

基于智能结构的空间大型可展开天线 H_∞ 振动控制

杨要恩¹, 刘明治¹, 王庆敏², 王淑艳¹, 魏航信¹

(1. 西安电子科技大学 机电工程学院, 陕西 西安 710071;
2. 石家庄铁道学院 大型结构所, 河北 石家庄 050043)

摘要: 将智能结构应用到大型可展开天线的“在轨”振动控制中, 使得结构紧凑, 重量轻, 控制效果好, 并将 H_∞ 控制理论应用于控制系统的设计, 采用平衡降阶处理方法设计控制器。算例仿真结果表明: 所设计的大型可展开天线“在轨”振动控制智能结构系统具有良好的鲁棒性能, 并能有效地抑制外界的干扰。这为大型可展开天线的在轨振动控制系统的工作提供了依据。

关键词: 智能结构; 有限元分析; 空间大型可展开天线; H_∞ 控制

中图分类号: O327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-9830(2005)S0-0112-04

H_∞ Vibration Control Based on Intelligent Structure for Large-space Deployable Antennas

YANG Yao-en¹, LIU Ming-zhi¹, WANG Qing-min², WANG Shu-yan¹, WEI Hang-xin¹

(1. School of Mechatronics Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
2. Structural Institute, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The frame of the controller is compact and light with the application of intelligent structure to the space deployable antenna. H_∞ control theory is applied to design the control system, and a H_∞ controller is designed with balance model reduction method. The simulation results prove that the control system has a good robust performance, and can resist the influence of noise around. The results give a basis for the design of the space deployable antenna control system.

Key words: intelligent structure; finite element analysis; space deployable antenna; H_∞ controller

大型化、低刚度与柔性化是各类航天结构尤其是大型可展开天线的一个重要发展趋势, 为了保证正常工作, 空间大型网状可展开天线的表面精度需要能在相当长的运行时间内, 保证高的运行精度。但可展开天线的结构刚度低, 内阻小, 太空环境又几乎无外阻, 如不采取措施对其振动进行抑制, 在太空中运行时, 一旦受到某种激励力的作用, 其大幅度的

振动要持续很长时间。这会直接影响到可展开天线的正常工作。因此, 为了提高空间结构的工作性能和精度, 必须对结构进行“在轨”振动控制。但是, 传统被动振动控制结构, 一经设计、制造完成后, 其性能是不易改变的, 不能适应不断发展的空间结构的要求, 而一般主动振动控制系统体积大、重量大, 很难用于可展开天线的在轨振动控制^[1,2]。

收稿日期: 2005-05-21

基金项目: 国家自然科学基金(59775052); 博士学科点专项基金(k0140104)

作者简介: 杨要恩(1978-), 女, 博士生, 主要研究方向: 智能结构与控制等研究, E-mail: yaoenyang0310@sina.com.cn。

近十几年以来,随着材料科学、控制、微电子和计算机技术的迅速发展,特别是新型传感器和作动器的研究取得突破性进展,促进结构设计中新技术的发展,产生了智能结构(Intelligent structure)这种崭新的现代结构概念。由于它将传感器、控制器和作动器与主体结构融为一体,使得结构紧凑,重量减轻。可见,若将智能结构应用于天线的控制系统,就能较好地解决上述的种种问题。并将 H_∞ 控制理论应用于控制系统的设计,采用平衡降阶处理方法设计控制器,采用 Matlab 进行仿真分析。

2 智能结构在大型可展开天线中的有限元建模和动力分析

对于像大型空间网状天线这样的大型空间柔性结构(LSS)而言,一般表现为以下的特征^[3,4]:(1)固有频率低,且低频模态密集;(2)系统的阻尼小;(3)本质上的分布参数系统,强耦合及强非线性;(4)结构复杂,参数易变,所受扰动具有不确定性。鉴于以上原因,其建模是一个非常棘手的问题。特别是在加入了智能结构后,结构的复杂性也增加了,相应地,建模的难度也随之加大。如果再考虑结构的柔性,则建模的难度就将大大增加。由于用偏微分方程描述的 LSS 系统的控制模型不易获得,即使获得也难以提供有效的计算机实时控制方法。所以,对于 LSS 建模通常采用离散的方法来建模,该法先把可展开天线系统划分为铰接在一起的若干个子结构,再把每一个子结构按有限元法离散化为杆、梁、板、壳等有限元单元,求出任意单元上任意点在总体坐标系中的位移矢量、速度矢量,计算出整个系统的动能、势能及非保守力所做的功,代入拉格朗日第二类方程,得出系统运动量之间所满足的方程式。另一方面,各子结构之间用铰相连,所以上面建立的方程中的广义坐标不是相互独立的,它们一定要满足位移协调条件,这两个关系式相联立就成为多柔体系统的动力学方程式,其形式为^[5]

