

Design Guide: TIDA-010931

耐辐射航天电池管理系统 (BMS) 参考设计



说明

此参考设计演示了航天级电池管理系统。该电路测量八节串联的电池，以监控电池运行状况、充电状态和温度。

资源

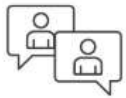
TIDA-010931	设计文件夹
MSP430FR5969-SP	产品文件夹
ADC128S102QML-SP	产品文件夹
TLV1H103-SEP	产品文件夹
TPS7H2211-SP	产品文件夹
TPS7A4501-SP	产品文件夹
LM4050QML-SP	产品文件夹
INA901-SP	产品文件夹
INA1H94-SP	产品文件夹
LMP7704-SP	产品文件夹
TMP9R00-SP	产品文件夹
LM117QML-SP	产品文件夹

特性

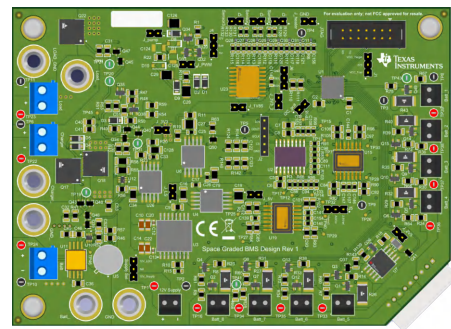
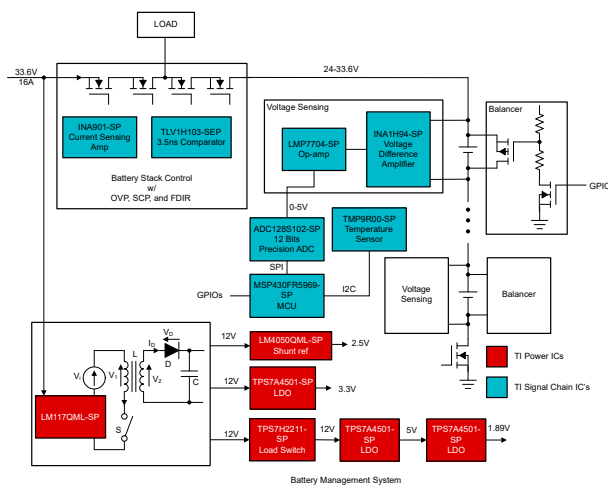
- 辐射性能 - 75krad / 72MeV
- 管理八节 4.2V 锂离子电池
- 电池监测精度： $\pm 1\text{mV}$ (电池 = 3V 至 4.2V)
- GPIO 控制型电池平衡电路
- 可扩展性，最多可测量 28 节电池
- 低漏电流： $0.02\ \mu\text{A}$
- 电路板尺寸： $5.5\text{in} \times 4\text{in}$

应用

- 航天器电池管理系统 (BMS)
- 卫星电力系统 (EPS)



请咨询我司 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

如表 2-1 和图 2-1 所示，TIDA-010931 参考设计包含许多子系统，包括：

- 电芯电压监测系统
- 电池电芯平衡器，可更大幅度地提高电池容量
- 用于监测电池电芯的温度传感器
- 电池组控制，可保护电池和负载免受过充和短路的影响

监控电池电压、电流和温度的能力具有许多价值主张。电池管理系统 (BMS) 提供了有关电池运行状况和充电状态的关键信息，这对于卫星保持可靠的能源至关重要。如今，锂离子电池是降低卫星成本和重量的关键，但仍然存在安全问题。

锂离子和与电池相关的易燃材料具有高能量密度，由于热失控、过度充电、平衡不当和发生短路，这种组合可能会造成危险。目前，没有已知能够检测电池运行状况和充电状态的耐辐射平衡器 IC 或监测 IC。为了减少电池电量和重量，应用需要提高电芯电压检测精度。太空中的 BMS 需要电池提供低漏电流，才能承受火箭发射的交货周期。此设计是一种分立式、自主和可靠的 BMS 方法，可提供高辐射性能、精确的电芯电压监测、快速过流保护、温度检测和平衡功能。

MSP430FR5969-SP MCU 测量电池特性（包括电流、电压和温度），并与 BMS 图形用户界面 (GUI) 通信。MSP430FR5969-SP 还用于为电源时序提供时序和逻辑，并为升压电路提供 PWM 开关信号。可以使用预先写入的固件对 MSP430FR5969-SP 进行编程，以实现与 BMS GUI 的兼容性。

该参考设计的电源设计使电源控制实现低漏电流能力。MSP430FR5969-SP 可启用和禁用不同的电源轨。

需要使用 12V 外部电源或八节电池包为 TIDA-010931 参考设计供电。该器件具有一个集成的电源，能够使用 LM117QML-SP、TPS7H2211-SP、LM4050QML-SP 和 TPS7A4501-SP 为每个子元件供电，从而创建不同的降压电压。有关确切电压和电源时序的详细信息，请参阅 [设计注意事项](#) 部分。

2 系统概述

表 2-1 详细说明了系统规格。

表 2-1. 系统规格

参数	值	单位
电源	12 或从电池包	V
电池电芯数	8	-
电池电芯电压	3 - 4.2	V
漏电流	0.02	μA
电池电芯电压精度	±1	mV
平衡器电流	120 至 169	mA

表 2-2 列出了跳线和接头说明。

表 2-2. 跳线和接头说明

参数	网络名	说明
电源	12V 电源	12V 电源
	电源选择	选择来自电池输出或外部 12V 电源的输入电源
JTAG	JTAG	JTAG 连接
PWM 控制寄存器	J_PWM	PWM 输入
输入/输出控制	J 泵	电荷泵输入
	Charger	充电器输入
	电池	八芯电池包输入
	负载	负载输出
电压电源	J_LS	启用到电路其余部分的负载
	J4	用于电池泵的 12V 或 5V 电源
	J_5V	将 LDO 和 5V 负载分开
	J_1V85	将 LDO 和 1.85V 负载分开
	J_3V3	将 3.3V LDO 输出与 MSP430FR5969-SP 分开
	J_3V3_2	将 3.3V LDO 和 ADC128S102-SP 分开
	J_2V5	将 LDO 和 2.5V 负载分开
通信	J_heater	分配用于打开或关闭电池加热器的 GPIO
	J6	温度控制通信
	J2	用于连接到数字分析仪的 ADC 通信
电池监测	J5	通过 2.5Vref 校准实现电压平衡
	电池 1	连接到电池电芯 1
	电池 2	连接到电池电芯 2
	电池 3	连接到电池电芯 3
	电池 4	连接到电池电芯 4
	电池 5	连接到电池电芯 5
	电池 6	连接到电池电芯 6
	电池 7	连接到电池电芯 7
温度监测	电池 8	连接到电池电芯 8
	传感器 1	温度传感器 1
	传感器 2	温度传感器 2
	传感器 3	温度传感器 3
	I2C_pull	启用 TMP9R00-SP I2C 3.3V 上拉

