

ICS 43.120

CCS T47

刘挺8675

刘挺8675

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1部分：状态监测

Drive motor system for electric vehicles—
Intelligent operation and maintenance guide—
Part 1: Condition monitoring

(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

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 总则	2
4.1 总体原则	2
4.2 监测数据	2
4.3 监测系统	2
5 状态监测实施流程	3
6 需考虑的因素	3
6.1 确定目标与范围	3
6.2 确定监测参数	4
6.3 监测数据采集	5
6.4 数据分析处理	6
6.5 预警与报警	7
附 录 A (资料性) 电机驱动控制器功率器件在线结温监测示例	8
A.1 案例背景	8
A.2 结温监测技术方案	8

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1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

电动汽车用驱动电机系统 智能运维指南

第1部分：状态监测

1 范围

本文件提供了电动汽车用驱动电机系统状态监测实施的原则、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状态监测的规划、设计、实施与运维管理活动，为技术人员、运维团队开展智能运维中的状态监测工作提供程序指引。

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 14412 机械振动与冲击 加速度计的机械安装
- 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 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

3 术语和定义

GB/T 20921、GB/T 2298、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

智能运维 intelligent operation and maintenance

以保障安全可靠运行、降低全生命周期维护成本为目标，融合大数据分析及人工智能等技术手段，持续开展状态监测、故障诊断与预测性维护的技术活动集合，构成覆盖“状态感知-异常识别-趋势预测-决策优化”的闭环动态过程。

3.2

状态监测 condition monitoring

系统性地获取、分析设备/系统的运行状态参数，以评估其当前状态，进行预警或报警，为故障诊断、寿命预测、运维决策等提供依据的活动。

3.3

监测系统 condition monitoring

由传感器、数据采集装置、分析算法及交互模块等构成的集成化技术系统，是实施状态监测活动的物理载体。

4 总则

4.1 总体原则

4.1.1 整体考量

状态监测宜综合考虑其机械、电气、热管理等多物理场耦合特性，系统规划监测项目与布局。

4.1.2 安全可靠

状态监测的实施以保障驱动电机系统的安全稳定运行为根本目标，并通过构建高可靠的监测体系来支撑该目标的实现。

4.2 监测数据

4.2.1 真实性

监测数据宜能准确、客观地反映驱动电机系统的真实运行状态。用于状态监测的测量参数应具备良好的可重复性，以确保数据趋势分析的可靠性。数据的绝对准确性应满足识别故障特征的基本要求，当采用趋势分析时，测量的可重复性比绝对准确性更为重要。

4.2.2 完整性

监测数据的记录宜包含完整的上下文信息，以确保数据可被准确解读与追溯。记录的参数信息宜包括测量值、单位、日期和时间、测量位置、测量准确度以及必要的趋势图或历史数据曲线。

4.2.3 一致性

监测数据在系统内、外部交换时，宜保证其格式、精度、单位和语义的一致性。宜采用统一的数据模型和通信协议，确保数据在整个采集、传输、处理链条中的可比性与可解读性。

4.2.4 时效性

数据采集、处理与反馈的时效性宜满足状态监测目标的需求。对于实时故障预警等场景，系统应具备实时或近实时的数据处理能力；对于长期性能评估，则应确保数据能满足趋势分析所需的周期性要求。

4.3 监测系统

4.3.1 可靠性

监测系统应具备高度的稳定性和容错能力，确保能够长期、可靠地执行数据采集与处理任务。系统关键硬件（如传感器、数据采集单元）的选型应基于其平均无故障工作时间（MTBF, Mean Time between Failures）等可靠性指标，且系统设计宜便于维护，平均修复时间（MTTR, Mean Time to Repair）最短。系统应具备一定的鲁棒性，在部分组件或数据异常时，能降级运行或发出自诊断报警，保障基础功能的连续性。

