

Application Note

基于 MSPM0 和 Triac 的低成本交流电机控制设计



Zoey Wei, Yahui Zhang

摘要

本应用手册使用采用 8 引脚封装和 Triac 的低成本 MCU MSPM0C1104，实现交流电机控制的成本效益。

该设计的主要特性如下：

- 220V 电源的最大输出功率为 900W
- 输入电压范围：90-265VAC，50/60Hz
- 过流保护
- 支持软启动
- 支持速度变更
- 有 RUN LED 用于显示电路板正在通电

软件和硬件原理图资源可从[此处](#)下载。

内容

1 简介.....	2
2 方框图.....	3
2.1 电源模块.....	3
2.2 过零检测 (ZCD).....	3
2.3 电流检测.....	4
2.4 MSPM0 微控制器.....	5
2.5 TRIAC.....	5
3 相位角控制.....	6
3.1 工作原理.....	6
3.2 边界条件及特殊情况.....	6
3.3 使用 MSPM0 实现.....	7
4 软启动功能.....	8
5 软件.....	9
5.1 软件工作流程.....	9
5.2 过零检测实现.....	10
5.3 脉冲发生.....	10
5.4 更新目标速度.....	10
5.5 过流保护.....	10
5.6 用户系统定义.....	10
6 结果.....	12
6.1 示波器波形.....	12
6.2 速度调整.....	13
6.3 软启动.....	17
6.4 温度.....	18
7 总结.....	19
8 参考资料.....	19
9 修订历史记录.....	20

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 简介

包括真空吸尘器、搅拌机和电动工具在内的现代家用电器越来越需要高效的速度控制设计，同时保持简单的切换机制。Triac 是用于直接 110/240V 电源操作的最经济电源开关元件，因此是成本敏感型电机应用的首选。当与微控制器单元 (MCU) 集成时，这些系统获得状态监控、动态速度调节和过流保护等智能功能。

TI MSPM0 微控制器系列通过丰富的外设集成，可在该应用中实现成本效益。本文介绍了 MSPM0 与 Triac 如何组合以实现低成本交流电机控制。

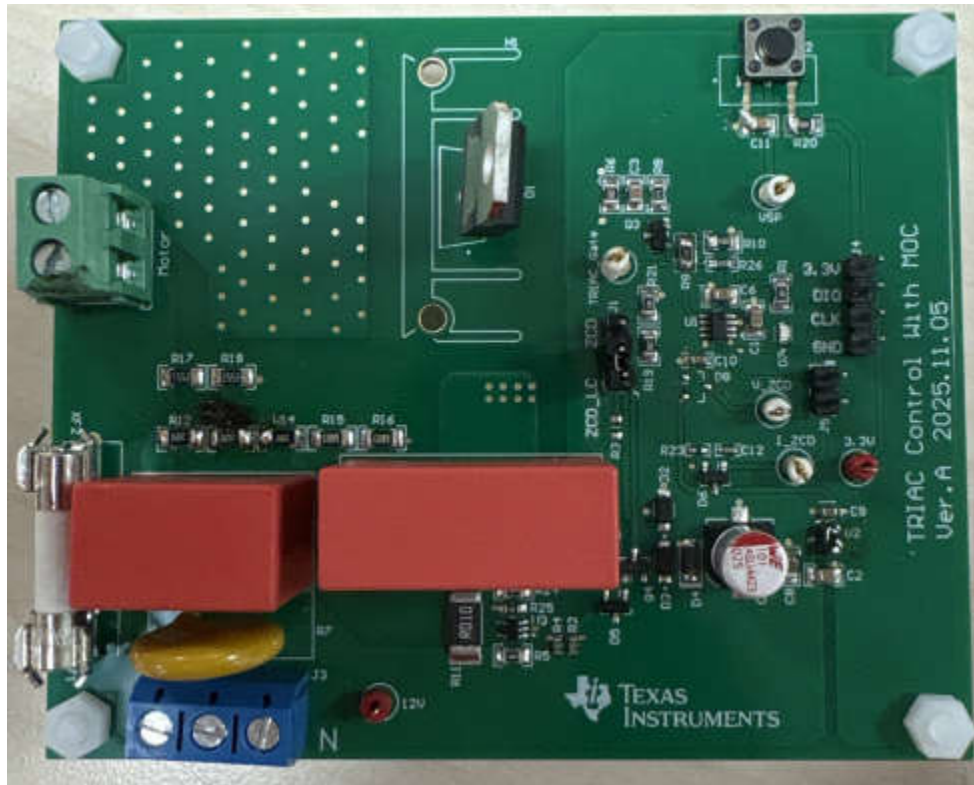


图 1-1. 评估板

2 方框图

图 2-1 展示了适合交流电机应用、基于 MSPM0 的 Triac 控制设计的系统方框图的六个主要功能。交流电源通过电压模块提供给 MSPM0 以生成 3.3V 电压。MSPM0 作为核心处理模块，可检测电流和电压并实时同步输出栅极驱动信号来驱动 Triac。

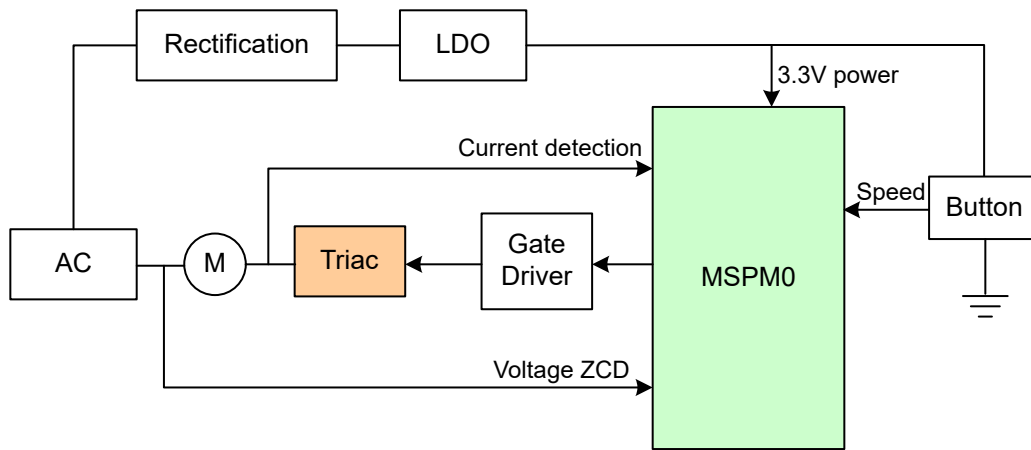


图 2-1. 系统方框图

2.1 电源模块

交流电源输入 (90-265VAC、50/60Hz) 通过整流电路和齐纳二极管转换为稳定的 12V 直流电源。为了给 MSPM0 及相关的控制电路供电，这里使用 LDO 将 12V 更改为 3.3V，从而确保在宽输入电压范围内可靠运行。

该设计强调了在高压域及低压域之间实现简单性、成本效益及足够的隔离。

2.2 过零检测 (ZCD)

