

*Decentralized Vibration
Control of Large Flexible Structures
— Theory and Method*

大型挠性结构分散化振动控制 ——理论与方法

(第2版)

李东旭 著

国防科技大学出版社

大型挠性结构分散化振动控制 ——理论与方法 (第2版)

李东旭 著

国防科技大学出版社

·长沙·

图书在版编目(CIP)数据

大型挠性结构分散化振动控制——理论与方法/李东旭著.—2版.—长沙:国防科技大学出版社,2010.1

ISBN 978-7-81099-620-4

I.大… II.李… III.航天器—结构振动—分散控制:振动控制 IV.V414

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 209221 号

国防科技大学出版社出版发行

电话:(0731)84572640 邮政编码:410073

<http://www.gfkdcbs.com>

责任编辑:石少平 责任校对:黄煌

新华书店总店北京发行所经销

国防科技大学印刷厂印装

*

开本:850×1168 1/32 印张:14 字数:364千

2002年5月第1版 2010年1月第2版第1次印刷 印数:1-1500册

ISBN 978-7-81099-620-4

定价:36.00元

第 1 版前言

随着航空航天事业的发展，各种不同形式的大型挠性结构应运而生。如大型飞机的机翼，直升机的螺旋桨、尾翼，卫星、飞船、空间探测器、空间站等的太阳能电池翼、天线、机械臂等。这些结构由于受发射重量的限制以及太空作业的特殊需要，往往具有质量轻，跨度大，构型复杂（一般为可伸缩或可折叠的多体结构的特点）。又由于太空环境中没有空气阻尼，而结构本身的阻尼微乎其微，因此，这些结构实际上处于零阻尼状态。这样的结构在这样的工作环境下必然表现出非常复杂的结构动力现象。任何一个干扰，如太阳风、流星雨、调姿、变轨、对接碰撞、机构活动、结构伸展等，都将引起这些挠性结构激烈且持续的振动。而由此产生的振动又给航天器带来极为不利的影晌。轻则影响航天器的正常工作，降低工作精度，缩短工作寿命；重则可使整个航天器失稳翻滚，遭致毁灭性的打击。因此有必要对大型挠性航天结构的振动采取振动控制措施。又由于这类结构振动系统往往庞大且复杂，并且常规的传感器、作动器以及星载计算机都受到太空作业的特殊限制，使得传统的集中控制方法在这种情况下难以实现。因此研究大型挠性航天结构分散化振动控制的理论与方

法具有十分重要的理论意义和实用价值。

本书较系统地介绍了大型挠性航天结构的主要类型，这类结构的结构动力学分析、振动控制系统的数学建模、大系统分散控制理论、分散化振动控制理论等。本书共七章。

第一章，绪论。主要介绍大型挠性结构的工程背景及其结构动力学问题；目前主要的振动控制方法；大型挠性结构振动控制面临的挑战；以及分散控制的基本思想。

第二章，结构动力学基本理论。主要介绍结构振动模态分析的基本概念；有阻尼振动与无阻尼振动的特点；组成大型挠性结构的基本单元及其结构动力学模型；复杂组合体的结构动力学模型；多自由度系统的结构动力学基本方程；以及多自由度系统振动模态的基本特征。

第三章，线性控制系统基本理论。主要介绍系统能观性与能控性的基本概念；控制器设计的基本方法；以及系统稳定性基本理论。

第四章，大系统分散控制原理。主要介绍大系统分散化的基本概念与方法；分散稳定化的基本理论；以及分散最优与满意决策的基本原理。

第五章，结构振动分散化控制系统。主要介绍结构振动控制系统的数学模型，包括基于广义位移、模态坐标及弹性应变等不同数学空间和不同物理坐标下的振动控制系统模型；以及振动控制系统的解耦及分散。

第六章，结构振动分散化控制理论。主要介绍结构振动控制的基本理论，包括：振动控制系统可控性理论；基于动态补偿的分散稳定化理论；基于局部状态反馈的分散控制理论；振动系统的多级分散控制理论；以及振动系统分散控制器设计方法。

