

SIMPACK动力学分析系列教材

SIMPACK

动力学分析基础教程

SIMPACK DONGLIXUE FENXI JICHU JIAOCHENG

缪炳荣 方向华 傅秀通 编著
罗世辉 主审



西南交通大学出版社
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)

TH113/28

2008

SIMPACK 动力学分析系列教材

SIMPACK 动力学分析基础教程

缪炳荣 方向华 傅秀通 编著

罗世辉 主审

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

内 容 简 介

本书重点阐述著名多体动力学分析软件 SIMPACK 在新产品开发中的重要作用,及其动力学分析的基础知识。同时介绍虚拟样机技术中多体系统动力学分析的基本理论,包括 SIMPACK 软件的基本算法,突出 SIMPACK 软件的优势和特点所在。根据作者使用 SIMPACK 软件多年的经验和体会,结合大量实例对 SIMPACK 软件的机械系统动力学分析的建模、分析、优化等基本概念,由浅入深地逐步阐述利用 SIMPACK 进行动力学分析的基本过程和方法。

本书可作为高等院校机械系统动力学分析的课程基础教材,也可作为机电工程类本科、研究生教学参考书,对从事新产品虚拟样机系统建模与仿真的科研与工程技术人员具有参考和实用价值。同时该书也适合需要进一步提高 SIMPACK 应用水平的读者,是掌握 SIMPACK 动力学分析技术的重要入门资料。

图书在版编目(CIP)数据

SIMPACK 动力学分析基础教程 / 缪炳荣, 方向华, 傅秀通
编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2008.3
(SIMPACK 动力学分析系列教材)
ISBN 978-7-81104-879-7

I. S… II. ①缪…②方…③傅… III. 机械系统—动力学
分析—应用软件, SIMPACK—教材 IV. TH113-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 020968 号

SIMPACK 动力学分析系列教材
SIMPACK 动力学分析基础教程
缪炳荣 方向华 傅秀通 编著

*

责任编辑 张 波
封面设计 翼虎书装

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

成都蜀通印务有限责任公司印刷

*

成品尺寸: 185 mm × 260 mm 印张: 10.75

字数: 267 千字 印数: 1—3 000 册

2008 年 3 月第 1 版 2008 年 3 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-879-7

定价: 24.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

20 世纪 90 年代以来,计算机软硬件技术的迅速发展为现代机械结构产品设计和分析技术带来全面的提升。计算机软硬件技术和应用数学、多刚体力学、计算机图形学等的不断融合,更是推动着现代产品结构设计与方法的不断创新和进步。

复杂机械系统可以由多刚体和柔性体(也称为弹性体)组成的系统模型进行有效描述,这些系统和模型简称为“多体系统”。多体系统动力学就是研究由刚体及柔性体所组成的系统经历大范围空间运动时的动力学行为,如机车车辆多体系统的多体动力学建模和仿真过程,就是通过对车体、构架、轮对等刚柔体、约束、力元以及轮轨接触等元素的定义来确定机车车辆各部分组件特性及其连接关系,从而形成一系列的车辆多体系统动力学方程并进行求解其形成的微分方程。

从 20 世纪 60 年代中期开始,多刚体系统动力学在经典力学基础上已经发展成为新的力学分支,国外多刚体系统动力学软件在车辆运动学和动力学等方面的研究和应用已经相当广泛,如 SIMPACK、MSC.ADAMS、DADS 和 NUCARS 等。我国 20 世纪 80 年代后期也已经将多刚体系统动力学应用到机车车辆运动学和动力学响应的研究分析中。通常,机械动力学仿真由分析者建立机械系统各个刚体的位移、速度、加速度与它所受力或者力矩的关系。而多体动力学仿真则将机械系统建成由一系列的刚体和柔性体,通过教学方法描述它们相互之间的各种拓扑关系由程序自动建立完整的动力学系统。

由于 SIMAPCK 多体动力学软件建模与仿真的高精度,特别是极为优秀的动力学迭代算法,它已经被广泛应用于汽车、铁路机车车辆、航空航天飞行器、机器人等复杂产品的机械设计中,近年来应用多体动力学在复杂机械结构的疲劳寿命研究中也得到广泛的应用。

目前,国内利用 SIMPACK 软件进行技术研究和应用的资料严重匮乏。本书针对国内多体动力学分析技术日益增长的需求,结合教学和科研的迫切需要,在深入了解和掌握动力学分析技术应用现状的基础上,以国际上复杂机械系统多体动力学分析的著名高端软件 SIMPACK 为例,从机械系统动力学的建模、分析以及工程应用实例等方面进行了相对全面、细致的阐述。本书对从事机械结构动力学分析和结构动态设计的工程技术人员具有重要参考价值,同时亦可作为机电工程本科、研究生教学参考用书。

