

ISSN1000 - 4750

《工程力学》增刊 CODEN GOLIEB

CN11 - 2595/O3

第 九 届 全国结构工程学术会议 论 文 集

第Ⅲ卷

PROCEEDINGS OF THE NINTH NATIONAL CONFERENCE ON
STRUCTURAL ENGINEERING

Vol.III

主编：崔京浩

ISSN 1000-4750



9 771000 475006

中国 成都
CHENGDU, CHINA
9.15~9.20,2000

第III卷目录

七、动力与稳定

平均对接法分析壳体结构的抗震动力特性	钱 江 吕西林 翁智远 (001)
瞬时最优半主动控制	何玉敖 何亚东 (006)
一种模糊随机动态有限元方程的解法	刘长虹 雷振宇 陈 虬 (011)
大佛寺斜拉桥抗震性能及稳定分析	王 策 刘西拉 辛克贵 刘钺强 (014)
基于简化 Gurtin 型变分原理的平面问题动力响应分析	罗志国 余 慧 黄伟江 罗 恩 (024)
结构地震反应的预测控制方法研究	何玉敖 冯德平 (029)
大幅旋转的柔性臂振动的复合单元法分析	程 鹏 曾 攀 (034)
考虑 SSI 影响的结构神经网络控制	李海岭 葛修润 霍 达 (040)
也论橡胶支座与 R/C 柱串联隔震系统的刚度系数	周 坚 (045)
简支圆板在集中荷载下的突变与混沌分析	魏德敏 吴 非 (050)
钢筋砼带暗柱异型柱纯框架与带支撑框架抗震性能比较分析	曹万林 王绍英 田宝发 刘建民 (054)
基于模糊神经网络的建筑结构系统辨识	何亚东 何玉敖 (062)
橡胶垫隔震结构杆系-层模型地震反应分析	张玉良 汪 洋 张铜生 周 坚 (067)
弹性地基加劲板 BEM-FEM 动力分析	金康宁 (072)
一类非线性结构的动力行为分析	叶建军 陈 虬 (077)
底框砖房加夹层橡胶垫的时程分析	康锦霞 魏德敏 (081)
对结构横风向驰振计算改进的建议	盛焕明 刘 东 李正良 (085)
附加粘弹性阻尼器结构模态阻尼比的计算	刘保东 朱 晞 (089)
防洪堤抗滑桩结构有限元非线性应力分析	燕柳斌 黄自成 (094)
关于框架节点抗震设计中若干问题的思考	季 韬 郑忠汉 (099)
航炮冲击荷载作用下飞机机身结构动力响应分析	杨德健 郝雅翰 (102)
单层厂房空间工作系数的解析算法	何爱军 屈铁军 (107)
基于库仑摩擦力的结构地震响应混合控制仿真研究	郭惠勇 王 伟 张 陵 (111)
悬挑斜拉网架的动力和地震响应分析	黄国辉 徐国彬 (116)
海洋平台涡激振动响应研究	马 骏 周亚军 (121)
影响地震动空间变化特性的效应研究	刘洪兵 李宏年 (126)
场地连续变化的桥墩抗震计算的简化公式	孙 欣 朱 晞 (131)
改装汽车车身实验模态分析	李惠彬 应怀樵 (136)
长杆弹对金属靶板侵彻的有限元数值模拟	张刚明 王肖钧 胡秀章 张昭宇 (142)
结构振动试验中测点优化布置研究	李学安 余作喜 (148)
多维地震作用下钢框筒结构弹塑性响应特性	刘永明 陈以一 陈扬骥 (152)
运行列车作用下连续梁桥的动力反应	王解军 刘万忠 (157)

一种时频非平稳人造地震动的生成及反应谱拟合方法	姜海鹏 杨庆山 (162)
移动荷载作用时连续配筋混凝土路面的动态响应	王 虎 胡长顺 王秉纲 (168)
一曲屈梁混沌运动控制的研究	张洵安 姜节胜 贺尔铭 (173)
水平分层土层结构地震反应计算	潘开名 刘 斌 泽田义博 (178)
受撞击简支梁的弹塑性响应模式	席 丰 杨嘉陵 鹿晓阳 (183)
地震作用下储液罐隔震模型及计算分析	许金余 马国强 张坚勇 (188)
结构——地基非线性相互作用系统的研究	姜忻良 常好诵 (193)
张力膜结构非线性风振响应浅析	黄国辉 姜海鹏 (198)
土——结构动力几何非线性相互作用体系的地震反应分析	职洪涛 杜守继 俞载道 曹国敖 (202)
多层框架结构考虑土——结构相互作用的地震反应分析	唐小微 傅炳忠 宋长清 (210)
建筑结构非线性地震反应的 Δt 最优采样线性预测控制	江 建 林 江 何放龙 邹银生 (215)
高速双体滑艇总振动计算分析	吴卫国 裴智勇 李祥宁 王洪乙 (221)
随机介质中的波动问题研究	张艳红 (226)
航空发动机参数灵敏度分析	马存宝 李 云 邓 明 宋 东 曾庆福 (231)
框架结构地震反应分析的有限元模型	沈冯强 林 峰 (236)
结构的滞回耗能特性及其影响因素分析	肖明葵 刘 纲 (242)
粘弹性地基上矩形薄板的振动	张系斌 (248)
单肋拱的横向自振特性研究	刘炎海 何广汉 (253)
高层或高耸结构考虑土——结构相互作用的地震反应分析	唐小微 宋长清 傅炳忠 (258)
圆拱主体结构多自由度体系弹性动力分析研究	徐干成 李 鲲 于伯毅 (263)
修订公路桥梁抗震设计规范浅见	王东升 冯启民 (270)
冲击阻尼器及桥梁减振	高勇利 袁向荣 卜建清 (274)
高层轻板框架结构地震响应分析	谢 强 薛松涛 陈 镅 姚谦峰 王清敏 (279)
单层工业厂房地震时的非线性动力计算	崔玉红 聂永安 邱 虎 严宗达 (284)
滑移隔震结构啮合滑移周期运动的计算	樊 剑 唐家祥 (290)
高烈度地震区地下结构减震原理研究	王明年 关宝树 (295)
龙潭河大桥纵向地震反应分析	郑家树 张克跃 (300)
蜂窝结构阻尼减振仪表板动态特性分析	梁天锡 周德业 陈岭丽 李永池 王肖钧 (306)
复合材料夹层板隔声性能测试研究	贺尔铭 张洵安 (311)
转子碰摩力学特征及其监控技术研究	王仲生 王育才 (315)
高耸结构 TMD 风振控制计算	范存新 薛松涛 陈 镅 秦 岭 (320)
某半敞开式地铁车站抗震分析	滕念管 王建华 梅兴富 (325)
支撑体系在厂房抗震中的作用	李 明 陈扬骥 (330)
底部框剪砖房的抗震性能研究	王玉岚 蒋沧如 (336)
客车转向架蛇行运动的 Hopf 分叉	罗冠炜 (340)
“朝天扬帆”结构构件的动力稳定性分析	李正良 盛焕明 刘 东 (344)
底框砖房基础隔震浅析	王 成 麻建锁 (352)

