

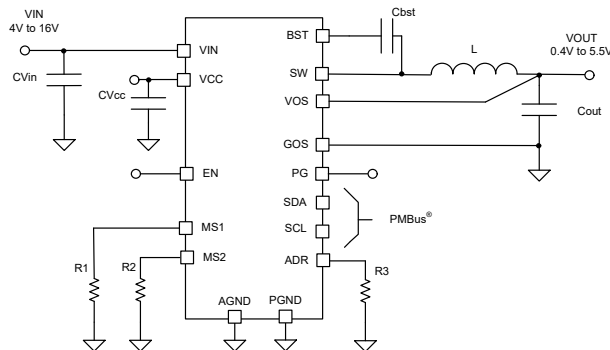
TPS544A28 4V 至 16V 输入，12A，远程传感 同步降压转换器 带 PMBus®

1 特性

- 输入电压范围为 4V 至 16V 时，无外部偏置
- 输入电压范围为 2.7V 至 16V 时，有外部偏置
- 支持 3.1V 至 4.5V 外部 VCC 辅助电源
- 8.5mΩ 和 3.0mΩ MOSFET ($V_{VCC} = 3.3V$)
- 12A 持续输出电流
- 符合 PMBus® 1.4 标准
- 针对效率和热性能优化的 19 引脚 WQFN-HR 封装
- 1% 输出电压精度，有内部反馈， $T_J = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $+150^{\circ}\text{C}$
- 0.4V 至 5.5V 输出电压范围
- 差分遥感
- D-CAP4 模式具有超快负载阶跃响应，支持所有陶瓷输出电容器
- 用户可编程的 NVM
- 可选自动跳 Eco-mode，用以在轻负载情况下实现高效率
- 实现可编程谷值电流限制
- 500kHz、600kHz、800kHz、1.0MHz、1.2MHz、1.4MHz 可选开关频率
- 可编程软启动时间
- 预偏置启动功能
- 开漏电源正常状态输出
- 过压和欠压故障保护
- 3mm × 3mm (0.4mm 引脚间距) 和 3mm × 3.5mm (0.5 引脚间距)，19 引脚 QFN 封装
- 与 20A TPS544B28 引脚对引脚兼容

2 应用

- 数据中心计算
- 数据中心网络
- 工业自动化
- 基带单元 (BBU)



简化版原理图

3 说明

TPS544A28 器件是一款具有自适应导通时间 D-CAP4 控制模式的高效率、小尺寸同步降压转换器。该控制方法无需外部补偿网络，即可在整个输出电压范围内提供较小的最短导通时间和快速负载瞬态响应。

TPS544A28 器件具有差分遥感功能、高性能集成 MOSFET、 $\geq 6A$ 时 $\pm 7.5\%$ 的电流遥测精度、并支持内部反馈、 $V_{OSL} = 1$ 或 0.5、 $T_J = 0^{\circ}\text{C}$ 至 $+85^{\circ}\text{C}$ 条件下 0.5% 的输出电压精度。该器件具有精确的负载和线路调整率，并支持 Eco-mode 或强制连续导通模式 (FCCM) 工作。

PMBus® 接口具有 1MHz 时钟支持，为器件配置提供了便捷和标准化的数字接口，并且实现了输出电压、输出电流和内部芯片温度遥测。引脚配置选项可用于配置以下项：过流限制、故障响应、内部或外部反馈、输出电压选择以及开关频率。内部 NVM 还可用于存储各种 PMBus 参数。

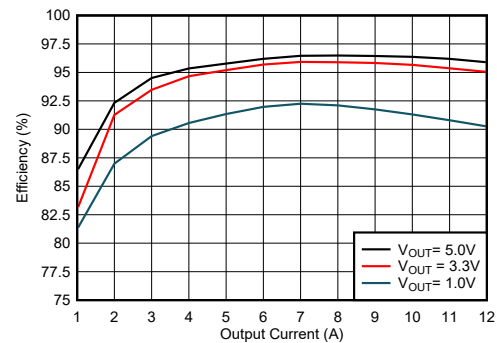
TPS544A28 是一款无铅器件，符合 RoHS 标准，无需豁免。

封装信息

器件型号	封装 ⁽¹⁾	封装尺寸 ⁽²⁾
TPS544A28	VAN (WQFN-HR, 19)	3mm × 3mm
	RBH (WQFN-HR, 19)	3mm × 3.5mm

(1) 有关更多信息，请参阅节 12。

(2) 封装尺寸 (长 × 宽) 为标称值，并包括引脚 (如适用)。



典型应用效率 ($V_{IN} = 12V$ ，外部 $V_{CC} = 3.3V$ ， $F_{sw} = 800kHz$ ， $L = 550nH$ ， $1.4m\Omega$)



内容

1 特性	1	8 对寄存器进行编程	33
2 应用	1	8.1 寄存器映射.....	34
3 说明	1	9 应用和实施	78
4 相关产品	3	9.1 应用信息.....	78
5 引脚配置和功能	4	9.2 典型应用.....	78
6 规格	6	9.3 电源相关建议.....	84
6.1 绝对最大额定值.....	6	9.4 布局.....	85
6.2 ESD 等级.....	6	10 器件和文档支持	88
6.3 建议运行条件.....	6	10.1 文档支持.....	88
6.4 热性能信息.....	7	10.2 接收文档更新通知.....	88
6.5 电气特性.....	7	10.3 支持资源.....	88
6.6 典型特性.....	11	10.4 商标.....	88
7 详细说明	15	10.5 静电放电警告.....	88
7.1 概述.....	15	10.6 术语表.....	88
7.2 功能方框图.....	15	11 修订历史记录	88
7.3 特性说明.....	16	12 机械、封装和可订购信息	89
7.4 器件功能模式.....	32		

4 相关产品

器件型号	最大输出电压	V _O 调节	引脚配置灵活性	数字接口	遥测
TPS548B23	20A	0.5V 至 5.5V	内部、外部 FB，F _{SW} ， FCCM/PFM，OCP，断续/ 锁存，SS 时间	不适用	否
TPS548A23	12A				
TPS544B28	20A	0.4V 至 5.5V		PMBus®	是
TPS544A28	12A				

5 引脚配置和功能

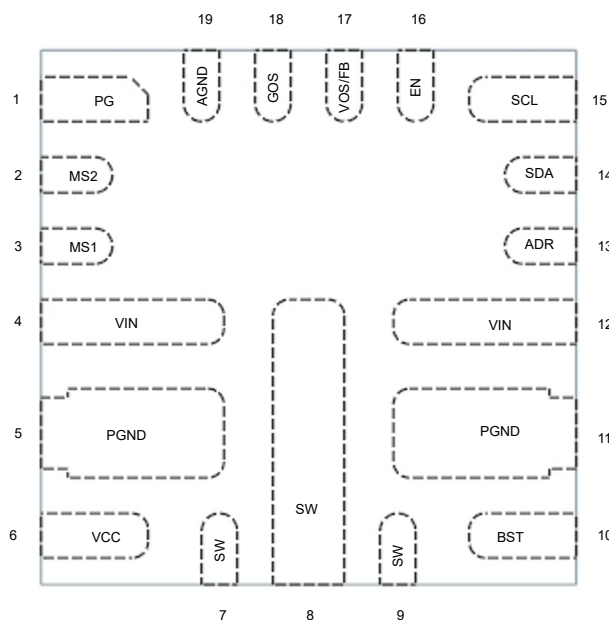


图 5-1. VAN 封装，19 引脚，3mm × 3mm (0.4mm 引脚间距) WQFN-HR (顶视图)

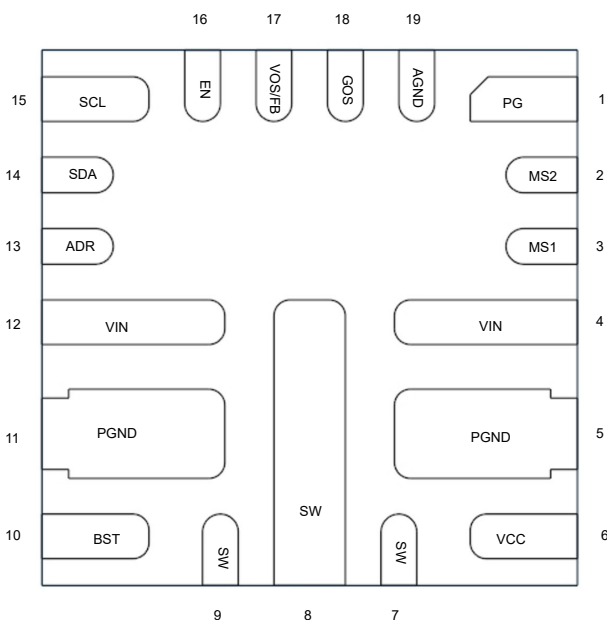


图 5-2. VAN 封装，19 引脚，3mm × 3mm (0.4mm 引脚间距) WQFN-HR (底视图)

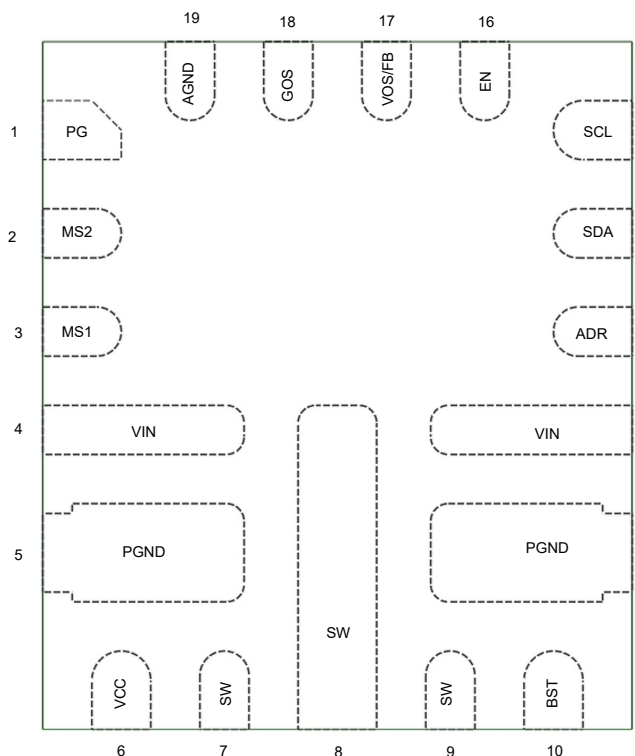


图 5-3. RBH 封装，19 引脚，3mm × 3.5mm (0.5mm 引脚间距) WQFN-HR (顶视图)

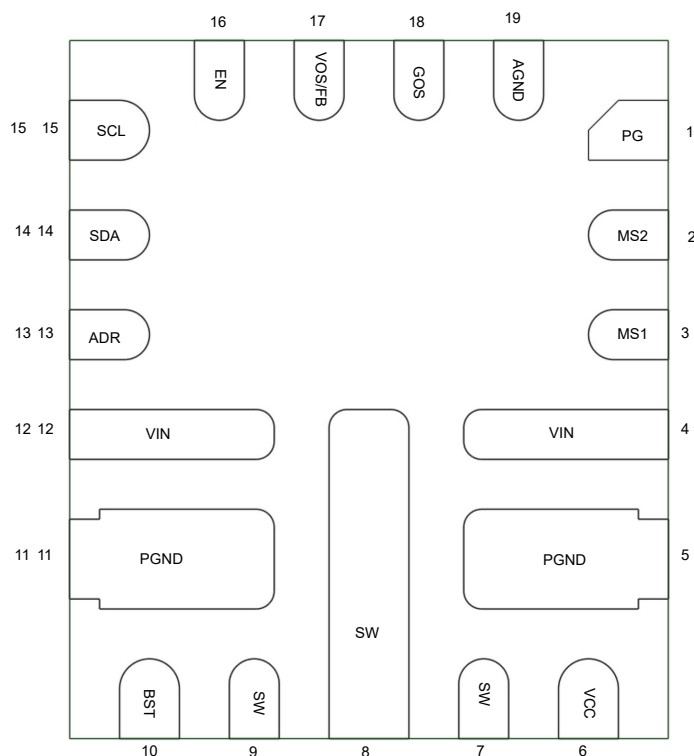


图 5-4. RBH 封装，19 引脚，3mm × 3.5mm (0.5mm 引脚间距) WQFN-HR (底视图)

表 5-1. 引脚功能

引脚		类型 ⁽¹⁾	说明
名称	否		
PG	1	O	开漏电源正常状态信号。将外部上拉电阻器连接到电压源。当 FB 电压超出指定限值时，PG 在指定的延迟后变为低电平。
MS2	2	I	多功能选择引脚。在 MS2 引脚与 AGND 之间连接一个电阻器，用于选择输出电压设置 VOUT_SCALE_LOOP 以及内部或外部反馈。
MS1	3	I	多功能选择引脚。从 MS1 引脚至 AGND 连接一个电阻器，可选择开关频率、谷值电流限制阈值和软启动时间。
VIN	4、12	P	功率级 MOSFET 和内部 LDO 的电源输入引脚。应将 VIN 引脚和 PGND 引脚之间的去耦输入电容器尽可能靠近放置。需要靠近 IC 在每个 VIN 和 PGND 之间连接一个电容器。
PGND	5、11	G	功率级接地回路。此引脚在内部连接到低侧 MOSFET 的源极。在 PGND 引脚下方放置尽可能多的过孔，并尽可能靠近 PGND 引脚。此操作可以更大限度减小寄生阻抗并降低热阻。
VCC	6	P	内部 3V LDO 输出。可将 3.1V 至 4.5V 的外部辅助电源连接到该引脚以减少内部 LDO 上的功率损耗。该引脚上的电压源为内部电路和栅极驱动器供电。从 VCC 引脚到 PGND 之间连接一个额定电压大于 6.3V 的 1 μ F 陶瓷电容器进行旁路。将此电容器尽可能靠近 VCC 和 PGND 引脚放置，以最大限度降低环路阻抗。
SW	7、8、9	O	电源转换器的输出开关端子。将该引脚连接到输出电感器。
BST	10	I/O	内部高侧 MOSFET 栅极驱动器（升压端子）的电源。从该引脚到 SW 节点之间连接自举电容器。
ADR	13	I	PMBus® 地址选择引脚。从 ADR 引脚至 AGND 连接一个电阻器，选择 PMBus 器件地址和故障恢复（断续或锁存）模式。
SDA	14	I	PMBus® 双向串行数据引脚
SCL	15	I	PMBus® 串行时钟引脚
EN	16	I	使能引脚。使能引脚可开启或关闭直流/直流开关转换器。在启动前将 EN 引脚悬空会禁用转换器。EN 引脚上施加的最大建议电压为 5.5V。TI 不建议将 EN 引脚直接连接到 VIN 引脚。
VOS/FB	17	I	输出电压反馈输入。差分遥感电路的负输入端，连接到负载侧的 Vout 检测点。当配置为外部反馈时，VOUT 与 GOS（在 FB 引脚上抽头）之间的电阻分压器可设置输出电压。
GOS	18	I	差分遥感电路的负输入端。连接到负载附近的接地检测点。
AGND	19	G	内部控制电路的模拟地回路和基准。

(1) I = 输入，O = 输出，P = 电源，G = 接地

6 规格

6.1 绝对最大额定值

在工作结温范围内测得 (除非另有说明) ⁽¹⁾

		最小值	最大值	单位
引脚电压	VIN	-0.3	19	V
引脚电压	SW - PGND, 直流	-0.3	19	V
引脚电压	SW - PGND, 瞬态 < 10ns	-4	20	V
引脚电压	VIN - SW, 直流	-0.3	19	V
引脚电压	VIN - SW, 瞬态 < 10ns	-3	25	V
引脚电压	BOOT - PGND	-0.3	24.5	V
引脚电压	BOOT - SW	-0.3	5.5	V
引脚电压	MS1、MS2、SDA、SCL、VCC	-0.3	5	V
引脚电压	VOS/FB、PG、EN	-0.3	6	V
引脚电压	GOS、PGND	-0.3	0.3	V
灌电流	PG		15	mA
工作结温	T _J	-40	150	°C
存储温度	T _{stg}	-55	150	°C

- (1) 超出“绝对最大额定值”运行可能会对器件造成永久损坏。“绝对最大额定值”并不表示器件在这些条件下或在“建议运行条件”以外的任何其他条件下能够正常运行。如果超出“建议运行条件”但在“绝对最大额定值”范围内使用，器件可能不会完全正常运行，这可能影响器件的可靠性、功能和性能并缩短器件寿命。

6.2 ESD 等级

			值	单位
V _(ESD)	静电放电	人体放电模型 (HBM), 符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 标准 ⁽¹⁾	±2000	V
		充电器件模型 (CDM), 符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-002 标准 ⁽²⁾	±500	

- (1) JEDEC 文档 JEP155 指出：500V HBM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。

- (2) JEDEC 文档 JEP157 指出：250V CDM 时能够在标准 ESD 控制流程下安全生产。

6.3 建议运行条件

在工作结温范围内测得 (除非另有说明)

			最小值	标称值	最大值	单位
V _{IN}	输入电压范围	内部 LDO	4		16	V
V _{IN}	输入电压范围	3.1V ≤ V _{VCC} 外部偏置 ≤ 4.5V	2.7		16	V
V _{IN}	输入电压范围	V _{VCC} ≤ 3.6V, -10°C ≤ T _J ≤ 125°C	4		17	V
引脚电压		V _{GOS} 与 V _{AGND} 间的关系	-0.1		0.1	V
		EN、PG	-0.1		5.5	V
V _{VCC}	外部偏置范围	V _{VIN} ≤ 16V	3.1		4.5	V
V _{VCC}	外部偏置范围	16V < V _{VIN} ≤ 17V, -10°C ≤ T _J ≤ 125°C,	3.1		3.6	V
V _{OUT}	输出电压范围	V _{OUT}	0.4		5.5	V
I _{PG}	电源正常灌电流	PG			10	mA
I _{OUT}	输出电流	SW			12	A
I _{LPEAK}	最大峰值电感器电流	SW			31	A
T _J	工作结温		-40		150	°C

6.4 热性能信息

热指标 ⁽¹⁾		TPS544A28				单位
		VAN (WQFN-HR、JEDEC 布局)	VAN (WQFN-HR、应用布局、6 层 PCB)	RBH (WQFN-HR、JEDEC 布局)	RBH (WQFN-HR、应用布局、6 层 PCB)	
		19 引脚	19 引脚	19 引脚	19 引脚	
$R_{\theta JA}$	结至环境热阻	59	19.0 ⁽²⁾	54.4	18.8 ⁽²⁾	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	结至外壳 (顶部) 热阻	32.6	不适用 ⁽³⁾	30.9	不适用 ⁽³⁾	°C/W
$R_{\theta JB}$	结至电路板热阻	18.4	不适用 ⁽³⁾	21.5	不适用 ⁽³⁾	°C/W
ψ_{JT}	结至顶部特征参数	0.77	不适用 ⁽³⁾	1.0	不适用 ⁽³⁾	°C/W
ψ_{JB}	结至电路板特征参数	18.4	不适用 ⁽³⁾	21.5	不适用 ⁽³⁾	°C/W

(1) 有关新旧热指标的更多信息，请参阅[半导体和 IC 封装热指标应用手册](#)。

(2) 在 TPS544B28EVM 上测得，器件中耗散 1.0W。

(3) 热测试或仿真设置不适用于应用布局。

6.5 电气特性

$T_J = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $+150^{\circ}\text{C}$ ， $V_{VCC} = 3.3\text{V}$ (外部)， $V_{VIN} = 4\text{V}$ 至 16V 。典型值是在 $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ 和 $V_{VIN} = 12\text{V}$ 条件下测得的 (除非另有说明)。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
电源						
$I_{Q(VIN)}$	VIN 静态电流	不进行开关， $V_{EN} = 2\text{V}$ ， $V_{FB} = V_{FB_REG} + 50\text{mV}$ ，VCC 引脚上无外部辅助电源		2800		μA
$I_{Q(VIN)}$	采用外部 VCC 辅助电源时的 VIN 静态电流	$T_J = 25^{\circ}\text{C}$ ， $V_{IN} = 12\text{V}$ ， $V_{EN} = 2\text{V}$ ， $V_{FB} = V_{FB_REG} + 10\text{mV}$ (非开关状态)，VCC 引脚上具有 3.3V 外部偏置		250	400	μA
$I_{Q(VCC)}$	VCC 静态电流	$T_J = 25^{\circ}\text{C}$ ， $V_{IN} = 12\text{V}$ ， $V_{EN} = 2\text{V}$ ， $V_{FB} = V_{FB_REG} + 10\text{mV}$ (非开关状态)，VCC 引脚上具有 3.3V 外部偏置		2500	4500	μA
I_{VCC}	VCC 外部偏置电流 ⁽¹⁾	$T_J = 25^{\circ}\text{C}$ ， $V_{IN} = 12\text{V}$ ， $V_{EN} = 2\text{V}$ ，常规开关， $V_{OUT} = 1.0\text{V}$ ， $f_{SW} = 600\text{kHz}$ ，VCC 引脚上具有 3.3V 外部偏置		10		mA
I_{VCC}	VCC 外部偏置电流 ⁽¹⁾	$T_J = 25^{\circ}\text{C}$ ， $V_{IN} = 12\text{V}$ ， $V_{EN} = 2\text{V}$ ，常规开关， $V_{OUT} = 1.0\text{V}$ ， $f_{SW} = 1200\text{kHz}$ ，VCC 引脚上具有 3.3V 外部偏置		16		mA
内部 LDO (VCC)						
V_{VCC}	内部 LDO 输出电压		2.85	3.0	3.1	V
I_{VCC}	内部 LDO 短路电流限制	$V_{VIN} = 12\text{V}$	50	180		mA
UVLO						
$V_{INUVLO(R)}$	VIN UVLO 上升阈值	V_{IN} 上升，VCC 引脚上 3.3V 外部偏置	2.35	2.4	2.5	V
$V_{INUVLO(F)}$	VIN UVLO 下降阈值	V_{IN} 下降，VCC 引脚上 3.3V 外部偏置	2.3	2.35	2.4	V
$V_{INUVLO(H)}$	VIN UVLO 迟滞			0.15		V
ENABLE						
$V_{EN(R)}$	EN 电压上升阈值	EN 上升，启用开关	1.15	1.2	1.25	V
$V_{EN(F)}$	EN 电压下降阈值	EN 下降，禁用开关	0.95	1.0	1.05	V
$V_{EN(H)}$	EN 电压迟滞			200		mV
$I_{EN(Hys)}$	EN 引脚迟滞电流	$EN > V_{EN(R)}$		5		μA
	EN 内部下拉电阻	EN 引脚至 AGND	0.74	1	1.27	$\text{m}\Omega$
PINSTRAP						
R_{MSX_TRIP}	MSx 电阻阶跃范围精度		-2%		+ 2%	
串行接口						
$V_{IH(SDx)}$	SDA、SCL 上的高电平输入电压		1.35			V
$V_{IL(SDx)}$	SCL、SDA 上的低电平输入电压				0.8	

6.5 电气特性 (续)

$T_J = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $+150^{\circ}\text{C}$, $V_{VCC} = 3.3\text{V}$ (外部), $V_{VIN} = 4\text{V}$ 至 16V 。典型值是在 $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ 和 $V_{VIN} = 12\text{V}$ 条件下测得的 (除非另有说明)。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V _{th_rise} (SDx)	SCL、SDA 上升阈值		1.03	1.1	1.17	V
V _{th_fall} (SDx)	SCL、SDA 下降阈值		0.84	0.9	0.96	V
V _{th_hys} (SDx)	SCL、SDA 上的迟滞		0.188	0.2	0.212	V
I _{IH} (SDx)	流入 SCL、SDA 的输入高电平电流		-10		10	μA
I _{IL} (SDx)	流入 SCL、SDA 的输入低电平电流		-10		10	μA
V _{OL} (SDx)	SDA 上的输出低电平电压	V _{CC} ≥ 4.5V, I _{pin} = 20mA			0.4	V
I _{OH} (SDx)	流入 SDA 的输出高电平开漏漏电流	V _{pin} = 5.5V			10	μA
I _{OL} (SDx)	PMB_DATA 上的输出低电平开漏灌电流	V _{pin} = 0.4V	20			mA
C _{PIN_SDx}	SCL 和 SDA 引脚输入电容 ⁽¹⁾	V _{pin} = 0.1V 至 1.35V			5	pF
f _{SDxmin}	最小 PMBus 工作频率				10	kHz
f _{SDxmax}	最大 PMBus 工作频率		1000			kHz
f _{SDx_CLK}	PMBus 工作频率范围		10		1000	kHz
t _{BUF}	STOP 与 START 条件之间的总线空闲时间		0.5			μs
t _{HD_STA}	(重复) START 条件的保持时间		0.26			μs
t _{SU_STA}	重复 START 条件的建立时间		0.26			μs
t _{SU_STO}	STOP 条件的建立时间		0.26			μs
t _{HD_SDA}	SDA 保持时间		0			μs
t _{SU_SDA}	SDA 设置时间		50			ns
t _{TIMEOUT}	检测时钟低电平超时		25	30	35	ms
t _{LOW}	SCL 的低周期		0.5			μs
t _{HIGH}	SCL 的高周期		0.26			μs
t _{R_SDx}	SCL 和 SDA 上升时间 ⁽¹⁾	1000kHz 级; V _{IL} (MAX) - 150mV 至 V _{IH} (MIN) + 150mV			120	ns
t _{F_SDx}	SCL 和 SDA 下降时间 ⁽¹⁾	1000kHz 级; V _{IH} (MIN) + 150mV 至 V _{IL} (MAX) - 150mV			120	ns
N _{WR_NVM}	NVM 可写周期数 ⁽¹⁾	- 40°C ≤ T _J ≤ 125°C	1000			周期
启动						
R _{PIN-STRAP}	引脚配置电阻阶跃范围精度	0.82kΩ ≤ R _{PIN-STRAP} ≤ 82kΩ	-4%		+4%	
t _{SS}	软启动时间 ⁽¹⁾	从开始切换到 V _{FB} = 0.5V, t _{SS} = 0.5ms 设置	0.4	0.5	0.6	ms
t _{SS}	软启动时间 ⁽¹⁾	从开始切换到 V _{FB} = 0.5V, t _{SS} = 1ms 设置	0.8	1	1.2	ms
t _{SS}	软启动时间 ⁽¹⁾	从开始切换到 V _{FB} = 0.5V, t _{SS} = 2ms 设置	1.6	2	2.4	ms
t _{SS}	软启动时间	从开始切换到 V _{FB} = 0.5V, t _{SS} = 4ms 设置	3.2	4	4.8	ms
t _{EN_DLY}	EN 高电平到开关延迟开始	TON_Delay = 0		50		μs
基准电压 (FB)						
V _{VOS_REG}	输出电压调节精度	内部反馈配置, T _J = 0°C 至 +85°C, VOSL = 1 或 0.5	-0.5%		+0.5%	
V _{VOS_REG}	输出电压调节精度	内部反馈配置, VOSL = 1 或 0.5	-0.75%		+ 0.75%	
V _{VOS_REG}	输出电压调节精度	内部反馈配置, T _J = 0°C 至 +85°C, VOSL = 0.25 或 0.125	-0.75%		+ 0.75%	
V _{VOS_REG}	输出电压调节精度	内部反馈配置, VOSL = 0.25 或 0.125	-1%		+1%	
V _{FB_REG}	反馈电压调节精度	外部反馈配置, T _J = 0°C 至 +85°C	-0.5%		+0.5%	
V _{FB_REG}	反馈电压调节精度	外部反馈配置	-0.75%		+ 0.75%	
I _{FB} (LKG)	FB 输入泄漏电流	V _{FB} = V _{FB_REG}			160	nA
差分遥感放大器						
I _{GOSNS}	流出 GOS 引脚的漏电流	V _{GOS} - V _{AGND} = 100mV			80	μA
V _{ICM}	用于调节的 GOS 共模电压 ⁽¹⁾	V _{GOS} 与 V _{AGND} 间的关系	-0.1		0.1	V

6.5 电气特性 (续)

$T_J = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $+150^{\circ}\text{C}$, $V_{VCC} = 3.3\text{V}$ (外部), $V_{VIN} = 4\text{V}$ 至 16V 。典型值是在 $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ 和 $V_{VIN} = 12\text{V}$ 条件下测得的 (除非另有说明)。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
遥测						
$M_{IOUT(rng)}$	输出电流测量范围		0		14	A
$M_{IOUT(acc)}$	输出电流测量精度	$3\text{A} < I_{OUT} \leq 6\text{A}$	-10%		10%	
		$6\text{A} < I_{OUT} \leq 12\text{A}$	-7.5%		7.5%	
$M_{IOUT(off)}$	输出电流测量偏移	$I_{OUT} \leq 3\text{A}$	-0.6		0.6	A
$M_{VOUT(rng)}$	输出电压测量范围		0		6	V
$M_{VOUT(acc)}$	输出电压测量精度	$400\text{mV} \leq V_{OUT} \leq 5.5\text{V}$	-2%		2%	
$M_{VOUT(lsb)}$	输出电压测量位分辨率			1		mV
$M_{TSNS(rng)}$	内部温度检测范围 ⁽¹⁾		-40		150	$^{\circ}\text{C}$
$M_{TSNS(lsb)}$	内部温度检测位分辨率, (8Dh) READ_TEMP1			1		$^{\circ}\text{C}$
$M_{TSNS(acc)}$	内部温度检测精度	$-40^{\circ}\text{C} \leq T_J \leq 150^{\circ}\text{C}$	-1.5	+2.5	+6.5	$^{\circ}\text{C}$
开关频率						
$f_{SW(FCCM)}$	开关频率, FCCM 运行	$V_{VIN} = 12\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $F_{SW} = 500\text{kHz}$, 空载	425	500	575	kHz
$f_{SW(FCCM)}$	开关频率, FCCM 运行	$V_{VIN} = 12\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $F_{SW} = 600\text{kHz}$, 空载	510	600	690	kHz
$f_{SW(FCCM)}$	开关频率, FCCM 运行 ⁽¹⁾	$V_{VIN} = 12\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $F_{SW} = 800\text{kHz}$, 空载	680	800	920	kHz
$f_{SW(FCCM)}$	开关频率, FCCM 运行	$V_{VIN} = 12\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $F_{SW} = 1.0\text{MHz}$, 空载	850	1000	1150	kHz
$f_{SW(FCCM)}$	开关频率, FCCM 运行 ⁽¹⁾	$V_{VIN} = 12\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $F_{SW} = 1.2\text{MHz}$, 空载	1020	1200	1380	kHz
$f_{SW(FCCM)}$	开关频率, FCCM 运行	$V_{VIN} = 12\text{V}$, $V_{OUT} = 3.3\text{V}$, $F_{SW} = 1.4\text{MHz}$, 空载	1190	1400	1610	kHz
功率级						
$R_{DS(on)(HS)}$	高侧 MOSFET 导通电阻	$V_{BOOT-SW} = 3.3\text{V}$		8.5		m Ω
$R_{DS(on)(LS)}$	低侧 MOSFET 导通电阻	$V_{VCC} = 3.3\text{V}$		3.0		m Ω
$t_{ON(min)}$	最小 ON 脉冲宽度 ⁽¹⁾			25		ns
$t_{OFF(min)}$	最小 OFF 脉冲宽度 ⁽¹⁾				150	ns
	输出放电 MOSFET 导通电阻	$V_{IN} = 12\text{V}$, $V_{SW} = 1\text{V}$, 禁用电源转换		100		Ω
$I_{BOOT(LKG)}$	流入 BOOT 引脚的漏电流	$V_{BOOT-SW} = 3\text{V}$, 已启用, 不进行开关。		30		μA
电源正常						
$V_{PGTH(RISE_OV)}$	电源正常阈值	FB 上升, PG 从高到低	105%	110%	116.4%	
$V_{PGTH(RISE_UV)}$	电源正常阈值	FB 上升, PG 从低到高	84.9%	90%	96.4%	
$V_{PGTH(FALL_UV)}$	电源正常阈值	FB 下降, PG 从高到低	79.2%	85%	91.7%	
t_{PG_DLY}	启动期间 PG 延迟从低电平到高电平			1.1	1.5	ms
	PG 从高电平到低电平的延迟			4	6.2	μs
$I_{PG(LKG)}$	开漏输出高电平时的 PG 引脚漏电流	$V_{PG} = 4.5\text{V}$			5	μA
	PG 引脚输出低电平电压	$I_{PG} = 7\text{mA}$			600	mV
	当 V_{IN} 和 V_{CC} 为低电平时, PG 引脚输出低电平	$V_{VIN} = 0\text{V}$, $V_{VCC} = 0\text{V}$, $V_{EN} = 0\text{V}$, PG 通过 $100\text{k}\Omega$ 电阻上拉至 3.3V			940	mV
	当 V_{IN} 和 V_{CC} 为低电平时, PG 引脚输出低电平	$V_{VIN} = 0\text{V}$, $V_{VCC} = 0\text{V}$, $V_{EN} = 0\text{V}$, PG 通过 $10\text{k}\Omega$ 电阻上拉至 3.3V			1100	mV
过流保护						

