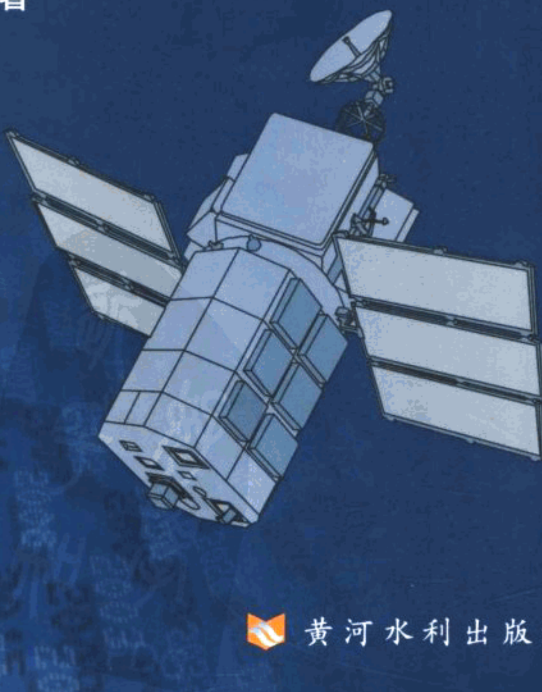
复杂挠性结构系统动力学稳定性与控制

——函数空间方法研究

徐建国 著



黄河水利出版社

复杂挠性结构系统动力学、稳定性与控制

——函数空间方法研究

徐建国　著

黄 河 水 利 出 版 社

内 容 简 介

复杂挠性结构控制工程(如柔性机器人、空间飞行器和大型挠性空间结构等)与分布参数系统理论的研究是涉及系统控制论、应用数学与力学等的一个重大课题。本书主要结合作者在该领域所进行的多个项目研究成果和国内外进展状况,论述了关于挠性结构系统动力学、稳定性与控制的函数空间方法研究的基本理论、主要框架和应用成果等。

本书可供应用数学与力学、控制理论与工程等专业研究生及进行相关应用基础研究的科技工作者阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

复杂挠性结构系统动力学、稳定性与控制:函数空间方法研究/徐建国著.—郑州:黄河水利出版社,2002.8

ISBN 7-80621-581-6

Ⅰ.复… Ⅱ.徐… Ⅲ.①柔性结构-动力稳定性-研究②柔性结构-控制-研究 Ⅳ.V21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 044460 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市金水路 11 号　　邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371-6022620

E-mail:yrcp@public2.zz.ha.cn

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:850 毫米×1 168 毫米　1/32

印张:6.125

字数:151 千字　　印数:1—1 000

版次:2002 年 8 月第 1 版　　印次:2002 年 8 月第 1 次印刷

书号:ISBN　7-80621-581-6/V·1　定价:20.00 元

序　言

随着空间科学和机器人技术的发展，以现代复杂航天器和大型挠性空间结构为对象的动力学与控制问题日益显示出其重要性，并向科技工作者提出了一系列富有挑战和急待研究的新课题。

近30年来，世界各地的力学、控制和数学专家们进行卓有成效的工作，取得了丰硕的研究成果。但是，在复杂挠性结构控制工程与分布参数系统理论领域中，尚有不少难题需待解决。有些问题的提法和解决途径尚不十分清楚，也存在不同观点的论争，特别是还没有一种为大家公认的具有实验证实的统一理论。如在挠性空间结构（飞行器，航天器等）的建模问题上，一种方法认为挠性体本质上是连续介质对象的分布参数系统，必须用偏微分方程描述；而另一种方法认为有限维离散近似模型是完全可行的。从已有的工作成果看，上述主要观点对推动本领域主要问题的解决是非常有效的，但是它们也有一定的局限性。就有限维模型论，还没有统一的方法建立截断准则以及处理截断后产生的“溢出”问题；而用连续模型设计的分布式控制规律，工程上的实现尚待发展之中。

随着理论研究的不断深入和实际工程应用的迫切需要，近年来，许多国际学术组织和专家在对前期工作总结的基础上，特别提出并强调必须从分布参数系统控制的角度研制出适应于连续介质对象模型的分析和设计方法，设计出控制乃至分布控制规律，使其成熟到易于工程实际应用。

本书是作者徐建国博士（后）阅读了国内外大量相关文献并结合其主持的国家自然科学基金、航空科学基金、国家博士后基金和广东省自然科学基金等多个项目研究的基础上，对具有挠性结构

