

Application Note

根据 C2000™ MCU 诊断库在电器应用中通过 UL/IEC 60730-1/60335-1 B 级认证



Jim Chen

System Engineering & Marketing

摘要

随着技术的发展，电器的功能变得越来越强大，使得电气系统的复杂性不断增加。为了满足市场对更安全、更智能和更节能的电器的需求，全球范围内制定了一系列标准，例如 UL/IEC 60730-1/60335-1。为了满足家用电器的功能需求并获得对于安全性和质量的全球认可，微控制器 (MCU) 必须符合 UL/IEC 60730-1/60335-1 要求。

德州仪器 (TI) 拥有种类繁多的 MCU 产品线，其中的 C2000™ MCU 系列以丰富的外设资源、强大的 CPU 内核以及高性价比脱颖而出，广泛应用于电器应用。此外，TI 还提供完整且成熟的 C2000 MCU 诊断库，旨在满足 UL/IEC 60730-1/60335-1 B 级认证的要求。

本应用手册主要介绍了 C2000 MCU 用于电器的各种规格，以及符合 UL/IEC 60730-1/60335-1 标准的软件库。本文档将深入探讨这些方面，旨在帮助工程师根据系统功能要求和 UL/IEC 60730-1/60335-1 认证需求快速选择最具成本效益的 C2000 MCU 设计。

内容

1 引言.....	2
2 电器中的 C2000™ MCU 器件概述.....	3
3 IEC/UL 60730-1/60335-1 标准简介.....	4
4 C2000™ 提供的 UL/IEC 60730-1/60335-1 诊断库.....	6
4.1 栈溢出检测.....	6
4.2 看门狗.....	7
4.3 CPU 和 FPU 寄存器.....	8
4.4 程序计数器 (PC).....	9
4.5 时钟.....	9
4.6 RAM.....	10
4.7 闪存.....	11
4.8 ADC.....	13
4.9 周期时间和存储器用量.....	13
5 参考文献.....	14

插图清单

图 2-1. 根据系统控制要求选择 C2000™ MCU.....	3
图 4-1. 常用的自检软件结构.....	6
图 4-2. 栈溢出监测.....	7
图 4-3. 看门狗测试结构.....	8
图 4-4. CPU、FPU 寄存器测试结构.....	9
图 4-5. 时钟测试结构.....	10
图 4-6. RAM March 测试结构.....	11
图 4-7. 闪存 CRC 测试结构.....	12
图 4-8. 闪存 ECC 测试结构.....	13

表格清单

表 3-1. IEC 60730-1 B 级失效模式表 H.1.....	4
--------------------------------------	---

表 4-1. 周期时间和存储器用量.....	13
------------------------	----

商标

C2000™ is a trademark of Texas Instruments.

Arm® and Cortex® are registered trademarks of Arm Limited.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

随着技术的发展，电器的功能变得越来越强大，使得电气系统的复杂性不断增加。因此，拥有众多特性和充足资源的 MCU 在此领域发挥着关键作用。为了满足市场对更安全、更智能和更节能的家用电器的需求，全球范围内制定了一系列标准。这些标准中的大部分都建立在 IEC/UL 60730-1 标准的基础之上；IEC/UL 60730-1 专门针对家用电器中的 MCU 和自动控制元件。另一方面，IEC/UL 60335-1 用作电器安全标准，其中的 MCU 部分直接参照 IEC/UL 60730-1 中规定的要求。

UL 认证在全球享有很高的知名度和认可度，而 VDE 认证则被认为是电气产品的质量标志，尤其是在欧洲市场。UL 和 VDE 认证中 MCU 的评估标准与 IEC/UL 60730-1 中规定的标准非常一致，但 VDE 在某些方面会有更高的要求。

德州仪器 (TI) 拥有种类繁多的 MCU 产品线，其中的 C2000 MCU 系列以丰富的外设资源、强大的中央处理单元 (CPU) 内核以及高性价比著称。此外，该系列还附带全面的诊断库，支持以较低的成本在较短的开发周期内满足电器功能要求和 UL/IEC 60730-1/60335-1 认证要求。

2 电器中的 C2000™ MCU 器件概述

在电器系统领域，不同功能所需的 MCU 计算能力、存储器和资源各不相同。从入门级 32 引脚 64KB 闪存 F280013x 到 256 引脚 1.28MB 闪存 F28P65x，TI 的 C2000 MCU 系列产品几乎涵盖了电器系统中的所有 MCU 应用需求。此外，F280015x 的锁步功能可以满足安全要求。有关电器应用入门级和性能级的 C2000 MCU 资源详细比较情况，请参阅为 C2000 实时微控制器实现 IEC 60730/UL 1998 合规性 用户指南。

第三代 C2000 MCU 的 C28x 内核配备了一个浮点单元 (FPU)，可实现快速浮点运算，而 TMU 支持快速三角函数计算。与 Arm® Cortex®-M7 内核相比，由于流水线结构经过优化，C28x 内核的频率相当于相应 Arm 内核频率能力的两倍。以 F280013x 为例，120MHz 频率能力相当于 240MHz Arm 内核的频率能力。

