

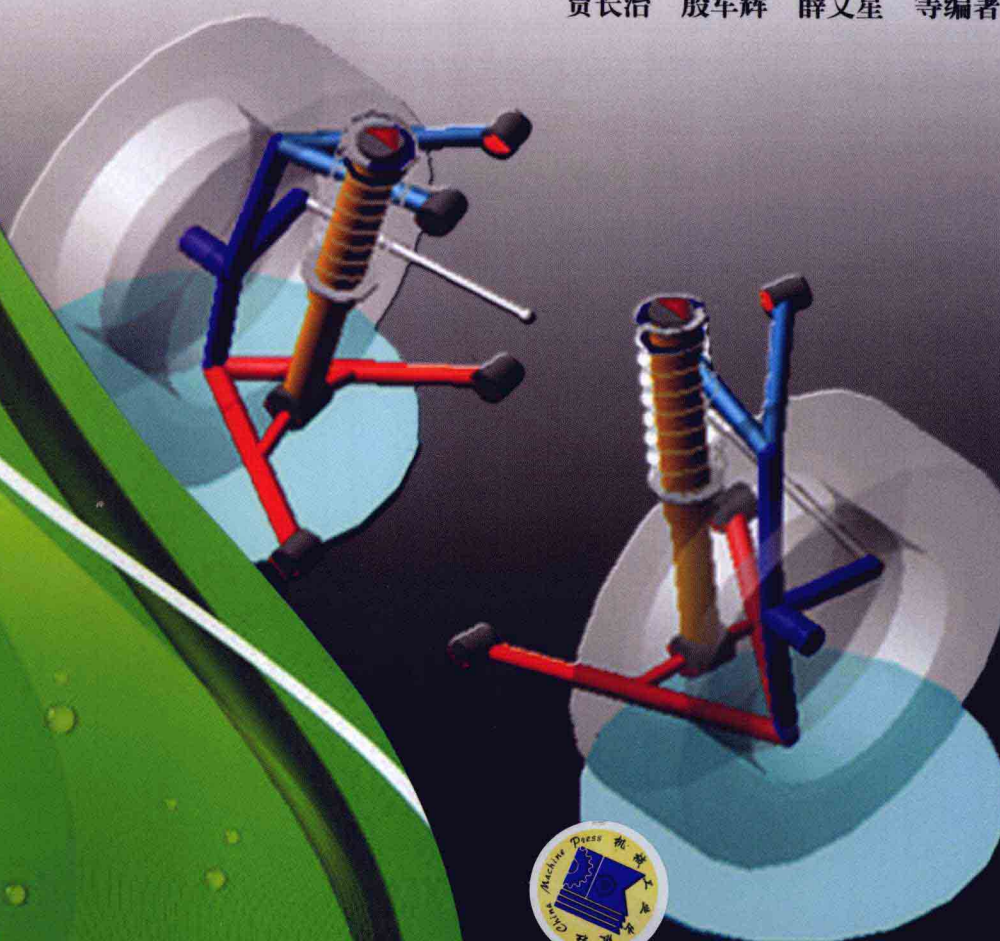
计算机辅助分析(CAE)系列

MD ADAMS

虚拟样机从入门到精通

三维书屋工作室

贾长治 殷军辉 薛文星 等编著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

MD ADAMS

虚拟样机从入门到精通

三维书屋工作室

殷长治 殷军辉 薛文星 等编著



机械工业出版社

机械工业出版社
 地址：北京机械工业出版社
 邮编：100001
 电话：(010) 88331066
 网址：http://www.cmpbook.com

ISBN 978-7-111-23421-1

MD ADAMS 软件

中国版本图书馆

机械工业出版社
 北京机械工业出版社
 2010年1月第1版

184mm×260mm 1/32 787mm×1092mm

0001-3000册

ISBN 978-7-111-23421-1

ISBN 978-7-111-23421-1

定价：29.00元(含CD)

本书以最新版 ADAMS——MD ADAMS 为对象,系统介绍了包括新增功能在内的 MD ADAMS 各种基本功能和一些简单的建模与仿真实例,主要包括绪论、多体系统动力学与 ADAMS、MD ADAMS 基本操作、创建约束、施加载荷、建模与仿真实例、计算结果后处理、参数化建模及优化设计,并在此基础上介绍了机械工程开发中最常用的几个专业模块,即 ADAMS/Vibration 振动模块、ADAMS/Controls 控制模块、ADAMS/Car 车辆模块、ADAMS/Engine 发动机模块。

