TEXAS INSTRUMENTS
BQ78709-Q1
ZHDS211 – MAY 2026

BQ78709-Q1 适用于锂离子、锂聚合物、$LiFePO_4$ (LFP)、LTO 电池包和超级电容器的 2 节至 7 节串联高精度 汽车 电池监测器和保护器

1 特性

- 符合面向汽车应用的 AEC-Q100 标准
- 功能安全合规型
  - 系统功能可满足 ASIL B / SIL 2 等级要求
  - 硬件功能可满足 ASIL B / SIL 2 等级要求
- 适用于 2 节至 7 节串联电池的电池和超级电容器监控功能
- 集成低侧驱动器，用于 NFET 保护，具有可选的自主恢复功能
- 广泛的保护套件，包括电压、温度、电流和内部诊断
- 16 位 Δ-Σ 电压 ADC
  - 1mV 的高精度电芯电压测量（典型值）
- 专用的 16 位或 24 位 Δ-Σ 库仑计 ADC
- – 具有低输入失调电压误差的高精度电流测量
  - 宽量程的电流应用（检测电阻上的测量范围为 ±200mV）
  - 配有计时器的 48 位累积电荷积分器
- 主机控制的电芯均衡
- 多种功耗模式（电池包典型运行范围条件）
  - NORMAL 模式（使用库仑计数）：32 µA 至 175 µA
  - SLEEP 模式（保护处于活动状态）：6 µA
  - DEEPSLEEP 模式：2.7 µA
  - SHUTDOWN 模式：<1 µA
- 电源电压范围为 3V 至 38.5V
- 电池连接和部分其他引脚上的高电压容差为 45V
- 支持使用内部传感器和外部热敏电阻进行温度检测
- 集成一次性可编程 (OTP) 存储器，用于保存器件设置，由 TI 编程
- 400kHz I^2C 串行通信，具有可选的 CRC 支持
- 供外部系统使用的可编程 LDO
- 20 引脚 QFN (RGR) 封装

2 应用

- 车门把手超级电容器模块
- 汽车 12V 辅助电池
- 汽车备用电池

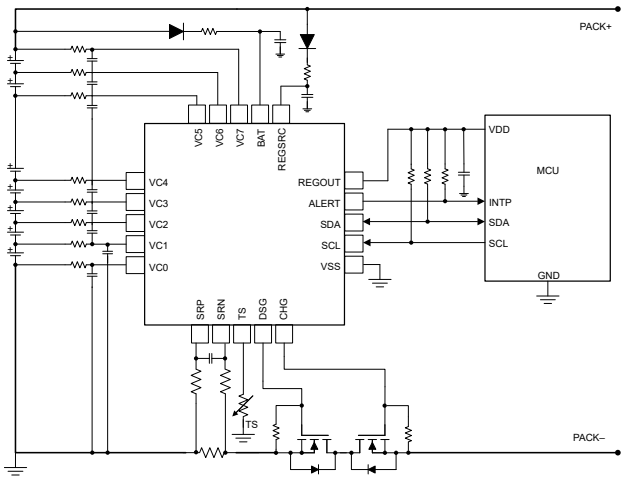
3 说明

德州仪器 (TI) 的 BQ78709-Q1 是一款高度集成的高精度电池监控器和保护器，适用于 2 节至 7 节串联锂离子、锂聚合物、$LiFePO_4$ (LFP)、LTO 电池组和超级电容器。该器件包含一个高精度监测系统、一个专用库仑计和累积电荷积分以及一个高度可配置的保护子系统，并支持主机控制型电芯均衡。它集成了低侧保护 NFET 驱动器、一个供外部系统使用的可编程 LDO 和一个支持高达 400kHz 工作频率并具有可选 CRC 的 I^2C 主机通信接口。在低至 32 µA 的多种功率模式下库仑计可连续计数。BQ78709-Q1 的供电电压为 3V 至 38.5V，并采用 20 引脚 QFN 封装。

封装信息

器件型号	封装(1)	封装尺寸（标称值）
BQ78709-Q1	RGR（20 引脚）	3.5mm × 3.5mm × 0.9mm，0.5mm 间距

(1) 如需更多信息，请参阅*机械、封装和可订购信息*部分。



简化版原理图

本资源的原文使用英文撰写。 为方便起见，TI 提供了译文；由于翻译过程中可能使用了自动化工具，TI 不保证译文的准确性。 为确认准确性，请务必访问 ti.com 参考最新的英文版本（控制文档）。

内容

1 特性 1
2 应用 1
3 说明 1
4 器件比较表 3
5 引脚配置和功能 3
6 规格 5
6.1 绝对最大额定值 5
6.2 ESD 等级 6
6.3 建议运行条件 6
6.4 热性能信息 BQ78709-Q1 7
6.5 电源电流 7
6.6 数字 I/O 7
6.7 REGOUT LDO 8
6.8 电压基准 8
6.9 库仑计 9
6.10 库仑计数字滤波器 9
6.11 电流唤醒检测器 11
6.12 模数转换器 12
6.13 电芯电压测量精度 14
6.14 电芯均衡 14
6.15 内部温度传感器 14
6.16 热敏电阻测量 14
6.17 硬件过热检测器 15
6.18 内部振荡器 15
6.19 充电和放电 FET 驱动器 15
6.20 基于比较器的保护子系统 16
6.21 时序要求 - I²C 接口，100kHz 模式 19
6.22 时序要求 - I²C 接口，400kHz 模式 19
6.23 时序图 20
6.24 典型特性 20
7 详细说明 23
7.1 概述 23
7.2 功能方框图 23
7.3 器件配置 23
7.3.1 命令和子命令 23
7.3.2 使用 OTP 或寄存器进行配置 24
7.3.3 器件安全性 24
7.4 器件硬件特性 24
7.4.1 电压 ADC 24
7.4.2 库仑计数器和数字滤波器 24
7.4.3 保护 FET 驱动器 25
7.4.4 电压基准 25
7.4.5 多路复用器 25
7.4.6 LDO 25
7.4.7 独立接口与主机接口 26
7.4.8 ALERT 引脚工作原理 26
7.4.9 低频振荡器 26
7.4.10 I²C 串行通信接口 26
7.5 测量子系统 28
7.5.1 电压测量 28
7.5.2 电流测量和电荷积分 29
7.5.3 内部温度测量 30
7.5.4 热敏电阻温度测量 30
7.5.5 出厂调整和校准 30
7.6 保护子系统 30
7.6.1 保护概述 30
7.6.2 初级保护 31
7.6.3 CHG 检测器 31
7.6.4 电芯开路保护 31
7.6.5 诊断检查 32
7.7 电芯均衡 32
7.8 器件运行模式 33
7.8.1 运行模式概述 33
7.8.2 正常模式 33
7.8.3 SLEEP 模式 34
7.8.4 DEEPSLEEP 模式 34
7.8.5 SHUTDOWN 模式 34
7.8.6 CONFIG_UPDATE 模式 35
8 应用和实施 36
8.1 应用信息 36
8.2 典型应用 36
8.2.1 设计要求 39
8.2.2 详细设计过程 40
8.2.3 应用性能曲线图 41
8.2.4 随机电芯连接支持 42
8.2.5 启动时序 42
8.2.6 FET 驱动器关断 43
8.2.7 未使用引脚的使用 46
8.3 电源相关建议 46
8.4 布局 47
8.4.1 布局指南 47
8.4.2 布局示例 47
9 器件和文档支持 49
9.1 文档支持 49
9.1.1 相关文档 49
9.2 接收文档更新通知 49
9.3 支持资源 49
9.4 商标 49
9.5 静电放电警告 49
9.6 术语表 49
10 修订历史记录 49
11 机械、封装和可订购信息 49

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 器件比较表

BQ78709-Q1 器件系列				
器件型号	封装	可编程设置	支持的电芯数	REGOUT 状态
BQ78709-Q1	QFN	Y	2 至 7	启用，3.3V

5 引脚配置和功能

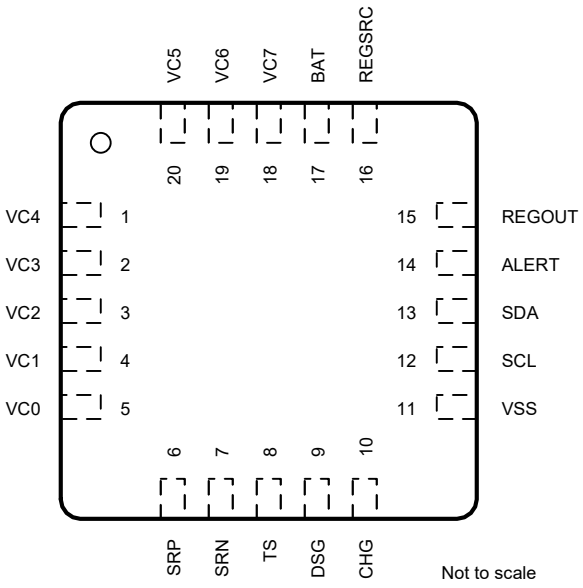


图 5-1. BQ78709-Q1 引脚排列

表 5-1. 引脚功能

引脚		I/O	类型	说明
编号	名称			
1	VC4	I	IA	电池组底部第四个电芯的检测电压输入引脚，为电池组底部第四个电芯提供均衡电流输入，并为电池组底部第五个电芯返回均衡电流
2	VC3	I	IA	栈底第三个电芯的检测电压输入引脚，为栈底第三个电芯提供均衡电流输入，并为栈底第四个电芯返回均衡电流
3	VC2	I	IA	栈底第二个电芯的检测电流输入引脚，为栈底第二个电芯提供均衡电流输入，并为栈底第三个电芯返回均衡电流
4	VC1	I	IA	栈底第一个电芯的检测电压输入引脚，为栈底第一个电芯提供均衡电流输入，并为栈底第二个电芯返回均衡电流
5	VC0	I	IA	栈底第一个电芯负极端子的检测电压输入引脚，为栈底第一个电芯返回均衡电流
6	SRP	I	IA	连接到内部库仑计外设的模拟输入引脚，用于在 SRP 和 SRN 之间集成一个小电压，其中 SRP 是感应电阻器的顶部。充电电流会在 SRP 处产生相对于 SRN 的正电压。
7	SRN	I	IA	连接到内部库仑计外设的模拟输入引脚，用于在 SRP 和 SRN 之间集成一个小电压，其中 SRN 是感应电阻器的底部。充电电流会在 SRP 处产生相对于 SRN 的正电压。
8	TS	I/O	I/OA	热敏电阻或通用 ADC 输入并充当从 SHUTDOWN 状态唤醒，
9	DSG	O	OA	NMOS 放电 FET 驱动输出引脚
10	CHG	O	OA	NMOS 充电 FET 驱动输出引脚
11	VSS	—	P	器件接地
12	SCL	I/O	I/OD	I^2C 串行通信总线时钟
13	SDA	I/O	I/OD	I^2C 串行通信总线数据
14	ALERT	O	OD	数字中断输出引脚
15	REGOUT	O	OA	LDO 输出，可编程为 1.8V、2.5V、3.0V、3.3V 或 5.0V。
16	REGSRC	I	IA	REGOUT LDO 的输入引脚，也用作 CHG 和 DSG FET 驱动器的电源。
17	BAT	I	P	主电源输入引脚
18	VC7	I	IA	栈底第七个电芯的检测电压输入引脚，为栈底第七个电芯提供均衡电流输入，并用作栈顶测量点
19	VC6	I	IA	电池组底部第六个电芯的检测电压输入引脚，为电池组底部第六个电芯提供均衡电流输入，并为电池组底部第七个电芯返回均衡电流
20	VC5	I	IA	电池组底部第五个电芯的检测电压输入引脚，为电池组底部第五个电芯提供均衡电流输入，并为电池组底部第六个电芯返回均衡电流

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6 规格

6.1 绝对最大额定值

在自然通风条件下的工作温度范围内测得（除非另有说明）(1)

说明	引脚	最小值	最大值	单位
输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	BAT、REGSRC	VSS – 0.3	VSS+40	V
短时输入电压范围，$V_{IN(short)}$ (2)	VC1 - VC7、BAT、REGSRC、CHG		VSS+45	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$	ALERT、SCL、SDA	VSS – 0.3	VSS+6	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$	TS	VSS – 0.3	2.1	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	SRP、SRN	VSS – 0.3	2.1	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	VC7	VSS – 0.3 和 VC6 – 0.3 的最大值	VSS+40	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	VC6	VSS – 0.3 和 VC5 – 0.3 的最大值	VSS+40	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	VC5	VSS – 0.3 和 VC4 – 0.3 的最大值	VSS+40	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	VC4	VSS – 0.3 和 VC3 – 0.3 的最大值	VSS+40	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	VC3	VSS – 0.3 和 VC2 – 0.3 的最大值	VSS+40	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	VC2	VSS – 0.3 和 VC1 – 0.3 的最大值	VSS+40	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	VC1	VSS – 0.3 和 VC0 – 0.3 的最大值	VSS+40	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$	VC0	VSS – 0.3	VSS+6	V
直流输入电压范围，$V_{IN(DC)}$ (2)	CHG	VSS – 30	VSS+40	V
输出电压范围，V_O	DSG	VSS – 0.3	VSS+20	V
输出电压范围，V_O	REGOUT	VSS – 0.3	VSS+6	V
每节电芯的最大电芯均衡电流	VC0-VC7		50	mA
结温，T_J		-65	150	°C
贮存温度，T_{STG}		-65	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*建议的工作条件*以外的任何其他条件下能够正常运行。如果超出*建议工作条件*但在*绝对最大额定值*范围内，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。

(2) 在器件的使用寿命内，所施加应力高于 $V_{IN(DC)}$ 且低于 $V_{IN(SHORT)}$ 的时间必须限制在 100 小时以内。 这些应力可能会在短暂的瞬态事件期间发生，但不应施加此范围内的直流电压。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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，所有引脚(1)	±2000	V
$V_{(ESD)}$	静电放电	充电器件模型 (CDM)，符合 ANSI/ESDA/JEDEC JS-002 标准，所有引脚(2)	±500	V

(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

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V_{BAT}	电源电压	BAT 引脚上的电压（正常运行）	3		38.5	V
$V_{BAT(UVLO)}$	欠压锁定电平	BAT 上导致器件复位的下降电压		2.5		V
$V_{WAKEONTS}$	TS 唤醒电压	BAT 引脚上的电压在有效范围内	0.65		1.2	V
$V_{WAKEONVC0}$	VC0 唤醒电压	BAT 引脚上的电压在有效范围内	0.65		1.2	V
V_{IN}	输入电压范围	ALERT、SCL、SDA	0		5.5	V
V_{IN}	输入电压范围（包括 ADC 测量）	TS	-0.2		1.8	V
V_{IN}	输入电压范围	SRP、SRN、SRP-SRN（测量电流时）	-0.2		0.2	V
V_{IN}	输入电压范围	SRP、SRN（不测量电流时）	-0.2		1.8	V
V_{IN}	输入电压范围(3)	$V_{VC(0)}$	-0.2		3.0	V
V_{IN}	输入电压范围	$V_{VC(x)}$，1 ⩽ x ⩽ 4	$V_{VC(x-1)}$ – 0.2 或 VSS – 0.2 的最大值		$V_{VC(x-1)}$+5.5 或 VSS + 38.5 的最小值	V
V_{IN}	输入电压范围	$V_{VC(x)}$，x ⩾ 5	$V_{VC(x-1)}$ – 0.2 或 VSS + 2.0 的最大值		$V_{VC(x-1)}$ + 5.5 和 VSS + 38.5 中的最小值	V
V_O	输出电压范围	CHG	-25		38.5	V
V_O	输出电压范围	DSG	-0.2		14	V
I_{CB}	电芯均衡电流（内部，每个电芯）(3)		0		50	mA
R_C	外部电芯输入电阻(2) (3)		10		1000	Ω
C_C	外部电芯输入电容(2) (3)		0.1		10	µF
R_f	外部电源滤波器电阻（BAT 引脚）(3)		50		1000	Ω
C_f	外部电源滤波器电容（BAT 引脚）(3)		1		40	µF
R_{filt}	检测电阻滤波器电阻(3)			100	200	Ω
C_{REGSRC}	REGSRC 电容(3)		1			µF
R_{TS}	25°C 时的外部热敏电阻标称电阻 (103-AT)			10		kΩ
T_{OPR}	运行期间的结温(1)		-40		125	°C

(1) 必须限制器件内的功率耗散，以确保运行期间结温保持在规格范围内。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

(2) 外部电芯输入电阻乘以外部输入电容必须限制在 200µs 或以下。
(3) 根据设计指定。

6.4 热性能信息 BQ78709-Q1

热指标(1)		BQ78709-Q1 RGR (QFN) 20 引脚	单位
$R_{\theta JA}$	结至环境热阻	47.2	°C/W
$R_{\theta JC(top)}$	结至外壳（顶部）热阻	47.9	°C/W
$R_{\theta JC(bottom)}$	结至外壳（底部）热阻	8.3	°C/W
$R_{\theta JB}$	结至电路板热阻	23.4	°C/W
Ψ_{JT}	结至顶部特征参数	1.4	°C/W
Ψ_{JB}	结至电路板特征参数	23.4	°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。

6.5 电源电流

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
I_{NORMAL}	正常模式	定期测量和保护处于活动状态，REGOUT = 3.3V，空载，CHG = ON，DSG = ON，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x0，**Settings:Configuration:Power Config[CVADCSPEED]** = 0x0，无通信		146		µA
I_{SLEEP}	SLEEP 模式	定期保护和监控，无电池包电流，REGOUT = OFF，CHG = OFF，DSG = ON，无通信，**Power:Sleep:Voltage Time** = 5s		6.1		µA
$I_{DEEPSLEEP}$	DEEPSLEEP 模式	无监控或保护，REGOUT = 3.3V，无负载，LFO = OFF，无通信		2.8		µA
$I_{SHUTDOWN}$	SHUTDOWN 模式	所有模块均已断电，无监控或保护，无通信		1	2	µA

6.6 数字 I/O

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V_{IH}	高电平输入	SCL，SDA	1.23		5.5	V
V_{IL}	低电平输入	SCL，SDA			0.53	V
V_{OL}	输出电压低电平	ALERT、SCL、SDA、V_{BAT} ≥ 3V、I_{OL} = 5mA、10pF 负载			0.4	V
C_{IN}	输入电容(1)	ALERT、SCL、SDA		2		pF
I_{LKG}	输入漏电流	ALERT、SCL、SDA，器件处于 SHUTDOWN 模式			1	µA

(1) 根据设计指定

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6.7 REGOUT LDO

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{REGOUT_1.8_LOW}$	稳压器电压（标称 1.8V 设置）	V_{BAT}，V_{REGSRC} = 3.0V，I_{REGOUT} = 10mA	1.62	1.8	1.92	V
$V_{REGOUT_1.8}$	稳压器电压（标称 1.8V 设置）(1)	V_{BAT} ≥ 3.0V，V_{REGSRC} ≥ 3.8V，I_{REGOUT} = 0mA 至 20mA	1.62	1.8	1.92	V
$V_{REGOUT_2.5}$	稳压器电压（标称 2.5V 设置）(1)	V_{BAT} ≥ 3.0V，V_{REGSRC} ≥ 3.8V，I_{REGOUT} = 0mA 至 20mA	2.25	2.5	2.75	V
$V_{REGOUT_3.0}$	稳压器电压（标称 3.0V 设置）(1)	V_{BAT} ≥ 3.0V，V_{REGSRC} ≥ 3.8V，I_{REGOUT} = 0mA 至 20mA	2.7	3.0	3.3	V
$V_{REGOUT_3.3}$	稳压器电压（标称 3.3V 设置）(1)	V_{BAT} ≥ 3.0V，V_{REGSRC} ≥ 4.2V，I_{REGOUT} = 0mA 至 20mA	3	3.3	3.6	V
$V_{REGOUT_5.0}$	稳压器电压（标称 5.0V 设置）(1)	V_{BAT} ≥ 3.0V，V_{REGSRC} ≥ 5.5V，I_{REGOUT} = 0mA 至 20mA	4.5	5.0	5.5	V
$\Delta V_{O(TEMP)}$	温度范围内的稳压器输出	ΔV_{REGOUT} 与（25°C 时的 V_{REGOUT}、I_{REGOUT} = 20mA、V_{BAT} = 3.0V、V_{REGSRC} = 4.2V、设置为标称 3.3V 设置条件下 V_{REGOUT}）间的关系		±0.015		% / ℃
$\Delta V_{O(LINE)}$	线性调整率(1)	当 V_{REGSRC} 范围为 4.2V 至 38.5V 且 V_{REGOUT} 设为标称 3.3V 设置时，ΔV_{REGOUT} 与 25°C、V_{BAT} = 3.0V、V_{REGSRC} = 4.2V、I_{REGOUT} = 5mA 条件下 V_{REGOUT} 间的关系	-1		1	%
I_{SC}	内部短路电流限制	V_{REGOUT} = 0V	23		50	mA
C_{EXT}	连接在 REGOUT 和 VSS 之间的外部电容器(2)		1			µF

(1) 由特性和生产测试的组合指定。
(2) 根据设计指定

6.8 电压基准

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
电压基准 1						
$V_{(REF1)}$	内部基准电压(1)	T_A = 25°C	1.1955	1.1962	1.1969	V
$V_{(REF1DRIFT)}$	内部基准电压漂移(1)	T_A = -40°C 至 125°C	-31		31	PPM/°C
电压基准 2						
$V_{(REF2)}$	内部基准电压(2)	T_A = 25°C	1.226	1.227	1.229	V
$V_{(REF2DRIFT)}$	内部基准电压漂移(2)	T_A = -40°C 至 125°C	-51		51	PPM/°C

(1) $V_{(REF1)}$ 用于 ADC 基准。其有效值通过使用 ADC 的间接测量来确定。
(2) $V_{(REF2)}$ 用于库仑计、LDO 和比较器保护子系统

