

北京新闻出版局批准号：京内资准字2007—Ly0108号
《工程力学》刊号：ISSN 1000-4750 CN11-2595/O3

第16届 全国结构工程学术会议 论文集

第Ⅲ册

PROCEEDINGS OF THE SIXTEENTH NATIONAL
CONFERENCE ON STRUCTURAL ENGINEERING

No. Ⅲ

主编：崔京浩

《工程力学》杂志社
2007.8

序

2007 年正值中国力学学会成立 50 周年的喜庆年份，所以今年第 16 届全国结构工程学术会议涵盖了三个内容：其一是庆祝中国力学学会成立 50 周年大会；其二是中国力学学会为了庆祝 50 周年召开全国性的学术大会’2007，本次会议属于这个大会的分会场之一；其三就是一年一度的全国结构工程学术会议。

50 年前的初春，我国著名的力学家钱学森、周培源、钱伟长、郭永怀等发起成立了中国力学学会，这一创举极大地推动了力学面向国民经济发展的主战场，在积极为国民经济建设服务的同时也大大促进了力学学科的发展与强大。

中国力学学会结构工程专业委员会和《工程力学》编委会作为中国力学学会的二级机构，也一直遵循力学要面向国民经济主战场的原则，从 1991 年开始就联合主办全国性的结构工程学术会议，每年召开一次，每届会议的论文集，都收录论文 300 多篇，与会代表 150 多人。受到力学与工程界的普遍欢迎，也得到了力学学会的肯定。

今年第 16 届全国结构工程学术会议在太原理工大学召开。太原理工大学前身是创立于 1902 年的国立山西大学堂西学专斋，是我国最早成立的三所国立大学之一。经过百余年的传承与发展，学校已建设成为一所以工为主、理工结合，兼有文、管、经、法、体、美等多学科协调发展的综合性大学，是山西省唯一一所国家“211 工程”重点建设大学，是一所历史悠久，具有深厚文化底蕴和充满现代气息的高等学府。对于知识份子来说，在这种氛围里召开会议无疑是一大快事。

作为会议的主办单位之一，太原理工大学承担了繁重的会务工作，在此我们表示由衷的感谢。

崔京浩



2007 年 8 月

第 16 届全国结构工程学术会议论文集

本次会议论文集收录论文 304 篇，共计 1571 页，分装成 3 册，每册独立编页。第 I 册载入全套论文集的总目录，第 II、III 册则只载本册目录。

第 I 册论文 83 篇（共 528 页），包括：特邀报告；1. 力学分析与计算；
2. 结构设计、施工、优化与可靠度

第 II 册论文 118 篇（共 542 页），包括：3. 钢与钢筋混凝土结构、材料与构件；4. 岩土、地基基础与地下工程；5. 路桥、水工、港工、特种结构

第 III 册论文 103 篇（共 501 页），包括：6. 机械结构、船舶结构、车辆及航空航天飞行器；7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定；8. 试验、监控、鉴定、事故分析与加固；9. 交叉学科与其他研究成果

第 16 届全国结构工程学术会议论文集目录

第 III 册目录

6. 机械结构、船舶结构、车辆及航空航天飞行器

履带车辆悬挂系统振动特性动态仿真与实验分析	王文瑞 顾 亮 杨 博 (001)
粘弹层合板振动的阻尼特性	杨少红 宋世奎 王安稳 (005)
楔环连接结构轴向-横向联合加载实验研究	尹益辉 唐章华 刘远东 (010)

7. 抗震、爆炸、冲击、动力与稳定

考虑局部非线性的复杂场地地震反应分析的约束模态综合法	白建方 楼梦麟 (014)
非均匀偏心配筋砌体结构地震反应影响参数分析	白秀芳 王焕定 于德湖 (020)
内藏钢桁架混凝土组合核心筒抗震研究	曹万林 常卫华 张建伟 赵长军 卢智成 (025)
冲击荷载下金属方板支承条件影响的数值模拟分析	崔高领 蒋志刚 胡 平 (031)
摩擦耗能支撑结构两种减震分析方法对比	樊长林 张文芳 (036)
非线性单自由度复合随机振动系统的反应特性	范么清 楼梦麟 (041)
设置软钢阻尼器的钢框架耗能减震性能研究	方鹏凯 裴星洙 臧秀平 (046)
组合梁-方钢管混凝土框架结构的 Pushover 分析	郭 冰 刘阳冰 刘晶波 (051)
基础隔震层软碰撞限位实验研究	韩 淼 杜红凯 李仙华 (057)
筏板基础对结构水平地震行波效应的影响	黄明开 楼梦麟 (063)
四铅芯桥梁隔震支座非线性力学性能试验研究及其显示有限元分析	江宜城 叶志雄 聂肃非 李 黎 (068)
钢管混凝土构件在侧向冲击载荷作用下的挠度分析	李 珠 刘 斌 王瑞峰 (073)
某除尘器钢支架的 pushover 分析	李奉阁 赵根田 (078)
聚合物材料的吸能特性实验分析	李经纬 庄惠平 (082)
填充墙框架结构基于位移的抗震评估	刘建毅 史庆轩 (086)
高层结构脉动风荷载模拟	刘立卫 隋杰英 刘兆新 (090)
联方型球面网壳结构风振响应分析及风振系数	刘文洋 张文福 (094)
组合梁-方钢管混凝土柱框架结构体系抗震性能分析	刘阳冰 郭 冰 刘晶波 (098)
不同地震波输入对连续梁桥隔震性能的影响	龙晓鸿 李 黎 (104)
偏心砌体隔震结构地震反应影响参数分析	鲁志雄 王焕定 (108)
模拟穿甲弹侵彻陶瓷复合靶的 FE-SPH 与 FEM 算法	罗夕容 陈 斌 曾首义 (115)

