

金属波纹管高温振动试验系统研制

秦志强^{1,2}, 吴乙万^{1,2}, 白鸿柏^{1,2}, 丁哲宇^{1,2}, 瞿宝^{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: 为解决金属波纹管的高温振动特性测试难题, 研制了一套低成本、温度连续可调的金属波纹管高温振动试验系统; 该试验系统以弧形石英灯阵为辐射加热装置并采用 LabVIEW 对波纹管进行精确温度控制, 通过电磁激振器对金属波纹管施加轴向和径向的外部激励, 由动态加速度传感器获取振动响应信号, 经数据采集器进行实时采集存储, 获得波纹管振动响应; 以 DN108 不锈钢波纹管为试验样件, 测试其在不同温度的频响曲线, 试验证明, 该系统可稳定、可靠地获取波纹管高温振动特性。

关键词: 金属波纹管; 热振试验; 温控程序; 加速度传感器

Development of High Temperature Vibration Test System for Metal Bellows

QIN Zhiqiang^{1,2}, WU Yiwan^{1,2}, BAI Hongbai^{1,2}, DING Zheyu^{1,2}, ZI Bao^{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: In order to solve the technical problem of high temperature vibration characteristics testing of metal bellows, a low-cost and continuously adjustable temperature test system for metal bellows was developed. The test system uses two arc-shaped quartz lamp array as the radiation heating device and uses LabVIEW to accurately control the temperature of the bellows. Axial and radial external excitation is applied to the metal bellows through an electro-magnetic exciter, the vibration response signal is obtained by the dynamic acceleration sensor, and the data collector is used for real-time collection and storage to obtain the bellows vibration response. Taking the DN108 stainless steel bellows as the test sample to test its frequency response curve at different temperatures. The test proves that the system can obtain the high temperature vibration characteristics of the bellows stably and reliably.

Keywords: metal bellows; thermal vibration test; temperature control program; acceleration sensor

0 引言

波纹管是带有一定数量侧面波纹的轴对称薄壁壳体, 被广泛用作管道的柔性连接器, 可对管道轴向、横向和角位移进行一定程度的补偿, 提高管道柔性, 可在一定程度上控制管道系统的振动和噪声^[1-2]。针对高温应用工况, 金属波纹管因具有高分子波纹管无法比拟的温度适应性而被广泛应用, 研究其在不同温度条件下的振动特性很有必要, 对金属波纹管制造工艺参数的改进及实际应用有重要意义。

目前, 许多学者已对于常温环境下波纹管的力学性能及阻尼特性进行研究^[3-6]。赵培等建立了波纹管有限元模型并对其进行模态分析, 分析了波纹管的波高、波距、直径、壁厚等对波纹管动态刚度的影响及其变化规律, 并用脉冲响应法进行振动试验, 验证了有限元分析结果的正确性^[7]。刘永刚等通过 ANSYS 软件分析多层波纹管的损耗因子和轴

向刚度, 建立管路系统模拟平台, 试验研究波纹管在管路系统的刚度和阻尼性能^[8]。陆永超采用 APDL 编程语言编写的模态应变能迭代法求解出多层波纹管的损耗因子, 讨论分析了粘弹性阻尼特性、多层波纹管几何参数和结构构型对多层波纹管损耗因子的影响及其作用规律, 并进行激振试验得到实验模态^[9]。刘江分别在常温 and 高温工况下对多层 U 形波纹管进行了内压稳定性试验, 并对比有限元仿真与试验刚度的误差范围^[10]。Gawande 分析了 U 型金属波纹管波纹数的增加对其轴向固有频率、模态频率响应和振型等动态特性的影响^[11]。

高温环境下波纹管的力学性能的研究则采用有限元分析手段为主, 常温力学性能试验为辅的研究方法。虽然常温环境下的力学试验结果可验证有限元分析方法的正确性, 但仍无法真实、准确地模拟高温环境下的波纹管的力学特性。高温振动试验技术虽尚未运用于波纹管上高温力学特

收稿日期: 2021-01-14; 修回日期: 2021-02-08。

作者简介: 秦志强(1996-), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要从事机械振动控制方向的研究。

通讯作者: 吴乙万(1984-), 男, 福建厦门人, 博士研究生导师, 主要从事金属阻尼材料、振动与冲击防护方向的研究。

引用格式: 秦志强, 吴乙万, 白鸿柏, 等. 金属波纹管高温振动试验系统研制[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(8): 228-232.

