

复杂机电系统的

建模与仿真研究

赵丽娟 刘杰 著

辽宁大学出版社

复杂机电系统的

建模与仿真研究

赵丽娟 刘杰 著

辽宁大学出版社

©赵丽娟 刘 杰 2007

图书在版编目 (CIP) 数据

复杂机电系统的建模与仿真研究/赵丽娟, 刘杰著. 沈阳: 辽宁大学出版社, 2007.4

ISBN 978-7-5610-5343-0

I. 复… II. ①赵…②刘… III. 机电系统—建立模型—研究②机电系统—系统仿真—研究 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 046383 号

出 版 者: 辽宁大学出版社

(地址: 沈阳市皇姑区崇山中路 66 号 邮政编码: 110036)

印 刷 者: 沈阳市政二公司印刷厂

发 行 者: 辽宁大学出版社

幅面尺寸: 170mm×228mm

印 张: 13.25

字 数: 238 千字

出版时间: 2007 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2007 年 4 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘 葵

封面设计: 邹本忠

版式设计: 程 莉

责任校对: 齐 月

书 号: ISBN 978-7-5610-5343-0

定 价: 28.00 元

联系电话: 024-86864613

网 址: <http://press.lnu.edu.cn>

邮购热线: 024-86851850

电子邮件: Lnupress@vip.163.com

前 言

复杂机电系统是指由机械、电气、液压、控制等部分组成的系统，而各组成部分又常常包含若干个存在多重耦合关系的子系统，它决定了系统的建模是一个较为复杂的过程，涉及到机械结构、电气控制、液压系统、控制工程等多学科、多领域的专业知识。单独对每个子系统进行模拟，都难以将系统的整体性能调节到最优，而必须应用机电液一体化多领域建模与协同仿真的方法才能实现系统整体性能的最优化。

现代冷连轧机、武器装备、航空航天器等多是非常典型的复杂机电系统，包括大量的机电液设备和部件，具有多变量、强耦合、非线性、时变性、连续性、高速性和复杂性等特征。因此，在这些实际设备上进行试验既困难又有很大风险，而且代价昂贵。作者基于虚拟样机技术，以典型的复杂机电系统——冷连轧机为工程背景，首次尝试以多领域建模与协同仿真技术为核心，以板厚、板凸度控制为目标，采用基于接口的多领域建模方法，把柔性多体系统动力学仿真应用于机电液一体化板带轧制设备中，为刚—柔耦合多体系统模型的建立提供了一种新的研究方法和手段。

本书共分七章，研究的重点内容如下：

系统地提出了柔性多体系统动力学在轧制领域中应用的理论意义。在对复杂系统多领域建模与协同仿真运行的关键使能技术分析的基础上，重点研究了基于接口的建模以及仿真模型互操作并加快仿真运行速度的相关方法。

基于弹塑性变形理论，应用有限元分析软件对影响轧机辊缝动力学行为的主要零、部件进行了柔性化，求解了轧机机架及轧辊的固有频率与纵向变形；建立了轧机垂振系统的虚拟样机模型，并基于 ADAMS/Vibration 求解了系统的各阶固有频率和模态主振型，提出了利用虚拟样机技术求解大型冷连轧机无阻尼自振圆频率的实用、高效、可视化的新方法。

分别采用时频分析和基于接口的多领域建模两种方法，建立了第四轧机 HGC 系统的传递函数和功能虚拟样机模型，寻得了轧制力控制方式下最优的 PI 控制参数，并对实际生产起到了较好的指导作用；通过对样机模型的协同仿真并与现场监控系统获取的轧机出口厚度偏差曲线进行比较，证明了

通过本书提出的构建虚拟样机协同仿真平台,研究复杂机电系统的方法的可行性。

首次将多领域建模方法与协同仿真理论引入轧制领域的研究中,基于模型转换和协同仿真的方法,建立了涵盖机械、液压、控制等领域的冷连轧机的刚—柔耦合多体系统虚拟样机模型,求解了轧件的板厚、板凸度曲线。仿真结果与现场实测曲线非常吻合,验证了模型简化的合理性以及建模方法的可靠性。

