

Andrew Soukup, Florian Mueller, Julian Hagedorn

### 摘要

智能电表备用电源的一个参考设计采用了低功耗降压/升压转换器；该转换器既可对双重超级电容器阵列进行充电，还具有输出调节功能，因此简化并降低了总体成本。该设计为仪表的高功率射频通信提供高达 2A 的输出电流，并提供可调节的充电限制以减少系统发热问题。

### 内容

1 系统说明.....	2
2 系统概述.....	3
3 测试结果.....	12
4 参考文献.....	15
5 修订历史记录.....	15

### 插图清单

图 2-1. PMP30693 方框图.....	3
图 2-2. TPS63802 功能方框图.....	5
图 2-3. LM66100 功能方框图.....	5
图 2-4. 具有 LM66100 的电源 ORing.....	6
图 2-5. PMP30693 的简化方框图.....	6
图 2-6. 峰值电流运行，反向电流.....	7
图 2-7. 停止对备用电容充电的一般实现方案.....	7
图 2-8. 稳态条件下的备用电容器电压.....	8
图 2-9. 超级电容器电压监控器的实现方案原理图.....	8
图 2-10. 电流限制电路实现方案的简化原理图.....	8
图 2-11. 用于计算备用时间的典型 GSM 负载曲线.....	9
图 2-12. 在备用运行期间实现 PFM 模式的自动更改.....	10
图 2-13. 主动电池平衡实现方案.....	10
图 2-14. 输出电压调节实现方案.....	11
图 3-1. PMP30693 的简化方框图.....	12
图 3-2. 备用电容器的预充电和充电.....	12
图 3-3. 备用运行.....	13
图 3-4. 正常稳态运行.....	14

### 表格清单

表 2-1. PMP30693 参考设计规格.....	4
-----------------------------	---

### 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 系统说明

可靠性和从电网中断状态快速恢复的能力是智能电网的基本要求。具有先进抄表基础设施 (AMI) 网络的智能电表必须能够在没有主电源的情况下持续运行一小段时间以提醒公用事业运营商已发生停电，并提供一个清晰的地图以指明实际的服务中断范围。这样一来，运营商就能够诊断根本原因，部署资源并安排人员来修复问题，以及尽快为用户恢复服务。

这一系统要求让智能电表的开发人员面临设计挑战。电表必须有足够的本地能量存储空间，能够在足够长的时间内为 AMI 网络供电，以便所有电表端点都能够向公用事业中心机构报告自身的状态；这一过程会需要几分钟时间，具体取决于所涉及的地理和网络拓扑。

在采用射频 (RF) 网状拓扑的 AMI 网络的常见情况下，每个电表节点都可充当任何其他节点返回中央机构的桥梁，因此，要求变得很清晰。为了确保任何断电的节点都能够报告停电状态，其他所有节点都必须准备好充当桥梁，并使断电通知“跳跃”到数据集中器前端系统或网状结构中的下一个节点。因此，在停电后的这段时间内，所有电表节点都必须完全正常运行。

为了满足这一要求，智能电表通常使用超级电容器来存储所需的能量。超级电容器提供每  $\text{cm}^3$  的良好能量密度，并在主电源恢复后立即轻松充电，因此与电池相比是更常见的选择。

智能电表开发人员必须平衡好系统在停电期间所需的可用能量与超级电容器及其所需充电和输出调节电路的系统成本。这种平衡的关键点在于尽可能增大从每个超级电容器中提取的可用能量。

本应用报告将详细介绍电表备用电源的拟议架构；该架构使用低功耗降压/升压转换器来管理超级电容器的充电并为系统提供最大可用能量。本应用手册是 [PMP30693 参考设计](#) 的配套文档。

## 2 系统概述

图 2-1 所示为备用电源系统图。TPS63802 低功耗降压/升压转换器既可用于超级电容器充电器，又可用于输出电压稳压器（为无线通信子系统提供能量）。LM66100 理想二极管在超级电容器放电期间提供反向阻断保护。拟议的备用电源架构的优点包括：

- 通过消除单独的超级电容器充电电路来降低系统成本。
- 支持公共运营商蜂窝调制解调器（例如 LTE/3G/GPRS）或私有 ISM 频段通信网络，因为输出电压高达 5V 且峰值输出电流为 2A（3.3V 时）。
- 可在高于主电源轨的电压下为超级电容器充电，这会增加可用的备用能量。
- 在停电的情况下，充电模式和放电模式之间的无缝转换可确保快速无中断地切换到备用电源。
- 可编程的充电电流限制作为可选的特性提供。
- 2S 超级电容器阵列的主动电池平衡功能作为可选特性提供。