表 2-3 列出了测试点和预期值。

表 2-3. 测试点说明和预期值

网络名	说明	预期值
TP1	12V 电源	12V
TP2	地	0V
TP3、TP4、TP5、TP6、 TP8、TP9、TP10、TP43	地	0V
TP7	电池 4 检测放大器输出	0.565V - 4.552V
TP11	负载电压	24V
TP12	电池 7 检测放大器输出	0.565V - 4.552V
TP13	电池 3 检测放大器输出	0.565V - 4.552V
TP14	电池 6 检测放大器输出	50.565V - 4.552V
TP15	电池 2 检测放大器输出	0.565V - 4.552V
TP16	电池输出电压	33.6V
TP17	电池 8 检测放大器输出	0.565V - 4.552V
TP18	电池 1 检测放大器输出	0.565V - 4.552V
TP19	栅极电压	27V
TP20	短路保护栅极电压	30mV
TP21	栅极电压	5V
TP22	充电器电压输入	28V
TP23	负载电压	28V
TP24	电池输出电压	33.6V
TP25	电池 8 检测第一个放大器输出	2.5V
TP26	电池 4 检测第一个放大器输出	2.5V
TP27	电池 7 检测第一个放大器输出	2.5V
TP28	电池 3 检测第一个放大器输出	2.5V
TP29	电池 6 检测第一个放大器输出	2.5V
TP30	电池 2 检测第一个放大器输出	2.5V
TP31	栅极电压	26.88V
TP32	电池 5 检测放大器输出	5V
TP33	电池 5 输入电压	21V
TP34	电池 7 输入电压	29.4V
TP35	电池 6 输入电压	25.2V
TP36	电池 4 输入电压	16.8V
TP37	电池 3 输入电压	12.6V
TP38	电池 2 输入电压	8.4V
TP39	电池 1 输入电压	4.2V
TP40	电池 5 检测第一个放大器输出	2.5V
TP41	电池 7 平衡器	29.4V
TP43	地	0V
TP45	INA901-SP 输出	0.6V
TP46	INA901-SP 输出	0.6V

2.1 方框图

图 2-1 所示为 TIDA-010931 系统方框图。

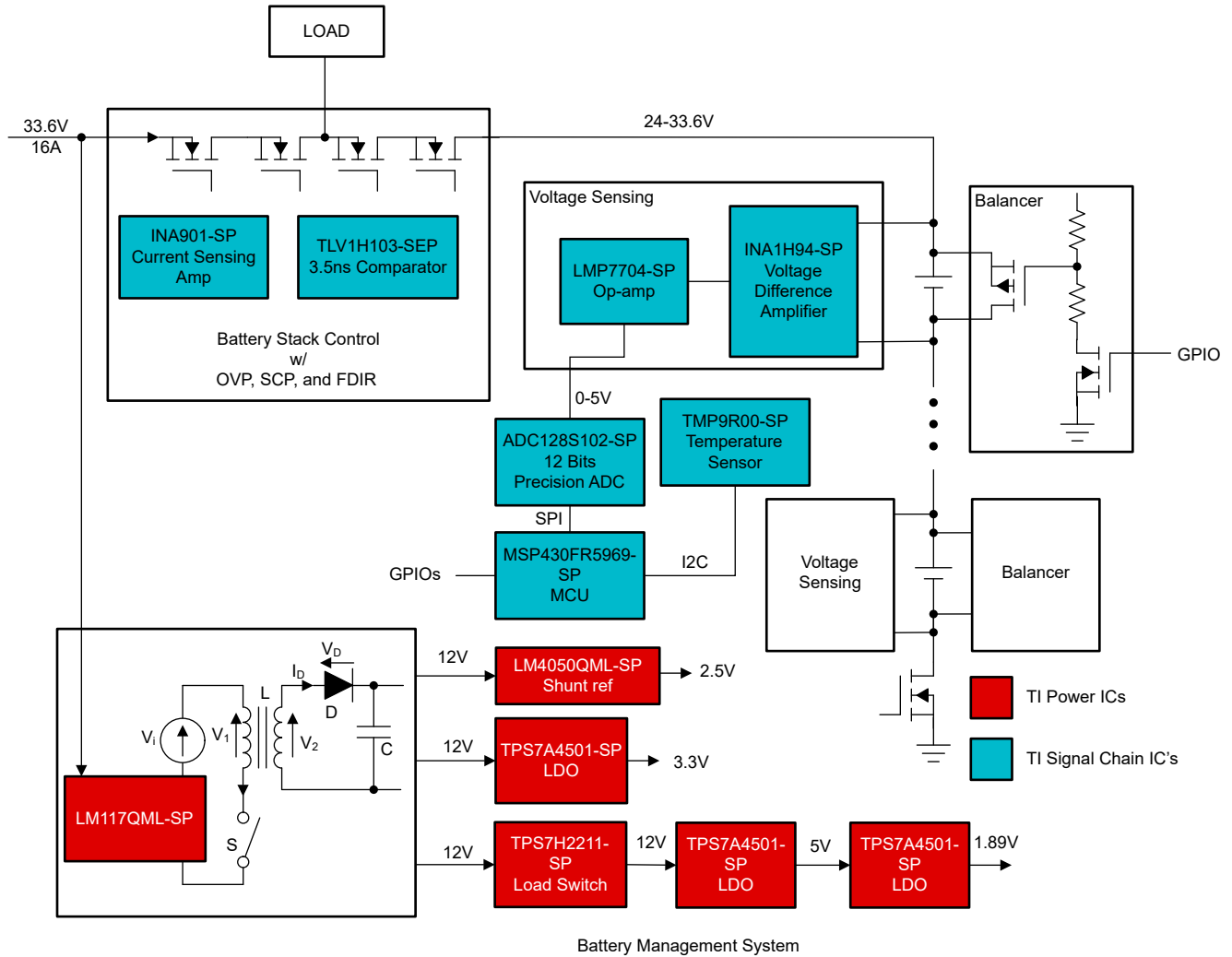


图 2-1. 方框图

2.2 设计注意事项

以下各节介绍了参考设计中基于终端应用的子系统的基本设计注意事项。

2.2.1 系统控制和处理

TIDA-010931 系统控制和处理基于 MSP430FR5969-SP MCU 的特性集和功能。MSP430FR5969-SP 连接不同的专用器件，可检测电池温度、电流和电压，并根据测量结果调整系统功能。

