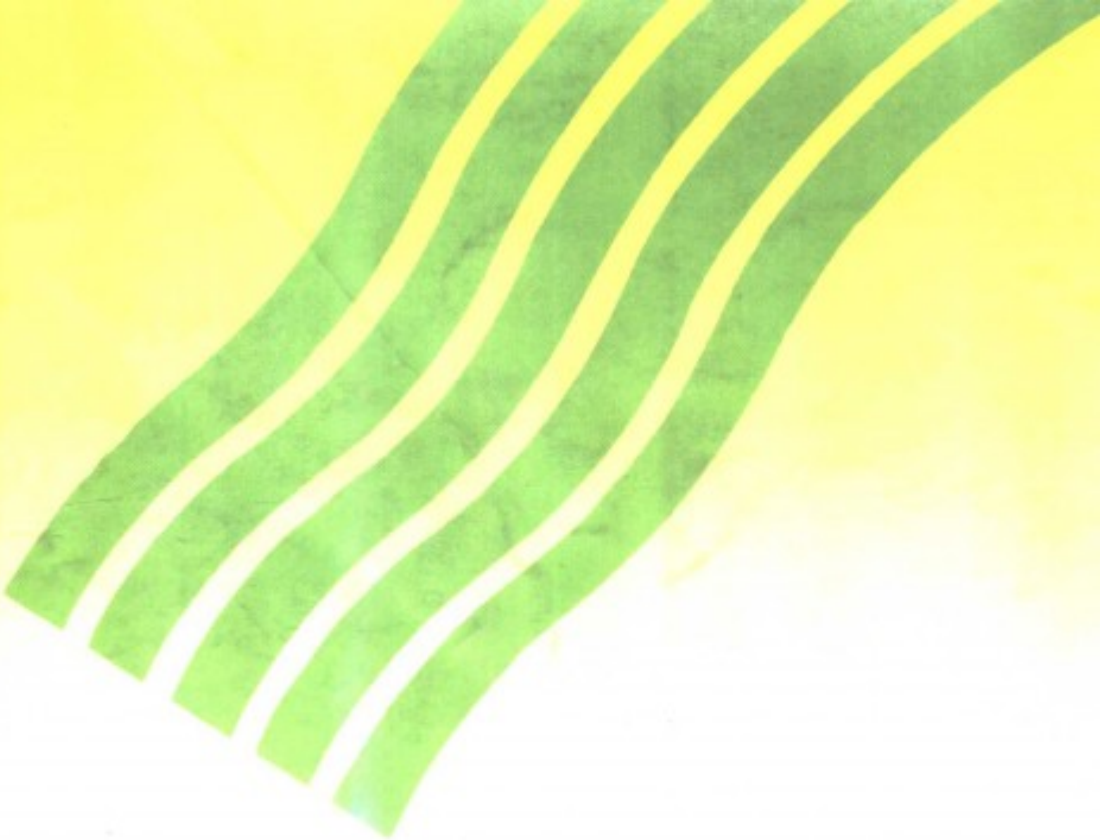




多柔体系统动力学

黄文虎 邵成勋 等 著

科学出版社

责任编辑：李成香

封面设计：张 放

ISBN 7-03-005080-0



9 787030 050809 >

ISBN 7-03-005080-0

O · 840

定 价： 22.30 元

科技新书目： 387-071

多柔体系统动力学

黄文虎 邵成勋 等著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

内 容 简 介

本书系统叙述多柔体系统动力学的基础理论和方法及其在航天器和机器人(机械臂)上的一些应用,还系统介绍了作者近几年研究的振动抑制的逆动力学方法。

本书读者对象为高等院校航天力学、机器人专业的师生及相关专业的科学技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

多柔体系统动力学/黄文虎,邵成勋等著.

-北京:科学出版社,1996

ISBN 7-03-005080-0

I. 多… I. ①黄… ②邵… II. 系统动力学,多柔体-航天学-基础理论 IV. ①N94②V 412

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第18150号

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

科地亚印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1996年10月第一版 开本:787×1092 1/16

1996年10月第一次印刷 印张:14 3/4

印数:1—800

字数:338 000

定价:22.30元

前 言

多柔体系统动力学是近 20 多年迅速发展起来的一个力学分支,它的应用背景包括带有可展开、可伸展或可转动的大型柔性附件的航天器、机器人、机械臂、某些工程机械以及一些高速精密机构。

关于多柔体系统目前尚无公认的、确切的定义,一般可理解为一个各部件间可在有控条件下相对运动的工程系统,对这种系统,用传统的结构动力学方法不足以准确地研究它,另一方面它又与控制问题密切结合,结构的柔性与控制系统的交叉问题,十分突出。

多柔体系统动力学的发展,除了由于结构柔性与控制系统交叉作用的推动外,工程系统设计现代化的要求对它也有很大推动作用,其中的因素之一,就是在设计工作中仿真工作的重要性日益显著,对于仿真,可以说动力学起到穿针引线,提携全局的作用。

因此,我们编著了这一本《多柔体系统动力学》,对多柔体系统动力学这一新兴的重要学科作比较系统的介绍,其中包括我们近几年所做的一部分工作和成果,希望它对于力学工作者、控制工作者和设计工作者都有一些参考价值,当然本书面向的主要还是从事动力学工作的技术人员,本科生和研究生。

