

文章编号: 1672-8785(2019)06-0013-05

机载红外探测器的健康管理 及其关键技术研究

陈晓露 曲云昊

(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 为了加快我国核心电子器件的国产化进程, 需要对国产核心电子器件的先进性和可靠性进行验证和评估, 以推动国产核心电子器件在电子信息装备中的工程应用。首先分析了开展机载红外探测器在线监测和健康管理所需要的关键技术需求, 梳理了国产红外探测器的敏感参数和故障模式, 最终确定了机载红外探测器进行在线监测和健康管理的关键技术, 并且对机载装备在线监测和健康管理系统未来的发展趋势进行了展望。通过对目前机载红外探测器在线监测和健康管理的梳理, 为后续机载红外探测器在线监测和健康管理系统的设计、开发与研制做好铺垫。

关键词: 健康管理; 红外探测器; 机载

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2019.06.003

Research on Health Management and Key Technologies of Airborne Infrared Detector

CHEN Xiao-lu, QU Yun-hao

(North China Research Institute of Electro-optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In order to speed up the localization process of China's core electronic devices, it is necessary to verify and evaluate the advancement and reliability of domestic core electronic devices to promote the engineering application of domestic core electronic devices in electronic information equipments. Firstly, the key technical requirements for on-line monitoring and health management of airborne infrared detectors are analyzed, and the sensitive parameters and failure modes of domestic infrared detectors are sorted out. Finally, the on-line monitoring and health management of airborne infrared detectors is determined. The future development trend of on-board monitoring and health management system for airborne equipment is prospected. Through the combing of the key technologies for current on-line monitoring and health management of airborne infrared detectors, it paves the way for the design and development of on-line monitoring and health management systems for airborne infrared detectors.

Key words: health management; infrared detector; airborne

收稿日期: 2019-06-11

作者简介: 陈晓露(1986-), 女, 湖北潜江人, 博士研究生, 主要从事机载光电系统总体技术研究。

E-mail: cxl5306548@126.com

0 引言

随着核心电子器件自主可控要求的日益推进,国产红外探测器在机载光电系统中应用的性能状况、健康状况是保证机载光电系统可靠性的关键。其所建立的国产红外探测器故障预测和健康数据库是机载光电系统实现精确目标搜索和稳定跟踪的基础。因此,国产红外探测器的发展是影响机载光电系统未来发展的关键之一。

针对国产红外探测器研制过程中在线监测与健康管理面临的核心器件敏感参数不明确、故障预测与健康管理关键技术缺乏、系统实施困难等问题,需要以国产红外探测器中应用的核心器件为研究对象,开展核心器件失效模式分析与敏感参数选取、在线监测与健康管理关键技术等研究,形成红外探测器核心器件的在线监测与健康管理方法,实现故障预测与健康管理技术在国产红外探测器核心器件上的应用。

1 健康管理的必要性

传统的售后维护和定期维护已无法满足当前机载设备的需求,故障预测与健康管理应运而生。该维护方法是基于对机载设备故障机制的综合研究,通过实时或离线健康监测,预先分析和判断故障位置和故障时间,从而消除故障。健康管理领域的故障预测可以实现复杂系统在线测试和健康监测功能的进一步扩展。因此,机载红外探测器运用健康管理,以确保其可靠性、安全性和任务成功。在此基础上,它最大限度地减少了维护资源和成本投入,实现了状态的维护和自主保护。同时,基于故障预测与健康管理方法的成功应用对于减少甚至消除重大设备事故的发生具有重要意义,它也是对现有装备保障系统体制改革的激励和推动。

将健康管理技术应用于国产机载红外探测器中,可以大幅度提升国产红外探测器维修的及时性和准确性,避免了故障程度加大导致的停机维修风险,可在故障发生初期及时进行故障定位,并进行维修处理。

2 故障模式和机理分析

国产红外探测器包括焦平面阵列、读出电路、微型杜瓦和制冷机几个部件。一般情况下,在焦平面组件任务应用中,导致组件失效的关键因素及原因如下:一是制冷机的磨损或污染失效,导致的应力为长期工作磨损及环境温度;二是混成芯片钢柱互连疲劳、冷头粘接疲劳,导致的应力为组件开关时的温度冲击;三是对于不带拔塞的杜瓦,缓慢放气是导致真空度下降的主要原因。表 1 列出了红外焦平面的失效模式及机理信息。

