

# 基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统设计

王 健, 熊福敏

(沈阳化工大学 信息工程学院, 沈阳 110000)

**摘要:** 针对传统航天测控频段故障诊断方法受到信息传输时延影响而导致诊断精度低的问题, 提出基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统设计; 硬件结构设计了判断故障类型的波头信号检测模块; 通过地面接收机接收卫星发出的微弱信号, 计算本机晶振脉冲数, 以此修改北斗卫星通信数据; 利用北斗授时模块, 保证了输出时间的准确性, 避免了延迟问题; 软件部分用逻辑推理设计航天测控频段故障诊断流程, 并使用北斗卫星诊断技术, 纠正误差; 由实验结果可知, 该系统信号线松动脉冲信号诊断结果与实际情况一致, 陀螺输出角度量漂移与实际值一致, 误差为 0, 具有精准诊断结果。

**关键词:** 北斗卫星通信; 航天测控频段; 故障诊断; 逻辑推理

## Design of a Fault Diagnosis System for Space Measurement and Control Frequency Band Based on Beidou Satellite Communication

WANG Jian, XIONG Fumin

(School of Information Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the traditional aerospace measurement and control frequency band fault diagnosis method is affected by the information transmission delay and the diagnosis accuracy is low, the design of a space measurement and control frequency band fault diagnosis system based on Beidou satellite communication is proposed. The hardware structure is designed with a wave-head signal detection module to determine the type of failure; the weak signal sent by the satellite is received through the ground receiver, and the number of local crystal oscillator pulses is calculated to modify the Beidou satellite communication data. The Beidou timing module is used to ensure the accuracy of the output time and avoid the delay problem. The software part uses logical reasoning to design the fault diagnosis process of the aerospace measurement and control frequency band, and uses the Beidou satellite diagnosis technology to correct the error. It can be seen from the experimental results that the system's signal line loose pulse signal diagnosis result is consistent with the actual situation, the gyro output angle drift is consistent with the actual value, and the error is 0, which has an accurate diagnosis result.

**Keywords:** Beidou satellite communication; space TT&C frequency band; fault diagnosis; logical reasoning

## 0 引言

航天测控系统属于电子系统工程问题, 对于该系统来说, 应先考虑的是航天任务要求, 从地面基站出发, 实现信息获取, 以此确定航天器飞行姿态<sup>[1]</sup>。如果某一个测控频段出现故障, 就会影响整个航天器运行状态。随着空间技术快速发展, 针对航天测控频段可靠性研究日益受到人们重视, 尤其对于航天测控频段故障诊断技术研究成为该领域重要研究内容<sup>[2]</sup>。传统基于信号处理的方法受到航天器结构复杂影响, 无法精准获取航天测控频段数据, 其动态数学模型难以建立, 并且实时可用检测信号很少, 同样受到外界环境干扰, 诊断结果不精准。为了解决上述问题, 根据航天测控频段层次结构, 提出了基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统设计。

## 1 系统总体架构设计

基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统总体架构, 如图 1 所示。

由图 1 可知, 该系统采用集中化设计结构, 即由多个 agent 组成的集中管理组织, 负责为各下属诊断 agent 提供统一的协调管理中心, 实现对各 agent 的行为、任务分配和信息资源共享<sup>[3]</sup>。

系统主要组成部分主要功能如下:

1) 传感器: 传感器主要负责监测航天器的环境信息和状态, 将监测结果存储于数据库中, 可用于故障预测与诊断<sup>[4]</sup>。

2) 推理模块: 分析数据库中的信息数据, 向上级系统代理发送故障预测结果和故障状态信息; 根据知识库中的经验知识或模型知识以及传感器中的信息, 由诊断推理机

收稿日期: 2021-05-10; 修回日期: 2021-06-02。

作者简介: 王 健(1965-), 男, 辽宁沈阳人, 博士, 副教授, 主要从事集成电路和微机电系统设计方向的研究。

引用格式: 王 健, 熊福敏. 基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(12): 8-12.

