

Application Note

隔离型环路供电 4-20mA 现场变送器设计



Donna Xu, Preeti Udupudi, Juergen Schneider

摘要

本应用手册介绍了用于双线制环路供电 4-20mA 现场变送器或传感器的三种隔离型低功耗电源设计，这些设计均基于初级侧半桥拓扑和次级侧肖特基整流创建。设计 1 使用 50kHz 的开关频率并提供出色的效率，在 TI.com 上作为 TIDA-00349 提供。设计 2 侧重于优化布板空间，工作开关频率为 250kHz，并使用定制的小尺寸变压器。此外，设计 3 使用 MSPM0 生成双通道 PWM (脉宽调制) 信号，灵活性在这三个设计中是最大的，开关频率高达 500kHz。本应用手册详细介绍了设计 3。

内容

1 引言.....	2
1.1 系统说明.....	2
1.2 设计 1：50kHz 高效率设计.....	2
1.3 设计 2：250kHz 空间优化型设计.....	2
1.4 设计 3：具有灵活开关频率的 MCU 驱动型设计.....	3
2 设计文件.....	7
2.1 原理图.....	7
2.2 物料清单.....	7
3 总结.....	9
4 参考资料.....	9

商标

FemtoFET™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

1.1 系统说明

在工业自动化和控制领域，双线制环路供电 4-20mA 现场变送器很常见，因为它能准确可靠地远距离传输信号。电流环路能够在数百米甚至数千米范围内保持信号完整性，这在很大程度上归功于电流信号能够稳健处理长线缆上引入的电气噪声。与电压信号不同，基于电流的信号不易受到压降和电磁源干扰的影响，从而确保了传感器和控制系统的通信路径稳定可靠。

但本质上，工业现场通常需要热电偶等传感器直接接触接地金属结构，而它们通信的控制系统可以参考不同的地电位。这种电势差会产生接地环路电流，由于所涉及的距离较长，这会导致信号中引入不需要的噪声和潜在偏移，从而显著降低测量精度。为了缓解这些问题，实施电气隔离势在必行。

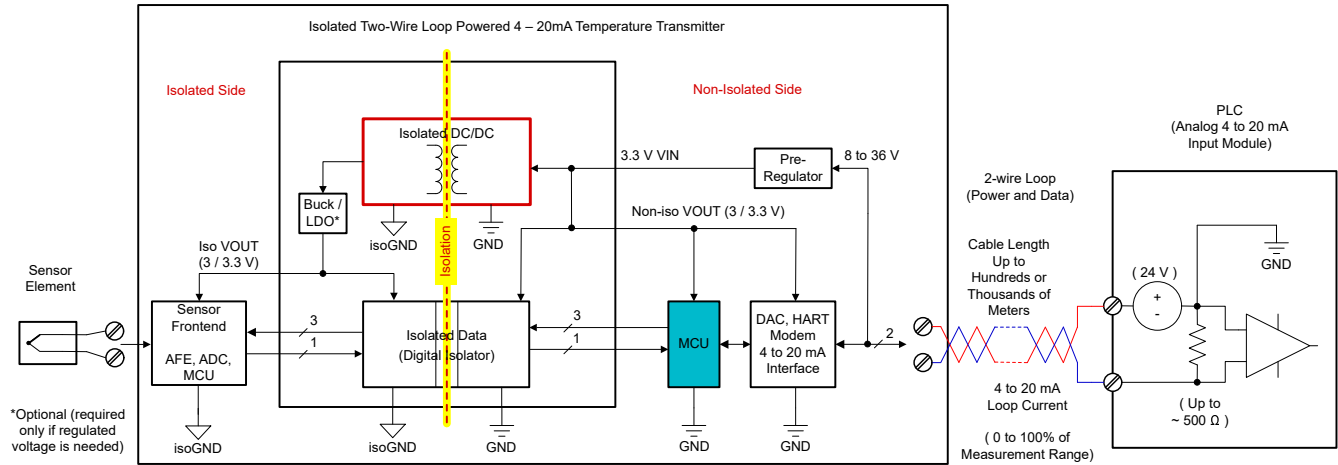


图 1-1. 隔离型双线制环路供电 4-20mA 温度变送器控制系统

图 1-1 展示了隔离型双线制环路供电 4-20mA 温度变送器系统的典型方框图，旨在将传感器测量数据转换为 4-20mA 环路电流信号，其中展示了通信总线和系统电源的电流流动情况。在正常运行条件下，变送器发送器的总功耗必须小于实际环路电流。任何独立子电路（包括隔离式直流/直流电路）节省下来的功率均可重新分配到系统的其他电路块。这可以优化其他功能，最终实现更高效的终端产品。由于电源电流预算有限，因此必须采用高效的电源设计。本应用手册将重点介绍图 1-1 红框内的隔离式直流/直流设计，而设计 3 更适用于系统非隔离侧已经有 MCU 的情况，见蓝色框中所示。此外，这些设计具有灵活性，还可针对需要小尺寸、高效功率转换和隔离式数据传输的各种应用进行定制，尤其是当这些应用必须由电流可用性受限的电源供电时。