固简支钢管混凝土构件侧向冲击试验研究	李 珠 王瑞峰 (120)
侧向约束陶瓷复合靶板防护系数的数值模拟分析	麻震宇 曾首义 蒋志刚 (124)
多铅芯橡胶隔震支座力学性能研究及应用	聂肃非 李 黎 江宜城 叶志雄 (129)
橡胶隔震采用摩擦消能的减震研究	牛力军 张文芳 (134)
钢管混凝土短柱轴向冲击本构关系实验研究	任够平 李 珠 王 蕊 (138)
槽形截面 Timoshenko 梁固有频率的确定	苏铁坚 邹建奇 (143)
小八字曲拐撑的试验研究	隋杰英 刘文锋 姚幸海 (147)
塔梁墩团结体系独塔混凝土斜拉桥地震反应分析	孙 颖 卓卫东 (151)
曲线桥反应谱分析中振型贡献率探讨	孙军举 李青宁 王天利 (157)
30mm 口径半穿甲模拟弹侵彻陶瓷复合靶板的 SPH 方法数值模拟研究	汪 维 何 焯 曾首义 (161)
侧向冲击荷载作用下钢管混凝土梁动力响应的实验和理论研究	王 蕊 李 珠 任够平 (166)
平头弹侵彻金属靶板的 SPH 数值仿真	王 震 晏麓晖 曾首义 (171)
防屈曲支撑框架结构的应用研究	王华琪 丁洁民 何志军 江 韬 (176)
叠梁在随机激励作用下响应的试验研究	王山山 任青文 曹茂森 (183)
带约束屈曲支撑的网壳减震性能分析	王秀丽 王 磊 高 森 (186)
桥梁结构抗震计算可视化系统研究	韦 韩 袁吉鸿 王克海 李 茜 (190)
短肢剪力墙拟静力试验研究	韦 炜 程文灏 彭 飞 陆和燕 荣 强 (197)
非线性刚度转子系统主共振特性及奇异性分析	吴敬东 高大威 包 鑫 (203)
墙式防护结构抗平面波炸药透镜爆炸冲击性能研究	吴祖堂 陈春毅 邵贤忠 张德志 胡泽根 唐润棣 (209)
供水管网渗漏模型研究	邢 燕 李 杰 (213)
钢纤维混凝土板抗爆性能试验研究	徐 峰 许金余 沈刘军 (218)
基于粒子群优化算法的磁流变阻尼器位置优化	徐晓龙 孙炳楠 桂满树 姜毅荣 (222)
碟形弹簧竖向隔震支座性能试验研究	薛素铎 祝天瑞 (231)
爆炸荷载作用下钢筋混凝土柱损伤 FEM 分析	阎 石 王 丹 张 亮 (235)
改进的能力谱方法在基础隔震结构中的应用	杨晓持 徐 勤 叶献国 (239)
基于间断伽辽金法的自由空气爆炸数值模拟	叶 昆 李 黎 (243)
考虑土与结构动力相互作用的 CFST 拱桥地震反应	张 博 宰金珉 (248)
轻质桁架式夹层复合圆柱管的冲击吸能数值模拟	张 巍 王跃方 (253)
基于 Pushover 分析的梁柱承载力比对 RC 框架结构抗震性能的影响研究	张人长 陆 琦 曹素荣 (258)
使用低屈服极限钢铅组合耗能器的基准结构地震反应分析研究	张永山 颜学渊 王焕定 辛亚军 (266)
应用碳纤维索的斜拉桥地震响应分析	张治成 谢 旭 张 鹤 (270)
不等高厂房抗震可靠性分析的一般方法	张治勇 孙柏涛 (279)
TMD 对行走激励下大跨度楼盖的减振控制	赵 玲 赵 均 陈永祁 李亚民 (283)
摩擦摆支座的摩擦系数对结构隔震性能影响分析	赵 伟 薛素铎 李雄彦 祝天瑞 (287)
网壳结构损伤研究在性能抗震设计中的应用	支旭东 谢礼立 (293)

橡胶支座和粘滞阻尼器在连续梁桥减、隔震中联合应用研究	周高瞻 闫维明 李素梅 (297)
复杂超高层结构抗震性能的有限元计算分析	邹 昀 吕西林 (304)
钻地模型弹侵彻岩石模拟材料试验研究	左 魁 李 林 王启睿 梁仕发 (309)

8. 试验、监控、鉴定、事故分析与加固

某水泵站厂房结构检测鉴定	常好诵 牟宏远 黄新豪 邓 明 (314)
复合薄壁剪力墙住宅体系抗震性能研究	窦远明 黄 磊 赵家妹 吴华伟 (318)
基于承载力评估的混凝土结构火灾损伤的无损检测与评估方法	杜红秀 (323)
单轴应力状态下受 NaCl 腐蚀混凝土受拉应力-应变曲线试验研究	胡跃东 范颖芳 张英姿 赵立东 (327)
基于粗集的结构损伤识别方法研究	姜绍飞 姚 娟 (332)
异型大厦附近的风环境影响研究	琚素芳 刘 军 李 龙 张成新 武建勋 (337)
上海长江隧桥斜拉桥承台裂缝监测及分析	李 东 睦少峰 (341)
新型桥梁疲劳寿命计精密合金箔材制备	李 飞 肖 丹 任伟新 (345)
应县木塔扭转振动特性和地面强迫振动试验与分析	李铁英 魏剑伟 李世温 张善元 (349)
某厂房沉降监测及地基处理	刘海生 (357)
碳纤维加固已损钢筋混凝土柱的试验研究	刘卫东 郑七振 陈 刚 (360)
腐蚀疲劳裂纹检测概率曲线测定	刘秀丽 陈 莉 黄华斌 (364)
外加预应力加固技术在桥梁工程中的应用	马 亮 梁 力 张树仁 (368)
梁刚度损伤诊断中的小波应用	马德云 霍 达 滕海文 杨雅平 (373)
FRP 约束混凝土圆柱的力学模型研究	欧阳煜 刘能科 (380)
复合材料的力学性能测试和复合材料结构的应变电测技术研究及其应用	沈观林 (385)
频率对结构损伤识别影响的神经网络方法研究	隋红军 赵广会 袁旭东 (389)
锈蚀光圆钢筋与混凝土的粘结强度模型	孙 彬 牛荻涛 (394)
百色膨胀土的抗剪强度试验分析	谭景和 朱寿增 王杰光 周健红 (398)
向心关节轴承铰节点的试验研究	王 帅 葛利俊 赵宪忠 陈以一 (403)
基于光纤光栅传感器的桥梁挠曲线测试	徐 辉 任伟新 (407)
模态试验中胶木垫块在高频下的使用	徐有刚 冯加权 张洁文 (411)
广东科学中心结构服役性能研究及展示	易 和 张季超 郭曼丽 陈大宾 (414)
碳纤维布静力及动力性能试验研究	袁正如 鲍育明 李志成 (418)
双向楼板粘钢加固的数值模拟研究	张海涛 傅 娟 杨昌盛 李 瑞 武建勋 (422)
全预应力砼梁动力性能试验研究	张耀庭 李宏健 (426)
某桥梁加固效果动静载力学分析	张宇辉 张献民 (432)
防腐高强钢丝加固受弯构件中钢筋与钢丝应力变化的试验研究	赵士永 李占文 (436)
基于事件树分析法的大跨斜拉桥施工事故分析	郑荣跃 简小生 俞凯磊 (440)
环境激励下圆筒结构的模态分析	周帮友 胡绍全 杜 强 (446)
预应力桥梁裂缝的成因之一——预应力施工中的若干技术问题	周明华 (450)

