

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2016.01.014

# 基于热电偶的爆炸场温度补偿方法 及其 LabVIEW 实现\*

王 瑞 张志杰 李岩峰 夏永乐 贾振华

中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室(山西太原,030051)

[摘 要] 在爆炸场瞬态高温测试过程中,由于热电偶的动态特性较差,使得测试结果存在较大动态误差。针对该问题,应用了以大功率激光器为热源的可溯源动态校准系统,对热电偶传感器进行动态校准,分析其动态特性;在此基础上,运用 MATLAB 和量子粒子群优化(QPSO)算法设计动态补偿滤波器,试验验证了动态补偿的有效性;通过 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程,最终在 LabVIEW 平台上实现对热电偶输出的动态补偿。结果表明,补偿后的热电偶响应速度加快,爆炸场温度补偿结果可信。

[关键词] 温度测试;动态校准;动态补偿滤波器;LabVIEW

[分类号] TQ56;TP274

## 引言

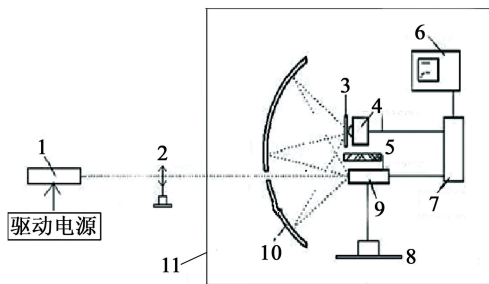
温压武器利用瞬态高温和冲击波效应产生杀伤效果,虽然目前毁伤研究仍集中在冲击波方面,但其爆炸温度测试也非常必要。爆炸时高温、高压、高冲击的恶劣环境及高温变化的瞬态过程,使得爆炸瞬态高温测量技术难度增大,而且常用的非接触式测温法存在很大的测试误差<sup>[1-3]</sup>。因此,选用接触式的 C 型热电偶与 LabVIEW 组建的瞬态温度储存测试系统来实现爆炸场温度测试。由于热电偶的热惯性,导致其在瞬态温度测量领域中存在动态误差,需对其进行动态校准<sup>[4-5]</sup>,由此得到热电偶传感器的动态特性及动态性能指标,并通过串联量子粒子群优化(QPSO)算法设计的动态补偿滤波器来改善其动态特性,以减小其测量动态误差。

在测试系统的上位机控制及数据处理中,选用 LabVIEW 开发平台与 MATLAB 相结合,充分利用 LabVIEW 数据采集、控制、分析、显示等友好人机交互优点<sup>[6-7]</sup>,以及 MATLAB 强大的数据运算和处理能力,通过 LabVIEW 调用 MATLAB Script 节点或 COM 组件技术进行 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程,共同实现数据补偿处理。

## 1 热电偶动态校准及建模

### 1.1 动态校准原理

应用一种表面温度可溯源的动态校准系统对 C 型热电偶进行动态校准。图 1 为动态标准系统的结



- 1 - 半导体激光器;2 - 980 nm 聚焦镜;3 - 快门;  
4 - 红外探测器;5 - 隔热块;6 - 数据采集卡;  
7 - 前置电路;8 - 可多维调节架;9 - 热电偶;  
10 - 球面反射镜;11 - 校准屏屏蔽箱

图 1 动态校准系统结构

Fig. 1 Composition of dynamic calibration system

构图。

利用红外探测器频率响应远快于热电偶响应的特性来校准热电偶。热电偶传感器的可溯源动态校准过程主要包括 3 个部分:热电偶的静态校准、红外探测器的静态校准和热电偶的动态校准。首先应用检定炉对热电偶进行静态校准,得到温度-电压曲线,找出输入温度与输出电压的对应关系;然后进行红外探测器的静态校准,用已静态校准过的热电偶对红外探测器进行标定,利用大功率半导体激光器在不同功率下对被校热电偶表面进行加热,热电偶感受温度向内传热的同时,其感温面向外辐射热红

