DOI: 10.19659/j.issn.1008-5300.2022.05.007

健康监测技术在机载雷达结构上的应用分析*

薛勇杰, 虞庆庆, 薛 飞 (南京电子技术研究所, 江苏南京 210039)

摘 要:故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)技术是一项前沿的复杂工程应用技术,在机载雷达系统上具有迫切的需求和广泛的应用前景。文中首先分析了典型的飞机PHM系统架构;然后,针对机载雷达系统结构特点,提出一种基于故障模式、影响及危害性分析(Failure Mode, Effects & Criticality Analysis, FMECA)的结构健康监测系统构建流程,得到了典型机载雷达系统结构的健康监测系统架构;最后,对PHM技术在某机载雷达大型一维转台上的应用进行了分析,获得了各关键系统的多参量实时数据,为机载雷达系统的结构安全提供早期预警、故障诊断与寿命预测。本研究对结构健康监测技术在机载雷达领域的工程化应用具有指导意义。

关键词:故障预测与健康管理;机载雷达;FMECA;转台;寿命预测 中图分类号:TN958 文献标识码:A 文章编号:1008-5300(2022)05-0033-05

Application Analysis of PHM Technology in Airborne Radar Structure

XUE Yongjie, YU Qingqing, XUE Fei

(Nanjing Research Institute of Electronics Technology, Nanjing 210039, China)

Abstract: Prognostics and health management (PHM) is an advanced complex engeneering application technology, which has an urgent need and wide application prospect in the airborne radar. Firstly, the typical aircraft PHM system framework is analyzed. Secondly, the construction process of structure PHM system based on the failure mode, effects & criticality analysis (FMECA) method is proposed. The PHM system framework of typical airborne radar system structure is obtained. Finally, the application of PHM technology in the large one-dimensional turntable of an airborne radar is analyzed. The multi-parameters real-time data of each key system is obtained, which provides early warning, fault diagnosis and life prediction for the structure safty of airborne radar. This study provides guidance for the engineering application of structure PHM technology in the field of airborne radar.

Key words: PHM; airborne radar; FMECA; turntable; life prediction

引 言

故障预测与健康管理(Prognostics and Health Management, PHM)技术的定义是"一种利用信号、测量、模型和算法来监测、评估和跟踪退化的健康状态并预测故障发展的维修保养方法"^[1],它是由基于状态的维修(Condition-Based Maintenance, CBM)升级发展而来。PHM技术能够通过即时监测获取系统的技术状况,预测功能性故障并做必要的预防维修,从而缩短维修时间,降低飞机全寿命周期维护保障费用,提高系统的可靠性和安全性,能够为未来战机实现快速、准确的维修保障提供有力支持^[2-3]。

近年来,国内外科研机构都致力于PHM相关理论 及关键技术的研究,取得大量成果,使得PHM技术的 发展进入了新的阶段。在飞机PHM整体架构理论研 究方面,文献[4]给出了基于空地一体化管理的大飞 机PHM的原型系统结构及软硬件设计方案,讨论了未 来大飞机PHM系统研制面临的主要问题。文献[5] 详细论述了实现PHM功能的信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)架构,分析了CPS在工业领域 及航空航天领域的应用现状及瓶颈问题。文献[6]依 据航空电子系统的故障模式与机理,提出了一种基于 测试性的电子系统综合诊断与故障预测系统架构。文

^{*} 收稿日期:2022-01-24

献[7]开发了基于可测性设计的PHM系统架构,分析 了测试数据对系统功能实现的影响。目前,美国已将 PHM技术应用于F-35战斗机,显著降低了维修人力和 后勤保障资源的需求,同时大大提升了其出动架次率、 全机使用寿命和作战效能^[7]。

机载雷达属于典型的复杂军用电子设备,其组成规模庞大、结构形式复杂、雷达与载机平台之间属于 紧耦合集成关系^[8],不可避免地导致雷达系统故障发 生概率高以及维护和保障成本高。开展机载雷达的 PHM系统架构体系研究,对PHM技术在我国机载雷 达上的实施具有重要意义。

