

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210757

复杂背景下三维弯曲表面红外测温修正*

张天宇¹, 吴嘉雯¹, 方弘毅², 张彪¹, 许传龙¹

(1. 东南大学能源与环境学院大型发电装备安全运行与智能测控国家工程研究中心 南京 210096;
2. 中国航发四川燃气涡轮研究院 绵阳 621000)

摘要:航空发动机涡轮叶片的断裂脱落与叶片温度密切相关,准确测量涡轮叶片温度对航空发动机的安全运行具有重要意义。针对涡轮叶片材料发射率不均匀、周围高温物体反射严重以及探测角度变化等因素导致传统红外辐射测温方法精度难以保证的问题,基于辐射传输理论与红外热成像测温原理,分析了对红外测温结果影响的主要因素,提出了复杂背景下三维弯曲表面红外辐射测温的修正模型。通过设计实验测量获得弯曲表面的发射率、双向反射分布函数、角系数等重要参数,根据提出的温度修正模型,得到弯曲表面红外修正温度。通过与典型位置上热电偶的测温结果对比,测温误差由修正前的4%左右下降到1%以内,证明了所提的修正模型具有较高的精度和适应性,可为涡轮叶片气动传热试验技术的提升和航空发动机等重大装备的研制提供支撑。

关键词: 传热; 热传导; 航空发动机; 辐射测温

中图分类号: TH811 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590

Infrared temperature measurement correction of three-dimensional curved surface under complex background

Zhang Tianyu¹, Wu Jiawen¹, Fang Hongyi², Zhang Biao¹, Xu Chuanlong¹

(1. National Engineering Research Center of Power Generation Control and Safety, School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China)

Abstract: The fracture and shedding of turbine blades in aero-engine systems are intimately linked to blade temperature. The precise measurement of turbine blade temperature is significant for ensuring the safe operation of aero-engines. However, traditional infrared radiation temperature measurement methods often face challenges in maintaining accuracy due to factors such as the non-uniform emissivity of turbine blade materials, pronounced reflections from high-temperature objects in the surroundings, and variations in detection angles. To address these issues, this article leverages the principles of radiation transfer theory and infrared thermal imaging temperature measurement to analyze the key factors that influence temperature measurement results. A modified model for infrared radiation temperature measurement of three-dimensional curved surfaces under complex backgrounds is formulated. To obtain the necessary parameters for the temperature correction model, the experimental measurement is designed to determine crucial factors such as emissivity, bidirectional reflection distribution function, and angle coefficient for the curved surface. By applying the temperature correction model proposed in this study, the infrared-corrected temperature values for the curved surface are derived. Comparative analysis of these results with temperature measurements obtained from thermocouples positioned at representative locations demonstrates a reduction in temperature measurement error from approximately 4% prior to correction to less than 1%. This result substantiates the high accuracy and adaptability of the proposed correction model, underscoring its potential to provide valuable support for enhancing aerodynamic heat transfer test technology and facilitating the development of major aero-engine equipment, particularly turbine blades.

Keywords: heat transfer; heat conduction; aircraft engine; radiation thermometry

0 引言

为了提高航空发动机的比冲,最直接有效的途径就是提高涡轮转子进口温度。但随着进口温度的升高,导致涡轮叶片长期工作在较大的热负荷条件下,提高了涡轮叶片的故障率。准确测量涡轮叶片的工作温度,对于提高涡轮叶片的寿命和航空发动机的安全运行具有重大意义。

目前主要的测温方式分为接触式测温和非接触式测温。接触式测温包括薄膜热电偶测温、示温漆测温方法、晶体测温等方法,非接触式测温包括荧光测温法和辐射测温法。在涡轮叶片工作的状态下,薄膜热电偶测温方法存在导线难以放置的问题,示温漆测温方法和晶体测温方法不能反映温度的动态变化^[1]。在非接触式测温的方法中,荧光测温法有测温范围宽、测温精度高的优点,但是响应信号采集的难度高,随着温度的升高信号十分容易失效^[2]。红外辐射测温的方法在目前国内外航空发动机的测温过程中有大量的应用,红外测温相对传统的测温方法有不会破坏被测物体的表面;响应时间短,能实时测量不断变化的温度值;测温范围广,灵敏度高的优点。在涡轮叶片的运行环境中,辐射测温法具有更大的优势^[3]。

在大量的应用中,研究人员逐渐发现并总结影响红外热成像测温精度的因素^[4-9]。Kerr等^[10-12]在研究中指出,辐射测温误差受到叶片表面发射率的影响,而叶片表面发射率又与叶片表面特性有关,比如涂层侵蚀、氧化程度等因素都会改变叶片表面的发射率。同时,叶片表面发射率还与温度、波长、观察角和表面条件等因素有关,因此很难对叶片表面发射率进行准确测量。Astarita等^[13]的研究认为,在金属表面喷涂合适的黑色底漆,则可视而非金属;当观测视线与被测件表面法线所成角度在 $0^\circ \sim 60^\circ$ 之间时,发射率基本保持不变。除了叶片自身发射率对测温结果有影响之外,叶片周围高温环境的辐射同时会对测温结果产生影响,王秋实等^[14]研究指出,某一点在光照条件下的反射属性与入射点的位置、入射方向、出射方向以及波长有关,获得双向反射分布函数(bidirectional reflectance distribution function, BRDF)值对有效辐射测量具有非常重要的意义。张涛等^[15]研究指出,在辐射传热计算时,需要计算任意两个辐射换热面元之间的角系数。

