

复杂热环境下涡轮叶片表面温度场测量数据处理算法优化研究

李源*, 蔡静, 张学聪, 董磊, 胡玮宸

(中国航空工业集团公司北京长城计量测试技术研究所, 北京 100095)

摘要: 航空发动机涡轮叶片表面温度场测量领域所使用的传统多光谱算法计算复杂度高, 需要对光谱数据进行奇异值分解才能进行温度场数据计算; 此外涡轮叶片定位信号精度受模拟转速信号影响, 温度数据存在偏差, 如果不进行转速偏移修正, 计算后的温度数据不能精准反映燃烧温度不均匀性、叶盘及叶片设计缺陷。针对上述问题, 本文对复杂热环境下涡轮叶片表面温度场测量数据处理算法进行优化, 分析构建多光谱测温模型并进行单色温度辅助计算, “多光谱+单色温度辅助修正”方法计算效率相较现有传统多光谱优化算法提升30%, 且测温精度无损耗; 此外本文提出自适应转速偏移修正算法, 动态化自适应调整滤波器参数, 相较现有自适应修正算法, 该方法的偏移修正误差降低15%。优化后的涡轮叶片表面温度场测量数据处理算法可适配多转速复杂工况, 弥补了现有测温算法的工程化应用短板。

关键词: 涡轮叶片; 复杂热环境; 表面温度场; 数据处理算法; 奇异值分解; 多光谱测温; 单色温度辅助; 自适应转速偏移修正

中图分类号: TB942; TH811; V23 文献标志码: A 文章编号: 1674-5795 (2026) 03-0099-10

Research on the optimization of data processing algorithms for measuring temperature field on turbine blade surface in complex thermal environments

LI Yuan*, CAI Jing, ZHANG Xuecong, DONG Lei, HU Weichen

(AVIC Changcheng Institute of Metrology & Measurement, Beijing 100095, China)

Abstract: The traditional multispectral algorithm used for temperature field measurement on the surface of aeroengine turbine blades has high computational complexity, requiring singular value decomposition of spectral data for temperature field data calculation. In addition, the accuracy of turbine blade positioning signals is affected by simulated speed signals, resulting in deviations in temperature data. If no speed offset correction is performed, the calculated temperature data cannot accurately reflect the uneven combustion temperature and design defects of the blade discs and blades. To address the above issues, this paper optimizes the data processing algorithm for temperature field measurement on the surface of turbine blades in complex thermal environments, analyzes and constructs a multispectral temperature measurement model, and performs monochromatic temperature auxiliary calculation. Compared with the existing traditional multispectral optimization algorithm, the "multispectral + monochromatic temperature auxiliary correction" method

收稿日期: 2026-02-25; 修回日期: 2026-04-27; 录用日期: 2026-04-28; 发表日期: 2026-06-28

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3207000)

引用格式: 李源, 蔡静, 张学聪, 等. 复杂热环境下涡轮叶片表面温度场测量数据处理算法优化研究[J]. 计测技术, 2026, 46(3): 99-108.

Citation: LI Y, CAI J, ZHANG X C, et al. Research on the optimization of data processing algorithms for measuring temperature field on turbine blade surface in complex thermal environments [J]. Metrology & Measurement Technology, 2026, 46(3): 99-108.



improves the calculation efficiency by more than 30% without loss of temperature measurement accuracy. In addition, this paper proposes an adaptive speed offset correction algorithm that dynamically and adaptively adjusts the filter parameters. Compared with the existing adaptive correction algorithm, this method reduces the offset correction error by 15%. The optimized data processing algorithm for temperature field measurement on the surface of turbine blades can adapt to complex working conditions with multiple speeds, making up for the shortcomings of existing temperature measurement algorithms in engineering applications.

Key words: turbine blade; complex thermal environment; surface temperature field; data processing algorithm; singular value decomposition; multispectral thermometry; monochromatic temperature assistance; adaptive rotational speed offset correction

0 引言

涡轮叶片作为航空发动机的核心关键部件,其工作状态直接决定了装备的运行效率、可靠性与使用寿命。涡轮叶片长期处于高温、高压、高速旋转的极端复杂环境中,表面温度是评估其热负荷承载能力、判断材料老化程度及预测故障风险的核心参数,精准测量航空发动机涡轮叶片表面温度具有重要的理论研究价值与工程应用意义。随着科学技术的进步,辐射测温方法取得了很大进展。但是,常规辐射测温方法受物体表面状态及发射率的影响很大,且不同背景辐射下,物体表面状态温度测量结果差别极大,使用户进行数据分析时难以计算实际温度。研究人员采用多光谱算法进行温度计算,可减小叶片发射率、高温热背景辐射的影响^[1-3]。

多光谱辐射测温的原理是:利用被测对象在不同波长下的辐射强度与温度之间的固有对应关系,通过光学系统采集多个光谱波段的辐射强度信号,结合辐射换热理论推算叶片实际温度^[1, 4]。但该算法在构建光谱辐射强度与温度之间的数学模型时,需进行大量复杂处理,包括光谱测量系统的增益函数、偏置函数校准,以及光谱数据的采集、去噪、归一化等预处理过程,且必须通过奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)法实现数据降维与干扰分离^[1-5],导致模型参数繁琐、计算过程复杂,难以满足工程现场实时测温的需求。另外,航空发动机涡轮叶片在高速旋转下工作,产生巨大的离心力和机械应力,这些应力随着转速的增加而增大。航空发动机涡轮叶片定位信号来源于转速信号,转速信号是模拟量,表面

