

# 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2部分：故障诊断

Drive motor system for electric vehicles—  
Intelligent operation and maintenance guide—

Part 2: Fault diagnosis

(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 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	1
4 缩略语 .....	2
5 总则 .....	2
5.1 诊断一致性 .....	2
5.2 诊断时效性 .....	2
5.3 过程可靠性 .....	2
5.4 结论可信度 .....	2
5.5 技术经济性 .....	2
6 故障诊断实施流程 .....	2
7 需考虑的因素 .....	3
7.1 失效模式分析 .....	3
7.2 诊断数据规划 .....	3
7.3 诊断方法选择 .....	4
7.4 诊断结论与输出 .....	5
7.5 结果验证与评估 .....	6
7.6 诊断知识管理 .....	6
附 录 A （资料性） 驱动电机系统典型失效模式 .....	7

## 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2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。

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

# 电动汽车用驱动电机系统 智能运维指南

## 第 2 部分：故障诊断

### 1 范围

本文件提供了电动汽车用驱动电机系统故障诊断实施的原则、流程及运行的指导及建议。

本文件适用于电动汽车用驱动电机系统故障诊断的规划、设计、实施与结果应用，为技术人员、运维团队在智能运维体系中，基于状态监测数据开展故障定位、原因分析及严重程度判断提供程序指引。

### 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 7826—2012 系统可靠性分析技术 失效模式和影响分析（FMEA） 程序

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 22393 机器状态监测与诊断 一般指南

GB/T 22394.1 机器状态监测与诊断 数据判读和诊断技术 第 1 部分：总则

GB/T 32960.3 电动汽车远程服务与管理系统技术规范 第 3 部分：通信协议及数据格式

GB/T 43555—2023 智能服务 预测性维护 算法测评方法

QC/T 893 电动汽车用驱动电机系统故障分类及判断

### 3 术语和定义

GB/T 20921、GB/T 2298、GB/T 23713.1、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

**失效 failure**

产品执行规定功能能力的终止。

[来源：GB/T 7826—2012, 3.2]

#### 3.2

**失效模式 failure mode**

产品失效的表现形式。

[来源：GB/T 7826—2012, 3.5]

## 4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

FMECA：失效模式、影响及危害性分析（Failure Modes, Effects and Criticality Analysis）

FMSA：失效模式征兆分析（Failure Mode and Symptoms Analysis）

## 5 总则

### 5.1 诊断一致性

故障诊断宜采用统一的诊断逻辑、判定标准与数据规范，确保相同失效模式的诊断过程与结论在不同时间、不同场景下具有高度的一致性和可重复性。诊断系统的版本更新应保证算法与阈值的兼容性，维护诊断结果的长期可比性。

### 5.2 诊断时效性

故障诊断宜满足不同应用场景下对时效性的差异化需求。对于可能引发重大后果的严重故障，须建立快速诊断通道与应急响应机制；诊断系统的计算资源与算法设计应支持实时或近实时分析，确保及时输出诊断结论。

### 5.3 过程可靠性

诊断系统宜具备高度的抗干扰能力与容错机制，能够在噪声、工况波动或部分数据异常等条件下稳定运行并输出可靠结论。系统须定期校验与维护，保障其长期运行的可靠性与结果的可信度。

### 5.4 结论可信度

诊断结论宜附带置信度评估，明确其不确定性水平，并为重要结论提供推理过程与证据支撑。须建立结论验证与反馈机制，通过实际维修结果不断优化诊断准确性，提升结论的可接受度与实用性。

### 5.5 技术经济性

在满足诊断准确性和响应时效性要求的前提下，故障诊断宜统筹技术可行性、实施成本与诊断效益，确保故障诊断方案技术可行、经济合理。

## 6 故障诊断实施流程

故障诊断实施流程宜包括：系统失效模式分析、诊断数据的规划、诊断方法的选择策略、诊断结论的输出、结果验证与评估、诊断知识管理。可根据实际需求，参考本章节确立适合自身特点的故障诊断流程。