本文针对三维弯曲表面的红外测温难题,提出了一种考虑了发射率不均匀、高温背景辐射等复杂条件下的红外测温修正模型。通过获得叶片的发射率、角系数、双向反射分布函数对影响红外热像仪测温结果准确性的主要因素进行修正,利用不同叶片距离和探测角度下的测量结果验证了本文所提模型的适用性。

1 涡轮叶片红外测温原理

红外辐射测温原理如图1所示,红外热像仪测温是根据接收到的辐射能反推表面的温度,而红外探测器接收到的辐射能量包括目标自身的辐射、目标对周围环境的反射辐射及环境的自发辐射^[16],上述辐射经过辐射参与性介质衰减到达探测器。由于高温燃气的厚度低、吸收系数小^[17],在本研究中不考虑高温燃气对测温结果的影响,红外探测器接收到的辐射能量可以用下式表示^[18-23]:

$$M_{\lambda, T_m} = \varepsilon_{\lambda} M_{\lambda, T_0} + \rho_{\lambda} M_{\lambda, T_b} \quad (1)$$

式中: M_{λ, T_m} 为探测器接收到的总的辐射量, M_{λ, T_0} 为测量目标发出的辐射能量, M_{λ, T_b} 为周围环境辐射到达被测目标表面的能量。 ε_{λ} 为测量目标表面的光谱发射率, ρ_{λ} 为测量目标表面的光谱反射率。

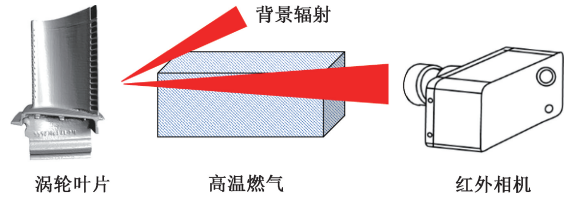


图1 红外热像仪测温原理

Fig. 1 Infrared thermal imager temperature measurement principle

根据红外探测器接收到的辐射能量表达式,表面光谱发射率是一个很关键的参数。根据普朗克公式,式(1)可以表示为关于波长、温度及发射率的表达式^[24]:

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_m)] - 1} d\lambda = \varepsilon_{\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_0)] - 1} d\lambda + \rho_{\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_b)] - 1} d\lambda \quad (2)$$

式中:为红外相机温度示值, T_0 为被测叶片的真实温度, T_b 为背景环境的温度, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-6} \text{ W} \cdot \text{m}$ 为第一普朗克系数, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{K}$ 为第二普朗克系数, λ 为测量波长。

对于大部分的叶片而言,它的表面反射即不全是镜反射,也不全是漫反射。对被测件辐射能量进行修正时,需要得知被测件对周围能量的反射比例,因此需要进行表面BRDF的测量^[25]。BRDF是一种描述物体表面光反射现象的物理参数^[26-27]。光谱双向反射分布函数 $BRDF_{\lambda}(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, T)$,在入射方向 (θ_i, ϕ_i) 上,立体角 $d\Omega_i$ 内,单位时间单位面积投射的光谱能量为 $I_{\lambda, i}(\lambda,$

$\theta_i, \phi_i) \cos \theta_i d\Omega_i$, 此能量投射到表面, 在不同反射方向上反射的能量不同。若在反射方向 (θ_r, ϕ_r) 上, 反射的光谱辐射强度为 $I_{\lambda,r}(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r)$, 则光谱双向反射分布函数的定义为两能量之比:

$$BRDF_{\lambda}(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, T) = \frac{I_{\lambda,r}(\lambda, \theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r, T)}{I_{\lambda,i}(\lambda, \theta_i, \phi_i) d\Omega_i} \quad (3)$$

M_{λ,T_b} 为相邻叶片各微元面对被测微元面发出的辐射与对应的 BRDF 函数相乘之和。相邻叶片微元面对被测微元面发出的辐射为^[28-30]:

$$M_{\lambda,T_b} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp[c_2/(\lambda T_b)] - 1} d\lambda \cdot X_{i,j} \cdot BRDF_{\lambda} \quad (4)$$

