

南京航空航天大学
论文集

(二〇一〇年) 第3册

航空宇航学院

(第3分册)

南京航空航天大学科技部编

二〇一一年五月

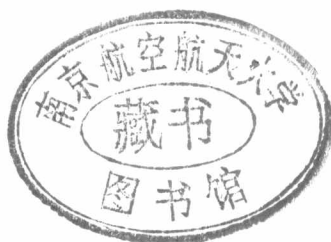


NUAA2011039760

Z427
1033 (2010) -CJ

航空宇航学院

013



2011039760

航空宇航学院2010年学术论文清单 (0131)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	姜双燕 陈怀海 贺旭东 游伟倩	博士 教授 副教授 博士生	0131 0131 0131 0131	基于回路整型设计的多轴振动控制	航空学报	2010. 31. 10	2010. 10
2	崔旭利 陈怀海 贺旭东 姜双燕	博士 教授 副教授 博士生	0131 0131 0131 0131	多输入多输出随机振动试验交叉比例控制算法	南京航空航天大学学报	2010. 42. 04	2010. 08
3	陆勇星 陈怀海 曹立娟	博士 教授 博士	0131 0131 0131	多点随机振动控制试验中随机相位双谱恢复方法	振动工程学报	2010. 23. 04	2010. 08
4	徐浩 陈怀海 游伟倩	硕士 教授 博士	0131 0131 0131	多输入多输出冲击振动试验研究	振动、测试与诊断	2010. 30. 02	2010. 04
5	汤廷孝 赵后良 陈怀海	博士后 工程师 教授	0131 外单位 0131	无人机用三角转子发动机进气流量测量模型	航空动力学报	2010. 25. 11	2010. 11
6	汤廷孝 赵后良 陈怀海	博士后 工程师 教授	0131 外单位 0131	三角转子发动机汽油喷射系统的试验研究	内燃机学报	2010. 00. 01	2010. 02
7	汤廷孝 赵后良 陈怀海	博士后 工程师 教授	0131 外单位 0131	海拔高度对转子发动机性能影响的模拟试验	航空动力学报	2010. 25. 04	2010. 04
8	汤廷孝 赵后良 陈怀海	博士后 工程师 教授	0131 外单位 0131	自主飞行时三角转子发动机转速的鲁棒性控制	内燃机学报	2010. 31. 05	2010. 10
9	王宏宏 陈怀海 崔旭利 王亮 伍特辉	硕士 教授 博士 博士 硕士	0131 0131 0131 0131 0131	热效应对导弹翼面固有振动特性的影响	振动、测试与诊断	2010. 30. 03	2010. 06
10	游伟倩 陈怀海 贺旭东 崔旭利	博士 教授 副教授 博士	0131 0131 0131 0131	随机振动功率谱的H双自由度跟踪控制研究	振动工程学报	2010. 23. 03	2010. 06
11	王亮 陈怀海 贺旭东 倪杰 游伟倩	博士 教授 副教授 博士 博士	0131 0131 0131 0131 0131	轴向运动悬臂梁系统阻尼与边界条件试验	振动、测试与诊断	2010. 30. 05	2010. 10
12	崔旭利 陈怀海 贺旭东 游伟倩	博士 教授 副教授 博士 博士	0131 0131 0131 0131 0131	多输入多输出随机振动试验变参数PID控制	航空学报	2010. 31. 09	2010. 09
13	王亮 陈怀海 贺旭东 扬巍	博士 教授 副教授 硕士	0131 0131 0131 0131	悬臂梁振动非接触式磁力主动控制研究	振动与冲击	2010. 29. 07	
14	王亮 陈怀海 贺旭东 游伟倩	博士 教授 副教授 博士	0131 0131 0131 0131	轴向运动悬臂梁横向振动的磁力控制	南京航空航天大学学报	2010. 42. 05	2010. 10
15	王亮 陈怀海 贺旭东	博士 教授 副教授	0131 0131 0131	Active H Control of the Vibration of a Cantilever Beam by Noncontact Magnetic Force	Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Enviroments	2010	
16	程凌 陈前	硕士 教授	0131 0131	基于经验模态分解与神经网络的结构故障诊断	振动、测试与诊断	2010. 30. 02	2010. 04
17	张翠霞 陈前 滕汉东	硕士 教授 讲师	0131 0131 0131	混合介质缓冲器的动力学特性及缓冲效果研究	振动与冲击	2010. 29. 01	
18	崔鹏 韩景龙	博士 教授	0131 0131	切尖三角翼极限环振荡的气动弹性模拟	航空学报	2010. 31. 12	2010. 12

19	王晓庆 韩景龙	博士 教授	0131 0131	不同气流偏角下的壁板热颤振分析及多目标优化设计	航空学报	2010. 31. 11	2010. 11
20	崔鹏 韩景龙	博士 教授	0131 0131	基于CFD-CSD的非线性气动弹性分析方法研究	航空学报	2010. 31. 03	2010. 03
21	张军红 韩景龙	博士 教授	0131 0131	The flutter suppression of composite material panel and the actuators placement optimization	The 2nd IEEE international conference on advanced computer control		2010
22	张军红 韩景龙	博士 教授	0131 0131	Fuzzy control on flutter of 2-D airfoil section with freeplay	The Third International Conference on Modeling and Simulation		2010
23	王云海 韩景龙	博士 教授	0131 0131	Computation of Volterra kernels' identification to Riccati nonlinear equation	2010 3rd IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology		2010
24	张兵 韩景龙	博士 教授	0131 0131	基于GPU和隐式格式的CFD并行计算方法	航空学报	2010. 31. 02	2010. 02
25	茅晓晨 胡海岩	博士 教授	0131 0131	Stability and Bifurcation Analysis of a Network of Four Neurons with Time Delay	ASME Journal of Computational and Nonlinear Dynamics	2010. 05. 04	
26	胡海岩 王在华	教授 教授	0131 0131	论迟滞与时滞	力学学报	2010. 42. 04	2010. 07
27	刘博 胡海岩	博士 教授	0131 0131	Group delay induced instabilities and Hopf bifurcations, of a controlled double pendulum	International Journal of Non-linear Mechanics	2010. 45	
28	纪国宜 赵淳生	副研究员 教授	0131 0135	振动测试和分析技术综述	机械制造与自动化	2010. 40. 03	
29	吴道 纪国宜	硕士 副研究员	0131 0134	基于谐波小波包理论检测微弱信号的研究	电子测量技术	2010. 33. 06	2010. 06
30	丁镇军 纪国宜	硕士 副研究员	0131 0131	基于有限元法的疲劳裂纹叶片振动特性研究	机械科学与技术	2010. 29. 10	2010. 1
31	张勇 纪国宜	硕士 副研究员	0131 0131	基于混沌振子和小波理论的轴承故障诊断方法	轴承	2010. 00. 05	2010. 05
32	孙燕军 冷小磊	硕士 副教授	0131 0131	公路桥梁的车桥耦合系统振动响应研究	第一届振动利用及控制工程国际学术会议		2010
33	李军 冷小磊	硕士 副教授	0131 0131	固支半球壳的随机响应分析	武汉科技学院学报	2010. 23. 01	2010. 02
34	杨建华 刘先斌	博士 教授	0131 0131	Controlling vibrational resonance in a multistable system by time delay	Chaos	2010. 20. 03	
35	杨建华 刘先斌	博士 教授	0131 0131	Delay induces quasi-periodic vibrational resonance	Journal of Physics A	2010. 43. 12	
36	杨建华 刘先斌	博士 教授	0131 0131	Controlling vibrational resonance in a delayed multistable system driven by an amplitude modulated signal	Physica Scripta	2010. 82. 02	
37	杨建华 刘先斌	博士 教授	0131 0131	stochastic resonance in an asymmetric bistable system driven by coloured noise	Chinese Physics B	2010. 19. 05	
38	杨建华 蔡祥梅 刘先斌	博士 硕士 教授	0131 0131 0131	The maximal lyapunov exponent for a three-dimensional system driven by white noise	Communications in nonlinear science and numerical simulaion	2010. 15. 11	
39	杨建华 刘先斌	博士 教授	0131 0131	色交叉关联噪声作用下癌细胞增长系统的平均首通时间	物理学报	2010. 59. 06	
40	杨建华 刘先斌	博士 教授	0131 0131	一类三维随机动力系统的最大Lyapunov指数	力学学报	2010. 42. 03	
41	黄勇 方次军 刘先斌	博士 博士 教授	0131 0131 0131	二元非线性机翼随机动力学行为	航空学报	2010. 31. 10	
42	张丽 王怀磊 胡海岩	博士 副教授 教授	0131 0131 0131	Global View of Hopf Bifurcations of a van der Pol Oscillator with Delayed State Feedback	Science in China, Series E	2010. 53. 03	2010. 03
43	杨征兵 王怀磊	硕士 副教授	0131 0131	蔡氏电路混沌系统的单状态延时反馈控制	动力与控制学报	2010. 08. 04	2010. 12

