

基于红外辐射的发动机涡轮叶片温度测量方法综述

高山^{1,2*}, 熊新梦¹, 刘海龙¹

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 黑龙江省先进智能感知技术协同创新中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 介绍了辐射测温技术的基本原理以及研究中的关键问题。归纳了基于红外辐射的发动机涡轮叶片温度测量方法的国内外应用现状, 对测量时产生的误差进行了分析, 并提出降低误差的措施。指出在环境辐射方面, 需要充分考虑燃烧气体和环境表面辐射的影响, 建立准确的反射模型, 融合算法, 矫正辐射干扰误差; 在发射率模型方面, 应根据具体情况预先建立发射率模型和无发射率模型, 结合机器学习等算法提高测量精度; 在光学系统设计方面, 需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, 可利用神经网络、遗传算法、约束优化等方法, 最大程度减小误差, 提高计算精度。

关键词: 辐射测温技术; 环境辐射; 发射率模型; 光学系统设计; 数据处理

中图分类号: TB942; O551.2; V235.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2024) 04-0001-28

Overview of temperature measurement methods for engine turbine blades based on infrared radiation

GAO Shan^{1,2*}, XIONG Xinmeng¹, LIU Hailong¹

(1. School of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Heilongjiang Province Advanced Intelligent Perception Technology Collaborative Innovation Center, Harbin 150001, China)

Abstract: This paper introduces the basic principles of radiation temperature measurement technology and key issues in research. The current application status of temperature measurement methods for engine turbine blades based on infrared radiation at home and abroad is summarized, the errors generated during measurement are analyzed, and the measures to reduce errors are proposed. It is pointed out that in terms of environmental radiation, it is necessary to fully consider the influence of combustion gases and environmental surface radiation, establish accurate reflection models, integrate algorithms, and correct radiation interference errors; In terms of emissivity modelling, emissivity model and non-emissivity model should be established in advance according to specific situations, and machine learning algorithms should be combined to improve measurement accuracy; In terms of optical system design, it is necessary to select appropriate optical materials and coatings to enhance the sensitivity of the system in different environments; In terms of data processing, methods such as neural networks, genetic algorithms, and constraint optimization can be used to minimize errors and improve computational accuracy to the greatest extent possible.

收稿日期: 2024-08-01; **修回日期:** 2024-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(62275059, U20A20213); 黑龙江省自然基金项目(YQ2023F014); 中央高校基本科研业务项目(3072024XX0807)

引用格式: 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.

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



Key words: radiation temperature measurement technology; environmental radiation; emissivity model; optical system design; data processing

0 引言

为了研发高性能的涡轮叶片，确保其在极端条件下的安全性，同时实现更高的涡轮入口温度、改善发动机的推重比，精确测量涡轮叶片的温度至关重要。涡轮叶片在高温、高压以及高速工况下的持续运作对材料加工技术、冷却系统以及构造设计方面形成了极大的考验。一旦涡轮入口区域温度升高至超出叶片材质所能承受的最高温度界限，则叶片将在蠕变和疲劳效应的叠加作用下出现裂纹现象，严重时，叶片可能瞬间失效，从而威胁整台发动机的运行安全。因此，准确的温度监测与控制对于确保涡轮叶片的可靠性至关重要，同时也是提高发动机性能的关键途径。

目前，涡轮叶片的温度测量技术主要分为接触式与非接触式两大类^[1]。在接触式温度测量的范畴内，常用测量工具包括热电偶、示温漆等。这些测量工具虽然较为简单易用，但也存在一些不足之处，使用这些测量工具有可能破坏叶片表面的原始温度场分布，从而干扰目标的热平衡；同时，这些测量工具的寿命有限，使用时间增加可能导致测量误差增加。此外，接触式测量方法的动态稳定性较差，热响应时间较长，不利于准确检测实际温度场。

非接触式温度测量技术不直接接触被测对象，因此不会对其温度场造成干扰，同时具备更快的响应速度^[2]，这些特性使其特别适用于高温条件和复杂环境中的温度测量。在工程学范畴内，采用非接触式测量手段，可以有效捕获涡轮叶片表面的温度及其分布特性(例如通过对燃气及水蒸气的实时监测，能收集到叶片所处环境的全局温度信息)，这使得非接触式测温技术在获取更全面和准确的温度数据方面具有显著优势。在非接触式测温技术中，由于辐射测温技术更能满足涡轮叶片在线温度测量要求，如今被广泛运用。

本文主要针对发动机涡轮叶片辐射测温技术进行介绍，包括辐射测温的基本原理、研究现状及关键问题。从环境辐射、反射误差、光学系统

设计、数据处理方面重点阐述辐射测温的误差来源以及解决措施，为高精度辐射测温技术的发展与应用提供理论指导。

1 辐射测温原理

1.1 普朗克定律

普朗克定律是热辐射领域的基本物理定律，阐明了黑体辐射的强度如何与温度和波长相关联。该定律的基础是能量以离散的量子形式存在的假设。根据普朗克辐射公式，在任意温度下，黑体辐射的能量谱密度(即单位频率和单位体积中辐射能量)与频率(或波长)之间的关系可以被有效描述^[3]，即

$$M(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{C_2/\lambda T} - 1} \quad (1)$$

式中： $M(\lambda, T)$ 为黑体的辐射强度； λ 为波长； T 为目标的绝对温度； C_1 为第一辐射常数， $C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ ； C_2 为第二辐射常数， $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

1.2 维恩位移定律

维恩位移定律明确阐述了在黑体辐射中，辐射峰值的波长与黑体的绝对温度呈现出特定的关系。在黑体辐射源的温度上升阶段，其发射的辐射强度达到最高值时所对应的波长表现出逐渐减小的动向。此类现象暗示了波长与温度之间存在一种逆向比例关系，这一关系反映了随着温度的升高，波长相应缩短的物理现象，公式为^[4]

$$\lambda_m T = b \quad (2)$$

式中： λ_m 为黑体辐射的波长极值， T 为黑体物体的温度， b 为维恩位移常数。

需特别指出，维恩位移定律仅适用于发射连续光谱的热平衡体，即黑体。在特定条件下，尤其是当辐射的强度并非随波长的变化而均匀变化时(例如激光系统等条件下)，维恩位移定律并不适用。

1.3 斯蒂藩-玻尔兹曼律

斯特藩-玻尔兹曼定律揭示了黑体辐射的总能量与其绝对温度之间的联系。根据这一定律，通过计算单位时间内每单位面积的总辐射能量(即辐

射度), 可以准确地推算出黑体的温度。依据斯特藩-玻尔兹曼定律, 黑体每单位面积的辐射能量与其绝对温度的四次方成正比, 公式为^[5]

$$E = \sigma \cdot T^4 \quad (3)$$

式中: E 为黑体辐射的强度; T 为黑体本身的温度; σ 为与之相关联的物理常数-斯特藩玻尔兹曼常数, $\sigma = 5.6703 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

斯特藩-玻尔兹曼定律的核心在于解析黑体辐射的能量密度如何随着温度的波动而相应地调整变化。维恩位移定律和斯特藩-玻尔兹曼定律是研究黑体辐射的关键理论, 结合这两项定律, 可以更全面地分析和解释黑体辐射的行为。

2 辐射测温研究现状及关键问题

2.1 辐射测温研究现状

辐射测温不影响叶片的温度场分布, 同时对测量点数量没有限制, 因此在测量高速运动目标的温度方面尤为适用; 此外, 辐射测温技术具有高分辨率和高灵敏度, 响应迅速, 并能够有效涵盖广泛的温度测量范围, 这些特性使得该技术在多样化的应用环境中表现出色, 满足了不同场景下的测温需求。

探测器件的持续改良促进了辐射测温技术的进步。探究辐射测温技术中探测器件的发展轨迹, 其研究进程可概括为3个至关重要的阶段: ①研究侧重于隐丝式光学高温计的创新和发展; ②光电倍增管高温计得到了广泛应用; ③光电精密测温技术逐渐成熟^[6]。这些技术经历了从单波长测温到多波长测温的逐步演进, 各阶段的创新不仅扩大了测温范围, 还提高了测量的准确性和可靠性。相关研究成果为辐射测温技术应用于涡轮叶片温度测量提供了稳固的基础。

当前, 辐射测温技术包括3种主要方法: 亮度测温、比色测温和多光谱测温^[7-10]。亮度测温通过测量物体发出的辐射亮度来估算温度; 比色测温根据物体表面颜色的变化来推断温度变化, 通过分析辐射光谱中的不同波长, 得到关于温度的信息; 多光谱测温法通过同时测量多个波长的辐射来提高温度测量的准确性, 通过比较不同波长下的辐射强度, 可以降低环境因素对测量结果的影响, 提供更准确的温度估计。表1为辐射测温方式及特点, 可以发现不同的测温方式均与目标光谱发射率有关, 因此, 有必要得到较为准确的发射率模型, 提高测温结果的正确性和可靠性。

表1 辐射测温方式及特点

Tab.1 Radiation temperature measurement method and characteristics

类别	典型仪器	特点
亮度测温法	亮度测温仪	需已知发射率
比色测温法	比色温度计	需已知发射率
多光谱测温法	多光谱测温系统	测温精度与测温上限高, 适当选择发射率与温度之间的函数关系

航空发动机涡轮叶片的辐射测温技术研究始于20世纪60年代, 最初由美国和英国的科研人员主导。这两个国家在涡轮发动机叶片温度测量技术方面取得了显著进展。这些研究大大推动了测温技术的发展, 为涡轮发动机性能的提升提供了关键支撑。

目前, 比较有代表性的涡轮发动机测温技术研究机构包括: 美国通用电气公司(General Electric Company, GE)、美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、美国联合技术公司(United Technologies Corporation, UTC)、

英国罗罗(Rolls-Royce)公司等^[11]。Rolls-Royce公司于1964年就已经开展了涡轮发动机叶片的温度测量研究, 并提出了一套用于涡轮叶片辐射测温的系统设计方案, 后来该公司又提出了一种涡轮叶片的发射率修正方法来提高辐射测温的准确性^[12-14]; 于2006年研发了基于衍射光学元件的涡轮叶片成像测温系统, 并研究准确测量涡轮叶片的表面发射率的方法和消除燃烧球热辐射影响的方法^[15]。UTC于1977年通过采用双波段测温的方法将目标叶片的热辐射和环境辐射分开, 在构建准确的发射率模型的同时, 利用特定的辐射高温

计,对周期旋转的涡轮叶片进行多次辐射采集和比较,得到无火焰干扰的辐射信号,再进行目标叶片温度的反演,如图1所示^[16]。GE公司于2009年提出一种通过对比采集得到的包含燃气吸收和无燃气吸收的叶片辐射的方法,实现涡轮叶片和燃气温度的同时测量,并给出了相应的系统设计原理^[17];于2011年研发了用于涡轮叶片辐射温度测量的光学系统,可分别测量涡轮叶片1 064、1 600、2 200 nm三个波段的辐射,并进行温度计算^[18]。

我国的涡轮叶片辐射测温研究起步较晚,目前的主要测温设备大多为引进的国外早期产品,如英国Rotadata公司研制的ROTAMAPII型涡轮叶片辐射测温系统。近几年,我国高校和科研机构也积极推进涡轮叶片辐射测温技术的研究及应用,

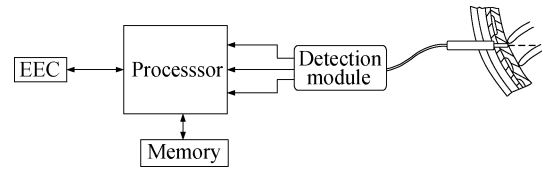


图1 高温计简易示意图^[19]

Fig.1 Simplified schematic diagram of pyrometer^[19]

国内辐射测温应用如图2所示,电子科技大学、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、中国航发四川燃气涡轮研究院和中国航发沈阳发动机研究所等科研机构,在辐射高温计及位移驱动设备研制、红外辐射测温技术优化、涡轮叶片温度场数值模拟等方面取得了较大进展,部分成果已实现整机验证并应用于航空发动机涡轮叶片的温度监测和故障诊断中。



图2 国内辐射测温应用

Fig.2 Application of domestic radiation temperature measurement

2.2 辐射测温关键问题

从前文可知,辐射测温法具有许多优点,但针对涡轮叶片进行测温时,高温燃气与热端部件构成的高温背景会引入测量误差。已有的研究表明,影响涡轮叶片辐射测温精度的主要因素有:

- 1) 高温燃气的吸收与辐射^[20]

从燃烧室喷出的燃气会选择性吸收目标热辐

射,使系统接收到的热辐射减少。高温燃气自身热辐射的一部分会进入系统,使系统接收的热辐射增加,所以高温燃气对涡轮叶片测温的影响包含燃气吸收与辐射的综合作用。

- 2) 高温背景反射辐射干扰^[21]

在测量高温背景环境下的物体时,高温环境辐射量会在待测表面形成反射辐射量并与待测辐

射量叠加,对辐射测温的准确度产生极大影响。在对发动机涡轮叶片进行辐射测温时,反射辐射占高温计接收总辐射量比例较高,邻近高温叶片等部件形成的强反射辐射会直接影响温度测量结果。

3) 发射率数值设定偏差^[22]

涡轮叶片通常由合金材料及涂层制成,其发射率会受环境因素(如高温、氧化、腐蚀等)影响而变化。表面状态的变化(如氧化层、沉积物等)直接影响发射率。发射率数值与温度、波长、被测目标表面状态、测量角度等均相关,叶片不同部位可能因不同的环境影响导致发射率不同,造成测量的不一致性。

4) 光学系统污染^[23]

在高温环境下,光学元件容易受到炭黑、灰尘和其他化学物质的污染,导致光的传递效率降低。污染物的性质(如颗粒大小、形状等)也会对光的散射产生影响。光学组件透过率下降会导致最终得到的测量信号强度减弱,从而影响测温准确性。

5) 数据处理偏差^[24]

测温系统所获取的信号通常会受到环境噪声、设备本身的电子噪声、高温燃气的瞬态变化等干扰。需处理测量数据,以去除噪声和干扰。处理算法的精度直接影响温度测量结果。不当的数据处理可能会导致测量值出现偏差,影响最终结果的可靠性。

6) 热颗粒物质的干扰^[25]

在涡轮引擎的高温环境中,燃烧过程会产生大量热颗粒物质(如炭黑、灰烬、未燃烧的燃料颗粒等)。这些颗粒不仅会吸收特定波长的辐射,导致传感器接收的信号减弱,还会散射光线,改变测量信号的传播路径,从而混淆有效信号与背景噪声。此外,颗粒物质的存在会增加测量信号中的噪声,使得信号与噪声比下降,进一步降低温度测量的精确性。

可以通过实时监测、优化测量条件、数据校正和环境控制等手段降低热颗粒物质的干扰。本文主要针对环境辐射、反射误差、光学系统设计、数据处理算法方面进行阐述,分析降低测量误差的方法。

3 辐射测温的误差分析及解决措施

3.1 环境辐射影响

在涡轮叶片的辐射测温过程中,环境辐射的存在可能对测量结果产生显著影响,其中,燃烧气体的干扰和环境表面辐射(高温背景反射辐射)的影响最明显。

3.1.1 燃烧气体影响及解决措施

热辐射是由物体温度产生的电磁波辐射,其强度和波长分布取决于物体的温度和材料特性。根据普朗克辐射定律,辐射强度与物体的绝对温度呈现明显的关系。然而,当涡轮叶片周围的燃烧气体密集时,辐射信号会因为气体的吸收和散射受到显著影响。

