

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306986

融合多传感器的飞行器电缆网状态在线监测系统

纪泽源 许晓凡 孙伟 胡云涛 高远飞 邵夏静

(北京机电工程研究所 北京 100074)

摘要:飞行器电缆网承担着电气、信号和数据传输等关键职能。在飞行器超声速飞行过程中电缆网面临诸如高温、振动、电流过载和低气压等挑战,对飞行器电气系统的安全性和可靠性产生影响。本研究设计了电缆网多传感器监测系统和基于多传感器融合的电缆网健康状态监测算法。在监测系统中实现了电压、电流、温度、加速度和气压等数据采集、存储以及无线传输功能。算法在预处理阶段通过归一化的方式,综合考虑了高温、振动、电流过载和低气压等稳态和瞬态值对电缆网健康状态的影响,算法健康状态分类部分设计了多层分类网络对电缆网状态进行分类,在实际实验数据集与仿真数据集中,本文多层分类网络相比于SVM分类网络正确率平均提升6.4%,虚警率平均降低了77.2%;本文的多传感器监测算法相比于单通道监测算法,正确率有显著提升,对比实验结果验证了本文算法在电缆网健康状态分类任务中的有效性。实验结果表明,电缆网多传感器监测系统可以有效监测并识别飞行器电缆网的健康状态,为飞行器电气系统运行提供了有力保障。

关键词: 电缆网; 状态监测; 传感器; 神经网络; 通信协议

中图分类号: V19 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.40

Multi-sensor monitoring system and health status classification for air-craft cable networks

Ji Zeyuan Xu Xiaofan Sun Wei Hu Yuntao Gao Yuanfei Shao Xiajing

(Beijing Electro-mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: Aircraft cable networks play a crucial role in electrical, signal, and data transmission functions. During supersonic flight, aircraft cable networks face challenges such as high temperatures, vibrations, current overload, and low pressure, which affect the safety and reliability of the aircraft electrical system. This study designs a multi-sensor monitoring system for cable networks and a cable network health monitoring algorithm based on multi-sensor fusion. The monitoring system achieves functions including data collection, storage, and wireless transmission of voltage, current, temperature, acceleration, and pressure. In the preprocessing stage, the algorithm comprehensively considers the effects of steady-state and transient values such as high temperatures, vibrations, current overload, and low pressure on the health status of cable networks through normalization. For the health status classification part, a multi-layer classification network is designed to classify the cable network states. In both practical experimental datasets and simulated datasets, the multi-layer classification network in this study achieves an average increase in accuracy of 6.4% and a decrease in false alarm rate of 77.2% compared to the SVM classification network. Compared to single-channel monitoring algorithms, the multi-sensor monitoring algorithm in this study significantly improves accuracy. Experimental results validate the effectiveness of the algorithm in cable network health status classification tasks. The results indicate that the multi-sensor monitoring system for cable networks can effectively monitor and identify the health status of aircraft cable networks, providing strong assurance for the operation of aircraft electrical systems.

Keywords: cable network; state monitoring; sensors; neural networks; communication protocols

0 引言

在航空电子领域,电缆网是一种用于飞行器内部电力和数据传输的复杂系统。电缆网广泛存在于各种设备之间,是系统中信息沟通交流的“神经”,它对电力系统的运行可靠性有着重要影响,为此本文设计了融合多传感器的电缆网在线状态监测系统,可实时监控电缆网电气状态、温度、气压和振动状态,具有重要的工程和应用意义。

飞行器电缆网状态监测方案目前分为离线监测和在线监测,离线监测是在电缆网生产阶段和飞行器地面维护阶段,测量静态条件下电缆网的绝缘阻值,导通电阻、阻抗等电气参数,主要依靠人工逐个拔插电缆接头进行测量,时间成本高,自动化程度低,较难发现高温、低气压、振动等条件下的电气故障隐患。在线监测是在飞行器正常工作阶段,在线监测系统实时测量并存储电缆网电压、电缆、温度等电气参数,无需飞行器返航和人工操作,自动化程度高,有助于电缆网的快速诊断与后期改进和维护。杨林^[1]以某型号系统作为诊断对象,从软件和硬件设计了电缆网的故障诊断系统,但是测试方式为离线测试。Zhang 等^[2]分析了时域反射法(time domain reflectometry, TDR)和小波法相结合的方法检测屏蔽同轴电缆故障的可行性,提出了一种模拟波在有故障电缆中传播的数学模型。构建并实现了具有陡峭上升沿的阶梯波发生器来检测模拟信号线故障。王晓兵等^[3]设计了一种适用于电力电缆的温度在线监测系统,算法上使用 BP 网络对温度传感器采集到的温度信号进行处理,预测电缆导体温度,但该系统没有设计数据加密环节,数据传输过程中存在泄露风险。曹红星等^[4]设计了某型航天电缆网的自动化检测系统,用于电缆网生产中的自动化检测,主要检测复杂电缆网的通断和导通电阻,借助计算机技术,显著提高了电缆网的离线检测效率。

本文的主要贡献如下:

1) 在电缆网电气参数测量的基础上,设计了飞行状态监测模块,设计集成了电缆网电压、电流、温度、加速度和海拔高度数据采集、存储和无线传输系统,为状态监测提供数据支撑。

