

Application Note

低成本交流过零检测设计



Zoey Wei

摘要

本文介绍了一种简化的方法，用于检测工作电压高达数百伏的交流电源线路中的过零点。此设计的关键在于所需外部元件极少，仅需一个电阻器即可实现功能完备的检测电路。基于此，该方案在对成本和空间有严格要求的应用中具有显著优势。

内容

1 实现.....	2
2 MSPM0 中的 GPIO 选择.....	4
3 典型应用.....	5
3.1 AC 压降.....	5
3.2 三端双向可控硅控制.....	6
4 总结.....	7
5 参考资料.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 实现

此设计仅需一个外部电阻器，配合 MSPM0 微控制器的内部钳位二极管，即可实现可靠的过零检测。

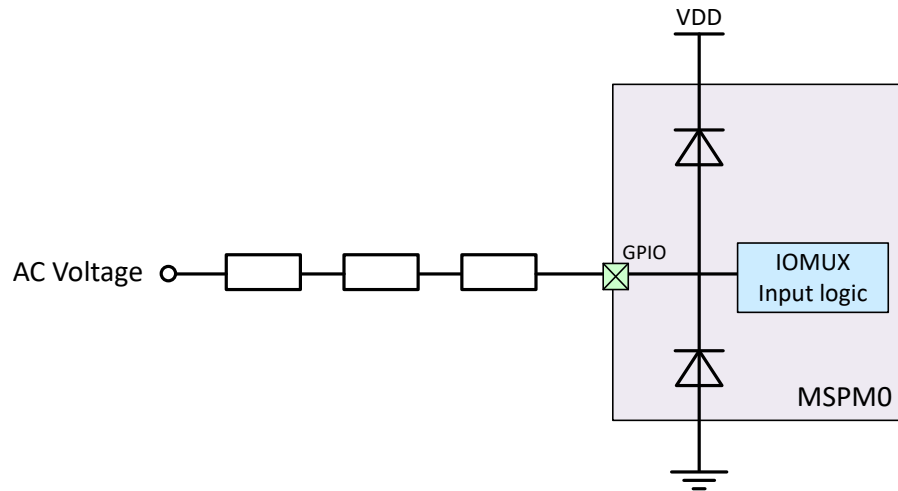


图 1-1. ZCD 示意图

内置钳位二极管通过将输入电压限制在 $-0.3V$ 至 $VDD + 0.3V$ 范围内，保护 MCU 免受静电放电 (ESD) 影响。有关内部 IOMUX 的详细信息，请参阅 [MSPM0 C 系列微控制器](#)。在此设计中，该钳位机制可确保任何从外部施加、超过 VDD 或低于 $0V$ 的交流电压均被强制限制在 $0 - VDD$ 范围内。重要的是，原本自然落在有效电压窗口内的原始交流信号段不受影响，从而保留了过零特性。因此，MCU 可通过 GPIO 中断或类似方法可靠地检测交流过零时刻，同时严格满足规定的运行条件。该方法能够在不影响器件完整性的前提下，实现精确的交流信号监测。

