DOI：10.13700/j.bh.1001-5965.2006.01.005
2006年 1月 北京航空航天大学学报 January 2006
第32卷 第1期 Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics Vol.32 No.1

复杂结构振动控制设计与仿真方法研究

罗晓平 黄 海 咸奎成

（北京航空航天大学 宇航学院，北京 100083）

摘 要：为了避免在建立结构数学模型过程中因简化和降阶引起的模型误差，解决复杂结构建模难的问题，提高控制器设计的准确性，提出了一种新的基于有限元法(FEM)的结构振动控制设计方法.该方法可借助于商用结构有限元分析软件来实现，简便易行，在PATRAN/NASTRAN环境中利用PATRAN命令语言PCL(Patran Command Language)建立了通用结构控制仿真平台.通过对压电自适应桁架结构的振动控制进行控制设计仿真和实验验证，证明了新方法的有效性；与Simulink使用简化模型的仿真结果相比，新方法的结果与实验结果更为接近，表明其准确性更高.该方法适用于对处在设计阶段的复杂结构进行控制设计与仿真评估.

关 键 词：结构；振动控制；有限元法；仿真

中图分类号：O 328

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2006)01-0018-04

Vibration control design and simulation method for complex structures

Luo Xiaoping Huang Hai Xian Kuicheng

(School of Astronautics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A new vibration control design method based on FEM (finite element method) was proposed for structures to avoid the model error due to simplification and model reduction, in order to solve the difficulty of complex structures modeling and to improve the accuracy of the control design. The method could be implemented easily with the help of commercial FEM analysis softwares. A universal control simulation interface was established in structure analysis package PATRAN/NASTRAN environment with the programmable PCL (patran command language). The effectiveness of the method was demonstrated through the PCL simulation and experimental validation of the vibration control of a piezoelectric adaptive truss structure. The numerical result of the new technology agrees better with the experimental data when compared with Simulink simulation using simplified model. The new FEM method is proved to be more accurate and suitable for the control design simulation and evaluation of complex structures in design stage.

Key words: structure; vibration control; finite element method; simulation

1 问题背景

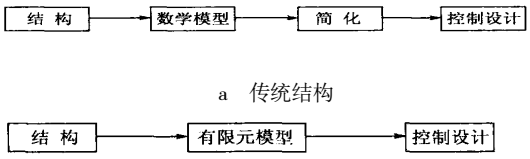
传统的结构振动控制设计方法一直是遵循图1a所示流程，该流程中控制器的设计要求有一个确定的数学模型，这对简单结构非常有效.但对复杂结构，在建立模型的过程中，往往要进行简化处理，忽略一些次要因素，比如不考虑高阶模态的影响、进行降阶处理、非线性环节线性化、时变参数定常化，最后得到一个适合控制系统设计使用的数学模型.这种模型仅仅是实际系统的一种近似，二者存在较大的差别.如果所建立的模型参数误差较大，所设计出的控制器往往达不到预期的效果甚至不可用.对某些大型复杂结构，还可能无法建立其数学模型，无法使用已有的控制设计与仿真工具，只能用实验的方法来进行结构振动控制设计，这不但带来费用的增加，且显然不符合现代

收稿日期：2004-10-29

基金项目：北京市科技新星计划资助项目(952873900)

作者简介：罗晓平(1967—)，男，湖北广水人，副教授，aidong67@163.com.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net



a　传统结构

b　以有限元法为基础的结构

图 1　两种控制设计方法比较

结构-控制一体化设计思想.

对自适应结构的研究也是如此,研究的手段多用有限元法以简单结构为例进行仿真和实验,自适应结构分析和控制仿真的通用方法却很少被研究. Reaves[1] 用 NASTRAN[2] 和 ANSYS 对表面贴有压电元件的铝板和盒形梁进行了建模仿真分析,研究结构响应随驱动电压的变化关系,却未涉及控制问题;周舟[3] 在 ANSYS 中对压电梁的振动控制问题进行了仿真,却仍以简单梁为例,缺乏通用性.

考虑到实践中有限元法大量被使用,本研究提出基于有限元法的控制设计概念,采用更接近实体的有限元模型进行结构控制设计,将结构分析和控制设计与仿真结合起来,不但解决了复杂结构控制设计与仿真的难题,而且提高了控制设计的准确性. 目前已有多种比较成熟的有限元结构分析软件,本文选取在航空航天领域使用最为普遍的大型结构有限元工程分析软件 PATRAN/NASTRAN 为工具,在 PATRAN 前后置处理环境下,以 NASTRAN 作求解器,用 PCL (Patran Command Language)语言[4]构建仿真平台,以空间柔性自适应结构振动控制为例进行了控制设计与仿真.

