

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2212051

一种基于FPGA的瞬态温度采集系统设计

王志超 张志杰 张秋宁

(中北大学仪器科学与动态测试教育部重点实验室仪器与电子学院 太原 030051)

摘要: 为了实现爆炸温度场恶劣环境下的温度准确测量,设计了一种以FPGA作为微控制器、铠装热电偶为测温元件的温度数据采集存储系统。其坚固的防护结构与热电偶不锈钢铠装使系统在爆炸场拥有极强的生存能力。参数可编程、可多次触发的设计使系统具有灵活、可靠的优点。针对热电偶动态响应不足的问题,使用粒子群算法完成了动态补偿滤波器设计并将其集成到上位机软件中,实验结果表明系统平均静态误差为1.43%,动态误差不超过6.4%。

关键词: 热电偶;接触式测温;FPGA;动态校准;PSO

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Contact temperature measurement system based on FPGA

Wang Zhichao Zhang Zhijie Zhang Qiuning

(Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of Ministry of Education, School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: To achieve accurate temperature measurement in the harsh environment of an explosive temperature field, we designed a temperature data acquisition and storage system. The system uses an FPGA as a microcontroller and armored thermocouples as temperature measurement elements. Its rugged protective structure and stainless steel armor of thermocouple make the system highly survivable in the explosion field. The system has a parameter programmable and multi-triggerable design, making it flexible and reliable. To address the problem of insufficient dynamic response of the thermocouples, we completed the dynamic compensation filter design using particle swarm algorithms and integrated it into the upper computer software. The experimental results show that the system has an average static error of 1.43% and a dynamic error that does not exceed 6.4%.

Keywords: thermocouple; contact temperature measurement; FPGA; dynamic calibration; PSO

0 引言

现代战争中,远程打击及高效的毁伤成为了各国争相发展的重要技术,而云爆弹等武器可以对人员及设施造成有效打击的武器,产生的爆炸温度场具有温度变化快,覆盖面积大,伴有高压高速气流,具有较强毁伤作用的特点^[1-2],传统的温度测试手段因为精度、生存性差等原因而不适用于爆炸场温度的测量。

传统的温度测试方法分为接触式与非接触式两大类,接触式的测温方法包括膨胀式测温、电量式测温、接触式光电、热色测温几类^[3]。接触式的温度测量方法温度传感器能与爆炸火球、气流直接接触,可以更为精确地获取其温度参数^[4]。由于热电偶传感器无论是其测温范围还是响应时间都优于热敏电阻测温,因此本系统选择了热电偶测温的方式。

现有的爆炸场接触式温度采集系统存在多方面不足,一些测试系统需要布置电缆和导线才能工作,这种方法虽然可以实时进行采集数据,在爆炸场中电缆与导线容易断裂,同时现场的布设工作会很繁琐^[5],采用触发采集的存储测试技术可以解决此类问题;有的测试系统的热电偶在爆炸场中的生存性与动态特性无法很好兼顾^[6],可以采用铠装热电偶加软件补偿的方式满足要求;还有些测试系统存在参数固定或调整范围小、便携型与测试效率差、无法消除动态误差带来的影响以及动态补偿补偿需要依赖后续处理等不足^[7-9],可以借助参数可编程的设计思路 and 上位机嵌入补偿算法的方式来弥补这些短板。本文设计了一种适用于爆炸场的铠装热电偶,同时在基于FPGA硬件系统中实现了多参数可配置功能,在系统上位机软件中集成了动态补偿算法,能满足各种爆炸场的温度采集需求。

收稿日期:2022-11-12

1 测试系统组成与原理

1.1 系统的总体设计

本文针对于爆炸温度场的瞬态温度测量,应用热电偶测温技术,设计并制作了一种接触式温度测试系统。该系统以 FPGA 芯片为控制核心,将热电偶温度传感器测得的温度信号经由 AD 转换电路采集,经过滤波后将信号存储到 SDRAM 中,最后通过上位机程序进行读取信号与集成数字芯片 DS18B20 采集到的冷端温度信号,在上位机中完成冷端补偿。系统的设计框图如图 1 所示。