6.5 电气特性 (续)

$T_J = -40^{\circ}\text{C}$ 至 $+150^{\circ}\text{C}$, $V_{VCC} = 3.3\text{V}$ (外部), $V_{VIN} = 4\text{V}$ 至 16V 。典型值是在 $T_J = 25^{\circ}\text{C}$ 和 $V_{VIN} = 12\text{V}$ 条件下测得的 (除非另有说明)。

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
	低侧谷值电流限值	LS FET 上的谷值电流, $R_{MS1} = \text{GND}$	11.5	13	14.5	A
		LS FET 上的谷值电流, $R_{MS1} = 4.7\text{k}\Omega^{(1)}$	9	10	11	A
		LS FET 上的谷值电流, $R_{MS1} = 22\text{k}\Omega^{(1)}$	6	7	8	A
		LS FET 上的谷值电流, $R_{MS1} = 56\text{k}\Omega^{(1)}$	3	4	5	A
$I_{\text{LS(NOC)}}$	低侧负电流限制	LS FET 上的灌电流限制		-6	-4	A
I_{ZC}	进入 DCM 的过零检测电流阈值, 开环	$V_{\text{IN}} = 12\text{V}$		-750		mA
$I_{\text{ZC(HYS)}}$	进入 DCM 后的过零检测电流阈值迟滞, 开环	$V_{\text{IN}} = 12\text{V}$		1000		mA
输出 OVP 和 UVP						
$V_{\text{OVP_FIX}}$	固定过压保护 (OVP) 阈值电压	V_{FB} 上升, $\text{VOUT_SCALE_LOOP} = 1$		1.1		V
$V_{\text{OVP_FIX}}$	固定过压保护 (OVP) 阈值电压	V_{FB} 上升, $\text{VOUT_SCALE_LOOP} = 0.5$		2.2		V
$V_{\text{OVP_FIX}}$	固定过压保护 (OVP) 阈值电压	V_{FB} 上升, $\text{VOUT_SCALE_LOOP} = 0.25$		4.4		V
$V_{\text{OVP_FIX}}$	固定过压保护 (OVP) 阈值电压	V_{FB} 上升, $\text{VOUT_SCALE_LOOP} = 0.125$		6.6		V
V_{OVP}	过压保护 (OVP) 阈值电压	V_{FB} 上升	107%	116%	125%	
t_{OVPDLY}	OVP 延迟	施加 100mV 过驱		400		ns
V_{UVP}	欠压保护 (UVP) 阈值电压	V_{FB} 下降	73.9%	80%	87%	
t_{UVPDLY}	UVP 滤波器延迟			70		μs
	断续等待时间	启用断续模式		56		ms
热关断						
$T_{\text{J(SD)}}$	热关断阈值 ⁽¹⁾	温度上升		165		°C
$T_{\text{J(HYS)}}$	热关断迟滞 ⁽¹⁾			15		°C

(1) 根据设计确定；未经生产测试。

6.6 典型特性

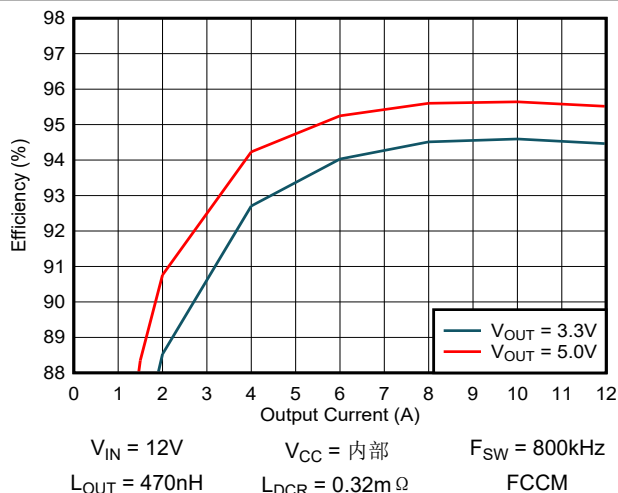


图 6-1. $V_{OUT} \geq 3.3V$ 时的效率

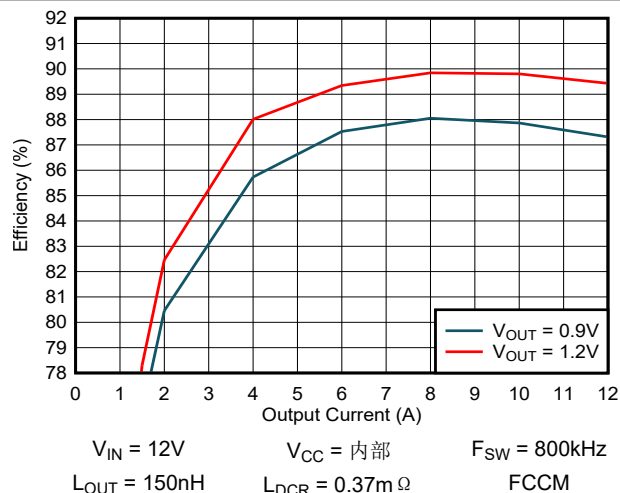


图 6-2. $V_{OUT} \leq 1.2V$ 时的效率

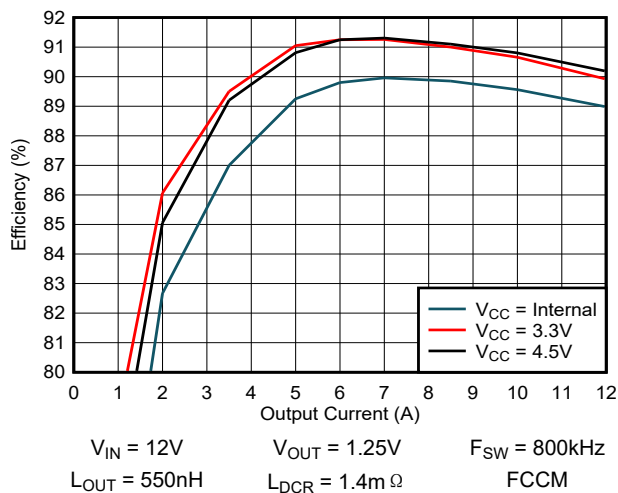


图 6-3. 效率与 V_{CC} 偏置之间的关系 ($V_{OUT} = 1.25V$)

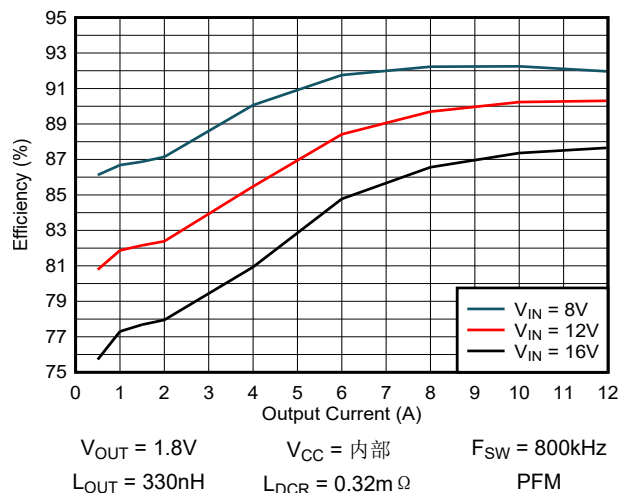


图 6-4. 效率与 V_{IN} 之间的关系 ($V_{OUT} = 1.8V$)

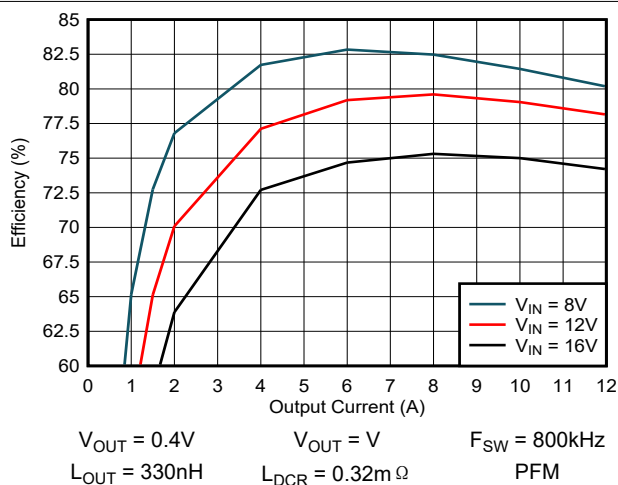


图 6-5. 效率与 V_{IN} 之间的关系 ($V_{OUT} = 0.4V$)

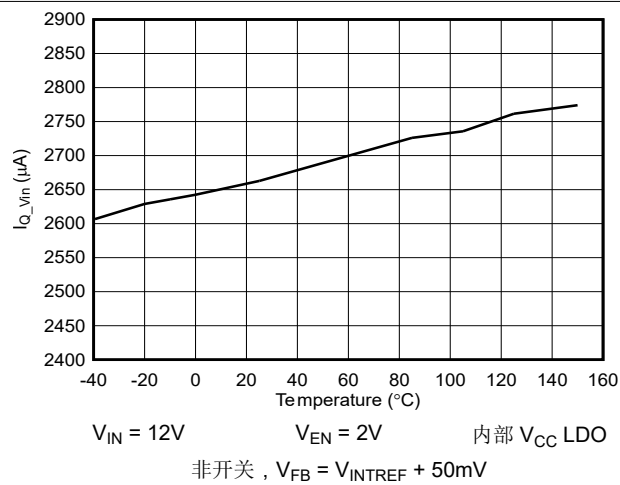


图 6-6. $I_{Q(VIN)}$ 与结温间的关系

6.6 典型特性 (续)

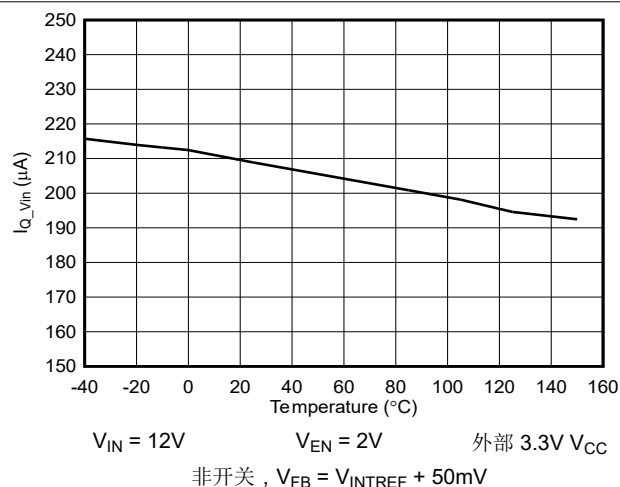
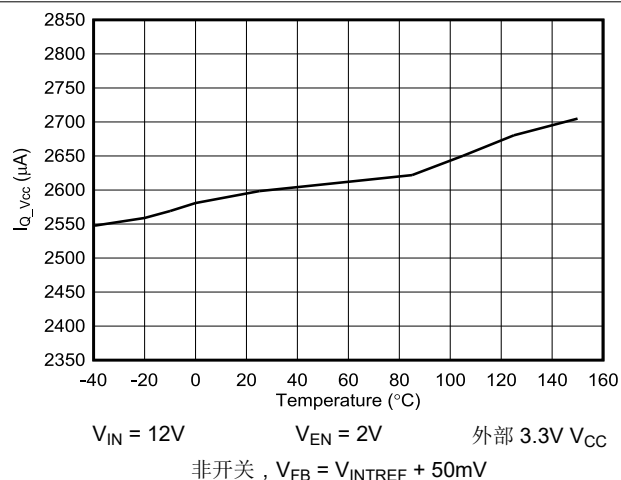
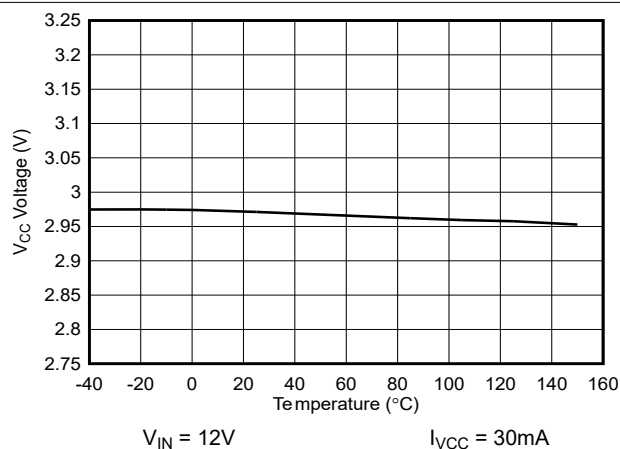
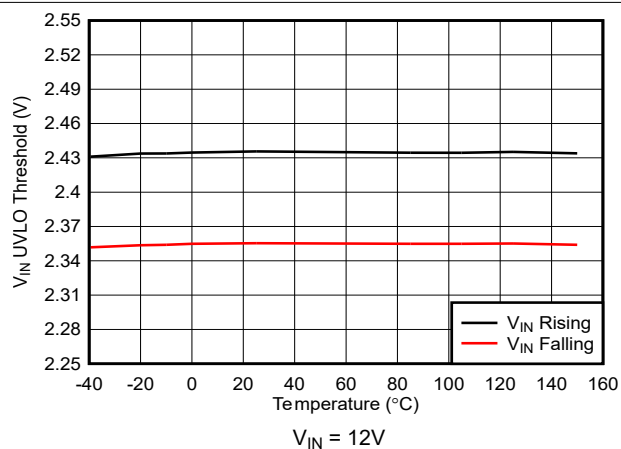
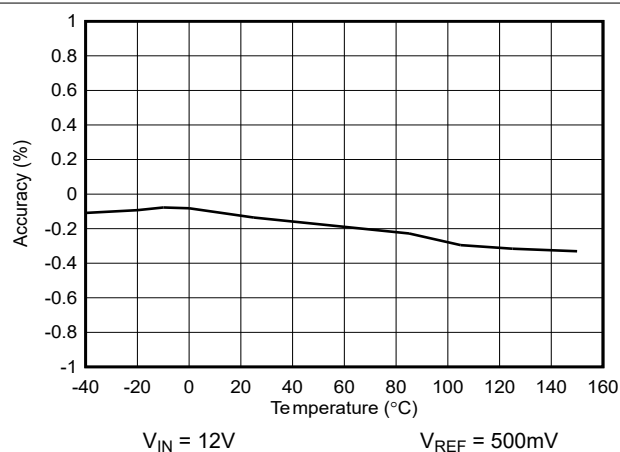
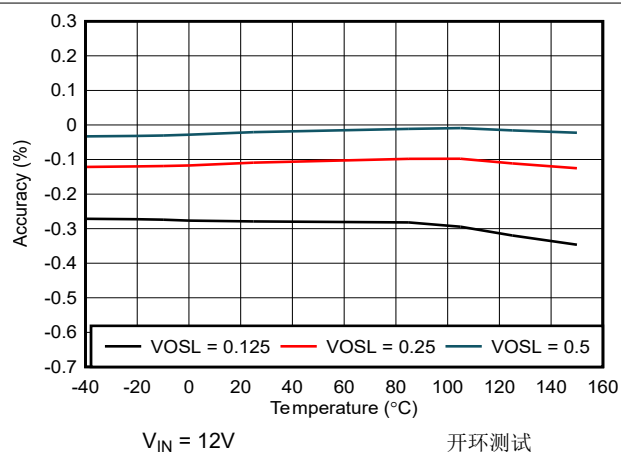
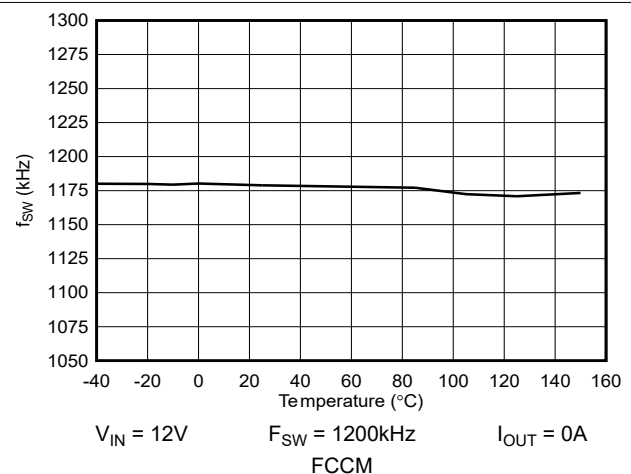
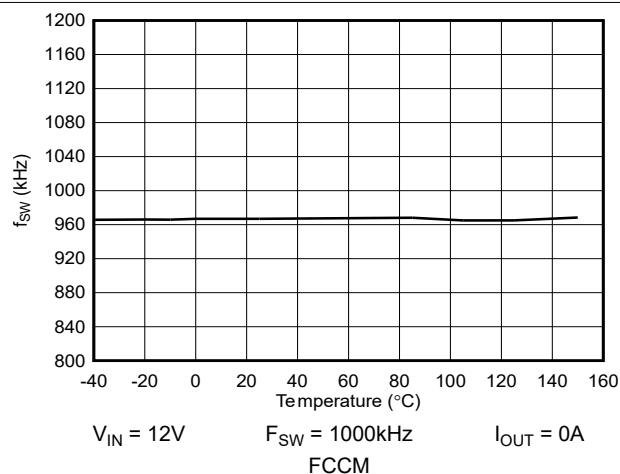
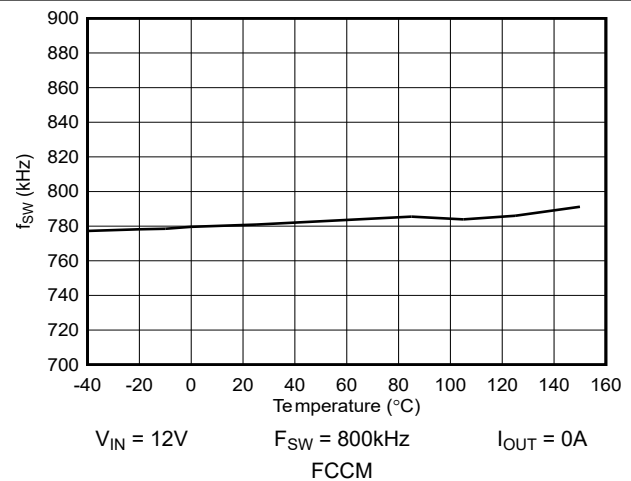
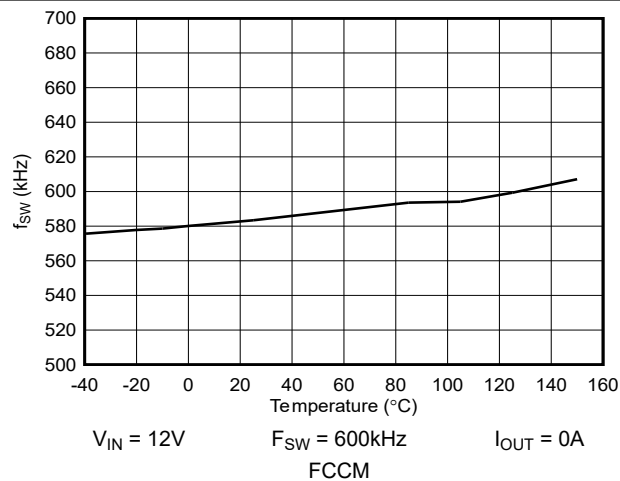
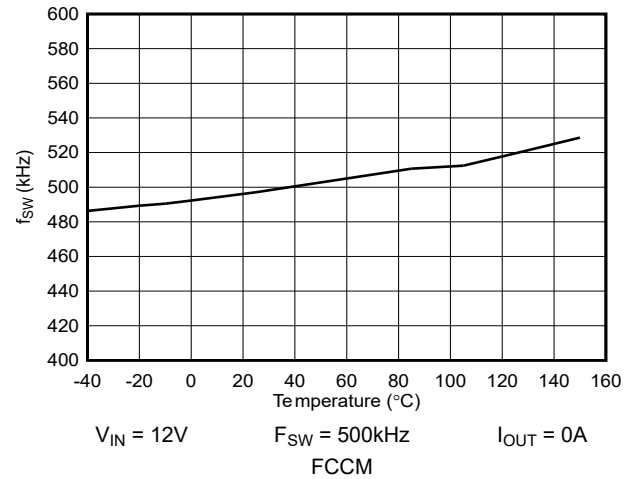
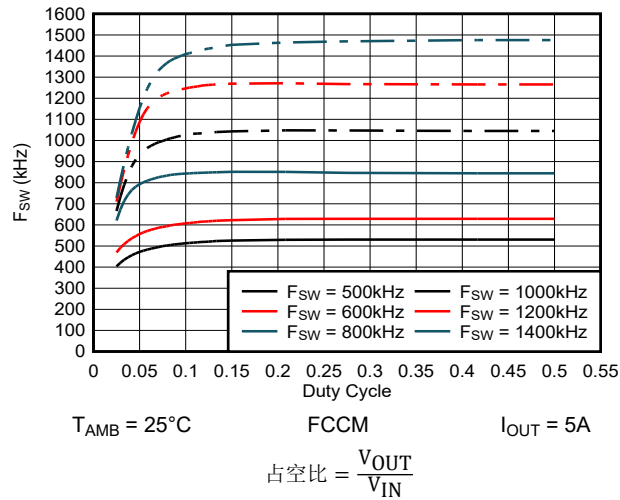
图 6-7. $I_{Q(VIN)}$ 与结温间的关系图 6-8. $I_{Q(VCC)}$ 与结温间的关系图 6-9. V_{CC} LDO 与结温间的关系图 6-10. V_{IN} 引脚欠压锁定与结温间的关系图 6-11. V_{REF} 与结温间的关系

图 6-12. 内部电阻分压器精度与结温间的关系

6.6 典型特性 (续)



6.6 典型特性 (续)

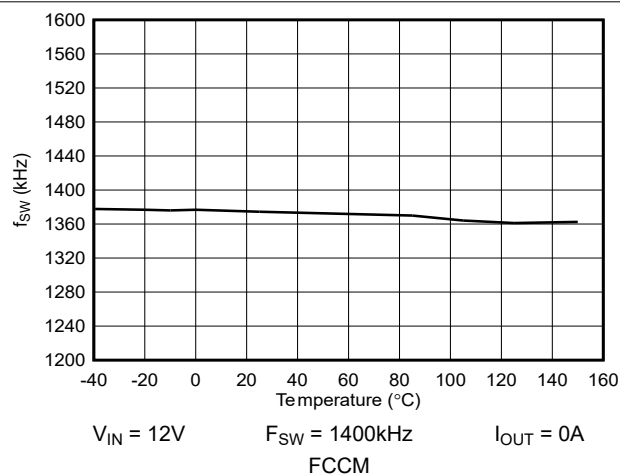


图 6-19. 开关频率与结温的关系

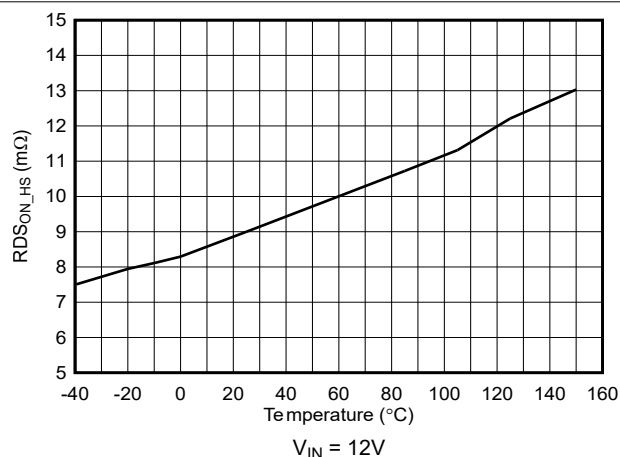
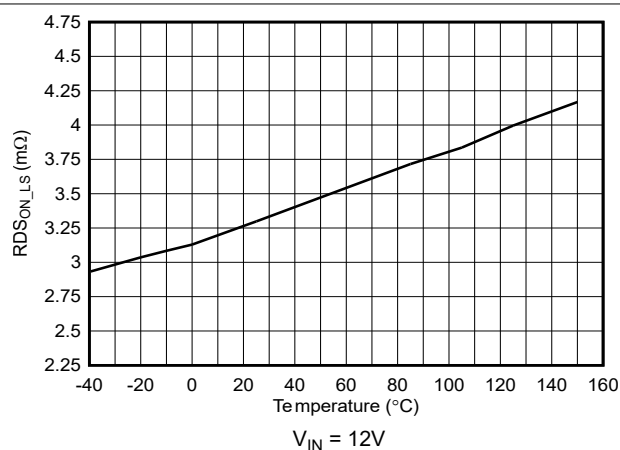
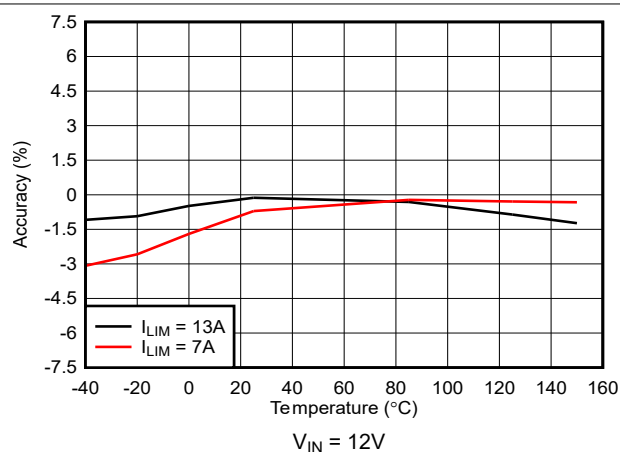
图 6-20. $R_{DSon(HS)}$ 与结温间的关系图 6-21. $R_{DSon(LS)}$ 与结温间的关系

图 6-22. 低侧谷电流限制精度与结温间的关系

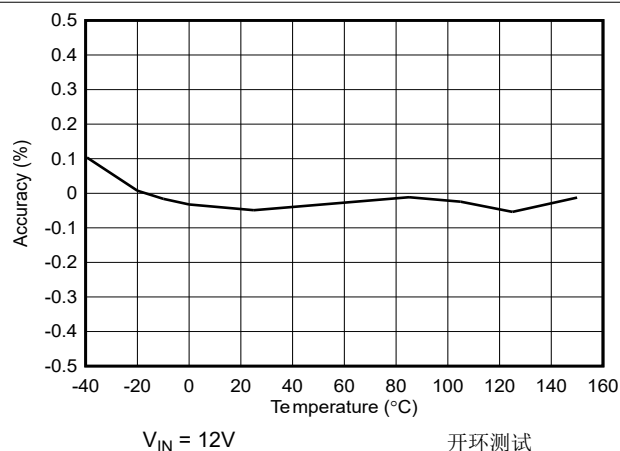


图 6-23. 输出电压遥测精度与结温间的关系

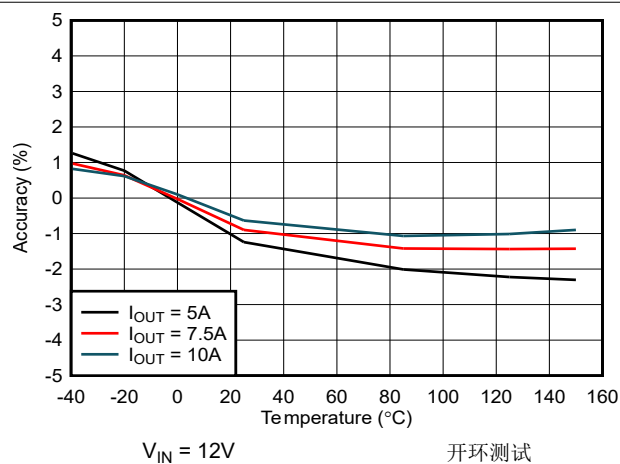


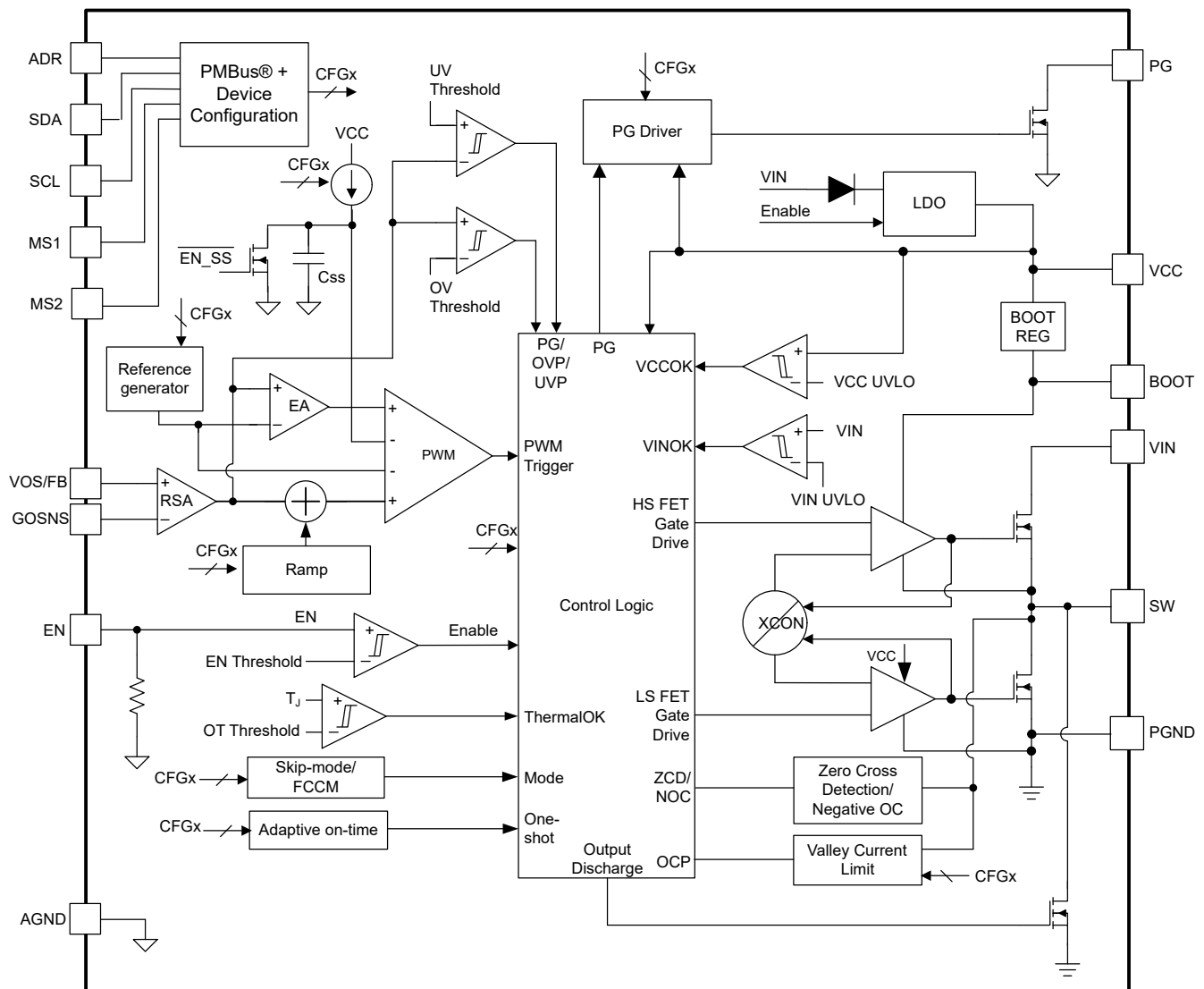
图 6-24. 输出电流遥测精度与结温间的关系

7 详细说明

7.1 概述

TPS544A28 器件是一款高效的单通道小尺寸同步降压转换器。该器件适用于服务器、存储和类似计算应用中输出电流为 12A 或更低的低输出电压负载点应用。TPS544A28 具有专有的 D-CAP4 控制模式和自适应导通时间架构。这种组合以出色的方式构建具有低占空比和超快速负载阶跃响应的现代直流/直流转换器。反馈分压器设置的输出电压范围为 0.4V 至 5.5V。转换输入电压范围为 2.7V 至 16V，VCC 输入电压范围为 3.1V 至 4.5V。D-CAP4 调制器使用仿真电流信息来控制调制。D-CAP4 调制器可减少不同输出电压下的环路增益变化，从而在更高输出电压应用中提供更好的瞬态响应。该控制方案的一个优势是其不需要外部的相位补偿网络，这使得该器件易于使用，并且所需的外部元件数量少。该控制方案的另一个优势是其支持采用所有低 ESR 输出电容器（如陶瓷电容器和低 ESR 聚合物电容器）实现稳定运行。最后，自适应导通时间控制功能可在宽输入和输出电压范围内跟踪预设开关频率，同时可在负载阶跃瞬态期间根据需要增大开关频率。