首先,燃烧气体的辐射特性在高温下发生显著变化,尤其是在涉及红外波段的吸收和发射特性方面。燃烧产生的主要气体成分,如水蒸气(H_2O)和二氧化碳(CO_2),在特定波长范围内具有强吸收特性,例如:水蒸气在 $3\sim 5\ \mu m$ 和 $8\sim 12\ \mu m$ 之间的波段吸收率较高,二氧化碳在 $4.2\ \mu m$ 和 $15\ \mu m$ 区域的吸收率较高。这意味着,当燃烧气体浓度增加时,涡轮叶片红外辐射信号将经历显著的衰减,导致辐射测温仪器所接收到的信号强度减弱,最终使测量结果出现偏差^[26]。

其次,燃烧气体中的颗粒物和气体分子会对辐射光进行散射,影响测量的准确性。在高温和高压力的工作环境中,未完全燃烧的碳粒和其他固体颗粒会显著影响光的传播路径,造成辐射信号的散射与衍射^[27]。散射不仅降低了辐射信号的强度,还可能引入多路径干扰,使得传感器在捕捉信号时更难区分源于涡轮叶片的辐射与其他热源的辐射。这种干扰在气体浓度较高或燃烧不完全的情况下尤为显著,可能导致测量结果的波动、不稳定。

此外,燃烧气体的温度梯度和成分变化也会对辐射测温产生影响。涡轮引擎内部的温度分布通常十分复杂,不同位置的温度存在差异,热辐射的强度和特性也各不相同。当燃烧气体在涡轮叶片周围流动时,气体的流动状态和温度梯度会进一步改变其辐射特性,导致传感器在不同时刻获取的温度测量值不一致。

之前的研究主要通过限制测量的光谱范围或对测量结果进行透射率校正,以减少燃烧气体对温度测量的干扰。值得注意的是,这些方法在干扰燃烧气体浓度较低的情况下可能是有效的。如果高温燃烧气体以高浓度存在,气体对辐射的吸收和释放会对辐射温度测量产生严重影响,上述方法的效果也会明显下降。SAUNDERS P使用常用的装置测量温度,如图3所示,实验结果表明气体吸收和发射误差接近 $6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}^{[28]}$ 。深入研究燃烧气体中辐射增强和衰减的基本原理,以及燃烧气体引入测量误差的机制,对于正确选择和应用辐射温度测量技术至关重要。

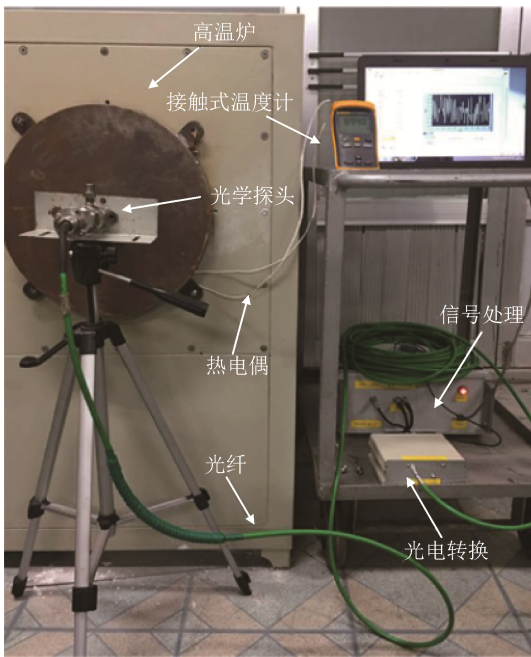
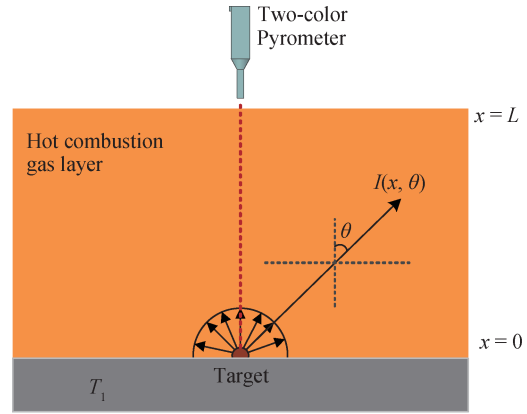


图3 测量装置^[28]

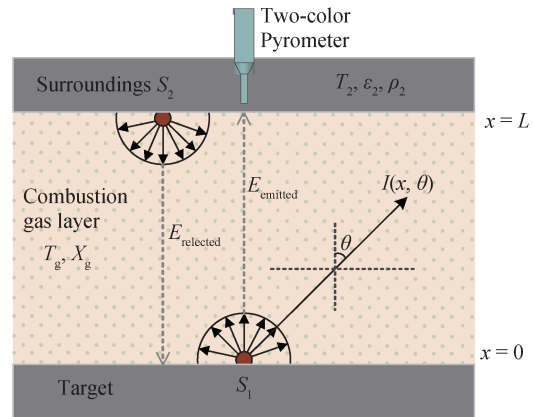
Fig.3 Measuring device^[28]

2019年,重庆大学利用双色测温法量化燃烧气体辐射对表面温度测量的影响,提出了与双色热法模型相结合的辐射传热模型,如图4所示,其采用统计窄带模型(Statistical Narrow Band Model, SNB)和灰带近似法,得到了干扰燃烧气体的辐射特性,分析了 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}-\text{N}_2$ 混合物在3种测量情况下产生的温度误差,评估了模型输入参数的变化,计算了特定波长下理论温度的变化,为进行不确定性分析奠定了基础,并针对影响因素进行了灵敏度分析^[29]。

2021年,黄云伟等人进一步考虑了来自高温



(a) 热燃烧气体辐射测温的物理模型^[29]
(a) A physical model for radiation temperature measurement of hot combustion gases^[29]



(b) 存在周围环境和燃烧气体干扰的情况下辐射测温的物理模型^[30]
(b) A physical model for radiation temperature measurement under the interference of the surrounding environment and combustion gases^[30]

图4 两种考虑燃烧气体辐射测温模型

Fig.4 Two radiation temperature measurement models considering combustion gases

环境和热/冷燃烧气体的反射辐射并开展研究,结果表明双色热分析法实际测量误差较大,如图5所示。他们利用解析双色热法模型,定量分析了反射 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{CO}-\text{N}_2$ 混合辐射联合产生的温度误差,提出了一种线性外推的方法来降低不确定的气体吸收和发射的影响^[30]。

在燃烧气体温度为 $1\ 600\ \text{K}$ 、环境温度为 $800\ \text{K}$ 的情况下双色分析法的预测温度误差如图5所示,可以发现,气体吸收和发射的误差与总误差基本相似,而总误差由物体的反射误差、气体吸收和发射误差构成,即总误差主要由气体吸收和发射误差组成。因此,利用双色分析法测量的结果误差较大,不适合工程应用。

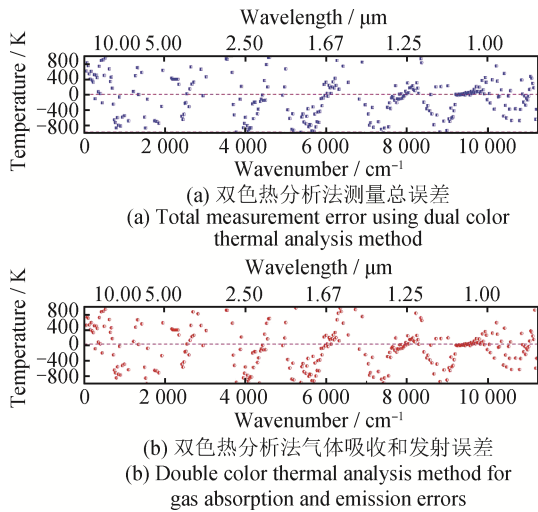


图5 双色热分析法预测温度误差^[30]

Fig.5 Prediction temperature error of dual color thermal analysis method^[30]

2015年,高山研究了混合气体在高温高压条件下的辐射特点,分析不同工况下燃气辐射与吸收特性的变化,使用 k 分布模型将剧烈变化的光谱吸收系数重新排列为平滑单调上升的函数,并结合HITEMP数据库提出了光谱窗计算方法^[31]。与已有气体辐射计算方法相比,该方法的计算精度和计算速度均有优势,可修正叶片测温时燃气的影响,并为测量光谱优化选择提供依据。2023年,张天宇系统分析了航空发动机涡轮叶片工作条件、辐射测温中进入到红外探测器的辐射能量来源,获得了影响红外测温的主要因素,针对高温燃气吸收问题,提出了复杂背景下三维弯曲表面红外测温修正模型,模型中考虑了叶片的表面发射率分布、双向反射分布函数、辐射角系数、高温燃气、红外窗口透过率等影响因素,有效抑制了涡轮叶片红外测温中燃烧气体的干扰^[32]。

3.1.2 环境表面辐射影响及解决措施

当涡轮叶片在高温高压的狭窄环境下运转时,他对周围环境表面辐射的反射对辐射测温造成了很大影响。环境表面辐射在目标叶片表面发生漫反射后,会与目标叶片的热辐射一起到达探测器,这将对测温结果产生非常大的影响,尤其是对表面涂覆热障涂层的低发射率叶片而言。根据相关研究,一般来说,发动机内部各部件按照表面温度从高到低排序:燃烧室、火焰筒壁面、导向叶片、动叶、后向部件、机匣壁面、涡轮盘面^[33]。

为了对反射误差进行校正,需要对高温环境影响下的辐射传输进行研究。

2014年,维拉诺瓦大学的ARAUJO A等人用蒙特卡罗统计方法估计了双光谱红外辐射测量得到的灰色表面在环境温度下的发射率的不确定度^[34]。该研究考虑了以下重要区域:给定温度 T_s 和发射率 ϵ_s 下的目标表面(其输出信号 s 取决于入射辐射的探测器),以及目标表面和探测器周围的背景表面(其温度为 T_a),如图6所示,并建立如式(4)所示的关系。

$$s = K \left[\epsilon_s \int_{\lambda=\lambda'}^{\lambda''} L_\lambda(T_s) d\lambda + (1 - \epsilon_s) \int_{\lambda=\lambda'}^{\lambda''} L_\lambda(T_a) d\lambda + F \right] \quad (4)$$

式中: K 为探测器吸收的热量与输出信号的关系参数, λ' 和 λ'' 为常数, L_λ 为辐射亮度, F 为从内部源到达探测器的辐射。实验结果表明,对于灰度目标表面,距离较远、波长较短的窄谱带测量不确定度最小。

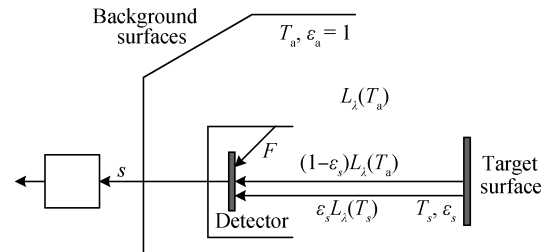


图6 热探测器处的能量通量^[34]
Fig.6 Energy flux at the thermal detector^[34]

2021年,ZHANG K F指出,在采用辐射测温技术测量涡轮叶片温度时,应考虑环境对叶片辐射的影响。这时高温计测量的目标表面在波长 λ 处的辐射出射度 $M_{total}(\lambda)$ 为

$$M_{total}(\lambda) = \epsilon_b M_b(T, \lambda) + (1 - \rho_b) E_e \quad (5)$$

式中: ϵ_b 为叶片发射率; $M_b(T, \lambda)$ 为目标叶片同温度的黑体在波长 λ 处的辐射出射度; E_e 为目标叶片受环境叶片辐射的辐射照度; ρ_b 为目标表面的反射率, $\rho_b = 1 - \epsilon_b$ (因为对于不透明表面,发射率和反射率的和为1)。基于辐射传输理论,ZHANG K F根据发动机的涡轮叶片位置关系,建立了一种涡轮叶片三维动态辐射传输模型,同时提出了基于环境表面总辐射出射度的反射辐射校正方法,分析了不同温度和不同位置处的涡轮叶片因反射环

境辐射造成的测温误差^[35]。

高温背景反射辐射对测温结果的影响程度与环境表面的发射率有很大关系。上海技术物理研究所张长兴研究背景辐射对短波红外高光谱成像仪辐射精度、信噪比的影响，分析了波长为0.8~15 μm范围内的涡轮叶片表面发射率的变化趋势^[36]。2022年，CHEN L W等人针对高温强反射环境下反射辐射干扰和难以获得光谱发射率的问题

进行了研究，提出了一种基于Alpha谱-levenberg Marquaret(LM)算法的发射率模型识别算法，将高温背景辐射与发射率模型相结合，构建并求解多光谱目标方程，从而实现高温强反射背景下的反射辐射误差校正和辐射温度测量。与现有的方法相比较，该方法的测温误差在9.5 K以下，可以有效地修正反射辐射误差，进一步提高测温精度，具体实验结果与误差对比如图7所示^[37]。

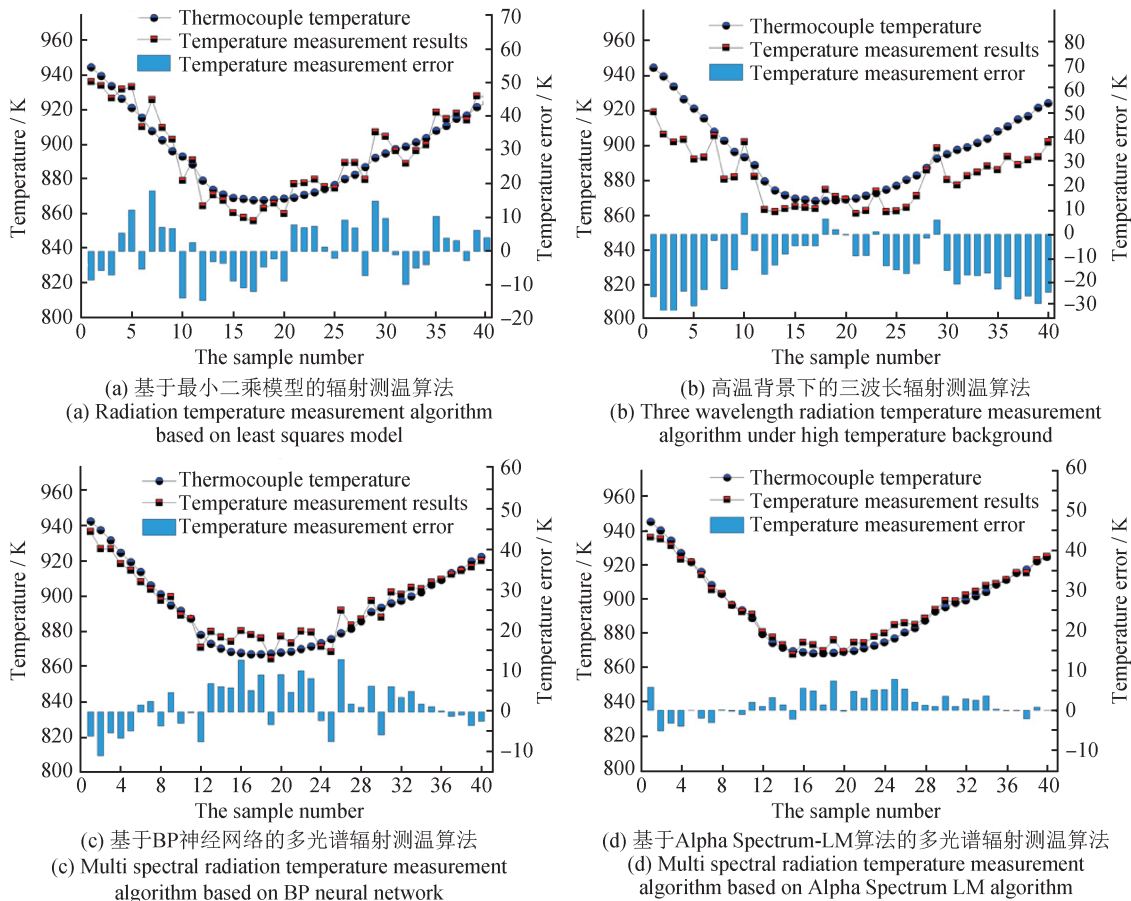


图7 实验结果与误差对比图^[37]