第七章，振动系统分散控制数值仿真。本章以一些典型的空问结构为例，运用分散控制的方法，对振动的分散控制系统进行了数值仿真研究。

本书所涉及的研究得到了国家“863”高技术研究项目经费及国防科技大学“九五”科研经费的支持。在此，特表示衷心感谢。

由于作者水平所限，书中错误和缺点在所难免，欢迎读者批评指正。

著 者

2001年5月

于长沙国防科技大学

第 2 版前言

关于结构振动控制的研究与应用已有近百年的历史，然而关于大型挠性结构的振动控制目前还是一个世界性的难题。主要原因是这类结构系统庞大而复杂，传统的控制方法不能解决它们的问题。

这类问题的典型代表是航天器大型挠性结构的振动控制问题。关于大型挠性航天结构的动力学特性分析请参见作者的另一本专著：《挠性航天器结构动力学》（科学出版社，2009.2）。在那本书中，可以较多地了解到大型挠性结构的构型特点，和这类结构系统所呈现出的高维性、复杂性，以及这类结构由于跨度大、质量轻、阻尼弱等特点所带来的低频、密模、非线性等复杂动力学问题。对于航天器挠性结构，由于各种干扰因素不可避免，该结构的振动必然发生，不可避免。又由于太空环境中不存在大气阻尼，振动一旦被激起，就很难自行衰减。这种振动对航天器是非常有害的：轻则，影响航天器正常工作，降低航天器的姿态稳定性和指向精度，缩短航天器的工作寿命，等等；重则，可以直接危害航天器的安全，造成灾难性后果。因此，对航天器挠性结构的振动控制势在必行。

目前经典控制理论和现代控制理论在系统的设计和

控制方面都得到了许多的应用，例如：建模方法、系统品质方法、控制方法等等。然而，所有这些方法都有一个基本的假定：“集中性”。即所有的计算都是依据系统信息（以前的系统信息或传感器采集的信息），且系统信息又集中在给定的中心，通常是集中在一个地理位置上。对于大型挠性航天结构，由于结构系统庞大且复杂，航天结构的特殊要求以及空间环境的特殊性也限制了传感器安装的数目与位置，同时星载计算机的计算能力也难以完成如此庞大的计算，因此这类结构系统由于缺乏集中计算能力和缺乏集中的信息而不能保持集中性。这就使得传统的集中控制方法在这种情况下难以实现。因此研究大型挠性结构分散化振动控制的理论与方法具有十分重要的理论意义和实用价值。

本书基本保持了第1版的内容和编排风格，在第1版的基础上增加了两章内容，即第八章和第九章。

第一章，绪论。主要介绍大型挠性结构的工程背景及其结构动力学问题；目前主要的振动控制方法；大型挠性结构振动控制面临的挑战；以及分散控制的基本思想。

第二章，结构动力学基本理论。主要介绍结构振动模态分析的基本概念；有阻尼振动与无阻尼振动的特点；组成大型挠性结构的基本单元及其结构动力学模型；复杂组合体的结构动力学模型；多自由度系统的结构动力学基本方程；以及多自由度系统振动模态的基本特征。

第三章，线性控制系统基本理论。主要介绍系统能观性与能控性的基本概念；控制器设计的基本方法；以及系统稳定性基本理论。

第四章，大系统分散控制原理。主要介绍大系统分散化的基本概念与方法；分散稳定化的基本理论；以及分散最优与满意决策的基本原理。

第五章，结构振动分散化控制系统。主要介绍结构振动控制系统的数学模型，包括基于广义位移、模态坐标及弹性应变等不同数学空间和不同物理坐标下的振动控制系统模型；以及振动控制系统的解耦及分散。

第六章，结构振动分散化控制理论。主要介绍结构振动控制的基本理论，包括：振动控制系统可控性理论；基于动态补偿的分散稳定化理论；基于局部状态反馈的分散控制理论；振动系统的多级分散控制理论；以及振动系统分散控制器设计方法。

