



RECURDYN

中国大陆唯一一本RecurDyn多体动力学分析技术的
权威之作!



RecurDyn

多体系统优化仿真技术

张潜渭 彭斌彬 编著

- 基于RecurDyn的机械系统分析、建模及仿真
- 基于RecurDyn的多体系统联合仿真
- 解读刚柔混合系统的建模及多学科优化分析
- 理论与应用紧密结合，实用性与可操作性并存



清华大学出版社

RecurDyn 多体系统优化仿真技术

焦晓娟 张潜渭 彭斌彬 编著

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分为 10 章,在理论部分介绍了 RecurDyn 的基本算法;在应用部分,系统、全面地介绍了基于 RecurDyn 进行机械系统分析的环境、建模要素及仿真流程,讲解了刚柔混合系统的建模方法,说明了基于 RecurDyn 进行机械-控制系统联合仿真的多种途径及实现流程,阐述了 RecurDyn 的多学科优化分析功能,并以实例简单介绍了 RecurDyn 的二次开发应用。

本书在内容编排上注重实用性和可操作性,考虑各个层次读者的接受程度,适合于广大技术人员和高校学生学习、参考。

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。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

RecurDyn 多体系统优化仿真技术/焦晓娟,张潜渭,彭斌彬编著. —北京:清华大学出版社,2010.12

ISBN 978-7-302-24157-7

I. ①R… II. ①焦… ②张… ③彭… III. ①机械系统-系统仿真-应用软件, RecurDyn IV. ①TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 217251 号

责任编辑:许存权 纪文远

封面设计:刘 超

版式设计:侯哲芬 杨 洋

责任校对:姜 彦 张彩凤

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:29.5 字 数:682 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版 印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:60.00 元

产品编号:039209-01

序

机械产品在国内外市场中竞争力的强弱，在很大程度上取决于产品的质量。产品的设计可赋予产品“先天性优劣”的本质特性，它对产品的质量有着显著的直接影响。力学的发展与应用，已解决了产品设计中的诸多重大实际问题，对推动科学和工程技术的进步正在发挥着重要的作用；计算技术和力学理论的融合，为计算力学服务于产品的设计开辟了一条新的十分有效的途径。

本书介绍了基于递归算法的 RecurDyn 多体系统仿真软件，它是以多体动力学为基础，以提高机械产品技术性能为目标，为产品设计所涉及的机构和结构、液压系统和控制系统的优化，以及机器零部件疲劳失效分析及寿命预估等问题提供一个数字化仿真的平台，可以克服目前产品设计中存在着的抽象的和孤立的对产品设计优劣进行评价的弊端，能够更加方便地对机械产品设计各个阶段进行自我评判与改进。特别是 RecurDyn 所提供的专业化的工具包，可更加方便地在相关行业中进行具体应用。RecurDyn 软件由 A. A. Shabana 博士的弟子所开创，本书作者是想通过对 RecurDyn 软件的介绍，使他们所传承的多体动力学理论与技术得以发扬广大，这自然是一项具有重要意义的工作，它一定会让更多的人从使用中获益。

焦晓娟同志主持编写本书，是基于一种新的、独特的理念和坚定的信念，通过她的勤奋学习和不懈努力的工作，创作出了这一具有创造性的和实际意义的产品，它一定能够让更多的人学会运用这一先进的仿真技术，进而服务于我国的经济发展，我期待本书为我国新时期产品设计的自主创新带来重大的实际应用价值。

最后，我祝愿工程力学今后的发展更加朝气蓬勃，愿力学在工程中的应用更加丰富多彩。

闻邦椿

2010 年 11 月 5 日

前 言

适值中国正处于工业化和信息化“两化”融合的时代，需要大批的具备数字化分析能力的技术人才融入产品的研发进程。作为驱动工业化研发能力发展的 CAE 仿真工具，为产品性能的综合分析、设计优化方案的选择、创新设计的有效评估等更高层次的产品设计行为提供了方便。作为集成的多学科优化仿真工具，RecurDyn 在国内外产业界的应用业已获得了长足的进步。这款享有国际声誉、备受用户信赖的软件，凝聚着全球 7 所大学和 10 个实验室的共同努力，基于最新多体技术的发展，为机-电-液-控耦合领域多体系统的统一建模及分析优化搭建了行之有效的数字化仿真平台。

非常感谢越来越多的中国技术人员和高校学生关注 RecurDyn 的发展。基于越来越多使用者对指导教材的呼声，我们怀着极其喜悦的心情，迎来了第一本关于 RecurDyn 的简体中文教程在中国大陆的面世。感谢曾经为 RecurDyn 广泛应用而努力过的所有 FunctionBay China 技术人员及参与者，感谢 Michael Jang、Inho Song 等 FunctionBay 公司的大力协助，感谢清华大学出版社第六事业部为第一本 RecurDyn 中文简体书的出版而提供的帮助，感谢南京理工大学机械工程学院所做的部分翻译工作，尤其要感谢默默支持该书编写工作的家人及亲友们。

