



用于安全相关应用微控制器的 TPS65381A-Q1 多轨 电源

1 器件概述

1.1 特性

- 适用于汽车电子 应用
- 具有符合 **AEC-Q100** 标准的下列特性：
 - 器件温度 1 级：–40°C 至 +125°C 的环境运行温度范围
 - 器件 HBM ESD 分类等级 H2
 - 器件 CDM ESD 分类等级 C3B
- 多轨电源支持等
 - TI Hercules™TMS570、C2000™以及各种功能安全架构微控制器
- 电源轨
 - 输入电压范围：
 - 5.8V 至 36V (CAN、I/O、MCU 内核以及传感器电源稳压器功能)
 - 4.5V 至 5.8V (3.3V I/O 和 MCU 内核稳压器功能)
 - 6V 异步开关模式前置稳压器，具有内部 FET 和 1.3A 输出电流
 - 5V (CAN) 电源电压线性稳压器，具有内部 FET、300mA 输出电流
 - 3.3V 或 5V (MCU I/O) 电压线性稳压器，具有内部 FET、300mA 输出电流
 - 0.8V 至 3.3V 可调 (MCU 内核电压) 线性稳压器控制器，具有外部 FET
 - 3.3V 至 9.5V 可调传感器电源：线性跟踪稳压器，具有内部 FET、100mA 输出电流以及用于对电源短路和接地短路的保护措施
 - 电荷泵：通常比电池电压高 12V
- 电源和系统监控
 - 所有稳压器输出、电池电压和内部电源均具有独立欠压和过压监控
 - 稳压器基准电压和用于电压监控的电压基准是相互独立的。电压监控电路具有独立带隙基准和单独电源输入引脚
 - 针对所有电压监控的自检 (在开通期间以及由外部 MCU 启动之后自动执行)
 - 通过电流限制和过热关断对所有具有内部 FET 的电源进行保护
- 微控制器 (MCU) 接口
 - 看门狗：触发模式 (打开/关闭窗口) 或问答模式
 - 用于锁步双核 MCU 的 MCU 错误信号监控器，包括 Hercules™ TMS570、C2000™ 以及各种使用脉宽调制 (PWM) 错误输出的功能安全架构 MCU
 - 用于执行器件自检、诊断和外部互连检查的诊断状态
 - 在进行错误事件检测时用于器件和系统保护的安全状态
 - 用于内部振荡器的时钟监视器
 - 诊断状态中，每个器件开通或由 MCU 激活时执行的模拟和数字关键电路自检
 - 在非易失性存储器、器件和配置寄存器上执行 CRC
 - MCU 的复位电路和输出引脚
 - 诊断输出引脚，允许 MCU 通过多路复用器监测器件的内部模拟和数字信号
- 串行外设接口 (SPI)
 - 可配置寄存器
 - 看门狗问答
 - 诊断状态读取
 - 与 3.3V 和 5V 逻辑电平兼容
- 使能驱动输出，可在检测到系统故障时禁用保险路径或外部功率级
- 通过 IGNITION 引脚或 CAN WAKEUP 引脚唤醒
- 封装：32 引脚 HTSSOP PowerPAD™ IC 封装



1.2 应用

- 汽车安全 应用
 - 助力转向：电动助力转向 (EPS) 和电液助力转向 (EHPS)
 - 制动：防抱死制动系统 (ABS)、电子稳定性控制 (ESC) 和电子驻车制动
 - 高级驾驶员辅助系统 (ADAS)
 - 悬架
- 工业安全 应用
 - 安全可编程逻辑控制器 (PLC)
 - 安全 I/O 控制模块
 - 测试和测量
 - 铁路和地铁信号控制和安全模块
 - 升降机和自动扶梯安全控制
 - 风力涡轮机控制

1.3 说明

TPS65381A-Q1 器件是一种多轨电源，旨在为汽车和工业等市场中的安全相关应用微控制器 (MCU) 供电。该器件支持德州仪器 (TI) 的 Hercules™ TMS570 MCU 和 C2000™ MCU 系列以及其他各种具有双核锁步 (LS) 或松散耦合架构 (LC) 的 MCU。

TPS65381A-Q1 器件集成了多个为 MCU、控制器局域网 (CAN) 或 FlexRay 以及外部传感器供电的电源轨。异步降压开关模式电源转换器具有内部 FET，可将输入电源（电池）电压转换为 6V 的前置稳压器输出。该 6V 前置稳压器为其他稳压器供电。该器件支持通过 IGNITION 或 CAN 收发器唤醒。

例如，该具有内部 FET 的集成式固定 5V 线性稳压器可用于 CAN 或 FlexRay 收发器电源。第二个线性稳压器也具有内部 FET，可选择将输出电压调节至 5V 或 3.3V，以适用于 MCU I/O 电压。

TPS65381A-Q1 器件包含可调线性稳压器控制器，需要使用外部 FET 和电阻分压器，将可调电压稳定在 0.8V 和 3.3V 之间，以适用于 MCU 内核电源。

集成式传感器电源能够以跟踪模式或可调输出模式运行，并包含接地短路和对电池短路保护。因此，该稳压器能够为模块外部的传感器或电子控制单元 (ECU) 供电。

集成式电荷泵为内部稳压器提供过驱电压。通过使用电荷泵输出来控制外部 NMOS 晶体管，该电荷泵还可用于电池反向保护电路。当器件必须以可能的最低电源电压运行时，与传统电池反向阻断二极管相比，该解决方案支持以更低的最小电池电压运行。

该器件监控所有稳压器输出、电池电压和内部电源轨上的欠压和过压情况。第二个带隙基准独立于主带隙基准，可用于欠压和过压监控，以免未检测到主带隙基准内的任何漂移。此外，还实现了稳压器电流限制和温度保护。

TPS65381A-Q1 器件具有监控和保护功能，包括：具有触发模式和问答模式的看门狗、MCU 错误信号监控器、针对内部振荡器的时钟监控、针对时钟监控器的自检、针对非易失性存储器的 CRC、支持 MCU 监测器件的内部模拟和数字信号的诊断输出引脚、针对 MCU 的复位电路以及可在检测到故障时禁用保险路径或外部功率级的使能驱动输出。内置自检 (BIST) 可在启动时自动监控器件功能。专用的诊断状态支持 MCU 检查 TPS65381A-Q1 监控和保护功能。

TPS65381A-Q1 器件采用 32 引脚 HTSSOP PowerPAD 封装。

器件信息⁽¹⁾

器件型号	封装	封装尺寸（标称值）
TPS65381A-Q1	HTSSOP (32)	11.00mm x 6.20mm

(1) 如需了解所有可用封装，请参阅数据表末尾的可订购产品附录。

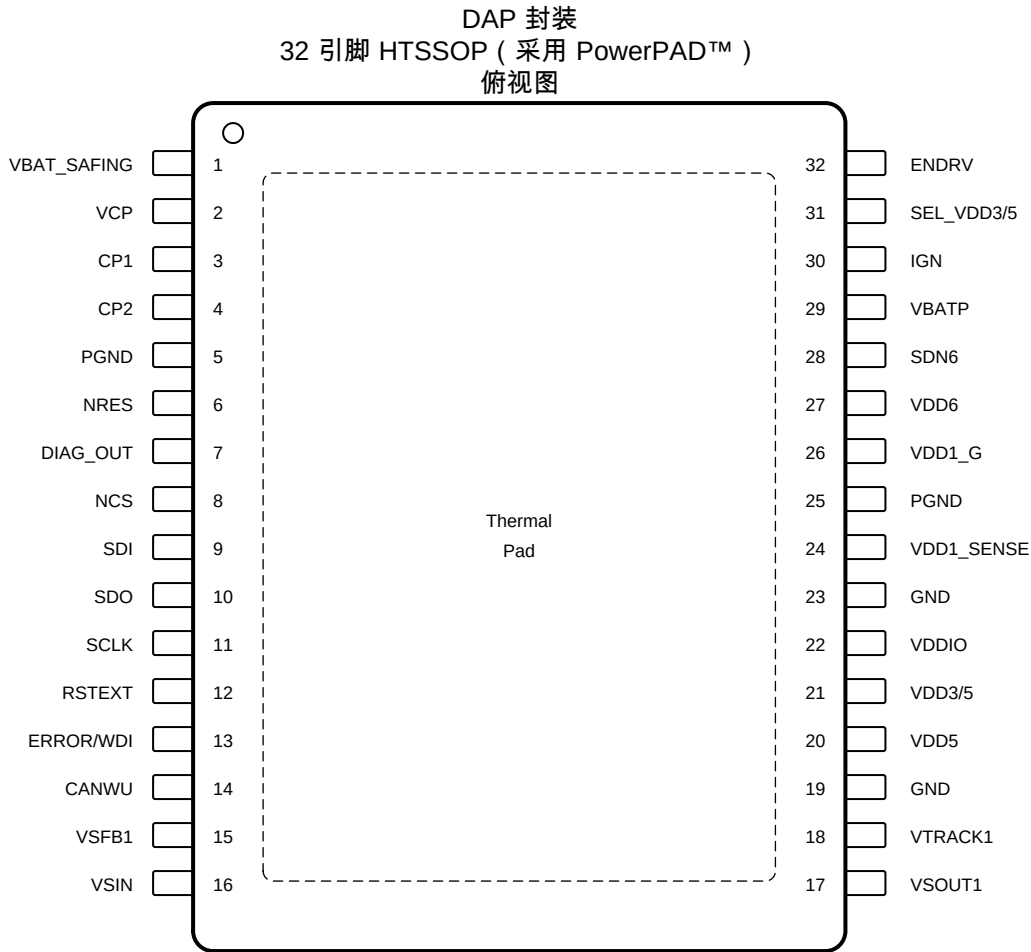
2 修订历史记录

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

Changes from Original (July 2016) to Revision A	Page
• 已发布完整版数据表	2

3 引脚配置和功能

本节中的引脚配置图未按比例绘制。有关封装尺寸，请参阅节 10 中的机械数据。



引脚功能

引脚		类型	说明
编号	名称		
1	VBAT_SAFING	PWR	用于监控 (VMON) 和 BG2 功能的电池 (电源) 输入 (必须提供反向保护) 应连接至 VBATP
2	VCP	PWR	电荷泵输出电压
3	CP1	PWR	电荷泵外部电容器，高电压侧
4	CP2	PWR	电荷泵外部电容器，低电压侧
5	PGND	GND	接地 (电源)
6	NRES	O	微控制器 (MCU) 的冷复位输出信号 (低电平有效，内部上拉，开漏输出)
7	DIAG_OUT	O	用于诊断多路复用器的诊断输出引脚。到 MCU ADC 和数字 IO 的内部模拟 (AMUX) 和数字 (DMUX) 信号连接
8	NCS	I	SPI 片选 (低电平有效，内部上拉)
9	SDI	I	SPI 串行数据输入 (内部下拉)
10	SDO	O	SPI 串行数据输出
11	SCLK	I	SPI 时钟 (内部下拉)
12	RSTEXT	I	用于通过连接至 GND 的电阻器设置复位扩展时间的配置引脚
13	ERROR/WDI	I	使用 MCU ESM (看门狗处于问答模式) 时来自 MCU 错误输入信号、触发模式下 (未使用 MCU ESM) 看门狗的触发器输入。该引脚是边沿触发型引脚。

引脚功能 (continued)

引脚		类型	说明
编号	名称		
14	CANWU	I	来自 CAN 收发器、其他收发器或其他源的唤醒输入。使用 CANWU_L 锁存的唤醒请求 (内部下拉)
15	VSFB1	I	传感器电源稳压器 (VSOUT1) 的反馈输入基准
16	VSIN	PWR	传感器电源稳压器 (VSOUT1) 的输入电源电压
17	VSOUT1	PWR	VSOUT1 传感器电源稳压器的输出电压
18	VTRACK1	I	传感器电源稳压器 (VSOUT1) 的跟踪输入基准 (内部下拉)
19	GND	GND	接地 (模拟)
23	GND	GND	接地 (模拟)
20	VDD5	PWR	VDD5 稳压器输出电压
21	VDD3/5	PWR	VDD3/5 稳压器输出电压
22	VDDIO	PWR	I/O 电源输入 (连接至 MCU 的引脚和来自 MCU 的引脚)
24	VDD1_SENSE	I	VDD1 稳压器的基准输入 (反馈) 和 VDD1 稳压器的 UV/OV 监控的输入
25	PGND	GND	接地 (电源)
26	VDD1_G	O	VDD1 稳压器外部 FET 的栅极驱动器
27	VDD6	PWR	VDD6 开关模式稳压器反馈输入和集成式 VDD5 和 VDD3/5 稳压器的电源输入
28	SDN6	PWR	VDD6 开关模式稳压器的开关节点
29	VBATP	PWR	电池 (电源) 电压 (必须由反向保护)，器件的主电源输入
30	IGN	I	来自点火开关 (钥匙) 或其他源的唤醒输入 (内部下拉)
31	SEL_VDD3/5	I	VDD3/5 稳压器的输入选择电压电平 (SEL_VDD3/5 引脚断开：来自 VDD3/5 的稳定电压；SEL_VDD3/5 引脚连接到 GND：来自 VDD3/5 的 5V 稳定电压)
32	ENDRV	O	外设 (例如电机驱动器 IC) 使能输出信号，保险路径输出 (内部上拉，开漏输出)
—	散热焊盘	—	将热通路放置到大型接地平面并连接至 GND 和 PGND 引脚。

4 规格

4.1 绝对最大额定值

在自然通风条件下的工作温度范围内 (除非另有说明) ⁽¹⁾⁽²⁾

POS			最小值	最大值	单位
M1.1	受保护的电池电压	VBATP、VBAT_SAFING、VSIN	−0.3	40	V
M1.2	电荷泵电压	VCP、CP1 ⁽³⁾	−0.3	VBATP + 16 和 52 中的较小者	V
M1.3	电荷泵泵浦电容器电压	CP2	−0.3	40	V
M1.3a	电荷泵过驱电压	VCP ⁽³⁾ -VBATP	−0.3	16	V
M1.4	VDD6 开关节点电压	SDN6	−0.3	40	V
M1.5	VDD6 输出电压	VDD6	−0.3	40	V
M1.6	VDD5 输出电压	VDD5	−0.3	7	V
M1.7	VDD3/5 输出电压	VDD3/5	−0.3	7	V
M1.8	VDD1_G 电压	VDD1_G	−0.3	15	V
M1.10	VDD1_SENSE 电压	VDD1_SENSE	−0.3	7	V
M1.11	传感器电压跟踪电压	VTRACK1	−0.3	40	V
M1.12	传感器电源输出和反馈电压	VSOUT1、VSFB1 ⁽⁴⁾	−2	18	V
M1.14	模拟/数字基准输出电压	DIAG_OUT	−0.3	7	V
M1.15	逻辑 I/O 电压	VDDIO、ERROR/WDI、ENDRV、NRES、NCS、SDI、SDO、SCLK、RSTEXT	−0.3	7	V
M1.16		SEL_VDD3/5	−0.3	40	V
M1.17	IGN 唤醒	IGN	−7	40	V
M1.18	CAN 唤醒	CANWU	−0.3	40	V
M1.19	运行虚拟结温 T _j			150	°C
	贮存温度, T _{stg}		−65	150	°C

- (1) 超出绝对最大额定值下列值的应力可能会对器件造成永久损坏。这些仅为在应力额定值下的工作情况，对于额定值下的器件的功能性操作以及在超出推荐的操作条件下的任何其它操作，在此并未说明。在绝对最大额定值条件下长时间运行会影响器件可靠性。
- (2) 除非另有说明，否则所有电压值都以网络接地引脚为基准。
- (3) VCP 和 CP1 是输出引脚，不应向这些引脚施加任何外部电压。这些引脚的绝对最大额定值是可能在引脚上显示的值。
- (4) VSOUT1 直接连接至 VSFB1 (适用于单位增益)，或者通过电阻分压器进行连接 (跟踪模式增益或非跟踪模式输出电压调节)。如果发生对电源短路故障，则 VSOUT1 上的电压等于器件的电源电压 (VBATP、VBAT_SAFING 和 VSIN，其中 VSIN 连接至 VBATP，因为它是电源，而不是 VDD6)，VSFB1 电压将直接 (对于单位增益) 或通过电阻分压器 (跟踪模式增益或非跟踪模式输出电压调节) 遵循 VSOUT1 (根据用例)。

4.2 ESD 额定值

POS			值	单位
M1.21	V _(ESD) 静电放电	人体放电模型 (HBM)，符合 AEC Q100-002 ⁽¹⁾	除 VSOUT1 (17) 和 VSFB1 (15) 以外的所有引脚	±2000
M1.20			在传感器电源引脚 VSOUT1 (17) 和 VSFB1 (15) 上	±4000
M1.22		充电器件模型 (CDM)，符合 AEC Q100-011	转角引脚 (1、16、17 和 32)	±750
M1.23			所有引脚	±500

- (1) AEC Q100-002 指示应当按照 ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 规范执行 HBM 应力测试。

4.3 建议运行条件

在工作温度范围内并以 GND 和 PGND (GND = PGND) 引脚为基准 (除非另有说明)

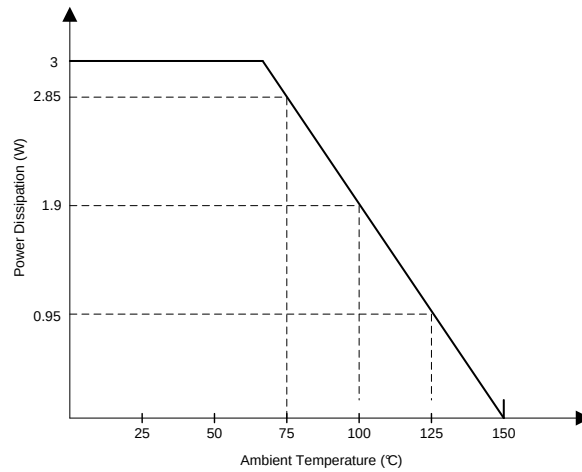
POS		最小值	最大值	单位
M1.20a	运行环境温度 T_A	-40	125	°C
R1.1	用于初次开通的 VBATP 上的最低输入电源电压 (POS 6.2, VBATP_UV _{on}) ⁽¹⁾⁽²⁾		5.8 ⁽³⁾	V
R1.2	VBATP 上的输入电源电压 ⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾ - 为了支持在 VBATP 介于 5.8V 和 7V 之间时运行, 器件保持正常工作。某些电源轨可能处于压降或欠压状态, 具体取决于实际输入电源和特定稳压器的配置。 - VDD6 可能处于压降模式 (100% 占空比) - 配置为 5V 输出的 VDD3/5 可能处于压降状态。如果输出达到 VDD3/5_UV 阈值, 则器件会由于 VDD3/5 欠压事件转换到复位状态。如果 VDD3/5 配置为 3.3V 输出, 则将保持正常工作状态。 - VDD5 可能处于压降状态。如果输出达到 VDD5_UV 阈值, 则器件会通过 VDD5_UV 状态位指示欠压事件。 - VSOUT1 可能处于压降状态, 具体取决于配置。如果输出达到 VSOUT1_UV 阈值, 则器件会通过 VSOUT1_UV 状态位指示欠压事件。	5.8	34 ⁽⁵⁾	V
R1.3	初次开通后 VBATP 上的输入电源电压, 可在发生低输入电源电压事件期间正常运行 (POS 6.1, VBATP_UV _{off}) : ⁽¹⁾⁽⁶⁾ - 器件保持正常运行。某些电源轨可能处于压降或欠压状态, 具体取决于实际输入电源和特定稳压器的配置。 - VDD6 处于压降模式 (100% 占空比)。 - 配置为 5V 输出的 VDD3/5 可能处于压降状态。如果输出达到 VDD3/5_UV 阈值, 则器件会由于 VDD3/5 欠压事件转换到复位状态。如果 VDD3/5 配置为 3.3V 输出, 则将保持正常工作状态。 - VDD5 可能处于压降状态。如果输出达到 VDD5_UV 阈值, 则器件会通过 VDD5_UV 状态位指示欠压事件。 - VSOUT1 可能处于压降状态 (具体取决于配置), 如果输出达到 VSOUT1_UV 阈值, 则器件会通过 VSOUT1_UV 状态位指示欠压事件。	4.5	5.8	V
R1.4	VDDIO 电源电压范围	3.3	5	V
R1.5	待机模式下的电流消耗 (禁用所有稳压器输出) IGN = 0V, CANWU = 0V, 5.8V ≤ VBAT ≤ 20V (对于 $T_J < 85^\circ\text{C}$) 或 5.8V ≤ VBAT ≤ 14V (对于 $T_J = 125^\circ\text{C}$)		75	μA

- (1) VBATP 应连接到 VBAT_SAFING。
- (2) VBAT_SAFING 具有足够高的电源电压, 能够为 VMON 块和 AVDD_VMON_UV 之上的内部电源轨 AVDD_VMON 供电。
- (3) 器件可能会在 VBATP 低于 5.8V 时开通, 但它在 VBATP 为 5.8V 或更高时会始终开通, 而 VBAT_SAFING 具有足够高的电源电压, 能够为 VMON 块和 AVDD_VMON_UV 之上的内部电源轨 AVDD_VMON 供电。
- (4) 在 VBAT 缓慢下降情况下以及当 VDD3/5 电源轨配置为 5V 电源轨时, NRES 输出可能会在 VBAT 处于大约 6.3V 时被拉低。这是由于 VDD3/5 电源轨上的欠压瞬态导致的。
在 VBAT 缓慢上升情况下以及当 VDD3/5 电源轨配置为 5V 电源轨时, NRES 输出可能会在 VBAT 处于大约 6.6V 时被拉低。这是由于 VDD3/5 电源轨上的欠压瞬态导致的。在类似的情况下, 可以在 VDD5 和 VSOUT1 电源轨上观察到欠压瞬态 (请参阅《VBAT 缓慢上升和下降时的器件行为》)。
- (5) VBATP 和 VBAT_SAFING 的建议最大工作电压列为 34V, 略低于 VBATP_OV_{rise} 和 VBATP_OV_{fall} 的过压检测阈值。TI 建议在 VBATP 上启用过压检测 (默认为启用, MASK_VBATP_OV = 0)。TI 还建议对器件在应用中的热耗散和功率耗散进行评估, 并确保设计具备充分的热管理功能, 以便在必要的电源电压电平下运行。
- (6) 如果 VBATP 从 5.8V 下降至 VBATP_UV_{off} 阈值或另一个电压监控器在特定电源轨上检测到欠压并更改器件状态, 器件将保持开启。可能会检测到 VBAT_UV_{off} 处于 4.5V, 但也可能检测到它低至 4.2V。VBAT_SAFING 具有足够高的电源电压, 能够为 VMON 块和 AVDD_VMON_UV 之上的内部电源轨 AVDD_VMON 供电。

4.4 热性能信息

热指标 ⁽¹⁾		TPS65381A-Q1	单位
		DAP (HTSSOP)	
		32 引脚	
$R_{\theta JA}$	结至环境热阻	26.3	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	结至外壳 (顶部) 热阻	14.1	°C/W
$R_{\theta JB}$	结至电路板热阻	6	°C/W
Ψ_{JT}	管结至顶部的特征参数	0.2	°C/W
Ψ_{JB}	结至电路板的特征参数	6.2	°C/W
$R_{\theta JC(bot)}$	结至外壳 (底部) 热阻	0.5	°C/W

(1) 有关传统和新热指标的更多信息，请参阅应用报告《半导体和 IC 封装热指标》。



- 在存在功率耗散较高和/或封装热阻较差的应用中，可能必须降低最高环境温度。最高环境温度 (T_{Amax}) 取决于最高运行结温 (T_{Jmax})、应用中器件的最大功率耗散 (P_{Dmax}) 以及应用中的部件/封装的结至环境热阻 ($R_{\theta JA}$)，计算公式如下： $T_{Amax} = T_{Jmax} - (R_{\theta JA} \times P_{Dmax})$ 。
- 最大功率耗散是 T_{Jmax} 、 $R_{\theta JA}$ 和 T_A 的函数。任何允许环境温度下的最大允许功率耗散为 $P_D = (T_{Jmax} - T_A)/R_{\theta JA}$ 。

Figure 4-1. 基于高 K JEDEC PCB 的功率耗散降额曲线

4.5 电气特性

在运行环境温度 $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ 至最高运行结温 $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，并且 $\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$ 处于建议运行范围内（请参阅 Section 4.3 中的 R1.2）（除非另有说明）

POS	参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
VDD6 - 具有内部 FET 的降压							
AN	C _{VDD6}	输出陶瓷电容器的值 ⁽¹⁾	ESR 范围 100mΩ 至 300mΩ ⁽²⁾	22		47	μF
AN	L _{VDD6}	电感器的值		22	33		μH
1.1	VDD6	VDD6 输出电压	平均直流值（ 不包括纹波和负载瞬态 ），VBAT > 7V，0 < I _{VDD6} < 1.3A，包括直流线路和负载调节、温度漂移和长期漂移（ 其中 VBAT = VBATP = VBAT_SAFING ）	5.4	6	6.6	V
1.1a	VDD6 _{ripple}	VDD6 纹波电压	峰峰值，由设计确保 VBATP = VBAT_SAFING = 14V，L = 33μH，C = 22μF		200		mV
1.2	I _{VDD6}	VDD6 输出电流 I _{VDD5} + I _{VDD3/5} + I _{VDD1} + I _{VSOUT1} ⁽³⁾				1.3	A
1.3	V _{dropout6}	VDD6 输出压降电压 V _{dropout6} = (VBATP – SDN6)	I _{VDD6} = 1.3A (例如：R _{DS(on)} = 0.46Ω)			0.6	V
1.4	I _{VDD6_limit}	SDN6 引脚提供的峰值电流 ⁽⁴⁾		1.5		2.5	A
1.5	f _{clk_VDD6}	时钟频率 ⁽⁵⁾		396	440	484	kHz
1.6	DC _{VDD6}	t _{on} /t _{period}	0 < I _{VDD6} < 1.3A 当 VBATP < 7V 时，VDD6 会进入压降模式（ 100% 占空比 ）	7% ⁽⁶⁾		100%	
1.7	T _{protVDD6}	温度保护阈值 ⁽⁷⁾		175		210	°C
VDD5 – 具有内部 FET 的 LDO							
AN	C _{VDD5}	输出陶瓷电容器的值	ESR 范围 0mΩ 至 100mΩ	1		5	μF
2.1	VDD5	VDD5 输出电压 ⁽⁸⁾	0 < I _{VDD5} < 300mA	4.9	5	5.1	V
2.2	I _{VDD5}	VDD5 输出电流，包括来自 660Ω（ 典型值 ）内部电阻器的负载				300	mA
2.3	VDD5 _{dyn}	VDD5 动态输出电压	5μs 内 20% 至 80% 负载阶跃 (C _{VDD5} = 5μF)	4.85	5	5.15	V
2.4	VDD5 _{max}	10μs 内 5.5V 至 13.5V 的 VBATP 阶跃期间的最大 VDD5 输出电压	C _{VDD5} = 5μF，I _{VDD5} < 300mA			5.5	V
2.5	V _{dropout5}	VDD5 输出压降电压 V _{dropout5} = (VDD6 – VDD5)	I _{VDD5} < 300mA			0.3	V
2.6	PSRR _{VDD5}	电源抑制比	50 < f < 20kHz，VBATP = 10V，U = 4Vpp， C _{VDD5} = 5μF，0 < I _{VDD5} < 300mA		> 40		dB
2.7	LnReg _{VDD5}	线路调节（ I _{VDD5} 恒定 ）	0 < I _{VDD5} < 300mA， 8V < VBATP < 19V	–25		25	mV
2.8	LdReg _{VDD5}	负载调节（ VDD6 恒定 ）	0 < I _{VDD5} < 300mA， 8V < VBATP < 19V	–25		25	mV
2.9	TmpCo _{VDD5}	温度漂移	标准化为 25°C 值	–0.5%		0.5%	
2.11	dVDD5/dt	启动时 VDD5 上的 dV/dt	介于 VDD5 最终值的 10% 和 90% 之间	5		50	V/ms
2.13	T _{protVDD5}	温度保护阈值 ⁽⁹⁾		175		210	°C
2.14	I _{VDD5_limit}	电流限制 ⁽¹⁰⁾		350		650	mA

- (1) 电容是针对工作电压、温度和使用寿命降额后的有效电容。
- (2) ESR 是电容器的总有效串联电阻，如有必要，添加串联电阻器。
- (3) I_{VDD6} 是来自 VDD6 稳压器上 VDD5、VDD3/5、VDD1 和 VSOUT1 的负载电流；对于无法以较宽的容差和纹波运行的应用或外设，不建议直接加载 VDD6，因为 VDD6 是前置稳压器。不过，只要 VDD6 上的总负载电流 I_{VDD6} 不超过 VDD6 负载电流的规格，就可以直接连接 LDO 或直流/直流转换器。
- (4) VDD6 电流限制基于流经 SDN6 开关的峰值电流，它不会直接对应于平均电流限制。
- (5) SDN6 上的实际开关取决于 VDD6 上的输出电压在 $F_{\text{clk_VDD6}}$ 时钟处于上升沿时是高于还是低于迟滞 PWM 比较器阈值。如果在发生 $F_{\text{clk_VDD6}}$ 时钟上升沿时不需要开关，SDN6 不会打开。SDN6 关闭由迟滞 PWM 比较器阈值决定，当实际 VDD6 电压高于阈值时，SDN6 将关闭。
- (6) 当 VDD6 控制环路在 $f_{\text{clk_VDD6}}$ 时钟周期的上升沿打开 SDN6 开关时，SDN6 将以 7% 的最小占空比保持开启。不过，如果控制环路跳过某个时钟周期，那么对于该 $f_{\text{clk_VDD6}}$ 时钟周期，占空比将为 0%。
- (7) VDD6 保护，与 VDD3/5 过热保护共享。
- (8) VDD5 输出调节包含线路和负载调节、温度漂移。
- (9) VDD5 保护。如果检测到过热，将仅关闭 VDD5。
- (10) $I_{\text{VDD5_limit}}$ 电流限制具有迅速反向行为。在发生短路情况期间，将发生高于最大值的瞬态电流，直到电流限制迅速反向到指定的范围。

电气特性 (continued)

在运行环境温度 $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ 至最高运行结温 $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，并且 $\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$ 处于建议运行范围内（请参阅 Section 4.3 中的 R1.2）（除非另有说明）

POS	参数		测试条件		最小值	典型值	最大值	单位
VDD3/5 – 具有内部 FET 的 LDO								
AN	C _{VDD3/5}	输出陶瓷电容器的值	ESR 范围 0mΩ 至 100mΩ		1	5		μF
3.1a	VDD3/5	VDD3/5 输出电压，SEL_VDD3/5 引脚：开路 = 3.3V 设置，接地 = 5V 设置	0 < I _{VDD3/5} < 300mA	3.3V 设置	3.234	3.3	3.366	V
3.1b				5V 设置	4.9	5	5.1	
3.2	I _{VDD3/5}	VDD3/5 输出电流，包括来自 440Ω（典型值）（对于 3.3V 设置）或 660Ω（典型值）（对于 5V 设置）内部电阻器的负载 ⁽¹¹⁾					300	mA
3.3a	VDD3/5 _{dyn}	VDD3/5 动态输出电压	5μs 内 20% 至 80% 阶跃 C _{VDD3/5} = 5μF	3.3V 设置	3.15	3.3	3.43	V
3.3b				5V 设置	4.85	5	5.15	
3.4	VDD3/5 _{max}	10μs 内 5.5V 至 13.5V 的 VBATP 阶跃期间的最大 VDD3/5 输出电压	C _{VDD3/5} = 5μF，I _{VDD3/5} < 300mA				3.6 5.5	V
3.5	Vdropout3/5	VDD3/5 输出压降电压 Vdropout3/5 = (VDD6–VDD3/5)	I _{VDD3/5} < 300mA				0.3	
3.6	PSRR _{VDD3/5}	电源抑制比	50 < f < 20kHz，VBATP = 10V，U = 4Vpp C _{VDD3/5} = 5μF，0 < I _{VDD3/5} < 300mA			> 40		dB
3.7	LnReg _{VDD3/5}	线路调节（I _{VDD3} 恒定）	0 < I _{VDD3/5} < 300mA， 8V < VBATP < 19V			–25	25	mV
3.8	LdReg _{VDD3/5}	负载调节（VDD6 恒定）	0 < I _{VDD3/5} < 300mA， 8V < VBATP < 19V			–25	25	mV
3.9	TmpCo _{VDD3/5}	温度漂移	标准化为 25°C 值			–0.5%	0.5%	
3.11	dVDD3/5/dt	启动时 VDD3/5 上的 dV/dt	介于 VDD3/5 最终值的 10% 和 90% 之间	3.3V 设置	3		30	V/ms
3.13	Tprot _{I_{VDD3/5}}	温度保护阈值 ⁽¹²⁾		5V 设置	5		50	
3.14	I _{VDD3/5_limit}	电流限制 ⁽¹³⁾				350	650	mA
3.15	I _{pu_SEL_VDD3/5}	SEL_VDD3/5 引脚上的上拉电流					20	μA
VDD1 – 具有外部 FET 的 LDO								
AN	V _{gs} (th)	栅极阈值电压，外部 FET	ID = 1mA			0.3	3	V
AN	C _{iss}	栅极电容，外部 FET	VGS = 0V				3200	pF
AN	Q _{gate}	栅极电荷，外部 FET	VGS = 0V 至 10V				70	nC
AN	g _{fs}	正向跨导，外部 FET	ID = 50mA			0.4		S
AN	C _{VDD1}	输出陶瓷电容器的值	ESR 范围 0mΩ 至 100mΩ			5	40	μF
4.1	VDD1	VDD1 输出电压，取决于外部电阻分压器				0.8	3.3	V
4.2	VDD1 _{SENSE}	VDD1 基准电压 ⁽¹⁴⁾	10mA < I _{VDD1} < 600mA			0.792	0.8 0.808	V
4.2a	VDD1 _{SENSE_BIAS}	VDD1 _{SENSE} 的偏置电流				–6.6	–10	μA
4.3	I _{VDD1}	VDD1 输出电流	使用外部电阻分压器实现的最小电流			10	600	mA
4.4	VDD1 _G	VDD1 _G 输出电压	以 GND 为基准				15	V
4.5	VDD1 _{G_off}	关闭条件下的 VDD1 _G 电压	流入 VDD1 _G 引脚的电流为 20μA				0.3	V
4.6	I _{VDD1G}	VDD1 _G 直流负载电流					200	μA
4.7	VDD1 _{dyn}	VDD1 动态输出电压	1μs 内 10% 至 90% 阶跃 (C _{VDD1} = 40μF) ⁽¹⁵⁾			± 4%		
4.8	VDD1 _{max}	10μs 内 5.5V 至 13.5V 的 VBATP 阶跃期间的最大 VDD1 输出电压	C _{VDD1} > 6μF，I _{VDD1} < 600mA	VDD1 = 0.8V 输出			0.898	V
				VDD1 = 1.23V 输出			1.287	
				VDD1 = 3.3V 输出			3.435	
4.9	PSRR _{VDD1}	电源抑制比	50 < f < 20kHz，VBATP = 10V，U = 4Vpp， C _{VDD1} = 10μF，10mA < I _{VDD1} < 600mA			> 40		dB
4.10	LnReg _{VDD1}	VDD1 _{SENSE} 上的线路调节（I _{VDD1} 恒定）	10mA < I _{VDD1} < 600mA，8V < VBATP < 19V			–7	7	mV
4.11	LdReg _{VDD1}	VDD1 _{SENSE} 上的负载调节（VDD6 恒定）	10mA < I _{VDD1} < 600mA，8V < VBATP < 19V			–7	7	mV
4.12	TmpCo _{VDD1}	温度漂移	标准化为 25°C 值			–0.5%	0.5%	
4.14	dVDD1/dt	启动时 VDD1 _{SENSE} 上的 dV/dt	介于 VDD1 最终值的 10% 和 90% 之间			0.8	8	V/ms
VSOUT1 – 具有受保护的内部 FET 的 LDO								
AN	C _{VSOUT1}	输出陶瓷电容器的值	ESR 范围 0mΩ 至 100mΩ			0.5	10	μF
5.1	VSOUT1	VSOUT1 输出电压，取决于外部电阻分压器以及跟踪或非跟踪模式				3.3	9.5	V

(11) 在器件开通期间 NRES 变为高电平之前，在 VDD3/5 稳压器上施加的电流应低于 $I_{\text{VDD3/5}}$ 最大负载的 50%。

(12) VDD3/5 保护，被视为全局过热（针对所有稳压器关断）。

(13) $I_{\text{VDD3/5_limit}}$ 电流限制具有迅速反向行为。在发生短路情况期间，将发生高于最大值的瞬态电流，直到电流限制迅速反向到指定的范围。

(14) VDD1 调节，包含线路和负载调节、温度漂移和长期漂移。不包含用于设置 VDD1 输出电压的电阻分压器的容差。

(15) VDD1_{dyn} 将依赖于外部 FET 选择。

电气特性 (continued)

在运行环境温度 $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ 至最高运行结温 $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，并且 $\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$ 处于建议运行范围内（请参阅 Section 4.3 中的 R1.2）（除非另有说明）

POS	参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
5.2	$\text{MV}_{\text{VSOUT1}}$ 对于跟踪模式： 匹配输出错误 $\text{MV}_{\text{VSOUT1}} = (\text{VTRACK1} - \text{VSFB1})^{(16)}$	$0 < I_{\text{VSOUT1}} < 100\text{mA}$	-35		35	mV
5.3	VSFB1 对于非跟踪模式： VSOUT1 基准电压 ⁽¹⁷⁾	$10\text{mA} < I_{\text{VSOUT1}} < 100\text{mA}$	2.45	2.5	2.55	V
5.3a	$\text{VTRACK1}_{\text{th}}$ 用于选择跟踪/非跟踪模式的阈值（对于跟踪模式， $\text{VTRACK1} > \text{VTRACK1}_{\text{th_max}}$ V；对于非跟踪模式， $\text{VTRACK1} < \text{VTRACK1}_{\text{th_min}}$ V）		1.1	1.2	1.3	V
5.3b	$\text{VTRACK1}_{\text{pd}}$ VTRACK1 引脚上的内部下拉电阻			100		k Ω
5.4	I_{VSOUT1} VSOUT1 输出电流，包括消耗最小电流的内部电阻器 ⁽¹⁸⁾				100	mA
5.5	VdrS1 VSOUT1 压降电压 $\text{VdrS1} = (\text{VSIN} - \text{VSOUT1})$	$0 < I_{\text{VSOUT1}} < 100\text{mA}$			0.75	V
5.6	$\text{PSRR}_{\text{VSOUT1}}$ 电源抑制比	$\text{VTRACK1} = \text{GND}$, $\text{VSOUT1} = 4.5\text{V}$, $50 < f < 20\text{kHz}$, $\text{VSIN} = 10\text{V}$, $U = 4\text{Vpp}$ $C_{\text{VSOUT1}} = 1\mu\text{F}$, $0 < I_{\text{VSOUT1}} < 100\text{mA}$		> 40		dB
5.7	$\text{LnReg}_{\text{VSOUT1}}$ 线路调节（ I_{VSOUT1} 恒定）	$0 < I_{\text{VSOUT1}} < 100\text{mA}$, $8\text{V} < \text{VSIN} < 19\text{V}$	-25		25	mV
5.8	$\text{LdReg}_{\text{VSOUT1}}$ 负载调节（ VSIN 恒定）	$0 < I_{\text{VSOUT1}} < 100\text{mA}$, $8\text{V} < \text{VSIN} < 19\text{V}$	-35		35	mV
5.9	$\text{TmpCo}_{\text{VSOUT1}}$ 温度漂移	标准化为 25°C 值	-0.5%		0.5%	
5.11	$\text{VSOUT1}_{\text{SH}}$ 输出短路电压范围	VSOUT1 （ VSFB1 配置为稳压） ⁽¹⁹⁾	-2		18	V
5.12	$-I_{\text{VSIN}}$ 输出反向电流	$\text{VSOUT1} = 14\text{V}$ 并且 $\text{VBATP} = 0\text{V}$ ，稳压器关闭			20	mA
5.13	$\text{Tprot}_{\text{VSOUT1}}$ 温度保护阈值 ⁽²⁰⁾			175	210	$^{\circ}\text{C}$
5.14	$I_{\text{VSOUT1_limit}}$ 电流限制			120	500	mA
电压监控						
6.1	$\text{VBATP_UV}_{\text{off}}$ 由 VBAT_UV 比较器指示的 VBATP 和 VBAT_SAFING 电平 ⁽²¹⁾	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		4.2	4.5	V
6.2	$\text{VBATP_UV}_{\text{on}}$ 由 VBAT_UV 比较器指示的 VBATP 和 VBAT_SAFING 电平 ⁽²¹⁾	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		5.4	5.8	V
6.3	$\text{VBATP_UV}_{\text{hys}}$ 欠压迟滞	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		1.1	1.4	V
6.4	$\text{VBATP_OV}_{\text{rise}}$ 用于设置 VBAT_OV 标志的 VBATP 电平 ⁽²²⁾	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		34.7	36.7	V
6.5	$\text{VBATP_OV}_{\text{fall}}$ 用于清除 VBAT_OV 标志的 VBATP 电平 ⁽²³⁾	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		34.4	36.3	V
6.8	VDD5_UV VDD5 欠压电平	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		4.5	4.85	V
6.8a	迟滞	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$			140	mV
6.9	$\text{VDD5_UV}_{\text{head}}$ VDD5 欠压余量 ($\text{VDD5}_{\text{act}} - \text{VDD5_UV}_{\text{act}}$)	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		200		mV
6.10	VDD5_OV VDD5 过压电平	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		5.2	5.45	V
6.10a	迟滞	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$			140	mV
6.11	$\text{VDD5_OV}_{\text{head}}$ VDD5 过压余量 ($\text{VDD5_OV}_{\text{act}} - \text{VDD5}_{\text{act}}$)	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$		200		mV
6.12	VDD3/5_UV VDD3/5 欠压电平	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$	3.3V 设置	3	3.17	V
			5V 设置	4.5	4.85	
6.12a	迟滞	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$	3.3V 设置		100	mV
			5V 设置		140	
6.13	$\text{VDD3/5_UV}_{\text{head}}$ VDD3/5 欠压余量 ($\text{VDD3/5}_{\text{act}} - \text{VDD3/5_UV}_{\text{act}}$)	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$	3.3V 设置		155	mV
			5V 设置		200	
6.14	VDD3/5_OV VDD5_3 过压电平	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$	3.3V 设置	3.43	3.6	V
			5V 设置	5.2	5.5	
6.14a	迟滞	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$	3.3V 设置		100	mV
			5V 设置		140	
6.15	$\text{VDD3/5_OV}_{\text{head}}$ VDD3/5 欠压余量 ($\text{VDD3/5_OV}_{\text{act}} - \text{VDD3/5}_{\text{act}}$)	$\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$	3.3V 设置		170	mV
			5V 设置		200	

(16) 以 VTRACK1 输入为基准（包括长期漂移和温度漂移）。

(17) VSOUT1 ，包含线路和负载调节、温度漂移和长期漂移。

(18) VSOUT1 针对内部 FET 的最大功率耗散不得超过 0.6W ，以避免过热。对于高于 5V 的输出电压以及使用 VBATP 为 VSIN （而不是 VDD6 ）供电时，必须进行特殊考虑。

(19) VSOUT1 直接连接至 VSFB1 （适用于单位增益），或者通过电阻分压器进行连接（跟踪模式增益或非跟踪模式输出电压调节）。如果发生对电源短路故障，则 VSOUT1 上的电压等于器件的电源电压（ VBATP 、 VBAT_SAFING 和 VSIN ，其中 VSIN 连接至 VBATP ，因为它是电源，而不是 VDD6 ）， VSFB1 电压将直接（对于单位增益）或通过电阻分压器（跟踪模式增益或非跟踪模式输出电压调节）遵循 VSOUT1 （根据用例）。

(20) VSOUT1 传感器电源保护。仅 VSOUT1 关闭。

(21) $\text{VBATP_UV}_{\text{off}}$ 和 $\text{VBATP_UV}_{\text{on}}$ 是 VBATP 的阈值电平，其中 UV 将由 VMON_STAT_1 寄存器中的 VBAT_UV 位进行指示。将允许器件开通的 VBATP 电平由 R1.1 表示。

(22) 使器件进入复位状态并在 SPI 中设置标志

(23) 清除 SPI 中的标志

电气特性 (continued)

在运行环境温度 $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ 至最高运行结温 $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，并且 $\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$ 处于建议运行范围内（请参阅 [Section 4.3](#) 中的 R1.2）（除非另有说明）

POS	参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
6.16	VDD1_UV	VDD1 欠压电平	VBATP = VBAT_SAFING。在 VDD1_SENSE 引脚上感应。相对阈值以标称 800mV VDD1_SENSE (Pos 4.2) 为基准	752		784	mV
6.16a		迟滞	VBATP = VBAT_SAFING。在 VDD1_SENSE 引脚上感应。相对阈值以标称 800mV VDD1SENSE (Pos 4.2) 为基准		10		mV
6.17	VDD1_OV	VDD1 过压电平	VBATP = VBAT_SAFING。在 VDD1_SENSE 引脚上感应。相对阈值以标称 800mV VDD1SENSE (Pos 4.2) 为基准	816		848	mV
6.17a		迟滞	VBATP = VBAT_SAFING。在 VDD1_SENSE 引脚上感应。相对阈值以标称 800mV VDD1SENSE (Pos 4.2) 为基准		9		mV
6.19	VSOUT1_UV	VSOUT1 欠压电平	在 VSFB1 引脚上感应。相对阈值 (比率) : - 对于非跟踪模式，以标称 2.5V VSFB1 (Pos 5.3) 为基准 - 对于跟踪模式，以施加到 VTRACK1 引脚上的电压为基准 - 在跟踪模式下，VSOUT1_UV 比较器输出对于 VTRACK1 直流条件有效	0.88		0.94	VSOUT1
6.20	VSOUT1_OV	VSOUT1 过压电平	在 VSFB1 引脚上感应。相对阈值 (比率) : - 对于非跟踪模式，以标称 2.5V VSFB1 (Pos 5.3) 为基准 - 对于跟踪模式，以施加到 VTRACK1 引脚上的电压为基准 - 在跟踪模式下，VSOUT1_OV 比较器输出对于 VTRACK1 直流条件有效	1.06		1.12	VSOUT1
6.22	VDD6_UV	VDD6 欠压电平 ⁽²⁴⁾		5.2		5.4	V
6.22a		迟滞			115		mV
6.23	VDD6_OV	VDD6 过压电平 ⁽²⁴⁾		7.8		8.2	V
6.23a		迟滞			115		mV
IGNITION 和 CAN WAKE-UP							
7.1	IGN_WUP	IGN 唤醒阈值 ⁽²⁵⁾	VBATP = VBAT_SAFING =12V	2		3	V
7.2	CAN_WUP	CAN 唤醒阈值 ⁽²⁵⁾	VBATP = VBAT_SAFING =12V	2		3	V
7.3	WUP_hyst	唤醒迟滞	VBATP = VBAT_SAFING =12V	50		200	mV
7.4	I_IGN	IGN 引脚正向泄漏电流	IGN 引脚处于 36V，VBATP = VBAT_SAFING = 12V			50	μA
7.5	I_IGN_rev	IGN 反向电流	IGN 处于 -7V，VBATP = VBAT_SAFING =12V	-1			mA
7.7	I_CANWU	CANWU 引脚正向泄漏电流	CANWU 引脚处于 36V，VBATP = VBAT_SAFING = 12V			50	μA
7.8	I_CAN_rev	CANWU 反向电流	CANWU 处于 -0.3 V，VBATP = VBAT_SAFING =12V				mA
电荷泵							
AN	C _{pump}	泵浦电容器 (位于 CP1 和 CP2 之间)			10		nF
AN	C _{store}	储能电容器 (位于 VCP 和 VBATP 之间)			100		nF
8.1	VCP _{on}	处于开启状态的 VCP 输出电压	VBATP > 5.8V	VBATP + 4		VBATP + 15	V
8.2	I _{CP}	外部负载	来自电池反向保护的 R _{GS} 的负载			100	μA
8.3	f _{CP}	电荷泵开关频率		225	250	275	kHz
复位和使能输出							
9.1	V _{NRES_ENDRV_L}	NRES/ENDRV 低输出电平	具有外部 2mA 开漏电流			0.2	V
9.2	R _{NRES_ENDRV_PULLUP}	NRES/ENDRV 内部上拉电阻		3		6	kΩ
9.2a	R _{DS(on)_ENDRV_NRES}	R _{DS(on)} NRES/ENDRV 下拉晶体管				40	Ω
9.3	R _{RSTEXT}	外部复位扩展电阻器的值，如果连接开路，器件将保持复位状态 ⁽²⁶⁾		0	22		kΩ
9.5	V _{ENDRV_NRES_TH}	ENDRV 和 NRES 输入反馈逻辑 1 阈值	读回多路复用至 DIAG_OUT 引脚	350	400	450	mV
数字输入/输出							
10.1	V _{DIGIN_HIGH}	NCS、SDI、SCLK、ERROR/WDI 和 SEL_VDD3/5 的数字输入 (高电平)		2			V
10.2	V _{DIGIN_LOW}	NCS、SDI、SCLK、ERROR/WDI 和 SEL_VDD3/5 的数字输入 (低电平)				0.8	V
10.3	V _{DIGIN_HYST}	NCS、SCI、SCLK 和 ERROR/WDI 的数字输入迟滞 ⁽²⁷⁾		0.1			V
10.4	R _{DIAGOUT_AMUX}	AMUX 模式下 DIAG_OUT 引脚上的输出电阻	在 AMUX 上选择了 BG1，流入或流出 DIAG_OUT 引脚的电流 < 200nA			15	kΩ
10.5	V _{DIGOUT_HIGH}	数字输出 (高电平) ⁽²⁸⁾	I _{OUT} = -2mA (流出引脚)	VDDIO - 0.2			V

