

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.01.02

涡轮叶片辐射测温技术应用进展

马宏伟^{1,2*}, 高若琳¹

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 北京航空航天大学 航空发动机气动热力国家级重点实验室, 北京 100191)

摘要: 相比传统测温技术, 辐射测温具有非接触、响应快、高温适应性强等优势, 可实时测量涡轮转子叶片等关键部件的表面温度分布。介绍了亮度测温法、比色测温法、电荷耦合器件(Charge-Coupled Device, CCD)测温法、多波长辐射测温法等具有代表性的辐射测温方法的基本原理、技术特点及适用范围。阐述了辐射测温技术在涡轮叶片温度测试中的应用和发展现状, 探讨了该技术未来的发展方向, 提出可通过优化光学探头设计、使用更先进的算法、应用新型耐高温材料等手段, 进一步提升辐射测温技术的准确性和可靠性; 可将辐射测温技术与热电偶测温技术相结合, 构建更加精准、稳定的涡轮叶片温度监测系统。

关键词: 辐射测温; 高温涡轮; 亮度测温; 比色测温; CCD测温; 多波长辐射测温

中图分类号: TB942; V232.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-5795 (2025) 01-0021-24

Application progress of turbine blade temperature radiation thermometry technology

MA Hongwei^{1,2*}, GAO Ruolin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, Beihang University, Beijing 100191;

2. National Key Laboratory of Science and Technology on Aero-Engine Aero-Thermodynamics, Beihang University, Beijing 100191)

Abstract: Compared with the traditional temperature measurement technology, radiation thermometry technology offers the advantages of non-contact measurement, fast response and excellent high-temperature adaptability. It enables real-time measurement of the surface temperature distribution of key components such as turbine rotor blades. It introduces the basic principles, technical characteristics and application scope of various radiation temperature measurement methods including brightness thermometry, colorimetric thermometry, charge-coupled device (CCD) thermometry, and multi-wavelength radiation thermometry. The application and development status of radiation thermometry technology in turbine blade temperature measurement are described, and the future development direction of this technology is discussed. It is pointed out that the accuracy and reliability of radiation thermometry technology can be further improved by optimizing the design of optical probe, using more advanced algorithms, and applying new type of high-temperature-resistant materials; and that the radiation thermometry technology can be combined with thermocouple thermometry technology to build a more precise and stable turbine blade temperature monitoring system.

Key words: radiation thermometry; high-temperature turbine; brightness thermometry; colorimetric thermometry; CCD thermometry; multi-wavelength radiation thermometry

收稿日期: 2025-01-17; 修回日期: 2025-02-01

基金项目: 国家科技重大专项项目(2017-V-0016-0068, J2019-V-0002-0093)

引用格式: 马宏伟, 高若琳. 涡轮叶片辐射测温技术应用进展[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 21-44.

Citation: MA H W, GAO R L. Application progress of turbine blade temperature radiation thermometry technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 21-44.



0 引言

研制高性能燃气涡轮发动机需要测量涡轮叶片表面温度场。测温方法主要分为接触式和非接触式两种^[1]。接触式测温以热电偶测温为主,但热电偶测温涉及复杂的转子布线及数据传输设备安装,不仅耗时长且成本高昂^[2]。此外,热电偶测点数量有限,难以全面反映叶片表面温度的分布情况。随着涡轮进口温度的不断提升,叶片冷却结构越来越复杂,传统有限测点的布置方式已难以满足对温度场的精准监测需求。因此,如何突破测点限制,获取更全面的涡轮叶片温度分布信息,已成为当前研究的重要方向。

辐射测温作为一种非接触式温度测量方法,利用物体在红外波段的辐射特性测量表面温度,克服了热电偶技术固有的热惯性问题,可以快速响应表面温度的变化。此外,辐射测温装置无需与涡轮叶片直接接触,可避免对涡轮内压力场、速度场、温度场的干扰,同时不受周围环境电磁干扰^[3]。辐射测温技术能够实时测量动态温度场变化,适应强振动、极端温度等复杂环境,快速获取涡轮转子及静子叶片表面温度场的分布情况,为高温涡轮部件研制、状态评估和健康监测提供重要实验数据支撑。

本文系统介绍辐射温度计的结构组成,对比分析全辐射测温、亮度测温、比色测温、CCD测温和多波长辐射测温等典型测温方法的原理、特点和适用范围。结合燃气涡轮的测温需求,介绍辐射测温技术在涡轮叶片表面温度测试实验中的应用。探讨当前辐射测温技术在实际应用中面临的挑战,并对涡轮叶片辐射测温技术的重点研究方向进行展望。

1 辐射温度计

辐射温度计主要由光学探头、光电转换器、信号调理器以及计算机数据采集处理系统组成^[4]。光学探头用于接收待测物体辐射的光信号,并通过光纤将其传输至光电转换器。光电转换器将光信号转换为电信号,然后输入信号调理器对其进行放大处理。最后,数据采集系统对采集到的电信号进行分析和处理,并将其转化为温度读数。

1.1 光学探头

光学探头是辐射温度计的前端组件,负责接收被测物体表面的辐射信号。物理实验室中的光学探头通常为开放式结构,主要由光学透镜、镜片组和支座组成。然而,这种开放式探头难以在燃气涡轮发动机整机或部件试验环境中使用。测量燃气涡轮部件温度时,往往伴随着强烈振动和高速气流冲刷,且光路需透过机匣,开放式探头难以满足这些苛刻条件。为满足高温涡轮叶片温度场测试的需求,光学探头通常设计为探管形式,其原理如图1所示。该探头内部包含光学透镜和用于限制杂光的小孔光阑,透镜参数和光阑尺寸决定了测量点面积,即靶面大小。光学透镜用于收集并聚焦辐射光,确保最大限度地将被测物体的辐射光通过光导纤维传输至光电转换器。这种探管式光学探头通过金属或陶瓷探管将光学系统与测温点隔离,并采用水冷或气冷方式对探头进行降温,从而有效保护光学系统,使其在恶劣高温环境下仍能稳定运行。

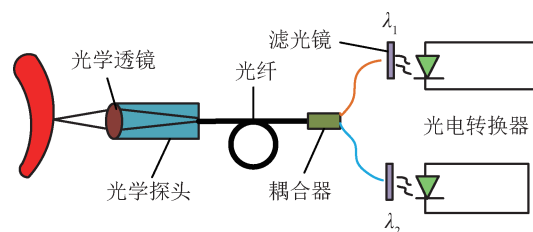


图1 典型的探管式光学温度计

Fig.1 A typical probe optical pyrometer

近年来,随着光纤技术的进步,一种新型的光纤式光学探头应运而生。与传统探管式探头不同,光纤式探头利用光纤接收被测对象辐射的光信号,并通过传输光纤将光信号传输至光电转换器,转换为电信号后进行信号分析和数据处理。光纤式光学探头主要由光纤束、光学透镜和光学滤波器组成。其中,光纤束的前端布置在测温点附近,用于引导测量区域的辐射能量进入光纤束;光学透镜进一步聚焦辐射能量,并通过滤波器选择特定波长的光信号,随后将其传输至光电转换器,如图2所示。被测对象的辐射能量经单模光纤传输至多模光纤,并通过包层和纤芯形成辐射光谱。基于光纤式光学探头的测温方法具有结构简单、对被测温度场干扰小的优点。然而,该方法

也存在一定的局限性,例如:无法测量低温物体,且要求被测材料具有较高的发射率,同时测量结果易受环境的影响。

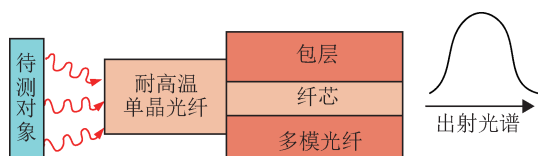


图2 光纤式光学探头示意图^[5]

Fig.2 The schematic diagram of optical fiber probe^[5]

为了提高光纤式探头的性能,将探头设计为带有黑体腔的结构,以增强其对辐射信号的捕获能力。黑体腔由耐高温的金属材料和非金属氧化物制成。腔内的高温物体通过单模光纤将辐射能量传输至多模光纤,并经过包层和纤芯传输至光电转换器,最终生成辐射光谱,这种结构提高了测量的精度和稳定性。图3展示了典型的光纤黑体腔辐射测温原理。

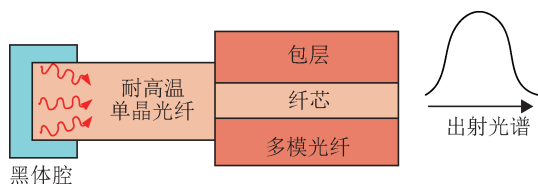


图3 典型的光纤黑体腔辐射测温原理示意图^[5]

Fig.3 Typical schematic diagram of optical fiber blackbody cavity radiation temperature measurement principle^[5]

光纤材料是决定光纤式探头能否适应高温测试环境的关键因素。传统石英基光纤受限于石英的熔点(1 330 °C),难以满足航空发动机等极端高温测试需求。因此,研发具有高温稳定性的单晶介质并应用于光纤式探头中是研究重点,以突破其在发动机应用中的技术瓶颈。在这一背景下,蓝宝石单晶光纤逐渐崭露头角,其理化性能稳定、熔点高达2 040 °C,成为高温传感领域的理想材料。然而,蓝宝石光纤的大折射率、大光纤直径及无包层结构会引发多模模间干涉,限制其性能提升。为解决这些问题,研究人员正致力于研发具有包层结构的蓝宝石光纤及其他耐高温单晶光纤材料。例如,将单晶蓝宝石与石英外包层结合,并通过拉丝工艺制成蓝宝石衍生光纤。这种光纤在保持优异耐高温性能的同时,克服了无包层结

构和多模干涉的缺陷,显著提升了高温环境中的传感能力。

浙江大学、山东大学和国防科技大学等机构针对耐温性能更优异的单晶光纤开展研究,并取得了重要进展^[6-7]。浙江大学首次制备了单晶蓝宝石光纤高温测试仪,实现了20 ~ 1 800 °C的温度测量,测量误差不超过±0.2%^[8]。山东大学自主设计并研发了国内首台微下拉生长炉等单晶光纤生长平台,成功制备出直径从微米级到毫米级的高质量单晶光纤^[9]。此外,该团队利用激光加热拉制生长法,成功制备出熔点超过2 700 °C的ZrO₂单晶光纤,突破了超高熔点氧化物晶体光纤的生长难题,为单晶光纤在极端高温环境中的应用提供了新的可能性。与此同时,美国艾利逊公司研制的涡轮进口温度光纤测量系统采用无源光纤温度传感器,能够在高达2 000 °C的环境下稳定工作,满足先进航空发动机热端部件的高温测量需求^[10-11]。这些研究进展和技术突破,为辐射测温技术在高温测量领域中的广泛应用奠定了坚实基础。

1.2 光电转换器

光电转换器是辐射温度计的核心组件,其主要功能是通过光电二极管将光学探头接收到的光信号转化为电信号。为满足高速及高精度的温度测量需求,光电二极管应具备高频率响应、高灵敏度和宽使用范围,以确保能够准确捕捉和转换来自高温物体的微弱辐射信号。常用的光电二极管包括光电倍增管、硅光电二极管、铟镓砷光电二极管等。20世纪60年代中期,光电倍增管作为转换器首次应用于辐射温度计中,其能够将微弱的光信号转化为电信号,并在紫外、可见光和近红外光谱范围工作,具有较高的精度和灵敏度^[12]。美国标准局等机构曾利用光电倍增管温度计复现国际实用温标,我国曾用这种温度计来复现金点以上的国际温标,并成功传递800 ~ 2 000 °C的高温实用温标^[13]。20世纪70年代初,WITHERELL P G等人^[14]发现硅光电二极管具有高线性度、高稳定性、高灵敏度、耐用性强、使用寿命长且成本适中的特点,更适用于精密光度测量。RUFFINO G等人^[15]从噪声对温度分辨力的限制、动态温度范围及辐射测温精度等方面对光电倍增管和硅光电二极管的性能进行了对比研究,验证了在1 μm波

长下工作的硅光电二极管的优越性。随着半导体材料和电子技术的发展,硅光电二极管逐渐取代光电倍增管,广泛应用于高分辨力辐射温度计中。近年来,研究人员开始探索钢镓砷材料在光电转换器中的应用潜力^[16-17]。ZHU Y等人^[18]成功制备了氧化镓-砷化钢镓紫外-短波红外双波段光电转换器,该转换器对280 nm以上波长的光具有良好的透射效果,且不影响转换器对短波红外波段的响应,实现了紫外和短波红外双波段的高效探测。

高性能涡轮进口温度可超过1 700 ℃,涡轮叶片表面温度范围较宽,单一光电二极管难以覆盖整个测温范围并保证测温精度,因此,可采用叠层型光电二极管。钢镓砷光电二极管对长波段(0.9 ~ 1.7 μm)具有高响应灵敏度,适用于550 ~ 900 ℃的温度测量^[19]。硅光电二极管对短波段的光更敏感,适用于750 ~ 1 100 ℃的温度测量。叠层型光电二极管内部集成了钢镓砷光电二极管和硅光电二极管,可对不同波长范围的光信号做出响应,从而实现对更高温度的精准测量。

1.3 信号调理器及数据采集控制

信号调理器用于处理光电转换器输出的微弱电信号,通过放大、滤波和转换来提高信号质量,以便计算机数据采集系统准确读取和分析信号。信号调理器主要由放大器、滤波电路等模块组成。由于辐射光信号本身较弱,且在光纤传输过程中会进一步衰减,加之光电转换器的探测靶面较小(直径约0.3 ~ 2 mm),导致光电转换器输出的电信号极为微弱,仅为nA量级。若直接输入数据采集系统,该信号可能无法被有效检测。因此,必须设计前置放大电路,将信号放大至可测范围。此外,为提高信号纯净度,还需采用滤波器消除高频干扰,确保信号的准确性。计算机数据采集系统则负责对处理后的电信号进行分析和转换,并最终输出温度读数。该系统由计算机控制模块组成,并配备相应的软件算法用于计算物体温度。通过结合预设的发射率参数和辐射传输模型,计算机模块能够精确推算物体的真实温度。