MSP430FR5969-SP 还为非稳压升压控制器电路提供 PWM 开关信号。升压电路通过 N-MOSFET 实现，可实现快速关断能力。升压稳压器的右栅极电压可以使用 N-MOS 短接至地。

2.2.2 电池电芯监测

此参考设计旨在支持八节标准锂离子 4.2V 电池。此参考设计中使用了 LM117QML-SP 线性稳压器，以便将 33.6V 电池输出降至 12V。LM117QML-SP 的最大额定输入电压为 40V。如果需要更多电池电芯，则需要不同的降压转换器。

电池电芯监测旨在监测 3V 至 4.2V 范围内的电池电芯电压。在 INA1H94-SP 之后更改 LMP7704-SP 放大器电路的增益，可以适应更宽的范围。这种电阻变化也需要通过 SCISwitchValueChanged 函数反映在 BMS GUI 中。

电池监测电路（请参阅图 2-2）首先利用精密单位增益差分放大器 INA1H94-SP 来准确测量两节电池的电压。INA1H94-SP 可在出现高达 150V 共模信号时精确测量小差分电压。R97 电阻器用于更改增益。LMP7704-SP 用于调整信号的共模和范围，以更大程度地提高 ADC 输入的动态范围。输出发送到 MCU 并显示在 GUI 上。

在本设计中，INA1H94-SP 由单电源供电，从而增加一个 2.5V 基准。该 IC 没有轨到轨输入或输出，需要使用满足共模范围的基准。数据表指定内部放大器上的电压在电源电压的 1.5V 范围内。为满足这一要求，选择了 2.5V 基准，但低至 1.5V 的基准是可以接受的。

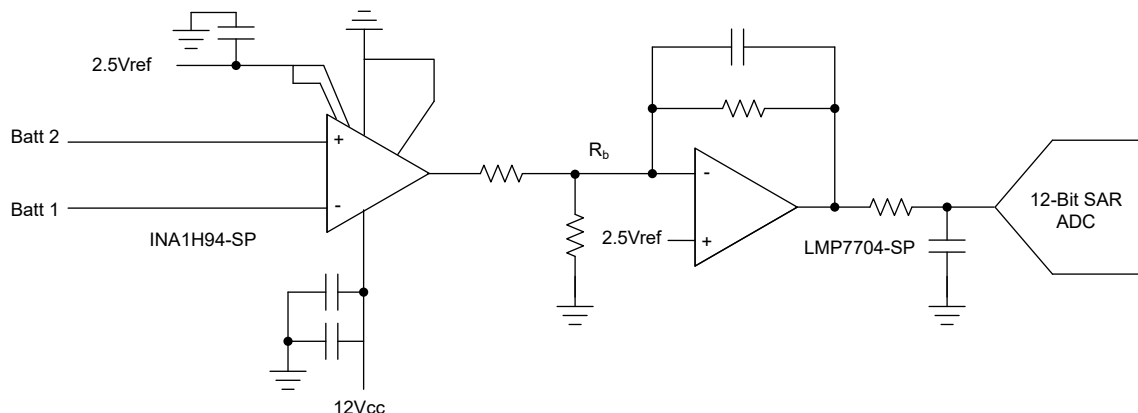


图 2-2. 电池监测

2.2.3 温度检测

温度检测在监测电池寿命和确保正常运行方面发挥着至关重要的作用。图 2-3 展示了温度检测电路。TMP9R00-SP 可在本地监测 -55°C 至 125°C 的温度，并远程监测 -55°C 至 150°C 的温度。TMP9R00-SP 可支持八个远程通道，最大总电压为 6V。本地和远程传感器均用 12 位数字编码表示温度测量值