由于 ADAMS 属于比较难以掌握的高端 CAE 软件,并且其最新版本 MD ADAMS 在界面风格、工具栏设置、操作步骤等方面都比以往版本有很多变化,所以作者专门随书配送了多媒体学习光盘,包括全书实例源文件和所有实例的操作过程动画文件,可以帮助读者更加形象直观地学习本书内容。

图书在版编目(CIP)数据

MD ADAMS 虚拟样机从入门到精通/贾长治等编著. —北京:机械工业出版社, 2010. 1

ISBN 978 - 7 - 111 - 29480 - 1

I. M… II. 贾… III. 机械工程—计算机仿真—应用软件, MD ADAMS IV. TH - 39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 002211 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:曲彩云 责任印制:杨曦

北京蓝海印刷有限公司印刷

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 19.5 印张 · 482 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978 - 7 - 111 - 29480 - 1

: ISBN 978 - 7 - 89451 - 407 - 3 (光盘)

定价: 53.00 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

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

封面防伪标均为盗版

读者服务部:(010)68993821

前言

虚拟样机技术 (Virtual Prototyping Technology) 通过 CAD/CAM/CAE 等技术手段把产品资料集成到一个可视化环境中, 实现产品的仿真、分析。使用 ADAMS 等系统仿真软件, 可以在各种虚拟环境中真实地模拟系统的运动, 不断修改设计缺陷以改进系统, 直至获得最优设计方案, 最终做出比较理想的物理样机。ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) 软件, 是由美国机械动力公司 (Mechanical Dynamics Inc.) (现已并入美国 MSC 公司) 开发的机械系统动态仿真软件, 是目前世界上最具权威、使用范围最广的机械系统动力学分析软件, 广泛应用于航空航天、汽车工程、铁路车辆及装备、工业机械、工程机械等领域。

本书以最新版 ADAMS——MD ADAMS 为对象, 系统介绍了包括新增功能在内的 MD ADAMS 的各种基本功能和一些简单的建模与仿真实例, 主要包括绪论、多体系统动力学与 ADAMS、MD ADAMS 基本操作、创建约束、施加载荷、建模与仿真实例、计算结果后处理、参数化建模及优化设计, 并在此基础上介绍了机械工程开发中最常用的几个专业模块, 即 ADAMS/Vibration 振动模块、ADAMS/Controls 控制模块、ADAMS/Car 车辆模块、ADAMS/Engine 发动机模块。

由于 ADAMS 属于比较难以掌握的高端 CAE 软件, 所以作者专门随书配送了多媒体学习光盘, 包括全书实例源文件和所有实例的操作过程动画文件, 可以帮助读者更形象直观地学习本书内容。

本书主要由军械工程学院的贾长治、殷军辉和薛文星编写, 同时参加本书编写的还有王仕松、崔凯波、郑凯、陈鹿民、胡仁喜、陈树勇、谷德桥、张俊生、阳平华、周冰、董伟、王兵学、王渊峰、郑长松、王敏、李瑞、周广芬、李鹏、陈丽芹、李世强、王佩楷、袁涛等。由于编者水平有限, 时间仓促, 所以本书难免在内容选材和叙述上有欠缺之处。竭诚欢迎广大读者对本书提出批评和建议。可以发电子邮件到编者的电子信箱: win760520@126.com, 以方便作进一步的修改。

