

有源相控阵雷达状态监测与健康管理技术

高洪青

(南京电子技术研究所, 南京 210039)

摘要: 状态监测和健康管理技术作为新一代测试与诊断技术, 是装备自主式保障的核心系统之一, 在保障武器装备战备完好性, 提高作战效能, 降低全寿命周期费用等方面具有重要作用; 从有源相控阵雷达的状态监测与健康管理入手, 构建了分层式健康管理框架, 以作用距离和副瓣电平指标进行信息融合和健康评估, 实现了有源相控阵雷达的状态监测和健康管理。

关键词: 状态监测; 健康管理; 相控阵天线; 雷达系统

Research on Architecture of Condition Monitoring and Health Management of Active Electronically Scanned Array Radar

Gao Hongqing

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

Abstract: As the new technology of test and diagnosis, condition monitoring and health management has been the core system of autonomous logistics of military equipment, and it has important role in ensuring the combat readiness, improving the operational effectiveness and reducing the total cycle cost of equipment. Focused on the condition monitoring and health management of active electronically scanned array antenna radar, the layered architecture of health management is constructed. By information fusion and health assessment of the character of radar range and antenna side-lobe level, the condition monitoring and health management of AESA radar is realized.

Keywords: condition monitoring; health management; AESA; radar

0 引言

状态监测与健康管理技术作为对装备传统 BIT (机内自检) 功能的进一步拓展, 承担着对武器装备状态的监控和健康评估, 并将原来由事件主宰的维修 (事后维修) 或时间相关的维修 (定期维修) 被基于状态的维修 (视情维修) 所取代, 该技术是压缩维修保障费用, 减小保障规模, 降低维修费用, 降低雷达寿命周期费用的重要手段。^[1-3]

在大型相控阵雷达设计、研制过程中, 运用现代测试理论并结合计算机网络、数据挖掘、人工智能等先进技术手段, 同步开展测试性设计、故障预测与健康管理技术研究, 建立雷达状态监测与健康管理软硬件平台, 可保障雷达系统运行安全, 提高其作战效能, 对促进雷达系统视情维修工作的顺利开展, 减少盲目检修、维修次数, 避免传统维修体制所造成的资源浪费, 提高保障资源利用率等都有十分重要的意义。^[4]

1 有源相控阵雷达健康管理框架

1.1 分层式健康管理框架构

本文采用的健康管理框架构是一种分层式的框架构, 该框架构的功能要素及相互关系如图 1 所示。^[5-7]

- 1) 数据获取层, 通过该层获取状态信息。
- 2) 数据处理层, 实现数据处理、统计分析等功能。
- 3) 状态监测层, 特征数据与期望值比较, 输出状态指示 (如低、中、高等)。
- 4) 健康评估层, 监测系统、分系统、模块的健康情况。

收稿日期:2016-01-30; 修回日期:2016-07-28。

作者简介: 高洪青 (1975-), 男, 江苏省靖江市人, 高级工程师, 主要从事健康管理、综合保障方向的研究。

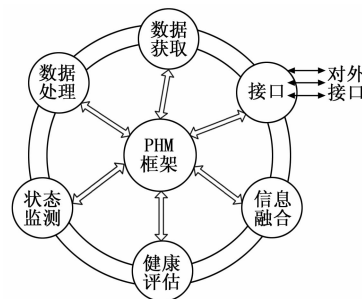


图 1 分层式 PHM 框架

5) 信息融合层, 完成多种信息源的融合。

6) 接口层, 健康管理系统的用户界面和与其他系统的接口。

1.2 健康管理功能分类

健康管理技术是对雷达传统 BIT 和状态监控功能的进一步拓展, 使雷达能诊断自身的健康状况, 在事故发生前预测故障, 并采用最少的维修活动实现维修。主要包括下列功能: ①故障检测; ②故障诊断; ③故障隔离; ④性能监测; ⑤资源与信息管; ⑥重构支持。^[8-10]

根据某雷达的维护体制、使用维护需求等特点, 将雷达的健康管分为在线健康管理和离线健康管理共两类, 其各自的主要功能如下:

