doi：10. 11823/j. issn. 1674-5795. 2017. 01. 02

大温差强对流条件下壁温测量偏差分析

汪涛，高颖，王俊琦
（中国飞行试验研究院，陕西 西安 710089）

摘　要： 为了提高防冰试验时进气道壁温测量结果的准确度，需要考虑传热对结果的影响。本文建立了温度测量方案的传热模型，计算了由传热引起的壁温测量偏差。计算结果表明，大温差强对流的试验环境使得测温偏差较大，导致测得温度偏低。本文分析讨论了显著影响测温偏差的因素，提出了相应地减小测温偏差的测量方案。

关键词： 测温偏差；大温差；强对流；传热
中图分类号： TK311　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1674-5795(2017)01-0006-03

Wall Temperature Measurement Error Analysis in Large Temperature Difference and Strong Convection Condition

WANG Tao, GAO Ying, WANG Junqi
(Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089, China)

Abstract: In order to increase the accuracy of wall temperature measurement of inlets in the anti-icing test, the effect of heat transfer to the measurement results should be considered. The heat transfer model of the measurement scheme is constructed, and the measured wall temperature error by heat transfer is calculated. The result shows that in the environment of large temperature difference and strong convection, the measured wall temperature error is greater, so that the measured temperature is lower. Other conditions in which wall temperature measurement error exists are also discussed. The scheme of minimizing wall temperature measurement error is presented in the end.

Key words: temperature measurement error; large temperature difference; strong convection; heat transfer

0　引言

在发动机试验中，壁温测量是一项有广泛需求的测试内容。一般情况下，壁温测量采用在待测壁面粘贴温度传感器的方式进行。本单位开展了一项涡轴发动机进气道防冰试验，在进气道外壁面加装了铂电阻温度传感器测量壁面温度。为了提高温度测量准确度，需要考虑各环节对测温产生系统性偏差的影响。除了提高传感器自身精度和采集精度之外，由传热学理论可知，传感器处于强烈的强制对流环境中且环境温度与被测表面温差较大时，温度测量会由于传热的影响产生偏差[1]，而防冰试验满足大温差和强对流两个条件，因此必须考虑传热可能引起测温偏差。

参考文献[2]，[3]中，定性地讨论了传热对测温结果的影响，文献[4]在构建高精度测温系统时也对温度进行了补偿，可见传热对测温的影响不可忽略。文献[5]对热电偶测温时由于传热引起的测温误差进行了定量分析，文献[6]计算了测量流体温度时，传热造成测温精度的降低，文中的传热模型对本文的建模计算有一定的借鉴意义。

为了提高温度测量精度，需要评估传热对壁温测量造成的偏差，本文针对防冰试验的传感器布置情况建立了传热模型，估算了传热可能引起的测温偏差。

1　试验介绍

本单位开展的涡轴发动机进气道防冰试验，结合直升机的人工结冰试验进行。试验过程中，由喷洒塔喷出的细小水滴与环境中的冷空气混合，吹向直升机，此时在机体表面、旋翼、发动机进气道等部位可能结冰。为了试验发动机进气道防除冰能力，在进气道防冰腔内引入发动机压气机后热气流对进气道进行加热，并在进气道防冰腔表面加装温度传感器来测量开启防冰引气后的进气道表面温度，以验证引气设计的有效性。图 1 示出了温度传感器加装的位置。温度传感器均位于进气道唇口及外部，以铸工胶粘贴在防冰腔表

收稿日期： 2016-11-15
作者简介： 汪涛(1982-)，男，陕西汉阴人，工程师，硕士，主要研究方向为航空发动机试飞。

面，并将传感器与线缆用铜箔胶带固定在进气道表面，防止传感器和导线脱落，在气流作用下吸入发动机。此次试验的环境温度 T_a 约为−30 ℃，发动机进气轴向速度最大值约为 60 m/s，防冰腔表面温度 T_w 约 70 ℃。

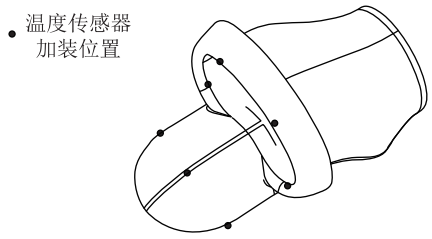

图 1　温度传感器加装位置示意图

图 2 为温度传感器示意图。测温所采用的温度传感器为铂电阻传感器，允差等级为 B 级，允差值±(0.3+0.005 | t |)℃，传感器长宽高尺寸为10 mm×6 mm×3 mm，外壳材料为紫铜，以增强导热，厚度为0.5 mm，铂电阻紧贴一侧 10 mm×6 mm 内表面，与另一侧之间为空气，铂电阻周围仍然为紫铜，宽度 2 mm。

