

# 基于数据驱动的航空装备生产系统 PHM 方法与应用系统设计



张浩驰,张星一,崔赞,刘谨尧

中国航空工业发展研究中心,北京 100029

**摘要:**随着航空装备生产系统复杂度、集成度的不断提高,传统航空装备制造企业的综合保障能力和水平已无法满足现役航空装备生产需求。为了有效优化航空装备制造企业生产效能,实现生产系统状态监测、故障诊断、寿命预测及智能运维,基于数据驱动的故障预测和健康管理(PHM)技术得到广泛关注和应用。目前,PHM相关研究工作主要聚焦于数据体系的管理维护,较少涉及应用系统架构设计。本文结合大数据分析的CRISP-DM模型,从业务理解到模型评估部署提出一种基于数据驱动的航空装备生产系统PHM分析流程,基于“云+端”的技术架构刻画了PHM应用系统的总体设计和功能设计思路,能够高效实现PHM分析过程中的数据资源化和模型化,有力支撑航空装备生产系统的智能决策,为推进PHM技术创新应用和航空装备制造业转型升级提供参考。

**关键词:**航空装备生产系统; CRISP-DM模型; 故障预测与健康管理; 数据驱动; PHM应用系统

中图分类号:V37

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.011

在国家顶层战略发展要求下,航空装备生产等传统行业正经历生产系统数字化、智能化转型的关键时期,随着生产系统软硬件组成日趋复杂,功能集成度越来越高,导致生产系统的失效模式日渐增多,故障发生原因更加复杂,基于“事后维修”和“计划维修”的传统被动维修保障模式已经难以满足现代化制造企业高质量、高效益、低成本的发展要求。

生产系统故障预测与健康管理(PHM)诞生于20世纪90年代中期,生产系统PHM是指通过采集生产制造过程中的设备运行参数信息,构建数据分析模型和算法,实现生产系统运行状态监测、故障诊断与健康管理<sup>[1]</sup>。近年来,以大数据分析、数字孪生、人工智能为代表的新兴技术取得了飞速发展,给人类的生产生活带来巨大变化,也给航空、航天、汽车、船舶等传统制造业发展注入新的生机与活力,在生产系统产能分析、质量监测、布局优化、故障诊断等方面发挥了重要作用,加速推动了制造企业的转型升级。大数据技术的不断成熟助力生产系统PHM技术发展突破,通过信息技术融合应用,逐渐发展出生产系统智能任务规划、故障预测预警、智能维护的能力<sup>[2]</sup>。

随着航空装备需求逐年增加,生产任务逐渐加重,对航

空装备生产企业产能、质量的要求日益提高,产线的运行情况直接影响装备交付。但航空装备生产企业大多数字化程度不高,正处于由传统工厂向数字化工厂转型的时期,在此阶段,一方面要加大相关企业能力条件建设投入,另一方面要应用最新PHM技术保障生产系统稳定高效运行。应用PHM技术是落实国家“制造强国”“数字中国”“中国制造2025”战略要求的切入点和突破口<sup>[3]</sup>,是实现航空装备制造现代化和高质量发展的必经之路,是维持装备生产系统稳定运行、提升产能和质量、降低维修保障成本、确保任务完成的关键举措,是推动中国航空装备产品走向世界的重要手段。

本文结合CRISP-DM模型提出一种基于数据驱动的航空装备生产系统PHM方法,并以此为基础对PHM应用系统设计思路进行阐述,以期推动航空装备制造企业实现降本增效。

## 1 基于数据驱动的航空装备生产系统 PHM 方法

航空装备生产系统PHM是大数据应用中的一个重要技术领域,采用科学合理的大数据分析方法可显著提升PHM的

收稿日期: 2023-06-05; 退修日期: 2023-08-29; 录用日期: 2023-09-26

引用格式: Zhang Haochi, Zhang Xingyi, Cui Yun, et al. Data driven PHM method and application system design of aviation equipment production system[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11): 81-86. 张浩驰, 张星一, 崔赞, 等. 基于数据驱动的航空装备生产系统PHM方法与应用系统设计[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11): 81-86.