特别要感谢的是东北大学的两院院士闻老师和他的助理任朝晖老师，闻老师并没有看到该书的内容，也不了解该书的作者。闻老师为该书题序是出于对作者的鼓励，对勤奋学习和努力工作的倡导，我们期待闻老师的严谨态度和做人原则指引更多的人努力往前走。

RecurDyn 简体中文书的出版，承载着 FunctionBay China 的希望。我们期待，RecurDyn 以强大的仿真性能和卓越的分析效率更加广泛地服务于工业界和学术界，在中国“两化”融合时代的应用更加深入，在仿真驱动设计中所起到的作用更加积极。渴望探索 RecurDyn 功能的读者可登录 RecurDyn 官方网站 www.recurdyn.cn 申请试用，欢迎广大读者和使用者提出宝贵意见及建议。时间仓促，错误难免，如果读者需要最新信息，请将您的联系方式发至 xiaojuan.jiao@pro-lambda.com 信箱，我们会将更新信息及时通知您。

编 者
2010-11-5

Preface

It is always very delightful and joyful experience to meet a new product or goods. Whenever I encounter a new product, some unknown expectation make my heart beat, like which function do they have? what can I do with this one? etc. I don't know what other people do when they meet a new product, but in my case, my first thing to do is reading a manual or related documents. I don't want to ruin my feeling of some expectation and excitement by abusing the product due to my lack of knowledge. So, I try to fully understand the product before operating through the documents. However, some product doesn't provide the manual or related documents which are written in my mother language. Then, I have to spend much longer time on reading and understanding the content. Sometimes, it makes me tired and finally my exciting feeling for that product has been disappeared even before I started to use it. As a manufacturer, FunctionBay always have some uncomfortable feeling due to a similar reason when we have started to enter the Chinese market. Language is very difficult problem to me even though I am very proud of our product. I really wanted to provide good materials to our Chinese users with Chinese language, but it was not easy work. But timely and finally, I heard that the book is published which is written in Chinese language. As a CEO of headquarter, I was very happy because we can explain the various and nice function of RecurDyn with more efficient and fast method to Chinese users through this book. And also, I can get some relief feeling that this book will decrease my burden about the feeling of sorry toward Chinese users.

So, I really appreciate xiaojuan Jiao and FunctionBay China's valuable work, publishing this book instead of headquarter. I hope that this book can give more deep understanding about RecurDyn and help Chinese users to handle RecurDyn more easily.

Please contact us when you have any request or feedback. FunctionBay headquarter and FunctionBay China will do our best to improve it and provide better materials to Chinese users continuously.

Michael Jang.
CEO of FunctionBay, Inc.

目 录

第 1 章 多体仿真的沿革趋势与

RecurDyn 1

- 1.1 多体动力学仿真时期 1
- 1.2 多体系统的仿真时期 2
- 1.3 多体产品仿真时期 3
- 1.4 小结 3

第 2 章 RecurDyn 基本算法 4

- 2.1 计算多体动力学基本概念 4
- 2.2 广义递归算法 4
 - 2.2.1 相对运动学坐标 5
 - 2.2.2 速度递归算法 7
 - 2.2.3 力递归算法 8
 - 2.2.4 机械系统的图形表示法 9
 - 2.2.5 运动方程和 DAE 的解法 9
 - 2.2.6 广义的递归算法 11
 - 2.2.7 广义递归算法的应用 15
- 2.3 隐式数值积分的解耦算法 16
 - 2.3.1 代数微分方程的隐式数值积分 16
 - 2.3.2 隐式数值积分的解耦算法 17
 - 2.3.3 数值算法 19
- 2.4 采用虚拟构件和铰的柔性多体动力学 20
 - 2.4.1 相邻柔性体的运动学 21
 - 2.4.2 运动方程 25
 - 2.4.3 计算过程与讨论 27
- 2.5 柔性多体动力学的广义递归算法 29
 - 2.5.1 两相邻柔性体的相对坐标运动 30
 - 2.5.2 正向递归算法 34
 - 2.5.3 反向递归算法 36
 - 2.5.4 求解控制方程 37

2.6 大变形问题的相对节点法 39

- 2.6.1 相对变形运动 40
- 2.6.2 平衡方程 42
- 2.6.3 数值算法 45
- 2.6.4 数值算例 45
- 2.7 一种有效的接触搜索算法 47
 - 2.7.1 接触对的运动学表示 47
 - 2.7.2 接触区域划分 48
 - 2.7.3 预搜索 48
 - 2.7.4 后搜索和柔性接触力 49
 - 2.7.5 递归算法的运动学和运动方程 50
 - 2.7.6 数值积分策略 52
- 2.8 闭环多体系统的线性运动方程 52
 - 2.8.1 相对坐标运动学 53
 - 2.8.2 运动方程 55
 - 2.8.3 拉格朗日乘子的消元和运动方程的线性化 55
- 2.9 小结 56