\* 收稿日期:2015-03-30

作者简介:王瑞(1988~),女,硕士,主要研究方向为毁伤性测试及信息处理。E-mail:wangrui8596@163.com

通信作者:张志杰(1965~),男,博导,教授,主要研究方向为测试计量技术与仪器,动态测试与校准技术。E-mail:zhangzhijie@nuc.edu.cn

外信号,当达到热平衡时,迅速打开快门,红外探测器在快门打开瞬间接收由球面反射镜聚焦的红外辐射信号<sup>[8]</sup>,由获得的红外探测器温度-电压曲线来实现温度可溯源量值传递;最后通过热电偶的动态校准,利用激光器产生一定脉宽的脉冲信号,得到如图 2 所示的红外探测器和被校热电偶温度-时间曲线图,目的是为得到被校热电偶的时间常数,即热电偶的响应时间。

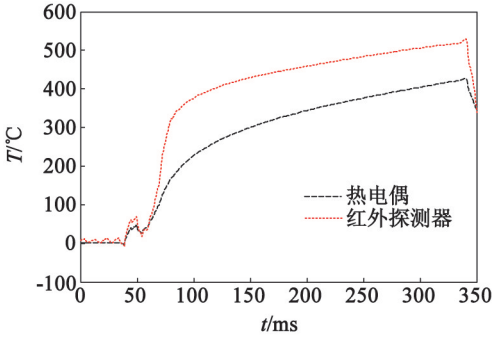


图 2 热电偶和红外探测器的信号曲线

Fig. 2 Response curves of thermocouple and infrared detector

图 2 所示,红外探测器及热电偶曲线均未达到平衡,故若以峰值的 63.2% 时刻来计算热电偶的响应时间会带来误差。采用归一化的方法,即热电偶的输出值与红外探测器的输出值相比,认为红外探测器的值为真值,当热电偶的输出值达到红外探测器同一时刻输出值的 63.2%,且逐渐逼近 1 时,用此时刻来计算热电偶的时间常数。由于激光驱动器的原因,舍弃校准曲线前半部分的小尖峰。起始时刻为第二次加热开始时刻。归一化曲线如图 3 所示,可得 C 型热电偶的时间常数约为 50 ms。

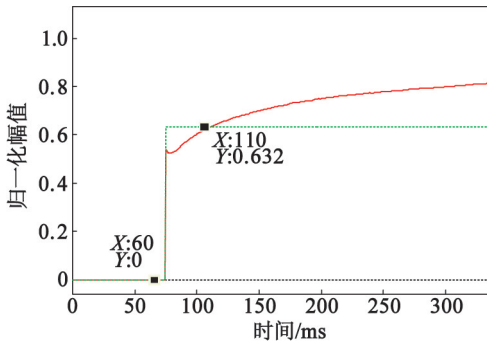


图 3 归一化法时间常数曲线

Fig. 3 Time constant curve of the C-type thermocouple with normalization method

## 1.2 动态补偿滤波器设计

选取图 2 中曲线上升部分来建立热电偶的动态补偿滤波器,进而改善热电偶的动态特性,来获取准确的测试结果。采用系统逆建模方法,将动态校准

的被校热电偶数据作为补偿滤波器的输入,红外探测器数据作为补偿滤波器的输出,应用 QPSO 算法计算 C 型热电偶动态补偿滤波器模型系数,建立补偿滤波器模型<sup>[9]</sup>,具体原理如图 4 所示。

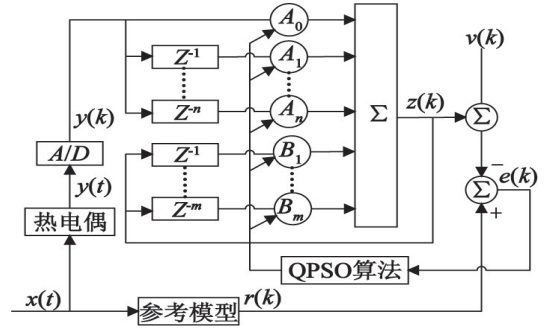


图 4 基于 QPSO 算法的动态补偿原理图

Fig. 4 Principle diagram of dynamic compensation based on QPSO

图 4 中, $x(t)$  为热电偶输入, $y(k)$  为热电偶数字输出, $r(k)$  为期望的模型输出, $z(k)$  为经动态补偿滤波器补偿后的输出, $e(k)$  为动态补偿误差, $v(k)$  为均匀随机噪声信号。