作者

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 多体系统动力学基础理论	1
1.1.1 多体系统动力学研究进展	1
1.1.2 多体系统动力学方程的结构形式	2
1.1.3 多体系统动力学方程的数值求解	3
1.2 虚拟样机技术	3
1.3 多学科分析技术	5
1.4 MD ADAMS 相关情况	6
1.4.1 MD ADAMS 简介	6
1.4.2 MD ADAMS 的性能改进	7
第 2 章 ADAMS 建模基础	9
2.1 多刚体系统动力学模型	9
2.2 多柔体系统动力学模型	11
2.2.1 任意点的位置、速度和加速度	11
2.2.2 多体系统动力学方程	12
2.3 ADAMS 动力学建模与求解	12
2.3.1 ADAMS 采用的建模方法	17
2.3.2 ADAMS 的方程求解方案	17
2.3.3 ADAMS 采用的碰撞模型	23
第 3 章 MD ADAMS 基本操作	25
3.1 ADAMS 软件模块	25
3.1.1 ADAMS 软件基本仿真模块	25
3.1.2 ADAMS 软件扩展模块	27
3.1.3 ADAMS 软件接口模块	29
3.1.4 ADAMS 软件专业领域模块	31
3.2 ADAMS/View 命令操作	32
3.2.1 启动 ADAMS/View	32
3.2.2 ADAMS/View 界面	36
3.3 几何建模	39
3.3.1 几何建模基础知识	39
3.3.2 建模前的准备工作	40
3.3.3 几何建模工具	43
3.3.4 创建基本几何体	44
3.3.5 创建实体几何模型	49

目 录

20	3.3.6 创建复杂几何图形	55
20	3.3.7 创建柔性梁	61
80	3.3.8 修改几何体	62
00	3.3.9 修改构件特性	63
第 4 章	创建约束	66
501	4.1 约束类型	66
001	4.2 约束和自由度	66
201	4.3 约束的命名	67
401	4.4 约束工具	67
701	4.5 常用约束	68
701	4.5.1 常用理想约束	68
801	4.5.2 施加螺旋副	70
801	4.5.3 施加齿轮副	70
111	4.5.4 施加耦合副	71
111	4.5.5 修改理想运动副	71
511	4.6 虚约束	73
511	4.7 创建高副	74
011	4.8 定义机构运动	77
411	4.8.1 机构运动类型	77
411	4.8.2 创建运动副运动	77
411	4.8.3 创建点运动	79
211	4.8.4 添加约束的技巧	80
011	4.9 应用实例	81
011	4.9.1 启动 ADAMS/View	81
011	4.9.2 设置建模环境	82
711	4.9.3 几何建模	82
811	4.9.4 添加约束	85
011	4.9.5 运动仿真	86
第 5 章	施加载荷	88
151	5.1 载荷类型及定义方法	88
151	5.1.1 基本载荷类型	88
151	5.1.2 定义载荷值和方向的方法	88
551	5.2 施加载荷	89
551	5.2.1 施加单方向作用力	89
651	5.2.2 施加分量作用力	90
251	5.3 柔性连接	92
251	5.3.1 拉压弹簧阻尼器	92
251	5.3.2 扭转弹簧阻尼器	94

5.3.3	轴套力	95
5.3.4	无质量梁	96
5.3.5	力场	98
5.4	创建接触	99
第 6 章	建模与仿真实例	102
6.1	曲柄连杆机构	102
6.1.1	运行 ADAMS	103
6.1.2	设置建模环境	103
6.1.3	几何建模	104
6.1.4	建立约束	105
6.1.5	设置初始状态	107
6.1.6	进行仿真	108
6.1.7	测量仿真结果	108
6.2	单摆机构	111
6.2.1	运行 ADAMS	111
6.2.2	建立摆臂	112
6.2.3	设置摆臂质量	112
6.2.4	设置摆臂位置	113
6.2.5	建立单摆支点	114
6.2.6	设置初始运动	114
6.2.7	验证模型	114
6.2.8	设置 A 点支撑力的测量	115
6.2.9	运行仿真	116
6.2.10	得到支撑力	116
6.3	凸轮机构	116
6.3.1	运行 ADAMS	117
6.3.2	建立凸轮部件	118
6.3.3	建立转动副	119
6.3.4	建立其他部件	119
6.3.5	建立平动副	121
6.3.6	添加线-线约束	121
6.3.7	添加运动约束	122
6.3.8	验证模型	122
6.3.9	建立测量	122
6.3.10	运行仿真	123
6.4	自由降落的石块	125
6.4.1	启动 ADAMS	125
6.4.2	建立模型	125

