

团体标准

T/CSAE xx—20xx

电动汽车用驱动电机系统 智能运维指南 第3部分：预测性维护

Drive motor system for electric vehicles—
Intelligent operation and maintenance guide—
Part 3: Predictive maintenance

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

20xx-xx-xx 发布

20xx-xx-xx 实施

中国汽车工程学会 发布

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

目 次

前 言	II
引 言	III
1 范围	4
2 规范性引用文件	4
3 术语和定义	4
4 缩略语	5
5 总则	5
5.1 预测前瞻性与准确性	5
5.2 数据驱动与多源融合	5
5.3 技术经济性	5
5.4 决策导向与可靠性	5
6 预测性维护实施流程	5
7 需考虑的因素	6
7.1 确定目标与范围	6
7.2 预测性维护数据规划	7
7.3 预测方法选择	8
7.4 维护决策与优化	9
7.5 预测结果与维护建议	10
7.6 预测效果验证与评估	10
附 录 A （资料性） 可用于预测的状态监测参数示例	12

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》的规定起草。

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。

本文件是T/CSAE XXX《电动汽车用驱动电机系统 智能运维指南》的第3部分。T/CSAE XXX已经发布了以下部分：

- 第1部分：状态监测
- 第2部分：故障诊断
- 第3部分：预测性维护

本文件由电动汽车产业技术创新战略联盟提出。

本文件由中国汽车工程学会标准化工作委员会归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

引言

驱动电机系统是电动汽车的核心动力来源。对其开展智能运维，有助于提升其运行的安全性与可靠性。通过建立覆盖状态监测、故障诊断与预测性维护的技术体系，可为降低产品全生命周期风险提供支持。本文件拟由3部分构成。

——第1部分：状态监测。目的在于明确电驱动系统状态监测的规划设计、实施运行中需考虑的因素，为实现系统运行状态的清晰、自主监测提供方法指导与信息参考。

——第2部分：故障诊断。目的在于提供故障诊断的通用流程与可用方法，实现故障的自主分类、精准定位与等级划分，为制定高效、准确的故障诊断方案提供依据。

——第3部分：预测性维护。目的在于给出预测性维护的工作流程、寿命预测与维护管理等方面需考虑的因素与可用方法，为预测产品剩余寿命、实现视情维修与智能管理提供建议。

电动汽车用驱动电机系统 智能运维指南

第3部分：预测性维护

1 范围

本文件提供了电动汽车用驱动电机系统预测性维护实施的原则、流程及运行指导及建议。

本文件适用于电动汽车用驱动电机系统预测性维护的规划、设计、实施与效果评估，为技术人员、运维团队在智能运维体系中，基于状态监测与故障诊断结果开展设备健康状态预测、维护时机判断及维护策略制定提供程序指引。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；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 2298 机械振动、冲击与状态监测 词汇

GB/T 18488 电动汽车用驱动电机系统

GB/T 19596 电动汽车术语

GB/T 20921 机器状态监测与诊断 词汇

GB/T 23713.1—2024 机器状态监测与诊断 预测 第1部分：一般指南

GB/T 40571—2021 智能服务 预测性维护 通用要求

GB/T 43555—2023 智能服务 预测性维护 算法测评方法

3 术语和定义

GB/T 20921、GB/T 2298、GB/T 23713.1—2024、GB/T 19596、GB/T 18488 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

预测 prognostics

在设计参数范围内，通过故障征兆分析来预估将来状况和剩余寿命。

[来源：GB/T 23713.1—2024, 3.2]

3.2

剩余使用寿命 remaining useful life (RUL)

系统健康状况下降至定义的故障阈值前的剩余时间。

[来源：GB/T 23713.1—2024, 3.9]

3.3

预测性维护 predictive maintenance

根据观测到的状态而决定的连续或间断进行的维护，以监测、诊断或预测构筑物、系统或部件的条件指标。

[来源：GB/T 40571—2021, 3.5]