C2000 MCU 中的 ePWM 模块拥有全面且成熟的功能配置，支持高精度 PWM 模式，可提供精确可靠的驱动控制信号。此外，所有 C2000 MCU 均带有多个独立的 ADC 模块，可实现同步采样，从而提高采样速度。内置比较器可轻松配置为保护 AD 信号，其保护阈值由内部 DAC 设置，从而提供快速、灵敏且可靠的保护功能。

展示 C2000™ 控制 MCU 优化信号链的实时基准测试 应用手册介绍了围绕真实控制应用创建的实时基准测试，其中突出了实时控制的复杂性以及对于这种更全面的基准测试方法的需求。

当根据系统功能选择 C2000 MCU 时，请参考空调室外机的示例。MCU 的选择主要围绕驱动器板的基本控制要求进行，这些控制要求可分类如下：单电机控制、单电机 + 数字 PFC 控制、双电机 + 数字 PFC 控制以及三电机 + PFC 控制。

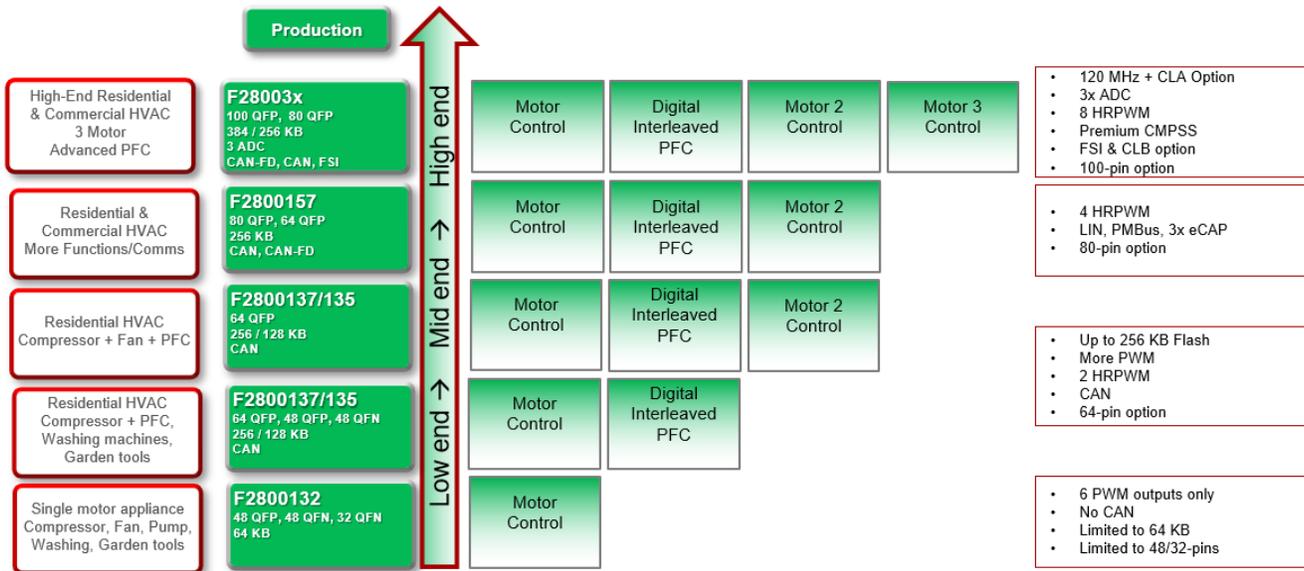


图 2-1. 根据系统控制要求选择 C2000™ MCU

在 TIDA-010265 单电机控制参考设计中，向软件添加了符合 IEC/UL 60730-1 要求的自检程序，可在 c2000ware_MotorControl_SDK_x_0x_00_00\solutions\tida_010265_wminv 中找到该程序。

3 IEC/UL 60730-1/60335-1 标准简介

UL 60335 是专为家用和类似电器设计的安全标准，由信誉良好的美国电气安全认证组织美国保险商实验室 (UL) 制定。该标准的主要目标是确保用户的安全和福祉。UL 60335 用于电气产品的安全审查和认证，是许多国家和地区采用或参考的全球公认标准。

UL 60335 电气标准包含电气产品的一系列安全要求，包括但不限于产品结构和材料、电气连接和绝缘、发热和机械强度、温度和电气参数。本应用手册的主要重点是介绍与 MCU 相关的安全要求。UL 60335-1 中的参考附录 R 列出了软件评估要求，其中大部分 MCU 控制失效自检要求几乎完全基于 IEC 60730-1，包括每项安全要求对应的法规。因此，下面的讨论与 IEC 60730-1 相关。

IEC 60730 规定了自动电气控制的安全和功能要求，是国际电工委员会 (IEC) 确立的国际公认标准。该标准主要适用于家用或类似电器及电子设备，包括但不限于家用电器、照明设备、空调系统和电动工具。从专业的角度分析 IEC 60730 标准，可以评估以下几个方面：

