

基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统设计

陈晓飞, 贾勇, 韩芳

(新疆工程学院 信息工程学院, 乌鲁木齐 830023)

摘要: 传统无人机故障诊断系统故障传感器与故障算法间的逻辑变量存在差值, 当故障点存在于传感器结构内部时, 无法及时感知并反馈故障数据, 导致系统软件部分分析算法分析异常, 故障信号诊断准确性差, 为此提出基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统设计; 引入遥测数据分析技术, 建立基于遥测数据分析的故障信号诊断硬件, 创建故障数据采集单元、故障数据调理单元、故障数据通信单元, 并在三大硬件单元中分别采用 M1401 8 路模量数据采集卡、CY7C68013A-56PVXI 多模数据分析处理器、EP3C16Q240C8N 通信 IC, 配合外围器件, 构建起基于遥测数据分析的无人机故障信号诊断平台; 配合硬件性能, 软件部分分别对故障信号诊断策略与算法进行了优化设计; 通过实验数据表明: 所设计系统对无人机软件故障信号的检测准确率为 97.3%, 硬件信号故障的检测准确率为 98.6%, 能够实现对故障信号的精准诊断, 有效解决传统诊断系统存在的问题。

关键词: 遥测数据; 无人机; 故障; 诊断系统

Design of UAV Fault Diagnosis System Based on Telemetry Data Analysis

CHEN Xiaofei, JIA Yong, HAN Fang

(Department of Information Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China)

Abstract: There is a difference in the logic variables between the fault sensor and the fault algorithm of the traditional UAV fault diagnosis system. When the fault point exists inside the sensor structure, the fault data cannot be sensed and fed back in time, resulting in abnormal analysis of the system software part of the analysis algorithm and fault signal diagnosis. The accuracy is poor, for this reason, a UAV fault diagnosis system design based on telemetry data analysis is proposed. Introduce telemetry data analysis technology, establish fault signal diagnosis hardware based on telemetry data analysis, create fault data acquisition unit, fault data conditioning unit, and fault data communication unit, and use M1401 8-channel modulus data acquisition card in the three hardware units, CY7C68013A-56PVXI multi-mode data analysis processor, EP3C16Q240C8N communication IC, with peripheral devices, build a UAV fault signal diagnosis platform based on telemetry data analysis; with hardware performance, software part of the fault signal diagnosis strategy and algorithm optimize the design. Experimental data shows that the designed system has an accuracy rate of 97.3% for the detection of UAV software fault signals, and an accuracy rate of 98.6% for the detection of hardware signal faults. It can achieve accurate diagnosis of fault signals and effectively solve the existing problems of traditional diagnostic systems.

Keywords: telemetry data; UAV; fault; diagnosis system

0 引言

近年来, 无人机技术发展与研究取得了较大的成就。无人机控制技术, 基于无线网络传输技术、远程控制技术, 通过远程指令数据交互与飞行状态数据的实时交互, 完成对无人机飞行状态数据的收集与飞行姿态的控制。受到无人机应用场景不同^[1]与外界气候影响^[2], 无人机在飞行过程中会出现不同的故障, 根据故障类型可分为硬件故障、软件故障与控制故障。为了实时了解无人机飞行状态, 无人机控制系统下会独立存在一个无人机故障诊断系统, 其作用在于对无人机飞行过程中的数据进行收集、反馈、分析, 通过分析飞行数据, 对故障原因进行诊断。但是, 现有的故障诊断系统数据来源基于无人机数据采集传感器, 因此一旦与传感器相关器件损坏, 系统就无法对飞行数据进行收集, 无法做出故障信号诊断。针对此种问题, 引入遥测

数据分析技术替代故障数据收集传感器, 根据遥测数据分析机制与计算方法, 提出基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统, 并设计仿真实验验证提出系统的有效性。