2) 设计基于多传感器融合的电缆网状态监测算法,综合考虑电气状态、飞行器振动和气压对电缆网健康状态的影响,设计多层分类网络,准确分类电缆网健康状态。

1 飞行器电缆网状态监测系统设计

1.1 系统组成

如图 1 所示,飞行器电缆网状态监测系统包含电气状态监测模块、飞行状态监测模块、单片机和外部接口组成。单片机与各个传感器之间的通信均为数字信号,减小信号在复杂电磁环境中受到的干扰^[5]。电气状态监测和飞行状态监测模块测量电缆网的电压、电流、温度、气压、加速度和角速度数据;单片机处理传感器数据,根据数据协议将数据通过数字端口传送至外部设备;外部接口设备包括 4G DTU、SD 存储^[6]和飞行控制中心。最终实现多传感器采样到数据处理再到数据存储和传输功能。

飞行器电缆网状态监测系统的传感器布置如图 2 所示,关键电缆电流采样模块选用非接触式的霍尔电流传感器^[7],相比于采样电阻方案,霍尔电流传感器与电缆电气隔离,电流测量更加可靠。关键端子电压采样模块对多点电压进行实时采样,从安全性考虑,电压采样模块设计光耦隔离放大器,隔离高压与低压电路。

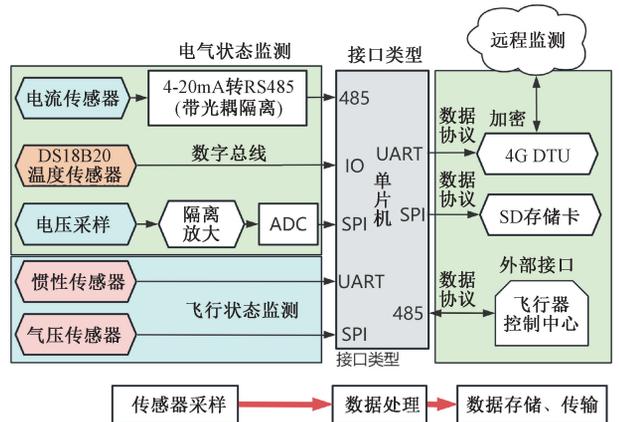


图 1 电缆网电气状态监测系统组成

Fig. 1 Composition of the cable network electrical state monitoring system

温度采样模块选用数字总线式的 DS18B20 温度传感器,单总线通信减少对单片机 IO 端口数量的占用,适合多点温度采集。为了进一步分析出飞行器飞行状态与电缆网电气状态之间的关联,飞行状态监测模块中包含基于 MEMS 的惯性测量单元和气压测高计,选用 CH110 型号的惯性测量单元,姿态角、加速度计和陀螺仪的数据输出频率为 400 Hz;气压测高计用于估计飞行器海拔高度,飞行状态数据将作为电缆网电气故障原因的重要参考数据。

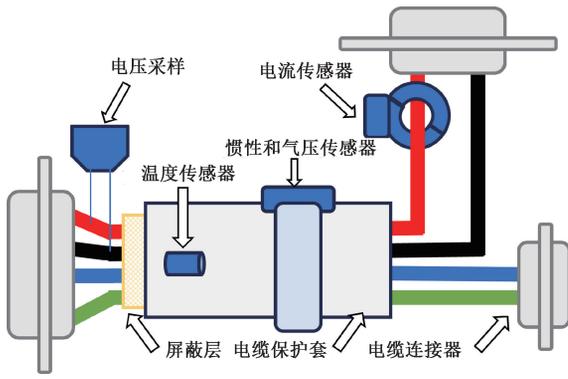


图2 飞行器电缆网状态监测系统传感器布置示意图

Fig.2 Schematic of sensor layout in the aircraft cable network state monitoring system

本地和远程数据存储模块存储电缆网的电压、电流、温度等电气参数和时间戳数据以及飞行状态参数和时间戳数据。其中4G DTU^[8]用于远程实时记录电缆网状态数据,无需飞行器返航后再读取数据,数据通过SHA-256算法^[9]加密后通过4G DTU模块和基站网络传输到计算机中进行存储和数据处理。本地数据存储通过SD卡存储,单片机通过SPI总线将电缆网状态数据写入到SD卡中。

1.2 程序设计

如图3所示,系统中单片机的程序中主要包含初始化和主循环部分,初始化程序首先读取配置文件参数,确定各传感器的地址和参数和本机参数,接着按照参数初始化各个传感器和外部接口的IO端口。

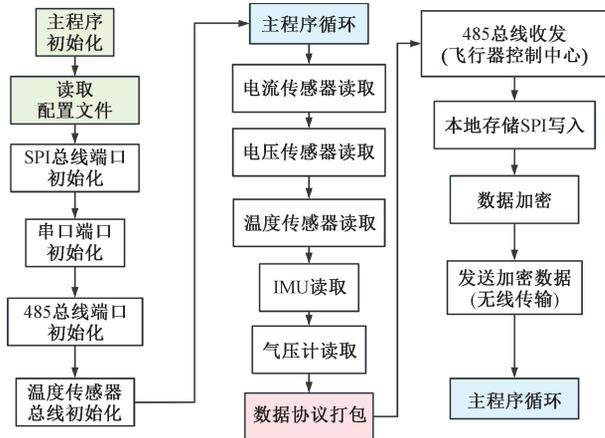


图3 飞行器电缆网状态监测系统程序流程

Fig.3 Program flowchart of the aircraft cable network state monitoring system

主程序循环程序任务为顺序读取多传感器的数值,并对传感器数据打包,通过外部接口对数据进行存储和发送。其中IMU传感器数据来自串口接收中断,主程序

读取最新的IMU串口中断数据。时间戳数据来自单片机的定时器或飞行器测控系统。

1.3 电缆网状态监测数据包设计

本小节将设计图3中“数据协议打包”流程中数据包的设计,数据包中包含电压、电流、温度等电气参数、时间戳数据以及飞行状态参数和时间戳数据,也包含电缆网电气状态监测系统的总线地址等信息。