提出了对各向同性材料用弹簧—阻尼系统等效轧件的弹塑性变形力的研究方法,有效地解决了含有塑性变形体的机械系统虚拟样机的建模与动力学分析问题。

基于刚—柔耦合虚拟轧机,以板厚、板凸度控制为目标,研究了液压压下系统及液压弯辊系统对板厚、板凸度的影响机理,对轧机垂振系统的振动性态进行了仿真实验,分析了带宽、平均单位张力和阻尼等对轧机振动行为的影响,并提出了抑制轧机振动的措施。

基于 LabVIEW,首次将虚拟仪器技术引入冷轧带钢的板凸度计算中,开发了板厚、板凸度的在线监测系统;结合现场工况进行了实际测试和对比分析,结果表明,系统能够直观、准确、实时地完成对信号的监测、显示、报警和存储等处理工作,并实现了对监测数据的协同分析,具有较强的抗干扰能力、较好的实效性和较高的性价比。

某冷轧厂的领导和专家们对本书的出版给予了大力支持,东北大学闻邦椿院士、辽宁工程技术大学李贵轩教授审阅了书稿并提出了宝贵的意见和建议,在课题的研究过程中,刘宇、才宏、徐涛、王天博、邵新、刘宏梅、胡建华、李世旭等研究生做了大量工作,在此一并表示衷心感谢!

作者

2007年3月于辽宁工程技术大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1. 1 复杂系统建模及轧制过程仿真的国内外研究现状	1
1. 2 虚拟样机技术及其国内外研究现状	3
1. 2. 1 虚拟样机及虚拟样机技术	3
1. 2. 2 虚拟样机技术的国内外研究现状	5
1. 3 多体系统动力学研究的进展及应用	8
1. 3. 1 多体系统动力学的研究进展	8
1. 3. 2 柔性多体系统动力学在轧制领域应用的理论意义	10
1. 4 复杂系统虚拟样机技术的核心——多领域建模与协同仿真	13
1. 4. 1 多领域建模	14
1. 4. 2 协同仿真	15
1. 5 复杂系统多领域建模与协同仿真运行的关键使能技术	16
1. 6 多领域协同仿真的实现方法	16
1. 7 课题的来源、意义及研究方法	18
1. 7. 1 课题的来源及意义	18
1. 7. 2 研究的主要内容和方法	19
第 2 章 板带轧制基本理论及建模软件的接口原理	21
2. 1 板带几何尺寸精度控制的基本理论	21
2. 1. 1 板带几何尺寸精度的基本概念	21
2. 1. 2 厚度控制的基本思想	21

2. 1. 3	影响轧件出口厚度的因素	24
2. 1. 4	描述板带断面形状的主要参数	28
2. 1. 5	液压弯辊法的相关概念	30
2. 1. 6	1676mm 冷连轧机液压辊缝控制系统的组成	31
2. 2	基于接口的多领域建模技术研究	33
2. 2. 1	基于虚拟样机技术的商品化软件	33
2. 2. 2	多领域建模软件的数据模型与接口原理	34
2. 3	应用研究	45
2. 3. 1	Smith 预估器在冷轧机出口厚度控制系统中的 应用	45
2. 3. 2	弯辊系统在四辊轧机辊缝控制中的应用研究	52
2. 3. 3	神经模糊 PI 控制在冷连轧机弯辊系统中的应用 研究	58
2. 3. 4	ANSYS 在矿用减速器箱体优化设计中的应用	63
2. 4	本章小结	87
第 3 章	基于虚拟样机的轧机垂振分析与振动抑制	88
3. 1	轧机振动的研究现状及进展	88
3. 2	轧机机座垂振系统的基本原理	91
3. 2. 1	垂直振动的分类	91
3. 2. 2	垂振的基本原理	92
3. 3	轧机机架与轧辊的模态分析	95
3. 3. 1	模态分析原理	97
3. 3. 2	有限元分析原理	97
3. 3. 3	机架计算模态分析	99
3. 3. 4	轧辊计算模态分析	103
3. 4	轧机垂振模型的简化	106
3. 5	垂振系统的等效质量和等效刚度计算	107
3. 6	冷轧机垂振系统虚拟样机的建模与仿真实验	108

