

石英灯辐射式瞬态热环境试验关键技术分析

王德成, 林辉

(西北工业大学, 西安 710129)

摘要: 结合石英灯辐射式加热器的特性, 从传感器弱信号传输、无功补偿、智能控制、仿形加热器、开环试验技术等角度出发, 分析了对型号瞬态热试验性能的影响。结合瞬态热试验的实施, 给出了上述几个角度制约热试验实施的改进措施, 以期提高试验系统瞬态热试验的有效性。

关键词: 热环境试验; 石英灯; 热流传感器; 热电偶

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.05.006

中图分类号: TJ86; V416

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2016)05-0036-05

Main Technical Analysis of Quartz Lamp Radiation Transient Thermal Environment Experiment Main Technical Analysis

WANG De-cheng, LIN Hui

(Northwest Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

ABSTRACT: Based on the characteristics of quartz lamp radiation heater, the influence of following factors on experiment performance is was analyzed, such as sensor weak signal transmit, reactive power compensation, intelligent control, profile modeling heater design and open loop experiment way. Combined with the implementation of transient thermal environment experiment implementation process, the corresponding corrective actions based on the above constraint thermal experiment implementation aspects wereare given, in order to improve the effectiveness of transient thermal experiment of experiment system.

KEY WORDS: thermal environment experiment; quartz lamp; heat flow sensor; thermocouple

飞行器飞行过程中, 当高速气流流过飞行器时, 气流与飞行器表面产生强烈摩擦, 边界层内气流损失的动能转化为热能, 使边界层内气流温度上升, 即气动加热。气动加热会使飞行器结构的刚度下降, 强度减弱, 并产生热应力、热应变和材料烧

蚀等现象, 引起飞行器内部温度升高, 使舱内工作环境恶化。气动加热是飞行器设计中必须考虑的问题。热环境试验在地面通过一定的手段模拟飞行器在空中飞行过程的热环境, 分析飞行器相应的热响应, 是研究气动加热问题的有效方法, 成为结构设

收稿日期: 2016-08-15; 修订日期: 2016-08-25

Received: 2016-08-15; Revised: 2016-08-25

基金项目: 航空科学基金(20140953016)

Fund: Aerospace Science Foundation of China(No.20140953016)

作者简介: 王德成(1981—), 男, 山东临沂人, 博士, 副教授, 主要研究方向热试验、智能控制。

Biography: WANG De-cheng(1981—), Male, from Linyi, Shandong, Doctor, Associate professor, Research focus: thermal environment experiment technique and intelligent control.

通讯作者: 林辉(1957—), 男, 福建福州人, 博士, 教授, 主要研究方向热试验、机电伺服、控制技术。

Corresponding author: LIN Hui(1957—), Male, from Fuzhou, Fujian, Doctor, Professor, Research focus: thermal environment experiment technique, electromechanical servo and control technique.

计、强度及可靠性分析、产品性能检验和鉴定的重要手段^[1-3]。

按照加热方式进行分类，热环境试验主要分为对流加热、传导加热、辐射加热三大类^[4-5]。对流加热主要借助于热介质和试验件之间的高速相对运动来实现，以风洞为代表。传导加热主要通过在试件表面敷设加热垫实现，或利用试件电阻直接通电进行加热，主要用于材料高温性能测定。以石英灯作为辐射热源，具有以下优点：尺寸小，功率大；热效率高，寿命长；热惯性小；结构紧凑，便于安装。这些优点使得石英灯成为热试验最常用的热源^[6]。经行业内调查可知，石英灯辐射式热环境试验是目前国内航空、航天领域最为普遍的热环境试验方法。

随着型号设计水平的提高，飞行速度和飞行条件的改变，使得热环境试验过程中的给定谱线在短时间内呈现快速宽范围变化特性。这种给定谱线特性，使得瞬态热环境试验的实施遇到瓶颈。文中结合石英灯辐射式热环境试验系统特性，基于提高瞬态热试验能力的视角，对其关键技术问题进行了深入的分析。

1 石英灯辐射式热环境试验系统

石英灯辐射式热环境试验系统的结构如图 1 所示。控制器实时采集热状态信号，进行相应的分析运算后，输出控制信号给电压调节装置。电压调节装置根据控制信号改变输出电压，即改变加热器的输出功率，使到达被试产品表面的热状态跟随给定控制目标谱线。

