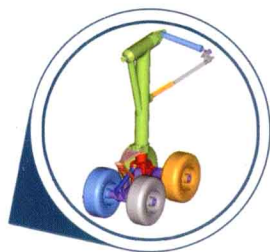
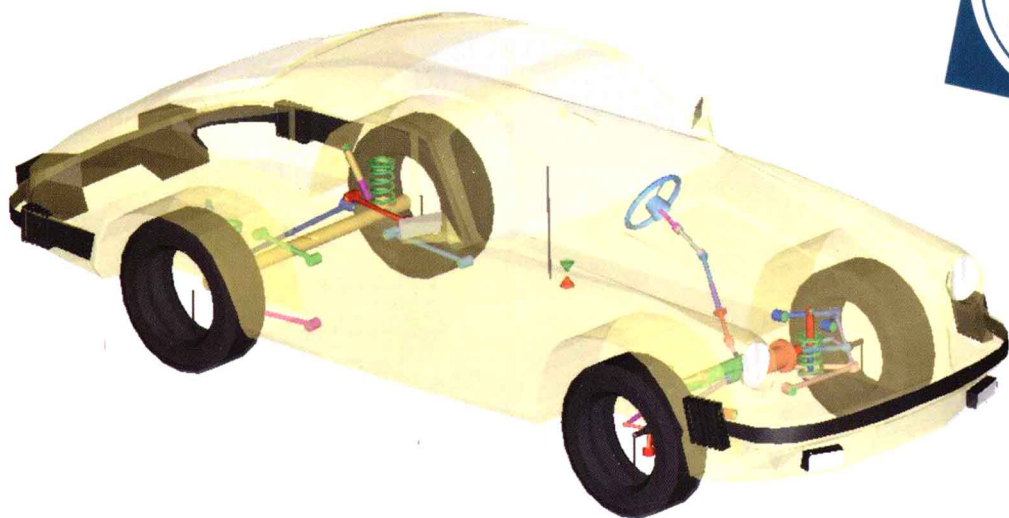


HyperWorks进阶教程系列

MotionView & MotionSolve

应用技巧与 实例分析

李修峰 王亚斌 王 晨 编著



附赠超值  光盘

- 全书练习实例模型文件
- Altair中国HyperWorks技术大会论文集



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

HyperWorks 进阶教程系列

MotionView & MotionSolve 应用技巧与实例分析

李修峰 王亚斌 王 晨 编著



机械工业出版社

本书是根据 MotionView & MotionSolve 软件的特点,以编者在学习、工作中积累的经验,精心组织编写而成的。全书共 10 章,系统介绍了 MotionView & MotionSolve 软件使用的基础知识与仿真实例,主要内容包括软件基本操作、刚体系统建模与仿真、刚柔耦合分析与柔性体建模、模型定义语言及其应用、仿真结果后处理、传感器与仿真脚本、机构优化设计、机械控制系统建模与仿真以及耐久性分析等。

本书是 Altair 中国公司推荐的 HyperWorks 软件培训用书,可作为机械、汽车、航空航天、重型装备、国防、消费品和力学等相关领域工程技术人员自学或参考用书,也可以作为高等工科院校机械类专业本科生和研究生学习虚拟样机技术的教学用书。

本书中实例所涉及的模型文件,读者可在随书附赠的光盘中找到。

图书在版编目(CIP)数据

MotionView & MotionSolve 应用技巧与实例分析 / 李修峰, 王亚斌, 王晨编著. —北京: 机械工业出版社, 2013.5

HyperWorks 进阶教程系列

ISBN 978-7-111-42217-4

I. ①M… II. ①李… ②王… ③王… III. ①有限元分析-应用软件-教材 IV. ①0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 079552 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张淑谦

责任编辑: 张淑谦 范成欣

责任印制: 乔宇

三河市宏达印刷有限公司印刷

2013 年 6 月·第 1 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·27.5 印张·680 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-42217-4

ISBN 978-7-89433-888-4 (光盘)

定价: 79.00 元(含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

序 一

Altair 公司于 1985 年从工程咨询起家，在 1989 年发布了 HyperMesh 软件，并很快在汽车业得到广泛认同，从此激发了 Altair 在软件上投入的热情。1994 年，Altair 推出了 OptiStruct 模块，当年即获得《工业周刊》(Industry Week) 年度技术奖。随后的几年，Altair 通过收购和开发，扩展了一系列模块，并于 1999 年整合成 HyperWorks 软件包。在 2006 年收购 RADIOSS 软件后，Altair 终于在结构仿真和优化方面形成了完整的产品系列。