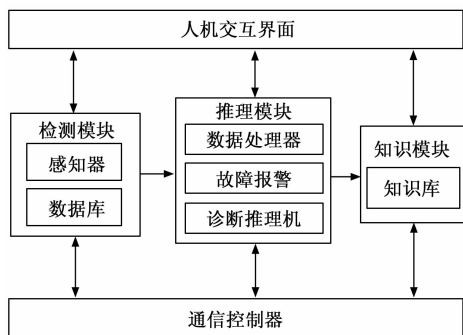


图 1 系统总体架构

根据上级代理指派的诊断任务进行初步故障诊断<sup>[5]</sup>。

3) 执行器: 执行器主要负责重构系统接收的指令, 并将该指令发送给通信控制器。

4) HMI 接口: 通过人机交互, 将代理工作状态的显示和诊断结果呈现给代理, 并对各个模块进行更新。

5) 通信控制器: 从高级代理收到的消息被发送到该代理的相关模块, 并将各模块产生的结果发送到上级代理。

## 2 系统硬件结构

系统硬件结构如图 2 所示。

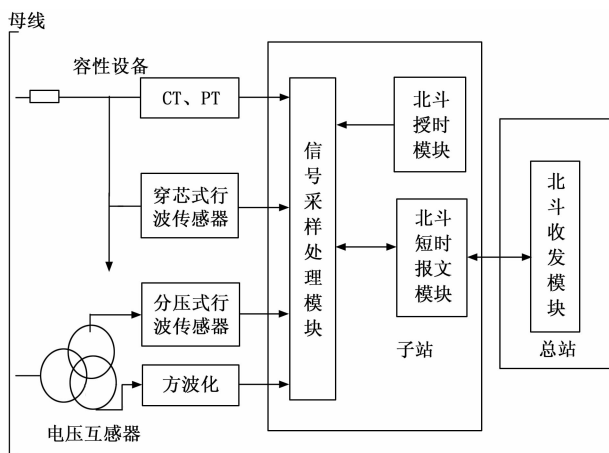


图 2 系统硬件结构

由图 2 可知, 对 A/D 信号进行高速采集, 通过检测初始行波头, 避免了高负载, 简化了电路结构, 降低了存储要求。

### 2.1 波头信号检测模块

波头信号检测模块主要是将穿芯式行波传感器、分压式行波传感器接收到的波头信号转换为脉冲信息, 并将该信号传送到信号处理模块<sup>[6]</sup>。该检测模块是由时间记录模块、采样处理模块、北斗短信通信模块、人机交互模块组成的, 其中时间记录模块主要负责记录行波到达时脉冲触发的采样时间, 并利用采样处理模块处理接收到的故障信息进行故障判断<sup>[7-9]</sup>。一旦故障确认后, 该模块立刻将信息反馈给主机, 主设备采用双端法确定故障位置, 并及时反馈到人机交互界面<sup>[10-12]</sup>。

### 2.2 地面接收器

地面接收器接收卫星输出的微弱信号时, 需要经过功率放大、频率转换、杂波滤波等一系列处理, 才能得到所需的数据。北斗卫星发出信号是以最小功率 $-157.8$  dBW 和正常功率 $-146.9$  dBW 的方式发送到地面接收机的, 载频 $2\,491.74$  MHz, 带宽 $8.15$  MHz。为确保地面接收机能准确采集卫星发射信号, 将接收信号的灵敏度设置在 $-145$  dBW<sup>[13-15]</sup>。

### 2.3 计数器

计数器主要统计本振输出的脉冲数, 从而调整频率范围, 使之保持在可靠范围内。结合调频估计下一秒时域, 充分考虑线路老化对时钟脉冲的影响。通过计时器, 能够使卫星接收机输出时间完整度得以区分, 提高了系统稳定性。时间一频率统计系统将北斗授时接收机输出的 $1$  PPS 信号转换为数字信号形式, 并由北斗授时接收机接收该信号, 达到时间一致性<sup>[16]</sup>。若北斗授时接收机不能正常工作, 则计数器将保持原有状态, 避免信号接收延迟问题出现。