ZCD 电路可实现与交流电源波形的精确同步，这对于精确的相位角控制至关重要。适当的过零检测可确保微控制器可以确定 TRIAC 的触发角，从而实现精确的功率控制。

此设计实现了电压 ZCD。交流电流受高值电阻器限制，然后连接到晶体管，该晶体管将以交流为基准的正弦信号转换为与电源过零同步的方波，从而向 MCU 提供纯净的 12V 数字信号。从 MCU 侧，有两个钳位二极管会自然地将输入信号从 12V 限制到安全的 0V 至 3.3V 范围，以生成 MCU 中断。

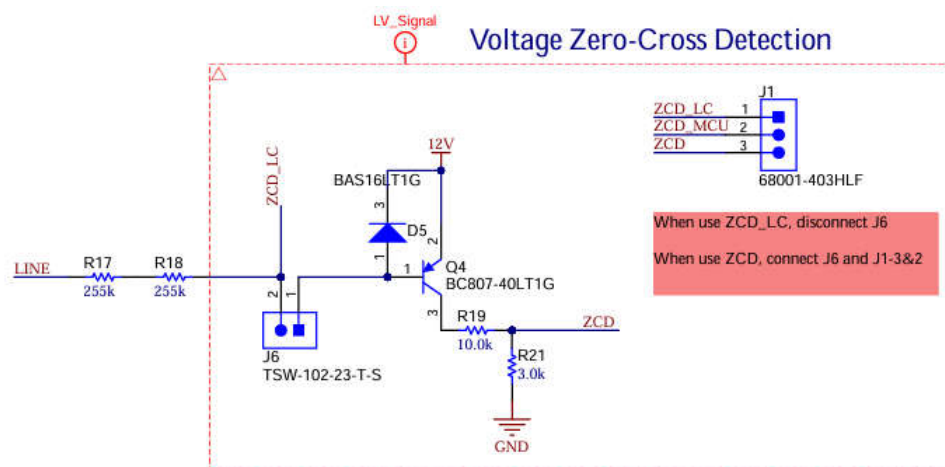


图 2-2. 电压过零检测原理图

作为替代方案，系统支持源自电机电流检测电路的基于电流的过零检测。由于当电机电流在电感性负载中过零时会出现可预测的相，因此该方法可提供可靠的同步。

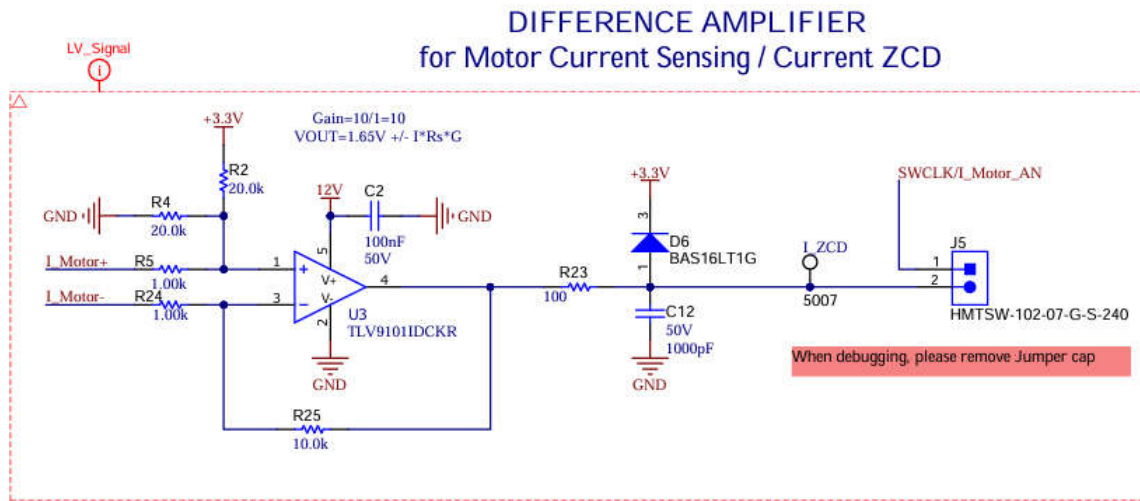


图 2-3. 电流过零检测原理图

2.3 电流检测

此设计中使用了电压 ZCD 检测。重复使用电流 ZCD 电路来实时监测当前状态，以防止过载。

在电机返回路径中使用低值精密分流电阻器来生成小差分电压，该电压由差分放大器电压转换为单端接地基准信号，以进行检测。对于 MSPM0 ADC 输入，该电压的设计范围为 1.05V 至 2.25V。

MSPM0 持续对电流信号进行采样，并将测量值与可编程保护阈值进行比较。当电流超过安全限制时，固件会立即禁用 TRIAC 触发，以保护电机和功率半导体。

2.4 MSPM0 微控制器

MSPM0 微控制器根据用户输入、电机电流反馈及过零时序执行实时相位角控制算法。

MSPM0 集成了所有必需的外设，只需极少的外部元件即可实现闭环电机控制。TIMER 用来检测过零并判断输入电压频率。GPIO 用于按钮捕获以获得所需功率级别，并在检测到过零中断和电压频率时，固件会根据用户设置计算所需的 TRIAC 触发延迟。PWM 可以生成从过零事件到 TRIAC 栅极驱动器的精确计时延迟。