本书共分八章,由黄文虎及邵成勋主编,参加编写人员的分工如下:第一章和第二章由邵成勋、黄文虎编写;第三章由黄建军、王兴贵、邵成勋、聂润兔编写;第四章由邵成勋、黄建军、管红根编写;第五章由王本利编写;第六章由马兴瑞、王兴贵、宋培林、许宏伟编写;第七章由王学孝、荣丽、邵成勋、陈占清编写;第八章由黄文虎、毕士华、费从宇、邵成勋编写,在编写中为了使各章不致与所依据的文献脱节,个别章节某些符号与全书符号有点不一致,当然,在文字风格上的差异也是在所难免的。

本书承清华大学王照林教授审阅,王照林教授给本书提出了很多中肯的意见和有益的建议,我们已仔细加以考虑,并深表感谢!

本书的部分研究内容得到国家自然科学基金的资助。

本书的出版还得到中央统战部王兆国部长和其他各位领导的关怀,并得到中央统战部的资助,特此致谢。

作者

1994 年 10 月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
§ 1. 什么是多柔体系统, 它的工程背景	1
§ 2. 多柔体系统动力学的发展概况	3
§ 3. 多柔体系统动力学的几个突出的问题	6
§ 4. 本书内容的安排	7
第二章 多柔体系统的描述	10
§ 1. 引言	10
§ 2. 描述体间关系的方法	12
§ 3. 多柔体系统的运动学描述	15
§ 4. 位形坐标的选择——混合坐标法	18
§ 5. 连体参考系的设定	23
第三章 多柔体系统动力学方程的建立	29
§ 1. 引言	29
§ 2. 虚功原理	30
§ 3. 用虚功方程建立多柔体簇系统的动力学方程	32
§ 4. 用 Lagrange 第二方程推导多柔体簇系统的动力学方程	48
§ 5. Kane 方程的基本概念	51
§ 6. 用 Kane 法建立多柔体簇系统动力学方程	54
§ 7. 多柔体链系统的动力学方程	57
§ 8. 基于向量对的多柔体系统的有约束的动力学方程	66
§ 9. 用待定乘子法建立多柔体系统动力学方程	69
§ 10. 多柔体系统动力学方程的符号推导	72
第四章 多柔体系统动力学模型的降阶准则	74
§ 1. 引言	74
§ 2. 惯性完备性准则	75
§ 3. 价值函数和模态价值函数	81
§ 4. 模态价值分析准则	86
§ 5. 内部平衡降阶准则	88
§ 6. 模态的选择和分级降阶问题	97
第五章 多柔体系统动力学的几个数值解法	101
§ 1. 引言	101
§ 2. 隐式 Runge-Kutta 法 (RK 法)	102
§ 2.1 Runge-Kutta 方法的一般形式	102
§ 2.2 基于数值求积的隐式 RK 方法	104
§ 3. Gear 方法及改进	105
§ 4. 辛算法的概念和算式	107

§ 4.1 辛几何	107
§ 4.2 Hamilton 力学与辛算法	109
第六章 约束多体系统动力学理论方法及应用	115
§ 1. 引言	115
§ 2. 约束多体系统动力学的 d'Alembert - 正交补方法	115
§ 3. 约束多体链的运动学和动力学方程	118
§ 3.1 几类系统的约束多体动力学模型	118
§ 3.2 约束多体链的运动学描述	119
§ 3.3 约束多体链的动力学方程建立	122
§ 3.4 约束函数及正交补方法的约束多体链动力学方程	124
§ 4. 基于约束多体链的 d'Alembert - 正交补方法的动力学计算机仿真程序及算例	126
§ 4.1 DRCRCS 程序简介	126
§ 4.2 算例及结果分析	127
§ 5. 约束多体系统动力学的 Newton-Euler 正交法	132
§ 5.1 Newton-Euler 正交法的一般原理	133
§ 5.2 Newton-Euler 正交法在机器人动力学中的应用	135
§ 5.3 机械臂 PUMA562 实例	137
§ 6. 约束多体系统动力学的两种递推子结构方法	142
§ 6.1 子结构综合的递归消约束法	142
§ 6.2 子结构综合的一次消约束法	144
§ 6.3 子结构综合方法的应用	145
§ 7. 双机器人捕捉公共目标的协调关节轨迹规划	148
§ 7.1 机器人的无因次归一化关节轨迹	149
§ 7.2 规划轨迹的机器人约束条件	150
§ 7.3 系统关节空间的协调运动轨迹	151
§ 7.4 算例	152
第七章 飞行器对接动力学	154
§ 1. 引言	154
§ 2. 对接的动态约束条件	157
§ 2.1 导向叶片和捕获环上点的几何描述	158
§ 2.2 动态约束条件	159
§ 2.3 接触力的方向	161
§ 3. 滑动和捕获阶段的对接动力学方程	162
§ 3.1 追踪飞行器的惯性力虚功率	163
§ 3.2 主动对接机构的惯性力虚功率	165
§ 3.3 目标飞行器的惯性力虚功率	167
§ 3.4 弹性力虚功率和外力虚功率	168
§ 3.5 对接动力学方程	169
§ 4. 调整与紧固阶段的动力学方程	172
第八章 柔性机械臂振动控制的逆动力学方法	175
§ 1. 引言	175
§ 2. 简单柔性机械臂基于谱分析的构造性逆动力学方法	177