### 2.4 北斗短报文模块

短消息通过卫星将其转发到基站。经过解密和重新加密后, 地面站接收到一个通信请求信号, 接收端接收输出信号, 解调解密输出信息, 通信完成。该模块下的短消息通信有大约 $0.5$  s 传输延迟, 最大通信频率是 $1$  s。在安装了北斗短信模块之后, 终端的短信通信更加高效。北斗短消息通过北斗卫星系统实现收发信息功能的同时, 也可用于航天测控频段的监测。每个监测点设置完毕后, 北斗短报文技术可直接将修改后的数据通过北斗短报文发送到中心系统, 以便计算后及时处理突发故障。

北斗短报文模块结构如图 3 所示。

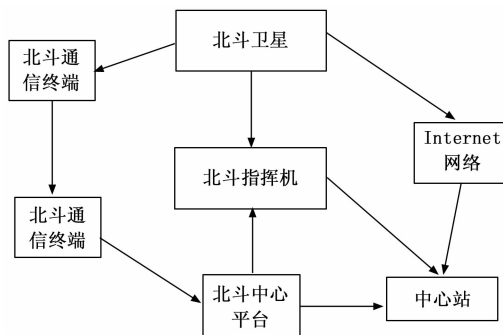


图 3 北斗短报文模块结构

由图 3 可知, 北斗短报文模块服务主要性能指标如下: 服务成功率大于等于 $95\%$ , 服务频度一般 $1$ 次/ $30$  s, 最高 $1$ 次/ $1$  s, 响应时间小于等于 $1$  s, 终端发射功率小于等于 $3$  W, 服务容量上行 $1\,200$ 万次/小时, 下行 $600$ 万次/小时, 单次报文最大长度为 $15\,000$  bit, 定位精度可达 $95\%$ 。

### 2.5 北斗授时模块

根据使用者与卫星通信之间的时间差, 通常至少需要 $4$ 颗卫星来导航和定位。当使用者计算出来与卫星通信之间

的时间差后，可以通过北斗授时模块修正自己的本地时钟，让它与人造卫星的高精度时钟同步，这个过程叫做定时。

北斗授时模块如图 4 所示。

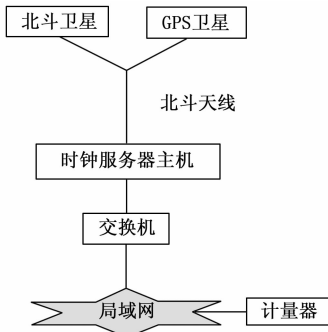


图 4 北斗授时模块

由图 4 可知，GPS 定位系统能够同时接收扫描范围内的全部卫星信号，将该信号传送给时钟服务器主机，通过主机记录信号接收与处理的时间。经过时钟服务器主机处理后，可得到两种时间信号，分别是同步脉冲信号和绝对时间信号，两种信号同步误差不会超过 1 ns。当天线安装好后，只需从卫星上接收信号，就能保证输出的准确时间。

### 3 软件部分设计

#### 3.1 故障诊断流程设计

基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统，故障诊断流程如下所示：

步骤 1：使用者可直接选择设备名称、型号及故障类型；

步骤 2：基于该方法，用户可以选择故障范围最小的节点，也可以直接提交故障范围值，从而确定故障发生的条件；

步骤 3：当用户提交一个节点和一个故障特征信息时，系统根据用户提供的诊断信息按照搜索策略和故障识别规则进行匹配，并将匹配结果输入到“故障识别冲突集”中。当识别冲突集为空时，返回步骤 2，如非空白，转至步骤 4；

