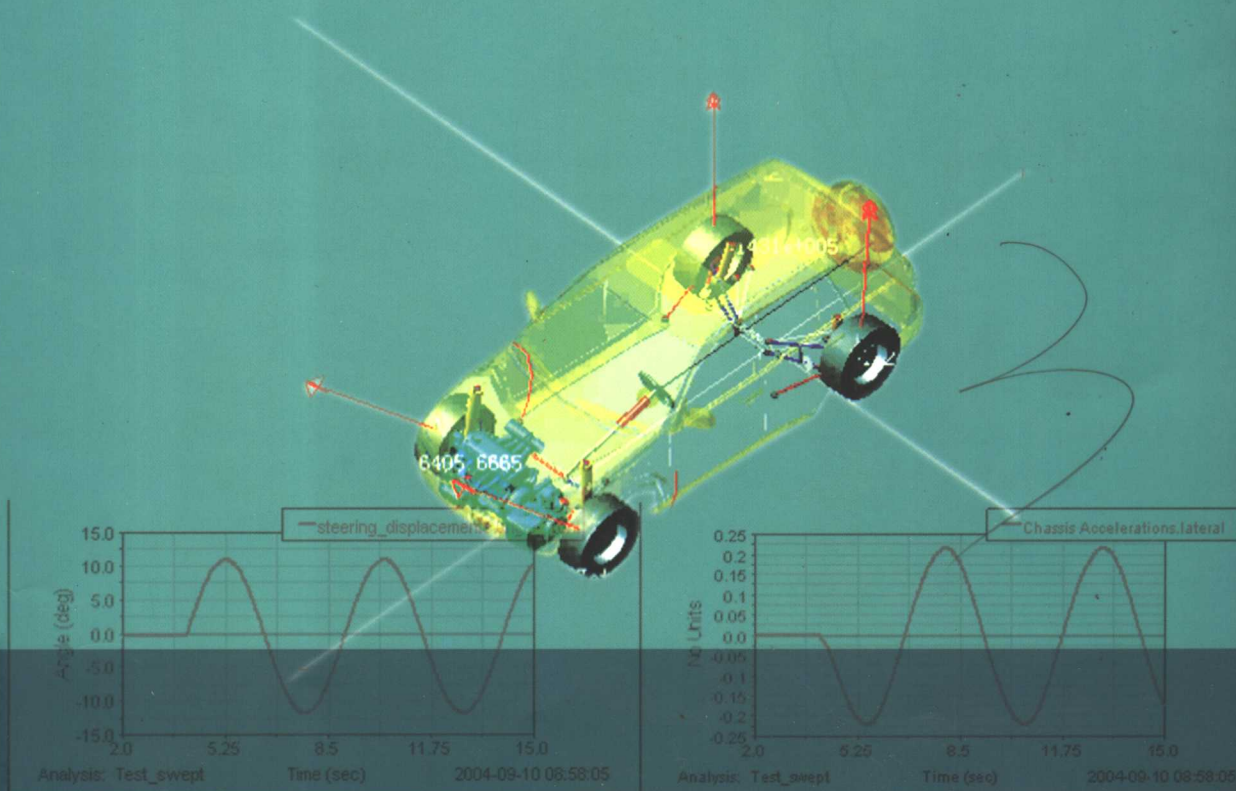


机械系统动力学分析及ADAMS应用教程

陈立平 张云清 等编著
任卫群 覃 刚



清华大学出版社

机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程

陈立平 张云清 任卫群 覃刚 等编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍了虚拟产品开发与虚拟样机技术的特点、内容及其应用,机械系统动力学分析与仿真在数字化功能样机中的重要作用,以及多体系统动力学的基本理论,主要包括多刚体系统动力学建模、多柔体系统动力学建模、多体系统动力学方程求解及多体系统动力学中的刚性(Stiff)问题,并进一步介绍了ADAMS软件的基本算法,包括ADAMS建模中的概念、运动学分析算法、动力学分析算法、静力学分析及线性化分析算法,以及ADAMS软件积分器介绍。根据作者使用ADAMS的经验和体会,结合实际例子对机械系统动力学分析的建模、分析、优化以及专业化仿真系统的二次开发等进行了较详细的阐述。