1.4 温度计标定

标定对辐射温度计的应用至关重要,辐射温度计通过接收被测物体的辐射能量进行温度测量,测得温度值与被测物体的辐射特性、距离、介质、

辐射能的传输、测试电路、信号处理以及环境干扰等因素有关^[20]。提高辐射温度计精度的关键在于对其进行准确标定。

如图4所示,使用已知温度的标准黑体炉对辐射温度计进行标定。为减少外界环境对测温结果的干扰,标定环境的温度、湿度和气压需要保持相对稳定。标定时,将温度计对准黑体炉内腔,确保其光轴与黑体炉内腔中心对齐。在每个设定的温度点稳定后,记录温度计输出的电压信号及对应的黑体炉温度,并进行多次实验。通过比较温度计的读数与黑体炉的实际温度,建立二者之间的对应关系,从而完成标定。此外,还可采用更简易的标定方法,如使用电热条形靶。电热条形靶的背面焊接已标定的热电偶,辐射温度计对准靶的正面进行测量,通过比较热电偶与辐射温度计的输出数据完成标定。这种标定方法可将测温过程的稳定性控制在1%以内。

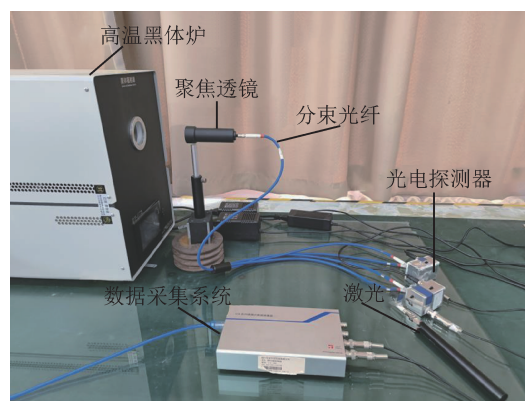


图4 辐射温度计标定设备^[21]

Fig.4 Radiation thermometer calibration equipment^[21]

2 辐射测温方法

任何物体在绝对零度以上都会产生原子或分子的无规则运动,并通过辐射向外释放红外热能量。物体的表面温度与其红外辐射能量及波长分布之间存在密切的对应关系。通过测量物体辐射的红外能量,可以准确确定物体的表面温度。辐射测温方法包括全辐射测温法、亮度测温法、比色测温法、CCD测温法及多波长测温法等。

2.1 全辐射测温法

普朗克定律揭示了黑体辐射的分布在不同波长上的差异,随着温度升高,辐射向更短的波长

移动。黑体在波长 λ 和 $(\lambda + d\lambda)$ 之间的辐射强度 E_λ 可以表示为^[22]

$$E_\lambda = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1} \quad (1)$$

式中: T 为黑体的绝对温度; C_1 为第一辐射常数, $C_1 = 3.741\,774\,9 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; C_2 为第二辐射常数, $C_2 = 1.438\,769 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

维恩位移定律描述了黑体光谱辐射亮度最大值对应的峰值波长 $\lambda_{\max}$ 与温度 T 之间的关系^[23], 如式(2)所示。

$$\lambda_{\max} \cdot T = (2\,897.8 \pm 0.4) \mu\text{m} \cdot \text{K} \quad (2)$$

维恩位移定律说明了黑体温度越高, 物体发出的辐射峰值波长越短^[24]。

斯特藩-玻尔兹曼定律描述了物体辐射总功率与其温度的四次方成比例关系^[25], 如式(3)所示。

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d\lambda = \frac{2\pi^5 k^4 T^4}{15c^2 h^3} = \sigma T^4 \quad (3)$$

式中: σ 为斯特藩-玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.676 \times 10^{-8} \text{ W} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; k 为玻尔兹曼常数; c 为电磁波在真空中的传播速度; h 为普朗克常数。物体温度越高, 其辐射出的总能量越大。

全辐射测温法通过测量物体在整个光谱范围内所有波长的辐射总能量, 并结合黑体标定实验来确定物体的温度。其总辐射功率 $E(T)$ 的大小与被测对象温度 T 之间的关系由斯特藩-玻尔兹曼定律描述, 即

$$E(T) = \varepsilon_{(\lambda, T)} \sigma T^4 \quad (4)$$

式中: $\varepsilon_{(\lambda, T)}$ 为物体在波长 λ 处的发射率, 同时也表示被测物体在特定波长下的光谱辐射能量 $E_{(\lambda, T)}$ 与黑体在相同波长和温度下的光谱辐射能量 $E_{b(\lambda, T)}$ 之比。实际物体的发射率是一个多变量函数, 受物体温度、辐射波长、辐射方向(与发射面元法线的夹角)、材料表面的粗糙度及氧化程度等因素的影响^[23]。

全辐射测温法的应用受光电转换器光谱响应范围的限制, 由于现有探测器无法覆盖全波长光谱, 该方法通过测量高温物体在有效探测波段内的光谱辐出度积分值, 反演出具有相同积分辐出度的等效黑体温度, 以此作为被测物体的辐射温度^[26]。因此, 准确测量被测物体的发射率是保证全辐射测温精度的关键^[27-28]。

常见的发射率测定方法包括基于黑体的比较法^[29]、能量平衡法、双波长比色法和热电偶对比法等。基于黑体的比较法通过将待测物体与已知发射率的标准黑体在相同温度下进行比较, 确定物体的发射率, 该方法对温度控制要求严格, 实验条件较为苛刻^[30]; 能量平衡法则基于物体表面辐射、反射与吸收能量的平衡关系推导发射率, 涉及复杂的热平衡计算; 双波长比色法利用不同波长的辐射强度比值来计算发射率, 该方法对测量系统的光谱响应特性要求较高, 且波长选择对测量结果影响较大^[31]; 热电偶对比法通过热电偶直接测量物体表面温度, 并与辐射温度计的测量值进行比较, 计算出发射率, 操作相对简单。如图5所示, 中国燃气涡轮研究院熊兵等人^[32]采用热电偶对比法测量涡轮叶片表面发射率。在该实验中, 将涡轮叶片置于坩埚电阻炉内, 并在叶片表面固定高精度热电偶, 等间隔地选择若干个温度参考点, 用热电偶测出叶片表面的真实温度, 同时调整红外测温仪的发射率, 使其测得的温度与热电偶测量值一致, 此时的发射率即为叶片在该温度下的实际发射率^[33]。通过热工检定仪记录叶片上铠装热电偶的电压值, 并计算测量点的实际温度。同时, 控温仪精准调节坩埚电阻炉的温度, 以确保叶片处于稳定的测试环境中。

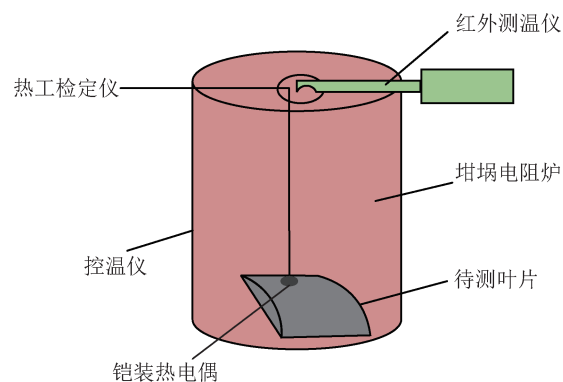


图5 热电偶对比法测量发射率^[32]

Fig.5 Measurement of emissivity by thermocouple comparison method^[32]

图6展示了一种典型的全辐射测温系统结构。该系统的测温精度受环境温度的变化、物体发射率差异及测距大小等因素影响, 需要进行相应的补偿处理^[34]。米松涛等人^[35]通过分析表面粗糙度

对红外发射率的影响,提出一种基于发射率修正模型的红外测温补偿方法,并通过实验验证了其有效性。实验结果表明,该方法能够显著提高测温精度,将最大误差由2.783℃降低至1.058℃,平均误差由1.683℃降至0.649℃。魏绍亮等人^[36]则构建了一种基于不同发射率条件下的温度补偿模型,修正了待测物体在不同发射率下的温度测量值。该模型有效降低了发射率数值偏离对红外温度测量结果的影响,使温度误差值控制在±1℃以内。

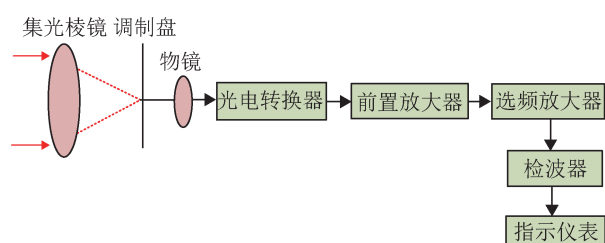


图6 全辐射测温系统结构示意图^[34]

Fig.6 Structure diagram of total radiation temperature measurement system^[34]

2.2 亮度测温法

亮度测温法是一种基于单波长辐射测量的方法,根据测量物体在特定波长 λ 下的辐射亮度,利用黑体辐射定律推算其表面温度 T_L 。根据维恩近似理论,亮度温度计的信号可由与它有相同辐射功率的黑体的温度所表示,理想黑体的温度 T 与其最大单色辐射强度所对应的波长 λ_m 成反比关系^[37],即

$$\lambda_m \cdot T = K \quad (5)$$

式中: K 为仅与波长有关而与温度无关的仪表常数, $K = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。只要测知某辐射黑体的峰值波长 λ_m ,即可计算得出其温度 T 。但在设计亮度辐射测温系统时,波长 λ_m 随物体温度变化而持续变化,因此 λ_m 值难以确定;此外,在实际测温时,被测物体不可能是理想的黑体,物体的发射率是随温度和波长变化的复杂函数。以上这些因素都会对亮度测温的精度产生影响,不能简单地使用维恩位移定律来直接获得物体的温度^[38]。

物体亮度温度 T_L 可表示为

$$\frac{1}{T_L} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{C_1}{\lambda^5 \varepsilon(\lambda, T) E(\lambda, T)} \right] \quad (6)$$

物体亮度温度 T_L 和真实温度 T 的关系为

$$\frac{1}{T_L} - \frac{1}{T} = \frac{\lambda}{C_2} \ln \left[\frac{1}{\varepsilon(\lambda, T)} \right] \quad (7)$$

在实际测温中,温度计通过测量物体和标准光源在特定波段的辐射度,计算出物体的亮度温度 T_L ,再由此推算出物体的真实温度 T 。要得到物体的真实温度必须知道物体在工作波长附近的发射率,并对系统进行修正^[34, 39]。若该波长处的发射率不可知,则可以将亮度温度近似为真实温度,尽管这种近似会引入一定的误差,但相较全辐射测温法误差更小。电子科技大学张泽展等人^[40]研究了材料发射率变化对亮度测温精度的影响,如图7所示。研究表明,在发射率已知且无干扰条件下,亮度测温精度较高。然而,若真实发射率低于0.7,测量结果会偏低。反之,若真实发射率高于0.7,测量结果偏高。此外,测温误差与目标温度相关,且随温度升高而增大,即高温条件下,发射率误差对测温精度的影响更显著。

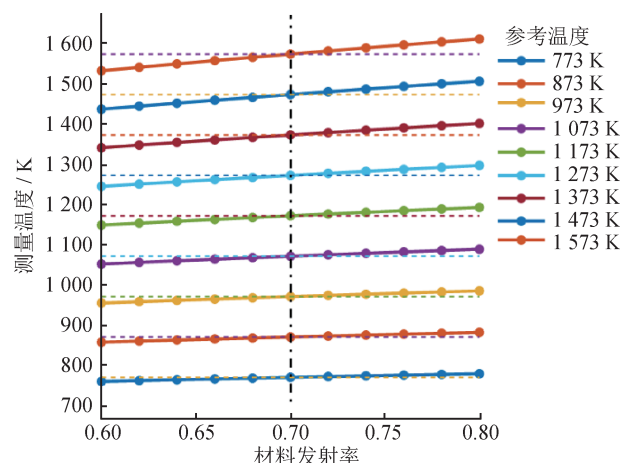


图7 材料发射率在0.6~0.8范围变化时的亮度测温结果^[40]

Fig.7 The brightness temperature measurement results when the emissivity of the material changes in the range of 0.6~0.8^[40]

2.3 比色测温法

全辐射和亮度测温方法的测温精度受物体发射率影响较大,为了减小物体发射率对测温结果的影响,比色测温法应运而生。比色测温法基于比色测温理论,通过放宽比色测温系统中滤波片的窄波带范围并进行积分来获得实验结果。该方法通过测量两个特定波长(λ_1 、 λ_2)的辐射量比值来确定物体的温度^[34],公式为

$$T_c = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln k + 5\ln(\lambda_1/\lambda_2) + \ln[\varepsilon(\lambda_2, T)/\varepsilon(\lambda_1, T)]} \quad (8)$$

式中: T_c 为比色测温法测得的温度, k 为物体在波长 λ_1 和 λ_2 时的辐射亮度之比。通过测量这两个波长及其对应的辐射亮度, 在已知选定波长参数的条件下, 结合不同波长处的发射率之比就可以计算出比色温度值。

实际物体的辐射受发射率影响, 在比色测温法中, 如果选择的波长 λ_1 和 λ_2 的发射率近似相等, 则测量误差相对较小。使用两个可以滤过特定光谱的窄带滤光片提取两个波长相近的窄波段, 通过理论计算, 比色温度与物体真实温度之间的误差为^[38]

$$\frac{1}{T_c} - \frac{1}{T} = \frac{\ln[\varepsilon(\lambda_1, T)/\varepsilon(\lambda_2, T)]}{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)} \quad (9)$$