底部框剪砖房抗震性能的有限元分析王玉岚 蒋元平 蒋沧如 (356)

核反应堆堆心的失压冲击响应王伟桥 张若京 (361)

动力学系统精细积分算法的一种改进格式袁政强 (367)

识别结构模态参数的神经网络方法研究翟东武 朱 晞 (371)

底框砖房隔震设计实例浅析王 成 麻建锁 (376)

电气化复线高路堑拓宽安全快速石方控爆技术刘高飞 李向国 (382)

逆摄动法探索结构破损仲伟刚 (388)

八、地 基 与 岩 土

非饱和膨胀土边坡稳定分析方法李青云 濮家骝 包承纲 (395)

大直径灌注桩桩身强度设计研究朱彦鹏 王秀丽 王文达 (400)

深基坑工程的研究现状与发展趋势桂国庆 涂 铿 (406)

长桩桩尖锤击贯入的有限元分析王怀忠 (413)

闸基的防渗与补强技术李 东 张大鹏 刘瑞钾 (418)

大直径桩的现状与远景孔祥金 任永利 (423)

天然弱面岩体真三轴压缩下声发射机制研究秦乃兵 徐东强 张艳博 (428)

深基坑支护结构的优化设计研究谭文辉 蔡美峰 陈浩生 (431)

人工挖孔低承台大直径扩底桩的设计计算韩建平 苏长吉 苏 琳 苏 琪 (436)

高层建筑桩筏联合基础荷载分配测试研究王明恕 朱浮声 徐国瑞 (441)

基于神经网络方法的嵌岩桩承载特性研究黄 雨 徐 斌 (446)

略论软土深基坑喷锚网支护李福厚 曲 波 李晓宾 刘 元 (451)

不同应力路径下饱和砂土的动力学特性谢永涛 张鸿儒 姜海鹏 (457)

基于量化、非量化信息的单桩极限承载力预测新探索倪立峰 韩晓林 (462)

高层建筑地基处理邹忠刚 (467)

水平荷载作用下桩-土-桩-结构共同工作研究.....卢成原 李先俊 (470)

连拱支墩挡墙土压力的分布杜建成 杜瑞成 (474)

软土地区土钉支护的工作性能研究林雪梅 林胜天 (479)

基坑工程施工对邻近建筑物及隧道的相互影响程 斌 刘国彬 侯学渊 (486)

不同筋材的加筋土的本构关系研究杨锡武 欧阳仲春 (492)

粉喷桩加固地基承载力的试验研究白 良 杨晓东 周亦唐 李 苓 何友义 (498)

强夯动力 Biot 方程的理论研究许金余 张鲁渝 梅 平 (503)

碎石挤密桩处理地基液化的探讨滕桃居 郭耀明 丁菊芬 (510)

横力桩内力和变形的有限元法求解王文达 朱彦鹏 王秀丽 (514)

一种提高数值解精度的新方法居炎飞 章 光 王水林 (520)

塑料土工格栅加筋土在工程中的应用周亦唐 马存明 白 良 (524)

土坡稳定安全系数与临界滑动面技术宗 兰 史恒通 (529)

加筋土路堤优化设计的离心模型试验杜建成 杜瑞成 (534)

竖向荷载下桩群承载力的计算赵国旗 朱步银 孙锁泰 (539)

两类弹塑性本构模型的有限元法分析	杨庚宇 鲁彩凤 (544)
多层主楼与单层裙房基础差异沉降的处理	黄庆文 刘向阳 (548)
道面混凝土碱骨料反应及预防	滕桃居 董现强 王亚军 (553)
钻孔灌注桩桩底压浆技术研究与应用	吴开成 侯 为 袁小树 裘 涛 (557)
某工程桩基设计及施工事故处理	刘荣木 (562)
高路堤填筑体变形粘弹性三维有限元分析	何兆益 周虎鑫 (567)
高层建筑箱形与片筏基础的特性分析与总结	戴 葵 (573)
锚管加固在高水位软土基坑支护中的应用	王跟锁 胡金华 (580)
基于损伤力学的岩石材料力学行为的有限元模拟	张会银 张瑞云 刘 骏 (585)
与既有房屋毗邻的新建房屋的基础设计	张岩俊 曹明星 孟丽军 (590)
素砼桩复合地基竖向荷载下受力特性的试验研究	郭忠贤 耿建锋 杨志红 王 裴 (593)
预应力锚索钻孔抗滑桩结构现场试验研究	曾德荣 王卫花 范草原 (598)
强夯法处理崇明机场软土地基	滕桃居 方维凤 刘道永 (604)
土地锚加固薄层软基的机理	梁 波 王安正 (609)
地下工程裂隙围岩稳定性的边界元法分析	王鲁明 赵洪先 刘 军 王永峰 (614)
微型桩在建筑物室内增层改造中的应用	孙剑平 陈启辉 尹燕池 田文宝 (620)
深圳地铁重叠隧道邻桩施工力学模拟	仇文革 杨明举 关宝树 (624)
地下挡土结构中土钉支挡体系的力学性能研究	周龙翔 廖红建 杨 政 (629)
既有线路控爆施工设计与防护	王武现 常艸东 (635)
基坑支护前沿——土钉墙	卢学伟 (640)
粉煤灰在公路基层中的应用研究	王 烨 郑建岚 (645)
防止预应力混凝土钢丝断丝滑丝方法研究	王希岩 岳渠德 (650)
浅谈预应力管桩锤击法施工之监控	李 亭 李 蓓 (655)
地下岩石中爆炸波的传播和相互作用	刘文韬 王肖钧 胡秀章 张昭宇 (659)
复合加载条件下环肋圆柱壳的抗冲击屈曲能力分析	江松青 李永池 王肖钧 郑际嘉 (665)
时域抖振分析的风场模拟方法探索	潘言喻 (671)
土工格栅处理软基上的桥头跳车问题	田小草 应荣华 郑健龙 (677)
市政桥梁工程建设监理质量控制系统	金 兢 黄金枝 李春祥 (682)
高喷防渗墙围井注水试验分析	韩海鹏 乔亮生 宋绍常 (687)
一种无损测试焊接板件残余应力的方法	任小平 刘 怡 (691)
储仓—地基相互作用—筒仓模型的静力实验研究	黄 义 尹冠生 陈皆民 (694)
佳铁鞍形网壳结构施工可靠性及监控技术	李 智 赵仁孝 马世英 刘平来 (699)
钢桁架结构几何优化的新方法	江建祥 夏才安 (704)
分类分级控制 NR 决策法在深基坑支护方案选型系统中的应用	邹春芽 黄金枝 李春祥 (709)
参变振动不稳定区域边界的确定	江建祥 朱六三 (717)
可展结构技术评述	王春江 钱若军 王人鹏 杨联萍 (722)
圆形窨井盖的强度、刚度分析计算	徐红星 孙锁泰 骆 英 (728)