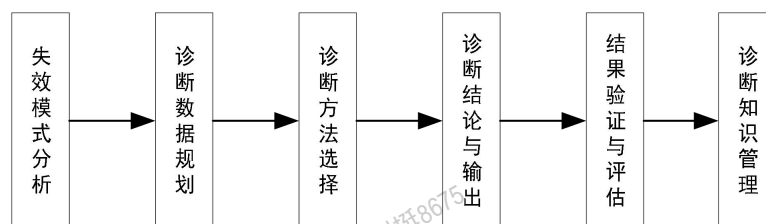


图 1 故障诊断实施流程图



以上流程的主要工作宜包含如下内容：

- a) 失效模式分析。通过梳理系统功能单元可能发生的故障类型、触发故障的内外因素，以及故障引发的连锁反应，系统识别被诊断对象的潜在失效形式、诱因及后果，量化故障的严重度、发生概率与可探测性。为后续诊断环节确定核心关注方向；
- b) 诊断数据规划。依据失效模式分析结果，界定数据类型（如传感器实时数据、设备日志、环境参数）、来源，基于诊断需求优化配置数据；
- c) 诊断方法选择。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诊断方法；
- d) 诊断结论与输出。结构化呈现诊断结果并规范化结论输出形式；
- e) 结果验证与评估。通过验证方法和量化指标评估诊断有效性；
- f) 诊断知识管理。对全流程产生的知识资产（如失效模式库、诊断规则库、模型参数集、典型案例库、专家经验等）实施结构化管理。

## 7 需考虑的因素

### 7.1 失效模式分析

开展以故障诊断为目的的失效模式分析，其核心方法如下：

- a) 失效FMECA：宜首先采用此方法，旨在系统性地识别驱动电机系统各部件的潜在失效模式、分析其根本原因及后果影响，并依据其发生概率、严酷度等级和可探测度进行危害度分析。该分析结果可用于确定需优先监测的失效模式排序，为诊断资源的分配提供决策依据。FMECA的实施流程可参照GB/T 7826给出的指导；
- b) FMSA：在FMECA基础上，宜进一步采用此方法，重点分析已识别失效模式所对应的、可被测量的物理或化学症状（特征信号）。通过综合评估症状的可检测性、与失效模式的关联度、以及所采用监测技术的适用性与诊断置信度等因素，为具体失效模式选择最适宜的监测与诊断方法。FMSA的实施可参照GB/T 22394.1给出的指导；
- c) 无征兆失效模式的处置策略：对于通过分析确认无可测量征兆的失效模式，其诊断程序的确立宜考虑转向可选的维修策略。可供选择的策略包括但不限于：老化筛选（初始测试）、视情维修、定期预防性维修、修复性维修或通过设计修改以消除该失效模式。

驱动电机系统的故障分类宜参考QC/T 893，其典型失效模式示例可参见附录A。

### 7.2 诊断数据规划

#### 7.2.1 概述

诊断数据规划旨在为诊断数据的识别、获取、存储和管理提供系统性指导，确保诊断活动具备充分、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结果，重点考虑以下因素：

- a) 诊断目标导向：根据待诊断失效模式的特性，确定所需观测的关键特征信号类型；
- b) 数据维度要求：明确数据的时间分辨率（采样频率）、空间分布（测量点位）及历史跨度要求；
- c) 多源数据融合：考虑不同数据源（如实时监测数据、历史维护记录、工况环境数据）的协同使用需求。

#### 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一部分T/CSAE xx—20xx中确立的基本原则，并结合故障诊断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。在状态监测数据基础上，宜根据诊断需求优化数据源选择：
  - 1) 优先采用T/CSAE xx—20xx中5.2.3所述的总线监测方式，充分利用系统已有参数实现基础诊断；
  - 2) 当总线数据无法满足特定故障诊断需求时，宜按照T/CSAE xx—20xx中5.2.3要求，采用附加传感器方式获取专项诊断数据；
  - 3) 对于复杂故障诊断，可结合总线数据与专用传感器数据。
- b) 诊断导向的配置优化。基于T/CSAE xx—20xx中5.2.4的测量位置选择原则，宜进一步考虑诊断需求：
  - 1) 测量点位布置需满足故障特征提取要求，重点覆盖故障敏感区域；
  - 2) 采样频率设置还需考虑诊断算法对数据质量的要求；
  - 3) 传感器选型需兼顾诊断精度需求与系统兼容性。

