

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2023.02.16

# 基于LabVIEW的热电偶动态特性测试系统

孔祥雪, 赵俭, 李亚晋

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

**摘要:** 随着航空技术的发展, 对热电偶的动态特性评价提出了更高的要求。针对现有热电偶采集方案不能连续采集以及无法实时获取温度值的问题, 设计了一套基于LabVIEW的热电偶动态特性测试系统, 并与示波器采集方案进行数据比对。经试验验证, 该测试系统可靠性高, 自动化程度高, 有效地提高了工作效率, 为温度传感器相关性能的评价提供了支撑。

**关键词:** 热电偶; 动态特性; 测试系统; LabVIEW

中图分类号: TB94 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795(2023)02-0128-07

## Dynamic characteristics measurement system of thermocouple based on LabVIEW

KONG Xiangxue, ZHAO Jian, LI Yajin

(Changcheng Institute of Metrology &amp; Measurement, Beijing 100095, China)

**Abstract:** With the development of aviation technology, higher requirements are put forward for the dynamic characteristics of thermocouples. In view of the problem that the existing thermocouple acquisition scheme cannot continuously acquire and obtain the temperature value in real time, a set of thermocouple dynamic characteristics measurement system based on LabVIEW is designed. The working principle, hardware structure and software design of the system are described in detail, and the system is compared with the oscilloscope data collection scheme. The test results show that the system has high reliability and high automation, which effectively improves the working efficiency, and provides support for the performance evaluation of temperature sensors.

**Key words:** thermocouple; dynamic characteristics; measurement system; LabVIEW

## 0 引言

热电偶因其较高的测温精度和简单实用的特性被广泛应用于航空航天、燃烧爆炸和武器装备等复杂场合的温度测量<sup>[1]</sup>。动态响应特性是衡量热电偶测温性能的重要指标, 温度传感器对阶跃温度的响应常用来描述其动态响应特性, 主要参数包括热响应时间和时间常数。为了评估热电偶

的动态特性, 常用的测试方法主要包括恒温水/油槽法<sup>[2-3]</sup>、热风洞法<sup>[4-6]</sup>、激波管法<sup>[7-9]</sup>、电加热法<sup>[10-11]</sup>和激光加热法<sup>[12-15]</sup>等。

目前, 热电偶的数据采集系统主要通过数字多用表确定阶跃前和阶跃后的温度, 之后利用示波器采集温度阶跃变化波形, 通过示波器采集的波形对应的时间计算热电偶的时间常数。然而, 远程控制示波器时, 在数据充满缓冲区的情况下,

收稿日期: 2022-10-18; 修回日期: 2023-01-05

引用格式: 孔祥雪, 赵俭, 李亚晋. 基于LabVIEW的热电偶动态特性测试系统[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 128-134.

Citation: KONG X X, ZHAO J, LI Y J. Dynamic characteristics measurement system of thermocouple based on LabVIEW[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(2):128-134.



示波器才能将数据传输至上位机,因此需要根据开始采集的时刻以及采样需要的最长时间来设定时基的大小,从而确保视窗内的波形完整。所以远程控制示波器时,无法实现数据的实时采集。此外,示波器的垂直灵敏度最小为1 mV/div,对于某些测温范围较小的热电偶,在示波器的可视范围内难以分辨出传感器波形。

针对上述问题,设计了一套基于LabVIEW的热电偶动态特性测试系统,通过信号调理模块的引入,实现了动态特性试验数据的实时采集,并利用数据采集模块满足了实时获取温度值的测试需求。此外,通过动态特性试验对试验过程和结果进行分析,对测量不确定度进行评定,验证了该动态特性测试系统的可行性。

## 1 工作原理

热电偶动态特性测试系统主要用于温度传感器的动态特性试验,系统结构如图1所示,主要由温度传感器、信号调理模块、数据采集模块以及上位机软件组成,其工作原理为:将温度传感器输出的毫伏电压值通过信号调理模块转换为标准电压值,再用数据采集模块采集电压数据,并传输至上位机软件,软件将电压数据转化为温度数据,并进行数据的处理和保存,从而实现温度信号的实时采集。