2　基于有限元法的控制设计技术

2.1　基本思想与特点

以有限元法为基础的结构振动控制设计技术,直接针对结构的有限元模型(而不是简化后的数学模型)进行控制方法设计,见图 1b. 其基本思想是,利用有限元结构分析技术,以有限元模型代替实物进行控制仿真实验,以确定控制方法并优化控制参数. 具体方法是:首先建立结构的有限元模型和载何工况;然后对结构进行动力响应分析,从分析结果中输出反馈信号,经一定的控制算法获得控制信号施加到结构上;再次进行结构响应分析,计算并施加控制信号;如此循环下去,直到满足中止条件. 整个过程如同控制实验中信号的传感、采集、处理到作动,只不过这里结构的实际响应以有限元动力响应分析来代替.

对控制设计而言,关键问题是控制律的确定和控制参数的选取,在本方法中不同的控制律对应不同的控制算法,且对同一控制方法的参数可进行调整,根据仿真结果即可选定适当的控制律并优化相应的控制参数,完成控制方法的选择和设计.

基于有限元模型的控制设计技术具有众多优点:①以实体为对象的有限元模型一旦建立,无需对模型作进一步简化,也不必写出模型的数学表达式;②模型更接近实物,据此设计的控制器准确性更高;③结构动力分析采用有限元法中的直接瞬态分析是对全部耦合的运动方程进行直接数值积分来求解,避免了截去模态引起的误差;④有限元法已在工程实践中广泛采用,且有成熟的应用软件,便于使用与推广. 利用现成软件进行有限元建模和结构响应分析,简便易行,避免了自行划分有限元和编写程序的繁琐;⑤依托大型通用的结构有限元分析软件,将结构设计、优化、结构分析、控制设计与仿真结合在一起,可在同一环境中一次完成,真正实现结构-控制一体化设计. 此种技术特别适用于对正处在设计阶段、不要求实时控制的复杂结构进行控制设计与仿真实验.

2.2　控制设计举例

现以自适应四棱柱桁架结构为例(图 2),说明上述技术的具体应用. 假设随时间变化的扰动 $\boldsymbol{F}_e(t)$引起结构振动,建立结构有限元动力学方程

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{F}_e(t) \quad (1)$$

其中, $\boldsymbol{M}$, $\boldsymbol{C}$, $\boldsymbol{K}$ 分别为结构系统的质量矩阵、刚度矩阵、阻尼矩阵; $\boldsymbol{F}_e(t)$是结构的外激励力向量; $\boldsymbol{x}(t)$是结构节点位移向量.

选取合适的时间步长 Δt(越小精确性越好)

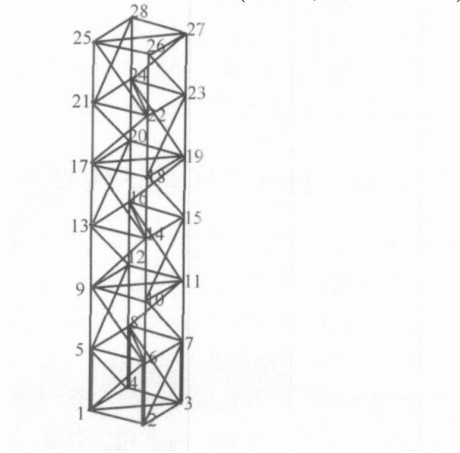


图 2　桁架模型

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

进行瞬态响应分析.施加控制时,提取结构模型中传感器对应部位的分析结果(单元或节点位移、速度、加速度、内力等)作为反馈信号,经相应的控制算法获得控制力向量 $\boldsymbol{F}_c(t)$,作用在结构有限元模型相应的控制作动单元上,方程(1)变为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}(t)+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{F}_e(t)+\boldsymbol{F}_c(t) \quad (2)$$

本结构以内置的压电主动元件为作动器(最下部4根垂直杆),将反馈信号转换成电压信号驱动作动器.根据压电堆式作动器的特性,振动控制律采用位移反馈,压电作动器控制电压向量

$$\boldsymbol{V}=-\boldsymbol{g}\boldsymbol{u} \quad (3)$$

式中,增益矩阵 $\boldsymbol{g}=\mathrm{diag}(g_i)$, $i=1,2,\cdots,m$, m 为压电主动构件数; $\boldsymbol{u}$ 是位移反馈向量.忽略主动元件自感应电场影响的控制力向量[5]

$$\boldsymbol{F}_c(t)=\mathrm{diag}(k_e)\mathrm{diag}(d_e)\boldsymbol{V} \quad (4)$$

其中 k_e, d_e 为压电元件等效刚度,等效压电系数.

