

## Application Note

## 易爆环境中传感器变送器的电源设计注意事项



Colin Chen and Xiaoying Lu

## 摘要

本应用手册介绍了易爆环境中传感器变送器系统的电源设计。基于 TI 的低 IQ 降压转换器 TPS629203，可实现满足所需目标的设计流程。此外，还针对纹波和效率的基本特性进行了实验，并得出了相应结果。建议对效率和电压纹波进行权衡，以帮助设计人员更好地应对类似应用中的挑战。

## 内容

1 简介.....	2
2 DCM 模式下降压转换器的输入和输出纹波.....	4
3 TPS629203 设计注意事项.....	6
4 实验结果.....	7
4.1 VIN 和 VOUT 纹波结果.....	7
效率.....	9
5 总结.....	11
6 参考资料.....	11

## 插图清单

图 1-1. 简化版方框图.....	3
图 2-1. DCM 模式下降压转换器的电流环路.....	4
图 2-2. DCM 模式下降压转换器的输入电压纹波.....	4
图 2-3. DCM 模式下降压转换器的输出电压纹波.....	5
图 3-1. TPS629203 原理图设计.....	6
图 4-1. $I_O = 4\text{mA}$ 时仿真的 $V_{IN}$ 纹波.....	7
图 4-2. $I_O = 10\text{mA}$ 时仿真的 $V_{IN}$ 纹波.....	7
图 4-3. $I_O = 20\text{mA}$ 时仿真的 $V_{IN}$ 纹波.....	7
图 4-4. $I_O = 4\text{mA}$ 时台架测试的 $V_{IN}$ 纹波.....	7
图 4-5. $I_O = 10\text{mA}$ 时台架测试的 $V_{IN}$ 纹波.....	7
图 4-6. $I_O = 20\text{mA}$ 时台架测试的 $V_{IN}$ 纹波.....	7
图 4-7. $I_O = 4\text{mA}$ 时仿真的 $V_{OUT}$ 纹波.....	8
图 4-8. $I_O = 10\text{mA}$ 时仿真的 $V_{OUT}$ 纹波.....	8
图 4-9. $I_O = 20\text{mA}$ 时仿真的 $V_{OUT}$ 纹波.....	8
图 4-10. $I_O = 4\text{mA}$ 时台架测试的 $V_{OUT}$ 纹波.....	8
图 4-11. $I_O = 10\text{mA}$ 时台架测试的 $V_{OUT}$ 纹波.....	8
图 4-12. $I_O = 20\text{mA}$ 时台架测试的 $V_{OUT}$ 纹波.....	8
图 4-13. 使用 $5.6\mu\text{H}$ 电感器时的效率.....	9
图 4-14. DCM 中的周期时间.....	10
图 4-15. 使用 $2.2\mu\text{H}$ 电感器和 $5.6\mu\text{H}$ 电感器时的效率.....	10

## 表格清单

表 1-1. 允许的电容与电压存在对应关系.....	2
表 1-2. 传感器变送器系统的典型电源轨.....	3
表 4-1. 计算、仿真和台架测试结果 $\Delta V_{IN}$ 比较.....	9
表 4-2. 计算、仿真和台架测试结果 $\Delta V_{OUT}$ 比较.....	9

## 商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

## 1 简介

### 支持 HART 协议的传感器变送器

传感器变送器广泛用于工厂自动化和过程控制。传感器变送器需要传感前端、微控制器和处理器。其中包括多种数据传输接口、协议和通信设计，例如 4-20mA HART。

HART 通信协议是模拟和数字混合工业自动化开放协议。HART 最显著的优势是支持通过一对共享导线在 4 - 20 mA 模拟电流环路上进行通信。HART 可以支持两种工作模式：点对点模式和多点模式。在点对点模式中，电流为 4 - 20 mA，控制器和测量仪器或最终控制元件之间的有效信令协议是数字信号。在多点模式中，模拟回路电流固定在 4mA 上，并且一个信号回路上可能有多个仪器。通常，模拟信号用于传输一定程度的液位、流量、温度和压力等数据。HART 协议对 4-20mA 提供了进一步的向后兼容，可发送命令或返回标准化响应，从而传达器件状态和诊断信息。数据还可以包括器件测量数字值及有关远程变送器的其他信息。因此，HART 对 4-20mA 系统做出了改进，使其从仅以电流值形式发送主要变量，转变为兼具数字通信方式，具备了更多功能和灵活性。此技术向后兼容并可与现有的基础设施配合使用，因此易于采用且具有成本效益。

### 易爆环境对于安全的要求

在电气和安全工程中，易爆环境是指存在火灾或爆炸危险的场所。在这些条件下，气体、蒸汽或粉尘形式的易燃物质与空气混合物在点火后会导致燃烧扩散到整个未燃烧的混合物中。一些国际标准（如 IEC 60079）对用于易爆环境中的本质安全电路的结构和测试作出了明确规定。在此类本质安全电路中，电源的关键特性是输入和输出电容。因为需要根据标准严格限制允许的电容，以限制电容器发生故障时产生的火花和能量。表 1-1 表明，基于设备类别，允许的电容与电压存在对应关系。