(24) 仅限 SPI 寄存器中的信息

(25) 对于器件唤醒，VBATP 和 VBAT_SAFING 必须是运行范围内、建议运行条件 R1.1 和 R1.3a 下以及允许器件启动的 IGN 或 CANWU 上的电平，尤其是在 VBATP 和 VBAT_SAFING 变化的情况下。

(26) 接地的 RSTEXT 的建议最大电阻是 120k Ω 。

(27) 在器件开通迟滞时对 SEL_VDD3/5 进行采样和锁存，V_{DIGIN_HYST} 不适用。

(28) 针对处于 DMUX 模式的引脚 SDO 和 DIAG_OUT。

电气特性 (continued)

在运行环境温度 $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ 至最高运行结温 $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，并且 $\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$ 处于建议运行范围内（请参阅 [Section 4.3](#) 中的 R1.2）（除非另有说明）

POS	参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
10.6	$V_{\text{DIGOUT_LOW}}$ 数字输出（低电平） ⁽²⁸⁾	$I_{\text{OUT}} = 2\text{mA}$ （流入引脚）			0.2	V
串行外设接口						
13.12	$R_{\text{PULL_UP}}$ NCS 输入引脚上的内部上拉电阻器		40	70	100	k Ω
13.13	$R_{\text{PULL_DOWN}}$ SDI 和 SCLK 输入引脚上的内部下拉电阻器		40	70	100	k Ω

4.6 时序要求

在运行环境温度 $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ 至最高运行结温 $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，并且 $\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$ 处于建议运行范围内（请参阅 [Section 4.3](#) 中的 R1.2）（除非另有说明）

POS	参数	测试条件	最小值	标称值	最大值	单位
VDD5 – 具有内部 FET 的 LDO						
2.12	$t_{\text{delayVDD5}}$ VDD5 电压稳定延迟	从 CANWU 引脚上的上升沿到 VDD5 达到最终值（2% 以内）的最大延迟			5	ms
VDD3/5 – 具有内部 FET 的 LDO						
3.12	$t_{\text{VDD3/5}}$ VDD3/5 电压稳定延迟	CANWU 唤醒后使 VDD3/5 输出稳定的最大延迟			5	ms
VDD1 – 具有外部 FET 的 LDO						
4.15	$t_{\text{delayVDD1}}$ VDD1 电压稳定延迟	CANWU 唤醒后使 VDD1 输出稳定的最大延迟			5	ms
电压监控						
6.7	VBATP_degitch VBATP 欠压和过压监控抗尖峰脉冲时间		180	240 ⁽¹⁾	260	μs
6.18	VDDx_degitch VDDx 欠压和过压监控抗尖峰脉冲时间		10		40	μs
6.21	VSOUT1_degitch VSOUT1 欠压和过压监控抗尖峰脉冲时间		10		40	μs
IGNITION 和 CAN WAKE-UP (IGN 和 CANWU)						
7.6	IGN_deg IGN 抗尖峰脉冲滤波器时间		7.5		22	ms
7.9	CANWU_deg CANWU 抗尖峰脉冲滤波器时间		100		350	μs
复位和使能输出						
9.4	$t_{\text{RSTEXT(22k}\Omega)}$ 复位扩展延迟	22k Ω	4.05	4.5	4.95	ms
9.4a	$t_{\text{RSTEXT(0k}\Omega)}$ 复位扩展延迟	0k Ω	0.98	1.4	1.89	ms
内部系统锁定						
11.1	f_{Sysclk} 系统时钟频率 ⁽²⁾		3.8	4	4.2	MHz
窗口看门狗						
12.2	$t_{\text{WD_pulse}}$ ERRORWDI 引脚上看门狗触发输入信号的抗尖峰脉冲时间		14.25	30	32	μs
串行外设接口时序⁽³⁾						
13.1	f_{SPI} SPI 时钟 (SCLK) 频率	VDDIO = 3.3V			5 ⁽⁴⁾	MHz
		VDDIO = 5V			6	
13.2	t_{SPI} SPI 时钟周期	VDDIO = 3.3V	200			ns
		VDDIO = 5V	167			
13.3	t_{high} 高电平时间：SCLK 逻辑高电平的持续时间	请参阅 Figure 4-2	85.7			ns
13.4	t_{low} 低电平时间：SCLK 逻辑低电平的持续时间		45			ns
13.5	t_{SUCS} 建立时间：NCS 下降沿和 SCLK 上升沿之间的时间		45			ns
13.7	t_{SUSI} SDI 上的建立时间：在 SCLK 的下降沿之前 SDI 的建立时间		15			ns
13.9	t_{HCS} 保持时间：SCLK 下降沿和 NCS 上升沿之间的时间		45			ns
13.10	t_{HCS} SPI 传输非活动时间（两次传输之间的时间），在此期间 NCS 必须保持高电平		788			ns

- (1) 对于 VBAT-UV 抗尖峰脉冲为 240 μs ，对于 VBAT-OV 抗尖峰脉冲为 260 μs
- (2) 系统时钟还用于导出用于看门狗计时器的时钟，因此系统时钟容差还会影响看门狗计时器容差。
- (3) C_{SDO} 上的电容 = 100pF
- (4) 最大 SPI 时钟容差为 $\pm 10\%$

4.7 开关特性

在运行环境温度 $T_A = -40^{\circ}\text{C}$ 至最高运行结温 $T_J = 150^{\circ}\text{C}$ 范围内，并且 $\text{VBATP} = \text{VBAT_SAFING}$ 处于建议运行范围内（请参阅Section 4.3中的 R1.2）（除非另有说明）

POS	参数	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
串行外设接口时序 ⁽¹⁾						
13.6	t_{d1} 延迟时间：从 NCS 的下降沿到 SDO 从三态转换至 0 的延时时间	请参阅 Figure 4-2			53.3	ns
13.8	t_{d2} 延迟时间：SCLK 的上升沿至 SDO 上的数据有效的延时时间		0		85.7	ns
13.11	t_{tri} 三态延迟时间：NCS 的上升沿和 SDO 处于三态之间的时间				53.3	ns

(1) C_{SDO} 上的电容 = 100pF

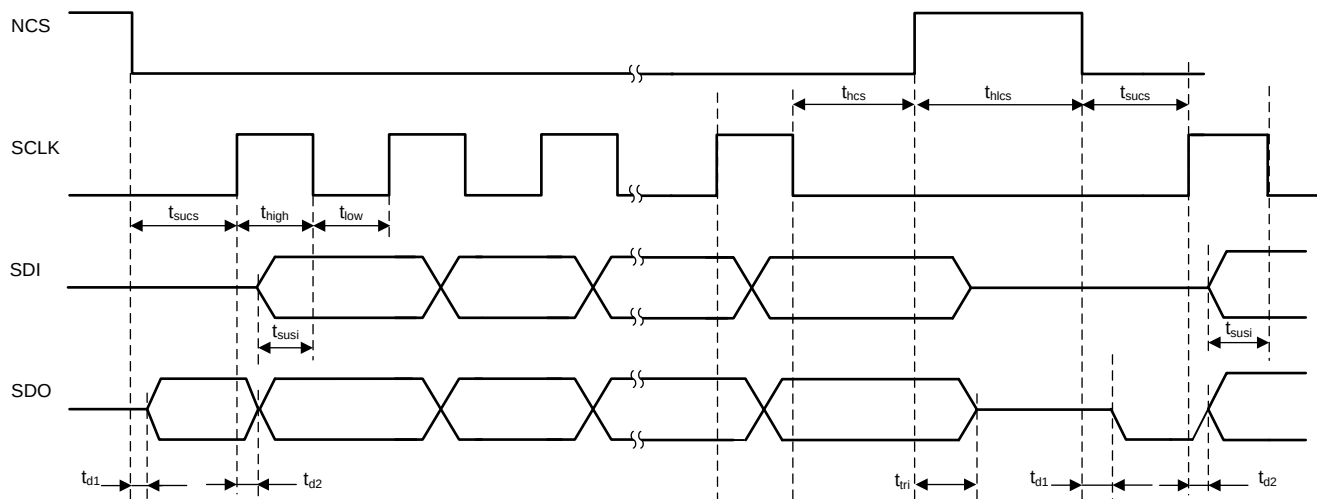


Figure 4-2. SPI 时序参数

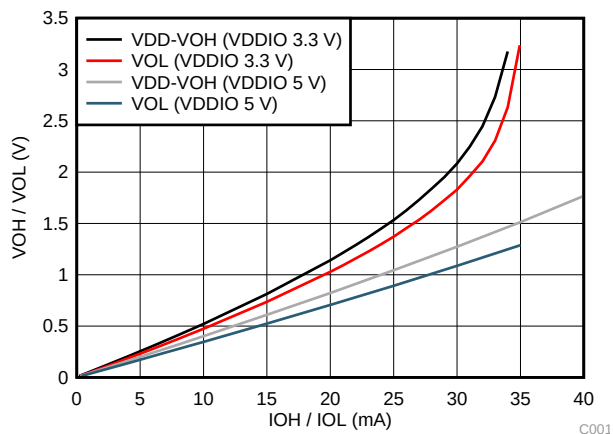


Figure 4-3. SPI SDO 缓冲器拉电流和灌电流

4.8 典型特性

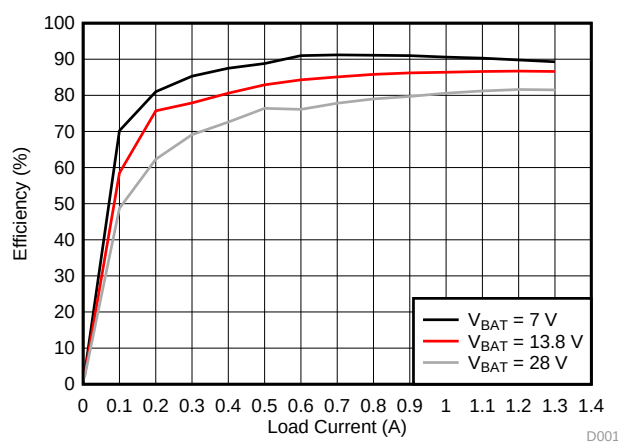


Figure 4-4. VDD6 降压器效率

5 详细 说明

5.1 概述

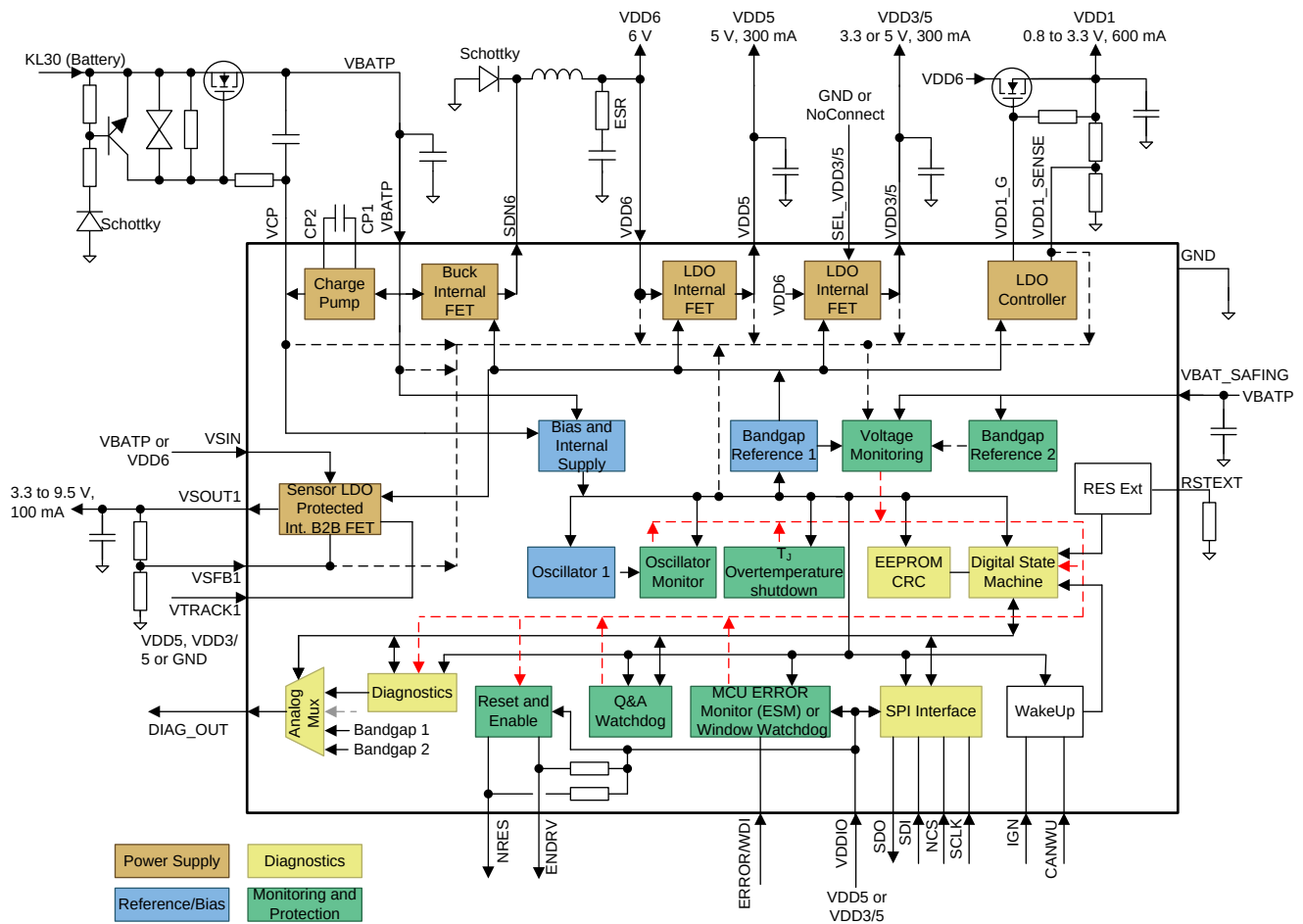
该器件集成了一个具有内部 FET 的异步降压开关模式电源转换器，该 FET 将输入电池电压转换成 6V 前置稳压器输出，从而为集成稳压器供电。

例如，一个具有内部 FET 的固定 5V 线性稳压器被用作一个 CAN 电源。第二个同样具有内部 FET 的线性稳压器将 6V 电压调节为可选的 5V 或 3.3V MCU I/O 电压。具有外部 FET 和电阻分压器的线性稳压器控制器将 6V 电压调节成可外部调节的内核电压（介于 0.8V 和 3.3V 之间）。具有两种不同运行模式（跟踪模式和非跟踪模式）且具有可调电压（介于 3.3V 和 9.5V 之间）的线性稳压器可以用作外部传感器的电源。

该器件监控所有稳压器输出、电池电压和内部电源轨上的欠压和过压情况。第二个带隙基准用于欠压和过压监控，独立于用于稳压电路的主带隙基准。此外，还实现了稳压器电流限制和温度保护。

该器件支持通过 IGNITION 或 CAN 收发器唤醒。

5.2 功能框图



5.3 功能说明

5.3.1 VDD6 降压开关模式电源

VDD6 降压开关模式电源的用途是降低作为前置稳压器的器件内的功率耗散。VDD6 电源将电池电压（主电源电压）范围调节至 6V。VDD6 输出用作 VDD5、VDD3/5、VDD1 的输入电压，还可以用于 VSOUT1 稳压器，具体取决于所需的 VSOUT1 输出电压。VDD6 电源用作前置稳压器，因此 VDD6 的输出精度低于其他集成稳压器。VDD6 电流容量设置为在 VDD5、VDD3/5、VDD1 和 VSOUT1 稳压器各自的最大输出电流下为其供电。应执行功率耗散和热分析，以确保 PCB 设计和热管理能够支持应用中需要的功率耗散。

该开关模式电源以固定频率自适应导通时间控制 PWM 运行。控制环路基于迟滞比较器。如果 VDD6 引脚上的感应电压低于迟滞比较器阈值，则该内部 N 通道 MOSFET 会在每个周期开始时打开。当 MOSFET 打开时，它会以最小 7% 的占空比（ $f_{\text{clk_VDD6}}$ 的 7%）导通。当迟滞比较器检测到 VDD6 引脚上的电压高于阈值时，MOSFET 会关闭。如果在发生时钟边沿事件时输出电压保持高于迟滞比较器，则 VDD6 稳压器可能会跳过一些脉冲。当 MOSFET 关闭时，外部肖特基二极管会在开关周期的其余部分对电感器中存储的能量进行再循环。对于 VBATP 引脚上低于大约 7V 的电源电压，VDD6 稳压器会进入压降模式（100% 占空比）。

电流限制电路为内部 MOSFET 提供了过大功率耗散保护。VDD6 稳压器还与 VDD3/5 稳压器共享过热保护电路。当该电路检测到过热情况时，器件会转换至待机模式（所有稳压器都关闭）。

由于 VDD6 稳压器的控制环路基于迟滞比较器，因此必须考虑输出上的有效电容以及输出电容的等效串联电阻（ESR）。在运行电压（6V，直流偏置降额）下，输出电容器上的有效电容、容差、温度范围和使用寿命必须符合 VDD6（ C_{VDD6} ）的有效电容范围。电容器供应商应提供计算有效电容所需的降额数据。迟滞比较器还需要指定的 ESR，以确保运行正常。通常，低 ESR 陶瓷电容器用作输出电容，因此需要使用外部电阻器将总 ESR 调节至 C_{VDD6} 的指定 ESR 范围。实现正常运行的一般准则是 $R_{\text{ESR}} = L / (15 \times C_{\text{Effective}})$ 。使用较高的有效输出电容可实现较低的 ESR，这进而可以实现较低的电压纹波。此外，电感会影响系统：使用较低的电感值可实现较低的 ESR，不过，电感峰值电流将较高。

5.3.2 VDD5 线性稳压器

VDD5 引脚在整个温度和电池电源电压范围内可实现 $5V \pm 2\%$ 输出的稳压电源。需要使用低 ESR 陶瓷电容器以实现环路稳定。该电容器必须放置在靠近器件引脚的位置。电流限制对该输出进行接地短路保护。该输出还会在开通期间以及线路或负载瞬态期间限制输出电压过冲。

在进行初始 IGN 或 CANWU 循环通电后，该稳压器上的软启动电路会立即启动，所需时间通常为 1ms 至 2ms。该输出可能需要较大的输出电容器，以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的稳压规格。

结过热保护为内部 MOSFET 提供了过大功率耗散保护。如果 VDD5 引脚上发生过热情况，则通过清除 SENS_CTRL 寄存器中的 D4 位仅使 VDD5 稳压器关闭。要重新启用 VDD5 引脚，必须再次设置 SENS_CTRL 寄存器中的 D4 位。

5.3.3 VDD3/5 线性稳压器

VDD3/5 引脚是 3.3V 或 5V $\pm 2\%$ 过热和电池电源电压范围内的稳压电源。输出电压电平通过 SEL_VDD3/5 引脚进行选择（引脚开路将选择 3.3V，引脚接地将选择 5V）。在首次初始 IGN 或 CANWU 循环通电时直接对该选择引脚的状态进行采样和锁存。锁存之后，在首次初始 IGN 或 CANWU 循环通电之后该选择引脚状态的任何变化都不会更改初始选择的 VDD3/5 变压器状态。

需要使用低 ESR 陶瓷电容器以实现环路稳定。该电容器必须放置在靠近器件引脚的位置。电流限制对该输出进行接地短路保护。该输出还会在开通期间或者线路或负载瞬态期间限制输出电压过冲。

在进行初始 IGN 或 CANWU 循环通电后，该稳压器上的软启动电路会立即启动，所需时间通常为 1ms 至 2ms。该输出可能需要较大的输出电容器，以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的调节规格。

电流限制电路和结过热保护为内部 MOSFET 提供了过大功率耗散保护。如果在 VDD3/5 引脚上发生过热情况，TPS65381A-Q1 器件会进入待机模式（所有稳压器都关闭）。

5.3.4 VDD1 线性稳压器

VDD1 引脚是可调稳压电源（0.8V 至 3.3V）。该稳压器使用 $\pm 2\%$ 基准 (VDD1_{SENSE})。外部反馈电阻分压器电阻器的容差会影响总体 VDD1 调节容差。为了降低片上功耗，使用了外部功率 NMOS。此外集成了环路控制器和栅极驱动器。TI 建议在外功率 NMOS 的栅极和源极之间应用值介于 100k Ω 和 1M Ω 之间的电阻器。这样在开通期间或者线路或负载瞬态期间，VDD1 栅极输出受到限制，以防止栅极/源极过压应力。

在进行初始 IGN 或 CANWU 循环通电后，该稳压器上的软启动电路会立即启动，所需时间通常为 1ms 至 2ms。该软启动用于防止在启动时出现任何电压过冲。VDD1 输出可能需要较大的输出电容器，以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的调节规格。

VDD1 LDO 未配备用于外部 NMOS FET 的电流限制和过热保护功能。因此，建议通过 VDD6 引脚为 VDD1 引脚供电（请参阅 [Section 5.2](#)）。这样，VDD6 引脚电流限制就用作 VDD1 引脚的电流限制，功率耗散也会受到限制。为了避免损坏外部 NMOS FET，建议所选 VDD1 引脚的电流额定值远高于最大指定 VDD6 电流限制。

如果未使用 VDD1 稳压器，则将 VDD1_G 和 VDD1_SENSE 引脚保持开路。VDD1_SENSE 引脚上的内部上拉器件可检测到连接开路并将 VDD1_SENSE 引脚上拉。这会强制调节环路降低 VDD1_G 输出。该机制还会屏蔽 VMON_STAT_2 寄存器中的 VDD1_OV 标志，因此还会屏蔽 VDD1 过压 (OV) 条件下的 ENDRV 引脚操作。这些操作与将 DEV_CFG1 寄存器中的 NMASK_VDD1_UV_OV 位清零等效。VDD1_SENSE 引脚上的该内部上拉器件还会在与 VDD1_SENSE 的连接开路时防止 MCU 内核电源上产生实际 VDD1 过压。因此，在这种情况下，VDD1 输出电压为 0V。

默认情况下，禁用 VDD1 监控。如果在应用中使用 VDD1 引脚，那么 TI 建议在器件处于诊断状态时将 DEV_CFG1 寄存器中的 NMASK_VDD1_UV_OV 位设置为 1。利用该设置，可以在检测到 VDD1 欠压事件时驱动并延长外部 MCU 复位。

5.3.5 VSOUT1 线性稳压器

VSOUT1 稳压器是具有以下两种不同模式的稳压电源：跟踪模式和非跟踪模式。模式选择通过 VTRACK1 引脚实现。当 VTRACK1 引脚上施加的电压高于 1.2V 时，VSOUT1 引脚处于跟踪模式。当 VTRACK1 引脚接地短路时，VSOUT1 稳压器处于非跟踪模式。该模式选择在首次 VDDx 电源轨上升期间发生，并在首次 VDDx 上升结束后锁存。因此，VDDx 上升完成之后，VTRACK1 引脚上的任何变化都不再影响所选的跟踪或非跟踪模式。

在跟踪模式下，VSOUT1 稳压器跟踪 VTRACK1 引脚上的输入基准电压，并具有由外部电阻分压器决定的增益系数。VTRACK1 和 VSFB1 引脚之间的跟踪失调电压为 $\pm 35\text{mV}$ 。例如，该模式允许 VSOUT1 输出电压在跟踪 VDD3 (3.3V) 电源时为 5V。在单位增益反馈中，VSOUT1 输出电压可能直接遵循 VDD5 引脚或 VDD3 引脚。

在非跟踪模式下，VSOUT1 输出电压与 VSFB1 引脚上的 2.5V 固定基准电压成正比，并具有由外部电阻分压器决定的增益系数。该模式允许 VSOUT1 引脚电压为内部基准电压的任何倍数。

在跟踪和非跟踪模式下，VSOUT1 输出电压必须为 3.3V 或更高。VSOUT1 稳压器可以在指定限制内跟踪采用 3.3V 设置的 VDD3/5 引脚。

VSOUT1 稳压器具有用于降低内部功率耗散的单独输入电源。例如，对于 3.3V 或 5V 输出电压，VDD6 电源可以用作输入电源。对于大于 5V 的输出电压，VBATP 引脚可以用作输入电源。内部 FET 的最大功率耗散不得超过 0.6W，以避免过热（热关断）。

需要使用低 ESR 陶瓷电容器以实现环路稳定；该电容器必须放置在靠近器件引脚的位置。该电源会在开通期间或者线路或负载瞬态期间限制输出电压过冲。

该电源轨会超出 ECU，因此由电流限制为其提供外部机箱接地短路保护。电源轨可能在指定的短路电压范围 VSOUT1_{SH} 内在外部发生短路。如果输出可能在指定的短路电压范围之外的电压短路，则需要提供额外的外部保护。

在启动时默认禁用 VSOUT1 稳压器。在 NRES 引脚释放后，MCU 可以通过使用 SPI 命令设置 SENS_CTRL 寄存器中的 D0 位来启用 VSOUT1 稳压器。在执行该 SPI 命令之后，该稳压器上的软启动电路会立即启动，所需时间通常为 1ms 至 2ms。该输出可能需要较大的输出电容器，以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的调节规格。无论是处于跟踪模式还是处于非跟踪模式，VSFB1 引脚都会在软启动完成后变至所需的值。

电流限制电路和结过热保护为内部 MOSFET 提供了过大功率耗散保护。如果 VSOUT1 引脚上发生过热情况，则通过清除 SENS_CTRL 寄存器中的 0 位仅使 VSOUT1 稳压器关闭。要重新启用 VSOUT1 引脚，首先必须在读取时清除 SAFETY_STAT 1 寄存器中的 2 位，然后必须再次设置 SENS_CTRL 寄存器中的 0 位。

VSOUT1 引脚电压可由 MCU 的 ADC 输入通过 DIAG_OUT 引脚进行观察（请参阅 [Section 5.4.9](#)），这样就可以在启用 VSOUT1 LDO 之前检测到对任何其他电源的短路情况。

NOTE

VSOUT1_EN 位在 SENS_CTRL 寄存器中，该寄存器仅由上电复位（NPOR）事件重新初始化，复位状态转换不会对其进行重新初始化。如果 VSOUT1_EN 位以前设置为 1，则在发生会导致转换至复位状态的事件后，该位仍设置为 1 并且 VSOUT1 稳压器仍保持启用状态。如果发生可导致 VSOUT1 引脚欠压或过压的故障，而 BIST 在复位转换至诊断状态时自动运行，那么在 BIST 运行期间的 VSOUT1_UV 或 VSOUT1_OV 条件会由于检测到 ABIST_ERR 导致器件进入安全状态。

5.3.6 电荷泵

电荷泵用于通过 VBATP 电源生成过驱电压，而 VBATP 电源则用于驱动 VDDx 和 VSOUT1 电源轨中内部 NMOS FET 的栅极。电荷泵是迟滞架构，当 VCP 电压足够高时，CP_OV 位会设置并且电荷泵停止泵浦，直到 VCP 电压降至低于阈值，此时 CP_OV 位将清除并且电荷泵再次开始泵浦。通过线性稳压器 VCP12 和 VCP17 在内部为器件提供电荷泵过驱。此外，该过驱电压可以驱动用作电池反向保护的外部 NMOS FET 的栅极。传统电池反向阻断二极管相比，此类电池反向保护支持以更低的电池电压运行。在使用电荷泵（VCP）驱动 NMOS 的栅极以实现电池反向保护时，必须在 VCP 引脚和 NMOS FET 的栅极之间连接一个大约 10kΩ 的串行电阻（请参阅 [Section 5.2](#)）。需要使用该串联电阻在 NMOS FET 的栅极被驱动至负电压时限制任何流出 VCP 引脚的电流，因为 VCP 引脚的绝对最大额定值由于连接至基板（接地）的寄生反向二极管被限制为 -0.3V。

电荷泵需要两个外部电容器、一个泵电容（C_{pump}）和一个储能电容（C_{store}）。为在低电池电压下也能通过电荷泵提供足够的过驱电压，VCP 引脚上的外部负载电流必须小于 100μA。

5.3.7 唤醒

TPS65381A-Q1 器件具有两个唤醒引脚：IGN 和 CANWU。两个引脚都具有 2V 至 3V 的唤醒阈值以及 50mV 至 200mV 的迟滞。

IGN 唤醒引脚是电平敏感型引脚，能够以 `IGN_deg` 抗尖峰脉冲（滤波）时间进行抗尖峰脉冲。TPS65381A-Q1 器件为该 IGN 引脚提供电源锁存功能 (POST_RUN)，允许 MCU 决定何时通过 SPI 命令关断 TPS65381A-Q1 器件。为此，MCU 必须在 SPI `SAFETY_FUNC_CFG` 寄存器中设置 IGN 电源锁存位 4 (`IGN_PWRL`)，并且在 SPI 寄存器 `DEV_STAT` 位 0 (IGN) 上读取抗尖峰脉冲（滤波）IGN 引脚的取消锁存状态。要进入待机状态，MCU 必须清除 `IGN_PWRL` 位。为此，TPS65381A-Q1 器件必须处于诊断状态，因为该 SPI 寄存器仅在诊断状态下可写。`IGN_PWRL` 位也会在检测到 `CANWU` 唤醒事件后清除。此外，TPS65381A-Q1 器件可在 POST_RUN 期间检测到 IGN 唤醒事件后提供可选的到复位状态的转换（请参阅 [Figure 5-2](#)）。

`CANWU` 引脚是电平敏感型引脚，能够以 `CANWU_deg`（滤波）时间进行抗尖峰脉冲。抗尖峰脉冲（滤波）`CANWU` 唤醒信号会锁存至 `CANWU_L`，允许 MCU 决定何时通过 `WR_CAN_STBY` SPI 命令关断 TPS65381A-Q1 器件。

NOTE

不应在 `CANWU` 引脚或 IGN 引脚仍处于高电平时将 `WR_CAN_STBY` 命令写入器件。器件开始转换至待机状态，并且会由于在 `CANWU` 或 IGN 引脚上接收到唤醒请求而立即转换至复位状态。寄存器会根据后 LBIST（由于复位转换）或根据 NPOR（由于待机转换）重新初始化。

IGN 和 `CANWU` 引脚是高电压引脚。如果这些引脚连接至具有瞬态的线路，则应在应用中提供适当的滤波和保护，以确保这些引脚处于指定的电压范围内。

NOTE

如果应用不需要通过 IGN（点火开关或 KL15）唤醒或通过 `CANWU`（CAN 或其他收发器）唤醒，但器件需要在提供电源时随时唤醒，则可通过将 10kΩ 或更大的串联电阻器将 IGN 引脚连接至 `VBATP` 引脚（和 `VBAT_SAFING`）的方法来实现。当 `VBATP` 电源打开时，IGN 引脚也会变为高电平，并且一旦电压电平允许针对 `VBATP` 和 `VBAT_SAFING` 引脚释放 NPOR 电路并且 IGN 为高电平就允许器件唤醒（上电）。

5.3.8 复位延长

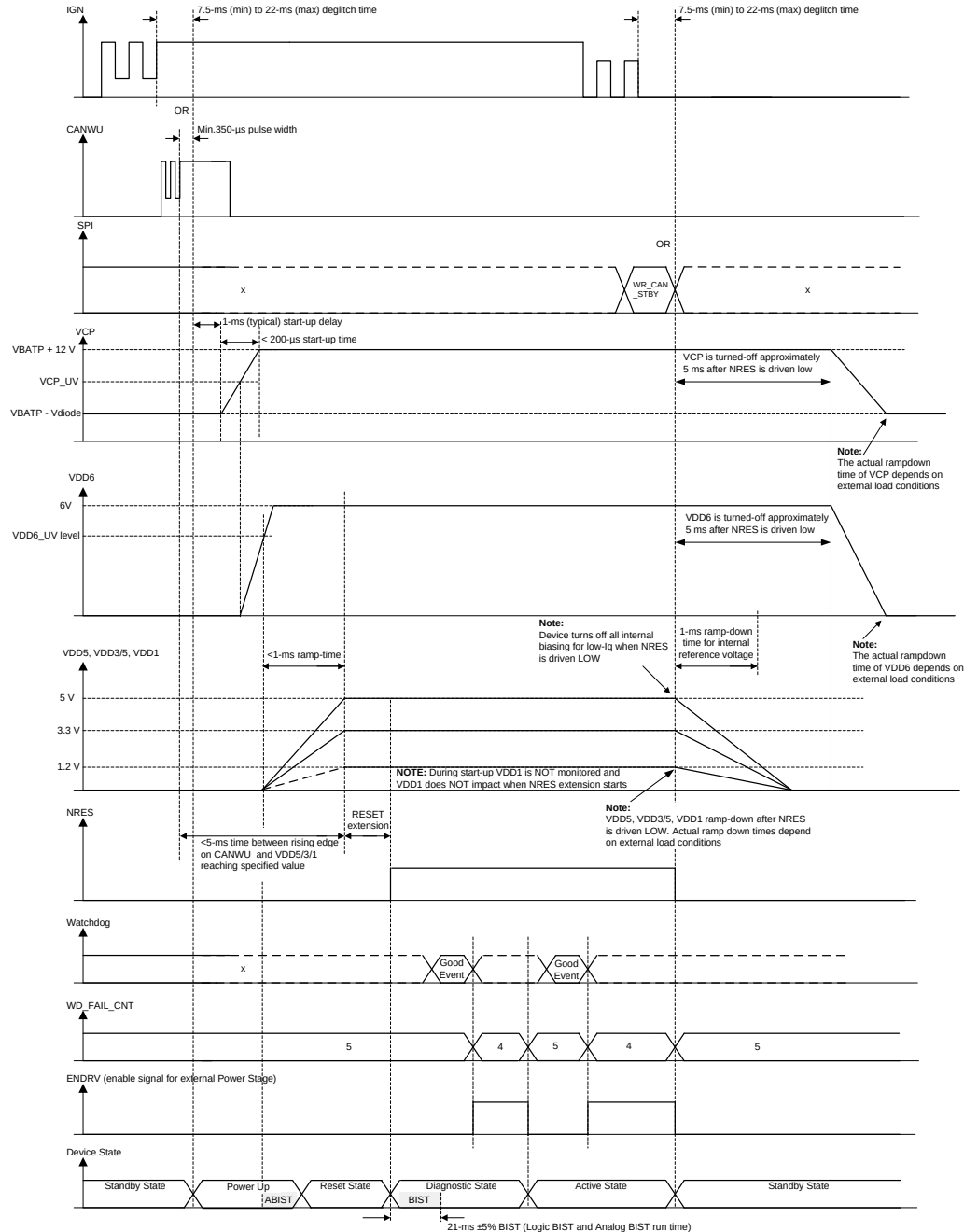
在上电事件期间，TPS65381A-Q1 器件会在 `VDD3/5` 和 `VDD1` 引脚越过各自的欠压阈值时通过 `NRES` 引脚以特定的延迟时间（复位延长时间）向外部 MCU 发送复位通知。

该复位延长时间可以通过 `RESEXT` 引脚与接地之间的电阻器从外部进行配置。在将 `RESEXT` 引脚接地短路时，最短复位延长时间通常为 1.4ms。对于 22kΩ 的外部电阻器而言，典型的复位延长时间为 4.5ms。

5.4 器件功能模式

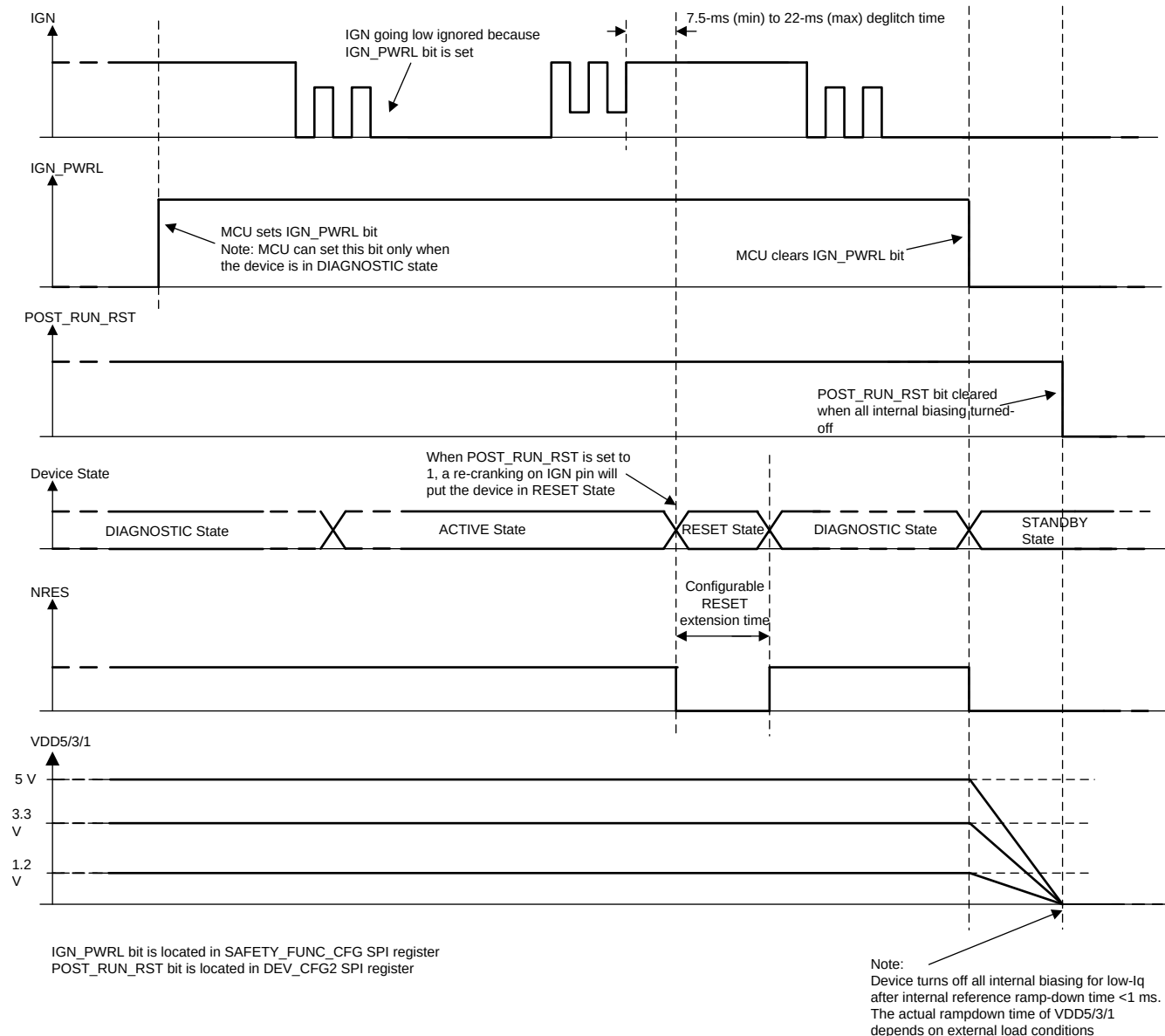
5.4.1 上电和断电行为

Figure 5-1 显示了上电和断电行为。



- 在上电事件期间，模拟 BIST (ABIST) 会在 VDD6 轨电压高于欠压阈值后自动启动。如果 ABIST 启动失败，则器件会转换至安全状态。
- 器件可能无法在 BIST 期间响应 MCU SPI 通信，因此如果 MCU 的引导速度快于 BIST，那么它应一直等到 BIST 完成才能使用 SPI 通信。如果 ABIST、LBIST 或者两者均启动失败，则器件会转换至安全状态。
- ENDRV 引脚的电平大小取决于看门狗故障计数器 WD_FAIL_CNT[2:0]、ENABLE_DRV 位以及 Figure 5-14 中显示的信号。MCU 只在 WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器低于 5 时设置 ENABLE_DRV 位。

Figure 5-1. 上电和断电行为



- 在 VBAT 缓慢下降情况下以及当 VDD3/5 轨电压配置为 5V 电源轨时，NRES 输出可能会在 VBAT 处于大约 6.3V 时被拉低。这是由 VDD3/5 电源轨上的欠压瞬态导致的。
- 在 VBAT 缓慢上升情况下以及当 VDD3/5 轨电压配置为 5V 电源轨时，NRES 输出可能会在 VBAT 处于大约 6.6V 时被拉低。这是由 VDD3/5 电源轨上的欠压瞬态导致的。
- 在类似的情况下，可以在 VDD5 和 VSOUT1 电源轨上观察到欠压瞬态。

Figure 5-2. IGN 电源锁存和 POST_RUN 复位

5.4.2 安全功能和诊断概述

TPS65381A-Q1 器件适用于汽车和工业安全相关应用。下列监控和保护块可用提高诊断覆盖率并减小未检测到故障的比率：

- 电压监控器 (VMON)
- 针对安全模拟块的模拟内置自检 (ABIST) 诊断
- 针对安全控制器功能的逻辑内置自检 (LBIST)
- 时钟丢失监控器 (LCMON)
- 针对所有具有内部 FET 的电源的结温监控
- 针对所有电源的电流限制
- 用于外部监控诊断和调试的模拟多路复用器 (AMUX)
- 用于外部监控诊断和调试的数字多路复用器 (DMUX)
- 可配置为触发模式 (打开和关闭窗口) 或问答模式的看门狗
- 用于监控功能安全架构 MCU 的错误输出的 MCU 错误信号监控器 (ESM)
- 用于外部功率级或外设唤醒的受控和受保护使能输出 (ENDRV)
- 器件配置寄存器 CRC 保护
- 带奇偶校验的 SPI 命令解码器
- SPI 数据输出反馈校验
- 用于初始化外部 MCU 的复位电路
- EEPROM 模拟调整内容 CRC 保护
- 在检测到错误事件时具有安全状态的器件状态控制器

5.4.3 电压监控器 (VMON)

VBAT 电源电压、所有稳压器输出和内部生成的电压由电压监控器模块 (VMON) 进行监控。欠压或过压情况由相应的 VMON 寄存器状态标志位进行指示：

- 当电源处于规格范围之内时 VMON 标志位会清零
- 当电源超出容差范围时 VMON 标志位设置为 1

监控通过欠压和过压比较器实现。VMON 模块的基准电压 (BANDGAP_REF2) 独立于稳压器使用的系统基准电压 (BANDGAP_REF1)。尖峰脉冲滤波功能可确保在无 VMON 状态标志位错误设置的情况下进行可靠的监控。完整的 VMON 块由单独的电源引脚 VBAT_SAFING 供电。

VMON 比较器诊断涵盖在器件启动和上电期间执行的 ABIST 中，或者在器件处于诊断或活动状态时由外部 MCU SPI 请求通过 SPI 命令激活。每个受监控的电压轨均在相应的比较器输入上针对欠压和过压情况进行仿真，因此这会强制相应的比较器进行多次切换 (处于由 ABIST 控制器监视和检查的切换模式)。在该自检过程中，受监控的电压轨自身不受影响，因此在其中的任何电压轨上都不会由于该自检发生实际欠压或过压事件。

Table 5-1 列出了所执行的电压监控概述。如此表所示，针对部分内部电源轨实施了过压保护。

Table 5-1. 电压监控概述⁽¹⁾

电压轨	输出电压	创建时所使用的基准	监控监测阈值		监控所依据的基准	受监控的引脚	OV 保护级别	OV 保护基准	对器件行为的影响	
			UV	OV					UV	OV
电源输入										
VBAT	N/A	N/A	4.2 至 4.5V	34.7 至 36.7V	VMON_BG	VBATP	N/A	N/A	SPI 标志 VMON_STAT_1 D6 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0	SPI 标志 VMON_STAT_1 D7 复位状态 (当 MASK_VBATP_OV = 0 时)
电源输出										
VDD6	6V ± 10%	MAIN_BG	5.2 至 5.4V	7.8 至 8.2V	VMON_BG	VDD6	N/A	N/A	SPI 标志 VMON_STAT_2 D6	SPI 标志 VMON_STAT_2 D7
VDD5	5V ± 2%	MAIN_BG	4.5 至 4.85V	5.2 至 5.45V	VMON_BG	VDD5	N/A	N/A	SPI 标志 VMON_STAT_2 D4	SPI 标志 VMON_STAT_2 D5 ENDRV = 0
VDD3/5 (5V)	5V ± 2%	MAIN_BG	4.5 至 4.85V	5.2 至 5.5V	VMON_BG	VDD3/5	N/A	N/A	SPI 标志 VMON_STAT_2 D2 复位状态 NRES = 0 , ENDRV = 0	SPI 标志 VMON_STAT_2 D3 ENDRV = 0
VDD3/5 (3.3V)	3.3V ± 2%		3 至 3.17V	3.43 至 3.6V						
VDD1	0.8V 至 3.3V –1% 至 +2% VDD1_SENSE = 800mV –1% 至 +2%	MAIN_BG	0.94 至 0.98 × VDD1	1.03 至 1.06 × VDD1	VMON_BG	VDD1_SENSE	N/A	N/A	SPI 标志 VMON_STAT_2 D0 复位状态 NRES = 0 , ENDRV = 0 (当 NMASK_VDD1_UV_OV=1 时)	SPI 标志 VMON_STAT_2 D1 ENDRV = 0 (当 NMASK_VDD1_UV_OV=1 时)
VSOUT1 (非跟踪)	3.3V 至 9.5V ± 2% VDSFB1 = 2.5V ± 2%	MAIN_BG	0.88 至 0.94 × VSOUT1	1.06 至 1.12 × VSOUT1	MAIN_BG	VSFB1	N/A	N/A	SAFETY_STAT1 D5	SPI 标志 SAFETY_STAT1 D4
VSOUT1 (跟踪)	3.3V 至 9.5V ± 2% VDSFB1 = VTRACK1 ± 20mV	VTRACK1			VTRACK1	VSFB1	N/A	N/A		
内部电源										
VCP17	17V (典型值)	MAIN_BG	N/A	27V (典型值)	VMON_BG	N/A	27V (典型值)	VMON_BG	N/A	SPI 标志 VMON_STAT_1 D5 → 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0
VCP12	12V (典型值)	MAIN_BG	7.43V (典型值)	14.2V (典型值)	VMON_BG	N/A	14.2V (典型值)	VMON_BG	SPI 标志 VMON_STAT_1 D3	SPI 标志 VMON_STAT_1 D4 VDD5、VDD3/5 和 VDD1 不工作 → 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0
AVDD	6.9V (典型值)	内部 LV 齐纳二极管	3.6V (典型值)	N/A	独立本地带隙	N/A	N/A	内部 MV 齐纳二极管	NPOR → 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0	没有变化
AVDD_VMON	6.9V (典型值)	内部 LV 齐纳二极管	3.56V (典型值)	N/A	独立本地带隙	间接监控 VBAT_SAFING	< 10.48V	内部 MV 齐纳二极管	SPI 标志 VMON_STAT_1 D2 → NPOR → 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0	SPI 标志 VMON_STAT_1 D2 → NPOR → 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0
DVDD	3V (典型值)	MAIN_BG	2.472V (典型值)	3.501V (典型值)	VMON_BG	N/A	N/A	N/A	NPOR → 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0	NPOR → 待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0
内部基准										
MAIN_BG	2.5V ± 2%	MAIN_BG	2.364V (典型值)	2.617V (典型值)	VMON_BG	N/A	N/A	N/A	待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0	待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0
VMON_BG	2.5V ± 2%	VMON_BG	2.364V (典型值)	2.617V (典型值)	MAIN_BG	N/A	N/A	N/A	待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0	待机状态 NRES = 0 , ENDRV = 0