直接位移反馈控制经仿真和实验验证效果不理想,单纯加大反馈增益会造成系统不稳定,但在反馈信号比较弱时,适当加大控制增益,有望使控制效果进一步提高.所以在控制设计时可以采取自适应控制策略,对增益进行实时优化.这里引入动态比例因子 K_d,对反馈增益进行自适应调节[6].对具体作动器,(3)式写为

$$V_i=-K_d g u_i \quad (5)$$

$$K_d=(N+1)\Big/\sqrt{\sum_{i=i-N}^{i}u_j^2} \quad (6)$$

其中, V_i 为第 i 时间点的输出控制电压; K_d 为动态比例因子,其初始值与采集的最大值相对应; u_i 为 i 时刻的测点振动幅度; N 为采样段中的数据点数,其大小至少覆盖一个振动周期.这样处理使反馈增益具有自适应性,当反馈信号较强时,反馈增益相应减小,保证系统的稳定性;当反馈信号较弱时,增益变大,可以提高控制效果.

根据式(4)的控制算法对式(2)叠代求解可完成对上述控制设计的仿真实验.

3 PATRAN环境下仿真平台的建立

根据上述控制设计思想,在航空航天领域广泛使用的有限元结构分析软件PATRAN/NASTRAN中,利用其提供的二次开发语言PCL建立了结构振动控制仿真平台(图3),并添加了多种控制模块.由于在编写过程中就注重通用性,从理论上讲,该平台对任何结构控制都适用,只需针对不同的控制策略添加相应的控制算法模块即可.

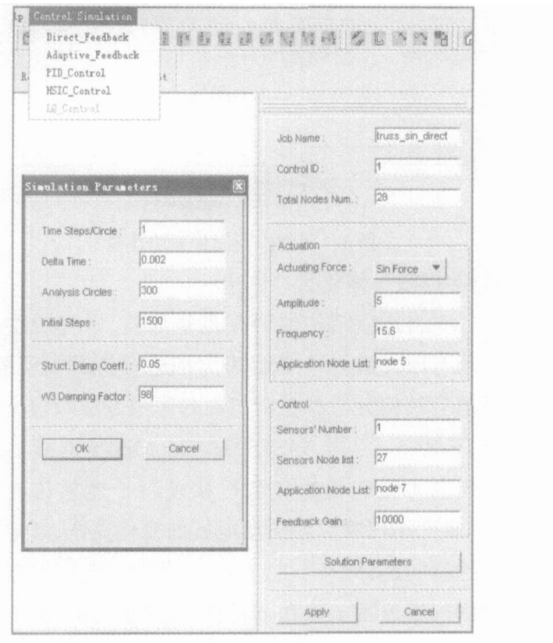


图3 PATRAN仿真平台

PCL是PATRAN/NASTRAN提供的一种面向用户的结构化编程语言,它不仅提供了选择、循环等流程控制语句以及标量和数组等参数对象,还自带有丰富的函数库.在PATRAN环境下用PCL编程,不但可以方便地使用其有限元求解功能,还可让用户开发适合自己特定需要的程序.

利用PATRAN强大的前处理功能先建立结构的有限元模型和边界条件,用自行开发的平台界面输入控制求解参数,调用NASTRAN中直接瞬态响应模块进行结构分析,然后由程序将计算得到的结果(位移、速度等)经控制运算再作用在控制作动器上,如此构成闭环反馈控制系统.具体流程如图4所示.计算所得结果可直接利用PATRAN

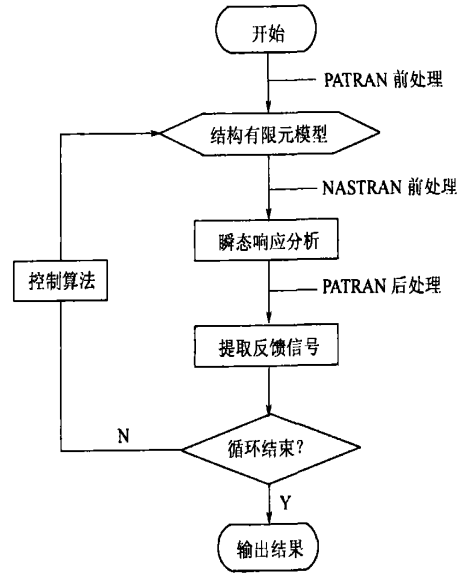


图4 PCL控制设计与仿真流程

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

的后处理功能以图形方式显示或以数据文件形式输出.

