

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

计算多体系统动力学

*Computational Dynamics
of Multibody Systems*

洪嘉振 著

高等教育出版社

ND13/13

研究生教学用书

教育部研究生工作办公室推荐

计算多体系统动力学

Computational Dynamics of Multibody Systems

洪嘉振 著

高等教育出版社

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

计算多体系统动力学/洪嘉振著. —北京:高等教育出版社,1999

研究生教学用书

ISBN 7-04-007269-6

I. 计… II. 洪… III. 多体问题-研究生教育-教材
IV. 0413.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 04962 号

计算多体系统动力学

洪嘉振 著

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市东城区沙滩后街55号

邮政编码 100009

电 话 010-64054588

传 真 010-64014048

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

经 销 新华书店北京发行所

排 版 高等教育出版社照排中心

印 刷 北京民族印刷厂

开 本 787×960 1/16

版 次 1999年7月第1版

印 张 27.75

印 次 1999年7月第1次印刷

字 数 500 000

定 价 47.50元

凡购买高等教育出版社图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请在所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

内 容 提 要

多体系统是指有大范围相对运动的多个物体构成的系统。它是航空航天器、机器人、车辆、兵器与机构等复杂机械系统的力学模型。本书筛选了国内外在计算多体系统动力学方面的成熟成果,收录了著者及其研究群体 17 年来在该领域的主要研究成果。按照著者的观点进行分类,较全面覆盖了多刚体系统动力学与柔性多体系统动力学的研究方法。在叙述上力求理论推导、计算方法与软件实现三方面相互贯通。

全书分为四篇。第一篇介绍本书所需的数学、刚体运动学、刚体动力学与数值方法等基础知识。第二篇介绍多体系统拓扑构型的描述,基于拉格朗日坐标的多刚体系统动力学方程的建立,数值处理方法与软件实现要点。第三篇介绍多刚体系统笛卡尔坐标的描述方法、系统运动学约束方程组集与分析方法,带拉格朗日乘子动力学方程的推导、动力学分析的计算方法与软件实现要点。第四篇为刚-柔混合多体系统动力学,介绍变形体的有限元与模态离散方法、基于笛卡尔与拉格朗日坐标的系统各物体运动学正向递推关系,基于拉格朗日坐标与模态坐标的系统动力学方程组集、开闭环柔性多体系统的计算方法与软件实现要点。

本书是一本学术著作,可作为高等工科院校的力学、机械、航空航天、机器人、车辆与兵器等专业的研究生教材,也可供上述专业的大学本科高年级学生、教师及有关研究人员和工程技术人员参考。

本书得到教育部研究生教材建设专项经费资助

上海市研究生教育专项经费资助

序 言

多体系统动力学作为一般力学的一个分支学科已经历了 30 年发展历程。在现代科学技术发展的冲击下,传统的以经典力学为依托的分析方法已不能应付由大量作大幅运动部件组成的复杂工程对象的动力学问题。而飞速发展的计算技术使得对复杂系统进行大规模数字仿真的可能性成为现实。于是多体系统动力学作为经典力学与计算技术的完美结合应运而生。多体系统动力学的早期研究对象是多刚体系统,这部分内容已发展得十分完善,在拉格朗日方法和笛卡尔方法的基础上均已发展了成熟的商业计算软件。多体系统动力学的进一步发展是考虑系统内部件的弹性变形。将研究对象由多刚体系统拓展为多柔体系统,尽管在理论建模方面并不特别困难,但在数值计算方面,由于慢变大幅变量与快变微幅变量的耦合而导致严重的病态问题。因此,柔性多体系统动力学的发展必然与计算方法和软件工程紧密联系,而逐渐形成为计算力学的一个组成部分,即计算多体系统动力学。这是一门不断发展的具有旺盛生命力的新学科分支。

