

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2024.05.04

动态温度测试小惯性热电偶时间常数在线标定方法

唐永涛, 侯孟, 郜攀, 黄明镜

(中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 绵阳 621000)

摘要: 为解决热电偶时间常数常规标定方法周期长、成本高、无法在线标定的问题, 介绍了一种基于回路电流阶跃响应(Loop Current Step Response, LCSR)的热电偶时间常数原位在线标定方法(简称“LCSR法”), 重点阐述了LCSR法的基本原理和标定方法, 开展了实验室环境下热风洞法与LCSR法时间常数实验对比研究, 实验表明: LCSR法标定周期远低于热风洞法, 且时间常数标定结果基本一致。最后, 探讨了温度畸变真实环境下原位在线标定的测试应用前景。

关键词: 动态温度; 小惯性热电偶; 时间常数; 回路电流阶跃响应法; 在线标定

中图分类号: TB9; V235; G312 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 05-0033-06

Online calibration method for time constant of fast thermocouple in dynamic temperature testing

TANG Yongtao, HOU Meng, GAO Pan, HUANG Mingjing

(AECC Sichuan Gas Turbine Research Establishment, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problems of long cycle, high cost and inability to calibrate thermocouple time constants online in conventional calibration methods, an in-situ online calibration method of thermocouple time constants based on loop current step response (LCSR) was introduced, and the basic principles and calibration methods of the LCSR time constant calibration were emphatically discussed. A comparative study on the calibration of time constants using the hot air tunnel method and the LCSR method was performed in a laboratory environment. The experimental results show that the calibration period of the LCSR method is much lower than that of the hot air tunnel method, and the time constant calibration results are basically the same. Finally, the test application prospect of in-situ online calibration in the real environment of temperature distortion is discussed.

Key words: dynamic temperature; fast thermocouple; time constant; LCSR; online calibration

0 引言

动态温度测试对于评定发动机进气温度畸变条件下的稳定性具有重要作用, 快响应和在线标定是动态温度测试小惯性热电偶研究的技术发展

方向。小惯性热电偶测温是动态温度测量最成熟和常用的手段, 其测量总体思路是: 首先制作热惯性小的传感器, 然后在风洞条件下事先标定该传感器的热响应时间常数并建立数据库, 最后在动态温度测试中依据时间常数数据库对动态测量

收稿日期: 2024-10-03; 修回日期: 2024-10-17

基金项目: 工信部重大专项基础研究项目(J2019-V-0002-0093)

引用格式: 唐永涛, 侯孟, 郜攀, 等. 动态温度测试小惯性热电偶时间常数在线标定方法[J]. 计测技术, 2024, 44(5): 33-38.

Citation: TANG Y T, HOU M, GAO P, et al. Online calibration method for time constant of fast thermocouple in dynamic temperature testing[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(5): 33-38.



误差进行修正。

目前,小惯性热电偶时间常数标定方法主要包括热风洞条件下的冷热气流掺混法(简称“热风洞法”)、常温风洞条件下的激光法(简称“热激光法”)等。上述方法原理相似,均是制造较为标准的正阶跃温升或者负阶跃温降,并对热电偶的热电势响应曲线进行数据处理,得到时间常数。此类时间常数标定方法目前存在以下两方面的短板:①对标定实验条件要求苛刻,且风洞标定成本高、周期长。时间常数最终将会作为重要的误差修正参数带入数据处理,因此在工程中必须对每个热电偶探头开展涵盖实验需求的不同流场状态下的标定实验,这给发动机测试带来了很大的校准工作压力;②均是在风洞条件下选取离散的状态点进行标定实验,而在发动机真实测试过程中,时间常数需要根据标定数据库插值得到,因此动态温度测试存在一定误差。

LCSR是一种原位测试技术,可以在不拆除传感器的基础上快速原位测量得到其动态响应时间参数。由于该技术采用内热源整体加热方式,模拟实际应用场景和传感器特性,测量结果与热风洞法具有较高一致性。国际上,针对LCSR的研究较多,例如:奥地利微电子公司(Austria Micro Systems, AMS)等利用LCSR对热电阻、热电偶等温度传感器响应的的时间常数进行测试,并将LCSR成功应用于核电领域温度传感器响应时间分析,但未开展在航空发动机动态温度测试中的应用研究。国内的动态温度测试技术还不成熟,主要表现为强畸变环境下测点存活率低、时间常数标定占用周期长等,并且对LCSR尚无明显的技术追踪。