44	张妍 王怀磊 杨杰	硕士 副教授 副教授	0131 0131 0131	斜拉桥索-面-塔三自由度非线性振动模型 及其1:2:1内共振分析	动力与控制学报	2010.08.01	2010.03
45	张妍 王怀磊 杨杰	硕士 副教授 副教授	0131 0131 0131	斜拉桥塔-索-桥耦合连续模型及其内共 振分析	振动工程学报	2010.23.04	2010.08
46	郑元广 王在华	博士 教授	0131 0131	Delayed Hopf bifurcation in time- delayed slow-fast systems	中国科学 E	2010.53.03	
47	郑元广 王在华	博士 教授	0131 0131	Stability and hopf bifurcation of a class of TCP/AQM networks	Nonlinear Analysis: real world applications	2010.11	
48	郑元广 王在华	博士 教授	0131 0131	The impact of delayed feedback on the pulsating oscillations of class- B lasers	International Journal of Non- Linear Mechanics	2010.45	
49	王在华 李俊余	教授 博士	0131 0131	时滞状态正反馈在振动控制中的新特征	力学学报	2010.42.05	
50	王在华 胡海岩	教授 教授	0131 0131	Stability of a linear oscillator with damping force of the fractional-order derivative	中国科学 G	2010.53.02	2010.02
51	文浩 金栋平 胡海岩	讲师 教授 教授	0131 0131 0131	Feedback Control for Retrieving an Electro-Dynamic Tethered Sub- Satellite	Tsinghua Science and Technology	2009.14.s2	
52	文浩 金栋平 胡海岩	讲师 教授 教授	0131 0131 0131	绳系卫星收放控制地面实验研究	振动工程学报	2010.23.01	
53	袁小红 朱兆达	讲师 教授	0131 外单位 0131	SAR图像小波域多尺度模型	南京航空航天大学学报	2009.41.04	20098.08
54	袁小红 朱兆达 张弓	讲师 教授 教授	0131 041 外单位	基于目标的低码率SAR图像压缩	中国图象图形学报	2010.15.03	
55	袁小红 朱兆达 张弓	讲师 教授 教授	0131 041 外单位	Multiresolution target detection in wavelet domain for SAR imagery	IAS' 09	2009.01	
56	袁小红 朱兆达 张弓	讲师 教授 教授	0131 041 外单位	Low bit rate ROI-based SAR image compression	IAS' 09	2009.01	
57	张令弥 王彤	教授 副教授	0131 0131	A frequency-spatial domain decomposition (FSDD) method for operational modal analysis	Mechanical Systems and Signal Processing	2010.24.05	
58	朱跃 张令弥 郭勤涛	博士 教授 副教授	0131 0131 0131	基于SVR方法的有限元模型确认中不确定性 建模研究	振动与冲击	2010.29.09	
59	孙鑫晖 张令弥 王彤	博士 教授 副教授	0131 0131 0131	基于左矩阵分式模型的模态参数识别方法	航空学报	2010.31.01	2010.01
60	赵永辉	教授	0131	Vibration Suppression of a Quadrilateral Plate Using Hybrid Piezoelectric Circuits	Journal of Vibration and Control	2010.16.05	
61	黄锐 钱文敏 赵永辉 胡海岩	博士 博士 教授 教授	0131 0131 0131 0131	Flutter Analysis-Using Piecewise Quadratic Interpolation with Mode Tracking and Wind-Tunnel Tests	journal of aircraft	2010.47.04	
62	王晓宇 金栋平			计入姿态的绳系卫星概同期振动	振动工程学报	2010.23.04	2010.08
63	徐志宾 金栋平			绳系单体系鲁棒控制实验研究	应用力学学报	2010.27.03	2010.09
64	王轲 张方 陈国平 张安平			基于有限元的结构动力学响应映射技术研 究	振动与冲击	2010.29.11	
65	王轲			基于多次附加质量模态试验的动力学模型 修改	南京航空航天大学学报	2010.42.02	2010.04

航空宇航学院2010年学术论文清单 (0135)

序号	姓名	职称	单位	论文题目	刊物、会议名称	年、卷、期	出版时间
1	李向华 孙运涛 陈超	博士后 硕士 副教授	0135 0135 0135	Oscillation Propagating in Non-Contact Linear Piezoelectric Ultrasonic Levitation Transporting System-From Solid State to Fluid Media	IEEE Transactions of UFFC	2010. 57. 04	
2	孙运涛 陈超	硕士 副教授	0135 0135	基于近场声悬浮的非接触式直线型压电作动器	中国机械工程	2010. 21. 24	2010. 12
3	李向华 陈超 赵淳生	博士后 副教授 教授	0135 0135 0135	非接触式直线型超声电机的振动分析	振动与冲击	2010. 29. 07	
4	陈正年 丁庆军 赵淳生	博士后 副教授 教授	0135 0135 0135	超声电机用还氧摩擦材料固化动力学研究	南京大学学报	2010. 46. 01	2010. 01
5	芦小龙 丁庆军 李华峰 赵淳生	博士 副教授 教授 教授	0135 0135 0135 0135	行波型旋转超声电机的低温特性	振动、测试与诊断	2010. 30. 05	2010. 1
6	彭翰旻 丁庆军 李华峰 赵淳生	博士 副教授 教授 教授	0135 0135 0135 0135	IPMC型柔顺手爪作动器的设计与性能测试	光学 精密工程	2010. 18. 04	2010. 04
7	彭翰旻 惠耀 丁庆军 李华峰 赵淳生	博士 硕士 副教授 教授 教授	0135 0135 0135 0135 0135	IPMC gripper static analysis based on finite element analysis	Frontiers of Mechanical Engineering in China	2010. 05. 02	2010. 06
8	彭翰旻 丁庆军 惠耀 李华峰 赵淳生	博士 副教授 硕士 教授 教授	0135 0135 0135 0135 0135	Three nonlinear performance relationships in the start-up state of IPMC strips based on finite element analysis	Smart Materials and Structures	2010. 19	2010. 02
9	胡俊辉 Januar Jong 赵淳生	教授 学生 教授	0135 0135 0135	Vibration Energy Harvesting Based on Integrated Piezoelectric Components Operating in Different Modes	IEEE Transactions of UFFC	2010. 57. 02	
10	胡俊辉 Saty Bhuyan 赵淳生	教授 学生 教授	0135 0135 0135	Wireless drive of piezoelectric components and its application in droplet merging	International Workshop on Piezoelectric Materials and Applications in Actuators 2010	2010	
11	胡俊辉 赵淳生	教授 教授	0135 0135	Recent Progress in the application of ultrasonic motors and R&D of ultrasonic	The Fifteenth China (International) Small Motor Technology Conference & Exhibition		
12	李宁 胡俊辉 黄卫清 朱春玲 赵淳生	硕士 教授 教授 教授 教授	0135 0135 0135 014 0135	THE EFFECT OF THE SIZE OF PIEZOELECTRIC ELEMENT ON SHEAR STRESS AT THE INTERINTERFACE OF DEICING SYSTEM	the 5th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications		
13	卢小龙 胡俊辉 赵淳生	博士 教授 教授	0135 0135	Cryogenic Temperature Performance of Traveling Wave Ultrasonic Motor	the 5th Symposium on Piezoelectricity, Acoustic Waves, and Device Applications		
14	卢小龙 胡俊辉 张建辉 赵淳生	博士 教授 教授 教授	0135 0135 0135 0135	Analyses of temperature field in ultrasonic motors by the finite element method	Proceedings of the Fifteenth China International Small Motor Technology Conference		
15	胡俊辉 刘燕燕 赵淳生	教授 学生 教授	0135 0135 0135	particle Trapping of particles on ultrasonic radiation surface	20th International Congress on Acoustics, 2010, Sydney, Australia		
16	陈乾伟 时运来 黄卫清	博士 博士 教授	0135 0135 0135	新型塔型直线超声电机	力学学报	2010. 30. 36	2010. 12
17	潘松 王冬 黄卫清	博士后 博士 教授	0135 0135 0135	基于超声悬浮轴承的微扭矩测量系	传感与微系统	2010. 29. 07	