2012 是 Altair 进入中国的第 11 个年头，在这 11 年中，在 Altair 中国同仁的不懈努力下，Altair 中国业务有了长足的发展，HyperWorks 用户群也逐渐壮大。为此，2007 年开始，我们每年举办 HyperWorks 技术大会 (HTC) 暨 Altair 用户年会。在会上，不仅有大会主题发言，还有大量的用户论文交流。2007 年，上海的第一届 HTC 大会就收到了 70 多篇论文，大部分是关于 HyperMesh 的应用。2008 年，在北京的第二届 HTC 大会上开始有一些制造仿真技术 (HyperXtrude/HyperForm) 方面的论文。2009~2010 年，在上海的第三、四届 HTC 大会上论文数都超过了 120 篇，内容涵盖的行业更广，应用的模块更多，涌现了大量的有限元求解、多体动力学仿真 (MotionSolve)、优化设计及二次开发的成功案例。

Altair 早些年的成功基本上得益于好的产品以及技术人员的口口相传。Altair 的业务模式也为 HyperWorks 的普及提供了强有力的支持，使得高端 CAE 的进入门槛大大降低。随着业务的飞速发展，要求使用 HyperWorks 的技术人员也越来越多，大家迫切希望有一些更好的教程，能帮助他们更快地上手、更系统地学习、更深入地应用。在这样的背景下，我们组织编写了 HyperWorks 进阶教程系列：《HyperMesh & HyperView 应用技巧与高级实例》、《OptiStruct & HyperStudy 理论基础与工程应用》、《RADIOSS 理论基础与工程应用》，以满足广大 CAE 工程师及爱好者的要求，并帮助高校学子更快掌握 HyperWorks 的软件应用。

无论您是新入行，还是已在这一行工作多年，您一定会为 CAE 工具的多样化伤透脑筋。HyperWorks 在高端 CAE 技术上提供了一站式解决方案，不仅使系统精简，同时又可同其他系统共享 CAE 模型，更进一步将目前的主流 CAE 求解器集成在统一的环境上，组成一个高效的产品研发平台，从而将创新、成本、效率有机结合起来，构造最有效的产品创新设计平台解决方案。Altair “以用户的成功衡量我们的业绩” 的服务理念、不断创新的技术和业务模式、全球工程咨询经验的导入，会助您更上一层楼！

戚国焕
Altair 大中华区总经理

序 二

随着现代科技的发展，人类对各种机械系统性能的要求越来越高，这就要求对机械系统性能进行动态设计。传统的手工设计模式在设计效率、设计准确性、设计成本等方面已无法满足现代机械系统的要求。

多体系统动力学理论与计算机技术的迅速发展，使得复杂机械系统动力学动态设计与分析成为可能，并由此出现了一系列优秀的多体系统动力学专用和通用软件，极大地推动了现代机械工业技术的发展。通过动力学设计者与计算机“对话”来进行多体动力学设计与分析，就像使用“傻瓜”相机自动选择曝光时间和快门等参数来自动拍摄一样。由美国 Altair 公司于 21 世纪初开发的 MotionView & MotionSolve 软件就是新一代多体系统动力学通用软件中具有代表性的一款。

MotionView & MotionSolve 软件因其强大的数字、图表、动画前处理和后处理功能，基于多体系统动力学理论的多体系统运动学和动力学快速计算求解器，多种可拓展使用范围的辅助软件接口，简洁友好的可视化用户界面，便于用户二次开发的完全开放式的程序架构等鲜明特点，在竞争激烈的动力学软件国际市场上占有了重要地位，受到广泛欢迎。

王亚斌博士与我在多体系统动力学应用领域合作研究近 10 年，他有深厚的多体系统动力学理论基础和丰富的 MotionView & MotionSolve 软件应用经验。通过与 Altair 公司合作，王亚斌博士与合作者编著的本书全面系统地介绍了 MotionView & MotionSolve 软件的建模、求解、结果分析方法以及在机械产品动力学设计中的应用实例，是一部重要的 MotionView & MotionSolve 使用指南，具有很好的可读性和实用性，对学习和使用 MotionView & MotionSolve 大有帮助。

我相信，该书的出版，对推广应用 MotionView & MotionSolve 软件和促进我国多体系统动力学研究与应用以及虚拟样机技术的发展具有重要的促进作用，对开发我国具有自主知识产权的多体系统动力学通用软件具有重要借鉴作用。

芮筱亭

南京理工大学力学首席教授

前 言

在日益激烈的市场竞争下，一个企业的兴衰很大程度上取决于是否拥有高效的产品研发能力。作为一种提高产品研发效率的有效工具，计算机仿真早已被应用到各个行业。通过仿真驱动设计理念，将仿真技术融入产品设计的全过程，特别是产品概念设计阶段，不但为产品设计提供指导，加速研发过程，还可以激发灵感，实现产品创新。