为了使动态补偿误差  $e(k)$  尽可能地小,即补偿后的输出  $z(k)$  尽可能地逼近期望的模型输出  $r(k)$ ,可以通过 QPSO 算法不断调整动态补偿滤波器模型系数来调整  $z(k)$  实现。补偿输出为:

$$z(k) = (A_0 + A_1 z^{-1} + \dots + A_n z^{-n}) y(k) - (B_1 z^{-1} + \dots + B_m z^{-m}) z(k) + v(k) \quad (1)$$

式中: $m, n$  为动态补偿滤波器的阶次; $A_0, \dots, A_n$  和  $B_0, \dots, B_m$  均为滤波器系数。

动态补偿滤波器模型系数矩阵  $x$  构成 QPSO 算法中的粒子:

$$x = [A^T, B^T]^T = [A_1^T \dots A_n^T, B_1^T \dots B_m^T]^T \quad (2)$$

为评价每一个粒子位置的优劣,以  $e(k)$  的最小均方误差  $J$  为适应度值进行评定:

$$J = \frac{1}{N} \times \sum_{k=0}^N e(k)^2 = \frac{1}{N} \times \sum_{k=0}^N [r(k) - z(k)]^2 \quad (3)$$

式中: $N$  为采样点数。

在 QPSO 算法中,粒子位置的更新公式如式(4)所示:

$$x_{i,j}(t+1) = p_{i,j}(t) \pm \beta \cdot |m_j(t) - x_{ij}(t)| \cdot \ln[1/u_{i,j}(t)] \quad (4)$$

式中: $p$  为粒子的当前最优位置; $\beta$  为扩张-收缩因子; $m$  为所有粒子个体最好位置的平均; $u$  为区间  $(0, 1)$  上的均匀分布随机数。

QPSO 算法具有收敛速度快、全局搜索能力强

的特点,应用该算法在 MATLAB 上对动态补偿滤波器进行建模计算,使补偿后的热电偶输出更好地逼近作为期望的红外探测器输出,如图 5 所示。可以看出,该补偿滤波器有效地改善了被校热电偶传感器系统特性引起的动态误差,提高了热电偶在温度测量过程中的精度。

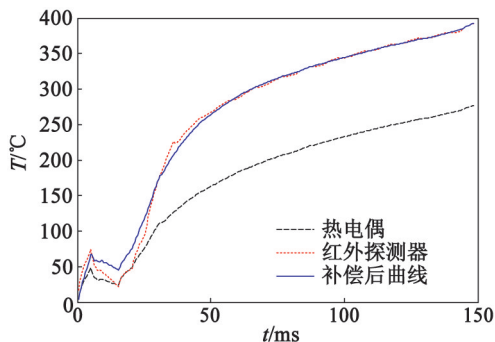


图 5 热电偶传感器动态补偿结果

Fig. 5 Dynamic compensation results of the thermocouple

## 2 软件动态补偿实现方法

上述热电偶动态补偿滤波器模型是在 MATLAB 上建立的,因为 QPSO 算法建模过程中,计算量大且程序复杂,所以为提高编程效率和方便用户操作,将 MATLAB 上建模获得的模型及参数编辑成 M 文件,通过 LabVIEW 平台调用 M 文件来显示数据动态滤波补偿结果。采用 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程方法,实现双方优势互补。LabVIEW 能够进行网络通信,设计友好人机交互界面,连接控制硬件系统数据采集;MATLAB 能在后台提供完备的工具箱和大型复杂算法给 LabVIEW,使其也拥有了强大的数据分析和处理能力。这种程序调用方法有很多,如可使用动态链接库(DLL)、动态数据交换(DDE)技术、MATLAB Script 节点、ActiveX 函数模板、Mathscript 节点、COM 组件技术等。其中 DLL 技术、Mathscript 节点和 COM 组件技术可以脱离 MATLAB 工作环境,实现用户应用程序的独立发布<sup>[11]</sup>。以下将介绍 LabVIEW 调用 MATLAB Script 节点和 COM 组件技术对已采集到的数据进行动态补偿的两种实现方法。

