

气体介质条件下的热电偶动态特性

杨兆欣, 曾 星, 张文清

(中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 针对热电偶动态特性的评估问题,实现热电偶测试性能评估与气体介质条件的匹配,开展了气体介质条件下热电偶动态特性研究。通过对传统激波管的结构和功能改造,设计了动态气体温度校准装置,开展了动态温度校准标准信号溯源方法的研究,建立了热电偶动态数学模型,实现了热电偶动态特性的定量描述和试验验证。动态校准试验结果表明:基于传统激波管改造的动态气体温度校准装置可以产生频域覆盖范围宽、阶跃幅值稳定的标准温度信号,基本可以覆盖常规温度传感器的动态校准需求;所采用的动态建模方法可以较为准确地评估热电偶动态模型的阶次和参数。经实验验证,建立的热电偶动态数学模型响应与实际响应信号的相关系数可以达到 0.996 7,基本可以满足热电偶动态特性评估的工程需要。

关 键 词: 气体介质; 热电偶; 动态校准装置; 激波管; 动态特性

中图分类号: V211.71 **文献标志码:** A

Dynamic characteristics of thermocouple in gas medium

YANG Zhaoxin, ZENG Xing, ZHANG Wenqing

(Facility Design and Instrumentation Institute,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: In order to estimate the dynamic characteristics of the thermocouples and fulfill the matching requirement of dynamic characteristics estimation with the gas medium, the dynamic characterization research of the thermocouples with the gas medium was studied. Based on the improvement of structure and function of traditional shock tube, dynamic calibration equipment for the gas temperature was designed, the traceability method of standard signal of dynamic temperature calibration was analyzed, the dynamic model of thermocouple was established, and precise description and experimental verification was realized. The result of dynamic calibration experiment showed that the dynamic calibration equipment for the gas temperature based on traditional shock tube transformation could generate standard temperature signal featuring wide frequency coverage and steady step amplitude. The dynamic calibration requirement of the conventional thermocouples can basically be fulfilled by the generated standard temperature signal; the thermocouple dynamic model and the order can be estimated very accurately with the adopted dynamic modelling method. With the verified results of the experiment, the correlation coefficient between the response signal of the established thermocouple dynamic model and the testing response signal could achieve 0.996 7, which can generally satisfy the requirement of dynamic characterization estimation of thermocouple in the engineering applications.

收稿日期: 2020-04-20
作者简介: 杨兆欣(1982—),男,工程师,博士,主要研究方向为风洞流场测试技术。

引用格式: 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. YANG Zhaoxin, ZENG Xing, ZHANG Wenqing. Dynamic characteristics of thermocouple in gas medium[J]. Journal of Aerospace Power, 2020,35(12):2514-2520.

Key words: gas medium; thermocouple; dynamic calibration equipment; shock tube; dynamic characteristics

热电偶是工业领域通用温度传感器,具有动态特性好、精度高、成本低等优点。常被应用于动态温度测量工况^[1-5]。为了提高动态温度测量数据的可靠性和有效性,需要对热电偶的动态特性进行评估^[6]。动态特性评估通常是基于动态校准装置实现的。常用的热电偶动态校准装置有水浴油浴装置、激光阶跃校准装置、电加热校准装置等^[7]。校准装置介质条件对于接触式测温传热过程具有重要影响,如果热电偶实际工况介质与校准介质不一致,得到的动态性能评估结果与工程实际可能存在巨大差异。对于气体介质动态温度校准装置,具有代表性的是热风洞动态校准设备^[8]。该设备具有流场温度稳定,温度上限值高等优点,对于气体介质条件下热电偶动态特性评估提供了持续、可靠的校准标准信号源,基本可以满足常规温度传感器的动态校准需求。但该装置采用物理弹射方式实现标准信号阶跃过程,该方法上升时间相对较长,无法实现高频响温度传感器的动态校准。此外,进行动态温度校准时,热风洞若采用开口试验段,受环境温度对于激励温度信号幅值和上升过程的传热干扰,直接影响到动态校准数据质量。

为了解决现有气体介质动态温度校准装置介质匹配、标准信号发生和溯源等问题,结合激波管原理,研制了气体介质条件下热电偶动态校准装置,并对动态温度校准标准信号的溯源方法进行了研究。以此为基础,进行了热电偶动态特性评估研究。研究结果对于气体介质条件下热电偶动态特性的精确评估具有参考意义。