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6.9 库仑计

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(CC_IN)}$	测量的输入电压范围 (3)	V_{SRP} - V_{SRN}	-0.2		0.2	V
$V_{(CC_IN)}$	测量的输入电压范围 (3)	V_{SRP}、V_{SRN}	-0.2		0.2	V
$B_{(CM_INL)}$	积分非线性(2)	16 位，在 -200mV 至 200mV 输入电压范围内的最佳拟合直线，使用 *CC1 Current()* 命令数据与 ***CC1 Gain*** = 32，使得在 25℃ 时 1 LSB ≈ 7.52µV			±4.3	LSB(1)
$B_{(CM_INL)}$	积分非线性(2)	16 位，在 -200mV 至 100mV SRP-SRN 输入电压范围内的最佳拟合直线，使用 *CC1 Current()* 命令数据与 ***CC1 Gain*** = 32，使得在 25℃ 时 1 LSB ≈ 7.52µV			±1.2	LSB(1)
$V_{(CM_OFF)}$	偏移误差	16 位，未校准，使用 *Current()* 命令数据与 ***Curr Gain*** = 32，使得 1 LSB ≈ 7.52µV	-5		5	µV
$V_{(CM_OFF_DRIFT)}$	偏移误差漂移(2)	16 位，未校准，使用 *Current()* 命令数据与 ***Curr Gain*** = 32，使得 1 LSB ≈ 7.52µV		0.01		µV/°C
$B_{(CM_GAIN)}$	增益(2)	使用来自 *Current()* 命令的 16 位数据，其中 ***Curr Gain*** = 32 且 V_{SRP} - V_{SRN} = ±0.15V	132344	132832	133911	LSB/V(1)
$B_{(CM_GAIN)}$	增益漂移(2)	使用来自 *Current()* 命令的 16 位数据，其中 ***Curr Gain*** = 32 且 V_{SRP} - V_{SRN} = ±0.15V	-12		15	LSB/V/°C(1)
$R_{(CM_IN)}$	有效输入电阻(3) (4)		2			MΩ

(1) 1 LSB = V_{REF2} / (5 × 2^{N-1}) ≈ 1.227 / (5 × 2^{15}) = 7.49µV
(2) 根据特征确定
(3) 根据设计指定。
(4) 器件在 NORMAL 模式下运行并施加 0.1V 差分输入时的平均有效差分输入电阻。

6.10 库仑计数字滤波器

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
CC1 电荷积分数字滤波器						
$t_{(CC1_CONV)}$	转换时间	单次转换		250		ms
$B_{(CC1_RSL)}$	有效分辨率(1) (2)	在 25℃ 条件下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 之间的直流输入为 -200mV 至 +200mV。	15.5			位
$B_{(CC1_RSL)}$	低功率模式下的有效分辨率(1) (2)	在 25℃ 条件下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 之间的直流输入为 -200mV 至 +200mV。		15.7		位
CC2 电流测量数字滤波器						
$t_{(CM_CONV)}$	慢速模式下的转换时间	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 之间的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x0		2.93		ms
$t_{(CM_CONV_MEDSLOW)}$	中等慢速模式下的转换时间	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 之间的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x1		1.46		ms

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$t_{(CM_CONV_MEDFAST)}$	中等快速模式下的转换时间	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 之间的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x2		732		µs
$t_{(CM_CONV_FAST)}$	快速模式下的转换时间	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 之间的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x3		366		µs
$B_{(CM_RES)}$	慢速模式下的有效分辨率(1) (2)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 之间的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x0（25℃ 条件下）。	13.4			位
$B_{(CM_RES_MEDSLOW)}$	中等慢速模式下的有效分辨率(1)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 上的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x1（25℃ 条件下）。		14.4		位
$B_{(CM_RES_MEDFAST)}$	中等快速模式下的有效分辨率(1)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 上的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x2（25℃ 条件下）。		13.0		位
$B_{(CM_RES_FAST)}$	快速模式下的有效分辨率(1)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 上的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x3（25℃ 条件下）。		10.6		位
$B_{(CM_LP_RES)}$	慢速模式和低功耗模式下的有效分辨率(1) (2)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 上的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x0，**Settings:Configuration:DA Config[CCMODE]** = 0x2（25℃ 条件下）。		15.0		位
$B_{(CM_LP_RES_MEDSLOW)}$	中等慢速模式和低功耗模式下的有效分辨率(1)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 上的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x1，**Settings:Configuration:DA Config[CCMODE]** = 0x2（25℃ 条件下）。		14.3		位

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$B_{(CM_LP_RES_MEDFAST)}$	中等快速模式和低功耗模式下的有效分辨率(1)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 上的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x2，**Settings:Configuration:DA Config[CCMODE]** = 0x2（25℃ 条件下）。		13.0		位
$B_{(CM_LP_RES_FAST)}$	快速模式和低功耗模式下的有效分辨率(1)	在 NORMAL 模式下进行单次转换，V_{SRP} - V_{SRN} 上的直流输入为 -200mV 至 +200mV，**Settings:Configuration:Power Config[IADCSPEED]** = 0x3，**Settings:Configuration:DA Config[CCMODE]** = 0x2（25℃ 条件下）。		10.5		位

(1) 有效分辨率定义为数据在 ±1LSB 范围内表现出 1 Σ 变化的分辨率。
(2) 根据特征确定。

6.11 电流唤醒检测器

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 1，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	8	325	615	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 2，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	513	844	1140	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 3，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	1018	1367	1668	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 4，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	1285	1879	2423	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 5，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	1850	2389	2907	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 6，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	2375	2916	3425	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 7，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	2833	3417	4005	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 8，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	3184	3941	4698	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 9，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	3650	4470	5233	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 10，正阈值（充电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	4136	4990	5799	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 1，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-739	-600	-461	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 2，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-1236	-1101	-949	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 3，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-1759	-1586	-1413	µV

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 4，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-2273	-2074	-1871	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 5，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-2786	-2570	-2349	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 6，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-3324	-3067	-2793	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 7，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-3841	-3557	-3269	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 8，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-4364	-4049	-3738	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 9，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-4901	-4543	-4192	µV
V_{WAKE_THR}	唤醒电压阈值 (V_{SRP} – V_{SRN})，设置 = 10，负阈值（放电电流）(1)	T_A = -40°C 至 125°C。使用平均数据进行测量以消除噪声的影响。	-5419	-5038	-4643	µV
t_{WAKE}	测量间隔			2.44		ms

(1) 由特性和生产测试的组合指定

6.12 模数转换器

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(ADC_IN_CELLS)}$	输入电压范围（电芯差分输入模式）(2) (4)	内部基准 (Vref = V_{REF1})	-0.2		5.5	V
$V_{(ADC_IN)}$	输入电压范围（ADCIN 测量模式）(2) (6)	内部基准（Vref = V_{REF1}，**Settings:Configuration:DA Config[TSMODE]** = 1），适用于使用 TS 引脚的 ADCIN 测量	-0.2		1.8	V
$V_{(ADC_IN_TS)}$	输入电压范围（外部热敏电阻测量模式）(2) (5)	稳压器基准（Vref = V_{REG18}，**Settings:Configuration:DA Config[TSMODE]** = 0），适用于使用 TS 引脚的外部热敏电阻测量	-0.2		1.8	V
$V_{(ADC_IN_DIV)}$	输入电压范围（分压器测量模式）(2) (7)	内部基准 (Vref = V_{REF1})，适用于使用 VC7 引脚相对于 VSS 的分压器测量。	2.0		38.5	V
$B_{(ADC_OFF_CELL)}$	电芯差分偏移误差	16 位，未校准，VC7 - VC6 = 0V，VC6 = 24V，使用原始 ADC 代码		-0.5		LSB (4)
$B_{(ADC_OFF_DRIFT_CELL)}$	电芯差分偏移误差漂移(3)	16 位，未校准，VC7 - VC6 = 0V，VC6 = 4V，使用原始 ADC 代码，-40°C 至 +125°C	-0.27		0.24	LSB/°C (4)
$B_{(ADC_OFF)}$	TS 偏移误差 (1)	16 位，未校准，使用 Vref = V_{REG18}	-33	4.2	44	LSB(6)
$B_{(ADC_OFF_DIV)}$	分压器偏移误差	16 位，未校准，在 VC7 上使用分压器模式		-3.7		LSB(7)
$G_{(ADC_TS_REG18)}$	使用 Vref = V_{REG18} 时 ADC TS 引脚测量的增益(9)	报告的数字代码 = $G_{(ADC_TS_REG18)}$ × V_{TS} / V_{REG18}。 16 位，未校准，使用 TS 引脚，V_{TS} = 1.5V。	19172	19416	19684	不适用 (5)
$G_{(ADC_TS_ADCIN)}$	使用 Vref = V_{REF1} 时 ADC TS 引脚测量的增益(9)	报告的数字代码 = $G_{(ADC_TS_ADCIN)}$ × V_{TS}。 16 位，未校准，使用 TS 引脚，V_{TS} = 1.5V。	15732	16020	16272	LSB/V (6)
$G_{(ADC_CELL_RAW)}$	ADC 电芯电压测量的原始增益 (9)	在 VC7 - VC6 上的电芯差分输入模式下、使用 2.0V 和 4.0V 及原始 ADC 代码测得的 16 位增益，未校准。	5465	5477	5490	LSB/V (4)

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$R_{(ADC_IN_CELL)}$	有效输入电阻(8)	VC7 - VC6 上的电芯差分输入模式		4		MΩ
$R_{(ADC_IN_TOS)}$	有效输入电阻	VC7 引脚上的分压器测量（仅在测量该引脚时有效）		600		kΩ
$I_{(LEAKAGE)}$	引脚漏电流(3)	从每个引脚到 VC1 ~ VC7、BAT、REGSRC 的输入电流，无转换，采用每个电芯 5V 进行电池组偏置，V_{BAT} = 30V，器件处于 SHUTDOWN 模式。			2	µA
$B_{(ADC_RES_SLOW)}$	慢速设置下的有效分辨率(1)	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[SSADCSPEED]** = 0x0，在 ADCIN 模式下使用 TS 输入。		15		位
$B_{(ADC_RES_MEDSLOW)}$	中等慢速设置下的有效分辨率(1)	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[SSADCSPEED]** = 0x1，在 ADCIN 模式下使用 TS 输入。		14		位
$B_{(ADC_RES_MEDFAST)}$	中等快速设置下的有效分辨率(1)	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[SSADCSPEED]** = 0x2，在 ADCIN 模式下使用 TS 输入。		13		位
$B_{(ADC_RES_FAST)}$	快速设置下的有效分辨率(1)	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[SSADCSPEED]** = 0x3，在 ADCIN 模式下使用 TS 输入。		11		位
$t_{(ADC_CONV_SLOW)}$	转换时间	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[CVADCSPEED]** 和 **[SSADCSPEED]** = 0x0		2.93		ms
$t_{(ADC_CONV_MEDSLOW)}$	中等慢速模式下的转换时间	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[CVADCSPEED]** 和 **[SSADCSPEED]** = 0x1		1.46		ms
$t_{(ADC_CONV_MEDFAST)}$	中等快速模式下的转换时间	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[CVADCSPEED]** 和 **[SSADCSPEED]** = 0x2		732		µs
$t_{(ADC_CONV_FAST)}$	快速模式下的转换时间	单次转换，NORMAL 模式下，**Settings:Configuration:Power Config[CVADCSPEED]** 和 **[SSADCSPEED]** = 0x3		366		µs
$V_{STACK(ACC)}$	电池组电压 (V_{C7} - V_{VSS}) 测量精度 (9)	3V ≤ V_{VC7} - V_{VSS} ≤ 38.5V，T_A = 25°C，使用 20Ω 和 220nF 的输入网络指定。	-37		28	mV
		3V ≤ V_{VC7} - V_{VSS} ≤ 38.5V，T_A = -20°C 至 65°C，使用 20Ω 和 220nF 的输入网络指定。	-162		168	mV
		3V ≤ V_{VC7} - V_{VSS} ≤ 38.5V，T_A = -40°C 至 125°C，使用 20Ω 和 220nF 的输入网络指定。	-380		215	mV

(1) 有效分辨率定义为数据在 ±1 LSB 范围内表现出 1 Σ 变化的分辨率。
(2) 根据设计指定
(3) 根据特征确定
(4) 电芯差分电压原始代码测量的 16 位 LSB 大小由以下公式给出：1 LSB = 1V / $G_{(ADC_CELL_RAW)}$ 大约为 1V / 5479 LSB/V = 182.5µV
(5) 假设 V_{REG18} 的标称值为 1.8V，则热敏电阻模式下 TS 引脚电压测量的 16 位 LSB 大小由以下公式给出：1 LSB = V_{REG18} / $G_{(ADC_TS_REG18)}$ ≈ 1.8V / 19405 = 93µV
(6) ADCIN 模式下 TS 引脚电压测量的 16 位 LSB 大小由以下公式给出：1 LSB = 1V / $G_{(ADC_TS_ADCIN)}$ 大约为 1V / 16027 = 62µV

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

(7) 分压器电压测量的 16 位 LSB 大小由以下公式给出：1 LSB = 50 x V_{REF1} / 2^{N-1} 大约为 50 x 1.1962V / 2^{15} = 1.825mV
(8) 器件在 NORMAL 模式下运行、禁用电芯均衡并施加 5V 差分电压时的平均有效差分输入电阻。
(9) 由特性和生产测试的组合指定

6.13 电芯电压测量精度

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = –40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3V 至 38.5V（除非另有说明）(1)

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
VCELL(ACC)	电芯电压测量精度，$V_{VC(x)}$ - $V_{VC(x-1)}$ = 4.5V，1 ≤ x ≤ 7(1)	T_A = 25°C	-3.6		3.6	mV
		–20°C ≤ T_A ≤ 65°C	-4.6		8.2	mV
		–40°C ≤ T_A ≤ 125°C	-6.2		10.8	mV
VCELL(ACC)	电芯电压测量精度，2V < $V_{VC(x)}$ - $V_{VC(x-1)}$ = 5V，1 ≤ x ≤ 7(1)	T_A = 25°C	-3.9		4.3	mV
		–20°C ≤ T_A ≤ 65°C	-4.8		8.2	mV
		–40°C ≤ T_A ≤ 125°C	-7.6		11.4	mV

(1) 通过特性分析和生产测试的组合进行指定，使用 7 节串联电池包，输入网络串联电阻 = 20Ω，差分电容 = 220nF，电芯均衡无效

6.14 电芯均衡

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$R_{(CB)}$	内部电芯均衡电阻(1)	$R_{DS(ON)}$ 用于内部 FET 开关，$V_{VC(n)}$ - $V_{VC(n-1)}$ = 1.5V，1 ≤ n ≤ 7	53	93	200	Ω

(1) 必须控制电芯均衡，以便根据绝对最大允许电流来限制电流，并避免超过建议的器件工作温度。这可以通过适当调整片外电芯输入电阻器的大小并限制可同时均衡的电芯数量来实现。

6.15 内部温度传感器

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(TEMP)}$	内部温度测量误差 (1)		-7.8		9.0	°C
$V_{(TEMP)}$	内部温度传感器电压漂移	使用原始 LSB 测量 ΔV_{BE}		6.76		LSB/°C

(1) 根据特征确定

6.16 热敏电阻测量

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$R_{(TS_PU)}$	25°C 时的内部上拉电阻(1)		19.75	20	20.25	kΩ
$R_{(TS_PU_DRIFT)}$	内部上拉电阻随温度的变化 (1) (2)	-20°C/+65°C 范围内的变化与 25°C 时的值	-23		28	Ω
$R_{(TS_PU_DRIFT)}$	内部上拉电阻随温度的变化 (1) (2)	-40°C/+125°C 范围内的变化与 25°C 时的值	-28		38	Ω

(1) 内部上拉电阻仅包括 REG18 内部 LDO 与 ADC 电压检测点之间的电阻。
(2) 根据特征确定

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6.17 硬件过热检测器

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(OTSD)}$	硬件过热检测器阈值(1)		118		132	°C

(1) 根据设计指定

6.18 内部振荡器

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
低频振荡器						
f_{LFO}	工作频率	全速设置（25°C 下）	260.0	262.626	265.0	kHz
		低速设置（25°C 下）	32.3	32.815	33.4	kHz
$f_{LFOF(ERR)}$	频率漂移，全速模式(1)	25°C 时频率变化与值间的关系，T_A = –20°C 至 +65°C	-1.3		1	%
		25°C 时频率变化与值间的关系，T_A = –40°C 至 +125°C。	-1.7		1.7	%
$f_{LFOS(ERR)}$	频率漂移，低速模式(1)	25°C 时频率变化与值间的关系，T_A = –20°C 至 +65°C。	-1.0		1.0	%
$f_{LFOS(ERR)}$	频率漂移，低速模式(1)	25°C 时频率变化与值间的关系，T_A = –40°C 至 +125°C。	-1.4		1.6	%
$f_{LFO(FAIL)}$	故障检测频率	如果处于低速模式，则指 LFO 频率；如果处于全速模式，则指 LFO 频率除以 8。如果频率降至低于该水平，则检测到振荡器故障。	11	15	20	kHz

(1) 根据特征确定

6.19 充电和放电 FET 驱动器

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(FETON_DSG)}$	DSG 驱动器已启用	V_{REGSRC} ≥ 12V，C_L= 20nF	10.5	11.2	13	V
$V_{(FETON_CHG)}$	CHG 驱动器已启用	V_{REGSRC} ≥ 12V，C_L= 20nF	10	10.8	12	V
$V_{(FETON_LOBAT_DSG)}$	DSG 驱动器已启用	V_{REGSRC} < 12V，C_L = 20nF	V_{REGSRC} – 1		V_{REGSRC}	V
$V_{(FETON_LOBAT_CHG)}$	CHG 驱动器已启用	V_{REGSRC} < 12V，C_L = 20nF	V_{REGSRC} – 1.75		V_{REGSRC}	V
$t_{(CHG_ON)}$	CHG FET 驱动器上升时间	CHG C_L = 20nF，R_{GATE} = 100Ω，V_{REGSRC} = 12V、0.5V 至 5V		50	85	µs
$t_{(DSG_ON)}$	DSG FET 驱动器上升时间	DSG C_L = 20nF，R_{GATE} = 100Ω，V_{REGSRC} = 12V，0.5V 至 5V		35	55	µs
$t_{(CHG_OFF)}$	CHG FET 驱动器下降时间	CHG C_L = 20nF、R_{GATE} = 100Ω、V_{REGSRC} = 12V、$V_{(FETON_CHG)}$ 的 80% 至 20%		24	35	µs
$t_{(DSG_OFF)}$	DSG FET 驱动器下降时间	DSG C_L = 20nF、R_{GATE} = 100Ω、V_{REGSRC} = 12V、$V_{(FETON_DSG)}$ 的 80% 至 20%		2	3	µs
$I_{(CHG_ON)}$	CHG FET 驱动器输出电流	CHG 启用且引脚保持在 8V，V_{REGSRC} = 12V		1		mA

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$I_{(DSG_ON)}$	DSG FET 驱动器输出电流	DSG 启用且引脚保持在 8V，V_{REGSRC} = 12V		1.56		mA
$R_{(DSG_OFF)}$	DSG FET 驱动器关断电阻	DSG 关断且引脚保持在 100mV		15	30	Ω
$V_{(CHG_DETECT)}$	CHG 检测器阈值	CHG 引脚电压上升	1.2		1.8	V
$V_{(CHG_DET_HYS)}$	CHG 检测器迟滞			0.95		V

6.20 基于比较器的保护子系统

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(SCD)}$	放电短路电压阈值范围	标称设置，阈值基于 V_{SRP} – V_{SRN}		– 10、– 20、– 40、– 60、– 80、– 100、– 125、– 150、– 175、– 200、– 250、– 300、– 350、– 400、– 450、– 500		mV
$V_{(SCD_ACC)}$	放电短路电压阈值检测精度 (2)	-10mV 设置	-43.3		39.8	标称阈值的百分比
		-20mV 设置	-22.6		19	标称阈值的百分比
		-40mV 设置	-14.2		9.7	标称阈值的百分比
		设置 – 60mV	-12.0		7.0	标称阈值的百分比
		设置 – 80mV	-9.6		5.8	标称阈值的百分比
		设置 – 100mV 至 -500mV	-9.1		5.4	标称阈值的百分比

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(SCD_DLY)}$	放电短路检测延迟[1]	最快设置（具有 3mV 过驱）		8		µs
		最快设置（具有 25mV 过驱）		0.6		µs
		15µs 的设置（具有 3mV 过驱）		20	28	µs
		15µs 的设置（具有 25mV 过驱）			20	µs
		31µs 的设置（具有 25mV 过驱）	14		35	µs
		61µs 的设置（具有 25mV 过驱）	42		66	µs
		122µs 的设置（具有 25mV 过驱）	102		130	µs
		244µs 的设置（具有 25mV 过驱）	218		258	µs
		488µs 的设置（具有 25mV 过驱）	452		510	µs
		977µs 的设置（具有 25mV 过驱）	920		1018	µs
		1953µs 的设置（具有 25mV 过驱）	1860		2034	µs
		3906µs 的设置（具有 25mV 过驱）	3735		4065	µs
		7797µs 的设置（具有 25mV 过驱）	7470		8112	µs
$V_{(OCC)}$	充电过流 (OCC) 电压阈值范围	标称设置，阈值基于 V_{SRP} – V_{SRN}		阶跃为 2mV 时，3mV 至 19mV，22mV 至 124mV		mV
$V_{(OCC_ACC)}$	充电过流 (OCC) 电压阈值精度 [2]	设置 3mV 至 19mV	-1.45		1.81	mV
$V_{(OCC_ACC)}$	充电过流 (OCC) 电压阈值精度 [2]	设置 22mV 至 80mV	-3.02		2.95	mV
$V_{(OCC_ACC)}$	充电过流 (OCC) 电压阈值精度 [2]	设置 82mV 至 124mV	-4.05		5.26	mV
$V_{(OCD)}$	放电过流（OCD1、OCD2）电压阈值范围	标称设置，阈值基于 V_{SRP} – V_{SRN}		-4mV 至 -200mV（步长为 2mV）		mV
$V_{(OCD_ACC)}$	过流（OCD1、OCD2）检测电压阈值精度 [2]	设置 –4mV	-1.76		1.4	mV
		设置 -6mV 至 -16mV	-1.45		1.0	mV
		设置 –18mV 至 -166mV	-3.34		3.27	mV
		设置 –168mV 至 -200mV	-3.98		4.38	mV

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
$V_{(OC_DLY)}$	过流（OCC、OCD1、OCD2）检测延迟（每个保护均具有独立的延迟设置）	最快设置		0.46		ms
		标称设置，低范围		1.22ms 至 20.435ms，以 0.305ms 为步长		ms
		标称设置，中低范围		22.875ms 至 176.595ms，以 2.441ms 为步长		ms
		标称设置，中高范围		181.475ms 至 488.915ms，以 4.883ms 为步长		ms
		标称设置，高范围		498.675ms 至 1103.795ms，以 9.766ms 为步长		ms
$V_{(OC_DLY)}$	过流（OCC、OCD1、OCD2）检测延迟精度(1)	最快设置	-0.35		0.35	ms
		标称设置，低范围	-1.2		0.90	ms
		标称设置，中低范围	-7.5		7.2	ms
		标称设置，中高范围	-20		20	ms
		标称设置，高范围	-45		45	ms

(1) 根据设计指定
(2) 由特性和生产测试的组合指定

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6.21 时序要求 - I²C 接口，100kHz 模式