比色测温的理论误差主要受所选波长发射率

的影响, 物体的发射率大小不随辐射波长变化, 仅与温度相关, 因此测得的温度可以视为真实温度。与亮度测温法相比, 比色测温法对发射率变化的依赖性较低, 适用于发射率未知或变化较大的目标测量。

比色测温装置原理如图8所示, 该装置主要由聚焦透镜、分束光纤、带通滤光片、铟镓砷转换器、调理电路和信号采集卡组成。测温时, 比色温度计的聚焦透镜对准被测温度场, 使被测温度场散射的红外辐射经透镜汇聚到分束光纤端面。分束光纤将红外辐射分成两束, 并分别传输至两个不同波长的带通滤光片, 实现对目标波段的红外辐射的筛选。随后, 铟镓砷光电转换器将其转化为电流信号, 经调理电路放大、滤波后转换为电压信号。最终, 数据采集卡将电压信号传输至计算机进行显示。

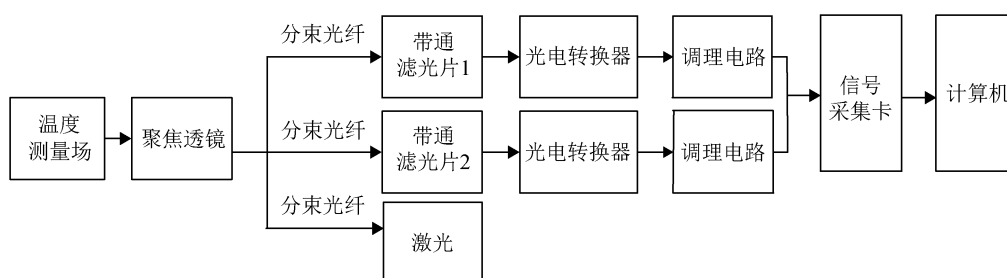


图8 比色测温装置原理框图^[21]

Fig.8 Principle block diagram of colorimetric temperature measuring device^[21]

在动态温度测量中, 比色测温法在一定程度上减小了发射率对测温结果的影响, 并展现出响应速度快、测温范围宽、不破坏温度场等优势。邵海颖等人^[21]基于比色测温法设计了一套动态温度测量系统, 为验证系统精度, 该课题组采用经过标定的比色温度计与标准红外测温仪同步测量不锈钢靶体的动态温度。结果表明, 在 400 ~ 1 200 °C 测量范围内, 比色温度计的相对误差小于 5.4%, 可实现精准的动态测温。李云红等人^[41]基于双波段比色测温原理, 搭建了一套双波段比色测温试验系统。该系统无需预先获取物体的发射率, 也能较为精确地测定物体的真实温度。实验表明, 在系统标定置信度为 0.95 时, 测得的物体温度标准偏差在 3 °C 以内。此外, 哈尔滨工程大学张崇关等人^[42]采用红外比色辐射测温方法, 设计

了一种用于燃气轮机涡轮叶片温度测量的比色温度计(如图9所示), 其测温范围为 650 ~ 950 °C, 测温误差不超过 ±2 °C。黄志成等人^[43]研究了波长选择和标定误差对比色测温精度的影响, 并通过分析波长与采集电压之间的灵敏度关系, 确定最优波段为 0.96 μm 和 1.00 μm, 从而提升了比色测温精度。该课题组采用最小二乘法 and 遗传算法分别对实验数据进行拟合, 并对系统进行验证测试。结果表明, 选择最优波长可显著提高测温精度, 且遗传算法相较最小二乘法具有明显优势, 可将整体测量误差控制在 4‰ 以内。闫白等人^[44]使用蓝宝石窗、聚焦透镜、滤光片和光电二极管等组件, 设计了一种智能比色温度计系统。测温时, 蓝宝石窗对准被测温度场, 使光辐射透过蓝宝石窗并经透镜聚焦到滤光片上, 再由光电二极管接收滤

光片透射的光信号并转换为电流信号,将输出电流通过转换电路转换为电压信号,最终由单片机

计算调理电路的两路电压输出,实现600~1 000℃范围内的温度测量。

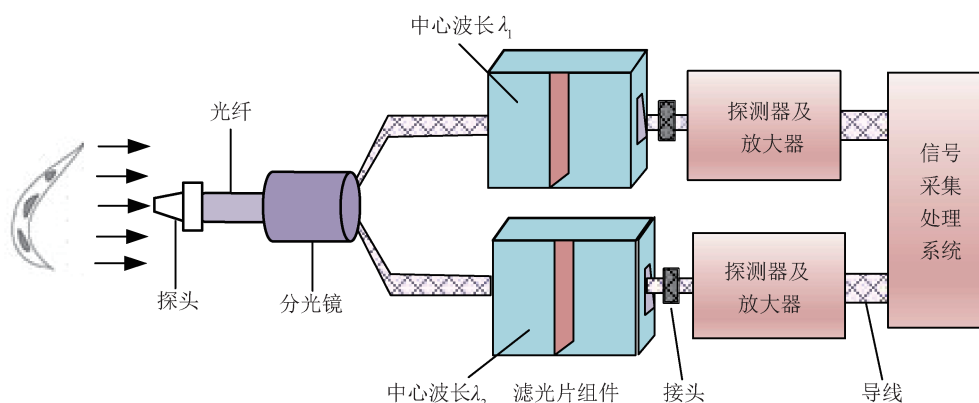


图9 比色温度计组件安装图^[42]

Fig.9 Installation diagram of colorimetric thermometer components^[42]

2.4 CCD测温法

CCD测温法是一种基于CCD摄像传感器的温度测量技术,其通过采集目标辐射光信号,结合图像处理与光谱分析实现目标温度的测量^[45]。CCD传感器是一种以电荷为信号载体,由光敏单元、输入结构和输出结构等部分组成的光电转换器,能够采集物体反射或辐射的光信号,并对物体进行成像。获得物体表面图像后,通过内部信号转换输出红(R)、绿(G)、蓝(B)三色光信号,从而计算出物体的表面温度 T ,公式为

$$\begin{cases} R = K_r E(\lambda_r, T) \\ G = K_g E(\lambda_g, T) \\ B = K_b E(\lambda_b, T) \end{cases} \quad (10)$$

$$T = \frac{C_2(1/\lambda_2 - 1/\lambda_1)}{\ln(R/G) + \ln(K_g/K_r) + 5\ln(\lambda_1/\lambda_2)} \quad (11)$$

式中: K_r 、 K_g 、 K_b 分别为红、绿、蓝的比例系数; E 为辐射强度; λ_r 、 λ_g 、 λ_b 皆为380~780 nm中间的某个值; λ_1 、 λ_2 分别代表红光和绿光的波长,即 $\lambda_1 = \lambda_r$ 、 $\lambda_2 = \lambda_g$ 。

传统比色测温法依赖单独的光学滤波器和光电转换器,而CCD测温法则通过光谱分离技术实现多波长同时测量,显著提高了测量精度、适用范围、数据采集效率。CCD测温系统常与比色测温原理相结合,用于高温环境下的实时温度监测。然而,由于CCD的敏感光谱波段为380~780 nm,只有当被测温度超过800℃时才能接收到足够的辐射能量,因此CCD测温法主要适用于800℃以上的

高温物体测量。

CCD传感器由多个金属氧化物半导体场效应晶体管按一定阵列排列而成,每个晶体管可视为一个独立的辐射量传感器。这些传感器捕捉从物体表面发出的辐射信号,并将其转换为电信号,电信号经采样和放大后输入转换器,最终转化为数字信号^[46]。通过分析这些场效应晶体管生成的数字信号,可以准确获取图像中每个像素点的辐射量,从而实现精确的辐射温度测量。CCD测温始于20世纪末。1986年,日立研究实验室采用图像识别方法模拟计算了火焰温度分布,由此提出了CCD测温方法^[47]。随后,研究人员围绕CCD测温展开了大量研究^[48-50]。BÜNGER L等人^[51]基于普朗克定律和相机的绝对光谱辐射响应特性,为CCD相机配备了可见光窄带干涉滤光片,实现了1 200 K以上的高温测量。孙元等人^[52]通过标定减少了CCD光谱响应带宽和被测对象光谱发射率对测温精度的影响,提高了测温精度。在此基础上,该研究团队开发了CCD高温场测量仪,通过变换光圈快门组合扩展了测温范围。针对黑体辐射源(温度范围885~1 521.7℃)的校准实验表明,该测温仪的精度能够满足工业生产中的测温要求。杨鹰等人^[53]针对烧蚀模型温度及材料发射率的精确测量问题,利用CCD相机获得模型烧蚀整体图像,并对CCD相机的光谱响应系数进行标定。该课题组采用比色测温法模拟平板烧蚀模型的温度场,基于发射率与温度的对应关系,得到烧蚀模

型表面发射率。重庆大学陈金龙等人^[54]通过分光片和滤光片将物体的辐射光分别成像在2个CCD相机中,并利用衰减片降低其中一个通道的灰度值,从而扩展系统测温带宽,使测温范围提高了2倍以上,显著增强了系统的线性度。

2.5 多波长辐射测温法

多波长辐射测温法是一种非接触测温技术,其采用多个波长或波段,在单个仪器中集成多个光谱通道,并结合被测物体的多光谱辐射亮度信息,通过适当选择发射率与温度之间的函数关系,来推算目标温度^[55]。相较亮度测温法和比色测温法,多波长测温法通过多个波长的辐射数据同时求解目标温度和发射率,适用于发射率变化较大的复杂环境测量。

根据维恩公式与亮度温度的基本定义,设定多波长辐射测温系统第*i*个测量通道的波长为 λ_i ,当物体的真实温度为*T*时,该物体在波长 λ_i 处的光谱辐射亮度 $L_{\lambda_i}(T)$ 等于其在某一温度 T_i 时黑体的光谱辐射亮度 $L_{\lambda_i, b}(T)$ ^[56],如式(12)所示。

$$\varepsilon(\lambda_i, T) \frac{C_1 \lambda_i^{-5}}{e^{C_2 / \lambda_i T} - 1} = \frac{C_1 \lambda_i^{-5}}{e^{C_2 / \lambda_i T_i} - 1} \quad (12)$$

式中: $\varepsilon(\lambda_i, T)$ 为物体在波长 λ_i 处的发射率。基于维恩公式的多波长温度计的亮度温度模型为

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_i} = \frac{\lambda_i}{C_2} \ln \varepsilon_i \quad (13)$$

当多波长温度计的每一个光谱测量通道都满足式(12)时,*N*个光谱测量通道可构成*N*个方程。其中,方程组包含*N*个未知的光谱发射率变量 ε_i 及1个未知的真实温度变量*T*,因此该方程组属于欠定方程组,其解存在不确定性,需结合数学反演方法求解目标温度和光谱发射率。

多波长温度计系统的结构与装置如图10所示。光纤准直镜将桥区的辐射光聚焦并引导至光纤中,随后,通过1分6束光纤将光线均匀分配到6个通道中。光纤尾端连接带有滤光片的光电二极管。当光电二极管接收到光信号时,会产生微弱的反向电流,该电流信号经转换放大电路处理后,转换为电压信号供数据采集卡采集。多通道数字采集卡将模拟信号转换为数字信号,并传输至电脑端进行分析。

分光系统如图11所示。被测物体表面发出的热辐射经光学透镜聚焦后进入光学探头,并通过光纤传输传至光路分路系统。在分路系统中,光

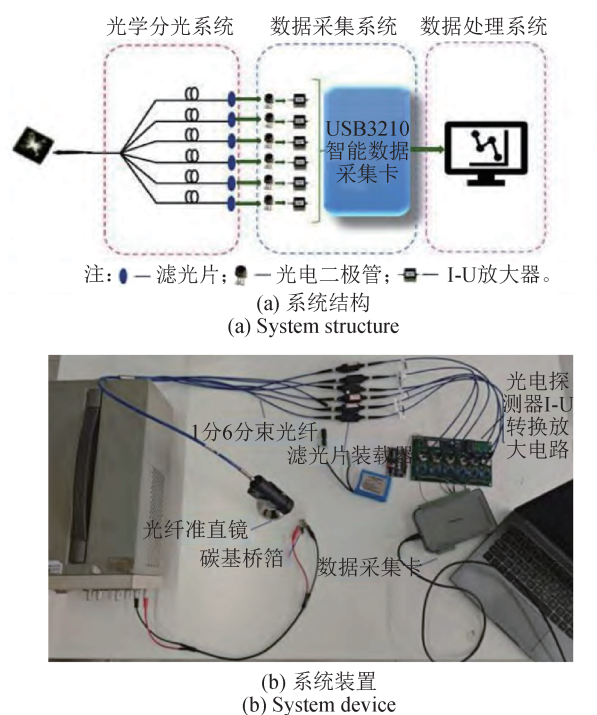


图10 多波长温度计系统的结构与装置^[56]

Fig.10 Structure and device of multi-wavelength pyrometer system^[56]

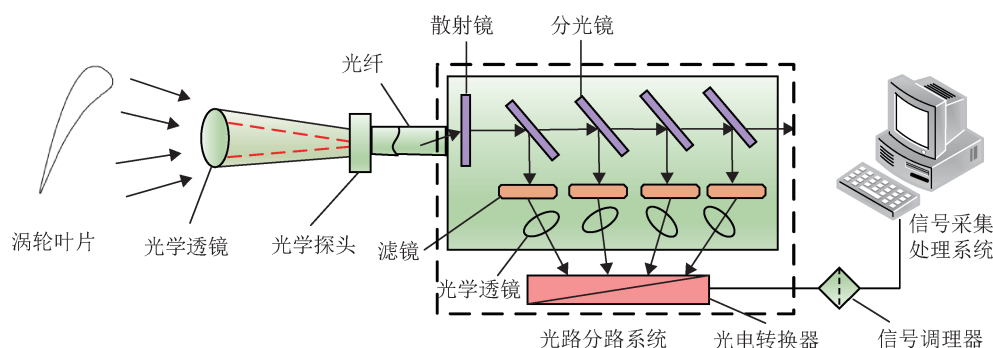


Fig.11 The schematic diagram of the optical path system of the multi-wavelength temperature test device