针对上述问题,本文提出了一种基于LCSR的热电偶响应时间原位测量技术,该技术可以实现小惯性热电偶在发动机真实气流环境下的时间常数原位标定,直接进行探针的测试动态误差修正,无需在风洞上事先建立热电偶的时间常数数据库,并开展实验对该技术的应用效果进行验证。

1 原理

对于热电偶温度传感器,其时间常数 τ 定义为

$$\tau = \frac{WVC}{hA} \quad (1)$$

式中: W 为热电偶材料的比重, V 为体积, C 为比热容, h 为导热系数, A 为周围流体薄膜的面积。

公式(1)表明:热电偶的时间常数由热电偶的材料、结构形式及测温环境等因素决定。由于热电偶存在热惯性,在简化热电偶测量的传热物理模型时,一般将传热物理模型视为一阶系统进行研究,则热电偶对阶跃温度的响应为

$$T - T_0 = (T_e - T_0)(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2)$$

式中: T 为热电偶指示温度, T_0 为初始温度, T_e 为终止温度, e 为自然常数, t 为阶跃上升时间。

当 $t = \tau$ 时,有

$$T - T_0 = (T_e - T_0)(1 - e^{-1}) = 0.632(T_e - T_0) \quad (3)$$

由式(3)可知, τ 是 T 与 T_0 之差达到温度阶跃 $T_e - T_0$ 的63.2%所需的时间,此即时间常数的定义与测量方法。热电偶的温度阶跃响应见图1。

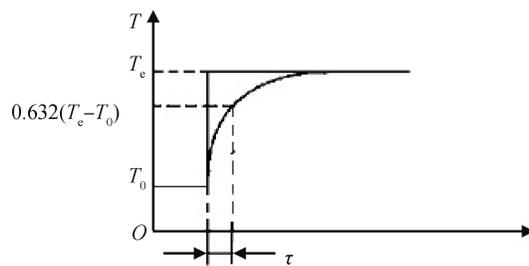


图1 热电偶的温度阶跃响应

Fig.1 Temperature step response of thermocouple

τ 的值与温度阶跃 $T_e - T_0$ 的大小无关,与 T_0 的值也无关。因此,当 $T_0 > T_e$ 时(即温度阶跃为负),式(2)和式(3)同样成立。这说明:同一温度传感器采用负温度阶跃测得的 τ 与采用正温度阶跃测得的 τ 应是一致的。

为了测量热电偶的时间常数(如毫秒级、秒级),需要较为理想的温度阶跃,即 t 应远小于 τ ,才能使测量结果具有较高的准确性。为此,可以采用几乎理想的温度阶跃方法——LCSR法。

在对热电偶回路中的串联直流/交流恒流电源测温时,由于焦耳效应,其热接点将产生热量而升温,当热电偶达到某一预设的较高温度点时,切断直流/交流电源,形成负温度阶跃;通过处理热电偶的负阶跃响应信号,实现热电偶响应时间常数的在线标定测量,在线标定周期低于10 s。

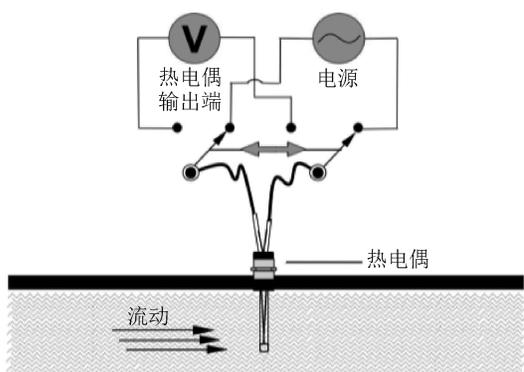
2 标定方法

温度传感器的回路电流阶跃响应实验原理：通过传感器敏感元件的信号引线给传感器的感温元件通以某种频率的电流，对感温元件进行欧姆加热，使感温元件的温度高于被测对象的温度；对热电偶温度传感器进行电流加热，记录电流断开后的传感器的阶跃响应，即电流断开后热电偶冷却至环境温度后的全部过程，该过程的温度信

