

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2015.04.05

基于雷诺准则的测温偏差压力工况修正方法

赵俭

(中航工业北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 提出了一种温度传感器测温偏差校准结果的压力工况修正方法, 并以某裸露式温度传感器为例, 进行了测温偏差的压力工况修正。根据雷诺准则, 通过改变马赫数的方式来替代压力的改变, 对测温偏差的计算修正结果进行了验证。结果表明, 计算修正结果与试验数据比较接近, 所提出的压力工况修正方法, 可以为常压条件下该型温度传感器的测温偏差校准结果提供修正的依据, 同时也为其它类型温度传感器的压力工况修正提供了参考。

关键词: 雷诺准则; 测温偏差; 压力工况; 修正

中图分类号: TB943

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2015)04-0019-03

Pressure Working Condition Correction Method for Temperature Measuring Deviation Based on Reynolds Criterion

ZHAO Jian

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

Abstract: A pressure working condition correction method for temperature measuring deviation calibration results of temperature sensors is proposed in this paper. As an example, temperature measuring deviation of a certain bare-typed temperature sensor is corrected. According to Reynolds criterion, calculated correction results of temperature measuring deviation are validated by the method which replaces change of pressure by that of Mach number. The results show that calculated correction results are near experiment data, and the proposed correction method can not only provide foundation for this type of temperature sensors, but also give reference for other types of temperature sensors.

Key words: Reynolds criterion; temperature measuring deviation; pressure working condition; correction

0 引言

在航空发动机领域, 高温气流温度是重要的测试参数, 主要用来评价发动机性能, 进行状态监控等。目前, 国内通常采用接触式方法来测量高温气流温度, 其中最常用的是基于热电偶的高温气流温度传感器。高温气流温度传感器, 由于存在辐射误差、导热误差、速度误差等各类误差, 使其测得的温度低于真实气流温度。为保证高温气流温度测量结果的准确性, 需要在相似工况下对高温气流温度传感器进行校准, 得到温度传感器的综合测温偏差, 对测量结果进行修正后使用。

对高温气流温度传感器进行校准, 一般是在高温热校准风洞上进行。目前国内的高温热校准风洞, 以航空煤油为燃烧介质, 气流温度上限可达 1700℃, 气流马赫数最高为 0.9, 气流压力为常压。由于风洞气流

压力不能模拟航空发动机试验时的实际状况, 使得温度传感器测温偏差的校准结果与实际情况存在差异, 不能直接将校准结果用于实际测温修正。

1 测温偏差校准

气流总温和温度传感器指示温度的差值, 即为温度传感器的测温偏差。测温偏差中包含了辐射误差、导热误差和速度误差, 其中辐射误差和导热误差合称为传热误差。辐射误差和导热误差分别按式(1)和(2)计算:

$$\Delta T_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_j^4 - T_w^4)}{h} \quad (1)$$

式中: ΔT_r 为温度传感器的辐射误差, K; ε 为热电偶丝的表面发射率; σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数, $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_j 为温度传感器指示温度, K; T_w 为环境壁温, K; h 为热电偶和气流的对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

$$\Delta T_c = \frac{T_g - T_d}{\text{ch} \left[L \left(\frac{hU}{\lambda F} \right)^{0.5} \right]} \quad (2)$$

收稿日期: 2015-04-01

作者简介: 赵俭(1973-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事特殊条件下温度测量技术和动态温度校准技术研究。

式中: ΔT_c 为温度传感器的导热误差, K; T_g 为气流有效温度, K; T_d 为支座温度, K; L 为热电偶浸入长度, m; U 为热电偶周长, m; λ 为热电偶材料导热系数, W/(m·K); F 为热电偶横截面积, m²。

校准时, 温度传感器的测温偏差通常按式(3)计算:

$$\Delta T = T_0 - T_j \quad (3)$$

式中: T_0 为气流总温, K, 由参考温度传感器——双屏吸气偶测得。双屏吸气偶是经过精心设计的高准确度气流温度传感器, 具有内外两层屏蔽罩, 敏感元件置于内屏蔽罩内部。利用真空泵抽气, 使被测气流高速流过内外屏蔽罩之间的环形流道, 强化气流和内外屏蔽罩之间的对流换热, 提高内外屏蔽罩的温度, 从而减小双屏吸气偶的辐射误差和导热误差。另外, 通过设计合理的内屏蔽罩滞止结构, 减小双屏吸气偶的速度误差^[1]。

校准时, 将双屏吸气偶与被校温度传感器安装于热校准风洞试验段的核心区, 调整到规定的气流温度、马赫数工况并充分稳定后, 采集记录试验数据, 并根据式(3)计算被校温度传感器的测温偏差^[2]。校准框图如图 1 所示。

