

# 某型火炮预测与健康管理工作 (PHM) 体系结构设计与应用

赵征凡<sup>1</sup>, 刘靖波<sup>1</sup>, 黄萌<sup>2</sup>, 刘舜鑫<sup>3</sup>

(1. 中国人民解放军 63961 部队, 北京 100012; 2. 防空兵学院, 郑州 410052;

3. 工业和信息化部第五研究所, 广州 510610)

**摘要:** 故障预测与健康管理工作 (PHM) 技术已在航空航天领域取得较为广泛的应用, 而在地面装备领域鲜有应用, 为将故障预测与健康管理工作 (PHM) 技术从航空航天领域推广到地面装备领域, 设计和构建了某型火炮的 PHM 体系结构; 首先, 通过对比和借鉴航空航天领域典型的 4 种 PHM 体系结构 OSA-CBM 开放式体系结构、集中式体系结构、分布式体系结构、分层融合式体系结构的特点, 结合地面装备作战特点和实际工作环境, 设计并构建了适于地面装备的 PHM 体系结构; 然后, 以地面装备的 PHM 构建思路为依托, 将 PHM 体系应用到具体的某型火炮中, 设计出了基于某型火炮的 PHM 体系结构, 根据所构建 PHM 体系结构, 详细描述了在火炮上的应用情况; 最后展望了 PHM 技术在地面装备领域的发展趋势和对国防工业发展的借鉴意义。

**关键词:** PHM; 火炮; 结构体系; 地面装备

## Design and Application of Prognostics and Health Management (PHM) for A Type of Gun

Zhao Zhengfan<sup>1</sup>, Liu Jingbo<sup>1</sup>, Huang Meng<sup>2</sup>, Liu Shunxin<sup>3</sup>

(1. 63961 Unit of the PLA, Beijing 100012, China; 2. Air Defense Forces Academy, Zhengzhou 410052, China;

3. China CEPREI Laboratory, Guangzhou 510610, China)

**Abstract:** Prognostics and health management (PHM) technology has been widely used in the aerospace field, but its application is still very few in the field of ground equipment. In order to promote the application of prognostics and health management technology in the field of ground equipment, the PHM system frame of a certain type gun is designed and constructed. Firstly, the four typical aerospace PHM architectures, OSA-CBM open architecture, centralized architecture, distributed architecture and hierarchical fusion architecture are compared and researched. Considered these characteristics and working environment, a suitable PHM system structure is proposed for ground equipment. Secondly, based on proposed the ground equipment PHM construction, the PHM system for a specific type gun is designed and its application in detail is described. Finally, the development trend of PHM technology in ground equipment and its future use in defense industry are prospected.

**Keywords:** prognostics and health management (PHM); gun; system structure; ground equipment

## 0 引言

故障预测与健康管理工作 (prognostics and health management, PHM) 技术对电子系统和机械系统的监控技术, 在航空和航天领域已有成熟的理论和全面的应用, 在地面装备中还属于理论向工程化过渡的摸索期, 如何真正实现提前发现故障, 适时开展维修, 准确预测故障发生的时间和位置, 提高系统运行可靠性, 同时记录分析系统的使用数据, 对整个系统进行健康管理还有许多关键技术需要研究和试验。本文通过分析地面装备功能特点, 从地面装备对故障预测和健康技术的需求出发, 结合已有技术和理论研究基础, 借鉴航空以及其他领域先进经验, 论证地面装备开展 PHM 的必要性和可行性<sup>[1]</sup>。

## 1 4 种典型 PHM 体系结构对比分析

目前比较通用的 4 种典型 PHM 体系结构分别为 OSA-

CBM 开放式体系结构, 集中式体系结构, 分布式体系结构, 分层融合式体系结构。4 种体系结构各自有不同的适用范围, 各有特点。地面装备 PHM 构建必须明确 4 种体系结构的特点, 结合地面装备作战状况和运行环境, 吸收各自优点以建立更有效的 PHM 体系结构。

下面对这 4 种典型 PHM 体系结构的特点进行对比分析。

OSA-CBM 开放式体系结构是由美国 10 多个科研机构联合开发的 PHM 体系结构, 由波音公司牵头设计并推广。目前该 PHM 体系结构已在航空, 船舶, 军事等领域得到广泛的应用; 集中式体系结构是一种适用于小型飞机的 PHM 体系结构, 其拥有一个核心处理器, 通过核心故障控制处理器来完成各种任务的集中处理和集中控制; 分布式体系结构是一种由多个控制中心组成的分布式结构。根据不同的单元分成各个子系统, 分别进行集中式控制; 分层融合式体系结构融合了分布式与集中式结构各自的优点, 可在子系统级与系统级两个层次间进行融合, 全面利用冗余信息, 对于降低系统虚警的问题能够很好地解决<sup>[2]</sup>。