1 无人机故障遥测诊断系统设计

由无人机结构特征可知, 无人机在飞行过程中, 主要工作单元分为控制单元、驱动单元与数据传输单元三部分构成, 其中控制单元由控制电路、主控与相关指令处理器构成; 驱动单元由电机、传动器及相关驱动器件构成; 数据传输单元由存储器与一些数据转存、寄存器件以及数据信号收发器件构成; 因此在飞行过程中无论哪一单元出现功能异常, 都会影响无人机的正常飞行。针对当下无人机控制技术是通过多组件间的无线数据传输、无线数据分析、无线数据执行三部分构成, 根据无线数据处理特点, 多数据在无线处理过程中, 会产生数据控制的耦合作用^[3],

收稿日期: 2020-10-29; 修回日期: 2021-01-08。

作者简介: 陈晓飞(1975-), 女, 江苏如皋人, 硕士, 副教授, 主要从事物联网方向的研究。

引用格式: 陈晓飞, 贾勇, 韩芳. 基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(7): 21-25.

耦合作用达到一定值时,上述 3 个单元中的任意器件就会出现异常,触发无人机上的故障传感器,对耦合点进行故障反馈,完成对故障的诊断。但是,当故障耦合点发生在故障传感器结构区时,传感器反馈数据产生的数据耦合与故障点耦合形成交叉耦合,即输入数据与输出数据在变量转换过程中出现交叉误差系数,诊断量无法对交叉误差系数做出判定,导致诊断失败。

基于上述特点,引入遥测数据分析理念^[4],通过在无人机各功能单元加入遥测数据采集点,通过遥测卫星实时接收无人机状态数据,通过地面控制系统,将各遥测数据采集点上报数据进行远分离诊断,解决无人机故障传感器故障带来的诊断失败问题。通过地面遥测数据采集平台,实现对无人机故障遥测数据的实时采集与分析。无人机故障遥测诊断系统工作原理,如图 1 所示。

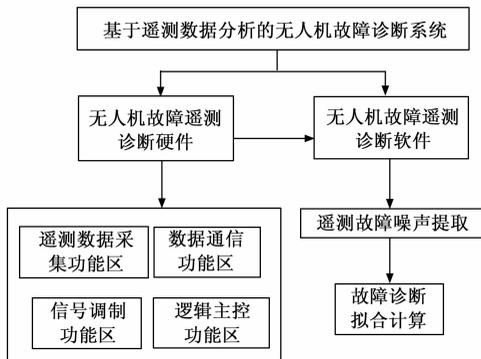


图 1 无人机故障遥测诊断系统工作原理

如图 1 所示,无人机故障遥测诊断系统硬件包括遥测数据采集功能区、信号调制功能区、数据通信功能区及逻辑主控功能区;系统软件通过提取遥测故障噪声实现无人机遥测故障解析,通过拟合计算实现无人机故障信号诊断。

2 基于遥测数据分析的无人机故障诊断硬件设计

根据设计系统的工作原理,对设计系统的硬件部分进行设计。硬件共分为 4 部分,分别为遥测数据采集功能区、信号调制功能区、数据通信功能区、逻辑主控功能区,下面对各功能区硬件进行详细分析。

(1) 遥测数据采集功能区内部主要采用 KJF-34GS 前置遥测信号收发基带板卡作为此功能区无人机故障数据的采集卡,支持 MSD/TPC 编译码功能,CPCI 结构^[5]设计,可兼容接收 PCM-FM、PCM-BPSK、PCM-QPSK 和 PCM-CDMA-BPSK 等多种调制体制的遥测信号,可扩展接收新体制信号,具有良好的通用性;信息传输速率为 20 Mbps;多频段 L/S;

采用左右旋极化分集成技术:当两路信号信噪比相等时,可获得优于 2.5 dB 的增益;

具有时码器功能,能接收并转发 IRIG-B000 时间码信号^[6],为系统提供遥测时间基准;

具有 PCM 模拟器功能,可输出模拟 PCM 信号完成系

统自检功能;

输入接口支持:中频信号(接收机)(SMA),外部 PCM 信号(PCM)(CPCI)具有位同步、帧同步、副帧同步状态指示 AGC 动态范围:≥20 dB 解调体制:PCM-FM、PCM-BPSK/QPSK、PCM-CDMA-BPSK/QPSK 中频带宽:50 kHz~20 MHz/自动;码型:NRZ-L/M/S, Bi-C-L/M/S, RNRZ-L 加解密接口:DB-15;1 综合数据接口:DB-25。工作电压:12 V±10%1。