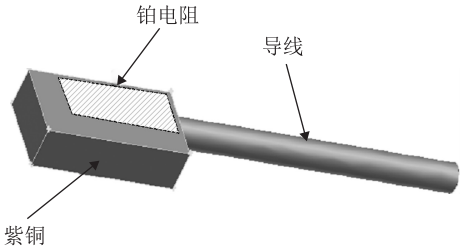

图 2　温度传感器示意图

2　传热建模计算

按照试验布置，传感器在待测壁面传热模型见图 3。由于导线表面存在绝缘层，导热较差，忽略导线对导热的影响；各接触面在布置时均压紧，忽略接触热阻为一维稳态导热问题。将传感器作为整体考虑导热，从高温待测表面到冷空气之间的热阻环节分别为：粘胶、传感器、胶带、对流换热，铂电阻实际测量的温度为传感器下表面的温度，如图 4 所示。

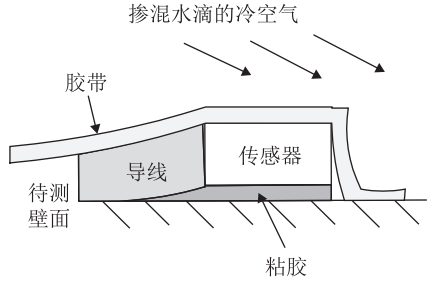

图 3　温度传感器传热模型

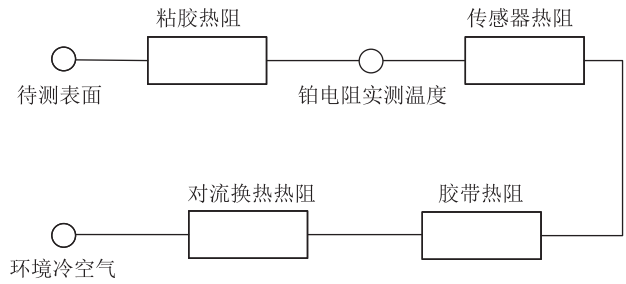

图 4　传热热阻示意图

分别计算各部分热阻，其中，粘胶层厚度约为 0.2 mm，粘胶主要成分为环氧树脂，其导热系数取 0.2 W/(m² · K)，传感器材料紫铜，导热系数取 386.4 W/(m² · K)，胶带厚度为 0.05 mm，沿厚度方向其导热系数取 1 W/(m² · K)。计算结果表达式为

$$\Omega_j=\frac{\delta}{\lambda}=\frac{0.2\times10^{-3}}{0.2}=1\times10^{-3}(\ m^2\cdot K\cdot W^{-1}) \tag{1}$$

$$\Omega_c=\frac{\delta}{\lambda}=\frac{3\times10^{-3}}{386.4}=7.764\times10^{-6}(m^2\cdot K\cdot W^{-1}) \tag{2}$$

$$\Omega_{jd}=\frac{\delta}{\lambda}=\frac{0.05\times10^{-3}}{1}=5\times10^{-5}(\ m^2\cdot K\cdot W^{-1}) \tag{3}$$

式中：δ 为材料厚度，λ 为导热系数，Ω 为热阻；下标 j 表示粘胶，c 表示传感器，jd 为胶带。

由于传感器处于收敛型区域，暂按照空气外掠等温平板传热层流分析计算对流换热系数[1]，特征长度 x 取 0.05 m，空气物性按温度为壁面温度和自由来流温度的平均值，即 20 ℃的干空气计算，实际由于空气中含有小水滴，换热系数 h 应比计算结果偏大。

$$h_{conv}=0.332\frac{\lambda}{x}(Re_x)^{\frac{1}{2}}(Pr)^{\frac{1}{3}}=0.332\times\frac{2.59\times10^{-2}}{0.05}\times\left(\frac{60\times0.05}{15.06\times10^{-6}}\right)^{\frac{1}{2}}\times0.703^{\frac{1}{3}}=68.250\ (W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}) \tag{4}$$

$$\Omega_{conv}=\frac{1}{h_{conv}}=1.465\times10^{-2}(m^2\cdot K\cdot W^{-1}) \tag{5}$$

式中：下标 conv 为对流换热。

当防冰腔表面实际温度为 70 ℃时，传感器的测量值与实际壁温之差为

$$\Delta T=\frac{\Omega_j}{\Omega_j+\Omega_c+\Omega_{jd}+\Omega_{conv}}\cdot(T_w-T_a)=6.42\ ℃ \tag{6}$$