式中: $X_{i,j}$ 为 i 对 j 的角系数, 可根据 j 网格中心点与相机镜头方向和该网格的法向量的夹角求出。

2 涡轮叶片的表面物性参数测量

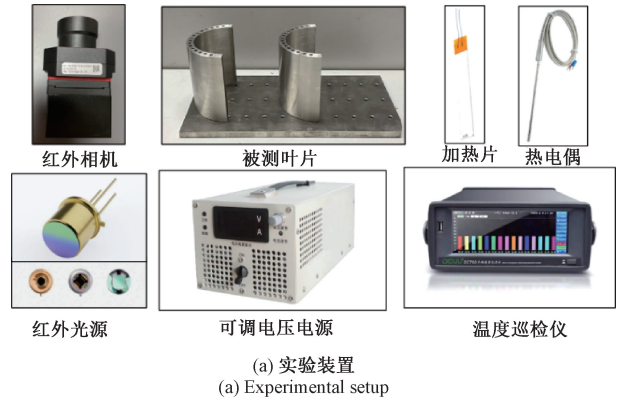
2.1 实验系统及设备

不失一般性, 在本研究中利用半圆环形弯曲表面代替具体的涡轮叶形, 即内径为 90 mm, 外径为 110 mm, 高度为 100 mm 的半圆环, 使用平面底板对半圆环进行固定, 底板每隔 2.5 cm 开一处固定孔, 实验中可以改变两个半圆环的位置来探究相邻叶片的距离对测温结果的影响, 如图 2(a) 所示。为了校验测试结果, 在半圆环的顶部开孔埋热电偶, 按照两组孔深分别为 8、6、4、2、2、4、6、8 cm 共开了 16 个孔, 如图 2(b) 所示。将弯曲表面划分成 16×5 的网格, 叶片吸力面上每一个网格中点对应 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_{16}$, 叶片压力面上每一个网格中点对应 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{16}$, 可根据角系数的定义^[31-34], 利用 θ_i 和 α_i 的坐标关系计算网格之间的角系数大小。

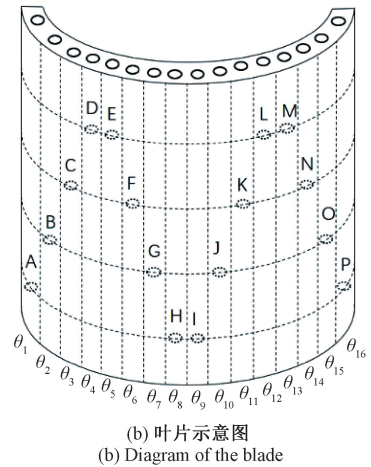
弯曲叶片红外测温实验系统主要设备有: 本研究中使用红外 CCD 相机来获得弯曲表面的红外图像及温度, 其型号为 HiNet-6400EM, 测温范围为 273.15~1 000 K, 波长为 8~14 μm 。为了模拟被测高温叶片以及叶片周围高温环境, 使用 48 V、1 500 W 可调电源配合陶瓷加热片给叶片加热。利用型号为 WRNK-191 的 32 路温度巡检仪 DC700 实时记录 K 型耐高温热电偶测得的温度数据, 作为实验中的参考。另外在叶片表面 BRDF 测量中使用型号为 IR emitter JSIR-350-4 的红外光源作为透射光源。

2.2 表面发射率分布测量

由于实际涡轮叶片表面发射率不均匀, 所以实验中将被测侧面的吸力面均分成 80 个网格, 测量表面发射率分布情况对测温结果进行修正。在叶片打孔位置插入耐高温热电偶, 为了可以测得比较准确的真实温度, 用导热胶



(a) 实验装置
(a) Experimental setup



(b) 叶片示意图
(b) Diagram of the blade

图 2 实验系统及设备

Fig. 2 Experimental system and equipment

进行密封。如图 3 所示, 采用陶瓷导热片对叶片进行加热, 将叶片加热至 550 K 后在室温下自然冷却, 冷却过程中红外相机和温度巡检仪可以同时记录叶片的温度。根据式(2)对 16 个网格处的发射率进行测量。

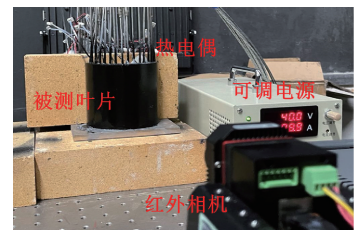


图 3 发射率测量实验图

Fig. 3 Emissivity measurement experimental diagram

涡轮叶片的主要材料是高温合金, 且表面还涂有一层耐热层, 本研究实验中用来模拟的叶片材质为不锈钢。为了与实际涡轮叶片发射率保持相当, 实验中的模拟叶片表面涂有一层磨砂漆提高其发射率。利用 16 个热电偶测温点的温度和红外热像仪拍摄得到的表观温度, 如图 4 所示, 可以看出, 由于固定底板的散热和陶瓷加热片的热均匀性, 导致实验叶片的温度分布并不均匀。

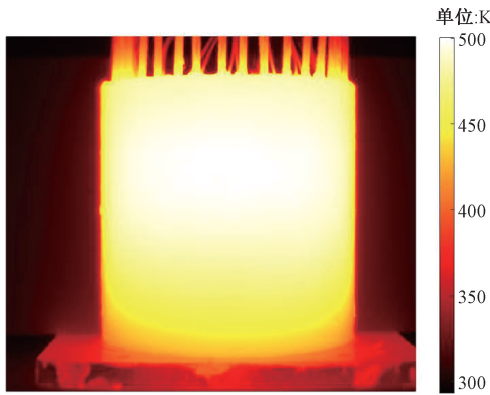


图 4 某一时刻红外相机拍摄图像

Fig. 4 The infrared camera takes the image at a certain moment

根据式(2)得到 16 个测温点的发射率,如图 5 所示。呈现和叶片高度相关的发射率大小分布。但考虑到温度分布的不均匀性,分别在 420 和 435 K 下测量了不同深度处叶片发射率,如图 6 所示,可以看出两种温度下发射率与深度几乎无关,叶片的发射率水平可能仅是温度的函数。