171	6.4.3	建立测量	127
172	6.4.4	验证模型	128
173	6.4.5	运行仿真	128
177	6.5	投射石块	131
177	6.5.1	启动 ADAMS	131
177	6.5.2	建立模型	132
179	6.5.3	建立测量	133
181	6.5.4	进行仿真	134
181	6.6	斜面上的滑块	136
182	6.6.1	启动 ADAMS	136
183	6.6.2	建立模型	137
184	6.6.3	添加约束	140
184	6.6.4	建立测量	140
184	6.6.5	验证模型	141
184	6.6.6	运行仿真	141
188	6.6.7	改进模型	142
188	6.7	起重机	144
188	6.7.1	启动 ADAMS	145
189	6.7.2	建立模型	146
189	6.7.3	添加约束	151
190	6.7.4	添加运动	153
191	6.8	弹簧阻尼器	156
191	6.8.1	启动 ADAMS	156
191	6.8.2	建立模型	156
	第 7 章	计算结果后处理 PostProcessor	165
191	7.1	ADAMS/PostProcessor 简介	165
192	7.1.1	ADAMS/PostProcessor 的用途	165
192	7.1.2	启动与退出 ADAMS/PostProcessor	166
192	7.1.3	ADAMS/PostProcessor 窗口介绍	166
192	7.2	ADAMS/PostProcessor 基本操作	167
192	7.2.1	创建任务和添加数据	167
192	7.2.2	工具栏的使用	169
192	7.2.3	窗口模式的设置	171
192	7.2.4	ADAMS/PostProcessor 的页面管理	171
192	7.3	ADAMS/PostProcessor 输出仿真动画	172
192	7.3.1	动画类型	172
192	7.3.2	加载动画	172
192	7.3.3	动画演示	173

7.3.4	时域动画的控制.....	174
7.3.5	频域动画的控制.....	175
7.3.6	记录动画.....	176
7.4	ADAMS/PostProcessor 绘制仿真曲线.....	177
7.4.1	曲线图的类型.....	177
7.4.2	曲线图的建立.....	177
7.4.3	曲线图上的数学计算.....	179
7.5	曲线图的处理.....	181
7.5.1	曲线数据滤波.....	181
7.5.2	快速傅立叶变换.....	182
7.5.3	生成伯德图.....	183
7.6	ADAMS/PostProcessor 的应用实例.....	183
7.6.1	动力学模型的建立和仿真分析.....	184
7.6.2	采用 ADAMS/PostProcessor 生成曲线图.....	184
7.6.3	采用 ADAMS/PostProcessor 操作曲线图.....	186
第 8 章	参数化建模及优化设计.....	188
8.1	ADAMS 参数化建模.....	188
8.2	ADAMS 参数化分析.....	188
8.2.1	设计研究 (Design Study).....	189
8.2.2	试验设计 (Design of Experiments).....	189
8.2.3	优化分析 (Optimization).....	190
8.3	参数化建模应用实例.....	190
8.3.1	门锁机构模型简介.....	190
8.3.2	启动 ADAMS/View 设置操作环境.....	191
8.3.3	建立门锁机构模型.....	194
8.3.4	测试模型.....	199
8.3.5	验证模型.....	202
8.4	优化设计实例分析.....	203
8.4.1	模型参数化.....	203
8.4.2	设计研究.....	204
8.4.3	优化设计与分析.....	206
第 9 章	振动模块/Vibration.....	209
9.1	建立模型.....	211
9.2	模型仿真.....	212
9.3	建立输入通道.....	213
9.4	建立输出通道.....	216
9.5	测试模型.....	217
9.6	验证模型.....	218

