

基于无线传感器的航空发动机轴承 温度实时监测系统设计

陈虹洁¹, 肖川²

(1. 烟台黄金职业学院 信息工程系, 山东 烟台 265401;

2. 烟台南山学院 工学院, 山东 烟台 265700)

摘要: 为有效校正航空发动机轴承温度误差曲线, 得到准确的温度测量结果, 使得发动机元件的寿命周期得到充分延长, 设计基于无线传感器的航空发动机轴承温度实时监测系统; 将 JTAG 串口电路中的输出电量, 按照实际应用需求, 分配至电量集中器与基于 ARM 的无线传感器元件中; 借助温度采集节点芯片整合未完全利用的电量信号, 并将其寄存于温感信号协调器内部, 完成实时温测系统的硬件开发; 根据 ZigBee 协议栈、Z-Stack 协议栈的约束标准, 确定温度阈值的计算结果, 完善温度实测数据的时序条件, 采集航空发动机轴承温度数据。再根据温测节点布置情况, 对发动机轴承温测数据实施建模处理, 完成基于无线传感器的航空发动机轴承温度实时监测系统设计; 实验结果表明, 实验组温度校正数值最大值达到了 47.8 °C, 温度差达到其最大数值 0.3 °C, 温度差均值为 0.17 °C, 在无线传感器元件的作用下, 航空发动机轴承的温度误差曲线得到较好校正, 所得温测数据确实贴合实际情况, 对于延长发动机元件的寿命周期能够起到一定的促进性影响作用。

关键词: 无线传感器; 航空发动机轴承; 温度监测; 实时监测系统; 电量集中器; 温度阈值; 温度误差曲线

Design of Temperature Real-Time Monitoring System for Aero-engine Bearing Based on Wireless Sensor

CHEN Hongjie¹, XIAO Chuan²

(1. Information Engineering Department, Yantai Gold College, Yantai 265401, China;

2. College of Engineering, Yantai Nanshan University, Yantai 265700, China)

Abstract: In order to effectively correct the temperature error curve of aero-engine bearing, and obtain the accurate temperature measurement results and fully prolong the life cycle of engine components, an aero-engine bearing temperature real-time monitoring system based on wireless sensor is designed. The output power in JTAG serial port circuit is distributed to the power concentrator and ARM based on wireless sensor components according to the actual application requirements. With the help of the temperature acquisition node chip, the underutilized power signal is integrated and stored in the temperature sensing signal coordinator to complete the hardware development of the real-time temperature measurement system. According to the constraint standards of ZigBee protocol stack and Z-stack protocol stack, the calculation results of temperature threshold are determined, the timing conditions of measured temperature data are improved, and the aero-engine bearing temperature data is collected. Then, according to the arrangement of temperature measurement nodes, the modeling and processing of engine bearing temperature measurement data are implemented, and the design of aero-engine bearing temperature real-time monitoring system based on wireless sensor is completed. The experimental results show that the maximum temperature correction value of the experimental group reaches 47.8 °C, the temperature difference reaches its maximum value of 0.3 °C, and the average temperature difference is 0.17 °C, under the action of wireless sensor elements, the temperature error curve of the aero-engine bearing is well corrected, and the obtained temperature measurement data really fits the actual situation, which can play a certain role in prolonging the life cycle of engine elements.

Keywords: wireless sensor; aero-engine bearing; temperature monitoring; real-time monitoring system; power concentrator; temperature threshold; temperature error curve

0 引言

在机械应用系统中, 无线传感器组成模块被完全封装于一个足够大的外壳结构内, 利用振动发电机与外接电池提供的传输电量, 按需部署相关网络节点, 由于通信模块、数据处理单元、微型传感器等元件始终保持分散连接状态,

所以整个无线传感体系一直沿用传统的自组织构成模式^[1]。大多数无线传感器监测信号都保持逐级跳动的传输行为, 当数据信息参量在监测节点处大量累计时, 路由器设备开始快速运转, 一方面对暂存的数据信息进行打包处理, 使其以数据包的形式反馈至下级应用单元之中, 另一方面重

收稿日期: 2022-04-07; 修回日期: 2022-06-01。

作者简介: 陈虹洁(1981-), 女, 山东招远人, 硕士, 副教授, 主要从事计算机应用技术方向的研究。

引用格式: 陈虹洁, 肖川. 基于无线传感器的航空发动机轴承温度实时监测系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(12): 30-35.