效率和价值。例如,由 SPSS、Teradata 等公司<sup>[4]</sup>提出的 CRISP-DM 模型,将大数据分析工作划分为业务理解、数据理解、数据准备、模型建立、模型评估等流程,是现在的主流数据分析方法之一。CRISP-DM 模型如图 1 所示。本文以 CRISP-DM 数据分析挖掘方法论为基础,结合生产系统 PHM 技术,介绍基于数据驱动的航空装备生产系统 PHM 方法。

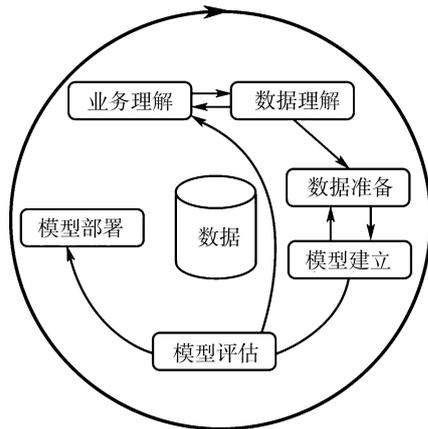


图1 CRISP-DM模型  
Fig.1 CRISP-DM model

### 1.1 业务理解

在进行航空装备生产系统 PHM 分析之前,需要对分析对象进行全面、深入的理解,了解其设备加工类型、运行操作机制、工作生产场景、典型故障类型、预期寿命目标、关键运行参数等综合信息。基于数据驱动的航空装备生产系统 PHM 分析的关键运行参数主要包括转速、功率、电流、电压、振动、温度等,通过对采集得到的数据进行处理和建模,即可获得设备运行参数与设备健康状态、可靠性和使用寿命的关系,从而实现航空装备生产系统的故障预测和健康管理,为维修保养、计划排产、产能分析等提供数据支撑<sup>[5]</sup>。目前,PHM 在航空装备生产系统中主要的应用场景包括参数异常预警、运行状态监测、设备故障诊断及生产系统寿命预测。

### 1.2 数据理解

在明确航空装备生产系统 PHM 业务需求之后,通过将传感器布置在生产系统中合适的设备位置,采集生产系统运行过程中的关键运行状态参数,转化成光、电、磁等信号,最终通过信号放大器将数据传输给数据处理系统或存储系统,完成数据的采集与存储<sup>[6]</sup>。

航空装备生产系统的数据主要分为以下几类:(1)生产系统基本属性:生产系统的基本组成结构特征、性能技术指标、固有质量特性等,包括生产系统设备、设施、仪器、工具

的基本配置关系,设计和使用的规范,物理参数等;(2)生产系统健康管理数据:运行状态数据、故障数据、操作状态数据、诊断结果、预测结果、维修数据、保养数据等;(3)生产系统决策数据:产能数据、质量数据、成本数据、物料数据、能源数据等;(4)其他数据:供应商数据、技术资料等<sup>[7]</sup>。基于数据驱动的航空装备生产系统 PHM 将重点针对生产系统健康管理数据进行分析和挖掘工作。

针对采集得到的数据,首先,进行简单分类,梳理数据的所属设备加工环节,将数据映射到生产系统的特定制造资源属性下,建立 PHM 分析数据资源树;其次,根据生产系统工作原理或物理模型,初步分析 PHM 分析数据资源树与生产系统实际运行状态之间的关联关系;最后,对数据资源树的可用性、真实性、准确性进行判断,为数据准备环节奠定基础。

### 1.3 数据准备

在完成 PHM 数据理解的基础上,需对原始数据进行处理,筛掉原始数据中存在的大量异常、噪声、失真、缺失数据,以保证航空装备生产系统故障监测、状态监测、寿命预测的准确度。通过上述数据处理可大幅提高数据标准化与规范化程度,提高数据分析挖掘效率。

数据准备环节一般包括数据清洗、数据集成、数据转换等环节<sup>[8]</sup>。数据清洗是指检查数据一致性、处理异常值和缺失值的过程;数据集成是指对来自不同设备技工环节数据源的数据进行整合,形成一个数据整体的过程,包括数据的归一化处理;数据转换是将数据转化为适当的形式,以适应数据建模分析算法需要的过程。