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
f_{SCL}	时钟工作频率(1)	SCL 占空比 = 50%			100	kHz
$t_{HD:STA}$	启动条件保持时间(1)		4.0			µs
t_{LOW}	SCL 时钟的低电平周期(1)		4.7			µs
t_{HIGH}	SCL 时钟的高电平周期(1)		4.0			µs
$t_{SU:STA}$	建立重复启动(1)		4.7			µs
$t_{HD:DAT}$	数据保持时间（SDA 输入）(1)		0			ns
$t_{SU:DAT}$	数据建立时间（SDA 输入）(1)		250			ns
t_r	时钟上升时间(1)	10% 至 90%			1000	ns
t_f	时钟下降时间(1)	90% 至 10%			300	ns
$t_{SU:STO}$	建立时间停止条件(1)		4.0			µs
t_{BUF}	停止和启动之间的总线空闲时间(1)		4.7			µs
t_{RST}	I²C 总线复位(1)	如果在此期间内检测到 SCL 为低电平，则总线接口会复位	1.9		2.1	s
R_{PULLUP}	上拉电阻器(1)	上拉电压轨 ≤ 5V	1.1			kΩ

(1) 根据设计指定

6.22 时序要求 - I²C 接口，400kHz 模式

所述典型值的条件是 T_A = 25°C 且 V_{BAT} = 25.9V，最小值/最大值的条件是 T_A = -40°C 至 125°C 且 V_{BAT} = 3 V 至 38.5V（除非另有说明）

参数		测试条件	最小值	典型值	最大值	单位
f_{SCL}	时钟工作频率(1)	SCL 占空比 = 50%			400	kHz
$t_{HD:STA}$	启动条件保持时间(1)		0.6			µs
t_{LOW}	SCL 时钟的低电平周期(1)		1.3			µs
t_{HIGH}	SCL 时钟的高电平周期(1)		600			ns
$t_{SU:STA}$	建立重复启动(1)		600			ns
$t_{HD:DAT}$	数据保持时间（SDA 输入）(1)		0			ns
$t_{SU:DAT}$	数据建立时间（SDA 输入）(1)		100			ns
t_r	时钟上升时间(1)	10% 至 90%			300	ns
t_f	时钟下降时间(1)	90% 至 10%			300	ns
$t_{SU:STO}$	建立时间停止条件(1)		0.6			µs
t_{BUF}	停止和启动之间的总线空闲时间(1)		1.3			µs
t_{RST}	I²C 总线复位(1)	如果在此期间内检测到 SCL 为低电平，则总线接口会复位	1.9		2.1	s
R_{PULLUP}	上拉电阻器(1)	上拉电压轨 ≤ 5V	1.1			kΩ

(1) 根据设计指定

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

6.23 时序图

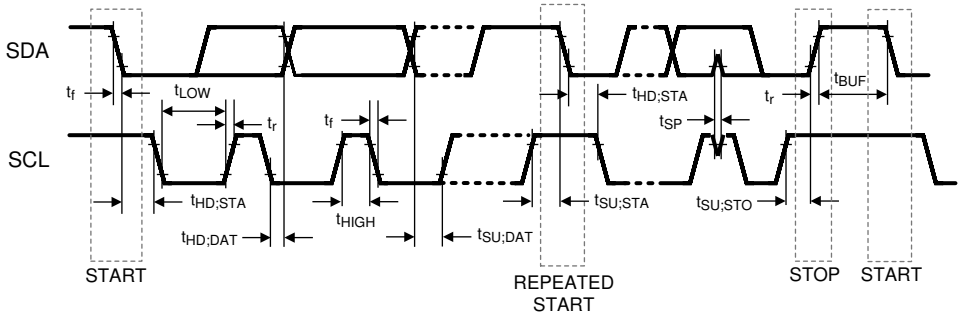


图 6-1. I²C 通信接口时序

6.24 典型特性

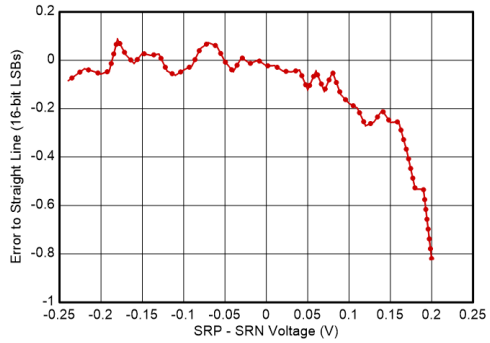


图 6-2. 电流线性误差与检测电阻电压间的关系

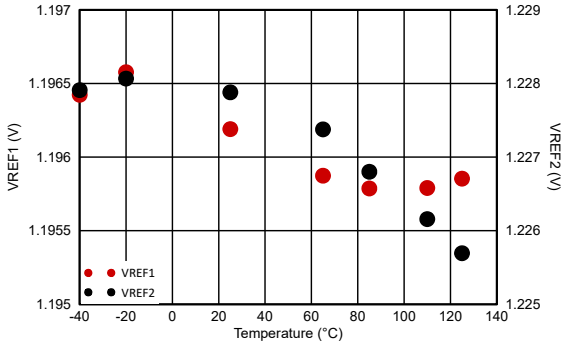


图 6-3. 内部电压基准与温度间的关系（VREF1 和 VREF2）

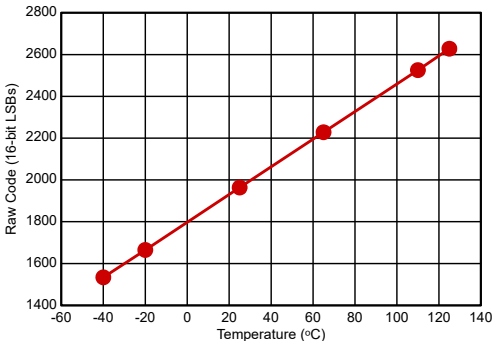


图 6-4. 内部温度测量原始代码与温度间的关系

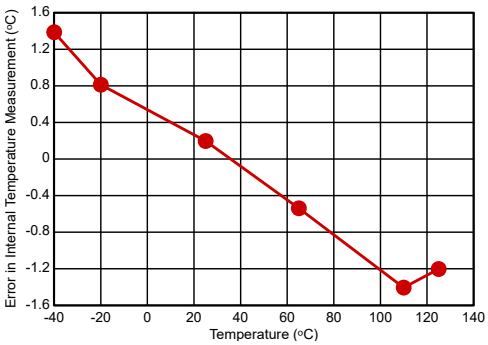


图 6-5. 内部温度测量误差与温度间的关系

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

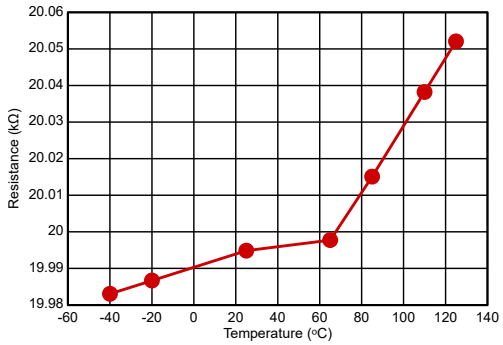
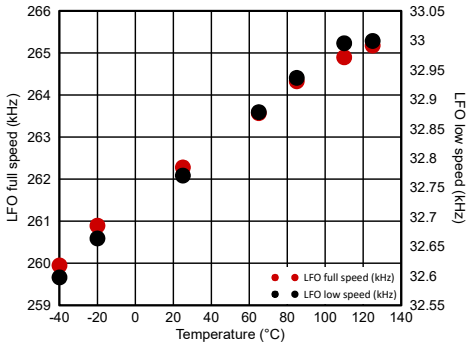


图 6-6. 热敏电阻上拉电阻与温度间的关系



在全速模式 (262kHz) 和低速模式 (32.77kHz) 下测量的 LFO

图 6-7. 低频振荡器 (LFO) 精度与温度间的关系

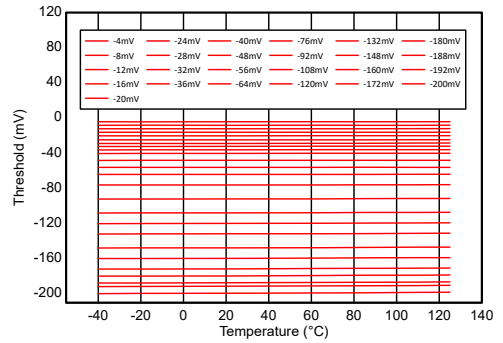


图 6-8. 放电过流保护 1 (OCD1) 阈值与温度间的关系

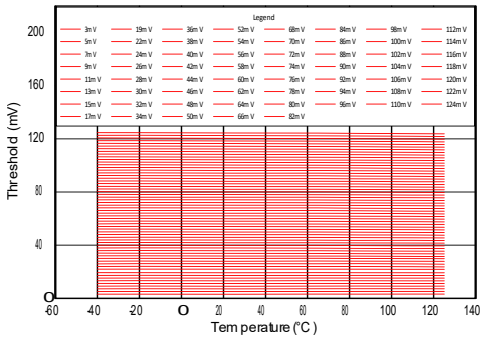


图 6-9. 充电过流保护 (OCC) 阈值与温度间的关系

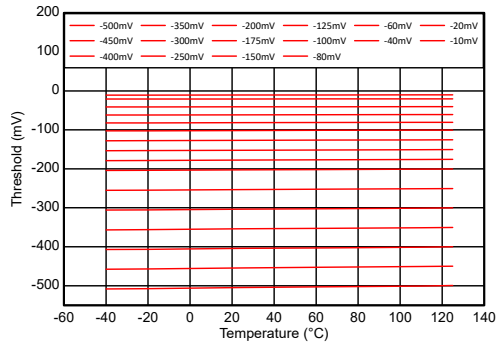
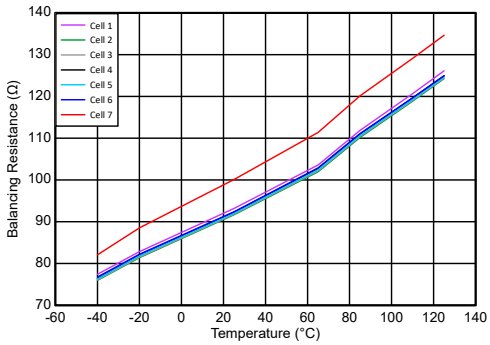


图 6-10. 放电短路保护 (SCD) 阈值与温度间的关系



数据通过电芯上的 1.5V 差分输入进行采集。

图 6-11. 电芯均衡电阻与温度间的关系

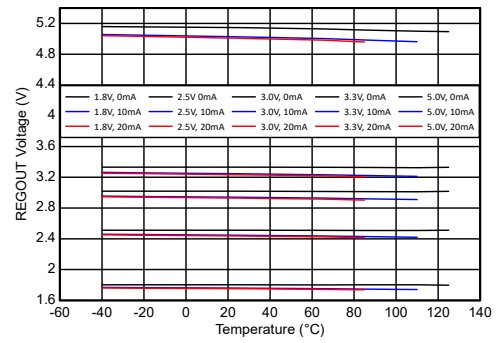


图 6-12. REGOUT 电压与温度和负载间的关系

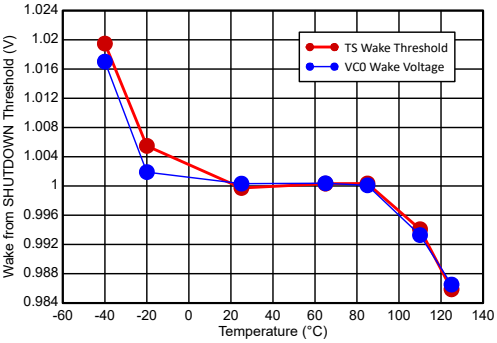
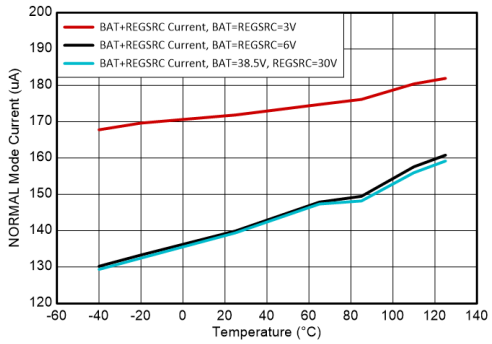


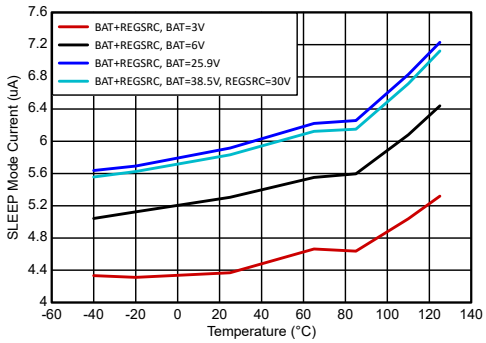
图 6-13. TS 和 VC0 唤醒电压与温度间的关系

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated



当 REGSRC = 3V 时，REGSRC 电流会随着器件尝试将 REGOUT 电压升高至其目标 3.3V 而增加。

图 6-14. NORMAL 模式下的电源电流与温度间的关系



无通信，REGOUT 禁用

图 6-15. SLEEP 模式下的电源电流与温度间的关系

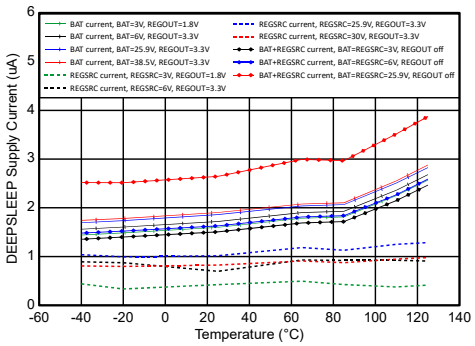


图 6-16. DEEPSLEEP 模式下的电源电流与温度间的关系

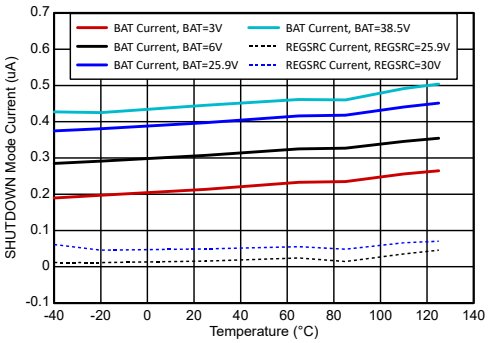


图 6-17. SHUTDOWN 模式下的电源电流与温度间的关系

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

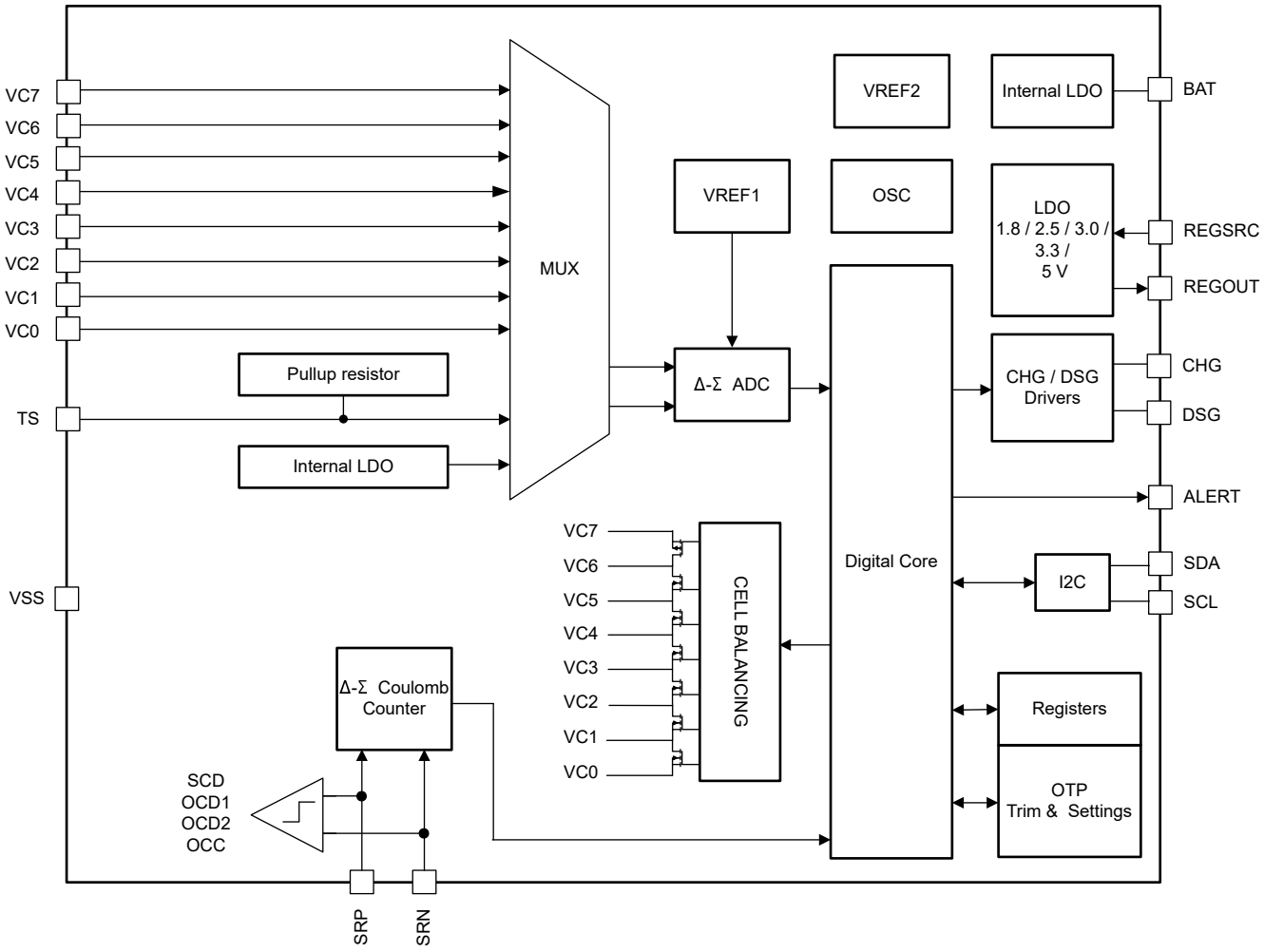
7 详细说明

7.1 概述

BQ78709-Q1 器件是一款高度集成且精确的电池监测器和保护器，适用于 2 节至 7 节串联锂离子、锂聚合物、$LiFePO_4$ (LFP) 和 LTO 电池包及超级电容器。高精度电压、电流和温度测量为基于主机的算法和控制提供数据。功能丰富且高度可配置的保护子系统提供了广泛的保护措施，这些保护可以由该器件完全自主地触发和恢复，也可以在主机处理器的完全控制下进行。集成的 FET 驱动器用于驱动低侧充电和放电保护 NFET。该器件包含一个供外部系统使用的可编程 LDO，其电压可编程为 1.8V、2.5V、3.0V、3.3V 或 5.0V，并且能提供高达 20mA 的电流。

BQ78709-Q1 器件包含一次性可编程 (OTP) 存储器，TI 会对其进行编程以配置默认的器件操作设置，用于主机处理器可能无法用于配置器件的系统。400kHz I^2C 通信接口和 ALERT 中断输出可实现与主机处理器的通信。该器件支持使用一个外部热敏电阻，并支持进行内部芯片温度测量。

7.2 功能方框图



7.3 器件配置

7.3.1 命令和子命令

BQ78709-Q1 器件支持直接命令和子命令。使用 7 位命令地址访问直接命令，该地址从主机通过器件串行通信接口发送，并触发操作，或提供待写入器件的数据值，或指示器件向主机报告数据。子命令是使用 7 位命令地址空

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

间间接访问的附加命令，并提供了块数据传输功能。有关该器件支持的命令和子命令的更多信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.3.2 使用 OTP 或寄存器进行配置

BQ78709-Q1 器件包含寄存器，其值存储在 RAM 中，并可从一次性可编程 (OTP) 存储器中自动加载。初始上电时，该器件将 OTP 设置加载到寄存器中，供器件在运行期间使用。OTP 设置由 TI 在制造过程中编程到器件中。当该器件处于 NORMAL、SLEEP 或 DEEPSLEEP 模式时，寄存器值会被保留。如果该器件进入 SHUTDOWN 模式，则所有寄存器存储器都会被清除，再次上电时该器件将从 OTP 重新加载值。

7.3.3 器件安全性

BQ78709-Q1 器件包含两种安全模式：SEALED 和 FULLACCESS，它们可用于限制查看或更改设置的功能。

- 在 SEALED 模式下，可以使用命令和子命令读取大多数数据和状态，但只能更改选定的设置。无法直接更改数据存储器设置。
- FULLACCESS 模式允许读取和修改所有器件设置。

可以在该器件运行时通过支持的命令和子命令修改该器件中的选定设置，但要修改所有设置，该器件必须进入 CONFIG_UPDATE 模式（请参阅 CONFIG_UPDATE Mode），这可以在更新设置时停止器件操作。更新完成后，系统会使用新设置重新启动器件操作。CONFIG_UPDATE 模式仅在 FULLACCESS 模式下可用。

BQ78709-Q1 器件实现了一种用于在 SEALED 和 FULLACCESS 模式之间切换的密钥访问方案。从 SEALED 更改为 FULLACCESS 时，需要通过子命令向器件发送一组唯一的密钥。有关更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.4 器件硬件特性

7.4.1 电压 ADC

BQ78709-Q1 集成了一个在电芯电压测量之间进行多路复用的 Δ-Σ 电压 ADC、一个内部温度传感器和一个外部热敏电阻，还可以测量 VC7 引脚上的电压、内部 1.8V LDO 电压和 VSS 电压轨（后两个用于诊断目的）。BQ78709-Q1 器件支持测量串联配置（从 2 节串联到 7 节串联）中单个电芯的差分电压。每个电芯电压测量值是两个相邻电芯输入引脚之间（如 VC1 – VC0、VC2 – VC1 等）电压的差分测量值。电芯电压测量值进行调整和校准校正后，使用 1mV 的单位以 16 位分辨率报告。

该 ADC 从 ADC 多路复用器获取其输入，并生成高速数字数据流，该数据流经过数字滤波以产生 24 位输出。该 ADC 使用 262.144kHz LFO 时钟作为其采样时钟。数字滤波器包含可编程的抽取率，这会以不同的间隔生成具有不同分辨率的数据。ADC 转换的有效分辨率（定义数据在 ±1LSB 范围内表现出 1 Σ 变化的分辨率）随着抽取率的变化而变化，有效分辨率随着输出速率的降低而增加。