本书可作为高等院校“机械系统动力学分析”课程教材,对从事机械系统数字化功能样机的建模、求解、专业化仿真系统二次开发的工程技术人员具有重要的实用价值,可作为机电工程类本科、研究生教学用书。

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

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

本书防伪标签采用清华大学核研院专有核径迹膜防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

机械系统动力学分析及ADAMS应用教程/陈立平等编著. —北京:清华大学出版社,2005.1

ISBN 7-302-10096-9

I.机… II.陈… III.①机械学:动力学—教材②机械制造—计算机仿真—应用软件,ADAMS—教材
IV.①TH113②TH164

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第130475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

责任编辑:孟毅新

封面设计:久久度文化

版式设计:康 博

印 刷 者:北京牛山世兴印刷厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印 张:28 字 数:646千字

版 次:2005年1月第1版 2005年1月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-10096-9/TH·155

印 数:1~4000

定 价:38.00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

前 言

20 世纪 50 年代以来, 计算机技术的迅速发展已经为工程设计、分析和优化技术带来全面的变革。计算机硬件、计算技术、应用数学、力学、计算机图形学、软件等技术的不断地结合、融合, 推动着设计理念、理论、方法、技术乃至工具的进步, 设计理论研究和新技术应用空前繁荣。

20 世纪 90 年代以前, 以 C3P(CAD/CAE/CAM/PDM)为代表的计算机辅助设计工具 CAX 在工业界得到广泛普及, 产生了巨大的经济效益和社会效益, “数字化”作为显著的时代技术特征初露端倪。C3P 首次用计算机取代人完成产品开发过程中机械、繁琐、重复的绘图、计算和例程管理类工作, 大大提高了产品开发效率。但由于学科的融合度较低, 各类设计工具更多地表现为单一学科技术的软件化, 其相互集成亦是以软件接口实现所谓的数据集成, 因此, 以 C3P 为代表的计算机辅助设计工具对更高层次的设计活动如综合分析、系统优化设计乃至创新设计缺乏有效的、可操作的支持。针对这些不足, 20 世纪 90 年代中期以来, 计算机辅助设计更多地强调了基于多体系统(Multi-body System)复杂机械产品的系统动态设计、基于多学科协同(Multidisciplinary collaborative)集成框架的优化设计、基于本构融合的多领域统一建模(Multi-domain physical modeling)可重用机、电、液、控数字化功能样机分析的研究与开发, 并逐步形成相关技术和平台工具; 在设计管理方面, 产品数据管理(PDM)向产品全生命周期拓展, 已形成产品全生命周期管理技术(PLM)。可以说, 多学科、多领域的融合渗透是 21 世纪计算机辅助产品开发技术发展的主线, M3P 已成为当前技术研究、开发和应用的时期特征。

多学科融合在推动计算机辅助产品开发技术变革方面使学科、领域、专业的界限逐步弱化, 对技术的研究、开发和应用人员提出新的要求, 无论是研究、开发者还是应用工程师都需要站在全局的高度把握机电产品的多学科、多领域性, 并学习、研究和掌握全新的设计理念、方法和技术。华中科技大学国家 CAD 支撑软件工程技术研究中心, 自 20 世纪 80 年代以来在优化设计、智能设计、动态设计及 CAD 支撑技术方面进行了深入的基础研究, 在相关共性技术、关键技术方面取得了一批成果, 其中许多成果在国内工业界得到了广泛推广, 产生了良好的社会效益。近年来, 该中心在 M3P 方面结合工业应用开展了大量的共性技术、关键技术和应用研究。

本书的主要编著者陈立平、张云清、任卫群、覃刚在本领域具备多年研究开发积累和工程应用经验。编著组针对国内多体动力学、数字化功能样机技术的日益增长的需求, 结合技术教学和工程应用现状, 以国际上具有代表性的复杂机械系统动力学建模及仿真平台 ADAMS 为例, 对机械数字化功能样机的建模理论、方法、求解、通用平台架构、专业化二次开发、典型工业应用实例等方面进行了全面、具体、生动地阐述, 对相关技术研究、

系统开发和工程应用人员具有重要实用价值，同时亦可作为机电工程本科、研究生教学用书。华中科技大学 CAD 中心的周凡利、王波、项俊、杨勇、陈萌等研究生参与了本书的编写工作，在此一并表示衷心感谢。