洪嘉振教授完成的《计算多体系统动力学》是一本全面叙述多体系统动力学学科内容的学术著作。在对多刚体系统动力学与柔性多体系统动力学研究方法的叙述过程中,本书的最大特点是将理论推导、计算方法与软件实现三部分内容相互贯通,而且收进了作者及其领导的上海交通大学多体系统动力学研究集体多年来在该领域内的研究成果。无论在深度和广度上本书都远远超过了 10 年前我们共同编著的《多刚体系统动力学》。在本书出版之际,我以欣喜的心情表示祝贺,并衷心希望本书的出版能促进多体系统动力学学科的繁荣,并在授予 21 世纪未来工程师们以解决复杂机械系统动力学的知识和能力方面作出应有的贡献。

刘延柱

1998 年冬

于上海交通大学

前 言

很难想象在未来的 21 世纪对大型工程设计与优化是一种什么需求,但是充分利用计算技术不断提高工程设计的效率,以达到加快产品的更新,提高产品的性能与减小投资风险是不变的。近年来提出的工程对象虚拟设计的思想,是达到上述目标的探索。实现工程对象虚拟设计的领域是多方面的,而对工程对象复杂的动力学与控制性态的分析及优化是虚拟设计的基础,是对力学工作者提出的任务。要实现这项任务,必须对复杂工程对象建立具有通用性与程式化特点的动力学与控制的数学模型,这些模型必须有良好的数值计算的性态,必须便于计算机软件的实现。这种方法与传统方法的主要区别是它可以充分发挥计算技术的潜能,将工程对象的性态分析与优化的工作效率大大提高。

如果说计算固体力学的发展对大型工程结构的计算机辅助分析与优化具有举足轻重的作用的话,那么计算多体系统动力学在复杂机械系统的动力学与控制性态的计算机辅助分析与优化方面扮演了相同的角色。尽管计算多体系统动力学的起步比计算固体力学的发展晚十来年,处理的对象更复杂些,但是三十多年来已取得了长足进展。机械系统通用的力学模型从多刚体系统已发展到刚-柔混合的力学模型。为了达到上述目的,国内外许多学者作出了巨大的努力。

著者自 1982 年涉足该领域的研究,力图将多体系统动力学的建模理论、计算方法与软件工程紧密地结合起来。著者在研究工作中始终认为,由力学基本原理得到的形式各异的动力学方程在理论上等价,但是其数值性态的优劣不尽相同。如果说这种情况在多刚体系统动力学仿真计算中表现不明显,那么在处理柔性多体系统动力学问题时将成为主要矛盾。这也是计算柔性多体系统动力学至今尚未达到计算多刚体系统动力学成熟的原因。评价一个多体系统动力学模型优劣的重要标准应该是该模型是否能稳定可靠地处理各种动力学对象。以此观点,本书筛选了国内外在计算多体系统动力学方面的成熟成果,收录了作者及其研究群体 17 年来在该领域的主要研究成果。在计算多刚体系统动力学方面,不同类型的动力学模型形成了两种完全不同的数值处理方法,在软件的实现上也各不相同。按照著者的观点将这两种相互独立的流派分别称为多刚体系统动力学的拉格朗日方法与笛卡尔方法,在本书的第二与第三篇分别进行介绍。在计算柔性多体系统动力学方面,著者在总结国内外拉格朗日模型与笛卡尔模型数值性态优劣的基础上,提出了柔性多体系统动力学的单向递推组集建模方法,它是旨在得到一种提高仿真计算精度、效率与稳定性的数值计算数学模型。

通过多年的研究与解决工程问题的经历表明,这种单向递推组集建模方法是行之有效的。这里采用“建模方法”的提法是强调该数学模型的实现过程,而不是追求模型本身的显式或隐式的表达式。这也是计算动力学与传统动力学追求目标的不一致处。这方面的内容安排在最后一篇。

应该指出,本书的大多数研究成果是在国家自然科学基金委员会数理学部研究课题的资助下完成的。本书的出版得到了教育部研究生教材建设专项经费与上海市研究生教育专项经费资助,著者对基金委的长期连续的支持和教育部与上海市教委有关部门的资助表示感谢。

中国力学学会副理事长刘延柱教授在本书的撰写过程中给予了指导,并为本书作了序。北京航空航天大学谢传锋教授在百忙中仔细审阅了书稿,提出了许多改进的意见。对两位前辈的帮助,在此表示衷心的感谢。

