

Application Note

为隔离式放大器设计自举电荷泵电源



Maggie Lee

摘要

隔离式放大器可在输入信号和输出信号之间提供隔离，这在许多应用中非常有用，例如电机驱动器中的相电流检测。为隔离式放大器提供高侧电源可能具有挑战性。本应用手册介绍了一种自举电荷泵电路，作为生成高侧电源的小型低成本替代方案，并详细介绍了此类电路的设计。

内容

1 引言.....	2
2 自举电源设计.....	2
2.1 选择电荷泵电容器.....	4
2.2 在 TINA-TI 中仿真.....	5
2.3 使用 AMC1311-Q1 进行硬件测试.....	8
3 总结.....	8
4 参考资料.....	8

插图清单

图 1-1. 自举电源.....	2
图 2-1. 为自举电容器充电.....	2
图 2-2. 对自举电容器放电.....	3
图 2-3. 仿真模型.....	5
图 2-4. 比较电容器值.....	5
图 2-5. 更改 PWM 频率.....	6
图 2-6. 更改 PWM 占空比.....	7

表格清单

表 2-1. 使用不同电容器时的稳态输出电压.....	5
表 2-2. 不同频率下的启动时间和稳态电压.....	6
表 2-3. 不同占空比下的启动时间和稳态电压.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

隔离式放大器能够以相对较高的精度测量电压或电流，同时使测量数据与低侧隔离。这在以下应用中非常有用：出于安全相关考虑，高侧电压需要隔离时，或者高侧可能出现突然瞬变，从而可能损坏低侧控制器。常见的应用包括测量高压电机总线或测量电机相电流。

但是，隔离式放大器需要将高侧电源与低侧电源隔离，这可能导致尺寸和复杂性增加。一种替代方案是采用变压器隔离式电源，它从低侧产生高侧轨，同时使高侧与低侧保持隔离。但是，变压器可能很大且成本高昂。自举电荷泵电源是一种具有成本效益的替代方案。该电源由脉宽调制 (PWM) 信号提供，并且只需要一个电容器、一个二极管和一个限流电阻器。在某些情况下，还可能需要线性压降稳压器 (LDO)。

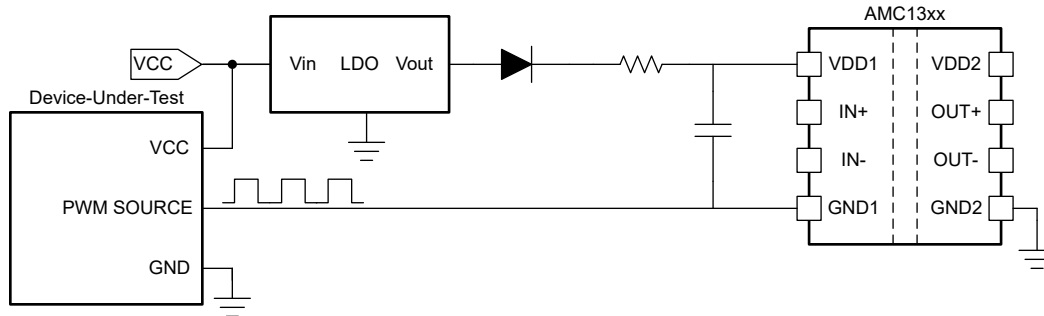


图 1-1. 自举电源

2 自举电源设计

自举电路采用输入电压和 PWM 信号工作。输入电压由为被测器件 (DUT) 供电的同一电源提供，并且可以使用 LDO 降低输入电压。自举电路需要 PWM 信号才能运行，因此该信号只能与产生 PWM 信号或采用 PWM 信号运行的 DUT 一起使用。DUT 不一定要与放大器的低侧隔离，如图 1-1 所示，因此不能单独使用直流/直流电源转换器。放大器的高侧不与 DUT 共用接地连接。PWM 信号连接到隔离式放大器的高侧接地端。自举电路确保高侧电源始终浮动在 PWM 信号以上，因此即使高侧接地是 PWM 信号，高侧电源也具有稳定的信号。

自举电路的输入电压决定了输出稳态值，因此输入电压必须接近所需的高侧电源电压，以免违反放大器的高侧电源规格。如果 DUT VCC 总线超出隔离式放大器的建议运行条件，则需要 LDO。LDO 通常需要很少的额外外部元件，而 LDO 产生的信号比开关稳压器更干净，因此建议在此应用中使用 LDO。自举电路的输入电压高于 DUT 地，因此当 PWM 信号为低电平时，二极管上会出现正压降，并且它会导通，对电容器充电，如图 2-1 所示。