1. 器件安全要求：IEC 60730 针对自动控制器件有明确的安全要求，包括电气安全、机械安全、防火安全及其他方面。这些要求旨在确保器件在正常运行期间不会对人类或环境造成伤害。
2. 器件功能要求：IEC 60730 还定义了对自动控制器件的功能性能的要求，包括测量、检测、控制和调节。这些要求确保器件能够满足用户需求并表现出稳定可靠的性能。
3. 器件可靠性要求：IEC 60730 规定了自动控制器件的可靠性要求，包括器件寿命、故障诊断、故障恢复等方面。这些要求可确保器件在长期使用期间不会频繁发生故障，并且能够及时有效地处理故障。
4. 器件标识和标签要求：IEC 60730 还规定了自动控制器件的标识和标签要求，包括器件型号、序列号、安全相关信息等。这些要求可帮助用户正确使用器件并迅速了解安全性能。

总之，IEC 60730 标准从专业角度就自动控制器件的安全、功能性能、可靠性、标识和标签提出了详细要求。该标准有助于确保器件在设计、制造、使用和维护过程中实现预期的安全和功能性能。该标准在自动电气控制设备行业中起着至关重要的指导作用，为制造商、设计人员和用户提供了需要遵循的共享基准。

IEC 60730 定义了 3 个等级：

1. A 级：相关功能的示例包括室内恒温器、湿度控制、照明控制、计时器和开关。这些功能的特点是不依赖于设备的安全。
2. B 级：相关功能的示例包括过热切断，旨在防止诸如洗衣机、洗碗机、干衣机、冰箱、冰柜和炊具/炉灶等家用电器的不安全运行。
3. C 级：相关功能用于防止诸如爆炸的特定危险。这些功能包括自动燃烧器控制和针对不通风的封闭式热水器的热切断。

家用电器应用中的安全要求主要涉及 B 级。因此，根据 B 级引入和分析了后续标准要求和测试方法。

IEC 60730-1 概述了各种商品类型的具体规范，并在参考附录 H 中列出了电子控制器件的要求。附录 H.11.12.7 中详细说明了必须测试的元件，具体测试取决于软件分级。表 H.1 中列出了每个元件的故障类型和测试方法。表 3-1 根据 IEC-60730-1 B 级要求，介绍了电器 MCU 需要考虑的所有项目。

表 3-1. IEC 60730-1 B 级失效模式表 H.1

要测试的组件		要检测的硬件故障 错误
		B 级
1.CPU	1.1 寄存器	卡滞
	1.2 指令解码和执行	不适用
	1.3 程序计数器	卡滞
	1.4 寻址	不适用
	1.5 数据路径	不适用
2.中断		无或过于频繁
3.时钟		频率错误

表 3-1. IEC 60730-1 B 级失效模式表 H.1 (续)

要测试的组件		要检测的硬件故障 错误
		B 级
4. 存储器	4.1 非易失性	所有一位故障
	4.2 易失性	直流故障
	4.3 寻址	卡滞
5. 内部数据路径	5.1 数据	卡滞
	5.2 寻址	地址错误
6. 外部通信	6.1 数据	所有一位和双位错误
	6.2 寻址	地址错误
	6.3 时序	时间点错误 顺序错误
7. 输入/输出外设	7.1 数字 I/O	开路和短路或按产品标准规定
	7.2 模拟 I/O	开路和短路或按产品标准规定
	7.2.1 模数和数模转换器	
	7.2 模拟 I/O 7.2.2 模拟多路复用器	寻址错误

第 1、3、4、5 和 7 项主要与 MCU 的功能方面有关，而第 2 和 6 项对应于应用功能的测试要求。关于应用功能的故障检测，有必要根据软件结构和认证机构的具体要求添加相应的测试代码。对于 MCU 相关的故障检测，TI 的 C2000 系列 MCU 针对所有相关测试要求提供了原理和示例。

总之，通过将所需的 C2000 自检库整合到应用程序中，大多数电器都能快速满足 IEC/UL 60730-1 的 B 级测试要求，还可满足 IEC/UL 60335-1 安全认证的相关要求。

4 C2000™ 提供的 UL/IEC 60730-1/60335-1 诊断库

安全标准的要求几乎是统一的，但不同认证机构的理解和要求有所不同。因此，TI 针对这些标准中的 MCU 部分提供了非常成熟的诊断库，让工程师可以根据机构的具体要求进行库的调用。为了满足 IEC/UL 60730-1/60335-1 的测试要求，通常会在上电或复位后执行一轮自检，并在应用程序正常运行后执行定期自检。图 4-1 显示了常用的自检软件结构。