7.2 功能方框图



7.3 特性说明

7.3.1 D-CAP4 控制

该器件使用 D-CAP4 控制架构来实现快速负载瞬态响应，同时保持易用性。该控制系统包含一个内部纹波发生网络，用于模拟电感器电流纹波并与电压反馈信号相集成，既能实现快速响应，又能保证精确的输出电压调节。D-CAP4 允许使用极低 ESR 的输出电容器，包括多层陶瓷电容器 (MLCC) 和低 ESR 聚合物电容器，无需外部电流检测、纹波注入或电压补偿网络。

与早期的 D-CAP2 和 D-CAP3 架构不同，D-CAP4 在每个开关周期使用固定的斜坡幅度和正向增益路径来改善瞬态响应并减少脉冲频率抖动，而误差放大器可提供高直流设定精度。D-CAP4 的一个关键优势是能够最大限度地减小整个输出电压范围内的环路增益变化，从而通过单一斜坡设置在宽范围内实现一致的快速负载瞬态响应。与其他基于 R-C 的内部斜坡生成架构类似，内部斜坡电路的 R-C 时间常数设置斜坡的零点频率。环路增益变化的减小还消除了利用前馈电容器来优化瞬态响应的需求。此外，固定斜坡幅度架构消除了输入电压范围内的环路增益变化。

该器件通过 (D4h) COMP 提供四种用户可选的补偿设置。当内部基准 DAC 目标电压 $\geq 750\text{mV}$ 时，器件会自动增加斜坡幅度，以补偿更高的有效环路增益，并在更宽的基准电压范围内维持稳定的设定点。(D4h) COMP 中的 SEL_SUMCOMP 显示了该补偿调整的状态。用户可以通过写入 (D4h) COMP 中的覆盖位来强制将 SEL_SUMCOMP 置为高电平或低电平。对于内部反馈，通过将输出电压乘以 (29h) VOUT_SCALE_LOOP 来估算 $V_{\text{REF_DAC}}$ (例如， $V_{\text{OUT}} = 1.6\text{V}$ ， $V_{\text{OUT_SCALE_LOOP}} = 0.5$ ，则 $V_{\text{REF_DAC}}$ 为 800mV)。使用外部反馈时， $V_{\text{REF_DAC}}$ 等于 VOS/FB 引脚上的电压。请注意， $V_{\text{REF_DAC}}$ 目标仅在输出被禁用时更新，因此在器件调节期间通过 (21h) VOUT_COMMAND 跨过 750mV 阈值并不会改变 SEL_SUMCOMP 的状态。表 7-1 详细列出了可通过数字接口访问的可用环路补偿设置。

表 7-1. COMP 枚举列表

斜坡	SEL_RAMP (b)	相对有效斜坡幅度	
		SEL_SUMCOMP = 0b	SEL_SUMCOMP = 1b
RAMP1	00	2.1×	3.3×
RAMP2	01	1.6×	2.4×
RAMP3	10	1.4×	2.0×
RAMP4	11	1×	1.5×

由于斜坡幅度相似，RAMP2 和 RAMP3 与环路带宽相似。这两种设置之间的主要差异是斜坡零点频率。RAMP3 的斜坡零点位置较低，增加了相位裕度。然而，RAMP2 提供了比 RAMP3 更快的瞬态响应，因为在相近的斜坡幅度下，RAMP2 具有更高的斜坡零点位置，从而在整个频率范围内提供更高的增益。对于大多数应用，必须使用 RAMP3 代替 RAMP2。RAMP3 可用于在使用 L-C 的应用中实现相位提升，此类应用的双极频率允许使用 RAMP4，但在这些应用中，更大限度减少抖动比更快的瞬态响应更重要。TI 建议在评估补偿设置和输出 L-C 选型时使用 TPS544A28 产品页面 技术文档部分中的计算器。

对于任何不支持外部补偿的控制拓扑，控输出滤波器的最小值范围和/或最大值范围适用。用于典型降压转换器的输出滤波器是低通 L-C 电路。此 L-C 滤波器具有方程式 1 所示的双极点。

$$f_P = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L_{\text{OUT}} \times C_{\text{OUT}}}} \quad (1)$$

在低频率下，整体环路增益是由输出设定点电阻分压器网络和器件的内部增益设定的。低频 L-C 双极点具有 180 度同相压降。在输出滤波器频率下，增益以每十倍频程 -40dB 的速率滚降，且相位快速下降。内部纹波生成网络引入了高频零点，可将增益滚降从每十倍频 -40dB 降低到 -20dB，并在零点频率以上每十倍频程将相位增加 90 度。

为输出滤波器选择的电感器和电容器，必须使得方程式 1 的 f_P 双极点位置不高于使用表 7-2 中的比例常数计算所得的值。增大 V_{REF} 会降低 $f_{P(\text{MAX})}$ ，因为内部 DCAP-4 斜坡幅度保持恒定。随着基准电压增加，相对斜坡幅度减小，也会降低 $f_{P(\text{MAX})}$ 。

$$f_{p(\text{MAX})} = \frac{10^3 \times K_{f_LC}}{\sqrt{V_{\text{REF_DAC}}}} \quad (2)$$

表 7-2. 最大 L-C 双极点的计算常数

f _{sw} (kHz)	最大 L-C 双极点常数 K _{f_LC}							
	SEL_SUMCOMP = 0b0				SEL_SUMCOMP = 0b1			
	RAMP1	RAMP2	RAMP3	RAMP4	RAMP1	RAMP2	RAMP3	RAMP4
500	7.3	6.4	6.0	5.1	8.7	7.6	7.1	6.1
600	8.8	7.7	7.2	6.1	10.4	9.1	8.5	7.3
800	11.7	10.2	9.6	8.2	13.9	12.2	11.4	9.8
1000	14.6	12.8	12.0	10.2	17.4	15.2	14.2	12.2
1200	17.5	15.4	14.4	12.2	20.9	18.2	17.0	14.6
1400	20.4	17.9	16.8	14.3	24.4	21.3	19.9	17.1

对于每个设置，可能出现违反这些指导原则的 L-C 双极点频率，但必须在应用中通过测量进行验证。

备注

对于通过 (21h) VOUT_COMMAND 进行动态电压调节的应用，TI 建议确认输出 L-C 双极点频率在所有目标电压下均满足方程 1。

确定应用要求后，设计中采用的输出电感值通常会使电感器峰值纹波电流大约介于应用中最大输出电流的 15% 与 40% 之间。选择非常小的输出电容会产生高频的 L-C 双极点，从而导致整个环路增益保持高水平，直至达到 L-C 双极点频率。由于内部纹波生成网络的零点频率也相对较高，因此输出电容非常小的环路可能具有过高的交叉频率，而这可能导致不稳定。通常，在需要合理（或更小）输出电容的情况下，可以使用输出纹波要求和负载瞬态要求来确定稳定运行所需的输出电容。

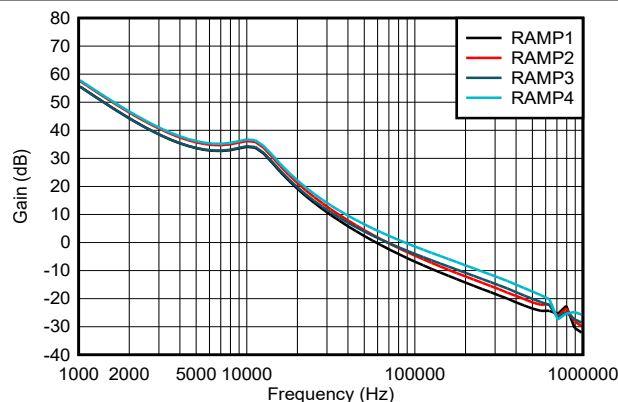
如果使用 MLCC，请考虑降额特性来确定设计的最终输出电容。例如，当使用规格为 10μF、X5R 和 6.3V 的 MLCC 时，直流偏置和交流偏置的降额分别为 80% 和 50%。实际降额是这两个系数（在本例中为 40% 和 4μF）的乘积。如需了解要在应用中使用电容器的具体特性，请咨询电容器制造商。

一条简化规则是，如果输出电容器的 ESR 零点小于 10 倍的 L-C 双极点频率，则出于稳定性考虑，TI 建议在计算 L-C 双极点频率时忽略。必须仅使用低 ESR MLCC 重新计算 L-C 双极点频率。为了在使用混合型输出电容器时进行更准确的分析，TI 建议进行仿真或测量。

对于最大输出电容建议，选择电感与电容值时，应使 L-C 双极点频率不低于开关频率的 1/100。以此为起点，在电路板上验证小信号响应，并确认环路交越频率处的相位裕度大于 45 度。只要相位裕度大于 45 度，实际最大输出电容便可增大。但是，应进行小信号测量（波特图）来确认设计。

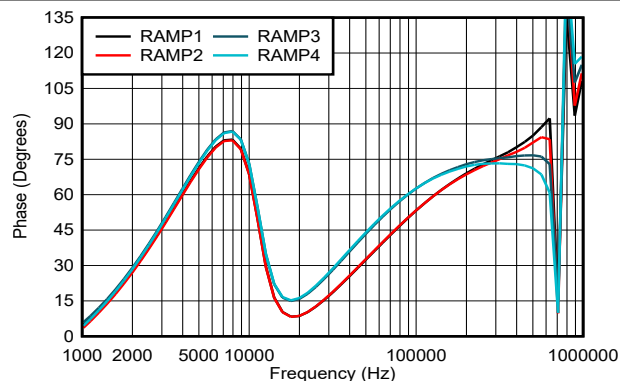
对于 L-C 双极点接近工作频率 1/100 的较大输出滤波器，可能需要额外的相位提升。使用外部反馈时，在 R_{FB_HS} 两端并联一个前馈电容器可提升相位。使用内部反馈时，用户可通过 SYS_CFG_USER1 中的 SEL_LC_H 位调整内部环路响应。在实际中，这可以帮助提高大输出滤波器的相位裕度。另请参阅[采用前馈电容器优化内部补偿直流/直流转换器的瞬态响应应用手册](#)。

除了提升相位外，前馈电容器通过交流耦合将更多的 V_{OUT} 节点信息馈入 FB 节点。负载瞬态事件期间的这种前馈使控制环路能够更快地响应 V_{OUT} 偏差。但是，稳态运行期间的这种前馈也会将更多的 V_{OUT} 纹波和噪声馈入 FB。FB 上的高纹波和噪声通常会导致更多抖动，甚至双脉冲行为。在确定最终的前馈电容值时，考虑对相位裕度、负载瞬态性能和纹波以及 FB 噪声的影响。TI 建议使用频率分析设备来测量交叉频率和相位裕度。



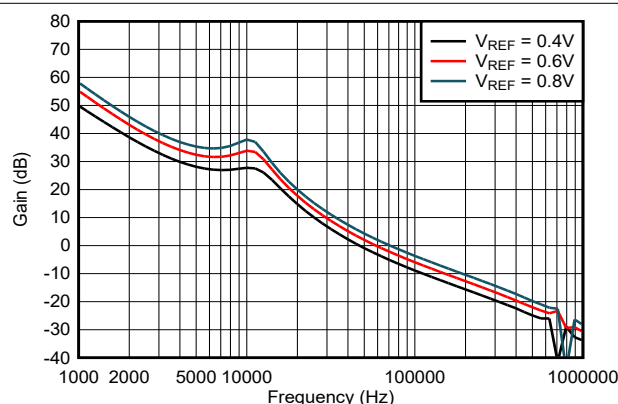
$V_{IN} = 12V$ $V_{CC} = \text{内部}$ $F_{SW} = 800kHz$
 $L_{OUT} = 1 \mu H$ $C_{OUT} = 5 \times 47 \mu F$ 负载 = 250m Ω

图 7-1. $V_{OUT} = 0.5V$ 且 $SEL_SUMCOMP = 0$ 时，仿真增益与斜坡设置间的关系



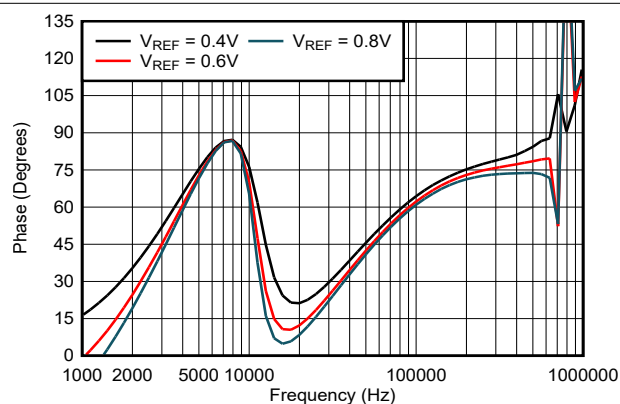
$V_{IN} = 12V$ $V_{CC} = \text{内部}$ $F_{SW} = 800kHz$
 $L_{OUT} = 1 \mu H$ $C_{OUT} = 5 \times 47 \mu F$ 负载 = 250m Ω

图 7-2. $V_{OUT} = 0.5V$ 且 $SEL_SUMCOMP = 0$ 时，仿真相位与斜坡设置间的关系



$V_{IN} = 12V$ $V_{CC} = \text{内部}$ $F_{SW} = 800kHz$
 $L_{OUT} = 1 \mu H$ $C_{OUT} = 5 \times 47 \mu F$ 负载 = 250m Ω

图 7-3. RAMP3、 $SEL_SUMCOMP = 1$ 时，仿真增益与 V_{REF} 间的关系



$V_{IN} = 12V$ $V_{CC} = \text{内部}$ $F_{SW} = 800kHz$
 $L_{OUT} = 1 \mu H$ $C_{OUT} = 5 \times 47 \mu F$ 负载 = 250m Ω

图 7-4. RAMP3、 $SEL_SUMCOMP = 1$ 时，仿真相位与 V_{REF} 间的关系

7.3.2 内部 VCC LDO 以及在 VCC 引脚上使用外部辅助电源

TPS544A28 具有一个内部 3.0V LDO，LDO 从 V_{IN} 获取输入，并输出到 V_{CC} 。时，当 V_{IN} 电压上升至高于 $UVLO$ 阈值 ($V_{IN_UVLO(R)}$) 时，内部 LDO 将被启用并开始调节 V_{CC} 引脚上的输出电压。 V_{CC} 电压为内部模拟和数字电路提供辅助电源电压，还为栅极驱动器提供电源电压。使用额定电压至少为 6.3V 的 1 μF 陶瓷电容器将 V_{CC} 引脚旁路至 $PGND$ ，并保持器件的 V_{CC} - $PGND$ 电流返回环路路径尽可能短。TI 不建议将 V_{CC} 旁路至 $AGND$ 。有关 V_{CC} 旁路电容器的推荐布局示例，请参阅节 9.4。

高于内部 LDO 输出电压的外部辅助电源可以覆盖内部 LDO。该覆盖可以提高转换器的效率，因为 V_{CC} 电流现在由外部辅助电源而不是内部线性稳压器提供。可以使用 3.1V 和 4.5V 之间的外部辅助电源，通过降低集成式功率 MOSFET 的 $R_{DS(on)}$ 来提供额外的效率增强。

V_{CC} $UVLO$ 电路会监测 V_{CC} 引脚电压，并在 V_{CC} 低于 V_{CC} $UVLO$ 下降阈值时禁用整个转换器。为了使该器件平稳运行，需要 V_{CC} 电压保持稳定和纯净。

以下是在 V_{CC} 引脚上使用外部辅助电源时的注意事项：

- 当外部辅助电源施加到 VCC 引脚足够早 (例如在 EN 信号进入之前) 时, 内部 LDO 导通器件始终关闭, 并且内部模拟电路在电源使能端具有稳定的电源轨。
- TI 不建议考虑这么做。如果在 VCC 引脚上延迟施加外部辅助电源 (例如在 EN 信号进入之后), 只要在 VCC 引脚上没有拉出过大电流, 便可以应用任何上电和断电时序。在这个序列中, 请注意 VCC 引脚上的外部放电路径, 此放电路径可能会将电流拉高到内部 VCC LDO 的电流限值以上。如果负载超过内部 VCC LDO 的电流限值, 可能会将 VCC 电压拉低并通过其 UVLO 关闭 VCC LDO, 从而关闭转换器输出。
- 一种良好的上电序列是, 在满足 VCC UVLO 上升阈值后, 满足 VIN UVLO 上升阈值或 EN 上升阈值中的至少一个条件。例如, 一种实际的上电序列为: 首先施加 VIN, 然后施加外部辅助电源, 然后 EN 信号变为高电平。

7.3.2.1 通过单根总线为该器件供电

该器件在由单个 VIN 配置供电时运行良好。在单 VIN 配置中, 内部 LDO 通常由一根 5V 或 12V 总线供电, 并生成 3V 输出为内部模拟电路提供辅助电源, 同时为 MOSFET 栅极驱动器供电。该配置下的 VIN 输入范围为 4V 至 16V, 负载电流高达 12A。图 7-5 展示了这个单 VIN 配置的示例。

VIN 和 EN 是用于启用器件的两个信号。对于启动序列, VIN 和 EN 信号之间的任何序列都可以为该器件正确上电。

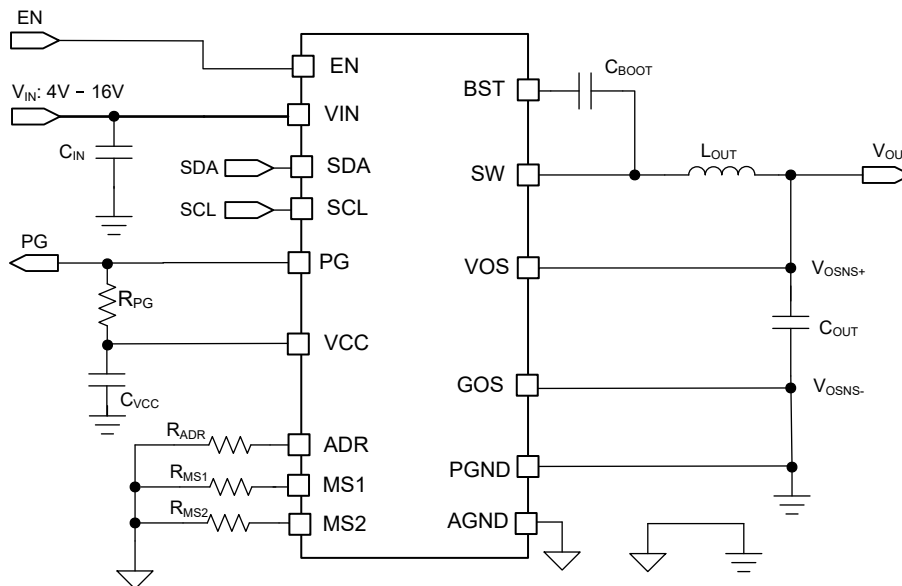


图 7-5. 采用 12V 总线的单 VIN 配置

7.3.2.2 通过双电源配置为该器件供电

在 VCC 引脚上施加与主 VIN 总线电平不同的外部辅助电源时, 可通过同时利用主 VIN 总线和 VCC 辅助电源将该器件配置为双电源模式。将有效的 VCC 辅助电源连接到 VCC 引脚会覆盖内部 LDO, 从而减少内部 LDO 上的功率损耗。该配置有助于提高整体系统级效率, 但需要有效的 VCC 辅助电源。3.3V 电源轨是 VCC 辅助电源的常见选择。借助稳定的 VCC 辅助电源, 该配置下建议的 VIN 输入范围扩展为 2.7V 至 16V。此外, 由于内部数字电路由 VCC 供电, 用户能够与具有 VCC 偏置但无 VIN 偏置的器件通信。

外部辅助电源的噪声会影响内部模拟电路。为了确保正常运行, 需要一个纯净、低噪声的外部辅助电源, 并需要在 VCC 引脚和 PGND 引脚之间连接良好的局部去耦电容器。图 7-6 展示了这种双电源配置的示例。

标称运行期间, VCC 外部偏置电流随辅助电源电压电平和频率的变化而变化。例如, 通过将该器件设置为跳跃模式, 当轻负载条件下频率降低时, VCC 引脚从外部辅助电源汲取的电流更小。中列出了 FCCM 运行模式下的典型 VCC 外部偏置电流。外部辅助电源必须能够提供该电流, 否则外部辅助电源电压可能会下降, 从而不再覆盖内部 LDO。

在双电源配置下， V_{IN} 、 V_{CC} 辅助电源和 EN 是用于启用器件的信号。对于启动序列，TI 建议在达到 V_{CC} 后，达到 V_{IN} UVLO 上升阈值或 EN 上升阈值中的至少一个值。一个实际的启动序列示例是：

1. 施加 V_{IN}
2. 施加外部 V_{CC} 辅助电源
3. EN 信号变为高电平

同样，对于断电序列，TI 建议在外部的 V_{CC} 辅助电源关闭之前，达到 V_{IN} UVLO 下降阈值或 EN 下降阈值中的至少一个值。如果外部 V_{CC} 辅助电源先关闭，则器件的内部 LDO 会阻止 V_{CC} 电压降至 3.0V 以下，并由通过外部 V_{CC} 辅助电源供电的其他电路加载。

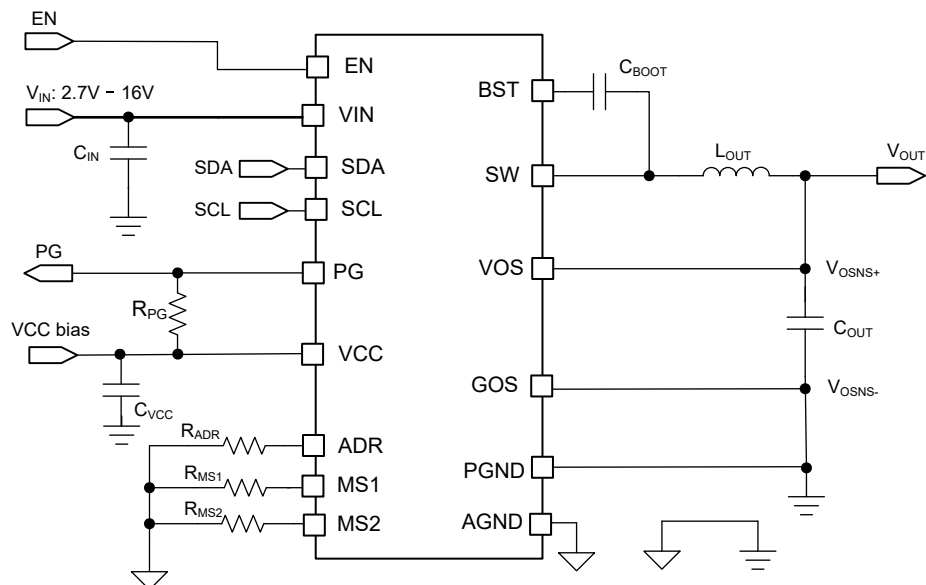


图 7-6. 具有外部 V_{CC} 辅助电源的双电源配置

7.3.3 多功能选择 (MS1) 引脚

该器件允许用户通过在 MS1 引脚和 AGND 引脚之间连接一个电阻来选择开关频率、电流限制和软启动时间。表 7-3 列出了用于选择开关频率、工作模式和软启动的电阻值。为在器件工作范围内进行精确检测，需要一个具有 $\pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 典型温度系数的 $\pm 1\%$ 容差电阻器。

在内部上电延迟期间会设置并锁存 MS1 状态。在上电延迟后更改 MS1 引脚电阻不会改变该器件的状态。

为了确保内部电路正确检测到该电阻值，请勿在 MS1 引脚上放置任何电容器。

表 7-3. MS1 引脚选择

MS1 引脚到 AGND 的电阻 (k Ω)	开关频率 (f _{sw}) (kHz) ⁽¹⁾	谷值电流限制 (A)	SS 时间 (ms)
0/GND	600 ⁽²⁾	13 ⁽²⁾	1 ⁽²⁾
0.82	1200	13	1
1.2	600	13	4
1.8	800	13	4
2.2	1200	13	4
2.7	600	10	1
3.3	800	10	1
3.9	1200	10	1
4.7	600	10	4
5.6	800	10	4
6.8	1200	10	4
8.2	600	7	1
10	800	7	1
12	1200	7	1
15	600	7	4
18	800	7	4
22	1200	7	4
27	600	4	1
39	800	4	1
47	1200	4	1
56	600	4	4
68	800	4	4
82	1200	4	4
≥ 118 (悬空/VCC)	800	13	1

(1) 开关频率基于 3.3V 输出电压。频率随输出电压而变化。

(2) 出厂默认值。如果 NVM 编程为不同的值，器件会使用在 NVM 中编程的值。

7.3.4 多功能选择 (MS2) 引脚

该器件允许用户通过在 MS2 引脚和 AGND 引脚之间连接一个电阻器来选择输出电压。表 7-4 列出了用于选择输出电压的电阻器值。为在器件工作范围内进行精确检测，需要一个具有 $\pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 典型温度系数的 $\pm 1\%$ 容差电阻器。

除了通过 PMBus 扩展输出电压可编程性之外，还可以使用任意一个 0.4V 至 0.8V VOS/FB 引脚稳压设置，通过外部反馈电阻分压器设置输出电压。

在内部上电延迟期间会设置并锁存 MS2 状态。在上电延迟后更改 MS2 引脚电阻不会改变该器件的状态。

为了确保内部电路正确检测到该电阻值，请勿在 MS2 引脚上放置任何电容器。

表 7-4. MS2 引脚选择

MS2 引脚到 AGND 的电阻 (k Ω)	VOS/FB 引脚调节 (V)	支持外部反馈
0/GND	1.0 ⁽¹⁾	否
0.82	0.4	是
1.2	0.45	是
1.8	0.5	是
2.2	0.55	是
2.7	0.6	是
3.3	0.65	是
3.9	0.7	是
4.7	0.75	是
5.6	0.8	是
6.8	0.85	否
8.2	0.9	否
10	0.95	否
12	1.05	否
15	1.10	否
18	1.15	否
22	1.20	否
27	1.25	否
39	1.3	否
47	1.5	否
56	1.8	否
68	2.5	否
82	5.0	否
≥ 118 (悬空/VCC)	3.3	否

(1) 出厂默认值。如果 NVM 编程为不同的值，器件会使用在 NVM 中编程的值。

7.3.5 PMBus® 地址 (ADR) 引脚

该器件允许用户通过在 ADR 引脚与 AGND 引脚之间连接一个电阻器来选择 PMBus® 器件地址和故障恢复模式。表 7-4 列出了用于地址和故障恢复模式选择的电阻器值。为在器件工作范围内进行精确检测，需要一个具有 $\pm 100\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 典型温度系数的 $\pm 1\%$ 容差电阻器。

在内部上电延迟期间会设置并锁存 ADR 状态。在上电延迟后更改 ADR 引脚电阻不会改变该器件的状态。

为了确保内部电路正确检测到该电阻值，请勿在 ADR 引脚上放置任何电容器。

表 7-5. ADR 引脚选择

ADR 引脚到 AGND 的电阻 (k Ω)	PMBus® 地址	故障恢复模式
0	0x31h	断续
0.82	0x32h	断续
1.2	0x33h	断续
1.8	0x34h	断续
2.2	0x35h	断续
2.7	0x36h	断续
3.3	0x39h	断续
3.9	0x3Ah	断续
4.7	0x3Bh	断续
5.6	0x3Ch	断续
6.8	0x3Dh	断续
8.2	0x3Eh	断续
10	0x31h	锁存
12	0x32h	锁存
15	0x33h	锁存
18	0x34h	锁存
22	0x35h	锁存
27	0x36h	锁存
39	0x39h	锁存
47	0x3Ah	锁存
56	0x3Bh	锁存
68	0x3Ch	锁存
82	0x3Dh	锁存
≥ 118 (悬空/VCC)	0x3Eh	锁存

7.3.6 输出电压设置

TPS544A28 支持使用内部反馈分压器和外部反馈分压器设置输出电压。无论使用内部还是外部反馈，器件都必须首先调节到表 7-6 中列出的预定义引导电压列表之一，然后才能切换到其他电压。

以下各节概述了引导电压的选择和影响、通过内部反馈进行电压设置和通过外部反馈进行电压设置。

7.3.6.1 设置 VBOOT 和 VOUT_SCALE_LOOP

TPS544A28 通过 (D5h) VBOOT 支持 32 种独特的启动电压设置。其中，默认有 24 种可通过引脚配置获取，所有设置均可编程至 NVM。这些设置决定了器件在软启动期间开始调节至的启动电压，以及器件在当前上电周期中使用的 (29h) VOUT_SCALE_LOOP。(29h) VOUT_SCALE_LOOP 值在启动时的引脚配置检测期间被锁存，直至下一个上电周期方可更改。

为了为用户提供更大的灵活性，(D1h) SYS_CFG_USER1 包含一个 NRSA_L 位，该位可调节某些引导电压所用的 (29h) VOUT_SCALE_LOOP。这改变了用户在一个上电周期内通过 (21h) VOUT_COMMAND 可访问的电压范围，从而允许切换到比默认值更低的电压。将 NRSA_L 置为高电平后，用户必须通过 STORE_USER_ALL 存储至 NVM 并下电上电，更改才会生效。

备注

对于具有 NRSA_L 的给定 V_{OUT}，更改其 (29h) VOUT_SCALE_LOOP 也会更改内部 V_{REF_DAC} 设定点，并可能影响节 7.3.1 中所述的补偿设置。

(D5h) VBOOT 和 (29h) VOUT_SCALE_LOOP 设置在表 7-6 中指定：

表 7-6. VBOOT 枚举列表

VBOOT [4:0] (十进制)	VOUT_SCALE_LOOP (V/V)		V _{OUT} (V)
	NRSA_L = 0b	NRSA_L = 1b	
0	1	1	0.4
1	1	1	0.45
2	1	1	0.5
3	1	1	0.55
4	1	1	0.6
5	1	1	0.65
6	1	1	0.7
7	1	1	0.75
8	1	1	0.8
9	0.5	1	0.85
10	0.5	1	0.9
11	0.5	0.5	0.95
12	0.5	0.5	1.0
13	0.5	0.5	1.05
14	0.5	0.5	1.1
15	0.5	0.5	1.15
16	0.5	0.5	1.2
17	0.5	0.5	1.25
18	0.5	0.5	1.3
19	0.5	0.5	1.5
20	0.5	0.5	1.6
21	0.25	0.5	1.7
22	0.25	0.5	1.8
23	0.25	0.25	2
24	0.25	0.25	2.25
25	0.25	0.25	2.5
26	0.25	0.25	2.75
27	0.25	0.25	3.0
28	0.125	0.25	3.3
29	0.125	0.25	3.6
30	0.125	0.125	4.5
31	0.125	0.125	5.0