书中不妥之处，敬请读者指正。

华中科技大学 CAD 中心
陈立平

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 虚拟产品开发与虚拟样机技术	1
1.1.1 虚拟产品开发技术	1
1.1.2 虚拟样机技术	5
1.2 数字化功能样机及机械系统动力学分析与仿真	8
1.2.1 功能虚拟样机	8
1.2.2 数字化功能样机	11
1.2.3 机械系统动力学分析与仿真	12
1.2.4 数字化功能样机软件系统	14
1.3 机械系统动力学分析与仿真的发展方向及前沿	16
第 2 章 多体系统动力学基本理论	21
2.1 多体系统动力学研究状况	21
2.1.1 多体系统动力学研究的发展	21
2.1.2 多体系统动力学研究活动	24
2.1.3 多体系统动力学研究现状	25
2.2 多刚体系统动力学建模	30
2.2.1 多体系统动力学基本概念	30
2.2.2 计算多体系统动力学建模与求解一般过程	32
2.2.3 多刚体系统运动学	33
2.2.4 多刚体系统动力学	43
2.2.5 计算多刚体系统动力学自动建模	53
2.3 多柔体系统动力学建模	56
2.3.1 柔性体上点的位置向量、速度和加速度	56
2.3.2 多柔体系统动力学方程的建立	57
2.4 多体系统动力学方程的求解	62
2.4.1 非线性代数方程组求解	63
2.4.2 微分代数方程组求解	64
2.5 多体系统动力学中的刚性(Stiff)问题	71
2.5.1 微分方程刚性(Stiff)问题	71
2.5.2 多体系统动力学中 Stiff 问题	74

第 3 章 ADAMS 软件简介	76
3.1 ADAMS 软件概述	76
3.2 ADAMS 软件基本模块	78
3.2.1 用户界面模块(ADAMS/View)	78
3.2.2 求解器模块 (ADAMS/Solver)	79
3.2.3 后处理模块(ADAMS/PostProcessor)	79
3.3 ADAMS 软件扩展模块	81
3.3.1 液压系统模块(ADAMS/Hydraulics)	81
3.3.2 振动分析模块(ADAMS/Vibration)	81
3.3.3 线性化分析模块(ADAMS/Linear)	82
3.3.4 高速动画模块(ADAMS/Animation)	82
3.3.5 试验设计与分析模块(ADAMS/Insight)	83
3.3.6 耐久性分析模块(ADAMS/Durability)	83
3.3.7 数字化装配回放模块(ADAMS/DMU Replay)	84
3.4 ADAMS 软件接口模块	84
3.4.1 柔性分析模块(ADAMS/Flex)	84
3.4.2 控制模块(ADAMS/Controls)	85
3.4.3 图形接口模块(ADAMS/Exchange)	85
3.4.4 CATIA 专业接口模块(CAT/ADAMS)	85
3.4.5 Pro/E 接口模块(Mechanical/Pro)	86
3.5 ADAMS 软件专用领域模块	86
3.5.1 轿车模块(ADAMS/Car)	86
3.5.2 悬架设计软件包(Suspension Design)	86
3.5.3 概念化悬架模块(CSM)	87
3.5.4 驾驶员模块(ADAMS/Driver)	87
3.5.5 动力传动系统模块(ADAMS/Driveline)	87
3.5.6 轮胎模块(ADAMS/Tire)	88
3.5.7 柔性环轮胎模块(FTire Module)	88
3.5.8 柔性体生成器模块(ADAMS/FBG)	88
3.5.9 经验动力学模型(EDM)	89
3.5.10 发动机设计模块(ADAMS/Engine)	89
3.5.11 配气机构模块(ADAMS/Engine Valvetrain)	90
3.5.12 正时链模块(ADAMS/Engine Chain)	90
3.5.13 附件驱动模块(Accessory Drive Module)	90
3.5.14 铁路车辆模块(ADAMS/Rail)	91
3.5.15 FORD 汽车公司专用汽车模块(ADAMS/Pre, 现名 Chassis)	91