$$\dot{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}\mathbf{q} + \mathbf{B}^T\lambda = \mathbf{Q}_e + \mathbf{Q}_v \quad (1)$$

$$\phi(\mathbf{q}) = 0$$

这里 $\phi(\mathbf{q}) = 0$ 为位移约束方程, $\mathbf{B} = \delta\varphi/\delta\mathbf{q}$, \mathbf{q} 为广义坐标, λ 为拉格朗日乘子, \mathbf{M} 、 \mathbf{K} 、 \mathbf{Q}_e 、 \mathbf{Q}_v 分别为系统的质量矩阵、刚度矩阵、广义外力及二次速度矢量。综合法采用的是广义坐标,其建模高度规格化,很适于计算机建模,既可以显示出系统的刚弹耦合,又可避免花费很大气力去消除约束力,是适于空间可展开天线动力学建模的好方法。

笔者主要对有辅助牵引面的伞形天线进行了研究,辅助牵引面是用若干绳索组成的网状面,它与反

射面间用线相连,调其长度可调反射面精度。网状展开天线的反射面是一个旋转抛物面,由 18 根径向肋分成 18 瓣。由绳索网络和反射面网两者构成,而绳索网络又由表面绳索、背面系统和调整绳索组成,图 1 示出其 1/18 的有限元模型图。根据反射面的旋转对称性,只考虑反射面的 1/18 部分的节点如图 2 所示,表面绳索、背面绳索和调整绳索都采用杆单元,但是这些杆单元不受压力而受张力的,这就是所谓的“张力杆”概念。其有限元模型的杆单元有两种存在形式。一种是被动单元,它不含有压电元件;另一种是主动单元,含有压电元件。反射网采用膜单元,也就是空间三角形平面应力单元。和一般空间三角形板单元不同的是,膜单元只受平面内载荷,而不受弯曲载荷。主、副肋采用梁单元。通过选用以上的方法步骤用符号运算成功地完成了杆、梁、膜单元的质量阵等公式的推导,在求出各个单元的质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵后,便可以形成相应的总装矩阵并采用零位移约束处理可得到如下形式的动力学方程:

$$\ddot{\mathbf{M}}\mathbf{q} + \mathbf{C}\mathbf{q} + \mathbf{K}\mathbf{q} = \mathbf{F}$$

式中: \mathbf{M} 是约束处理后的总装质量矩阵, \mathbf{C} 是约束处理后的总装质量矩阵, \mathbf{K} 是约束处理后的总装刚度矩阵, \mathbf{F} 是天线节点受到的合力。

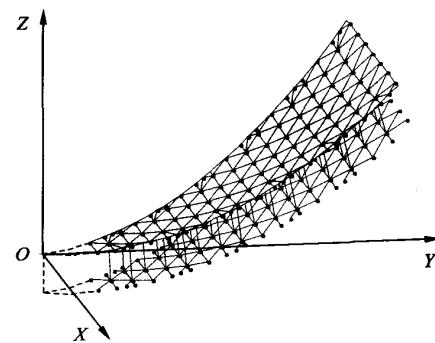


图 1 网状展开天线有限元模型图

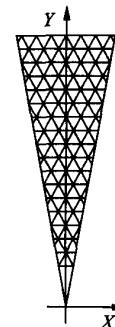


图 2 反射网面节点分布图

3 H_∞ 鲁棒控制在大型可展开天线中的应用

大型空间网状天线是大型柔性结构,在理论上通常是无限维的分布参数系统。对这样的系统若要实施完全精确的控制,则要对它的每一维都施加控制。但是,在实际中控制器是有限维的,因此在控制过程中的控制溢出和观测溢出引起系统的不稳定性是很难避免的。这恰恰是柔性振动主动控制中要解决的主要问题。此外,由于系统中存在着机电耦合和非线性等因素,使得建立起来的理论模型与实际结构间存在模型误差很大。如不考虑这些模型的不确定因素,由此涉及的控制系统往往鲁棒稳定性较差,产生模态溢出等现象。 H_∞ 控制设计方法能够处理各种模型不确定性的问题,并可将鲁棒稳定性问题与干扰抑制问题统一在一个框架下讨论,因而为大型空间网状天线的型面振动控制提供了一个有利的工具^[4]。

通过有限元建模可得到加入智能单元的网状天线结构的数学模型为

$$\ddot{\mathbf{M}}\mathbf{x} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{F}\mathbf{u} + \mathbf{G}\mathbf{w} \quad (2)$$

\mathbf{x} 为位移响应, \mathbf{u} 为系统的输入, \mathbf{w} 为外扰。 $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ 为相应阶数的矩阵, \mathbf{F} 为输入控制矩阵, \mathbf{G} 为干扰输入矩阵。