### 2.1 方框图

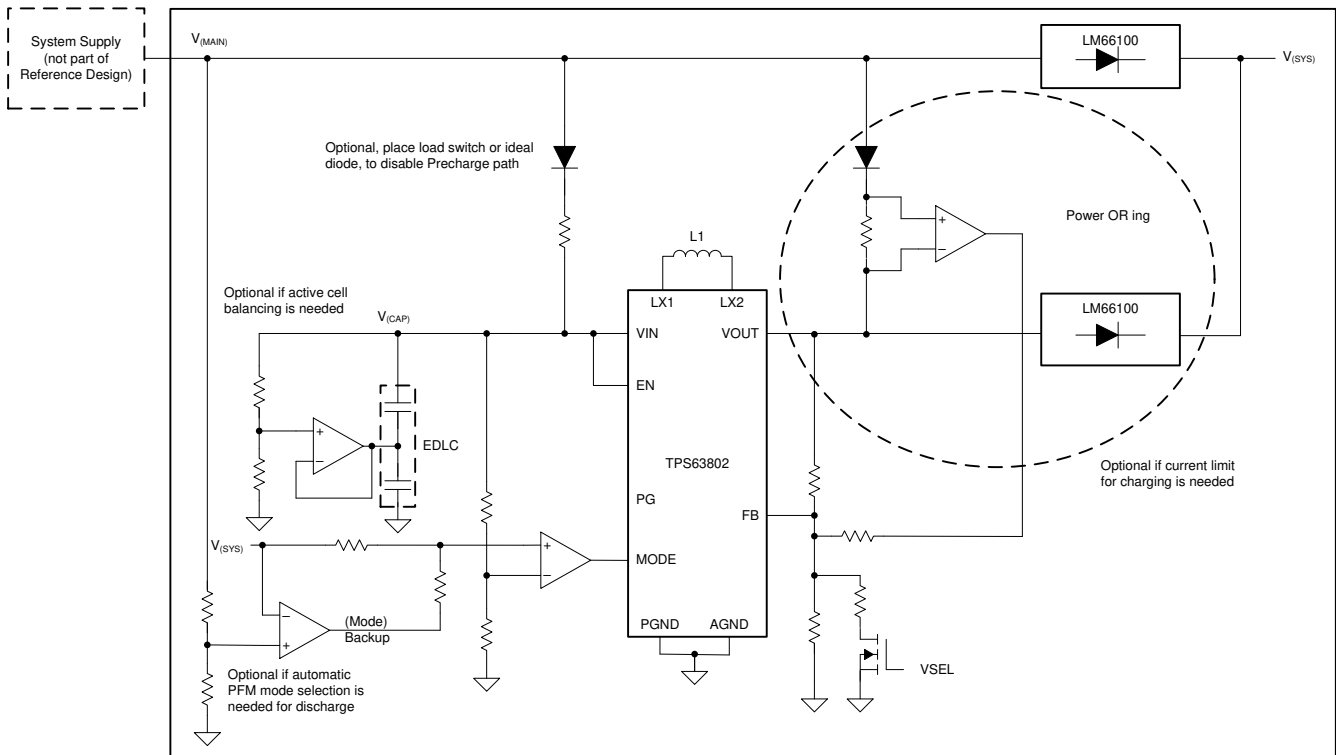


图 2-1. PMP30693 方框图

### 2.2 设计注意事项

此设计提供了一种从超级电容器中提取最大能量的有效方法，并为射频子系统提供所需的电压和电流。GPRS 或 GSM 系统需要高达 2A 的峰值电流，持续时间为几百微妙。LTE 传输需要高达 1A 的峰值电流。在正常运行期间，该能量需要由主电源提供。如果主电源无法提供所需的峰值电流，或完全失效，备用电源系统就会介入。

所选的 TPS63802 能够通过超级电容器在宽输入电压范围内提供大于 2A 的电流。主电源和备用电源之间的转换会自动无缝进行。当系统电压下降到某个阈值以下时（通常比系统电压低 100mV），降压/升压转换器开始开关操作。所需的能量从超级电容器转移到系统。

TPS63802 降压/升压转换器具有已确定的达 -900mA 的反向峰值电流限值，因此平均充电电流约为 1.2A。但是，如果主电源无法为系统和超级电容器充电操作提供足够的电流，则需要限制充电电流。例如，这种主电源可以是 TPS7A78 交流/直流线性稳压器。PMP30693 参考设计还包括一个基于 INA181 的可选电路，用于将充电电流的最小值限制在 50mA。

降压/升压转换器的反向电流操作可将超级电容器电压升高到高于主电源的电压。这一情况再加上 1.3V 的低输入电压，意味着 TPS63802 会使用存储在超级电容器中的大部分能量。

此参考设计遵循以下规格，请参阅表 2-1。

**表 2-1. PMP30693 参考设计规格**

参数	规格	单位	说明
V(MAIN)	0 至 5，典型值为 3.9	V	在备用情况下，此值为 0V。此处，系统电源电压为 3.9V。
V(SYS)	3.3V 至 5V，典型值为 3.9V	V	
V(CAP)	0 至 5.4	V	此处限值为 5V (已充电)。
V(BACKUP)	3.8 (典型值)	V	TPS63802 编程的输出电压需要略低于 V(MAIN) 以允许充电。
电容	12.5	F	2x 25F 串联。
备用时间	>100	s	带脉冲的负载曲线。
电容预充电电流	50 (典型值)	mA	可通过电阻进行配置。
电容充电电流 (受限)	>-50	mA	受限的电容充电电流。
电容充电电流, 最大值 (不受限)	-900	mA, 峰值	平均电流约为 1.1A。
电容放电电流, 最大值	2.0	A	
V(SYS) 时的负载曲线	311	mA, 平均值	GSM 负载曲线。
V(SYS) 输出压降	200	mV, 最大值	在备用情况下。

## 2.3 主要产品

PMP30693 设计中包括的 TPS63802 器件是一款高效率、低  $I_q$ 、双向降压/升压直流/直流转换器，可将超级电容器充电至 5.4V 以及放电至 1.3V。LM66100 理想二极管用于主系统电源与来自超级电容器的备用电源之间的反向电流阻断和电源 Oring。低成本 INA181 用于控制和限制超级电容器充电电流，而低成本运算放大器 TLV52x 用作电压监控器并用于主动电池平衡。

### 2.3.1 TPS63802 : 2A 输出电流、高效率、低 $I_Q$ 降压/升压转换器

输入电压高于、等于或低于输出电压时均可使用 TPS63802 器件。在宽电压范围内支持高达 2A 的输出电流。在升压和降压模式下，器件的峰值电流限值分别为 4.5A 和 3.5A。器件调整为已编程的输出电压。TPS63802 器件采用 2mm × 3mm 封装。该器件可与微型无源组件配套使用，从而使整体解决方案尺寸保持小巧。TPS63802 降压/升压转换器使用四个内部开关在所有可能的工作条件下保持同步电源转换。

