

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2021.02.23

几种典型温度传感器跨超音速恢复特性校准

赵俭, 王鹏, 刘琳琳

(航空工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 介绍了跨、超音速条件下温度传感器恢复特性的校准设备与校准方法, 采用反串、低流速原位互校等方法, 针对几种典型结构的温度传感器进行了马赫数 0.95 ~ 2.0 条件下的恢复特性校准, 并与美国航空航天局的校准结果进行了比较, 结果表明, 二者之间的相对偏差在 0.1% ~ 2.8% 之间。通过校准实验揭示了跨、超音速条件下温度传感器恢复特性的相关规律, 为高速气流温度的准确测量提供了依据。

关键词: 跨音速; 超音速; 恢复特性; 校准

中图分类号: TB942

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2021)02-0155-04

Recovery Characteristic Calibration of Several Typical Temperature Sensors under Transonic and Supersonic Conditions

ZHAO Jian, WANG Peng, LIU Linlin

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

Abstract: The device and method of recovery characteristic calibration of temperature sensors under transonic and supersonic conditions are introduced in this paper. By using the method such as inverse series connection and local mutual correction at low flow speed, several typical temperature sensors are calibrated under conditions of Mach 0.95 to Mach 2.0, and the calibration results are compared with the results of NASA. Comparison results show that relative deviation between them ranges in 0.1% ~ 2.8%. Some laws on recovery characteristic of temperature sensors under transonic and supersonic conditions are revealed through the calibration, which can provide basis for precise measurement of high-speed gas temperature.

Key words: transonic; supersonic; recovery characteristic; calibration

0 引言

飞行器在飞行试验和正常服役时, 需要准确地测量大气总温, 以获得大气密度和真空速等关键参数^[1]。超音速条件下, 在大气总温传感器的各类误差中, 速度误差占主要成分, 而温度传感器的恢复特性通常用来表征其速度误差的大小。对于恢复系数为 0.8 ~ 0.9 的温度传感器而言, 当飞行马赫数为 2 时, 其相对速度误差高达 4.4% ~ 8.9%。如果不对速度误差进行修正, 将会严重影响大气总温测量的准确性。因此, 在使用大气总温传感器之前, 需要模拟实际工况, 对其进行恢复特性校准, 以便对速度误差进行修正。我国在役、在研的多款飞机、导弹, 飞行马赫数上限可达到 2, 而目前国内温度传感器恢复特性的校准只能在亚音速条件下进行, 超音速条件下的温度传感器恢复特性校准技术研究尚不完善。

作为高超声速飞行器主要动力的超燃冲压发动机,

内流马赫数在 1 ~ 2 之间。根据美国航空航天局 (NASA) 的早期研究结果, 气流温度对温度传感器恢复特性的影响程度较小^[2], 而高温恢复特性校准难以实现, 因此, 国内外通行的做法是用常温下的恢复特性来代替高温下的恢复特性。因此, 需要模拟超音速气流马赫数工况, 对温度传感器进行恢复特性校准。

综上所述, 开展超音速条件下温度传感器恢复特性校准技术研究, 以获取准确的总温测量修正结果具有重要意义。

1 被校传感器简介

被校温度传感器的敏感元件均为 K 型热电偶, 偶丝直径 0.5 mm, 选用三种不同的结构类型: 裸露式对焊结构、裸露式两侧带管结构以及屏蔽式结构。被校温度传感器头部照片如图 1 所示, 其中, 裸露式对焊结构如图 1(a) 所示, 其特点为气流方向垂直于偶丝平面; 裸露式两侧带管结构如图 1(b) 所示, 其特点为:

偶丝为楔形焊,在偶丝两侧设计有测压管,支杆为 L 形,气流方向平行于偶丝平面;屏蔽式结构如图 1(c)所示,其特点为:偶丝为楔形焊,设计有屏蔽罩,出气口为延伸到屏蔽罩端部的长槽,屏蔽罩进出气口面积比为 3.5,气流方向平行于偶丝平面。



(a) 裸露式对焊 (b) 裸露式两侧带管 (c) 屏蔽式

图 1 被校传感器头部照片

上述三种温度传感器仿照美国 NASA 的温度传感器结构,目的是与 NASA 的校准结果进行比对。

2 校准设备与方法

2.1 校准设备

恢复特性校准在超音速恢复特性校准系统(主体部分为校准风洞)上进行,超音速恢复特性校准系统由压缩机组、油水分离器、干燥器、气罐组、调节阀、过渡段、稳定段、喷管、试验段、排气段、背压阀、消音塔、数据采集系统及控制系统等部分组成,如图 2 所示。