最后,对 SIMPACK 公司中国总代理北京奥斯普公司的授权,以及共同合作编著的该公司总经理傅秀通博士、方向华技术总监,对西南交通大学牵引动力国家重点实验室主任张卫华教授、国内铁路领域 SIMPACK 动力学分析资深专家罗世辉教授,以及肖守讷研究员等在多体动力学分析和有限元方面给予的多年技术指导和支持,对所引用相关文献,特别是由于出版要求而无法一一列出的所有作者及其成果表示诚挚感谢,对为这本书出版提供许多帮助的卜继玲博士以及其他一直给予帮助的老师 and 研究生们,在此一并表示衷心感谢。

西南交通大学罗世辉教授对全书内容做了认真细致的审阅，提出许多宝贵的修改建议，在此特别表示衷心的感谢。

因作者水平和经验有限，书中不妥之处，敬请各位读者批评指正。也衷心希望本书能在 SIMPACK 应用领域起到抛砖引玉的作用，和朋友们一起分享对 SIMPACK 应用不断探索的热情。

作者

2008年2月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 背景问题	1
1.2 多体系统动力学	2
1.3 产品开发中的多体动力学仿真	6
1.4 系统动力学的仿真算法	12
1.5 小结和建议	13
第 2 章 多体系统动力学基本理论	14
2.1 理论背景	14
2.2 多体系统动力学最新研究状况	24
2.3 多体系统建模基本概念	27
2.4 SIMPACK 中多体系统运动方程理论	29
2.5 车辆多体动力学建模基本理论	32
2.6 小结和建议	37
第 3 章 SIMPACK 软件基础	38
3.1 SIMPACK 软件介绍	38
3.2 SIMPACK 用户界面	42
3.3 SIMPACK 的前处理	45
3.4 SIMPACK 的后处理	48
3.5 SIMPACK 软件及其特点	53
3.6 SIMPACK 的数据处理	57
3.7 SIMPACK 数据库结构概念	58
3.8 拓扑结构	61
3.9 仿真概念	62
3.10 文件和模型管理	65
3.11 小结和建议	68
第 4 章 单摆模型	69
4.1 单摆模型建立	69
4.2 单摆数据	69
4.3 打开模型	70
4.4 开始前处理器	70
4.5 修改参考框架	71
4.6 放弃变化	72
4.7 修改刚体	72

4.8	修改铰接	73
4.9	定义 G 矢量	75
4.10	修改传感器	75
4.11	存储模型	76
4.12	创建 3D 几何体	76
4.13	体-棱柱-原型的图形显示	78
4.14	操纵视角	79
4.15	在线/离线积分	80
4.16	计算方法	82
4.17	激活积分结果	82
4.18	小结和建议	83
第 5 章	双摆模型	84
5.1	双摆模型建立	84
5.2	从单摆模型到双摆模型	85
5.3	给体增加标志	85
5.4	创建新体和增加标志	86
5.5	修改铰接	87
第 6 章	创建和输入模型的子结构	89
6.1	创建子结构	89
6.2	输入子结构	90
第 7 章	给双摆增加力元	92
7.1	力元参数	92
7.2	增加力元	92
7.3	结果绘图	94
7.4	静态平衡	96
7.5	名义力计算	97
7.6	特征值	98
7.7	振型的动画	99
7.8	施加 BumpStop 力元	99
第 8 章	曲柄滑块机构	101
8.1	从双摆模型到曲柄滑块	101
8.2	定义一个约束 (闭环)	101
8.3	非独立铰 (相关铰) 和独立铰	102
8.4	在线运动学	103
8.5	逆运动学	104
第 9 章	频响分析	107
9.1	模型说明	107

9.2 建模过程	108
9.3 计算结果	112
9.4 小结和建议	113
第 10 章 建立铁路模块的二轴转向架	114
10.1 建模过程	114
10.2 建立轮轨力的箭头模型	121
10.3 实例应用	127
第 11 章 建立摩擦	130
11.1 摩擦单元	130
11.2 创建摩擦模型	130
第 12 章 建立汽车 Mcpherson 悬挂	134
12.1 汽车悬挂建模	134
12.2 小 结	144
第 13 章 控制过程建模	145
13.1 控制元建模	145
13.2 控制过程建模简述	145
13.3 控制单元实例	149
13.4 建立拓扑图	149
13.5 建模过程	150
13.6 数值计算观察结果	159
附 录	162
参考文献	163

第1章 绪 论

本章主要简单介绍一些相关背景知识,包括虚拟样机技术和 SIMPACK 软件的基本特点。特别是根据相关文献资料,尽可能多的对多体动力学领域的相关发展做一个简单的调查和总结。为方便 SIMPACK 软件的学习建立良好的理论基础,更深入的多体系统动力学理论研究可以参考相关文献。