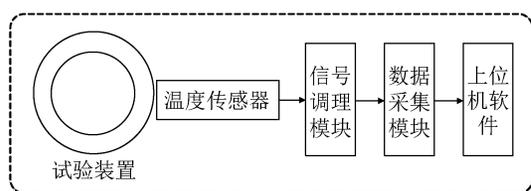


图1 热电偶动态特性测试系统结构

Fig.1 Structure diagram of thermocouple dynamic characteristics test system

## 2 硬件构成

根据系统的工作原理,硬件主要由温度阶跃装置、信号调理模块和数据采集模块三部分组成。

### 2.1 温度阶跃装置

激光具有高亮度、高方向性等特点,可实现被辐照物体的快速温升,因此采用激光器作为热电偶的温度激励源。

与连续式激光器相比,脉冲激光器的功率较高,可提供理想的脉冲信号,便于对响应曲线进行动态分析,故采用脉冲式激光器作为温度阶跃装置。

### 2.2 信号调理模块

热电偶的动态特性试验对数据采集的采样率和采集精度要求较高,在信号调理模块选型时,需重点关注模块的带宽和精度。

选用DATAFORTH公司生产的SCM5B系列的信号调理模块提供单通道模拟输入,将热电偶的毫伏电压信号放大、隔离,使其转换为高电平模拟电压输出。为实现对快速变化的气流温度的准确测量,需要测温传感器具有毫秒级的时间响应能力,因此采集系统的准确度至少为 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,采样率在1 kHz以上。在该系统中,信号调理模块的输入为 $-10\sim 10\text{ mV}$ ,输出为 $-5\sim 5\text{ V}$ ,准确度为0.03%,带宽为10 kHz,能够满足动态特性试验对采样率和采样精度的要求。

### 2.3 数据采集模块

#### 2.3.1 模块选型

数据采集模块的主要功能是采集信号调理模块输出的电压信号,故采用面向仪器系统的外围组件互连扩展(Peripheral Component Interconnection Extensions for Instrumentation, PXI)控制器配合PXI机箱的方案。PXI控制器连接显示器和鼠标键盘即可作为电脑主机使用,集成度高,有助于试验现场的操作。

选用PXIe-4302控制器用于电压信号的采集,其具有32通道的输入模块,适用于电压、热电偶和电流的测量,能够满足动态特性试验的数据采集要求。

#### 2.3.2 温度解算

由于信号调理模块的输入量程为 $-10\sim 10\text{ mV}$ ,输出为 $-5\sim 5\text{ V}$ ,相当于模块将输入的电压信号放大500倍,因此在进行温度解算时,需要将测得的电压值除以500,再根据热电偶类型,用热电偶分度表将电压值换算成温度值。其中,热电偶分度表按照不同温区温度与电压值的多项式进行解算。热电偶的反函数为

$$t_{90} = \sum_{i=0}^n d_i \cdot E^i \quad (1)$$

式中： $t_{90}$ 为ITS-90（1990年国际温标）温度， $^{\circ}\text{C}$ ； $E$ 为电动势， $\mu\text{V}$ ； $d_i$ 为多项式第 $i$ 项系数； $n$ 为多项式阶数。 $d_i$ 和 $n$ 根据热电偶类型和温度范围确定。

### 3 软件功能

热电偶动态特性测试系统基于LabVIEW图形化编程语言开发，其结合了图形化编程方式的高性能与灵活性，以及专为测试与自动化控制应用设计的高端性能与配置功能，可广泛应用于数据采集、仪器控制、测量分析与数据显示各个领域。