针对以上故障体现到实际应用中的现象,因此,国产红外探测器的故障预测指标包括噪声等效温差、信噪比、盲元率、非均匀性、响应率、探测率、焦面温度、芯片温度和底板温度等。

3 健康管理的关键技术

3.1 信号分析与特征提取技术

信号分析与特征提取主要将所采集的各参数分为两组,除工作时间参数,其他信息首先需要进行数据预处理,包括时间历程数据采集过程中由于软硬件、传感器异常所造成的数据野值、数据包丢失等问题,进行相应的野值剔除、数据平滑和插值拟合,便于后续的特征提取和数据转换,从而综合工作时间参数信息和提取预处理后数据的特征信息,通过不同的方法提取特征。完成上述操作后,对所有信息进行变换和转换,获得标准时域、频域和时频域数据,传送至数据仓库(见图 1)。

信号分析将数据采集活动获取的关键参数信息、环境参数信息、资源状态信息、工作时间信息和工作负载信息分为两组,关键参数信息、环境参数信息和资源状态信息和工作负载信息为一组,以进行数据预处理,主要进行剔除异常数据点、填补缺失数据、数据平滑处理等操作,便于后续的特征提取和数据转换及标准化。然后,综合工作时间信息,进行时频域信息的提取。最后,对完成预处理和特征提取的信息进行格式转换,获得标准格式的输出数据,传送至数据仓库。

表 1 红外焦平面的失效模式及机理信息表

部件名称	寿命阶段	失效模式	失效机理	对应的试验应力
真空杜瓦	贮存	泄漏	密封不良、裂缝	温度循环
		材料放气	放气导致真空下降	高温
	运输	机械磨损(泄漏)	密封不良、裂缝	振动和冲击的强度、持续时间
		机械毁坏	裂缝	振动和冲击的强度、持续时间
	工作	泄漏	密封不良、裂缝	温度循环
		——	——	振动和冲击的强度
混成芯片	贮存	像元退化	MCT 材料退化	高温
	运输	无	无	无
	工作	互连失效	钢柱互连疲劳	工作温度循环次数
冷头粘接	贮存	粘接老化	粘接胶老化	高温
	运输	粘接断裂	粘接胶强度弱	振动和冲击的强度、持续时间
	工作	粘接断裂	粘接胶强度弱	振动和冲击的强度、持续时间
		粘接疲劳	粘接胶疲劳	工作温度循环次数

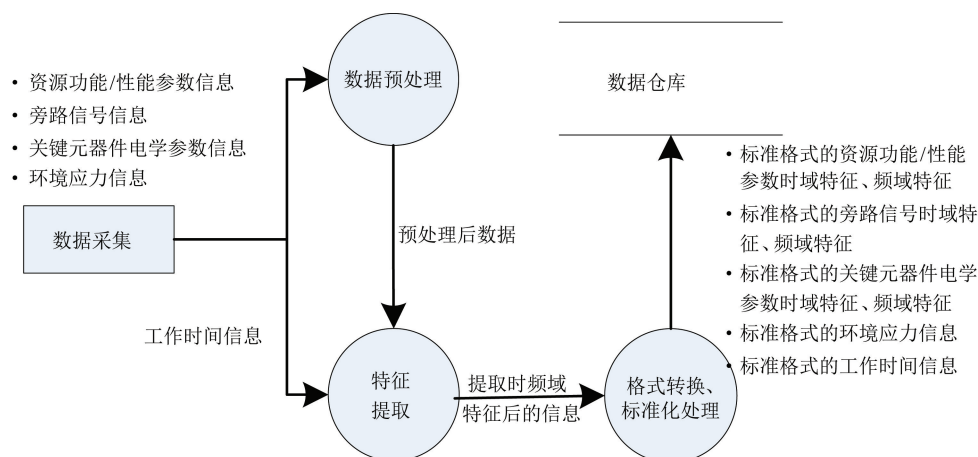


图 1 信号分析与特征提取流程图

3.2 状态评估技术

状态评估是体现红外焦平面探测器健康状态的参数,或直接从性能变量中选择表征红外探测器健康状况的参数,并确定相应的故障阈值或退化模式的判断条件,从而实现红外探测器的健康评估。目前的状态评估方法一般可分为以下两类:

(1)基于层次分析法的红外探测器组件健康评估,即根据相邻层级之间的组成关系,可研究通过层次分析法进行健康评估,即利用下一级(如模块级)的健康评估结果对上一级(如

分系统级)的健康状态进行评估。

红外探测器由多个模块组成,自然形成了一种组件/模块二级结构。层次分析过程是根据整体目标的子客观评价标准和具体的备选方案,将决策问题分解为不同的层次结构。然后,使用求解判断矩阵的特征向量方法获得每个级别的元素,某个元素的优先级是最后加权和方法的权重。总目标的最终权重是最终目标的最终权重^[1]。

(2)基于马氏距离法的红外焦平面/制冷机模块健康评估,即当给定模块的一组基准健康

数据和一组新测试数据后,通过新的测试评估数据与基准健康数据比较,采用马氏距离算法判定红外焦平面/制冷机模块的健康状态是否发生变化。该算法适用于具有多维数据的红外探测器健康评估。

3.3 故障诊断技术

故障诊断是根据故障现象开展故障的监测和隔离,主要运用专家知识对监测到的异常进行推理分析,从而得出故障定位结论。目前,采用的故障诊断方法一般可以分为以下两类:

(1)基于支持向量机的故障诊断技术和基于规则的故障诊断,即根据多组基准故障数据和一组测试的故障数据,通过测试的故障数据与基准故障数据比较,判定该测试的故障数据属于哪一类故障数据。

(2)基于规则的故障诊断,即采用产生式对知识进行表达,并在此基础上构建基于规则的知识库,包括宽度优先搜索方法、深度优先搜索方法和启发式搜索方法。

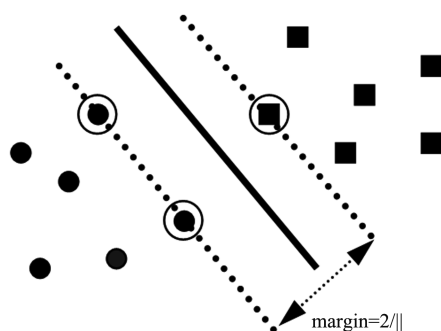


图 2 支持向量机算法思想

图 2 中,圆点和方形点表示两种类型的样本,实线是分类线,两条虚线是最接近分类线并与分类线平行的线。它们之间的距离称为分类间隔。所谓的最优分类线是要求分类线不仅要正确地分离两个类别(训练错误率为 0),而且要使分类间隔最大化^[2]。

给定红外探测器的两组基准故障数据和一组测试的故障数据,通过比较测试的故障数据与基准故障数据,判定该测试的故障数据属于哪一类故障数据。具体而言,根据给定的训练故障数据样本集合 $\{(x_1, y_1), \dots, (x_l, y_l)\}$, $x_i \in$

R^n 是输入向量, $y_i \in \{1, -1\}$ 是输出, $y_i = 1$ 表示第一类故障, $y_i = -1$ 表示第二类故障, $i = 1, 2, 3, \dots, L, l$ 。寻找 R^n 上的一个函数 $g(x)$, 根据判别函数 $f(x) = \text{sgn}\{g(x)\}$ 推断任一输入 x 相对应的 y 值。数据特点是, $x_i \in R^n$, y 的取值范围为两个: 1 和 -1。将 l 个数据样本组成的训练样本集合分成两类故障数据,同时判定测试的故障数据属于哪一类故障。

3.4 故障预测技术

监测和提取红外探测器测试、试验过程中的监测参数退化数据,结合实际工程应用中的可靠性数据,采用适当的数据特征挖掘技术方法,建立监测参数退化与红外探测器故障间的关系,构建红外探测器核心器件的故障预测模型。机载红外探测器健康管理系统中采用时间序列求和自回归滑动平均模型(Autoregressive Integrated Moving Average Model, ARIMA)模型和灰色模型两种算法开展故障预测建模研究。

3.4.1 基于时间序列 ARIMA 模型的故障预测技术

根据红外探测器的性能退化数据 $x_1, x_2, \dots, x_n$, 采用 ARIMA 模型对红外探测器参数的变化趋势进行建模(见图 3),并根据失效阈值进行预测。