7.4.2 库仑计数器和数字滤波器

BQ78709-Q1 器件使用一个低侧检测电阻器监测电池包电流，该电阻器通过外部 RC 滤波器连接到 SRP 和 SRN 引脚，并且必须连接该滤波器，从而充电电流将在 SRP 上产生相对于 SRN 的正电压。SRP 和 SRN 之间的差分电压通过集成 Δ-Σ 库仑计 ADC 进行数字化，该 ADC 可以对 ±200mV 范围内的电压进行数字化，并使用多个数字滤波器对瞬时电流、平均电流和积分电流进行优化测量。该器件支持多种检测电阻值，较大的值可为数字化结果提供更好的分辨率。必须限制感应电阻器的最大值，以确保在需要进行电流测量时，差分电压保持在 ±200mV 范围内，以便支持系统运行。例如，正常运行期间（非故障状态）最大放电电流为 200A 的系统应将感应电阻器限制在 1mΩ 或更低。

多个数字化电流值以及一个累积的电荷积分可以通过串行通信接口读出，其中两个使用单独的硬件数字滤波器 CC1 和 CC2。有关电流测量和电荷积分结果的更多详细信息，请参阅电流测量和电荷积分。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7.4.3 保护 FET 驱动器

BQ78709-Q1 集成了低侧 CHG 和 DSG FET 驱动器，这些驱动器可直接驱动低侧保护 NFET 晶体管。该器件支持串联和并联 FET 配置，当配置为串联 FET 配置时，如果一个 FET 驱动器打开而另一个 FET 驱动器关闭，可提供 FET 体二极管保护。当体二极管保护已启用时，如果电池包在存在放电禁止故障条件时充电，则可以打开 DSG 驱动器，以防止损坏 FET。同样，如果电池包在存在充电禁止故障条件时放电，则可以打开 CHG 驱动器。这些决策取决于检测到的电流是否绝对值超过可编程体二极管阈值，该电流检测使用库仑计电流测量来做出决策。

当未被命令阻止并且不存在相关故障（例如 UV、OTD、UTD、OCD1、OCD2、SCD 和选择诊断）时，DSG 引脚会被驱动为高电平，这种配置用于实现自主控制或用于体二极管保护。可以通过命令强制启动驱动器，但只有配置设置允许时，该命令才能生效。

DSG 驱动器旨在允许用户选择 DSG 引脚和 DSG FET 栅极之间的最佳串联电阻，以根据应用要求和 FET 特性选择实现所需的 FET 上升和下降时间。当 DSG FET 关断时，DSG 引脚会驱动为低电平，并会禁用所有放电过流保（OCD1、OCD2、SCD），以便更好地节省功耗。这些操作会在 DSG FET 开启时恢复运行。器件配置设置决定哪种保护将自主控制相应的 FET 驱动器。

仅当未被命令阻止并且不存在相关故障（OV、OTC、UTC、OCC、SCD 和选择诊断）时，CHG 引脚才会被驱动为高电平，这种配置用于实现自主控制或用于体二极管保护。可以通过命令强制启动驱动器，但只有配置设置允许时，该命令才能生效。关断 CHG 引脚不影响过流保护电路。CHG FET 驱动器在启用时主动将 CHG 引脚驱动为高电平，并在禁用时主动将该引脚驱动为低电平，使其在大约 100 µs 的时间内比 VSS 电压高大约 0.5V，然后允许该引脚通过外部 CHG FET 栅源电阻器稳定到 PACK- 电压。如果在禁用 CHG FET 的情况下将充电器连接到电池包，则根据器件的电气规格，CHG 引脚可降至比器件 VSS 低 25V 的电压。由于 CHG 会在 100 µs 的时间间隔期间主动拉至低电平，CHG 驱动电路（由驱动器有效电阻、CHG 引脚和 CHG FET 栅极之间的任何串联电阻和 FET 栅极电容组成）的时间常数必须保持远低于此水平。

BQ78709-Q1 在 CHG 和 DSG FET 驱动器上具有 PWM 驱动能力，这使得这些驱动器能够限制充电或放电模式下的平均电流。DSG FET 驱动器根据驱动器控制，主动将 DSG 引脚驱动为高电平或低电平，因此可以实现持续开关，从而开启和关闭 DSG FET。如果未连接充电器，那么 CHG 驱动器也可以在 PWM 模式下实现连续开关。如果连接了充电器且电压明显高于电池包电压，则 CHG FET 栅极电压通常会被快速驱动至约 VSS + 0.5V，然后更慢地稳定至较低的 PACK- 电压，具体取决于系统电容。有关更多信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.4.4 电压基准

BQ78709-Q1 器件包含 VREF1 和 VREF2 两个电压基准，其中 VREF1 由电压 ADC 用于电压测量（外部热敏电阻除外）。库仑计、集成式 1.8V LDO 和内部振荡器使用 VREF2。在使用 VREF1 时，VREF2 的值可以通过电压 ADC 测量内部 1.8V LDO 电压来间接确定。此测量可通过命令用于诊断目的。如果此测量结果超出允许的范围，则会触发诊断警报或故障（如果已通过设置启用）。

7.4.5 多路复用器

多路复用器将各种信号连接到电压 ADC，其中包括各个电芯差分电压引脚、片上温度传感器、偏置的热敏电阻引脚、内部 1.8V LDO 电压、电池组顶部电压和 VSS 引脚电压。多路复用器输入电路经过定制，可支持每个特定输入所需的电压范围和电平。

7.4.6 LDO

BQ78709-Q1 器件包含一个集成的 1.8V LDO (REG18)，可为器件的内部电路和数字逻辑提供 1.8V 的稳压电源电压。该 LDO 的电源电流来自 BAT 引脚。

该器件还集成了可编程 LDO (REGOUT)，用于主机处理器或外部收发器电路等外部电路。REGOUT LDO 的输入为 REGSRC 引脚。该引脚通常需要连接到栈顶，或者 REGSRC 电压可由系统中的单独直流/直流转换器生成。如果热条件允许，REGOUT LDO 可提供高达 20mA 的输出电流。

根据 OTP 配置，REGOUT LDO 可以编程为在器件每次退出 SHUTDOWN 模式时保持禁用状态或自动上电。通过修改配置设置，可以将 LDO 输出电压编程为 1.8V、2.5V、3.0V、3.3V 或 5.0V。当 REGOUT LDO 处于禁用

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

状态并且器件处于 NORMAL、SLEEP 或 DEEPSLEEP 模式时，其输出 通过约为 2.5kΩ 的内部电阻拉至 VSS。如果 LDO 根据待供电的 OTP 设置进行配置，则在以后每次上电时，器件 将自主加载 OTP 设置并按照配置启用 LDO，而无需先进行通信。

BQ78709-Q1 可在高达 125°C 的裸片温度下正常运行，因此如果 裸片温度超过该水平， 则系统设计 必须避免从 REGOUT LDO 汲取过多电流。例如，当栈电压为 31.5V，并且 REGOUT 编程为 2.5V 输出电压时， 该器件将在提供 20mA 负载电流时耗散约 580mW。然后，可以使用封装热阻来根据预期的最高环境温度计算最终的芯片温度。如果这超出了器件的指定温度范围，则必须在系 统中 限制负载电流。

BQ78709-Q1 包括一个裸片温度监测器，该监测器可以检测裸片温度是否超过约 120°C。如果发生这种情况，则会禁用 REGOUT LDO，并且根据配置设置，器件还 将进入 SHUTDOWN 模式。如果 REGOUT LDO 因过热而被禁用（但器件未关断），则当裸片温度降至阈值以下时，REGOUT LDO 将再次自动上 电。

7.4.7 独立接口与主机接口

BQ78709-Q1 可以配置为在完全独立的模式下运行，系统中无需任何主机处理器，或者与主机处理器一起运行。如果处于独立模式，该器件可以监测条件，根据阈值设置控制 FET，并在条件允许时恢复 FET，所有这些都无需与外部处理器进行任何交互。如果存在主机处理器，该器件仍可配置为完全自主运行，同时主机处理器可以根据需要读取测量数据并进行控制。或者，该器件可以配置为手动主机控制，以便该器件可以监测并在发生保护警报或故障时提供标志，但将依靠主机禁用 FET。在独立模式下使用该器件时，需要 TI 将所有设置编程到 OTP 中。这仅适用于涉及较大发货量的情况。有关此选项的信息，请与 TI 销售代表联系。

BQ78709-Q1 可以通过主机处理器进行全面配置，并通过串行通信接口将所有设置写入器件的内部寄存器，无需任何 OTP 编程。使用这种方法时，每次器件复位或进入 SHUTDOWN 模式并重新启动时，都必须从主机重新加载设置。

7.4.8 ALERT 引脚工作原理

BQ78709-Q1 包含在 ALERT 引脚上生成警报信号的功能，该信号可用作主机处理器的中断。ALERT 引脚是一个开漏引脚，每当生成警报信号时，器件都会将该引脚拉低。警报功能包含一个可编程掩码，允许客户决定哪个标志或事件可以触发警报。所选的警报标志将保持锁存，直到主机处理器读取其状态并清除触发的报警位。可以在现场操作期间更改警报屏蔽，以屏蔽或取消屏蔽各个标志以防生成警报信号。除了锁存版本之外，该器件还提供每个标志的未锁存瞬时值。有关此功能的更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.4.9 低频振荡器

BQ78709-Q1 中的低频振荡器 (LFO) 会在 NORMAL 和 SLEEP 模式下持续运行，并根据设置在 DEEPSLEEP 模式下关断（需要时除外）。在 NORMAL 模式下，LFO 以大约 262.144kHz 的频率运行，而在 SLEEP 模式下降至大约 32.768kHz。LFO 在制造过程中进行了调整，以在整个温度范围内满足指定的精度。

7.4.10 I^2C 串行通信接口

BQ78709-Q1 器件中的 I^2C 串行通信接口用作目标器件，支持高达 400kHz 的速率和可选的 CRC 检查。默认情况下，BQ78709-Q1 最初将在由 TI 出厂编程的 OTP 设置确定的模式中上电。在 CONFIG_UPDATE 模式下，主机可以更改 CRC 模式设置，然后新的设置将在退出 CONFIG_UPDATE 模式时生效。

I^2C 器件地址（作为包括目标器件地址和 R/W 位在内的 8 位值）默认设置为 0x10（写入）或 0x11（读取），该地址也可以通过配置设置进行更改。

通信接口包括可编程超时功能，在发生启用的超时时，内部 I2C 总线逻辑会复位。*BQ76907 技术参考手册* 对此进行了详细介绍。

I^2C 写入事务如 图 7-1 所示。通过在停止之前发送额外的数据字节来允许进行块写入。I^2C 逻辑将在每个数据字节后自动递增寄存器地址。阴影区域展示了器件什么时候可能进行时钟延展。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

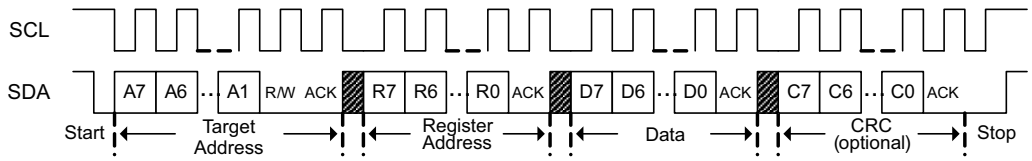


图 7-1. I²C 写入

CRC 校验通过设置一个数据存储器位来启用。启用时，可以通过以下方式来计算 CRC：

- 请注意，CRC 在每个数据字节后和每次停止后都会复位。
- 在单字节写入事务中，会根据目标器件地址、寄存器地址和数据来计算 CRC。
- 在块写入事务中，会根据目标器件地址、寄存器地址和数据来计算第一个数据字节的 CRC。后续数据字节的 CRC 仅根据数据字节来计算。

The CRC polynomial is $x^8 + x^2 + x + 1$, and the initial value is 0.

当目标器件检测到无效 CRC 时，I²C 目标器件将不确认 CRC，从而使 I²C 目标器件进入空闲状态。

图 7-2 展示了使用重复启动的读取事务。阴影区域展示了器件什么时候可能进行时钟延展。

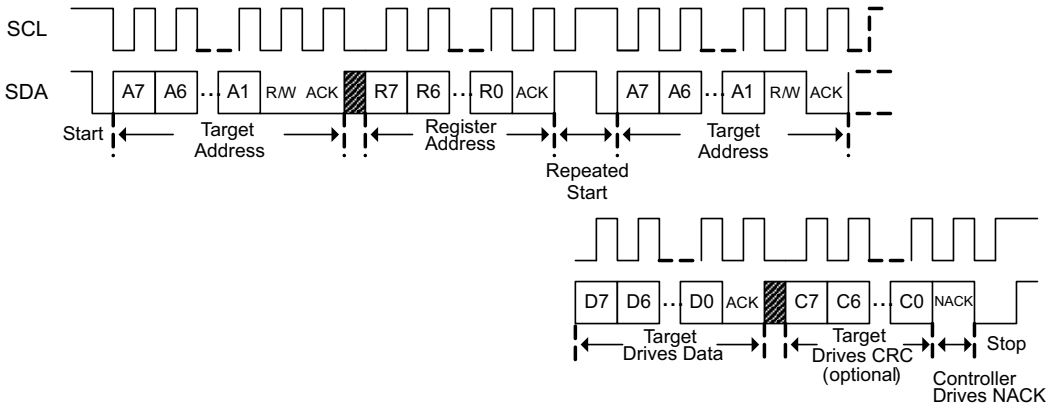


图 7-2. 使用重复启动的 I²C 读取

图 7-3 显示了一个未使用重复启动的读取事务（例如在硬件中不可用时）。对于块读取，控制器确认除最后一个数据字节之外的每个数据字节，并继续为接口提供时钟。I²C 块将在每个数据字节后自动递增寄存器地址。阴影区域展示了器件什么时候可能进行时钟延展。

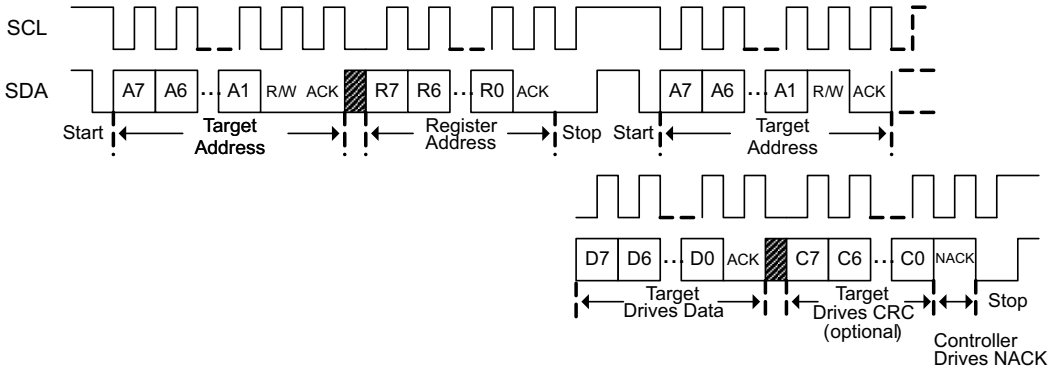


图 7-3. 不使用重复启动的 I²C 读取

启用时，可以通过以下方式来计算读取事务的 CRC：

- 请注意，CRC 在每个数据字节后和每次停止后都会复位。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

- 在使用重复启动的单字节读取事务中，CRC 是从第一个启动开始计算的，因此将包含目标器件地址、寄存器地址、设置了读取位的目标器件地址以及数据字节。
- 在初始寄存器地址后使用停止的单字节读取事务中，CRC 会在停止后复位，因此将仅包含设置了读取位的目标器件地址和数据字节。
- 在使用重复启动的块读取事务中，第一个数据字节的 CRC 是从第一个启动开始计算的，并将包含目标器件地址、寄存器地址、设置了读取位的目标器件地址以及数据字节。后续数据字节的 CRC 仅根据数据字节来计算。
- 在初始寄存器地址后使用停止的块读取事务中，CRC 会在停止后复位，因此将仅包含设置了读取位的目标器件地址和第一个数据字节。后续数据字节的 CRC 仅根据数据字节来计算。

CRC 多项式为 $x^8 + x^2 + x + 1$，初始值为 0。

当控制器检测到无效 CRC 时，I^2C 控制器将不确认 CRC，从而使 I^2C 目标器件进入空闲状态。

有关更多信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.5 测量子系统

7.5.1 电压测量

BQ78709-Q1 器件集成了一个在电芯电压测量之间进行多路复用的电压 ADC、一个内部温度传感器和 TS 引脚，还可以测量 VC7 引脚上、内部 1.8V LDO 电压和 VSS 电压轨上的电压（用于诊断）。BQ78709-Q1 器件支持测量串联配置（从 2 节串联到 7 节串联）中单个电芯的差分电压。每个电芯电压测量值是两个相邻电芯输入引脚之间（如 VC1-VC0、VC2-VC1 等）电压的差分测量值。电芯电压测量值进行调整校正后，使用 1mV 的单位以 16 位分辨率报告。电芯电压测量支持推荐的 -0.2V 至 5.5V 电压范围。在测量电芯电压时，电压 ADC 会在 5 × VREF1（约 6.06V）的水平饱和，但为了获得最佳性能，建议将最大输入保持在 5.5V。

7.5.1.1 电压 ADC 调度

BQ78709-Q1 电压测量在由多个测量槽组成的嵌套测量循环中进行。每个 ADSCAN 循环都会测量所有有效电芯电压，然后一个测量槽是“共享测量槽”，用于连续 ADSCAN 循环上的不同用途（额外的系统和诊断测量），从而在每个 ADSCAN 循环上总共产生 3 个测量槽（如果两个电芯处于活动状态）至 8 个测量槽（如果 7 个电芯处于活动状态）。测量槽的宽度是可编程的，在 NORMAL 模式下，根据设置，每个 ADSCAN 的范围约为 1.1ms 至 24ms。

SLEEP 模式与 NORMAL 模式下的测量调度有所不同，并且在初始上电或复位后还使用特殊的测量调度，以实现系统快速上电。有关其余测量循环以及与工作模式之间的差异的详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.5.1.2 未使用的 VC 引脚

如果 BQ78709-Q1 器件用于 7 节以下串联电芯的系统，则必须使用特定电芯来连接实际电芯，如 表 7-1 所示。未使用的电芯输入必须在电路板上短接。该器件仅测量和报告那些被指定为实际电芯的电芯的数据。

表 7-1. 电芯使用情况

使用的电芯数量	电芯连接	短路连接
7	VC7–VC6、VC6–VC5、VC5–VC4、VC4–VC3、VC3–VC2、VC2–VC1、VC1–VC0	–
6	VC7–VC6、VC6–VC5、VC5–VC4、VC3–VC2、VC2–VC1、VC1–VC0	VC4–VC3
5	VC7–VC6、VC5–VC4、VC3–VC2、VC2–VC1、VC1–VC0	VC6–VC5、VC4–VC3
4	VC7–VC6、VC5–VC4、VC3–VC2、VC1–VC0	VC6–VC5、VC4–VC3、VC2–VC1
3	VC7–VC6、VC5–VC4、VC1–VC0	VC6–VC5、VC4–VC3、VC3–VC2、VC2–VC1
2	VC7–VC6、VC1–VC0	VC6–VC5、VC5–VC4、VC4–VC3、VC3–VC2、VC2–VC1

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

未使用的电芯输入引脚必须短接到相邻的电芯输入引脚，如适用于 6 节串联电芯系统的图 7-4 所示。

还需要注意的是，不同 VC 引脚支持的电压范围会因引脚而异。例如，引脚 VC5、VC6 和 VC7 只能在其引脚电压大于或等于 2V 时支持测量。因此，如果使用顶部和底部电芯输入引脚实现 2 节串联系统，一旦下部电芯电压降至 2V 以下，则可能无法正确测量上部电芯电压，因为此时 VC6 将低于 2V。

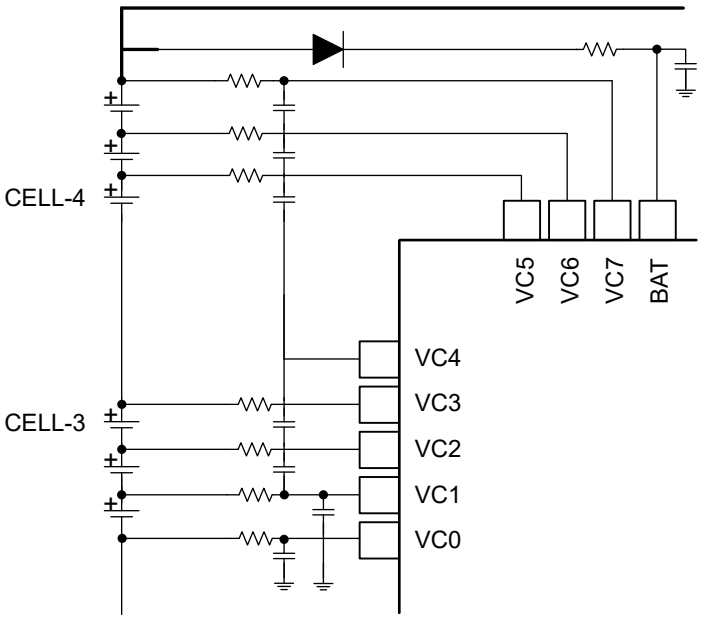


图 7-4. 连接未使用的电芯输入引脚

器件数据存储器必须配置为指定哪些电芯输入用于实际电芯。该器件使用此信息来禁用与未使用的输入相关的电芯电压保护。用于实际电芯的输入的电压测量值以 16 位格式报告（单位为 mV）。有关更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.5.1.3 通用的 ADCIN 功能

BQ78709-Q1 器件上的 TS 引脚如果不用于热敏电阻的温度测量，则可用于测量通用的 ADC 输入 (ADCIN)。当用于 ADCIN 功能时，ADC 使用内部带隙基准，ADC 的输入范围限制为 1.8V。ADC 的数字满量程范围实际为 1.6667 × VREF1，在正常工作期间约为 2.02V。

数据存储器设置控制 TS 引脚是用于热敏电阻还是用作通用 ADC 输入。TS 引脚的测量结果以 16 位 ADC 计数为单位。

7.5.2 电流测量和电荷积分

BQ78709-Q1 器件使用一个低侧检测电阻器监测电池包电流，该电阻器通过外部 RC 滤波器连接到 SRP 和 SRN 引脚，并且必须连接该滤波器，从而充电电流将在 SRP 上产生相对于 SRN 的正电压。SRP 和 SRN 之间的差分电压由集成库仑计 ADC 数字化，该 ADC 可以对 ±200mV 范围内的电压进行数字化，并使用多个数字滤波器对瞬时和积分电流进行优化测量。该器件支持多种检测电阻值，较大的值可为数字化结果提供更好的分辨率。必须限制感应电阻器的最大值，以确保在需要进行电流测量时，差分电压保持在 ±200mV 范围内，以便支持系统运行。例如，正常运行期间（非故障状态）最大放电电流为 200A 的系统应将感应电阻器限制在 1mΩ 或更低。

