

团 体 标 准

T/SAQ XXXX—XXXX

轨道交通 车载 PHM 系统 技术要求

Technical requirements for onboard prognostics and health
management (PHM) system in rail transit

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

上海市质量协会 发布



上海市质量协会

SHANGHAI ASSOCIATION FOR QUALITY



目次

目次.....II

前言.....IV

轨道交通 车载 PHM 系统 技术要求.....5

1 范围.....5

2 规范性引用文件.....5

3 术语和定义.....5

4 缩略语.....6

5 系统组成.....7

 5.1 架构图.....7

 5.2 部件级 PHM.....7

 5.3 列车级 PHM.....7

 5.4 PHM 移动终端.....8

6 技术要求.....8

 6.1 基本要求.....8

 6.2 通用性能要求.....8

 6.3 环境与安装适应性要求.....9

 6.4 功能要求.....10

 6.5 PHM 模型与算法要求.....11

7 检验规则.....13

 7.1 型式试验.....13

 7.2 系统集成检验.....13

 7.3 现场验收检验.....14

附录 A.....15

 A.1 外观检查.....15

 A.2 通用性能要求检验.....15

 A.2.1 安全完整性等级验证.....15

 A.2.2 预期功能的安全性验证.....15

 A.2.3 可靠性、可用性、可维护性检验.....15

A. 2. 4 实时性检验 15

A. 2. 5 数据存储性能检验 15

A. 2. 6 数据接入与传输性能检验 16

A. 2. 7 信息安全性能检验 16

A. 3 环境与安装适应性要求检验 16

 A. 3. 1 安装布线检验 16

 A. 3. 2 防护等级检验 16

 A. 3. 3 电磁兼容与防护检验 16

 A. 3. 4 绝缘性能检验 16

 A. 3. 5 耐压性能检验 16

 A. 3. 6 振动和冲击性能检验 17

 A. 3. 7 温度振动综合试验 17

 A. 3. 8 海拔适应性验证 17

A. 4 功能要求检验 17

 A. 4. 1 状态监测功能检验 17

 A. 4. 2 故障诊断功能检验 18

 A. 4. 3 寿命预测功能检验 18

 A. 4. 4 健康评估功能检验 18

A. 5 PHM 模型与算法要求检验 18

 A. 5. 1 PHM 模型检验 19

 A. 5. 2 PHM 算法测评验证 19

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由上海市质量协会归口。

本文件起草单位：上海申铁信息工程有限公司、上海申通地铁集团有限公司、中车南京浦镇车辆有限公司、上海泽高电子工程技术股份有限公司、同济大学。

本文件起草人：崔建岷、叶丹、梁荣青、邓奇、周黎明、马毅华、华敏、汪凌志、邓辰鑫、沈拓。

首期承诺执行单位：上海申铁信息工程有限公司、上海申通地铁集团有限公司、中车南京浦镇车辆有限公司、上海泽高电子工程技术股份有限公司、同济大学。



轨道交通 车载 PHM 系统 技术要求

1 范围

本文件规定了轨道交通机车车辆车载 PHM 系统的系统组成、技术要求与检验规则。

本文件适用于轨道交通机车车辆车载 PHM 系统的设计、开发、运用、维护，也适用于轨道交通机车车辆车载 PHM 系统技术要求的第一方评价、第二方评价、第三方评价。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 191-2008 包装储运图示标志

GB/T 4208-2017 外壳防护等级（IP 代码）

GB/T 21563-2018 轨道交通 机车车辆设备 冲击和振动试验

GB/T 21562 轨道交通 可靠性、可用性、可维护性和安全性（RAMS）规范及示例

GB/T 2423 电工电子产品环境试验

GB/T 25119-2021 轨道交通 机车车辆电子装置

GB/T 28029 轨道交通电子设备 列车通信网络（TCN）

GB/T 28808 轨道交通 通信、信号和处理系统 软件

GB/T 28809 轨道交通 通信、信号和处理系统 硬件

GB/T 40571-2021 智能服务 预测性维护 通用要求

GB/T 43441.1-2023 信息技术 数字孪生 第1部分：通用要求

GB/T 20271 信息安全技术 信息系统通用安全技术要求

GB/T 25068 信息技术 安全技术 网络安全

GB/T 28452 信息安全技术 应用软件系统通用安全技术要求

GB/T 32350.1-2015 轨道交通 绝缘配合 第1部分：基本要求 电工电子设备的电气间隙和爬电距离

TB/T 1484.1 机车车辆电缆 第1部分：动力和控制电缆

TB/T 1759 机车车辆布线规则

TB/T 3035 列车通信网络 多功能车辆总线（MVB）

TB/T 3248 机车车辆电子装置的安装

IEC 62439-2 工业通信网络 高可用性自动化网络 第2部分：用于自动化的介质冗余协议（MRP）

IEC 61375-3-4 轨道交通 列车通信网络（TCN）

IEEE Std 1588 网络测量和控制系统的精确时钟同步协议

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

状态监测 condition monitoring

监测与收集反映设备状态的信息和数据。

[来源：GB/T 40571-2021, 3.1]

3.2

故障诊断 fault diagnostics

确定故障的性质（种类、状况、程度）所采取的行动。

[来源：GB/T 40571-2021, 3.2]

3.3

健康评估 health assessment

评估系统健康状态的过程。

[来源：GB/T 40571-2021, 3.6]

3.4

预警 alert

当遇到选定的参数或其逻辑组合异常，要求提高警觉时，用于通知人员而设计的运行信号或警告信息。

[来源：GB/T 40571-2021, 3.7]

3.5

报警 alarm

当遇到选定的参数或其逻辑组合异常，要求采取纠正行动时，用于通知人员而设计的运行信号或信息。

[来源：GB/T 40571-2021, 3.8]