令 $\bar{\mathbf{x}} = [\mathbf{x}^T \quad \dot{\mathbf{x}}^T]^T$ 可把上式写成状态空间方程为

$$\ddot{\bar{\mathbf{x}}} = \mathbf{A}\bar{\mathbf{x}} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{D}\mathbf{w} \quad (3)$$

测量方程为

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\bar{\mathbf{x}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{K} & -\mathbf{M}^{-1}\mathbf{C} \end{bmatrix}$, $\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{F} \end{bmatrix}$, $\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{M}^{-1}\mathbf{G} \end{bmatrix}$ 。

这里得出的数学模型是高阶的,直接用 H_∞ 控制方法得到控制器的阶数很高,从而导致实现困难。因此,控制器设计的第一步便是将上述模型进行降阶处理,若 $P(s)$ 是稳定的,通过将 $P(s)$ 状态空间平衡实现中对应可控性和可观性都小的去掉,而得到 k 阶 ($k < n$) 降阶系统 $P_0(s)$,且有 $\|P(s) - P_0(s)\| \leq 2(\sigma_{(k+1)} + \dots + \sigma_n)$;其中, $\sigma \geq \dots \geq \sigma_k \geq \sigma_{k+1} \geq \dots \geq \sigma_n > 0$, σ_i 是 $P(s)$ 的 Hankel 奇异值,若 $P(s)$ 有不稳定极点,可只对其稳定部分降阶,如果 $\sigma_i = 0$,则与 σ_i 相对应的状态分量是不可控或不可观的,因此,忽略这样的状态分量并不影响系统的输入和输出特性。然后对降阶后的模型进行 H_∞ 控制设计,最后把鲁棒控制器和未降阶前的模型闭合

通过 Matlab 仿真来确定与设计指标的接近程度,如果相差不大,则此控制器被认可,否则重新设计控制器。

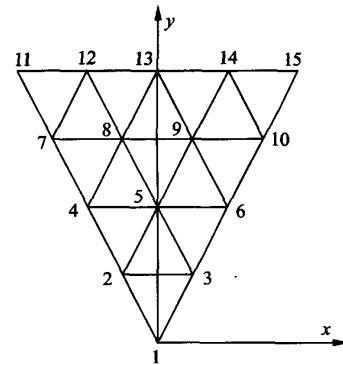


图3 网状天线的算例模型

为了在数值上处理方便把图1中的大型网状天线模型加以简化,得到下面简单的反射网面模型图,它是把反射面分成6等分,天线的径向长为5 m。背网面和反射面一致。其中,反射面和背网面的编织方式以及反射网面和背网面之间的连接的方式可见图3。

在式(2)中的 F 包含了智能结构的位置信息。能够说明问题的前提下,可把控制系统设计为单输入单输出系统,因此 F 中只包含了一个智能结构单元信息。通过计算可知道当把智能结构布置在索5将达到较好反映激励作用和最大限度的控制系统的程度。所以,上述的 M, K, F 分别包含了索5中的智能结构的质量、刚度和位置信息。于是写出式(2)的状态空间 $P: (A, B, C, D)$ 。

3.1 设计过程

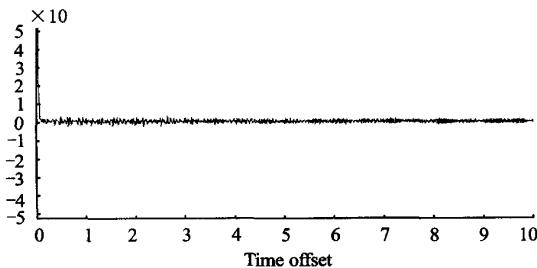
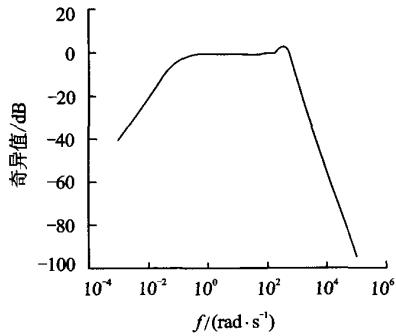
首先对模型 $P: (A, B, C, D)$ 进行降阶处理,经检验 A 的所有特征值的实部均为负,因此,模型 P 是稳定的,用平衡降阶法将系统降阶。并设控制性能指标为:鲁棒稳定性指标为 2 000 r/s 的带宽,所以相应的 $W_2^{-1}(s) = \frac{2000}{s}$ 。为了使灵敏度函数尽可能的小,同时结合权函数的选择条件,可选定补灵敏度权函数为 $W_1^{-1}(s) = \gamma \frac{(1 + s/100)^2}{1 + s/5000}$, γ 是调节系数。通过调整 γ 从 0.12 到 0.98 可得到鲁棒控制数据如表 1。表中数据表明,当 $\gamma = 0.12$ 时,闭环系统相应的增益裕度和相角裕度都比较小;随着 γ 值的增加,相应的增益裕度和相角裕度逐渐增加;当 γ 值接近 1 时,增益裕度和相角裕度最大。 $\gamma = 0.98$ 时能使系统的鲁棒控制性能较好, $\gamma = 0.98$ 的代价函数比 $\gamma = 0.12$ 时的代价函数更接近 1,从而可保证较好的阻尼。

