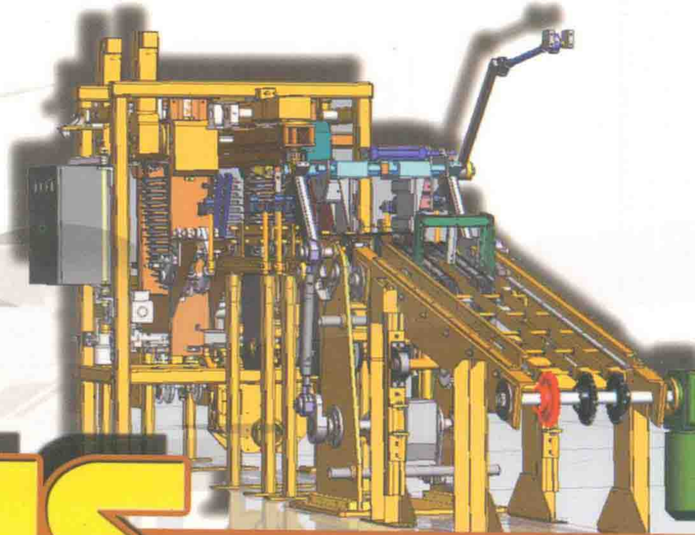
计算机辅助分析（CAE）系列
JISUANJIFUZHUFENXI(CAE)XILIE

学习交流QQ群：379090620
学习咨询网站：www.sjzswsw.com



ADAMS 2014 虚拟样机从入门到精通

三维书屋工作室
宫鹏涵 胡仁喜 康士廷 等编著

全面完整的知识体系　循序渐进的分析讲解
深入浅出的理论阐述　实用典型的实例引导

随书配送 DVD 光盘。包含全书所有实例的源文件素材，并制作了全部实例的制作过程动画 AVI 文件和效果图演示。可以帮助读者更加形象直观、轻松自在地学习本书。

机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

ADAMS 2014
虚拟样机从入门到精通

三维书屋工作室
宫鹏涵　胡仁喜　康士廷　等编著

机 械 工 业 出 版 社

本书以最新版的MSC ADAMS 2014为对象，系统介绍了包括新增功能在内的ADAMS的基本功能和一些简单的建模与仿真实例，主要包括多体系统动力学与ADAMS基本操作、创建约束、施加载荷、建模与仿真、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。

由于ADAMS属于比较难掌握的高端CAE软件，而且其最新版本在界面风格、工具栏设置、操作步骤等方面都比以往版本有很多变化，所以编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

ADAMS 2014虚拟样机从入门到精通/宫鹏涵等编著.—5版.—北京：机械工业出版社，2015.11

ISBN 978-7-111-52872-2

Ⅰ. ①A…　Ⅱ. ①宫…　Ⅲ. ①机械工程—计算机仿真—应用软件　Ⅳ.①TH-39

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第023076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：乔　宇
北京中兴印刷有限公司印刷
2016年3月第5版第1次印刷
184mm×260mm · 24.25印张 · 602千字
0001—3000册
标准书号：ISBN 978-7-111-52872-2
　　　　　ISBN 978-7-89405-921-5（光盘）
定价：69.00 元（含1DVD）

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	
服务咨询热线：	010-88361066	机 工 官 网：	www.cmpbook.com
读者购书热线：	010-68326294	机 工 官 博：	weibo.com/cmp1952
	010-88379203	金 书 网：	www.golden-book.com
编辑热线:	010-88379782	教育服务网：	www.cmpedu.com