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

RUL：剩余使用寿命（Remaining Useful Life）

5 总则

5.1 预测前瞻性与准确性

预测性维护宜注重故障发展规律的趋势识别与剩余寿命的准确预测，确保维护决策具备足够的提前量和可靠性，实现从被动维修向主动预警的转变。预测结果应包含置信区间评估，明确不确定性范围，并充分考虑传感器精度、采样误差等因素的影响。

5.2 数据驱动与多源融合

预测性维护宜通过数据融合与协同分析提升预测的准确度与鲁棒性。应建立完善的数据质量管理体系，确保数据完整性、归档机制和多源数据有效融合。

5.3 技术经济性

在满足预测精度和时效性要求的前提下，预测方案的选择宜兼顾技术可行性、实施成本与维护效益，确保预测方案技术可行、经济合理。宜动态调整维护行动的触发阈值，基于不确定性大小优化资源投入。

5.4 决策导向与可靠性

预测性维护活动及其系统输出宜以支持运维决策为首要目标，预测结果宜明确指导维护策略的制定与优化。预测系统自身宜具备高可靠性和实用性，包括容错能力、实时性保障和持续改进机制。

6 预测性维护实施流程

预测性维护实施流程宜包括：确定目标与范围、预测性维护数据规划、预测方法选择、维护决策与优化、预测结果与维护建议、预测效果验证与评估。可根据实际需求，参考本章节确立适合自身特点的预测性维护流程。

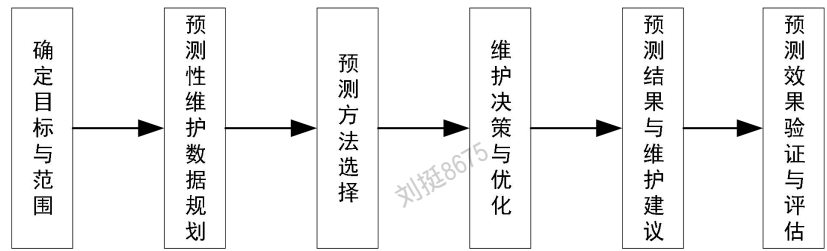


图 1 预测性维护实施流程图

以上流程主要工作宜包含如下内容：

- a) 确定目标与范围。明确预测性维护的目标，界定实施范围，识别关键性能指标及约束条件；
- b) 预测性维护数据规划。规划所需数据类型（如传感器实时数据、设备日志、环境参数）、来源，基于预测需求优化配置数据；
- c) 预测方法选择。结合故障特性、实施条件与约束、全生命周期成本等方面选择预测方法；
- d) 维护决策与优化。根据预测模型的输出结果，制定动态维护策略，结合业务规则与成本效益分析，优化维护计划；
- e) 预测结果与维护建议。输出预测结果并生成维护建议；
- f) 预测效果验证与评估。通过对比实际故障发生情况与预测结果，采用准确率等指标量化预测性能，评估预测性维护方案的有效性与收益，根据反馈迭代优化模型与流程。

7 需考虑的因素

7.1 确定目标与范围

7.1.1 确定流程

预测性维护目标与范围的界定宜遵循以下流程：

- a) 系统调研：收集设备历史数据、故障记录、维护成本等信息；
- b) 关键度排序：采用失效模式、影响及危害性分析（FMECA, Failure Modes, Effects and Criticality Analysis）等方法识别关键设备和故障；
- c) 可行性评估：从技术、经济等维度评估预测性维护的可行性；
- d) 范围确定：基于评估结果确定预测性维护的优先实施范围；
- e) 目标制定：根据范围确定具体可量化的预测性维护目标。

7.1.2 预测性维护目标

预测性维护目标的确定宜基于以下因素的考量：

- a) 业务目标导向：预测性维护目标应与组织整体的运维战略目标保持一致，重点考虑安全性提升、可靠性保障、成本优化等核心需求；
- b) 技术可行性：目标的设定应充分考虑当前监测能力、数据分析技术及预测模型的成熟度，确保目标具备技术可实现性；
- c) 经济合理性：目标预期收益应高于预测性维护系统实施与运行的成本，确保投入产出比的合理性。