根据测控系统的功能需求，软件设计主要包括3个功能模块：温度通道配置、数据采集和数据显示及处理模块。

#### 3.1 温度通道配置

温度通道配置的主要功能是选择热电偶类型以及配置温度传感器通道，其中温度传感器通道可多选，适用于采集多个温度通道的情况。软件界面如图2所示。

试验开始前，首先选择待测试的热电偶类型，然后选择温度通道，可进行多选，选中后将在右侧已选通道内显示。

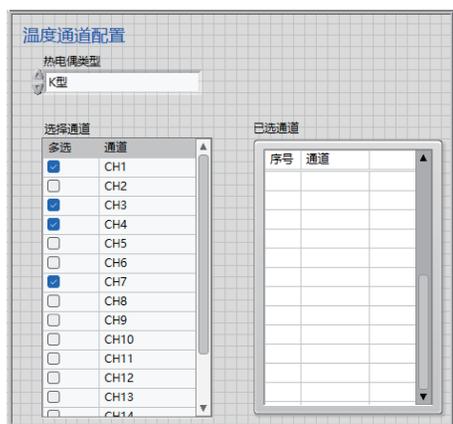


图2 温度通道配置界面

Fig.2 Temperature channel configuration interface

#### 3.2 数据采集

通道配置完成后，选择保存文件路径以及文件名，开始采集数据。试验过程中，根据实时采集的数据，判断起始温度是否达到稳态，在起始温度到达稳态时，点击开始保存数据，实时显示已保存的数据组数。数据采集的界面如图3所示。



图3 数据采集界面

Fig.3 Data acquisition interface

#### 3.3 数据显示和处理

开始采集后，软件根据选择的热电偶类型将电压值换算为温度值，并将各通道的温度值显示在表格中，同时波形图表中显示各通道的传感器温度随时间变化的波形图。数据显示和处理的界面如图4所示。

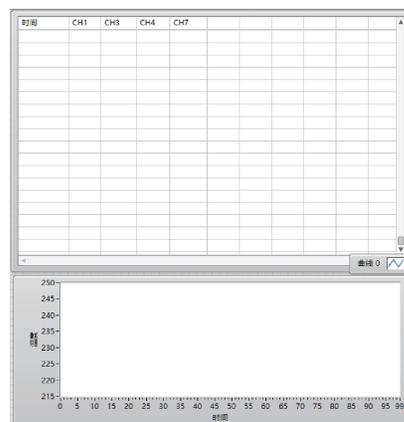


图4 数据显示和处理界面

Fig.4 Data display and processing interface

## 4 试验验证

为了验证测试系统的可靠性，在常温风洞上进行动态特性试验。试验装置包括常温风洞、K型热电偶、激光器、位移机构、信号调理模块和PXI采集设备。

为了能直接感受到激光能量带来的温度变化，系统采用裸露式结构的温度传感器。温度传感器为直径0.1 mm的K型热电偶，支撑偶丝直径为0.3 mm，采用平行对焊的焊接工艺，并在焊接完成后将细丝压制成平行于气流方向的薄片，用于增大对流换热面积，降低时间常数。传感器的结构如图5所示。

试验装置的结构如图6所示，实物如图7所示。在常温风洞试验段出口位置安装温度传感器，



图5 热电偶的结构示意图

Fig.5 Structure diagram of thermocouple

激光器放置在传感器侧面，作为温度阶跃装置为热电偶提供温度脉冲变化。通过调节激光器的功率和对准传感器的焦距位置，使得温度传感器产生 160 °C 的温差，然后调节马赫数，观察温度传感器在马赫数 0.2 ~ 0.6 工况下的时间常数变化。为了进行试验结果的对比，将信号调理模块和电压采集模块依次更换为数字多用表、滤波器和示波器，通过示波器来计算时间常数。

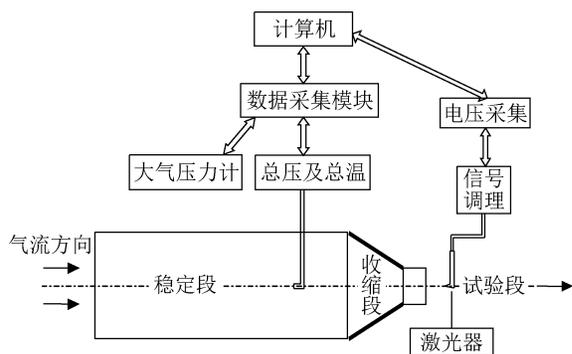


图6 试验装置结构示意图

Fig.6 Structure diagram of test device



图7 试验装置

Fig.7 Test device

### 4.1 试验过程分析

示波器每次只能采集一屏的数据，在重复试验时需要依次保存多屏的数据，而测试系统可以进行连续采集，并根据工况要求开始保存数据。此外，示波器的垂直灵敏度最小为 1 mV/div，在温差较小的情况下，示波器采集的波形可视范围较小，而测试系统可以根据温度的范围动态调整坐标轴的变化，有助于观察波形的变化。

