

文章编号: 1000-8055(2010)02-0302-06

曲面红外测温方向性误差分析与修正方法

常国强¹, 常海萍¹, 王寅会¹, 单学庆²

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 通过实验验证与理论分析, 探讨了曲面特征的红外辐射测温特性. 研究表明: 曲面红外辐射测温在本质上与平面辐射测温相同, 满足同一数学表达式; 出现曲面红外测温失真的根本原因是被测表面等效面出现了不满足表面漫射条件假设的状况, 这主要是由被测表面法向与测量方向夹角过大导致的; 通过测量当地表面发射率可以校正因等效面不满足漫射条件假设造成的红外测温结果失真.

关 键 词: 红外测温; 曲面; 漫射表面; 发射率

中图分类号: V231.1

文献标识码: A

Research on error analysis and correction of infrared temperature measurement for curved surface

CHANG Guo-qiang¹, CHANG Hai-ping¹, WANG Yin-hui¹, SHAN Xue-qing²

(1. College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Shenyang Aeroengine Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China)

Abstract: Experiments and theory analysis were carried out to investigate the characteristics of temperature measurement using thermal imager for curved surface. According to the theory of infrared thermometry techniques, the infrared radiation characteristics of curved surface essentially have no difference with flat surface, both of which can be described by the same mathematics expression. The essential reason which induces the measuring error of infrared thermal imagery for curved surface is that equivalent face of the measured surface no longer satisfies the diffuse body hypothesis, owing to too large included angle of the normal direction of curved surface and the measuring direction of infrared thermal imagery. The temperature measuring accuracy can be improved by measuring the local emissivity for the region where the diffuse body hypothesis is invalid for its equivalent face.

Key words: infrared temperature measuring; curved surface; diffuse body hypothesis; emissivity

红外测温技术用于表面温度测量已经很久, 测温精确度在过去几十年中已经得到了大大提高. 相比其他传统的测温手段, 红外测温技术能取得很好的表征表面关于温度的热辐射数据, 直接

提供测量视野范围内目标表面的二维温度分布图. 在航空发动机传热领域, 红外测温技术已经被很多研究人员用于获得高温部件的绝热壁温分布图^[1-4], 促进了高温部件冷却结构设计水平的

收稿日期: 2009-01-21; 修订日期: 2009-04-23

作者简介: 常国强(1979-), 男, 山东微山人, 博士生, 主要从事航空发动机高温部件冷却技术研究.

提升.

在工程应用中经常遇到测量具有曲面特征的物体表面温度分布的需求,如涡轮叶片、炉膛内壁、供热管路等.以往对这类曲面特征的目标采用红外非接触测温方法相对较少,且很少考虑曲率对测量结果精度的影响.文献[5]通过理论分析和实验验证,提出球面辐射模型,认为表面形状及测温距离对红外测量结果无影响.但是它的理论分析模型是一种简化模型,无法真实反映红外测温机理,经本文研究可知,它的结论是有局限性的.

本文从红外热成像原理角度出发,探讨曲面曲率对红外测温精度的影响规律,指出提高曲面红外测量精度的方法.

1 测量方向对红外测温影响实验

相比平面红外测温,曲面红外测温的一大特征就是被测表面法向与红外测温方向存在不为零的夹角.本文首先开展了一个研究测温距离与测温方向对红外测温影响的小实验.实验系统见图 1 所示,实验中采用厚度为 0.02 mm 的康铜膜作为发热元件,康铜膜表面均匀喷涂一层黑漆,并粘结在胶木材料的衬底上,衬底固定在一根金属材质的转轴上.转轴底部与转台焊接在一起,并置于带有角度刻度的基座上,转台相对基座可做旋转运动.以图示的康铜膜中心位置作为温度测点,测点对应位置的胶木衬底表面布置一个 K 型热电偶,热电偶头与康铜膜紧密接触,忽略两者之间的导热热阻,认为热电偶测量得到的温度即为测点实际温度.

