



软件原厂指定用书，权威指导！



# RecurDyn

## 多体动力学仿真

### 基础应用与提高

刘 义◎主 编

徐 恺 李济顺 韩 翔◎副主编

RecurDyn——

多体动力系统优秀仿真软件  
快速、亲切、可靠

本书——

实用理论、工程案例、专家经验

套配资源下载：[www.myrecurdyn.cn](http://www.myrecurdyn.cn)



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

# RecurDyn 多体动力学仿真 基础应用与提高

刘 义 主编

徐 恺 李济顺 韩 翔 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

## 内 容 简 介

本书以最新版的 RecurDyn V8R1 为平台,系统介绍 RecurDyn 的各项基本功能和机械工程开发的专业模块。通过本书的学习,读者不仅能够掌握 RecurDyn 的基本操作,还能够掌握利用虚拟样机技术解决相关工程领域实际问题的思路,以及建模方法,培养应用多体动力学理论解决实际问题的能力。

全书分为 12 章,重点介绍 RecurDyn 的工作界面、仿真类型、接触建模、设计函数、刚柔耦合动力学系统建模的使用方法,并对相关仿真参数设置的含义,以及方法进行深入详细地介绍。通过针对各内容精心设计的典型案例学习,读者能轻松掌握 RecurDyn 的建模仿真方法,本书提供全部教学案例下载。

本书可作为广大工程技术人员、大中专院校相关专业学生的自学辅导教材,也适用于机械设计、汽车设计、航空航天设计等科研院所研究人员作为科研参考资料。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

RecurDyn 多体动力学仿真基础应用与提高 / 刘义主编. —北京: 电子工业出版社, 2013.10  
ISBN 978-7-121-21450-9

I. ①R… II. ①刘… III. ①多体动力学—计算机仿真—应用软件 IV. ①O313.7-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 213731 号

策划编辑: 许存权

责任编辑: 许存权 特约编辑: 刘海霞 刘丽丽

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 36 字数: 865 千字

印 次: 2013 年 10 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 78.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

服务热线: (010) 88258888。

## 머리말

R&D 에 있어서 CAE 의 중요성은 날이 갈수록 증대되고 있습니다. 갈수록 복잡해져 가는 제품과 짧아지는 개발리드타임을 맞추기 위해서는 실제 프로토타입 대신 가상의 프로토타입을 사용하여 시뮬레이션을 하는 CAE 가 필수적이며, 이러한 트렌드는 점점 강해질 것으로 보입니다. RecurDyn 은 이러한 CAE 분야 중에도 자동차, 항공우주, 건설기계는 물론 전기전자, 메카트로닉스 분야 등에서 시스템의 해석 및 자동화와 관련하여 그 중요성이 더해지고 있는 Multi-Body Dynamics (MBD) 분야의 해석 소프트웨어로 현재 수십여 개국에서 널리 활용되고 있는 선두 소프트웨어입니다.

하지만, RecurDyn 이 개발되었던 1990 년대 말, CAD/CAE 소프트웨어는 모두 미국과 유럽의 거대기업들이 개발한 것들 뿐이었습니다. 때문에 아시아의 실정에 맞춘 제품, 아시아권 사용자에게 맞는 자료를 갖춘 제품은 거의 존재하지 않았습니다. 이러한 환경 속에서, 아시아의 실정에 맞고, 아시아의 고객의 요구에 대응할 수 있는 소프트웨어를 개발하겠다는 신념을 가지고 아시아에서도 세계적으로 인정받을 수 있는 CAE 소프트웨어를 만들어 보겠다는 목표를 가지고 개발된 것이 바로 RecurDyn 입니다.

한편 중국의 경우, 아시아의 그 어느 나라보다도 많은 잠재력을 보유한 나라입니다. 특히 이미 중국의 수많은 기업들이 세계에서 손꼽히는 업체로 성장하였고, 앞으로도 더욱 많은 회사가 그렇게 될 것입니다. 이러한 발전을 지속하기 위해서는 뛰어난 R&D 를 바탕으로 기술력의 확보가 무엇보다도 필수적입니다. 이를 위해 아시아를 대표하는 CAE 소프트웨어인 RecurDyn 이 중국이 아시아는 물론 세계를 대표하는 기술력을 갖추는데 이바지할 수 있으리라 생각합니다.

본 교재의 경우, 중국의 RecurDyn 을 사용하고 있거나, 앞으로 사용하고자 하는 분들이 보기에 쉽게 RecurDyn 을 이해하고 사용법을 익힐 수 있도록 돕기 위해 기획되었습니다. 특히 번역이 된 교재가 아니라, 뛰어난 중국의 저자가 직접 중국어로 집필하였기 때문에, 여타 다른 자료에 비해 중국의 사용자들이 활용하는데 유용하리라 믿습니다. 부디 이 교재를 통해 보다 많은 중국의 사용자들이 RecurDyn 을 잘 활용하여 많은 성과를 이룰 수 있기를 기원합니다. 마지막으로 이 책을 집필하느라 수고해주신 Liu 교수님의 노고에도 깊은 감사드리고 싶습니다.