第 3 章 RecurDyn 软件简介 57

- 3.1 RecurDyn 概述 57
- 3.2 RecurDyn 产品线 58
- 3.3 RecurDyn 组成模块 59
- 3.4 RecurDyn 产品应用领域 60
- 3.5 安装 RecurDyn 软件 60
 - 3.5.1 Windows 系统安装 RecurDyn 61
 - 3.5.2 Linux 系统安装 RecurDyn 软件 64
- 3.6 RecurDyn 的文件结构 65
- 3.7 RecurDyn 建模环境介绍 67
 - 3.7.1 启动 RecurDyn/Modeler 67
 - 3.7.2 RecurDyn/Modeler 建模

环境	69	4.8.4 Pre Analysis 预分析	145
3.7.3 单摆动力学分析实例	79	4.8.5 Direct Frequency Response Analysis 直接频率响应 分析	146
3.7.4 RecurDyn 后处理功能介绍	85	4.9 RecurDyn 测量工具	146
3.7.5 RecurDyn 后处理实例	99	4.9.1 RecurDyn/Request	146
3.7.6 RecurDyn 操作技巧	104	4.9.2 RecurDyn/Scope	149
3.8 小结	107	4.9.3 RecurDyn/Measure	151
第 4 章 基于 RecurDyn 的机械系统 分析	108	4.10 RecurDyn/Extract 萃取 中间状态	154
4.1 基于 RecurDyn 仿真分析 的步骤	108	4.11 曲柄滑块机构分析实例	156
4.2 模型方案分析	109	4.11.1 建立部件几何体	157
4.2.1 刚体和柔性体的选择	109	4.11.2 建立约束和驱动	165
4.2.2 子系统的选择	110	4.11.3 提交分析任务	167
4.3 建模环境设置	110	4.11.4 分析结果研究	168
4.3.1 重力场设置	110	4.12 4 质量弹簧系统分析实例	171
4.3.2 工作平面及其他建模设置	111	4.12.1 建立质量块	172
4.4 RecurDyn 的编辑模式	112	4.12.2 建立连接弹簧	173
4.5 刚体部件建模	112	4.12.3 建立质量块和大地之间 的平动副	174
4.5.1 几何体创建	112	4.12.4 进行特征值分析	174
4.5.2 几何形状的修改	115	4.12.5 结果分析	174
4.5.3 部件属性的修改	115	4.13 小结	175
4.5.4 部件质心 Marker 的修改	117	第 5 章 RecurDyn 高级建模技术	176
4.5.5 部件几何体位置调整	117	5.1 接触建模	176
4.6 Joint 约束建模	120	5.1.1 RecurDyn 接触类型	176
4.6.1 约束种类	120	5.1.2 RecurDyn 接触算法	177
4.6.2 创建约束	121	5.1.3 RecurDyn 常用接触类型	180
4.6.3 定义驱动	122	5.1.4 同时创建多个接触	189
4.6.4 定义摩擦	123	5.1.5 曲柄滑块机构实体接触 分析实例	189
4.6.5 约束力显示	128	5.2 RecurDyn 参数化建模	191
4.6.6 约束建模注意事项	129	5.3 弹球接触仿真实例	194
4.7 外力载荷建模	129	5.3.1 建立几何模型	195
4.7.1 RecurDyn 载荷种类	129	5.3.2 建立弹簧力	196
4.7.2 直接外力	130	5.3.3 建立接触	197
4.7.3 特殊力	130	5.3.4 初步仿真	198
4.7.4 RecurDyn 柔性连接力	133	5.3.5 参数化弹簧自由长度	198
4.7.5 力的显示	140	5.3.6 参数化控制仿真分析	199
4.8 RecurDyn 分析类型	141	5.4 RecurDyn 函数表达式	200
4.8.1 动力学/运动学分析	142		
4.8.2 Static 静态分析	143		
4.8.3 Eigenvalue 特征值分析	145		