温度数据经过转化之后与实际空间位置处的温度数据存在误差^[2, 4],造成温度数据与航空发动机叶片实际热分布不匹配,影响热负荷分析的准确性。

针对上述问题,本文对复杂热环境下航空发动机涡轮叶片表面温度场测量数据处理算法进行优化,采用单色辅助修正策略,在保证测温精度的前提下提升分析效率;设计自适应发动机转速偏移修正算法,实时捕捉转速信号的波动特征并进行动态补偿,解决温度数据偏移问题,保障测量数据的准确性与实时性符合要求,为航空发动机涡轮叶片精准测温提供重要技术支撑。

1 基于单色辅助的多光谱算法优化

本文采用发射率模型假设法结合多光谱测温算法对滤波后的采集数据进行温度模型建立,并利用单色辅助算法提升温度反演的效率与精度,即可精准反演出涡轮叶片的真实工作温度,确保温度数据的可靠性与准确性。

1.1 多光谱测温原理

在多光谱温度计算时需先对实验数据预处理,数据滤波处理后,需根据黑体辐射定律和涡轮叶片的辐射特性,建立光谱辐射强度与温度之间的数学模型^[6]。

航空发动机涡轮叶片并非理想黑体,其辐射特性与黑体存在显著差异,实际叶片的光谱辐射强度不仅与温度、波长相关,还受叶片材料的发射率、表面状态(如氧化、磨损、粗糙度)等因素影响^[7]。因此,在建立数学模型时,需引入叶片材料的光谱发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 进行修正,使用维恩公式替代普朗克公式,并配合维恩公式设置合理的发射率假设方程,建立多光谱测温线性方程组^[1, 4-5]。

用维恩近似公式来取代普朗克公式, 得到

$$E(\lambda_i, T) = \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda_i^5 \exp(c_2 / \lambda_i T)}, i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中: E 为光谱辐射强度; λ_i 为第 i 通道光谱波长; T 为参考温度; c_1 为第一黑体辐射常数, $c_1 = 3.7418 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二黑体辐射常数, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$; ε 为发射率。

计算得出第 i 个通道的输出电压值 D_i 和在定点黑体参考温度 T' 下第 i 个通道的输出信号 D_i' 分别为

$$D_i = k_{\lambda_i} \cdot \varepsilon(\lambda_i, T) \cdot \frac{c_1}{\lambda_i^5 \exp(c_2 / \lambda_i T)} \quad (2)$$

$$D_i' = k_{\lambda_i} \frac{c_1}{\lambda_i^5 \exp(c_2 / \lambda_i T')} (\varepsilon(\lambda_i, T) = 1.0) \quad (3)$$

式中: k_{λ_i} 为第 i 通道光谱波长下探测器仪器增益系数。

D_i 与 E 满足线性关系, 即

$$D_i = kE(\lambda_i, T) + q \quad (4)$$

式中: k 为探测器仪器增益, q 为系统偏置。

参考温度下输出信号 D_i' 与 D_i 的仪器参数完全一致, 式(2)与式(3)相除即可抵消仪器常数 k 和 q , 无需额外开展校准, 简化了整体计算流程。可得

$$\frac{D_i}{D_i'} = \varepsilon(\lambda_i, T) \exp\left(\frac{c_2}{\lambda_i T'} - \frac{c_2}{\lambda_i T}\right) \quad (5)$$

根据经验, 通常情况下材料发射率与波长在特定光谱范围内呈单调关系, 为简化光谱辐射强度与温度关联模型运算, 降低公式复杂度, 可假设目标发射率的方程为

$$\ln \varepsilon(\lambda, T) = a + b\lambda \quad (6)$$

式中 a 、 b 为发射率拟合系数(由实验校准得到)。

选择4个通道, 可得方程组

$$\begin{cases} a + \lambda_1 \cdot b + \left(-\frac{c_2}{\lambda_1}\right) \cdot \frac{1}{T} = \ln\left(\frac{D_{\lambda_1}}{D_{\lambda_1}'}\right) - \frac{c_2}{\lambda_1 T'} \\ a + \lambda_2 \cdot b + \left(-\frac{c_2}{\lambda_2}\right) \cdot \frac{1}{T} = \ln\left(\frac{D_{\lambda_2}}{D_{\lambda_2}'}\right) - \frac{c_2}{\lambda_2 T'} \\ a + \lambda_3 \cdot b + \left(-\frac{c_2}{\lambda_3}\right) \cdot \frac{1}{T} = \ln\left(\frac{D_{\lambda_3}}{D_{\lambda_3}'}\right) - \frac{c_2}{\lambda_3 T'} \\ a + \lambda_4 \cdot b + \left(-\frac{c_2}{\lambda_4}\right) \cdot \frac{1}{T} = \ln\left(\frac{D_{\lambda_4}}{D_{\lambda_4}'}\right) - \frac{c_2}{\lambda_4 T'} \end{cases} \quad (7)$$

用矩阵形式可以表达为

$$\mathbf{M}\mathbf{x} = \mathbf{v} \quad (8)$$

其中,

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_1 & -c_2/\lambda_1 \\ 1 & \lambda_2 & -c_2/\lambda_2 \\ 1 & \lambda_3 & -c_2/\lambda_3 \\ 1 & \lambda_4 & -c_2/\lambda_4 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} \ln(D_{\lambda_1}/D_{\lambda_1}') - c_2/(\lambda_1 T') \\ \ln(D_{\lambda_2}/D_{\lambda_2}') - c_2/(\lambda_2 T') \\ \ln(D_{\lambda_3}/D_{\lambda_3}') - c_2/(\lambda_3 T') \\ \ln(D_{\lambda_4}/D_{\lambda_4}') - c_2/(\lambda_4 T') \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ 1/T \end{bmatrix} = \mathbf{M} / \mathbf{v}$$

