



Dorian Brillet de Cande, Giorgia Navarra, Nelson Espindola-Rojas

摘要

直流/直流转换器可视为控制系统，其目标是保持恒定的输出电压。调节后的输出电压应该能够抵抗各种干扰，例如输入电压阶跃、负载变化和噪声。

本应用手册介绍了如何仅通过测量输出阻抗来实现稳定性分析，并将此方法与常用的电压注入方法进行了比较，然后提供了可帮助电源工程师快速开始执行这些测量的分步指导。

内容

1 引言.....	2
2 环增益测量.....	3
3 TPS62816 的输出阻抗测量.....	4
4 波特图重建和与电压注入法的比较.....	6
5 结论.....	8
6 参考文献.....	8

插图清单

图 1-1. TPS62816 的输出阻抗设置.....	2
图 2-1. 通用降压转换器的闭环系统.....	3
图 3-1. TPS62816 的输出阻抗设置.....	4
图 3-2. TPS62816 的输出阻抗测量幅度.....	4
图 3-3. TPS62816 的输出阻抗测量幅度.....	5
图 3-4. 将开环输出阻抗除以闭环输出阻抗.....	5
图 4-1. 使用输出阻抗重建（蓝色）和电压注入方法（红色）的环路增益幅度.....	6
图 4-2. 使用输出阻抗重建（蓝色）和电压注入方法（红色）的环路增益相位.....	7

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

环路增益测量显示了电源控制环路的稳定性和可靠性，并提供了改善输出瞬态响应的思路。为了表征环路，通常使用电压注入法测量开环增益。

图 1-1 显示了一种测量直流/直流转换器环路增益的常用方法，即电压注入法。该方法包括用一个电阻器在一个地方断开控制环路，并用注入变压器将不同频率的正弦扰动注入环路。随后将测量输入信号和输出信号的相对幅度和相位与频率的关系。

电压注入方法可确保系统中正确的静态工作条件，并避免具有大直流环路增益的系统中的常见困难。但是，限制是电压注入方法需要通过在合适的点放置一个额外的电阻来断开控制环路。