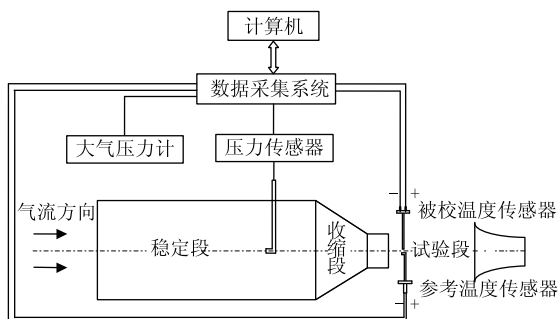


图 1 温度传感器测温偏差校准框图

2 工况修正方法

如果温度传感器的使用工况与校准工况完全一致, 则将温度传感器的测量指示温度与其测温偏差直接相加, 即可得到真实气流总温。但实际情况往往并非如此, 由于校准工况与温度传感器的实际使用工况不一致, 所以需要在校准结果进行一定的处理之后再用于修正。

通常情况下, 测温偏差校准时燃气介质的压力以及环境壁温无法完全模拟。首先考虑环境壁温的问题, 环境壁温主要影响的是温度传感器的辐射误差, 所以对环境壁温变化前后传感器的辐射误差进行估算。假定某裸露式温度传感器的指示温度为 2000 K, 环境壁温为 1000 K, 偶丝的表面发射率为 0.18, 传感器偶丝与来流的对流换热系数为 1000 W/(m²·K), 则该传感器的辐射误差为

$$\Delta T_r = \frac{0.18 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (2000^4 - 1000^4)}{1000} = 153.1 \text{ K}$$

将环境壁温变为 300 K, 其它条件不变, 此时传感器的辐射误差为

$$\Delta T_r = \frac{0.18 \times 5.67 \times 10^{-8} \times (2000^4 - 300^4)}{1000} = 163.2 \text{ K}$$

由此可见, 当环境壁温由 1000 K 变为 300 K 后, 传感器的辐射误差增大了 6.6%。由于对流换热系数和壁温的变化都取的偏于保守, 所以认为环境壁温对传感器测温偏差的影响在工程上可忽略不计。

接下来考虑压力的影响, 压力主要是影响到温度传感器与被测介质的对流换热系数, 进而影响到温度传感器的辐射误差和导热误差。

一般情况下, 当温度传感器的长径比 $L/d \geq 10$ 时, 其导热误差就很小。通常所说的长径比, 包括热电偶丝的长径比和屏蔽罩的长径比, 热电偶丝容易满足长径比 $L/d \geq 10$ 的条件, 而由于空间、强度等的限制, 屏蔽罩的长径比则不易满足, 但屏蔽罩的温度只是作为一个间接的影响量, 通过影响温度传感器的辐射误差而起作用。因此, 在高温条件下, 温度传感器的测温偏差中辐射误差占主要成分。

以某型裸露式温度传感器(如图 2 所示)为例, 说明压力对温度传感器测温偏差的影响。该型温度传感器为单点水冷裸露式结构, 敏感元件为 B 型热电偶, 折转 90°后伸出传感器支杆, 使用时传感器支杆与气流方向垂直。由于偶丝的长径比足够大, 导热误差很小, 在此忽略不计, 仅考虑压力对温度传感器辐射误差的影响。

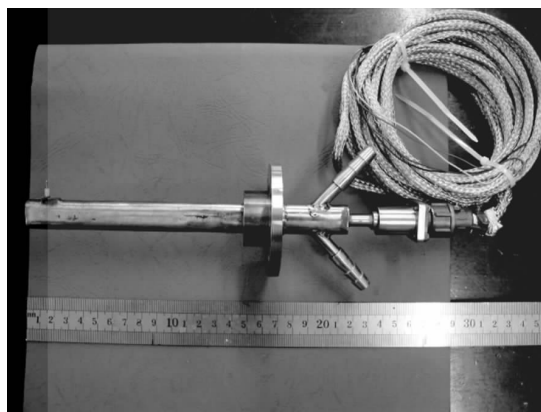


图 2 某型裸露式温度传感器

热电偶与气流的对流换热系数按式(4)计算:

$$h = \frac{Nu\lambda}{d} \quad (4)$$

式中: Nu 为努塞尔数; λ 为气体介质的导热系数, W/(m·K); d 为特征尺寸, m。

由于气流方向垂直于传感器支杆, 与热电偶丝平行, 按式(5)计算努塞尔数:

$$Nu = (0.085 \pm 0.009) Re^{0.674} \quad (5)$$

式中： Re 为雷诺数。而雷诺数：

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \tag{6}$$

式中： ρ 为介质密度， kg/m^3 ； v 为气流速度， m/s ； μ 为介质动力粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