4.3.2 适用性

监测系统的能力设计应与状态监测的目标紧密匹配。在满足监测核心需求的前提下，系统的复杂度和技术路径选择应追求合理的投入产出比，兼顾技术先进性与经济性。监测方案的选择宜优先评估现有资源的可用性。

4.3.3 安全性

监测系统应具备必要的数据安全防护能力，确保监测数据在传输、存储、访问过程中的机密性、完整性和可用性。

4.3.4 持续优化

监测系统应具备持续优化与演进的能力。需定期评审系统的有效性（如预警准确率），并利用积累的历史数据和运维反馈，优化报警与预警阈值。同时，应跟踪新技术发展，适时对系统进行升级，以保持其长期效能。

5 状态监测实施流程

状态监测实施流程宜包含以下环节：确定目标与范围、确定监测项目、监测数据采集、数据分析处理以及预警与报警。

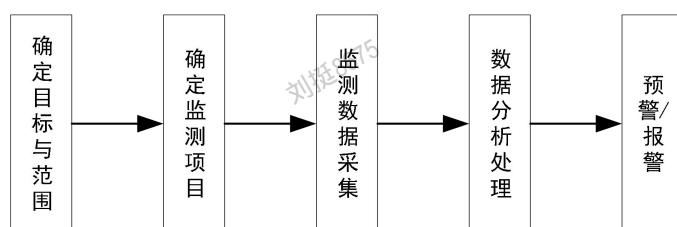


图 1 状态监测实施流程图

以上实施流程宜包含如下内容：

- 确立监测目标与范围。基于驱动电机系统的功能特点、关键故障模式及运维需求，界定监测的总体目标，并明确监测覆盖的物理对象、关注的运行状态以及可用的数据资源，最终确定监测工作旨在解决的业务问题与边界；
- 确定监测项目。根据已确立的目标与范围，为驱动电机系统选择合适的监测项目；
- 监测数据采集。选择数据采集方式，如总线读取或附加传感器等方式，规范化采集监测数据并记录；
- 数据分析处理。利用适宜的分析方法对采集的数据进行处理，提取状态特征，评估系统当前健康状态，识别异常或性能退化趋势。
- 预警与报警。根据分析结果，对照预设阈值或模型，触发分级预警或报警并提供清晰的报警信息，为运维决策提供即时输入。

6 需考虑的因素

6.1 确定目标与范围

6.1.1 监测目标

状态监测目标的确定，宜考虑（但不限于）以下方面：

- f) 分析状态监测活动旨在支持的高层业务目标，例如提升驱动电机系统运营安全、保障可靠性、降低全生命周期成本、优化维护策略或满足法规要求；
- g) 基于历史运行及维护数据、故障诊断以及预测性维护需求，识别驱动电机系统的关键故障模式，并确定监测的优先级；
- h) 评估现有技术（如传感技术、数据分析算法）对识别出的关键故障模式进行有效监测与诊断的能力和成熟度；
- i) 进行经济性分析，权衡状态监测系统投入（如传感器、数据系统、运维成本）与预期收益（如减少非计划停机、避免重大损坏、延长设备寿命）之间的平衡点。

6.1.2 监测范围

状态监测范围的界定，宜考虑（但不限于）以下边界：

- a) 明确状态监测所覆盖的物理系统范围，例如，是涵盖驱动电机、控制器的整套驱动电机系统，还是仅针对其中的某个子系统或部件；
- b) 明确状态监测所关注的系统状态，例如，是仅监测运行状态下的参数，还是同时包含待机、启动、停机等瞬态或特殊状态；
- c) 明确状态监测的数据来源与类型，例如，是仅利用系统本身已有的数据，还是需要新增专用传感器；是仅基于实时/准实时数据，还是融合历史数据与维护记录；
- d) 基于当前技术水平和资源条件，合理界定状态监测系统所能实现的能力，例如，是实现故障的预警与报警，还是进一步为深层次的故障定位、寿命预测与维护管理提供数据支撑。