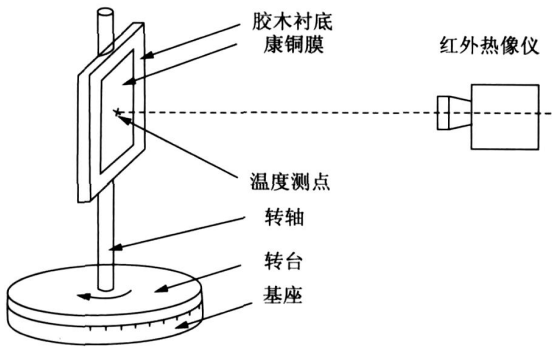


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Sketch map of experimental system

本文考察了测量距离及测量角度对红外测温结果的影响.实验时,康铜膜通过恒定电流,在足够长时间后,康铜膜测点附近温度应为一定值(不

考虑环境温度变化).实验首先研究了旋转角度为零度时(即被测表面正对红外热像仪入射瞳),不同距离对红外测温的影响规律.从表 1 中可以看出,在本文所研究的范围内,红外测得温度十分接近实际温度,可以认为距离对红外测温结果基本上没有影响.

表 1 测量距离对红外测温影响
Table 1 Effect of measuring distance

测试方案	测量距离/ m	红外测量温度/ °C	实际温度/ °C
Case 1	0.5	26.4	26.15
Case 2	0.8	26.9	26.22
Case 3	1.2	26.6	26.11
Case 4	1.6	26.4	26.05

在研究角度变化对红外测温影响时,测量距离固定为 0.8 m,测量结果见表 2.从表 2 中可以看出,在旋转角度小于等于 60° 时,红外测得温度与实际温度在数值上非常接近,可以认为角度变化对红外测温结果基本没有影响;当旋转角度大于 60° 时,红外测得温度偏离实际温度(小于真实温度),角度越大,测温偏差越大.

表 2 测量角度对红外测温影响
Table 2 Effect of measuring angle

测试方案	旋转角度/ (°)	红外测量温度/ °C	实际温度/ °C
Case 1	0	27.03	25.57
Case 2	20	26.19	25.67
Case 3	40	26.37	25.58
Case 4	60	25.01	25.15
Case 5	70	23.8	25.86
Case 6	80	15.01	25.78

如要对表 2 的现象做出合理的解释,必然要用到红外热成像机理.

2 红外热成像机理

成像在广义上讲,就是显示目标辐射能量密度分布情况.红外线的传播规律和可见光一样,符合几何光学的各种定律^[6].探测目标发射的红外线通过红外光学系统而成像在某一确定的平面上,这个平面上的红外线能量密度分布图就是目

标的红外图像。

整个红外热成像系统是由红外光学系统、光机扫描系统、探测器、显示器四大部分组成(见图2)。红外光学系统是由红外光学透镜组成,对被测物体表面红外辐射起接收、汇聚和聚焦作用;红外热像仪通过光机扫描系统将瞬时视场中的有效红外辐射汇聚到红外探测器上,瞬时视场是光机扫描系统最小立体张角内探测目标表面的可视面积,设瞬时视场面积为 A_0 ,红外热成像仪与探测目标之间的距离为 d , $A_0 d^{-2}$ 是红外热像仪系统的一个常数,它约等于红外热像仪最小立体张角 Ω (为 10^{-6} sr的量级)。

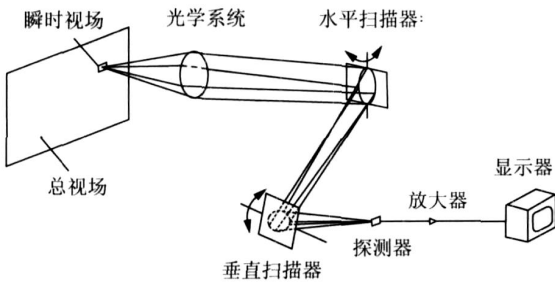


图2 红外热成像系统图

Fig. 2 Infrared thermal imagery

实际测量时,红外热像仪接收到的有效辐射包括三部分:目标自身辐射、环境反射辐射和大气辐射^[7]。被测物体表面的辐射亮度可表述为

$$L_{\lambda} = \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}(T_0) + \rho_{\lambda} L_{\lambda}(T_u) = \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda}(T_0) + (1 - \alpha_{\lambda}) L_{\lambda}(T_u) \quad (1)$$