## 序 (译文)

当今, CAE 技术在各大集团的研发部门中所发挥的作用日益明显。针对产品复杂化和研发周期缩短的现状, 企业选择 CAE 仿真分析代替物理样机试验的趋势不断攀升。RecurDyn 软件的适用领域涵盖汽车、重工、航空航天、消费电子、自动化生产线等所有机械或机电一体化领域。经过十多年的发展, RecurDyn 软件已经被数十个国家和地区的工程师广泛使用, 也已成为 Multi-Body Dynamics (MBD) 仿真领域的主导软件。

RecurDyn 软件开发于 20 世纪 90 年代末。当时, 所有的 CAD/CAE 软件都是由美国和欧洲大型软件公司所开发的, 那个时代几乎不存在任何迎合亚洲实情的软件产品, 也不能提供给亚洲用户适合的使用资料。在这样的环境下, 我们怀着“开发符合亚洲实情、对亚洲客户快速应答”的目标推出了 RecurDyn, 直到今日, 我们都坚信 RecurDyn 可以而且

能力成为被全球公认的优质亚洲 CAE 软件的典范。

中国，亚洲最具潜力的国家！这种潜力表现为很多企业发展为世界级的大型企业后，更多的优秀企业也正在准备加入该行列中。保持可持续发展，优秀的研发部门是必不可少的，研发是确保企业技术革新和发展前提条件。由此，我坚信 RecurDyn 最终可以帮助中国拥有代表亚洲乃至世界级的技术生产力。

本书为正在使用或者准备使用 RecurDyn 的用户量身定做。在本书中，大家可以迅速找到了解和使用 RecurDyn 的方法。特别想说的是，本书并非简单的翻译版本，而是由具备资深专业知识和多年使用 RecurDyn 经验的专家所著，可以说，该书是非常适合中国用户的宝贵资料。最后，很感谢刘老师的努力与勤奋，同时也希望广大的中国使用者在该书的引导下灵活掌握 RecurDyn，并真正解决实际工作上所遇到的问题。

Jin H · Choi

Professor and Head of Mechanical Engineering

KyungHee University, Korea

## ( 文 译 ) 序

当今，CAE 技术在各大集团的研究部门中所发挥的作用日益显著。针对产品开发和研发周期缩短的现状，企业选择 CAE 仿真分析软件进行物理问题的数值模拟已不再少见。RecurDyn 软件的适用范围越来越广，汽车工业、航空航天、消费电子、自动化生产等领域的工程机械设备一体化领域。经过十年的发展，RecurDyn 软件已广泛被几十个国家和地区的工程广泛使用，也已成为 Multi-Body Dynamics (MBD) 仿真领域的主导软件。

RecurDyn 软件开发于 20 世纪 90 年代末。当时，所有的 CAD/CAE 软件都是由美国或欧洲大型软件公司所开发的，那个时候几乎不存在任何迎合亚洲市场的软件产品，也不能提供亚洲用户适合的使用资料。在这样的环境下，我们怀着“开发符合亚洲国情，对亚洲客户快速应答”的目标推出了 RecurDyn。自那至今，我们一直坚信 RecurDyn 可以而且

# 序

---

随着计算机的容量和算速的快速成长，CAE（计算机辅助工程）的力学算法和可视化技术也得以不断精进；这创造了一张温床，让工程理论和应用需求持续地挑战着数字化工程仿真的极限。作为 CAE 的一个主要核心技术，以计算力学为基础的多体动力学自然也不例外。自 1980 年，多体运动和动力分析软件开始普遍应用在机械设计领域中以来，多体系统仿真无论在广度与深度上都拥有着大幅度的提升。在深度上多体算法由粗略走向细致。例如，系统构件的模型由早期的全刚体走向模态（缩减）柔性体、再走向有限元（直接）柔性体，再如，构件间的关系由早期只能模拟单纯的机械连接（Mechanical Joints）走向模拟各种复杂的接触、摩擦与碰撞关系。在广度上多体仿真已不再只是早期的机构（Mechanism）为主的动力学或运动学模拟，现在的多体系统是一个包括机构、电控、液控甚至操作环境的复杂系统。正因为要满足多体系统的多样性、复杂性、精确性的需求，以 RecurDyn 为代表的多体系统仿真软件必须提供比以前功能更全面且难度更高的可视化建模工具和数值算法，伴随而来的是使用的难度相应增高了。因此，如何更好地运用强大的多体系统软件达成数字化仿真和工程分析的目的，就成为系统仿真工程师的一项挑战。

在数字化的多体系统仿真、分析、优化的实施过程中，工程人员常遭遇的较大难点在于，不明白如何将系统中构件的物理特质和构件间的相互状态以参数的方式在虚拟的软件环境中加以表达。要克服这个难点有两个要件：一是仿真工程师对仿真分析的目标对象（产品或系统）具备一定的专业知识；二是仿真工程师对软件中各类参数的物理及数学意义有一定的了解。二者缺一不可。仿真工程师在面临这项难点时，往往舍弃这两样基本功，将困难归纳为软件的不完备。而忘记了软件如同雕刻刀、画笔一样，只是一个工具；工具能否产生效益则要看使用者的“工艺”。同样的工具在不同使用者手中产生的效益可以截然不同。我们期待一本结合理论算法与实务技巧的参考书，可以给 RecurDyn 的使用者提供一个学习“工艺”的机会。