的分布参数系统主动控制动力学、稳定性、振动镇定等课题所进行的一系列学术上的研究与发展,以作者在清华大学工程力学系一般力学专业博士、西北工业大学航天工程学院飞行力学专业博士后等研究阶段的成果为参考,本论著特别着重对函数空间方法研究的基本理论、主要框架和应用成果等进行了归纳和总结,取得了重要的研究成果。在复杂结构航天器和大型空间结构系统动力学与控制科研领域中,由于国内的研究工作不很多,而出版的专著则更少,在国际上的研究尚在发展之中,本书特别在理论上具有独特见解、精辟论述和高度概括,发展了函数空间方法在复杂挠性结构系统中的应用领域,一些模型和结果均为作者所提,有较大创新;因此尽管篇幅不很长,但所构成的完整的理论体系框架以及创新的学科研究成果具有开拓性。可以说,本书的工作在一定程度上填补了本领域的空白,体现了著作具有重要的科学理论学术价值及工程应用意义。

本书的问世将对本学科的发展起到积极推动作用。希望对同行学术研究者、青年科技研究工作者、高级工程师、研究生等具有重要的学术参考价值。

中国工程院院士
俄罗斯宇航科学院外籍院士
陈士橹
2002,7,16

前　言

伴随着当今科学技术的迅速发展，空间技术和机器人等领域内的复杂控制系统，迫切要求理论上对具有挠性结构的分布参数系统动力学、稳定性、振动与控制等课题进行系统深入地研究，以期解决工程应用中出现的诸多难题。

高科技工程应用的实践表明，上述系统的行为和规律性是十分复杂的。其复杂性主要表现为由系统的结构、形状不断趋于大型化、多体化和挠性化所诱发的大范围运动的非线性、多体子系统交联耦合和挠性的振动特性等。其中挠性结构的振动耦合对控制系统的响应性能和稳定性品质存在很大的影响，从而系统内存在的结构挠性特征和能量空间分布特征是决定系统动力学、稳定性与控制的关键因素。针对这种无穷维动力系统的本质特性，理论研究上需要将有限维矢量代数的方法拓展到无穷维函数空间方法上。

结合国内外进展和作者在该领域所进行的科学技术项目研究工作，本书主要论述和概括了关于挠性结构系统动力学、稳定性与控制的函数空间方法研究的基本理论、主要构架和应用成果等，体现了一定的科学性、系统性和先进性。

作者对中国工程院院士、西北工业大学陈士橹教授，清华大学王照林教授多年来给予的指导表示衷心的感谢；对国家自然科学基金和广东省自然科学基金以及佛山大学重点学科的资助表示诚挚的谢意。

由于作者学识所限，加之本学科领域不断更新，书中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

著　者

2002 年 5 月 10 日

徐建国，1964年生于河南潢川。1987年获西安交通大学应用数学专业硕士学位，1993年获清华大学一般力学专业博士学位，1993～1995年于西北工业大学航天工程学院从事动力学与控制学科领域博士后研究工作。现为副教授、硕士研究生导师、广东省"千·百·十"工程人员培养对象，同时，受聘为佛山大学重点学科学术带头人，广东省力学学会常务理事。多年从事挠性结构的主动控制动力学、复杂分布参数系统与控制理论及应用数学模型等方面的研究工作。先后主持国家自然科学基金、航空科学基金、中国博士后基金和广东省自然科学基金等近十项科研课题的研究；还作为主要参与者参加过国家863高科技、国家自然科学基金重点项目和原航天部协作项目等攻关课题。在《中国科学》、*Sys.Sci. & Math.Sci.*、*Appl.Math. & Mech.* 和《清华大学学报》等学术刊物和相关会议上发表或宣读论文40余篇。主要研究成果获航空工业总公司科技进步二等奖，原国家教委科技进步三等奖等多次奖励。

目　录

第一章 绪 论

第一节 关于复杂挠性结构系统若干相关问题

自从20世纪50年代末期卫星发射入轨后，随着空间科技的迅速发展，航天器的结构形状变得越来越复杂，航天器主体上的附件越来越多。如大型抛物面天线、雷达阵、伸展到离本体十几米远的仪器设备（如太空望远镜等）、空间机械臂、太阳帆板等（见图1-1，图1-2，图1-3），使得以大型挠性空间结构对象的动力学与控制问题日益成为航天高技术研究领域的重要课题。

