

板状结构可变边界热振耦合试验系统研制

彭富豪^{1,2}, 吴乙万^{1,2}, 白鸿柏^{1,2}, 李上洲^{1,2}

(1. 福州大学 金属橡胶工程研究中心, 福州 350108; 2. 福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: 针对板状结构存在不同边界约束以及恶劣高温环境, 研制了变边界高温试验模态系统, 为板状结构在高温振动耦合环境下的测量提供一套低成本、可变边界试验系统; 该试验系统采用虚拟仪器 LabVIEW 对石英灯阵进行温度控制, 自行研制耐高温陶瓷导杆引伸装置, 将板状结构上的振动信号传递至非高温区域, 使用激振器对板状结构进行激励, 通过常温加速度传感器测量其响应信号, 使用时-频联合技术对测量的模态数据进行参数识别获得板状结构的模态参数; 以 45 号钢板为测试样件, 得到其在室温下不同边界的模态参数; 并在单边约束下对 45 号钢板进行 500℃ 高温振动耦合实验, 得出其模态参数; 该试验系统可为板状结构在变边界高温振动耦合环境下的安全设计提供可靠依据。

关键词: 板状结构; 振动试验; LabVIEW 温控程序; 热模态试验分析

Development of Coupled Thermo—Vibration Test System for Plate Structure with Variable Boundary

Peng Fuhao^{1,2}, Wu Yiwan^{1,2}, Bai Hongbai^{1,2}, Li Shangzhou^{1,2}

(1. Engineering Research Center for Metal Rubber, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: Aiming at the different boundary constraints and harsh high temperature environment of plate structure, a variable boundary high temperature test modal system is developed, which provides a low cost and variable boundary test system for the measurement of plate structure under high temperature vibration coupling environment. The test system uses virtual instrument LabVIEW to control the temperature of quartz lamp array. A high temperature resistant ceramic guide rod extension device is developed to transmit the vibration signal from the plate structure to the non-high temperature area. The plate structure is stimulated by a vibrator. The response signal is measured by an acceleration sensor at room temperature. The system uses time-frequency combination. The technique identifies the measured modal data and obtains the modal parameters of the plate structure. Taking No. 45 steel plate as test sample, the modal parameters of different boundaries at room temperature were obtained, and the modal parameters of No. 45 steel plate were obtained by high temperature vibration coupling experiment under unilateral constraints. The test system can provide a reliable basis for the safety design of plate structures under the coupled environment of variable boundary and high temperature vibration.

Keywords: plate structure; vibration test; LabVIEW temperature control program; thermal modal test analysis

0 引言

板状结构在实际工程中被广泛应用, 其工作环境温度范围较宽, 如航空发动机设备安装基座(多个平板组成)工作温度可达上百度。设计此类板状结构应考虑温度的影响, 对板状结构在不同环境下的热模态设计对改善板状结构振动水平、提高板状结构使用寿命有重要意义^[1-5]。

有限元技术对结构在热环境下模态分析提供了一种新的思路。Bevins^[6]建立飞行器蒙皮结构有限元模型, 分析了热环境下结构受到声载荷激励产生的响应。Lee^[7]运用有限元方法对碳纤维环氧加筋板结构在热环境下的振动性能进行研究。孙强^[8]通过有限元技术对航空发动机叶片固有频