1.1 背景问题

现代机械产品结构设计理念中,动态设计是其重要的内容,涉及范围非常宽泛,主要目的是保证产品具备良好的动态特性,这也是其优异品质的重要标志之一。虚拟样机技术是在计算机辅助技术和面向设计技术 CAX/DFX (Computer Aided X/Design For X 等)基础上迅速发展起来的。动态设计融合了先进的计算机辅助设计、制造和仿真分析技术。通过建立数学模型和物理模型,在三维可视化环境中,可以模拟真实环境下机械系统的运动和动力学性能,并根据仿真分析的结果优化产品的设计与过程,为产品提供了一种全新设计理念。

在产品开发过程的具体设计阶段,一般使用计算机工具辅助设计、辅助分析、辅助制图和其他过程的计划编制,这也经常称为计算机辅助工程,即 CAE (Computer Aided Engineering),其中 I-DEAS、Pro/Engineer、Solidworks、ANSYS 和 ABAQUS 等是其中的一些重要工具。作为计算机辅助技术的重要基础,CAE 已经成为机械系统动态设计方法的主要手段和工具之一。这主要是因为其具备如下的特点:

- 应用数学模型的创建,快速进行计算机辅助分析计算,可以保证产品结构设计的多种并行设计条件下的合理性;
- 与可靠性和优化设计等技术相互结合,确定性能最佳的设计方案。

以机车车辆为例,新产品开发中不仅要求结构具有良好的可靠性 (Reliability)、耐久性 (Durability),结构尽可能轻量化 (Lightweight),还要求机车车辆具有优异的运行性能,以提高产品竞争力。随着市场竞争日趋激烈,产品开发周期极大地缩短,结构轻量化和耐久性设计也越来越受到重视。与传统的结构静强度和常规结构疲劳设计方法相比,考虑随机动载荷作用下的机械结构疲劳寿命预测更能反应复杂机械系统的实际工作状态。国内外结构疲劳设计的研究重点已经开始从传统的静强度和常规疲劳设计方法,逐步转向考虑结构刚、柔耦合多体动力学特性和随机振动特性的现代结构疲劳设计方法。

1.2 多体系统动力学

从 20 世纪 60 年代中期开始, 多体系统 (Multibody System, 简称 MBS) 动力学, 在经典力学基础上已经发展成为新的力学分支。机械系统的动力学仿真通常是分析者自己研究系统各个刚体的位移、速度、加速度与其所受力或者力矩的关系。而多体动力学仿真则将机械系统建成由一系列的刚体和柔性体, 通过数学描述它们之间的各种拓扑关系, 由程序来建立完整的动力学微分方程, 由铰接来定义各刚体间的运动关系。

多体系统研究内容可以分为两类问题: 第一类问题, 可以表示为分析机械系统在力的作用下如何运动, 也称其为正动力学 (Forward Dynamics); 另一类问题, 即机械系统运动所需特定的运动是已知的, 主要求解系统的作用力, 又称为逆动力学 (Inverse Dynamics)。后者在机器人动力学分析领域尤为重要, 这是因为这些领域需要对系统的力进行精确的控制以达到规定的运动状态。在进行多体系统仿真分析时, 既需要对多体系统理论有一定深度的理解, 又需要对复杂机械系统的实际仿真工具和方法进行详细了解。

1.2.1 多体动力学理论简介

显然, 动力学作为力学的重要组成部分, 着重解决机械系统在力的作用下实体的运动问题。正如前面阐述的那样, 动力学也可以分为两种不同的研究内容: 一类为运动学 (Kinematics), 即只考虑系统运动的位置; 另一类为动力学 (Kinetics), 即研究导致系统运动的力的作用状况, 将在第 2 章中详细讨论。

传统上, 动力学的发展应首先归功于伽利略 (Galileo, 1564—1642 年)。伽利略研究如何将科学方法引入到解决实际物理问题的领域中, 如球的自由落体运动和单摆运动等问题。在那个时代由于他对传统理论抱有怀疑的态度而使得他所建立的理论一直没有得到公开承认。比如亚里士多德 (Aristotle, 公元前 384—322 年) 的哲学信仰就是那个时期的主流学术思想之一, 他认为重球比轻球落得快。后来实验证明了伽利略理论的准确性。牛顿 (Newton, 1642—1727 年) 继承和发展了伽利略理论, 给出了运动定律的准确表达式, 并且以三大定律奠定了动力学在力学领域研究的重要地位。由于大量运动方程的建立方法都与牛顿的三大定律相关, 因此牛顿基本定律成了多体系统的重要部分。当形成运动方程时, 迫切需要获得建立运动方程的有效方式, 牛顿第二定律可表示成

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \quad (1.1)$$

其中矢量 $\mathbf{F}$ 是作用在质点上的合力; m 表示质量; $\mathbf{a}$ 是加速度矢量。

实际上一般的机械系统主要属于完整约束系统, 对于完整约束系统的运动主要有三种基本方法可以建立运动微分方程: 牛顿-欧拉 (Newton-Euler) 法、拉格朗日 (Lagrange) 法和凯恩 (Kane) 法。