同时在功能区内独立配备宽域电源管理器与电路传感器,保障故障数据采集状态的稳定。

(2) 信号调制功能区内设有 Anaren 公司^[7]生产的 X3DC08E2S 信号调制器,通过内建射频通信通道,将故障数据进行 862~894 MHz 模量转换,有效屏蔽冗余数据信号的扰动;为了保证信号调制效果的稳定,在信号调制器前端设计了 SBB-5089Z 信号方法与 TPD8F003DQDR 滤波器作为故障数据信号调制的增益处理模块。通过放大、滤波处理,使载入信号调制器的数据信号满足以下指标:调制终止射频频率 200 MHz;输出电阻值 100 Ω;信号放大范围 1 GHz;编码形式 SMD/SMT。

(3) 数据通信功能区负责调制信号的地面诊断系统软件层面信号与指令信号的收发。采用 AT89C51RC2-SLSUM 通信模块,通过自带多模信道,支持 6 路并发技术,通过独立信号线连接,支持将模量射频信号转换为网络数字信号,通过对信号电路的调理,完成信号编码转换,数据传输信号转换电路,如图 2 所示。

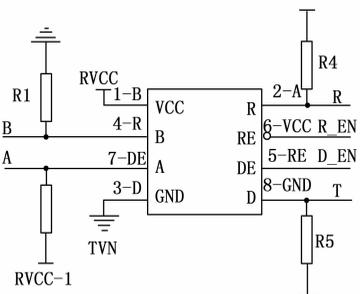


图 2 AT89C51RC2-SLSUM 通信模块信号转换工作电路图

在该电路图中,有 4 路数据信号为数字信号输出量、2 路射频输出模量以及 2 路 4 位模量转换补偿信号,可保障数据在网络数字信道中 6 路并发的稳定。

(4) 逻辑主控功能区为设计硬件的核心功能区,采用 AMR 架构的 x86 平台处理器,通过 17-10700 处理器的八核芯 16 线程,稳定保证多因素故障数据的分析处理,同时兼顾控制、分析、调度等多任务处理的资源调度。动态主频高达 5.1 GHz,能够满足多数据流下复杂故障的处理,集成指令集 SSE4.1/4.2, AVX2, 64 bit,为硬件平台的设计提供核心保障。

3 软件部分设计

针对遥测故障采集数据的分析策略与故障信息的诊断算法,系统在软件层面设计上进行了针对性优化设计,通

过针对性设计实现与硬件性能的高度适配。

3.1 遥测故障噪声提取策略

在遥测采集的无人机飞行故障信息中, 受到诸多不可控因素的影响以及电磁信号等干扰源扰动, 故障信息流中夹杂着大量扰动噪声, 虽然不同变量位置的噪声对无人机故障分析精准度的影响有所不同, 但不可否认噪声的存在无疑会降低无人机故障信号诊断结果的精度。因此, 需要对遥测数据信号中的噪声进行提取, 通过噪声提取获得一个数据信号波分布均匀的遥测故障模型。

为了减轻设计系统的运算压力, 噪声提取任务设计采用策略设计的方式, 将噪声变量与提取逻辑以策略的形式通过 Matlab 环境工具编辑到软件底层, 使其具有独立的调用权限, 保证任务运行的稳定, 具体操作如下:

在 Matlab 环境工具中创建变量工具窗口, 在窗口中选择小波变量设计工具, 在恐惧中输入无人机遥测飞行数据, 创建无人机飞行数据场景, 在场景中会得到一组有飞行数据生成的解析波, 其中包含着无人机飞行状态、故障位置、故障类型以及噪声。在小波工具窗口输入 Audio track 命令, 打开解析波编辑界面, 在编辑界面中会对解析波进行噪声的小波过滤, 噪声维度调节设定等变量处理, 设计系统中的噪声提取处理的变量设计如下:

(1) 根据无人机遥测数据生成无人机飞行状态解析波, 状态数据中设定无人机的飞行高度为 X , 对应 X 时域的故障数据设定为噪声提取目标;