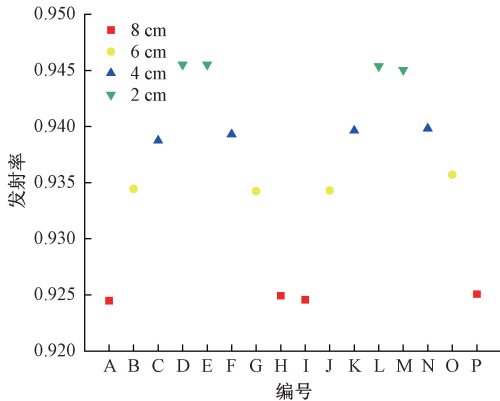


图 5 同一时刻叶片不同位置上的发射率分布

Fig. 5 The distribution of emissivity at different positions of the blade at the same time

为了研究叶片发射率与温度的关系,将叶片加热到 650 K 后使叶片自然降温,所有位置每隔 20 K 进行一次温度值,进而获得在 420~620 K 温度区间内的发射率,对实验测量结果进行二次多项式拟合,得到拟合方程为 $\varepsilon(T) = -3.325 \times 10^{-7} T^2 + 4.306 \times 10^{-4} T + 0.814$, 拟合方程的决定系数为 0.994 8,如图 7 所示。对发射率随温度的变化情况进行,根据拟合方程,可以得出叶片测量面每个网格处的发射率,从而对测量面进行发射率的面修正。

2.3 表面双向反射分布测量

考虑到实际的叶片既非理想的镜反射面也不是理想的漫反射面,在红外测温修正中需要考虑周围物体的反

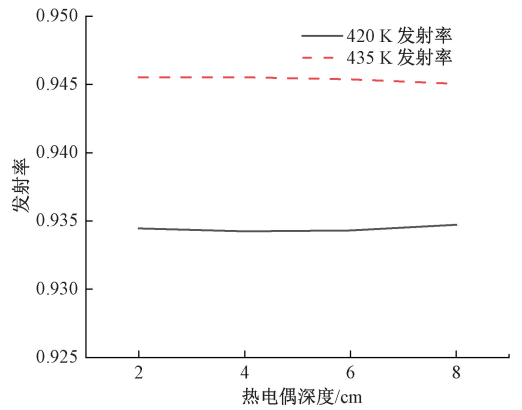


图 6 相同温度下不同深度上的发射率变化曲线

Fig. 6 Emissivity curve at different depths at the same temperature

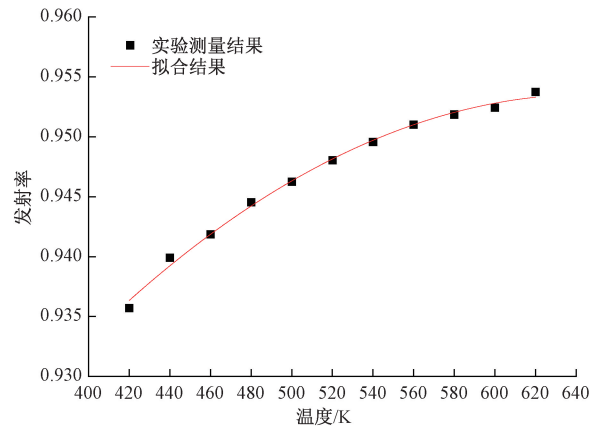


图 7 叶片发射率随温度的变化规律

Fig. 7 Variation of blade emissivity with temperature

射,因此有必要通过测量获得叶片的双向反射分布函数。如图 8 所示,采用红外光源与细长空心管组成红外平行光源,沿某一固定角度照射到叶片表面,将红外相机固定在导轨上,以入射点为圆心固定测量半径,改变测量角度,获得叶片的双向反射分布函数。由于叶片的发射率较高,在反射角大于 60° 的情况下,红外相机接收到的辐射能量非常小,其对叶片的测温影响可以忽略。

图 9 给出了红外光源入射角分别为 20°、30°、45° 条件下,测量出叶片吸力面反射角小于 60° 的 BRDF 值。从图 9 中可以看出,在入射角等于反射角时,反射方向上的相对能量最大,改变测量角度,在其他方向上获得的反射辐射并没有锐减,说明了本研究中的实验叶片即有镜反射又存在漫反射部分。

2.4 表角系数分布测量

由于叶片是弯曲的,周围叶片的不同位置对被测叶片的反射贡献不同,在红外测温修正中需要对角系数进

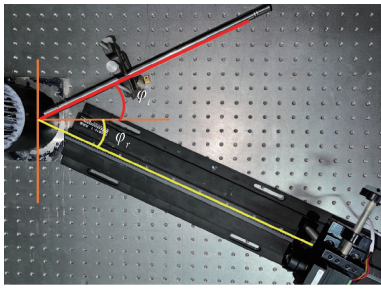


图8 BRDF 测量实验系统

Fig. 8 BRDF measuring system

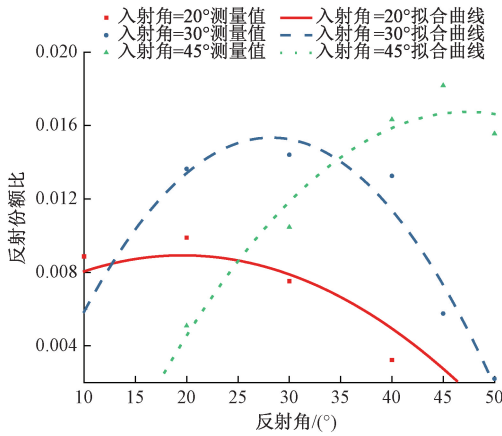


图9 叶片吸力面部分方向的 BRDF 分布结果

Fig. 9 BRDF distribution results in the partial direction of the blade suction surface

