

# 基于全生命周期管理的产品实现标准体系构建研究

张龙

浙江云贸科技有限公司

DOI:10.12238/acair.v3i2.13553

**[摘要]** 随着制造业数字化转型深化,产品全生命周期管理逐渐成为企业核心竞争力的关键要素。传统管理模式在跨阶段数据整合、动态决策优化方面存在显著短板,难以适应复杂市场环境下的敏捷响应需求。智能算法与生命周期管理的融合创新为突破现有瓶颈提供了技术路径,机器学习在多源异构数据处理中的特征提取能力,遗传算法在资源配置优化中的全局搜索特性,粒子群算法在动态调度场景中的快速收敛优势,共同构成智能驱动型标准体系的技术支撑。构建覆盖产品全生命周期的标准化管理框架,既是实现数据价值闭环的必然选择,也是推动制造企业向服务型制造转型的重要基础,对于提升产业链协同效率具有战略意义。

**[关键词]** 全生命周期管理; 产品实现; 标准体系构建

**中图分类号:** TU973+.15 **文献标识码:** A

## Research on the construction of product implementation standard system based on full life cycle management

Long Zhang

Zhejiang Yunmao Technology Co., LTD.

**[Abstract]** As the digital transformation of manufacturing deepens, product lifecycle management is gradually becoming a key element of core competitiveness for enterprises. Traditional management models have significant shortcomings in cross-phase data integration and dynamic decision optimization, making it difficult to meet the agile response requirements under complex market environments. The innovative integration of intelligent algorithms and lifecycle management provides a technical path to break through existing bottlenecks. The feature extraction capabilities of machine learning in handling multi-source heterogeneous data, the global search characteristics of genetic algorithms in resource allocation optimization, and the rapid convergence advantages of particle swarm algorithms in dynamic scheduling scenarios collectively form the technical support for an intelligence-driven standard system. Building a standardized management framework that covers the entire product lifecycle is not only an inevitable choice for achieving a closed loop of data value but also an important foundation for promoting the transition of manufacturing enterprises towards service-oriented manufacturing, which has strategic significance for enhancing supply chain collaboration efficiency.

**[Key words]** whole life cycle management; product realization; standard system construction

### 引言

制造业智能化升级进程中,产品全生命周期管理面临着多维挑战。现有研究多聚焦于单一环节的优化改进,缺乏贯穿设计、生产、运维等全流程的体系化解决方案。标准体系构建需突破传统管理模式的线性思维,解决跨阶段数据壁垒、动态决策迟滞、资源利用低效等核心问题。本文以智能算法深度应用为突破口,通过机器学习实现历史数据价值挖掘,运用遗传算法构建多目标优化模型,借助粒子群算法提升实时调度效率,形成具有自优化能力的生命周期管理架构。研究重点在于建立算法应

用与业务场景的映射机制,开发可配置的模型构建工具链,探索标准体系的动态演进路径,为制造企业提供可落地的智能化转型方法论。

### 1 相关理论与技术基础

#### 1.1 全生命周期管理 (PLM)

全生命周期管理 (PLM) 作为系统性工程方法,贯穿产品从需求分析、设计开发、生产制造到运维退役的全过程。其核心在于通过数字化工具整合跨阶段数据流,建立统一的产品信息模型,消除传统分段式管理导致的信息孤岛。技术实现层面,PLM

依赖产品数据管理(PDM)系统构建结构化数据仓库,结合工作流引擎实现跨部门协同作业,利用版本控制技术追踪设计变更影响。在复杂产品场景中,基于模型的系统工程(MBSE)方法通过多学科联合仿真验证设计可行性,支持需求溯源与冲突消解<sup>[1]</sup>。当前研究趋势聚焦智能算法与PLM的深度融合,例如利用知识图谱关联异构数据提升检索效率,引入数字孪生技术实现物理实体与虚拟模型的实时映射。

### 1.2 机器学习算法

机器学习算法通过数据驱动范式挖掘产品全生命周期中的潜在规律,为决策优化提供数学支撑。支持向量机(SVM)基于结构风险最小化原则构建分类超平面(图1),其优化目标定义为公式(1):

$$\min_{w,b,\xi} \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N \xi_i \quad (1)$$