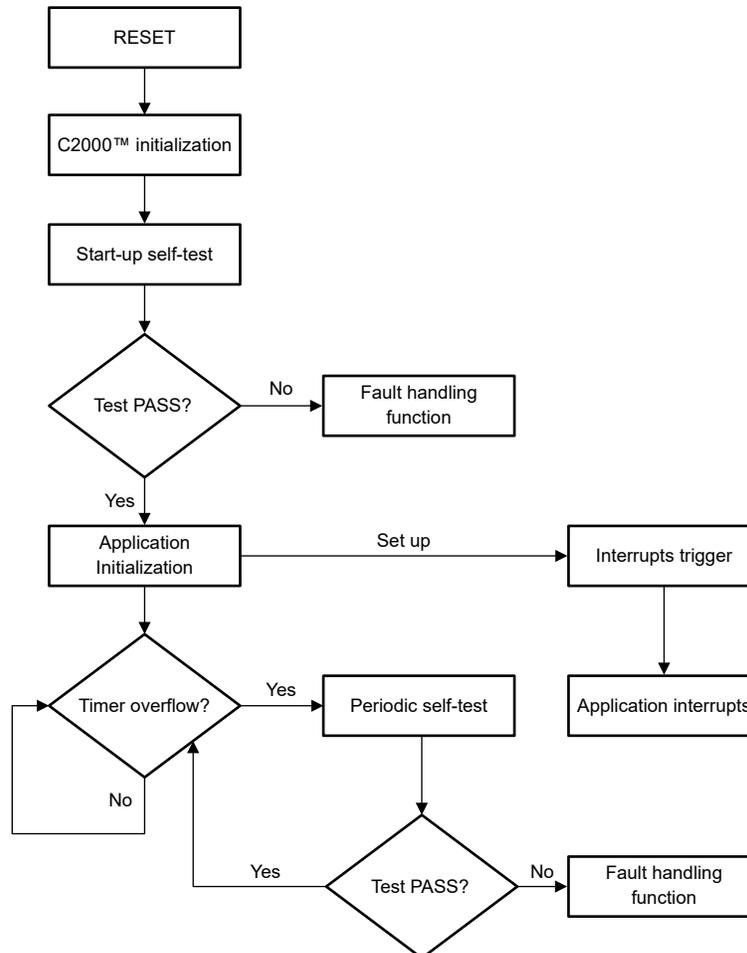


图 4-1. 常用的自检软件结构

上电后，当 MCU 初始化完成时，会执行一轮自检，包括栈溢出检测、看门狗测试、CPU 和 FPU 寄存器测试、PC 测试、时钟测试、RAM 测试 (March13N)、闪存测试 (CRC 或 ECC)、ADC 测试，等等。系统功能进入运行状态后，会执行定期自检。上电检测和定期检测之间的主要区别在于栈和看门狗。栈溢出检测由硬件触发，可在上电检测中进行配置。看门狗检测只需在上电检测期间执行一次，因为在程序运行时会定期馈送看门狗。

TI 的 C2000ware SDK 提供与前述 MCU 的自检相关的软件诊断库。以 F280013x 为例，代码位于 `c2000ware_x_0x_00_00\libraries\diagnostic\f280013x`，示例工程位于 `f280013x\examples\test_application`。为了帮助工程师更好地理解 C2000 MCU 自检的原理和方法，还为了便于将所需的源代码应用到系统工程中，以及与安全认证机构进行通信和确认，下面将详细介绍每个自检项。

4.1 栈溢出检测

ERAD 模块中的增强型总线比较器 (EBC) 单元可以监测内部地址和数据总线，当指定的总线和掩码与指定值匹配时，EBC 会触发 RTOSINT 中断。因此，检测栈溢出的基本方法是配置 EBC 单元，在数据写入地址总线处于栈结束之前的某个范围内时触发中断。图 4-2 阐明了这一概念。该存储器仅保留供栈使用，因此指定地址范围内的数据写入表明栈使用量即将达到分配的大小限值。检测到即将发生的栈溢出会触发可屏蔽中断。程序编入的错误响应和任何必要的软件要求由系统集成商定义。

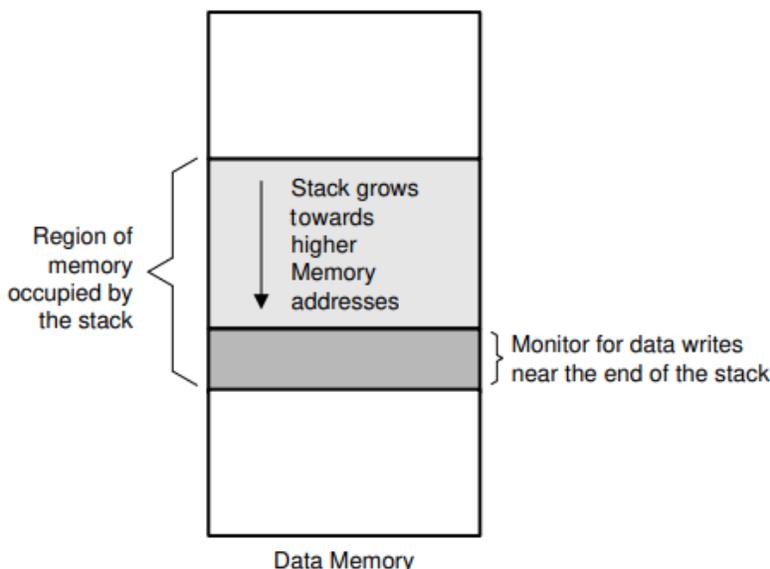


图 4-2. 栈溢出监测

API 函数 `STL_SP_configSP(const STL_SP_Handle spHandle)` 位于示例工程中，源代码位于 `f280013x\source\stl_sp.c`。需要配置 `STL_SP_MARGIN` 参数，参考值为 `0x50`。此参数定义了从栈尾观察到的存储器空间范围。