作用于热像仪的辐射照度为

$$E_{\lambda} = A_0 d^{-2} \tau_{a\lambda} L_{\lambda} = A_a d^{-2} \cdot [\tau_{a\lambda} \varepsilon_{\lambda} L_{\lambda} + \tau_{a\lambda} (1 - \alpha_{\lambda}) L_{\lambda}(T_u) + \varepsilon_{a\lambda} L_{\lambda}(T_a)] \quad (2)$$

其中 T_0 为被测目标表面温度; T_u 为环境温度; T_a 为大气温度; ε_{λ} 为光谱发射率; α_{λ} 为表面光谱吸收率; $\tau_{a\lambda}$ 为大气的光谱透射率; $\varepsilon_{a\lambda}$ 为大气的光谱发射率。文献[7]最终推导出满足漫射条件假设的热像仪真实温度计算公式

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} \left[\frac{1}{\tau_a} T_0'' - (1 - \vartheta) T_u^n - \left(\frac{1}{\tau_a} - 1 \right) T_a^n \right] \right\}^{1/n} \quad (3)$$

对于InSb(3~5 μ m)探测器, n 值为8.68^[7],近距测量时,通常可以忽略大气吸收作用,即 $\tau_a = 0$,上式可进一步简化为

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon} [T_0'' - (1 - \vartheta) T_u^n] \right\}^{1/n} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,发射率 ε 是决定红外测温最终结果精度的关键因素。在红外测温中,被测表面往往被涂成黑色,就是为了获得接近黑体表面的辐射特性,进而确保红外测温结果的精度。利用式(4)可以对表1的现象做出很好的解释:尽管图1中的被测表面涂上了发射率很高的黑漆(发射率约为0.95),但它仍不是表面黑体,当转台旋转角度大于60°时,表面实际发射率不再是定值,而随角度增加而减小,进入红外光学系统的辐射能量减少,成像平面上显示的被测表面能量密度值要小于被测表面真实能量密度,故红外测得温度要小于壁面实际温度。

3 曲面红外测温分析

由红外热成像机理可知,瞬时视场面积 A_0 约为 Ωd^2 ,当近距测量($d \leq 1$ m)时,相比红外热像仪入射瞳面积 A_r ,瞬时视场满足小面源条件(以TVS-2000MK II型红外热像仪为例, $A_0/A_r \leq 0.002$)。

图3为曲面热成像示意图,图中 A_0 为任一最小立体角内的探测表面的面积。 A_0 的法向与投影方向夹角为 θ , A_0 为该最小立体角下投影面在测量方向上的等效面(大小等于瞬时视场面积),如 A_0 也满足小面源条件, A_0 和 A_r 应满足余弦关系

$$A_0 = A_r \cos \theta \quad (5)$$

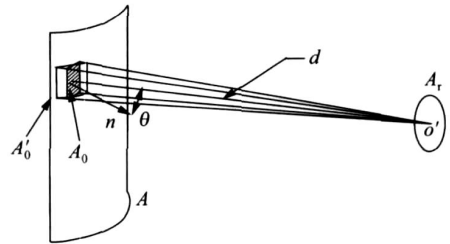


图3 曲面热成像示意图

Fig. 3 Sketch map of infrared thermal imagery for curved surface

由文献[8]可知, A_0 作用于红外热像仪上的辐射照度应为

$$E_{\lambda} = A_0' \cos \theta d^{-2} \tau_{a\lambda} L_{\lambda} = A_0 d^{-2} \tau_{a\lambda} L_{\lambda} \quad (6)$$

由式(6)可以看出,最小立体角内探测曲面对红外热像仪的辐射照度等于相同辐射亮度条件下可视面积对红外热像仪的辐射照度。对于更加复杂的表面,由文献[8]中的立体角投影定理可知,满足漫射条件的表面,在距离不变的条件下,最小立体角内产生的辐射照度与被测表面形状无关。从更