博士研究生倪纯双、于清、刘锦阳、蒋丽忠等对书中复杂算例的完成与文字及插图的校对作了许多工作,在此也一并表示谢意。

由于著者水平有限,书中的不妥之处在所难免,垦望读者指教。

洪嘉振

1998年10月

于上海交通大学

主要符号表

说明:

1. 本书中的数学与物理量涉及到标量、矢量、张量、标量矩阵、矢量矩阵与张量矩阵等 6 种。在实施国家标准(GB 3100~3102-93)《量和单位》的过程中,如果采用国家标准中规定的表示方法,当上述各种量中的几种出现在同一表达式中时将无法区分。为此,本书为了便于教学、阅读及书写规范,在保证执行国家标准的前提下,作如下约定:凡标量用白斜体字母表示,例如, d 、 D 等;凡矢量用小写黑斜体字母表示,例如 \mathbf{d} 等;凡张量用大写黑斜体字母表示,例如 \mathbf{D} 等。按照国家标准中规定,标量矩阵应用黑斜体表示,在表达式中它将与矢量或张量混淆。此外,矢量矩阵与张量矩阵在国标中没有规定。根据上述情况,约定字母下面有一横的表示矩阵。这样,白斜体字母下加一横的表示标量矩阵,例如 \underline{d} 、 \underline{D} 等、小写黑体字母下加一横的为矢量矩阵,例如 $\underline{\mathbf{d}}$ 等;大写黑体字母下加一横的为张量矩阵,例如 $\underline{\mathbf{D}}$ 等。

2. 一矢量(或张量)与其在某一坐标系下的坐标阵在本书中经常同时出现,为了便于理解与表达,约定该矢量(或张量)与其的坐标阵用同一斜体字母表达,只是前者为黑体,后者为白体,例如矢量 \mathbf{d} 与张量 \mathbf{D} 它们的坐标阵分别为 $\underline{\mathbf{d}}$ 与 $\underline{\mathbf{D}}$ 。

$\mathbf{0}$	零矢量
$\underline{0}$	零矩阵
$\underline{1}_n$	元素为 1 的 n 阶列阵
\underline{A}	方向余弦阵
\underline{A}^j	基 i 相对于基 j 的方向余弦阵
\underline{A}^i	基 i 相对于公共基的方向余弦阵
\underline{A}^h	铰动基相对于本地基的方向余弦阵
$(\underline{A})_{m \times n}$	$m \times n$ 阶矩阵 A
\mathbf{a}	加速度矢量
$ \mathbf{a} $	矢量 \mathbf{a} 的模
$\dot{\mathbf{a}}$	矢量 \mathbf{a} 对时间的绝对导数,矢量 \mathbf{a} 在公共基下对时间的导数
$\dot{\underline{\mathbf{a}}}$	矢量 \mathbf{a} 对时间的相对导数,矢量 \mathbf{a} 在某动基下对时间的相对导数
$\underline{\mathbf{a}}$	矢量 \mathbf{a} 的坐标阵,系统模态坐标阵