牛顿-欧拉法主要是考虑作用在所有分析物体上的约束力, 根据作用在每个物体上的力和力矩平衡条件写出系统的运动微分方程。该方法推导过程简单, 缺点是微分方程的数目巨大, 特别是将约束支反力包含在运动微分方程之中。因此要求约束方程联立求解, 增加了微分方程求解的难度, 特别是计算大型复杂的多体系统时更是如此, 计算效率比较低。

拉格朗日法解决了描述受约束系统的位形,以及建立运动微分方程的一系列根本性问题。从实际使用角度看,拉格朗日方程提供了建立任意完整系统运动微分方程普遍的、规范化的方法。最重要的是它以广义坐标表达系统的运动,因而方程数目小,与自由度数目相等,且约束力不出现在微分方程之中,给求解带来了便利。缺点是要引入系统动力学的动能和势能分量,需要分别求解其导数,使得推导过程较为繁琐,对于解决大型复杂多体系统更是困难。

凯恩法采用 d'Alembert 准则消除约束力,与牛顿-欧拉方法相比而言,减少了许多不必要的方程。凯恩法主要是解决自由度很大的多体系统的动力学问题,其特点既适用于多体系统又适用于受约束的、时间不相关的不完整约束系统。凯恩方程是一阶微分方程,便于转化为标准形式,但缺点是引入了“广义速率”的概念,其选择存在一定的技巧,而且求解计算刚体的速度和惯性率工作量也比较大。后面将会进一步介绍这些方法的优缺点。要深入了解这三种方法的优缺点可以参考相关资料,如本书参考文献[1, 2]。

1.2.2 仿真分析软件的发展历程

多体动力学仿真软件的发展主要想解决在卫星、飞机和地面车辆的动力学研究中面临的技术问题。自 20 世纪 50 年代中期至今,国内外已经开发了大量的动力学分析软件。尤其是近 20 年,随着计算机软硬件技术的快速发展,如何有效结合刚、柔性多体动力学理论的最新发展和计算机应用技术成果解决复杂系统的动力学和运动学的分析和综合问题,成为一般力学和机械设计等领域的重要研究发展方向之一,计算多体动力学的相关理论背景可以参考文献[3~8]。

通过运用动力学分析软件,可以快速和自动对各种复杂的机械多体系统进行运动方程的建立和求解。同时这些软件还提供了大量的计算机代码和功能,可以根据数值符号形式产生运动方程,或者提供数值积分和仿真计算。此外,还提供一定的图形数据输入和图形动画能力,包括提供各种 CAD (Computer Aided Design) 软件接口以及相应的数据结果分析功能。

这些多体系统的分析软件基本是根据多体系统给定的初始条件,建立牛顿-欧拉运动方程或拉格朗日运动方程,然后进行数值积分。而且一些著名的商业软件还提供和其他著名 CAD 软件如 Pro/Engineer、I-DEAS 等的接口程序,使得多体系统仿真分析软件具有计算运动过程可视化的优点,便于用户更为直观地理解和观察复杂系统的运动特性变化。对于一些要求高级建模的用户而言,灵活性也很大。但是由于这些软件主要是针对专门应用领域,因此设计工程师要真正地熟练操作起来也会感觉到更加复杂。目前著名动力学分析软件主要有 MSC.ADAMS (具有汽车和铁路模块等)、LMS.DADS (具有汽车模块)、SIMPACK (具有汽车和铁路模块等);应用在机器人领域的主要是 Recurdyn。其他应用在铁路的动力学软件还有 VAMPIRE、NUCARS、UM 等。由于 SIMPACK 的轮轨模块功能强大,在铁路领域取得了占全球同类系统软件销售量第一的业绩。

1960 年,美国通用汽车公司研制了动力学软件 DYNA,主要解决多自由度无约束的机械系统的动力学问题,进行车辆的“质量-弹簧-阻尼”模型分析。作为第一代计算机辅助设计系统的代表,对于解决有约束的机械系统的动力学问题,工作量依然非常巨大,而且没有提供求解静力学和运动学问题的简便形式。其余就是在 M. A. Chace 的矢量代数的分析法基础

上,于1964年由IBM公司研制的运动学分析软件KAM和美国Michigan大学1964年研制的运动学分析软件,并在不断完善的基础上形成DRAM软件。这几种软件由于均不是通用软件,因此在实际工程应用中很难继续推广。

随着多体动力学的诞生和发展,机械系统运动学和动力学软件同时得到了迅速的发展。1973年美国密西根大学的N. Orlando和M. A. Chace等人研制出ADAMS(Automatic Dynamic Analysis of Mechanicla System)软件,能够简单分析二维和三维、开环或闭环机构的运动学、动力学问题,侧重于解决复杂系统的动力学问题。1977年美国Iowa大学在E. J. Haug教授的引导下,研制了DADS(Dynamic Anslysis and Design System)软件,能够顺利解决柔性体、反馈元件的空间机构运动学和动力学问题。随之,人们在机械系统运动学、动力学的分析软件中逐步加入了一些功能模块,使其可以包含柔性体、控制器等特殊元件的机械系统。