(1) N/A = 不适用

5.4.4 TPS65381A-Q1 内部错误信号

Table 5-2 提供了有关 TPS65381A-Q1 器件内部错误信号以及这些信号对器件行为的影响的概述。

Table 5-2. 内部错误信号

DMUX POS 编号	信号名称	说明	检测条件 (阈值电平)					设置标志的抗尖峰脉冲时间 (μs)				设置标志时的器件状态		
			最小值	典型值	最大值	单位	电气特性编号	最小值	典型值	最大值	电气特性编号	NRES	ENDRV	器件状态
D1.2	NAVDD_UV	AVDD 欠压比较器输出 (反相)		3.6		V		15		30		低电平	低电平	待机
D1.3	BG_ERR1	VMON 或主带隙关闭 (当 VMON 带隙 > 主带隙时设置为 1)		主带隙 = 2.364 (VMO N 带隙 = 2.477)		V		15		30		低电平	低电平	待机
D1.4	BG_ERR2	VMON 或主带隙关闭 (当 VMON 带隙 < 主带隙时设置为 1)		主带隙 = 2.617 (VMO N 带隙 = 2.477)		V		15		30		低电平	低电平	待机
D1.5	NVCP12_UV	VCP12 电荷泵欠压比较器 (反相)		7.43		V		15		30		不变	不变	不变
D1.6	VCP12_OV	VCP12 电荷泵过压比较器		14.2		V		15		30		低电平	低电平	待机
D1.7	VCP17_OV	VCP17 电荷泵过压比较器		21		V		15		30		低电平	低电平	待机
D1.8	NVDD6_UV	VDD6 欠压比较器 (反相)	5.2		5.4	V	6.22	10		40	6.18	不变	不变	不变
D1.9	VDD6_OV	VDD6 过压比较器	7.8		8.2	V	6.23	10		40	6.18	不变	不变	不变
D1.10	NVDD5_UV	VDD5 欠压比较器 (反相)	4.5		4.85	V	6.8	10		40	6.18	不变	不变	不变
D1.11	VDD5_OV	VDD5 过压比较器	5.2		5.45	V	6.10	10		40	6.18	不变	低电平	不变
D1.12	NVDD3/5_UV	VDD3/5 欠压比较器 ; 3.3V 设置 (反相)	3		3.17	V	6.12	10		40	6.18	低电平	低电平	复位
		VDD3/5 欠压比较器 ; 5V 设置 (反相)	4.5		4.85									
D1.13	VDD3/5_OV	VDD3/5 过压比较器 ; 3.3V 设置	3.43		3.6	V	6.14	10		40	6.18	不变	低电平	不变
		VDD3/5 过压比较器 ; 5V 设置	5.2		5.5									
D1.14	NVDD1_UV	VDD1 欠压比较器 (反相)	0.94		0.98	VDD1	6.16	10		40	6.18	当 NMASK_VDD1_UV_OV = 0 (默认配置) 时不变 当 NMASK_VDD1_UV_OV = 1 时 : NRES = 低电平	当 NMASK_VDD1_UV_OV = 0 (默认配置) 时不变 当 NMASK_VDD1_UV_OV = 1 时 : ENDRV = 低电 平	当 NMASK_VDD1_UV_OV = 0 (默认配置) 时不变 当 NMASK_VDD1_UV_OV = 1 时 : 复位
D1.15	VDD1_OV	VDD1 过压比较器	1.03		1.06	VDD1	6.17	10		40	6.18	不变	不变 (默认配置) 当 MASK_VDD1_UV_OV = 1 时 : ENDRV = 低电平	不变
D1.16	LOCLK	系统时钟丢失比较器	0.742		2.64	MHz		0.379		1.346		低电平	低电平	待机
D3.4	CP_OV	电荷泵过压比较器		VBAT + 12		V		N/A	N/A	N/A		不变	不变	不变
D3.5	NCP_UV	电荷泵欠压比较器 (反相)		VBAT + 6		V		N/A	N/A	N/A		不变	不变	不变
D3.8	CP_DIFF3V	指示 VCP-VBTP > 3V		VBAT + 3		V		N/A	N/A	N/A		不变	不变	不变
D3.10	NVBAT_UV	VBAT 欠压比较器 (反相)	4.2		4.5	V	6.1		200		6.7	低电平	低电平	待机

Table 5-2. 内部错误信号 (continued)

检测条件 (阈值电平)								设置标志的抗尖峰脉冲时间 (μs)				设置标志时的器件状态		
DMUX POS 编号	信号名称	说明	最小值	典型值	最大值	单位	电气特性编 号	最小值	典型值	最大值	电气特性 编号	NRES	ENDRV	器件状态
D3.11	VBATP_OV	VBAT 过压比较器	34.7		36.7	V	6.5		200		6.7	低电平 (默认配置) 当 MASK_VBATP_OV = 1 时 : NRES 不变	低电平 (默认配置) 当 MASK_VBATP_OV = 1 时 : ENDRV 不变	复位 (默认配置) 当 MASK_VBATP_OV = 1 时 : 器件状态不变
D3.12	VDD5_OT	VDD5 过热	175		210	°C	3.13	45		64		低电平	低电平	器件状态取决于 NMASK_VDD5_OT 位设 置 : NMASK_VDD5_OT = 0 : 对器件状态没有影响 NMASK_VDD5_OT = 1 : VDD5 禁用 → 复位
D3.13	VDD3/5_OT	VDD3/5 过热	175		210	°C	2.13	45		64		低电平	低电平	器件状态取决于 NMASK_VDD3/5_OT 位设 置 : NMASK_VDD3/5_OT = 0 : VDD3/5 禁用 → VDD3/5 UV 事件 → 复位 NMASK_VDD3/5_OT = 1 : 待机
D3.14	VSOUT1_OT	VSOUT1 过热	175		210	°C	5.13	45		64		不变	不变	不变
D3.15	VDD5_CL	VDD5 电流限制 ⁽¹⁾	350		650	mA	2.14	15		30		不变	不变	不变
D3.16	VDD3/5_CL	VDD3/5 电流限制	350		650	mA	3.14	15		30		不变	不变	不变
D4.2	VSOUT1_CL	VSOUT1 电流限制	100		500	mA	5.19	15		30		不变	不变	不变
D4.3	NVSOUT1_UV	VSOUT1 欠压比较器 (反相)	0.88		0.94	VSOUT1	6.19	10		40	6.21	不变	不变	不变
D4.4	VSOUT1_OV	VSOUT1 过压比较器	1.06		1.12	VSOUT1	6.20	10		40	6.21	不变	不变	不变
D4.5	NDVDD_UV	DVDD 欠压比较器 (反相)		2.472		V			0			低电平	低电平	待机
D4.6	DVDD_OV	DVDD 过压比较器		3.501		V			0			低电平	低电平	待机
D4.8	VS_TRK_MODE	VSOUT1 处于跟踪模式指示		1.2		V	5.3a	N/A	N/A	N/A		不变	不变	不变
D4.9	VMON_TRIM_ERR	VMON 调整错误	在 VMON 调整寄存器中检测到位翻转时设置					5		10		低电平	低电平	待机

(1) VDD5_CL DMUX 输出仅在 SENS_CTRL 寄存器中的 VDD5_EN 位设置为 1 时有效。当 VDD5_EN 清零时, 该 VDD5_CL 将处于高电平。

5.4.5 时钟丢失监控器 (LCMON)

LCMON 检测内部振荡器故障，包括：

- 振荡器时钟卡在高电平或卡在低电平
- 时钟频率降低

在释放上电复位 (NPOR) 之后，在上电事件期间会启用 LCMON。在器件正常运行（待机、复位、诊断、活动和安全状态）期间，时钟监控器保持活动状态。如果发生时钟故障：

- 器件转换至待机状态。
- 所有稳压器禁用。
- 数字内核重新初始化。
- 外部 MCU 复位置于低电平。
- 故障情况由 SAFETY_STAT_4 寄存器中的 LOCLK 位进行指示。

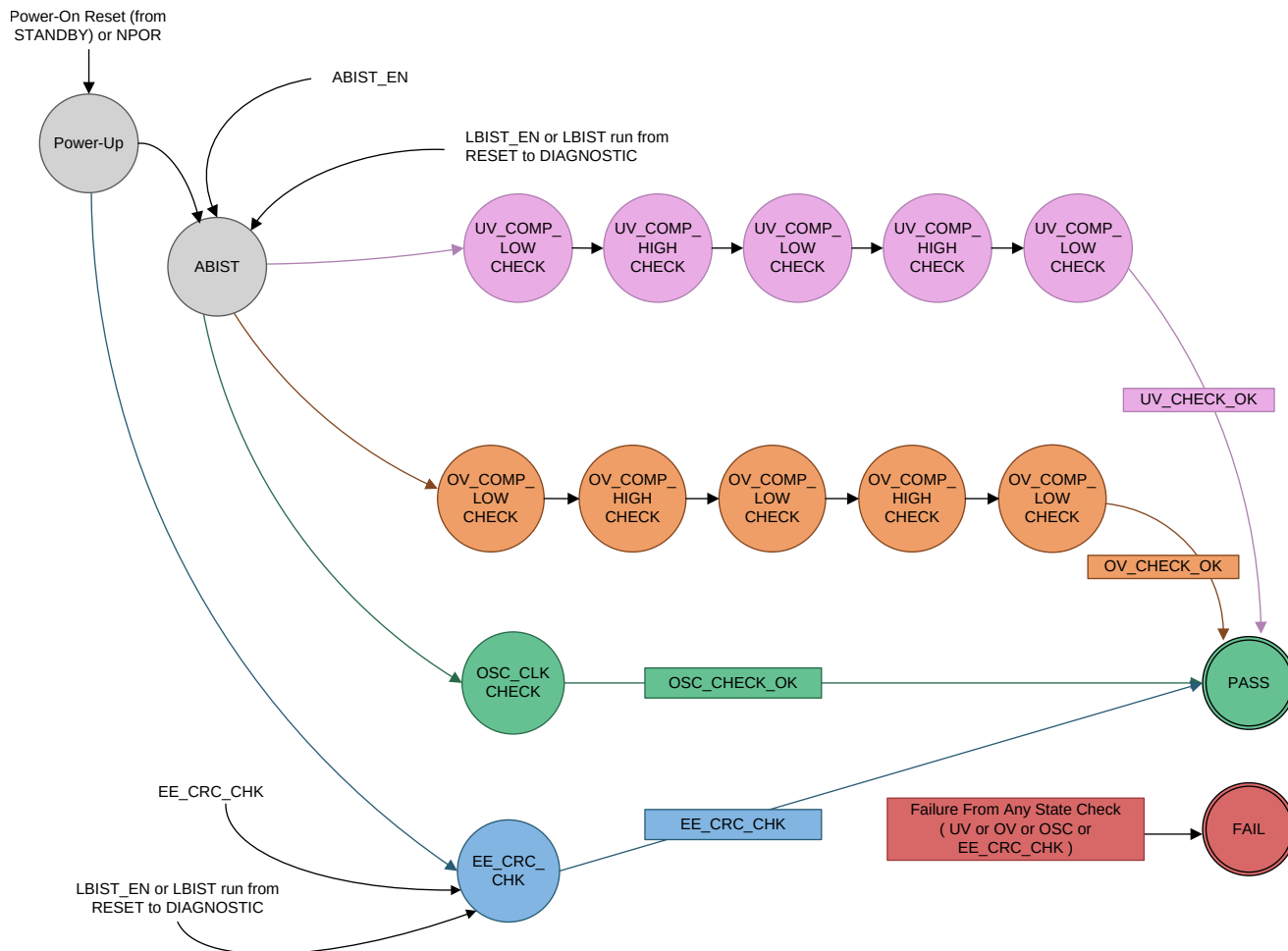
LCMON 具有由模拟 BIST (ABIST) 激活和监控的自检结构。当器件处于诊断状态或激活状态时，外部 MCU 可以随时重新检查 LCMON。已启用诊断对导致时钟监控器输出进行切换的时钟故障进行仿真。时钟监控器切换模式由 ABIST 进行检查，同时外部 MCU 可以在活动检测期间检查时钟丢失状态位是否设置。在该自检期间，实际振荡器频率 (4MHz) 不会由于该自检而变化。

5.4.6 模拟内置自检 (ABIST)

ABIST 是用于对关键模拟功能执行自检诊断的控制器和监控器电路：

- VMON 欠压和过压比较器
- 时钟监控器 (LCMON)
- EEPROM 模拟调整内容校验 (CRC 保护)

在对 VMON 欠压和过压比较器进行自检期间，受监控的电压轨保持不变，因此在其中的任何电压轨上都不会由于这些自检发生实际欠压或过压事件。此外，在对时钟监控器进行自检期间，实际振荡器频率 (4MHz) 也不会因该自检而变化。



(1) 有关任何 ABIST 功能失败对器件状态产生影响的信息，请参阅 [Section 5.4.19](#)。

Figure 5-3. 模拟 BIST 运行状态

ABIST 在每次发生器件上电事件或任何到复位状态的转换时激活。还可以通过在 SAFETY_BIST_CTRL 寄存器中设置 ABIST_EN 位由外部 MCU 运行 ABIST。在 ABIST 运行期间，器件无法监控稳压电源的状态，并且 ENDRV 引脚会被拉低。ABIST 运行时间大约为 300μs。还可以按照 MCU 请求在活动状态下执行 ABIST，具体取决于系统安全要求（如系统故障响应时间），在 ABIST 运行期间 ENDRV 引脚将处于低电平。

正在运行的 ABIST 在 SAFETY_STAT_3 寄存器的 ABIST_RUN 位（D0 位）中进行指示。该位在 ABIST 运行期间设置成 1，并在 ABIST 完成后清零。如果在处于诊断状态时发生 ABIST 故障（包括上电事件），则器件会进入安全状态，而不会将复位外部 MCU 的信号变为有效，并且 ABIST_ERR 状态标志在数字内核中保持锁存状态，直到 ABIST 成功运行。这允许外部 MCU 通过读取 SAFETY_STAT_3 寄存器中的 ABIST_ERR 位来检测 ABIST 故障。如果在处于活动状态时发生 ABIST 故障，则器件会设置 ABIST_ERR 状态标志，但不会发生任何状态转换。

5.4.7 逻辑内置自检 (LBIST)

逻辑 BIST (LBIST) 测试数字内核安全功能。LBIST 具有以下特性：

- 应用可控制的逻辑 BIST 引擎，该引擎向数字内核应用测试矢量。
- LBIST 向被测试的逻辑块提供卡在故障测试覆盖范围。
- LBIST 运行时间通常为 4.2ms ($\pm 5\%$)。在执行 LBIST 之后会等待 16ms (典型值) 以填充 LBIST 所覆盖的数字滤波器。在此期间，ABIST 会运行。总 BIST 时间大约为 21ms。在 BIST 期间 SPI 寄存器可能不可用，因此在 BIST 正在运行时不应进行任何 SPI 读取或写入。
- LBIST 引擎具有作为失效防护功能的超时计数器。

在上电事件期间任何退出复位状态的转换都会诊断状态下激活和运行 BIST (LBIST 以及 ABIST)。除非设置了 SAFETY_BIST_CTRL 寄存器中的 AUTO_BIST_DIS 位，否则任何其他退出复位状态的转换也会激活 BIST。

通过在 SAFETY_BIST_CTRL 寄存器中设置 LBIST_EN 位，MCU 可以运行 LBIST (BIST)。

NOTE

在活动状态下，如果通过将 LBIST_EN 位设置为 1 来启动 LBIST 手动运行，则必须考虑以下注意事项。LBIST 只应在系统安全时序要求能够允许总 BIST 时间为 21ms 并且 ENDRV 在该 21ms 的时间内处于低电平时以活动状态运行。

NOTE

在活动、诊断或安全状态下，如果通过将 LBIST_EN 位设置为 1 来启动 LBIST 手动运行，则必须考虑以下注意事项。在 LBIST 完成之后，WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器重新初始化为 5。MCU 应通过对 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 寄存器进行写入或通过立即引起不良事件来与 TPS65381A-Q1 看门狗重新同步。这两个重新同步选项都会启动新的看门狗序列并使 WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器递增。如果 WD_RST_EN 位设置为 1 (启用)，则 MCU 中的看门狗服务例程必须确保良好事件发送至看门狗以开始使 WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器递减，直到其达到 7 +1，这会导致转换至复位状态。在 LBIST 完成之后，某些寄存器会重新初始化。如果这些配置寄存器从初始化的值变为其他值，那么必须将这些寄存器重新配置为应用所需的设置。

NOTE

在诊断状态下，如果通过将 LBIST_EN 位设置为 1 来启动 LBIST 手动运行，则必须考虑以下注意事项。将 LBIST_EN 位设置为 1 可将 DIAG_EXIT_MASK 位清零。如果 DIAG_EXIT_MASK 位用于将器件保持在诊断状态以进行软件调试，则在 LBIST 完成后必须再次将其设置为 1 以保持诊断状态。诊断状态超时计数器仅在 LBIST 运行期间停止。在 LBIST 完成之后，超时计数器从最后的值继续计数。对于从诊断状态到活动状态的转换，DIAG_EXIT 位必须设置为 1。

在 BIST 运行期间，器件无法监控稳压电源的状态并且无法响应任何 SPI 命令，因此无法通过看门狗计时器监控 MCU 的状态。在 BIST 运行期间，ENDRV 引脚会被拉低，并且看门狗失效计数器会重新初始化为 5。在 BIST 完成之后，以下功能和寄存器会重新初始化：

- DEV_STAT
- SAFETY_STAT_2
- SAFETY_STAT_4
- SAFETY_STAT_5 (但 FSM[2:0] 会立即更新以反映当前器件状态)
- WD_TOKEN_VALUE
- WD_STATUS
- SAFETY_CHECK_CTRL
- DIAG_CFG_CTRL
- DIAG_MUX_SEL

正在运行的 LBIST 在 SAFETY_STAT_3 寄存器的 LBIST_RUN 位 (D1 位) 中进行指示。该位在 LBIST 运行时设置成 1，并在 LBIST 完成后清零。在 LBIST 运行之后，整个 BIST 完成由 MCU 通过针对 LBIST_RUN 和 ABIST_RUN 位读取 0 进行确认。

如果在诊断状态下发生 LBIST 故障，则器件进入安全状态。外部 MCU 可以通过读取 SAFETY_STAT_3 寄存器中的 LBIST_ERR 位来检测 LBIST 故障。如果在处于活动状态时发生 LBIST 故障，则器件会设置 LBIST_ERR 状态标志，但不会发生任何状态转换。由于在 LBIST 期间会运行 ABIST，因此 ABIST_ERR 位也可以由 MCU 进行监控。

5.4.8 结温监控和电流限制

每个具有内部功率 FET 的 LDO 都具有结温监控和过热保护 (热关断) 功能。如果发生过热情况，则稳压电源仅在过热情况消除之后才能重新启用。

对于 VSOUT1 稳压器，过热情况会禁用稳压器并清除使能位 (VSOUT1_EN)，同时所有其他稳压器保持启用。当 VSOUT1 过热情况消失后，外部 MCU 必须重新设置使能控制位以重新启用稳压器。

VDD3/5 和 VDD6 稳压器共享过热保护电路。过热事件会禁用 VDD3/5 稳压器。如果 NMASK_VDD3/5_OT 设置为 1 (默认设置)，则器件会转换至待机状态。如果 NMASK_VDD3/5_OT 位清零，则在 VDD3/5 输出达到 VDD3/5 变压器的 UV 电平时器件会转换至复位状态。在两种情况下，NRES 引脚都会变为低电平并将外部 MCU 复位，ENDRV 引脚为低电平。TI 建议在 NMASK_VDD3/5_OT 位设置为 1 的情况下使用该器件。

对于 VDD5 稳压器，过热情况会清除 VDD5_EN 使能位并转换为复位状态。NRES 引脚会变为低电平并将 MCU 复位，ENDRV 引脚为低电平。所有其他稳压器都保持启用。当 VDD5 过热情况消失后，MCU 必须重新设置使能控制位以重新启用稳压器。

VDD6、VDD3/5、VDD5 和 VSOUT1 稳压器包含电流限制电路，用于提供功耗过大和热过载保护。

Table 5-3 提供了电源输出轨的过热和过流保护概述。

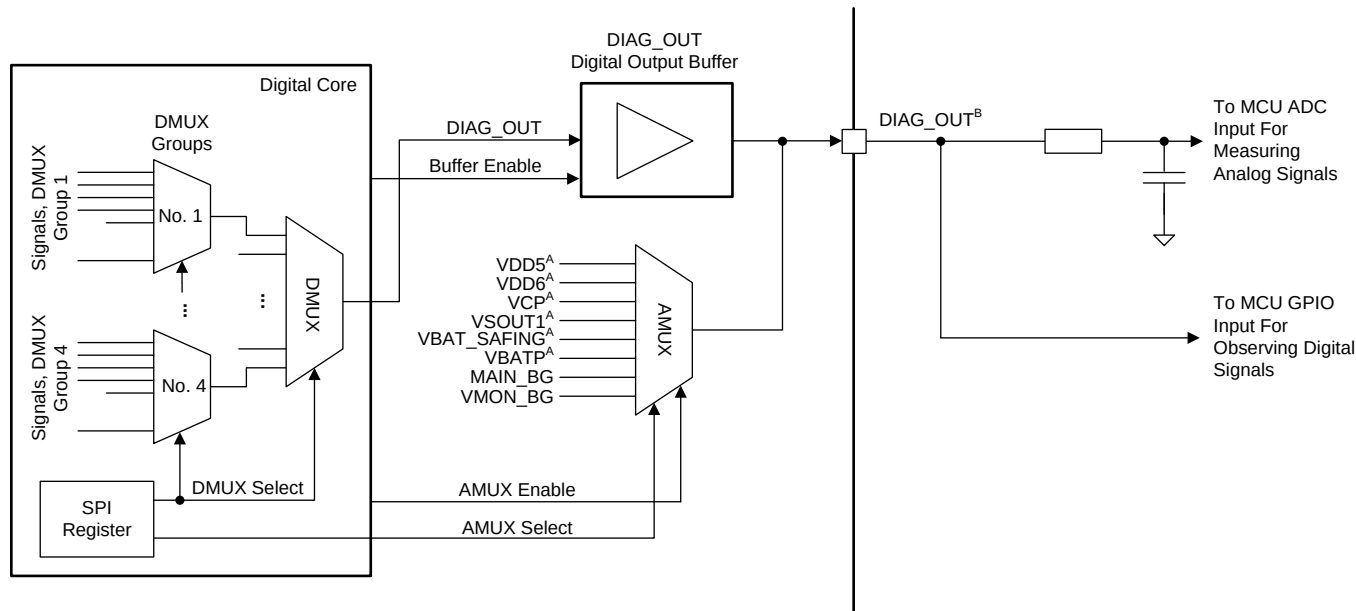
Table 5-3. 过热和过流保护概述

电压轨	过热保护		过流保护	
	阈值 (°C)	对器件行为的影响	电流限制	对器件行为的影响
VDD6	175 至 210 (与 VDD6 和 VDD3/5 共享)	设置 VDD3/5_OT (在 SAFETY_STAT_1 中) 当 NMASK_VDD3/5_OT = 1 时处于待机状态 当 NMASK_VDD3/5_OT = 0 时禁用 VDD3/5, 当 VDD3/5 达到 UV 电平时复位	1.5 至 2.5A	无
VDD3/5			350 至 650mA	设置 VDD3/5_ILIM (在 SAFETY_STAT_1 中)
VDD5	175 至 210	设置 VDD5_OT (在 SAFETY_STAT_1 中) 当 NMASK_VDD5_OT = 1 时清除 VDD5_EN (在 SENS_CTRL 中) 并且 VDD5 关闭, 处于复位状态 当 NMASK_VDD5_OT = 0 时在 VDD5_OT 中指示过热	350 至 650mA	设置 VDD5_ILIM (在 SAFETY_STAT_1 中)
VDD1	无	N/A	无	N/A
VSOUT1	175 至 210	设置 VSOUT1_OT (在 SAFETY_STAT_1 中) 清除 VSOUT1_EN (在 SENS_CTRL 中) 并且 VSOUT1 禁用	100 至 500mA	针对 VSOUT1_CL 通过数字多路复用器设置 DIAG_OUT

5.4.9 诊断多路复用器和诊断输出引脚 (DIAG_OUT)

未直接连接至 MCU 的模拟和数字信号由多路复用器切换至外部 DIAG_OUT 引脚。多路复用器通过 DIAG_MUX_SEL 寄存器来实现信号切换。数字信号会经过缓冲以具有足够的驱动能力。

该多路复用器通过反馈输入引脚状态或反馈内部模块自检状态或安全比较器输出来利用外部引脚互联测试。



- A. 这些模拟信号以某个分压比多路输出
- B. 如果应用必须使用 MCU ADC 测量模拟信号并使用 MCU GPIO 监控数字信号，则应用设计必须确保 GPIO 输入级不影响 ADC 测量。如果在 MCU 内无法隔离 MCU GPIO，则应用设计必须在外部实现必要的隔离。

Figure 5-4. 诊断输出引脚 DIAG_OUT

如果 DIAG_OUT 引脚连接至 MCU 的混合模拟或数字输入引脚，则 TI 建议根据所需的信号类型（模拟或数字）同时配置该 MCU 输入引脚和 DIAG_OUT 引脚。DIAG_OUT 引脚上的信号类型（模拟或数字）可以通过 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的 MUX_CFG[1:0] 位进行配置。DIAG_OUT 多路复用器可以通过 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的位 7 全局启用和禁用。在禁用时，DIAG_OUT 引脚处于高阻状态（三态）。

NOTE

如果在使用 SPI 通信时启用 DIAG_OUT 多路复用器，则在 NCS 引脚处于高电平并且 DIAG_OUT 多路复用器启用时 SDO 引脚未处于高阻抗状态。可能需要在应用中修改软件和硬件。对于硬件修改，如果使用电阻器来调节 SPI 总线上 SDO 引脚的电压电平或使用具有使能和三态输出的缓冲器门（如 [SN74AHC1G125](#)）以允许在 NCS 引脚处于高电平时下游 SDO 信号处于高阻抗状态（如果应用需要），则应检查 SDO 阈值电平，即使 DIAG_OUT 多路复用器启用也是如此。

5.4.9.1 模拟多路复用器 (AMUX)

Table 5-4 列出了 DIAG_OUT 引脚上的可选模拟内部信号。对于模拟多路复用器模式，必须在 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中将 MUX_CFG[1:0] 位设置成 10b。

Table 5-4. 模拟多路复用器选择表

信号 编号	电压轨 或 信号名称	说明	电源范围 ⁽¹⁾	分压比	分压比精度 ⁽²⁾		输出电阻 (kΩ)		DIAG_MUX_SEL[7:0]
					最小值	最大值	最小值	最大值	
A.1	VDD5	线性 VDD5 稳压器输出	5.8 至 34V	2	-2.25%	0.75%	20	50	0x01
A.2	VDD6	开关模式前置稳压器	5.8 至 34V	3	-3.75%	0.5%	30	100	0x02
A.3	VCP	电荷泵	5.8 至 18V	13.5	-6.25%	2.25%	90	200	0x04
			5.8 至 34V		-6.25%	4.75%			
A.4	VSOUT1	传感器电源电压	5.8 至 34V	4	-0.5%	1.2%	40	100	0x08
A.5	VBAT_SAFING	用于监控 (VMON) 和 BG2 功能的电池 (电源) 输入	5.8 至 18V	10	-5%	0%	125	200	0x10
			5.8 至 34V		-5%	5.5%			
A.6	VBATP	电池 (电源)、主电源	5.8 至 18V	10	-5%	0%	125	200	0x20
			5.8 至 34V		-5%	5.5%			
A.7	MAIN_BG	稳压器带隙基准	5.8 至 34V	1	N/A		3	15	0x40
A.8	VMON_BG	电压监控器带隙	5.8 至 34V	1	N/A		3	15	0x80

(1) 电源范围是 VBATP 和 VBAT_SAFING (VBATP = VBAT_SAFING) 的输入电源范围。

(2) 提供的精度不包含通过 DIAG_OUT 引脚消耗的直流负载电流。对于总体精度计算，必须考虑分压比精度和 $I_{DIAG_OUT} \times$ 输出电阻导致的电压降。

如果分压比之后的某个 AMUX 信号的电压高于 VDDIO 电压，则钳位变为活动状态，以避免在 DIAG_OUT 引脚上产生任何高于 VDDIO 电压的电压电平。

为了以最快的速度使切换至 DIAG_OUT 引脚的信号达到稳定，不建议遵循从 A.1 一直到 A.8 的 AMUX 切换顺序。

建议从 A.8 开始按照从高电压到低电压的顺序进行切换，例如：A.8 – A.7 – A.1 – A.2 – A.3 – A.5 – A.6 – A.4。

NOTE

在该示例中传感器电源输出电压 (VSOUT1) 为 0V。如果 VSOUT1 电压较高，则必须更改前一示例中所述的切换顺序。

NOTE

在应用中，需要在 MCU 的 ADC 输入的输入电容器滤波器上使用一个电阻至少为 100kΩ 的串联电阻。

5.4.9.2 数字多路复用器 (DMUX)

以下各表列出了 DIAG_OUT 引脚上的可选数字内部信号。对于数字多路复用器模式，必须在 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中将 MUX_CFG[1:0] 位清理成 01b。

这些信号中的大多数是可以影响器件状态以及 NRES 引脚和 ENDRV 引脚行为的内部错误信号。有关内部错误信号及其对器件行为影响的更详细信息，请参阅 Table 5-2。

Table 5-5. 数字多路复用器选择表 – 第 1 组

信号编号	信号名称	说明	通道组 DIAG_MUX_SEL [6:4]	通道编号 DIAG_MUX_SEL [3:0]
D1.1	RSV	保留, 逻辑 0	000b	0000b
D1.2	NAVDD_UV	AVDD 欠压比较器输出 (反相)	000b	0001b
D1.3	BG_ERR1	VMON 或主带隙关闭	000b	0010b
D1.4	BG_ERR2	VMON 或主带隙关闭	000b	0011b
D1.5	NVCP12_UV	VCP12 电荷泵欠压比较器 (反相)	000b	0100b
D1.6	VCP12_OV	VCP12 电荷泵过压比较器	000b	0101b
D1.7	VCP17_OV	VCP17 电荷泵过压比较器	000b	0110b
D1.8	NVDD6_UV	VDD6 欠压比较器 (反相)	000b	0111b
D1.9	VDD6_OV	VDD6 过压比较器	000b	1000b
D1.10	NVDD5_UV	VDD5 欠压比较器 (反相)	000b	1001b
D1.11	VDD5_OV	VDD5 过压比较器	000b	1010b
D1.12	NVDD3/5_UV	VDD3/5 欠压比较器 (反相)	000b	1011b
D1.13	VDD3/5_OV	VDD3/5 过压比较器	000b	1100b
D1.14	NVDD1_UV	VDD1 欠压比较器 (反相)	000b	1101b
D1.15	VDD1_OV	VDD1 过压比较器	000b	1110b
D1.16	LOCLK	系统时钟丢失比较器	000b	1111b

Table 5-6. 数字多路复用器选择表 – 第 2 组

信号编号	信号名称	说明	通道组 DIAG_MUX_SEL [6:4]	通道编号 DIAG_MUX_SEL [3:0]
D2.1	RSV	保留, 逻辑 0	001b	0000b
D2.2	SYS_CLK	系统时钟源	001b	0001b
D2.3	DFT	为生产测试保留的信号	001b	0010b
D2.4	WD_CLK	看门狗时钟基准 (0.55ms 周期时间)	001b	0011b
D2.5	RST_EXT_CLK	复位延长振荡器输出	001b	0100b
D2.6	T_5US	5μs 时间基准	001b	0101b
D2.7	T_15US	15μs 时间基准	001b	0110b
D2.8	T_40US	40μs 时间基准	001b	0111b
D2.9	T_2MS	2ms 时间基准	001b	1000b
D2.10	UC_ERROR/WDI	外部 MCU ERROR/WDI 输入引脚	001b	1001b
D2.11	SPI_NCS	SPI 片选输入引脚	001b	1010b
D2.12	SPI_SDI	SPI 从数据输入引脚	001b	1011b
D2.13	SPI_CLK	SPI 时钟输入引脚	001b	1100b
D2.14	SDO_RDBCK	SPI 从数据输出引脚读回	001b	1101b
D2.15	UC_ERROR/WDI	与 D2.10 相同的信号	001b	1110b
D2.16	NRES_EXT_IN	NRES 引脚读回 (对外部 MCU 进行复位)	001b	1111b

Table 5-7. 数字多路复用器选择表 – 第 3 组

信号编号	信号名称	说明	通道组 DIAG_MUX_SEL [6:4]	通道编号 DIAG_MUX_SEL [3:0]
D3.1	RSV	保留, 逻辑 0	010b	0000b
D3.2	DFT	为生产测试保留的信号	010b	0001b
D3.3	DFT	为生产测试保留的信号	010b	0010b
D3.4	CP_OV	电荷泵过压比较器	010b	0011b
D3.5	NCP_UV	电荷泵欠压比较器 (反相)	010b	0100b
D3.6	CP_PH1	电荷泵开关阶段 1	010b	0101b
D3.7	CP_PH2	电荷泵开关阶段 2	010b	0110b
D3.8	CP_DIFF3V	指示 VCP-VBATP > 3V	010b	0111b
D3.9	DFT	为生产测试保留的信号	010b	1000b
D3.10	NVBAT_UV	VBAT 欠压比较器 (反相)	010b	1001b
D3.11	VBATP_OV	VBAT 过压比较器	010b	1010b
D3.12	VDD5_OT	VDD5 过热	010b	1011b
D3.13	VDD3/5_OT	VDD3/5 过热	010b	1100b
D3.14	VSOUT1_OT	VSOUT1 过热	010b	1101b
D3.15	VDD5_CL	VDD5 电流限制	010b	1110b
D3.16	VDD3_CL	VDD3 电流限制	010b	1111b

Table 5-8. 数字多路复用器选择表 – 第 4 组

信号编号	信号名称	说明	通道组 DIAG_MUX_SEL [6:4]	通道编号 DIAG_MUX_SEL [3:0]
D4.1	RSV	保留, 逻辑 0	011b	0000b
D4.2	VSOUT1_CL	VSOUT1 电流限制	011b	0001b
D4.3	NVSOUT1_UV	VSOUT1 欠压比较器 (反相)	011b	0010b
D4.4	VSOUT1_OV	VSOUT1 过压比较器	011b	0011b
D4.5	NDVDD_UV	DVDD 欠压比较器 (反相)	011b	0100b
D4.6	DVDD_OV	DVDD 过压比较器	011b	0101b
D4.7	RSV	保留	011b	0110b
D4.8	VS_TRK_MODE	VSOUT1 处于跟踪模式指示	011b	0111b
D4.9	VMON_TRIM_ERR	VMON 调整错误	011b	1000b
D4.10-16	RSV	保留	011b	1001b-1111b

Table 5-9. 数字多路复用器选择表 – 第 5 组

信号编号	信号名称	说明	通道组 DIAG_MUX_SEL [6:4]	通道编号 DIAG_MUX_SEL [3:0]
D5.1	RSV	保留, 逻辑 0	111b	0000b
D5.2	TI_TEST_MODE	TI 生产测试模式指示	111b	0001b
D5.3-16	DFT	为生产测试保留的信号	111b	0010b-1111b

SDO 数字输出引脚上的诊断检查也可以在 DMUX 模式下执行。对于该诊断检查，需要执行以下序列：

1. 对于数字多路复用器模式，MUX_CFG[1:0] 配置必须设置为 01b。
2. SPI NCS 必须保持在高电平。
3. SDO 引脚的状态由 SPI_SDO 位 (DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的 D6 位) 进行控制。

在 SDO 引脚上执行该 SDO 检查期间，如果未选择“数字多路复用器选择”表中的任何信号，则 DIAG_OUT 引脚保持低电平。

5.4.9.3 诊断多路复用器输出状态 (通过 MUX_OUT 位)

对于 DIAG_OUT 引脚和 MCU 模拟/数字输入引脚之间的诊断互连检查，DIAG_OUT 引脚的状态通过 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的 SPI 位 MUX_OUT 进行控制。要使用该模式，必须在 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中将 MUX_CFG[1:0] 位设置成 00b。

5.4.9.4 多路复用器互连检查

为了在数字输入引脚 (ERROR/WDI、NCS、SDI 和 SCLK) 上执行诊断互连检查，必须将 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的 MUX_CFG[1:0] 位设置为 11b。DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的 INT_CON[2:0] 位可以选择将其中的哪些数字输入多路复用至 DIAG_OUT 引脚 (请参阅 [Section 5.5.1](#) 中的 DIAG_CFG_CTRL 寄存器)。

5.4.10 看门狗计时器 (WD)

看门狗监视 MCU 是否正常运行。该看门狗需要 MCU 以特定的时间间隔发出特定的触发或消息，以检测 MCU 是否正常运行。当看门狗检测到 MCU 正常运行时，MCU 可以通过 ENABLE_DRV 位控制 ENDRV 引脚的逻辑电平。当看门狗检测到 MCU 未正常运行时，器件会将 ENDRV 引脚拉低。该 ENDRV 引脚可以在应用中用作控制信号，用于在 MCU 未正常运行时停用电源输出级 (例如电机驱动器)。因此该功能称为看门狗启用功能。

看门狗具有两种不同的模式，其定义如下：

触发模式： 在触发模式下，MCU 在 ERROR/WDI 引脚上施加触发 (脉冲) 以发送触发模式所需的看门狗事件。当器件从复位状态转至诊断状态时，看门狗默认以触发模式运行。当看门狗以触发模式运行时，不应使用 MCU 错误信号监控器 (ESM)。

问答模式 (Q&A 模式)： 在 Q&A 模式下，MCU 通过 SPI 发送看门狗应答。

要选择 Q&A 模式，MCU 必须在处于诊断状态时在安全功能配置寄存器 (SAFETY_FUNC_CFG) 中设置 WD_CFG 位 (位 5)。当看门狗以 Q&A 模式运行时，可以使用 MCU 错误信号监控器 (ESM)。

5.4.11 看门狗失效计数器、状态和失效事件

看门狗包含看门狗失效计数器 (WD_FAIL_CNT[2:0])，该计数器的值会因不良事件的增加而递增或因良好事件的增加而递减。当看门狗失效计数器的值大于等于 5 时，看门狗处于超范围状态并且 ENDRV 引脚处于低电平 (看门狗启用功能禁用)。

当看门狗失效计数器小于等于 4 时，看门狗处于在范围内状态并且看门狗不再禁用看门狗启用功能。在这种情况下，在设置 ENABLE_DRV 控制位 (在 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中) 或器件未检测到其他影响 ENDRV 引脚电平的错误时器件会上拉 ENDRV 引脚。

看门狗失效计数器独立于 SAFETY_FUNC_CFG 寄存器中看门狗复位配置位 (位 3) WD_RST_EN 的状态运行。

看门狗失效计数器的响应方式如下：

- 每发生一个良好事件，将失效计数器递减一，一直到最小值零。
- 每发生一个不良事件，将失效计数器递增一，一直到最大值七。
- 每发生一个超时事件，将失效计数器增加一，一直到最大值七，并设置 TIME_OUT 标志 (WD_STATUS 寄存器位 1)。

Section 5.4.14和Section 5.4.15中列出了良好事件、不良事件 和超时事件 的定义。

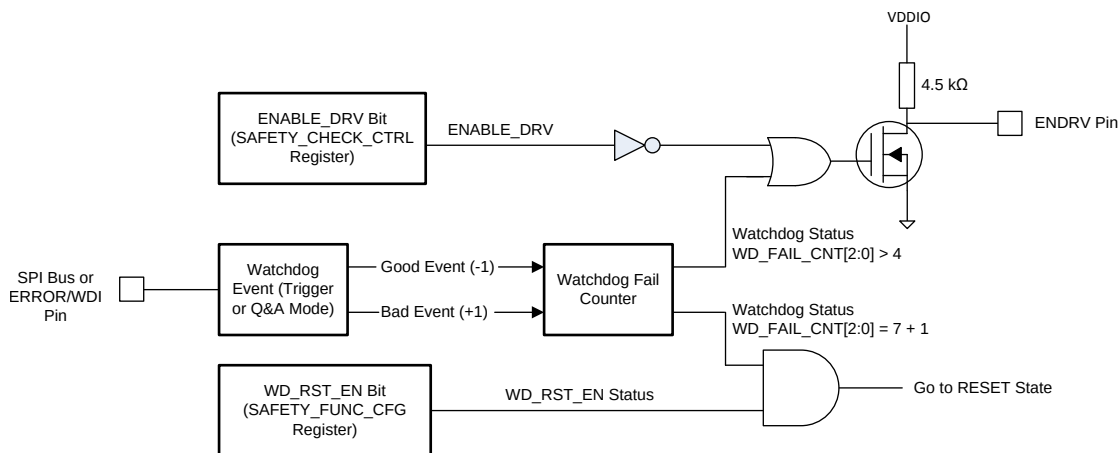


Figure 5-5. 看门狗对 ENDRV 和复位的影响

Table 5-10. 不同看门狗失效计数器值范围的对应看门狗状态

看门狗失效计数器 WD_FAIL_CNT[2:0]	000b 至 100b	101b 至 111b	111b
看门狗状态基于 WD_FAIL_CNT[2:0] 值。	看门狗在范围内	看门狗超出范围	如果 WD_RST_EN 位 设置为 1，则 NRES 引脚被拉低，器件在 下次接收到“不良”或 “超时”事件时处于复位 状态

当器件进入诊断状态（在经历复位状态之后）时以及器件从诊断状态转换至活动状态时，看门狗失效计数器初始化至计数 5。

当看门狗失效计数器达到计数 7 时，另一个不良事件不会更改计数器：计数器保持为 7。不过，如果看门狗复位启用（SAFETY_FUNC_CFG 寄存器中的 WD_RST_EN 位设置为 1），则在下次发生不良事件或超时事件（7 + 1）时器件会进入复位状态并且通过拉低 NRES 引脚使 MCU 复位。在复位状态下，看门狗失效计数器会重新初始化为 5。如果在 WD_RST_EN 位设置为 1 时看门狗失效计数器为七，则器件无需另一个不良事件或超时事件即会立即进入复位状态。

5.4.12 看门狗序列

每个看门狗序列以窗口 1 开始，后跟窗口 2。当器件处于诊断状态时，MCU 可以分别使用 WD_WIN1_CFG 和 WD_WIN2_CFG 寄存器对窗口 1 的时间周期 (t_{WIN1}) 和窗口 2 的时间周期 (t_{WIN2}) 进行编程。当器件从复位状态转至诊断状态时，看门狗序列以默认的 t_{WIN1} 和 t_{WIN2} 时间周期开始。

使用 Equation 1 和 Equation 2 来计算 t_{WIN1} 时间周期的最小值和最大值。使用 Equation 3 和 Equation 4 来计算 t_{WIN2} 时间周期的最小值和最大值。

$$t_{WIN1_MIN} = [(RT[6:0] - 1) \times 0.55 \times 0.95] \text{ ms}$$

其中

- RT[6:0] 位位于 WD_WIN1_CFG SPI 寄存器中。

(1)

$$t_{WIN1_MAX} = (RT[6:0] \times 0.55 \times 1.05) \text{ ms}$$

其中

- RT[6:0] 位位于 WD_WIN1_CFG SPI 寄存器中。

(2)

$$t_{WIN2_MIN} = [(RW[4:0] + 1) \times 0.55 \times 0.95] \text{ ms}$$

其中

- RW[4:0] 位位于 WD_WIN2_CFG SPI 寄存器中。

(3)

$$t_{WIN2_MAX} = [(RW[4:0] + 1) \times 0.55 \times 1.05] \text{ ms}$$

其中

- RW[4:0] 位位于 WD_WIN2_CFG SPI 寄存器中。

(4)

如果 MCU 在看门狗序列期间停止发送事件 或停止对看门狗进行喂狗，则看门狗会将该缺少来自 MCU 的响应的情况视为 **超时事件** (无响应事件)。这会设置 TIME_OUT 状态位 (WD_STATUS 寄存器中的位 1) 并使看门狗失效计数器递增。下一个看门狗序列会紧随 **超时事件** 启动。

基于窗口 1 和窗口 2 时间周期，看门狗序列和超时时间周期的计算方法如下：

$$t_{SEQUENCE_MIN} = t_{TIMEOUT_MIN} = t_{WIN1_MIN} + t_{WIN2_MIN} \quad (5)$$

$$t_{SEQUENCE_MAX} = t_{TIMEOUT_MAX} = t_{WIN1_MAX} + t_{WIN2_MAX} \quad (6)$$

看门狗使用器件的内部系统时钟 ($\pm 5\%$ 精度) 作为用于创建 0.55ms 看门狗时间阶跃的时间基准。窗口 1 可能最多比编程的值短一个 0.55ms 看门狗时间阶跃，如 Equation 1 中所示。

NOTE

由于窗口 1 和窗口 2 时间周期的不确定性，TI 建议为窗口 1 和窗口 2 使用值为二或更高的设置。窗口 2 可以设置为低至一 (假设窗口 1 设置为六或更低)。MCU 的响应应指向窗口 2 的已知计时的中点。随着窗口 1 设置增加至高于六，与窗口 2 中的设置一相比，器件系统时钟容差 ($\pm 5\%$) 将变大，从而不允许在窗口 2 中使用响应的已知时间范围，因此必须根据窗口 1 调节窗口 2 设置，以便允许计时裕量。

