

· 工程力学丛书 ·

柔性多体系统 动力学

Dynamics of Flexible Multibody Systems

陈佑方



高等教育出版社



1714663

·工程力学丛书·

柔性多体系统 动力学

Dynamics of Flexible Multibody
Systems

陆佑方

JY11126/17

国家自然科学基金资助项目



高等教育出版社



B1325228

0313/14. 1714663.

(京)112号

图书在版编目(CIP)数据

柔性多体系统动力学/陆佑方等编著. —北京:高等教育出版社, 1996

(工程力学丛书)

ISBN 7-04-005711-5

I. 柔… II. 陆… III. 弹性动力学 IV. 0347

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 14627 号

*

高等教育出版社出版

北京沙滩后街 55 号

邮政编码:100009 传真:64014048 电话:64054588

新华书店总店北京发行所发行

国防工业出版社印刷厂印刷

*

开本 850×1168 1/32 印张 18.625 字数 480 000

1996年7月第1版 1996年9月第1次印刷

印数 0001—1 102

定价 25.50 元

(精装本)

凡购买高等教育出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题者,请与当地图书销售部门联系调换。

版权所有,不得翻印



B1325228

内 容 简 介

本书分基础篇和专题篇两部分,共十三章。基础篇七章,概述了弹性动力学和拉格朗日方程的基础知识,系统地讲述了柔性多体系统的运动学和动力学,介绍了几种用于柔性多体系统动力响应分析的数值方法。专题篇三章,讲述了柔性多体系统的有限元列式;讨论了动参考系的选取方法及其对解的精度影响等;叙述了模态分析与综合、灵敏度和重分析;介绍了逆运动学和逆动力学的解法以及柔性臂系统的轨迹控制。书中有关章节介绍了作者多年来的有关研究工作和成果。

本书可供力学、航空、航天、汽车、机械等专业的研究生、教师和科技工作者阅读和参考。





作者简介

陆佑方,上海市人,1936年生。1957年毕业于长春汽车拖拉机学院汽车专业,1962年毕业于清华大学工程力学研究班固体力学专业。现任吉林工业大学教授、中国科学院机器人学开放研究实验室客座教授、中国力学学会一般力学专业委员会委员、多体动力学及机器人学专业组副组长等职。1986年作为交流学者在美国伊利诺大学(芝加哥)机械工程系从事柔性多体系统动力学的研究工作,1993年作为高级访问学者在加拿大多伦多大学机械工程系机器人与自动化实验室从事研究工作,1994年曾在日本东京中央大学和香港理工大学作学术交流。1986年以前主要从事结构动力学、模态综合技术的研究工作,1986年以后主要研究柔性多体系统动力学及其控制的建模理论、数值计算方法、逆动力学、现代控制策略的实现以及数值仿真动画显示的软件编制等。

前 言

柔性多体系统动力学不同于多刚体系统动力学,它含有柔性部件,其变形不可忽略,并且该系统的逆运动学是不确定的;它与结构动力学不同,部件在自身变形运动的同时,在空间经历着大的刚性移动和转动,且刚性运动与变形运动互相影响、强烈耦合;与一般简单系统不同,它是一个多输入、多输出的无穷维、时变、高度非线性的复杂系统。因此,柔性多体系统动力学是经典动力学、连续介质力学、计算力学和现代控制理论等多学科交叉的边缘性新学科。它是在航天、机器人、地面车辆、机械系统等向轻型、高速、大型和复杂方向发展,以提高运作效率、减少能量耗损和适应复杂运行环境能力的高技术工程应用和市场竞争的背景下发展起来的。这门学科之所以能够萌生和迅速发展也是与当代计算机技术发展分不开的。现在柔性多体系统动力学已经引起了广泛的关注和兴趣,成为理论和应用力学的一个很活跃的领域。然而大量的丰富多采的成果目前还只散见于各个领域的学术刊物和会议文集中,系统的论著极少,满足不了从事这方面工作的科技工作者、教师和研究生的迫切需要。作者自1987年以来,已为博士、硕士研究生讲授了9遍本门课程,深感有一本既适合于教学又有助于深入研究的专著的必要。不过,由于这是一门正在发展中的学科,新思想、新方法不断涌现,不少问题的研究尚待成熟。另外,它的内容极为丰富,涉及范围非常广泛,显然一本书是无法完全概括的,只能从基本的有代表性的问题入手,对一些方法和思想作扼要介绍。