性的研究, 但其在各型减振结构中已有应用。肖坤等设计金属橡胶包覆管路结构, 并在管路中通入高温蒸汽进行动态和高温激励试验^[12]。吴大方等采用石英灯阵设计了一系列超高温气动热环境模拟试验系统, 试验温度最高达到了 1 200 ℃ 以上, 并开发了配套的热振环境测试技术^[13]。

针对波纹管特殊的结构形式和应用需求, 本文在已有研究的基础上提出以弧形石英灯阵与电磁激振器为核心构建波纹管高温振动耦合试验系统的方案, 研制一套低成本、温度连续可调的新型金属波纹管高温振动试验系统, 以 DN108 不锈钢波纹管为测试对象验证所研制系统的适用性与有效性。

1 高温振动试验系统方案及原理

图 1 为金属波纹管高温振动试验系统方案示意图。该系统可分为高温环境加载子系统和振动激励采集子系统。高温环境加载子系统由弧形石英灯辐射加热模块、温度传感器、温度控制箱、多功能数据采集卡 (NI-DAQ 板卡)、计算机等组成。操作人员通过计算机运行的温控程序可配置目标温度, 温控程序将安装在被测物上温度传感器测得的实际温度与目标温度进行门限值比较, 控制多功能数据采集卡 (NI-DAQ 板卡) 输出辐射加热模块作动信号, 经温度控制箱的功率放大电路进行进行大功率放大后驱动弧形石英灯辐射加热模块对目标波纹管进行加热状态调控以产生目标温度场。振动激励采集子系统由电磁激振器、动态力传感器、陶瓷激振杆、加速度传感器、多通道数据采集控制器、计算机等组成。操作人员通过数据采集控制器配套采集软件可配置目标激励信号并监视数据采集过程, 数据采集控制器的信号源通道输出的控制信号经功率放大器后驱动激振器对波纹管施加外部激励, 数据采集控制器的输入通道则实时采集由加速度传感器与力传感器检测的振动响应与激励载荷信号。

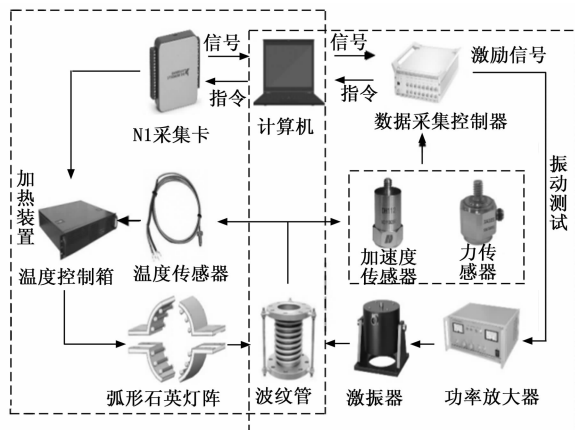


图 1 金属波纹管高温振动试验系统方案示意图

高温环境加载子系统和振动激励采集子系统相互独立又相互协同, 通过控制两个子系统可实现在不同目标环境

温度下对金属波纹管进行高温动力学性能测试。

2 高温振动试验系统硬件设计

计算机是高温振动试验系统的控制核心, 其上运行数据采集控制器配套的数据采集软件 DHDAS 和基于 LabVIEW 开发的温度控制程序。操作人员可在两个软件程序里设定试验工况、监测试验过程、存储与处理数据。

2.1 高温环境加载子系统

多功能数据采集板卡是实现温度采集、加热模块控制驱动的核心部件, 选用美国 NI 公司生产的 USB-6002 采集卡。USB-6002 拥有 8 路模拟输入、13 条 I/O 线、2 条模拟输出通道, 可满足高温环境监测与加载的需求, 同时具有较优的成本优势。

弧形石英灯阵辐射加热装置由石英灯阵、固态继电器、温度传感器、NI 采集卡、弧形安装支架等组成, 加热装置如图 2 所示。为确保能可靠地将波纹管加热到目标温度, 结合波纹管的几何尺寸, 选用 12 根额定功率为 1 500 W、长 400 mm、管径 15 mm 的碳纤维石英灯作为辐射热源。将石英灯以并联的方式, 分别安装在两个弧形安装支架上, 形成石英灯辐射加热模块, 为波纹管工装营造所需的高温环境。为提高辐射加热的热效率, 选用耐 1 300 ℃ 的 310S 不锈钢板作为石英灯固定板, 进行单侧抛光并加工成弧形安装支架。在石英灯辐射加热模块的保温隔热方面, 设计有金属隔热板, 并在石英灯固定板与金属隔热板中间填充有硅酸铝材料制作的隔热层, 防止强辐射损伤其他试验设备及人员。