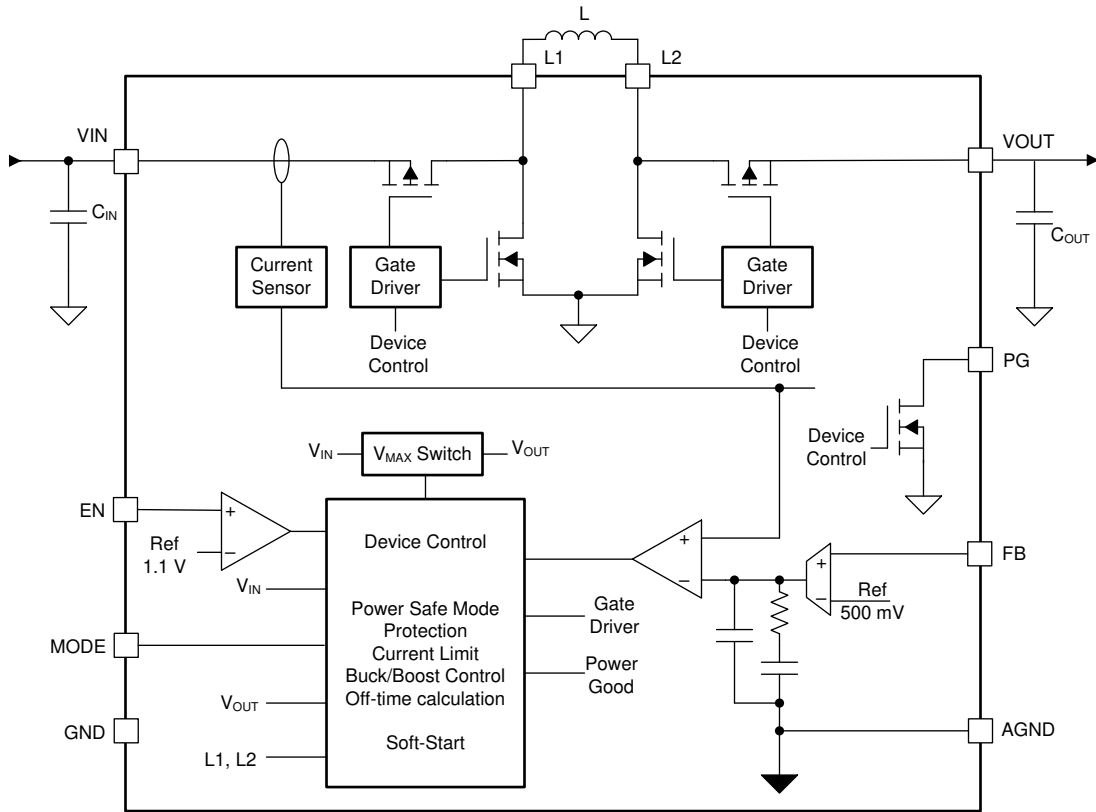


图 2-2. TPS63802 功能方框图

因此，该器件能够在宽输入电压和输出负载范围内保持高效率。为了在所有可能的输入电压条件下调节输出电压，该器件会根据配置的要求在降压、降压/升压和升压工作模式之间自动转换。在降压和升压模式下，它始终使用一个有源开关、一个整流开关、一个开关导通和一个开关关断。如果输入电压与输出电压大致相等，则保持三个周期的降压/升压模式。转换将无缝进行，避免不必要的模式切换。

### 2.3.2 LM66100

LM66100 是单输入单输出 (SISO) 集成式理想二极管，是各种应用的理想之选。该器件包含一个可在 1.5V 至 5.5V 输入电压范围内运行的 P 通道 MOSFET，并且支持 1.5A 的最大持续电流。

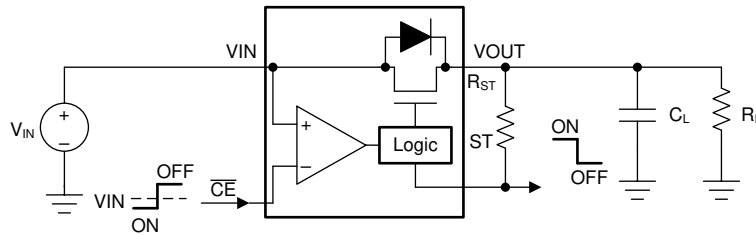


图 2-3. LM66100 功能方框图

可在 ORing 配置中使用两个 LM66100 器件，其实施方法与双二极管 ORing 相似。在此配置中，该器件将最高输入电压传递到输出端，同时阻断反向电流流入输入电源。这些器件可比较输入和输出电压，从而确保内部电压比较器成功阻断反向电流。

