

基于健康管理技术的机载计算机智能故障诊断方法

马小博¹, 王芳², 陈益¹, 李亚锋¹

(1. 西安航空计算技术研究所, 西安 710068;

2. 空装驻西安地区军事代表局第六代表室, 西安 710068)

摘要: 为了满足飞机机载电子设备以状态监控为基础的视情维修保障策略, 提升设备可维护性, 提出了一种基于在线检测、故障预测、辅助决策的健康监控管理故障诊断方法, 支持对机载电子设备的健康状态进行预测和评估; 通过划分机载电子设备功能的敏感威胁区域, 对这些区域设计专门的威胁预警监控电路, 进行功能危害监控, 建立推理监控模型对监控电路故障进行预警监控, 结合辅助决策的方式对预警到的故障进行定位, 实现对电子设备的智能故障诊断; 通过 FMEA 的分析与故障注入测试验证, 该预警电路、推理模型和辅助决策能有效的预测故障及定位, 具有较高的故障预测覆盖率, 可提高机载计算机的维修性、降低维修时间, 在电子设备视情维修策略上具备工程应用价值。

关键词: 机载计算机, 健康管理, 故障预测, 视情维修

An Intelligent Fault Diagnosis Method for Airborne Computer Based on Health Management Technology

Ma Xiaobo¹, Wang Fang², Chen Yi¹, Li Yafeng¹

(1. Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, AVIC, Xi'an 710068, China;

2. Air Force Equipment Department Sixth Military Delegate Room at Xi'an 710068, China)

Abstract: In order to satisfy the condition-based maintenance support strategy of airborne electronic equipment based on condition monitoring and improve the maintainability of equipment, a fault diagnosis method of health monitoring management based on on-line detection, fault prediction and assistant decision-making is proposed to support the prediction and evaluation of the health status of airborne electronic equipment. By dividing sensitive threat areas of electronic functions of airborne electronic equipment, designing special threat early warning and monitoring circuits for these areas, monitoring functional hazards, establishing reasoning monitoring model for early warning and monitoring of monitoring circuit faults, locating the early warning faults combined with assistant decision-making, and realizing electronic equipment early warning and monitoring. Intelligent fault diagnosis. Through FMEA analysis and fault injection test, the early warning circuit, reasoning model and assistant decision-making can effectively predict and locate faults, have higher fault prediction coverage, improve the maintainability of airborne computers, reduce maintenance time, and have engineering application value in electronic equipment maintenance strategy.

Keywords: airborne computer; health management; condition maintenance

0 引言

随着信息技术的不断发展, 飞机机载设备的复杂度、综合化、智能化程度急剧增加, 虽然综合化带来设备的数量在减少, 但是单个设备的成本确处于上升趋势, 传统的设备维修性、保障性等逐渐难以适应复杂的设备维修需要, 故障定位慢、维修时间长、备件成本高等问题会带来生命周期成本的提高。为了满足信息化条件下作战飞机效能, 针对复杂电子设备的故障诊断技术的研究也在不断的深入开展, 希望能够找到一种快速定位故障, 快速维修的方法, 降低复杂电子设备带来的维修与保障成本。20 世纪 90 年代国外提出了一种 PHM (Prognostics and Health Management) 技术, 也就是预测与健康管理工作, 并得到了各军

事强国的高度重视, PHM 已被认为是提高系统“五性”和降低全寿命周期费用的关键技术。对于飞机用户方, 不断降低航空飞行器生命周期费用的需求非常强烈, 需要不断缩短设备的维修时间。通常提高机载电子设备的维护性需要增加平均无故障时间或减少平均修复时间。增加平均无故障时间要求增加系统的可靠性, 提高和优化设备的使用环境, 通常会带来机载设备成本的大幅度提升, 另外一种方式是在尽量不增加成本费用的情况下, 需要通过提前预警的方式, 降低平均修复时间, 也可以达到提升设备维护性的目的。目前传统的方法是采用修复性维修和定期维修, 这种维修可能导致系统失效后维修时间长或者过修。很难对维修时间有较高的提升。在降低平均修复时间因此需要采取新的方法提前诊断和预测故障, 通过提前介入维修降低维修时间, 提高飞行器任务执行的及时率。

