

高等学校教材

材料成型过程数值模拟

靳玉春 侯华 赵宇宏 等编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

本书介绍了材料热加工数值模拟的基本知识,包括基本理论、方法、应用等。根据材料加工学科中铸造、塑性加工、焊接和热处理等专业领域的情况,重点介绍了材料热加工中的温度场、流场数值模拟方面的内容,其中也包括了作者的部分研究工作。本书共分为3章,第1章主要介绍材料成型过程数值模拟的主要内容,着重介绍了计算方法、前后处理技术;第2章主要介绍材料成型过程温度场数值模拟的基本概念和方法,并附有铸件凝固过程数值模拟系统实例;第3章主要介绍铸件充型过程数值模拟的数学模型、计算模型的离散化、速度场和压力场的计算及其他问题的处理等。

本书是为适应材料成型与控制专业本科生的教学需要而编写的,也可供材料加工工程学科硕士研究生及从事材料成型的技术人员学习与参考。

图书在版编目(CIP)数据

材料成型过程数值模拟/靳玉春等编著. —北京:兵器工业出版社,2004.5

ISBN 7-80172-209-4

I. 材... II. 靳... III. 工程材料-成型-数值模拟 IV. TB3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 034458 号

出版发行:兵器工业出版社

责任编辑:莫丽珠

邮编社址:100089 北京市海淀区车道沟10号

经 销:各地新华书店

印 刷:河南济源五三一印刷厂

版 次:2004年5月第1版第1次印刷

印 数:1-1050

封面设计:安 雅

责任校对:郭 芳

责任印制:王京华

开 本:787×1092 1/16

印 张:12.875

字 数:319千字

定 价:28.00元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

前 言

先进制造技术是制造业赖以生存、国民经济赖以发展的主体技术,是当代科学技术发展最活跃的领域,是国际上高技术竞争的重要战场。材料成型技术涉及铸造、塑性加工、焊接和热处理等诸多领域,随着时代的发展,它已经形成一个与经济发展、国防建设紧密相关的技术学科,并成为先进制造技术不可缺少的组成部分。

20世纪80年代以来,计算机技术取得了前所未有的进展,引发了虚拟制造技术、并行工程的发展热潮,并进入到材料成型领域。材料成型过程的数值模拟便是虚拟热加工、并行工程的重要基础,国外某些企业已将数值模拟作为一道必要的工序。

材料成型是一个非常复杂的过程,涉及固体的变形、流体的流变、热能的传递、材料的性变,还有其他各种物理化学场的交互作用等,并受多种因素影响。要模拟这样复杂的过程,就涉及到塑性力学、流变学、传热学、材料物理化学和材料学等各个基础学科,并需要大量精确的实验准确地确定所需材料的热物性参数。生产实践中对于数值模拟最基本的要求就是准确,而这又是最难做到的。对于材料成型这样的复杂过程进行数值模拟,进行若干简化是必要的,但是简化带来的误差在工程上是可以接受的还是致命的却难以估计。在无法通过数值的方法准确地分析和估计误差的现状下,只有通过实验来检验其准确性。此外,仍有很多问题,虽经许多研究者多年探索,但至今仍未取得理论和技术上的根本性突破。

目前,很多高等学校和研究院所在从事数值模拟方面的工作,一些企业的材料成型技术人员也在使用数值模拟软件。无论使用或编制软件,都需要一些有关材料成型过程数值模拟的基本知识。本书是为适应材料成型与控制专业本科生的教学需要而编写的,也可供从事材料加工工程学科硕士研究生和技术人员参考。

本书绪论部分由赵宇宏编写,第1章由靳玉春教授编写,第2章和第3章的1、2、3、4节由侯华编写,第3章的5、6、7、8节由毛红奎、张国伟和尹志喜编写。在编写过程中得到程军教授的关注和支持,徐宏及铸造工程中心的同志们也给予很多帮助,在此表示衷心的感谢。

本书是在作者多年来从事本课程教学的讲稿基础上编写而成的,全书力求适应基础教学的同时能够反映一些本领域的最新成果,所以还融入了作者的一部分研究工作。由于本书专业领域覆盖面广,加之作者水平有限,疏漏之处在所难免,恳请读者予以指正。