§ 2.1 简单柔性机械臂的模型	177
§ 2.2 逆动力学方法的基本原理	178
§ 2.3 构造实例	180
§ 3. 柔性机械臂两点边值逆动力学方法	182
§ 3.1 两点边值逆动力学方法	183
§ 3.2 轨迹追踪问题	184
§ 3.3 算例	185
§ 4. 柔性机械臂点位运动控制的轨迹规划	186
§ 4.1 铰关节的运动学分析	188
§ 4.2 点位运动控制的逆动力学方法	189
§ 4.3 铰关节最优和次优运动轨迹	190
§ 5. 柔性机械臂轨迹追踪控制的递推逆动力学方法	191
§ 5.1 柔性机械臂的运动学描述	191
§ 5.2 相邻连杆的运动学关系	192
§ 5.3 柔性连杆变分形式的动力学方程	193
§ 5.4 柔性机械臂的逆动力学分析	194
§ 6. 柔性机械臂逆动力学开环控制的实验研究	195
§ 6.1 实验装置简介	195
§ 6.2 伺服系统	196
§ 6.3 柔性机械臂逆动力学的实验研究	197
附录 A 关于刚体转动的一些概念	200
§ 1. 坐标转换矩阵	200
§ 2. 向量运算的矩阵表达	201
§ 3. 角速度向量与坐标转换矩阵间关系	202
§ 4. 动坐标参考系内向量的时间导数	204
§ 5. Euler 角	205
§ 6. Euler 角的时间导数与角速度向量分量间的关系	209
§ 7. Euler 参数	210
§ 8. 并矢张量	211
附录 B 关于结构动力学的一些基本概念	215
§ 1. 引言	215
§ 2. 模态展开	217
§ 3. 用模态坐标表达的结构动能和弹性变形能	219
§ 4. 振动方程的状态方程表达式	219
§ 5. 状态方程的特征值问题	220
参考文献	223

第一章 绪 论

§ 1. 什么是多柔体系统，它的工程背景

关于多柔体系统，目前尚无确切的、众所接受的定义。人们通常将多柔体系统理解为由多个柔性体（柔性部件）通过铰链（又称关节）连接而成的一个系统；相邻两个柔性部件之间可以有较大的相对刚体位移发生。因此，多柔体系统和由多个柔体组成的结构是不同的。传统意义下的结构，应该具有几何不可变性，就是说相邻两部件间除弹性变形外，不允许有相对的刚体位移发生。这样，一个固定的结构（如楼房、桥梁）的自由度数，只是它的弹性位移的自由度数。倘若结构是可移动的（如车辆，飞行器），则还需加上可能发生的整体运动的刚体自由度数。但是对于多柔体系统就完全不同了，除去各柔性体的弹性位移的自由度数以外，还有两柔性体间的关节的刚体运动自由度数。例如图1-1所示的由两个柔性臂杆组成的平面机械臂，倘若关节被锁死，它就是一个结构（悬臂梁）。它的自由度数就是弹性位移的自由度数。如果利用有限元法，可确定其弹性位移自由度数为 N_E 。但当关节不被锁死时，在关节处就可能发生相对刚体转角 θ_1 和 θ_2 。这时就构成一个由两柔体组成的多柔体系统，它的自由度数就是弹性位移自由度数与关节的刚体位移自由度数之和，在本例中 $N = N_E + 2$ 。由此可见，多柔体系统已经不是传统定义下的结构。对于多柔体系统，它的刚体位移（包括系统整体运动的刚体位移和部件间的相对刚体位移）总是和弹性位移同时发生、相互耦合的；而且这些刚体位移大都是在有控条件下发生的。例如机械臂是靠关节处的电机驱动以产生关节的相对转角，从而完成指定的操作任务的。因此可以说，多柔体系统事实上是一类在有控条件下运动的工程系统。对于这样一类不属于结构的工程系统，用传统的结构动力学理论和方法已不足以对它进行动力学分析，因此，发展了多柔体系统动力学。

目前公认，多柔体系统动力学理论的发展是以三个重要的工程领域作为背景的。这就是航天器、机器人（机械臂）和高速精密机构，尤以前两者的推动作用最大。

机器人（机械臂）必然被模化为多体系统是显而易见的。图1-1是一个例子。图1-2是一个自由飞行机器人的示意图，它是一个可移动的多体系统。目前的地面应用的机器人，它的臂杆还多是刚性的。但是用于美国航天飞机上的空间遥控机械臂已经具有相当的柔性。而机器人（机械臂）的轻型化、高速化要求的需要，特别是用于空间环境的空间机械人的发展需要，使得机器人工程领域成为推动多柔体系统动力学发展的一个重要的工程领域。