7.3.6.2 设置输出电压 (内部反馈)

当使用没有裕度调节的内部反馈时，输出由两项设置决定：[\(21h\) VOUT_COMMAND](#) 和 [\(29h\) VOUT_SCALE_LOOP](#)。[\(21h\) VOUT_COMMAND](#) 用于调节误差放大器的基准 DAC 输入，其电压范围为 0.25 至

0.9V。(29h) VOUT_SCALE_LOOP 指定内部电阻分压器增益为 1、0.5、0.25 或 0.125。如 (20h) VOUT_MODE 中所定义, (21h) VOUT_COMMAND 的 LSB 为 0.976mV。

建议的 (21h) VOUT_COMMAND 值范围取决于所配置的 (29h) VOUT_SCALE_LOOP。该设计不会将 (21h) VOUT_COMMAND 值限制在此建议范围内。可能的最大 VOUT 为 5.505V。表 7-7 中定义了每个 (29h) VOUT_SCALE_LOOP 设置的建议输出电压范围。

当使用 PMBus 或引脚配置来设置稳压电压时, 命令的输出电压 (以伏特为单位) 由 (21h) VOUT_COMMAND、(25h) VOUT_MARGIN_HIGH、(26h) VOUT_MARGIN_LOW、(01h) OPERATION 和 (20h) VOUT_MODE 的组合确定, 如方程式 3 所定义。

$$V_{OUT} = VOUT_MODE \times (VOUT_COMMAND + ((VOUT_MARGIN_HIGH - 1) \times VOUT_COMMAND \times OPERATION[5]) - ((1 - VOUT_MARGIN_LOW) \times VOUT_COMMAND \times OPERATION[4])) \quad (3)$$

表 7-7. 建议输出电压范围

VOUT_SCALE_LOOP (V/V)	建议的 V _{OUT} 范围 (V)	建议的 VOUT_COMMAND 范围 (十进制)
1	0.35 - 0.9	359 - 922
0.5	0.5 - 1.8	512 - 1844
0.25	1.4 - 3.6	1434 - 3687
0.125	2.8 - 5.505	2868 - 5637

7.3.6.3 设置输出电压 (外部反馈)

使用外部反馈时, 使用由 R_{FB_T} 和 R_{FB_B} 组成的电阻分压器。在 FB 引脚和负载的正节点之间连接 R_{FB_T}, 并在 FB 引脚和 GOS 引脚之间连接 R_{FB_B}。FB 引脚被调节至内部基准 (V_{REF})。建议的 R_{FB_B} 值为 10kΩ, 范围为 1kΩ 至 20kΩ。使用方程式 4 确定 R_{FB_T}。

$$R_{FB_T} = \frac{V_{OUT} - V_{REF}}{V_{REF}} \times R_{FB_B} \quad (4)$$

使用外部反馈时, 仅支持 (29h) VOUT_SCALE_LOOP 为 1 的 (D5h) VBOOT 值 (请参阅表 7-6)。但是, 仍可使用 (21h) VOUT_COMMAND 在建议范围内动态更改 V_{REF}。

为了提高整体 V_{OUT} 精度, 强烈建议为 FB 分压器使用 ±1% 精度或更佳电阻。FB 分压电阻器必须靠近器件放置, 以尽量缩短连接到 FB 引脚的布线长度。

7.3.7 开关频率

TPS544A28 允许用户通过 MS1 上的引脚配置或 (33h) FREQUENCY_SWITCH 寄存器来选择开关频率, 并通过 (D1h) SYS_CFG_USER1 中的 FCCM 位来选择 FCCM/PFM 工作模式。表 7-8 中概述了数字可编程开关频率选项。

表 7-8. FREQUENCY_SWITCH 枚举列表

FREQUENCY_SWITCH [3:0]		开关频率 (kHz)
≥	≤	
0d	4d	500
5d	5d	600
6d	6d	800
7d	8d	1000
9d	9d	1200
10d	15d	1400

7.3.8 动态电压压摆率

TPS544A28 包含 (27h) **VOUT_TRANSITION_RATE**，用于在更改输出电压电平时设置转换率。表 7-9 中概述了可选择的选项。

表 7-9. **VOUT_TRANSITION_RATE** 枚举列表

VOUT_TRANSITION_RATE [6:0]		转换率 (mV/ μs)
$\geq$	$\leq$	
0d	19d	1.625
20d	38d	3.25
39d	77d	6.5
78d	127d	13

在输出电压切换期间，由于输出电容器的快速充电或放电，功率级会出现额外的浪涌电流。当 OCL 或 NOC 设置没有足够的空间时，该浪涌电流加上负载电流可能触发过流保护。例如，VOUT 升压转换期间的正电感器电流高于标称工作电流。如果 LS 谷值 OCL 阈值设置为相对较低，并且不允许额外的浪涌电流，则电感器电流可能会受到逐周期过流限制特性的限制，因此实际升压压摆率低于所需值。在空载条件下，VOUT 降压转换也会发生类似情况。VOUT 降压转换期间的负电感器电流比标称工作电流（负值的绝对值）更大。但是，不允许电感器电流比负 OC 阈值（负值的绝对值）更大。因此，在 VOUT 降压转换期间触发 NOC 运行会导致实际降压压摆率低于所需值。

7.3.9 启用

当 EN 引脚电压上升至高于使能阈值电压 ($V_{EN(R)}$) 且 VIN 上升至高于 VIN UVLO 上升阈值时，该器件进入内部上电序列。

EN 引脚有一个内部滤波器可避免因小干扰而意外导通或关断。这个 RC 滤波器的时间常数为 2 μ s。例如，在 EN 引脚上施加一个 3.3V 电压源（这个电压源会从 0V 跳至 3.3V 并具有理想的上升沿）时，内部 EN 信号将在 2 μ s 后达到 2.1V，即达到施加的 3.3V 电压电平的 63.2%。

在 EN 引脚和 AGND 引脚之间采用了一个内部下拉电阻。借助该下拉电阻，在启动前使 EN 引脚悬空会使器件保持禁用状态。EN 引脚上的电阻分压器可用于增加该器件开始启动序列所需的输入电压。使用外部电阻分压器时，必须考虑内部下拉电阻。为降低对 EN 上升和下降阈值的影响，该内部下拉电阻设置为 1M Ω 。在标称运行期间，当功率级进行开关操作时，这个大的内部下拉电阻可能没有足够的抗噪能力将 EN 引脚保持在低电平，从而使器件进入禁用状态。

如果将一个外部电阻分压器连接到 EN 引脚，则当 EN 电压超过上升阈值时，会激活一个额外的 5 μ A 电流源，以便根据使能下降阈值电压 ($V_{EN(F)}$) 和外部电阻器提供可编程迟滞。

EN 引脚的建议运行条件为最大 5.5V。如果 VIN 超过 5.5V，请勿将 EN 引脚直接连接到 VIN 引脚。

7.3.10 软启动和软停止

该器件实现了可选的软启动时间（0.5ms、1ms、2ms 或 4ms），可通过引脚配置或数字接口进行配置。软启动时间可以通过 (61h) **TON_RISE** 进行数字设置，如表 7-10 中所述。该器件还实现了与软启动时间对称的软停止时间，可在 (01h) **OPERATION** 中启用或禁用。如果未启用软停止，则器件在禁用时将按节 7.3.17 中的定义进行响应。

表 7-10. **TON_RISE** 枚举列表

TON_RISE [3:0]		软启动时间 (ms)
$\geq$	$\leq$	
0d	1d	0.5
2d	3d	1
4d	7d	2

表 7-10. TON_RISE 枚举列表 (续)

TON_RISE [3:0]		软启动时间 (ms)
$\geq$	$\leq$	
8d	15d	4

该器件包含可选的 (60h) TON_DELAY (启用至开始开关的延迟) 和 (64h) TOFF_DELAY (禁用至电压开始斜降的延迟)。其时序如软启动和软停止时序中所述。

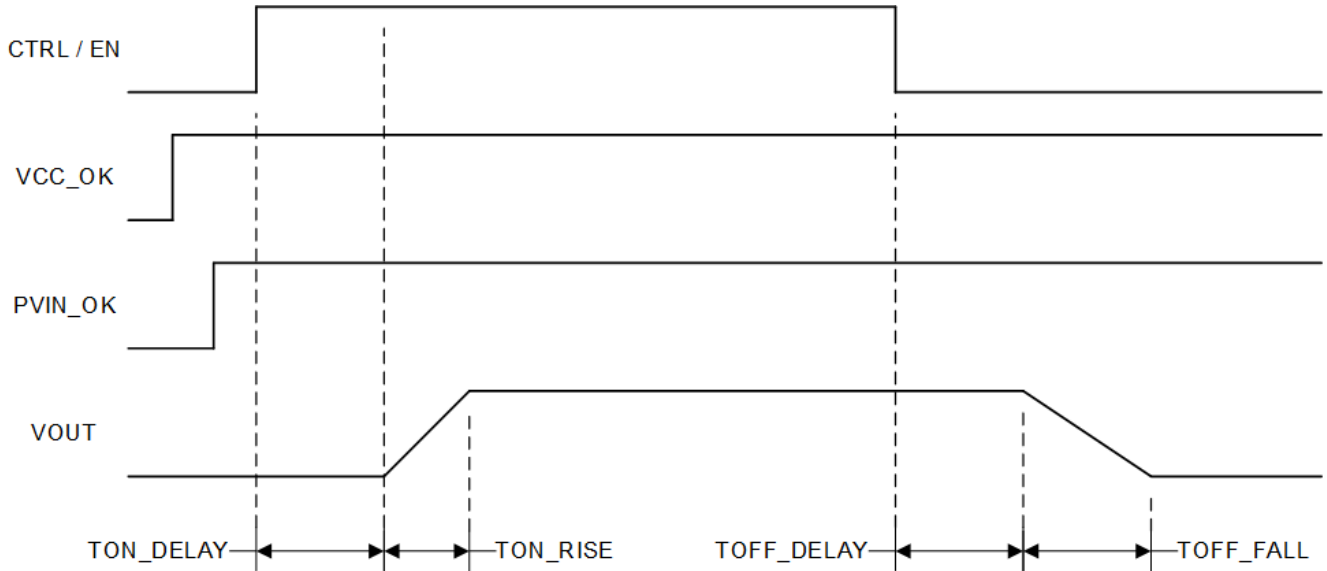


图 7-7. 软启动和软停止时序

备注

在实际中, V_{OUT} 下降时间并不完全等于 (65h) TOFF_FALL, 因为当输出电压在内部反馈中放电至 $V_{OUT} = 50\text{mV}$ 或在外部反馈中放电至 $V_{FB} = 50\text{mV}$ 后, 器件就会停止开关。

7.3.11 电源正常

该器件具有电源正常 (PG 或 PGOOD) 输出, 该输出会变为高电平来指示转换器输出何时处于稳压状态。电源正常信号输出是一个开漏输出, 必须通过上拉电阻 (通常为 $30.1\text{k}\Omega$) 上拉至 VCC 引脚或外部电压源 ($< 5.5\text{V}$) 来变为高电平。建议的电源正常信号上拉电阻值为 $1\text{k}\Omega$ 至 $100\text{k}\Omega$ 。

备注

对于使用外部电压源上拉 PG 引脚的系统, TI 建议也使用该相同的外部电压源来偏置 VCC 引脚。

在软启动斜坡完成后, 电源正常信号便会在内部延迟 t_{PG_DLY} 后变为高电平。当 SS 电压达到 $V_{SS(DONE)}$ 时, 内部软启动完成信号会变为高电平, 指示软启动斜坡已完成。如果 FB 电压降至 V_{REF} 电压的 85% 或超过 V_{REF} 电压的 110%, 则电源正常信号会在 $4\mu\text{s}$ 的内部延迟后锁存低电平。仅当重新切换 EN 或 VIN 复位后, 电源正常信号才会再次拉至高电平。

如果 OV 事件导致 FB 电压在软启动期间超过 OV 阈值, 但 FB 电压在软启动完成之前降至 OV 阈值以下, 则电源正常信号在 FB 超过 OV 阈值或降至 UV 阈值以下之前不会锁存为低电平。OV 或 UV 事件必须在软启动斜坡完成后发生, 电源正常信号才能锁定为低电平。但是, 如果 FB 在软启动期间超出 OV 阈值, 则会触发 OV 故障, 而器件对 OV 的响应 (如过压和欠压保护所述) 通常会将输出电压拉至 UV 阈值以下。

如果输入电源无法为器件上电（例如 VIN 和 VCC 都保持为零伏），并且该引脚通过外部电阻器上拉，则电源正常引脚会钳位至 [电气特性](#) 中“电源正常”部分规定的低电平

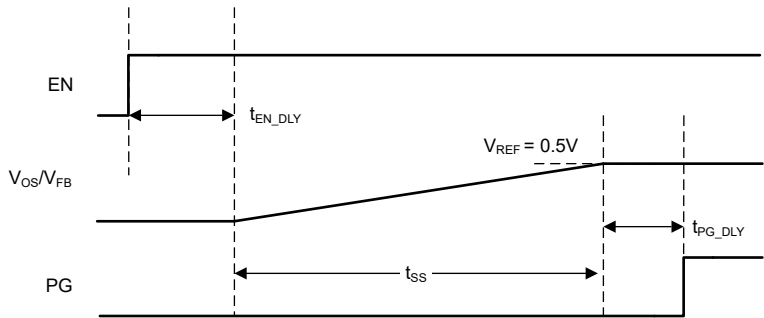


图 7-8. EN、SS 和 PG 时序图

7.3.12 过压和欠压保护

该器件可监测经过电阻分压的反馈电压以检测过压和欠压事件。当输出被启用时，OVP 功能会启用。UVP 功能在软启动周期完成后启用。

软启动完成后，当 FB 电压低于 V_{REF} 电压的 85% 时，UVP 比较器会跳闸，内部 UVP 延迟计数器开始计数。在 70 μ s UVP 延迟时间后，根据 [\(45h\) VOUT_UV_FAULT_RESPONSE](#) 中所选的故障恢复模式，器件会在经过 56ms 的睡眠时间后进入断续模式并重新启动，或锁存高侧和低侧 MOSFET。清除锁存故障的方法是复位 VIN 或重新切换 EN 引脚。当发生 UVP 故障时，[\(79h\) STATUS_WORD](#) 中的 VF 位被置位，可通过 [\(03h\) CLEAR_FAULTS](#) 将其清除。

当输出被启用时，FB 电压必须上升到高于 90% PG 低电平到高电平阈值，以清除 UVP 比较器。如果 FB 电压在软启动周期结束前未超过 90% 阈值，器件会对欠压事件做出响应。

在 UVP 延迟时间内，如果 FB 电压高于 90% PG 低电平至高电平阈值，则欠压事件将被清除，并且计时器将复位为零。当输出电压再次低于 85% UVP 阈值时，70 μ s 计时器重新启动。

当 FB 电压高于 V_{REF} 电压的 110% 时，OVP 比较器会跳闸，同时电路会锁存故障状况并将 PG 引脚驱动为低电平。高侧 MOSFET 会关断，而低侧 MOSFET 会导通，直到达到负电流限值 I_{NOCL} 。在达到负电流限值时，低边 MOSFET 将关断，高边 MOSFET 将再次导通并保持适当的导通时间（由 $V_O/V_{IN}/f_{SW}$ 确定）。在输出电压下拉至低于 UVP 阈值电压之前，该器件一直采用此模式运行。然后，器件会响应响应如 [\(41h\) VOUT_OV_FAULT_RESPONSE](#) 中所定义。当发生 OVP 故障时，[\(78h\) STATUS_BYTE](#) 中的 OVF 位和 [\(79h\) STATUS_WORD](#) 中的 VF 位都被置位，并可通过 [\(03h\) CLEAR_FAULTS](#) 清除。

如果在输出启用之前存在过压情况（例如高预偏置输出），则器件会在软启动周期开始时按如上所述对过压事件进行响应。器件会等待软启动周期完成以启用 UVP，并且根据所选的故障恢复模式，器件会在经过 56ms 的睡眠时间后进入断续模式并重新启动，或锁存。

当通过引脚配置设置故障响应时，OVP 和 UVP 的故障响应相同。但是，如果需要不同的响应，则可以通过 [\(41h\) VOUT_OV_FAULT_RESPONSE](#) 和 [\(45h\) VOUT_UV_FAULT_RESPONSE](#) 独立设置响应

作为一层额外的保护，该器件实现了一个固定 OVP。与基于百分比的 OVP 不同，该 OVP 即使在软启动完成之前也处于激活状态。固定 OVP 阈值由 [\(29h\) VOUT_SCALE_LOOP](#) 确定，可在 [\(D1h\) SYS_CFG_USER1](#) 中启用/禁用。[表 7-11](#) 中定义了固定 OVP 阈值。

表 7-11. 固定 OVP 阈值

VOUT_SCALE_LOOP (V/V)	固定 OVP 阈值 (V)
1	1.1
0.5	2.2
0.25	4.4

表 7-11. 固定 OVP 阈值 (续)

VOUT_SCALE_LOOP (V/V)	固定 OVP 阈值 (V)
0.125	6.6

7.3.13 遥感

该器件在 VOS/FB 和 GOS 引脚上集成了一个遥感放大器。遥感功能可补偿 PCB 布线上的压降，从而在稳态运行状态和负载瞬态事件中帮助保持 V_{OUT} 精度。

对于内部反馈，VOS/FB 和 GOS 引脚必须直接连接到遥感点。对于外部反馈， R_{FB_T} 顶端和 GOS 必须连接到遥感点。使用外部反馈时，分压器必须尽可能靠近器件放置，以最大限度缩短连接至 VOS/FB 引脚的走线长度。

无论采用内部还是外部反馈，从检测网络到远程位置的连接都必须是一对 PCB 走线，并在远程位置跨接一个 $0.1\ \mu\text{F}$ 或更高的高频本地旁路电容器，以进行开尔文检测。为了保持稳定的输出电压并更大限度减小纹波，这个遥感线路差分对必须远离任何噪声源（例如电感器和 SW 节点）或高频时钟线路。TI 建议用上下两个接地平面屏蔽这对遥感线路。

单端 V_{OUT} 检测通常用于本地检测。在该配置中，在本地检测点将 VOS（内部）或 R_{FB_T} 顶端（外部）连接到一个 $0.1\ \mu\text{F}$ 或更高的高频本地旁路电容器，并将 GOS 短接至 AGND。

建议的 GOS 工作范围（请参阅 AGND 引脚）为 -100mV 至 $+100\text{mV}$ 。

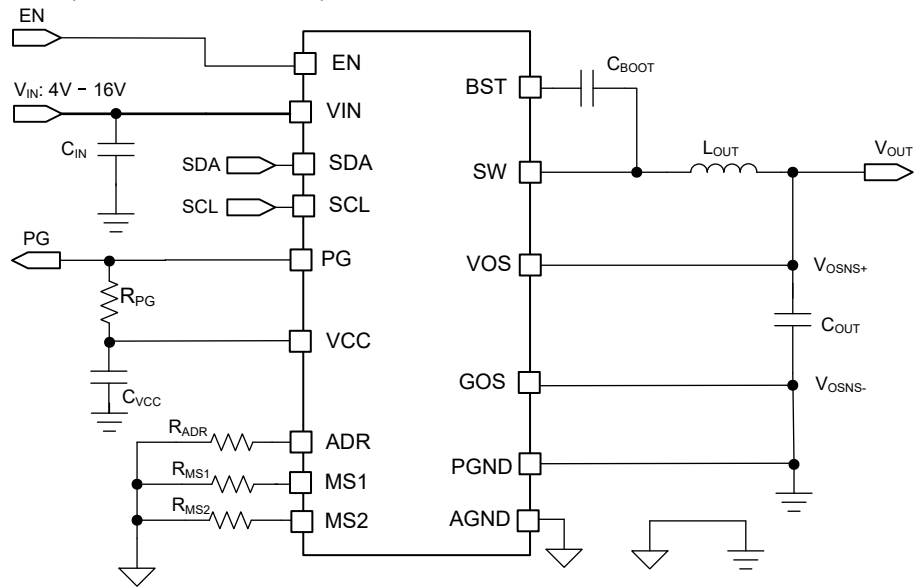


图 7-9. 通过内部反馈和遥感实现的输出电压设置

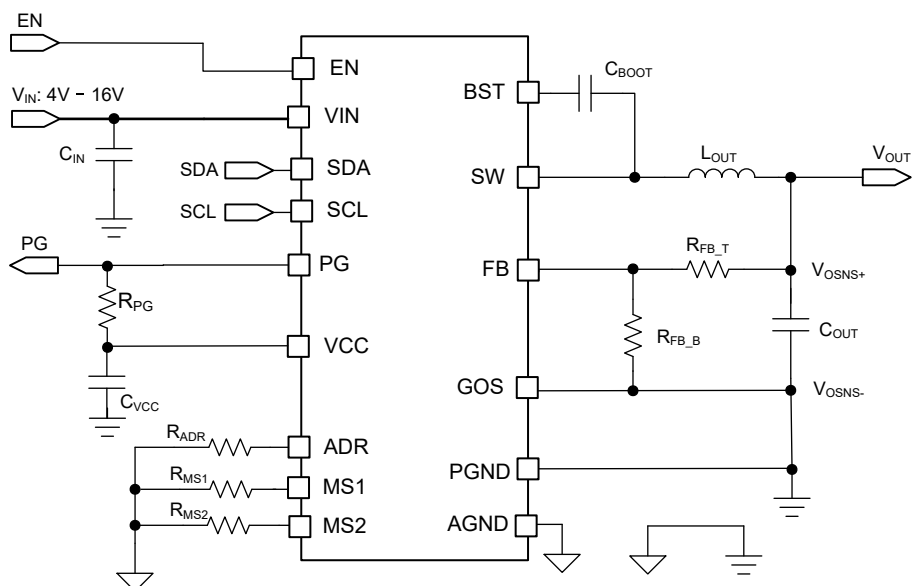


图 7-10. 通过内部反馈和遥感设置输出电压

有些用户偏好混合检测方案，即本地和遥感信息均反馈给器件。该拓扑还有一个额外的优势，即在遥感走线损坏或断开时，可提供额外一层保护。有关混合遥感的示例，请参阅图 7-10。

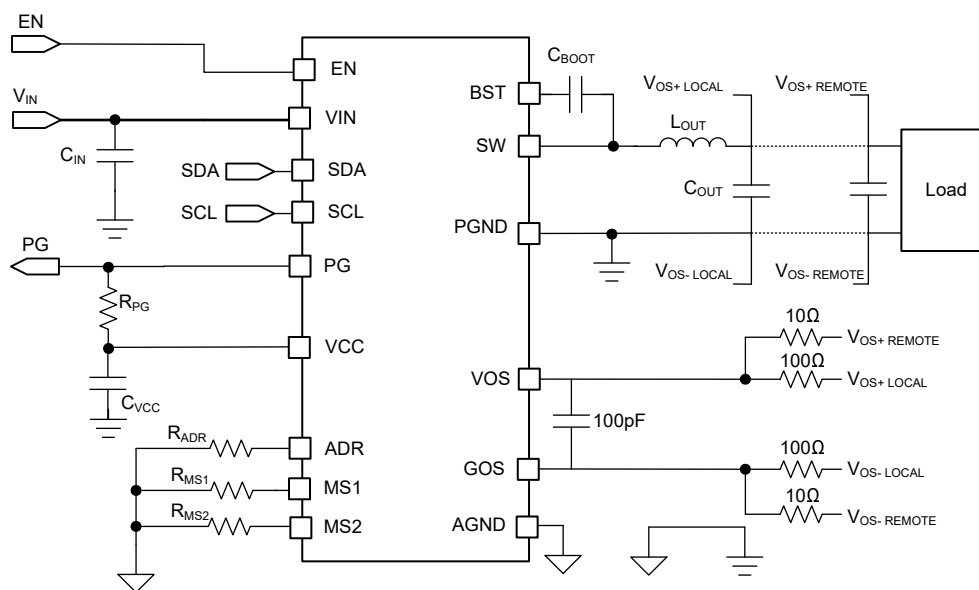


图 7-11. 混合遥感

7.3.14 低侧 MOSFET 过零

该器件使用过零 (ZC) 电路在跳跃模式期间执行零电感器电流检测。在低侧 MOSFET 关闭之前，将 ZC 阈值设置为较小的负值，从而进入不连续导通模式 (DCM) 运行。进入 DCM 后，ZC 阈值迟滞会在进入 DCM 后将阈值增大到一个较小的正值。因此，该器件可提供更高的轻负载效率。

当负载电流增加到足以使器件退出 DCM 时，ZC 电路必须检测到 16 个连续周期内负电感器电流低于 ZC 阈值，然后再返回 DCM。只需一个没有 ZC 检测的周期，即可退出 DCM。

当输出被启用时，在器件处于软启动状态的前 32 个开关周期内，ZC 电路也会被启用。如果器件经配置用于 FCCM，则 ZC 将被禁用并且器件会在软启动完成后转换至 FCCM。有关软启动完成的说明，请参阅[软启动](#)。如果在软启动完成前没有至少 32 个开关周期，例如在启动期间使用高输出预偏置，则在软启动完成后的第一个高侧 MOSFET 导通时间之前不会禁用 ZC。

7.3.15 电流检测和正过流保护

对于降压转换器，在高边 MOSFET 的导通阶段，开关电流以线性速度增加，速度由输入电压、输出电压、导通时间和输出电感值决定。在低边 MOSFET 的导通阶段，该电流以线性方式下降。开关电流的平均值等于负载电流。

该器件中的输出过流限制 (OCL) 由逐周期谷值电流检测控制电路实施。在低边 MOSFET 导通状态期间会通过测量低边 MOSFET 漏源电流来监控电感器电流。如果测得的低边 MOSFET 漏源电流高于电流限制阈值，则低边 MOSFET 将保持导通状态，直到电流电平低于电流限制阈值。这种类型的行为会降低该器件提供的平均输出电流。

OCL 可通过引脚配置（如[节 7.3.3](#)中所述）以及通过 (46h) IOUT_OC_FAULT_LIMIT 的数字接口进行设置。[表 7-12](#)中概述了数字可选的 OCL 选项。

表 7-12. IOUT_OC_FAULT_LIMIT 枚举列表

IOUT_OC_FAULT_LIMIT [4:0]		过流限制 (A)
$\geq$	$\leq$	
0d	4d	4
5d	8d	7
9d	11d	10
12d	13d	13
14d	16d	13
17d	19d	13
20d	31d	13

在过流情况下，流向负载的电流超过流向输出电容器的电流。因此，输出电压趋于降低。最终，当输出电压降至低于欠压保护阈值 (85%) 时，UVP 比较器会检测到电压下降并在 70 μ s 的等待时间后关断该器件。根据故障恢复配置，器件会断续或锁存，如[过压和欠压保护](#)中所述

备注

如果在启动期间发生了 OCL 情况，该器件仍具有基于低侧谷值电流的逐周期电流限制，但在软启动完成之前，UVP 比较器不会关断器件。

当发生正过流条件时，(78h) STATUS_BYTE 中的 OCF 位和 (79h) STATUS_WORD 中的 CF 位都被置位，可通过 (03h) CLEAR_FAULTS 将其清除。

7.3.16 低侧 MOSFET 负电流限值

该器件具有固定的逐周期负过流限值 ($I_{LS(NOC)}$)。与正过流限值类似，在低侧 MOSFET 的导通时间期间会监测电感器电流。为防止过大的负电流流过低侧 MOSFET，当器件检测到 -6A (典型阈值) 电流流过低侧 MOSFET 时，器件会关断低侧 MOSFET，然后在一次性计时器设置的导通时间内导通高侧 MOSFET (由 $V_{IN}/V_{OUT}/f_{SW}$ 确定)。高侧 MOSFET 导通时间结束后，低侧 MOSFET 再次导通。

在标称运行期间，除非选择的电感值太小或电感器变饱和，否则该器件不应触发 -6A 负电流限值阈值。该负电流限制用于在输出 OVP 事件期间使输出电容器放电。另请参阅[过压和欠压保护](#)。

当发生负过流情况时，(79h) STATUS_WORD 中的 CF 位被置位，可通过 (03h) CLEAR_FAULTS 将其清除。

7.3.17 输出电压放电

当通过 EN 或数字接口禁用该器件时，该器件将启用输出电压放电模式。该模式会强制高侧和低侧 MOSFET 均锁存，但会导通 SW 与 PGND 之间连接的内部放电 MOSFET 以使输出电压放电。FB 电压降至 50mV 以下后，放电 MOSFET 便会关断。

如果器件在 (01h) OPERATION 中配置为软停止，则不会使用输出电压放电模式，器件转而按节 7.3.10 中的定义响应。

7.3.18 UVLO 保护

该器件监测 VIN 和 VCC 引脚上的电压。

当 VIN 引脚电压低于 V_{INUVLO} 下降阈值电压，但 VCC 引脚被偏置一定的外部电压时，该器件将停止开关。在 VIN 电压超过 V_{INUVLO} 上升阈值电压后，该器件便会重新执行软启动并再次进行开关。VIN UVLO 是一种非锁存保护机制。

7.3.19 遥测

TPS544A28 中的遥测子系统支持以下测量：

- 通过 (8Bh) READ_VOUT 读取输出电压
- 通过 (8Ch) READ_IOUT 读取输出电流
- 通过 (8Dh) READ_TEMP 读取裸片温度

ADC 输出是对每项测量进行的单次转换，不会进行滚动窗口期取平均，从而实现这些关键系统参数的快速刷新。所有参数均在功能调用时按需测量。(8Bh) READ_VOUT 始终报告在 VOS/FB 和 GOS 引脚之间测得的电压，无论采用内部反馈还是外部反馈。因此，使用外部反馈时，该功能报告的是基准电压，而非实际输出电压。

7.3.20 热关断

该器件可监测内部结温。如果温度超出阈值（通常为 165°C），器件就会停止开关。当温度降至阈值以下约 15°C 时，该器件会重新发起软启动以重新开启。热关断是一种非锁存保护机制。

当发生过热故障条件时，(78h) STATUS_BYTE 中的 OTF 位被置位，可通过 (03h) CLEAR_FAULTS 将其清除。

7.4 器件功能模式

7.4.1 自动跳跃(PFM) Eco-mode 轻负载运行

如果通过 PMBus 接口选择了跳跃 (PFM) 模式，则该器件会在轻负载条件下自动降低开关频率以保持高效率。有关如何选择 PFM 模式，请参阅编程寄存器部分。

随着输出电流从重负载条件下减小，电感器电流也会减小，直到电感器纹波电流的谷值达到过零检测电流阈值（[低边 MOSFET 过零检测](#)）。过零检测阈值设置连续导通模式和不连续导通模式之间的边界。当检测到该过零检测阈值时，同步 MOSFET 会关断。随着负载电流进一步降低，转换器会进入不连续导通模式 (DCM)。导通时间保持在与连续导通模式运行期间大致相同的水平，因此以较小的负载电流将输出电容器放电至基准电压电平需要更多的时间。使用 [方程式 5](#) 来计算轻负载运行转换点 $I_{OUT(LL)}$ （例如，连续导通模式和不连续导通模式之间的边界）。

对于低输出纹波，TI 建议在跳跃模式下运行的设计中仅使用陶瓷输出电容器。

$$I_{OUT(LL)} = \frac{1}{2} \times \frac{(V_{IN} - V_O) \times V_O}{V_{IN}} \times \frac{1}{L \times f_{SW}} \quad (5)$$