3.6

数字实体 digital entity

目标实体的数字化映射。

[来源：GB/T 43441.1-2023, 3.2]

3.7

数字模型 digital model

通过对目标实体的内外部特征、行为规律、关联关系等要素进行数字化映射，形成与目标实体相对应的数字化抽象描述。

[来源：GB/T 43441.1-2023, 3.3]

4 缩略语

下列缩略词适用于本文件。

BCU：制动控制单元（Brake Control Unit）

CCU：中央控制单元（Central Control Unit）

DCU：车门控制单元（Door Control Unit）

HVAC：空气调节系统（Heating, Ventilation and Air Conditioning System）

MDM：移动终端管理（Mobile Device Management）

MTBF：平均故障间隔时间（Mean Time Between Failure）

MTTR：平均修复时间（Mean Time To Repair）

PHM：故障预测与健康管理（Prognostics and Health Management）
RUL：剩余可用寿命（Remaining Useful Life）
SIL：安全完整性等级（Safety Integrity Level）
TCU：牵引控制单元（Traction Control Unit）

5 系统组成

5.1 架构图

轨道交通机车车辆车载 PHM 体系采用“部件级—列车级—地面级”分级架构，如图 1 所示。车载 PHM 系统包括部件级 PHM 与列车级 PHM。

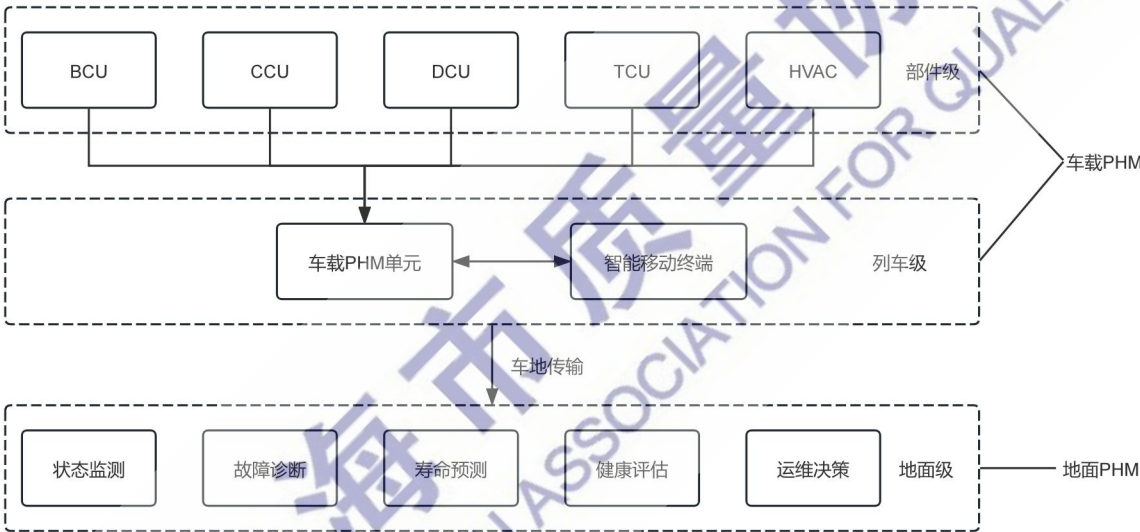


图 1 “部件级-列车级-地面级”分级 PHM 系统架构

5.2 部件级 PHM

部件级 PHM 针对车辆关键部件（如牵引电机、齿轮箱、制动单元等）部署，应符合下列要求：

- a) 部件级 PHM 应包括部件级 PHM 单元，并宜与列车级 PHM 共用 PHM 移动终端；
- b) 部件级 PHM 应实现状态监测与故障诊断功能；
- c) 部件级 PHM 应采集所辖部件子系统的实时运行状态数据，进行本地化存储，完成预警与报警等数字模型运算，并将状态数据及运算结果传输至 PHM 移动终端。采集频率应根据监测对象的信号特征和故障诊断需求确定，对于振动等快变信号应支持足以捕捉其特征频率成分的采样率。

5.3 列车级 PHM

列车级 PHM 在列车层面集成各部件级 PHM 信息及列车运行参数，应符合下列要求：

- a) 列车级 PHM 包括列车级 PHM 单元与 PHM 移动终端；
- b) 列车级 PHM 应实现状态监测、故障诊断、寿命预测、健康评估功能；
- c) 列车级 PHM 应采集列车各部件子系统的高频实时参数，进行本地化存储，完成预警与报警等数字模型运算，并将运算结果及相关参数传输至 PHM 移动终端，为司乘人员应急处置提供决策辅助；

d) 列车级 PHM 单元应与各部件级 PHM 单元对接,采集其输出参数、预警与报警结果,作为列车级数字模型运算的参考输入;

e) 列车级 PHM 宜利用车辆既有显示屏作为人机交互界面,并与既有显示屏系统进行数据对接;

f) 列车级 PHM 应将预警与报警等数字模型运算结果通过车地数据传输系统实时传输至地面 PHM 系统。

5.4 PHM 移动终端

PHM 移动终端是面向运维人员的移动式人机交互设备,应符合下列要求:

a) PHM 移动终端宜采用双系统架构,具备 2 个隔离的运行区域,区分 PHM 工作系统与非 PHM 工作系统。PHM 工作系统运行 PHM 相关应用,非 PHM 工作系统运行非 PHM 相关应用,两个系统的系统分区与硬件资源访问互相独立;

b) PHM 移动终端宜受 MDM 服务器端安全策略的管控,对 PHM 工作系统的相关接口与操作实施管理。

6 技术要求

6.1 基本要求

车载 PHM 系统应符合下列要求:

a) 应不影响车辆被监测对象的功能和性能,不得干扰车辆上其他系统的正常工作;

b) 应以列车统一的时间基准进行时间同步,宜采用列车控制网络时钟作为统一时间基准;

c) 各部件应装配正确,接插件应安装牢固,电子元器件应清洁、无腐蚀,接线装置应安装牢固;

d) 应采用工业级或以上的元器件;

e) 应具备自诊断功能,在每次初始化时验证系统是否正常工作,正常运行后应定期自检;自检失败时应提供系统故障信息;

f) 部件级 PHM 单元与列车级 PHM 单元的结构设计应适应车载安装环境,不得侵入车辆限界,并便于安装、维护和更换。

6.2 通用性能要求

6.2.1 安全完整性等级

车载 PHM 系统的安全完整性等级(SIL)应根据其在列车运行安全中的功能重要性进行评估和定级。SIL 的确定及全寿命周期管理应符合 GB/T 21562、GB/T 28808、GB/T 28809 的规定。

6.2.2 预期功能的安全性

预期功能的安全性应基于 FMEA(失效模式与影响分析)、FTA(故障树分析)、STPA(系统理论过程分析)等方法,对系统进行预期安全功能分析,对预期功能不足、或由可合理预见的误用所导致的危害和风险进行识别,并将此类风险控制在可接受范围。

6.2.3 可靠性、可用性、可维护性

车载 PHM 系统的可靠性、可用性、可维护性应符合下列要求:

a) 车载 PHM 主控单元(含边缘计算单元)的 MTBF 应不低于 1.0×10^5 h;

b) 车载 PHM 数据通信网关单元的 MTBF 应不低于 5.0×10^4 h,可用性应大于 99.99%;

c) 车载 PHM 移动终端的 MTBF 应大于或等于 2.5×10^4 h;

d) 车载 PHM 单元主要部件的设计使用寿命应不低于 15 年，机械结构件的设计寿命应不低于 30 年；

e) 车载 PHM 单元应便于维护和更换，平均修复时间（MTTR）应满足轨道交通运营维护需求。

6.2.4 实时性

车载 PHM 系统的实时性应符合下列要求：

a) 系统应实现在线故障诊断应实现实时报警，从数据输入到报警信息输出至车载呈现单元的端到端延迟不应大于 500 ms；

b) 车载 PHM 系统与车辆网络控制单元之间的命令响应时间不应大于 128 ms；

c) 车载 PHM 系统车地通信网关单元的数据处理与转发延迟（从网关收到列车级 PHM 输出数据到完成无线接口发送准备）不应大于 150 ms。车地无线链路（含 4G/5G/AP 等制式）的实际传输延迟应由系统记录并上报，作为运维参考数据，但不作为 PHM 系统的合格判定指标。

6.2.5 数据存储性能要求

车载 PHM 系统的数据存储性能应符合下列要求：

a) 车载本地存储容量应能存储不小于 168 h（7 天）的连续监测数据、故障诊断记录及健康评估结果；

b) 对于承担地面分析功能的 PHM 系统，其地面数据存储时间不应小于 720 h（30 天）；

c) 存储介质应采用工业级固态硬盘或等效非易失性存储器件，具备断电数据保护功能；

d) 存储数据应具备完整性校验和防篡改机制，确保数据可追溯。

6.2.6 数据接入与传输性能要求

车载 PHM 系统的数据接入与传输性能应符合下列性能要求：

a) 网络冗余备份应符合 IEC 62439-2 的要求；

b) 精确时钟同步应符合 IEEE Std 1588 的要求；

c) TCN 网关和接口应符合 GB/T 28029（所有部分）、IEC 61375-3-4、TB/T 3035 的要求。

6.2.7 信息安全性能要求

车载 PHM 系统的信息安全性能应符合下列要求：

a) 应提供安全互联、接入控制、统一身份鉴别、授权管理、恶意代码防范、入侵检测等功能；

b) 信息安全设计应符合 GB/T 25068（所有部分）、GB/T 20271、GB/T 28452 的规定；

c) 车载 PHM 系统与外部系统（地面系统、维护终端等）之间的数据传输应加密，加密算法应符合国家密码管理相关规定。

6.3 环境与安装适应性要求

6.3.1 安装布线要求

车载 PHM 系统的线缆应符合 TB/T 1484.1 的要求，系统设备安装和布线应遵守 TB/T 3248 的规定。

6.3.2 防护等级

车载 PHM 系统的防护等级应符合 GB/T 4208-2017 的规定。

安装于车辆内部的设备，其防护等级应不低于 IP42；安装于车辆外部（如车体底部、车顶等露

天区域)的设备,其防护等级应不低于 IP67。

6.3.3 电磁兼容与防护

电磁兼容性能应符合 GB/T 25119-2021 中 12.2.7、12.2.8、12.2.9 的规定;

6.3.4 绝缘性能

绝缘性能应符合 GB/T 25119-2021 中 12.2.10.1 的规定。

6.3.5 耐压性能

耐压性能应符合 GB/T 25119-2021 中 12.2.10.3 的规定。

6.3.6 振动和冲击性能

振动和冲击性能应能通过 GB/T 21563-2018 规定的测试。

6.3.7 海拔适应性

适用海拔上限应不低于 2500 m。

6.4 功能要求

6.4.1 状态监测功能

车载 PHM 系统的状态监测功能应符合下列要求:

- a) 应能采集关键部件的运行状态信号,包括但不限于转向架、牵引电机、齿轮箱、制动系统的振动、温度、转速等参数;
- b) 应对原始测量值进行预处理,包括滤波、降噪、去趋势项等信号处理操作,去除外部干扰或无效信号;
- c) 应对处理后的数据进行特征提取,从时域、频域或时频域获取能表征设备健康状态的特征量;
- d) 应对提取的特征量进行趋势分析、阈值比较或模式识别,形成能表征设备状态的结果数据;
- e) 状态识别结果应分类处理,宜分为正常状态、注意状态、异常状态三类;
- f) 状态监测应优先采用总线监测方式,直接从车辆控制系统获取现有传感器数据;对于现有传感器无法覆盖的监测需求,应采用附加传感器方式进行补充监测。

6.4.2 故障诊断功能

车载 PHM 系统的故障诊断功能应符合下列要求:

- a) 应结合实时运行数据与历史故障模式库,采用基于数据驱动的方法、基于机理模型的方法或基于经验知识的方法,识别可能发生的故障类型;
- b) 应结合系统结构模型、信号传递路径和故障传播机理,判断故障发生的具体位置或模块,定位精度应达到可更换单元级别;
- c) 应评估故障对当前行车安全及后续运行可靠性的影响程度,确定故障严重等级,故障严重等级可分为轻微、一般、严重、灾难性四级,各级别的划分准则应在系统设计文件中明确定义;
- d) 应根据故障评价结果,结合当前运行场景和相关规定,给出处置建议,处置建议包括维持运行、限速运行、就近停车和立即紧急制动。
- e) 应自动生成故障诊断报告,报告内容应包括故障描述、定位信息、严重等级、置信度评估、处置建议及维修方案;

f) 故障诊断应分为在线故障诊断与离线故障诊断两种模式：

- 1) 在线故障诊断应基于实时流式计算引擎，对实时数据进行处理，实现实时报警；
- 2) 离线故障诊断应基于大数据批处理平台，对历史运行数据进行深度挖掘。

6.4.3 寿命预测功能

车载 PHM 系统的寿命预测功能应符合下列要求：

- a) 应选择安全关键部件、高价值部件及具有明显退化轨迹的部件作为预测对象；
- b) 应对确定的预测对象持续开展状态监测，获取反映其健康状态的实时数据和退化特征；
- c) 应根据部件的退化阶段、数据质量和应用需求，确定预测时机，预测时机可基于时间触发、里程触发、状态触发或事件触发；
- d) 应根据部件特性、数据条件和应用场景，选择合适的预测方法，包括基于机理的方法、基于数据驱动的方法或混合方法；
- e) 应对预测结果进行置信度评估和准确性验证；
- f) 当预测结果与实际失效存在偏差时，应对预测方法进行修正。

6.4.4 健康评估功能

车载 PHM 系统的健康评估功能应符合下列要求：

- a) 应根据应用场景和部件特点，定义健康等级划分方案，健康等级应具有明确的状态描述和运维建议；
- b) 应从性能、可靠性、安全性、经济性等多维度构建能够表征设备健康状态的指标体系；
- c) 应根据应用场景及工况特点，确立健康基线、退化基线和故障基线，基线的设置应结合专家经验、历史数据和行业标准综合确定；
- d) 应将实时监测数据与已确立的状态基线进行对比，综合评估系统当前的健康等级；
- e) 应输出健康评估结果，评估结果应包括健康等级、健康指数、主要退化指标、维护时机。

6.5 PHM 模型与算法要求

6.5.1 PHM 模型要求

6.5.1.1 PHM 数字模型

PHM 数字模型应符合下列要求：

- a) 应包含几何模型，用于描述目标实体的外部形状、内部结构、尺寸、空间位置和拓扑关系；
- b) 应包含物理模型，基于物理、化学等基础科学原理构建，用于反映目标实体的工作原理和内在机制；
- c) 应包含行为模型，用于描述目标实体在外部环境和内部运行机制共同作用下的状态转移、属性变化和响应机制；
- d) 应包含规则模型，从法律法规、技术标准、知识经验、操作规程、历史数据或预定义策略中提取规则条目，并具有指令驱动、事件触发、状态触发、时间触发等触发条件。

6.5.1.2 PHM 数字模型构建

PHM 数字模型构建应符合下列要求：

- a) 应进行需求分析，明确数字模型建模的目标、功能需求、性能指标及约束条件；
- b) 应进行数据准备，包括目标实体相关数据的采集、标注、集成和融合，保证数据的准确性、完整性和一致性；

- c) 应进行单元模型构建，针对目标实体的各物理单元选择建模方法和技术，将数据转化为数字模型；
- d) 应进行模型组装，将单元模型组装为系统级模型；
- e) 应进行数字实体验证，检验数字实体输出与目标实体物理对象输出之间的差异；
- f) 当验证结果存在偏差时，应对模型参数进行修正。

6.5.1.3 PHM 数字模型维护

PHM 数字模型维护应符合下列要求：

- a) 应建立数据采集管理机制，确定关键数据、采集频率和方法；
- b) 应建立数据处理管理机制，规范数据处理的流程和算法；
- c) 应建立监控机制，检测数字实体的性能指标和异常情况；
- d) 应建立版本管理和文档管理机制，确保数字实体的可追溯性和可复用性；
- e) 应建立备份和恢复管理机制，防止模型数据的丢失和损坏；
- f) 应建立更新管理机制，基于真实数据和实际观测结果进行参数调整和修正；
- g) 应建立优化管理机制，通过精简模型结构、改进算法和提高计算效率优化模型。

6.5.1.4 PHM 数字模型管理工具

车载 PHM 系统应通过 PHM 数字模型管理工具对 PHM 模型进行统一管理，并应符合下列要求：

- a) 管理工具应能查看所有模型的类型、规则、逻辑、应用单位、涉及部件等信息及当前应用状态；
- b) 管理工具应结合平台模型预测结果和实车故障数据形成数据闭环，利用测试数据或实车数据对模型进行算法测评，支撑运维单位持续优化模型算法。