表 1-1. 允许的电容与电压存在对应关系

电压 (V)	允许的电容 ( $\mu$ F) (以 IIC 类别仪器为例)	
	安全系数为 1	安全系数为 1.5
5.0		100
6.0	600	40
7.0	175	15.7
8.0	69	8.4
9.0	40	4.9
10.0	20	3
20.0	0.90	0.22
30.0	0.22	0.066

## 简化版方框图

图 1-1 所示为易爆环境中采用 HART 协议的传感器变送器的简化方框图。输入功率来自 4-20mA 电流环路。为了满足表 1-1 中的严格电容要求，有一个输出为 10V 电压的前置稳压器。然后，使用降压转换器来输出 3.3V 电压，为 MCU、HART 和 DAC 供电。对于 4-20mA 电流环路，目标是达到更高的功率效率，因此以脉冲频率调制 (PFM) 模式运行的低 IQ 降压转换器是理想选择。但是，由于轻负载时采用的是不连续导通模式 (DCM)，因此降压转换器的输入和输出电压纹波可能会很大。HART 通信协议使用调制频率来表示数字信号，这使得信号对大电压纹波非常敏感。由于允许的电容存在限制，无法仅通过增加降压转换器的输入和输出电容来降低这些纹波。因此，设计一款考虑低纹波和高效率的电源是必要的。

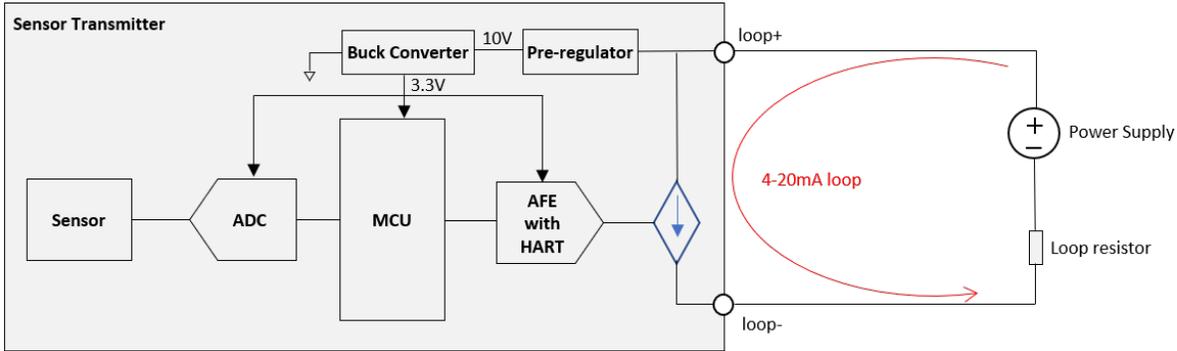


图 1-1. 简化版方框图

本应用手册基于采用 PFM 和 COT 控制的低 IQ 降压转换器 TPS629203。此设计满足典型 HART 系统的要求（如表 1-2 所示），可为工程师提供指南。

表 1-2. 传感器变送器系统的典型电源轨

参数	
输入电压 (VIN)	10V
输出电压 (VOUT)	3.3V
额定负载 (I <sub>O</sub> )	4mA-20mA
输入电容 (C <sub>IN</sub> )	1uF
输出电容 (C <sub>OUT</sub> )	10uF
输入纹波目标 ( $\Delta V_{IN}$ )	0.2%·VIN
输出纹波目标 ( $\Delta V_{OUT}$ )	0.2%·VOUT

## 2 DCM 模式下降压转换器的输入和输出纹波

图 2-1 显示了 DCM 模式下降压转换器的电流环路。高侧 FET 电流  $I_{HS\_FET}$  和电感器电流  $I_L$  都是不连续波。输入电流 ( $I_{IN}$ ) 和负载电流 ( $I_O$ ) 可分别视为  $I_{HS\_FET}$  和  $I_L$  的直流分量。因此，输入电容电流  $I_{CIN}$  和输出电容电流  $I_{COUT}$  是交流分量。基于电荷平衡原理，如果忽略 ESR，则在脉冲期间，通过  $C_{IN}$  和  $C_{OUT}$  上的电荷变化量  $\Delta Q$ ，可以得知输入和输出电压纹波。