3.6	ADAMS 软件工具箱	91
3.6.1	软件开发工具包(ADAMS/SDK)	91
3.6.2	虚拟试验工具箱(Virtual Test Lab)	92
3.6.3	虚拟试验模态分析工具箱 (Virtual Experiment Modal Analysis)	92
3.6.4	钢板弹簧工具箱(Leafspring Toolkit)	93
3.6.5	飞机起落架工具箱(ADAMS/Landing Gear)	93
3.6.6	履带/轮胎式车辆工具箱(Tracked/Wheeled Vehicle)	93
3.6.7	齿轮传动工具箱(ADAMS/Gear Tool)	94
第 4 章	ADAMS 软件基本算法	95
4.1	ADAMS 建模基础	95
4.1.1	参考标架	95
4.1.2	坐标系的选择	95
4.2	ADAMS 运动学分析	96
4.2.1	ADAMS 运动学方程	96
4.2.2	ADAMS 运动学方程的求解算法	97
4.3	ADAMS 动力学分析	98
4.3.1	ADAMS 动力学方程	98
4.3.2	初始条件分析	103
4.3.3	ADAMS 动力学方程的求解	104
4.4	ADAMS 静力学及线性化分析	105
4.4.1	静力学分析	105
4.4.2	线性化分析	106
4.5	ADAMS 求解器算法介绍	106
4.5.1	ADAMS 数值算法简介	106
4.5.2	动力学求解算法介绍	107
4.5.3	动力学求解算法特性比较	108
4.5.4	刚性问题求解算法选择	110
第 5 章	ADAMS/View	112
5.1	ADAMS/View 简介	112
5.1.1	建模和仿真的步骤	112
5.1.2	创建模型	113
5.1.3	测试并验证模型	114
5.1.4	优化模型	115
5.1.5	用户化和宏功能	116
5.1.6	启动 ADAMS/View	116

5.1.7 定义建模环境	119
5.2 几何建模工具	123
5.2.1 建模工具调用的两种方式	123
5.2.2 基本几何形状的绘制	124
5.2.3 简单形体的建模	125
5.2.4 复杂形体的建模	126
5.2.5 几何形体的修改	127
5.2.6 Body 特性的修改	128
5.3 约束建模	132
5.3.1 约束简介	132
5.3.2 创建约束	133
5.3.3 定义驱动	135
5.3.4 约束建模时需要注意的几点	138
5.4 施加外力	139
5.4.1 基本概念	139
5.4.2 作用力	140
5.4.3 柔性连接	143
5.5 仿真分析	147
5.5.1 设置仿真分析输出	148
5.5.2 模型检查	152
5.5.3 样机调试	152
5.5.4 样机仿真分析和试验	155
5.5.5 仿真过程中参数的设置	159
5.5.6 仿真结果的保存和删除	161
5.6 ADAMS/View 应用实例	161
5.6.1 几何建模	161
5.6.2 添加约束	170
5.6.3 添加运动和力	173
5.6.4 仿真分析	175
第 6 章 ADAMS 模型语言及仿真控制语言	177
6.1 ADAMS 的主要文件介绍	177
6.2 ADAMS/Solver 模型语言(ADAMS DATA Language)	178
6.2.1 ADAMS/Solver 模型语言的分类及其语法介绍	178
6.2.2 模型文件的开头与结尾	181
6.2.3 惯性单元	181
6.2.4 几何单元	182

6.2.5 约束单元	186
6.2.6 力元	188
6.2.7 系统模型单元	191
6.2.8 轮胎单元	193
6.2.9 数据单元	195
6.2.10 分析参数单元	196
6.2.11 输出单元	198
6.3 ADAMS/Solver 命令及仿真控制文件	200
6.3.1 ADAMS/Solver 命令结构及分类	200
6.3.2 创建 ADAMS/Solver 仿真控制文件	206
第 7 章 ADAMS/PostProcessor 使用方法	209
7.1 ADAMS/PostProcessor 简介	209
7.1.1 ADAMS/PostProcessor 的用途	209
7.1.2 ADAMS/PostProcessor 的启动与退出	210
7.1.3 ADAMS/PostProcessor 窗口介绍	210
7.2 ADAMS/PostProcessor 基本操作	211
7.2.1 创建任务和添加数据	212
7.2.2 工具栏的使用	213
7.2.3 窗口模式的设置	216
7.2.4 ADAMS/PostProcessor 的页面管理	216
7.3 ADAMS/PostProcessor 输出仿真结果的动画	216
7.3.1 动画类型	217
7.3.2 加载动画	217
7.3.3 动画演示	218
7.3.4 时域动画的控制	218
7.3.5 频域动画的控制	220
7.3.6 记录动画	221
7.4 ADAMS/PostProcessor 绘制仿真结果的曲线图	221
7.4.1 由仿真结果绘制曲线图的类型	222
7.4.2 曲线图的建立	222
7.4.3 曲线图上的数学计算	224
7.5 曲线图的处理	226
7.5.1 曲线数据滤波	226
7.5.2 快速傅立叶变换	227
7.5.3 生成伯德图	228
7.6 ADAMS/PostProcessor 的应用实例	228