九、重大工程

长梁山隧道施工安全管理的实践与体会	刘安金 杨志峰 (733)
长梁山隧道 F5 断层的地质超前预报	常艄东 吴洪波 (737)
软弱围岩控制爆破设计与施工	邹树梅 王胜勇 (742)
铁路长大隧道斜井与正洞交叉段软弱层状围岩开挖支护施工方法浅析	马 栋 黄立新 (751)
新奥法在长梁山隧道东沟斜井施工中的应用	莫锦德 (758)
长梁山隧道后期施工方法与技术总结	张有生 (764)
长梁山隧道进口施工技术综述	吴洪波 常艄东 (770)
长大隧道软弱围岩斜井工区施工前期提高工效的几项技术措施	莫锦德 吴范玉 杨文生 (776)
长梁山隧道通过破碎地层施工技术	张明革 (781)
长梁山隧道模喷砼施工技术	殷立军 杨文生 (784)
锚固药包生产技术	殷立军 石新桥 杨文生 (787)
长梁山隧道东沟斜井工区施工技术	王占龙 张俊兴 (790)
谈谈长梁山隧道地质条件对爆破的影响	夏 雷 马 栋 (797)
软弱围岩隧道斜井喇叭口施工方法探讨	孙明彪 (801)
隧道层状围岩全断面深孔光面爆破	单士军 (804)
隧道全断面深孔楔形掏槽技术	单士军 王胜勇 (809)
隧道衬砌渗漏的成因分析及防治措施	张明革 (812)
长梁山隧道的帷幕注浆及衬砌渗漏水整治	董红元 陈卫东 (816)
长梁山隧道施工地质方法	杨文生 殷立军 (819)
长梁山隧道防水施工技术	梁 佶 (824)
长梁山隧道进口区段(DK20+105~DK24+720)反坡施工排水综述.....	栗光前 宫海军 (828)
长梁山隧道施工控制测量及围岩动态监控	罗克富 (831)
浅谈长梁山隧道施工组织设计	詹慧鸿 (835)
长梁山隧道东沟斜井施工计划完成进度情况分析	王建强 (839)
隧道有轨仰拱作业平台应用实例	吴范玉 (843)
长梁山隧道 3#斜井快速施工机械配套技术	马 栋 黄立新 (848)
绞车使用应注意的问题及斜井出碴安全保障系统	宫海军 (853)
液压动力转向系统典型故障分析	全雪勇 (856)
长梁山隧道施工机械故障分析及改进三例	贾开兴 李来义 (859)
长梁山隧道 3#斜井施工通风技术探讨	黄立新 马 栋 (863)
长梁山隧道进口施工通风浅析	李国英 杨文生 (867)
长梁山隧道施工环境保护措施一例	莫锦德 (870)

平均对接法分析壳体结构的抗震动力特性

钱 江 吕西林 翁智远

(同济大学结构工程与防灾研究所, 上海 200092)

提 要 本文根据作者提出的子结构界面平均对接的概念, 利用通用有限元程序动力子结构分析功能, 对复杂壳体结构的离散化计算模型进行分级凝聚, 最终只需求解一个非常小规模矩阵特征值问题。数值计算表明, 采用本文建议的减缩方法, 不仅能极大地提高数值计算效率, 且对结构地震响应参与显著的模态可以给出相当高精度的结果。

关键词 有限元, 壳体结构, 动力特性

1 引言

有限元通用程序分析大型动力特征值问题采用的一种基本方法就是所谓的特征值节化法^[1], 配合数值离散过程中的子结构技术, 通常具有很高的求解效率。数值离散过程中的各级子结构, 一般作为一个有限元超单元处理, 其内部节点可由Guyan减缩法消去^[2-4], 仅保留超单元界面节点进行对接。对一些复杂的工程实际问题, 很可能出现对接界面自由度过多的情形, 若能对这些对接界面自由度进行再次减缩, 则可获得更高的求解效率。

本文根据作者提出的子结构界面平均对接的方法, 在分析组合壳体类结构的抗震动力特性时, 先用较精细的板壳有限元对结构整体进行离散, 形成基本的有限元数值离散数据库, 然后根据组合壳体的结构特征划分成少数几个子结构系统, 并进行第一次凝聚。由于壳体子结构界面的对接自由度数目仍相当可观, 而大量研究又表明壳体的环向模态对地震反应的贡献甚微, 因此可以将界面对接自由度二次减缩。取壳体水平截面上各节点位移的平均值为保留自由度进行凝聚, 得到一个仅具有几个凝聚质量的简化体系, 最终只需求解一个非常小规模矩阵特征值问题。数值计算表明, 如此简化后的模型, 对那些地震响应参与明显的模态仍能给出满足工程精度要求的结果。