1 动态气体温度校准装置

校准装置是进行校准活动的物质基础,需要满足的两个前提条件是标准信号发生和标准信号可溯源。其中,动态校准标准信号要求其频域范围能够覆盖被校准测试系统的频域范围^[9]。动态气体温度校准装置的研制主要围绕动态温度激励信号的发生和动态激励信号的溯源两方面展开。

1.1 动态温度校准标准信号发生

气体动态温度校准标准信号发生最具挑战性的是可以产生上升时间较小的幅值阶跃过程。由于气体分子稀薄,通过传热的方式,难以产生较快的阶跃温度变化。本论文采用气体压缩的方式实

现温度上升,具体是利用激波管产生的激波压缩气体,使得气体温度产生瞬时阶跃变化实现标准信号的发生,而该过程在数学上公认地作为理想阶跃来处理^[10-11],由此产生的温度信号可以满足动态校准对于激励信号频域覆盖的要求。

激波管本质而言是一个被膜片隔开的管子,一端可以是开口或者闭口,另一端为闭口。在闭口段充满高压气体,为激波运动提供驱动力。当膜片两端的压力差达到膜片临界压力值(实现破膜的最低压力值),膜片自然破裂,同时产生向膜片下游端运动的激波^[12]。基于传统激波管产生的温度变化过程,并不是一个理想的阶跃过程^[13],由于高压段产生稀疏波的影响,气体在被激波压缩产生瞬态阶跃过程后,会有一个温度下降的过程。而且仅可以持续毫秒级的温度变化过程,对于常规热电偶而言,无法产生有效激励。无法满足标准信号对于幅值稳定过程的要求。

由此,本论文对激波管高压段和低压段进行了改造设计,目的是实现标准信号在激波压缩温度变化过程后可以产生幅值持续稳定的温度信号,从而满足标准信号对于幅值稳定过程的要求。

1.1.1 动态气体温度校准装置高压段设计

为了实现上述目的,通过对激波管的高压段改造,使得校准装置在激波过程结束后转入持续稳定的高温气流发生过程。一方面通过激波压缩特性满足了标准信号的频域覆盖要求,另一方面通过持续稳定高温气流发生过程满足了常规温度传感器对于校准持续时间和标准信号幅值稳定性的要求。

高压段结构改造具体采用了循环腔体结构,在腔体内部安装了电加热器和轴流风机,通过轴流风机和电加热器的综合作用,实现腔体内气体循环加热,从而在腔体内产生温度均匀的高温气体。为了保证加热效率和防护安全,在高压段外裹覆有保温绝热层。高压段气体保持高压,低压段气体通过真空泵调节低压段压力,控制膜片自然破裂,同时由高低压段压差驱动气体在低压段内的持续流动。由于高压段内为温度均匀的高温气体,因此在低压段内可以产生幅值稳定、作用持续的气流温度,从而满足标准信号对于幅值稳定过程的要求。结构示意图如图 1 所示。

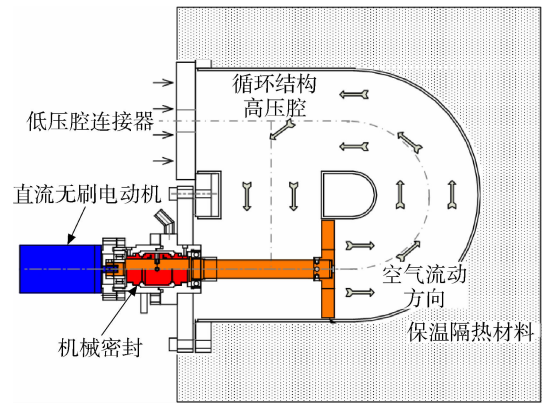


图 1 高压段结构示意图

Fig. 1 Structure schematic diagram of high pressure section

1. 1. 2 动态气体温度校准装置低压段设计

低压段设计目的是为了满传感器动态校准对于标准信号幅值稳定性的要求。因此,与传统激波管低压段设计理念和结构存在较大差异。

低压段截面积设计远小于高压段,一方面可以使得自然破膜后高压段内气体在低压段流动持续较长时间,另一方面可以减小高压段内产生稀疏波对于激波压缩阶跃过程温度变化幅值的影响。低压段结构示意图如图 2 所示。被校热电偶安装在低压段侧壁上。在低压段下游出口位置安装有节流喷嘴,实现低压段内流速的精确控制。节流喷嘴另一侧与真空泵连接。

