



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进制造技术与应用前沿

虚拟制造

杜宝江 著

上海科学技术出版社

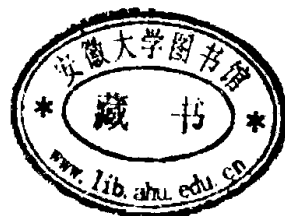


国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”国家重点图书出版规划项目
先进制造技术与应用前沿

虚拟制造

杜宝江 著



上海科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

虚拟制造/杜宝江著. —上海:上海科学技术出版社,
2012. 1

(先进制造技术与应用前沿)

ISBN 978—7—5478—1069—9

I. ①虚... II. ①杜... III. ①计算机辅助制造
IV. ①TP391. 73

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 238932 号

上海世纪出版股份有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路 71 号 邮政编码 200235)

新华书店上海发行所经销

苏州望电印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 31 插页:4

字数:510 千字

2012 年 1 月第 1 版 2012 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978—7—5478—1069—9/TH·24

定价:98.00 元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,
请向工厂联系调换

内容提要

本书主要内容包括虚拟制造系统的构造技术、虚拟制造系统的设计、虚拟制造工厂、销售与售后服务中的虚拟制造等。书中内容着重体现了近年来作者在该领域的专利、软件著作权成果,学术论文和重大科研成果,以及在装备制造业中的应用案例,反映了具有国际先进和国内领先水平的虚拟技术及应用状况,如产品系列的快速化虚拟设计、实参数虚拟样机分析、重大装备生产虚拟资产管理、快速搭建式车间虚拟规划、大型工件的虚拟生产工艺优化、复杂产品的虚拟装配指导、工装操作虚拟培训、定制化销售演示、远程虚拟维护指导、生产系统虚拟运行监控等。

本书可供装备制造业中的设计、制造、销售和售后服务人员、研究人员和高校师生阅读与参考。

编撰委员会

先进制造技术与应用前沿

主 任 路甬祥

副 主 任 李蓓智 曹自强

委 员 (按姓氏笔画排序)

王庆林 石来德 包起帆 严仰光

杜宝江 李 明 李 春 李希明

何 宁 何亚飞 陈 明 阎耀保

葛江华 董丽华 舒志兵

学术专家 艾 兴 汪 耕 周勤之

前 言

先进制造技术在最近十几年中发展迅速,人类的制造经验和技能得到了不断的丰富和提高。为此,人们希望从制造经验出发,利用计算机技术推演出实物制造各环节中能够实现理想结果,并与实物制造过程混合应用,以达到最好的制造效能。近年来,功能强大的计算机系统作为中间媒体存在于人和自然环境之间,开始实现人-自然环境-计算机三者现实空间内的相互调和,虚拟制造正是这种调和关系的产物。

虚拟制造是在以计算机为核心的虚拟空间内把生产要素转变为虚拟产品及制造机能的全部行为,涵盖了从产品概念的形成、结构设计、生产场地规划、生产决策、制造工艺、生产流程、性能测试、产品试验、装配指导、技能培训、市场销售等生产全过程。它在互动性三维可视化环境下,通过企业生产身临其境式的计算机模拟来评估和优化制造过程,在实际生产前发现问题,在不消耗实际生产资源的情况下找出最优方案,达到缩短周期、降低成本、提高效益的目的。

虚拟制造技术是前沿性边缘学科,融合了先进制造、计算机信息网络、虚拟现实和视觉艺术等多项技术,进入 21 世纪尤其是近几年,在发达国家得到了政府的支持和装备制造业的高度重视和发展。我国在本世纪初期偏重于系统基础研究,技术核心主要集中在研究机构,企业很少自行应用。近几年侧重于应用开发,尤其是金融危机后,我国制造业从加工制造走向自主创新的绿色制造新阶段,对自主品牌产品设计、高附加值的生产制造和自我市场战略提出了更高的要求,装备制造业的技术能级继续提升,在这样一个转型发展的关键时期,虚拟制造技术应该尽快地走向制造企业,成为企业自行应用的众多技术之一,变贵族技术为平民技术。为此,要大力发展虚拟制