2 特征值方程的分级减缩

大型动力特征值问题矩阵降阶的静力减缩方法是由Irons和Guyan提出^[2-4], 其基本思想是, 通过合理选择, 保留一小部分未知的节点参量作为‘正’自由度, 而把其余的节点参量作为‘副’自由度借助静力方程消掉。

考察自由振动特征值问题

$$([K] - \omega^2 [M]) \{U\} = \{0\} \quad (1)$$

其中 $[K]$ 、 $[M]$ 分别为有限元离散结构的刚度矩阵和质量矩阵, $\{U\}$ 为节点位移列向量, ω 则是体系的振动固有频率。将位移参量区分成正、副自由度并重新排列后, 记成

$$\{U\} = [\{U_m\}, \{U_s\}]^T \quad (2)$$

其中 $\{U_m\}$ 、 $\{U_s\}$ 分别为正、副自由度位移列向量。于是, 振动特征值矩阵方程 (1) 可以改写成如下的分块形式

$$\left(\begin{bmatrix} K_{mm} & K_{ms} \\ K_{sm} & K_{ss} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} M_{mm} & M_{ms} \\ M_{sm} & M_{ss} \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} U_m \\ U_s \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

假设在低频段上惯性力对副自由度的影响比静力效应小, 略去这部分惯性力后, 可得到

$$\{U_s\} = -[K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]\{U_m\} \quad (4)$$

这也相当于对方程 (3) 引入变换矩阵

$$\{U\} = [L]\{U_m\} \quad (5)$$

其中,

$$[L] = \begin{bmatrix} [I] \\ -[K_{ss}]^{-1}[K_{sm}] \end{bmatrix}$$

经减缩以后的振动特征值矩阵方程为

$$(\bar{K} - \omega^2 \bar{M})\{U_m\} = \{0\} \quad (6)$$

其中,

$$\bar{K} = [K_{mm}] - [K_{ms}][K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]$$

$$\bar{M} = [M_{mm}] - [M_{ms}][K_{ss}]^{-1}[K_{sm}]$$

上述减缩过程相当于对原始的离散结构施加了某种约束, 只要对保留的正自由度选择恰当, 由 (6) 式得到的结构低阶固有频率仍能具有优良的精度。

对复杂体系进行动力分析时, 可以结合有限元子结构技术, 实施分级凝聚^[5]。先根据实际结构的几何及构造特点划分成一系列的子系统, 即子结构。将每个子结构作为一个有限元超级单元, 取子结构的内部节点作为副自由度, 由静力凝聚消去, 子结构交界面上的节点则作为正自由度予以保留, 得到离散结构的第 I 级减缩方程。对于某些大型复杂工程结构, 如组合壳体结构, 子结构交界面上仍会留有较多数目的对接自由度, 这时可以对交界面自由度再次实施前述静力凝聚步骤, 形成第 II 级减缩方程, 重复这一过程, 即可得到逐级降阶的特征值问题。

3 子结构交界面自由度的平均对接

对于组合壳体一类的大型复杂结构,实施分级减缩时,对接交界面往往选在壳体连接处的交贯线或某一水平截面上,当有限元网格较细密时,沿环向分布的对接自由度不仅数目很大,而且它们往往具有同等的重要程度。考察这些交界面节点的运动形式可以发现:它们的平均值,体现的是壳体结构整体弯曲型或剪切型运动模式,这类振型在结构的地震响应分析中占有主导地位。而交界面节点之间的相对位移,一般体现的则是壳体的环向振型,这类振型在结构的地震响应分析中参与程度均不显著。

我们希望分级减缩的过程中,在待解方程阶数降低的同时,这些主导振型的结果精度能够得以保持,凝聚后结构的物理特征能逐级简明清晰。

记,经过子结构凝聚后保留下来的对接位移向量为 $\{u\}$

$$\{u\} = [\{u_1\}, \{u_2\}, \dots, \{u_k\}]^T \quad (7)$$

其中, k 为对接交界面总数,子向量 $\{u_i\}$ 表示对接界面 i 上的对接位移向量。定义对接界面平均位移为

$$u_i^0 = \frac{1}{n_i} \sum_{s=1}^{n_i} u_i^s \quad (8)$$

其中, n_i 为对接界面 i 上的节点总数。

引入如下的变换矩阵

$$\{u_i\} = \begin{bmatrix} n_i & -1 & -1 & \cdots & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_i^0 \\ u_i^1 \\ u_i^2 \\ u_i^3 \\ \vdots \\ u_i^n \end{Bmatrix} \quad (9)$$

二次凝聚时,仅取各对接界面的平均位移 u_i^0 ($i = 1, 2, \dots, k$) 作为正自由度予以保留,于是得到一个以平均位移为虚拟节点参量的等效质点弹簧串系统。该等代体系,较之由等效刚度法得到的壳体结构等效质点弹簧串系统具有更简明的物理含义。

4 数值算例

根据上述子结构界面平均对接的概念,利用通用有限元分析程序的动力子结构功能,计算分析了某快堆主容器壳体结构的自振动力特性。如图 1 所示,快堆主容器结构经简化后可以近似成一个下端固定的圆柱壳。壳体顶部支承的设备等,由于刚度较大,故可以作为刚性质量处理, $M = 1.2 \times 10^5 \text{ Kg}$, $h = 2.0 \text{ m}$ 。圆柱壳直径 $D = 8.0 \text{ m}$, 高 $H = 10.0 \text{ m}$, 壁厚 $t = 25 \text{ mm}$, 属于薄壁短壳。采用环向 24 等分,高度方向 40 等分的有限元网格进行离散,再沿高度方向按 5 等分形成 5 个子结构。