18	潘松 黄卫清	博士后 教授	0135 0135	新型压电作动器驱动的直线电机驱动电源研究	机械与电子	2010.00.08	
19	潘松 黄卫清	博士后 教授	0135 0135	基于DC-DC升压和LC振荡的叠层压电陶瓷驱动电源研究	科学技术与工程	2010.20.11	
20	王寅 金家楣 黄卫清	博士 副教授 教授	0135 0135 0135	A COMPACT ULTRASONIC MOTORS USING TWO IN PLANE MODES	The 2010 symposium on piezoelectricity ,acoustic wave and device applications		
21	王寅 金家楣 黄卫清	博士 副教授 教授	0135 0135 0135	a novel rotary ultrasonic motor using an in-plane traveling wave	journal of the koreanphysical society	2010.57.04	
22	王寅 钱富 金家楣 黄卫清	博士 博士 副教授 教授	0135 0135 0135 0135	一种面内行波旋转超声电机的模态实验方法	第一届振动利用及控制工程国际学术会议暨第四届全国振动利用工程学术会议	2010	
23	李华峰 王红占 黄卫清	教授 硕士 教授	0135 0135 0135	控制量独立可调的超声电机新型驱动器	电机与控制学报	2010.14.09	2010.09
24	彭翰旻 李华峰 丁庆军 赵淳生	博士 教授 副教授 教授	0135 0135 0135 0135	人工肌肉材料驱动器的非线性建模分析	第十五届中国小电机技术研讨会		2010.11
25	彭翰旻 李华峰 惠耀 丁庆军 赵淳生	博士 教授 硕士 副教授 教授	0135 0135 0135 0135 0135	应用人工肌肉IPMC材料的三指微型柔性手爪设计	振动、测试与诊断	2010.30.04	2010.08
26	杨淋 丁庆军 黄卫清 赵淳生	讲师 副研究员 教授 教授	0135 0135 0135 0135	斜槽式纵扭模态转换型超声电机在不同摩擦副下的负载荷特性研究	中国电机工程学报	2010.30.15	2010.5.25
27	杨淋 赵淳生 张建辉 黄卫清	讲师 教授 教授 教授	0135 0135 0135 0135	斜槽式模态转换型超声电机振动分析及性能	北京工业大学学报	2010.36.07	2010.07
28	杨淋 丁庆军 黄卫清 赵淳生	讲师 副研究员 教授 教授	0135 0135 0135 0135	一种新型模态转换压电站	压电与生光	2010.32.05	2010.1
29	周盛强 赵淳生	副教授 教授	0135 0135	超声电机解除界面的时域分析	机械科学与技术	2010.29.02	2010.02
30	周盛强 赵淳生 黄卫清	副教授 教授 教授	0135 0135 0135	旋转型行波超声电机接触界面的空间域分析	中国电机工程学报	2010.30.12	201.04
31	周盛强 赵淳生 黄卫清	副教授 教授 教授	0135 0135 0135	模态叠加法在压电复合结构分析中的应用	压电与声光	2010.32.04	2010.08
32	张健滔 朱华 赵淳生	博士 副教授 教授	0135 0135 0135	行波型杆式超声电机模态频率调节	中国电机工程学报	2010.30.06	2010.2.25
33	朱华 刘卫东 赵淳生	副教授 博士生 教授	0135 0135 0135	变体飞行器及其变形驱动技术	机械制造与自动化	2010.39.02	
34	朱华 李志荣 赵淳生	副教授 教授 教授	0135 0135 0135	An efficient approach to optimize the vibration mode of bar-type ultrasonic motors	Ultrasonics	2010.5	
35	张建辉	教授	0135	内外不等锥度的软质锥壳形单阀体压电泵的原理与试验研究	机械工程学报	2010.46.24	2010.12
36	黄毅 张建辉	硕士 教授	0135 0135	Dynamics analysis and experiment on the fish-tailing type of valveless piezoelectric with rectangular vibrator	science china technological sciences	2010.53.12	2010.12
37	黄毅 成伟 张建辉	硕士 硕士 教授	0135 0135 0135	非对称坡面腔底无阀压电泵流场分析	振动 测试与诊断	2010.30.03	2010.06

文章编号: 1000-6893(2010)10-1940-06

基于回路整型设计的多轴振动控制

姜双燕, 陈怀海, 贺旭东, 游伟倩

(南京航空航天大学 振动工程研究所 飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 江苏 南京 210016)

Multi-axis Vibration Control Research via Loop-shaping Design

Jiang Shuangyan, Chen Huaihai, He Xudong, You Weiqian

(MOE Key Laboratory of Structure Mechanics and Control for Aircraft, Institute of Vibration Engineering Research, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

摘 要: 多激励多轴向振动控制试验中, 在频响函数矩阵呈现病态的频率点, 控制点响应的自谱和互谱往往难以达到预定参考谱目标。针对这种情况, 首先在控制频段对频响函数进行拟合修正, 求得系统前置补偿矩阵, 然后根据 H_∞ 回路整型理论对驱动谱矩阵进行整型, 将整型后的驱动谱矩阵代替原驱动谱进入控制回路计算。通过试验验证表明, 基于回路整型设计的修正算法, 能够明显地抑制某些频段内频响函数的不良影响, 自谱和互谱响应都能得到比较理想的控制结果。

关键词: 回路整型设计; 多激励多轴向; 振动试验; 振动控制; 多输入多输出

中图分类号: V216.5; O234 **文献标识码:** A

Abstract: In multi-exciter/multi-axis (MEMA) vibration control tests, it is frequently difficult for the auto-spectra of the control point responses to achieve the required reference targets at the frequency points where the frequency response function matrices are ill-conditioned. To cope with this problem, a new method is proposed in this article. The pre-compensator of the plant is obtained by curve fitting and modifying of the frequency response functions in a specified frequency range. The exciting spectrum matrix is then shaped via H_∞ loop-shaping theory. The shaped exciting matrix is used in the control loop computation instead of the original one. The experiment shows that the modified algorithm via loop-shaping design is capable of suppressing the adverse effect of the frequency response function at some specific frequencies. The auto-spectra of the control point responses are improved and become satisfactory.

Key words: loop-shaping design; multi-exciter/multi-axis; vibration test; vibration control; multi-input/multi-output

振动环境试验技术在航空、航天、车辆、船舶以及电子等实际工程领域中有着广泛的应用。传统的单轴试验技术发展多年来, 已经衍生了大量的试验设备、试验方法和标准规范。但是, 对于实际中经受多轴向振动激励或冲击环境的装备来说, 传统的单轴试验技术在模拟实际振动环境方面的能力亟待改进。因此, 自 20 世纪 90 年代以来, 多台多轴振动试验系统的研发已经成为振动环境试验技术的一个主要发展趋势^[1]。

在多轴振动试验中, 输入激励点和响应控制点之间存在很强的相互耦合, 必须采用有效的解耦措施, 才能实现较好的控制目标。实践中, 多轴向振动试验系统首先要进行机械解耦, 例如对三轴向试验系统来讲, 就是先要采用机械手段尽可能消除或削弱 3 个轴向运动之间的耦合关联。机

械解耦常采用交叉导轨或静压轴承^[2]。机械解耦不可能完全消除轴向运动之间的耦合关联, 剩余的耦合因素必须依靠控制算法进行解耦。本文主要针对多轴振动试验系统的控制算法进行研究。

目前广泛使用的多激励多轴向 (Multi-exciter/Multi-axis, MEMA) 控制算法, 是由 D. O. Smallwood 等在 20 世纪 80 年代提出的^[3-5], 其主要目标是实现控制谱对参考谱的再现。但是, 在实际工程应用中, 参考谱中的互谱难以确定, 因此很多随机振动控制系统的算法中没有考虑互谱的影响^[6], 忽略对互谱控制, 或者仅仅把互谱作为自谱控制的辅助手段^[7]。

但是, 在实践中发现, 若不考虑互谱影响, 往往会出现个别频率点的响应自谱超标, 即使通过修正算法进行迭代修正, 也不能有效控制超标谱线。通过对频响函数矩阵的性态进行分析后发现, 在自谱超标频率点, 频响函数矩阵条件数过大, 频响矩阵呈现病态, 系统在该频段对外部干扰

较敏感, 可控性较差, 导致控制精度不好。由此可见, 若在控制回路中引入互谱元素控制环节, 用以修正或消除频响函数矩阵在某些频率点处的不利影响, 有可能获得更好的控制效果。基于这种思想, 本文引入系统回路整型的方法, 在控制算法回路中添加整型加权函数矩阵, 引入互谱修正环节, 消除频响函数在不利频率点出现病态的影响, 达到修正驱动谱矩阵的目的, 从而使响应信号的自谱和互谱都得到良好的控制效果。

1 多轴振动控制理论

多轴振动控制系统的本质是多输入多输出 (Multi input/ Multi output, MIMO) 系统, 通常采用多激励多轴向的形式进行振动测试和试验。

图 1 所示为典型的三轴向多点激励振动试验系统示意图^[8], 以空间 3 个互相垂直的轴向平动自由度为测量和控制方向。

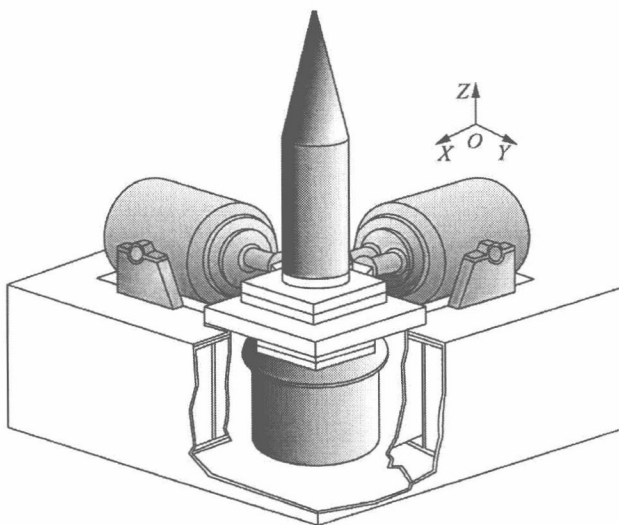


图 1 多激励多轴向振动试验系统

Fig. 1 MEMA vibration test system

多轴振动控制算法的目的就是在三轴向同时进行随机信号激励输入的情况下, 根据试验台面的响应进行驱动信号的修正, 从而使响应点的自谱和互谱达到预设参考谱的要求。

驱动信号和输出响应信号之间的谱矩阵的关系为

$$S_y = G S_d G^H \quad (1)$$

$$\text{式中: } S_y = \begin{bmatrix} S_{y11} & S_{y12} & \cdots & S_{y1N} \\ S_{y21} & S_{y22} & \cdots & S_{y2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ S_{yN1} & S_{yN2} & \cdots & S_{yNN} \end{bmatrix} \text{ 为 } N \text{ 维系统}$$