7.4.2 强制连续导通模式

如果通过 PMBus 接口选择 FCCM 模式，则控制器在轻负载条件下以连续导通模式 (CCM) 运行。有关如何选择 FCCM 模式，请参阅编程寄存器部分。

在 FCCM 期间，开关频率在整个负载范围内几乎维持在一个恒定的水平，因此旨在用于需要严格控制开关频率和输出电压纹波的应用，但其代价是轻负载条件下的效率会有所下降。使用 [方程式 5](#) 可以计算典型的轻负载运行边界。当负载电流低于此计算值时，该器件以 FCCM 模式运行。

8 对寄存器进行编程

支持的 PMBus 寄存器和默认值表列出了实现的寄存器以及默认位行为和寄存器值。

表 8-1. 支持的 PMBus® 寄存器和默认值

寄存器地址	寄存器名称	R/W	NVM	默认值 (十六进制)	默认行为
01h	操作	R/W	否	00h	无电压裕度调节。
02h	ON_OFF_CONFIG	R/W	是	16h	仅通过 EN 引脚开/关。关闭时，使用 TOFF_DELAY 和 TOFF_FALL。
03h	CLEAR_FAULTS	W	否	不适用	清除所有故障。
10h	WRITE_PROTECT	R/W	是	00h	所有命令都是可写的。
15h	STORE_USER_ALL	W	否	不适用	将所有当前可存储寄存器设置存储到 NVM 中。
16h	RESTORE_USER_ALL	W	否	不适用	从 NVM 恢复所有可存储寄存器设置。
19h	CAPABILITY	R	否	C0h	定义器件功能。
20h	VOUT_MODE	R	否	96h	只读。请参阅命令说明。
21h	VOUT_COMMAND	R/W	否	VBOOT	设置输出电压。由 MS2 上的引脚配置覆盖。
25h	VOUT_MARGIN_HIGH	R/W	否	210h	在 OPERATION 中启用时设置裕度高百分比
26h	VOUT_MARGIN_LOW	R/W	否	1F0h	在 OPERATION 中启用时设置裕度低百分比
27h	VOUT_TRANSITION_RATE	R/W	否	E81Ah	设置输出电压变化速率 (mV/μs)。默认为 3.25mV/μs。
29h	VOUT_SCALE_LOOP	R	否	VBOOT	设置内部电阻分压器分压比。由 MS2 上的引脚配置覆盖。
33h	FREQUENCY_SWITCH	R/W	是	3805h	设置开关频率。默认为 600kHz。由 MS1 上的引脚配置覆盖。
41h	VOUT_OV_FAULT_RESPONSE	R/W	是	BFh	设置 Vout OV 故障响应。默认为断续模式。由 ADR 上的引脚配置覆盖。
45h	VOUT_UV_FAULT_RESPONSE	R/W	是	7Ah	设置 Vout UV 故障响应。默认为断续模式。由 ADR 上的引脚配置覆盖。
46h	IOUT_OC_FAULT_LIMIT	R/W	是	001Fh	设置过流限制。默认为 13A。由 MS1 上的引脚配置覆盖。
60h	TON_DELAY	R/W	是	0000h	50 μs 导通延迟。
61h	TON_RISE	R/W	是	F800h	从开始开关到进入稳压带的间隔时间为 1ms。由 MS1 上的引脚配置覆盖。
64h	TOFF_DELAY	R/W	是	0000h	无关断延迟。
65h	TOFF_FALL	R	否	TON_RISE	TON_RISE 和 TOFF_FALL 之间的镜像值
78h	STATUS_BYTE	R	否	41h	当前状态
79h	STATUS_WORD	R	否	0841h	当前状态
7Eh	STATUS_CML	R	否	0h	当前状态
80h	STATUS_MFR_SPECIFIC	R	否	0h	当前状态
8Bh	READ_VOUT	R	否	不适用	检测到的输出电压。
8Ch	READ_IOUT	R	否	不适用	检测到的输出电流。
8Dh	READ_TEMP1	R	否	不适用	检测到的结温。
98h	PMBUS_REVISION	R	否	55h	PMBus 1.4
99h	MFR_ID	R	否	4954h	“TI” 的 ASCII
9Ah	MFR_MODEL	R	否	544A2800h	IC 器件型号。
9Bh	MFR_REVISION	R/W	是	00h	全部为零。
ADh	IC_DEVICE_ID	R	否	5449544A2800h	IC 器件型号。
AEh	IC_DEVICE_REV	R	否	05h	IC 修订版本。
D1h	SYS_CFG_USER1	R/W	是	51h	启用 FCCM 和固定 OVF。ADR 的最高半字节为 3h。
D2h	PASSKEY	R/W	是	00h	取消设置密钥并解锁。
D4h	COMP	R/W	是	02h	请参阅寄存器说明。

表 8-1. 支持的 PMBus® 寄存器和默认值 (续)

寄存器地址	寄存器名称	R/W	NVM	默认值 (十六进制)	默认行为
D5h	VBOOT	R/W	是	0Ch	设置器件在启动后要调节至的输出电压。默认为 1V。由 MS2 上的引脚配置覆盖。
D9h	NVM_CHECKSUM	R	否	F592h	不包括密钥的 NVM 校验和。

8.1 寄存器映射

表 8-2. 寄存器映射

地址	首字母缩写词	说明	写入事务	读取事务
01h	操作	定义器件的运行情况	写入字节	读取字节
02h	ON_OFF_CONFIG	配置器件对 EN 引脚和数字使能信号的响应	写入字节	读取字节
03h	CLEAR_FAULTS	清除所有故障位	发送字节	不适用
10h	WRITE_PROTECT	控制器件写入	写入字节	读取字节
15h	STORE_USER_ALL	将所有可存储寄存器设置存储到 NVM 中	发送字节	不适用
16h	RESTORE_USER_ALL	从 NVM 恢复所有可存储寄存器设置	发送字节	不适用
19h	CAPABILITY	定义器件功能	不适用	读取字节
20h	VOUT_MODE	定义 VOUT 相关命令的数据格式	不适用	读取字节
21h	VOUT_COMMAND	设置输出电压	写入字	读取字
25h	VOUT_MARGIN_HIGH	启用时设置裕度高百分比	写入字	读取字
26h	VOUT_MARGIN_LOW	启用时设置裕度低百分比	写入字	读取字
27h	VOUT_TRANSITION_RATE	设置输出电压变化速率	写入字	读取字
29h	VOUT_SCALE_LOOP	定义内部分压器分压比	不适用	读取字
33h	FREQUENCY_SWITCH	设置开关频率	写入字	读取字
41h	VOUT_OV_FAULT_RESPONSE	设置输出过压故障响应	写入字节	读取字节
45h	VOUT_UV_FAULT_RESPONSE	设置输出欠压故障响应	写入字节	读取字节
46h	IOUT_OC_FAULT_LIMIT	设置过流限制	写入字	读取字
60h	TON_DELAY	设置从启用到开始开关的延迟	写入字	读取字
61h	TON_RISE	设置软启动时间	写入字	读取字
64h	TOFF_DELAY	设置从禁用到停止开关的延迟	写入字	读取字
65h	TOFF_FALL	设置软停止时间	不适用	读取字
78h	STATUS_BYTE	当前状态	不适用	读取字节
79h	STATUS_WORD	当前状态	不适用	读取字
7Eh	STATUS_CML	当前状态	不适用	读取字节
80h	STATUS_MFR_SPECIFIC	当前状态	不适用	读取字节
8Bh	READ_VOUT	检测到的输出电压	不适用	读取字
8Ch	READ_IOUT	检测到的输出电流	不适用	读取字
8Dh	READ_TEMP1	检测到的结温	不适用	读取字
98h	PMBUS_REVISION	PMBus 1.4	不适用	读取字节
99h	MFR_ID	TI 的 ASCII 码	不适用	块读取
9Ah	MFR_MODEL	IC 器件型号	不适用	块读取
9Bh	MFR_REVISION	制造商的修订版本号	块写入	块读取
ADh	IC_DEVICE_ID	IC 器件型号	不适用	块读取
AEh	IC_DEVICE_REV	IC 版本	不适用	块读取
D1h	SYS_CFG_USER1	其他配置	写入字节	读取字节
D2h	PASSKEY	提供锁定器件访问权限的功能	块写入	块读取
D4h	COMP	内部补偿设置	写入字节	读取字节

表 8-2. 寄存器映射（续）

地址	首字母缩写词	说明	写入事务	读取事务
D5h	VBOOT	设置器件在启动后要调节至的输出电压	写入字节	读取字节
D9h	NVM_CHECKSUM	不包括密钥的 NVM 校验和	不适用	读取字
FCh	FUSION_ID0		不适用	读取字
FDh	FUSION_ID1		不适用	块读取

复杂的位访问类型经过编码可适应小型表单元。节 8.1 展示了适用于此部分中访问类型的代码。

表 8-3. 寄存器映射访问类型代码

访问类型	代码	说明
读取类型		
R	R	读取
写入类型		
W	W	写入
复位或默认值		
-n		复位后的值或默认值

8.1.1 OPERATION (地址 = 01h)

OPERATION 在图 8-1 中展示并在表 8-4 中进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字节

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：无

更新：动态

OPERATION 命令用于根据 ON_OFF_CONFIG 命令的配置，结合 EN 引脚的输入，开启或关闭器件输出。当通过 OPERATION 命令关闭时，它还用于将输出电压设置为裕度水平的上限或下限以及选择软停止。

图 8-1. OPERATION

7	6	5	4	3	2	1	0
导通	关断	MARGIN				RESERVED	
R/W-0h	R/W-0h	R/W-0h				R-0h	

表 8-4. OPERATION 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	导通	R/W	0h	在 CMD 位为高电平的情况下对 ON_OFF_CONFIG 命令进行配置时，开启或关闭器件输出。可能还必须满足其他几个要求，才能开始电源转换。输入电压必须高于其 UVLO 阈值，并且如果 ON_OFF_CONFIG 中的 CPR 位为高电平，则使能引脚必须为高电平。 0h = 器件输出关闭 1h = 器件输出开启
6	关断	R/W	0h	通过 OPERATION[7] (ON 位从 1 转换为 0) 命令器件输出关闭时并且在 CMD 位为高电平的情况下对 ON_OFF_CONFIG 命令进行配置时，设置关闭行为。如果 ON 位为 1，则忽略 OFF 位。 0h = 通过 OPERATION[7] 命令关闭时，立即关闭器件输出，强制功率级进入高阻态并且不遵循编程的 TOFF_DELAY 和编程的 TOFF_FALL。 1h = 软关闭。通过 OPERATION[7] 命令关闭时，使用 TOFF_DELAY 中编程的关闭延迟和 TOFF_FALL 中的斜降。
5-2	MARGIN	R/W	0h	设置裕度状态，与 OPERATION[7] 位值无关。除下面列出的值外，其他值均为无效/不受支持的数据。如果裕度关闭，则输出电压源为 VOUT_COMMAND，OV/UV 故障的行为符合其各自故障响应寄存器中的编程设定。 0h = 裕度关闭，故障的行为符合编程设定。 1h = 裕度关闭，故障的行为符合编程设定。 2h = 裕度关闭，故障的行为符合编程设定。 3h = 裕度关闭，故障的行为符合编程设定。 5h = 裕度高 (忽略故障)。输出电压目标值使用 VOUT_MARGIN_LOW。忽略 UV 故障，不触发关断但触发状态更新。 6h = 裕度低 (对故障执行操作)。输出电压目标值使用 VOUT_MARGIN_LOW。根据各自的故障响应设置，触发 OV/UV 故障。 9h = 高裕度 (忽略故障)。输出电压目标值使用 VOUT_MARGIN_HIGH。忽略 OV 故障，不触发关断但触发状态更新。 Ah = 高裕度 (对故障执行操作)。输出电压目标值使用 VOUT_MARGIN_HIGH。根据各自的故障响应设置，触发 OV/UV 故障。
1-0	RESERVED	R	0h	保留

8.1.2 ON_OFF_CONFIG (地址 = 02h)

ON_OFF_CONFIG 在图 8-2 中展示并在表 8-5 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字节

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

ON_OFF_CONFIG 命令配置开启和关闭器件输出所需的使能引脚输入和串行总线命令的组合。这包括将电源施加到 VIN 时单元的响应方式。对于 ON_OFF_CONFIG，器件 EN 引脚是 CONTROL 引脚。

图 8-2. ON_OFF_CONFIG

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED			PU	CMD	CPR	POL	CPA
R-0h			R/W-Xh	R/W-Xh	R/W-Xh	R-1h	R/W-Xh

表 8-5. ON_OFF_CONFIG 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-5	RESERVED	R	0h	保留
4	PU	R/W	X	将默认设置为在有电源的任何时候打开器件输出，或设置为通过 CONTROL 引脚和/或 OPERATION 命令控制器件输出的打开和关闭。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 无论 CONTROL 引脚或 OPERATION 命令的状态如何，任何时候只要存在足够的输入电源，器件输出就会打开。 1h = 只有在 CONTROL 引脚和/或 OPERATION 命令发出命令 (根据 ON_OFF_CONFIG 命令中的编程设定) 之后，器件输出才会打开。
3	CMD	R/W	X	CMD 位设置器件如何响应 OPERATION 命令。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 器件忽略 OPERATION 命令中的 ON 位。 1h = 器件响应 OPERATION 命令中设置为高电平的 ON 位 (以及 CONTROL 引脚，如果通过 CPR 配置)，以启用器件输出。
2	CPR	R/W	X	CPR 位设置 CONTROL 引脚响应。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 器件忽略 CONTROL 引脚以启用其输出。 1h = 器件输出响应 CONTROL 引脚。
1	POL	R	1h	POL 位设置 CONTROL 引脚的极性。 1h = CONTROL 引脚具有高电平有效极性。
0	CPA	R/W	X	当器件输出通过 CONTROL 引脚关闭时，CPA 位设置 CONTROL 引脚的操作。必须将器件配置为通过 CPR 位响应控制引脚。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 当输出通过 CONTROL 引脚关闭时，继续稳压 TOFF_DELAY 中编程的时间并在 TOFF_FALL 中编程的时间内斜降。 1h = 当输出通过 CONTROL 引脚关闭时，立即关闭输出。

8.1.3 CLEAR_FAULTS (地址 = 03h)

图 8-3 展示了 CLEAR_FAULTS，表 8-6 对其进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：发送字节

读取事务：不适用

数据格式：无数据

NVM 备份：无

更新：动态

CLEAR_FAULTS 是一个用于清除已设置的所有故障位的命令。该命令会清除所有状态寄存器中的所有位。CLEAR_FAULTS 是不带数据的只写命令。

CLEAR_FAULTS 命令不会导致已针对故障情况锁闭的单元重新启动。如果在清除该位后故障仍然存在，则会立即再次置位故障位并通过常规方式通知主机

图 8-3. CLEAR_FAULTS

7	6	5	4	3	2	1	0
CLEAR_FAULTS							
W-0h							

表 8-6. CLEAR_FAULTS 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	CLEAR_FAULTS	W	0h	不适用

8.1.4 WRITE_PROTECT (地址 = 10h)

WRITE_PROTECT 在图 8-4 中展示并在表 8-7 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字节

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

WRITE_PROTECT 命令用于控制对 PMBus 器件的写入。该命令的目的是防止意外更改。该命令并不用于防止对器件配置或运行进行故意或恶意更改。无论 WRITE_PROTECT 设置如何，所有支持的命令都允许读取其参数。

备注

除非作为允许的命令列出，否则应通过写保护阻止发送字节命令（例如 CLEAR_FAULTS、STORE_USER_ALL 和 RESTORE_USER_ALL）。

图 8-4. WRITE_PROTECT

7	6	5	4	3	2	1	0
保护			RESERVED				
R/W-Xh			R-0h				

表 8-7. WRITE_PROTECT 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-5	保护	R/W	X	复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 启用对所有命令的写入。 1h = 禁用除 WRITE_PROTECT、STORE_USER_ALL、OPERATION、ON_OFF_CONFIG、VOUT_COMMAND 和 PASSKEY 命令之外的所有写入操作。 2h = 禁用除 WRITE_PROTECT、STORE_USER_ALL、OPERATION 和 PASSKEY 命令之外的所有写入操作。 4h = 禁用除 WRITE_PROTECT、STORE_USER_ALL 和 PASSKEY 命令之外的所有写入操作。
4-0	RESERVED	R	0h	保留

8.1.5 STORE_USER_ALL (地址 = 15h)

图 8-5 展示了 STORE_USER_ALL，表 8-8 对其进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：发送字节

读取事务：不适用

数据格式：无数据

NVM 备份：无

更新：动态

STORE_USER_ALL 命令指示 PMBus 器件将当前寄存器设置存储到非易失性存储器中。

由于 EEPROM 编程时间，该命令的持续时间约为 125ms。当器件忙于对 EEPROM 进行编程时，对于任何传入的 PMBus 流量，该器件将 ACK (确认) 其器件地址；但根据 PMBus 器件 II 第 10.8.7 节的规定，对其他任何字节 NACK (否定确认)，同时所有数据位均返回 1。在 EEPROM 编程期间，器件不会为被 NACK (否定确认) 的事务设置任何状态标志。

EEPROM 编程故障将置位 (78h) STATUS_BYTE 中的 CML 位和 (7Eh) STATUS_CML 寄存器中的 OTH 位。

不建议在启用输出时执行 NVM 存储操作 (尽管未明确禁止用户这样做)，因为中断可能会导致 NVM 损坏。发布 NVM 存储命令后，TI 建议禁用稳压并至少等待 125ms 后再继续。

图 8-5. STORE_USER_ALL

7	6	5	4	3	2	1	0
STORE_USER_ALL							
W-0h							

表 8-8. STORE_USER_ALL 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	STORE_USER_ALL	W	0h	不适用

8.1.6 RESTORE_USER_ALL (地址 = 16h)

图 8-6 展示了 RESTORE_USER_ALL，表 8-9 对其进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：发送字节

读取事务：不适用

数据格式：无数据

NVM 备份：无

更新：动态

RESTORE_USER_ALL 命令指示 PMBus 器件将用户存储非易失性存储器的全部内容复制到操作存储器中的匹配位置。在最后一次下电上电期间通过引脚检测设置的所有值均会覆写操作存储器中的值，同时也会覆写从用户存储区检索到的值。

备注

允许在输出启用时使用 RESTORE_USER_ALL 命令。但是，PMBus 命令将在复制操作期间被忽略，并且如果在启用输出的情况下执行该操作，可能会产生不可预测、不利甚至灾难性的结果。TI 建议在通过 ON_OFF_CONFIG 中编程的方法发出此命令之前关闭器件输出。

图 8-6. RESTORE_USER_ALL

7	6	5	4	3	2	1	0
RESTORE_USER_ALL							
W-0h							

表 8-9. RESTORE_USER_ALL 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	RESTORE_USER_ALL	W	0h	不适用

8.1.7 CAPABILITY (地址 = 19h)

CAPABILITY 在图 8-7 中展示并在表 8-10 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：无

更新：不适用

该命令为主机系统提供了一种确定此 PMBus 器件的一些关键功能的方法。该命令为只读命令，具有一个格式如下的数据字节。

图 8-7. CAPABILITY

7	6	5	4	3	2	1	0
PEC	SPD		ALRT	格式	AVS	RESERVED	
R-1h	R-2h		R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	

表 8-10. CAPABILITY 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	PEC	R	1h	1h = 支持数据包错误检查。
6-5	SPD	R	2h	2h = 支持的最大总线速度为 1MHz。
4	ALRT	R	0h	0h = 该器件没有 SMB_ALERT# 引脚并且不支持 SMBus 警报响应协议。
3	格式	R	0h	0h = 该器件支持 LINEAR11、ULINEAR16、SLINEAR16 或 DIRECT 格式 (相对于 IEEE 半精度浮点格式) 。
2	AVS	R	0h	0h = 表示不支持 AVSBus。
1-0	RESERVED	R	0h	保留

8.1.8 VOUT_MODE (地址 = 20h)

VOUT_MODE 在图 8-8 中展示并在表 8-11 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：无

更新：不适用

VOUT_MODE 命令的数据字节设置 VOUT 相关命令的数据格式。

数据有效性：尝试写入 VOUT_MODE 命令应被视为无效数据或不受支持的数据 (ivd)，器件应按照 ivd 所述进行响应。

图 8-8. VOUT_MODE

7	6	5	4	3	2	1	0
VOUT_MODE				VOUT_EXPONENT			
R-4h				R-16h			

表 8-11. VOUT_MODE 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-5	VOUT_MODE	R	4h	4h = 相对模式，线性格式 (ULINEAR16、SLINEAR16) 。
4-0	VOUT_EXPONENT	R	16h	16h = 指数值为 - 10 (相当于 0.976mV/计数) 。

8.1.9 VOUT_COMMAND (地址 = 21h)

VOUT_COMMAND 在图 8-9 中展示并在表 8-12 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：ULINEAR16 0.976mV，由 VOUT_MODE LSB 确定

NVM 备份：无

更新：动态

当使用 PMBus 来设置稳压电压时，命令的输出电压（以伏特为单位）由 VOUT_COMMAND、VOUT_MARGIN_HIGH、VOUT_MARGIN_LOW 和 OPERATION 命令的组合确定。如 VOUT_MODE 命令的说明所述，VOUT_MODE 阶跃为 0.976mV。

建议的 VOUT_COMMAND 值范围取决于所配置的 (29h) VOUT_SCALE_LOOP。设计不会将 VOUT_COMMAND 值限制在此建议范围内。但是，VOUT_COMMAND 的最大钳位为 5.5V。执行 MARGIN_HIGH 时，该最大钳位不受影响。低电压没有最小钳位。

上电时，VOUT_COMMAND 的复位值根据 VBOOT/VOUT_SCALE_LOOP 得出。当电源轨因编程为 ON_OFF_CONFIG 的机制或由于故障而被禁用时，VOUT_COMMAND 中的值将更新为 VBOOT。

备注

该寄存器可在软启动或软停止期间更改。然而，电源轨将继续以编程到 TON_RISE/TOFF_FALL 中的速率上升/下降到原始目标 (VBOOT)。软启动完成后（如果 VOUT_COMMAND 与 VBOOT 值不同），器件将立即以编程的 VOUT_TRANSITION_RATE 从 VBOOT 值转换到最新写入的 VOUT_COMMAND。

在稳压期间，即使 DAC 仍转换到之前编程的 VOUT_COMMAND，也允许对 VOUT_COMMAND 进行抢占式写入。器件将立即开始以编程到 VOUT_TRANSITION_RATE 中的速率转换到新目标。

图 8-9. VOUT_COMMAND

15	14	13	12	11	10	9	8
RESERVED			VOUT_COMMAND				
R-0h			R/W-0h				
7	6	5	4	3	2	1	0
VOUT_COMMAND							
R/W-0h							

表 8-12. VOUT_COMMAND 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-13	RESERVED	R	0h	保留
12-0	VOUT_COMMAND	R/W	0h	通过 PMBus 接口设置输出电压目标。

表 8-13. 建议输出电压范围

VOUT_SCALE_LOOP (V/V)	建议的 V _{OUT} 范围 (V)	建议的 VOUT_COMMAND 范围 (十进制)
1	0.35 - 0.9	359 - 922
0.5	0.5 - 1.8	512 - 1844
0.25	1.4 - 3.6	1434 - 3687
0.125	2.8 - 5.505	2868 - 5637

8.1.10 VOUT_MARGIN_HIGH (地址 = 25h)

VOUT_MARGIN_HIGH 在图 8-10 中展示并在表 8-14 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：ULINEAR16，相对

NVM 备份：无

更新：动态

当 OPERATION 命令设置为“高裕度”时，该命令通过提高 VREF 基准电压，增加稳压电压的值。由于在 (20h) VOUT_MODE 寄存器 - 位 [7] 中将 Vout 格式设置为相对，因此命令中的 Vout 将增加此命令中所示的乘法系数。该命令也使用由 (20h) VOUT_MODE 指定的 LSB。

图 8-10. VOUT_MARGIN_HIGH

15	14	13	12	11	10	9	8
RESERVED					VOUT_MARGIN_HIGH		
R-0h					R/W-420h		
7	6	5	4	3	2	1	0
VOUT_MARGIN_HIGH							
R/W-420h							

表 8-14. VOUT_MARGIN_HIGH 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	RESERVED	R	0h	保留
10-0	VOUT_MARGIN_HIGH	R/W	420h	高裕度输出电压。 420h = 3.125% 440h = 6.25%

8.1.11 VOUT_MARGIN_LOW (地址 = 26h)

VOUT_MARGIN_LOW 在图 8-11 中展示并在表 8-15 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：ULINEAR16，相对

NVM 备份：无

更新：动态

当 OPERATION 命令设置为“低裕度”时，该命令可用于通过下移 VREF 基准电压，降低稳压电压的值。由于在 (20h) VOUT_MODE 寄存器 - 位 [7] 中将 Vout 格式设置为相对，因此命令中的 Vout 将降低此命令中所示的乘法系数。该命令也使用由 (20h) VOUT_MODE 指定的 LSB。

图 8-11. VOUT_MARGIN_LOW

15	14	13	12	11	10	9	8
RESERVED						VOUT_MARGIN_LOW	
R-0h						R/W-3E0h	
7	6	5	4	3	2	1	0
VOUT_MARGIN_LOW							
R/W-3E0h							

表 8-15. VOUT_MARGIN_LOW 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-10	RESERVED	R	0h	保留
9-0	VOUT_MARGIN_LOW	R/W	3E0h	低裕度输出电压。 3C0h = -6.25% 3E0h = -3.125%

8.1.12 VOUT_TRANSITION_RATE (地址 = 27h)

VOUT_TRANSITION_RATE 在图 8-12 中展示并在表 8-16 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：无

更新：动态

当 PMBus 器件接收到 VOUT_COMMAND 或操作（裕度高、裕度低、裕度关闭）而导致输出电压发生变化时，该命令设置输出应改变电压的速率（以 mV/us 为单位）。当命令器件打开或关闭时，此命令的变化率不适用。

数据有效性：

对指数和尾数中的只读位的写入将被忽略，并且其值不会更新。读取/写入尾数位中的每个二进制组合都是可写和可读的。但是，实际输出电压压摆率设置为最接近的受支持设置。此外，针对每种支持的设置，从 EEPROM 恢复的尾数值是固定的。

图 8-12. VOUT_TRANSITION_RATE

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT						RESERVED	
R-1Dh						R-0h	
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED	VOUT_TRANSITION_RATE						
R-0h	R/W-1Ah						

表 8-16. VOUT_TRANSITION_RATE 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	1Dh	线性格式二进制补码指数。固定指数为 -3，得到 0.125mV/μs LSB。
10-7	RESERVED	R	0h	保留
6-0	VOUT_TRANSITION_RATE	R/W	1Ah	线性格式二进制补码尾数。

8.1.13

表 8-17. VOUT_TRANSITION_RATE 枚举列表

VOUT_TRANSITION_RATE [6:0]		转换率 (mV/μs)
≥	≤	
0d	19d	1.625
20d	38d	3.25
39d	77d	6.5
78d	127d	13

8.1.14 VOUT_SCALE_LOOP (地址 = 29h)

VOUT_SCALE_LOOP 在图 8-13 中展示并在表 8-18 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：SLINEAR11

NVM 备份：EEPROM

更新：下电上电时

VOUT_SCALE_LOOP 允许 PMBus 器件在命令电压和控制电路输入电压之间进行映射。VOUT_SCALE_LOOP 还对内部精密电阻分频器进行编程，因此无需外部分频器。

图 8-13. VOUT_SCALE_LOOP

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT					RESERVED		
R-1Dh					R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED				VOUT_SCALE_LOOP			
R-0h				R-4h			

表 8-18. VOUT_SCALE_LOOP 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	1Dh	线性格式二进制补码指数。固定指数为 -3，得到 0.125 LSB。
10-4	RESERVED	R	0h	保留
3-0	VOUT_SCALE_LOOP	R	4h	线性格式尾数。 1h = 0.125V/V 的 VOUT_SCALE_LOOP 2h = 0.25V/V 的 VOUT_SCALE_LOOP 4h = 0.5V/V 的 VOUT_SCALE_LOOP 8h = 1.00V/V 的 VOUT_SCALE_LOOP

8.1.15 FREQUENCY_SWITCH (地址 = 33h)

FREQUENCY_SWITCH 在图 8-14 中展示并在表 8-19 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：SLINEAR11

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

FREQUENCY_SWITCH 会设置活动器件的开关频率。

图 8-14. FREQUENCY_SWITCH

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT					RESERVED		
R-7h					R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED				FREQUENCY_SWITCH			
R-0h				R/W-Xh			

表 8-19. FREQUENCY_SWITCH 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	7h	线性格式二进制补码指数。固定指数为 7，得到 128kHz LSB。
10-4	RESERVED	R	0h	保留
3-0	FREQUENCY_SWITCH	R/W	X	线性格式二进制补码尾数。复位时，该值将由 NVM 确定。

8.1.16

表 8-20. FREQUENCY_SWITCH 枚举列表

FREQUENCY_SWITCH [3:0]		开关频率 (kHz)
$\geq$	$\leq$	
0d	4d	500
5d	5d	600
6d	6d	800
7d	8d	1000
9d	9d	1200
10d	15d	1400

8.1.17 VOUT_OV_FAULT_RESPONSE (地址 = 41h)

VOUT_OV_FAULT_RESPONSE 在图 8-15 中展示并在表 8-21 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

VOUT_OV_FAULT_RESPONSE 命令指示器件执行何种操作来响应输出过压故障。

图 8-15. VOUT_OV_FAULT_RESPONSE

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED			RS_OV			TD_OV	
R-0h			R/W-Xh			R-0h	

表 8-21. VOUT_OV_FAULT_RESPONSE 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-6	RESERVED	R	0h	保留
5-3	RS_OV	R/W	X	输出电压过压重试设置。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 器件不会尝试重启。输出保持禁用状态，直到故障清除为止（请参阅 PMBus 规范的第 10.7 节。） 7h = 器件持续进行不受限制的正常启动（软启动），直到命令其关闭或移除辅助电源，或其他故障条件导致单元关断。 数据有效性： 将不接受 000 或 111 以外的任何值，此类尝试应视为无效数据或不受支持的数据 (ivd)，器件应按照 ivd 中所述进行响应。请注意，由于所有 3 位必须相同，EEPROM 中只存储一位（位 5）。
2-0	TD_OV	R	0h	输出过压重试延时时间设置。 0h = 重试延时时间设置为零值，意味着该单元不会延迟重启。仅当通过 RS_OV[2:0] = 000 禁用重启时，才支持该设置。输出保持禁用状态，直到故障清除为止（请参阅 PMBus 规范的第 10.7 节。）

8.1.18 VOUT_UV_FAULT_RESPONSE (地址 = 45h)

VOUT_UV_FAULT_RESPONSE 在图 8-16 中展示并在表 8-22 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

VOUT_OV_FAULT_RESPONSE 命令指示器件执行何种操作来响应输出欠压故障。

图 8-16. VOUT_UV_FAULT_RESPONSE

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED			RS_UV			TD_UV	
R-0h			R/W-Xh			R-2h	

表 8-22. VOUT_UV_FAULT_RESPONSE 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-6	RESERVED	R	0h	保留
5-3	RS_UV	R/W	X	输出电压欠压重试设置。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 器件不会尝试重启。输出保持禁用状态，直到故障清除为止（请参阅 PMBus 规范的第 10.7 节。） 7h = 器件持续进行不受限制的正常启动（软启动），直到命令其关闭或移除辅助电源，或其他故障条件导致单元关断。 数据有效性： 将不接受 000 或 111 以外的任何值，此类尝试应视为无效数据或不受支持的数据 (ivd)，器件应按照 ivd 中所述进行响应。请注意，由于所有 3 位必须相同，EEPROM 中只存储一位（位 5）。
2-0	TD_UV	R	2h	这些位会选择从检测故障条件信号到电源轨关断的延迟。换句话说，这将设置故障抗尖峰脉冲持续时间，以便如果故障条件在延迟计数器到期之前消失，则延迟计数器将复位为零。抗尖峰脉冲计数器中的误差为 +/- 1us，因此该误差在较低的设置下更明显。断续持续时间或连续重启尝试之间的时间也配置为 64us 的响应延迟和 52ms 的断续延迟。 2h = 输出欠压重试/断续时间设置