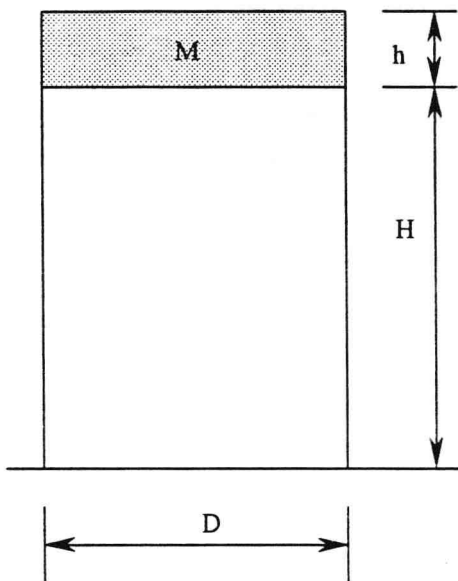


图1. 简化的快堆主容器壳体结构

表1列出了各种计算方案得到的结构对地震激励参与显著的各阶固有频率数值结果及其比较。ANSYS 解, 是对有限元离散模型用 ANSYS 程序 (Version 5.4) 计算得到的结果; SAP84 解, 则是用微机结构分析通用程序 SAP84(4.0版) 计算得到的结果; 二者均未作任何自由度减缩, 计算模型节点总数为984, 自由度总数为 5760。减缩解, 是对子结构进行凝聚后得到的结果, 保留的正自由度为子结构交界面节圆上的各节点平动位移分量, 节点总数为144, 自由度总数为360。本文解, 则采用了作者提出的对接界面平均位移概念进行二次减缩, 并且保留对接界面的平均转角自由度, 特征值方程的总自由度数为30。括号内数值是与ANSYS数值解的相对百分误差。

图2、3绘出了结构对水平向地震激励参与最显著的前 2 阶模态的振型示意图, 实线为沿壳体 $\theta=0$ 母线上 SAP84 有限元计算结果, 虚线为本文方法计算结果。

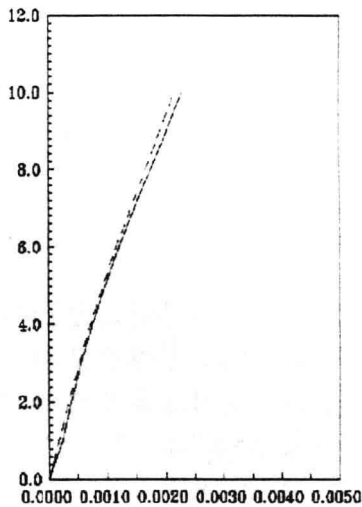


图2. 水平向第1主导振型示意图

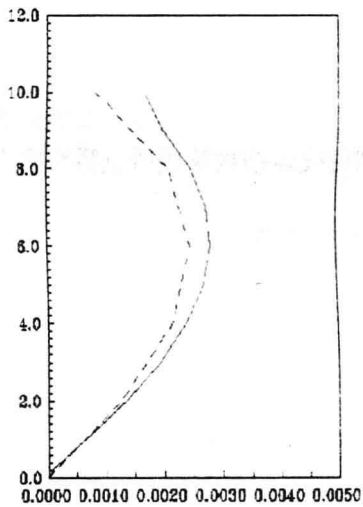


图3. 水平向第2主导振型示意图

表1. 壳体结构对地震激励参与显著的各阶模态固有频率计算值

序号	模态特征	ANSYS 解	SAP84 解	减缩解 (误差%)	本文解 (误差%)
1	水平向*	13.923	13.904	10.840 (-22.1)	13.595 (-2.4)
2	垂直向	48.937	48.971	35.194 (-28.1)	34.049 (-30.4)
3	水平向*	63.515	63.468	54.345 (-14.4)	65.618 (3.3)
4	水平向*	107.837	102.878	80.760 (-25.1)	99.700 (-7.5)
5	水平向*	135.515	126.853	83.786 (-38.2)	107.825 (-20.4)
6	水平向*	171.660	172.273	115.705 (-32.6)	110.355 (-35.7)
7	垂直向	197.531	198.266	102.506 (-48.1)	115.570 (-41.5)

注: *该行结果为重特征值

5 结论

本文在子结构分级减缩的基础上, 提出了界面平均对接的概念, 对计算组合壳体类结构的抗震动力特性相当有效, 由此得到的壳体结构等效质点弹簧串系统, 其物理意义更简明清晰。本文算例表明, 对薄壁短壳类剪切效应较显著的结构, 按常规的静力凝聚消去转动自由度会对结果精度产生较明显的影响, 而采用截面平均位移、平均转角的方法进行自由度减缩, 对水平向振型有明显改善。

参 考 文 献

[1] P. Kohnke, ANSYS Theory reference, Eighth Edition, SAS IP, Inc., 1997.
[2] B. M. Irons, Eigenvalue economizers in vibration problems, J. Roy. Aeronaut. Soc., 1963,67: 526-528.
[3] R. J. Guyan, Reduction of stiffness and mass matrices, AIAA J., 1965, 3: 380.
[4] B. M. Irons, Structural eigenvalue problems elimination of unwanted variables, AIAA J., 1965, 3: 961-962.
[5] 王文亮, 杜作润. 结构振动与动态子结构方法. 复旦大学出版社. 1985年.

瞬时最优半主动控制

何玉敖 何亚东

(天津大学土木系 300072)

提要: 本文提出一种瞬时最优半主动控制方法, 利用瞬时最优化的方法找出在每一时刻使结构能量指标函数最小的主动变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制开关策略, 不仅可以极其显著地降低结构的位移与速度响应, 而且克服了其他半主动控制方法使结构的加速度反而比无控时增大的弊病。算例仿真结果进一步验证了本文所提方法的有效性和实用性。

关键词: 瞬时最优, 半主动控制, AVS/D

1. 引言

近年来, 由于半主动控制具有几乎不耗费能源和控制效果接近主动控制效果等优点, 国内外许多学者纷纷将注意力集中到半主动控制上, 并作出了许多有益的工作, 但都或多或少存在一些值得商酌和解决的不够理想的问题^{(1),(2),(3),(4),(5)}。究其原因, 半主动控制从本质上讲是一种非线性现象, 因为结构的刚度与阻尼的变化并不是一个连续变化的过程, 而是一种跃变, 因此半主动控制本身非常复杂; 然而正是由于这种跃变, 使得结构在任意激励的作用下可以保持一种非共振状态, 因而可以有效地减小外部输入给结构的能量。