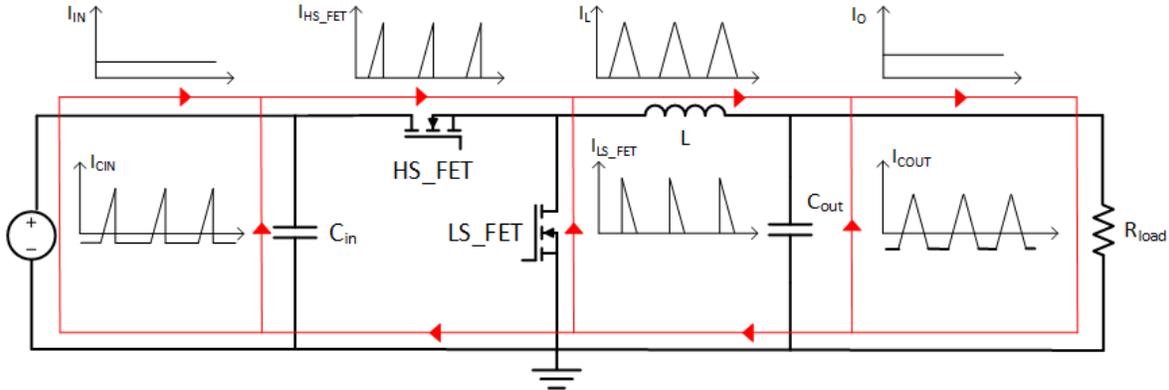


图 2-1. DCM 模式下降压转换器的电流环路

### 输入电压纹波的计算

图 2-1 显示了输入电压纹波  $\Delta V_{IN}$  与  $I_{HS\_FET}$  和  $I_{IN}$  之间的关系。黄色区域表示  $I_{IN}$ ，红线表示  $I_{HS\_FET}$ 。在  $I_{HS\_FET}$  超过  $I_{IN}$  的时间段内， $C_{IN}$  会向高侧 FET 放电，从而使  $\Delta V_{IN}$  降低。红色区域的  $\Delta Q_{HS\_FET}$  电荷可以通过公式 1 计算得出。

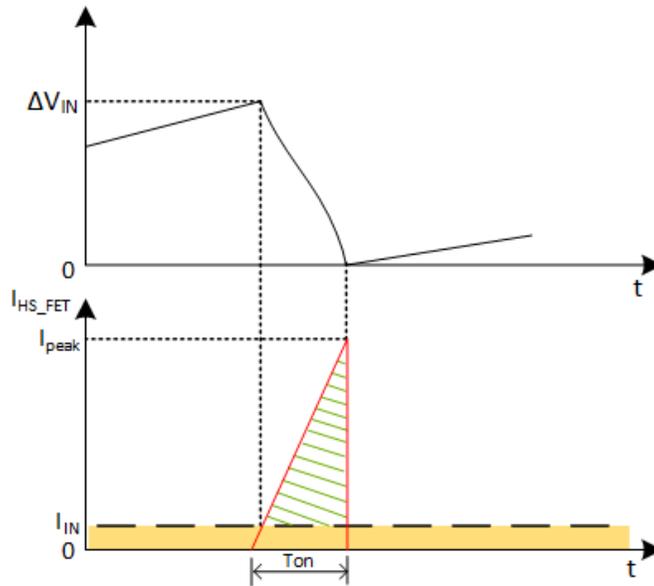


图 2-2. DCM 模式下降压转换器的输入电压纹波

$$\Delta Q_{HS\_FET} = \frac{1}{2} \times I_{peak} \times T_{on} \quad (1)$$

根据几何关系， $\Delta Q_{CIN}$  可以使用公式 2 计算得出。 $\Delta V_{IN}$  可以使用公式 3 计算得出。

$$\Delta Q_{CIN} = \Delta Q_{HS\_FET} \times \left( \frac{I_{peak} - I_{IN}}{I_{peak}} \right)^2 \quad (2)$$

$$\Delta V_{IN} = \frac{1}{2C_{IN}} \times I_{peak} \times T_{on} \times \left( \frac{I_{peak} - I_{IN}}{I_{peak}} \right)^2 \quad (3)$$

### 输出电压纹波的计算

图 2-3 显示了  $\Delta V_{OUT}$  与一个脉冲中的  $I_L$  和  $I_O$  之间的关系。黄色区域表示  $I_O$ ，红线表示  $I_L$ 。在  $I_L$  超过  $I_O$  的时间段内， $C_{OUT}$  会向负载放电，从而使  $\Delta V_{OUT}$  减小。红色区域的  $\Delta Q_L$  电荷可以通过公式 4 计算得出。