新配置整个网络链路, 使得传感器主机能够对收集到的监测数据进行按需调度^[2]。为保证信息参量的传输完整性, 无线传感器体系中必须配置一个容量足够大的数据存储结构。

航空发动机是一种高度复杂的热力学精密机械元件, 作为飞机的心脏, 不但能够为其提供飞行动力, 还可以有效延长飞行器元件的飞行续航时间。对于航空发动机而言, 最常见的就是活塞式应用结构, 其工作原理是指利用活塞承载燃气压力作用, 并以此推动火花塞在气缸中进行反复运动。然而随着航空发动机运行时间的延长, 主轴承结构会表现出明显的温度误差, 这不但会促使所得测温结果的准确性受到影响, 还会导致发动机元件的寿命周期出现明显缩短。因为, 对航空发动机轴承温度进行监测具有重要意义。

目前相关领域学者针对轴承温度监测进行了研究^[3]。根据实时采集和监控系统的时间序列, 采用轻量级梯度增强学习器主轴承的温度预报模型, 并对其进行残差特性的估计。基于统计控制的方法, 在控制线范围内筛选出主轴承的异常温度, 并利用 AC-GAN 进行残差的重建。利用自然梯度法对主轴承进行实时检测, 并对其进行了分析。该方法可以对风机轴承的工作状况进行有效的监控。但温度测量误差较大。文献 [4] 提出了基于多节点热网络法的航空发动机主轴承温度场分析。根据 Hertz 热扩散原理, 将 3 个轴承部件分为两个节点, 即接触面和本体, 采用 Hertz 扩散热阻法进行连接。在接触部位设有油膜节点, 并对其进行加热, 由油膜热阻将节点与支座的接触面进行热阻。建立了多个节点的轴承热网模型, 得到了更加精细的温度分布。该方法对滑油出口温度的计算误差不超过 7%, 但该方法温度计算准确性有待提高。

针对上述问题, 以无线传感器元件为基础, 设计一种新型的航空发动机轴承温度实时监测系统。在无线传感器元件的作用下, 根据协议栈的约束标准, 计算温度阈值, 完善温度实测数据时序条件, 采集航空发动机轴承温度数据, 建模处理发动机轴承测温数据, 实时监测航空发动机轴承温度, 从而有效校正航空发动机轴承的温度误差曲线。

1 实时测温系统的硬件开发

航空发动机轴承温度实时监测系统的硬件应用结构由 JTAG 串口电路、DTSD720-L2 型电量集中器、DS18B20 温度采集节点芯片、基于 CC2430 的温感信号协调器等多个结构共同组成, 在基于 ARM 的无线传感器元件的调试作用下, 其具体设计方法如下。

1.1 JTAG 串口电路

JTAG 串口电路存在于航空发动机的 VCC 端口与 VDD 端口之间, 可将交变电流转化为直流传输形式, 并通过电量循环的方式, 将这些电子信号反馈至测温系统的各级硬件应用结构之中。JTAG 串口电路结构如图 1 所示。