8.1.19 IOUT_OC_FAULT_LIMIT (地址= 46h)

IOUT_OC_FAULT_LIMIT 在图 8-17 中展示并在表 8-23 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

IOUT_OC_FAULT_LIMIT 命令设置导致过流检测器指示过流故障条件的输出电流值。此处选择的阈值将与检测到的低侧谷值电流进行比较。有关更多详细信息，请参阅过流限制和低侧电流检测。

图 8-17. IOUT_OC_FAULT_LIMIT

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT					RESERVED		
R-0h					R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED			IOUT_OC_FAULT_LIMIT				
R-0h			R/W-Xh				

表 8-23. IOUT_OC_FAULT_LIMIT 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	0h	线性格式二进制补码指数，得到一个 1A LSB。
10-5	RESERVED	R	0h	保留
4-0	IOUT_OC_FAULT_LIMIT	R/W	X	IOUT_OC_FAULT_LIMIT 命令设置导致过流检测器指示过流故障情况的输出电流值。此处选择的阈值将与检测到的低侧谷值电流进行比较。有关更多详细信息，请参阅过流限制和低侧电流检测。 复位时，该值将由 NVM 确定。 数据有效性： 在设置 OCL 限制时，只会考虑 IOUT_OC_FAULT_LIMIT[4:0]。任何大于 31 的值都将被混叠。

表 8-24. IOUT_OC_FAULT_LIMIT 枚举列表

IOUT_OC_FAULT_LIMIT [4:0]		过流限制 (A)
$\geq$	$\leq$	
0d	4d	4
5d	8d	7
9d	11d	10
12d	13d	13
14d	16d	13
17d	19d	13
20d	31d	13

8.1.20 TON_DELAY (地址 = 60h)

TON_DELAY 在图 8-18 中展示并在表 8-25 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

TON_DELAY 命令设置从收到启动条件 (由 ON_OFF_CONFIG 命令进行编程) 到输出电压开始上升的时间 (以毫秒为单位) 。

图 8-18. TON_DELAY

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT					RESERVED		
R-0h					R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED							TON_DELAY
R-0h							R/W-Xh

表 8-25. TON_DELAY 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	0h	线性格式二进制补码指数。该指数不可编程，其结果为 1ms LSB。
10-1	RESERVED	R	0h	保留
0	TON_DELAY	R/W	X	这些位选择 TON_DELAY 时间。选择 000b 后，强制执行最低 50us 延迟。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 0.05ms TON_DELAY 1h = 1ms TON_DELAY

8.1.21 TON_RISE (地址 = 61h)

TON_RISE 在图 8-19 中展示并在表 8-26 中进行介绍。

返回到汇总表。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

TON_RISE 命令会设置从输出开始上升到电压进入稳压范围的时间（以毫秒为单位），这可以有效地设置软启动期间基准 DAC 的压摆率。使用 VOUT_COMMAND 进行引导时，软启动时间与 TON_RISE 选择不同。有关更多详细信息，请参阅启动和关断部分。

图 8-19. TON_RISE

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT					RESERVED		
R-1Fh					R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED				TON_RISE			
R-0h				R/W-Xh			

表 8-26. TON_RISE 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	1Fh	线性格式二进制补码指数。该指数不可编程，其结果为 0.5ms LSB。
10-4	RESERVED	R	0h	保留
3-0	TON_RISE	R/W	X	该位选择 TON_RISE 时间。复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 0.5ms TON_RISE 2h = 1ms TON_RISE 4h = 2ms TON_RISE 8h = 4ms TON_RISE

表 8-27. TON_RISE 枚举列表

TON_RISE [3:0]		软启动时间 (ms)
$\geq$	$\leq$	
0d	1d	0.5
2d	3d	1
4d	7d	2
8d	15d	4

8.1.22 TOFF_DELAY (地址 = 64h)

TOFF_DELAY 在图 8-20 中展示并在表 8-28 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

TOFF_DELAY 命令设置从收到停止条件 (由 ON_OFF_CONFIG 命令进行编程) 到器件开始软停止运行的时间 (以毫秒为单位) 。

图 8-20. TOFF_DELAY

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT					RESERVED		
R-0h					R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED							TOFF_DELAY
R-0h							R/W-Xh

表 8-28. TOFF_DELAY 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	0h	线性格式二进制补码指数。该指数不可编程，其结果为 1ms LSB。
10-1	RESERVED	R	0h	保留
0	TOFF_DELAY	R/W	X	该位选择 TOFF_DELAY 时间。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 0ms TOFF_DELAY 1h = 1ms TOFF_DELAY

8.1.23 TOFF_FALL (地址 = 65h)

TOFF_FALL 在图 8-21 中展示并在表 8-29 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

TOFF_FALL 命令设置从关断延迟时间结束到根据命令将基准 DAC 设为 0mV 的时间（以毫秒为单位）。此命令用于使输出电压以受控速率降低，从而有效地设置软关断期间基准 DAC 的压摆率。在 TOFF_FALL 的实现中，会针对每个支持的 32 VBOOT 电平调整 VREF DAC 压摆率，以获得压摆率，从而使软停止时间接近（但并非总是完全等于）目标值。0.5ms TOFF_FALL 的所选压摆率与 TON_RISE 中所示的相同，但具有负斜率。TOFF_FALL 的缩放方式与 TON_RISE 相同，但具有不同的设置。

在实际中，VOUT 下降时间并不完全等于 TOFF_FALL 值，因为一旦输出电压放电至 50mV，器件就会停止开关。

图 8-21. TOFF_FALL

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT[4:0]					RESERVED		
R-1Fh					R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED				TOFF_FALL[3:0]			
R-0h				R-Xh			

表 8-29. TOFF_FALL 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT[4:0]	R	1Fh	线性格式二进制补码指数。该指数不可编程，其结果为 0.5ms LSB。
10-4	RESERVED	R	0h	保留
3-0	TOFF_FALL[3:0]	R	X	TOFF_FALL 将是只读的，并且将具有 TON_RISE 中编程的相同值。 复位时，该值将由 NVM 确定。

8.1.24 STATUS_BYTE (地址 = 78h)

表 8-30 展示了 STATUS_BYTE。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：无

更新：动态

STATUS_BYTE 命令返回一字节信息，汇总最严重故障，例如过压、过流、过热等。支持的 STATUS_BYTE 消息内容如下表所述。STATUS_BYTE 等于 STATUS_WORD 的低字节。STATUS_BYTE 中的条件仅为摘要信息。这些条件生效时会通知主机在发生故障时应该检查哪些其他 STATUS 寄存器。不支持清除单个故障。必须通过 (03h) CLEAR_FAULTS 命令同时清除所有故障位。

表 8-30. STATUS_BYTE 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
6	关断	R	1h	LIVE (未锁存) 状态位。 0h = 该器件已启用并正在转换电源。 1h = 该器件由于任何原因 (包括只是未被启用) 而不会转换电源。
5	OVF	R	0h	发生了输出过压故障。 0h = 未发生输出过压故障。 1h = 发生了输出过压故障。
4	OCF	R	0h	发生了输出过流故障。 0h = 未发生输出过流故障。 1h = 发生了输出过流故障。
3	不支持	R	0h	不受支持且始终设置为 0。
2	OTF	R	0h	发生了过热故障。 0h = 未发生温度故障或警告。 1h = 发生温度故障或警告
1	CML	R	0h	(7Eh) STATUS_CML 中发生了通信、存储器或逻辑故障 0h = 未发生通信、存储器、逻辑故障。 1h = 发生了通信、存储器或逻辑故障。
0	OTH	R	1h	该位用于标记 STATUS_BYTE 中的其他位故障未涵盖的故障 - 在此情况下：LOW_VIN、UCF 和 UVF。 0h = 未发生上述故障以外的故障。 1h = 发生了上面列出的故障以外的故障。

8.1.25 STATUS_WORD (地址= 79h)

STATUS_WORD 在图 8-22 中展示并在表 8-31 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：无符号二进制 (2 字节)

NVM 备份：无

更新：动态

STATUS_WORD 命令返回两字节信息，汇总最严重故障，例如过压、过流、过热等。STATUS_WORD 的低字节与 STATUS_BYTE 为同一寄存器。下表介绍了支持的 STATUS_WORD 消息内容。STATUS_BYTE 中的条件仅为摘要信息。

图 8-22. STATUS_WORD

15	14	13	12	11	10	9	8
VF	CF	输入	制造商	PGOOD_Z	不支持		
R-0h	R-0h	R-1h	R-0h	R-1h	R-0h		
7	6	5	4	3	2	1	0
STATUS_BYTE							
R-0h							

表 8-31. STATUS_WORD 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15	VF	R	0h	存在 VOUT 故障 (OVF + UVF)。 0h = 未发生输出电压故障或警告。 1h = 发生了输出电压故障或警告。
14	CF	R	0h	存在故障 (OCF + NOC/UCF)。 0h = 未发生输出过流故障。 1h = 发生了输出电流故障 (OCF + NOC/UCF)。
13	输入	R	1h	存在输入故障或警告。 0h = 未发生输入故障或警告。 1h = 发生了输入故障或警告。
12	制造商	R	0h	(80h)STATUS_MFR_SPECIFIC 中存在故障，位 7 DCM 除外 0h = 未发生 STATUS_MFR_SPECIFIC 故障。 1h = 已发生 STATUS_MFR_SPECIFIC 故障。
11	PGOOD_Z	R	1h	当转换器输出电压超出模拟中定义的过压警告 (OVW) 和欠压警告 (UVW) 限制时，电源不正常用于标记。该信号未锁存，始终表示器件的当前状态，但会锁存将 PGOOD 置为低电平的故障。 0h = 电源正常。 1h = 电源不正常。
10-8	不支持	R	0h	不受支持且始终设置为 0。
7-0	STATUS_BYTE	R	0h	始终等于 STATUS_BYTE 值。

8.1.26 STATUS_CML (地址 = 7Eh)

STATUS_CML 在图 8-23 中展示并在表 8-32 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：无

更新：动态

STATUS_CML 命令返回一个数据字节，其中包含与通信、逻辑和存储器相关的内容，如下所示。所有受支持的位均可通过下电上电、发送 (03h) CLEAR_FAULTS 命令或切换电源轨的开关机制 (如 (02h) ON_OFF_CONFIG 寄存器中所配置) 来清除。

图 8-23. STATUS_CML

7	6	5	4	3	2	1	0
IVC	IVD	PEC_FAIL	MEM	RESERVED		OTH	不支持
R-0h	R-0h	R-0h	R-0h	R-0h		R-0h	R-0h

表 8-32. STATUS_CML 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	IVC	R	0h	0h = 指示未接收到无效或不受支持的命令的锁存标志。 1h = 指示接收到无效或不受支持的命令的锁存标志。
6	IVD	R	0h	0h = 指示未接收到无效或不受支持的数据的锁存标志。 1h = 指示接收到无效或不受支持的数据的锁存标志。
5	PEC_FAIL	R	0h	0h = 指示未发生数据包错误检查失败的锁存标志。 1h = 指示已发生数据包错误检查失败的锁存标志。
4	MEM	R	0h	故障源可能是以下内部故障源之一：STORE_USER_ALL 期间/之后的奇偶校验失败。在复位恢复 (即 EEPROM 在启动时恢复) 期间，EEPROM 内容与寄存器内容不匹配；或未通过奇偶校验。当用户发出 RESTORE_USER_ALL 命令时，未能通过奇偶校验。NVM 编程序列期间出现故障。该位不能通过任何清零机制清零，直到底层问题得到解决并且存储器得到更新。 0h = 指示未检测到存储器错误的锁存标志。 1h = 指示检测到存储器错误的锁存标志。
3-2	RESERVED	R	0h	
1	OTH	R	0h	0h = 指示未检测到通信错误的锁存标志。 1h = 指示检测到通信错误的锁存标志。
0	不支持	R	0h	不受支持且始终设置为 0。

8.1.27 STATUS_MFR_SPECIFIC (地址 = 80h)

STATUS_MFR_SPECIFIC 在图 8-24 中展示并在表 8-33 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：无

更新：动态

STATUS_MFR_SPECIFIC 命令返回一个数据字节，其中包含有关制造商定义的状态的内容，如下所示。所有受支持的位均可通过下电上电、发送 (03h) CLEAR_FAULTS 命令或切换电源轨的开关机制 (如 (02h) ON_OFF_CONFIG 寄存器中所配置) 来清除。

图 8-24. STATUS_MFR_SPECIFIC

7	6	5	4	3	2	1	0
DCM	不支持						
R-0h	R-0h						

表 8-33. STATUS_MFR_SPECIFIC 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	DCM	R	0h	LIVE (未锁存) 状态位。该位在检测到 DCM 运行时设置。该位不会触发 SMB_ALERT#，也不会使 STATUS_WORD 中的 MFR 位或 STATUS_BYTE 中的 OTH 位置为有效。 0h = 器件不在 DCM 模式下运行。 1h = 器件在 DCM 模式下运行。
6-0	不支持	R	0h	不受支持且始终设置为 0。

8.1.28 READ_VOUT (地址 = 8Bh)

READ_VOUT 在图 8-25 中展示并在表 8-34 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR16，绝对

NVM 备份：无

更新：动态

READ_VOUT 命令会返回实际测量的输出电压 (VOSNS-GOSNS)，单位为伏特。更多详细信息，请参阅遥测。格式和 LSB 由 (20h) VOUT_MODE 设置。

备注

该器件不支持 VOUT_SCALE_MONITOR 功能。因此，使用外部反馈时，READ_VOUT 将读回 FB 引脚上的基准电压，而非输出电压。

图 8-25. READ_VOUT

15	14	13	12	11	10	9	8
不支持			READ_VOUT				
R-0h			R-0h				
7	6	5	4	3	2	1	0
READ_VOUT							
R-0h							

表 8-34. READ_VOUT 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-13	不支持	R	0h	不受支持且始终设置为 0。
12-0	READ_VOUT	R	0h	输出电压遥测数据。被钳位在 0V 最小值。

8.1.29 READ_IOUT (地址 = 8Ch)

READ_IOUT 在图 8-26 中展示并在表 8-35 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：无

更新：动态

READ_IOUT 命令返回测得的 SW 输出电流（以安培为单位）。更多详细信息，请参阅遥测。

图 8-26. READ_IOUT

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT_IOUT					READ_IOUT		
R-1Ah					R-XXh		
7	6	5	4	3	2	1	0
READ_IOUT							
R-XXh							

表 8-35. READ_IOUT 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT_IOUT	R	1Ah	线性格式二进制补码指数。固定指数为 -5，得到 0.03125A LSB。
10-0	READ_IOUT	R	X	输出电流读数。位 [10] 连接为 0，因为器件不支持负值。

8.1.30 READ_TEMP1 寄存器 (地址 = 8Dh)

图 8-27 展示了 READ_TEMP1，表 8-36 对其进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：LINEAR11

NVM 备份：无

更新：动态

READ_TEMP1 命令返回控制器芯片温度（以摄氏度为单位）。更多详细信息，请参阅遥测。

图 8-27. READ_TEMP1

15	14	13	12	11	10	9	8
EXPONENT					READ_TEMP1		
R-0h					R-XXh		
7	6	5	4	3	2	1	0
READ_TEMP1							
R-XXh							

表 8-36. READ_TEMP1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-11	EXPONENT	R	0h	线性格式二进制补码指数。固定指数为 0，得到 1 摄氏度。
10-0	READ_TEMP1	R	X	裸片温度。

8.1.31 PMBUS_REVISION (地址 = 98h)

PMBUS_REVISION 在图 8-28 中展示并在表 8-37.中进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：否

PMBUS_REVISION 命令返回 PMBus 的修订版。

图 8-28. PMBUS_REVISION

7	6	5	4	3	2	1	0
PMBUS_REVISION							
R-55h							

表 8-37. PMBUS_REVISION 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	PMBUS_REVISION	R	55h	PMBus 修订版，符合 PMBus 规范修订版 1.4 (第 I 和 II 部分) 。

8.1.32 MFR_ID (地址 = 99h)

MFR_ID 在图 8-29 中展示并在表 8-38 中进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：块读取

数据格式：无符号二进制 (2 字节)

NVM 备份：否

该只读块读取命令返回一个单字 (16 位) 以及制造商的 ID (用于标识单元制造商的名称、缩写或符号)。块读取命令中的 BYTE_COUNT 字段将为 2 (指示后面将跟随 2 个字节)。

图 8-29. MFR_ID

15	14	13	12	11	10	9	8
I 的 ASCII							
R-49h							
7	6	5	4	3	2	1	0
T 的 ASCII							
R-54h							

表 8-38. MFR_ID 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-8	I 的 ASCII	R	49h	
7-0	T 的 ASCII	R	54h	

8.1.33 MFR_MODEL (地址 = 9Ah)

MFR_MODEL 在图 8-30 中展示并在表 8-39 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：块读取

数据格式：无符号二进制 (4 字节)

NVM 备份：否

该只读块读取命令返回 4 个字节 (32 位) 以及制造商的型号。块读取命令中的 BYTE_COUNT 字段将为 4 (指示后面将跟随 4 个字节)。

图 8-30. MFR_MODEL

31	30	29	28	27	26	25	24
器件型号扩展							
R-0h							
23	22	21	20	19	18	17	16
器件型号第五位				器件型号第六位			
R-2h				R-8h			
15	14	13	12	11	10	9	8
器件型号第三位				器件型号第四位			
R-4h				R-Ah			
7	6	5	4	3	2	1	0
器件型号第一位				器件型号第二位			
R-5h				R-4h			

表 8-39. MFR_MODEL 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
31-24	器件型号扩展	R	0h	
23-20	器件型号第五位	R	2h	
19-16	器件型号第六位	R	8h	
15-12	器件型号第三位	R	4h	
11-8	器件型号第四位	R	Ah	
7-4	器件型号第一位	R	5h	
3-0	器件型号第二位	R	4h	

8.1.34 MFR_REVISION (地址 = 9Bh)

MFR_REVISION 在图 8-31 中展示并在表 8-40 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：块写入

读取事务：块读取

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

此单字节块命令用于设置或读取制造商的版本号。它是可写的，包括 NVM 备份。

图 8-31. MFR_REVISION

7	6	5	4	3	2	1	0
MFR_REVISION							
R/W-XXh							

表 8-40. MFR_REVISION 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	MFR_REVISION	R/W	X	

8.1.35 IC_DEVICE_ID (地址 = ADh)

IC_DEVICE_ID 在图 8-32 中展示并在表 8-41 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：块读取

数据格式：无符号二进制 (6 字节)

NVM 备份：EEPROM

块只读 IC_DEVICE_ID 命令用于读取嵌入 PMBus 内的 IC (用于 PMBus 接口) 的类型或器件型号。IC_DEVICE_ID 使用 6 字节块格式。对于 ASCII 文本格式的“TI”，前两个字节应为 5449h。第三个字节到第五个字节应为表示 6 位器件型号的可直接读取的十六进制器件型号。第六个字节应为器件型号扩展代码。

图 8-32. IC_DEVICE_ID

47	46	45	44	43	42	41	40
器件型号扩展							
R-0h							
39	38	37	36	35	34	33	32
器件型号第五位				器件型号第六位			
R-2h				R-8h			
31	30	29	28	27	26	25	24
器件型号第三位				器件型号第四位			
R-4h				R-Ah			
23	22	21	20	19	18	17	16
器件型号第一位				器件型号第二位			
R-5h				R-4h			
15	14	13	12	11	10	9	8
I 的 ASCII							
R-49h							
7	6	5	4	3	2	1	0
T 的 ASCII							
R-54h							

表 8-41. IC_DEVICE_ID 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
47-40	器件型号扩展	R	0h	
39-36	器件型号第五位	R	2h	
35-32	器件型号第六位	R	8h	
31-28	器件型号第三位	R	4h	
27-24	器件型号第四位	R	Ah	
23-20	器件型号第一位	R	5h	
19-16	器件型号第二位	R	4h	
15-8	I 的 ASCII	R	49h	
7-0	T 的 ASCII	R	54h	

8.1.36 IC_DEVICE_REV (地址 = AEh)

IC_DEVICE_REV 在图 8-33 中展示并在表 8-42 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：块读取

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：否

块只读 IC_DEVICE_REV 命令返回一个具有唯一器件版本标识符的字节。第一个器件的 DEVICE_REV 值从 0 开始，以后每个器件版本的 DEVICE_REV 值都会递增。块读取命令中的 BYTE_COUNT 字段将为 01h (指示后跟 1 个字节)。

图 8-33. IC_DEVICE_REV

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED	PS_IC			DEVICE_REVISION			
R-0h	R-0h			R-5h			

表 8-42. IC_DEVICE_REV 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	RESERVED	R	0h	保留
6-4	PS_IC	R	0h	功率级版本。
3-0	DEVICE_REVISION	R	5h	器件修订版本。

8.1.37 SYS_CFG_USER1 寄存器 (地址 = D1h)

图 8-34 展示了 SYS_CFG_USER1，表 8-43 对其进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字节

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

此命令包含系统配置的其他位。

图 8-34. SYS_CFG_USER1

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED	FCCM	PMB_LOCK	ADDR_CFG	RESERVED	SEL_LC_H	NRSA_L	EN_FIX_OVF
R-0h	R/W-Xh	R/W-Xh	R/W-Xh	R-0h	R/W-Xh	R/W-Xh	R/W-Xh

表 8-43. SYS_CFG_USER1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7	RESERVED	R	0h	保留
6	FCCM	R/W	X	强制 CCM 运行。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 根据 LFET 检测到的电流的过零检测，启用并自动进入/退出 DCM 运行。 1h = 在开关转换器中强制进行连续导通。
5	PMB_LOCK	R/W	X	该位控制对 PASSKEY 命令的写入访问。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 如 PASSKEY 命令说明中的定义。 1h = 写入 PASSKEY 将会收到带 ivc 的 NACK (否定确认)。
4	ADDR_CFG	R/W	X	该位选择通过 ADR 引脚的引脚配置选择的 PMBus 器件地址范围，如下所示： 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = ADR 的最高半字节为 2h。 1h = ADR 的最高半字节为 3h。该位仅在写入、发送 STORE_USER_ALL 命令并执行 POWER_ON_RESET，或发送 PMBus 命令 RESTORE_USER_ALL 后才生效。
3	RESERVED	R	0h	保留
2	SEL_LC_H	R/W	X	该位调节控制环路响应，有助于提高使用大输出 LC (LC 双极点约在 10-15kHz) 的 BOM 的相位裕度。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 默认环路响应。 1h = 修改后的环路响应。
1	NRSA_L	R/W	X	当设置为 1 时，该位会选择 NRSA 的较低值；当设置为 0 时，该位会选择较高的 NRSA 值。请参阅 VOUT_SCALE_LOOP 中的表格。 复位时，该值将由 NVM 确定。
0	EN_FIX_OVF	R/W	X	该位用于使能固定 OV 故障。 复位时，该值将由 NVM 确定。 0h = 已禁用固定 OVF。 1h = 已启用固定 OVF。

8.1.38 PASSKEY (地址 = D2h)

PASSKEY 在图 8-35 中展示并在表 8-44 中进行介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入块 (1 字节)

读取事务：读取块 (3 字节)

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

密钥让用户能够使用用户编程的 8 位值锁定对 (15h) STORE_USER_ALL 和 (10h) WRITE_PROTECT 的访问权限。读取时，PASSKEY 将返回 3 字节，其上两个字节镜像 NVM_CHECKSUM，最低字节反映当前 PASSKEY 状态。解锁后，PASSKEY 的最低字节会读回 00h。

当在上电复位或 RESTORE_USER_ALL 后解锁 PASSKEY 时：

非易失性存储器解锁。WRITE_PROTECT 解锁且可写。STORE_USER_ALL 正常工作。读取 PASSKEY 将返回 00h。写入操作将更新 PASSKEY，但该值必须通过 STORE_USER_ALL 存储至 NVM 方能生效。

当在上电复位或 RESTORE_USER_ALL 后锁定 PASSKEY 时：

非易失性存储器锁定。STORE_USER_ALL 和 WRITE_PROTECT 将被 NACK，并返回 “UNSUPPORTED or INVALID DATA”。

PASSKEY 读取将报告值：

- 10h (若解锁 PASSKEY 时未发生无效尝试)
- 11h (若解锁 PASSKEY 时发生一次无效尝试)
- 12h (若解锁 PASSKEY 时发生两次无效尝试)
- 1Fh (若解锁 PASSKEY 时发生三次或更多无效尝试)。

无效访问尝试计数器仅在上电复位后清零。

设置 PASSKEY 后，执行 RESTORE_USER_ALL 操作或向 PASSKEY 写入错误的值，使计数器按上述规则递增。在 3 次错误尝试后，后续写入尝试虽会收到 ACK，但不会置位任何 STATUS 位，且 PASSKEY 将保持锁定，即使随后写入匹配的 PASSKEY 值也无法解锁。如果写入的数据与 PASSKEY 匹配，且无效尝试次数少于三次，则 PASSKEY 将可读回当前 PASSKEY 值，并可用新值覆写 (包括 00h，写入该值将使器件保持解锁状态)。无效尝试计数器将重置为 0。STORE_USER_ALL 和 WRITE_PROTECT 将允许写入访问。必须发出 STORE_USER_ALL 命令才能使新的 PASSKEY 值生效。

图 8-35. PASSKEY

7	6	5	4	3	2	1	0
PASSKEY							
R/W-XXh							

表 8-44. PASSKEY 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-0	PASSKEY	R/W	X	请参阅上述寄存器说明。

8.1.39 COMP (地址 = D4h)

图 8-36 展示了 COMP，表 8-45 中对此进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字节

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：动态

该命令包含稳压轨的反馈环路补偿设置。

图 8-36. COMP

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED			OVRD_SUMCOMP_HIGH	OVRD_SUMCOMP_LOW	SEL_SUMCOMP	SEL_RAMP	
R-0h			R/W-Xh	R/W-Xh	R-0h	R/W-Xh	

表 8-45. COMP 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-5	RESERVED	R	0h	保留
4	OVRD_SUMCOMP_HIGH	R/W	X	无论 DAC 目标如何，设置该位都会将 SEL_SUMCOMP 覆盖为高电平。复位时，该值将由 NVM 确定。
3	OVRD_SUMCOMP_LOW	R/W	X	无论 DAC 目标如何，设置该位都会将 SEL_SUMCOMP 覆盖为低电平。该位的优先级高于 OVRD_SUMCOMP_HIGH 位。如果两个位都被置位，SEL_SUMCOMP 将为 0。复位时，该值将由 NVM 确定。
2	SEL_SUMCOMP	R	0h	报告 DAC 参考目标是否大于或等于 750mV (DAC 目标仅在禁用期间更新)。
1-0	SEL_RAMP	R/W	X	这些位决定斜坡幅度/斜率。复位时，该值将由 NVM 确定。

表 8-46. COMP 枚举列表

斜坡	SEL_RAMP (b)	相对有效斜坡幅度	
		SEL_SUMCOMP = 0b	SEL_SUMCOMP = 1b
RAMP1	00	2.1×	3.3×
RAMP2	01	1.6×	2.4×
RAMP3	10	1.4×	2.0×
RAMP4	11	1×	1.5×

8.1.40 VBOOT (地址 = D5h)

图 8-37 展示了 VBOOT，表 8-47 中对此进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：写入字节

读取事务：读取字节

数据格式：无符号二进制 (1 字节)

NVM 备份：EEPROM

更新：下电上电时

该命令包含用于设置引导电压 VBOOT 的位。

图 8-37. VBOOT

7	6	5	4	3	2	1	0
RESERVED				VBOOT			
R-0h				R/W-Xh			

表 8-47. VBOOT 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
7-5	RESERVED	R	0h	保留
4-0	VBOOT	R/W	X	这些位包含用于 VREF DAC 目标代码的 VBOOT 设置，以实现软启动 (与直接指定初始 VOUT 电压相反)。用户必须选择合适的 VOUT_SCALE_LOOP 以实现所需的输出电压 VOUT。复位时，该值将由 NVM 确定。

表 8-48. VBOOT 枚举列表

VBOOT [4:0] (十进制)	VOUT_SCALE_LOOP (V/V)		V _{OUT} (V)
	NRSA_L = 0b	NRSA_L = 1b	
0	1	1	0.4
1	1	1	0.45
2	1	1	0.5
3	1	1	0.55
4	1	1	0.6
5	1	1	0.65
6	1	1	0.7
7	1	1	0.75
8	1	1	0.8
9	0.5	1	0.85
10	0.5	1	0.9
11	0.5	0.5	0.95
12	0.5	0.5	1.0
13	0.5	0.5	1.05
14	0.5	0.5	1.1
15	0.5	0.5	1.15
16	0.5	0.5	1.2

表 8-48. VBOOT 枚举列表 (续)

VBOOT [4:0] (十进制)	VOUT_SCALE_LOOP (V/V)		V _{OUT} (V)
	NRSA_L = 0b	NRSA_L = 1b	
17	0.5	0.5	1.25
18	0.5	0.5	1.3
19	0.5	0.5	1.5
20	0.5	0.5	1.6
21	0.25	0.5	1.7
22	0.25	0.5	1.8
23	0.25	0.25	2
24	0.25	0.25	2.25
25	0.25	0.25	2.5
26	0.25	0.25	2.75
27	0.25	0.25	3.0
28	0.125	0.25	3.3
29	0.125	0.25	3.6
30	0.125	0.125	4.5
31	0.125	0.125	5.0

8.1.41 NVM_CHECKSUM (地址 = D9h)

图 8-38 展示了 NVM_CHECKSUM，表 8-49 对其进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：无符号二进制 (2 字节)

NVM 备份：无

更新：下电上电时或 RESTORE_USER_ALL

此命令包含读取非易失性存储器 (NVM) 内容所获得的 CRC 值。校验和的值将计算为 CRC-16 (多项式 8005h)。校验和将在 8 个并行切片中计算。为使输入的最后一个字为 8 位，所需的任何填充都将为 0。校验和值将存储在 NVM 中，以确保 STORE 函数的完整性。当用户将计算出的 NVM_CHECKSUM 与预期的已知正常值进行比较时，STORE 操作期间发生的任何损坏数据都将在 RESTORE 时被检测到。

图 8-38. NVM_CHECKSUM

15	14	13	12	11	10	9	8
NVM_CHECKSUM							
R-XXXXh							
7	6	5	4	3	2	1	0
NVM_CHECKSUM							
R-XXXXh							

表 8-49. NVM_CHECKSUM 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-0	NVM_CHECKSUM	R	X	使用最后存储的 NVM 的校验和结果进行响应。32 位 (0Eh) PASSKEY NVM 位将从 NVM_CHECKSUM 测定结果中排除，以防止恶意执行者读取设备配置并重复设置 PASSKEY 值，以尝试发现 PASSKEY 值。

8.1.42 FUSION_ID0 (地址 = FCh)

图 8-39 展示了 FUSION_ID0，表 8-50 对其进行了介绍。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：读取字

数据格式：无符号二进制 (2 字节)

NVM 备份：否

FUSION_ID0 提供平台级识别代码，供德州仪器 (TI) Digital Power Designer 用于识别 TI 器件。

将接受对该命令的写入，否则将忽略 (该命令的回读值在写入尝试后不会改变)。此命令对于某些 TI 器件是可写的，因此为了保持交叉兼容性，器件也接受对此命令的写入事务。并未因收到对此命令的写入尝试而设置任何 STATUS_CML 位。

图 8-39. FUSION_ID0

15	14	13	12	11	10	9	8
FUSION_ID0							
R-2C0h							
7	6	5	4	3	2	1	0
FUSION_ID0							
R-2C0h							

表 8-50. FUSION_ID0 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
15-0	FUSION_ID0	R	2C0h	硬编码为 02C0h。