### 4.2 试验结果比对

以马赫数 0.6 为例，示波器获得的试验数据波形如图 8 所示，测试系统获得的试验数据波形如图 9 所示。可以看出，示波器获得的电压值存在负值，这是由于示波器容易受到干扰，电压值的准确性低，通常需要用数字多用表确定阶跃前和阶跃后的温度；而测试系统可以实时换算温度值，及时地了解试验工况。

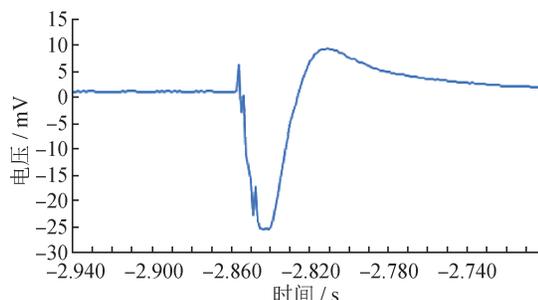


图8 示波器试验数据波形图

Fig. 8 Test data waveform of oscilloscope

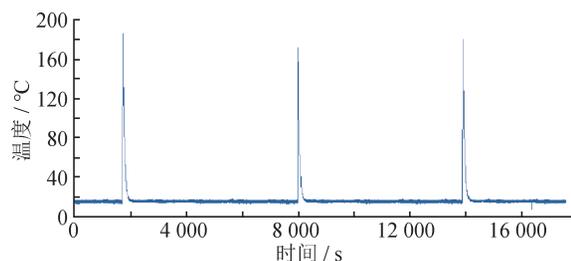


图9 测试系统试验数据波形图

Fig.9 Test data waveform of the test system

此外，时间常数的试验结果如表 1 所示，为了比较两种方案的差异，对试验结果进行比对。通常情况下测量结果与其不确定度的一致性用归一化偏差  $E_n$  进行评价。 $E_n$  的计算公式为

$$E_n = \frac{X_i - X_{ref}}{\sqrt{U_i^2 + U_{ref}^2}} \quad (2)$$

式中： $X_i$ 、 $X_{ref}$  分别为测试系统和示波器方案测得

的时间常数； $u_i$ ， $U_i$ 分别为测试系统方案得到的合成不确定度和扩展不确定度； $u_{ref}$ ， $U_{ref}$ 分别为示波器方案得到的合成不确定度和扩展不确定度； $k$ 为覆盖因子，一般情况 $k = 2$ 。

其中， $U_i$ ， $U_{ref}$ 的计算公式为

$$U_i = k \cdot u_i \quad (3)$$

$$U_{ref} = k \cdot u_{ref} \quad (4)$$

根据 $E_n$ 的计算公式，首先计算测试系统和示波器方案的扩展不确定度，然后计算归一化偏差。

表1 时间常数试验结果

Tab. 1 Test results

马赫数	测试系统得出的 时间常数/ms	示波器得出的 时间常数/ms
0.2	54	62
0.3	48	44
0.4	41	41
0.5	43	42
0.6	37	41

### 4.3 测量不确定度的评定

首先对测试系统和示波器方案的测量不确定度进行评定。

#### 4.3.1 数学模型

时间常数 $\tau$ 的测量不确定度评定的数学模型为

$$\tau = \frac{T_g - T_j}{dT_j/dt} \quad (5)$$

式中： $T_g$ 为气流有效温度，K； $T_j$ 为被校传感器温度，K； $t$ 为时间，s。

合成标准不确定度为

$$u_c = [(u(\Delta t))^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial Ma} \cdot u(Ma)\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau}{\partial T_g} \cdot u(T_g)\right)^2 + (u(\delta t_s))^2 + (u(\delta t_e))^2 + (u_A(\tau))^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中： $\Delta t$ 为采样间隔，s； $Ma$ 为气流马赫数； $\delta t_s$ 为阶跃起点选取误差，s； $\delta t_e$ 为阶跃终点选取误差，s。