1.2 设计 1：50kHz 高效率设计

设计 1 的工作温度为 -40°C 、 $+25^{\circ}\text{C}$ 和 $+85^{\circ}\text{C}$ ，接受 3V 至 5.2V 的输入电压，并提供高达 10mA 的输出电流。它使用低功耗电荷泵以 50kHz 的频率驱动变压器。即使在非常低的输出功率水平（从几十毫瓦到亚毫瓦范围）下，低开关频率也有助于实现独特的高效率。此设计在 5V 输入电压、15mW 至 50mW 输出功率下，能提供 85% 以上的效率；在 3.3V 输入电压、3mW 至 20mW 功率水平下，能提供 80% 以上的效率。

1.3 设计 2：250kHz 空间优化型设计

设计 2 侧重于通过减小变压器尺寸来优化布板空间，表 1-1 从不同特性对两个变压器进行了简单比较。设计 2 和设计 3（具有高开关频率）使用一个尺寸较小的定制变压器（ $9.60 \times 5.51 \times 4.83\text{mm}^3$ ）。

表 1-1. 变压器规格比较

	匝数比 (NP:NS)	磁化电感 L_m (mH)	V-t 积 (V- μs)	隔离 (V_{AC} , 1 分钟)	尺寸 (mm^3)	工作温度范围 ($^{\circ}\text{C}$)	制造商
设计 1	1:1.25	> 3	100	1500	$9.78 \times 9.14 \times 10.54$	-40 至 100	WURTH ELEKTRONIK
设计 2、3	1:1.5	>0.6	10	800	$9.60 \times 5.51 \times 4.83$	-40 至 100	WURTH ELEKTRONIK

图 1-2 展示了设计 2 的详细原理图，为了使用尺寸更小的变压器，必须增加开关频率。这可以通过使用频率为 250kHz 的 TPS60403 来实现。在此设计中，由于开关频率较高，电荷泵的功耗更高。因此，设计 2 的效率将略低于设计 1。但是，它仍然可以在 3.6V 输入下实现超过 80% 的效率，在 1.8V 输入下实现接近 70% 的效率。