半主动控制从变化的方式可以分为变刚度 (AVS)、变阻尼 (AVD) 和变刚度变阻尼 (AVS/D)。目前, 国内外许多学者研究的是前两种半主动控制, 但这两种半主动控制存在的同一个弊病是结构的位移和速度可以减小, 但结构的响应加速度却比无控时大大增加, 因而不能是人们的要求。其原因在于单纯变刚度、变阻尼控制所能提供的控制力有限的缘故。而变刚度变阻尼控制却可以避免这一缺点, 因为刚度阻尼提供的控制力可以互相补充, 本文算例的仿真效果也证明了这一点。

本文提出了一种基于瞬时最优的半主动控制方法, 利用瞬时最优化的方法找出了在每一时刻使指标函数最小的主动变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制开关策略。根据这种方法, 本文进行了算例仿真, 算例结果表明: 本文所提出的控制方法不仅可以有效地控制结构的位移和速度响应, 而且还可以避免单纯变刚度、变阻尼控制所带来的结构加速度变大的弊病, 使得结构的加速度也得到显著的降低。

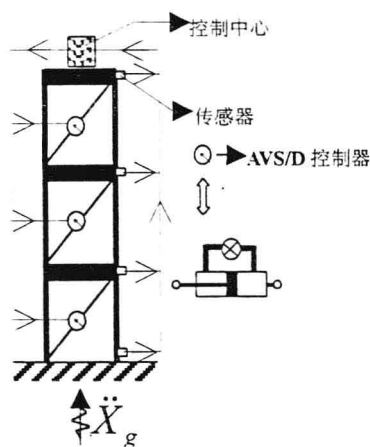


图1 结构模型图

2. 问题描述与分析

2.1. 运动方程

考虑一个如图 1 所示的 N 层剪切型建筑结构, 主动变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制装置布置在结构的每一层上; 结构被理想化为一个 N 自由度的线性结构, 并且遭受一维地震加速度 $\ddot{X}_g$ 的作用, 其运动方程为:

$$M\ddot{X}(t) + (C + D_C)\dot{X}(t) + (K + D_K)X(t) = E\ddot{X}_g(t) \quad (1)$$

其中: $X(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T$ (上标 T 表示矩阵或向量的转置) 是结构层间相对于地面的位移向量, $M, C, K \in R^{n \times n}$ 是结构相应的质量、阻尼、刚度矩阵, $E \in R^{n \times 1}$ 是地震力作用位置矩阵, $D_K \in R^{n \times n}$ 是变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制器所提供的附加刚度矩阵, $D_C \in R^{n \times n}$ 是变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制器所提供的附加阻尼矩阵。

将 (1) 式写成状态方程形式为:

$$\dot{Z}(t) = (A(t) + \Delta A(t))Z(t) + B\ddot{X}_g(t) \quad (2)$$

$$\text{其中: } \dot{Z}(t) = \begin{Bmatrix} X(t) \\ \dot{X}(t) \end{Bmatrix}, \quad A(t) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}E \end{bmatrix}$$

$$\Delta A(t) = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}D_K & -M^{-1}D_C \end{bmatrix}$$

$$D_K = \begin{bmatrix} f_1 & -f_2 & \cdots & 0 \\ 0 & f_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & -f_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & f_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dk_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & dk_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & dk_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$D_C = \begin{bmatrix} g_1 & -g_2 & \cdots & 0 \\ 0 & g_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & -g_{N-1} \\ 0 & 0 & 0 & g_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dc_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & dc_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & dc_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ -1 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

其中: $f_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$, $g_i = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$ 是 AVS/D 控制器开关状态, $\Delta k_i, \Delta c_i$ 是第 i 层的附加刚度、阻尼。

2.2. 主动变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制装置

主动变刚度/阻尼 (AVS/D) 控制装置安放在结构的层与层之间, 当控制中心发出指令使控制器的油路开关打开时, 则控制器的阻尼起作用, 而刚度不起作用, 即 $f_i(t) = 0, g_i(t) = 1$; 当控制中心发出指令使控制器的油路开关关闭时, 则控制器的刚度起作用, 而阻尼不起作用, 即 $f_i(t) = 1, g_i(t) = 0$; 也就是说控制器的开关会造成结构的状态具有 $2^3 = 8$ 种变化, 我们的控制目的正是要从这 8 种结构可能具有的状态中找出一种

抵抗地震作用最优的 AVS/D 开关。

2. 3. 控制设计

为了对结构进行瞬时最优控制, 必须首先确定一个性能指标 J 。由能量原理可知, 由控制器消耗的能量越大, 施加到结构上的能量越小; 而控制器消耗的能量可以等价的用结构物的动能和势能来表示, 所以如果结构物的动能和势能之和越小, 即意味着控制器消耗的能量越大。这里我们取能量函数为 $J = \mathbf{x}^T \mathbf{K} \mathbf{x} + \dot{\mathbf{x}}^T \mathbf{M} \dot{\mathbf{x}}$ 。写成状态变量的形式即为:

$$J(t) = \mathbf{Z}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{Z}(t)。其中 \mathbf{Z}(t) = \begin{Bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}(t) \end{Bmatrix} \quad \mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \mathbf{K} & 0 \\ 0 & \mathbf{M} \end{bmatrix}$$

从实际结构的状态反应可以看出: 位移和速度反应相差一个数量级, 这就要求我们在设计 $\mathbf{Q}$ 矩阵时, 应考虑这种影响, 以免出现位移项的“淹没”现象。

在对建筑结构进行 AVS/D 半主动控制时, 我们首先假定 AVS/D 控制器开关的切换是瞬时完成的, 其时间相对于计算机控制采样时间可以忽略不计。

我们的设计目的是要决定一种开关控制律, 即在 t_k 时刻瞬时根据结构状态反应 $\mathbf{Z}(t)$ 和结构所受的外力决定 $f_i(t_k), g_i(t_k) (i=1 \cdots n)$ 的开关, 使得结构的响应满足某一给定的性能指标。

由于权矩阵 $\mathbf{Q}$ 是正定矩阵, 故 $J(t) > 0$ 。对某个时刻 t_k 而言, 不同的 AVS/D 开关变化会造成不同的结构状态变化轨迹, 而使 $J(t)$ 最小的 AVS/D 开关变化是使结构状态从 t_k 时刻以最快的速率趋向平衡位置的控制器开关状态。