加直观的角度来考虑曲面特征红外测温的本质,可以将最小立体角内的曲面红外测温等效为平面特征的瞬时视场在该立体角内偏转一定角度形成的平面红外测温,这个角度应为曲面法向与测量方向的夹角,偏转后平面的面积要满足式(5),这类似本文在第1节中开展的旋转角度对红外测温影响的实验,从而可以看出曲面测温在本质上与平面测温是相同的。

由文献[9]可知,真实固体表面,漫射条件只在偏离辐射出射面积法向一定角度内成立,在这个角度范围之外,在探测器所接收的波段范围内, ε_λ 是一个与角度相关的量,即

$$\varepsilon_\lambda = \varepsilon_\lambda(\theta) \quad (7)$$

将式(7)带入式(1),在红外测量波段内, $\varepsilon_\lambda(\theta)$ 与波长无关^[9],且受温度影响较小,做类似文献[7]理论推导,可得针对固体表面近距离测量时,瞬时视场的红外测温表达式

$$T_0 = \left\{ \frac{1}{\varepsilon(\theta)} [T_0^4 - (1 - \varepsilon(\theta)) T_u^4] \right\}^{1/4} \quad (8)$$

对于非金属表面,利用式(8)可以校正曲面红外测温时,因等效面漫射表面假设不成立对测温结果带来的影响。

在推导式(6)时,有一个隐含的前提,即最小立体角内被测表面 A_0 满足小面源条件。在实际曲面红外测温中,小面源条件的确立受到红外热像仪分辨率、测温距离、光学镜头焦距及被测表面温度分布情况等因素影响,其中以被测表面温度分布最为关键。

为确保红外测温精度,小面源设定条件必须遵循两条原则:①小面源内温度分布要尽量均匀;②不同小面源间应能反映被测表面温度变化。为达到这两种要求,在红外热像仪性能参数已经确定的条件下,热像仪应尽可能靠近被测表面,且测温方向与被测表面法向夹角不易过大,确保等效面 A_0 和投影面 A_0 面积尽可能小。

当小面源条件确立后,实验人员就能通过式(5)确定式(8)应用的最大角度范围,进而可以确保红外测温的精度。

4 波纹曲面红外测温实验

本文开展了一种特定曲面-纵向波纹表面-红外测温实验,实验装置见图4所示,波纹板上开有多排气膜孔(见图5),冷却气流通过气膜孔注入到热气侧,通过改变冷气注入量来改变表面温