3. 6. 1	冷轧机垂振系统的建模	108
3. 6. 2	基于 ADAMS/Vibration 的垂振实验分析	109
3. 7	基于虚拟轧机的垂振抑制	113
3. 8	本章小结	114
第 4 章	HGC 系统的建模与仿真	115
4. 1	基于时频分析的 HGC 系统的建模与仿真	115
4. 1. 1	HGC 系统建模	115
4. 1. 2	HGC 系统动态特性分析	123
4. 1. 3	影响 HGC 系统动态特性的因素研究	124
4. 2	HGC 机械、液压系统模型的集成	126
4. 2. 1	液压系统虚拟样机技术	126
4. 2. 2	HGC 系统的工作原理及模型简化	127
4. 2. 3	1676mm 冷轧机 HGC 系统虚拟样机的建立	128
4. 3	基于接口的 HGC 系统的协同仿真	130
4. 3. 1	确定 ADAMS 的输入和输出	130
4. 3. 2	HGC 控制系统建模	131
4. 3. 3	设置协同仿真参数	132
4. 3. 4	基于协同仿真方法的 PI 控制参数寻优	133
4. 4	本章小结	135
第 5 章	刚—柔耦合多体系统的多领域建模与协同仿真	136
5. 1	刚—柔耦合多体系统的多领域建模方法研究	137
5. 1. 1	机械系统建模	137
5. 1. 2	液压系统建模	142
5. 1. 3	虚拟轧机模型的验证	145
5. 2	基于刚—柔耦合虚拟轧机的协同仿真	151
5. 2. 1	液压压下及液压弯辊系统对板厚、板凸度的影响 研究	151
5. 2. 2	基于虚拟轧机的垂振系统振动性态的研究	160

5. 3	本章小结	166
第 6 章 冷轧带钢板厚、板凸度在线监测系统开发		168
6. 1	虚拟仪器与虚拟仪器技术	168
6. 2	系统的检测原理与硬件构成	170
6. 2. 1	系统的功能及检测元件的确定	170
6. 2. 2	系统的检测原理	170
6. 2. 3	虚拟监测系统的硬件框架	173
6. 2. 4	数据采集卡的选用及设置	174
6. 3	基于虚拟仪器技术的监测系统开发	176
6. 3. 1	监测系统主面板	176
6. 3. 2	监测系统设置模块	177
6. 3. 3	数据采集模块	178
6. 3. 4	历史数据查询和报警子模块	180
6. 3. 5	功能补偿模块	183
6. 4	实验分析	184
6. 4. 1	仪器监测系统与现场实际工况对比实验	184
6. 4. 2	仪器监测系统与虚拟轧机仿真结果对比实验	187
6. 5	本章小结	189
第 7 章 结论与展望		190
参考文献		192

第 1 章 绪 论

1.1 复杂系统建模及轧制过程仿真的国内外研究现状

复杂系统是指系统内的各子系统之间的关联程度比较高,并且具有高阶次、多回路、非线性、不确定性和病态结构等特点的系统。

建模与仿真,是构造真实世界系统(或拟议中的系统)的模型并基于模型在计算机上做试验的有关活动。它涉及实际系统、模型和计算机程序三要素,同时考虑它们之间的关系,即建模关系、仿真关系与接受关系。建模关系关注描述模型对真实系统的有效性;仿真关系所关注的是计算机指令对描述模型的忠实程度;接受关系则表征计算机程序产生的结果对真实系统的有效性,即是否充分地表达了真实系统的行为^[1]。

国外仿真技术在轧制过程中应用的研究起步较早,各种轧钢过程的仿真研究以及通过数学模型对轧机控制系统等主要生产线的运行进行仿真研究的情况都有报道。许多现代化钢铁企业,如新日铁、川崎制铁等都已建立了仿真研究室或实验室,进行冶金过程设备仿真器的研究,数字冶金作为新技术已引起世界各国的充分重视^[2]。