求解式(9)即可推导得到目标温度 T 。

1.2 多光谱测温模型建立

实际测量过程中, 受环境噪声、仪器干扰等因素影响, 采集的多光谱数据含有冗余噪声, 需进行去噪处理, 本文选用SVD方法, 通过筛选有效奇异值重构数据, 即可剔除噪声干扰。但是仪器各波长需要在短波部分选取, 且探测器带宽有限, 各通道波长之差较小, 导致矩阵 $\mathbf{M}$ 的条件数可达 10^{15} 以上^[7-8], 属于严重病态方程组。如果使用常规方法求解, 由于测量随机误差的存在, 易导致误差被严重放大, 无法得到正确的结果, 因此需要使用SVD方法舍弃奇异值^[5], 避免误差放大效应。本文取奇异值阈值为0.001, 该阈值通过多组仿真实验反复验证确定, 可在剔除极小无效奇异值、避免误差放大的同时, 完整保留有效测量数据, 保证去噪效果与数据完整性符合要求。

SVD方法并非当前多光谱数据处理的主流方法, 其矩阵分解运算效率略低于主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)、小波变换等主流方法^[8-10]。但经多维度对比验证, SVD方法针对涡轮叶片测温场景的去噪效果更优, 测温数据失真度更低, 结合本文单色辅助优化算法, 可有效弥补其运算效率短板, 完全适配本文测温场景与算法体系, 具备切实可行性。SVD具体步骤如下:

对式(9)中的系数矩阵 $\mathbf{M}$ 进行SVD, 公式为

$$(M)_{4 \times 3} = U W V = (U)_{4 \times 4} \begin{pmatrix} w_1 & & \\ & w_2 & \\ & & w_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} (V^T)_{3 \times 3} \quad (10)$$

式中: U 和 V 为正交矩阵, 逆矩阵等于其转置; W

为对角矩阵, $W = \begin{pmatrix} w_1 & & \\ & w_2 & \\ & & w_3 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$, 逆矩阵仍为对角

矩阵; w_i 为矩阵 W 中的矩阵元素, $i = 1, 2, 3$ 。逆矩阵中的对角元素为 w_i 的倒数。计算可得

$$x = V \cdot \left[\text{diag} \left(\frac{1}{w_i} \right) \quad 0 \right] \cdot U^T \cdot v \quad (11)$$

当矩阵 M 病态严重时, w_i 存在极小值或零值, 如果求 $\frac{1}{w_i}$ 则会出现接近无穷大的值, 将微小误差严重放大, 从而导致解不正确。若 w_i 接近零, 对于解的贡献较小, 对于这种情况可设置一合理阈值 σ , 当 $w_i < \sigma$ 时, 则将 $\frac{1}{w_i}$ 也赋零值即可。

探针在扫描叶根到叶尖时根据脉冲信号将径向数据分成 n 圈, 对第 j 圈第 i 个通道平均电压 $\bar{D}_i$ 和在定点黑体参考温度 T' 下对应参考电压 D_i' 使用维恩公式化简后可得矩阵 $\bar{v}_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$), 将 $\bar{v}_j$ 和分解后的奇异值矩阵代入多光谱测温线性方程组^[4-5], 对数组索引 $x[2]$ (初始为 0) 求倒, 即可通过电压值得得第 j 圈平均温度 $\bar{T}_j$, 公式为

$$\bar{T}_j = \frac{1}{x[2]} = \frac{1}{\left[V \cdot \left[\text{diag} (1/w_i)_0 \right] \cdot U^T \cdot \bar{v}_j \right]}, j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

1.3 单色温度辅助计算

为解决传统多光谱算法计算复杂度高的问题, 本文引入单色温度辅助修正策略^[8-9], 选取单一波长辐射数据作为参考, 简化多光谱数据运算流程。本文选取短波波段 400 ~ 800 nm 内 650 nm 波长作为单色参考波长。选取原则: 该波段叶片自身辐射信号强度高、外界背景干扰信号弱, 与多光谱测量通道波长高度匹配, 完美适配本文测温装置量程范围。

根据普朗克定律, 目标的辐射能量与温度和波长的关系为

$$\overline{E(\lambda_i, T)}_j = \frac{c_1 \lambda_i^{-5}}{\exp(c_2 / \lambda_i \bar{T}_j) - 1}, i = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: $\overline{E(\lambda_i, T)}_j$ 为第 j 圈平均能量, λ_i 为第 i 个通

道的有效波长。

通过式(13)可计算每圈电压的平均辐射能量密度。第 j 圈第 k 个数据点的能量 $E_{\text{data}}[j, k]$ 为

$$E_{\text{data}}[j, k] = \frac{V[i, k]}{V_{\text{ave } j} \cdot E_{\text{ave } j}}, i = 1, 2, 3, 4; j = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

式中: $V[i, k]$ 为第 i 个通道第 k 个数据点电压, $V_{\text{ave } j}$ 为第 j 圈平均电压, $E_{\text{ave } j}$ 为第 j 圈平均能量辐射密度。

由式(14)可算出每个数据点辐射能量密度, 为了求解 T , 可以对等式两边取对数, 然后进行代数变换, 得到

$$T_i = \frac{c_2}{\lambda [-\ln(E(\lambda, T_i)) + \ln(c_1) - 5 \ln(\lambda)] + 1}, i = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中: T_i 为第 i 个通道温度数据, λ 为波长数据。

依托简化后的普朗克公式, 结合探测器输出信号可快速完成单色温度计算, 并将计算结果作为辅助参考, 修正多光谱测温结果, 大幅缩减冗余运算量。

该算法简化方案存在一定应用风险, 简化过程可能丢失部分高频细节信号, 对极端超高温工况下的测温精度有轻微影响。但该方案适用性极强, 可覆盖 550 ~ 1 500 °C 常规工程测温工况, 满足航空发动机涡轮叶片日常实时监测需求, 针对极端高温工况, 可通过微调单色波长进一步优化适配。