Fig.7 Experimental results and error comparison^[37]

图7(a)为基于最小二乘模型的辐射测温算法测温结果，最大测温误差为18.0 K，平均测温误差为7.3 K。高温背景下三波长辐射测温算法测温结果如图7(b)所示，由于实际待测目标在三个波长处的发射率值不相等，最大测温误差为-33.5 K，平均测温误差为14.8 K。基于BP(Back Propagation)神经网络的多光谱辐射测温算法的温度测量结果如图7(c)所示，由于所识别的发射率模型并不适用于真实目标，最大测温误差为13.0 K，平

均测温误差为5.1 K。基于Alpha光谱-LM算法的多光谱辐射测温算法在高温强反射背景下的测温结果如图7(d)所示，由于所识别的发射率模型更符合实际待测目标的发射率特性，最大测温误差为7.8 K，平均测温误差为2.7 K。实验结果验证了在实际高温强反射背景下多光谱辐射测温的有效性，为后续光谱发射率的研究提供重要参考，也有助于进一步提高工业过程中高温测量的精度。

2023年，张泽展研究并测量了发动机受环境

表面辐射影响下的光谱发射率,提出了一种基于构造随机表面的计算方法来估算未知环境表面光谱发射率。该方法通过计算和分析预测表面发射率,为高温背景下的环境表面辐射应用提供了重要参考。该研究还发现,随着表面粗糙度的增加,光谱发射率也会增加,但增加的程度会随着粗糙度或原始发射率的增加而减弱。此外,该方法对于在极端环境中获取物体的光谱发射率具有显著贡献,有助于降低环境辐射对测量结果的影响。通过这种方法,张泽展计算了不同的环境表面光谱发射率,计算结果与实验测量结果的最大相对误差为3%^[38]。2024年,翟颖妮等人为进一步分析涡轮叶片表面在端壁影响下的温度分布情况,采用数值模拟结合自定义编程的方式,进行了含端壁涡轮导叶的温度误差验证计算、端壁与涡轮导叶各网格单元的角度系数计算、叶片表面间的辐射换热计算,结果表明,受环境表面影响,计算温度误差最大不超过2.35%^[39]。

目前主要通过光谱分离和背景减除技术来校正环境辐射干扰误差,然而,这些方法需依赖准确的模型和复杂的计算过程。在未来的研究中,建议采用基于人工智能的算法,如卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)等实现自动化特征提取和干扰校正,从大量未标记的数据中学习环境辐射的模式,并实时调整测温策略。

3.2 发射率模型误差影响

发射率是一个介于0和1之间的无量纲量,描述了物体表面辐射能量与黑体辐射能量之比。光滑表面发射率接近0,完全吸收所有入射辐射的表面(如黑体)的发射率等于1^[40]。发射率是物体表面性质的决定性因素之一,对于非接触式测温(如辐射测温)的准确性至关重要^[41-42]。发射率的选择和使用直接影响测量结果的准确性,因此在应用辐射测温技术时,准确测定物体的发射率至关重要。

$$\varepsilon_e \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T) - 1} = \varepsilon \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T) - 1} + (1 - \varepsilon) \cdot \sum_{i=1}^n \varepsilon_{ai} \cdot F_{ai} \cdot \frac{C_1}{\lambda^5 \exp(C_2/\lambda T) - 1} \quad (7)$$

式中: ε_e 为目标的有效发射率, C_1 为第一辐射常数, C_2 为第二辐射常数, λ 为波长, T 为温度, ε_{ai} 为环境各部分的发射率, F_{ai} 为环境各部分对目标的角度系数。通常,构建假设的发射率模型时,需

发射率的计算公式为^[43]

$$\varepsilon = \frac{F_{\text{emissive}}}{F_{\text{received}}} \quad (6)$$

式中: ε 为发射率, F_{emissive} 为物体发射的热辐射能量, F_{received} 为物体接收的热辐射能量。

现阶段,对辐射测温中发射率模型的研究主要分为两个方向——建立发射率模型和无发射率模型。

3.2.1 假设发射率模型误差影响及解决措施

在过去的半个世纪中,发动机涡轮叶片辐射测温的发射率研究领域取得了重大进展^[44]。然而,与发射率相关的不确定性因素仍在阻碍该技术的发展^[45-48]。为了解决这个问题,许多研究人员建议使用假设的发射率模型。例如,SVET D I使用假设的线性光谱发射率模型测量了0.4~1 μm之间的叶片表面温度^[49]。TANAKA F等人引入了光谱发射率的倒数模型,并成功地将其应用于表面温度测量^[50]。KHAN M A等人提出了一个多项式模型来确定发射率数据,并通过对比实验证明了其有效性^[51]。SUN G X等人引入了一种被称为二次测量方法的假设模型来预测一个物体的发射率和真实温度,该方法虽然具有测温精度高的优点,但计算时间较长^[52]。LIU H等人对多项式模型的最优阶选择进行了研究,通过实验发现二阶模型可以提供最佳的测温结果^[53]。熊兵等人根据某型发动机涡轮转子叶片温度场试验测试的需求,使用辐射高温计ROTAMAP II在600~800℃进行了发射率测量,误差分析表明,该方法具有较高的精度^[54]。张学聪等人引入“有效发射率”的概念,提出了涡轮叶片有效发射率的计算方法,如式(7)所示,并采用图解法对各个热辐射背景的角度系数进行了仿真计算。结果表明,结合有效发射率的计算方法可以大幅提高辐射高温计测量涡轮发动机叶片温度的准确度^[55]。

要先建立发射率与波长或真实温度之间的物理模型。显然,当假设的发射率模型与实际情况非常接近时,计算出的真实温度和发射率将非常准确。反之,当实际条件与假设条件不匹配时,计算结

果与实际结果将存在显著差异。

为了解决传统假设发射率模型方法的局限性
问题，一些学者将机器学习引入辐射测温中。
SUN X G等人介绍了一种基于遗传算法-反向传播

$$S_i = G_i \int_{\Delta\lambda} \tau(\lambda_i) R(\lambda_i) \varepsilon(\lambda_i, T) C_1 \lambda_i^{-5} [\exp(\frac{C_2}{\lambda_i T}) - 1]^{-1} d\lambda \quad (8)$$

$$S_i = G_i \int_{\Delta\lambda} \tau(\lambda_i) R(\lambda_i) \varepsilon(\lambda_i, T) C_1 \lambda_i^{-5} [\exp(\frac{C_2}{\lambda_i T_s}) - 1]^{-1} d\lambda \quad (9)$$

式中： G_i 为仪器的几何因子， $\Delta\lambda$ 为带宽， $\tau(\lambda_i)$ 为
光学系统的光谱透过率， $R(\lambda_i)$ 为探测器的光谱响
应率， $\varepsilon(\lambda_i, T)$ 为温度目标发射率， T 为目标温
度， T_s 为目标亮度温度。

CONG D C等人利用相同的数学模型，提出了
一种基于径向基函数(Radial Basis Function, RBF)
网络的多光谱辐射测温方法，通过对各种测量场
景的大量仿真计算，取得了显著的效果^[57]。RBF

(Genetic Algorithm-Back Propagation, GA-BP)算法
的多光谱辐射测温数据处理技术，如图8所示，并
基于亮度温度模型对多光谱数据进行了仿真实
验^[56]，数学模型如式(8)、式(9)所示。

网络是一个三层前向网络，在三层前向网络中，
信号从输入层传入，经过隐藏层的处理，最后从
输出层输出。输入层到隐藏层的计算公式为

$$\begin{cases} a_1 = \mathbf{W}_1 x + b_1 \\ z_1 = \sigma(a_1) \end{cases} \quad (10)$$

式中： \mathbf{W}_1 为输入层到隐藏层的权重矩阵， x 为输入
信号， b_1 为偏置项， σ 为激活函数(例如Sigmoid、
ReLU等)， z_1 为隐藏层的输入。

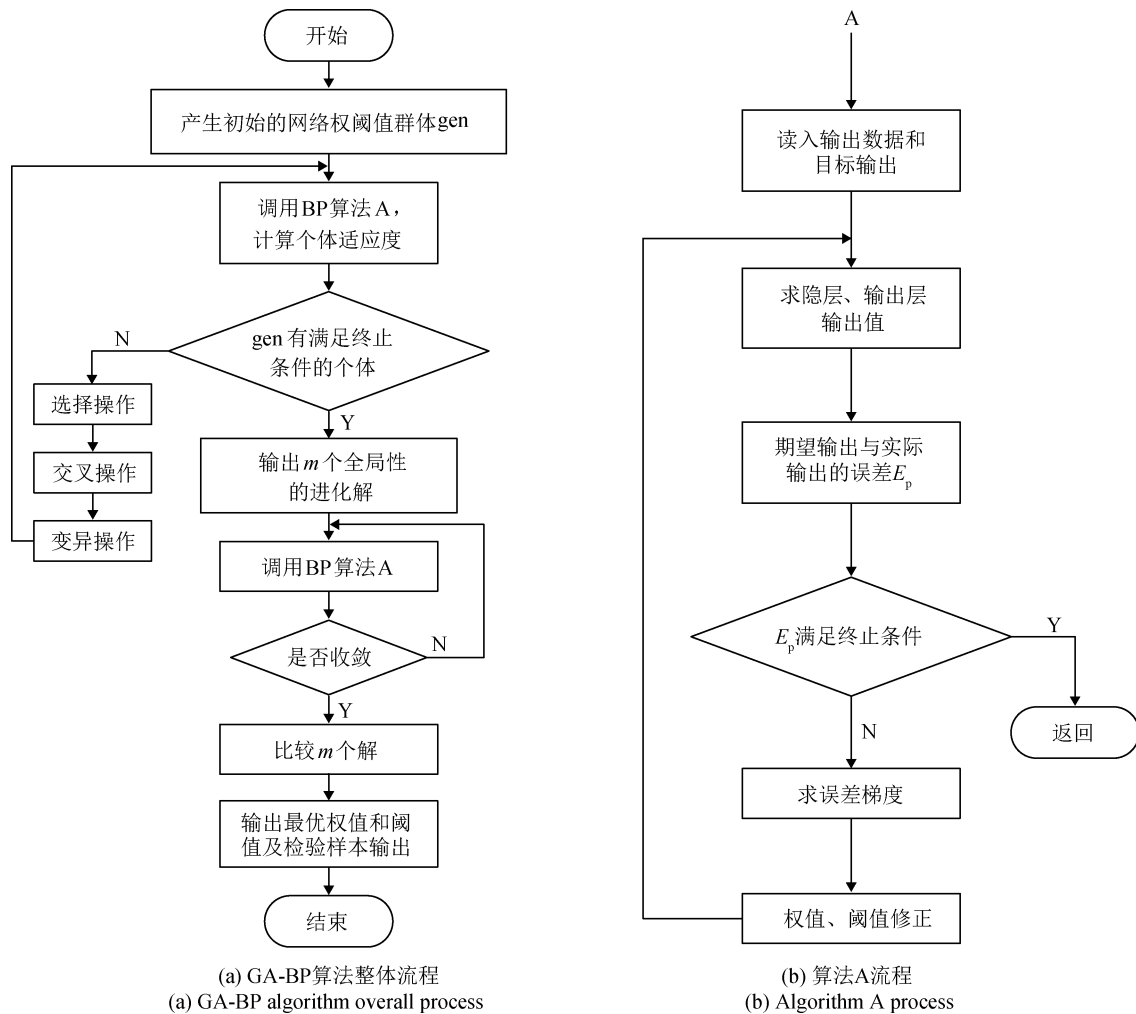


图8 GA-BP流程图^[56]

Fig.8 Flow chart of GA-BP^[56]

隐藏层到输出层的计算公式为

$$\begin{cases} a_2 = \mathbf{W}_2 z_1 + b_2 \\ z_2 = \sigma(a_2) \end{cases} \quad (11)$$

式中： \mathbf{W}_2 为输入层到隐藏层的权重矩阵， b_2 为偏置项， z_2 为输出层的输入。

输出层的计算公式为

$$y = \sigma(\mathbf{W}_3 z_2 + b_3) \quad (12)$$

式中： y 为网络的预测输出， \mathbf{W}_3 为输入层到隐藏层的权重矩阵， b_3 为偏置项。

尽管机器学习方法能够降低假设光谱发射率模型产生的误差，但其有效性依赖于初始阶段的大量样本数据收集与训练，这导致训练过程耗时较长^[58]。邢键提出了一个基于发射率偏差约束的二次测量算法和一个优化的二次测量迭代截止条件算法，如式(13)、式(14)所示，这两种算法通

$$\ln\left(\frac{V_{2i}}{V_{1i}}\right) - \frac{C_1}{\lambda_i T_1} + \frac{C_2}{\lambda_i T_2} = \beta_0(T_2 - T_1) + \beta_1(T_2 - T_1)\lambda_i + \beta_2(T_2 - T_1)\lambda_i^2 \quad (16)$$

式中： V_{1i} 、 V_{2i} 分别为温度 T_1 、 T_2 时第 i 个通道的输出信号， β_0 、 β_1 、 β_2 为需要通过最小二乘法求解的系数， λ_1 、 λ_i 分别为第1和第 i 个通道对应的波长。

王天在学位论文中针对假设的发射率模型普适性差的问题，利用参考温度模型，将真温求解问题转化为非线性优化问题，提出了模拟退火算法(Simulated Annealing, SA)和Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno(BFGS)算法相结合的SA-BFGS真温反演算法，并在此算法的基础上进行了改进(Improved)，得到IMP-SA-BFGS算法。他采用一种改进的弱Wolfe-Powell(MWPP)线搜索法获得最佳步长，如式(17)所示，提高算法的运算速度和计算精度，如图9所示^[61]。尽管如此，这些方法仍然建立在发射率模型与温度关系的特定假设之上。

$$\alpha_{k+1} = \frac{\alpha_k}{1 + \alpha_k [(f(k) - f_{opt}) / 3\sigma\alpha_k] \ln(1 + \delta)} \quad (17)$$