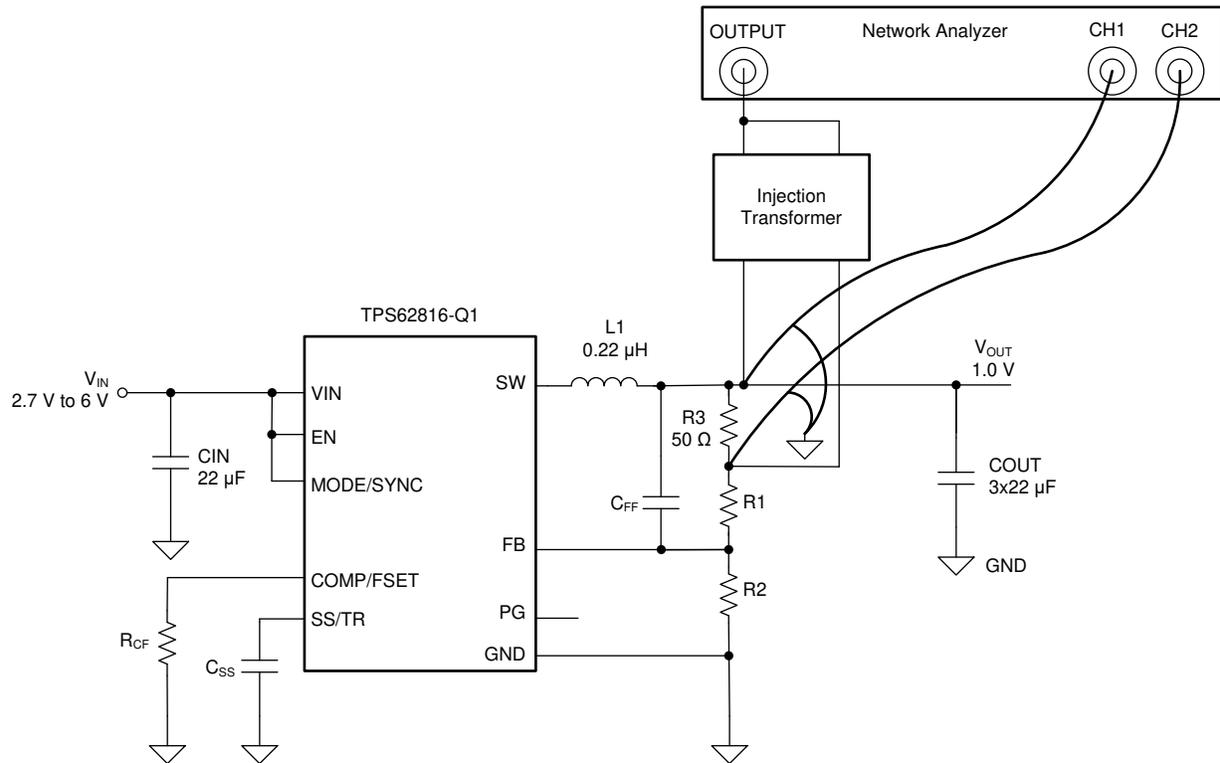


图 1-1. TPS62816 的输出阻抗设置

添加额外元件可能会使反馈信号布线更长，从而削弱器件的抗噪能力。因此，使控制环路对快速开关信号更加敏感。此外，对于空间有限的设计，电压注入方法可能不是可接受的方法。

为避免断开反馈环路，本文提出了一种替代方法，即通过测量直流/直流转换器的输出阻抗来获取环路增益值。

输出阻抗是表征开关稳压器的重要参数，有助于评估转换器如何响应不同频率下的负载变化。诸如控制环路稳定性、为器件供电的去耦网络、动态负载响应和电源对复杂负载的敏感性等有价值的信息可以从输出阻抗测量中获得。

本应用报告详细介绍了使用通过 TPS62816 获得的输出阻抗测量结果对开关稳压器进行环路增益测量。

2 环增益测量

降压转换器具有构成闭环系统的基本模块。图 2-1 显示了通用降压转换器的闭环系统。

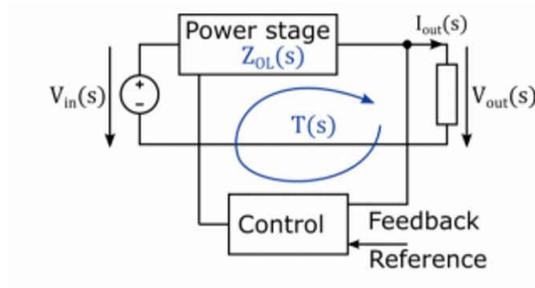


图 2-1. 通用降压转换器的闭环系统

$Z_o^{ol}(s)$ 是功率级环路增益的开环输出阻抗， $T(s)$ 定义为环路周围所有增益的乘积。当环路打开时，功率级在恒定工作点运行，这意味着控制器信号保持恒定。

当环路闭合时，转换器正常运行。闭环输出阻抗为 $Z_o^{cl}(s)$ ：

$$Z_o^{cl}(s) = \frac{Z_o^{ol}(s)}{1 + T(s)} \quad (1)$$

从此公式我们可以推断出环路增益越高，反馈环路降低的输出阻抗就越多。在设计电源时，可以通过增加输出电容来降低开环阻抗，从而降低输出阻抗。特别是对于大电流操作，确保整个频率范围内的输出阻抗较低对于实现良好的负载瞬态非常重要。但是，这种方法会产生尺寸和材料成本，而且对于不应超过最大输出电容的某些设计，还可能会降低其性能。