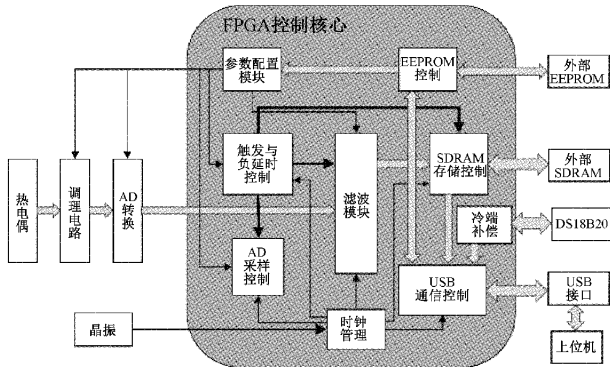


图 1 测试系统总体设计图

本系统由传感器、硬件电路、上位机软件三大部分组成,其中系统的硬件电路部分可以分为供电模块、信号调理模块、A/D 采集模块、外部 16M SDRAM、外部 EEPROM、FPGA 控制核心模块以及 USB 接口模块。硬件选型如下:程控放大 AD8231 芯片、DS18B20 数字温度传感器、Sparten6 系列的 XC6SLX150 芯片、模数转换器 AD7482 芯片等。

为了抵御爆炸时强冲击波强电磁干扰等恶劣环境的干扰,加固了测试系统的防护结构,最终制作完成的接触式温度测试系统实物图如图 2 所示。

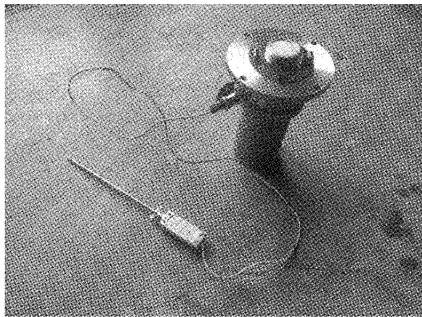
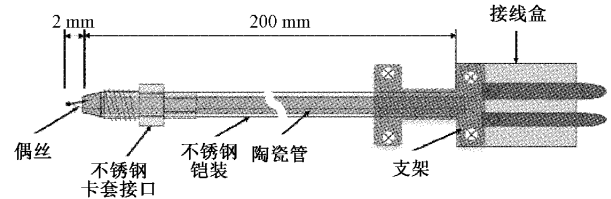


图 2 测试系统总体实物图

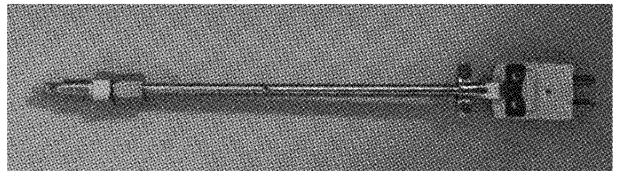
1.2 铠装热电偶设计及工作原理

本文选用了 K 型、C 型两种不同量程的偶丝制备铠装热电偶。K 型热电偶成本低但量程较小,适用于据爆心较远的点位或小药量爆炸温度测量;C 型的成本高,但其量程较大,在实验中可以将混合使用两者,降低成本。

为了提升在高温、高压和高冲击等恶劣爆炸场测试环境中的生存性,设计了一种成本低且动态性能优秀的铠装热电偶。总体设计如图 3 所示。热电偶偶丝被固定在双孔陶瓷管中。为了抵御爆炸场冲击,将陶瓷管插入不锈钢铠装中,使用高温水泥胶固定。把热电偶接在带有支架的接线盒中,并通过支架固定不锈钢铠装。在铠装上套上不锈钢卡套接头,方便实验现场的安装。



(a) 铠装热电偶设计图



(b) 铠装热电偶实物图

图 3 铠装热电偶设计图与实物图

区别于大多数将偶结密封在铠装套管中的设计,本设计选择将热电偶裸露,目的是使偶结直接与爆炸火球接触,以实现更佳的动力性能,最大限度的避免动态误差。同时应该保证每支热电偶偶结相对位置固定,以确保每支铠装热电偶的动力性能一致性。

1.3 接触式温度测试系统上位机软件设计

为了实现测试系统的参数设置、数据读取等操作,设计了基于 Labview 开发平台的上位机软件。上位机软件是整个测试系统的入口,通过上位机可以实现测试系统的采、存、读一体化控制,上位机与测试系统的工作状态密切相关。