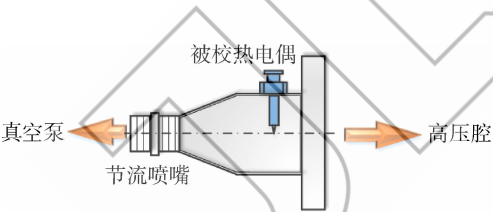


图 2 低压段结构示意图

Fig. 2 Structure schematic diagram of low pressure section

1. 2 动态温度校准标准信号溯源

动态温度校准标准信号溯源包括幅值阶跃过程和幅值稳定过程的评估。由于温度传感器动态特性的局限,标准信号阶跃过程的评估是难点。幅值阶跃过程的实现是基于激波原理,激波是一个厚度与分子平均自由程同量级的区域,激波压缩产生的温度、压力阶跃变化被认为是不同量纲、同时进行、同一变化过程^[13-16],因此,幅值阶跃过程,可以通过高频响压力传感器对同过程的温度变化进行定量评估。而幅值稳定过程的评估为稳

态过程,可以通过高精度温度传感器对其进行定量评估。高频响压力传感器的动态性能参数和高精度温度传感器稳态响应可以基于行业校准规范或国家计量标准进行溯源。综上,通过高频响压力传感器与高精度温度传感器响应信号信息融合实现动态温度校准标准信号的溯源,原理图如图 3 所示。

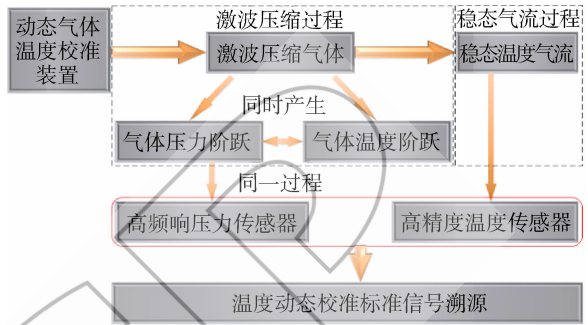


图 3 动态温度校准标准信号溯源方法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of traceability approach for standard signal of dynamic temperature calibration

高频响压力传感器与高精度温度传感器以及被校热电偶均安装于低压段同一横截面处。其中,高频响压力传感器安装于低压段侧壁上,感应端面与低压段内壁平齐,实现对标准信号幅值阶跃过程进行评估。高精度温度传感器与被校热电偶的敏感头尽可能靠近,即对同一物理点进行测试,实现对标准信号幅值稳定过程的评估。高频响压力传感器和高精度温度传感器位置示意图如图 4 所示。

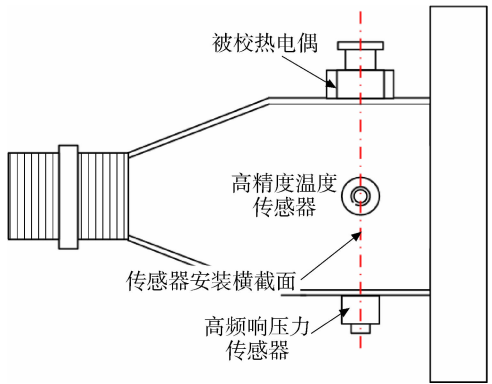


图 4 高频响压力传感器和高精度温度传感器位置示意图

Fig. 4 Positon schematic diagram of high frequency pressure sensor and high precision temperature sensor

2 热电偶动态特性分析

铠装热电偶是由金属套管、绝缘陶瓷以及热电偶丝组成的套管热电偶^[17]。铠装热电偶外部封装通常是不锈钢管(热工测试技术),其内部填充有电熔 MgO 绝缘的热电偶丝,三者经过组合加工,由粗管坯拉逐步制成为绝缘层十分致密的、坚实的组合体^[18]。其常见的结构包括露端型、接壳型以及绝缘性结构,结果形式如图 5 所示^[19]。