本文首先分析了典型飞机的PHM系统架构;然 后,针对机载雷达的结构特点,探究了机载雷达结构全 寿命流程紧密融合的PHM构建方法,分析了机载雷达 PHM系统构建流程;最后,以某机载雷达上大型一维 转台为监测对象,搭建了转台结构健康监测的地面试 验系统,实现了对机载雷达转台运行状态的实时监控、 故障诊断等功能。

1 典型飞机的PHM架构分析

PHM技术不仅是一种先进的测试、维修技术,更 是一种全面的故障预测、诊断、隔离及状态管理技 术^[9]。常规飞机PHM系统架构分为机上和地面两大 部分,之间通过通信系统互联,其典型架构可归纳为图 1所示框图。



图 1 典型飞机的PHM架构

该PHM系统首先从各类最底层信息源获取原始 数据,经信号处理后第一时间对其状态进行诊断和预 报。PHM机上管理系统将故障信息综合后,通过数传 系统传至地面PHM系统。地面PHM系统是实时和事 后处理系统,负责对机上部分提交的数据和信息进行 综合、仿真、评估、决策和优化,以得到关键对象的损伤 程度及寿命预计,最终据此对与作战计划、维修管理、 备件供应和人员培训等有关的需求资源做出恰当、及 时和决策性的响应,并将有用的信息通过专家/经验数 据库与同型号飞机共享^[10]。

2 机载雷达结构的PHM系统构建

2.1 雷达系统结构特点

一般的机载雷达分为舱内和舱外(罩内)两大部 分。透波天线罩为雷达系统中唯一的外露结构^[11], 罩内单元均通过安装结构实现在罩内的安装固定,典 型的有源相控阵雷达中该部分重量约占整个雷达的 40%^[8]。视雷达架构及功能的差异,独立单元的总数 量规模在500台/件以上。转台结构适用于机械旋转 的雷达,该结构带动综合交连实现雷达阵面整体的 旋转及静/动两部分之间的电、液传输。舱内单元一 般采用标准现场可更换单元(Line Replaceable Unit, LRU)插箱形式,部分内装标准现场可更换模块(Line Replaceable Module, LRM)。同样视雷达架构及功能 的差异,插箱及模块的总数量规模在100台/件以上。 安装结构指雷达各设备与载机平台互连的安装过渡结 构,包括框架、导轨、减振器等,该部分结构的规模与雷 达-载机平台结构一体化设计程度密切相关。

2.2 机载雷达PHM系统构建方法

本文提出了一种与机载雷达结构全寿命流程紧密 融合的PHM构建方法,具体流程如图2所示。从图2 中可以看出,PHM系统研发流程与雷达系统研发流程 在方案、设计、集成测试及使用的各个阶段紧密融合。 例如,在方案阶段,雷达系统研发流程中的故障模式、 影响及危害性分析(Failure Mode, Effects & Criticality Analysis, FMECA)的结果是PHM系统研发流程 中PHM系统初步方案的输入或依据,雷达系统研发流 程中FMECA结果确定的结构关/重件则决定了PHM 系统中监测对象及监测参数的选定。

FMECA是分析产品所有可能的故障模式及其可能产生的影响,并按每个故障模式产生影响的严重程度及其发生概率予以分类的一种归纳分析方法。FMECA由故障模式及影响分析(Failure Mode,

Effects Analysis, FMEA)和危害性分析(Criticality Analysis, CA)两部分组成。具体的分析方法可参考 GB/T 7826《系统可靠性分析技术失效模式和影响分析(FMEA)程序》和GJB 1391《故障模式、影响及危害 性分析指南》。