率与温度的关系进行研究。李跃明^[9]建立高超声速飞行器 X-43A 整机有限元模型, 并对其在高温环境以及 165dB 声压作用下的振动特性进行分析。

有限元技术虽已得到了长足的发展, 但针对某些特种材料的力学性能以及复杂结构的力学特性, 有限元方法总会造成一定的误差, 试验仍是一种可靠的手段。目前, 板状结构热模态试验技术已较为成熟。吴大方等^[10]基于石英灯阵加热技术对高速飞行器的翼舵进行热模态试验, 获得翼舵 25~1200℃ 范围内的模态频率参数, 对于常温区域测量高温环境下结构振动信号的研制提供了试验支持。Jeon^[11]使用非接触式激光测振方法对矩形平板开展自由-自由边界热模态试验, 其单侧实现温度为 500℃。McWithey 等^[12]针对 X-15 翼结构展开热模态试验技术的研究, 翼面结构的主体温度为 347℃, 在模拟空气动力学加热的过程中, 测量了五种固有频率模式发生改变, 结果表明: 高温下第一、二、六阶固有频率随温度的上升而下降, 一阶扭转模态频率变化最大, 下降幅度达 5%, 加热后丢失第三、

收稿日期: 2019-08-30; 修回日期: 2019-09-22。

作者简介: 彭富豪(1994-), 男, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要从事机械振动控制及复合材料方向的研究。

通讯作者: 吴乙万(1984-), 男, 福建厦门人, 硕士研究生导师, 主要从事振动与冲击防护方向的研究。

支撑底座起支撑作用, 放置在 T 型槽铸铁平台上; 支撑圈梁起转接作用, 使支撑梁能够根据不同的约束位置在支撑圈梁上进行调整。

2.1.2 控制部分

1) 温度控制模块: 温度控制模块如图 3 所示, 包括温度信号拾取子模块和加热控制子模块两部分。提供了一种低成本、精确测量温度的方法, 可测温度范围为 $-200 \sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。由于测试温度较高, 为防止铝合金箱体内存电器元件发热严重, 安装进排气风扇。

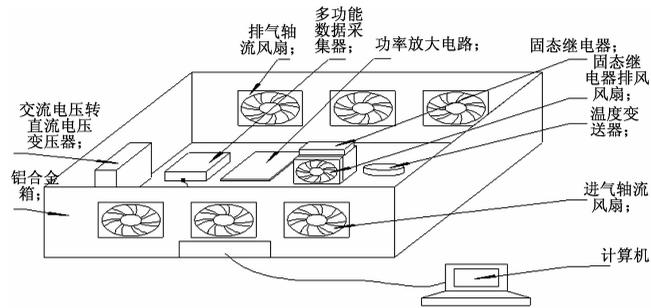


图 3 温度控制模块示意图

多功能数据采集器利用 NI-USB-6002 采集卡完成温度传感器信号采集与驱动信号输出工作, 实现温度数据采集与驱动加热控制, 使用 K 型热电偶温度传感器对板状结构温度信号进行采集, 温度变送器对采集的板状结构表面的温度信号进行放大。固态继电器可以将低压直流电信号用于控制 220 V 交流电, 为实现固态继电器的控制, 设计有功率放大电路子模块。

2) 动态数据采集与分析系统: 动态信号采集与分析系统采用武汉优泰电子技术有限公司生产的 uT8916FRS-DY 同步采集系统, 其有 2 路函数输出信号和 16 位 DA 输出信号源, 可输出电压、电荷、ICP 和应变信号。

3) 控制计算机: 使用控制计算机对实验全过程进行监测与控制。控制计算机与动态数据采集与分析系统、温度控制模块通过 TCP/IP 通讯方式进行数据交互。

2.1.3 激励部分

1) 激振器: 激振器的作用是使用状结构产生振动, 采用扬州一轩电子技术有限公司生产的电动式激振器 JZQ-50, 其最大激振力为 500 N, 频率范围为 $10 \sim 2000 \text{ Hz}$ 。

2) 功率放大器: 功率放大器的作用是将信号发生器输出的相当弱小的电压信号进行放大, 供给激振器一定的电流, 推动激振器工作, 采用杭州

亿恒科技有限公司生产的 E5878 功率放大器, 其最大输出功率为 1500 VA, 信噪比大于 90 dB。

2.1.4 传感部分

1) 动态力传感器: 动态力传感器用于测量激振力, 选用扬州一轩电子技术有限公司生产的 YD-303 压电型石英力传感器, 其测量范围为 $\pm 2 \text{ KN}$, 电荷灵敏度为 3.08 pC/N , 工作温度范围为 $-40 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