编著者

二〇〇四年五月

目 录

绪论	1
0.1 材料成型技术的地位及作用	1
0.2 计算机技术与材料成型技术	1
0.3 计算机在材料成型领域中的应用	2
0.4 材料成型过程数值模拟技术在先进制造技术中的地位及作用	9
0.5 材料成型过程数值模拟研究的发展趋势	9
第1章 材料成型过程数值模拟技术	11
1.1 材料成型过程数值模拟的主要内容	11
1.2 前处理技术原理及方法	13
1.3 数值模拟的数值计算方法	27
1.4 数值模拟的求解条件	32
1.5 OpenGL 概述及产品数据交换标准	34
1.6 后处理技术原理及方法	52
第2章 材料成型过程温度场数值模拟	69
2.1 温度场及传热的基本概念	69
2.2 传热问题的数值计算	71
2.3 有限差分法	72
2.4 有限元法	100
2.5 铸件凝固过程数值模拟系统实例	106
第3章 铸件充型过程数值模拟	144
3.1 流体动力学	144
3.2 金属液充型过程数值模拟方法	164
3.3 充型过程数值模拟的数学模型	166
3.4 计算模型的离散化	169
3.5 速度场和压力场的计算	177
3.6 其他问题的处理	186
3.7 铸件充型过程紊流的数值模拟	191
3.8 紊流模拟实例	196
3.9 小结	200

绪 论

0.1 材料成型技术的地位及作用

先进制造技术是制造业赖以生存、国民经济赖以发展的主体技术，是当代科学技术发展最活跃的领域，是国际上高技术竞争的重要战场。以制造技术为焦点的竞争已在工业发达国家之间展开，许多发展中国家也深切体会到发展先进制造技术的重要性和紧迫性，并制定了相应的战略发展规划。

材料成型技术是先进制造技术不可缺少的重要组成部分。据统计，全世界 75% 的钢材经塑性加工，45% 的金属结构用焊接得以成型，我国有 6000 家以上的规模化专业铸造锻压工厂。材料成型技术是发展汽车、电力、石化、造船、工程机械等支柱产业的重要基础。据测算，到 2005 年汽车重量的 65% 以上是由钢材、铝合金、铸铁等通过铸造、塑性加工、焊接等方法成型。

与以切削为主的机械加工相比，材料成型具有如下特点：在质量评价标准上，在保证零件尺寸形状精度和表面质量的同时，更注重保证零件和结构内部组织性能和完整性；在产品 and 零件设计上，更强调针对复杂型腔和曲面的加工能力；在工艺过程中，还涉及温度场、流动场、应力应变场及内部组织的变化等；生产环境恶劣，控制因素多样。以上特点反映了材料成型过程对综合自动化和信息集成的需求和复杂性，因此，了解材料成型过程计算机模拟的现状以及在并行工程、虚拟制造等先进制造技术中的地位和作用，掌握未来的发展方向，对于推动我国先进制造技术的进步，赶超世界先进水平，具有十分重要的意义。

0.2 计算机技术与材料成型技术

计算机技术经过半个世纪日新月异的发展，其应用范围已远不止科学计算，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。计算机技术对包括热成型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（Advanced Manufacturing Technology 简称 AMT）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计算机辅助设计（CAD）、计算机辅助工艺设计（CAPP）、计算机辅助制造（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，就形成所谓的计算机集成制造系统（CIMS）。

与机械加工比较，材料成型领域内计算机应用发展相对较晚，但发展非常迅速。目前，计算机技术在铸造、焊接、锻压、计算机检测与控制、专家系统、信息处理系统及工业工装设计等方面的应用发展很快，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品质，缩短了生产周期，降低了成本，增强了产品在市场中的竞争力。