7.1.3 预测性维护范围

预测性维护范围的确定宜综合考虑以下因素：

- a) 设备关键度分析：优先将对系统运行安全、可靠性有重大影响的关键设备纳入预测性维护范围；
- b) 故障可预测性：重点选择具有明显退化特征、发展规律可建模的故障；
- c) 数据可获得性：确保范围内设备的监测数据完整、准确，满足预测建模的需求；
- d) 资源约束：在有限资源条件下，根据故障风险等级和维护效益确定优先实施范围。

7.2 预测性维护数据规划

7.2.1 概述

预测性维护数据规划旨在为预测性维护所需数据的识别、获取、存储和管理提供系统性指导，确保预测活动具备充分、可靠的数据支撑。

7.2.2 数据需求分析

数据需求分析宜基于失效模式分析及故障诊断结果，重点考虑以下因素：

- a) 预测目标导向：根据待预测的失效模式及其退化特性，确定所需观测的关键特征信号类型及退化指标；
- b) 数据时间维度要求：明确数据的历史跨度要求，确保能够覆盖完整的设备生命周期或退化周期，支持趋势分析和模型训练；
- c) 多源数据融合：除实时监测数据外，需综合考虑历史维护记录、工况负载数据、环境数据等多源信息的协同使用，以提升预测精度；
- d) 数据完整性要求：预测性维护对数据缺失较为敏感，需确保数据在时间序列上的连续性。

7.2.3 数据源选择与配置

数据源的选择与配置宜遵循本系列标准第1部分T/CSAE xx—20xx中确立的基本原则，并结合预测性维护的特殊需求进行优化。具体实施时宜考虑以下方面：

- a) 数据源优先级策略
 - 1) 优先采用第1部分T/CSAE xx—20xx和第2部分T/CSAE xx—20xx已有的状态监测与故障诊断数据，作为预测的基础数据源；
 - 2) 为满足长期趋势分析需求，宜扩充历史数据存储周期，并增加工况与环境数据采集；
 - 3) 对于关键部件退化预测，可考虑增装专用传感器，以获取更高精度的性能退化数据。
- b) 预测导向的配置优化
 - 1) 测量点位布置需兼顾驱动电机系统故障敏感区域和性能退化表征区域；
 - 2) 采样频率设置除满足实时监测需求外，宜支持长期趋势分析所需的低频采样模式；
 - 3) 传感器选型需考虑长期稳定性与漂移特性，以满足预测模型对数据一致性的要求。

为支持上述数据源配置策略的有效实施，并在具体应用中明确关键监测参数，驱动电机系统关键部件的可用于预测的状态监测参数示例可参见附录A。

7.2.4 数据存储与管理

数据存储与管理宜满足以下要求：

- a) 存储格式：采用支持时间序列数据的结构化存储格式，便于趋势查询与批量处理；
- b) 存储策略：制定分级存储策略，对高频实时数据、低频趋势数据及历史归档数据实施差异化存储管理；
- c) 数据质量管理：建立数据完整性校验机制，对缺失数据宜采用合理的插值或重建方法；

d) 长期维护：定期对存储数据进行健康检查与一致性维护，确保长期可用的数据质量。

注：预测性维护数据规划宜与状态监测和故障诊断系统协调设计，确保数据链路的兼容性与一致性。

7.3 预测方法选择

7.3.1 预测方法

7.3.1.1 基于物理机理的方法

通过建立驱动电机系统关键部件的物理退化模型，结合实时监测数据实现剩余寿命预测。适用于失效物理明确、可建模的关键部件（如轴承、齿轮等），预测结果物理意义明确，外推能力强，但依赖精确机理模型，复杂系统建模难度大。

- a) 状态空间模型法：通过构建系统状态空间方程，利用观测器估计关键状态参数（如轴承磨损量、绝缘老化程度），基于状态演进规律预测剩余寿命；
- b) 失效物理模型法：依据材料疲劳、磨损等物理规律建立失效模型，通过累积损伤计算预测部件寿命。