VCC 端口作为交变电流输入端, 其外部负载一个阻值较大的连接电阻 R, 当电流输入量较大时, 转存设备 D 会

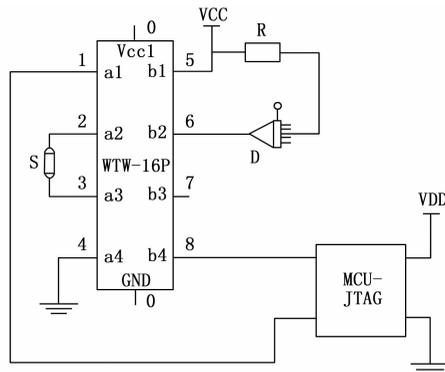


图 1 JTAG 串口电路结构图

开启单向输入状态, 一方面使得电量信号能够在 JTAG 串口电路中快速传输, 另一方面也可以适度缓解 WTW-16P 元件所面临的电量转存压力, 从而使得航空发动机轴承元件的表现稳定呈现出相对稳定的数值状态^[5-6]。VDD 端口作为直流电量输出端, 与 MCU-JTAG 主板直接相连, 当 WTW-16P 元件处于连续闭合状态时, MCU-JTAG 主板会快速更改已存储电量信号的排列方式, 从而使得无线传感器元件能够准确记录航空发动机轴承元件的运行温度数值。S 主控器存在于转存设备 D 的对立端, 前者能够对后者暂存的电量信号进行直接调取, 并可以联合 WTW-16P 元件已记录的航空发动机轴承温度实测数据, 判定设备结构的现有表现温度是否出现异常值状态。

1.2 电量集中器

电量集中器负责对航空发动机轴承温度实时监测系统传输的电量信号聚合处理, 由于其执行功能的特殊性, 在连接设备结构时, 应按照功能分块原理放置元件: 即将电容与电容放在一起、将电阻与电阻放在一起。在设计航空发动机轴承温度实时监测系统时, 选取 DTSD720-L2 主板作为电量集中器元件的核心搭建结构^[7]。DTSD720-L2 主板能够对电量脉冲信号进行全方位调试, 当电量脉冲波的传输位置相对靠近基于 ARM 的无线传感器时, 航空发动机轴承所表现出来的瞬时温度也就相对较高, 此时主板结构会通过积极调试的方式, 控制温度系数的上升幅度, 从而使得最终所获测温数据能够保持相对稳定的存在状态。DTSD720-L2 型电量集中器元件的结构模型如图 2 所示。

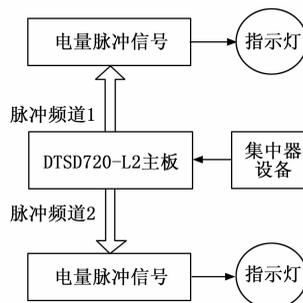


图 2 电量集中器元件的结构模型

为使常规测温数据与异常测温数据得到准确区分, DTSD720-L2 型电量集中器元件同时具备两个脉冲信号显示结构(图 2 中的脉冲 1 与脉冲 2)^[8]。当航空发动机轴承的表现温度相对较低时, 脉冲 1 信号灯亮起; 而当发动机轴承的表现温度相对较高或温度数值出现异常表现状态时, 脉冲 2 信号灯亮起。

1.3 基于 ARM 的无线传感器

基于 ARM 的无线传感器作为 JTAG 串口电路的下级调度元件, 可以借助信息采集节点与电量集中器结构相连, 并可以根据数据监测主机、核心处理器与数据库寄存元件之间的实时连接关系, 判断航空发动机轴承的温度表现水平, 并能够在传输信道组织的作用下, 将这些温测数据参量反馈回系统监测主机中^[9]。对于航空发动机轴承温度实时监测系统而言, 基于 ARM 的无线传感器保持层级连接状态, 具体结构如图 3 所示。

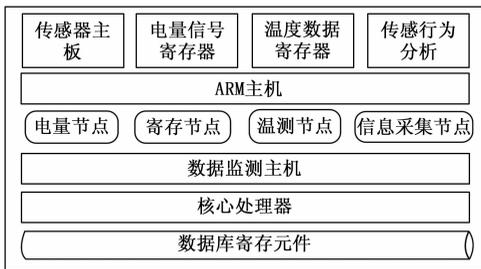


图 3 基于 ARM 的无线传感器的层级结构示意图

由于基于 ARM 的无线传感器始终保持层级连接状态, 所以各个元件结构的应用能力也会有所不同。

1) 传感器主板: 利用 ARM 主机同时管理电量信号寄存器、温度数据寄存器与传感行为分析元件, 且由于电量节点、寄存节点、温测节点、信息采集节点四类基础连接结构的存在, 已被记录的温度信息参量能够被无误传输至数据库主机之中, 在此过程中, 数据信息顺次通过数据监测主机与核心处理器结构, 但其中的信息参量却不会被相关元件设备所记录^[10]; 监测系统温度传感器的温度范围为 5~95℃, 响应速度为 5 ms, 工作电源为 AC220V±10%, 50 Hz, 控温稳定度优于 0.01℃/10 min;