(2) 由完成一次飞行状态解析波的小波滤波, 在滤波后的解析波正交基上, 会发现波形十分平滑, 根据飞行正常态波与故障波之间的正则性, 对解析波进行一次重组;

(3) 将重组后解析波上 db 小波^[8]的阶数 I 设为 1, 解析次数设定为 5, 执行得到解析结果, 如图 3 所示;

(4) 对解析结果进行信号降维, 打开噪声工具窗口, 输入噪声波范围, 设计中将噪声提取范围设定为 4, 执行得到提取噪声后的无人机遥测故障解析波, 如图 4 所示。

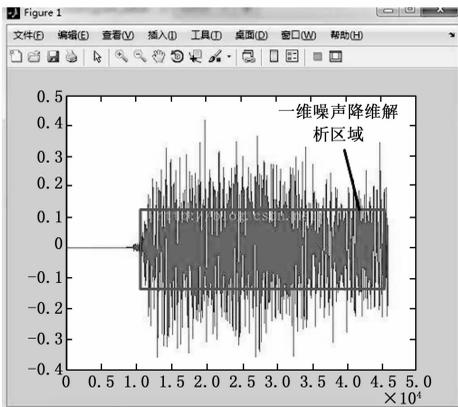


图 3 无人机遥测故障解析波降维解析结果

3.2 多因素遥测数据分析下故障诊断拟合计算

对提取噪声后的解析波进行故障信号诊断判定计算。针对遥测故障解析波当前时域状态包含多因素特征, 采用

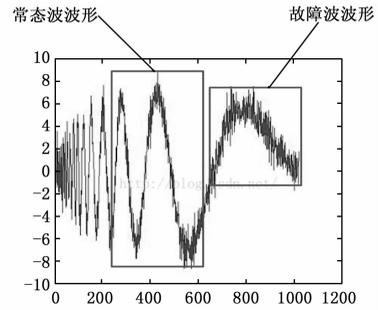


图 4 提取噪声后的无人机遥测故障解析波

曲线拟合判断方式, 对解析波故障数据点进行拟合诊断, 通过曲线拟合判定计算, 使判定结果无限逼近精准值, 通过最小二乘法计算, 优化诊断判定结果, 得到判定结果的最小值。具体计算步骤如下:

设定拟态因素要件: C_1, C_2, \dots, C_z 与 u_1, u_2, \dots, u_z 对其进行函数求解计算。

$$\gamma(C) = \beta_0 \gamma_0(C) + \beta_1 \gamma_1(C) + \dots + \beta_i \gamma_i(C) = \sum_{k=0}^i \beta_k \gamma_k(C) \quad (1)$$

定义 $\sum_{n=1}^z [\gamma(C_n) - u_n]^2 = \sum_{n=1}^z \left[\sum_{k=0}^i \beta_k \gamma_k(C_n) - u_n \right]^2$ 的值为诊断判定量的最小值。

(1) 当 $\gamma(C)$ 为单一要素诊断函数时, 解析函数的曲线形态与拟合诊断判定曲线形态一致^[9]。

(2) 当 $\gamma(C)$ 为多要素诊断函数时, 其最小二程计算值必须处于拟合诊断判定曲线之上。

(3) 对故障拟合函数判定: $\{\gamma_0(C), \gamma_1(C), \dots, \gamma_i(C)\}$ 由遥测故障数据中故障波密集分布形态确定^[10]。

对抽取的故障拟态要件 $(c_n, u_n) (n = 1, 2, \dots, i)$ 进行多因素 $z (z \ll i)$ 的拟态诊断判定函数表达, 即:

$$h_z(C) = s_0 + s_1 c + s_2 c^2 + \dots + s_z c^z \quad (2)$$

将多因素故障拟合要件与 $(c_n, u_n) (n = 1, 2, \dots, i)$ 进行拟合函数关联判定, 得到拟合后的函数诊断式为:

$$\tilde{u}_y = h(c_y) = \sum_{k=0}^i s_k c_y^k = s_0 + s_1 c_y + s_2 c_y^2 + \dots + s_z c_y^z \quad (3)$$