7.3.1.2 基于数据驱动的方法

该方法利用历史运行数据，通过统计学习或机器学习算法挖掘性能退化规律。适用于数据积累充足、但机理复杂的系统，无需精确物理模型，适应性强，但预测精度依赖数据质量与数量，可解释性较弱。

- a) 时序预测方法：采用自回归积分滑动平均模型（ARIMA, Auto-regressive Integrated Moving Average）、长短期记忆网络（LSTM, Long Short-Term Memory）等时序模型，直接基于监测数据序列预测未来状态趋势；
- b) 统计学习方法：通过回归分析、生存分析等方法建立监测参数与剩余寿命的映射关系；
- c) 深度学习方法：利用深度神经网络提取退化特征，实现端到端的剩余寿命预测。

7.3.1.3 混合预测方法

该方法融合物理模型与数据驱动方法的优势，提升预测精度与可靠性。适用于对预测精度和可解释性要求均较高的关键系统，能兼顾物理可解释性与数据适应性，设计复杂，实现难度较大。

- a) 物理模型引导的数据驱动方法：利用物理模型约束数据驱动算法的搜索空间，增强预测结果的可解释性；
- b) 数据驱动辅助的物理模型：通过数据驱动方法校正物理模型参数，提高模型适应性。

7.3.2 方法选择需考虑的因素

选择预测方法时，宜系统考虑以下因素：

- a) 预测需求特性
 - 预测目标（RUL、性能衰退趋势等）；
 - 预测精度要求；
 - 预测结果的时间跨度需求。
- b) 数据条件
 - 可用数据的类型、质量、数量及时序完整性；
 - 是否包含完整的退化过程数据；
 - 数据采集频率与历史跨度。
- c) 技术可行性

- 方法复杂度与现有技术能力的匹配度；
- 计算资源需求与实时性要求的平衡；
- 模型可解释性需求。

d) 经济性因素

- 方法开发与实施成本；
- 运维维护成本；
- 预期效益评估。

e) 实施条件

- 与现有监测系统的集成兼容性；
- 技术团队的专业能力；
- 系统可扩展性要求。

注：预测方法的选择宜遵循迭代优化原则，随数据积累与技术发展持续改进。建议建立方法评估机制，定期对预测效果进行复核验证。

7.4 维护决策与优化

7.4.1 维护策略制定

维护策略的制定宜基于预测结果，结合电动汽车运行特性进行差异化设计，宜考虑以下因素：

a) 基于预测导向的维护策略

- 1) 宜建立基于RUL预测的分级响应机制。根据预测RUL值，设置注意、预警、行动等不同维护等级，并明确各等级对应的维护时间窗、具体操作内容和响应时限，确保在故障发生前适时安排维护干预；
- 2) 建议构建性能退化趋势与维护参数的动态关联机制。可根据实时监测到的退化速率和预测结果，自动调整维护周期和维护内容，实现对维护计划的动态优化；
- 3) 宜设置完善的多级维护阈值体系，包括注意、预警和报警等级别。针对每个预警级别，明确相应的响应流程、时间要求及具体维护措施，形成完整的预警响应闭环。

b) 运行模式适配的维护策略

- 1) 可根据车辆使用性质（如商用车、运营车辆、私家车等）和个体运行特征（如日均行驶里程、常用车速区间、负载情况等），制定差异化的个性化维护方案，优化维护周期和内容；
- 2) 针对驱动电机高转速轴承、永磁体、控制器功率模块等具有明显退化特征的关键部件，宜建立部件级寿命预测模型。基于预测结果制定预防性更换策略，明确更换时机、更换标准和操作规范；
- 3) 可根据部件重要性和故障风险程度，将维护策略分为日常维护、定期维护和预测性维护等多个层级。针对每个层级，宜明确触发条件、执行标准和质量验收要求，确保维护工作的规范性和有效性；
- 4) 宜建立预测结果与资源配置的联动机制，根据预测结果与维护资源情况动态调整维护时机和维护内容，实现维护决策的精准化和智能化。