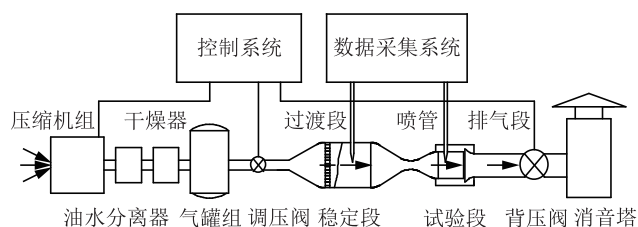


图 2 校准设备框图

喷管和试验段采用一体化设计,试验段组件根据不同的气流马赫数范围分为亚音速试验段组件、跨音速试验段组件和超音速试验段组件,其中亚音速试验段组件和跨音速试验段组件的气流马赫数可连续调节,超音速试验段组件采用固壁式喷管,每一个喷管对应一个固定的气流马赫数。

参考温度传感器为单屏蔽式温度传感器,敏感元件采用 K 型热电偶。参考温度传感器安装于风洞稳定

段,从稳定段到试验段,沿程均做保温处理,以减小气流沿程的热量损失,保证参考温度传感器与被校温度传感器测量同样的气流总温。

2.2 校准方法

表征温度传感器恢复特性的参量有三个:恢复系数、恢复修正系数和恢复率,其定义式^[3]分别为

$$r = \frac{T_g - T}{T_0 - T} \quad (1)$$

式中: r 为恢复系数; T_g 为气流有效温度, K; T 为气流静温, K; T_0 为气流总温, K。

$$\Delta = \frac{T_0 - T_g}{T_0} \quad (2)$$

式中: Δ 为恢复修正系数。

$$R = \frac{T_g}{T_0} \quad (3)$$

式中: R 为恢复率。

校准时,由于静温不可得,恢复系数 r 按式(4)进行计算。

$$r = 1 - \frac{T_0 - T_g}{T_0} \left[1 + \frac{2}{(\kappa - 1)Ma^2} \right] \quad (4)$$

式中: κ 为气体绝热指数,空气取 1.4; Ma 为气流马赫数。

为减小校准不确定度,按反串法接线,即参考温度传感器与被校温度传感器的负极相连,将二者正极之间的电势差作为温差电势,按分度表将温差电势转换为温差 $T_0 - T_g$ 。

由于参考温度传感器与被校温度传感器的分度值存在一定差异,因此校准时,首先应采用低流速原位互校法进行互校^[4]。

改变试验段气流马赫数,对被校温度传感器进行恢复特性校准。由于参考温度传感器位于气流速度较低的稳定段,故以其指示温度作为气流总温 T_0 。由于气流温度为室温,被校温度传感器的辐射误差、导热误差可忽略不计^[5],其指示温度可作为气流有效温度 T_g 。需要说明的是,对敏感元件为 T 型热电偶的温度传感器进行恢复特性校准时,应注意气流温度与环境温度的差异,如果差异明显,由于 T 型热电偶具有良好的导热性,用被校温度传感器的指示温度作为气流有效温度时会引起较大的误差^[6-7]。每一个马赫数下的温差电势在参与计算之前,需要减去互校时的温差电势。