航天器工程领域是推动多柔体系统动力学发展的另一个重要领域。航天器上都需要带有大型天线和太阳帆板。这些我们都通称为柔性附件。由于航天器在空间轨道上是在接近于零的过载下（微重力、无机动情况）工作的，因此，这些附件都设计得尽可能的轻柔。又由于航天器在发射入轨过程中，要承受很大过载，因此，通常在发射时，这些附件是以紧凑形式折叠安装于航天器上，在入轨后，再展开到工作状态。图1-3就是一

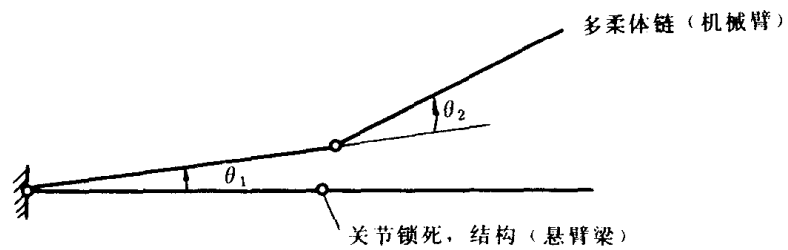


图 1-1 被模化为多柔体系统的机械臂

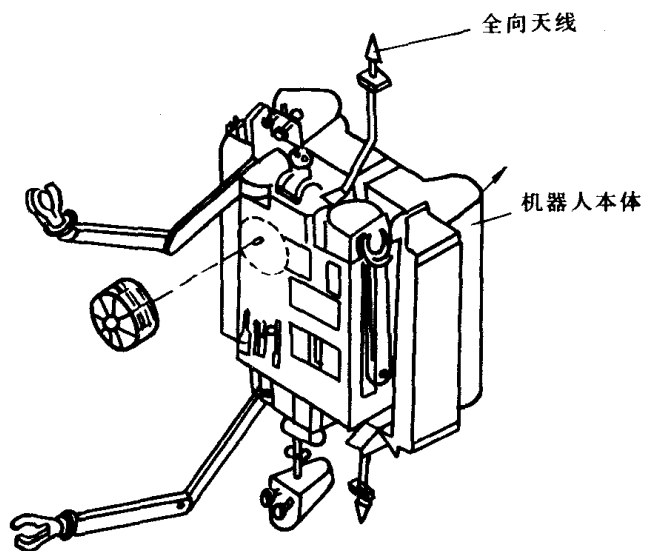


图 1-2 自由飞行机器人示意图

个具有正在展开中太阳帆板的卫星的示意图。这也是一个典型的多柔体系统。在展开过程中，除去帆板有弹性位移，帆板与卫星本体之间以及各子帆板之间都有相对的刚体位移。

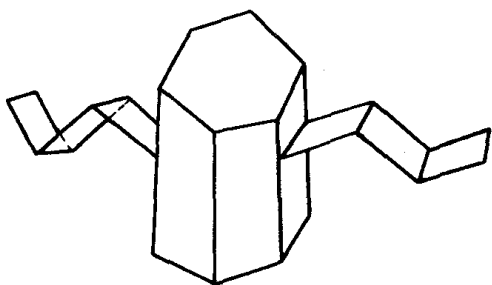


图 1-3 带展开中太阳帆板的卫星示意图

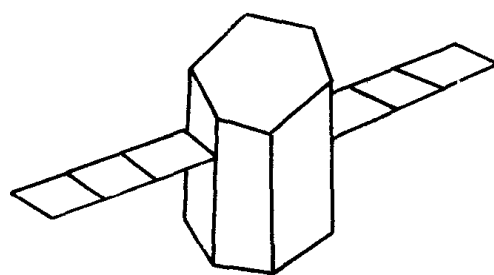


图 1-4 带展开到工作位置太阳帆板的卫星示意图

已经展到工作状态的柔性附件，与航天器之间仍可能有很大的刚体位移。例如一个地球同步卫星，24 小时对太阳转动 360 度；但太阳帆板必需是永远以最大工作面积朝向太阳，因而它必定相对卫星有刚体转动。

这样，我们就看到了两类最常见的多柔体系统：多柔体簇系统和多柔体链系统。带有几个已展到工作位置的太阳帆板（当然还包括其他已展开的柔性附件）的航天器，可以看做（或说模化为）多柔体簇系统，因为卫星本体（又可称为根体）如花托，诸柔性附件连于其上形如花簇，图 1-4 被称为多柔体簇系统。