造技术,提升制造业的附加值,实现绿色制造,为制造业插上翅膀。

早些年的虚拟制造技术主要应用在独立于实物制造的 CAD 延伸化虚拟样机上,而近年来的发展不仅拓宽了虚拟设计的内容,而且更多地深入到生产制造和售后服务等各个环节,虚实融为一体,使虚拟制造的真正含义和功效在企业生产中体现出来。

近十年来,作者所在团队在姚福生院士的带领下,从国家多个部委的课题攻关,到上海市及区级委办局的课题研究,致力于装备制造业的应用开发和实施,并走向虚拟制造公共服务平台的技术服务,先后建设并运行了国家支撑计划和上海市服务业虚拟制造技术服务平台,有上百项的成果、课题和项目的经验积累,从而形成了适应现阶段我国装备制造业生产各环节的实用技术、软件和针对性解决方案。本书内容是这些成果和项目经验的积累和总结,希望能帮助科研技术人员和高校师生更快地掌握理论基础和实践应用,帮助企业更快地解决实际生产中的技术问题。

本书内容从企业应用和新技术发展两个视角展开。应用部分本着装备制造业生产各环节对虚拟制造技术的需求分析、解决方案、开发实施、集成、运行效能这条主线进行。同时在技术上融入相关的新技术,连接实际案例,形成有价值的参考链。书中各章内容安排如下:

第一章主要阐述我国制造业转型期的技术发展现状、虚拟制造技术的内涵发展、制造业对虚拟制造技术的需求和技术发展趋势。

第二章叙述目前常用的虚拟制造系统的软硬件系统构成、处理、交互、素材数据库、运行等方面的内容和相关技术知识,为后续实际应用系统的构建和实现奠定基础。

第三章分析虚拟制造系统的入口——虚拟设计系统的需求、构建、运行和与现有 CAX 系统的接口和集成应用,着重介绍基于设计制造经验信息的快速参数化设计方法、虚拟机实电设计方法和基于制造信息的虚拟样机和产品性能分析预测,以及设计成果在生产其他环节中的综合应用过程。

第四章主要分析实现绿色制造的虚拟制造工厂所涉及的虚拟制造问题,按照生产环节顺序分别讨论各类典型应用的需求分析、实现要点、构建和运行方法,包括工厂、车间、生产线、物流线的虚拟规划,加工设备等资产管理,加工工艺模拟,虚拟运行环境和调度管理,操作培训,三维虚拟化信息

管理,装配指导和优化,性能检测等内容,基本涵盖了制造环节的主要节点内容。

第五章主要介绍销售与售后服务中的虚拟制造技术应用,包括虚拟展示、制造物流的虚拟监控和调度指挥、远程设备虚拟诊断与维护等技术。

本书的总体构架由姚福生院士拟定,第一章根据姚福生院士的手稿资料编写,其他各章节由杜宝江撰写。书中涉及的研究成果和应用实施是十年来众多老师、博士和硕士研究生以及企业技术人员共同努力的结果,在此表示感谢。

许多合作单位给出了科研资金、人员、场地、测试和应用反馈等大力帮助,为成果的实用化和技术发展作出了贡献,在此一并表示感谢,如上海电气临港重型机械装备有限公司、上海电气集团股份有限公司、上海电气印刷包装机械集团、上海电气输配电集团;上海世博会事务协调局;申能(集团)有限公司;中国航天科技集团上海航天技术研究院 811 所;上海太阳能工程技术研究中心;上海隧道股份机械公司;上海宝钢工业检测公司;中国商飞上海飞机设计研究院、西安飞机设计研究院;上海飞机制造有限公司;上海通用泛亚汽车技术中心;上海乾通汽车附件有限公司;上海电力股份有限公司等企业。