### 1.4 数据建模

航空装备生产系统 PHM 数据建模是指根据业务理解,基于数据理解与数据准备环节提供的学习样本和测试样本,选取一种或多种合适的 PHM 算法模型对生产系统数据进行学习、分析、挖掘,经过反复训练和测试,最终建立数据样本和目标参数的关联关系,达到生产系统状态监测、故障诊断和寿命分析的效果。生产系统 PHM 常用的数据挖掘算法包括关联、聚类、分类和预测等方法,分别用来实现不同的业务需求<sup>[9]</sup>。

关联方法是分析多个设备加工环节之间的依赖性和关联性的方法,建立其中的关联规则,通常可以用来识别航空装备生产系统不同运行参数之间的内在关系。常用的关联方法有 Apriori 算法、PCY 算法、多阶段算法、FP-Tree 算法等。

聚类方法是通过分析数据对象的特征和相似性,自动建立分类规则,并将数据划分进不同类别的方法。通常可

用于航空装备生产系统状态监测中,可将系统运行状态进行区分。常用的聚类方法有k-means算法、k-均值算法、BIRCH算法、DBSCAN算法、STING算法等。

分类方法是按照已有分类规则对数据对象进行划分的方法,本质上是一种有监督的学习方法,通常可用于航空装备生产系统故障诊断。常用的分类方法有NBC算法、LR算法、决策树算法、SVM算法、KNN算法、ANN算法等。

预测方法主要是基于航空装备生产系统历史数据的分析,识别不同运行参数之间的关系并建立模型,从而对未知变量进行预测的方法,常用于航空装备生产系统的故障诊断与寿命预测。利用生产系统运行过程中监测到的状态数据和全寿命周期的历史数据等,采用统计方法、机器学习方法或深度学习方法,对生产系统的未来健康状态、故障间隔和稳定运行时间进行预估及推算,实现对生产系统的故障诊断及寿命预测<sup>[10]</sup>。常用的预测算法有决策树算法、贝叶斯网络、神经网络、随机滤波、粒子滤波、ARMA、支持向量机、相关向量机等。

### 1.5 模型评估与部署

在完成数据建模环节后,需要对PHM分析模型的质量、性能、可提供的价值进行评估,通常还需要抽样数据对模型进行验证。评估的指标主要包括准确率、召回率、计算速度、鲁棒性、可解释性等。通过将评估结果与设定的目标进行对照,判断是否满足业务理解环节需求。若满足即可进行模型的部署与应用,开发基于数据驱动的航空装备生产系统PHM应用系统,部署在生产系统中进行实际测试和运行使用。

## 2 基于数据驱动的航空装备生产系统PHM应用系统设计

面向航空装备生产系统故障监测与健康管理的需要,设计涵盖数据采集、数据处理、数据分析挖掘、智能管理应用在内的生产系统PHM应用系统(以下简称系统)。

### 2.1 系统总体设计

系统基于“云+端”技术架构。包括数据服务云平台和应用终端,满足生产企业针对不同应用场景的部署和应用需求。云平台支持企业多源数据的汇集、统一管理,支持内、外部的专家进行数据治理、分析建模、知识数字化沉淀,以及数据及模型的可视化展示与呈现。应用终端安装部署于制造现场,提供数据接入、实时处理分析和现场决策应用。系统基于“云+端”协同框架进行数据和知识的交互,一方面将航空装备生产现场采集的数据汇集到云平台,另一方面将云平台的生产系统状态监测、故障诊断、寿命预测等

相关数据分析模型和知识应用模型下发到应用端,实现现场智能决策应用。系统各服务组件功能内聚和服务间的松耦合,保证系统具有高可扩展性,能够实现高效、灵活部署与应用。系统总体架构如图2所示。

系统基于统一的基础开发框架,包括认证授权模块、多租户支持、Docker容器平台、统一系统监控平台以及统一的日志管理和操作审计,使得产品可以迁移到其他主流的PaaS平台,满足企业统一部署管理需求。整个平台基于DevOps技术实现快速开发迭代,持续交付。基础共性技术采用互联网成熟技术框架,保障系统稳定性和功能扩展性,从而更专注于系统业务建设目标的实现。