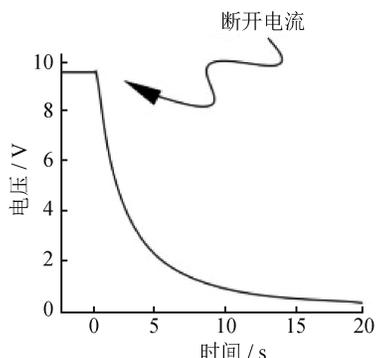
号容易检测，且能获得较高的信噪比；然后结合传感器的数学模型分析记录的阶跃响应，将其转换成被测对象温度变化的响应。

基于LCSR的小惯性热电偶时间常数在线标定方法原理如图2所示，热电偶可置于风洞中验证，也可以原位放置于发动机真实测试流场中验证，在热电偶回路中设置电路切换开关，切换“标定”和“采集”模式。“标定”模式时，直流/交流电源与热电偶形成加热回路，调节电源的电压和电流，热电偶自热达到特定的温度，一般控制在200℃以上，待热电偶测点在流场中换热稳定，即达到了可标定的状态。“采集”模式时，断开直流/交流电源，热电偶回路接入后端的采集下位机，记录热电偶回路断开供电后的热电势负阶跃信号曲线，并通过上位机的数据处理程序直接计算出当前流场环境下的时间常数值。

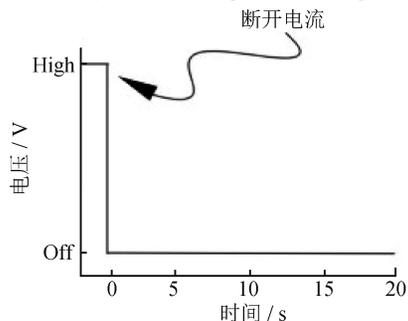
标定实验设备主要由测试热电偶传感器、直流/交流恒流电源、电压采集下位机、数据处理上位机、线缆、切换开关等组成，如图3所示。当采集到信号后，通过定义法计算热电偶的时间常数。除了采集热电偶信号，还需要考虑信号的信噪比以及元件的选择和电路的设计，减小测量误差。因此，本课题组设计了一个继电器开关系统，利用延时装置预设好加热时间，使用交流电源给热电偶加热，到了预设的时间后，延时装置断开(即继电器开关系统断开交流电与热电偶的连接)，将热电偶接入信号放大器电路，通过数据处理程序进行数据采集与处理分析。如图4所示，数据处理程序可实现供电电路的“开/关”切换控制、热电偶输出电势的实时采集、时间常数在线计算处理等功能。



(a) 标定原理图
(a) Schematic diagram of calibration



(b) 输出回路示意图
(b) Schematic diagram of the output loop



(c) 通电回路示意图
(c) Schematic diagram of the energizing circuit

图2 基于LCSR的小惯性热电偶时间常数
在线标定方法原理图

Fig.2 Schematic diagram of on-line calibration method for time constant of fast thermocouple based on LCSR