步骤 4：根据故障规则匹配策略，判断故障类型识别是否成功，当故障类型识别失败时，需要修改提交规则。当故障类型识别成功时，则直接调用故障类型诊断线程；

步骤 5：用户可以选择进行逻辑推理诊断和系统定位故障类型，获得精确定位结果后，按照故障规则进行逻辑推理诊断故障。如果启用了测试规则，则将在错误对话框中询问测试项目，并为该测试项目提供相关参数。如果用户维护验证成功，那么诊断维护记录按要求归档后，诊断工作即结束；如果用户维护验证失败，那么可参考以前故障类型的诊断和维护记录，帮助用户调整维护计划。

#### 3.2 基于北斗卫星诊断误差纠正

以秒为基本单位的北斗系统分为单向授时和双向授时，该系统是由卫星终端、用户终端和地面控制中心组成的，如图 5 所示。

如图 5 (a) 所示，用户终端与地面控制中心的精确坐

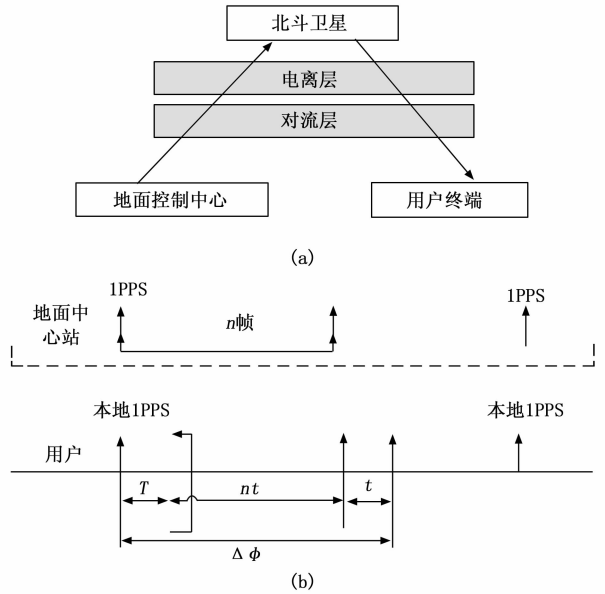


图 5 北斗卫星的单向授时示意图

标信息实现了单向计时过程中的实时交互。然而，接收端需要计算用户终端的信息，并且接收端需要计算并校正传输延迟。它的特点是地面控制中心负责处理所有信息，因此用户终端系统的存储容量较低，位置要求较低<sup>[17-18]</sup>。

如图 5 (b) 所示，单方向计时方式如下：本地 1 PPS 为开启脉冲，用户接收地面中控系统以其相关峰值为闭合脉冲的计时查询信号：

$$\Delta\varphi = \Delta t + nt + \gamma \tag{1}$$

式 (1) 中， $\Delta t$  表示控制用户终端受到外界环境影响时信号接收的时间差； $n$  表示传输次数； $t$  表示控制中心发送信号与用户终端接收信号所需的时间； $\gamma$  表述信号传输延迟。通过分析报文中的延迟，用户终端可以获得准确的接收时间，GPS 和北斗系统的时间误差不超过 100 ns，可以满足大多数单位对精度的要求。

综上，基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断方法流程如图 6 所示。

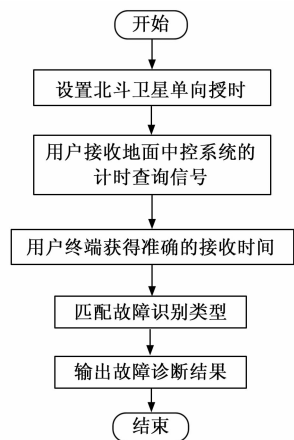


图 6 航天测控频段故障诊断流程

根据图 6 可知, 航天测控频段故障诊断流程为: 设置单向授时的北斗卫星系统, 用户能够接受来自地面中控系统的故障信号, 通过单向授时实时获得准确的故障信号, 并对故障类型进行匹配, 输出配准的故障类型, 即为航天测控频段故障诊断结果。

