现代集成制造系统（CIMS）系列 8

Contemporary Integrated Manufacturing Systems Series

虚拟制造

Virtual Manufacturing

肖田元 等著

Xiao Tianyuan

TUP

清华大学出版社

Springer

现代集成制造系统(CIMS)系列

虚拟制造

肖田元 等著

清华大学出版社 Springer
北 京

内 容 简 介

虚拟制造是实际制造在计算机上的本质实现，即采用计算机仿真与虚拟现实技术，实现产品设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验，以及生产过程的管理与控制等产品制造的本质过程，以增强制造过程的预测与决策能力。本书基于作者多年来的研究与应用成果，系统地总结和介绍了虚拟制造技术。全书共 15 章，可分为 3 部分，其中第一部分（第 1～7 章）是虚拟制造的共性技术，第二部分（第 8～13 章）是虚拟制造的专门技术，第三部分（第 14，15 章）是虚拟制造的应用。

本书的使用对象是制造工程、系统仿真等领域的科研人员，也可作为相关专业的大学高年级学生和研究生教学参考用书。

版权所有，翻印必究。举报电话：010-62782989　13901104297　13801310933

图书在版编目（CIP）数据

虚拟制造/肖田元等著. —北京：清华大学出版社，2004.8
（现代集成制造系统（CIMS）系列）
ISBN 7-302-08281-2

Ⅰ.虚…　Ⅱ.肖…　Ⅲ.计算机辅助制造　Ⅳ.TP391.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2004）第 019141 号

出 版 者：清华大学出版社　　**地　　址**：北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn　　**邮　　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**客户服务**：010-62776969
组稿编辑：王一玲
文稿编辑：田志明
印 刷 者：北京国马印刷厂
装 订 者：三河市新茂装订有限公司
发 行 者：新华书店总店北京发行所
开　　本：175×245　**印张**：46.5　**字数**：855 千字
版　　次：2004 年 8 月第 1 版　2004 年 8 月第 1 次印刷
书　　号：ISBN 7-302-08281-2/TP・5970
印　　数：1～3000
定　　价：70.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题，请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话：（010）62770175-3103 或（010）62795704

序

振兴我国制造业是当今的热点问题。目前，我国制造业面临严峻的形势，总体水平与发达国家相比，有较大的差距，这已成为制约我国21世纪经济发展的关键。同时，国际化市场竞争越来越激烈，使我国相当多的制造企业遇到了前所未有的挑战。为了克服这一困难，运用现代信息技术改造和提升制造业，将信息化和工业化结合，进一步过渡到现代化，在较短时间内实现跨越式发展，是符合我国制造业国情的一条发展之路。

当今世界已进入信息时代，并迈向知识经济时代。以信息技术为主导的高技术为制造业的发展提供了极大的支持，并推动着制造业的变革与发展，计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing Systems，简称CIMS）技术的应用及其产业化是其中最重要的组成部分。

CIMS这一概念由美国的Joseph Harrington博士于1973年首次提出，而开始得到重视并大规模实施则是在十年之后。其背景是美国20世纪70年代的产业政策发生偏差，过分夸大了第三产业的作用，而将制造业，特别是传统产业，贬低为“夕阳工业”、“生了锈的皮带”。这导致美国制造业优势的衰退，并在80年代初开始的世界性石油危机中暴露无遗。此时，美国才开始重视制造业，并决心用其信息技术的优势夺回制造业的霸主地位，认为“CIMS, no longer a choice!”。

863/CIMS主题结合国际上先进制造技术的发展，特别是基于该主题中3000多名人员十余年的实践，提出了“现代集成制造系统”（Contemporary Integrated Manufacturing Systems，简称CIMS）的理念，在广度和深度上拓展了传统CIMS的内涵。

我国“现代集成制造系统”拓展了传统“计算机集成制造系统”的要点，细化了现代市场竞争的内容；提出了 CIMS 的现代化特征是数字化、网络化、虚拟化、集成化和绿色化；强调了系统的观点，扩展了系统集成优化的内容，包括信息集成、过程集成和企业间集成优化，企业活动中三要素（人、经营、技术）和三流（物流、信息流、资金流）的集成优化，以及 CIMS 相关技术和各类人员的集成优化；突出了管理与技术的结合，以及人在系统中的重要作用；指出了 CIMS 技术是基于制造技术、信息技术、管理技术、自动化技术、系统工程技术的一门发展中的综合性技术，其中，特别突出了信息技术的关键作用；扩展了 CIMS 的应用范围，包括离散型制造业、流程及混合型制造业。总之，“现代集成制造系统”的提法更具广义性、开放性和持久性。