6.2 确定监测参数

6.2.1 概述

选择监测参数宜覆盖5.1所确定的目标与范围，并综合考虑技术可行性、经济性及后续数据分析需求。

6.2.2 监测参数

对于电动汽车用驱动电机系统，宜监测的参数包括：

- 电机转速；
- 电机转矩；
- 直流母线电压；
- 控制器工作电流；
- 控制器温度；
- 电机温度。

对于驱动电机，宜监测的参数包括：

- 电机转速；
- 转子温度；
- 绕组电流；
- 直流母线电压；
- 电机温度；
- 角位置；
- 振动；

- 噪声；
- 绕组电阻；
- 绕组电感；
- 绝缘电压；
- 绝缘漏电流。

对于电机控制器，宜监测的参数包括：

- 直流母线电压；
- 控制器供电电压；
- 控制器工作电流；
- 控制器电容容值；
- 开关频率；
- 导通电压/电阻；
- 功率器件结温。

电机驱动控制器功率器件在线结温状态监测示例参见附录A。

6.3 监测数据采集

6.3.1 数据采集方式

6.3.1.1 总线监测方式

此方式通过车辆总线（如CAN总线）直接读取电机驱动控制系统内部已有的参数。其优势在于无需外加传感器与采集设备，实施便捷、成本较低，适用于获取电机、驱动器及整机的控制参数与基础状态参数。

6.3.1.2 附加传感器方式

当系统无法提供或现有数据不满足特定状态监测要求时，宜采用此方式。通过安装专用传感器来获取目标参数，选择传感器时宜综合考虑监测目标对准确度、采样频率及安装位置的要求。

选择传感器测量位置及安装方式时，宜考虑以下因素：

- a) 安全性：测量位置与安装应确保不对设备正常运行及人员安全构成风险；
- b) 环境影响：安装位置的环境条件（如温度、湿度、电磁干扰）应在传感器工作规格范围内；
- c) 测量品质：位置选择应保证能获取具有足够信噪比、能代表设备真实状态的特征信号；
- d) 监测成本：在满足测量目标的前提下，宜选择性价比高的传感器与安装方案；
- e) 可接近性与可维护性：位置应便于传感器的安装、调试、校准及后期维护。

注：使用振动传感器对电机进行监测时，其安装宜按照GB/T 14412的要求。

6.3.2 采样频率

采样频率的确定，需综合考虑拟监测的故障类型、其发展速率以及信号本身的变化率。在满足监测目标的前提下，宜选择经济高效的方案。不同物理量的信号特性差异较大，以下为常见信号的推荐采样频率参考值：

- 温度信号：宜不低于10 Hz；
- 振动信号：宜不低于10 kHz；
- 电机电流、电压信号：宜不低于1 kHz；
- 电机转矩、转速信号：宜不低于100 Hz。

6.3.3 数据格式

为便于数据的交互与处理,电动汽车用驱动电机系统的状态监测数据宜进行结构化处理。其数据格式宜按照GB/T 32960.3的要求执行。

6.3.4 参数记录

监测参数的记录宜包括下列信息:

- 测量值、单位;
- 日期和时间信息;
- 测量位置;
- 测量的准确度;
- 趋势图和变化曲线、历史数据、记录长度。

6.4 数据分析处理

6.4.1 概述

监测数据分析处理的目的,在于将采集到的原始数据转化为可用于评估系统健康状态的特征信息。宜根据5.1所确定的目标与5.2所设计的方案,选择并组合适当的数据处理方法,以有效识别状态变化、早期故障特征或性能退化趋势。

6.4.2 分析方法的类型与选择

数据分析方法的选择宜基于监测参数的类型、故障模式的特征以及数据本身的性质。常用方法包括但不限于:

- a) 时域分析:适用于分析信号随时间变化的直接特征,如均值、有效值、峰值、波形指标等,常用于振动、电流等信号的初步判断;
- b) 频域分析:适用于将信号分解为频率成分,以识别与特定机械部件(如轴承、齿轮)故障相关的特征频率,常用方法包括快速傅里叶变换、包络谱分析等;
- c) 短时频域分析:适用于分析频率成分随时间变化的非平稳信号,常用方法包括短时傅里叶变换、小波分析等;
- d) 模型与数据驱动分析:适用于建立系统模型或利用历史数据训练算法进行状态识别与预测,如状态观测器、机器学习模型等。