9. 交叉学科与其他研究成果

智能合金材料及在道路工程中的应用	邓洪亮 廖 丹 王正念 陈 玲 (453)
计算机辅助建筑结构构件设计软件述评	韩 通 石建光 (457)
飞机掩蔽库可见光特征控制技术研究	李 可 孟祥龙 丁伯毅 贾治勇 李猛深 (461)
基于曲率模态梁式结构的损伤定位分析	潘日光 周 平 何惠平 李 顺 (465)
建筑节能评价体系的发展与研究方向	田稳苓 王洪福 袁 全 (470)
基于参数改进的混沌粒子群混合优化算法	董金旺 张 鹏 沈小伟 (475)
一种测量射弹作用后靶板形状的简易光刀法	苑 云 陈 斌 曾首义 (481)
结构温度场数值模拟	张 丹 张之颖 (485)
相变材料在建筑节能领域应用研究综述	田稳苓 邢 超 袁 全 (491)
横向磁场中对边简支对边固支矩形薄板的分岔与混沌	朱为国 白象忠 杨 阳 (495)

履带车辆悬挂系统 振动特性动态仿真与实验分析

王文瑞^{*1}, 顾亮¹, 杨博²

(1 北京理工大学振动与噪声控制实验室, 北京, 100081; 2 北京中远船贸技术咨询有限公司, 北京, 100027)

摘要: 利用多体动力学软件 Recurdyn 建立某型履带车辆的整车非线性多体动力学模型, 对该模型在标准路面 (D, E, F 级) 上以不同车速行驶时, 车辆的动态响应进行了分析, 最后通过实车实验证明, 采用多体动力学模型的方法可以用于车辆悬挂结构、性能设计中的参数选择, 也可以为车辆悬挂的主动控制策略的研制提供了理论依据。

关键词: 多体动力学仿真; 履带车辆; 平顺性; 动态响应; 主动控制策略

中图分类号: U46. 1, TP391. 9

DYNAMIC SIMULATION AND EXPERIMENTAL ANALYSIS ON SUSPENSION VIBRATION CHAARACTERS OF TRACKED VEHICLE

Wang Wenrui¹, Gu Liang¹, Yang Bo²

(1 Lab. of Vibration and Noise Control, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081;

2 Coscoship Beijing CO.,LTD., Beijing, 100027)

Abstract: A comprehensive nonlinear vehicle model of a tracked vehicle suspension system is established by using multibody dynamics software Recurdyn. Dynamics vibration characters of the multibody model is simulated, which is about the model on the different roads (such as D,E,F) by the different riding speeds, the experiment proved that using multibody system simulation could select appropriate parameters in the structure and performance design about vehicle suspension, that could give theory bases about active suspension controlling strategy.

Keywords: multibody system simulation; tracked vehicle; ride comfort performance ; dynamics response; active controlling strategy

1 引言

悬挂系统是履带车辆行动系统的重要组成部分, 功用是支撑车体, 缓和并衰减车轮在履带上行驶时因路面不平而激起的车轮对车体的冲击以及振动, 保证车辆能够高速平稳地行驶, 减轻乘员的疲劳, 提高履带车辆的机动性, 增强火炮的射击准确度和火力。悬挂系统优良的动态特性是履带车辆具有高机动性、高通过性和乘员舒适性乃至提高乘员战斗力的重要保障^[1]。本文基于虚拟样机技术和多体理论, 以大型多体动力学分析软件 RecurDyn 作为仿真平台, 建立履带车辆行动系统多体仿真模型, 并对所建悬挂系统模型的动态特性进行研究, 分析, 最后结合实际车辆实验验证了模型分析的正确性。旨在阐明采用多体动力学模型可以准确有效地仿真车辆振动特性; 而且还可以对车辆悬挂结构、性能设计中的参数进行优化选择, 缩短车辆开发周期; 也可以为车辆悬挂的主动控制策略的研制提供了理论依据^[2]。

作者简介 *王文瑞(1979), 男, 山西人, 博士生, 主要从事车辆动力学, 悬挂动力学, 平顺性研究(E-mail: gmbitwrw@bit.edu.cn);
顾亮(1958), 男, 山东人, 教授, 主要从事车辆工程及人机工程研究;
杨博(1980), 男, 辽宁人, 工程师, 主要从事车辆, 船舶振动噪声研究。

2 悬挂系统动态特性仿真

履带车辆行动系统由车体子系统和左右侧履带环子系统三部分构成,其中车体子系统由车体、负重轮、主动轮、诱导轮、托带轮、平衡肘、弹性和阻尼元件等组成;两侧履带环子系统是由多块履带板通过履带连接器组成的环状结构。根据其各组成构件的运动特征,抽象它们之间的约束关系,采用自下而上的建模顺序,整车模型和系统总成模型建立在子系统模型基础上^{[3][11][31]}。RecurDyn 提供了基于 Parasolid 内核的三维 CAD 实体建模界面,在该环境下,可以方便的建立履带车辆的实体模型。本文所研究的整车悬挂系刚体构件数目为 243,共计 1210 个自由度。按照上述方法在 RecurDyn 软件中,建立的悬挂系统的模型如图 1 示。

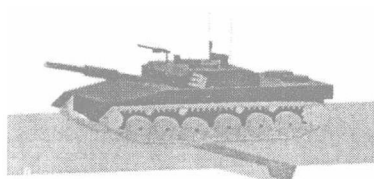


图 1 履带车辆悬挂系统多体力学模型

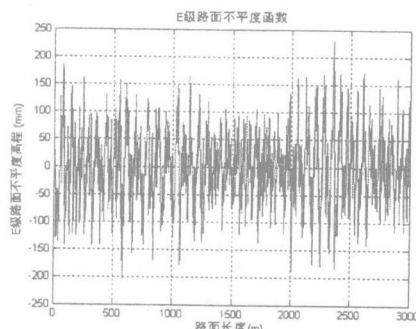


图 2 E 级路面仿真模型的路面激励

2.1 模型激励与模型参数设置

路面不平度输入是整个动力学模型的激励,本文路面激励采三角级数法所构造路面激励^{[11][16]},构造的 E 级路面不平度时域曲线如图 2 示。由于模型的结构参数为常数,在建模时,需严格按履带车辆设计的参数和结构参数进行设置;悬挂系统参数主要包括悬挂刚度参数和阻尼参数;需要按照相应特性曲线设置。其中悬挂的刚度可以按照弹簧的曲线和几何安装等设置,阻尼的设置须采用曲线拟合的办法。本文采用软件提供的 RSDA 模型的“阻尼力矩——角速度”输入用减振器阻尼特性试验测得曲线作为输入。

2.2 悬挂系统的动力学仿真分析

本文分别研究模型以 20~60km/h 车速匀速通过 D, E, F 级路面时,在各种不同工况与悬挂参数下车辆平顺性的基本状况。

图 3 为不同路面下车体的质心垂直振动加速度均方根值的比较。车辆以相同的速度行驶在不同路面,每相差一个路面等级,车体振动加速度响应会随着路面的变坏而增大。同样地,在同一路面上,由于车速的增大,车内振动环境也在变坏。这说明,车辆振动环境受到外部激励,车速等条件的制约。