### 2.1 调用 MATLAB Script 节点

MATLAB Script 节点尽管不能脱离 MATLAB 环境独自运行,但它是最简单、方便、快捷的方法。首先,用户可以在 MATLAB Script 节点中编辑 MATLAB 程序或直接导入 M 文件;然后右键单击节点边框可添加输入和输出变量;最后设置变量数据类型并保证与 MATLAB 数据类型匹配,这样才能使数据交换顺利进行,如图 6 所示。此方法需注意 MAT-



图 6 MATLAB Script 节点程序框图

Fig. 6 Program block diagram of MATLAB Script node

LAB Script 节点运行时必定伴随 MATLAB 界面打开,这就会对前台程序运行造成一定干扰。

### 2.2 调用 COM 组件技术

COM 组件技术不仅能使用户脱离 MATLAB 环境干扰,同时也优化内存。首先,在 MATLAB 窗口中输入 mbuild-setup 命令,按照提示逐步设置,选择 C++ 编译器,再运行 deploytool 工具,新建工程,编译并打包 M 文件,生成 COM 组件<sup>[10]</sup>。然后,运行 COM 组件文件夹中的 \_install.bat,点击确定,将组件成功地注册到计算机内,此时已进入 LabVIEW 的 Active 对象库中。最后,通过 LabVIEW 中 Active 操作函数打开自动化(automation open)控件,再从对象列表中选择自己生成的 buch\_1\_0.dll 组件,添加到 LabVIEW 程序中,完成 COM 组件调用,如图 7 所示。此方法虽初始化时间要比 2.1 的方法时间稍长,但适用于规模较大、性能要求较高的 LabVIEW 应用程序<sup>[11-12]</sup>。

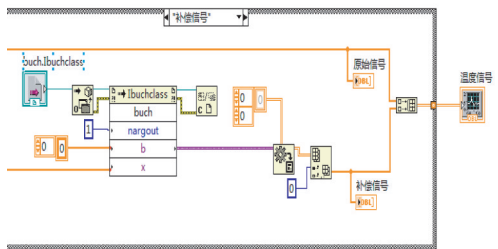


图 7 COM 组件调用程序框图

Fig. 7 Program block diagram of calling COM component

## 3 试验验证及分析

测试过程中,试验样品为 TNT,质量 6 kg,分别将 4 套测试节点按半径为 3 m 布置于爆炸中心周围。为防止爆炸冲击损坏装置,将测试系统的采集储存节点埋于地下,而热电偶及补偿导线置于地面的圆柱形防护套管中,保护套管起到安装固定和保护的作用。测试数据通过无线 WiFi 和有线 USB 接口两种方式传输到计算机中,并在 LabVIEW 上进行显示处理,其中无线中继站布置在离爆心 200 m 处,



无线主控端同计算机一起布置到 1 800 m 处,如图 8 所示。为避免数据丢失以及节省爆炸现场读数时间,选用 USB 数据传输方式。通过 LabVIEW 调用 COM 组件技术实现数据的滤波补偿。

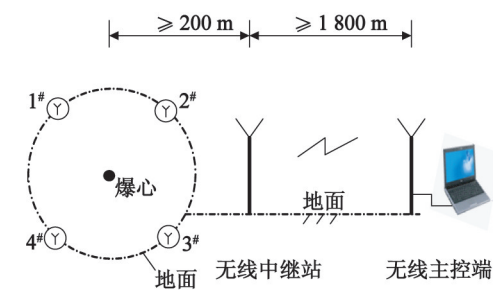


图 8 爆炸场测试节点布置图

Fig. 8 Layout of test nodes in explosion field

由试验结果验证补偿方法的可行性及有效性,依据相同算法获得每个热电偶的模型参数,将这些参数模型集中到 LabVIEW 动态特性修正库里。每读一个热电偶采集到的数据,即可从库里选择与其对应的模型参数获得补偿结果。

