

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2313946

微秒级温度传感器动态校准研究进展*

孟庆富¹ 涂程旭¹ 杨洪波¹ 贾洲侠² 包福兵¹

(1. 中国计量大学计量测试工程学院 杭州 310018; 2. 北京强度环境研究所可靠性与环境工程技术重点实验室 北京 100076)

摘要:近年来,应用于航空航天领域极端测温场合的温度传感器响应速度已达到微秒量级,然而,如何实现对其进行微秒级的动态校准仍是一个亟待解决的挑战。激波管法和激光法是两种解决该问题的潜在技术途径,二者均可提供微秒级的温度阶跃响应,但也具有不同的特点。激波管法适用于高温高压环境,但其阶跃信号的上升过程和幅值存在不稳定性。激光法则具备非接触性和高精度的特点,但目前尚未建立统一的评估体系,无法直接比较不同温度传感器的动态响应特性。最后,总结出3个关键研究方向:改进现有校准方法、探索新的校准方法,以及构建新的评估理论,以促进微秒级温度传感器动态校准研究和相关技术应用的发展。

关键词:微秒级温度传感器;时间常数;动态校准;激波管;激光

中图分类号: TH811.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.2030

Progress on dynamic calibration of microsecond temperature sensors

Meng Qingfu¹ Tu Chengxu¹ Yang Hongbo¹ Jia Zhouxia² Bao Fubing¹

(1. College of Metrology and Measurement Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Science and Technology on Reliability and Environment Engineering Laboratory, Beijing Institute of Structure and Environment Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: In recent years, the response speed of temperature sensors applied in extreme temperature measurement situations in aerospace has reached the microsecond scale, however, how to realize dynamic calibration of them at the microsecond scale is still a challenge to be solved. The shock tube method and the laser method are two potential technological approaches to the problem, both of which can provide a microsecond temperature step response but also have different characteristics. The shock tube method is suitable for high-temperature and high-pressure environments, but the rising process and amplitude of its step signal are unstable. The laser method is characterized by non-contact and high accuracy, but a unified evaluation system has not yet been established to directly compare the dynamic response characteristics of different temperature sensors. Finally, three key research directions are summarized: improving existing calibration methods, exploring new calibration methods, and constructing new evaluation theories to facilitate the development of microsecond temperature sensor dynamic calibration research and related technology applications.

Keywords: microsecond temperature sensor; time constant; dynamic calibration; shock tube; laser

0 引言

伴随着航空航天及国防领域的迅速发展,航空发动机燃烧室燃烧诊断^[1-2]、高超冲压发动机地面试验^[3-4]、高超声速边界层转捩热流测试^[5-6]以及高能武器毁伤效果评估^[7-8]等测试场合都对动态温度的测量提出了更高的要求。例如,航空发动机燃烧室的燃烧诊断中,对高频动态温度信号

的测量频响要求达到10~50 kHz^[9];在高超冲压发动机地面试验中,采用红外辐射方法测量发动机排气羽流中的动态温度时,要求热像仪的响应时间小于10 ms^[10];在火炮射击过程中需要监测火炮击发时20 ms内的高温动态变化过程,否则火炮身管迅速升温会直接影响火炮筒的寿命^[11]。目前,应用于上述极端场合的温度传感器响应速度已达到微秒量级,保障微秒级温度传感器测量数据的准确性和可

收稿日期:2023-06-21

* 基金项目:国家自然科学基金(11972334,12272367)、浙江省科技计划项目(2021C01099)、浙江省属高校基本科研业务费专项资金(200006, 210081)、“挑战杯”竞赛培育项目(220003)资助

靠性是提高国家动态温度测量质量乃至国防科技水平的重要支撑。

在动态温度测量过程中环境温度随时间迅速变化,由于温度传感器中感温部件的热惯性和有限热传导,温度传感器测得的温度和被测介质的温度之间存在差异,即所谓的动态响应误差^[12]。为减少这一类误差,提高微秒级温度传感器测量数据的可靠性和有效性,通常需对温度传感器进行动态校准,即通过可溯源的、快速变化的温度激励信号研究温度传感器的动态响应特性,并对测量结果加以修正使其更接近实际被测温度。德国工程师协会和德国电气工程师协会针对温度传感器动态校准制定的标准规范中,采用了水浴/油浴法、热风洞法和火焰法^[13]。目前我国对温度传感器的动态校准一般参考国家计量技术规范 JJF 1049-1995《温度传感器动态响应校准》^[14],该校准规范中采用了水浴/油浴法和热风洞法。这些方法只能对响应速度为毫秒量级的温度传感器进行动态校准,而针对微秒级温度传感器尚没有成熟的校准方法,这极大限制了动态测温乃至航空航天技术的进步。