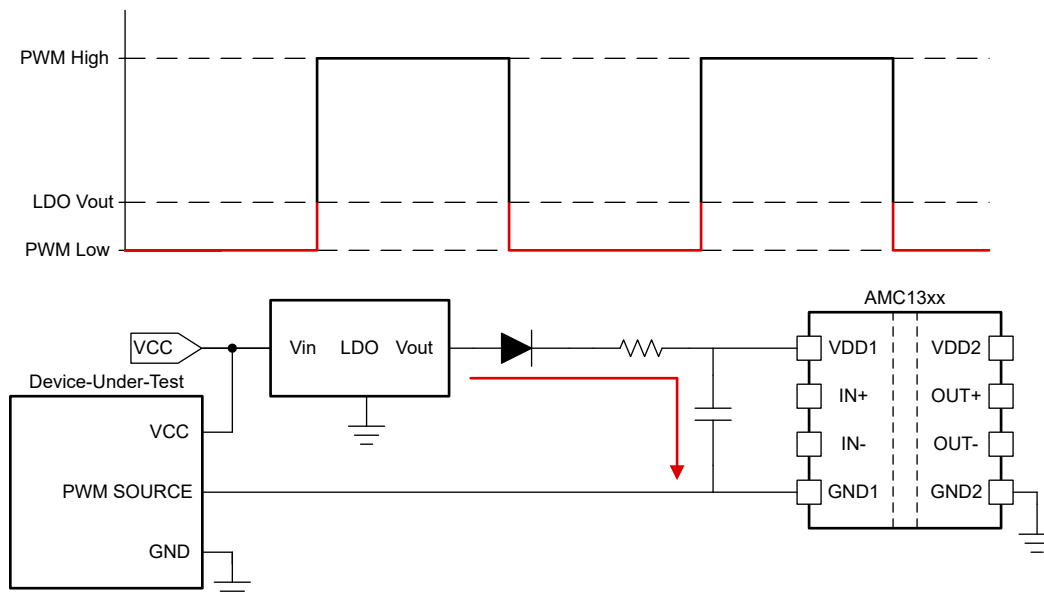


图 2-1. 为自举电容器充电

当 PWM 信号为高电平时，电容器上没有压降或负电压降，并且信号停止导通，因此电容器向高侧电源放电，如图 2-2 所示。如果 PWM 信号为低电平时电容器储存的电压等于 PWM 信号为高电平时电容器放电的电压，自举电路可以实现稳定状态。这意味着启动时间和稳态纹波取决于 RC 时间常数，并可能受到 PWM 信号的频率和占空比的影响。