4.2 看门狗

看门狗自检的主要用途是验证是否可以正确触发看门狗计数器溢出。在自检期间，看门狗计数器溢出触发功能从“复位”切换到“中断”。通过检查程序是否在特定时间段内跳转到看门狗中断，并计算触发次数，即可确定看门狗的功能是否正常。图 4-3 显示了看门狗测试结构。示例工程位于 `f280013x\examples\sd1_ex_watchdog`。

当系统正常工作时，需要启用看门狗复位模式，并需要定期向看门狗提供应用中断。这样就可以同时满足周期性看门狗测试和 PC 指针测试的测试要求。

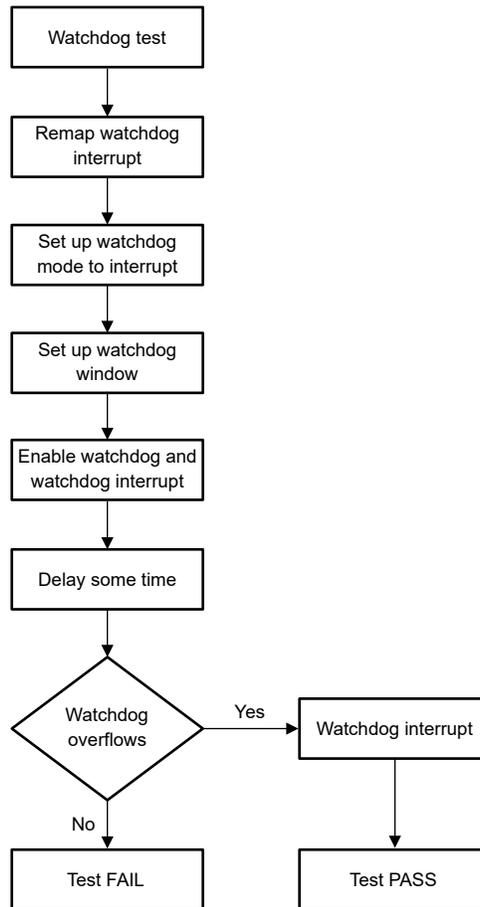


图 4-3. 看门狗测试结构

4.3 CPU 和 FPU 寄存器

此函数测试 CPU 内核寄存器和 FPU 寄存器是否存在卡滞位。接受测试的 CPU 寄存器包括：ACC、P、XAR0 至 XAR7、XT、SP、IFR、IER、DBGIER、ST0、ST1（不包括 IDLESTAT 和 LOOP 位）和 DP。接受测试的 FPU 寄存器包括：R0 至 R7、RND32、TF、ZI、NI、ZF、STF 寄存器 NF 位、R0 至 R7 影子寄存器和 STF。在此测试中会保存和恢复 ST0、ST1、DP、IER、IFR、DBGIER、入口保存 XAR 寄存器、STF 和入口保存 RnH 寄存器（由编译器调用约定所定义）的值。在调用 CPU 和 FPU 测试 API 前禁用中断。

CPU 和 FPU 的自检非常相似。首先，根据机构的要求，将测试模式设置为一个特定的值，例如 0XA AAAA。在测试期间，CPU 和 FPU 寄存器数据需要存储在栈中，然后将测试模式写入 CPU 和 FPU 寄存器。读取这些寄存器的数据后，会验证数据是否与预设测试模式匹配。最后，CPU 和 FPU 寄存器数据从栈中恢复，并完成 CPU 或 FPU 的寄存器自检。test_application 工程包含适用于 CPU 和 FPU 自检的相应案例，即 STA_CPU_REG 和 STA_FPU_REG，其中的测试函数为 STL_CPU_REG_testCPURegisters(bool injectError) 和 STL_CPU_REG_testFPURegisters(bool injectError)。两个函数都由汇编代码组成，源代码位于 f280013x\source\stl_cpu_reg.asm。图 4-4 显示了 CPU 和 FPU 寄存器测试结构。

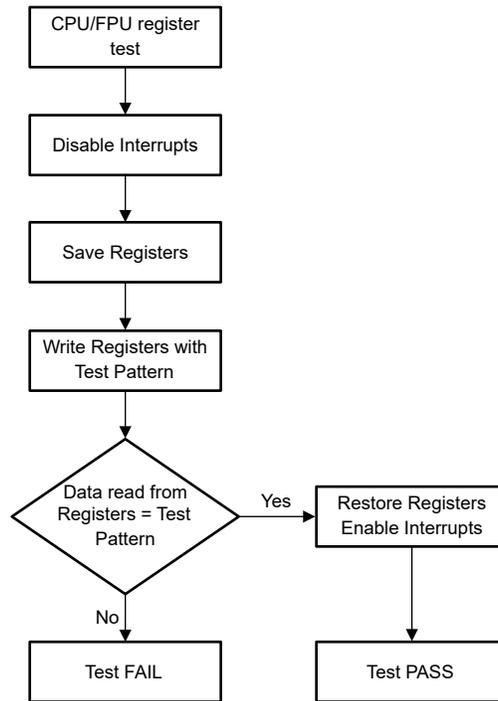


图 4-4. CPU、FPU 寄存器测试结构

请注意，设置 INTM 不会阻止中断传播到 IFR 寄存器，因此虽然该函数会保存和恢复 IFR，但在此测试期间到达 IFR 的中断会通过恢复操作清除，否则可能导致此测试失败。如果需要在运行时使用此测试，则可以修改 `stl_cpu_reg.asm` 中的 `STL_CPU_REG_testCPURegisters()` 以删除 IFR 测试（以及相关的保存和恢复）。或者，在 PIE 级 (PIEIER) 禁用所有中断，在非 PIE 中断的情况下（例如 CPU 计时器 1 和 2）则在外设级禁用中断，并在 `STL_CPU_REG_checkCPURegisters()` 完成后恢复中断。也可以删除 IFR 测试部分，这对于某些认证机构也是可以接受的。