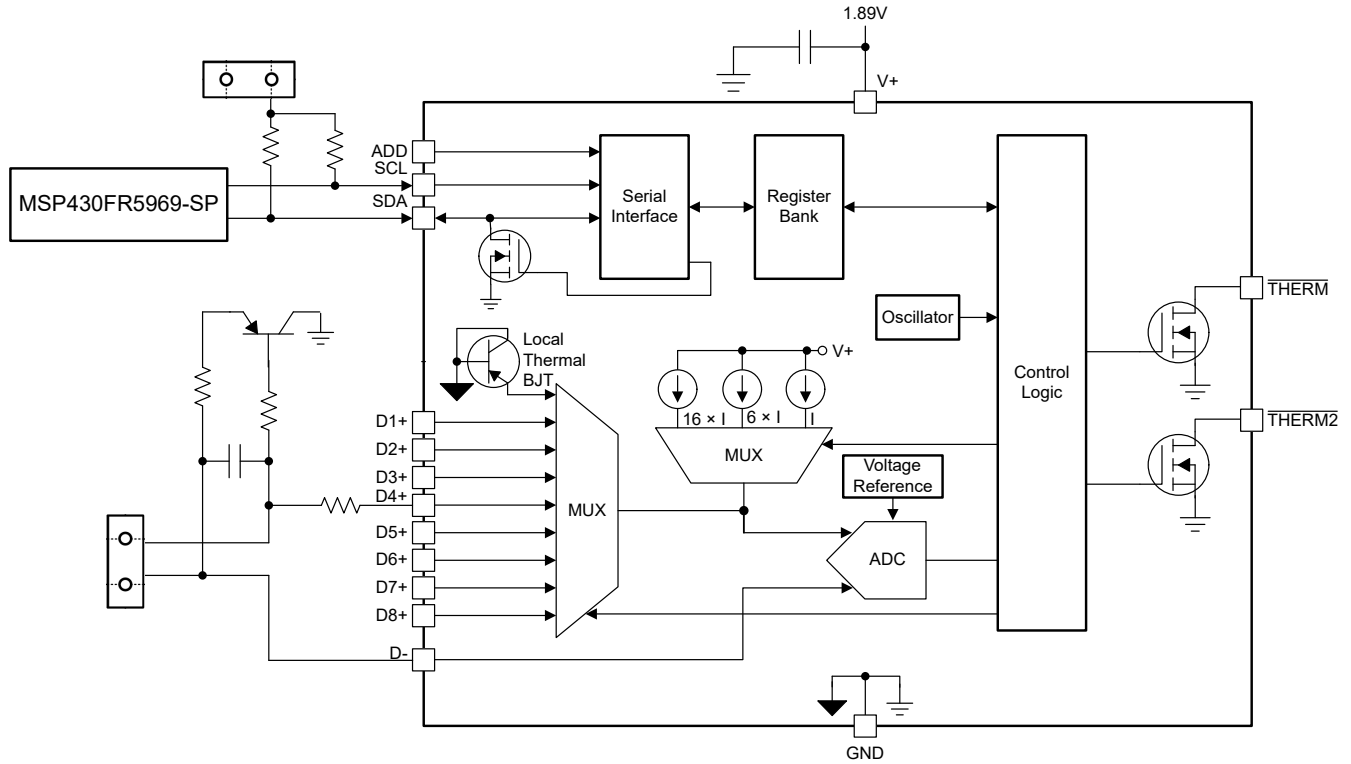


图 2-3. 温度检测

2.2.4 电池栈控制

INA901-SP 是一款电流检测放大器，具有 20V/V 的内置增益，允许使用更小的电流检测电阻，从而更大幅度地减小检测电阻上的压降和功率损耗。INA901-SP 与 TLV1H103-SEP 电压比较器配对使用以驱动 MCU (请参阅图 2-4) 。

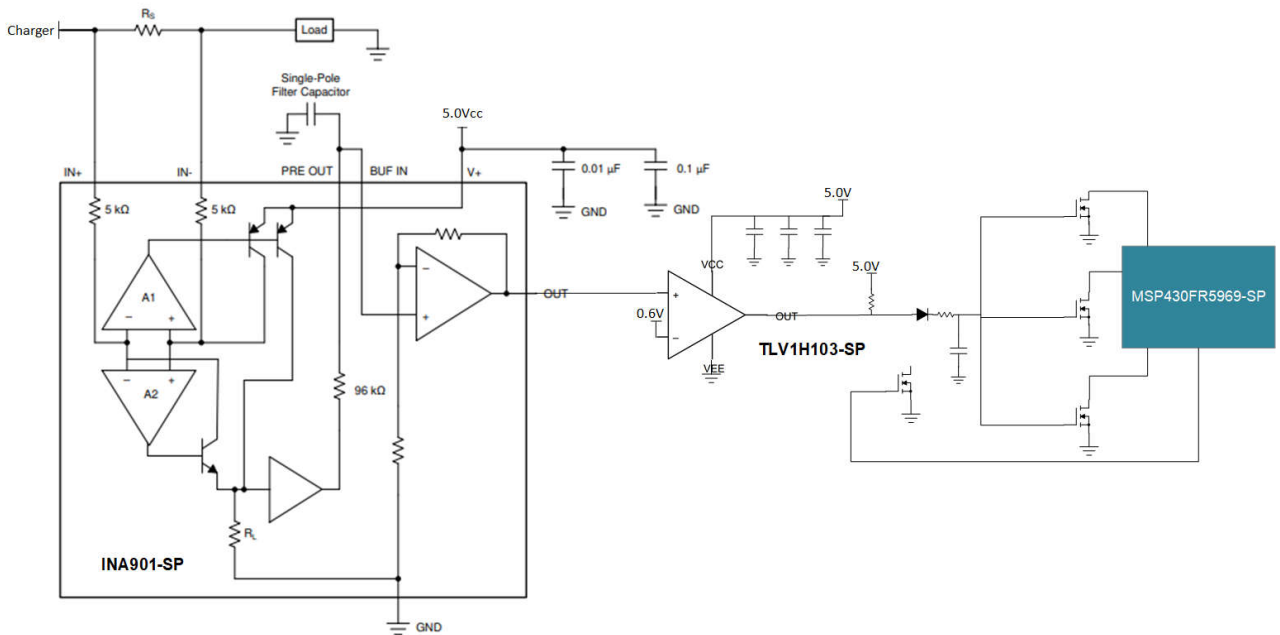


图 2-4. 短路保护

2.2.5 电池平衡

电池电芯平衡功能在每个电池电芯的容量和性能方面发挥着重要作用。该系统 (参阅图 2-5) 包括一个低复杂性被动平衡设计。当 MCU 的 GPIO 为低电平时, 不会发生平衡; 因此, 不会从电池电芯汲取电流。当 MCU 的 GPIO 为高电平时, 晶体管导通, 从电池电芯汲取的电流约为 15mA。

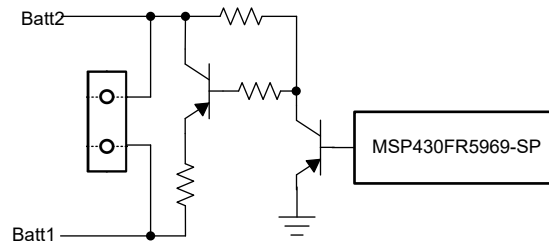


图 2-5. 电池平衡

2.2.6 电源树和电源时序

图 2-6 展示了包含四个主要元件的电源树：TPS7H4010-SEP、LM4050QML-SP、TPSH2211-SP 和 TPS7A4501-SP。

LM117QML-SP 集成电路可将电池包的电压 (33.6V) 转换为 12V。LM117QML-SP 是一款易于使用的宽输入范围 1.5A 线性稳压器, 专为各种应用而设计。LM4050QML-SP 是一款航空级 2.5V 并联电压基准, 用于为电池电芯监测提供低噪声基准。TPS7A4501-SP 是一款可调节低压降稳压器, 用于将电压从 12V 转换为 3.3V, 将 12V 转换为 5V, 以及将 5V 转换为 1.89V。MSP430 可以启用或禁用电源的每个部分, 以减少不使用时的电流消耗。