德国航天局(German Aerospace Center,简称DLR)早在20世纪70年代,Willi Kort ü m教授领导的团队就开始从事MBS软件的开发,先后使用的MBS软件名有Fadyna(1977年),MEDYNA(MEhrkörper DYNAmik,1984年),以及最终享誉业界的SIMPACK(1990年)。随着计算机硬件和数值积分技术的迅速发展,以及欧洲航空航天事业需求的增长,DLR决定停止开发基于频域求解技术的MEDYNA软件,并致力于基于时域数值积分技术的发展。1985年由DLR开发的相对坐标系递归算法的SIMPACK软件问世,并很快应用到欧洲航空航天工业,掀起了多体动力学领域的一次算法革命。

同时DLR首次在SIMPACK软件中将多刚体动力学和有限元分析技术结合起来,开创了多体系统动力学由多刚体向刚柔混合系统的发展。另外,由于SIMPACK算法技术的优势,成功地将控制系统和多体计算技术结合起来,发展了实时仿真技术,并迅速地应用到航空航天工业,且将软件与优化设计等技术结合起来,使得软件的功能更加完善^[3]。关于多体系统软件的开发的时间历程和软件特征图分别如图1.1和表1.1所示。图表中给出了典型的模型(包括刚柔性或二次插值,采用的形式和公式)、采用的公式类型(绝对或相对坐标,线性或非线性)以及所产生的典型运动方程。

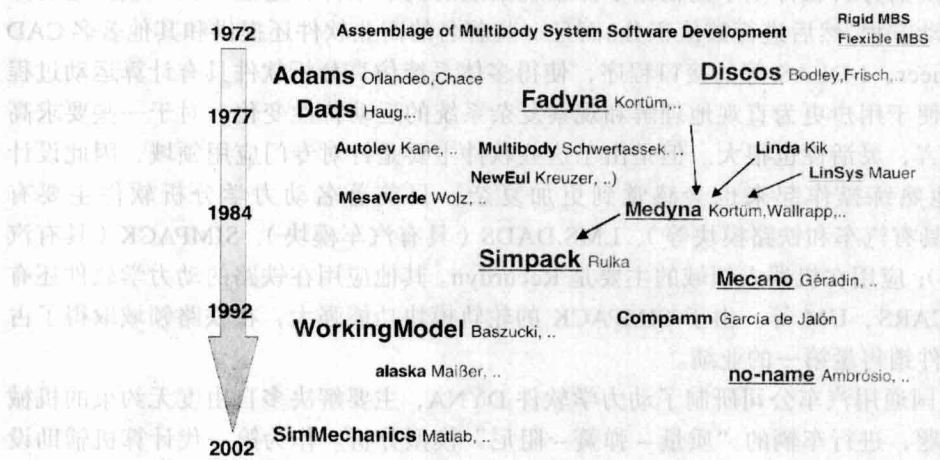


图 1.1 多体系统软件开发图

表 1.1 多体系统软件基本情况图

软件名称	技术开发先驱	体模型	主要采用形式	运动方程
ADAMS	M. Chace	Rigid Flex-Lin-Modal	Absolute, Nonlin	DAE
DADS	E. Haug	Rigid Flex-Lin-Modal	Absolute, Nonlin	DAE/ODE
SIMPACK	W. Kortüm	Rigid Flex-Quadr-Modal	Relative, Nonlin	ODE/DAE
MECANO	G. GÉRadin	Flex-Nonlin-Modal	Absolute, Nonlin	DAE
Workingmodel	D. Baszucki	Rigid	Absolute, Nonlin	DAE/ODE
Simmechanics	NN	Rigid	Absolute, Nonlin	DAE
Recurdyn	Bai&Kim	Rigid Flex-Lin-Modal	Relative, Nonlin	ODE/DAE

注：DAE—微分代数方程；ODE—常微分方程。

1.2.3 多体动力学应用领域

多体系统动力学应用领域涉及机械、液压、控制、有限元等技术，并将它们结合在一起成为多学科交叉的边缘学科和技术，与传统的 CAD 和有限元分析（FEA, Finite Element Analysis）等技术相比，具有涉及专业知识面更宽、覆盖领域更广等特点。国外多刚体系统动力学模型在车辆运动学和动力学等方面的研究和应用已经相当广泛，通用的多体动力学分析软件也已经逐渐在工程设计中得到推广和应用。通过多体动力学仿真分析准确获得大型复杂结构的动态特性，就可以在物理样机制造出来之前，预先了解产品的各种动力学性能，避免结构设计错误，优化产品结构，从而达到缩短开发周期，降低开发成本的目的。使用多体系统仿真进行虚拟产品设计的示意图如图 1.2 所示。

