识的组织和表示的过程。与其它软件系统的开发过程一样,要建立具体领域的专家系统,首先必须分析该领域中的特性,并在此基础上进行形式化。形式化过程是一个对领域知识的获取与表达,对求解过程的刻画与精化的过程。

4.4.1 开发工具

众所周知,专家系统虽然都有各自的开发特点,很难用统一的模式来描述它们的一般结构和原理,但各类专家系统之间又有很多共性之处,包括其体系结构、控制流程运行方式、推理及知识表达形式等;这些共性使得建造各种专家系统的开发工具成为可能。

专家系统开发工具很多,但从专家系统的实现途径大致可划分四类:即用于人工智能系统开发的通用程序设计语言、专用知识表示和处理语言、专家系统外壳和专家系统的开发工具箱(环境)。

(1) 通用人工智能语言 目前,最流行的人工智能语言是LISP、PROLOG。它们都是构造专家系统需要的专门计算机语言。LISP是函数型程序设计语言,具有很强的符号和数据处理能力。PROLOG是一种专门求解逻辑问题的语言,即面向对象的陈述式语言,具有很强的逻辑推理能力,很适合于表达人类思维和推理规则。对于一些非常简单的小型专家系统也可使用C、BASIC、FORTRAN等语言来建造。

(2) 知识表示和处理语言 知识的处理虽然也包含着对数据的处理,但主要是符号处理和逻辑处理。虽然LISP、PROLOG和Smalltalk等通用的人工智能程序设计语言比面向数据的高级程序设计语言(如FORTRAN、BASIC、COBOL等)有较强的符号处理和逻辑处理能力,但要用这些通用的人工智能语言来表示知识和处理知识还有相当的编程工作量和困难,它需要较高的编程技巧。为解决这些困难和减少工作量,人工智能学者又开发了更专用的知识

表示和处理语言，如有代表性的 FRL、OPS5 和 KEE 等。在这类专用知识处理语言中，为知识表示提供了固定的模式，应用很方便。只要这类语言中规定的知识表示模式适用于具体应用领域中的知识表达，那么在具体实现专家系统时，就可直接采用该知识表示模式，从而节省编程工作量。

(3) 专家系统的外壳 专用知识表示和处理语言虽然较通用人工智能语言表示知识更现成、方便，但要建造一个较完善的专家系统还需在推理机构、解释机构、学习机构等几大机构上花费大量时间。若在知识表达、推理或执行方式、解释机构以及学习机构等方面都已形成了基本固定的模式，类似于有了一个“空架子”，则这个“空架子”被称做专家系统的外壳。专家系统开发者只要按照外壳系统的要求将某特定领域的知识装入这个“空架子”，即可构成一个专家系统。因此外壳作为专家系统开发工具使用起来十分方便，可以大大缩短专家系统的开发周期。但是，一个完善的外壳系统只能用于开发一类类似领域或更窄范围的专家系统，使用局限性很大，灵活性较差。

专家系统外壳的出现使开发专家系统和经费大幅度地降低，开发速度大为提高，产生了明显的经济效益，因此，近年来国内外涌现出大量适用于各种专业领域的商品化专家系统外壳。

(4) 专家系统开发工具箱(环境) 专家系统开发工具从通用的程序设计语言到相当专用的专家系统的外壳系统，虽然可以适应不同用户的各种要求，但是这些工具都还有各自的某些缺陷，在使用过程中造成用户使用不便。为了克服这些工具的缺点，专家系统开发工具箱应运而生。专家系统开发工具箱给开发者提供的既不仅仅是一个专家系统外壳(shell)，也不仅仅是简单的一种开发语言，而是方便灵活、集成组织的、完整的一套工具。在专家系统的整个开发过程中都有较方便适用的工具可供用户选择。一个比较理想的开发工具箱一般包括：

1) 知识获取的工具或辅助获取知识的工具。

2) 具有各种知识表示模式的库及其管理系统，其中不仅包含丰富多样的知识表示模式，而且有一个管理系统能根据所获取知识的特点，向知识工程师推荐最合适的知识表示模式，或者给出如何把几种模式进行改造并这综合到一块的提示。

3) 知识编辑器能把获取的知识按选定的表示模式放入知识库，并具有从库中删除、修改知识等管理功能的一种编辑工具。

4) 知识一致性检验工具用于检验以保证知识库中的知识无矛盾性(或一致性)的软件系统。

5) 高级知识处理语言能方便灵活地表示各种知识模型的处理语言。

6) 专家系统的调试工具是辅助在专家系统中查错或纠错的软件系统。

7) 专家系统描述语言。一种能用来形式地描述专家系统的功能和性能要求，结合一种领域知识描述语言可能完整地描述一个专家系统。这里所谓的描述是指叙述专家系统“能做什么”和“有什么性能”，而并不要求具体描述“如何做”。

8) 专家系统生成系统能根据上述专家系统的形式描述，自动生成专家系统的软件系统。

9) 智能接口能识别声、文、图像，能理解自然语言，并能以人类容易理解的方式与用户进行交流。要达到这些功能必须有很强的硬件支持。

4.4.2 建立专家系统的过程

与其它软件系统的开发过程一样，要建立具体领域的专家系统，首先必须分析该领域中

的特性，并在此基础上进行形式化。形式化过程是一个对领域知识的获取与表达，对求解过程的刻画与精化的过程。建立专家系统的步骤可分为如下几个方面，如图 4-6 所示。

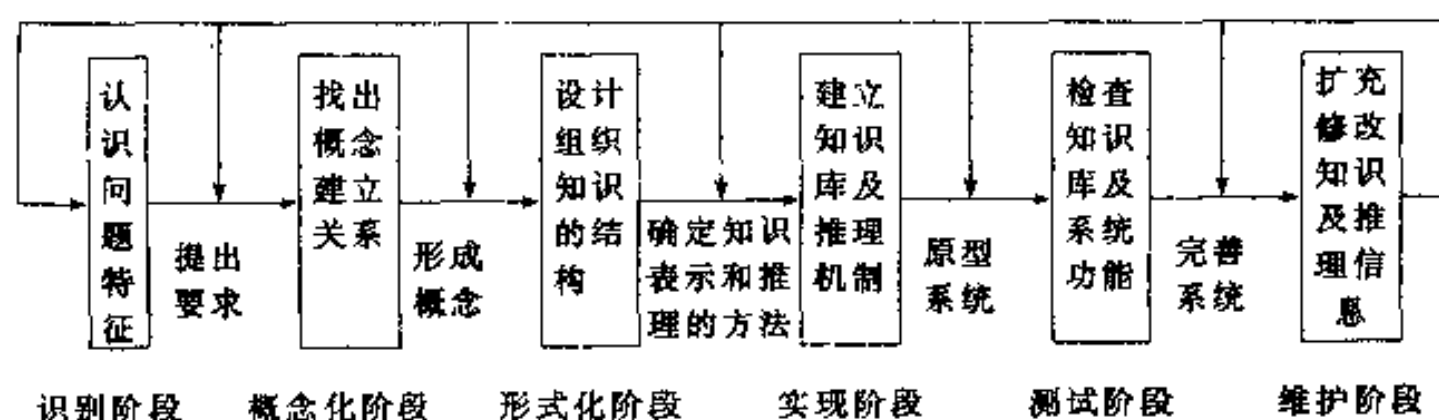


图4-6 建造专家系统的步骤

(1) 识别阶段 识别过程中要确定领域问题的特征，明确系统要解决的问题及要用到的相应的领域背景。这一步是以后实现系统的关键。如果对领域问题的特性刻画得不全面，那么所建立的专家系统的求解能力肯定是不完备的。识别领域问题特征的方法可以采用外推法，即首先确定系统要解决的最终目标，以此为内核逐步分析与该目标相关的诸多因素，然后再逐步分析这些因素。识别过程也可看作知识获取阶段。

(2) 概念化阶段 概念化过程是对识别阶段取得的各种因素进行抽象化，找出表达知识的概念，建立“概念模型”。例如要建立一个旅游专家系统时，经过识别我们可以首先把“旅游者”及“旅游地”作为两个基本概念，建立它们各自的基本内容及相互联系。

(3) 形式化阶段 这一过程实际上是要设计和组织知识的结构。由于知识库是专家系统的核心，它的结构直接影响到专家系统求解问题的有效性，因而形式化过程是建立专家系统的又一关键。由于不同类型的专家系统在知识库结构及问题求解方法上有一定的区别，所以，在组织知识库、建立知识库结构时，首先要确定采用的知识表达方式与推理技术。如用产生式规则和框架表达知识是两种不同的风格，在知识库结构上也不相同，如果两者相结合，那么知识库的结构又有所不同，推理方式也受到改变。

(4) 实现阶段 为了产生体现知识的各种计算机形式，使这些知识在计算机中发挥有效的作用以产生问题求解能力，必须把已经形式化的各种知识实体表示成计算机的内部形式。还要针对相同的要求，建立必要的解释机制和良好的用户界面。为了使形式化后的各种知识实体（包括求解实体）有效地转换成机器内部形式，必须选择一定的专家系统实现环境。

(5) 测试阶段 这一阶段主要为了验证体现知识的各种规则或知识实体。在建立完知识库后，知识库中可能会有大量冗余知识或不一致的知识，进而引起专家系统推理过程的低效，或出现多种矛盾的结果。知识库中还有可能未包含解释某种状态的知识，从而引起专家系统问题求解的不完备性。测试的主要目的，就是要确定知识库或推理机的正确性。

(6) 维护阶段 这主要用于扩充、修改知识库和推理机中的各种信息，以使专家系统更进一步完善。这一阶段与前面几个阶段有着密切地联系。如实现阶段中的各种知识获取手段，在维护阶段同样可用到，从而可以减少大量的软件编程。

以上建立专家系统的各个步骤都有密切的联系，而且为使专家系统能真正付诸实用而日趋完善，每一阶段都应重复多次。

4.5 专家系统应用实例

4.5.1 铸件缺陷分析的专家系统

铸件缺陷分析的专家系统的研制在国外起始于 20 世纪 80 年代后期,瑞典、美国和印度先后不同类型的铸造专家系统推向市场,如冲天炉控制专家系统、铸件缺陷诊断专家系统、铸造过程规划、咨询专家系统等,并在实际生产中已经取得了较好的应用效果。

国内在这方面的开发研究工作起步较晚,但在一些方面也取得了长足的进步,先后推出了铸造型砂质量专家系统、铸件缺陷分析专家系统、自硬砂质量分析专家系统、压铸工艺参数设计及缺陷诊断铸造生产专家系统等。

铸造生产是一个复杂的过程,影响铸件质量的因素很多。这些因素一般是随机的、复杂的,很难用数学公式描述。另外,高质量铸件生产需要有丰富的知识与经验。铸件缺陷分析专家系统就是要在生产中错综复杂的情况下,在不确定信息基础上求得正确的结论,解决生产实际问题。

人类专家在分析铸件缺陷时的基本思路是根据铸件的外观形貌(包括铸件宏观的和微观的、外部的和内部的),并结合人类专家长期积累的理论 and 实践经验确定缺陷的类型,如气孔、裂纹等,然后分析影响铸件缺陷产生的主要因素,最后提出解决、改进和防止铸件缺陷产生的措施。铸件缺陷分析专家系统就是模拟人类专家的这个思路面建立的。一般地,此类专家系统由知识库、推理机、数据库、人机接口、解释机构等几个主要模块组成。

4.5.1.1 知识库

知识的组织和表达是专家系统的基础,它应忠实、全面地体现出人类专家的知识 and 经验。一般来说,铸件缺陷分析的专家系统的知识组织采用树状结构,即将铸件缺陷根据外观形貌分成几大类(如图 4-7 所示)。

在每一大类缺陷下可用每种缺陷表现的特征分析缺陷的属性(如图 4-8~图 4-14 所示)。通过各种知识的组织方式可以方便地表达知识,并利于推理机实现推理。系统中的知识主要来源于从事铸造工作多年的专家 and 有关铸件缺陷手册或其它有关文献。另外,这种知识库结构可以使系统的分析过程简化,因为它先将铸件缺陷分成几大类,这样就可

将为用户解答咨询而进行的数据检验总量限制为树形结构的一个子树,缩小推理机构进行推理的范围。在每一子树下包含有不同属性的铸件缺陷信息,这些信息唯一地确定了某种类型的缺陷。

在知识库中,有关于铸件缺陷的名词解释以事实的形式存储,其它专家知识以规则的形式表达,例如一条完整的判断缩孔缺陷的规则为:

IF 缺陷是孔洞类, and

 产生在热节和最后凝固部位, and

 是大且集中的孔洞

THEN 该缺陷是缩孔

4.5.1.2 推理机构

铸件缺陷分析专家系统的推理机构采用不确定性推理,深度优化搜索策略 and 反向链推理

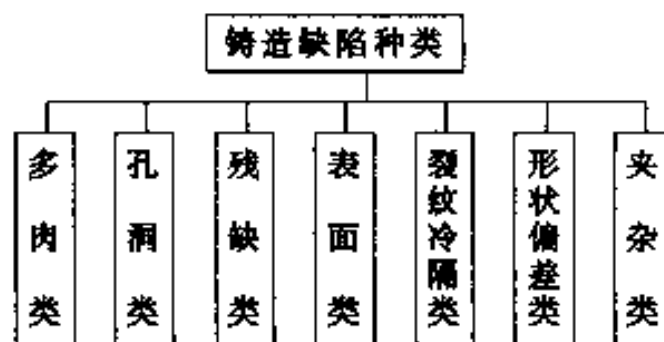


图4-7 铸件缺陷分类图

策略，这种方法运算推理迅速，且节省机时。

现举例说明这些策略在铸件缺陷分析过程中的应用。

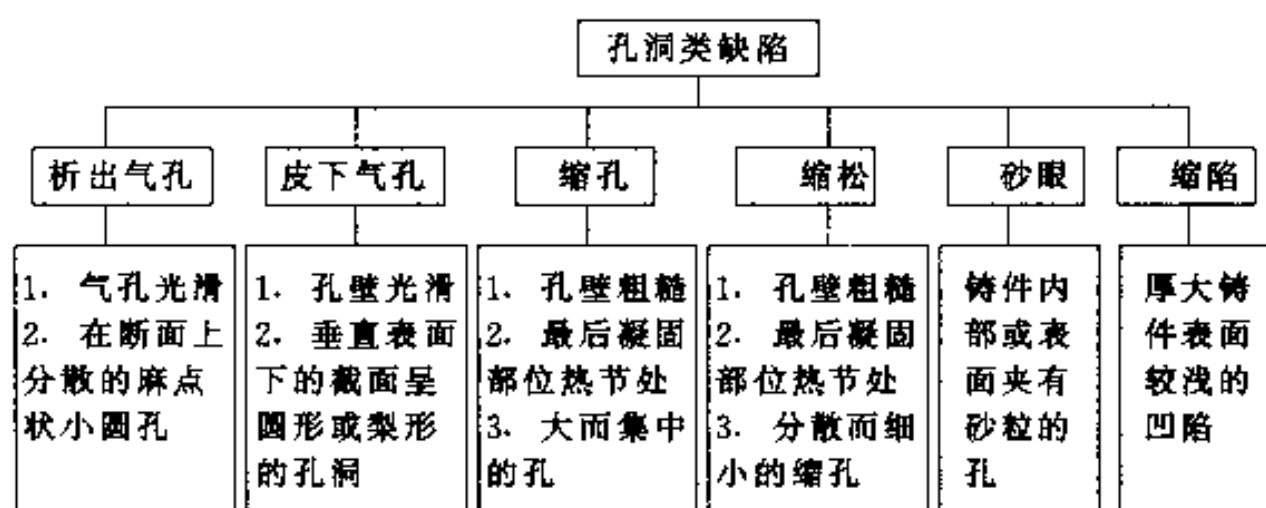


图4-8 孔洞缺陷的分类

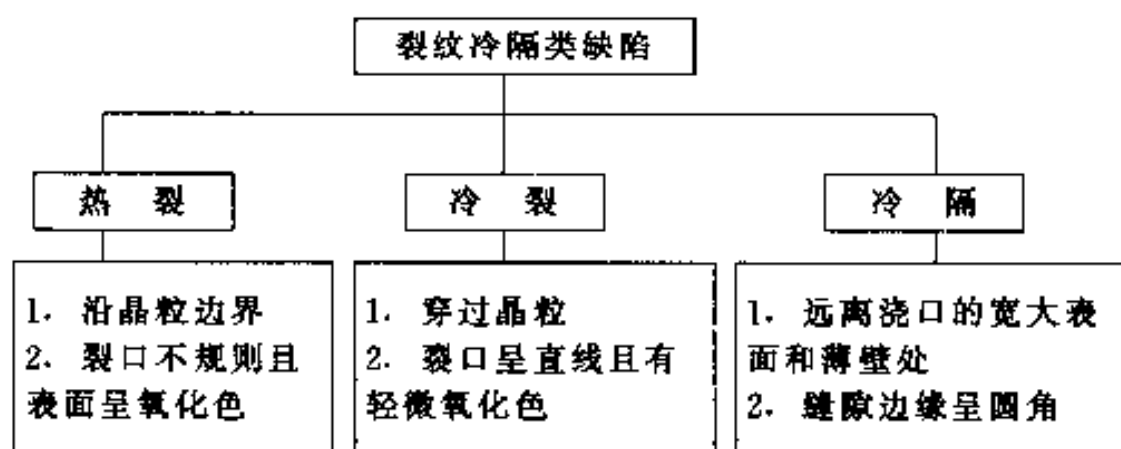


图4-9 裂纹类缺陷分类

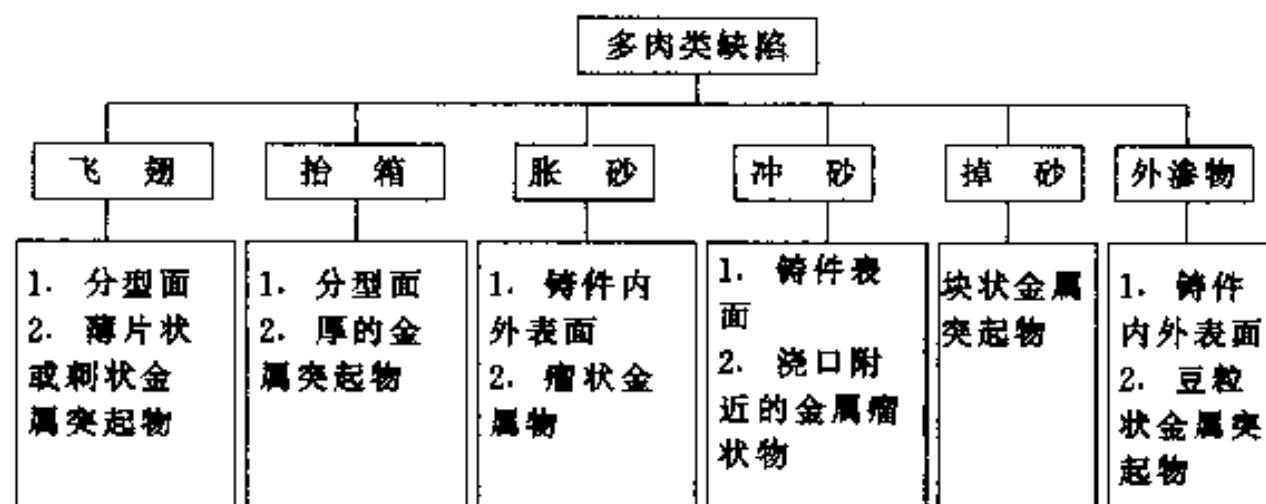


图4-10 多肉类缺陷分类

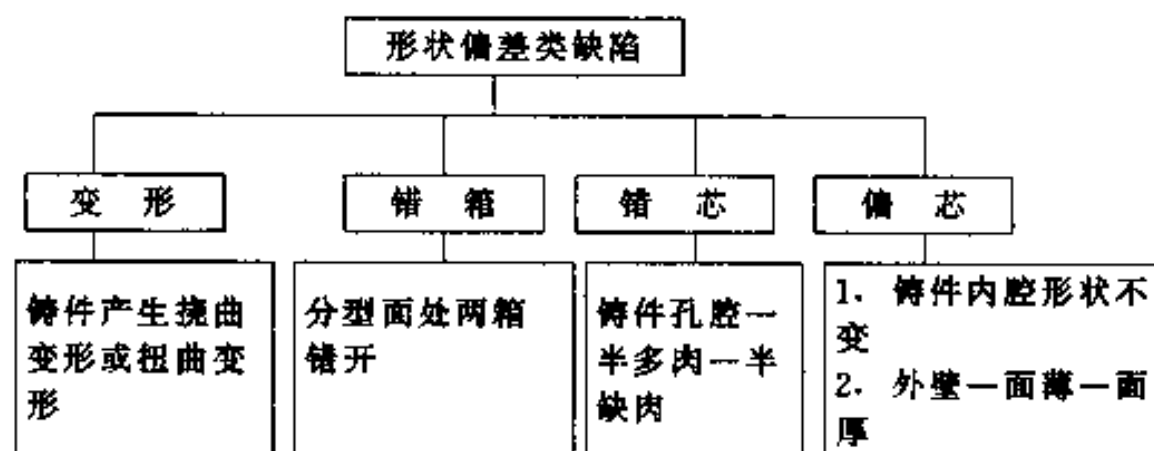


图4-11 形状偏差类缺陷分类

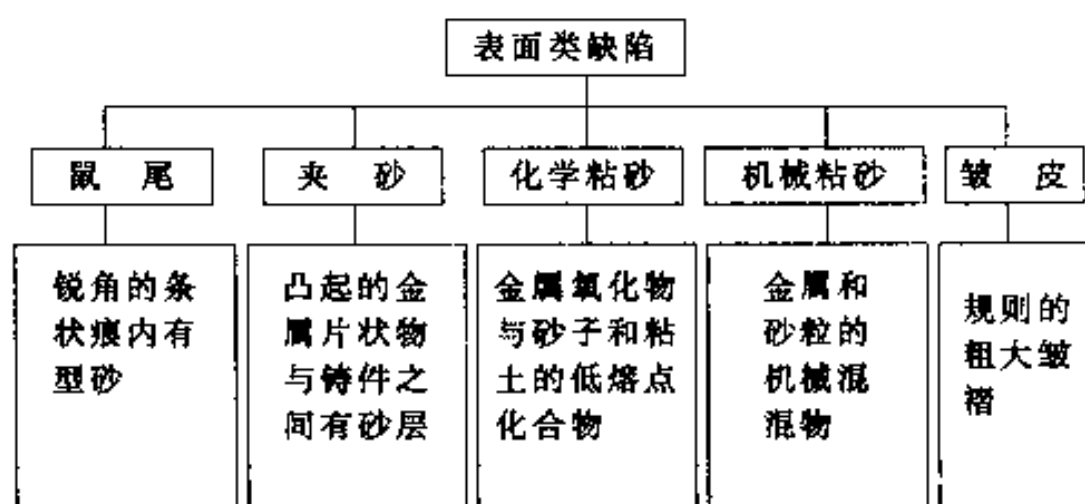


图4-12 表面类缺陷分类

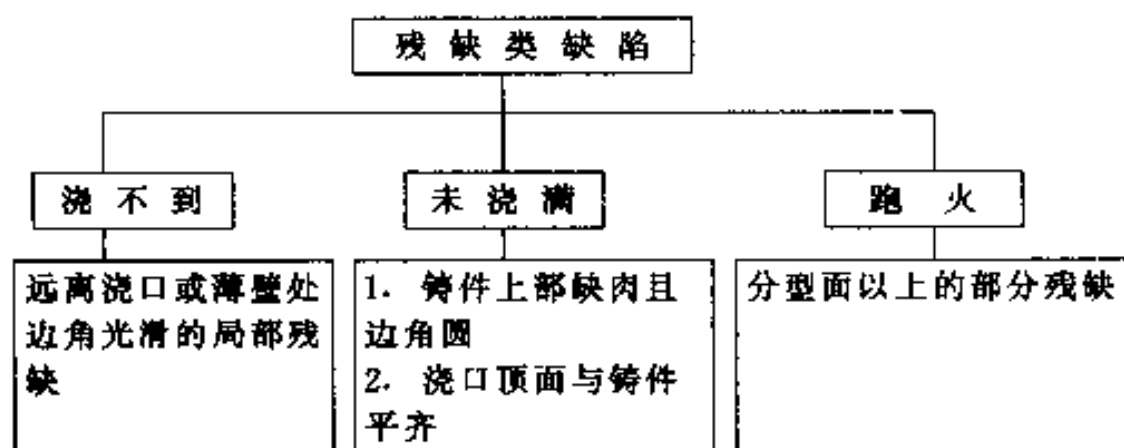


图4-13 残缺类缺陷分类

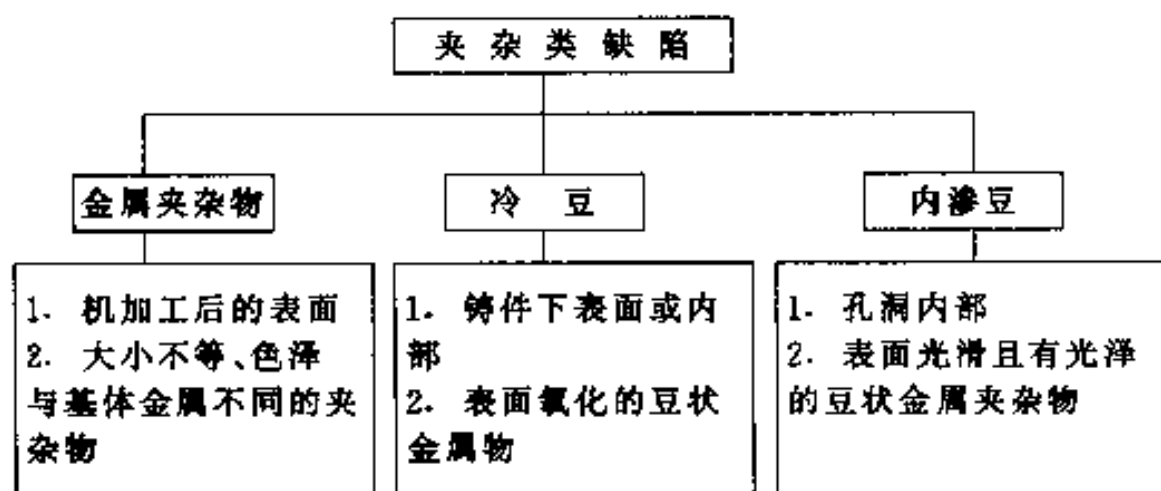


图4-14 夹杂物类缺陷分类

在诊断过程中，首先确定一个最上层假设，例如设为气孔。为证实这个假设，系统寻找后件是气孔缺陷的规则，然后把这些规则的前件再作为新的子目标进行求证，这样通过从每一前件条件出发，逐步地向后推理，就构成一深度优化的推理网络。当下一步要确认的子目标是一事实时，推理机制就将要求证的子目标与知识库进行匹配。如成功，便求证下一个新目标，否则向用户询问，直到有关的规则均被使用为止。整个过程如图 4-15 所示。

4.5.1.3 数据库

数据库中存有产生铸件缺陷的原因和防止措施。推理机构在确定缺陷种类之后，将访问数据库，根据缺陷的属性和数据库中的原因、措施相匹配，实现铸件缺陷原因分析，并提出其防止措施。

以往在铸件缺陷原因分析的过程中，为尽快使问题得到解决，往往得到一种可能性较大的原因后，就不再去验证其它可能的原因了，这样通常会影响我们找到解决问题的正确方法。因此，在确定缺陷的原因之前，很有必要先列举出所有可能的原因。图 4-16 给出了造成表面气孔缺陷的原因的具体图解形式。

在了解所有可能的原因之后，系统将逐一检查操作条件（如浇注温度、粘结剂水平等），以确定潜在的造成缺陷的原因。图 4-17 具体说明了对个别因素（造型、浇注、熔炼）进行检

验的过程。

产生缺陷的原因确定之后，系统将给出防止缺陷产生的措施。这些补救措施直接由引起缺陷的原因确定，如原因是浇注温度过低，措施就应是提高浇注温度；原因是浇注速率过低，措施就应是增大内浇道面积和直浇道高度。

4.5.1.4 用户接口

铸件缺陷分析的专家系统具有友善的用户接口，为用户与系统的交流提供了方便。通常，系统可以通过两种方式向用户获取信息：其一是显示供用户选择的菜单；其二是就推理需要向用户提问。这些问题中有的要求用户用 yes 或 no 回答，有的要求用户回答某一过程参数，也有的问题向用户提供几个可供选择的参考答案，用户按实际情况键入所选答案标号即可。在用户向系统提供足够信息之后，系统将向用户显示缺陷种类，缺陷产生的原因及防止其产生的工艺措施。

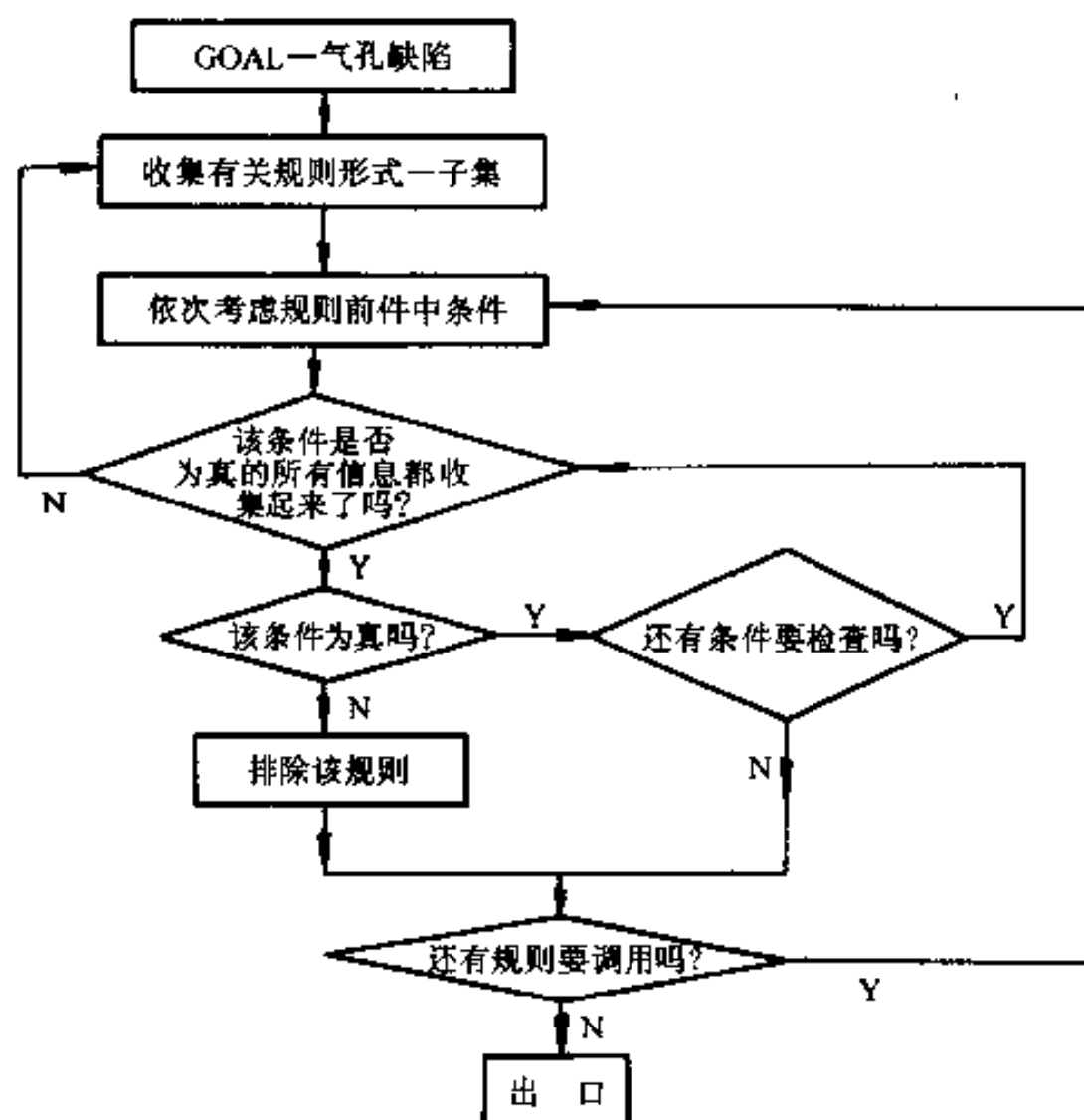


图 4-15 铸件气孔缺陷诊断过程

这种用户接口的使用户不需了解系统的详细结构，即可根据菜单提示使用系统，达到直接与专家交流，了解其证实内容和推理思路的目的。

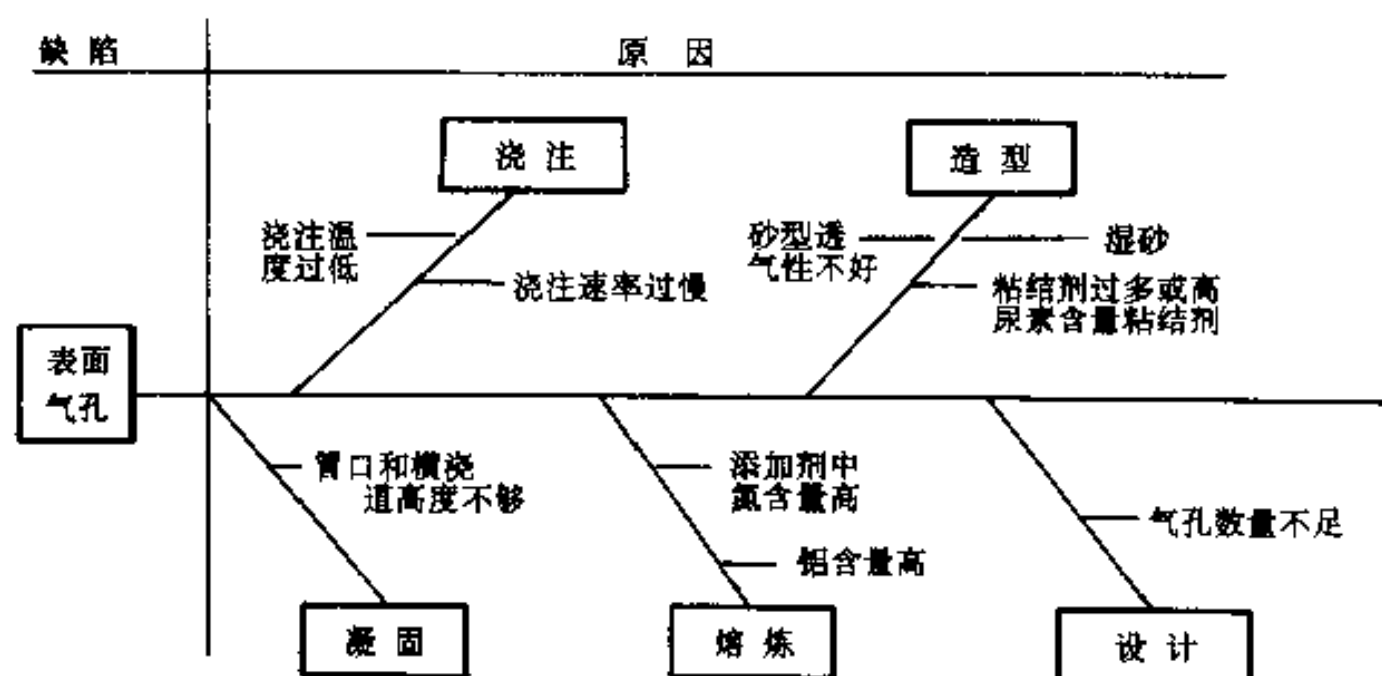


图 4-16 铸件表面气孔缺陷原因图解

4.5.1.5 解释机构

铸件缺陷分析专家系统的解释机构增强了系统对用户的透明度，使用户能更好地与系统进行交流。当用户不能理解系统提问的内容时，可键入“Help”向系统请求帮助，系统则向用户显示出问题的含义。例如：若用户对以下问题不理解，则键入“h”。

多肉发生在分型线处吗？h

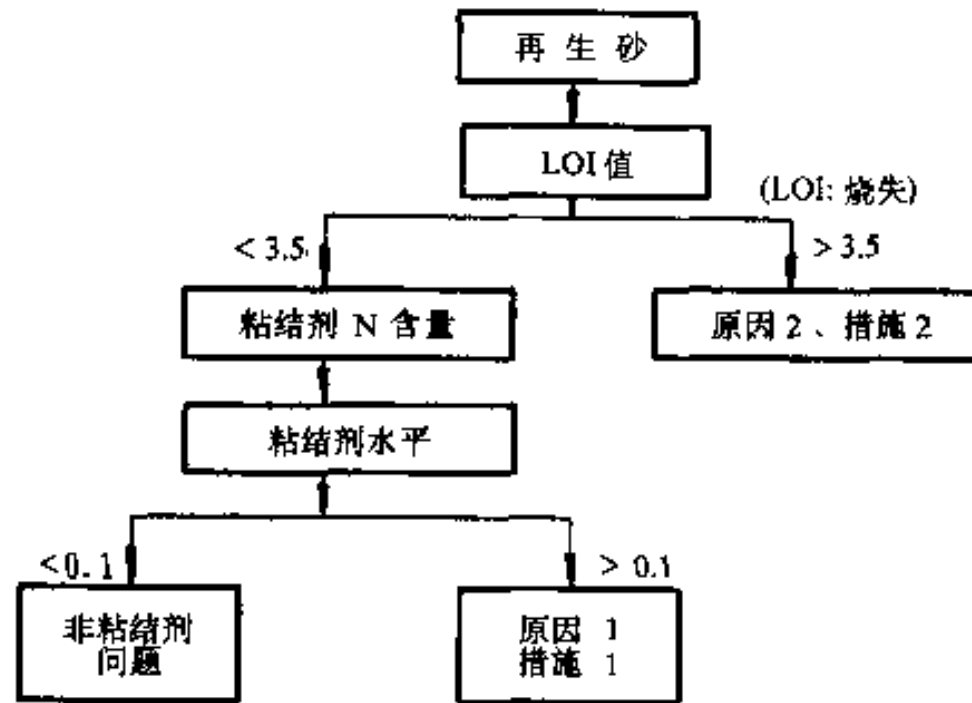
计算机显示：

分型线是铸型上下两部分的分界线。

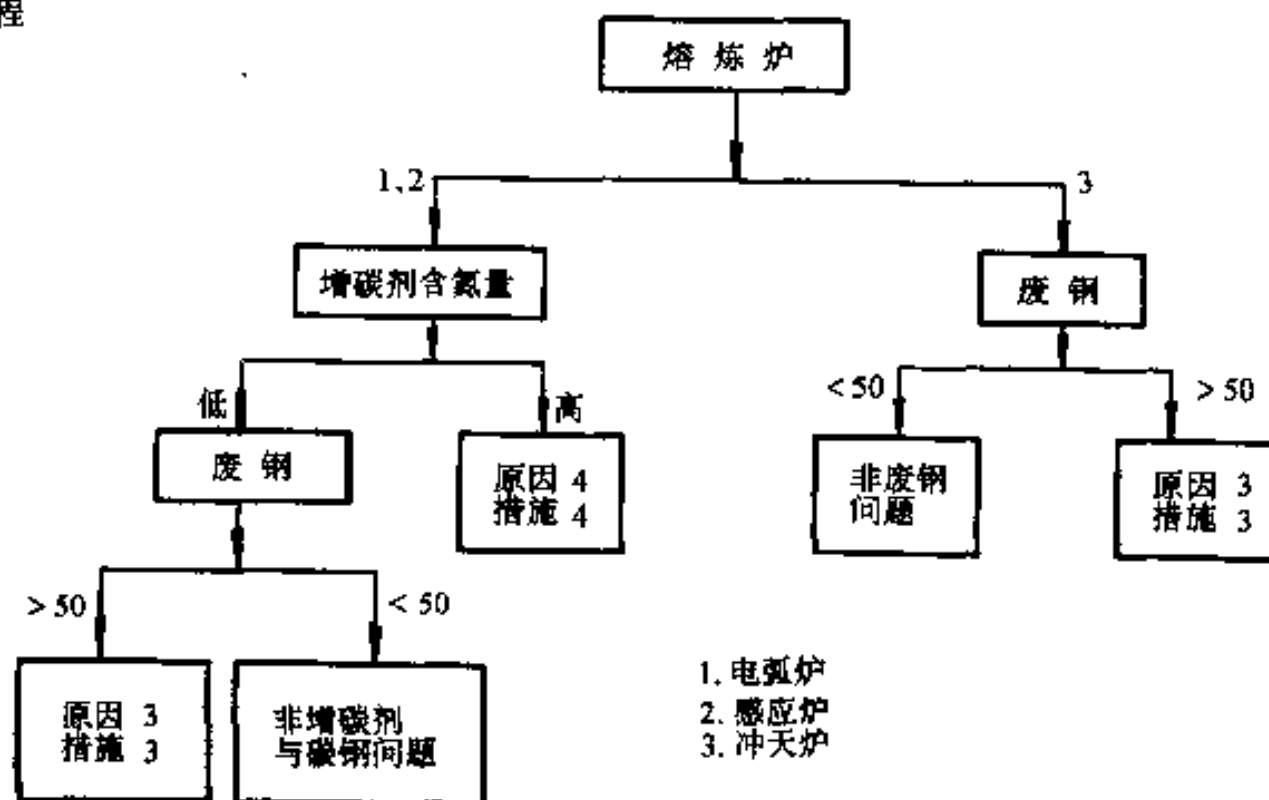
这一事实以下面的形式存在知识库中：

Help (“分型线”是铸型上下两部分的分界线)