控制点响应功率谱矩阵, 对角线元素表示响应信号的自谱, 非对角元素表示响应信号的互谱; G 为

系统频响函数矩阵, 上标 H 表示共轭转置; S_d 为驱动谱矩阵。

假设按照试验规范预先设定的参考谱矩阵为 R , 则有理想的驱动谱矩阵为

$$S_d = A R A^H \quad (2)$$

式中: $A = G^{-1}$ 为系统补偿矩阵。

对参考谱矩阵作三角分解:

$$R = L L^H \quad (3)$$

代入式(2)则有:

$$S_d = (A L) (A L)^H \quad (4)$$

对理想驱动谱矩阵作三角分解:

$$S_d = D D^H \quad (5)$$

可得

$$D = A L \quad (6)$$

由于参考谱矩阵 R 缺乏相位信息, 所以对式(6)添加随机相位矩阵 $X^{[9]}$, 得到

$$D = A L X \quad (7)$$

式中: $X = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N})$, 上标 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N$ 为服从 $[-\pi, \pi]$ 均匀分布的随机相位; D 为驱动信号的傅里叶谱。

对 D 作逆傅里叶变换, 并进行时域随机化, 则得到时域驱动信号。

根据测得的台面响应信号, 使用比例均方根算法^[9]不断修正 L , 从而使 S_y 逐步逼近预设参考谱 R , 以满足控制要求。

2 回路整型设计方法

2.1 整型控制算法

在试验和仿真中发现, 通过对 L 的不断迭代修正, 并不能使所有频率点的响应谱全部满足预设参考谱的要求。经过研究发现, 在频响函数条件数过大的频率点处, 响应自谱谱线容易超标, 互谱控制效果也很差。为了修正某些频率点处频响函数矩阵病态影响, 引入 H_∞ 回路整型方法^[10], 进行系统补偿修正。系统回路整型示意图如图 2 所示。

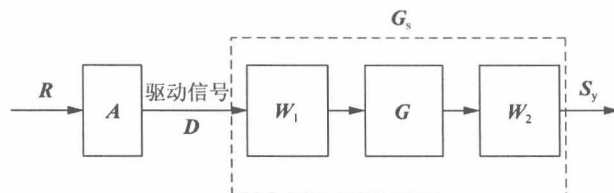


图 2 系统回路整型示意图

Fig. 2 Loopshaping system

如图 2 所示, 假定 W_1 和 W_2 分别为系统 G 的前置和后置补偿矩阵, 则经过整型后的系统频响

矩阵为

$$G_s = W_2 G W_1 \quad (8)$$

式中: 后置补偿矩阵 W_2 通常选择为常数矩阵, 因此, 将 W_2 取为 $I^{[10]}$ 。

将式(8)代入响应谱求解公式(1), 则有

$$S_y = (G W_1) S_d (G W_1)^H = G (W_1 S_d W_1^H) G^H \quad (9)$$

经过整型后的驱动谱矩阵为

$$S_{ds} = W_1 S_d W_1^H \quad (10)$$

结合式(4)进行三角分解, 有

$$S_{ds} = (W_1 A L) (W_1 A L)^H \quad (11)$$

对整型后的驱动谱进行 Cholesky 分解, 有

$$D_s = W_1 A L X \quad (12)$$

使用 D_s 代替 D 进行逆傅里叶变换, 并进行时域随机化, 求得新的时域驱动信号, 再进入控制算法修正回路。

2.2 整型加权函数矩阵设计

由式(2)~式(12)推导可知, 只要选择适当的系统前置加权矩阵 W_1 , 就可得到整型系统 G_s 。可以把 G_s 看做一个理想化的系统, 它既包含系统的固有频率特性, 同时又剔除了原系统在个别频率点的矩阵病态对控制结果造成的不良影响。因此, 要求出系统前置补偿矩阵 W_1 , 只需要确定整型系统 G_s , 则有

$$W_1 = G^{-1} G_s = A G_s \quad (13)$$

式中: 系统整型加权矩阵 W_1 即为整型得到的频响函数矩阵 G_s 与试验中测量得到的频响函数 G 的比值。

系统频响函数在个别频率点处的矩阵病态影响, 导致该频段频响函数的条件数过大和信噪比过小, 是引起响应谱超标的主要原因。所以, 只需要把真实频响矩阵 G 的“不利因素”剔除, 就可以得到 G_s 。

本文的具体处理步骤是:

(1) 首先对系统的真实频响函数矩阵 G 在分析频段内进行拟合^[11-13], 获得连续系统模型 H 。

(2) 将 H 以零极点的形式表达, 剔除右半平面极点和过于接近虚轴的极点, 则可得整型系统模型 G_s , 根据式(13), 即可求得 W_1 , 代入式(9), 最终有

$$S_y = G S_{ds} G^H \quad (14)$$

根据试验结果和仿真结果的反复对比, 实际测取的控制点响应自谱与通过式(14)计算得到的控制点响应自谱是相互吻合的。因此, 在系统对测量误差扰动不敏感的情况下, 式(14)中使用的 G , 即为试验中测量得到的频响函数矩阵, 其与真实的频

响函数矩阵的误差值, 可以通过控制算法循环回路中, 对 L 的修正^[9]得到补偿, 见式(7)。

3 试验验证

试验采用如图3所示的3层铁架作为三轴向振动控制试验模型, 铁架层间用厚度为0.2 mm 铍铜片相连接, 该铜片主要传递沿其面内的力, 以达到多轴向之间机械解耦目的, 剩余的耦合因素依靠控制软件的算法解耦。顶层铁架模拟振动台面, 控制目标是使顶层铁架同时产生预定的 XYZ 3个轴向随机振动。

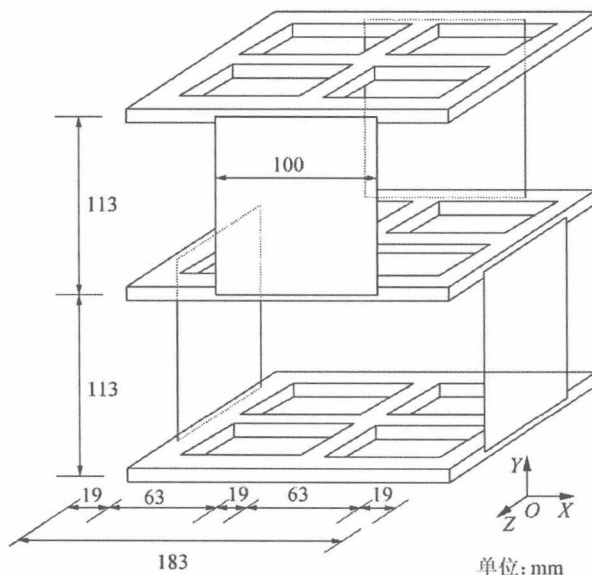
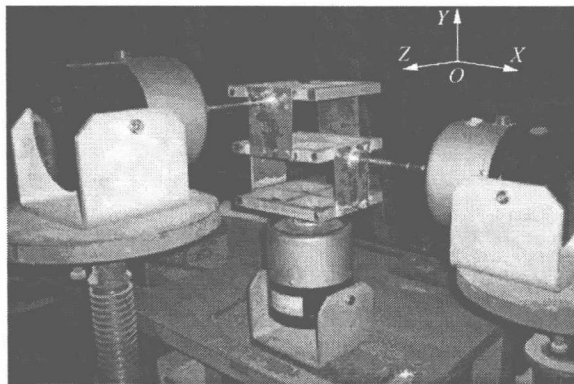


图3 试验模型

Fig. 3 Test model

试验中, 采用 NI PXI 作为信号发送(6733 模拟输出模块)和采集(4472B 动态信号采集模块)硬件, 使用 LabVIEW 软件编程进行信号处理。铁架顶层控制点使用美国 PCB 加速度传感器进行响应信号采集。在如图3所示的3个轴向, 使用 Labworks 20 kg 激振器同时进行三轴向激励信号输出。