本文综述了解决微秒级温度传感器动态校准问题的两种潜在技术途径:激波管法和激光法。激波管法通过膜片破裂产生激波,形成瞬时的温度阶跃信号,但受激波的不稳定性影响,其信号上升过程和幅值存在不稳定性,限制了其在微秒级温度传感器校准中的应用。相比之下,激光法通过激光照射温度传感器的感温区域,产生微纳秒级的温度变化,实现了对微秒级温度传感器的动态校准。然而,激光法面临激光强度分布不均匀等技术挑战,且不同激励类型需要不同的时间常数评定方法,尚未形成统一的评定标准。最后,文章归纳了微秒级温度传感器动态校准方法未来重点研究方向。

1 时间常数

温度传感器的动态响应特性是指温度传感器的温度与被测介质温度增量之间的关系^[14]。在测量瞬态温度变化时,温度传感器并不会立刻反应被测温度,需要一定时间后才能达到热平衡状态,即温度传感器的响应速度比温度的变化速度慢^[15]。上述标准中都是将温度传感器近似一阶系统下,采用时间常数来衡量其响应速度,表征传感器对外部温度变化的跟随能力^[16]。

一阶系统的动态特性校准方法通常有两种^[17-18]:一种是阶跃激励法,当系统接受单位阶跃信号激励时,其响应信号如图 1(a)所示,系统的阶跃响应为:

$$s(t) = [1 - e^{-t/\tau}]u(t) \quad (1)$$

一般把阶跃响应曲线达到稳态值的 $1 - 1/e$ (即 63.2%) 时所需要的时间定义为该系统的时间常数 τ , 如图 1(a) 所示。另外一种脉冲激励法,当温度传感器接受单位脉冲信号激励时,其响应信号如图 1(b) 所示,单位脉冲响应为:

$$h(t) = \frac{1}{\tau} e^{-t/\tau} u(t) \quad (2)$$

当脉冲响应曲线衰减到最高点的 $1/e$ (即 36.8%) 时,所需要的时间定义为系统的时间常数 τ , 如图 1(b) 所示。同时脉冲响应的的时间常数可以通过曲线最高点做切线求得,由式(2)计算出脉冲响应曲线最高点的斜率:

$$\left. \frac{dY(t)}{dt} \right|_{t=0} = -\frac{1}{\tau^2} \quad (3)$$

根据式(2)和(3)可知,从脉冲响应曲线的顶点做曲线的切线,与时间轴的交点为 τ , 即系统时间常数。

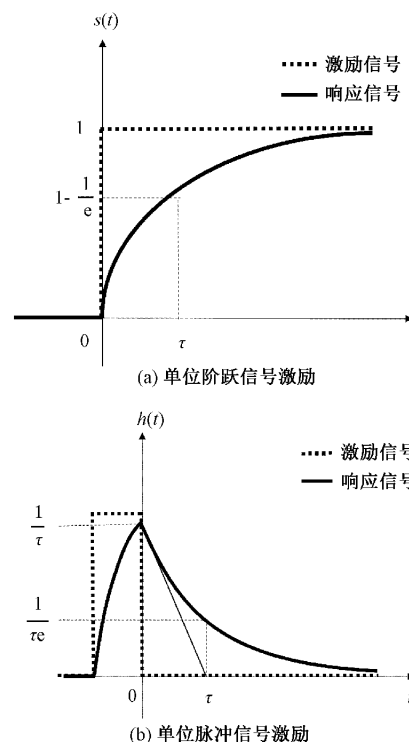


图1 温度传感器响应曲线

2 校准方法

温度传感器的时间常数与其本身的结构、材料和制造方法等相关,由于涉及参数较多,同时感温区域的结构形貌无法准确获得,难以从理论上精确计算出温度传感器的时间常数,且其时间常数还与使用 and 校准工况密切相关,所以温度传感器的时间常数一般通过校准试验来测定^[19]。温度传感器的动态校准过程主要为:产生稳定的校准工况,产生温度阶跃激励温度传感器,采集被校传感器的输出响应信号,计算被校传感器的时间常数^[14]。

