



## 摘要

IEEE 802.3cg 10BASE-T1L 规范通过以下方法同时解决了工业通信中的许多问题：通过一对双绞线实现距离长达 1000 米的 10Mbps 全双工通信，DP83TD510E 单对以太网 PHY 已经可以利用这一点。此外，该标准还包括数据线供电 (PoDL) 作为以太网供电 (PoE) 的单对替代方案。这使得工厂和楼宇自动化市场的设计人员能够使用其熟悉的基于以太网的协议在工业控制器和传感器之间进行长距离通信，其中以太网协议套件中的 TCP/IP 协议是 OPC UA、MQTT 和 HTTP 的基础。PoDL 可实现这一点，同时还减少了布线，并融合和简化了现有的 4mA 至 20mA 或现场总线通信网络。10BASE-T1L PoDL 系统由电源设备 (PSE)、链路段和供电设备 (PD) 组成。本文档概述了此类系统，并详细描述了如何设计符合 10BASE-T1L 12 类标准的 PoDL PD。

## 内容

1 引言.....	2
1.1 10BASE-T1L (IEEE 802.3cg) PoDL 概述.....	2
1.2 PoDL PSE 类型和功率等级.....	3
2 术语.....	3
3 PD 设计.....	4
3.1 PD 设计概述.....	4
3.2 耦合和去耦网络 (CDN).....	4
3.3 VID 电路.....	5
3.4 SCCP 通信.....	7
3.5 保护特性.....	9
3.6 电源和可扩展性.....	9
4 参考文献.....	11
5 修订历史记录.....	11

## 插图清单

图 1-1. 数据线供电 (PoDL) 简图.....	2
图 3-1. PoDL PD 系统方框图.....	4
图 3-2. PD 耦合和去耦网络.....	5
图 3-3. PD VID 电路.....	6
图 3-4. PD 特征电压测试结果.....	6
图 3-5. PD SCCP 系统方框图.....	7
图 3-6. PD 简化的最终 SCCP 电路.....	8
图 3-7. PD LDO 电路.....	8
图 3-8. PSE 启动行为.....	9
图 3-9. PSE 以 SCCP 启动.....	9
图 3-10. PD 电子保险丝电路.....	9
图 3-11. PD 电源启动.....	10

## 表格清单

表 1-1. PoDL PSE 类型一览表.....	3
表 1-2. PoDL 等级电源要求一览表.....	3
表 3-1. PD 引脚排列.....	4
表 3-2. PD 检测.....	6
表 3-3. PD 兼容的功率等级.....	10

## 商标

E2E™ 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 10BASE-T1L (IEEE 802.3cg) PoDL 概述

IEEE Std 802.3cg-2019 以太网物理层标准由 IEEE 于 2019 年 11 月 7 日发布。该标准为仅通过长达 1000m 的单平衡双绞线对进行长距离通信提供了新的标准化选项。该标准允许工程师利用他们现有的以太网硬件和掌握的软件知识，将现有的复杂通信基础设施置于熟悉的以太网系列网络技术之下。新方法还允许执行器、传感器和其他设备的无缝连接，从而提高运营效率，尤其是在楼宇和工厂自动化市场。这融合了可能分散的网络。

IEEE 802.3cg 标准中的 10BASE-T1L 以太网变体定义了 10Mbps、全双工、点对点通信方案。DP83TD510E 以太网 PHY 完全支持这一新标准，并通过支持长达 2000 米的长度超越了规范，提供了设计灵活性并最大限度地延长了单对平衡导体上的电缆长度。

IEEE 802.3cg 标准扩展了 IEEE 802.3bu 标准的 PoDL 部分，增加了对更长电缆和额外功率等级的支持。在许多情况下，将 4mA 替换为 20mA 或现场总线通信可降低设计复杂性，消除对耗电网关的需求，并增加连接设备的可用功率。与 4mA - 20mA 电流环路相比，这不仅增加了反向通道，还显著加快了数据速率。此外，与其他协议相比，HART 允许增加反向通道，但速度相对较慢 (1200bps)。IO-Link 比 HART 更快 (高达 230kbps)，但仅限于 20m。

图 1-1 展示了 PoDL 的简图。实现 PoDL 需要设计兼容的电源设备 (PSE)、供电设备 (PD) 以及两者之间的链路。PSE 向链路供电，PD 从该链路获取电力。