4　仿真与实验结果

运用仿真平台对多种结构进行了控制设计与仿真,特别是对以空间结构为背景设计的自适应桁架结构的振动进行了直接反馈、自适应反馈、PID 和仿人智能控制设计与仿真,这里给出位移反馈控制的仿真和实验结果.

4.1　结构参数

桁架为底部固定的六跨等边四棱柱,在 PATRAN 中建立其有限元模型(图 2),所有杆件以等截面单元模拟,而连接节头以节点质量代替.四棱柱每跨边长 0.32 m,节点质量 0.78 kg,最下部的 4 个垂直杆为压电陶瓷材料 PZT(Plumbum Zirconate Titanate)制成的主动元件.各单元参数如表 1 所示,其中压电元件截面积是将整个元件等效成铜材时得到的.

表 1　四棱柱桁架结构参数表

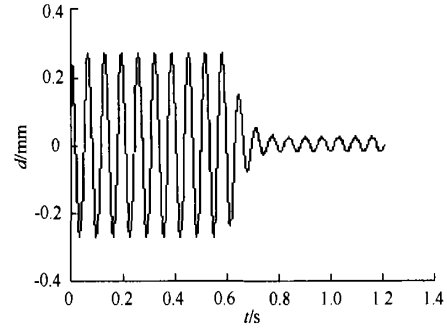
单元类型	材料	弹性模量/($N \cdot m^{-2}$)	泊松比	材料密度/($kg \cdot m^3$)	等效截面积/m^2
普通杆单元	铜	1.08×10^{11}	0.345	8940	3.17×10^{-5}
压电作动单元	铜+PZT	1.08×10^{11}	0.345	8940	1.45×10^{-5}

仿真中主动杆 1～5 为激振器,3～7 为作动器,为了提高控制信号的信噪比,采用异位位移反馈控制,只要选取合适的采样点同样可以保证闭环系统的稳定性.通过结构模态分析,选取节点 27 处沿对角线 25～27 方向的位移为反馈控制量,结构阻尼系数取 0.0168.

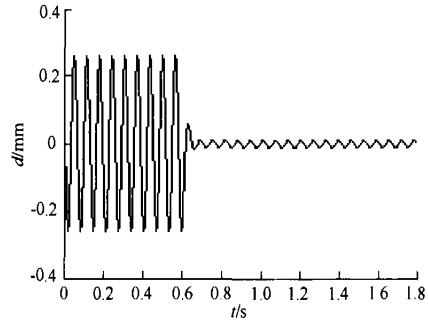
4.2　结果与分析

图 5a 为激振器以结构的一阶谐振频率(15.6 Hz)进行周期激振时,测量点位移 d 随时间 t 变化的 PCL 仿真结果,其振幅降低到原来的 7.03%;为了验证此结果,在 Matlab/Simulink 中使用简化后的模型进行了仿真(图 5b),振幅降低到原来的 5.01%,效果最好;最后进行了实验验证(图 5c),振幅降低为原来的 7.30%,效果最差.从施加控制后,重新达到稳定状态的响应速度看,也是 Simulink 仿真结果最快,PCL 仿真次之,实验最慢.

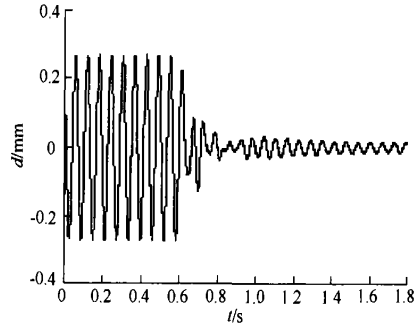
实验结果与仿真结果相符,且与基于有限元结构分析技术的仿真更为吻合,这充分说明使用简化的数学模型所设计的控制器在实际中并不能达到预期的效果,而基于有限元模型的控制设计方法更接近实际结构,准确性更高.实验结果与 PCL 仿真的误差,更主要是由于实验系统误差的存在和噪声干扰引起的.



a　PCL 仿真结果



b　Simulink 仿真结果



c　实验结果

图 5　节点 27 对角线方向位移

5　结　论

通过对基于有限元模型的控制设计与仿真方法的研究,得到以下结论:

1) 利用有限元结构分析软件进行控制设计与仿真的方法有效可行,为复杂结构的振动控制设计开辟了一条简便易行的工程化途径,特别适用于对正处在设计阶段、不要求实时控制的复杂结构系统进行控制设计与仿真;

(下转第 39 页)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

接近 1 时的拐点位置没能算准,其结果同没有压力修正的 BL 模型的结果很接近.可见压力的影响在机械能方程中确有体现.而图 8 是不计压力影响的摩阻系数分布,改变并不是很大.