3.4.2 基于灰色模型的故障预测技术

灰色模型主要用于预测模型的性能参数,灰色模型理论在电子系统健康预测中具有广泛的应用。该理论有两个关键点:第一,电子系统健康状态可以用一个常微分方程进行描述;第二,该模型的参数未知,需要估计,故称为灰色模型。因此,先利用系统量测数据对未知参数进行估计,再根据估计的结果对系统状态进行预测。

具体而言,根据系统量测数据 $\{x^{(0)}(i), i = 1, 2, \dots, n\}$ 然后通过累加变换得到数据 $\{x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k \{x^{(0)}(i), k = 1, 2, \dots, n\}$ 并假定这些数据 $\{x^{(1)}(k), k = 1, 2, \dots, n\}$ 是从以下模型采集得到:

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (1)$$

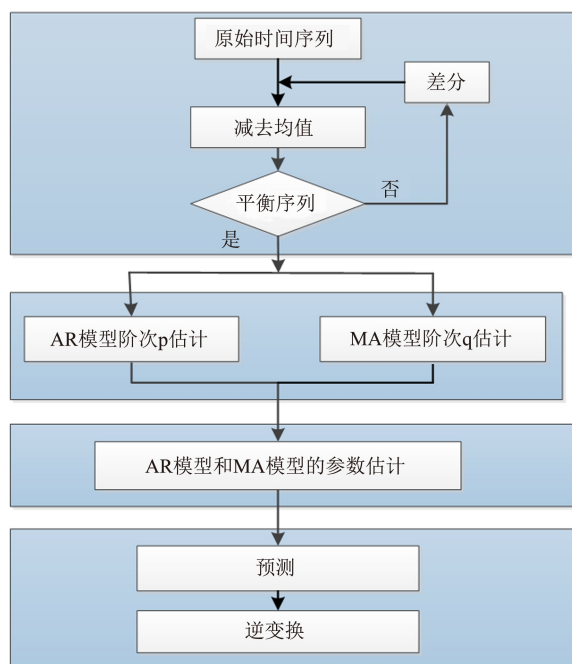


图 3 ARIMA 模型建模框图

式中, 模型参数 a, b 未知。需要考虑的是预测系统状态 $\{\hat{x}^{(0)}(n+k), k=1, 2, \dots, p\}$ 。

一阶的、单变量的灰色模型(简记为 GM(1,1))灰色建模的主要步骤如下:

(1)对原始数据进行累加变换, 降低随机噪声的影响。

(2)估计未知参数, 建立灰色模型。

(3)求解常微分方程 $\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b$ 。

(4)利用灰色模型, 对健康状态进行预测。

(5)误差精度分析。

4 展望

在线监测和健康管理技术是确保国产红外探测器在机载环境下正常工作的前提。国产红

外探测器在进行健康管理后, 能够大大减少红外探测器整个寿命周期的运行成本, 降低工作时发生故障所带来的风险, 从而有效提高机载装备的作战性能以及任务成功率。虽然当前国产红外探测器的在线监测和健康管理技术仍处于理论研究阶段, 但机载环境下在线监测和健康管理技术已成为我国未来机载装备发展的必然趋势, 原因如下: (1)对于机载应用, 振动、冲击、温度、湿度、电磁等环境参数对国产红外探测器健康工作的影响较大, 运用在线监测和健康管理技术, 能够实现对国产红外探测器的性能状况、健康状况的有效分析、预测, 从而保证国产红外探测器时刻保持最佳工作状态, 为机载装备的功能实现提供有力支撑。(2)随着国内经济和市场的变化, 核心技术的国产化显得尤为重要。因此发展国产红外探测器的在线监测和健康管理技术有利于加快我国机载装备全面自主可控的步伐。在线监测和健康管理技术已成为二十一世纪红外探测的热门研究课题, 它是提高系统可维修性的主要途径, 在机载上应用该技术对提高大中型预警机系统的故障预测与故障定位能力具有广阔的应用前景及重要的应用价值。

参考文献

- [1] 秦晓书, 潘晔华. 基于 AHP 沃尔玛供应商选择指标分析 [J]. 商场现代化, 2019, 5: 8-9.
- [2] 戴健文, 冯超, 黄冬丽, 等. 行人检测分类器的研究与设计 [J]. 电脑知识与技术, 2012, 29(8): 7068-7072.