国外温度传感器动态特性测定的标准^[13]要求校准过程中确保恒定、可重复和已知的传热条件,包括阶跃响应的开始阶段。我国现行的温度传感器动态校准标准规范^[14]中指出,产生温度阶跃所需要的时间应小于被校传感器时间常数的 10%。对于微秒级温度传感器的动态校准,为了提供高速的温度阶跃条件,产生温度阶跃的时间需要达到

微秒级甚至纳秒级。现行的校准方法中,水浴/油浴法^[20-22]、火焰法^[23-25]和热风洞法^[26-28]均采用了物理弹射手段使温度传感器进入高温环境,实现温度阶跃过程,由于物理弹射机械驱动装置难以产生微纳秒级温度阶跃信号,上述方法只适用于毫秒量级等响应速度较低的温度传感器校准,无法满足微秒级温度传感器的动态校准需求。

2.1 激波管法

为了实现产生上升时间较小的温度阶跃过程,国内外学者对激波管装置进行了深入研究。激波管是一种由膜片分隔成高压段和低压段两段管道的装置,当两段管道的压差达到了膜片临界压力时,即超过膜片承受压力极限,膜片自发破裂,形成激波产生一个瞬时的阶跃信号^[29],如图 2 所示。激波管法作为美国仪器学会 ISA 动态压力校准标准^[30]中动态压力传感器的校准装置,其不仅可以产生微秒级的压力阶跃,由气体动力学理论可知,同时也可以产生微秒级的温度阶跃,可作为微秒级温度传感器动态校准的温度激励。例如 Li 等^[31]采用激波管法完成了对动态响应时间小于 $100 \mu\text{s}$ 的薄膜热电偶的标定测试;Irimpan 等^[32]用激波管对同轴热电偶的动态特性进行了评定,实验结果表明该热电偶的时间常数大约为 $25 \mu\text{s}$ 。

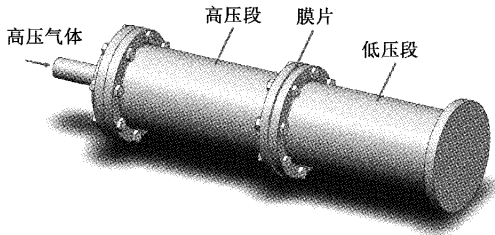


图 2 激波管法实验装置示意图

尽管如此,激波管内的激波传播会对动态校准产生不可忽视的影响^[33]。Mohammed 等^[34]采用了自主研发的快速响应表面温度传感器测量了激波管装置内的温度变化过程,如图 3 所示,激波管产生的温度阶跃上升时间小于 $0.5 \mu\text{s}$,可以满足微秒级温度传感器的动态校准测试需求。但由图 3 可以看出,在温度变化过程中存在两个峰值:第一个峰值为入射冲击波的传播导致,它将空气压缩并加热到较高的温度;第二个峰值为反射冲击波的传播,它再次压缩将空气加热到更高的温度。在入射冲击波和反射冲击波的强度变弱之后,激波管内的温度逐渐达到平衡。同时由于激波管高压段产生稀疏波的影响,温度变化到达第二个峰值后,存在一个温度下降的过程。初始阶段温度变化过程虽然持续时间较短,但会引起温度阶跃激励幅值的较大波动,从而影响动态校准结果。

针对激波管法无法产生稳定激励的问题,杨兆欣等^[35-36]在传统激波管的基础上,设计了如图 4 所示的动态温度校准装置。对原激波管法的高压段和低压段进行了优化,其中高压段采用了循环腔体结构从而产生温度均匀的高温气体,保证低压段的气流温度的稳定性,满足校准过程

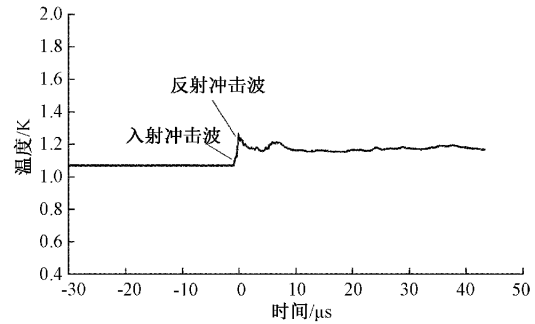


图 3 激波管内激励时的温度变化^[34]

中对阶跃信号的要求;低压段截面积采用了远小于高压段截面积的设计,延长高压段气体在低压段的流动时间,减小温度阶跃幅值的变化。同时在低压段安装了高频响应压力传感器和高精度温度传感器对动态温度校准标准信号幅值稳定过程进行监测。结果表明该方法可以产生幅值稳定且持续时间达到 40 s 的温度阶跃,但是阶跃上升时间随之延长至 1.6 ms ,无法满足微秒级温度传感器对阶跃信号激励的要求。