刘义老师是国内较早接触 RecurDyn 软件的多体系统仿真专家之一，与河南科技大学的科研团队以 RecurDyn 为工具，透过产学研合作的方式，曾经多次成功地解决工程难点，帮助企业提升工业技术和产品质量。很高兴刘老师在百忙中抽出时间和精力，联合河南科技大学的徐恺、司东宏、李济顺老师和徐州工程学院的韩翔老师共同著书，将 RecurDyn 的应用技术分享推进。刘老师是个做实事的人，期待读者能透过这本著作，获得许多务实的应用思维与技巧。

张潜渭

# 前言

机械系统动态仿真技术，又称为虚拟样机技术（Virtual Prototyping Technology, VPT），它是一种全新的机械设计方法。VPT 作为一项计算机辅助工程（CAE）技术于 20 世纪 80 年代随着计算机技术的发展而出现，在 20 世纪 90 年代特别是进入 21 世纪以后得到了迅速发展和广泛应用。

利用虚拟样机技术，工程师可以在计算机上方便快捷地建立物理样机的仿真模型，通过对仿真模型进行各种动态性能分析，然后改进物理样机的设计方案，从而达到用数字化形式代替传统物理样机实验的目的。机械系统动态仿真技术涉及多体系统运动学与动力学建模理论及其技术实现，是基于先进的建模技术、多领域仿真技术、信息管理技术、交互式用户界面技术和虚拟现实技术的综合应用技术。

随着计算机技术的日益进步和工程的需要，机械系统的动态分析对象也越来越复杂，工程对仿真技术提出了更高的要求。人们对一个系统进行仿真分析时，不仅仅限于其简单的机械系统的仿真分析，更多的研究对象表现为一个复杂的机—电—液—控制系统。支持多领域物理系统混合建模与仿真成为当今虚拟样机仿真软件的发展方向。韩国 FunctionBay 公司推出的新一代仿真软件 RecurDyn，是一个能够实现机—电—液—控制、优化多学科系统协同仿真的优秀软件。

这是一本介绍新一代多体系统动力学仿真软件 RecurDyn 的图书，目的是引导读者如何能够快速掌握这个优秀的仿真工具。RecurDyn 是由韩国 FunctionBay 公司基于相对坐标系建模和递归求解，充分利用最新的多体动力学理论，开发的一个优秀多学科协同仿真软件。由于其令人震撼的求解速度与稳定性，方便、快捷的建模方法，自诞生至推广到市场以来受到业内持续关注，并且国际、国内客户群日益壮大。尤其是在国内企业、高校等用户稳步扩大的情况下，对 RecurDyn 相关的中文教学指导资料的需求也日益迫切。正是在这种情况下，本书编著者根据教学，以及工程实践的基础上，将推出 RecurDyn 系列图书。

RecurDyn 作为一个功能强大的高级 CAE 机—电—液—控制、优化多学科系统协同仿真软件，想要在一本书中对其进行全面透彻的讲解几乎是不可能的；同时根据学习的特点，也为了避免大而全、多而不精的情况，使读者通过 RecurDyn 系列图书的学习能够对 RecurDyn 的建模特点达到真正掌握的目的，从而满足能够熟练应用 RecurDyn 解决工程实际问题，以及学术研究的需要，编著者将 RecurDyn 的介绍分为基础篇、进阶篇、工程篇三部分进行详细介绍。

本书为 RecurDyn 系列图书的基础篇，本书中详细透彻地介绍了 RecurDyn 的基本操作、建模方法、后处理、刚柔耦合动力学建模等内容。全书所有的案例均以最新版本的 RecurDyn

V8R1 进行讲解，系统介绍了 RecurDyn 平台的各个基本分析模块。所有案例均经过精心设计与筛选，其中不乏真正的工程案例，代表性较强。并且在介绍每个案例的过程中都通过用户图形交互界面进行全程详细讲解，并给出了尽可能最为详细的操作说明过程。

以后将陆续推出 RecurDyn 的进阶篇（工业子系统建模工具的应用、优化设计、二次开发等）、工程篇（工程应用案例），会在不久之后与广大的读者见面。RecurDyn 系列图书从初学者学习的角度出发，系统介绍了 RecurDyn 的功能、建模方法，以及大量的操作技巧，希望 RecurDyn 系列图书的推出能够对刚入门和有使用经验的读者学习 RecurDyn 提供帮助。

本书的出版，特别要感谢 FunctionBay 韩国公司 Jin H·Choi 教授，以及上海博览达 CEO 张涪涪博士、技术经理焦晓娟在本书编写过程中给予的大力协助。尤其是焦晓娟经理在本书后期成稿过程中付出了大量辛勤的劳动，在此表示深深的谢意！同时感谢中国博士后科学基金（编号：2012M521003），以及江苏南方轴承博士后工作站对本书的支持。

全书共 12 章，第 1~2 章由徐恺（河南科技大学）编写，第 3~5 章由司东宏（河南科技大学）编写，第 6~9 章由刘义（河南科技大学）编写，第 10 章由涂鲜萍（河南科技大学）编写，第 11 章由李济顺、薛玉君（河南科技大学）编写、第 12 章由韩翔（徐州工程学院）编写。全书由刘义策划、统稿。本书使用的案例源文件读者可到 [www. myrecurdyn.cn](http://www.myrecurdyn.cn) 自行下载。