5.4.13 MCU 与看门狗的同步

要使 MCU 与看门狗序列同步，MCU 可以向 WIN1_CFG 或 WIN2_CFG 寄存器进行写入以启动新的看门狗序列。在 MCU 对 WIN1_CFG 或 WIN2_CFG 寄存器进行写入访问（即使在这些寄存器已锁定或器件处于活动或安全状态时）之后，器件会立即启动新的看门狗序列并使看门狗失效计数器递增。因此，对 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 寄存器的写入访问仅在该新的看门狗序列中生效。

当 MCU 与看门狗序列同步后，来自 MCU 的良好事件 会立即启动一个新的看门狗序列。这样，MCU 就会与该看门狗序列保持同步。

有关如何将 MCU 与 TPS65381A-Q1 看门狗进行同步的示例软件流程图，请参阅Figure 6-11。

5.4.14 触发模式（默认模式）

当器件从复位状态转至诊断状态时，看门狗以触发模式（默认模式）运行。第一个看门狗序列以默认的 t_{WIN1} 和 t_{WIN2} 时间周期开始。看门狗在 ERROR/WDI 引脚上接收来自 MCU 的触发。如果 ERROR/WDI 引脚上产生一个上升沿，然后在经过长于所需脉冲时间 $t_{WD_pulse(max)}$ (32 μ s) 的时间后在 ERROR/WDI 引脚上产生一个下降沿，那么这就是一个触发。即使具有较长持续时间的先高后低波形也会被计为触发（如果上升沿和下降沿符合该要求）。

窗口 1（称为关闭窗口）是看门狗序列中的第一个窗口。在窗口 1 中接收到的触发是不良事件，会终止窗口 1，启动新的看门狗序列并设置 ANSWER_EARLY 标志。

窗口 2（称为打开窗口）紧随窗口 1。窗口 2 至少持续到接收触发。窗口 2 至多持续到编程设定的 t_{WIN2} 时间。在窗口 2（打开）中接收到的触发是良好事件。看门狗在窗口 2 中接收到触发后，新的看门狗序列会立即开始。

如果 MCU 在看门狗序列期间停止发送触发，则看门狗会将该缺少来自 MCU 的响应的情况视为超事件（无响应事件）。这会设置 TIME_OUT 状态位（WD_STATUS 寄存器中的位 1）并使看门狗失效计数器递增。新的看门狗序列会紧随超事件启动。

TIME_OUT 标志有助于 MCU 软件将看门狗触发脉冲事件与所需的器件看门狗计时同步。在以这种方式进行同步时，MCU 会检测所设置的 TIME_OUT 标志。所设置的 TIME_OUT 标志指示超事件 和新看门狗序列启动。MCU 应该发送带计时功能的触发，以便触发处于该新看门狗序列的窗口 2（打开）中。

NOTE

如果在发生超事件 时存在活动 SPI 帧（nCS 为低电平），则不会在 WD_STATUS 寄存器中锁存（设置）TIME_OUT 标志，但看门狗失效计数器仍会递增。由于 TIME_OUT 标志未锁存，因此这会影响 MCU 的重新同步功能和状态监控。建议使用Section 5.4.13中所述的同步过程。

在触发模式下，看门狗使用具有 t_{WD_pulse} 滤波器时间的抗尖峰脉冲滤波器和内部系统时钟来创建内部生成的看门狗脉冲（请参阅Figure 5-6 和Figure 5-7）。

ERROR/WDI 引脚上的触发的上升沿必须至少在窗口 2（打开）终止之前的 $t_{WD_pulse(max)}$ 时间发生，以生成良好事件。

当器件处于诊断状态时，窗口 1 (关闭) 和窗口 2 (打开) 的窗口持续时间可以通过 WD_WIN1_CFG 和 WD_WIN2_CFG 寄存器进行编程。在触发模式下，窗口持续时间如下：

$$t_{WCW_MIN} (\text{触发模式}) = t_{WIN1_MIN}$$

其中

- WCW 是看门狗关闭窗口

(7)

$$t_{WCW_MAX} (\text{触发模式}) = t_{WIN1_MAX}$$

其中

- WCW 是看门狗关闭窗口

(8)

$$t_{WOW_MIN} (\text{触发模式}) = t_{WIN2_MIN}$$

其中

- WOW 是看门狗打开窗口

(9)

$$t_{WOW_MAX} (\text{触发模式}) = t_{WIN2_MAX}$$

其中

- WOW 是看门狗打开窗口

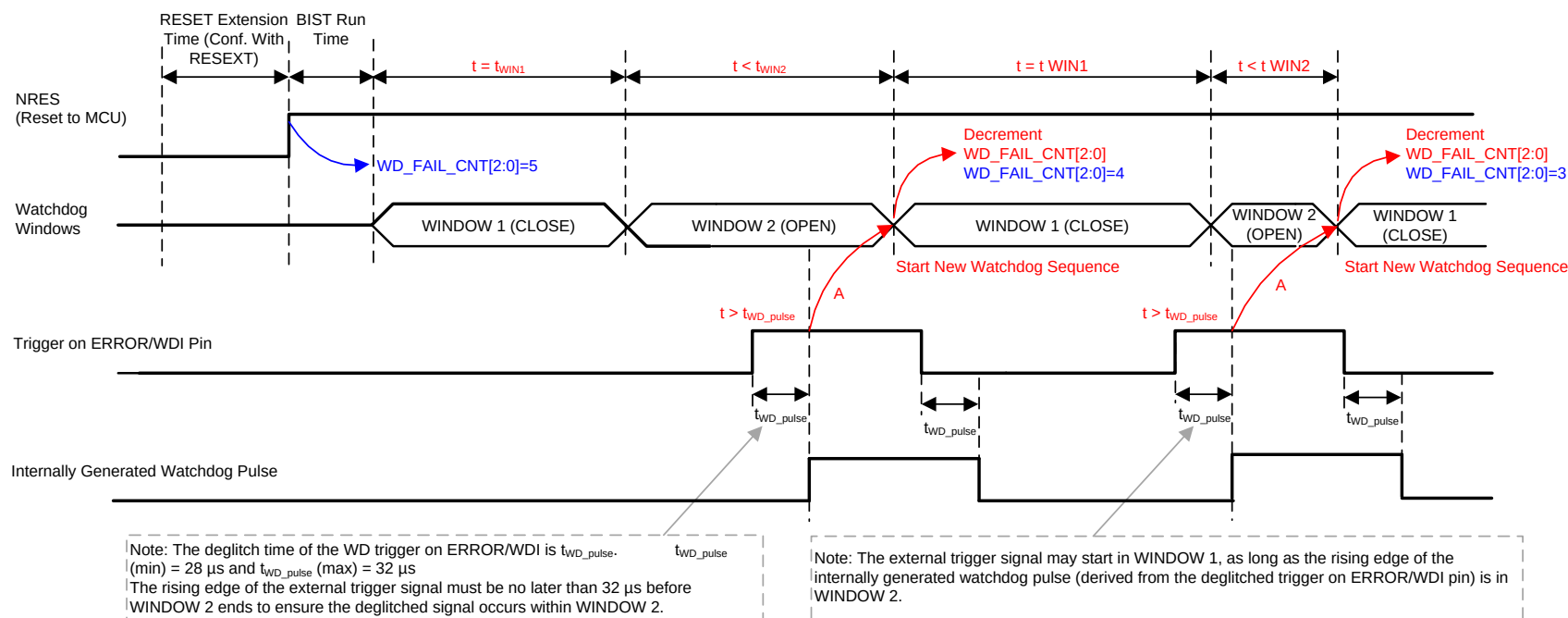
(10)

使用Equation 1 和Equation 2 来计算 $t_{WIN1} = t_{WCW}$ 时间周期的最小值和最大值。使用Equation 3 和Equation 4 来计算 $t_{WIN2} = t_{WOW}$ 时间周期的最小值和最大值。

立即向 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 寄存器写入新的窗口 1 或窗口 2 时间会开始新的看门狗序列并使看门狗失效计数器递增。即使在 WD_WIN1_CFG 寄存器和 WD_WIN2_CFG SPI 寄存器锁定时写入也会启动新的看门狗序列，因为器件未处于诊断状态或 SPI 命令 SW_LOCK 阻止对寄存器值进行写入更新。

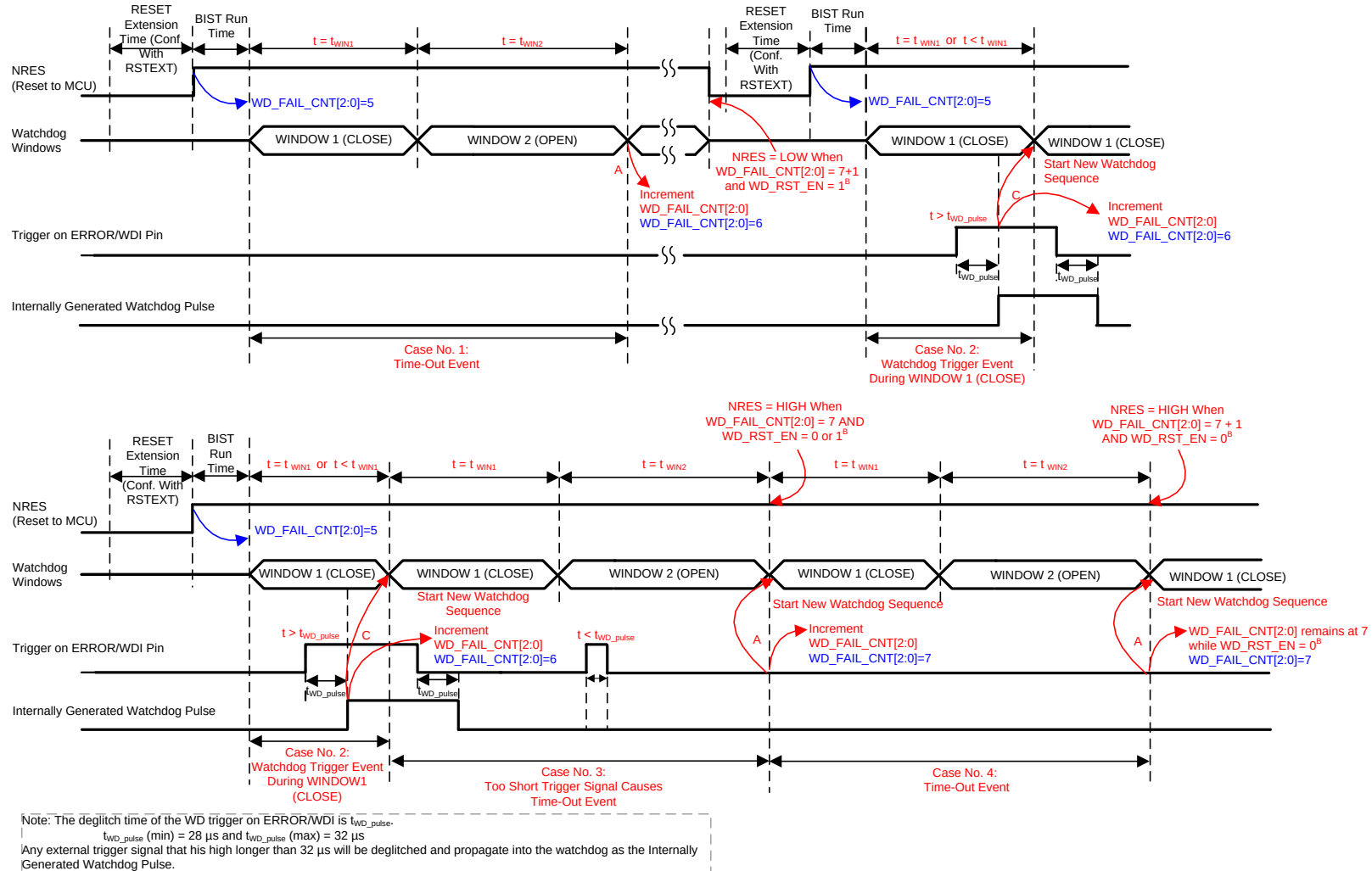
如果在窗口 2 (打开) 窗口期间接收，则看门狗触发事件被视为良好事件，如果在窗口 1 (关闭) 窗口期间接收，则被视为不良事件。良好事件 会终止当前看门狗序列并启动新的看门狗序列，因此 MCU 和器件看门狗计时会保持同步。

良好事件、不良事件、超时事件、上电事件或断电事件会终止当前看门狗序列并启动新的看门狗序列。



A. 在窗口 2 中接收到良好事件时，会在 1 个系统时钟周期（典型值 250ns）之后开始下一个看门狗序列。因此，窗口 2 的实际长度取决于 MCU 何时发送良好事件。

Figure 5-6. 触发模式下良好事件的示范案例



- 在发生超时事件时，会在 1 个系统时钟周期（典型值 250ns）之后开始下一个看门狗序列。
- 默认情况下 $WD_RST_EN = 0$ 。要启用在 $WD_FAIL_CNT[2:0] = 7 + 1$ 时通过看门狗进行复位， WD_RST_EN 必须设置为 1。 $WD_FAIL_CNT[2:0] = 7 + 1$ 表示法意味着如果在 $WD_RST_EN = 1$ 时 $WD_FAIL_CNT[2:0] = 7$ ，则下一个 (+1) 不良事件或超时事件将导致转换至复位状态。不过，当 $WD_RST_EN = 0$ 时， $WD_FAIL_CNT[2:0]$ 计数器不会递增至超过 7，并且看门狗不会导致转换至复位状态。
- 在窗口 1 中接收到不良事件时，会在 1 个系统时钟周期（典型值 250ns）之后开始下一个看门狗序列。因此，窗口 1 的实际长度取决于 MCU 何时发送不良事件。

Figure 5-7. 触发模式下不良事件和超时事件的示范案例

5.4.15 Q&A 模式

在器件处于诊断状态时将 SAFETY_FUNC_REG 寄存器中的 WD_CFG 位设置为 1 可以将看门狗配置为 Q&A (问答) 模式。在 Q&A 模式下, 器件会在 WD_TOKEN_VALUE 寄存器中向 MCU 提供问题 (或令牌)。MCU 会对问题执行一系列固定的算术运算, 以计算所需的 32 位应答。该应答分为四个应答字节或响应。MCU 通过 SPI 以一次一个字节的方式将这些应答字节写入 WD_ANSWER 寄存器。器件验证 MCU 是否在指定的计时窗口内返回了应答字节以及应答字节是否正确。

当 MCU 在正确的看门狗窗口内按照正确的顺序发送针对当前问题计算的正确应答后, 会发生良好事件。

发生以下事件之一时会发生不良事件:

- MCU 发送正确的应答字节, 但不在正确的看门狗窗口中。
- MCU 发送的应答字节计算错误。
- MCU 以错误的顺序 (序列) 返回正确的应答字节。

如果 MCU 在看门狗序列期间停止发送应答字节, 则看门狗会将该缺少来自 MCU 的响应的情况视为 **超时事件** (无响应事件)。这会设置 TIME_OUT 状态位 (WD_STATUS 寄存器中的位 1) 并使看门狗失效计数器递增。新的看门狗序列会紧随 **超时事件** 启动。

TIME_OUT 标志有助于 MCU 软件将看门狗应答计时与所需的器件看门狗计时同步。在以这种方式进行同步时, MCU 会检测所设置的 TIME_OUT 标志。所设置的 TIME_OUT 标志指示 **超时事件** 和新看门狗序列启动。MCU 应该发送带计时功能的应答字节, 以便它们处于新看门狗序列的正确窗口中。

NOTE

如果在发生 **超时事件** 时存在活动 SPI 帧 (nCS 为低电平), 则不会在 WD_STATUS 寄存器中锁存 (设置) TIME_OUT 标志, 但看门狗失效计数器仍会递增。由于 TIME_OUT 标志未锁存, 因此这会影响 MCU 的重新同步功能和状态监控。建议使用 [Section 5.4.13](#) 中所述的同步过程。

NOTE

在 Q&A 模式下, 每个看门狗序列都以窗口 1 (打开) 开始, 后跟窗口 2 (关闭)。相对于触发模式而言, 针对 Q&A 模式出现的打开和关闭是颠倒的, 但窗口 1 和窗口 2 的顺序与包含每个窗口的设置的寄存器 (WD_WIN1_CFG 和 WD_WIN2_CFG) 相同。

5.4.15.1 看门狗 Q&A 相关定义

Q&A 模式定义如下:

问题 (令牌) 问题 (令牌) 是一个 4 位字 (请参阅 [Section 5.4.15.3](#))。

当 MCU 从 WD_TOKEN_VALUE 寄存器读取问题 (TOKEN[3:0]) 时, 看门狗向 MCU 提供问题 (令牌)。

MCU 可以在看门狗序列开始时请求每个新问题 (令牌), 但这对于计算应答而言不是必需的。MCU 还可以通过实现问题生成电路来生成问题, 如 [Figure 5-9](#) 中所示。不过, 问题 (从而以及应答) 字节始终基于在器件的看门狗内部生成的问题。因此, 如果 MCU 生成错误的问题并且提供通过错误的问题计算出的应答字节, 那么看门狗会检测到不良事件。

仅当在前一个看门狗序列中发生良好事件, 从而使令牌计数器 (内部计数器) 递增并生成新问题 (令牌) 时, 才会生成新问题 (令牌), 如 [Figure 5-9](#) 中所示。

应答 (响应) 应答 (响应) 是 32 位字, 分为四个应答字节或响应: 应答 3 (WD_TOKEN_RESP_3)、应答 2 (WD_TOKEN_RESP_2)、应答 1 (WD_TOKEN_RESP_1) 和应答 0 (WD_TOKEN_RESP_0)。

当 MCU 对看门狗应答寄存器 (WD_ANSWER 寄存器中的 WD_ANSW[7:0] 位) 进行写入时, 看门狗会接收应答字节。

对于每个问题, 看门狗要求 MCU 以正确的计时和顺序 (序列) 提供四个正确的应答字节。应答 3、应答 2 和应答 1 可以按照正确的顺序位于窗口 1 或窗口 2 中, 而应答 0 必须位于窗口 2 中, 这样才能被检测为良好事件。

5.4.15.2 Q&A 模式下的看门狗序列

在 MCU 写入第四个应答字节应答 0 (WD_TOKEN_RESP_0) 之后或在发生超时事件之后，Q&A 模式下的看门狗序列将终止。前一个看门狗序列终止之后，新的看门狗序列将启动。

当器件处于诊断状态时，窗口 1 (打开) 和窗口 2 (关闭) 的窗口持续时间可以通过 WD_WIN1_CFG 和 WD_WIN2_CFG 寄存器进行编程。在 Q&A 模式下，窗口持续时间如下：

$$t_{WOW_MIN} (Q\&A \text{ 模式}) = t_{WIN1_MIN}$$

其中

- WOW 是看门狗打开窗口

(11)

$$t_{WOW_MAX} (Q\&A \text{ 模式}) = t_{WIN1_MAX}$$

其中

- WOW 是看门狗打开窗口

(12)

$$t_{WCW_MIN} (Q\&A \text{ 模式}) = t_{WIN2_MIN}$$

其中

- WCW 是看门狗关闭窗口

(13)

$$t_{WCW_MAX} (Q\&A \text{ 模式}) = t_{WIN2_MAX}$$

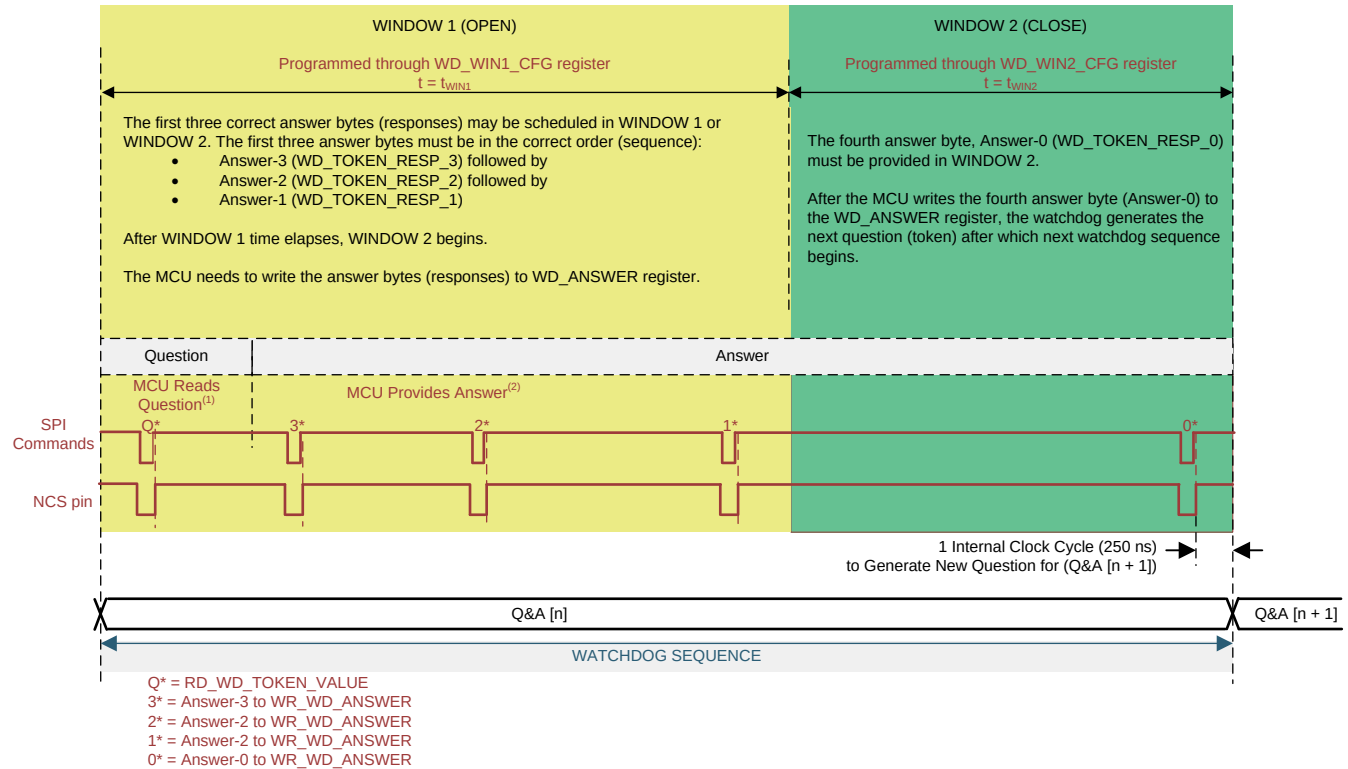
其中

- WCW 是看门狗关闭窗口

(14)

使用Equation 1 和Equation 2 来计算 $t_{WIN1} = t_{WOW}$ 时间周期的最小值和最大值。使用Equation 3 和Equation 4 来计算 $t_{WIN2} = t_{WCW}$ 时间周期的最小值和最大值。

立即向 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 寄存器写入新的窗口 1 或窗口 2 时间会开始新的看门狗序列并使看门狗失效计数器递增。即使在 WD_WIN1_CFG 寄存器和 WD_WIN2_CFG SPI 寄存器锁定时写入也会启动新的看门狗序列，因为器件未处于诊断状态或 SPI 命令 SW_LOCK 阻止对寄存器值进行写入更新。



- (1) MCU 无需读取问题（令牌）。在窗口 1 或窗口 2 的任何位置，MCU 都可以开始提供正确的应答字节应答 3、应答 2、应答 1。只要应答是良好事件，就会在最后的应答 0 之后的 1 个系统时钟周期内生成新的问题（令牌）并启动新的看门狗序列。不良事件或超时事件会导致启动新的看门狗序列，不过不会生成新的问题（令牌）。
- (2) MCU 可能会在 WR_WD_ANSWER 命令之间放置其他 SPI 命令（即使重新请求问题也是如此）。只要四个正确的应答字节遵循正确的顺序并且第四个正确的应答字节在窗口 2 中提供，那么这些 SPI 命令对良好事件检测就没有影响。

Figure 5-8. Q&A 模式下的看门狗序列

5.4.15.3 问题（令牌）生成

看门狗使用 4 位令牌计数器（Figure 5-9 中的 TOKEN_CNT[3:0] 位）和 4 位马尔可夫链来生成 4 位问题（令牌）。MCU 可以在 WD_TOKEN_VALUE 寄存器 TOKEN[3:0] 位中读取该问题。当令牌计数器递增时，看门狗会生成新的问题，这仅在在看门狗检测到良好事件时发生。当看门狗检测到不良事件或超时事件时，它不会生成新的问题。对于在 MCU 对 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 寄存器进行写入之后启动的看门狗序列，看门狗不会生成新的问题。

当令牌计数器从 1111b 转换为 0000b 时，它会向马尔可夫链提供一个时钟脉冲。当器件完成 LBIST（在从复位转换至诊断状态时进行手动 LBIST 运行或自动 LBIST 运行）后，问题计数器和马尔可夫链将设置为奇异默认值 0000b。为了离开奇异点，实施了反馈逻辑组合。

Figure 5-9 显示了用于问题（令牌）生成的逻辑组合。问题位于 WD_TOKEN_VALUE 寄存器 TOKEN[3:0] 位中。

令牌计数器与 WD_ANSW_CNT[1:0] 状态位（位于 WD_STATUS 寄存器中）的逻辑组合可生成参考应答字节，如 Figure 5-9 中所示。

4-bit LFSR Polynomial Equation¹

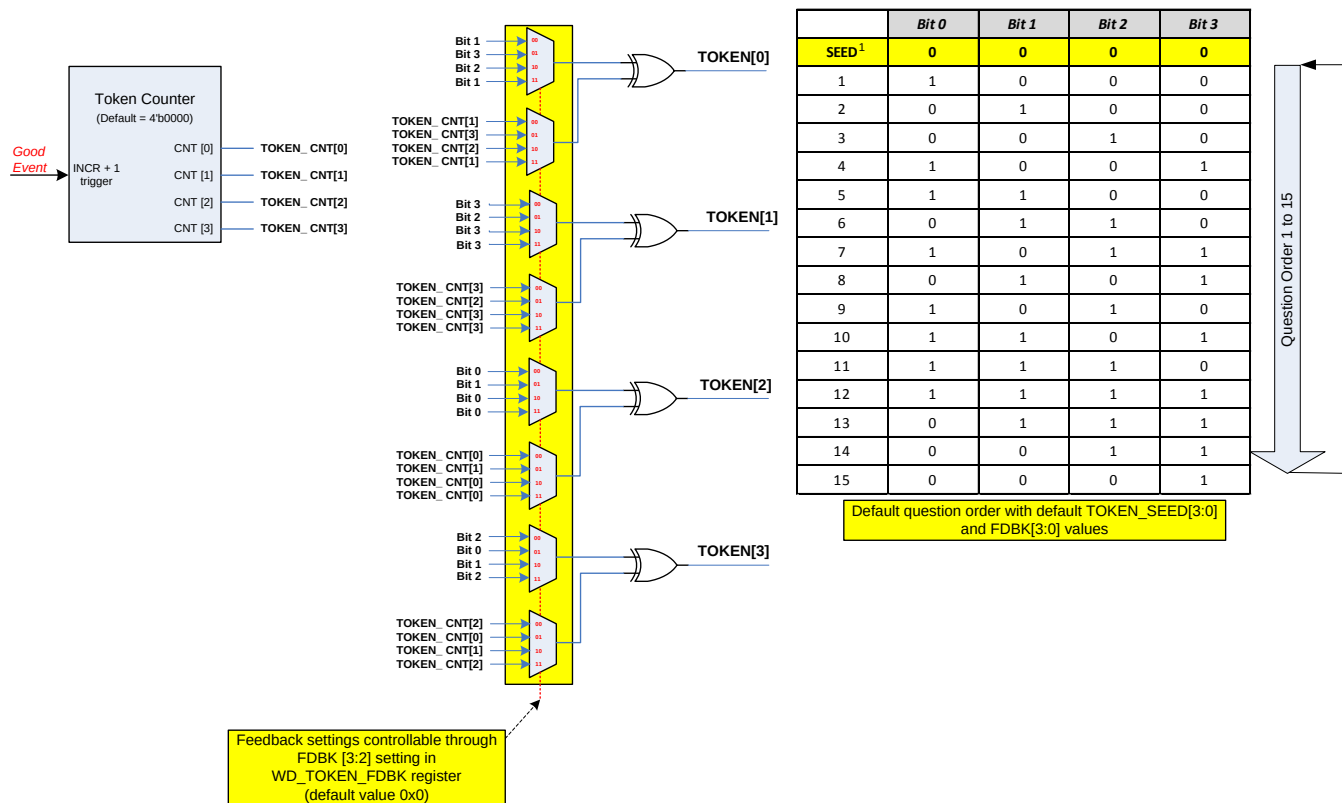
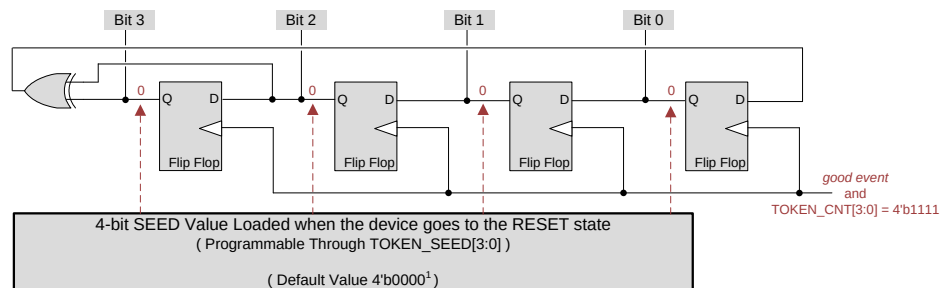
FDBK[2:1] = 2b'00: $y = x4 + x3 + 1$ (Default Value)

FDBK[2:1] = 2b'01: $y = x4 + x2 + 1$

FDBK[2:1] = 2b'10: $y = x3 + x2 + 1$

FDBK[2:1] = 2b'11: $y = x4 + x3 + x2 + 1$

Equivalent for Default LFSR Polynomial (Default FDBK value)



(1) 值 0000b 是特殊种子，等于 0001b，在上电期间包含默认负载 0000b。

Figure 5-9. 看门狗问题 (令牌) 生成

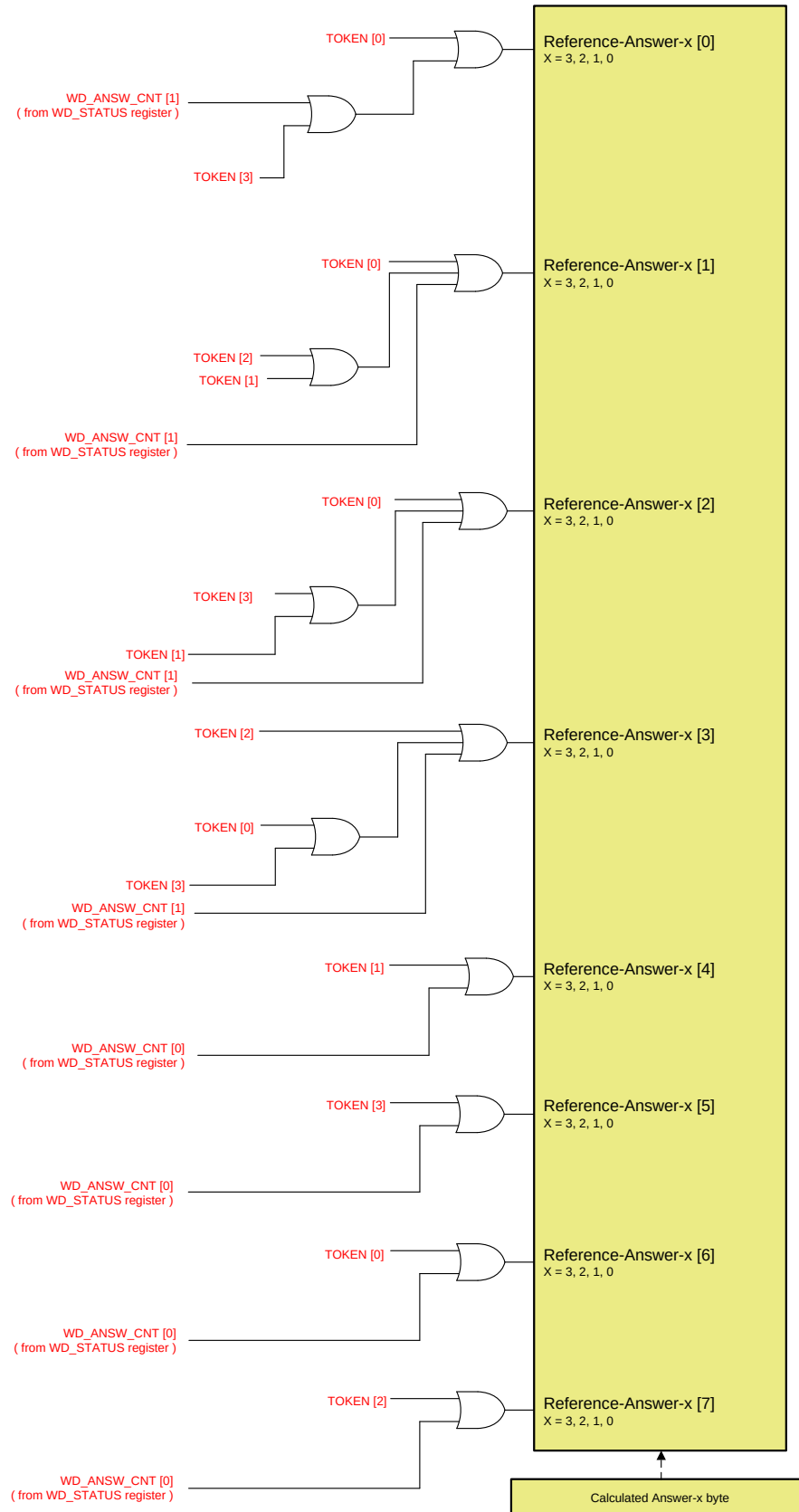


Figure 5-10. 看门狗应答计算

5.4.15.4 应答比较和参考应答

2 位看门狗应答计数器 WD_ANSW_CNT[1:0] (位于 WD_STATUS 寄存器中) 会对接收到的应答字节数进行计数并控制参考应答 x 字节的生成, 如 [Figure 5-10](#) 中所示。在每个看门狗序列的开始, WD_ANSW_CNT[1:0] 的默认值为 11b, 该值指示看门狗期望 MCU 在 WD_ANSWER 寄存器中写入应答 3 (WD_RESP_3)。

5.4.15.4.1 2 位看门狗应答计数器的序列

对于每个计数器值, 2 位看门狗应答计数器 WD_ANSW[1:0] 的序列如下:

- WD_ANSW_CNT[1:0] = 11b :
 - 看门狗计算参考应答 3
 - 发生写入访问: MCU 在 WD_ANSWER 寄存器中写入应答 3 (WD_TOKEN_RESP_3) 字节。
 - 看门狗将参考应答 3 与 WD_ANSWER 寄存器中的应答 3 字节进行比较。
 - 看门狗将 WD_ANSW_CNT[1:0] 位递减至 10b 并更新 ANSWER_ERR 标志位。
- WD_ANSW_CNT[1:0] = 10b :
 - 看门狗计算参考应答 2
 - 发生写入访问: MCU 在 WD_ANSWER 寄存器中写入应答 2 (WD_TOKEN_RESP_2) 字节。
 - 看门狗将参考应答 2 与 WD_ANSWER 寄存器中的应答 2 字节进行比较。
 - 看门狗将 WD_ANSW_CNT[1:0] 位递减至 01b 并更新 ANSWER_ERR 标志位。
- WD_ANSW_CNT[1:0] = 01b :
 - 看门狗计算参考应答 1
 - 发生写入访问: MCU 在 WD_ANSWER 寄存器中写入应答 1 (WD_TOKEN_RESP_1) 字节。
 - 看门狗将参考应答 1 与 WD_ANSWER 寄存器中的应答 1 字节进行比较。
 - 看门狗将 WD_ANSW_CNT[1:0] 位递减至 00b 并更新 ANSWER_ERR 标志位。
- WD_ANSW_CNT[1:0] = 00b :
 - 看门狗计算参考应答 0
 - 发生写入访问: MCU 在 WD_ANSWER 寄存器中写入应答 0 (WD_TOKEN_RESP_0) 字节。
 - 看门狗将参考应答 0 与 WD_ANSWER 寄存器中的应答 0 字节进行比较。
 - 看门狗更新 ANSWER_ERR 标志位。
 - 看门狗启动新的看门狗序列并将 WD_ANSW_CNT[1:0] 设置为 11b。

Table 5-11. 使用 WD_TOKEN_FDBK 寄存器的默认设置来设置问题 (令牌) 和相应的应答字节

WD_TOKEN_VALUE 寄存器中的问题 (令牌)	WD 应答 (将要写入 WD_ANSW 寄存器)			
	应答 3 (WD_TOKEN_RESP_3)	应答 2 (WD_TOKEN_RESP_2)	应答 1 (WD_TOKEN_RESP_1)	应答 0 (WD_TOKEN_RESP_0)
令牌 [3:0]	WD_ANSW_CNT [1:0] = 11b	WD_ANSW_CNT [1:0] = 10b	WD_ANSW_CNT [1:0] = 01b	WD_ANSW_CNT [1:0] = 00b
0h	FFh	0Fh	F0h	00h
1h	B0h	40h	BFh	4Fh
2h	E9h	19h	E6h	16h
3h	A6h	56h	A9h	59h
4h	75h	85h	7Ah	8Ah
5h	3Ah	CAh	35h	C5h
6h	63h	93h	6Ch	9Ch
7h	2Ch	DCh	23h	D3h
8h	D2h	22h	DDh	2Dh
9h	9Dh	6Dh	92h	62h
Ah	C4h	34h	CBh	3Bh
Bh	8Bh	7Bh	84h	74h
Ch	58h	A8h	57h	A7h
Dh	17h	E7h	18h	E8h
Eh	4Eh	BEh	41h	B1h
Fh	01h	F1h	0Eh	FEh

5.4.15.5 看门狗 Q&A 模式序列事件和 WD_STATUS 寄存器更新

对于列出的不同情形，看门狗序列事件如下：

- 当所有应答字节的值正确 (ANSWER_ERR 位清零) 并且时序也正确时，会发生良好事件。对于此类良好事件，会发生以下事件：
 - 看门狗失效计数器 WD_FAIL_CNT[2:0] 递减一。
 - 令牌计数器递增一，从而导致生成新的问题 (令牌)。
 - SEQ_ERR 位复位。
 - ANSWER_EARLY 位复位。
- 当所有应答字节的值正确 (ANSWER_ERR 位清零) 但时序不正确时，会发生不良事件。对于此类不良事件，会发生以下事件：
 - 看门狗失效计数器 WD_FAIL_CNT[2:0] 递增一。
 - 令牌计数器不变，因此问题 (令牌) 不变。
 - 设置 SEQ_ERR 位。
 - 设置 ANSWER_EARLY 位。
- 当一个或多个应答字节的值不正确 (ANSWER_ERR 位设置为 1) 但时序正确时，会发生不良事件。对于此类不良事件，会发生以下事件：
 - 看门狗失效计数器 WD_FAIL_CNT[2:0] 递增一。
 - 令牌计数器不变，因此问题 (令牌) 不变。
 - 设置 SEQ_ERR 位。
 - 设置 ANSWER_EARLY 位。
- 当一个或多个应答字节的值不正确 (ANSWER_ERR 状态位设置为 1) 并且时序不正确时，会发生不良事件。对于此类不良事件，会发生以下事件：
 - 看门狗失效计数器 WD_FAIL_CNT[2:0] 递增一。
 - 令牌计数器不变，因此问题 (令牌) 不变。
 - 设置 SEQ_ERR 位。
 - 设置 ANSWER_EARLY 位。

- 如果发生**超时事件**，则会发生以下事件：
 - 看门狗失效计数器 WD_FAIL_CNT[2:0] 递增一。
 - 令牌计数器不变，因此问题（令牌）不变。
 - 设置 TIME_OUT 位。
- 如果 MCU 对寄存器 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 进行写入，则会发生以下事件：
 - 看门狗失效计数器 WD_FAIL_CNT[2:0] 递增一。
 - 设置 WD_CFG_CHG 位。

Table 5-12. WD_STATUS 位与可能的看门狗序列事件

看门狗序列事件					WD_STATUS 寄存器位			
所有 MCU 应答字节是否都正确？	应答 0 在窗口 2（关闭）期间到达	应答 0 在窗口 1（打开）期间到达	在等待应答时是否发生超时？	窗口 1 或窗口 2 持续时间是否更改？	WD_CFG_CHG	SEQ_ERR	TIME_OUT	ANSWER_EARLY
是	是	否	否	否	0	0	0	0
是	否	是	否	否	0	0	0	1
否	是	否	否	否	0	1	0	0
否	否	是	否	否	0	1	0	1
是（前 3 个应答 x）	否	否	是	否	0	0	1	0
否	否	否	是	否	0	1	1	0
—	—	—	—	是	1	0	0	0

5.4.16 MCU 错误信号监控器 (MCU ESM)

该模块通过 ERROR/WDI 输入引脚来监控从外部 MCU 发送至器件的错误情况。MCU ESM 可配置为监视两个不同的信号，具体取决于监视哪个功能安全架构 MCU 系列以及特定的 MCU 系列如何在错误或故障输出引脚上指示不正常的运行。MCU ESM 模式可通过 SAFETY_FUNC_CFG 寄存器中的 ERROR_CFG 位进行选择。

在 TMS570 模式下，ESM 检测具有可编程低电平脉冲持续时间阈值的低电平脉冲信号（请参阅 [Section 5.4.16.1](#)）。当 ERROR_CFG 位设置为 1 时会选择该模式。在 PWM 模式下，ESM 检测具有可编程频率和占空比的 PWM 信号（请参阅 [Section 5.4.16.2](#)）。当 ERROR_CFG 位清零（默认设置）时会选择该模式。PWM 模式可用作外部时钟监控器功能。

默认情况下 MCU ESM 处于停用状态。要将其激活，请将 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中的 NO_ERROR 位清零。

NOTE

建议仅当看门狗配置为 Q&A 模式时才激活 MCU ESM，否则 ERROR/WDI 引脚会用于看门狗触发输入和 MCU 信号发送。

低电平信号发送持续时间阈值（对于 TMS570 模式）或预期的低电平脉冲持续时间（对于 PWM 模式）可通过 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器进行设置。预期的 PWM 高电平脉冲持续时间（对于 PWM 模式）可通过 SAFETY_ERR_PWM_H 寄存器进行设置。当 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 ERROR_PIN_FAIL 位设置为 1 时，会指示检测到的 MCU 信号发送错误。

NOTE

SAFETY_ERR_PWM_x 寄存器更新（仅在诊断模式下可行）会立即生效。因此，如果 MCU 向 SAFETY_ERR_PWM_x 写入小于当前脉冲持续时间计数器值的新值，则 MCU ESM 会立即在 ERROR/WDI 引脚上检测到错误情况。然后脉冲持续时间计数器会重新初始化为 0 并将 ERROR_PIN_FAIL 位设置为 1。

当 TPS65381A-Q1 器件处于诊断状态时，MCU 可以对信号发送错误进行仿真（仿真故障注入），从而通过在 NO_ERROR 位清零（MCU ESM 启用）时检查 ERROR_PIN_FAIL 位的状态对错误信号监控器进行诊断检查（无需转换至安全状态）。

NOTE

要在处于诊断状态时对引脚执行 MCU ESM 诊断检查，可以使用以下过程。ERROR/WDI 引脚是边沿触发型引脚。

1. 通过在 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中将 ERROR_PIN_FAIL 位清零来清除该位。
2. 确认当 MCU ESM 启用时 ERROR_PIN_FAIL 位未复位至 1。
3. 在 ERROR/WDI 引脚上注入特定于 MCU ESM 运行模式的故障。
4. 确认即使 ENABLE_DRV 位设置为 1 ERROR_PIN_FAIL 位也设置为 1 并且 ENDRV 引脚处于低电平。
5. 删除注入的故障。
6. 写入 0 以清除 ERROR_PIN_FAIL 位。
7. 通过读回 SAFETY_ERR_STAT 寄存器来确认 ERROR_PIN_FAIL 位已清除。
8. 确认当 ENABLE_DRV 位设置为 1 时 ENDRV 引脚返回高电平（假设不存在其他阻止 ENDRV 为高电平的情况）（请参阅 [Figure 5-14](#)）。

当 TPS65381A-Q1 器件处于活动状态时，监测到的 MCU 信号发送错误会导致转换至安全状态。专用 4 位错误计数器（SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 DEV_ERR_CNT[3:0] 位）对从活动状态到安全状态的转换进行计数。

该模块处于逻辑 BIST (LBIST) 覆盖范围之内。

5.4.16.1 TMS570 模式

当 ERROR/WDI 引脚处于低电平的时间长于由 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器以编程方式设置的时长时，会检测到错误情况。可编程时间范围为 5μs 至 1.28ms (典型值)，阶跃为 5μs (±5%)。

必须根据 TMS570 MCU 检测错误或故障以及可能从错误或故障恢复或更正错误或故障所需的最长时间将 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器设置为所需的值。

低电平持续时间如下：

$$t_{\text{TMS570_LOW_MIN}} = (\text{PWML}[7:0]) \times 5\mu\text{s} \times 0.95 \quad (15)$$

$$t_{\text{TMS570_LOW_MAX}} = (\text{PWML}[7:0] + 1) \times 5\mu\text{s} \times 1.05 \quad (16)$$

使用 Equation 15 和 Equation 16 来计算低电平持续时间 $t_{\text{TMS570_LOW}}$ 的最小值和最大值。Figure 5-11 显示了错误检测案例情形。

NOTE

SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器 (PWML[7:0]) 应配置为寄存器中最低为 1 (01h)。

ERROR/WDI 引脚上的低电平脉冲监控实现方式如下：

- 当 NO_ERROR 位清零后，ERROR/WDI 引脚上的每个下降沿都会在一个系统时钟周期 (250ns ±5%) 内将低电平脉冲持续时间计数器重新初始化为 0。
- 在重新初始化之后，低电平脉冲计数器会在一个系统时钟周期 (250ns ±5%) 之后重新启动。
- 只要 ERROR/WDI 引脚处于低电平，低电平脉冲持续时间计数器就会每 5μs (精度为 ±5%) 递增一次。ERROR/WDI 引脚上的上升沿会停止低电平脉冲持续时间计数器。
- 当低电平脉冲持续时间计数器等于 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器设置时，会检测到一个错误。

在检测到 MCU 信号发送错误之后，会在一个系统时钟周期 (250ns ± 5%) 内设置 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 ERROR_PIN_FAIL 位。当器件处于活动状态时，再经过一个系统时钟周期之后会发生到安全状态的转换。