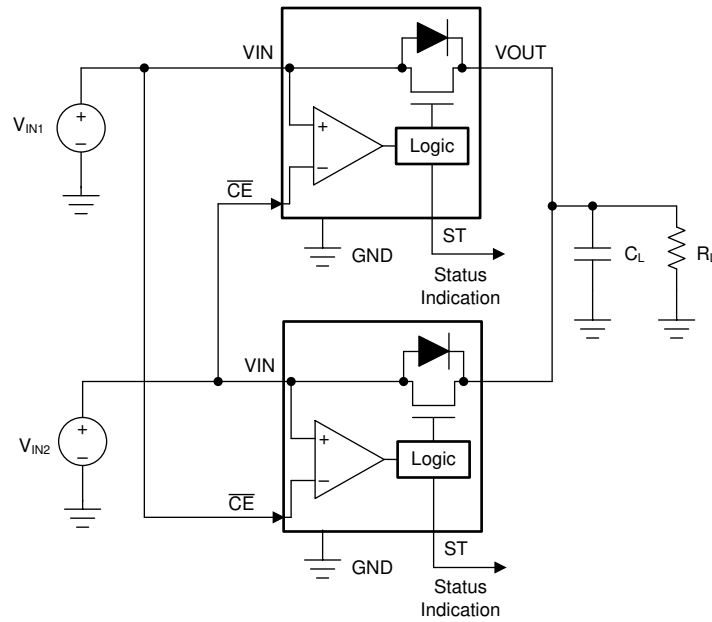


图 2-4. 具有 LM66100 的电源 ORing

## 2.4 系统设计原理

图 2-5 所示为此参考设计的简化方框图。

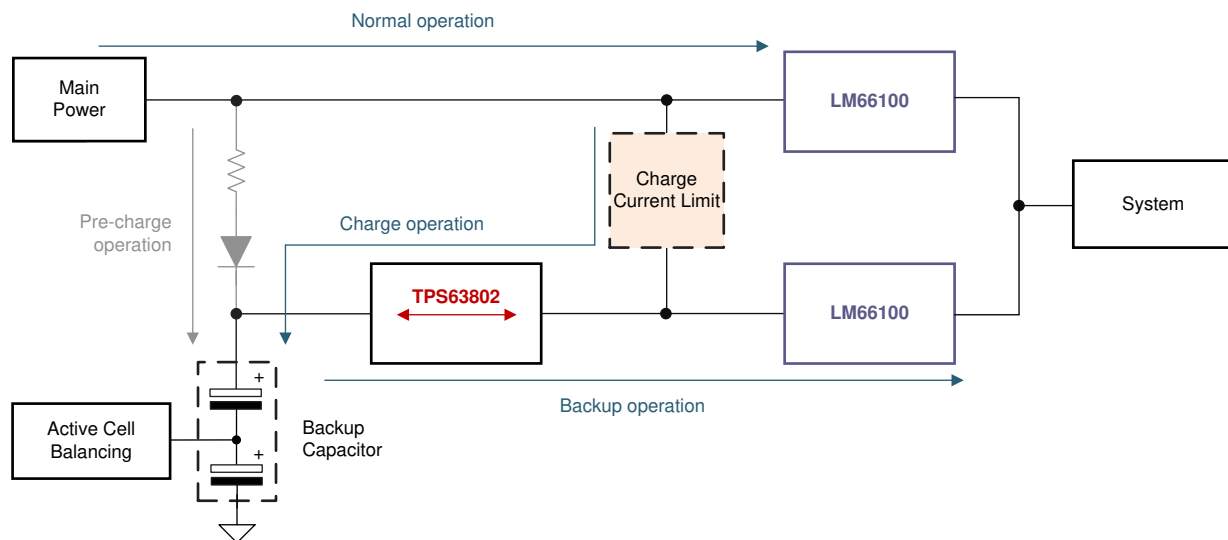


图 2-5. PMP30693 的简化方框图

### 2.4.1 超级电容器预充电操作

在系统初次上电时，超级电容器未充电，因此降压/升压直流/直流转换器的输入端没有电压。必须将输入端充电至高于转换器开始运行的上升欠压锁定阈值，对于 TPS63802，该阈值通常为 1.7V。

预充电电路可采用一个简单的二极管来阻止反向电流并采用一个电阻来限制充电电流。

$$I_{PCH} = \frac{V_{main} - V_{D1} - V_C}{R_1} \tag{1}$$

其中

- $V_{Main}$  : 主电源电压

- $V_{D1}$  : 二极管 D1 的正向电压
- $V_C$  : 备用电容器电压
- $R_1$  : 用于设置预充电电流的电阻
- $I_{PCH}$  : 预充电电流

#### 2.4.2 具有电流限制功能的超级电容器的充电操作

大多数降压/升压直流/直流转换器允许器件电流反向流动。之所以出现这种情况是因为这些器件具有负电流能力。TPS63802 的典型负峰值电流目标设置为 0.9A。即使目标为负值，平均电流也低于峰值电流。

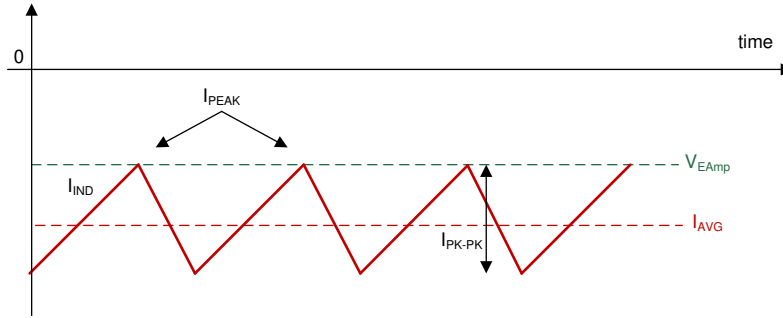


图 2-6. 峰值电流运行，反向电流

为了允许反向电流流动，需要满足两个条件。首先，输出电压目标必须略低于施加的输出电压。

$$V_{OUT} = \left( \frac{R_4}{R_5} + 1 \right) \times V_{FB} \quad (2)$$

其中

- $V_{OUT}$  : TPS63802 编程的输出电压
- $V_{FB}$  : TPS63802 的反馈电压 (典型值为 500mV)
- $R_4$ 、 $R_5$  : 输出分压器的电阻

其次，需要强制转换器进入不断开关的 PWM 模式。在 TPS63802 中，MODE 引脚需拉至 VIN。

如果这两个条件都满足，转换器会尝试通过汲取电流来调整输出电压。该电流会为输入侧的超级电容器充电，直到触发输入过压保护特性，在 TPS63802 中，该触发值通常为 5.7V。

对于包含两节电池的超级电容器设计，最大电压通常为 5.4V。因此，需要实施外部电压监控电路以停止充电。可通过将工作模式从强制 PWM 模式更改为 PFM 模式来停止充电。此设计使用一个简单的电阻分压器和一个运算放大器 (TLV522)。

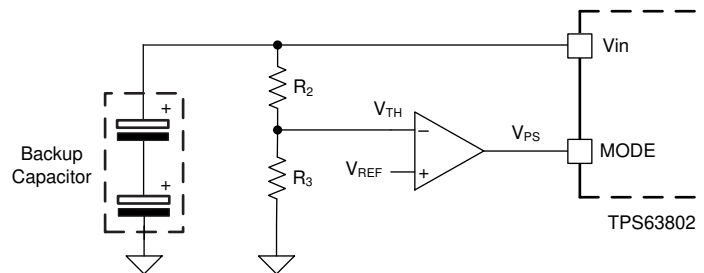


图 2-7. 停止对备用电容充电的一般实现方案

由于存在备用电容的漏电流、TPS63802 的静态电流和通过电阻分压器 ( $R_2$ 、 $R_3$ ) 的电流，超级电容器会缓慢放电。当电压  $V_{TH}$  下降至低于比较器的下限阈值时，MODE 引脚将恢复强制 PWM 模式，以便再次为超级电容器充电。图 2-4 所示为在稳态运行中已充电的超级电容器的电压。