4 种体系结构各自特点对比如表 1 所示。

收稿日期: 2017-06-26; 修回日期: 2017-09-01。

作者简介: 赵征凡 (1982-), 男, 陕西西安人, 博士, 工程师, 主要从事通用质量特性工程方向的研究。

表 1 4 种典型 PHM 结构体系对比表

体系类别	优点	缺点	使用例子
OSA-CBM	1)能对系统状态退化趋势进行灰度建模,便于掌握系统实时状态 2)各功能模块均为单独开发,具有强的算法保密性	对人工智能的要求较高	美军 F-35 联合攻击机
集中式体系结构	1)多个终端单元根据不同的接口单元分别实现对底层的驱动 2)不同单元可自行实行底层驱动	仅局限于小型飞机或简单系统,复杂系统下执行效率低下	小型机载系统
分布式体系结构	1)子系统拥有完整的信号处理,状态监测及预测与健康管理功能,针对具体部件可设置不同子系统,针对性强。2)实现了子系统级的信息获取、处理与决策,有效降低测试费用。	难以集成,冗余信息过多,缺乏子系统间相互作用的考虑。	可信度要求较低的装备
分层融合式体系结构	拥有 PHM 数据库,知识库,对各系统信息处理、诊断预测,决策提供指导作用,提高预测准确性及决策正确性。	体系结构庞大,只适用于大型复杂系统,对于小型系统显得过于繁琐。	大型复杂机载设备

## 2 地面装备 PHM 系统体系结构建立

地面装备与航空电子设备既有相似点,也存在不同点。地面装备如装甲装备、火炮、坦克等武器装备在机械结构方面与航空电子设备存在类似的体系结构,可根据其结构分为系统级与子系统级。在 PHM 体系结构方面可大胆借鉴航空领域典型 PHM 系统。

地面装备与航空电子设备的不同点体现在其故障具有复杂性与不确定性等特点,由于地面装备自动化程度低于航空电子设备,人工干扰因素更大,导致故障的不确定性更大,同时也为故障监测与诊断带来更大困难。同时,地面装备产品分布广泛,维修与售后服务难以系统化管理<sup>[3]</sup>,需要故障诊断能体现实时性的特征,并做出实时的预测与决策。

针对以上特点,本文构建了地面装备 PHM 结构体系如图 1 所示。

地面装备 PHM 体系特点:

1) 该 PHM 体系沿用了 OSA-CBM 开放式体系结构的顺序结构模式,将信号处理,状态监测,故障预测,推理决策等分成不同的模块,同时每个模块与历史数据库,实时数据库,关系数据库,动态数据库相连接。历史数据库将历史的故障信息收集起来以实现实时信号处理,状态监测,故障预测,推理决策的帮助作用;实时数据库可将实时数据记录下来以供后续使用。关系数据库和动态数据库存储大量知识,方便各模块随时调用<sup>[4-5]</sup>。有效应对了地面装备结构复杂,故障不确定性大的特点。

2) 将地面装备按故障特征分为不同的子系统,按分

类不同安装不同类型的传感器,分类进行数据采集。同时将机内自带测试系统所测数据直接导入到历史数据库以方便对各模块提供数据信息。每个子系统可完整实现从数据采集到推理决策的全过程。实现了分布式进行的模式,提高了故障预测与健康管理的效率。

3) 每个子系统故障预测所得结果最终由综合决策模块来通过故障危害分析表(FMECA),数据库知识等来做出综合性决策,提高了预测的准确性和决策的正确性。

4) 设置用户层以方便人机交互和管理。

## 3 某型火炮 PHM 工程应用

### 3.1 某型火炮 PHM 系统体系构架的研究

OSA-CBM 定义的标准 PHM 系统体系结构对某型火炮 PHM 系统架构的设计具有很好的指导作用。地面装备 PHM 系统架构很好地诠释了地面装备的健康管理系统应该具备的基本的组成部分、各部分之间基本的关联关系以及系统功能等。

某型火炮结构复杂,整体结构由多个子系统组合而成,涉及到的零件级,部件级关键结构庞杂多样,不同子系统因受载荷不同和工作环境的差异,其故障模式和复杂性不尽相同。

针对某型火炮结构特点,设计 PHM 体系结构需要考虑以下关键问题

1) 由于火炮作战和运行时,车身并不能一直平稳运行,且车载空间小,因此,车载监测设备应具备体积小,稳定性强等特点<sup>[7]</sup>。由于车载空间受限,因此有必要将 PHM 系统分为车载 PHM 系统和车下 PHM 系统,车载 PHM 系统应具备关键参数的记录和信号提取能力;车下 PHM 系统则需利用复杂算法和先进设备进行综合故障诊断和故障预测。