表 1 是炸弹爆炸后 4 套设备的实测结果与补偿结果,可以看出,每套设备的补偿温度相比于实测温度分别提高了 186、176、170 ℃ 和 152 ℃,提高的温度彼此间偏差均值为 18 ℃,说明基于统一算法的补偿结果比较稳定,受环境因素影响小。由于 TNT 炸药点源爆炸的特征,爆炸结束后,温度迅速降低,高温区域小、持续时间短。表 1 中最高补偿温度为 475 ℃,补偿效果与文献[13]的结果比较接近。

图9是爆炸场测试点1#获得的瞬态温度值与表 1 测试与补偿结果

Tab. 1 Test and compensation results

设备号	半径 /m	实测温度/℃	补偿温度/℃
1#	3	289	475
2#	3	253	429
3#	3	245	415
4#	3	228	380

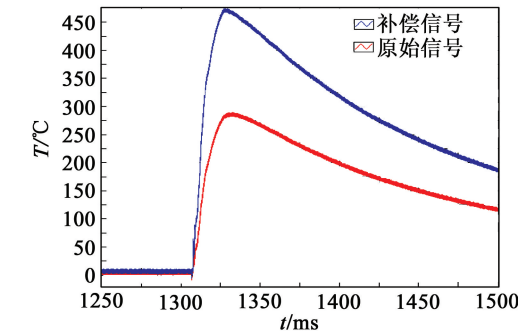


图 9 动态温度补偿结果

Fig. 9 Results of dynamic temperature compensation

修正值,可以看出补偿后热电偶传感器的动态响应得到明显改善,说明此补偿方法可行。

4 结论

1)利用可溯源动态校准系统对 C 型热电偶进行动态校准,了解了热电偶动态响应性能,获得了时间常数以及动态补偿数据。在此基础上运用 QPSO 算法在 MATLAB 中建立了动态滤波补偿器模型,减小了热电偶动态响应误差。

2)避免在 MATLAB 中反复建模,方便用户使用,将建模获取的热电偶补偿模型参数集成到 LabVIEW 动态特性修正库中,可以直接改善热电偶响应特性,从而提高了测试系统滤波补偿的灵活性,简化了数据处理过程,缩短了测量系统的开发周期。

3) LabVIEW 动态特性修正库是基于 LabVIEW 与 MATLAB 混合编程技术,使用 MATLAB Script 节点便于程序的及时修改和更新;使用 COM 组件技术能够摆脱 MATLAB 干扰,有利于独立程序发布。两种调用方法综合不同应用需求,合理选择。

4)基于 LabVIEW 构建的智能化测试系统,操作过程简单快捷,既能节省大量投资,又能便于系统更新和功能扩充,对于爆炸场温度测试及应用热电偶进行瞬态温度测试领域具有一定借鉴意义和工程实用价值。

参考文献

[1] 韩早,王伯良,李席.全密闭空间内温压炸药的冲击波参数试验研究[J].爆破器材,2015,44(1):20-23.  
HAN Z,WANG B L,LI X. Experimental study on shock wave parameters of thermobaric explosive in fully enclosed space[J]. Explosive Materials,2015,44(1):20-23.  
[2] 王代华,宋林丽,张志杰.基于钨铼热电偶的接触式爆炸温度测试方法[J].探测与控制学报,2012,34(3):23-28.  
WANG D H,SONG L L,ZHANG Z J. Contact measuring method of explosion temperature based on tungsten-rhenium thermocouple[J]. Journal of Detection & Control, 2012, 34(3): 23-28.  
[3] 杨磊,方建成,赵紫玉,等.基于 LabVIEW 的瞬态温度测试系统[J].仪表技术与传感器,2008(6):49-51.  
YANG L, FANG J C, ZHAO Z Y, et al. Transient temperature measurement system based on LabVIEW[J]. Instrument Technique and Sensor,2008(6):49-51.  
[4] 郝晓剑.瞬态表面高温测量与动态校准技术研究[D].太原:中北大学,2005.  
HAO X J. Transient high surface temperature measurement and dynamic calibration[D]. Taiyuan: North University of China,2005.  
[5] ARWATZ G, BAHRI C, SMITS A J, et al. Dynamic