图 2 机载雷达PHM系统构建流程

这里以典型雷达简化后的舱内设备为例,得到舱 内系统的结构层级树(图3)、典型单元的功能与结构 层次对应关系(图4)以及功能结构严酷度类别等级定 义(表1)。



由于雷达属于电讯功能为主的复杂电子系统,大 部分结构故障危害将通过各种机理及路径耦合,最终 体现在电讯功能上,因此这里仅以结构的FMEA分析 为例,进一步的功能CA分析不在此文展开详述。基于上述定义及综合分析,可得到对应雷达舱内系统的 FMEA分析表。通过严酷度等级并结合关/重件特性 分析,可以进一步确定雷达关/重结构件。



图 4 典型单元的功能与结构层次对应关系图

表 1 雷达舱内系统功能结构严酷度类别等级定义

| 严酷度 | 等级 | 影响程度定义 | | |
|-----|----|------------------------------|--|--|
| 灾难性 | Ι | 导致人员伤亡、严重影响载机 安全或造成严重破坏 | | |
| 致命性 | Π | 导致雷达丧失功能、设备与载机 非正常脱离或设备损伤 | | |
| 严重性 | Ш | 导致雷达丧失部分功能、设备 局部破坏或损伤 | | |
| 轻微性 | IV | 导致雷达非关键性功能下降、 个别结构件松脱或损伤 | | |

根据雷达全系统FMECA的详细分析结果,可以 得到雷达系统内各结构的故障影响内容及严酷度等 级,最终得到典型机载雷达严酷度等级结构件清单(表 2),从而确定监测对象。

为了实现机载雷达系统结构上的健康监测功能, 载机势必需要付出额外的综合资源代价,主要包括重 量、尺寸/空间、功耗、系统复杂程度及可靠性。然而, 额外的资源代价将影响飞机的设计指标及作战效能。 因此,PHM在机载雷达系统中的应用必须重点突出、 有所取舍,不可一味盲目地搞"大而全"。

现有用于PHM监控技术的传感器类别包含热、 电、机械、化学、温度、生物、光学(辐射)、磁性等。结合 表1的分析结果,得到雷达整机全系统结构的PHM系 统架构(图5)。