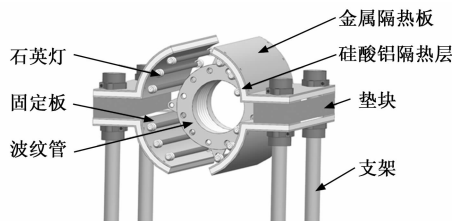


图 2 加热装置示意图

温度传感器是加热装置中用来测量金属波纹管试件实际环境温度的部件。为实现金属波纹管的精确控温, 采用热电偶进行温度检测, 通过 NI 多功能数据采集卡 (USB-6002) 进行实时数据采集。温度传感器选用镍铬-镍硅 K 型热电偶温度传感器, 测温范围为 -200~1 300 ℃, 其电阻值会随环境温度变化而改变。为使 USB-6002 能可靠、有效地采集温度信号, 选用 HT-010 智能温度变送器对热电偶的输出信号进行转换与放大处理后输入 USB-6002 的模拟输入通道 (AI)。

因 USB-6002 的输出驱动电压/电流较小无法直接驱动固态继电器控制石英灯辐射加热装置的通电状态, 设计的功率驱动放大电路如图 3 所示。

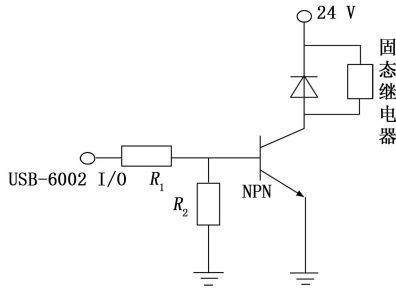


图 3 功率放大电路

2.2 振动激励采集子系统

2.2.1 试验工装

波纹管通过基架安装在试验平台上，其一端法兰通过螺栓固定于基架侧面，基架上加工有不同高度的通孔以满足不同尺寸的波纹管试件。为了测得高温环境下传递至安装基架的 3 个方向加速度响应信号，在基架背面装有陶瓷转接头以避免加速度传感器直接受热超出其正常工作温度范围。

当系统需要轴向激励时，激振器将通过 T 型螺栓固定在升降台上，升降台用专用金属压板完全锁在 T 型槽平台上，同时调节激振器两侧螺丝，使激振杆沿轴向放置。在进行试验之前，需要通过改变升降台的高度以来调整激振杆与波纹管之间的预紧力，保证两者受迫共振时不会脱开。当系统需要径向激励时，激振器通过弹性绳悬置在试验平台上方，弹性绳由 304 长吊耳螺栓与激振器相连，同样需要调整位置来获得合适的预紧力以满足试验要求。

2.2.2 激励加载模块

选用杭州亿恒科技有限公司生产的 EJZK-50 型电磁激振器作为外部激励源，其最大激振力 ±500 N，最大幅值为 ±10 mm，频率范围在 5~2 kHz 之间。选用杭州亿恒科技有限公司生产的 E5978 型功率放大器对数据采集器信号源通道输出的振动激励信号进行功率放大以驱动激振器对波纹管施加目标外部激励，其最大功率为 1 500 VA、信噪比大于 90 dB，具有信号削波和过流保护等功能。

2.2.3 驱动信号与数据采集

为实时采集高温振动系统各传感器的信号，选用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 DH5922N 动态信号测试分析系统作为数据采集控制器。DH5922N 包含两个信号源通道、32 个数据采集通道，可实现多通道同步输出与采样。

2.2.4 传感模块

为实时获取金属波纹管的振动响应，选用江苏东华测试技术股份有限公司生产的 1A102E 型 IEPE 压电式加速度传感器，其灵敏度为 10.47 mV/g，测试量程为 ±500 g，正常工作温度为 -40~120 ℃。为避免弧形石英灯阵辐射加热过程中加速度传感器因超过温度工作区间而损坏，将加速度传感器经陶瓷转接头安装在波纹管安装基架的背面，一方面可避免直接热辐射，另一方面可避免波纹管与基架的