注:选择时需权衡不同方法的复杂度、对先验知识的需求、计算资源消耗与分析精度。

6.4.3 分析处理的通用流程

监测数据的分析处理宜遵循一个逻辑流程,该流程通常包括以下环节:

- a) 数据预处理:对原始数据进行清洗、去噪、剔除异常值等操作,以提高数据质量;
- b) 特征提取:利用5.3.2所述方法,从预处理后的数据中计算能够表征系统状态的特征量;
- c) 特征选择与融合:从提取的特征中筛选出对状态变化最敏感、最相关的特征,并可进行多特征融合,形成综合性的状态指标;
- d) 状态评估:将处理后的特征或指标与基线、阈值或模型输出进行对比,完成对系统当前状态的初步评估。

6.4.4 监测数据分析处理需考虑的因素

规划数据分析处理程序时,宜考虑以下因素:

- a) 计算资源：所选方法的计算复杂度是否与现有的硬件处理能力相匹配；
- b) 实时性要求：分析处理是需要在线实时完成，还是可以离线进行；
- c) 基线数据的可获得性：用于对比的健康状态基线数据是否充足、可靠；
- d) 结果的可解释性：分析结果是否易于被运维人员理解和用于决策。

6.5 预警与报警

6.5.1 概述

预警与报警是状态监测程序的关键决策环节，旨在基于数据分析结果，及时识别系统状态的异常变化或劣化趋势，并为后续维护决策提供依据。宜建立分级的预警与报警机制，以实现差异化的响应策略。

6.5.2 状态等级与阈值设定

规划数据分析处理程序时，宜考虑以下方面：

- a) 等级划分。为有效区分状态严重程度，宜建立分级的预警与报警体系。常见的等级可包括：
 - 1) 正常：状态特征量在预期范围内波动；
 - 2) 注意（或预警）：状态特征量出现显著变化或偏离基线，提示需加强监控；
 - 3) 异常（或报警）：状态特征量明显异常，指示可能存在故障，需计划干预；
 - 4) 严重（或紧急报警）：状态特征量严重超限，指示故障可能随时发生或正在发生，需立即干预。
- b) 阈值设定方法。阈值的确定宜有据可依，可考虑的方法包括：
 - 1) 基于历史健康数据统计分析（如均值与标准差）；
 - 2) 基于设备设计规格或理论模型计算；
 - 3) 基于行业标准、法规要求或类似产品经验。

注：阈值可设置为静态值，也可根据运行工况、负载变化等因素设计为动态值。

6.5.3 预警与报警信息的管理

预警与报警信息的管理宜建立规范的流程，确保信息从生成、传递到处理的全过程清晰、可追溯。具体实施时宜考虑以下方面：

- a) 信息内容：触发的预警或报警信息宜清晰、明确，宜包含（不限于）以下要素：时间、监测点位/部件、状态特征量名称、当前数值、所处等级、阈值信息；
- b) 触发与消警：宜明确预警与报警的触发条件（如持续时长、频次）和消警条件（如数值恢复正常、经人工确认处理完毕），以避免误报和漏报。

6.5.4 预警与报警机制的评审与优化

预警与报警机制确立后，宜定期评审其有效性。评审需考虑的因素可包括：

- 预警与报警记录的准确性（误报率、漏报率）；
- 阈值设置的合理性（是否过于敏感或迟钝）；
- 根据运行经验的积累和数据的丰富，对阈值和等级进行动态优化。

附录 A (资料性)