本书以美国 Altair 公司的机械系统动力学分析软件 MotionView & MotionSolve 为平台，从基础入门开始，由浅入深地引导读者通过具体操作过程来掌握 MotionView & MotionSolve 软件建模、求解与结果分析的方法，详细阐述了虚拟样机技术在机械产品设计与分析中的应用。全书共分 10 章：第 1 章简要介绍了虚拟样机技术、多体系统动力学及仿真软件 MotionView & MotionSolve；第 2 章详细介绍了 MotionView 的基础知识；第 3 章通过实例介绍了应用 MotionView & MotionSolve 软件建立机构虚拟样机模型、求解以及结果后处理的基本过程；第 4 章介绍了应用 MotionView & MotionSolve 进行刚柔耦合多体系统建模与仿真的基本功能；第 5 章对 MotionView 的模型语言 MDL 进行了介绍；第 6 章介绍了后处理工具 HyperView & HyperGraph 的使用方法；第 7 章介绍了 MotionView 中传感器以及仿真脚本的基本用法，并通过实例说明机械系统序列仿真的实现过程；第 8 章介绍了应用 MotionSolve 联合系统优化求解器 HyperStudy 和结构优化求解器 OptiStruct 进行机构优化设计的基本方法；第 9 章介绍了 MotionView & MotionSolve 机械控制联合仿真功能，讲解了控制系统建模工具以及使用方法，并通过实例说明了 MotionSolve 自身以及联合 Simulink 进行机械控制系统联合仿真的基本过程；第 10 章主要介绍了耐久性分析向导 Durability Director 的使用方法。附录部分提供了 MotionSolve 常用函数说明以及软件使用过程中遇到的常见问题与解答。

本书的第 1 章、第 2 章、第 4 章、第 8 章、附录由李修峰编写，第 5 章、第 7 章、第 9 章、第 10 章由王亚斌编写，第 3 章、第 6 章由王晨编写。全书由李修峰统稿。

在本书的编写过程中，得到了 Altair 中国公司的大力支持，市场及合作伙伴总监钱纯女士为本书的选题与出版提供了帮助和指导；高级技术经理洪清泉先生在百忙之中对本书进行了审查并提出了宝贵的修改意见；北方区技术支持经理王钰栋先生对本书的框架给予了建议。北京理工大学的刘明杰教授和李晓峰老师在本书的编写过程中给予了指导，贾静波和王茹同学为本书实例的校对做了大量细致的工作。在此，一并致以最诚挚的谢意。

由于作者水平有限，加之时间仓促，虽经多次校对，书中疏漏和不足之处在所难免，敬请专家和读者批评指正。

编 者

机工出版社·计算机分社书友会邀请卡

尊敬的读者朋友：

感谢您选择我们出版的图书！我们愿以书为媒与您做朋友！我们诚挚地邀请您加入：

“机工出版社·计算机分社书友会”

以书结缘，以书会友

加入“书友会”，您将：

- ★ 第一时间获知新书信息、了解作者动态；
- ★ 与书友们在线品书评书，谈天说地；
- ★ 受邀参与我社组织的各种沙龙活动，会员联谊；
- ★ 受邀参与我社作者和合作伙伴组织的各种技术培训和讲座；
- ★ 获得“书友达人”资格（积极参与互动交流活动的书友），参与每月 5 个名额的“书友试读赠阅”活动，获得最新出版精品图书 1 本。

如何加入“机工出版社·计算机分社书友会”

两步操作轻松加入书友会

Step1

访问以下任一网址：

- ★ 新浪官方微博：<http://weibo.com/cmpjsj>
- ★ 新浪官方博客：<http://blog.sina.com.cn/cmpbookjsj>
- ★ 腾讯官方微博：<http://t.qq.com/jigongchubanshe>
- ★ 腾讯官方博客：<http://2399929378.qqzone.qq.com>

Step2

找到并点击调查问卷链接地址（通常位于置顶位置或公告栏），完整填写调查问卷即可。

联系方式

通信地址：北京市西城区百万庄大街 22 号

机械工业出版社计算机分社

邮政编码：100037

联系电话：010-88379750

传 真：010-88379736

电子邮件：cmp_itbook@163.com

敬请关注我社官方微博：<http://weibo.com/cmpjsj>

第一时间了解新书动态，获知书友会活动信息，与读者、作者、编辑们互动交流！

目 录

序一
序二
前言

第 1 章 虚拟样机技术与 MotionView & MotionSolve 1

1.1 虚拟样机技术	2	1.2 多体系统动力学	4
1.1.1 虚拟样机技术定义	2	1.3 MotionView & MotionSolve 简介	5
1.1.2 虚拟样机分类	3	1.4 应用 MotionView & MotionSolve 软件 进行虚拟样机设计的一般过程 ...	10
1.1.3 虚拟样机技术特点	3	1.5 小结	11
1.1.4 虚拟样机技术应用	3		

第 2 章 MotionView 基本知识 12

2.1 MotionView 入门	13	2.6 重力设置	27
2.1.1 启动 MotionView	13	2.7 建模工具	28
2.1.2 MotionView 工作界面	13	2.7.1 模型转换工具	28
2.2 文件管理	14	2.7.2 几何建模工具	31
2.2.1 模型打开与保存	14	2.7.3 约束建模工具	42
2.2.2 模型输入/输出	15	2.7.4 载荷建模工具	47
2.3 模型显示控制	20	2.7.5 数据输入文本框	53
2.3.1 项目浏览树	20	2.7.6 表达式编辑器	55
2.3.2 视角控制	23	2.7.7 宏菜单	61
2.3.3 图形对象显示控制	25	2.8 偏好设置	64
2.4 窗口布局及页面控制	26	2.9 初识 MotionView 界面	66
2.5 单位设置	27	2.10 小结	70