2 自适应偏移修正

涡轮叶片温度场采用扫描式测量方法, 可能由于触发信号的偏摆导致各环域之间的空间位置不完全对应^[10-11], 这是导致温度数据位置偏移、空间失配的核心原因。自适应偏移修正算法的核心是通过有限冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)带通滤波器结合相位差补偿, 解决数字滤波引起的位置偏移问题。自适应偏移修正算法首先提取每个环的叶片峰值部分, 并对各个环域相应位置峰值进行对齐, 最后采用数据补值的方法将缺失的数据进行自动补齐, 实现测试数据与空间位置的高精度对应, 消除偏移误差对反演结果的影响^[11-14]。

FIR 滤波器输出的一般公式如式(16)。

$$y[n] = \sum_{k=0}^{N-1} h[k] \cdot x[n-k] \quad (16)$$

式中: $y[n]$ 为输出信号, $x[n]$ 为输入信号, $h[k]$ ($k=0, 1, \dots, N-1$) 为 FIR 滤波器的系数(即窗函数截断后的脉冲响应), N 为滤波器的阶数(即系数的数量)。结合航空发动机转速波动范围, 本文 FIR 滤波器阈值选取转速平均值的 5%, 该阈值可精准捕捉转速峰值信号^[15-16], 避免漏检、误检问题, 同时实现滤波器参数随发动机转速、叶片数量的动态自适应调整, 全面提升偏移修正精度与工况适配性。

涡轮叶片多光谱测温系统采样率为 F_s , 可根据测量数据, 计算得到涡轮叶片的转速 r_{pm} 为

$$r_{pm} = \frac{F_s}{T_{otal}/n} \quad (17)$$

式中: T_{otal} 为总采样点数, n 为采样圈数。

本文进行滤波器参数规格设计时采用窗函数法, 通过数据仿真模拟发动机每个阶段工作频率。为了保证带通滤波器允许每个涡轮叶片峰值的频率信号通过, 同时抑制该范围之外的频率信号, 取带通滤波器中心频率 $f_c = r_{pm} \cdot t_{stages}$ (t_{stages} 为叶片数量), 带通滤波器通带截止频率 w_{p1} 、 w_{p2} 和阻带截止频率 w_{s1} 、 w_{s2} 设计如下

$$\begin{cases} w_{p1} = 1.0(f_c - a_1)\pi / (F_s/2) \\ w_{p2} = 1.0(f_c - b_1)\pi / (F_s/2) \\ w_{s1} = 1.0(f_c + b_1)\pi / (F_s/2) \\ w_{s2} = 1.0(f_c + a_1)\pi / (F_s/2) \end{cases} \quad (18)$$

系数 a_1 、 b_1 计算公式为

$$\begin{cases} a_1 = r_{pm} \cdot t_{stages} / 2 \\ b_1 = r_{pm} \cdot t_{stages} / 10 \end{cases} \quad (19)$$

可得通带宽度 w_{delta} 为

$$w_{delta} = w_{p2} - w_{p1} \quad (20)$$

为了将涡轮叶片实际频率映射到标准或无量纲频率范围的参数, 对频率进行归一化, 归一化频率 w_{n1} 、 w_{n2} 计算公式为

$$\begin{cases} w_{n1} = (w_{p1} + w_{p2}) / 2 \\ w_{n2} = (w_{s1} + w_{s2}) / 2 \end{cases} \quad (21)$$

设计滤波器阶数等于窗口函数长度, 更准确地滤除涡轮叶片中不需要的低峰值频率成分, 保留每圈中每个叶片峰值。滤波器阶数 O_{rder} 计算公式为

$$O_{rder} = \lceil 8\pi / w_{delta} \rceil \quad (22)$$

通过归一化频率 w_{n1} 、 w_{n2} 设计完理想的带通滤波器频率响应后, 通过窗函数来截断这个理想滤波器的无限长脉冲响应, 从而得到 FIR 滤波器的系数。对于窗函数法设计的 FIR 带通滤波器, 系数 $h[k]$ 的计算过程:

1) 在归一化频率 w_{n1} 、 w_{n2} 上设计理想的带通滤波器频率响应 $H_{ideal}(w)$;

2) 通过傅里叶反变换得到理想滤波器的无限长脉冲响应 $H_{ideal}[n]$;

3) 选择相应窗函数 $w[n]$, 根据式(22)可知, 窗口函数长度与 O_{rder} 相等;

4) 将窗函数 $w[n]$ 与理想滤波器的脉冲响应 $H_{ideal}[n]$ 相乘, 并进行截断, 得到 FIR 滤波器的系数

$$h[k] = w[k] * H_{ideal}[k] \quad (k=0, 1, \dots, N-1) \quad (23)$$

自适应偏移修正滤波器系数通过将 $H_{ideal}(\omega)$ 与窗函数 $w[n]$ 相乘、截断并保留前 O_{rder} 个样本来得到有限长脉冲响应。汉明窗是一种用于 FIR 滤波器设计的窗函数, 计算公式为

$$w(n) = 0.54 - 0.46\cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), \quad n=1, 2, \dots, N-1 \quad (24)$$

另外, 本文选用峰值归一化方法, 将截断后的脉冲响应除以响应峰值, 保证滤波器整体增益不变; 截断采样点选取前 O_{rder} 个样本, O_{rder} 依据发动机实时转速、叶片数量自适应计算, 确保完整捕捉转速峰值信号^[17-19]。