图 4 分别为不同阻尼下车体的质心垂直振动加速度均方根值比较。车辆的振动加速度响应和车辆悬挂系统的阻尼比是相关的,不同的阻尼比,在同一路面以同一车速行驶车辆振动响应也不同,这说明通过改变车辆悬挂系统的阻尼比,可以改善车体振动环境。这正是(半)主动悬挂技术的基础所在,通过识别车辆运行工况的不同,改变车辆悬挂系统的阻尼参数使之适于车辆平顺性的提高。

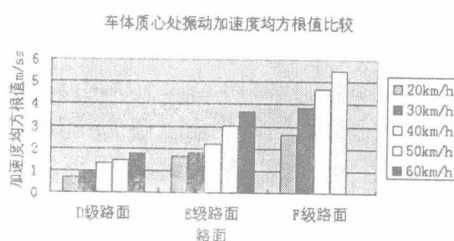


图 3 车体质心处振动加速度均方根值

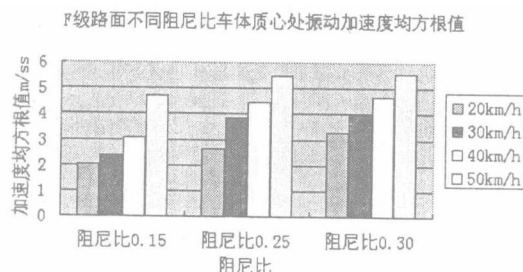


图 4 F 级路面车体质心处振动加速度均方根值

2.3 车辆振动响应的频谱分析

图 5，图 6 分别为车辆模型以 50 km/h 的速度通过 D 级路的车体质心垂直加速度功率谱曲线。图 5 是车辆匀速行驶时的车体垂直加速度剔除运算“奇点”后的动态响应，显然具有明显的随机性。图 6 用 Welch 法对图 5 信号分析得到的功率谱^[8]。可以看出，车辆振动响应的能量分布范围主要在低频段，高频段则不是很明显。

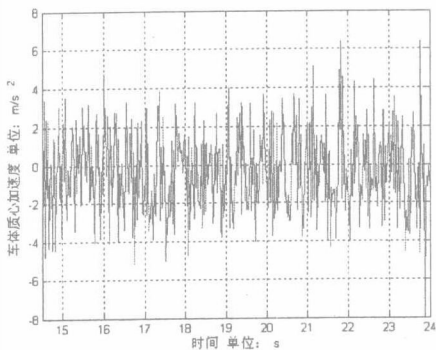


图 5 D 级路面的车辆质心垂直加速度曲线

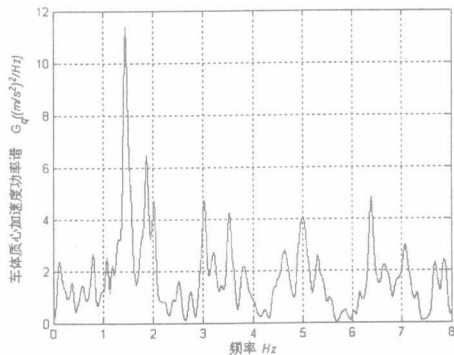


图 6 车体质心垂直加速度功率谱

3 悬挂系统实车实验分析

履带车辆道路试验可以考核其悬挂系统的性能和可靠性，也可以为车辆的设计提供指导依据，本文将试验结果与多体仿真方法所得到的坦克整车仿真模型的动力学特性进行对比，为后续仿真模型的完善提供依据。测试系统框图如图 7 所示。实验中车辆通过路面行驶的速度也为 20~60km/h，测试时车辆行驶速度为匀速。

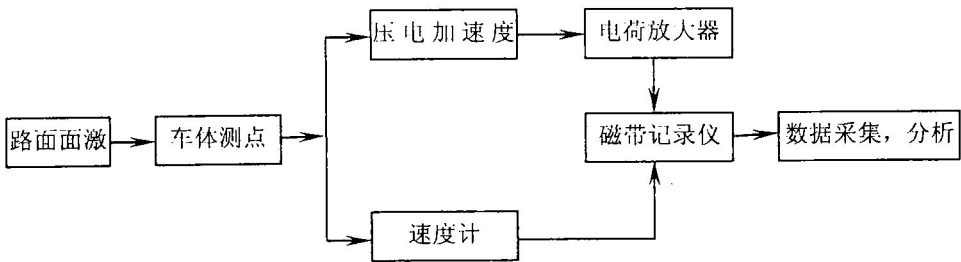


图 7 实车振动测试系统

通过对振动信号的预分析，车体测点通道低滤波截止频率均为 50Hz，采样频率取为 500Hz，为消除高频混叠和趋势项对测试结果的影响，选用了抗混叠模拟滤波器，其中，带通滤波的下限频率为 0.5Hz，频谱分析时加窗处理，并对信号进行多段平均处理。图 8 为实验所得车辆以 40km/h 的行驶速度在水平随机路面（相当于 F 级标准路面）行驶时所得质心振动加速度时、频曲线，可以看出，所得结果与图 6 曲线的共振频率非常接近，均为 1.45Hz 左右，由于实验没有测得路面特性，所以两条曲线的峰值存在一定的差异，但是二者的趋势完全相同。

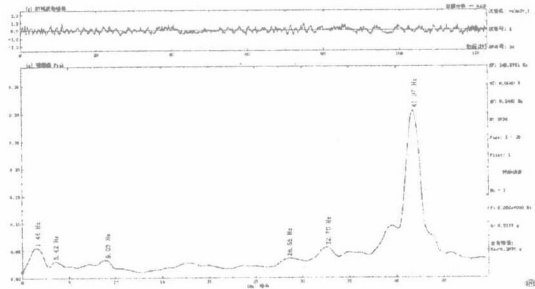


图 8 车体质心垂直振动加速度时、频曲线

4 结论

(1) 履带车辆行驶过程中, 影响车辆动态振动特性的主要因素有: 路面激励、车辆行驶速度、悬挂参数等。

(2) 实验证明, 利用多体动力学理论可以方便, 准确, 快速地分析出车辆悬挂系统动态特性, 可以用于车辆平顺性动力学研究。

(3) 通过多体动力学仿真计算, 可以对车辆悬挂结构、性能设计中的参数进行优化选择, 结合实车实验数据可以为车辆悬挂的主动控制策略的研制提供理论依据。

参考文献:

- [1] 丁法乾. 履带式装甲车辆悬挂系统动力学. 北京: 国防工业出版社. 2004
- [2] 张越金. 汽车多体动力学及计算机仿真. 长春: 吉林科学技术出版社, 1998
- [3] Han Sik RYU, Kun Soon HUH and Dae Sung BAE et al. Development of multibody dynamics simulation tool for tracked vehicles. JSME International Journal, series C, 2003, 46 (2): 540-549
- [4] 康新中, 马春茂, 魏孝达. 火炮系统建模理论. 北京: 国防工业出版社. 2003
- [5] 韩宝坤. 装甲车辆行动装置动态性究:[学位论文]. 北京: 北京理工大学. 2003
- [6] Hoogterp F B, Saxon L. Nancy, & Schihi. J, Peter. Semiactive Suspension for Military Vehicles. SAE papers 930847, 1993.
- [7] James Lacombe, Mark Moran. A 3-Dimensional dynamics model for generating tracked vehicles seismic signals 2000
- [8] 张志涌. 精通 MATLAB6. 5. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2003