(1) 造型过程



(2) 熔炼过程



(3) 浇注过程

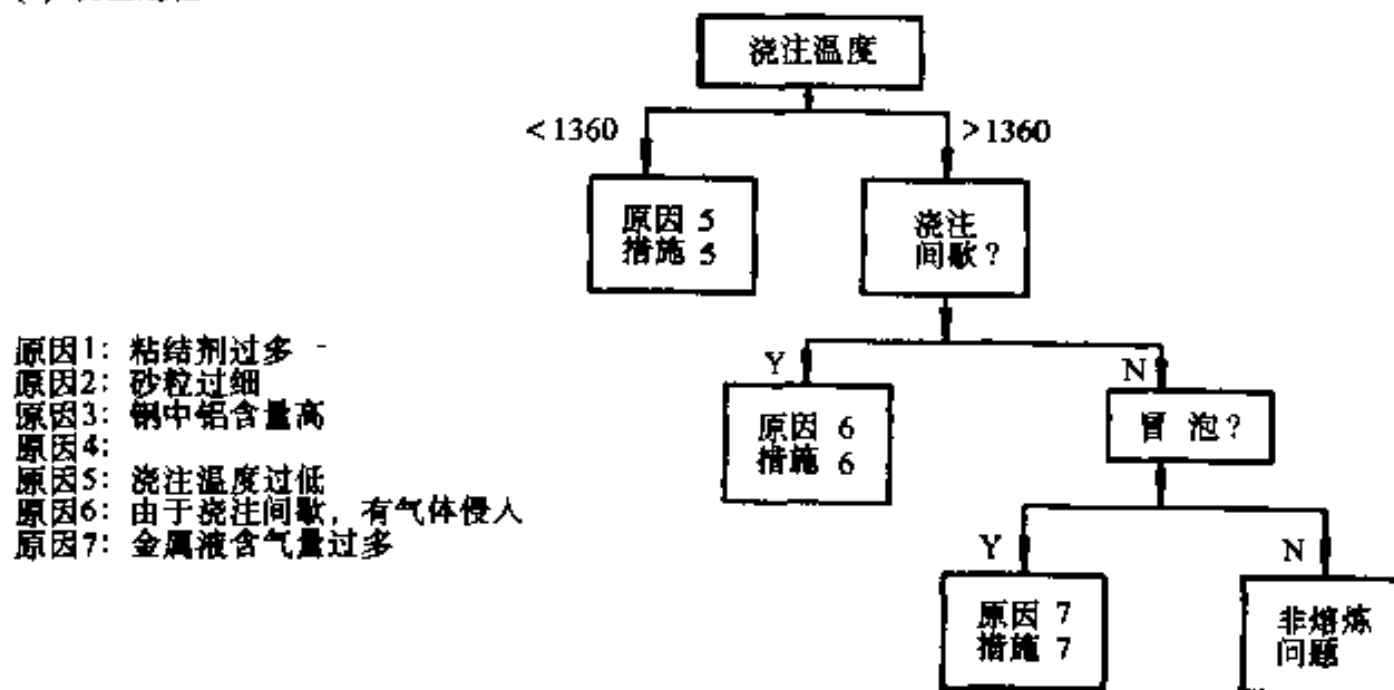


图 4-17 对造型、熔炼、浇注条件检验的过程

有的专家系统不需用户提出请求，而是在提问的同时给出每一个问题的含义。此类系统所显示的内容如图 4-18 所示。

铸件缺陷分析专家系统	
<p style="text-align: center; margin: 0;">咨 询</p> <p>问题：是多肉？ N</p> <p>问题：是孔洞？ Y</p> <p>问题：孔壁光滑？ N</p> <p>问题：孔壁粗糙？ Y</p> <p>问题：最后凝固部位及热节处？ Y</p> <p>问题：大而集中的孔？ Y</p>	<p style="text-align: center; margin: 0;">主菜单</p> <p>1 判断缺陷</p> <p>2 已知缺陷</p> <p>3 退出</p> <p style="text-align: center;">请选择 1~3</p>
<p style="text-align: center; margin: 0;">信 息</p> <p>问题是多肉是指多肉类缺陷即铸件表面有金属突起物</p> <p>问题是孔洞是指孔洞缺陷即铸件表面或内部有孔洞</p> <p>问题是裂纹冷隔是指裂纹冷隔类缺陷即铸件表面或内部出现裂纹</p> <p>问题是表面是指表面类缺陷即铸件表面不符合要求</p> <p>问题是残缺是指残缺类残缺即铸件外形不完整</p> <p>问题是形状偏差是指形状偏差类缺陷即铸件内外形不符合图样要求</p> <p>问题是夹杂是指夹杂缺陷即铸件含有与本体不同的金属或非金属物</p>	<p style="text-align: center; margin: 0;">缺陷 是 缩孔</p>

图 4-18 系统显示的问题说明

这一解释功能使非专业人员也能使用此类专家系统进行铸件缺陷分析。

另外，解释机构还可以对用户的其它提问进行解释。当用户以“How”提问时，系统会向用户显示整个推理过程及推理中所用到的所有规则，从而说明如何得到某一结论；当用户以“W”提问时，系统会向用户显示为何要提出某一问题。

解释机构的实现使用户彻底了解系统的推理思路，另一方面，通过解释机构，用户可以从专家系统中获得知识和经验，达到使用过程中学习的目的。

铸件缺陷分析的专家系统除具有上述五个基本模块以外，还具有知识库维护模块。该模块提供用户对知识库的各种操作，如读取、显示、修改已有知识，向库内添加新知识等。

在一些比较完备的铸件缺陷分析专家系统中，还建立起了自学习模块。当系统给出的缺陷分析结果被认为有误时，系统激活本模块。它首先将结论保存起来，然后按下列结束条件搜索更合适的规则：

- 1) 规则左部条件应少于 10 个。
- 2) 规则至少与正面例子的 20% 匹配。
- 3) 规则置信度绝对值大于 0.4。
- 4) 规则至多与反面例子的 10% 匹配。

收集符合条件的规则，形成假设空间 H。然后按下列步骤形成新规则：

- 1) 用最一般的假设使假设空间 H 初始化。
- 2) 使 H 中每一个假设特殊化，以形成新假设。

3) 如果 2) 中产生的后续假设没有破坏前面的约束条件，就把它放到 H 中，并从 H 中去掉其前导假设，如果所有可能的后续假设都不满足约束条件，则把原来的前导假设作为新规

则输出，并把它从 H 中去掉。

4) 重复 2)、3) 步骤，直至 H 空。通过大量正反例子，对新规则按下列原则取舍：

如果新规则是冗余的去掉；如果新规则不包含在知识库内，加入；如果新规则比旧规则更一般具体或相互矛盾，则以新代旧。

这一学习模块的加入，使系统能够在应用的过程中不断进行自我调整和自我完善，使专家系统更与专家相类似。

另外，在 P-H、Yang 等学者建立的孔洞类缺陷分析的专家系统中，为了更加详实地描述各种缺陷的外观形貌，系统对每一种缺陷都给出了与之相应的图形，使用户对系统所描述的各种缺陷有了更加直观的认识，同时也使系统使用起来更加方便。

在 R. C. Creese 等学者建立的消除铸件缺陷的专家系统中。除具有前面提到的几种功能外，还具有过程监视功能。监视系统通常包括对过程参数的测量以及应用过程控制的统计技术确定各参数的极限。在实际应用中不一定要对每一个缺陷补救措施进行连续监视，但对一些关键的过程参数，如金属液温度等，必须进行连续地或有规律地监视，监视所得的资料应及时反馈给系统，以便系统根据这些信息对数据库进行调整，这样，当同一缺陷再度发生时，系统就能够更准确地使问题得到解决。

就铸件缺陷分析的专家系统的实现方式而言，此类专家系统可分为利用计算机语言构造的专家系统和利用专家系统工具构造的专家系统。现今在这一领域曾经应用过的计算机语言有 Prolog 语言、Cobol 语言和 Fortran 语言等。其中应用较多的是 Turbo、Prolog 语言。专家系统工具有 IITMRULE、PC、Plus、CLIPS、NEXPERT 等。

4.5.2 焊接专家系统的应用

4.5.2.1 焊接专家系统的现状

焊接领域的专家系统研究始于 20 世纪 80 年代中期，首先由美国学者开发的专家系统是焊接材料选择系统。相继英国、日本、德国及其它一些国家也都开展了这方面的研究工作。其主要解决有关焊接工艺制定和选择、热处理工艺制定、焊材方法选择、焊接 CAD、焊接质量控制、焊接缺陷分析和预测、焊接设备故障诊断等等。几乎包括了焊接生产的所有主要阶段及主要方面。

我国焊接专家系统研究始于 20 世纪 80 年代末期。最早见于报道的是南昌航空工业学院的焊接方法选择专家系统。之后，清华大学、哈尔滨工业大学、天津大学等单位相继进行了焊接专家系统的开发，并取得一定的研究成果。其中，清华大学研制的“通用型弧焊工艺专家系统”和哈尔滨工业大学研制的“焊接工艺数据库及专家系统”因其有较强的适应性和再开发能力而独具特色，均得到较好的应用。

经过焊接工作者十多年的探索和努力，专家系统这门高新技术已经在我国焊接领域获得了较大的应用。这些系统按内容可分为以下几种类型：

(1) 工艺选择与工艺制定 包括单因素工艺选择和综合工艺选择两种形式。

(2) 裂纹预测 在给定的焊接工艺条件下，预测焊接接头是否会产生裂纹。

(3) 缺陷预测和诊断 根据焊接缺陷特征判断缺陷类型，进而分析缺陷成因和提出缺陷防止措施。

(4) 工艺设计 根据施焊条件（母材牌号、焊接位置、焊头形式等）设计焊接工艺。

(5) 焊接 CAD 已开发的专家系统有焊接变压器设计和超声波焊机设计，属于焊接设备

CAD。

(6) 结构安全评定 对具有缺陷的结构进行使用安全性评定。

4.5.2.2 典型焊接专家系统

1. Weldselector——焊接材料选择

该软件可根据焊接条件,选择一种到几种可使用的焊接材料。Weldselector 内包括一数据库,存有 1200 多种钢材及相关焊材的工艺、力学性能、化学性能、焊接特点等信息。该系统拥有 150 余条规则。

2. Weldgen——焊接工艺制定

可为 C-Mn 钢、低合金钢、不锈钢、铝合金等材料制定焊接工艺,工艺内容包括焊接道数、电流、电压、送丝速度、焊接速度、线能量、热处理工艺等。

3. MAGWLN——焊接工艺优化及焊接缺陷分析

该软件具有工艺制定、工艺优化和缺陷分析功能,各功能间衔接好。软件首先将在用户参与下确定一套初步工艺。然后,进行工艺优化设计。用户将试验结果告知系统,程序随即进行推理,得出工艺改进方案。若焊接过程中出现焊接缺陷,可启用其缺陷分析功能。程序能对产生裂纹、几何偏差、未熔合、未焊透、类渣、气孔等缺陷的原因进行分析,并给出具体措施。

4. “弧焊工艺制定与咨询专家系统”——焊接工艺选择与工艺制定

该软件能在焊接工艺评定报告数据库的基础上,制定出可直接用于压力容器生产的焊接工艺。也可借助其内部的知识库,为不同的焊材进行焊接工艺评定和方案设计。根据实际工况,系统可连续完成焊材选择、坡口设计、预热及焊后热处理设计、焊接规范设计等一系列任务,并自动处理各工艺参数间的约束与联系,最终形成一份完整的焊接工艺,为焊接工艺评定试验提供指导。该系统拥有各类规则约 800 条。

5. 焊接裂纹预测及诊断专家系统

该系统能够对碳钢、合金钢采用手工电弧焊时的冷裂纹、热裂纹、再热裂纹及层状撕裂进行预测。根据用户提供的母材、工艺等有关信息,系统可预测产生裂纹的可能性。并根据各种裂纹典型特征及产生条件诊断裂纹种类。用户要提供有关焊接工艺数据,如:电流、电压、焊接速度、送丝速度、母材厚度等等,系统根据用户提供的这些信息进行预热评估、热过程分析、组织性能分析、应力变化分析等,得出硬度、冷却速度、预热温度、淬硬性、焊道宽度、熔渣、塑性等指标。然后,程序将进入缺陷分析阶段,经推理得出最终结果。其结论包括:发生裂纹的可能性、产生敏感组织的可能性、存在焊接应力的可能性以及推荐应采取的措施。

6. 有缺陷结构安全评定专家系统

该系统以国际最新的双判据法评定规范为主要基础,同时吸收英国、日本及国内有关评定规范的优点及相关知识,对有缺陷结构进行不同层次的断裂安全性分析及安全裕量敏感性分析和疲劳安全性分析。

4.6 专家系统的发展趋势

我国的热加工领域专家系统的研究和应用已取得了可喜的成果,但总的来说目前还处于初级阶段。随着信息技术、人工智能技术及多媒体技术的发展和运用,未来热加工领域专家

系统将有如下发展趋势：

(1) 加强和完善现有应用研究领域, 拓宽和发展新的应用研究领域 虽然, 热加工领域专家系统在热加工工艺、缺陷分析与诊断、材料和方法选择等方面得到了成功的应用, 但无论从品种、数量还是质量、稳定性、再现性等方面, 都有待进一步深化拓展提高和完善。除已有的应用外, 专家系统在热加工生产规划、资源配置、生产调度、质量控制、成本核算、教育培训等方面将有广泛的应用前景。

(2) 人工智能及多媒体新技术的应用 除了灵活运用现有的专家系统技术、完善和提高系统性能, 如解释能力、人机界面的友好性能外, 专家系统将引入目前人们广泛研究的人工智能、多媒体技术、不精确推理尤其是模糊推理技术。未来的热加工领域的专家系统应具有开发性, 增强系统的处理能力。

(3) 权衡专家系统的专用性和通用性 专家系统的特长是解决领域的专门问题, 但它通常为众多用户服务, 即使为个别用户开发的专家系统, 也应考虑其使用条件的可能变化。开发具有良好通用性、适应性的热加工领域专家系统可扩大其应用范围, 提高开发效益。但同时也要避免过分的通用化, 因为这种专家系统将失去其领域特点而变得没有价值。

(4) 集成化和网络技术的应用 目前开发的热加工领域专家系统基本是独立使用的软件, 而未来的系统将向集成化方向发展, 凡涉及较多领域知识的, 比较复杂的问题, 可由多个系统协同处理。这样可发挥专家系统的特长。通过 Internet、Intranet 联网, 可以利用某些大型数据资源, 系统也可提供多用户能力, 实现系统共享。

第5章 计算机在企业管理信息系统中的应用

5.1 管理信息系统的概念

5.1.1 管理信息系统的定义

管理信息系统 MIS (Management Information System) 的概念起源很早,早在 20 世纪 30 年代,伯德就写书强调了决策在组织管理中的作用,直到 20 世纪 80 年代,1985 年管理信息系统的创始人,明尼苏达大学卡尔森管理学院的著名教授高登、戴维斯才给出管理信息系统一个较完整的定义:“它是一个利用计算机硬件和软件、手工作业、分析、计划、控制和决策模型,以及数据库的用户——机器系统。它能提供信息,支持企业或组织的运行、管理和决策功能。”这个定义说明了管理信息系统的目标、功能和组成,而且也反映了管理信息系统当时已达到的水平。管理信息系统在中国出现于 20 世纪 70 年代末 80 年代初,根据中国的特点,许多最早从事管理信息系统的学者也给管理信息系统下了一个定义,登载于《中国企业管理百科全书》上,该定义为:“管理信息系统是一个由人、计算机等组成的能进行信息收集、传递、储存、加工、维护和使用的系统。管理信息系统能实测企业的各种运行情况,利用过去的数据预测未来,从企业全局出发辅助企业进行决策,利用信息控制企业的行为,帮助企业实现其规划目标。”

我们可以重新描述一个管理信息系统的定义。

管理信息系统是一个以人为主导,利用计算机硬件、软件、网络通信设备以及其它办公设备进行信息的收集、传输、加工、储存、更新和维护,以企业战略竞优,提高效率和效益为目的,支持企业高层决策,中层控制,基层运作的集成化的人机系统。这个定义说明管理信息系统决不仅仅是一个技术系统,而是把人包括在内的人机系统,因而它是一个管理系统,是个社会系统。

管理信息系统正在形成为一门学科,我国已把它列为管理科学与工程一级学科下的二级学科。它引用其它学科的概念,综合集成为一门系统性的学科。它面向管理,利用系统的观点,数学的方法和计算机应用三大要求形成自己独特的内涵,从而形成系统型、交叉型、边缘型的学科。

5.1.2 管理信息系统的结构

管理信息系统的结构是指各部件的构成框图,由于对部件的不同理解就构成了不同的结构方式,其中最重要的是概念结构、功能结构、软件结构和硬件结构。

管理信息系统的概念结构:从概念上看,管理信息系统由四大部分组成,即信息源、信息处理器、信息用户和信息管理者,如图 5-1 所示。

这里,信息源是信息产生地;信息处理器担负信息的传输、加工、保存等任务;信息用户是信息的使用者,它应用信息进行决策,经信息管理者负责信息系统的设计实现,在实现以后,它负责信息系统的运行和协调。

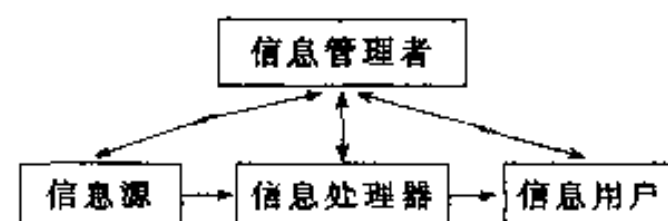


图5-1 管理信息系统总体结构

管理信息系统的功能结构：一个管理信息系统从使用者的角度看，它总是有一个目标，具有多种功能，各种功能之间又有各种信息联系，构成一个有机结合的整体，形成一个功能结构。例如，一个企业的内部管理系统可以具有图 5-2 所示的结构。

由图我们可以看出，这里子系统的名称所标注的是管理的功能或职能，而不是计算机的名词，它说明了管理信息系统能实现哪些功能的管理，而且说明如何划分子系统。实际上这些子系统又可分为：人事档案管理、工资管理、社会保障管理、人事变动管理等二级子系统。

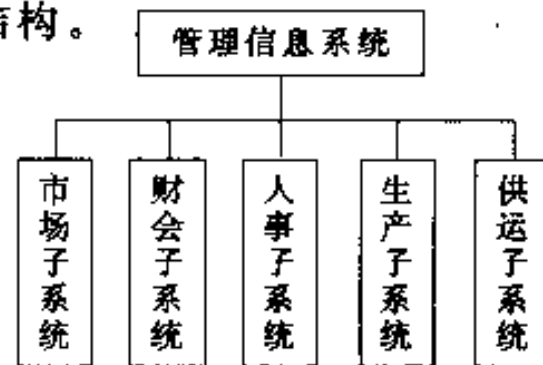


图 5-2 管理信息系统的功能结构

管理信息系统的软件结构：管理信息系统从软件结构上可分为四层：业务处理、运行控制、管理控制、战略计划。管理信息系统的硬件结构如图 5-3 所示。

5.1.3 管理信息系统在企业管理中的作用

管理信息系统对企业的业务运作有三种作用形式：一是“替代”，信息系统替代人工，提高事物处理的效率，如会计电算化系统；二是“补充”，改变工作方式，以人工管理不曾有的方式来处理业务，例如电视会议系统；三是“创新”，开创新的分析，沟通方法和途径，创造新的营销方式和模式，例如电子商务。

如果说信息化在 20 世纪 80 年代还是一种时尚，一种企业形象的需要的话，经过近 20 年来的发展，信息化已经成为一种现实的潮流，一种无法回避的潮流，信息时代确实扑面而来。

作为管理信息系统实现的电脑，人们有时对其寄予太大的希望，认为其是万能的，我们设想一个没有任何软件的“裸机”，它是什么事情都无法作的。软件可以让电脑控制电气设备自动运转，软件可以让电脑管理仓库，软件本身有思想，所以说有了电脑并不等于有了电脑应用，有了局部的电脑应用并不等于建立了信息系统。

随着国内经济建设的迅速发展，企业间的竞争日益加剧，企业逐步认识到信息的竞争将成为企业经营成败的关键，企业物统控制内部沟通、外界交流等各种影响决策的信息获取的通道都明显出现不畅，已成为企业发展的障碍，反之，应用计算机提高效率的例子比比皆是。如总经理出差，一个重要的付款单无法签字，因此而耽误了一笔大生意。又如，销售企业有贷无贷往往无法准确及时掌握等等，有了计算机系统这些问题都可以解决。

其实需要思考一个好像不需要再讨论的问题：企业应用电脑到底有什么好处？如果一定要简单的回答这个问题，那么我们可以说：

- 1) 大部分应用领域有直接的效益，信息资源将与资金、人才一样成为企业赖以生存的资源。
- 2) 外向型企业与市场联系密切的企业会对企业的经营战略产生积极影响。
- 3) 促使企业改善内部管理，跟上现代管理技术的步伐，在未来的竞争中保持优势。

从系统的角度来看，企业信息系统与企业系统有内在的一致性，企业信息系统的要求与企业的高级目标存在着自然的逻辑关系，这是信息化影响企业战略进而影响企业的效率和效益的根本原因。

僵化的企业组织不能适应信息社会，信息化对企业管理的影响是多方面的多层次的。职能制、科层制使企业管理有条不紊，但这种以分工为基础的管理模式不够灵活，对提高企业的整体运作效率不利。