2) 加速度传感器: 加速度传感器用于测量板状结构表面的振动响应信号, 选用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 IEPE 压电式加速度传感器, 其抗干扰性好, 可与长导线使用, 灵敏度为 10.36 mV/g , 测量范围为 $\pm 500 \text{ g}$, 工作温度范围为 $-40 \sim +120 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3) 温度传感器: 温度传感器用于测量板状结构表面的温度, 选用由镍铬-镍硅材料制成的 K 型热电偶温度传感器, 其温度测量范围为 $-200 \sim 1250 \text{ }^\circ\text{C}$ 。温度传感器为直径 6 mm 的圆丝, 适用于板状结构在宽温域下热振耦合试验。

2.2 软件部分

系统软件设计部分包括 LabVIEW 温控程序、数据采集控制软件、机械模态分析软件三部分。

2.2.1 LabVIEW 温控程序

LabVIEW 温控程序如图 4 所示, 包括加热控制循环程序和恒温控制循环程序。为保证板状结构在可调的温度环境下进行振动试验, 采用模糊控制的方法进行控制。首先通过设置温度上限值对板状结构进行加热; 然后通过温度下限值一起将温度调整在一个较小范围内来对板状结构表面温度进行温度范围调节, 试验温度误差在 3% 左右; 最后使温度信号拾取系统的温度与多功能数据采集器数字输出

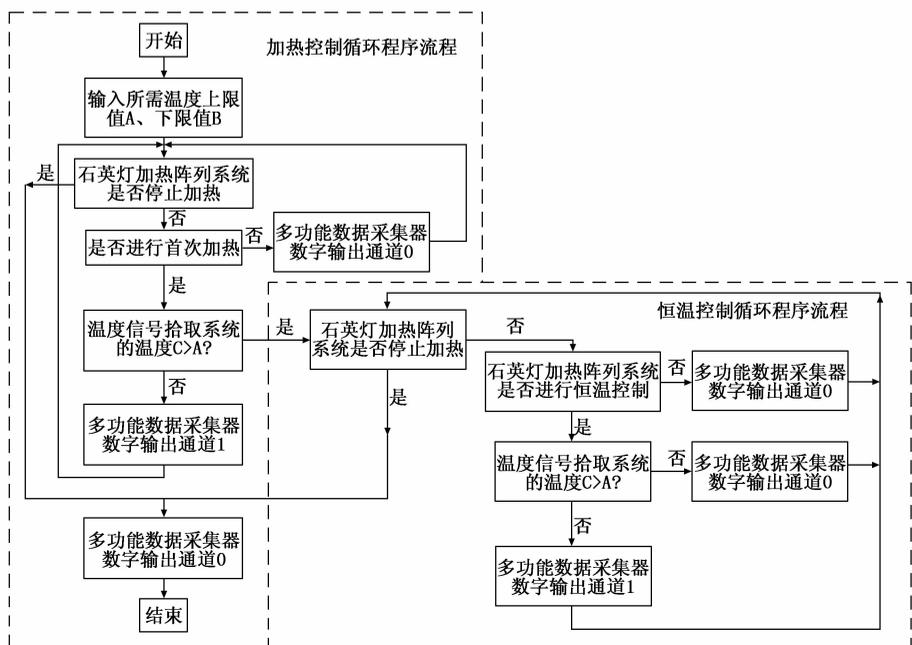


图 4 LabVIEW 温控程序

通道的温度对比进行恒温控制。

2.2.2 数据采集控制软件

数据采集控制流程如图 5 所示，为了采集板状结构表面上的振动响应信号，首先，创建一个工程文件，在数据采集控制软件上对信号发生器进行输出通道和信号类型进行选择，对信号的频率、幅值、时间周期进行参数设置；然后，对采集参数进行设置，将采样频率、触发参数、传感器的数值和单位进行标定；最后，对板状结构进行示波，待信号稳定后进行数据采集。