2) 火炮中各部件,零件运行参数获取方式不同,有些参数如应变、冲击等需要在线获取,有些结构参数是既可以在线获取也可以事后获取,如对结构的损伤而言,既可以在线监测,也可以待装备定期维修时采用便携式结构 PHM 系统进行损伤诊断,这主要取决于监测的结构部位的重要性。

3) 某型火炮 PHM 系统应该具有层次化分布式<sup>[8]</sup>的特点。每种结构参数对应的系统应该能够利用已有的车载总线进行互

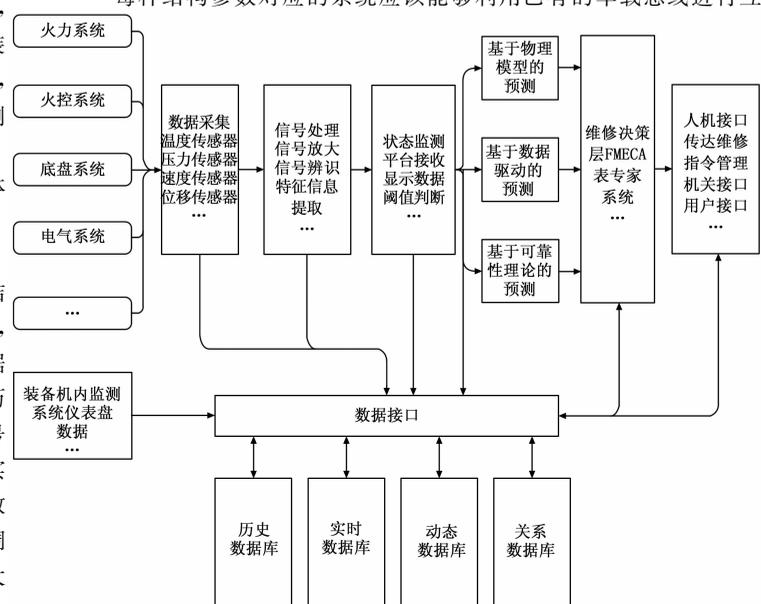


图 1 地面装备 PHM 结构体系图

联，并且应该存在一个系统核心对多个分系统进行管理和信息综合。由此达到多种结构部位、多种结构形式、多种损伤模式的综合健康监测与管理的功能要求。

4) PHM 系统是一个不断完善和功能不断完备的系统，随着各种新技术、新算法的应用，系统所需的各种资源也是不断更新和完善的，因此某型火炮 PHM 系统的架构应该能够使系统具有良好的可扩展性<sup>[9]</sup>。

### 3.2 某型火炮 PHM 系统体系设计

基于上述分析，提出了一种分布式层次某型火炮 PHM 系统整体体系架构，如图 2 所示。

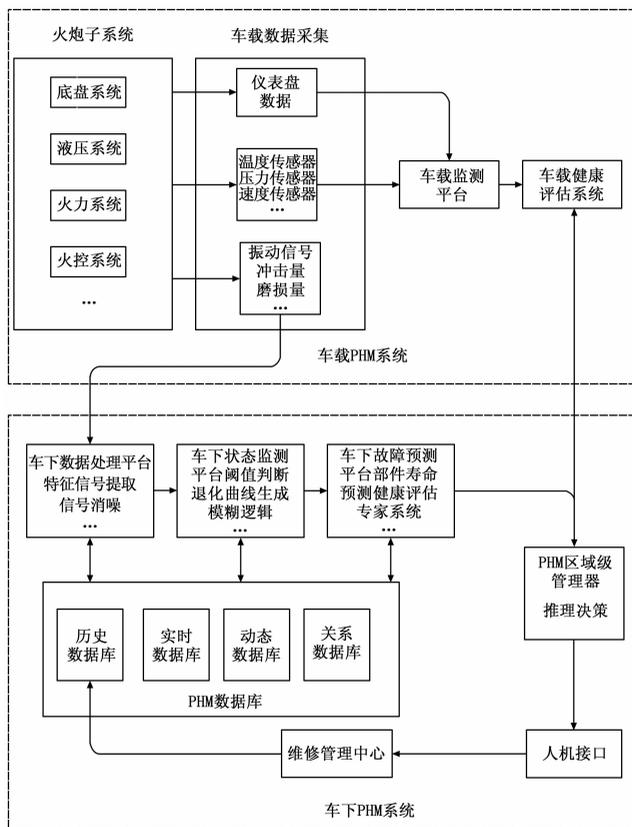


图 2 某型火炮 PHM 结构体系图

从图 2 可以看出，某型火炮 PHM 系统由车载 PHM 系统和车下 PHM 系统组成。车载 PHM 系统由火炮子系统、车载数据采集、车载监测平台和车载健康评估系统组成。车下 PHM 系统由车下数据处理平台、车下状态监测平台、车下故障预测平台、PHM 区域级管理器<sup>[11]</sup>、PHM 数据库、人机接口和维修管理中心组成。