上位机设计遵循了操作简便、运行流畅的原则,主界面包括系统复位、参数设置、软件触发、读取数据、数据处理功能。可通过上位机完成采样频率、数据长度、放大倍数、触发电平等参数的设置。

本系统通过硬件与软件的结合实现数据的处理,在上位机软件侧嵌入了 matlab 代码,实现了信号的二次滤波、电压值转换温度值、以及系统中关键的动态补偿,最后将数据显示在上位机软件的面板,并将其保存。上位机面板如图 4 所示。

2 关键技术

2.1 参数可配置

通过 FPGA 内的参数配置模块与各个执行模块的参数可配置设计的结合,使得本系统可根据不同的参数配置,执行不同的采集方案。参数配置模块将预先被用户通过

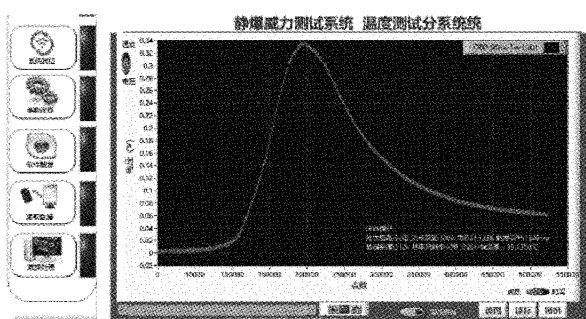


图4 上位机面板

USB 总线存储在 EEPROM 中的参数读取,并且将其分配给其他执行模块。可配置的参数有单次采样长度与负延时长度、增益放大倍数、采样频率、触发电平、触发次数与滤波截止频率,这些可配置的参数组合使得系统能够满足各种测量需求。

1)增益放大倍数可配置

放大倍数可调通过调理电路中的 ADI 公司产品程控放大器 AD8321 实现,该模拟芯片可根据 3 个引脚 A0、A1、A2 的高低电平组合来实现八种放大倍数,带宽为 1 M,满足测试系统的需求。采用通过 FPGA 控制调理电路的方式实现增益配置。系统选用的 K 型热电偶的输出电压最大为 54.86 mv,模数转换器 AD7482 的输入电压为 0~2.5 V,为了达到最佳的测量效果,需要可变增益放大^[10]。

2)采样频率可配置

采样频率根据 FPGA 内部的时钟分频方法实现。当 AD 完成一次数据转换后将 BUSY 位拉高并将数据送至数据总线,当 FPGA 检测到 BUSY 的上升沿后将数据总线上的数据存入 SDRAM,并继续等待下一个上升沿的到来,不断重复。AD 芯片的控制方式如图 5。

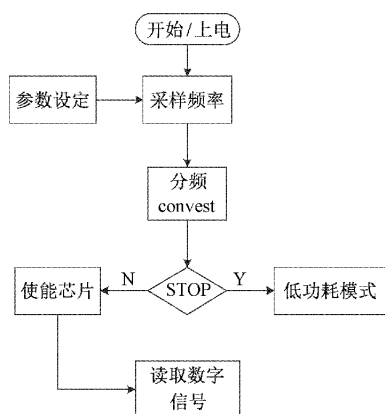


图5 AD控制流程

当参数配置信息送给 AD 采集模块时,其根据配置信息设置模块内部计数器的最大值,当计数器到达最大值时控制时序完成一次采样。本系统的采样频率有 100 k、500 k、1 M、2 M 四档可调,以适应不同的温度测试需求。

3)滤波截止频率可配置

爆炸场往往伴随着电磁等强干扰元素,给测试系统带来较大的影响,使得采集到的信号伴随着噪声干扰。过高的噪声不仅不利于对实验结果的分析,也对后续的动态补偿带来了挑战。因为动态补偿的本质就是对传感器带宽的拓展,是对较高频率信号的放大,较大的噪声不仅使补偿得不到预期的效果,反而使有用信号被噪声淹没^[11]。所以需要在补偿前对信号进行滤波。