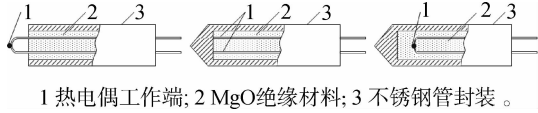


图 5 铠装热电偶结构形式

Fig. 5 Structure formation of shield thermocouple

鉴于本论文研究方向,采用露端型结构热电偶。热电偶置于高温气体流场中,由于封装外壳温度对于热电偶丝温度具有辐射和导热因素的影响,热电偶动态特性会呈现相较于 1 阶系统更为复杂的特性^[20-21]。

采用同时辨识模型参数和阶次的方法,对铠装热电偶动态模型阶次进行验证,并对动态模型参数进行辨识。对于热电偶测试系统而言,为单输入单输出线性定常系统,其差分方程模型可以表示为^[22]

$$\sum_{i=0}^n B(d^{-i}) \cdot t_g(k) = \sum_{i=0}^n A(d^{-i}) \cdot t_m(k) + \varepsilon(k) \quad (1)$$

$$A(d^{-i}) = a_i d^{-i}$$

$$B(d^{-i}) = b_i d^{-i}, \quad (i = 0, 1, \dots, n)$$

式中 t_m 为被校准热电偶响应温度信号, t_g 为动态校准标准温度信号, $A(d^{-i})$ 、 $B(d^{-i})$ 为差分方程系数序列, $a_0 = 1$, d^{-i} 为后移算子, a_i 和 b_i 为待辨识参数, $\varepsilon(k)$ 为噪声序列, n 为模型阶次。

假定模型阶次估计值为 $\hat{n}$, 并且 $\hat{n} \leq v$, 定义辨识参数序列 θ 及噪声序列 e , 分别为

$$\theta = [b_v \quad a_v \quad b_{v-1} \quad a_{v-1} \quad \dots \quad b_0 \quad a_0]$$

$$e = [\varepsilon(1) \quad \varepsilon(2) \quad \dots \quad \varepsilon(N_0)]$$

$$N_0 = N - v \quad (2)$$

式中 θ 为辨识参数序列, e 为观测噪声序列, N 为 t_m 和 t_g 的数据长度, N_0 、 v 是正整数, 其中 v 为估计阶次上限值。

式(1)可进一步转换为

$$\sum_{i=0}^v B(d^{-i}) \cdot t_g(v+k) - \sum_{i=0}^v A(d^{-i}) \cdot t_m(v+k) = \varepsilon(k)$$

$$k = 1, 2, \dots, N_0 \quad (3)$$

定义由输入输出信息构成的信息矩阵为

$$D =$$

$$[t_g(k) \quad -t_m(k) \quad \dots \quad t_g(k+v) \quad -t_m(k+v)] \quad (4)$$

式(3)可以转换为

$$D \cdot \theta = e \quad (5)$$

由最小二乘法定义, 确定指标函数

$$J(\theta) = \|e - D \cdot \theta\|_2^2 = (e - D \cdot \theta)^T \cdot (e - D \cdot \theta) \quad (6)$$

通过 Householder 算法可以将信息矩阵 D 和噪声序列 e 进行上三角变换^[23-24], 可得

$$H \cdot D = \begin{bmatrix} R \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$H \cdot e = \begin{bmatrix} g_1 \\ \vdots \\ g_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中 H 为正交变换阵, R 为 $(2v+2)$ 阶上三角阵, g_1 为 $(2v+2)$ 维列向量, g_2 为 $[N_0 - (2v+2)]$ 维列向量。

式(6)可进一步转换为

$$J(\theta) = \left\| \begin{bmatrix} g_1 - R \cdot \theta \\ g_2 \end{bmatrix} \right\|_2^2 = \|g_1 - R \cdot \theta\|_2^2 + \|g_2\|_2^2 \quad (9)$$

由式(9)可以分别得到指标函数和辨识参数序列的解析解为

$$J(\hat{\theta}) = \|g_2\|_2^2 \quad (10)$$

$$\hat{\theta} = R^{-1} \cdot g_1 \quad (11)$$

由最小二乘理论, 当系统响应噪声 $\varepsilon(k)$ 为白噪声时, 由系统辨识方法得到的待辨识参数为无偏估计, 当 $\varepsilon(k)$ 为自相关的随机过程, 由系统辨识方法计算的待辨识参数则是有偏的^[25]。对于热电偶测试过程而言, 温度响应噪声信号可以认为是白噪声序列, 因此, 基于最小二乘法辨识模型参数为无偏估计。