5.4.1 创建函数	200	第 6 章 刚柔混合系统仿真	239
5.4.2 在函数表达式中引用参数 化点分量	201	6.1 RecurDyn 柔性体建模	239
5.4.3 在函数表达式中使用 变量	201	6.2 RecurDyn/RFlex 概述	240
5.4.4 引用函数	202	6.3 RecurDyn/RFlex 建模	241
5.5 RecurDyn 函数类型	202	6.3.1 RecurDyn 的 RFI 文件	241
5.5.1 数学函数	202	6.3.2 RFlex 建模环境	244
5.5.2 IF 函数	203	6.4 RecurDyn/RFlex 应用实例	253
5.5.3 插值函数	204	6.4.1 基于 Ansys 创建*.rfi 文件	254
5.5.4 变量方程和微分方程	206	6.4.2 基于 RFlex 进行刚柔混合 系统仿真	257
5.5.5 时间函数 Time	207	6.5 RecurDyn/FFlex 功能	260
5.5.6 一般函数	207	6.5.1 FFlex 单元	261
5.5.7 位移函数	210	6.5.2 FFlex 的材料	264
5.5.8 速度函数	212	6.5.3 FFlex 与有限元属性相应 关系	267
5.5.9 加速度函数	213	6.5.4 RecurDyn/FFlex 建模环境	268
5.5.10 力函数	213	6.6 基于 RecurDyn/FFlex 建模	269
5.5.11 应力、应变函数 Stress/ Strain	215	6.6.1 FFlex 的选择模式	271
5.6 RecurDyn 输出请求	216	6.6.2 FFlex 的编辑功能	272
5.6.1 RecurDyn 输出请求类型	216	6.6.3 FFlex 的接触	276
5.6.2 输出请求举例	217	6.6.4 FFlex 的载荷	282
5.6.3 特定力的输出简例	219	6.6.5 FFlex 输出节点位置	283
5.7 RecurDyn 子系统建模技术	220	6.6.6 FFlex 的仿真结果及显示	284
5.7.1 创建子系统	221	6.7 FFlex 的力连接	285
5.7.2 子系统间的操作	221	6.8 RecurDyn/Mesh Interface 网格界面	287
5.7.3 子系统的导出、导入及 编辑	221	6.9 RecurDyn/FFlex 应用实例	287
5.8 基于子系统建模技术的汽车 高位自卸机构实例	222	6.10 RecurDyn/DFRA 直接频率 响应	296
5.8.1 建立举升机构子系统	223	6.11 小结	297
5.8.2 建立液压缸子系统	226	第 7 章 机械-控制系统联合仿真	298
5.8.3 建立举升机构	229	7.1 RecurDyn 机械-控制联合 仿真方法概述	298
5.8.4 建立卸货机构	230	7.2 RecurDyn/Control 功能	299
5.8.5 总装汽车高位自卸机构	232	7.3 基于 RecurDyn/Control 进行 联合仿真	299
5.9 RecurDyn 求解器类型及 并行计算	234	7.3.1 建立 PIN 和 POUT	300
5.10 RecurDyn 批处理仿真	235	7.3.2 建立 M 文件	301
5.11 Linux 求解器	237		
5.12 小结	238		

7.3.3 以 Simulink 为主程序的 联合仿真	301	Design Optimization)	375
7.3.4 以 RecurDyn 为主程序进行 联合仿真	303	9.2.4 RecurDyn 的试验设计方法	376
7.4 RecurDyn/Control 应用实例	304	9.2.5 元模型	377
7.5 RecurDyn/CoLink 功能	309	9.2.6 RecurDyn 的数值优化方法	379
7.5.1 CoLink 模块库	309	9.3 基于 RecurDyn/Professional 进行设计优化	379
7.5.2 伯德工具	313	9.3.1 进行参数化研究的步骤	379
7.6 基于 RecurDyn/CoLink 进行 机械-控制联合仿真	314	9.3.2 设计研究的结果	382
7.6.1 基于 RecurDyn/CoLink 分析流程	314	9.3.3 What-if-Study 假设分析	383
7.6.2 CoLink 系统界面及操作 方式	314	9.4 基于 Professional 进行优化 实例	383
7.6.3 建模要点	315	9.4.1 定义设计变量—弹簧自由 长度	384
7.7 RecurDyn/CoLink 操作实例	315	9.4.2 定义性能指标	384
7.8 RecurDyn/Hydraulic 简介	318	9.4.3 运行优化分析	385
7.8.1 AMESim 接口设置	319	9.5 RecurDyn/AutoDesign 功能 简介	386
7.8.2 RecurDyn/AMESim 联合 仿真步骤	319	9.5.1 RecurDyn/AutoDesign 优化 分析流程	386
7.9 小结	319	9.5.2 定义设计变量	387
第 8 章 RecurDyn 行业应用子系统	320	9.5.3 定义性能指标	388
8.1 带传动仿真实例	325	9.5.4 进行设计研究	389
8.2 链传动仿真实例	335	9.5.5 进行优化分析	391
8.3 齿轮增速机构仿真实例	346	9.5.6 进行鲁棒性优化分析	391
8.4 Track LM 低机动履带系统 建模实例	349	9.6 弹射机构优化分析实例	392
8.5 媒介传送机构仿真实例	362	9.7 机械-控制联合系统优化 实例	400
8.6 发动机建模仿真实例	368	9.7.1 定义设计变量	402
8.7 小结	372	9.7.2 定义分析响应	403
第 9 章 RecurDyn 设计优化仿真	373	9.7.3 运行设计优化	405
9.1 优化分析概述	373	9.7.4 结果比较	408
9.1.1 优化分析技术的发展	373	9.8 鲁棒性优化及 6 σ 优化实例	408
9.1.2 优化三要素	373	9.8.1 定义设计变量	409
9.2 RecurDyn 优化设计功能	374	9.8.2 定义性能指标	410
9.2.1 设计研究 (Design Study)	375	9.8.3 鲁棒性优化	411
9.2.2 设计优化 (Design Optimization)	375	9.8.4 六西格玛设计优化	415
9.2.3 鲁棒性设计优化 (Robust		9.8.5 结果比较	418
		9.9 小结	418
		第 10 章 RecurDyn 二次开发	419
		10.1 RecurDyn 二次开发概述	419