信号被分成4路具有有限带宽的光信号。首先，光路分路系统利用散射镜将光束调整为平行光，再通过分光镜将平行光束分成两个光束，从而分离出满足四色通道所需的光谱。随后，滤镜对光路带宽进行限制，以满足测量需求。经过分光和滤镜后的光信号进入光电转换器，在光电转换器内被转换为电信号。最后，信号调理器对电信号进行处理，并将处理结果传输至数据采集处理系统，用于计算被测物体的温度。

早期的多波长温度测量系统大多未采用多波长测温理论中的数据拟合方法，仅采用比色测温 and 单色测温的基本数据处理方法，多个通道的数据主要用于相互校验。随着多波长测温理论的发展，波长数量的增加对数据拟合精度产生了显著影响，国内外学者围绕该问题开展了深入研究，并取得了重要进展^[57]。哈尔滨工业大学研究团队在该领域做了大量的工作，张先岐等人^[58]针对高温环境下涡轮叶片多波长辐射测温中的反射辐射分析计算及测温误差修正问题，提出了基于有效发射率的涡轮叶片多波长红外辐射测温算法。实验结果表明，该算法的最大测温误差为 $\pm 7.8\text{ K}$ ，平均测温误差为 $\pm 2.7\text{ K}$ ，可有效修正反射辐射测温误差，满足高温强反射背景下的涡轮叶片辐射测温需求。

多波长辐射测温技术基于对被测介质多个等温区域的探测，构建被测介质真实温度、实测温度及光谱发射率之间的响应函数，并通过迭代计算求解目标的真实温度及其发射率，从而有效降低测温误差。目前，多波长测温技术已在燃气涡轮温度测量试验中得到广泛应用。NASA研究中心^[59]利用多波长辐射温度计测量了氧化铝、氧化铍、氧化镁、氧化钇等陶瓷的表面温度，结果表明，该方法可替代比色测温仪用于发射率随波长变化的表面温度测量。尽管多波长辐射测温技术理论上能够降低被测物体发射率对温度测量的影响，但在实际应用中该技术仍面临诸多挑战，如何减少辐射散失、降低环境辐射干扰、补偿燃气中气体吸收，还需进一步深入研究。

3 辐射测温方法对比

表1总结了5种辐射测温方法的特点。全辐射测温法灵敏度高，响应速度快，但受发射率影响较大，难以在实际应用中进行准确测量。亮度测温法需要较苛刻的测量条件，且易受到发射率影响，需采用适当的修正方法以提高测量精度。比色测温法通过测量2种不同波长的辐射能之比来确定物体的温度，适用于发射率难以准确测定的高温环境。在测量具有不同发射率特性的物体时，

表1 辐射测温方法对比
Tab.1 Comparison of radiation temperature measurement methods

测温方法	测量原理	优点	不足	误差来源	适用范围
全辐射测温	测量物体总辐射能量来推算温度 ^[62] 。	灵敏度高，测温范围广。	测量精度低，且受背景辐射影响较大。	环境温度、辐射干扰影响。	适用于表面近似黑体的高温物体测温。
亮度测温	测量物体单波长的辐射亮度，推算温度。	结构简单，响应速度快，可以进行动态温度测量。	受发射率变化影响大 ^[63] 。	物体发射率变化、光学系统误差。	适用于发射率稳定的高温物体测温。
比色测温	测量2种不同波长的辐射能之比，以确定物体的温度。	不受物体发射率的影响，抗环境干扰能力强。	需选择合适的波长对以及高精度的光学系统和传感器进行信号处理。	波长选择引入的误差、光学探头响应误差。	适用于发射率随温度变化的物体测温。
CCD测温	通过CCD摄像传感器获取目标的辐射图像并解算温度 ^[64] 。	空间分辨力高，可获取温度分布信息。	受CCD摄像机灵敏度影响，需要图像处理 ^[65] 。	传感器噪声、光学畸变、定标误差。	适用于温度场测量，且温度高于800℃。
多波长测温	选取3个或以上波长的辐射强度，综合计算温度 ^[66] 。	能校正发射率变化的影响，测温精度高。	计算复杂，成本高。	波长选择引入的误差、模型及计算算法误差。	适用于发射率复杂变化的高温物体测温。

比色测温法通常比亮度测温法更加准确和可靠,然而,该方法对环境条件比较敏感,不同材料可能具有不同的双波长发射率比,从而影响测量精度;另外,该方法的信号处理复杂,需要配备高精度的光学系统和传感器。因此,亮度测温 and 比色测温仅适用于目标发射率特性已知且无背景辐射干扰的常规条件下的目标温度测量,无法处理发射率未知且存在背景辐射干扰的情况。此外,亮度测温和比色测温法仅能获取单点温度信息。CCD测温法通过成像技术获取温度场分布,在比色测温的基础上可扩展至三波长或多波长测温,具有较高的抗干扰能力。多波长测温法使用数学模型进行逆向计算,以测量物体在多个波长下的辐射能量并获得物体的温度分布^[60-61]。因此,多波长测温法具有更高的测量精度并可获得更多信息,适用于动态温度场测量。然而多波长测温具有很高的系统复杂性,需要处理大量数据,并依赖于高精度数学模型和优化算法,在实际应用中具有一定的挑战性。

4 辐射测温技术应用进展

英国LAND公司^[67]率先采用硅探测器进行高温测量,其探测波段可延伸至 $1.1\ \mu\text{m}$ 。如图12所示, LAND公司将辐射温度计安装在涡轮叶片表面,以测量其温度。在测量过程中,通过滤光片选择特定波长,有效降低了燃气对测量结果的干扰。为进一步提升测量精度,该公司还引入了双波长对比法,成功降低了炭黑粒子对测温结果的干扰。这一系列技术创新为辐射测温技术的发展奠定了基础。

英国克兰菲尔德大学的科研人员^[68]对带有6种热障涂层的涡轮叶片开展了研究,其研究成果使得探头最大工作温度可达 $700\ ^\circ\text{C}$,光学透镜、纤维光缆可分别在 $500\ ^\circ\text{C}$ 、 $400\ ^\circ\text{C}$ 环境中稳定工作,部分电子仪器可在 $125\ ^\circ\text{C}$ 环境中工作。克兰菲尔德大学的科研人员进一步分析了被测对象的发射率波动、周围热端部件的热辐射、燃气辐射与吸收效应、高温火焰中的碳粒子散射、镜头表面的粒子沉积等因素对测量误差的影响(如图13所示)。研究发现,在复杂的高温环境中,辐射温度计测量误差一般为 $\pm 20\ ^\circ\text{C}$,这为提高航空发动机涡轮叶片表面温度测量精度提供了重要参考。

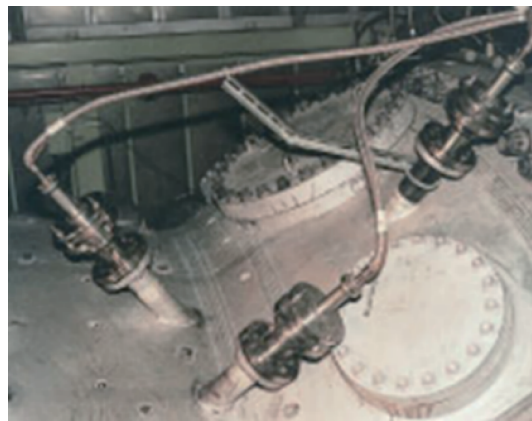


图12 LAND公司用辐射温度计测量涡轮叶片温度^[67]

Fig.12 LAND company uses radiation thermometer to measure the temperature of turbine blade^[67]

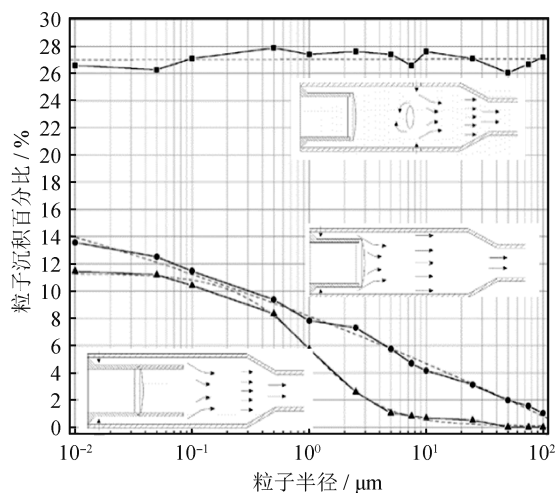


图13 探头气流组织对粒子沉积影响^[68]

Fig.13 Effect of probe airflow on particle deposition^[68]

辐射测温技术可在 $\pm 10\ \text{K}$ 的误差范围内确定涡轮叶片表面温度,为先进高温燃气涡轮温度测量提供了有力支撑^[68]。20世纪60年代初,英国R·R公司首先提出了利用光学系统进行燃气轮机叶片辐射测温的思想,并设计了一套完整的涡轮叶片辐射测温系统。该系统在结构设计上考虑了高温及机械应力的影响,探头头部直径为 $22\ \text{mm}$,采用超级镍铬合金制造并通过电子束焊接而成,其截面结构如图14所示。为了防止探头过热,探管内设有冷却通道,由高压叶轮泵进行水冷却。此外,采用高压氮气对光学元件进行冷却和吹扫,以提高光学探头在高温环境中的稳定性和测量精度。在马赫数为0.7、压力为 $2\ \text{MPa}$ 、最高温度为 $1650\ ^\circ\text{C}$ 的条件下,该测温系统成功测量了涡轮叶

片的温度,如图15所示。该辐射温度计具有更高的分辨力,能够提供更真实的热图像^[69-70]。

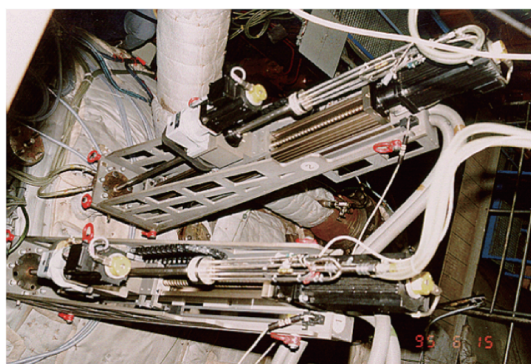
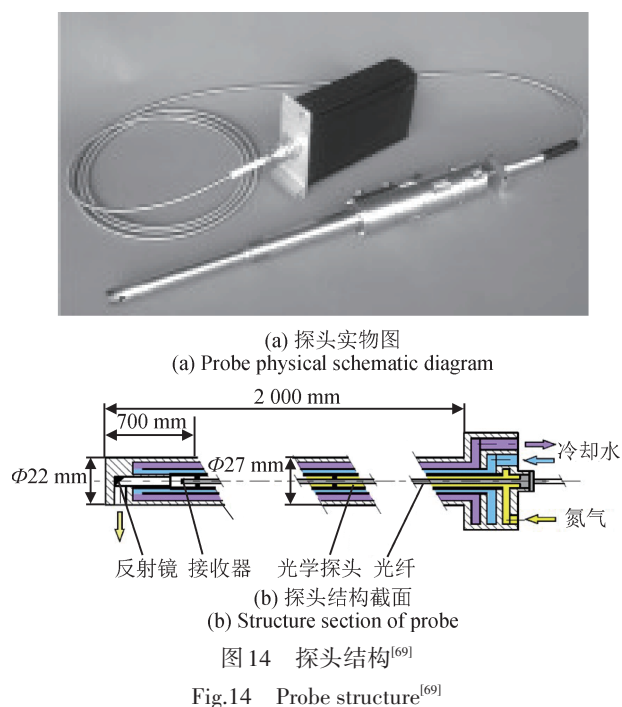


图15 用辐射温度计测量重型燃气轮机
涡轮叶片上表面温度^[69]

Fig.15 Surface temperature of turbine blade of heavy-duty gas turbine is measured by radiation pyrometer^[69]

美国GE公司自20世纪70年代开始研究用于涡轮叶片温度测量的辐射温度计,并采用中心波长为 $1\mu\text{m}$ 的硅探测器进行探测。该技术已在航空发动机涡轮叶片上进行了测试,为提升测量效果,研究团队结合滤光片技术来优化波长选择策略,进一步减少了燃气和环境因素对测量的影响^[31, 71]。随后,针对在线测量时高温烟尘粒子对辐射温度计测温信号的干扰问题,该公司研发了多波长辐射温度计。该温度计结合表观发射率处理技术,

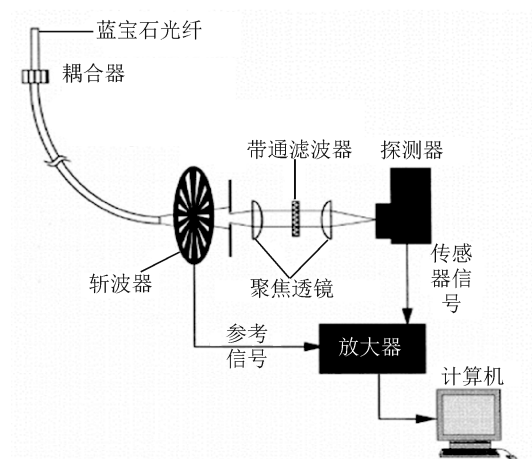
能够有效去除干扰信号。基于喷气式发动机进行测试验证,多波长辐射温度计表现出优异的抗干扰能力和测量稳定性^[72]。美国Cummins公司开发了一种用于航空发动机瞬态表面温度测量的多波长辐射温度计,该温度计基于多波长辐射测温法,监测4个离散光谱区域的表面热辐射,结合相应的发射率模型,采用非线性最小二乘法计算航空发动机瞬态表面温度。