行计算。在实验中,对相邻叶片进行相同的网格划分,根据叶片的叶型函数获得每个网格的外法线方向向量和网格面积,计算每一个网格对测温面每一个网格的角系数 $X_{i,j}$,由式(3)结合 BRDF 数据,可以计算出相邻叶片对测温叶片的辐射换热能量,进而消除高温背景辐射量对测温结果的影响。

为了考虑周围叶片对被测叶片的辐射贡献,以两个相邻叶片距离为 7.5 cm 时为例,计算出周围叶片每一个网格对测量叶片每一个网格角系数之和,如图 10 所示。可以看出,由于叶片倾斜和遮挡,周围叶片对被测叶片的中间区域辐射贡献最大,有必要在测温修正中扣除。

3 结果与分析

3.1 不同叶片温度下的结果误差分析

设定被测叶片和周围叶片的间距为 7.5 cm,将电源电压设定为 40 V,同时加热两片相邻叶片 20 min,红外热像仪在于叶片底座成 30°下拍摄被测叶片表面温度分布,如图 11(a) 所示。由于视角的原因,红外热像仪只能拍摄到被测叶片的局部,从图 11(a)中可以看出在周围叶

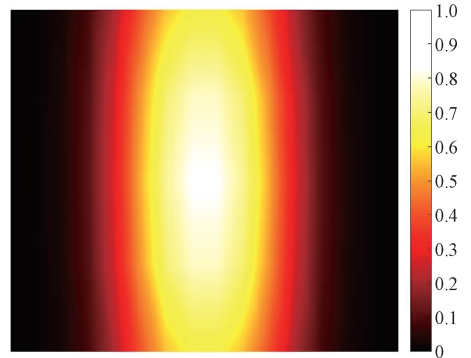
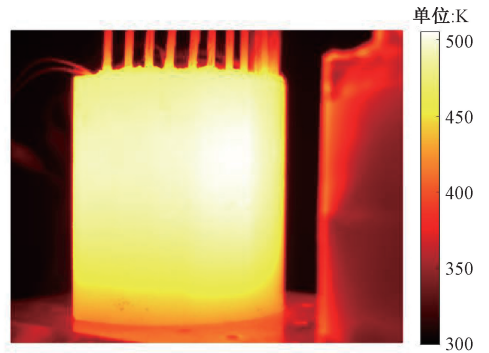


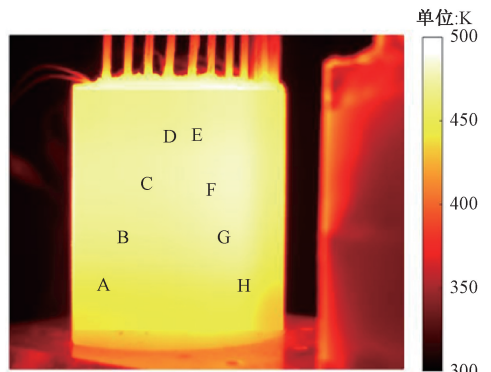
图10 7.5 cm 叶片间距下被测叶片辐射贡献分布

Fig. 10 Radiation contribution distribution of tested leaves at 7.5 cm spacing

片的影响下,被测叶片的温度分布与没有相邻叶片干扰下的温度分布(图 4)有较大区别,不再仅是沿叶片高度上变化,叶片中心出现了局部高温区,这与辐射贡献分布规律相符。利用前面测量获得被测叶片的发射率、角系数、BRDF 参数,带入到修正公式内进行测温修正,结果如图 11(b) 所示。可以看出,经过温度修正后叶片的高温区域温度有所降低,而低温区温度降低的较少。



(a) 红外相机获得原始图像
(a) The infrared camera obtains the raw image



(b) 校正后的叶片温度分布
(b) Corrected blade temperature distribution

图11 红外热像仪温度测量及修正结果分布

Fig. 11 Infrared thermal imager temperature measurement and distribution of correction results

为了定量的分析校正后的结果,利用预埋在特定位置的热电偶数据作为参考温度,在 410~510 K 温度区间内每隔 20 K,对热像仪视场内的特定点温度和修正数据进行分析。不失一般性,表 1 给出了不同高度上的两个指定位置 E、F 在不同温度下的测量结果对比,表中 T_0 为热电偶测量的参考温度, T_m 为红外热像仪直接测量的温度, T_c 为经修正后的红外温度。根据表中数据可以看出,经过修正后的温度与热电偶测得的参考温度相比,误差均保持在 1% 以内,比红外热像仪直接测量的误差下降了 3% 左右,说明了本修正模型在实验温度范围内有较好的修正效果。