10.2	RecurDyn 用户子程序	419	10.6	RecurDyn/ProcessNet 简介 ...	441
10.2.1	用户子程序的使用	419	10.6.1	RecurDyn/ProcessNet IDE 环境	441
10.2.2	用户子程序简介	419	10.6.2	运行 RecurDyn/ ProcessNet	442
10.2.3	常用辅助子程序	420	10.7	RecurDyn/PressNet 二次 开发实例	443
10.2.4	用户自定义子程序简介	424	10.7.1	开发自动化创建接触 功能	443
10.2.5	在 RecurDyn 模型中 调用用户子程序	425	10.7.2	开发对话框和消息输出	447
10.2.6	Source 文件和 Header 文件	425	10.7.3	开发后处理自动绘制曲线 功能	451
10.3	用户自定义子程序电机 驱动实例	425	10.8	小结	457
10.4	用户自定义子程序轴向力 驱动实例	431			
10.5	用户自定义子程序运动 驱动实例	436			

第 1 章 多体仿真的沿革趋势与 RecurDyn

多体仿真技术的发展进程可以分为 3 个阶段：前期是以现代计算力学为基础的“多体动力学仿真”阶段，近期扩展到与结构、控制和优化结合的“多体系统仿真”阶段，目前正走向结合机-电-控与多物理场的“多体产品仿真”阶段。RecurDyn 诞生于第一阶段的后期，随着第二阶段的发展而快速成长，目前正跟随市场的脚步和技术的导向步入了方兴未艾的第三阶段。

1.1 多体动力学仿真时期

这一时期是多体仿真的萌芽期，从事多体仿真的多是机构动力学学者。20 世纪 70 年代，随着电脑应用的逐渐普及，以美国为主的许多大学的应用力学学者开始以牛顿的运动定律对机械构造组成（如图 1-1 所示，包括构件和连接）建立可数字化的数学模型（Mathematical Models），这就是今天多体仿真的前身。70 年代中期至 90 年代中期是多体动力学的蓬勃发展期，许多重要的数学模型和算法、有效的数值解法，甚至几何模型与数学模型关系的建立都是发生在此期间，其中影响较大的包括密西根大学的以 Euler Angles 为旋转自由度的三维数模，爱荷华大学的 Euler Parameters 旋转自由度、相对自由度和递归算法（Recursive Formulation），伊利诺大学 Dr. Shabana 的模态柔性体算法等。到了 90 年代中期这些技术都已成熟，RecurDyn 的研发团队因此集成了以上的学术成果，并且引入同时期发展成熟的有限元算法作为可承受大变形和接触的柔性体数模，于 90 年代末，在微软的视窗操作系统上发布了第一版的 RecurDyn，这也算是“多体动力学仿真”纪元的一个总成。

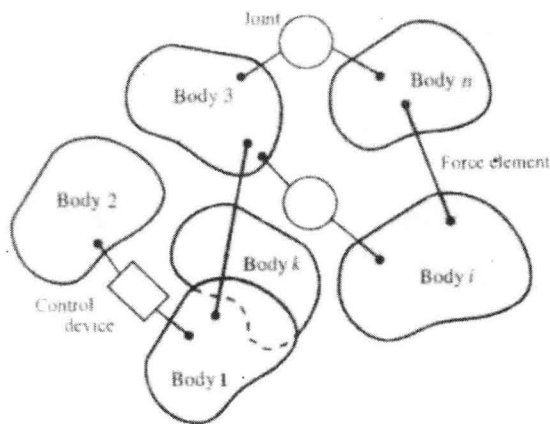


图 1-1 多体系统

1.2 多体系统的仿真时期

这一时期是多体仿真的成长期,市场主导了多体仿真的内涵。在 RecurDyn 第一版发布的 20 世纪 90 年代末,电脑的容量和速度又达到了一个新境界,新的多体仿真技术要求和挑战也随之浮现,由此迎来了“多体系统仿真”的新纪元。