由式 (1) 有:

$$\begin{aligned} \dot{J}(t) = \dot{\mathbf{Z}}(t)^T \mathbf{Q} \mathbf{Z}(t) + \mathbf{Z}(t)^T \mathbf{Q} \dot{\mathbf{Z}}(t) = & \left[(\mathbf{A}(t) + \Delta \mathbf{A}(t)) \mathbf{Z}(t) + \mathbf{B} \ddot{\mathbf{X}}_g(t) \right]^T \mathbf{Q} \mathbf{Z}(t) \\ & + \mathbf{Z}(t)^T \mathbf{Q} \left[(\mathbf{A}(t) + \Delta \mathbf{A}(t)) \mathbf{Z}(t) + \mathbf{B} \ddot{\mathbf{X}}_g(t) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

这里使上式最小所对应的 AVS/D 开关变化 $f_i(t_k), g_i(t_k) (i=1 \cdots n)$ 正是使结构状态从 t_k 时刻以最快的速率趋向平衡位置的控制器开关状态, 由于性能指标 $J(t)$ 与结构在 t_k 时刻的状态有关, 故我们称这种半主动控制为瞬时最优半主动控制。

3. 仿真分析

为了验证本文所提方法的有效性, 以一栋被国际控制界普遍采用的剪切型振动控制试验结构为例来进行仿真, 结构各层物理参数为:

$$\begin{aligned} \text{质量矩阵: } \mathbf{M}(\text{Kg}) &= \begin{bmatrix} 981.4 & 0 & 0 \\ 0 & 981.4 & 0 \\ 0 & 0 & 981.4 \end{bmatrix} \\ \text{刚度矩阵: } \mathbf{K}(\text{N/m}) &= \begin{bmatrix} 2741700 & -1641600 & 369100 \\ -1641600 & 3022200 & -1624800 \\ 369100 & -1624800 & 1333600 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\text{阻尼矩阵: } C(N \cdot s/m) = \begin{bmatrix} 382.8 & -57.3 & 61.7 \\ -57.3 & 456.9 & -2.6 \\ 61.7 & -2.6 & 437.5 \end{bmatrix}$$

AVS/D 控制器安装在层与层之间, AVS/D 控制器参数 $\Delta k_i \approx 0.2k_i = 2.6 \times 10^6 \text{ KN/m}$ 和 $\Delta c_i = 400 \text{ N} \cdot \text{s/m}$, ($i = 1, \dots, 3$)。输入地震波选为调幅为 0.3g 的 EI-CENTRO 南北向地震波。根据 AVS/D 控制器的开关会造成 $2^3 = 8$ 种结构可能具有的状态, 我们所提出的瞬时最优半主动控制正是要在每一瞬时从 8 种结构可能具有的状态中找出一种使结构的性能指标最小的结构状态出来。

图 2 是结构顶层即第 3 层层间相对于地面位移在无控和瞬时最优半主动控制下的反应对比图; 图 3 是结构顶层相对于地面的速度在无控和瞬时最优半主动控制下的反应对比图; 图 4 是结构顶层相对于地面的加速度在无控和瞬时最优半主动控制下的反应对比图; 为比较控制效果, 我们将在地震波作用时间内所有控制器全部打开起作用但并不进行切换的控制方式称为“被动控制”。图 5 给出了结构顶层位移在采用本文所提出的瞬时最优半主动控制方法和“被动控制”下的控制效果时程比较图; 图 6 为结构采用无控、“被动控制”和瞬时最优半主动控制下结构各层的峰值层间位移控制效果对比图; 图 7 给出了结构采用在无控、“被动控制”和瞬时最优半主动控制下结构各层相对于地面的峰值加速度控制效果对比图。从以上控制效果图我们可以看出:

1. 本文所提出的控制方法可以极其有效地控制结构的位移响应, 在本文算例中顶层位移减震率达到 57.5%; 而且还可以明显地降低结构的加速度反应, 解决了其它半主动控制方法只能控制结构的位移和速度响应但却增加了结构的加速度响应的弊病。
2. 从结构在无控、“被动控制”和本文所提出的瞬时最优半主动控制下的各层峰值层间相对位移、峰值加速度的对比图我们可以看出, 本文所用的瞬时最优半主动控制方法极其显著地降低了结构各层的峰值层间相对位移和峰值加速度。而且我们还可以看出: 采用瞬时最优半主动控制比被动的靠增大结构的刚度与阻尼来抵抗外荷载的效果要好的多。
3. 应该注意的是: 本文所提出的瞬时最优半主动控制是基于穷举法的基础上的, 在高层结构中如果安置的 AVS/D 控制器很多的情况下, 由控制器的开关所造成的结构状态组合将是指数形式增长的, 再采用穷举法将是不现实的, 可行的途径是借助于优化算法如遗传算法等, 我们将在以后的文章中加以论述。

4. 结论

由上面仿真结果可以看出: 我们所提出的瞬时最优半主动控制方法是极其有效的一种建筑结构控制方法, 它不但能极大地削减结构在遭受不同地震波激励下的位移与速度响应, 而且还克服了国内外许多学者所用的半主动控制方法中只能控制结构的位移与速度响应但结构的加速度响应在控制后反而放大的弊病, 本文所用方法可以极大地削减结构的加速度响应。而且所需驱动能源极小, 因而本文所提出的瞬时最优半主动控制方法是极具工

程应用发展前途的一种建筑结构振动控制方法。

参考文献

[1]. He Yu'ao , et al. Multi-State Hybrid control of high-rise buildings. Proc. Of First World Conf. On Structure Control, 1994, FP5. 3-FP5. 9.

[2]. KAZUHIKO YAMADA, et al. Control algorithm for estimating future responses of active variable stiffness structure. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1995, VOL. 24:1085-1099.

[3]. J.N.YANG, et al. Control of seismic-excited buildings using active variable stiffness systems. Engineering Structures, 1996, VOL. 18, No. 8:589-596.

[4]. CHIN-HSIUNG LOH, et al. Control of seismically excited building structures using variable damper systems. Engineering Structures, 1996, VOL. 18, No. 4:279-287.