式中： α_{k+1} 为根据当前步长和迭代点的信息计算出的下一个迭代点步长， α_k 为当前迭代步长， $f(k)$ 为当前迭代点的目标函数值， f_{opt} 为目标函数值的标准差， δ 为预定给定的小正数， σ 为调整步长的参数。

图9(a)为6种材料反演温度及其相对误差，该数据由BFGS算法、SA-BFGS算法和IMP-SA-BFGS算法得出，以柱状图形式呈现。IMP-SA-BFGS算

过获取发射率和温度偏差的关系曲线，实现了快速发射率追踪，显著缩短了计算时间^[59]。

$$\varepsilon_i^2 = \varepsilon_i^1 [1 + k(T_2 - T_1)] \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^n [T_i^l - E(T_l)]^2 < F \quad (14)$$

$$E(T_l) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i^l \quad (15)$$

式中： ε_i^1 为波长 λ_i 、温度 T_1 的光谱发射率， ε_i^2 为波长 λ_i 、温度 T_2 的光谱发射率， T_1 、 T_2 为两个相邻时刻的温度值， k 为系数， F 为测量误差， T_i^l 为通道 i 的第 l 个目标温度。

祁博文等人结合最小二乘法设计了辐射测温算法，并采用近红外光纤光谱仪对高温炉的辐射进行了测量，最终得出在1 100 ~ 1 600 nm该算法的误差不高于1.60%，具有较高的测量精度和测量速度^[60]。公式为

法的准确性最高，SA-BFGS算法次之，传统BFGS算法反演精度最低。图9(b)展示了计算出反演温度的时间以及6种材料的平均计算时间。相较于其他算法，传统的BFGS算法运行时长最短。IMP-SA-BFGS算法相较SA-BFGS算法在快速性方面具有显著优势，柱状图数据表明其快速性提升达100%。此外，IMP-SA-BFGS算法对于6种不同材料的平均处理时间在1 s以下。综上所述，IMP-SA-BFGS算法的性能表现更优。

3.2.2 非预先假设发射率模型影响及解决措施

发射率不仅会随材料的变化而变化，也会因表面粗糙程度的不同而不同，而且还会受到温度、波长等因素的影响。众多学者开展了基于发射率的模型假设研究。然而，当假设模型与实际情况存在偏差时，会造成较大的温度测量误差。因此，消除目标未知发射率的干扰，减少对发射率模型的依赖，增加测温算法的通用性，是辐射测温技术亟须解决的难题。

2017年，XING J等人将多光谱数据处理难题转化为约束优化问题，提出了一种基于梯度投影(Gradient Projection, GP)和内罚函数(Interior Penalty Function, IPF)的多光谱辐射测温技术^[62]。之后该课题组对所提出的方法进行了改进，改进后的公式如式(18)所示，提高了计算的速度和准

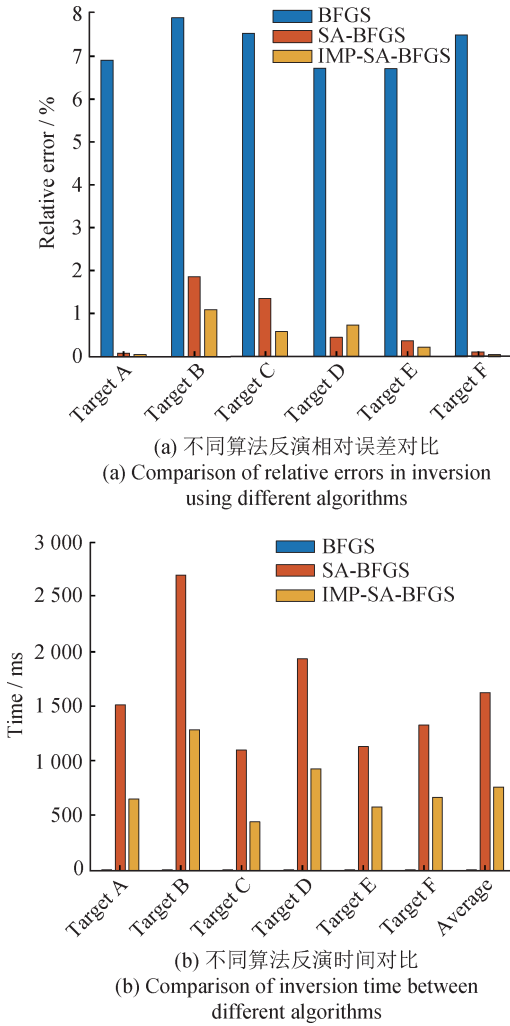


图9 6种发射率模型下不同算法对比^[61]
Fig.9 Comparison of different algorithms under 6 emissivity models^[61]

确性。虽然改进后的方法对发射率模型的依赖有所减少，但是，仍然需要初步获得被测物体在一定温度下的近似光谱发射率范围，这在现实条件下是不容易实现的。

$$\begin{cases} B(\lambda) = \frac{1}{\sigma T^4} \int_{\lambda} E(T, \lambda) d_{\lambda} \\ J(T) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (B_{\text{obs}}(i) - B_{\text{calc}}(i))^2 \\ f(T) \leq c \end{cases} \quad (18)$$

式中： $B(\lambda)$ 为波长 λ 处的亮度温度， σ 为斯特潘-玻尔兹曼常数， T 为物体的真实温度， $E(T, \lambda)$ 为与温度有关的发射率， $J(T)$ 为温度有关的目标函数

$$\begin{cases} \vec{v}_i(t+1) = w\vec{v}_i(t) + C_1 r_1 (\vec{p}_{\text{best},i}(t) - \vec{x}_i(t)) + C_2 r_2 (\vec{g}_{\text{best}}(t) - \vec{x}_i(t)) \\ \vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \end{cases} \quad (19)$$

数， B_{obs} 为观察到的亮度温度， B_{calc} 为通过模型计算得到的亮度温度， i 为信号通道， $f(T)$ 为某种物理约束函数(如发射率非负性)， c 为约束常数。

近年来，一些研究者提出了不需要假设光谱发射率模型，也不需要样本数据的辐射测温方法。2020年，张伟以普朗克辐射定律为基础，建立参考温度的数学模型，提出梯度下降法和迭代算法两种优化方法对数据进行处理，如图10所示，其中， T_i 为温度， ε_i 为波长 λ_i 、温度 T_i 时的发射率， T_i^l 为第 l 个温度。仿真实验表明，通过优化算法可以找到满足条件的发射率，求解出的目标温度和真温之间的误差在20 K以内^[63]。

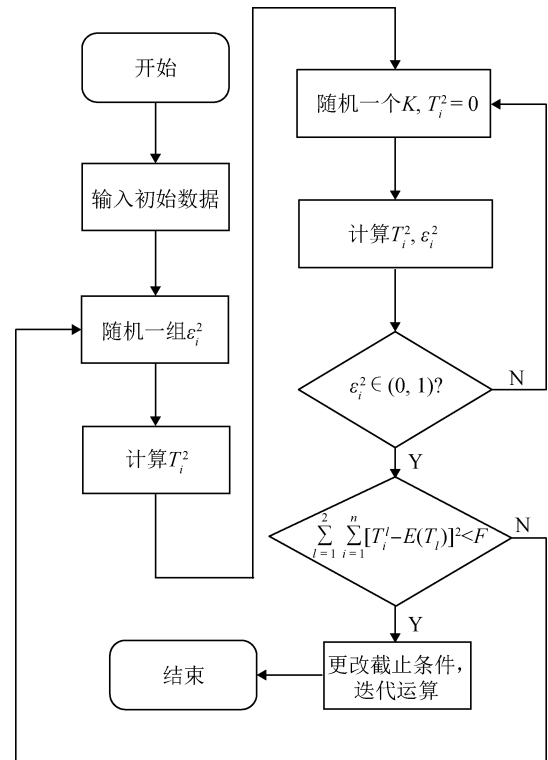


图10 算法系统流程图^[63]

Fig.10 Algorithm system flowchart^[63]

2023年，高伟玲等人在建立发射率模型时，考虑了模型与实际情况之间的偏差可能导致的测温误差，研究了如何减少这种偏差对测温结果的影响，提出基于改进的粒子群算法，计算公式如式(19)所示，并利用HPSOGA算法不断地进化、迭代操作^[64]，如图11所示。

式中： $\vec{v}_i(t+1)$ 为更新的速度， $\vec{x}_i(t+1)$ 为更新的位置， t 为时间， $\vec{v}_i(t)$ 为粒子 i 在时刻 t 的速度， $\vec{x}_i(t)$ 为粒子 i 在时刻 t 的位置， $\vec{p}_{best, i}(t)$ 为粒子的历史最佳位置， $\vec{g}_{best}(t)$ 为全局最佳位置， w 为惯性权重， r_1 、 r_2 为随机常数。

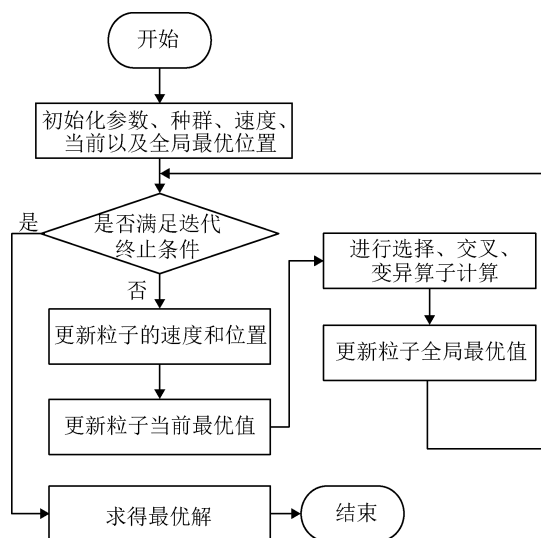


图 11 HPSOGA 混合算法流程图^[64]

Fig.11 HPSOGA hybrid algorithm flow chart^[64]

郭会鸽于 2021 年在不假设发射率模型的情况下，将多光谱测温数据处理问题转化为求解最优化问题，如式(20)所示，分别使用拟牛顿法中的 BFGS 算法、DFP 算法和 Broyden 算法进行仿真实验，自动地识别出不同变化趋势的发射率，有效地解决了未知且多变的光谱发射率问题^[65]。

$$\begin{cases} \frac{V_i}{V_i'} = \varepsilon(\lambda_i, T) e^{-\frac{C_2}{\lambda_i T}} \\ \min = \sum_{i=1}^n [T_i - E(T_i)]^2 \rightarrow 0 \\ 0 \leq \varepsilon(\lambda_i, T) \leq 1 \end{cases} \quad (20)$$

式中： V_i 为第 i 个通道的输出信号， V_i' 为参考黑体在参考温度 T' 下的输出信号， $\varepsilon(\lambda_i, T)$ 为温度 T 的发射率， λ_i 为通道的有效波长。

邢小玉于 2023 年提出了一种非事先假设光谱发射率模型的多光谱辐射测温算法，如图 12 所示^[66]，其中， i 为波长数量， T_f 为真实温度。该方法利用高温金属材料在窄波段内光谱发射率变化较为平缓的特性，以光谱仪输出的相对光谱辐射强度为计算数据，通过比较窄谱带窗口内、归一化后的相对光谱强度曲线与不同温度下的黑体相

对光谱强度曲线的相似度，获取相似度最高的黑体相对光谱强度曲线，该黑体相对光谱强度曲线所对应的温度即为被测对象的测量温度。根据获得的温度信息进行光谱发射率的计算，实现被测对象的光谱发射率与温度的同时测量。

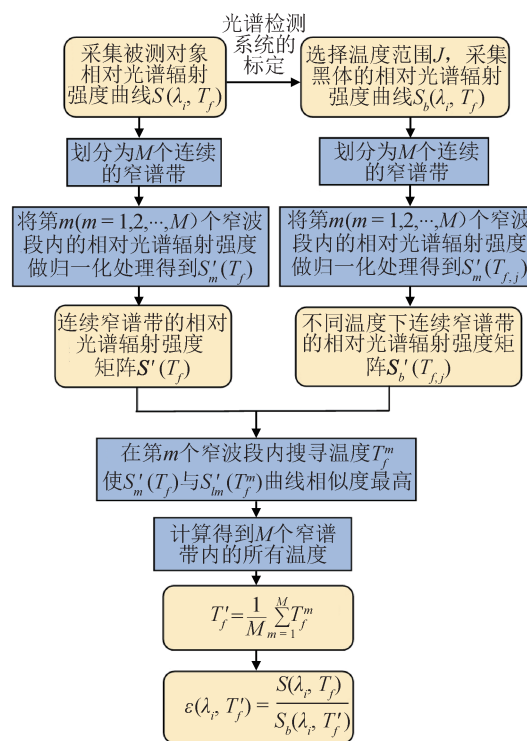


图 12 非事先假设光谱发射率模型的多光谱辐射测温算法流程图^[66]

Fig.12 Flowchart of multi spectral radiation temperature measurement algorithm based on non pre-assumed spectral emissivity model^[66]

现有的发射率模型和无发射率模型的方法通常基于经验公式，在极端温度或非典型表面条件下的测量误差较大。未来可利用机器学习和数据驱动方法，如支持向量机(Support Vector Machine, SVM)、随机森林等，适应不同工况下的变化，并提供自适应的发射率估计。

3.3 光学系统设计的影响

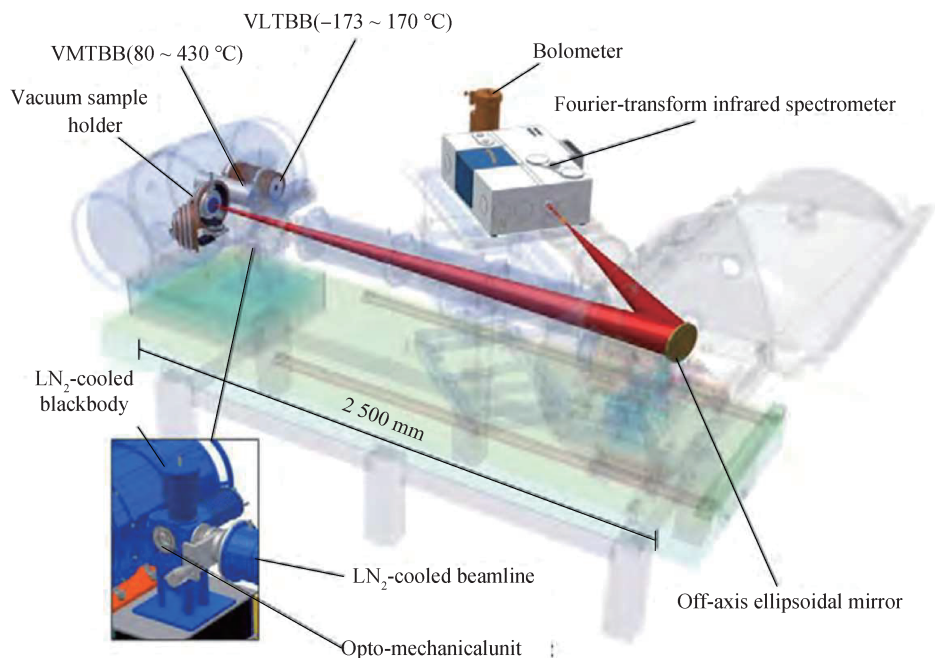
在辐射测温领域，光学系统的设计直接影响测量的准确性。精确的光学设计可以优化传感器的视场、焦距和光谱响应，确保能够准确捕捉目标物体的辐射，同时减少外界干扰影响。并且，选择合适的光学材料和涂层可以降低反射和吸收损失，提升系统对不同温度和材质表面的灵敏度，