多体系统由“多体动力学”引申而来,一般泛指包括机械构造、结构材料和控制(软、硬)元件的整体系统。多体系统仿真则是以电脑辅助的方法对多体系统进行数字化模拟的技术。

多体系统仿真所面临的挑战大致可分为 5 类:大型模型的运算、滑动和碰撞接触、运动中的柔性体、控制-机构集成,以及系统的设计与优化。在 21 世纪的第一个 10 年中,RecurDyn 的研发总部集成了美、德、日、韩研发团队的技术专长,针对以上 5 个挑战提出了解答。

- 大型模型的运算

除了原有的针对大型多刚体模型所提供的递归算法(Recursive Formulation),RecurDyn 增加了针对大型有限元多柔体(MFBD)模型的 SMP 并行求解,这两种方法对提高大型模型的计算效率起到了重要的作用。

- 滑动和碰撞接触

除了改良原有的面接触算法(Surface Contact Algorithms)以外,RecurDyn 还提供了快速的解析解接触算法(Primitive Contact Algorithms)、稳定性更高的实体接触算法(Solid Contact Algorithms),以及支持柔性体的接触算法,这些算法大幅提高了接触计算的速度、稳定性和精确性。

- 运动中的柔性体

除了原有的以运动中的振动为仿真目的的 RFLEX 模态法柔性体算法,RecurDyn 强化了以运动中的接触、大变形和其他非线性为仿真目的的 FFLEX 有限元柔性体算法。计算精度因此得到了较大的提升。

- 控制-机构集成

除了原有的与 MATLAB/Simulink 联合仿真的功能外,RecurDyn 的研发部门直接将控制系统的建模界面和算法集成到 RecurDyn 中,其求解器已可以实现机械和控制两种算法的耦合求解,两者在这一时期真正融合成了一个单一的数字化系统。

- 系统的设计与优化

为了达到以仿真驱动设计的目的,RecurDyn 针对不同的产业,推出了各种专业建模工具包,包括发动机的各个子系统、工具机、履带、进纸机构、链、带、滑轮、齿轮、轴承、弹簧等,这些工具包的出现大幅缩短了工程师建立(并修改)数字化仿真系统所需的时间。接着 RecurDyn 提供了全面的参数化几何建模和优化功能,帮助工程师以数字方法寻找更优化的设计方案。更重要的是 RecurDyn 推出了 ProcessNet 二次开发工具包,客户可以依据各

自的产品特性和设计需求, 开发出专用的参数化系统和设计优化的开发平台。此时仿真本身已不再是目的, 设计的优化才是多体系统仿真的真正目的。

如图 1-2 所示, 目前已发行的 RecurDyn 版本正是因应这一时期的市场需求和技术挑战而开发的。有关利用 RecurDyn 进行多体系统仿真所需要的理论基础和应用教程将在后文中详细介绍。

INTEGRATED MULTI-DISCIPLINE (IMD) DYNAMICS

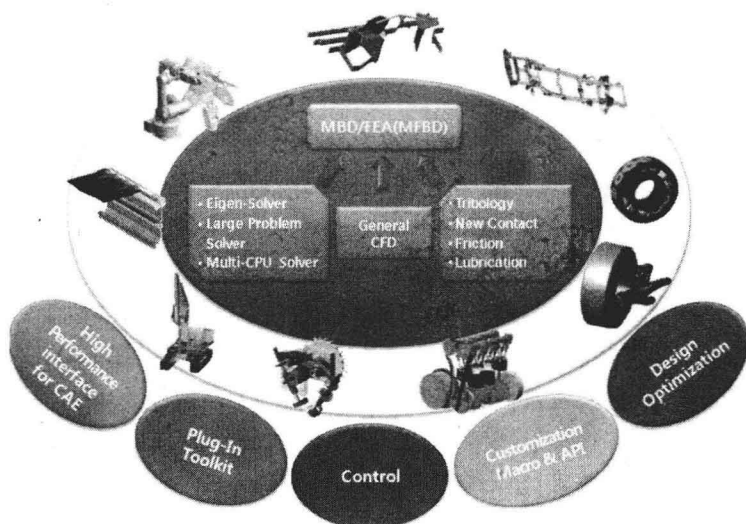


图 1-2 多学科集成的多体分析系统

1.3 多体产品仿真时期

这一时期将是多体仿真的成熟期, 多体仿真将成为“数字化产品开发”的核心技术。多体产品仿真是指在“多体系统仿真”技术的基础上, 加上“多物理场仿真”、“芯片-韧带仿真”、“软-硬件联合仿真”等功能, 以进一步达成数字化产品开发的目的。当前正处于这一新时期的开端, RecurDyn 的研发部门正集中全球的开发资源, 计划将 RecurDyn 开发成一个“多学科集成的优化平台”和一个“机-电-控集成的产品开发平台”, 让我们拭目以待它的精彩表现吧!