目 录

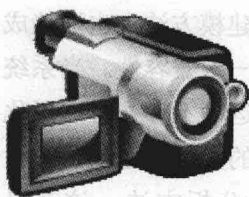
9.6.1	绘制系统模态	218
9.6.2	动画显示固有模态	220
9.6.3	动画显示受迫振动分析结果	222
9.6.4	绘制频率响应	223
9.6.5	绘制功率谱密度	225
9.6.6	绘制模态坐标	226
9.7	精化模型	227
9.7.1	受迫振动分析	227
9.7.2	动画显示固有模态	228
9.7.3	绘制受迫振动频率响应	229
9.8	优化模型	230
9.8.1	1%的总阻尼	230
9.8.2	2%, 3%, 4%, 5%的总阻尼	233
第 10 章	控制模块/Controls	235
10.1	ADAMS/Controls 设计流程	235
10.2	ADAMS/Controls 应用实例	237
10.2.1	导入天线模型	237
10.2.2	加载 ADAMS/Controls 模块	239
10.2.3	运行实验仿真	239
10.2.4	取消驱动	239
10.2.5	核实输入变量	240
10.2.6	核实输出变量	242
10.2.7	导出 ADAMS 模型	243
10.3	ADAMS/Controls 和 MATLAB 集成建模	244
10.3.1	开启 MATLAB	244
10.3.2	创建控制系统模型	245
10.3.3	搭建控制系统模型	245
10.3.4	设置仿真参数	246
10.3.5	运行模型仿真	248
10.3.6	绘制仿真结果	248
第 11 章	车辆模块/Car	250
11.1	创建悬挂系统	250
11.1.1	创建前悬挂子系统	250
11.1.2	创建悬挂和转向系统	253
11.1.3	定义车辆参数仿真	255
11.1.4	绘制仿真曲线	256
11.1.5	分析基本推力	257
11.1.6	定义和施加载荷文件	257

815	11.1.7 绘制仿真曲线.....	259
820	11.1.8 修改悬挂系统与转向系统.....	261
825	11.1.9 分析修改后的系统模型.....	261
830	11.1.10 比较分析结果.....	262
835	11.1.11 删除仿真和绘图.....	262
835	11.2 分析弹性体对悬挂装配的影响.....	263
835	11.2.1 创建悬挂装配.....	263
835	11.2.2 创建弹性体.....	265
835	11.3 包含弹性体的整车装配.....	266
835	11.3.1 创建整车装配.....	266
835	11.3.2 交换 MNF 文件.....	268
835	第 12 章 发动机模块/Engine.....	270
835	12.1 创建配气系统.....	270
835	12.1.1 创建配气子系统.....	270
835	12.1.2 替换气门弹簧.....	272
835	12.1.3 修改板的半径.....	272
835	12.1.4 修改弹簧安装长度.....	273
835	12.1.5 创建气门系统.....	273
835	12.1.6 修改凸轮包角.....	273
835	12.1.7 仿真分析.....	275
835	12.1.8 绘制接触力曲线.....	275
835	12.1.9 绘制阀的运动与凸轮包角关系曲线.....	276
835	12.1.10 替换阀门弹簧.....	277
835	12.1.11 仿真分析.....	277
835	12.1.12 比较分析结果.....	277
835	12.1.13 执行 Rpm Sweep SVT 分析.....	279
835	12.2 创建和修改多质量弹簧.....	281
835	12.2.1 创建弹簧系统.....	281
835	12.2.2 修改安装长度及多质量弹簧.....	282
835	12.2.3 创建请求及仿真分析.....	282
835	12.2.4 输入试验数据.....	283
835	12.2.5 绘制试验结果曲线.....	284
835	12.3 分析已修改的多质量弹簧.....	285
835	12.3.1 修改多质量弹簧及仿真.....	285
835	12.3.2 绘制试验结果曲线.....	286
835	12.3.3 保存模型.....	286
835	12.4 创建液压连接调节装置.....	287
835	12.4.1 创建组件装配.....	287

目 录

12.4.2	修改安装长度和油压	287
12.4.3	修改液压连接调整装置及油特性.....	288
12.4.4	执行稳态加载分析	289
12.4.5	保存子系统	289
附录 A	设计过程函数	291
附录 B	运行过程函数	298

第 1 章 绪论



内容导航

本章详细介绍了多体系统动力学基础理论及其在虚拟样机技术中的应用，并介绍了多学科分析技术，最后详尽地介绍了 ADAMS 软件的最新版本 MD ADAMS 的相关情况。

1.1 多体系统动力学基础理论

多体系统动力学的研究更偏重于多柔体系统动力学，这个领域也正式被称为计算多体系统动力学，它至今仍然是力学研究中最有活力的分支之一，但已经远远地超过一般力学的涵义。

1.1.1 多体系统动力学研究进展

多体系统动力学研究的两个最基本的理论问题是建模方法和数值求解。多体系统动力学的早期研究对象是多刚体系统，这部分内容到 20 世纪 80 年代已发展得比较完善。多刚体系统动力学建模的出发点涉及到了许多分析力学和矢量力学方法。