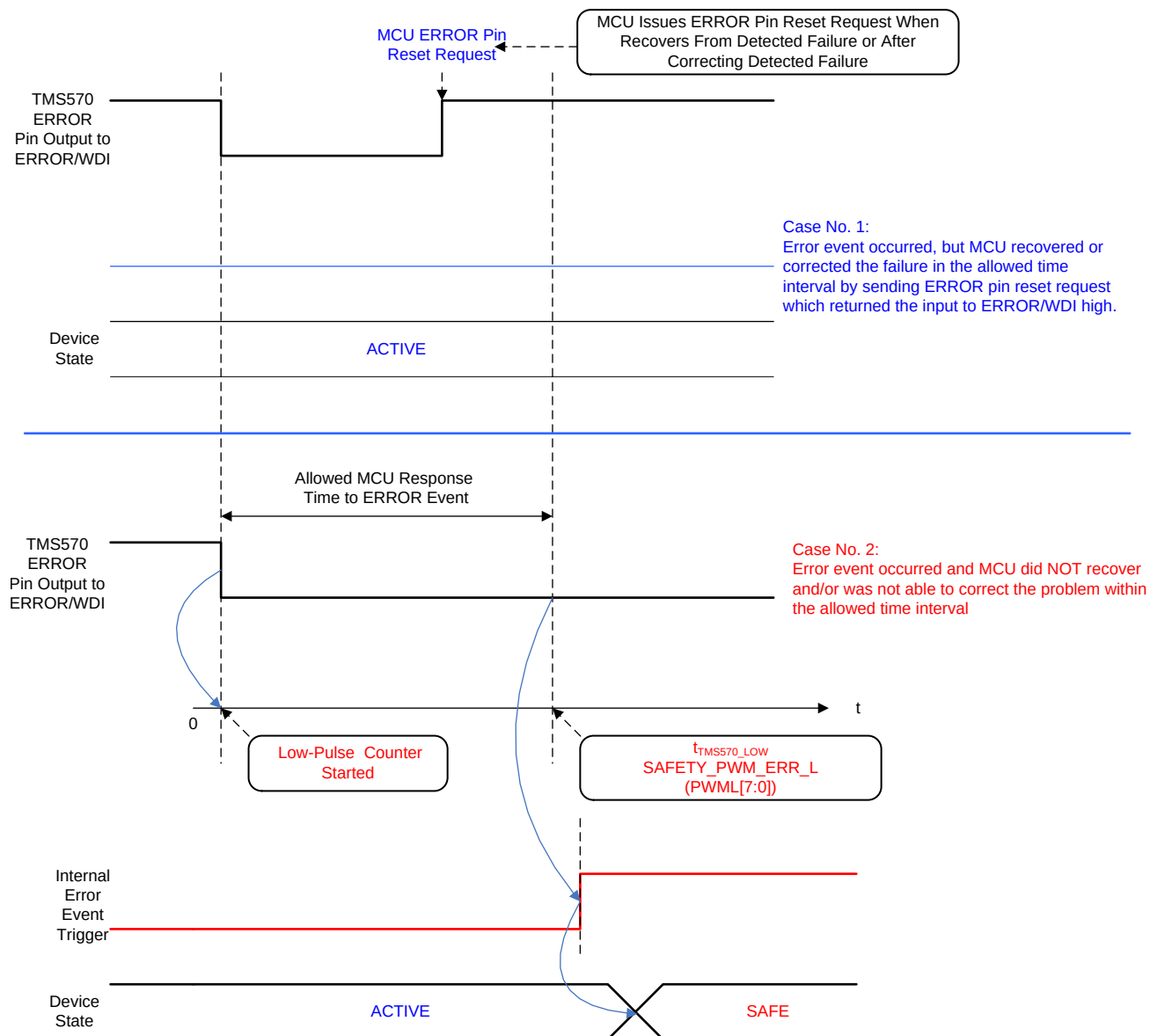


Figure 5-11. TMS570 模式下的错误检测案例情形

5.4.16.2 PWM 模式

在 ERROR/WDI 引脚上发生以下情况之一时，会检测到错误情况：

- ERROR/WDI 引脚高电平脉冲持续时间超出由 PWM_H 寄存器以编程方式设置的阈值。
- ERROR/WDI 引脚低电平脉冲持续时间超出由 PWM_L 寄存器以编程方式设置的阈值。

如果同时发生以下两种情况，则 MCU ESM 不会在 ERROR/WDI 引脚上检测到 MCU 信号发送错误：

- ERROR 引脚高电平脉冲持续时间小于由 PWM_H 寄存器以编程方式设置的阈值。
- ERROR 引脚低电平脉冲持续时间小于由 PWM_L 寄存器以编程方式设置的阈值。

预期高电平和低电平脉冲持续时间的可编程时间范围为 15μs 至 3.8ms (典型值)，分辨率阶跃为 15μs (±5%)。当器件处于诊断状态时，高电平和低电平脉冲持续时间可通过 SAFETY_ERR_PWM_H 和 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器以编程方式进行设置。脉冲持续时间如下：

$$t_{\text{PWM_HIGH_MIN}} = (\text{PWMH}[7:0]) \times 15\mu\text{s} \times 0.95 \quad (17)$$

$$t_{\text{PWM_HIGH_MAX}} = (\text{PWMH}[7:0] + 1) \times 15\mu\text{s} \times 1.05 \quad (18)$$

$$t_{\text{PWM_LOW_MIN}} = (\text{PWML}[7:0]) \times 15\mu\text{s} \times 0.95 \quad (19)$$

$$t_{\text{PWM_LOW_MAX}} = (\text{PWML}[7:0] + 1) \times 15\mu\text{s} \times 1.05 \quad (20)$$

使用 Equation 17 和 Equation 18 来计算高电平脉冲持续时间 $t_{\text{PWM_HIGH}}$ 的最小值和最大值。使用 Equation 19 和 Equation 20 来计算低电平脉冲持续时间 $t_{\text{PWM_LOW}}$ 的最小值和最大值。

NOTE

SAFETY_ERR_PWM_H (PWMH[7:0]) 和 SAFETY_ERR_PWM_L (PWML[7:0]) 寄存器应配置为寄存器中最低为 1 (01h)。

高电平脉冲持续时间和低电平脉冲持续时间监视的实现方式如下：

低电平脉冲监视：

- 当 ERROR/WDI 引脚处于低电平时，ERROR/WDI 引脚上的每个下降沿或将 NO_ERROR 位从 1 设置为 0 会在一个系统时钟周期 (250ns ±5%) 内将低电平脉冲持续时间计数器重新初始化为 0。
- 在重新初始化之后，低电平脉冲计数器会在一个系统时钟周期 (250ns ±5%) 之后重新启动。
- 当 ERROR/WDI 引脚保持为低电平时，低电平脉冲持续时间计数器会每 15μs (±5%) 递增一次。
- 当低电平脉冲持续时间计数器等于 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器设置时，会检测到一个错误。

高电平脉冲监视：

- 当 ERROR/WDI 引脚处于高电平时，ERROR/WDI 引脚上的每个上升沿或将 NO_ERROR 位从 1 设置为 0 会在一个系统时钟周期 (250ns ±5%) 内将高电平脉冲持续时间计数器重新初始化为 0。
- 在重新初始化之后，高电平脉冲计数器会在一个系统时钟周期 (250ns ±5%) 之后重新启动。
- 当 ERROR/WDI 引脚保持为高电平时，高电平脉冲持续时间计数器会每 15μs (精度为 ±5%) 递增一。
- 当高电平脉冲持续时间计数器等于 SAFETY_ERR_PWM_H 寄存器设置时，会检测到一个错误。

NOTE

ERROR/WDI 引脚是边沿触发型引脚，用于将 MCU 与 MCU ESM 模块同步，在诊断模式下，MCU 应开始发送所需的 PWM 信号。在第一个下降沿或上升沿，MCU ESM 会检测到该边沿并与该边沿同步启动内部计时器，因此 MCU 与 MCU ESM 会同步。MCU ESM 会在每个上升沿和下降沿与 MCU 重新同步。当处于诊断状态时，如果发生同步，则应该会清除 ERROR_PIN_FAIL 标志。

在检测到 MCU 信号发送错误之后，会在一个系统时钟周期 (250ns ±5%) 内设置 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 ERROR_PIN_FAIL 位。当器件处于活动状态时，再经过一个系统时钟周期之后会发生到安全状态的转换。

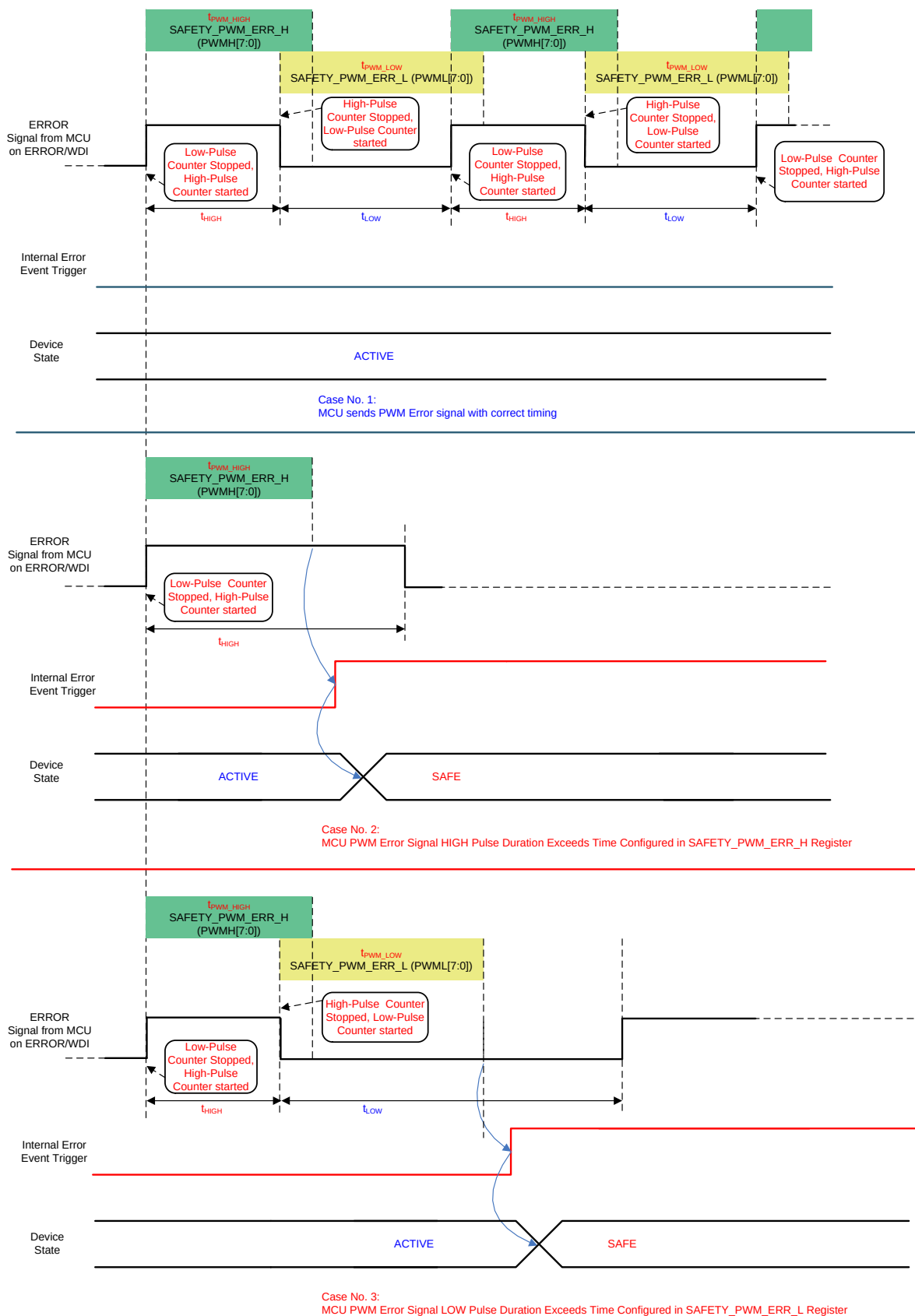


Figure 5-12. PWM 模式下的错误检测案例情形

5.4.17 器件配置寄存器保护

该功能通过 SPI 写入访问保护和 CRC 校验来保护安全 SPI 映射寄存器。

寄存器访问保护包括两种独特的功能：

- 在设置写入访问锁定保护之后无法对寄存器进行写入。可以通过软件或上电复位来清除锁定。
- 针对配置寄存器的 CRC 保护。

在 SPI 写入更新之后会在安全数据上发生 CRC，以验证是否已对 SPI 寄存器内容进行正确编程。CRC 控制器是一个诊断模块，可通过执行 CRC 来验证 SPI 映射寄存器空间的完整性。内容读入 CRC 控制器之后，会获取表示安全寄存器内容的签名。CRC 控制器的职责是为一组数据计算签名，然后将计算出的签名值与预先确定的良好签名值进行比较。预先确定的 CRC 签名值存储在 SAFETY_CFG_CRC 寄存器中。外部 MCU 使用 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器来启用 CRC 校验并使用 SAFETY_STAT_2 寄存器来监视状态。启用之后，会对配置寄存器执行 CRC 校验。如果检测到签名错误，将在 SAFETY_STAT_2 SPI 寄存器中设置 CFG_CRC_ERR 标志。器件状态和 ENDRV 引脚状态保持不变。如果检测到处于诊断状态的 TPS65381A-Q1 器件发生校验和错误，那么将 CFG_CRC_EN 位清零会使 TPS65381A-Q1 器件进入安全状态（ENDRV 引脚被拉低）。

采用了标准 CRC-8 多项式： $X^8 + X^2 + X + 1$

CRC 监控器测试处于逻辑 BIST 覆盖范围之内。

64 位字符串由 CRC 进行保护。以下寄存器受到保护：

- SAFETY_FUNC_CFG
- DEV_REV
- SAFETY_PWD_THR_CFG
- SAFETY_ERR_CFG
- WD_TOKEN_FDBK
- WD_WIN2_CFG
- WD_WIN1_CFG
- SAFETY_ERR_PWM_L
- DEV_CFG2
- DEV_CFG1 (仅第 6 位)

Table 5-13 列出了 CRC 总线结构。

Table 5-13. CRC 总线结构

寄存器名称	64 位总线排序
SAFETY_FUNC_CFG [6:0]	[63:57]
DEV_REV [7:0]	[56:49]
SAFETY_PWD_THR_CFG [3:0]	[48:45]
SAFETY_ERR_CFG [7:0]	[44:37]
WD_TOKEN_FDBK [7:0]	[36:29]
WD_WIN2_CFG [4:0]	[28:24]
WD_WIN1_CFG [6:0]	[23:17]
SAFETY_ERR_PWM_L [7:0]	[16:9]
DEV_CFG2 [7:0]	[8:1]
DEV_CFG1 [6]	0

在外部 MCU 中，CRC 计算必须按字节执行并且从 64 位总线排序值的最低字节开始。最高有效位在位顺序中处于第一位。一次计算生成的 CRC 是下一次计算的种子值。初始种子值为 FFh。第八次按字节进行的计算的 CRC 结果是 CRC 签名值，该值必须存储在 SAFETY_CFG_CRC 寄存器中（请参阅Figure 5-13）。

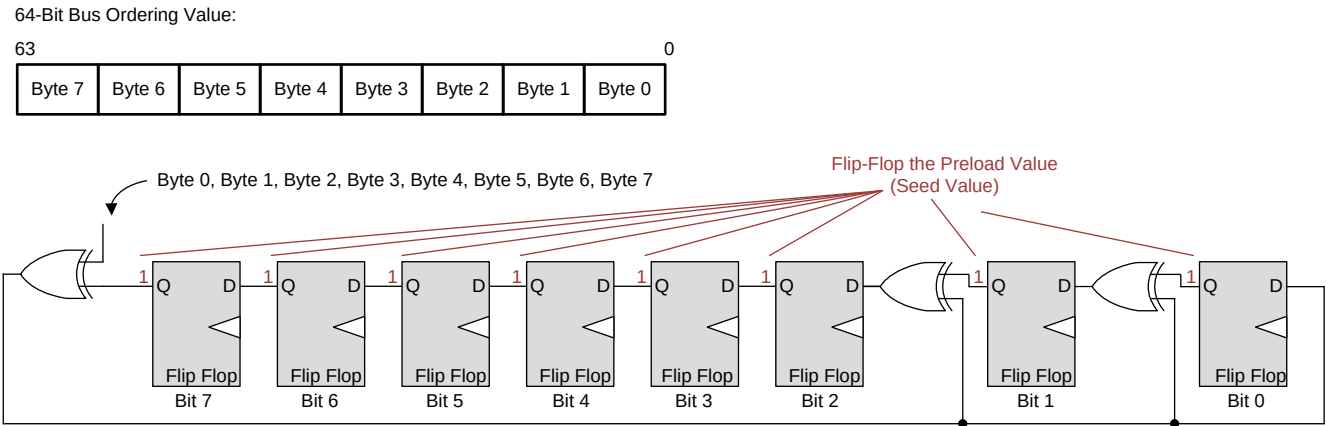


Figure 5-13. CRC 计算逻辑

Table 5-14 列出了一些 CRC 计算示例。

Table 5-14. CRC 计算示例

64 位总线排序值	CRC-8 结果
0000 0000 0000 0000h	DBh
FFFF FFFF FFFF FFFFh	0Ch
0A0A 0505 0A0A 0505h	D4h
0505 0A0A 0505 0A0Ah	17h
A0A0 5050 A0A0 5050h	2Bh
0A23 E000 18FE 7B80h	1Bh

如果 CRC 控制器在配置寄存器上检测到签名错误，则在执行后续的 EEPROM CRC 时必须非常小心。如果在配置寄存器中检测到签名错误，那么当 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中的 CFG_CRC_EN 位清零后，在通过将 SAFETY_BIST_CTRL 寄存器中的 EE_CRC_CHK 位设置为 1 来执行 EEPROM CRC 之前，器件首先会报告 EEPROM 签名错误，即使 EEPROM 位没有错误也是如此。因此，如果在对配置寄存器执行 CRC 之后执行 EEPROM CRC，必须始终按以下顺序执行这些步骤：

1. 在 MCU 中计算 CRC8 并将其存储在 SAFETY_CFG_CRC 寄存器中。
2. 将 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中的 CFG_CRC_EN 位设置为 1，以便对配置寄存器执行 CRC。
3. 在 SPI 命令将 CFG_CRC_EN 位设置为 1 之后（例如，在 NCS 上产生上升沿之后），等待至少 2.1μs 以便配置寄存器完成 CRC。
4. 在 SAFETY_STAT_2 寄存器的 CFG_CRC_ERR 位中读取配置寄存器 CRC 的结果。如果必须对配置寄存器执行连续 CRC，则将 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中的 CFG_CRC_EN 位清零并重复从 [步骤 1](#) 开始执行。如果必须对 EEPROM 寄存器执行 CRC，则转到 [步骤 5](#)。

NOTE

后续的正确 EEPROM CRC（如 [步骤 5](#) 中所述）会清除该 CFG_CRC_ERR 位。因此，TI 建议在执行 EEPROM CRC 之前读取该 CFG_CRC_ERR 位。

5. 将 SAFETY_BIST_CTRL 寄存器中的 EE_CRC_CHK 位设置为 1，以便对 EEPROM 寄存器执行 CRC。
6. 在 SPI 命令将 EE_CRC_CHK 位设置为 1 之后（例如，在 NCS 上产生上升沿之后），等待至少 811μs 以便 EEPROM CRC 完成。
7. 通过读取 EE_CRC_CHK 位来观察 EEPROM CRC 是否完成。当 EEPROM CRC 完成后，该 EE_CRC_CHK 位会清零。
8. 将 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中的 CFG_CRC_EN 位清零。
9. 在 SAFETY_STAT_2 寄存器的 EE_CRC_ERR 位中读取 EEPROM CRC 的结果。
10. 返回到 [步骤 1](#)。

NOTE

返回到 [步骤 1](#) 不是必需的；也可以选择返回到 [步骤 2](#)。

NOTE

当处于诊断状态时，可以在 SAFETY_CFG_CRC 寄存器中存储的值与通过 CRC8 涵盖的配置寄存器计算出的值之间出现不匹配时执行校验，以确认 CFG_CRC_ERR 位是否设置为 1。如果在 CFG_CRC_ERR 位设置为 1 时清除 CFG_CRC_EN，则器件会转换至安全状态，设置 EE_CRC_ERR 位，并且清除 CFG_CRC_EN 位。为了避免该到安全状态的转换，必须通过运行 EEPROM CRC（通过设置 EE_CRC_CHK 位）来清除 CFG_CRC_ERR 位。在运行 EEPROM CRC 时，会设置 EE_CRC_ERR 位。假设 EEPROM CRC 正常，EE_CRC_ERR 和 CFG_CRC_ERR 位都会清除。为了针对匹配的 CRC 检查 CFG_CRC_ERR 位是否为 0，匹配的 CRC 值应存储在 SAFETY_CFG_CRC 寄存器中。然后，必须将 CFG_CRC_EN 位清零并再次设置为 1，这将重新对配置寄存器运行 CRC，从而导致 CFG_CRC_ERR 位为 0。

5.4.18 启用和复位驱动器电路

Figure 5-14 显示了复位和启用电路。

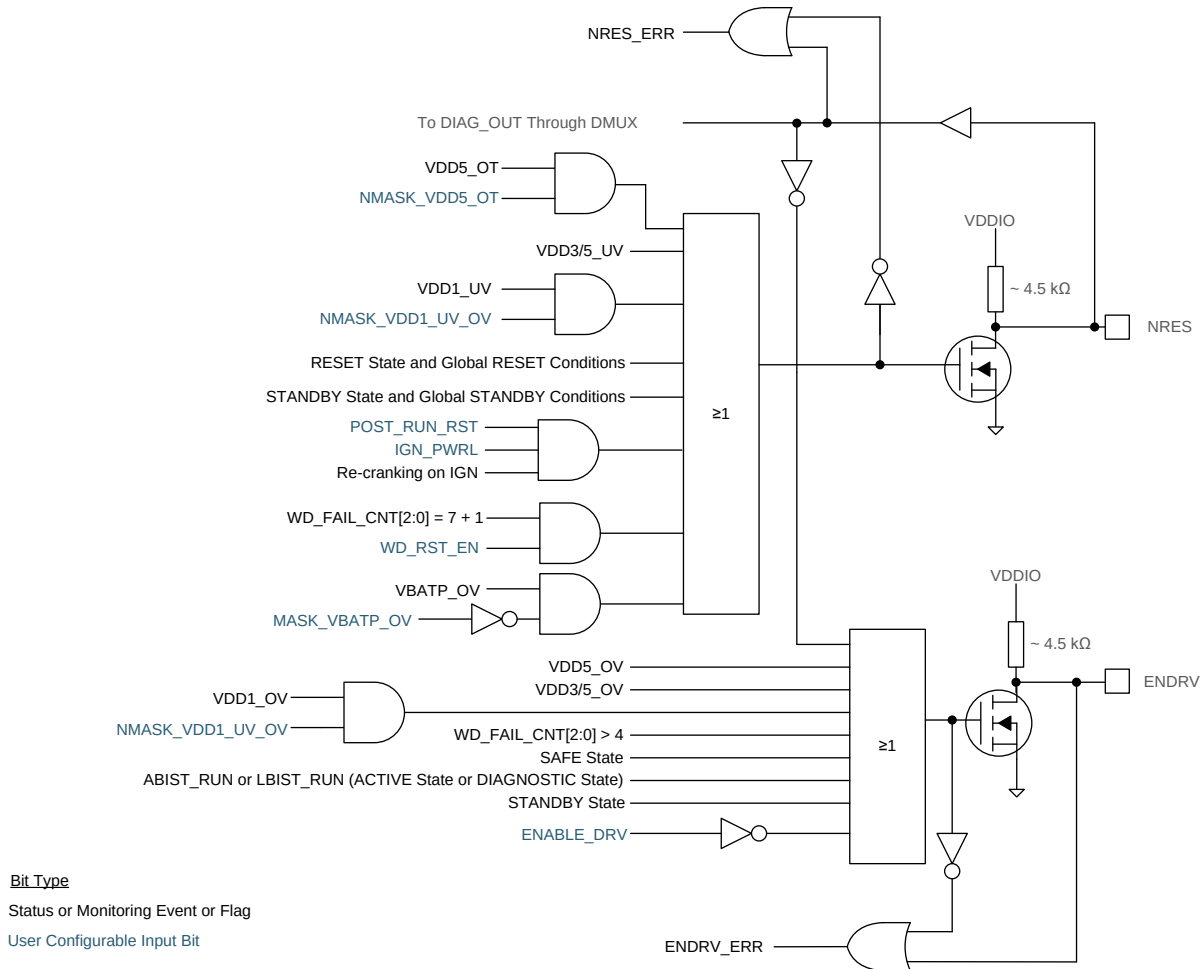


Figure 5-14. 复位和启用电路

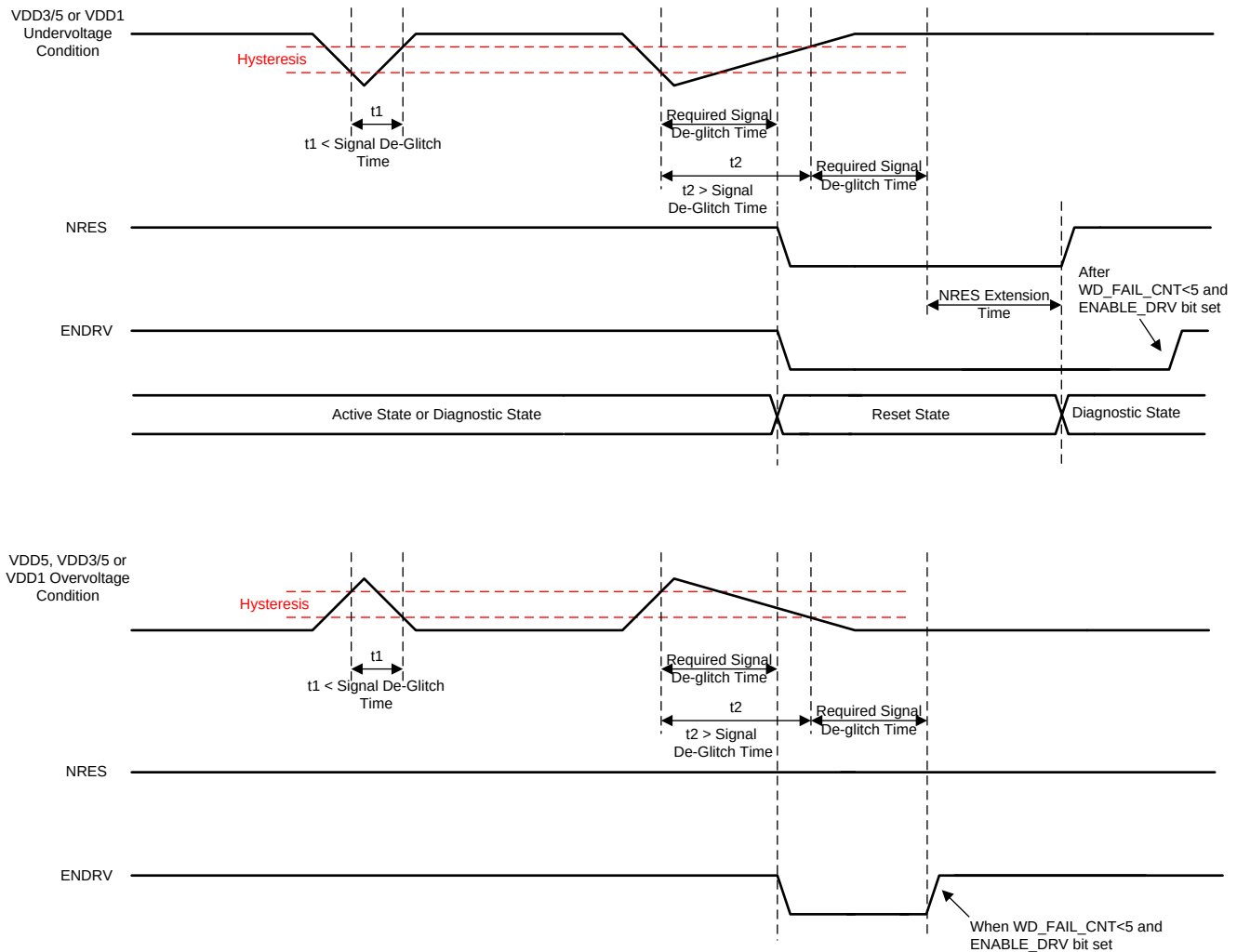
ENDRV 引脚采用读回电路将外部 ENDRV 电平与在内部施加的 ENDRV 电平进行比较。该功能可检测 ENDRV 上拉或下拉组件中的任何可能故障。MCU 通过 ENDRV_ERR 位 (SAFETY_STAT_4 寄存器中的位 1) 检测故障。

当 ENDRV 输出打开并驱动至高电平后激活 ABIST 功能时, ENDRV 引脚会在 ABIST 持续时间内被拉低。这是 ENDRV 诊断的一部分, 可验证用于禁用 ENDDRV 输出的所有监视功能并确认 ENDRV 输出可使用 ENDRV 读回路进行控制。

NRES 引脚具有外部 NRES 电平读回功能。在 DIAG_OUT 引脚以及 NRES_ERR 位 (SAFETY_STAT_3 寄存器中的位 5) 上读取该值。

对于 ENDRV 引脚和 NRES 引脚, 逻辑读回阈值电平通常为 400mV。

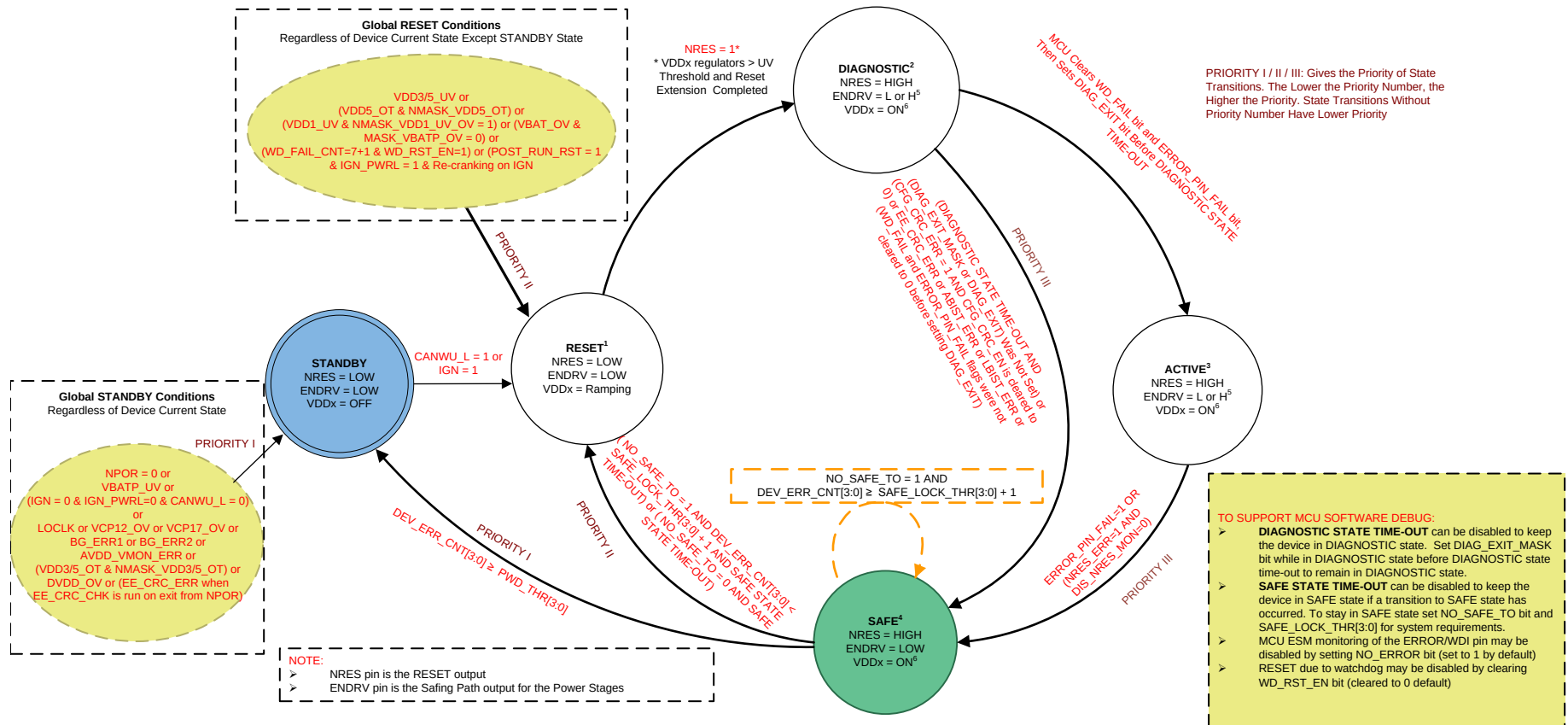
Figure 5-15 显示了 NRES 和 ENDRV 引脚针对任何 VDDx 欠压或过压条件的时序响应图。



- (1) 针对每种欠压或过压条件定义了信号抗尖峰脉冲时间，如Section 4中所述。
- (2) 通过外部电阻器值定义了 NRES 延长时间，如Section 4中所述。

Figure 5-15. NRES 和 ENDRV 引脚针对任何 VDDx 欠压或过压条件的时序响应图

5.4.19 器件运行状态



- (1) 复位状态：SPI、看门狗和 MCU ESM 处于复位状态；有关阻止从待机状态唤醒至复位状态的条件，请参阅Section 5.4.21。
- (2) 诊断状态：在转换至诊断状态时立即启动 BIST (LBIST 以及 ABIST)。有关禁用自动 BIST 运行、诊断状态超时和 MCU 可能对安全功能执行的诊断的选项，请参阅Section 5.4.22。在转换至诊断状态后，WD_FAIL_CNT 会立即重新初始化为 5。
- (3) 活动状态：在转换至活动状态期间，WD_FAIL_CNT 会重新初始化为 5。在活动状态期间，MCU 可能会执行某些安全功能诊断，有关更多详细信息，请参阅Section 5.4.23。
- (4) 安全状态：任何到安全状态的转换都会使 DEV_ERR_CNT[3:0] 递增。有关安全状态超时的详细信息，请参阅Section 5.4.24。
- (5) ENDRV 引脚电平依赖于 ENABLE_DRV 位、WD_FAIL_CNT[2:0] 计数值以及 VDDx_OV (如Figure 5-14 中所示，处于诊断和活动状态)。
- (6) 可以在诊断、活动和安全状态下启用或禁用 VDD5 和 VSOUT1 稳压器。

Figure 5-16. 器件控制器状态图

5.4.20 待机状态

当器件由 VBATP 和 VBAT_SAFING 电源供电时，待机状态是默认状态。该状态具有以下特性：

- 所有稳压器禁用。
- NRES 和 ENDRV 引脚处于低电平。
- 器件会由于以下原因从任何状态转换至待机状态：
 - 内部上电复位事件 (NPOR = 0)
 - VBATP 欠压事件 (VBATP_UV)
 - 抗尖峰脉冲 IGN = 0 且 IGN_PWRL = 0 (清除了 IGN 电源锁存控制位) 且 CANWU_L = 0
 - 时钟丢失检测 (LOCLK)
 - VDD3/5 过热事件 (VDD3/5_OT) (当 NMASK_VDD3/5_OT = 1 时)
 - DVDD 欠压事件 (DVDD_UV)
 - DVDD 过压事件 (DVDD_OV)
 - AVDD_VMON 过压或欠压事件 (AVDD_VMON_ERR)
 - VCP12 过压事件 (VCP12_OV)
 - VCP17 过压事件 (VCP17_OV)
 - 带隙错误：BG_ERR1 或 BG_ERR2
 - 在从 NPOR 事件退出之后的运行期间，EEPROM 校验失败 (当从 NPOR 退出后运行 EE_CRC_CHK 时 EE_CRC_ERR = 1)
 - 器件错误计数 (DEV_ERR_CNT[3:0]) 大于或等于已编程的断电阈值 PWD_THR[3:0]

5.4.21 复位状态

复位状态具有以下特性：

- 在 IGNITION (IGN 引脚 = 高电平，抗尖峰脉冲 IGN 位 = 1) 或 CANWU 引脚 (CANWU 引脚 = 高电平，抗尖峰脉冲和锁存 CANWU_L 位 = 1) 发出唤醒请求之后会从待机状态进入该状态。以下条件会阻止从待机状态到复位状态的转换，即使发生唤醒请求也是如此：
 - BG_ERR1
 - BG_ERR2
 - VCP17_OV
 - VCP12_OV
 - AVDD_VMON_ERR
 - EE_CRC_CHK 失败
- 在发生安全状态超时以及 DEV_ERR_CNT[3:0] 计数器小于已编程的 SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 后会从安全状态进入该状态。有关由 SAFE_TO[2:0] 和 NO_SAFE_TO 位设置的安全状态超时持续时间的详细信息，请参阅 [Section 5.4.24](#)。
- 器件会由于以下原因从任何其他状态转换至复位状态：
 - VDD3/5 欠压事件 (VDD3/5_UV)
 - VDD5 过热事件 (VDD5_OT) (当 NMASK_VDD5_OT = 1 时)
 - VDD1 欠压事件 (VDD1_UV) (当 NMASK_VDD1_UV_OV = 1 时，这不是默认设置)
 - VBATP 过压事件 (VBATP_OV) (当 MASK_VBATP_OV = 0 时，这是默认设置)
 - 看门狗复位。在看门狗失效计数器 (WD_FAIL_CNT[2:0]) 达到值 7 并且发生另一个不良事件 (7+1) 之后会发生看门狗复位，这会在 WD_RST_EN = 1 (非默认设置) 时设置 WD_FAIL 标志
 - POST_RUN_RST = 1 并且 IGN_PWRL = 1 并且在 IGN 引脚上进行了重新启动 (低电平后跟有效的高电平)
- VDDx 稳压器处于通电状态。
- NRES 和 ENDRV 引脚处于低电平。
- SPI、看门狗和 MCU ESM 处于复位状态。

5.4.22 诊断状态

诊断状态具有以下特性：

- 在 VDDx 稳压器升高并且复位延长完成之后会从复位状态进入诊断状态
- VDD5 (默认启用) 稳压器可以通过 VDD5_EN 位禁用, VSOUT1 稳压器可以通过 VSOUT1_EN 位启用 (默认禁用)。
- NRES 引脚处于高电平。
- ENDRV 引脚的状态由 ENABLE_DRV 位、WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器值和 VDDx 稳压器的过压监控 (VDDx_OV) 决定, 如 Figure 5-14 中所示。
- 可以配置和运行看门狗和 MCU 错误信号监控 (ESM) 功能。在 ERROR/WDI 引脚上检测到仿真故障时, MCU ESM 模块不会导致从诊断状态转换至安全状态。这允许 MCU 在诊断状态期间对 MCU ESM 和 ERROR/WDI 引脚运行诊断。
- MCU 应在该状态下执行所有器件自检和诊断 (会引发故障以便对内部故障进行仿真并确认检测)。
- 在进入诊断状态后, 看门狗失效计数器会立即重新初始化为 5。
- 从复位状态转换至诊断状态 (包括从待机状态到发生上电事件) 会激活 BIST (LBIST 以及 ABIST)。对于从诊断、活动或安全状态进入复位状态的情况, 该自动 BIST 运行可以通过 AUTO_BIST_DIS 位禁用, 但如果在上电时从待机状态进入复位状态, 则无法禁用。
- 在转换至诊断状态时立即启动 BIST (LBIST 以及 ABIST)。
- 在诊断状态期间, MCU 可以执行任何安全功能 (如看门狗、MCU ESM、ERROR/WDI 引脚、DIAG_MUX 引脚和针对寄存器的 CRC) 诊断。TI 建议至少在每个上电周期运行一次诊断检查 (处于诊断状态)。

NOTE

诊断状态超时：进入诊断状态后, 如果 DIAG_EXIT_MASK 或 DIAG_EXIT 位未在 512ms (典型值) 内设置为 1, 则诊断状态超时间隔会到期, 从而导致转换至安全状态。这还会在 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中设置 ERROR_PIN_FAIL 和 WD_FAIL 位, 并在 SAFETY_STAT_4 寄存器中设置镜像位 MCU_ERR 和 WD_ERR。器件错误计数 (DEV_ERR_CNT[3:0]) 会递增。只应在单个 SPI 写入命令中向 SAFETY_CHECK_CTRL 设置 DIAG_EXIT_MASK 或 DIAG_EXIT 位。将 DIAG_EXIT 位设置为 1 会导致转换至活动状态。将 DIAG_EXIT_MASK 位设置为 1 会导致器件保持在诊断状态 (仅针对软件调试执行该操作)。

NOTE

用于软件调试的 DIAG_EXIT_MASK：当 DIAG_EXIT_MASK 位设置为 1 时, 在诊断状态超时间隔到期之前, 器件会保持在诊断状态, 直到该位清除。诊断状态超时计时器在后台保持自由运行, 但不会导致状态转换。当诊断状态超时间隔到期后, 会自动设置 DIAG_EXIT 位 (此外 DIAG_EXIT_MASK 位保持设置状态) 并且器件会保持在诊断状态。对于到活动状态的受控转换, TI 建议通过单个 SPI 写入命令针对 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器清除 DIAG_EXIT_MASK 位并设置 DIAG_EXIT 位。如果 DIAG_EXIT_MASK 位和 DIAG_EXIT 位同时清除, 则器件会保持在诊断状态, 直到下一个诊断状态超时间隔到期, 从而导致转换至安全状态, 或者如果 DIAG_EXIT 位设置为 1, 则在诊断状态超时之前, 将器件转换为活动状态。

NOTE

在诊断状态下, 如果通过将 LBIST_EN 位设置为 1 来启动 LBIST 手动运行, 则必须考虑以下注意事项。将 LBIST_EN 位设置为 1 可将 DIAG_EXIT_MASK 位清零。如果 DIAG_EXIT_MASK 位用于将器件保持在诊断状态以进行软件调试, 则在 LBIST 完成后必须再次将其设置为 1 以保持在诊断状态。诊断状态超时计数器仅在 LBIST 运行期间停止。在 LBIST 完成之后, 超时计数器从最后的值继续计数。对于从诊断状态到活动状态的转换, DIAG_EXIT 位必须设置为 1。

5.4.23 活动状态

活动状态具有以下特性：

- 在 MCU 设置 DIAG_EXIT 位（在清除 ERROR_PIN_FAIL 和 WD_FAIL 位之后）之后，器件会从诊断状态进入活动状态。

NOTE

当处于诊断状态时，MCU 必须通过向 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 ERROR_PIN_FAIL 位和 WD_FAIL 位写入 0 来进行清除，然后才能设置 DIAG_EXIT 位。清除这些位还会清除其镜像位 MCU_ERR 和 WD_ERR。否则，会切换到安全状态。

- NRES 引脚处于高电平。
- ENDRV 引脚的状态由 ENABLE_DRV 位、WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器值和 VDDx 稳压器的过压监控 (VDDx_OV) 决定，如 Figure 5-14 中所示。
- VDDx 稳压器处于打开状态，可以通过 VDD5_EN 位启用或禁用 VDD5 稳压器。可以通过 VSOUT1_EN 位启用或禁用 VSOUT1 稳压器。
- 在从诊断状态转换到活动状态期间，WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器会重新初始化为 5。
- 看门狗和 MCU ESM 监控功能按照配置运行，但无法重新配置。
- 在活动状态期间，MCU 可以执行某些安全功能诊断，这些安全功能包括看门狗、DIAG_MUX 引脚、ABIST（大约 300μs，ENDRV 引脚将处于低电平）、LBIST（大约 21ms，ENDRV 引脚将处于低电平）以及针对寄存器的 CRC，具体取决于系统安全要求。

NOTE

在活动状态下，如果通过将 LBIST_EN 位设置为 1 来启动 LBIST 手动运行，则必须考虑以下注意事项。LBIST 只应在系统安全时序要求能够允许总 BIST 时间为 21ms 并且 ENDRV 引脚在该 21ms 的时间内处于低电平时以活动状态运行。

有关在活动状态下运行 LBIST 时的其他系统注意事项，请参阅 Section 5.4.7。

5.4.24 安全状态

安全状态具有以下特性：

- 可以从以下状态进入安全状态：
 - 活动状态：
 - MCU ESM（启用时）检测到的 ERROR/WDI 引脚上的信号错误。该转换是由 MCU 中的错误导致的，会设置 ERROR_PIN_FAIL 标志。
 - 在 NRES 引脚上检测到的读回错误，该错误会在 DIS_NRES_MON 清零（默认状态下为 1）时设置 NRES_ERR 标志。
 - 诊断状态：
 - 在发生诊断状态超时事件之后，在 DIAG_EXIT_MASK 位设置为 1 之前，使器件保持在诊断状态，或者在 DIAG_EXIT 位设置为 1 之前将器件转换至活动状态。
 - CFG_CRC_ERR = 1 并且 CFG_CRC_EN 清零
 - 在诊断状态下检测到 EE_CRC_ERR。
 - 在诊断状态下检测到 ABIST_ERR 或 LBIST_ERR。
 - 在退出诊断状态时，在设置 DIAG_EXIT 位之前 WD_FAIL 和 ERROR_PIN_FAIL 状态未清零。
- 每个到安全状态的转换都会使器件错误计数 DEV_ERR_CNT[3:0] 递增。
- 当 NO_SAFE_TO 位设置为 1（默认状态）并且 DEV_ERR_CNT[3:0] = SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 时，器件保持在安全状态。这允许在不引起复位以及转换至复位状态（由于安全状态超时）的情况下对 MCU 进行编程。
- NRES 引脚处于高电平。
- ENDRV 引脚处于低电平状态。

- VDDx 稳压器处于打开状态，可以通过 VDD5_EN 位启用或禁用 VDD5 稳压器。可以通过 VSOUT1_EN 位启用或禁用 VSOUT1 稳压器。

NOTE

器件状态机使用安全状态超时和器件配置设置来确定器件在转换至安全状态之后所执行的操作。根据 NO_SAFE_TO、PWD_THR[3:0]、SAFE_LOCK_THR[3:0] 和 DEV_ERR_CNT[3:0] 位，器件会保持锁定在安全状态、转换至复位状态或转换至待机状态。安全状态超时持续时间可通过 SAFE_TO[2:0] 进行编程。

NO_SAFE_TO = 1 (默认设置)

- 当 $DEV_ERR_CNT[3:0] < (SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1)$ 时，安全状态超时的延时时间通过 SAFE_TO[2:0] 位进行编程。延迟的计算方式为 $[(SAFE_TO[2:0] \times 2) + 1] \times 22ms$ 。
- 当 $DEV_ERR_CNT[3:0] \geq SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1$ 时器件保持锁定在安全状态。

NO_SAFE_TO = 0

- 当 $DEV_ERR_CNT[3:0] < (SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1)$ 时，安全状态超时的延时时间通过 SAFE_TO[2:0] 位进行编程。延迟的计算方式为 $[(SAFE_TO[2:0] \times 2) + 1] \times 22ms$ 。
- 当 $DEV_ERR_CNT[3:0] \geq SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1$ 时，安全状态超时持续时间将更改并且器件会在大约 680ms 后转换至复位状态。

如果使用 PWD_THR[3:0] 阈值，则在 $DEV_ERR_CNT[3:0] \geq PWD_THR[3:0]$ 时器件从安全状态转换至待机状态。该转换的优先级（优先级 I）要高于从安全状态到复位状态的路径（优先级 II），因此如果 $PWD_THR[3:0] = SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1$ ，器件将转换至待机状态，而不是复位状态。

5.4.25 状态转换优先级

对于所有全局或可能的双重状态转换，存在以下优先级：

1. 优先级 I：所有待机状态转换条件
2. 优先级 II：所有复位状态转换条件
3. 优先级 III：所有安全状态转换条件

与列出的所有具有优先级编号的状态转换相比，所有其他状态转换的优先级更低。

5.4.26 上电复位 (NPOR)