从前面的公式我们可以得出环路增益：

$$T(s) = \frac{Z_o^{ol}(s)}{Z_o^{cl}(s)} - 1 \quad (2)$$

3 TPS62816 的输出阻抗测量

图 3-1 显示了输出阻抗测量测试设置。有关阻抗测量方法和良好校准的不同步骤的更多信息，请参阅[如何测量直流/直流转换器的配电网路阻抗](#)。

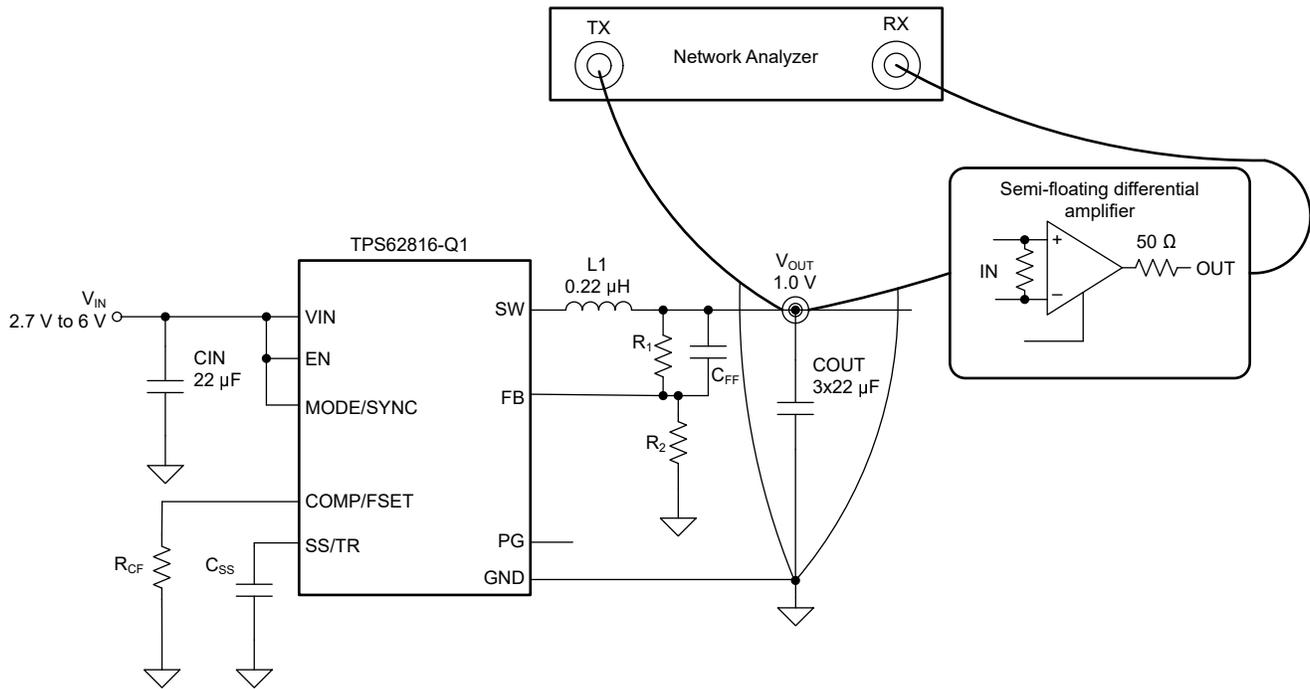


图 3-1. TPS62816 的输出阻抗设置

图 3-2 显示了以下情形下的输出阻抗比较：环路是开路 $Z_o^{ol}(s)$ 和环路闭合， $Z_o^{cl}(s)$ 在输出端将 $500\text{m}\Omega$ 电阻负载连接到 GND。图 3-3 中绘制了各个相位。