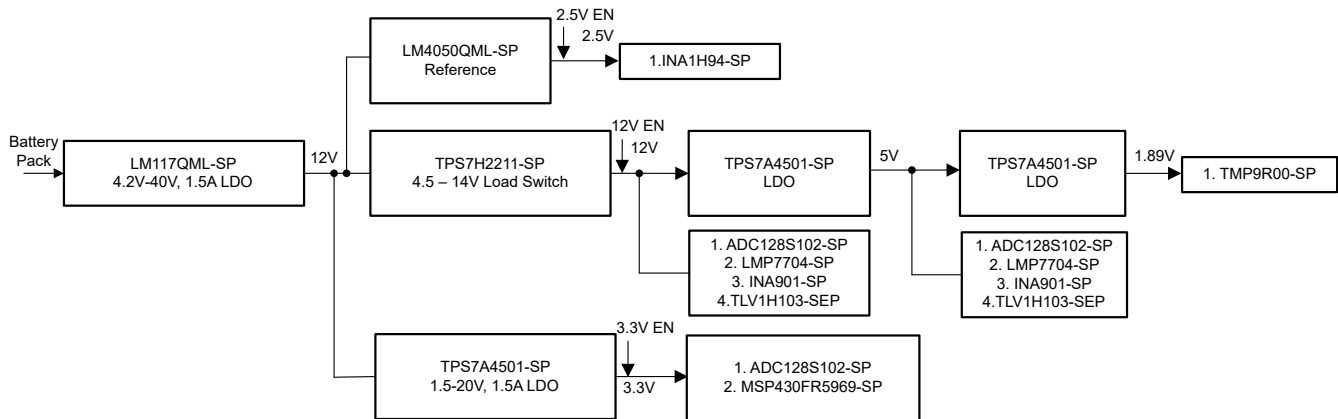


图 2-6. 电源管理

2.3 主要产品

本节介绍了电池组控制、处理、平衡、温度检测和监控参考设计中使用的主要产品。

TIDA-010931	设计文件夹
MSP430FR5969-SP	产品文件夹
ADC128S102QML-SP	产品文件夹
TLV1H103-SEP	产品文件夹
TPS7H2211-SP	产品文件夹
TPS7A4501-SP	产品文件夹
INA901-SP	产品文件夹
INA1H94-SP	产品文件夹
LMP7704-SP	产品文件夹
TMP9R00-SP	产品文件夹
LM117QML-SP	产品文件夹
LM4050QML-SP	产品文件夹

2.3.1 MSP430FR5969-SP

MSP430™ 超低功耗 (ULP) FRAM 平台将独特的嵌入式 FRAM 和整体超低功耗系统架构相结合，支持创新人员以较低能源预算提升性能。FRAM 技术完美融合了静态随机存取存储器 (SRAM) 的速度、灵活性和耐用性与闪存的可稳定性和可靠性，功耗极低。

MSP430FR5969-SP 的超低功耗架构可提供七种低功耗模式，这七种模式均经过优化，能够在低功耗的情况下对系统进行分布式遥测和辅助控制。

MSP430FR5969-SP 具有集成的混合信号特性，非常适合下一代航天器中的分布式遥测应用。对单粒子门锁的强大抗干扰性和电离辐射总剂量使得该器件得以应用于多种空间和辐射环境中。

2.3.2 ADC128S102QML-SP

ADC128S102 器件是一款低功耗、8 通道、CMOS、12 位模数转换器，具有 50kSPS 至 1MSPS 的转换吞吐率。该转换器基于逐次逼近寄存器架构，并具有内部追踪保持电路。该器件经配置可接收多达八路输入信号 (IN0 至 IN7) 。

串行数据输出采用标准二进制，兼容多个标准 (如 SPI、QSPI、MICROWIRE) 和许多常见的 DSP 串行接口。

ADC128S102 可由独立的模拟和数字电源供电。模拟电源 (VA) 的电压范围为 2.7V 至 5.25V，数字电源 (VD) 的电压范围为 2.7V 至 VA。使用 3V 或 5V 电源的正常功耗分别为 2.3mW 和 10.7mW。使用 3V 和 5V 电源时，断电特性可分别将功耗降至 0.06μW 和 0.25 μW。

2.3.3 TLV1H103-SEP

TLV1H103-SEP 是一款 325MHz 高速比较器，具有轨到轨输入和 2.5ns 的传播延迟。这款比较器可快速响应，并具有宽工作电压范围，非常适合雷达成像和通信有效载荷系统中的窄信号脉冲检测和数据与时钟恢复应用。

与替代高速差分输出比较器相比，TLV1H103-SEP 的推挽（单端）输出可以简化 I/O 接口的板对板布线并节省相关成本，同时能够降低功耗。此外，TLV1H103-SEP 还具有可调迟滞控制和输出锁存功能等特性。该比较器可以直接连接下游电路中的大多数现行数字控制器和 IO 扩展器。

TLV1H103-SEP 采用高速互补 BiCMOS 工艺，并提供 6 引脚封装。

2.3.4 TPS7H2211-SP

TPS7H2211-SP 是一款单通道电子保险丝（具有附加功能的集成 FET 负载开关），可提供反向电流保护、过压保护和可配置的上升时间，以便更大限度减少浪涌电流（软启动）。此器件包含一个可在 4.5V 至 14V 输入电压范围内运行的 P 沟道 MOSFET，并且支持最大 3.5A 的持续电流。

开关由可与低压控制信号直接连接的打开和关闭输入 (EN) 控制。过压保护和软启动可通过 OVP 和 SS 引脚使用很少的外部组件进行编程。TPS7H2211-SP 采用具有外露散热焊盘的陶瓷和塑料封装，可提高散热性能。QML 5962R1822001VXC 提供了标准微电路图 (SMD)。-SEP 型号提供了供应商项目图 (VID)，V62/23609。

2.3.5 TPS7A4501-SP

TPS7A4501-SP 是一款针对快速瞬态响应进行了优化的低压降 (LDO) 稳压器。59621222402VHA 在压降为 300mV 时可提供 750mA 的输出电流。5962R1222403VXC 在压降为 320mV 时可提供 1.5A 的输出电流。静态电流受到很好的控制，与很多其他稳压器一同工作时一样，它在压降时不上升。除了快速至 20V 瞬态响应，TPS7A4501-SP 稳压器还具有极低的输出噪声，使得该器件成为灵敏射频电源应用的理想选择。