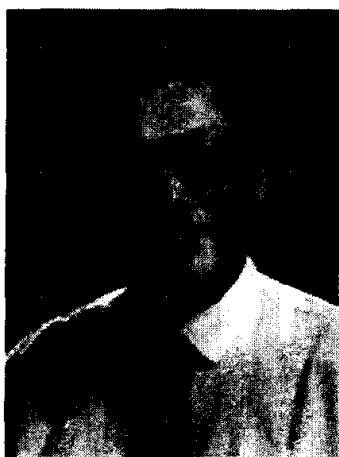
$\underline{\bar{a}}$	矢量 \mathbf{a} 的坐标方阵
\underline{a}_i	矢量 \mathbf{a}_i 的坐标阵, 变形体 i 模态坐标阵
B_i	物体 i
B_i^*	B_i 的增广体
\underline{b}_{ik}	增广体 i 上的增广体矢量
\underline{b}	增广体矢量阵
\underline{C}_{ij}	刚体 i 上加权体铰矢量
\underline{C}_{ik}^c	刚体 i 上切断铰加权体铰矢量
\underline{C}_{ik}^e	刚体 i 上非约束力元体加权体元矢量
C_i	刚体 i 的质心
C_i^*	增广体刚体 i 的质心
\underline{c}_{ij}	刚体 i 上体铰矢量
\underline{c}_{ij}^c	刚体 i 上切断铰的体铰矢量
\underline{c}_{ik}^e	刚体 i 上非约束力元体元矢量
$\hat{\mathbf{D}}$	张量(并矢) \mathbf{D} 的共轭张量(并矢)
\underline{d}_{ik}	刚体 i 上的通路矢量
\underline{d}_{ik}^*	刚体 i 上的广义通路矢量
\underline{dq}	实位移(列阵)
\underline{dq}^*	可能位移(列阵)
E_k^e	非约束力元 k
E_k^r	约束力元 k
\underline{e}	矢量基(简称基), 矢量列阵
$\underline{e}_1 \underline{e}_2 \underline{e}_3$	矢量基的 3 个基矢量
\underline{e}^r	矢量基 r , 参考基
\underline{e}^b	矢量基 b , 连体基
\underline{e}^{h_0}	铰的本地基, 铰的参考基
\underline{e}^h	铰的动基
$\underline{e}(k)$	约束力元数组
$\underline{e}^+(k)$	非约束力元 k 的关联数组(内连刚体下标)
$\underline{e}^-(k)$	非约束力元 k 的关联数组(外连刚体下标)
\mathbf{F}	力, 主矢
\mathbf{F}^k	作用于点 k 点的力
\mathbf{F}_k^a	作用于点 k 的主动力

F_i^o	作用于刚体 i 的外力
F_k^c	非约束力元 k 的力
F_k^r	约束力元 k 的力
F_k^c	切断铰 k 的约束力
F_k^n	铰 k 的理想约束力
\underline{F}^{nq}	铰理想约束力关于广义坐标阵 \underline{q} 的广义力(列)阵
\underline{F}^{cq}	非约束力元关于广义坐标阵 \underline{q} 的广义力(列)阵
\underline{F}^{cq}	切断铰约束力关于广义坐标阵 \underline{q} 的广义力(列)阵
$\underline{F}^{r q}$	约束力元关于广义坐标阵 \underline{q} 的广义力(列)阵
H_i	铰 i
H_k^c	切断铰 k
\underline{H}^h	铰相对坐标的约束库矩阵
\underline{H}^Ω	铰相对坐标的约束库矩阵
h	铰的位移矢量
h_k^c	切断铰 k 的位移矢量
I	单位张量(并矢)
\underline{I}	单位阵
\underline{I}_n	n 阶单位阵
$i^+(j)$	铰 j 的关联数组(铰 j 关联的内接刚体的标号)
$i^-(j)$	铰 j 的关联数组(铰 j 关联的外接刚体的标号)
J	惯量张量,对质心的惯量张量
J_D	对点 D 的惯量张量
\underline{K}_i	增广体 i 关于其内接铰点的惯量张量
\underline{K}_i^*	增广体 i 关于其质心的惯量张量
L	绝对动量矩矢量
L_D	对点 D 的绝对动量矩矢量
$L(i)$	内接刚体数组,刚体 i 的内接刚体的标号
M	力矩
M_D	力关于点 D 的主矩
M^k	作用于点 k 点的力偶(矩)
M_k^r	约束力元 k 的力偶(矩)
M_k^c	切断铰 k 的约束力偶(矩)
M_k^n	铰 k 的理想约束力偶(矩)