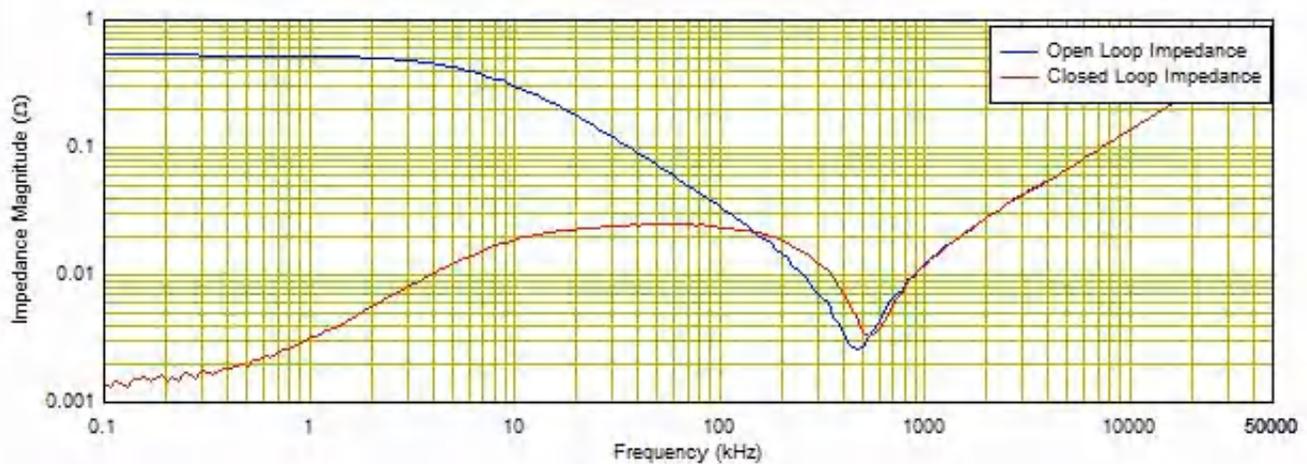


图 3-2. TPS62816 的输出阻抗测量幅度

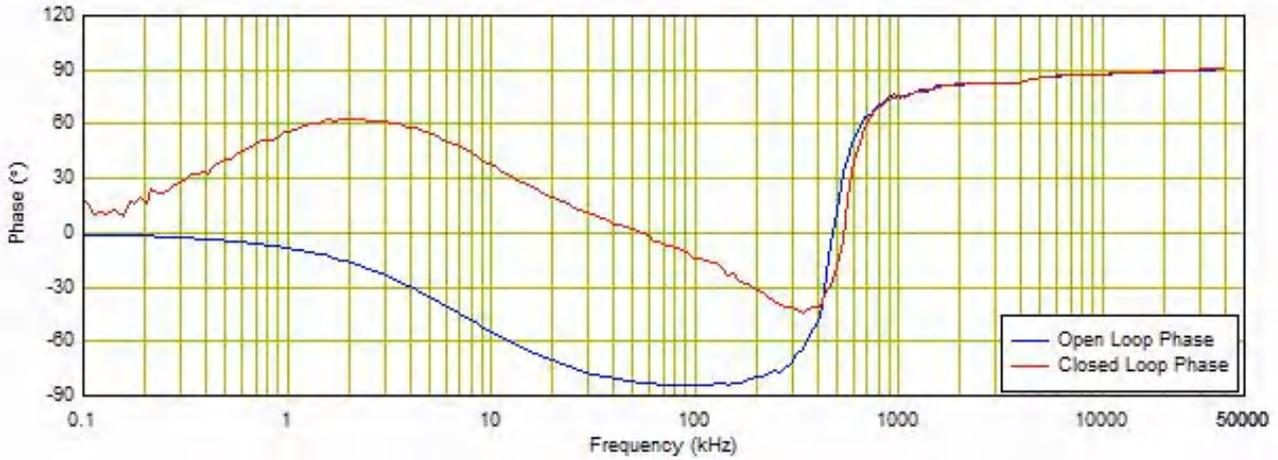


图 3-3. TPS62816 的输出阻抗测量幅度

对于开环阻抗，在低频下，阻抗曲线受 $500\text{m}\Omega$ 恒定输出电阻的影响。在 10kHz 以上，测得的阻抗会跟踪输出电容器组的阻抗，随着其 ESR 值在 500kHz 处变平。曲线的最右边部分由电容在非常高的频率下的电感行为决定。

对于闭环阻抗，在低频下可以观察到高直流环路增益值，这会导致低输出阻抗。在较高频率下，测得的阻抗曲线显示出与开环条件类似的行为。

环路增益稳定性的一个特殊特性是，在相关频率下，闭环阻抗高于开环阻抗。这种行为是由于控制环路稳定性造成的，可以在 100kHz 和 500kHz 之间观察到。这个特定的频率范围有助于我们通过计算相位裕度以及 TPS62816 的交叉频率来确定。