令 \tilde{u}_y 为诊断近似值, 同遥测数据量 u_y 之间的关系满足 $r_y = u_y - \tilde{u}_y$, 则有:

$$W = \sum_{y=1}^i r_y^2 = \sum_{y=1}^i \left[u_y - \sum_{k=0}^z s_k c_y^k \right]^2 \quad (4)$$

进一步换量计算, 得到故障拟合诊断判断式:

$$\frac{\epsilon W}{\epsilon s_l} = 2 \sum_{l=1}^i \left(u_y - \sum_{k=0}^z s_k c_y^k \right) c_y^l = 2 \left[\sum_{y=1}^i c_y^l u_y - \sum_{y=1}^i \left(\sum_{k=0}^z s_k c_y^k \right) c_y^l \right] = 0 \quad (5)$$

综上所述, 无人机故障诊断系统软件流程图如图 5 所示。

如图 5 所示, 软件部分首先设定时域故障数据为噪声提取目标, 通过小波滤波对解析波进行一次重组, 设定噪

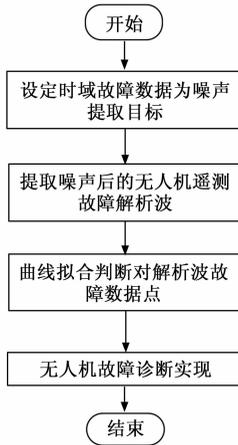


图 5 提取噪声后的无人机遥测故障解析波

声波范围为 4，执行得到提取噪声后的无人机遥测故障解析波；再通过曲线拟合的判断方式得到故障拟合诊断判断式，将其传输至硬件模块，实现基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统设计。

4 系统调试

为了验证基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统设计合理性，对设计系统进行软件故障、硬件故障、控制故障 3 个维度的系统调试。