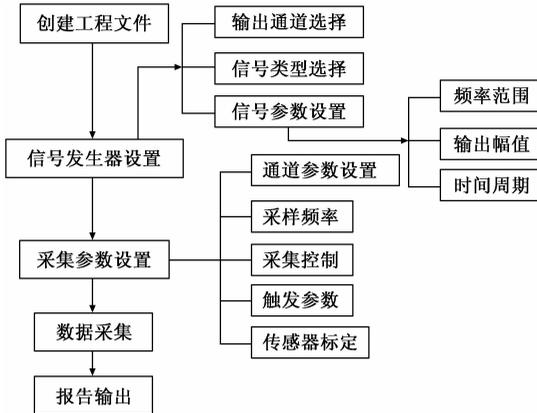


图 5 数据采集控制流程图

2.2.3 机械模态分析软件

机械模态分析流程如图 6 所示，为了对数据采集到的板状结构信号进行模态分析，首先，建立模态工程文件，

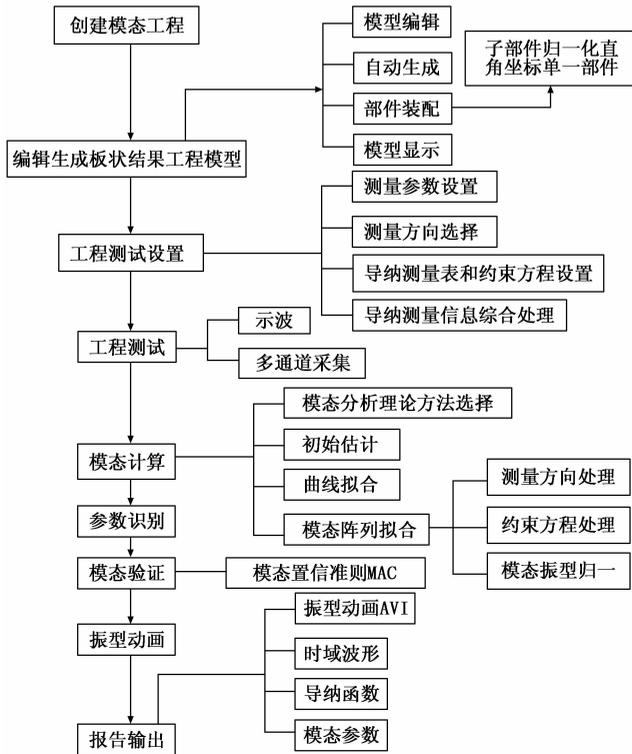


图 6 模态分析流程图

对板状结构进行工程模型编辑；然后，将数据采集到的板状结构信号导入到机械模态分析软件中进行模态计算；其次，选择模态计算方法，对试验数据进行初始估计与整体数据拟合，并对模态阵型进行测量方向和约束方程进行处理，使模态振型归一；最后，对模态工程数据进行参数识别和模态验证，得到板状结构的模态参数，输出试验数据报告并进行存储。