1.4 小 结

本章概括了多体动力学的发展历程、多体系统的仿真时期以及多体产品的仿真时期, 并指明 RecurDyn 未来的发展方向。

第 2 章 RecurDyn 基本算法

2.1 计算多体动力学基本概念

计算多体动力学分析涵盖建模和求解两个阶段,其中建模包括从几何模型形成物理模型的物理建模、由物理模型形成数学模型的数学建模两个过程,求解阶段需要根据求解类型(运动学/动力学、静平衡、特征值分析等)选择相应的求解器进行数值运算和求解。

几何模型是指构成多体系统的几何体构件,可在多体分析软件中建立,亦可从外部导入 CAD 模型。

物理模型即力学模型,是指在赋予物理属性(质量、惯量、质心位置等)的几何模型基础上,通过施加运动学约束、驱动约束、力载荷、初始条件计算等装配形成的表达多体系统力学关系的模型。赋予物理属性的构件统称为 Body,亦可称为部件,是机构零件的模型化。部件可分为刚体和柔性体,刚体上质点间距离保持不变,柔性体则需要考虑质点间距离的变化。物理模型是由部件、铰接约束、力、接触关系等要素组成的具有一定构型的系统。约束是指对多体系统中部件之间相对运动所进行的限制,包括运动学约束和驱动约束;铰接即运动副 Joint,是指部件之间的运动学约束;多体系统中的力包括部件间的相互作用内力和多体系统外的物体施加在系统部件上的外力载荷。

数学模型是指物理模型通过数学建模,组装运动方程组中的系数矩阵而形成的用于数值求解的分析模型。包括静力学模型、运动学/动力学模型等,是相应条件下多体系统力学模型的数学描述。静平衡是在与时间无关的力作用下系统的平衡,静平衡分析用于确定系统的静平衡位置;运动学/动力学分析用于确定多体系统中部件的响应,包括位置、速度、加速度及运动过程的约束反力、接触碰撞力。

连体坐标系是指固定在刚体上并随其运动的坐标系,用于确定刚体的运动,刚体上任一质点的位置都可以通过连体坐标系的不变矢量来确定。

广义坐标是指唯一确定多体系统中所有部件位置和方位的一组变量,对于运动系统而言,广义坐标是时变量。

系统自由度是指确定系统的位置所需要的最小的广义坐标数。

2.2 广义递归算法

J. Wittenburg 将约束机械系统在笛卡儿坐标系下的运动方程通过速度变换法转化到相

对坐标系,从而得到更紧凑的方程。但这些方程不能显式地表达相对运动的递归特性,仍然不具备高效的运算效率。Hooker 在进行树形拓扑结构的卫星动力学分析时提出了递归计算方法,其计算成本随构件的数量而线性增加。Featherstone 应用螺旋理论提出了机器人手臂加速度的递归算法。这些方法被 D. S. Bae 和 Edward J. Haug 广泛应用于约束机械系统的变量微积分运算。

约束机械系统可表示为代数微分方程(DAE)。求解 DAE 方程有多种向后差分法(BDF)可供选择,尤其是参数化方法可将 DAE 方程表示为关于系统多个运动约束的常微分方程(ODE),该方法的稳定性、收敛性等数值稳健性已得到证实。Lin, T. C.和 Yae, K. H.在运动方程线性时通过递归方法获得雅克比矩阵,应用状态矢量,直接得到运动方程各项的递归算法。Ming-Gong Lee 和 Edward J. Haug 采用类似的方法进行相对坐标的隐式 BDF 积分,由于逐项推导递归算法,结果方程和运算将变得异常复杂。为了避免这种情况的发生,可采用速度变换法将运动方程转变为紧凑矩阵,仔细分析约束铰空间运动方程的算法结构,将所有能够在同一递归方式下进行的计算操作分类,而后逐类开发广义递归算法并应用于各种计算中。在运动方程中可观测到逐项推导中不易观察到的公共因素,而且矩阵形式的方程更易于调试及理解,其计算过程更有效率。RecurDyn 程序通过开发广义递归算法库,采用 BDF 方法和相对坐标进行动力学分析。

2.2.1 相对运动学坐标

1. 坐标系

刚体在空间中的一般运动,是以刚体中某一点 O 为原点建立刚体的连体坐标系,刚体中的任意点 P 相对于 O 点进行数学描述。如图 2-1 所示,刚体的姿态可表示为:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} = [f \ g \ h] \quad (2-1)$$