8.1.43 FUSION_ID1 (地址 = FDh)

FUSION_ID1 如表 8-51 所示。

返回到[汇总表](#)。

写入事务：不适用

读取事务：块读取

数据格式：无符号二进制 (6 字节)

NVM 备份：否

FUSION_ID1 提供平台级识别代码，供德州仪器 (TI) Digital Power Designer 用于识别 TI 器件。

将接受对该命令的写入，否则将忽略 (该命令的回读值在写入尝试后不会改变)。此命令对于某些 TI 器件是可写的，因此为了保持交叉兼容性，器件也接受对此命令的写入事务。并未因收到对此命令的写入尝试而设置任何 STATUS_CML 位。

表 8-51. FUSION_ID1 字段说明

位	字段	类型	复位	说明
3-0	FUSION_ID1	R	4h	硬编码为 5h。硬编码为 Ch。硬编码为 Fh。硬编码为 4h。硬编码为 Bh。硬编码为 3h。硬编码为 9h。

9 应用和实施

备注

以下应用部分中的信息不属于 TI 元件规格，TI 不承担其准确性和完整性。TI 的客户负责确定元件是否适合其用途，以及验证和测试其设计实现以确认系统功能。

9.1 应用信息

TPS544A28 器件是一款高效的单通道小尺寸同步降压转换器。该器件适用于服务器、存储和类似计算应用中输出电流为 **12A** 或更低的低输出电压负载点应用。**TPS544A28** 具有专有的 **D-CAP4** 控制模式和自适应导通时间架构。这种组合以出色的方式构建具有低占空比和超快速负载阶跃响应的现代直流/直流转换器。输出电压范围为 至 **5.5V**。转换输入电压介于 **2.7V** 至 **16V** 之间，**VCC** 输入电压介于 **3.1V** 至 **5.3V** 之间。**D-CAP4** 模式使用仿真电流信息来控制调制。该控制方案的一个优势是其不需要外部相位补偿网络，这使得该器件易于使用，并且所需的外部元件数量少。该控制方案的另一个优势是其支持采用所有低 **ESR** 输出电容器（如陶瓷电容器和低 **ESR** 聚合物电容器）实现稳定运行。自适应导通时间控制功能可在宽输入和输出电压范围内跟踪预设开关频率，同时可在负载阶跃瞬态期间根据需要增大开关频率。

9.2 典型应用

原理图展示了 **TPS544A28** 的典型应用。本例介绍了将 **8V 至 16V** 的输入电压范围转换为 **3.3V**，最大输出电流为 **12A**。

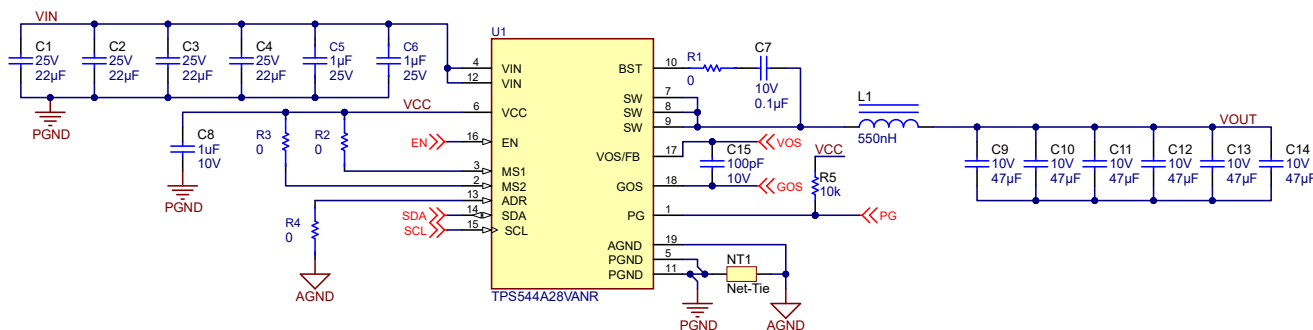


图 9-1. 应用电路图

9.2.1 设计要求

此设计使用下表中列出的参数。

表 9-1. 设计示例规格

规格	测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V _{IN} 电压范围		8	12	16	V
输入电流	V _{IN} = 8V, I _{OUT} = 12A		5.55		A
V _{IN} 启动电压	通过 EN 引脚电阻分压器设置		3.84		V
输出电压设定点	通过 MS2 引脚选择设置 V _{OUT} = 3.3V。		3.3		V
输出电流范围	V _{IN} = 8V 至 16V	0		12	A
负载瞬态响应	I _{OUT} = 0A 至 10A	电压变化		-99	mV
	I _{OUT} = 10A 至 0A	电压变化		99	mV
输出纹波电压	I _{OUT} = 12A		16		mVPP
软启动时间	从开始切换到 V _{OUT} = 3.3V, t _{SS} = 1ms 设置	0.8	1	1.2	ms
电流限制	通过 MS1 引脚选择设置 OCP = 13A	11.5	13	14.5	A
开关频率 (f _{SW})	通过 MS1 引脚选择设置 f _{SW} = 800kHz		800		kHz
IC 外壳温度	I _{OUT} = 12A, 浸泡 15 分钟		52.7		°C

9.2.2 详细设计过程

使用 D-CAP4 模式时，可以轻松选择外部元件。请按照以下步骤选择外部元件。

9.2.2.1 输出电压设定点

MS2 引脚根据 表 7-4 选择器件输出电压配置以及 FCCM 或 PFM 运行。对于此设计，使用内部 FB 配置选项。

如果需要 表 7-4 中未提供的输出电压，外部反馈配置允许通过分压电阻器 R1 和 R2 对输出电压进行编程。在 VOS/FB 引脚和输出端之间连接 R1，并在 VOS/FB 引脚和 GOS 之间连接 R2。建议的 R2 值为 10kΩ，但该值也可以设置为 1kΩ 至 20kΩ 范围内的另一个值。使用方程式 6 可确定 R1。

$$R1 = R2 \times \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \quad (6)$$

9.2.2.2 选择开关频率

对于此设计，使用内部反馈模式，并通过将 MS1 引脚连接到一个引脚配置电阻、GND 或 VCC。另请参阅 表 7-3。

开关频率的选择是在更高效率和更小系统设计尺寸之间进行权衡的结果。较低的开关频率可实现较高的总体效率，但外部元件相对较大。较高的开关频率会导致额外的开关损耗，从而影响效率和热性能。在此设计中，将 MS1 引脚连接到 VCC，以便将开关频率设置为 800kHz

选择降压转换器的开关频率时，必须考虑最短导通时间和最短关断时间。方程式 7 可计算受最短导通时间限制前的最大 f_{SW}。当达到具有 D-CAP4 控制功能的转换器的最短导通时间限制时，实际开关频率将改变以保持输出电压稳定。此计算忽略转换器中的电阻压降以提供最坏情况下的估算值。

$$f_{SW(max)} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN(max)}} \times \frac{1}{t_{ON_MIN}} = \frac{3.3V}{16V} \times \frac{1}{25ns} = 8250kHz \quad (7)$$

方程式 8 可计算受最短关断时间限制前的最大 f_{SW}。当达到具有 D-CAP4 控制功能的转换器的最短关断时间限制时，工作占空比将达到最大值，而输出电压将开始随输入电压下降。该公式需要用到电感器的直流电阻 R_{DCR}（在以下步骤中选择），在该初步计算中假定电阻为 1.4mΩ。如果在受最短关断时间限制的最大 f_{SW} 附近工作，则在使用方程式 9 时必须考虑电阻随温度的变化。所选的 800kHz f_{SW} 低于两个计算得出的最大值。

$$f_{SW(max)} = \frac{V_{IN(min)} - V_{OUT} - I_{OUT(max)} \times (R_{DCR} + R_{DS(ON_HS)})}{t_{OFF_MIN(max)} \times (V_{IN(min)} - I_{OUT(max)} \times (R_{DS(ON_HS)} - R_{DS(ON_LS)}))} \quad (8)$$

$$f_{SW(max)} = \frac{8V - 3.3V - 12A \times (1.4m\Omega + 8.9m\Omega)}{150ns \times (8V - 12A \times (8.9m\Omega - 3.3m\Omega))} = 3846kHz \quad (9)$$

9.2.2.3 选择电感器

要计算输出电感 (L_{OUT}) 的值, 请使用 [方程式 10](#)。输出电容器可以过滤电感器纹波电流 ($I_{IND(ripple)}$)。因此, 选择较大的电感器纹波电流会影响输出电容器的选择, 因为输出电容器的纹波电流额定值必须等于或大于电感器纹波电流。较大的纹波电流会增加输出纹波电压, 但会改善信噪比并有助于使运行保持稳定。通常, 为实现平衡性能, 电感值必须将纹波电流设置为最大输出电流的约 15% 至 40%。

在此设计中, 电感器纹波电流设置为 12A 输出电流的 30%。开关频率为 800kHz、最大 V_{IN} 为 16V 且输出电压为 3.3V 时, 根据这些参数, 使用 [方程式 10](#) 计算得出的电感为 0.91 μH 。已选择最接近的标准值 0.91 μH 。

$$L = \frac{(V_{IN(max)} - V_{OUT}) \times V_{OUT}}{I_{RIPPLE} \times V_{IN(max)} \times f_{SW}} = \frac{(16V - 3.3V) \times 3.3V}{0.3 \times 12A \times 16V \times 800kHz} = 0.91\mu H \quad (10)$$

电感器需要低 DCR 才能实现良好的效率。在饱和前, 电感器还需要有高于峰值电感器电流的足够余量。使用 [方程式 11](#) 来估算电感电流纹波。在此设计中, 将 CFG1 引脚连接至 VCC, $I_{OC(valley)}$ 设置为 13A, 因此在最大 V_{IN} 下使用 [方程式 12](#) 计算得到的峰值电感器电流为 13.8A。

$$I_{RIPPLE} = \frac{(V_{IN(max)} - V_{OUT}) \times V_{OUT}}{L \times V_{IN(max)} \times f_{SW}} = \frac{(16V - 3.3V) \times 3.3V}{0.91\mu H \times 16V \times 800kHz} = 3.6A \quad (11)$$

$$I_{L(PEAK)} = I_{OUT} + \frac{I_{RIPPLE}}{2} = 12A + \frac{3.6A}{2} = 13.8A \quad (12)$$

$$I_{L(RMS)} = \sqrt{I_{OUT}^2 + \frac{I_{RIPPLE}^2}{12}} = \sqrt{12A^2 + \frac{3.6A^2}{12}} = 12.04A \quad (13)$$

9.2.2.4 选择输出电容器

选择输出电容值时, 需要考虑三点:

1. 稳定性
2. 稳态输出电压纹波
3. 稳压器对负载电流变化的瞬态响应

首先, 根据这三个要求计算最小输出电容。[方程式 14](#) 计算使 LC 双极点低于 [表 7-2](#) 中 $f_{P(MAX)}$ 的最小电容, 从而满足稳定性要求。要计算 $f_{P(MAX)}$, 请在 [表 7-2](#) 中找到正确的 K_{f_LC} 。默认情况下, 该器件预编程为 RAMP3 且 SEL_SUMCOMP = 0 的补偿设置。在本例中, $K_{f_LC} = 9.6$ 且 $V_{REF_DAC} = V_{OUT_COMMAND} \times VOSL = 3.3V \times 0.125V/V = 0.4125V$ 。确定正确的 K_{f_LC} 和 V_{REF_DAC} 后, 将这两个值代入 [方程式 2](#)。对于此示例应用, $f_{P(MAX)} = 14.947kHz$ 。将计算得出的 $f_{P(MAX)}$ 代入 [方程式 14](#), 以确定实现稳定性所需的最小 C_{OUT} 。[方程式 15](#) 计算满足 16mV 稳态输出电压纹波要求的最小电容。这些计算适用于 CCM 工作模式, 不包括由输出电容器的 ESR 或 ESL 引起的输出电压纹波部分。

$$C_{OUT_STABILITY} > \left(\frac{1}{2\pi \times f_{P(MAX)}} \right)^2 \times \frac{1}{I_{OUT}} = \left(\frac{1}{2\pi \times 14.947kHz} \right)^2 \times \frac{1}{0.55\mu H} = 207\mu F \quad (14)$$

$$C_{OUT_RIPPLE} > \frac{I_{RIPPLE}}{8 \times V_{RIPPLE} \times f_{SW}} = \frac{5.95A}{8 \times 16mV \times 800kHz} = 58.1\mu F \quad (15)$$

[方程式 17](#) 和 [方程式 18](#) 计算满足 99mV 瞬态响应要求 (阶跃为 10A) 的最小电容。这些公式计算当电感器电流在负载阶跃后斜升或斜降时保持输出电压稳定所需的输出电容。

$$C_{OUT_UNDERSHOOT} > \frac{L \times I_{STEP}^2 \times \left(\frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)} \times f_{SW}} + t_{OFF_MIN(max)} \right)}{2 \times V_{TRANS} \times V_{OUT} \times \left(\frac{V_{IN(min)} - V_{OUT}}{V_{IN(min)} \times f_{SW}} - t_{OFF_MIN(max)} \right)} \quad (16)$$

$$C_{OUT_UNDERSHOOT} > \frac{0.55\mu H \times 10A^2 \times \left(\frac{3.3V}{8V \times 800kHz} + 150ns \right)}{2 \times 99mV \times 3.3V \times \left(\frac{8V - 3.3V}{8V \times 800kHz} - 150ns \right)} = 95.9\mu F \quad (17)$$

$$C_{OUT_OVERSHOOT} > \frac{L \times I_{STEP}^2}{2 \times V_{TRANS} \times V_{OUT}} = \frac{0.55\mu H \times 10A^2}{2 \times 99mV \times 3.3V} = 84.2\mu F \quad (18)$$

满足过冲要求所需的输出电容是最高值，因此这将设置本例所需的最小输出电容。稳定性要求也会限制最大输出电容。[方程式 19](#) 计算建议的最大输出电容。此计算使 LC 双极点保持在 f_{SW} 的 1/100 以上。

$$C_{OUT_STABILITY} < \left(\frac{50}{\pi \times f_{SW}} \right)^2 \times \frac{1}{L} = \left(\frac{50}{\pi \times 800kHz} \right)^2 \times \frac{1}{0.55\mu H} = 720\mu F \quad (19)$$

可以使用更大的输出电容，但必须通过波特图或瞬态响应测量来检查稳定性。选择的输出电容为 $6 \times 47\mu F$ 、10V 陶瓷电容器。使用陶瓷电容器时，由于直流和交流偏置效应，电容必须降额。选择的电容器降额至其标称值的 75%，即有效总电容为 $211\mu F$ 。该实际电容值满足最小值和最大值要求。

该应用全部使用陶瓷电容器，因此忽略了 ESR 对纹波和瞬态的影响。如果使用非陶瓷电容器，则 ESR 一开始必须低于 [方程式 20](#) 中计算的值以满足纹波要求，并低于 [方程式 21](#) 中计算的值以满足瞬态要求。为了进行更准确的计算或如果使用的是混合的输出电容器，必须使用输出电容器的阻抗来确定是否可以满足纹波和瞬态要求。

$$R_{ESR_RIPPLE} < \frac{V_{RIPPLE}}{I_{RIPPLE}} = \frac{26mV}{5.95A} = 4.4m\Omega \quad (20)$$

$$R_{ESR_TRANS} < \frac{V_{TRANS}}{I_{STEP}} = \frac{99mV}{10A} = 9.9m\Omega \quad (21)$$

9.2.2.5 选择输入电容器 (C_{IN})

该器件要求在两对 V_{IN} 和 $PGND$ 引脚之间使用输入旁路电容器来旁路掉功率级。在布局允许的情况下，旁路电容器必须尽可能靠近 IC 的引脚放置。至少需要标称值为 $20\mu F$ 的陶瓷电容和两个高频陶瓷旁路电容器。必须尽可能靠近器件电路板同一侧的 V_{IN} 引脚 4 和 12 放置一个 $0.1\mu F$ 至 $1\mu F$ 电容器，以提供所需的高频旁路，从而减少 V_{IN} 和 SW 引脚功率级上的高频过冲和下冲。TI 建议至少将 $1\mu F$ 的旁路电容尽可能靠近每个 V_{IN} 引脚，从而尽可能减少输入电压纹波。陶瓷电容器必须采用 X6S 或更高质量的电介质来实现高电容体积比，并在工作温度范围内保持稳定特性。除此要求外，根据应用的不同，输入端可能需要更大的大容量电容，以便尽可能减小瞬态条件下输入电压的变化。

使用 [方程式 22](#) 计算满足特定输入纹波目标所需的输入电容。建议的目标输入电压纹波为最小输入电压的 5%，在本例中为 $400mV$ 。计算得出的输入电容为 $9.1\mu F$ 。本例采用 2 个 $10\mu F$ 陶瓷电容器，满足这两个要求。

$$C_{IN} > \frac{V_{OUT} \times I_{OUT} \times \left(1 - \frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \right)}{f_{SW} \times V_{IN(min)} \times V_{IN_RIPPLE}} = \frac{3.3V \times 12A \times \left(1 - \frac{3.3V}{8V} \right)}{800kHz \times 8V \times 400mV} = 9.1\mu F \quad (22)$$

此外，电容器的 RMS 电流等级还必须大于应用中的最大输入 RMS 电流。使用 [方程式 24](#) 可以计算输入电容器必须支持的输入 RMS 电流。在本例中，结果为 $5.9A$ 。陶瓷输入电容器的额定电流大于此值。

$$I_{CIN(RMS)} = \sqrt{\frac{V_{OUT}}{V_{IN(min)}} \times \left(\frac{(V_{IN(min)} - V_{OUT})}{V_{IN(min)}} \times I_{OUT}^2 + \frac{I_{RIPPLE}^2}{12} \right)} \quad (23)$$

$$I_{\text{CIN(RMS)}} = \sqrt{\frac{3.3\text{V}}{8\text{V}} \times \left(\frac{(8\text{V} - 3.3\text{V})}{8\text{V}} \times 12^2 + \frac{3.6^2}{12} \right)} = 5.9\text{A} \quad (24)$$

对于需要大容量输入电容的应用，例如具有低输入电压和大电流的应用，TI 建议使用 [如何选择降压转换器的输入电容器](#) 模拟设计期刊中的选型过程。

9.2.2.6 VCC 旁路电容器

VCC 引脚上至少需要一个额定电压至少为 6.3V 的 1.0μF、X5R 陶瓷旁路电容器，在布局允许的情况下尽可能靠近该引脚。使用尺寸尽可能小的电容器，例如 0402 封装，以更大限度地减小从 VCC 引脚到 PGND 引脚的环路。

9.2.2.7 BOOT 电容器

在布局允许的情况下，BOOT 和 SW 引脚之间至少需要一个 0.1μF 的 10V X5R 陶瓷旁路电容器，并尽可能将其靠近引脚放置。

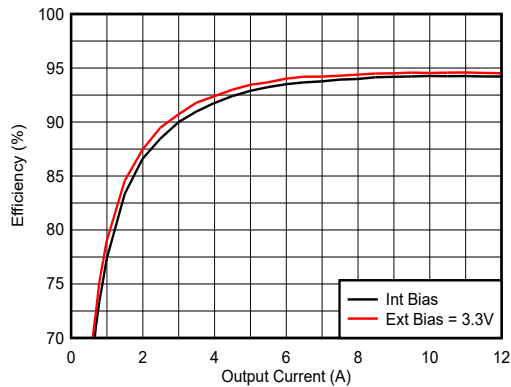
9.2.2.8 PG 上拉电阻器

PG 引脚为开漏引脚，因此在使用该引脚时需要一个上拉电阻。建议阻值介于 1kΩ 和 100kΩ 之间。

9.2.2.9 选择 PMBus® 地址和故障恢复模式

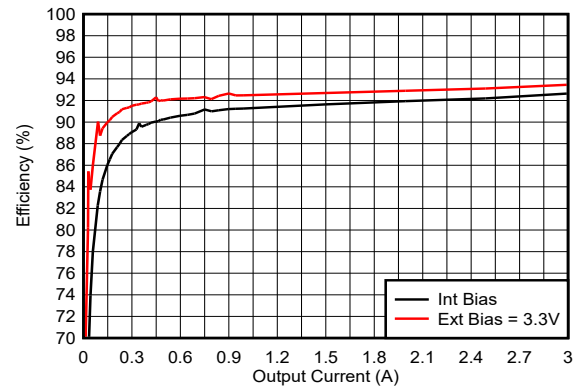
ADR 引脚和 AGND 之间的电阻器可设置存储器映射中预配置的 PMBus 地址和故障恢复模式。有关可由外部电阻器选择的 PMBus 地址和故障恢复模式，请参考 [表 7-5](#)。在此应用中，若使用 0Ω 电阻器将该引脚短接至 AGND，会选择 PMBus 地址 21h 和断续故障恢复模式。

9.2.3 应用曲线



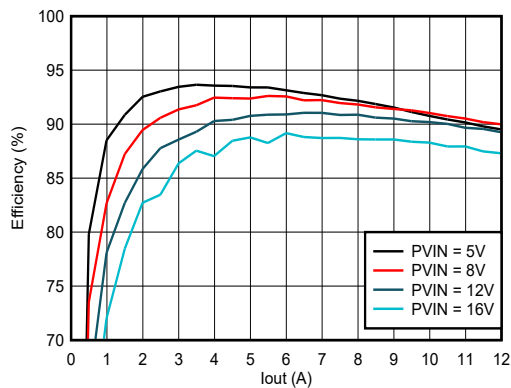
$L = 0.55 \mu\text{H}$ $V_{\text{OUT}} = 3.3\text{V}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $V_{\text{IN}} = 12\text{V}$

图 9-2. 效率 - FCCM



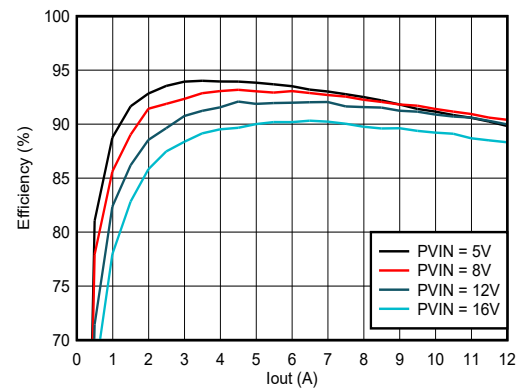
$L = 0.55 \mu\text{H}$ $V_{\text{OUT}} = 3.3\text{V}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $V_{\text{IN}} = 12\text{V}$

图 9-3. 效率 - PFM 模式



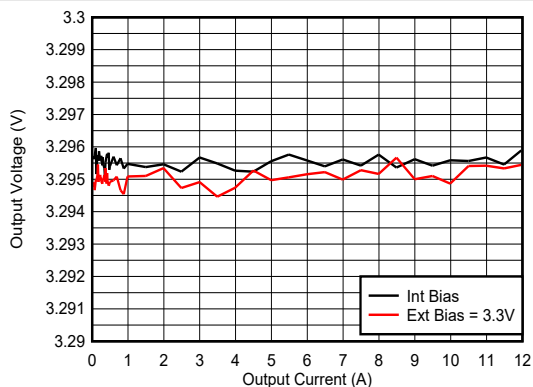
$L = 0.55 \mu\text{H}$ $V_{\text{OUT}} = 1\text{V}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $V_{\text{CC}} = \text{INT BIAS}$

图 9-4. 效率 - FCCM



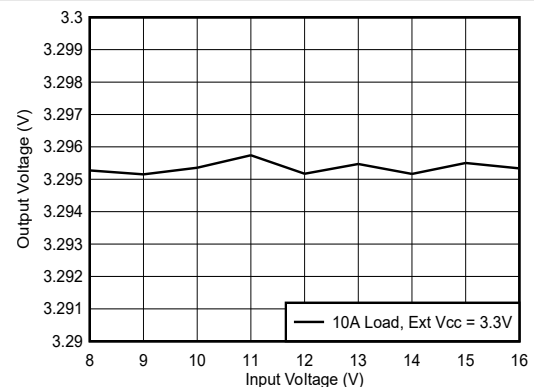
$L = 0.55 \mu\text{H}$ $V_{\text{OUT}} = 1\text{V}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $V_{\text{CC}} = 3.3\text{V EXT}$

图 9-5. 效率 - FCCM



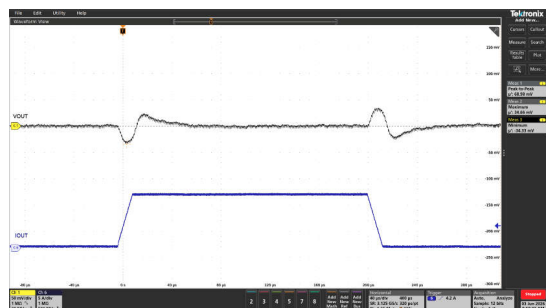
$L = 0.55 \mu\text{H}$ $V_{\text{OUT}} = 3.3\text{V}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $V_{\text{IN}} = 12\text{V}$

图 9-6. 负载调整率 - FCCM



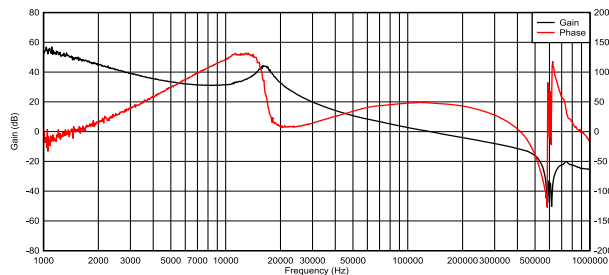
$L = 0.55 \mu\text{H}$ $V_{\text{OUT}} = 3.3\text{V}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$

图 9-7. 线性调整率



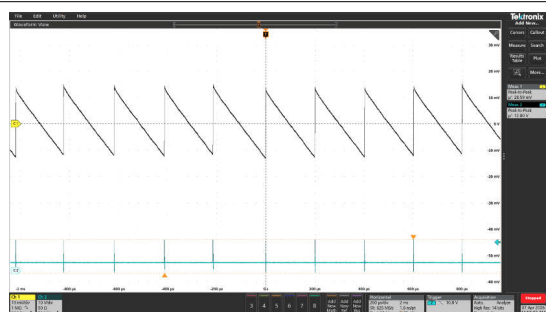
$L = 0.55 \mu\text{H}$ $I_{\text{OUT}} = 0\text{A 至 } 10\text{A}$, $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $1\text{A}/\mu\text{s}$
 $V_{\text{OUT}} = 3.3\text{V}$ $\text{CH1} = 50\text{mV}/\text{div}$

图 9-8. 负载瞬态



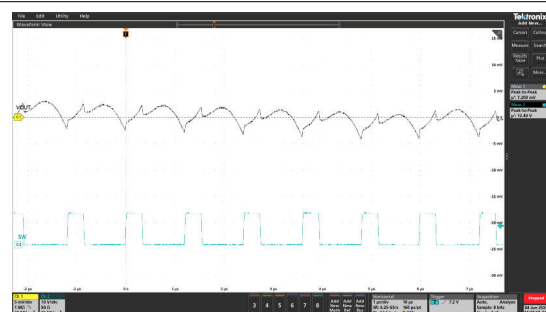
$I_{\text{OUT}} = 10\text{A}$

图 9-9. 频率响应



$L = 0.55 \mu\text{H}$ $I_{\text{OUT}} = 10\text{mA}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $V_{\text{OUT}} = 3.3\text{V}$

图 9-10. 输出电压纹波 - PFM 模式



$L = 0.55 \mu\text{H}$ $I_{\text{OUT}} = 10\text{A}$ $C_{\text{OUT}} = 6 \times 47 \mu\text{F}$
 $V_{\text{OUT}} = 3.3\text{V}$

图 9-11. 输出电压纹波 - FCCM 模式

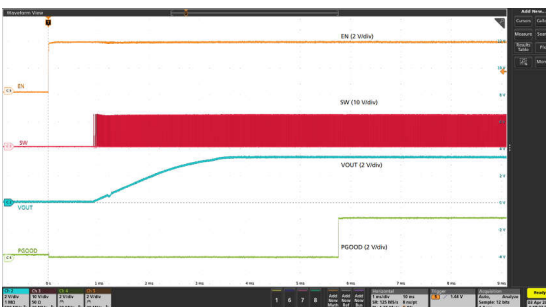


图 9-12. 通过 EN 启动

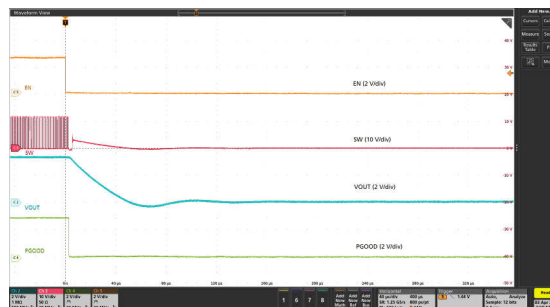


图 9-13. 通过 EN 关断

9.3 电源相关建议

该器件设计为在 4V 至 16V 的输入电源电压范围内运行。因此，必须对两个输入电源 (VIN 和 VCC 辅助电源) 进行良好调节。除了 PCB 布局和接地方案外，对输入电源 (VIN 和 VCC 辅助电源) 进行正确旁路对于噪声性能也至关重要。请参阅 [布局](#) 中的建议。

9.4 布局

9.4.1 布局指南

在开始使用该器件进行设计之前，请注意以下事项：

- 让 VIN、PGND 和 SW 布线尽可能宽，以便降低布线阻抗并改善散热。
- 将功率元件（包括输入和输出电容器、电感器和 IC）放置在 PCB 的顶面。要屏蔽小信号布线并使其与有噪声的电力线隔离，请至少插入一个实心接地内部平面。
- VIN 去耦电容器的放置位置对于功率 MOSFET 的稳健性非常重要。每个 VIN 引脚（引脚 4 和 12）上需要一个 $1\ \mu\text{F}/25\text{V}/0402$ 陶瓷高频旁路电容器，并连接到相邻的 PGND 引脚（分别为引脚 5 和 11）。将剩余的陶瓷输入电容放置在这些高频旁路电容器旁边。剩余的输入电容可以放置在电路板的另一侧，但要使用尽可能多的过孔，以更大限度地减少电容器和 IC 引脚之间的阻抗。
- 在 PGND 引脚下方和附近放置尽可能多的过孔。此操作可以更大限度减小寄生阻抗并降低热阻。
- 在两个 VIN 引脚附近使用过孔，并通过内部层在过孔之间实现低阻抗连接。也可以在每个 VIN 引脚下方放置一个过孔。
- 将 VCC 去耦电容器尽可能靠近器件放置，并通过较短的返回路径连接到 PGND 引脚 5。确保 VCC 去耦环路较小，并使用宽度为 12mil 或更宽的走线进行连接布线。
- 将 BOOT 电容器尽可能靠近 BOOT 和 SW 引脚放置。使用宽度为 12mil 或更宽的布线进行连接。
- 连接 SW 引脚和电感器高压侧的 PCB 布线定义为开关节点。开关节点必须尽可能短且宽。
- 如果使用外部反馈，则无论是单端检测还是遥感，应始终将反馈电阻放置在该器件附近以尽可能缩短 FB 布线长度。
 - 对于遥感，FB 分压电阻与远位置之间的连接必须采用一对差分的 PCB 布线，并必须在 $0.1\ \mu\text{F}$ 或更高的旁路电容器上实施开尔文检测。遥感信号的接地连接必须连接到 GOS 引脚。遥感信号的 V_{OUT} 连接必须连接到反馈电阻分压器，并让底部反馈电阻端接在 GOS 引脚上。为了保持稳定的输出电压并更大限度减小纹波，这个遥感线路差分对必须远离任何噪声源（例如电感器和 SW 节点）或高频时钟线路。TI 建议用上下两个接地平面屏蔽这对遥感线路。
 - 对于单端检测，应将 FB 引脚和输出电压之间的顶部反馈电阻连接到 $0.1\ \mu\text{F}$ 或更高的高频本地输出旁路电容器，并用短布线将 GOS 短接至 AGND。
- 将 AGND 引脚（引脚 19）连接到器件下方的 PGND 引脚（引脚 5 和 11）。
- 避免在应用中将 PG 信号和任何其他噪声信号路由到 VOS/FB 和 GOS 等噪声敏感信号附近，以限制耦合。
- 有关布局建议，请参阅 [布局示例](#)。

9.4.2 布局示例

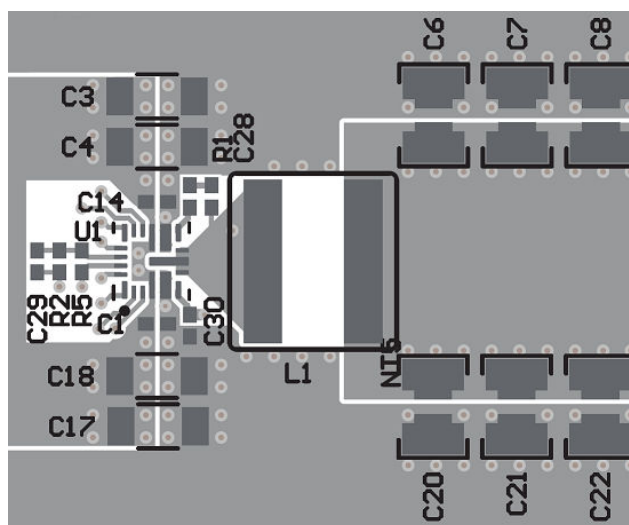


图 9-14. 布局建议

有关更详细的布局示例，请参阅 [TPS544B28 降压转换器评估模块 EVM 用户指南](#)。

9.4.3 TI EVM 上的热性能

测试条件： $f_{SW} = 800\text{kHz}$ ， $V_{IN} = 12\text{V}$ ， $V_{CC} = \text{内部 LDO}$ ， $V_{OUT} = 3.3\text{V}$ ， $I_{OUT} = 12\text{A}$ ，电感器 $L_{OUT} = 0.55\mu\text{H}$ （典型值 $1.42\text{m}\Omega$ ）， $C_{OUT} = 6 \times 22\mu\text{F}$ (1206/6.3V/X7R)，无 R_{BOOT} ，无 RC 缓冲器

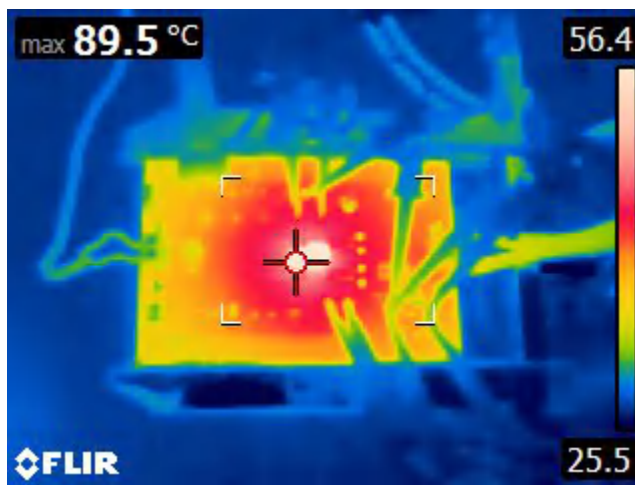


图 9-15. 27°C 环境温度下的热图像

10 器件和文档支持

10.1 文档支持

10.1.1 相关文档

- 德州仪器 (TI), [采用前馈电容器优化内部补偿直流/直流转换器的瞬态响应 应用手册](#)
- 德州仪器 (TI), [机架服务器和数据中心应用中适用于 VR13.HC 的非隔离式负载点解决方案 应用手册](#)
- 德州仪器 (TI), [TPS548B23 降压转换器评估模块 EVM 用户指南](#)
- 德州仪器 (TI), [如何选择降压转换器的输入电容器 模拟设计期刊](#)

10.2 接收文档更新通知

要接收文档更新通知, 请导航至 [ti.com](https://www.ti.com) 上的器件产品文件夹。点击 [通知](#) 进行注册, 即可每周接收产品信息更改摘要。有关更改的详细信息, 请查看任何已修订文档中包含的修订历史记录。

10.3 支持资源

[TI E2E™ 中文支持论坛](#) 是工程师的重要参考资料, 可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题, 获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”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](#)。

10.4 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

PMBus® is a registered trademark of System Management Interface Forum, Inc..