电机驱动控制器功率器件在线结温监测示例

A.1 案例背景

功率器件（如绝缘栅双极型晶体管IGBT）的结温是影响电机控制器可靠性及寿命的核心因素之一。结温的异常升高直接关联到器件的性能退化与失效，是状态监测中需重点关注的特征参量。然而，现有电机控制器设计方案中通常不具备功率器件结温在线监测功能，本附录给出的技术方案，旨在为进行功率器件结温在线监测提供技术参考与思路启发，具体实施的技术方案和参数宜根据实际产品特性和应用场景进行调整与验证。

A.2 结温监测技术方案

A.2.1.1 确定监测目标与范围

A.2.1.1.1 业务目标

通过实时监测IGBT结温，预警过热风险，避免因结温超标导致的器件失效，提升控制器可靠性并降低维护成本。

A.2.1.1.2 监测范围

Si基IGBT功率模块在运行工况下的结温变化，监测范围涵盖器件在运行期间的瞬态结温。

A.2.1.2 确定监测项目

基于结温与器件失效的强关联性，确定核心监测参数为：

- 导通压降 (V_{CE})；
- 集电极电流 (I)。

A.2.1.3 监测数据采集

A.2.1.3.1 标定数据采集

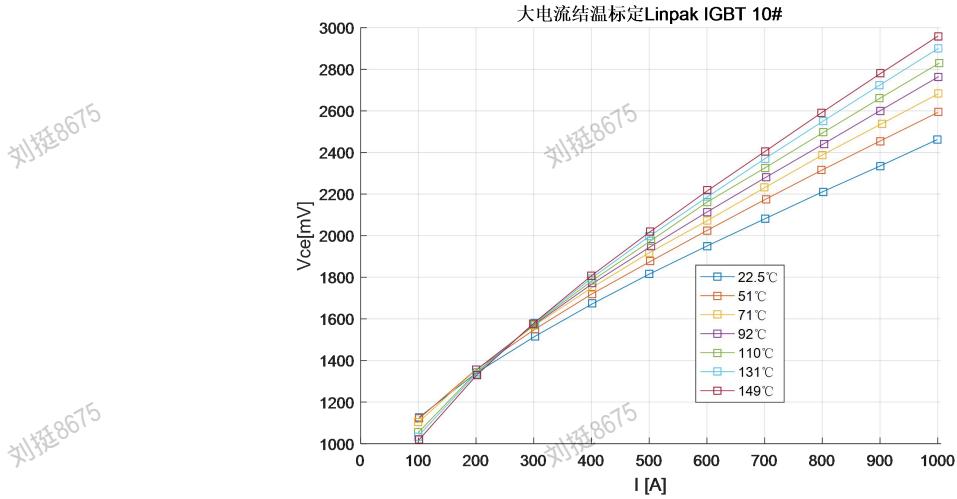
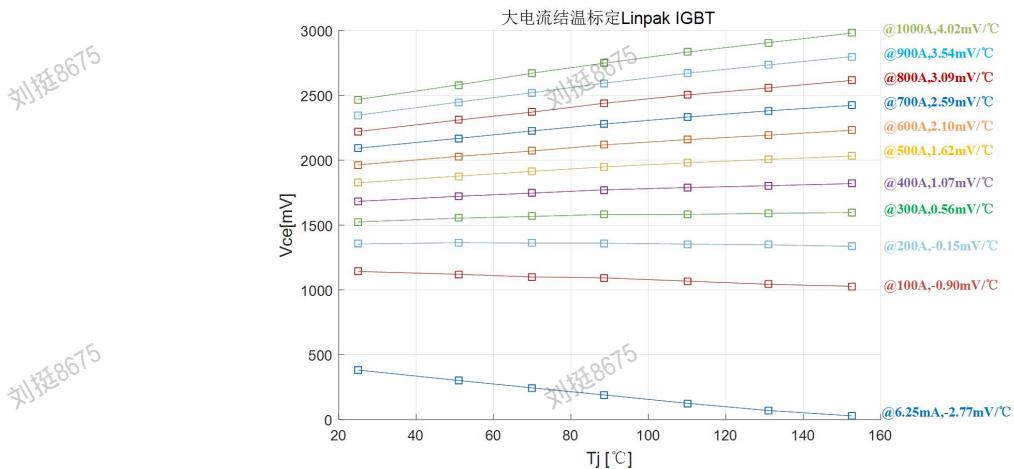
通过半桥单脉冲测试电路，在可控条件下采集结温与电参数的映射关系：