4.4 程序计数器 (PC)

过去，实现 PC 指针检测的方法是通过自检程序跳转到一个指定的函数地址，然后将返回的地址与预设地址相比较。如果地址相同，则表示自检通过。此检查的本质是验证函数跳转的正确性。

在实际应用中，会启用看门狗，并会在固定频率中断中执行看门狗馈送操作。因此，如果能进入看门狗中断以执行馈送，即表示 PC 指针工作正常。如果 PC 指针失败，则会发生看门狗计时器溢出引起复位的情况，从而实现相同的保护目的。因此，PC 指针通常不会单独自检。PC 指针检测可以与启用看门狗同时进行，在提供给认证机构的文档中进行了相关说明。

4.5 时钟

在电器应用中，内部振荡器通常用作时钟源。C2000 MCU 有两个内部振荡器。这两个振荡器可用于相互验证时钟频率的稳定性。C2000 MCU 有两种时钟自检方法。一个是使用 HRPWM 模块，另一个是使用 CPU 计时器。两种测试方法都可以在 `test_application` 工程中找到：`STA_OSC_HR` 对应于 HRPWM，`STA_OSC_CT` 对应于 CPU 计时器。

应使用 CPU 计时器模块来检测不正确的时钟频率以及时钟源之间的漂移。CPU 计时器 2 包含一个可编程计数器，可以选择该计数器的预分频值和时钟源。以系统时钟为参考时基，可以确定所选时钟与系统时钟之间的频率关系。通过对参考时钟和测量时钟使用不同的时钟源和不同的预分频值，可以减少共因失效。

使用 CPU 计时器进行检测的原理是，通常将系统时钟设置为内部振荡器 2 (XTAL2)，并将 CPU 计时器 2 的时钟源切换到内部晶体振荡器 1 (XTAL1)。系统时钟和 CPU 计时器 2 同时用于测量一段时间，并比较计数之间的差值以确定内部振荡器是否存在频率偏差。如果所经历的节拍数不在指定范围内，函数会返回 `STL_OSC_CT_FAIL`。否则，函数返回 `STL_OSC_CT_PASS`。源代码位于 `f280013x\source\stl_osc_ct.c`。

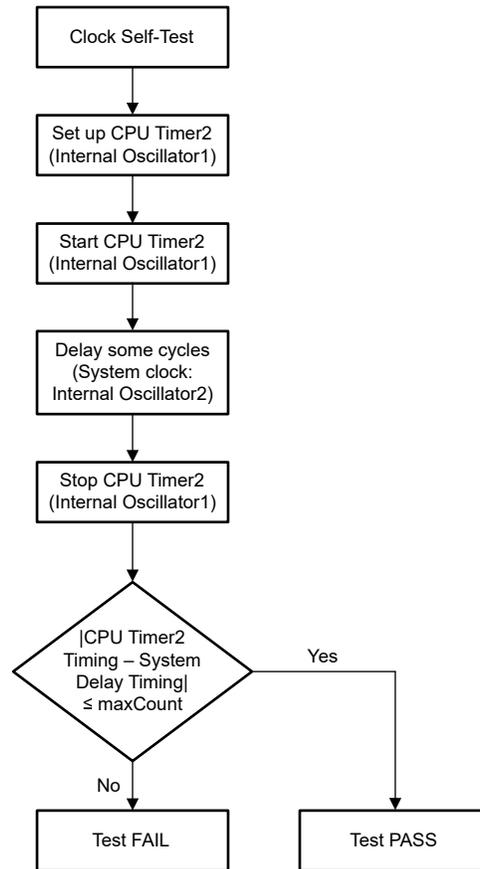


图 4-5. 时钟测试结构

4.6 RAM

RAM 测试通常对指定的 RAM 存储器执行 March13N 无损存储器测试。文本首先将存储器的原始内容复制到预设的地址，执行存储器测试，然后将原始内容恢复到受测存储器。图 4-6 显示了 RAM March 测试结构。RAM March 测试位于名为 STA_MARCH_COPY 的 test_application 工程中，源代码位于 f280013x\source\st1_march_s.asm。

如果从 RAM 运行该代码，请注意不要在该存储器测试中执行自检，也就是说不要在 RAM 的 March13N 程序代码中执行 March13N 存储器测试。这样做可能导致 ITRAP。要测试此 March13N 算法的程序代码，请在 RAM 或闪存中创建此函数的副本，并运行副本中的存储器测试代码。此函数会禁用全局 CPU 中断 (DINT)，然后在测试完成后重新启用它们。