由于编者的时间、水平所限，本书难免存在不妥之处，真诚地欢迎广大读者提出批评和建议，以便修正和补充。同时也欢迎各位 CAE 爱好者和编者进行技术方面的交流。作者邮箱：[liuyixnjd@163.com](mailto:liuyixnjd@163.com)。

编著者



# 目 录

第 1 章 多体动力学及虚拟样机技术	1	2.3 RecurDyn 工具主菜单	40
1.1 多体系统动力学研究状况	1	2.3.1 File 文件菜单	40
1.1.1 多刚体系统建模理论	2	2.3.2 Home 本地菜单	41
1.1.2 刚柔耦合多体系统动力学的进展	4	2.3.3 SubEntity 参数化建模菜单	55
1.1.3 模态柔性体建模原理	4	2.3.4 Analysis 分析菜单	66
1.1.4 有限元柔性体建模原理	8	2.3.5 Professional 专业菜单	75
1.2 多体系统动力学建模与求解	14	2.3.6 Flexible 柔性体建模工具菜单	78
1.3 虚拟样机技术	16	2.3.7 Durability 疲劳分析菜单	79
1.4 多学科仿真技术	17	2.3.8 CoLink 控制建模工具菜单	79
1.5 RecurDyn 软件概述	18	2.3.9 AutoDesign 优化设计工具菜单	79
1.5.1 RecurDyn 软件简介	18	2.3.10 Communicator 通信接口工具菜单	80
1.5.2 RecurDynV8R1 基本模块	19	2.3.11 Toolkit 行业子系统建模工具菜单	80
1.6 RecurDynV8R1 的安装启动	23	2.3.12 ProcessNet 二次开发工具菜单	81
1.6.1 RecurDynV8R1 的安装	23	2.4 RecurDyn 的工具栏	81
1.6.2 RecurDyn 文件系统	25	2.4.1 RecurDyn 的视图控制工具	81
1.7 本章小结	26	2.4.2 RecurDyn 模型显示模式 (Rendering Mode) 工具	82
第 2 章 RecurDyn 工作界面及基本功能	27	2.4.3 工作平面设定 (Working Plane Setting) 工具	83
2.1 RecurDyn 仿真的基本步骤	27	2.4.4 RecurDyn 图层控制命令	85
2.1.1 建模和仿真的步骤	27	2.4.5 RecurDyn 其他建模工具	86
2.1.2 多体动力学仿真的基本概念	28	2.4.6 RecurDyn 切割显示工具	87
2.2 启动 RecurDyn	30	2.4.7 RecurDyn 快速访问命令	89
2.2.1 启动 RecurDyn/Moder	30	2.4.8 RecurDyn 右击快捷命令	90
2.2.2 RecurDyn/Moder 的工作界面	32	2.5 本章小结	91
2.2.3 RecurDyn 的工作界面新旧版本的比较	33		

第 3 章 RecurDyn 的几何建模 .....	92	5.1.1 创建外力 .....	165
3.1 RecurDyn 的实体建模 .....	93	5.1.2 创建特殊力 .....	168
3.1.1 RecurDyn 编辑模式 .....	93	5.1.3 柔性连接 .....	174
3.1.2 RecurDyn 的坐标系统 .....	95	5.2 RecurDyn 建模常用技巧 .....	185
3.1.3 RecurDyn 创建基本几何体 .....	96	5.2.1 导航按钮 .....	186
3.1.4 RecurDyn 创建复杂几何体 .....	100	5.2.2 图层的使用 .....	187
3.1.5 Ground 建模 .....	105	5.2.3 常用操作技巧 .....	188
3.1.6 外部几何模型的导入 .....	105	5.3 添加载荷实例 .....	193
3.1.7 几何体的复制 .....	105	5.3.1 定义载荷实例一 .....	193
3.2 体属性的修改 .....	106	5.3.2 定义载荷实例二 .....	203
3.2.1 体几何形状的修改 .....	106	5.4 本章小结 .....	208
3.2.2 体特性的修改 .....	107	第 6 章 仿真分析 .....	209
3.2.3 体几何位置的修改 .....	110	6.1 仿真类型 .....	209
3.3 RecurDyn 建模实例 .....	116	6.1.1 动力学/运动学分析 .....	211
3.3.1 机械手实体建模 .....	116	6.1.2 静力学分析 .....	214
3.3.2 RecurDyn 曲柄摇杆 机构建模 .....	126	6.1.3 Eigenvalue 特征值分析 .....	216
3.3.3 RecurDyn 几何模型的导入 .....	130	6.1.4 Pre Analysis 预分析 .....	218
3.3.4 RecurDyn 几何模型零 部件的隐藏 .....	132	6.1.5 Frequency Response Analysis 频率响应分析 .....	219
3.4 本章小结 .....	134	6.1.6 Scenario 脚本仿真 .....	219
第 4 章 约束及载荷 .....	135	6.1.7 仿真控制 .....	223
4.1 RecurDyn 中运动副的建模 .....	135	6.2 RecurDyn 的测量工具 .....	223
4.1.1 约束种类及简介 .....	136	6.2.1 RecurDyn /Request 的 输出请求 .....	223
4.1.2 创建约束 .....	137	6.2.2 RecurDyn /Scope .....	227
4.1.3 添加驱动 .....	139	6.2.3 RecurDyn /Measure .....	228
4.1.4 定义摩擦 .....	141	6.3 本章小结 .....	231
4.1.5 定义运动副需要注意的 几个问题 .....	148	第 7 章 结果后处理 .....	232
4.2 运动副、驱动及柔性连接创建实例 .....	149	7.1 后处理基本用途 .....	232
4.2.1 运动副的添加实例一 .....	149	7.2 RecurDyn 后处理的启动与退出 .....	233
4.2.2 运动副的添加实例二 .....	154	7.3 RecurDyn 后处理界面 .....	234
4.2.3 关于约束冗余 .....	159	7.3.1 快捷命令菜单 .....	235
4.3 本章小结 .....	163	7.3.2 File 菜单 .....	235
第 5 章 模型施加载荷 .....	164	7.3.3 Home 菜单 .....	237
5.1 基本概念 .....	164	7.3.4 Tool 菜单 .....	248
		7.3.5 RecurDyn 后处理数据库 .....	261