为了能根据需求选择不同的通带截止频率,在 FPGA 中实现了参数可调的数字低通滤波器。首先在 MATLAB 软件的 FDATool 滤波器设计工具中,获取系统四种采样频率下 1 k、5 k、10 k 三种截止频率的 7 阶 IIR 滤波器参数,并将其量化获得滤波器参数。并考虑到有限字长效应,选择了级联型 IIR 滤波器并在在 FPGA 中实现了逻辑模块,该模块可根据不同的参数配置实现不同的滤波器截止频率或者选择不进行滤波。

4)数据与负延时长度可配置

传统的触发采集方案只能获得触发之后的数据,上升曲线存在缺失,影响测试结果。而通过负延迟模块可以使系统能够采集到触发时刻之前的一段数据,添加负延时设计能够使采集到的数据更加完整。

负延时模块的实现原理:当系统开始工作但未触发时,FPGA 在 SDRAM 的预设存储空间不断内循环写入采样数据,预设存储空间的大小为单次采样长度;当数据幅值上升直到满足触发条件后,负延时模块开始计数,此时刻之后写入的数据即为触发后数据;当计数器数值=总采样长度-负延时长度=触发后数据长度时,通知 SDRAM 读写模块停止写入数据。此时 SDRAM 内的数据即包含完整的负延时数据与触发后数据,且均与预设大小一致。本系统的参数配置模块将负延时与单次出发长度两条信息发送到负延时模块,负延时模块根据原理对模块内部计数器进行配置,即可实现数据与负延时的可配置。

当完成一次采样后,预设存储空间中数据的起始地址是随机的,如果按照地址顺序读取,则无法找到正确的数据起点,无法正常使用数据。按照上文的存储策略,每次触发后写入的最后一个地址的下一个地址即为数据的起始地址,将该地址存储在读写模块中,等待读命令到达时可以根据参数生成正确的读取顺序。

5)触发次数可配置

传统的爆炸场温度/压力存储测试系统一般只能单次触发,当测试系统误触发后,系统便丧失采集存储数据能力,不够可靠。多次触发设计充分利用了系统中的存储资源,可以实现连续多发炮弹的信号采集,大大提高了实验效率。

多次触发的实现方式:将 SDRAM 存储单元以单次测试的数据量为最小单位,将存储空间划分为多个区域,每个区域的大小与单次测试的数据量相等。每次触发后,便将

写入地址区域指定为下一个存储区域,直到最后一次触发,系统停止采集存储。触发次数与单次测试的数据量的关系必须满足此关系:存储器的容量≥触发次数×单次测试的数据量。在使用上位机设置参数时,如果不满足此条件,则会进行设置失败提示。本系统可以根据实验需求可设置为 1、2、4、8 次触发。

2.2 基于 PSO 的动态补偿滤波器设计

爆炸产生的高温高压高速流动气体会导致其难以准确测量,且热电偶自身物理性质热惯性会导致响应速度跟不上温度变化速度以致存在动态误差,因此需要对热电偶的动态性能进行改善。通常的方法有改进热电偶结构来减小偶结及比热容以及通过动态补偿滤波器拓宽温度传感器工作频带^[12-13]两种。其中使用动态补偿滤波器的方法易于实现、成本较低,已得到广泛应用。

对于热电偶这个研究对象来说,裸露的热电偶丝可以看做一个一阶的系统,而铠装热电偶则需看做一个二阶系统。而二阶系统的表征通常需要将输入与输出的关系构建成一个与动态响应相关的数学模型,并通过对模型特征的分析来确定其动态特性^[14]。一般有正建模和逆建模两种方法来设计动态补偿滤波器,而由于在逆建模的方法时无需建立热电偶动态模型,避免了在传感器建模中产生的误差^[15],本文采用了逆建模的方法对该系统进行动态补偿。本文选择的系统模型为传递函数,其离散表达式如下,本文设计动态补偿滤波器的方法是使用粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO)^[16],得到一组局部最优参数,使系统尽量符合预设输入-输出条件。

$$H(z^{-1}) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_n z^{-n}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (1)$$

本文采用 PSO 对热电偶传感器的动态补偿滤波器模型进行构建,并以 3.2 中动态测试实验中的热电偶输出作为补偿滤波器的输入,以实验中设定的热电偶进给速度、峰值温度等参数构造的拟合函数作为理想的动态补偿滤波器的输出,优化算法的动态补偿原理图如图 6 所示。