可以这样说，陈旧的企业运行模式需要信息系统的支持。反之，管理信息系统的引入又加快了企业管理模式的革命。

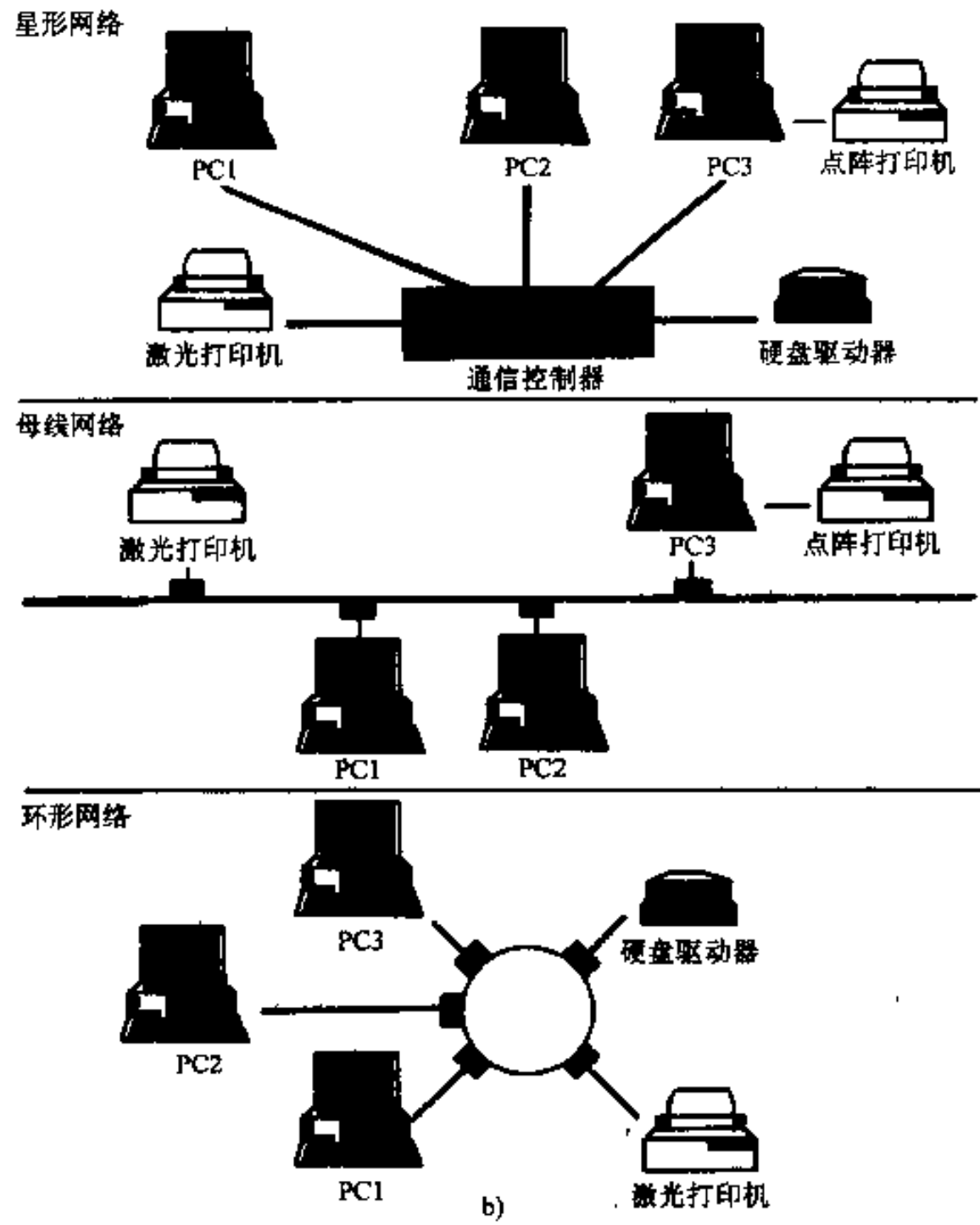
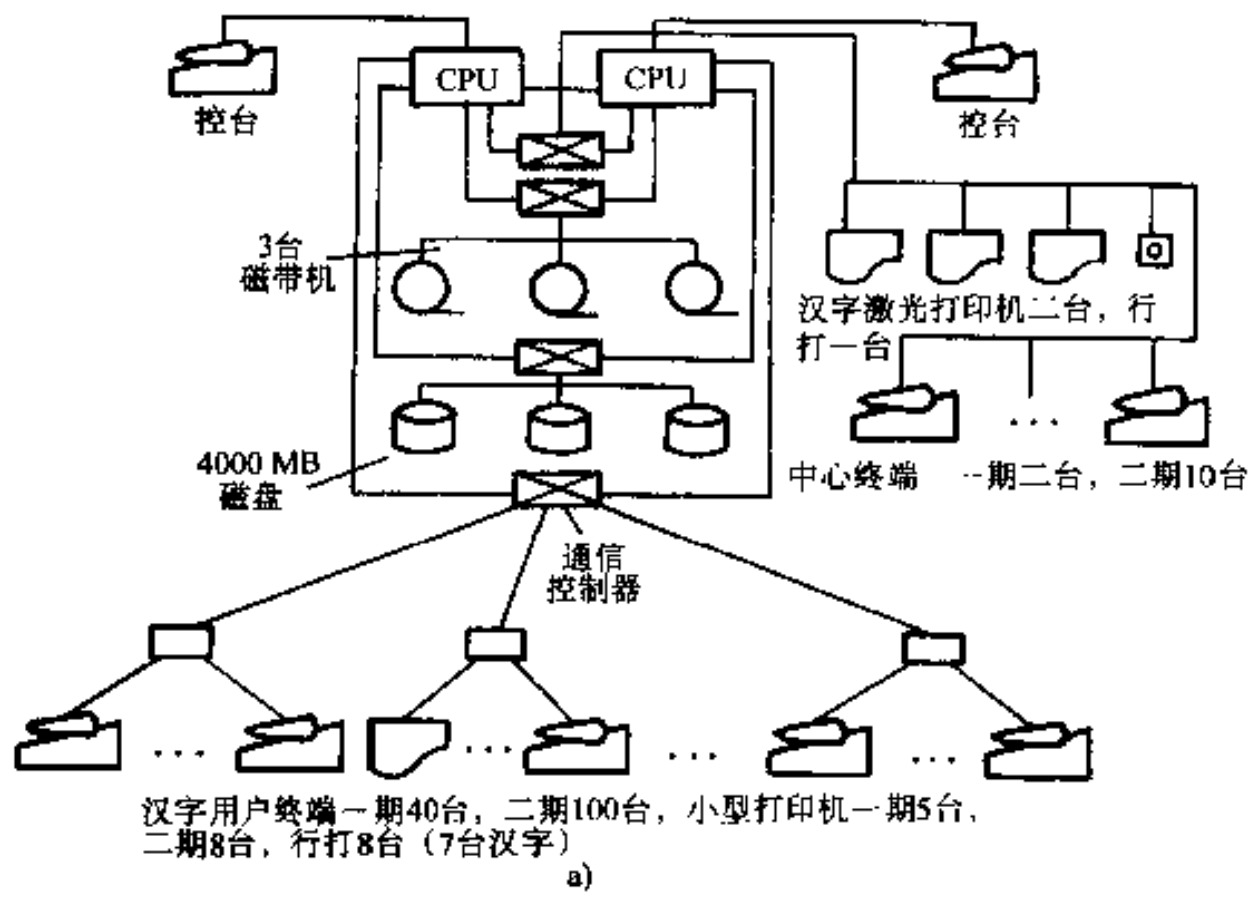


图 5-3 管理信息系统硬件结构
a) 两台主机组成的终端网结构 b) 微机网结构

5.2 现代计算机技术

5.2.1 计算机硬件系统

世界上第一台电子计算机诞生于1946年,它的诞生标志着计算工具随着世界文明的进步飞跃到一个崭新的极端,电子计算机的广泛应用有利地推动着国民经济、科学技术和文化事业的发展,尤其在20世纪70年代初,大规模集成电路技术的发展,微型计算机的问世出现,为计算机的广泛应用开拓了极其广阔的前景,展示了它在科学技术领域中日益显要的地位。

据统计,计算机每隔5~7年,其速度提高10倍,可靠性提高10倍,成本降低到原来的十分之一。计算机的发展趋势明显朝向两极发展;一方面为航天领域和军事的需求研制高速度,强大功能的巨型计算机;另一方面,为了国民经济各个领域的应用而研制微型,超小型计算机。以LSI工艺和计算机技术为基础的微处理器和微计算机的问世,是计算机发展史上新的里程碑。

微型计算机是伴随着集成度的不断提高而产生和发展的。自从1971年美国的Intel集成电子产品公司首先研制成了Intel4004微处理器,并用它组成了MCS4微型计算机,到现在20几年的时间,微处理器和微型计算机的发展日新月异,产品不断翻新,就其微处理器品种而言从4位,8位,16位,32位发展到64位,各类产品走向系列化,如Intel、Cyrix、AMD系列,从它们的性能上看,运算速度从5000次/s发展到今天的上百亿次/s,从体系结构的变化看,从最初的简单浮点运算到引入MMX技术的双独立总线DIB结构,其功能已达到甚至超过小型计算机。计算机系统的时钟频率也迅速增大,从20~700MHz,随着计算机应用的普及,计算机已大量转向图象,自然语言,声音等非数值信息的处理,因而向计算机提出了更高的要求。在国际上提出了两种解决途径,一是应提高硬件的功能,研究和开发巨型超级计算机;另一种是变革计算机系统的体系结构,采用并行处理系统,综观计算机的发展过程和计算机技术的提高,计算机的发展趋势是智能化、微型化、巨型化和网络化。

一般计算机硬件系统的组成部分有:运算器、控制器、存储器、输入设备输出设备以及将上述各部件连为一体的总线。

(1)运算器 简称为算术逻辑部件ALU,是对二进制数进行算术运算和逻辑运算的部件。由累加器、算术逻辑单元、寄存器和其它逻辑电路等组成。其中累加器和算术逻辑单元是运算器的关键部件。寄存器用于暂时存放参与运算的数据和运算结果,在控制器的作用下,运算器根据指令功能对数据进行诸如加减乘除等算术运算、逻辑运算、移位运算等操作。运算所需的数据由存储器提供。

(2)存储器 存储器是用来存放计算步骤,初始数据,中间数据和结果数据,即存储程序和数据的部件。存储器是计算机各种信息存放和交流的中心,能够方便的按指定位置存入或取出信息,当从存储器读信息时,无论读出信息次数的多少,并不破坏原来的存储内容。向存储器中写入信息时,则原来存储的内容将被新内容替代。

(3)控制器 控制器是计算机系统发布操作命令的部件,犹如人脑中中枢神经一样。它是计算机的指挥中心。根据指令提供的信息实现对系统各部件操作的控制,控制器首先从存储器取出指令、分析指令、根据指令的要求,生成一系列控制信号控制计算机各部件自动协调的工作。

(4)输入输出设备 输入设备,输出设备统称为外围设备,是人和计算机之间进行信息

交换的主要通道。输入设备的功能是将原始数据和处理这些数据的程序输入到计算机中。常见的输入设备有键盘、鼠标、图形图像输入设备（扫描仪、传真机、数字化仪、摄像机、数码相机等）。输出设备的功能是将计算机处理的结果数据转化为人或其它设备能够接受和识别的信息形式。计算机常用的输出设备有显示器、打印机、绘图仪、声音输出设备等。计算机的外围通过计算机外围设备的控制接口与计算机相连接，从而实现计算机与外围设备的信息交换，外围设备的控制接口也称为适配器。

(5) 总线 总线是计算机各组成部件之间进行信息传送的一组公共通道。计算机各部件信息的发送和接收只与总线有关，总线将运算器、控制器、存储器和输入输出设备等各部件相互连接起来，形成一个有机的整体，构成一个完整的计算机硬件系统。总线有数据总线、控制总线和地址总线。它们分别传送数据、控制信号和地址编号。

微型计算机系统和一般计算机系统结构上的差异在于硬件系统结构。微型计算机硬件系统包括主机和外围设备。主机指计算机机箱内的构件，包括系统板、CPU、存储器、总线、显示卡、扩展卡及接口等。外围设备指显示器、键盘、鼠标、操纵杆、扫描仪、数码相机、数字化仪、打印机等。

在空机箱内，通常可以看到以下的组成部件：

(1) 系统板 系统板也称主板，是计算机机箱内最大的电路板，一般位于计算机底部（桌面型机箱）或侧面（立式机箱）。任何构件都必须插在主板上才能正常工作。主板负责管理计算机的输入和输出，同时也是控制构件间的数据元素流动的通道，主板主要包括：

1) 中央处理器 CPU 及其配套集成电路芯片。

2) 快存和主存储器。快存采用高速的静态半导体随机存储器（SRAM）组成，在快存与 CPU 之间有局部总线进行连接，主存通常采用动态随机存储器器件（DRAM）组成。DRAM 的价格低于 SRAM。

3) 扩充卡插槽。在系统板上有多个空插槽，可供插入扩充卡，这些空插槽又称为总线插槽，扩充卡插入插槽后即可实现与总线的完整连接，从而可以方便灵活的完成系统功能的扩充。

4) 总线 它是连接计算机中 CPU，主存，辅存，各种输入/输出部件的一组物理信号线及其相关的控制电路。它是计算机中运载各部件间信息的公共通道。

5) ROM 和 CMOS 电路。在系统板上还有两片特别有用的集成电路芯片，一是只读存储器 ROM，其中存放基本输入/输出系统（BIOS），BIOS 是一组紧靠着裸机的机器语言程序，是计算机硬件与软件之间的接口，也是操作系统的基础。在 BIOS 中还包含有对计算机进行加电后自动检查测试的程序（即所谓的 POST 程序）。另一个有用的集成电路芯片是 CMOS 存储器，其中存放着用户对计算机配置参数，一旦用户设定后，CMOS 将记住这些数据，不必每次开机后再设置了（仅当配置需要改变时，再去修改 CMOS 中的参数）。由于电路是易失性的存储器，故必须在系统板上配有可充电的小电池，该电池在断电之后可支持 CMOS 工作，而在加电后又可接受系统电源的充电。

(2) 各类辅助存储器 在主机箱的框架上提供了若干个位置（称为支架框架），用来安置辅存设备。通常一台微型计算机的辅存设备有硬盘、软盘、光盘，这些辅存的驱动器均安置在主机箱的支架框上。用软性扁平电缆把信号线连接至系统板上（直接的或者通过扩展卡间接的连接到系统板）。

(3) 各类扩充（插件）卡 在主机箱内，除了系统板这一重要的电路板外，通常还在系

统板的不同总线插槽中安插了若干个扩充卡,这种扩充卡实际上是系统与 I/O 设备之间的接口控制电路板,或者是 I/O 设备控制器功能扩展与延伸的电路板。例如显示卡是系统与显示器之间的接口控制板,系统通过显示卡上的电路去控制显示器的工作,网卡是该 PC 机与计算机网络的接口系统,通过网卡实现最基本的网络通信协议,多媒体扩充卡(如声卡、视卡等)则进一步为该 PC 机提供相应的多媒体功能。

(4) 电源盒 在未进行安装的主机空机箱内,除了外壳与金属框架外,主要是一个为全机供电的电源盒,电源线插头可区分为连接系统板的两个供电插头和若干个连接软盘驱动器、硬盘驱动器和光盘驱动器等的供电插头。

常用的输入设备:

(1) 键盘 键盘是最重要的输入设备。计算机键盘通过一个有五个引脚的圆形插座与主机箱中的键盘控制电路相连接,每当在键盘上按下一个按键时,键盘内的电路根据该按键的位置,把该字符信号转换成为二进制码,再通过五芯的电缆传给主机,主机接收后再送回显示器,供用户核对其正确性。

(2) 鼠标器 鼠标器是控制显示屏上光标移动位置并向主机输入的一种常用输入设备,广泛应用于图形用户界面,鼠标器可以通过专用的计算机鼠标器插头座(RS-232)与主机相连接。

(3) 其它输入设备 扫描仪是目前常用的一种图片和文字输入设备。它利用光学扫描原理(类似于复印机的工作方式)从低介质上“读出”照片、文字或图形,然后把信息送入计算机进行分析、加工与处理。比如,使用 OCR 软件把读入的一段文字的映像(图像),由软件识别分析后转换为文字的对应编码供编辑使用。

数字化仪由平板加上连接的手动定位器组成,主要用于输入线划图形。例如:工程图样,地图等。用户可以通过手动定位器方便的获取每根线段的端点坐标,从而实现线划图形的输入。

条形码读入器和 IC 磁卡也已广泛用于商品管理、图书管理、功能验证等应用中。

常用的输出设备:

(1) 显示器 显示器是计算机最重要的输出设备。它通过显示屏幕向用户输出信息,用户可以通过显示器看到自己所输入的信息,了解程序运行的结果,跟踪或监视程序运行的过程。它是用户与计算机对话的主要窗口。

显示器屏幕上总是用光点(像素)来构成输出内容的,光点应越小越好。光点的行列数越多,分辨率越高,光点(像素)的浓淡变化称为灰度。任一彩色可以由红、绿、蓝三色组合而成。因此每一像素用 24 位二进位表示时可以表现出真彩色(224 种不同颜色)、分辨率、彩色数目及屏幕尺寸是显示器的主要指标。

(2) 打印机 打印机是产生硬拷贝输出的一种设备,供用户保存计算机处理的结果,常用的有针式打印机、激光打印机和喷墨打印机等。

(3) 绘图仪 绘图仪用于在纸上输出线划图形。它是 CAD(计算机辅助设计)系统的主要输出设备。

5.2.2 计算机软件基础

提到计算机软件,首先就要谈一个操作系统,所谓操作系统是指一组计算机程序模块,用来控制和管理计算机系统的全部硬件和软件资源,并有效的利用这些资源,合理的组织计算

机系统的工作流程，为用户提供方便使用、功能强大的工作环境。操作系统是“裸机”外面的第一层软件，也是最基本最重要和最必不可少的系统软件。它不但对计算机系统的总体功能进行了扩充，也是其它系统软件和应用软件的工作基础，并得到它的支持和取得它的服务。从用户的角度看，计算机配备了操作系统后，用户不再需要直接与计算机硬件打交道，只需要利用操作系统提供的命令操作计算机，方便使用，所以有人称操作系统是用户与计算机之间的“接口”。由此不难看出操作系统在计算机系统所占的重要地位。

从资源管理的观点来看，操作系统的功能包括：处理器管理、存储管理、文件管理、设备管理和作业管理。

(1) 处理器管理 处理器是计算机最主要的硬件。因此，合理地管理处理器，充分发挥处理器的作用，提高它的使用效率是十分重要的问题，处理器管理的第一部分工作是处理中断事件，硬件的处理器只能发现中断事件并产生中断，但不能处理。配置了操作系统之后，由操作系统对各种事件进行处理。处理器管理的第二部分工作是处理器调度，处理器可能是一个或多个。不同的操作系统针对不同情况采用不同的调度策略。

(2) 存储管理 存储管理主要是管理主存储器资源，存储管理将根据用户程序的要求给程序分配主存储器。同时，还将保护用户存放在主存储器中的程序和数据不被破坏。操作系统的这一部分功能与硬件存储器的结构密切相关，操作系统的设计者应根据硬件情况和使用需要，采用各种相应的有效调度策略与保护措施。

(3) 文件管理 文件管理是支持对文件的存取、检索、修改等操作以及文件保护的功能，早期的管理程序对文件的管理功能很简单，而操作系统提供了功能强大的文件管理系统。

(4) 设备管理 设备管理负责管理各类外围设备，包括分配、启动和故障处理。为了提高效率还引进了逻辑（虚拟）设备的概念，以实现预输入和缓输出的功能。

(5) 作业管理 作业管理的第一部分功能是提供一个“作业控制语言”，供用户写作业说明书用。同时还为操作员和终端用户提供与系统对话的“命令语言”。作业管理的第二部分功能是作业调度，根据不同的系统要求将制定相应的调度策略。

现在常用的几种操作系统有：

(1) DOS 操作系统 DOS 是 Disk Operating System 的缩写，中文的意思是磁盘操作系统，它主要运行在 IBM-PC 及其兼容的微型计算机上。DOS 系统主要分为 Microsoft 公司的 MS-DOS 和 IBM 公司的 PC-DOS。这两个系统在主要功能上基本相同。

(2) Windows 9X Windows 的中文名称叫视窗。是目前世界上应用最广泛的微机操作环境，它是一种单用户多任务操作系统。与 DOS 系统相比，Windows 系统用图标 (Icon) 代替了文字提示，即每一种应用软件都用一个图标来表示。用灵活的鼠标代替传统的键盘操作，使得用户可以不用记忆 DOS 系统繁琐的文字命令。只需要“看图识字”，用鼠标“指指点点”就可以完成对计算机的操作，使计算机的操作变得容易学习和容易掌握，极大地方便了用户。Windows 启动后直接展现出屏幕界面——“桌面”，好像一个摆满了各种工具的办公室，学会非常方便的使用这些工具，不但可以运行程序，借助多媒体的新特性欣赏音乐，还可以在网络上与朋友通信和实时交谈。

(3) Windows NT 后面两个大写字母代表了“New Technology”（新技术）。Windows NT 可以运行我们以前大多数的 MS-DOS 和 Windows 程序。但是软件实际进行的工作还是有区别的。Windows NT 在外观上与 Windows 95 极其相似，但它们实际上存在一些重要的区

别。Windows 95 是专门为家庭用户和办公室的人设计的,它在笔记本电脑上会工作得很好,通过它很容易可与网络相连,而它的即插即用特性使得新硬件的增添变得相当容易,然而,它的安全性不高,不用太麻烦,能接触计算机键盘的任何人都可以在你的硬盘驱动器内到处游逛。Windows 95 有时也会莫名其妙的崩溃,特别是它在只有较少的资源可以使用的时候。如果 PC 机设置了 Windows NT,那么它抵御外来侵入者的能力就会比使用 Windows 95 的时候强得多,我们可以锁定自己的计算机。这样其他任何人都无法侵入硬盘驱动器,除非他知道口令。另外,和以前的 Windows 版本比较起来 Windows NT 具有最强的防崩溃能力。

从计算机诞生到今天,程序设计语言也在不断升级换代,目前常用的办公自动化软件有 WORD、EXCEL、POWERPIONT、Lotus Notes 等。

常用的高级语言有 BASIC、C、C++、DENPHI、JAVA、FORTRAN、PASCAL 等。

常用的数据库管理系统开发语言有 dBASE、foxBASE、FoxPro、Powerbuilder 等。

5.2.3 计算机网络技术

目前任何一种关于计算机网络如何分类的方法都不是十全十美的,但是有两点极其重要。即网络的传输技术与大小规模。一般的说,网络按传输技术可以分为两类:广播网络和点对点网络。

(1) 广播网络 广播网络的通信信道是共享介质,即网络上的所有计算机都共享它们的传输通道,网络上处理的最小单位是分组。任何一台计算机发出的分组信息都可以被网络上的全体接收。每个分组都携带了一个它所发往目的地的地址,当任何一台机器接收到一个分组后,它首先检查是不是发给自己的,如果是则接收,否则放手。

(2) 点对点网络 点对点网络使得发信者和接收者之间有许多连接通道,分组要通过它们之间的一台或数台机器。它们通常被称为路由器。而且每一个分组所经历的路径是不确定的。因此,路由算法在点对点网络中起重要作用。

作为一种通用的规则,广播网络应用在更小和地理位置较集中的场合。而点对点网络主要用在更大规模的场合。

网络按规模可分为以下几类:

(1) 局域网 (LAN) 局域网常用构建在实验室、建筑物或校园里。一般距离小于 1000m,主要连接个人计算机或工作站来共享网络资源和信息交换。

(2) 城域网 (MAN) 距离大于 1000m 小于 10000m,它比局域网的规模要大,但采用相同的技术。随着 ATM 技术的不断成熟和广泛应用,大量使用 ATM 作为 MAN 的主要设计技术,如上海信息港整个网络使用了 68 台 ATM 干线网交换机和 ATM 视频网络设备,采用光纤信道,具有实时的数据传输、语言和视频等业务。