### 4 实验结果与分析

为了检测基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断结果, 与传统诊断方法进行对比, 并分析实验结果。

#### 4.1 实验要求及数据

航天测控频段监测系统的数据采集需要专业、全面的数据检测。本文系统通过子系统的控制检测和时空匹配, 采集航天器的数据通信信息, 辅助模拟飞行激励系统模拟工作, 根据预定的采集参数采集数据并存储。航天测控频段数据的获取步骤为:

1) 数据参数收集: 在航天器的运行状态下, 需要判断输入数据是否超过了预设的阈值范围, 从而检查航天器辅助设备的参数值是否随着运行状态的变化而变化。如果发生变化, 则需要确定航天器的运行模式; 如果没有发生变化, 则需要确定设备参数值是否与预期设置的参数值一致。

2) 数据指令查找: 对数据进行预处理和采集, 进行指令搜索。依据接收到的数据指令进行相关指标搜索, 并根据具体情况决定命令搜索的起点。

3) 数据通信收集: 指令搜索完成后, 可以利用搜索结果对航天器运行过程进行动态监测, 在探测期间收集由航天器发送的数据通信信号, 并指定飞行时间的飞行状态。

#### 4.2 实验过程

为了验证基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统设计合理性, 进行实验验证分析。实验是以航天测控频段的雷达故障为例进行研究的, 假设雷达故障主要原因主要有两种, 分别是信号线松动、陀螺输出有波纹, 接收故障短报文内容的测控系统如图 7 所示。

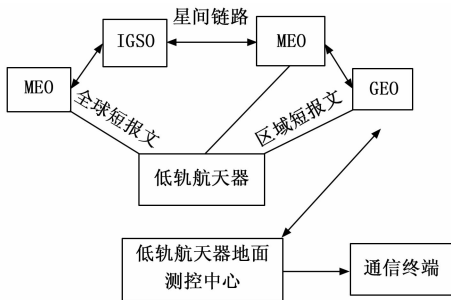


图 7 天基测控系统

如图 7 所示, 通过天基测控系统接收北斗短报文, 获取航天测控频段故障诊断脉冲信号, 分别得到雷达信号线松动的幅值及陀螺输出波纹的角度量漂移值, 与实际值相对比, 验证所提方法的有效性, 并以解析模型及信号处理方法作为实验对比方法, 进一步体现所设计方法的故障诊断精度。

### 4.3 实验结果与分析

#### 4.3.1 信号线松动

依据上述情况, 分别使用解析模型、信号处理方法及北斗卫星诊断方法诊断信号线松动脉冲, 如图 8 所示。

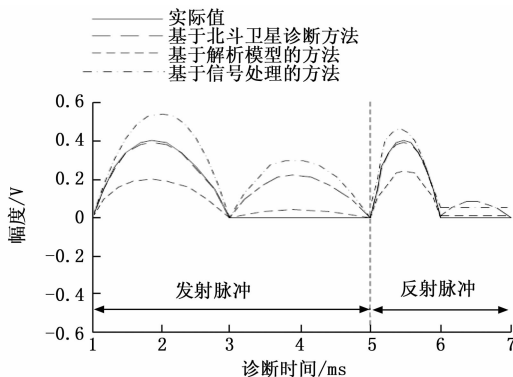


图 8 3 种方法信号线松动脉冲信号诊断结果对比分析

由图 8 可知, 在发射脉冲阶段, 实际脉冲幅度由最高 0.4 V 降到 0 V, 反射脉冲幅度由最高 0.4 V 降到 0 V; 使用基于解析模型的方法脉冲幅度由最高 0.2 V 降到 0.08 V, 反射脉冲幅度由最高 0.25 V 降到 0.02 V; 使用基于信号处理的方法脉冲幅度由最高 0.55 V 降到 0.32 V, 反射脉冲幅度由最高 0.5 V 降到 0.09 V, 并保持不变; 使用基于北斗卫星诊断方法脉冲幅度由最高 0.39 V 降到 0 V, 反射脉冲幅度由最高 0.4 V 降到 0 V。由此可知, 使用基于北斗卫星诊断方法信号线松动脉冲信号诊断结果与实际情况一致, 该方法的故障诊断准确性较好。