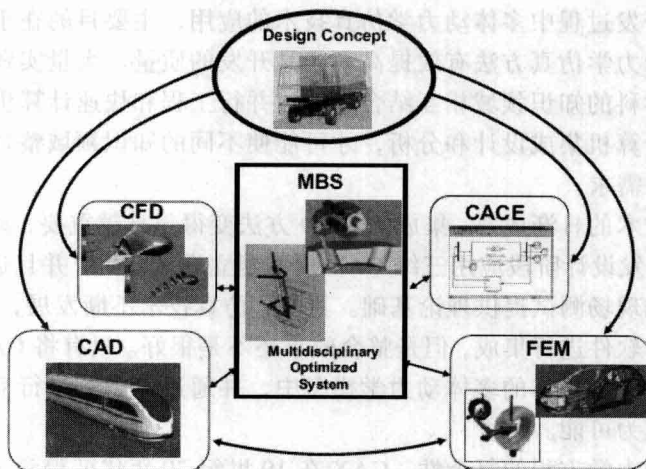


图 1.2 多体系统仿真的集成虚拟设计方法

由于多体动力学软件具备建模与仿真的高精度,已经被广泛应用于汽车、铁路机车车辆、航空航天飞行器、机器人等复杂产品的机械设计中,另外在复杂机械结构的疲劳寿命研究中也得到广泛应用。同时动力学的仿真分析已运用到铁道车辆、液压传动、内燃机、可变阀技术、自动化动力学和车辆自动延迟动力学等延伸领域。但是对于多体动力学分析技术而言,也要求研究人员和应用工程师对诸如汽车、铁道、航空航天、国防军事、船舶工程、机器人、机电工程产品、生物工程、仿生学和各类通用机械等相关领域的分析技术有一定的理论基础,即不仅要求使用者具有一般的多体系统动力学、控制等专业基础知识,同时也要求具有较高的专业工程应用背景。只有具备了这两项才能真正理解和熟练使用这门技术,准确高效地解决工程问题。多体动力学在机械领域的部分应用如图 1.3 所示。

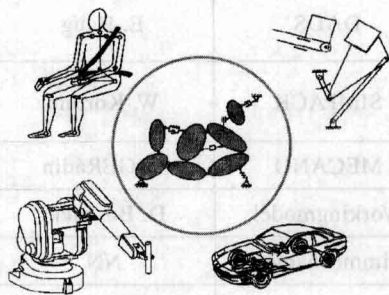


图 1.3 多体动力学在机械工程中的应用

近年来,随着国家基础建设的迅速发展和快速投入,很多高校和科研院所逐步引进和购买了动力学分析的软件。但是真正高效率应用起来的用户仅占总用户数的 10%^[6]。主要原因之一就是许多企业在培养专业分析技术人才时往往没有足够的耐心和长远的规划,以及保持足够的重视,加之软件技术支持人才和相关培训研究资料匮乏,导致了多体动力学分析技术在许多用户手中没有得到充分的利用和挖掘,造成了国家投资的大量浪费。本书正是在此背景下,利用自己在科研工作中搜集整理的大量国内外相关研究文献资料,将零散的知识点较为系统地整理出来,以期在应用过程中得到进一步的研究和提高。

1.3 产品开发中的多体动力学仿真

机械系统产品开发过程中多体动力学仿真技术的应用,主要目的在于通过仿真模型和产品开发中使用多体动力学仿真方法有效提高新产品开发的质量。大量实践表明,只有将计算机辅助技术和其他学科的知识领域相互结合,通过并行工程和快速计算机仿真技术的发展,满足开发过程中的计算机集成设计和分析,才可能使不同的知识领域整合起来,更好地满足整体产品开发工作的需求。

随着建模仿真技术的日渐成熟,集成的 CAD 方法变得越来越重要,其工业需求也变得越来越重要。如在产品开发设计阶段应用三维 CAD 模型建立虚拟样机,并且进行计算机仿真,为创建实际物理样机和现场测试提供理论基础。目前,仿真技术不断发展,CAD 系统虽然已经逐步与多体系统仿真软件进行集成,但是整合效果还不是很好。只有将 CAD 模型应用于结构的有限元模型和机械系统整体的多体动力学模型中,并通过 MBS 进行动力学特性的准确仿真,综合分析才会成为可能。

由于机械系统动力学方程的复杂性,CAX 在 19 世纪 70 年代就得到了大力发展,从相关文献中可以获得动力学方程形式的理论背景。为了对机械系统的动力学性能进行仿真分析,

至今已研制了许多分析工具。通过运用计算机仿真技术可以自动对各种类型的机械系统进行动力学方程的建立和求解,比如侧重于数值或符号表示的运动方程的形成,或者是提供有效的数值积分法和仿真法。此外,一些典型的软件系统还提供了动力学仿真结果的图形数据输出、动画、CAD 系统的接口和信号数据分析等功能。