第七章，振动系统分散控制数值仿真。本章以一些典型的空结构为例，运用分散控制的方法，对振动的分散控制系统进行了数值仿真研究。

第八章，结构振动分散输出反馈控制理论。本章研究结构振动系统的分散化输出反馈振动控制问题。利用系统测量输出来构建分散化控制器，主要包括：分散保代价静态输出反馈控制器、分散 H_2 动态输出反馈控制器和分散鲁棒 H_2 动态输出反馈控制器。

第九章，智能结构分散化振动控制数值仿真。本章以表面粘贴压电作动器的智能悬臂板结构研究对象，进

行分散化输出反馈振动控制数值仿真。包括：分散保代价静态输出反馈控制数值仿真，分散 H_{∞} 动态输出反馈振动控制数值仿真，和分散鲁棒 H_{∞} 动态输出反馈振动控制数值仿真。

本书自 2002 年出版以来受到广大读者的欢迎，很快便销售一空。这些年来，不断有读者向我索要此书，然而此书再版之事却一拖再拖。之所以拖到今天，一方面的确因为很忙没有时间考虑再版的事情，另一方面，也是更主要的一方面，是想等我们还在做的一些研究能有点成果出来好添加到书中去。感谢我的学生蒋建平博士，此书中的第八章和第九章主要来自他博士阶段的研究成果。

特别感谢我的好朋友陈小前博士（我们空间所的副所长），正是在他的积极帮助下促成了此书再版的实施。非常感谢国防科技大学出版社为本书的再版及稿件的校对、编辑等付出了艰辛的努力。感谢所有关心、支持、帮助过我和我的专著的人们。本书研究得到了国家“863”高技术研究等许多相关研究项目的经费支持。在此，特表示衷心地感谢。

由于作者水平所限，书中错误和缺点在所难免，欢迎读者批评指正。

著 者

2010 年元月于国防科技大学

目 录

第一章 绪 论

- 1.1 航天与航天结构 (1)
- 1.2 振动控制方法 (5)
- 1.3 分散控制理论的基本思想 (7)

第二章 结构动力学基本理论

- 2.1 结构动力学基本问题 (9)
- 2.2 结构单元动力学分析 (10)
 - 2.2.1 弦的振动 (10)
 - 2.2.2 杆的纵向振动 (15)
 - 2.2.3 杆的扭转振动 (18)
 - 2.2.4 细长梁的横向振动 (20)
 - 2.2.5 组合梁的振动及梁的组合振动 (30)
 - 2.2.6 圆环的振动 (39)
 - 2.2.7 薄膜的振动 (45)
 - 2.2.8 板的横向振动 (47)
- 2.3 复杂结构的模态综合技术 (73)
 - 2.3.1 部件模态的基本概念 (74)
 - 2.3.2 无阻尼自由振动系统的综合方法 (77)
 - 2.3.3 自由部件模态 (82)
 - 2.3.4 残余柔度及残余部件模态 (89)
- 2.4 多体结构动力学模型 (102)

2.4.1	连接单元模型	(102)
2.4.2	多体模型	(107)
2.5	一般多自由度系统模态分析	(124)
2.5.1	多自由度系统的一般特性	(125)
2.5.2	多自由度系统的模态	(129)
2.5.3	固有频率与固有模态的特性	(132)
第三章 线性控制系统基本理论		
3.1	系统的基本概念	(139)
3.1.1	单变量系统与多变量系统	(139)
3.1.2	系统输入—输出描述	(140)
3.1.3	线性系统状态空间描述	(144)
3.2	系统的能控性与能观性	(151)
3.2.1	能控性	(151)
3.2.2	能观性	(156)
3.2.3	对偶性	(159)
3.2.4	状态空间的标准分解	(160)
3.3	系统的稳定性	(162)
3.3.1	稳定性概念	(162)
3.3.2	稳定性判据	(165)
3.4	线性反馈控制率设计	(173)
3.4.1	状态反馈和输出反馈	(173)
3.4.2	系统状态空间描述的能控规范形和能观规范形	(179)
3.4.3	单变量系统极点配置	(184)
3.4.4	多变量系统极点配置	(192)