在线健康管理以雷达各种 BIT 方式为主要信息来源, 获取各模块的状态信息和雷达功能参数, 进行快速的故障诊断和隔离。同时根据故障隔离结果及任务需求进行模块重构, 实现最大限度的任务可靠性。主要功能包括: ①故障检测与隔离 (以 BIT 为主); ②性能监测; ③资源与信息管; ④重构

支持。

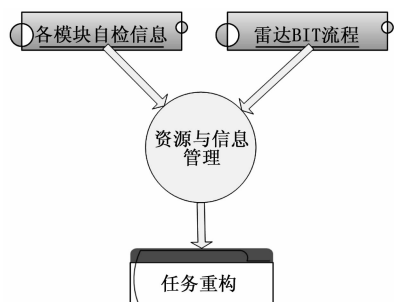


图2 在线健康管理框架

离线健康管理以雷达状态信息数据库为核心，以便携式维修辅助设备PMA和BIT方式为信息来源，对雷达状态进行深层次的检测，通过各种信息进行综合诊断，对雷达状态进行准确的健康评估，同时对获取的各种雷达工作参数，通过预测模型进行故障预测。主要功能包括：①故障检测与隔离（结合BIT与地面维护设备）；②多信息综合诊断；③性能监测；④健康评估。

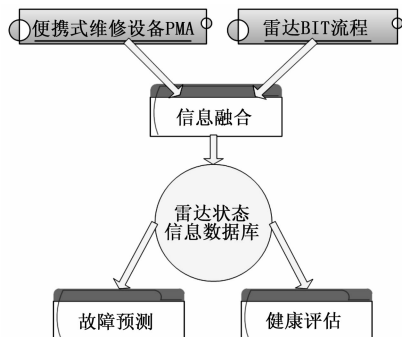


图3 离线健康管理框架

2 信息融合与健康评估技术

对有源相控阵雷达来说，由于组合了多个模块、分系统，其运行状况复杂，影响因素众多，同一种故障可能有不同的表现形式。工程上对雷达状态监测过程中，不存在对所有故障敏感的特征参量，而同一种故障现象又常常是若干种故障共同作用的结果。故障的多样性、不确定性和各种故障之间联系的复杂性构成了雷达状态评价与故障诊断的难点，仅靠单一的故障特征量和诊断方法已无法完成诊断任务。本文采用数据集成与信息融合技术来克服这一困难。

相控阵雷达由若干组件、模块、分系统组成，其信息融合一般分为3种模式，即数据级融合、特征级融合和决策级融合。数据级融合是最基本的融合，通过对各种原始测试数据进行综合、分析与融合；特征级融合是把原始测试数据先经特征提取，再进行数据关联和归一化等处理，进行分析、处理和融合，实现雷达系统的健康评估；决策级融合从雷达作战任务的需求出发，充分利用特征级融合所提取的特征信息，采用适当的融合技术来实现。

3 有源相控阵雷达天线健康管理

某雷达天线系统为多功能有源相控阵系统，能实现探测、干扰、高速数据通信等功能。使用过程中，TR组件的故障会

导致雷达作用距离、副瓣电平指标的变化。天线阵面健康管理基于有源相控阵天线的可测试性设计，实现对天线TR组件的状态进行故障检测与隔离，判断出每个TR组件的状态，通过天线阵面的仿真模型，评估天线阵面的健康状态。

3.1 作用距离评估

雷达距离方程如下：

$$R^4 = \frac{P_{AV} \cdot G_t \cdot G_r \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot \frac{n}{L_i(n)}}{(4\pi)^3 \cdot K \cdot T_s \cdot F_n \cdot \Delta f \cdot L \cdot D_1(n)} \quad (1)$$

式中： P_{AV} 为平均发射功率； G_t 为发射天线增益； G_r 为接收天线增益； σ 为目标截面积； λ^2 为辐射信号波长的平方； $\frac{n}{L_i(n)}$ 为非相参积累的得益； $K T_s F_n$ 为 $-K$ 为波尔兹曼常数， T_s 为以绝对温度表示的系统噪声温度， F_n 为接收机噪声系统； Δf ——多卜勒滤波器带宽； $D_1(n)$ ——检测因子； L ——系统损耗。