从而提高测温结果的可靠性和准确性。因此，合理的光学系统设计对实现发动机涡轮叶片的高精度辐射测温至关重要。

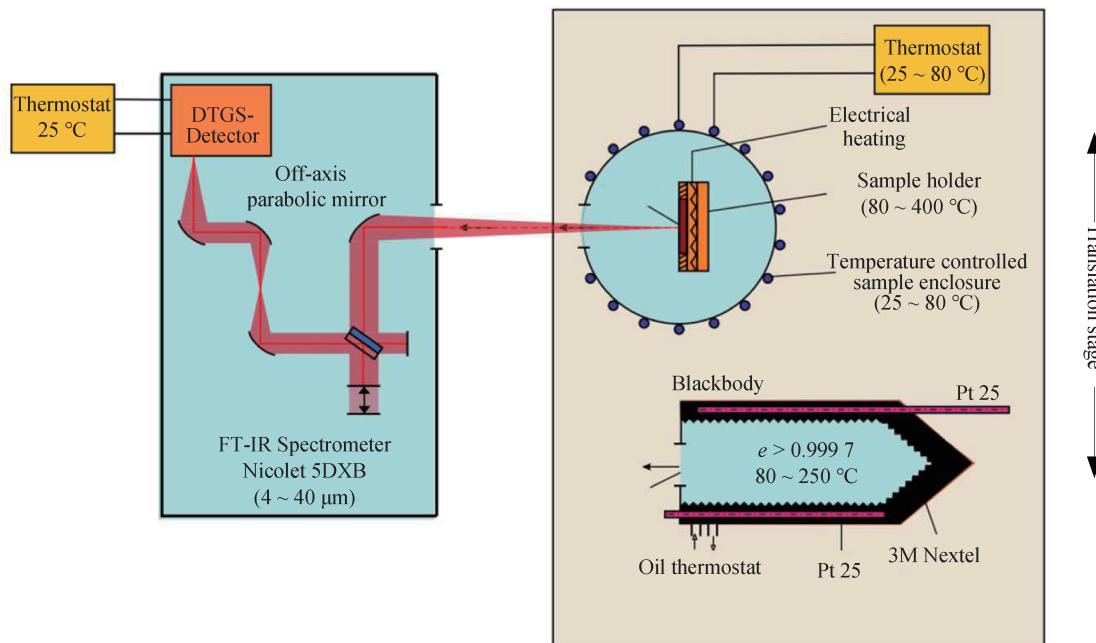
3.3.1 光学装置的发展及影响

如图 13 所示，柏林的德国物理技术研究所

(Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) 目前通过两种装置来确定材料的发射率——用于真空下测量的减少背景校准设施(Low Background Calibration Device, LBCD)和空气中发射率测量设施(Air Emissivity Measurement Facility, AEMF)^[67-68]。



(a) 低背景校准装置^[67]
(a) Low background calibration device^[67]



(b) 空气中发射率测量设施^[68]
(b) Air emissivity measurement facility^[68]

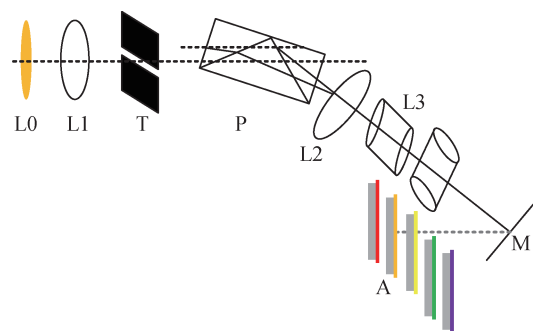
图 13 装置示意图

Fig.13 Device schematic diagram

用于测量不透明材料光谱发射率的设备已经扩展了应用范围,目前也能测量半透明材料的光谱发射率,例如天然聚四氟乙烯箔和纤维增强塑料复合材料,且这些设备提供的测量结果具有0.005的不确定度^[69-71]。巴斯克大学(University of the Basque Country / Euskal Herriko Unibertsitatea, UPV / EHU)的研究小组利用HAIRL(High Accuracy InfraRed, Leioa)发射仪升级实验装置,升级后的装置测量不确定度在2.09%以内^[72]。奥尔兰的MENEXES D D S等人基于CO₂激光器测量了2310 K以下材料的发射率^[73-74],斯图加特大学核技术与能源系统研究所(Institute for Nuclear Technology and Energy Systems, IKE)基于热电微传感器和带通滤波器在1600 °C下测量了1.3 ~ 8.3 μm范围内涂层材料的光谱和总发射率^[75]。中国计量科学研究院(National Institute of Metrology, NIM)利用傅里叶变换红外光谱仪建立了基于集成黑体原理的红外光谱发射率测量装置,研究了源尺寸效应、光谱响应度线性等非理想因素对基于集成黑体原理的红外光谱发射率测量的影响^[76-77]。其他研究机构,例如国家标准技术研究院(National Institute of Standards and Technology, NIST)、国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL)、中国空气动力研究与发展中心(China Aerodynamics Research and Development Center, HAI)超高速空气动力研究所和哈尔滨工业大学(Harbin Institute of Technology, HIT)等,也为直接发射率测量技术的发展做出了很大贡献^[78-80]。

研发小型化、便携式的发射率测量设备有助于提高测试灵活性,满足工业应用中的实际需求。2017年,陈昱卓设计了一种简单、便捷的非接触测温装置,通过对辐射温度计进行相应设计,削减光学元件的数量,之后使用TracePro软件对装置进行模拟,并对光学系统设计的可信性进行验证,极大地提高了设计的测温装置的可信度^[81]。2018年,TERADA D等人利用由辐射温度计、可多次反射光的圆柱腔和可获得镜面反射参数的激光器组成的测温系统,同时测量具有任意表面不规则性的样品的温度和发射率^[82]。2019年,王磊结合锻造金属的性质与辐射测温理论,设计了一款比色测温仪,该测温仪具有体积小、响应时间短、精度高和功耗低等优点^[83]。2020年,李志彬选择

FTIR光谱仪作为测量仪器,进行黑体辐射特性测量方法研究,实验结果表明,基于FTIR的黑体辐射特性测量系统与标准辐射温度计测量结果相对偏差为0.26%,验证了基于FTIR的黑体辐射特性测量方法的准确性,其测量不确定度优于 2.01×10^{-3} ^[84]。2021年,郑凯丰对光学系统进行了整体分析,确定了前置聚光镜的调焦设计方案和热效应的消除方法,对物面离焦量与探测器接收能量的变化关系进行了分析,然后对三波段辐射测温光学系统进行了设计,采用ASAP软件对三波段辐射测温光学系统的光线传输进行了仿真分析^[85]。张南楠等人利用ZEMAX光学设计软件,基于S4111-16Q光电探测器阵列进行反向光学系统设计,搭建了多光谱线温高温计光学系统,如图14所示^[86],经过狭缝后的辐射,在通过棱镜分光之后,会通过L1、L2透镜,但由于透镜产生了球差,需要通过正交柱状透镜组来校正。经正交柱状透镜组后弯曲光线变直,经反射镜进入光电探测器阵列,线表面辐射信息完全进入探测器,减少远轴辐射产生的像差,实现线温各点与探测器单元阵列的精确匹配,准确测量探测器对应各点的温度。



注: L0为被测物体; L1为物镜; T为狭缝(对准待测线); P为组合分光棱镜; L2为透镜; L3为正交柱状透镜组; M为反射镜; A为线阵探测器阵列。

图14 高温计光路设计图^[86]

Fig.14 Design diagram of pyrometer optical path^[86]

3.3.2 光学材料和涂层的发展及影响

随着纳米技术和新材料的不断发展,研究者也在探索新型光学材料和涂层的应用,以进一步降低系统的反射和吸收损失。新材料的引入将提升测量系统的灵敏度,并扩大其应用范围,实现极小物体及极端环境下的温度测量。

1997年, ALLISON S W 和 GILLIES G T 对热像

磷光测温技术的研究发展进行综述,该技术是一种非接触式的光学测温技术,具有时间分辨率高、受环境干扰影响小、可以实现温度面分布测量等优势^[87]。基于热像磷光测温技术,英国团队首次提出“智能热障涂层”的概念,将稀土元素掺杂到热障涂层的材料中,制备具有测温能力的热障传感涂层,兼具热防护和在线温度检测功能^[88]。FEIST J P等人利用某些磷光材料在高温下,其磷光性能发生不可逆的转变的特性,将其制备成热历史涂层实现离线测温功能,例如 $Y_2O_3:Sr$ 制备的涂层测温范围为 $627 \sim 1152\text{ }^\circ\text{C}$,测温误差不超过 $\pm 1\%$ ^[89]。COPIN E等人采用浸涂溶胶-凝胶法成功制备了 Eu^{3+} 、 Er^{3+} 和 Dy^{3+} 掺杂层分布的热障传感涂层,用于热梯度测温,研究表明, $Eu-Er-Dy$ 组合掺杂氧化钇稳定氧化锆(YSZ)基体可以表现出最强的发光强度,且发射峰分别处于不同波段,发射光谱互不干扰,可实现不同位置温度检测^[90]。DHOMNE S等人研究了热障涂层对发动机的影响,发现燃烧过程中产生的大部分热量被活塞和燃烧室壁面吸收,降低了内燃机的性能,他们提出在YSZ中加入一定量的 Al_2O_3 ,以提高YSZ的硬度和结合强度,增加涂层的热循环寿命^[91]。目前,美国及欧洲多国的研究人员已在发动机高温部件上成功制备了智能型热障涂层,旨在对其实际工况下的温度监测潜力进行深入验证,如图15所示^[92]。

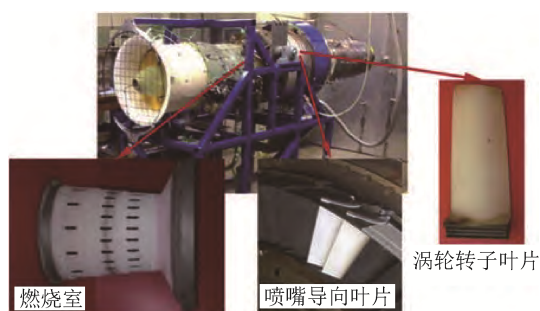


图15 发动机热端部件示意图^[92]

Fig.15 Schematic diagram of engine hot end components^[92]

近年来,中国研究人员也开展了光学材料和涂层的研究。刘郑红等人制备了含Eu掺杂的氧化钇部分稳定氧化锆(YSZ:Eu)表层、YSZ中间层与Dy掺杂YSZ(YSZ:Dy)底层的磷光传感热障涂层,实验结果表明,在不同温度下,该涂层对发动机

涡轮叶片的测量效果较好^[93]。冀晓鹏等人采用第一原理方法计算研究了添加稀土元素对YSZ晶格畸变的影响,结果表明在一定范围内,添加共价半径越大的稀土元素,引起的晶格膨胀畸变越大,材料的热扩散系数越小^[94]。王晟等人开发了一种温度范围可从室温到800 K的双色热敏磷光涂层材料,该发光材料受激辐射的发光光谱的2个发射峰光强在不同温度下呈现不同的衰减趋势,研究表明:双色热敏磷光涂层测温技术能够实现物体表面温度的定量测量,对于测试技术的发展具有重要推动作用^[95]。苟学科以高温环境常用的钛合金材料作为研究对象,分别使用硅酸盐、磷酸盐、铝酸盐、锆盐作为主要电解液成分并加入 ZrO_2 粒子,初步探究了使用微弧氧化工艺在钛合金表面制备稳定高发射率涂层的可行性^[96]。杜明润等人采用简单的固相反应方法合成了高熵 $(La_{0.2}Dy_{0.2}Er_{0.2}Yb_{0.2}Y_{0.2})_2Zr_2O_7$ 氧化物(RZHEO-1600),并研究了其光学压力传感应用前景,与YSZ和单组分锆酸盐相比,RZHEO-1600在 $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 时表现出优异的热稳定性^[97]。

光学系统的设计优化是提高辐射测温精度的关键。未来可以探索采用新型光学材料(如光子晶体或超材料),设计具有更高光谱选择性和抗环境干扰能力的光学系统。此外,可使用自适应光学元件(如变形镜)动态调整光束的形状和方向,以适应不断变化的测量环境。

3.4 数据处理误差的影响

在传统的辐射测温中,数据处理误差主要源于传感器校准、发射率不一致及环境干扰等因素。随着多光谱辐射测温技术的发展,这些误差的处理方法也在不断演变。多光谱技术通过采集不同波长的辐射信息,可以更准确地估算物体的温度和发射率,从而减少因单一波长测量带来的误差。此外,多光谱数据处理利用先进的算法和模型,综合考虑多种影响因素,提升温度测量的准确性和可靠性,为高温环境下的涡轮发动机叶片精准监测提供了更强的技术支撑。

3.4.1 基于神经网络的多光谱辐射测温数据处理误差及解决措施

使用神经网络有利有弊。神经网络的主要优势包括学习和适应新数据的能力,处理大量数据和数据内部复杂关系的能力,以及对新的、未见

过的数据进行预测的能力^[98-103]。神经网络在功能映射和模式识别方面具有很大优势，理论上，只要有足够的输入数据样本和适当的参数选择，神经网络就可以以任意精度逼近任意函数。使用神经网络的缺点是，与更“经典”的机器学习方法相比，他们更难解释；此外，神经网络的训练需要大量的标记数据，而这些标记数据的获取既耗时又耗费资源^[104-108]。

在多光谱辐射测温中引入神经网络可以解决物体发射率复杂多变、无法用精确数学函数表示的问题。神经网络的引入消除了人为假设的射速基函数的影响，通过对被测目标采集的数据进行

非线性映射，得到较好的发射率模型^[109-111]。

1998年，为了解决多光谱测温非线性系统的数据处理问题，孙晓刚等人首次将神经网络中的BP模型引入多光谱辐射测温领域^[112]。BP神经网络是一种多层前馈神经网络，通过反向传播算法来训练网络。如果前向输出不满足期望，则通过反向传播误差来校正隐藏层的权值，使网络的输出更接近期望值。孙晓刚等人通过神经网络BP模型处理多波长数据，最终得出训练样本集越大，数据模型的准确率越高的结论。之后，哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学等研究机构先后对BP神经网络进行了改进，如表2所示^[113-121]。

表2 其他网络结构在多光谱辐射测温中的应用

Tab.2 Application of other network structures in multispectral radiation temperature measurement