例如,澳大利亚的 BHP 钢铁公司于 1991 年成功开发了热轧仿真大型软件包,可用于轧机装备决策和控制模型调整,以达到提高产量和产品精度的目的,可广泛用于热轧带钢的平直度与凸度、热膨胀与轧制磨损、温度以及厚度压下规程的分析与优化。韩国的 Kang, YH 等人于 1992 年利用有限元法开发了热轧过程仿真系统,用于分析轧制过程中的接触摩擦系数、传热系数、轧制速度、厚度、压下及喷水冷却等问题。日本三菱的 Shimoda 等人于 1995 年成功开发了轧钢过程的控制模型支持系统,可以利用实际数据对热轧产品生产过程进行离线仿真,用以评估产品质量、控制效果和设备状态,可以找出控制异常的原因,也可以对带钢厚度、板形和温度等控制模型

的参数进行优化,以提高产品精度^[3]。英国的 Yang 等人于 1995 年开发了基于扩展彩色 Petri 网的、从加热炉到热轧卷取全线过程控制的建模和仿真系统^[4]。德国的 Jepsen 等 1996 年介绍了热/冷轧机的系统仿真情况,并结合冷连轧机中抖振的情况加以举例说明。德国的 Feldmann 于 1997 年开发了用于热轧仿真和控制的数学模型,主要用于预测和分析轧制过程,测试各种不同的解决方法,并提出了最佳决策^[5]。1996 年, Rigler 在多机架热带轧机仿真系统上应用和测试了先进的控制策略,明显地改进了厚度精度^[6]。波兰的 R. Gregorczyk、中国台湾的 Perng、美国的 Yun 和中国的 Wang 等人于 1996~2000 年分别考虑了连轧机和传动系统的振荡,研究了连轧机的理论建模、仿真和控制问题^[7-11]。2000 年,美国的 Remn-Min Guo 利用增广的线性动态控制方程来描述冷连轧机机架内和机架间的方程和边界条件,对冷连轧机的动态行为进行研究,分析了带材入口厚度、硬度变化等干扰因素对动态性能的影响^[12]。国外钢铁大国均已经历了单项、局部、静态仿真系统的开发过程,正在向面向整个系统的仿真应用方向发展,并使用动态仿真技术研究轧制过程,采用了组件式等多种先进的建模方法和手段。

我国冶金工业总体水平比较落后,国内对于钢铁生产过程控制系统的仿真研究较少,轧制过程仿真从 20 世纪 80 年代开始的。1980 年,陈振宇对热、冷连轧机 AGC 系统进行了仿真研究,并提出了热连轧精轧机组第一、二机架仿真的模型结构^[13]。燕山大学的王益群、高英杰等对板带轧机液压 AGC 系统进行了动态模拟,并对液压 AGC 系统设计了故障诊断专家系统软件^[14-15]。杜凤山等也对板材热连轧过程进行了计算机仿真和模拟^[16]。东北大学潘学军等也开发了一个冷连轧仿真软件包^[17]。高慧敏、曾建潮在分析、研究热连轧精轧机组生产过程特点的基础上,建立了精轧机组各设备及控制系统的数学模型及仿真模型,并已在国家“九五”攻关项目“热连轧生产过程计算机仿真系统”中得到了应用^[18]。我国轧钢过程仿真在单项、局部、静态仿真系统的开发上也取得了大量的研究成果^[19-24],燕山大学、东北大学、北京科技大学等高校都做了大量的研究工作。2000~2003 年王益群主持的国家自然科学基金资助项目“连轧设备建模与仿真、冷连轧虚拟轧制设备仿真”,在分析和研究冷连轧机组生产过程的基础上,确定虚拟轧制系统的组成结构,从机理建模出发,将虚拟轧机分为压下、速度、张力三个子系统,建立了机械、电气、液压、检测仪表等综合的虚拟轧机设备机理模型^[25],将轧机负载简化为三自由度质量分布负载模型。

半个多世纪以来,建模与仿真技术已经发展形成了综合性的专业技术体系,并正在向“网络化、虚拟化、智能化、协同化、普适化”为特征的现代

化方向发展。

据美国科学研究院工程技术委员会的测算,建模与仿真技术可提高产品质量 5~15 倍,增加材料出品率 25%,降低工程技术成本 13%~30%,降低人工成本 5%~20%,提高投入设备利用率 30%~60%,缩短产品设计和试制周期 30%~60%等。