7.4 螺旋推进器仿真及结果后处理	267
7.4.1 螺旋推进器仿真模型建模	267
7.4.2 模型的预分析及其 结果后处理	273
7.4.3 动力学/运动学分析及其 结果后处理	274
7.4.4 特征值分析及结果后处理	288
7.4.5 时域内的特征值分析及 结果后处理	290
7.4.6 脚本分析	291
7.5 本章小结	293

## 第 8 章 RecurDyn 高级建模技术

8.1 RecurDyn 的接触建模	294
8.1.1 RecurDyn 的接触类型	295
8.1.2 RecurDyn 的接触算法	296
8.1.3 RecurDyn 的接触建模方法	298
8.1.4 RecurDyn 的接触信息设置	304
8.2 RecurDyn 的子系统建模技术	314
8.2.1 子系统	314
8.2.2 子系统建模	316
8.2.3 子系统之间的建模操作	317
8.2.4 子系统的导入、导出操作	318
8.2.5 子系统的编辑操作	319
8.3 建模实例	319
8.3.1 接触建模仿真实例 1—— 电泳杆干涉检验仿真	319
8.3.2 接触建模仿真实例 2—— 锁紧机构运动分析	329
8.3.3 接触建模仿真实例 3—— 齿轮传动精度对比分析	334
8.3.4 子系统建模实例——机器人 手臂运动仿真	342
8.4 本章小结	354

## 第 9 章 RecurDyn 函数表达式

9.1 函数表达式创建	355
9.2 函数表达式中变量的使用	356

9.3 函数表达式的调用	357
9.4 函数表达式编辑	357
9.5 RecurDyn 函数表达式的种类	358
9.5.1 基本数学函数 (Fortran Functions)	359
9.5.2 位移函数 (Displacement Functions)	363
9.5.3 速度函数 (Velocity Functions)	368
9.5.4 加速度函数 (Acceleration Functions)	369
9.5.5 力 (力矩) 函数 (Force and Torque Functions)	369
9.5.6 特殊力函数 (Specific Force Functions)	370
9.5.7 传感器函数 (Sensor Functions)	372
9.5.8 IF 函数 (Arithmetic IF Function)	373
9.5.9 插值函数 (Interpolation Functions)	375
9.5.10 变量和微分函数 (Variables and Differential Equations)	377
9.5.11 预定义函数 (Predefined Functions)	382
9.5.12 时间函数 (Time)	390
9.5.13 应力/应变函数 (Stress/ Strain Function)	390
9.6 函数应用实例	392
9.6.1 函数应用实例 1—— 挖掘机动力学仿真	392
9.6.2 函数应用实例 2—— 活塞机构动力学仿真	400
9.7 本章小结	402