本书由陆佑方撰写第一、五~七、九~十一各章以及第二、四、十二、十三各章的部分内容,并负责全书的统稿;王彬撰写第三、八

章,并负责全书的校核及附图;冯冠民撰写第二、四、十二、十三各章的部分内容。全书由王照林教授审稿,黄文虎教授作了评阅。在本书立项撰写之初得到洪善桃教授、于东英研究员的推荐,作者对他们热情支持、辛勤的劳动和宝贵的意见,致以诚挚的谢意。作者还对伊利诺大学(芝加哥)薛伯纳教授(A. A. Shabana, Professor, University of Illinois at Chicago)以及他的专著 *Dynamics of Multibody System* 所给予的启发表示感谢。在本书出版过程中,得到“柔性多体系统动力学与控制”科研课题组的同事们以及我的研究生的热情帮助,在此一并致谢。本书撰写出版得到国家自然科学基金、中国科学院机器人学开放研究实验室和高等学校博士学科点专项科研基金的资助以及高等教育出版社给予的支持,谨表衷心的感谢。

由于作者水平有限,本书内容涉及的领域又如此宽广,缺点、错误在所难免,诚请读者批评指正。

陆佑方

于吉林工业大学

1993年9月30日

主要符号表

A	面积
A	旋转变换矩阵
A^T	转置矩阵
$\sim A$	反对称矩阵
$A_\theta = \frac{\partial A}{\partial \theta}$	旋转变换矩阵对变量 θ 的偏导数
A_j	$Ox'y'z'$ 坐标系与 $Ox''y''z''$ 坐标系之间的旋转变换矩阵
$\frac{\partial A_{n \times n^2}}{\partial \mathbf{q}^T} = \left[\frac{\partial A}{\partial q_1} \quad \frac{\partial A}{\partial q_2} \quad \dots \quad \frac{\partial A}{\partial q_n} \right]_{n \times n^2}$	
\mathbf{a}	加速度向量
$C(\mathbf{q}, t) = 0$	约束方程
C^d	驱动约束方程
C^p	以欧拉参数为广义坐标的约束方程
$C_q = \frac{\partial C}{\partial \mathbf{q}^T}$	约束雅可比矩阵
C_{qd}	对应不独立广义坐标的约束雅可比矩阵
C_{vi}	对应独立广义坐标的约束雅可比矩阵
C_q^d	驱动约束雅可比矩阵
$C_{qv} = \frac{\partial C_q}{\partial t}$	
$C_{ii} = \frac{\partial^2 C}{\partial t^2}$	
E	弹性模量
EI	抗弯刚度
EA	抗拉压刚度
\hat{E}	用欧拉参数表示的 3×4 变换矩阵
G	剪切模量

GI_p	抗扭刚度
\hat{G}	用欧拉参数表示的 3×4 变换矩阵, 有 $A = \hat{E}\hat{G}^T$
g	重力加速度向量
I_1, I_2, I_3	截面惯性矩
I_p	截面极惯性矩
$I_{x'}, I_{y'}, I_{z'}$	物体对 x', y', z' 轴的转动惯量
I_O	物体对坐标系原点 O 的惯性张量
I_C	物体对质心 C 的惯性张量
$I_1 = \int_V \rho u_{i0} dV$	柔性体变形前对动坐标系原点的一次矩
$I_0 = \int_V \rho \Phi^T u'_{i0} dV$	
I	单位矩阵
$\tilde{i} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} = A_\theta A$	
J	雅可比矩阵行列式
K	刚度矩阵
K_{ff}	对应弹性变形广义坐标 q_i 的刚度矩阵
L	拉格朗日函数
l	长度
L	力系主矩向量
M	质量矩阵
N^{ij}	i 物体上 j 单元在 i 物体坐标系中的形函数
$OXYZ$	惯性坐标系或整体坐标系
$O'x'y'z', O'xyz$	动坐标系
$O'x'y'z^i$	与 i 物体相连的动坐标系
$O''x''y''z''$	关节点动坐标系
$O'''x'''y'''z'''$	关节点处辅助动坐标系
$P = [\varepsilon_0 \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3]^T$	欧拉参数向量
Q	广义力向量
Q_e	弹性广义力向量