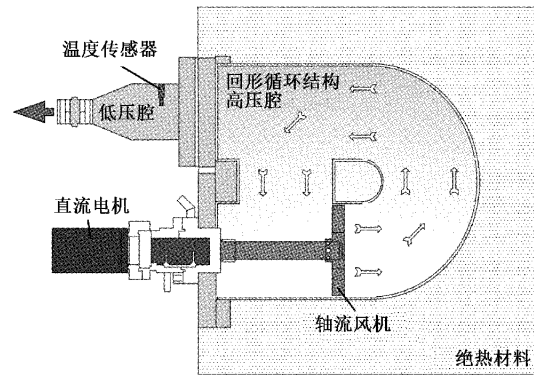


图 4 改进激波管装置图^[35]

综上,激波管法虽然可以为微秒级温度传感器校准提供瞬态的温度阶跃,但是激波管产生的阶跃信号上升过程和幅值具有不稳定性,会直接影响动态校准结果的质量,无法客观评价微秒级温度传感器的动态响应特性。

2.2 激光法

除激波管法外,为了克服难以产生稳定瞬态温度激励问题,学者们发展了基于激光诱导温度变化的温度传感器动态校准技术^[37]。激光法是目前国内外温度传感器动态校准研究中采用最多的一种方法,其测试装置如图 5 所示,利用激光垂直照射在温度传感器的感温区域上,通过辐射换热使得传感器产生微纳秒级温度变化,实现对微秒级温度传感器的动态校准。例如 Cui 等^[38]采用脉冲激光器对自制的 NiSi 薄膜温度传感器的动态性能进行评定研究,时间常数最快可达 $42 \mu\text{s}$;Bourg 等^[39]采用激光器测得 J 型热电偶的上升时间为 $130 \pm 70 \mu\text{s}$ 。

如何保证激光质量稳定性是激光法应用于微秒级温度传感器动态校准的关键。激光器发射的激光一般为椭圆形

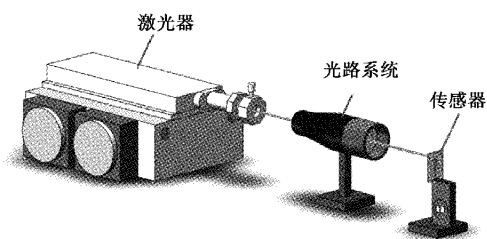
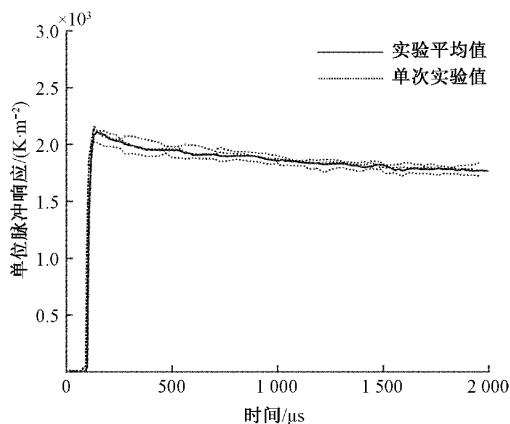


图5 激光法实验装置示意图

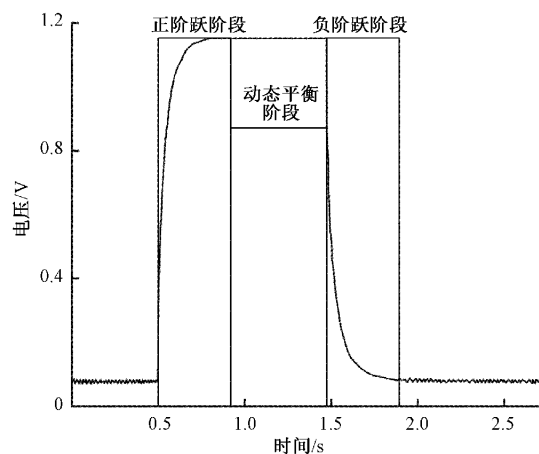
高斯分布的光束,激光强度分布不均匀,形成的光斑温度变化范围较大,会对温度传感器的输出信号产生影响^[40]。Penty等^[41]研究了激光光束在温度传感器上的强度分布,结果表明在温度传感器的表面激光强度变化高达20%。针对激光强度分布不均匀的问题,国内外学者进行了大量的研究,采用光阑拦截^[42]、非球面透镜^[43]、双折射透镜^[44]、二元光学元件法^[45]、液晶空间调制法^[46]、异型棱镜法^[47]、微透镜阵列^[48]等方法对激光光束进行均匀化整形,但无法彻底解决这个问题,可以预见,在校准微秒级温度传感器时,虽然响应曲线只是存在较小的波动,但在求取时间常数时会因为该较小波动产生较大的误差。同时Penty等^[41]采用激光器进行了温度传感器单位脉冲响应实验图6为温度传感器在3种初始温度下经过滤波降噪的脉冲响应曲线。其中深色实线为相同条件下4个实验结果的平均值,相同颜色的透明线为单个实验的结果。由图6可以看出每组实验的误差棒较大,响应曲线的波动明显,在此情况下,动态校准的重复性和准确性将难以保证。