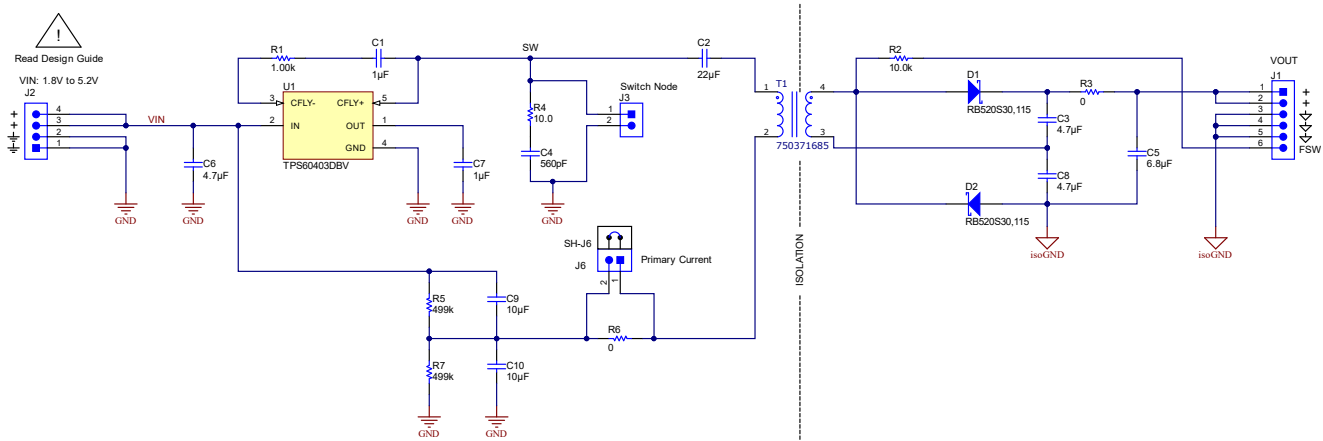


图 1-2. 设计 2 原理图

1.4 设计 3：具有灵活开关频率的 MCU 驱动型设计

设计 3 可在 1.62V 至 3.6V 的输入电压范围内工作，兼容高达 10mA 的输出电流。在效率方面，设计 3 在输入电压为 3.6V 时最高可达 83%，在输入电压为 1.8V 时最高可达 72%（开关频率均为 50kHz）。当开关频率增加至 250kHz 时，3.6V 输入电压下的效率可达 77%，1.8V 输入电压下的效率可达 62%。

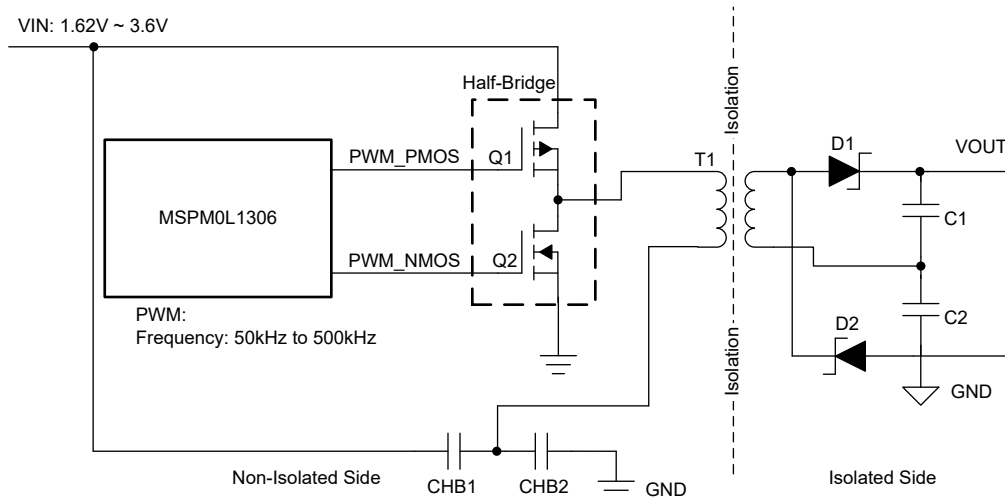


图 1-3. 设计 3 方框图

图 1-3 展示了 MCU 驱动型设计的方框图，它使用 MSPM0L1306 生成双通道 PWM 信号，控制由 P-MOSFET 和 N-MOSFET 组成的半桥，进而驱动非隔离侧的变压器初级绕组和隔离侧的双电压电路。MSPM0 系列 MCU 的多功能性可准确实现高达 500kHz 的可编程开关频率。

1.4.1 MOSFET 选型

为了确保图 1-3 中的半桥电路在安全范围内运行、保持效率并延长电路的寿命，选择合适的 MOSFET 需要考虑以下因素：

1. 电压额定值：MOSFET 的漏源电压额定值 (V_{DS}) 必须超过电路的最大输入电压 (3.6V)，以便在出现电压尖峰时不会发生击穿。

2. $R_{DS(on)}$ 阻值：为了降低传导损耗，最好选择较低的导通电阻 ($R_{DS(on)}$)，这样可以提高效率并尽可能减少发热。
3. 栅极电荷：较少的栅极电荷 (Q_g) 可实现更快的开关速度和更低的开关损耗，这对于高开关频率运行至关重要。

除了上述特性外，还要务必考虑阈值电压 ($V_{GS(th)}$)、开关速度和封装。为了实现更紧凑的设计，这里对具有超小型封装布局的各种 MOSFET 进行了比较，详见表 1-2 (针对 N-MOSFET) 和表 1-3 (针对 P-MOSFET)。

表 1-2. 超小型封装布局 N 沟道 FemtoFET™ MOSFET 的比较

	CSD13380F3	CSD13383F4	CSD13385F5	CSD15380F3	CSD17381F4
V_{DS} (V)	12	12	12	20	30
$R_{DS(on)}$ ($m\Omega$) ($V_{GS} = 2.5V$)	73	53	18	2220	110
Q_g (典型值) (nC)	0.91	2.0	3.9	0.216	1.04
$V_{GS(th)}$ (典型值) (V)	0.85	1.0	0.8	1.1	0.85