Q_F	广义主动力向量
Q_v	速度二次项广义力向量
$q = [q_1 q_2 \cdots q_n]^T$	广义坐标向量
q_i	变形广义坐标向量
q_i	独立的广义坐标向量
q_d	不独立的广义坐标向量
$R_{O'}^i$	动坐标系原点 O' 的位置向量
r, r_P	P 点在惯性坐标系中的位置向量
\dot{r}, \ddot{r}	r 的绝对导数
\dot{r}^*, \ddot{r}^*	r 的相对导数
S^{ij}	i 物体上 j 单元在单元坐标系中的形函数
T	动能
T^*	用伪速度表示的动能
T	齐次变换矩阵
T_i^{i-1}	i 动坐标系与 $i-1$ 动坐标系之间的齐次变换矩阵
$\frac{\partial T}{\partial q^T} = \left[\frac{\partial T}{\partial q_1} \quad \frac{\partial T}{\partial q_2} \cdots \frac{\partial T}{\partial q_n} \right]_{1 \times n}$	
u_O	物体变形前点在动坐标系中的位置向量
u_O	u_O 在惯性坐标系中的表示
u_i	在动坐标系中点的弹性位移向量
\bar{u}_i	u_i 在惯性坐标系中的表示
$u' = u_O + u_i$	点在动坐标系中的位置向量
u	u' 在惯性坐标系中的表示
u_4	在动坐标系中点的齐次坐标向量
\bar{u}_4	u_4 对应的 4×4 反对称矩阵
V	体积、势能
V_g	重力势能
v	挠度
V_0, V'	伪速度向量
\bar{V}_0	伪速度反对称矩阵
v	速度向量

δW	虚功
$\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$	欧拉参数
e^j	i 物体 j 单元上点的应变向量
A	特征值矩阵
λ	拉格朗日乘子向量
ρ	质量密度
σ^i	i 物体 j 单元上点的应力向量
τ	扭矩或力偶矩向量
$\Phi = [\Phi_1 \Phi_2 \dots \Phi_n]^T$	模态矩阵
ψ, θ, φ	欧拉角
ω	在惯性坐标系中的角速度向量
ω'	在动坐标系中的角速度向量
$\tilde{\omega}$	ω 对应的反对称矩阵
$\tilde{\omega}'$	ω' 对应的反对称矩阵
$\text{Col}(B)$	B 矩阵的列
$\text{tr}(B)$	B 矩阵的迹
$D_i = \frac{\partial}{\partial t} + \tilde{\omega}$	协变导数

目 录

主要符号表	1
-------------	---

基础篇

1 绪论	3
§ 1.1 柔性多体系统动力学	3
§ 1.2 内容安排	16
2 弹性动力学基础	19
§ 2.1 物体运动和变形的描述	19
§ 2.2 变形体运动学	22
§ 2.3 变形体动力学	33
§ 2.4 小变形弹性体的大范围整体运动	42
3 分析动力学基础	58
§ 3.1 拉格朗日方程	59
§ 3.2 具有不独立坐标的拉格朗日方程 乘子法	73
§ 3.3 伪坐标形式的拉格朗日方程	75
§ 3.4 刚体一般运动的伪坐标形式的拉格朗日方程	81
§ 3.5 柔性多体系统的混合坐标形式的拉格朗日方程	86
§ 3.6 凯恩方法	88
4 柔性多体系统平面运动动力学	109
§ 4.1 柔性体平面运动运动学	109
§ 4.2 约束及约束方程	117
§ 4.3 柔性多体系统平面运动的动力学控制方程	123
§ 4.4 递推列式	158
§ 4.5 双连杆柔性机械臂	165
5 柔性多体系统的空间运动学	181
§ 5.1 参考系运动学	181