数据包由5个部分组成,包括帧头、帧类型、长度、CRC校验值^[10]和数据组成。数据包组成示意图如图4所示,设计帧头为“0xaa 0xaa”,数据包解析时通过判断帧头确定数据包起点。

类型	帧头(2 bytes)	帧类型(1 bytes)	帧长度(2 bytes)	校验值(2 bytes)	数据(N bytes)
举例	0xaa 0xaa	0~01	0~3a 0~00	0~5a 0~10	0~01 0~1f...

图4 数据包组成

Fig.4 Composition of data packets

图4中校验值为校验值两个字节外其余数据的CRC校验值,接收设备将收到的数据从新校验计算并与数据包的中校验值进行对比,如果校验值不同,则舍弃本次数据包,数据包校验的目的在于确保数据传输的准确。

考虑到温度、电流、电压传感器的采样频率不同,单片机在发送数据包时对不同的传感器类型进行了区分,并根据采样频率发送数据,图5中帧类型决定了数据包中传感器的类型,0x01~0x04分别代表电流、电压、温度和飞行状态数据。

电流值数据部分	本机地址	时间戳(8 bytes)	电流1 (8 bytes)	电流 _n
电压值数据部分	本机地址	时间戳(8 bytes)	电压1 (8 bytes)	电压 _n
温度值数据部分	本机地址	时间戳(8 bytes)	温度1 (8 bytes)	温度 _n
飞行状态数据部分	本机地址	时间戳(8 bytes)	气压计(1 bytes)	加速度计(3×8 bytes)

图5 数据包中数据部分的组成

Fig.5 Composition of data section in data packets

2 多传感器融合的电缆网状态监测算法设计

目前电缆网状态监测算法包括传统的单通道状态监测^[11]和多传感器状态监测,其中单通道状态监测首先关注电缆网电压、电流和温度的上下限,约束了电缆网工作的边界状态。多传感器融合的电缆网监测算法根据飞行器电缆网的电气和环境特征,多对传感器信息进行特征提取后,根据电缆网故障的机理进行加权融合。设电缆

网中共需要监测 i 根电缆的状态, 设飞行器工作时在 t 时刻采集到的电压为 U_i^t , 电流为 I_i^t , 温度为 T_i^t , 气压为 P_i^t , 三轴加速度为 $a_i^t = [x a_i^t, y a_i^t, z a_i^t]^T$ 。

2.1 单通道状态监测

单通道状态监测参考电缆额定电压、电流和温度值进行阈值判断^[12], 为避免噪声和误码对测量的影响, 如图 6 所示, 每个通道的数据先进行一阶低通滤波^[13]后进行上下阈值判断, 得出单通道的监测结果。如式(1)所示, 对于电压 U_i^t 的一阶低通滤波, Y_i^{t-1} 为上一次滤波的输出值, 其中 Y_i^t 为本次低通滤波的输出值, F_s 为截止频率, τ 为采样时间间隔。

$$Y_i^t = \alpha U_i^t + (1 - \alpha) Y_i^{t-1} \quad (1)$$

$$F_s = \frac{\alpha}{2\pi\tau}$$

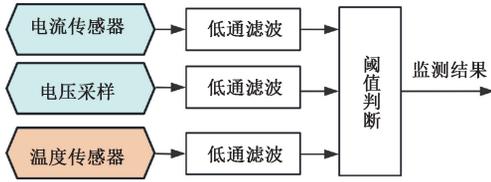


图 6 单通道状态监测示意图

Fig. 6 Schematic of single-channel state monitoring

单通道状态监测算法只根据电压、电流和温度单通道的状态值进行阈值判断, 无法综合多种传感器的数据, 具有一定的局限性。

2.2 多传感器融合的电缆网状态监测算法

影响电缆网健康状态的主要因素有: 电压变化引起的电应力; 由导电部分的欧姆损耗、绝缘部分的介电损耗以及在某些情况下来自环境和电流加热引起的热应力及飞行器振动引起的机械应力; 低气压条件下电缆的绝缘性能下降。考虑到电缆网健康状态的影响因素, 多传感器融合算法的输入为传感器的瞬态和稳态数据, 输出为电缆网的健康状态。如图 7 所示, 对于加速度计、电流、电压值, 算法测量归一化数据的滑动窗口内的标准差来量化数据的瞬态变化; 归一化的操作如式(2)所示, 其中 x 为某一传感器的数值, x_{\min} 和 x_{\max} 分别代表该传感器数据中的最小值与最大值。特别地, 加速度计数据取其三轴加速度向量的模长。

$$x_{norm} = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

滑动窗口和取标准差过程如式(3)所示, 设滑动窗口长度为 w , 滑动窗口内的数据集为 V_{window} , 算法对滑动窗口内的数值取标准差。

$$V_{window} = \{x_{norm}^i\}_{t-w}^t \quad (3)$$

$$x_{std} = \sqrt{\frac{\sum_{i=t-w}^t (x_{norm}^i - \bar{x}_{norm})^2}{w-1}}$$

对于电流、电压、温度和气压的稳态数据, 其表达式如式(4)所示, 算法计算传感器数值与额定值一阶距离 x^d , 并进行归一化。其中 x_m 为电气或环境条件的额定值。