其中 f 、 g 和 h 分别是沿 x' 、 y' 、 z' 轴的单位矢量。该 x' - y' - z' 是刚体连体坐标系, X - Y - Z 是惯性参考坐标系。

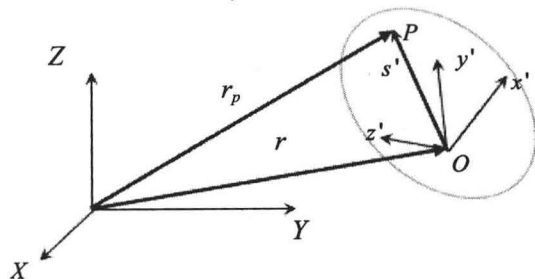


图 2-1 坐标系和刚体

定义 X - Y - Z 坐标系下 O 点的速度和虚位移分别为:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (2-2 \text{ (a)})$$

$$\begin{bmatrix} \delta \mathbf{r} \\ \delta \pi \end{bmatrix} \quad (2-2 \text{ (b)})$$

在 $x'-y'-z'$ 坐标系中其对应量被定义为

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{r}}' \\ \mathbf{w}' \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \dot{\mathbf{r}} \\ \mathbf{A}^T \mathbf{w} \end{bmatrix} \quad (2-3 \text{ (a)})$$

$$\delta \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{r}' \\ \delta \pi' \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{A}^T \delta \mathbf{r} \\ \mathbf{A}^T \delta \pi \end{bmatrix} \quad (2-3 \text{ (b)})$$

2. 相邻构件的相对运动

如图 2-2 所示, 有一对相邻构件, 设构件 $(i-1)$ 是连接构件 (i) 的前一个构件, 且点 O_i 的位置表示为:

$$\mathbf{r}_i = \mathbf{r}_{(i-1)} + \mathbf{s}_{(i-1)i} + \mathbf{d}_{(i-1)i} - \mathbf{s}_{i(i-1)} \quad (2-4)$$

定义 $\mathbf{A}_{(i-1)i} = \mathbf{A}_{(i-1)}^T \mathbf{A}_i$, 通过式 (2-3 (a)) 可得构件 i 在其自身参考坐标系中的角速度:

$$\mathbf{w}'_i = \mathbf{A}_{(i-1)i}^T \mathbf{w}'_{(i-1)} + \mathbf{A}_{(i-1)i}^T \mathbf{H}'_{(i-1)i} \dot{\mathbf{q}}_{(i-1)i} \quad (2-5)$$

其中 $\mathbf{H}'$ 由旋转轴来确定。

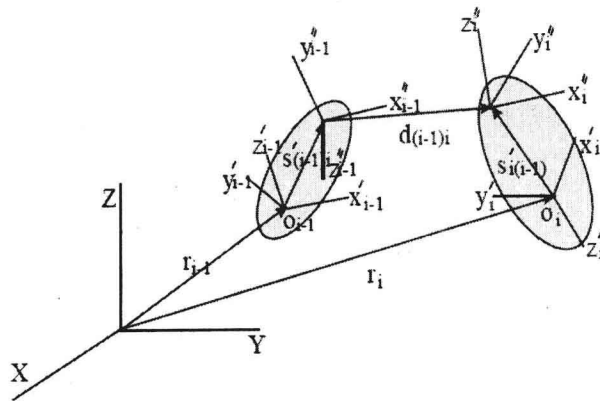


图 2-2 两个相邻构件的运动学关系

对式 (2-4) 求导, 通过式 (2-3 (a)) 可得:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i \dot{\mathbf{r}}'_i &= \mathbf{A}_{(i-1)} \dot{\mathbf{r}}'_{(i-1)} - \mathbf{A}_{(i-1)} \tilde{\mathbf{s}}'_{(i-1)i} \boldsymbol{\omega}'_{(i-1)} \\ &\quad - \mathbf{A}_{(i-1)} \tilde{\mathbf{d}}'_{(i-1)i} \boldsymbol{\omega}'_{(i-1)} + \mathbf{A}_i \tilde{\mathbf{s}}'_{i(i-1)} \boldsymbol{\omega}'_i \\ &\quad + \mathbf{A}_{(i-1)} (\tilde{\mathbf{d}}'_{(i-1)i})_{\mathbf{q}_{(i-1)i}} \dot{\mathbf{q}}_{(i-1)i} \end{aligned} \quad (2-6)$$

其中带波浪符号的变量表示由矢量叉积中矢量元素组成的斜对称矩阵, $\mathbf{q}_{(i-1)i}$ 表示相对坐标矢量。将式 (2-5) 中 $\boldsymbol{\omega}'_i$ 代入, 并在式 (2-6) 两边同乘上 $\mathbf{A}_i^T$,