表 1-3. 超小型封装布局 P 沟道 FemtoFET™ MOSFET 的比较

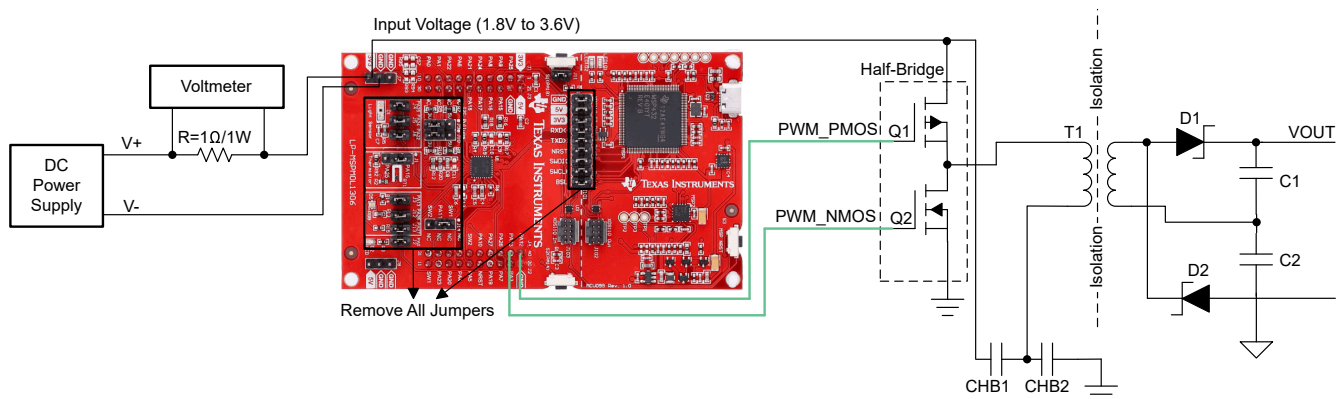
	CSD23280F3	CSD23382F4	CSD23285F5	CSD25480F3	CSD25481F4
V_{DS} (V)	-12	-12	-12	-20	-20
$R_{DS(on)}$ ($m\Omega$) ($V_{GS} = -2.5V$)	129	90	38	203	145
Q_g (典型值) (nC)	0.95	1.04	3.2	0.7	0.913
$V_{GS(th)}$ (典型值) (V)	-0.65	-0.8	-0.65	-0.95	-0.95

比较了表中的规格后，N 沟道 MOSFET 选用 CSD13380F3，P 沟道 MOSFET 选用 CSD23382F4。依据是它们具有更低的导通电阻 ($R_{DS(on)}$)，而且开关所需的电荷 (Q_g) 更少，因此功耗更低、开关速度更快。此外，这两款器件的阈值电压 ($V_{GS(th)}$) 非常相似，可确保实现平衡的开关，并降低转换期间发生短路的风险，总体而言，能提高电路运行效率。这些特性使其非常合适用于空间受限的高频应用。

1.4.2 效率测试

1.4.2.1 PWM (I_{pwm}) 电流消耗测试

为了准确地确定 MCU 驱动型设计的效率，必须了解 MSPM0 产生双通道 PWM 信号时的电流消耗。该测试在 MSPM0L1306 评估模块 (EVM) 电路板上执行，测试配置如图 1-4 所示。通过测量 MCU 驱动半桥时 (连接绿线) 的电流消耗，然后减去 MCU 运行空程序而消耗的电流 (断开绿线)，可得出用于生成双通道 PWM 信号的特定电流。


图 1-4. MSPM0L1306 EVM 电路板电流消耗测试的设置

根据 [MSPM0L1306 LaunchPad 开发套件用户指南](#) 的第 2.6 节内容，使用外部电源，而不是 PC 的 USB 电源。MSPM0L1306 处于“自由运行”模式，并断开 MSPM0L1306 和电路板调试部分（接头 J101）之间的编程信号。

通过测量分流电阻（位于电源正极端子和 MSPM0L1306 EVM 电路板 3V3 引脚之间）两端的压降，有助于进行电流测量。为了防止 I/O 悬空导致任何额外的电流消耗，将所有未使用的 GPIO 设置为低电平。此外，为了将微控制器与任何寄生负载隔离，应断开所有其他跳线，尤其是连接到指示灯 LED 的跳线。