### 2.2 系统功能设计

数据服务云平台主要功能包括数据管理、数据资源化管理、数据建模和模型发布。数据管理提供多源异构数据的统一接入集成和存储管理功能,支持关系数据引擎、时序数据引擎、对象数据引擎,提供分布式查询引擎,方便按需从数据湖里抽取数据。数据资源管理通过资产建模构建统一的数字化生命周期档案,实现工业数据的有机组织,支持以业务视角为核心的数据资产管理,内置工业通用的资产模型作为基础,降低数据建模和数据管理的难度,提供工业对象维度的数据服务为上传数据分析和应用提供一致的可信的数据资源。数据建模模块提供业内先进的数据分析方法论及算子库应用指导,支持通过拖拽式进行模型研发、调试和运行,提供数据模型的集成环境和工具箱。模型发布模块负责模型的部署、应用与监控,对于建好的数据分析模型,选择相应的设备实例和运行策略即可进行模型部署运行,同时提供模型运行管理功能,可以查看模型运行状态、日志和结果。基于云平台建立的数据分析模型,在应用端实现包括生产系统故障诊断、状态监测、寿命分析、智能维护、质量分析、产能优化在内的综合应用。

“云+端”的部署方案和协同框架,解决了工业知识部署应用环境复杂、运维困难等应用难题,实现了云平台与应用端的协同部署应用。支持数据、模型、应用解耦分离的一键式发布部署,实现云侧研发和端侧应用。支持在云平台将模型推送/下载到应用端运行实现远处部署和在应用端按需下载导入模型部署运行。

### 2.3 系统应用实例

机械加工中心是一种典型的航空装备生产系统,航空装备大量的机身结构和发动机关键零件均为机械加工件。目前,主要的航空装备制造企业加工车间内配装了三轴、五轴的大型龙门立式加工中心以满足大批量订单需求。因此,在

生产过程中,机械加工中心的PHM就成为决定航空装备制造企业生产效能的关键因素。下面以机械加工中心为例,介绍基于数据驱动的航空装备生产系统PHM系统应用实例。

如图3所示,基于PHM应用系统“云+端”的技术架构,系统在端侧,也就是机加中心设备上布置了振动传感器和电流传感器对生产现场数据进行实时采集。设备在生产过程中可能发生的滚珠丝杠及螺母磨损、滚珠导轨磨损、润滑不良、滚珠丝杠及丝母座磨损、滚珠导轨磨损、润滑不足等潜在问题可以通过振动传感器获取数据;电流传感器则主要用于排查解决设备主轴不对称、电机故障、汽蚀、轴弯曲

等典型故障类型的数据采集。通过对端侧传感器采集得到的数据进行清洗、集成、转换后得到有效的生产系统数据,即可在云侧,通过PC或移动终端后台运行PHM全流程数据管理。PHM应用系统通过内置的模型,能够基于有效的生产现场数据自动计算出设备综合效率(OEE),自动统计设备停机时长,并自动识别出卡件缺料的状态,利用智能决策算法,实现机加中心的故障识别预测和智能运维。