(3) 广域网 (WAN) 广域网距离小于 1000000m,跨度更大。它由通信子网和资源子网两部分组成,而通信子网又由传输线路和交换设备组成,其中交换设备又称为分组交换节点,或中间系统,或数据交换机等。更为广义的命名为路由器,WAN 拓扑的设计通常没有规则而只有层次,通信信道可以有电缆、光纤,也可以是卫星或地面无线电。

(4) 互联网 (Internet) 距离是全球范围 从通信技术的角度看,Internet 是一个通过通信线路连接数以万计的计算机网络组成的一个庞大的结构松散的巨型网络。从信息资源的角度看,Internet 是一个集各个部门、各个领域各种信息资源为一体的供网上用户共享的数据资源网。它代表着全球范围的一组无限增长的信息资源。

计算机网络技术及产品的发展过程几乎经历了 30 多年的历史,从技术更新的观点来看,经历了三代的发展。大型机时代 (1965~1975),小型机联网 (1975~1985),共享型的局域网 (1985~1995),当前已步入第四代发展时期:一个交换的,专用的和高速联网时代。

为什么需要网络?其一是资源共享,它能使得网络上的所有程序、设备、特别是数据实行共享;其二是高可靠性的需要,无论是多 CPU 系统还是多机系统,它们对军事、金融、空中交通管制、核反应堆的安全等至关重要。其三是节省开支。在很多场所,我们可以使用个人计算机而不是昂贵的大型计算机系统,通过建立服务器,使用 Client/Server 体系结构来获得最为广泛的应用和高性能价格比。其四是加速提高工作效率。通过网络我们可以进行工作负荷分摊,使得一人“串行的”工作模式改为多人“并行”而又协调的工作。当然,使用网络也能增强人们之间的交流,加深彼此之间的感情。

现在网络技术相当复杂,无论是网络硬件产品还是软件平台甚至到桌面计算机系统都发生了巨大变化,网络有以太网、令牌网、X.25 网、中续继网、数字数据网 DDN、虚拟网、交换网和 ATM 网等。软件平台有 Novell 的 IntranetWare, Microsoft 的 Windows 和各种不同厂商广泛使用的 UNIX 系统;传输介质有铜线、光纤、微波、卫星等;传输速率从 300bps 到 4Gbps;客户字符终端走进图形环境,它们相互并存,促进网络繁荣。

基于网络的管理信息系统 (MIS) 特别引人注目,信息的发布,出版与重建正经历着一场新的革命,以信息高速公路引发的一系列基础设施建设引起世界各国的高度重视并正在快速向前推进。

计算机通信系统和计算机网络原来是分开和独立的,实现互相连接与网络互连的目的是:产生一种功能强大的计算机通信网络,这便是设计 TCP/IP 的基本原则。TCP/IP 是一种网际网互联通信协议,旨在网际各种异构网络或主机通过 TCP/IP 协议实现互联互通。所谓协议,实际是一组规则,定义了软件如何工作,计算机操作系统使用这样的一组规则来处理用户之间、应用程序之间和计算机之间的信息传递问题。

5.3 信息系统技术

5.3.1 数据库系统

数据库系统是由数据库管理系统、数据库、用户和计算机系统组成的具有高度组织的整体,数据库是以一定的组织方式存储在一起的数据集合,它能以最佳方式,最少数据重复为多种用户 (或应用程序) 服务,数据的存储方式独立于使用它的应用程序。数据库管理系统是管理和维护数据库的软件,其主要功能是维护数据库系统的正常活动,接受并回答用户提出的访问数据库的各种应用请求,如要求从数据库中检索信息等等。也就是说数据库管理系统处理用户对数据库的操作,负责数据库组织的逻辑细节和物理细节的处理,使用户可能不受这些细节的影响,从而可以从更加抽象的观点看待和使用数据库。

计算机系统是用于数据库管理的计算机硬件和基本软件,数据库需要容量大的主存储器以存放操作系统、数据库管理系统例程序、应用程序 (包括用户工作区)、数据库表、目录和缓冲区等。

数据库系统是一个完整的可以组织和存取大量数据的计算机系统,它应具备以下几个特点:

1. 数据的独立性

指应用程序对数据库系统的非依赖性。数据库系统中数据与应用程序是相互独立存储的。当数据发生变化时，并不影响应用程序。

2. 最小冗余度

指存储在数据库中的数据重复尽可能减少，减少重复数据的操作，可以避免由冗余数据值而引起的数据不一致性。

3. 最大的共享性

存储在数据库中的数据应能作出多种组合，以最优的方式去适应多个用户的需求，不同的使用者可以用不同的方式调用数据。

4. 统一管理与控制

为了提高用户存储、检索、更新数据的能力，以及用户并发使用数据库时进行并发控制，保证数据的完整性、安全性、保密性，建立数据库应提供统一的管理软件（即数据库管理系统）对数据进行统一管理和控制。

5. 整体性

数据库应能充分描述数据间的内在联系。数据库中所有数据项，应具有相互配合、调配、转化运用的能力，目的是使数据的存储、更新和修正更方便。

6. 可修改和可扩充性

整个数据库系统在结构和组织技术上应该是可修改和可扩充的，因此数据库通常不是一次建立，而是逐步建立起来的，数据需要不断扩充，用户也在不断地变化。

7. 安全和保密性

在数据库系统中的数据必须确保安全和机密性，有时数据库中存储某一重要信息，要给予安全保证措施，以避免硬件或软件的失常、意外的灾祸、误用或破坏。

5.3.2 数据库的设计

建立一个企业组织的数据库，首先应该建立组织的数据库模型，该模型能使数据以记录的形式组织在一起，综合反映企业组织经营活动的各种业务信息，它既能使数据库含有各个用户所需要的信息，又能在综合过程中除去不必要的冗余。其次该模型能反映企业组织中各部门业务信息所存在的内在联系，这种联系可能是错综复杂的网络状，也可能是有从属联系的层次状。总之要用一定的数据结构把它们反映出来，以使数据能从面向用户的逻辑关系转化成计算机的存储结构，由于数据库中数据的存取由 DBMS 提供实现的功能，因此建立企业组织的数据库模型必须与 DBMS 所提供的数据库模型相一致。

目前，DBMS 所提供的数据库模型主要有三种：网络型、层次型和关系型，如图 5-4 所示。

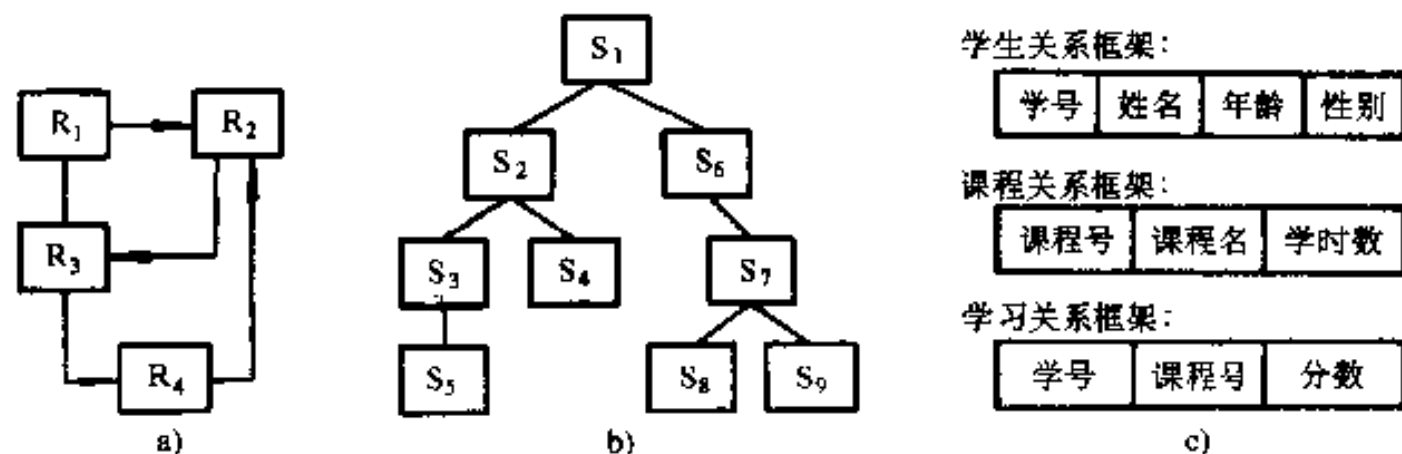


图 5-4 数据库模型
a) 网络模型 b) 层次模型 c) 关系模型

目前，世界上最流行的是关系式数据库，如：Oracal、Sybase、Informax 及 FoxPro 都属此类。关系型数据库的特点是用人们最熟悉的表格数据的形式描述数据记录之间的联系，它是以数学中的关系理论为基础的。

数据库是信息系统的核心组成部分。数据库设计在信息系统的开发中占有重要的地位，数据库设计的质量将影响信息系统的运行效率及用户对数据使用的满意度。如何根据企业中用户的需求及企业生存环境，在指定的数据库管理系统上设计企业数据库的逻辑模型，最后建成企业数据库，这是一个从现实世界向计算机世界转化的过程。

1. 信息的转化

信息是人们提供关于现实世界客观存在事物的反映，数据则是用来表示信息的一种符号。若要将反映客观事物状态的数据，经过一定的组织，成为计算机内的数据，将经历三个不同的状态：现实世界、信息世界、数据世界，如图 5-5 所示。

在不同的世界中使用的概念与术语是不同的，但它们在转换过程中都有一一对应的关系。三个不同世界术语对照表如表 5-1。

例如现实世界中的一个“事物”，对应信息世界中的一个“实体”。实体可以是一个学生、一个零件或一张定货合同。事物总是有一些性质，反映事物的特征。实体总是有一些属性，反映实体的特征，如学生的学号、姓名等。实体的属性在计算机中用数据项描述，实体属性的集合在数据世界中用记录描述，一个学生对应一条记录。具有相同属性的事物的集合，如一群学生、一群教师就形成了事物类，它们是信息世界中的实体集。在数据世界中则形成一个个数据文件。如学生文件、课程文件等。但是客观事物是复杂的，涉及同一事物的事物有多个，相互之间又有错综复杂的联系，如学生教师授课计划的教学系统。因此反映在信息世界就有实体及它们的联系（学习联系），反映在计算机中就形成了逻辑数据库（许多数据文件的集合）。最后，数据世界中的数据，在数据库管理系统 DBMS 的支撑下映射成计算机中以二进制表示的物理数据，当具体的研究某个实体时，就要对实体型属性型赋予一定的值，在数据世界就是面向用户的一条记录值，一项数据项。

2. E-R 信息模型的设计

E-R 方法是英文 entity-relationship approach 的简称译作实体-联系方法，简称 E-R 方法。此法是通过 E-R 图形表示信息世界中的实体、属性、关系的模型。

E-R 图中包括实体、属性和联系三种基本因素。约定实体用矩形框表示，联系用菱形框表示，属性用椭圆框表示，框内填入相应的实体名、联系名及属性名，以作标识。

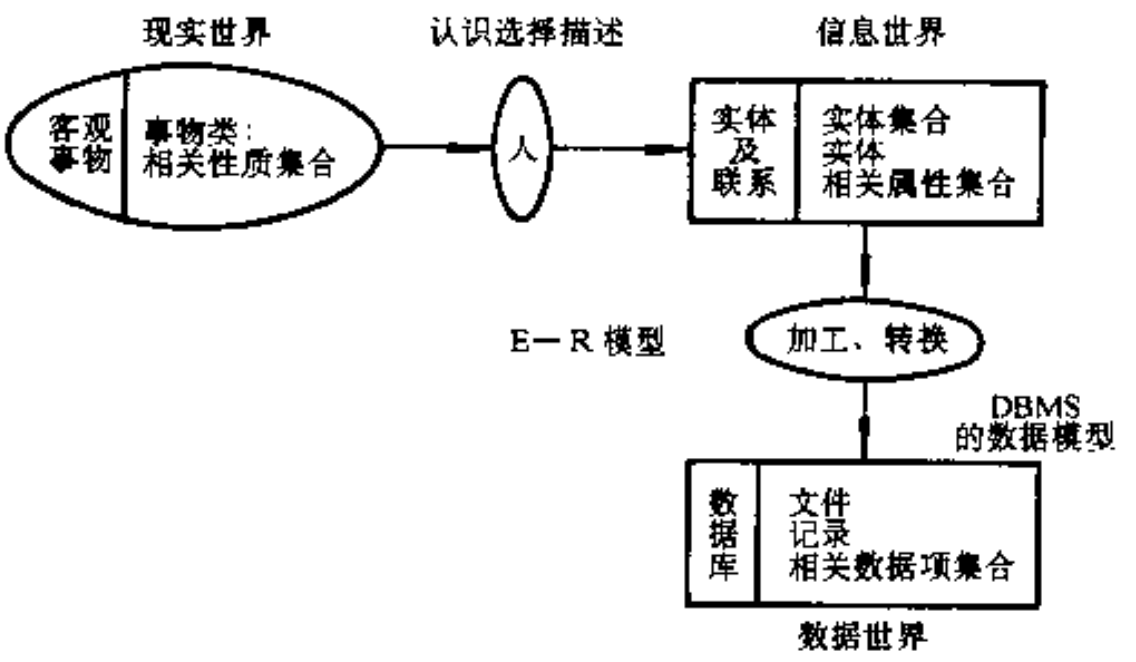


图 5-5 三个不同的世界

表 5-1 三个不同世界术语对照表

客观世界	信息世界	数据世界
组织(事物及其联系)	实体及其联系	数据库(概念模型)
事物类(总体)	实体集	文件
事物(对象,个体)	实体	记录
特征(性质)	属性	数据项

如图 5-6 所示,则表示了两个实体间的三种不同联系方式。由图可以看到实体有属性,联系也有可能属性。如图中的联系“学习”也有属性,“成绩”它反映了某个学生学习某课程的成绩。

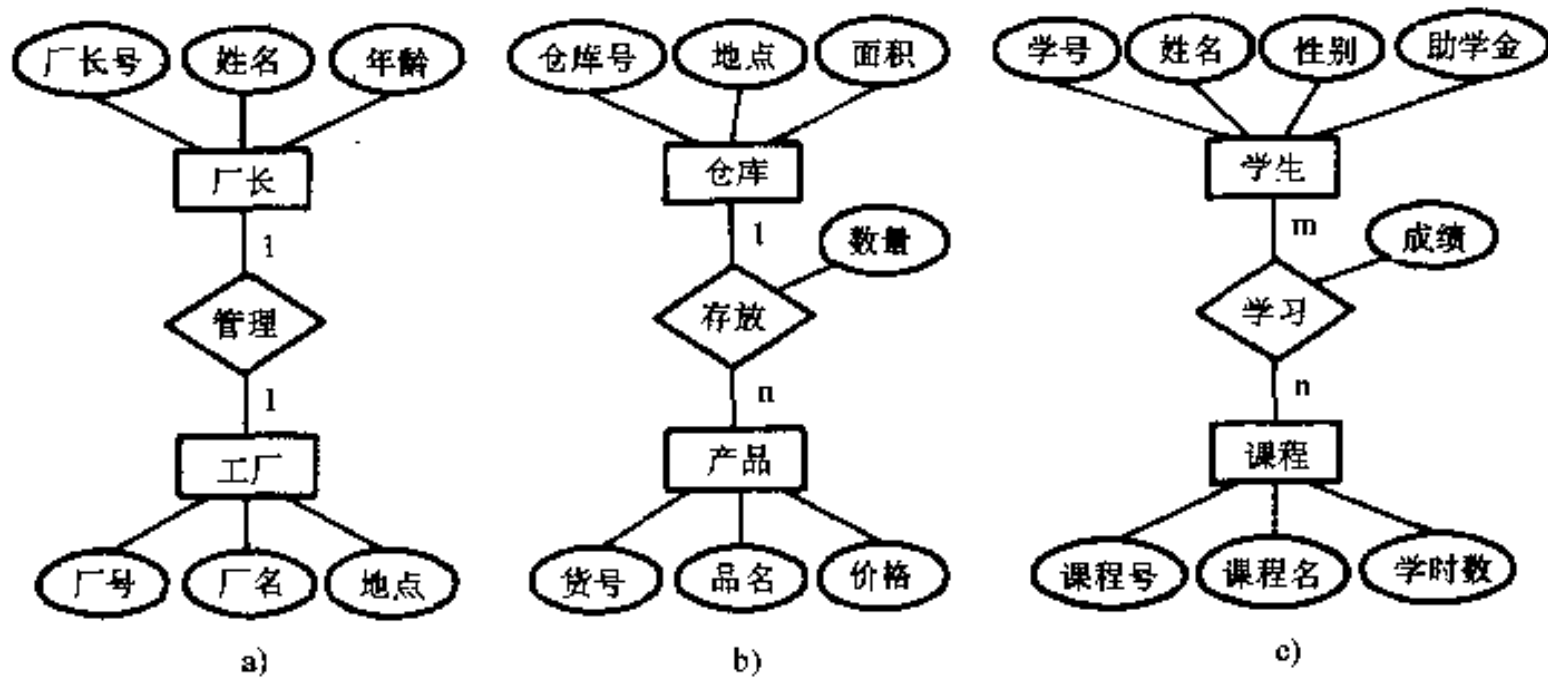


图 5-6 E-R 图表示

a) 厂长与工厂一对一关系 b) 仓库与产品一对多联系 c) 学生与课程多对多联系

E-R 图直观易懂,能比较准确的反映出现实世界的信息联系,并从概念上表示了一个数据库的信息组织情况,数据库系统设计人员可根据 E-R 图结合具体 DBMS 所提供的数据库模型类型,再演变为 DBMS 所能支持的数据模型。例如假定某企业的信息系统要求适应以下不同用户的应用要求,人事科处理职工档案,供应科处理采购业务,生产科处理产品组装业务,总务科处理仓库业务,根据要求我们假定各个用户的局部 E-R 图,如图 5-7 所示。

现在需要对各局部 E-R 图加以综合,产生总体 E-R 图,综合后的总体 E-R 图,如图 5-8 所示。

注意:

1) 在综合中,同一实体只出现一次。

2) 总体 E-R 图中并未反映“产品”与“材料”间的联系,即供应科视图中出现的“产品”与“材料”间的联系,在总体 E-R 图中被除去了,因为这种联系是多余的,它可以从“零件”所“消耗”的“材料”一种更为基本的联系中推导出来。

3) 总体 E-R 图中“供应商”与“材料”之间被增加了新的联系

“合同”,该联系并未出现于任何局部 E-R 图中,这里增加它是允许的,表示该信息系统能支持“材料”合同处理。从 E-R 图导出关系数据模型

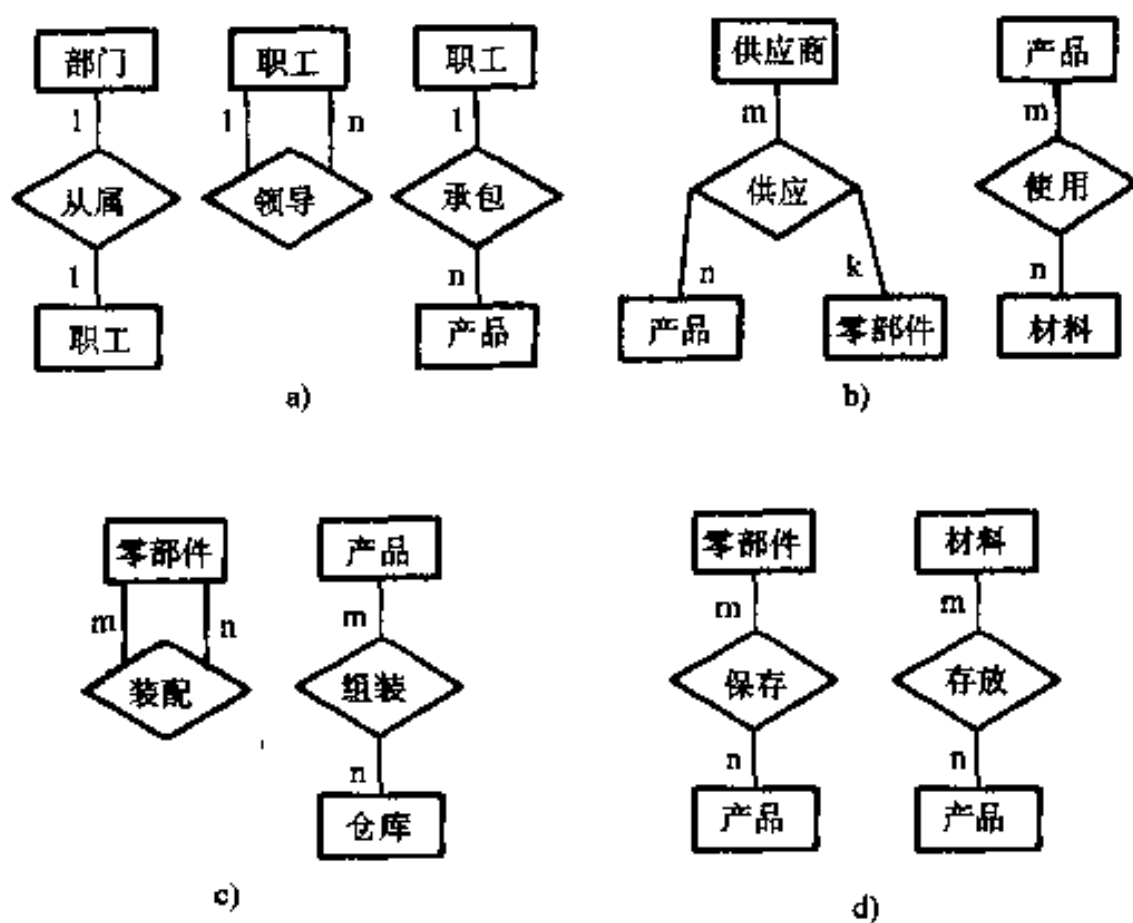


图 5-7 企业各部门局部 E-R 图

a) 人事科 b) 供应科 c) 生产科 d) 总务科

E-R图是建立数据模型的基础,从E-R图出发,导出计算机系统上安装的DBMS所能接受的数据模型,这一步工作在数据库设计中称为逻辑设计。我们的重点是掌握由E-R图转换为关系式数据库模型,即把E-R图转换为一个个关系框架,使之相互联系构成一个整体结构化了的数据模型,关键问题是怎样建立不同联系的关系模型。