6.5.2 PHM 算法要求

6.5.2.1 测评对象

状态监测算法、故障诊断算法、寿命预测算法为基本测评对象。

6.5.2.2 测评流程

算法测评流程应符合下列要求：

- a) 测试准备：应包括测试申请、测评类型选择、样本数据库支持性判断；
- b) 算法测评：应包括模型准备、测试环境搭建、算法测试、算法评价；
- c) 算法调试：当算法测评结果不满足要求时，应进行算法调试和更新，并重新测试。

6.5.2.3 状态监测算法评价

状态监测算法定量测试结果的评价应符合下列要求：

- a) 合格线应为状态判别准确率大于 85%，且异常状态漏报率小于 15%。对于直接涉及行车安全的关键部件（如走行部、制动系统、牵引系统等），其异常状态漏报率应小于 10%；
- b) 优秀线应为状态判别准确率大于 95%，且异常状态漏报率小于 5%。

6.5.2.4 故障诊断算法评价

故障诊断算法定量测试结果的评价应符合下列要求：

- a) 合格线应为准确率、精确率、召回率均大于 80%；

- b) 优秀线应为准确率、精确率、召回率均大于 90%。

6.5.2.5 寿命预测算法评价

寿命预测算法定量测试结果的评价应符合下列要求：

- a) 合格线应为预测准确率大于 70%；
- b) 优秀线应为预测准确率大于 85%；
- c) 对于退化轨迹明显、数据充足的部件（如机械传动部件），预测准确率应不低于 80%；
- d) 对于退化机理复杂、数据稀疏的部件（如电子控制单元），可参照 a) 项合格线执行。

6.5.2.6 算法测试报告

算法测试报告应包括算法是否通过的结论以及测试过程的详细描述，包括测试环境搭建、样本集、测试指标、测试方法。算法测试报告还应包括对算法能力的综合分析：

- a) 泛化能力：基于测试指标分析算法泛化能力和场景适应性；
- b) 优化能力：说明算法是否具有自优化能力；
- c) 易用能力：说明算法部署配置要求的易用性。

7 检验规则

7.1 型式试验

7.1.1 基本要求

型式试验应在系统设备完成设计定型后、系统集成检验前，在实验室或专用测试场地进行。型式试验应由制造商完成，或委托具备相应资质的第三方检测机构执行，并出具型式试验报告。型式试验未通过的设备，不得进入系统集成检验阶段。

7.1.2 型式试验要求

型式试验应符合下列要求：

- a) 应完成车载 PHM 主控单元（含边缘计算单元）、数据通信网关单元、移动终端等各组成单元的独立试验；
- b) 环境适应性试验应按附录 A.2（高低温、交变湿热、低温存放）、A.3（防尘防水）、A.8（温度振动综合试验）的规定执行；
- c) 电磁兼容性试验应按 5.6 及附录 A.4 的规定执行，符合 GB/T 25119-2021 中 12.2.7、12.2.8、12.2.9 的要求；
- d) 绝缘与耐压试验应按 5.7、5.8 及附录 A.5、A.6 的规定执行；
- e) 振动和冲击试验应按 5.9 及附录 A.7 的规定执行；
- f) 电源适应性试验应按附录 A.15 的规定执行。

7.2 系统集成检验

7.2.1 基本要求

系统集成检验应在实验室或专用测试场地，依据系统设计方案和测试大纲，对系统的功能、性能和接口进行集成测试。

7.2.2 系统集成检验要求

系统集成检验应符合下列要求：

- a) 应完成各组成单元（主控单元、通信网关、移动终端等）的功能验证；
- b) 应完成系统级通信协议、数据接口和时间同步的兼容性测试；
- c) 应完成故障诊断、寿命预测、健康评估等核心算法模型的性能测评，测评方法按附录 A.13 的规定执行；
- d) 应完成附录 A 规定的各项环境适应性、电磁兼容性及其可靠性指标的验证。

7.3 现场验收检验

7.3.1 基本要求

车载 PHM 系统安装在轨道交通机车车辆上后，应进行现场验收检验。现场验收检验应由系统集成方与用户共同完成，检验记录应纳入车辆竣工文件。

7.3.2 现场检验要求

现场检验应符合下列要求：

- a) 应检查系统的安装布线是否满足 5.4 的要求，是否侵入车辆限界；
- b) 应在车辆实际运行工况下，验证系统与车辆网络的数据通信是否正常，命令响应时间应符合 5.16 b) 的规定；
- c) 应验证系统自诊断功能（5.1 e）在车载环境下的正确性；
- d) 应在模拟或实际故障注入条件下，验证故障诊断的实时报警功能及诊断准确率（5.15 a、b、c）。

附录 A (规范性) 检验方法

A.1 外观检查

外观检查应按 GB/T 25119-2021 中 12.2.2 的规定进行。

A.2 通用性能要求检验

A.2.1 安全完整性等级验证

应按下列方式进行安全完整性等级验证：

- 应核查 PHM 系统的安全完整性等级（SIL）评估报告，确认其定级结果；
- 对于提供安全相关功能（如紧急制动触发、限速建议等）的控制单元，应确认其是否满足相应的 SIL 等级要求；
- 应模拟 PHM 系统自身发生故障，检查其是否影响列车既有的安全运行功能。

