

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2025.01.06

基于多光谱的涡轮叶片表面温度场测量系统

张学聪, 董磊, 胡玮宸, 蔡静, 李源*

(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: 由于航空发动机内部背景辐射较强, 利用常规辐射测温系统测量涡轮叶片表面得到的温度值与实际温度值存在较大偏差, 针对此问题, 基于多光谱测温原理研制了新一代涡轮叶片表面温度测量系统。该系统采用可动镜探针及固定镜探针实现高可靠性扫描, 通过高速多通道同步信号采集与控制系统实现信号的高效采集和设备的精准控制, 利用复杂热环境多光谱测温建模、多视角三维温度场重建等技术实现叶片表面三维温度场在线测量与重建。使用黑体辐射源和动态校准装置对基于多光谱的涡轮叶片表面温度场测量系统的性能指标进行测试, 结果显示: 该系统能够实现 550 ~ 1 500 °C 涡轮叶片表面温度的实时在线测量, 最大允许误差不超过 ± 7.5 °C, 满足涡轮叶片温度测量需求。研究成果为促进高温复杂环境下航空发动机涡轮叶片热学参数测试技术发展提供了有力支撑。

关键词: 辐射测温; 多光谱测温; 高速数据采集; 三维温度场; 融合重建

中图分类号: TB942; V232.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-5795 (2025) 01-0088-08

Research on turbine blade surface temperature field measurement system based on multi-spectrum

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

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

Abstract: Due to the strong background radiation inside the aero engine, there is a large deviation between the temperature value obtained by measuring the surface of the turbine blade using the conventional radiation temperature measurement system and the actual temperature value. To address this issue, a new generation of turbine blade surface temperature measurement system was developed based on the principle of multispectral temperature measurement. The system uses movable mirror probes and fixed mirror probes to achieve high-reliability scanning, realizes efficient signal acquisition and precise control of equipment through high-speed multi-channel synchronous signal acquisition and control system, and realizes online measurement and reconstruction of three-dimensional temperature field on the blade surface by using multispectral temperature measurement modeling in complex thermal environment, multi-view three-dimensional temperature field reconstruction and other technologies. The performance indexes of the multispectral turbine blade surface temperature field measurement system were tested by using a blackbody radiation source and a dynamic calibration device, and the results showed that the system could achieve real-time online measurement of the surface temperature of turbine blades at 550 ~ 1 500 °C, and the maximum allowable error did not exceed ± 7.5 °C, which met the temperature

收稿日期: 2024-12-28; 修回日期: 2025-01-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2022YFB3207000)

引用格式: 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.

Citation: 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.



measurement requirements of turbine blades. The research results provide strong support for promoting the development of thermal parameter testing technology for aeroengine turbine blades in high-temperature and complex environments.

Key words: radiation temperature measurement; multi-spectral temperature measurement; high-speed data acquisition; three-dimensional temperature field; fusion reconstruction

0 引言

涡轮叶片是动力装备的重要组成部分,其所处工作环境恶劣、旋转速度高、结构复杂,容易发生故障。研究表明,涡轮叶片工作温度每超过额定温度 $28\text{ }^{\circ}\text{C}$,航空发动机寿命将会缩短 50% ,航空发动机运行过程中存在的潜在风险也会急剧增加^[1]。针对航空发动机涡轮叶片的测温方法可分为接触式测温法和非接触式测温法两大类。接触式测温法的布点密度提升困难,晶体测温 and 示温漆只能获得最高温度,且只能在温度测试后判读,无法实现温度实时测量。典型的非接触式测温法包括荧光测温法与辐射测温法,可实现实时温度测量。荧光测温法使用的荧光物质制备工艺复杂,在制备过程中可能会改变热障涂层的强度与隔热特性,且需要外设激光对荧光物质进行激发。辐射测温技术具有响应速度快、不影响温度场、不破坏叶片结构以及测温上限高等优点,能适应多种测温环境要求,是目前实现涡轮叶片在线温度测量的理想方式之一^[2-3]。Siemens公司在 180 mW 燃气轮机原型机上使用辐射高温计对叶片的温度分布细节进行研究。Kawasaki公司研制了高温计测量叶片表面的温度分布,评估其研发的 L30A 型工业燃气轮机涡轮叶片的冷却能力。GE公司使用多光谱高温计测量涡轮叶片,可以检测叶片涂层是否脱落,并测量叶片的温度和发射率。然而,常规辐射测温法测量结果易受目标表面状态、路径介质和环境温度的影响,此外发动机内部存在各种强背景辐射,导致温度测量结果与真实温度值之间存在较大偏差^[4]。