属于向量力学方法的有：

(1) 牛顿—欧拉方程。它将单个刚体的 N-E 方程推广到多刚体系统，物理概念鲜明、建立方程直接。在分析过程中，若需要增加体的数目，只需续增方程数目，无需重新另建动力学方程组。但它的一个极大的弱点是消除约束力十分困难。以后人们又发现，在采用递推型式时，递推的 Newton-Euler 法运算量最小。因此，Newton-Euler 法一直受到一些作者的注意。

(2) Roberson-Wittenburg 方法。其特点是将图论原理应用于多刚体系统的描述得到适用于不同结构的公式，易处理树形系统。

属于分析力学方法的有：

(1) 拉格朗日方程。它将经典的 Lagrange 方程用于多刚体系统，这个方法使未知变量的个数减小到最低程度且程式化，但计算动能函数及其导数的工作极其繁琐，而引入计算机符号运算则会方便一些。与之类似的还有海默方程、阿贝尔方程等。

(2) 凯恩方程。由于引入了广义速率代替广义坐标描述系统的运动，并将力矢量向

特定的基矢量方向投影以消除理想约束力，从而可以直接对系统列写运动微分方程而不必考虑各刚体间理想约束的情况，兼由牛顿—欧拉方程和拉格朗日方程的优点。

(3) 变分法。此法不需建立系统的运动微分方程，直接应用优化计算方法进行动力学分析。

对考虑部件弹性变形的多柔体系统，自 20 世纪 80 年代后期在建模方法上也渐趋成熟。柔性多体系统动力学的数学模型和多刚体系统、结构动力学有一定兼容性。当系统中的柔性变形可以不计，退化为多刚体系统。当部件间的大范围运动不存在时，退化为结构动力学问题。对柔性多体系统，通常用浮动坐标系描述物体的大范围运动，弹性体相对于浮动坐标系的离散将采用有限单元法与现代模态综合分析方法，这就是 P. W. Likins 最早采用的描述柔性多体系统的混合坐标法。据此再根据力学基本原理进行推导，就可将多刚体系统动力学方程拓展到多柔体系统。

根据各种力学基本原理得到的形式不同的动力学方程，尽管在理论上方程等价，但其数值形态的优劣却不尽相同。

1.1.2 多体系统动力学方程的结构形式

对多刚体系统，自 20 世纪 60 年代以来，从各自研究对象的特征出发，航天与机械两大工程领域分别提出了不同的建模策略，主要区别是对刚体位形的描述。

在航天领域，以系统每个铰的一对邻接刚体为单元，以一个刚体为参考物，另一个刚体相对该刚体的位形由铰的广义坐标（拉格朗日坐标）来描述。这样树系统的位形完全可由所有铰的拉氏坐标阵 q 所确定。其动力学方程形式为拉氏坐标阵的二阶微分方程组，即

$$A\ddot{q} = B \quad (1-1)$$

这种形式的优点是方程个数最少，但方程呈严重非线性， A 、 B 矩阵形式相当复杂，程式化时要包含描述系统拓扑的信息，对非树形系统，需求解约束方程。对于要求出约束反力的系统来说，这种形式反而不理想。在有些文献中，称这种形式为第一类方法（模型）。由于反馈控制变量一般是相对坐标变量，在带控制的多体系统动力学分析中一般采用第一类方法，在传统的火炮与自动武器动力学分析中一般也采用第一类方法。

机械领域是以系统每一个物体为单元，建立固接在刚体上的坐标系，刚体的位形均相对于一个公共参考基进行定义，其位形坐标统一为刚体坐标系基点的笛卡儿坐标与坐标系的姿态坐标，一般情况下为 6 个。由于铰的存在，这些位形坐标不独立，系统动力学方程的一般形式为

$$\begin{cases} A\ddot{q} + \Phi_q^T \lambda = B \\ \Phi(q, t) = 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

式中 Φ 为位形坐标阵 q 的约束方程, Φ_q 为约束方程的雅可比矩阵, λ 为拉氏乘子。

这是个维数相当大的代数—微分混合方程组。但由于此时方程组的系数矩阵呈稀疏状, 可利用稀疏矩阵的特点进行快速数值计算, 提高数值算法的效率。在约束方程以约束库形式存入计算机的情况下, 这种形式便于对复杂系统自动建模, 适用于大型通用软件的编程, Haug 称之为动力学分析的基本方法, 利用该方法可根据要求出任何约束的约束反力。在有些文献中, 也称这种形式为第二类方法(模型)。