试验采用 400 线采样, 分析频段 2 000 Hz, 实测频响函数矩阵维数为 $3 \times 3 \times 513$ 。

图4所示为频响函数矩阵对角元数值的拟合

图。根据第 2 节方法, 使用拟合优化后的频响函数模型, 得到整型系统 G_s , 求出系统前置补偿矩阵 W_1 , 从而对驱动谱进行整型和修正, 得到 S_{ds} , 并进入控制算法回路。

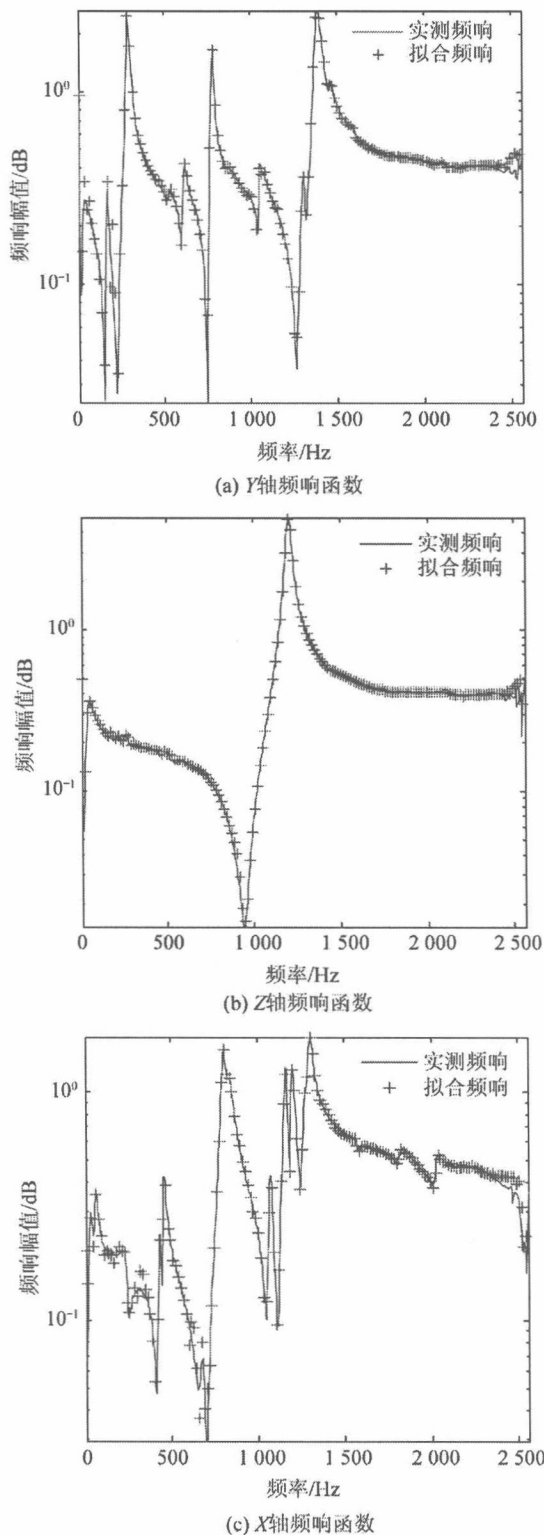


图 4 频响函数矩阵对角元拟合图

Fig. 4 Fitting of diagonal elements of frequency response

为检验互谱控制效果, 在参考谱矩阵 R 中预设 Y 轴和 Z 轴控制点间相干系数为 0.9。则未使用整型算法和使用整型算法的控制结果比较如

图 5~ 图 8 所示。

图 6 和图 8 所示的自谱控制结果图中, 点划线为参考谱误差 ± 3 dB 的自谱报警线, 虚线为参考谱误差 ± 6 dB 的自谱退出线。在实际工程中,

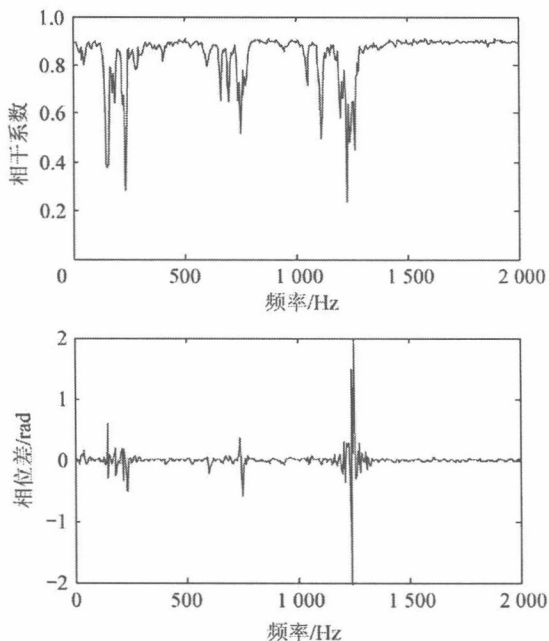


图 5 Y 轴和 Z 轴互谱控制结果(未整型)

Fig. 5 Auto-spectrum of Y axis and Z axis (without loop shaping)

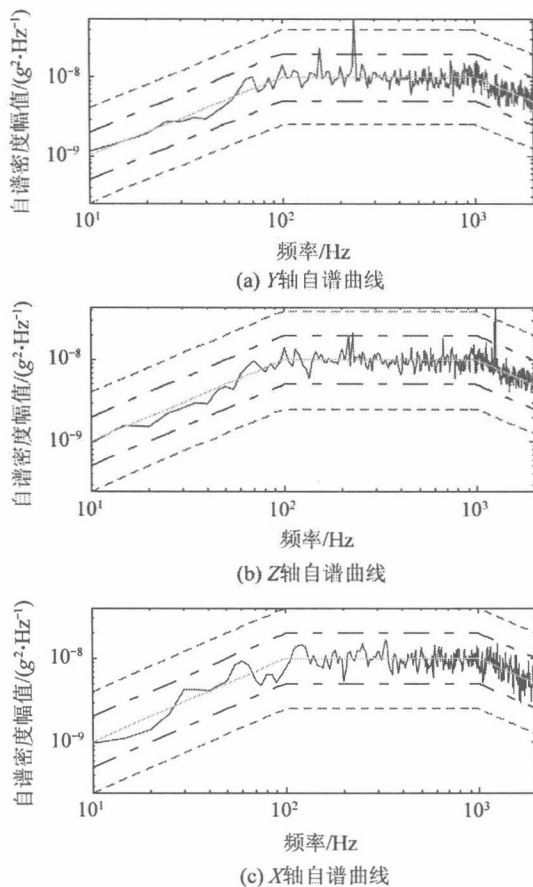


图 6 自谱控制结果(未整型)

Fig. 6 Auto-spectrum (without loop shaping)

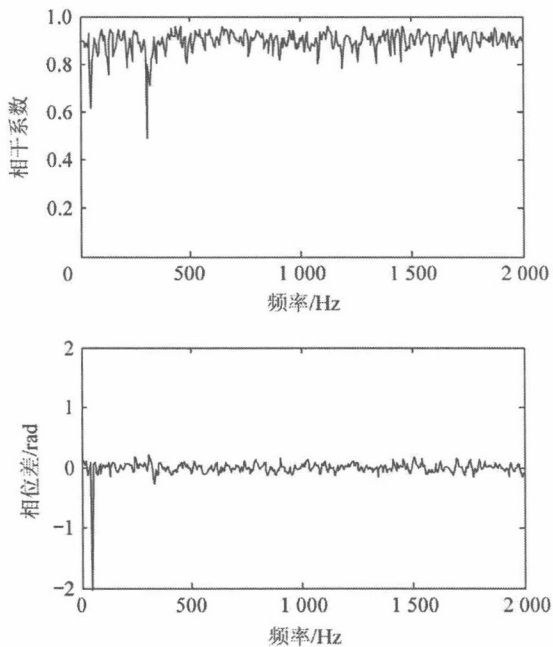


图7 Y轴和Z轴互谱控制结果(整型后)

Fig. 7 Autospectrum of Y axis and Z axis (with loop shaping)

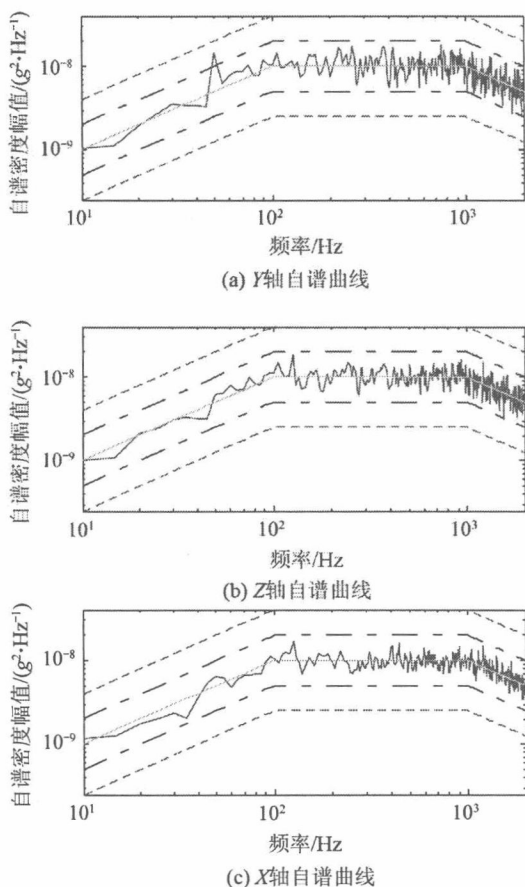


图8 自谱控制结果(整型后)