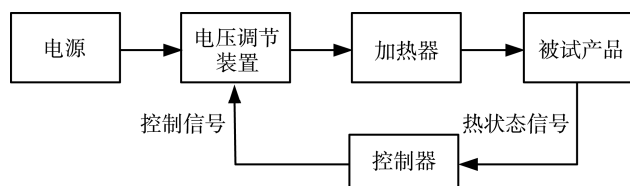


图 1 石英灯辐射式热环境试验系统典型结构

Fig.1 Typical structure of quartz lamp radiation transient thermal environment experiment

电源为整个热环境试验过程提供原始能源，可以采用大功率直流电源，也可采用交流电源。交流电源具有容量大、使用方便等优势，成为电源选择方式的首选。为了获取更高的热流密度，三相模式下的线-线接法可取代单相模式下的相-中线接法。

电压调节装置，接收控制器发出的控制信号，

将固定的输入电压转换成施加在石英灯两端可变的电压。对于交流电源来说，电压调节装置就是利用可控硅组成的 AC/AC 变换器。

加热器本身就是石英灯阵列。石英灯的热源通过钨丝螺旋绕制而成。典型石英灯的额定电压为 220 V。石英灯的热流输出能力，决定加热器的能力。为了提高加热器的热流输出能力，可采用额定电压为 380 V 的石英灯，且在灯管远离被试产品的一侧，涂有反射涂层。

被试产品可以是整体的战术型号或者运载型号，也可以是型号的部分组件。反映被试产品的热状态信号，可以通过相应的传感器测量得到。温度信号可以通过热电偶测量得到。热流信号可以通过热流传感器测量得到。

控制器主要通过闭环控制策略，产生控制信号。可以作为控制器的选择有多种，如工业可编程逻辑控制器（PLC）^[7-9]、数字信号处理器（DSP）^[10]、计算机（通过板卡进行闭环控制所需反馈数据的采集）^[11]等。谱线跟踪的好坏取决于控制器的控制律设计，谱线跟踪过程中的控制律设计，耗时、耗力、耗财。

2 关键技术分析

2.1 传感器弱信号传输

热环境试验过程中，热电偶和热流传感器的测量数据是闭环控制的反馈。反馈数据的准确性，严重影响热环境试验的有效性。热电偶和热流传感器输出信号都是毫伏量级，甚至微伏级。控制器和被试产品的距离往往高达几十米。传感器输出的弱信号在传输过程中，除微弱信号通用传输过程受到的干扰外，还受到热环境特殊的影响。

采用交流电源提供能源的方式，主要通过电力电子斩波控制的方式，实现电压的改变。AC/AC 变换器的工作过程中，向供电系统注入大量的谐波。这些谐波通过供电的方式，以传导的形式影响弱信号的传输。连接电压调节装置和加热器的动力线，在空间产生电磁波，耦合在传输线上，对弱信号的传输产生干扰。这种干扰在电力电子斩波控制模式下更加严重。

为了降低弱信号传输过程中受到的干扰，需要从传导干扰和辐射干扰两个角度出发。在传导方

面,从电源耦合干扰路径出发,在控制系统的供电电源前配置隔离变压器、EMI滤波器等设备,减小来自电源的干扰。在辐射干扰方面,可采用的抗干扰措施为:选择双绞带屏蔽的信号传输线,且屏蔽层接地处理好;信号线现场布线时尽量远离干动力线;在传感器附近增加信号变换装置,增大信号传输的电压;控制器中信号采集过程中增加软件数字滤波器,从软件的角度进行滤波处理。

2.2 无功补偿

电力电子技术在热环境试验中的应用,使得试验过程中产生大量的无功功率和谐波。以单相接法为例分析热环境中的无功补偿^[12],对于单相交流电压信号:

$$v = \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) \quad (1)$$

导通角为 α 时,石英灯阵列的有效值为:

$$V_o = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [\sqrt{2}V_s \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)} = V_s \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (2)$$

结合石英灯阵列是纯阻性负载的特性,功率因数可表示为:

$$PF = \frac{P}{S} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \sin 2\alpha + \frac{\pi - \alpha}{\pi}} \quad (3)$$