年份	方法模型	机构	作者	结论
2001	RBF网络	哈尔滨工业大学	丛大成等人	通过多种发射训练样本模型进行验证，可以自动辨识被测目标的发射率模型。在温度为1 816 ~ 1 954 K的情况下，发射率测量准确度高达81% ^[113] 。
2007	GA-BP	哈尔滨工业大学	孙晓刚等人	GA-BP网络比BP网络更好地逼近了函数，已训练样本的误差不超过±5 K，未训练样本的误差不超过±10 K ^[114] 。
2017	Levenberg-Marquard法对神经网络进行改进	哈尔滨工业大学	郑凯	构造了适用于温度反演问题的BP网络，与传统的测温方法相比，反演结果误差小于30 K，相对误差小于3%，计算时间小于0.4 s ^[115] 。
2022	广义逆-长短期记忆 (Generalized Inverse-Long Short-Term Memory, GIM-LSTM)神经网络	东北林业大学	邢键等人	与GIM-EPF和BP方法相比，不添加噪声时，准确度达到60%，添加5%的噪声时，相对误差小于GIM-EPF和BP方法的53%，并且计算效率比传统方法高出约30倍 ^[116] 。
2022	一维卷积神经网络	哈尔滨工业大学	侯维	与BP网络对比，温度预测误差在10%以内，有效改善了由于其他物质吸收和散射现象的存在，辐射能量发生衰减，导致测量系统接收的能量信号受损，使得测温精度大幅降低的问题 ^[117] 。
2023	LSTM-MLP网络	哈尔滨工程大学	贺依伟	预训练的网络判断信息点的能力达到99.6%，在滤除噪声的基础上减少了信息损失 ^[118] 。
2023	广义逆-循环神经网络 (Generalized Inverse-Recurrent Neural Network, GIM-RNN)网络	东北林业大学	闫鹏禹	GIM-RNN算法的数据集处理结果与黑体炉实验数据理论值之间的平均误差小于2.0%，反映了良好的反演精度 ^[119] 。
2023	Alpha谱-LM	哈尔滨工程大学	张先岐	在高温环境下，最大温度测量偏差达到7.8 K，而平均温度测量偏差则稳定在2.7 K ^[120] 。
2024	深度学习	哈尔滨工业大学	王瑄等人	构建含有注意力模块的双支路网络模型，如图16所示。针对测试数据集，温度场的平均相对偏差降低至0.64%，与同用均方差损失函数训练的全连接网络模型相比优化了8.8%。同时，与基于卷积神经网络的模型相比，改进幅度达到了3.7% ^[121] 。

由表2可知,在多光谱辐射温度测量技术中,神经网络的应用可分为两大类——作为光谱发射率的分类工具和作为温度等参数的回归预测工具。神经网络用于分类和识别不同的光谱发射率模式时,可通过学习大量的光谱数据,自动辨识不同的发射率特性。神经网络作为温度等参数的回归预测工具时,能够处理多光谱数据,提供高精度的温度预测。表3为这两大类应用的优缺点总结。

3.4.2 基于约束优化理论的多光谱辐射测温数据处理误差及解决措施

2013—2023年,邢键等人尝试了不同的迭代

方法来优化发动机叶片多光谱数学模型建立的目标方程的解,如表4所示^[122-126]。

梯度投影、外点罚函数和广义逆-坐标轮换算法等约束优化方法的实现依赖于合适的初始发射率解,需要人为预设发射率搜索范围,如果搜索范围和初始解选择不当,会降低算法的精度。针对这一问题,2020年,WANG N等人以发射率-波长曲线作为约束,采用遗传算法作为参数优化的工具,研究结果表明,温度反演的相对误差小于1%,发射率反演的相对误差小于10%^[127]。2021年,李东基于多宇宙平行量子遗传算法,通过设

表3 辐射温度测量技术中神经网络的不同应用优缺点

Tab.3 Advantages and disadvantages of different applications of neural networks in radiation temperature measurement technology

应用分类	优点	缺点	拟解决措施
光谱发射率分类工具	<ol style="list-style-type: none"> 1. 自动化处理:能够自动从复杂数据中提取发射率特征,无需人工干预。 2. 泛化能力:经过适当训练的网络对未知样本具有很好的泛化能力。 3. 处理复杂性:适合处理高光谱数据中的非线性和复杂关系。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 数据依赖:需要大量标记数据进行训练,获取这些数据耗时长且成本高。 2. 过拟合风险:利用有限数据训练的模型对未知数据的泛化能力有限。 3. 计算成本:训练复杂的神经网络模型需要较高的计算资源。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 数据预处理:在神经网络应用之前,进行适当的数据预处理,如归一化、去噪,可以提高模型性能。 2. 模型选择:根据具体任务选择合适的神经网络模型,如CNN用于提取空间特征,LSTM用于处理时间序列数据。 3. 正则化技术:使用Dropout、正则化等技术,以减少过拟合的风险。
温度等参数回归预测工具	<ol style="list-style-type: none"> 1. 高精度:可以对温度等参数进行精确预测,尤其是在处理复杂模式时。 2. 非线性拟合:擅长捕捉数据中的非线性关系,适用于温度测量。 3. 实时更新:模型可以实时更新,快速响应环境或设备状态的变化。 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 过拟合风险:在只有少量数据或数据维度很高时,可能发生过拟合。 2. 超参数调整:需要仔细选择和调整网络结构、学习率等超参数,这通常需要大量实验。 3. 模型解释性:深度神经网络通常被认为是“黑箱”模型,决策过程缺乏透明度。 	<ol style="list-style-type: none"> 4. 模型验证:使用交叉验证等方法对模型进行严格的验证,确保其泛化能力。 5. 解释性工具:考虑使用模型解释性工具,如特征可视化、注意力机制,以提高模型的可解释性。

表4 不同的迭代方法

Tab.4 Different iterative methods

年份	方法	结论
2013	基于温度二次测量方法的迭代递推算法	新的迭代重建算法在没有噪声干扰的情况下,温度计算结果的绝对误差小于20 K;同时,发射率趋势也能与假设模型的发射率趋势较好吻合,平均计算时间小于0.6 s。
2017	多光谱真温反演算法	与传统的二次测量法相比,新算法无需设定温度初值范围,在保证反演精度的前提下,运算效率提高60%以上。
2018	梯度投影法	反演结果误差小于20 K,发射率反演结果的趋势与模型吻合,开辟了多光谱辐射测温新的研究思路。
2020	外点罚函数	多光谱辐射测温的最大绝对误差为35.7 K,最大相对误差为3.2%。
2023	广义逆-坐标轮换算法	在真温1 800 K的情况下,绝对误差和相对误差均小于5.0%,与梯度投影法相比运算效率平均提高了202倍。

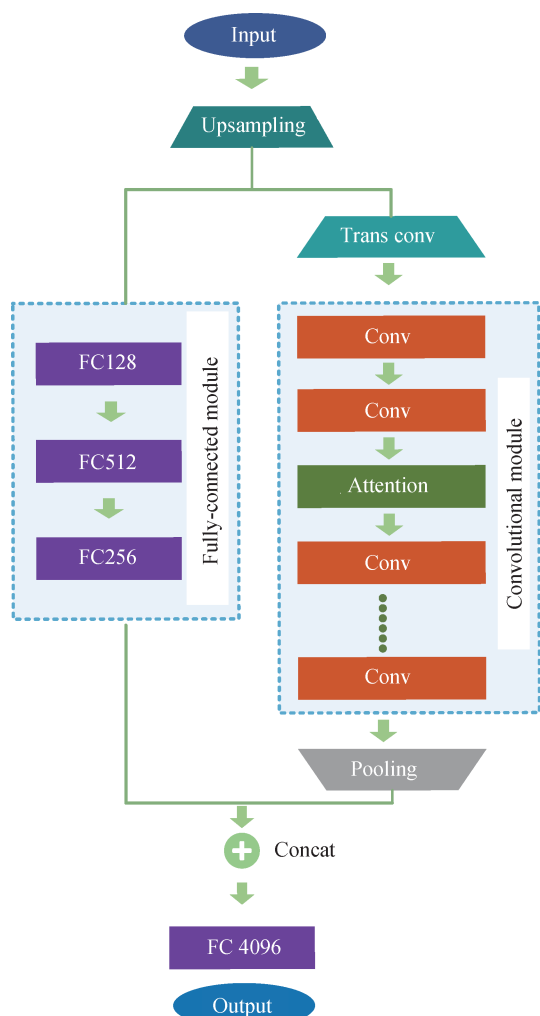


图 16 含有注意力模块的双支路网络模型结构^[121]

Fig.16 Structure of dual branch network model with attention module^[121]

置多个宇宙，扩大解的搜索范围，有效降低了多光谱测温误差；为了提高算法收敛效率，设置动态调整的量子旋转角，并通过判断量子收敛情况作为循环跳出的条件^[128]。2024年，ZHANG K等人通过输入不同波长的发射率值生成温度矩阵，在温度矩阵中选择一行作为参考向量，并对其他波长的温度矩阵进行重新排列，目标函数为重新排列后的温度矩阵各列元素与参考向量之间的欧氏距离，最终得到目标的真实温度^[129]。GAO S等人构建 Alpha 光谱模型，建立发射率形状约束，然后采用改进的 Lichtenberg 算法进行求解，反演精度显著提高，如图 17 所示^[130]。

数据处理是辐射测温中的一个关键环节。未来可利用更为先进的算法(如基于深度学习的递归

神经网络或长短期记忆网络)处理时间序列数据，并预测短期的温度波动。此外，可以研究基于压缩感知的理论以减少数据的采样率，同时保持测量精度。

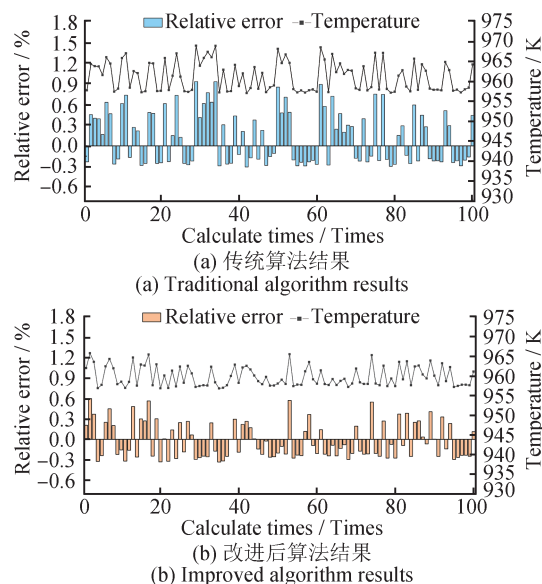


图 17 计算精度对比^[130]

Fig.17 Comparison of calculation accuracy^[130]

4 结论

辐射测温是在辐射理论的基础上发展而来的一种测温方法，具有非接触式、测温范围宽、响应时间快等特点，可应用于航空航天、工业锻压等高温恶劣工况下的目标温度监测。本文对近年来发动机涡轮叶片辐射测温技术研究情况进行了全面回顾，综述了辐射测温技术的基本原理、研究现状、关键问题，以及可能的解决方案，包括：①通过建立准确的反射模型和融合算法，可以有效矫正由环境辐射引起的误差；②将预先建立的发射率模型和无发射率模型与机器学习算法结合，可以提高测温的精准度；③选择合适的光学材料和涂层，可以增强系统在不同环境下的灵敏度；④基于神经网络、遗传算法、约束优化等方法，可以减小误差，提高计算精度。

随着测量设备的发展和测温原理的完善，发动机涡轮叶片辐射测温技术水平不断提高。相关研究人员致力于降低辐射测温误差，对发动机技术的发展起到了重要推动作用。主要结论如下：

1) 燃烧气体方面

在辐射测温过程中,未来可采用先进的传感器技术和光谱分析方法,提升燃烧气体成分和温度的实时监测精度;利用机器学习和人工智能算法进行数据分析与建模,动态优化测温系统,准确反映燃烧气体的变化;开发新型的辐射模型和算法,更准确地量化燃烧气体的吸收和散射效应,从而提高辐射测温的准确性与可靠性。此外,将多种测温技术(如光学和热电技术)相结合以实现互补,能够进一步增强系统对复杂燃烧环境的适应能力,在高温高压条件下获得更为精准的温度数据。

2) 环境表面辐射方面

未来将通过精确建模和补偿技术的结合降低环境表面辐射的影响。建立更复杂的辐射传输模型,全面考虑环境光源、表面材质和温度变化对辐射测量的影响;利用先进的传感器技术和数据融合算法,实时校正环境背景辐射的干扰,提高测温系统的准确性;结合机器学习与人工智能,动态调整测量参数和算法,以适应多变的环境条件,从而确保在各种复杂场景下获得可靠的温度数据。

3) 发射率模型方面

预先建立发射率模型的发展方向:利用机器学习、人工智能和数据驱动方法实时估计和校正发射率,以应对复杂和动态的测量环境。

无发射率模型的发展方向:利用自动化的特征提取和智能算法实时估计和校正发射率,实现对不同材料和表面状况的精确建模。

4) 光学系统设计方面

未来将开发更加灵活和智能的光学系统,结合先进的算法和传感器技术,利用人工智能和机器学习对发射率进行实时建模和校正,以适应多变的测量环境。同时,探索应用新型光学材料和涂层,以进一步降低系统的反射和吸收损失,提升系统对不同温度和材质表面的灵敏度。

5) 数据处理方面

每种数据处理方法都有其优点,不能将反演温度的精度作为唯一的标准。在温度监测场景中,需要快速获取温度信息,因此可以考虑在精度范围符合要求的前提下缩短反演时间。如果需要准

确的温度信息,且对测温实时性要求不高,可以利用辐射测温仪采集不同波段的响应,然后结合辐射测温中的高精度数据处理方法,计算温度和发射率。当被测目标的光谱特性非常复杂,无法建模时,可以考虑采用不含发射率模型的方法求解温度和发射率。综上所述,需要从反演时间、反演精度、建模复杂度等多个维度对辐射测温算法进行评价,针对不同的测温场景选择不同的算法。未来将探索兼具高反演精度、高反演速度且建模简便化的数据处理技术。

参考文献

- [1] 路宗敏,陈卓,尹星. 荧光光纤测温技术及应用[J]. 中国检验检测, 2024, 32(1): 24-27.
LU Z M, CHEN Z, YIN X. Fiber-optic temperature measurement technology and its applications [J]. China Inspection and Testing, 2024, 32(1): 24-27. (in Chinese)
- [2] HAI R, ZE Z, YI N, et al. Review of multispectral radiation thermometry data processing algorithms [J]. Infrared Physics and Technology, 2023, 129: 104573-104581.
- [3] SHAN G, XIANQI Z, LIWEI C, et al. Review: radiation temperature measurement methods for engine turbine blades and environment influence [J]. Infrared Physics and Technology, 2022, 123: 104204-104206.
- [4] 汪家荣,严亦乐,林奕成,等. 基于傅里叶变换光谱验证维恩位移定律[J]. 物理实验, 2024, 44(8): 38-43.
WANG J R, YAN Y L, LIN Y C, et al. Verification of Wien's displacement law based on Fourier transform spectroscopy [J]. Physics Experiment, 2024, 44(8): 38-43. (in Chinese)
- [5] ANURADHA G, DEEPAK J. Some interesting facts about Planck's law of blackbody radiation [J]. The Physics Educator, 2023, 5(4): 2320008-2320009.
- [6] 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/OL]. 激光与光电子学进展. <https://www.opticsjournal.net/Articles/L241681/EarlyPostin>.
SHAO H Y, ZHANG Z L, MA X H, et al. Design and application of a dual-band colorimetric temperature measurement device [J/OL]. Progress in Laser and Photonics. <https://www.opticsjournal.net/Articles/L241681/EarlyPostin>. (in Chinese)
- [7] RIVERA K, GREGORY O. Indium tin oxide as a dual region resistance temperature detector [J]. Measurement: Sensors, 2024, 34: 101265-101265.