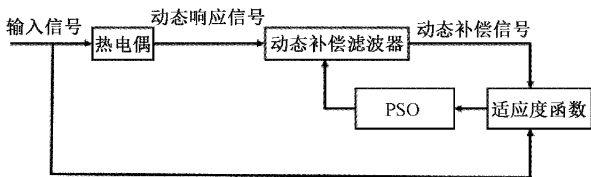


图 6 动态补偿滤波器参数优化流程

选用均方根误差为算法中的适应度函数,其表达式如下:

$$f = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (x'(n) - x(n))^2} \quad (2)$$

其中, $x(n)$ 是预估输入热电偶的温度信号, $x'(n)$ 为动态补偿之后的信号。适应度函数表达式数值越小,说明补偿后的信号越接近热电偶的输入信号,补偿效果越好。

滤波器的传递函数表达式在系统阶数为 5 时的表达式如式(3)所示。

$$H(z^{-1}) = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + a_3 z^{-3} + a_4 z^{-4} + a_5 z^{-5}}{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + b_3 z^{-3} + b_4 z^{-4} + b_5 z^{-5}} \quad (3)$$

基于 MATLAB 软件,运用 PSO 算法对不同型号的热电偶动态测试温度信号模型进行了动态补偿滤波器系数计算,其中 K 型热电偶模型的传递函数系数结果如下: $a_0 = 0.583\ 658, a_1 = 0.420\ 301, a_2 = 0.557\ 859, a_3 = 1.829\ 91, a_4 = -0.743\ 761, a_5 = -2.647\ 74; b_0 = 0.857\ 854, b_1 = -0.508\ 347, b_2 = -0.723\ 345, b_3 = -0.016\ 738\ 5, b_4 = 0.361\ 431, b_5 = 0.029\ 376$ 。虚拟仪器软件具有扩展性强、开发时间短的优势,基于此动态补偿模型,实现了响应的 MATLAB 代码,将其集成在上位机软件中,用户可通过操作面板完成数据的动态补偿。后续使用测试系统动态测试实验中采集到的温度信号对该滤波器模型进行了验证实验。

3 系统测试实验

系统整体设计制作完成后,需要对本接触式温度测试系统进行测试,针对传感器及设计的电路搭建了检定炉测试平台并进行了静态标定实验及动态测试快进快出试验。实验平台如图 7 所示,检定炉环境下的换热环境主要以热辐射和对流换热为主,可以反映温度传感器在以热辐射及对流换热环境为主条件下的温度变化情况以及其动态特性。检定炉中存在一个标准热电偶作为 PID 控制台的参考温度传感器,恒温区位于距炉口 110~130 mm 的区域内,其温度误差为 ±1 °C,温度波动约为 0.2 °C/min,恒温度温度可通过温控装置设定,其范围为 300 °C~1 500 °C。

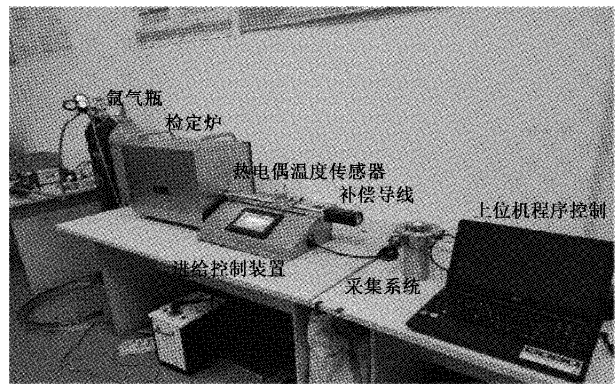


图 7 检定炉实验平台

3.1 测试系统静态标定实验

基于该测试平台,进行温度传感器的静态标定实验。将铠装 K 型热电偶置于检定炉的恒温区静置一段时间,等待其测温区温度稳定,将热电偶通过补偿导线连接到高精度万用表读取电压值,分别在 500 °C、600 °C、700 °C、800 °C、900 °C 下进行了测试,取 3 次结果的平均值,并将采