A.2.2 预期功能的安全性验证

应按下列方式进行预期功能的安全性验证：

- 核查系统设计阶段是否开展了 FMEA（失效模式与影响分析）、FTA（故障树分析）、STPA（系统理论过程分析）等安全分析，并查阅分析报告；
- 核查是否对预期功能不足、或由可合理预见的误用所导致的危害和风险进行了识别，并确认相关风险已控制在可接受范围。

A.2.3 可靠性、可用性、可维护性检验

应按下列方式统计和计算可靠性指标：

- 应统计车载 PHM 主控单元（含边缘计算单元）的 MTBF，验证是否不低于 1.0×10^5 h；
- 应统计车载 PHM 数据通信网关单元的 MTBF 及可用性，验证是否大于或等于 5.0×10^4 h，可用性是否大于 99.99%；
- 应统计车载 PHM 移动终端的 MTBF，验证是否大于或等于 2.5×10^4 h。

A.2.4 实时性检验

应按下列方法进行实时性检验：

- 应输入故障数据，测量从数据输入到报警输出的端到端延迟，验证在线故障诊断是否实现实时报警；
- 应测试车载 PHM 系统与车辆网络控制单元之间的命令响应时间；
- 应测试车载 PHM 系统与地面 PHM 系统间的车地数据传输端到端延迟，统计单网情况下不大于 150 ms 的概率是否不小于 98%。

A.2.5 数据存储性能检验

应按照下列步骤进行测试：

a) 应用信号发生器替代状态感知单元，向车载 PHM 系统输入模拟生成数据，持续时长应不少于 48 h；

b) 应通过以太网口、USB 接口或无线方式提取存储的数据；

c) 应检查提取数据的完整性和正确性，判断车载数据存储容量。

A.2.6 数据接入与传输性能检验

应按下列方式进行数据接入与传输性能检验：

a) 核查网络冗余备份方案是否符合 IEC 62439-2 的要求；

b) 核查精确时钟同步方案是否符合 IEEE Std 1588 的要求；

c) 核查 TCN 网关和接口是否符合 GB/T 28029（所有部分）、IEC 61375-3-4、TB/T 3035 的要求。

A.2.7 信息安全性能检验

应按下列方式进行信息安全性能检验：

a) 验证系统是否提供安全互联、接入控制、统一身份鉴别、授权管理、恶意代码防范、入侵检测等功能；

b) 核查信息安全设计是否符合 GB/T 25068（所有部分）、GB/T 20271、GB/T 28452 的规定；

c) 验证车载 PHM 系统与外部系统（地面系统、维护终端等）之间的数据传输是否加密，核查加密算法是否符合国家密码管理相关规定。

A.3 环境与安装适应性要求检验

A.3.1 安装布线检验

应检查系统设备安装和布线是否遵守 TB/T 3248 的规定，线缆是否符合 TB/T 1484.1 的要求。

A.3.2 防护等级检验

应按下列要求进行防护等级检验：

a) 应按 GB/T 4208-2017 进行测试，检查车载 PHM 单元和 PHM 移动终端的防护等级；

b) 当装置可能暴露于油雾、盐雾、导电尘埃、二氧化硫等特殊污染物时，应按 GB/T 2423（所有部分）或供需双方商定的方法进行耐受能力试验。

A.3.3 电磁兼容与防护检验

应按下列标准进行电磁兼容检验：

a) 电源过电压试验应按 GB/T 25119-2021 中 12.2.7 的规定进行；

b) 浪涌、静电放电和电快速瞬变脉冲群抗扰度试验应按 GB/T 25119-2021 中 12.2.8 的规定进行；

c) 射频抗扰度试验（含射频场辐射抗扰度、射频场感应的传导抗扰度）应按 GB/T 25119-2021 中 12.2.9.1 的规定进行；

d) 射频发射试验（含辐射发射、传导发射）应按 GB/T 25119-2021 中 12.2.9.2 的规定进行。

A.3.4 绝缘性能检验

绝缘试验应按 GB/T 25119-2021 中 12.2.10 的规定进行。

A.3.5 耐压性能检验

耐压试验应按 GB/T 25119-2021 中 12.2.10.3 的规定进行，电源线与设备外壳之间施加规定的耐受电压（1000V 工频电压 1min），不应发生击穿或闪络。

A.3.6 振动和冲击性能检验

按照 GB/T 21563-2018 标准执行，试验结束后，应能通过 A.1 外观检查、A.10 和 A.11 性能试验。

A.3.7 温度振动综合试验

温度振动综合试验应按照下列步骤执行：

- a) 试验前，应按 A.1 的规定进行外观检查；
- b) 应将设备牢固地固定在振动台上，按表 A.1 规定的功率频谱密度（PSD）进行随机振动，每个轴向的试验时间应为 5 h；
- c) 振动试验期间，试验箱应以 5 °C/min 的变化速率在 -40 °C~+80 °C 的低温设定点和高温设定点之间循环；
- d) 试验结束后，应按 A.1 的规定进行外观检查，并按 A.9 和 A.10 的规定进行性能试验。

表 A.1 功率频谱密度规定

序号	频率断点	PSD (g^2/Hz)
1	10	0.03
2	35	0.05
3	120	0.02
4	250	0.01
5	400	0.005

A.3.8 海拔适应性验证

应核查系统的设计文件及测试记录，验证其适用海拔上限是否不低于 2500 m。

A.4 功能要求检验

A.4.1 状态监测功能检验

应按下列方式进行状态监测功能检验：

- a) 检查系统是否能够采集关键部件（包括但不限于转向架、牵引电机、齿轮箱、制动系统）的振动、温度、转速等运行状态信号；
- b) 提取存储的数据，检查采集数据的完整性、正确性和同步性，并检查采集数据的采样精度和采集速率；
- c) 验证系统是否对原始测量值进行预处理，包括滤波、降噪、去趋势项等信号处理操作；
- d) 验证系统是否对处理后的数据进行特征提取，从时域、频域或时频域获取表征设备健康状态的特征量；
- e) 验证系统是否对提取的特征量进行趋势分析、阈值比较或模式识别，形成表征设备状态的结果数据；