## 第 10 章 模态柔性体建模

10.1 柔性多体系统动力学研究状况	403
--------------------	-----

10.2 基于模态柔性体刚柔耦合动力学 仿真过程.....404	11.3.5 FFlex 有限元柔性体载荷...499
10.3 RecurDyn 模态柔性工作界面介绍...405	11.4 FFlex 结果后处理 ..... 501
10.4 生成 RFI 文件 .....405	11.4.1 柔性体结果云图显示 ..... 501
10.4.1 利用 Nastran 生成 RFI 文件·405	11.4.2 FFlex 单元数据的输出 ..... 505
10.4.2 利用 ANSYS 生成 RFI 文件 414	11.5 疲劳分析 ..... 506
10.4.3 编辑模态柔性体 RFlexBody .....427	11.6 本章小结 ..... 507
10.4.4 RFlex 仿真结果等值云图 显示控制 .....431	<b>第 12 章 刚柔耦合仿真实例 ..... 508</b>
10.4.5 RFlexBody 应力振型界面·437	12.1 模态柔性体在刚柔耦合动力学 模型中的使用 ..... 508
10.4.6 RFlexBody 有限元载荷 数据输出 .....439	12.1.1 装载机 RFlex 柔性体 动力学仿真 ..... 508
10.5 本章小结 .....448	12.1.2 焊接机器人 RFlex 柔性体 动力学仿真 ..... 520
<b>第 11 章 有限元柔性体 .....449</b>	12.2 有限元柔性体在刚柔耦合动力学 模型中的使用 ..... 528
11.1 有限元柔性体 FFlex 概述 .....449	12.2.1 阀门凸轮机构的 FFlex 柔性体动力学仿真 ..... 528
11.2 FFlex 支持的单元类型 .....450	12.2.2 行星轮 FFlex 柔性体动力学 仿真 ..... 535
11.3 FFlex 有限元柔性体建模 .....452	12.3 RecurDyn 中两种柔性体仿真实例 541
11.3.1 FFlex 有限元柔性体 建模环境 .....453	12.3.1 发动机曲柄连杆机构 柔性体动力学仿真 ..... 542
11.3.2 FFlex 的网格划分工具 Mesher .....477	12.3.2 摩擦提升机柔性体 动力学仿真 ..... 554
11.3.3 FFlex 的 Mesh Interface .....487	12.4 本章小结 ..... 564
11.3.4 FFlex 有限元柔性体 接触建模 .....488	

# 第 1 章

## 多体动力学及虚拟样机技术

本章主要对多体动力学的基本计算理论，以及虚拟样机技术的应用情况进行了详细介绍。对利用多体动力学的基本计算理论进行多体系统动力学建模的基本术语，以及动力学方程求解方法作了较为详细的说明；最后详细介绍了最新版本的 RecurDyn V8R1 的相关情况。

### 1.1 多体系统动力学研究状况

工程领域对机械系统的研究主要有两大问题。一个问题是涉及系统的结构强度分析。由于计算结构力学的理论与计算方法的研究不断深入，加之有限元 (FEA) 应用软件系统的成功开发和应用，这方面的问题已经基本得到解决；另一个问题是要解决系统的运动学、动力学与控制的性态问题，也就是研究机械系统在载荷作用下各部件的动力学响应。作为大多数的机械系统，系统部件相互连接方式的拓扑与约束形式多种多样，受力的情况除了外力与系统各部件的相互作用外，还可能存在复杂的控制环节，故称为多体系统。与之相适应的多体动力学的研究已经成为工程领域研究的热点和难点。

多体系统动力学的核心问题是建模和求解，其系统研究开始于 20 世纪 60 年代。起始于 20 世纪 70 年代的基于多体系统动力学的机械系统动力学分析与仿真技术，随着计算机技术，以及计算方法不断进步，到了 20 世纪 90 年代，在国内外已经成熟并成功地应用于工业界，成为当代进行机械系统设计不可或缺的有力工具之一。

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。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，特别是在前者已经趋于成熟。

多体动力学是以多体系统动力学、计算方法,以及软件工程相互交叉为主要特点,面向工程实际问题的新学科。计算多体动力学是指利用计算机数值手段来研究复杂机械系统静力学分析、运动学分析、动力学分析,以及控制系统分析的理论和方法。计算多体动力学的产生极大地改变了传统机构动力学分析的面貌,对于原先不能够求解或者求解困难的大型复杂问题,可以借助计算机顺利完成。

在 20 世纪 80 年代初, Haug 等人提出了“计算多体动力学”的概念,认为其主要任务如下:

- 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,再输入少量描述系统特征的数据、由计算机自动建立系统运动学与动力学方程。
- 建立稳定的、有效的数值计算方法,分析弹件变形对静态偏差、隐定性、动态响应的影响,通过仿真由计算机自动产生系统的动力学响应。
- 将仿真结果通过计算机终端以方便直观的形式表达出来。实现有效数据后处理,采用动画显示、图标或者其他方式提供数据后处理。

在多刚体系统建模理论已经成熟的情况下,多体动力学的研究内容重点由多刚体系统转向了侧重多柔性系统。由于多柔性系统能够比刚形体精确描述系统在实际工作状态下的动态特性,多柔性体系统的建模和分析一直是计算多体动力学的重要内容和研究的热点。国内外的学者提出了许多新的概念和方法,其中,应用比较多的有浮动标架法、运动—弹性动力学方法、有限段方法,以及最新提出的绝对节点坐标法等。

### 1.1.1 多刚体系统建模理论

多刚体系统动力学是基于经典力学理论的,多体系统中最简单的情况(自由质点)和一般简单的情况(少数多个刚体),是经典力学的研究内容。多刚体系统动力学就是为多个刚体组成的复杂系统的运动学和动力学分析建立适宜于计算机程序求解的数学模型,并寻求高效、稳定的数值求解方法。由经典力学逐步发展形成了多刚体系统动力学,在发展过程中形成了各具特色的多个流派。

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。这种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。由于计算机数值计算方法的出现,使得面向具体问题的程序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。对于每一个具体的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,但是这个过程长期的重复是让人不可忍受的,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变得迫切需要了。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。如罗伯森·维滕堡(Roberson·Wittenburg)方法、凯恩(Kane)方法、旋量方法和变分方法等。