其中，车载 PHM 系统将整个火炮划分为多个子系统，每个子系统对应一个完整的 PHM 成员级系统，由于不同故障模式在监测和信号处理方面难度不同，对于简单的故障模式如温度，压力等完全可以利用成员级系统完整实现针对子系统从数据采集、信号处理到状态监测、健康评估的全过程，而对于如振动，冲击，磨损等故障的监测，成员级系统只进行数据采集并传输到区域级 PHM 系统中。对于简单故障车载系统可进行初步的决策并传输到区域级管理器中做综合决策。

车下系统中，数据处理平台、状态监测平台和故障预测平台主要用于复杂故障数据收集，并利用先进算法对信号进行特

征提取，状态监测，利用物理模型或专家知识进行故障预测<sup>[10]</sup>，推断故障发生时间，并将所得结果传输至区域级管理器中做综合决策；区域级管理器负责接收来自车上和车下的信息来做综合的决策，区域级管理器采用类似推理机的设计，综合考虑各种因素，做出最终决策。首先，区域级管理器将收集到的信息及推理结果发送至 PHM 数据库中以做信息归档，同时通过人机接口将指令发送至维修管理部门；PHM 数据库则作为一个知识库的存在，收集来自整个 PHM 系统中的数据信息和知识信息，同时利用历史数据库中的故障信息和知识可以对当前故障监测与预测提供参考。

### 4 结束语

本文针对地面武器装备 PHM 体系尚未成熟的现状，分析了航空领域已经运用的相对成熟的 4 种典型 PHM 体系结构，结合地面装备复杂性和不确定性等特点，借鉴航空航天领域先进经验，设计出了一种面向地面装备的 PHM 体系结构，并在某型火炮上具体应用，实现了故障预测与健康管理的功能，为 PHM 在地面装备领域推广提供了参考。下一步工作中应当在具体框架下细化，将重点放在子系统级信号处理方法、状态监测方法、故障预测方法的实现方面，从方法上落实 PHM 结构体系。

### 参考文献：

- [1] 张宝珍. 国外综合诊断、预测与健康管理工作的发展及应用 [J]. 计算机测量与控制, 2008, 16 (5): 591-594.
- [2] 张亮, 张凤鸣, 李俊涛, 等. 机载预测与健康管理工作 (PHM) 系统的体系结构 [J]. 空军工程大学学报, 2008, 9 (2): 7-11.
- [3] Wang P, Gachtsevanov V. Fault prognostics using dynamic wavelet neural networks [J]. AI EDAM - Artificial Intelligence for Engineering Design Analysis and Manufacturing, 2001, 15: 349-365.
- [4] Qiu H, Liao H T, Lee J. Degradation assessment for machinery prognostics using hidden Markov models [A]. Proceedings of the ASME International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference [C]. Hyatt Regency, California, USA, 2005: 531-537.
- [5] Goebe K, Bhaskar S, Abhinav S. A comparison of three data-driven techniques for prognostics [A]. 62nd Meeting of the Society For Machinery Failure Prevention Technology (MFPT) [C]. Virginia Beach, VA, USA, 2008, 191-131.
- [6] Skormin V A, Popyack L J, Gorodetski V I, et al. Applications of cluster analysis in diagnostics-related problems [A]. Proceedings of the 1999 IEEE Aerospace Conference [C]. Snowmass at Aspen, CO USA, 1999, 3: 161-168.
- [7] IEEE Std 1641-2004. IEEE Standard for Signal and Test Definition [S]. Piscataway, New Jersey: IEEE Standards Association Press, 2004.
- [8] 黄金国, 臧铁钢, 张淑猛, 等. 智能维修决策支持系统的研究 [J]. 机械工程师, 2003 (12): 6-8.
- [9] 孙博, 赵宇, 黄伟, 等. 电子产品健康监测和故障预测方法的案例研究 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 29 (6): 1012-1016.
- [10] 高占宝, 梁旭, 李行善. 复杂系统综合健康管理 [J]. 测控技术, 2005, 24 (8): 1-5.
- [11] Kalgren P, Baybutt M, Dabney T, et al. Application of Prognostic Health Management in Digital Electronic Systems [A]. IEEE Aerospace Conference [C]. IEEE Press, 2007: 1-9.