由式(3)可知,随着导通角从 $0 \sim 180^\circ$ 变化,功率因数从 $1 \sim 0$ 变化。随着型号研制飞行速度的提升,电源的容量都比较大,导致在试验过程中导通角较大,使得功率因数较小,存在大量的无功功率。这些无功功率的存在,使得变压器容量增加,增大设备的损耗,引起上级断路器及其他电力保护装置的不正常动作。

通过傅里叶级数分解,可得到基波电压幅值为:

$$V_{1m} = \sqrt{(\pi - \alpha)(\pi - \alpha + \sin 2\alpha) + \frac{1 - \cos 2\alpha}{2}} \times \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi} \quad (4)$$

n 次谐波电压幅值为:

$$V_{nm} = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5)$$

系数 a_n , b_n 分别为:

$$a_n = \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi} \left\{ \frac{1}{n+1} [\cos(n+1)\alpha - 1] - \frac{1}{n-1} [\cos(n-1)\alpha - 1] \right\} \quad (6)$$

$$b_n = \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi} \left[\frac{1}{n+1} \sin(n+1)\alpha - \frac{1}{n-1} \sin(n-1)\alpha \right] \quad (7)$$

式(6)和式(7)中的 n 取奇数。这些谐波的存在,会引起以下问题:变压器局部过热;电容器绝缘老化、寿命缩短以致损坏;自动装置的误动作;供电质量下降。

无功功率和谐波在谱线剧烈变化下瞬态热试验的过程中,表现得尤为突出。要解决热环境试验过程中的谐波污染和低功率因数问题,必须增加无功补偿装置^[13]。

2.3 智能控制

热环境试验过程中,试验操作人员需要花费相当长的时间进行谱线的跟踪调试。调试过程中,若调试方法不当,产生大超调,会对被试产品产生破坏性作用,甚至损坏。控制律的设计对试验有效性有重要影响。

热环境试验系统是一个典型的大惯性、大时滞、非线性特性复杂的系统。对于这样一个复杂系统,基于PID的谱线跟踪调试方法很难取得良好的跟踪效果^[14]。PID控制策略是目前广泛应用于热环境试验的谱线跟踪调试方法,跟踪性能取决于控制律的参数和被试对象的尺寸形状、材料和试验环境。因此加热设备针对不同的被试对象需要调整控制律的参数才能得到较好的控制效果,但调整控制参数是一个非常麻烦复杂的过程。理想的情况是加热试验系统自身能自动识别被试对象的数学模型,然后自动生成合适的控制律及控制参数。目前可用智能控制方法^[15],如自适应控制、自校正控制、模糊控制等方法,以调节控制参数,但这个过程非常复杂,不易得到较好的控制效果。这些控制算法在谱线跟踪调试过程中,控制器参数的调节将会全面地改变控制量,这使得某些跟踪性能比较好的时间区间段在进行下一次的调试过程中会出现较差的性能。

考虑到热环境试验谱线是根据飞行条件通过有限元分析得到的,在试验过程中保持不变,满足迭代学习控制的基本条件。将迭代学习引入谱线跟踪调试的过程,可提高谱线的调试效率和谱线的跟踪性能^[16-18]。迭代学习谱线跟踪调试的过程中,控制量的变化,总是结合当前的误差以及上一次所用控制量产生,属于局部修正。通过选则小的学习增益,可以有效地避免超调现象,保护被试产品。

可在实际的谱线调试过程中,可以采用迭代学习取代PID进行谱线跟踪调试,提高谱线跟踪调试的效率和跟踪精度。

飞行器的飞行气动特性,以及结构材料的不同,使得热环境试验过程中同一被试产品不同的位置给定的谱线不同。这一特性在全弹体试验过程中尤为突出。这需要在热环境试验过程中,需要开展分温区解耦控制。由于热环境试验系统各温区之间的耦合性不是固定不变的,因此精确的解耦控制律设计需要建立在动态解耦基础上。