3 变边界振动试验模态系统性能试验

以 45 钢作为测试样件进行试验，板结构的参数如表 2 所示。

表 2 45 钢参数

名称	数值/mm
宽度	150
长度	150
厚度	8

对 45 钢试件在室温下进行不同边界振动试验，以单边固支为例对 45 钢试件进行 500 °C 高温振动耦合试验。

图 7 为所测试 45 钢板前三阶模态频率曲线，由图可知，单边约束下 500 °C 的模态频率比室温均低，双边、三边和四边约束下前三阶模态频率相差不多。

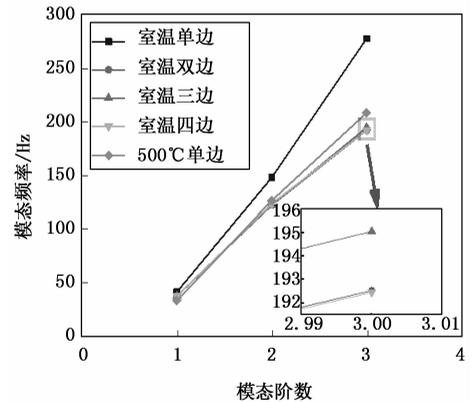


图 7 45 钢板前三阶模态频率曲线

表 3 为所测试 45 钢板前三阶模态阵型，由图可知，不同约束边界模态阵型不一样，单边约束室温和 500 °C 前三阶模态阵型一致。

4 结论

1) 通过研制陶瓷引伸装置将高温环境下板状结构的振动信号引导出热场之外，实现在高达 500 °C 的温度下进行板状结构高温模态参数的测量。

2) 通过支撑梁与约束梁配套使用，研制了一套低成本、可变边界的板状结构测试工装。

3) 对 45 号钢板进行不同边界进行测试，不同边界的模态阵型不一样，此外，45 号钢板双边、三边和四边约束的模态频率相差不多。

表 3 45 钢板前三阶模态振型

边界条件	模态振型		
	一阶	二阶	三阶
单边约束			
单边约束 500℃			
双边约束			
三边约束			
四边约束			

4) 对 45 钢板在单边约束下室温和 500℃ 高温下进行振动测试, 说明温度升高, 45 钢板的模态频率降低, 而模态阵型基本一致。

经实际应用研制了一套低成本、可变边界板状结构高温振动耦合试验系统, 该测试系统可为板状结构在变边界高温振动耦合环境下的安全设计提供参考依据。

参考文献:

[1] 金咸定. 船舶结构动力学的进展与信息化 [J]. 振动与冲击, 2002 (4): 3-8, 119.

[2] 李重玲, 李跃明, 李海波, 等. 考虑热效应符合材料典型壁板结构模态演变规律 [J]. 复合材料学报, 2018, 35 (4): 936-945.

[3] 赵锐, 于开平, 崔乃刚. 时变热环境下复合材料夹层板结构动力学响应分析 [J]. 振动工程学报, 2018, 31 (2): 329-335.

[4] 王超, 吕振华, 顾叶青, 等. 薄板一附加阻尼层复合结构振动模态特性试验研究与仿真分析 [J]. 汽车工程学报, 2018, 8 (1): 16-23.

[5] 夏巍, 杨智春. 热环境下复合材料壁板的振动特性分析 [J]. 应用力学学报, 2005, 22 (3): 359-363.

[6] Bevins, et al. Thermoacoustic loads and fatigue of hypersonic vehicle skin panels [J]. Journal of Aircraft, 1993, 30 (6): 971-978.

[7] Lee I, et al. Supersonic flutter analysis of stiffened laminated plates subjected to thermal load [J]. Journal of Sound and Vibration, 1999, 234 (1): 49-67.

[8] 孙强, 张忠平, 柴桥, 等. 航空发动机压气机叶片振动频率与温度的关系 [J]. 应用力学学报, 2004, 21 (4): 137-139.

[9] 杨雄伟, 李跃明, 耿谦. 基于混合 FE-SEA 法的高温环境飞行器宽频声振特性分析 [J]. 航空学报, 2011, 32 (10): 1851-1859.

[10] 吴大方, 王岳武, 商兰, 等. 1200℃ 高温环境下板结构热模态试验研究与数值模拟 [J]. 航空学报, 2016, 37 (6): 1861-1875.

[11] Jeon B H, Kang H W, Lee Y S. Free vibration characteristics of rectangular plate under rapid Thermal Loading [A]. The 9th International Congress on thermal stresses [C]. Budapest: Hungarian Academy of Sciences, 2011.

[12] McWhitney R R, Vosteen L F. Effects of transient heating on the vibration frequencies of a prototype of the X-15 wing [R]. Technical note D-362, 1960.