2) 数据监测主机: 管控电量节点、寄存节点、温测节点、信息采集节点的连接状态, 并可以对 ARM 主机输出的数据信息参量进行初步加工;

3) 核心处理器: 航空发动机轴承温度实测数据的传输过渡装置;

4) 数据库主机: 寄存航空发动机轴承的温度实测数据, 并生成具有传输能力的信息存储文件。

1.4 温度采集节点芯片

选用 DS18B20 作为温度采集节点芯片, 主要负责处理与航空发动机轴承温度相关的实测数据, 由电阻接入区域、温感芯片接入区域、节点接触区域、连接触点四部分共同组成, 温度采集节点芯片的平面结构如图 4 所示。

其中, 电阻接入区域负责对电量集中器、基于 ARM 的

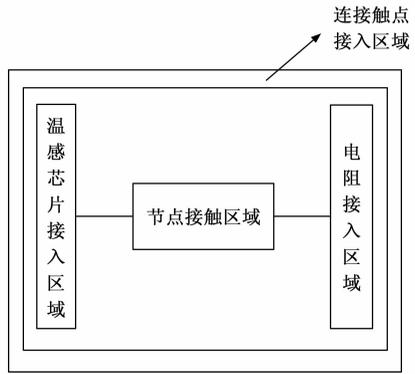


图 4 温度采集节点芯片平面结构

无线传感器元件中的感应电阻进行聚合处理, 并可以分辨出电量信号的实时传输行为, 从而使得传感器主机的信息查询需求得到较好满足。温感芯片接入区域作为温度数据采集模块与温感信号协调器元件的连接端口, 可以根据负载电阻的接入数值, 调节无线传感器结构的行为模式, 从而使其能够准确监测航空发动机轴承的实时表现温度^[11-12]。节点接触区域内负载了大量的连接管脚, 能够将其他硬件应用结构与主芯片连接起来, 进而实现对电量集中器元件执行能力的有效维护。连接触点负责区分处于传输状态的数据信息参量, 并可以将满足监测需求的信息文件, 反馈回系统核心运行主机中。在温度采集节点芯片模块中, 数据信息参量不可以自主选择其传输路径, 这也是设备元件之间始终保持稳定连接状态的主要原因。

1.5 温感信号协调器

温感信号协调器负责对无线传感器设备进行管理配置, 可以将提取到的航空发动机轴承稳定实测数据存储于 CC2430 调试模块中, 再联合电量供应装置与指示灯元件, 向核心监测主机反馈发动机轴承温度的实时量测数据^[13]。温感信号协调器的模块框架结构如图 5 所示。

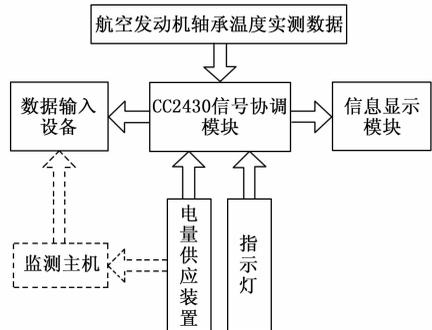


图 5 温感信号协调器模块的结构示意图

CC2430 信号协调模块负责建立基于无线传感器的监测网络, 能够按照数据信息的传输位置, 对其进行分配处理, 并可以借助数据输入设备, 更改这些信息参量的编码形式, 从而使得监测主机的运行需求得到较好满足^[14]。指示灯能够显示温感信号协调器模块的实时连接状态, 当电量供应装置的连接形式与 CC2430 信号协调模块完全相同时, 指示