0.3 计算机在材料成型领域中的应用

图 0-1 是计算机在材料成型领域中的应用情况和组成部分，这些各个单独的部分可以靠网络联成一个完整的计算机应用系统。

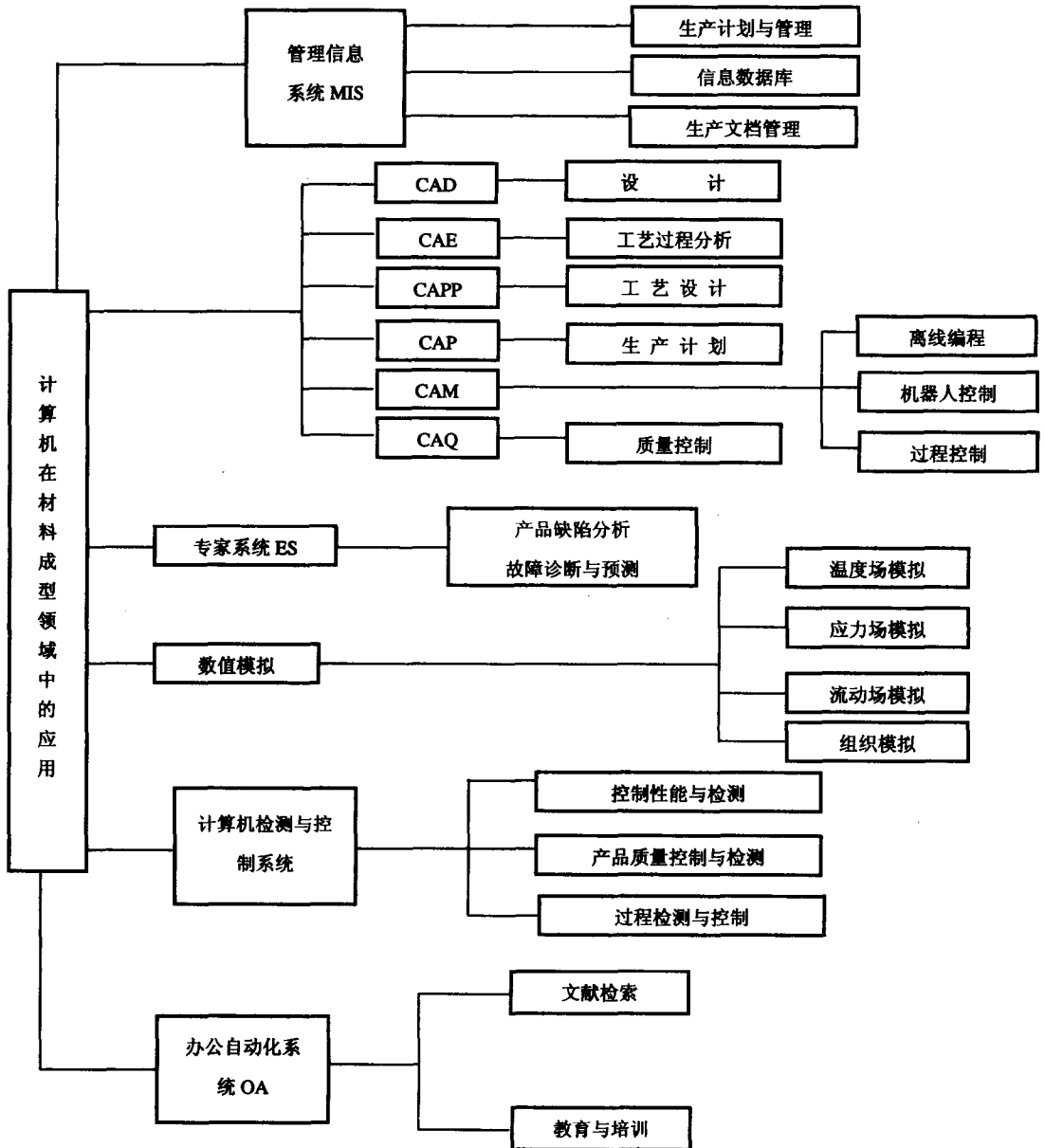


图 0-1 计算机在材料成型领域中的应用

在各个组成部分中，管理信息系统（MIS）与办公自动化系统（OA）一般由行政管理人員和计算机专业技术人员完成与管理，但 CAD、CAE、CAPP、CAP、CAM、CAQ、专家系

统(ES)与数值模拟,尤其是数值模拟部分对知识的掌握要求非常高,科技含量很高,它主要由高等院校或科研部门材料成型专业技术人员完成,有时需要辅助的配备一些计算机专业人员。系统的管理则主要由材料加工专业人员实施。

下面对这一完整的系统中的主要部分分别加以介绍。

0.3.1 计算机辅助设计和集成制造系统

计算机辅助设计(Computer Aided Design 简称 CAD)、计算机辅助工艺过程分析(Computer Aided Engineering 简称 CAE)、计算机辅助工业设计(Computer Aided Process Planning 简称 CAPP)、计算机辅助制造(Computer Aided Manufacturing 简称 CAM)是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、CAE、CAPP、CAM 等技术及其应用一直处于日新月异的动态发展浪潮之中。

CAE 在机械加工与材料成型中的含义有所区别,机械加工领域中 CAE 偏重于结构的设计分析,而材料成型领域内 CAE 偏重于工艺过程分析、计算机辅助工程。材料成型过程 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。材料成型领域 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,并已取得了多项研究成果。

从字面理解 CAD 定义是:计算机辅助设计,但其内容却十分丰富。在不同时期、不同场合代表不同内容。在微机应用初期,人们往往把计算机辅助绘图就称为 CAD,例如著名绘图软件 AutoCAD。广义地讲:在设计过程中只要将计算机应用于设计的任何一个、几个或全部过程都可称为 CAD。所以材料成型过程 CAD 往往可以包括 CAPP 甚至 CAE。如:铸造工艺 CAD。

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,从而更好地完成从方案提出、评价、分析模拟到修改和具体实现设计与制造等全过程。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的领域。

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。其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,产生出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)的实现奠定基础。