3 试验结果

动态校准试验中, 溯源环节采用固有频率 380 kHz 高频响绝压传感器和测试精度为 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ 的高精度温度传感器。被校热电偶采用 K 型热电偶, 被校热电偶响应信号与采集系统之间接入精度为 0.1% 的 50 倍隔离放大器, 采样频率为 150 kHz。破膜时, 高压段内温度为 378°C , 高压段内压力为 258 kPa, 节流喷嘴控制体积流量

为 64 L/min。高频响压力传感器时域响应上升过程如图 6 所示。

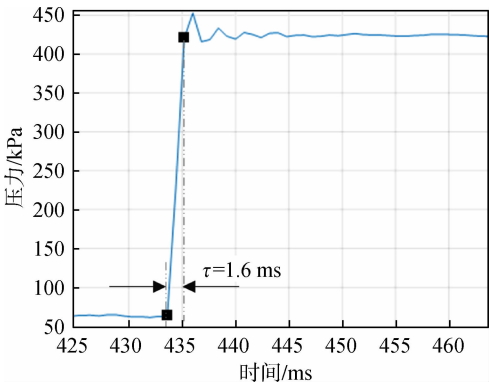


图 6 高频响压力传感器响应信号上升过程局部图
Fig. 6 Partial diagram of the step-up process of the response signal for the high frequency pressure sensor

由图 6 可以得到,压力信号上升时间 $\tau=1.6$ ms。将高频响压力传感器响应信号上升过程和高精度温度传感器响应信号稳值过程进行信息融合处理,可得动态温度校准标准信号时域曲线如图 7 所示。

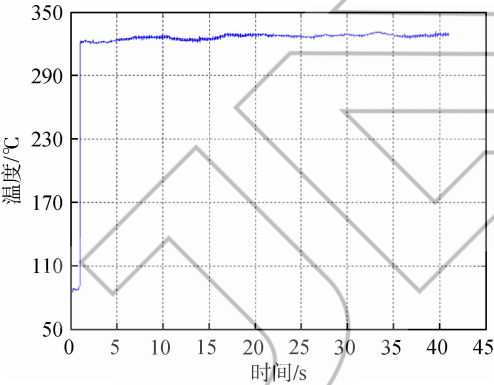


图 7 动态温度校准标准信号时域曲线
Fig. 7 Standard signal of dynamic temperature calibration in time-domain

K 型热电偶时域响应信号波形,如图 8 所示。由动态温度校准标准信号和 K 型热电偶时域响应信号,建立热电偶差分方程模型。基于 Householder 算法,计算指标函数结果如表 1 所示。由表 1 分析得:当 $n \geq 2$ 时, $J(\hat{\theta})$ 变化趋势较为缓慢,故可以得到模型阶次估计值 $\hat{n}=2$ 。进而计算 2 阶差分方程模型待辨识参数,可得离散传递函数为

$$G(z) = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2}$$

(12)

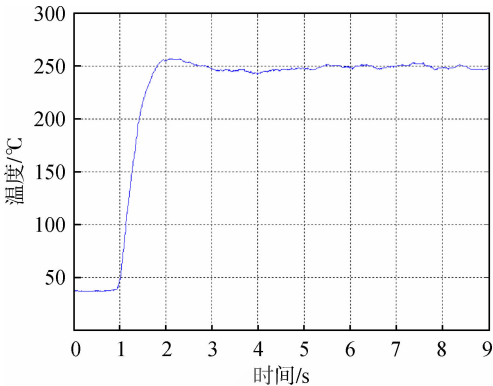


图 8 K 型热电偶时域响应信号曲线
Fig. 8 Response signal of K-type thermocouple in time-domain

表 1 模型阶次及指标函数结果

Table 1	Results of model order and index function	
	$\hat{n}$	$J(\hat{\theta})$
	1	1992.730
	2	17.868
	3	1.790
	4	1.000
	5	0.990
	6	0.982

式中 $b_0=0.021, b_1=-0.0053, b_2=0.024, a_1=-0.449, a_2=-0.511$ 。

经双线性变换后传递函数为

$$G(s) = \frac{5.0173 \times 10^{-2} s^2 + 1.4583 s + 1.5864 \times 10^3}{0.9383 s^2 + 6.0445 s + 1.5771 \times 10^3}$$

(13)