图6 温度传感器脉冲响应曲线^[41]

由于激光分为连续激光和脉冲激光两种,所以激光法可以提供阶跃和脉冲两种温度激励。现研究中根据不同的激光温度激励,其所对应的温度传感器的时间常数评定方法存在着差异。

纳鑫等^[49]采用连续激光器对铜-康铜自制热电偶加热,得到热电偶阶跃温度响应信号,如图7所示。温度阶跃变化过程被分为3个阶段,包括正阶跃阶段、动态平衡阶段和负阶跃阶段。正阶跃阶段以热电偶温度阶跃达到稳态值63.2%对应的时间为其时间常数,负阶跃阶段以热电偶温

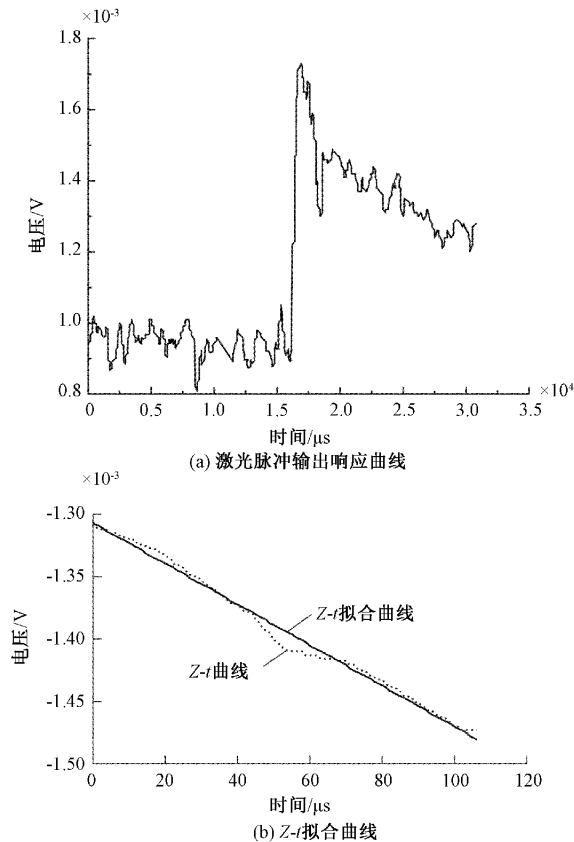
度阶跃达到稳态值36.8%对应的时间为其时间常数。实验结果表明正阶跃阶段测得的时间常数比负阶跃测得的时间常数大,这是由于激光直射在热电偶上,正阶跃阶段只有热电偶正面受到了激光的辐射传热,背面不会因为激光而增加热量,相反会损失掉一部分能量,导致热电偶整体的辐射传热强度降低;而负阶跃阶段,热电偶整体都在与环境进行辐射以及对流传热,散热更快,因此负阶跃阶段时测得的时间常数更小且更接近真值^[50]。另外兰州交通大学^[51]使用正、负阶跃激励微细T型热电偶,求得其时间常数,发现负阶跃过程与时间常数理论模型的边界条件相符,对上述观点进行了补充论证。

图7 热电偶对阶跃激光的响应曲线^[49]

李立凯^[52]采用脉冲激光器对探针式薄膜热电偶进行时间常数测定,由脉冲响应曲线下落沿最高点的切线与时间轴的交点得到时间常数为6.6 μs。张秋宁等^[53]采用脉冲激光作为激励源校准研制的快速响应S型铂铑薄膜热电偶,根据响应曲线上沿到达响应峰值63.2%所需时间得到传感器时间常数为530 μs。王刚等^[54]采用脉冲激光作为激励热源研究Pt/PtRh薄膜热电偶的动态性能,将响应时间分为前响应时间和后响应时间,其中前响应时间为热电偶开始接受能量输入到开始输出电信号的时间,后响应时间为热电偶开始输出电信号到电信号到达峰值的时间。通过前、后响应时间来评定热电偶的动态响应特性,实验结果表明热电偶的整体响应时间在25~40 μs范围内。