- f) 检查状态识别结果是否分类处理，宜分为正常状态、注意状态、异常状态三类；
- g) 核查系统是否优先采用总线监测方式从车辆控制系统获取现有传感器数据，对于附加传感器方式是否仅在现有传感器无法覆盖时采用。

A. 4. 2 故障诊断功能检验

应按下列方式进行故障诊断功能检验：

- a) 在模拟或实际故障注入条件下，验证系统是否能够结合实时运行数据与历史故障模式库，识别可能发生的故障类型；
- b) 验证系统是否能够结合系统结构模型、信号传递路径和故障传播机理，判断故障发生的具体位置或模块，定位精度是否达到可更换单元级别；
- c) 验证系统是否评估故障对当前行车安全及后续运行可靠性的影响程度，确定故障严重等级（轻微、一般、严重、灾难性四级），核查各级别划分准则是否在系统设计文件中明确定义；
- d) 验证系统是否根据故障评价结果给出处置建议（维持运行、限速运行、就近停车、立即紧急制动）；
- e) 验证系统是否自动生成故障诊断报告，报告内容是否包括故障描述、定位信息、严重等级、置信度评估、处置建议及维修方案。

A. 4. 3 寿命预测功能检验

应按下列方式进行寿命预测功能检验：

- a) 核查预测对象是否选择安全关键部件、高价值部件及具有明显退化轨迹的部件；
- b) 验证系统是否对确定的预测对象持续开展状态监测，获取反映其健康状态的实时数据和退化特征；
- c) 核查预测时机是否基于时间触发、里程触发、状态触发或事件触发；
- d) 核查所选预测方法是否根据部件特性、数据条件和应用场景确定，包括基于机理的方法、基于数据驱动的方法或混合方法；
- e) 验证系统是否对预测结果进行置信度评估和准确性验证；
- f) 核查系统是否在预测结果与实际失效存在偏差时对预测方法进行修正。

A. 4. 4 健康评估功能检验

应按下列方式进行健康评估功能检验：

- a) 核查是否根据应用场景和部件特点定义健康等级划分方案，各等级是否具有明确的状态描述和运维建议；
- b) 核查是否从性能、可靠性、安全性、经济性等多维度构建表征设备健康状态的指标体系；
- c) 核查是否确立健康基线、退化基线和故障基线，基线设置是否结合专家经验、历史数据和行业标准综合确定；
- d) 验证系统是否将实时监测数据与已确立的状态基线进行对比，综合评估系统当前的健康等级；
- e) 验证系统输出健康评估结果是否包括健康等级、健康指数、主要退化指标、维护时机。

A.5 PHM 模型与算法要求检验

A.5.1 PHM 模型检验

A.5.1.1 PHM 数字模型检验

应按下列方式检验 PHM 数字模型：

- a) 核查数字模型是否包含几何模型，用于描述目标实体的外部形状、内部结构、尺寸、空间位置和拓扑关系；
- b) 核查数字模型是否包含物理模型，基于物理、化学等基础科学原理构建，用于反映目标实体的工作原理和内在机制；
- c) 核查数字模型是否包含行为模型，用于描述目标实体在外部环境和内部运行机制共同作用下的状态转移、属性变化和响应机制；
- d) 核查数字模型是否包含规则模型，从法律法规、技术标准、知识经验、操作规程、历史数据或预定义策略中提取规则条目，并具有指令驱动、事件触发、状态触发、时间触发等触发条件。

A.5.1.2 PHM 数字模型构建验证

应按下列方式验证 PHM 数字模型构建过程：

- a) 核查是否进行需求分析，明确数字模型建模的目标、功能需求、性能指标及约束条件；
- b) 核查是否进行数据准备，包括目标实体相关数据的采集、标注、集成和融合，保证数据的准确性、完整性和一致性；
- c) 核查是否进行单元模型构建，针对目标实体的各物理单元选择建模方法和技术；
- d) 核查是否进行模型组装，将单元模型组装为系统级模型；
- e) 验证是否进行数字实体验证，检验数字实体输出与目标实体物理对象输出之间的差异；
- f) 核查当验证结果存在偏差时，是否对模型参数进行修正。

A.5.1.3 PHM 数字模型维护验证

应按下列方式验证 PHM 数字模型维护机制：

- a) 核查是否建立数据采集管理机制，确定关键数据、采集频率和方法；
- b) 核查是否建立数据处理管理机制，规范数据处理的流程和算法；
- c) 核查是否建立监控机制，检测数字实体的性能指标和异常情况；
- d) 核查是否建立版本管理和文档管理机制，确保数字实体的可追溯性和可复用性；
- e) 核查是否建立备份和恢复管理机制，防止模型数据的丢失和损坏；
- f) 核查是否建立更新管理机制，基于真实数据和实际观测结果进行参数调整和修正；
- g) 核查是否建立优化管理机制，通过精简模型结构、改进算法和提高计算效率优化模型。

A.5.1.4 PHM 数字模型管理工具验证

应验证 PHM 数字模型管理工具是否满足下列要求：

- a) 管理工具是否能查看所有模型的类型、规则、逻辑、应用单位、涉及部件等信息及当前应用状态；
- b) 管理工具是否结合平台模型预测结果和实车故障数据形成数据闭环，利用测试数据或实车数据对模型进行算法测评，支撑运维单位持续优化模型算法。