2.3.6 INA901-SP

INA901-SP 是一款电压输出、电流检测放大器，可在独立于电源电压的 -15V 至 65V 共模电压中感应分流电阻上的压降。INA901-SP 由单个 2.7V 至 16V 电源供电，消耗 700 μ A (典型值) 电源电流。

INA901-SP 的增益为 20V/V。130kHz 带宽简化了电流控制环路中的使用。其引脚排列可充分支持滤波。

该器件具有 -55°C 至 +125°C 的扩展额定工作温度范围，并且采用 8 引脚 CFP 封装。

2.3.7 INA1H94-SP

INA1H94-SP 是一款耐辐射精密单位增益差动放大器，此放大器有一个非常高的输入共模电压范围。该器件是一款单一、单片器件，此器件包括一个精密运算放大器和一个集成型薄膜电阻器网络。INA1H94-SP 可在出现高达 ± 150 V 共模信号时精确测量小差分电压。

在很多无需电流隔离的应用中，INA1H94-SP 可以取代隔离放大器。这个功能可以免除对于昂贵隔离输入侧电源的需要并去除相关的纹波、噪声、和静态电流。INA1H94-SP 具有出色的 0.0005% 典型非线性和 500kHz 带宽，因此该器件是传统隔离放大器的理想选择。

2.3.8 LMP7704-SP

LMP7704-SP 是一款精密放大器，具有低输入偏置、低失调电压、2.5MHz 增益带宽积和宽电源电压。该器件耐辐射，可在 -55°C 至 +125°C 的军用级温度范围内运行。

该放大器具有高直流精度等特性，特别是 $\pm 60\mu\text{V}$ 的低偏移电压和 $\pm 500\text{fA}$ 的超低输入偏置，因此非常适合连接具有高输出阻抗的精密传感器。该放大器可配置为换能器/传感器、电桥、应变仪和跨阻放大。

2.3.9 TMP9R00-SP

TMP9R00-SP 器件是一款使用双线制 SMBus 或 I²C 兼容接口的耐辐射、多区域、高精度且低功耗的温度传感器，最多可同时监控八个远程温度区域和一个本地温度区域，从而在一个系统中聚合温度测量值，降低设计复杂性。典型用例是监控不同大功率器件的温度，如 MCU、GPU、ADC、DAC 和 FPGA。由于包括串联电阻抵消、可编程理想因子、温度偏移校正和温度限制等高级功能，因此可提供稳健的热监控设计。

每个远程通道和本地通道都具有两个独立可编程的阈值，会在对应的温度超过限值时触发。可编程迟滞设置可避免阈值切换。

TMP9R00-SP 器件可提供高测量精度 ($\pm 1.5^\circ\text{C}$) 和高测量分辨率 (0.0625°C)。该器件支持低电压轨 (1.7V 至 2.0V) 和通用双线制接口 (1.7V 至 3.6V)，工作温度范围为 55°C 至 125°C，远程结温范围为 -55°C 至 150°C。

2.3.10 LM117QML-SP

LM117QML-SP 3 端子正电压线性稳压器能够在 1.2V 至 37V 输出范围内提供 0.5A 或 1.5A 的电流。该器件简单易用，并且仅需要 2 个外部电阻器即可设置输出电压。

该稳压器是悬空的并且仅检测输入到输出差分电压，因此，只要不超过最大输入到输出差分电压，就可以调节几百伏特的电源电压。

经飞行验证的 LM117QML-SP 可提供电流限制、热过载保护和安全区保护等完整的过载保护功能。该器件用途广泛，还可用作可调节开关稳压器、可编程输出稳压器和精密电流调节器等。

2.3.11 LM4050QML-SP

LM4050QML 精密电压基准采用 10 引线陶瓷 CLGA 封装。LM4050QML 采用的设计无需使用外部稳定电容器，同时可确保 25°C 时容性负荷下的稳定性，这使得 LM4050QML 非常易于使用。LM4050-2.5QML 具有 60 μA 最小和 15mA 最大工作电流。LM4050-5.0QML 具有 74 μA 最小和 15mA 最大工作电流。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

此参考设计需要五个硬件：

1. 12V 电源：需要外部 12V 电源，并通过 TIDA-010931 参考设计 *Batt_Out* 电源连接器进行连接
2. TIDA-010931：航天电池管理系统参考设计板
3. MSP430 编程器和调试器：用于编程的 JTAG 调试探头
4. USB 转 TTL 串行电缆：用于 BMS GUI 和 TIDA-010931 之间的 SCI 通信
5. 八芯电池包或电池仿真器

3.2 软件要求

需要三个软件：Code Composer Studio™ 集成式开发环境 (IDE)、BMS 固件和 BMS GUI。

Code Composer Studio™ IDE 支持 TI 的 MCU 和嵌入式处理器产品系列。需要使用软件对 MSP430FR5969-SP 进行编程。该流程从初始化 GPIO、PWM、SPI、SCI 和 ADC 开始，然后进入由 GUI 控制的无穷环路。程序首先等待接收 GUI 命令。然后根据收到的命令执行工作，并返回到环路的开头以执行下一条 GUI 命令。

将固件加载到 MSP430FR5969-SP 后，TIDA-010931 可通过 USB 转 TTL 串行电缆连接到计算机。此电缆可在 MATLAB® GUI 与 TIDA-010931 之间连接串行通信接口 (SCI)。然后，GUI 根据 MCU 的反馈显示每个电池电芯的电压和电流。图 3-1 显示了 GUI 屏幕。