表 1 E、F 点不同温度下修正结果

Table 1 Correction results at different temperatures at points E and F

测点位置	T_0 /K	T_m /K	T_c /K	原始误差 /%	修正误差 /%
E 点	503.74	487.68	498.80	3.19	0.98
	483.39	465.96	479.27	3.61	0.85
	463.01	450.42	459.73	2.72	0.71
	443.69	429.57	440.87	3.18	0.64
	423.38	410.81	419.33	2.97	0.96
F 点	499.89	523.36	495.67	4.70	0.84
	480.24	496.18	476.47	3.32	0.79
	460.44	478.02	458.87	3.82	0.34
	440.74	454.21	439.80	3.06	0.21
	420.57	432.64	418.73	2.87	0.44

3.2 不同叶片距离影响下的结果误差分析

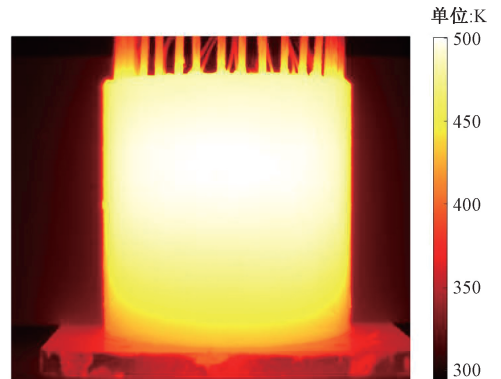
由于在航空发动机中涡轮叶片间的距离随叶片高度而不同,有必要讨论不同叶片间距下本文所提修正模型的适用性。表 2 给出了叶片 C、H 两个位置在不同叶片间距下的热电偶测试温度 T_0 、直接红外热像仪温度 T_m 和修正的红外温度 T_c 。从表中可以看出,在改变叶片之间的距离之后,修正的红外温度和热电偶参考温度的误差仍在 1% 以内,说明了不同的叶片距离下,本文所提出的红外修正温度依然具有较高的修正精度。

3.3 不同探测角度下的结果误差分析

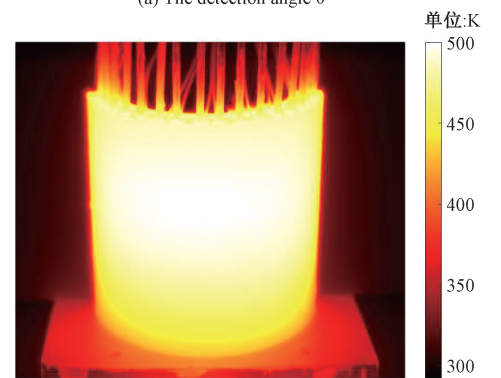
在可视化的叶栅实验台中,红外热像仪可以从多个角度拍摄测温。但拍摄角度会影响红外热像仪接收到的辐射能量,因此需要考虑红外热像仪在不同探测角度下的修正精度。图 12 给出了 0° 和 30° 俯视拍摄下,红外热像仪的测温结果。从图中可以看出 30° 俯视拍摄下的直接测温结果与 0° 的拍摄结果接近。

表 2 C、H 点不同叶片距离下修正结果点
Table 2 Correction results under different blade distances at points C and H

测点位置	间距 /cm	T_0 /K	T_m /K	T_c /K	原始误差 /%	修正误差 /%
C 点	7.5	501.96	482.31	498.80	3.91	0.63
	7.5	483.71	463.25	480.93	4.23	0.57
	10.0	509.96	493.61	506.87	3.21	0.61
	10.0	486.71	465.82	482.68	4.29	0.83
	12.5	508.66	491.35	505.61	3.40	0.60
	12.5	481.89	463.80	479.36	3.75	0.53
	7.5	501.00	483.72	497.50	3.45	0.70
	7.5	482.80	463.08	480.43	4.08	0.49
	10.0	510.86	494.62	507.80	3.18	0.60
	10.0	490.18	472.61	487.95	3.58	0.45
H 点	12.5	510.06	492.54	507.40	3.43	0.52
	12.5	483.89	462.88	481.40	4.34	0.51



(a) 探测角为 0° 时
(a) The detection angle 0°



(b) 探测角为 30° 时
(b) The detection angle 30°

图 12 不同探测角度下的直接红外测温结果
Fig. 12 Direct infrared temperature measurement results at different detection angles

表3给出了不同位置下利用本文修正模型获得的红外修正温度和热电偶测量的参考温度分布。从表中可以看出,在改变了拍摄角度后,红外修正温度依然可以维持在较高的精度。说明了本模型可以适用于不同的探测角度。

表3 不同探测角度拍摄下的修正结果

Table 3 Correction results under different detection angles

测点位置	拍摄角度/(°)	T_0/K	T_m/K	T_c/K	原始误差/%	修正误差/%
C点	0	506.86	490.72	504.01	3.18	0.56
	0	489.53	473.08	487.03	3.36	0.51
	30	509.46	491.62	507.68	3.50	0.35
	30	492.38	474.61	488.70	3.61	0.75
H点	0	505.95	488.61	503.10	3.43	0.56
	0	488.66	471.80	486.17	3.45	0.51
	30	508.32	491.09	505.53	3.39	0.55
	30	490.67	474.10	489.37	3.38	0.26

