

## Technical Article

## 借助支持边缘 AI 的 MCU 优化实时控制系统中的系统故障检测



Michael Wang 和 Zhen Yu

当前关于人工智能 (AI) 和神经网络的讨论主要集中在生成应用 (生成图像、文本和视频)，很容易忽视 AI 将为工业和基础设施应用中的电子产品带来变革的实际示例。

不过，虽然在电机驱动器、太阳能 (如图 1 所示) 和电池管理应用的实时控制系统中采用 AI 不会像新的大型语言模型那样引起大量关注，但使用边缘 AI 进行故障检测可以显著影响系统的效率、安全性和生产力。



图 1. 太阳能电池板阵列

在本文中，我将讨论集成式微控制器 (MCU) 如何增强高压实时控制系统中的故障检测功能。此类 MCU 使用集成神经网络处理单元 (NPU) 运行卷积神经网络 (CNN) 模型，帮助在监测系统故障时降低延迟和功耗。通过将边缘 AI 功能集成到用于管理实时控制的同一 MCU 中，可以帮助您优化系统设计，同时增强整体性能。

## 电机轴承和太阳能电弧故障

要实现电机驱动和太阳能系统的可靠运行，需要进行快速且可预测的系统故障检测，以帮助减少错误警报，同时还需要监测电机轴承异常和实际故障。支持边缘 AI 的 MCU 可以监测两种类型的故障：

- 当电机轴承出现异常情况或老化时，会发生电机轴承故障。检测这些故障对于防止意外故障、减少停机时间和降低维护成本至关重要。
- 太阳能电弧故障是指当电流通过意外路径（如空气）时发生的电弧放电。太阳能电弧故障通常由太阳能系统中的绝缘击穿、连接松动或其他故障引起。放电会产生强烈的热量，从而导致火灾或电气系统损坏。监测和检测太阳能电弧故障有助于防止危险事件，并确保太阳能系统的安全性和可靠性。

如果没有响应式监测，系统可能会因实际故障或错误警报而发生意外停机或系统故障，从而影响运营效率和操作员安全。例如，光伏逆变器中的误报可能会导致系统停机，需要进行检查，从而影响生产力。带电电弧漏检也会增加火灾或系统损坏的风险。

除了 MCU 之外，一些电机轴承故障监测方法还使用多个器件来实现实时控制，通过振动分析进行监测、温度监控和声学测量。然后，这种离散化方法使用基于数据的规则检测来监测潜在故障，这需要手动解析，并且可能会错过早期故障，或者无法准确检测故障类型。

同样，电弧故障检测的传统方法是分析频域中的电流信号，然后应用基于阈值的规则来检测电弧故障信号。但这两种方法都需要大量的系统专业知识，并且自适应性和灵敏度都受到限制，从而限制检测精度。此外，向系统中添加用于故障监测的分立式器件和用于电机控制的专用实时控制 MCU 会增加系统的复杂性。

基于边缘 AI 的集成式故障检测功能在 TMS320F28P550SJ 等实时 MCU 中本地运行 CNN 模型，有助于提高故障检测率、避免误报，同时提供更好的预测性维护。借助边缘 AI，这些系统可以学习并适应环境，从而优化实时控制、提高整体系统可靠性、安全性和效率，同时减少停机时间，请参阅图 2。

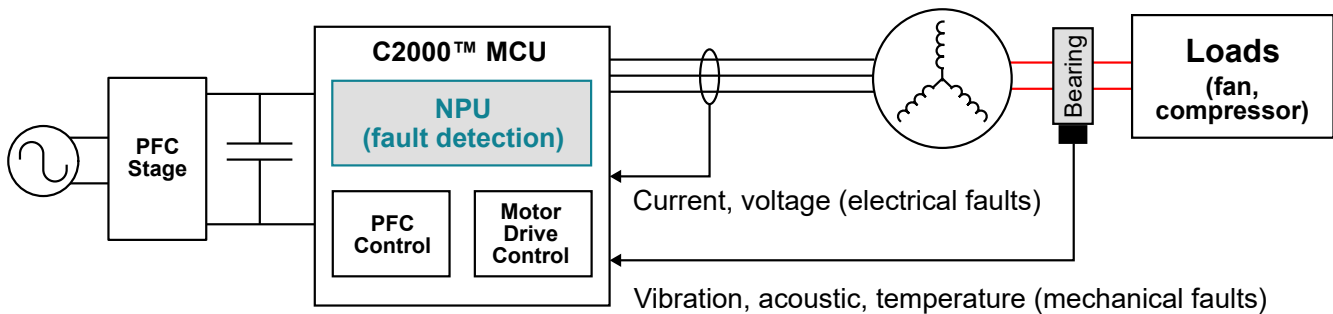


图 2. 实时控制系统中支持边缘 AI 的故障监测解决方案

## CNN 模型如何增强实时控制系统中的故障监测和检测

用于电机轴承和电弧故障检测的 CNN 模型可以从原始传感器数据（例如振动信号）中学习复杂模式，然后检测指示轴承故障的细微变化。

由于 CNN 模型可以自主从原始或预处理的传感器数据（例如电机振动信号、太阳能直流电流或电池电压和电流）中学习，因此 CNN 模型非常适合用于故障检测和预测性维护的传感器数据分析。无需手动干预即可直接提取有意义的特征，从而实现稳健、准确的检测。同时，可以利用表示可变工作条件和不同硬件变化的传感器数据以及快速傅里叶变换 (FFT) 等不同的预处理算法来提高模型的适应性、抗噪性和可靠性，同时减少总检测或推理延迟。

由于 CNN 可以高效处理大量数据，并在不同的运行条件下表现良好，因此适用于工业环境中的实时监测和预测性维护。在这些环境中采用 CNN 模型可以更早、更有效地检测电机轴承故障，从而提高设备可靠性和运行效率。

对于电机驱动器，CNN 可以识别故障模式，例如振动或电流信号导致的轴承磨损或转子不平衡。在太阳能系统中，CNN 可以检测直流电流波形中的异常，从而进行电弧故障检测。在电池管理应用中，CNN 模型可以分析电池充电曲线寿命、进行电池运行状况监测和电池充电状态估算。CNN 的适应性可确保在动态条件下进行精确的故障检测，而且实时处理可提高效率。

### 结语

在电机驱动器和太阳能系统等应用中，实时故障检测可确保运行安全性和长期可靠性。提前准确识别故障或预测故障的能力可显著增强系统可靠性，防止代价高昂的停机时间并提高整体性能。边缘 AI 提供了一种革命性的方法，通过在本地实时处理数据可显著提高故障检测精度，减少延迟并提高响应能力。

### 商标

所有商标均为其各自所有者所有。

## 重要声明和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、某特定用途方面的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他功能安全、信息安全、监管或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265  
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司