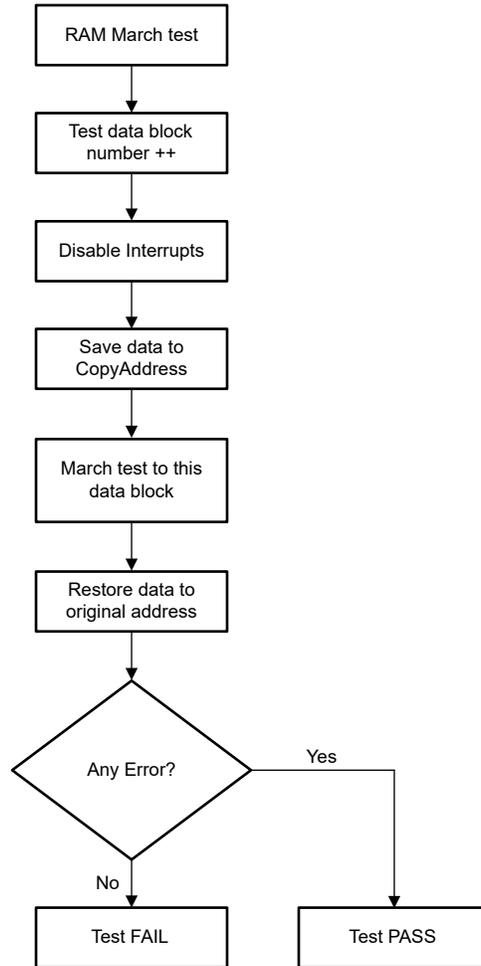


图 4-6. RAM March 测试结构

由于需要禁用全局中断，因此不要让每次检测的持续时间过长而影响系统功能中断的执行。向应用程序添加此函数时，请先确认要检查的区域的大小和地址，然后通过平衡测试频率和执行时间来确定每次检测的数据长度。

4.7 闪存

闪存验证的主要目的是检查闪存中的代码和数据是否与初始内容一致。过去，闪存验证通过 CRC 实现。闪存块按顺序进行 CRC 计算，计算出的 CRC 存储为黄金 CRC 数组。在上电和周期性循环验证期间，再次按顺序计算闪存块的 CRC，并将结果与相应的黄金 CRC 进行比较。如果结果匹配，则验证通过。这种验证方法的问题在于，在闪存验证期间仍然需要禁用全局中断，因此单次检测的每个存储块的大小不能太大，以免影响系统功能中断的执行。随着电器功能的增加以及 MCU 闪存的逐渐增大，一轮闪存自检所需的时间可能会变得过长，无法满足认证组织的安全要求。因此，当使用 CRC 来验证闪存时，有必要平衡单次检测中每个存储块的大小与一轮自检所需的时间。图 4-7 显示了闪存 CRC 测试结构。闪存 CRC 测试位于名为 STA_FLASH_CRC 的 test_application 工程中，源代码位于 f280013x\source\st1_crc.c。

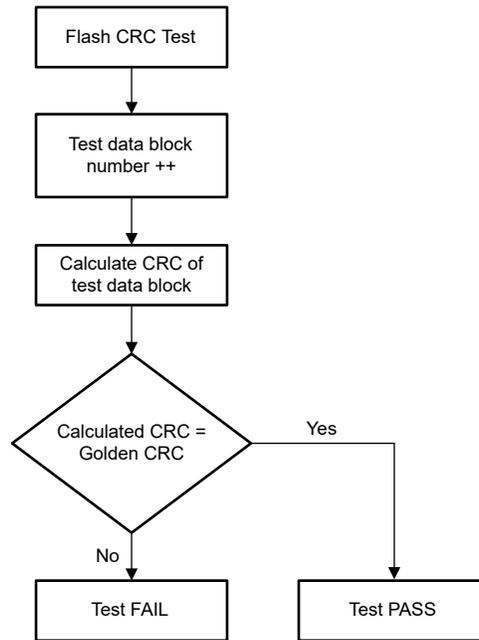


图 4-7. 闪存 CRC 测试结构

在 TI 推荐用于电器应用的第三代 C2000 MCU 中，闪存附带 ECC 验证功能，这大大减少了闪存验证所需的时间。对闪存进行编程时，ECC 代码会生成并存储在相应的存储器位置。当读取闪存时，ECC 模块再次执行 ECC 计算，并将结果与编程期间生成的 ECC 进行比较。这样就可以检测一位错误和双位错误，其中一位错误是可校正的。

片上闪存可以进行单错校正双错检测 (SECCDED) 错误校正码 (ECC) 诊断。在该 SECCDED 机制中，会使用一个 8 位代码字来存储 64 位数据的 ECC 和相应的地址。闪存组输出的 ECC 解码逻辑检查存储器内容的正确性。对读取的每个数据和程序都进行 ECC 评估。连接 CPU 和闪存的数据和程序互连不受 ECC 保护。根据是否启用校正功能，可以校正或不校正检测到的可校正错误。一位地址 ECC 错误被标记为不可校正的错误。无法校正的错误会生成 NMI 并使 ERRORSTS 引脚置为有效。闪存包装程序会监测已校正错误（一位数据错误）的计数，一旦计数超过编程阈值，就会生成中断。最后一个错误位置的损坏存储器地址也记录在闪存包装程序中。