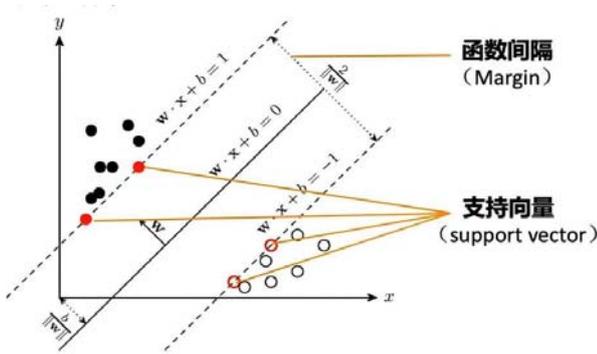


图1 支持向量机(SVM)分类

其中  $w$  为超平面法向量,  $b$  为偏置量,  $\xi_i$  表示松弛变量,

$C$  控制分类误差与间隔宽度的平衡。该算法在PLM早期故障诊断中,通过历史运维数据训练分类模型,识别设备振动信号的异常模式。某航空发动机制造商采集涡轮叶片运行时的振动频谱数据,提取时频域特征构建高维样本空间,利用SVM划分正常与异常状态边界,实现裂纹萌生阶段的预警,减少非计划停机次数。

随机森林(RF)基于决策树集成提升模型泛化能力,特征重要性评估采用基尼系数为公式(2):

$$Gini(D) = 1 - \sum_{k=1}^K \left( \frac{|C_k|}{|D|} \right)^2 \quad (2)$$

式中  $D$  为数据集,  $C_k$  为类别  $k$  的样本子集。某汽车冲压

件生产商在工艺设计阶段,采集模具压力、材料厚度与温度等多参数数据,利用随机森林量化各参数对成品平面度的影响权重,筛选出冲压速度与模具间隙为关键因子,据此调整工艺参数组合,使产品变形量降低且模具寿命延长。

### 1.3 遗传算法

遗传算法基于生物进化原理构建全局优化框架,通过模拟自然选择与遗传机制迭代搜索最优解。算法采用染色体编码表征问题变量,适应度函数评估个体优劣,选择操作保留高适应度个体,交叉与变异算子分别实现基因重组与多样性维持。

种群进化过程中,轮盘赌选择概率由个体适应度占比确定,如公式(3):

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j} \quad (3)$$

其中  $p_i$  为个体  $i$  的选择概率,  $f_i$  表示其适应度值,  $N$  为

种群规模。在PLM生产规划领域,某重型机械制造商针对多工序协同调度问题,将设备能耗、加工周期与资源冲突率编码为目标函数,利用遗传算法生成非支配解集<sup>[2]</sup>。初始种群基于历史调度方案初始化,采用两点交叉策略保留父代优良基因片段,自适应变异率动态平衡局部搜索与全局探索。优化后的调度方案有效降低产线空闲率并缩短订单交付周期。

### 1.4 粒子群优化算法

粒子群优化算法(PSO)模拟鸟群觅食行为,通过群体协作机制求解连续空间优化问题。算法将解空间映射为粒子群运动轨迹,每个粒子根据个体历史最优解与群体全局最优解动态调整飞行方向与速度。粒子速度与位置更新公式为(4):

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (pbest_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (gbest - x_i(t)) \quad (4)$$

式中  $v_i(t)$  为粒子  $i$  在  $t$  时刻的速度,  $x_i(t)$  为当前位置,

$\omega$  为惯性权重,  $c_1$  与  $c_2$  为加速系数,  $r_1$  和  $r_2$  为  $[0, 1]$  均匀分

布随机数,  $pbest_i$  为粒子历史最优位置,  $gbest$  为群体最

优位置。在PLM工艺参数优化场景中,某注塑成型企业针对多目标参数匹配问题,将模具温度、注射压力与保压时间编码为粒子位置向量,以产品翘曲度与成型周期为适应度函数,通过PSO迭代搜索帕累托最优解集。

## 2 标准体系构建方法论

### 2.1 数据采集与处理

工业场景中数据来源涵盖传感器时序信号、工艺参数日志、三维点云模型及质量检测图像,其异构性导致数据对齐与融合复杂度较高。数据预处理流程包含异常值剔除、时域同步对齐及特征降维,针对振动信号采用小波阈值去噪消除高频干扰,工艺参数日志通过滑动窗口均值平滑抑制随机波动。特征提取阶段,时频分析技术将振动信号转换为梅尔频谱系数,图像数据利用卷积神经网络提取边缘梯度特征,实现高维数据向低维语义