- [8] RADWAN A, SUI Y. The influence of microstructure on TCR for inkjet-printed resistive temperature detectors fabricated using AgNO_3 / ethylene-glycol-based inks[J]. *Micromachines*, 2024, 15(6): 749–752.
- [9] 萧鹏, 台泓冰, 向茂林, 等. 基于红外辐射测温法的焊头动态高速真温测量系统研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(3): 836–842.
XIAO P, TAI H B, XIANG M L, et al. Development of a high-speed true temperature measurement system for welding heads based on infrared radiation thermometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(3): 836–842. (in Chinese)
- [10] 洪途, 赵猛, 秦天令, 等. 基于成像光谱的温度场重建[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(7): 1036–1042.
HONG T, ZHAO M, QIN T L, et al. Temperature field reconstruction based on imaging spectroscopy[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(7): 1036–1042. (in Chinese)
- [11] MOECKLY K, GILL C, LING R. Self-generating engine-specific health monitoring model from generic model base: U. S. Patent 11,300,069[P]. 2022–4–12.
- [12] GAO S V. Effects of the geometrical dimensions of applicator antennas for microwave radiothermometry on radio-brightness temperature measurement results[J]. *Biomedical Engineering*, 2023, 57(3): 190–194.
- [13] NELLO K Q. Laboratory evaluation of forehead infrared radiation thermometers (FIRTs) used for core body temperature measurements[J]. *Research on Biomedical Engineering*, 2023, 39(3): 467–478.
- [14] AVIER L D. Geometrical and thermal optimization of cylinder-conical blackbody cavities to uniform radiance temperature profiles in the infrared[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2023: 104684–104689.
- [15] YU V L. Electrodynamics calculation of the electric field of a printed ring antenna for microwave radiothermometry of the breast[J]. *Biomedical Engineering*, 2024, 57(6): 414–417.
- [16] TAKAHIKO O, TAKAHIKO K, SHINO A H, et al. Emissivity-free radiation thermometry based on multivariate analysis of spectral radiance applied to steel-making process[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(9): 89–92.
- [17] KAIFENG Z, JING L, YINGZE Z, et al. Turbine blade three-wavelength radiation temperature measurement method based on reflection error correction[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(9): 3913–3923.
- [18] WEILONG W, LONGFFENG L, KUN Y, et al. Infrared directional spectral emissivity of tungsten-copper alloy in the 400–700 °C temperature range[J]. *International Journal of Thermophysics*, 2024, 45(4): 59–63.
- [19] SUAREZ-GONZALEZ E. Triple spectral area pyrometer: US 19910640758[P]. 1992–06–30.
- [20] 高翔. 飞行器/排气系统红外辐射及电磁散射特性数值研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2016.
GAO X. Numerical study on infrared radiation and electromagnetic scattering characteristics of aircraft/exhaust system[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2016. (in Chinese)
- [21] KERR C, IVEY P. A review of purge air designs for aero-engine-based optical pyrometers[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124(2): 227–234.
- [22] 张志林. 基于多光谱辐射测温的火焰温度场测量技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
ZHANG Z L. Research on flame temperature field measurement technology based on multispectral radiation thermometry[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [23] 于为雄, 戴景民, 王勇. 基于比色测温原理的动态辐射扫描测温仪研制[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(5): 1390–1395.
YU W X, DAI J M, WANG Y. Development of dynamic radiation scanning thermometer based on colorimetric temperature measurement principle[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1390–1395. (in Chinese)
- [24] CHRZANOWSKI K. Non-contact thermometry: measurement errors[M]. SPIE Polish Chapter, 2001.
- [25] 高山. 考虑运行环境影响的燃气轮机涡轮叶片辐射测温方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
GAO S. Research on radiation thermometry method for gas turbine blade considering operating environment impact[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017. (in Chinese)
- [26] MARCO D P, STEFANO F. A methodology to formulate multicomponent fuel surrogates to model flame propagation and ignition delay[J]. *Fuel*, 2020, 279: 118337–118466.
- [27] YANG B, LI W. Hydrogen sulfide measurement of combustion gaseous product using ultraviolet absorption spec-

- troscopy[J]. *Measurement*, 2023, 214: 112766–112774.
- [28] SAUNDERS P. *Radiation thermometry: fundamentals and applications in the petrochemical industry*[M]. SPIE press, 2007.
- [29] FUEL R. New fuel research findings reported from Chongqing University (quantifying the effects of combustion gases' radiation on surface temperature measurements using two-color pyrometry)[J]. *Energy Weekly News*, 2019, 33(4): 3610–3619.
- [30] HUANG Y W, LONG J, CHEN D, et al. Temperature errors in two-color pyrometry simultaneously considering reflection and combustion gas radiation [J]. *Optics Express*, 2021, 29(16): 25084–25099.
- [31] GAO S, WANG L, FENG C, et al. Analyzing the influence of combustion gas on a gas turbine by radiation thermometry[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2015, 73: 184–193.
- [32] 张天宇. 航空发动机涡轮叶片辐射测温修正方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2023.
- ZHANG T Y. Research on radiation temperature correction method for aircraft engine turbine blades [D]. Nanjing: Southeast University, 2023. (in Chinese)
- [33] 胡彬彬, 王臻. 燃气轮机热端部件用高温合金的研究进展[J]. *科技与创新*, 2024 (17): 107–109.
- HU B, WANG Z. Research progress on high-temperature alloys for gas turbine hot end components[J]. *Sci. Technol. Innov.*, 2024 (17): 107–109. (in Chinese)
- [34] ARAUJO A, SILANO S, MARTINS N. Monte Carlo uncertainty simulation of surface emissivity at ambient temperature obtained by dual spectral infrared radiometry[J]. *Infrared Physics and Technology*, 2014, 67: 131–137.
- [35] ZHANG K F. Turbine blade three-wavelength radiation temperature measurement method based on reflection error correction[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11 (9): 3913–3914.
- [36] 张长兴. 一种高光谱面阵探测器坏元检测的方法: CN 201911124456.8[P]. 2021–11–18.
- ZHANG C. X. A method for detecting faulty elements in a hyperspectral detector: CN 201911124456.8 [P]. 2021–11–18. (in Chinese)
- [37] CHEN L W, ZHANG X Q, GAO S, et al. Multi-spectral radiation thermometry based on an Alpha spectrum-LM algorithm under the background of high temperature and intense reflection [J]. *Optics express*, 2022, 30 (20): 36603–36621.
- [38] 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. High-precision infrared radiation thermometry and related research [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023. (in Chinese)
- [39] 翟颖妮, 梁智杰, 孟宪龙, 等. 含端壁涡轮导叶红外测温的误差影响机理研究[J]. *红外与激光工程*, 2024, 53 (1): 109–121.
- ZHAI Y N, LIANG Z J, MENG X L, et al. Study on the error mechanism of infrared thermometry for endwall turbine guide vanes [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2024, 53(1): 109–121. (in Chinese)
- [40] FAPPIANO L, CARACCI E, IANNONE A, et al. Emission rates of particle-bound heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in PM fractions from indoor combustion sources [J]. *Building and Environment*, 2024, 265: 112033–112034.
- [41] FAN F, WANG J, PAN H, et al. Optical-thermal modeling and geographic analysis of dusty radiative cooling surfaces [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 205: 114878–114879.
- [42] WANG Y, DAI J, ZHANG Y, et al. In-situ measurement method for surface temperature and normal spectral emissivity of TC-4 high-temperature alloy based on thin film interference mechanism model [J]. *Measurement*, 2025, 240: 115591–115601.
- [43] GOPINATH N, DAN A, ARUNA S, et al. High emittance plasma sprayed $ZrO_2-Y_2O_3 / La_2Zr_2O_7$ thermal barrier coatings for potential application in scramjets[J]. *Applied Surface Science*, 2024, 652: 159324–159327.
- [44] LIU S Y, HUANG Y, HE Y, et al. Review of development and comparison of surface thermometry methods in combustion environments: principles, current state of the art, and applications [J]. *Processes*, 2022, 10 (12): 2528–2529.
- [45] XING J, CUI S, QI W, et al. A data processing algorithm for multi-wavelength pyrometry-which does not need to assume the emissivity model in advance [J]. *Measurement*, 2015, 67: 92–98.
- [46] FERRIER L, BOUTEYRE P, PICK A, et al. Unveiling the enhancement of spontaneous emission at exceptional points [J]. *Physical Review Letters*, 2022, 129 (8): 083602–083612.

- [47] GU W H. Multi spectral true temperature inversion algorithm based on constrained optimization method[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(12): 3846-3850.
- [48] XING J, LIU Z, LUO J, et al. Generalized inverse matrix normalization algorithm to extract high-temperature data from multiwavelength pyrometry[J]. Review of Scientific Instruments, 2020, 91(10): 104903-105000.
- [49] SVET D I. Determination of the emissivity of a substance from the spectrum of its thermal radiation and optimal methods of optical pyrometry[J]. High Temperatures - High Pressures, 1976, 8(5): 493-498.
- [50] TANAKA F, OHIRA H, NAGANUMA Y. Application of a new radiation thermometry method to galvanized and cold-rolled steels[C]// 6th IEEE Conference Record., Instrumentation and Measurement Technology Conference. IEEE, 1989: 24-28.
- [51] KHAN M A, ALLEMAND C, EAGAR T W. Noncontact temperature measurement. I. Interpolation based techniques[J]. Review of Scientific Instruments, 1991, 62(2): 392-402.
- [52] SUN G X, YUAN B G, DAI M J, et al. Processing method of multi-wavelength pyrometer data for continuous temperature measurements[J]. International Journal of Thermophysics, 2005, 26(4): 1255-1261.
- [53] LIU H, ZHENG S, ZHOU H, et al. Measurement of distributions of temperature and wavelength - dependent emissivity of a laminar diffusion flame using hyper-spectral imaging technique[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(2): 025201-025211.
- [54] 熊兵, 石小江, 陈洪敏, 等. 航空发动机涡轮叶片发射率测量[J]. 燃气轮机试验与研究, 2011, 24(2): 45-48.
- XIONG B, SHI X J, CHEN H M, et al. Emissivity measurement of turbine blades in aero engines[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2011, 24(2): 45-48. (in Chinese)
- [55] 张学聪, 董磊, 杨永军, 等. 涡轮叶片有效发射率计算方法研究[J]. 计测技术, 2016, 36(增刊1): 88-90.
- ZHANG X C, DONG L, YANG Y J, et al. Study on calculation method of effective emissivity for turbine blades[J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(supplement 1): 88-90. (in Chinese)
- [56] SUN X G, YUAN G B, DAI J M. Multi - spectral thermometry based on GA-BP algorithm[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2007, 27(2): 213-216.
- [57] CONG D C, DAI J M. Study of the application of RBF network to multi-spectral thermometry[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2001, 20(2): 97-101.
- [58] WANG Y Q, CHEN Y R, ZHAO Q, et al. Multi-spectral measurement of basic oxygen furnace flame temperature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(11): 2920-2924.
- [59] 朱自民, 邢键. 基于二分迭代递推的多光谱辐射测温反演算法[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(9): 2674-2678.
- ZHU Z M, XING J. Multispectral radiative temperature inversion algorithm based on binary iterative recursion[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(9): 2674-2678. (in Chinese)
- [60] 祁博文, 吕勇, 牛春晖, 等. 基于最小二乘的变发射率辐射测温方法[J]. 激光杂志, 2022, 43(10): 40-44.
- QI B W, LYU Y, NIU C H, et al. Variable emissivity radiation temperature measurement method based on least squares[J]. Laser Magazine, 2022, 43(10): 40-44. (in Chinese)
- [61] 王天. 多光谱辐射测温方法的反演算法优化研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2023.
- WANG T. Research on optimization of inversion algorithm for multispectral radiation temperature measurement method[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023. (in Chinese)
- [62] XING J, PENG B, MA Z, et al. Directly data processing algorithm for multi-wavelength pyrometer (MWP)[J]. Optics Express, 2017, 25(24): 30560-30574.
- [63] 张伟. 基于最优化算法的辐射测温仿真研究[D]. 黄石: 湖北师范大学, 2020.
- ZHANG W. Simulation study of radiation temperature measurement based on optimization algorithm[D]. Huangshi: Hubei Normal University, 2020. (in Chinese)
- [64] 高伟玲, 张凯华, 徐艳粉, 等. 改进HPSOGA的多光谱辐射测温数据处理方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2023, 43(12): 3659-3665.
- GAO W L, ZHANG K H, XU Y F, et al. Improved HPSOGA for multispectral radiation temperature measurement data processing[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(12): 3659-3665. (in Chinese)
- [65] 郭会鸽. 基于优化理论的多光谱辐射测温算法研究

- [D]. 新乡: 河南师范大学, 2021.
- GUO H G. Research on multispectral radiation temperature measurement algorithm based on optimization theory [D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2021. (in Chinese)
- [66] 邢小玉. 基于多光谱分析的微型航空涡喷发动机叶片表面温度测量研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- XING X Y. Research on surface temperature measurement of miniature aircraft turbofan engine blades based on multispectral analysis [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese)
- [67] ADIBEKYAN A, MONTE C, KRHRT M, et al. Emissivity measurement under vacuum from 4 μm to 100 μm and from $-40\text{ }^\circ\text{C}$ to $450\text{ }^\circ\text{C}$ at PTB[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(2 / 3): 283-289.
- [68] MONTE C, HOLLSDT J. The determination of the uncertainties of spectral emissivity measurements in air at the PTB[J]. Metrologia, 2010, 47(2): 172-181.
- [69] GIESELER J, ADIBEKYAN A, MONTE C, et al. Apparent emissivity measurement of semi-transparent materials part 1: experimental realization [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2020, 257: 107316-107359.
- [70] IESELER J, ADIBEKYAN A, MONTE C, et al. Apparent emissivity measurement of semi-transparent materials part 2: theoretical concept [J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2021, 258: 107317-107352.
- [71] ADIBEKYAN A, KONONOVA E, MONTE C, et al. Review of PTB measurements on emissivity, reflectivity and transmissivity of semitransparent fiber-reinforced plastic composites [J]. International Journal of Thermophysics, 2019, 40: 1-14.
- [72] DELCAMPO L. New experimental device for infrared spectral directional emissivity measurements in a controlled environment [J]. Review of Scientific Instruments, 2006, 77(11): 113111-113300.
- [73] MENEXES D D S, MELIN P, DEL C L, et al. Apparatus for measuring the emittance of materials from far infrared to visible wavelengths in extreme conditions of temperature [J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 69: 96-101.
- [74] MENEXES D D S, MELIN P, DEL C L, et al. Probing high temperature thermal emissive properties of energy materials and coatings with emission spectroscopy augmented by in situ reflection [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 108: 103329-103335.
- [75] NEUER G. Spectral and total emissivity of high-temperature materials [J]. International Journal of Thermophysics, 1998, 19(3): 917-929.
- [76] SONG X, DONG W, YUAN Z, et al. Investigation of the linearity of the NIM FTIR infrared spectral emissivity measurement facility by means of flux superposition method [J]. Infrared Physics & Technology, 2020, 109: 103416-103423.
- [77] SONG X R, DONG W, PAN Y J, et al. The infrared spectral emissivity measurement of a graphite material in a high temperature range of $1000\sim 1500\text{ }^\circ\text{C}$ using integrated blackbody principle [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2021, 40(2): 204-213.
- [78] CAGRAN C P, HANSEN L M, NOORMA M, et al. Temperature-resolved infrared spectral emissivity of SiC and Pt-10Rh for temperatures up to $900\text{ }^\circ\text{C}$ [J]. Int. J. Thermophys, 2007, 28(2): 581-597.
- [79] WANG H, CHEN D, WANG G, et al. Measurement technology for material emissivity under high temperature dynamic heating conditions [J]. Measurement, 2013, 46(10): 4023-4031.
- [80] DAI J, WANG X, YUAN G. Fourier transform spectrometer for spectral emissivity measurement in the temperature range between 60 and $1500\text{ }^\circ\text{C}$ [C]// Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2005, 13(1): 63-66.
- [81] 陈昱卓. 自校验红外辐射温度计的研制[D]. 长春: 长春理工大学, 2017.
- CHEN Y Z. Development of self-calibration infrared radiation thermometer [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [82] TERADA D, TAKIGAWA R, IUCHI T. Automatically emissivity-compensated radiation thermometry [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018, 1065(12): 122008-122009.
- [83] 王磊. 基于辐射测温理论的比色测温仪的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2019.
- WANG L. Research on colorimetric thermometer based on radiation temperature measurement theory [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019. (in Chinese)
- [84] 李志彬. 基于 FTIR 的黑体辐射特性测量方法研究 [D]. 长春: 长春理工大学, 2020.