机加中心的PHM应用系统支持故障报警数据的精确分析,基于设备工况的历史数据,统计出不同类型报警出现的频率,在标准预警阈值的基础上,通过机器学习等算法,

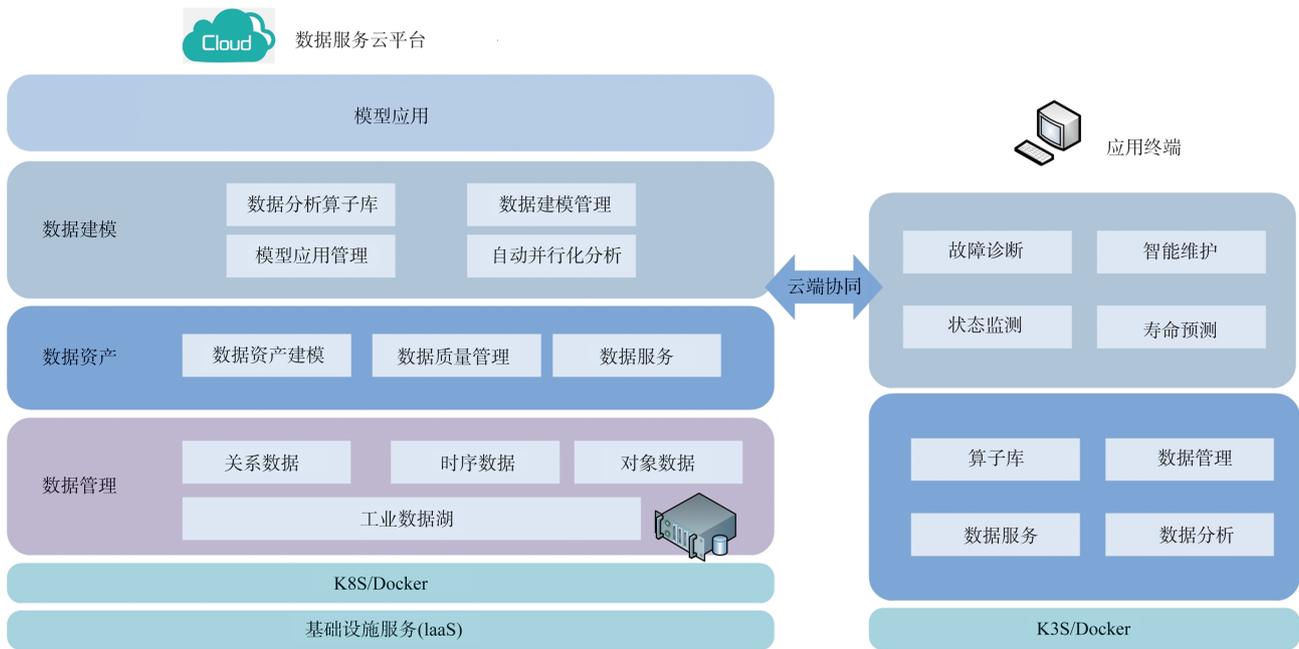


图2 PHM系统总体架构  
Fig.2 PHM system architecture



现场数据采集管理



图3 机加中心PHM应用系统数据采集及管理流程

Fig.3 Data acquisition and centralized management process of PHM application system in machining center

拟合得出自适应阈值模型。针对不同工况、不同设备建立不同生命周期的动态自适应阈值,帮助航空装备制造企业了解机加车间内最常见的故障类型和最易发生故障的设备,精准定位影响设备健康度的主要因素,有针对性地做出调整改善,以提高机加设备的可用度。

在可视化展示方面,PHM应用系统支持移动端App的告警推送、详情确认、实时运行浏览以及状态结果展示。当航空装备机加中心发生故障或停机时间过长,倍率、转速、进给超过设定值时会及时告警推送提醒,用户在收到告警推送后可以在移动端完成详情确认,设备运行状态在线浏览,最终形成状态结果报告。

### 3 结论与展望

大数据分析、传感器、物联网、数字孪生、人工智能等新一代信息技术的更新迭代不断推动着制造企业生产系统的变革,给生产系统PHM技术发展注入新的生命力,基于数据驱动的PHM技术获得了快速发展。本文提出一种针对航空装备生产系统的基于数据驱动的PHM方法和PHM应用系统的设计思路,为推动航空装备生产系统PHM技术向数字化、智能化转型提供了一种适用性较强的解决路径。值得说明的是,由于航空装备生产系统的种类多样、构成复杂,且差异较大,需结合目标对象的具体特点和业务需要,选择合适的数据采集清洗、融合集成、挖掘分析的方法和模型,并建立可靠的PHM平台,实现PHM技术的科学应用。

结合国家战略发展要求、技术发展趋势和航空装备生产企业现状,对航空装备生产企业和PHM技术发展提出如下几点思考与建议:

(1)加快传统制造业数字化转型升级,快速构建以数据驱动的智能工厂,提升企业运营管理、制造与工艺管理、生产过程管控、设备管理服务等环节的数字化,全面提升制造企业的精准决策能力及协作与运营效率。

(2)加强生产系统建设顶层谋划,在航空装备生产能力建设中,统筹考虑大数据分析、数字孪生、人工智能、工业物联网、边缘计算、云原生等领域的信息技术在传统制造业中的应用,推进生产工艺技术、管理技术与信息技术融合。