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成本等等。

(1) 集成化 以三维造型为基础的 CAD/CAE/CAPP/CAM 的集成是未来产品设计开发的主要模式。如果进一步与快速原型制造(RPM)集成,可以构成一个闭环快速产品开发系统,在并行工程(CE)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。并行工程又称为同步工程(Simultaneous Engineering)它是一种机械工程领域涉及产品生命周期的系统方法,但又不同于纯粹的方法,它涉及的内容相当广泛,包括许多基础技术,支撑技术,以及协议、标准乃至组织结构、管理方法等等。

它在设计产品的同时,就同步的设计与产品生命周期相关的过程(包括制造过程和支持过程),力求使产品开发者在设计阶段就考虑到从概念到投放市场的整个产品生命周期的所有因素,包括设计、分析、制造、检验、维护、可靠性、成本和质量等。

传统的机械工程方法是“串行”的过程,即:构思→设计→制造→装配→成品。而并行工程采用的是“并行”过程,简而言之,就是在设计阶段,集中有关产品研制周期的各个部门的各种专业人员,设计产品和有关过程,并对产品性能和有关过程进行计算机动态仿真、分析和评估,产生软样品(机)(soft prototype)以求取得最优结果。但并行工程并不提倡在产品设计的同时同步进行实际制造。

并行工程不同于计算机集成制造(CIM),CIM是一种哲理,一种系统策略,它关心的是各种信息的集成和单项技术的集成,而并不涉及单项技术之间以何种方法进入CIM。因此,并不排除按传统的串行法进入CIM;另一方面,实施并行工程并不一定要建立了CIMS才能进行,然而并行工程却能为CIMS提供良好的运行环境,赋予CIMS以更新的内容,促进CIMS产生更好的效益。

CAD+CAE+CAM+CAPP → CIMS

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。

(2) 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,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融为一体,实现人机一体化设计。材料成型CAD的智能化基于专家系统、信息处理系统以及CAE技术来实现。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。

(3) 网络化或协同化 形成信息高速公路互联的协同CAD,实现计算机支持协同工作(CSCW),达到远程制造的目的。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。这种网络系统的结构灵活、功能强大、价格较低。每个工作站可单独使用,也可配合使用,实现部门资源信息共享,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。

(4) 虚拟化 虚拟技术是以计算机支持的模拟技术为前提,对材料成型工艺及过程经过统一建模形成虚拟的过程、虚拟的产品,即在虚拟环境下实现整个材料成型工艺及生产过程在计算机上制造出数字化产品。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。虚拟制造技术以使企业多快好省地生产出高质量产品，在市场上具有强的竞争力。

0.3.2 计算机检测与控制系统

在材料成型生产和研究中，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检测到的信号由人或机器做出判断，然后采取相应的措施加以控制。然而，这种方法不能反映瞬间信号的变化和实时控制，不能满足实际生产和科研测试与控制的需求。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要求。

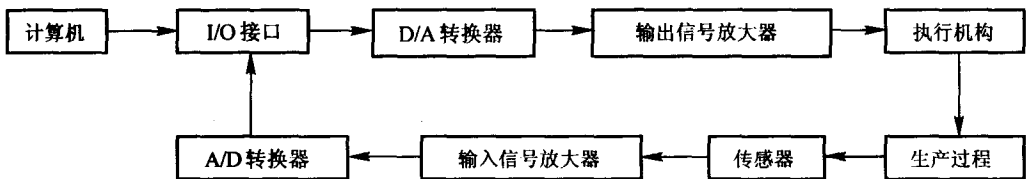


图 0-2 计算机检测与控制系统示意图

利用计算机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 0-2 所示。

近年来，材料成型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(Distribution Control System 简称 DCS)。它发挥和结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。

由于铸造工序最多、最复杂，所以在整个过程中计算机应用也比较多。下面是铸造生产过程中的一些计算机检测控制系统：

(1) 冲天炉熔炼的计算机检测与控制。包括配料的自动调节、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) 铸件成型过程的计算机检测与控制。包括金属液流动性检测、铸造性能检测、造型线主辅机工作状态的监测。

(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、有效粘土含量、透气性及水分的测试。

(6) 压力铸造过程的测试。

0.3.3 计算机信息处理系统

对企业来讲，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、CAPP、CAM 所需要及所生成的数据彼此相差很大，需要协调管理，才能达到资源共享。根据以上要求，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 及产品数据管理（Product Data Management 简称 PDM），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。目前，材料成型领域信息处理技术研究、开发与应用还处于起步阶段。

随着计算机技术的发展，计算机应用过程中产生和需要大量的数据，由于对这些数据的处理与共享又产生了计算机网络技术。而网络技术的发展不仅仅改变了和发展了计算机技术，而且改变着世界，对人类社会正产生着极其深远的影响。利用计算机及其网络技术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。