第 3 章 刚体系统建模与仿真 71

3.1 汽车前悬架系统建模与仿真	72	3.2 汽车后备箱盖开启机构	
------------------------	----	----------------------	--

	建模与仿真	83
3.3	确动凸轮机构建模与仿真	93
3.4	随动机构建模与仿真	101

3.5	半车机构模态分析	111
3.6	小结	114

第 4 章 刚柔耦合分析与柔性体建模 115

4.1	刚柔耦合分析方法	116
4.2	柔性体创建及使用	118
4.2.1	MotionViewFlexPrep 工具	118
4.2.2	HyperMesh 工具	122
4.2.3	柔性体使用	123
4.3	柔性体建模实例	127
4.3.1	应用 MotionViewFlexprep 创建	

	柔性体	127
4.3.2	应用 HyperMesh 创建柔性体	136
4.4	刚柔耦合分析实例	139
4.4.1	汽车前悬架机构刚柔耦合分析	139
4.4.2	车门闭锁机构刚柔耦合分析	150
4.5	小结	157

第 5 章 模型定义语言及其应用 158

5.1	模型定义语言简介	159
5.1.1	MDL 对象类型	161
5.1.2	MDL 对象基本属性	161
5.1.3	MDL 关键字	162
5.2	应用 MDL 创建子系统模型	162
5.2.1	子系统定义	163
5.2.2	子系统连接关系定义	164
5.2.3	子系统实例化	165
5.3	应用 MDL 创建分析模型	165

5.4	模型向导	166
5.5	实例	168
5.5.1	应用 MDL 创建单摆模型	168
5.5.2	应用 MDL 创建和使用单摆子 系统	172
5.5.3	应用 MDL 创建分析工况	184
5.5.4	应用 MDL 创建数据库	186
5.5.5	应用向导创建模型与分析工况	189
5.6	小结	194

第 6 章 仿真结果后处理 195

6.1	仿真动画处理方法	196
6.1.1	动画结果	197
6.1.2	数据结果	198
6.2	动画结果后处理	201
6.2.1	动画类型	201
6.2.2	结果载入	201
6.2.3	动画控制	203
6.2.4	截面图	205

6.2.5	爆炸视图	206
6.3	数据结果后处理	207
6.3.1	坐标曲线图绘制	208
6.3.2	曲线数据评估与参考	209
6.3.3	曲线属性控制	212
6.3.4	曲线视图控制	217
6.3.5	曲线滤波	218
6.4	演示与报告	219

6.4.1	结果演示	219
6.4.2	报告模板	221
6.4.3	模型与结果播放器 HyperView Player	224

6.5	实例	225
-----	----------	-----

6.5.1	动画结果后处理应用实例	225
6.5.2	数据结果后处理应用实例	230
6.5.3	报告模板应用实例	238
6.5.4	结果可视化及 HyperView Player	243