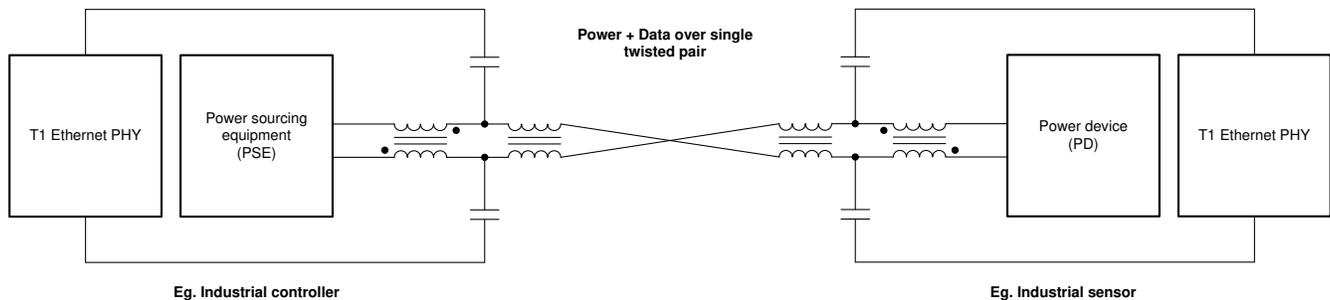


图 1-1. 数据线供电 (PoDL) 简图

## 1.2 PoDL PSE 类型和功率等级

将 IEEE 802.3cg 标准视为适用于 100BASE-T1 和 1000BASE-T1 的 IEEE 802.3bu 标准的 10BASE-T1S/10BASE-T1L 和 PoDL 修订版。IEEE 802.3bu 标准定义了 4 种类型的 PSE，Type A、Type B、Type C 和 Type D。该标准还为 PD 和 PSE 定义了 10 种不同的功率等级，包括 12V、24V 和 48V 非稳压和稳压 PSE 等级。IEEE 802.3cg 标准通过引入 E 型并添加 30V 和 58V 等级实现了扩展，总计有 15 个不同的兼容等级。表 1-1 和表 1-2 详细说明了完整的类型和功率等级一览表。

表 1-1. PoDL PSE 类型一览表

类型	A)	B	C	D	E
10BASE-T1S	X		X		
10BASE-T1L					X
100BASE-T1			X		
1000BASE-T1		X	X		
无数据或不兼容				X	

表 1-2. PoDL 等级电源要求一览表

等级	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
VPSE(max) (V)	18	18	18	18	36	36	36	36	60	60	30	30	30	58	58	58
VPSE_OC(min) (V)	6	14.4	14.4	12	12	26	26	48	48	48	30	20	20	50	50	50
VPSE(min) (V)	5.6	5.77	14.4	14.4	11.7	11.7	26	26	48	48	20	20	20	50	50	50
IPI(max) (mA)	101	227	249	471	97	339	215	461	735	1360	92	249	632	231	600	1579
Pclass(min) (W)	0.566	1.31	3.59	6.79	1.14	3.97	5.59	12	35.3	65.3	1.85	4.8	12.63	11.54	30	79
VPD(min) (V)	4.94	4.41	12	10.6	10.3	8.86	23.3	21.7	40.8	36.7	14	14	14	35	35	35
PPD(max) (W)	0.5	1	3	5	1	3	5	10	30	50	1.23	3.2	8.4	7.7	20	52

### 备注

如果没有在 PSE 和 PD 之间实现 SCCP 通信，该标准为每种类型和功率等级指定了强制检测协议。

本文档重点介绍了符合 12 级 10BASE-T1L 标准的 PD 的设计注意事项。

## 2 术语

<b>10Base-T1L</b>	通过单对平衡导体实现 10Mbps 全双工通信的标准
<b>CDN</b>	耦合、去耦网络
<b>CMC</b>	共模扼流圈
<b>DMI</b>	差分模式电感器
<b>IEEE</b>	电气和电子工程师学会
<b>OVP</b>	过压保护
<b>PD</b>	供电设备
<b>PHY</b>	物理层收发器
<b>PoDL</b>	数据线供电
<b>PSE</b>	电源设备
<b>SCCP</b>	串行通信分级协议
<b>SPE</b>	单线对以太网
<b>UVLO</b>	欠压锁定