为实现航空发动机涡轮叶片温度场的准确测量与重建,本文研制了基于多光谱的涡轮叶片表面温度场测量系统。采用多光谱测温算法减小叶片发射率、高温热背景辐射等因素对测量结果的影响^[5-6],并根据涡轮叶片面型、大小、测量距离等条件设计探针机械结构。涡轮叶片表面温度测

量系统采用专用四光谱通道光学系统进行数据采集,并通过滤波、降噪技术对数据进行处理,生成三维温度场数据,为航空发动机涡轮叶片设计及性能测试提供可靠的数据支撑。

1 涡轮叶片表面温度场测量系统原理

1.1 硬件原理

扫描探针安装于航空发动机机匣上,处于准备状态时,扫描探针停留在外涵道,以免受高温气流影响。测温开始时,通过气缸活塞组件驱动扫描探针伸入。本系统的数据采集模式分为可动镜采集和固定镜采集。在固定镜探针伸入过程中,视场沿涡轮叶片叶根到叶尖的方向进行移动,系统通过探针伸入/缩回状态判断数据采集的开始/结束,从而采集叶片表面辐射信息。可动镜探针在伸入过程中不进行采集,当可动镜探针伸入到指定位置后,电机带动反光镜旋转,实现视场从叶根到叶尖的扫描。探针工作原理如图1所示。后端光电探测器及电路系统将测量得到的辐射能量信息转换为电压信息,传输至软件部分进行数据处理^[7-8]。

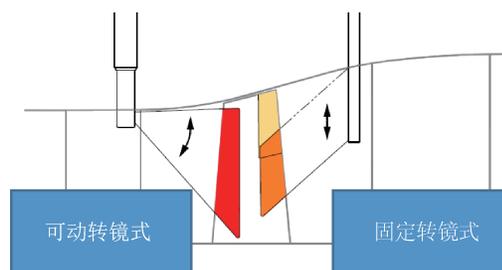


图1 探针工作原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of probe working principle

1.2 软件原理

为实现多个不同网络间的数据信息传输,温度采集控制软件使用传输控制协议/网际协议(Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP)、用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)、Modbus协议完成串口、以太网指令控制和温度场数据交互等通信过程。使用SQLite轻量型

数据库存储发动机参数，实现控件关联检索和数据回滚。由于控制软件部分含多个功能模块，开发时为了降低各模块耦合性并提升数据处理流畅性，增加了多线程设计，提高程序的响应速度和资源分配率。温度扫描模块采用 Modbus 协议和 TCP 协议混合设计，利用 Modbus 独立进行探针流量、压力、温度等参数的监测，增加系统的可靠性和数据鲁棒性。数据分析模块采用滤波算法、奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)算法进行多光谱温度计算^[9-10]，对每个叶片的平均温度进行计算，并绘制曲线，最终生成对应的二维温度矩阵。通过协同开发的方式将温度场重建模块和探针控制软件进行耦合设计，在点击温场重建模块时，软件会通过相应配置文件参数访问二维温度场分析模块进行数据分析，结合叶片机械结构模型生成三维温度场。软件原理如图2所示，软件根据指令进行脉冲信号采集，之后自动选择标定函数并根据触发方式决定是否进行行程轨迹追踪，在进行触发数据解析后，利用多光谱温度测量算法对采集的电压信号进行转换，得到温度矩阵。