6.6	小结	248
-----	----------	-----

第 7 章 传感器与仿真脚本 249

7.1	传感器	250
-----	-----------	-----

7.1.1	事件监测	250
7.1.2	传感器触发	250
7.1.3	动作执行	251
7.1.4	传感器定义	251

7.2	仿真脚本	252
-----	------------	-----

7.3	实例	254
-----	----------	-----

7.3.1	滑杆序列运动仿真	254
7.3.2	吊杆序列运动仿真	259

7.4	小结	266
-----	----------	-----

第 8 章 机构优化设计 267

8.1	优化设计方法	268
-----	--------------	-----

8.1.1	设计变量	268
8.1.2	约束条件	268
8.1.3	目标函数	269

8.2	MotionSolve 联合 HyperStudy 进行 系统级优化	269
-----	---	-----

8.2.1	HyperStudy 简介	269
8.2.2	HyperStudy 工作流程	270

8.3	MotionSolve 联合 OptiStruct 进行 零件级优化	276
-----	---	-----

8.3.1	等效静态载荷技术(ESL)	276
8.3.2	ESL 优化流程	277

8.3.3	优化模型定义及输出	279
8.3.4	柔性体局部边界条件	280
8.3.5	优化收敛性研究	281
8.3.6	多体系统级响应优化	282

8.4	实例	283
-----	----------	-----

8.4.1	汽车前束曲线优化	283
8.4.2	压力机压紧力优化	294
8.4.3	挖掘机臂拓扑优化	299
8.4.4	四杆机构形状优化	304

8.5	小结	313
-----	----------	-----

第 9 章 机械控制系统建模与仿真 314

9.1	机械控制系统简介	315
-----	----------------	-----

9.2	建模工具	316
-----	------------	-----

9.3	实例	321
-----	----------	-----

9.3.1	弹簧质量系统仿真分析	321
-------	------------------	-----

9.3.2	单入单出系统控制分析	328
-------	------------------	-----

9.3.3	汽车悬架系统控制分析	334
-------	------------------	-----

9.4	小结	354
-----	----------	-----

第 10 章 耐久性分析 355

10.1 耐久性分析流程 356

- 10.1.1 软件架构 357
- 10.1.2 所需的仿真软件 358
- 10.1.3 分析需要的模型与数据 358
- 10.1.4 作业提交 359

10.2 启动向导与首选项设置 360

- 10.2.1 启动向导 360
- 10.2.2 新建项目 361
- 10.2.3 已有项目载入 363

10.3 标准工作流程 363

- 10.3.1 流程一 363
- 10.3.2 流程二 378
- 10.3.3 流程三 379

10.4 实例 381

- 10.4.1 自行车架耐久性分析 381
- 10.4.2 车门耐久性分析 392
- 10.4.3 下控制臂耐久性分析 399

10.5 小结 409

附录

附录 A MotionSolve 函数说明 411

附录 B 常见问题与解答 416

参考文献 429

第 1 章



虚拟样机技术与 MotionView & MotionSolve

本章首先介绍了虚拟样机技术的定义、分类、特点及其应用，然后阐述了多体系统动力学分析的发展历程及研究方法，最后讲解了多体动力学仿真软件 MotionView & MotionSolve 的功能与特点以及进行虚拟样机设计的一般过程。通过本章的学习可以对虚拟样机技术及多体系统动力学分析与仿真技术的内容及发展有较深入的了解，对 MotionView & MotionSolve 的应用范围有基本的认识，便于以后对具体内容的学习和掌握。

本章重点知识

- 1.1 虚拟样机技术
- 1.2 多体系统动力学
- 1.3 MotionView & MotionSolve 简介
- 1.4 应用 MotionView & MotionSolve 软件进行虚拟样机设计的一般过程
- 1.5 小结

1.1 虚拟样机技术

在产品开发过程中,时间始终是一个重要因素。为了提高产品竞争优势或市场份额,企业需要不断开发高质量、高性能、个性化的产品。然而,传统的产品设计过程,要经过图样设计、样机制造、测试改进、定型生产等步骤。为了使产品满足设计要求,往往要多次制造样机,反复测试,不但延长了产品推向市场的时间,而且浪费了大量的人力物力。虚拟样机技术的出现为改变这一现状提供了可能。通过仿真驱动设计理念,在产品设计初期,即概念设计阶段开始引入仿真技术,合理定义和约束设计空间,有效预测产品在真实工作状态下的性能并及早发现设计中存在的问题,将大大缩短研发周期。同时,应用仿真技术还可以深入研究设计变量对产品性能的影响,帮助设计决策以获得最佳的产品性能,并实现产品创新。图 1-1 对比了传统产品开发与虚拟产品开发流程之间的差异。

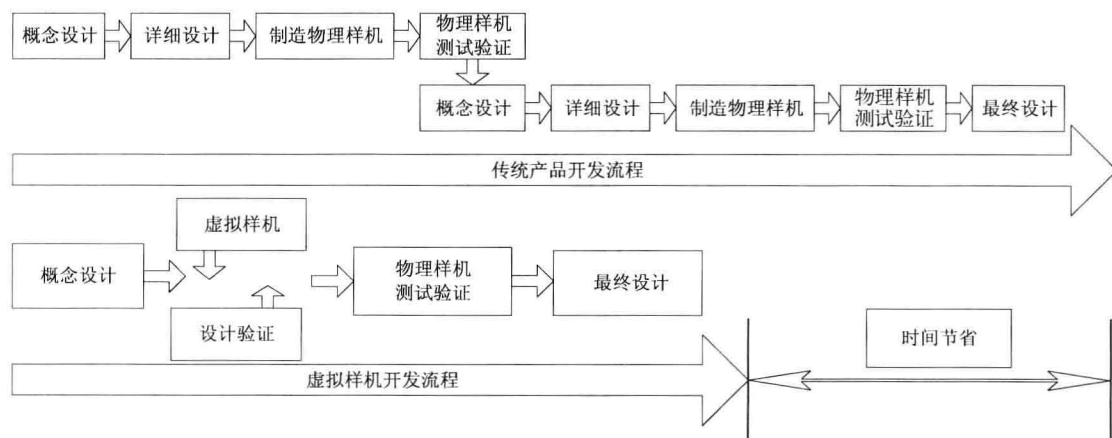


图 1-1 传统产品开发与虚拟产品开发流程比较

1.1.1 虚拟样机技术定义

虚拟样机技术（Virtual Prototyping, VP）是指在产品的设计开发过程中,将分散的零部件设计和分析技术（指在某一系统中零部件的 CAD 和 FEA 技术）融合在一起,在计算机上建造出产品的整体模型,并针对该产品在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,进而改进产品设计,提高产品性能的一种新技术。

虚拟样机技术是基于计算机技术的一个新概念技术,到目前为止还没有一个统一的定义,有学者对集中代表性的论述进行了以下归纳:

(1) 虚拟样机技术就是在建立第一台物理样机之前,设计师利用计算机技术建立机械系统的数学模型,进行仿真分析并从图形方式显示该系统在真实工程条件下的各种特性,从而进行修改并得到最优设计方案的技术。

(2) 虚拟样机是一种计算机模型,它能够反映实际产品的特性,包括外观、空间关系以及运动学和动力学特性。借助于这项技术,设计师可以在计算机上建立机械系统模型,伴之以三维可视化处理,模拟在真实环境下系统的运动和动力特性并根据仿真结果精简和优化系统。

(3) 虚拟样机技术利用虚拟环境在可视化方面的优势以及可交互式探索虚拟物体功能,对产品进行几何、功能、制造等许多方面交互的建模与分析。它在 CAD 模型的基础上,把虚拟技术与仿真方法相结合,为产品的研发提供了一个全新的设计方法。

1.1.2 虚拟样机分类

虚拟样机按照实现功能的不同可分为结构虚拟样机、功能虚拟样机和结构与功能虚拟样机。

1) 结构虚拟样机主要用来评价产品的外观、形状和装配。新产品设计首先表现出来的就是产品的外观形状是否符合要求;其次,零部件能否按要求顺利安装,能否满足配合要求,这些都是在产品的虚拟样机中得到检验和评价的。

2) 功能虚拟样机主要用于验证产品的工作原理,如机构运动学仿真和动力学仿真。新产品在满足了外观形状的要求以后,就要检验产品整体上是否符合基于物理学的功能原理。这一过程往往要求能实时仿真,但基于物理学功能分析,计算量很大,与实时性要求经常冲突。

3) 结构与功能虚拟样机主要用来综合检查新产品试制或生产过程中潜在的各种问题。这是将结构虚拟样机和功能虚拟样机结合在一起的一种完备型的虚拟样机。它将结构检验目标和功能检验目标有机结合在一起,提供全方位的产品组装测试和检验评价,实现真正意义上的虚拟样机系统。这种完备型虚拟样机是目前虚拟样机领域研究的主要方向。

1.1.3 虚拟样机技术特点

与传统的基于物理样机的设计研发方法相比,虚拟样机技术具有以下特点:

(1) 新的研发模式。

传统的研发方法是一个串行过程,而虚拟样机技术真正地实现了系统角度的产品优化。它基于并行工程使产品在概念设计阶段就可以迅速地分析、比较多种设计方案,确定影响性能的敏感参数,并通过可视化技术设计产品、预测产品在真实工况下的特征以及所具有的响应,直至获得最优的工作性能。

(2) 更低的研究成本、更短的研究周期、更高的产品质量。

通过计算机技术建立产品的数字化模型,可以完成无数次物理样机无法进行的虚拟试验,从而无需制造及试验物理样机就可获得最优方案,不但减少了物理样机的数量,而且缩短了研发周期、提高了产品质量。

(3) 实现动态联盟的重要手段。

动态联盟的概念:为了适应快速变化的全球市场,克服单个企业资源的局限性,出现了在一定时间内,通过 Internet 临时缔结的一种虚拟企业。为实现并行设计和制造,参盟企业之间产品信息的交流显得尤为重要。而虚拟样机是一种数字化模型,通过网络输送产品信息,具有传递快速、反馈及时的特点,进而使动态联盟的活动具有高度的并行性。

1.1.4 虚拟样机技术应用

虚拟样机技术应用的目的是尽可能逼真地虚拟产品的物理原型,因此虚拟样机研究具有

鲜明的领域特色。当前国际上对虚拟样机技术的研究主要集中在以下 4 个方向:

第一种是面向虚拟现实的虚拟样机, 强调数字模型在感观特性方面与实际产品的一致性, 可以通过数据手套、头盔等对虚拟原型进行实际操作, 验证原型外在特性和内部功能及性能等, 主要应用在消费类电子、通信产品及医学等领域, 如芬兰的 VTT 实验室研究的手机虚拟原型。

第二种是面向行为、结构仿真的虚拟样机, 或称为机械系统仿真, 强调数字模型在行为及结构方面与实际产品的一致性, 主要是利用虚拟原型仿真产品的几何和运动特性, 通过原型可视化进行产品外形设计、布局设计、可达性设计、运动和动力学仿真、装配仿真等, 主要应用于机械设计领域。典型的应用是机械系统仿真软件 MotionView & MotionSolve。

第三种是面向并行工程的虚拟样机, 强调从概念、设计、分析到可制造性等阶段连续的计算机仿真, 目的是减少设计反复, 缩短产品研制周期, 降低成本, 主要应用在航空航天、船舶等领域。有代表性的实例是 Boeing 公司 Boeing 777 客机和西斯基飞机公司的科曼奇武装直升机研制, 采用虚拟原型技术后, 前者比起以往的飞机设计, 减少了 94% 的花费, 减少了 93% 的设计更改; 后者减少了 11 590 小时飞行测试时间, 节约经费总计 673 000 000 美元, 获得了巨大的经济效益。