复杂机电系统是指由机械、电气、液压等部分组成的系统,而各组成部分又常常包含若干个存在相互作用关系的子系统,这些子系统之间协同工作共同实现系统的功能。复杂机电系统各子系统之间的多重耦合关系,决定了它的动态建模是一个较为复杂的过程,涉及到机械结构、电气控制、液压系统、控制工程等多学科、多领域的专业知识。单独对每个子系统进行模拟,都难以将系统的整体性能调节到最优,而必须应用机电液一体化多领域建模与协同仿真的方法才能实现系统整体性能的最优化。因此,将整个大系统分解为若干个子系统,在对各子系统分别建模的基础上再将其集成起来,得到整个系统的动态模型是对复杂机电系统建模的有效途径。

近年来,在制造业剧烈竞争需求的牵引以及相关学科技术发展的推动下,以系统多领域建模与协同仿真技术为核心的虚拟样机技术(尤其是复杂产品虚拟样机工程技术)得以迅速发展,它能大幅度地缩短产品的设计、开发时间,降低成本,极大地提高产品的质量和服

1.2 虚拟样机技术及其国内外研究现状

1.2.1 虚拟样机及虚拟样机技术

1.2.1.1 虚拟样机

虚拟样机的说法有很多,目前还没有一个统一的定义^[26]。

Antonino Gomes 等人认为,对于虚拟样机主要有两种理解:从计算机图形学的角度和从生产制造的角度,前者即 VP (Virtual Prototyping),后者则指 DMU (Digital Mock up)。VP 可以理解为利用虚拟现实技术将产品数据转变为取代物理样机的数字模型,强调仿真数据的可视化。DMU 是产品的高度逼真的计算机仿真模型,包含有关产品设计、制造、维护和回收等各方面的信息,作为产品开发的平台,在开发过程中起辅助决策的作用。Mmitchell M. Tseng 等人从用途和用户的角度,将虚拟样机分为沉浸式虚拟样机 (Immersive VP) 和分析式虚拟样机 (Analytical VP) 两种。沉浸式样机主要面向用户,强调视觉效果,以获得有关产品的外形、材质和纹理特

征。分析式样机主要面向设计、研究人员,并不强调图形的显示与交互,这类样机主要由各类物理特性模型和功能模型组成,用于对产品的性能、功能进行仿真试验,以指导设计、修改、生产与优化。Mikko Kerttula 等人提出,虚拟样机是一个产品的数字模型,通过建立与真实系统有一定的功能和结构逼真度的仿真模型,并将该模型放入到一个虚拟现实环境中对还没有物理模型的产品进行测试^[27]。他们已将这种虚拟样机成功地应用在消费类电子产品的设计过程中。

从机械工程研究领域的角度出发,Ed P. Andert 等人认为,虚拟样机技术是一种针对测试的对象和物理原型进行的一个虚拟制造和仿真的过程。基于虚拟样机技术建立的工程化制造开发模型可以使设计人员访问一个实际物理模型的所有关于机械、物理、外观和功能特性的有关信息。而 Bloor 等人则认为,虚拟样机技术是将目前的 CAD、CAE 等 CAX 技术结合在一起的一种集成技术,它贯穿于产品生命周期的全过程。

美国国防部建模和仿真办公室给虚拟样机下的定义是:对原型产品或系统具有一定真实功能,并建立在一定程度上具有与物理样机相似的功能真实度的计算机仿真模型^[28]。从系统研究与分析的领域出发,系统建模和仿真领域倾向于美国国防部建模和仿真办公室的定义。

1.2.1.2 虚拟样机技术

虚拟样机技术是近年来兴起的将建模和仿真技术扩展到复杂产品的设计与分析的新型技术,其具体的内涵目前尚无统一的定义^[26],以下几个观点比较有代表性。

美国国防部对虚拟样机技术下的定义是“使用虚拟样机代替物理样机进行测试和评估的过程”。

美国 UAPK 大学虚拟样机技术实验室的研究人员认为,虚拟样机技术是在一个人造的四维交互环境中对新的或修改过的想法/概念、产品、模式或过程所进行的设计、仿真和试验^[29]。