同时也感谢国家相关部委、山东省公安厅、上海市有关委办局、杨浦区委组织部和宝山区科委等部门多年来对科研、成果应用、技术服务的大力支持和帮助。

由于制造服务业发展迅速,技术进步快,涉及面广,应用需求各异,再加上作者视野和学术水平有限,本书难免有疏漏和不当之处,恳请读者批评指正。

作者

目 录

第一章	概述	1
第一节	转型期的制造技术发展	1
第二节	虚拟制造的意义和现状	1
第三节	装备制造业对虚拟制造技术的需求	6
	一、装备制造业的特点	6
	二、装备制造对虚拟制造技术的需求分析	8
第四节	虚拟制造技术的发展	12
	一、虚拟制造的应用表现	12
	二、虚拟制造技术的发展趋势	13
第二章	虚拟制造系统构造技术	17
第一节	虚拟制造系统概述	17
	一、虚拟制造系统体系结构	17
	二、虚拟制造系统的组成和工作原理	19
第二节	虚拟制造系统的硬件设备	22
	一、虚拟制造系统的处理设备	22
	二、虚拟制造系统的感知设备	25
	三、虚拟制造系统的操控模拟器件	29
	四、虚拟制造系统的立体显示装置	32
第三节	虚拟制造系统构建准备知识	38
	一、虚拟模型建模技术	38
	二、虚拟制造系统描述语言类软件	45

三、制造模型的装配和运动处理	58
四、其他用于虚拟制造的软件	60

第三章 虚拟设计 **64**

第一节 虚拟设计概述	64
一、虚拟设计需求分析	65
二、虚拟设计功能概述和构造	67
第二节 三维虚拟信息管理	75
一、数据库构成	76
二、零件数据管理	91
第三节 产品快速参数化虚拟设计辅助	92
一、虚拟辅助设计概述	92
二、新产品功能设计	94
第四节 机电系统虚机实电设计方法	117
一、设计方法概述	117
二、控制技术总体框架	119
三、开发路线	122
四、PLC 与虚拟样机通讯控制	129
五、问题检查与告警处理	133
第五节 虚拟样机性能分析	135
一、虚拟样机模型构建	135
二、虚拟样机与制造信息集成	138
三、虚拟样机性能的 CAE 分析方法	142

第四章 虚拟制造工厂 **150**

第一节 生产系统虚拟规划	151
一、生产系统虚拟规划概述	151
二、技术开发内容	155
三、生产虚拟规划系统的模型建立	164
四、拖拽式虚拟生产线交互布局技术	172

五、虚拟设备的动态生成技术	179
六、虚拟设备的定位和布局约束	185
七、应用实例	192
第二节 基于固定资产虚拟管理的生产优化	200
一、固定资产虚拟管理总体结构	202
二、虚拟模型和数据准备	204
三、工件的虚拟模型设计	214
四、生产资源管理设计	220
五、平衡能力优化计算和模拟	227
第三节 虚拟操作培训	237
一、虚拟培训概述	238
二、大型机械装备交互式虚拟培训系统的总体设计	242
三、交互式虚拟场景的生成及控制	248
四、虚拟元素数据库处理	260
五、虚拟操作控制逻辑处理	263
六、虚拟设备模型交互操作技术	265
七、培训系统功能与模式设计	271
八、盾构机虚拟培训示例	278
第四节 虚拟制造系统交互再现	281
一、交互再现概述	282
二、总体设计框架	286
三、模拟操控输入装置	292
四、动作原型设计及模式库搭建	295
五、面向感知交互的再现技术	311
六、交互再现信号通信与场景协同	327
七、虚拟制造系统交互再现设计示例	333
第五节 虚拟装配技术及其应用	336
一、研究内容及关键技术	337
二、研究现状	338
三、虚拟装配设计结构	343
四、虚拟装配顺序规划	348
五、装配路径规划	351