现代集成制造系统是信息时代提高企业竞争力的综合性高技术。它应用于企业产品全生命周期（从市场需求分析到最终报废处理）的各个阶段。通过信息集成、过程优化及资源优化，实现物流、信息流、资金流的集成和优化运行，达到人（组织、管理）、经营和技术三要素的集成，以缩短企业新产品（P）开发的时间（T）、提高产品质量（Q）、降低成本（C）、改善服务（S）、有益于环保（E），从而提高企业的市场应变能力和竞争能力。

我国发展 CIMS，是为了提高企业的竞争力。在技术路线上，从国情出发，我们走了一条与美国有较大差别的创新发展之路。20 世纪 80 年代中期，以通用汽车（GM）为代表的美国制造业，把 CIMS 的重点放在车间层设备的信息集成上，以实现制造设备的互联和柔性自动化为目标，提出了耗资几十亿美元的 MAP 计划。而从我国的企业实际情况看，企业经营生产中的瓶颈是产品开发能力，特别是新产品的开发能力弱，管理粗放。因此，我国研究、应用和实施 CIMS 的重点放在加强产品的设计和企业管理上，车间层只能是适度自动化。在此基础上实现信息集成应采用 TCP/IP，通过软件技术实现与 MAP 的集成。实践证明，这些技术决策避免了走大量投资而效果不大的弯路，并取得了很好的效果。

十多年来，我们以提高我国企业的竞争能力和创新能力作为技术发展的宗旨，以“企业真正取得效益、企业说好才是真好”作为技术成败的主要评价标准，走出了一条与我国企业紧密结合的道路。通过与机械、电子、航空、航天、轻工、纺织、石油、化工、冶金等行业的二百多家企业密切合作，取得了显著的经济效益和社会效益。这也为 CIMS 本身的技术创新提供了源泉。二者互相促进不断深化。我国 CIMS 研究的深度和广度、应用效果及其对国家的影响，在国际上是公认的。我国对 CIMS 技术内涵的丰富和发展，也得到国际同行的承认。清华大学、华中理工大学分别于 1994 年和 1999 年获得美国制造工程师学会（Society of Manufacturing Engineers，简称 SME）的 CIMS“大学领先奖”（一般每年在世界范

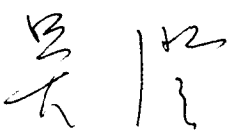
此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

围内只评选一名),1995 年北京第一机床厂获 SME 的 CIMS“工业领先奖”。这使得我国成为除美国以外惟一获得过两个“大学领先奖”和一个“工业领先奖”的国家。我国在这一国际重要技术领域有了“一席之地”。

进入 20 世纪 90 年代以来,如何以最短的时间开发出高质量及价格能被用户接受的新产品已成为市场竞争的新焦点。基于企业动态联盟和网络化的敏捷制造(Agile Manufacturing)将成为 21 世纪的重要发展方向;网络的协同产品商务(CPC)将成为研究应用的一个具体热点;围绕提高新产品开发能力,新的工具软件迅速发展,建立在建模、仿真、虚拟现实技术基础上,以减少或取消制造原型机或原型系统的虚拟制造(Virtual Manufacturing)发展很快;用来加速新产品开发过程的并行工程(Concurrent Engineering)迅速得到推广;提高生产过程控制水平已成为企业投入少、见效快、挖潜增效的重要途径;面向中小企业的、经济实用的低成本综合自动化系统得到重视和发展;更多企业将采用大批量定制生产(Mass Customization Production)模式;合理开发利用资源,保护生态环境,实现经济—社会相互协调的可持续发展越来越受到重视;制造全球化已成为发展的必然趋势,因此,未来制造业信息化的发展趋势将是数字化、集成化、绿色化、智能化、敏捷化与网络化的融合,各种新的管理模式和管理思想不断出现,将导致全球化敏捷生产体系的形成。