| 表 2 典型机载雷达严酷度等级结构件清单 | | | | | | | | | |
|----------------------|---|---|---|--|---|------------------------------|--|--|--|
| | 结构件名称 结构功能描述 | | | | 严醒 | i度等级 | | | |
| | | 结构 特合交罩 新人们 有 有 有 有 有 有 大 后 结 环 功 世 名 本 大 后 结 天 后 结 年 数 端 构 控 率 世 4 一 4 一 4 4 2 5 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 | 实现雷达顶罩 实现转动过程 满足全机气动外形 实现 实现雷 实现雷 | 与机体的安装互连, 言机体的安装互连, 是中电、液等信号与、雷达辐射透波及J 雷达信号收、发等当 达信号控制、处理等 重达功能单元在机, 实现雷达功率信号的 采现雷达功率信号的来 | 及顶罩的机械旋转 后端设备的传输 页罩内设备防护的 主要功能 序主要功能 序主要功能 外的安装 >却 □传输 | 大 | <u> 1</u> <u> 1</u> エ エ エ エ エ エ エ エ エ | | |
| 监测对象 传感器网络 监测物理参数 - | ★ 内/外环 应力/应变传感器 ★ 内/外环 应力/应变/位移传感器 ★ 一方/常结构 ±右构刚/强度 ★ 内/外环 应力/应变/位移传感器 ±右构刚/强度 ★ 日常 ±方/常 | 共 点 小 小 <td>Rt 電 一 一 一 一 一 一 一 一 二 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 空 体 蒙 皮 小 面 一 一 空 体 蒙 皮 小 面 一 一 空 体 蒙 皮 小 面 一 一 変 人 加 速 度 传 感 器 一 一 五 反 村 面 一 一 形 変 / 位 移 传 感 器 一 二 度 侍 感 器 一 二 反 村 柄 / 二 成 約 四 一 一 和 長 小 二 度 侍 感 器 一 二 た 内 洲 面 一 一 形 変 / 加 速 度 传 感 器 一 二 た 内 洲 面 一 一 形 変 / 二 定 方 前 一 一 二 定 方 一 二 の を 一 二 定 方 一 二 の 一 一 一 二 の 一 二 の 一 一 二 の 一 一 二 の 一 二 の の 一 二 の 一 一 二 の 一 一 一 一 一 二 の 一 一 一 一 二 の 一 一 一 一 一 二 の 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一</td> <td>広 山 (</td> <td>氏 「 麻 歴 二 一 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、</td> <td>功率电缆 典捆部 温度传感器 局部温度</td> <td></td> | Rt 電 一 一 一 一 一 一 一 一 二 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 定 反 射 面 一 一 空 体 蒙 皮 小 面 一 一 空 体 蒙 皮 小 面 一 一 空 体 蒙 皮 小 面 一 一 変 人 加 速 度 传 感 器 一 一 五 反 村 面 一 一 形 変 / 位 移 传 感 器 一 二 度 侍 感 器 一 二 反 村 柄 / 二 成 約 四 一 一 和 長 小 二 度 侍 感 器 一 二 た 内 洲 面 一 一 形 変 / 加 速 度 传 感 器 一 二 た 内 洲 面 一 一 形 変 / 二 定 方 前 一 一 二 定 方 一 二 の を 一 二 定 方 一 二 の 一 一 一 二 の 一 二 の 一 一 二 の 一 一 二 の 一 二 の の 一 二 の 一 一 二 の 一 一 一 一 一 二 の 一 一 一 一 二 の 一 一 一 一 一 二 の 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 一 | 広 山 (| 氏 「 麻 歴 二 一 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 、 | 功率电缆 典捆部 温度传感器 局部温度 | | | |
| | | | | | | | | | |
| | | | | けい モンレ ズ /ナノトトレム | L DIT & T 12 +11 +4 | | | | |

图 5 典型机载雷达系统结构的PHM系统架构

3 PHM 在机载雷达转台上的应用

3.1 监测对象分析

基于机载雷达系统结构的PHM系统架构分析开 展某机载雷达一维伺服转台系统的健康监测技术应用 研究。该大型一维转台主要由支撑环(外环、内环)、方 位轴承、支撑腿、大齿圈、减速器、小齿轮、测角装置等 组成。检测对象主要包括方位轴承、齿轮、液压马达减 速机及内外环撑腿等结构。转台的主要监控部位包括 电控部分、转台结构和液压部分,监控要素包括转速、 角度、应力、振动等。

3.2 监测系统软硬件系统架构

3.2.1 监测系统总体方案

大型一维转台健康监测系统整体方案如图6所 示。系统由嵌入式机载信息采集终端和故障诊断与健 康管理服务平台构成。振动、应变、电流等传感器感知 转台信号,信号调理数据采集器获取传感器信号,通过 信号处理获得有效数据,再将数据传输至数据服务器。 健康管理服务平台通过信号处理与特征提取、健康评 估、故障诊断以及寿命预测等关键环节,实现运行状态 实时监控和故障诊断,并进行故障预测和健康管理。



图 6 大型一维转台健康监测系统整体方案

3.2.2 监控参量与监控方法

监控内容主要分为电控部分、转台结构部分和液 压部分,监控要素包括转速、角度、应力、振动等。电控 部分通过总线方式从电控系统获取转速、转角、电流、 流量、压力、温度等监控参量。转台结构部分包括:1) 结构件应力监测采用传统的电测应变方式,采用低温 应变片作为应变传感器,通过应变采集模块采集应变 信号;2)传动机构状态监测采用加速度传感器获取轴 承、大齿圈、小齿轮、减速机、马达等传动部件的振动信 号,通过提取微弱故障信号进行轴承早期故障诊断,依 据轴承振动监测数据进行趋势分析,并依据轴承寿命 模型进行寿命预测;3)结构最大位移监测采用定制的 位移传感器获取位移信号。液压部分采用光电传感器 获取信号。