六、虚拟装配指导	354
第六节 虚拟制造企业	366
一、虚拟企业概述	367
二、虚拟制造企业的定义及技术发展	367

第五章 虚拟制造服务技术 371

第一节 制造物流与虚拟监控	371
一、制造物流	371
二、虚拟监控技术基础	374
三、虚拟监控功能实现方法	385
四、应用实例	403
第二节 远程设备虚拟诊断与维护	409
一、虚拟诊断与维护概述	409
二、虚拟远程故障诊断与维护系统架构	418
三、远程故障诊断环境构建	424
第三节 产品虚拟展示服务	453
一、产品虚拟展示服务概述	453
二、技术路线	455
三、虚实融合的产品虚拟展示服务	455
第四节 装备制造业虚拟制造技术服务模式探讨	471
一、需求概述	471
二、体系探讨	474

第一章

概 述

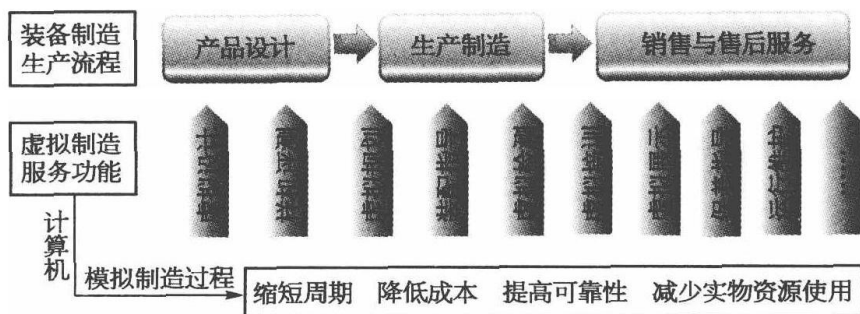
第一节 转型期的制造技术发展

装备制造业是我国的支柱产业之一。过去我国的制造业属于劳动密集型产业,现在着重发展的制造业是具有自主创新的高技术、高附加值的先进制造业,它迫切需要新技术、新工艺来提升其技术水平和能级。虚拟制造技术能够结合众多核心技术,以其前瞻性、低成本和提升企业整体效率的优点为制造业的转型和发展发挥重要作用,如对生产过程的规划、设计、加工制造、生产自动化、过程优化、试验、检测、培训、销售、售后服务等生产过程全生命周期都起着重要的作用,是先进制造技术与工业创意的综合体现和运用。

第二节 虚拟制造的意义和现状

虚拟制造技术是指在计算机虚拟环境下,模拟产品和制造设备的现实运行环境,在实时和经验数据的支撑下,进行产品生产完整生命周期的一体化模拟仿真过程。虚拟制造广泛应用于产品设计、场地规划、生产决策、工艺流程、测试试验、装配指导、远程监控、调度指挥、技能培训、市场销售、售后服务等制造业各个环节,在不消耗或少消耗实际生产资源的情况下实现最优结果,达到缩短周期、降低成本、提高效益的目的。虚拟制造技术在制造环节中的作用见下页图。

1994年7月在美国俄亥俄州举办的虚拟制造用户专题讨论会上,人们根据制造过程的侧重点不同将虚拟制造分为3类,提出了“3个中心”的分类方



虚拟制造技术在制造环节中的作用

法,即“以产品为中心的虚拟制造”、“以生产为中心的虚拟制造”和“以控制为中心的虚拟制造”,获得国际学术界的认同(见表 1-1)。

表 1-1 虚拟制造的类别

类别	以产品为中心的虚拟制造	以生产为中心的虚拟制造	以控制为中心的虚拟制造
目的	优化产品和工艺设计	优化资源配置和生产	优化车间控制
工作内容	将制造信息加入到产品设计与工艺设计过程中,在计算机中生成制造过程原型,对多种制造方案进行仿真,对数字化产品模型的性能、可制造性、可装配性、成本等进行分析,优化产品设计和工艺设计,以期尽早发现产品设计及工艺过程存在的问题	将仿真信息加入到生产计划模型中,以便快速便捷地评价多种生产计划,优化生产计划和制造环境的配置。主要是根据企业现有资源对不同的加工过程进行评估优化,决定合理的生产组织方式,并将生产、销售、售后服务进行虚拟化,以提高整体效能	将仿真能力加入到设备控制模型中,提供实际生产过程中的虚拟环境,使企业在考虑车间控制行为的基础上对制造过程进行优化控制,并在此基础上实现虚实联动的虚拟培训、生产监控和调度、远程诊断等服务功能