将多刚体系统动力学方程拓展到多柔体系统, 方程的结构形式也如同上述两种形式。

1.1.3 多体系统动力学方程的数值求解

由多体力学方程的结构形式可知, 多体力学仿真数值求解的核心通常是对常微分方程初值问题的处理。求解常微分方程

$$\begin{cases} \dot{y} = f(t, y) \\ y(t = t_0) = y(t_0) \end{cases} \quad (1-3)$$

的基本途径有以下 3 种: 1) 化导数为差商的方法, 即用差商来近似代替导数, 从而得到数值解序列。代表性的是各种欧拉方法。2) 数值积分法, 将方程化成积分形式, 利用梯形、龙贝格、高斯等数值积分方法得到解序列。3) 利用泰勒公式的近似求解。典型的方法是各阶龙格—库塔公式。另外为了充分利用有用的信息, 进一步提高计算结果的精度, 还提出了线形多步法来代替单步法的思想。典型的如亚当姆斯(ADAMS)法和哈明(Hamming)法。

由于在方程求解时经常要遇到系统的特征值在数值上相差若干个数量级的情况, 描述这种系统的微分方程, 称为刚性(Stiff)方程。对这种方程的处理必须采用特殊的方法, 现在常用的方法有隐式或半隐式 Kunge—Kutta 法、自动变阶变步长的 Gear 法、隐式或显式 ADAMS 法等, 而且对于线性病态系统, 还可用增广矩阵法和蛙跳算法等。

多柔体系统在数值计算时, 由于慢变大幅变量与快变微幅变量的耦合要导致方程严重的病态, 这个问题已成为多柔体系统动力学发展的一个“瓶颈”, 引起了学者们的普遍关注。Gear 方法被认为是求解刚性微分方程的很有效的办法, 但用到多柔体系统动力学方程上有很大的不便, 即 Gear 方法需计算方程右端项的 Jacobian 矩阵, 这对复杂多柔体系统动力学方程而言, 几乎是难以作到的。

1.2 虚拟样机技术

虚拟样机技术是指在产品设计开发过程中, 将分散的零部件设计和分析技术融合在一起, 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

拟样机技术源于对多体系统动力学的研究。尽管它的核心是机械系统运动学、动力学和控制理论，但没有成熟的三维计算机图形技术和基于图形的用户界面技术，虚拟样机技术也不会成熟。虚拟样机技术在技术与市场两个方面的成熟也与 3C 技术的成熟及大规模推广应用分不开。首先，CAD 中的三维几何造型技术能够使设计师们的精力集中在创造性设计上，把绘图等繁琐的工作交给计算机去做。这样，设计师就有额外的精力关注设计的正确和优化问题。其次，三维造型技术使虚拟样机技术中的机械系统描述问题变得简单。第三，由于 3C 强大的三维几何编辑修改技术，使机械系统设计的快速修改变为可能，在此基础上，基于计算机的设计、试验、设计的反复过程才有时间上的意义。

虚拟样机技术在工程中的应用是通过界面友好、功能强大、性能稳定的商品化虚拟样机软件实现的。国外虚拟样机技术软件的商品化过程早已完成。

虚拟制造技术 (Virtual Manufacturing Technology, VMT) 首先在飞机、汽车等领域获得成功的应用。飞机制造业对虚拟样机的需求最为迫切，因为飞机成本非常高，系统复杂，因此不可能制造多台物理样机，或多台飞机子系统物理样机；此外实地试验耗资巨大，危险系数高，且受到安全法规的严格限制，还必须满足产品安全性、性能和可靠性的标准。

目前，虚拟样机技术除了应用到飞机、汽车制造业外已经广泛地应用到工程机械、航天航空业、国防工业及通用机械制造业等领域。所涉及的产品从庞大的卡车到照相机的快门，上天的火箭到海里轮船的锚链。在各个领域里，针对各种产品，虚拟样机技术都为用户节省了开支和时间，并通过仿真分析、试验设计、改进优化等最终给用户提供了满意的设计方案。