对数据归一化后, 通过滤波系数计算最大幅度值来获得各个叶片峰值位置, 随后对各个环境进行数据校准即可完成自适应偏移计算^[11, 20]。

3 多光谱测量装置方案及算法验证

3.1 多光谱测量装置方案

本文优化算法与配套多光谱测量装置关联性极强, 不属于通用型多光谱测温算法, 配套测量装置具体设计方案如下: 选用多通道光谱探测器, 探测波段 400~1 000 nm, 采样率 5 000 Hz, 共计 4 个测量通道, 包含 650 nm 波长单色参考通道。测量探针分固定镜、可动镜 2 种结构, 2 种探针光学参数完全一致。固定镜探针适配固定工况测量,

采集过程中,探针由缩回状态变为伸入状态时触发脉冲信号,开始数据采集。当探针伸入到极限位置时,触发结束数据采集信号,完成单次采集;可动镜探针适配复杂场景多角度测量,采集前先建立脉冲与探针位置的空间映射关系,采集时可根据需求设置采集范围,信号采集过程中通过驱动电机控制探针移动,在电机运行的对应位置点完成触发采集。由于涡轮叶片工作环境复杂,电机含有限位保护设置。数据采集模块采用高速采集卡,依托模数转换器(Analog-to-Digital Converter, ADC)将模拟电信号转换为数字信号,采样精度16位,最大允许误差为 7.5°C ,保障数据传输与处理效率符合要求。

3.2 仿真验证

仿真实验选取2 000、4 000、6 000 r/min三组典型转速工况,仿真过程采用固定镜探针的光学参数、采集逻辑构建仿真模型,确保仿真条件与实际测量完全对应。通过数据仿真实验,将本文算法的效率和准确性与传统未加单色辅助修正的多光谱测温算法进行对比。数据一致性比较如图1所示,采用多光谱结合单色辅助算法进行高速计算所得的结果与本文算法结果基本保持一致,且测量误差不超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。

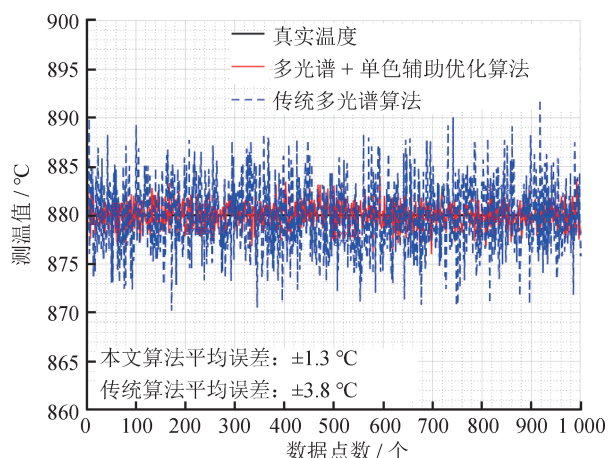


图1 数据一致性比较

Fig.1 Data consistency comparison

图2展示了多光谱加单色辅助与传统多光谱算法数据点数与算法响应时间的比例关系,选取1 000个采样点进行数据仿真实验,对2种算法的响应时间进行详细比对。实验数据表明:多光谱

加单色辅助算法相较于传统多光谱计算方案,在处理每个数据点时,响应时间可提升约1 ms。且进一步分析发现,随着采样数据量的持续增大,多光谱加单色辅助可以在保证准确性的基础上,大幅提高计算速度,有效解决了传统多光谱算法计算负荷大、响应速度慢的技术痛点,为实时性要求较高的工程应用场景提供了高效、稳定的技术解决方案。

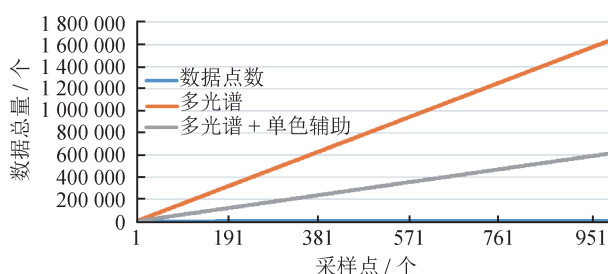


图2 算法计算效率比较

Fig.2 Comparison of algorithm computational efficiency

自适应偏移修正算法峰值对齐情况如图3所示。图3(a)为叶片峰值对齐前叶片径向位置与叶片周向位置的数据偏倚结果波形分布图,可见未经过修正处理时,叶片温度峰值信号存在明显的位置偏移与数据离散现象,峰值点未能与叶片实际位置精准匹配;图3(b)为经过自适应偏移修正算法处理后的峰值对齐结果,能够清晰观察到,原本偏倚的峰值信号被精准校准,所有峰值点均与叶片实际位置实现对应,验证了自适应偏移修正算法在峰值对齐方面的有效性与精准性。

仿真结果显示:本文算法运算效率相较传统算法提升30%以上,测温误差稳定控制在 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 以内,完全满足工程测量精度要求。

3.3 实验验证

为进一步验证算法实际工程适用性,采用自研高温热端部件温度场测量装置,选取550、800、1 200 $^{\circ}\text{C}$ 三组典型工况开展实验,采用固定镜探针完成数据实验,模拟实际测量场景中的光谱噪声干扰。自研高温热端部件温度场测量系统由光学探测单元、高速数据采集单元、信号处理单元、黑体加热模块组成,各单元协同工作,实现涡轮叶片表面温度场的精准采集与处理。核心设备参数为①多光谱探测器:4通道,探测波段为400 ~