第四种是面向国防工业虚拟采办的虚拟样机, 强调虚拟原型在虚拟环境中功能与实际产品的一致性。例如, 美国国防部联合建模和仿真系统 (简称 J-MASS) 体现了对新型武器系统研制进行全寿命周期管理的思想, 是协同虚拟样机技术在虚拟采办领域的一个典型应用。

1.2 多体系统动力学

虚拟样机技术是一门多学科综合的技术, 它的核心部分是多体系统运动学与动力学建模理论及其技术实现。多体系统是指由多个物体通过运动副连接组成的复杂机械系统。多体系统动力学的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。它是在经典力学基础上产生的新学科分支, 在经典刚体系统动力学上的基础上, 经历了多刚体系统动力学和计算多体系统动力学两个发展阶段, 目前已趋于成熟。

对于由多个刚体组成的复杂系统, 理论上可以采用经典力学的方法, 即以牛顿-欧拉方法为代表的矢量力学方法和以拉格朗日方程为代表的分析力学方法。这些方法对于单刚体或者少数几个刚体组成的系统是可行的, 但随着刚体数目的增加, 方程复杂度成倍增长, 寻求其解析解往往是不可能的。后来随着计算机数值计算方法的出现, 面向具体问题的数值方法成为求解复杂问题的一条可行道路, 即针对具体的多刚体问题列出其数学方程, 再编制数值计算程序进行求解。但是, 对于每一个具体问题都要编制相应的程序进行求解, 虽然可以得到合理的结果, 但是这个过程是非常繁琐的, 于是寻求一种适合计算机操作的程式化的建模和求解方法就变得非常迫切了。20 世纪 60 年代初期, 在航天领域和机械领域, 分别展开了对于多刚体系统动力学的研究, 并且形成了不同派别的研究方法。

最具代表性的方法是罗伯逊-维登伯格 (Roberson-Wittenburg) 方法、凯恩 (Kane) 方法和变分方法。

罗伯逊与维登伯格于 1966 年提出一种研究多刚体系统动力学的普遍性方法, 简称为 R/W 方法。该方法的主要特点是利用图论的概念描述多刚体系统的结构特征, 使各种不同结构的系

统能用统一的数学模型来描述；以邻接刚体之间的相对位移作为广义坐标，导出适合于任意多刚体系统的普遍形式动力学方程；引入增广体概念赋予动力学方程的系统以明确的物理意义且使方程的形式简洁。由此得到的系统动力学方程是一组精确的非线性运动微分方程，在运动学研究中还给出了各种有意义的运动量的表达式。 R/W 方法以十分优美的风格处理了树结构多刚体系统，对于非树系统，通过铰切割或刚体分割方法将非树系统转变成树系统进行处理。

凯恩方法是建立一般多自由度离散系统动力学方程的一种普遍方法，其特点是以伪速度作为独立变量描述系统的运动，兼有矢量力学和分析力学的特点，既适用于完整系统，也适用于非完整系统。建立的动力学中不出现理想约束反力，也不必计算动能等动力学函数及其导数，推导计算规范化，所得结果是一阶微分方程，便于计算机计算。

变分方法使用高斯最小约束来研究多刚体动力学问题。变分的力学原理并不直接描述机械运动的客观规律，而是把真实发生的运动和可能发生的运动加以比较，在相同条件下所发生的很多可能运动中找出真实运动所应满足的条件。因此该方法不需要建立系统的动力学方程，而是以加速度为变量，根据约束这个泛函的极值条件，直接利用系统在每个时刻的坐标和速度值解出真实加速度，从而确定系统的运动规律。该方法的主要特点是可以利用各种有效的数学规划方法寻求泛函极值，对于带控制的多刚体系统，动力学分析可以与系统的优化结合进行。不论是树形的系统，还是非树形的系统，都可用同样的方法处理。

这几种方法构成了早期多刚体系统动力学的主要内容，借助计算机数值分析技术，可以解决由多个物体组成的复杂机械系统动力学分析问题。但是，相对于成熟的结构有限元分析，多体系统动力学在建模与求解方面的自动化程度相差甚远。为此，美国的 Chace 和 Haug 于 20 世纪 80 年代提出了适宜于计算机自动建模与求解的多刚体系统笛卡儿建模方法，并确立了“计算多体系统动力学”这门新的学科。

计算多体系统动力学是指用计算机数值手段来研究复杂机械系统的静力学分析、运动学分析、动力学分析以及控制系统分析的理论和方法。其具体任务如下：

(1) 建立复杂机械系统运动学和动力学程式化的数学模型，开发实现这个数学模型的软件系统，用户只需输入描述系统的最基本数据，借助计算机就能自动进行程式化处理。

(2) 开发和实现有效的处理数学模型的计算方法与数值积分方法，自动得到运动学规律和动力学响应。

(3) 实现有效的数据后处理，采用动画显示、图表或其他方式提供数据处理结果。

计算多体系统动力学的产生极大地改变了传统机构动力学分析的面貌，使工程师从繁琐的手工计算中解放了出来，只需根据实际系统建立合适的模型，就可由计算机自动求解，并获得所需的结果。对于原来不可能求解或求解极为困难的大型复杂问题，都可利用计算机的强大计算功能顺利求解。同时，多体系统动力学分析软件还为其他工程辅助设计或分析软件提供了强大的接口功能，并与它们紧密联系在一起，形成了完整的计算机辅助工程（CAE）技术。