4.1 调试数据采集

调试数据来源于 HT-1 遥感卫星；无人机采用搭载遥测故障采集传感器的测试机；诊断系统分别为设计系统与传统诊断系统；测试环境数据如表 1 所示。

表 1 采集数据标准

环境量	调试环境值范围	调试点环境值
温度	20~27 ℃	25 ℃
湿度	43~72%RH	58%
风向	全风向	西南风
风速	3~6 m/s	4 m/s

4.2 软件故障信号诊断

将调试无人机所反馈带有软件故障的遥测数据信号波，导入设计系统，如图 6 所示，生成故障诊断曲线如图 7 所示，并根据曲线分布结果，进行调试总结。

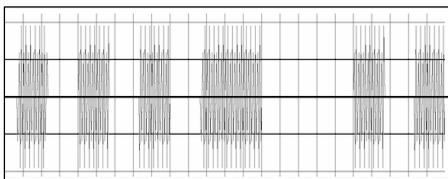


图 6 带有软件故障的无人机遥测数据信号波

由图 7 中诊断曲线分布区域可知，设计诊断系统准确的对调试故障数据作出了软件故障的诊断判定，证明设计系统对无人机软件故障的诊断效果满足技术标准。

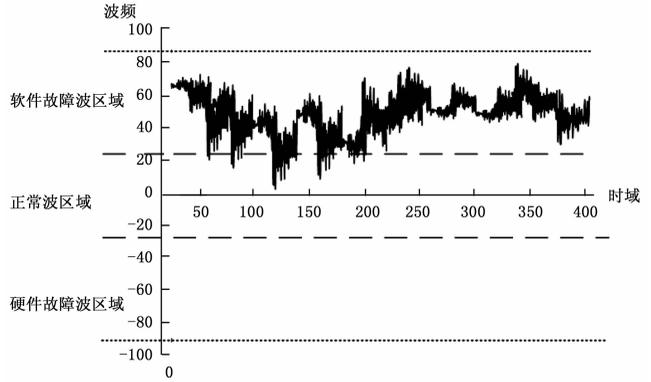


图 7 故障诊断曲线

4.3 硬件故障信号诊断

将调试无人机所反馈带有硬件故障的遥测数据信号波导入设计系统，如图 8 所示，生成故障诊断曲线如图 9 所示，并根据曲线分布结果，进行调试总结。

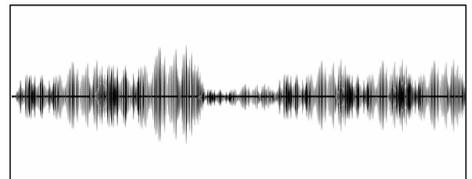


图 8 带有硬件故障的无人机遥测数据信号波

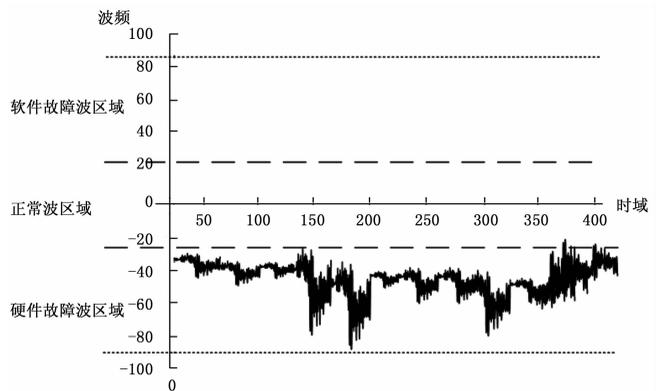


图 9 故障诊断曲线

由图 9 中诊断曲线分布区域可知，设计诊断系统准确的对调试故障数据做出了硬件故障的诊断判定，证明设计系统对无人机硬件故障的诊断效果满足技术标准。

4.4 控制故障信号诊断

将调试无人机所反馈带有控制故障（信号故障）的遥测数据信号波导入设计系统，如图 10 所示，生成故障诊断曲线，如图 11 所示，并根据曲线分布结果，进行调试总结。

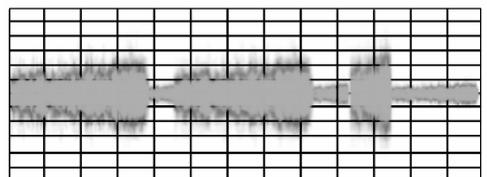


图 10 带有控制故障的无人机遥测数据信号波

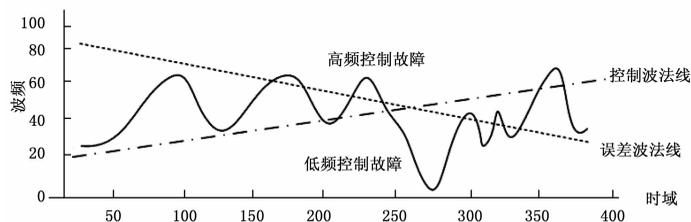


图 11 故障诊断曲线

由图 11 中诊断曲线分布区域可知, 设计诊断系统能够根据控制参与与误差参量, 通过最小二乘法生成两条诊断法线, 并对法线之外的高频与低频区域的故障波进行诊断判定, 可以证明设计系统对无人机控制故障的诊断效果满足技术标准。

4.5 故障数据统计分析

将上述 3 个调试维度的调试数据进行整合统计分析, 3 个维度故障诊断数据的整合采用大数据融合技术, 根据诊断精度与调试次数比同调试总次数间的最佳诊断比进行融合统计, 统计表详见表 2 所示。

表 2 设计系统无人机故障诊断综合性能

故障类型	故障波频域	调试次数	诊断准确率/%
软件故障	20~100 Hz(横波)	100	97.3
硬件故障	120~200 Hz(横波)	100	98.6
控制故障	>95 Hz 且 <120 Hz(纵波)	100	97.8
综合诊断精度比			97.9

在表 2 数据的统计过程中, 软件故障调试数据与硬件故障调试数据的解析波采用横波形态, 主要在于两种调试数据设定中不含有相对数据存在, 因此在波形表现上横波可以满足调试数据收集分析的需要; 而控制故障调试数据包含了硬件区域与软件区域的控制信息, 在横波上会同时涉及两种故障波区域, 无法有效收集所需信息, 而在纵波上受到时频空间不同的影响, 在纵波上只会呈现控制信号的噪声波, 即故障波, 因此控制故障调试数据采用纵波解析波完成。

根据表 2 中的数据可知, 提出设计的基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统, 不论在软件维度还是在硬件维度, 都能对故障做出精准的诊断, 表现效果令人满意。同