空间机器人或带有展开中太阳帆板等柔性附件的航天器都是多柔体链系统的典型。因为在这个系统中，诸柔性体串连如链。当然，可以将簇看做是链的特例。

还有更复杂一点的系统，即多柔体树系统和有回路的多柔体树系统，如图 1-5，图 1-6。在一些复杂的高速精密机构中可能遇到这样的模型。

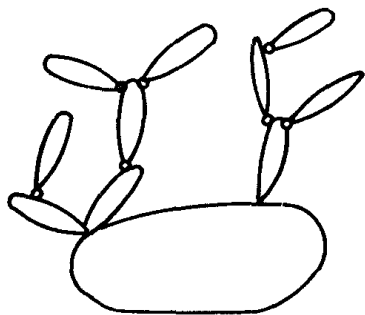


图 1-5 多柔体树系统

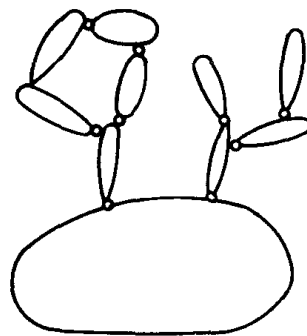


图 1-6 有回路的多柔体树系统

§ 2. 多柔体系统动力学的发展概况

从动力学角度讲，刚体是柔性体的特殊情况。因此，在讨论多柔体系统动力学发展时，必然会首先涉及到多刚体系统动力学。而且正像人们所能想象的那样，首先被发展起来的正是多刚体系统动力学。最早的工作是 H. J. Fletcher 等人在 1963 年做的。他们讨论的是由两个刚体组成的系统，使用的是向量力学中的 Newton-Euler 法^[20]。稍晚，在 1965 年 W. W. Hooker 和 G. Margulies 讨论了由 n 个刚体组成的多刚体系统^[30,31]。1968 年 R. E. Roberson 和 J. W. Wittenburg 又把图论中的概念和数学工具（关联矩阵和通路矩阵等）创造性地用于对多刚体系统的描述和动力学方程的建立中^[65]。他们的研究工作把多刚体系统动力学的研究推进到一个新阶段，并有了关于多刚体系统动力学的一本专著^[82]。到目前，多刚体系统动力学发展已较成熟，国内外都有专著^[82,90,92]。

对多柔体系统动力学的研究开展得略晚一点。这方面早期工作有 P. W. Likins 在 70 年代初的研究工作^[53,54,55]。他首先研究的是带有弹性附件的卫星的动力学问题，这就是后来被称为的多柔体簇系统。P. W. Likins 采用了由 L. Meirovitch 和 H. D. Nelson 最先提出的混合坐标^[60]，这一概念后来被广泛应用于多柔体系统动力学中。在这一时期，还有 V. J. Modi^[63]，C. S. Bodley 等人^[10]和 H. P. Frisch^[22]都在这一领域做了很多工作。

1978年C. S. Bodley等人公布了他们的DISCOS(Dynamic Interaction Simulation of Controls and Structure, 控制与结构动力学交互作用模拟)软件^[10]. 这是我们能看到的第一个关于多柔体系统的通用软件的源程序. 到此, 可以认为多柔体系统动力学的发展已初具规模, 它作为力学的一个重要分支的地位已稳固树立了. 事实上, 1977年国际理论力学与应用力学联合会(International Union of Theoretical and Applied Mechanics, IUTAM)曾组织了多体系统动力学的专题学术会议^[124]. 1983年NATO-NSF-ARD主持了关于机构系统的计算机辅助分析与优化, 也是以多柔体系统动力学作为重要主题之一^[125]. 1985年IUTAM和IFTOMM又再次召开了多柔体系统动力学学术会议^[126]. 到1989年由Stuttgart大学的力学学院主持了关于多体系统动力学分析软件的测试, 结果发表了一个手册, 系统介绍了一些软件^[68].

在多体系统动力学发展的初期, 差不多向量力学和分析力学的一些方法都被用来建立动力学方程. 最早被采用的是向量力学中的Newton-Euler法^[20, 65, 82]. 它以物理概念鲜明、建立方程直接而著称. 在分析过程中, 若需要增加体的数目, (例如在实时分析机械臂攫取物体过程时, 体的数目将有增加) 只需续增方程数目, 无需重新另行建立动力学方程组. 有些文献称之为具有良好的开放性. 这是Newton-Euler法的又一个优点. 但消除约束力的困难则是它的一个大的弱点. 以后人们还发现, 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. 此外, 还有刘延柱提出的旋量-矩阵法^[91], 也是属于向量力学范畴的方法. 更多文献在建立多柔体系统动力学方程时, 采用的大多是分析力学的各种方法. P. W. Likins曾用虚功原理^[53, 54], 这种方法繁而不难, 思路清晰. C. S. Bodley等人用Lagrange乘子法. 采用这种方法处理有约束条件的多柔体系统时特别方便, 但是它的求导数过程较繁琐, 必须十分小心^[10]. R. K. Cavin和A. R. Dusto用Hamilton原理^[14]建立动力学方程. 王学孝等人则用Jourdain原理建立了柔性航天器的对接动力学方程^[100]. 此外, 还有T. R. Kane提出的Kane方程, 它兼有向量力学的形式简洁和分析力学的不必考虑理想约束的约束反力的作用, 以及推导规范等优点, 被广泛应用于多柔体系统动力学方程的建立^[44-47, 74]. 还有一些力学工作者深入讨论了Kane方程的概念^[84, 101, 102].

以后, 随着多柔体系统动力学在航天器、机器人和高速精密机构等工程领域内的深入应用, 研究工作又向纵深发展. 由于机器人的爪端有时要在特定的表面上以特定的条件运动; 又有些复杂机构需模化成有回路的多柔体系统; 又由于多个机器人的协调操作, 因此, 约束动力学问题引起人们的注意. J. T. Wang和R. L. Huston把待定乘子法推广到Kane方程中^[81], 建立了带有待定乘子的Kane动力学方程, 它和Lagrange乘子法异曲同工. J. W. Kamman和R. L. Huston^[43], 许宏伟和马兴瑞^[107, 108]等先后用正交补矩阵消除待定乘子(Lagrange乘子), 以降低方程维数. 而Singh和Likins则用奇异值分解技术消除待定乘子^[73]. 事实上Singh和Likins采用的奇异特征向量 V 中的 V_2 就是Kamman和许宏伟采用的正交补矩阵, 出发点虽不同, 但殊途同归. 宋培林和马兴瑞还用切空间和法空间正交理论处理约束系统^[78].