4) E-R图中每个实体都相应的转换为一个关系,该关系应包括对应实体的全部属性,并应根据该关系表达的语意确定出关键字,因为关系中的关键字属性是实现不同关系联系的主要手段。

5) 对于E-R图中联系,要根据联系方式的不同采取不同手段以使被它联系的实体所对应的关系彼此实现某种联系。

具体方法是:

①如果两实体间是1:n联系,就将“1”方的关键字纳入“n”方实体对应的关系中作为外部关键字,同时把联系的属性也一并纳入“n”方的关系中。如图5-6b所示,E-R图对应的关系数据模型为:

仓库(仓库号,地点,面积)

产品(货号,品名,价格,仓库号,数量)

②如果两实体间是M:N联系,则需对联系单独建立一个关系,用来联系双方实体,该关系的属性中至少要包括被它所联系的双方实体的关键字,如果联系有属性也要归入这个关系中。图5-6c中表示“学生”与“课程”两实体间是M:N联系,对应的关系数据模型如下:

学生(学号,姓名,性别,助学金)

课程(课程号,课程名,学时数)

学习(学号,课程号,成绩)

③如果两个实体间是1:1联系,如图5-6a表示“工厂”与“厂长”两实体间的联系,联系本身并无属性,转换时只要在“工厂”的关系中增加“厂长”的关键字作为属性项,就能实现彼此间1:1联系。

厂长(厂长号,厂号,姓名,年龄)

工厂(厂号,厂名,地点)

或:厂长(厂长号,姓名,年龄)

工厂(厂号,厂长号,厂名,地点)

5.3.3 决策支持系统DSS (Decision Support System)

决策支持系统是管理信息系统应用概念的深化,是在管理信息系统的基础上发展起来的系统。

管理信息系统是一个由人、计算机等组成的,能进行管理信息的收集、传递、储存,加工、维护和使用的系统。MIS能实测企业的各种运行情况,利用过去的预测未来,利用

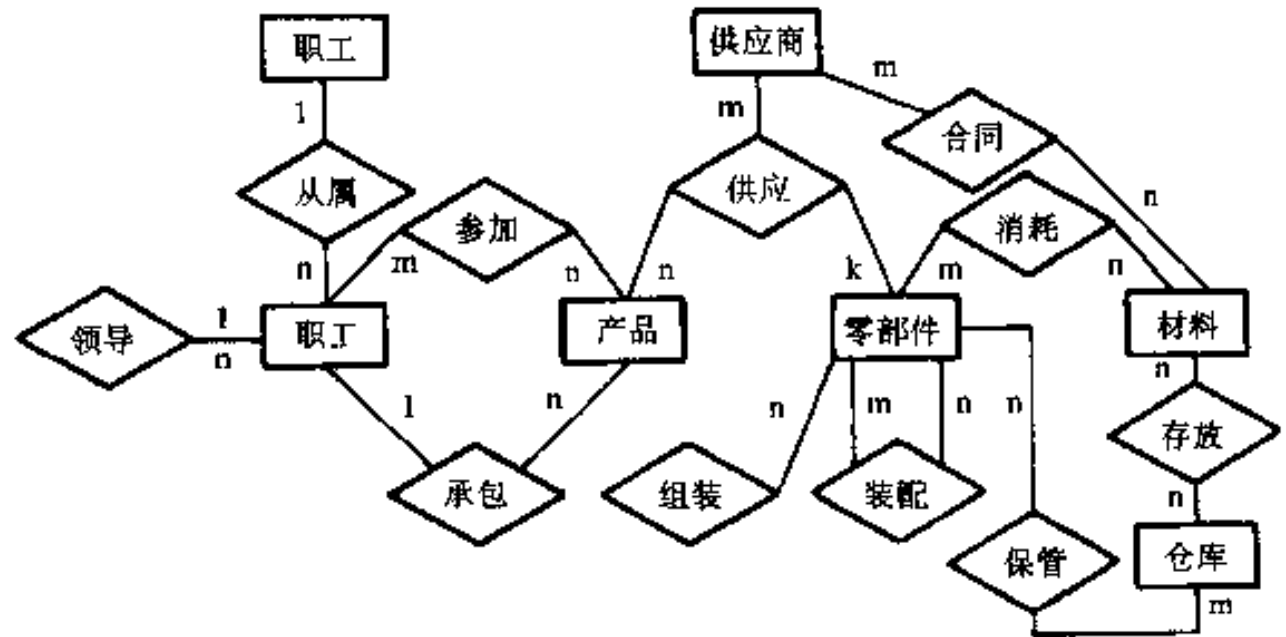


图 5-8 综合后的 E-R 图

信息控制企业行为，帮助企业实现其规划目标。因此，MIS 能把孤立的、零碎的信息变成一个比较完整的，有组织的信息系统，不仅解决了信息存在的“冗余”问题，而且大大提高了信息的效能。但是 MIS 只能帮助管理者对信息作表面上的组织和管理，而不能把信息的内在规律更深刻的挖掘出来，为决策服务。

应用系统分析、传统运筹学在解决现实世界问题（特别是比较复杂的问题）时遇到了不少障碍。应用系统分析的许多模型、方法，往往看起来有用但有时并不真正能用。很多研究成果仅仅停留在研究室里，书面报告之中，大部分束之高阁，真正为决策者采纳并付诸实施的成功案例并不多，系统分析人员与决策者之间缺乏必要的沟通，传统的系统分析方法对系统中人的因素和作用考虑不够或缺乏有效的手段去考虑，是造成这种现象的重要原因。另一方面，在电子数据处理（EDP）之后发展起来的 MIS 也没有达到预期的社会经济效果，这是由于 MIS 技术及方法论上有缺陷造成的，特别是刻板的结构化系统分析方法，漫长的生命周期及信息导向的开发模式使传统的 MIS 难以适应多变的外部及内部管理环境，对管理人员的帮助十分有限。由此，人们普遍认为系统分析人员和信息系统本身都不能取代决策者去作出决策，支持决策者才是他们正确的地位，于是人们自然期望一种新的用于管理的信息系统，它在某种程度上可克服上述缺点，为决策者提供一些切实可行的帮助，决策支持系统应运而生。

DSS 的理论发展及其开发与很多学科有关，它涉及到计算机软件 and 硬件、信息论、人工智能、信息经济学、管理科学、行为科学等，显然这些学科构成了它发展的理论框架，亦称之为它的理论基础。尽管有些学科在它形成的过程中起的作用不大，但它们对 DSS 未来的发展给予极为重要的启迪。DSS 是一种开放的技术，它总是在不停的吸收其它学科的营养。一般来说，只要能面向计算机并且给决策人员提供帮助，DSS 都可以并且可能把它转化为自己的技术。

DSS 是以计算机为工具的人机交互作用的系统，它利用计算机运行速度快，存储信息量大等特点，应用决策理论与方法、心理学、行为科学、人工智能、计算机网络、数据库等技术，根据决策者的决策思维方式，从系统分析角度为决策者或决策分析人员创造一种决策环境。在此环境下决策，决策者和决策分析人员可以充分利用和应用自己的经验、知识或者在系统的引导下详细了解和分析其决策过程中的各主要因素及其影响，激发其思维创造力，从而在 DSS 系统的帮助和引导下逐步深入的透视问题，最终有效的作出决策，即通过人机互助完成决策。

许多文献都论述过将专家系统 ES 的基本原理与方法用于 DSS，构成所谓的智能型 DSS。目前的 DSS 常常尝试把分析技术与常规的数据存取和对半结构或非结构化的问题的检索功能结合起来。大多数 DSS 生成程序倾向有友好用户接口和解释子系统的会话和交互式计算机系统，大多数 DSS 的问题是需要把非结构化问题通过作出有限的假定，化成一个具有结构化的模块。

DSS 与专家系统的区别是：

1) DSS 为了强调数据与模型的有机结合和方便用户而引入了人工智能思维和技术，而专家系统则是抽取专家的知识并加以组织，以提供专家水平的咨询。

2) DSS 强调在大范围内支持决策者工作，它可按着人的思维规律引导用户解决问题，而不是侧重将某一专门流域的知识装入知识库自动工作，因此 DSS 强调通用性，而 ES 是专用

的，它强调在某一窄范围内代替决策者工作。

3) 管理领域内问题复杂多变，DSS 不可能将解决问题的过程完全自动化，即在解决问题过程中对某些不能解决的仍需调用人脑解决，人机是紧密配合的，而专家系统除了要求用户回答问题，提供必要数据外，基本上是自动独立工作的。

4) 对于问题比较窄的 DSS 有可能模拟决策者的思维过程自动得到解答，决策者只在最后决定时起作用，只有这时，可以说 DSS 与 ES 是雷同的。

DSS 的发展方向：

(1) 群决策支持系统 所谓群体决策是相对于个人而言的，两人或多人召集在一起，讨论实质性问题，提出解决某一问题的若干方案，评估这些策略各自的优势，最后作出决策，这样的决策过程可称为群决策，群体决策的多数问题是解决非结构问题。

(2) 分布式决策支持系统 随着 DSS 的迅速发展，人们很自然地希望在更高的决策层次和更复杂的决策环境下得到计算机的支持。这种支持面向的对象已不仅仅陷于单个的决策人，或代表同一机构的决策群，而是若干具有一定独立性，又存在某种联系的决策组织，许多大规模管理决策活动已不可能或不便于用集中方式进行，这些活动涉及到许多承担不同责任的决策人，决策过程必需的信息资源或某些重要的决策因素分散在较大的活动范围，是一类组织决策或分布决策，分布式决策支持系统是为适合这类决策问题而建立的信息系统，分布式决策支持系统上由多个物理上分离的信息处理节点构成的计算机网络。网络的每个节点一般含有一个决策支持系统或若干个辅助决策的功能。

(3) 智能决策支持系统 人工智能技术引入 DSS 中可以有几种途径，有的 DSS 已融进了启发式搜索技术，这就是人工智能方法在 DSS 中的初步实现。其次，人工智能因可以处理定性的近似的或不精确的知识而引入 DSS 中，这方面正是专家系统的优势所在。最后，DSS 的一个共同特征是交互性强，这就要求使用更方便，并在接口水平和进行的推理上更为“透明”，人工智能在接口水平，尤其是对活动功能上对此可以作出有益的贡献。

(4) 决策支持中心 决策支持中心的特点是它处在高层次重要决策部位，有一批参与政策制定、决策分析和系统开发的专家，装备有计算机等先进设备，通过人机结合等多种方式支持高层决策者作出应急和重要决策。这里应特别指出，决策支持系统是基于计算机的信息系统为核心支持决策者解决决策问题，而决策支持中心是以决策支持小组为核心，采取人机结合方式支持决策者解决决策问题。

构成 DSS 的四库系统：

1. 数据库系统

数据库 DB 是 DSS 的一个最基本的部件，一般情况下，任何一个 DSS 都不能缺少数据库及其管理系统。自从 20 世纪 60 年代提出了数据库概念之后，经过 30 多年的发展，已经形成了一套比较完整的理论，但是由于 DSS 是 70 年代才开始出现的概念，所以 DSS 对数据的要求，早期形成的数据库理论并不能满足，这种情况一方面也对数据库的基础研究提出了新的课题。

2. 模型库系统

模型库系统是传统 DSS 的三大支柱之一，也是 DSS 最有特色的部件之一。与 MIS 相比，DSS 之所以能够对决策制订过程提供有效的支持，除了系统设计思想不同外，主要在于 DSS 中有能为决策者提供推理、比较选择和分析整个问题的模型库。因此，模型库及其相应的模

型库管理系统在 DSS 中占有十分重要的位置。但是,模型库并不是 DSS 必不可少的部件,少数仅通过信息服务来作决策支持的系统就可以没有模型库,一些向专家系统方向发展的 DSS 也不太重视模型库在 DSS 中的配置。由此可见,模型库是 DSS 最重要的部件,但却不是必不可少的部件。

3. 知识库系统

当 DSS 向智能方向发展时,知识和推理的研究就显得越来越重要。事实上,也只有当知识和推理技术被娴熟的用于 DSS 时,才可能真正达到决策支持所提出的目标。开发知识库的关键技术是:知识的获取和解释,知识的表示,知识推理以及知识库的管理和维护。从本质上讲,这些技术和知识工程,专家系统所使用的技术并没有什么差别。因此,在 DSS 研究中完全可以借鉴知识工程和专家系统的一些成果。但是也要注意它们之间的差别,最主要的差别在于 DSS 特别重视推理和计算的结合,以及机器推理对于决策者思维的延拓能力。

4. 方法库系统

方法库系统主要是一个软件系统,它综合了数据库和程序库。在早期的方法库系统中,人们采用了面向多种应用的程序包。它们具有某一特定领域的功能程序,用以描述数据结构和功能要求的通用、格式化的接口。通过内部的数据管理系统处理存储的数据,建立方法库的难点之一是把程序和数据库综合起来。

5.4 企业管理信息系统的开发

管理信息系统的开发是一项复杂的系统工程工作,它涉及的知识面广,部门多,不仅涉及技术,而且涉及管理业务、组织和行为。它不仅是科学,而且是艺术。

5.4.1 企业管理信息系统的开发方法

1. 原型方法

原型方法是 20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展,特别是在关系数据库系统,第四代程序生成语言和各种系统开发生成环境产生的基础之上,提出的一种从设计思想、工具、手段都全新的系统开发方法。它通过模拟以及对模拟后原型的不断讨论和修改建立系统,要想将这样一种方法应用于一个大型信息系统开发过程中的所有环节是根本不可能的,故它多被用于小型局部系统或处理过程比较简单系统的设计到实现环节。

2. 结构化系统开发方法

结构化系统开发方法是至今为止开发方法中应用最普遍最成熟的一种方法。它的基本思想是:用系统工程的思想 and 工程化的方法,按用户至上的原则,结构化、模块化、自顶向下的对系统进行分析与设计。在系统调查时,应从最顶层的管理业务入手,逐步深入至最基层。在系统分析时,要从宏观整体考虑入手,先考虑子系统整体的优化,然后再考虑局部的优化问题。在系统实施阶段则应坚持自底向上的逐步实施。

3. 面向对象的开发方法

面向对象的开发方法是从 20 世纪 80 年代各种面向对象的程序设计方法逐步发展而来的。面向对象方法一反那种功能分解方法只能单纯反映管理功能的结构状态、数据流程,信息模型只能被动地迎合实际问题需要的作法,而是从对象的角度让我们认识事物。对象是面向对象方法的主体,对象至少应有以下特征:模块性、继承性、类比性以及动态连接性。

4. 计算机辅助开发方法

计算机辅助开发方法的基本思路是，在前面所介绍的任何一种系统开发方法中，如果自对象系统调查后，系统开发过程中的每一步都可以在一定程度上形成对应关系的话，那么就可以借助于软件工具来实现上述一个个的系统开发过程。它是一种除系统调查外全面支持系统的开发方法。

5.4.2 需求分析

需求分析是系统开发工作中最重要的环节之一，实事求是的全面调查是分析与设计的基础，也就是说这一步工作的质量对于整个开发工作的成败来说都是决定性的，同时需求分析工作量很大，所涉及的业务和人、数据、信息都非常多，所以如何科学的组织和适当的着手展开这项工作是非常重要的。

1. 需求分析方法

所谓需求分析方法实际上就是对对象进行系统调查，在系统调查过程中应始终坚持正确的方法，以确保调查工作客观性、正确性。系统调查的工作应该遵循以下几点：

(1) 自顶向下全面展开 系统调查工作应严格按照自顶向下的系统化观点全面展开。首先以组织管理工作的最顶层开始，然后再调查为确保最顶层工作完成的下一层（第二层）的管理工作。完成这二层的调查后，再深入一步调查为确保第二层工作完成的下一层（第三层）的管理工作。依此类推，直至摸清组织的全部管理工作。这样做的目的是使调查者既不会被组织内部庞大的管理机构搞得不知所措，无从下手，又不会因调查工作量太大而顾此失彼。

(2) 弄清它存在的道理再分析有无改进的可能性 组织内部的每一个管理部门和每一项管理工作都是根据组织的具体情况和管理需要而设置的。我们调查工作的目的正是要摸清这些管理工作存在的道理、环境条件以及工作的详细过程然后再通过系统分析所讨论其在新的信息系统支持下有无优化的可行性。所以我们在系统调查时，最好是保持头脑冷静，实实在在地摸清现实工作和它所在的环境条件。如果调查前脑子里已经有了许多的“改革”或“合理化”设想，那么这些设想势必会先入为主，妨碍你接收调查的现实情况信息，这样往往会造成还未接触实质问题，就感觉到这也不合理，那也不合理，以致无法客观地了解实际问题。

(3) 工程化的工作方式 对于一个工业企业来说，其内部的管理机构都是庞大的。这就给调查工作带来了一定的困难。对于一个大型系统的调查，一般都是多个系统分析人员共同完成的。按工程化的方法组织调查可以避免调查工作中一些可能出现的问题。所谓工程化的方法就是将工作中的每一步工作事先都计划好，对多个人的工作方法和调查所用的表格、图例都统一规范化处理，以使群体之间都能互相沟通，协调工作。另外，所有规范化调查结果都应整理后归档，以便进一步工作的使用。

(4) 全面铺开与重点调查结合 如果是开发整个组织的 MIS，开展全面的调查工作是当然的。如果我们近期内只需开展组织内部某一局部的信息系统，这就必须坚持全面铺开与重点调查相结合的方法，即自顶向下全面展开，但每次都只侧重于与局部相关的分支。例如我们只要求开发企业生产作业计划部分，调查工作也必须是从组织管理的顶层开始，先了解总经理或厂长的工作，公司或工厂管理委员会的分工，下设各下部的主要工作，企业年度综合计划的制定过程以及所涉及的部门和信息，然后略去其它无关部门的具体业务调查，而将工作重点放在生产部门的计划调度处和物资供应处的具体业务上，如图 5-9 所示。

(5) 主动沟通和亲和友善的工作方式 系统调查是一项涉及组织内部管理工作的各个方面, 涉及各种不同类型人的一项工作, 故调查者主动的与被调查者在业务上的沟通是十分重要的。创造出一种积极、主动、友善的工作环境和人际关系是调查工作顺利开发的基础。一个好的人际关系可能导致调查和系统开发工作的事半功倍, 反之则有可能根本进行不下去, 但是这项工作说起来容易, 做起来却很难, 它对开发者有主观上积极主动和行为心理方面的要求。

2. 需求分析的范围

详细调查的范围应该是围绕组织内部信息流所涉及领域的各个方面, 但应该注意的是, 信息流是通过物流而产生的, 物流和信息流又都是在组织中流动的, 故

我们所调查的范围就不能仅仅局限于信息和信息流, 应该包括企业的生产、经营、管理等各个方面, 下面我们把它大致的归纳为九个方面的问题:

- 1) 组织结构和功能业务。
- 2) 组织目标和发展战略。
- 3) 数据与数据流程。
- 4) 工艺流程和产品构成。
- 5) 业务流程与工作形式。
- 6) 管理方式和具体业务的管理方法。
- 7) 决策方式和决策过程。
- 8) 可用资源和限制条件。
- 9) 现存问题和改进意见。

以上九个方面只是一种大致的划分, 实际工作时应视具体情况增加或修改之。

5.4.3 系统分析及系统设计

系统分析的主要任务是将在系统需求分析中所得到的文档资料集中到一起, 对组织的内部整体管理状况和信息处理过程进行分析, 进行新系统设计。新系统设计包括两个方面: 首先是总体结构的设计, 其次是具体物理模型的设计。系统设计的主要目的就是为下一阶段的系统实现(如编程、调试、试运行等)制定蓝图。在系统设计阶段, 我们的主要任务就是在各种技术实施方法中权衡利弊, 精心设计, 合理地使用各种资源, 最终勾画出新系统的详细设计方案。

1. 系统总体结构设计

系统总体结构设计是要根据系统分析的要求和组织的实际情况来对新系统的总体结构形式和可利用的资源进行大致设计, 它是一种宏观、总体上的设计和规划。系统总体结构设计的主要内容有:

(1) 子系统划分 子系统划分一般在系统分析阶段完成, 系统划分应遵循如下原则:

- 1) 系统要具有相对独立性, 子系统的划分必须使得子系统内部功能、信息等各方面的凝

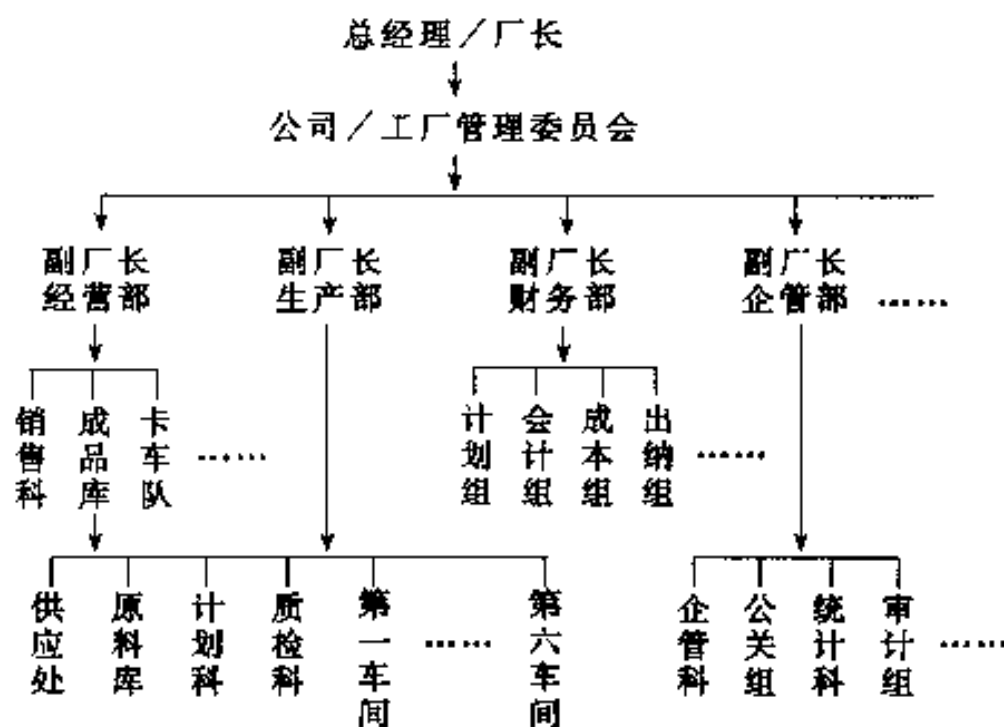


图5-9 调查方式举例

聚性较好。在实际中我们都希望每个子系统模块相对独立，尽量减少各种不必要的数据调用和控制联系，并将联系比较密切，功能近似的模块相对集中。这样对于以后的搜索、查询、调试、调用都比较方便。

2) 使子系统之间数据的依赖性尽量小，子系统之间的联系要尽量减少，接口要简单、准确。一个内部联系强的子系统对外部联系必然很少，所以划分时应将联系较多者引入子系统的内部。剩余的一些分散、跨度比较大的联系就成为这些子系统之间的联系和接口。这样划分的子系统，将来调试维护和运行都是非常方便的。

3) 子系统划分的结果应使数据冗余度较小。如果我们忽视这个问题，则可能会使相关的功能数据分布到各个不同的子系统中，大量的原始数据需要调用，大量的中间数据需要保存和传递，大量的计算工作将要重复，从而使得程序结构紊乱、数据冗余，不但给软件编制工作带来很大的困难，而且系统的工作效率也大大降低了。

4) 子系统的设置要考虑今后管理发展的需要，子系统的设置光靠上述系统分析的结果是不够的。因为现存的系统由于这样或那样的原因，很可能没有考虑到一些高层次管理决策的要求。

5) 子系统的划分应便于子系统分析阶段实现。信息系统的开发是一项较大的工程。它的实现一般都要分期分步进行，所以子系统的划分应能适应这种分期分步的实施。另外，子系统的划分还必须兼顾组织结构的要求但又不能完全依赖于组织。因为在目前情况下，我国正在进行体制改革，组织结构相对来说是不稳定的，所以要求系统实现后能够符合现有的情况和人们的习惯，更好地运行。

6) 子系统的划分应考虑到各类资源的充分利用和各类资源的合理利用。一个适当的系统划分应该既考虑有利于各种设备资源在开发过程中的搭配使用，又考虑到各类信息资源的合理分布和充分使用，以减少系统对网络资源的过分依赖，减少输入输出、通信等设备的压力。

(2) 网络设计 网络设计首先要根据用户的要求选择网络的结构，然后根据系统结构划分的结果，安排网络 and 设备的分布，再根据厂区内部的布局来考虑联网布线和配件，根据实际业务的要求选择网络的结构，然后划定网络各节点的级别、管理方式、数据读写的权限选择相应的软件子系统等等。

(3) 设备和网络的配置 在确定了子系统的划分后，就可以考虑各子系统的设备（主要是计算机和网络设备）配置问题以及如何将这些分布的设备和任务、功能、数据资源等集中统一管理。换句话说，就是到了应该考虑计算机系统结构和配置的时候了。

在确定网络和设备配置时应考虑以下的问题：

1) 设备选配的依据 确定网络和计算机设备配置的原则最重要的有两点：一是应完全根据系统调查和系统分析的结果来考虑硬件配置和系统结构，即管理业务的需要决定系统的设备配置；二是一定要考虑到实现上的可能性和技术上的可靠性，这是设计方案是否可靠的基础，也就是说根据实际管理业务和办公室地理位置来考虑设备配置。

2) 网络选择指标 购买网络时需选择的指标有多项，包括：模拟网络还是数字网络；网络的基本属性指标，如：频带宽度、传输的范围、使用的范围等；传输介质和速率指标；网络的拓扑结构；网络协议；网络管理软件；网络的访问规则；通信方式，网络配件指标等。

3) 计算机硬件指标 CPU 的速度、内存的大小等。

4) 软件指标 软件的指标必须与系统开发所采用的战略和方法学结合起来。在信息系统

开发过程中，开发方法以及相应软件工具的选择对系统开发是否顺利都是重要的。

(4) 计算机处理流程设计 在确定了子系统的划分和系统的设备配置之后，必须根据系统分析方案大体勾画出设计者关于每个子系统内部计算机处理流程的草图，该图主要说明的是信息在新系统内部的流动、转换、存储和处理情况。它不是对具体处理或管理分析模型细节的描述，只是设计者对设计过程中，信息在计算机内部处理过程的大致想法，且不是固定不变的，常常随着后续的设计过程而不断改变。

2. 代码设计

设计出一个好的代码方案对子系统的开发工作是一件极为有利的事情，它可以使很多机器处理（如某些统计、校对、查询等）变得十分方便，另外还把一些现阶段计算机很难处理的工作变成很简单的处理。

(1) 编码的目的 在系统开发过程中设计代码的目的是：

1) 唯一化 在现实世界中有很多东西如果我们不加以标识是无法区分的。这时机器处理就十分困难，所以能否将原来不能确定的东西唯一地加以标识是编制代码的首要任务。最简单、最常见的例子就是职工编号。在人事档案管理中我们不难发现，人的姓名不管在一个多么小的单位里都很难避免重名，为了避免二意性，要唯一的标识每一个人，因此编制了职工代码。

2) 规范化 唯一化虽是代码设计的首要任务，但如果我们仅仅为了唯一化来编制代码，那么代码编出来后可能是杂乱无章的，使人无法辨认，而且使用起来也不方便。所以我们在唯一化的前提下还要强调编码的规范化，例如在学生的学籍管理中材料系用“2”打头表示，铸造专业则为“21”，焊接专业为“22”，依次排序。要查找材料系的学生，只要输入“2”即可显示相关的学生信息。

3) 系统化 系统所用代码应尽量标准化，在实际工作中，一般企业所用大部分编码都有国家或行业标准。又如生产产品和商品中各行业都有其标准分类方法，所有企业必须执行。另外，还有一些需要企业自行编码的内容。例如生产任务码、生产工艺码、零部件码等等，都应该参考其它标准化分类和编码的形式来进行。

(2) 编码分类原则 编码问题的关键在于分类必须遵循以下几点原则：

1) 必须保证有足够的容量，要足以包括规定范围内的所有对象。

2) 按属性系统化，分类不能是无原则的，必须遵循一定的规律。

3) 分类要有一定的柔性，不至于在出现变更时破坏分类的结构。所谓柔性是指在一定的情况下分类结构对于增减或变更处理对象的可容纳程度。柔性好的系统在一般的情况下增加分类不会破坏其结构。

4) 注意本分类系统与外系统、已有系统的协调。

(3) 代码的应用 代码的应用范围很广，除了为某个人、某项工作、某个机械零件、某个加工设备等需要编码外，还有很多其它的用途。如：图书情报检索、项目经济效益的统计等等。

3. 数据结构和数据库设计

信息系统的主要任务是通过大量的数据获得管理所需要的信息，这就必须存储和管理大量的数据，因此建立一个良好的数据组织结构和数据库，使整个系统都可以迅速、方便、准确的调用和管理所需要的数据，是衡量信息系统开发工作好坏的主要指标之一。

(1) 规范化的重组数据结构 对数据结构进行了五种规范化定义并定名为规范化模式，称为范式。在这五种范式中，一般只用前三种，对于常用系统就足够了。而且这五种范式是“向上兼容”的，即满足第五范式的数据结构自动满足一、二、三、四范式。

1) 第一范式 第一范式就是指在同一表中没有重复出现，如果有，则应将重复项去掉，这个去掉重复项的过程称之为规范化处理。

2) 第二范式 第二范式是指每个表必须有一个数据元素为主关键字，其它数据元素与主关键字一一对应。

3) 第三范式 第三范式就是指表中的所有数据元素不但要能够唯一的被主关键字所标识，而且它们之间还必须相互独立，不存在其它的函数关系。

(2) 关系数据结构的建立 在进行了数据基本结构的规范化重组后，还必须建立整体数据的关系结构。这一步设计完成后数据库和数据结构设计工作基本完成，将数据分析和数据字典的内容代入到本节所设计的数据整体关系结构中，一个规范化数据库系统结构就建立起来了。

建立关系数据结构涉及三方面内容：确定关联的关键指标项并建立关联表，确定单一的父亲记录结构，建立整个数据库的关系结构。

(3) 确定数据资源的分布和安全保密属性 在建立了数据整体关系结构之后，剩下的就是要确定数据资源分布和安全保密属性了。如果我们所规划和设计的系统是在网络环境之下，那么我们的数据库设计必须考虑整个数据资源在网络各节点上的分配问题。考虑数据资源分配的原则是：同一子系统的数据尽量放在本子系统所使用的机器上，需要公用的数据和最后统计汇总类数据放在服务器上，否则如分配不当将会造成整个网络子系统数据通信紧张，从而降低系统运行效率。一般 DBMS 都提供给我们定义数据安全保密属性的功能，针对某些特殊信息（如财务数据等），这一步设计工作是完全必要的。系统提供的安全保密功能一般分为几个等级：如系统维护，数据录入，一般用户等等。

4. 输入输出设计

系统输入输出设计是一个在系统设计中很容易被忽视的，又是一个重要的环节，它对于用户和今后系统使用的方便和安全性来说都是十分重要的。

(1) 输入设计 输入设计包括输入方式设计和用户界面设计，在实现系统开发过程中输入设计所占的比重较大。

输入方式的设计主要是根据总体设计和数据库设计的要求来确定数据输入的具体形式。常用的输入有：键盘输入、网络数据传送、键盘/光盘读入等几种形式。通常在设计新系统的输入方式时，应尽量利用已有的设备和资源，避免大批量的数据重复多次的通过键盘输入。

用户界面是系统与用户之间的接口，也是控制和选择信息输入、输出的主要途径。用户界面设计应坚持用户简便、实用、易于操作的原则，尽量避免过于繁琐。界面设计包括：菜单方式、会话方式、操作提示方式以及操作权限管理方式。

(2) 输出设计 相对于输入方式来说，输出方式的设计要简单得多。输出方式常用的有两种：一种是报表输出，另一种是图形输出。一般来说对于基层或具体事物的管理者，应用报表方式给出详细的记录数据为宜，而对于高层领导或宏观综合管理部门，则应该使用图形方式给出比例或综合发展趋势的信息。

5. 系统设计报告

系统设计阶段的最终结果是系统设计报告。系统设计报告应包括以下主要内容：

1) 系统总体结构图（包括总体结构图、子系统结构图、计算机流程图等）。

2) 系统设备配置图（包括系统设备配置图、设备在各生产岗位的分布图、主机、网络和终端连接图等）。

3) 系统分类编码方案（包括分类方案、缩码）。

4) 数据库结构图（包括 DB 结构、表内部结构、数据定典等）。

5) 输入/输出设计方案。

6) HIPO 图（层次化模块控制图、IPO 图等）。

7) 系统详细设计方案说明书。

6. 模块功能与处理过程设计

模块功能与处理过程设计是系统设计的最后一步，也是最详细的涉及到具体业务处理过程的一步。

HIPO 图（层次化模块控制图）由层次结构图和 IPO 图两部分组成，前者描述了整个系统的设计结构以及各类模块之间的关系，后者描述了某个特定模块内部处理的过程和输入/输出关系。

5.4.4 系统实施、评估与运行管理

1. 系统实施

系统实施是新系统开发工作的最后一个阶段。所谓实施指的是将系统设计阶段的结果在计算机上实现，将原来纸面上的类似于设计图纸的新系统方案转换成可执行的应用软件系统。系统实施阶段的主要任务是：

1) 按总体设计方案购置和安装计算机网络系统及硬件调试。

2) 建立数据库系统。

3) 程序设计与调试。

4) 整理基础数据，进行数据录入、数据采集。

5) 培训操作和管理人员。

6) 试运行。

2. 系统运行管理制度

系统运行管理制度主要是指一个信息系统研制工作基本完成之后的工作，运行管理主要包括如下几个方面：

1) 系统运行管理和组织机构。

2) 基础数据的管理。

3) 运行管理制度。

4) 系统运行结果分析。

3. 信息系统的评估

信息系统在投入运行后要不断地对其运行状况进行分析评估，并以此作为系统维护、更新以及进一步开发的依据。系统运行评估指标一般有：

(1) 预定的系统开发目标的完成情况

1) 对照系统目标和组织目标检查系统建成后的实际完成情况。

2) 是否满足了各级管理人员？

3) 系统的可维护性, 可扩展性, 可移植性如何?

4) 还有无进一步改进的意见和建议?

(2) 系统运行实用性评估

1) 系统运行是否稳定可靠?

2) 系统的安全保密性能如何?

3) 用户对系统操作、管理、运行状况的满意程度如何?

4) 系统的误操作保护和故障恢复的性能如何?

5) 系统功能的实用性和有效性如何?

6) 系统运行结果的科学性和实用性分析。

(3) 设备运行效率评估

1) 设备的运行效率如何?

2) 数据传送、输入输出与其加工处理的速度是否匹配?

3) 各类设备资源的负荷是否平衡, 利用率如何?

5.5 管理信息系统的开发实例

5.5.1 铸造车间的管理信息系统

铸造生产是一个复杂过程, 要经过设计、造型、烘干、浇注等多个工序, 涉及到工艺、合金、设备、检测等多个方面。由于涉及因素多, 范围广, 故对生产管理提出了较高的要求。在实际生产中往往由于工序管理等原因, 使铸件质量得不到保证, 材料消耗大, 废品率较高, 不能满足现代化生产的要求。

本系统根据铸造厂实际生产过程, 即订货—材料预算—购买材料—材料管理—生产铸件(造型、制芯、熔炼等工艺)—铸件管理—交货—统计各项经济指标这一生产流程, 设计开发了六大模块:

- 1) 文档管理。
- 2) 生产调度。
- 3) 材料库管理。
- 4) 成品库管理。
- 5) 综合统计。
- 6) 工部管理。

系统框图如图 5-10 所示。

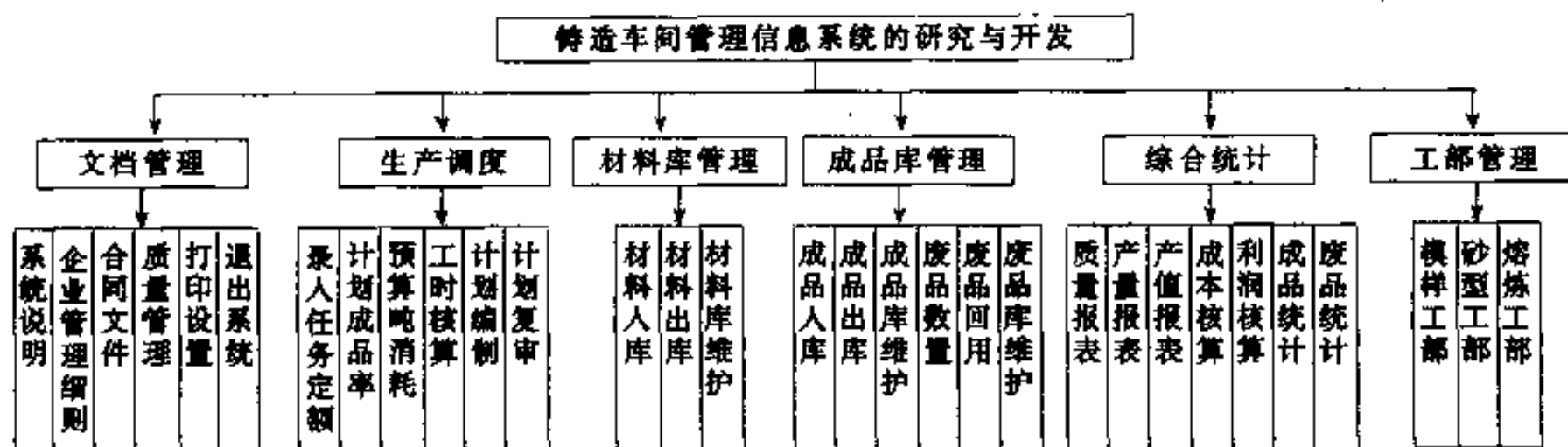


图5-10 铸造车间管理信息系统的研究与开发系统框图

铸造车间管理信息系统以工序为中心，以管理者分析需求为目标，通过数据信息来反映各工序及产品之间的关系，因此必须建立数据库，其中包括各种生产过程信息数据库，经验数据库，标准数据库等。各数据库通过公共接口（如零件编号，铸铁牌号等）联系起来。图5-11为其数据流程图。现场的数据庞大而复杂，必须对这些数据进行整理提炼，最终以报表的形式提供给决策者，以供分析决策。

系统功能如下：

1. 文档管理

文档管理的对象是企业的各种文件，主要包括合同文件，铸件产品质量管理标准，企业管理细则及系统帮助等。系统还提供了文件浏览、文件修改、新建文件、删除文件等功能。

2. 生产调度

生产调度模块可对生产过程进行合理调配，了解生产任务、原材料使用、所需工作时间，下达生产计划及监督计划完成情况。它包括下述子模块：

1) 录入任务定额 主要完成生产进度的安排，涉及内容有零件编号、材料、重量、交货日期等，便于随时查询实际进度与计划进度的差异。

2) 预算材料消耗 这是一个根据工厂实践建立的经验数据库，用于粗略预估产品所需消耗的材料，以便工厂及时准备原材料。

3) 工时核算 此部分为人工输入信息，可通过屏幕显示使用户了解零件在工部所消耗的工时，主要是为以后的综合统计服务。

4) 计划编制 针对录入任务定额而设置，进一步规范需分阶段完成的某一产品相应的时间段。

5) 计划复审 具有人工智能作用，用于判断并向用户提示生产完成情况，是否交货，材料是否需购买补充等，以保证生产的顺利进行。

3. 材料库管理

完善的企业材料库管理系统应能完成以下工作：原材料的出入库和记帐，根据库存情况及生产计划下达的生产任务所需原材料用量提出购料清单，完成有关生产和原材料库存的查询。为此我们设置了材料入库、材料出库、材料库维护（包括查询、编辑库存等），其目的是最大限度地减少企业库存占用的资金，提高企业资金的周转速度，保证生产的顺利进行。

4. 成品库管理

该模块设计了成品和废品的入库、出库、维护及废品回用等子模块，可对实际生产进度与计划进度进行比较，统计成品和废品数量，使企业决策者及时了解生产动态，对生产计划作相应的调整。

5. 综合统计

铸造生产中各种生产报表及各项经济指标的统计是一项庞大而复杂的工作。由于产品品种以及不同批次、不同流水线 and 不同时间内产品质量的波动，故生产过程是一个动态变化过

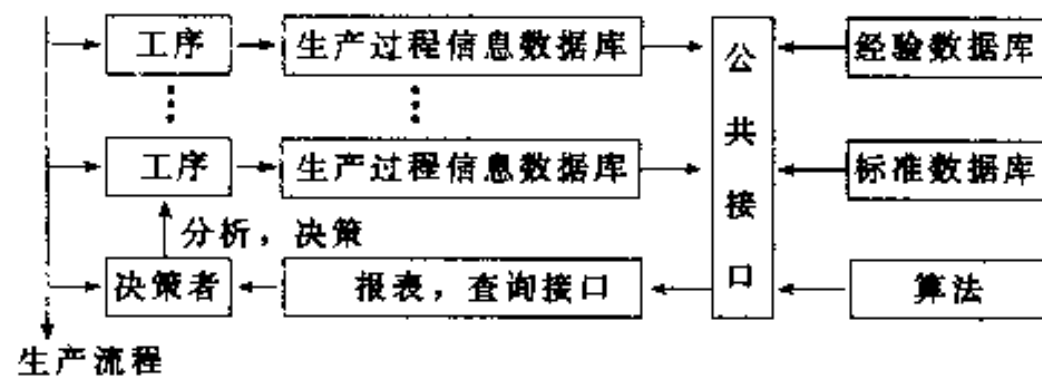


图5-11 “铸造车间管理信息系统的研究与 发展”数据流程图

程,生产管理人员只有及时得到生产一线的检测值和统计结果,才能采取相应的调整措施。本模块可利用前面的各种数据库在几秒钟内完成各项统计计算。考虑到各企业由于归口不同统计略有差异,为适应不同的需要,本模块除设有一些基本统计项目外,还设有人工输入项部分。

6. 工部管理

工部管理分为三部分:

1) 模样部分 对模样的成品和废品进行管理,包括模样的入库及记帐等操作,其实现方式与毛坯库管理一样。

2) 砂型工部 在砂型铸造中,砂型性能的好坏对铸件质量影响很大。由于砂型配比往往是根据经验来确定,为此建立了可根据实际情况修改的经验数据库,用于实现砂型的配料。其过程为:先输入铁水牌号及需要的配砂重量,然后根据经验数据库及现有材料(查询材料库)完成配砂计算。该模块还提供了对经验数据库的各种操作功能。