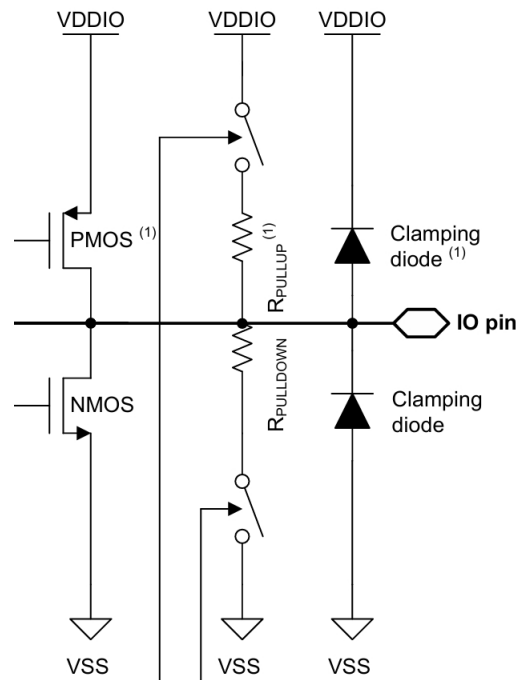


图 1-2. MCU IOMUX 示意图

为了严格遵守数据表中规定的 MSPM0 微控制器 $6mA$ 的 GPIO 输入电流限制，采用串联电阻网络构成的高阻抗电流限制设计是成本最低的方法。此处选择了 $1M\Omega$ 。此配置可有效地将峰值输入电流限制在约 $311\mu A$ (按中国标准 $220VAC/50Hz$ 市电电压计算： $220V_{rms} \times \sqrt{2}/1M\Omega$)，从而确保器件在绝对最大额定值范围内可靠运行。

采用分布式电阻器拓扑（使用多个串联电阻器而非单个高值元件），是为了增强电路的性能特性：这种方法不仅通过改善电场应力分布来保证了耐压能力，还能通过最大限度地减少热老化效应并消除单点故障模式来优化长期可靠性。

2 MSPM0 中的 GPIO 选择

MSPM0 上的所有通用 I/O (GPIO) 引脚均配备钳位二极管，但耐压 5V 的漏极开路 IO 引脚除外。如果使用 ODID 引脚，可能需要额外的外部保护电路。

为 GPIO 配置模拟 ADC 功能时，必须谨慎考虑相邻引脚的电流影响。在一个通道上进行 ADC 转换期间，如果相邻引脚上出现超过 VDD 的注入电流（正注入），则会激活 PMOS 开关，同时将中间节点拉至接地。这会形成一条通向接地的替代电流路径，不经过 ADC 通道，从而避免泄漏干扰，并保持转换精度。

反之，当相邻引脚电压降至 -0.7V 时，负注入 (<0V) 会激活 NMOS 开关，导致非预期的泄漏电流流经导通通道，如图 2-2 所示。这会在导通路径上引入压降，最终使 ADC 读数发生失真，并可能导致代码错误。

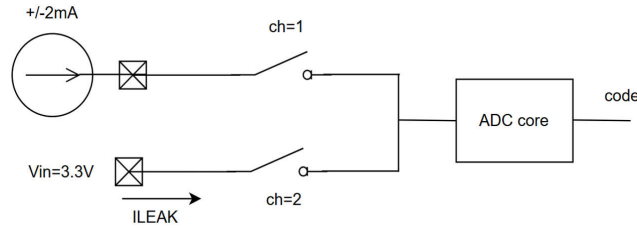


图 2-1. ADC 通道图

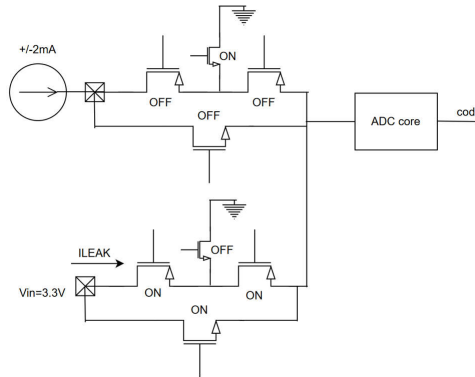


图 2-2. ADC 内部电路

幸运的是，此问题已在我们较新的硬件修订版中得到解决。对于目前量产的器件，ADC 功能可按预期运行，不存在相邻引脚泄漏风险。但在使用早期器件（例如 MSPM0L1x0x 或 MSPM0Gx50x）时，TI 强烈建议避免将 GPIO 通道分配给 ADC 模拟功能，以防出现潜在的信号完整性问题。

3 典型应用

3.1 AC 压降

在工业设备前端交流信号监测系统中，过零检测 (ZCD) 方法被证明对于实时电源故障检测特别重要。其实现方式为：让交流信号流经全桥整流器配置，整流后的输出流经一个高阻值电流限制电阻器。通过策略性地使用钳位二极管，将电压幅值限制在安全工作范围内，同时确保信号完整性。经 MCU 内部二极管钳制后的电压如图 3-1 所示。