7.6.1 动力学模型的建立和仿真分析	229
7.6.2 采用 ADAMS/PostProcessor 建立和设置曲线图	230
7.6.3 采用 ADAMS/PostProcessor 对曲线图进行操作	232
第 8 章 ADAMS/View 函数及 ADAMS/Solver 函数	233
8.1 ADAMS/View 函数及 ADAMS/Solver 函数的类型及建立	233
8.1.1 建立表达式模式下的函数	233
8.1.2 建立运行模式下的函数	234
8.2 ADAMS/View 设计函数	234
8.2.1 数学函数	234
8.2.2 位置/方向函数	236
8.2.3 建模函数	237
8.2.4 矩阵/数组函数	238
8.2.5 字符串函数	241
8.2.6 数据库函数	242
8.2.7 GUI 函数	243
8.2.8 系统函数	243
8.3 ADAMS/View 运行函数及 ADAMS/Solver 函数	244
8.3.1 位移函数	244
8.3.2 速度函数	245
8.3.3 加速度函数	246
8.3.4 接触函数	246
8.3.5 样条差值函数	247
8.3.6 约束力函数	247
8.3.7 合力函数	248
8.3.8 数学函数	248
8.3.9 数据单元	249
8.4 函数应用实例	249
8.4.1 定义不同形式的驱动约束	249
8.4.2 定义和调用系统状态变量	252
8.4.3 度量或请求的定义和调用	254
第 9 章 ADAMS 用户子程序	255
9.1 ADAMS 用户子程序简介	255
9.1.1 用户子程序的种类	255
9.1.2 子程序的使用	257
9.2 常用 ADAMS 用户子程序简介	259

9.2.1	使用 GFOSUB 用户子程序实例	259
9.2.2	常用用户定义子程序简介	262
9.3	功能子程序	270
9.3.1	功能子程序概述	270
9.3.2	功能子程序 SYSARY 和 SYSFNC	272
第 10 章	ADAMS 参数化建模及优化设计	277
10.1	ADAMS 参数化建模简介	277
10.2	ADAMS 参数化分析简介	278
10.2.1	设计研究(Design Study)	278
10.2.2	试验设计(Design of Experiments)	278
10.2.3	优化分析(Optimization)	280
10.3	参数化建模应用实例	280
10.3.1	双摆臂独立前悬架拓扑结构	281
10.3.2	系统环境设置	281
10.3.3	双摆臂独立前悬架参数化建模	282
10.4	优化设计实例分析	289
10.4.1	参数化分析的准备	289
10.4.2	设计研究	295
10.4.3	试验设计	300
10.4.4	优化分析	306
第 11 章	ADAMS 二次开发及实例	313
11.1	定制用户界面	313
11.1.1	定制菜单	315
11.1.2	定制对话框	320
11.2	宏命令的使用	325
11.2.1	创建宏命令	325
11.2.2	在宏命令中使用参数	327
11.3	循环命令和条件命令	331
11.3.1	循环命令	331
11.3.2	条件命令	333
11.4	ADAMS 二次开发实例	335
11.4.1	问题描述	335
11.4.2	二次开发文件的组织及 ADAMS 环境的初始化	336
11.4.3	菜单文件及菜单的初始化	339
11.4.4	对话框文件和命令文件在建模(前处理)中的应用	345

11.4.5	对话框文件和命令文件在分析计算部分的应用·····	361
11.4.6	对话框文件和命令文件在后处理部分的应用·····	364
第 12 章	ADAMS 应用实例·····	373
12.1	等速万向节专用仿真分析系统应用实例·····	373
12.1.1	等速万向节结构简介·····	373
12.1.2	等速万向节动力学模型的建立·····	375
12.1.3	等速万向节动力学仿真分析系统简介·····	377
12.1.4	基于本专用系统的万向节虚拟试验及结果·····	380
12.2	ADAMS 在汽车悬架及整车系统仿真的应用·····	392
12.2.1	整车拓扑结构分析·····	393
12.2.2	悬架、转向子系统仿真及其模型验证·····	402
12.2.3	整车动力学仿真及其模型验证·····	404
参考文献	·····	432