1958年探险者Ⅰ号由于四根鞭状天线挠性振动造成系统内能耗散，导致姿态失稳。在此以后，人们开始重视挠性对飞行器动力学与控制，特别是对姿态稳定性的影响。继而，1962年发射的Alouette、1963年发射的63－22A、1966年发射的OGO－Ⅲ、1969年发射的TAC SAT－I以及1982年发射的Landsat－Ⅳ都因为没有很好地考虑结构的挠性及内部可动部件驱动的耦合作用，致使姿态控制系统性能下降以至失稳[1][2]。这些事实表明，对挠性结构的姿态和外形的要求越来越高，挠性对控制系统的响应性能和稳定性品质存在着严重影响。结构挠性有时会使控制系统的特性与在刚性体假设条件下的设计值有很大差别，严重时控制系统会出现振动，直至反作用飞轮、喷气卸载等全部被激励。传统的把整个系统作为刚体来处理的方法已经不能满足要求，因此不得不在

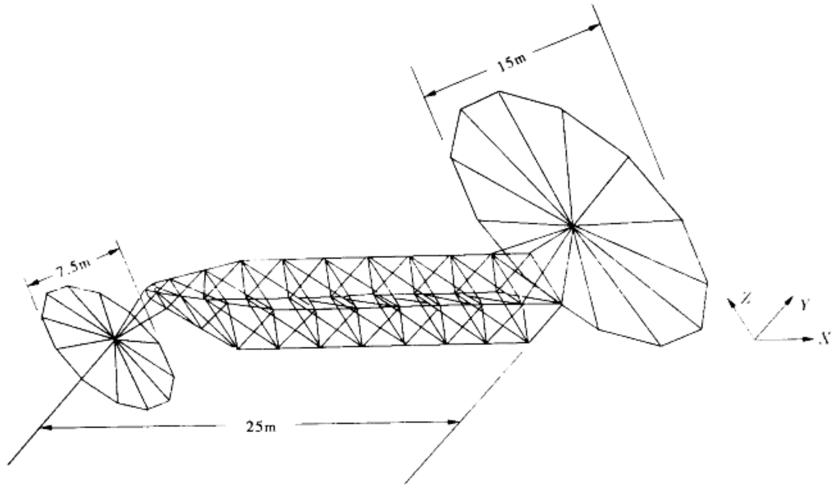


图 1-1　大型空间框架

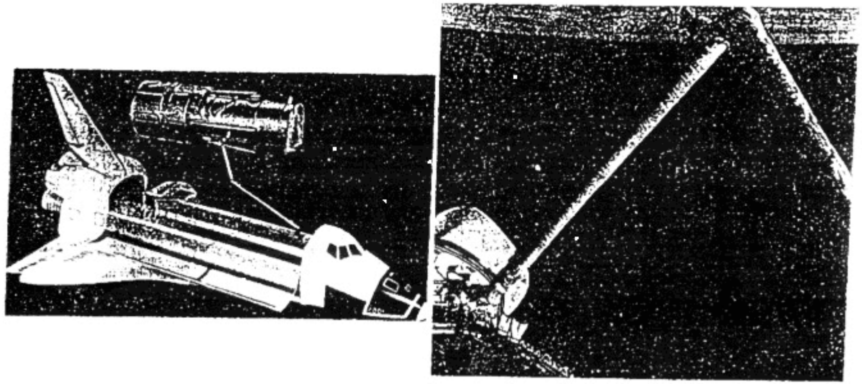


图 1-2　航天飞机及太空挠性机械臂

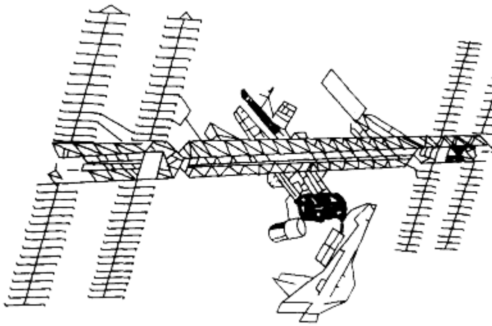


图 1-3 空间站

系统的数学模型中考虑弹性的影响。

进入 80 年代,许多大型航天器的结构和控制方案相继提出,航天科技已进入实用阶段。美国、苏联、西欧和日本都相继制定并实行空间站计划,而我国为跟踪全球范围内航天高科技也相应地提出了自己的航天发展规划。目前主要以载人飞船为初步实施对象,它的主体是多舱段的大型结构,并带有多贮液腔、太阳帆板、天线等可伸展部件,还要求有交会对接的能力,这也是一个典型的多体挠性结构复杂系统。大型结构的基本要害问题是由结构的挠性特征和系统的能量分布特征引起的。例如由于航天器质量受到限制,使得结构变得很薄,因而结构的自然频率很低,且结构阻尼也较小。