第四章 大系统分散控制原理

- 4.1 分散控制的概念与方法 (196)
- 4.2 分散稳定理论 (200)
 - 4.2.1 固定多项式和固定模式 (200)
 - 4.2.2 用动态补偿的稳定化 (205)
 - 4.2.3 用局部状态反馈的稳定化 (209)
 - 4.2.4 用多极控制的稳定化 (219)
- 4.3 系统分散次最优控制设计 (225)
 - 4.3.1 无约束极小化的最优分散控制 (225)
 - 4.3.2 用顺序最优化的分散控制 (228)
 - 4.3.3 大系统的状态估计 (230)

第五章 结构振动分散控制系统

- 5.1 基于物理坐标的振动控制系统 (239)
- 5.2 基于模态坐标的振动控制系统 (239)
- 5.3 具有动态补偿的结构振动分散控制子系统 (243)
- 5.4 局部状态反馈的振动分散控制子系统 (247)
- 5.5 多级分散振动控制子系统 (248)

第六章 振动系统分散控制理论

- 6.1 振动系统的可控性理论 (253)
- 6.2 具有动态补偿的分散化振动控制理论 (262)
 - 6.2.1 基于结构模态参数的控制理论 (262)
 - 6.2.2 基于结构物理参数的分散控制理论 (269)
- 6.3 具有局部状态反馈的分散化振动控制理论 (274)
 - 6.3.1 局部反馈定理 (274)
 - 6.3.2 振动控制定理 (280)

6.4	结构振动系统多级分散控制理论	(283)
6.4.1	全局反馈与系统解耦	(283)
6.4.2	局部反馈控制率设计	(285)
6.5	结构振动系统分散最优控制方法	(286)
6.5.1	振动系统的最优控制	(286)
6.5.2	振动系统的次最优控制	(289)

第七章 挠性结构振动系统分散控制数值分析

7.1	极点配置算法	(292)
7.1.1	单输入系统状态反馈极点配置算法	(292)
7.1.2	多输入系统状态反馈极点配置法	(295)
7.1.3	单输入情况下结构的振动集中控制	(296)
7.1.4	多输入情况下结构的振动控制	(303)
7.1.5	讨论	(307)
7.2	分散控制方法的应用	(307)
7.2.1	基于模态参数的动态补偿分散控制	(307)
7.2.2	基于结构物理参数的动态补偿分散控制	(314)
7.2.3	局部状态反馈分散控制	(326)
7.3	卫星太阳能帆板振动控制系统的建模与仿真 ..	(333)
7.4	大型运载火箭振动控制系统的建模与仿真	(352)
7.5	空间站大型外伸结构振动控制系统的建模与仿真	(365)
7.5.1	研究模型	(365)
7.5.2	多级分散控制	(367)
7.5.3	帆板振动的多级分散化应变控制	(371)

第八章 结构振动分散输出反馈控制理论	
8.1	分散保代价静态输出反馈控制理论 (390)
8.1.1	分散保代价静态输出反馈控制 (390)
8.1.2	分散保代价静态输出反馈控制器设计 ... (392)
8.2	结构振动分散 H_{∞} 动态输出反馈控制理论 (395)
8.2.1	分散 H_{∞} 动态输出反馈控制 (395)
8.2.2	分散 H_{∞} 控制器迭代设计 (399)
8.2.3	分散 H_{∞} 控制器直接设计 (401)
8.3	结构振动分散鲁棒 H_{∞} 动态输出反馈控制理论 (405)
8.3.1	结构振动系统的参数不确定性 (405)
8.3.2	分散鲁棒 H_{∞} 动态输出反馈控制 (406)
8.3.3	分散鲁棒 H_{∞} 控制器迭代设计 (408)
第九章 智能结构分散化振动控制数值仿真	
9.1	智能悬臂板振动控制系统模型 (412)
9.2	分散保代价静态输出反馈控制数值仿真 (416)
9.3	分散 H_{∞} 动态输出反馈振动控制数值仿真 (420)
9.3.1	迭代设计结果 (420)
9.3.2	直接设计结果 (424)
9.4	分散鲁棒 H_{∞} 动态输出反馈振动控制数值仿真 (425)
参考文献 (428)	