面对信息“爆炸”时代，还要加强对 Internet/Intranet 在材料成型领域应用技术的开发，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 对材料成型产业影响与对策的研究；
- （2）材料成型企业网上电子商务的研究与开发；
- （3）材料成型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。

Internet 与 Intranet 的区别在于：我们称 Internet 为互联网，而 Intranet 则称为“内部网”。Internet 具有六项基本标准的服务：文件共享、目录查询、打印共享、信息浏览、电子邮件及网络管理。Intranet 是采用因特网技术建立的企业内部信息管理和交换的基础设施，它为企业和因特网之间建立起了一座桥梁，使企业无论大小都可平等地走向世界。

目前，许多单位和企业建立了自己的计算机网络，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个步骤都可以从计算机和网络中及时得到必要的信息和进行所有生产、经营等活动。

而以上这些局域网络又通过因特网与世界相联。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。国内因特网发展也非常快，有些铸造模具厂家已通过因特网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、资料也可以通过网络分发，甚至网上讨论和召开会议，从而大大提高了效率，减少了企业在经营、管理、设计、生产各环节脱节的现象。

为了形成完整的网络信息系统，已开发出不少软件。从管理信息的角度，曾提出的物料需求计划系统（Material Requirement Planning 简称 MRP）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（Manufacturing Resource

Planning 简称 MRPII), 这一系统可将企业的产、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(Enterprise Resource Planning 简称 ERP), 它扩展了 MRPII 的信息范围: 从企业外部来说, 包括企业供应商、经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, 从而形成了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。

0.3.4 人工智能与专家系统

人工智能(Artificial Intelligence 简称 AI) 是当前科学技术发展过程中涌现出的一种新思想、新观念、新理论、新技术、新学科。它是在计算机学、控制论、信息论、精神心理学、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在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。这里和我们关系比较密切的是专家系统。例如目前研究开发的专家系统、机器翻译系统、机器学习系统、机器人等。

专家系统定义: 在搜集大量的经验与知识的基础上经过严密的推理、判断, 做出对某一过程有指导意义的决策判断。

专家系统是近几十年来人工智能研究领域中最具有使用价值的应用领域。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 DENDRAL 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课题, 促进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。因此, 许多国家纷纷把专家系统研制列入国家重点科研项目。

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生产除了受铸造工艺的影响外, 还与合金熔炼、造型、浇铸和清理等各种工序的实际操作的管理因素有关, 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。

目前材料成型领域内的专家系统研制开发得较多, 已在许多方面达到了实用化的程度并取得了良好的经济效益, 但总的来说目前还处于初步阶段。

0.3.5 计算机数值模拟系统

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，采用数值计算的方法求解，以获得该过程（或一个过程的某一方面）的定量认识，及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。

材料成型（包括铸造、塑性加工、焊接、热处理）是一个涉及物理、流体、传热、冶金、力学等因素的复杂过程。要得到一个高质量的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多快好省地满足了这些要求。通过计算机数值模拟来确定材料加工产品设计方案、生产工艺及相关参数、产品缺陷诊断、预测及质量检测。数值模拟使人们进行大量优化设计、方案筛选，从而节省很多人力、物力和时间，具有很大的经济效益。

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

铸造方面计算机数值模拟技术在过去的20几年内取得了长足的进步，受到世界各国的重视，科研成果层出不穷，归纳起来主要有以下几个方面：

（1）温度场模拟。利用传热学原理，分析铸件的传热过程，模拟铸件的凝固过程、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、预测热裂及变形等缺陷。

（4）流动与传热耦合设计。利用流体力学原理，在模拟充型的同时，计算热传，可以预测浇注不足、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。

金属塑性加工的计算机数值模拟系统主要研究材料在塑性加工过程中的变形情况、温度、应力、应变等分布规律以及微观组织、力学、机械及物化性能等的变化情况。常用有限元数值分析方法模拟钢的锻造、轧制、挤压、拉拔、板成型等。根据模拟研究内容的发展，又可分为宏观模拟与微观模拟，前者主要研究宏观塑性变形行为、成型特性、内部孔隙和疏松的压实技术及参数，后者则着重探讨微观塑性变形机制，寻找塑性加工过程中组织性能的变化规律并优化工艺方案和参数。

焊接方面计算机数值模拟近些年也取得不少的研究成果。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测定。
- (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。

0.4 材料成型过程数值模拟技术在先进制造技术中的地位及作用

金属材料成型过程是十分复杂的高温、动态、瞬时过程, 过程开放性差, 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。材料成型工艺过程数值模拟技术就是在材料成型理论指导下, 通过数值模拟计算, 预测实际工艺条件下, 材料成型后所得到的组织、性能和质量, 进而实现材料成型工艺的优化设计, 实现材料成型由“技艺”走向“科学”, 使材料成型技术水平产生质的飞跃。