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 System）软件，是由美国机械动力公司（Mechanical Dynamics Inc.）开发的优秀的机械系统动态仿真软件，是目前世界上最具权威性、使用范围最广的机械系统动力学分析软件之一。ADAMS 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。国外的一些著名大学已开设了 ADAMS 软件的课程，将三维 CAD 软件、有限元软件和虚拟样机软件作为机械专业学生必须了解的工具软件。一方面，ADAMS 是机械系统动态仿真软件的应用软件，用户可以运用该软件非常方便地对虚拟样机进行静力学、运动学和动力学分析；另一方面，ADAMS 又是机械系统动态仿真分析开发工具，其开放性的程序结构和多种接口，可以成为特殊行业用户进行特殊类型机械系统动态仿真分析的二次开发工具。ADAMS 与先进的 CAD 软件（UG、Pro/ENGINEER）和 CAE 软件（ANSYS）可以通过计算机图形交换格式文件相互交换以保持数据的一致性。ADAMS 软件支持并行工程环境，节省大量的时间和经费。利用 ADAMS 软件建立参数化模型可以进行设计研究、试验设计和优化分析，为系统参数优化提供了一种高效开发工具。

本书以最新版的 ADAMS 2014 为对象，系统介绍了包括新增功能在内的 ADAMS 的基本功能和一些简单的建模与仿真实例，主要包括多体系统动力学与 ADAMS 基本操作、创建约束、施加载荷、建模与仿真、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。

由于 ADAMS 属于比较难掌握的高端 CAE 软件，所以编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。

本书由军械工程学院的宫鹏涵、胡仁喜老师以及康士廷老师主要编写，同时参加本书编写的还有刘昌丽、张日晶、孟培、万金环、闫聪聪、卢园、杨雪静、郑长松、张俊生、李瑞、董伟、王玉秋、王敏、王玮、王义发、王培合、辛文彤、路纯红、周冰、王艳池等。

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。望广大读者登录网站 www.sjzswsw.com 或发送邮件到 win760520@126.com 批评指正，编者将不胜感激。

编　者

目　录

第1章

ADAMS分析基本理论

本章分别详细介绍了多刚体系统动力学和多柔体系统动力学的建模方法，并在此基础上介绍了 ADAMS 求解多体系统动力学模型的原理、方法，最后对 ADAMS 的计算流程进行了说明。

学习要点

- 多体系统动力学基础理论
- 多刚体系统动力学模型
- 多柔体系统动力学模型
- ADAMS 动力学建模与求解

1.1 多体系统动力学基础理论

多体系统动力学的核心问题是建模和求解问题，其系统研究开始于 20 世纪 60 年代。从 60 年代到 80 年代，侧重于多刚体系统的研究，主要是研究多刚体系统的自动建模和数值求解；到了 80 年代中期，多刚体系统动力学的研究已经取得了一系列的成果，尤其是建模理论趋于成熟，但更稳定、更有效的数值求解方法仍然是研究的热点；80 年代以后，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，并且至今仍然是力学研究中最有活力的分支之一，但已经远远地超过了一般力学的涵义。

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 年代已经发展得比较完善。多刚体系统动力学建模的出发点涉及了许多矢量力学和分析力学方法。

1. 矢量力学方法

（1）牛顿-欧拉（Newton-Euler）方程。该方法将单个刚体的 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，无需另建动力学方程组。有些文献称之为“具有良好的开放性”。但它的一个极大的弱点是消除约束力十分困难。后来人们又发现，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。近年来，有影响的是 Schiehlen 以及 Schwertassek 等人的工作，刘延柱采用矩阵记法列写旋量形式的 Newton-Euler 方程，使动力学方程具有极简明的表达形式。

（2）罗伯森-维滕堡（Roberson-Wittenburg）方法。该方法的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，易处理的树形系统，从而对计算进行简化。

2. 分析力学方法

（1）拉格朗日（Lagrange）方程。该方法将经典的 Lagrange 方程用于多刚体系统，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（Kane）方程。由于该方法引入了以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，因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，兼有牛顿-欧拉方程和拉格朗日方程的优点。

（3）变分法。该方法不需要建立系统的运动微分方程，可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与多刚体系统、结构动力学有一定的兼容性。当系统中的柔性变形可以不计时，柔性多体系统退化为多刚体系统；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：

$$A\ddot{q} = B \tag{1-1}$$

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。对于需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：

$$\begin{cases} \mathrm{A}\ddot{q} + {\phi_q}^T \lambda = \mathrm{B} \\ \phi(q,\ t) = 0 \end{cases} \tag{1-2}$$