MSPM0C 系列通过至少八引脚封装支持 ADC、TIMER、GPIO 等丰富的外设，从而实现复杂的电机控制，同时保持成本效率。

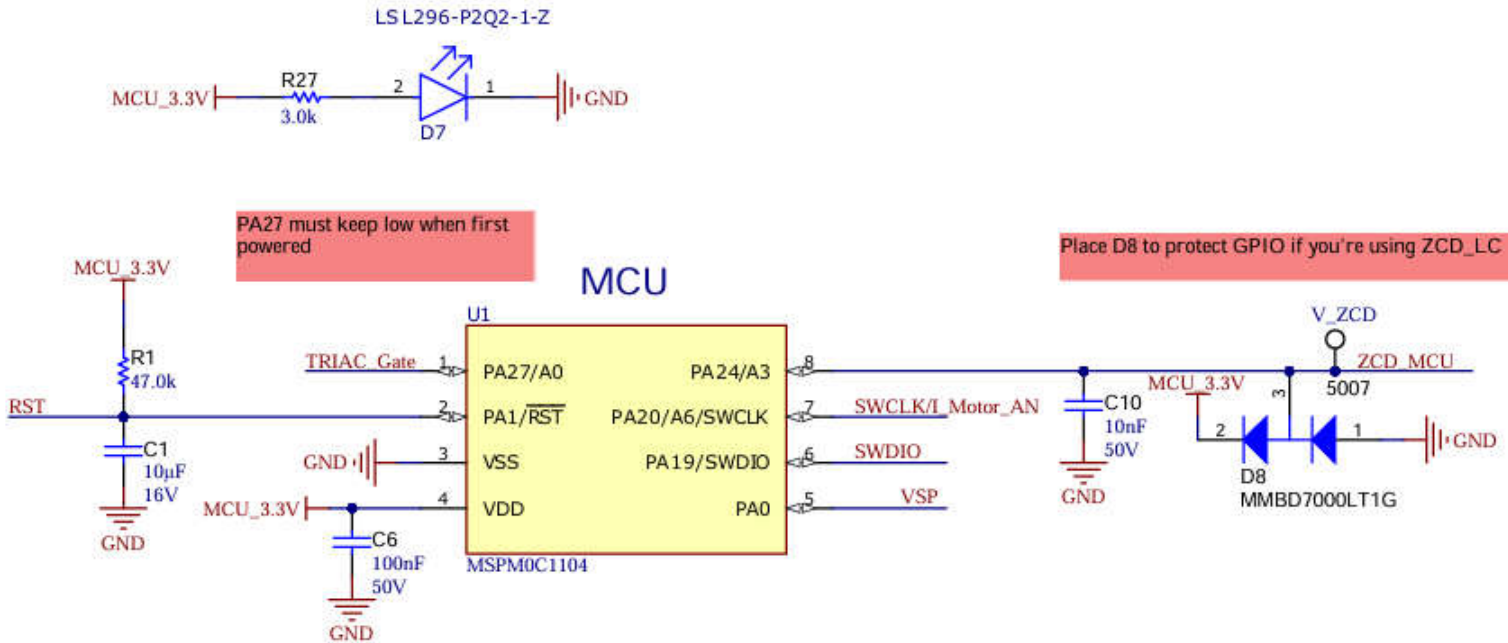


图 2-4. MCU 器件原理图

2.5 TRIAC

TRIAC 充当与通用电机串联的双向交流开关，通过相位角调制控制电力输送。一旦由栅极脉冲触发，TRIAC 就会锁存至导通状态并保持导通状态，直到负载电流在交流过零时自然降至保持阈值以下。这种自换向行为简化了驱动电路，只需要短暂的触发脉冲，而不是连续的栅极驱动。

从过零到 TRIAC 触发的延迟决定了传导角度，进而决定了输送到电机的 RMS 电压和功率。

此设计在 220VAC 时支持高达 900W 的电机负载，因此该设计非常适合真空吸尘器、搅拌机和类似家用电器。

3 相位角控制

按钮输入可让用户通过更改 TRIAC 触发角来调整电机转速。相位角控制是在基于 TRIAC 的应用中调整交流电机转速的主要技术。

3.1 工作原理

交流线路电压形成正弦波形，50Hz 时周期为 20ms (60Hz 时周期为 16.67ms)，由两个半周期组成：正周期和负周期。在每个过零点，TRIAC 均处于关断状态。MSPM0 微控制器会检测到这些过零事件，并在可编程延迟时间 (称为触发角) 后生成栅极触发脉冲。触发后，TRIAC 会在该半个周期的剩余时间内导通，从而使电流流经电机。当交流电流在半个周期结束时自然过零时，TRIAC 会自动关闭。

触发角决定传递给电机的功率。触发角越小，所提供的功率越低。

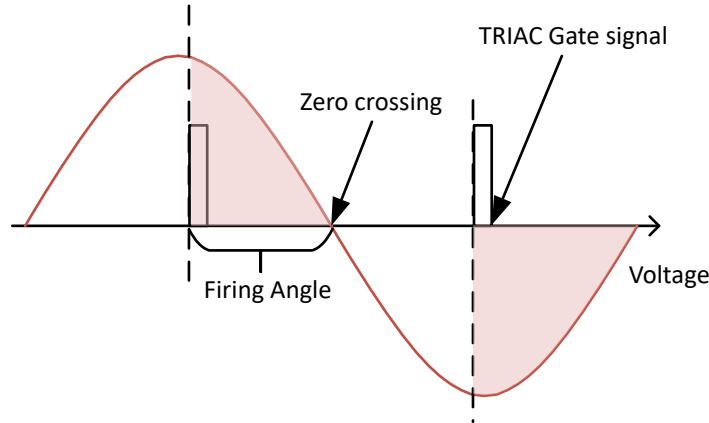


图 3-1. 相位角控制

3.2 边界条件及特殊情况

真空吸尘器及类似电器中使用的通用电机是高感性负载。驱动电感负载时，电流以由电机的电感和电阻决定的相位角来滞后电压。该电流滞后意味着 TRIAC 不会在电压过零时关断，是在电流通过过零之前继续导通额外的电角度。

如果触发角增大，接近 180° ，在前半个周期中的电流完全消失之前就可以触发 TRIAC，如图 3-2 所示。

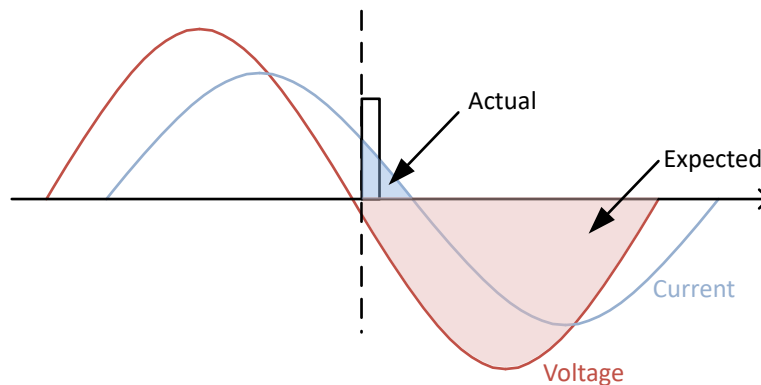


图 3-2. 意外关闭

这种潜在问题可以通过两种方法来解决。一种方法是随着触发角接近，延长 TRIAC 栅极脉冲持续时间。栅极脉冲必须具有足够的持续时间，以确保栅极脉冲跨越下一个电流过零点，从而验证 TRIAC 在当前过零点不会关断。

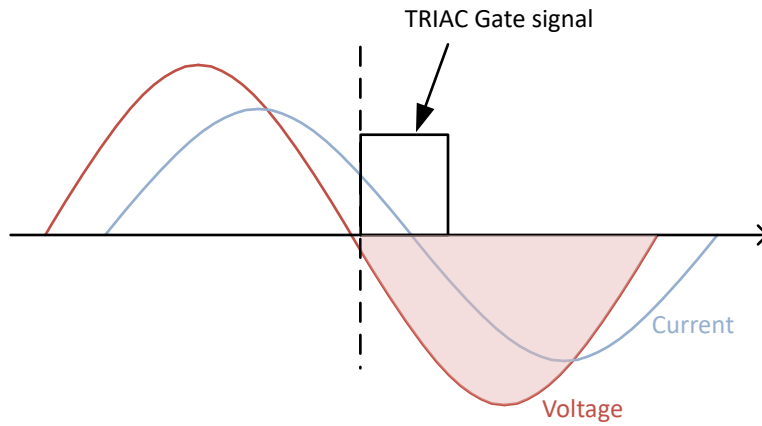


图 3-3. 使用长脉冲进行栅极驱动

另一种更简单的方法是在固件内为触发角设置边界，从而将运行限制在指定范围内。此方法的控制范围不如第一种方法的控制范围宽广。然而，固件开发相对简单。对于当前设计，采用了该方法。