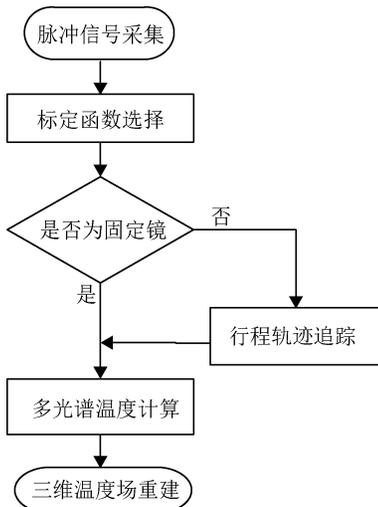


图2 软件原理

Fig.2 Principle of software

2 涡轮叶片表面温度场测量系统组成及主要功能

2.1 硬件组成

涡轮叶片表面温度测量系统中的硬件模块由扫描探针及控制器组成。扫描探针包括探针外壳、扫描机构、气缸、吹扫缸、视管组件等部分^[11]。

本课题组研发了固定镜扫描探针和可动镜扫描探针两款产品。固定镜扫描探针根据气缸伸入/缩回状态进行信号采集，可动镜扫描探针根据扫描范围进行扫描点信号采集。控制器包含光电组件、数据采集组件、气缸、电机驱动组件及电源模块。光电组件通过光纤与扫描探针相连，数据采集组件通过现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)采集多通道数据。固定镜扫描探针和可动镜扫描探针实物图如图3所示。

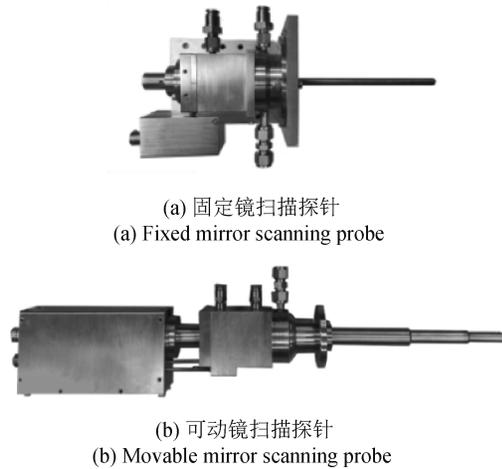


图3 固定镜扫描探针和可动镜扫描探针实物图

Fig.3 Physical pictures of fixed mirror scanning probe and movable mirror scanning probe

2.2 软件组成

温度控制采集软件包括通信模块、校准模块、参数设置模块、探针控制模块、实时计算模块、温度扫描模块、数据分析模块、温度场重建模块及各子功能模块。开启软件后，需先建立通信并配置发动机参数，之后可进行相应温度扫描和数据分析。实时计算模块用于在测试开始前进行温度数据预测试并判断其是否准确。探针控制模块主要由指令控制模块、电机脉冲表载入模块及实时计算模块组成，其中指令控制模块可对探针、激光进行操作，温度扫描模块包含参数设置模块、触发测试模块、运行状态模块、数据保存模块、转速显示模块、状态采集模块、平均温度计算模块。数据解析部分可解析采集的脉冲数据并计算叶片平均温度。在进行数据采集和软件操作时，主界面会通过状态栏显示软硬件交互信息，实时刷新通信状态。

2.3 系统主要功能

2.3.1 通信功能

通信模块负责建立软硬件之间的连接。硬件初始化完成后，在软件主界面点击连接即可完成通信建立，并通过 Modbus 连接开启传感器数据实时采集。状态栏会显示连接是否建立成功。

2.3.2 量程标定功能

量程标定模块在需要重新标定温度计算函数时使用。根据对应步骤进行校准保存后，即可将标定参数自动存储到数据库中。在温度扫描时，探针控制软件会自动根据选项关联查询对应标定函数，并进行SVD温度计算。

可使用黑体辐射源对零点电压和参考温度上限、下限进行标定^[12]，同时利用参考温度信息计算每个量程范围内的有效波长。采用多光谱算法进行温度计算，大幅降低背景噪声、强辐射、距离等因素所产生的影响，标定文件只需对各温度范围进行一次标定即可完成温度精准计算。标定流程如图4所示。

2.3.3 发动机参数设置功能

温度控制采集软件利用SQLite轻量级数据库进行参数数据存储。参数设置模块用于对发动机类型、叶片级数、探针位置、探针型号、标定函数等信息进行存储及设置。发动机、探针参数设置关系如图5所示。

2.3.4 探针控制功能

探针控制模块负责对探针状态、激光状态、电机驱动进行设置。探针温度采集控制软件具有电机远程控制功能，通过网口下达电机控制指令，硬件系统收到指令后控制电机旋转，实现对电机温度的校准。电机温度校准包含微调 and 幅调操作，解决了手动输入脉冲数操作过于复杂的问题。对电机位置进行调节操作时，软件可自动判断电机限位状态并进行相关提示，防止过度操作或同向操作造成电机烧毁。