Joseph P. 等人认为,虚拟样机技术意指在产品开发过程中采用计算机模型取代物理模型,其目的是降低构造物理模型所需要的时间、成本和材料^[30]。Competek 公司的 Tim Hodgson 认为,虚拟样机技术是一门基于软件的学科,它在建立物理样机之前,对一个机械系统进行建模,在实际的操作条件下对它的三维运动行为进行仿真和显示,并且通过反复的设计研究来改进、优化设计方案^[31]。Mikko Kerttula 等人则把虚拟样机技术称为虚拟现实原型技术 (Virtual Reality Prototyping, VRP),认为 VRP 是建立原型的过 程,是在计算机上利用计算机模型和虚拟现实原型技术对产品的行为和

使用情况进行拟真的模拟^[27]。

我国的研究人员在对国外不同领域虚拟样机定义研究和总结的基础上,也提出了几种虚拟样机及虚拟样机技术的定义,其中最典型的当属清华大学熊光楞教授在文献^[26]中下的定义:虚拟样机技术是以并行工程为指导,以CAX/DFX技术为基础,以协同仿真技术为核心的先进的数字化设计方法。它是一种基于产品的计算机仿真模型的数字化设计方法,这些数字化模型就是虚拟样机,能从视觉、听觉、触觉以及功能、性能和行为上模拟真实产品。

虚拟样机技术是始于20世纪80年代,到90年代中后期随着计算机技术的快速发展而迅速发展起来的一门综合多学科的技术,除了机械系统运动学和动力学仿真技术外,它还包括CAD建模技术、有限元分析技术、机电液控制技术、最优化技术等相关技术。它基于并行工程(Concurrent Engineering),强调系统的观点,涉及产品全生命周期。支持对产品的全方位测试、分析与评估,强调不同领域的虚拟化的协同设计。在虚拟样机技术中,工程技术人员可以直接利用CAD系统所提供的各零、部件的物理信息及其几何信息,在计算机上定义其连接关系并对机械系统进行虚拟装配,从而获得机械系统的虚拟样机。然后对样机模型针对投入使用后的各种工况进行仿真分析,预测产品的整体性能,为新产品的研发和对现有设备的改造提供了全新的研发方法,可以明显提高产品的系统级性能,获得最优化的设计产品。

1.2.2 虚拟样机技术的国内外研究现状

虚拟样机技术在英国、美国、德国、日本等一些较发达国家已经得到了广泛的应用,应用领域从汽车制造业、工程机械、航空航天业、造船业、机械电子工业、国防工业到人机工程学、生物力学及工程咨询等诸多方面^[32-34],主要是利用虚拟样机仿真产品的几何和运动特性,通过样机可视化进行产品的外形设计、布局设计、可达性设计、运动和动力学仿真、装配仿真等。

英国 Sikorsky 公司和波音公司在联合开发军队最新最大的航空项目——Comanche 时大规模地使用了虚拟样机技术,使 Comanche 的开销降低了 20%~30%。美国通用动力电船公司应用虚拟样机技术,支持新型攻击潜艇项目,至少节约了 25% 的制造费用。Chrysler 公司与 IBM 合作开发的虚拟制造环境用于新型车研制,在样车生产前,发现定位系统的控制存在设计缺陷,及时进行改进,从而缩短了研制周期。欧洲空中客车采用虚拟样机及仿真技术,把客车的试制周期从 4 年缩短为 2.5 年。CORVIDS 则通过虚拟现实环境实现产品或实体的概念形状设计。美国航空航天局的喷气推进

实验室成功地实现了火星探测器“探路号”在火星上的软着陆。实验室的工程师利用虚拟样机技术研究宇宙飞船在进入大气层、减速和着陆等不同阶段的工作过程。在探测器发射以前, JPL 的工程师运用虚拟样机技术探测到由于制动火箭与火星风的相互作用, 探测器很有可能在着陆时翻滚。针对这个问题, 工程师们修改了技术方案, 将灵敏的科学仪器安全送抵火星表面, 保证了火星登陆计划的成功。作为生产工程机械的著名厂商 John Deere 公司, 为了解决工程机械在高速行驶时的蛇行现象以及在重载下的自激振动问题, 利用虚拟样机技术, 不仅找到了问题存在的原因, 而且提出了改进方案, 并且在虚拟样机的基础上得到了验证, 大大提高了产品的高速行驶性能与重载作业性能。