粘弹层合板振动的阻尼特性

杨少红^{*1}, 宋世奎², 王安稳¹

(1. 海军工程大学理学院, 湖北 武汉 430033; 2. 海军 91278 部队, 辽宁 大连 116000)

摘 要: 应用混合分层理论推导出的粘弹层合板的动力学方程, 不仅得出与三层弹性板精确的频率解吻合良好的解, 而且对于粘弹层合板, 所计算的振动频率和结构损耗因子也与三维结果吻合较好。计算了两层自由阻尼结构对应的低阶频率和结构损耗因子, 并分析了粘弹性材料的影响。结果表明, 随着阻尼材料弹性模量的增大, 自由阻尼层合板的一阶频率和结构损耗因子增大。由于采用较高弹性模量的粘弹性材料, 结构的整体刚度增加, 导致低阶振动频率增大。由于粘弹性层厚度的增加, 增大了结构的阻尼效应, 相应地减小了低阶振动频率和增大了结构损耗因子。

关键词: 层合板; 混合分层理论; 粘弹性材料; 振动频率; 结构损耗因子

Vibration and Damped Characteristic of Visco-elastic Laminated Plates

YANG Shao-hong¹, SONG Shi-kui², WANG An-wen¹

(1. College of Science, Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China; 2. Naval Unit No.91278, Dalian 11600, China)

Abstract: Applying the mixed layerwise plate theories, the dynamics equations of viscoelastic laminated plates are derived. The predicted numerical results show the good agreement with the exact elastic solutions. Moreover for the laminated plates with a constrained viscoelastic layer, the predicted vibration frequency and loss factor show the good agreement with the three-dimensional observations. The predicted vibration frequency and loss factor were computed for different Young's modulus and thickness of viscoelastic layer. The results show that the first rank vibration frequency and loss factor will increase with higher Young's modulus of a viscoelastic layer. The first rank vibration frequency will increase and loss factor will decrease, when the damped effect of layerwise structure become larger with thicker Young's modulus of a viscoelastic layer.

Key words: laminated plates; mixed layerwise theories; viscoelastic layer; vibration frequency; loss factor

1 引言

近年来, 由于纤维加强的复合材料和高阻尼粘弹性材料的发展, 复合材料层合板和粘弹层合板已广泛应用于飞机、船舶和工程机械等领域的结构。有很多文献采用各种理论和各种方法研究了这类层合板的自由振动或动力响应特性^[1]。在预测带有复杂几何形状的多层各项异性板中的响应特性, 采用三维理论^[2-4]的应用模型计算, 虽然精确度高, 但计算极其复杂, 沿厚度方向展开的幂级数收敛慢, 而且不容易用于实际形状的层合板。实际上, 二维理论已能够正确预测中厚层合板的振动和动力响应特性。在考虑横向变形效应的二维层合板理论中, 一阶理论^[5]通过采用适当的剪切修正因子, 能够较精确地计算振动的低阶频率, 但需要一个剪切修正因子, 这决定于每一层放置顺序、层数和每一层的性质, 而且也不能正确地计算横向应力。高阶理论^{[6][7]}改变传统的层合理论和剪切变形理论的不准确性而且较低阶理论具有更高的精确度, 但从工程的角度来看, 在解决偏微分控制方程和描述边界条件中存在很大的困难, 而且不同介质层的弹性刚度较大时, 也不能得出协调的层间剪应力和层间正应力。但这些文献没有考虑层合板层间横向应力的连续性, 甚至将横向正应力简化为零。

1987 年, Sciuva^[8]采用沿板厚方向满足层间横向剪应力平衡条件(没有考虑横向正应力)的复杂位移

作者简介: *杨少红(1975), 男, 湖北武汉人, 博士, 从事舰船结构力学研究(E-mail: julcy1129@sina.com);

宋世奎(1974), 男, 辽宁大连人, 工程师, 从事舰船设备维修;

王安稳(1945), 男, 山东日照人, 教授, 博导, 博士, 从事板壳力学、结构稳定性和结构动力学研究。

模型建立了简支各向异性厚板的弯曲和非线性运动, 并研究了一个三层的对称铺设的四面简支平方板的弯曲和自由振动。H.Murakami^[9]和 A.Toledano^[10]为了提高剪变形多层复合板理论的平面响应的准确性, 基于 Reissner 混合变分原理建立了新的高阶层合板理论。他们采用 Z 字形的一阶连续函数和 Legendre 多项式用来近似沿板厚方向分布的位移, 得到对称和非对称的正交铺设的弹性层合板的解与精确理论吻合良好。E.Carrera^[11]采用二维理论模型和分层理论计算了厚板的平面内和平面外的弯曲响应。所建立的模型优先满足两个相邻层间的横向剪应力和正应力的连续性, 通过 Reissner 的混合变分原理得到控制方程并通过协调方程来加强界面连续条件。所得到的由各项异性层组成的层合板的解与三维结果完全吻合。此外 E.Carrera 在文献^[12]研究了横向正应力对多层板壳结构的振动影响, 并指出如果不考虑层间连续剪应力和正应力, 改进传统理论来研究层合板的弯曲和响应是毫无意义的。

本文采用混合分层理论和 Reissner 混合变分原理来推导粘弹层合板的动力方程。不仅得出与弹性层合板精确解^{[13][14]}吻合良好的频率, 而且对于粘弹层合板, 所计算的振动频率和结构损耗因子也与三维结果^[15]吻合较好。计算了两层自由阻尼结构自由振动对应的低阶固有频率、结构损耗因子和层间横向应力, 分析了粘弹性材料的影响, 并得到了正确协调的层间横向正应力。