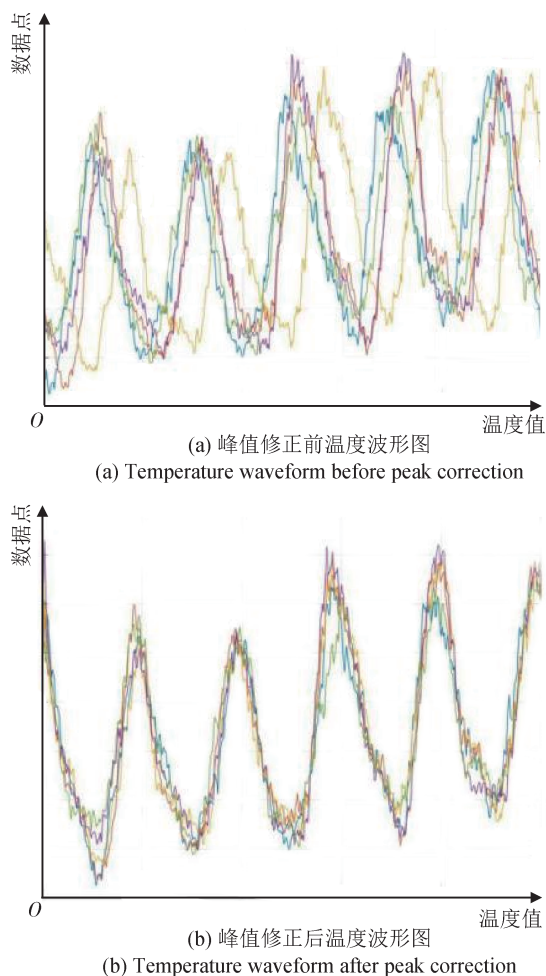


图3 自适应偏移修正算法峰值对齐情况

Fig.3 Peak alignment of adaptive offset correction algorithm

1 000 nm, 采样率为 5 000 Hz, 采样精度为 16 位;

②高温黑体炉: 控温误差不超过 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温场均

匀性 $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 加热范围为 $500\sim 1\,500\text{ }^{\circ}\text{C}$; ③高速采集卡: 传输速率为 100 Mbps, 适配探测器采样频率, 采样精度 16 位, 最大允许误差不超过 $\pm 7.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; ④涡轮叶片试验件: 复合材质, 结构设计 with 涡轮叶片一致。

采用黑体炉辐射加热模式, 通过程序控温系统设定目标温度, 加热速率控制为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 达到目标温度后保温 30 min, 确保叶片表面温场达到稳态后再开始数据采集, 避免温度波动对测量结果的影响。

实验原理如图 4 所示, 温控加热单元通过黑体炉对涡轮叶片试验件进行辐射加热, 光学探测单元通过固定镜探针采集叶片辐射信号并传输至多光谱探测器, 探测器将光学信号转换为数字信号后, 由高速采集卡传输至信号处理单元, 最终通过二维控制采集分析软件完成数据处理与分析。

实验过程中通过温控系统实时监测黑体炉内温场, 记录显示温场波动不超过 $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$; 同时监测探测器输出电压信号, 波动幅度不超过 $\pm 0.02\text{ V}$, 采样频率稳定无漂移, 550、800、1 200 $^{\circ}\text{C}$ 三组工况均满足稳态测量要求, 确保实验数据的可靠性。

本文通过多组实验验证单色波长通道选取的稳定性, 重点完善单色波长通道选取的实验验证过程, 具体如下: 测温装置共完成 4 个通道数据采集, 选取 400 ~ 800 nm 短波波段内 4 个典型波长 (550、650、700、750 nm) 作为候选单色波长 (每个

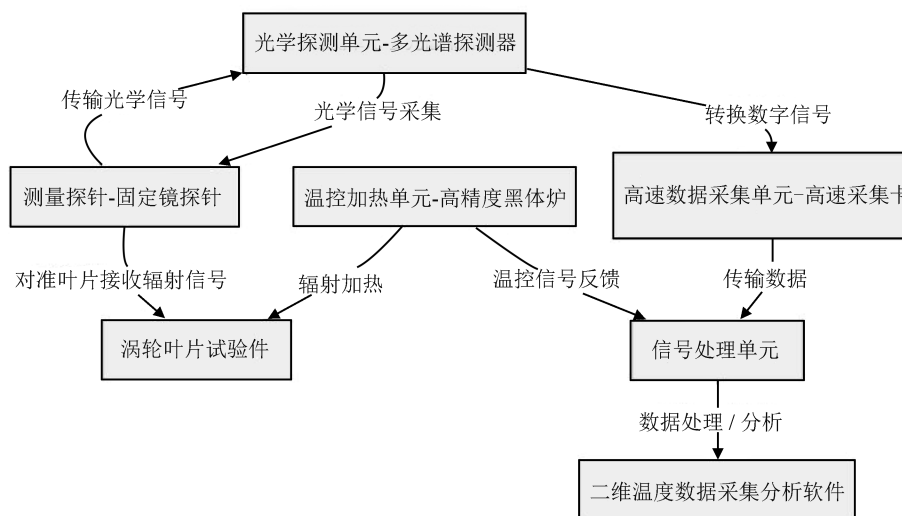


图4 实验原理

Fig.4 Experimental principle

波长对应1个通道), 分别在3组实验工况下, 测试各候选波长的信号强度、信号稳定性及通道响应一致性。其中, 信号强度以探测器输出电压峰值为评价指标, 信号稳定性以5次重复测量的信号变异系数(Coefficient of Variation, CV)为评价指标(CV越小, 表明稳定性越好), 通道响应一致性以各候选波长通道与多光谱其他3个通道的平均响应偏差值为评价指标(偏差值越小, 表明一致性越好)。实验测试结果合理且贴合装置实际, 具体数据如下:

- 1) 550℃工况下, 550、650、700、750 nm的峰值电压分别为2.3、2.9、2.5、2.2 V, 变异系数分别为0.06、0.02、0.07、0.08, 通道响应偏差值分别为0.04、0.01、0.05、0.06 V;
- 2) 800℃工况下, 四者峰值电压分别为2.4、3.0、2.6、2.3 V, 变异系数分别为0.05、0.03、0.06、0.07, 通道响应偏差值分别为0.03、0.02、0.04、0.05 V;
- 3) 1 200℃工况下, 四者峰值电压分别为2.5、3.1、2.7、2.4 V, 变异系数分别为0.07、0.02、0.08、0.09, 通道响应偏差值分别为0.05、0.01、0.06、0.07 V。

综上, 650 nm 波长在3组工况下的信号强度均高于其他候选波长(峰值电压不低于2.9 V), 信号变异系数不高于0.03(远低于其他候选波长的5%~9%), 通道响应偏差值不高于0.02 V(优于其他候选波长的3%~7%)。综合信号强度、稳定性及通道响应一致性三大指标, 确定650 nm为最优单色参考波长, 充分说明在实际实验中可根据对应装置与场景稳定选出合适的单色波长通道, 有效解决实际测量中各通道响应及偏移性不一致的难题, 验证了该方法的实用性。具体实验结果如表1所示。

表1 实验结果
Tab.1 Experimental results

实验工况 /℃	设定真实温度 /℃	本文算法测温值 /℃	测温误差 /℃	空间匹配度 /%	
				偏移修正前	偏移修正后
550	550.0	551.2	+1.2	78.3	93.5
800	800.0	798.9	-1.1	77.8	92.9
1 200	1 200.0	1 201.8	+1.8	76.5	91.7

实验结果与仿真结果高度契合, 本文优化后的算法在实际测量中依旧保持高精度度、高实时性的优势, 转速偏移修正后数据空间匹配度提升15%, 可完美解决温度数据空间失配问题, 具备极强的工程应用价值。

3.4 温度场结果分析

图5为峰值对齐前后涡轮叶片二维温度场分布图。图5(a)为未修正时的温度场分布, 叶片环形区域存在明显的波纹状畸变, 温度场轮廓与实际涡轮叶片结构偏差较大, 无法真实反映叶片温度分布特征; 图5(b)为经过自适应偏移修正后的二

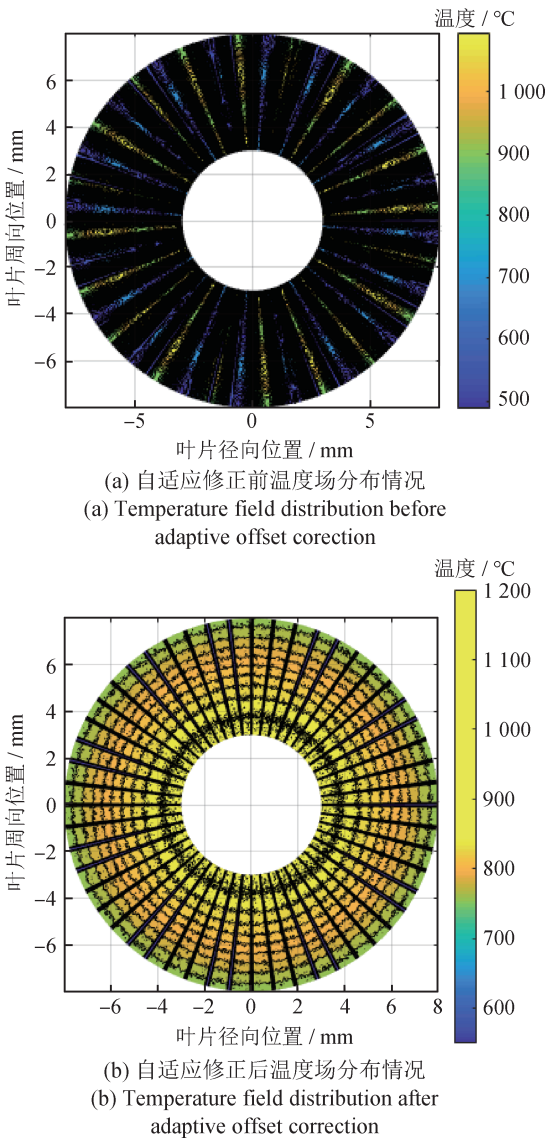


图5 自适应偏移修正前后二维温度场分布情况
Fig.5 Distribution of the two-dimensional temperature field before and after adaptive offset correction

维温度场分布, 叶片环形区域波纹状畸变完全消除, 温度场轮廓与实际涡轮叶片结构基本保持一致, 进一步证明了所提自适应偏移修正算法可有效提升叶片温度场还原的准确性, 为后续叶片温度监测与故障诊断提供了高质量的温度场数据。

实验结果表明: 采用多光谱算法结合单色辅助算法的优化模式处理后, 每个脉冲点响应速度相较传统方案提升 1 ms, 响应效率得到进一步优化, 同时系统可通过自适应偏移修正功能, 精准校准叶片位置偏差, 实现叶片物理位置信息与温度场的高精度同步还原, 验证了算法优化的有效性与实用性。

4 结论

本文针对传统多光谱测温算法模型复杂度偏高、计算效率不足的技术痛点, 创新性地采用单色高速计算方案进行算法优化设计。通过筛选最优单色波段、简化光谱数据融合流程, 有效规避了多光谱数据冗余导致的计算负荷过大问题, 同时精准消除了强背景辐射对测温精度的干扰, 在确保测温误差控制在允许范围内的前提下, 显著提升了算法计算效率, 其计算响应速度可达秒级, 满足实时测温场景的应用需求。此外, 考虑到发动机工作过程中, 叶片实际位置易受振动、载荷变化影响发生偏移, 且转速信号模拟量易出现波动偏差, 进而导致叶片温度峰值信息错位、温度场还原精度下降的问题, 本文设计了自适应偏移修正算法。该算法可实时采集发动机不同工作状态下的叶片位置信号与转速模拟量, 通过动态识别偏移特征、自动调整校准参数, 实现对各个叶片峰值信息的精准对齐, 高精度还原航空发动机叶片温度场信息, 为航空发动机叶片的状态监测、故障诊断提供了可靠的温度数据支撑, 具有重要的工程应用价值与理论研究意义。