7.4.2 维护资源规划

维护资源规划宜结合车辆厂商的技术特点、维护服务提供商的资源条件及实际运营需求进行协同规划，宜注重实效性和经济性，在确保维护质量的前提下，提高资源利用效率，降低维护成本。建议建立资源调度协调机制，实现资源的合理配置和高效利用。宜考虑以下方面：

- a) 宜根据预测性维护需求配置专业人员、专用设备和必备工具；

- b) 宜基于预测结果建立备件需求预测模型，实行分级库存管理，优化库存结构；
- c) 宜建立维护知识管理系统和决策支持平台，整合故障案例、维护经验和技術文档；
- d) 可建立资源动态调整机制，定期评估资源使用效果，根据需求变化及时优化配置方案。

7.4.3 维护策略优化

维护策略优化宜作为一个动态、持续的过程，基于实际维护活动的反馈与效果评价，对策略进行周期性评审与调整。具体实施宜考虑以下方面：

- a) 宜建立维护结果反馈机制，系统记录每次维护活动的执行情况、效果评估及异常处理记录；
- b) 可建立维护效果量化评价体系，定期对维护策略的有效性进行评估；
- c) 基于维护反馈和效果评价结果，宜建立维护策略的动态优化机制。优化过程可包括维护周期调整、维护内容优化、资源配置改进等方面。

7.5 预测结果与维护建议

7.5.1 预测结果输出

预测结果宜按照以下要求输出：

- a) 标准化格式：宜采用统一的数据结构，包含设备标识、预测时间、RUL估值、置信区间等核心字段；
- b) 可视化呈现：可提供趋势图表、退化曲线等直观展示方式，便于运维人员快速理解；
- c) 多维度信息：除数值结果外，宜包含预测方法说明、关键特征参数变化趋势等辅助信息。

7.5.2 维护建议生成

维护建议的生成宜考虑以下因素：

- a) 可操作性：建议内容应具体明确，包含维护时间、维护内容、所需资源等要素；
- b) 经济性：在确保系统安全的前提下，宜综合考虑维护成本与效益；
- c) 优先级：根据预测结果的风险等级，宜明确维护建议的紧急程度。

生成的维护建议宜包含以下要素：

- a) 维护时机：基于RUL预测确定最佳维护时间窗口；
- b) 维护内容：具体维护项目和操作要求；
- c) 资源需求：所需备件、工具和人员安排；
- d) 预期效果：维护后的性能改善预期。

7.6 预测效果验证与评估

7.6.1 验证方法

预测效果的验证具体实施时可考虑以下方法：

- a) 历史数据回溯验证。可利用完整的历史运行数据和维护记录，对预测模型进行回溯测试；
- b) 实时监测对比验证。可通过实时监测数据持续验证退化趋势预测结果的准确性，建议设置验证周期，定期输出验证报告；
- c) 现场或实验室实验验证。可在控制条件下系统或关键部件进行针对性实验，验证特定故障的预测能力及效果。

7.6.2 评估指标

预测效果的评估宜采用广泛认可的、标准化的指标与方法。可参考GB/T 43555—2023中8.3所规定的预测算法测试指标框架与计算方法，使用平均绝对误差（MAE, Mean Absolute Error）、均方根误差（RMSE, Root Mean Squared Error）、准确率等核心指标量化评估预测点值的准确性。对于需要考虑预测不确定性的场景，宜结合预测区间覆盖率（PICP, Prediction Interval Coverage Probability）、平均预测区间宽度（MPIW, Mean Prediction Interval Width）等指标综合评价预测区间的可靠性。

附录 A
(资料性)
可用于预测的状态监测参数示例

表 A.1 关键部件的可用于预测的状态监测参数

关键部件	电机轴承	电机绝缘	功率器件
状态监测参数	a) 振动信号 b) 噪声信号	a) 绝缘电容 b) 击穿电压 c) 介质损耗因数 d) 局部放电量	a) 导通电阻 b) 热阻 c) 阈值电压