Fig. 8 Autospectrum (with loop shaping)

一般要求总均方根(RMS)误差不超过 $\pm 5\%$,且超出 ± 3 dB自谱谱线根数小于总根数的10%,但不得有超过 ± 6 dB退出线的谱线。

未整型和整型后的三轴向控制点总均方根值相对误差比较,如表1所示。未整型和整型后的超标谱线数比较,如表2所示。

表1 均方根值误差比较

Table 1 Comparison of RMS errors

轴 向	相对误差/%	
	未整型	整型后
Y 轴	1.846 4	0.931 4
Z 轴	2.248 0	1.089 1
X 轴	1.583 8	0.663 0

表2 超标谱线比较

Table 2 Comparison of overstepped spectra

轴 向		超标谱线/%	
		未整型	整型后
Y 轴	报警线	0.755 7	0.251 9
	退出线	0	0
Z 轴	报警线	1.511 3	0.251 9
	退出线	0.251 9	0
X 轴	报警线	0.755 7	0.503 8
	退出线	0	0

从上述多轴振动控制结果图表可以看出,由于某些频率点的频响函数矩阵病态导致的响应自谱和互谱控制效果较差,可以经过整型控制算法对驱动谱矩阵的修正得到改善。并且能够在一定程度上消除系统在特定频率点病态以及对外部干扰过于敏感的特性,得到较好的输出控制效果。

4 结 论

(1) 整型加权函数对驱动谱的修正独立于控制算法回路之外,不参与实时迭代计算,因此不会影响实时控制回路的计算响应速度。

(2) 根据 H_∞ 控制理论和回路整型思想,通过灵活地选择整型加权函数矩阵,可以得到更良好的控制效果。

综上所述,基于 H_∞ 回路整型的多轴振动控制算法,可以在一定范围内改善多轴振动控制效果,包括响应自谱控制及互谱控制。

参 考 文 献

- [1] 夏益霖. 多轴振动环境试验的技术、设备和应用[J]. 导弹与航天运载技术, 1996(6): 52-59.
Xia Yilin. The technology, equipment, and application of multi-axis vibration environment testing[J]. Missiles and Space Vehicles, 1996(6): 52-59. (in Chinese)
- [2] 王光芦, 祝耀昌, 刘达德, 等. 多轴向多激励振动技术

- [J]. 环境技术, 2000(5): 2-6.
- Wang Guanglu, Zhu Yaocang, Liu Dade, et al. A review of multiaxis and multiexciter vibration technology[J]. Environmental Technology, 2000(5): 2-6. (in Chinese)
- [3] Smallwood D O. Multiple shaker random control with cross-coupling[C] // Proceedings of the Institute of Environmental Sciences and Technology. 1978: 341-347.
- [4] Smallwood D O. Random vibration testing of a single test item with a multiple input control system[C] // Proceedings of the Institute of Environmental Sciences and Technology. 1982: 42-49.
- [5] Smallwood D O. Random control at n^2 points using n shakers[C] // Proceedings of the Institute of Environmental Sciences and Technology. 1987: 271-275.
- [6] Hamma G A. Digital control system for 3-axis vibration testing[C] // Proceedings of the 31st International Instrumentation Symposium. 1985: 419-427.
- [7] Smallwood D O. Multiple shaker random vibration control—an update[C] // Proceedings of the Institute of Environmental Sciences and Technology. 1999: 212-221.
- [8] MIL-STD-810G Environmental engineering considerations and laboratory tests[S]. AERA ENVR, 2008.
- [9] 贺旭东. 多输入多输出振动试验控制系统的理论、算法及实现[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- He Xudong. MIMO vibration test control system: theories, algorithms and implementations[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)
- [10] Skogestad S, Postlethwaite I. Multivariable feedback control: analysis and design[M]. New York: Wiley, 1996.
- [11] Gustavsen B, Semlyen A. Rational approximation of frequency domain response by vector fitting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1052-1061.
- [12] Gustavsen B. Improving the pole relocating properties of vector fitting[J]. IEEE Transactions on Power Delivery. 2006, 21(3): 1587-1592.
- [13] Deschrijver D, Mrozowski M, Dhaene T, et al. Macro-modeling of multiport systems using a fast implementation of the vector fitting method[J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2008, 18(6): 383-385.

作者简介:

姜双燕(1982-) 女, 博士研究生。主要研究方向: 多激励多轴向振动控制。

Email: jsy_0702@hotmail.com

陈怀海(1965-) 男, 教授, 博士生导师。主要研究方向: 振动测试分析与控制、有限元模型与修正、结构动力学设计。

Tel: 025-84893082

E-mail: chhnuaa@nuaa.edu.cn

贺旭东(1978-) 男, 博士, 副教授。主要研究方向: 机械振动测试与控制技术。

E-mail: hexudong@hotmail.com

游伟倩(1980-) 女, 博士研究生。主要研究方向: 振动控制。

E-mail: youweiqian@gmail.com

(编辑: 徐晓, 杨冬)

多输入多输出随机振动试验交叉比例控制算法

崔旭利 陈怀海 贺旭东 姜双燕

(南京航空航天大学飞行器结构力学与控制教育部重点实验室, 南京, 210016)

摘要: 针对多输入多输出随机振动控制试验中少量控制谱线始终超标的现象进行了深入研究。推导得到了参考谱的Cholesky分解矩阵和控制谱矩阵之间的关系表达式。指出控制点之间的耦合因素是影响控制效果的一个重要原因。据此提出了一种交叉比例修正算法, 该算法能有效改善自谱的控制效果, 使自谱的所有谱线都能保持在允许误差范围内, 消除了超标谱线。最后通过与比例均方根修正算法的对比试验, 验证了该算法的有效性。

关键词: 多输入多输出; 振动环境试验; 随机振动; 自功率谱

中图分类号: O324

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2010)04-0429-06

Cross Proportional Control Algorithm for MIMO Random Vibration Test

Cui Xuli, Chen Huaihai, He Xudong, Jiang Shuangyan

(MOE Key Lab of Structure Mechanics and Control for Aircraft,

Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract: The factors causing a few of spectral lines exceeding acceptable error bounds all the time are analyzed in multi-input and multi-output(MIMO) random vibration test. A formula to express the relationship of the control spectrum matrix and the matrix of Cholesky decomposition of reference spectrum matrix is derived. It shows that the control result is affected severely by the coupling between the control points. A cross proportional correction algorithm is put forward to improve the control results. With the new algorithm, all the spectrum lines can be controlled within the acceptable error bounds. The new cross proportional correction algorithm is compared with the proportional root square mean correction algorithm by tests. Results show that the new algorithm is better.

Key words: multi-input and multi-output; vibration environment test; random vibration; auto-power spectrum

随机振动试验是检验产品可靠性和耐久性的的重要手段。早期人们使用的是单输入单输出随机振动试验。随着科技的发展和人们认识的深入, 单输入单输出随机振动试验的局限性逐渐暴露, 不能满足越来越高的实际需求, 多输入多输出随机振动试验开始受到人们的关注。

1973年, Fisher^[1]首先提出了基于频响函数逆阵的多输入多输出振动试验控制的解耦方法。此后, Smallwood等^[2-8]先后发表多篇论文, 发展和完

善了多输入多输出随机振动试验控制理论。此外, 国外多家商业公司相继涉足多输入多输出随机振动试验控制相关产品的研发和生产, 如美国的Spectral Dynamic(SD)公司, Data Physics(DP)公司, 日本的IMV公司, 比利时的LMS公司等, 其中SD公司的Underwood等^[9-11]发表多篇论文介绍了多输入多输出振动试验控制系统的研究近况, 以及宽频带随机振动试验控制的一些理论和方法, 但是没有公开其多输入多输出随机振动试验控制系统

基金项目: 国家自然科学基金(10972104)资助项目。

收稿日期: 2009-10-23; 修订日期: 2009-12-16

作者简介: 崔旭利, 男, 博士研究生, 1981年9月生; 陈怀海(联系人), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: chhnuaa@yahoo.com.cn。