为了便于进一步处理，可以使用数学函数将开环输出阻抗 $Z_o^{ol}(s)$ 除以闭环输出阻抗 $Z_o^{cl}(s)$ ：

$$\frac{Z_o^{ol}(s)}{Z_o^{cl}(s)} \quad (3)$$

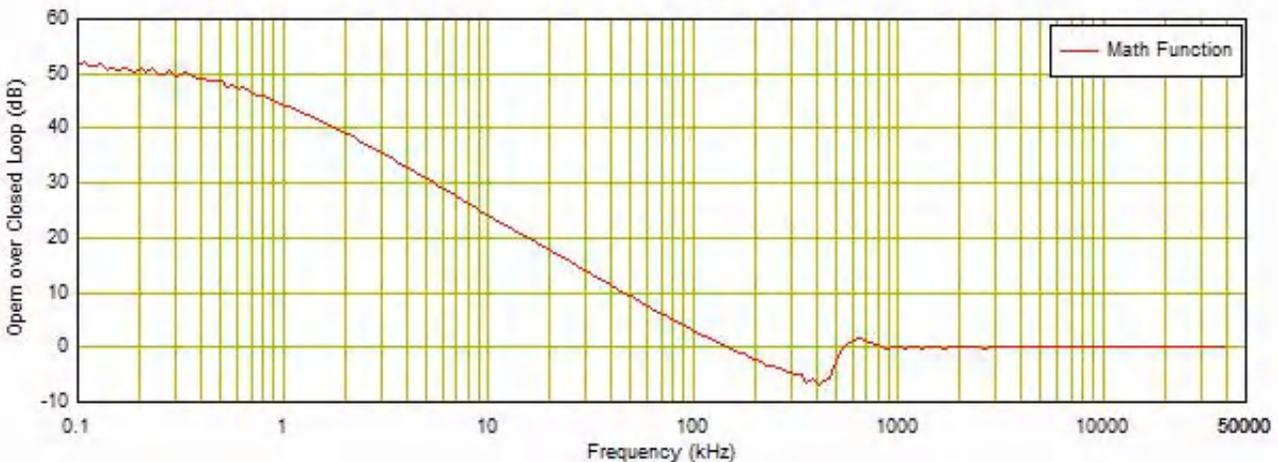


图 3-4. 将开环输出阻抗除以闭环输出阻抗

4 波特图重建和与电压注入法的比较

由于是复数阻抗，环路增益是具有实部和虚部的复数。计算环路增益所需的信息是**方程式 4** 和**方程式 5** 中分别显示的幅度 $\text{Mag}[T(s)]$ 和相位 $\text{Phase}[T(s)]$ 。

$$\text{Mag}[T(s)] = 20\log_{10}\left(\sqrt{\Re\left(\frac{Z_o^{ol}}{Z_o^{cl}} - 1\right)^2 + \Im\left(\frac{Z_o^{ol}}{Z_o^{cl}}\right)^2}\right) \quad (4)$$

$$\text{Phase}[T(s)] = \arctan\left(\frac{\Im\left(\frac{Z_o^{ol}}{Z_o^{cl}}\right)}{\Re\left(\frac{Z_o^{ol}}{Z_o^{cl}} - 1\right)}\right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (5)$$