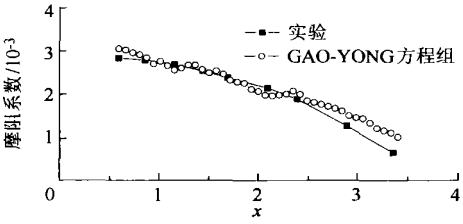


图 8　机械能方程中没有计入压力梯度影响时摩阻系数分布

3　结　论

1) 对 A. Samuel 和 P. Joubert 给出的扩压器实验,GAO-YONG 湍流方程组计算得到的速度型,壁面摩阻系数分布与实验值符合得很好,说明 GAO-YONG 湍流方程组能够模拟有压力梯的湍流流动;

2) 本文考察了机械能方程中压力梯度项对湍流模拟的影响,证实了 GAO-YONG 湍流方程组是通过机械能方程来反映压力梯度的影响的;

3) GAO-YONG 湍流方程组虽然对 A. Samuel 和 P. Joubert 给出的扩压器计算得到很好的结果,但是毕竟此扩压器的流场相对简单,扩压程度不大,也没有分离发生,所以 GAO-YONG 湍流方程组在有强逆压梯度和分离流中的发展还需做进一步的研究工作.

参考文献 (References)

[1] Gao Ge, Yong Yan. Partial-average-based equations of incompressible turbulent flow [J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2004,39: 1407～1419

[2] 李维冰,高　歌. 解决湍流圆/平射流异常现象的数值研究[J].航空动力学报,2001,16(3):262～266
Li Weibing, Gao Ge. The solution of round-jet/plane-jet anomaly using GAO-YONG incompressible turbulence equations [J]. Journal of Aerospace Power, 2001,16(3):262～266(in Chinese)

[3] 陈广业,高　歌,尹幸愉.使用 GAO-YONG 方程组对不可压转捩/湍流平板边界层的计算[J].航空动力学报,2003,18(1):2～7
Chen Guangye, Gao Ge, Yin Xingyu. The calculation of incompressible wall boundary layer using GAO-YONG turbulence equations [J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(1):2～7(in Chinese)

[4] Samuel A E, Joubert P N. A boundary-layer developing in an increasingly adverse pressure gradient[J]. J Fluids Mechs, 1974, 66: 481～505

[5] CHAE-MYUNG RHIE. A numerical study of the flow past an isolated airfoil with separation[D]. Urbana-Champaign: University of Illinois, 1981

[6] 陶文铨. 计算传热学的近代进展[M]. 北京:科学出版社, 2000
Tao Wenquan. Advances in numerical heat transfer [M]. Beijing: Science Press, 2000(in Chinese)

(上接第 21 页)

2) 该方法省去了结构数学建模过程,只需建立结构的有限元模型,有限元模型更接近真实结构,结构响应分析更精确,据此进行的控制设计与仿真也更准确;

3) 有限元法及其分析软件的普遍使用为该方法的使用奠定了基础;

4) 经过适当开发可将结构设计、优化、分析、振动控制设计与仿真结合在一起,并在同一环境中一次完成,真正实现结构-控制一体化设计.

参考文献 (References)

[1] Mercedes C Reaves, Lucas G Horta. Test cases for modeling and validation of structures with piezoelectric actuators[R]. AIAA-2001-1466, 2001

[2] MSC/NASTRAN for windows reference manual [M]. Los Angeles: The MacNeal-Schwendler Corporation, 2000

[3] 周　舟,任革学,周玉勋. 分布传感/执行器智能梁的振动控制及 APDL 仿真[J]. 压电与声光,2001,23(6): 494～495
Zhou Zhou, Ren Gexue, Zhou Yuxun. Vibration control of the smart beam with distributed sensor/actuator and APDL simulation[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2001, 23(6): 494～495(in Chinese)

[4] PCL library [M]. Los Angeles: The MacNeal-Schwendler Corporation, 2000

[5] 李俊宝,葛建明,扬庆佛. 智能桁架结构机电有限元分析与实验研究[J].太原理工大学学报, 1998, 29(6): 577～584
Li Junbao, Ge Jianming, Yang Qingfo. Electromechanical coupled finite element analysis and experimental study on intelligent truss structure [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 1998, 29 (6): 577～584(in Chinese)

[6] 赵国伟,黄　海,夏人伟. 柔性自适应桁架及其振动最优控制实验[J].北京航空航天大学学报,2005,31(4):434～438
Zhao Guowei, Huang Hai, Xia Renwei. Experimental research on active control of adaptive structures vibration[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005, 31(4): 434～438 (in Chinese)

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net