本文通过设计新的电子设备故障监视预警电路、建立一套故障预测推理模型提前预警即将发生的故障, 可实现

收稿日期: 2019-08-26; 修回日期: 2019-10-09。

作者简介: 马小博(1979-), 男, 陕西渭南人, 高级工程师, 主要从事容错计算机方向的研究。

提前故障预警,使得维护人员可提前介入维修和提供备件,缩短准备时间,通过建立故障预警后的故障定位辅助决策算法,实现对系统工作过程中故障的监测、定位,也能够有效的缩短设备故障后的维修时间,有效提高了系统的可维护性,降低了系统平均修复时间。

1 机载计算机健康管理

随着机载计算机复杂度的不断提升,目前的事后维修和定期维修对于飞机的实时完好性有一定的影响,其故障维修时间在不断的延长,“视情维修”变得更为迫切,视情维修的重点是对机载计算机系统故障机理和故障模式要有充分的认识和研究,有较为大量的故障数据分析结果,对计算机的运行情况、软硬件状态能够实时的进行“体检”,区别于传统的机内自测试 BIT (Build-in Test),是一种涵盖了状态故障预测与机内 BIT 的复杂健康管理技术的应用体现。

目前飞行器的故障预测与健康管理的 PHM 的相关技术研究与应用研究发展迅速,先进飞机系统已经建立了专门的综合飞行器健康管理 (IVHM) 系统,负责整个飞机的健康监控与故障预测。IVHM 将机载健康管理划分为飞机级故障预测与健康管理的 APHM、子系统级故障预测与健康管理的 SPHM、以及模块(设备)级故障预测与健康管理的 MPH,MPHM 是飞机 IVHM 的基础,比如计算机设备需要提供诸多设备信息的健康状态、故障信息、周边环境信息。由于计算机的复杂性和专用性,这方面的研究相对较少,工程应用也处于数据的积累阶段。机载计算机通常由大规模集成电路器件、分立器件、定制功能组件、专用软件组成,健康监控的重点是对这些组件及元器件的运行状态及周边环境的监控测量,实时的发现异常情况。

综上所述机载计算机的健康管理是在飞机健康管理体系下的基础级健康管理,对飞机级的故障预测与健康管理的提供有效的状态监控信息,为整个飞机的维护性和安全性提供支持。而机载计算机自身的故障诊断,也可以基于新的健康管理技术,结合已有的 BIT 技术,设计针对性的故障预测预警功能,提供设备级的维护与保障支持。从机载计算机的特征切入,开展故障敏感数据信息采集,挖掘信息进行预警预测,建立预测模型推断可能的故障,并根据预测信息进行辅助决策故障定位。

2 故障预测

机载计算机等电子产品主要由大规模集成电路和分立器件组成,其功能失效主要是由于器件经过长时间的外部应力作用出现器件老化或性能退化引起,有分析和实验结果表明外部应力的恶劣会缩短电子器件的寿命。针对这种潜在的缓慢变化引起的器件失效,分析器件的故障模式,对器件相关功能区域威胁较大的应力进行监控和监测,选取典型的失效模式监控方法,如时序监控、功耗测量、温度应力测量、振动应力测量等,捕获典型引起故障的应力

数据。为此也需要在功能电路内部嵌入传感器或增加测量电路,建立专门的预测预警功能电路。预测预警电路能够准确的反应计算机的环境应力情形,计算机各功能的运行状态,提供实时的变化趋势信息等。