第1章 绪 论

本章首先介绍虚拟产品开发与虚拟样机技术的特点、内容及其应用；在此基础上提出数字化样机的概念，并由此引入机械系统动力学分析与仿真，概述了机械系统动力学分析与仿真在数字化功能样机中的重要作用；最后阐述了机械系统动力学分析与仿真的发展方向及前沿。通过本章的学习，可以对虚拟样机技术及机械系统动力学分析仿真技术的内容及发展有较深入的了解，便于以后对具体内容的学习掌握。

1.1 虚拟产品开发与虚拟样机技术

1990年10月29日，美国波音公司正式启动波音777飞机研制计划，采用了一种全新的设计与制造方式，于1994年6月12日直接进行了第1架波音777的首次试飞。波音777飞机的研制采用了全数字化的无纸设计技术，整机外型、结构件和整机飞机系统100%采用三维数字化定义，100%应用数字化预装配，整个设计制造过程无需模型和样机，一次成功，首次实现了整机数字化设计、数字化制造和数字化协调。对比以往的飞机研制，波音777成本降低了25%，出错返工率减少了75%，制造周期缩短了50%。波音777的研制成为现代产品开发新技术应用的里程碑，其采用的开发过程现在称之为虚拟产品开发(Virtual Product Development, VPD)，应用的开发技术称之为虚拟样机技术(Virtual Prototyping, VP)。

虚拟产品开发和虚拟样机技术的出现是市场激烈竞争的拉动和技术迅速发展的推动共同作用的结果。随着世界经济的一体化发展，市场竞争日趋激烈，多品种小批量生产和大批量定制生产逐渐成为主导的生产形式。在这种情况下，企业要求得生存与发展，就必须调整其产品开发和生产组织模式，解决T(最快的上市时间)、Q(最好的产品质量)、C(最低的产品成本)、S(良好的产品服务)和E(尽少的环境污染)难题。另一方面，世界已经进入全球化的知识经济时代，现代信息技术特别是计算机技术得到了飞速发展与广泛应用，这为TQCSE难题的解决提供了机遇。在这样的背景条件下，虚拟产品开发和虚拟样机技术应运而生。

1.1.1 虚拟产品开发技术

1. 虚拟产品开发特点

早在1993年，世界著名的CAD/CAM服务供应商EDS UG的总裁John Mazzola就对

VPD 作了这样的描述：“虚拟产品开发是一种设想，在这个设想中，以网络方式组织在一起的人们将协同工作，以完成对产品的设计、分析、制造及技术支持。他们的工作将以数字化的方式确定和分配，从而使得他们能够在任何时间、任何地点协同或独立地工作。这种开发网络除了生产公司外，还将包括供应商、合作伙伴及客户。”

这个描述对于“虚拟产品开发”作了精确的概括，直到十年之后的现在仍然是合乎时宜的，它指出了虚拟产品开发具备的三个主要特点。

(1) 数字化方式

虚拟产品开发是产品设计制造的真实过程在虚拟环境中的映像。虚拟产品开发数字化的特征表现在三个方面：一是产品存在的数字化，产品在开发过程中的不同阶段，直至成品出现之前，都以数字化方式存在，称之为产品的数字化模型；二是开发管理的数字化，在产品开发过程中，开发过程的管理采用数字化的方式，开发网络的任务是以数字化方式确定和分配的；三是信息交流的数字化，在产品设计制造的全生命周期中，同一阶段或不同阶段之间，如设计单位内部或设计与制造单位之间，产品信息的交流采用数字化方式，基于数字化模型实现无纸化设计。