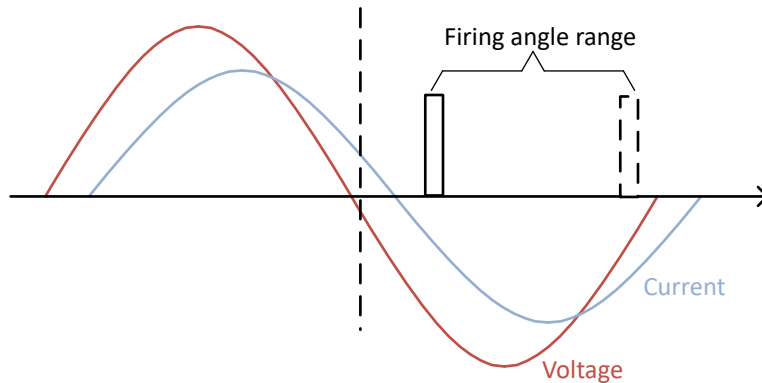


图 3-4. 触发角范围

3.3 使用 MSPM0 实现

该参考设计实现了三个离散的速度级别，可提供简单直观的电机控制：

- **高速**：1000 μs 延迟（大约 162° 触发角）- 最高电机转速下的最大功率输出。
- **中速**：5000 μs 延迟（大约 90° 触发角）- 中等速度的中等功率。
- **低速**：7000 μs 延迟（大约 54° 触发角）- 最低运行速度的最小功率。
- 触发角的边界设置为 30.6° 。

MSPM0 用高分辨率计时器通过过零检测来精确测量交流周期。对于每半个周期，微控制器都会计算最近两次测量的平均周期，以补偿线路频率变化。控制算法依据该周期测量值和所选速度模式来确定生成 1ms 栅极触发脉冲以开启 TRIAC 之前的延迟时间。

4 软启动功能

为了防止电机启动时出现机械应力并降低浪涌电流，此设计实现了软启动机制。控制算法不是立即应用目标触发角，而是逐渐从大延迟（低功率）转换到所需的延迟值。转换通过两个参数定义的受控速率发生：

UPDATE_RATE（每 2 个过零周期）和 **UPDATE_STEP**（每次更新 50 μs ）。这会产生平稳的加速斜坡，从而延长电机寿命并降低启动期间的声学噪声。

例如，当从 **SpeedOff** (10000 μs) 转换到 **SpeedHigh** (1000 μs) 时，延迟每两个周期减少 50 μs ，因此在 50Hz 线路频率下的总转换时间约为 3.6 秒。这种逐渐上电可以显著减少机械冲击并提高系统可靠性。

5 软件

5.1 软件工作流程

该软件包含几个主要功能：

表 5-1. 固件中的主 API

API	说明
Triac_Init	配置全部外设并初始化控制参数
Triac_ControlLoop	执行此项可执行所有必要的计算，并在适当的时刻触发 Triac
Triac_updateCurDelay	更新触发角
Triac_generatePulse	生成栅极驱动器脉冲
CAPTURE_0_INST_IRQHandler	计时器中断处理程序 实现过零检测
GPIOA_IRQHandler	GPIO 中断处理程序 检测按钮和更改速度
ADC12_0_INST_IRQHandler	ADC 中断处理程序 监控电流

图 5-1 是软件工作流程。

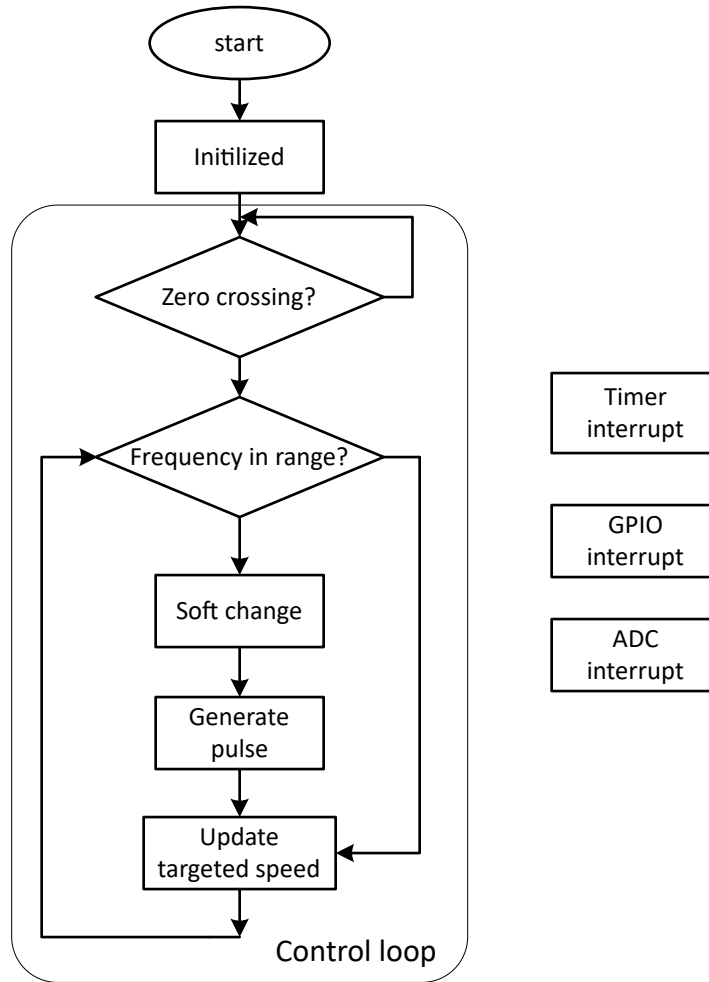


图 5-1. 软件工作流程

5.2 过零检测实现

过零检测使用在捕获模式下运行的计时器，配置为在 ZCD 输入信号的上升沿和下降沿触发。中断处理程序 (CAPTURE_0_INST_IRQHandler) 处理三个不同事件：

- **CC0_DN (第一个半周期)**：捕获正到负过零时的计时器值，并计算第一个半周期持续时间
- **CC1_DN (第二个半周期)**：捕获负到正过零时的计时器值，计算第二半周期，并手动重新加载计时器计数器以保持同步
- **ZERO 事件**：如果计时器在未检测到过零的情况下达到零，系统会设置 `gSynced = false` 以指示同步丢失，从而防止栅极脉冲的产生不稳定

通过对捕获的周期值求平均值 (`periodAvg`)，可提供可靠的测量来补偿线路频率和噪声的微小变化。此平均值用作计算精确触发角延迟的时机。

5.3 脉冲发生

`Triac_generatePulse()` 函数使用在 PWM 模式下配置的一次性计时器来生成栅极触发脉冲。计时器加载的值等于 `currentDelay + PULSE_WIDTH (1ms)`，其中 `currentDelay` 决定脉冲开始的时间，`PULSE_WIDTH` 定义脉冲持续时间。计时器在生成脉冲后自动停止，从而验证节能运行。

脉冲生成基于 `pulseType`：当 `currentDelay` 超过 `DELAY_MIN_POWER_TIME (8300 μs)` 时，`pulseType` 设置为 `noPulse`，不会生成栅极信号，从而有效地关闭电机。该阈值可防止 TRIAC 在电机可能失速或者在消耗过多电流的过小导通角度下运行。

5.4 更新目标速度

`GPIOA_IRQHandler` 通过四种状态来递增 `speedMode` 变量，以响应按钮按下事件：`SpeedOff`、`SpeedLow`、`SpeedMiddle` 及 `SpeedHigh`。每个速度模式都映射到一个特定的 `targetDelay` 值，该值决定触发角。此接口的循环性质（从 `SpeedHigh` 包装回 `SpeedOff`）向用户提供了直观的单按钮控制。