SRP 和 SRN 引脚还可以支持相对于 VSS 更高的正电压（例如在放电条件下过流或短路期间可能发生的电压），而不会损坏器件，但在这种情况下不会准确地对电流进行数字化。例如，如果系统配有 1mΩ 感应电阻器且放电短路保护阈值编程为 500mV，则在检测到 500A 的放电电流时会触发 SCD 保护故障。

库仑计集成了两个硬件数字滤波器（CC1 和 CC2），每个滤波器都提供单独的数字输出。CC2 数字滤波器生成 24 位原始输出，并具有可编程时序和分辨率输出，而输出速率也影响转换的分辨率。库仑计转换的有效分辨率

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

（数据在 ±1 LSB 范围内表现出 1 Σ 变化的分辨率）随着输出数据之间的时序延长而增加。库仑计处于全功率模式时的设置选项为 366 µs（产生 最低 有效分辨率）、732 µs、1.46ms 或 2.93ms（产生最高 有效分辨率）。此输出速率通过数据存储器配置位进行设置。此外，库仑计支持低功率模式，该模式的运行速率比上述设置慢 16 倍，每个设置具有相似的分辨率性能，但全功率运行时仅消耗 4 µA，而不是约 60 µA。

CC1 滤波器生成 16 位的电流测量值，用于电荷积分和其他决策目的，当器件在 NORMAL 模式下运行且库仑计在全功率模式下运行时，每 250ms 生成一个输出，而当器件在低功耗模式下运行时，每 4 秒生成一个输出。

积分通过电荷（对 CC1 处理结果进行积分而来）以 48 位值的形式提供，其中包括作为整数部分的累积电荷的高 16 位，作为小数部分的累积电荷的低 32 位，以及 32 位累积时间，在该时间上以秒为单位对电荷进行积分。累积的电荷积分和计时器可以由主机通过数字通信接口发出的命令来复位。请注意，在 SLEEP 模式下，电荷和时间不会积分。

有关电流测量、电荷积分及其相关可编程设置的更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.5.3 内部温度测量

BQ78709-Q1 器件集成了通过数字化内部晶体管基极-发射极电压差值来测量其内部裸片温度的功能。该电压会在测量循环中进行定期测量，并在处理后通过数字通信接口提供报告的温度值。

该器件还会将内部温度与可编程保护阈值进行比较，以实现裸片过热保护。为响应这种保护，该器件可以配置为禁用 FET 并可选择进入 SHUTDOWN 模式。有关这方面的详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册* 中的“内部过热保护”一节。

7.5.4 热敏电阻温度测量

BQ78709-Q1 器件支持测量 TS 引脚上的外部热敏电阻。该器件包含一个 20kΩ 内部上拉电阻器，用于在测量期间偏置热敏电阻。可以使用数据存储器设置选择 TS 引脚来进行热敏电阻测量或通用 ADCIN 测量。

当选择该引脚进行热敏电阻测量时，内部上拉电阻用于在测量期间偏置该引脚。为了提供高精度的结果，该器件使用与用于偏置热敏电阻上拉电阻的相同 1.8V 内部 LDO ADC 基准电压，从而实现比例测量，消除了 LDO 电压电平导致的误差。由于上拉电阻仅在引脚测量期间启用，因此建议限制该节点的电容，以减轻上拉电阻偏置时不完全稳定的影响。在最高分辨率模式下，建议电容保持在 4nF 以下，在最高速度模式下，建议电容保持在 500pF。

如果选择该引脚用于通用 ADCIN 测量，则测量期间不会启用上拉电阻，并且 ADC 在测量该引脚时使用 VREF1 作为其基准。

数据以 16 位 ADC 计数为单位进行报告。满量程数字值反映了其基准 × 5/3 的模拟输入电平。因此，当 TS 引脚使用 1.8V 内部稳压器作为基准在比率模式下测量热敏电阻时，16 位 LSB 为 1.8V × 5 / 3 / 32768 ≅ 91.55 µV。当 TS 引脚使用 VREF1 基准在 ADCIN 模式下进行测量时，16 位 LSB 为 VREF1 × 5 / 3 / 32768 ≅ 61.80 µV。

7.5.5 出厂调整和校准

BQ78709-Q1 器件在电芯电压 ADC 测量、栈测量、内部裸片温度测量和电流测量方面进行了出厂调整，即使在客户未执行进一步校准的情况下，也可以优化测量性能。调整信息用于校准原始 ADC 读数，然后再在处理后将其报告为 16 位值。假设使用 1mΩ 外部感应电阻器，则可以执行电流测量调整以提供 mA 单位，但如果需要不同的单位，用户可以对此进行修改。用户可以修改调整后的偏移值和增益值，以便在客户生产线上执行校准，从而进一步优化系统性能。有关更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.6 保护子系统

7.6.1 保护概述

BQ78709-Q1 中集成了一个包含丰富初级保护功能的子系统，该系统可以监控各种参数、启动保护动作并根据条件自主恢复。该器件还具有广泛的灵活性，可配置为监控和启动保护措施，但恢复由主机处理器控制；或者仅在运行需要保护措施时监控和提醒主机处理器，但动作和恢复完全由主机处理器控制。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

该保护子系统包括一套可单独启用和配置的单项保护，包括电芯欠压、过压和充电过流保护、两种独立的放电过流保护、放电短路电流保护、电芯充放电过热和欠温保护、内部芯片过热保护和主机处理器通信看门狗超时保护。充放电过流保护以及放电短路保护基于比较器决策，而其余保护（例如涉及电芯电压、温度和主机看门狗的保护）基于 ADC 测量或逻辑操作。该器件集成了用于低侧 CHG 和 DSG 保护 FET 的 NFET 驱动器，这些驱动器可配置为串联或并联配置，也可用于脉宽调制模式下，以手动实现预充电或预放电功能。

7.6.2 初级保护

BQ78709-Q1 集成了广泛的电池管理保护套件，不仅能启用单项保护，还能选择哪些保护会对 FET 进行自主控制。有关每种保护功能的详细说明，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。主要保护特性包括：

- 电芯欠压保护
- 电芯过压保护
- 电芯开路保护
- 充电过流保护
- 放电过流保护（两级）
- 放电短路保护
- 电流保护锁存器
- 充电欠温保护
- 放电欠温保护
- 充电过热保护
- 放电过热保护
- 内部过温保护
- 主机看门狗故障保护

该器件还包含附加诊断检查，这些诊断检查也可以根据配置设置实现 FET 的自主控制。

7.6.3 CHG 检测器

BQ78709-Q1 提供一个信号，指示 CHG 引脚电压是否高于约 2V 的电平。可通过通信接口读取此标志的原始值，并且只要此标志的去抖版本根据器件设置更改状态，就可以在 ALERT 引脚上生成一个警报。系统可以使用该标志来帮助从电流故障状况中恢复。

当系统发生短路事件等电流故障时，该器件通常会禁用其 DSG FET，并还可能会禁用 CHG FET，具体取决于设置。该器件可以配置为等待编程的延迟，然后重新启用 FET。如果短路情况仍然存在，则将触发新的故障，并再次禁用 FET。如果短路持续存在，这种定期恢复和重新触发故障的循环可能会无限期地继续下去，这通常是不可接受的。

一种替代方法是只允许有限的重试次数，然后在达到该限制后禁用进一步的重试。该功能由电流保护锁存器提供支持。这可以避免无限次重试，但随后可能会在重试停止后导致电池包无法使用。

如果电池包是可拆卸的，例如在电动工具中，则另一种选择是在从系统中移除电池包之前使 FET 保持禁用状态。在这种情况下，如果 CHG 驱动器被禁用并且未连接充电器，则在连接负载时 CHG 引脚会被上拉至 PACK+ 电压，从而使 CHG 探测器信号置为有效。当电池包从系统中移除（并且仍未连接充电器）时，CHG 引脚通常会下降到接近 BAT- 电压电平，从而使 CHG 检测器信号取消置位。然后，电池包的主机处理器可以使用此信号来触发电池包的恢复。

请注意，使用此 CHG 探测器移除负载取决于系统配置，并非在所有情况下都可以使用。因此，电池包设计人员务必要评估它是否适用于系统。有关 CHG 检测器的更多信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.6.4 电芯开路保护

BQ78709-Q1 器件支持检测电池包中的电芯与包含 BQ78709-Q1 器件的 PCB 的电芯附件之间的连接是否断开。如果不进行此项检查，BQ78709-Q1 器件的电芯输入引脚上的电压可能会在板级电容器上持续一段时间，从而导致电压读数不正确。BQ78709-Q1 器件中的电芯开路检测通过以可编程间隔启用从每节电芯到 VSS 的小电流源来运行。如果电芯输入引脚由于开路情况而处于悬空状态，该电流将使电容放电，从而导致该引脚上的电压缓慢下降。这种电压下降最终会在特定电芯及其上方的电芯上触发保护故障。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

电芯开路电流将按照配置寄存器设置的周期间隔启用。这基于 55µA 的典型电流水平提供了平均电流可编程性，其范围为约 5.4nA 至约 1.1µA。有关更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

备注

电芯开路检查会造成电芯不均衡，因此必须选择适当的设置。

7.6.5 诊断检查

BQ78709-Q1 包含多个用于诊断目的的测量和检查。其中一些将触发保护故障，但它们通常不包括具有可编程延迟周期的警报阶段，而是会在检测到故障时立即触发故障。它们并非都可以自主恢复，但有些可以使用主机发送的子命令手动恢复。有关每个诊断的更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

VREF1 与 VREF2 检查 - 该器件会定期比较两个内部基准电压，如果结果超出可接受的范围，则可以触发故障。这是通过使用 ADC 并以 VREF1 作为基准来测量内部 1.8V LDO 电压（基于 VREF2）来实现的。

VSS 检查 - 该器件还会在测试循环中定期测量 VSS 电压并将结果值与预期值进行比较，以实现 VSSF 诊断保护。

电池组检查 - 该器件会在测量循环中定期测量栈顶 (TOS) 电压。主机可以使用该测量值力与各个电芯差分电压测量值之和进行比较，如果存在显著的差异，则可能表明存在某种类型的故障。

REGOUT 检查 - 如果检测到错误，例如稳压器处于短路电流限制状态，REGOUT LDO 会生成标志。检测到错误时，该器件会触发 REGOUT 诊断故障，并可以根据设置禁用 FET。

LFO 完整性检查 - 该器件集成了一个特殊的硬件模块，用于监控 LFO 是否停止振荡或频率相对于其预期值显著下降。如果检测到这种情况，该器件会立即切换到 SHUTDOWN 模式。

内部出厂调整检查 - 该器件会在初始上电时或任何完全复位后检查器件内的数字调整和设置信息。如果在此检查过程中检测到错误，该器件将立即切换到 SHUTDOWN 模式。

硬件过热检测器 - 该器件集成了一个硬件过热检测电路，用于确定芯片温度何时超过大约 120°C 的过高温度。如果该检测器触发，该器件将根据配置设置自动进入 SHUTDOWN 模式的序列。

7.7 电芯均衡

BQ78709-Q1 使用电芯之间的集成旁路开关或外部旁路 FET 开关旁路所选电芯的电流，从而支持被动电芯均衡。均衡必须从主机处理器中手动启动和控制。有关更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

相邻和非相邻电芯都可以进行平衡。均衡通过主机的子命令进行控制。启动均衡时，该器件会启动一个计时器，并开始均衡指定的电芯，持续时间最长达 20 秒。如果发出新的均衡子命令，计时器将复位。这是一种预防措施，以防主机处理器启动了均衡但随后又停止与 BQ78709-Q1 通信，这样均衡就不会无限期地继续。主机还可以在需要时使用该子命令提前禁用均衡。读取子命令时，该子命令将报告位掩码，可用于显示对哪些电芯进行主动均衡。

如果不打算使用均衡功能，则可以将该器件配置为在电池包处于 SEALED 模式时阻止启动均衡。该器件还可以配置为在热敏电阻温度或裸片温度超过可编程阈值时禁用均衡。客户应仔细分析均衡对系统中器件的热效应。根据该器件在运行期间规划的环境温度和封装的热属性，必须计算出该器件内会耗散的最大功率，并同时确保器件在推荐的运行温度范围内运行。然后可以确定电芯均衡配置，通过减少同时均衡的电芯数量或通过适当地选择与每节电芯串联的外部电阻来减小每节电芯的均衡电流，从而使该器件的功率低于此水平。

由于在均衡处于活动状态时 BQ78709-Q1 上电芯输入引脚有电流流入，因此在均衡期间修改了该器件对电芯电压的测量和对电芯电压保护的评估。在 ADC 测量电芯电压或电池组顶部电压时，在常规测量循环期间会暂时禁用均衡。这发生在每个测量循环中，因此会导致流过的平均均衡电流显著减小。为了帮助缓解这种情况，该器件包含一些配置位，用于在电芯均衡处于活动状态时降低测量循环速度，从而增大平均均衡电流。当测量循环变慢时，对电芯过压或欠压情况的响应时间也会相应变慢。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7.8 器件运行模式

7.8.1 运行模式概述

此器件具有四种运行模式，以支持经优化的功能和功率耗散，并且该器件能够在这些模式之间自主切换或由主机处理器控制。

- NORMAL 模式：在此模式下，该器件会频繁测量系统电流、电芯电压、内部和热敏电阻温度以及各种其他电压，按照配置运行保护，并提供数据和状态更新。电池保护处于启用状态，并且 FET 驱动器通常处于启用状态（在没有任何保护故障的情况下）。
- SLEEP 模式：在此模式下，该器件以可调节的时间间隔执行测量、计算和数据更新。在测量间隔之间，该器件在降低的功率级下运行，以最大程度地减少总平均电流消耗。电池保护仍处于启用状态，并且 FET 驱动器通常处于启用状态（在没有任何保护故障的情况下）。
- DEEPSLEEP 模式：在该模式下，会禁用 FET 驱动器，并禁用所有的电池保护，且不进行任何电流或电压测量。REGOUT LDO 可以保持通电，以保持对外部电路（例如主机处理器）的供电。使用 I^2C 的通信仍处于活动状态。
- SHUTDOWN 模式：该器件完全禁用（包括内部 1.8V 和 REGOUT LDO），CHG 和 DSG FET 都禁用，所有电池保护均禁用，并且不进行任何测量。这是该器件的最低功耗状态，可用于运输或长期存储。在 SHUTDOWN 模式下，所有寄存器设置都会丢失。

该器件还包含 CONFIG_UPDATE 模式，用于参数更新。运行模式之间的转换如 BQ78709-Q1 运行功率模式中所示。

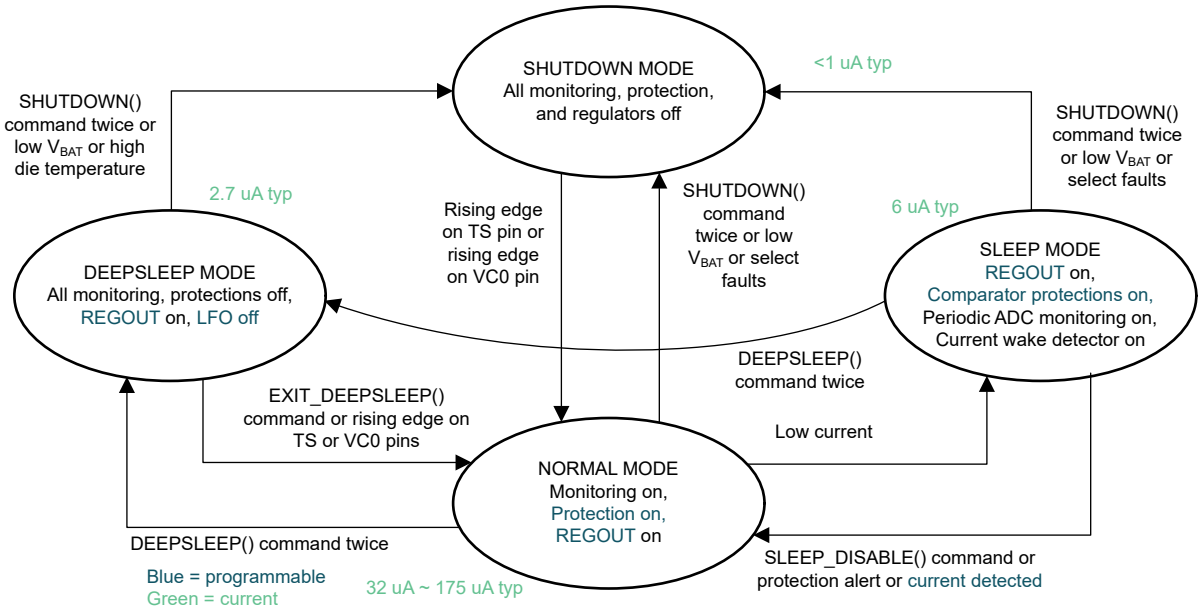


图 7-5. BQ78709-Q1 运行功率模式

7.8.2 正常模式

NORMAL 模式是该器件的最高性能模式，在该模式下，该器件会定期测量电压、电流和温度，并且 LFO（低频振荡器）全速运行。根据器件配置设置运行完整的电池保护。连续测量电芯电压、电流、温度和其他参数，时序由设置决定。

只要正在进行任何有效的充电或放电，该器件通常就会处于 NORMAL 模式。当电流测量值低于可编程电流阈值时，系统被视为处于静置模式，并且该器件可以根据配置自主切换为 SLEEP 模式。该器件包含一个电流唤醒检测器，如果检测到电流超过可编程阈值，该检测器将触发器件退出 SLEEP 模式并返回 NORMAL 模式。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7.8.3 SLEEP 模式

SLEEP 模式是一种降低功能的状态，当系统负载电流很小或没有，或者在充电时，可以选择使用 SLEEP 模式来降低功耗，但仍在电池包端子上提供电压以保持系统运行。初始上电时，配置设置决定器件是否可以进入 SLEEP 模式。初始化后，可以使用子命令允许或禁止 SLEEP 模式。该器件包括一个通过命令访问的状态位，用于指示器件当前是否处于 SLEEP 模式。

当电流测量幅度低于可编程电流阈值时，系统被视为处于静置模式，如果设置允许，该器件会自主切换到 SLEEP 模式。在 SLEEP 模式下，基于比较器的保护操作与 NORMAL 模式下相同。使用 ADC 和库仑计以可编程的间隔进行电流、电压和温度测量。

该器件将在发生保护故障时、电流开始流动时或通过子命令退出 SLEEP 模式。该器件会大约每 2.44ms 检查一次电流，如果电流超过可编程电平，该器件会切换回 NORMAL 模式。

该器件还包括进入 SLEEP 模式时的 10 秒迟滞，以避免器件基于动态负载快速进入和退出 SLEEP 模式。从 SLEEP 模式转换到 NORMAL 模式后，除非通过子命令覆盖，否则器件将在 10 秒内再次进入 SLEEP 模式。有关更多详细信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

7.8.4 DEEPSLEEP 模式

BQ78709-Q1 器件集成了 DEEPSLEEP 模式，这是一种低功耗模式，允许 REGOUT LDO 保持通电，但禁用大多数其他子系统。在该模式下，保护 FET 全部被禁用，因此在电池包端子处不提供电压。所有的保护都被禁用，并且所有的电压、电流和温度测量都被禁用。

可以通过主机发送子命令来进入 DEEPSLEEP 模式。通过使用子命令或在 TS 或 VC0 引脚上出现上升沿时，该器件将退出 DEEPSLEEP 模式并返回 NORMAL 模式。此外，如果处于 DEEPSLEEP 模式时 BAT 引脚电压降至低于 V_{PORA} - V_{PORA_HYS}，该器件将切换至 SHUTDOWN 模式。

当退出 DEEPSLEEP 模式并返回 NORMAL 模式时，该器件首先完成一个启动测量循环并评估与启用的保护相关的条件，以确保这些条件可接受以继续。这可能需要大约 8ms 加上完成测量循环的时间。

REGOUT LDO 将在进入 DEEPSLEEP 模式时保持其电源状态。根据设置，LFO 可能会在 DEEPSLEEP 模式期间被禁用。如果被禁用，它将由 I^2C 通信唤醒，这可能会导致器件需要比正常时钟延展更长的时间才能响应通信。

7.8.5 SHUTDOWN 模式

SHUTDOWN 模式是 BQ78709-Q1 的最低功率模式，可用于运输或长期储存。在此模式下，器件会丢失所有寄存器状态信息，内部逻辑断电，保护 FET 全部被禁用，因此电池包端子上不提供电压。所有保护都被禁用，所有电压、电流和温度测量都被禁用，并且不支持通信。当该器件退出 SHUTDOWN 模式时，它将读取存储在 OTP 中的参数（由 TI 编程），从而有效地设定设置默认值。器件上电后，可通过主机写入器件寄存器来更改设置。

该器件可以由主机发出子命令来进入 SHUTDOWN 模式。该器件还可以配置为根据电池组顶部电压或最小电芯电压自动进入 SHUTDOWN 模式。基于电芯电压的关断不适用于不用于实际电芯的电芯输入引脚。

当 BQ78709-Q1 处于 NORMAL 模式或 SLEEP 模式时，该器件还可以配置为在内部温度测量值超过可编程阈值时进入 SHUTDOWN 模式。

当从 SHUTDOWN 模式唤醒时，该器件需要大约 10ms，才能使内部电路上电，从 OTP 存储器加载设置，执行初始测量，评估与启用的保护相关的设置，然后在设置和条件允许的情况下启用 FET。

BQ78709-Q1 集成了硬件过热检测电路，该电路可以确定芯片温度何时超过约 120°C 的过高温度。如果触发了该检测器，该器件将根据配置设置自动开始进入 SHUTDOWN 的序列。

如果在 TS 或 VC0 引脚上施加高于大约 1.2V 的电平，则 BQ78709-Q1 将从 SHUTDOWN 模式唤醒。如果关断序列已启动，但器件检测到存在唤醒条件，则器件将保持“软关断”状态，直到唤醒条件被移除。在“软关断”状态中，FET 被禁用，并且保护和测量被停止。当条件允许器件继续进入 SHUTDOWN 模式时，器件将退出“软关断”。主机可以通过命令中止进入 SHUTDOWN 模式，并且器件将在完全复位后重新启动操作。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7.8.6 CONFIG_UPDATE 模式

BQ78709-Q1 使用特殊的 CONFIG_UPDATE 模式来更改数据存储器设置。如果在正常测量和保护功能运行期间更改了数据存储器设置，当逻辑使用的设置在运行过程中发生更改时，可能会导致运行异常或不良的后果。通常只应在客户生产线上或在离线条件下更改数据存储器设置，例如从 SHUTDOWN 上电后立即进行更改。

在 CONFIG_UPDATE 模式下，该器件会停止正常操作并停止所有测量和保护监控。然后，主机可以更改数据存储器设置。更改完成后，主机发送命令来退出 CONFIG_UPDATE 模式，此时该器件使用新的数据存储器设置重新启动正常运行。有关更多信息，请参阅 *BQ76907 技术参考手册*。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