在世纪之交,我们回顾过去,展望未来,组织编写现代集成制造系统(CIMS)系列丛书,其目的是:总结我们十多年来在国家高技术发展研究计划(863 计划)的支持下,用高技术改造传统产业,并加强新兴产业的丰富成果和认识;同时不断拓展 CIMS 理念和内涵,使 CIMS 技术持续发展。该丛书的题材都是作者多年来在现代集成制造技术领域中的最新研究成果,代表了我国在该领域的前沿方向。我们相信该丛书的出版必将在我国 CIMS 的研究、应用和发展中起到积极的推动作用。

实现我国制造业的信息化、现代化是一个很长的历史过程,需要几代人的努力。但是我们坚信:中国必将以一个制造强国、工业强国的面貌屹立于世界民族之林。



中国工程院院士

国家高技术计划自动化领域首席科学家

2000 年 5 月

前言

制造业的新技术、新概念往往都是围绕着市场需求变化而诞生的。20世纪90年代以来，制造系统面临外部环境与内部环境两方面的快速变化。在外部环境方面，制造系统必须适应社会和经济环境发展的要求，如制造活动全球化、绿色制造、降低能源和原材料消耗、产品责任等。“技术、个性化第一”、全球知识经济的兴起标志着产品竞争已经从原来的价格竞争转化到技术含量的竞争，产品的技术含量成为市场的主流和企业成功的关键；客户对产品的性能、规格、品种不断提出新的需求，追求多元化、个性化，多品种、小批量的生产成为主导形式；同时，快速变化、日益激烈的市场竞争对制造业提出了更为苛刻的TQCS(T上市时间、Q产品质量、C低成本高附加值、S服务满意度)要求，可持续性发展战略也要求制造业对环境的负面影响减至最小。

然而，与市场需求不相适应的是在内部环境方面，系统投资大、周期长，在系统建立和运行之前，难以对风险和效益进行切实有效的评估；当开发一个新产品时，在大量投入人力物力之前，无法准确确定其开发价值；在进行产品设计时，难以兼顾下游开发过程的因素，如制造成本、装配难易程度等，因而难以确保设计的成功，也难以缩短产品开发周期；系统组织模式固定，无法根据市场需求进行动态调整。面临着这些严峻的挑战，在制造基础设施和产品两方面都必须加强信息化。许多机床和设备都具有数控能力，现在需要进一步的信息处理能力以及同各种性能的计算机进行通信的能力。材料、零件、产品要附有标志、条形码、标签、IC卡等，从而才有可能实现其全生命周期的信息处理与通信。将信息技术更深入更全面地渗透到传统制造业领域，对之进行改造，发展新一代制造技术，提高企业的柔性和快速响应市场的能力，就成为现

代制造业发展的必由之路。

近十几年来建模与仿真技术飞速发展，分布式交互仿真技术向人们展示了借助建模与仿真技术来设计与分析复杂系统、复杂产品的巨大能力。计算机图形学、虚拟现实技术和可视化技术在娱乐界的普及带给人们感官上的强烈震撼。工程技术人员以及客户迫切希望使用这些先进技术对制造业进行改造，为产品的设计、加工、分析以及生产的组织和管理等提供一个虚拟的仿真环境，从而在计算机上组织和"实现"生产，在实际投入生产前对产品的可制造性和可生产性等各方面性能进行论证，保证一次生产就能够成功，从而降低生产成本、减少上市时间、快速响应用户需求和市场变化、实现清洁生产以减少环境污染，由此提高企业的竞争力。因此，建模与仿真技术、虚拟现实技术正成为21世纪信息技术同制造技术结合的重要桥梁。

人们预测，21世纪的制造技术将是基于集成化技术、智能化技术、网格技术、分布式并行处理技术、人—机—环境系统技术等多学科综合的新一代制造技术。虚拟制造就是在这种情况下，在强调柔性和快速响应的前提下，随着信息技术，特别是建模与仿真技术、虚拟现实技术的发展，在20世纪90年代初由美国首先提出的。"虚拟制造"(Virtual Manufacturing)这样一个概念，简单地说，它提供的是"在计算机上制造"的能力，或者说是"实际制造过程在计算机上的本质实现"。从它诞生之日起，其潜在的优势就受到广泛关注和认可，被认为是下一代制造技术的关键。