2.1 基于功能区域的威胁分析

机载计算机故障预测技术采用基于功能区域的威胁分析。首先对实现系统功能的组件块进行威胁分析,提取不同应力环境对组件块的影响,对不同的组件块设置不同的监视传感器和预警电路,研究典型性能下降的特征参数、提取故障特征,评估故障状态,监视系统运行环境,预测系统健康状况。机载计算机故障预测技术的基本原理如图 1 所示。机载计算机相关功能区域威胁主要包括:热威胁功能区域;振动威胁功能区域;电应力威胁功能区域;时序偏移威胁功能区域。机载计算机相关故障征兆分析主要包括:输出电压低漂移;时序漂移或工作不稳定;数据不稳定;过热或工作不稳定;时序抖动;接口时断时续,接口数据抖动。机载计算机相关监测参数选择主要包括:输出工作电压;时序抖动检测;工作温度;振动环境;内部回绕状态。

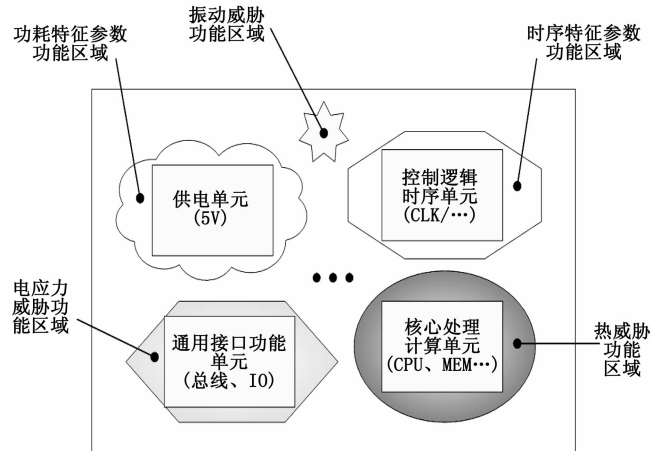


图 1 机载计算机故障预测技术

2.2 热威胁区域故障预测

热威胁区域敏感区主要集中在机载计算机散热量较大的集成电路区域,包括像中央处理器 CPU 芯片,大容量 FPGA 芯片,高速存储芯片、网络、显示等芯片组成的功能区间内,通过对该区域进行热威胁相关状态监控,监测机载计算机热功能威胁区域的热应力变化趋势,对异常热应力进行提前预判。故障预测预警电路在热威胁区域设计专门的温度传感器,并且该温度传感器满足机载热应力的温度范围,电路如图 2,该温度传感器每增加 1°C ,其电流增加 $1\mu\text{A}$,在 0°C 时,电流值为 $273.15\mu\text{A}$,故此可计算得知在机载环境温度 $-55\sim+125^{\circ}\text{C}$,电流值为 $218.15\sim398.15\mu\text{A}$,其串接电阻 1K ,则 A/D 可采集的电压范围为 $G_x(218.15\sim398.15\text{mV})$,即 $4.123\sim7.525\text{V}$ 。机载计算机预测预警软件结合热应力预警电路可实时监控热威胁区域的温度变化情况,并能够对异常发出告警信息。

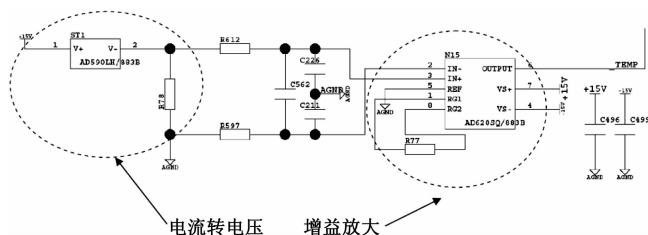


图 2 热应力预警电路

2.3 振动威胁区域故障预测

振动威胁区域敏感区主要集中在体积重量较大的器件, 比如较大的储能电容、较大的定制组件、安装结构件加固的重要部位等功能区间内, 通过检测机载计算机振动功能威胁区域的振动量级, 对出现异常振动两级进行故障预判, 振动传感器处理电路如图 3, 振动传感器输出为线性电压, 其敏感度为 50 mV/g, 在 0 g 时输出电压为 2.5 V, 为了更直观显示其加速度与电压之间的关系, 在后级和差电路中减去 2.5 V 的 0 g 电压, X 轴与 Y 轴设计一致, 后级比例因子可由下式给出。