著名的多体动力学分析软件 MSC.ADAMS、LMS.DADS 和 SIMPACK 等,一般是先建立牛顿-欧拉运动方程和拉格朗日运动方程,然后在给定初值条件下进行数值积分。其他软件有 Pro/MECHANICA 和 Working Model,而 Working Model 的建模环境更加直观。以上系统具有计算运动过程可视化这一优点。而这与时间历程相比更便于理解。这些工具具有高稳定性的特点,能够满足用户高级建模或方程直接控制的要求。然而,设计工程师操作起来复杂度较高,因为这些软件主要是针对专业领域的。产品开发中的并行工程系统的示意图如图 1.4 所示。

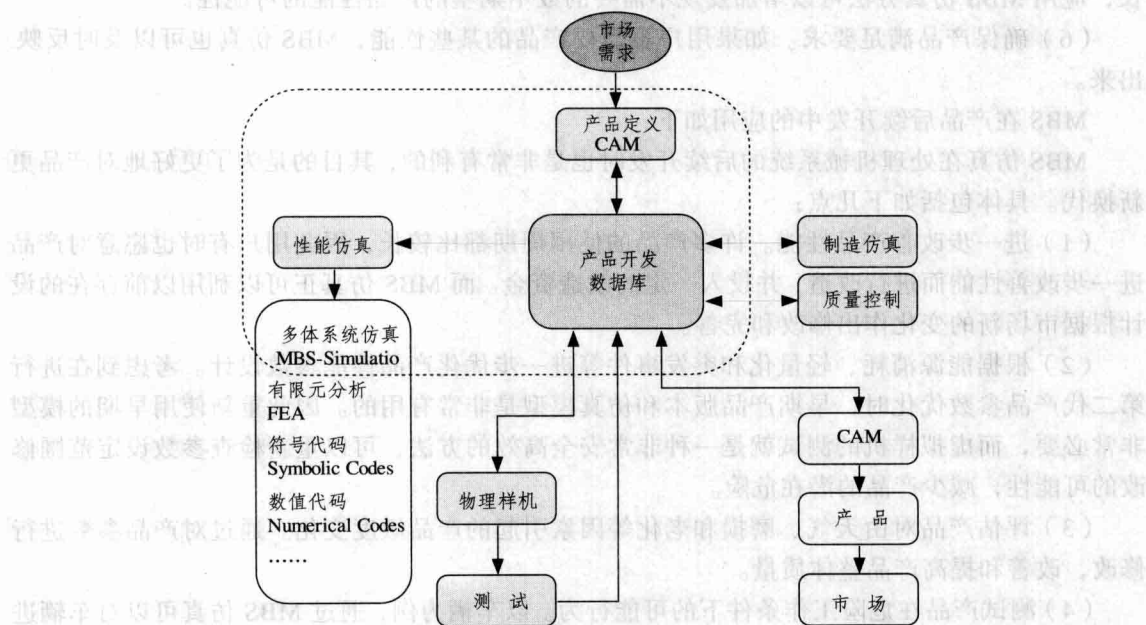


图 1.4 产品开发过程并行工程系统中多体系统仿真的应用

传统意义上,具有专门分析部门的大型机械制造企业才会在其产品开发过程中注重动力学的仿真分析。这些仿真分析可以用来验证产品是否具有很好的性能。由于计算机技术的快速发展以及动力学仿真和建模技术日益成熟和普及,大量的制造企业也十分渴望将其作为一种提高产品竞争力的工具运用到新产品开发中去。不管是整个开发过程还是其不同的设计阶段,产品开发始终是一种反复的设计过程。在开发产品的不同阶段,如考虑新的机械系统、原始设计或者对已有产品设计的修改、后续设计时,MBS 仿真所起的作用是不同的^[10]。但是有一点可以肯定,那就是利用 MBS 仿真技术可以极大地提高产品的设计质量并缩短产品开发周期,甚至可以降低物理样机生产和测试中的昂贵费用。

在进行机械系统的原始开发时,执行 MBS 仿真有以下优越性:

(1) 在产品开发过程中能做到有据可循。在开发早期进行分析可以提出基本设计概念,

避免大规模的原型设计改动。如果可能,早期类似的仿真模型还可以在后续开发中重复使用。

(2) 在短时间内给设计者充分的想象可能:

- 利用系统的数字样机和模型,使得模型修改变得更加容易。
- 减少物理原型的错误改变,节省工作时间和资源耗费。
- 选择更多、做出更好决定的新的设计概念,得到良好的产品解决方案。
- 参数化模型可作设计研究之用,仿真过程也能自动执行直到达到理想的目标值。

(3) 区分不同设计方法。可以清晰地定义设计、假定和评估准则,更能突出产品的设计创新性。

(4) 理解产品动态行为,以及生产前不同因素是如何对产品产生影响的。如果准备制造产品原型,并且经过与其物理条件相一致的 MBS 仿真分析,则可以得到更为充分的产品信息。