热传导。

动态力传感器用来测量激振器输出的外部激励力信号，并传递至数据采集器中，其安装在激振器与陶瓷激振杆之间。采用扬州一轩电子技术有限公司生产的 YD-303 压电式石英力传感器，其电荷灵敏度为 3.00 pC/N，测量范围为 ±2 kN，工作温度为 -40~150 ℃。

3 高温振动试验系统软件设计

3.1 LabVIEW 温度控制程序

LabVIEW 温度控制程序是热环境精确加载的核心，其控制思路为：通过试验工装上布置的温度传感器对金属波纹管温度进行实时监测控制，将实时温度值与目标温度、温度调节阈值进行对比，控制石英灯阵处于全功率加热、半功率加热、停止加热等状态的切换。为避免石英灯阵工作状态在目标温度点附近频繁切换，程序中设置了温度调节阈值。本系统中金属波纹管半功率加热为石英灯阵中每间隔一根石英灯管开启以获得更缓慢的温度变化，而全功率加热则所有石英灯管均开启。图 4 为所研制的弧形石英灯阵温控系统控制流程图。

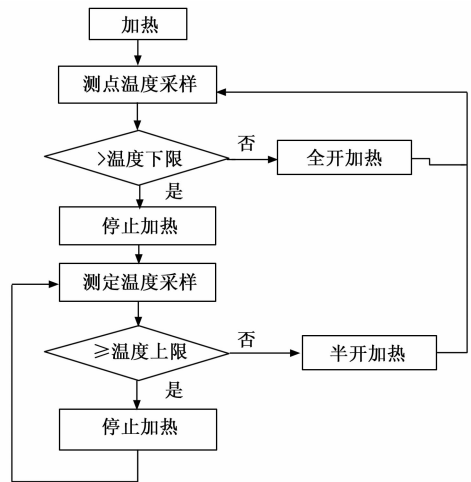


图 4 LabVIEW 温度控制程序

3.2 数据采集控制软件

数据采集软件的基本操作控制流程如图 5 所示。此软件的作用主要是发出激励信号，采集波纹管系统的振动响应反馈。首先，新建工程文件，选择采样频率、设置传感器通道测试类型、输入方式、不同传感器测量的物理量均有不同，并对其灵敏度进行设置；其次，设置信号源通道，输入所需的信号类型、幅值、相位角等参数；最后对激振力、振动加速度等信号进行实时显示，待信号稳定后设定存储规则，并对数据做频谱分析，输出图像、文本或 Excel 工作簿文件。

4 金属波纹管高温振动性能试验

为验证本文设计的试验系统是否能稳定地采集金属波纹管的动态响应信号，采用 DN108 的 U 型单层波纹管作为

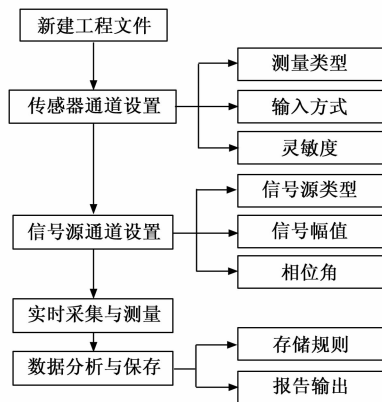
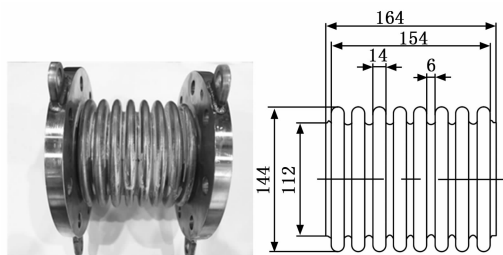


图 5 数据采集流程图

测试样件进行高温振动加载试验, 波纹管材质为 304 (06Cr19Ni10) 不锈钢, 波纹管段与管端法兰为缝焊焊接, 其实物图与尺寸如图 6 所示。



(a) 波纹管实物图 (b) 波纹管尺寸

图 6 DN108 波纹管实物及尺寸图

将被测金属波纹管试件安装在工装上, 试验系统实物如图 7 所示, 加速度传感器因隔热要求安装在肋板基架背后。测试其在 100 °C、200 °C、300 °C 的条件下, 作用径向正弦扫频激励 (扫频范围为 5~100 Hz, 扫频时间为 40 s) 时, 采集测点的振动加速度响应信号。