灯元件则表示为“熄灭”状态; 而当电量供应装置的连接形式不满足 CC2430 信号协调模块的运行需求时, 指示灯元件则表示为“亮起”状态。

2 航空发动机轴承温度数据采集

在无线传感器元件的作用下, 按照协议栈设置、温度阈值计算、数据时序条件建立的执行流程, 完成对航空发动机轴承温度数据的采集与处理。

2.1 ZigBee 协议栈与 Z-Stack 协议栈

ZigBee 协议栈同时作用于电量集中器元件与基于 ARM 的无线传感器结构, 能够管理与航空发动机轴承温度监测指令相关的数据信息参量, 并可以将不同类型的信息参量, 存储于不同的数据库空间之中^[15]。将航空发动机轴承温度实时监测系统的 ZigBee 协议栈定义条件表示为:

$$x_1 = \frac{V - (\chi + 1)}{\alpha_1} \quad (1)$$

式 (1) 中, V 表示航空发动机轴承测温数据的初始赋值, χ 表示标准测温系数, α_1 表示基于 ZigBee 协议的测温参量。

Z-Stack 协议栈的作用能力与 ZigBee 协议栈相反, 随着该类型协议文件的应用, 协调器设备能够直接调度已存储的航空发动机轴承测温数据, 并对其进行加工与处理^[16]。将航空发动机轴承温度实时监测系统的 Z-Stack 协议栈定义条件表示为:

$$x_2 = \chi\alpha_2 - V^2 \quad (2)$$

式 (2) 中, α_2 表示基于 Z-Stack 协议的测温参量。

为使无线传感器元件能够准确监测航空发动机轴承的实时温度, 在采集数据信息参量时, 必须同时参考 ZigBee 协议栈与 Z-Stack 协议栈。

2.2 温度阈值设定

温度阈值决定了无线传感器元件所能记录的最大温度数值。对于航空发动机设备而言, 随着其运转速率的增大, 航空发动机轴承设备的表现温度也会不断增大, 出于安全性考虑, 若表现温度的数值过大, 则会导致无线传感器元件的稳定运行能力受到影响, 从而使其实测准确性大幅下降。而由于温度阈值条件的存在, 温感信号协调器可在温度测量值接近极大值条件时, 促使指示灯亮起, 并以此实现对无线传感器元件的有效保护^[17-18]。将航空发动机轴承温度实时监测系统的温度阈值设定表达式定义为:

$$B(\delta) = \frac{\delta(x_1 \cdot x_2)}{\beta} \quad (3)$$

式 (3) 中, β 表示轴承表现温度数据, δ 表示与无线传感器元件相关的实测温感。为使航空发动机元件的运行能力得到保障, 温度阈值指标的选取应尽量趋近其物理极大值。

2.3 数据时序条件

数据时序条件也叫航空发动机轴承温度数据的实测排列条件, 在已知温度阈值设定条件的前提下, 只有确保信息参量存储位置不发生改变, 才能最大化激发无线传感器

元件的实时监测能力^[19-20]。将航空发动机轴承温度数据的传输序列条件定义为:

$$L = B(\delta) \sqrt{d(A_n - A_0)} \quad (4)$$

式 (4) 中, A_0 表示航空发动机轴承温度数据的初始测量值, A_n 表示航空发动机轴承温度数据的最终测量值, d 表示实测温度数据的时序排列标准值。

在实际应用过程中, 无线传感器元件对于航空发动机轴承温度数据的监测与处理, 必须严格遵循数据时序条件。

3 监测程序配置

3.1 测温节点布置

在航空发动机轴承温度实时监测系统中, 为使数据信息参量得到有序传输, 在布置测温节点时必须遵循同向化原则。所谓同向化就是指所有测温数据都必须保持相同的初始传输位置与目标传输位置, 且在传输过程中, 数据信息参量之间的相互干扰能力较弱^[21-22]。具体的测温节点布置原理如图 6 所示。

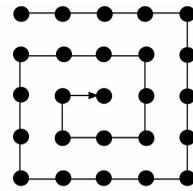


图 6 测温节点布置原理

在图 6 所示的测温节点布局结构中, 每一个实心圆点都表示一个温度数据传输节点。

3.2 传输数据建模

传输数据建模是航空发动机轴承温度实时监测系统搭建的末尾设计环节, 若将测温节点布置位置看作已知条件, 则可认为单一建模标注所包含的数据信息参量越多, 无线传感器元件对于发动机轴承元件表现温度的测量准确性也就越强^[23-24]。对于无线传感器元件来说, 在进行传输数据建模时, 应同时参考轴承温度实测信息定标值、特征监测向量等多项物理指标。轴承温度实测信息定标值可表示为 i , 在航空发动机运行体系中, i 指标的最小取值只能等于自然数“1”。 p_i 表示 i 条件下的温度数据建模定标值, 当 i 指标参量的物理取值保持不变时, p_i 系数的赋值结果也始终保持不变。 ρ 表示轴承温度实测数据的传输密度, f 表示一个随机选取的数据信息建模系数。在上述物理量的支持下, 联立公式 (4), 可将航空发动机轴承温度实时监测系统的传输数据建模条件表示为:

$$Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{+\infty} (p_i^2 - \rho f^2)}{\theta \cdot L}} \quad (5)$$

式中, θ 表示与无线传感器元件匹配的温度数据测度参量, l 表示航空发动机轴承温度数据的监测标准值, h 表示温度数据的实时测度权限。传输数据建模条件能够影响主监测程

序在无线传感器元件中的配置形式，一般来说，只有建模表达式取值结果与实际应用情况无限接近，才能使得航空发动机轴承温度数据得到准确地监测与处理。

4 实验分析

为了验证基于无线传感器的航空发动机轴承温度实时监测系统的有效性，选取航空发动机主轴承作为实验对象，在 Matlab 仿真软件中进行实验验证。设置测温传感器的具体性能参数如表 1 所示。

表 1 测温传感器的具体性能参数

项目	参数
温度范围	最大 -200~500 °C
绝缘电阻	>200 MQ
供电电流	<2 mA
测量准确度	0.01 级
温度极限	120%

设置航空发动机主轴承结构如图 7 所示。

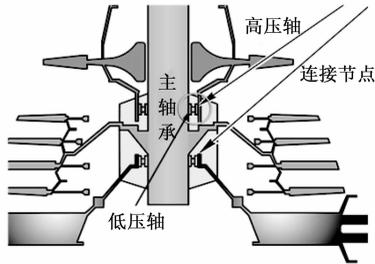


图 7 航空发动机主轴承结构

在图 7 所示的航空发动机主轴承结构中，令低压轴与主轴承元件直接相连，将高压轴放置于低压轴之上，在主轴承元件两侧分设两个连接节点，其中一个节点作为主轴承元件与供电设备的连接端口，另一个节点负责将主轴承元件与外部传感器设备连接起来，从而使得航空发动机轴承的运行需求得以保障。

确保航空发动机轴承处于正常运行状态后，对轴承元件表现温度进行测量。在实验过程中，首先利用基于无线传感器的监测系统测量航空发动机轴承的运行温度，将所得温度数据作为实验组变量；然后利用基于瞬时能量密度谱的监测系统测量航空发动机轴承的运行温度，将所得温度数据作为对照组变量；最后对比实验组、对照组变量数据，总结本次实验的变化规律。

监测主机对于航空发动机轴承温度的校正能力，反映了温度测量值结果的准确性。通常情况下，校正后航空发动机轴承温度曲线与设定曲线之间的偏差程度越小，就表示监测主机对于温度测量值结果的监测准确能力越强，此时所得数据能够较好反映出发动机元件的运行能力，对于延长航空发动机设备的寿命周期能够起到促进性影响作用；反之，若校正后航空发动机轴承温度曲线与设定曲线之间的偏差程度越大，就表示监测主机对于温度测量值结果的

监测准确能力越弱，此时所得数据并不能反映出发动机元件的运行能力，对于延长航空发动机设备的寿命周期也就无法起到促进性影响作用。设定的航空发动机轴承温度曲线如图 8 所示。

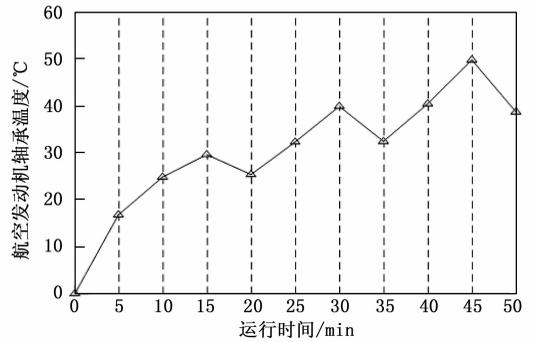


图 8 设定的航空发动机轴承温度曲线

分析图 8 可知，当航空发动机运行时间处于 0~15 min 的实验时间之内，轴承温度呈现出不断上升的数值变化状态；当航空发动机运行时间处于 15~50 min 的实验时间之内，轴承温度则保持下降、上升连续出现的数值变化状态，整个实验过程中，航空发动机轴承温度的最大数值达到了 49.8 °C。