王晓娜等^[55]采用脉冲激光器对K型热电偶进行动态校准实验,激光脉冲输出响应曲线如图8(a)所示,并对响应曲线进行Z-t变化得到热电偶的时间常数。由于传统的时间常数求取方法仅取决于整个过程的两个有效值,未涉及响应的全过程,可靠性低,因此对脉冲响应信号曲线的上升部分进行Z-t变化并拟合来求取时间常数。Z-t变化拟合后的曲线如图8(b)所示,通过计算得到该热电偶的时间常数为101 μs。

综上,激光法作为目前的研究热点满足微秒级温度传感器校准的激励要求,但是仍存在重复性和可靠性难以保

图 8 热电偶对脉冲激光的响应曲线^[55]

证的问题,且评定方法较多,尚未形成一套统一的评定体系,无法直接比较各种微秒级温度传感器之间的动态响应特性,限制了微秒级温度传感器的发展。

3 结 论

随着现代科技水平的提高,众多极端测温场合对动态测温技术提出了更高的要求。目前温度传感器的时间常数可达微秒级,如何正确地评定其动态特性是一个重要的问题,这关系到传感器能否及时准确地测量温度的变化。然而针对微秒级温度传感器尚没有成熟的校准方法,这极大的限制了动态测温技术的进步。

水浴/油浴法和热风洞法只适用于时间常数在毫秒量级温度传感器的动态校准,虽然激波管法虽然能够满足微秒级温度激励的产生,但是其重复性和稳定性都无法真正达到动态校准的要求。激光法作为目前的研究热点是微秒级温度传感器校准方法的未来发展方向,但是仍存在着实验实现和理论研究方面的问题。从目前国内外温度传感器动态校准技术的研究现状和趋势来看,待攻克的关键技术如下:

完善现行的校准方法:针对激波管法和激光法,对其不足进行完善,如设计激波管的内部结构满足校准需求、继续提升激光法中光斑的均匀度、构建激光法统一的评定方法等。

发展新的校准方法:随着动态温度测量技术的发展,现有校准技术的完善能否满足更快的温度传感器校准需求仍是未知。在后续研究中,还需尝试发展新的校准方法,如双脉冲激光等新的温度激励方法。

发展新的评定理论:在实验数据的基础上,发展新的温度传感器动态特性评定理论,建立完善的数学模型,使得动态温度校准水平能够适应动态温度测量技术的快速发展。

解决微秒级乃至未来纳秒级、皮秒级的温度传感器动态校准问题,并形成一套科学统一的动态响应特性评定标准规范,是提高国家动态温度计量水平的必由之路。

参考文献

- [1] 徐毅,黄明镜,程新琦,等. 航空发动机涡轮叶片涂层热电偶测温技术[J]. 航空发动机, 2021, 47(1): 91-95.
- [2] ZHOU Y, HUANG Y, MU Z. Large eddy simulation of the influence of synthetic inlet turbulence on a practical aeroengine combustor with counter-rotating swirler [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(3): 978-990.
- [3] ZHANG C, YAO Z, QIN J, et al. Experimental study on measurement and calculation of heat flux in supersonic combustor of scramjet [J]. Journal of Thermal Science, 2015, 24(3): 254-259.
- [4] 史超. 冲压发动机地面试验技术及试验能力述评[J]. 火箭推进, 2021, 47(1): 1-12.
- [5] FONTANESI S, GIACOPINI M. Multiphase CFD-CHT optimization of the cooling jacket and FEM analysis of the engine head of a V6 diesel engine[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 52(2): 293-303.
- [6] KEGERISE M A, RUFER S J. Unsteady heat-flux measurements of second-mode instability waves in a hypersonic flat-plate boundary layer[J]. Experiments in Fluids, 2016, 57(8): 1-15.
- [7] 李奇. 大气中激光热烧蚀数值模拟及毁伤效果评估方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2019.
- [8] ROSS M J, JENKINS R B, NELSON C, et al. High temperature effects during high energy laser strikes on embedded fiber bragg grating sensors[J]. Sensors, 2019, 19(6): 1432-1441.
- [9] 王毅,赵俭. 动态温度测量与校准技术[J]. 计测技术, 2015, 35(1): 9-13,44.
- [10] YI J H, SUN Z H, WANG C J, et al. Dynamic measurement and correction of infrared radiation temperature for rocket motor exhaust plume [J]. FirePhysChem, 2021, 1(1): 21-26.
- [11] 赵彦凯. 火炮膛内瞬态温度测试技术研究[D]. 太原:中北大学, 2021.
- [12] 郝晓剑,邢恩普,管清波,等. 铠装 K 型热电偶动态响