对于多刚体系统,从 20 世纪 60~80 年代,在航天和机械两个领域形成了两类不同的数学建模方法,分别称为拉格朗日方法和笛卡儿方法;20 世纪 90 年代,在笛卡儿方法的基础上又形成了完全笛卡儿方法。这几种建模方法的主要区别在于对刚体位形描述的不同。

航天领域形成的拉格朗日方法,是一种相对坐标方法,以 Roberson·Wittenburg 方法为代表,是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置由铰的广义坐标(又称为拉格朗日坐标)来描述,广义坐标通常为连接刚体之间的相对转角或位移。这样,开环系统的位置完全可由所有铰的拉格朗日坐标阵  $q$  所确定。其动力学方程的形式为拉格朗日坐标阵的二阶微分方程组,即

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

这种形式首先在解决拓扑为树的航天器问题时推出。其优点是方程个数最少,树系统的坐标数等于系统自由度,而且动力学方程易转化为常微分方程组(ODEs-Ordinary Differential Equations)。但方程呈严重非线性,为使方程具有程式化与通用性,在矩阵  $A$  与  $B$  中常常包含描述系统拓扑的信息,其形式相当复杂,而且在选择广义坐标时需人为干预,不利于计算机自动建模。不过目前对于多体系统动力学的研究比较深入,现在有几种应用软件采用拉格朗日的方法也取得了较好的效果。

对于非树系统,拉格朗日方法要采用切割铰的方法以消除闭环,引入了额外的约束,使得产生的动力学方程为微分代数方程,不能直接采用常微分方程算法去求解,需要专门的求解技术。

机械领域形成的笛卡儿方法是一种绝对坐标方法,即 Chace 和 Haug 提出的方法,以系统中每一个物体为单元,建立固结在刚体上的坐标系,刚体的位置相对于一个公共参考基进行定义,其位置坐标(又称为广义坐标)统一为刚体坐标系基点的笛卡儿坐标与坐标系的方位坐标,方位坐标可以选用欧拉角或欧拉参数。单个物体位置坐标在二维系统中为 3 个,在三维系统中为 6 个(如果采用欧拉参数为 7 个)。对于由  $N$  个刚体组成的系统,位置坐标阵  $q$  中的坐标个数为  $3N$ (二维)、 $6N$  或  $7N$ (三维),由于铰约束的存在,这些位置坐标不独立。系统动力学模型的一般形式可表示为

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

式中,  $\Phi$  为位置坐标阵  $q$  的约束方程,  $\Phi_q$  为约束方程的雅可比矩阵,  $\lambda$  为拉格朗日乘子。

这类数学模型就是微分一代数方程组(DAEs - Differential Algebraic Equations),又称为欧拉-拉格朗日方程组(Euler-Lagrange Equations),其方程个数较多,但系数矩阵呈稀疏状,适用于计算机自动建立统一的模型进行处理。笛卡儿方法对于多刚体系统的处理不区分开环与闭环(即树系统与非树系统),统一处理。目前,国际上最著名的两个动力学分析商业软件 ADAMS 和 DADS 都是采用这种建模方法。

完全笛卡儿坐标方法,由 Garcia 和 Bayo 于 1994 年提出,是另一种形式的绝对坐标方法。这种方法的特点是避免使用一般笛卡儿方法中的欧拉角或欧拉参数,而是利用与刚体固结的若干参考点和参考矢量的笛卡儿坐标描述刚体空间位置与姿态。参考点选择在铰的中心,参考矢量沿铰的转轴或平移轴,通常可由多个刚体共享而使未知变量减少。完全笛

卡儿坐标所形成的动力学方程与一般笛卡儿方法本质相同，只是其雅可比矩阵为坐标线性函数，便于计算。

### 1.1.2 刚柔耦合多体系统动力学的进展

实际工程中，绝对的刚形体是不存在的。一个多体系统的构件在运动过程中，或多或少地会表现其柔性体特征。为了更为真实地模拟机构实际工作状态，在多刚体建模成熟的今天，刚柔耦合多体系统动力学建模成为多体动力学建模研究的重点。

对于刚柔耦合（柔性）多体系统，从计算多体系统动力学理论上来说，刚柔耦合（柔性）多体系统动力学的数学模型能够和多刚体系统与结构动力学存在兼容性，或者说，可以将多刚体系统看作刚柔耦合（柔性）多体系统所有部件柔性特性不明显的特例。