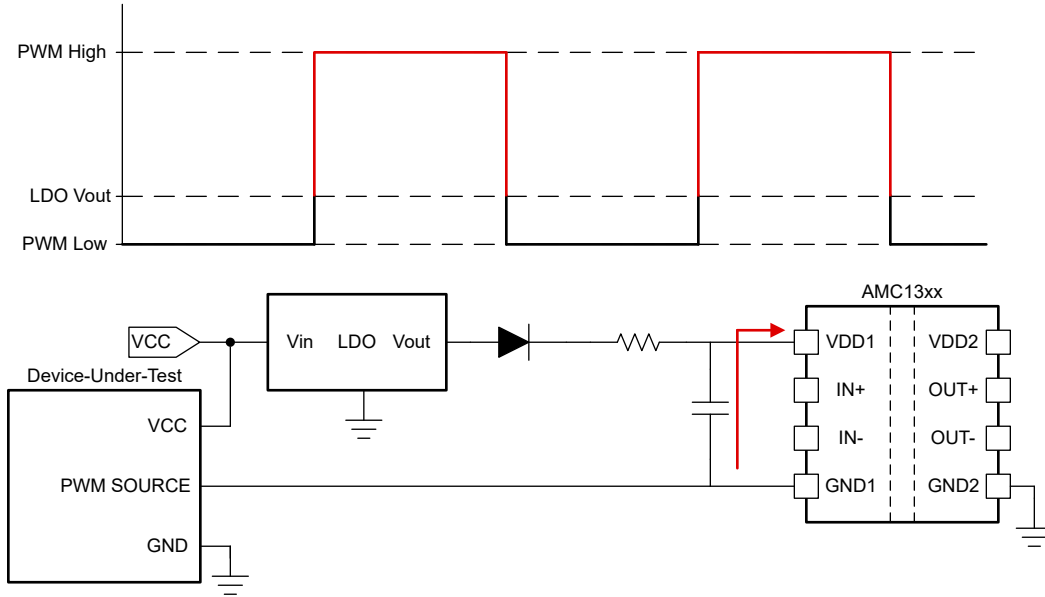


图 2-2. 对自举电容器放电

2.1 选择电荷泵电容器

自举电路提供的最大电压值可以通过将自举电路的输入电源电压减去二极管的压降来进行估算。不过，自举电路可以在自举电压达到最大值之前达到稳定状态，具体取决于 RC 电路和 PWM 信号的值。RC 时间常数定义为：

$$\tau = R \times C \quad (1)$$

电容器和电阻器决定了电容器充电和放电的 RC 时间常数。启动时间和稳态纹波之间需要进行权衡。时间常数较小意味着电容器可以更快地充电和放电，从而更快地达到稳定状态。但是，在电容器达到稳定状态后，电容器每个 PWM 占空比的充电或放电电压可能要高于具有更大时间常数的电容器，进而会导致更大的纹波。同样地，时间常数较大时会因充电或放电时间较长而产生较少的纹波。电容器值可以使用以下参数来估算：

1. PWM 开关频率
2. PWM 占空比
3. 为隔离式放大器供电所需的电流
4. 允许的纹波

我们可以变换 [方程式 2](#) (如 [方程式 3](#) 所示) 来求解电容。

$$Q = I \times t = \Delta V_{\text{ripple}} \times C \quad (2)$$

$$C = \frac{I \times t}{\Delta V_{\text{ripple}}} \quad (3)$$

假设开关频率为 20kHz 且占空比为 50%，如果使用 AMC1311-Q1 数据表中的最大电流消耗，并要求最大纹波为 100mV，则将得到以下最小电容值：

$$C = \frac{9.7\text{mA} \times 0.5 \times \frac{1}{20\text{kHz}}}{100\text{mV}} = 2.4\mu\text{F} \quad (4)$$

然后，可以仿真自举电路来估算启动时间，并可以根据启动时间要求来选择合适的电容器和电阻器。选择电阻器时需要确保电阻器不会阻止放大器的高侧汲取足够的电流。

2.2 在 TINA-TI 中仿真

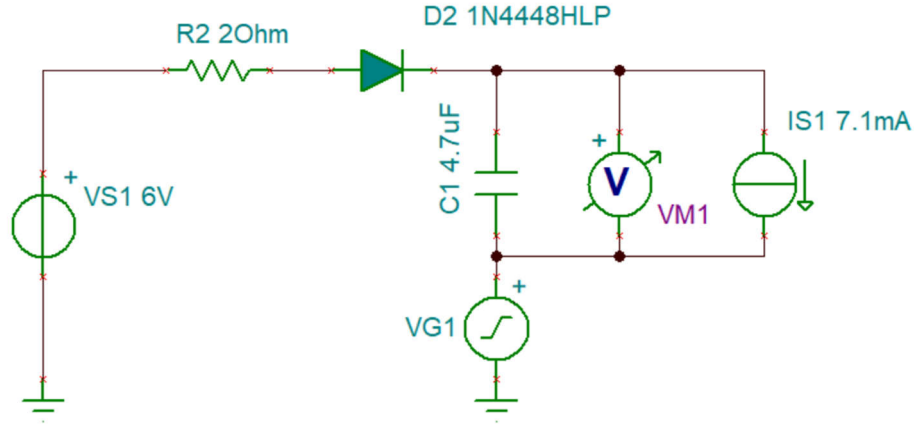


图 2-3. 仿真模型

VS1 是 LDO 的输出，VG1 用于仿真 PWM 信号，而 IS1 仿真隔离式放大器的负载消耗。由于 VS1 为 6V 且二极管两端的压降为 300mV，因此自举电路的最大输出为 5.4V。VG1 以 50% 的占空比提供 20kHz、50V_{pp} 的 PWM 信号。C1 在四个不同的电容器值之间逐个切换。