器件会经历上电复位 (NPOR) 过程，这会重新初始化所有寄存器。导致 NPOR 的事件为：

- 模拟上电复位：
 - 时钟丢失检测 (LOCLK)
 - AVDD_VMON 过压或欠压事件 (AVDD_VMON_ERR)
 - DVDD 欠压事件 (DVDD_UV)
 - DVDD 过压事件 (DVDD_OV)
- 数字上电复位。这些错误可能会导致 NPOR。如果检测到的故障持续时间小于 6ms，则可能不会发生 NPOR。当 CANWU 或 IGN 状态保持为高电平时，器件会由于唤醒请求转换至复位状态。BIST 后重新初始化列表中的寄存器会在从复位状态转换至诊断状态时运行的 BIST 之后重新初始化（除非 $AUTO_BIST_DIS = 1$ ，这不是默认设置）。
 - VBATP 欠压事件 (VBATP_UV)
 - VDD3/5 过热事件 (VDD3/5_OT)（当 $NMASK_VDD3/5_OT = 1$ 时）
 - AVDD 欠压事件 (AVDD_UV)
 - 器件 VMON 调整设置错误 (VMON_TRIM_ERROR)
 - 带隙错误：BG_ERR1 或 BG_ERR2
 - VCP12 过压事件 (VCP12_OV)
 - VCP17 过压事件 (VCP17_OV)

5.5 寄存器映射

5.5.1 串行外设接口 (SPI)

器件与外部 MCU 之间的通信主要通过 SPI 总线进行，该总线是采用主从配置的全双工通信。外部 MCU 始终是 SPI 主设备，它在 SDI 引脚上发送命令请求并在 SDO 引脚上接收器件响应。TPS65381A-Q1 器件始终是 SPI 从设备，它接收命令并通过 SDO 线路向外部 MCU 发送响应（状态、测量的值）。

- SPI 是 4 引脚接口。
 - NCS - SPI 片选（低电平有效）
 - SCLK - SPI 时钟
 - SDI - SPI 从设备入/主设备出 (SIMO)
 - SDO - SPI 从设备出/主设备入 (SOMI，三态输出)
- SPI 帧大小为 16 位。
- 速率高达 6 兆位/秒。
- 命令和数据转变为从 MSB 到 LSB 的顺序。
- 在 SCLK 的下降沿对 SDI 线路进行采样。
- 在 SCLK 的上升沿移出 SDO 线路。

SPI 通信从 NCS 下降沿开始，在 NCS 上升沿结束。NCS 高电平使 SPI 从设备接口保持在复位状态，SDO 输出处于三态。

5.5.1.1 SPI 命令传输阶段

Table 5-15 显示了执行命令（写入或读取命令）期间 SPI 数据的传输帧格式。

Table 5-15. SPI 命令传输阶段

位	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
功能	CMD6	CMD5	CMD4	CMD3	CMD2	CMD1	CMD0	奇偶校验

CMD[6:0] 寄存器写入 (WR) 或读取 (RD) 命令

奇偶校验 7 位命令字段的奇偶校验位

SPI 不支持背对背 SPI 帧操作。在执行每条 SPI 命令或进行每次读取访问之后，NCS 引脚必须从低电平转换至高电平，然后才能启动下一次 SPI 传输。两条 SPI 命令之间的最短时间 (t_{hlcs}) 为 788ns，在此期间 NCS 引脚必须保持在高电平。

5.5.1.2 SPI 数据传输阶段

Table 5-16 显示了在进行写入访问期间 SPI 数据的传输帧格式。

Table 5-16. SPI 数据传输阶段

位	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
功能	DATA7	DATA6	DATA5	DATA4	DATA3	DATA2	DATA1	DATA0

DATA[7:0] 写入访问的数据值（8 位）

SPI 不支持背对背 SPI 帧操作。每次完成 SPI 传输之后，NCS 引脚必须从低电平转换至高电平，然后才能启动下一次 SPI 传输。两条 SPI 命令之间的最短时间 (t_{hlcs}) 为 788ns，在此期间 NCS 引脚必须保持在高电平。

5.5.1.3 器件状态标志字节响应

Table 5-17 显示了执行命令（写入或读取访问）期间 SPI 数据状态的响应帧格式。

Table 5-17. 器件状态标志字节响应

位	R7	R6	R5	R4	R3	R2	R1	R0
功能	STAT[7]	STAT[6]	STAT[5]	STAT[4]	STAT[3]	STAT[2]	STAT[1]	STAT[0]

STAT[7]	1
STAT[6]	0
STAT[5]	1
STAT[4]	0
STAT[3]	SPI WR 访问 (在上一个 SPI 帧命令阶段)
STAT[2]	SPI SDO 错误 (在上一个 SPI 帧期间)
STAT[1]	0
STAT[0]	SPI 错误, 包括 SPI 帧截断、SPI 传输的位数大于 16、SPI 传输的命令未定义或 SPI 传输具有错误的命令奇偶校验 (在上一个 SPI 帧期间)

在当前 SPI 命令期间发送的状态位会反映上一条 SPI 命令的状态。

NOTE

如果在 SPI 帧传输期间产生 MCU 复位 (导致 SPI 帧截断), 则这些 SPI 错误状态位不会清除, 而是根据已截断的上一个 SPI 帧保持相关状态, 直到发生 SPI 读取访问。

NOTE

当 NCS 引脚处于高电平、SDO 引脚处于高电平以及在 SPICLK 引脚上产生下降沿时, 可能会无意中设置 SPI SDO 错误位 STAT[2]。在具有多个 SPI 从设备的 SPI 总线中使用该器件时最常发生该组合。如果符合全部三种条件, 则会在与 TPS65381A-Q1 的后续 SPI 通信的第二个 SPI 标志字节响应中将 SDO 错误标志设置为 1。如果在这些条件下使用该器件, 则应用软件应屏蔽 SDO 错误标志。如果检测到 SPI SDO 错误, 则器件会接受 SPI 传输, 因为检测到的错误位于 SPI 的输出中, 而不是 SPI 的输入中。

NOTE

要实现 SPI 写入传输的其他诊断覆盖范围, 系统软件可以对写入的寄存器执行读取, 并且将返回的值与在写入之后的预期值进行比较。请注意, 某些寄存器中的某些位不是可写的。

5.5.1.4 器件 SPI 数据响应

Table 5-18 显示了写入或读取访问期间 SPI 器件数据的响应帧格式。

Table 5-18. 器件 SPI 数据响应

位	R7	R6	R5	R4	R3	R2	R1	R0
功能	R7	R6	R5	R4	R3	R2	R1	R0

R[7:0] 内部寄存器值。所有未使用的位都会清零。

5.5.1.5 SPI 帧概览

Figure 5-17 显示了完整的 16 位 SPI 帧概览：

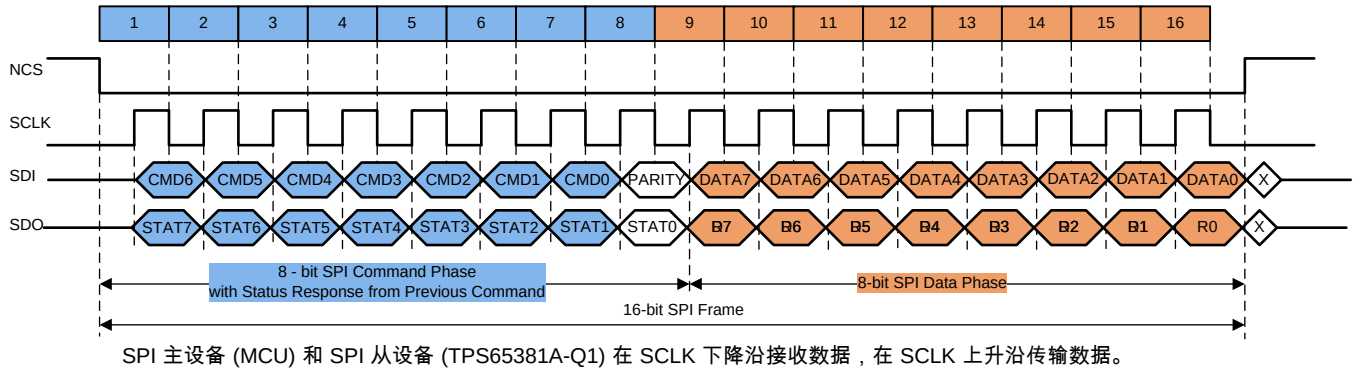


Figure 5-17. 16 位 SPI 帧

5.5.2 SPI 寄存器写入访问锁定 (SW_LOCK 命令)

SW_LOCK 命令针对写入更新访问 (通过 MCU 控制) 为 SPI 寄存器提供保护。向器件发送包含数据 AAh 的 SW_LOCK 命令时，列出的寄存器将锁定，不会通过写入访问进行更新。要解锁 SPI 寄存器，应向器件发送包含数据 55h 的 SW_UNLOCK 命令。

NOTE

除了自动锁定特定的 SPI 寄存器之外，还可以使用 SW_LOCK 命令进行锁定，以阻止写入更新访问 (器件处于诊断状态时除外)。请参阅“SPI 命令”表和寄存器说明，以确定 SW_LOCK 和自动锁定 (处于诊断状态时除外) 是否适用于特定的写入访问寄存器。

5.5.3 SPI 寄存器 (SPI 映射响应)

以下各部分列出了 SPI 寄存器。对于每个 SPI 寄存器，提供了位名称以及初始化的值 (内部逻辑复位后的值)。

在每次从待机状态唤醒之后或在任何其他上电复位 (NPOR) 事件之后会初始化这些值。

在完成 LBIST 运行 (包括在退出复位状态时运行的 LBIST) 之后，会重新初始化以下功能和寄存器：

- DEV_STAT
- SAFETY_STAT_2
- SAFETY_STAT_4
- SAFETY_STAT_5 (但 FSM[2:0] 会立即更新以反映当前器件状态)
- WD_TOKEN_VALUE
- WD_STATUS
- SAFETY_CHECK_CTRL
- DIAG_CFG_CTRL
- DIAG_MUX_SEL

会指示保留位 (RSV) 的初始化值，不过其中的某些位用于内部器件运行，应用软件应屏蔽这些位，因为它们可能不会保持且初始化值。

以下各部分也提供了各个位功能的说明。

Table 5-19. SPI 命令表

8 位十六进制命令代码 (带奇偶校验)	7 位十六进制命令代码 (不带奇偶校验)	7 位二进制命令代码 (不带奇偶校验)	奇偶校验	WR SW 锁定保护	寄存器命令名称 ⁽¹⁾
BDh	5Eh	1011 110b	1	N/A	具有数据 AAh 的 SW_LOCK (用于锁定对列出的寄存器的 SPI WR 访问)
BBh	5Dh	1011 101b	1	N/A	具有数据 55h 的 SW_UNLOCK (用于解锁对列出的寄存器的 SPI WR 访问)
06h	03h	0000 011b	0	N/A	RD_DEV_ID
0Ch	06h	0000 110b	0	N/A	RD_DEV_REV
B7h	5Bh	1011 011b	1	是	WR_DEV_CFG1 (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
AFh	57h	1010 111b	1	N/A	RD_DEV_CFG1
95h	4Ah	1001 010b	1	是	WR_DEV_CFG2 (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
48h	24h	0100 100b	0	N/A	RD_DEV_CFG2
7Dh	3Eh	0111 110b	1	否	WR_CAN_STBY (仅针对数据 00h 有效)
24h	12h	0010 010b	0	N/A	RD_SAFETY_STAT_1
C5h	62h	1100 010b	1	N/A	RD_SAFETY_STAT_2
A3h	51h	1010 001b	1	N/A	RD_SAFETY_STAT_3
A5h	52h	1010 010b	1	N/A	RD_SAFETY_STAT_4
C0h	60h	1100 000b	0	N/A	RD_SAFETY_STAT_5
30h	18h	0011 000b	0	N/A	RD_SAFETY_ERR_CFG
DBh	6Dh	1101 101b	1	是	WR_SAFETY_ERR_CFG (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
A9h	54h	1010 100b	1	是	WR_SAFETY_ERR_STAT (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
AAh	55h	1010 101b	0	N/A	RD_SAFETY_ERR_STAT
39h	1Ch	0011 100b	1	N/A	RD_SAFETY_PWD_THR_CFG
99h	4Ch	1001 100b	1	是	WR_SAFETY_PWD_THR_CFG (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
44h	22h	0100 010b	0	N/A	RD_SAFETY_CHECK_CTRL
93h	49h	1001 001b	1	否	WR_SAFETY_CHECK_CTRL
3Ch	1Eh	0011 110b	0	N/A	RD_SAFETY_BIST_CTRL
9Fh	4Fh	1001 111b	1	是	WR_SAFETY_BIST_CTRL
2Eh	17h	0010 111b	0	N/A	RD_WD_WIN1_CFG
EDh	76h	1110 110b	1	是	WR_WD_WIN1_CFG (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
05h	02h	0000 010b	1	N/A	RD_WD_WIN2_CFG
09h	04h	0000 100b	1	是	WR_WD_WIN2_CFG (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
36h	1Bh	0011 011b	0	N/A	RD_WD_TOKEN_VALUE
4Eh	27h	0100 111b	0	N/A	RD_WD_STATUS
E1h	70h	1110 000b	1	否	WR_WD_ANSWER
11h	08h	0001 000b	1	N/A	RD_DEV_STAT
12h	09h	0001 001b	0	N/A	RD_VMON_STAT_1
A6h	53h	1010 011b	0	N/A	RD_VMON_STAT_2
56h	2Bh	0101 011b	0	N/A	RD_SENS_CTRL
7Bh	3Dh	0111 101b	1	N/A	WR_SENS_CTRL
3Ah	1Dh	0011 101b	0	N/A	RD_SAFETY_FUNC_CFG
35h	1Ah	0011 010b	1	是	WR_SAFETY_FUNC_CFG (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
5Ah	2Dh	0101 101b	0	N/A	RD_SAFETY_CFG_CRC
63h	31h	0110 001b	1	是	WR_SAFETY_CFG_CRC (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)

(1) 所有命令都具有偶校验。

Table 5-19. SPI 命令表 (continued)

8 位十六进制命令代码 (带奇偶校验)	7 位十六进制命令代码 (不带奇偶校验)	7 位二进制命令代码 (不带奇偶校验)	奇偶校验	WR SW 锁定保护	寄存器命令名称 ⁽¹⁾
DDh	6Eh	1101 110b	1	N/A	RD_DIAG_CFG_CTRL
CCh	66h	1100 110b	0	否	WR_DIAG_CFG_CTRL
ACH	56h	1010 110b	0	N/A	RD_DIAG_MUX_SEL
C9h	64h	1100 100b	1	否	WR_DIAG_MUX_SEL
D7h	6Bh	1101 011b	1	N/A	RD_SAFETY_ERR_PWM_H
D8h	6Ch	1101 100b	0	是	WR_SAFETY_ERR_PWM_H (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
59h	2Ch	0101 100b	1	N/A	RD_SAFETY_ERR_PWM_L
7Eh	3Fh	0111 111b	0	是	WR_SAFETY_ERR_PWM_L (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)
78h	3Ch	0111 100b	0	N/A	RD_WD_TOKEN_FDBK
77h	3Bh	0111 011b	1	是	WR_WD_TOKEN_FDBK (仅在诊断状态下才可能发生 SPI WR 更新)

5.5.3.1 器件版本和 ID

5.5.3.1.1 DEV_REV 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：只读 (RD_DEV_REV)

Figure 5-18. DEV_REV 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
REV[7]	REV[6]	REV[5]	REV[4]	REV[3]	REV[2]	REV[1]	REV[0]
0b	0b	1b	1b	0b	0b	0b	0b

D[7:0] **REV[7:0]**：器件版本

- REV[3:0]：器件次要版本
- REV[7:4]：器件主要版本

5.5.3.1.2 DEV_ID 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：只读 (RD_DEV_ID)

Figure 5-19. DEV_ID 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
ID[7]	ID[6]	ID[5]	ID[4]	ID[3]	ID[2]	ID[1]	ID[0]
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	1b

D[7:0] ID[7:0]：器件 ID

5.5.3.2 器件状态

5.5.3.2.1 DEV_STAT 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化

控制器访问：只读 (RD_DEV_STAT)

Figure 5-20. DEV_STAT 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	RSV	RSV	RSV	RSV	CANWU_L	IGN
0b	0b	0b	0b	0b	0b	X	X

D[7:2] RSV

D[1] CANWU_L：锁存 CAN 唤醒事件

- 初始化值取决于是否通过 CANWU 或 IGN 引脚发生了器件唤醒事件。
- 当通过 CANWU、仅 WR_CAN_STBY 命令或任何其他全局待机条件发生器件唤醒时，该位会清零

D[0] IGN：抗尖峰脉冲 IGN 引脚（7.5ms 至 22ms 抗尖峰脉冲时间）

- 初始化值取决于是否通过 CANWU 或 IGN 引脚发生了器件唤醒事件。该位遵循抗尖峰脉冲 IGN 信号，因此仅在抗尖峰脉冲 IGN 处于低电平时清零或由任何其他全局待机条件清零。

5.5.3.3 器件配置

5.5.3.3.1 DEV_CFG1 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_DEV_CFG1)

写入 (WR_DEV_CFG1)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-21. DEV_CFG1 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
VDD_3_5_SEL	NMASK_VDD1_UV_OV	RSV	RSV	RSV	RSV	RSV	RSV
X	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7] VDD_3_5_SEL：上电时的 VDD3/VDD5 选择状态位

- 在上电时对 SEL_VDD3/5 输入引脚进行采样和锁存
 - 0b = 5V 设置 (SEL_VDD3/5 引脚接地)
 - 1b = 3.3V 设置 (未连接 SEL_VDD3/5 引脚)
 - 复位状态下的值取决于首次上电时 SEL_VDD3/5 引脚的状态
- 该位是只读的

注：该位与 SAFETY_FUNC_CFG 位 D0 相同。

D[6] NMASK_VDD1_UV_OV

- 默认情况下会清零：
 - 被屏蔽的 VDD1_OV 不影响 ENDRV 引脚状态
 - 被屏蔽的 VDD1_UV 不影响 NRES 引脚状态
- 如果在应用中未使用 VDD1 稳压器并且未填充外部功率 FET，则可以使用默认设置 (0，屏蔽)。

注：如果在应用中使用了 VDD1 稳压器，那么在首次启动或上电事件之后器件处于诊断状态时，TI 建议将该位设置为 1。

注：即使该位设置为 1，但 VDD1_SENSE 引脚在外部悬空，该引脚也会上拉。会检测到上拉条件，但 VDD1_OV 条件会被屏蔽，ENDRV 引脚状态不受影响。

D[5:0] RSV

5.5.3.3.2 DEV_CFG2 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_DEV_CFG2)

写入 (WR_DEV_CFG2)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-22. DEV_CFG2 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
NMASK_VDD3/5_OT	NMASK_VDD5_OT	MASK_VBATP_OV	POST_RUN_RST	RSV	RSV	RSV	RSV
1b	1b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7] NMASK_VDD3/5_OT

- 当设置为 1 (默认值) 时, VDD3/5 或 VDD6 稳压器上的过热事件会禁用 VDD3/5 稳压器并且器件会转至待机状态。检测到过热事件时, 会在 SAFETY_STAT_1 寄存器中设置 VDD3/5_OT 标志。
- 当清零后, VDD3/5 或 VDD6 稳压器上的过热事件会禁用 VDD3/5 稳压器。当 VDD3/5 稳压器达到 UV 电平时, 器件会转至复位状态。检测到过热事件时, 仍会在 SAFETY_STAT_1 寄存器中设置 VDD3/5_OT 标志。

D[6] NMASK_VDD5_OT

- 当设置为 1 (默认值) 时, VDD5 稳压器上的过热事件会禁用 VDD5 稳压器并且器件会转至复位状态。检测到过热事件时, 会在 SAFETY_STAT_1 寄存器中设置 VDD5_OT 标志。
- 当清零后, VDD5 过热关断会禁用并且 VDD5 稳压器保持启用。检测到过热事件时, 仍会在 SAFETY_STAT_1 寄存器中设置 VDD5_OT 标志。

D[5] MASK_VBATP_OV

- 默认情况下会清零。
- 当设置为 1 时, 会从复位条件屏蔽 VBATP_OV 位。

D[4] POST_RUN_RST :

- 默认情况下会清零。
- 如果设置为 1, 则在使用 IGN_PWRL 功能时, IGN 引脚上的重新启动会导致器件转至复位状态。

D[3:0] RSV (在诊断状态下位可读且可写, 对器件状态或 ENDRV 和 NRES 输出没有任何影响)

5.5.4 器件安全状态和控制寄存器

5.5.4.1 VMON_STAT_1 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：只读 (RD_VMON_STAT_1)

Figure 5-23. VMON_STAT_1 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
VBATP_OV	VBATP_UV	VCP17_OV	VCP12_OV	VCP12_UV	AVDD_VMON_ERR	BG_ERR2	BG_ERR1
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

- D[7] VBATP_OV**：VBATP 过压状态位
- 当检测到 VBATP 过压条件时设置为 1
 - 如果过压条件不再存在则清零
- D[6] VBATP_UV**：VBATP 欠压状态位
- 当检测到 VBATP 欠压条件时设置为 1
 - 如果欠压条件不再存在则清零
- D[5] VCP17_OV**：VCP17 过压状态位
- 当检测到 VCP17 过压条件时设置为 1
 - 如果过压条件不再存在则清零
- D[4] VCP12_OV**：VCP12 过压状态位
- 当检测到 VCP12 过压条件时设置为 1
 - 如果过压条件不再存在则清零
- D[3] VCP12_UV**：VCP12 欠压状态位
- 当检测到 VCP12 欠压条件时设置为 1
 - 如果欠压条件不再存在则清零
- D[2] AVDD_VMON_ERR**：电压监控器电源正常状态
- 当电压监控器电源不正常时设置为 1。
 - 如果错误条件不再存在则清零
- D[1] BG_ERR2**：基准带隙 2 错误
- 当电压监控器小于主带隙时设置为 1
 - 如果错误条件不再存在则清零
- D[0] BG_ERR1**：基准带隙 1 错误
- 当电压监控器大于主带隙时设置为 1
 - 如果错误条件不再存在则清零

5.5.4.2 VMON_STAT_2 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_VMON_STAT_2)

Figure 5-24. VMON_STAT_2 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
VDD6_OV	VDD6_UV	VDD5_OV	VDD5_UV	VDD3/5_OV	VDD3/5_UV	VDD1_OV	VDD1_UV
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7] VDD6_OV : VDD6 过压状态位

- 当检测到 VDD6 过压条件时设置为 1
- 如果过压条件不再存在则清零

D[6] VDD6_UV : VDD6 欠压状态位

- 当检测到 VDD6 欠压条件时设置为 1
- 如果欠压条件不再存在则清零

D[5] VDD5_OV : VDD5 过压状态位

- 当检测到 VDD5 过压条件时设置为 1
- 如果过压条件不再存在则清零

D[4] VDD5_UV : VDD5 欠压状态位

- 当检测到 VDD5 欠压条件时设置为 1。
- 如果欠压条件不再存在则清零

注：该位反映欠压状态，即使 SENS_CTRL 寄存器中的 VDD5_EN 位已清零也是如此。如果 VDD5 稳压器已禁用，那么当 VDD5 稳压器放电并且检测到欠压条件时，VDD5_UV 位将设置为 1。

D[3] VDD3/5_OV : VDD3/5 过压状态位

- 当检测到 VDD3/5 过压条件时设置为 1
- 如果过压条件不再存在则清零

D[2] VDD3/5_UV : VDD3/5 欠压状态位

- 当检测到 VDD3/5 欠压条件时设置为 1
- 如果欠压条件不再存在则清零

D[1] VDD1_OV : VDD1 过压状态位

- 当检测到 VDD1 过压条件时设置为 1
- 如果过压条件不再存在则清零

D[0] VDD1_UV : VDD1 欠压状态位

- 当检测到 VDD1 欠压条件时设置为 1
- 如果欠压条件不再存在则清零

5.5.4.3 SAFETY_STAT_1 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_STAT_1)

Figure 5-25. SAFETY_STAT_1 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
VDD5_ILIM	VDD3/5_ILIM	VSOUT1_UV	VSOUT1_OV	RSV	VSOUT1_OT	VDD5_OT	VDD_3_5_OT
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7] VDD5_ILIM：VDD5 电流限制状态位

- 当超出 VDD5 电流限制条件时设置为 1
- 如果电流限制条件不再存在则清零

注：该状态位仅在 SENS_CTRL 寄存器中的 VDD5_EN 位设置为 1 时有效。当 VDD5_EN 位清零后，该位将为 1。

D[6] VDD3/5_ILIM：VDD3 电流限制状态位

- 当超出 VDD3 电流限制条件时设置为 1
- 如果电流限制条件不再存在则清零

D[5] VSOUT1_UV：传感器电源欠压状态位

- 当检测到 VSOUT1 欠压条件时设置为 1
- 如果欠压条件不再存在则清零

D[4] VSOUT1_OV：传感器电源过压状态位

- 当检测到 VSOUT1 过压条件时设置为 1
- 如果过压条件不再存在则清零

D[3] RSV

D[2] VSOUT1_OT：传感器电源过热状态位

- 当超出 VSOUT1 过热条件时设置为 1。只要设置该位，该位就会使 VSOUT1 稳压器保持禁用状态。
- 如果过热条件不再存在则清零

D[1] VDD5_OT：VDD5 过热状态位

- 当超出 VDD5 过热条件时设置为 1。当 NMASK_VDD5_OT 位设置为 1 时，过热事件会禁用 VDD5 稳压器并且将 VDD5_EN 位清零 (SENS_CTRL 寄存器)。当 NMASK_VDD5_OT 位为 0 时，过热事件会将 VDD5_OT 位设置为 1，但不执行其他器件操作。
- 如果过热条件不再存在则清零

D[0] VDD_3_5_OT：VDD3/5 过热状态位

- 当超出 VDD3/5 过热条件时设置为 1。只要该位设置为 1，该位就会使 VDD3/5 稳压器保持禁用状态。
- 如果过热条件不再存在则清零

5.5.4.4 SAFETY_STAT_2 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化

控制器访问：只读 (RD_SAFETY_STAT_2)

Figure 5-26. SAFETY_STAT_2 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	CFG_CRC_ERR R	EE_CRC_ERR	RSV	WD_FAIL_CNT [2]	WD_FAIL_CNT [1]	WD_FAIL_CNT [0]
0b	0b	0b	0b	0b	1b	0b	1b

D[7:6] RSV

D[5] CFG_CRC_ERR：安全配置寄存器的 CRC 错误状态位

- 安全配置寄存器受 CRC8 保护。
- 当安全配置寄存器的 CRC8 计算值与 SAFETY_CFG 寄存器中存储的 CRC8 预期值不匹配时，该位会设置为 1。
- 当 CRC8 不匹配情况不再存在时清零。
- 当 EEPROM CRC 执行无错误时清零（无论 CFG_CRC 校验结果如何）。

D[4] EE_CRC_ERR：EEPROM CRC 错误状态位

- EEPROM 内容受 CRC8 保护。
- 当 CRC8 计算值与 EEPROM DFT 寄存器中存储的 CRC8 预期值不匹配时，该位会设置为 1。当该位设置为 1 并且器件处于诊断状态时，器件会转换至安全状态。
- 当 CRC8 不匹配情况不再存在时清零。

D[3] RSV

D[2:0] WD_FAIL_CNT[2:0]：看门狗失效计数器

- 默认值为 5，当进入诊断和活动状态后立即初始化为该值。
- 看门狗失效计数器将在器件看门狗每次检测到糟糕或超时事件时递增，并在其每次接收到良好事件时递减。
- 看门狗失效计数器必须递减到低于 5 才会启用 ENDRV 引脚。
- 如果 WD_RST_EN 位设置为 1，在看门狗失效计数器达到计数 7 之后下次发生糟糕或超时事件时（即 7+1）检测到看门狗失效。在 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中，WD_FAIL 状态位设置为 1（在 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中将 WD_FAIL 位设置为 1）。

5.5.4.5 SAFETY_STAT_3 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：只读 (RD_SAFETY_STAT_3)

Figure 5-27. SAFETY_STAT_3 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	NRES_ERR	LBIST_ERR	ABIST_ERR	ABIST_ERR	LBIST_RUN	ABIST_RUN
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:6] RSV

D[5] NRES_ERR：复位错误输入状态

- 无论 DIS_RES_MON 位的值如何，当检测到 NRES 引脚输出高电平与 NRES 引脚输入读回低电平之间存在不匹配情况时，该位设置为 1。如果外部 RC 延迟减缓电平变化，使其长于内部抗尖峰脉冲时间（120μs 典型值），它可能短暂设置为 1，具体取决于该引脚的外部 RC 负载和读取该位的时序。
- 如果故障不再存在，则清零。
- SAFETY_FUNC_CFG 寄存器中的 DIS_NRES_MON 位决定该错误是否会导致从活动状态转换至安全状态。

D[4] LBIST_ERR：逻辑 BIST (LBIST) 错误状态位

- 当 LBIST 失败时该位设置为 1
- 在 LBIST 运行完成（无故障）之后清零。
- 仅当 LBIST_RUN 位为 0 时有效。

D[3] ABIST_ERR：模拟 BIST (ABIST) 错误状态位

- 当 ABIST 失败时该位设置为 1。如果该位设置为 1 并且器件处于诊断状态，则器件会转换至安全状态。
- 在 ABIST 运行完成（无故障）之后清零
- 仅当 ABIST_RUN 位为 0（ABIST 未在运行）时有效

D[2] ABIST_ERR：模拟 BIST (ABIST) 错误状态位（与 D3 相同）

- 当 ABIST 失败时该位设置为 1。如果该位设置为 1 并且器件处于诊断状态，则器件会转换至安全状态。
- 在 ABIST 运行完成（无故障）之后清零
- 仅当 ABIST_RUN 位为 0（ABIST 未在运行）时有效

D[1] LBIST_RUN：逻辑 BIST (LBIST) 运行状态位

- 当 LBIST 在运行时该位设置为 1。
- 当 LBIST 未在运行时清零。

D[0] ABIST_RUN：模拟 BIST (ABIST) 运行状态位

- 当 ABIST 在运行时该位设置为 1。
- 当 ABIST 未在运行时清零。

5.5.4.6 SAFETY_STAT_4 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化

控制器访问：只读 (RD_SAFETY_STAT_4)

Figure 5-28. SAFETY_STAT_4 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SPI_ERR[1]	SPI_ERR[0]	LOCLK	RSV	MCU_ERR	WD_ERR	ENDRV_ERR	TRIM_ERR_VMON
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:6] SPI_ERR[1:0]：SPI 错误状态位

00b = 无错误

01b = SPI SDO 错误 (SDO 输出不匹配)

如果在同一个 SPI 帧期间同时发生 SPI SDO 错误和另一个 SPI 错误，则 SPI_ERR[1:0] 位中会显示 01b，因为 SPI SDO 错误具有较高的优先级。

10b = 保留

11b = SPI 错误，包括 SPI 帧截断、SPI 传输的位数大于 16、SPI 传输的命令未定义或 SPI 传输具有错误的命令奇偶校验

- 在 SPI 读取访问或任何没有错误的 SPI 帧之后清零。

注：如果在 SPI 帧传输期间产生 MCU 复位（导致 SPI 帧截断），则这些 SPI 错误状态位不会清除，而是根据已截断的上一个 SPI 帧保持相关状态，直到发生 SPI 读取访问

D[5] LOCLK：缺少时钟检测状态位

- 当检测到缺少时钟故障时出现，还会在完成 ABIST 之后出现
- 在内部 NPOR 之后清零并在读取时清除（在 ABIST 之后）

D[4] RSV

D[3] MCU_ERR：MCU 错误信号监控器 (MCU ESM) 状态位

- 当 MCU ESM 监控启用时，如果 MCU ESM 模块在 ERROR/WDI 引脚上检测到错误，则该位会设置为 1。
- 该位对 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 ERROR_PIN_FAIL 位进行镜像

D[2] WD_ERR：看门狗错误状态位

- 当 WD_RST_EN 位 (SAFETY_FUNC_CFG 中的位 3) 设置为 1 时，在 WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器达到计数 7 之后下次发生糟糕或超时事件（即 7+1）时，该位会设置为 1。如发生诊断状态超时，也会设置为 1。
- 该位对 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 WD_FAIL 位进行镜像

D[1] ENDRV_ERR：启用驱动器错误

- 当检测到 ENDRV 引脚输出与 ENDRV 输入反馈之间存在不匹配情况时该位设置为 1。如果外部 RC 延迟减缓电平变化，使其长于内部抗尖峰脉冲时间（32μs 典型值），它可能短暂设置为 1，具体取决于该引脚的外部 RC 负载和读取该位的时序。
- 如果故障不再存在，则清零。

D[0] TRIM_ERR_VMON：VMON 调整错误状态位

- 当检测到不匹配电压监控器调整错误时该位设置为 1。
- 在内部 NPOR 之后以及故障不再存在时清零。

5.5.4.7 SAFETY_STAT_5 寄存器

初始化源：POR、LBIST 之后重新初始化

控制器访问：只读 (RD_SAFETY_STAT_5)

Figure 5-29. SAFETY_STAT_5 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	RSV	RSV	RSV	FSM[2]	FSM[1]	FSM[0]
0b	0b	0b	0b	0b	0b	1b	1b

D[2:0] FSM[2:0]：当前器件状态

– 反映当前器件状态 (在 NPOR 或 LBIST 后重新初始化之后，位将立即更新以反映当前器件状态)

- 待机状态：00h
- 复位状态：03h
- 诊断状态：07h
- 活动状态：05h
- 安全状态：04h

5.5.4.8 SAFETY_ERR_CFG 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_ERR_CFG)

写入 (WR_SAFETY_ERR_CFG)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-30. 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
SAFE_TO [2]	SAFE_TO [1]	SAFE_TO [0]	SAFE_LOCK_T HR [3]	SAFE_LOCK_T HR [2]	SAFE_LOCK_T HR [1]	SAFE_LOCK_T HR [0]	CFG_LOCK
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:5] SAFE_TO[2:0]：安全状态超时设置

- 安全状态持续时间具有时间限制，以针对潜在的 MCU 锁定 状态提供保护。
- 超时持续时间 = $(2 \times \text{SAFE_TO}[2:0] + 1) \times 22\text{ms}$ 。
- 最短持续时间为 22ms。
- 最长持续时间为 330ms。
- 22ms 时间基准具有 5% 的精度 (来自 4MHz 内部振荡器)

D[4:1] SAFE_LOCK_THR[3:0]

- 将相应器件的 DEV_ERR_CNT[3:0] 阈值设置为器件在安全状态下的值，而无论是否发生安全状态超时事件
- 当 NO_SAFE_TO 位 (SAFETY_FUNC_CFG 寄存器位 7) 设置为 1 后：
 - 当 DEV_ERR_CNT[3:0] < SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 时，从安全状态到复位状态的安全状态超时转换时间通过 SAFE_TO[2:0] 位设置进行控制。安全状态超时持续时间的计算方法为 $(\text{SAFE_TO}[2:0] \times 2 + 1) \times 22\text{ms}$ 。
 - 当 DEV_ERR_CNT[3:0] 计数器达到 SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 值后，器件会保持锁定 在安全状态。
- 当 NO_SAFE_TO 位 (SAFETY_FUNC_CFG 寄存器位 7) 清零后：
 - 当 DEV_ERR_CNT[3:0] < SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 时，从安全状态到复位状态的超时转换时间通过 SAFE_TO[2:0] 位设置进行控制。延时时间持续时间的计算方法为 $(\text{SAFE_TO}[2:0] \times 2 + 1) \times 22\text{ms}$ 。
 - 当 DEV_ERR_CNT[3:0] 计数器达到 SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 值时，器件会在 680ms 后转换至复位状态。
- 旨在支持软件调试和开发，不建议用于常规功能运行。
- 0000b 设置是默认设置，具有与 1111b 设置相同的效果。这两种设置都可以提供最小阈值。

D[0] CFG_LOCK

- 寄存器锁定访问控制。
- 当设置为 1 时，无法通过 SPI WR 访问更新寄存器内容。

5.5.4.9 SAFETY_BIST_CTRL 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_BIST_CTRL)

写入 (WR_SAFETY_BIST_CTRL)。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-31. SAFETY_BIST_CTRL 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
BIST_DEG_CN T[1]	BIST_DEG_CN T[0]	AUTO_BIST_DI S	EE_CRC_CHK	RSV	LBIST_EN	ABIST_EN	ABIST_EN
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:6] BIST_DEG_CNT[1:0]：活动 ABIST 期间的抗尖峰脉冲滤波器持续时间设置

- 该位控制每个安全监控电压的抗尖峰脉冲滤波器持续时间。
- 分辨率为 15μs (最小设置为 15μs, 最大设置为 60μs) : $bist_deglitch = (BIST_DEG_CNT[1:0] + 1) \times 15\mu s$ 。
- 15μs 时间基准具有 5% 的精度 (来自 4MHz 内部振荡器)。
- 在活动状态下运行 ABIST 时, TI 建议将其设置为最长抗尖峰脉冲时间。

D[5] AUTO_BIST_DIS

- 该位控制仅当器件从诊断、活动或安全状态进入复位状态时在从复位状态转换到诊断状态时执行的自动 BIST。
- 当设置为 1 时, 会执行自动 BIST 运行, 但在从待机状态上电时的自动 BIST 运行除外。

D[4] EE_CRC_CHK：重新计算 EEPROM CRC8

- 该位控制 EEPROM CRC8 校验功能
- 当设置为 1 时, 会重新加载 EEPROM 内容, 并且重新计算 CRC8 并与 EEPROM DFT 寄存器中存储的预期值进行比较。
注：对于每个上电事件, 会重新加载 EEPROM 内容并重新计算其 CRC8。
- 自检状态通过 SAFETY_STAT_2 寄存器中的位 4 进行检查。

D[3] RSV, 可读且可写, 没有影响

D[2] LBIST_EN：启用 LBIST 运行

- 该位控制 LBIST 运行 (还运行 ABIST)。
- 自检状态通过 SAFETY_STAT_3 寄存器中的 D1 和 D4 位进行监控。
- LBIST_EN 位将 DIAG_EXIT_MASK 位清零。诊断状态超时计数器仅在 LBIST 运行期间停止。在 LBIST 完成之后, 超时计数器从最后的值继续计数。要保持在诊断状态, 必须在 LBIST 完成后将 DIAG_EXIT_MASK 位设置为 1。对于从诊断状态到活动状态的转换, DIAG_EXIT 位必须设置为 1。

D[1] ABIST_EN：启用 ABIST 运行 (与 D[0] 相同)

- 该位控制模拟 UV、OV 和 LOC BIST 运行。
- 自检状态通过 SAFETY_STAT_3 寄存器中的 D0、D2 和 D3 位以及 SAFETY_STAT4 寄存器中的 D5 位进行监控。

D[0] ABIST_EN：启用模拟 BIST 运行 (与 D[1] 相同)

- 该位控制模拟 UV、OV 和 LOC BIST 运行。
- 自检状态通过 SAFETY_STAT_3 寄存器中的 D0、D2 和 D3 位以及 SAFETY_STAT4 寄存器中的 D5 位进行监控。

5.5.4.10 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_CHECK_CTRL)

写入 (WR_SAFETY_CHECK_CTRL)。

Figure 5-32. SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
CFG_CRC_EN	RSV	ENABLE_DRV	RSV	RSV	NO_ERROR	DIAG_EXIT_MASK	DIAG_EXIT
0b	0b	0b	1b	0b	1b	0b	0b

D[7] CFG_CRC_EN

- 该位控制是否针对器件配置寄存器启用 CRC8 保护。
- 当设置为 1 时，会针对所有器件配置寄存器计算 CRC8 并与 SAFETY_CFG_CRC 寄存器中存储的 CRC8 值进行比较。
- TI 建议首先设置所需的器件配置，然后更新 SAFETY_CFG_CRC 寄存器，再将该位设置为 1。
- 以下寄存器受到保护：
 - SAFETY_FUNC_CFG 寄存器
 - DEV_REV (器件版本) 寄存器
 - SAFETY_PWD_THR_CFG 寄存器
 - SAFETY_ERR_CFG 寄存器
 - WD_TOKEN_CFG 寄存器
 - WD_WIN1_CFG 寄存器
 - WD_WIN2_CFG 寄存器
 - SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器
 - DEV_CFG2 寄存器
 - DEV_CFG1 寄存器 (仅 D6 位)

D[6] RSV, 可读且可写, 对器件状态或 ENDRV 和 NRES 输出没有影响

D[5] ENABLE_DRV

- 控制 ENDRV 输出的启用。
- 除了将该位设置为 1 之外, 看门狗失效计数器必须递减至低于默认计数值 5 才能启用 ENDRV 输出。

D[4:3] RSV, 可读且可写, 对器件状态或 ENDRV 和 NRES 输出没有影响

D[2] NO_ERROR

- 该位启用 ERROR/WDI 引脚的 MCU ESM 监控。启用后, MCU ESM 会在检测到错误时将器件从活动状态转换至安全状态。
 - 0b = MCU ESM 启用并且 ERROR/WDI 引脚受到监控。在活动状态下检测到的故障会导致转换至安全状态, 在诊断状态下检测到的故障不会导致转换至安全状态。
 - 1b = MCU ESM 未启用并且 ERROR/WDI 引脚不受监控, 活动状态下的故障不会导致转换至安全状态。
- 如果在 NO_ERROR = 0 (MCU ESM 启用) 时检测到故障:
 - 将出现 SAFETY_ERR_STAT 寄存器中的 ERROR_PIN_FAIL 状态位。
 - 会设置 SAFETY_STAT_4 寄存器中的 MCU_ERR 状态位。

D[1] DIAG_EXIT_MASK

- 控制从诊断状态退出。
- 无论是否发生诊断状态超时事件或者是否设置 DIAG_EXIT 位, 当该位设置为 1 时, 将禁用从诊断状态退出。
- 建议仅针对软件调试和开发使用该功能, 不得在功能模式下将其激活。

D[0] DIAG_EXIT

- 控制从诊断状态退出并进入活动状态
- 当设置为 1 并且 DIAG_EXIT_MASK 位为 0 时, 器件会从诊断状态转换至活动状态。

5.5.4.11 SAFETY_FUNC_CFG 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_FUNC_CFG)

写入 (WR_SAFETY_FUNC_CFG)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-33. SAFETY_FUNC_CFG 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
NO_SAFE_TO	ERROR_CFG	WD_CFG	IGN_PWRL	WD_RST_EN	DIS_NRES_MON	RSV	VDD_3_5_SEL
1b	0b	0b	0b	0b	1b	0b	X

D[7] NO_SAFE_TO

- 控制安全状态超时功能的启用和禁用。
 - 当设置为 1 时：安全状态超时禁用。当 DEV_ERR_CNT[3:0] 计数器达到 SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 值后，器件会在安全状态下保持锁定。
 - 当清零时：安全状态超时启用。当 DEV_ERR_CNT[3:0] 计数器达到 SAFE_LOCK_THR[3:0] + 1 值时，器件会在 680ms 后转换至复位状态。

D[6] ERROR_CFG：MCU ESM 配置位

- 当清零时：会选择 PWM 模式（可用作外部时钟监控器）。预期 ERROR/WDI 引脚低电平和高电平持续时间由 SAFETY_ERR_PWM_H 和 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器进行控制（请分别参阅 Section 5.5.4.13 和 Section 5.5.4.14）。
- 当设置为 1 时：会选择 TMS570 模式。ERROR 引脚低电平持续时间阈值由 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器进行设置。
- 使用 SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中的 NO_ERROR 位来启用 MCU ESM 功能。

D[5] WD_CFG：看门狗功能配置位

- 当清零时：触发模式（默认模式）– 通过 ERROR/WDI 引脚输入看门狗触发。
- 当设置为 1 时：Q&A 模式 – 通过 SPI 输入看门狗应答。

D[4] IGN_PWRL：点火开关电源锁存控制位

- 控制点火开关电源锁存的启用。
 - 注：仅当器件处于诊断状态时才能更改该位。
- 当清零时：在 IGN 引脚处于低电平的情况下，器件进入待机状态。由 CANWU 事件清除。
- 当设置为 1 时：IGN 引脚可能会被拉低，但器件保持上电状态。

D[3] WD_RST_EN

- 1b = 当检测到看门狗故障时（WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器达到计数 7+1）启用至复位状态的转换。
- 0b（默认值）= 当检测到看门狗故障事件时（WD_FAIL_CNT[2:0] 计数器达到计数 7 + 1）禁用至复位状态的转换。

D[2] DIS_NRES_MON

- 当清零时：在活动状态下，NRES 引脚上读回电平与 NRES 引脚输出驱动器状态之间的差异会导致转换至安全状态并且会设置 NRES_ERR 位。
- 当设置为 1（默认状态）时：会由于读回 NRES 引脚电平与 NRES 驱动器状态之间的差异而禁用状态转换。（默认状态）注：如果检测到读回 NRES 引脚电平与 NRES 驱动器状态之间的差异，则仍会设置 NRES_ERR 位。

D[1] RSV，在诊断状态下可读且可写，对器件状态或 ENDRV 和 NRES 输出没有影响

D[0] VDD_3_5_SEL：上电时的 VDD3/VDD5 选择状态位

- 在上电时对 SEL_VDD3/5 输入引脚进行采样和锁存。
 - 0b = 5V 设置（SEL_VDD3/5 引脚接地）
 - 1b = 3.3V 设置（未连接 SEL_VDD3/5 引脚）
 - 复位状态下的值取决于首次上电时 SEL_VDD3/5 引脚的状态
- 该位是只读的。
 - 注：该位与 DEV_CFG1 位 D7 相同。

5.5.4.12 SAFETY_ERR_STAT 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_ERR_STAT)

写入 (WR_SAFETY_ERR_STAT)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-34. SAFETY_ERR_STAT 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	ERROR_PIN_FAIL	WD_FAIL	DEV_ERR_CN T[3]	DEV_ERR_CN T[2]	DEV_ERR_CN T[1]	DEV_ERR_CN T[0]
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:6] RSV

D[5] ERROR_PIN_FAIL

- 仅当 NO_ERROR = 0 (SAFETY_CHECK_CTRL 寄存器中的 D2 位) 时，会在 MCU ESM 模块在 ERROR/WDI 引脚上检测到故障时设置为 1。当器件处于活动状态并且 NO_ERROR = 0 时，器件会在该 ERROR_PIN_FAIL 位设置为 1 时进入安全状态。如发生诊断状态超时，也会设置为 1。
- 通过使用 SPI 向该位写入 0 进行清除，或在复位事件期间清零。注：在诊断状态下，还可以向该位写入 1，将其设置为 1 所产生的器件级影响与在 ERROR/WDI 引脚上检测到故障相同。

D[4] WD_FAIL

- 当 WD_RST_EN 位 (SAFETY_FUNC_CFG 中的位 3) 设置为 1 时，在看门狗失效计数器达到计数 7 之后下次发生不良事件 (即 7 + 1) 时，该位会设置为 1。如发生诊断状态超时，也会设置为 1。
- 当看门狗失效计数器小于 7 时通过使用 SPI 向该位写入 0 进行清除，或在复位事件期间清零。注：在诊断状态下，还可以向该位写入 1，在退出诊断状态时将其设置为 1 会导致转换至安全状态。

D[3:0] DEV_ERR_CNT[3:0]

- 跟踪当前器件错误计数。
- 由 SPI WR 访问进行覆盖，但仅限诊断模式。

5.5.4.13 SAFETY_ERR_PWM_H 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_ERR_PWM_H)

写入 (WR_SAFETY_ERR_PWM_H)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-35. SAFETY_ERR_PWM_H 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
PWMH[7]	PWMH[6]	PWMH[5]	PWMH[4]	PWMH[3]	PWMH[2]	PWMH[1]	PWMH[0]
1b	0b	1b	0b	1b	0b	0b	0b

D[7:0] PWMH[7:0]：PWM 模式下 ERROR/WDI 引脚高电平阶段持续时间 (分辨率为 15μs)