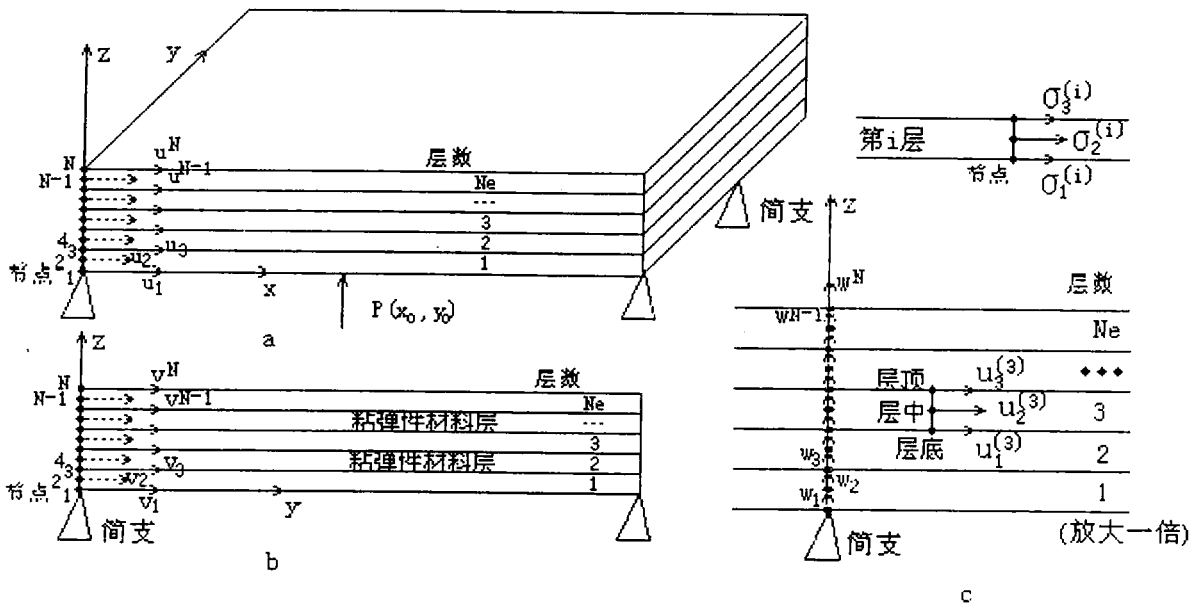


图 1 粘弹层合板的数学模型

2 控制方程的推导

如图 1 所示, 假定层合板沿厚度方向被分成 N_e 个数值层, i 表示层数, $i=1, 2, \dots, N_e$; 设第 i 层位移 $q^{(i)} = [u^{(i)} \quad v^{(i)} \quad w^{(i)}]^T$ 和横向应力场 $\sigma_n^{(i)} = [\sigma_{xz}^{(i)} \quad \sigma_{yz}^{(i)} \quad \sigma_{zz}^{(i)}]^T$ 。采用混合分层理论和 Reissner 混合变分原理^[16], 进行一系列推导^[17], 得到粘弹层合板的动力方程和协调方程:

$$\int_{A_i} (-C_p^T \phi_j D_{pp} C_p \phi_\tau) d\bar{z} q_\tau^{(i)} + \int_{A_i} (-C_p^T \phi_j D_{pn} \psi_\tau - C_n^T \phi_j \psi_\tau + \phi_{jz} \psi_\tau I) d\bar{z} \sigma_n^{(i)} = - \int_{A_i} \rho^{(i)} \phi_j \phi_\tau I d\bar{z} \ddot{q}^{(i)} + f \quad (1)$$

$$\int_{A_i} (\psi_j C_{nz} \phi_\tau + \psi_j \phi_\tau I - \psi_j D_{np} C_p \phi_\tau) d\bar{z} q_\tau^{(i)} + \int_{A_i} (-\psi_j D_{nn} \psi_\tau) d\bar{z} \sigma_n^{(i)} = 0 \quad (2)$$

其中: 下标 $j=1, 2, 3$; 下标 $\tau=1, 2, 3$; $f=[f_x \quad f_y \quad f_z]$ 为外载荷; ϕ 表示位移插值函数; ψ 表示横向应力的插值函数; $\bar{z} = 2(z - z^{(i)})/h^{(i)}$, 此处, $h^{(i)}$ 表示第 i 个数值层的厚度, $z^{(i)}$ 表示 i 层中的 z 坐标;

D_{pp} 、 D_{pn} 、 D_{np} 、 D_{nn} 是材料弹性常数的函数^[17]；忽略粘弹性材料的模量和损耗因子随温度和频率的变化，采用简化的复刚度形式来表征阻尼材料的特性参数；参数 C 表示为：

$$C_p = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} & 0 \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} & 0 \end{bmatrix}, \quad C_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_{nz} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial z} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial z} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (3)$$

如图 1 所示，设第 k 节点的位移分别为 u^k 、 v^k 、 w^k ，横向应力分别为 σ_{xz}^k 、 σ_{yz}^k 、 σ_{zz}^k ，采用 Navier 型完备解求解方程 (1) 和 (2) 的解。动力方程组和协调方程组可表示为：

$$K \cdot \Gamma = \omega^2 \cdot M \cdot \Gamma + f \quad (4)$$

其中 K 为刚度矩阵， M 为质量矩阵。此方程组是 $3N$ 阶的方程，对应每一对 (m, n) 可得出特征值 ω_{mn}^2 的 $3N$ 个值 λ_j 及相应的振动模式。则粘弹层合板的第 j 阶固有频率 ω_j 和结构损耗因子 η_j 分别为：

$$\omega_j = \sqrt{\text{Re}(\lambda_j)^2 - \text{Im}(\lambda_j)^2}; \quad \eta_j = 2\text{Im}(\lambda_j) \cdot \text{Re}(\lambda_j) / (\text{Re}(\lambda_j)^2 - \text{Im}(\lambda_j)^2) \quad (5)$$

3 与三维理论的计算结果进行比较

为验证本文解法及算式的正确、可靠性，用所编程序计算了文[13]中的三层简支正方弹性板的前三阶振动频率，见表 1。每层由各向同性弹性材料组成，泊松比 $\nu=0.3$ ，并取频率参数 $\omega h \sqrt{\rho/G}$ ，其中 h 为整个板厚、 ρ 为材料的密度、 G 为材料的剪切模量。计算中将夹层板划分为四个数值层，每一层厚度分别为： $h_1=0.1h$ ， $h_2=0.4h$ ， $h_3=0.4h$ ， $h_4=0.1h$ 。

表 1 与文献[13]用三维弹性理论计算正方形层合板的前三阶频率参数 $\omega h \sqrt{\rho/G}$ 对比

模态 m/n	第一阶		第二阶		第三阶	
	文献[13]	本文	文献[13]	本文	文献[13]	本文
1/1	0.0932	0.0996	0.444	0.406	0.7498	0.7951
2/1	0.223	0.230	0.702	0.719	1.183	1.212
2/2	0.342	0.374	0.888	0.811	1.494	1.583
3/1	0.417	0.423	0.993	1.112	1.665	1.648
3/2	0.524	0.571	1.133	1.084	1.894	1.983
3/3	0.689	0.771	1.333	1.217	2.217	2.353

本文还采用混合分层理论计算了文[14]中四层正交铺设 (0/90/0/90) 的简支各向异性正方板的前十阶频率参数，见表 2。材料参数如下： $a=b=10h$ ； $E_L=1.729 \times 10^{11} \text{pa}$ ； $E_T=3.307 \times 10^{10} \text{pa}$ ； $E_Z=5.168 \times 10^9 \text{pa}$ ； $G_{LT}=9.371 \times 10^9 \text{pa}$ ； $G_{LZ}=8.268 \times 10^9 \text{pa}$ ； $G_{TZ}=3.238 \times 10^9 \text{pa}$ ； $\nu_{LT}=0.036$ ； $\nu_{LZ}=0.250$ ； $\nu_{TZ}=0.171$ 。计算中将夹层板划分为四个数值层，每一层厚度分别为： $h_1=0.25h$ ， $h_2=0.25h$ ， $h_3=0.25h$ ， $h_4=0.25h$ 。