模型仿真实验持续时间为 6 s,比较不同阶次动态模型仿真结果,如图 9 所示。

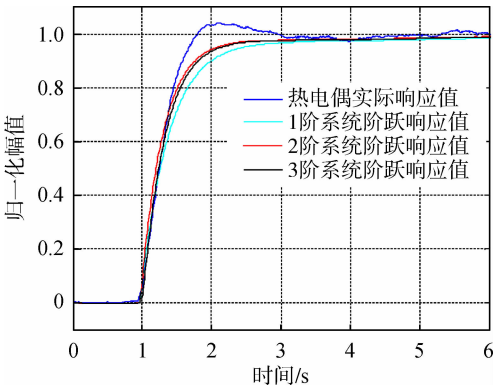


图 9 不同阶次热电偶动态模型仿真结果比较
Fig. 9 Comparison of simulation results of different thermocouple models

由图 9 可以看出,2 阶模型与 3 阶模型响应曲线较为相近,1 阶系统吻合度相对较差。由不同阶次热电偶动态系统与实际响应信号的相关系数,对不同系统仿真效果进行定量评估。1 阶、2 阶及 3 阶系统与实际响应信号的相关系数分别为 $r_1=0.9824$, $r_2=0.9967$, $r_3=0.9958$, 因此可知 2 阶系统仿真结果与实际响应曲线最为接近,与前述内容分析结果一致。

4 结 论

热电偶动态特性研究需要基于可靠、可溯源的动态温度校准装置实现。本论文基于传统激波管的改造,实现了动态温度校准标准信号的发生,基于高频响压力传感器和高精度温度传感器响应信号的信息融合,实现了动态温度校准标准信号的溯源。结果表明:所设计的动态温度校准装置可以产生较为理想的动态温度校准标准信号且满足可溯源性要求。以 K 型热电偶为被校准对象,开展了动态校准实验,建立了 K 型热电偶动态数学模型,动态校准实验结果表明,所建立的热电偶动态模型合理可靠。本论文提出的动态温度校准装置和热电偶动态特性研究方法,对于气体介质条件下温度传感器的动态特性评价提供了有益的探索与尝试。

参考文献:

[1] 陈炳贻,陈国明.航空发动机高温测试技术的发展[J]. 推进技术,1996,17(1):92-96.
CHEN Bingyi, CHEN Guoming. Development of high temperature measurement technique for aeroengines[J]. Journal of Propulsion Technology, 1996, 17(1):92-96. (in Chinese)

[2] SOUSA J, VILLAFANE L, PANIAGUA G. Thermal analysis and modeling of surface heat exchangers operating in the transonic regime[J]. Energy, 2014, 64 (1):961-969.

[3] BASHA M, SHAAHID S M, Al-HadhrAMI L. Impact of inlet fogging and fuels on power and efficiency of gas turbine plants[J]. Thermal Science, 2013, 17 (4):1107-1117.

[4] CHANDRASEKARAN N, GUHA A. Development and optimization of a sustainable turbofan aeroengine for improved performance and emissions[J]. Journal of Aerospace Engineering, 2013, 227(11):1701-1719.

[5] 刘鹏.电渣重熔结晶器多点热电偶测温系统开发与应用[D]. 沈阳:东北大学,2011.
LIU Peng. Multi-point thermocouple temperature system development and application in electros slag remelting mold [D]. Shenyang: Northeastern University, 2011. (in Chinese)

[6] 李杰,樊丁,纪仓国,等.航空发动机温度传感器动态特性改善方法[J]. 航空动力学报,2012,27(3):707-714.
LI Jie, FAN Ding, JI Cangtun, et al. Dynamic response capability improvement method for aero-engine temperature sensor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(3):707-714. (in Chinese)

[7] 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 Xiaojian. Transient high surface temperature measurement and dynamic calibration[D]. Taiyuan: North University of China, 2005. (in Chinese)

[8] 赵时安,廖理,陈勇,等.1700℃热校准风洞[J]. 航空计测技术,2000,20(4):3-6.
ZHAO Shian, LIAO Li, CHEN Yong, et al. 1700℃ hot calibration wind tunnel[J]. Aviation Metrology and Measurement Technology, 2000, 20(4):3-6. (in Chinese)

[9] 郭勇,王效葵,王洪伟,等.高频压力探针动态性能的补偿方法[J]. 航空动力学报,2005,20(2):273-274.
GUO Yong, WANG Xiaokui, WANG Hongwei, et al. Improvement on dynamic characteristics of high response pressure probe [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2):273-274. (in Chinese)

[10] REVEL G M, PANDARESE G, CAVUTO A. The development of a shocktube based characterization technique for air-coupled ultrasonic probes[J]. Ultrasonics, 2014, 54(6):1545-1552.