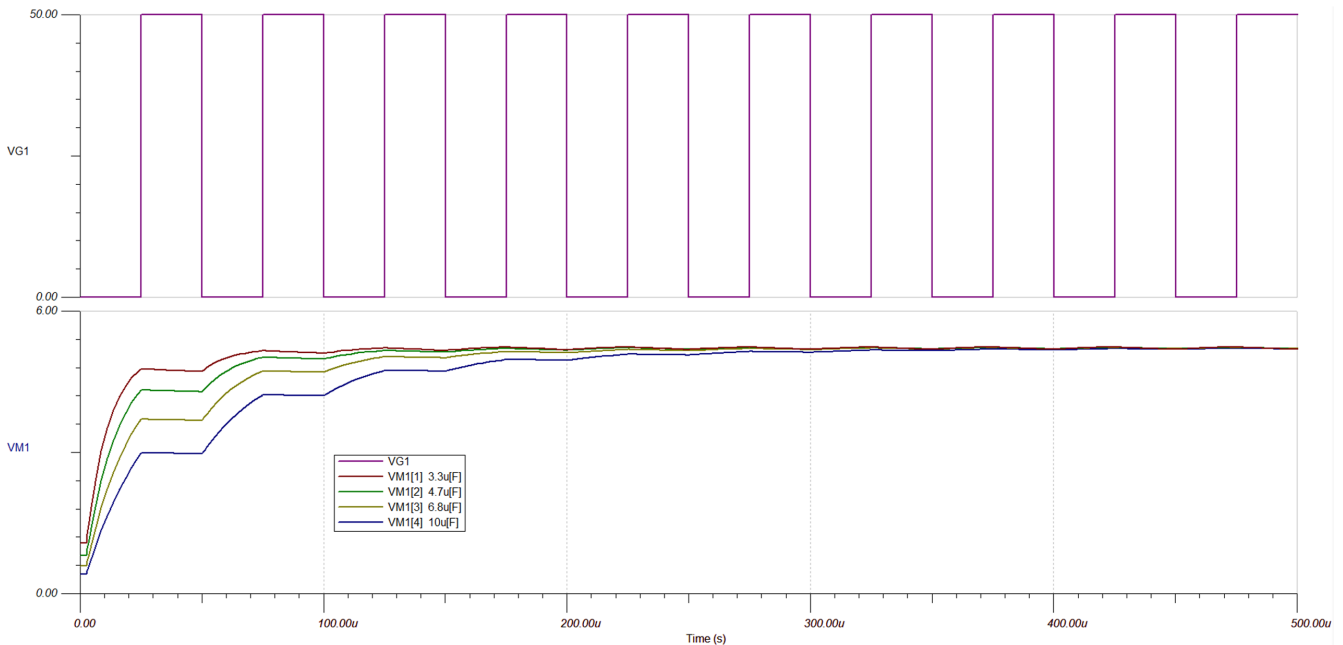


图 2-4. 比较电容器值

表 2-1. 使用不同电容器时的稳态输出电压

电容器值 (μF)	稳态纹波 (mV)	平均稳态值 (V)
3.3	53.6	5.215
4.7	37.7	5.200
6.8	25.8	5.215
10	17.7	5.215

图 2-4 展示了使用同一 PWM 信号时的四种不同电容器值。表 2-1 展示了采用不同电容器时的稳态输出电压。请注意，理论上，电容器无法达到 5.4V 的最大稳态值。但是，随着纹波减小，启动时间明显增加。当电容器值为 4.7 μF 时，该信号可以在启动时间和纹波之间取得良好的平衡。

自举电路的启动时间和稳态纹波还取决于输入 PWM 信号的频率和占空比。我们可以通过将 C1 设置为单个值并更改 VG1 生成的 PWM 信号，在仿真中观察到这一点。