$$x^d = |x - x_m|$$

$$x_{norm}^d = \frac{x^d - x_{\min}^d}{x_{\max}^d - x_{\min}^d} \quad (4)$$

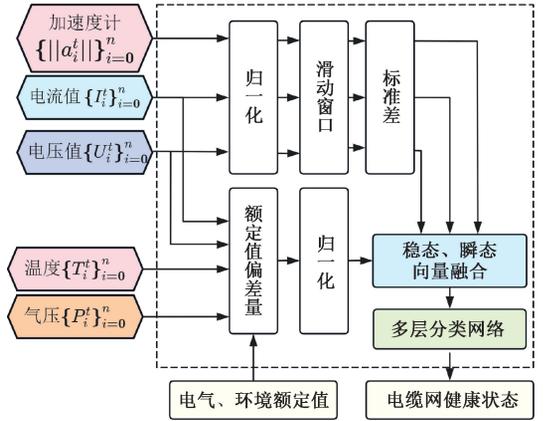


图 7 多传感器融合的电缆网状态监测算法组成
Fig. 7 Composition of cable network state monitoring algorithm with multi-sensor fusion

如图 7 所示, 稳态、瞬态向量的融合对稳态状态向量和瞬态状态向量进行拼接设 t 时刻稳态状态向量为: $\mu_t = [{}^d U_{norm}^t, {}^d I_{norm}^t, {}^d T_{norm}^t, {}^d P_{norm}^t]^T$, 瞬态的状态向量为 $\varepsilon_t = [a_{std}^t, I_{std}^t, U_{std}^t]^T$, 如式(5)和(6)所示:

$$X^t = [\mu_t; \varepsilon_t]^T \quad (5)$$

$$Y^t = [1, 0, 0, 0]^T \quad (6)$$

其中, t 时刻瞬态与稳态融合向量为 X^t , “:” 代表稳态和瞬态状态向量在列方向上的拼接。

本文中, 电缆网健康状态共有“轻负载工作”、“正常工作”、“超负载”、“损伤”4 种健康状态, 使用 one-hot 方法对状态进行编码, 例如 t 时刻电缆网健康状态为“轻负载工作”的 one-hot 编码如式(6)所示。电缆网健康状态分类网络参考支持向量机^[14] (support vector machine, SVM) 结构进行状态分类。

如表 1 和 2 所示, 本文在 SVM 的基础上加入多个线性层, 以增强网络的表征能力。如图 8 和表 1 所示, 多层分类网络的输入层为向量 X^t , 输出层为健康状态分类的

结果 Y' 。隐藏层中包含多层线性层,“ReLU^[15]”作为线性层后的激活层。在最后的输出层中,“Softmax^[16]”对多层神经网络的输出进行处理,输出状态分类的概率。

表 1 本文多层分类网络的结构

Table 1 Structure of the multi-layer classification network in this study

网络层名称	网络层结构	网络层参数
输入层	线性层+ReLU	(7, 32)
隐藏层 1	线性层+ReLU	(32, 128)
隐藏层 2	线性层+ReLU	(128, 512)
输出层	线性层+Softmax	(512, 4)

表 2 传统 SVM 分类网络的结构

Table 2 Structure of the traditional SVM classification network

网络层名称	网络层结构	网络层参数
线性层	线性层	(7, 4)
归一化函数	Softmax	—

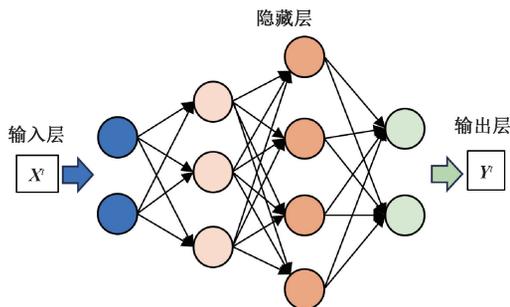


图 8 多层分类网络结构

Fig. 8 Structure of the multi-layer classification network

3 实验验证

3.1 电缆网在线状态监测系统搭建

如图 9 所示,为验证飞行器电缆网在线状态检测系统的传感器采集功能,使用某型电缆作为监控对象,采集电缆的温度、电流、加速度、气压等信息,电缆供电电源为某型动力锂电池组,负载主要为飞行器舵机等用电器。考虑到电缆电压直接采集需要拨开电缆绝缘层,会降低电缆的电气性能,因此实际的电缆端口电压来自飞行器供电处理机采集的端口电压数据。

为方便地面站数据存储与可视化,如图 10 所示,本文使用 PyQt5 设计了地面站上位机,显示并存储无线通信模块回传的飞行器电缆网的电压、电流、温度、气压、加速度曲线。