数值模拟技术在材料成型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测, 缩短产品开发周期。
- (3) 在计算机上进行工艺模拟实验, 降低产品开发费用和对资源的消耗。

并行工程将设计和制造紧密联系在一起, 而数值模拟使并行工程成为可能(如图 0-3 所示)。选用合适的 CAE 工具可使并行工程易于实现。使用 CAE 工具, 产品开发便可在获得对设计和加工更多了解的情况下, 选择更好的工艺, 并对早期工艺设计做出准确的关键决策。此外, 还有助于并行工程避免那些难以加工和不经济的工艺设计, 有助于实现虚拟化、敏捷化、绿色化生产。因此可以确定: 数值模拟技术是材料成型领域 CAD 的重要内容, 也是先进制造技术——虚拟化、敏捷化、绿色化生产、并行工程的重要基础。

0.5 材料成型过程数值模拟研究的发展趋势

高质量, 低成本, 短周期材料成型技术的实现, 要求深入了解和掌握材料成型机理、过程变化, 并在计算机上显示成型过程。为实现最优设计与制造, 计算机数值模拟技术以及以此为优化的设计方法研究成为当今国内外的研究热点。

并行工程环境下的计算机数值模拟技术是材料成型过程数值模拟技术发展的一个主要方向, 并行工程环境要求高质量、高效率的高度集成数值模拟系统。

研究发展高质量的数值模拟系统依赖于对成型机理的深入探讨、建立高质量的数学物理模型。为了提高数值模拟系统的效率, 除依靠计算机软硬件技术的发展之外, 人们在研究提高计算速度的方法, 开发了大规模计算问题的并行计算方法(Parallel Computation), 利用并行处理机中多 CPU 可同时工作的特点, 配以软件编程中的并行处理方法, 使计算速度大为加快, 目前国际上许多商业软件都推出了并行版, 如 ANSYS、MARC、LS-DYNA3D 等; 另一方面, 人们在研究改善计算方法, 寻找合理而有效的计算方法。