脉冲文件配置用于配置可动镜扫描探针电机脉冲数与物理空间位置之间的关系，使探针在多种测量距离下均具有良好的空间分辨力。

本系统中增加了日志显示部分，用于显示上位机与下位机之间的通讯指令，可根据日志显示内容判断下位机工作是否正常。

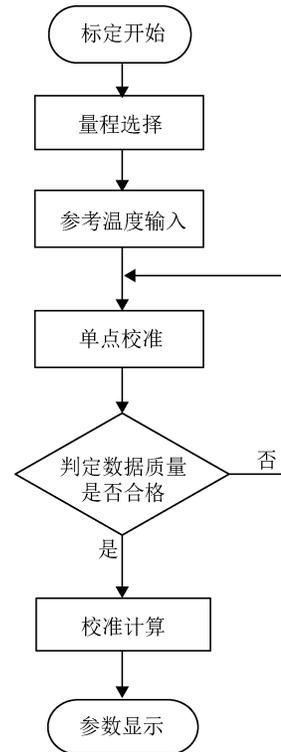


图4 标定流程

Fig.4 Calibration process

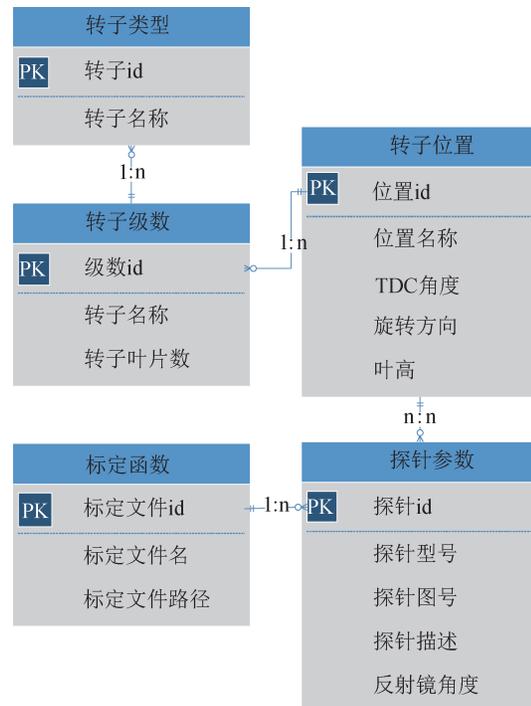


图5 发动机、探针参数设置关系图

Fig.5 Diagram of relationship between engine and probe parameter settings

2.3.5 扫描模式控制功能

进行温度扫描时需先选择指定发动机参数、

标定文件、量程和扫描范围信息，之后测量系统会根据对应参数信息进行数据采集及分析计算。触发测试模块负责采集探针运行过程中对应触发信号之间的温度数据。数据采集由下位机FPGA完成，采集速度最高可达5 m/s，由于采集速度远大于叶片转动线速度，因此产生的拖影可忽略不计。运行状态模块对探针伸缩位置、激光、电机、当前量程等状态进行实时显示，状态正常时，对应指示灯呈绿色；状态异常时，对应指示灯呈红色；若软件处于未连接状态，指示灯呈灰色。状态监测模块对气缸压力、吹扫压力、吹扫流量、气缸位移等物理量进行实时监测。软件启动时，系统自动对各个状态监测传感器下达指令并开始数据采集。采集数据时，软件会同步监测数据状态，报警蜂鸣和指示灯会在传感器测量得到的数据超出阈值时启动。扫描模式测试流程图如图6所示。