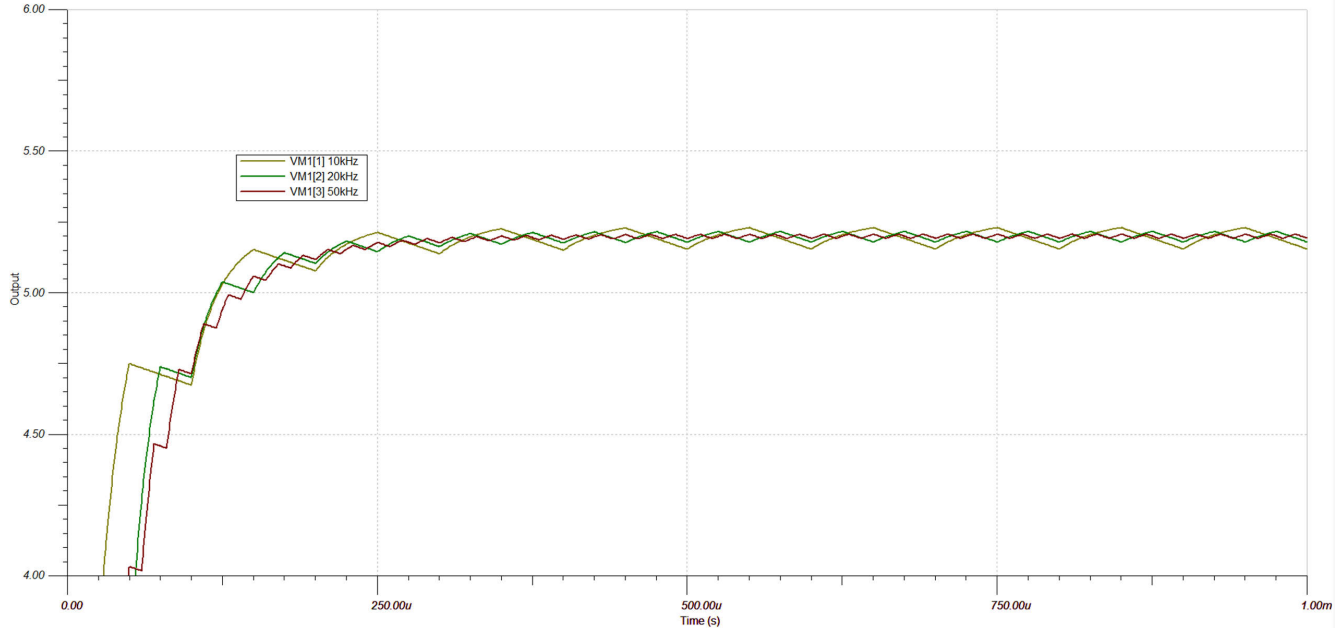


图 2-5. 更改 PWM 频率

表 2-2. 不同频率下的启动时间和稳态电压

PWM 频率 (kHz)	稳态纹波 (mV)	平均稳态值 (V)
10	75.1	5.190
20	37.7	5.200
50	14.7	5.200

C1 为 4.7 μF ，PWM 信号幅度为 50V_{PP} 且占空比为 50%。频率对输出纹波的影响要大得多，而不会对启动时间和平均稳态产生太大的影响，如表 2-2 所示。