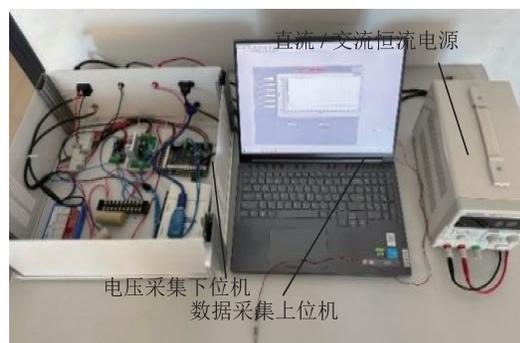


图3 热电偶时间常数标定设备

Fig.3 Thermocouple time constant calibration equipment

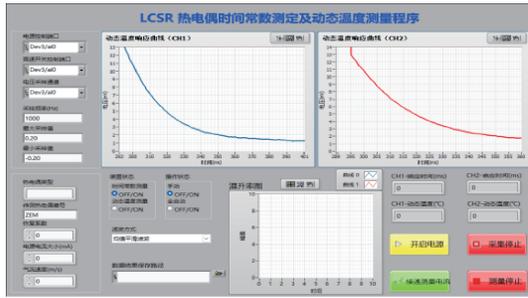


图4 数据处理程序
Fig.4 Data-handler

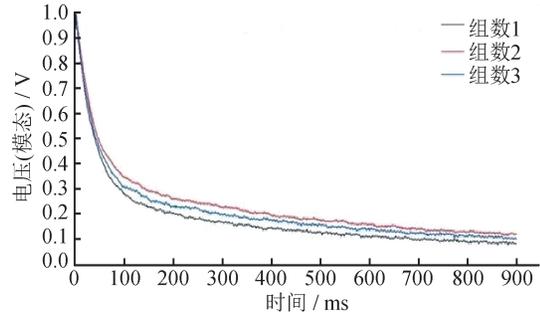
3 实验结果及分析

在风洞实验室内验证了上述基于LCSR的时间常数在线标定方法的可行性，并与热风洞法的标定结果进行了对比验证。实验所用小惯性热电偶传感器为自制，偶丝材料为NiCr-NiSi，偶丝直径分为0.1 mm和0.05 mm两种，用激光焊接设备焊接热接点，小惯性热电偶实物如图5所示。

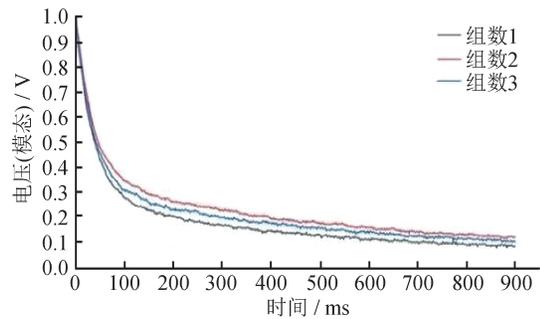


图5 小惯性热电偶
Fig.5 Fast thermocouple

LCSR法标定实验的风洞条件——温度 T 为常温、流速 V 约为 40 m/s、阶跃电流 I 为 2A/0.5A，温度阶跃 t 为 10%、63.2%、90% 时的标定结果见表1，响应曲线见图6。



(a) 0.1 mm 偶丝热电偶阶跃响应曲线
(a) 0.1 mm thermocouple step response curve



(b) 0.05 mm 偶丝热电偶阶跃响应曲线
(b) 0.05 mm thermocouple step response curve

图6 小惯性热电偶响应曲线

Fig.6 Response curve of fast thermocouple

热风洞法标定实验的风洞条件——温度 T 为常温 ~ 200 °C 阶跃、流速 V 约为 40 m/s，标定结果见表2。

表1 LCSR法标定结果

Tab.1 Calibration results of LCSR method

流场环境	样本实验次数 / 次	时间常数 τ / ms					
		偶丝直径 0.1 mm			偶丝直径 0.05 mm		
		10% t	63.2% t	90% t	10% t	63.2% t	90% t
T : 常温、 $V = 40\text{ m/s}$ 、 I : 2A/0.5A	1	16	58	115	11	32	84
	2	15	56	113	10	32	83
	3	17	55	116	11	33	85

表2 热风洞法标定结果

Tab.2 Calibration results of hot air tunnel method

流场环境	样本	时间常数 τ / ms	
		偶丝直径 0.1 mm	偶丝直径 0.05 mm
T : 常温 ~ 200 °C、 $V = 40\text{ m/s}$	多实验件均值	51	33

根据实验结果及响应曲线分析, 可以得出以下结论: ①LCSR法标定所获得的热电偶负阶跃的响应曲线与公式(1)物理模型的指数函数规律十分吻合; ②对于同一支热电偶, 在同样工况下, LCSR法标定的时间常数值重复性好, 重复偏差低于5%; ③LCSR法的单测点标定周期低于10 s, 远低于热风洞法的标定周期; ④在相同工况下, LCSR法与热风洞法标定的同一支热电偶的时间常数最大差异小于7 ms, 结果基本一致; ⑤LCSR法可以实现热电偶时间常数的原位在线标定, 技术原理可行。

4 结论

基于LCSR的热电偶响应时间原位在线测量技术, 可以大幅缩短小惯性热电偶的时间常数标定周期、降低标定实验成本, 并提高热电偶在发动机真实环境下的时间常数标定准确性, 有效解决目前小惯性热电偶动态测温存在的问题, 其应用前景较广阔。