(2) 产品全生命周期

虚拟产品开发是从产品研究、产品规划、产品设计、产品试验、产品制造、产品销售、产品使用到产品最终报废的产品全生命周期在计算机上构造的虚拟环境中予以实现，其目标不仅是对产品的物质形态和制造过程进行模拟和可视化，而且对产品的性能、行为和功能以及在产品实现的各个阶段中的实施方案进行预测、评价和优化。产品全生命周期的数字化是由 CAD(Computer Aided Design, 计算机辅助设计)/CAE(Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程)/CAM(Computer Aided Manufacture, 计算机辅助制造)/PDM(Product Data management, 产品数据管理)技术支持的。目前, CAD/CAE/CAM/PDM 技术有了进一步的发展, 称之为 VP(Virtual Prototype, 虚拟样机)/PLM(Product Life-Cycle Manager, 产品全生命周期管理)。

(3) 网络协同

虚拟产品开发是开发网络协同工作的结果，产品本身及其开发过程的复杂性，使得单一公司或部门难以胜任全部的工作，往往是由相关的部门和公司共同组成一个开发网络，协同开发。如上述波音 777 开发过程中，日本三菱、川崎和富士重工业株式会社承担了 20% 的结构工作。虚拟产品开发的数字化特性以及现代网络技术的发展使得网络协同成为现实，基于网络的协同开发和并行工程成为 VPD 的重要特征。

2. 虚拟产品开发使能技术

为了实现具有上述三个特点的虚拟产品开发，需要有相关的使能技术支持。虚拟产品开发主要有以下四个方面的使能技术。

(1) 产品数字化建模

虚拟产品开发技术是利用计算机虚拟地实现产品全生命周期的所有活动，这就要求建立一个全数字化的适宜于产品全生命周期的产品模型。与产品开发过程相适应，产品全生

命周期数字化模型应该包容以下内容：首先是产品几何模型，几何模型与产品结构设计相对应，是后续一系列过程进行的基础；其次是产品分析模型，分析模型要求支持以保证和提高产品性能为主旨的各种工程分析，如有限元分析、运动学和动力学分析以及与具体产品类型相关联的特性分析等；再者是产品制造模型，以支持产品的虚拟制造过程。这样，通过一致化的全生命周期产品模型，以数字化的方式统一产品的设计、分析与制造过程。

(2) PDM/PLM

虚拟产品开发技术以数字化方式统一产品的全生命周期过程，但是产品开发过程中的不同阶段有着不同的侧重点，同时不同阶段之间存在着频繁的资料和信息交流，这就要求采用某种方式或工具以实现产品开发不同阶段的产品信息的表示、存储和操作，以及异地设计人员的直接交流，这是靠产品数据管理(PDM)系统来实现的。目前产品数据管理系统已经进一步发展为产品全生命周期管理(PLM)系统。

(3) 网络协同技术

随着竞争的全球化、产品创新周期的缩短以及信息和知识超越地点与时间的应用等情况的出现，企业力求提高产品开发的并行化程度，增强不同时间、不同地点的开发人员进行协同开发的能力。虚拟产品开发技术将产品的模型定义在计算机上，利用计算机网络通信的技术，使处于异地的产品设计人员也可方便地进行交流，协同进行产品的开发。除了包含设计、制造、装配、试验等专业人员外，还可以有合作开发伙伴以及具体的用户参加，这样便可以使产品的开发者与需求者能共同进行产品的设计。由于这一切都是在对计算机中的产品数据模型进行操作，使得产品的开发过程中发现的问题可以通过对产品模型的调整得到迅速的解决。

(4) 业务流程重组

虚拟产品开发技术相对于传统产品开发而言，不只是一种新技术的采用，它改变了传统产品开发过程的几乎所有环节，这就要求生产企业针对自身的实际情况，面向虚拟产品开发进行业务流程的重组并建立相应的数字化过程模型。如建立产品开发过程模型，实现过程模型表示、处理、调整、优化和电子化；根据实际生产环境制定相应的生产组织模型，设定各种组织结构、活动分工、责任权限；建立资源模型来描述生产过程中的各种活动信息，如加工设备、工作人员等，从而能在产品开发过程中实现资源的动态优化配置；制定合适的约束规则和协调机制，产品的开发活动要受到一定的约束条件制约，从而使产品最终能满足用户的要求，协调机制则是为了能保障产品开发过程顺利地进行，并按照最优的方向发展。