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。

式（1-2）是一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的自动建模，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。利用该方法可根据需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。其公式如下：

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

求解式（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。具有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会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，还可以用增广矩阵法和蛙跳算法等。

多柔体系统在数值计算时，慢变大幅变量与快变微幅变量的耦合会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，几乎是难以做到的。

1.2

随着多体动力学的发展，目前应用于多刚体系统动力学的方法主要有以下几种：牛顿-欧拉法(Newton-Euler)、拉格朗日方程法、图论(R-W)法、凯恩法、变分法、旋量法等。在求解机械系统（多体系统）动力学控制方程时，常常（如 ADAMS 软件等）采用 3 种功能强大的变阶和变步长积分求解程序，即 BDF、Gstiff 和 Dstiff 来求解稀疏耦合的非线性微分—代数方程。ADAMS 用刚体 i 的质心笛卡儿坐标和反映刚体方位的欧拉角（或广义欧拉角）作为广义坐标，即 $q_i = \left[x, y, z, \psi, \theta, \varphi\right]_i^{\mathrm{T}}$，$q = \left[q_1^{\mathrm{T}}, \cdots, q_n^{\mathrm{T}}\right]^{\mathrm{T}}$。采用拉格朗日乘子法建立系统运动方程：

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}}\right)^{\mathrm{T}}-\left(\frac{\partial T}{\partial q}\right)^{\mathrm{T}}+f_q^{\mathrm{T}}\rho+g_{\dot{q}}^{\mathrm{T}}\mu=Q \tag{1-4}$$

完整约束方程时：$f(q,t)=0$

非完整约束方程时：$g(q,\dot{q},t)=0$

式中，T为系统动能；Q为系统广义坐标列阵；ρ 为对应于完整约束的拉氏乘子列阵；M为对应于非完整约束的拉氏乘子列阵；$\dot{q}$为系统广义速度列阵。

定义1　系统动力学方程：对于有N个自由度的力学系统，确定N个广义速率以后，即可计算出系统内各质点及各刚体相应的偏速度及偏角速度，以及相应的N个广义主动力及广义惯性力。令每个广义速率所对应的广义主动力与广义惯性力之和为零，所得到的N个标量方程即称为系统的动力学方程，也称为凯恩方程：

$$F^{(r)}+F^{*(r)}=0 \quad (r=1, 2, \cdots, N) \tag{1-5}$$

写成矩阵形式为：

$$F+F^{*}=0 \tag{1-6}$$

式中，F、F^{*}为N阶列阵。

定义为：$F=\left[F^{(1)}\cdots F^{(N)}\right]^{\mathrm{T}}$　$F^{*}=\left[F^{*(1)}\cdots F^{*(N)}\right]^{\mathrm{T}}$

在系统运动方程（1-4）中令：$u=\dot{q}$，$\dot{u}=\ddot{q}$。

则系统运动方程可化成动力学方程为：

$$F(q,u,\dot{u},\lambda,t)=0 \tag{1-7}$$

$$G(u,\dot{q})=u-\dot{q}=0 \tag{1-8}$$

$$\Phi(q,t)=0 \tag{1-9}$$

式中，u为广义速度列阵；λ 为约束反力及作用力列阵；G为描述广义速度的代数方程列阵；Φ为描述约束的代数方程列阵。

定义2　Gear 预估—校正多步算法：继承 ADAMS 四阶预估—校正变阶算法，采用变步长法，其步骤如下：

（1）f(x，t)的 Jacobi 矩阵的计算。

（2）校正的迭代运算，第二步运行时要适当给出迭代精度与单步积分精度，否则会出现迭代收敛所要求的步长小于单步积分精度要求的步长，造成计算步长反复放大缩小。

定义系统的状态矢量$y=\left[q^{T},u^{T},\lambda^{T}\right]$，用 Gear 算法求解系统运动方程，根据当前时刻的系统状态矢量值，用 Taylor 级数预估下一个时刻系统的状态矢量值：

$$y_{n+1}=y_n+\frac{\partial y_n}{\partial t}h+\frac{1}{2!}\frac{\partial^2 y_n}{\partial t^2}h^2+\cdots \tag{1-10}$$