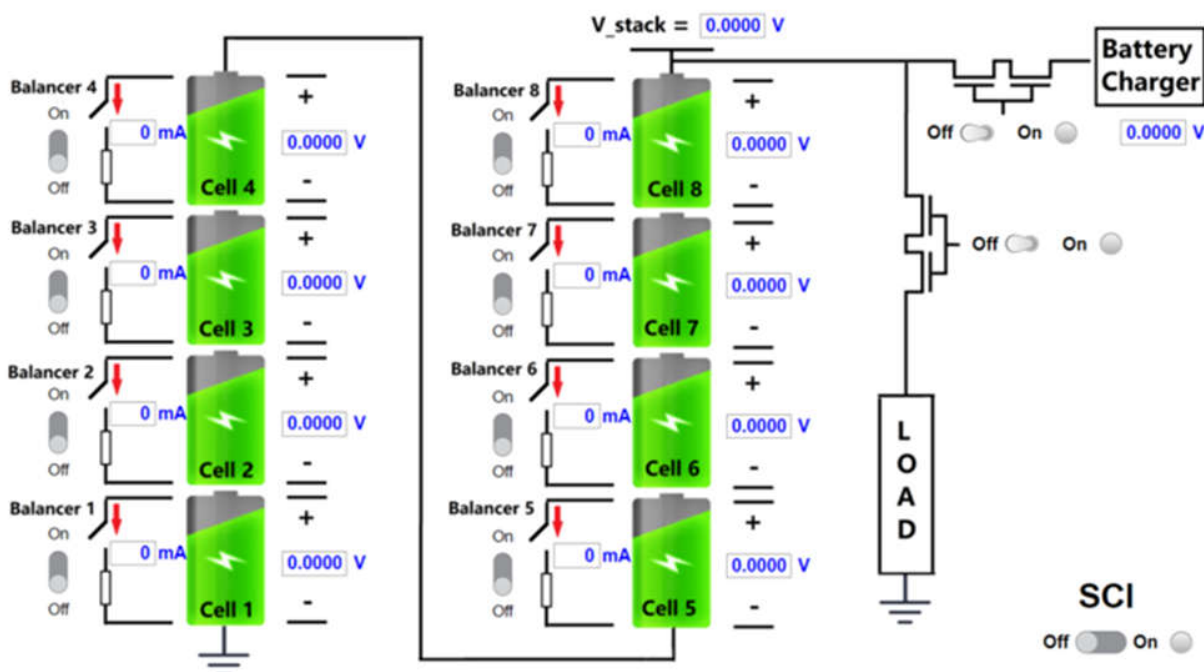


图 3-1. TIDA-010931 GUI

3.3 测试设置

TIDA-010931 可通过提供的固件和 GUI 轻松实现参考设计。要设置 BMS，请按照以下步骤操作：

1. 准备所有必需的硬件和软件
2. 为 TIDA-010931 提供 12V 电压。有两个选项：
 - a. 使用电池的输出为 BMS 供电，并选择 *电源选择* 跳线上的 *12V_LDO* 引脚
 - b. 使用 12V 直流电压电源并选择 *电源选择* 跳线上的 *12V_Supply* 引脚
3. 将 MSP430 调试探头连接到 TIDA-010931 JTAG 接头
4. 使用 Code Composer Studio 对 MSP430 MCU 进行编程
5. 将 JTAG 接头和 USB 转 TTL 串行电缆连接到 PC
 - TTL 串行电缆有四个连接器，分别为红色、绿色、白色和黑色。只有绿色、白色和黑色连接器连接到 JTAG，如图 3-2 所示
6. 安装并运行 BMS MATLAB GUI
7. 在 GUI 中，输入 SCI COM 编号并点击 *Connect* 按钮。连接后，将出现绿色指示灯，GUI 就可以控制 TIDA-010931
8. 通过测量 *5VCC* 引脚的输出并更新 GUI 上的值来校准 GUI。通过参考板上的位置 *J5* 并点击 GUI 上的 *cal* 按钮来校准 *2.5Vref*。