`Triac_updateCurDelay()` 中的软启动机制通过以受控速率递增或递减（每个 `UPDATE_RATE` 周期的 `UPDATE_STEP`），将 `currentDelay` 平稳地转换到新的 `targetDelay`。这可防止突然的速度变化，进而导致机械应力或声学噪声。

5.5 过流保护

`ADC12_0_INST_IRQHandler` 使用 MSPM0 的集成窗口比较器实现基于硬件的过流保护机制。在初始化期间，ADC 配置有一个与最大安全电流电平相对应的高阈值（`AC_CURRENT_LIMITATION = 3.2V` 来自电流检测电路）。当检测到的电流超过此阈值时，窗口比较器会产生中断。

ISR 的响应方式是立即禁用所有中断（`__disable_irq()`）以停止正常操作、清除周期测量以防止更多的门脉冲，以及触发断点（`__BKPT(0)`）以进行调试。在生产系统中，此断点被替换为更复杂的故障处理例程，其中可能包括状态指示、自动重试逻辑或根据应用要求的永久关断。

5.6 用户系统定义

系统配置参数在 `system_define.h` 头文件中定义。这些宏允许用户自定义相位角控制行为、时序参数和保护阈值，以匹配特定的应用要求和交流线路频率。除非另有说明，否则所有定时值均以微秒（`μs`）为单位指定。

默认时序参数是对 50Hz 交流电源（20ms 周期、10ms 半周期）设计的。对于 60Hz 交流电源运行（16.67ms 周期，8.33ms 半周期），必须按比例调整时序参数，以保持等效的相位角和控制特性。

表 5-2. 用户定义的宏列表

宏名称	默认值	说明
PULSE_WIDTH	1000 μs	Triac 栅极触发脉冲宽度。定义施加到 Triac 的栅极驱动信号的持续时间。脉冲必须足够长，以验证负载电流是否达到 Triac 锁存阈值，这对于电感负载尤其重要。1ms 脉冲可以在大多数工作条件下提供可靠的触发。

表 5-2. 用户定义的宏列表 (续)

宏名称	默认值	说明
VOLTAGE_PERIOD_MAX	12000 μ s	可接受的最大交流半周期。用作周期验证的上限，以检测异常线路频率情况。对于 50Hz 操作，标称半周期为 10ms；12ms 最大值允许 20% 容差。
VOLTAGE_PERIOD_MIN	8000 μ s	可接受的最小交流半周期。用作周期验证的下限，以抑制杂散过零检测或噪声引起的误触发。在 50Hz 下，8ms 的最小容差低于标称 10ms 半周期，容差为 20%。
AC_INPUT_HALF_PERIOD	10000 μ s	标称交流输入半周期。在 50Hz 下，一个完整周期为 20ms，因此每个半周期为 10ms。
DELAY_SPEED_HIGH	1000 μ s	高速运行的触发延迟。
DELAY_SPEED_MIDDLE	5000 μ s	中速运行的触发延迟。
DELAY_SPEED_LOW	7000 μ s	低速运行的触发延迟。
DELAY_MIN_POWER_TIME	8300 μ s	最小功率阈值延迟。
UPDATE_RATE	2 cycles	过零周期中延迟更新速率。定义了速度转换期间将 <code>currentDelay</code> 参数调整到 <code>targetDelay</code> 的频率。
UPDATE_STEP	50 μ s	每次更新的延迟调整增量。每次经过 <code>UPDATE_RATE</code> 周期时， <code>currentDelay</code> 会按此步长递增或递减，直到到达 <code>targetDelay</code> 。
AC_CURRENT_LIMITATION	3.2 V	过流保护阈值电压。

6 结果

本节介绍了从通用电机负载下运行的基于 MSPM0 的 TRIAC 控制系统中获得的实验结果。测量验证相位角控制实现、演示软启动功能，并表征各种工作条件下的热性能。

6.1 示波器波形

示波器曲线显示了过零检测信号（蓝色）、TRIAC 栅极驱动脉冲（粉色）和电机电流（绿色）之间的关系，如图 6-1 所示。栅极脉冲发生在从 ZCD 上升沿编程的延迟之后，电机电流在栅极脉冲之后开始导通，当下一个过零点到来时，电机将关闭。

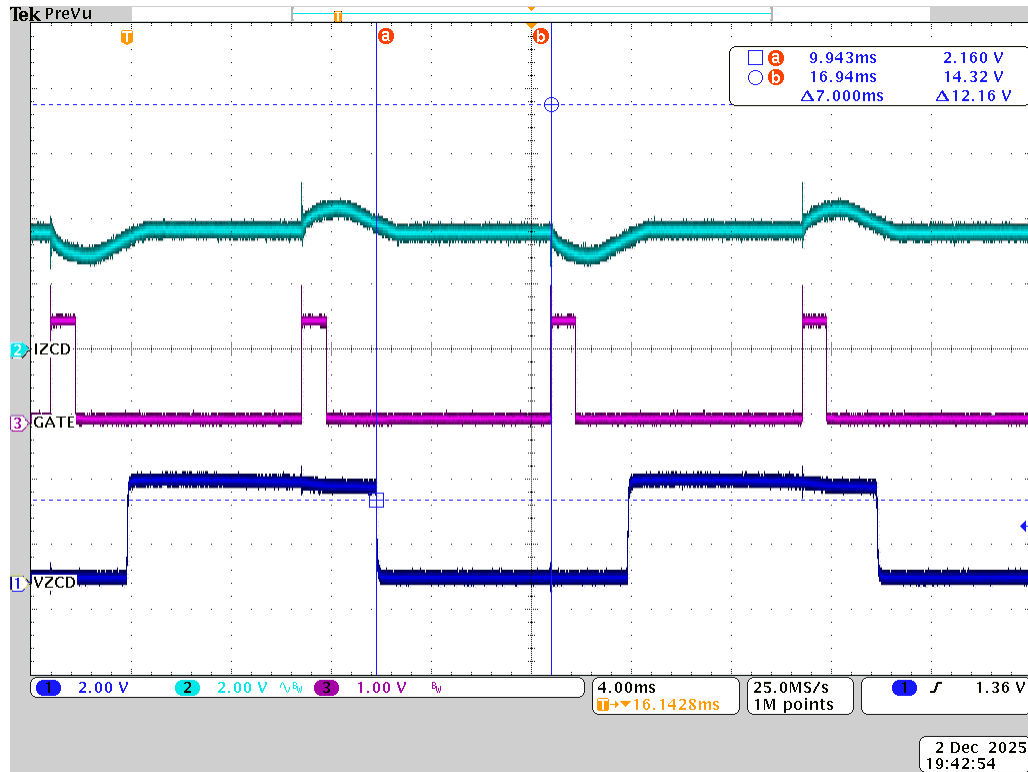


图 6-1. 高速模式下的信号（蓝色 - ZCD 信号，粉色 - 栅极驱动器信号，绿色 - 电机电流）

6.2 速度调整

图 6-2 至图 6-7 显示了不同速度模式下的栅极信号、ZCD 信号和电机电流。从下图可以看出，在低速模式下，相角很小，电流持续时间很短；相反，在高速模式下，相角很大，电流持续时间很长。