根据雷达作用距离方程可知，雷达作用距离的下降会随着平均发射功率 P_{AV} 、发射天线增益 G_t 、接收天线增益 G_r 的变化相关。

设在雷达工作一段时间后，发射通道失效比例为 α ，接收通道失效比例为 β ，因此，失效后的发射功率

$$P_{AV\text{失效}} = (1 - \alpha) P_{AV}; \quad (2)$$

失效后的发射天线增益

$$G_{t\text{失效}} = G_t + 10\log(1 - \alpha); \quad (3)$$

失效后的接收天线增益

$$G_{r\text{失效}} = G_r + 10\log(1 - \beta) \quad (4)$$

失效后的作用距离

$$\frac{R_{\text{失效}}^4}{R_{\text{正常}}^4} = \frac{(1 - \alpha)(G_t + 10\log(1 - \alpha))(G_r + 10\log(1 - \beta))}{G_r G_t} \quad (5)$$

因此，雷达接收增益、发射增益、辐射功率、作用距离随TR组件通道失效的变化趋势分别如图4~6所示。

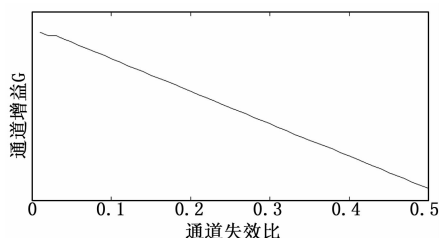


图4 增益变化趋势

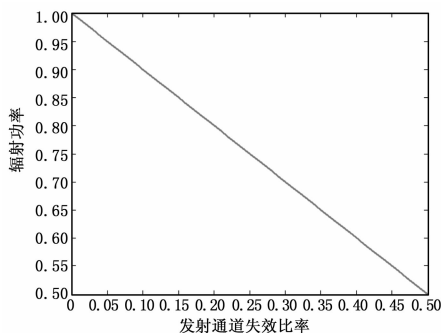


图5 辐射功率变化趋势

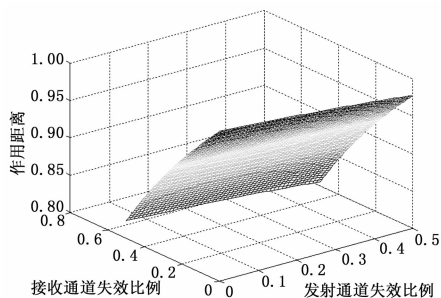


图 6 雷达作用距离变化趋势

3.2 副瓣电平评估

天线的波瓣形式体现了雷达能量在空间的分布情况，副瓣电平为天线波瓣的一个重要指标。副瓣电平尤其是空域平均副瓣电平直接影响雷达的抗干扰能力、干扰能力和杂波抑制处理能力，从而影响雷达目标观测性能。天线发射或接收通道的部分失效除了对天线增益有较大影响以外，对天线的副瓣电平也存在不可忽视的影响。

雷达工作一段时间后，发射通道失效比例为 α ，接收通道失效比例为 β 。天线在发射情况下采用均匀加权，由于天线单元数量较多，发射时最大副瓣电平受通道失效的影响较小，平均副瓣电平的变化如图 7。