8 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 不担保其准确性和完整性。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。

8.1 应用信息

BQ78709-Q1 器件可与 2-7 节串联电池包配合使用，支持 3V 至 38.5V 的栈顶电压。在开发过程中，要为特定电池包设计和实施一组全面的参数，用户需要使用 Battery Management Studio (bqStudio)，它是安装在 PC 上的图形用户界面工具。借助 bqStudio，在了解各种系统参数，例如用于保护的故障触发阈值、某些操作功能的启用或禁用、电芯配置等，便可在开发过程中根据特定的应用要求来配置器件。这将产生设置的“黄金映像”，然后可以将其编程到器件寄存器中。

8.2 典型应用

BQ78709-Q1 7 节串联电芯典型实现方式（简化原理图） 展示了 7 节串联电池包的简化应用原理图，其中将 BQ78709-Q1 与外部次级保护器、主机微控制器和通信收发器一起使用。该配置使用串联的低侧 CHG 和 DSG FET。实现中需要考虑的几个要点如下：

- 建议在 BAT 引脚处连接一个串联二极管并在该引脚与 VSS 之间连接一个电容器。当发生可能导致栈顶电压降至 0V 的电池包短路时，这些元件可允许器件继续工作一小段时间。在这种情况下，二极管会防止 BAT 引脚被栈拉低，并且器件将继续运行，从电容器中汲取电流。通常只需要在短时间内运行，直到该器件检测到短路事件并禁用 DSG FET。如果需要低压电池包运行，则可以使用肖特基二极管，否则可以使用传统二极管。
- FET CHG 和 DSG 驱动器使用 REGSRC 引脚作为其电源，因此用户可能还希望在电池组顶部和 REGSRC 引脚之间添加一个二极管，类似于用于 BAT 引脚的二极管。如果在栈顶与 REGSRC 引脚之间串联了任何电阻 (> 1Ω)，建议在 REGSRC 引脚与 VSS 之间添加一个 1μF 电容器。REGSRC 引脚可以短接到 BAT 引脚并使用单个二极管，但由于 REGOUT 稳压器从 REGSRC 引脚汲取的负载增加，这可能会导致 BAT 引脚电压在短路事件期间下降得更快。
- VC0 至 VC4 引脚上的建议最小电压向下扩展至 –0.2V，而 VC5 至 VC7 引脚上的建议最小电压相对于 VSS 限制为 2.0V。该限制的存在是为了确保指定的电芯电压测量精度。
- TI 建议在 SRP 和 SRN 引脚上串联 100Ω 电阻器，并在这些引脚之间使用 100nF 和可选的 100pF 差分滤波电容以进行滤波。这些元件以及检测电阻到引脚的布线必须尽可能地缩短并完全对称，同时建议所有元件与器件保持在 PCB 的同一侧。从引脚连接到 VSS 的电容器可以对到达引脚的共模瞬变进行滤波，但它们也可能对电流测量性能产生轻微影响。
- 连接在检测电阻与 SRP 和 SRN 引脚之间的滤波器网络会引入模拟滤波器延迟，当需要快速电流保护时，例如确定在 FET 禁用之前的放电短路 (SCD) 时间，这一点非常重要。如果此网络引入的延迟太长，则可以减小电阻和电容值。这将需要权衡提供较少的高频分量模拟滤波。
- 由于热敏电阻通常与电芯相连，并且可能需要长导线连接回器件，因此在热敏电阻引脚和器件 VSS 之间添加一个电容器可能会有所帮助。但是，切勿使用过大的电容值，因为当热敏电阻发生偏置并进行定期测量时，这会影响稳定时间。经验法则是将电路的时间常数保持在测量时间的 5% 以下。当 ***Settings:Configuration:DA Config[IADCSPEED1:0]*** = 0x0 时，测量时间约为 3ms。使用此速度设置时，时间常数通常应小于 (20kΩ) × C，因此建议使用小于 7.5nF 的电容器。使用更快的速度设置时，电容值必须相应减小。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

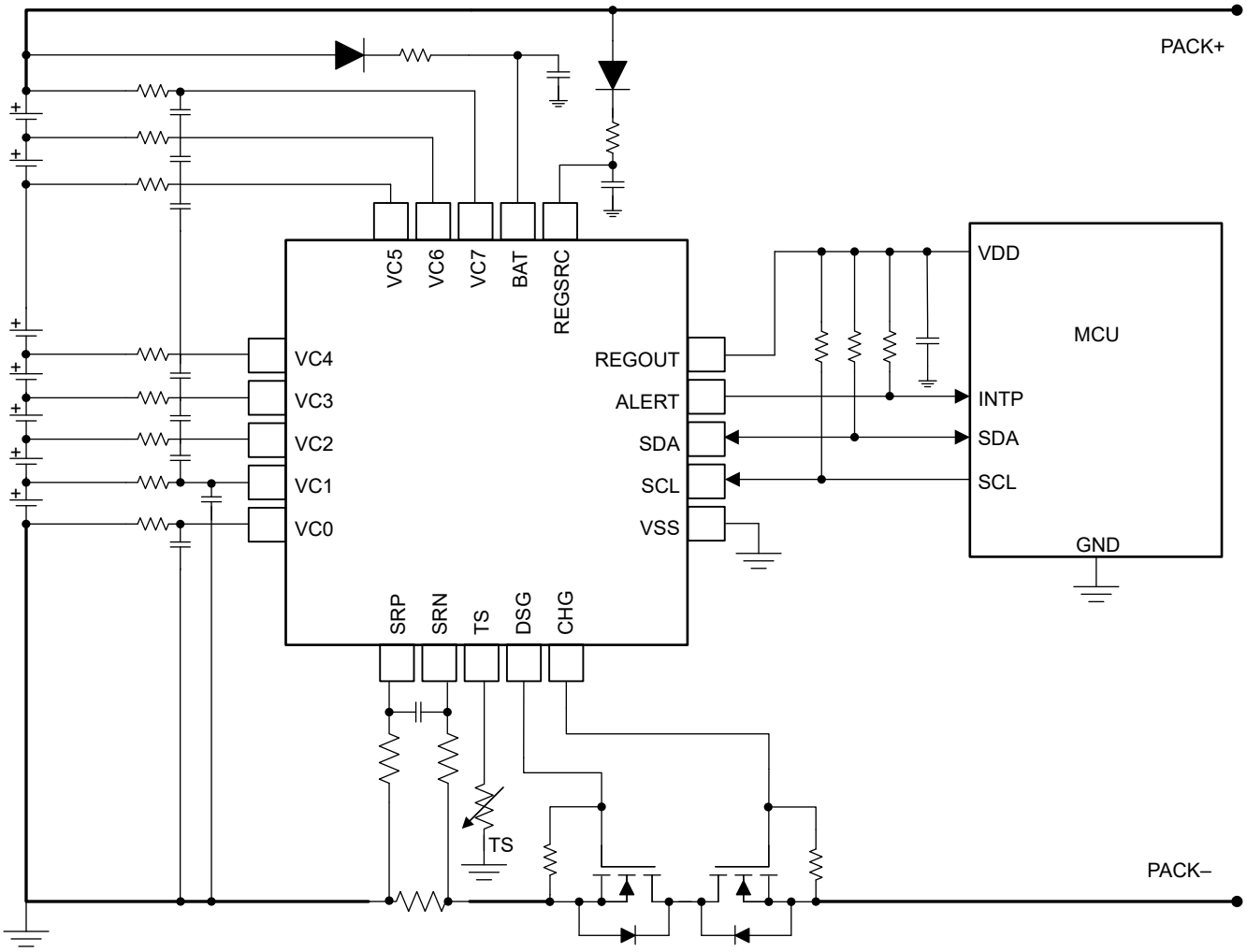


图 8-1. BQ78709-Q1 7 节串联电芯典型实现方式（简化原理图）

下面显示了基于 BQ78709-Q1 的 7 节串联电池包评估模块基本监测器电路的完整原理图。节 8.4.2 显示了该设计的电路板布局布线。

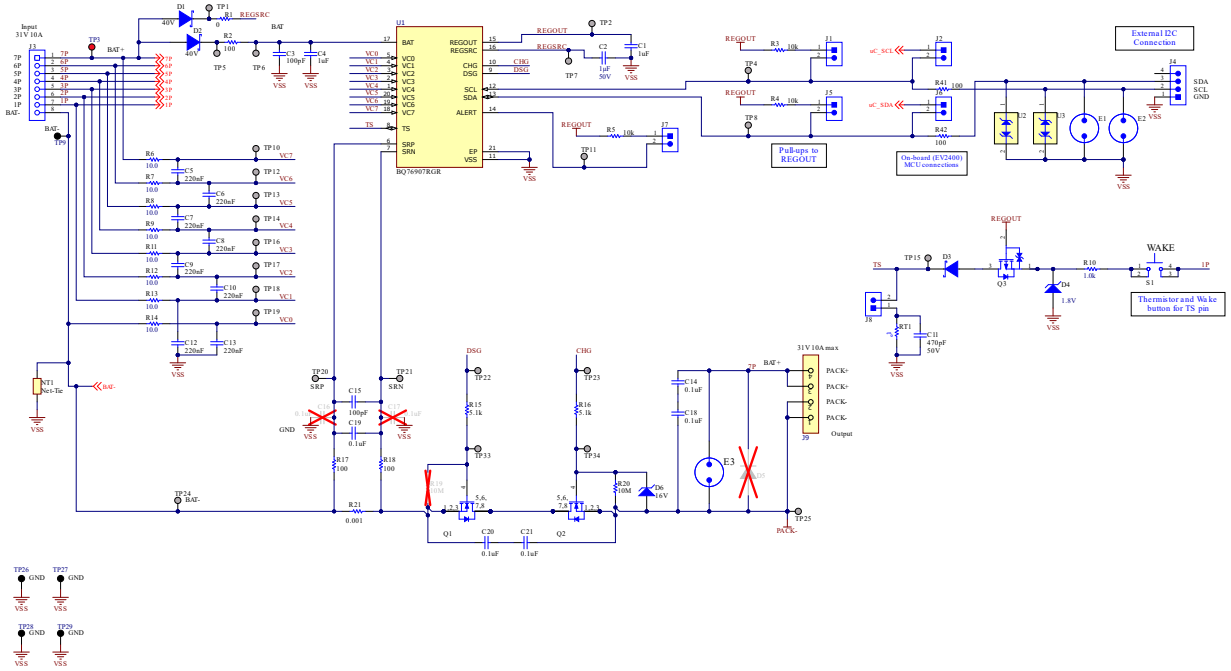


图 8-2. BQ78709-Q1 7 节串联电芯原理图 - 监测器

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

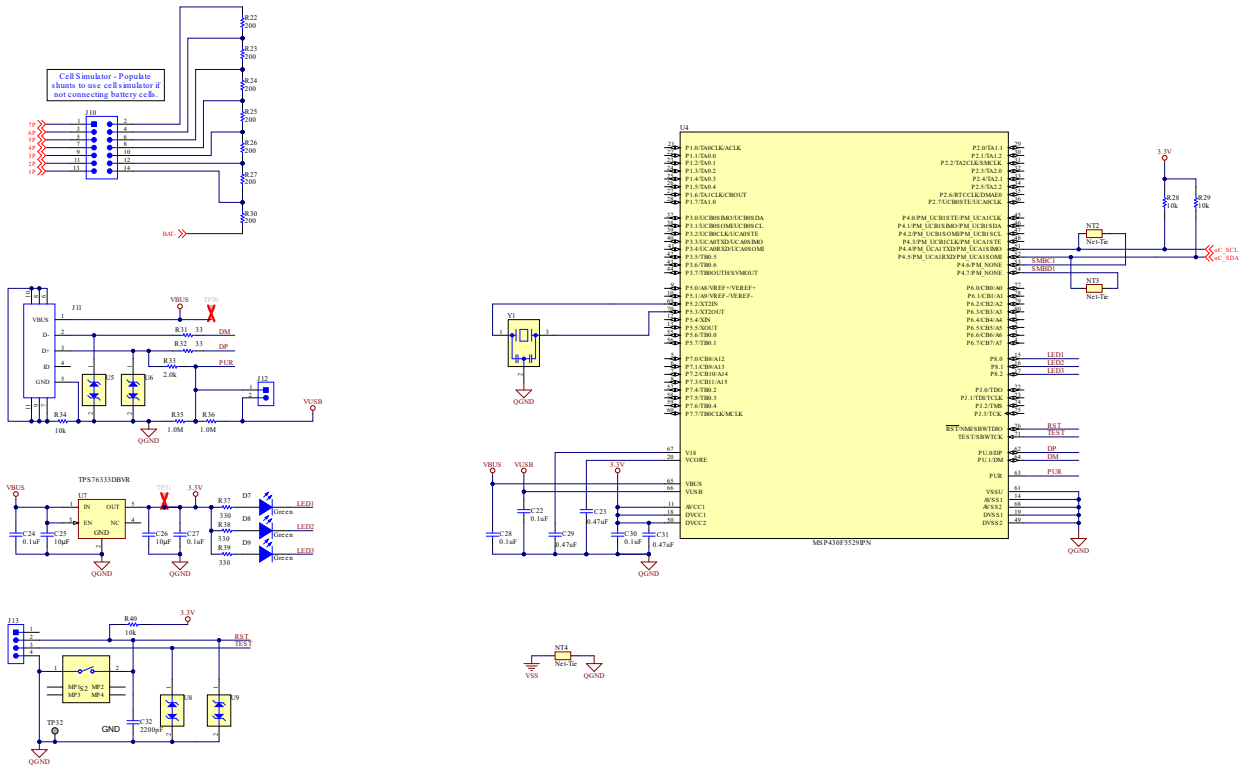


图 8-3. BQ78709-Q1 7 节串联电芯原理图 - 附加电路

8.2.1 设计要求

表 8-1. BQ78709-Q1 设计要求

设计参数	示例值
最小系统工作电压	17.5V
最小电芯工作电压	2.5V
串联电池节数	7
检测电阻	1mΩ
热敏电阻处于使用状态	是
充电电压	29.75V
最大充电电流	6.0A
峰值放电电流	40.0A
配置设置	客户生产期间在寄存器中编程
测量速度	设置为最高分辨率（每次测量 2.93ms）
保护子系统配置	串联 FET 配置、器件监控、在发生故障时禁用 FET、自主恢复
过压保护阈值	4.30V
过压保护延迟	375ms（16 个 ADSCAN 周期）
过压保护恢复迟滞	100mV
欠压保护阈值	2.5V
欠压保护延迟	141ms（6 个 ADSCAN 周期）
欠压保护恢复迟滞	100mV
SCD 保护阈值	80mV（对应于标称 80A，基于 1mΩ 感应电阻器）

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 8-1. BQ78709-Q1 设计要求（续）

设计参数	示例值
SCD 保护延迟	45 至 60μs
OCD1 保护阈值	68mV（对应于标称 68A，基于 1mΩ 感应电阻器）
OCD1 保护延迟	10ms
OCD2 保护阈值	56mV（对应于标称 56A，基于 1mΩ 感应电阻器）
OCD2 保护延迟	81.1ms
OCC 保护阈值	8mV（对应于标称 8A，基于 1mΩ 感应电阻器）
OCC 保护延迟	159.2ms
OTD 保护阈值	代码 = 2592（相当于约 60°C）
OTD 保护延迟	2 秒（17 次 FULLSCAN）
OTD 保护恢复	代码 = 2970（相当于约 55°C），持续 2 秒
OTC 保护阈值	代码 = 3888（相当于约 45°C）
OTC 保护延迟	2 秒（17 次 FULLSCAN）
OTC 保护恢复	代码 = 4428（相当于约 40°C），持续 2 秒
UTD 保护阈值	代码 = 15169（相当于约 –20°C）
UTD 保护延迟	7.97 秒（68 次 FULLSCAN）
UTD 保护恢复	代码 = 13398（相当于约 –10°C），持续 2 秒
UTC 保护阈值	代码 = 11319（相当于约 0°C）
UTC 保护延迟	5.04 秒（43 次 FULLSCAN）
UTC 保护恢复	代码 = 10318（相当于约 5°C），持续 2 秒
主机看门狗超时保护延迟	5 秒
ALERT 引脚功能	用于报警中断功能
REGOUT LDO 用法	启用时为 3.3V 输出

8.2.2 详细设计过程

- 确定串联电池节数
  - 该值取决于电芯化学成分以及系统的负载要求。例如，要使用电芯最小电压为 3V 的 Li-CO_2 型电池来支持 18V 的最小电池电压，至少需要 6 节串联电芯。
  - 有关正确的电芯连接，请参阅未使用引脚的使用。
- 保护 FET 选择和配置
  - BQ78709-Q1 器件专为与低侧 NFET 保护配合使用而设计。
  - 必须为串联 FET 和并联 FET 选择相应的配置，可能需要针对充电方向和放电方向选择不同的 FET。
  - 这些 FET 的额定性能必须符合以下要求：
    - 最大电压，该值必须为每节串联电芯大约 5V（直流）至 10V（峰值）。
    - 最大电流，必须根据最大直流电流和最大瞬态电流计算并留有一定的裕度。
    - 最大功率损耗，其可能是 FET、FET 封装和 PCB 设计的 RDS(ON) 额定值的一个因素。
- 检测电阻选型
  - 所选电阻值必须尽可能扩大库仑计的输入范围，但不超过绝对最大额定值，并避免电阻器内产生过多热量。
    - 使用正常的最大充电或放电电流时，检测电阻最大值等于 200mV/40.0A = 5mΩ。
    - 假设短路放电电流为 80A，建议的最大 SRP、SRN 电压约为 0.75V，并且最大 SCD 阈值为 500mV，则检测电阻最大值必须低于 500mV/80A = 6.25mΩ。
  - 此外，还应考虑进一步的容差分析（值容差、温度变化等）和 PCB 设计裕度，因此 1mΩ 的感应电阻器适合 50ppm 温度系数和 1W 额定功率。
- 选择的 REGOUT 用于为外部主机处理器提供电源，并为 I^2C 总线和 ALERT 引脚提供上拉电源，而输出电压选择为 3.3V。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

- 必须在 REGOUT 引脚处放置一个 1 µ F 或更大的电容器。
- REGOUT 从 REGSRC 引脚汲取其输入电流。此引脚通过串联二极管和 10 Ω 电阻器连接到 PACK+，而 1 µ F 电容器连接到位于 REGSRC 引脚的 VSS。

8.2.3 应用性能曲线图

下面的示波器图显示了器件对放电短路 (SCD) 事件和后续保护的响应。该器件配置为 SCD 阈值等于 10mV，SCD 延迟等于 0 µ s 至 15 µ s。通过 1m Ω 感应电阻器施加短路。SRP 和 SRN 引脚上的输入滤波器网络由 100 Ω 电阻器和 100nF 差分电容器组成，因此会产生 20 µ s 的时间常数。*Alarm Status()* 中的 *[SSA]* 位会导致 ALERT 引脚下降，这会在触发安全状态并禁用 DSG 驱动器后大约 15 µ s 到 30 µ s 之间发生。该电路在 DSG 引脚和 DSG FET 栅极之间包含一个 5.1k Ω 电阻器。

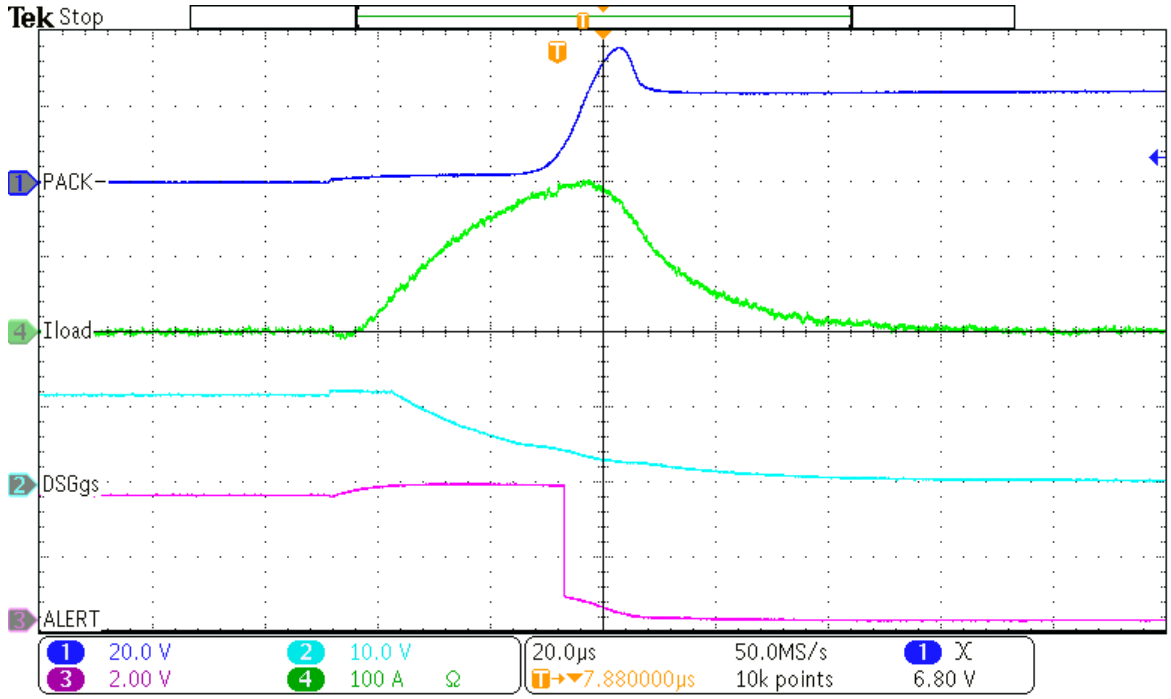


图 8-4. SCD 事件和保护的示波器图。直接在 SRN-SRP 引脚上测量的负载电流，其中包括 RC 延迟与检测电阻上电压间的关系。

8.2.4 随机电芯连接支持

BQ78709-Q1 器件支持在电池包制造期间按照随机顺序将电芯连接到该器件。例如，7 节电池组中的电芯 6 可以首先连接到引脚 VC6 和 VC5 的输入端子，然后电芯 2 可连接到引脚 VC2 和 VC1 的输入端子，依此类推。无需先在 VC0 处连接电芯 1 的负极端子。再举一个例子，假设一个电池组已经组装好，并且电芯已经互相连接，然后该电池组通过一个连接器连接到 PCB，而该连接器可以插入或焊接到 PCB 上。在这种情况下，与 PCB 的连接顺序在时间上可能是随机的，无需按特定的顺序进行控制。

制造期间对电芯的连接方式存在一些限制：

- 为了避免误解，请注意电池组中的电芯不能随机连接到器件上的任何 VC 引脚，例如最下面的电芯（电芯 1）连接到 VC7，而顶部电芯（电芯 7）连接到 VC1 等等。重要的是，电池组中的电芯按引脚升序连接，最下面的电芯（电芯 1）连接在 VC1 和 VC0 之间，下一个更高电压的电芯（电芯 2）连接在 VC2 和 VC1 之间等等。
- 由于引脚 VC1-VC7 上的高电压容差，因此可以支持随机电芯连接。