虚拟制造技术是虚拟现实技术在制造业中的开发和应用,它将先进制造技术、计算机技术、网络信息技术、虚拟现实技术等进行融合,是前沿的交叉学科。

实施虚拟制造一般有以下 4 个方面的收益:

(1) 缩短产品开发周期。传统制造遵循设计、试制、修改设计、规模化大生产的串行式结构,只有在试制出样品后才进行产品信息反馈,决定是否要修改设计。而在虚拟制造中,可以随时在设计过程中检验可制造性和可装配性,方便地修改模型,信息反馈更为及时。

(2) 提高产品质量。虚拟制造过程通过对多种制造方案进行仿真,优化产品设计和工艺设计,可弥补传统制造业靠经验决定加工方案的不足,提高产品质量。

(3) 低资源消耗。由于虚拟制造在计算机中进行,并不消耗实际生产所需的物理材料,可减少材料浪费和刀具磨损。

(4) 提高企业柔性生产能力,增强企业决策准确性。决策者可以在虚拟制造中了解产品性能、制造成本、生产进度等信息,有助于决策者把握利润与风险之间的平衡。

如今,在经济全球化、信息化和贸易自由化的形势下,制造业的经营战略发生了很大变化,企业先是追求规模效益,后来更加重视降低生产成本,继而以提高产品质量为主要目标。而近代,尤其是金融危机之后,全球市场的特征由过去的相对稳定逐步演变为动态多变,全球范围内的竞争和跨行业之间的相互渗透日益增强。现代制造企业早就提出了要解决 TQCS (time, quality, cost, service)问题,而虚拟制造技术可以发挥重要的作用(见表 1-2)。

表 1-2 虚拟制造技术的作用

TQCS	虚拟制造技术的作用
最快的上市速度 T	虚拟制造技术不需要制造样机,可以随时在设计过程中检验产品的可制造性和可装配性,方便地修改模型,极大地缩短产品的开发周期
最好的质量 Q	虚拟制造技术可以通过对多种制造方案进行仿真,优化产品设计和工艺设计,弥补传统制造业靠经验决定加工方案的不足,提高产品质量
最低的成本 C	虚拟制造在计算机中进行,在产品设计和生产工艺优化各环节并不消耗实际生产所需的物理材料,减少材料浪费和刀具磨损,有效降低设计和生产成本
最好的服务 S	决策者可以在虚拟制造中了解产品性能、生产进度、订单、库存、物流等动态信息,从而准确进行生产决策、把握订单交期,提升对客户的服务能力

可见,虚拟制造能够全面提升制造业的核心竞争力,从而成为未来制造业发展的方向。

虚拟制造技术在国外获得了比较广泛的应用。例如,波音 777,其整机设计、部件测试、整机装配以及各种环境下的试飞均是在计算机上完成的,其开发周期从过去 8 年时间缩短到 5 年。又如,以色列 Tecnomatix 公司的

ROBCAD 软件,自 1986 年开始已在工业生产中得到了广泛应用,美国福特、德国大众、意大利菲亚特等多家汽车公司,美国洛克希德宇航局都使用 ROBCAD 进行生产线的布局设计、工厂仿真和离线编程。再如,美国华盛顿州立大学在 PTC 公司的 Pro/engineer 等计算机辅助设计 CAD (computer aided design)/计算机辅助制造 CAM (computer aided manufacturing)系统上开发了面向设计与制造的虚拟环境 VEDAM 软件,它包括加工设备建模环境、虚拟设计环境、虚拟制造环境和虚拟装配环境。