集结果进行统计,结果如表1所示。读取的电压值转换成温度值后与实际温度基本一致。表明测试系统静态标定结果较好,测试结果较为准确。

表1 铠装热电偶检定炉静标实验结果

| 温度/ ℃ | 分度表 电压值/mV | 采集到的电压 平均值/mV | 换算后 温度值/℃ | 误差 $\sigma 1/\%$ |
|----------|---------------|------------------|--------------|---------------------|
| 500 | 20.644 | 20.375 | 494 | 0.80 |
| 600 | 24.905 | 24.723 | 596 | 0.67 |
| 700 | 29.129 | 29.007 | 697 | 0.43 |
| 800 | 33.275 | 33.019 | 794 | 0.75 |
| 900 | 37.326 | 37.075 | 894 | 0.67 |

将补偿导线连接到接触式温度测试系统,对测试系统的静态性能进行标定,对9组测试系统使用同样的铠装热电偶在不同的温度下进行了3次测试实验,并分别对其静态误差进行了计算,如表2所示。采集到的信号虽然有噪声,但经滤波后较平滑,且波动较小。从表中可以看到,铠装热电偶的静态误差小于1%,经过计算,测试系统的平均静态误差为1.43%。

3.2 测试系统动态测试实验

为了研究制备的温度传感器的动态特性以更好地测试瞬时高温的爆炸场温度,基于检定炉实验平台设计了一种快速进出动态测试实验,实验示意图如图8所示。实验中,

表2 接触式温度测试系统静态误差实验结果

| 实测温度/℃ | 检定炉温度/℃ | 误差/ $\sigma 2/\%$ |
|--------|---------|-------------------|
| 392.8 | 400 | 1.80 |
| 494.7 | 500 | 1.06 |
| 591.1 | 600 | 1.48 |
| 692.7 | 700 | 1.37 |

先使用夹具将温度传感器固定于滑轨上,设定好进给装置的进给速度以及退出速度,然后在上位机上设定好参数进行实验,传感器将快速进入检定炉恒温区然后再快速退出,使用测试系统记录下整个过程中传感器采集到的温度信号。

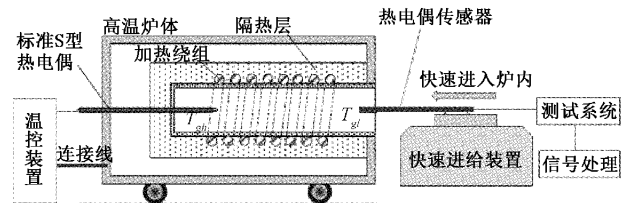


图8 动态测试实验示意图

为了研究测试系统的动态特性,使用K型铠装热电偶,设置了不同的温度作为测试点进行了动态测试实验。并根据热电偶的热电势值区间选取了合适的放大倍数,实验结果记录如表3所示,铠装热电偶动态测试实验数据曲线如图9所示。

表3 动态测试实验结果

| 检定炉 温度/℃ | 第1次实验(16倍放大) | | 第2次实验(16倍放大) | | 第3次实验(16倍放大) | | 平均 温度值/℃ |
|-------------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-------------|
| | 电压值/mV | 温度值/℃ | 电压值/mV | 温度值/℃ | 电压值/mV | 温度值/℃ | |
| 500 | 29.70 | 46 | 30.88 | 48 | 30.72 | 47 | 47.0 |
| 600 | 41.16 | 65 | 42.72 | 66 | 43.68 | 67 | 66.0 |
| 700 | 54.56 | 84 | 53.92 | 83 | 56.48 | 86 | 84.3 |
| 800 | 75.68 | 115 | 76.48 | 117 | 73.92 | 113 | 115.0 |
| 900 | 94.56 | 144 | 96.64 | 148 | 90.72 | 139 | 143.7 |