仅连接黑色、绿色和白色连接器，如图 3-2 所示。红色连接器可以保持断开状态。

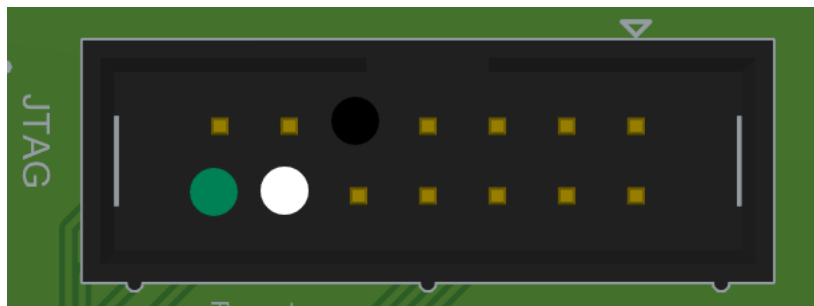


图 3-2. TTL 串行电缆与 JTAG 连接

3.4 测试结果

图 3-3 展示了偏移校准后的电池电芯监测误差。对于 3.0V 至 4.2V 的电池电压，误差小于 $\pm 1\text{mV}$ 。

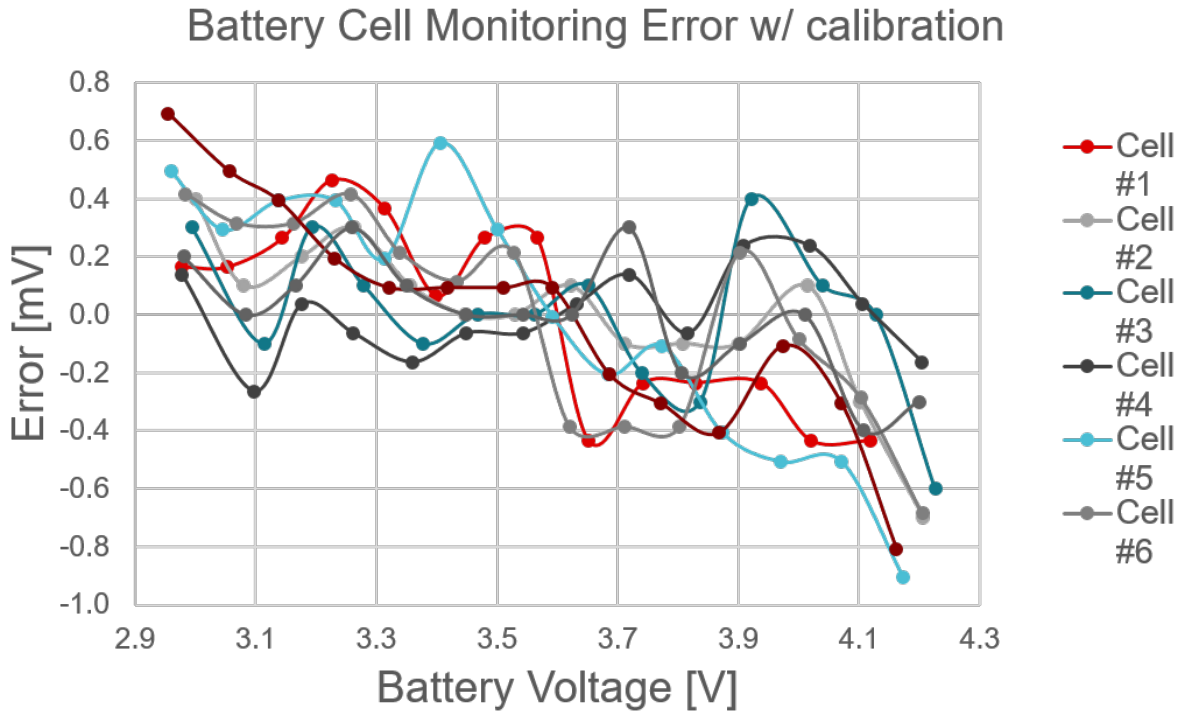


图 3-3. 电池电芯监控误差

图 3-4 所示为在 $4.56\ \mu\text{s}$ 延迟时间内关闭电源时的短路保护。

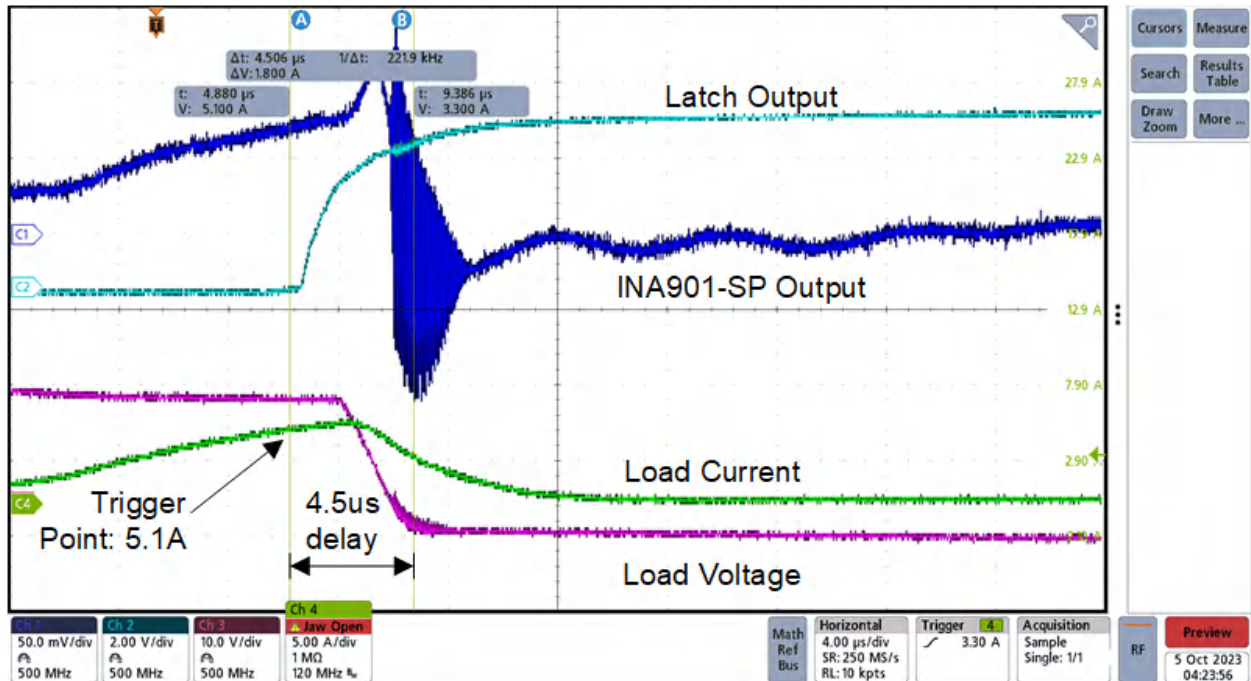


图 3-4. 短路保护

4 设计和文档支持

4.1 设计文件

4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010931](#) 中的设计文件。

4.1.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010931](#) 中的设计文件。

4.2 工具与软件

工具

MSP430 调试器	用于固件编程的调试器
USB 转 TTL 电缆	GUI 连接电缆参考设计

软件

BMS GUI

4.3 文档支持

- 德州仪器 (TI)，[MSP430FR5969-SP 耐辐射混合信号微控制器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[ADC128S102QML-SP 耐辐射 8 通道、50kSPS 至 1MSPS、12 位模数转换器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TLV1H103-SEP 具有 2.5ns 传播延迟的抗辐射高速比较器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS7H2211-SP 和 TPS7H2211-SEP 耐辐射保障 \(RHA\) 14V、3.5A 电子保险丝数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TPS7A4501-SP 低压降稳压器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[共模范围为 -15V 至 65V 的 INA901-SP 耐辐射单向电流分流监控器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[INA1H94-SP 耐辐射高共模电压差分放大器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[LMP7704-SP 具有低输入偏置和宽电源电压范围的耐辐射加固保障 \(RHA\)、精密 RRIO 放大器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[TMP9R00-SP 9 通道 \(8 条远程通道和 1 条本地通道\) 高精度温度传感器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[LM117QML-SP RHA 4.25V 至 41.25V 3 端子可调稳压器数据表](#)
- 德州仪器 (TI)，[LM4050QML 精密低功耗并联电压基准数据表](#)

4.4 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](#)。

4.5 商标

TI E2E™, MSP430™, and Code Composer Studio™ are trademarks of Texas Instruments.

MATLAB® is a registered trademark of The MathWorks, Inc.

所有商标均为其各自所有者的财产。

5 作者简介

BHAVIKA KAGATHI 是德州仪器 (TI) 的系统工程师，负责开发太空系统程序。Bhavika 自 2023 年以来一直在 TI 工作。Bhavika 在伊利诺伊大学厄巴纳-香槟分校获得生物工程理学学士学位和工程硕士学位。

重要通知和免责声明

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

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

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

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司