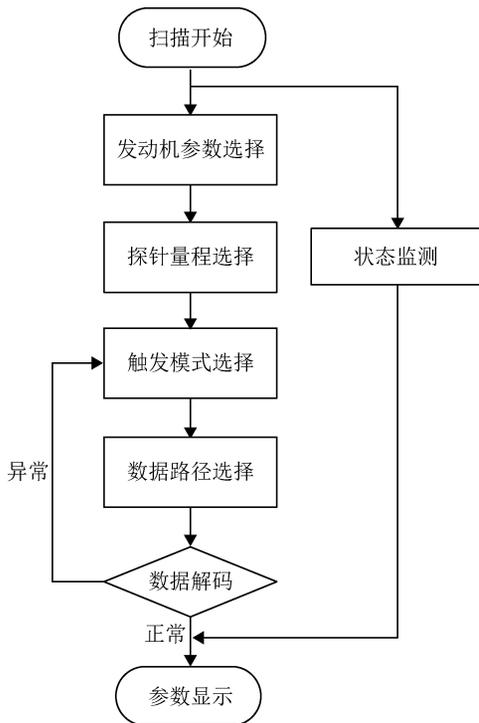


图6 扫描模式测试流程图

Fig.6 Scanning mode test flowchart

2.3.6 温度数据解析功能

本系统通过连续计算数据温度点样本的平均值来减少随机噪声，有效抑制短期波动，并突出长期温度模型的趋势。数据解析基本流程如图7所示。

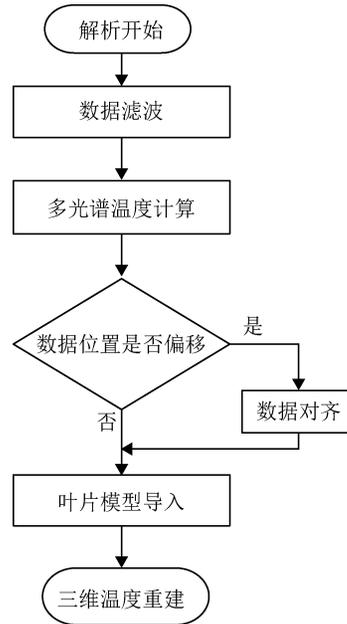


图7 数据解析基本流程

Fig.7 Basic process of data parsing

3 测试试验

3.1 性能指标测试及不确定度分析

使用黑体辐射源和动态校准装置对基于多光谱的涡轮叶片表面温度场测量系统的主要性能指标进行测试，结果如表1所示。多光谱温度计算公式为

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

式中： a 、 b 、 c 为与发射率相关的待定系数； $\lambda_1 \sim \lambda_4$ 为通道1至通道4的有效波长； c_2 为第二普朗克黑体辐射常数， $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ ； $V_{\lambda_1} \sim V_{\lambda_4}$ 为测量时通道1至通道4的输出电压； $V_{\lambda_1}' \sim V_{\lambda_4}'$ 为标定时通道1至通道4的输出电压； T 为被测目标温度； T' 为标定时黑体辐射源温度。式(1)中 a 、 b 、 T 为待求解参数，其余参数已知，通过计算即可求解得到目标温度 $T^{[13]}$ 。

表1 涡轮叶片表面温度场测量系统指标

Tab.1 Index of turbine blade surface temperature field measurement system

温度测量范围/°C	最大允许误差/°C	频率响应	采样率/(MSa/s)	靶点直径/mm	行程/mm
550 ~ 1 500	± 7.5	DC ~ 300 kHz(±3 dB)	5	2	≥ 100

影响测温结果的不确定度分量包括^[14]:

1) 有效波长的不确定度 u_λ

不同温度下有效波长不同,虽然在标定时已经按照整百摄氏度点间隔标定了有效波长,但在100 °C的变化范围内,有效波长依然会发生一定的变化。因为无法准确得知被测温度,也就无法获得有效波长的确切值,只能以不确定度的形式对其范围做一个约束。有效波长的不确定度使用蒙特卡洛法进行计算^[15],其标准不确定度 $u_\lambda = 3 \text{ nm}$ 。

2) 标定时所使用的黑体辐射源温度的不确定度 u_{T_s}

仪器首先需要在标准黑体辐射源上进行标定,以获得各个通道的仪器常数。查询标准黑体辐射源证书可得到标准黑体辐射源的不确定度,以1 000 °C为例,其不确定度为1.4 °C($k = 2$),则标准不确定度 $u_{T_s} = 0.7 \text{ °C}$ 。

3) 标定时通道输出电压的不确定度 u_{V_s}

电路中不可避免地存在噪声,经过实际测试,噪声大小约为灰度值的0.7%,按正态分布($k = 3$)进行计算,标准不确定度 $u_{V_s} = 0.23\%$ 。