注：数据源的具体配置需根据T/CSAE xx—20xx中5.2.5的采样频率要求和5.2.6的数据格式规范执行，确保与状态监测系统的兼容性。

#### 7.2.4 数据存储与管理

数据存储与管理宜考虑以下要求：

- a) 存储格式：采用结构化数据格式，保证数据的可读性和可处理性；
- b) 存储策略：根据数据使用频率和重要性，制定分级存储策略；
- c) 质量管理：建立数据质量评估机制，包括完整性校验、一致性检查和准确性验证；
- d) 安全管控：制定数据访问权限管理策略，确保数据安全。

### 7.3 诊断方法选择

#### 7.3.1 故障诊断方法

##### 7.3.1.1 基于解析模型的方法

该方法通过建立被监测对象的机理模型模拟被监测对象的瞬态和稳态行为诊断故障，适用于系统机理明确、可精确建模的故障，诊断结果物理意义明确，但依赖精确机理模型，复杂系统建模难度大。包括但不限于以下方法。

- a) 状态估计法。通过被监测对象的数学模型的输出值或者状态值与状态观测器的输出值或者状态值进行比较，得到对应的残差值，进而通过判断残差值与实现设定的阈值的关系诊断故障；
- b) 等价空间法。通过系统的输入和输出的实际测量值检验系统数学模型的等价性（即一致性）以检测和分离故障。

##### 7.3.1.2 基于数据驱动的方法

数据驱动方法是指利用传感器采集的运行数据（如电流、电压、温度、振动等）结合机器学习、深度学习或统计模型，实现对系统健康状态（如故障检测、寿命预测、性能退化评估等）的智能化分析与预测，而无需依赖精确的物理模型或专家经验规则。适用于数据丰富但机理不明确的故障，适应性强、适用于非线性系统，结果可解释性较弱，对数据数量、质量要求高。一些数据驱动方法如下：

- a) 基于信号处理与分析的方法；
- b) 统计数据分析和案例推理；
- c) 基于人工智能的方法。

### 7.3.1.3 基于知识的方法

该方法通过对故障行为或症状的精确表述，依赖专家经验对故障逻辑进行评估和判断。适用于故障逻辑清晰、专家经验成熟的场景，知识可积累、解释性强，适应新故障能力有限。主要包括：

- a) 基于人工智能系统的专家系统的方法；
- b) 基于通过模糊规则模糊逻辑方法；
- c) 利用本体论构建电驱系统的结构化知识模型本体的方法；
- d) 通过故障树分析（FTA, Fault Tree Analysis）和贝叶斯网络(BN, Bayesian Network)实现的图模型的方法。

### 7.3.2 选择方法需考虑的因素

选择适合的诊断方法，宜从方法本身的技术特性、实施条件与约束、全生命周期成本等三方面进行考虑。

- a) 方法本身的技术特性
  - 解析模型方法：宜重点考量模型的精确性、线性/非线性特性、参数辨识难度等因素；
  - 数据驱动方法：宜重点考量数据质量、特征提取能力、算法复杂度与可解释性等因素；
  - 知识驱动方法：宜重点考量知识库的完备性、推理机制的可靠性等因素。
- b) 实施条件与约束
  - 数据条件：是否具备方法所需的数据（如模型类方法需机理数据，数据驱动方法需大量样本）；
  - 计算资源：是否满足方法的实时性要求（如深度学习通常需较高算力）；
  - 系统兼容性：方法与现有平台的集成能力（如专家系统需知识库支持）。
- c) 全生命周期成本
  - 开发成本：宜考虑模型建立或算法开发的难度与投入成本；
  - 维护成本：宜考虑模型/算法更新与优化需求的成本；
  - 效益评估：宜对预期提升的故障发现与处置效率进行综合效益评估。

## 7.4 诊断结论与输出

### 7.4.1 概述

诊断结论与输出是故障诊断程序的最终环节，旨在将数据分析结果转化为指导运维决策的规范化信息。诊断结论的输出宜确保其准确性、可解释性和可操作性，为后续的预警、报警及维护决策提供直接依据。