虚拟制造将是制造业最具挑战性的领域。虚拟制造技术的研究可以说是刚刚起步，仍然处于探索阶段，目前得到普遍赞同的意见是："虚拟制造"中的"制造"是广义的制造，即一切与产品相关的活动和过程，有些文献称为"大制造"(Big Manufacturing)，这是相对于传统的狭义"制造"而言的(有些文献为了区别，将传统的狭义"制造"称为"小制造"(Small Manufacturing))。"虚拟制造"中的"虚拟"(Virtual)含义则是：这种制造在传统意义上不是真实的，但却是"本质上的"，也就是说，"虚拟制造"就是"在计算机上实现制造的本质内容"。因此，虚拟制造是实际制造在计算机上的本质实现，即采用计算机仿真与虚拟现实技术，在高性能计算机及高速网络的支持下，实现产品设计、工艺规划、加工制造、性能分析、质量检验，以及企业各级过程的管理与控制等产品制造的本质过程，以增强制造过程各级的决策与控制能力。

本书是作者近8年来在虚拟制造领域研究与攻关的科研工作的整理与总结。作者从1996年开始在国家863计划自动化领域CIMS主题支持下开始虚拟制造的研究工作，近8年来，得到了CIMS主题、国家教育部211工程、清华大学985规划，北京市科委等多方面的支持，结合山西经纬纺机股份有限公司、徐工集团、嘉陵工业集团、三一重工、万东医疗设备股份有限公司等企业的实际开展研究与攻关。

本书的内容是如下安排的:全书共分 15 章,可分为 3 部分。第一部分是虚拟制造的共性技术,共 7 章(第 1～7 章);第二部分是虚拟制造专门技术,共 6 章(第 8～13 章);第三部分是应用,共两章(第 14,15 章)。

第一部分第 1 章是绪论,对虚拟制造提出的背景、研究进展、技术内涵、关键技术、体系结构进行了综述。虚拟制造是基于模型的,因此,在第 2 章讨论产品建模,包括计算机图形学基本知识、实体几何建模以及产品建模等。虚拟制造中的产品模型最基本的问题是不同层次、不同抽象程度、不同领域、不同阶段、不同粒度和不同信息组织方式的模型之间如何实现信息集成和共享。针对这种情况出现了元模型的概念,并被认为它是解决模型集成问题的一个很有前途的方向。第 3 章讨论了面向虚拟产品开发的元建模技术,包括基于模型定义单元(MDU)的虚拟产品元模型理论,MDU 继承、复合和组装,MDU 的结构、行为、功能、约束规则与它们之间联接方式,以及在 MDU 的基础上构建具有特定工程语义的、面向具体产品的产品定义单元 PDU 技术。第 4 章讨论虚拟制造系统,包括内涵、特点、体系结构,并介绍了一些典型的虚拟制造系统。在此基础上讨论了建模技术,重点介绍 CIMOSA 的建模体系和基于 Petri网的虚拟制造系统建模技术等。第 5 章从系统的角度讨论仿真建模技术,对连续系统,首先介绍集中参数模型的仿真建模方法,然后介绍分布参数系统的经典的差分法和线上求解法;对离散事件系统,讨论了事件调度法、活动扫描法、进程交互法以及三阶段法。虚拟制造需要提供虚拟现实环境,因此,第 6 章就虚拟现实(Virtual Reality,VR)技术的发展历程做了概括性介绍,并讨论了 VR 中的基本技术,如位置跟踪通道、视觉通道、听觉通道、触觉/力反馈、虚拟场景的生成等。为了实现虚拟产品开发过程的集成,保证产品开发各阶段有序协调地并行工作,虚拟产品开发管理成为必不可少的平台,第 7 章讨论了虚拟产品开发管理技术,包括组织管理、数据管理、配置管理、流程管理等。

虚拟制造包括设计方案确定、概念设计、详细设计、仿真分析和优化设计等,涉及的领域是多方面的。这在第二部分中分 6 章介绍,其中复杂系统运动和动力学性能分析及优化理论方法是开发虚拟样机(Virtual Prototype)的基础。因此在第 8 章讨论了基于多体系统的虚拟样机技术,包括多体运动学和动力学基本知识、多体系统运动学建模、多体系统动力学建模,最后通过实例讨论多体系统仿真分析,包括运动学分析和动力学分析。虚拟样机除了涉及多体系统分析技术外,流场分析技术是另一类典型虚拟样机技术,在第 9 章讨论了计算流体力学技术。流场一般采用偏微分方程描述,本章在对一般性流场进行简要介绍的基础上,重点讨论了流动模型、湍流方程离散化方法以及求解方法,并通过实例介绍基于典型商品化软件的湍流仿真分析。虚拟样机设计完成后,可制造性检验是虚拟制造的重要内容。尽管 CAD/CAM 从 20 世