在压力不太高的情况下，根据完全气体状态方程，有

$$\rho = \frac{p}{RT} \tag{7}$$

式中： p 为气流静压， Pa ； R 为气体常数； T 为气流静温， K 。

由式(4) ~ (7)以及式(1)可知，温度传感器的辐射误差 ΔT_r 与气流压力之间的关系为

$$\Delta T_r \propto \frac{1}{p^{0.674}} \tag{8}$$

3 工况修正实例及试验验证

以某型裸露式温度传感器为例，对其测温偏差校准结果进行压力工况修正，并对修正结果进行试验验证。该型温度传感器在常压下的测温偏差校准结果如表 1 所示。表 1 中， Ma 为气流马赫数； ΔT_v 为温度传感器的速度误差。

表 1 某型温度传感器测温偏差校准结果

Ma	p/Pa	T_0/K	$\Delta T/\text{K}$	$\Delta T_v/\text{K}$	$\Delta T_r/\text{K}$
0.206	99184	1319.9	66.1	1.1	65.0
0.205	99184	1523.3	84.7	1.3	83.4
0.206	99184	1747.7	108.7	1.5	107.2
0.499	99178	1313.0	41.4	6.2	35.2
0.498	99179	1509.8	47.6	7.1	40.5
0.504	99180	1723.7	66.7	8.3	58.4

根据恢复特性校准结果，该温度传感器的恢复系数为 0.88。计算出温度传感器的速度误差，进而由测温偏差和速度误差计算出温度传感器的辐射误差(忽略导热误差)，将计算得到的速度误差和辐射误差亦列入表 1。

由相关资料^[3]可知，温度传感器的恢复系数受压力的影响较弱，则在忽略导热误差时，用式(8)进行计算，得到变压力条件下温度传感器速度误差和辐射误差的计算结果如表 2 所示。表 2 中，前三行为引用表 1 的数据，后三行为变压力条件下的计算结果； δt_r 为高速低压和低速高压条件下传感器测温偏差的相对差值。

表 2 某型温度传感器速度误差和辐射误差计算结果(变压力)

Ma	p/Pa	T_0/K	$\Delta T/\text{K}$	$\Delta T_v/\text{K}$	$\Delta T_r/\text{K}$	$\delta t_r/\%$
0.206	99184	1319.9	66.1	1.1	65.0	/
0.205	99184	1523.3	84.7	1.3	83.4	/
0.206	99184	1747.7	108.7	1.5	107.2	/
0.206	240256	1313.0	36.9	1.1	35.8	10.9
0.205	240945	1509.8	47.1	1.2	45.9	1.1
0.206	242664	1723.7	60.1	1.4	58.7	9.9

当两个流动的惯性力和粘滞力成比例时，它们的雷诺数相等，这就是雷诺准则。由式(6)可以看出，压力与速度对雷诺数的影响规律是一致的，雷诺数则通过影响努塞尔数而间接影响到对流换热系数，进而可以推断，压力与速度对辐射误差的影响规律也是一致的，亦即

$$\Delta T_r \propto \frac{1}{v^{0.674}} \tag{9}$$

在同样的温度下，有

$$\Delta T_r \propto \frac{1}{Ma^{0.674}} \tag{10}$$

因此，可通过改变速度(或马赫数)的方法，来验证压力对辐射误差的影响。

根据表 1 和表 2 的试验及计算结果，将高速低压(变马赫数)和低速高压(变压力)条件下传感器的测温偏差进行比较可知，不同温度下两者的相对差值在 1.0% ~ 10.9% 之间，非常接近。由此可见，对于此类温度传感器，按式(8)进行压力工况修正是可行的。

4 结论

1) 提出了裸露式温度传感器测温偏差校准结果的压力工况修正方法，通过压力工况修正，提高了测温偏差校准结果的可信度。

2) 对于其它结构类型的温度传感器，应根据实际情况，选用不同的准数方程来进行压力工况修正。

3) 根据雷诺准则，可通过改变马赫数的方法来替代压力工况的改变，用来对测温偏差校准的压力工况修正结果进行验证。

参 考 文 献

[1] 张中亭. 双屏蔽抽气式热电偶[J]. 航空发动机, 1992(2): 50-53.
[2] 赵时安. 温度传感器辐射修正校准的准确性研究[J]. 计测技术, 2006, 26(5): 44-46.
[3] 廖理. 热学计量[M]. 北京: 原子能出版社, 2002.