3.2.3 运行状态监控硬件系统

大型一维转台运行状态监控硬件平台由传感器、 调理器、采集器、存储器、电脑、通讯接口等组成,实现 信号传感、调理、采集、通讯、存储等功能。电控部分在 外环上布置2个速度编码器和2个角度编码器,由测角 装置通过总线获取数据。转台结构部分包括:1)针对 结构件应力监测,在转台支腿的上下左右位置共安装 24个应变传感器,在外环上部均匀布置4个应变传感 器;2)针对传动机构状态监测,在方位轴承上均匀布置 4个加速度传感器,在减速器、马达、马达轴承上布置18 个加速度传感器;3)针对结构最大位移监测,在内外环 上各布置4个位移传感器。液压部分在液压马达上布 置2个温度传感器,在进出油管上各布置1个温度传感 器,共计4个温度传感器,在进出油管上各布置1个流 量传感器。

3.2.4 运行状态监控软件系统

PHM主要包含故障预测和健康管理两方面内容。 软件开发基于嵌入式平台系统,具有很强的人机交互 能力,结合上述硬件平台,主要完成数据采集、数据通 讯、数据存储、数据分析、状态监控、故障诊断、寿命预 测等功能。

(1)状态监测、故障预警功能

利用时域分析、频域分析及神经网络等分析方法, 判定转台运行健康状况,如果出现异常,将结合故障机 理和测试数据进行早期故障诊断和故障预警。转台健 康监测采用图形和动画的直观方式显示应力、位移和 振动数据,基于健康基线以绿色、黄色和红色分别表示 健康、警示和危险状态,如图7所示。



图 7 转台健康监控主界面

(2)故障预测与寿命预测功能

故障特征趋势预测主要通过对历史数据进行分 析,构建并训练能够较好反映故障特征随时间发展规 律的模型,进而应用该模型对未来故障特征的发展情 况进行预测。短期预测是指直接应用时间序列预测方 法、神经网络预测方法等数据趋势预测方法对未来故 障特征进行短期预测。长期预测是指在短期预测的基 础上,结合历史数据和短期预测数据,采取曲线拟合的 方式建立故障特征与时间的函数,并得到未来较长时 间内的故障特征发展趋势。要为运维决策提供可信依 据,需要完成健康状态的可视化,并生成相应数据库, 包括性能退化图、绩效雷达图、分类和故障分布图以及 风险图表,如图8所示。





目前,该健康监测系统主要用于健康状态监测,并 在使用过程中,通过数据积累逐渐建立和完善故障库 以及关键参量特征信号数据库,为转台系统的故障诊 断与预测以及寿命预测提供依据。后期可以根据使用 过程中出现的结构方面的问题,利用系统预留的备用 接口对部分结构件进行扩展监测。

4 结束语

本文通过对典型的飞机PHM系统架构的详细分 析,并结合机载雷达系统的结构特点,提出了基于雷达 全寿命周期和FMECA的PHM系统设计方法和总体 架构,得到了典型机载雷达系统结构的健康监测系统 架构。以某机载雷达转台为例,探究了PHM技术在雷 (下转第45页)

4.3 阵面骨架结构强度分析

阵面骨架结构在1500 kg(天线阵面质量)载荷和 自身重力载荷作用下的的应力分布如图8所示。由图 8可见,最大应力发生在连接接头处,约为35.3 MPa。



图 8 阵面骨架结构的应力分布图

从材料手册中查得5A05铝材(铝镁合金)的屈服 强度 $\sigma_{0.2} \ge 125$ MPa,安全系数 n_s 可取1.5,许用应力 $[\sigma] = \sigma_{0.2}/n_s = 83.3$ MPa。阵面骨架中铝材结构承 受的最大应力小于铝材的许用应力^[8],满足天线阵面 结构的强度要求。