纪80年代就获得了广泛的应用，但是在实际的制造系统中，经过CAD/CAM的零件，在正式加工之前，一般要进行试切这一步骤，因而虚拟加工成为虚拟制造中的重要一环。在第10章讨论虚拟加工技术，包括数控代码的翻译、实体提取方法、实体碰撞和干涉检验算法、材料切除过程仿真算法，并介绍了一个自主开发的通用加工过程仿真系统GMPS。可制造性检验的另一项重要内容是装配检验，虚拟装配基于产品的数字化实体模型，在计算机上分析与验证产品的装配性能及工艺过程，对产品的可装配性进行检验。第11章讨论虚拟装配技术，包括虚拟装配建模、装/拆过程的干涉检查技术。第12章讨论虚拟车间技术，包括车间布局设计与优化、生产计划与调度仿真、多机器人单元协调控制的仿真与优化等。Internet为企业提供了广域信息基础设施，WWW和JAVA为分布式数据库和分布式计算提供了工具，企业在Internet环境下开展全球范围内合作，基于Internet的虚拟产品协同开发成为可能，并且将成为重要的协作模式。第13章讨论基于网络的虚拟产品协同开发，包括协同开发系统模型、支持协同开发的支撑技术、资源共享中的分层调度算法、工具软件共享技术等，并介绍了一个基于多代理技术的支持虚拟产品协同开发的平台MSRS。

在第三部分中，第14章结合实际产品——剑杆织机，介绍如何应用虚拟制造技术实现产品的自主开发与创新，以便读者对虚拟产品开发技术的应用有实际的了解；第15章以摩托车开发为例，介绍如何在企业建立虚拟产品开发平台。

虚拟制造涉及的技术领域极其广泛，因此难以在一本书中对其进行全面而深入的讨论。特别是，“虚拟制造”这一概念于1994年正式提出，至今不到10年时间，尽管得到了学术界、工业界等许多领域的关注，已经取得了长足的进步，但目前仍然处于不断发展和深入阶段。从某种意义上来说，虚拟制造是信息技术对传统制造业的改造与提升，随着信息技术的发展，这种改造与提升也必然不断发展。加上本书作者研究范围有限、能力有限，因此，本书所提供的研究成果和技术是初步的，难免会有片面甚至谬误之处，敬请读者谅解并欢迎批评指正。

本书的许多素材来自清华大学自动化系系统集成研究所仿真与虚拟制造研究室多年来的研究成果，一批教师、博士后、博士生、硕士生对此书作出了贡献。参加本书写作的有：张林锴博士、赵银燕博士、李欣峰博士、罗亚波博士、王爱民博士、乔桂秀博士。对本书作出贡献的还有：韩相利博士、王新龙博士、郑会永博士、赵骥博士、吴群波博士、王云莉博士、董建华博士、张玲博士等。另外，本书还吸收了一些仿真与虚拟制造研究室的硕士生的研究成果。因此，本书是仿真与虚拟制造研究室师生们的集体创作。作者还要感谢支持本书所

涉及的研究工作的有关方面，他们是：国家863计划自动化领域CIMS主题，国家教育部211工程，清华大学985规划，北京市科委等。没有其经费支持，作者是不可能在虚拟制造领域有所作为的。