可见，对于本例的温度测量结果，比实际壁温约

低了 6.4 ℃，意味着测量数据与实际值相差较大，测量结果系统误差已经远远大于传感器测量精度，使测量结果不可靠。分析式(6)可以看出，当外界使用环境和被测表面温度一定时，影响测温误差的主要因素包括传感器与被测表面之间的热阻和从被测表面到环境大气之间的总热阻两部分，当前者越小、后者越大时，传热引起的测温误差越小。常规情况下，壁温测量多在自然对流或弱强制对流环境下进行，此时由于对流换热系数小，对流热阻较大，因此传热引起的测温误差较小。对于上文介绍的试验，一方面测温传感器处于强对流环境下，总热阻较小，另一方面在强对流环境下为避免传感器脱落采用的粘胶导热较差，造成测温误差显著偏大。因此，后续改进测量方案应从减小粘胶热阻和增大总热阻入手。

当然，对于本例的计算结果，由于多项数据为估计，计算结果可能与实际状况存在差异，但结果也能明确，在大温差强对流条件下，由于传热的影响，使温度测量结果显著偏低。上述计算结果可推广至其他壁面与环境温差较大且处于强对流环境中的温度测量，如发动机排气口后部机身表面温度测量、旋翼除冰状态表面温度测量等，该条件下温度测量结果与实际值之间可能存在较大偏差，在测量时应该对偏差进行估计，对产生偏差的来源进行分析，并采取相应措施降低测温偏差，或针对误差对测量结果进行补偿。

3 减小测量偏差的措施

按照上节分析，为了减小采用壁温传感器的测温误差，可采取以下三条途径：

1)降低传感器至壁面间的传热热阻，即增强与测温表面的导热。粘结传感器采用的铸工胶导热较差，是传感器至壁面间的热阻主要环节，由式(1)可见，在能保证粘结强度的基础上，可考虑采用导热系数更高的粘接剂或减薄粘胶的厚度，以降低热阻。例如电子元器件中常用的导热硅胶，其导热系数约为 1 W/(m²·K)，其剪切强度约 2.5 MPa，在相同厚度条件下，其导热热阻为

$$\Omega_{gj}=\frac{\delta}{\lambda}=\frac{0.2\times10^{-3}}{1}=0.2\times10^{-3}(\mathrm{m^2\cdot K\cdot W^{-1}}) \quad (7)$$

式中：下标 gj 表示导热硅胶。则总测温偏差为

$$\Delta T=\frac{\Omega_{gj}}{\Omega_{gj}+\Omega_c+\Omega_{jd}+\Omega_{conv}}\cdot(T_w-T_a)=1.39\ ℃ \quad (8)$$

可见，采用了导热硅胶后，整个测温偏差减小到原方案的约 1/5。

2)增加壁面至大气的传热热阻，即减弱与大气的换热。由式(1)~(6)可见，对流换热热阻是主要热阻环节，该热阻数值与气流流速、传感器安装位置、气体热物性相关，但以上三个变量受测试方案限制，在测量位置一定、发动机工况一定时基本不变，因此要增大对流热阻较为困难。可考虑在导热环节中增加不良导体，例如在传感器与胶带之间增加石棉板，以石棉板导热系数 0.1 W/(m²·K)计，若增加 1.5 mm 厚度的石棉板，则增加的石棉板热阻为

$$\Omega_s=\frac{\delta}{\lambda}=\frac{1.5\times10^{-3}}{0.1}=1.5\times10^{-2}(\mathrm{m^2\cdot K\cdot W^{-1}}) \quad (9)$$

式中：下标 s 表示石棉板。则总测温偏差为

$$\Delta T=\frac{\Omega_j}{\Omega_j+\Omega_c+\Omega_s+\Omega_{jd}+\Omega_{conv}}\cdot(T_w-T_a)=3.28\ ℃ \quad (10)$$

即将测温误差减小为原来的约一半。当与方法(1)同时使用时，总测温偏差为

$$\Delta T=\frac{\Omega_{gj}}{\Omega_{gj}+\Omega_c+\Omega_s+\Omega_{jd}+\Omega_{conv}}\cdot(T_w-T_a)=0.69\ ℃ \quad (11)$$

可见，测温偏差降至原来的 1/10，接近传感器精度，有效提高了测温精度。

3)在条件允许的情况下，也可将传感器埋入被测表面，或采用非接触式测量手段完成。

4 结论

本文针对提高结冰试验时进气道壁温测量精度，开展了测温方案的传热计算，定量分析了实际传感器布置时的由于传热对温度测量的影响，得出结论如下：

1)在大温差强对流条件下，传感器测得壁温比实际壁温约低 6.4 ℃，说明传热引起的测温偏差较大，显著降低了测温精度。对于其他在外界处于强对流环境中且壁面与环境温差较大时的壁温测量，设计测量方案时应注意。

2)为了减小测温偏差，可在传感器与壁面之间采用导热系数更高的导热硅胶，在传感器非测量面增加不良导热体石棉板。两者同时使用时，可将测温偏差降至约 0.69 ℃，显著提高了测温精度。

参 考 文 献

[1] 杨世铭，陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京：高等教育出版社，2006.