- LI Z B. Research on measurement method of blackbody radiation characteristics based on FTIR [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [85] 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]. 长春: 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2021.
- ZHENG K F. Research on radiation temperature measurement algorithm and system design for aviation engine turbine blades [D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [86] 张南楠, 陈茜雅, 常馨方, 等. 分布式多光谱高温计光学系统设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2024, 44(1): 230-233.
- ZHANG N N, CHEN Q Y, CHANG X F, et al. Design of optical system for distributed multispectral pyrometer[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2024, 44(1): 230-233. (in Chinese)
- [87] ALLISON S W, GILLIES G T. Remote thermometry with thermographic phosphors: instrumentation and application [J]. Review of Scientific Instruments, 1997, 68(7): 2615-2650.
- [88] CHOY K L, HEYES A L, FEIST J P. Thermal barrier coating with thermoluminescent indicator material embedded therein: US8173266[P]. 2012-05-08.
- [89] FEIST J P, NICHOLLS J R, HEYES A L. Determining thermal history of components: US2011006973 [P]. 2011-03-24.
- [90] COPIN E, SENTENAC T, LE M Y, et al. Feasibility of luminescent multilayer sol-gel thermal barrier coating manufacturing for future applications in through-thickness temperature gradient sensing [J]. Surface and Coatings Technology, 2014, 260: 90-96.
- [91] DHOMNE S, MAHALLE M A. Thermal barrier coating materials for SI engine[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2019, 8(1): 1532-1537.
- [92] ALJUBOURY M. The impact of engine heat on the erosion of its parts using biofuels[J]. Journal of Mechanical, Civil and Industrial Engineering, 2020, 1(1): 36-38.
- [93] 刘郑红, 余亚丽, 程伟伦, 等. 电子束物理气相沉积热障涂层隔热性能的磷光寿命在线测量[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(9): 1186-1195.
- LIU Z H, YU Y L, CHENG W L, et al. Online measurement of phosphorescence lifetime for thermal barrier coating insulation performance via electron beam physical vapor deposition [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(9): 1186-1195. (in Chinese)
- [94] 冀晓鹏, 宫声凯, 徐惠彬, 等. 添加稀土元素对热障涂层 YSZ 陶瓷层晶格畸变的影响[J]. 航空学报, 2007, 28(1): 196-200.
- JI X J, GONG S K, XU H B, et al. Effect of rare earth element addition on lattice distortion of YSZ ceramic layer in thermal barrier coatings [J]. Journal of Aeronautics, 2007, 28(1): 196-200. (in Chinese)
- [95] 王晟, 胡志云, 邵珺, 等. 双色热敏磷光涂层测温技术[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(5): 1406-1410.
- WANG S, HU Z Y, SHAO J, et al. Temperature measurement technology based on dual-color thermosensitive phosphorescent coatings [J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(5): 1406-1410. (in Chinese)
- [96] 苟学科. 复杂工况下辐射测温探针设计及目标涂层特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2020.
- GOU X K. Design of radiation temperature measurement probe and study on target coating properties under complex conditions [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2020. (in Chinese)
- [97] DU M R, XIAO Y, YANG X, et al. High-entropy $(\text{La}_{0.2}\text{Dy}_{0.2}\text{Er}_{0.2}\text{Yb}_{0.2}\text{Y}_{0.2})_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ oxide, a potential thermal barrier coating material with photoluminescence property sensitive to pressure [J]. Ceramics International, 2024, 50(5): 8010-8016.
- [98] 吴硕, 赵远涛, 李文戈, 等. 燃气轮机热障涂层陶瓷材料发展现状及展望[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2022, 43(1): 139-150.
- WU S, ZHAO Y T, LI W G, et al. Current status and prospects of thermal barrier coatings for gas turbines [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43(1): 139-150. (in Chinese)
- [99] 张永胜, 党静, 于小丽. 涡轮流量计时间常数校准技术研究[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 92-99.
- ZHANG Y S, DANG J, YU X L. Research on calibration technology of time constant for turbine flowmeters [J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 92-99. (in Chinese)
- [100] 张学仪, 何小妹, 王一璋, 等. 航空发动机叶片粗糙度测量方法研究[J]. 计测技术, 2023, 43(2): 35-43.

- ZHANG X Y, HE X M, WANG Y Z, et al. Research on measurement methods for surface roughness of aircraft engine blades [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(2): 35-43. (in Chinese)
- [101] 谈龙妹, 杨美芝, 纪万祥, 等. 荧光光纤测温技术在高温油罐火灾监测中的应用[J]. *消防科学与技术*, 2023, 42(7): 910-914.
- TAN L M, YANG M Z, JI W X, et al. Application of fluorescent optical fiber temperature measurement technology in fire monitoring of high-temperature oil storage tanks [J]. *Journal of Fire Science and Technology*, 2023, 42(7): 910-914. (in Chinese)
- [102] 汪家荣, 严亦乐, 林奕成, 等. 基于傅里叶变换光谱验证维恩位移定律[J]. *物理实验*, 2024, 44(8): 38-43.
- WANG J R, YAN Y L, LIN Y C, et al. Verification of Wien's displacement law based on fourier transform spectroscopy [J]. *Physics Experiment*, 2024, 44(8): 38-43. (in Chinese)
- [103] 李松, 张徐, 吕明阳, 等. 双孔光纤集成F-P干涉仪的高灵敏度温度传感器[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2020, 41(4): 601-606.
- LI S, ZHANG X, LYU M Y, et al. High-sensitivity temperature sensor based on double-hole optical fiber integrated F-P interferometer [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2020, 41(4): 601-606. (in Chinese)
- [104] 郑良广, 吴明明, 赵呈锐, 等. 一种新型荧光光纤测温探头及其一致性研究[J]. *自动化与仪表*, 2022, 37(11): 73-75, 92.
- ZHENG L G, WU M M, ZHAO C R, et al. A novel fluorescent optical fiber temperature sensing probe and its consistency study [J]. *Automation and Instrumentation*, 2022, 37(11): 73-75, 92. (in Chinese)
- [105] 杨芸, 李龙, 蔡翔, 等. 荧光磁粉探伤中磁悬液品质的影响及测控装置[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2021, 42(4): 574-580.
- YANG Y, LI L, CAI X, et al. The influence of magnetic suspension quality on fluorescent magnetic particle testing and its measurement and control device [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2021, 42(4): 574-580. (in Chinese)
- [106] 王一丹, 郭谦, 周琪杰, 等. 先进航空发动机高温功能涂层研究进展[J]. *航空材料学报*, 2024, 44(5): 48-69.
- WANG Y D, GUO Q, ZHOU Q J, et al. Research progress on high-temperature functional coatings for advanced aeroengines [J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2024, 44(5): 48-69. (in Chinese)
- [107] 符泰然, 吴宇颂, 张常贤. 荧光测温方法的测量误差与测量不确定度分析综述[J]. *计测技术*, 2024, 44(3): 21-38.
- FU T R, WU Y S, ZHANG C X. Review on measurement errors and uncertainty analysis of fluorescent temperature measurement methods [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2024, 44(3): 21-38. (in Chinese)
- [108] 吕汶辉, 杨永新, 衣宏昌, 等. 闪烁光纤阵列探测器最小可探测活度浓度仿真计算[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(11): 1636-1641.
- LV W H, YANG Y X, YI H C, et al. Simulation calculation of minimum detectable activity concentration for scintillating fiber array detectors [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(11): 1636-1641. (in Chinese)
- [109] 萧鹏, 台泓冰, 向茂林, 等. 基于红外辐射测温法的焊头动态高速真温测量系统研制[J]. *光谱学与光谱分析*, 2024, 44(3): 836-842.
- XIAO P, TAI H B, XIANG M L, et al. Development of a dynamic high-speed true temperature measurement system for welding heads based on infrared radiation thermometry [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2024, 44(3): 836-842. (in Chinese)
- [110] 张鹏浩, 陈爽, 武洪波. 飞秒光纤光栅高温测量方法研究[J]. *计测技术*, 2023, 43(5): 1-6.
- ZHANG P H, CHEN S, WU H B. Research on high-temperature measurement method using femtosecond fiber bragg grating [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2023, 43(5): 1-6. (in Chinese)
- [111] 张昊苏, 姜玉廷, 陆松兵, 等. 燃气轮机高温涡轮颗粒沉积的研究进展[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(8): 1122-1132.
- ZHANG H S, JIANG Y T, LU S B, et al. Research progress on high-temperature turbine particle deposition in gas turbines [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(8): 1122-1132. (in Chinese)
- [112] 孙晓刚, 何瑾, 戴景民, 等. 基于神经网络模型的多波长辐射测温的研究[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 1998, 30(6): 1-3.
- SUN X G, HE J, DAI J M, et al. Research on multi-

- wavelength radiation temperature measurement based on neural network model [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 1998, 30(6): 1-3. (in Chinese)
- [113] 丛大成, 戴景民, 孙晓刚, 等. RBF网络在多光谱测温中的应用研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2001, 20(2): 97-101.
CONG D C, DAI J M, SUN X G, et al. Application research of RBF network in multispectral temperature measurement [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2001, 20(2): 97-101. (in Chinese)
- [114] 孙晓刚, 原桂彬, 戴景民. 基于遗传神经网络的多光谱辐射测温法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2007, 27(2): 213-216.
SUN X G, YUAN G B, DAI J M. Multispectral radiation temperature measurement method based on genetic neural network [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2007, 27(2): 213-216. (in Chinese)
- [115] 郑凯. 基于热辐射反演的火焰纵向温度测量的研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
ZHENG K. Study on flame longitudinal temperature measurement based on thermal radiation inversion [D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2016. (in Chinese)
- [116] XING J, YAN P, LI W, et al. Generalized inverse matrix-long short-term memory neural network data processing algorithm for multi-wavelength pyrometry [J]. *Optics Express*, 2022, 30(26): 46081-46093.
- [117] 侯维. 基于多光谱测温法的大气透过率补偿方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
HOU W. Research on atmospheric transmittance compensation method based on multispectral temperature measurement [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [118] 贺依伟. 基于FPGA的涡轮叶片温度监测系统研究与设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
HE Y W. Research and design of turbine blade temperature monitoring system based on FPGA [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023. (in Chinese)
- [119] 闫鹏禹. 基于GIM-LSTM的多光谱辐射测温反演算法研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.
YAN P Y. Research on multispectral radiation temperature inversion algorithm based on GIM-LSTM [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023. (in Chinese)
- [120] 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: 哈尔滨工程大学, 2023.
ZHANG X Q. Research on infrared radiation temperature measurement method for turbine blades based on effective emissivity [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023. (in Chinese)
- [121] 王瑄, 孔辰, 韩云霄, 等. 引入物理约束的航空发动机燃烧室温度场预测模型[J/OL]. *推进技术*. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.2405006>.
WANG X, KONG C, HAN Y X, et al. Prediction model of temperature field in aircraft engine combustion chamber with physical constraints [J/OL]. *Journal of Propulsion Technology*. <https://doi.org/10.13675/j.cnki.tjjs.2405006>. (in Chinese)
- [122] 张志林, 孙伟民, 邢键, 等. 一种改进的可见-红外多光谱辐射测温反演算法[J]. *红外技术*, 2013, 35(8): 518-521.
ZHANG Z L, SUN W M, XING J, et al. An improved visible - infrared multispectral radiation temperature inversion algorithm [J]. *Infrared Technology*, 2013, 35(8): 518-521. (in Chinese)
- [123] 顾伟宏, 马召, 邢键, 等. 基于发射率偏差约束的多光谱真温反演算法[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(8): 2500-2504.
GU W H, MA Z, XING J, et al. Multispectral true temperature inversion algorithm based on emissivity deviation constraints [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(8): 2500-2504. (in Chinese)
- [124] 郭广廓, 王振兴, 崔双龙, 等. 基于梯度投影法的火焰温度测量技术研究[J]. *红外技术*, 2018, 40(7): 712-717.
GUO G K, WANG Z X, CUI S L, et al. Research on flame temperature measurement technology based on gradient projection method [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(7): 712-717. (in Chinese)
- [125] 邢键, 马召, 白岩. 多光谱辐射外点罚函数反演算法的生物质锅炉火焰温度测量[J]. *光谱学与光谱分析*, 2020, 40(12): 3761-3764.
XING J, MA Z, BAI Y. Measurement of flame temperature in biomass boilers using a multispectral radiation outlier penalization inversion algorithm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2020, 40(12): 3761-3764. (in Chinese)
- [126] 邢键, 刘志军, 韩冰, 等. 基于广义逆-坐标变换的多光谱辐射测温反演算法[J]. *光谱学与光谱分析*,

2023, 43(6): 1936-1940.

XING J, LIU Z J, HAN B, et al. Multispectral radiation temperature inversion algorithm based on generalized inverse - coordinate transformation [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2023, 43(6): 1936-1940. (in Chinese)

[127] WANG N, SHEN H, ZHU R. Constraint optimization algorithm for spectral emissivity calculation in multispectral thermometry [J]. Measurement, 2021, 170: 108725-108733.

[128] 李东. 燃气轮机涡轮叶片辐射测温方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.

LI D. Research on radiation temperature measurement method for gas turbine blade [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)

[129] ZHANG K, HE Y, YU K, et al. Fast data processing method for multispectral radiation thermometry based on

Euclidean distance optimization [J]. Optics Express, 2024, 32(2): 1342-1356.

[130] GAO S, WEI X, CHEN Z, et al. A method for processing multispectral radiometric thermometry data based on BP-Alpha constraints [J]. Infrared Physics and Technology, 2024, 140: 105387-105387.

(本文编辑: 刘宇轩)



第一作者: 高山(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要研究方向为智能信息处理以及复杂环境下的辐射测温技术。