(上接第 10 页)

数据。目前, 该电路已成功应用于某型无人机机载任务设备控制模块中, 并经历了百余小时多个起落的动态飞行验证。实际应用表明, 优化后的 BIT 检测电路, 完全满足设计功能与性能指标要求, 特别是其具有的自动识别与有效分离电压状态的自适应特点, 进一步省去了机载计算机参与控制的程序编写工作, 减少了软件设计、软件测试、软件第三方认证以及软件设计文档等多重工作量, 大大节约了人力资源, 降低了人工成本, 缩短了研制周期。同时, 其拥有体积小、成本低、可靠性高的优越指标, 被推广应用于

时, 系统对涉及软硬件双重维度的第三维度——控制维度故障诊断结果, 也达到了预期效果。通过对 3 个维度调试过程的 100 次重复数据综合统计表明, 基于遥测数据分析的无人机故障诊断系统, 能够稳定、高效、准确地对无人机故障做出诊断, 解决传统诊断系统硬件维度上故障诊断失败的问题。

5 结束语

远程控制技术、网络技术与无人机控制技术的发展, 使无人机快速应用于诸多领域。针对无人机故障诊断系统在当下应用场景中存在的问题。设计在硬件与软件层面进行了全新的设计。设计基于遥测数据分析技术, 通过对无人机硬件故障、软件故障与控制故障 3 个维度的数据分析, 总结不同维度下故障的特性与共性, 通过调试实例数据表明, 提出设计系统能够在不同故障维度场景中, 高效、稳定、准确的作出诊断。设计系统具有较高推广性与应用性。

参考文献:

- [1] 彭宇, 史书慧, 郭凯, 等. 无人机飞控系统故障仿真及数据生成 [J]. 仪器仪表学报, 2019 (7): 13-21.
- [2] 贾双成, 王涛. 基于数据挖掘的船舶主机故障远程诊断系统优化设计 [J]. 舰船科学技术, 2018, 40 (22): 80-82.
- [3] 蒙文跃, 杨延平, 温阳, 等. 一种临近空间太阳能无人机自主故障诊断及应急处理策略 [J]. 航天控制, 2020, 38 (2): 57-62.
- [4] 王洋, 华容. 组合时延预测的无人机传感器故障诊断研究 [J]. 电光与控制, 2019, 26 (5): 90-93.
- [5] 王栋, 鲜斌. 倾转式三旋翼无人机的自适应鲁棒容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2020, 37 (4): 784-792.
- [6] 谈娟, 陈欣, 曹东. 基于模型参数辨识的机载传感器故障诊断 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (5): 84-88.
- [7] 彭宇, 史书慧, 郭凯, 等. 无人机飞控系统故障仿真及数据生成 [J]. 仪器仪表学报, 2019 (7): 13-21.
- [8] 宋建, 宫梦晓, 张文君. 超声诊断左下肢神经纤维瘤 1 例 [J]. 湖北医药学院学报, 2018, 37 (2): 198-199.
- [9] 光明, 鄂爱东, 钱凤阳, 等. 基于三维激光扫描技术的输电线路无人机巡检方法分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37 (1): 21-24.
- [10] 马鑫龙, 艾冬生, 孙发鱼, 等. 基于 MQTT 的遥测数据无线传输 [J]. 探测与控制学报, 2020, 42 (2): 61-64.

其他型号无人机系统的同类产品、机载航空电子产品、数据链产品以及地面站控制设备中。

参考文献:

- [1] 王鉴渊, 李光升. BIT 技术发展及应用综述, 计算机测量与控制 [J]. 2018, 26 (4): 1-4.
- [2] 姜思卓, 程超, 王强. 电力计量装置电压异常状态检测系统设计, 计算机测量与控制 [J]. 2020, 28 (2): 399-42.
- [3] 姜波, 田会. 火焰触发器用自适应信号处理电路设计, 计算机测量与控制 [J]. 2019, 27 (3): 169-172.
- [4] 张晨, 胡永红. 道路空一地图像探测控制器可靠性增长设计. 西北工业大学学报 [J]. 2016, (34) 3: 399-403.