4) 测量时通道输出电压的不确定度 u_{V_m}

测量与标定时使用的是同一系统,通道输出电压引入的不确定度值相同, $u_{V_m} = 0.23\%$ 。

5) 发射率模型设置引入的不确定度 u_ϵ

实际的发射率模型与设定的发射率模型存在一定差异。发射率参数本身是一个输出量,不能作为不确定度的输入量进行计算。发射率模型设置引入的不确定度体现为各个通道测量得到的电压存在一定偏差,经过分析,此偏差约为0.5%,按正态分布($k = 3$)进行计算, $u_\epsilon = 0.17\%$ 。

按照以上不确定度模拟构造输入量的采样,以1 000 °C为例,使用蒙特卡洛法得到输出量 T ,结果如图8所示,近似正态分布,按照置信概率95%($k = 2$)计算,其不确定度为4.0 °C。

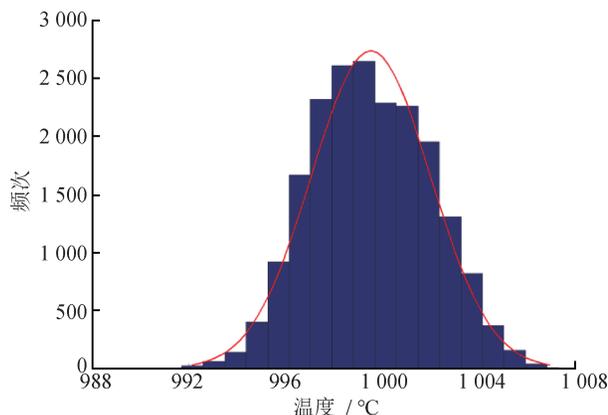


图8 利用蒙特卡洛方法评定的不确定度分布示意图

Fig.8 Schematic diagram of uncertainty distribution evaluated using Monte Carlo method

3.2 三维温度场重建试验

使用模拟数据和涡轮转子模型对三维温度场重建结果进行验证,并使用三维温度场重建软件的径向、环向分析功能对数据进行分析。图9为二维、三维温度场重建效果界面图。

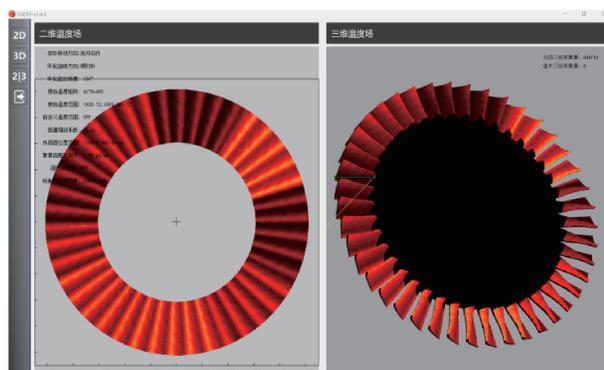


图9 二维、三维温度场重建效果界面图

Fig.9 Interface diagram of 2D and 3D temperature field reconstruction effect

角度为1.72°时的径向温度分析结果如图10所示,可清晰观察到叶片在高度方向上的温度分布情况。半径为318.55 mm时的环向温度分析结果如图11所示,可清晰观察到同一高度时,不同叶片以及同一叶片不同环向位置的温度变化情况。