表 2 与文献[14]用三维弹性理论计算正方形层合板的前十阶频率参数 $\omega h \sqrt{\rho/E_T}$ 对比

m/n	一阶	二阶	三阶	四阶	五阶	六阶	七阶	八阶	九阶	十阶
1/1	文献[14]	0.066	0.546	0.600	1.243	1.298	1.326	2.363	2.379	2.491
	本文	0.062	0.515	0.565	1.233	1.288	1.320	2.231	2.269	2.331
2/1	文献[14]	0.152	0.639	1.076	1.242	1.343	1.632	2.387	2.484	2.561
	本文	0.143	0.601	1.021	1.232	1.326	1.614	2.250	2.329	2.468

此外, 本文计算了三层夹层板 ($30.5 \times 34.8 \text{ cm}$, 外层厚 0.762 mm , 中间为粘弹性层厚 0.254 mm , 参数如下) 的第一阶频率和损耗因子, 如表 3。计算中将夹层板划分为 6 个数值层, 各层厚度分别为: $h_1=0.001$, $h_2=0.001$, $h_3=0.001$, $h_4=0.001$, $h_5=0.001$ 。板 1 和板 3 的参数为: 弹性模量 $E_1=E_2=2.069 \times 10^{11}$; $\rho_1=\rho_3=7.8 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; $\mu_1=\mu_3=0.3$ 。粘弹性材料的参数为: 弹性模量 $E_3=2.069 \times 10^{11}$; $\rho_2=1.2 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$; $\mu_2=0.4$; $\eta_V=0.58$ 。

表 3 与文献[15]用三维弹性理论计算三层夹层板的频率 ω (Hz) 和结构损耗因子 η 结果对比

m/n	1/1		1/2		2/1		2/2	
	ω	η	ω	η	ω	η	ω	η
文献[15]	60.3	0.190	115.4	0.203	130.6	0.199	195.7	0.174
本文	65.4	0.204	124.2	0.174	138.7	0.168	201.7	0.131

从表 1、2、3 可以看出本文计算方法的准确性。其中表 2 和表 3 吻合良好, 表 3 差别较大, 主要是由于夹层板太薄, 而且粘弹性材料与弹性板的模量比相差太大, 导致计算误差变大。

4 自由阻尼层合板的振动频率和结构损耗因子分析

本文计算的两层粘弹层合板的参数如下。层合板长 $a=0.50 \text{ m}$, 宽 $b=0.25 \text{ m}$; 弹性层厚度为 $H_1=0.006 \text{ m}$ 密度为 $\rho_1=7.85 \times 10^3 \text{ N/m}^3$; 泊松比 $\mu_1=0.3$; 弹性模量 $E_1=2.127 \times 10^{11} \text{ Pa}$; 剪切模量 $G_1=8.37 \times 10^{10} \text{ Pa}$; 粘弹性层密度为 $\rho_2=1.413 \times 10^3 \text{ N/m}^3$; 阻尼因子 $\eta_V=0.5$; 泊松比 $\mu_2=0.48$; 厚度分别为 $H_2=0.02 \text{ m}$ 和 $H_3=0.03 \text{ m}$; 弹性模量 $E_2=(0.2 \sim 4) \times 10^9 \text{ Pa}$ 。取 $m=1$ 和 3 , $n=1$, 分别计算了不同模量和两种不同厚度的阻尼材料结构的前三阶无量纲频率 $\Omega = \omega_{mn} a_1 [\rho_1 (1 - \mu_1) / E_1]^{1/2}$ 和结构损耗因子, 见表 4、5。计算中将层合板划分为 5 个数值层, 各层厚度分别为: $h_1=0.003 \text{ m}$, $h_2=0.003 \text{ m}$, $h_3=0.007 \text{ m}$, $h_4=0.007 \text{ m}$, $h_5=0.006 \text{ m}$ 。

表 4 粘弹性层厚度 $H_2 = 0.02 \text{ m}$ 的两层粘弹层合板的前三阶无量纲频率和结构损耗因子

模态 m/n	粘弹性材料的弹性模量	无量纲频率			结构损耗因子		
		一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
1/1	0.2×10^9	0.14138	1.92077	2.03098	0.07460	0.40130	0.47233
	0.6×10^9	0.16100	2.81431	3.39854	0.17046	0.18081	0.39690
	1×10^9	0.17836	3.02789	4.18808	0.22950	0.09909	0.30654
	2×10^9	0.21534	3.18001	5.01510	0.30836	0.05285	0.15308
	3×10^9	0.24637	3.24171	5.28027	0.34617	0.04490	0.10116
	4×10^9	0.27349	3.28310	5.41782	0.36704	0.04469	0.08172
3/1	0.2×10^9	0.37329	2.00274	2.15689	0.07150	0.46373	0.49101
	0.6×10^9	0.42214	3.30946	3.69663	0.16136	0.36248	0.47087
	1×10^9	0.46527	3.98770	4.71996	0.21918	0.25385	0.44636
	2×10^9	0.55772	4.57641	6.46056	0.29913	0.11987	0.36898
	3×10^9	0.63581	4.75429	7.55350	0.33888	0.08324	0.28324
	4×10^9	0.70436	4.86841	8.20521	0.36150	0.07078	0.21448

表 5 粘弹性层厚度 $H_2 = 0.03 \text{ m}$ 的两层粘弹层合板的前三阶无量纲频率和结构损耗因子

模态 m/n	粘弹性材料的弹性模量	无量纲频率			结构损耗因子		
		一阶	二阶	三阶	一阶	二阶	三阶
1/1	0.2×10^9	0.14503	1.32142	1.41443	0.16301	0.44674	0.48384
	0.6×10^9	0.18621	2.12572	2.40214	0.29236	0.32001	0.44656
	1×10^9	0.21952	2.49222	3.03434	0.34668	0.21827	0.40392
	2×10^9	0.28543	2.81169	4.00550	0.39903	0.11614	0.29441
	3×10^9	0.33772	2.93076	4.50457	0.41623	0.08951	0.21484
	4×10^9	0.38205	3.00331	4.78057	0.42241	0.08189	0.16997

从表 4、5 看出, 随着阻尼材料的弹性模量的增大, 自由阻尼层合板的低阶频率和一阶结构损耗因子增大, 而二阶和三阶结构损耗因子减小。由于采用较高弹性模量的粘弹性材料, 结构的整体刚度增加, 导致低阶振动频率增大。而由于粘弹性层厚度的增加, 增大了结构的阻尼效应, 相应地减小了低阶振动频率和增大了低阶结构损耗因子。