### 3 PD 设计

#### 3.1 PD 设计概述

在设计 PoDL 系统之前，了解 PD 和 PSE 的功能很重要。根据 IEEE 标准，PSE 具有 4 个主要功能。从 IEEE 802.3bu 标准来看，PSE 的主要功能包括：

1. 在链路中搜索 PD
2. 通过链路为检测到的 PD 供电
3. 监控施加到链路的功率
4. 当不再需要，或检测到短路或其他故障时，移除整个工作电压

相反，PD 只是器件的从链路获取电力的部分，或者是参与检测或分级算法的部分。本文中介绍的 PD 系统包括：

1. 耦合和去耦网络 (CDN) 将电源与电源和数据路径分离
2. PD 被检测为符合 PSE 的 PoDL 所需的 VID 块
3. 功率等级协商的可选分级功能所需的 SCCP 通信
4. 电源保护和稳压隔离 24V 12 类电源到被供电的器件

图 3-1 显示了这些系统方框图。

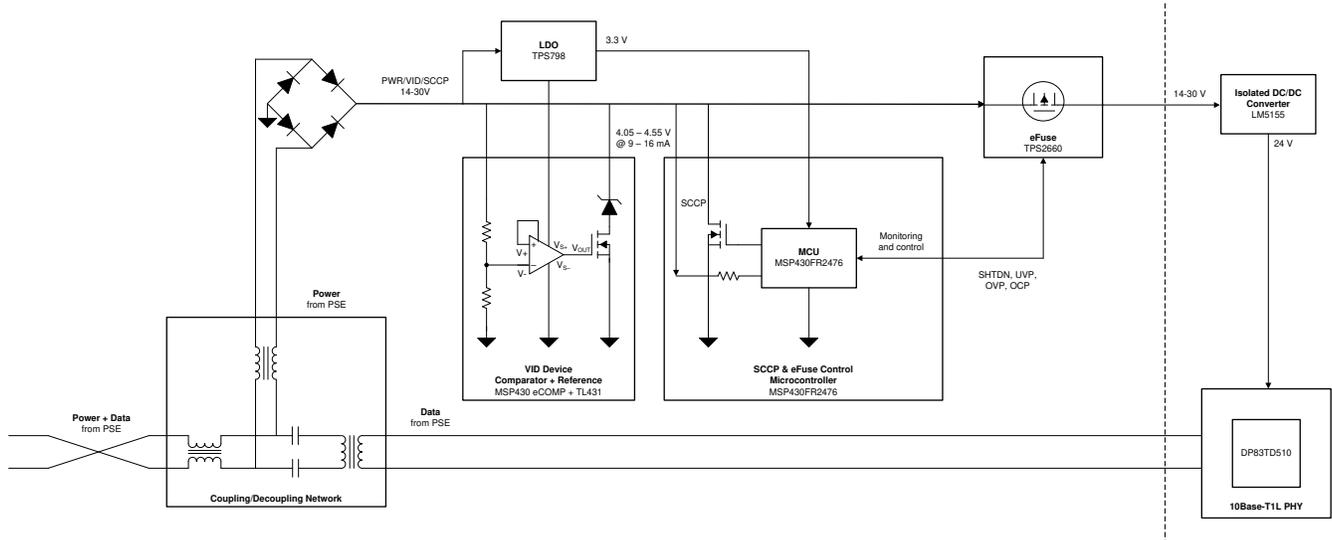


图 3-1. PoDL PD 系统方框图

#### 3.2 耦合和去耦网络 (CDN)

PD 必须以安全的方式将电源与 SPE 链路中的电源和数据路径相分离，同时允许数据透明地传递到 10BASE-T1L PHY 并且不影响信号完整性。此外，IEEE 802.3cg 标准规定 PD 可以通过交换电源输入引脚的两种模式来接收电力。

表 3-1 详细介绍了 PD 引脚排列。

表 3-1. PD 引脚排列

接触放电	模式 A	模式 B
1	PI+	PI -
2	PI -	PI+

为了保护 PD 并以不受电源极性影响的方式实现它，PD 将一个整流桥纳入其中。肖特基二极管经过精心挑选，可在整流器上提供低压降。

CDN 的工作模式如下：在 SPE 电缆上输送电力和数据。在保护电路（二极管 D5 到 D9）之后，共模扼流圈（CMC）L2 抑制共模噪声，电容器 C2 和 C3 提供必要的阻尼。必须在不影响差分信号完整性的情况下滤除共模噪声。为此，选择了在 10kHz 范围内具有大共模阻抗和小差模阻抗的 CMC。