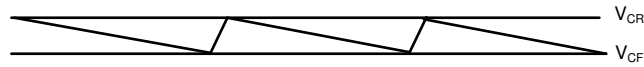


图 2-8. 稳态条件下的备用电容器电压

在此设计中通过一个简单的运算放大器 TLV522 实现了超级电容器电压监控器。TLV522 没有内部基准，因此使用 TLV431 生成 1.25V 基准。

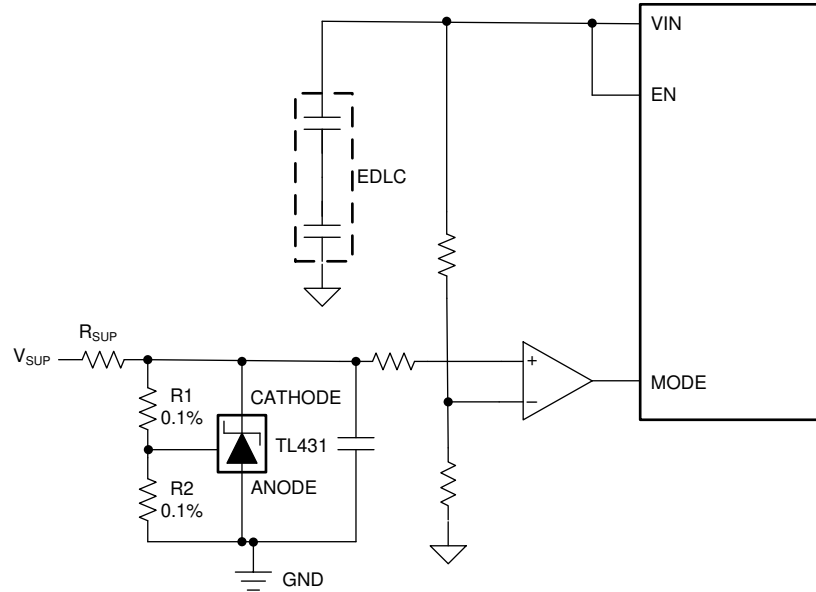


图 2-9. 超级电容器电压监控器的实现方案原理图

系统设计人员可能会因为几个原因而选择以低于 TPS63802 全部 1.2A 容量的电流为超级电容器充电，例如为了限制主系统电源的成本，或减少热量积聚和散热需求。为此，PMP30693 包含充电电流限制器功能。

INA181 电流感测放大器用于测量感测电阻上的电压并输出一个控制电压。该电压通过一个电阻连接到反馈引脚。它可以调整反馈电压，使转换器停止充电。这会限制平均电流。

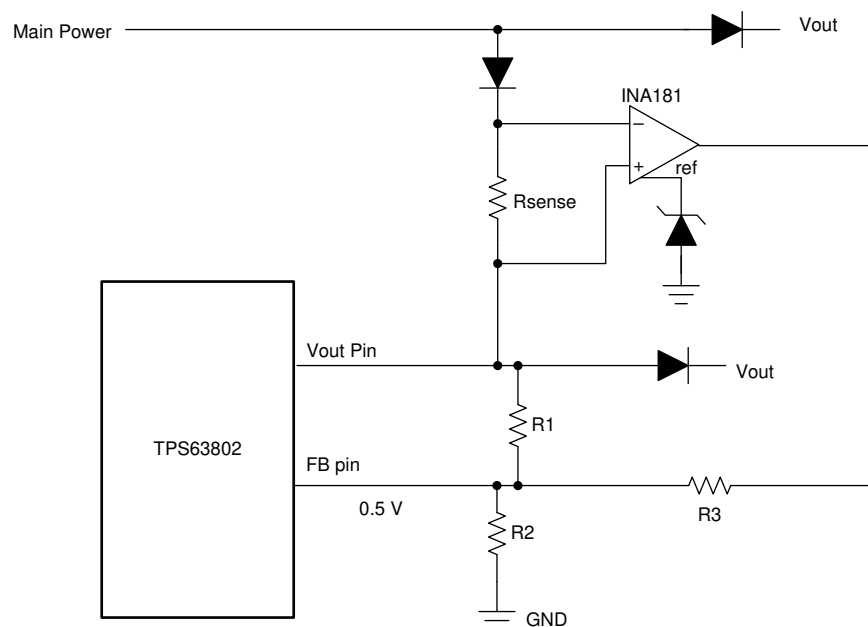


图 2-10. 电流限制电路实现方案的简化原理图

此参考设计能够将充电电流限制在低至 50mA。



$$\frac{V_{out} - V_{FB}}{R_1} + \frac{V_{INA} - V_{FB}}{R_3} = \frac{V_{FB}}{R_2} \quad (3)$$

其中

- $V_{INA} = I_{currLim} \times R_{sense}$
- $V_{out}$  : 充电期间的输出电压
- $V_{FB}$  : TP63802 反馈电压

可通过以下公式计算电流限值：

$$I_{currLim} = \frac{V_{FB}(R_1 \times R_3 + R_2 \times R_3 + R_1 \times R_2) - V_{out} \times R_2 \times R_3}{R_1 \times R_2 \times R_{sense}} \quad (4)$$

### 2.4.3 备用运行

在主电源断电的情况下，降压/升压转换器将为系统供电。系统电压会略微下降到事先编程的输出电压，并且转换器会立即开始调节系统电压。根据所需的备用时间和备用功率，[方程式 5](#) 可计算出超级电容器的最小所需值。 $V_{CL}$  是超级电容器可通过放电达到的最低电平，这是 TPS63020 降压/升压转换器的最小工作输入电压。如前文所示， $V_{CF}$  是超级电容器达到比较器下降阈值电压时的电压电平。该电压是正常运行的超级电容器充电电压在最坏情况下的电压值。

根据所需的备用时间和备用功率，可采用以下公式计算出备用电容的最小所需值。

$$C_{min} = \frac{2 \times T \times P}{\eta \times (V_{CF}^2 - V_{CL}^2)} \quad (5)$$

其中

- $C_{min}$  : 所需备用电容的最小值
- $V_{CF}$  : 处于比较器下限阈值时的备用电容电压
- $V_{CL}$  : 备用电容的最小放电电压，由 TPS63802 的最小输入电压确定
- $\eta$  : TPS63802 的效率
- $T$  : 备用时间
- $P$  : 备用功率