20世纪末,美国NASA和先进燃料研究公司对热障涂层的光谱吸收和散射系统进行了相关研究,获得了不同厚度热障涂层的辐射特性。然而,辐射温度计获取的辐射信号不仅取决于物体表面温度,还受涂层材料、表面粗糙度和涂层厚度等因素影响,导致测温结果存在较大误差^[73]。为改善这一问题,美国先进燃料研究公司研发了长波红外温度计,并对涡轮叶片热障涂层的表面温度分布进行了测试。测试结果与傅里叶变换红外光谱仪测量结果高度吻合,如图16所示。

随后,该公司与德国西门子公司展开合作研究,分别采用长波红外辐射温度计和短波辐射温度计对涡轮叶片热障涂层的表面温度进行了对比分析(如图17所示)。结果显示,长波红外辐射温度计在 $10\sim 11.4\mu\text{m}$ 波段内的辐射能有效穿透热障涂层所产生的辐射的表面层,其测量出的温度较短波辐射温度计略高。而短波辐射温度计更适用于较高温度范围的测量,能够更精确地测量表层温度。

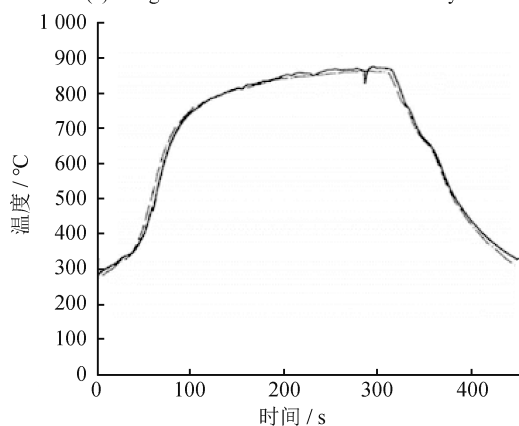
2017年,巴伐利亚应用能源研究中心联合西门子公司研制了一款 $10\mu\text{m}$ 波段辐射温度计,并在实验室内对叶片热障涂层的表面温度进行了测量及测试精度分析。结果表明,该辐射温度计能够有效测量涡轮叶片热障涂层的表面温度,其测量精度显著优于传统近红外测温方法。

20世纪70年代末,国内多家科研机构对辐射测温技术开展研究。303所联合606所共同研发了涡轮叶片辐射温度计,采用硅探测器作为传感器,并在涡扇发动机试验台上进行了测试,研究了火焰和碳粒子对测量结果的影响。21世纪初,西安航空发动机公司对某型号辐射温度计进行了测试,旨在评估和验证光学温度计在高温、高速气流环境中的测量性能和精度,同时分析热障涂层在实



(a) 长波红外温度计测试系统

(a) Long-wave infrared thermometer test system



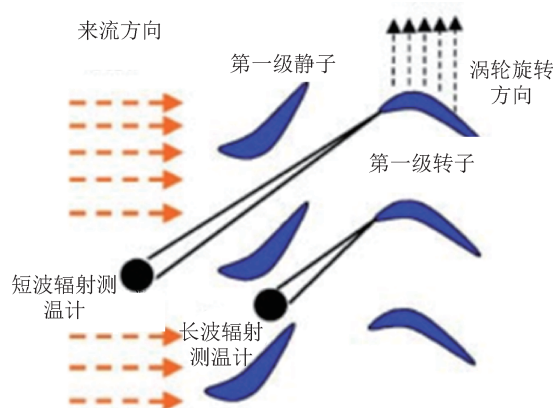
(b) 测试结果

(b) Measurement results

图16 长波红外温度计测试系统及测试结果

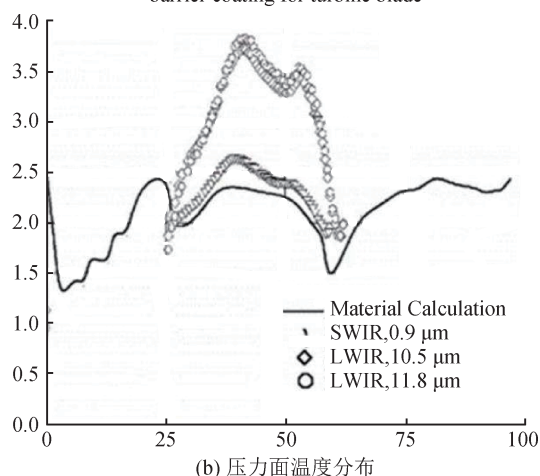
Fig.16 Long-wave infrared thermometer test system and measurement results

际运行条件下的热性能和稳定性。该研究为优化涡轮叶片冷却结构设计和改进热障涂层材料提供了重要的参考依据,并推动了辐射测温技术在国内涡轮机领域的应用和发展。20世纪末,哈尔滨工业大学戴景民^[74]成功研制了一款棱镜分光无干涉滤光片式35波长辐射温度计。该温度计彻底摒弃了欧美采用的干涉滤光片限定工作波长的方法,显著提高了多波长辐射温度计的信噪比,实现了波长的灵活选用。之后,哈尔滨工业大学孙晓刚等人^[75]和李云红等人^[76]对辐射温度计的标定和数据处理方法进行了深入研究,提出了曲线自动搜索法、曲线自动回归法和神经网络法3种多波长温度计数据处理方法,逐步提高了温度计的测量精度。高山等人^[77]细致分析了涡轮叶片辐射测温误差,并提出了相应的校正方法。其团队开发的多



(a) 涡轮叶片热障涂层表面温度测量

(a) Surface temperature measurement of thermal barrier coating for turbine blade



(b) 压力面温度分布

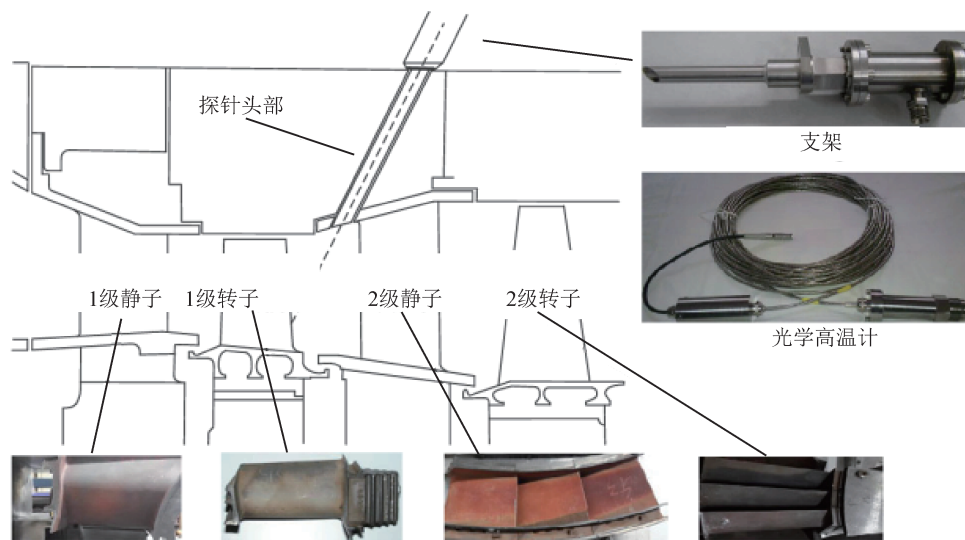
(b) Pressure surface temperature distribution

图17 涡轮叶片热障涂层表面温度分布

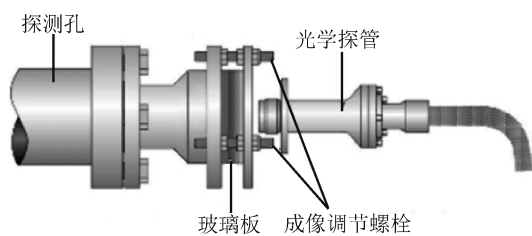
Fig.17 The surface temperature distribution of turbine blade thermal barrier coating

波长测温技术已成功应用于某重型燃气轮机叶片温度测试,测温范围为1 073 ~ 1 673 K,测试误差为 ± 7 K。随后,他们与哈尔滨工程大学合作,利用多波长辐射测温技术,建立了叶片表面发射率模型、不同工况下燃烧气体影响模型^[78]和环境辐射反射模型^[79],并提出一种叶片温度迭代算法。在涡轮叶片温度测量中,该方法的测量范围可以达到800 ~ 1 300 K,在温度高于1 000 K时的误差小于0.34%(如图18所示)。

采用辐射测温技术测量涡轮叶片温度时,测量的准确性受叶片表面发射率变化、燃烧气体影响以及周围环境反射辐射能的干扰。清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室的科研人员系统研究了高温时涡轮叶片表面辐射发射率的变化

图18 温度计安装^[77]Fig.18 Thermometer installation^[77]

情况。哈尔滨工程大学的冯驰等人^[80-81]基于比色法测温原理设计了一种光纤式辐射温度计并用于测量涡轮叶片表面温度。该温度计的光学探头可深入燃气轮机内部,捕捉高温叶片辐射出的近红外光信号(如图19所示),从而提高燃气轮机内部温度测量的精度和准确性,其测温范围达到800~1400℃。

图19 高温探头安装^[80]Fig.19 High-temperature probe installation^[80]

中国科学院工程热物理研究所李勋锋^[82]重点分析了不同涡轮叶片材料在不同温度下的发射特性以及叶片材料在氧化过程中的波长发射率变化情况,并建立了不同温度下法向光谱发射率随波长变化的模型。此外,李勋锋团队还研究了涡轮叶片材料的反射特性,并选取了合适的工作波长用于温度测量。通过改进光纤温度测量系统的光路与电路,该团队设计并建立了一套便携式光纤温度测量样机。该系统测温范围为600~1400℃,稳态校准误差不超过 $\pm 2^\circ\text{C}$,系统响应时间小于 $2\mu\text{s}$,为高温测量提供了高精度和快速响应的解决方案。2024年,李勋锋团队^[83]针对高温叶栅试验台的红

外测温需求,设计了辐射测温探头的防护结构,在最小化干扰主流的前提下实现了对探头的热防护与污染防护。通过数值模拟的方法,对安装测温探头后实验装置的流场及温度场进行了计算,并分析了测温探头防护结构设计的合理性,如图20所示。研究发现,冷却空气能对测温探头起到一定的气膜冷却作用,当空气入口总压过大时,会对主流产生过大的干扰,从而影响叶栅试验段测试结果。

目前,尽管辐射测温技术具有显著优势,但在对航空发动机测温时,由于安装空间与被测区域需求,常需要将测温探头安装在机匣外壁或伸入机舱内,如图21所示。这需要在机匣上开设光学测量窗口,而发动机内燃油燃烧不充分时会产生碳烟,严重时污染光学窗口,降低透光率,必须用高压气体进行清洁并降低温度。因此,必须设计吹扫机构,使气体由上端进入,经过光学腔体后对石英窗进行吹扫,在完成清洁的同时实现降温效果。通过增加气体流速、扩大吹扫面积等措施均能增加散热效果。敖晨阳等人^[4]设计了一种有效的吹扫系统(如图22所示),清洁气体从测温探头尾部进入,流经探头内部对光学元件进行吹扫,最终从探管头部汇入涡轮燃气流道,有效防止流道内的高温燃气逆流进入探管而污染或损坏光学元件。这解决了高速多光谱测温技术测量高温叶片时的光学污染难题。

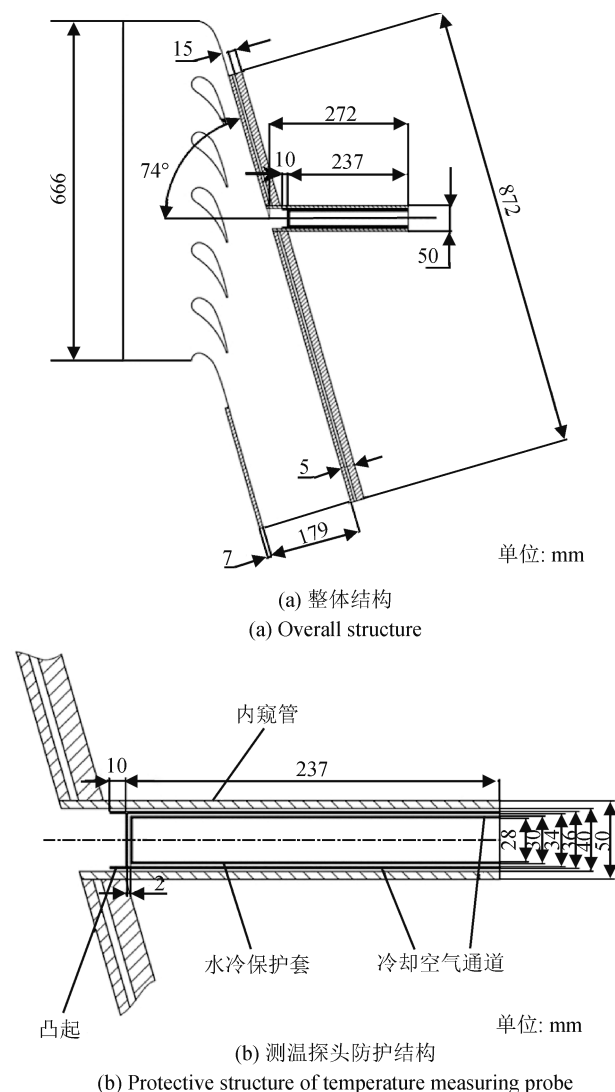
图20 加上探头防护结构后的排气段与叶栅结构示意图^[83]

Fig.20 The schematic diagram of the exhaust section and the cascade structure after adding the probe protection structure^[83]