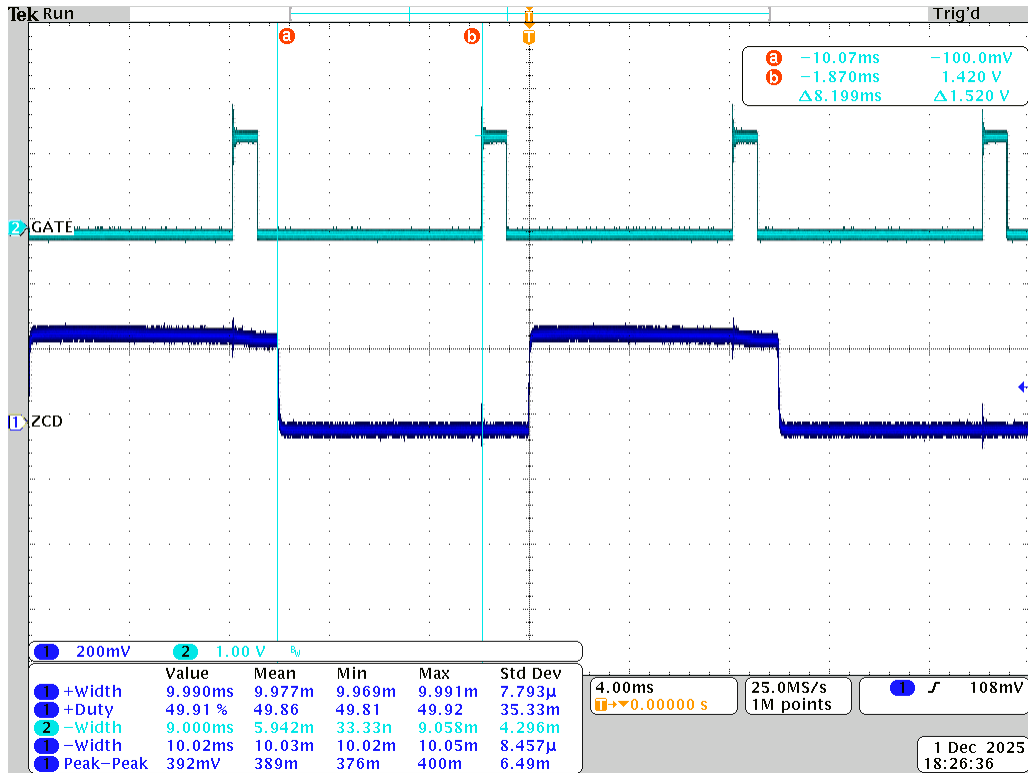


图 6-2. 低速模式下的信号 (蓝色 - ZCD 信号, 绿色 - 栅极驱动器)

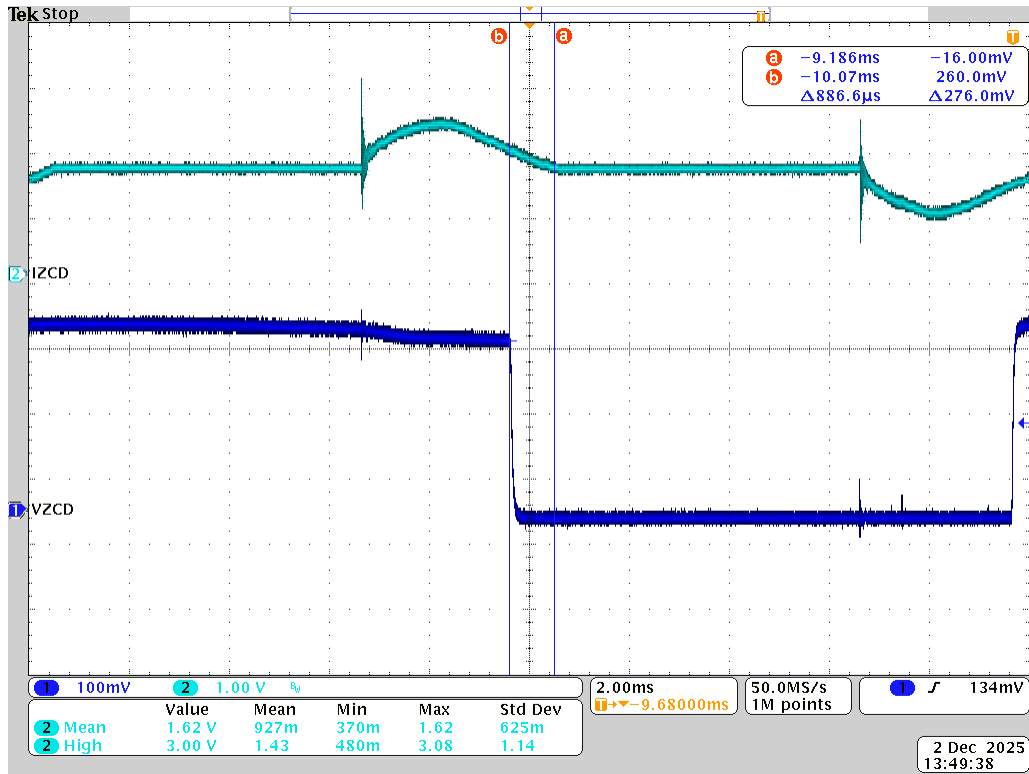


图 6-3. 低速模式下的信号 (蓝色 - ZCD 信号, 绿色 - 电机电流)

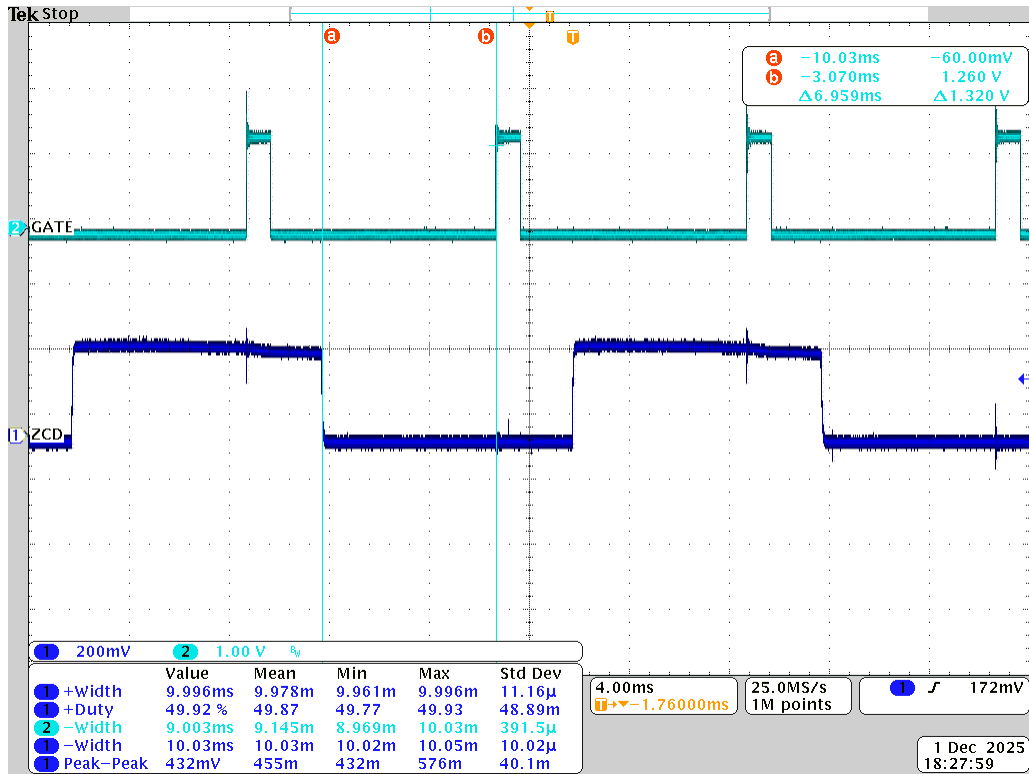


图 6-4. 速度介质模式下的信号 (蓝色 - ZCD 信号, 绿色 - 栅极驱动器)