可通过以下方式测试 ECC 的功能：在测试模式下注入一位错误和双位错误，对存在 ECC 错误的位置执行读取，并检查是否存在错误响应。借助 ECC 测试寄存器 (FECC_CTRL、FADDR_TEST、FECC_TEST、FDATAH_TEST、FDATAL_TEST) 即可检查闪存 ECC 逻辑。也可以使用这项技术来验证与一位错误相关的错误计数器和阈值中断是否能够正常运行。图 4-8 显示了闪存 ECC 测试结构。闪存 ECC 测试位于 example\sd1_ex_flash_ecc_test 工程中，源代码位于 f280013x\examples\sd1_ex_flash_ecc_test\sd1_ex_flash_ecc_test.c。

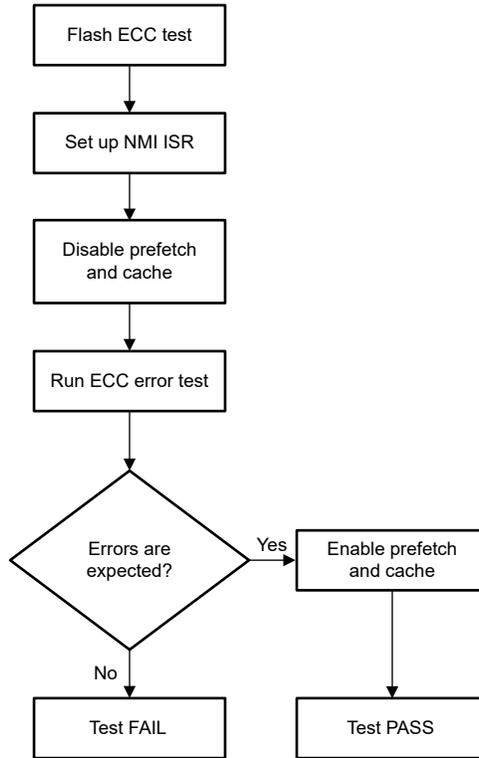


图 4-8. 闪存 ECC 测试结构

4.8 ADC

此外，为了获得 UL/IEC 60730-1/60335-1 认证，ADC 模块通常需要进行自检。TLV431 等外部电压基准芯片可以添加到与 AD 端口相连的 C2000 MCU 的外设。一个 C2000 集成电路通常包含多个 ADC 模块，且每个 ADC 模块都需要接受验证。因此，连接到电压基准芯片的 AD 端口通常能够由任何 ADC 模块进行采样。该信号在上电自检和定期自检期间进行采样，如果信号处于特定偏差范围内，则被视为“通过”。

4.9 周期时间和存储器用量

表 4-1 列出了主要的自检项，以及相应函数的存储器用量和执行周期数。

表 4-1. 周期时间和存储器用量

项	API	存储器 (16 位字)	通过周期数 (RAM)
CPU	STL_CPU_REG_testCPURegisters	205	652
FPU	STL_CPU_REG_testFPURegisters	106	287
时钟	STL_OSC_CT_startTest 和 STL_OSC_CT_stopTest	96	145
RAM	STL_March_testRAMCopy (16 字)	47	501
闪存 (CRC)	STL_CRC_checkCRC (32 字)	36	234
闪存 (ECC)	RunECCErrorTest	67	276

其中，RAM 和闪存 (CRC) 仅列出 16 字和 32 字的通过周期。完整 RAM 和闪存 (CRC) 测试需要考虑总的测试存储器空间和自检执行周期。闪存 (ECC) 在一轮自检中只需要执行一次，这就是闪存 (ECC) 可以显著减少 CPU 使用自检功能的原因。

5 参考文献

1. IEC 60730-1 Automatic Electrical Controls - Part1: General Requirements, International Electrotechnical Commission, Edition, Edition 5.2 2020-04
2. IEC 60335-1 Household and similar electrical appliances - Safety - Part1: General Requirements, International Electrotechnical Commission, Edition, Edition 5.2 2016-05
3. 德州仪器 (TI), [C2000™ 实时微控制器的工业功能安全](#) 产品概述
4. 德州仪器 (TI), [为 C2000 实时微控制器实现 IEC 60730/UL 1998 合规性](#) 产品概述
5. 德州仪器 (TI), [IEC60730 安全应用中的 C2000™ MCU 安全手册](#) 用户指南
6. 德州仪器 (TI), [TMS320F280015x 功能安全手册](#) 功能安全信息
7. 德州仪器 (TI), [TMS320F28002x 安全手册](#) 功能安全信息
8. 德州仪器 (TI), [TMS320F28003x 实时微控制器功能安全手册](#)
9. 德州仪器 (TI), [TMS320F28004x 功能安全手册](#) 用户指南
10. 德州仪器 (TI), [TMS320F2837xD、TMS320F2837xS 和 TMS320F2807x 功能安全手册](#) 用户指南
11. 德州仪器 (TI), [在 TMS320C28x DSP 上进行在线栈溢出检测](#) 应用手册
12. 德州仪器 (TI), [C2000™ CPU 存储器内置自检](#) 应用手册
13. 德州仪器 (TI), [C2000™ 实时 MCU 安全机制](#) 产品概述

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