从动力学与控制的角度出发,这些大型挠性空间结构可归纳为如下特点[3][4]:①结构大、质量轻、刚度小;②本质上是分布参数系统;③结构十分复杂;④固有频率很低,且“成堆”出现;⑤系统阻尼很小;⑥挠性振动、液体晃动与控制系统是互相耦合的;⑦地面上的部件或缩尺不能完全预测它们的空间行为;⑧对姿态指向精度、消振和定位的要求很高。

上述特点说明，挠性空间结构动力学与控制带来许多新课题需要我们认真加以研究。原先处理刚体卫星以及主刚体加小挠性附件的动力学分析及控制系统设计的方法，对于大型空间结构的分析，已不够用了。比如，通常用压低姿态控制系统的频带使其与挠性振动频率分离开以及采用谐波滤波器的办法，在大型挠性空间结构上都难以满足要求。

大型挠性结构的运动形式，一是其系统的整体运动(平动与姿态运动)，二是其柔性部件的弹性振动。其姿态控制的特点是：①由于结构挠性，控制对象是无限维的，而控制器是有限维的；②出于计算的截断误差以及工程实现上的考虑，只能计算挠性附件的有限阶振型。系统存在未模型化和模型化的状态；模型化状态又分为控制状态和未控制状态。未模型化状态和未控制状态，组成了剩余模态；这些剩余模态对系统特性的影响应予以讨论。由于传感器和执行机构的使用，引入了控制溢出与观测溢出，从而使控制系统的性能不能提高，或导致系统的不稳定性。

对挠性空间结构的控制的要求有：①刚、弹模态同时控制，即姿态到位、弹性振动抑制；②避免溢出；③最少使用传感器；④鲁棒性要求。对执行机构硬件控制的要求是：①控制力和力矩加在交联处；②有限数目、有限带宽的传感器等。

如前所述，由于弹性体的控制本质上是分布参数系统的控制问题，因此，对它的研究过去有，现在仍然有如下两个方向：

其一，是把弹性体用一个有限维的集中参数系统来近似。其理由是实际系统中不存在无穷频带，一旦扰动输入的频谱分布及系统的性能指标确定之后，闭环系统的频宽便可确定；挠性结构振动频率通常大于控制频率的 10 倍时，将对系统不产生任何影响[2]，因而认为用有限维模型是完全可行的。同时这样做的主要原因还在于能够提供工程上易于实现的点测量和点控制。这种方法采用模态分析(包括假定模态或有限元)法把无穷维的分布参数

系统截断成有限维低阶模型进而用已成熟的集中参数系统控制理论研究其控制问题，这样将给研究工作带来极大的方便，但是另一方面却必然导致“溢出”(Spillover)现象的发生[3]。Spillover 问题是由截断高阶模态而产生的，系统在闭合状态下工作时，被截断的高阶模态就与含有控制器的低阶模态系统相互作用，这种现象就是 Spillover 现象。溢出包括两部分：①是模型误差而产生的溢出；②是模型化后的未控状态对系统的作用而产生的溢出(见附录)。由于 Spillover 现象的存在，使控制性能不能提高，或使设计的控制系统变得不稳定。如何进行截断、选取近似系统的维数以及受控状态的个数是截断中首要考虑的问题[2][4][5][6]。从动力学的角度看，需要关心的只是挠性体的动态性质，因此希望近似系统的维数大一些，以便更好地反映系统性能。这样做的结果是导致了一个大的矩阵特征值问题；而另一方面，就控制而言，则希望系统的维数小一些，因为大维数的系统对控制来说是个灾难。截断准则就是想在一定程度上从一定角度回答上述问题。现有的截断准则有模态频率、惯性完整性、适定阻尼、能控度与能观度以及模态价值分析等[4][7]。这些准则是针对特定问题提出来的，带有一定的主观性和局限性，有时好用，有时不好用。例如，对挠性空间机械臂而言，就大部分文献看，只保留一阶模态，将二阶以上全部截断，但还没有统一的理论根据。因此尚存在理论上没有解决的难题，特别是对于寻求一个便于判断且能比较全面反映模型误差的准则，尚有很多工作要做。

其二，则是认为挠性空间结构是连续介质的分布参数系统，用偏微分方程和泛函分析的理论研究其控制。从60年代起，这方面的研究一直在进行，且取得了不少成果[8][9][10][11][12][13]。这里分布参数控制包括两层含义：一是用偏微分方程来描述挠性空间结构对象，用泛函空间中算子符号演算公式辨识系统的主要参数，然后用分布参数控制的方法，对挠性结构进行控制；二是采取分布式