所有商标均为其各自所有者的财产。

10.5 静电放电警告



静电放电 (ESD) 会损坏这个集成电路。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。

10.6 术语表

[TI 术语表](#) 本术语表列出并解释了术语、首字母缩略词和定义。

11 修订历史记录

日期	修订版本	注释
July 2026	*	初始发行版

12 机械、封装和可订购信息

以下页面包含机械、封装和可订购信息。这些信息是指定器件可用的最新数据。数据如有变更，恕不另行通知，且不会对此文档进行修订。有关此数据表的浏览器版本，请查阅左侧的导航栏。

PACKAGING INFORMATION

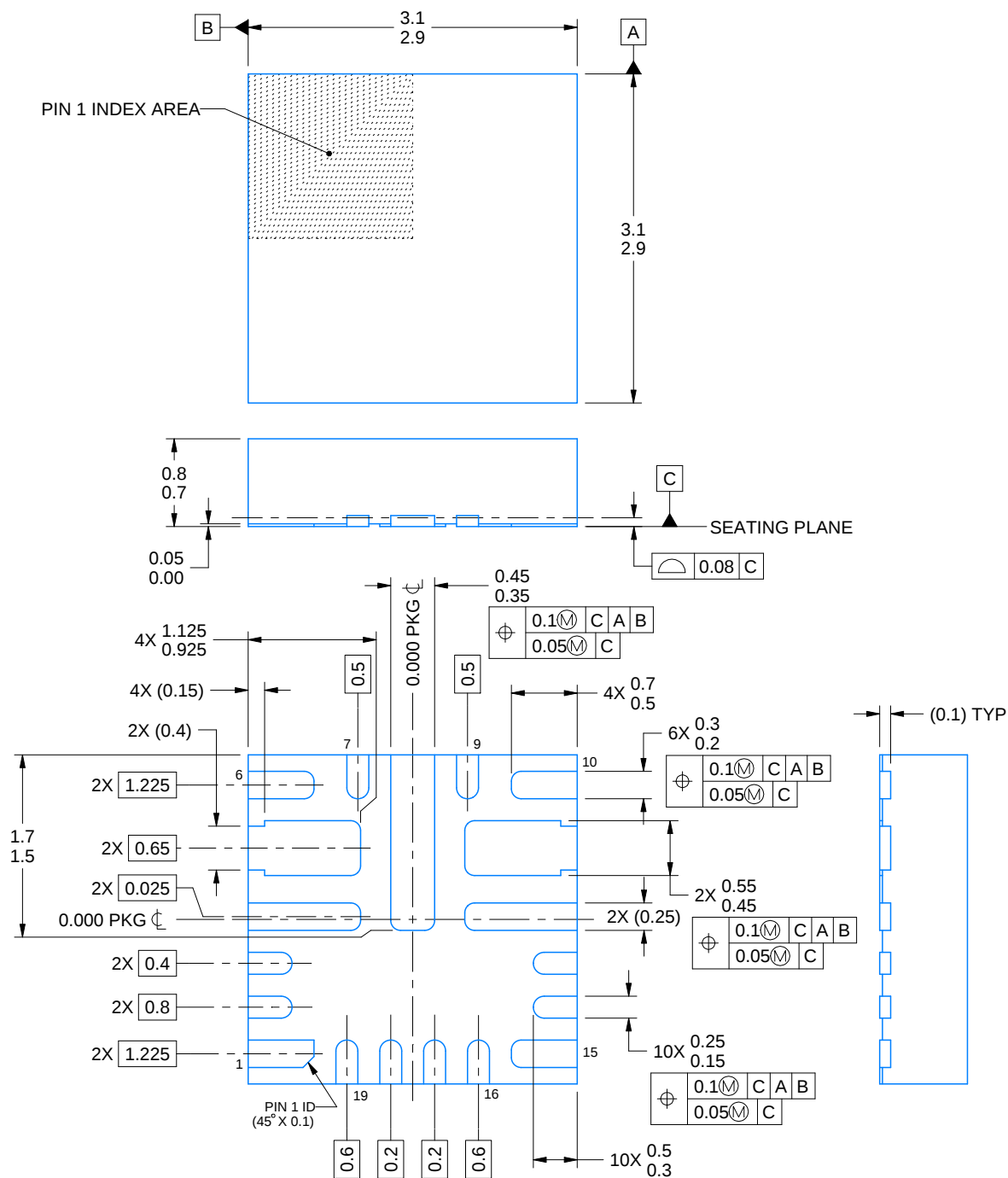
Orderable part number	Status (1)	Material type (2)	Package Pins	Package qty Carrier	RoHS (3)	Lead finish/ Ball material (4)	MSL rating/ Peak reflow (5)	Op temp (°C)	Part marking (6)
TPS544A28RBHR	Active	Production	WQFN-HR (RBH) 19	5000 LARGE T&R	Yes	SN	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 150	T4A28R
TPS544A28VANR	Active	Production	WQFN-HR (VAN) 19	5000 LARGE T&R	Yes	SN	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 150	T4A28V

- ⁽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.



4230372/B 04/2025

NOTES:

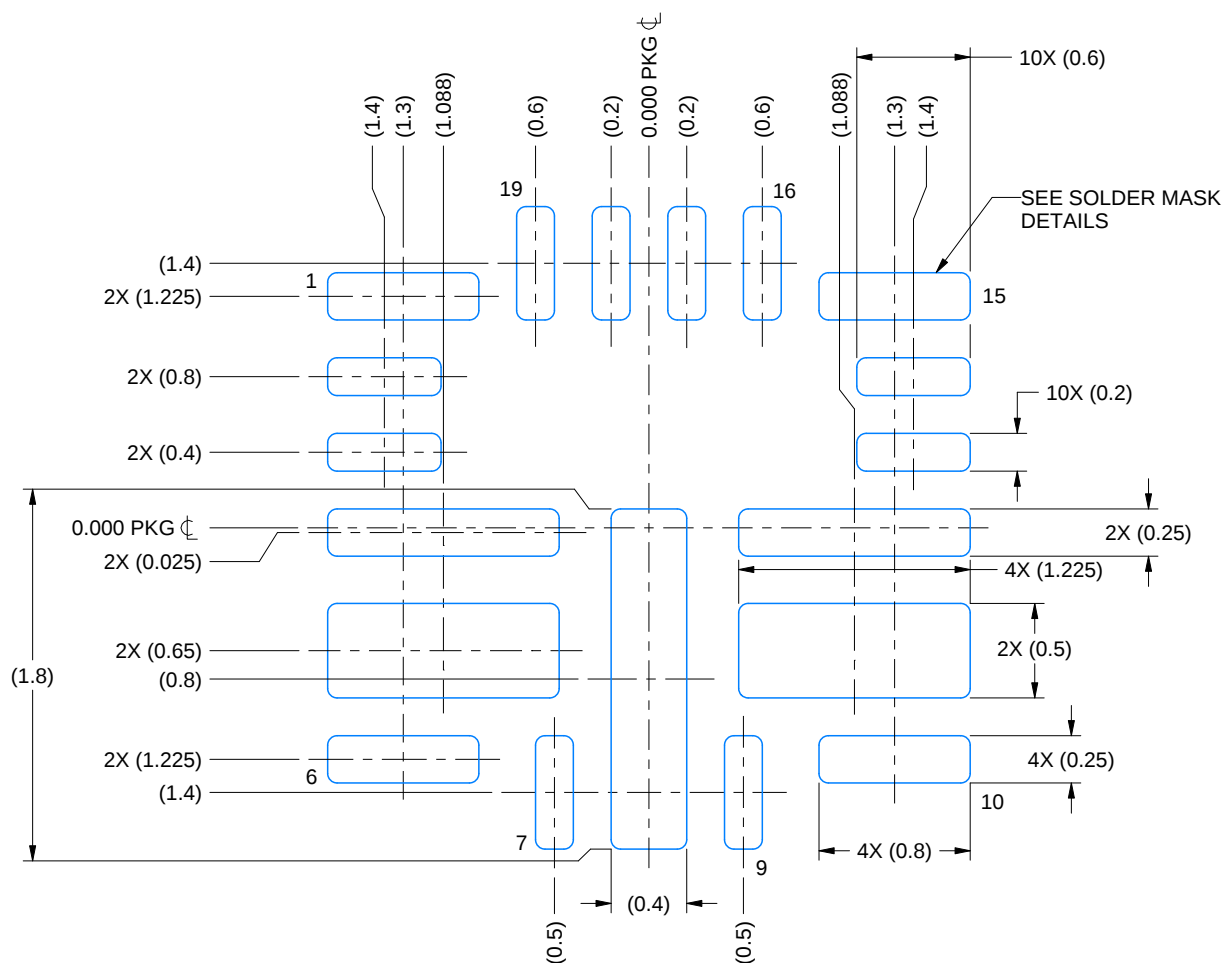
1. All linear dimensions are in millimeters. Any dimensions in parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
2. This drawing is subject to change without notice.

EXAMPLE BOARD LAYOUT

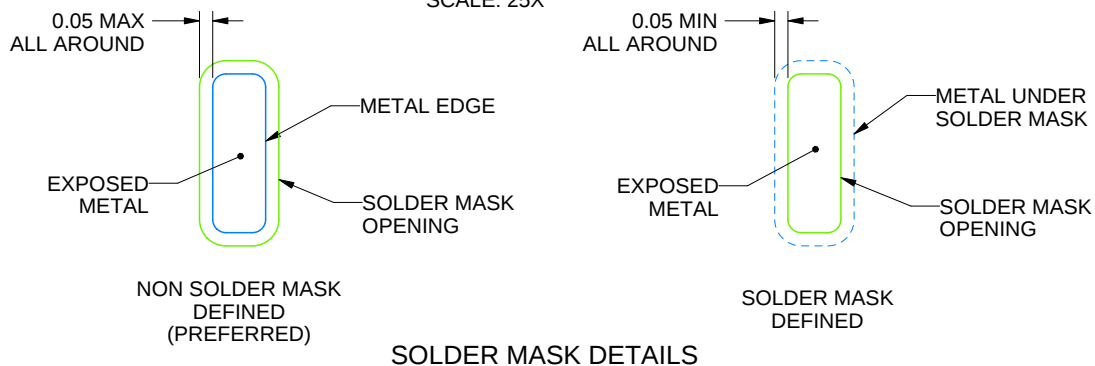
VAN0019A

WQFN-HR - 0.8 mm max height

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD



LAND PATTERN EXAMPLE
EXPOSED METAL SHOWN
SCALE: 25X



4230372/B 04/2025

NOTES: (continued)

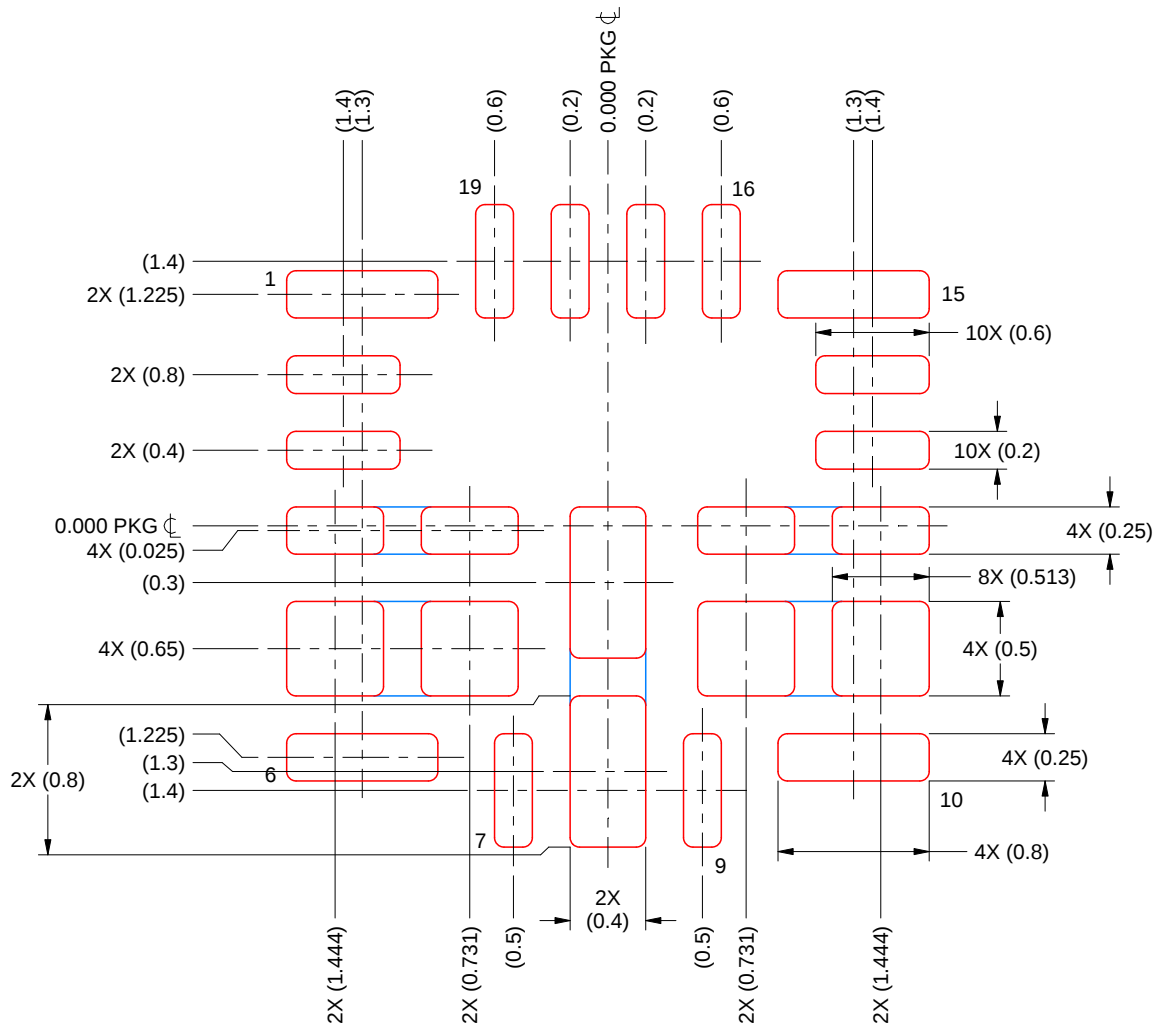
3. For more information, see Texas Instruments literature number SLUA271 (www.ti.com/lit/slue271).

EXAMPLE STENCIL DESIGN

VAN0019A

WQFN-HR - 0.8 mm max height

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD



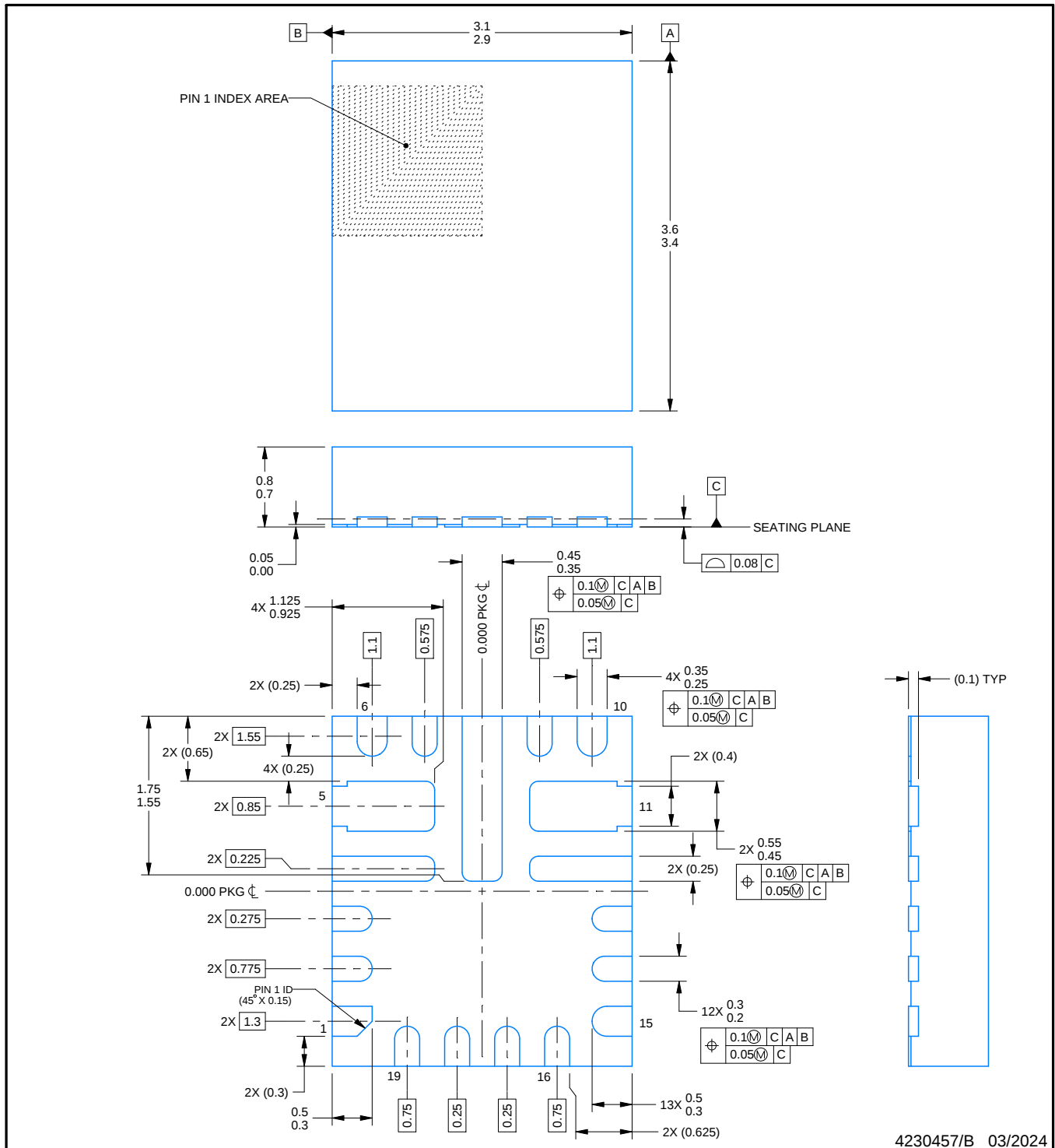
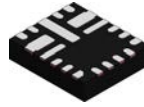
SOLDER PASTE EXAMPLE
 BASED ON 0.125 mm THICK STENCIL
 SCALE: 25X

PRINTED SOLDER COVERAGE BY AREA UNDER PACKAGE
 PADS 4, 5, 11 & 12: 84%
 PAD 8: 89%

4230372/B 04/2025

NOTES: (continued)

4. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.



NOTES:

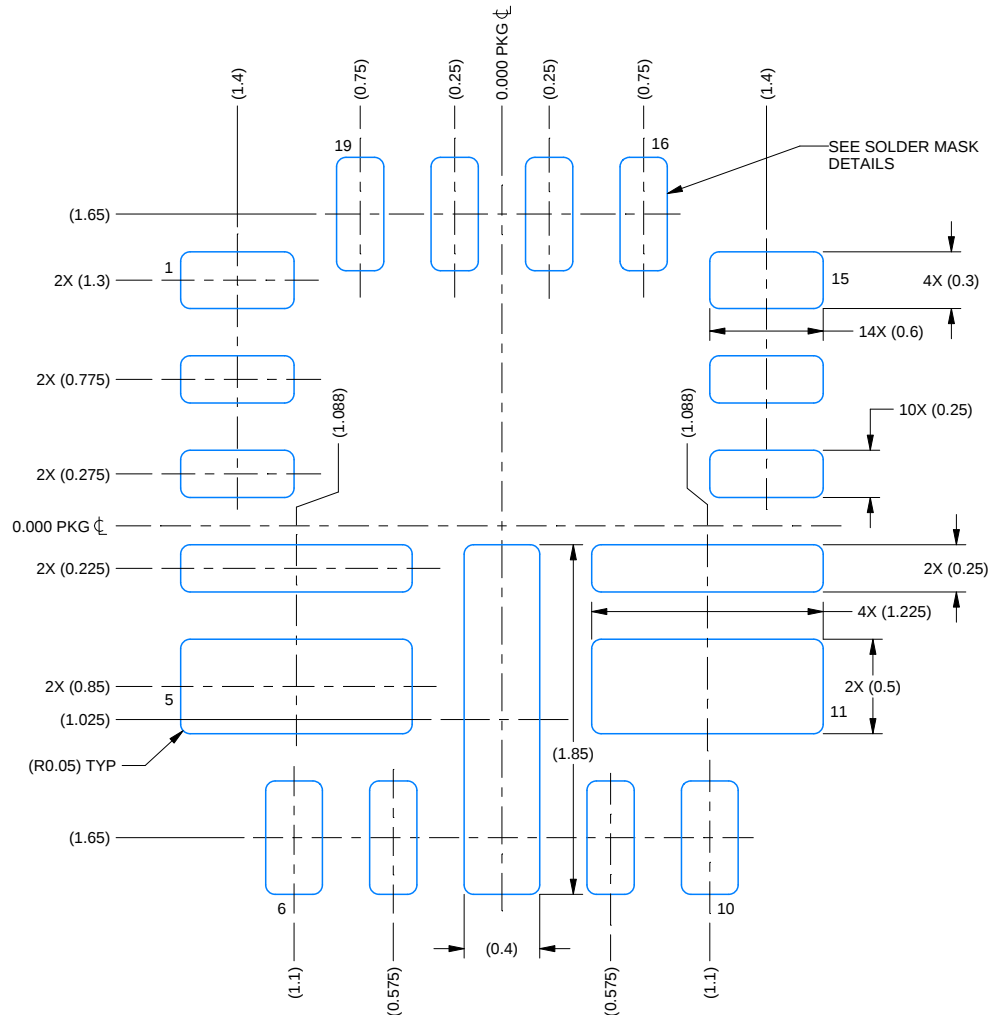
- All linear dimensions are in millimeters. Any dimensions in parenthesis are for reference only. Dimensioning and tolerancing per ASME Y14.5M.
- This drawing is subject to change without notice.

EXAMPLE BOARD LAYOUT

RBH0019A

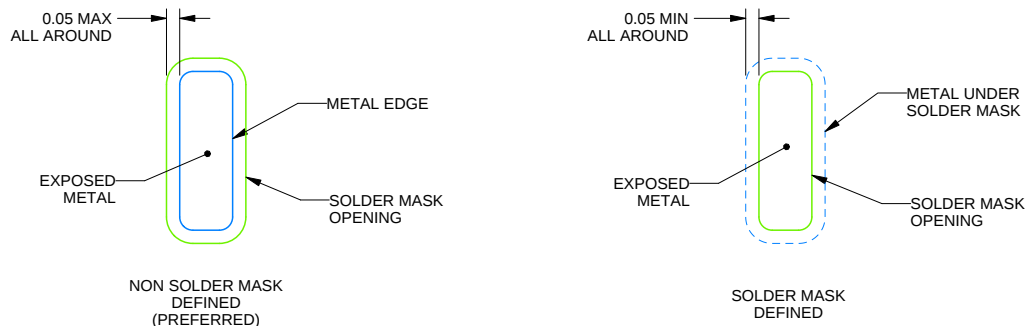
WQFN-HR - 0.8 mm max height

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD



LAND PATTERN EXAMPLE

EXPOSED METAL SHOWN
SCALE: 25X



SOLDER MASK DETAILS

4230457/B 03/2024

NOTES: (continued)

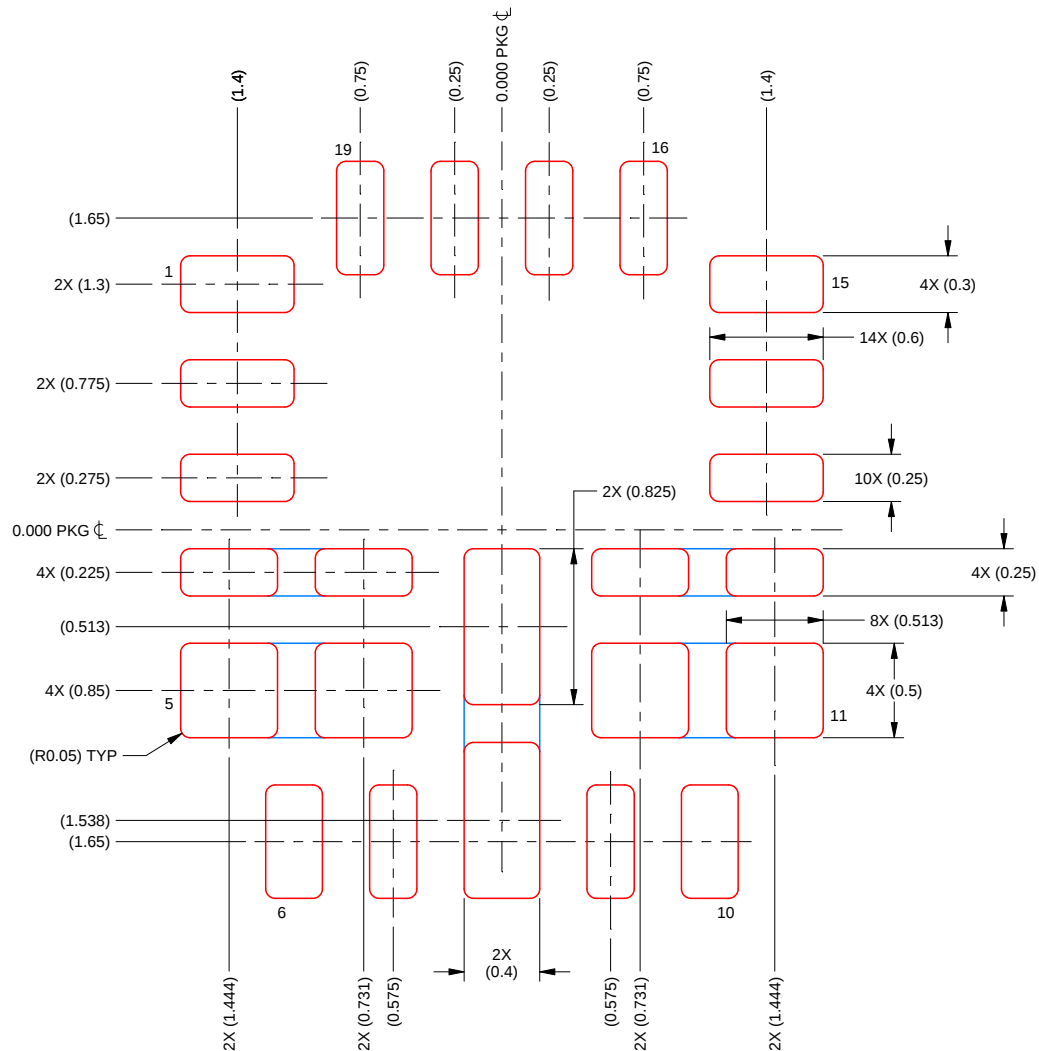
3. For more information, see Texas Instruments literature number SLUA271 (www.ti.com/lit/sluea271).

EXAMPLE STENCIL DESIGN

RBH0019A

WQFN-HR - 0.8 mm max height

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD



SOLDER PASTE EXAMPLE

BASED ON 0.125 mm THICK STENCIL
SCALE: 25X

PRINTED SOLDER COVERAGE BY AREA UNDER PACKAGE
PADS 4, 5, 11 & 12: 84%
PAD 8: 89%

4230457/B 03/2024

NOTES: (continued)

4. Laser cutting apertures with trapezoidal walls and rounded corners may offer better paste release. IPC-7525 may have alternate design recommendations.

重要通知和免责声明

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

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

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月