实验表明: 本文采用的LCSR法可以获得较为理想的负温度阶跃, 实现小惯性热电偶时间常数在线原位标定, 且实验设备简单、操作方便、测量时间短、费用低、测量结果准确可靠。此方法对于解决小惯性热电偶时间常数的标定问题具有重要意义, 未来, 该方法可应用于航空发动机小惯性热电偶时间常数在线原位标定测量。

参考文献

- [1] 陈焕生. 温度测试技术及仪表[M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.
CHEN H S. Temperature testing technology and instrument [M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1987. (in Chinese)
- [2] 黄亮, 郝晓剑. 热电偶时间常数测试技术研究[J]. 传感器世界, 2006(9): 16-18.
HUANG L, HAO X J. Research on thermocouple time constant measurement technology [J]. Sensor World, 2006(9): 16-18. (in Chinese)
- [3] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 第四版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
YANG S M, TAO W Q. Heat transfer science [M]. 4th edition. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [4] 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 for determining the time constant of small inertial thermocouples [J]. Journal of Nanjing Institute of Technology, 2002, 2(1): 39-41. (in Chinese)
- [5] 赵书杰, 郭伟民. 热电偶时间常数的在线校验与动态温度的测量[J]. 航空学报, 1997, 18(5): 633-634.
ZHAO S J, GUO W M. On-line calibration of thermocouple time constant and dynamic temperature measurement [J]. Journal of Aeronautics, 1997, 18(5): 633-634. (in Chinese)
- [6] 傅元, 董宇哲. 热电偶时间常数的测量[J]. 测控自动化, 2012(10): 28-34.
FU Y, DONG Y Z. Measurement of thermocouple time constant [J]. Measurement and Control Automation, 2012(10): 28-34. (in Chinese)
- [7] 杨述平. 激光调制法的热电偶时间常数测量[J]. 中北大学学报, 2007(3): 246-250.
YANG S P. Thermocouple time constant measurement by laser modulation method [J]. Journal of North University of China, 2007(3): 246-250. (in Chinese)
- [8] 路立平, 冯建勤, 鹿晓力. 温度传感器的热时间常数及其测试方法[J]. 仪表技术与传感器, 2005(7): 17-18.
LU L P, FENG J Q, LU X L, et al. Thermal time constant of temperature sensor and its test method [J]. Instrumentation Technology & Sensors, 2005(7): 17-18. (in Chinese)
- [9] 郑阳新. 热敏电阻器热时间常数测试方法的研究[J]. 仪表技术与传感器, 1989(6): 36-39.
ZHENG Y X. Research on thermal time constant test method for thermistor resistor [J]. Instrumentation Technology & Sensors, 1989(6): 36-39. (in Chinese)
- [10] 张存芳. 温度传感器时间常数测试[J]. 宇航计测技术, 1999, 19(2): 31-34.
ZHANG C F. Time constant test of temperature sensor [J]. Aerospace Measurement Technology, 1999, 19(2): 31-34. (in Chinese)
- [11] 宋延勇. LCSR法响应时间原位测量装置的设计与实现[J]. 自动化仪表, 2017(8): 69-72.
SONG Y Y. Design and implementation of in-situ measurement device for response time by LCSR method [J]. Automation Instrument, 2017(8): 69-72. (in Chinese)

- [12] 师钰璋. 圆箔热流传感器动态标定技术研究[D]. 太原: 中北大学, 2021.
SHI Y Z. Research on dynamic calibration technology of circular foil heat flow sensor [D]. Taiyuan: North University of China, 2021. (in Chinese)
- [13] 李岩峰. 基于高温炉的热电偶时间常数测试系统[J]. 计量与测试技术, 2024, 51(7): 1-4.
LI Y F. Thermocouple time constant test system based on high temperature furnace [J]. Metrology & Measurement Technique, 2024, 51(7): 1-4. (in Chinese)
- [14] 姜帅, 杨威. 热电偶时间常数测量分拣系统研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2021(3): 30-34.
JIANG S, YANG W. Research on thermocouple time constant measurement sorting system [J]. Industrial Instrumentation and Automation Device, 2021(3): 30-34. (in Chinese)
- [15] 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. Research on transient surface high temperature measurement and dynamic calibration technology [D]. Taiyuan: North University of China, 2005. (in Chinese)

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 唐永涛(1984—), 男, 工程师, 主要研究方向为航空发动机测试技术。