2.4 仿形加热器设计

当前的热环境试验主要针对型号的组件展开进行,这种试验方式的试验结果具有较大的局限性,不能真实的反映型号的热响应。举例来说,整流罩的筒段在热试验过程中施加的热流不到 10 kW/m^2 ,但是这么小的热流可以使球头产生几十摄氏度的温差。如果不采用整体的整流罩热环境试验,这种结构响应就无法获得。随着型号研制水平的提升,尤其是战术型号,需要全尺寸仿形加热器配套使用进行热环境试验,得到整体的热响应。

仿形加热器的设计,需要按照飞行器的真实尺寸进行量身定做。该种类型的加热器设计技术难点体现在以下两个方面。

1) 仿形石英灯的设计。目前市面上的石英灯全部是管状水平的。要设计仿形加热器,相应的灯管必须定制。仿形石英灯的弧度需要依据飞行器的结构外形进行设计,否则很难做到对飞行器表面进行均匀的加热。

2) 水冷板设计。水冷板具有增加加热器热流输出密度的功效。在设计水冷板时,应保证水流的均匀性,以及焊接的牢固性,避免水冷板的漏水,对灯管产生破坏作用。水冷板的水流方向应是由低到高,以避免气泡的存在,降低其水冷性能。

2.5 开环试验

热流传感器的测量方式是一种间接测量方式,建立在冷壁、热壁温度差基础上。虽然在热环境试验过程中,对热流传感器的冷端进行隔热处理,如通冷水降温、隔热石棉包裹处理,但在试验过程中,无法避免冷端温度的上升,产生较大的测量误差。在某被试产品试验过程中,热流给定在 300 kW/m^2 以上,一个热流传感器进行隔热处理,输出作为闭

环控制使用,另一个热流传感器未经隔热处理,输出信号呈现出较大的下降趋势。这种由冷壁温度升高产生的热流测量误差,在大热流、封闭状态下,显得尤为突出,造成过度试验。

高热流状态下的热流传感器校验,目前也是困扰热环境试验的难点问题。热流传感器的敏感片在使用中需要涂黑漆。黑漆的不均匀,以及使用过程中黑漆的脱落,都会产生测量误差。热流传感器需要经常校验。校验过程中,高热流的热源很难提供,这给型号的高热流试验状态下的精确测量带来困难。

真实被试件往往还不允许打孔安装热流传感器,或是传感器的水冷等使用条件不具备,无法进行闭环试验。解决的办法是可以采用开环控制试验。该方法是在模拟试验件上反复进行闭环控制试验调试,由于模拟件上不受打孔,安装热流传感器、冷却等这些约束限制,可以在闭环控制试验中取得很好的控制精度。闭环试验成功后保存整个过程控制电压随时间变化的控制参数,在真实的被试件试验时采用该控制参数直接作用于试验系统,实行开环试验。由于开环试验不包含闭环反馈环节,可以不需装配热流传感器,却可以保证与闭环控制系统得到相同的试验精度,使得试验真实性更好。

3 结语

石英灯辐射式加热系统在热环境试验中起主导作用。型号研制水平的提升,对加热系统提出更高的要求。为了使得地面热环境模拟更加真实、有效,无论在加热系统设计方面,还是在谱线跟踪调试方面,需要针对上述关键问题,进行深入分析。

参考文献:

- [1] 范绪箕. 高速飞行器结构分析与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
FAN Xu-qi. High Speed Flight Vehicle Structure Analysis and Application[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2009.
- [2] 沈淳, 孙凤贤, 夏新林, 等. 局部多孔壁-内腔结构的气动加热瞬态特性[J]. 宇航学报, 2012, 33(8): 1006—1012.
SHEN Chun, SUN Feng-xian, XIA Xin-lin, et al. Transient Characteristics of Aerodynamically Heating Partial Porous Wall-Inner Cavity[J]. Journal of Astronautics, 2012, 33(8): 1006—1012.