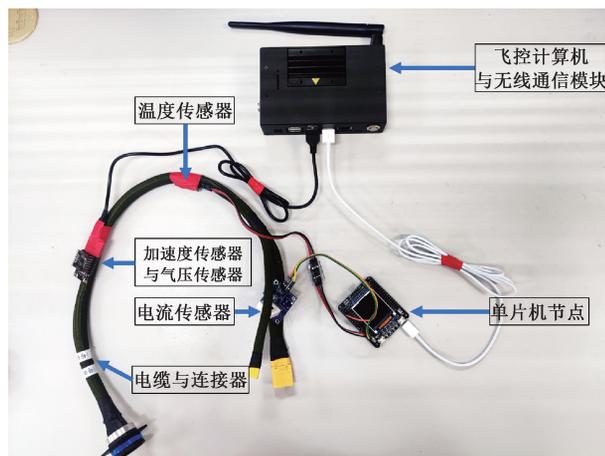


图 9 电缆网状态在线监测系统硬件组成

Fig. 9 Hardware composition of online monitoring system for cable network status

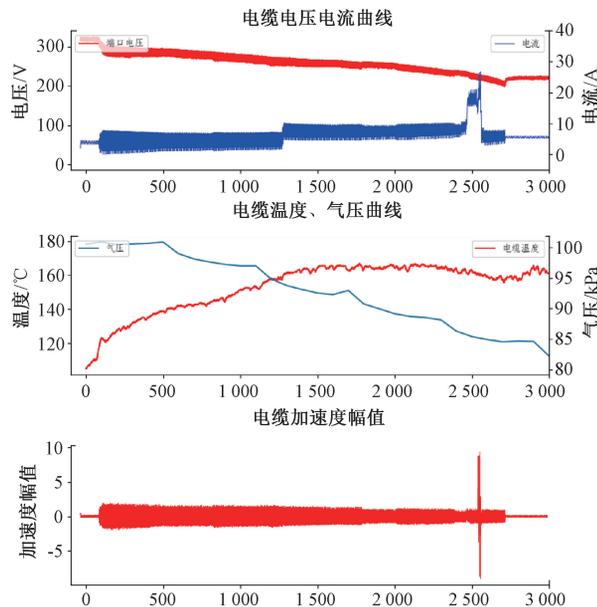


图 10 电缆网状态在线监测系统上位机

Fig. 10 Upper computer of the online monitoring system for cable network status

3.2 多传感器融合的电缆网状态监测算法数据集准备

为了获得用于训练电缆网健康状态分类网络和 SVM 分类网络的监督数据,本文使用实际实验采集数据和仿真软件生成数据作为网络训练的数据集^[17],实际实验采集数据及数据参数如图 11 和表 3 所示。

考虑到电缆网在极端高温、低气压、大电流脉冲条件下会对飞行器安全造成影响,因此极端条件下的电缆网数据由仿真软件生成。本文使用 ANSYS 软件仿真得到了电缆在大电流、高温、低气压、振动条件下的实验数据,仿真参数如表 4 所示。

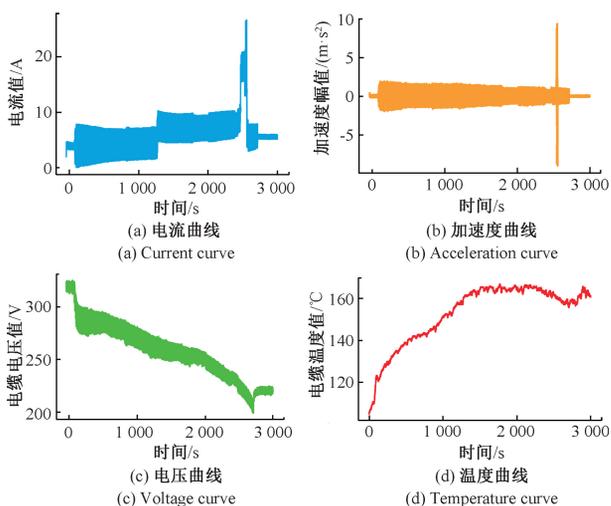


图 11 实际实验采集数据曲线

Fig. 11 Actual experimental data collection curve chart

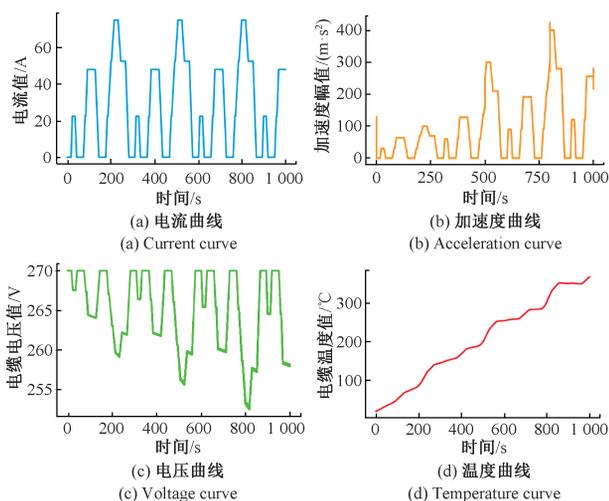


图 12 仿真实验数据曲线

Fig. 12 Curve graph of simulation experiment data

表 3 实际系统采集数据参数

Table 3 Actual system collection data parameters

参数名称	参数值或参数范围
电缆温度范围/°C	40~165
电缆电流值范围/A	0~40
电缆端口电压范围/V	310~200
气压值/kPa	80~101
加速度幅值/(m·s ⁻²)	0~10
数据量个数	3 036 906

表 4 仿真实验参数

Table 4 Simulation experiment parameters

参数名称	参数值或参数范围
电缆温度范围/°C	20~380
电缆电流值范围/A	0~80
电缆端口电压范围/V	270~245
气压值/kPa	30~101
加速度值/(m·s ⁻²)	0~450
数据量个数	1 000 000