- 应误差补偿研究(英文)[J]. 测试科学与仪器:英文版, 2014, 5(4): 10-15.
- [13] 中国计量科学研究院,上海市计量测试技术研究院,苏州集成校准检测认证有限公司,等. 振动与冲击传感器校准方法第43部分:基于模型参数辨识的加速度计校准:GB/T 20485.43-2021[S]. 北京:国家市场监督管理总局,国家标准化委员会,2021.
- [14] 航空工业总公司第304研究所. 温度传感器动态响应校准规范:JJF 1049-1995[S]. 北京:国家技术监督局,1995.
- [15] GARINEI A, TAGLIAFERRI E. A laser calibration system for in situ dynamic characterization of temperature sensors[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 190: 19-24.
- [16] WU F, YANG X, WANG L. Study on measuring time constants of surface temperature sensors[J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2014, 34(4): 60-62.
- [17] 郝晓剑,闫庆丰. 高斯脉冲激光激励热电偶时间常数测试及有限元仿真[J]. *应用激光*, 2020, 40(3): 526-531.
- [18] 段向港,郝晓剑. 热电偶时间常数测试中阶跃升温信号的研究[J]. *激光技术*, 2018, 42(2): 192-195.
- [19] 闫庆丰. 激光激励热电偶温度传感器时间常数测试技术研究[D]. 太原:中北大学,2020.
- [20] GOSWAMI R, KUMAR R. Dynamic calibration of temperature sensors from light rays for transient measurement[J]. *Thermal Science*, 2019, 23(3 Part B): 1901-1910.
- [21] ZHAO X M, WANG W L, LI Y F, et al. Temperature sensor's dynamic characteristic compensation during the test of flame temperature field[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2017, 30(5): 735-741.
- [22] 贾超,蔡杰,熊朝晖. 不同传热方式下温度传感器动态特性研究[J]. *计量学报*, 2020, 41(5): 563-566.
- [23] 李晓丹,裴焕斗,赵学敏. 高温火焰法在热电偶动态特性分析中的应用[J]. *中国科技论文*, 2018, 13(14): 1674-1678.
- [24] 赵学敏,王文廉,李岩峰,等. 火焰温度场测试中的传感器动态特性补偿[J]. *传感技术学报*, 2017, 30(5): 735-741.
- [25] 张根甫,郝晓剑,桑涛,等. 热电偶温度传感器动态响应特性研究[J]. *中国测试*, 2015, 41(10): 68-72.
- [26] AUGUSTIN S, FRÖHLICH T, AMENT C, et al. Dynamic properties of contact thermometers for high temperatures[J]. *Measurement*, 2014, 51: 387-392.
- [27] TERZIS A, VON WOLFERSDORF J, WEIGAND B, et al. Thermocouple thermal inertia effects on impingement heat transfer experiments using the transient liquid crystal technique[J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(11): 115303.
- [28] DING J, TANG X, YANG S, et al. Dynamic characteristics calibration of temperature sensor based on miniaturized deflagrating generation equipment[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2018, 31(2): 195-201.
- [29] 杨军,薛斌. 激波管管长对阶跃压力波形的影响分析[J]. *振动与冲击*, 2019, 38(3): 252-257.
- [30] American Society of Mechanical Engineers. A guide for the dynamic calibration of pressure transducers[S]. New York, USA: ASME, 1972.
- [31] LI J, CHEN H, ZHANG S, et al. On the response of coaxial surface thermocouples for transient aerodynamic heating measurements[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 86: 141-148.
- [32] IRIMPAN K J, MANNIL N, ARYA H, et al. Performance evaluation of coaxial thermocouple against platinum thin film gauge for heat flux measurement in shock tunnel[J]. *Measurement*, 2015, 61: 291-298.
- [33] 杨兆欣,顾正华,张文清. 冲击动力学在传感器校准方面的应用研究[A]. 中国力学大会-2021+1, 2022, 中国陕西西安、线上会议.
- [34] MOHAMMED H A, SALLEH H, YUSOFF M Z. Fast response surface temperature sensor for hypersonic vehicles I[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2010, 53(1): 153-159.
- [35] 杨兆欣,顾正华,张文清,等. 基于激波原理的气体动态温度校准装置研究[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(5): 23-31.
- [36] 杨兆欣,曾星,张文清. 气体介质条件下的热电偶动态特性[J]. *航空动力学报*, 2020, 35(12): 2514-2520.
- [37] YANG H B, TU C X, JIA Z X, et al. Dynamic characterization of thermocouples under double-pulse laser-induced thermal excitation[J]. *Sensors*, 2023, 23(5): 2367.
- [38] CUI Y X, YANG D S, JIA Y, et al. Dynamic calibration of the cutting temperature sensor of NiCr/NiSi thin-film thermocouple[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 24(1): 73-77.
- [39] BOURG M E, VAN DER VEER W, GRÜWELL A, et al. Electrodeposited submicron thermocouples with microsecond response times[J]. *Nano letters*, 2007, 7(10): 3208-3213.
- [40] 程航,张志杰,李岩峰. 温度传感器校准中激光光束均匀化研究[J]. *激光杂志*, 2017, 38(7): 44-47.
- [41] PENTY G R T, MCGILVRAY M, WILLIAMS B, et al. Laser-based calibration and processing