辐射测温系统测量涡轮叶片温度时, 由于安装角度的限制, 只能实现涡轮叶片上一条扫描线上的温度测量, 即某叶高位置的表面温度的测量, 如图23所示。通过对扫描路径进行研究, 可以将涡轮叶片的测温结果与被测涡轮叶片的位置相匹配, 这有利于叶片温度特征分析。为了测量全叶高叶片表面温度, 可采用电动位移机构来移动光学探头的径向测点位置。光学探头在需要进行数据采集时会伸出, 平时则缩回以避免长时间暴露在高温环境中, 从而延长设备寿命。探头及内部的反射镜由步进电机控制, 可以扫描涡轮不同叶高的叶片表面, 实现全叶高温度场的测试, 如图24所示^[32]。

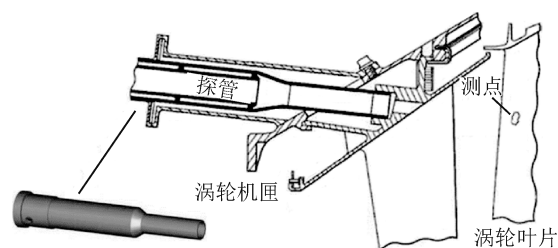
图21 安装在机匣上的辐射测温探头^[84]

Fig.21 The radiation temperature probe is installed on the casing^[84]

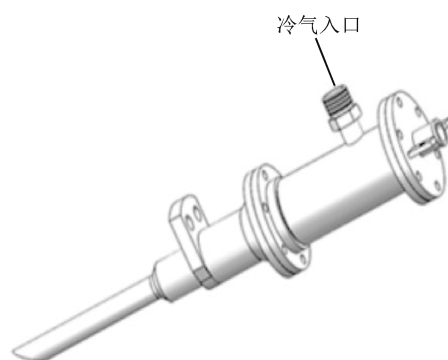
图22 探管结构设计^[4]

Fig.22 Structure design of probe tube^[4]

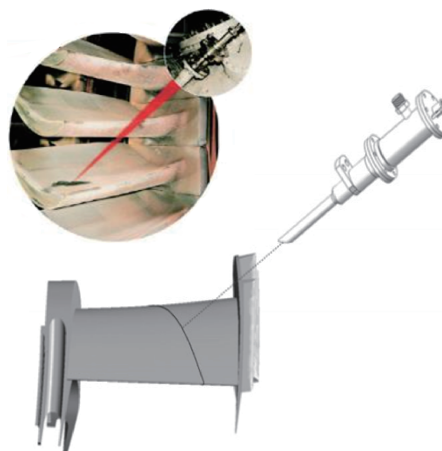
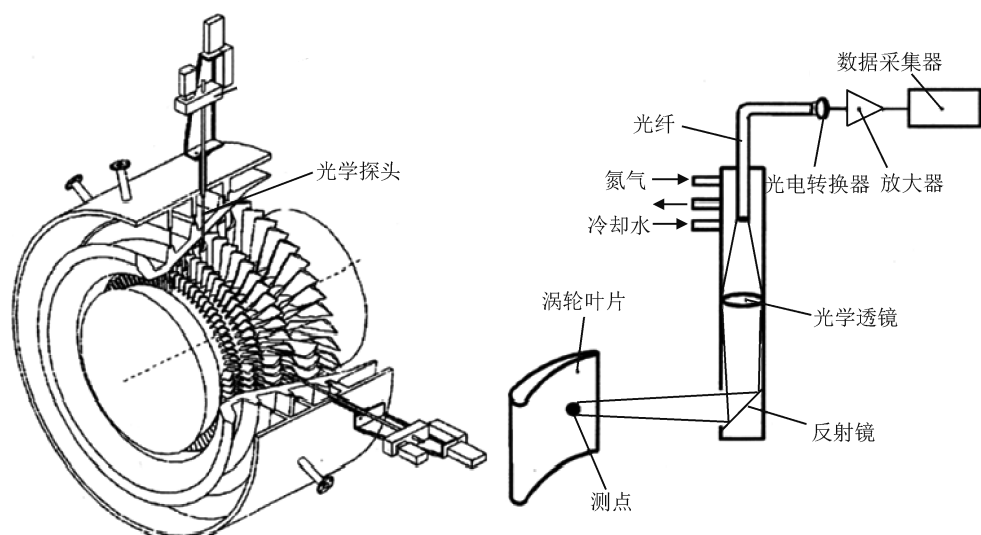
图23 测温系统扫描路径图^[4]

Fig.23 Diagram of scanning path of temperature measurement system^[4]

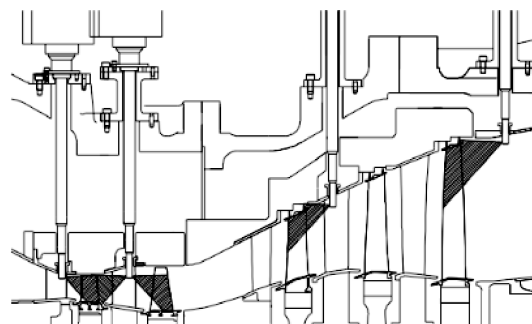
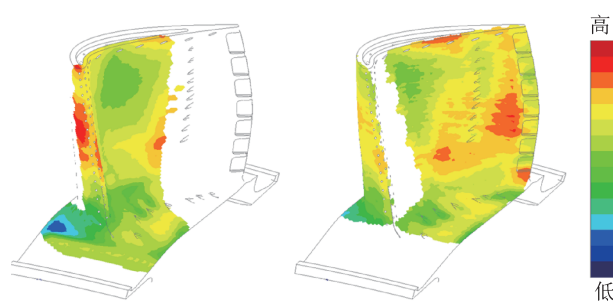
2012年, 日本川崎重工有限公司的科研人员^[85-86]采用Rotadata公司开发的辐射温度计对L30A重型燃气轮机的动叶表面温度进行了测量。图25显示了辐射温度计的安装位置, 温度计固定在发动机机匣外壁上, 光学探头通过机匣上开设的孔插入机匣内。光学温度计探头直径为13 mm, 测量光斑直径为2 mm, 焦距为170 mm, 探测器采用铟镓砷光电转换器, 测温范围为700~1150℃, 分辨

图24 涡轮叶片辐射测温系统^[69-70]Fig.24 Turbine blade radiation temperature measurement system^[69-70]

力为 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，测量误差为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。与热电偶对比，其测温偏差最大为 6°C 。此外，该研究团队还开发了三维温度场重建软件，对涡轮叶片表面温度场进行重构。图26显示了辐射温度计的测量结果，可以清楚地分辨出涡轮叶片压力面下游存在高温区，靠近前缘的平台和吸力面两端角区存在高温区，这为改进涡轮叶片气膜冷却设计指明了方向。熊兵等人^[33]采用基于全辐射测温理论的红外辐射温度计对某二级涡轮转子叶背温度场进行测量。图27为 $9\,100\text{ r/min}$ 的转速下测得的转子叶背温度场分布，64个叶片呈现出明显的周期性周向温度场分布，没有出现单个局部热点区。在 $2/3$ 叶高处出现了一片高温区域，温度在 600°C 左右，尖部尾缘区温度在 550°C 左右。叶根处出现明显的温度梯度，温度值在 500°C 以下，这可能是由于叶根榫槽吹风冷却以及主流区与冷却气流的掺混所造成的。

徐春雷等人^[87]使用红外测试技术结合示温漆技术测量了某发动机整机状态低压涡轮工作叶片前缘及盆侧的温度场。红外测温系统安装在发动机外部并穿过外涵机匣和涡轮机匣到达主流道内。为了最大限度地获取涡轮叶片辐射能量，红外高温测量光路垂直于被测涡轮叶片表面，叶片和探头位置关系以及测温区域如图28所示。

图29显示了低压涡轮转子叶片温度场测量结果，孔探针孔位置的涡轮叶片定义为物理1号叶片，叶片序号沿顺时针方向逐渐增大，第69、71、

图25 辐射测温探头的安装位置^[2]Fig.25 Installation position of radiation temperature measurement probe^[2]图26 辐射温度计测量结果^[2]Fig.26 Measurement results of radiation pyrometer^[2]

72号叶片为涂有示温漆的叶片。当设置所有叶片发射率系数相同时，涂有示温漆的3片叶片温度高于其他叶片。测量结果表明，采用红外辐射测温技术可以清晰地得到涡轮叶片表面温度分布云图，在此状态下涡轮叶片前缘和盆侧清晰可见，叶片叶身温度较为均匀，温度较高区域位于前缘偏下

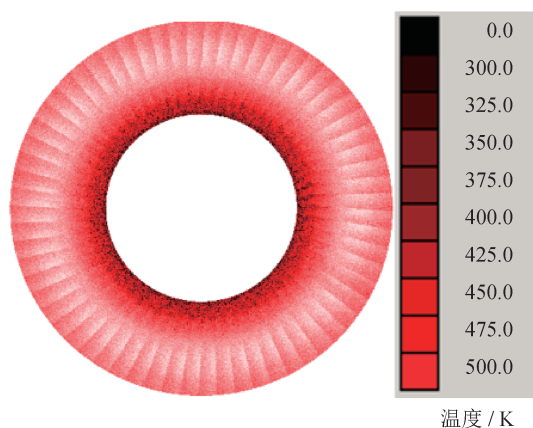


图27 转速9 100 r/min下转子叶背温度场分布^[33]

Fig.27 Temperature field distribution of rotor blade back at 9 100 r/min^[33]

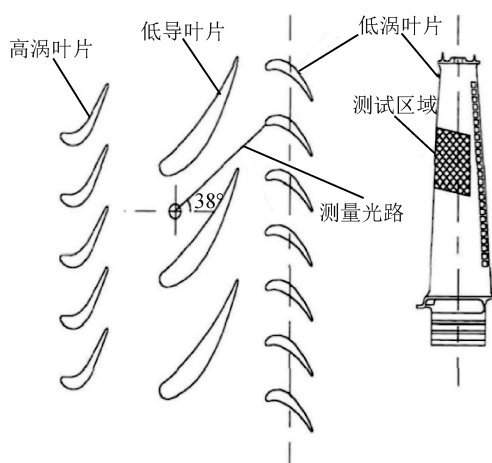


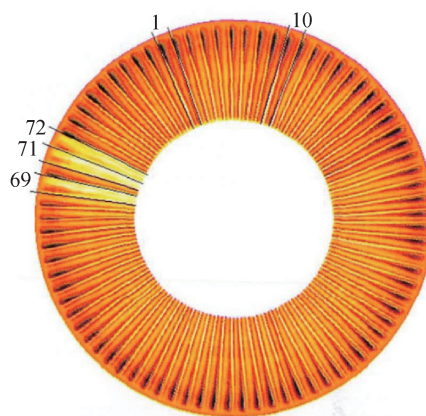
图28 叶片和探头位置关系及测温区域^[87]

Fig.28 Position relationship between blade and probe and temperature measurement area^[87]

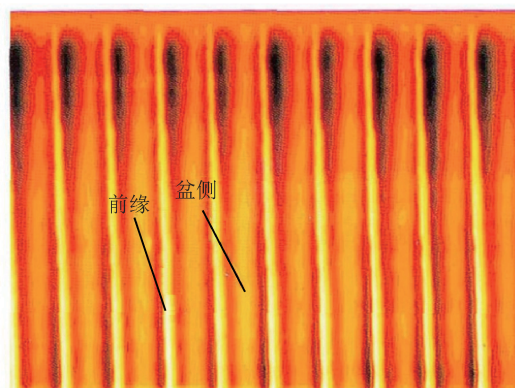
位置，温度较低区域位于叶片上部前缘靠后位置，在叶盆的中间位置，高温区域呈现椭圆状分布。

2021年，长春光学精密机械与物理研究所的科研人员^[88]提出了一种基于环境辐射修正的涡轮叶片三波长辐射测温方法，用于测量环境辐射下发射率未知的涡轮叶片表面温度。该研究选取航空涡轮发动机第一级转子叶片作为目标叶片，相邻导流叶片和上部叶片作为相邻叶片，建立了涡轮叶片三维动态反射模型，并在不同旋转位置、不同温度下对目标叶片进行分析。在此基础上，提出了一种基于反射误差修正的三波长辐射测温算法。通过理论推导与分析，证明了该算法求解温度的唯一性。之后设计实验对该方法进行验证，结果显示：这种基于环境辐射修正的涡轮叶片三

波长辐射测温方法可以有效降低反射辐射的影响，准确获得发射率未知的叶片表面温度。



(a) 发动机低压涡轮前缘的温度分布
(a) The temperature distribution of the leading edge of the engine low pressure turbine



(b) 第1~10号叶片的温度
(b) The temperature of No.1 ~ 10 leaves

图29 辐射测温结果^[87]

Fig.29 Radiation temperature measurement results^[87]

内蒙航天动力机械测试所等机构的科研工作者^[89]为满足燃烧场温度参量时空演化特征诊断的需求，提出了基于多CCD同步耦合的动态三维辐射测温方法。在多视线方向测量基础上，通过代数重建技术对燃烧场进行体素分割，根据普朗克辐射定律，采用标准黑体辐射源对光电信号的映射关系进行标定，并利用比色法实现三维温度场表征。该研究团队在时间序列上控制多CCD相机来同步获取燃烧场不同视线方向的辐射信息，基于R、G通道内的灰度信息，对实验室蜡烛火焰与外场某型号固体火箭发动机试验器尾喷焰的瞬态燃烧场温度参量进行了测试。经近红外测温仪验证，测试误差在8%以内。该技术能够在保证时间、空间分辨力的条件下对燃烧场的三维温度参

量进行特征诊断，为航天领域的温度参量测量提供了一种有效的方法。表2列出了测量发动机温度的典型温度计系统参数。在评估或对比温度计系统时，需重点关注组件的最高工作温度、仪器的整体精度以及最低可检测温度。

涡轮叶片表面温度测量容易受到环境辐射干扰，包括来自涡轮机匣、轮毂壁面及燃气流场的热辐射，若不加以有效处理，将显著降低测温精度。高山等人^[90]系统综述了影响涡轮叶片辐射测