作　者

2003年4月于清华园

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目 录

第1章 绪 论 …… 1

1.1 引言 …… 1

1.1.1 市场变化是直接的推动力 …… 1

1.1.2 制造技术自身发展的必然结果 …… 3

1.1.3 支撑技术的发展 …… 6

1.2 虚拟制造技术国内外研究概况 …… 7

1.2.1 国外研究概况 …… 7

1.2.2 国内研究概况 …… 12

1.3 虚拟制造的定义及分类 …… 13

1.3.1 虚拟制造的定义 …… 13

1.3.2 虚拟制造的分类 …… 16

1.4 虚拟制造技术的内涵 …… 21

1.4.1 虚拟制造的特点 …… 21

1.4.2 虚拟制造及其相关概念 …… 23

1.4.3 虚拟制造的关键技术 …… 28

1.5 虚拟制造技术在制造业中的应用 …… 33

参考文献 …… 35

第 2 章 虚拟产品建模基础 …… 38
2.1 虚拟产品建模特点 …… 38
2.1.1 概述 …… 38
2.1.2 虚拟制造模型分类 …… 38
2.1.3 虚拟制造对模型的要求 …… 39
2.1.4 模型的层次关系 …… 41
2.2 计算机图形学基础 …… 43
2.2.1 坐标系统 …… 43
2.2.2 基本几何元素及其方向的定义 …… 44
2.2.3 几何元素的相交计算 …… 46
2.2.4 三维图形的几何变换 …… 47
2.2.5 包容性测试 …… 49
2.3 实体几何建模方法 …… 51
2.3.1 构造实体几何模型 …… 52
2.3.2 边界表示模型 …… 53
2.4 产品建模 …… 54
2.4.1 概述 …… 54
2.4.2 面向结构的产品模型 …… 55
2.4.3 面向几何的产品模型 …… 55
2.4.4 面向特征的产品模型 …… 56
2.4.5 面向知识的产品模型 …… 57
2.4.6 集成化产品模型 …… 58
参考文献 …… 60

第 3 章 虚拟产品元建模方法学 …… 61
3.1 元建模方法学概述 …… 61
3.1.1 模型与元模型 …… 61
3.1.2 基于 MDU 的元建模 …… 65
3.1.3 基于 MDU 的元模型类型系统 …… 67
3.2 MDU 形式化描述 …… 68
3.2.1 MDU 的级别 …… 70
3.2.2 MDU 的功能描述 …… 72
3.2.3 MDU 的行为描述 …… 73
3.3 MDU 复合的约束 …… 75
3.3.1 参数约束 …… 75

3.3.2 拓扑约束 …… 82
3.3.3 三种类型的 MDU 复合 …… 83
3.4 MDU 的组装和重组 …… 85
3.4.1 MDU 的联接方式 …… 86
3.4.2 MDU 的组装 …… 87
3.4.3 组装 MDU 的行为推理 …… 88
3.4.4 基于 MDU 的元建模系统总体框架 …… 92
3.5 基于元建模技术的产品模型 …… 94
3.5.1 产品对象模板 POT …… 95
3.5.2 产品定义单元 PDU …… 96
3.6 产品模型总框架 …… 100
3.6.1 产品语义模型 …… 101
3.6.2 产品语义模型与实体模型的关系 …… 102
3.6.3 产品设计模型衍生到分析模型 …… 103
3.7 小结 …… 104
附录 3.1 MDU 库 …… 105
附录 3.2 联接方式 …… 117
附录 3.3 拓扑推理规则 …… 124
参考文献 …… 126

第 4 章 虚拟制造系统 …… 128
4.1 引言 …… 128
4.2 虚拟制造系统目标 …… 129
4.2.1 虚拟制造系统作为沟通信息技术与制造系统的桥梁 …… 129
4.2.2 虚拟制造系统作为集成制造系统资源的手段 …… 130
4.3 虚拟制造系统特点 …… 131
4.3.1 虚拟制造系统的功能特点 …… 131
4.3.2 虚拟制造系统的结构特点 …… 134
4.3.3 虚拟制造系统的仿真特点 …… 135
4.4 典型虚拟制造系统结构 …… 137
4.4.1 基于 VIS 和 VPS 体系结构 …… 137
4.4.2 基于 Mediator 的体系结构 …… 139
4.4.3 基于 INTERNET/STEP 的虚拟制造信息共享系统结构 …… 142

4.4.4 强调沉浸感的 Virtual Workbench 系统 …… 147
4.4.5 基于 PDM 集成的虚拟制造系统结构 …… 149
4.4.6 基于 5 层协议的虚拟制造体系结构 …… 152
4.5 虚拟制造系统建模 …… 153
4.5.1 CIMOSA …… 153
4.5.2 Multi Agent 方法 …… 158
4.5.3 Petri 网建模方法 …… 165
4.6 结论 …… 176
附录 4.1 CIMOSA 建模模板结构 …… 176
参考文献 …… 179