$$\Delta Q_L = \frac{1}{2} \times I_{peak} \times (T_{on} + T_{off}) \quad (4)$$

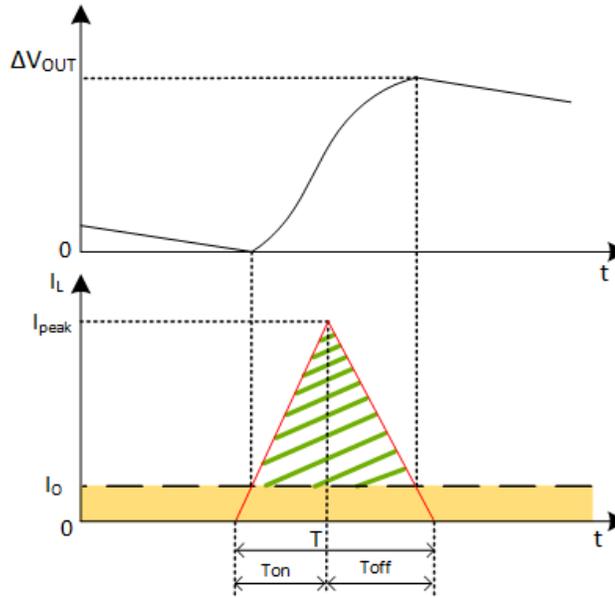


图 2-3. DCM 模式下降压转换器的输出电压纹波

根据公式 5 中关于电感器电流在 DCM 模式下的情况， $\Delta Q_L$  电荷可以进一步用公式 6 来表示。

$$I_{peak} = \frac{V_{IN} - V_{OUT}}{L} \times T_{on} = \frac{V_{OUT}}{L} \times T_{off} \quad (5)$$

$$\Delta Q_L = \frac{1}{2} \times I_{peak} \times \frac{V_{IN}}{V_{OUT}} \times T_{on} \quad (6)$$

根据几何关系， $\Delta Q_{COUT}$  可以通过公式 7 计算得出。 $\Delta V_{OUT}$  可以通过公式 8 计算得出。

$$\Delta Q_{COUT} = \Delta Q_L \times \left( \frac{I_{peak} - I_{LOAD}}{I_{peak}} \right)^2 \quad (7)$$

$$\Delta V_{OUT} = \frac{I_{peak} \times T_{on}}{2C_{OUT}} \times \frac{V_{IN}}{V_{OUT}} \times \left( \frac{I_{peak} - I_{LOAD}}{I_{peak}} \right)^2 \quad (8)$$

### 3 TPS629203 设计注意事项

TPS629203 是一款采用 DCS 控制 (COT)、高效且易于使用的同步降压转换器，其典型 IQ 为 4uA。在  $V_{IN} = 10V$  且  $V_{out} = 3.3V$  的电源轨中，TPS629203 的输入和输出电容器选择为  $C_{IN}=1\mu F$  (GRM21BR71E105KA99L) 和  $C_{OUT} = 10\mu F$  (GRM21BR61E106MA73L)。考虑到陶瓷电容器的直流偏置效应和电容变化，实际电容可视为  $C_{IN} = 0.9\mu F$ 、 $C_{out} = 5.8\mu F$ 。从“TPS629203 300mA、具有 DCS 控制的 3V 到 17V 低 IQ 降压转换器”数据表中的模式说明中，可使用公式 9 计算具有 AEE 功能的恒定导通时间。

$$T_{on} = 100 \times \frac{V_{IN}}{V_{IN} - V_{OUT}} (\text{ns}) = 150 (\text{ns}) \quad (9)$$

为满足纹波目标，值为表 1-2 中输入和输出电压的 0.2%。根据公式 3 和公式 8，电感器可以计算为  $L \leq 5.6\mu H$ 。图 3-1 是整个设计的原理图。考虑到输入电容很低，用户可能会遇到振荡问题，尤其是当输入布线较长时。因此，TI 建议在输入布线上添加一个  $1\Omega$  电阻器 (R3) 以起到阻尼作用。

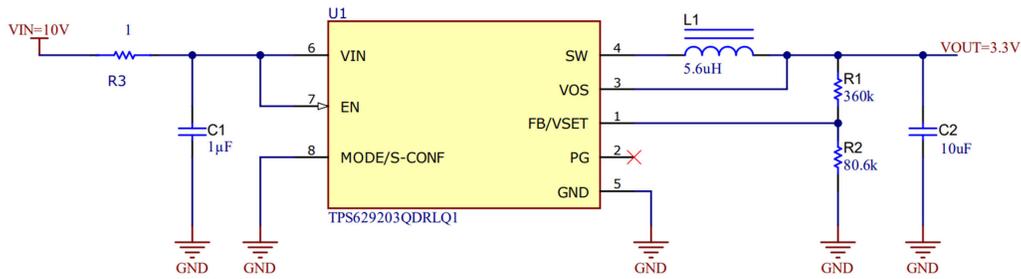


图 3-1. TPS629203 原理图设计

## 4 实验结果

### 4.1 VIN 和 VOUT 纹波结果

图 4-1、图 4-2 和 图 4-3 是 TPS629203 VIN 纹波的仿真结果。图 4-1、图 4-2 和 图 4-3 是台架测试结果。负载电流分别为 4mA、10mA 和 20mA。