其中， $u(Ma)$ 为

$$u(Ma) = \frac{2 + (\kappa - 1)Ma^2}{2\kappa Ma} \left\{ \left[ \frac{u(P_0)}{P_0} \right]^2 + \left[ \frac{u(P_s)}{P_s} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

式中： $\kappa$ 为气体绝热指数； $P_0$ 为气流总压，Pa； $P_s$ 为气流静压，Pa。

$\frac{\partial \tau}{\partial T_g}$ 的计算公式为

$$\frac{\partial \tau}{\partial T_g} = 1.718 \frac{\tau}{T_g - T_b} \quad (8)$$

式中： $T_b$ 为阶跃前温度，K。

#### 4.3.2 测量不确定度的来源

$u(\Delta t)$ 的来源为数据采集间隔引入的不确定度 $u_1$ 。

$u(P_0)$ 的来源包括：总压传感器的示值误差引入的不确定度 $u_2$ ；无汞气压计的示值误差引入的不确定度 $u_3$ ；风洞气流的总压波动引入的不确定度 $u_4$ ；数据采集系统引入的不确定度 $u_5$ 。

$u(P_s)$ 的来源包括：静压传感器的示值误差引入的不确定度 $u_6$ ；无汞气压计的示值误差引入的不确定度 $u_3$ ；风洞气流的静压波动引入的不确定度 $u_7$ ；数据采集系统引入的不确定度 $u_5$ 。

$u(T_g)$ 的来源包括：温度传感器的示值误差引入的不确定 $u_8$ ；示波器的示值误差引入的不确定 $u_9$ ；风洞气流的有效温度波动引入的不确定度 $u_{10}$ 。

$u(\delta t_s)$ 的来源为阶跃起点的选取误差引入的不确定度 $u_{11}$ 。

$u(\delta t_e)$ 的来源为阶跃起点的选取误差引入的不确定度 $u_{12}$ 。

#### 4.3.3 测量不确定度的评定

根据上述数学模型和不确定度的来源，以温度传感器在气流马赫数0.6、气流温度从常温阶跃到160℃时的时间常数为例，进行不确定度评定。不确定度分量如表2所示。

根据式(3)~式(5)计算两种方案的相对合成不确定度，可得示波器方案的合成标准不确定度 $u_{ref} = 0.002$  s，扩展不确定度为 $U_{ref} = 0.004$  s；测试系统方案的合成标准不确定度 $u_i = 0.001$  s，扩展不确定度为 $U_i = 0.002$  s。不确定度的评定结果验证了测试系统的测量结果优于示波器。

### 4.4 比对结果一致性

根据比对结果一致性的评判原则： $|En| \leq 1$ ，则测量结果与参考值之差在合理的预期之内，比对结果可接受； $|En| > 1$ ，则测量结果与参考值之差没有达到合理的预期，应分析原因。根据 $En$ 的计算公式以及试验结果和不确定度，得到 $|En| = 0.89 < 1$ ，表明两种方案的试验结果接近，验证了

表2 不确定度分量一览表  
Tab.2 List of uncertainty components

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	$k$ 值	示波器方案的标准不确定度	测试系统方案的标准不确定度
$u_1$	数据采样间隔	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.000 6 s	0.000 3 s
$u_2$	总压传感器的示值误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	8.7 Pa	8.7 Pa
$u_3$	无汞气压计的示值误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	23 Pa	23 Pa
$u_4$	风洞气流的总压波动	B	均匀	$\sqrt{3}$	5.8 Pa	5.8 Pa
$u_5$	数据采集系统的测量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	5.8 Pa	5.8 Pa
$u_6$	静压传感器的示值误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	3.5 Pa	3.5 Pa
$u_7$	风洞气流的静压波动	B	均匀	$\sqrt{3}$	5.8 Pa	5.8 Pa
$u_8$	温度传感器的示值误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.37 K	0.37 K
$u_9$	示波器的示值误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.46 K	
$u_9'$	信号调理模块的示值误差	B	均匀	$\sqrt{3}$		0.014 K
$u_9''$	数据采集模块的示值误差	B	均匀	$\sqrt{3}$		0.02 K
$u_{10}$	风洞气流的有效温度波动	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.17 K	0.17 K
$u_{11}$	阶跃起点的选取误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.001 s	0.001 s
$u_{12}$	阶跃终点的选取误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.001 s	0.001 s
$u_{13}$	测量的重复性	A			0.000 7 s	0.000 3 s