5 结束语

采用混合分层理论和 Reissner 混合变分原理推导的粘弹层合板动力方程, 不仅得出与弹性层合板精确解吻合良好的频率, 而且对于粘弹层合板, 所计算的振动频率和结构损耗因子也与三维结果吻合较好。随着阻尼材料的弹性模量的增大, 自由阻尼层合板的低阶频率和一阶结构损耗因子增大, 而二阶和三阶结构损耗因子减小。由于采用较高弹性模量的粘弹性材料, 结构的整体刚度增加, 导致低阶振动频率增大。而由于粘弹性层厚度的增加, 增大了结构的阻尼效应, 相应地减小了低阶振动频率和增大了低阶结构损耗因子。

参考文献:

- [1] 刘棣华.《粘弹阻尼减振降噪应用技术》[M]. 北京: 宇航出版社, 1990.
- [2] Noor A K, Burton W S. Assessment of shear deformation theories for multilayered composite plates[J]. Appl. Mech. Rev., 1989, 42(1): 1~13.
- [3] Noor A K, Burton W S. Stress and free vibration analyses of multilayered composite plates[J]. Composite Structures, 1989, 11: 183~204.
- [4] Awrejcewicz J, Krysko V A. 3-D theory versus 2-D approximate theory of free orthotropic (isotropic) plate and shell vibrations, part 1: derivation of governing equations[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(5): 807~829.
- [5] Dube G P, Dumir P C, Kumar C B. Segmented sensors and actuators for thick plates and shells part I: analysis using FSDT[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 226(4): 739~753.
- [6] Cheng Z Q, Jemah A K, Williams F W. Theory for Multilayered Anisotropic Plates With Weakened Interfaces[J]. Journal of Applied Mechanics, 1996, 63 (9): 1019~1026.
- [7] Tessler A, Saether E. A computationally viable higher-order theory for laminated composite plates[J]. Int. J. Numer. Meth. Eng., 1991, 31: 1069~1086.
- [8] M. Di Sciuva, Bending, Vibration and Buckling of Simply Supported Thick Multilayered Orthotropic Plates: An Evaluation of a New Displacement Model[J]. Journal of Sound and Vibration, 1986, 105(3): 425~442.
- [9] H. Murakami, Laminated Composite Plate Theory With Improved In-plane Responses[J]. Journal of Applied Mechanics, 1987, 23(1): 111~131.
- [10] A. Toledano and H. Murakami. A High-order Laminated Plate Theory With Improved In-plane Responses[J]. Int. J. Solids Structures, 1987, 23(1): 111~131.
- [11] Erasmo Carrera. Evaluation of Layerwise Mixed Theory of laminated Plates Analysis[J]. AIAA J, 1998, 36(5): 830~839.
- [12] E. Carrera. A Study of Transverse Normal Stress Effect on Vibration of Multilayered Plates and Shells[J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 225(5): 803~829.
- [13] S. Srinivas. An Exact Analysis for Vibration of simple-supported Homogeneous and Laminated Thick Rectangular Plates[J]. Journal of Sound and Vibration, 1970, 12(2): 187~199.
- [14] S. Srinivas, C. V. Joga Rao and A. K. Rao. Flexural vibration of rectangular plates[J]. Journal of Applied Mechanics, 1970, 23: 430~436.
- [15] Abdulhadi, F. Transverse Vibrations of Laminated Plates with Viscoelastic Layer Damping[M], IBM System Development Div., Rochester, Minn., 1971.
- [16] E. Reissner. On a certain mixed variational theorem and a proposed application [J], Int J Numer Meth Eng. 1984, 20: 1366~1368.
- [17] 杨少红, 王安稳. 粘-弹层合板的阻尼振动和横向应力[J]. 海军工程大学学报, 2003, 15(3): 69~74.

楔环连接结构轴向一横向联合加载实验研究

尹益辉*, 唐章华, 刘远东

(中国工程物理研究院 总体工程研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 楔环连接是采用两根楔形带将两段筒体类结构连接为一体的连接方式。本文对一种特定的楔环连接结构(试件)进行了无轴向力和恒定轴向力下的横向弯曲和变化轴向力下的横向弯曲三种加载实验, 利用电阻应变片测试了试件特征部位的应变/应力, 得到了各种加载状态下试件表面特征部位的应力分布规律和应力随载荷的变化情况。所得测试结果可作为有限元数值模拟的对比依据。

关键词: 楔环连接结构; 弯曲实验; 局部应力

1 引言

楔环连接是一种连接筒体类结构的新方式。与采用螺栓一法兰连接的筒体类结构相比, 采用楔环连接的筒体类结构(以下简称楔环连接结构)的质量和横断面尺寸都更小, 表面更加光顺, 更易于在水中航行和在更小的飞行器外壳中装配, 因此楔环连接现已在鱼雷、水雷和某些空间飞行器中得到了应用。

近年来, 作者等人^[1~3]对一种典型的楔环连接结构进行了轴向拉伸实验和相应的数值模拟研究, 获得了有关轴向载荷下该种结构力学行为的一些规律性认识。本文采用实验方法研究该种结构在横向和轴向一横向联合载荷作用下的力学行为, 以便为该种连接结构的设计提供依据, 同时为相应的有限元数值模拟提供实验测试的对比数据。

2 轴向一横向联合加载实验、测试及结果分析

2.1 试件

试件如图 1 所示, 为一特定的楔环连接结构。有关该结构的组装过程、传递力的原理和实现连接的原理已在文献[1~3]中作了介绍, 此处不再赘述。该结构中各组件材料的力学性能参数见表 1。

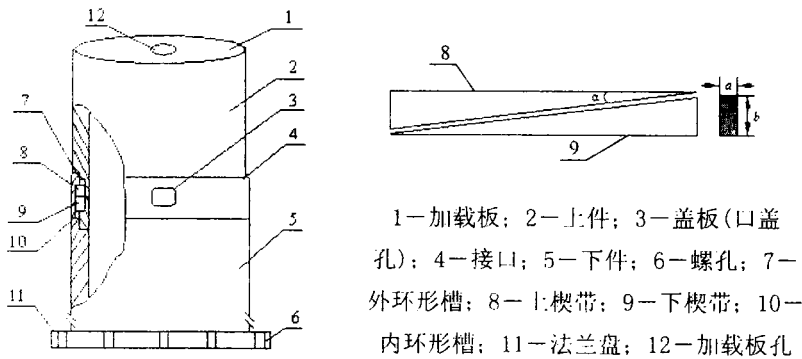


图 1 楔环连接结构与楔形带示意图

表 1 楔环连接结构中各组件材料的力学性能参数

组件名称	材料	E/GPa	μ	σ_s/MPa	σ_b/MPa
楔形带	LC4	72.0	0.3	420.0	520.0
上件	QAL9-4	113.8	0.3	300.0	500.0
下件	45#	205.0	0.3	323.6	588.4

基金项目: 中国工程物理研究院基金资助项目(2002-421050503-4-02)
* 尹益辉, 中国工程物理研究院, 男, 四川人, 研究员, 博士, 主要从事工程结构分析和计算固体力学研究(E-mail: yin_yihui@sina.com)。