$$G = R115 / R545 = 196K / 51K = 3.84$$

则 A/D 采集的电压与加速度通过下式给出。例: 若振动量级为 10 g, 则转换后电压值。

$$V = 0.05 \times 3.84 \times g$$

$$V = 0.05 \times 3.84 \times 10 = 1.92 \text{ V}$$

机载计算机预测预警软件结合振动应力预警电路可实时监控振动威胁区域的振动量级变化情况, 并能够对异常发出告警信息。

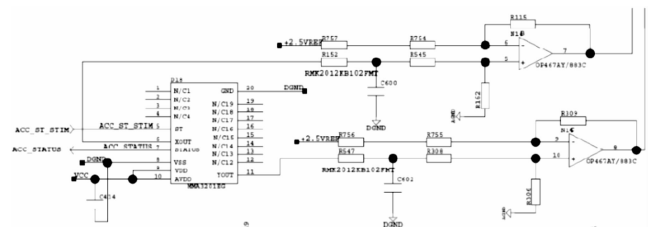


图 3 振动传感器处理电路

2.4 电应力威胁区域故障预测

由于复杂的机载计算机联结众多的外部设备, 每一种外部设备的对外接口形式多样, 也有许多非智能设备与计算机交联, 因此电应力威胁区域主要在机载计算机接口部分, 采用在线监控的方式对接口电路进行故障预测与诊断, 对输入信号采用比较监控的方式进行诊断, 对输出信号采用回绕监控的方式进行诊断。离散量输出电路原理如图 4 所示, 图中控制电路的作用是输出锁存信号, 最后经达林顿管改变电平并增加输出驱动能力, 输出给外部设备或系统。另外根据故障诊断的要求, 输出信号设计两级级回绕测试电路。机载计算机预测预警软件结合电应力的预警电路可实时监控电应力威胁区域的各类型测试结果, 并能够对异常发出告警信息。



图 4 输入信号监控示意

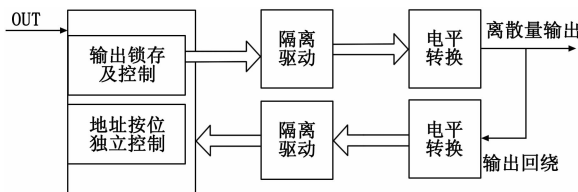


图 5 输出信号监控示意

2.5 时序特征区域故障监控

时序对于数字计算机的准确运行非常重要, 但计算机的时序通常是一个容易被忽略的特征区, 是因为对于时序监控通常难度较大, 因此需要设计专门定制的时序特征故障监控电路监控时序的故障, 为了检测典型时序信号的漂移, 设计时钟互比监控传感器设计如图 6 所示。其中 33 M 时钟用于计算机自己的调试, 66 M 时钟用于多个处理器之间的访问, 100 M 时钟用于 CPU 访问存储等资源。以两个 CPU (CPUA, CPUB) 访问为例, 根据不同时钟的影响范围, 时钟检测传感器判断结果处理见表 1。机载计算机预测预警软件结合时序监控预警电路可实时监控时序特征区域的测试结果, 并能够对异常发出告警信息, 并按照已拟定的结果进行相关处理。

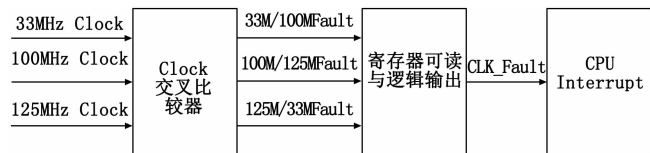


图 6 时序时钟互比监控示意

2.6 功耗特征区域监控

功耗特征区域主要集中在为机载计算机产生二次供电的区域, 通常机载计算机都会有专门的供电转换模块, 为计算机的处理器、存储、接口、网络等所有器件提供所需的供电, 因此各供电的功耗变化会引起供电电压的抖动, 这是重要的故障关注点, 针对功耗特征功能区域对健康的影响, 设置二次电源监控器, 通常包括 5 V、+15 V、-15 V 等多种电源监控处理电路, 分别产生电源有效信号作为电源故障指示源之一, 最后通过或门电路进行综合输出总的二次电源指示电源的正常与否。电源监控主要工作原理包括:

当某一电源低于预警值时, 比较器发生状态反转, 输出为“低”; 并通过与门电路综合出总的电源指示信号为“低”, 表征某一电源从有效变为故障;

当电源高于预警值, 比较器发生状态, 输出为“高”, 并通过与门电路综合出总的电源指示信号为“高”, 表征某一电源从故障变为有效。

表 1 时钟检测传感器判断结果处理

序号	33M/ 66M	66M/ 100M	100M/ 33M	故障处理建议
1	有效	有效	有效	无故障,不需要处理。
2	有效	有效	故障	对于 CPUA:66M 有效,33M 和 100M 超差,可正常工作,故障登记,择机维护。 对于 CPUB:故障登记,择机维护。
3	有效	故障	有效	对于 CPUA:33M 有效,66M 和 100M 超差,可正常工作,故障登记,择机维护。 对于 CPUB:故障登记,择机维护。
4	有效	故障	故障	对于 CPUA:33M 和 66M 有效,100M 故障,不可正常工作,故障登记,立即维护。 对于 CPUB:不可正常工作,故障登记,立即维护。
5	故障	有效	有效	对于 CPUA:100M 有效,33M 和 66M 超差,可正常工作,故障登记,择机维护。 对于 CPUB:故障登记,择机维护。
6	故障	有效	故障	对于 CPUA:66M 和 100M 有效,33M 故障,不可正常工作,故障登记,立即维护。 对于 CPUB:不可正常工作,故障登记,立即维护。
7	故障	故障	有效	对于 CPUA:33M 和 100M 有效,66M 故障,不可正常工作,故障登记,立即维护。 对于 CPUB:故障登记,立即维护。
8	故障	故障	故障	对于 CPUA:相互之间均超差,不可正常工作,故障登记,立即维护。 对于 CPUB:不可正常工作,故障登记,立即维护。

3 推理模型设计

根据机载计算机的工作条件,电应力特征区预警、时序特征区预警,有相应的真实监控电路,准确率高,可直接进行故障处置。但对于环境应力如振动、热的监控有异常不足以说明计算机故障情况,需要在已有数据信息的基础上建立环境应力和功耗特征区故障推理模型。健康预测选取的特征包括 3 种,分别是:

- 1) 热威胁对健康的影响,设置 2 级监视门限,分别是:
大于 80℃ 小于 100℃: 恶劣环境威胁;
大于 100℃: 强恶劣环境威胁。
- 2) 振动威胁对健康的影响,设置 1 级监视门限: 大于 26 g 为一般恶劣环境威胁;
- 3) 功耗特征功能区域对健康的影响,设置二次电源采

集,跟踪信号特征的长期变化,设置监视门限包括:

- 5 V 电源低于 4.5 V 持续时间大于 10 ms: 一般寿命威胁;
- +15 V 电源低于+13 V 持续时间大于 10 ms: 一般寿命威胁;
- 15 V 电源高于-13 V 持续时间大于 10 ms: 一般寿命威胁。