5 结束语

本文根据球面阵列天线结构设计需求,采用富勒 烯结构中的C60形式将纯球面阵结构转化为易于实现 的多平面式球面阵结构,提高了球面阵列天线的可生 产性。在此基础上提出了一种新的天线阵面结构布局 方案,并给出了阵面骨架、天线子阵、天线单元等的设

(上接第37页)

达关键结构件健康监测上的应用,并获得了各关键系 统的多参量实时数据。本研究对结构健康监测技术在 机载雷达领域的工程化应用具有指导意义。

参考文献

- [1] PATRICK K, BYINGTON C, ROEMER M, et al. Defining PHM A lexical evolution of maintenance and logistics[C]//IEEE AUTOTESTCON 2006 Conference Record, Anaheim, California, 2006: 353–358.
- [2] 景博, 徐光跃, 黄以锋, 等. 军用飞机 PHM 技术进展分析及问题研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(2): 161-169.
- [3] YANG L, WANG J, ZHANG G. Aviation PHM system research framework based on PHM big data center[C]// International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM), IEEE, 2016: 1–5.
- [4] WANG J, ZHU E, LV Z, et al. Study and realization of the prototype for the large aircraft's PHM[C]//11th

计思路,可为其他类似球面阵列天线的结构设计提供 理论参考。本文针对球面阵列天线结构仅仅做了总体 布局的规划,后续还需要对阵面骨架、天线子阵等开展 进一步研究。

参考文献

- [1] 唐宝富, 钟剑锋, 顾叶青. 有源相控阵雷达天线结构设计 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2016.
- [2] 束咸荣,何炳发,高铁.相控阵雷达天线[M].北京:国防 工业出版社,2007.
- [3] 林沂. 球面共形阵列天线研究 [D]. 长沙: 国防科学技术 大学, 2015.
- [4] 林杰. 球面共形阵的宽带宽角扫描技术研究[D]. 成都: 电 子科技大学, 2019.
- [5] 北京无线电测量研究所. 一种球面式相控阵天线框架: 中国, 201711292484.1[P]. 2018-06-01 [2021-12-10].
- [6] 操卫忠, 陶晓瑛. 某车载雷达天线骨架结构的有限元分析 [J]. 电子机械工程, 2014, 30(3): 57-60.
- [7] 卫晓俊. 共形微带阵列天线设计 [D]. 西安: 西安电子科 技大学, 2020.
- [8] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.

陈应春 男,1982年生,高级工程师,主要从事天 线阵面结构设计工作。

宋晓斐 男,1971年生,高级工程师,主要从事天 线阵面结构设计工作。

World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA), IEEE, 2014: 3735–3740.

- [5] 景博,周伟,黄以锋,等.信息物理融合系统及其应用[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2014,15(2):1-6.
- [6] 邓森,景博.基于测试性的电子系统综合诊断与故障预测 方法综述[J].控制与决策,2013,28(5):641-649.
- [7] 朱斌, 陈龙, 强弢, 等. 美军F-35战斗机PHM体系结构分析[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(1): 1-3.
- [8] 虞庆庆, 彭雪林, 林载誉. 预警雷达与载机平台的加装耦 合分析[J]. 现代雷达, 2019, 41(4): 84-90.
- [9] 陈青, 张观海, 刘琪. 飞机预测与健康管理体系结构浅析[J]. 飞机设计, 2011, 31(2): 51–58.
- [10] 方旭, 薛景锋, 宋昊, 等. 飞机结构健康监测系统数据处理及在线应用[J]. 计测技术, 2019, 39(6): 1-7.
- [11] 虞庆庆, 王长武. 机载预警相控阵雷达顶罩质量及其敏感 性分析[J]. 现代雷达, 2015, 37(6): 16-20.

薛**勇杰** 男,1966年生,工程师,主要从事机载雷 达结构总体设计研究工作。