第 5 章 系统仿真建模技术 …… 180
5.1 概述 …… 180
5.2 集中参数连续系统建模与仿真 …… 182
5.2.1 连续时间模型 …… 182
5.2.2 离散时间模型 …… 184
5.2.3 连续—离散混合模型 …… 186
5.3 集中参数连续系统仿真建模方法学 …… 188
5.3.1 离散化原理及要求 …… 188
5.3.2 龙格—库塔法 …… 190
5.3.3 线性多步法 …… 192
5.3.4 线性多步法误差分析 …… 196
5.3.5 稳定性分析 …… 198
5.4 分布参数连续系统建模与仿真 …… 199
5.4.1 概述 …… 199
5.4.2 差分法原理 …… 200
5.4.3 差分格式的相容性、收敛性及稳定性 …… 203
5.4.4 扩散方程的菱形法及跳点法 …… 207
5.4.5 对流方程的耗散中心差公式 …… 209
5.4.6 椭圆方程的差分法 …… 211
5.4.7 线上求解法 …… 213
5.5 离散事件系统建模 …… 216
5.5.1 基本概念 …… 216
5.5.2 事件调度法 …… 218
5.5.3 活动扫描法 …… 220

5.5.4 进程交互法 …… 222
5.5.5 三阶段法 …… 224
5.5.6 4种建模方法的比较 …… 227
5.6 小结 …… 230
参考文献 …… 230

第6章 虚拟现实技术 …… 231
6.1 虚拟现实的特征及基本构成 …… 231
6.2 虚拟现实技术的发展概况 …… 235
6.3 位置跟踪通道 …… 238
6.4 视觉通道 …… 241
6.4.1 视景的生成过程 …… 241
6.4.2 基于投影变换原理三维立体图的生成算法 …… 242
6.4.3 典型的立体视觉设备 …… 245
6.5 听觉通道 …… 246
6.5.1 虚拟声音的产生 …… 247
6.5.2 虚拟声音的定位 …… 249
6.6 触觉、力反馈 …… 250
6.6.1 人体触觉系统 …… 251
6.6.2 触觉/力反馈技术 …… 252
6.7 虚拟场景的生成 …… 257
6.7.1 虚拟场景静态模型的建立 …… 257
6.7.2 虚拟场景动态模型的建立 …… 259
6.8 小结 …… 261
参考文献 …… 262

第7章 虚拟产品开发管理 …… 263
7.1 概述 …… 263
7.1.1 虚拟产品开发管理内涵 …… 263
7.1.2 虚拟产品开发管理关键技术 …… 264
7.2 虚拟产品开发组织及安全权限管理 …… 265
7.2.1 组织模型管理 …… 266
7.2.2 安全权限管理 …… 269
7.2.3 组织及权限管理体系的建立 …… 271
7.2.4 工作过程描述 …… 272

7.3 虚拟产品开发数据管理 …… 273
7.3.1 响应动态用户需求的管理策略 …… 274
7.3.2 动态修改数据的管理策略 …… 276
7.3.3 产品数据的版本管理策略 …… 277
7.3.4 应用工具封装的管理策略 …… 278
7.3.5 虚拟产品开发数据管理小结 …… 280
7.4 虚拟产品开发配置管理 …… 280
7.4.1 响应动态需求的配置策略 …… 282
7.4.2 配置中的 BOM 管理策略 …… 284
7.4.3 针对定制要求的配置策略 …… 285
7.4.4 面向虚拟产品开发的配置策略 …… 286
7.4.5 虚拟产品开发配置管理小结 …… 287
7.5 虚拟产品开发流程管理 …… 288
7.5.1 虚拟化的流程管理策略 …… 290
7.5.2 虚拟化的项目管理策略 …… 291
7.5.3 与先进思想结合的策略 …… 293
7.5.4 开发流程管理小结 …… 294
7.6 虚拟产品开发管理的实施与应用 …… 294
7.6.1 数据管理实施与应用 …… 295
7.6.2 配置管理的实施与应用 …… 296
7.6.3 流程管理的实施和应用 …… 297
7.6.4 集成方面的实施和应用 …… 298
7.6.5 管理平台的实施 …… 299
7.6.6 常用软件介绍 …… 302
7.6.7 虚拟产品开发管理实施和应用小结 …… 303
7.7 小结 …… 304
参考文献 …… 304

第 8 章 虚拟样机多体系统仿真分析 …… 306
8.1 多体系统运动学、动力学基本知识 …… 307
8.1.1 多体系统描述模型 …… 307
8.1.2 拓扑构型 …… 309
8.2 多刚体系统运动学 …… 312
8.2.1 刚体的姿态、角速度和角加速度 …… 313
8.2.2 刚体质心的位置、速度和加速度 …… 314

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com