校正后实验组、对照组航空发动机轴承温度曲线如图 9 所示。

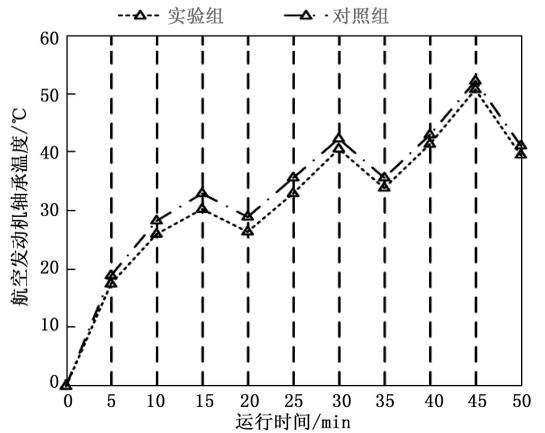


图 9 校正后实验组、对照组航空发动机轴承温度曲线

分析图 9 可知，随着运行时间的延长，实验组、对照组航空发动机轴承温度校正数值的变化趋势均与设定数值保持一致，整个实验过程中，实验组温度校正数值最大值达到了 47.8 °C，对照组温度校正数值最大值达到了 51.2 °C，二者差值为 3.4 °C。

对图 8、图 9 中的温度数值，计算实验组校正值、对照组校正值与设定数值之间的差值水平。具体计算结果如表 2 所示。

分析表 2 可知，当运行时间为 35 min 时，实验组温度差达到其最大数值 0.3 °C，整个实验过程中，实验组温度差均值为 0.17 °C；当运行时间为 18 min 时，对照组温度差

达到其最大数值 $2.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, 整个实验过程中, 对照组温度差均值为 $1.16\text{ }^{\circ}\text{C}$, 高于实验组差值水平。

表 2 温度数值差

运行时间/min	实验组温度差/ $^{\circ}\text{C}$	对照组温度差/ $^{\circ}\text{C}$
5	0.1	0.4
10	0.2	0.6
15	0.1	0.8
20	0.2	1.2
25	0.1	1.6
30	0.1	1.5
35	0.3	1.3
40	0.2	0.9
45	0.2	2.4
50	0.2	0.9

综上所述, 随着基于无线传感器的实时监测系统的应用, 航空发动机轴承的温度误差曲线确实得到了较好校正, 可以辅助监测主机对于温度测量值结果进行准确监测, 在延长航空发动机设备寿命周期方面, 能够起到促进性影响作用。

5 结束语

与基于瞬时能量密度谱的监测系统相比, 新型航空发动机轴承温度实时监测系统在无线传感器元件的作用下, 联合 JTAG 串口电路、电量集中器等多个硬件应用结构, 对温度阈值指标进行计算, 又根据温测节点的实际布置情况, 建立完善的传输数据建模条件。从实用性角度来看, 在这种新型监测系统的作用下, 航空发动机轴承温度误差曲线得到了更好校正, 对于监测主机而言, 可在准确获得温度测量结果的同时, 使得发动机元件的寿命周期得到充分延长, 符合实际应用需求。

参考文献:

- [1] 郁滨, 熊俊. 基于平衡迭代规约层次聚类的无线传感器网络流量异常检测方案 [J]. 电子与信息学报, 2022, 44 (1): 305-313.
- [2] 石元博, 王建辉, 方晓柯, 等. 基于 HJB 方程的无线传感器网络系统 Minimax 控制器设计 [J]. 控制与决策, 2021, 36 (4): 947-952.
- [3] 尹诗, 侯国莲, 胡晓东, 等. 基于 AC-GAN 数据重构的风电机组主轴承温度监测方法 [J]. 智能系统学报, 2021, 16 (6): 1106-1116.
- [4] 高文君, 刘振侠, 朱鹏飞, 等. 基于多节点热网络法的航空发动机主轴承温度场分析 [J]. 推进技术, 2019, 40 (2): 382-388.
- [5] 李炳臻, 李杰, 胡陈君, 等. 箭载测控系统高速数据采集传输电路的设计 [J]. 中北大学学报 (自然科学版), 2020, 41 (6): 571-576.
- [6] 杨新波, 郑岳久, 高文凯, 等. 基于改进等效电路模型的高比能量储能锂电池系统功率状态估计 [J]. 电网技术, 2021, 45 (1): 57-66.
- [7] 陈晓江, 伍江瑶, 沈桂泉, 等. 具备边缘计算功能的新型智能集中器架构设计 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32 (5): 99-104.
- [8] 朱敏, 朱志敏, 陶维青, 等. 配电网中基于实时传输的相量数据集中器设计 [J]. 合肥工业大学学报 (自然科学版), 2020, 43 (6): 784-789, 796.
- [9] 任文嘉, 邹济军, 程龙, 等. 一种 LOS/NLOS 混合环境下无线传感器网络定位方法 [J]. 中国电子科学研究院学报, 2020, 15 (1): 84-91.
- [10] 王振东, 刘燧桃, 胡中栋, 等. 改进差分进化算法下的无线传感器网络覆盖优化 [J]. 小型微型计算机系统, 2020, 41 (5): 1041-1046.
- [11] 兰天, 蓝元良, 盛财旺, 等. 基于无线传感网络的换流阀温度传感器节点温差取能建模仿真 [J]. 电网技术, 2021, 45 (9): 3601-3608.
- [12] 王迪, 甄国涌, 张凯华. 基于 WRc5-26 型热电偶的高精度温度信号调理电路设计 [J]. 中国测试, 2020, 46 (9): 96-102.
- [13] 聂守成, 钱林方, 陈志群, 等. 基于干扰观测器的弹丸协调器电液伺服系统自适应滑模控制 [J]. 兵工学报, 2020, 41 (9): 1745-1751.
- [14] 范亚楠, 刘天羽, 张新松. 基于直流电压信号的光储系统协调控制策略 [J]. 现代电力, 2020, 37 (3): 285-294.
- [15] 史燕平, 王丽娇, 李秀彩, 等. 电力线和无线双媒质通信系统的自适应中继协议 [J]. 电力自动化设备, 2021, 41 (6): 171-179.
- [16] 王楚晴, 郑萌, 梁炜, 等. 一种基于机会转发的认知无线传感路由协议 [J]. 信息与控制, 2020, 49 (6): 714-721.
- [17] 刘康丽, 朱元元, 吴晓晔, 等. 基于 IEEE1451 的靶场分布式无线传感器网络构建方案 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (11): 265-269.
- [18] 张贺, 袁兆祥, 李先允, 等. 基于平滑阈值函数的分布式光纤雷击定位方法 [J]. 电力建设, 2021, 42 (12): 75-82.
- [19] 乔颖, 鲁宗相, 吴问足. 考虑误差时序一条件性质的短期风电功率率预测 [J]. 电网技术, 2020, 44 (7): 2529-2537.
- [20] 宋晓通, 徐文悦, 周京华, 等. 面向微电网时序多态不确定性的选择性数据驱动 [J]. 高电压技术, 2020, 46 (7): 2370-2380.
- [21] 谷行, 白清, 王清琳, 等. 基于窗函数优化的布里渊光时域反射仪测温精度提升研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34 (1): 25-31.
- [22] 霍峰, 段长君, 周广东, 等. 基于无线热点测温法的干式空心电抗器匝间绝缘状态带电诊断方法应用研究 [J]. 高压电器, 2020, 56 (2): 215-220.
- [23] 吴佳杰, 朱荣钟, 钟志峰. 无线传感器网络基于时空差分阈值 Huffman 数据压缩 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (2): 273-277.
- [24] 王鹏, 杨妹, 祝建成, 等. 面向数字孪生的动态数据驱动建模与仿真方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (12): 2779-2786.