然后，变压器 L3 提供隔离，并包含 ESD 二极管用于 ESD 保护。根据应用、所需的隔离等级以及在适当频率范围内的良好性能来选择变压器。变压器的电感对压降有直接影响。

来自 CMC 的低 DCR 差模电感（DMI）L1 允许直流电流通过整流器（二极管 D1 到 D4）。无论电缆方向如何，整流器都能确保 PD 的极性正确。DMI 的饱和电流必须足以应对所需的功率等级（对于 12 级，至少为 632mA），并且 DCR 应尽可能低，以最大限度地提高效率 and 降低压降，尤其是在设计 1km 电缆长度时。DMI 的电感必须足够高，以免对数据造成太大的阻尼。

图 3-2 显示了 PD 耦合网络和去耦网络。

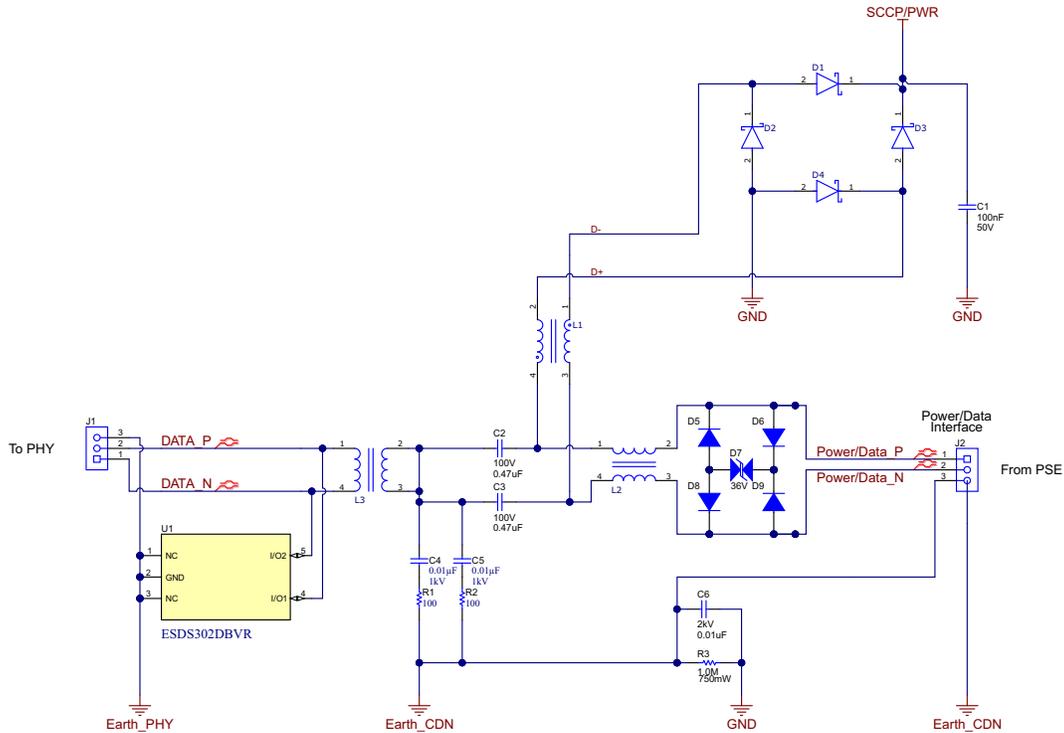


图 3-2. PD 耦合和去耦网络

其他注意点是 CDN 接地和 PD 接地之间的端接以尽可能减少 EMI（R3 和 C6）以及共模端接（C4、C5、R1 和 R2）。

### 3.3 VID 电路

电压识别功能是 PD 的强制性特性。在 PSE 向链路施加全功率之前，它将使用 9mA 至 16mA 恒流脉冲来测试链路，并且必须检测到 4.05V 至 4.55V 的特征电压。如果 PSE 检测到有效的特征电压，PSE 会将器件识别为符合 PoDL 标准，现在可以为该链路提供全功率。

表 3-2 详细介绍了 PD 检测参数。

表 3-2. PD 检测

特征禁用电压 (上升沿) :	4.6V 至 5.75V
特征启用电压 (下降沿) :	3.6V 至 4.3V
有效特征电压	4.05V 至 4.55V
PD 电流	7mA 至 17mA