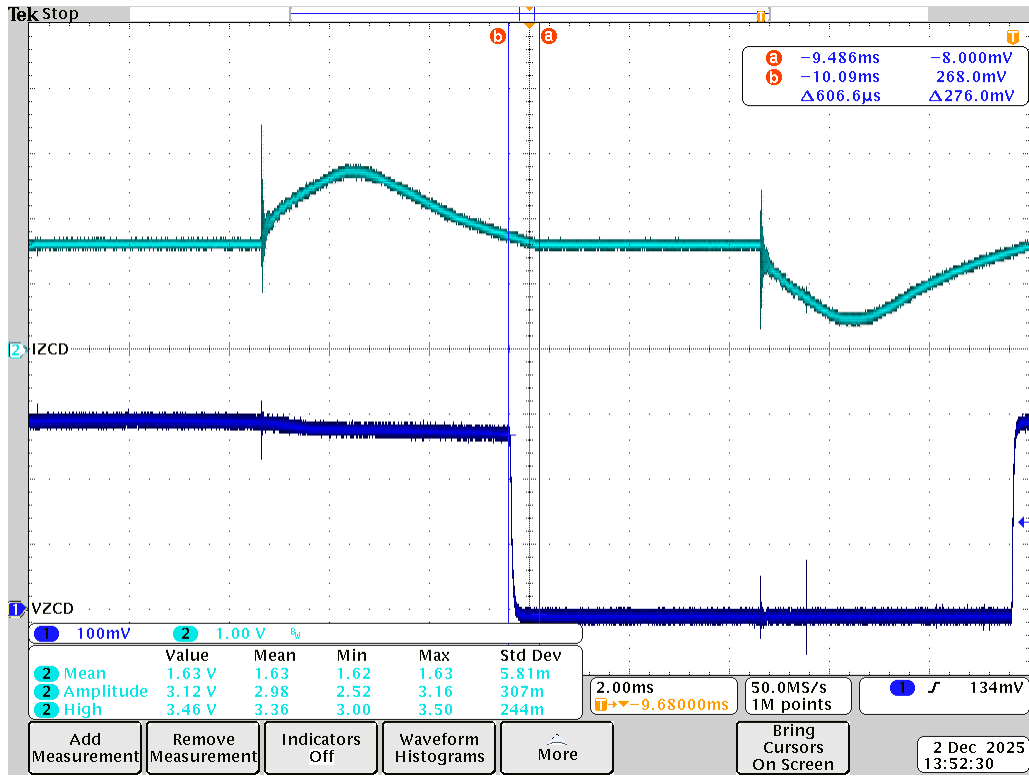


图 6-5. 速度介质模式下的信号 (蓝色 - ZCD 信号, 绿色 - 电机电流)

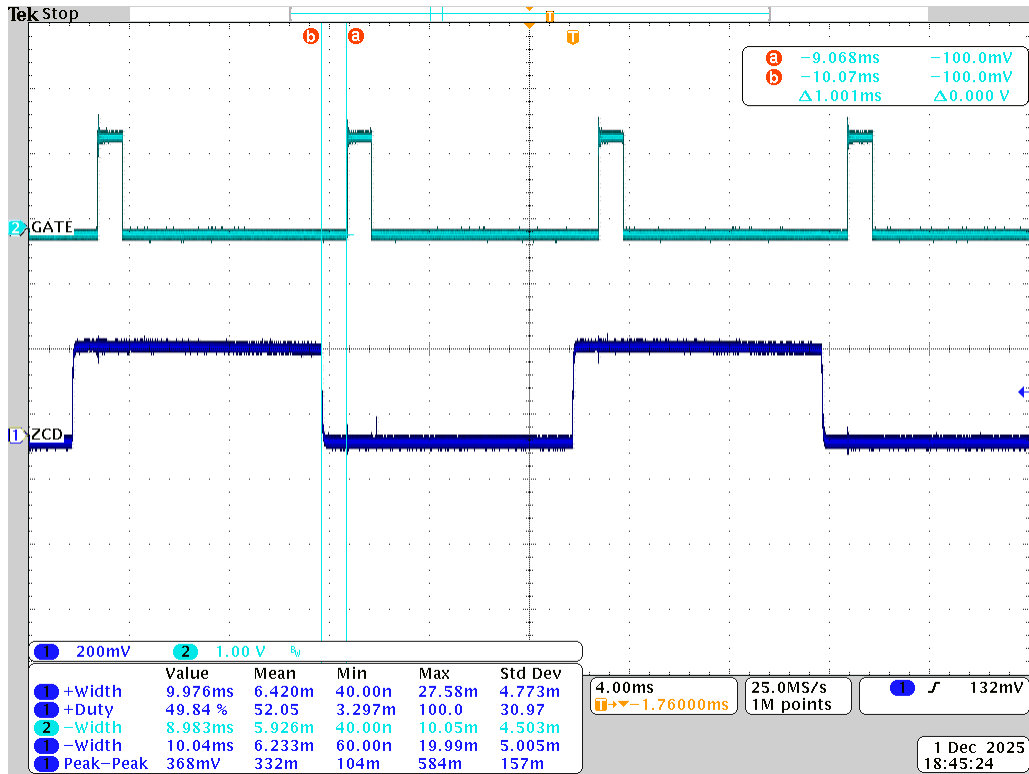


图 6-6. 速度介质模式下的信号 (蓝色 - ZCD 信号, 绿色 - 栅极驱动器)