在柔性体的建模方法上，工程界许多学者一直致力于把有限元分析与多体力学的分析统一起来，进行多柔性体动力学建模研究，这也是近年来多体动力学分析的一个研究热点。

模态柔性体是在工程中应用最广的一种柔性体。一般先用有限元程序计算得出部件的模态参数，然后利用包含模态信息的有限元模型代替多体系统中的刚体，该柔体在多体中受力后的响应是用模态叠加法计算的，对于高端多体仿真软件模态柔体方法在其中普遍实现了。模态柔性体的理论基础是固定界面模态综合法，最早由 Hurty 提出，随后由 R.R.Craig 和 M.C.C.Bampton 在 1966 对 Hurty 提出的理论进行改进，所以，此方法又称为 Craig-Bampton 方法，属于动态子结构方法的一种。一般，首先将整个结构划分为若干子结构，并将子结构的界面完全固定。构造由固定界面的分支保留主模态集合全部界面坐标的约束模态集组成的建设分支模态集。对各子结构分析完成以后，对个子结构作模态坐标变换，将物理坐标变换到缩减后的模态坐标下；进行第二次坐标变换，非独立的模态坐标，建立系统运动方程，最后返回物理坐标再现子结构。具体详细推导过程见参考文献。可见，模态柔性体是与有限元模态分析技术紧密结合在一起的。模态柔性体用变形体的模态矢量及相应的模态坐标的线性组合来描述物体的弹性变形，同时可以把相对于变形贡献小的模态忽略，从而可以利用较少的模态自由度比较准确地描述系统构件的动态特性，由于缩减了求解规模，大大节省计算时间，降低了对计算机硬件的要求，因而得到了大量的应用。模态柔性体最大的缺点就是不能够描述大变形柔性体的运动特性，只能够用于分析变形相对较小柔性体的动力学特性。另外，局限性也是很明显的：对接触问题的建模不准确，因为接触是用虚拟的“触点”表述，要提高精度需要静力修正模态；柔体变形后模态模型需要更新，但是需要运行外部有限元程序进行模态分析，这很难实现。

### 1.1.3 模态柔性体建模原理

在构建诸如摩擦提升机这类比较复杂结构的柔性体时，采用有限元方法对研究对象进行离散化，往往会使系统的自由度多达几千、几万阶以上，求解这样大自由度系统的特征问题，在实际过程中会遇到许多困难。动态子结构模态综合法是解决复杂结构动力学分析的有效方法。该方法可以在不改变问题本质的基础上大幅度缩减整体结构的自由度。



基于模态综合法的柔性体（模态柔性体）变形描述基本原理是将柔性体视为有限元模型节点的集合，从而用模态来表示物体弹性的。利用此种方法建立的柔性体对于计算弹性小、变形的系统是相当有效的。模态柔性体建模基本思想是赋予系统中每个柔性体各一个模态集，利用模态展开法，将柔性体中节点的线性局部运动近似为模态振型或模态振型矢量的线性叠加。通过计算每一时刻物体的弹性位移来描述系统中柔性体的变形运动。

模态综合法根据各子结构间连接关系的不同，可以分为自由界面模态综合法、固定界面模态综合法、混合界面模态综合法三种。Craig-Bampton 法是固定界面模态综合法中具有代表性，应用最多的一种方法。

传统的 Craig-Bampton 法是将弹性结构分为  $n$  个子结构，每个子结构用  $\lambda$  ( $\lambda=1,2,\dots,n$ ) 标号，并假定其模态集为

$$\phi^\lambda = \begin{bmatrix} \phi_k^\lambda & \psi_c^\lambda \\ 0_{jk}^\lambda & I_{jc}^\lambda \end{bmatrix} \quad (1-3)$$

$$\phi_k^\lambda = \begin{bmatrix} \phi_{ik}^\lambda \\ 0_{jk}^\lambda \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

式中， $\phi_k^\lambda$  为假定子结构界面坐标固定得到的分支保留模态； $i$  为内部自由度数； $j$  为界面自由度数； $k$  为保留的主模态数； $\psi_c^\lambda$  为子结构对全部界面坐标约束模态； $c$  为子结构附加约束的自由度数， $j=c$ ； $\psi_{ic}^\lambda$  为界面坐标依次产生单位位移引起的内部坐标的静模态； $I_{jc}^\lambda$  为界面坐标依次产生的单位位移。

对各子结构有限元离散化后，求界面固定状态下的特征值，求解方程，即

$$(K^\lambda - p^2 M^\lambda) \phi^\lambda = 0 \quad (1-5)$$

得到正则化的固定界面分支主模态，即

$$(\phi_{ik}^\lambda)^T M^\lambda \phi_{ik}^\lambda = I_{kk} \quad (1-6)$$

$$(\phi_{ik}^\lambda)^T K^\lambda \phi_{ik}^\lambda = \Lambda_{kk} = \text{dia}(p_k^2) \quad (1-7)$$

结构的静力平衡方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} k_{ii} & k_{ij} \\ k_{ji} & k_{jj} \end{bmatrix}^\lambda \begin{bmatrix} \psi_{ic} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^\lambda = \begin{bmatrix} 0_{ic} \\ R_{jc} \end{bmatrix} \quad (1-8)$$

得到

$$\psi_c^\lambda = \begin{bmatrix} \psi_{ic} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^\lambda = \begin{bmatrix} -k_{ii}^{-1} k_{ij} \\ I_{jc} \end{bmatrix}^\lambda \quad (1-9)$$

子结构的模态坐标和物理坐标的变换关系为

$$\begin{cases} \mu^\lambda = \phi^\lambda p^\lambda \\ \begin{bmatrix} \mu_i \\ \mu_j \end{bmatrix}^\lambda = \begin{bmatrix} \phi_{ik} & \psi_{ic} \\ 0_{jk} & I_{jc} \end{bmatrix}^\lambda \begin{bmatrix} p_k \\ p_c \end{bmatrix}^\lambda \end{cases} \quad (1-10)$$