A.5.2 PHM 算法测评验证

A.5.2.1 测评流程验证

应验证算法测评流程是否包括下列阶段：

- a) 测试准备：是否包括测试申请、测评类型选择、样本数据库支持性判断；
- b) 算法测评：是否包括模型准备、测试环境搭建、算法测试、算法评价；
- c) 算法调试：当算法测评结果不满足要求时，是否进行算法调试和更新，并重新测试。

A.5.2.2 状态监测算法测试

A.5.2.2.1 状态判别准确率为正确判别样本数量与总样本数量的百分比，按式 A.1 计算：

$$A_{cm} = \frac{C_s}{S} \times 100\% \quad \text{A.1}$$

式中：

A_{cm} ——状态判别准确率；

C_s ——正确判别状态的样本数量（含将正常样本判定为正常状态的数量和将异常样本判定为异常的数量）；

S ——全部的样本数量。

状态判别准确率取值范围为[0,1]，数值越大表示算法性能越好。

A.5.2.2.12 异常状态漏报率为未识别到的异常数量与异常总数量的百分比，按式 A.2 计算：

$$U_r = \frac{M_s}{A_s} \times 100\% \quad \text{A.2}$$

式中：

U_r ——异常状态漏报率；

M_s ——未识别到的异常样本数量；

A_s ——全部的异常样本数量。

异常状态漏报率取值范围为[0,1]，数值越小表示算法性能越好。

A.5.2.3 故障诊断算法测试指标

A.5.2.3.1 故障诊断准确率为正确诊断的样本数与总诊断样本数的比值，按式 A.3 计算：

$$A_{cl} = \frac{\sum_{i=1}^n TP_i}{N} \times 100\% \quad \text{A.3}$$

式中：

A_{cl} ——准确率；

TP_i ——正确识别为*i*类别的样本数；

n ——样本的总类别数；

N ——总样本数。

准确率取值范围为[0,1]，数值越大表示算法诊断结果与真实情况的一致性程度越高。

A.5.2.3.2 故障诊断精确率（微平均）为正确诊断的正样本数与所有诊断为正样本数的比值，按式 A.4 计算：

$$P_{rmi} = \frac{\sum_{i=1}^n TP_i}{\sum_{i=1}^n (TP_i + FP_i)} \times 100\% \quad \text{A.4}$$

式中：

P_{rmi} ——精确率微平均；

TP_i ——正确识别为*i*类别的样本数；

FP_i ——错误识别为*i*类别的样本数；

n ——样本的总类别数。

精确率取值范围为[0,1]，数值越大表示被算法诊断为故障的样本与真实情况越符合。。

A.5.2.3.3 故障诊断召回率（微平均）为正确诊断的正样本数与真实正样本数的比值，按式 A.5 计算：

$$R_{emi} = \frac{\sum_{i=1}^n TP_i}{\sum_{i=1}^n (TP_i + FN_i)} \times 100\% \quad \text{.....} \quad \text{A.5}$$

式中：

R_{emi} ——召回率微平均；

TP_i ——正确识别为*i*类别的样本数；

FN_i ——将*i*类别识别为其他类别的样本数；

n ——样本的总类别数。

召回率取值范围为[0,1]，数值越大表示诊断算法能越完整地找出真实的故障样本。

A.5.2.4 寿命预测算法测试指标

A.5.2.4.1 预测准确率按式 A.6 和式 A.7 计算：

$$e(t_i) = r(t_i) - r_*(t_i) \quad \text{.....} \quad \text{A.6}$$

$$Ac(r, r_*) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-\left| \frac{r(t_i) - r_*(t_i)}{r(t_i)} \right|} \times 100\% \quad \text{.....} \quad \text{A.7}$$

式中：

$Ac(r, r_*)$ ——预测准确率；

i ——第*i*个样本；

N ——样本总数；

$e(t_i)$ —— t_i 时刻实际剩余使用寿命与预测剩余使用寿命之差；

$r(t_i)$ —— t_i 时刻的实际剩余使用寿命；

$r_*(t_i)$ —— t_i 时刻的预测剩余使用寿命。

预测准确率取值范围为(0,1]，数值越接近于 1 表示算法准确性越好。

A.5.2.4.2 预测均方根误差按式 A.8 计算：

$$RMSE(r, r_*) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [r(t_i) - r_*(t_i)]^2} \quad \text{.....} \quad \text{A.8}$$

式中：

$RMSE(r, r_*)$ ——均方根误差；

i ——第*i*个样本；

N ——样本总数；

$r(t_i)$ —— t_i 时刻的实际剩余使用寿命；

$r_*(t_i)$ —— t_i 时刻的预测剩余使用寿命。

$RMSE$ 取值范围为[0,+∞)，数值越小表示算法误差越小。

A.5.2.5 算法测试报告核查

应核查算法测试报告是否包括下列内容：

a) 算法是否通过的结论以及测试过程的详细描述，包括测试环境搭建、样本集、测试指标、测试方法；

b) 对算法能力的综合分析，包括：

泛化能力：基于测试指标分析算法泛化能力和场景适应性；

优化能力：说明算法是否具有自优化能力；

易用能力：说明算法部署配置要求的易用性。

A.5.2.6 代码实现正确性测试

应检查源代码是否符合相应编程语言的国家标准或行业公认的编程规范，并检查是否存在堆栈溢出、整数溢出、数组越界、缓冲区溢出等代码漏洞，确认诊断程序可正确实现预期功能且无报错。

A.5.2.7 软硬件平台兼容性测试

应按下列方法进行软硬件平台兼容性测试：

a) 在不同软硬件环境下对模型执行测试，记录各次诊断输出；

b) 计算智能诊断算法在不同软硬件环境下诊断输出的均方根误差比，验证一致性。