此参考设计使用两个串联的 25F 超级电容器。这样得到的总电容为 12.5F。如果假设是典型的 GSM 电流负载曲线（如图 2-11 所示），则计算出的备用时间为 111s。

$$T = \frac{C \times \eta \times (V_{CF}^2 - V_{CL}^2)}{2 \times P} = \frac{12.5 \text{ F} \times 0.9 \times (5 \text{ V}^2 - 1.3 \text{ V}^2)}{2 \times 3.8 \text{ V} \times 0.311 \text{ A}} = 110.9 \text{ ms} \quad (6)$$

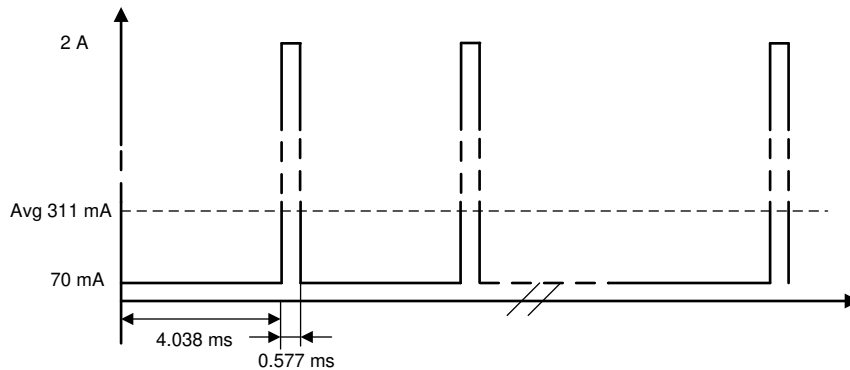


图 2-11. 用于计算备用时间的典型 GSM 负载曲线

### 2.4.3.1 自动更改为 PFM 模式

一旦超级电容器放电至低于比较器的下限阈值，就会更改为强制 PWM 模式。在轻载运行条件下，转换器处于 PFM 模式时效率更高。

LM66100 集成了一个可用于监测主电源电压的比较器。逻辑输出 (ST) 连接到 TPS63802 MODE 引脚。

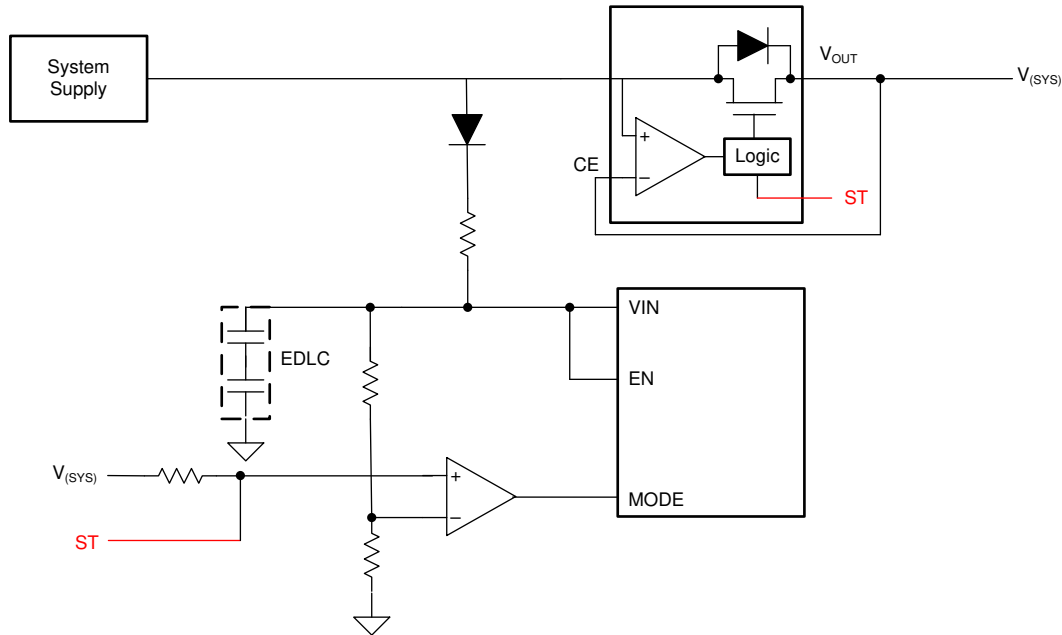


图 2-12. 在备用运行期间实现 PFM 模式的自动更改

当主电源电压降至系统输出电压以下时，理想二极管被禁用。ST 引脚为低电平有效的开漏输出，当芯片被禁用时下拉至低电平。这种情况下会强制转换器在 PFM 模式下运行。一旦主电源再次变为可用状态且启用理想二极管，ST 引脚就会变为高阻态并释放 MODE 引脚。

### 2.4.4 电池平衡

由于技术方面的限制，超级电容器电池的最大电池电压较低，因此通常将它们串联堆叠才能达到所需的电压电平。然而，超级电容器电池的容差会导致充电和放电循环期间的电压不平衡，并且会超过绝对最大额定值。这种情况对超级电容器的寿命有影响。所以，此设计中使用了电池平衡电路。

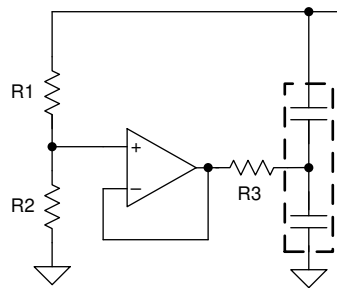


图 2-13. 主动电池平衡实现方案

此设计使用了基于运算放大器的主动电池平衡方法。因此，即使使用高电阻来减小泄漏，也能快速实现电池平衡。该电路仅在电池不平衡时才有效。损耗主要来自运算放大器的静态电流和通过电阻的电流。PMP30693 设计使用  $R1 = R2 = 1M\Omega$ ，这会造成  $2.5\mu A$  的泄漏电流。