3) 熔炼工部 该模块用于实现冲天炉铁水的优化配料,使铁水中常规元素 CSMPS 及其它元素的含量符合有关标准的规定。为此,建立了标准铸铁的化学成分库和金属炉料的化学成分及价格库,以及冲天炉熔炼过程中各元素烧损率的数据库,利用线性规划即可实现冲天炉铁水的优化配料。

5.5.2 熔模铸造厂的计算机管理信息系统

熔模铸造是一种少或无切削加工的方法,我国现有熔模铸造企业或车间有两千多家,年产量估计 20 万 t 左右。随着竞争日趋激烈,熔模铸造企业必须面向国内外市场,及时掌握和处理各种信息以适应快速的市场变化。因此,对先进科学技术的需求越来越迫切,计算机信息管理技术就是其中之一。

在企业的整个经营活动中,人、财、物、信息等要素构成了企业的“物流”和“信息流”。“物流”过程中产生“信息流”,“信息流”又对“物流”有引导和控制作用。企业的计算机管理系统就是收集各种“物流”信息数据,以企业的运作规律为基础,对这些数据进行统计、分析,从而为企业进行计算、调度、统计、定额和经济活动分析等工作提供依据。

熔模铸造厂的计算机管理信息系统共分为七个功能模块,如图 5-12 所示。

(1) 生产基本信息模块 它是系统中对其它模块起补充作用但又不可缺少的一项。它为订单、生产计算、车间控制、工资计算、产品估价等提供必要的基本信息。

(2) 订单管理模块 这是整个系统的入口。系统通过订单与外部市场发生联系,所有经营活动也都以订单为依据。该模块能够帮助企业全面及时地掌握订货和订单完成情况。

(3) 生产数据模块 生产是企业的核心活动,因此,该模块是系统的关键,是大部分模块数据的基础。由于各种原因,往往造成生产的大幅度波动,导致难以及时掌握生产状况。生产现场用交接卡、废品卡、盘存卡来记录日生产数、产品数废品数、月末清线数据等,而这些就是该模块作统计分析的数据来源,具体关系如图 5-13 所示。

模块对各工序产生的动态数据进行录入统计,从而得到各种生产报表,销售报表,综合分析表。分析这些报表,使管理者实现了对任务进展情况的跟踪与监控,得到为保证订单顺利完成而调整生产进度的信息依据。

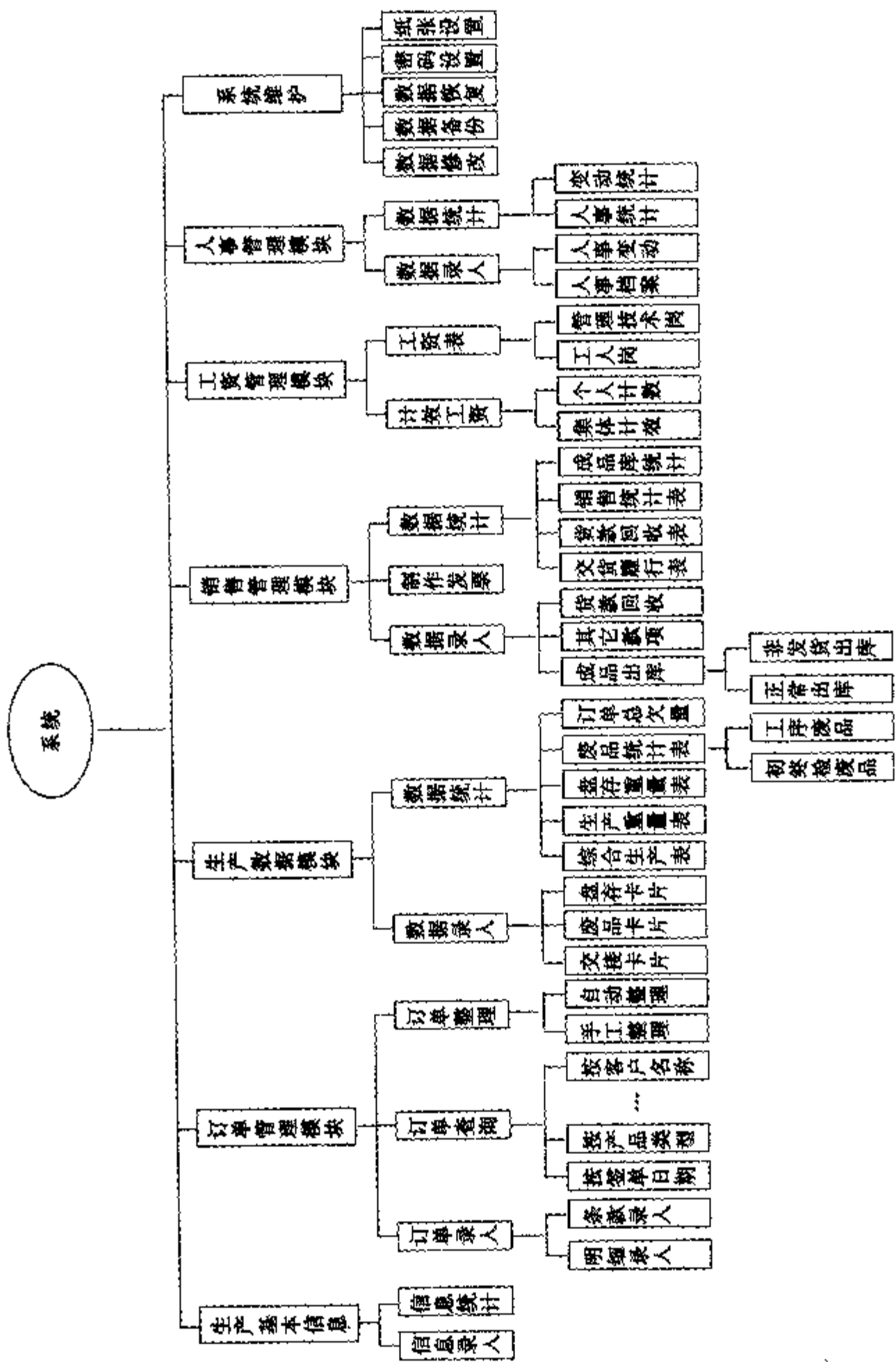


图5-12 系统功能模块图

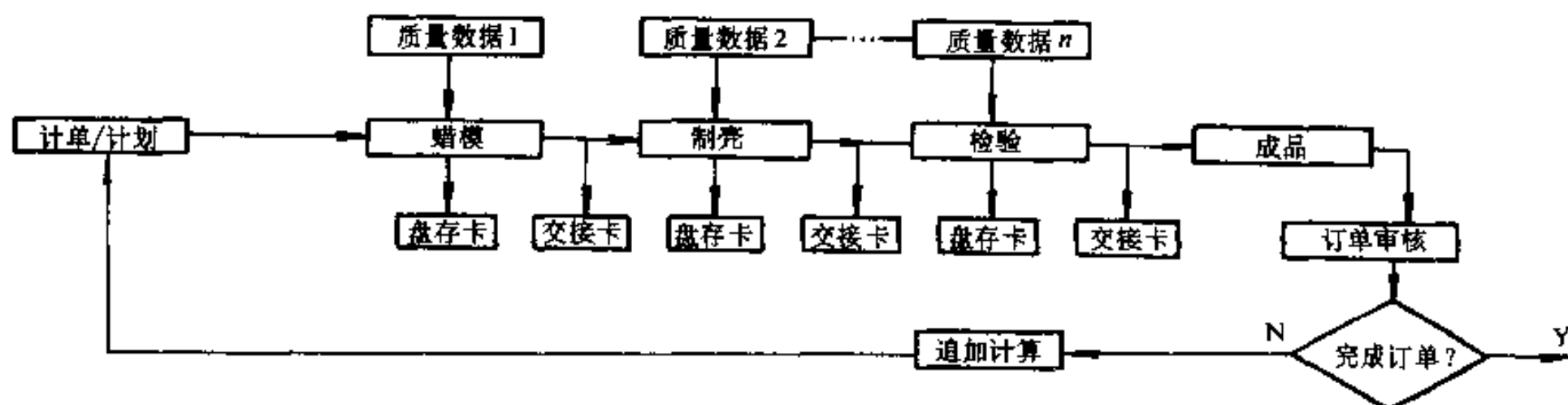


图 5-13 生产控制的数据来源

(4) 销售管理模块 这是系统的一个出口。企业通过发货、退货、货款回收等活动与市场、银行、主管财政部门、客户等外界部门发生联系。模块的功能就是管理这些活动所产生的信息，掌握资金流动情况，并与库存接口，了解实际出库量，库存量。该模块是系统中一个重要的子集，它面向销售业务全过程，建立正确完整的各种台帐，实时监督控制销售合同执行和发运进度，掌握产品分配和资金流动的信息以提高销售服务水平，追踪客户回款情况，定期分类统计销售成果，并加以全面分析，来提高经营决策水平，获取最大经济效益。

(5) 工资管理模块 这是管理系统中一个重要辅助模块。一般职工工资分效益和非效益工资两部分。效益工资与职工的具体劳动表现直接挂钩，是生产状况的一个再现。月底根据当月综合报表及各主管部门上报的系数，计算出当月的效益工资总额。计效方式和工序有关，压蜡、修蜡、精磨、修整等采用个人计效，而模组、制壳、浇注等采用集体计效方式。非效益工资的补贴、利息、年薪、技术补贴等与人事档案中职工岗位、入厂时间、工种、保证金等人事信息密切相关。工资管理模块对工人计效工资、管理人员岗位工资、固定工资的计算，显示出了极大的优越性，大大提高了工作效率。

(6) 人事管理模块 此模块以建立人事档案库为中心，实现人员情况的查询、人事变动的录入、查询等工作，并最终打印出统计信息。人事管理模块提供有关人事信息，使企业领导能更好地组织和使用人才。

(7) 系统维护模块 精铸生产管理系统存有企业内外的各种信息，关系到生产经营活动的各个方面，与企业的生存竞争密切相关，因此对系统的可靠性要求很高。为保证系统的可靠性设计了系统维护模块。它包括数据修改、备份恢复、纸张设置、密码修改等功能。用户录入数据后，发现数据有错，且错误数据已经存入总库，那么用户就需要利用系统提供的维护功能来进行修改。另外，随着时间的推移，总库冗余记录增多，导致运算速度的下降，影响工作效率，这样可用备份功能将无用数据备份到其它文件中。如果用户需要已备份的数据，系统亦提供数据恢复功能。密码设计实现了系统的对外保密。

参 考 文 献

- 1 李燕. 对中小型制造业 CIMS 系统建设的认识. 计算机辅助设计与制造, 2000(8):65~66
- 2 张煜. MRP I 的未来. 机械设计与制造, 1998(5):51~52
- 3 李红等. 利用 INTERNET 发展我国的模具工业. 模具工业, 1998(2):3~5
- 4 虞和润. INTERNET/INTRANET 与产业发展. 中国铸造装备与技术, 1998(5):12~15
- 5 王君卿. 国内外铸造工业过程计算机数值模拟技术和铸造工艺 CAD 发展概况. 造型材料, 1993(1):23~32
- 6 柳百成. 铸件充型凝固过程数值模拟国内外研究进展. 铸造, 1999(8):40~45
- 7 王同敏等. 铸件凝固过程微观模拟研究进展. 铸造, 1999(5):41~47
- 8 李敏贤. 面向 21 世纪的先进制造技术. 机械工业自动化, 1998(8):1~3
- 9 张云鹏等. 铸件凝固过程数值模拟的新进展. 铸造技术, 1998(1):34~36
- 10 陈立亮等. 铸造行业计算机应用战略. 铸造, 1999, 增刊: 26~31
- 11 李新亚等. 铸造行业国内外生产技术现状及发展方向. 铸造, 1999, 增刊: 3~11
- 12 吴春京, 沈定钊. 微机在铸造测控中的应用. 北京: 冶金工业出版社, 1999
- 13 施文康, 余晓芬. 检测技术. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 14 陈丙森等. 计算机辅助焊接技术. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 15 陈世福, 陈兆乾. 人工智能与知识工程. 南京: 南京大学出版社, 1999
- 16 向婉成. 控制仪表与装置. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 17 邵裕森, 戴先中. 过程控制工程. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 18 侯志林. 过程控制与自动化仪表. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 19 张晓华. 控制系统数字仿真与 CAD. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 20 郭宗仁. 可编程序控制器及其通信网络技术. 北京: 人民邮电出版社, 1999
- 21 李士勇. 模糊控制. 神经控制和智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998
- 22 裴振中. 模糊逻辑控制技术及其应用. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995
- 23 任凤清. 工业控制计算机系统的发展及应用. 北京: 冶金工业出版社, 1999
- 24 常健生. 检测与转换技术. 北京: 机械工业出版社, 1990
- 25 胡寿松. 自动控制原理. 北京: 国防工业出版社, 1991
- 26 邹振春. MCS-51 系列单片机原理及接口技术. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 27 南海等. 冲天炉冶炼智能控制技术的新进展. 中国铸造装备与技术, 1998(3):6~8
- 28 吴浚郊等. 型砂质量计算机集成控制系统. 中国铸造装备与技术, 1999(4):41~45
- 29 陈浩等. 人工智能在型砂质量过程控制中的应用. 中国铸造装备与技术, 1998(4):3~6
- 30 王智平. 冲天炉冶炼智能优化控制系统. 控制与决策, 1999(5):46~49
- 31 姚瑞波. 冲天炉冶炼控制的人工神经网络模型. 铸造, 1997(2):14~17
- 32 陆文周等. 型砂综合性能计算机检测装置的研究. 铸造设备研究, 1997(6):29~32
- 33 吴浚郊等. 型砂系统质量控制的新进展. 铸造, 1999(12):44~48
- 34 沈清涛等. 10t/h 冲天炉微机检测及控制系统. 铸造, 1991(2):37~40
- 35 方怡冰等. 船舶燃油锅炉微机控制系统. 控制系统, 2000(4):29~31
- 36 樊留群等. 产品制造过程的检测与企业信息化技术的研究. 制造业自动化, 2000(8):44~47
- 37 张毅. 铸件凝固数值模拟及铸造工艺 CAD 现代进展. 铸造, 1987(6):8~12
- 38 张毅. 铸造工艺 CAD 及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1994
- 39 (日)大中逸雄. 计算机传热凝固解析入门. 许云祥译. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 40 孙大涌. 先进制造技术. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 41 孙逊. 铸钢铸件充型凝固过程数值模拟研究〔博士论文〕. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1999

- 42 陈海清等编著. 铸件凝固过程数值模拟重庆: 重庆大学出版社, 1991
- 43 杨全, 张真编著. 金属凝固与铸造过程数值模拟. 杭州: 浙江大学出版社, 1996
- 44 孙逊等. 工程湍流模式在铸件充型过程数值模拟中的应用. 铸造, 1998(10):1~3
- 45 Sun Xun, Wang Junqing, Su shifang and An Geyang. Algorithm of Mold Filling Process and its Application in Suction Pouring. Modeling of Casting Solidification Process IV. Korea. 1999. 9
- 46 孙逊等. 铸件充型凝固过程数值模拟发展现状. 铸造, 2000(2)
- 47 X. Sun, S. Sum X. Qi, J. Wang. Numerical Simulation of Mold Filling and Solidification Process for Permanent Mold Casting. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process IX. August, 2000.
- 48 党惊知等编著. 材料加工工艺 CAD 及其应用. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 49 M. Rappaz and Ch-A. Gandin. Probabilistic Modelling of Microstructure Formation in Solidification Process. Acta Metall Mater., 1993, 41(2):345~360
- 50 V. A. Wills and D. G. McCartney. Modelling of Dendritic Solidification Using Finite Element Method. Mater. Sci. Eng., 1991, A145: 223~232
- 51 M. Rappaz. Modelling of Microstructure in Solidification Process. Int. Mater. Rev., 1989, 34(3):93~123
- 52 M. Rappaz and D. W. Stefanescu. Solidification Processing of Eutectic Alloys. 1998: 133~151
- 53 J. A. Spittle and S. C. R. Brown. Acta Metall. 1989, 37: 1803
- 54 Zhu and W. Smith. Acta Metall. 1992, 40: 683
- 55 Dianzhong LI, Shifang SU, Xuehua XU, Junqing Wang, Modelling of Microstructure Formation For Nickel-Based Superalloy Turbine Blade Casting. The 61st World Foundry Congress, Beijing, 1995: 63~74
- 56 LI Wenzhen, LIU Baicheng et al. Microstructure Simulation and Property Prediction of Spheroidal Graphite Iron Castings. The 62nd World Foundry Congress. Philadelphia, 1996
- 57 JIAO Yuning, LIU Baicheng. Simulation of Metal Solidification Using a Coupling Macroscopic Heat Transfer and Monte Carlo Method. Proceedings of Fifth Asian Foundry Congress, Nanjing, 1997
- 58 李殿中等. 镍基合金叶片凝固过程微观组织模拟及工艺优化研究. 铸造, 1997,(8):1~6
- 59 于艳梅等. 相场法凝固组织模拟的研究进展. 铸造, 2000, 49(9):507~511
- 60 (德)D. 拉达伊著. 焊接热效应. 熊第京等译. 北京: 机械工业出版社, 1997
- 61 张佑生, 王永智. 塑料模具计算机辅助设计. 北京: 机械工业出版社, 1999
- 62 林尧瑞, 张殿, 石纯一. 专家系统原理与实践. 北京: 清华大学出版社, 1999
- 63 冯培恩, 刘谨. 专家系统. 北京: 机械工业出版社, 1993
- 64 (英)理查德·福西斯等著. 专家系统原理和实例分析. 徐光佑, 周曼丽译. 北京: 中国铁道出版社, 1989
- 65 薛华成. 管理信息系统. 北京: 清华大学出版社, 1998
- 66 王永庆. 人工智能原理与方法. 西安: 西安交通大学出版社, 1998
- 67 蔡自兴, 徐光佑. 人工智能及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1996
- 68 徐贵宝等. 铸造工业计算机专家系统技术及其应用. 中国铸造装备与技术, 1998(1):7~10
- 69 刘旭麟等. 铸造缺陷分析专家系统的研究. 特种铸造及有色合金. 2000(4):34~36
- 70 彭金宁等. 焊接专家系统在我国的发展. 焊接, 1993,(1):2~7
- 71 R. C. Creese et al. Casting Reject Elimination Using Expert System. AFS Transactions. 1987. 617~620
- 72 A. Kulkarni et al. Casting Defect Analysis Expert System. AFS Transactions. 1992. 881~886
- 73 K. Nyamekye et al. Design of Data Base for Expert System Shells for the Foundry. AFS Transactions. 1993. 1077~1080
- 74 Md. Roshan. Expert System for Analysis of Casting Defects: "Cause" Module. AFS Transactions. 1993. 601~606

- 75 A. Phelps. Analysis of Internal Unsoundness Casting Defects Using Artificial Intelligence Techniques. AFS Transactions. 1989. 507~511
- 76 P-H. Yang. The Development of a Computerised Diagnostic System for Casting Defects. AFS Transactions. 1990. 855~858
- 77 K. Sreenivas et al. MODCAS-A Knowledge Based Expert System for Defect Diagnosis in Casting. Indian Foundry Journal. June. 1994. 1~8
- 78 雷田玉. 计算机软件基础. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 79 高洪深. 决策支持系统 (DSS) 理论. 方法. 案例. 北京: 清华大学出版社, 2000
- 80 夏云. 现代计算机网络技术与应用. 北京: 科学出版社, 1999
- 81 任守渠. 现代制造系统分析与设计. 北京: 科学出版社, 1999
- 82 维展资讯. Notes R5 快速上手 Client 篇. 北京: 人民邮电出版社, 1999
- 83 王玉琳等译. WEB 程序设计教程. 北京: 电子工业出版社, 1997
- 84 谭浩强等. C 语言程序设计教程. 北京: 高等教育出版社, 1993
- 85 北京科海培训中心. 最新颖关系数据库, 1990
- 86 徐建林等. 铸造车间管理信息系统的研究与发展. 铸造, 1999(10):22~24
- 87 阎守忠等. 熔模铸造厂的计算机管理信息系统. 铸造技术, 1998(3):30~33
- 88 吕志刚等. 精铸厂计算机质量管理系统. 铸造, 1997(3):18~21
- 89 周明等. 中小企业在 CIMS 环境下的管理软件及其集成. 机械工业自动化, 1998(2):19~21
- 90 崔劲柏等. 铸造工厂管理信息系统规划的探讨. 铸造, 1997(12):44~48
- 91 徐俊光. 试论铸造厂的管理信息系统. 铸造, 1996(10):44~47
- 92 吕志刚等. 基于信息系统的精铸行业计算机应用. 特种铸造及有色合金, 1996(4):37~40
- 93 陈年生. 大中型制造业集成化管理信息系统的设计与实现. 计算机工程与应用, 2000(9):174~176
- 94 刘青林等. 计算机在焊接生产计划中的应用. 电焊机, 1999(3):22~24
- 95 魏艳红等. 焊接工艺规程数据库系统. 焊接, 1998(3):12~15
- 96 李连胜等. 焊接材料数据管理系统. 焊接, 1993(5):2~5
- 97 魏艳红等. 焊接工艺评定管理数据库系统. 焊接学报, 1993(3):30~34
- 98 邓连祥等. 焊接工艺管理专家系统. 焊接, 1997(10):15~18
- 99 胡小建. 焊接数据库及弧焊工艺评定系统. 焊接技术, 1998(6):39~40
- 100 魏艳红. 焊接工艺评定必要性判定数据库系统. 焊接, 1993(1):8~11
- 101 杨藏. 电子计算机在生产计划管理中的应用. 电焊机, 1999(9):17~19
- 102 费秉新. 初探计算机在电焊机产品材料定额管理中的应用. 电焊机, 1996(2):36~37

[G e n e r a l I n f o r m a t i o n]

书名 = 计算机在材料热加工领域中的应用

作者 =

页数 = 1 3 0

S S 号 = 1 0 4 4 3 5 7 6

出版日期 =