在 PD 板上, 该电压是使用集成到 MSP430FR2476 微控制器中的 eComp 模块和 TL431 分流基准生成的。分流基准配置为输出大约 3.6V 电压。整流二极管上的额外压降将使 PD 的总压降增加至 4.05V - 4.55V 范围内。微控制器由 3.3V 轨供电并具有 1.2V 内部基准。微控制器会检查连接器上的电压, 当输入电压高于特征禁用电压阈值时断开与 Q1 MOSFET 的并联基准, 并在输入电压低于特征启用电压阈值时再次连接 TL431 基准 U1。

图 3-3 显示了使用 MSP430 内部的比较器和基准实现的 PD VID 电路。

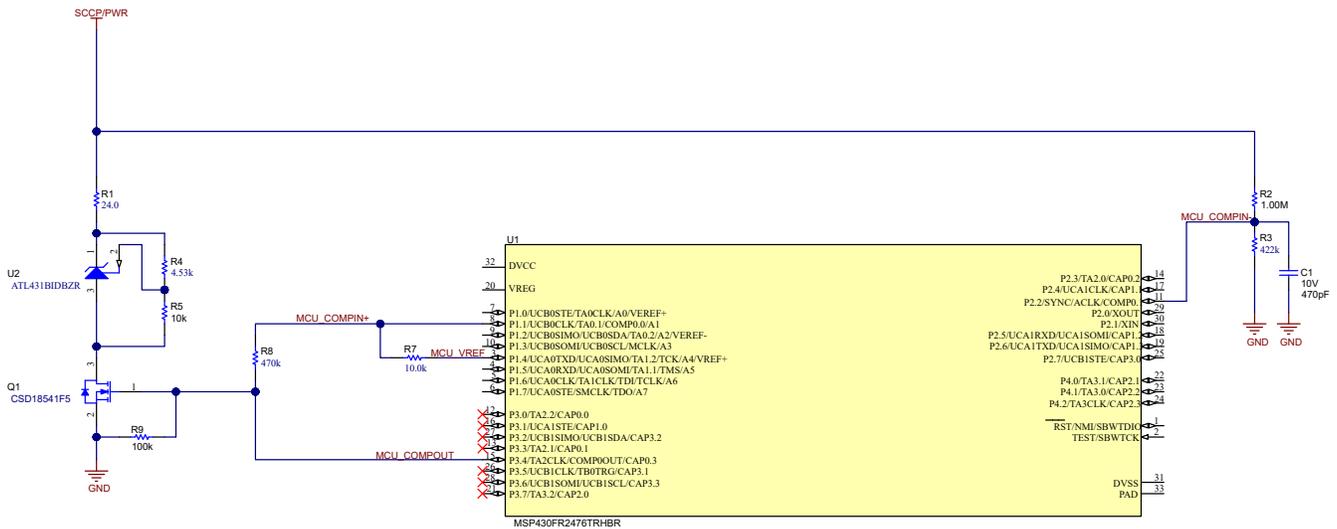


图 3-3. PD VID 电路

图 3-4 显示了电压特征电路的测试结果。当使用 7mA 至 17mA 信号进行测试时, 可以看到黑线位于 4.05V 至 4.55V 范围内。请注意, 在计算电阻器 R1 至 R7 时, 必须考虑整流桥上的压降。