对于标准的 220V、50Hz 市电监测，电压通常在过零后约 $50\ \mu\text{s}$ 内从 0V 上升至 V_{DD} 。通过实现一种软件算法，在检测到过零时启动 $100\ \mu\text{s}$ 看门狗计时器，如果无法在该窗口内可靠地恢复高电压，则指示发生了电源故障。此外，还可通过连续过零点之间的时间间隔来精确测量交流频率。这种方法能够有效检测完全断电及频率波动，且仅需极少的计算资源。

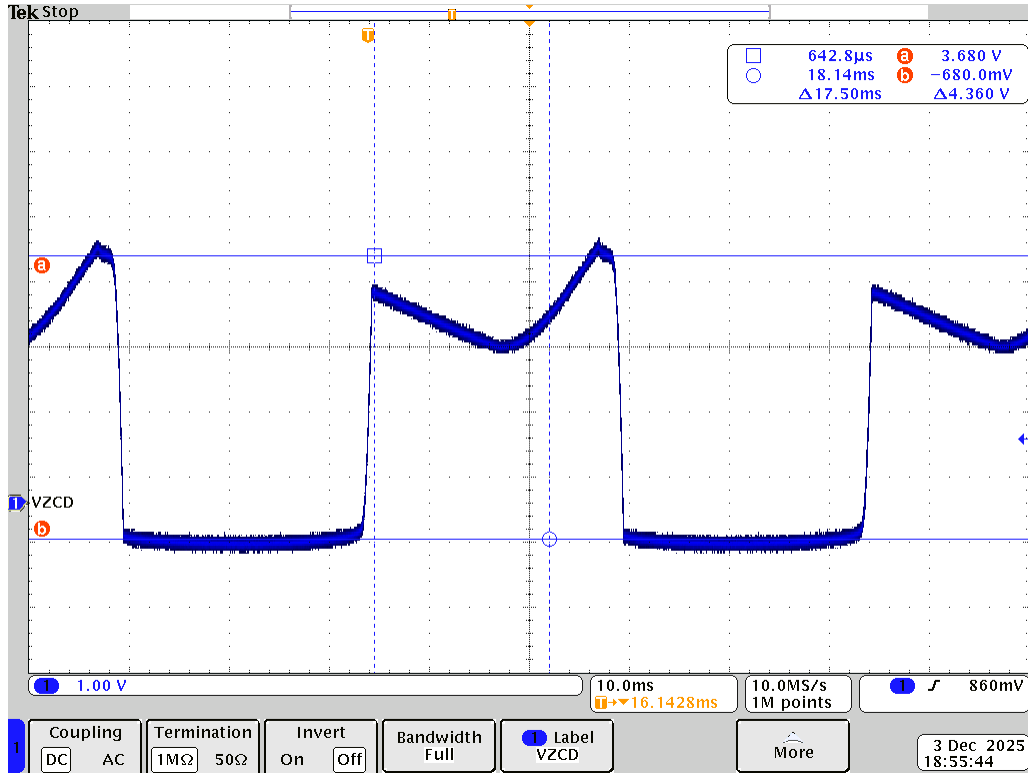


图 3-1. MCU 输入引脚电压

3.2 三端双向可控硅控制

在成本敏感的应用中，如基础型搅拌机和真空吸尘器，最大限度地降低 BOM 成本至关重要，此时通常采用三端双向可控硅作为驱动交流电机的开关设计。该系统的核心在于过零检测 (ZCD)，其功能包括：

1. 判断交流波形的导通状态
2. 计算后续触发三端双向可控硅所需的导通角
3. 将电力传输与交流周期同步

这种过零参考时序机制能够有效实现电机速度控制，同时维持超低的系统实现成本 — 仅需单个三端双向可控硅配合基础微控制器进行管理，而无需采用基于 IGBT 的更昂贵设计或专用电机驱动器 IC。