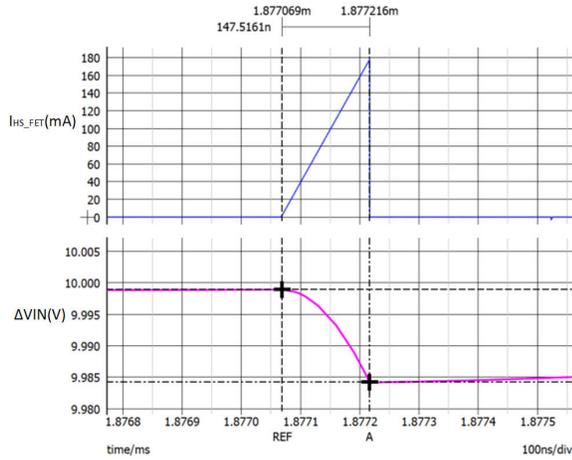


图 4-1.  $I_O = 4\text{mA}$  时仿真的 Vin 纹波

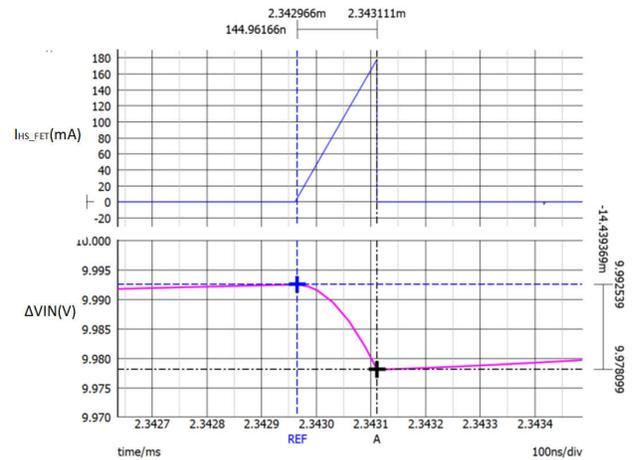


图 4-2.  $I_O = 10\text{mA}$  时仿真的 Vin 纹波

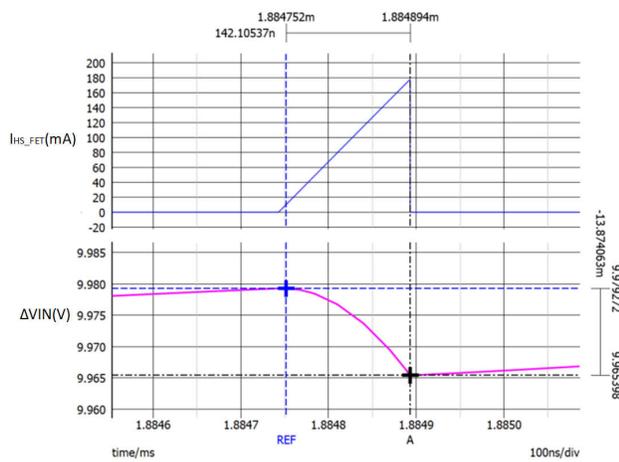


图 4-3.  $I_O = 20\text{mA}$  时仿真的 Vin 纹波

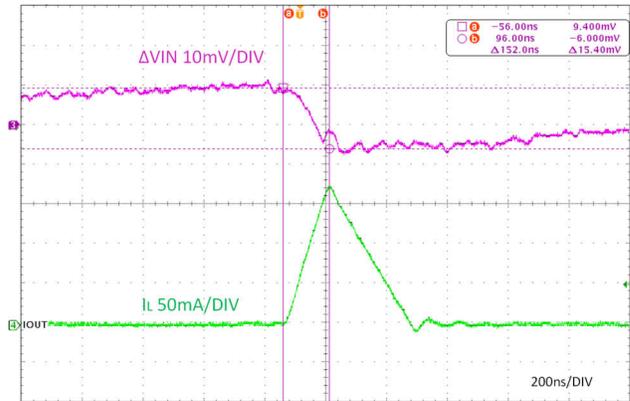


图 4-4.  $I_O = 4\text{mA}$  时台架测试的 VIN 纹波

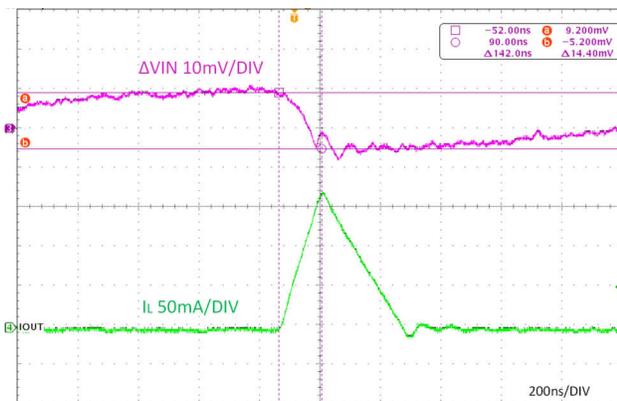


图 4-5.  $I_O = 10\text{mA}$  时台架测试的 VIN 纹波

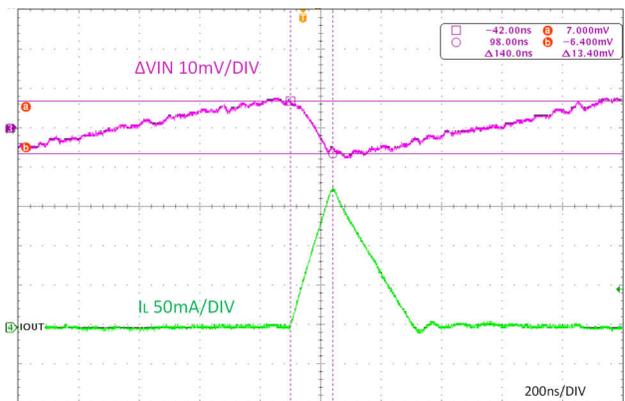


图 4-6.  $I_O = 20\text{mA}$  时台架测试的 VIN 纹波

图 4-7、图 4-8 和 图 4-9 是 TPS629203 VOUT 纹波的仿真结果。图 4-10、图 4-11 和 图 4-12 是台架测试结果。负载电流点分别为 4mA、10mA 和 20mA。