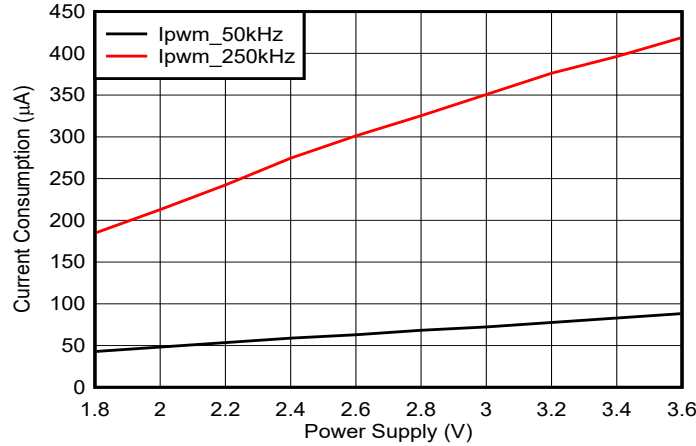


图 1-5. MSPM0L1306 在不同 PWM 频率下的电流消耗与电源电压

图 1-5 展示了在 1.8V 至 3.6V 的不同电源电压和不同频率下，生成 PWM 信号时的电流消耗。红线展示了占空比为 45.3%、开关频率为 250kHz 时的电流消耗，黑线展示了占空比为 49%、开关频率为 50kHz 时的电流消耗。随着电源电压增加，电流消耗也增加。具体而言，在 250kHz 的较高开关频率下，整个电源电压范围内的电流消耗明显比在 50kHz 较低频率下的消耗更大。

1.4.2.2 效率测试设置

隔离式直流/直流的效率是双线制环路供电 4-20mA 现场变送器系统的关键参数，影响着环路电源的功耗和可靠性。图 1-6 展示了 MCU 驱动型设计效率测试的设置。其中，连接的精密仪器用于记录输入和输出电压（ V_{in} 和 V_{out} ）以及电流（ I_{in} 和 I_{out} ）。旋转电阻箱用作负载，它在高达 10mA 的输出电流范围内工作以进行测试。配备的数字万用表可高精度采集电压和电流读数，确保收集的数据反映此设计的真实性能。可使用 [方程式 1](#) 计算效率，其中 I_{pwm} 是上一节中的测试结果。

$$\text{Efficiency} = \frac{V_{out} \times I_{out}}{V_{in} \times (I_{in} + I_{pwm})} \quad (1)$$

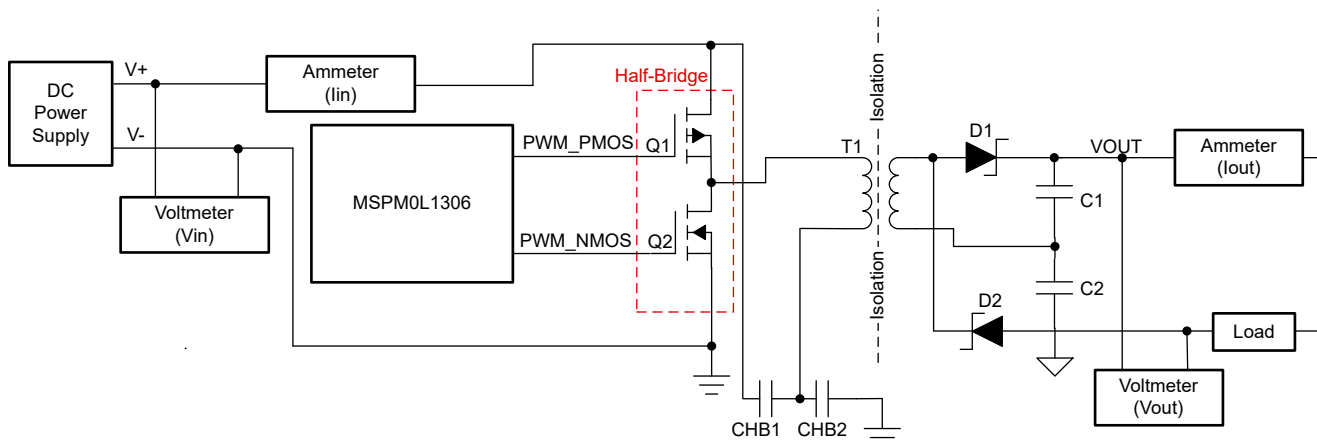


图 1-6. 效率测试设置

1.4.2.3 50kHz 开关频率下的效率测试结果

该效率测试是在输入电压设置为 1.8V、2.4V 和 3.6V 的条件下进行的。图 1-7 展示了设计 1 (用实线表示) 和设计 3 (用虚线表示) 效率曲线与输出电流的关系。在此测试中,设计 3 使用与设计 1 相同的变压器,并以 50kHz 开关频率运行。当输入电压为 3.6V 时,观察到两种设计的效率均超过 80%。