在图 3-2 中，通道 1 展示了施加到 MCU 的零电压检测信号。该信号通过对大交流电压进行钳制得到，并在市电电压过零时发生翻转。通道 2 为三端双向可控硅的栅极控制信号。MCU 检测电压过零并计算导通角，以使三端双向可控硅的栅极信号与市电电压保持同步。

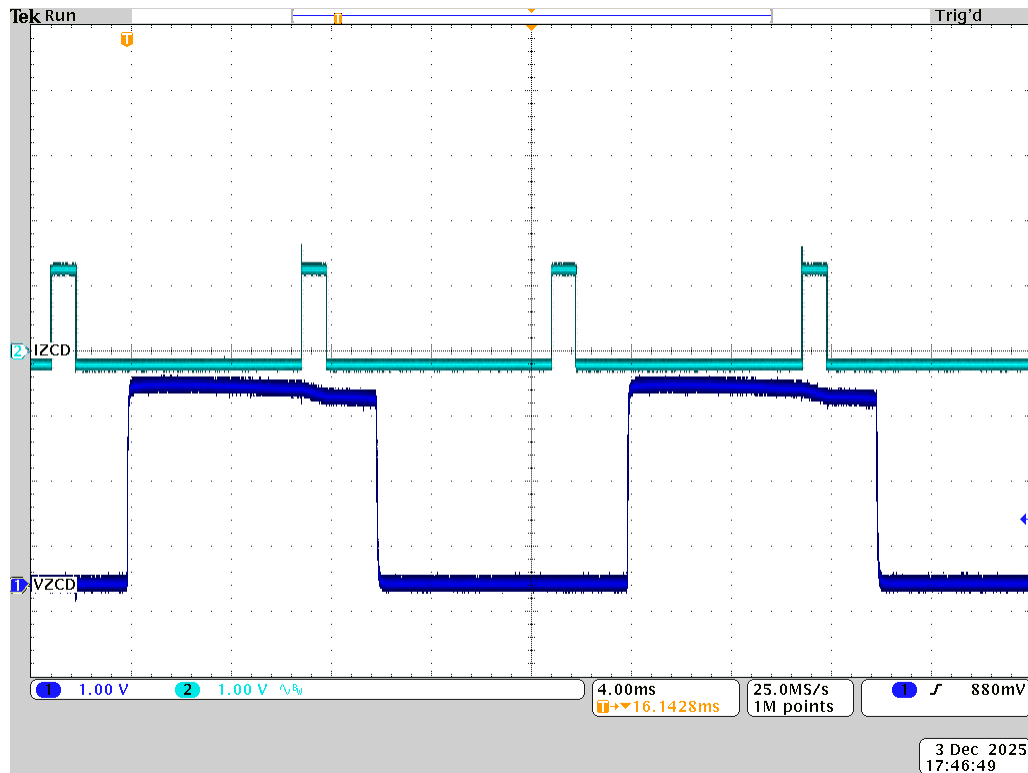


图 3-2. 三端双向可控硅电机驱动器系统中的零电压检测

4 总结

本文重点探讨了如何针对交流信号处理，实现成本优化的过零检测 (ZCD) 设计。通过采用仅需要基础元件、经过巧妙简化的电路设计，所提出的 ZCD 模块可适用于多种不同应用场景。

5 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [MSPM0C110x、MSPS003 混合信号微控制器](#) 数据表。
2. 德州仪器 (TI), [MSPM0L130x 混合信号微控制器](#) 数据表。
3. 德州仪器 (TI), [MSPM0C1105、MSPM0C1106 混合信号微控制器](#) 数据表。
4. 德州仪器 (TI), [MSPM0 C 系列微控制器](#), 技术参考手册。
5. 德州仪器 (TI), [LP-MSPM0C1104 评估模块](#), EVM 用户指南。
6. 德州仪器 (TI), [LP-MSPM0C1106 评估模块](#), EVM 用户指南。

重要通知和免责声明

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月