#### 4.3.2 陀螺输出有波纹

使用 4 种方法的陀螺输出有波纹诊断结果, 如图 9 所示。

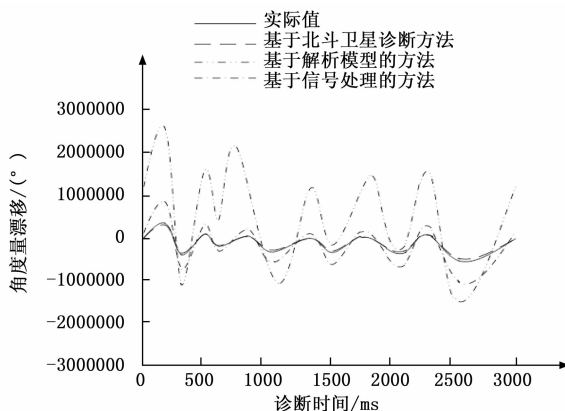


图 9 3 种方法陀螺输出有波纹诊断结果对比分析

由图 9 可知, 分别使用传统的两种方法角度量漂移与实际值在 0~1 000 ms 诊断时间内一致, 而在 1 000~3 000 ms 诊断时间内相差较大; 而使用基于北斗卫星诊断方法, 在诊断时间内角度量漂移与实际值一致, 误差为 0。由此可见, 基于北斗卫星诊断方法的陀螺输出波纹检测结果与实际值一致。由于本文方法采用北斗卫星通信技术, 通过北

斗授时模块保证了输出时间准确性,通过北斗卫星诊断技术纠正了诊断误差。因此其诊断结果较为准确。

## 5 结束语

基于北斗卫星通信的航天测控频段故障诊断系统,结合北斗卫星单向时序故障诊断技术,不仅能快速、准确地分析故障、定位故障,大大提高故障排除的效率,而且能帮助科技人员找出设备中的薄弱环节。相对于传统技术,该系统大大减少了不必要干扰因素,提高了接收数据的清晰度,简化了操作流程,增加了整体技术参与度,能够满足用户需求。

### 参考文献:

- [1] 耿飞龙,李爽,黄旭星,等.基于深度神经网络的航天器姿态控制系统故障诊断与容错控制研究[J].中国空间科学技术,2020,40(6):5-16.
- [2] 田二林,王凤琴,韩雪琴.基于MatLab的农用车辆车载故障检测系统的设计[J].农机化研究,2019,41(1):258-262.
- [3] 房昕宇,金隼,唐水龙.基于S变换和XGBoost算法的进给系统轴承故障诊断方法[J].机械设计与研究,2020,36(4):79-84.
- [4] 潘宏侠,张玉学.基于SST时频图纹理特征的供输弹系统故障诊断[J].振动与冲击,2020,39(6):132-137.
- [5] 吴金利,马宏忠,吴书煜,等.基于振动信号的高压并联电抗器故障诊断方法与监测系统研制[J].电测与仪表,2020,57(1):120-127.
- [6] 冯姣,陈苏婷,李鹏.北斗预警信息压缩传输系统的设计与实现[J].现代电子技术,2019,42(10):118-123.