- techniques for a robust fast-response surface heat transfer gauge[J]. 2018 Joint Thermophysics and Heat Transfer Conference, 2018.
- [42] 于晓晨, 胡家升, 王连宝. 基于液晶空间光调制器的激光束整形[J]. 光学学报, 2012, 32(5): 133-138.
- [43] MAXSON J M, BARTNIK A C, BAZAROV IV. Efficient and accurate laser shaping with liquid crystal spatial light modulators[J]. Applied Physics Letters, 2014, 105(17): 171109.
- [44] HSIAO Y N, WU H P, CHEN C H, et al. One-dimensional reflective diffuser for line beam shaper with microlens array homogenizer[J]. Optical Review, 2014, 21(5): 715-718.
- [45] 吴学锋. 基于高功率光纤激光器的光束整形镜研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2011.
- [46] 马向宁. 使用液晶空间光调制器实现激光束整形[D]. 大连:大连理工大学, 2013.
- [47] 曾晓东, 安毓英. 堆积式(Stack)大功率激光二极管光束整形[A]. 第十届全国光电技术与系统学术会议.
- [48] JIN Y H, ALI H, JIANG Y J. Freeform microlens array homogenizer for excimer laser beam shaping[J]. Optics Express, 2016, 24(22): 24846-24858.
- [49] 纳鑫, 谢建斌, 徐立新, 等. 一种用于高速气流瞬态测温的快速响应热电偶[J]. 科学通报, 2019, 64(31): 3223-3231.
- [50] 刘宁, 徐毅, 刘显明, 等. 基于脉冲激光负阶跃响应的高速热电偶时间常数测量方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(4): 254-262.
- [51] NA X, XIE J, XU L, et al. A rapid response micro-thermocouple used for transient temperature measurement of high-speed gas flow [J]. Chinese Science Bulletin-Chinese, 2019, 64(7): 3223-3231.
- [52] 李立凯. 快响应探针式薄膜热电偶的设计及制备技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2022.
- [53] 张秋宁, 张志杰, 陈昊泽. 一种新型铂铑薄膜热电偶的制备及其性能测试[J]. 微纳电子技术, 2022, 59(5): 473-479, 493.
- [54] 王刚, 姚锦元, 王博, 等. Pt/PtRh 薄膜热电偶的动态性能研究[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(6): 37-39.
- [55] 王晓娜, 于方舟, 杨遂军, 等. 基于集总热容法的薄膜热电偶动态特性研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(12): 1627-1631.

作者简介

孟庆富, 硕士研究生, 主要研究方向为高温环境下热流传感器的动态校准方法的研究。

E-mail: p21020854087@cjlu.edu.cn

涂程旭(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为多相流检测及其计量技术。

E-mail: tuchengxu@cjlu.edu.cn

杨洪波, 硕士研究生, 主要研究方向为微秒级温度传感器动态校准系统的研究。

E-mail: yanghb1211@163.com

贾洲侠, 博士, 工程师, 主要研究方向为飞行器热防护及热强度试验技术。

E-mail: zxjia@163.com

包福兵, 博士, 教授, 主要研究方向为流量计量与流体测试技术。

E-mail: dingobao@cjlu.edu.cn