P_k	点、节点或质点 k
\underline{q}	坐标(列)阵, 广义坐标(列)阵
$\dot{\underline{q}}$	实速度(列阵)
$\dot{\underline{q}}^*$	可能速度(列阵)
$\mathbb{R}^{m \times n}$	$m \times n$ 维实数空间, $m \times n$ 维空间
\underline{r}	矢径, 连体基基点的矢径, 刚体质心的矢径
\underline{r}_P	点 P 的矢径
\underline{S}_0	树系统关联矩阵的第 1 行的分块行阵
\underline{S}	树系统关联矩阵的分块矩阵
\underline{S}_0^c	非树系统关联矩阵中与切断铰有关的第 1 行的分块行阵
\underline{S}^c	非树系统关联矩阵中与切断铰有关的分块矩阵
\underline{S}^r	非约束力元关联矩阵
\underline{S}^f	约束力元矩阵
\underline{T}	通路矩阵
\underline{U}	回路矩阵
\underline{u}_i^k	变形体 i 中节点 k 单元平移变形矢量
\underline{u}	非独立坐标(列)阵
\underline{v}	速度矢量
\underline{v}_r	相对速度矢量
\underline{v}_r°	相对加速度矢量
\underline{v}	独立坐标(列)阵, 变形体绝对位形速度坐标阵
$\underline{Y}_\alpha, \underline{Y}_\beta, \underline{Y}_\nu, \underline{Y}_w$	绝对坐标下的约束库矩阵
\underline{y}	变形体相对位形坐标阵
\underline{Z}	广义质量(矩)阵
\underline{z}	动力学方程组的右项, 广义力(列)阵
$\underline{\alpha}$	角加速度矢量
$\underline{\Delta q}$	速度变更(列阵)
δ	自由度数
δP	虚功率
$\underline{\delta q}$	虚位移(列阵)
$\underline{\epsilon}_i^k$	变形体 i 节点 k 单元旋转变形矢量
$\underline{\Phi}$	约束方程组(列阵)
$\underline{\Phi}^K$	主约束方程组(列阵)

$\underline{\Phi}^D$	驱动约束方程组(列阵)
$\underline{\Phi}_q$	约束方程雅可比(矩阵),列阵 $\underline{\Phi}$ 对坐标阵 q 的偏导数
$\underline{\Phi}_t$	速度约束方程的右项(列阵),列阵 $\underline{\Phi}$ 对时间 t 的偏导数
$\underline{\phi}_{ij}^k$	变形体 i 中节点 k 单元的第 j 阶平移模态矢量
$\underline{\gamma}$	加速度约束方程的右项(列阵)
$\underline{\eta}$	铰相对坐标的约束库矩阵
$\underline{\Delta}$	欧拉四元数(列)阵
$\underline{\mu}$	拉格朗日乘子(列阵),增广体质量分布的无量纲矩阵
$\underline{\Theta}^k$	切断铰 k 的约束方程(列阵)
$\underline{\Theta}_y^k$	切断铰 k 的约束方程关于广义坐标的雅可比(矩阵)
ρ_P	点 P 的在连体基上的矢径
ρ_i^k	变形体 i 中节点 k 点的矢径
ρ_{i0}^k	变形体 i 中节点 k 点在未变形时的矢径
$\underline{\sigma}$	拉格朗日乘子(列阵)
$\underline{\omega}$	角速度矢量
$\underline{\omega}_r$	相对角速度矢量
$\overset{\circ}{\underline{\omega}}_r$	相对角加速度矢量
$\underline{\psi}_{ij}^k$	变形体 i 中节点 k 单元的第 j 阶转动模态矢量
$\underline{\zeta}$	加速度约束方程的右项(列阵)

作者简介



洪嘉振 1944年生。1966年毕业于清华大学工程力学与数学系六年本科。1978年攻读上海交通大学精密仪器系陀螺力学硕士研究生,1982年获工学硕士学位。现任上海交通大学教授、博士生导师、建筑工程与力学学院副院长、工程力学系系主任。兼任教育部工科力学课程教学指导委员会

委员、国家自然科学基金委数理学部评议组成员、中国力学学会一般力学专业委员会副主任、上海力学学会一般力学专业委员会主任等职。研究领域为多体系统动力学、航天器姿态动力学、复杂系统动力学和控制的计算机辅助分析与优化。根据他在多体系统动力学的教育与科研方面的贡献,1992年获国务院与教育部授予的“全国做出突出贡献的中国硕士学位获得者”称号。主编过《多体系统动力学——理论、计算方法与应用》和《多体系统动力学与控制》论文集。合著的《分析动力学》获教育部优秀教材一等奖、《多刚体系统动力学》获教育部优秀教材二等奖。