图 1-8 展示了这两种设计的输出电压与输出电流的函数关系,两者在测试的整个电流范围内均具有良好的线性度。

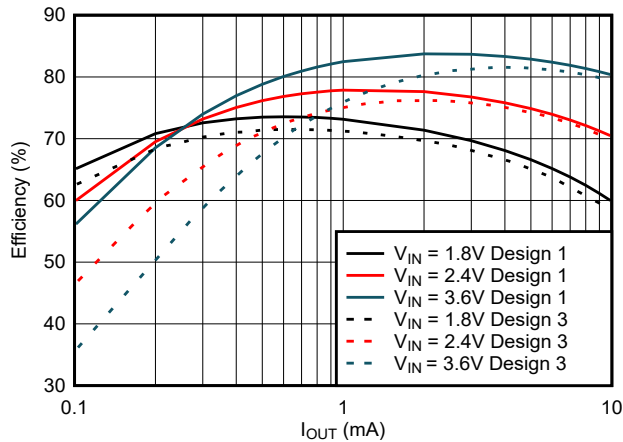


图 1-7. 50kHz 开关频率下设计 1 和设计 3 的效率测试结果

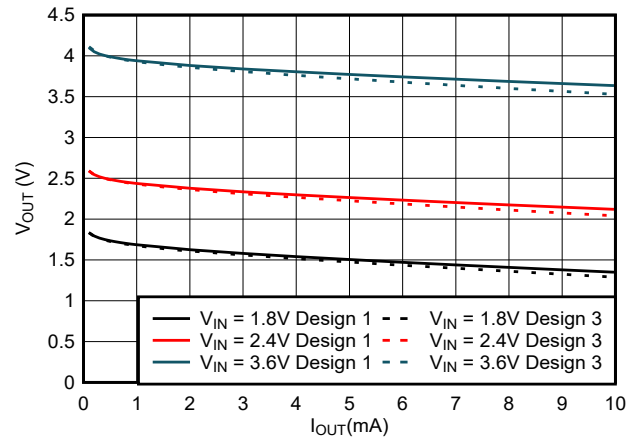


图 1-8. 50kHz 开关频率下设计 1 和设计 3 中 VOUT 与 IOUT 的关系

1.4.2.4 250kHz 开关频率下的效率测试结果

250kHz 开关频率的效率测试采用了与 50kHz 频率测试相同的布置,但包含一个新设计的更小型变压器。实线表示设计 2 的结果,而虚线对应于设计 3。图 1-9 展示了两种设计的效率与输出电流关系曲线,图 1-10 展示了输出电压与输出电流之间的函数关系。

这些测试是在 1.8V、2.4V 和 3.6V 输入电压下执行的。开关频率增至 250kHz 会导致 MSPM0L1306 生成 PWM 信号产生的功耗更高,这一点可通过图 1-5 的数据对比证明。与设计 2 相比,设计 3 的效率有所降低,这是由于功耗增加的原因。尽管如此,在 3.6V 的输入电压下,设计 3 也能实现高达 77% 的效率。