的控制算法。国内,贺旭东^[12]和叶建华等^[13]均发表论文阐述了多输入多输出随机振动试验控制的理论并给出了控制效果。Smallwood 在文献[8]中提出了一种随机振动控制算法:差分修正算法。差分修正算法在修正过程中可能会使修正堵塞或发散,需要做一些特殊处理。2006年,贺旭东等^[12]在分析了差分修正算法的基础上,在不考虑互谱控制的条件下提出了比例均方根修正算法,能够使自谱稳定快速地收敛。试验中发现,差分修正算法和比例均方根修正算法在某些控制对象上,控制结果中少数自谱谱线总是超过参考谱+3 dB 误差限。

为此,本文根据线性系统随机振动的基本理论,以两输入两输出随机振动控制过程为例,研究了控制点之间耦合因素对谱线超标的影响,并在比例均方根修正算法的基础上提出了一种交叉比例修正算法,当自谱中存在超标谱线,谱线超出参考谱的±3 dB 误差限而不超出±6 dB 误差限时,该算法能有效改善自谱的控制效果,使自谱的所有谱线都保持在参考谱的±3 dB 误差限之内,整体控制效果得到改善。

1 控制目标

多输入多输出随机振动试验控制的控制目标是使控制谱和参考谱保持一致,若以响应的功率谱 $S_{yy}(f)$ 为控制谱,由振动理论可知

$$S_{yy}(f) = G(f) S_{dd}(f) G^H(f) = R(f) \quad (1)$$

式中: $G(f)$ 为系统频响矩阵; $S_{dd}(f)$ 为驱动谱矩阵; $R(f)$ 为参考谱矩阵; 上标 H 表示矩阵的共轭转置; 自变量 f 表示频率,为简化起见,后文中省去自变量 f 。

2 驱动信号的生成

由式(1)可得理想的驱动谱矩阵

$$S_{dd} = \tilde{A} R \tilde{A}^H \quad (2)$$

式中: $\tilde{A} = G^{-1}$ 称为系统的补偿矩阵; S_{dd} 表示理想的驱动谱矩阵。

分别对驱动谱矩阵和参考谱矩阵做 Cholesky 分解^[14]

$$R = LL^H \quad (3)$$

$$S_{dd} = \tilde{D} \tilde{D}^H \quad (4)$$

将式(3,4)代入到式(2)中,可得

$$\tilde{D} \tilde{D}^H = (\tilde{A} L) (\tilde{A} L)^H \quad (5)$$

由 Cholesky 分解的惟一性可得

$$\tilde{D} = \tilde{A} L \quad (6)$$

根据自谱矩阵的性质, $\tilde{D}$ 就是理想驱动信号的

频谱矩阵。由于参考谱矩阵中的自谱元素缺少相位信息,故对式(6)补充随机相位,即进行相位随机化处理。以两输入两输出为例

$$\tilde{D} = \tilde{A} L P \quad (7)$$

$$P = \begin{bmatrix} e^{j\theta_1} & 0 \\ 0 & e^{j\theta_2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: P 为随机相位矩阵; j 为虚数单位; $\theta_i (i=1,2)$ 为在 $[-\pi, \pi]$ 内服从均匀分布的随机数。

对 $\tilde{D}$ 作逆傅里叶变换就可以得到一帧伪随机驱动信号

$$\tilde{d}(t) = \text{IFFT}(\tilde{D}) = \begin{bmatrix} \tilde{d}_{11}(t) & \tilde{d}_{12}(t) \\ \tilde{d}_{21}(t) & \tilde{d}_{22}(t) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中 t 表示时间。经过时域随机化^[15]处理后得到真随机驱动信号

$$d(t) = \begin{bmatrix} d_{11}(t) & d_{12}(t) \\ d_{21}(t) & d_{22}(t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

在时域随机化过程中, $\tilde{d}(t)$ 的同一列元素同时随机延时,不同列元素随机延时量不同,经过加窗叠加后生成新的一帧时域驱动信号。记 $\tilde{d}(t)$ 第一列元素随机延时 t_{r1} , 第二列元素随机延时 t_{r2} , 其中 t_{r1} 和 t_{r2} 是两个独立的随机变量。根据傅里叶变换的时移特性^[16], $\tilde{d}(t)$ 的傅里叶变换可以表示为

$$D = A L P Q \quad (11)$$

其中 Q 为时移因子矩阵,记为

$$Q = \begin{bmatrix} e^{-j2\pi f t_{r1}} & 0 \\ 0 & e^{-j2\pi f t_{r2}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

A 是受到频谱泄漏影响的 $\tilde{A}$ 。在时域随机化过程中,对时域伪随机信号加窗会引起频谱的泄漏^[17],从而引起相邻的谱线发生变化。由于 L , P 和 Q 频谱幅值随频率变化相对于 $\tilde{A}$ 较小,在分析泄漏对 $\tilde{D}$ 的影响时,忽略 L , P 和 Q 。因此,时域随机化过程中泄漏对 $\tilde{D}$ 的影响就是对 $\tilde{A}$ 的影响。

参考谱设定如下

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & \gamma \sqrt{r_1 r_2} e^{-j\varphi} \\ \gamma \sqrt{r_1 r_2} e^{j\varphi} & r_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: r_1, r_2 分别为控制点 1 和 2 的自功率谱的参考值; γ 为两控制点的响应之间的相干函数; φ 为两点响应的频谱之间的相位差。

将式(13)代入到式(3)中,可得

$$L = \begin{bmatrix} l_{11} & l_{21} \\ l_{21} & l_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{r_1} & \\ \gamma \sqrt{r_2} e^{j\varphi} & \sqrt{1-\gamma^2} \sqrt{r_2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

3 功率谱矩阵与自谱分离矩阵的关系

根据线性系统理论,将 D 输入到系统中可得系统响应

$$Y = GD \quad (15)$$

把 G 和 A 分块表示

$$\begin{cases} G = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \end{bmatrix} \\ A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (16)$$

式中: G_1, G_2 为行向量; A_1, A_2 为列向量。将式(11, 16)代入式(15)中,可得

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (G_1 A_1 l_{11} + G_1 A_2 l_{21}) e^{j\phi_1} & G_1 A_2 l_{22} e^{j\phi_2} \\ (G_2 A_1 l_{11} + G_2 A_2 l_{21}) e^{j\phi_1} & G_2 A_2 l_{22} e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

式中 $\phi_i = \theta - 2\pi f t_{ri} (i=1, 2)$ 。由于 t_{r1} 和 t_{r2} 是独立随机变量,因此 ϕ_1 和 ϕ_2 也是相互独立的随机变量。在试验中, $d(t)$ 的同一行元素对应同一个振动台,所以需要 $d(t)$ 每行元素相加,得到时域激励信号向量

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_1(t) \\ u_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11}(t) + d_{12}(t) \\ d_{21}(t) + d_{22}(t) \end{bmatrix} \quad (18)$$

将 $u(t)$ 输入到系统中,测量得到时域响应向量,记作 $v(t)$,其傅里叶变换记作 V 。根据傅里叶变换的线性性质^[16],结合式(15, 17)可得

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} + y_{12} \\ y_{21} + y_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (G_1 A_1 l_{11} + G_1 A_2 l_{21}) e^{j\phi_1} + G_1 A_2 l_{22} e^{j\phi_2} \\ (G_2 A_1 l_{11} + G_2 A_2 l_{21}) e^{j\phi_1} + G_2 A_2 l_{22} e^{j\phi_2} \end{bmatrix} \quad (19)$$

进一步可求得响应的功率谱密度矩阵

$$S_{vv} = E[VV^H] \quad (20)$$

式中 E 表示数学期望。由于 ϕ_1 和 ϕ_2 都是相互独立的随机变化量,在频谱估计中,同时含有 $e^{j\phi_1}$ 和 $e^{j\phi_2}$ 项的数学期望为零,故功率谱密度矩阵 S_{vv} 可以写成

$$S_{vv} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{21}^H \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \quad (21)$$

式中

$$\begin{cases} S_{11} = |G_1 A_1|^2 |l_{11}|^2 + |G_1 A_2|^2 (|l_{21}|^2 + |l_{22}|^2) + \\ \quad G_1 A_1 l_{11} (G_1 A_2 l_{21})^H + G_1 A_2 l_{21} (G_1 A_1 l_{11})^H \\ S_{21} = G_2 A_1 l_{11} (G_1 A_1 l_{11})^H + G_2 A_1 l_{11} (G_1 A_2 l_{21})^H + \\ \quad G_2 A_2 l_{21} (G_1 A_1 l_{11})^H + G_2 A_2 l_{21} (G_1 A_2 l_{21})^H + \\ \quad G_2 A_2 l_{22} (G_1 A_2 l_{22})^H \\ S_{22} = |G_2 A_1|^2 |l_{11}|^2 + |G_2 A_2|^2 (|l_{21}|^2 + |l_{22}|^2) + \\ \quad G_2 A_1 l_{11} (G_2 A_2 l_{21})^H + G_2 A_2 l_{21} (G_2 A_1 l_{11})^H \end{cases} \quad (22)$$