度。波纹板材料为低导热系数的PA1010,波纹板结构详见图5。

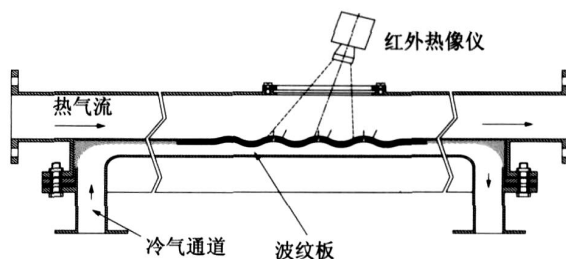


图4 实验装置

Fig. 4 Experimental equipment

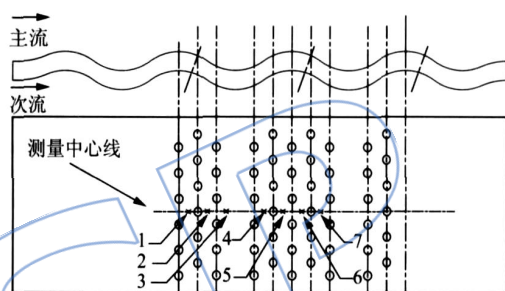


图5 纵向波纹多孔板结构

Fig. 5 Structure of longitudinal wavy liner

在波纹板孔排之间埋设7个K型热电偶来测量壁面真实温度,埋设位置见图5。热电偶头部嵌入波纹板表面,头部直径约为0.5 mm,可以忽略对红外测温的影响。

红外测温设备采用TVS-2000MK II型红外热像仪(瞬时视场角度为2.2 mrad),最大测量距离小于250 mm,最大等效面面积小于0.55 mm × 0.55 mm;为确保测量精度,最小立体角内的最大被测表面面积要小于1.1 mm × 1.1 mm,由公式(5)可得最大测量角度应小于75°。实验时,红外热像仪按图6所示的位置进行测量,在波纹迎风侧A附近部分区域表面法线方向与测量方向夹角大于60°但小于75°,而测量总视野的其他区域,这个夹角都小于60°。

实验前利用式(8)可以预先测定材料的表面发射率,本文用的PA1010的表面发射率约为0.84。

图7为测量得到的温度分布云图,从图中可以看出,A区域附近的两排孔所成红外热像明显小于其他孔排。可见在此区域,因曲面法向与测量方向夹角过大,最小立体角内被测表面的面积明显大于等效面面积,而其他区域的投影面积与等效面面积相差无几,故A区域的孔排热成像相对

较小,这在一定程度上验证了本文第 3 节中对曲面特征红外热成像作的理论分析.

图 8 为一次测量后,各测点红外热像仪测得温度与实际温度对比图.从图上可知,红外测得

温度与真实温度在点 4 与点 5 位置相差较大,由对图 6 的分析,可以认为点 4 与点 5 所在位置附近区域表面法向与红外测量方向夹角较大,以致出现了等效面漫射表面条件不成立的现象,使得红外测量温度与真实温度存在较大偏差.利用图 8 的数据和式 (10) 可求取点 4 与点 5 处的表面此种状况下的发射率,分别为 0.68 和 0.66.

增加通过孔排进入主流侧的冷气量,可以得到另一组红外热像仪测得温度与壁面真实温度对比图,同时利用公式 (8) 及上步得到的点 4 与点 5 处的实际发射率,可以对点 4 与点 5 的红外测温结果进行修正,三种结果对比见图 9.从图 9 中可以看出,经过发射率修正后的红外热像仪测得温度与壁面真实温度吻合非常好,这说明通过发射率修正的方法可以校正因壁面法向与测量方向之间夹角过大带来的红外测温结果的失真,从而起到大幅度提高红外测温精度的作用.

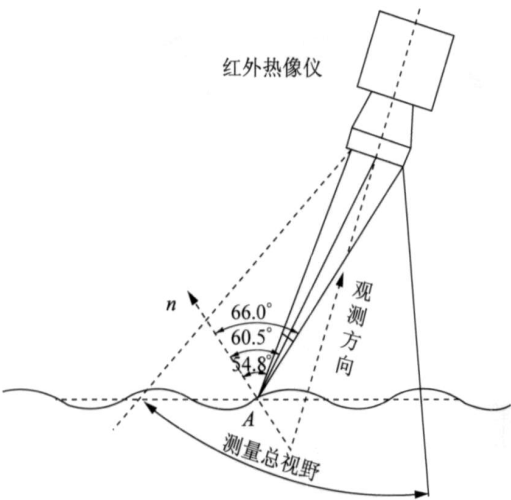


图 6 红外热像仪摆放位置
Fig. 6 Location of infrared camera

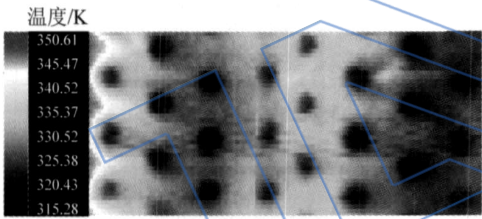


图 7 温度云图
Fig. 7 Temperature contour

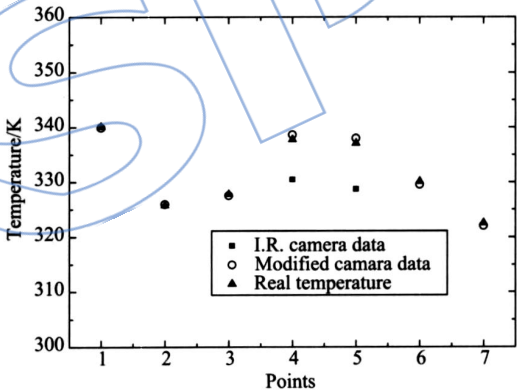


图 9 发射率修正后红外热像仪测得表面温度与真实温度对比图

Fig. 9 Comparison of the infrared camera measuring surface temperature with emissivity modified and real temperature