随着实时模拟多柔体系统动力学过程的需要, 人们又致力于研究提高运算速度的方法. 递推型动力学方程就被提出来了^[8, 12, 29]. D. S. Bae和E. J. Haug用并行处理技术实施了递推动力学的仿真过程^[8]. 王兴贵把递推型Newton-Euler方程应用于多机器人的

协调动力学与控制中^[129].

人们还对求解动力学方程中的一些实用问题给予了很大的注意. 一个重要的、一直吸引了很多作者研究的问题就是动力学模型降阶问题. 柔性体的弹性位移的引入使动力学模型的阶数大为增加. 即使通过弹性位移的模态展开方法引入模态坐标后, 动力学模型的阶数仍然过高. 这样高阶的设计模型, 其阶数已超出了多变量控制设计技术所能提供的设计能力. 因此模型降阶问题(又称为模态截断问题)曾是很多作者研究的热点.

在众多的关于模型降阶问题的文献中, 研究的问题事实上涉及两大类. 一类是研究在求特征值问题时如何以一个低阶模型代替原系统, 而使两者所得的特征值至少在我们关心的频段范围内是工程上相符的. 另一类问题是在已求得模态而应用于模态展开时, 应选取哪些模态就可使后继分析(控制系统综合或系统仿真)有必要的精度. 前一类问题是结构动力学中感兴趣的问题, 又称为特征值提取问题. 后一类问题又称模态截取问题, 是多柔体系统动力学中更关心的问题. 在模态截取准则中最使人们感兴趣的有惯性完备性准则^[33,34], 模态价值分析准则^[75,76]和内部平衡降阶准则^[64,69]. 最近还有作者进一步研究采用什么样的模态能更好地进行航天器弹性位移的模态展开^[69,26]. 另外, 我们还可在大系统理论中找到关于降阶问题的研究, 限于篇幅, 不加引述.

在求解多柔体系统动力学方程时, 另一个使实际工作者们深感烦恼的问题, 就是解的稳定性的问题. 出现解的不稳定, 可能是物理不稳定, 也可能是数值不稳定. 一些作者由方程的非线性特点出发, 研究了它的性态, 企图弄清楚在哪些情况下可能出现物理不稳定的现象. 马兴瑞等人曾以两臂杆的柔性机械臂为例, 说明在这里存在有出现参数共振的可能^[94]. 还有文献指出当机械臂的基座作某种往复运动时, 可以出现动力不稳定现象. 张嘉钟等的实验研究与分析也说明对非线性系统可能由于“内部共振”而引起不稳定现象^[95]. 另一些作者则着重于克服数值不稳定问题的研究. 在这方面辛(Symplectic)算法受到很大重视^[96,97,98], 因为这种算法在应用于Hamilton系统时有很好的数值稳定性. 辛算法已被应用于多体系统动力学的求解中^[99].

在将多柔体系统动力学应用于机器人(或机械臂)时, 对振动的主动抑制也是一个重要的问题. 逆动力学方法是近几年提出来的一个振动主动抑制方法. 逆动力学方法是用合理设计机器人(臂)的关节驱动力矩的方法, 在机器人(臂)达到操作要求的同时, 使弹性振动被抑制到最小. 显然这是一个很吸引人的方法. 在国内黄文虎等在这方面作了系统的工作^[85-89,116,117].

另外, 近些年来, 有些学者在函数空间内, 用分布参数理论, 对多柔体动力学系统稳定性、镇定与控制进行了研究, 从而可以克服由于对无限维柔性系统的“离散化”和“截断”所产生的溢出(spillover)现象以及系统特性的“失真”问题^[127,128].

在将多体系统动力学理论推向应用中, 计算机程序是非常关键的一环. C. S. Bodley可能是唯一的一位把计算机程序(即DISCOS)全部公开发表的作者. 以后, 关于多柔体系统动力学的计算程序屡有报道^[111-115]. 1989年在Stuttgart大学的力学学院推动下曾汇集和表演了一批关于多体系统动力学的软件^[68]. 这对于推动多体系统动力学软件的发展无疑是很有意义的.

国内关于多柔体系统的研究工作大约起步于80年代初. 这些研究工作也是先在航天器及机器人领域内进行的^[103-105,100]. 还有一些学者则由一般力学角度进行了讨论. 自80

年代后期,国内也连续召开了一些学术讨论会,推动这一学科的发展.在应用方面中国空间技术研究院的总体设计部联合国内一些大学作了很深入的工作^[130],结合航天器动力学仿真,编制了若干关于多柔体系统动力学仿真的软件包,由航天器工程提出的需求推动了国内有关研究工作.