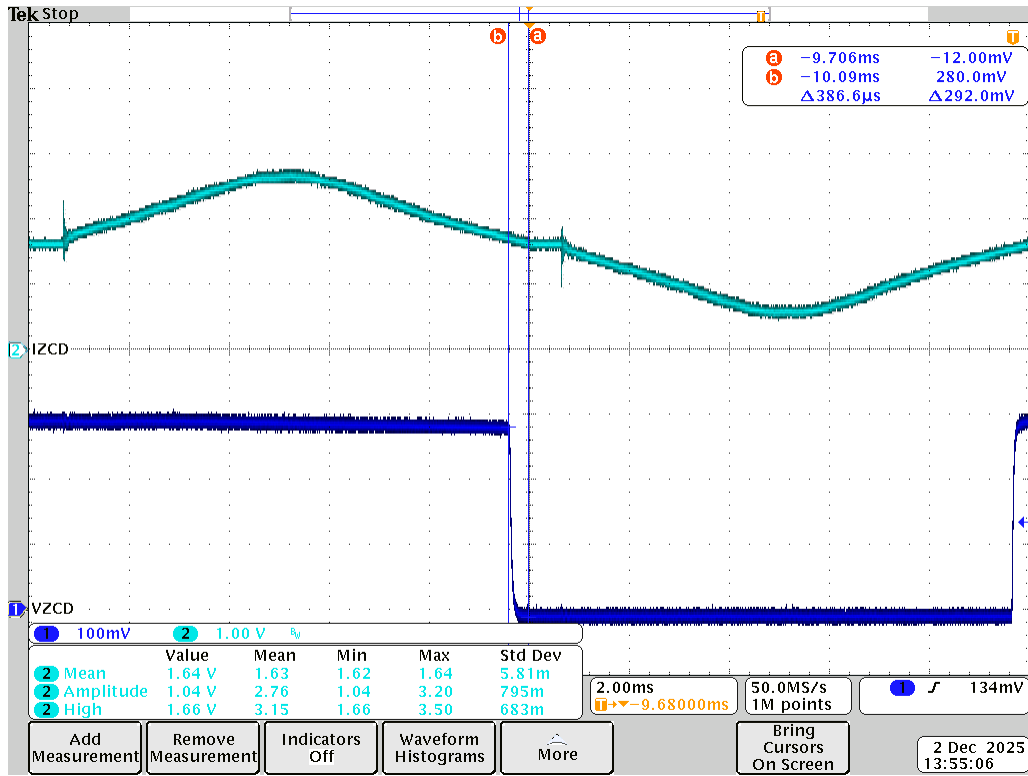


图 6-7. 速度介质模式下的信号 (蓝色 - ZCD 信号, 绿色 - 电机电流)

6.3 软启动

触发角通过中间值平稳进行，而不是在目标速度之间突然跳转。这种逐渐转换由 UPDATE_RATE 和 UPDATE_STEP 参数实现，其每两个交流周期的触发延迟逐渐调整 50 μs。平稳的斜坡可防止对电机和驱动负载产生机械冲击、减少咔嗒声或砰砰声，并更大限度地减小电流瞬态，否则会触发过流保护或导致电压闪烁。

图 6-8 显示了将速度从关闭模式更改为低电平模式时的输出电流行为。随着电机加速，电机电流平稳增加。

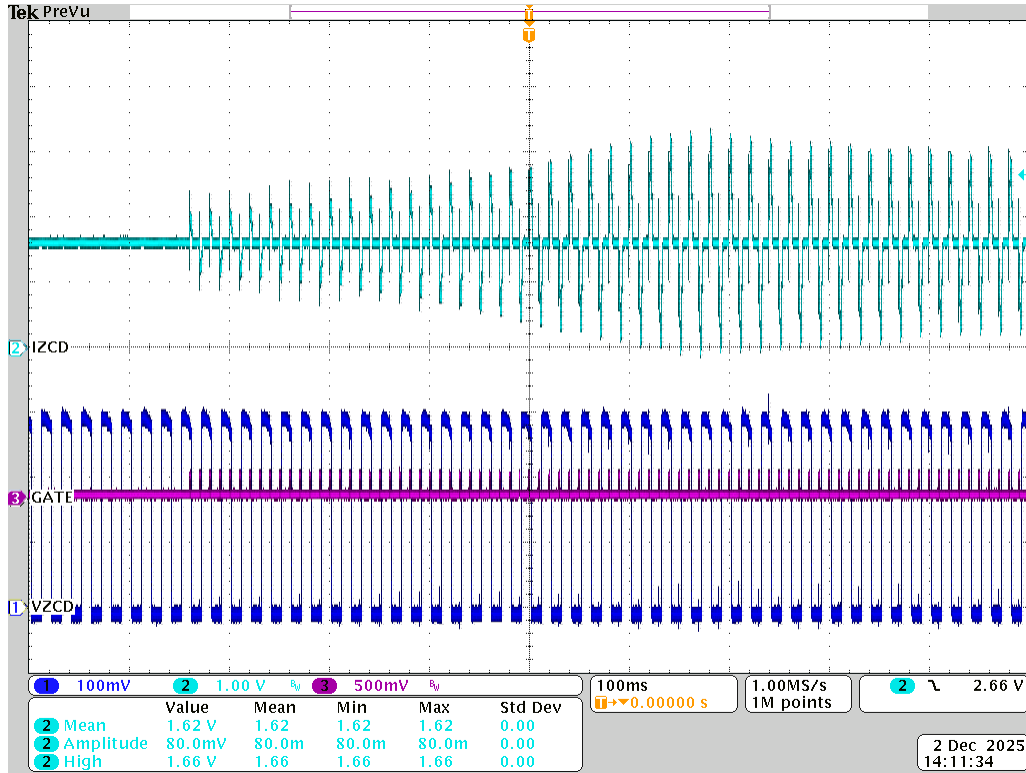


图 6-8. 软启动

6.4 温度

图 6-9 显示了关键元件的热测量结果。在高速模式下运行 10 分钟后，由于电流流动期间的导通损耗，TRIAC 可能高达 125°C。而 MSPM0C1104 MCU 封装在所有运行条件下的温度都保持在环境温度的 10°C 范围内。

TI 建议在实际生产期间为 TRIAC 提供适当散热。

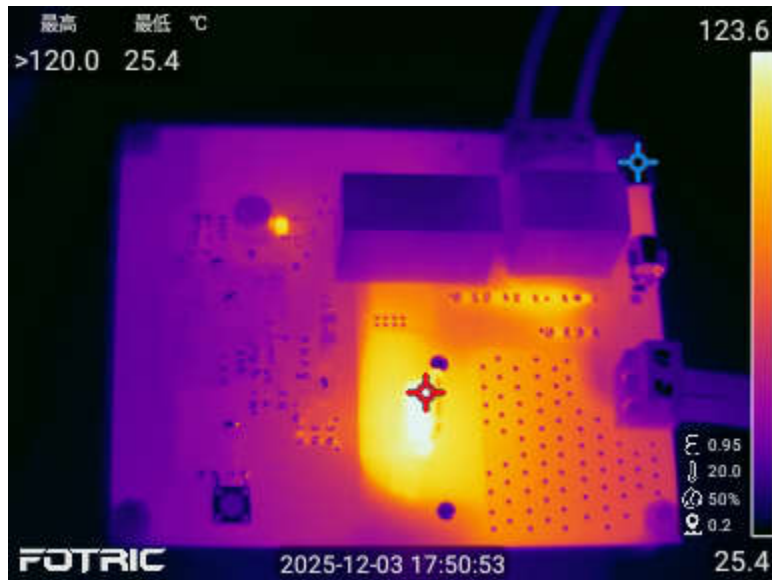


图 6-9. 温度测试

7 总结

本应用手册介绍了采用 MSPM0C1104 微控制器且适合家用电器应用的基于 TRIAC 的完整交流电机控制设计。该设计表明，通过有效利用 MSPM0 的集成外设（包括高分辨率计时器，ADC 和灵活的 GPIO），可以使用极少的外部元件实现精确的相位角控制、软启动功能和过流保护。

8 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [MSPM0C110x](#)、[MSPS003 混合信号微控制器](#), 数据表。

9 修订历史记录

Changes from Revision A (March 2026) to Revision B (May 2026)	Page
• 已更正排印错误.....	9

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