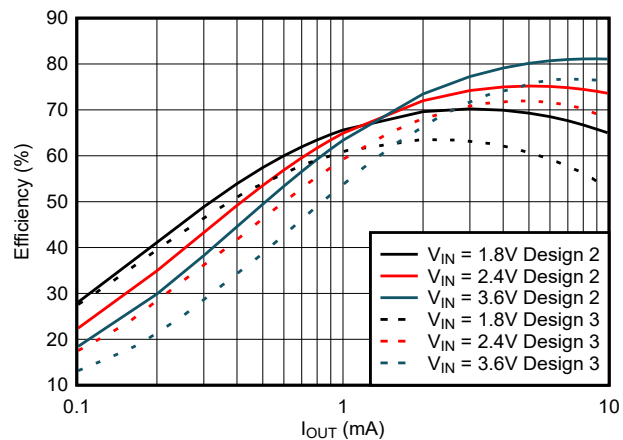


图 1-9. 250kHz 开关频率下设计 2 和设计 3 的效率测试结果

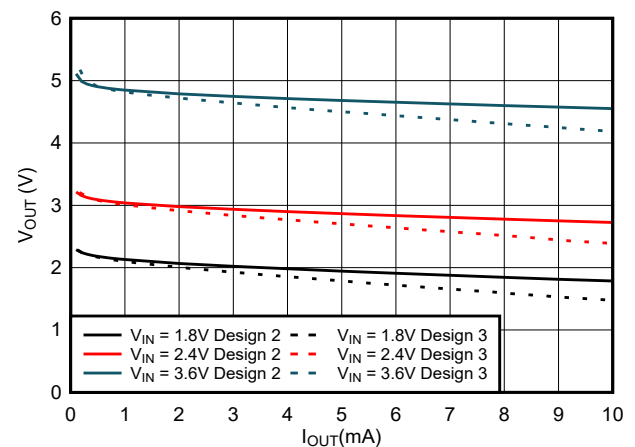


图 1-10. 250kHz 开关频率下设计 2 和设计 3 中 VOUT 与 IOUT 的关系

2 设计文件

2.1 原理图

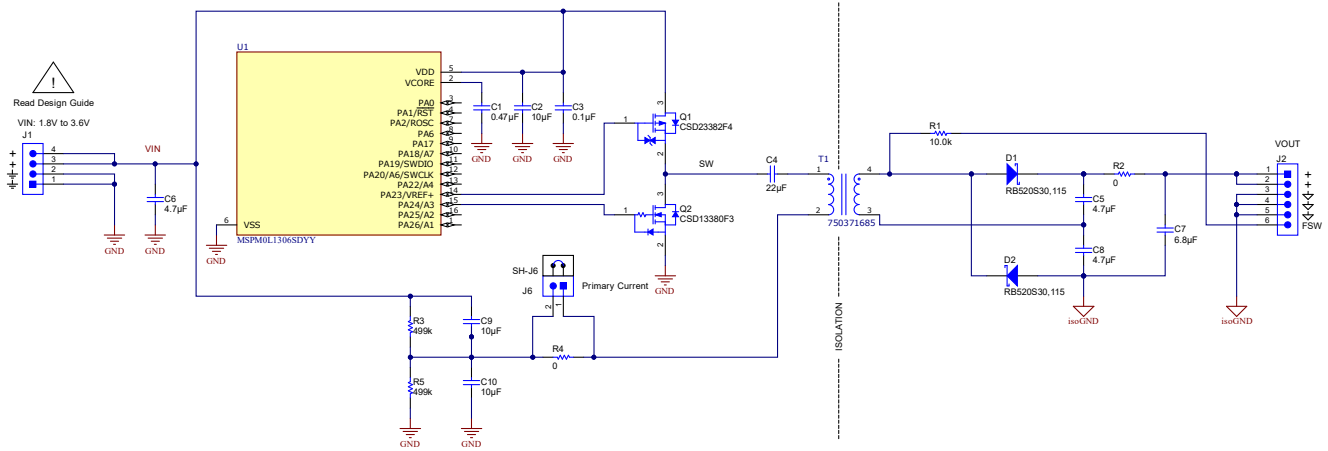


图 2-1. 设计 3 原理图

2.2 物料清单

表 2-1. 物料清单

项目编号	标识符	数量	器件型号	制造商	说明	封装参考
1	!PCB	1		不限	印刷电路板	
2	C1, C2, C3, C6	4	C0603C475K8PACTU	Kemet	电容, 陶瓷, 4.7uF, 10V, ±10%, X5R, 0603	0603
3	C4	1	GRM31CR61A226KE19L	MuRata	电容, 陶瓷, 22uF, 10V, ±10%, X5R, 1206	1206
4	C5, C8	2	CGB3B1X5R1A475K055AC	TDK	电容, 陶瓷, 4.7uF, 10V, ±10%, X5R, 0603	0603
5	C7	1	C1608X5R1E685K080AC	TDK	电容, 陶瓷, 6.8uF, 25V, ±10%, X5R, 0603	0603
6	C9, C10	2	GRM21BR71A106KE51L	MuRata	电容, 陶瓷, 10uF, 10V, ±10%, X7R, 0805	0805
7	D1, D2	2	RB520S30,115	NXP Semiconductor	二极管, 肖特基, 30V, 0.2A, SOD-523	SOD-523
8	H1、H2、H3、H4	4	SJ5382	3M	Bumpon, 半球形, 0.25 X 0.075, 透明	75x250mil
9	J1	1	61300411121	Würth Elektronik eiSos	接头, 2.54mm, 4x1, 金, TH	接头, 2.54mm, 4x1, TH
10	J2	1	61300611121	Würth Elektronik eiSos	接头, 2.54mm, 6x1, 金, TH	接头, 2.54mm, 6x1, TH
11	J6	1	61300211121	Würth Elektronik eiSos	接头, 2.54mm, 2x1, 金, TH	接头, 2.54mm, 2x1, TH
12	LBL1	1	THT-14-423-10	Brady	热转印可打印标签, 0.650" (宽) x 0.200" (高) - 10,000/卷	PCB 标签 0.650" (高) x 0.200" (宽)
13	Q1	1	CSD23382F4	德州仪器 (TI)	MOSFET, P 沟道, -12V, -3.5A, YJC0003A (PICOSTAR-3)	YJC0003A