工况稳定后,采集并记录数据,根据式(2)~式(4)计算被校温度传感器的恢复修正系数、恢复率和恢复系数。

3 校准结果与分析

三种温度传感器的恢复特性校准分别在马赫数 0.95, 1.0, 1.1, 1.6, 2.0 下进行, 气流总温为常温, 校准结果如表 1 所示。

表 1 三种温度传感器的恢复特性校准结果

马赫数 <i>Ma</i>	传感器 结构类型	气流总温 <i>t</i> ₀ /℃	恢复 系数 <i>r</i>	恢复 率 <i>R</i>	恢复修正 系数 Δ
0.95	裸露式对焊	16.1	0.760	0.963	0.037
	裸露式两侧带管	17.4	0.776	0.966	0.034
	屏蔽式	17.8	0.967	0.995	0.005
1.0	裸露式对焊	17.0	0.824	0.971	0.029
	裸露式两侧带管	18.1	0.830	0.972	0.028
	屏蔽式	19.2	0.983	0.997	0.003
1.1	裸露式对焊	17.7	0.881	0.973	0.027
	裸露式两侧带管	18.7	0.882	0.974	0.026
	屏蔽式	19.4	0.980	0.995	0.005
1.6	裸露式对焊	22.2	0.901	0.967	0.033
	裸露式两侧带管	19.3	0.944	0.981	0.019
	屏蔽式	16.8	0.972	0.990	0.010
2.0	裸露式对焊	19.1	0.932	0.970	0.030
	裸露式两侧带管	19.9	0.910	0.960	0.040
	屏蔽式	19.5	0.978	0.990	0.010

由表 1 的校准结果可知, 三种结构的温度传感器中, 屏蔽式结构的恢复系数最高; 裸露式两侧带管结构的恢复系数只有在马赫数 2.0 时比裸露式对焊结构的恢复系数低, 其余马赫数下均比裸露式对焊结构的恢复系数高。与裸露式结构相比, 屏蔽式结构具有二次滞止性能, 敏感元件感受到的气流速度相对更低, 所以屏蔽式结构的温度传感器恢复系数更高, 这与亚音速条件下的趋势是一致的。由于裸露式两侧带管结构的温度传感器支杆为 L 形, 支杆端面增强了滞止效果, 同时两侧的管子也增强了滞止效果, 所以裸露式两侧带管结构的温度传感器的恢复系数总体上高于裸露式对焊结构的温度传感器的恢复系数。

在亚音速条件下, 当气流方向平行于偶丝平面时, 温度传感器的恢复系数随马赫数的变化不明显^[8-10]。由表 1 可知, 当马赫数在 0.95 ~ 2.0 范围内变化时, 裸露式两侧带管结构的温度传感器恢复系数变化明

显, 最大变化率可达 21.6%, 与亚音速条件下的规律不一致。产生这种现象的原因是: 当马赫数大于 1 时, 温度传感器感温部位处于激波后, 激波后的气流总温与激波前相等, 激波后的气流马赫数低于激波前, 且小于 1, 而计算恢复系数时使用的气流马赫数均为激波前的来流马赫数, 因此使得计算出的恢复系数偏高。

基于同样的原因, 当马赫数在 1.6 以上时, 裸露式温度传感器的恢复系数均达到了 0.9 以上, 高于亚音速条件下裸露式温度传感器的恢复系数(一般不超过 0.9)。

由表 1 可以看出, 对于同一支温度传感器而言, 当马赫数变化时, 恢复率与恢复系数的变化方向不完全同步。如前所述, 计算恢复系数时用的是来流马赫数, 而非传感器感温部位的实际马赫数, 如果存在激波, 则用恢复系数来评价温度传感器的恢复特性并不客观, 这时推荐采用恢复率或恢复修正系数来评价传感器的恢复特性。

4 恢复率校准结果与 NASA 的比较

将上述三种温度传感器的恢复率校准结果与 NASA 结构尺寸相同的温度传感器恢复率校准结果进行比较^[11-13], 结果如表 2 所示。

表 2 与 NASA 恢复率校准结果的比较

传感器 结构类型	马赫数 <i>Ma</i>	恢复率 <i>R</i> (CMM)	恢复率 <i>R</i> (NASA)	相对偏 差/%
裸露式对焊	0.95	0.963	0.962	0.1
	1.0	0.971	0.961	1.0
	1.1	0.973	0.96	1.4
	1.6	0.967	0.957	1.0
	2.0	0.970	0.957	1.4
裸露式两侧带管	0.95	0.966	0.978	-1.2
	1.0	0.972	0.976	-0.4
	1.1	0.974	0.965	0.9
	1.6	0.981	0.954	2.8
	2.0	0.960	0.948	1.3
屏蔽式	0.95	0.995	0.993	0.2
	1.0	0.997	0.993	0.4
	1.1	0.995	0.992	0.3
	1.6	0.990	0.988	0.2
	2.0	0.990	0.988	0.2