- a) 方法：在加热台设定不同温度 (T_j)，对器件施加窄脉冲 (120μs) 导通，同步记录 T_j 、 I 、 V_{CE} ，形成标定数据集；
- b) 数据记录：包括测量值、单位、环境温度、测量时间等完整信息，确保可追溯性。

刘挺8675

刘挺8675

刘挺8675

图 A.1 不同温度下 V_{ce} 与电流对应标定数据曲线图 A.2 不同电流下 V_{ce} 与结温对应标定数据曲线

A. 2. 1. 3. 2 在线数据采集

采用附加传感器方式，在控制器运行时实时采集 V_{CE} 和 I 。采样设置如下：

- 时机：选择电流值600-1000A的导通中期进行采样，以降低噪声影响。
- 频率：每个结温采样周期内进行8次过采样（采样时间15μs），同步采集 V_{CE} 和 I 。
- 时序控制：通过控制器双定时中断实现同步，确保采样与开关频率对齐。

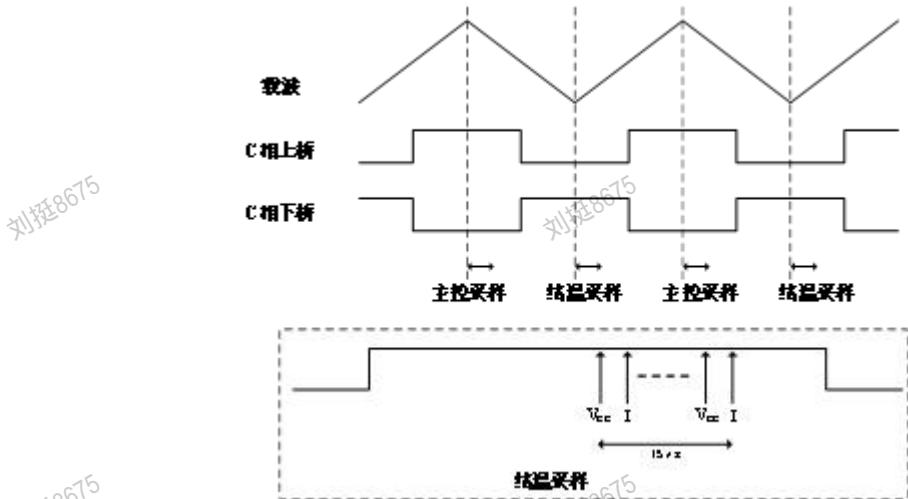


图 A.3 结温在线采样时序

A.2.1.4 数据分析处理

数据分析处理并计算结温的步骤如下：

- 数据预处理：对采集的 V_{CE} 和 I 数据进行滤波去噪，取均值作为有效输入；
- 特征提取：基于标定数据（图A.1、图A.2）建立的 $T_j=f(V_{CE}, I)$ 映射模型，代入实时 V_{CE} 和 I ，计算当前结温；
- 状态评估：将计算结温与器件最大允许结温（150℃）对比，判断是否超限。

A.2.1.5 预警与报警机制

等级划分如下：

- 正常：结温 $< 120^\circ\text{C}$ ；
- 注意： $120^\circ\text{C} \leq \text{结温} < 130^\circ\text{C}$ （提示加强监控）；
- 异常： $130^\circ\text{C} \leq \text{结温} < 150^\circ\text{C}$ （需主动降功率运行）；
- 严重：结温 $\geq 150^\circ\text{C}$ （立即停机）。

报警信息：包含时间、器件位置、结温值、所处等级等，通过控制器通信接口输出。