- 控制预期的高电平阶段持续时间 (分辨率为 15μs)
使用 Equation 17 和 Equation 18 来计算高电平脉冲持续时间 t_{PWM_HIGH} 的最小值和最大值。
(15μs 时间基准具有 5% 的精度，来自 4MHz 内部振荡器)

5.5.4.14 SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_ERR_PWM_L)

写入 (WR_SAFETY_ERR_PWM_L)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-36. SAFETY_ERR_PWM_L 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
PWML[7]	PWML[6]	PWML[5]	PWML[4]	PWML[3]	PWML[2]	PWML[1]	PWML[0]
0b	0b	1b	1b	1b	1b	0b	1b

D[7:0] PWML[7:0]：ERROR/WDI 引脚低电平阶段持续时间

– 控制预期低电平阶段持续时间。

- 当 ERR_CFG 位为 0 (处于 PWM 模式) 时：PWM 低电平阶段持续时间 (分辨率为 15 μ s)
使用 Equation 19 和 Equation 20 来计算低电平脉冲持续时间 $t_{\text{PWM_LOW}}$ 的最小值和最大值。
(15 μ s 时间基准具有 5% 的精度，来自 4MHz 内部振荡器)
- 当 ERR_CFG 位设置为 1 (TMS570 模式) 时：错误低电平持续时间 (分辨率为 5 μ s)
使用 Equation 15 和 Equation 16 来计算低电平持续时间 $t_{\text{TMS570_LOW}}$ 的最小值和最大值。
(5 μ s 时间基准具有 5% 的精度，来自 4MHz 内部振荡器)

5.5.4.15 SAFETY_PWD_THR_CFG 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_PWD_THR_CFG)

写入 (WR_SAFETY_PWD_THR_CFG)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-37. SAFETY_PWD_THR_CFG 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	RSV	RSV	PWD_THR[3]	PWD_THR[2]	PWD_THR[1]	PWD_THR[0]
0b	0b	0b	0b	1b	1b	1b	1b

D[7:4] RSV

D[3:0] PWD_THR[3:0]：用于将器件断电的器件错误计数阈值

- 当 DEV_ERR_CNT[3:0] 计数器达到编程的阈值时，器件会断电。
- 器件会在发生新的唤醒或 ignition 事件时恢复。

5.5.4.16 SAFETY_CFG_CRC 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SAFETY_CFG_CRC)

写入 (WR_SAFETY_CFG_CRC)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-38. SAFETY_CFG_CRC 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
CFG_CRC[7]	CFG_CRC[6]	CFG_CRC[5]	CFG_CRC[4]	CFG_CRC[3]	CFG_CRC[2]	CFG_CRC[1]	CFG_CRC[0]
0b	0b	0b	1b	0b	0b	0b	0b

D[7:0] CFG_CRC[7:0]：安全配置寄存器的 CRC8 值

5.5.4.17 诊断

5.5.4.17.1 DIAG_CFG_CTRL 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化
 控制器访问：读取 (RD_DIAG_CFG_CTRL)
 写入 (WR_DIAG_CFG_CTRL)

Figure 5-39. DIAG_CFG_CTRL 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
MUX_EN	SPI_SDO	MUX_OUT	INT_CON[2]	INT_CON[1]	INT_CON[0]	MUX_CFG[1]	MUX_CFG[0]
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7] MUX_EN：启用诊断多路复用器输出

0b = 禁用 (三态)

1b = 使能

D[6] SPI_SDO：用于在互联测试期间控制 SPI_SDO 输出缓冲器状态

要检查 SDO 诊断，请使用以下序列：

- MUX_CFG[1:0] 配置必须为 01b (数字多路复用器模式)
- SPI_NCS 必须保持在高电平
- SDO 引脚的状态由 SPI_SDO 位进行控制

D[5] MUX_OUT：诊断多路复用器输出状态控制位

注：当 MUX_CFG 位设置为 00b 并且 MUX_EN 位设置为 1 时

D[4:2] INT_CON[2:0]：器件互联测试配置位

000b = 无活动互联测试

001b = 在诊断多路复用器输出上观察到的 ERR 输入状态

010b = 在诊断多路复用器输出上观察到的 SPI_NCS 输入状态

011b = 在诊断多路复用器输出上观察到的 SPI_SDI 输入状态

100b = 在诊断多路复用器输出上观察到的 SPI_SCLK 输入

101b = 不适用

110b = 不适用

111b = 不适用

D[1:0] MUX_CFG[1:0]：诊断多路复用器配置

00b = 多路复用器输出由 MUX_OUT 位 (DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的位 5) 控制

01b = 数字多路复用器模式

10b = 模拟多路复用器模式

11b = 器件互联模式 (输入引脚互联测试)

5.5.4.17.2 DIAG_MUX_SEL 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化
 控制器访问：读取 (RD_DIAG_MUX_SEL)
 写入 (WR_DIAG_MUX_SEL)

Figure 5-40. DIAG_MUX_SEL 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
MUX_SEL[7]	MUX_SEL[6]	MUX_SEL[5]	MUX_SEL[4]	MUX_SEL[3]	MUX_SEL[2]	MUX_SEL[1]	MUX_SEL[0]
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:0] MUX_SEL[7:0]：诊断多路复用器通道选择

注：多路复用器通道表取决于 DIAG_CFG_CTRL 寄存器中的 MUX_CFG[1:0] 位设置 (请参阅 [Section 5.5.4.17.1](#))。

5.5.5 看门狗计时器

5.5.5.1 WD_TOKEN_FDBK 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_WD_TOKEN_FDBK)

写入 (WR_WD_TOKEN_FDBK)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-41. WD_TOKEN_FDBK 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
FDBK[3]	FDBK[2]	FDBK[1]	FDBK[0]	TOKEN_SEED[3]	TOKEN_SEED[2]	TOKEN_SEED[1]	TOKEN_SEED[0]
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:4] FDBK[3:0]：看门狗问题（令牌）FSM 反馈配置位

- FDBK [3:0] 位控制生成的问题和马尔可夫链多项式序列
- 该器件具有一系列生成问题（共 16 个），重复或序列排序可通过 FDBK[3:0] 位进行调节
- FDBK[3:2] 控制 Q&A 模式下的看门狗问题（令牌）生成。
- FDBK[2:1] 控制用于看门狗问题（令牌）生成的 LFSR 配置。
- FDBK[0] RSV

D[3:0] TOKEN_SEED[3:0]：看门狗令牌种子值，用于生成一组新问题（令牌）

- 只能在诊断状态下（复位之后）重新初始化看门狗之后由 MCU 更新令牌种子值。新的 TOKEN_SEED[3:0] 值在进行另一个从复位状态到其他状态的转换 (AUTO_BIST_DIS = 1) 之后生效。
- 仅用于 Q&A 模式。

5.5.5.2 WD_WIN1_CFG 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_WD_WIN1_CFG)

写入 (WR_WD_WIN1_CFG)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-42. WD_WIN1_CFG 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RT[6]	RT[5]	RT[4]	RT[3]	RT[2]	RT[1]	RT[0]
0b	1b	1b	1b	1b	1b	1b	1b

D[7] RSV

D[6:0] RT[6:0]：看门狗窗口 1 持续时间设置

- 要计算 t_{WIN1} 时间段的最小值和最大值，请参阅 [Equation 1](#) 和 [Equation 2](#)。

5.5.5.3 WD_WIN2_CFG 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_WD_WIN2_CFG)

写入 (WR_WD_WIN2_CFG)。仅在诊断状态下才可能发生写入更新。写入访问通过 SW_LOCK 命令进行锁定。

Figure 5-43. WD_WIN2_CFG 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	RSV	RT[4]	RW[3]	RW[2]	RW[1]	RW[0]
0b	0b	0b	1b	1b	0b	0b	0b

D[7:5] RSV

D[4:0] RW[4:0]：看门狗窗口 2 持续时间设置

- 要计算 t_{WIN2} 时间段的最小值和最大值，请参阅 [Equation 3](#) 和 [Equation 4](#)。

5.5.5.4 WD_TOKEN_VALUE 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化
控制器访问：只读 (RD_WD_TOKEN_VALUE)

Figure 5-44. WD_TOKEN_VALUE 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
WD_FAIL_TH	RSV	RSV	RSV	TOKEN[3]	TOKEN[2]	TOKEN[1]	TOKEN[0]
1b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7] WD_FAIL_TH

- 当看门狗失效计数器达到计数 5 或更高 (SAFETY_STAT_2 寄存器中的 WD_FAIL_CNT[2:0] 位) 时设置为 1。
- 当看门狗失效计数器达到小于 5 的计数 (SAFETY_STAT_2 寄存器中的 WD_FAIL_CNT[2:0] 位) 时清零。

D[6:4] RSV

D[3:0] TOKEN[3:0]：看门狗问题 (令牌)

- MCU 必须读取 (或计算) 当前问题 (令牌)，以生成正确的应答字节。
- 仅用于 Q&A 模式。

5.5.5.5 WD_STATUS 寄存器

初始化源：NPOR、LBIST 之后重新初始化
控制器访问：只读 (RD_WD_STATUS)

Figure 5-45. WD_STATUS 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
WD_ANSW_CNT NT [1]	WD_ANSW_CNT NT [0]	ANSWER_ERR	WD_WRONG_CFG	WD_CFG_CHG	SEQ_ERR	TIME_OUT	ANSWER_EARLY
1b	1b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:6] WD_ANSW_CNT[1:0]：当前看门狗应答计数

- 仅用于 Q&A 模式。

D[5] ANSWER_ERR：用于显示错误的应答 x 字节的看门狗错误状态位 (以前称为 TOKEN_ERR)

- 一旦应答 x 字节 (WD_TOKEN_RESPx) 不正确，该位就立即设置为 1。如果后续应答再次正确或在新看门狗序列的开始，该标志会清除。该位不会在进行 SPI 读取时清除。
- 仅用于 Q&A 模式。

D[4] WD_WRONG_CFG

- 当 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 位设置为 00h 时设置为 1。

D[3] WD_CFG_CHG：看门狗配置更改状态位

- 当 WD_WIN1_CFG 或 WD_WIN2_CFG 设置更改时该位设置为 1。该位在新看门狗序列的开始清除。

D[2] SEQ_ERR：任一应答字节错误

- 时序错误或应答错误。
- 仅用于 Q&A 模式。

D[1] TIME_OUT：在看门狗序列内未接收到看门狗事件 (触发或四个应答 x 字节) (超时事件)

- 在触发模式 (默认模式) 下：如果在看门狗序列期间未在 ERROR/WDI 引脚上接收到触发，则设置为 1。
- 在 Q&A 模式下：如果在看门狗序列期间接收到的应答 x 字节数少于四，则设置为 1。
- 该标志可用于将 MCU 时序与器件看门狗重新同步。
- 由 SPI 读取访问清零，在看门狗良好事件或不良事件之后清零，或在复位事件期间清零。注：在诊断状态下，还可以向该位写入 1，将其设置为 1 所产生的器件级影响与在 ERROR/WDI 引脚上检测到故障相同。

D[0] ANSWER_EARLY：应答 x 字节完成得太早或触发太早 (以前称为 TOKEN_EARLY)

- 如果在窗口 1 期间返回四个应答字节或在窗口 1 中发生触发，则设置为 1。

5.5.5.6 WD_ANSWER 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：只写 (WR_WD_ANSWER)

Figure 5-46. WD_ANSWER 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
WD_ANSW[7]	WD_ANSW[6]	WD_ANSW[5]	WD_ANSW[4]	WD_ANSW[3]	WD_ANSW[2]	WD_ANSW[1]	WD_ANSW[0]
0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b	0b

D[7:0] WD_ANSW[7:0]：应答字节

- 有关应答字节的详细信息，请参阅Section 5.4.15.4。
- 仅用于 Q&A 模式。

5.5.6 传感器电源

5.5.6.1 SENS_CTRL 寄存器

初始化源：NPOR

控制器访问：读取 (RD_SENS_CTRL)

写入 (WR_SENS_CTRL)。

Figure 5-47. SENS_CTRL 寄存器

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
RSV	RSV	RSV	VDD5_EN	RSV	RSV	RSV	VSOUT1_EN
0b	0b	0b	1b	0b	0b	0b	0b

D[7:5] RSV

D[4] VDD5_EN：如果清零，则 VDD5 稳压器会关闭。

- 该位默认设置为 1，并且在发生 VDD5 过热情况时清除（由 SAFETY_STAT1 寄存器中的 VDD5_OT 位 D1 指示）。

注：VDD5 稳压器禁用时，VDD5_ILIM 位（SAFETY_STAT1 寄存器中的 D7 位）设置为 1，并且只要 VDD5 稳压器禁用（或 VDD5_EN 位为 0），该位就保持设置为 1。不过，VDD5_OV 和 VDD5_UV 位会反映 VDD5 稳压器上的过压或欠压情况。

D[3:1] RSV

D[0] VSOUT1_EN：传感器电源使能位（将该位设置为 1 可启用 VSOUT1 传感器电源）

- 该位默认清零，必须由 MCU 设置为 1 才能启用 VSOUT1 传感器电源。如果发生 VSOUT1 过热情况（由 SAFETY_STAT1 稳压器中的 VSOUT1_OT 位 D2 指示），VSOUT1 稳压器将禁用，并且该位 (VSOUT1_EN) 会清零。当 VSOUT1 传感器电源中的过热情况不再存在时，必须重新启用 VSOUT1 传感器电源。

6 应用和实现

NOTE

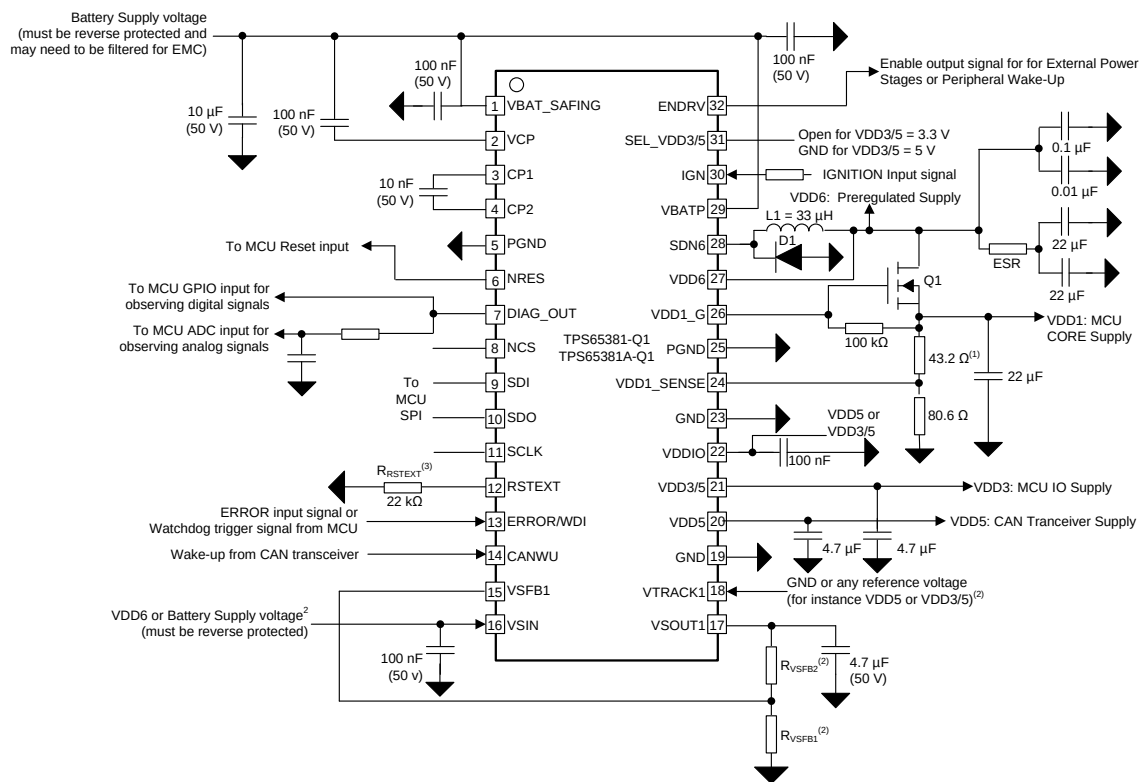
以下 应用 部分的信息不属于 TI 组件规范，TI 不担保其准确性和完整性。客户应负责确定 TI 组件是否适用于其应用。客户应验证并测试其设计是否能够实现，以确保系统功能。

6.1 应用信息

TPS65381A-Q1 器件是一款多轨电源，其中包含一个降压前置稳压器、一个线性控制器、一个 5V 线性稳压器、一个可编程 3.3V 或 5V 线性稳压器以及一个线性跟踪稳压器（具有对电池短路或接地短路保护功能）。该器件具有许多诊断和监控功能。该器件为许多不同的应用提供了电源管理基础。

6.2 典型应用

以下设计要求和设计流程举例说明了如何为用于典型应用的 TPS65381A-Q1 器件选择组件值。由于其中的许多稳压器是可调节的，因此提供了公式来计算特定应用的组件值。有关其他参考，另请参阅节 9.1.1 中列出的设计检查清单和应用手册。



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

示例组件：

- Q1 : BUK9213-30A
- D1 : Vishay SS3H09/10、OnSemi MBRS340T3
- D2 : ROHM UDZSTE-176.2B
- L1 : TDK CLF10060NIT-330M-D 或 COILCRAFT MSS1246T-333ML

NOTE:

1. 针对 1.23V 输出电压使用 43.2 Ω (建议针对 TI TMS570 MCU 使用该值)。更改该电阻器可获得不同的 VDD1 输出电压; VDD1_SENSE = 800mV。该电阻分压器中电阻器的容差将影响 VDD1 调节和电压监控容差。建议使用容差为 0.1% 的电阻器。
2. R_{V_{SFB1}} 和 R_{V_{SFB2}} 配置 VSOUT1 电压。
 - 引脚 16 (VSIN) 连接到引脚 27 (VDD6) (对于 VSOUT1 $\leq$ 5V) 或引脚 29 (VBATP) (对于 5V < VSOUT1 < 9.5V)。
 - 引脚 18 (VTRACK1) 连接到 GND (对于非跟踪模式) 或基准电压 (对于示例 VDD5 或 VDD3/5) (对于跟踪模式)。
 - 该电阻分压器中电阻器的容差将影响 VSOUT1 调节和电压监控容差。建议使用容差为 0.1% 的电阻器。
 - 有关详细信息, 请参阅 [Section 5.3.5](#)。
3. R_{RS_{EXT}} 配置复位延长时间。请参阅 [Section 4.5](#) 的复位和使能输出部分。

Figure 6-1. 典型应用图

6.2.1 设计要求

在选择电容器时，应考虑以下特性：

- 在选择合适的电容器时，必须使用工作电压下的有效电容。电容器随运行电压而降额，有时高达 70%。因此，电路的电容可能会超出 [Section 4](#) 中所列电容器的指定值范围。
- 电容器的温度和寿命也可能会影响有效电容，因此应加以考虑。
- 应考虑电容器的电压额定值，尤其是在也可能经历瞬态电压的高电压输入电路上。

在选择电容器时，必须考虑所有这些影响，以便电路具有电容器的应用运行条件（如温度、电压和寿命）下该器件的指定电容。

VBATP 和 VBAT_SAFING 引脚是器件的电源输入。这些电源必须受到电池反向保护。电源还应针对目标应用受到充分的瞬态保护并具有足够的噪声滤波功能。如果应用具有连接至 VBATP 引脚、VBAT_SAFING 引脚或两者的噪声和高电流输出驱动器，则可能需要在输出驱动器和器件之间提供额外的滤波功能。

IGN 引脚是器件的唤醒输入。该输入提供高达 -7V 的保护。在该电压范围之外，IGN 引脚必须受到反向保护。如果噪声的发生时间可能长于指定的抗尖峰脉冲时间，则 IGN 还应针对目标应用受到充分的瞬态保护并具有足够的噪声滤波功能。

6.2.2 详细设计流程

6.2.2.1 VDD6 前置稳压器

必须考虑电感器、输出电容器和输出电容的总有效串联电阻 (ESR)，以实现 VDD6 前置稳压器平衡运行。

输出电感器必须大于或等于最小电感 (22μH)。典型的额定电感为 33μH，该设计中选用的也是该值。

VDD6 前置稳压器的有效输出电容的额定值为 22μF 至 47μF。该设计选用了 22μF 的有效电容（在 6V 直流运行点下）。该值允许在电压稳压器输入上提供额外的下游输入电容。要滤除高频信号，请使用并联的 10nF 和 0.1μF 电容器。如果使用更高的有效电容，则电压纹波会降低并且可以降低所需的 ESR。电容器的有效电容应由电容器供应商提供，并且必须针对容差、寿命、温度和运行电压进行降额。

由于 VDD6 前置稳压器采用迟滞架构，因此使用输出电容需要控制 ESR。额定 ESR 范围为 100mΩ 至 300mΩ。使用 [Equation 21](#) 计算实现平衡运行所需的最小总 ESR。

$$R_{ESR} = L / (15 \times C_{Effective}) = 33 / (15 \times 22) = 100m\Omega \quad (21)$$

例如，电容器的数据表指出电容器的 ESR 为 4mΩ，PCB 设计的寄生参数提取为 6mΩ。仍可以使用 100mΩ 的 ESR 电阻器，或者可以将分立式 ESR 电阻器调整为 90mΩ，从而达到至少 100mΩ 的总有效 ESR。如果使用更大的有效电容，则根据公式可能得出低于 100mΩ 的 ESR 值。在这种情况下，仍应将总 ESR 提高至 100mΩ 总 ESR 最小值，以符合规格。

应使用高电压表面贴装式肖特基整流器二极管（如 SS3H9/10 或 MBRS340T3）。

[Figure 6-2](#) 显示了该配置。

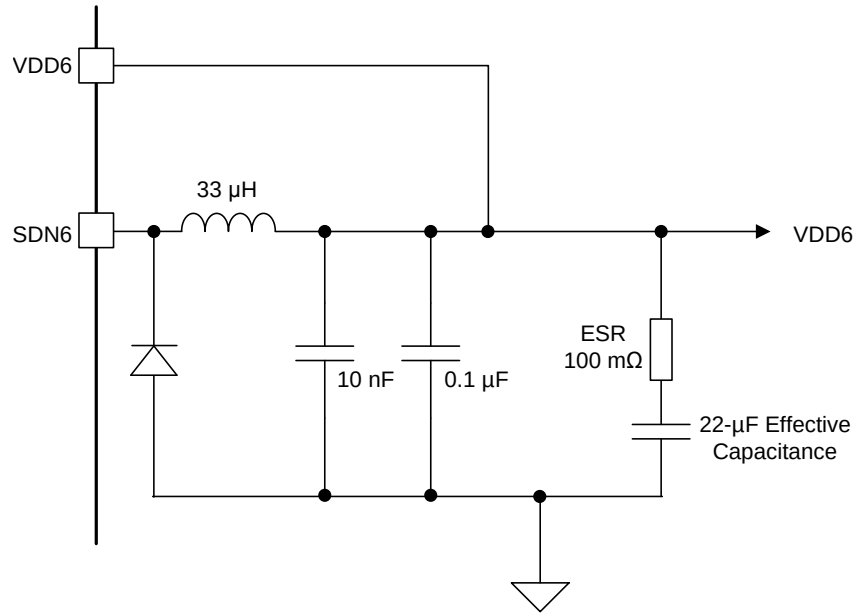


Figure 6-2. VDD6 设计

6.2.2.2 VDD1 线性控制器

与 TPS65381A-Q1 器件配合使用的微处理器需要 1.23V 的内核电压。

VDD1 线性控制器的输出电压由 VDD1 输出与接地之间的电阻分压器进行设置，分得的电压连接至 VDD1_SENSE 引脚，该电压必须设置为 800mV。为了确保有足够的偏置电流流过电阻分压器，请将 R1 的值选择为 80.6Ω。使用 Equation 22 计算 R2 的电阻。

$$R2 = ([VDD1 \times R1] / V_{VDD1_SENSE}) - R1 = ([1.23V \times 80.6\Omega] / 0.8V) - 80.6\Omega = 43.3\Omega \quad (22)$$

选择标准值 43.2Ω。

NOTE

该电阻分压器中 R1 和 R2 电阻器的容差将影响 VDD1 调节和电压监控容差。建议使用容差为 0.1% 的电阻器。

为 VDD1 线性控制器选择符合 Section 4.5 中 VDD1 – 具有外部 FET 的 LDO 中的要求的输出 FET。示例输出 FET 包括 BUK9213-30A。输出 FET 的栅极连接至 VDD1_G 引脚。FET 的栅极和源极之间连接一个 100kΩ 电阻器。FET 的漏极连接至 VDD6 前置稳压器输出，该输出用作 VDD1 线性控制器的电源输入。

使用在 1.23V 下具有 22µF 有效电容的低 ESR 陶瓷输出电容器，以符合该数据表中列出的输出电容器的要求。该输出可能需要更大的输出电容器，以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的稳压规格，具体取决于应用。VDD1 输出电容的额定值高达 40µF。

Figure 6-3 显示了该配置。

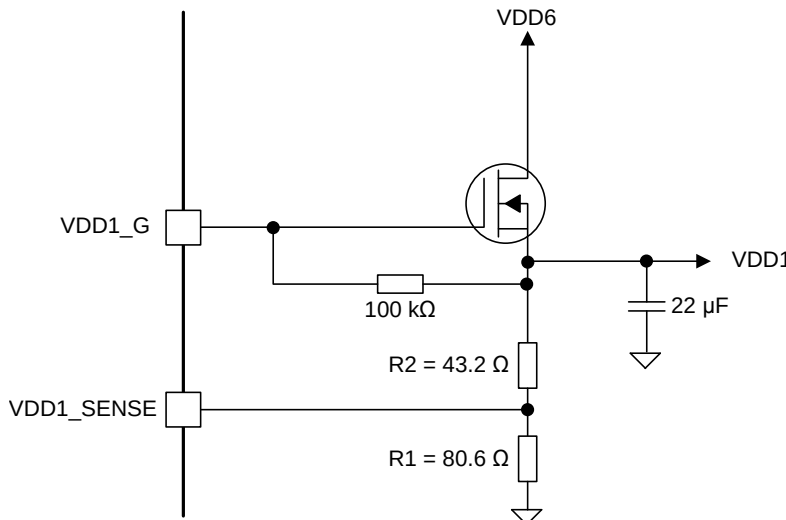


Figure 6-3. VDD1 设计

6.2.2.3 VSOUT1 跟踪线性稳压器 (配置为跟踪 VDD5)

系统的其中一个传感器需要能够跟踪 VDD5 电源的 5V 电源。应设置配置以实现更高的效率。

VDD5 输出连接至 VTRACK1 引脚，该引脚针对跟踪模式配置稳压器。由于输出必须跟踪输入，因此可将 VSFB1 引脚连接至 VSOUT1 引脚，从而在 VSFB1 引脚上使用单位增益反馈。

为了提高效率，请使用 VDD6 前置稳压器作为电源。因此，VDD6 输出连接至 VSIN。在本机上，为 VSIN 引脚采用低 ESR 100nF 陶瓷电容器以稳定输入。

在 VSOUT1 输出上使用本地低 ESR 4.7μF 陶瓷电容器以实现环路稳定。该输出可能需要更大的输出电容器，以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的稳压规格，具体取决于应用。VSOUT1 输出电容的额定值高达 10μF。

Figure 6-4 显示了该配置。

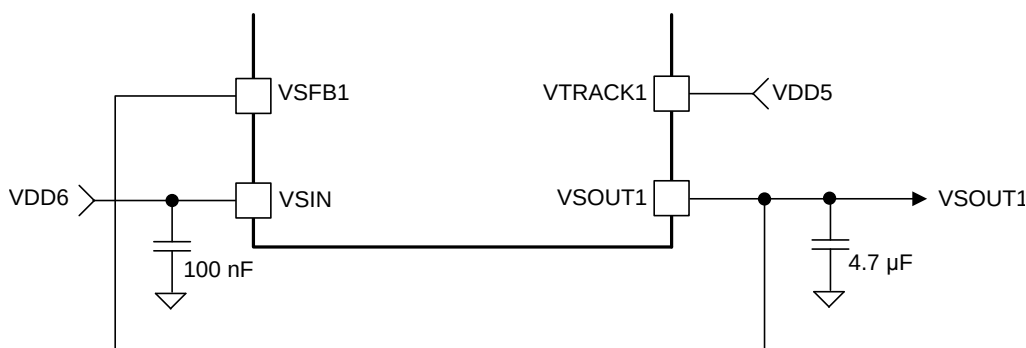


Figure 6-4. VSOUT1 设计 - 跟踪，无增益

6.2.2.4 VSOUT1 跟踪线性稳压器的替代用法 (配置为 3.3V 模式下的 6V 输出跟踪 VDD3/5)

系统具有一个需要必须跟踪 VDD3/5 电源 (在 3.3V 下运行) 的 6V 电源的传感器。

在 3.3V 模式下运行的 VDD3/5 电源连接至 VTRACK1 引脚，该引脚针对跟踪模式配置稳压器。由于输出必须具有增益以使 6V 输出跟踪 3.3V 电源，因此在 VSFB1 引脚上使用增益反馈。为了实现所需的增益，在 VSOUT1 和 VSFB1 引脚之间连接一个电阻分压器。为 R_{VSFB1} 电阻器选择 3.3k Ω 的值以平衡流过电阻分压器的电流，以实现合理的偏置电流和损耗。使用 Equation 23 计算 R_{VSFB2} 的电阻。

$$R_{VSFB2} = ([VSOUT1 \times R_{VSFB1}] / VTRACK) - R_{VSFB1} = ([6V \times 3.3k\Omega] / 3.3V) - 3.3k\Omega = 2.7k\Omega \quad (23)$$

选择标准值 2.7k Ω 。

NOTE

该电阻分压器中 R_{VSFB1} 和 R_{VSFB2} 电阻器的容差将影响 VSOUT1 调节和电压监控容差。建议使用容差为 0.1% 的电阻器。

由于所需的 VSOUT1 输出大于 5V，因此必须将 VBATP 电源用作跟踪电源。因此，将 VBATP 电源连接至 VSIN 引脚。在本机上，为 VSIN 引脚采用低 ESR 100nF 陶瓷电容器以稳定输入。

在 VSOUT1 引脚上使用本地低 ESR 4.7 μ F 陶瓷电容器以实现环路稳定。该输出可能需要更大的输出电容器，以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的稳压规格，具体取决于应用。VSOUT1 输出电容的额定值高达 10 μ F。

Figure 6-5 显示了该配置。

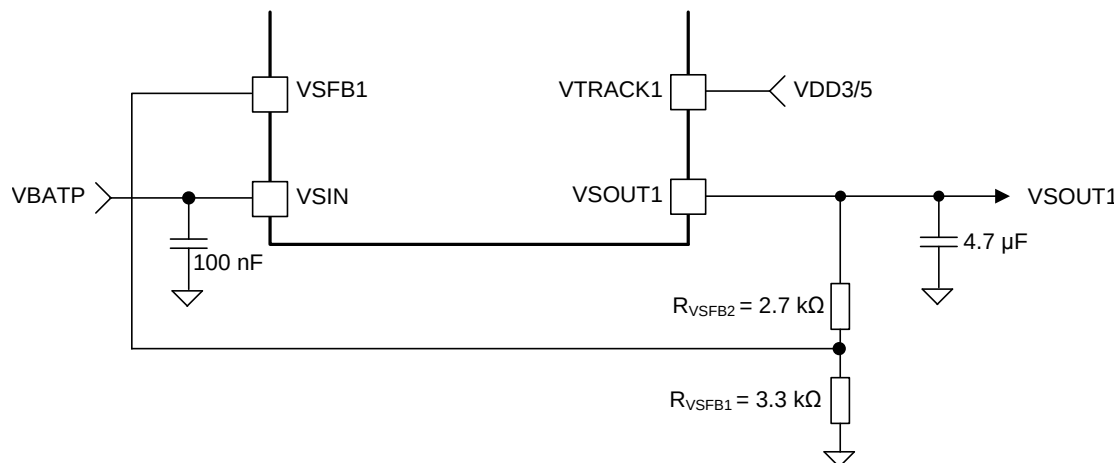


Figure 6-5. VSOUT1 设计 - 跟踪，带增益 (VDD3/5)

6.2.2.5 为从 VDD5 到 5V 输入的 9V 输出跟踪配置的 VSOUT1 跟踪线性稳压器的替代用法

系统具有一个需要必须跟踪 VDD5 电源 (在 5V 下运行) 的 9V 电源的传感器。

VDD5 电源连接至 VTRACK1, 该引脚针对跟踪模式配置稳压器。由于输出必须具有增益以使 9V 输出跟踪 5V 电源, 因此在 VSFB1 引脚上使用增益反馈。为了实现所需的增益, 在 VSOUT1 和 VSFB1 引脚之间连接一个电阻分压器。为 R_{VSFB1} 电阻器选择 $3.3\text{k}\Omega$ 的值以平衡流过电阻分压器的电流, 以实现合理的偏置电流和损耗。使用 Equation 24 计算 R_{VSFB2} 的电阻。

$$R_{VSFB2} = ([VSOUT1 \times R_{VSFB1}] / VTRACK) - R_{VSFB1} = ([9V \times 3.3\text{k}\Omega] / 5V) - 3.3\text{k}\Omega = 2.64\text{k}\Omega \quad (24)$$

选择标准值 $2.7\text{k}\Omega$ 。

NOTE

该电阻分压器中 R_{VSFB1} 和 R_{VSFB2} 电阻器的容差将影响 VSOUT1 调节和电压监控容差。建议使用容差为 0.1% 的电阻器。

由于所需的 VSOUT1 输出大于 5V, 因此必须将 VBATP 电源用作跟踪电源。因此, 将 VBATP 电源连接至 VSIN 引脚。在本机上, 为 VSIN 引脚采用低 ESR 100nF 陶瓷电容器以稳定输入。

在 VSOUT1 引脚上使用本地低 ESR $4.7\mu\text{F}$ 陶瓷电容器以实现环路稳定。该输出可能需要更大的输出电容器, 以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的稳压规格, 具体取决于应用。VSOUT1 输出电容的额定值高达 $10\mu\text{F}$ 。

Figure 6-6 显示了该配置。

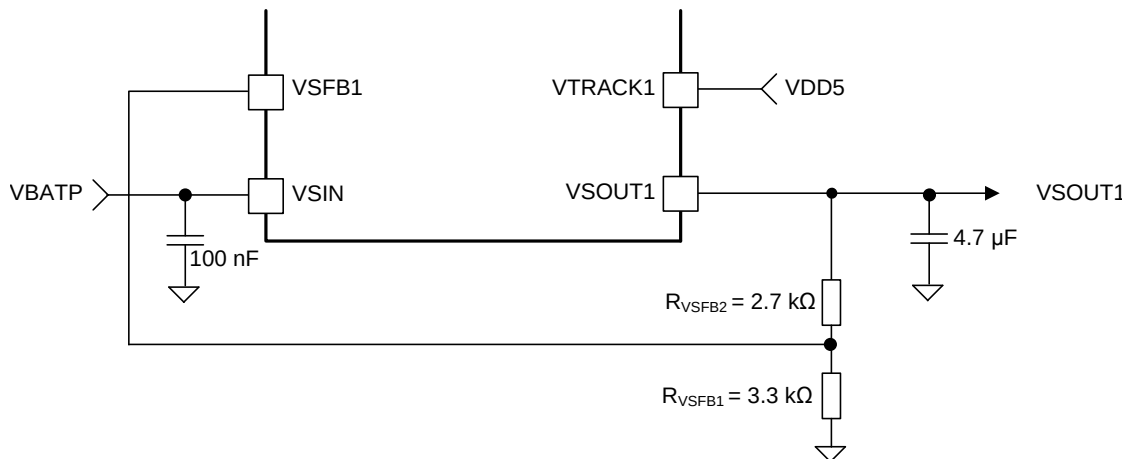


Figure 6-6. VSOUT1 设计 - 跟踪, 带增益 (VDD5)

6.2.2.6 在非跟踪模式下配置 (提供 4.5V 输出) 的 VSOUT1 跟踪线性稳压器的替代用法

如果系统需要不跟踪任何其他电源的 4.5V 电源, 则将 VTRACK1 引脚接地 (GND), 即配置为非跟踪模式稳压器。输出现在与 VSFB1 引脚上的 2.5V 固定基准电压 (V_{ref}) 成正比。由于输出必须具有增益以生成 4.5V 输出, 因此将在 VSFB1 引脚上使用增益反馈。为了实现所需的增益, 在 VSOUT1 和 VSFB1 引脚之间连接一个电阻分压器。为 RVSFB1 电阻器选择 $3.3\text{k}\Omega$ 的值以平衡流过电阻分压器的电流, 以实现合理的偏置电流和损耗。使用 Equation 25 计算 R_{VSFB2} 的电阻。

$$R_{VSFB2} = [(VSOUT1 \times R_{VSFB1})/V_{ref}] - R_{VSFB1} = [(4.5\text{V} \times 3.3\text{k}\Omega)/2.5\text{V}] - 3.3\text{k}\Omega = 2.64\text{k}\Omega \quad (25)$$

选择标准值 $2.7\text{k}\Omega$ 。

NOTE

该电阻分压器中 R_{VSFB1} 和 R_{VSFB2} 电阻器的容差将影响 VSOUT1 调节和电压监控容差。建议使用容差为 0.1% 的电阻器。

为了提高效率, VDD6 前置稳压器是电源, 因此 VDD6 输出连接至 VSIN 引脚。在本机上, 为 VSIN 引脚采用低 ESR 100nF 陶瓷电容器以稳定输入。

在 VSOUT1 引脚上使用本地低 ESR $4.7\mu\text{F}$ 陶瓷电容器以实现环路稳定。该输出可能需要更大的输出电容器, 以确保在负载瞬态期间输出不会降至低于所需的稳压规格, 具体取决于应用。VSOUT1 输出电容的额定值高达 $10\mu\text{F}$ 。

Figure 6-7 显示了该配置。

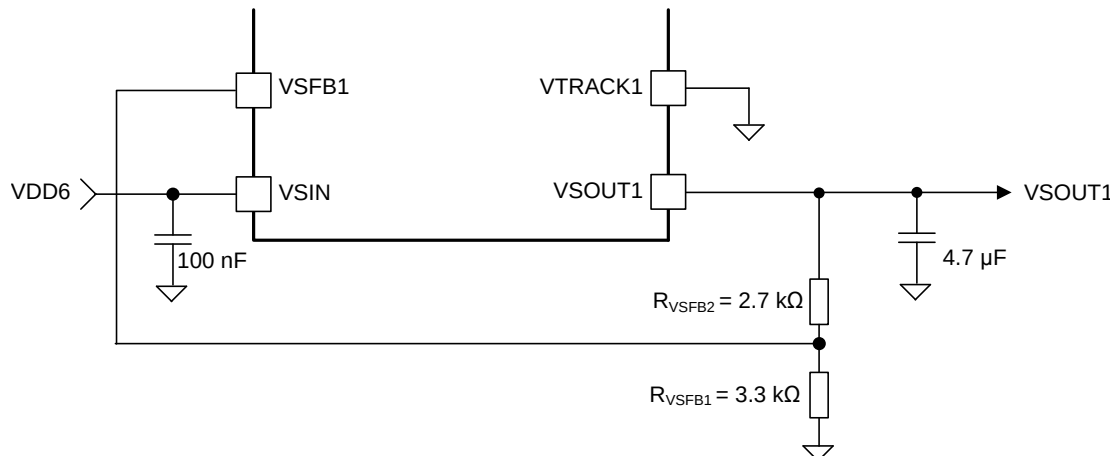


Figure 6-7. VSOUT1 设计 - 非跟踪

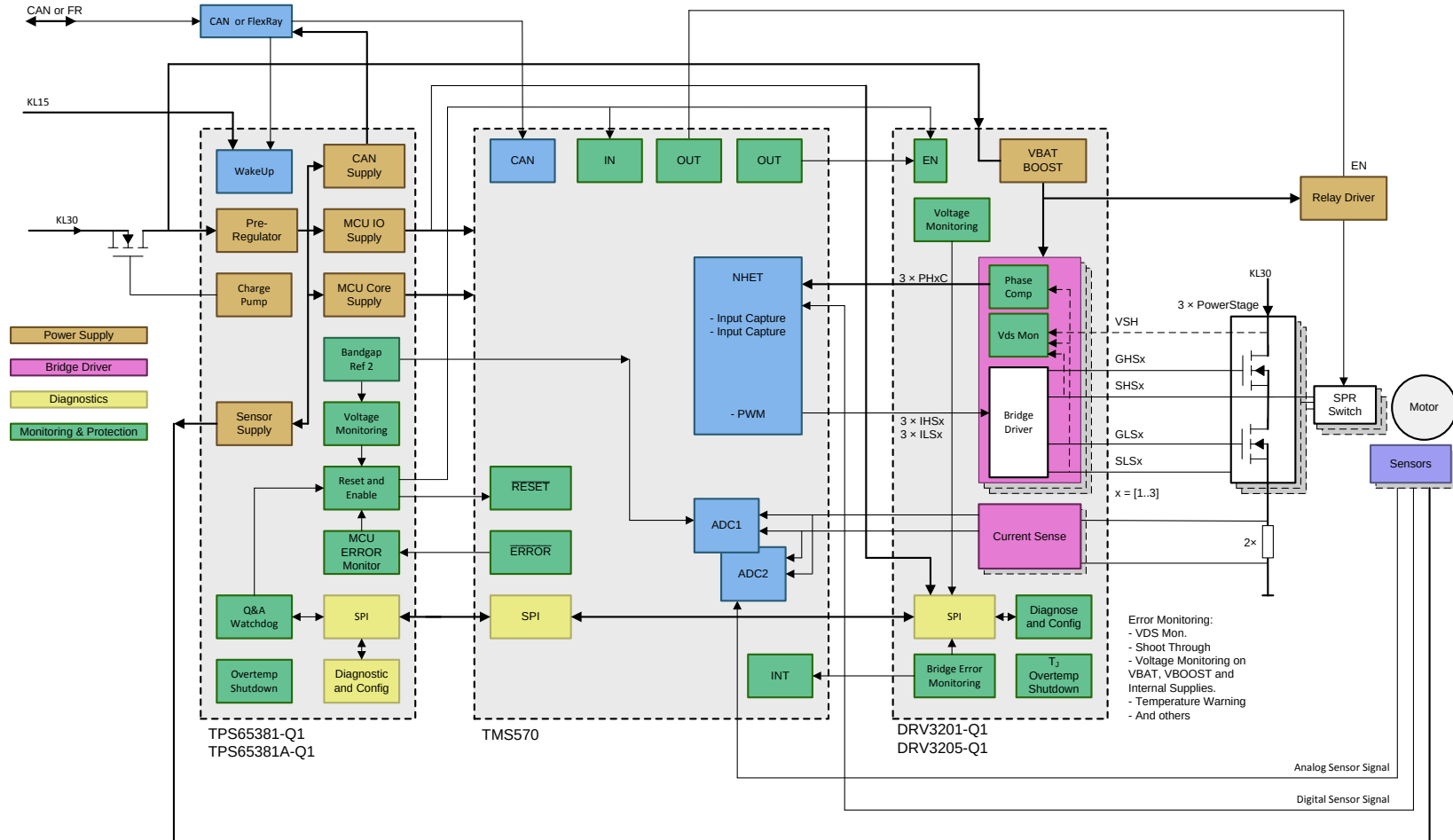
6.2.3 应用曲线

有关应用曲线, 请参阅 Table 6-1 中列出的图。

Table 6-1. 图形表

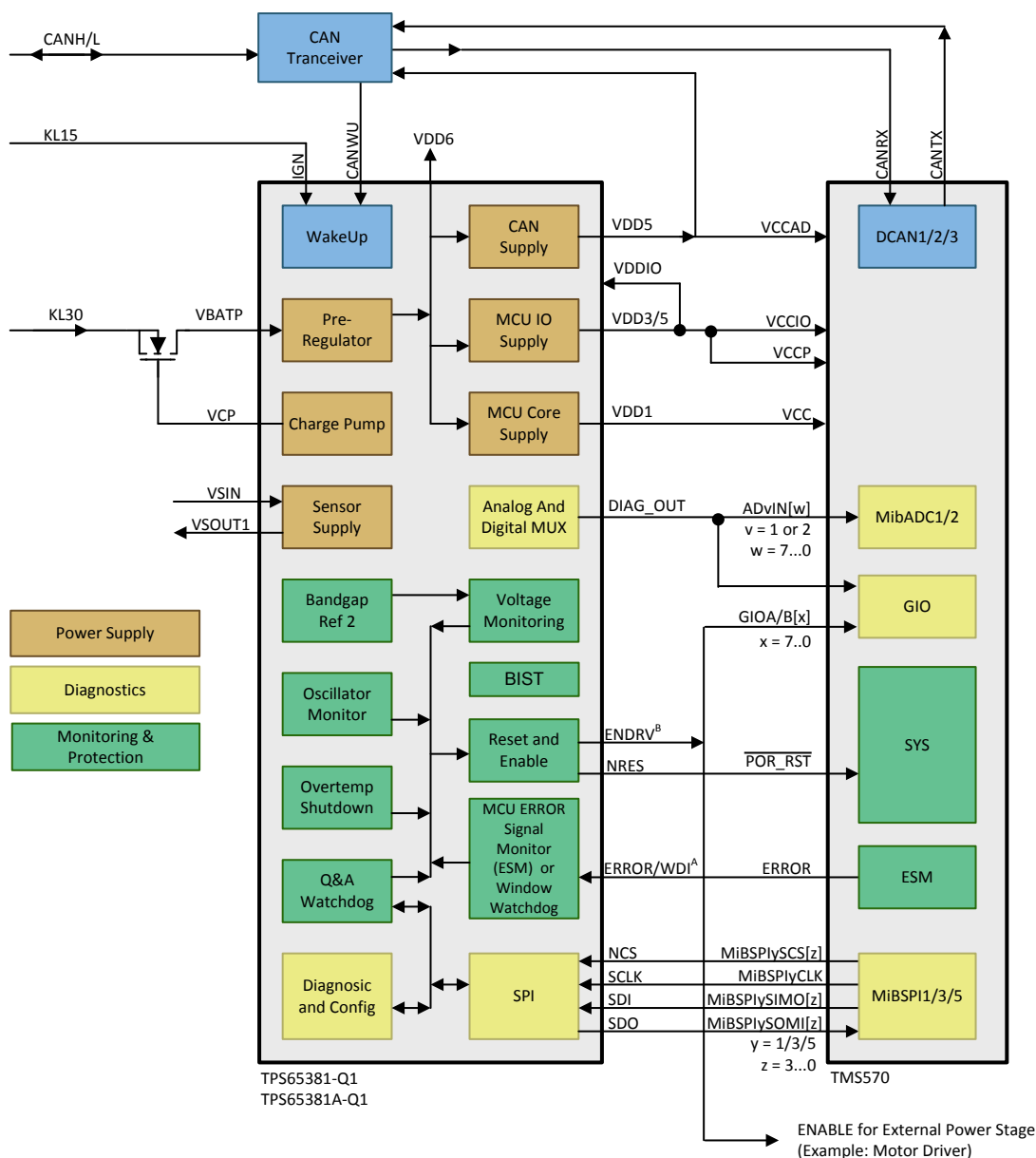
图标题	图编号
SPI SDO 缓冲器拉电流和灌电流	Figure 4-3
VDD6 降压效率	Figure 4-4