3. 虚拟产品开发流程

虚拟产品开发最主要的特征是产品开发过程的数字化，它彻底地改变了传统的产品开发流程；不仅如此，数字化设计还贯穿于产品全生命周期。产品全生命周期包括一系列不同的阶段，如图 1-1 所示。数字化设计主要用于产品开发，包括产品规划、产品设计(包括初步设计和详细设计)和产品试验这三个阶段，并且是一个循环反复的过程。同时，数字化模型不仅存在于产品开发阶段，还根据不同的需要存在于后续的产品制造、产品销售、产

品使用等过程。

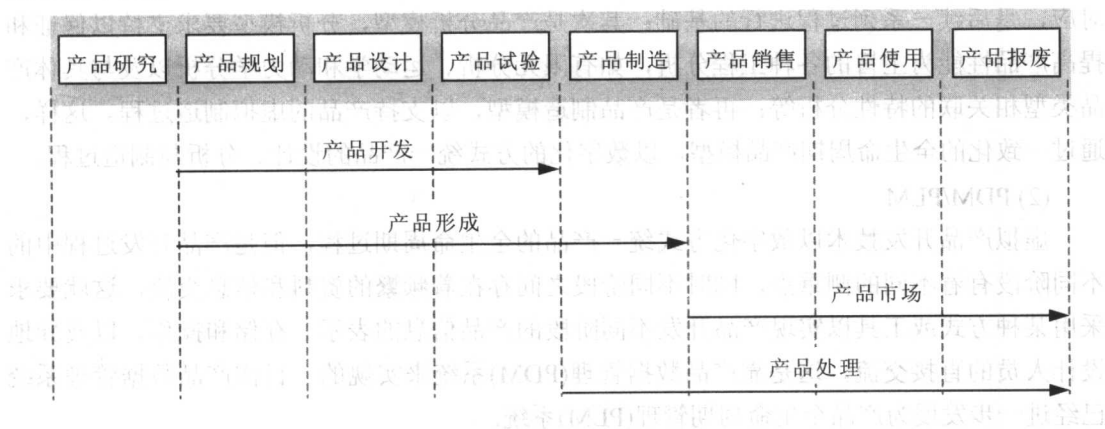


图 1-1 产品全生命周期

比照产品全生命周期阶段图，可以对虚拟产品开发和传统产品开发的流程进行比较，如图 1-2 所示。

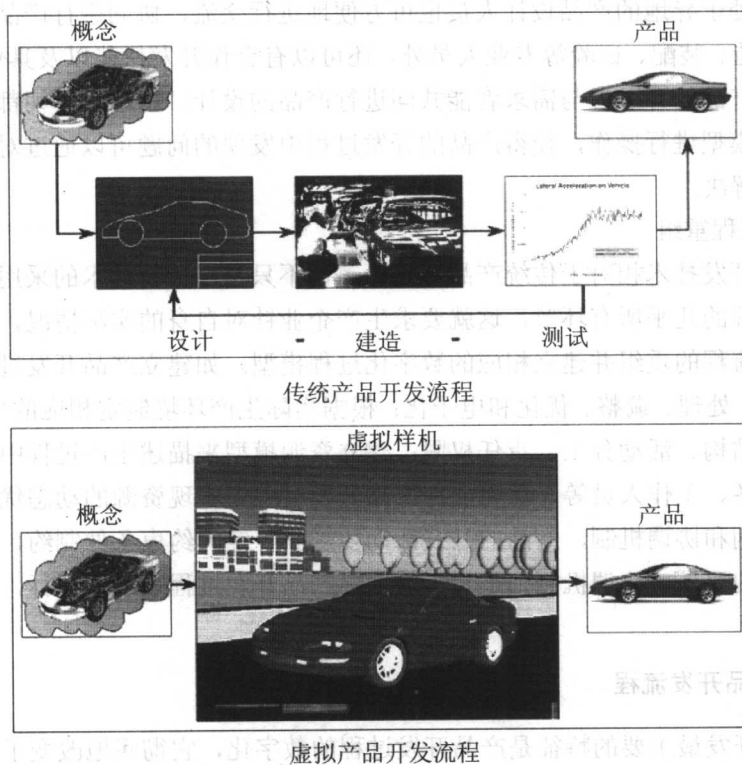


图 1-2 虚拟产品开发与传统产品开发流程比较

传统的产品开发，在概念设计(产品规划)之后，是一个产品设计—样机建造—测试评估—反馈设计的循环反复过程，这其中的每一次循环，都伴随有物理样机的建造或修改，