1.3 MotionView & MotionSolve 简介

国外的虚拟样机技术已走向商业化，目前比较有影响力的软件有美国机械动力学公司（Mechanical Dynamics Inc, MDI。现已并入 MSC 公司）的 ADAMS（Automatic Dynamic Analysis of Mechanical System）机械系统自动动力学分析软件、比利时的 LMS 公司的

Virtual.Lab Motion（其前身为 DADS）、德国航天局的 SIMPACK、美国 Altair 公司的 MotionView & MotionSolve 以及韩国的 Recurdyn 等。

MotionView & MotionSolve 软件是美国 Altair 公司研发的新一代多体动力学软件。该软件完全集成在 HyperWorks 平台中，为用户提供了强大的多体动力学前后处理、求解与优化功能。MotionView 是一个通用的多体动力学仿真前处理器和可视化工具，采用完全开放的程序架构，可以实现高度流程化、自动化的客户定制。MotionView 具有简洁友好的界面，高效的建模语言（MDL），同时也是第一款支持多求解器的多体动力学前处理器，可以将模型直接输出成 ADAMS、DADS、ABAQUS 和 NASTRAN 等多种求解格式文件，或直接由 MotionSolve 求解。MotionSolve 求解器是基于新一代的点辅助坐标系原理（Point-Auxiliary-Coordinate System）的多体动力学求解器，具有计算速度快、计算过程及结果稳定的特点，适用范围广泛，可以处理机械系统动力学、车辆动力学、隔振、控制系统设计、针对耐久性分析的载荷预期和稳健性仿真等多方面的问题，还可以对零自由度的机械系统和具有复杂非线性应变的模型进行仿真。应用 MotionView & MotionSolve 可以建立任意复杂机械系统虚拟样机，完成产品相关性能分析。

具体来说，MotionView 和 MotionSolve 具有以下特征及优势：

1. 高效的前、后处理

（1）MotionView 支持多种格式的数据文件输入/输出。输入文件包括如 Pro/E、CATIA、UG、SolidWorks、step、iges 等主流的 CAD 格式模型，RADIOSS、Optistruct、NASTRAN、ABAQUS、Dyna 等 FEA 格式模型以及试验数据文件等，创建完毕的模型可以提交 MotionSolve、ADAMS、DADS、ABAQUS 和 NASTRAN 等求解器求解，广泛的模型的接口便于不同部门之间的交流以及仿真平台建设。

（2）MotionView 强大的图形处理功能支持任意复杂程度模型的创建，灵活的模型树功能加上独有的可重用子系统功能使得模型管理非常便捷。模型树工具根据对象类型将当前会话中的所有对象进行分类，便于对象查看与编辑，特别适用于大规模多体系统的前处理。会话中任何现有模型在定义连接关系后都可以存储为子系统，子系统可以灵活调用和编辑，并且通过子系统内的不同选项可以实现不同零部件系统的任意切换，实现系列产品的统一建模和仿真。MotionView 模型树与复杂模型建模，如图 1-2 所示。

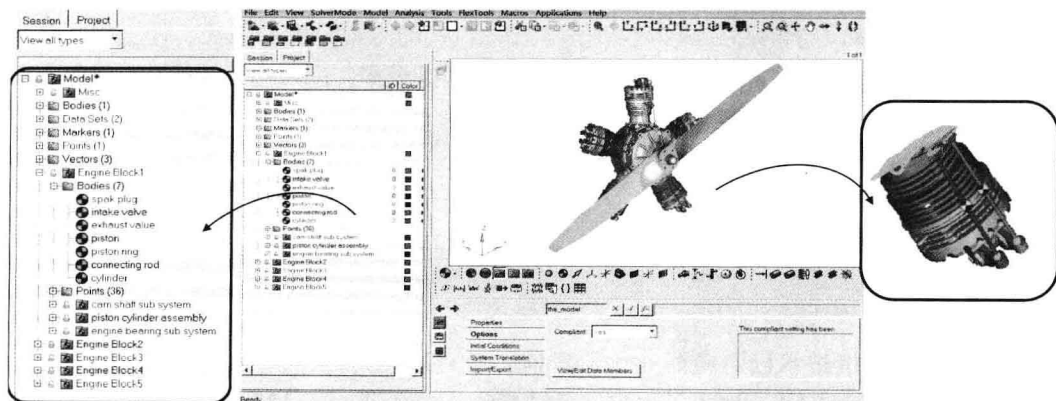


图 1-2 MotionView 模型树与复杂模型建模