其中时间步长$h=t_{n+1}-t_n$，这种预估算法得到新的时刻的系统状态矢量值通常不准确，可由 Gear 法 K + 1 阶积分进行校正：

$$y_{n+1} = -h\beta_0 \dot{y}_{n+1} + \sum_{i=1}^{k} \alpha_i y_{n-i+1} \tag{1-11}$$

式中，y_{n+1} 是 $y(t)$ 在 $t = t_{n+1}$ 时的近似值，β_0, α_i 为 Gear 积分系数值，也可写成：

$$\dot{y}_{n+1} = \frac{-1}{h\beta_0}\left[y_{n+1} - \sum_{i=1}^{k} \alpha_i y_{n-i+1} \right] \tag{1-12}$$

则系统动力学方程在 $t = t_{n+1}$ 时刻展开，得：

$$F\left(q_{n+1}, u_{n+1}, \dot{u}_{n+1}, \lambda_{n+1}, t_{n+1}\right) = 0 \tag{1-13}$$

$$G\left(u_{n+1}, \dot{q}_{n+1}\right) = u_{n+1} - \dot{q}_{n+1} = u_{n+1} - \left(\frac{-1}{h\beta_0}\right)\left(q_{n+1} - \sum_{i=1}^{k} \alpha_i q_{n-i+1}\right) = 0 \tag{1-14}$$

$$\Phi\ \left(q_{n+1}, t_{n+1}\right) = 0 \tag{1-15}$$

定义 3 Newton—Raphson **算法**：求解非线性方程组 Φ（x）= 0，其中共有 n 个方程，即：Φ=（$\Phi_1 \cdots \Phi_n$）$^{\mathrm{T}}$，变量 x 阵为 n 阶列阵。N-R 算法的关键是如何选取适当的初值，如果矩阵为非奇异，则解是唯一的。使用修正的 N-R 算法求解上述非线性方程，其迭代校正公式为：

$$F_j + \frac{\partial F}{\partial q}\Delta q_j + \frac{\partial F}{\partial u}\Delta u_j + \frac{\partial F}{\partial \dot{u}}\Delta \dot{u}_j + \frac{\partial F}{\partial \lambda}\Delta \lambda_j = 0 \tag{1-16}$$

$$G_j + \frac{\partial G}{\partial q}\Delta q_j + \frac{\partial G}{\partial u}\Delta u_j = 0 \tag{1-17}$$

$$\Phi_j + \frac{\partial \Phi}{\partial q}\Delta q_j = 0 \tag{1-18}$$

式中 j 表示第 j 次迭代，$\Delta q_j = q_{j+1} - q_j, \Delta u_j = u_{j+1} - u_j, \Delta \lambda_j = \lambda_{j+1} - \lambda_j$

由式（1-12）知：$\Delta \dot{u}_j = -\left(\frac{1}{h\beta_0}\right)\Delta u_j$

由式（1-14）知：$\frac{\partial G}{\partial q} = \left(\frac{1}{h\beta_0}\right)I$，$\frac{\partial G}{\partial u} = I$

则写成矩阵形式为：

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial F}{\partial q} & \left(\frac{\partial F}{\partial u} - \frac{1}{h\beta_0}\frac{\partial F}{\partial \dot{u}}\right) & \left(\frac{\partial \Phi}{\partial q}\right)^{\mathrm{T}} \\ \left(\frac{1}{h\beta_0}\right)I & I & 0 \\ \frac{\partial \Phi}{\partial q} & 0 & 0 \end{bmatrix}_j \begin{Bmatrix} \Delta q \\ \Delta u \\ \Delta \lambda \end{Bmatrix}_j = \begin{Bmatrix} -F \\ -G \\ -\Phi \end{Bmatrix}_j \tag{1-19}$$

式中，左边的系数矩阵称为系统的 Jacobi 矩阵；$\frac{\partial F}{\partial q}$ 是系统的刚度矩阵；$\frac{\partial F}{\partial u}$ 是系统阻