仿真结果如图 12 所示。仿真实验的电流值和加速度幅值参考了 NEDC^[18] 标准工况的剖面。NEDC 标准工况包括多个典型的工作循环,相比于随机工况更加贴近实际场景。如图 12(d) 的曲线显示,随着时间的推移,电缆的导体温度逐渐增加,从而加速了电缆的老化过程。如图 12(c) 的曲线所示,随着导体温度的升高,电缆导体的电阻率也随之增加,导致电缆在高温环境下产生较大的电压降,从而降低了电缆的电气传输效率。

参考国家标准^[19-21]和工程经验对实际系统采集数据和仿真实验中的电缆网状态进行电缆网健康状态标注,标注结果如图 13 和 14 所示,标注数据将作为多层分类网络训练的监督数据,其中训练集与测试集的比例为

8 : 2。测试集作为 4.2 节对比试验的测试数据集。

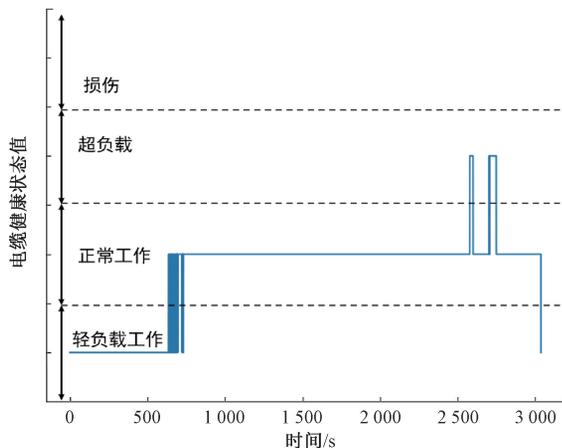


图 13 实际实验的电缆网状态标注曲线

Fig. 13 Actual experimental cable network state annotation curve

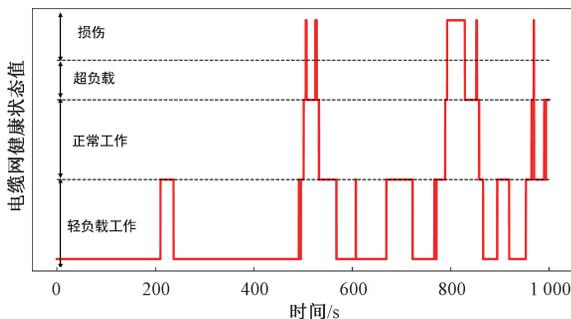


图 14 仿真实验的电缆网状态标注曲线

Fig. 14 Annotation curve of cable network state in simulation experiment

3.3 对比试验

本节试验首先对比传统 SVM 与多层分类网络,接着对比传统单阈值电缆网状态监控算法与多传感器融合的电缆网状态监测算法。

1) SVM 分类器与本文多层分类网络的对比试验

对比实验使用 4.1 节的测试集数据,传统的 SVM 分类网络和多层分类网络输入相同的瞬态与稳态融合向量 X' ,算法输出结果与图 13 和 14 中的标注数据进行比对和统计,对比试验结果如表 5 所示。如图 15(a)、(b)所示,正确率为网络的健康状态分类结果与标注数据一致的比例;虚警率为网络的健康状态分类结果高于数据标注的比例,例如网络输出的分类的状态为“损伤”,但实际数据标注为“超负载”的情况为虚警。同样的,漏检率为网络的健康状态分类结果低于数据标注的比例。

表 5 SVM 分类网络与多层分类网络对比试验结果

Table 5 Comparative experimental results between SVM classification network and multi-layer classification network (%)

数据集	实验结果	SVM 分类网络	多层分类网络
实验数据集	正确率	85.2	92.1
	虚警率	14.8	7.9
	漏检率	0	0
仿真数据集	正确率	89.1	93.4
	虚警率	10.9	6.6
	漏检率	0	0

对比实验结果表明,在实际实验数据集和仿真数据集中,本文多层分类网络相比于 SVM 分类网络正确率平均提升 6.4%,虚警率平均降低了 77.2%,验证了多层分类网络在电缆网健康状态分类任务中的有效性。

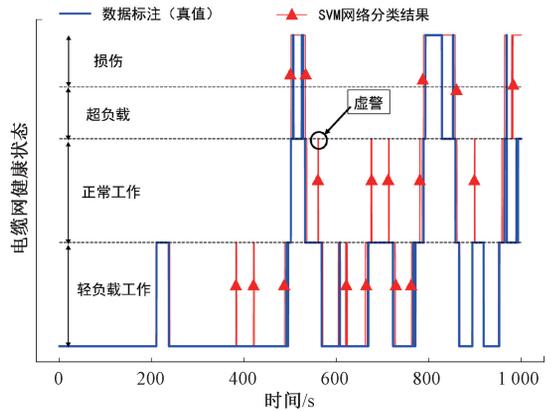
2) 多传感器融合的电缆网状态监测算法与单通道电缆网状态监测算法的对比实验

同样使用 4.1 节的数据进行对比实验,单通道状态监测算法单独考虑电缆电压、电流和温度的稳态值超出额定值的比例。比例值 k 的计算如式(7)所示:

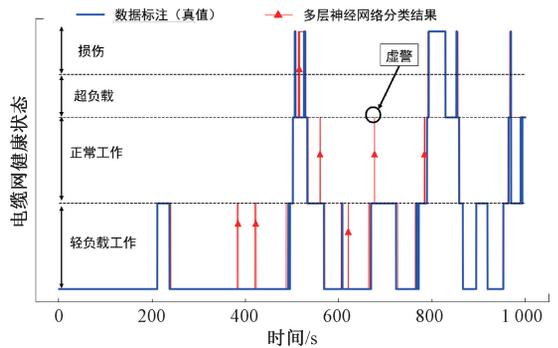
$$k = |v - v_{stand}| / v_{stand} \times 100\% \quad (7)$$