表 1 调整 γ 的设计结果

| γ | 0.12 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 0.98 |
|----------|---------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 增益裕度 | 9.690 3 | 8.98 | 8.836 6 | 9.139 6 | 9.825 1 | 10.953 | 12.706 | 15.518 | 20.869 | 34.334 |
| 相位裕度 | 154.23 | 108.29 | 90.965 | 81.827 | 76.789 | 72.693 | 69.442 | 67.614 | 66.023 | 65.091 |
| W_c | 19.645 | 43.232 | 74.661 | 112.35 | 138.99 | 154.90 | 169.35 | 180.77 | 191.45 | 199.33 |

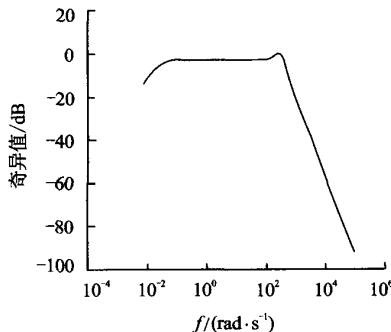
3.2 仿真结果分析

应用 Matlab 软件分析仿真图 3 所示算例的闭环 H_∞ 控制, 图 4、图 5、图 6 是使用 H_∞ 控制的闭环脉冲响应图和奇异值 Bode 图。图 4 中可看出, 系统的阻尼相对于闭环位移反馈控制有所增加, 系统的振动很快被抑制到一个较小的范围。这表明使用闭环 H_∞ 控制律控制智能结构能够使最大的位移振动得到较快的衰减。图 5 到图 6 反映出系统的峰值和低通特性都得到了改善, 说明了 H_∞ 控制的有效性。它不但能够抑制系统的共振峰值, 而且能够改善系统的频率特性, 使整个控制系统更易稳定, 并且抑制干扰的能力增强, 表明 H_∞ 控制能使系统的鲁棒性能和抑制干扰的性能都得到改善。

图 4 H_∞ 闭环控制脉冲响应图 ($\gamma = 0.98$)图 5 H_∞ 闭环控制奇异值Bode 图 ($\gamma = 0.98$)

同时, 从图 5 到图 6 还可以看到, 当调整系数 $\gamma = 0.98$ 时系统的频率低通特性比 $\gamma = 0.12$ 时更好一些, 这主要表现在频率 1 r/s 到 200 r/s 之间的前者的奇异值大于后者的奇异值; 这也正好和表 1 中的数据相符合, 即: 系统在 $\gamma = 0.98$ 时的相对稳定性优于 $\gamma = 0.12$ 时的相对稳定性, 即使用前者设计出的控制系统的鲁棒性稍强于后者。不过, 从抑制共振峰值的角度来说, 则相反。这主要是因为在增大低频

增益的同时, 也使输入的干扰增大。所以, 在实际设计 H_∞ 控制器时应当综合考虑系统的鲁棒性和抑制干扰的能力等。

图 6 H_∞ 闭环控制奇异值Bode 图 ($\gamma = 0.12$)

4 结论

为了有效抑制大型可展开天线的“在轨”振动, 在采用“在轨”振动控制智能结构的基础上, 应用 H_∞ 最优控制理论, 仿真结果表明: 两者的结合, 不仅能够增强系统的鲁棒性能, 而且抑制干扰的性能也能够得到改善。

参考文献:

- [1] 刘明治, 高桂芳. 空间可展开天线结构研究进展 [J]. 宇航学报, 2003, 24(1): 82-87.
- [2] Pereira C E, Steffen Jr V D. Crete-continuous optimization techniques applied to smart structure vibration control [A]. A Conference & Exposition on Structural Dynamics [C], Los Angeles, California, 2002. 105-107.
- [3] Sunar M, Rao S S. Distributed modeling and actuator locations for piezoelectric control systems [J]. AIAA Journal, 1996, 34(10): 2200-2203.
- [4] Sunar M, Rao S S. Thermo-piezoelectric control design and actuator placement [J]. AIAA Journal, 1997, 35(2): 534-539.
- [5] 刘军. 大型空间网状展开天线反射面精度控制的智能结构的研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2001. 27-30.

如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训(www.edatop.com)专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



关于易迪拓培训:

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网(www.mweda.com),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>