如果设相干函数 $\gamma=0$,那么 $l_{21}=0$,由式(22)可得

$$\begin{cases} S_{11} = |G_1 A_1|^2 |l_{11}|^2 + |G_1 A_2|^2 |l_{22}|^2 \\ S_{21} = G_2 A_1 l_{11} (G_1 A_1 l_{11})^H + G_2 A_2 l_{22} (G_1 A_2 l_{22})^H \\ S_{22} = |G_2 A_1|^2 |l_{11}|^2 + |G_2 A_2|^2 |l_{22}|^2 \end{cases} \quad (23)$$

式(23)列出了参考谱矩阵的Cholesky分解矩阵 L 与功率谱矩阵之间的关系。

理想情况下,由式(16)可得

$$GA = \begin{bmatrix} G_1 A_1 & G_1 A_2 \\ G_2 A_1 & G_2 A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (24)$$

在试验中,由于时域随机化过程、频响函数测量精度和输入输出噪声等的影响,式(24)并不成立,等式右边单位矩阵非对角元素不为零,因此试验中获得的响应谱如式(23)所示。

定义式(23)中含有 $G_i A_j (i \neq j)$ 的项为耦合项,如 $G_1 A_1 l_{11} (G_1 A_2 l_{21})^H$;定义只含有 $G_i A_i (i=1, 2)$ 的项为对角项,如 $|G_1 A_1|^2 |l_{11}|^2$ 。

在试验中,在多数频率处都满足

$$G_i A_j \ll G_i A_i (i \neq j) \quad (25)$$

因此,在这些频率处, $s_{ii} (i=1, 2)$ 中的耦合项远远小于对角项。

对式(17)中 Y 的每个元素计算自谱,并取 $\gamma=0$,记为

$$S_{dec} = \begin{bmatrix} |G_1 A_1|^2 |l_{11}|^2 & |G_1 A_2|^2 |l_{22}|^2 \\ |G_2 A_1|^2 |l_{11}|^2 & |G_2 A_2|^2 |l_{22}|^2 \end{bmatrix} \quad (26)$$

定义 S_{dec} 为自谱分离矩阵,比较式(23, 26)可得, S_{dec} 的第 $i (i=1, 2)$ 行之和就是 S_{vv} 的第 i 个自谱 s_{ii} 。

4 修正算法分析

比例均方根修正算法如式(27)所示

$$\begin{cases} \Delta^{(k)} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{r_1}{s_{11}}} & 0 \\ 0 & \sqrt{\frac{r_2}{s_{22}}} \end{bmatrix} \\ L^{(k+1)} = L^{(k)} \Delta^{(k)} \end{cases} \quad (27)$$

式中 k 表示第 k 次修正。

考虑当 $\gamma=0$ 时自谱的控制效果。由式(23)可见,每个控制点的自谱都是由两项组成:对角项和耦合项。在试验中,多数频率处 $s_{ii} (i=1, 2)$ 中的耦合项远远小于对角项。从式(23, 27)可以看出,控制算法是通过修正 $l_{ii} (i=1, 2)$ 来修正 s_{ii} ,即通过修正式(23)中的对角项来改善控制效果。因此,比例均

方根控制算法^[12]在多数频率处能取得很好的控制效果。

在少数频率(如共振频率和反共振频率)处,耦合项接近或超过对角项的值,此时仅仅修正对角项不能达到改善控制效果的目的,必须同时对耦合项作适当修正。例如在某频率处 s_{11} 有谱线超标,且超标主要由耦合项 $|G_1 A_2|^2 |l_{22}|^2$ 造成,那么就需要对 l_{22} 进行修正。修正 l_{22} 又会影响到 s_{22} 中对角项 $|G_2 A_2|^2 |l_{22}|^2$,但是如果 s_{11} 的谱线不超过+6 dB误差限,那么可以协调两点之间的控制效果,使两点都保持在 ± 3 dB的允许范围内,可以在一定程度上改善控制效果。

在式(27)的基础上改进修正算法,新的算法记作交叉比例修正算法

$$\begin{aligned} E &= \text{diag}(\sqrt{r_1/s_{11}}, \sqrt{r_2/s_{22}}) \\ E_{dB} &= 20\lg(E) \\ k_i &= \frac{\arctan(e_{dB,i}^2 - 3^2)}{\pi} + 0.5 \quad (i = 1, 2) \\ \Delta &= \text{diag}(e_{11} e_{22}^{k_2}, e_{11}^{k_1} e_{22}) \\ L^{(k+1)} &= L^{(k)} \Delta \end{aligned} \quad (28)$$

式中:diag表示对角矩阵; E 为误差矩阵,其对角元素记作 $e_{ii}(i=1,2)$; E_{dB} 为 E 的分贝形式,其对角元素为 $e_{dB,i}(i=1,2)$; k_i 为交叉修正的加权系数,是 $e_{dB,i}$ 的函数;当 $|e_{dB,i}| < 3$ 时, $k_i \approx 0$,不进行交叉修正,当 $|e_{dB,i}| > 3$ 时, $k_i \approx 1$,进行交叉修正。 k_i 随 $e_{dB,i}$ 的变化曲线如图1所示。

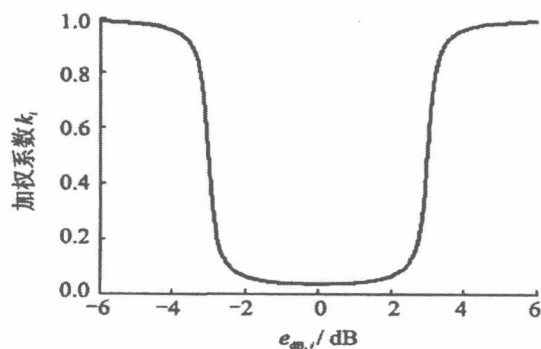


图1 加权系数 k_i 随 $e_{dB,i}$ 的变化曲线

5 试 验

本文在一根悬臂钢梁上做两点的随机振动控制(图2)。梁长 $l=1\,200$ mm,宽 $b=30$ mm,高 $h=12$ mm。试验仪器包括:HEV-50 激振器,HEAS-2 功率放大器,PCB 加速度传感器,Agilent VXI 信号发送与采集系统(图3)。

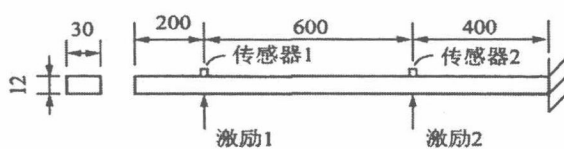


图2 悬臂梁尺寸

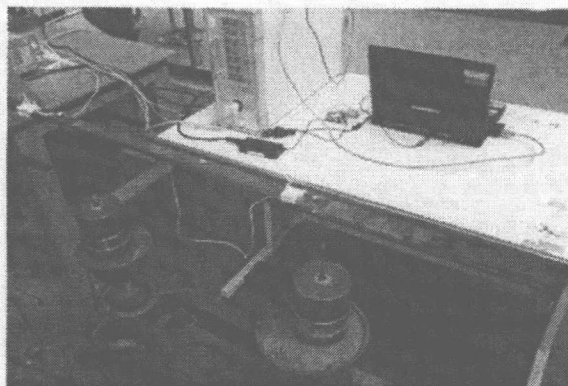


图3 试验现场

参考谱设定如图4所示,图中采用双对数坐标。

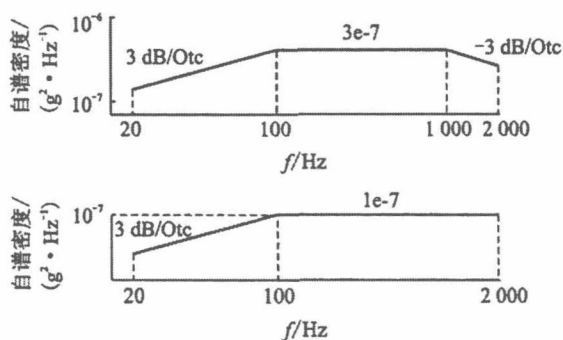


图4 参考谱

试验参数:频带宽2 000 Hz,谱线数为800线。采用比例均方根修正算法进行控制,结果如图5所示。

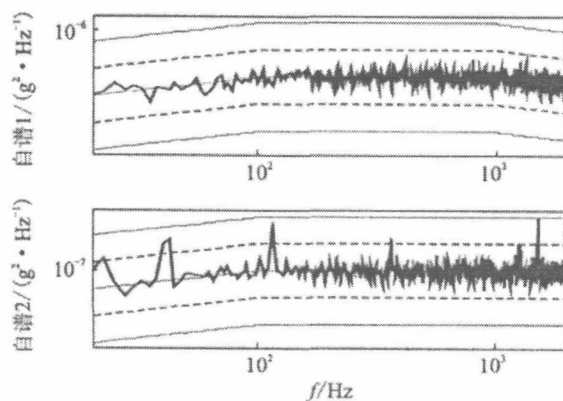


图5 比例均方根算法的自谱控制效果

图5中虚线是参考谱的 ± 3 dB误差限边界线,外侧实线是 ± 6 dB误差限边界线,中间是参考谱