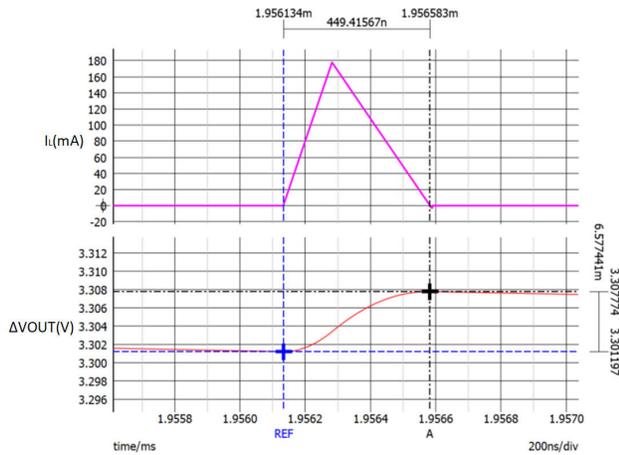


图 4-7.  $I_O = 4\text{mA}$  时仿真的 VOUT 纹波

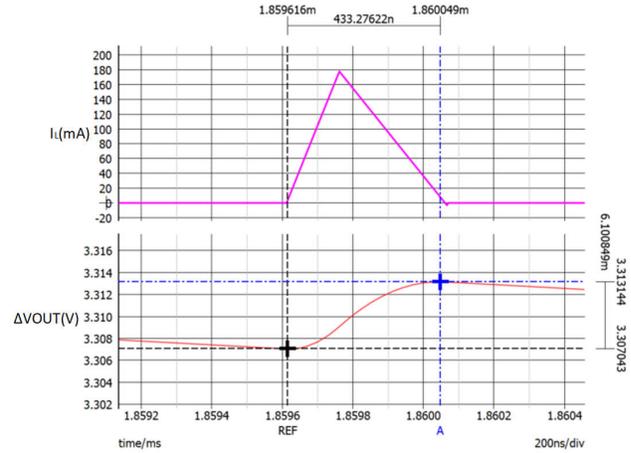


图 4-8.  $I_O = 10\text{mA}$  时仿真的 VOUT 纹波

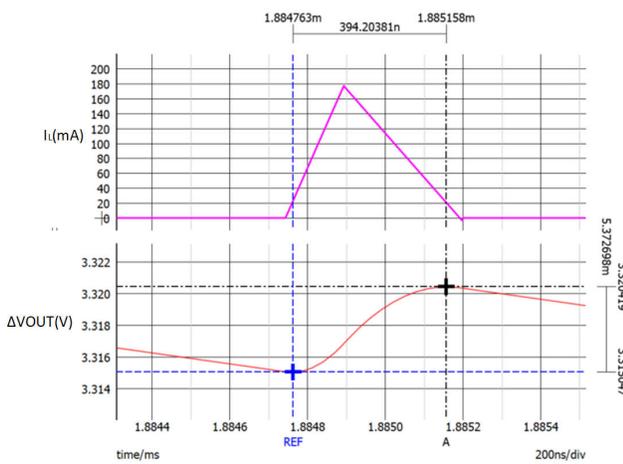


图 4-9.  $I_O = 20\text{mA}$  时仿真的 VOUT 纹波

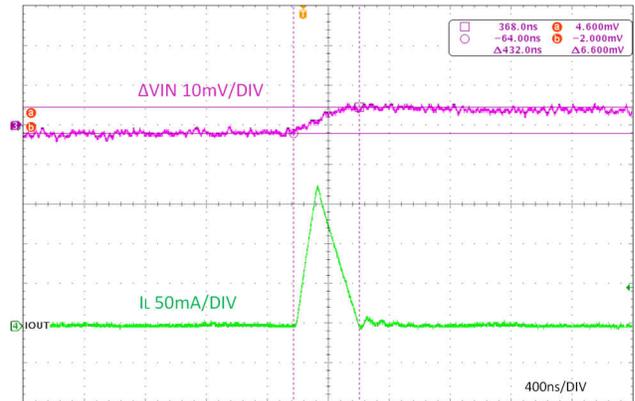


图 4-10.  $I_O = 4\text{mA}$  时台架测试的 VOUT 纹波

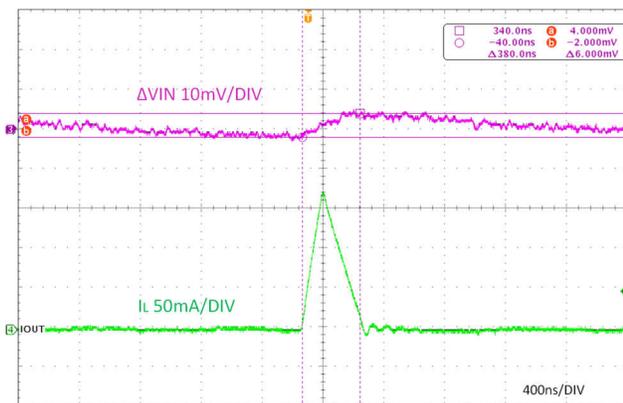


图 4-11.  $I_O = 10\text{mA}$  时台架测试的 VOUT 纹波

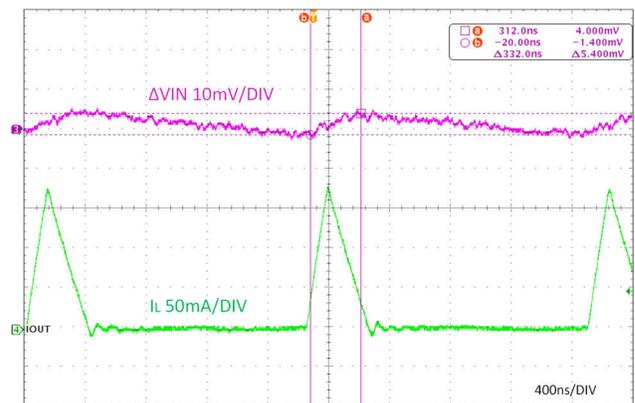


图 4-12.  $I_O = 20\text{mA}$  时台架测试的 VOUT 纹波

表 4-1 和 表 4-2 展示了计算的值与仿真和台架测试结果的比较。误差很小，证明了上述设计流程的正确性，能够实现设计目标。

表 4-1. 计算、仿真和台架测试结果  $\Delta V_{IN}$  比较

负载电流	计算值 ( $\Delta V_{IN}$ )	仿真值 ( $\Delta V_{IN}$ )	台架测试值 ( $\Delta V_{IN}$ )