4 结 论

本文提出了一种复杂背景下三维弯曲表面红外辐射测温的修正模型。针对涡轮叶片的红外测温中存在弯曲表面、发射率不均匀、叶片间距不均一、高温背景辐射等难题,开展了实验评价研究。通过实验获得了叶片的发射率、角系数、双向反射分布函数等基础物性参数,总结了这些物性参数的分布规律。利用所提修正模型对不同叶片温度、叶片间距、探测角度的直接红外测温结果进行修正,以热电偶的测量温度为参考,修正误差均保持在1%以内,表面本文所提模型具有较好的适用性。

参考文献

[1] 付万超, 范春利, 杨立. 非平表面的红外热像测温修正方法研究[J]. 红外技术, 2021, 43(2): 179-185.
FU W CH, FAN CH L, YANG L. Compensation method for temperature distribution measured by infrared thermography for non-flat surfaces [J]. Infrared Technology, 2021, 43(2): 179-185.

[2] ZHANG X, CHEN L, FU Y, et al. Research on error analysis and correction of infrared temperature measurement for rotating [C]. Proceedings of the 2017 12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), IEEE, 2017: 1932-1936.

[3] 马帅坤, 张谈贵, 蔡静, 等. 背景影响下涡轮叶片温度测量及修正技术研究[J]. 测试技术学报, 2021,

35(1): 25-30.

MA SH K, ZHANG T G, CAI J, et al. Research on turbine blade temperature measurement and correction technology under background influence [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2021, 35(1): 25-30.

- [4] 韩国庆, 刘显明, 雷小华, 等. 光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1): 145-164.
HAN G Q, LIU X M, LEI X H, et al. Application of optical fiber sensing technology in aircraft engine temperature test [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1): 145-164.
- [5] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望[J]. 自动化技术与应用, 2004, 23(3): 1-7.
DAI J M. Development status and prospect of radiation temperature measurement [J]. Techniques of Automation and Applications, 2004, 23(3): 1-7.
- [6] 黄名海, 臧树升, 葛冰, 等. 热风洞中涡轮叶片温度场红外热像测量方法[J]. 航空动力学报, 2014, 29(11): 2679-2683.
HUANG M H, ZANG SH SH, GE B, et al. Method of infrared thermography measurement for temperature field of turbine vane in hot wind tunnel [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(11): 2679-2683.
- [7] 焦华宾, 莫松. 航空涡轮发动机现状及未来发展综述[J]. 航空制造技术, 2015(12): 62-65.
JIAO H B, MO S. Overview of the current situation and future development of aero turbine engines [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015(12): 62-65.
- [8] 伍济钢, 文港, 杨康. 改进一维卷积神经网络的航空发动机故障诊断方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(3): 179-186.
WU J G, WEN G, YANG K. Improved one-dimensional convolutional neural network for aero-engine fault diagnosis method [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(3): 179-186.
- [9] SCHULZ A. Infrared thermography as applied to film cooling of gas turbine components [J]. Measurement Science Technology, 2000, 11(7): 948-956.
- [10] KERR C, IVEY P. An overview of the measurement errors associated with gas turbine aeroengine pyrometer systems [J]. Measurement Science and Technology, 2002, 13(6): 873-881.