由表2可知,裸露式对焊、裸露式两侧带管与屏蔽式三种结构温度传感器的恢复率校准结果与NASA校准结果的相对偏差绝对值分别为0.1%~1.4%,0.4%~2.8%以及0.2%~0.4%,其中屏蔽式结构的温度传感器偏差最小,其原因是屏蔽式结构的温度传感器敏感元件处于屏蔽罩内的理想低速流场中,此结果证明本文所用装置和方法与NASA具有很好的等效性。另外两种结构的温度传感器偏差略大,可能是由于名义上相同设计的传感器之间的细微差异所致。

5 结论

通过本文分析及校准实验,得到以下几点结论:

1)在跨、超音速以及常温条件下,裸露式两侧带管结构的温度传感器(L形支杆)恢复系数总体上高于裸露式对焊结构的温度传感器;

2)当马赫数在1.6以上,总温为常温时,裸露式两侧带管结构与裸露式对焊结构的温度传感器恢复系数均可达0.9以上;

3)在跨、超音速以及常温条件下,当气流方向平行于偶丝平面时,恢复系数随马赫数变化明显;

4)当马赫数大于1时,推荐采用恢复率或恢复修正系数来评价温度传感器的恢复特性;

5)三种典型温度传感器跨、超音速常温恢复率的校准结果,与NASA相差0.1%~2.8%。

后续将针对更多结构类型的温度传感器,进行跨、超音速条件下恢复特性校准,全面开展总温恢复特性的结构敏感性研究,为温度传感器的设计、使用等提供支撑。

参考文献

- [1] 姜宏伟,张玉莲,王清香. 大气总温传感器误差修正技术的研究[J]. 测控技术, 2007, 26(9): 7-10.
- [2] Glawe G E, Simmons F S, Stickney T M. Radiation and recovery corrections and time constants of several chromel-alumel thermocouple probes in high-temperature, high-velocity gas streams[R]. Cleveland, 1978.
- [3] 廖理. 热学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.
- [4] 杨永军. 高恢复系数总温传感器恢复特性校准新方法的研究[C]//第四届全国温度测量与控制学术会议论文集. 北京: 2003.

- [5] 赵彬, 赵俭. 超音速条件下K型温度传感器恢复特性数值模拟[J]. 计测技术, 2016, 36(5): 1-4.
- [6] 赵俭, 陈勇, 王毅, 等. 温度传感器恢复系数的影响因素分析[C]//第五届全国温度测量与控制学术会议论文集. 桂林: 2007.
- [7] 赵俭, 杨永军. 气流温度测量技术[M]. 北京: 中国质检出版社, 2017.
- [8] Zhao Jian, Yang Yongjun, Jin Zhentao. Study on computational model of recovery coefficient of temperature sensors [C]//CI-MM-PTB Seminar on Dynamic Measurements and Nanometrology. Beijing: 2011.
- [9] Zhao Jian, Yang Yongjun, Jin Zhentao. Study on calculating model of recovery coefficient of temperature sensors [C]//CI-MM-PTB Seminar on Dynamic Measurements and Nanometrology. Beijing: 2011.
- [10] 赵俭. 进出气口面积比对温度传感器恢复特性的影响[J]. 计测技术, 2006, 26(4): 57-59.
- [11] Glawe G E, Holanda R, Krause L N. Recovery and radiation corrections and time constants of several sizes of shielded and unshielded thermocouple probes for measuring gas temperature [R]. Cleveland, 1978.
- [12] Pin O, Badie J M, Olalde G, et al. Development of a stagnation temperature probe for air-hydrogen supersonic combustion flows [C]//19th advanced measurement and ground testing technology conference, 1996.
- [13] Pin O, Badie J M, Olalde G, et al. Temperature diagnostics in the hypersonic flow regime an application to develop a stagnation temperature probe [C]// alaa sixth international aerospace planes and hypersonics technologies conference, 1995.

收稿日期: 2021-01-25; 修回日期: 2021-03-10

基金项目: 国家“十四五”技术基础科研项目(JSJC2013205C208)

作者简介



赵俭(1973-),男,河北秦皇岛人,研究员,博士,硕士研究生导师,航空工业集团一级技术专家,航空工业计量所热学专业副总师,动温流速校准实验室主任,国家一级注册计量师,主要研究方向为气流温度测量与校准、动态温度测量与校准、非接触式温度测量。所承担科研项目获集团及计量测试学会等科技进步奖11项,发表论文50余篇,出版专著1部,获授权发明专利8项。