[2] 杨斌，白月飞，王忠. 接触测温法的不确定度分析[J]. 自动化与仪器仪表，2013(3)：178-180.

(下转第 17 页)

4.3 透射色板的色度稳定性和均匀性

透射色板是用来校准 CCD 相机色度指标的标准器，其色度稳定性需符合作为计量标准的要求。由于玻璃材质本身具有良好的化学稳定性，我们通过一年的考察，透射色板的均匀性最大为 0.0001，色坐标最大年变化量为 0.003，符合 JJG 453-2002《标准色板计量检定规程》中对于一级标准色板色坐标年变化量不大于 0.005 的技术要求。

通过对校准装置的主要特性考察可以看出，该装置可以满足亮度和色度量值传递的要求。

5 CCD 相机校准装置测量结果的验证

使用 CCD 相机校准装置和 JJG 211-2005《亮度计检定规程》中规定的亮度标准装置对同一台型号为 IC-PMG3 的 CCD 相机的亮度和色度参数进行单点校准，测量比对结果如表 1 所示。

表 1　CCD 相机校准装置和亮度标准装置比对测量结果

亮度校准点 /(cd·m^{-2})	CCD 相机校准装置测量值 /(cd·m^{-2})	亮度标准装置测量值 /(cd·m^{-2})	装置间相对偏差/%
10	10.22	10.32	0.98
100	100.2	100.3	0.1
1000	1003	1005	0.2

色度校准点	CCD 相机校准装置测量值/(cd·m^{-2})	亮度标准装置测量值/(cd·m^{-2})	装置间相对偏差/%
白 x=0.4495	0.4497	0.4496	0.0002
白 y=0.4103	0.4106	0.4105	0.0001
红 x=0.7264	0.7353	0.7345	0.0008
红 y=0.2736	0.2698	0.2703	0.0005
绿 x=0.4219	0.4257	0.4266	0.0009
绿 y=0.4617	0.4634	0.4639	0.0005
蓝 x=0.1652	0.1621	0.1630	0.0009
蓝 y=0.0454	0.0527	0.0517	0.0010

实验结果表明：在测量范围内，CCD 相机校准装置与亮度标准装置亮度测量结果的最大偏差为 0.98%，色度测量结果的最大偏差为 0.001，均小于亮度标准装置的测量不确定度，表明该 CCD 相机校准装置的测量结果是可靠的。

6 总结与展望

本文根据平板显示行业所特有的亮度和色度溯源需求，介绍了基于积分球匀光和光谱测色原理的 CCD 相机亮度色度校准装置的主要结构和研究内容，并对校准装置的计量性能和特性进行了研究。研究结果表明，该校准装置满足作为计量标准的技术要求，可用于 CCD 相机亮度和色度参数的校准。

随着技术发展，对于更低亮度和更高亮度范围仍有待去满足，尤其对于 1 cd·m^{-2}以下亮度的溯源，在测量显示屏黑画面时尤为重要，这有待装置进一步设计改进。另外校准装置需要人工介入，尚未实现自动测量。今后还需要针对不同 CCD 相机校准的特点，进一步研发自动化装置和测量软件，实现自动测量。

参 考 文 献

[1] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 211-2005 亮度计[S]. 北京：中国计量出版社，2005.

[2] 国家质量监督检验检疫总局. JJG 453-2002 标准色板[S]. 北京：中国计量出版社，2002.

[3] Ohno Y. Photometric Calibration[J]. NIST Special Publication 250-37，1997.

[4] 李安. 基于等色温自动调光积分球光源的辐射定标研究[D]. 长春：长春理工大学，2009.

[5] Cromer C L，Eppeldauer G，Hardis J E，et al. The NIST detector-based luminous intensity scale [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards & Technology，1997，101(2)：109-132.

[6] 赫英威，李平，吴厚平，等. 积分球辐射光源照度均匀性研究[J]. 应用光学，2012，33(3)：548-553.

(上接第 8 页)

[3] 蔡丽枝. 热电偶测量误差分析及使用注意事项[J]. 计测技术，2008，28(B10)：81-82.

[4] 胡鹏程，时玮泽，梅健挺. 高精度铂电阻测温系统[J]. 光学精密工程，2014，22(4)：988-995.

[5] 平亚明，赵海霞. 稳定环境下金属固体表面传热测温误差计算[J]. 山东大学学报工学版，2003，33(3)：279-281.

[6] 岳希明，梁晓军，王三保，等. 测温元件测量误差的传热学分析[J]. 郑州轻工业学院学报自然科学版，2003，18(3)：38-40.