### 7.4.2 诊断结论的生成

生成诊断结论时，宜考虑如下因素：

- a) 结论需基于多源数据、多种方法的融合分析结果，避免单一证据误判；
- b) 宜评估并表述诊断结论的不确定性（如置信度、概率），为决策提供风险参考；
- c) 结论宜根据故障的严重程度、发展速度和影响范围进行分级和分类。

典型诊断结论要素宜包括：

- 故障部件/位置：明确发生故障或异常的子系统和具体部件；
- 失效模式：阐明具体的失效形式；
- 严重等级：依据预设标准判定故障的严重程度；
- 发展预测：评估故障的发展趋势；

- 置信度：给出诊断结论的可信程度；
- 时间信息：记录故障发生/被发现的时间戳。

### 7.4.3 诊断输出的内容与格式

为保障诊断信息的一致性与可用性，输出内容与格式宜考虑以下要求：

- a) 输出内容。诊断输出信息宜至少包含：
  - 1) 诊断结论（核心要素见6.4.2）；
  - 2) 所使用的原始数据特征及分析过程摘要；
  - 3) 诊断方法与模型信息；
  - 4) 诊断时间、诊断周期及执行主体。
- b) 输出格式。输出格式可参考如下要求：
  - 1) 输出格式宜结构化，可采用表格、JSON/XML数据块等形式，便于系统自动解析与处理；
  - 2) 输出格式宜可读，宜包含自然语言描述的结论摘要，便于运维人员快速理解。
  - 3) 输出格式的设计宜参照GB/T 32960.3等相关标准，确保与上层平台的数据交互兼容。

## 7.5 结果验证与评估

### 7.5.1 验证方法

诊断结果的验证宜采用以下一种或多种方法组合：

- a) 离线无损或有损检测：通过实际拆解检测，直接确认故障位置和模式，作为最可靠的验证依据；
- b) 运行试验验证：在受控条件下进行专项试验，复现故障现象并验证诊断结论；
- c) 专家经验验证：组织领域专家对诊断过程和结果进行评审，依托专业经验完成确认；
- d) 历史数据比对：与经过验证的历史诊断案例进行对比分析，评估结论合理性。

### 7.5.2 评估指标

故障诊断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8.2所规定的测试指标框架与计算方法，对诊断算法的准确率、精确率、召回率等核心性能进行量化评估。

在具体实施过程中，可根据电动汽车驱动电机系统故障诊断的具体特点和诊断目标的需求，选择适用的评估指标组合。对于多分类故障诊断问题，宜采用宏平均或微平均等统计方法进行综合评估；对于类别不平衡数据集的诊断效果评估，宜结合F1-score等综合指标进行分析。

## 7.6 诊断知识管理

为实现诊断能力的持续提升和知识积累，宜考虑的因素包括：

- a) 建立诊断案例库，系统记录成功的诊断经验和典型误诊案例；
- b) 定期对诊断知识进行梳理和更新，保持诊断系统的先进性；
- c) 建立诊断专家经验传承机制，促进诊断知识的共享和应用。

注：在诊断实施过程中，宜参考第1部分T/CSAE xx—20xx中关于数据安全性的要求，确保诊断数据在全生命周期的安全性。

附录 A  
(资料性)  
驱动电机系统典型失效模式

驱动电机系统典型失效模式包括驱动电机系统故障、工作环境异常故障两类，驱动电机典型失效模式具体包含：

- a) 工作环境异常：电机工作环境异常包括冷却系统异常、通信异常、低压供电异常、高压供电异常等；
- b) 电机系统故障：电机系统故障主要包括电机定子故障、转子故障、功率模块故障、硬件电路故障、轴承故障等。

表 A.1 电机系统典型失效模式

电机定子故障	转子故障	功率模块故障	硬件电路故障	轴承故障
1) 匝间短路； 2) 线间短路； 3) 相间短路； 4) 绕组开路。	1) 转子偏心； 2) 永磁体退磁； 3) 转子断条（感应电机）。	1) 短路； 2) 开路； 3) 键合线退化； 4) 焊层退化； 5) 栅氧退化。	1) 芯片故障； 2) 通信故障； 3) 电源故障； 4) 传感器故障。	1) 疲劳剥落； 2) 润滑失效； 3) 保持架损坏。