(3)发展生产系统PHM效能评估技术,建立PHM效能评估模型,形成评价指标体系以及行业标准,组建PHM专家团队,鼓励成立PHM专业评估机构,推动生产系统PHM技术标准化、规范化、科学化应用。

### 参考文献

- [1] Vogl G W, Weiss B A, Helu M. A review of diagnostic and prognostic capabilities and best practices for manufacturing[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2019, 30(1): 79-95.
- [2] 王建民. 工业大数据技术综述[J]. *大数据*, 2017, 3(6): 3-14. Wang Jianmin. Survey on industrial big data[J]. *Big Data*, 2017, 3(6): 3-14.(in Chinese)
- [3] 陈雪峰. 智能运维与健康管理[M]. 北京:机械工业出版社, 2018. Chen Xuefeng. *Intelligent maintenance and health management*[M]. Beijing:China Machine Press, 2018.(in Chinese)
- [4] Chapman P, Clinton J, Kerber R, et al. CRISP-DM 1.0 step-by-step data mining guide[M]. Berlin: Springer, 1999.
- [5] 李晗, 萧德云. 基于数据驱动的故障诊断方法综述[J]. *控制与决策*, 2011, 26(1): 1-9+16. Li Han, Xiao Deyun. Survey on data driven fault diagnosis methods[J]. *Control and Decision*, 2011, 26(1): 1-9+16. (in Chinese)
- [6] Pecht M G, Kang M. Prognostics and health management of electronics: Fundamentals, machine learning, and the internet of things[M]. U.S.: John Wiley & Sons, 2018.
- [7] 曲昌琦, 周锐, 杜宝, 等. 航空装备故障预测与健康管理的数据库研究[J]. *航空科学技术*, 2020, 31(12): 61-67. Qu Changqi, Zhou Rui, Du Bao, et al. Research on PHM data system architecture for aviation equipment[J]. *Aeronautical Science & Technology*, 2020, 31(12): 61-67.(in Chinese)
- [8] 程学旗, 靳小龙, 王元卓, 等. 大数据系统和分析技术综述[J]. *软件学报*, 2014, 25(9): 1889-1908. Cheng Xueqi, Jin Xiaolong, Wang Yuanzhuo, et al. Survey on big data system and analytic technology[J]. *Journal of Software*, 2014, 25(9): 1889-1908.(in Chinese)
- [9] 景博, 焦晓璇, 黄以锋. 面向飞机PHM的大数据分析与人工智能应用[J]. *空军工程大学学报:自然科学版*, 2019, 20(1): 46-54. Jing Bo, Jiao Xiaoxuan, Huang Yifeng. Massive data mining and artificial intelligence application for aircraft PHM[J]. *Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition)*, 2019, 20(1): 46-54.(in Chinese)
- [10] Mosallam A, Medjaher K, Zerhouni N. Data-driven prognostic method based on Bayesian approaches for direct remaining useful life prediction[J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2016, 27(5): 1037-1048.

## Data Driven PHM Method and Application System Design of Aviation Equipment Production System

Zhang Haochi, Zhang Xingyi, Cui Yun, Liu Jinyao

*Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China*

**Abstract:** With the increasing complexity and integration of aviation equipment production system, the comprehensive support capability and level of traditional aviation equipment manufacturing enterprises can no longer meet the requirements of active aviation equipment production. In order to effectively optimize the production efficiency of aviation equipment manufacturing enterprises and realize production system status monitoring, prognostics diagnosis, life prediction and intelligent operation and maintenance, data driven Prognostics and Health Management (PHM) technology has been widely concerned and applied. At present, PHM related researches mainly focus on the management and maintenance of the data system, and rarely involve the design of the application system architecture. Based on CRISP-DM model of big data analysis, this paper proposes a data driven PHM analysis process of aviation equipment production system from business understanding to model evaluation and deployment. It depicts the overall design and functional design ideas of PHM application system based on the “cloud+application” technical architecture, which can efficiently realize data resource and modeling in the PHM analysis process, and effectively support the intelligent decision-making of aviation equipment production system, which provides reference for promoting PHM technology innovation and application and transformation and upgrading of aviation equipment manufacturing industry.

**Key Words:** aviation equipment production system; CRISP-DM model; PHM; data driven; PHM application system