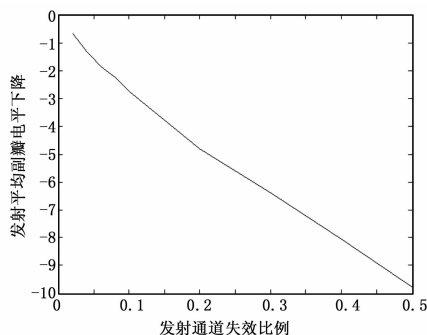


图 7 发射最大副瓣电平

天线在接收时采用低副瓣加权，接收通道失效对天线的最大副瓣和平均副瓣有较大的影响，其变化趋势如图 8 和图 9。

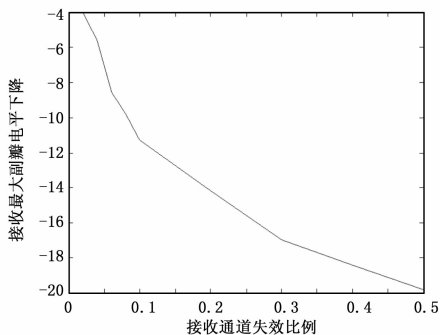


图 8 接收最大副瓣电平

雷达使用过程中，可以根据作用距离、副瓣电平的变化给出天线阵面的健康评估以及雷达性能指标的健康状况，并可划定阵面正常、次要、临界、恶化、严重等各种健康状况的报警线，对天线阵面的健康状况进行评估。

4 总结

本文以某雷达有源相控阵天线为应用背景，研究相控阵天

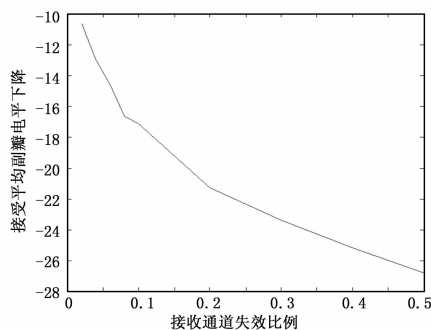


图 9 接收平均副瓣电平

线的状态监测与健康管理技术，实现动态掌握雷达现场使用状况及其健康状态发展趋势，为相控阵雷达天线的保障工作提供及时、可靠、有效的解决方法，对推动系统由“反应式”维修保障向“预防式”维修保障转变，对全面提升雷达的保障技术水平有重大意义。

参考文献:

- [1] 连光耀, 吕晓明, 黄考利, 等. 基于 PHM 的电子装备故障预测系统实现关键技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (9): 1959 - 1961.
- [2] 张宝珍. 预测与健康管理技术的发展及应用 [J]. 测控技术, 2008, 27 (2): 5 - 7.
- [3] 韩国泰. 航空电子的故障预测与健康管理技术 [J]. 航空电子技术, 2009, 40 (1): 30 - 38.
- [4] Mackey R., Iverson D., Pisanich G., et al. Integrated System Health Management (ISHM) Technology Demonstration Project Final Report [R]. California, USA: National Aeronautics and Space Administration, 2006.
- [5] 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技术 [J]. 测控技术, 2011, 30 (1): 1 - 5.
- [6] 曾声奎, Michael G. Pecht, 吴际. 故障预测与健康管理 (PHM) 技术的现状与发展 [J]. 航空学报, 2005 (5): 626 - 632.
- [7] 潘全文, 李天, 李行善. 预测与健康管理系统体系结构研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2007 年增刊.
- [8] Jason Hines. Cost-Benefit Analysis Trade-Space Tool as a Design-Aid for the U. S. Army Vehicle Health Management System (VHMS) Program [C]. Annual Conference of the Prognostics and Health management Society, 2009.
- [9] Balaban E, Saxena A. Airborne electro-mechanical actuator test stand for development of prognostic health management systems [A]. Annual Conference of the Prognostics and Health Management Society [C]. 2010.
- [10] 王志鹏, 吕琛, 等. 飞机 PHM 演示验证平台设计技术研究 [J]. 南京理工大学学报, 2011 (5): 250 - 255.
- [11] 李爽, 李培. 基于信息融合的校车自动变速器故障诊断新平台与方法 [J]. 西南师范大学学报 (自然科学版), 2015 (9): 49 - 54.
- [12] 胡蓉, 谭红斌, 冯志宇, 等. GA-BP 网络与 D-S 证据相结合的多传感器信息融合 [J]. 重庆邮电大学学报 (自然科学版), 2011 (2): 220 - 230.
- [13] 李文辉, 倪洪印. 一种改进的 Adaboost 训练算法 [J]. 吉林大学学报 (理学版), 2011 (3): 498 - 504.