4mA	14.6mV	14.7mV	15.4mV
10mA	14.2mV	14.4mV	14.4mV
20mA	13.4mV	13.8mV	13.4mV

表 4-2. 计算、仿真和台架测试结果  $\Delta V_{OUT}$  比较

负载电流	计算值 ( $\Delta V_{OUT}$ )	仿真值 ( $\Delta V_{OUT}$ )	台架测试值 ( $\Delta V_{OUT}$ )
4mA	6.7mV	6.6mV	6.6mV
10mA	6.1mV	6.1mV	6.0mV
20mA	5.5mV	5.4mV	5.4mV

## 效率

图 4-13 显示了 4mA 和 20mA 负载电流下的效率。观察到 TPS629203 的效率范围为 80.3% 至 82.1%，这在满足外部电容要求的同时实现了高效率。

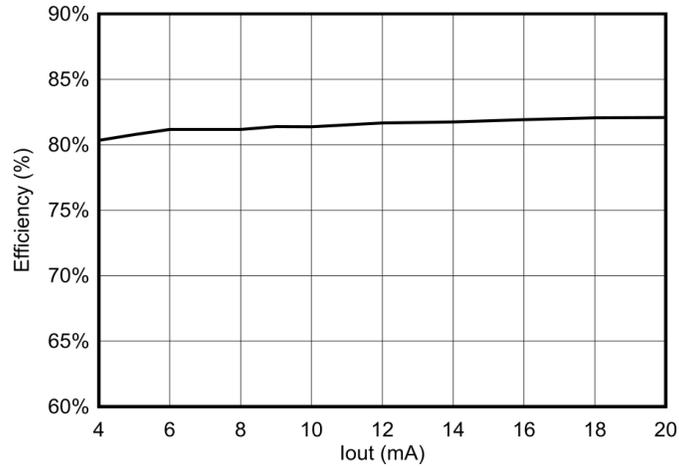


图 4-13. 使用 5.6uH 电感器时的效率

如果可以放宽纹波限值，则可以进一步提高效率。在一个  $T_{cycle}$  周期时间中，电感器的电荷  $\Delta Q_L$  等于图 4-13 中负载消耗的电荷。因此，可以使用公式 10 计算  $T_{cycle}$ 。

$$T_{cycle} = \frac{\Delta Q_L}{I_{LOAD}} = \frac{V_{IN} - V_o}{2I_{LOAD} \times L} \times \frac{V_{IN}}{V_o} \times T_{on}^2 \quad (10)$$