(上接第7页)

- [21] BJORKMAN E A, GRAY F B. Testing in a joint environment 2004-2008: findings, conclusions, and evaluation methodology project [J]. ITEA Journal, 2009, 30 (1): 39-44.
- [22] LOCKHART R, FERGUSON C. Joint mission environment test capability [J]. ITEA Journal, 2008, 29 (2): 160-166.
- [23] Ferguson, Chip. Joint mission environment test capability (JMETC) improving distributed test capabilities [C] // 28th Annual NDIA T&E, 2012.
- [24] Col Ted "Vader" Dempsey. Comprehensive approach to capability delivery deep-end theory [C] // 53d Wing, USAF. 33RD Annual National Test & Evaluation Conference, 2018.
- [25] Karl A. King. Test and training enabling architecture (TENA) and the Nevada test and training range (NTTR) [C] // 20th Test Instrumentation Workshop, 2016.
- [26] BERNARD, et al. an update on the joint mission environment test capability (JMETC) and the distributed testing world [J]. ITEA Journal, 2013, 34: 318-321.
- [27] HUDGINS G. TENA and JMETC enabling interoperability among ranges, facilities, and simulations [C] // 28th Annual NDIA T&E, 2012.

- [7] 刘帆,王莉,刘凯,等.一种基于中台的多航天器综合评估系统架构设计[J].计算机科学,2020,47(s2):672-676.
- [8] 林毅,吉鸿江,韩佳佳,等.一种基于马氏距离的系统故障诊断方法[J].计算机科学,2020,47(s2):67-73.
- [9] 黄杏.危重患者转运急救箱的改良及应用经验分享[J].饮食保健,2019,6(41):81.
- [10] 陈成. B型超声诊断仪的结构,原理和故障维修[J].养生保健指南,2019(49):235.
- [11] 何谦,刘洋,戴超,等. S频段统一测控雷达健康故障诊断系统的设计[J].计算机测量与控制,2019,27(4):66-69.
- [12] 杨奇,李传柱. CINRAD/SA-SB雷达高频放大链前级组件故障诊断系统设计与实施[J].气象科技,2020,48(6):32-39.
- [13] 宋丹,梁睿君,李伟,等.数控机床远程智能故障诊断系统设计[J].数据采集与处理,2020,35(1):177-184.
- [14] 许扬,雷震,高洁.基于大数据的电网调度故障自动诊断系统设计[J].自动化与仪器仪表,2020,243(1):210-213.
- [15] 吴国秋.基于自适应LS-SVM的雷达T/R组件热管冷却故障诊断系统设计[J].计算机测量与控制,2019,27(7):102-105,111.
- [16] 孙百红,田川.基于特征频段RMS值的发动机故障实时监测方法[J].火箭推进,2019,45(4):77-81.
- [17] 吕宏政,陈仁文,张祥,等.基于VMD交叉样本熵的旋翼桨叶故障诊断方法[J].电子测量技术,2019(9):107-111.
- [18] 于一三,袁文海,张永熙,等.智能变电站变压器内部故障诊断系统设计与实现[J].电气自动化,2020,42(6):84-87.

- [28] SKARPHOL J. Leveraging CRIIS for LVC testing in O/DT&E: The future of range instrumentation... today [C] // 21th Test Instrumentation Workshop, May 2017.
- [29] HINTON D. Laying the foundations for true cross-domain commonality: why is the common range integrated instrumentation system (CRIIS) not the answer for test and training time-space-position information? [J]. ITEA Journal, 2009, 30: 65-71.
- [30] SAUNDERS C. New era for multi-domain test force [EB/OL]. (2021-07-12) [2021-09-07]. <https://www.af.mil/News/Article-Display/Article/2691408/new-era-for-multi-domain-test-force>.
- [31] ALBON C. AFTC's Multidomain test force aiming for FOC in June [EB/OL]. (2021-02-04) [2021-06-11]. <https://insidedefense.com/daily-news/aftcs-multidomain-test-force-aiming-for-june>.
- [32] SAUNDERS C. Air force test center stands up multi-domain test force [EB/OL]. (2020-10-01) [2021-06-11]. <https://www.edwards.af.mil/News/Article/2369119/air-force-test-center-stands-up-multi-domain-test-force/>.