在制造领域虚拟样机技术在下面几个方面作用已显得尤为明显：

(1) 产品的外形设计。以前，汽车外形造型设计多采用泡沫塑料制作外形模型，要通过多次修改，既费工又费时，最终的结果也未必使人满意。采用虚拟技术的外形设计，可随时修改、评测，确定后方案的建模数据可直接用于设计、仿真和加工，甚至用于广告和宣传。

(2) 产品装配仿真。机械产品的配合性和可装配性是设计人员容易出现错误的地方，以往要到产品最后装配时才能发现，导致零件的报废和工期的延误，从而造成巨大的经济损失。采用虚拟装配技术可以在设计阶段就进行验证，确保设计的正确性，避免损失。

(3) 产品的运动和动力学仿真。运用虚拟样机技术在产品设计阶段就能展示出产品的行为、动态的表现以及产品的性能。在产品设计阶段解决运动构件工作时的运动协调关系、运动范围设计，可能的运动干涉检查、产品动力学性能、强度、刚度等问题。

(4) 虚拟样机与产品工作性能评测。首先进行产品的立体建模，然后将这个模型置于虚拟环境中控制、仿真和分析，可以在设计阶段就对设计的方案、结构等进行仿真，解决大多数问题，提高一次试验成功率。采用虚拟现实技术，还可以方便、直观地进行

工作性能检查。

虚拟样机技术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,而计算机可视化技术及动画技术的发展为这项技术提供了友好的用户界面。

1.3 多学科分析技术

多学科(MD)技术为用户提供了能够满足需求的缩小测试与仿真差距的技术,真正实现了多学科仿真,所建立的公共平台大大缩短了传统的单学科间数据传递的时间。

在工程实践中,单个解决方案允许多学科分析,但不能考虑多学科之间的交互作用和耦合。只有对关键学科之间复杂交互作用的准确表述才能保证真实地模拟物理现象。即使借用目前的前后处理器、计算力量和自动运行能力,单个学科专家仍然要通过许多离散的分析步骤来手工模拟仿真学科之间的复杂交互作用。对于某一学科的多步分析,相当耗费时间。另外,通过处理大量的分析数据来确定如何将结果从一个学科传递到另外一个学科,工程师有时手工传递计算信息,或者将运动信息作为静态施加到对系统进行的有限元分析中,往往会带来人为的错误、降低模拟精度,而且这个过程也没有可重复性。

多学科(MD)技术将它们连接在一起,使数据变得动态实时,也就是它们在一个开放的循环环境中。无论是线性、非线性、运动、CFD还是显式非线性动力学,多学科(MD)技术允许多学科集成仿真,而不是仅仅简单地相互之间连接。这意味着相互之间在极其适当的时候提供正确的工程和力学反馈,有别于传统的多物理系统。

在多体运动和有限元分析之间的多学科集成,有助于多学科模拟仿真在企业产品的早期就进行指导设计,有限元分析和CFD之间的集成,也是同样的方式。例如,ADAMS分析汽车在颠簸路面上如何引起噪声和车辆的振动,MD Nastran能够把ADAMS的模型以数学表述的形式和Nastran的NVH模型完全集成到一起,工程师使用一个模型仿真车内的噪声,同时集成到真实的颠簸路况的NVH研究中,而NVH仿真生成的载荷又作为后续的碰撞分析。在另外一个多学科耦合的例子中,汽车工程师在运行ADAMS分析悬架系统的同时,可以把悬架的数据作为有限元分析模型的一部分,通过Nastran评估部件的寿命。

相比将多个独立的仿真工具捆绑在一起分析的方法,多学科(MD)技术使用户可以用一个模型完成仿真。需要说明的是,这并不意味着所有的学科都用完全一样的模型,而是从一个模型中提取出共同的载荷和约束来做系统级仿真。同时,一个方程也不能解决所有的仿真问题,因此需要一系列的方程来表述一个模型才可能给出非常切合实际的方程结果。用户可以在仿真分析的任何层面上进行优化,拓扑和形状优化应用于不同的学科,概率优化用于确定设计的稳定性,工程师可以解算系统方程并在所有的层面上确定制造过程带来的大量不确定因素的影响。