第一章 绪 论

1.1 航天与航天结构

1957年10月,苏联成功地发射了第一颗人造地球卫星。从此,开始了人类征服太空的新时代。随着航空航天事业的发展,空间结构的振动控制问题也已提到了议事日程。航天器作为大型空间结构,包括人造地球卫星、载人飞船、空间站、宇宙探测器等便应运而生。

在空间活动的初期,由于航天器规模较小,结构紧凑,构造简单,而且对航天器控制性能要求不高,因此把航天器当作一个刚体进行控制,常常可以得到满意结果。但是也有例外,最典型的例子是1958年发射的美国第一颗人造地球卫星 Explorer(自旋稳定)。卫星入轨后,由于悬在星体外面的四根鞭状天线的弹性振动,造成系统的内能耗散,最后导致卫星姿态失稳而翻滚。在这之后,陆续有些卫星因为非刚性运动的影响而导致姿态控制性能下降或失稳。例如1962年发射的 Alouette I(自旋稳定);1963年发射的 1963-22A(引力梯度稳定);1964年发射的 Explorer X X(自旋稳定);1966年发射的 OGO III(反作用飞轮控制),OVI-X(引力梯度稳定);1969年发射的 TACSAT-I(双自旋稳定),AFS-5(自旋稳定加主动阻尼器)等。这些挫折与教训告诉人们,即使是早期的卫星,采用刚体模型也可能是失败的。后来,人们又提出半刚体模型,用以修正刚体模型。半刚体是指考虑了内耗散影响的刚体,也

即在考虑运动学问题时,把星体视为刚体,而在考虑动力学问题时,又要计入星体非刚体运动所引起的内能耗散。这一模型对研究早期卫星的动力学与控制问题有着重要意义。由于早期卫星刚度大,星体内部的相对运动影响不明显,因此,半刚体模型充分地描述了早期卫星的动力学特性。随着航天事业的发展,航天器承担的任务越来越多,航天器的规模也就越来越大,对航天器控制性能的要求也越来越高。例如美国国际通信卫星 V,带有两个太阳能电池翼,每翼由三块板组成,每块板尺寸为 $1.91\text{m} \times 1.71\text{m}$ 。两翼展开后跨度达 15.06m 。而且,卫星的质量受发射条件的限制,使得卫星的刚度很低,于是弹性运动的影响再也不能忽略不计。

航天飞机发射成功,天地往返运输系统提到议事日程,航天器的规模便不再受一次发射条件的限制了。大型航天器可在空间用模块式对接组装而成。80年代初美国航天局研制成功航天飞机以后,就开始永久性载人空间站的概念研究。较大型的天空实验室、空间站等已被送上地球轨道。航天器的规模已非早期卫星所能相比。例如,1986年2月苏联发射的“和平”号空间站,长 13.1m ,重 21t ,可容纳 $5 \sim 6$ 名宇航员。空间站侧面装有 3 个大型太阳能电池翼,每翼的面积达 38m^2 。“和平”号上设有 6 个对接口,可供各种类型的航天器模块对接。例如,1987年2月16日苏联发射了“联盟”TM-2 载人飞船,两天后与“和平”号对接。同年3月31日发射了“量子”号天文物理实验舱,4月12日与“和平”号对接。数天后,“量子”号上的推进舱脱离了“量子”号主舱进入更高轨道,使“量子”号后部露出第二个对接口。4月21日又发射了“进步-29”号货舱,两天后在“量子”号后部对接,从而组成长达 35m ,总重 50t ,密封舱容积达 150m^3 的大型轨道复合体。这样的复合体还可以通过再对接使规模进一步扩大。

1984年,美国总统里根批准永久性载人空间站的计划。这个