[11] KAJIKAWA H, KOBATA T. Reproducibility of calibration results by 0-A-0 pressurization procedures for hydraulic pressure transducers [J]. Measurement Science and Technology, 2014, 25(1):015008. 1-015008. 7.

[12] 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.
YANG Jun, XUE Bin. Effects of shock tube length on step pressure waveform [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(3):252-257. (in Chinese)

[13] 拉赫马杜林,谢苗诺夫.激波管[M]. 魏中磊,译.北京:国防工业出版社,1965.

[14] 薛莉.双膜激波管技术在动态校准中的研究[D]. 太原:中北大学,2014.
XUE Li. The research of double diaphragm shock tube in dynamic pressure calibration[D]. Taiyuan: North University of China, 2014. (in Chinese)

[15] 丰雷.影响激波管动态应力校准精度的关键问题研究[D]. 太原:中北大学,2016.
FENG Lei. Reserch of key problems affecting dynamic pressure calibration precision of shock tube[D]. Taiyuan: North University of China, 2016. (in Chinese)

[16] 李进平,冯珩,姜宗林,等.爆轰驱动激波管缝合激波马赫数计算[J]. 空气动力学学报,2008,26(3):291-296.
LI Jingping, FENG Heng, JIANG Zonglin, et al. Numerical computation on the tailored shock Mach numbers for a hydrogen oxygen detonation shock tube[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2008, 26(3):291-296. (in Chinese)

[17] 苏杏丽. 铠装热电偶电缆及铠装热电偶国内外标准化情况分析[J]. 自动化仪器, 2017, 38(8): 68-71.
SU Xingli. Analysis of domestic and foreign standardization for mineral insulated metal sheathed thermocouple cables and thermocouples[J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(8): 68-71. (in Chinese)

[18] 周洪琴. 单芯铠装热电偶的研发[J]. 自动化与仪器仪表, 2008, 137(3): 56-58.
ZHOU Hongqin. Research and development of single-core armored thermocouple[J]. Automation and Instrumentation, 2008, 137(3): 56-58. (in Chinese)

[19] 骆文龙. 严苛环境下露头型热电偶探头的内粘接失效分析与设计改进[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2018.
LUO Wenlong. Design improvement and analysis of internal bonding failure of the dew-type thermocouple probe in harsh environment[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2018. (in Chinese)

[20] 陈姗姗. 变时间常数的钢水连续测温传感器滞后补偿研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
CHEN Shanshan. Study on hysteresis compensation of continuous temperature measurement sensor with variable time constant [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012. (in Chinese)

[21] 肖飞. 火炮射击时身管温度场测试研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
XIAO Fei. Research on the temperature field measurement of the artillery during firing[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005. (in Chinese)

[22] 张广军, 黄俊钦, 李行善, 等. 温度传感器现场动态校准方法与实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1997, 23(3): 311-314.
ZHANG Guangjun, HUANG Junqin, LI Xingshan, et al. Spot calibration method for dynamic performance of temperature transducers and its experimental study[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1997, 23(3): 311-314. (in Chinese)

[23] 王立峰, 李正熙. 前向神经网络快速学习算法在发动机模型辨识中的应用[J]. 航空动力学报, 2003, 18(5): 705-708.
WANG Lifeng, LI Zhengxi. A rapid learning algorithm of feedforward neural network for identification of aeroengine model[J]. Journal of Aerospace Power, 2003, 18(5): 705-708. (in Chinese)

[24] 孙冠群. 基于 Householder 变换的光线寻优自适应算法[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
SUN Guanqun. Adaptive light ray optimization algorithm based on Householder transform[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)

[25] 赵建远, 李醒飞, 田凌子. 有色噪声背景下的正交子空间辨识[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(1): 43-48.
ZHAO Jianyuan, LI Xingfei, TIAN Lingzi. Orthogonal subspace identification in the presence of colored noise[J]. Control Theory Applications, 2015, 32(1): 43-48. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)