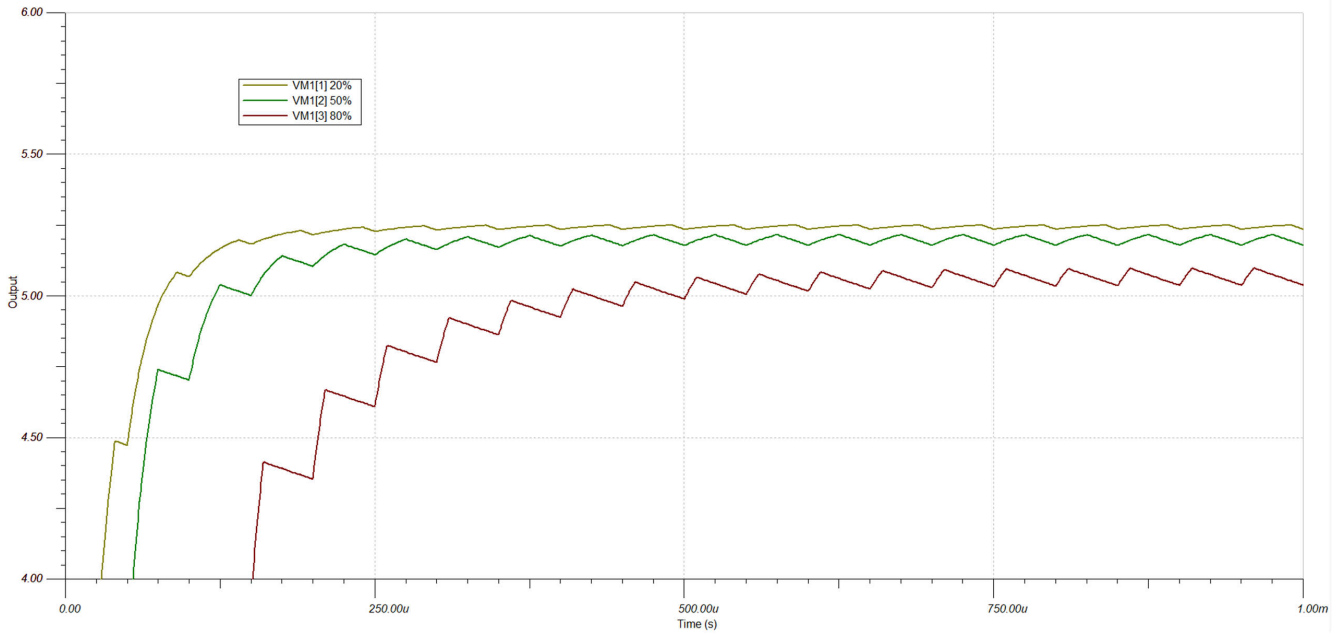


图 2-6. 更改 PWM 占空比

表 2-3. 不同占空比下的启动时间和稳态电压

PWM 占空比	稳态纹波 (mV)	平均稳态值 (V)
20%	14.7	5.245
50%	37.7	5.200
80%	59.9	5.070

C1 为 $4.7 \mu\text{F}$ ，PWM 信号幅度为 50V_{PP} 且频率为 20kHz 。启动时间和平均输出受到的影响要大得多，如图 2-6 和表 2-3 所示。

纹波太大会影响隔离式放大器的性能，因为电源弹跳可能会导致输出共模误差。但是，在放大器达到放大器高侧电源的最小建议值之前，无法验证隔离式放大器是否可以精确测量 DUT。对于在系统参数范围内设计有效的自举电路，了解预期的 PWM 输出信号至关重要。但是，选择 $4.7 \mu\text{F}$ 电容器的前提是：PWM 信号的占空比为 50%，频率为 20kHz （请参阅节 2.1），以便根据 PWM 信号特性调节最小电容（请参阅方程式 4）。

2.3 使用 AMC1311-Q1 进行硬件测试

实际电路按照图 1-1 所示构建，以便验证仿真结果。C=4.7 μ F，R=2 Ω ，LDO 的输出为 6V，并且输入 PWM 信号在 20kHz、50% 占空比条件下为 50V_{pp}。AMC1311-Q1 是选定的隔离式放大器，TPS7A4101 是针对宽输入范围选定的 LDO。

启动时间约为 260 μ s，稳态输出为 5.1V 且纹波电压 29.7mV，与图 2-3 中所示基本匹配。仿真和硬件之间的差异是由于设备电流限制造成的，在仿真设计中没有考虑这些限制。

与纯净电源的性能相比，自举电源的纹波对 AMC1311-Q1 的性能影响极小。干净的信号是使用变压器和 LDO 从低侧电源轨生成的。该变压器电源在尺寸上大约是自举电源的两倍，而且由于变压器的成本，因此比自举电源要昂贵得多。如果纹波过高，也可以使用简单的 RC 滤波器来使自举电源平滑。这会尽可能减小电路的尺寸并降低其成本。

3 总结

电荷泵自举电路是为 PWM 应用中的隔离式放大器生成隔离式电源轨的有效方法。设计良好的自举电源可以像纯净电源一样有效地运行，同时可以节省空间和成本。

在设计自举电路时，有几项关键因素需要考虑。务必要了解隔离式放大器的电流消耗、PWM 信号的频率和占空比、电路启动时间的允许范围以及隔离式放大器允许的电源纹波。所有这些规格都会影响自举电路中所用 RC 电路的选择。自举电路可以轻松地进行仿真，从而使选择过程变得更加简单，因为设计人员可以在不同的电路条件下轻松测试各种 RC 值。

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，[AMC13xx 参数表](#)。
2. 德州仪器 (TI)，[使用自举电荷泵技术的 DC+ 总线电源解决方案](#) 应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，[在电机驱动器中使用隔离比较器进行故障检测](#) 模拟设计期刊。
4. 德州仪器 (TI)，[隔离式电流检测的设计注意事项](#) 模拟设计期刊。

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 © 2023，德州仪器 (TI) 公司