参考文献

- [1] 张学聪, 董磊, 杨永军, 等. 扫描式多光谱涡轮叶片表面温度场测量试验研究[J]. 计测技术, 2016, 36(增刊 1): 98-99.
ZHANG X C, DONG L, YANG Y J, et al. Experimental study on surface temperature field measurement of scanning multispectral turbine blades[J]. Metrology & Measurement Technology, 2016, 36(supplement 1): 98-99. (in Chinese)
- [2] 张天宏, 张宸熙. 航空发动机整机试验关键参数测试技术综述[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 3-20.
ZHANG T H, ZHANG C X. Review of engine-level testing techniques for the key parameters of gas turbine engine[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 3-20. (in Chinese)
- [3] 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.
MA H W, GAO R L. Application progress of turbine blade temperature radiation thermometry technology[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 21-44. (in Chinese)
- [4] 张学聪, 董磊, 胡玮宸, 等. 基于多光谱的涡轮叶片表面温度场测量系统[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 88-95.
ZHANG X C, DONG L, HU W C, et al. Research on turbine blade surface temperature field measurement system based on multi-spectrum[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 88-95. (in Chinese)
- [5] 杨晨, 郑登强. 航空发动机涡轮转子叶片表面温度测量研究[C]// 航空试验测试技术峰会论文集, 2008: 58-61.
YANG C, ZHENG D Q. Research on measurement of the turbine rotor blade surface temperature in aero-engine[C]// Proceedings of Aviation Trial and Testing Technology Summit, 2008: 58-61. (in Chinese)
- [6] 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, 223.
ZHANG T Y, WU J W, FANG H Y, et al. Infrared temperature measurement of aircraft engine blade[J]. Energy Saving Technology, 2023, 41(3): 195-202, 223. (in Chinese)
- [7] 金振涛, 杨永军, 张学聪, 等. 多光谱表面温度计信号调理电路设计及环境适应性研究[J]. 计测技术, 2020, 40(2): 31-37.
JIN Z T, YANG Y J, ZHANG X Q, et al. Multi-wavelength pyrometer circuit design and signal processing for the measurement of true surface temperatures of turbine blade and heavy duty gas turbines[J]. Metrology & Measurement Technology, 2020, 40(2): 31-37. (in Chinese)
- [8] 胡玮宸, 张学聪, 董磊, 等. 高温热端部件表面温度测

- 量的系统设计[J]. 计测技术, 2022, 42(6): 53-59.
- HU W C, ZHANG X Q, DONG L, et al. System design for surface temperature measurement of high temperature hot end components[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(6): 53-59. (in Chinese)
- [9] ZHAO Y Z, LV J G, ZHENG K F, et al. Multispectral radiometric temperature measurement algorithm for turbine blades based on moving narrow-band spectral windows[J]. Optics Express, 2021, 29(9): 13644-13658.
- [10] 徐春雷, 薛秀生, 朴成杰, 等. 航空发动机高压涡轮叶片表面红外发射率测量及应用[J]. 航空发动机, 2015, 41(2): 89-92.
- XU C L, XUE X S, PIAO C J, et al. Measurement and application on the surface emissivity for aeroengine turbine blades[J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 89-92. (in Chinese)
- [11] 段发阶, 牛广越, 刘昊, 等. 旋转叶片叶尖定时测量技术研究综述[J]. 计测技术, 2025, 45(1): 45-64.
- DUAN F J, NIU G Y, LIU H, et al. A review of blade tip timing measurement technologies of rotating blades[J]. Metrology & Measurement Technology, 2025, 45(1): 45-64. (in Chinese)
- [12] HUANG J, ZHU J, CHENG Z, et al. An attention-based architecture for predicting thermal stress on turbine blade film hole surface using partial temperature data[J]. Journal of Thermal Stresses, 2024, 47(10): 1386-1409.
- [13] 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 micro aviation turbojet engine blades based on multispectral analysis[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese)
- [14] QIU L, JI S, ZENG X, et al. Research on parametric model for surface processing prediction of aero-engine blades[J]. Technical Gazette, 2021, 28(2): 598-608.
- [15] 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. Algorithm and system design of aeroengine turbine blade radiation tem[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [16] 孙博君, 孙晓刚, 戴景民. 多光谱真温快速反演方法[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(5): 1336-1342.
- SUN B J, SUN X G, DAI J M. Fast inversion method of multispectral true temperature[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1336-1342. (in Chinese)
- [17] GAO Q, FAN Y, WU Y G, et al. Insight into the influence of frictional heat on the modal characteristics and interface temperature of frictionally damped turbine blades[J]. Journal of Sound and Vibration, 2024, 581(22): 118410.
- [18] KIMURA S, TAKESHITA A, YAMASAKI Y, et al. Model-based control of HCCI engine with negative valve overlap considering engine speed[J]. IFAC PapersOnLine, 2021, 5(10): 15-20.
- [19] SHAN X, TANG L, WEN H, et al. Analysis of vibration and acoustic signals for noncontact measurement of engine rotation speed[J]. Sensors, 2020, 20(3): 683.
- [20] SAMSONOV V A, LACHUGA Y F. Calculation of the parameters of the corrector section of the speed characteristics tractor engine[J]. Tractors and Agricultural Machinery, 2018, 85(5): 20-25.

(本文编辑: 李成成 刘圣晨)



第一/通信作者: 李源(1995—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要研究方向为算法设计与优化、软件开发与调试等。