§ 3. 多柔体系统动力学的几个突出的问题

多柔体系统是一个在有控条件下运动的工程系统,在运动时,受控的刚体位移和弹性振动位移同时发生,相互耦合.这样,它的一个重要的特点就是系统的弹性振动与控制间的交互作用.由于缺乏认识而被这种影响所惩罚的例子可上溯到1958年美国第一颗“探险者1号”卫星.这是一个带有四根鞭状天线的卫星.按传统方法,卫星姿态控制系统是按刚性卫星模型进行设计的.但在运行中发现,这样设计的控制系统并未能保持姿态的稳定.正是这四根鞭状天线的振动耗散了能量从而导致卫星的翻滚.到70年代又发现美国的“国际V号”通讯卫星的挠性太阳帆板的较高阶频率的扭转振动与驱动系统发生谐振而导致帆板停转和打滑.随着在航天器上采用越来越大的弹性附件,为这一类系统的控制设计和控制品质评定建立多柔体系统动力学模型,就成为迫切的事情.这是系统弹性与控制系统交互作用的第一层意思.

再考虑像机器人(机械臂)的控制设计问题.通常爪端轨迹规划是第一步工作,然后再根据爪端轨迹确定各关节的角位移,并通过控制系统设计加以实现.爪端轨迹规划和关节角位移确定都是只根据运动学考虑作出的.这就是说,传统作法主要用基于运动学的考虑来实现实质为动力学过程的机器人控制设计问题.这样设计的控制系统,由动力学角度看难免有不合理性.当然在实施时还可考虑动力学补偿,但有时这种补偿是十分困难的.因此,系统弹性与控制系统的动力学交互作用的另一个含义应是用运动学与动力学结合的方法进行轨迹规划和控制系统设计.

再次,由于系统的弹性振动存在,总会影响系统的工作质量.例如,1982年美国发射的“陆地卫星-4”的观测仪器的旋转部分受到太阳帆板驱动部分的干扰而产生微小振动,降低了图象质量.图1-7给出了一个单臂杆柔性机械臂未加主动控制时的臂端弹性位移的时间历程;图1-8是加主动控制后的臂端弹性位移的时间历程,可以看出后者的弹性位移仅为未加控制时的1/3左右.显然,没有加主动控制时臂端的振动位移会严重影响机械臂的工作精度.随着机械臂轻型化,臂的弹性振动的自振频率会很低.特别是在空间环境下,这种低频振动一经激起就很难自行衰减掉.因此,对振动的抑制就是一个很重要的课题,其中振动的主动抑制又是一个系统弹性与控制交互作用问题.这也是在多柔体系统动力学中要特别注意研究的问题之一.

多柔体系统动力学的另一个特点是它的方程是强非线性的.一个很实际的问题就是必须考虑它的数值稳定性和物理稳定性.数值稳定性问题是我们在工作中经常受到困扰的问题,需要在数学家们提供给我们的算法中进行选择和改善.物理稳定性问题,在非线性振动中有很多研究.据报道,在振动抑制中曾发现有混沌现象.对某些类型的机械臂,在特定的参数下还可能有力学不稳定现象.这些说明多柔体系统动力学的研究,还必须与非线性理论结合起来.