温精度的关键因素，并深入分析了测量过程中可能产生的误差，指出在环境辐射校正方面，应建立精确的反射模型，并结合先进的传感器技术与数据融合算法，有效补偿辐射干扰误差；在光学系统设计方面，选择合适的光学材料和涂层，增强系统在不同环境下的灵敏度；在数据处理方面，利用神经网络、遗传算法、约束优化等方法计算温度和发射率，最大程度减小误差，确保在各种复杂环境条件下仍能够获得高精度的温度测量数据。

表2 测量发动机温度的典型温度计系统参数
Tab.2 Typical pyrometer system specifications for engine temperature measurement

测量温度 / °C	校准误差 / °C	稳定性	探头最大工作温度 / °C	光纤最大工作温度 / °C	辐射测温针总误差 / °C
500 ~ 2 500	± 2	± 2 °C / 1 000 h	500 ~ 700	400	± 20

5 总结与展望

介绍了辐射温度计的结构组成，对比分析了全辐射测温法、亮度测温法、比色测温法、CCD测温法和多波长辐射测温法等典型的辐射测温技术的测温原理和特点，归纳了辐射测温技术在涡轮叶片表面测温领域的研究现状。辐射测温技术在燃气涡轮叶片表面温度测试领域具有广阔的应用前景，但其精度和稳定性仍面临诸多挑战。随着耐高温材料和表面冷却技术的不断发展，涡轮温度和压力也在向更高的极限推进。因此，如何实现快速、精准的温度测量，以满足极端环境下温度测量的需求，成为亟待解决的问题。未来燃气涡轮辐射测温技术的重点研究方向包括：

1) 光学探头设计与优化研究

优化高数值孔径光学系统，精细设计透镜与光阑，以增强辐射信号的聚焦能力，实现微小区域的高精度测温，满足薄壁叶片、微小冷却孔等复杂结构的测温需求。探头应尽量小型化，以便于更换和维护，同时采用合理的吹扫气正压力控制策略，有效保护探头，减小因温度变化导致的探头变形及光路温度分布对测温精度的影响。此外，应优化安装位置，尽可能缩短测试距离，降低高温燃气干扰，减少叶片遮挡，扩大测试区域。在长期运行过程中，还需考虑机匣振动和探头热应力损伤的影响，以确保其在极端发动机测试环

境下的长期稳定性和测量准确性。

2) 算法优化和数据处理研究

需研发更高性能的光学器件和信号调理器，以提高其在复杂环境中的抗干扰能力和信号精度。应优化温度反演模型，提高测温精度，减小材料发射率变化和环境辐射干扰带来的误差。对光纤传感信号进行分析时，需要从一组光谱数据中提取特征参数，作为待测物理参数的标定依据。采用不同的特征数据提取方法，将导致不同的测量结果，而目前对光谱信号处理的方法尚缺乏标准和规范，未来需要进行完善。

3) 光纤与耐高温材料研究

光纤式辐射温度计已可实现对 2 000 °C 以下温度的监测，但在工程应用中仍需克服强振动、高速气流冲击等恶劣工况带来的挑战。裸光纤难以承受外部环境冲击，因此必须针对传感器的感温元件及关键部件进行结构优化与保护，以适应不同测温需求。为提升光纤在高温、强辐射、腐蚀性环境下的长期稳定性和信号传输质量，需进一步研究耐高温金属光纤、陶瓷包层等材料，提高其耐热性与抗损伤能力。此外，感温元件的热阻应足够小，以尽量降低对被测温度场或流场的干扰。光纤材料、纤芯与包层结构尺寸、黑体腔设计、制造工艺及涂覆层材料等因素均会显著影响光谱输出特性，当前的精准测温仍依赖于预先标定，应用上存在较大局限性。此外，针对涡轮叶

片表面温度测量,特别是带有热障涂层的部件,仍面临诸多技术挑战。需进一步深入研究涂层的透射性、发射率变化及厚度对测量结果的影响,以确保高温测量的准确性和可靠性。

4) 将辐射测温与热电偶测温相结合

设计辐射温度计时需考虑的一个关键因素是系统的温度下限,当温度低于500℃时,温度计无法产生响应,这意味着在发动机启动阶段,辐射温度计无法提供测量数据。需要结合热电偶测量方法,在低功率状态下监测发动机温度。在稳态运行及高功率、高温工况下,系统主要依赖辐射温度计进行测量,而在发动机瞬态工况,尤其是启动和点火阶段,则优先使用热电偶。通过这种双系统组合,不同测温技术能够相互补充,从而构建更加精准、稳定的温度监测与控制系统。

参考文献

- [1] MEKHRENGIN M V, MESHKOVSKII I K, TASHKINOV V A, et al. Multispectral pyrometer for high temperature measurements inside combustion chamber of gas turbine engines[J]. *Measurement*, 2019, 139: 355–360.
- [2] TANIGUCHI T, TANAKA R, SHINODA Y, et al. Application of an optical pyrometer to newly developed industrial gas turbine [C]// *Proceedings of the Turbo Expo 2012*, 2012: 795–802.
- [3] WINCHLER L, ANDREINI A, FACCHINI B, et al. Conjugate heat transfer methodology for thermal design and verification of gas turbine cooled components[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2018, 140(12). DOI: 10.1115/1.4041061.
- [4] 敖晨阳, 王强, 冯驰. 燃气轮机涡轮叶片多光谱辐射测温技术研究[J]. *舰船电子工程*, 2020, 40(9): 142–145.
AO C Y, WANG Q, FENG C. Research on multi-spectral radiation temperature measurement technology for gas turbine blades[J]. *Ship Electronic Engineering*, 2020, 40(9): 142–145. (in Chinese)
- [5] 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 in aero-engine temperature test[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(1): 145–164. (in Chinese)
- [6] 韩志远. 2.79微米掺铒铥石榴石单晶光纤制备与级联激光技术研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2023.
HAN Z Y. Preparation of 2.79 μm erbium-doped scandium gallium garnet single crystal fibers and investigation of cascade laser technology [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2023. (in Chinese)
- [7] 余露. Yb³⁺/Tm³⁺共掺杂YAG、Y₂O₃单晶光纤上转换荧光温度传感技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
YU L. Study on Yb³⁺/Tm³⁺ codoped YAG or Y₂O₃ single crystal fiber upconversion fluorescence temperature sensing technology [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [8] SHEN Y H, TONG L, WANG Y Q, et al. Sapphire-fiber thermometer ranging from 20 to 1 800 °C[J]. *Applied Optics*, 1999, 38(7): 1139–1143.
- [9] 张泽宇. 基于激光加热基座法的单晶光纤生长与性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2023.
ZHANG Z Y. Growth and properties of single crystal fiber based on LHPG method [D]. Jinan: Shandong University, 2023. (in Chinese)
- [10] HEATH S, IMREGUN M. A review of analysis techniques for blade tip-timing measurements[M]. American Society of Mechanical Engineers, 1997.
- [11] 姚艳玲, 代军, 黄春峰. 现代航空发动机温度测试技术发展综述[J]. *航空制造技术*, 2015(12): 103–107.
YAN Y L, DAI J, HUANG C F. Development for temperature measurement technology in modern aeroengine [J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015(12): 103–107. (in Chinese)
- [12] HERGERT E. Photomultiplier tubes-Near-infrared photodetectors enable new applications [J]. *Laser Focus World*, 2004, 40(6): 131–133.
- [13] 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. Survey of radiation thermometry [J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2004, 23(3): 1–7. (in Chinese)
- [14] WITHERELL P G, FAULHABER M E. The silicon solar cell as a photometric detector[J]. *Applied Optic*, 1970, 9(1): 73–78.
- [15] RUFFINO G. Comparison of photomultiplier and Si photodiode as detectors in radiation pyrometry[J]. *Applied Optics*, 1971, 10(6): 1241–1245.
- [16] BELOGUROV S, BRESSI G, CARUGNO G, et al. In-GaAs photodiode as an ionizing particle detector [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Sec-*

- tion A - Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment, 2000, 452(1/2): 377-380.
- [17] ZHENG F, WANG F L, WANG C, et al. Free - running InGaAs/ InP single photon detector with feedback quenching IC [J]. Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section A - Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipmen, 2015, 799: 25-28.
- [18] ZHU Y, MI W, WANG D. Preparing gallium oxide-indium gallium arsenide ultraviolet-short wave infrared dual-band photoelectric detector, comprises growing N-type indium phosphide buffer layer on N-type indium phosphide substrate, depositing silicon nitride thin film, performing zinc diffusion and annealing: CN118398723 [P]. 2024-07-26.
- [19] TURNER D G, BAKKER T C, DIXON P, et al. The development of, and applications for, extended response (0.7 to 1.7 μm) InGaAs focal plane arrays[C]// Infrared Technology and Applications, 34th Conference on Infrared Technology and Applications. Spie-Int Soc Optical Engineering, 2008. DOI: 10.1117/12.779865.
- [20] 王建军, 黄晨, 高昕, 等. 红外辐射测量系统内外标定技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(6): 1767-1771.
- WANG J J, HUANG C, GAO X, et al. Inner and outer calibration technology of infrared radiation measurement [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43 (6) : 1767-1771. (in Chinese)
- [21] 邵海颖, 张增良, 马霄汉, 等. 双波段比色测温装置设计及应用[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62 (5). DOI: 10.3788/LOP241681.
- SHAO H Y, ZHANG Z L, MA X H, et al. Design and application of dual - band specific color temperature measuring device [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2025, 62 (5). DOI: 10.3788/LOP241681. (in Chinese)
- [22] 彭利军, 杨坤涛, 章秀华. 光学测温技术中的物理原理[J]. 红外, 2006(10): 1-4.
- PENG L J, YANG K T, ZHANG X H. Physical principles of optical temperature measurement technologies [J]. Infrared, 2006(10): 1-4. (in Chinese)
- [23] BALL D W. Wien's displacement law as a function of frequency [J]. Journal of Chemical Education, 2013, 90 (9): 1250-1252.
- [24] YUAN G B, FAN Z G, SUN X G, et al. Approach method based on brightness temperature for multi-spectral thermometer[C]// 5th International Symposium on Instrumentation Science and Technology. SPIE, 2009: 75-84.
- [25] 赵春晖. 基于数字图像处理的火焰温度测量系统设计[D]. 西安: 西北工业大学, 2003.
- ZHAO C H. Design of flame temperature measurement system based on digital image processing [D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [26] 郑凯丰. 航空发动机涡轮叶片辐射测温算法及系统设计研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- ZHENG K F. Algorithm and system design of aeroengine turbine blade radiation temperature measurement [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2021. (in Chinese)
- [27] 王荣凯, 安保林, 赵云龙, 等. 基于超连续激光积分反射的材料可见近红外光谱发射率测量研究[J/OL]. 计量学报, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1864.TB.20250105.1933.002.html>.
- WANG R K, AN B L, ZHAO Y L, et al. Research on the measurement of material visible near - infrared spectral emissivity based on supercontinuum laser integrating sphere reflection[J/OL]. Acta Metrologica Sinica, 2025. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1864.TB.20250105.1933.002.html>. (in Chinese)
- [28] ZHAO X, JIA X, PEI L N, et al. Study of the test methods of emission rates in different ambient temperature fields[C]// Journal of Physics: Conference Series. 2021 3rd International Conference on Advanced Materials and Ecological Environment (AMEE2021) China. IOP Publishing, 2022. DOI:10.1088/1742-6596/2168/1/012018.
- [29] 丁经纬. 黑体涂层红外光谱发射率特性研究[D]. 新乡: 河南师范大学, 2023.
- DING J W. Reasearch on infrared spectral emissivity characteristics of blackbody coatings [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2023. (in Chinese)
- [30] 王勇, 徐大雄, 王群星, 等. 采用光学辐射零平衡比较法的黑体辐射源检定系统[J]. 红外技术, 1999(2): 26-30.
- WANG Y, XU D X, WANG Q X, et al. Blackbody radiation source calibration system using the optical radiation zero - balance comparison method [J]. Infrared Technology, 1999(2): 26-30. (in Chinese)
- [31] ESTEVADEORDAL J, WANG G, NIRMALAN N, et al. Multicolor techniques for identification and filtering of burst signals in jet engine pyrometers[J]. Journal of Turbomachinery, 2014, 136 (3). DOI: 10.1115/1.4024678.
- [32] 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. Emissivity measurement of aero-engine turbine blade[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(2): 45-48. (in Chinese)
- [33] 熊兵, 侯敏杰, 陈洪敏, 等. 辐射测温技术在涡轮叶片温度场中的应用[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2008(3): 50-54.
- XIONG B, HOU M J, CHEN H M, et al. Application of infrared thermometer in turbine blade temperature field[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2008(3): 50-54. (in Chinese)
- [34] 唐韬. 辐射测温法及其在落管测温中的应用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
- TANG T. Research on radiation thermometry and its application in temperature measurement of falling tubes [D]. Xian: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [35] 米松涛, 张玉存, 付献斌, 等. 基于发射率修正模型的红外测温补偿方法[J]. 计量学报, 2024, 45(2): 164-169.
- MI S T, ZHANG Y C, FU X B, et al. An infrared temperature measurement compensation method based on emissivity correction model [J]. Acta Metrologica Sinica, 2024, 45(2): 164-169. (in Chinese)
- [36] 魏绍亮, 邱孟庆, 程奉玉. 发射率对红外温度传感器测量精度的算法补偿研究[J]. 传感器与微系统, 2024, 43(9): 39-41.
- WEI S L, QIU M Q, CHENG F Y, et al. Research on algorithm compensation of emissivity to infrared temperature sensor measurement precision[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2024, 43(9): 39-41. (in Chinese)
- [37] 吴斌. 热辐射温度测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- WU B. The research of thermal radiation temperature measurement techniques [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012. (in Chinese)
- [38] 高晓成. 燃机叶片测量系统软件设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2011.
- GAO X C. Software design of gas turbine blade measurement system [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2011. (in Chinese)
- [39] 齐文娟. 发射率对红外测温精度的影响[D]. 长春: 长春理工大学, 2006.
- QI W J. Effect of emissivity on accuracy of infrared temperature measurement [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2006. (in Chinese)
- [40] 张泽展. 高精度红外辐射测温及相关研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- ZHANG Z Z. Research of high-accuracy infrared radiation thermometry [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [41] 李云红, 马蓉, 张恒, 等. 双波段比色精确测温技术[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(1): 27-35.
- LI Y H, MA R, ZHANG H, et al. Dual waveband colorimetric temperature accurate measurement technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(1): 27-35. (in Chinese)
- [42] 张崇关. 红外辐射温度测量关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
- ZHANG C G. The research of infrared radiation temperature measurement key techniques [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [43] 黄志成, 李新娥, 赵夏青. 比色测温法的最优波段及测温精度的研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(12): 1871-1876.
- HUANG Z C, LI X E, ZHAO X Q. Research on the optimal band and temperature measurement accuracy of temperature measurement method [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(12): 1871-1876.
- [44] 闫白, 郝晓剑, 周汉昌. 智能比色测温系统[J]. 光电技术应用, 2013, 28(5): 3-5.
- YAN B, HAO X J, ZHOU H C. Intellectual colorimetric temperature measurement system[J]. Electro-Optic Technology Application, 2013, 28(5): 3-5. (in Chinese)
- [45] 陈凯迪. 基于CCD图像传感器的温度场测量系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- CHEN K D. Research on temperature field measurement system based on CCD image sensor [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [46] CHEN M M, TAN C W, TANG Y P, et al. Research on reconstruction technology of temperature field in engine combustion chamber based on image thermometry [J]. Comptes Rendus De L Academie Bulgare Des Sciences, 2023, 76(7): 1084-1091.
- [47] KURIHARA N, NISHIKAWA M, WATANABE A, et al. A combustion diagnosis method for pulverized coal boilers using flame - image recognition technology [J]. IEEE Transactions on Energy conversion, 1986(2): 99-103.
- [48] 王振涛, 戴景民, 杨森. 用于爆炸火焰真温场测量的多