在工程机械方面, 国外关于工程机械虚拟样机技术的研究开展得比较早。Draws 等人认为, 虚拟样机技术具有巨大的发展潜力, 完全适用于工程机械这种机电液一体化的复杂机械产品的研发特点。目前, 国外已有工程机械制造企业采用这项技术, 具有代表性的是 John Deere 公司、Caterpillar 公司、Volvo 公司等^[35]

在电子产品的研制中, 虚拟样机技术也得到了应用, 如芬兰 VTT 电子公司研制成功了一个虚拟样机开发环境, 包括创建、测试、修改、使用和维护虚拟样机的工具, 并用以开发出移动电话的虚拟样机。美国微电子与计算机技术公司推出了针对消费类电子产品的虚拟样机软件, 可以连接产品仿真和产品实现, 在验证产品概念、功能正确的同时, 迅速执行决策。Harris 电子设计自动化公司认为, 虚拟样机软件是对传统电子设计自动化工具的补充, 可以方便地将决策分析加入到设计过程中, 使工程师以“Predict and Prevent”方式工作。该公司推出了针对 PCB 的虚拟原型软件——Edanavigator, 可在设计早期通过对关键性能指标的快速反馈减少设计迭代次数。

在工程咨询方面, 可以利用虚拟样机技术再现事故过程, 以提供诉讼证据, 或帮助制造商分析售后赔偿问题, 或为用户的产品设计预试验。例如, 一家公司利用虚拟样机技术进行车辆事故仿真, 在法庭上用其仿真结果进行辩护, 法庭根据虚拟样机技术提供的证据, 作出了客观的判决。

我国从“九五”期间开始了对虚拟样机技术的跟踪研究, 取得了初步的研究成果。其中对虚拟样机要求的相关技术, 如数据库技术、CAD/CAM 技术、网络技术、分布交互仿真技术的研究等已有一定的基础, 但尚未发现支持虚拟样机的工具与环境, 整体上与国际先进水平相比还有较大差距, 属于起步阶段。

国防科技大学计算机研究所在“九五”预研项目“电子设备虚拟样机并

行设计环境”（1996~2000年）和国家863计划项目“协同虚拟样机技术研究”（1998~2000年）经费支持下，对虚拟样机集成框架技术、虚拟样机建模技术、虚拟样机仿真技术等进行了深入研究。

清华大学、上海交通大学和西安交通大学在相关的虚拟制造技术方面均进行了一些有价值的研究，但尚未构造出应用系统。

清华大学国际CIMS工程研究中心提出了一个虚拟制造体系结构，给出了基于产品的数据管理集成的虚拟制造、虚拟生产、虚拟企业框架结构，并在剑杆织机的虚拟产品可视化、虚拟装配及虚拟机床方面进行了一些研究，清华大学提出的未来虚拟样机支撑环境如图1.1所示^[36]。