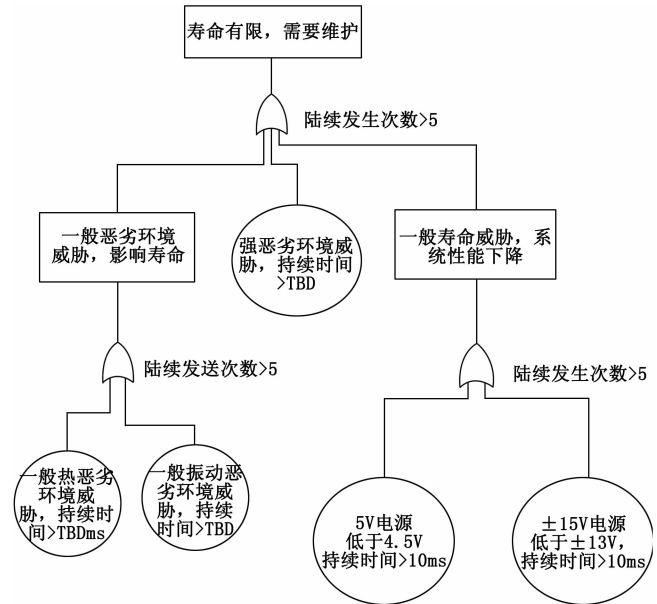


图 7 初步预测推理模型

4 辅助决策

根据区域威胁分析,处理器单元、存储单元、接口控制单元、电源转换单元易受热威胁区域,通过温度监控可提取各功能区域的温度,通过预测模型可提前进行热威胁告警,但对于故障的监控定位,故障预测并不能像时序、回绕监控进行精确定位,因此需要建立辅助决策系统进行热威胁区域的定位。同样功耗威胁也需要辅助决策系统对功耗区域进行故障定位,故障定位辅助决策通常针对单事件故障定位和关联事件故障定位,通过对故障征兆数据采集,故障模拟数据采集,因果关系推理,建立故障辅助决策系统,辅助决策系统建立流程见图 14。

5 实验结果分析

基于健康管理的智能故障诊断方法在某预先研究课题中已完成了相关技术攻关,并原理样机中进行了包括热、功耗、电、振动、时序的故障注入验证,能够有效的对环境应力变化发出预警和定位。在某型机载计算机的研制过程中,也已采用该方法并通过扩展 FMEA 开展分析计算,该方法对有源器件故障预测覆盖率 69.2%,有源器件失效率故障预测覆盖率 78.9%,其预测推理模型的有效性和准确性在后续试验及使用中将进一步跟踪验证。

6 小结

本文通过分析机载计算机环境应力及内部功能面临的

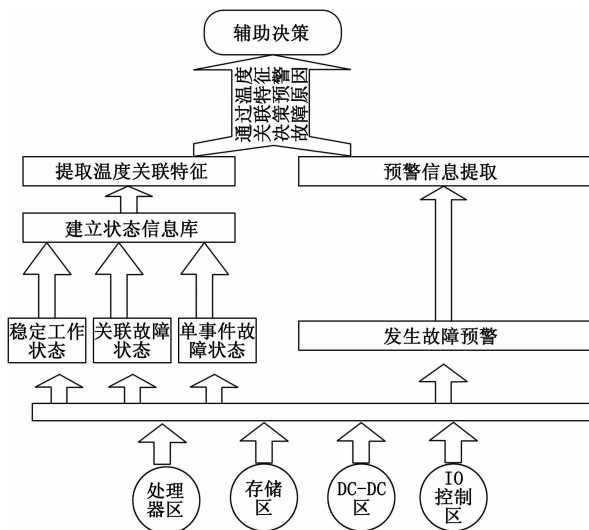


图 8 辅助决策建立流程

不同威胁,建立了有针对性的功能区域的威胁故障预测与监控电路,对计算机进行实时健康状态监控,设计了故障推理模型,可智能的对计算机故障进行诊断和预测,已将故障预测技术应用于机载计算机健康管理设计中,随着该方法的不断完善和成熟可以为机载计算机健康管理提供预警电路和预测模型,为飞机装备的维护性安全性提供更完美的解决方案。

(上接第 42 页)

表 5 数据分析结果表

测试项目	标气浓度/ppm	1# 误差/%	2# 误差/%	3# 误差/%
示值误差	8.02	1.15	0.2	0.52
示值误差	8.02	-0.68	0.05	1.23
示值误差	8.02	-2.21	-0.14	-1.6
重复性	8.02	2.29	1.29	1.16
检测线	14.0	0.8	-----	-----
检测线	20.0	0.8	-----	-----
检测线	14.0	0.9	-----	-----