敏感器与执行机构获得完善的测量与控制信息，达到能控度与能观度最大，以便进行主动的振动形状控制。随着现代科学理论和高技术的发展，使得分布参数系统的研究有了很大进展，成为现代控制理论中一个重要分支，并引起人们的广泛重视。

在下一节，我们将简要地表述分布参数系统控制的理论基础以及国内外关于挠性结构分布参数系统控制的研究现状。

第二节　泛函分析、半群理论与分布参数系统控制

众所周知，集中参数控制对象是由常微分方程描述的有限维系统，系统状态是有限维矢量，其状态空间法就是有限维矢量代数(线性代数)的方法。如前所述，分布参数控制的对象是无穷维系统，它由偏微分方程所描述。如弹性梁的运动体，其运动状态不仅依赖于时间，而且还依赖于空间变量。像梁的横向振动位移 $u(t,x)$，不同的时间，梁的振动位移不同，即使同一时间，梁上不同点 x 处的位移也不同。因而分布参数系统的状态空间则是无限维函数空间(特别地，Hilbert 空间)。因此要研究分布参数系统控制，首先是把有限维空间矢量代数理论推广到无穷维函数空间中去，这正是泛函分析所要研究的问题；同时，在集中参数系统控制理论中，跃迁阵(或状态转移阵)对应着的算子半群理论在分布参数系统控制理论中起着重要的作用，是研究无穷维系统的有力工具。

一、泛函分析

泛函分析是研究无穷维线性空间上的泛函数与算子理论的一门分析数学。无穷维线性空间是描述具无限多自由度的物理系统

的数学方法。因此，泛函分析是定量地研究诸如连续介质力学、电磁场理论等一类具无穷多自由度的物理系统的有力工具[14]。

在泛函分析中，首先要把有限维向量空间的概念，推广到一般线性空间，包括由函数类形成的无限维线性空间；其次还要把有限维空间上的线性变换推广到一般度量空间上的算子理论，特别是赋范线性空间上的线性算子理论；对偶空间和伴随（或共轭）算子的研究是算子理论的一个重要组成部分。还要把矩阵特征值的概念推广到一般线性算子的谱理论[15][16][17][18][19]。

1. 线性赋范空间、Banach 空间、Hilbert 空间[19][20][21][22]

设 E 是实（或复）数域 F 上的一线性空间，如果对每个元素 $x\in E$，有一个确定的非负数 $\|x\|$ 与之对应，并满足下列条件：

(1) $\|x\|\geqslant 0$，且 $\|x\|=0$ 的充要条件($\Rightarrow$)是 $x=0$；

(2) $\|\alpha x\|=|\alpha|\,\|x\|$，其中 $x\in E$，$\alpha\in F$；

(3) $\|x+y\|\leqslant\|x\|+\|y\|$，$x,y\in E$。

则称 E 为线性赋范空间，而 $\|x\|$ 为元素 x 的范数。

完备的赋范空间称为 Banach 空间。所谓完备性是指：对于任意点列 $\{x_n\}\subset E$，满足 $\|x_m-x_n\|\to 0\ (n\to\infty, m\to\infty)$（称这样的序列为 *Cauchy* 点列），而且存在 $x_0\in E$，使得 $x_n\to x_0$（即 $\|x_n-x_0\|\to 0, n\to\infty$）。

设 H 为复数域 C 上的线性空间，若从 $H\times H$ 到 C 中定义了一个函数 $\langle\cdot,\cdot\rangle$，使对任意 $x,y\in H$ 满足：

①$\langle x,y\rangle=\overline{\langle y,x\rangle}$，其中 $\overline{\langle y,x\rangle}$ 为 $\langle y,x\rangle$ 的共轭复数；

②对任意复数 α、β，有 $\langle\alpha x+\beta y,z\rangle=\alpha\langle x,z\rangle+\beta\langle y,z\rangle$；

③$\langle x,x\rangle\geqslant 0$，当且仅当 $x=0$ 时，$\langle x,x\rangle=0$。

则称函数 $\langle\cdot,\cdot\rangle$ 为 H 上的内积，定义了内积的空间 H 称为内积空间。显然若在内积空间中定义范数 $\|x\|=\sqrt{\langle x,x\rangle}$，$x\in H$，则 H 成为赋范线性空间。

完备的内积空间称为 Hilbert 空间。如 $[a,b]$ 区间上绝对平