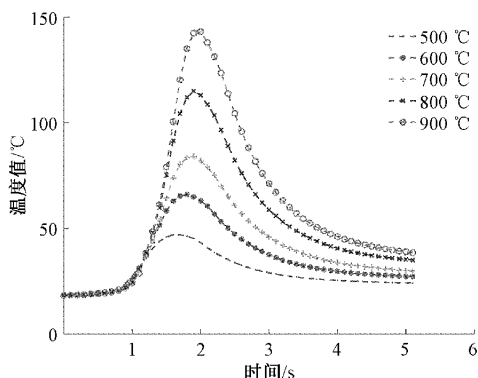


图9 动态测试实验数据结果

如图9所示,测试系统的输出较为稳定,但峰值温度与热源温度有较大的差距,表现出了明显的滞后性,例如

炉温为900℃时,平均峰值温度仅为143.6℃。这是由于热电偶热传导的延迟性所导致的动态误差,为了消除这种误差,需要对热电偶的温度信号进行动态补偿。

3.3 验证实验与爆炸场应用

1) 验证实验

基于设计的补偿滤波器模型,使用上一节测试系统动态测试实验中采集到的温度信号进行了多组验证实验。图10为800℃时动态测试实验中采集到的温度信号及经动态补偿滤波器补偿后的温度信号。

如图10所示,实测数据相当于实际温度(800℃)的1/7左右,有很大差距。经过补偿后温度信号峰值与实际温度更为接近,动态补偿滤波器有效的提高了系统的动态特性,大大提高了测量精确度。

表3为K型热电偶动态测试实验温度信号补偿前后

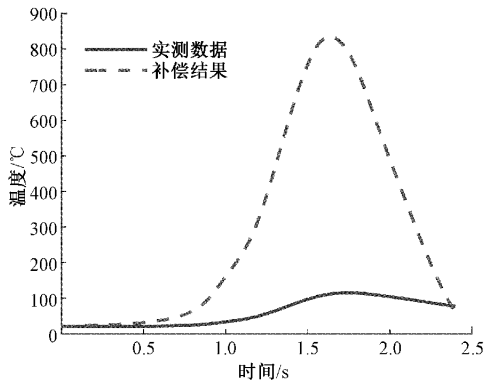


图 10 动态补偿滤波器补偿结果图

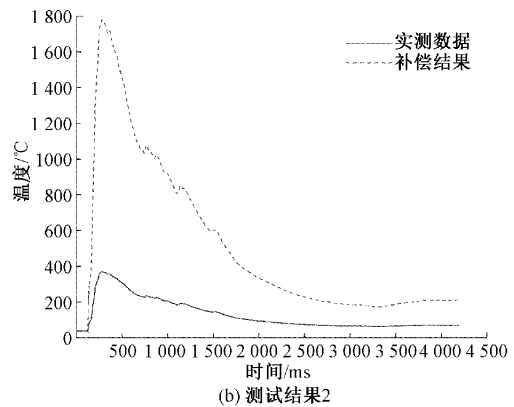


图 11 动态补偿滤波器补偿结果图

结果。从表中 3 可知, K 型热电偶的最大峰值误差为 43℃, 系统的最大误差为 6.4%。从上面的对照实验可以看出补偿后热电偶传感器的动态响应得到明显改善, 说明该动态温度补偿滤波器减小了热电偶动态响应误差, 使其更加接近实际测试温度, 可用于对实验数据的处理。

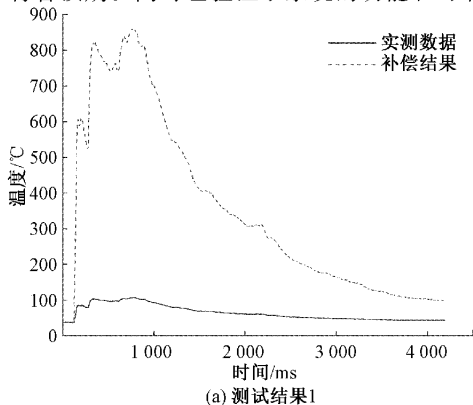
表 4 K 型热电偶温度信号补偿结果

| 实际温度/℃ | 测得温度/℃ | 补偿后温度/℃ | 峰值误差/℃ | 误差/% |
|--------|--------|---------|--------|------|
| 500 | 46 | 523 | 32 | 6.40 |
| 600 | 65 | 621 | 21 | 3.50 |
| 700 | 84 | 727 | 27 | 3.86 |
| 800 | 115 | 835 | 35 | 4.38 |
| 900 | 144 | 941 | 41 | 4.56 |
| 1 000 | 165 | 1 043 | 43 | 4.30 |