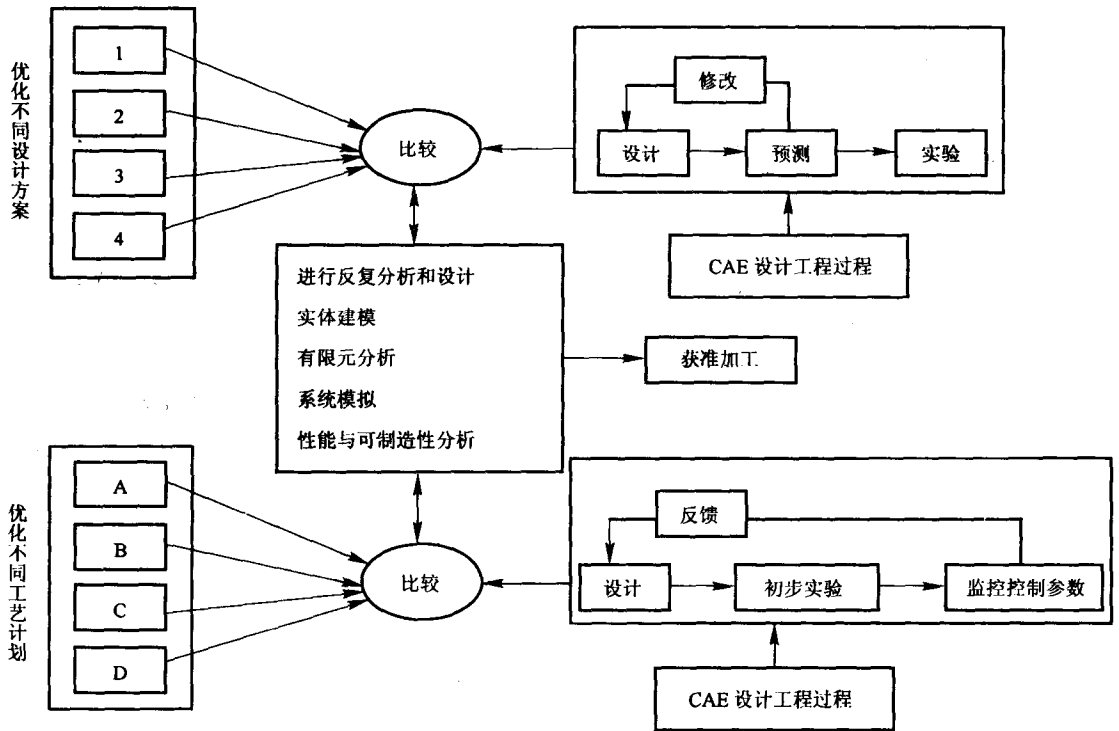


图 0-3 设计和制造的并行工程及计算机模拟

例如：在压力加工领域内，许多研究开发人员正致力于改进三维网格重划的自适应能力和自动化程度，改进新旧网格间信息传递的插值方法，取得了可喜的进展。同时，开发了 ALE 法，而 ALE 法不再像 Lagrangian 公式中将网格固定在材料上，而是不依赖于材料的运动而移动，因此可控制网格的几何形态，ALE 通过利用高阶的技术不断进行网格重划，从而避免上述问题，提高了计算速度和精度。

还有近年来兴起的一种与有限元法相类似的无网格方法。由于仅仅采用基点的近似，而不需要节点的连接信息。无网格方法不仅避免了繁琐的单元网格生成，而且提供了连续性好、形式灵活的场函数，具有前后处理简单、精度高等方面的优点。在处理裂纹扩展、多尺度分析、高速碰撞和具有大变形特征的工业成型问题时具有重要的研究价值和广阔的应用前景。

高度集成的数值模拟软件系统是此项技术发展的必然趋势，集成系统可为产品开发者提供一个高效快速的设计制造平台，以适应激烈的市场竞争的需要。一个集成的数值模拟系统包括：图形系统、数据传输程序、前处理系统、模拟分析系统、后处理系统、数据库管理系统。模拟分析系统中也是多种物理场模拟的集成，如：流场、温度场、应力场、相场的耦合；应力/应变场、温度场、相场耦合的模拟系统等等。

高质量、高效率的高度集成数值模拟系统是并行工程的可靠而有效的保证，也是发展虚拟制造技术的关键之一，它将会促进 21 世纪的材料加工技术得到更大的发展。

第1章 材料成型过程数值模拟技术

1.1 材料成型过程数值模拟的主要内容

材料成型过程数值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。

1.1.1 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环境及对象。前处理模块是材料成型过程数值模拟系统的重要组成部分,是对材料成型过程进行准确模拟、分析的前提和基础,其性能的好坏直接影响到整个系统的实用性及计算的准确性。前处理模块已成为影响整个数值模拟系统商品化及实用化的关键环节,对前处理模块的研究颇具意义。

材料成型过程数值模拟首先需要进行实体造型,即用计算机可识别的方式描述工件、工艺装备等信息(如铸造过程中的铸件、铸型、冷铁及保温材料)。其次,需要进行网格剖分,为模拟计算提供初始数据。自动剖分网格是分析的关键技术,它是材料成型过程数值模拟的前提。因此,前处理模块主要包括两部分内容:实体造型和网格剖分。

(1) 三维实体造型 将模拟对象(铸件、锻件、焊接构件等)的几何形状及尺寸以数字化的方式输入成为模拟分析软件能够识别的格式。

随着 CAD/CAE/CAM/RPM 一体化技术的发展,传统的几何造型技术已越来越显示出不足,新一代的三维实体造型技术——特征造型,由于其有参数化设计功能,基于特征设计思想及采用通用数据交换标准,已日益为集成系统所采纳。目前国内的数值模拟软件三维造型主要依托于国外三维造型软件进行三维实体建模,国内的此类软件的功能与实用性、可靠性与国外软件都有较大的差距,另外,国外某些专用数值模拟软件有的虽有三维建模功能,但总体来说功能较弱。

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 等,这些软件功能齐全,使用方便、快捷,大都提供较为通用的文件格式,因此已被大量采用,作为数值模拟的造型软件平台。

目前常采用的方法是通过数据交换文件实现与数值模拟专用软件的集成。为实现产品数据交换,不同 CAD 软件使用了统一的中间图形数据格式。三维中间图形数据的标准主要有 IGES、STL 和 STEP。这些文件提供了 CAD 系统与数值模拟软件系统的接口。

(2) 网格剖分 目前材料成型过程数值模拟的数值方法主要是有限元法和有限差分法。所以大部分自动剖分网格软件采用的技术主要有两种:三维有限元网格剖分技术和有限差分网格剖分技术。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。

网格剖分技术是数值模拟系统中前处理技术的重要组成部分。自动剖分网格是数值模拟

分析的关键模块。网格自动剖分主要分为有限元网格及有限差分网格。有限元网格自动剖分难度相对较大，目前国内的三维有限元网格自动剖分软件功能很弱，实用性差。国外许多机械 CAE 软件如 Ideas, Ansys 等分析功能都是基于有限元方法的，具有较强的网格自动剖分功能。美国铸造 CAE 专用软件 ProCAST 也采用此方法。目前国内外大多数铸造 CAE 软件都基于有限差分，并都开发出了三维有限差分自动网格剖分软件。许多学者针对不同的中间图形数据文件的有限差分自动网格剖分进行了研究。一般都基于 STL(Stereo Lithography)、IGES (Initial Graphics Exchange File) 或 DXF 文件格式。