根据表 5 的分析结果可知,示值误差小于正负 5%,重复性小于正负 3%,最低检测线为 1 ppb,系统稳定性良好。

5 结束语

本文设计了环境空气 TVOC 在线监测系统,该系统利用热解吸和 PID 传感器相结合的技术实现了对环境空气 TVOC 含量的痕量检测,利用 STM32F407 处理器实现气路的控制、信号处理和温度控制,其计算结果通过 GPRS 无线传输到预警及监测服务器上。实际测量结果表明,该系统具有稳定性高、检测线低、灵敏度高,无需人员在环境现场即可实现对某一地区环境空气 TVOC 含量的快速分析和检测等优点。另外该系统也具有很大的实际推广价值。

参考文献:

- [1] 曾声奎. 故障预测与健康管理的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005, 26 (5): 627-632.
- [2] 赵宁社, 翟正军, 王国庆. 新一代航空电子综合化及预测与健康管理的现状 [J], 测控技术, 2011, (1) 23: 88-102.
- [3] Dr. Celeste M. Belcastro, Aviation Safety Program Integrated Vehicle Health Management Technical Plan Summary [Z], NASA, 2008.
- [4] Ashok N. Srivastava, Robert W. mah. Interated Vehicle Health Management Technical Plan, Version 2.03[M]. 2009
- [5] 张亮, 张风敏, 李俊涛, 等. 机载预测与健康管理的 PHM 系统的体系结构 [J]. 空军工程大学学报 (自然科学版), 2008, 9 (2): 6-9.
- [6] 景博, 黄以峰, 张建业, 航空电子系统故障预测与健康管理的现状 [J], 空军工程大学学报, 2010, 5 (06): 218-245.
- [7] 许丽佳. 电子系统的故障预测与健康管理的现状研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.
- [8] 李旻. 复杂电子系统数据综合诊断与故障预测关键技术研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [9] 冯玉光, 徐望, 顾钧元, 等. 导弹装备健康管理及管件技术研究 [J]. 兵器装备工程学报, 2017 (1): 7-11.
- [10] 陈圣斌, 曾曼成, 郝宗敏. 以可靠性为中心的基于状态维修的分析及应用研究 [J]. 直升机技术, 2012 (3): 39-41.

参考文献:

- [1] 马磊. 石家庄市环境空气中挥发性有机物 (VOCs) 的特征研究 [D]. 石家庄: 河北科技大学, 2017.
- [2] 谭菊. 长沙市大气环境中 TVOC 的污染状况调查、评价及控制措施研究 [D]. 湘潭: 湘潭大学, 2013.
- [3] 魏荣霞. TD-GC-MS 法分析环境空气中挥发性有机物的研究 [D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.
- [4] 董鸣. AD7793 在高精度温控设备中的应用 [J]. 电子技术, 2012, 08.
- [5] 宋华鲁. 基于 STM32 和 FreeRTOS 的嵌入式太阳能干燥实时监测和控制系统设计 [J]. 现代电子技术, 2013, 36 (23): 102-103.
- [6] 全国环境化学计量技术委员会. 挥发性有机化合物光离子化检测仪器校准规范: JJF 1172-2007 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [7] 鲍春. 便携式环境空气 VOCs 现场快速分析仪的研制与应用 [J]. 分析仪器, 2017 (3): 1-8.
- [8] 陈燕赞. 光离子化检测器及其在环境监测中的应用 [J]. 分析仪器, 1993 (3).
- [9] 李国刚. 真空紫外光离子化检测器及其在环境监测中的应用 [J]. Modern Scientific Instruments, 2004, 01.
- [10] 姚静. 室内空气污染检测方法之探究 [J]. 工程质量, 2014 (1): 44-47.
- [11] 王海龙. 新型光离子化检测器的设计与应用 [J]. 分析化学, 2011 (4): 1513-1516.
- [12] 王昆. 可控硅性能检测可行性方案分析 [J]. 中州煤炭, 2013 (7): 31-32.