表 2-1. 物料清单 (续)

项目编号	标识符	数量	器件型号	制造商	说明	封装参考
14	Q2	1	CSD13380F3	德州仪器 (TI)	MOSFET, N 沟道, 12V, 3.6A, YJM0003A (PICOSTAR-3)	YJM0003A
15	R1	1	CRCW040210K0FKED	Vishay-Dale	电阻, 10.0k, 1%, 0.063W, 0402	0402
16	R2	1	CRCW08050000Z0EAHP	Vishay-Dale	电阻, 0, 5%, 0.333W, 0805	0805
17	R3、R5	2	CRCW0402499KFKED	Vishay-Dale	电阻, 499k Ω , 1%, 0.063W, 0402	0402
18	SH-J6	1	969102-0000-DA	3M	分流器, 100mil, 镀金, 黑色	分流器
19	T1	1	750371685	Würth Electronics	变压器	SMT4
20	U1	1	MSPM0L1306SDYY	德州仪器 (TI)	混合信号微控制器 SOT-23-THIN-16	SOT-23-THIN-6
21	FID1、FID2、 FID3	0	不适用	不适用	基准标记。没有需要购买 或安装的元件。	基准
22	R4	0	CRCW08050000Z0EAHP	Vishay-Dale	电阻, 0, 5%, 0.333W, 0805	0805

3 总结

本应用手册介绍了有关双线制环路供电 4-20mA 现场变送器系统隔离电源的三种设计。

设计 1 以 50kHz 的固定开关频率运行，在 5V 输入电压下提供最高的效率（达 86%），并能在较低的输入电压下保持较高的效率。但是，它使用的变压器尺寸较大，可能不是尺寸受限型应用的理想之选。

与设计 1 相比，设计 2 具有 250kHz 开关频率，但效率略有降低，在 3.6V 时的最高效率为 80%。它的变压器尺寸更小，有利于实现紧凑设计。

设计 3 的灵活性最高，其可编程频率高达 500kHz，可使用小型变压器，并保持紧凑的外形尺寸。表 3-1 对这三种设计进行了汇总。

表 3-1. 三种设计的比较

特性	设计 1 (50kHz)	设计 2 (250kHz)	设计 3 (高达 500kHz)
开关频率	固定 50kHz (- 40% , +40%)	固定 250kHz (-40% , +20%)	可编程，高达 500kHz
效率	<ul style="list-style-type: none"> • 86%(5V) • 82%(3.3V) 	<ul style="list-style-type: none"> • 80%(3.6V) • 67%(1.8V) 	<ul style="list-style-type: none"> • 50kHz : <ul style="list-style-type: none"> - 83%(3.6V) - 72%(1.8V) • 250kHz : <ul style="list-style-type: none"> - 77%(3.6V) - 62%(1.8V)
变压器尺寸 (mm ³)	大 9.78 x 9.50 x 10.54	小 9.60 x 5.51 x 4.83	小 9.60 x 5.51 x 4.83

总之，应根据具体的应用要求选择合适的设计，同时考虑电路板的整体尺寸和效率等因素。设计 3 特别适用于非隔离侧已存在 MCU 的系统，可提供简化的集成和可编程灵活性。

4 参考资料

1. 德州仪器 (TI), [适用于超低功耗和低功耗应用的独特高效隔离式直流/直流转换器](#), 设计指南。
2. 德州仪器 (TI), [隔离式环路供电热电偶变送器](#), 设计指南。
3. 德州仪器 (TI), [适用于低功耗应用的隔离式电源和数据接口](#), 设计指南。
4. 德州仪器 (TI), [MSPM0L1306 LaunchPad 开发套件 \(LP-MSPM0L1306\)](#), 用户指南。

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 © 2024，德州仪器 (TI) 公司