§ 5.2	柔性体上任一点的速度和加速度	216
§ 5.3	空间约束及约束方程	219
§ 5.4	柔性多体系统上点的位置、速度和加速度列式	230
6	柔性多体系统空间运动动力学	233
§ 6.1	柔性体的动能 质量矩阵	233
§ 6.2	广义力	239
§ 6.3	柔性多体系统空间运动的动力学控制方程	242
§ 6.4	递推列式	245
§ 6.5	几何非线性问题的柔性多体系统动力学模型	260
§ 6.6	碰撞动力学控制方程	266
7	动力响应分析的数值方法	274
§ 7.1	微分-代数混合方程组的解法	275
§ 7.2	求解非线性代数方程组的牛顿-拉斐逊(N-R)法	286
§ 7.3	二阶微分方程的直接数值积分	292
§ 7.4	一阶微分方程的数值积分	299
§ 7.5	误差校正及约束稳定方法	306
§ 7.6	静平衡分析	310
§ 7.7	约束反力	314
§ 7.8	程序组织	320

专 题 篇

8	有限元列式	329
§ 8.1	坐标变换	330
§ 8.2	动参考系的选取	332
§ 8.3	质量矩阵	333
§ 8.4	刚度矩阵	341
§ 8.5	梁单元的质量矩阵和刚度矩阵	342
§ 8.6	铁木辛柯梁的几何非线性刚度矩阵	353
9	动参考系	362
§ 9.1	变形体的动量矩及动能	363
§ 9.2	局部附着框架	364

§ 9·3 中心惯性主轴框架	365
§ 9·4 蒂斯拉德框架(平均轴系)	366
§ 9·5 巴克凯恩斯框架	372
§ 9·6 刚体模态框架	373
§ 9·7 问题的讨论	374
10 模态分析与综合	380
§ 10·1 各类部件模态集的定义	381
§ 10·2 部件模态综合	393
§ 10·3 一种部件模态综合的一般方法	407
§ 10·4 柔性多体系统动力分析中的部件模态分析与综合	415
11 灵敏度及重分析	435
§ 11·1 在部件水平上的特征值问题的灵敏度和重分析	437
§ 11·2 重分析	443
§ 11·3 整体系统水平上的响应灵敏度及重分析	449
12 逆动力学问题	461
§ 12·1 多刚体系统的逆运动学	462
§ 12·2 多刚体系统的逆动力学	474
§ 12·3 柔性多体系统的逆动力学	485
13 柔性臂系统的轨迹控制	502
§ 13·1 计算力矩法	502
§ 13·2 变结构控制	518
参考文献	535
索引	558
外国人名译名对照表	566
英文书名、作者名、内容简介及目录	569

基 础 篇

1

绪 论

§ 1.1 柔性多体系统动力学

柔性多体系统动力学研究由可变形物体以及刚体所组成的系统在经历大范围空间运动时的动力学行为。这门学科有时又称为多柔体系统动力学,这是相对于人们所熟悉的多刚体系统动力学而言的,两者合起来称为多体系统动力学。多刚体动力学是以系统中各部件均抽象为刚体,但可以计及各部件联结点(关节点)处的弹性、阻尼等影响为其分析模型的,而柔性多体动力学则在此基础上还进一步考虑部件的变形。从这一点来看,后者是前者的自然延伸和发展。两者的研究对象都是多体系统,但它们各有所侧重,后者并不能替代前者。粗略地说,多刚体动力学所侧重的是“多体”这一方面,研究各个物体刚性运动之间的相互作用及其对系统动力学行为的影响;柔性多体动力学则侧重“柔性”这一方面,研究物体变形与其整体刚性运动的相互作用或耦合,以及这种耦合所导致的独特的动力学效应。变形运动与刚性运动的同时出现及其耦合正是柔性多体系统动力学的核心特征。这个特征使得其动力学不仅区别于多刚体系统动力学,也区别于传统的结构动力学。事实上,柔性多体系统的动力学方程是多刚体系统动力学方