- [11] KERR C, IVEY P. Optical fouling of the RB199 pyrometer[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2003, 19(1): 66-72.
- [12] KERR C, IVEY P. Optical pyrometry for gas turbine aeroengines[J]. *Sensor Review*, 2004, 24(4): 378-386.
- [13] ASTARITA T, CARDONE G, CARLOMAGNO G, et al. A survey on infrared thermography for convective heat transfer measurements[J]. *Optics and Laser Technology*, 2000, 32(7-8): 593-610.
- [14] 王秋实, 马利庄, 曾洲. 基于图像的三维高光物体双向反射分布函数测量[J]. *系统仿真学报*, 2008, 20(11): 2931-2934.
WANG Q SH, MA L ZH, ZENG ZH. Image-based BRDF acquisition for 3D objects with specular reflection[J]. *Journal of System Simulation*, 2008, 20(11): 2931-2934.
- [15] 张涛, 孙冰. 复杂结构角系数计算方法[J]. *航空动力学报*, 2009, 24(4): 753-759.
ZHANG T, SUN B. Numerical computation of view factor of complicated configuration[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(4): 753-759.
- [16] ROTH R, HIEMSTRA W. Dual wavelength temperature monitoring of TBC coated Alstom 13E2 turbine blades[C]. *Power for Land, Sea, and Air*, F, 2003, 36843: 581-588.
- [17] 李洋, 蔡静. 扫描式多光谱光纤测温装置光学系统设计研究[J]. *工业计量*, 2015, 25(4): 19-21.
LI Y, CAI J. Design and research of optical system of scanning multispectral optical fiber temperature measuring device[J]. *Industrial Metrology*, 2015, 25(4): 19-21.
- [18] BENDADA A, LAMONTAGNE M. A new infrared pyrometer for polymer temperature measurement during extrusion molding[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2004, 46(1-2): 11-15.
- [19] BIRD C, PARRISH C J. Component temperature measuring method; US, US7003425B2[P]. 2006-02-21.
- [20] BROWN L E, BROWN R G, DASGUPTA S, et al. Multiwavelength thermometer; US, US2011128989A1[P]. 2011-06-02.
- [21] CEZAILIVAN A, MCLURE J L, TAYLOR R. Thermophysical measurements on 90 Ti-6 Al-4 V alloy above 1450 K using a transient (subsecond) technique[J]. *J. Res. Natl. Bur. Stand.*, 1977, 81(2): 251-256.
- [22] DAI J M, FAN Y, CHU Z X. Development of a millisecond pulse-heating apparatus [J]. *International Journal of the Rmophysics*, 2002, 23(5): 1401-1405.
- [23] DANIEL K, FENG C, GAO S. Application of multispectral radiation thermometry in temperature measurement of thermal barrier coated surfaces [J]. *Measurement*, 2016, 92: 218-223.
- [24] 邱超, 孙晓刚, 栾美生. 基于光谱线性拟合的宽波段光源波动补偿方法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(6): 1702-1706.
QIU CH, SUN X G, LUAN M SH. Compensation method of broadband illuminant fluctuation based on spectrum linear fitting [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(6): 1702-1706.
- [25] 冯驰, 刘思源. 涡轮叶片发射率测量[J]. *哈尔滨商业大学学报(自然科学版)*, 2020, 36(5): 576-581.
FENG CH, LIU S Y. Turbine blade emissivity measurement [J]. *Journal of Harbin University of Commerce*, 2020, 36(5): 576-581.
- [26] 张景瑜, 任杰骥, 李霏, 等. 基于双向反射分布函数模型的结构光投影自适应调制方法[J]. *光学学报*. 2021, 41(9): 116-126.
ZHANG J Y, REN J J, LI F, et al. Adaptive structured light projection modulation method based on BRDF model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(9): 116-126.
- [27] 李新, 郑小兵, 寻丽娜, 等. 多角度测量系统实现室外 BRDF 测量[J]. *光电工程*, 2008(1): 66-70.
LI X, ZHENG X B, XUN L N, et al. Realization of field BRDF acquisition by multiangular measurement system[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008 (1): 66-70.
- [28] 李明, 宗肖颖. 定标漫反射板实验室系统级 BRDF 测量方法[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(1): 176-182.
LI M, ZONG X Y. In-lab system-level BRDF measurement method of calibration diffuser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(1): 176-182.
- [29] 温悦, 蔡静. 基于有效辐射温度的面辐射源发射率测量方法研究 [J]. *计测技术*, 2018, 38(S1): 68-70.
WEN Y, CAI J. Research on the method of measuring the emissivity of area radiation sources based on effective radiation temperature [J]. *Metrology and Measurement Technology*, 2018, 38(S1): 68-70.
- [30] 熊兵, 石小江, 陈洪敏, 等. 航空发动机涡轮叶片发射率测量[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2011, 24(2): 45-48.
XIONG B, SHI X J, CHEN H M, et al. Aero-engine

turbine blade emissivity measurement [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2011, 24(2): 45-48.

- [31] REYHANI M R, ALIZADEH M, FATHI A, et al. Turbine blade temperature calculation and life estimation—a sensitivity analysis [J]. *Propulsion and Power Research*, 2013, 2(2): 148-161.
- [32] WANG G, ESTEVADEORDAL J, NIRMALAN N, et al. Real-time burst signal removal using multicolor pyrometry based filter for improved jet engine control[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(8): 081008.
- [33] FRANK S L F. Surface temperature mapping of gas turbine blading by means of high resolution pyrometry[J]. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 2001, 934(1): 257-264.
- [34] HAN J C. Fundamental gas turbine heat transfer [J]. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2013, 5(2): 021007.

作者简介



张天宇, 2020 年于武汉理工大学获得学士学位, 现为东南大学在读研究生, 主要研究方向为辐射测温。

E-mail: 220200404@seu.edu.cn

Zhang Tianyu received his B. Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2020. He is currently a postgraduate at Southeast University. His main research interest is radiation thermometry.



方弘毅, 2007 年于南京航空航天大学获得学士学位, 2011 年于沈阳航空航天大学获得硕士学位, 现为中国航发四川燃气涡轮研究院高级工程师, 主要研究方向为空气系统与热分析试验技术。

E-mail: 639164302@qq.com

Fang Hongyi received his B. Sc. degree from Nanjing University of Aeronautics and Astronautics in 2007, and received his M. Sc. degree from Shenyang Aerospace University in 2011. He is currently a senior engineer at AECC Sichuan Gas Turbine Research Institute. His main research interests include air system and thermal analysis test technology.



张彪 (通信作者), 2008 年, 2010 年和 2014 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 硕士学位和博士学位, 现为东南大学副教授, 主要研究方向为热辐射传输计算、多维温度场测量、燃烧诊断、多相流测试技术。

E-mail: zhangbiao@seu.edu.cn

Zhang Biao (Corresponding author) received his B. Sc. degree, M. Sc. degree and Ph. D. degree all from Harbin Institute of Technology in 2008, 2010 and 2014, respectively. He is currently an associate professor at Southeast University. His main research interests include radiative heat transfer calculation, multidimensional temperature field measurement, combustion diagnosis, and multiphase flow measurement technology.