责任编辑	王 晶
封面设计	李 卫
责任绘图	朱 静
版式设计	焦东立
责任校对	王效珍
责任印制	陈伟光

目 录

引论	1
0.1 计算多体系统动力学的任务	1
0.2 机械系统的多体系统力学模型	4
0.3 计算多体系统动力学的进展	9
0.4 本书的安排	11
第一篇 基础篇	
第 1 章 数学基础	13
1.1 矩阵	13
1.2 矢量	18
1.3 并矢 二阶张量	24
1.4 方向余弦阵	30
1.5 欧拉四元数	33
第 2 章 刚体运动学基础	37
2.1 连体基	37
2.2 刚体的有限转动	37
2.3 刚体的姿态坐标 姿态分析逆问题及其算法	41
2.4 刚体的角速度和角加速度	49
2.5 刚体的角速度与姿态坐标导数的关系 运动学方程	53
2.6 点的位置、速度和加速度	60
第 3 章 刚体动力学基础	63
3.1 动量、动量矩和动能	63
3.2 刚体的质量几何	66
3.3 牛顿-欧拉动力学方程	67
3.4 动力学普遍方程	68
3.5 带拉格朗日乘子的动力学方程	72
第 4 章 数值方法	74
4.1 线性代数方程组求解和矩阵分解	74
4.2 解非线性代数方程的牛顿-拉斐逊方法	86
4.3 常微分方程组的数值解法	89

第二篇 多刚体系统动力学拉格朗日数学模型及算法

第 5 章 多体系统拓扑构型的数学描述	98
5.1 树系统	98
5.2 非树系统	104
第 6 章 多刚体树系统拉格朗日运动学	108
6.1 铰的相对运动学	108
6.2 邻接刚体相对运动学	116
6.3 系统各刚体的姿态、角速度和角加速度	119
6.4 转动铰系统各刚体质心的位置、速度和加速度	121
6.5 带滑移铰系统各刚体质心的位置、速度和加速度	127
第 7 章 多刚体系统拉格朗日动力学	132
7.1 力元	132
7.2 有根树系统	140
7.3 无根树系统	149
7.4 非树系统	159
第 8 章 动力学仿真直接数值方法与程序设计	166
8.1 仿真计算机软件的组织	167
8.2 数据输入模块	168
8.3 数据前处理模块	171
8.4 数值积分模块	182
8.5 动力学正逆混合问题的算法	199

第三篇 多刚体系统动力学笛卡尔数学模型及算法

第 9 章 多刚体系统笛卡尔运动学	202
9.1 约束方程	202
9.2 运动学分析基础	206
9.3 平面运动多刚体系统	214
9.4 空间运动多刚体系统	247
9.5 运动学数值分析方法与软件的组织	277
第 10 章 多刚体系统笛卡尔动力学	289
10.1 空间运动多刚体系统动力学	289
10.2 平面运动多刚体系统动力学	298
10.3 动力学逆问题与约束反力	303
10.4 动力学仿真的数值分析方法	308
10.5 多刚体系统静平衡分析的计算方法	317
10.6 动力学仿真软件的组织	319

第四篇 刚-柔混合多体系统动力学单向递推组集数学模型及算法

第 11 章 单柔性体动力学方程	329
11.1 运动学关系	329
11.2 动力学方程	331
第 12 章 邻接物体的运动学递推关系	339
12.1 坐标系	339
12.2 铰点单元运动学	340
12.3 铰运动学	342
12.4 运动学递推关系	343
第 13 章 系统动力学方程	348
13.1 力元	348
13.2 树系统动力学方程的递推组集	350
13.3 非树系统动力学方程	354
13.4 铰约束反力	357
13.5 柔性多体系统的能量	363
第 14 章 动力学仿真计算方法与软件实现	366
14.1 动力学正-逆混合问题的计算方法	366
14.2 切断铰的选取	371
14.3 动力学仿真的计算方法	375
14.4 动力学仿真软件系统 CADAMB 的实现	380
14.5 算例	396
参考文献	409
名词索引	414
外国人名译名对照表	423
作者简介	425