备注

VC0 具有较低的电压容差。这是因为在任何电芯连接到 PCB 之前，VC0 必须通过串联电池输入电阻器连接到 PCB 上的 VSS 引脚。因此，在电芯连接期间，VC0 引脚电压预计将保持接近 VSS 引脚电压。如果 VC0 没有通过串联电阻器连接到 PCB 上的 VSS，则电芯无法以随机顺序连接。

- VC1-VC7 引脚各自都在该引脚和相邻的下个电芯输入引脚之间（即 VC7 和 VC6 之间、VC6 和 VC5 之间等）包含一个二极管，该二极管会在正常运行时反向偏置。这意味着，不得将上方电芯输入引脚驱动为低电压，而将下方电芯输入引脚驱动为高电压，因为这会使这些二极管正向偏置。在电芯连接期间，电芯输入端子通常在连接到适当的电芯之前处于悬空状态。连接每个电芯后，预计瞬态电流会短暂流动，但电芯电压会快速稳定到没有直流电流流经这些二极管的状态。但是，如果在电芯输入引脚和另一个端子（例如 VSS 或另一个电芯输入引脚）之间包含大电容，瞬态电流可能会过大并导致器件发热。因此，建议将施加在每个电芯输入引脚上的电容限制为规格中建议的值。

8.2.5 启动时序

BQ78709-Q1 器件从 SHUTDOWN 状态初始上电时，该器件执行一系列事件，然后再进入 NORMAL 模式运行。表 8-2 中通过示例配置介绍了这些情况，并显示了近似时序。

表 8-2. 启动序列和时序

步骤	注释	APPROXIMATE TIME（相对于唤醒事件）
唤醒事件	TS 引脚或 VC0 引脚被上拉，触发器件退出 SHUTDOWN 模式。	0
REGOUT 上电	通过 OTP 编程为自主给 REGOUT LDO 供电的情况下进行测量。	2.6ms
完成首次电芯 1 测量	可以读回电芯 1 的首次测量数据。	3.2ms
INITCOMP、ADSCAN 和 FULLSCAN 被置为有效 (7s)	第一个启动序列完成时，这三个信号将一同置为有效（通过 OTP 编程进行测量以使其在 ALERT 中显示）。 ***[CVADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[IADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[SSADCSPEED1:0]*** = 0x0。	9.4ms
FET 启用 (7s)	通过 OTP 编程为自主启用 FET 的情况下进行测量。 ***[CVADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[IADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[SSADCSPEED1:0]*** = 0x0。	9.4ms

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 8-2. 启动序列和时序（续）

步骤	注释	APPROXIMATE TIME（相对于唤醒事件）
INITCOMP、ADSCAN 和 FULLSCAN 被置为有效 (5s)	第一个启动序列完成时，这三个信号将一同置为有效（通过 OTP 编程进行测量以使其在 ALERT 中显示）。 ***[CVADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[IADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[SSADCSPEED1:0]*** = 0x0。	8.6ms
FET 启用 (5s)	通过 OTP 编程为自主启用 FET 的情况下进行测量。 ***[CVADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[IADCSPEED1:0]*** = 0x0， ***[SSADCSPEED1:0]*** = 0x0。	8.6ms

图 8-5 展示了启动序列的示波器图示例，其中器件针对 5 节串联电池包使用 OTP 中的设置，***[FET_EN]*** = 1 以实现自主 FET 控制，并且在 ALERT 引脚上提供 *[INITCOMP]* 标志。TS 引脚会被上拉，以启动器件从 SHUTDOWN 状态唤醒。



图 8-5. 5 节串联电池包的启动序列，ALERT 引脚上显示 *[INITCOMP]* 标志（TS 引脚电压为蓝色，DSG 引脚电压为绿色）

8.2.6 FET 驱动器关断

当低侧 CHG 和 DSG FET 驱动器被触发而关闭其各自的 FET 时，它们的工作方式有所不同。DSG 驱动器包含一个内部开关，当驱动器被禁用时，该开关会将 DSG 引脚驱动至 VSS 引脚电平。该驱动器指定为在具有 20nF 容性负载且 DSG 引脚和 DSG 栅极之间具有 100Ω 串联电阻时下降时间最大。如果将驱动器与较大的容性负载一起使用，下降时间通常会增加。系统设计人员可以根据使用的电路板组件和 DSG FET 来优化串联电阻值。

DSG 引脚和 DSG FET 栅极之间的外部串联栅极电阻用于调整关断瞬态的速度。低电阻（如 100Ω）可在短路事件期间提供快速关断，但这可能会在 FET 禁用时导致 电池组顶部的电感尖峰过大。较大的电阻值（例如 1kΩ 或 4.7kΩ）会降低 此速度和相应的电感尖峰水平。

CHG FET 驱动器会将 CHG 引脚放电至 VSS 引脚电平，但它包括一个额外的串联 PFET 以支持低于 VSS 的电压。当电池包深度放电时，通常需要这样做，例如，如果 7 节串联电池包中每节电芯的电压为 2.5V，则相对于 器件 VSS，PACK+ = 17.5V。然后，如果在 CHG FET 被禁用时连接了充电器，并相对于 PACK– 在 PACK+ 上施

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

加完全充电电压，例如每节电池 4.3V 或 7 节电池包 30.1V，这会导致 PACK– 相对于 VSS 降至大约 –-12.6V。要使 CHG FET 保持禁用状态，其栅极电压必须降至接近此 –-12.6V 电平。

为了支持这种情况，BQ78709-Q1 中的 CHG FET 驱动器设计为通过在该引脚上包含一个串联 PFET 且其栅极连接到 VSS，能够承受相对于 VSS 引脚电压低至 –25V（推荐）的电压。当 CHG 驱动器被禁用时，该驱动器会将引脚电压拉低。当引脚电压接近 VSS 时，PFET 被禁用，从而使该引脚变为高阻抗。此时，CHG FET 上的外部栅源电阻器会将引脚电压拉低至 PACK– 电平，使 CHG FET 保持禁用状态。

下面显示了 CHG 和 DSG 驱动器关断情况下示波器捕获的波形，其中相应引脚驱动 CSD18532Q5B NFET 栅极，其典型 C_{iss} 为 3900pF。图 8-6 显示了在 DSG 引脚和 FET 栅极之间使用 1.35kΩ 串联栅极电阻器以及在 PACK+ 和 PACK– 之间连接 2A 负载时的信号。

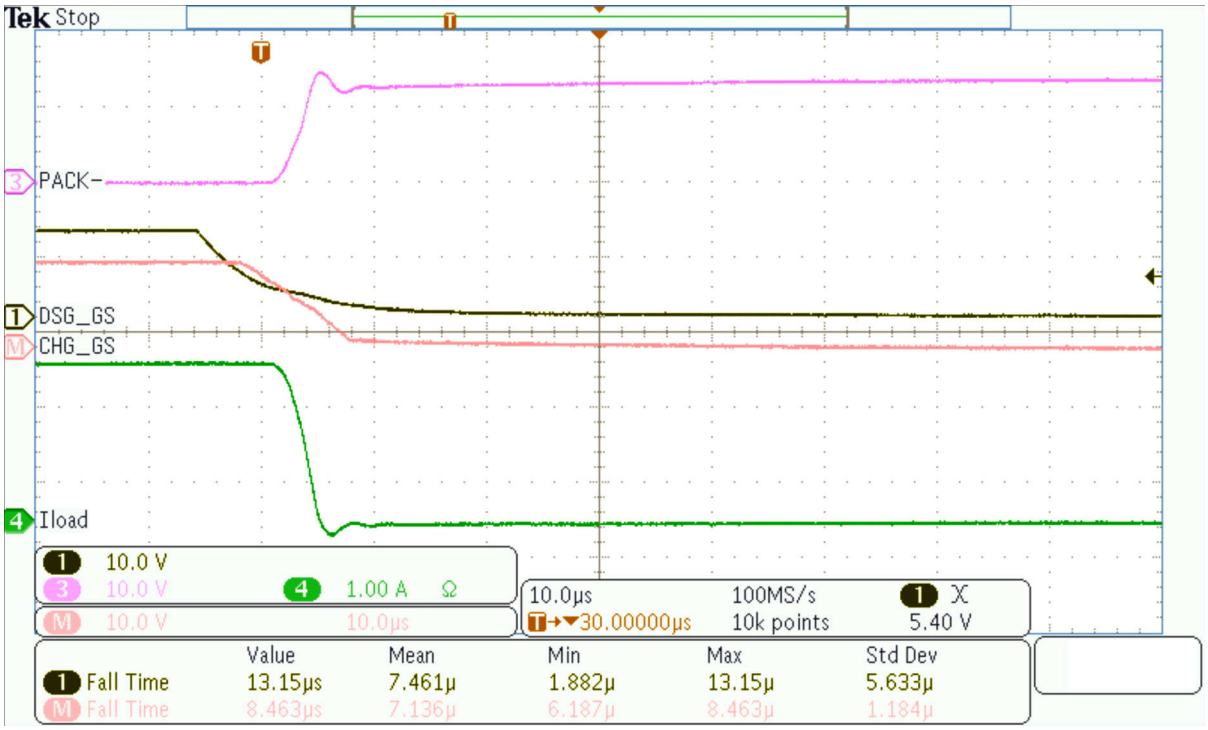


图 8-6. 中速 FET 关断，使用一个 1.35kΩ 串联栅极电阻器，并且 PACK+ 和 PACK– 之间具有 2A 负载。

图 8-7 显示了一个较慢的关断情况，其中使用一个 4.5kΩ 串联栅极电阻器且 PACK+和 PACK– 之间具有 2A 负载。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

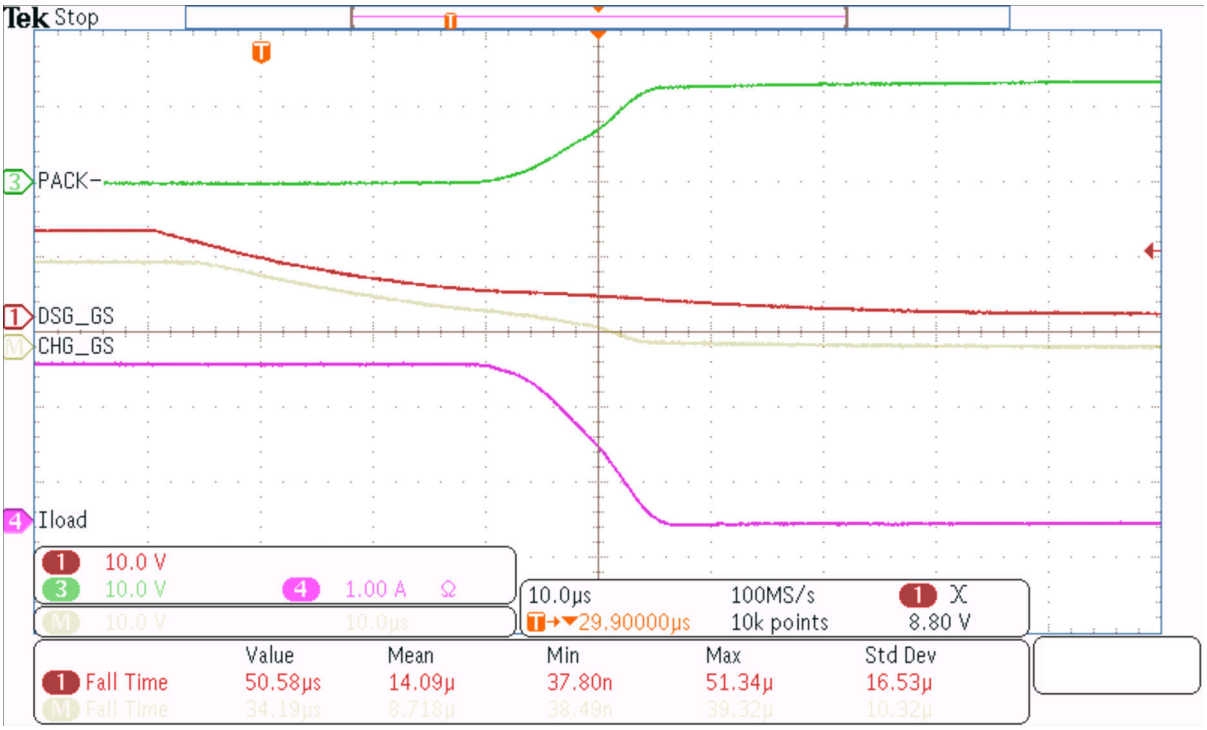


图 8-7. 使用 4.5kΩ 串联栅极电阻器时的较慢关断情况

图 8-8 显示了快速关断情况，其中在 DSG 引脚和 FET 栅极之间使用了一个 100Ω 串联栅极电阻器。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

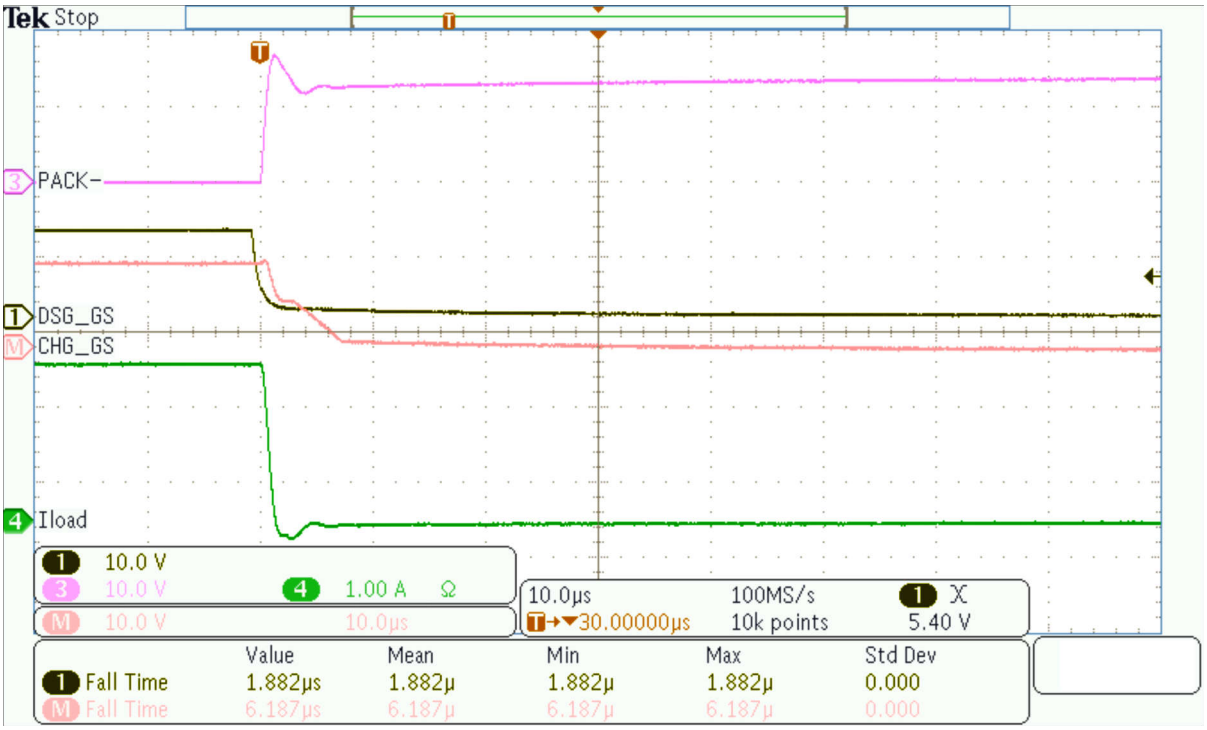


图 8-8. 使用 100Ω 串联栅极电阻器时的快速关断情况

8.2.7 未使用引脚的使用

特定应用中可能不需要某些器件引脚。下面介绍了这种情况下必须端接每个引脚时采用的方式。

表 8-3. 端接未使用的引脚

引脚	名称	建议
1-5、18 – 20	VC0 – VC7	电芯输入 1 和 7 应始终连接到实际电芯，其中电芯连接在 VC1 和 VC0 之间以及 VC6 和 VC7 之间。VC0 必须通过 PCB 上的电阻器和电容器连接到引脚 11 (VSS)。与未使用电芯相关的引脚（可以是电芯 2 至电芯 6，引脚 1 - 3、19、20）必须直接短接到相邻的 VC 引脚。所有 VC 引脚都必须连接到相邻的 VC 引脚或实际电芯（通过 R 和 C）。
6、7	SRP、SRN	如果未使用，这些引脚必须连接到引脚 11 (VSS)。
8	TS	如果未使用，此引脚必须连接到引脚 11 (VSS)。
9、10	DSG、CHG	如果未使用，这些引脚必须保持悬空。
12、13	SCL，SDA	如果未使用，这些引脚必须连接到引脚 11 (VSS)。
14、15	ALERT、REGOUT	如果未使用，这些引脚必须保持悬空。
16	REGSRC	如果 REGOUT 稳压器以及 CHG 和 DSG 驱动器均未使用，则此引脚必须连接到引脚 17 (BAT)。

8.3 电源相关建议

BQ78709-Q1 器件从 BAT 引脚获取其电源电流，该引脚通常通过串联二极管连接到电池组顶部，以防止器件内发生任何故障，从而导致大电池组意外充电。该器件包含一个串联电阻器和电容器，以对电阻组电压的快速变化进行低通滤波。在发生短路事件期间，在禁用保护 FET 之前，电池组电压可能会暂时拉至极低的电压。在这种情况下，BAT 引脚电容器上的电荷将暂时支持 BQ78709-Q1 器件的电源电流，以避免器件断电。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

REGSRC 引脚用作集成 REGOUT 客户稳压器以及 CHG 和 DSG FET 驱动器的电源电压。此引脚还可以通过二极管连接到电池组顶部，以类似地允许电压在短路事件期间保持更长时间。如果栈顶和 REGSRC 引脚之间配置一个二极管或任何串联电阻 (> 1Ω)，则建议在 REGSRC 至 VSS 引脚之间配置一个最小 1μF 的电容器。也可以将 REGSRC 引脚短接至 BAT 引脚，以便同一二极管和滤波器电路可以同时支持这两个引脚。不过，在这种情况下，REGOUT 引脚上的负载会更快地对 BAT 电容器放电，系统设计人员必须考虑这一点。

8.4 布局

8.4.1 布局指南

- 检测电阻上的开尔文连接质量至关重要。感应电阻器的温度系数不得大于 50ppm，以更大程度地减小电流测量随温度的漂移。选择检测电阻的值，使其与 BQ78709-Q1 器件可用的过流和短路范围相对应。只要确保良好的开尔文检测，就可以使用并联电阻。
- 对于系统电路，需要注意元件放置和布局的以下特性：差分低通滤波器和 I^2C 通信。
- BQ78709-Q1 器件使用积分 Δ-Σ 库仑计 ADC 进行电流测量。为了获得理想性能，从感应电阻器端子到器件的 SRP 和 SRN 输入之间必须包含 100Ω 电阻器，并在 SRP 和 SRN 引脚之间放置一个 0.1μF 滤波电容器。可以添加可选的 0.1μF 滤波电容器，为每个接地检测输入引脚进行额外的噪声滤波。所有滤波器元件必须放置在尽可能靠近器件的位置，而不是靠近检测电阻以及与滤波器电路并联的检测电路布线。滤波器网络周围还可以包含接地平面，以增加额外的抗噪能力。
- 感应电阻器与 SRP 和 SRN 端子之间的这些滤波器元件可以滤除噪声分量，但它们也会引入 RC 时间常数延迟，使用两个 100Ω 和一个差分 0.1μF 元件时标称值为 20μs。如果此延迟导致器件对短路事件的响应中额外增加了太多时间，则可以减小滤波器时间常数，但代价是会减少滤波。
- I^2C 时钟和数据引脚具有集成式 ESD 保护电路；但是，在每个引脚上添加齐纳二极管和串联电阻器可提供更强大的 ESD 性能。

8.4.2 布局示例

下面介绍了在 7 节串联电芯设计中使用 BQ78709-Q1 器件的电路布局示例。该设计实现了图 8-2 和图 8-3 所示的原理图，并使用 2.175 英寸 × 1.400 英寸 2 层电路卡组件，其中电芯连接在左侧边缘，而电池包连接在电路板的底部边缘。这里使用了宽布线区域，从而降低高电流路径的电压降。

如图 8-9 和图 8-10 所示，电路板布局布线包括电火，参考符号前缀 *E*。这些火花隙与电路板装配在一起，无需安装组件。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