空间的映射。数据标准化采用Z-score归一化消除量纲差异,确保多模态数据在联合建模时的分布一致性。

## 2.2 产品生命周期模型构建

产品生命周期模型构建旨在通过结构化方法整合设计、制造、运维与回收阶段的多维度数据流,形成可追溯、可优化的闭环体系。模型架构基于MBSE(基于模型的系统工程)方法论,采用SysML语言定义需求、功能与物理层级的交互关系,通过多视图建模映射产品全生命周期的动态演化路径<sup>[3]</sup>。需求分析阶段采用QFD(质量功能展开)工具将客户需求转化为技术特性矩阵,利用层次分析法(AHP)量化需求优先级权重;系统建模阶段结合多物理场仿真与Petri网理论,构建制造资源约束下的工艺链逻辑拓扑,支持并发事件与资源冲突的动态解析。流程建模工具BPMN 2.0规范描述跨部门协作流程,定义任务节点间的数据交换接口与异常处理机制。模型验证阶段基于ISO 15288标准开展V形验证流程,通过需求回溯矩阵确保模型输出与初始需求的覆盖完整性。工具链集成ANSYS Workbench、Teamcenter与MATLAB/Simulink,建立跨平台模型交互接口,支持全生命周期数据的实时映射与协同优化。

## 3 实验与结果分析

### 3.1 实验设计

实验设计聚焦于验证工业机器人关节减速器寿命预测模型的有效性,研究对象为某型号RV减速器,实验数据整合装配误差、润滑状态与动态负载工况等多维度参数。实验对象选取五组不同累计运行时间的同批次减速器,数据来源包含高精度编码器信号、扭矩传感器输出与红外热成像仪温升序列<sup>[4]</sup>。表1列举了实验关键监测变量及其技术规范,其中振动烈度分析基于ISO 13373标准,扭矩波动检测遵循ISO 10816机械振动评估准则。

表1 工业机器人RV减速器实验监测变量

变量名称	传感器类型	参数范围	数据来源	采样频率
主轴振动位移	电涡流位移传感器	$\pm 200 \mu\text{m}$	在线监测系统	500 Hz
输出扭矩波动	应变式扭矩仪	0-500 N·m	HBM T40B	1 kHz
齿轮箱温升	红外热像仪	20-120° C	FLIR A655sc	30 Hz
润滑剂颗粒浓度	在线油液传感器	0-100 ppm	Parker Kittiwake	1 Hz

### 3.2 优化效果对比

优化效果对比聚焦于验证生命周期模型在制造资源配置与产品性能提升方面的综合效益,基于多目标优化算法与历史生产数据驱动的仿真验证。成本维度采用全生命周期成本(LCC)评估方法,涵盖原材料采购、工艺能耗、维护开销与回收处理费用,通过价值流图(VSM)识别非增值环节并重构供应链拓扑。性能指标依据QFD分解的关键特性矩阵,结合灰色关联分析量化参数优化对功能需求的贡献度。资源利用率评估引入OEE(设备综合效率)模型,融合时间稼动率、性能稼动率与良品率指标,采用价值流分析工具定位瓶颈工序。

### 3.3 算法性能评估

算法性能评估针对生命周期优化场景下的多目标求解能力展开,对比遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)及机器学习与数据挖掘(ML-DM)三类方法的适用性与鲁棒性<sup>[5]</sup>。

## 4 结语

本研究构建的智能驱动型标准体系,有效弥合了理论方法与工程实践的间隙。算法集群的协同应用模式突破传统优化技术的应用边界,形成覆盖产品全生命周期的决策支持能力。模型构建工具的模块化设计增强体系适应性,满足不同规模企业的个性化需求。实验验证表明该体系在资源配置优化、异常响应效率等关键指标上具有显著优势。研究成果为制造企业提供可扩展的智能化管理体系,其方法论对服务型制造转型具有示范价值。未来研究将聚焦行业知识图谱构建与跨平台数据融合,持续完善标准体系的动态演进机制,推动全生命周期管理向认知智能阶段迈进。

### [参考文献]

- [1]唐兰.构建综合管廊全生命周期技术标准体系的研究[J].地下空间与工程学报,2023,19(S01):41-50.
- [2]姚冰,朱晓飞.以标准化活动全生命周期为视角的标准化技术体系研究初探[J].航空标准化与质量,2024(2):6-10.
- [3]姚冰,朱晓飞.以标准化活动全生命周期为视角的标准化技术体系研究初探[J].航空标准化与质量,2024(2):6-10.
- [4]庞义辉,毕经龙,袁鹏喆,等.煤机装备全生命周期管理系统架构与关键技术[J].煤炭科学技术,2025,53(2):335-336.
- [5]张琛,英琪,把宁,等.基于邮政业全生命周期法的标准体系建立应用[J].邮政研究,2024,40(2):52-59.

### 作者简介:

张龙(1982-),男,汉族,浙江省温岭市人,本科,研究方向架构设计,产品生命周期管理。