(5) 发现不期望的产品特性。由于原型物理样机试验费用越来越高,同时试验周期也很长,应用 MBS 仿真方法可以增加发现不需要的或不期望的产品性能的可能性。

(6) 确保产品满足要求。如果用户不需要产品的某些性能, MBS 仿真也可以及时反映出来。

MBS 在产品后续开发中的应用如下:

MBS 仿真在处理机械系统的后续开发时也是非常有利的,其目的是为了更好地对产品更新换代。具体包括如下几点:

(1) 进一步改善产品性能。许多产品的使用周期都比较长,因此用户有时也愿意对产品进一步改善性能而进行改造,并投入一定的改造资金。而 MBS 仿真正可以利用以前存在的设计根据市场新的变化作出修改和完善。

(2) 根据能源消耗、轻量化和突发事件等进一步优化产品性能参数设计。考虑到在进行第二代产品参数优化时,早期产品版本和仿真模型是非常有用的。因此重新使用早期的模型非常必要,而虚拟样机的测试就是一种非常安全高效的方法,可以重新检查参数设定范围修改的可能性,减少产品的潜在危险。

(3) 评估产品对由天气、磨损和老化等因素引起的产品敏度变化。通过对产品参数进行修改,改善和提高产品整体质量。

(4) 测试产品在危险工作条件下的可能行为。以车辆为例,通过 MBS 仿真可以对车辆进行风险预测,包括结构失效、人员受伤、材料破坏、交通延迟等后果,避免设计方案可能导致的昂贵费用。为了对产品性能的先进性作出合理的判断,应该运用仿真方法,建立仿真模型,输入实际的物理参数,提前预测和评估产品的性能。

(5) 理解控制条件作用下影响产品性能的各种因素。在实际整车试验中,许多参数是可以同时变化的,例如风载、温度、空气湿度、车辆状况和基础设施等。通过改进模型和研究控制条件中不同参数变化的影响,可以合理地将资源调配到最有利位置。

通常把握新产品开发的性能是非常复杂的,包括非线性特征和多自由度,要得到运动方程分析解可能性很小,通常需要使用数值试验对已开发模型的运动进行多途径的计算。通常将 CAD 手段与动力学系统的定义相结合比较合适, CAD 手段能较容易地定义几何结构、计算质量、惯性矩、节点和载荷位置等。三维 CAD 模型也适用于研究空气动力学特性,设计可视化与动力学性能的展现。多体系统的动力学仿真方法可以由以下几个主要步骤组成:

- 问题形成;

- 理想模型的定义;
- 计算机模型的开发;
- 系统方程的形成;
- 方程求解;
- 仿真后处理;
- 评价和结论。

1.3.1 问题形成

这一步主要是进行边界设置和解决目标问题。在仿真程序中包不包括物理作用的定义是需要预先确定的。没有合理定义前提条件,是很难评价结果的,因为缺少与结果相关的东西。关于产品功能性能问题的定义,应该包括使用过程中形成的原始问题的定义,例如,显示质量函数或者其他理论和方法。重要的是确定目标数量,避免误解,比如目标是力、力矩或加速度水平。

1.3.2 理想模型的定义

在理解系统组成及相互关系后,就可以建立物理模型。模型要求足够简单,且能够描述需要解决的问题。包括的步骤如下:收集相关系统数据、设置模型参数和选择算法。系统相关数据包括相互关联的部件。假如要研究物理系统,该系统需操作起来相当轻松,否则确定部件关系会是非常繁琐的工作。通常,做决定时将问题的形成牢记于心是很重要的,比如其他选择中的参数确定。模型参数一般包括质量、旋转中心、部件性能,比如阻尼、刚度还有存在的系统力。试验的用途在于能够确定系统参数。

算法的选择是基于对获得的信息建立的第一次理解,然后决定可能采用的解决方法。可以在手工计算、用计算机处理方程的产生方法、用实体建模软件建立三维计算机模型的开发方法三者中选择其一进行多体系统分析。在比较分析了初始问题和要求的结果精确水平后可以确定最终的解决方法。

1.3.3 计算机模型的创建

根据选择的求解方法和目的不同,创建的计算机模型也各不相同。通常更精确的模型采用更不稳定的算法,但是类似物理设计的模型的参数数据更容易确定。当创建更复杂的模型,如三维模型时,通常适合将动力学系统的定义与 CAD 手段相结合, CAD 手段可以容易地进行定义几何结构、计算质量、惯性矩、节点和载荷位置等。三维 CAD 模型还适合于过程中后阶段设计的修改和可视化。提高建模质量的有效方法是使用宏和自然的命令顺序使模型自动生成。多体系统的建模方法可以是基于有限元的,比如:

- (1) 重力;
- (2) 刚体和质点;
- (3) 轴承、节点和支撑;