目前,全球的虚拟制造技术研发以欧洲、美国、日本为核心。

在美国,目前已形成由政府、产业界、大学组成的多层次、多方位的综合研究开发力量。虚拟制造 VM (virtual manufacturing)已被作为增强产业国际竞争力的重要手段,由政府支持的研究、开发及商品化正在加紧进行,主要项目有:

- (1) TEAM (technologies enabling agile manufacturing, dept. of energy)。
- (2) NAMT (national advanced manufacturing testbed)。
- (3) SIMA (advanced manufacturing systems and networking testbed)。
- (4) NIIP (national industrial information infrastructure protocols, nist)。
- (5) MAVe (the metrics for the agile virtual enterprise, darpa)。
- (6) Man Tech (dod manufacturing technology program, dept. of defense)。
- (7) The JAST (joint advanced strike technology)。
- (8) Fast Track Program (US air force)。

以产业界团体为中心进行的作为 VM 基础的 VM 系统建模及建立标准的项目主要有:

- (1) SEMI (semiconductor equipment and materials international)。
- (2) SECS I/II (semi equipment communication standard I/II)。
- (3) HSMS (high - speed secs message)。
- (4) GEM (generic equipment model)。
- (5) VFEI (virtual factory equipment interface)。
- (6) OMG (object management group)。
- (7) CORBA (common object request broker architecture)。
- (8) ATARI (agile textile - appraire research initiative)。
- (9) SME (society of manufacturing engineers)。
- (10) CONDUIT (cooperative network for dual - use information technology)。



美国的众多大学及研究机构则把 VM 看作是 21 世纪生产的核心,纷纷从不同方面对 VM 进行研究:

- (1) Purdue University: Project SONOMA (WWW based Virtual Factory)。
- (2) Iowa State University: Virtual Factory Project。
- (3) Lehigh University: MAVE Project (With DARPA)。
- (4) Washington state University: Virtual Environment for Design and Manufacturing。
- (5) MIT: Leaders for Manufacturing Project。
- (6) Maryland University: Database of Virtual Manufacturing Projects。
- (7) University of Illinois at Chicago: Factory Models Using VR (With NIST)。

在欧洲,许多大学及研究机构通过相互间的合作,并联合企业共同进行 VM 的研究:

- (1) A virtual Workshop for Design by Manufacturing (University of Bath, UK)。
- (2) MOSES (Model Oriented Simultaneous Engineering System, Univ. of Leeds and Loughborough University of Technology, UK)。
- (3) Virtual Manufacturing Group (Herriot - Watt University, UK)。
- (4) Virtual Factory for Education (Pohjois - savopolytechnic, Finland)。

在日本,目前已形成了以大阪大学为中心的研究开发力量,主要进行 VM 系统的建模和仿真技术的研究,并开发了虚拟工厂的构造环境 VirtualWorks。

在我国,由于受制造业基本条件如 CAD/CAM/CAE (计算机辅助工程 computer aided engineering)/CAPP (计算机辅助工艺规划 computer aided process planning)等基础软件、仿真软件、建模技术等限制,虚拟制造技术在国内的应用尚属初期阶段。同时,使用的虚拟制造软件主要依靠进口。具体而言,我国制造业由于存在生产制造过程不够规范和标准化、数据采集程度低、协作程度低、研发能力低、设备少、高端人才匮乏,尤其是企业技术人才少,实用性技术资料 and 文献稀缺等问题,成为推广虚拟制造技术的制约因素。

尽管如此,我国一些高校联合研究所和企业虚拟制造理论方面进行了大量的研究,也开发出了许多适合我国企业的技术。如:

同济大学与香港理工大学联合机械科学院合作研发的分散网络制造、异地设计与制造等技术已经取得了不少进展。