测试系统方案的可行性。

## 5 结论

基于LabVIEW的热电偶动态特性测试系统可将毫伏级的热电偶信号调理成标准电压信号,实现了动态特性试验数据的连续采集,改进了传统的示波器采集方法,有效提高了工作效率。此外,该测试系统解决了示波器无法实时获取温度值的问题,满足了热电偶动态特性试验的测试需求,可适用于微小信号的采集,为航空领域热电偶性能评价的发展提供了支撑。

### 参考文献

- [1] WANG J, TIAN W, WANG Y, et al. Micromachined thermocouple for rapid detection of ultrahigh heat flux at high temperature [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(2): 2099-2106.
- [2] 王玮. 传感器惯性动态建模与实时自校正的研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.  
WANG W. Research on modeling and correction the inertia of sensors [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [3] 刘宗瑞, 咸婉婷, 刘志远. 热电偶动态响应测试系统[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(6): 82-85.  
LIU Z R, XIAN W T, LIU Z Y. Dynamic response testing system of thermocouple [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014, 33(6): 82-85. (in Chinese)
- [4] 李海燕, 赵俭. 温度传感器动态校准研究[J]. 计测技术, 2008, 28(1): 1-4.  
LI H Y, ZHAO J. The research of dynamic calibration for temperature probe [J]. Metrology & Measurement Technology, 2008, 28(1): 1-4. (in Chinese)
- [5] 王毅, 赵俭. 动态温度测量与校准技术[J]. 计测技术, 2015, 35(1): 9-14.  
WANG Y, ZHAO J. Dynamic temperature measurement and calibration technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2015, 35(1): 9-14. (in Chinese)
- [6] 杨灿. 气流温度测量用热电偶的设计和校准技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.  
YANG C. The research of design and calibration of thermocouple probes [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005. (in Chinese)
- [7] LI J P, CHEN H, ZHANG S Z, et al. On the response of coaxial surface thermocouples for transient aerodynamic

- heating measurements [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017(86), 141-148.
- [8] 杨兆欣. 气流温度测量系统的动态校准方法研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2014.  
YANG Z X. Research on dynamic calibration method of stream temperature measurement system [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014. (in Chinese)
- [9] YANG Z X, MENG X F. Research on the dynamic calibration of thermocouple and temperature excitation signal generation method based on shock-tube theory[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2014, 136(7).
- [10] 仇国富, 孟繁荣. 测定小惯性热电偶时间常数新法[J]. *南京工程学院学报*, 2002, 2(1): 39-41.  
QIU G F, MENG F R. A new method to determine the response time of thermocouples[J]. *Journal of Nanjing Institute of Technology*, 2002, 2(1): 39-41. (in Chinese)
- [11] SCHRECK E, HILLER B, Singh G P. Calibration of micron-size thermocouples for measurements of surface temperature[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(1): 218-220.
- [12] SERIO B, NIKA P, PRENEL J P. Static and dynamic calibration of thin-film thermocouples by means of a laser modulation technique [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(11): 4306-4313.
- [13] ZHANG Z J, LI Y, CHEN H, et al. Improved method of excitation signal in transient temperature calibration system based on laser[C]// 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). IEEE: 2019, 1-5.
- [14] 刘宁, 徐毅, 刘显明, 等. 基于激光激励的热电偶动态响应特性测试技术研究进展[J]. *激光杂志*, 2022, 43(9): 1-5.  
LIU N, XU Y, LIU X M, et al. Research progress of thermocouple dynamic response characteristic testing technology based on laser excitation[J]. *Laser Journal*, 2022, 43(9): 1-5. (in Chinese)
- [15] LI Y, ZHANG Z, HAO X, et al. Dynamic calibration method of temperature sensor based on quasi-delta pulse temperature excitation[J]. *Microwave & Optical Technology Letters*, 2018, 60(1): 212-219.

(本文编辑: 郑燕)



第一作者: 孔祥雪 (1991—), 女, 工程师, 毕业于天津大学, 主要研究方向是动态温度测量与校准技术。