为了可视化数据并将公式应用于取值，可能需要使用分析解决方案。所有网络分析仪都不能提供灵活的接口来分析数据。

图 4-1 显示了重建增益与测量的电压注入方法的比较。

使用**方程式 4** 根据阻抗测量值重建的增益显示出非常好的匹配结果，直到最低频率。红色曲线显示的是实际环路增益，蓝色曲线显示的是计算出的环路增益。

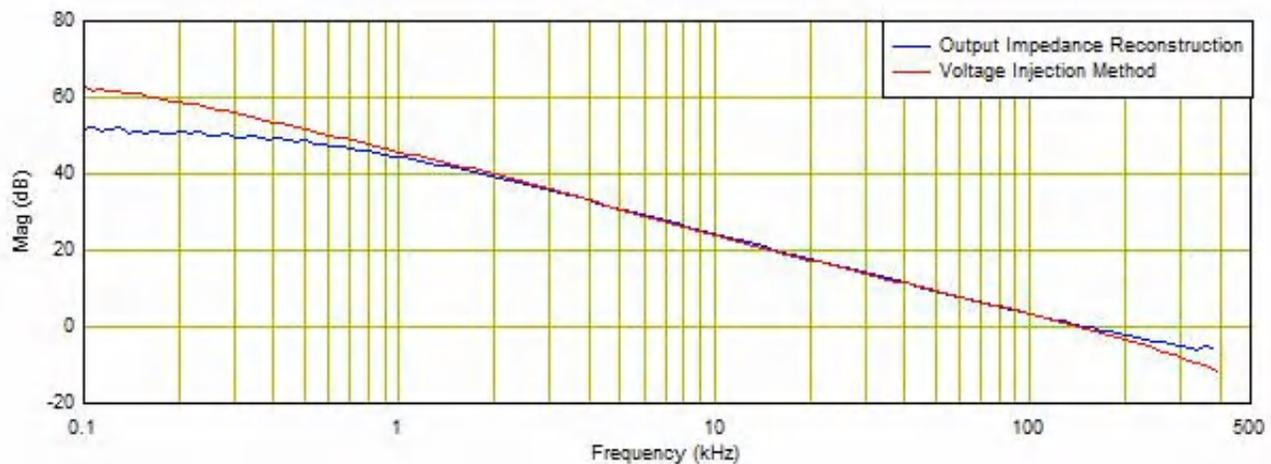


图 4-1. 使用输出阻抗重建 (蓝色) 和电压注入方法 (红色) 的环路增益幅度

运行条件： $V_{in}=3.3V$ ， $V_{out}=1.0V$ ， $I_{out}=2A$

交叉频率：141.25kHz (红色曲线)，146.27kHz (蓝色曲线)

图 4-2 显示了重建相位与测量的电压注入方法的比较。

图 4-2 的红色曲线显示了测量的电压注入方法相位，蓝色曲线显示了计算出的相位，使用**方程式 5** 根据阻抗测量值重建。

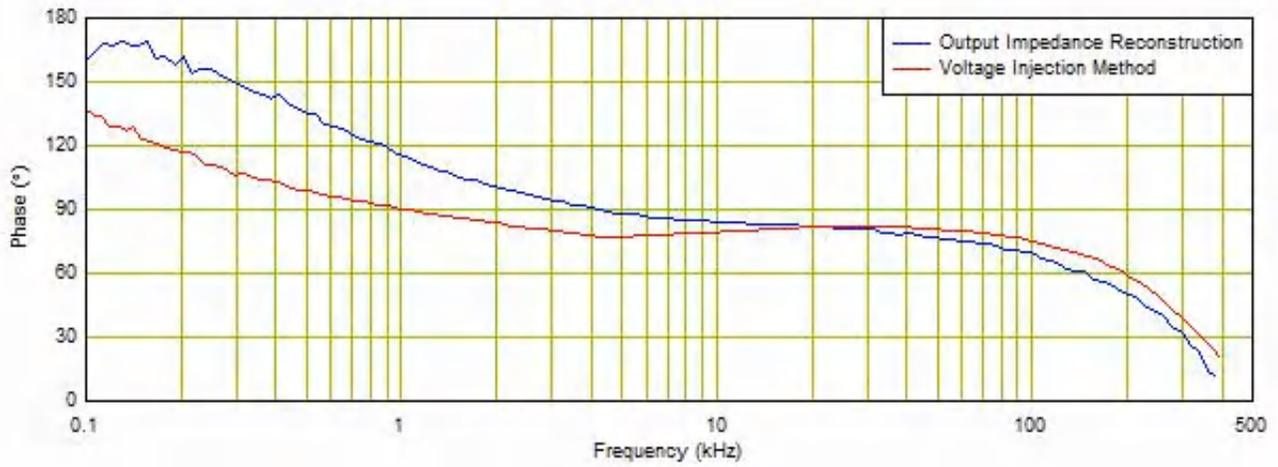


图 4-2. 使用输出阻抗重建 (蓝色) 和电压注入方法 (红色) 的环路增益相位

运行条件： $V_{in}=3.3V$ ， $V_{out}=1.0V$ ， $I_{out}=2A$

相位裕度：69.28° (红色曲线)，61.17° (蓝色曲线)

5 结论

如本应用手册中所示，可以通过测量不同工作状态下直流/直流转换器的输出阻抗来重建环路增益。输出阻抗测量有助于深入了解直流/直流转换器的性能。除了评估电源的带宽和相位裕度之外，输出阻抗测量还有助于评估转换器从特定负载中恢复的能力，或验证是否满足目标输出阻抗，以实现严格的负载阶跃要求。

6 参考文献

- [Output Impedance Measurements and Loop Gains](#)
- [Output Impedance for Stability Analysis](#)
- [Deviation of Loop Gain from Output Impedances in DC-DC Buck Converter](#)
- 德州仪器 (TI)，[如何测量 DCS-Control 器件的控制环路应用报告](#)
- 德州仪器 (TI)，[TI 低功耗降压直流/直流的主题索引应用报告](#)

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