- 光谱热成像仪研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(12): 3885-3890.
- WANG Z T, DAI J M, YANG S. Research on multi-spectral thermal imager explosion flame true [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(12): 3885-3890. (in Chinese)
- [49] 孙元, 彭小奇, 李晟, 等. CCD辐射测温的动态范围研究[J]. 传感器与微系统, 2008(2): 24-26.
- SUN Y, PENG X Q, LI S, et al. Research on dynamic range of CCD radiation temperature measurement [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008(2): 24-26. (in Chinese)
- [50] WANG F, SHEN X J, CHEN W G, et al. A new method of measuring the CCD device photoresponse non-uniformity [C]// Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers. Detectors, Focal Plane Arrays, and Imaging Devices II. SPIE, 1998: 295-296.
- [51] BÜNGER L, ANHALT K, TAUBERT R D, et al. Traceability of a ccd-camera system for high-temperature measurements [J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36: 1784-1802.
- [52] 孙元, 彭小奇, 严军. 基于彩色 CCD 的高温场辐射测温方法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(11): 2579-2584.
- SUN Y, PENG X Q, YAN J. High-temperature field radiation thermometry based on colored CCD [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2011, 32(11): 2579-2584. (in Chinese)
- [53] 杨鹰, 于哲峰, 胥建宇, 等. 基于 CCD 相机图像的烧蚀模型表面温度与材料发射率测量方法[J]. 实验流体力学, 2025, 39(1): 1-7.
- YANG Y, YU Z F, XU J Y, et al. Measuring method of ablative model's temperature and emissivity based on CCD camera image [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2025, 39(1): 1-7. (in Chinese)
- [54] 陈金龙, 姜泓宇, 易方正, 等. 改进的可见光-近红外比色测温系统与性能评估[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(11): 53-58.
- CHEN J L, JIANG H Y, YI F Z, et al. Improved visible near-infrared colorimetric thermometry system and performance evaluation [J]. Metrology Science and Technology, 2022, 66(11): 53-58. (in Chinese)
- [55] 朱泽忠, 沈华, 王念, 等. 基于多光谱法的激发温度和辐射温度瞬态测试技术[J]. 光谱学与光谱分析, 2018, 38(2): 333-339.
- ZHU Z Z, SHEN H, WANG N, et al. Transient measure technique for excitation temperature and radiation temperature based on multi-spectral method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(2): 333-339.
- [56] 李党娟, 丁成蛟, 樊洋, 等. 基于多光谱辐射测温法的换能元桥区温度检测技术[J]. 火工品, 2024(5): 84-90.
- LI D J, DING C J, PAN Y, et al. Temperature measurement of transducer bridge by multispectral radiation thermometry [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2024(5): 84-90.
- [57] USAMENTIAGA R, GARCÍA D F, MOLLEDA J, et al. Temperature measurement using the wedge method: comparison and application to emissivity estimation and compensation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2010, 60(5): 1768-1778.
- [58] 张先岐. 基于有效发射率的涡轮叶片红外辐射测温方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
- ZHANG X Q. Research on infrared radiation temperature measurement method of turbine blades based on effective emissivity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023. (in Chinese)
- [59] NG D, FRALICK G. Use of a multiwavelength pyrometer in several elevated temperature aerospace applications [J]. Review of Scientific Instruments, 2001, 72(2): 1522-1530.
- [60] CUI Y, QIU K X, GAO S, et al. Advances in the application of non-contact temperature measurement technology for aero-engine blade [J]. Review of Scientific Instruments, 2024, 95(8). DOI: 10.1063/5.0215538.
- [61] 李文凯, 周亮, 刘朝晖, 等. 基于距离修正的小目标中波红外光谱辐射测温方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(4): 1158-1164.
- LI W K, ZHOU L, LIU C H, et al. Infrared spectral radiation based on distance correction temperature measurement method for small target medium-wave [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(4): 1158-1164. (in Chinese)
- [62] BALL K S, TAN G Y. Comparison of silicon wafer temperature measurements using thin film thermocouples and light pipe radiation thermometers in a thermometry test bed [C]// 10th IEEE International Conference of Advanced Thermal Processing of Semiconductors. IEEE, 2002, 75. DOI: 10.1109/RTP.2002.1039442.
- [63] 张天宇, 吴嘉雯, 方弘毅, 等. 航空涡轮叶片表面红外温度测量[J]. 节能技术, 2023, 41(3): 195-202.
- ZHANG T Y, WU J W, FANG H Y, et al. Infrared tem-

- perature measurement of aircraft turbine blade surface [J]. *Energy Conservation Technology*, 2023, 41 (3): 195–202. (in Chinese)
- [64] CHEN M M, JIANG H Y, CAI X C, et al. Research on temperature field reconstruction technology for single-dome combustion chambers based on flame image [J]. *Frontiers in Materials*, 2024, 11. DOI: 10.3389/fmats.2024.1339375.
- [65] YAN J H, LI W T. Error correction research of colorimetric temperature-measurement based on CCD [C]// 31st Chinese Control Conference. CAA, 2012: 5649–5652.
- [66] ZHU Z Z, SHEN H, WANG N, et al. Transient measure technique for excitation temperature and radiation temperature based on multi-spectral method [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2018, 38(2): 333–339.
- [67] WANG Y T, ZHU Y J. Temperature and displacement measurement system with fiber optic sensors for turbine blades [C]// 3rd International Symposium on Precision Mechanical Measurements, 2006, 6280: 1–2.
- [68] AL-TAIE, ARKAN K H. Experimental study of radiation from coated turbine blades [D]. UK: Cranfield University, 1990.
- [69] FRANK S L, HOLT T O, EISENLOHR H, et al. Application of a high resolution turbine pyrometer to heavy duty gas turbines [C]// ASME Turbo Expo 2001: Power for Land, Sea, and Air, 2001: 8.
- [70] FRANK S L. Surface temperature mapping of gas turbine blading by means of high-resolution pyrometry [J]. *Annals-New York Academy of Sciences*, 2001, 934: 257–264.
- [71] ESTEVADEORDAL J, NIRMALAN N, WANG G, et al. Multi-color pyrometry techniques for characterization of spall in heavy duty gas turbine engines [C]// 42nd AIAA Thermophysics Conference. AIAA, 2011. DOI: 10.2514/6.2011-3781.
- [72] 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). DOI: 10.1115/1.4029615.
- [73] GONZALEZ A Y, PILGRIM C C, FEIST J P, ET AL. On-line temperature measurement inside a thermal barrier sensor coating during engine operation [J]. *Journal of Turbomachinery-Transactions of the Asme*, 2015, 137(10). DOI: 10.1115/1.4030260.
- [74] 戴景民. 多光谱辐射测温技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1995.
- DAI J M. Study of the technique of multispectral radiation thermometry [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1995. (in Chinese)
- [75] SUN X G, ZHAO W, YUAN G B, et al. Methods of data processing in multi-wavelength thermometry [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2006(4): 421–426.
- [76] 李云红, 孙晓刚, 杨幸芳, 等. 红外热像仪测温精度的理论分析 [J]. *西安工程科技学院学报*, 2007(5): 635–639.
- LI Y H, SUN X G, YANG X F, et al. Theoretical analysis on the technics of temperature measurement precision with infrared thermal imager [J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2007(5): 635–639. (in Chinese)
- [77] GAO S, FENG C, WANG L, et al. Multi-spectral temperature measurement method for gas turbine blade [J]. *Optical Review*, 2016, 23: 17–25.
- [78] 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.
- [79] KIPNGETICH K D, FENG C, GAO S. Reflection error correction of gas turbine blade temperature [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 75: 153–159.
- [80] 冯驰, 苏海燕, 高广凤, 等. 涡轮叶片光纤温度测量系统 [J]. *应用科技*, 2009, 36(7): 33–36.
- FENG C, SU H Y, GAO G F, et al. Turb blade temperature measurement system with fiber [J]. *Applied Science and Technology*, 2009, 36(7): 33–36. (in Chinese)
- [81] 李智伟, 冯驰. 红外测温系统设计与实现 [J]. *应用科技*, 2010, 37(5): 24–28.
- LI Z W, FENG C. Design and implementation of infrared temperature measurement system [J]. *Applied Science and Technology*, 2010, 37(5): 24–28. (in Chinese)
- [82] 李勋锋. 涡轮叶片温度非接触测试技术研究 [C]// 北京: 第六届中国空天动力联合大会, 2023.
- LI X F. Research on non-contact testing technology of turbine blade temperature [C]// Beijing: The 6th China Joint Conference of Aerospace Propulsion, 2023.
- [83] 叶志鹏, 李勋锋, 刘艳, 等. 红外测温探头防护性能数值模拟研究 [J]. *工程热物学报*, 2024, 45(1): 205–211.
- YE Z P, LI X F, LIU Y, et al. Numerical simulation research on the protective performance of infrared thermometer probes [J]. *Journal of Engineering Thermo-*

- physics, 2024, 45(1): 205–211. (in Chinese)
- [84] KERR C, IVEY P. Optical pyrometry for gas turbine aero-engines[J]. Sensor Review, 2004, 24(4): 378–386.
- [85] HORIUCHI T, TANIGUCHI T, TANAKA R, et al. Application of conjugate heat transfer analysis to improvement of cooled turbine vane and blade for industrial gas turbine[C]// ASME Turbo Expo: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2018. DOI: 10.1115/ GT2018-75669.
- [86] TANAKA R, KOJI T, RYU M, et al. Development of high efficient 30MW class gas turbine; the Kawasaki L30A [C]// American Society of Mechanical Engineers, ASME Turbo Expo 2012, 2012: 883–889.
- [87] 徐春雷, 朴成杰, 王亮, 等. 基于红外技术的发动机低压涡轮叶片温度场测量[J]. 航空发动机, 2018, 44(1): 75–78.
- XU C L, PIAO C J, WANG L, et al. The engine low pressure turbine blade temperature distribution measurement based on the infrared pyrometer technology [J]. Aeroengine, 2018, 44(1): 75–78.
- [88] ZHENG K F, LÜ J G, ZHAO Y Z, et al. Turbine blade three - wavelength radiation temperature measurement method based on reflection error correction [J]. Applied Sciences - Basel. 2021, 11(9). DOI: 10.3390/app11093913.
- [89] 段鹏程, 管今哥, 孙鹏, 等. 基于多CCD同步耦合的动态燃烧场三维辐射测温[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(10): 51–60.
- DUAN P C, GUAN J G, SUN P, et al. Three - dimen-

sional radiation thermometry for dynamic combustion field based on multi - CCD synchronous coupling [J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(10): 51–60. (in Chinese)

- [90] 高山, 熊新梦, 刘海龙. 基于红外辐射的发动机涡轮叶片温度测量方法综述[J]. 计测技术, 2024, 44(4): 1–28.

GAO S, XIONG X M, LIU H L. et al. Overview of temperature measurement methods for engine turbine blades based on infrared radiation[J]. Metrology & Measurement Technology, 2024, 44(4): 1–28. (in Chinese)

(本文编辑: 李成成)



第一/通信作者: 马宏伟(1968—), 男, 山东兰陵人, 博士, 北京航空航天大学长聘教授, 博士生导师, 主要研究方向为叶轮机气动热力学、测试技术。2000年至2003年, 德国Aachen大学访问学者; 2009年6月至8月, 美国爱荷华州立大学航空系客座教授; 2011年2月至3月, 法国里昂中央理工大学流体力学与声学实验室邀请教授。国家级科技工业科学技术委员会领域专业组成员, 中国航空学会测试技术分会副主任委员, 国际内流实验与计算学术会议(ISAIF)科学委员兼常务委员, 中国国际透平机械学术会议科学委员。发表学术论文140余篇, 发明专利授权66项, 软件著作权27项。