6.3 系统示例



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

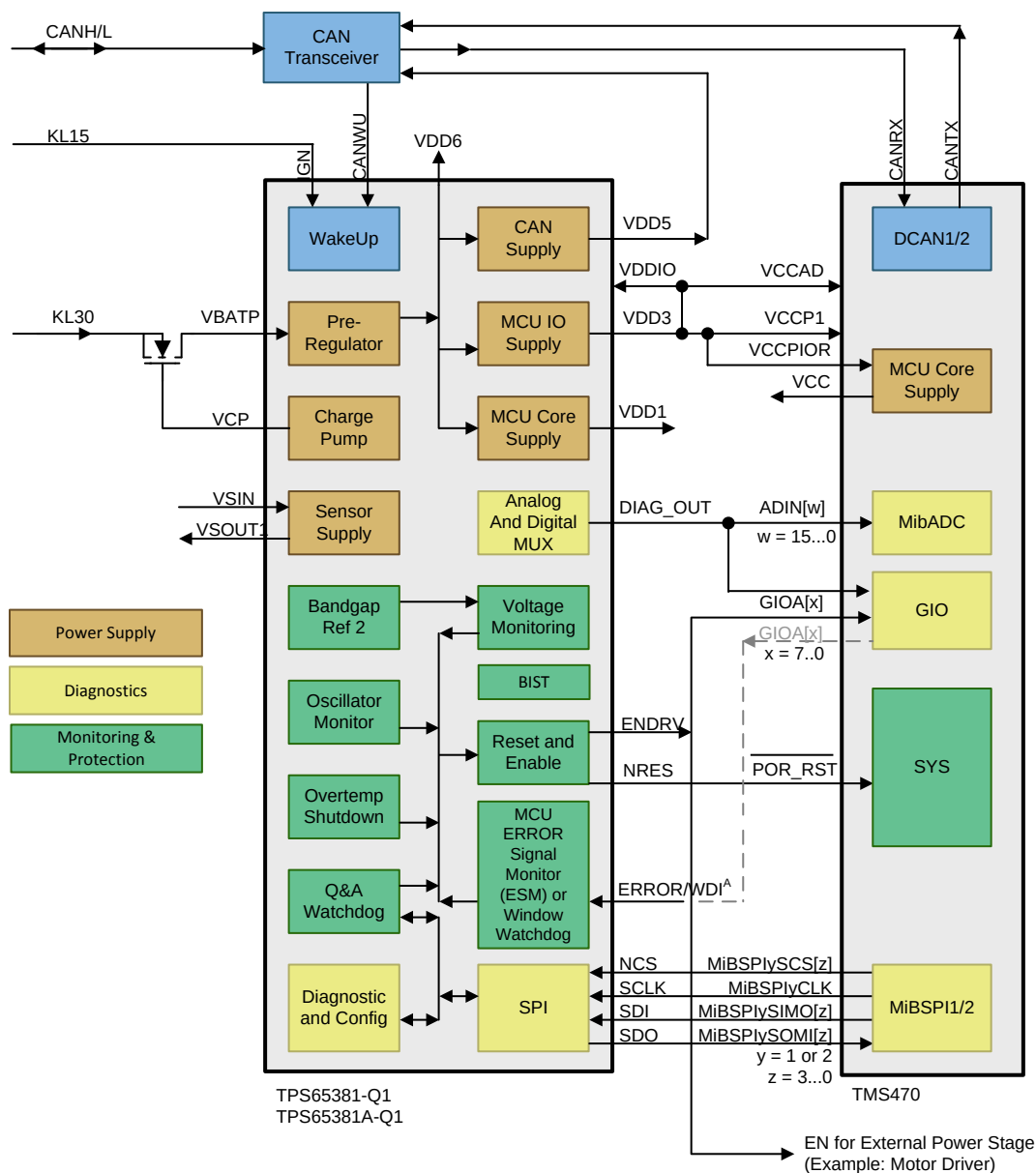
Figure 6-8. 电动助力转向示例



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

- A. ERROR/WDI 引脚可以配置为 MCU ERROR 信号监控器 (ESM) 的输入 (TMS570 双核或其他安全架构 MCU)，也可以配置为窗口安全狗输入 (TMS470 或其他单核 MCU)。
- B. ENDRV 输出可以配置为外部功率级的使能 (典型用法)，也可以选择配置为 TMS570 的热复位。

Figure 6-9. 采用 TI 的 TMS570LS 的示例 TPS65381A-Q1



Copyright © 2017, Texas Instruments Incorporated

- A. ERROR/WDI 引脚可以配置为 MCU ERROR 信号监控器 (ESM) 的输入 (TMS570 双核或其他安全架构 MCU)，也可以配置为窗口安全狗输入 (TMS470 或其他单核 MCU)。

Figure 6-10. 采用 TI 的 TMS470 (使用内部 MCU 内核电源) 的示例 TPS65381A-Q1

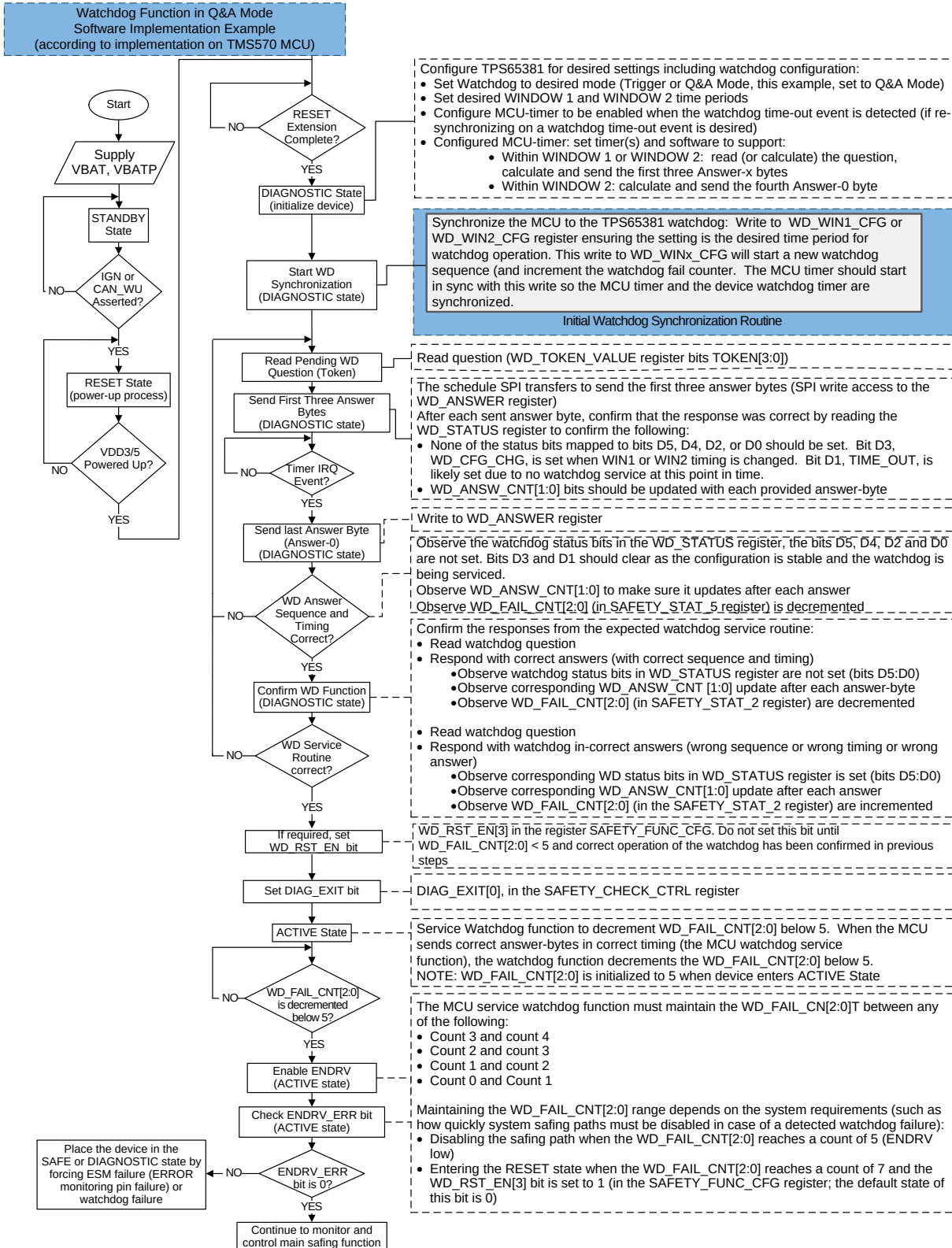


Figure 6-11. 配置 MCU 并将其与 Q&A 模式下的看门狗同步的软件流程图

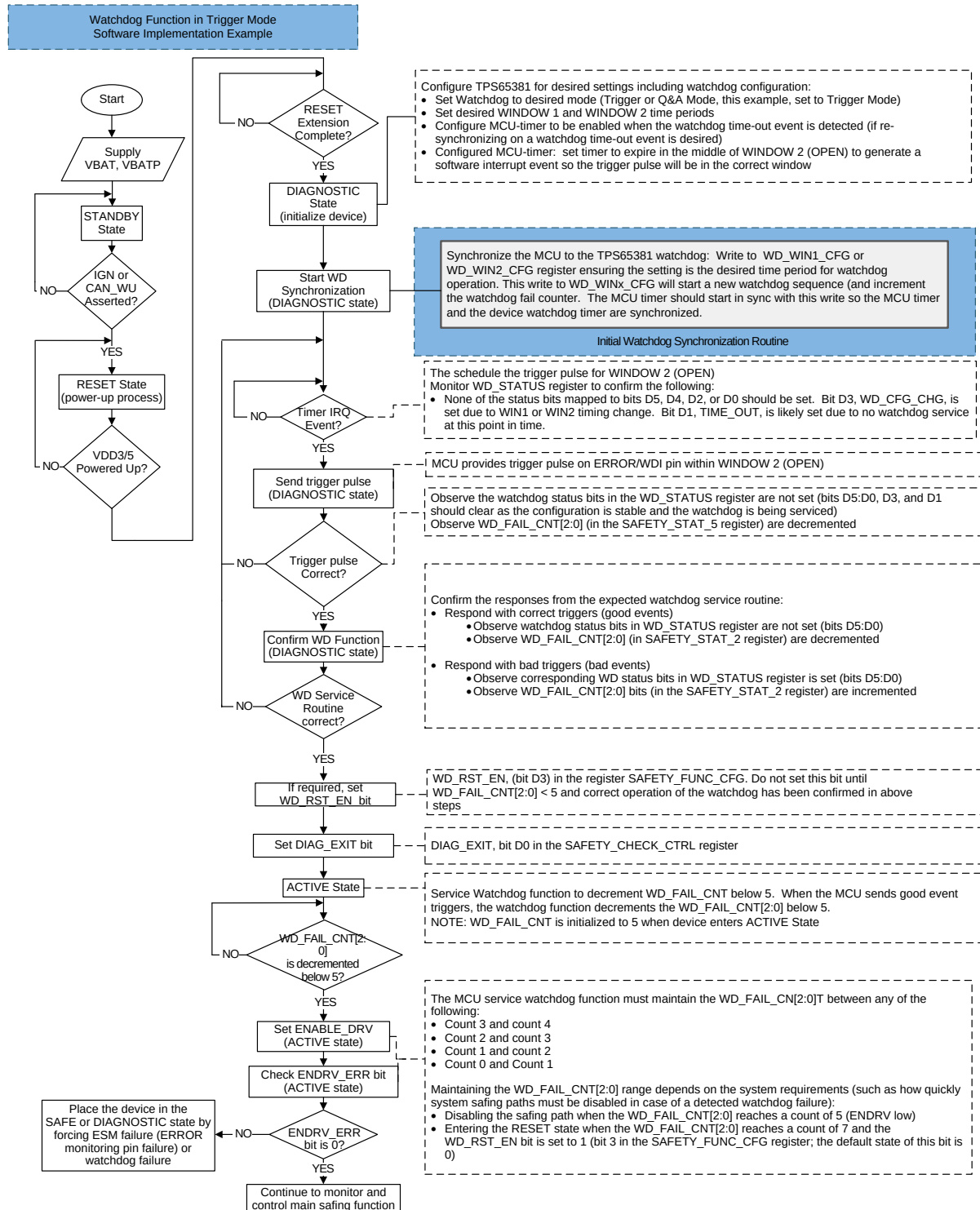


Figure 6-12. 配置 MCU 并将其与触发模式下的看门狗同步的软件流程图

7 电源建议

TPS65381A-Q1 器件旨在使用输入电压范围为 5.8V 至 36V (CAN、I/O、MCU 内核和功能传感器电源稳压器) 或 4.5V 至 5.8V (3.3V I/O 和功能 MCU 内核电压) 的电源运行。器件具有两个电源引脚：VBATP 和 VBAT_SAFING。VBATP 引脚是器件的主电源引脚。VBAT_SAFING 电源引脚用于监控 (VMON) 和 BG2 功能。VBATP 和 VBAT_SAFING 电源必须具有反向保护。VBAT_SAFING 引脚应以低阻抗连接方式连接至 VBATP 引脚，从而最大程度地减小器件电源引脚之间的电压差。有关其他电源建议，请参阅《TPS65381EVM 用户指南》。

8 布局

8.1 布局准则

8.1.1 VDD6 降压前置稳压器

- 最大程度地减小电感器、ESR 电阻器、输出电容器和二极管理开关环路的环路区域。
- 通过使用尽可能宽的引线最大程度地减小寄生引线阻抗。
- 通过使用多个通孔来最大程度地减小寄生通孔阻抗，尤其是在高电流和切换节点上。
- 在尽可能靠近引脚的位置将电感器和二极管理连接至 SDN6。
- 将二极管连接至 PGND (接地平面) 。
- 在 VDD6 输出 (电感器输出) 与 PGND 之间以串联方式连接 ESR 电阻器和输出电容器。
- 在 VDD6 输出与 PGND 之间连接 EMC 滤波电容器。
- 将 VDD6 输出连接至 VDD6 引脚，并使布线避免耦合开关节点。应最大程度地减小引线长度，并使每条引线尽可能宽。该引线是使用 VDD6 作为前置稳压器的下游稳压器的电源输入，应最大程度地减小寄生阻抗。

其他注意事项：添加用于 RC 缓冲电路的空间 (如果应用需要)。RC 以串联方式连接在 SDN6 和 PGND 引脚之间。

8.1.2 VDD1 线性稳压器控制器

- 将外部 FET 的漏极连接到 VDD6 节点，应最大程度地减少引线，从而无需额外的下游缓冲电容器。
- 将输出电容器连接到外部 FET 的源极，应最大程度地减小该引线的长度。将输出电容器连接到接地平面。
- 将栅极驱动器 VDD1_G 连接到 FET 的栅极。在 FET 的栅极和 FET 的源极之间连接电阻器，最大程度地减小引线长度。
- 用于检测和设置输出电压的电阻分压器连接在 FET 的源极 (VDD1 输出) 和 GND (器件信号接地) 之间。请勿将这些组件及其引线布置在开关节点或高电流引线附近。

8.1.3 VDD5 和 VDD3/5 线性稳压器

在 VDDx 输出和 GND 之间 (尽可能接近它们) 连接输出电容器。

8.1.4 VSOUT1 跟踪线性稳压器

- 在 VSOUT1 输出和 GND 之间 (尽可能接近它们) 连接输出电容器。
- 用于检测和设置输出电压的电阻分压器连接在 VSOUT1 和 GND (器件信号接地) 之间。请勿将这些组件及其引线布置在开关节点或高电流引线附近。
- 在 VSIN 和 PGND 引脚之间连接本地去耦电容器。最大程度地减小引线长度。
- 将跟踪电源信号连接至 VTRACK1 并远离开关节点或高电流引线。

8.1.5 电荷泵

- 在 CP1 和 CP2 引脚之间 (尽可能接近它们) 连接电容器。
- 在 VCP 引脚和 VBATP (反向保护和滤波) 电源之间连接电容器。

8.1.6 其他注意事项

- 使用接地平面。TI 建议使用实体接地平面并通过阻抗尽可能低的路径将 GND 和 PGND 连接至该接地平面。
- 最大程度地减小关键开关节点和高电流路径上的寄生阻抗。
- 将 PGNDx 和 GND 对散热垫短路。
- 如果连接至非接地平面系统, 则使用星型接地配置。对于电压检测反馈接地, 应使用连接件; 对于该星形接地, 应使用本地偏置旁路电容器接地网络。
- 在 VBATP 和 PGND 之间连接本地去耦电容器。最大程度地减小引线长度。

8.2 布局示例

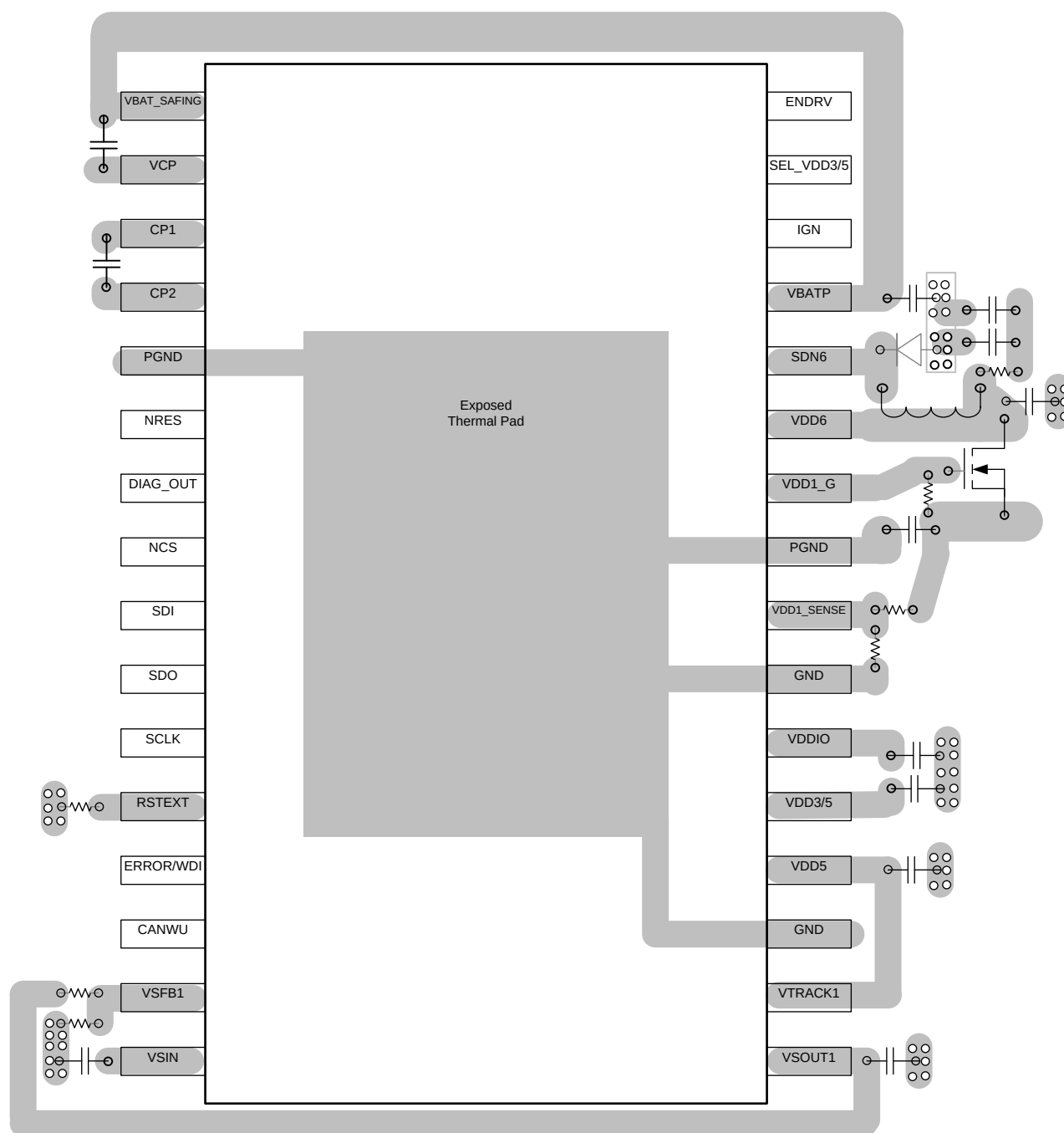


Figure 8-1. TPS65381A-Q1 板布局

8.3 功率耗散和热效应注意事项

应用中器件的功率耗散对应用的必要布局和热管理策略具有重大的影响。

用以下公式估计器件的功率耗散：

$$P_{VDD6} = (1 - \text{eff}_{VDD6}) \times 6V \times I_{VDD6}$$

其中

- P_{VDD6} 是器件中 VDD6 功率耗散的保守估计值，因为部分效率损失发生在外部的二极管和电感器中。
《TPS65381-Q1 和 TPS65381A-Q1 功耗估算器》中提供了更精确的功耗估算器。
- eff_{VDD6} 是 VDD6 降压前置稳压器的效率（根据 Figure 8-2）。
- I_{VDD6} 是来自 VDD5、VDD3/5、VDD1、VSOUT1 和连接到 VDD6 的任何外部负载的总负载电流。 (26)

$$P_{VDD5} = (6V - 5V) \times I_{VDD5} = 1V \times I_{VDD5}$$

其中

- I_{VDD5} 是 VDD5 上的负载电流。 (27)

$$P_{VDD3/5} = (6V - V_{VDD3/5}) \times I_{VDD3/5}$$

其中

- $V_{VDD3/5}$ 为 3.3V 或 5V。
- $I_{VDD3/5}$ 是 VDD3/5 上的负载电流。 (28)

$$P_{VSOUT1} = (V_{VSIN} - V_{VSOUT1}) \times I_{VSOUT1}$$

其中

- V_{VSIN} 为 6V (VDD6) 或 VBATP。
- V_{VSOUT1} 是已编程的 VSOUT1 输出电压。
- I_{VSOUT1} 是 VSOUT1 上的负载电流。 (29)

$$P_{TOT} = P_{VDD6} + P_{VDD5} + P_{VDD3/5} + P_{VSOUT1}$$

其中

- P_{TOT} 是器件中的总功率耗散。 (30)

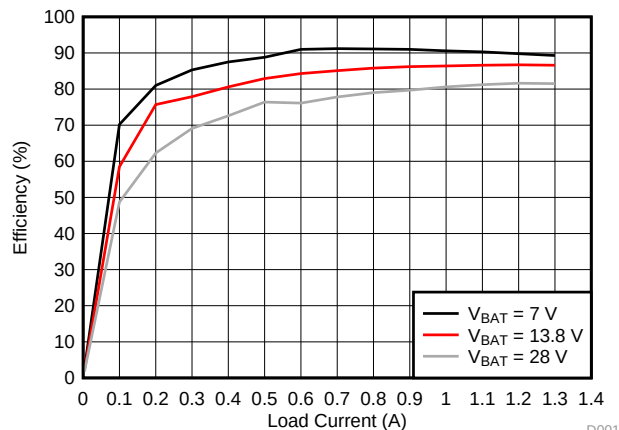


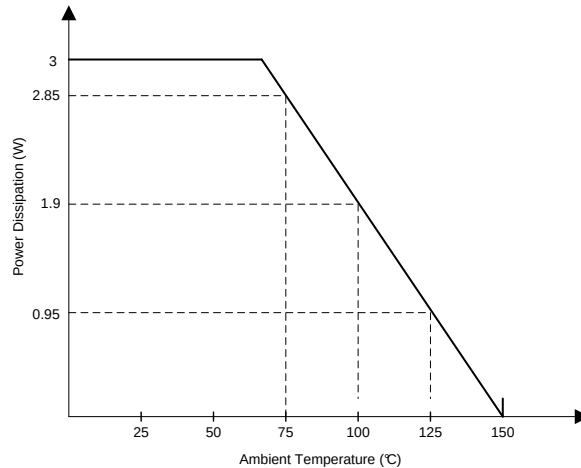
Figure 8-2. 典型 VDD6 降压器效率

器件运行的有效范围受电源电压、应用负载电流要求以及封装和印刷电路板 (PCB) 的散热特性的影响。为了使器件在宽温度范围内有用，封装、PCB 和热管理策略必须利于有效散热，从而使器件的结温保持在额定限制以内。

使用 Equation 26 至 Equation 30 来计算估计功率耗散。如用于计算 VDD6 功率耗散 (P_{VDD6}) 的公式 (Equation 27) 所示，很大一部分功率耗散由 VDD6 电源的效率决定。VDD6 电源的效率取决于负载电流和电源电压，如 Equation 27 中所示。

32 引脚 HTSSOP PowerPAD (DAP) 可帮助器件有效散热。如《PowerPad™ 热增强型封装》中所述，PowerPAD 封装在封装底部提供了外露的引线框架芯片垫。该散热垫必须直接焊接到封装下方 PCB 的铜上，以便为帮助器件散热（从而减小 $R_{\theta JC}$ ）创建有效的路径。PCB 设计必须采用导热焊盘和散热通孔，以完成热量移除子系统，《PowerPAD™ 速成》和《确保外露封装的最佳热阻性电路板布局指南》中对此进行了总结。

Figure 8-3 显示了采用 PowerPAD 的 32 引脚 HTSSOP (DCA) 封装的热降额曲线（根据 Section 4.4 中指定的 $R_{\theta JA}$ 值得出）。



- A. 在功率耗散较高和/或封装热阻较差的应用中，可能必须降低最高环境温度。最高环境温度 (T_{Amax}) 取决于最高运行结温 (T_{Jmax})、应用中器件的最大功率耗散 (P_{Dmax}) 以及应用中的部件/封装的结至环境热阻 ($R_{\theta JA}$)，计算公式如下： $T_{Amax} = T_{Jmax} - (R_{\theta JA} \times P_{Dmax})$ 。
- B. 最大功率耗散是 T_{Jmax} 、 $R_{\theta JA}$ 和 T_A 的函数。任何允许环境温度下的最大允许功率耗散为 $P_D = (T_{Jmax} - T_A) / R_{\theta JA}$ 。

Figure 8-3. 基于高 K JEDEC PCB 的功率耗散降额曲线

考虑特定应用中器件的功率耗散非常重要，这高度依赖于电源电压和负载电流、环境和板温度以及使器件的结温保持在最大结温 150°C 以下所必需的任何其他散热或冷却策略。

NOTE

VDD1 稳压器可能在外部 FET 中具有很高的功率耗散，具体取决于 VDD1 电压和负载电流。在系统级热分析中必须考虑 VDD1 稳压器的外部 FET 功率耗散。如果需要更高的效率或热性能，则可以使用直流/直流稳压器代替具有外部 FET 的线性稳压器控制器。当 VDD1 线性稳压器控制器与外部 FET 结合使用时，与 VDD1 输出电压类似，直流/直流稳压器的输出电压仍可以由 VDD1_SENSE 引脚进行监控。

NOTE

PowerPAD 散热垫未与封装的任何引线直接相连。不过，该散热垫以电气方式和热方式连接至基板，该基板是器件的接地 (GND) 和电源接地 (PGND)。

NOTE

有关热分析和设计的信息，请参阅 www.ti.com 上的 WEBENCH® 设计中心 热分析部分。

9 器件和文档支持

9.1 文档支持

9.1.1 相关文档

相关文档如下：

- [《VBAT 缓慢上升和下降时的器件行为》](#)
- [《DPI 评估 TPS65381-Q1》](#)
- [《效率评估 TPS65381-Q1》](#)
- [《TPS65381-Q1 和 TPS65381A-Q1 多轨电源的安全手册》](#)
- [《TPS65381 EVM 用户指南》](#)
- [《TPS65381-Q1 和 TPS65381A-Q1 设计检查清单》](#)
- [《TPS65381-Q1 和 TPS65381A-Q1 功耗估算器》](#)

9.2 接收文档更新通知

要接收文档更新通知，请导航至德州仪器 TI.com.cn 上的器件产品文件夹。请单击右上角的通知我 进行注册，即可收到任意产品信息更改每周摘要。有关更改的详细信息，请查看任意已修订文档中包含的修订历史记录。

9.3 社区资源

下列链接提供到 TI 社区资源的连接。链接的内容由各个分销商“按照原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的 [《使用条款》](#)。

TI E2E™ 在线社区 为了促进工程师之间的合作，我们创建了 TI 工程师对工程师 (E2E) 社区。在 e2e.ti.com 中，您可以提问、分享知识、拓展思路并与同行工程师一道帮助解决问题。

设计支持 **TI 参考设计支持** 可帮助您快速查找有帮助的 E2E 论坛、设计支持工具以及技术支持的联系信息。

9.4 商标

Hercules, C2000, PowerPAD, E2E are trademarks of Texas Instruments.
All other trademarks are the property of their respective owners.

9.5 静电放电警告



ESD 可能会损坏该集成电路。德州仪器 (TI) 建议通过适当的预防措施处理所有集成电路。如果不遵守正确的处理措施和安装程序，可能会损坏集成电路。

ESD 的损坏小至导致微小的性能降级，大至整个器件故障。精密的集成电路可能更容易受到损坏，这是因为非常细微的参数更改都可能会导致器件与其发布的规格不相符。

9.6 术语表

TI 术语表 这份术语表列出并解释术语、缩写和定义。

10 机械、封装和可订购信息

以下页中包括机械封装、封装和可订购信息。这些信息是针对指定器件可提供的最新数据。这些数据发生变化时，我们可能不会另行通知或修订此文档。如欲获取此数据表的浏览器版本，请参阅左侧的导航栏。

PACKAGING INFORMATION

Orderable part number	Status (1)	Material type (2)	Package Pins	Package qty Carrier	RoHS (3)	Lead finish/ Ball material (4)	MSL rating/ Peak reflow (5)	Op temp (°C)	Part marking (6)
TPS65381AQDAPRQ1	Active	Production	HTSSOP (DAP) 32	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-3-260C-168 HR	-40 to 125	TPS65381A
TPS65381AQDAPRQ1.A	Active	Production	HTSSOP (DAP) 32	2000 LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-3-260C-168 HR	-40 to 125	TPS65381A
TPS65381AQDAPTQ1	Active	Production	HTSSOP (DAP) 32	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-3-260C-168 HR	-40 to 125	TPS65381A
TPS65381AQDAPTQ1.A	Active	Production	HTSSOP (DAP) 32	250 SMALL T&R	Yes	NIPDAU	Level-3-260C-168 HR	-40 to 125	TPS65381A

⁽¹⁾ **Status:** For more details on status, see our [product life cycle](#).

⁽²⁾ **Material type:** When designated, preproduction parts are prototypes/experimental devices, and are not yet approved or released for full production. Testing and final process, including without limitation quality assurance, reliability performance testing, and/or process qualification, may not yet be complete, and this item is subject to further changes or possible discontinuation. If available for ordering, purchases will be subject to an additional waiver at checkout, and are intended for early internal evaluation purposes only. These items are sold without warranties of any kind.

⁽³⁾ **RoHS values:** Yes, No, RoHS Exempt. See the [TI RoHS Statement](#) for additional information and value definition.

⁽⁴⁾ **Lead finish/Ball material:** Parts may have multiple material finish options. Finish options are separated by a vertical ruled line. Lead finish/Ball material values may wrap to two lines if the finish value exceeds the maximum column width.

⁽⁵⁾ **MSL rating/Peak reflow:** The moisture sensitivity level ratings and peak solder (reflow) temperatures. In the event that a part has multiple moisture sensitivity ratings, only the lowest level per JEDEC standards is shown. Refer to the shipping label for the actual reflow temperature that will be used to mount the part to the printed circuit board.

⁽⁶⁾ **Part marking:** There may be an additional marking, which relates to the logo, the lot trace code information, or the environmental category of the part.

Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

Important Information and Disclaimer: The information provided on this page represents TI's knowledge and belief as of the date that it is provided. TI bases its knowledge and belief on information provided by third parties, and makes no representation or warranty as to the accuracy of such information. Efforts are underway to better integrate information from third parties. TI has taken and continues to take reasonable steps to provide representative and accurate information but may not have conducted destructive testing or chemical analysis on incoming materials and chemicals. TI and TI suppliers consider certain information to be proprietary, and thus CAS numbers and other limited information may not be available for release.

In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
TPS65381AQDAPRQ1	HTSSOP	DAP	32	2000	330.0	24.4	8.6	11.5	1.6	12.0	24.0	Q1
TPS65381AQDAPTQ1	HTSSOP	DAP	32	250	180.0	24.4	8.6	11.5	1.6	12.0	24.0	Q1

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
TPS65381AQDAPRQ1	HTSSOP	DAP	32	2000	350.0	350.0	43.0
TPS65381AQDAPTQ1	HTSSOP	DAP	32	250	213.0	191.0	55.0

GENERIC PACKAGE VIEW

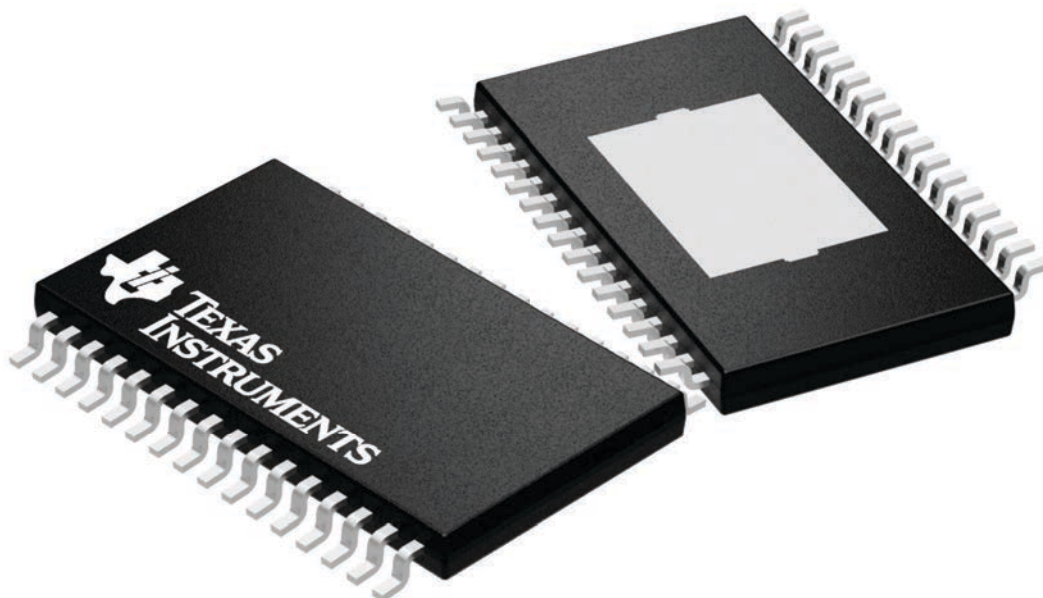
DAP 32

PowerPAD™ TSSOP - 1.2 mm max height

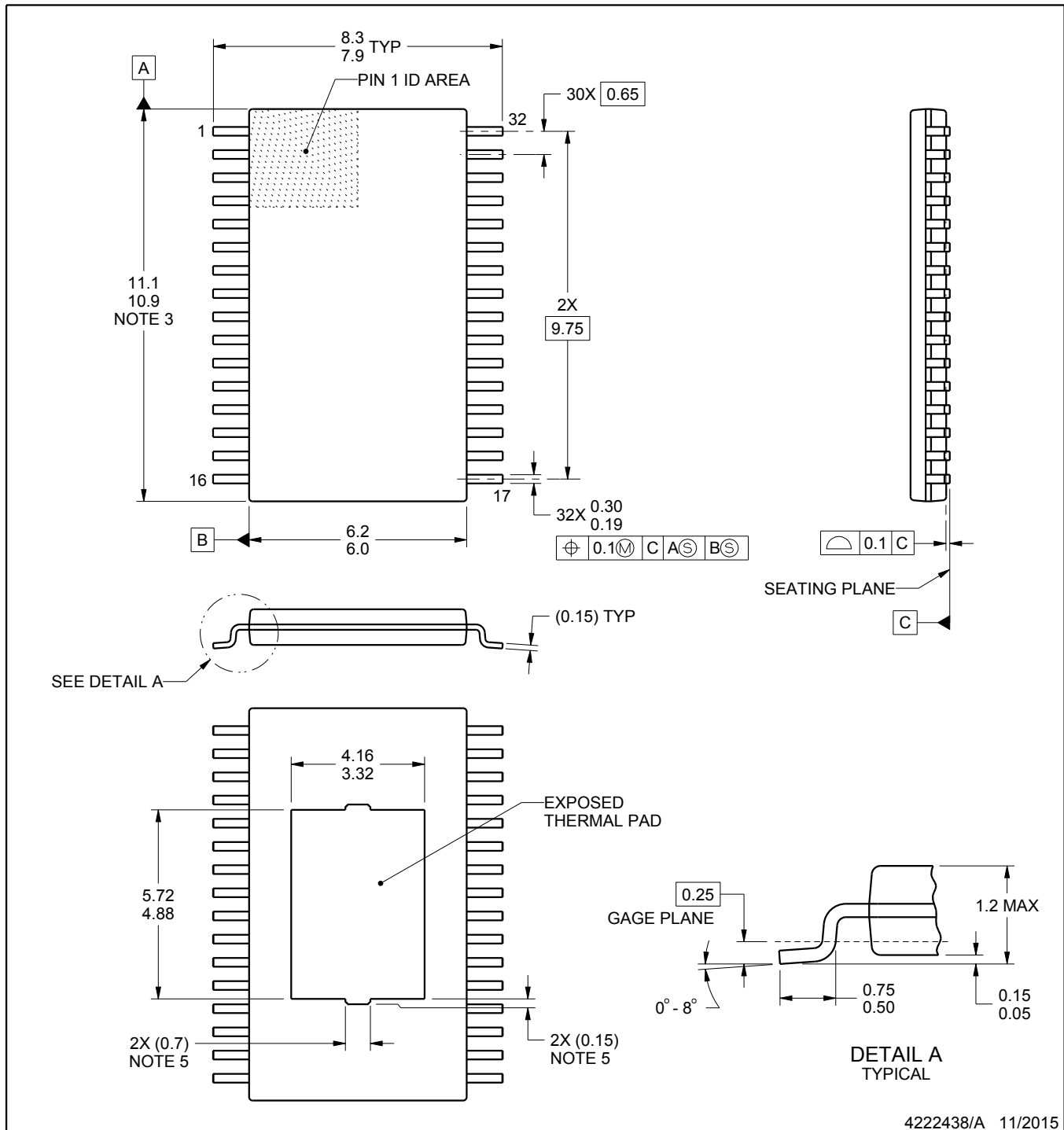
8.1 x 11, 0.65 mm pitch

PLASTIC SMALL OUTLINE

This image is a representation of the package family, actual package may vary.
Refer to the product data sheet for package details.



4225303/A



4222438/A 11/2015

NOTES:

PowerPAD is a trademark of Texas Instruments.

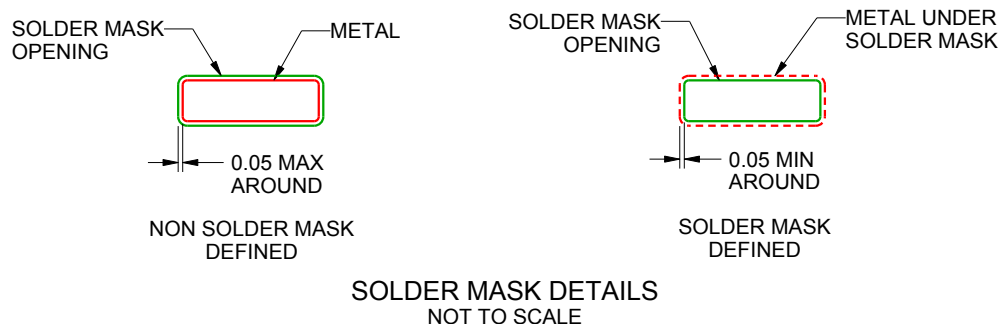
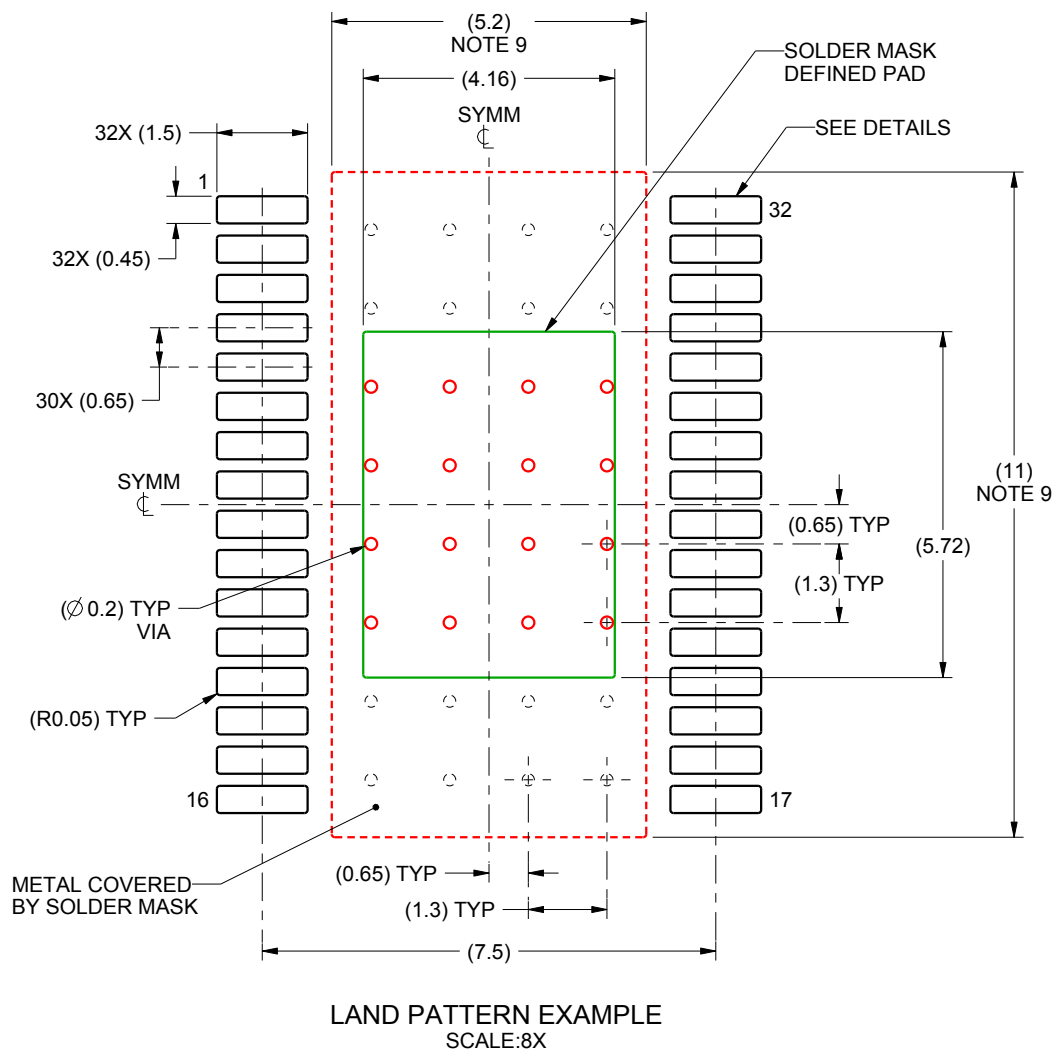
1. All linear dimensions are in millimeters. Any dimensions in parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.
3. This dimension does not include mold flash, protrusions, or gate burrs. Mold flash, protrusions, or gate burrs shall not exceed 0.15 mm per side.
4. Reference JEDEC registration MO-153, variation DCT.
5. Features may not present.

EXAMPLE BOARD LAYOUT

DAP0032B

PowerPAD™ TSSOP - 1.2 mm max height

PLASTIC SMALL OUTLINE



4222438/A 11/2015

NOTES: (continued)

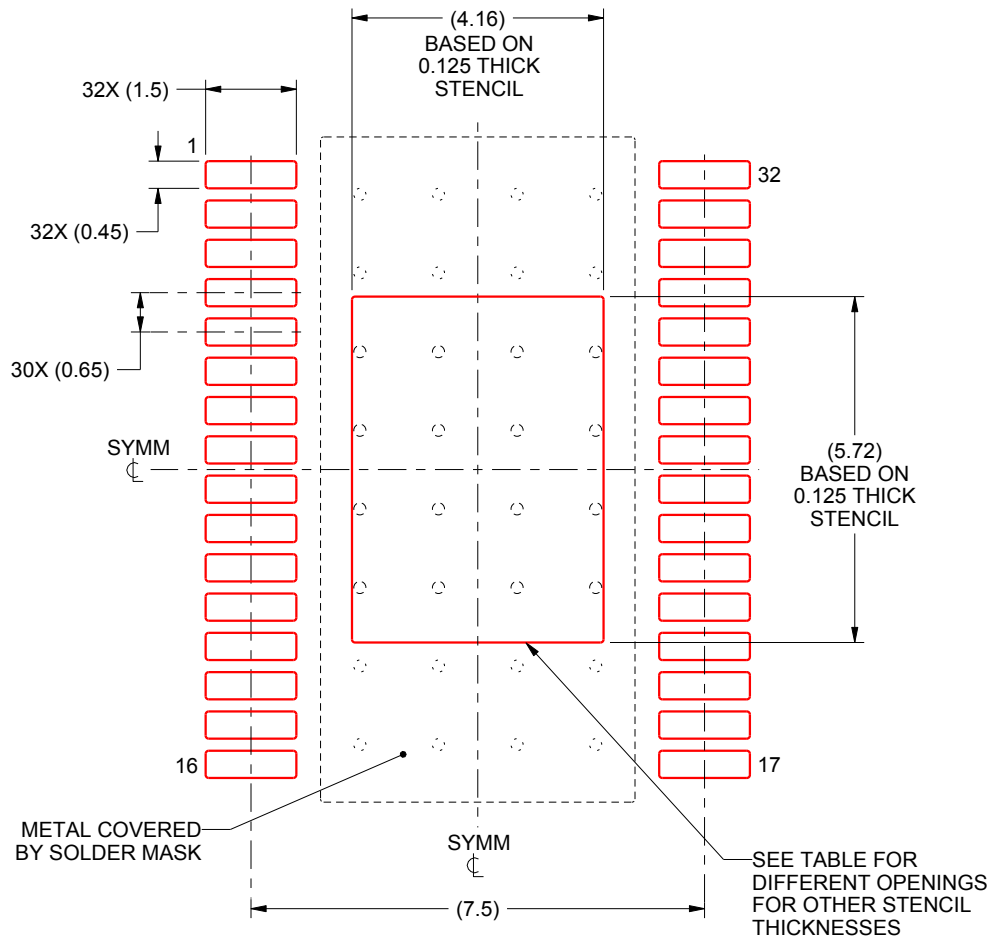
6. Publication IPC-7351 may have alternate designs.
7. Solder mask tolerances between and around signal pads can vary based on board fabrication site.
8. This package is designed to be soldered to a thermal pad on the board. For more information, see Texas Instruments literature numbers SLMA002 (www.ti.com/lit/slma002) and SLMA004 (www.ti.com/lit/slma004).
9. Size of metal pad may vary due to creepage requirement.

EXAMPLE STENCIL DESIGN

DAP0032B

PowerPAD™ TSSOP - 1.2 mm max height

PLASTIC SMALL OUTLINE



SOLDER PASTE EXAMPLE
EXPOSED PAD
100% PRINTED SOLDER COVERAGE BY AREA
SCALE:8X

STENCIL THICKNESS	SOLDER STENCIL OPENING
0.1	4.65 X 6.4
0.125	4.16 X 5.72 (SHOWN)
0.15	3.8 X 5.22
0.175	3.52 X 4.83

4222438/A 11/2015

NOTES: (continued)

10. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.
11. Board assembly site may have different recommendations for stencil design.

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、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。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
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司