其中, v 为稳定值, v_{stand} 为额定值。

参考工程经验和实际实验数据,电缆的压降、电流、温度和气压单通道状态监测阈值设置如表 6 所示,表中对电缆网的健康状态分配了不同的阈值。实验结果如图 16(a)、(b)、(c)所示,单通道状态监测算法无法整体估计电缆网的健康状态,与图 14 中的电缆网健康状态数据标注值(真值)有较大的差异。



(a) SVM 分类结果与数据标注之间的比较
(a) Comparison between SVM classification results and data annotations



(b) 多层网络分类结果与数据标注之间的比较
(b) Comparison between multi-layer network classification and data annotations

图 15 网络分类结果与数据标注之间的比较

Fig. 15 Comparison between network classification results and data annotation

表 6 单通道状态监测阈值

Table 6 Thresholds for single-channel state monitoring (%)

	轻负载工作	正常工作	超负载	损伤
压降阈值	1	2	5	10
电流阈值	10	20	30	50
温度阈值	20	50	100	180

多传感器融合的电缆网状态监测算法与单通道电缆网状态监测算法的正确率、虚警率和漏检率的对比结果如表 7 所示,为方便描述将多传感器融合的电缆网状态监测算法简称为“多传感器融合”算法,将单通道电缆网状态监测算法简称为“单通道”算法。可以发现多传感器融合算法精度远远优于单通道监测算法,这是由于影响电缆网健康状态的因素如压降、电流过载、振动和低气压均会对电缆网的工作状态产生较大的影响,通过阈值判断单通道的传感器数值无法全面的估计电缆网的健康状态。

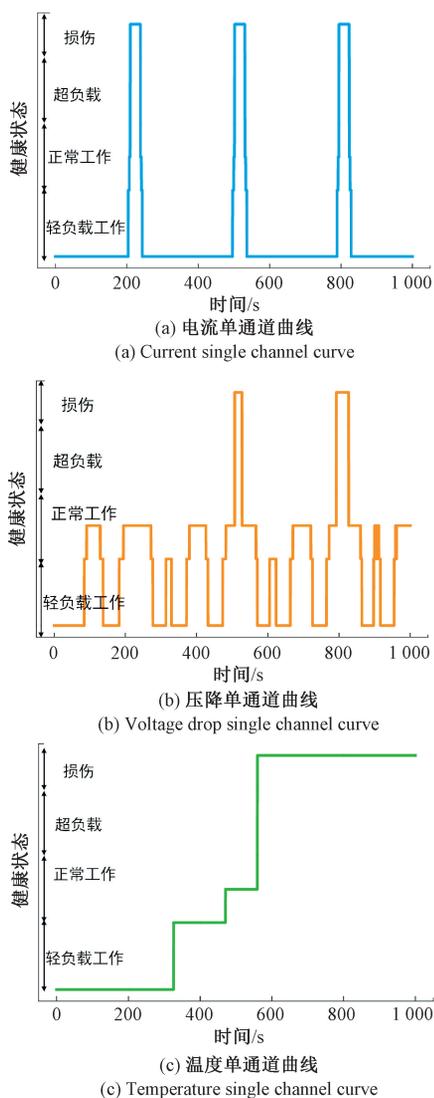


图 16 单通道状态监测曲线

Fig. 16 Curve of single-channel state monitoring algorithm

表 7 对比实验结果

Table 7 Comparative experimental results (%)

数据集	算法	正确率	虚警率	漏检率
实际数据集	多传感器融合	92.1	7.9	7.9
	单通道(压降)	32.6	16.7	50.7
	单通道(电流)	28.2	36.3	35.5
	单通道(温度)	15.9	24.7	59.4
仿真数据集	多传感器融合	93.4	6.6	0
	单通道(压降)	29.8	14.8	55.4
	单通道(电流)	3.2	3.4	93.4
	单通道(温度)	22.2	38.3	39.5

4 结 论

本研究设计了电缆网多传感器监测系统以及基于多

传感器融合的电缆网健康状态监测算法。所设计的算法在预处理阶段综合考虑了高温、振动、电流过载和低气压等稳态和瞬态值对电缆网健康状态的影响。算法中健康状态分类部分设计了多层分类网络对电缆网状态进行分类。对比实验结果表明,在实际实验数据集与仿真数据集中,本文多层分类网络相比于 SVM 分类网络正确率平均提升 6.4%,虚警率平均降低了 77.2%。这验证了其在电缆网健康状态分类任务中的有效性。本文的多传感器融合算法相较于单通道监测算法,具有更高的监测精度。这是由于多传感器融合算法能够更全面地估计电缆网的健康状态。

综上所述,本研究为飞行器电缆网的健康运行提供了坚实保障,对飞行器的安全性和可靠性具有重要意义。同时,本研究所提出的多传感器监测系统和健康状态监测算法也为电气系统健康监测领域的研究提供了有价值的参考和借鉴。

参考文献

[1] 杨林. 导弹电气系统故障仿真和样本采集平台研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2010.
YANG L. Development of fault simulation and sample acquisition platform for missile electrical systems [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.

[2] ZHANG J, ZHANG Y, GUAN Y. Analysis of time-domain reflectometry combined with wavelet transform for fault detection in aircraft shielded cables [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(11): 4579-4586.