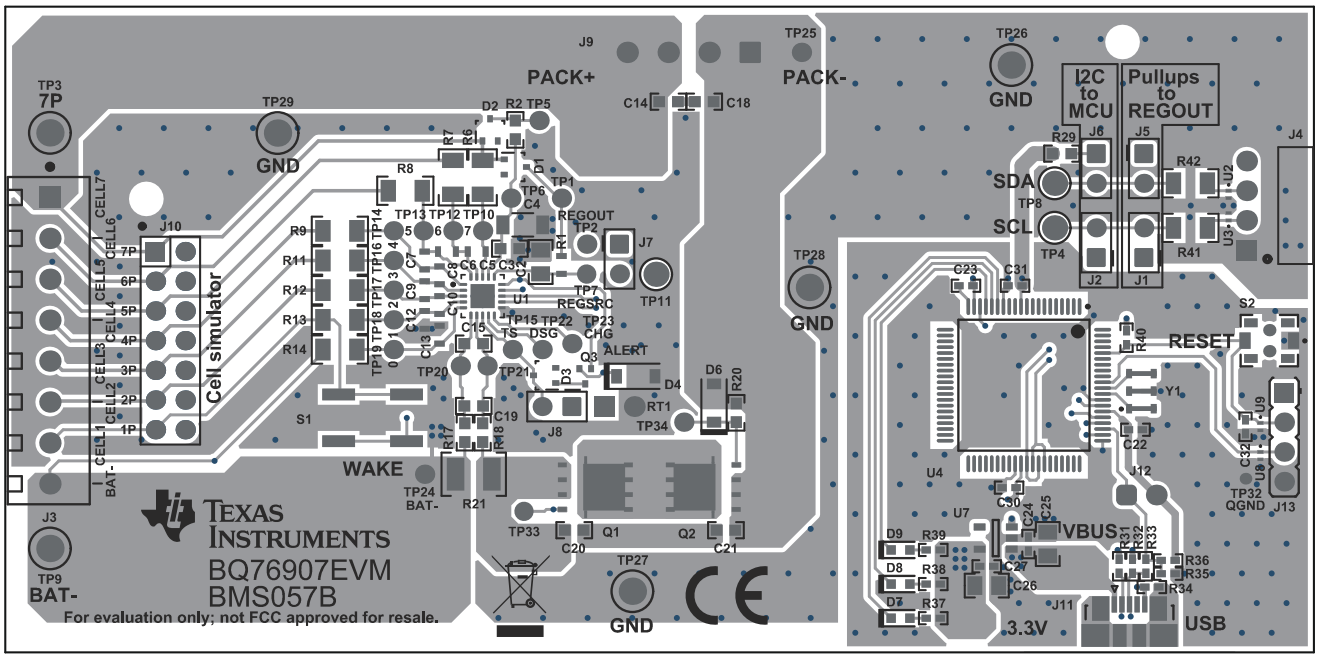


图 8-9. BQ78709-Q1 两层电路板布局布线 - 顶层

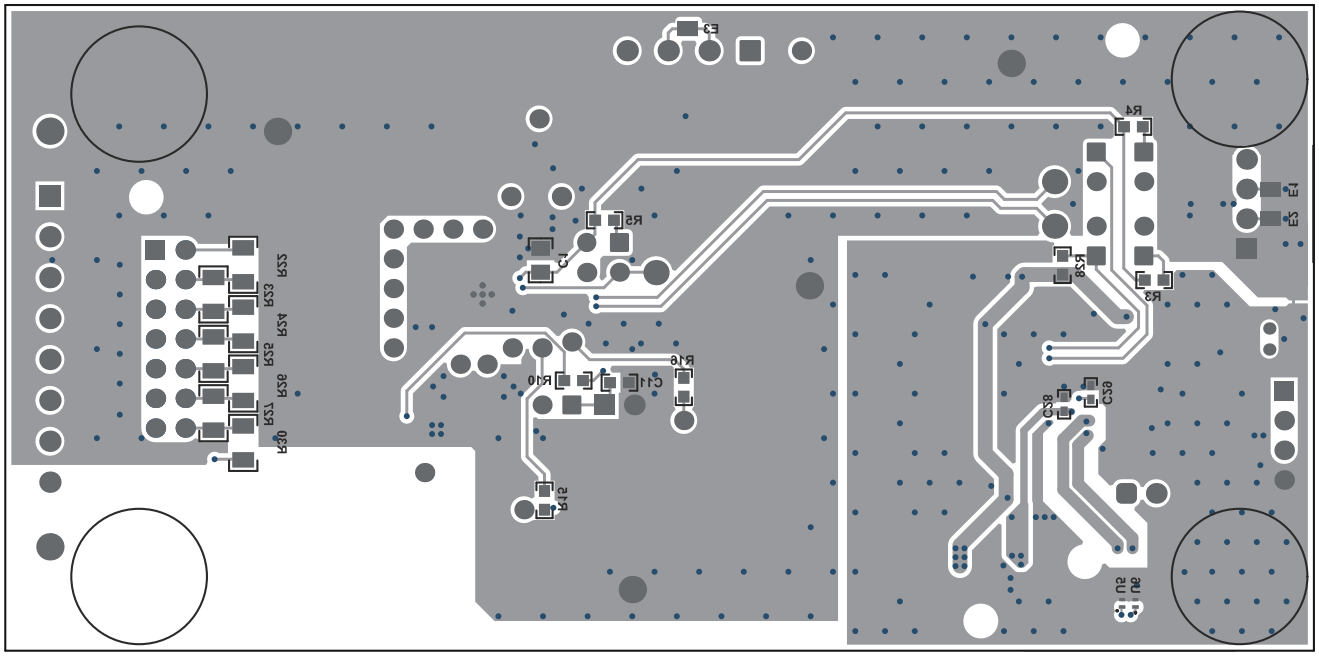


图 8-10. BQ78709-Q1 两层电路板布局布线 - 底层

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

9 器件和文档支持

TI 提供广泛的开发工具。下面列出了用于评估器件性能、生成代码和开发解决方案的工具和软件。

9.1 文档支持

9.1.1 相关文档

如需更多信息，请参阅以下相关文档：

- 德州仪器 (TI)，*BQ76907 技术参考手册*
- 德州仪器 (TI)，*BQ76907 评估模块用户指南*
- 德州仪器 (TI)，*Battery Management Studio (bqStudio) 软件*

9.2 接收文档更新通知

要接收文档更新通知，请导航至 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。

9.3 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。

9.4 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。

9.5 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。

9.6 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。

10 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

日期	修订版本	注释
May 2026	*	初始发行版

11 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。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

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)
BQ78709QRGRRQ1	Active	Production	VQFN (RGR) | 20	3000 | LARGE T&R	Yes	NIPDAU	Level-2-260C-1 YEAR	-40 to 125	709Q1

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

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

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

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

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

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

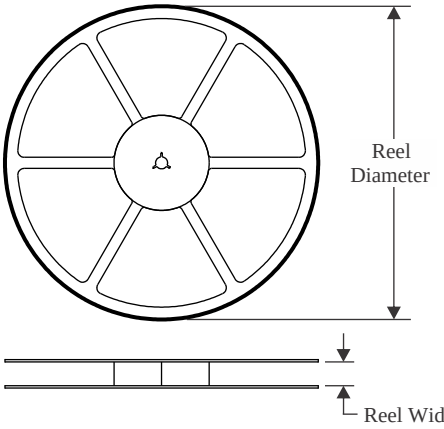
Multiple part markings will be inside parentheses. Only one part marking contained in parentheses and separated by a "~" will appear on a part. If a line is indented then it is a continuation of the previous line and the two combined represent the entire part marking for that device.

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

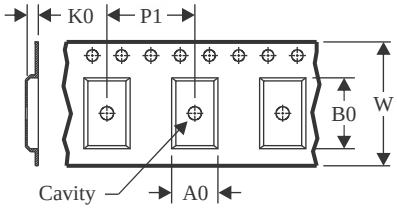
In no event shall TI's liability arising out of such information exceed the total purchase price of the TI part(s) at issue in this document sold by TI to Customer on an annual basis.

TAPE AND REEL INFORMATION

REEL DIMENSIONS

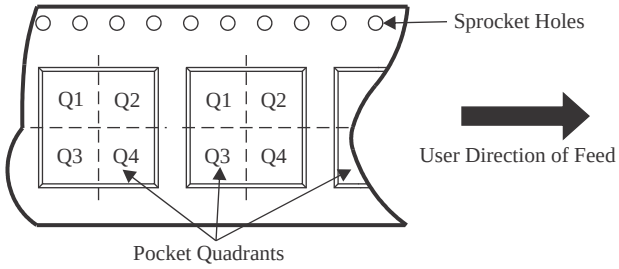


TAPE DIMENSIONS



A0	Dimension designed to accommodate the component width
B0	Dimension designed to accommodate the component length
K0	Dimension designed to accommodate the component thickness
W	Overall width of the carrier tape
P1	Pitch between successive cavity centers

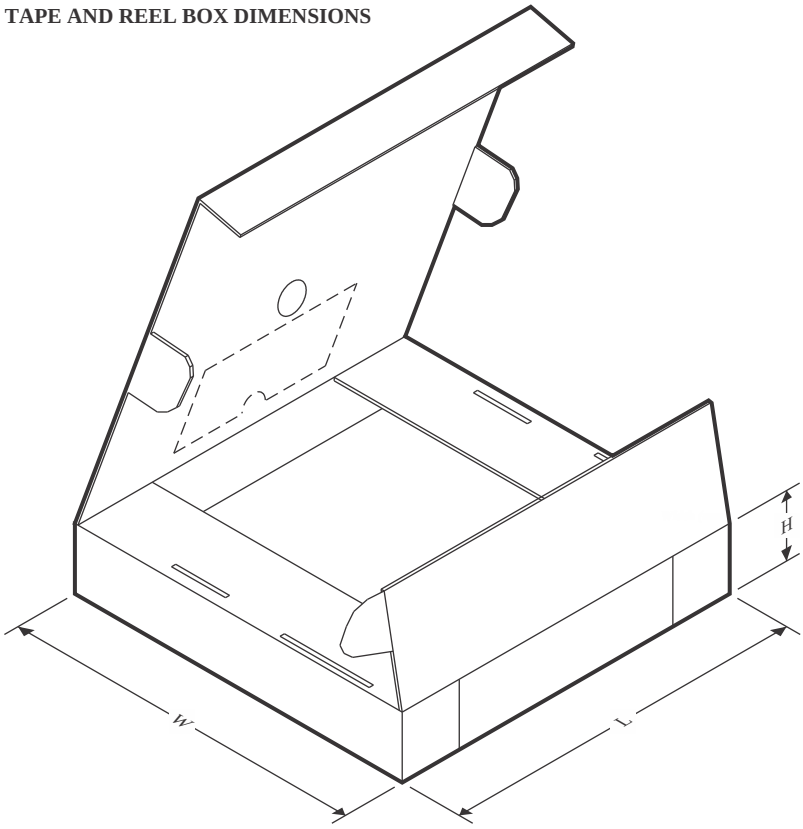
QUADRANT ASSIGNMENTS FOR PIN 1 ORIENTATION IN TAPE



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Reel Diameter (mm)	Reel Width W1 (mm)	A0 (mm)	B0 (mm)	K0 (mm)	P1 (mm)	W (mm)	Pin1 Quadrant
BQ78709QRGRRQ1	VQFN	RGR	20	3000	330.0	12.4	3.75	3.75	1.15	8.0	12.0	Q2

TAPE AND REEL BOX DIMENSIONS



*All dimensions are nominal

Device	Package Type	Package Drawing	Pins	SPQ	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)
BQ78709QRGRRQ1	VQFN	RGR	20	3000	360.0	360.0	36.0

GENERIC PACKAGE VIEW

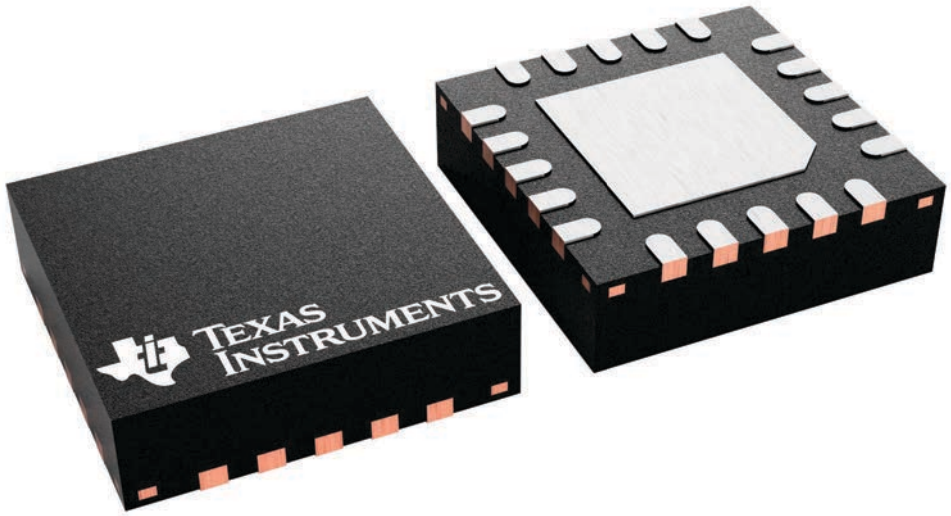
RGR 20

VQFN - 1 mm max height

3.5 x 3.5, 0.5 mm pitch

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD

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



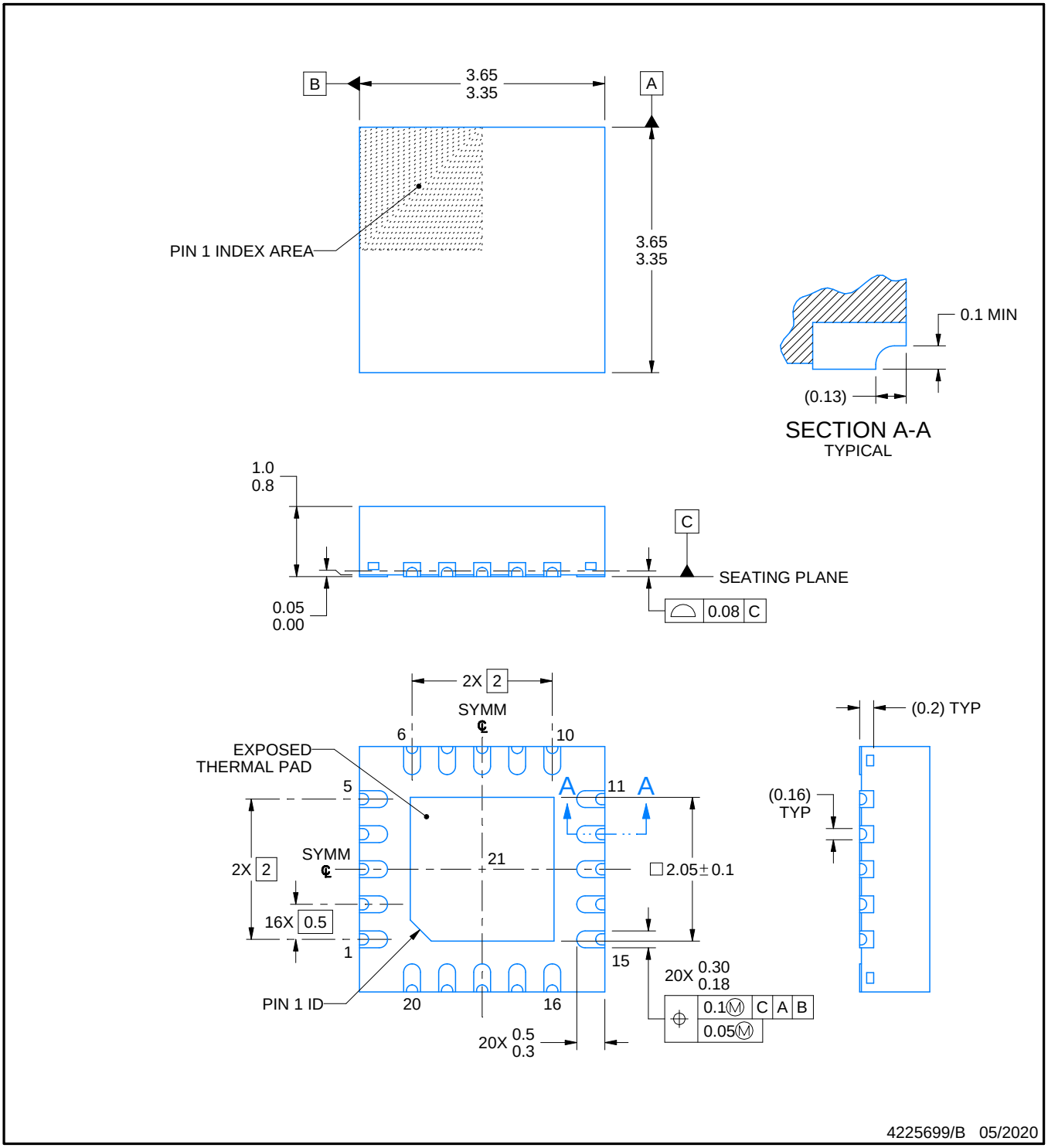
4228482/A

PACKAGE OUTLINE

RGR0020C

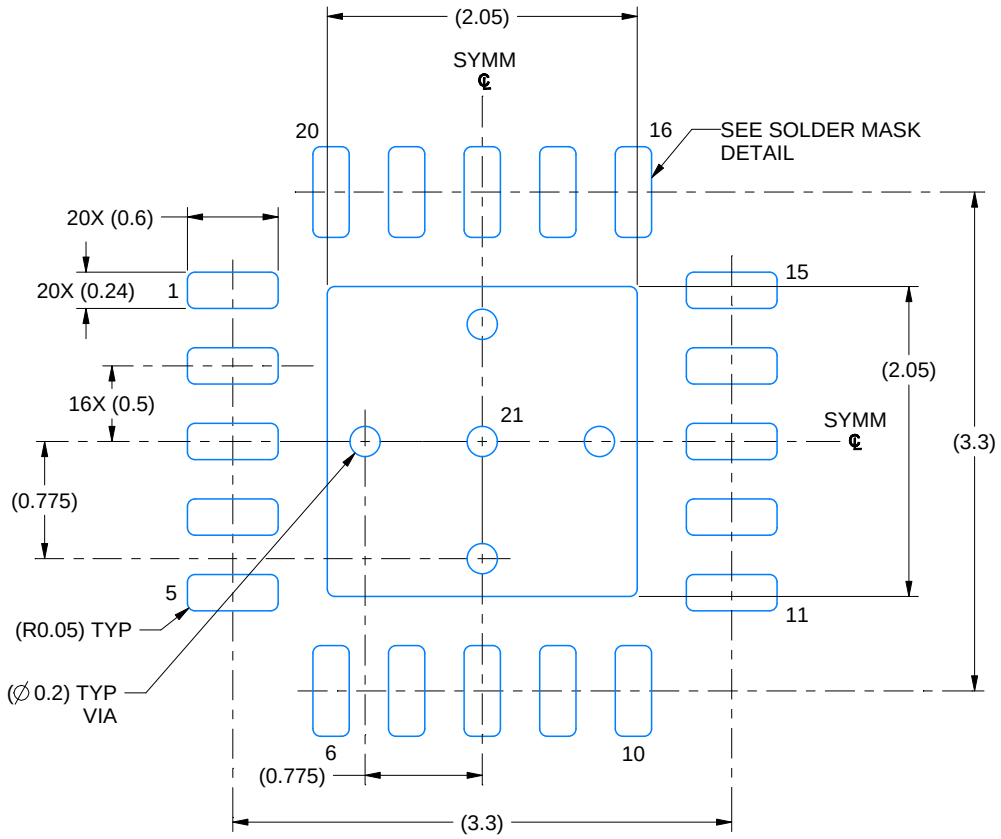
VQFN - 1 mm max height

PLASTIC QUAD FLATPACK - NO LEAD

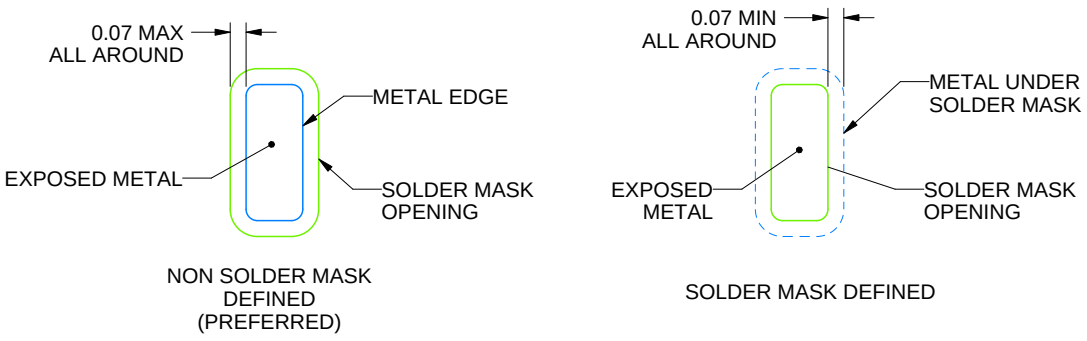


NOTES:

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.
3. The package thermal pad must be soldered to the printed circuit board for thermal and mechanical performance.



LAND PATTERN EXAMPLE
EXPOSED METAL SHOWN
SCALE: 20X

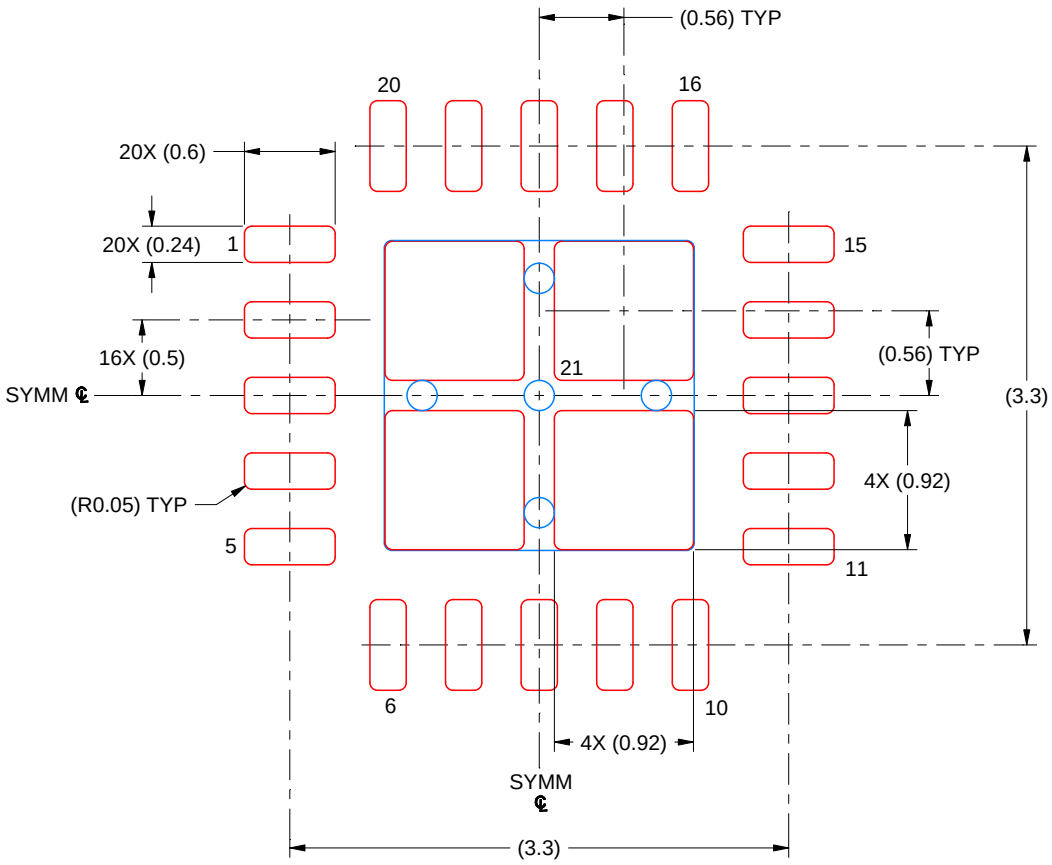


SOLDER MASK DETAILS

4225699/B 05/2020

NOTES: (continued)

4. This package is designed to be soldered to a thermal pad on the board. For more information, see Texas Instruments literature number SLUA271 (www.ti.com/lit/slua271).
5. Vias are optional depending on application, refer to device data sheet. If any vias are implemented, refer to their locations shown on this view. It is recommended that vias under paste be filled, plugged or tented.



SOLDER PASTE EXAMPLE
BASED ON 0.125 MM THICK STENCIL
SCALE: 20X

EXPOSED PAD 21
81% PRINTED SOLDER COVERAGE BY AREA UNDER PACKAGE

4225699/B 05/2020

NOTES: (continued)

6. 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出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