- [3] CULLER A J, MCNAMARA J J. Studies on Fluid-thermal- structural Coupling for Aerothermo-elasticity in Hypersonic Flow[J]. AIAA Journal, 2010, 48(1): 1721—1737.
- [4] 张钰. 结构热试验技术[M]. 北京: 宇航出版社, 1993.
ZHANG Yu. Structure Thermal Test Technology[M]. Beijing: Yuhang Express.
- [5] HOLDEN M S, WADHAMS T P, CANDLER G V. A Review of Experimental Studies in the LENS Shock Tunnel and Expansion Tunnel to Examine Real-gas Effects in Hypervelocity Flows[C]// 42th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Nevada, USA, 2004: 916—932.
- [6] 夏齐时, 齐斌, 张昕. 防隔热试验用平板型石英灯加热器热环境分析[J]. 红外技术, 2016, 38(7): 617—621.
XIA Lin-shi, QI Bin, ZHANG Xin. The Thermal-environment Analysis of Flat Quartz Lamp Heater System for Thermal Protection & Insulation Test[J]. Infrared technology, 2016, 38 (7): 617—621.
- [7] WANG De-cheng, WANG Lei, WANG Hai-dong, et al. One Adaptive Control Method Used in Quartz Lamp Radiation Aerodynamic Heating Simulation Experiment [C]// Proceedings of 2015 International Conference on Computer and Computational Sciences. Hong Kong: Asian Academic Press, 2015: 83—86.
- [8] 许奇, 齐蓉, 王德成. 一种气动加热模拟试验系统的实现[J]. 机电一体化, 2011, 17(2): 56—59.
XU Qi, QI Rong, WANG De-cheng, The Implementation of an Aerodynamic Heating Simulation System[J]. Mechatronics, 2011, 17(2): 56—59.
- [9] 刘俊飞, 林辉, 雷攀. 基于Matlab的气动加热模拟试验系统[J]. 机电一体化, 2012, 18(2): 25—27.
LIU Jun-fe, LIN Hui, LEI Pan. An Aerodynamic Heating Simulation System Based on Matlab[J]. Mechatronics, 2012, 18(2): 25—27.
- [10] WANG De-cheng, QIN Qiang, REN Qi-kang. One Low-cost Quartz Lamp Radiation Aerodynamic Heating Simulation Experiment System with Control Law Flexible Adjustment Feature[C]// Proceedings of the 2015 International Conference on Energy, Materials and Manufacturing Engineering, France: EDP Sciences Press, 2015.
- [11] 吴大方, 潘兵, 高镇同. 超高温、大热流、非线性气动热环境试验模拟及测试技术研究[J]. 实验力学, 2012, 27(3): 255—271.
WU Da-fang, PAN Bing, GAO Zhen-tong. On the Experimental Simulation of Ultra-high Temperature, High Heat Flux and Nonlinear Aerodynamic Heating Environment and Thermo-mechanical Testing Technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3): 255—271.
- [12] 陈坚. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
CHEN Jian. Power Electronics, Power Electronic Transformation and Control Technology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [13] 王兆安, 刘进军, 王跃, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
WANG Zhao-an, LIU Jin-jun, WANG Yue, et al. Harmonics Elimination and Reactive Power Compensation [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2016.
- [14] 张伟, 王乐善, 王梦魁. 气动加热模拟试验加热系统控制研究[J]. 强度与环境, 2005, 32(3): 45—52.
ZHANG Wei, WANG Le-shan, WANG Meng-kui. Research on Control of Heating System for Aerodynamic Heating Simulation Test[J]. Structure & Environment Engineering, 2005, 32(3): 45—52.
- [15] 李祖枢, 涂亚庆. 仿人智能控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
LI Zu-shu, TU Ya-qing. Human-simulated Intelligent Control[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2003.
- [16] 林辉, 王林. 迭代学习控制理论[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1998.
LIN Hui, WANG Lin. Iterative Learning Control Theory [M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Express, 1998.
- [17] 兰天一, 林辉. Lebesgue-p 范数意义下对初态误差进行加速修正的迭代学习控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(3): 429—434.
LAN Tian-yi, LIN hui. Accelerated Modify Approach for Initial State Error Iterative Learning Control in Sense of Lebesgue-p norm[J]. 2016, 31(3): 429—434.
- [18] 王德成, 兰天一, 李国豪, 等. 一种用于热试验谱线跟踪调试的迭代学习控制方法: 中国, G05B13/04GK 104483834SQ201410587783[P]. 2015-04-01.
WANG Decheng, LAN Tian-yi, LI Guo-hao, et al. One Method Used for the Thermal Experiment Given Spectrum Tracking Debugging Method Based on Iterative Learning Control: China, G05B13/04GK104483834SQ 201410587783[P]. 2015-04-01.