[3] 王晓兵, 黄青松, 赵东霞. 电力电缆温度在线监测系统的设计及系统测试分析[J]. 科学技术创新, 2023(8): 201-204.
WANG X B, HUANG QI S, ZHAO D X. Design and system test analysis of online monitoring system for electric cable temperature [J]. Scientific and Technological Innovation, 2023(8): 201-204.

[4] 曹红星, 胡攀辉, 赵寻珂, 等. 弹上电缆网电参量一体化检测系统的设计[J]. 装备制造技术, 2022(10): 112-115, 124.
CAO H X, HU P H, ZHAO X K, et al. Design of integrated detection system for electrical parameters of missile-mounted cable networks [J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(10): 112-115, 124.

[5] 陈铭芸, 何怡刚, 赵莹莹. 基于开关状态的三电平 NPC 整流器开路故障诊断[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(7): 62-71.
CHEN M Y, HE Y G, ZHAO Y Y. Open-circuit fault diagnosis of three-level NPC rectifier based on switching states [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(7): 62-71.

- [6] 李国政,吴振奎,于鸿,等. 基于多源热泵远程监控系统的设计 [J]. 电工技术, 2023(13): 225-229.
LI G ZH, WU ZH K, YU H, et al. Design of remote monitoring system for multi-source heat pump [J]. Electrician Technology, 2023(13): 225-229.
- [7] WEI S, XU D, LIU X, et al. Prediction of remaining lifetime of Hall current sensor based on Weibull distribution [J]. International Journal of Frontiers in Engineering Technology, 2023, DOI: 10.25236/IJFET.2023.050801.
- [8] 朱小平,孙军,方彦军. 基于 NUT/OS 的 DTU 模块设计与开发[J]. 通信技术, 2008(7): 89-91.
ZHU X P, SUN J, FANG Y J. Design and development of DTU module based on NUT/OS [J]. Communications Technology, 2008(7): 89-91.
- [9] 张大松,姜洪朝,刘智国. 基于 SHA-256 的可信启动完整性校验程序设计与验证[J]. 网络安全技术与应用, 2022, 255(3): 49-51.
ZHANG D S, JIANG H CH, LIU ZH G. Design and verification of trustworthy boot integrity verification program based on SHA-256 [J]. Network Security Technology & Application, 2022, 255(3): 49-51.
- [10] DE JONGE L, VAN DE SCHOOTBRUGGE-VANDERMEER H J, BREEKVELDT E C H, et al. Optimal use of limited colonoscopy capacity in a fit-based crc screening program during covid-19 pandemic [J]. Endoscopy, 2021, 53(S 01): OP86.
- [11] 叶水勇. 无源光网络通信通道状态实时监测系统探究[J]. 东北电力技术, 2021, 42(2): 12-14.
YE SH Y. Research on real-time monitoring system for communication channel status of passive optical network [J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(2): 12-14.
- [12] 车鲁阳,高军伟,付惠琛. 基于多通道融合的滚动轴承剩余寿命预测 [J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(12): 225-233.
CHE L Y, GAO J W, FU H CH. Prediction of remaining life of rolling bearings based on multi-channel fusion [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(12): 225-233.
- [13] THI V A, LAN H A, DINH M K, et al. Stream analysis for a sub-catchment of Red River (Vietnam) using isotopic technique and recursive digital filter method[J]. Journal of Hydro-Environment Research, 2024, 52: 1-16.
- [14] 程雨晴,郭沐然,王乐萍. 基于信息几何去噪的改进 SVM 的通信信号识别[J]. 航空兵器, 2023(8): 10-15.
CHENG Y Q, GUO M R, WANG L P. Communication signal recognition based on improved SVM with information geometry denoising [J]. Journal of Aviation Weapons, 2023(8): 10-15.
- [15] ANA S, STANISŁAW W, GUILLAUME B, et al. An exact mapping from ReLU networks to spiking neural networks[J]. Neural Networks: The Official Journal of the International Neural Network Society, 2023, 168.
- [16] YAO Y, ZOU J, WANG H. Optimal poisson subsampling for softmax regression [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2023, 36(4): 1609-1625.
- [17] 郑台台,姚燕,蔡晋辉. 基于三维坐姿的压力数据自动标注方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(10): 71-79.
ZHENG T T, YAO Y, CAI J H. Automatic annotation method for pressure data based on three-dimensional sitting posture [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(10): 71-79.
- [18] LUCA P, LUCIANO R, FEDERICO M. Energy management system optimization based on an LSTM deep learning model using vehicle speed prediction [J]. Transportation Engineering, 2023, 11.
- [19] GB/T 42096-2022, 飞机耐火电缆性能要求[S].
GB/T 42096-2022, Performance Requirements for Aircraft Fire-resistant Cables [S].
- [20] GB/T 12527-2008, 额定电压 1 kV 及以下架空绝缘电缆[S].
GB/T 12527-2008, Overhead Insulated Cables with a Rated Voltage of 1 kV and Below [S].

作者简介



纪泽源(通信作者), 2023 年于北京理工大学获得硕士学位, 现为北京机电工程研究所主管设计师, 主要研究方向为飞行器能源电气系统总体设计。

E-mail: jzyuan567@ 163. com

Ji Zeyuan (Corresponding author) received his M. Sc. degree from Beijing Institute of Technology in 2023. He is currently the chief designer at the Beijing Electromechanical Engineering Institute. His main research interest includes overall design of aircraft energy electrical systems.