### 2.4.5 放电期间的系统电压调节

如节 2.4.2 所述，降压/升压转换器的输出电压目标需要编程为低于所施加的输出电压。在备用模式下，这会导致系统电压下降。为了在备用情况下避免这一问题，附加电路将调节输出电压。VSEL 信号上的高电平会启用一个将 R3 连接到 GND 的晶体管。当 VSEL 信号为低电平时，R3 不影响电路。

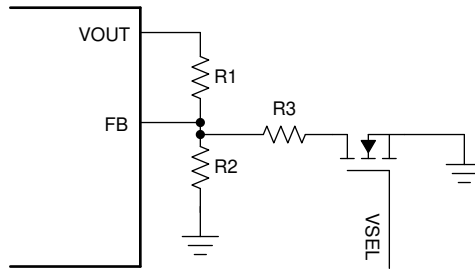


图 2-14. 输出电压调节实现方案

当 VSEL=LOW 时，要计算较低的输出电压：

$$R_1 = R_2 \left( \frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right) \quad (7)$$

当 VSEL=HIGH 时，要设置较高的输出电压：

$$R_3 = \frac{V_{o1} \times R_1 \times R_2^2}{(V_{o2} - V_{o1})(R_1 \times R_2 + R_2^2)} \text{ for } V_{o2} > V_{o1} \quad (8)$$

### 3 测试结果

PMP30693 用户指南提供了完整的测量报告。图 3-1 展示了四个不同的运行阶段：

- 预充电阶段
- 充电阶段
- 正常 (或稳态) 阶段
- 备用运行阶段

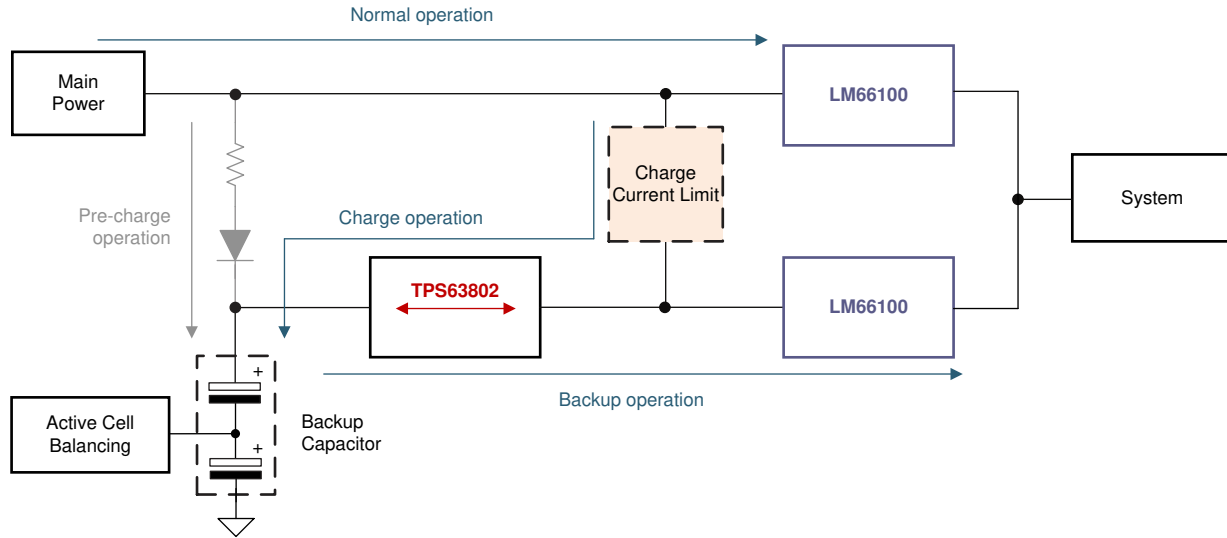


图 3-1. PMP30693 的简化方框图

#### 3.1 备用电容器预充电和充电操作

图 3-2 所示为超级电容器的预充电和充电波形。一旦有了主电源，电容器就开始通过电阻和二极管进行预充电。在超级电容器的电压达到 TPS63802 的最小工作输入电压电平 (典型值为 1.7V) 后，转换器开始工作并为超级电容器充电。在 5V 的编程电压电平下，MODE 信号变为低电平，降压/升压转换器停止为超级电容器充电。

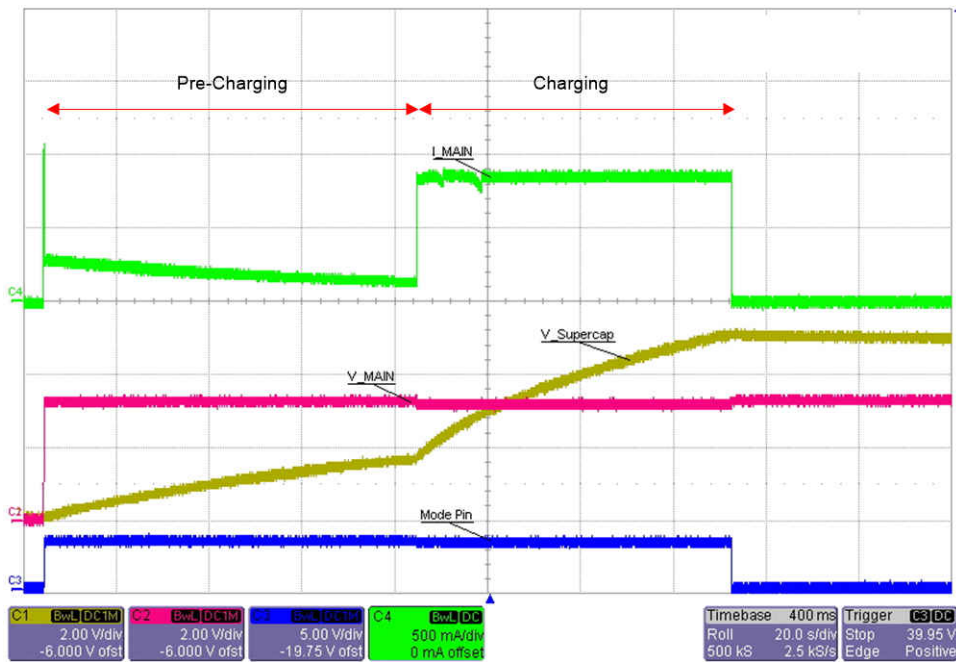


图 3-2. 备用电容器的预充电和充电

### 3.2 备用运行

图 3-3 所示为备用运行情况。如果主电源出现故障，TPS63802 转换器会立即开始将系统电压调节到事先编程的输出电压。超级电容器将放电，而电压会缓慢下降。当备用电容器电压达到 TPS63802 的最小电压时，转换器停止工作，系统电压降至零。此参考设计包含放电时可用的自动 PFM 模式开关。