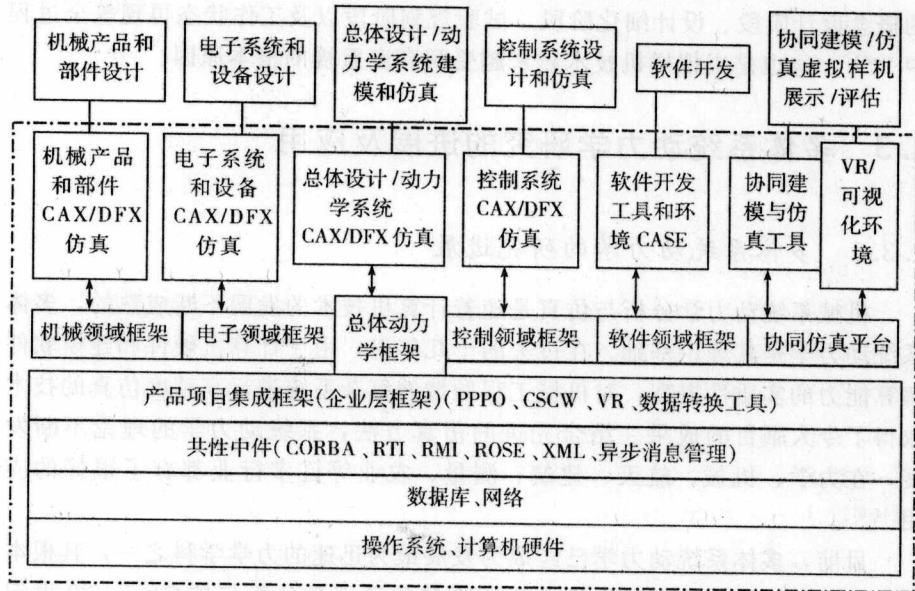


图 1.1 未来的虚拟样机支撑环境

上海交通大学 CIM 研究所提出虚拟制造系统的 5 层结构，即界面层、控制层、应用层、活动层、数据层，并对实施虚拟制造技术中的一些关键技术，如智能设计、可制造性自动分析、产品/工艺/生产模型、分布式制造和设计等进行了分析和研究。

西安交通大学 CAD/CAM 研究所提出了虚拟制造的概念和关键技术；西北工业大学分析了基于虚拟样机的系统仿真技术；北京航空航天大学分析了虚拟样机在控制系统中的应用，阐述了构筑虚拟样机所需的应用技术。

虚拟样机技术通过计算机建立产品的数字化模型即虚拟样机，使产品设计人员在虚拟环境中真实地模拟系统整体的运动和受力情况，快速分析多种

设计方案；利用软件系统提供的“*What if*”功能，设计人员能比较容易地对虚拟样机进行多次对物理样机而言是难以进行或根本无法进行的试验，模拟产品的真实性能，早期发现设计、制造乃至运行过程中存在的各类问题，低成本地获得最优方案^[37-39]，提高产品质量和企业的创新能力、竞争能力和经济效益，并且产品越复杂，应用虚拟样机技术的优势就越突出。此外，利用虚拟样机技术还可以分析对于物理样机来说是极其危险的工况，如越野车辆的抗翻倾试验、飞机乘员的安全性试验等，在不牺牲产品安全性的前提下大幅度降低成本，缩短设计开发时间。

虚拟样机技术不但可用于对系统方案的论证及评估，而且还可用于产品的概念设计阶段、设计细化阶段、试验规划阶段以及工作状态再现等全过程中^[40-43]，这也是虚拟样机技术越来越受到高度重视的根本原因。

1.3 多体系统动力学研究的进展及应用

1.3.1 多体系统动力学的研究进展

机械系统动力学分析与仿真是随着计算机技术的发展不断成熟的，多体系统动力学是其理论基础。在过去的十几年里，由于计算机硬件和建模软件解算能力的实质性提高，对机械工程领域的复杂系统进行高精度仿真的技术取得了令人瞩目的成果。结合先进的仿真方法，系统动力学的理论不断发展，在力学、机械、航天、建筑、测量、农业等许多行业都有了很好的应用^[44-51]。

目前，多体系统动力学已经成为发展最为迅速的力学学科之一，其根本目的是应用计算机技术进行复杂机械系统的动力学分析与仿真^[52]。20世纪60年代中期，Fletcher、Hooker、Margulies、Roberson、Wittenburg等人通过不懈的努力，奠定了多体系统动力学发展的理论基础。1977年，Wittenburg的“多刚体系统动力学”(Dynamics of Systems of Rigid Bodies^[53])问世，国际理论与应用力学联合会(IUTAM)主持召开了多刚体系统动力学研讨会^[54]，这门学科的基本理论体系已经形成。1983年，NATO-NSF-AR在Iowa大学联合举办了机械系统动力学计算机辅助分析和优化高级讲席会^[55]。1984年，国际机构学与机器科学联合会(IFToMM)主办召开了多体系统动力学研讨会^[56]，预示着这门学科已经从理论建模逐渐发展到面向工程的计算机辅助仿真研究的大趋势。

多体系统是指由多个物体通过运动副连接的复杂机械系统。根据系统中