- calibration and modeling of a cold wire for temperature measurement [J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12):125301.
- [6] 李飞,郑恒. LabVIEW 与 MATLAB 混合编程在数字天线阵列测试中的应用 [J]. 电子工程师,2007,33(3):1-3.
- LI F, ZHENG H. Application of composite programming of LabVIEW and MATLAB to test of digital antenna array [J]. Electronic Engineer,2007,33(3):1-3.
- [7] 靖苏铜,赵福堂. 基于 LabVIEW 的热电偶温度测量系统 [J]. 仪器仪表标准化与计量,2005(6):37-39.
- JING S T, ZHAO F T. Thermocouple temperature measure system based on LabVIEW [J]. Instrument Standardization and Metrological,2005(6):37-39.
- [8] 吕鹏飞,裴东兴,沈大伟. 基于 K 型热电偶的瞬态测温技术的研究 [J]. 传感技术学报,2014,27(6):775-780.
- LÜ P F, PEI D X, SHEN D W. The research of transient thermometry technology based on K-style thermocouple [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators,2014,27(6):775-780.
- [9] 吴健,赵德光,张志杰. 基于神经网络的传感器动态补偿算法及 DSP 实现 [J]. 计算机测量与控制,2011,19(5):1239-1241,1245.
- WU J, ZHAO D G, ZHANG Z J. Dynamic compensation of sensors algorithm based on neural network and its realization based on DSP [J]. Computer Measurement & Control,2011,19(5):1239-1241,1245.
- [10] 宋广东,王昌,王金玉,等. 基于 DLL 技术和 COM 组件技术实现 LabVIEW 和 MATLAB 混合编程 [J]. 计算机应用与软件,2013,30(1):287-289.
- SONG G D, WANG C, WANG J Y, et al. Implementing mixed programming with LabVIEW and MATLAB based on DLL technology and COM component technology [J]. Computer Application and Software,2013,30(1):287-289.
- [11] 姚娟. 基于无线网络的分布式测试系统软件平台设计 [D]. 太原:中北大学,2013.
- YAO J. The design of software platform of distributed measurement system based on WLAN [D]. Taiyuan: North University of China,2013.
- [12] 黄世奎,彭宇宁,谢树平,等. LabVIEW 与 Matlab/Simulink 混合编程方法及应用 [J]. 实验室研究与探索,2009,28(7):67-71.
- HUANG S K, PENG Y N, XIE S P, et al. Methods and application of mixed programming with LabVIEW and Matlab [J]. Research and Exploration in Laboratory,2009,28(7):67-71.
- [13] 闫潇敏,苏健军,李芝绒,等. 坑道内温压炸药的爆炸热效应研究 [J]. 火工品,2015(1):22-25.
- YAN X M, SU J J, LI Z R, et al. Experimental study on explosive thermal effect of thermal-baric explosives in tunnel [J]. Initiators & Pyrotechnics,2015(1):22-25.

## Temperature Compensation and Its LabVIEW Implementation of Explosion Field Based on Thermocouple

WANG Rui, ZHANG Zhijie, LI Yanfeng, XIA Yongle, JIA Zhenhua

Key Laboratory of Instrumentation Science & Dynamic Measurement of Ministry of Education,  
North University of China (Shanxi Taiyuan, 030051)

[ABSTRACT] During measuring transient high temperature of explosion field, aiming at the problem that the poor dynamic characteristics of thermocouples results in a big dynamic error of test results, the traceable dynamic calibration system was used to perform dynamic calibration of thermocouples by selecting a high-power semiconductor laser as heat source, and its dynamic characteristics were analyzed. With the quantum-behaved particle swarm optimization (QPSO) algorithm on MATLAB platform, a model of dynamic compensation filter is established, and the effectiveness of the dynamic compensation was verified by experiment. Finally, the compensation values of thermocouple were displayed by LabVIEW, basing on the mixed programming of LabVIEW and MATLAB. The experiment results show that the compensated thermocouple has ideal dynamic response characteristics, and the temperature compensation of the explosion field is reliable.

[KEY WORDS] temperature test; dynamic calibration; dynamic compensation filter; LabVIEW