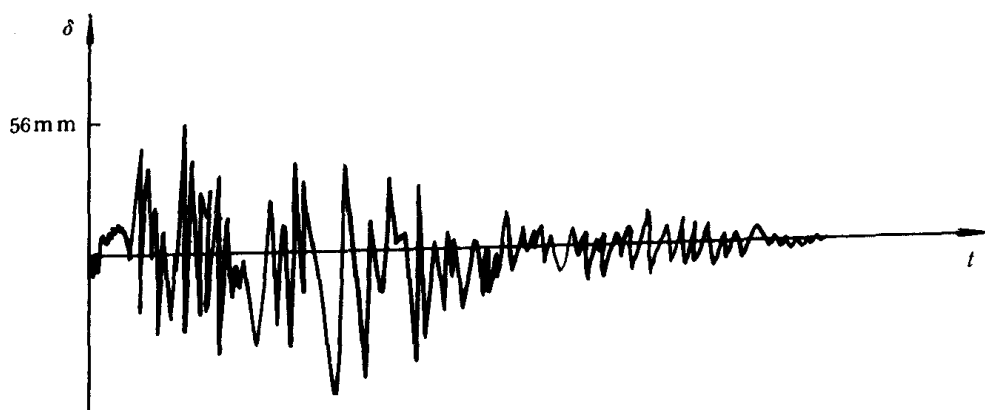


图 1-7 加主动控制前的臂端位移

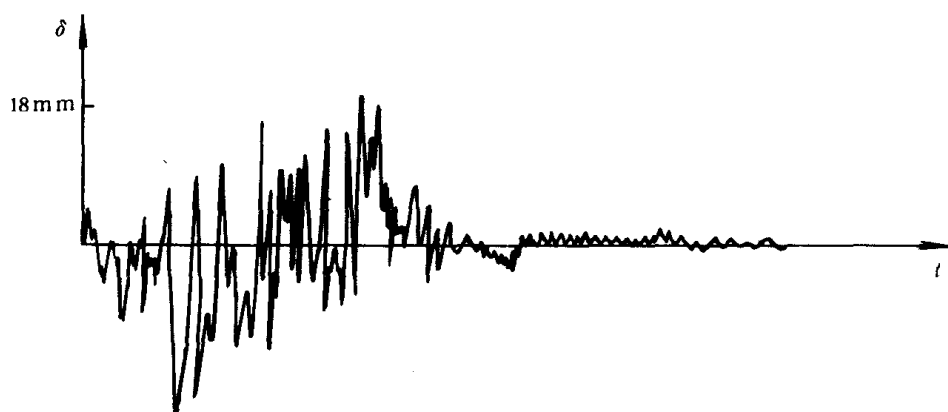


图 1-8 控制后的响应曲线

当然，可以从不同角度去说明多柔体系统动力学的特点，这里是从不同学科及学科分支之间的相互交叉角度说明它的特点。在这本书的编写过程中，力图注意上述问题，但这些都是很复杂的问题，还有待更多的研究和探讨。

§ 4. 本书内容的安排

多柔体系统动力学的基础是分析力学、结构动力学及刚体运动学和动力学。当然还有数学，特别是向量的矩阵运算。我们假定本书读者对分析力学已比较熟悉，但对另一些内容稍欠熟悉。因此，安排了两个附录，简明扼要地介绍关于结构动力学、刚体运动学和向量的矩阵运算。建议读者在阅读时可以先读一读这一部分，因为书的正文中有些公式是由这里引用的。

多柔体系统动力学的著作，我们见到过两本，都是写得很好的^[70,93]。本书与之比较起来，将主要篇幅集中到多柔体系统动力学的理论及一些实用问题上。

多柔体系统与结构不同,它是由多个相互间可在有控条件下作刚体运动的弹性体所组成的.因此对它的拓扑关系、动力学及运动学关系都有自己的描述方法.在第二章里对它作一个总的说明.

第三章讨论建立多柔体系统动力学方程的方法.有人曾说,多柔体系统动力学领域是分析力学可以尽情驰骋的广阔领地.就是说分析力学的各种方法都可被用来建立多柔体系统的动力学方程.本章着重介绍其中的虚功原理、Lagrange 方法和 Kane 方程,这里把讨论重点放在 Kane 方程上,因为 Kane 法是近 20 年大家比较注意的方法.为与 Kane 法比较,同时,较详细地介绍了虚功原理.至于 Lagrange 法,因为在分析力学书籍中有详细讨论,这里只直接引用.在这一章还讨论了有待定乘子的虚功原理和有待定乘子的 Kane 方程,并与 Lagrange 乘子法一起用来推导了多柔体树系统和有回路的多柔体系统.

第四章和第五章分别讨论了在实用中的两个重要问题.一个是模型降阶的问题,一个是数值解法问题.

模型降阶问题是动力学与控制结合过程中必须解决的问题之一.事实上,在结构动力学和大系统理论中也研究降阶模型,在那里的出发点是降阶后系统应与原系统的前若干阶特征对是一致的.我们关心的问题稍有不同,是在求得的特征对中,设法选出若干个组成降阶模型.这里着重介绍三个准则:惯性完备性准则、模态价值分析准则和内部平衡降阶准则.

在解动力学响应时,数值发散是一个经常遇到的难题.研究表明,大部分情况是数值不稳定问题;当然在一些特定情况下会有物理不稳定现象.因此,我们专门用一章篇幅讨论数值解法.除了常用的 Runge-Kutta 解法,还介绍 Gear 法,一般认为在解所谓刚性方程时有较好稳定性,以及辛(symplectic)解法,这是一个最近由冯康院士等人倡导研究和应用的有效的算法.

这三、四、五章合起来,可以为解决以多柔体簇系统为特点的航天器动力学问题和以多柔体链系统为特点的机械人动力学问题打下一个基础.

第六、七、八章事实上是几个专门问题.

约束动力学可被用来研究有约束的多柔体系统.例如有回路的多柔体树系统就是一个例子;爪端运动受约束的机器人也是一个例子.当然也可以像 Bodley 一样,用 Lagrange 乘子法研究所有多柔体系统,这也属于约束动力学.约束动力学还可看作是研究多机器人协调操作动力学的基础.具有待定系数的 Kane 方程和 Lagrange 乘子法都能把约束问题处理得非常漂亮,不过把解题的阶数增加为 $(n+m)$ 阶了.这里 n 是原有的位形变量数, m 是约束条件数.第六章介绍两个方法,即正交补矩阵法和切平面法,它们可以把问题恢复到其阶数与独立变量数 $(m-n)$ 一致.在这一章里还讨论了约束动力学在机器人中的若干应用.

对接动力学则是用多柔体系统动力学的基本方法解决航天器对接时的动力学问题,这是载人航天器飞行中的一个重要问题,在第七章里我们讨论了这个专门性问题.

振动抑制的逆动力学方法是第八章的内容.这属于主动抑制的一个方法,事实上属于一种非配置(non-located)控制.这是近几年人们很关心的一个问题.

这几章里包括了我们近几年所作的一些工作的成果.

这一本书是我们近几年在这个领域里进行工作、学习的一个小结.我们希望这本书

能把我们在本章第 3 节内谈到的有关多柔体系统动力学几个重要问题的某些侧面反映出来，但限于能力一定会有许多缺点和不足，请广大读者批评指正。