在此示波器图中，备用时间约为 105s。根据方程式 6，备用电容器的电容值越大，备用时间越长。

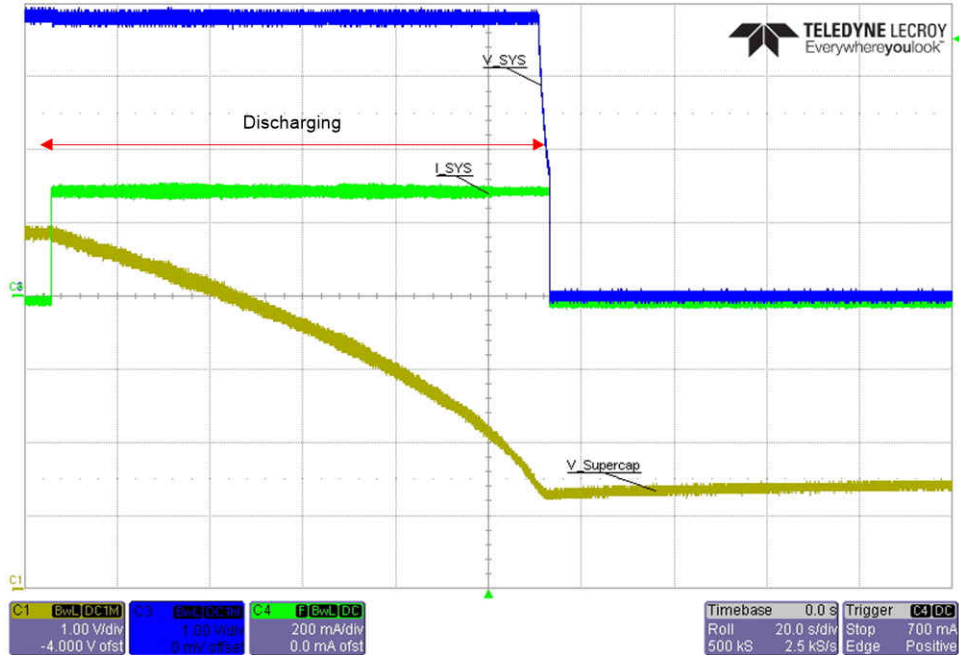


图 3-3. 备用运行

### 3.3 正常运行

图 3-4 所示为正常或稳态运行中的备用电源。主电源直接连接到系统，两者具有相同的电压电平。电容通过漏电流缓慢放电（在下图中，我们添加了 100 Ω 电阻以便能够在示波器上捕获此信息）。超级电容电压电平达到比较器阈值电压后，MODE 信号变为高电平，超级电容再次充电。

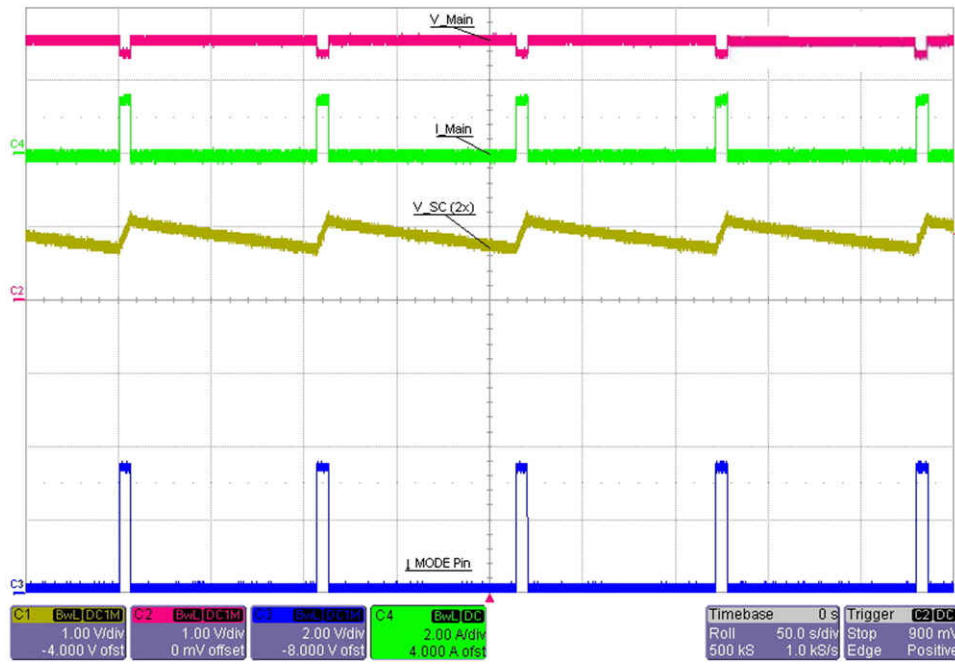


图 3-4. 正常稳态运行

## 4 参考文献

- 德州仪器 (TI), [PMP30693](#) 设计指南
- 德州仪器 (TI), [TPS7A78](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [PMP9766](#) 设计指南
- 德州仪器 (TI), [TPS63802](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [LM66100](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [INA181](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [TLV521](#) 数据表
- 德州仪器 (TI), [TLV431](#) 数据表

## 5 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

### Changes from Revision \* (October 2019) to Revision A (August 2021)

Page

- |                                 |   |
|---------------------------------|---|
| • 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式。..... | 2 |
|---------------------------------|---|

## 重要声明和免责声明

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

TI 提供的产品受 TI 的销售条款 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司



## 重要声明和免责声明

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

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

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

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

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2022，德州仪器 (TI) 公司