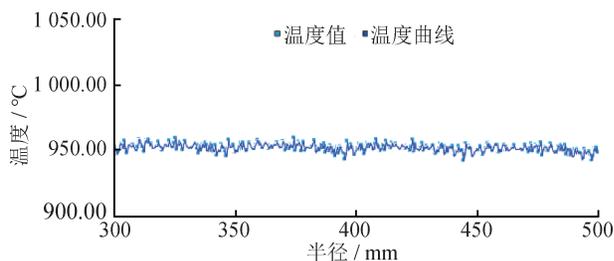


图10 径向温度分析结果

Fig.10 Radial temperature analysis results

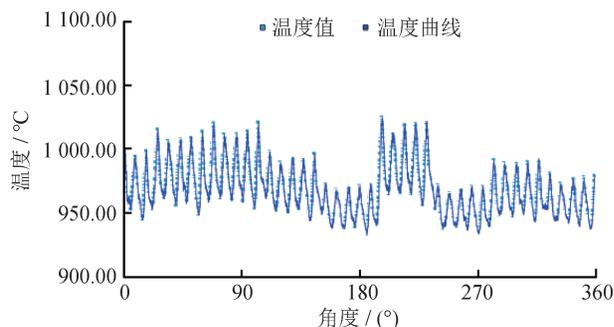


图11 环向温度分析结果

Fig.11 Circumferential temperature analysis results

4 结论

针对航空发动机涡轮叶片转速高、温度高、热冲击大等特点,开展涡轮叶片温度测量技术研究,研制出受发射率及背景环境影响小、能够建立三维可视温场的多光谱型高温测量系统。建立测量不确定度评估模型并开展分析,保证高压涡轮系统温度测量准确性。基于多光谱的涡轮叶片表面温度场测量系统能够实现550~1500℃涡轮叶片表面温度的实时在线测量,最大允许误差不超过 $\pm 7.5^{\circ}\text{C}$,为航空发动机涡轮叶片设计和性能试验提供了重要数据支撑。

参考文献

- [1] 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 of infrared emittance on the surface of high-pressure turbine blades of aero-engine [J]. Aeroengine, 2015, 41(2): 89-92. (in Chinese)
- [2] 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,2008:58-61.
YANG C, ZHENG D Q. Study on surface temperature measurement of engine turbine rotor blades [C]// Aviation Trial and Testing Technology Summit, 2008: 58-61. (in Chinese)
- [3] 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 on the surface of the aviation turbine blades [J]. Energy Saving Technology, 2023, 41(3): 195-202, 223. (in Chinese)
- [4] QIU L, JI S M, ZENG X, et al. Research on parametric model for surface processing prediction of aero-engine blades [J]. Technical Gazette, 2021, 28(2): 598-608.
- [5] 张学聪,蔡静,杨永军.多波长光电高温计测量高温壁面温度的研究[C]//第九届发动机试验与测试技术学术交流会.中国航空学会,2008.
ZHANG X C, CAI J, YANG Y J. Study on measuring high-temperature wall temperature [C]// The Ninth Engine Test and Test Technology Academic Exchange Meeting. Aviation Society of China, 2008. (in Chinese)
- [6] 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)
- [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] 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. Study on surface temperature measurement of miniature aviation turbojet engine blades based on multi-spectral analysis [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023. (in Chinese)
- [9] 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 of aero-engine turbine blade[D]. Changchun: University of Chinese Academy of Sciences (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)
- [10] 王中宇, 杨芳, 蔡静, 等. 多光谱高温测量数学模型的病态程度及算法研究[C]// 全国温度测量与控制技术学术交流会. 中国计量测试学会, 2012.
- WANG Z Y, YANG F, CAI J, et al. Research on the pathological degree and algorithm of multispectral high-temperature measurement mathematical model [C]// National Academic Exchange Conference on Temperature Measurement and Control Technology. Chinese Society for Measurement, 2012. (in Chinese)
- [11] 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 of surface temperature measurement of high-temperature hot end components[J]. Metrology & Measurement Technology, 2022, 42(6): 53-59. (in Chinese)
- [12] 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(3): 4405-4421.
- [13] 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. Multispectral true temperature rapid inversion method [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2021, 41(5): 1336-1342. (in Chinese)
- [14] 邓兴凯, 杨永军. CCD多光谱辐射测温技术的应用与发展[J]. 计测技术, 2011, 31(1): 45-49.
- DENG X K, YANG Y J. Application and development of multispectral radiation temperature measurement technology in CCD [J]. Metrology & Measurement Technology, 2011, 31(1): 45-49. (in Chinese)
- [15] 蔡静, 张学聪, 杨永军, 等. 瞬态成像式多光谱测温图像畸变及非均匀性矫正研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019, 40(增刊1): 217-221.
- CAI J, ZHANG X C, YANG Y J, et al. Transient imaging multispectral temperature image distortion and uniformity correction [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2019, 40 (supplement 1): 217-221. (in Chinese)

(本文编辑: 刘圣晨, 米若鑫)



第一作者: 张学聪(1985—), 女, 高级工程师, 主要研究方向为多光谱辐射测温技术、辐射测温仪器研制。



通信作者: 李源(1995—), 男, 助理工程师, 主要研究方向为计算机科学与技术、图像识别处理算法。