1.1.2 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 目的是模拟材料成型过程中材料形状、轮廓、尺寸及宏观缺陷（变形、缺肉、皱折、缩松、气孔、夹杂等）的演化过程及最终结果。为达到以上目的，对模拟不同的过程需求解不同的数理方程。

温度场 是进行材料成型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，同时它也是其他热过程物理场的计算基础。可以求出在材料成型过程中工件的温度变化及各点的温度分布。

应力/应变场—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型过程及充不满（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。

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) 微观组织模拟及缺陷模拟 目的是模拟材料成型过程中材料组织（枝晶生长、共晶生长、柱状晶到等轴晶的转变、晶粒度、变相等）及微观尺寸缺陷（混晶、偏析、氢致裂纹等）的演变过程及结果。

(3) 多种物理场的耦合计算 要解决材料成型实际问题，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他各种物理场的基础，常见的耦合有：温度场 \leftrightarrow 应力/应变场。再次是把描述材料成型过程宏观现象的连续方程与描述微观组织演变的模型进行耦合。如温度场 \leftrightarrow 相变场、应力/应变场 \leftrightarrow 相变场、温度场 \leftrightarrow 统计模型、温度场 \leftrightarrow 应力/应变场 \leftrightarrow 微观缺陷预测模型等多种宏、微观模型之间耦合。

1.1.3 数值模拟后处理

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，尤其三维结果更是如此。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。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的一项重要研究内容。

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。

后处理技术也称科学计算可视化技术,它是随着计算机图形学的发展而发展的。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使用这种处理技术。

科学计算可视化(Visualization in Scientific Computing 简称 VISC)是 1987 年由 B.H.Maccormick 等为美国国家基金会所写的一份报告中首次提出来的,它是利用计算机图形学技术帮助科学工作者洞察他们的数据。VISC 的研究领域涉及到多个学科,它的研究与计算机图形学、图像处理、计算机视觉、计算几何、CAD 等学科紧密相连,且有极强的应用背景。其中最活跃的研究领域是三维数据场的可视化技术。三维数据可视化技术是最近十年逐步发展起来的。基本的可视化算法根据显示不同可分为两类:面绘制技术(Surface Fitting 简称 SF)和直接的体绘制技术(Direct Volume Rendering 简称 DVR)。如何更有效地结合面绘制和体绘制技术的优点开发生成高质量、高速度的系统是三维图形研究者努力的目标。

1.2 前处理技术原理及方法

研究通过 STL 文件直接自动获得 FDM 计算网格是前处理技术的重要内容。科学计算可视化是获得过程仿真 CAE 软件计算结果的一项关键技术,它从复杂的多维数据集中生成与其内容相关的视觉图像。将材料成型过程中的铸件温度场、流场等数据通过直观逼真的图形显示出来,使研究者能直接观察到计算和仿真的结果。在可视化研究中,数据建模和物理建模是两个重要因素。物理建模关心数学公式所表达的物理内涵,数据建模关心计算机的方便与否;物理建模让使用者清楚问题的性质,数据建模便于研究人员使用计算机解决问题。

1.2.1 有限差分网格自动剖分

以造型文件作为输入数据,自动将连续模型划分为有限差分或有限元网络的功能模块,是 CAE 子系统前处理的一个最重要的组成部分。为增强 CAE 系统的通用性,网格剖分模块接受的输入文件格式一般为各种商品化造型平台均支持的标准格式,应用最广泛的是 STL 格式。在做网格自动剖分前,应通过造型平台提供的文件格式转换功能,输出各工艺元素的 STL 文件。因此,STL 文件可看作是沟通成型工艺 CAD 系统和 CAE 系统的桥梁。STL 文件有限差分网格的自动剖分模块的开发是本节阐述的重点。

1.2.1.1 STL 文件格式

STL (Stereo Lithography) 文件格式是 SLA 设备生产厂家美国 3D 系统公司提出的一种用于 CAD 模型与 RP 设备之间数据交换的文件格式,此文件格式主要用于支持激光快速成型技术,现已为大多数 CAD 系统和 RP 设备制造商所接受,成为 RP 技术领域内一个事实上的“准”工业标准。

STL 文件是通过对 CAD 实体模型或曲面模型进行表面三角化离散得到的,相当于用一种全由小三角形面片构成的多面体近似原 CAD 模型。从几何上看,它是用众多三角形小平