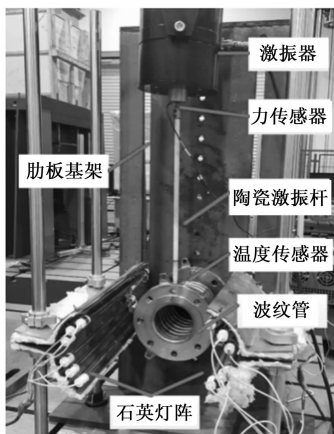


图 7 波纹管试验系统

测试过程中待金属波纹管的温度恒定在目标温度一段时间后, 才进行振动测试。实际测试过程中金属波纹管温度

随时间变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 所设计的温控程序能有效地控制弧形石英灯阵的工作状态以产生所需的高温环境。

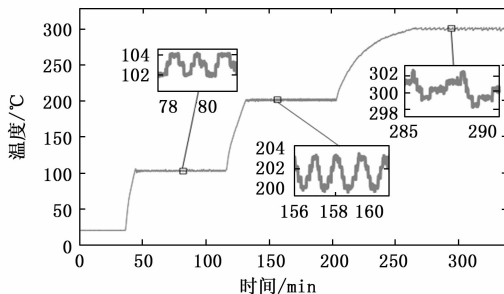


图 8 波纹管温度变化图

对采集到的各加速度传感器动态信号进行处理, 通过 FFT 变换后, 按公式 (1) 获得加速度级, 其频响曲线如图 9 所示。

$$L = 20 \lg a(\omega) + 120 \quad (1)$$

其中: L 为加速度级, $a(\omega)$ 为加速度频率响应。

由图 9 可以看出, 随着温度的升高, 各个方向的加速度响应均有增大, 这说明波纹管的薄壁结构对温度变化较为敏感, 波纹段在高温时有所软化, 故振动响应增大。该试验系统能稳定可靠地采集到波纹管加速度响应信号。

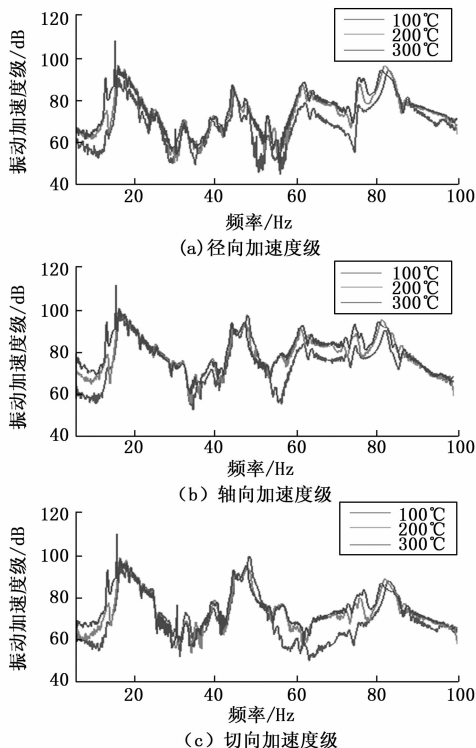


图 9 加速度级频响曲线

5 结束语

本文对现有的金属波纹管的振动试验进行研究分析, 研制了一套低成本、环境温度可调的新型金属波纹管高温

振动试验系统。该测试系统可以通过程序控制环境温度,在径向和轴向作用激振力,模拟不同振动环境,实时采集试件的动态响应信号,并进行频响分析,填补波纹管热振试验部分的空白。以 DN108 不锈钢波纹管为例,测试其在不同温度的振动响应。在实际测试使用时,系统稳定性良好,各模块及工作组件均能正常工作,能够满足试验的测试需求,在研究波纹管高温振动特性方面打下试验基础,并为波纹管高温振动测试系统的研制提供参考。

参考文献:

- [1] MUSILOVA V, KRALIK T, HANZELKA P, et al. Effect of different treatments of copper surface on its total hemispherical absorptivity bellow 77 K [J]. *Cryogenics*, 2007, 47 (4): 257 - 261.
- [2] OMAN S, NAGODE M, FAJDIGA M. The material characterization of the air spring bellow sealing layer [J]. *Materials&Design*, 2009, 30 (4): 1141 - 1150.
- [3] PRASANNA N K J, JOHNS K S, SARATHI J R K, et al. Effect of design parameters on the static mechanical behaviour of metal bellows using design of experiment and finite element analysis [J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 2017, 11 (3): 535 - 545.
- [4] LEE D, PARK G, HAN J. Experimental study on on-orbit and launch environment vibration isolation performance of a vibration isolator using bellows and viscous fluid [J]. *Aerospace* (上接第 227 页)
- [6] 杨文轮. 无线传感器网络的分布式时钟同步算法 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [7] LI F, HE G, WANG X. An improved hybrid time synchronization approach in wireless sensor networks for smart grid application [C] // 2015 IEEE 17th International Conference on High Performance Computing and Communications, 2015 IEEE 7th International Symposium on Cyberspace Safety and Security, and 2015 IEEE 12th International Conference on Embedded Software and Systems, 2015: 798 - 801.
- [8] 华威. 无线传感器网络时间同步算法的研究和应用 [D]. 山东: 中国石油大学(华东), 2017.
- [9] LI X, CHANG C, GAO W. Clock synchronization method for star-structure wireless sensor network [C] // 2010 International Conference on Computational Aspects of Social Networks, 2010: 603 - 606.
- [10] 夏腾飞. 无线传感器网络时间同步算法研究 [D]. 合肥: 安徽大学, 2018.
- [11] 张天禹. 无线传感器网络时间同步算法研究 [D]. 吉林: 长春理工大学, 2017.
- [12] 柯磊. 无线传感器网络时间同步算法研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2015.
- [13] LIU W X, LIANG D D, LUO R D et al. Application strategy of Beidou and GPS signals in regional high-precision time synchronization [C] // 2018 International Computers, Signals and Systems Conference (ICOMSSC), 2018: 886 - 891.
- [5] KARIMIASL M, EBRAHIMI F, MAHESH V. Nonlinear forced vibration of smart multiscale sandwich composite doubly curved porous shell [J]. *Thin-Walled Structures*, 2019, 143 (106152SI).
- [6] 杨明辉. 流固耦合下多层波纹管等效阻尼的研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2012.
- [7] 赵培, 马伟, 余永健, 等. 多层波纹管动态刚度的影响因素研究 [J]. *压力容器*, 2012, 29 (1): 11 - 15.
- [8] 刘永刚, 司东宏, 马伟, 等. 流固耦合下含夹层阻尼的多层金属波纹管刚度和阻尼研究 [J]. *机械工程学报*, 2014, 50 (5): 74 - 81.
- [9] 陆永超. 多层波纹管等效阻尼的影响因素及其作用规律研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2011.
- [10] 刘江. 管路用多层 U 形波纹管结构参数对性能影响研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [11] GAWANDE S H, PAGAR N D. A combined numerical and experimental investigation on the effect of dynamics characteristics of metal expansion bellows [J]. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 2018, 6 (5): 401 - 416.
- [12] 肖坤, 白鸿柏, 薛新, 等. 高温管路包覆金属橡胶耗能特性及参数识别 [J]. *兵器材料科学与工程*, 2019, 42 (1): 11 - 17.
- [13] 吴大方, 赵寿根, 潘兵, 等. 高速巡航导弹翼面结构热-振联合试验研究 [J]. *航空学报*, 2012, 33 (9): 1633 - 1642.
- [14] ZHANG H, YAO J M, YANG H Z, et al. Beidou RNSS timing technology and application in smart grid lightning locating system [C] // 2018 IEEE 4th Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC), Chongqing, 2018: 1372 - 1377.
- [15] 石磊, 孙祥福, 李腾. 北斗授时原理及终端性能检测技术 [J]. *环境技术*, 2017, 35 (2): 11 - 14.
- [16] 苏文剑. 北斗/GPS 授时技术的研究与实现 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2014.
- [17] 王睿. 北斗/GPS 综合授时技术研究与实现 [D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [18] 王天. 北斗卫星导航系统授时性能评估研究 [D]. 陕西: 长安大学, 2014.
- [19] 王文瑜. 基于北斗卫星的授时系统研制 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2008.
- [20] WANG Q, et al. Application of Beidou satellite timing and communication technology in power system fault location [C] // 2015 5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT), 2015: 1224 - 1230.
- [21] 覃秀英. 无线传感器网络中低开销的时钟同步算法研究 [D]. 桂林: 桂林电子科技大学, 2012.