[5]. M.P.SINGH, et al. Active and semi-active control of structures under seismic excitation. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1997. VOL. 26:193-213

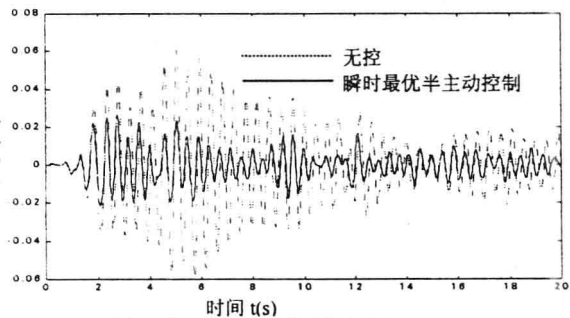


图 2: 结构顶层位移控制效果图

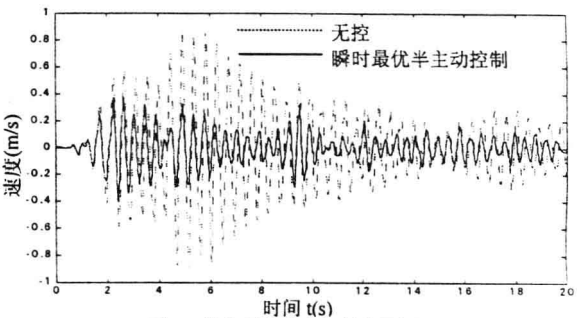


图 3: 结构顶层速度控制效果图

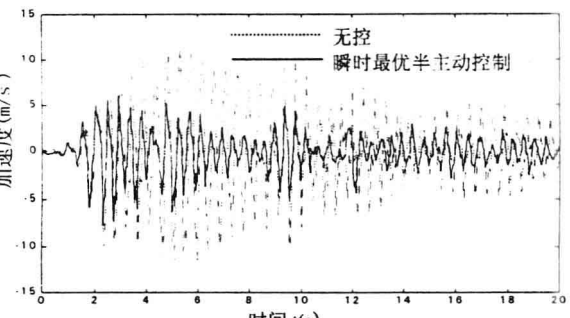


图 4: 结构顶层加速度控制效果图

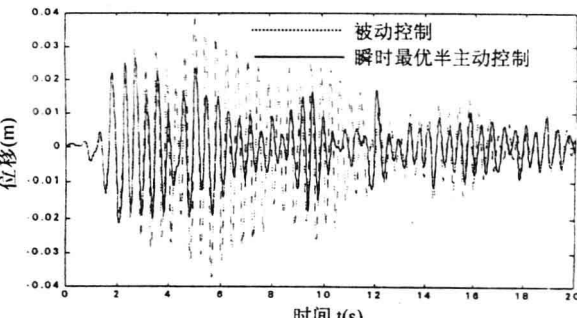


图 5: 结构顶层位移控制效果图

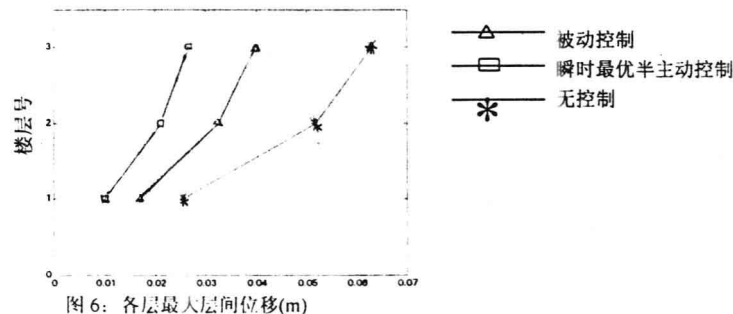


图 6: 各层最大层间位移(m)

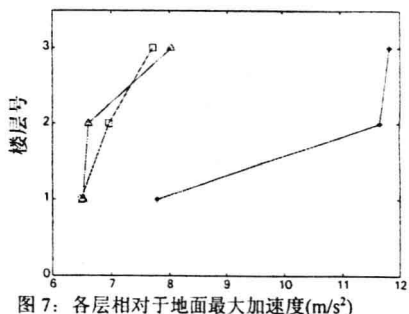


图 7: 各层相对于地面最大加速度(m/s²)

一种模糊随机动态有限元方程的解法

刘长虹 雷震宇 陈虬

(西南交通大学应用力学与工程系, 成都, 610031)

提 要: 本文对模糊随机动态有限元方程的解法做了较系统的探讨, 指出当对模糊随机动态有限元方程做 λ -截集时, 将得到一个区间随机动态有限元平衡方程。在满足一定的条件下, 利用区间数和模糊分解定理, 该方程将存在唯一最大和最小的两个解, 即得到一个解的区间。最后, 算例表明其计算量将是计算普通随机动态有限元方程的两倍以上。

关键词: 模糊, 随机, 动态有限元

1 引言

非线性问题是结构工程中的重要问题。目前对含随机模糊因素影响结构的静态、稳定性分析已取得了很大的成绩。相对而言, 在对随机结构动力学方面的研究工作比较少^[1], 而有关模糊随机结构的动力学问题方面的报道就更少。这是由于分析随机有限元动力问题的方法非常复杂和困难, 而增加了模糊因素后, 其解决方法将变得更加困难。模糊随机结构的动力学问题是工程中无法回避的难题。近年来, 经过国内、外学者从数学、力学和工程角度上的不断研究努力, 迄今已基本上给出了其解的存在性条件和若干解法^[2,3]。本文将在这些研究的基础上, 进一步探讨如何把模糊、随机动力有限元方程进行分析和求解的方法。

2 模糊随机动态有限元方程

2.1 模糊随机变量和模糊随机动态有限元方程

在工程结构中, 在确定材料特性、几何尺寸、阻尼系数和激励等因素时, 由于测试条件以及其他原因的限制, 往往处理成为模糊随机参数。由于有关模糊随机变量有不同的定义, 在此引入文〔4〕中的 Kwakernaak 的模糊随机变量定义和有关模糊随机区间, 模糊随机变量的统计特征的定义。并假设模糊随机动态有限元平衡方程满足文献[3]中的 Lipschitz 条件, 这时该方程存在唯一的最大和最小解。

2.2 模糊随机有限元动力学响应

在上述定义下, 并假设模糊随机变量与时间 t 无关。若结构的某些参数和外部环境条

刘长虹, 男, 工学博士, 副教授

国家自然科学基金委资助项目(59678039)