对于具有恒定导通时间的降压转换器，可以通过减小电感器 L 来增加  $T_{cycle}$ ，从而可以减小开关损耗并提高效率。然而，这会导致公式 3 和公式 8 中的纹波增加。

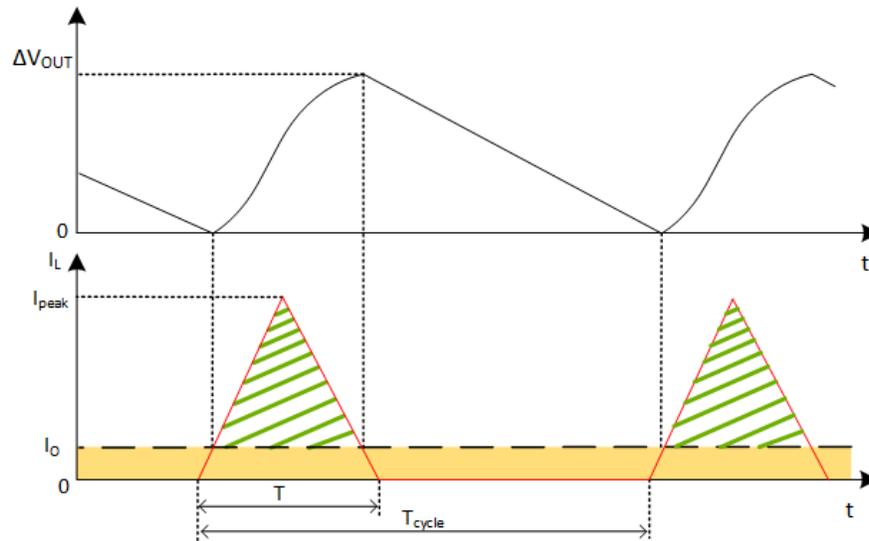
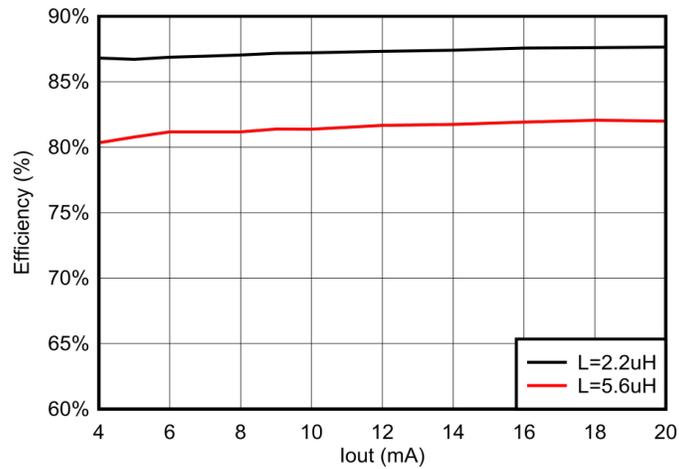


图 4-14. DCM 中的周期时间

图 4-15 比较了 2.2 $\mu$ H 电感器的效率 (纹波为输入和输出电压的 0.5%) 和 5.6 $\mu$ H 电感器的效率 (纹波为输入和输出电压的 0.2%)。观察到效率已升至 86.8%-87.7%。

图 4-15. 使用 2.2 $\mu$ H 电感器和 5.6 $\mu$ H 电感器时的效率

## 5 总结

本文档介绍了可在易爆环境中工作、采用 HART 协议的典型传感器发送器。根据 IEC 标准，本应用手册介绍了如何使用器件 TPS629203 及相关方法来设计降压转换器系统，从而满足输入和输出电容、纹波及效率方面的要求。本文还解释了脉冲频率调制 (PFM) 和 DCS 控制 (COT) 理论，以帮助系统设计人员更好地了解应用并实施设计。

## 6 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [TPS629203 300mA、具有 DCS 控制的 3V 到 17V 低 IQ 降压转换器](#), 数据表
2. 德州仪器 (TI), [了解 D-CAP 降压转换器在 DCM 运行模式下的输出电压纹波](#), 应用手册
3. 德州仪器 (TI), [TPS629203 降压转换器评估模块](#), 用户指南。
4. IEC 60079-11, [易爆环境 - 第 11 部分：由本质安全型“i”保护的的设备](#), 网页
5. 德州仪器 (TI), [HART 协议基本指南](#), 应用手册

## 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