2) 爆炸场应用

将此系统应用于爆炸场的温度测量, 并使用上位机集成的动态补偿滤波器进行补偿。图 11 是某次爆炸场实验中距爆芯方向、距离都不同的两次实验完整原始数据及补偿结果。

如图 11 所示, 实测弹药爆炸温度的峰值分别为 106.1℃、369.9℃, 经过动态补偿后到达了 858.4℃、1 771.1℃。两条曲线因为方向与距离不同而导致波形和峰值有差异, 实验结果符合预期。同时也验证了系统的功能和可靠性。



(a) 测试结果1

目前, 爆炸场的最高温度与其升温-降温曲线和分布规律并无权威数据可考, 本系统通过补偿所得温度测量结果可以弹药温度层面的毁伤能力进行评估, 同时提供给弹药研制工作人员重要参考。

4 结 论

本文研究并设计了一种以铠装热电偶为传感器的接存储测试系统, 使用了参数可配置、可多次触发与动态补偿等技术, 解决了传统测试系统动态误差大、容易误触发、灵活性差等问题。搭建了基于检定炉的测试系统并设计了静态、动态性能验证实验, 实验结果显示, 测试系统平均静态误差为 1.43%, 动态误差不超过 6.4%。将测试系统应用于真实爆炸场温度测试, 得到了有重要参考价值的温度数据。此系统硬件的数据读取和参数设置需要借助数据线进行, 后续可以将上位机与硬件的交互无线化, 进一步提升系统的便利性。

参考文献

- [1] 黄磊. 不同炸药爆源的爆炸场热效应分析与测试[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [2] 仲倩. 燃料空气炸药爆炸参数测量及毁伤效应评估[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- [3] 张秋宁. 接触式瞬态温度测试系统的设计与研究[D]. 太原: 中北大学, 2022.
- [4] 谢清俊, 罗攀, 程爽. 接触式测温技术综述[J]. 中国仪器仪表, 2017(8): 48-53.
- [5] 王青, 江剑. 热流密度测试系统的设计与开发[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(6): 68-71.
- [6] 马雪娇, 孔德仁, 徐春冬, 等. 高能战斗部威力参量测试技术现状[J]. 测试技术学报, 2022, 36(5): 426-435.
- [7] 白玉, 尤文斌, 丁永红, 等. 含铝炸药爆炸场瞬态温度的测试与研究[J]. 弹箭与制导学报, 2021, 41(5): 133-137.
- [8] 黄晓敏, 石晓丹, 张晋文, 等. 基于 FPGA 软核的爆炸场压力测试系统设计与实现[J]. 弹箭与制导学报,

- 2015,35(1):73-76.
- [9] 周征. 温压炸药爆炸温度场存储测试技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2011.
- [10] 谢尚豪,颜雁军,许波. 双通道100 MSPS数据采集板卡设计[J]. 电子测量技术,2018,41(19):118-123.
- [11] 李芝绒,王胜强,苟兵旺. 密闭空间爆炸温度测试方法研究[J]. 火工品,2012(5):52-56.
- [12] 刘伊. 高g值加速度传感器动态补偿方法的研究[D]. 太原:中北大学,2017.
- [13] 潘保青,李岩峰,张志杰. 基于量子粒子群算法的热电偶动态校准及动态补偿技术研究[J]. 传感技术学报,2015,28(7):992-996.
- [14] 李岩峰,张志杰,郝晓剑. 温度传感器动态校准系统中光学聚焦系统设计[J]. 激光与光电子学进展,2016,53(3):211-216.
- [15] WU J, ZHANG Z, DONG G, et al. Real-time correction for sensor's dynamic error based on DSP[C]. IEEE, 2011:1-6.
- [16] KENNEDY J, EBERHART R. Particle Swarm Optimization[C]. Icn95-international Conference on Neural Networks, IEEE, 1995.

作者简介

王志超,硕士研究生,主要研究方向为动态测试,接触式温度测试系统的研制与应用。

E-mail:984980530@qq.com

张志杰(通信作者),教授,博士生导师,主要研究方向为动态测试、数字信号处理等。

E-mail:zhangzhijie@nuc.edu.cn