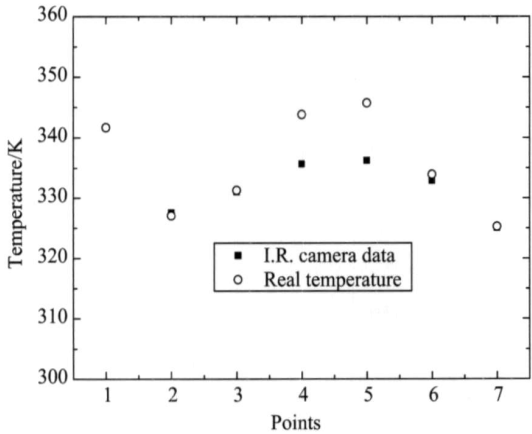


图 8 红外热像仪测得表面温度与真实温度对比图
Fig. 8 Comparison of the surface temperature measured by infrared camera and real temperature

5 结 论

本文经过实验研究与理论分析得到以下结论:

- 1) 平面和曲面红外测温在本质上是相同的,满足同一测温表达式;
- 2) 出现曲面红外测温失真的根本原因是被测表面部分区域测量等效表面不再满足漫射表面的假设,这主要是由于红外测温方向与被测表面法向夹角过大引起的;
- 3) 实际红外测温时,当被测表面等效面漫射表面条件不成立的情况无法避免,在一定的被测

表面法向与测量方向夹角范围内,可以通过测定当地发射率来修正红外测温偏差.

参考文献:

- [1] Scherer J ,Witting S,Morad K,et al.Jets in a crossflow: effects of hole spacing to diameter ratio on the spatial distribution of heat transfer[R]. ASME Paper 91-GT-356.
- [2] Blair M F,Lander R D. New techniques for measuring film cooling effectiveness [J]. ASME Journal of Heat Transfer,1975,97:539-543.
- [3] Gritsch M,Schulz A,Witting S. Adiabatic wall temperature measurements of film cooling holes with expanded exits[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120: 549-556.
- [4] Kohli A,Bogard D G. Fluctuating thermal field in the near-hole region for film cooling flows[J]. ASME Journal of Turbomachinery,1998,120: 86-91.
- [5] 郭道峰,王家森,刘忠齐. 球面热源辐射特性的研究[J]. 中国医学影响技术,2002,18(8):830-833.
- GUO Daofeng,WANG Jiasen,LIU Zhongqi. Research of spherical attribution[J]. Chinese Journal of Medical Imaging Technology,2002,18(8):830-833. (in Chinese)
- [6] 张维力,宋广礼. 热成像[M]. 北京:新时代出版社,1988:35-38.
- ZHANG Weili,SONG Guangli. Infrared thermal imagery [M]. Beijing: New Time Press,1988:35-38. (in Chinese)
- [7] 杨立. 红外热像仪测温计算与误差分析[J]. 红外技术,1999,21(4):20-24.
- YANG Li. Calculation and error analysis of temperature measurement using thermal imager[J]. Infrared Technology,1999,21(4):20-24. (in Chinese)
- [8] 张建奇,方小平. 红外物理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社,2004:28-34.
- ZHANG Jianqi,FANG Xiaoping. Infrared physics [M]. Xi'an: Xidian University Press,2004:28-34. (in Chinese)
- [9] 杨世铭,陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2006:366-372.
- YANG Shiming,TAO Wenquan. Heat transfer [M]. 4th ed. Beijing: High Education Press,2006:366-372. (in Chinese)