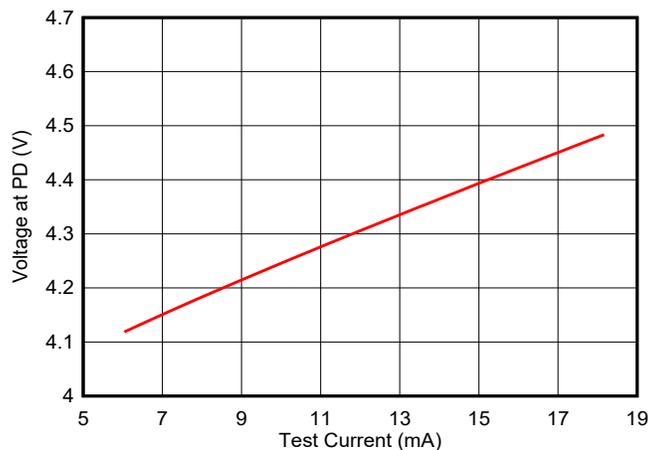


图 3-4. PD 特征电压测试结果

### 3.4 SCCP 通信

串行通信分级协议 (SCCP) 是 IEEE 802.3bu 标准 (并在 IEEE 802.3cg 中修订) 指定的双向单线串行通信协议, 用于在 PSE 向链路供电之前协商 PSE 和 PD 之间的电能传输要求。SCCP 是电流吸入和线或。在 SCCP 期间, PSE 充当控制器, 控制 PD 目标器件。PSE 上的 VID 电流源用作上拉电阻, 而 SCCP 线路通过使用分立式 MOSFET 将其拉低来驱动。如果在 PD 和 PSE 上正确实现检测, 则 SCCP 的实现是可选的。当在系统中跳过分级时, 这可以称为快速启动模式。

有关时序定义, 请参阅 IEEE 802.3bu 和 802.3cg 标准。本文档总结了如何在 PD 上实现合规的 SCCP 通信。SCCP 通信来自 PSE 的复位脉冲开始, 随后是来自 PD 的存在脉冲。在 SCCP 中, 每个事务都从 PSE 的下降沿开始, 它可以根据低逻辑时间读取 “1” 或 “0” ——即所谓的 “写 1 时隙” 和 “写 0 时隙”。对于读取, PD 在特定时间后将线路拉低。只有当 PSE 发出读时隙时, PD 才能向 PSE 传输数据。当控制器启动读取时隙时, PD 通过将线路保持为高电平或将其驱动为低电平来发送 “1” 或 “0”。

由于协议的简单性和相对较慢的 333bps 速度, 较简单的 SCCP 实现之一是仅使用微控制器上的 GPIO 引脚和钳位二极管来限制线路为高电平时引脚上的电压 (一旦 PSE 向链路供电则为 24V)。

图 3-5 显示了 PD SCCP 系统方框图。

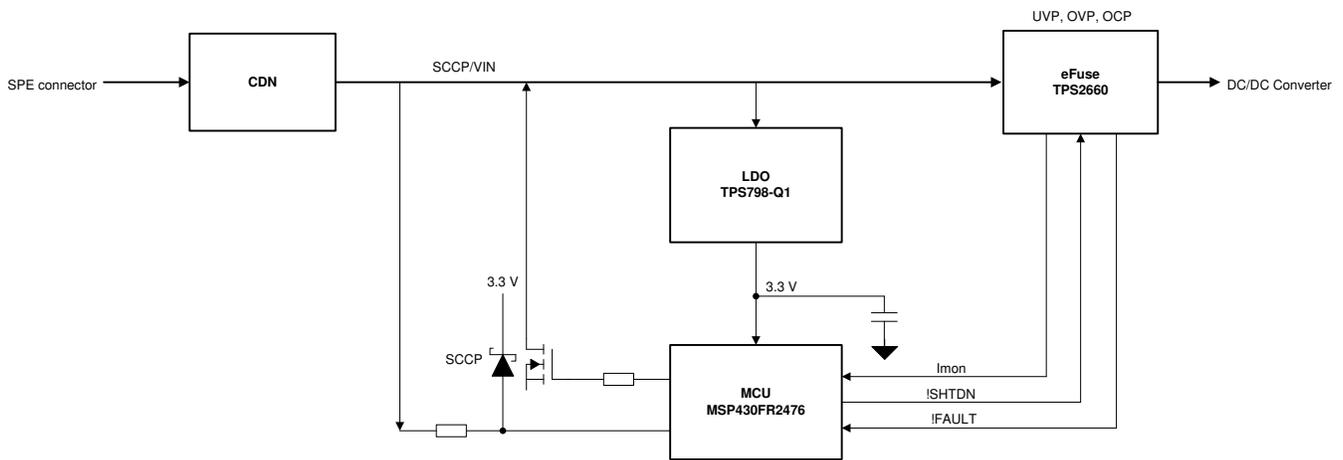


图 3-5. PD SCCP 系统方框图

但是, 可以通过在数据输入引脚 (U3 TLV7031) 上添加一个比较器作为缓冲器或驱动器来改进这种方法。这可确保电压上升和下降时间在规格范围内, 并且进入 GPIO 引脚的电压不会超过电源电压。

图 3-6 说明了 PD 简化的最终 SCCP 电路。

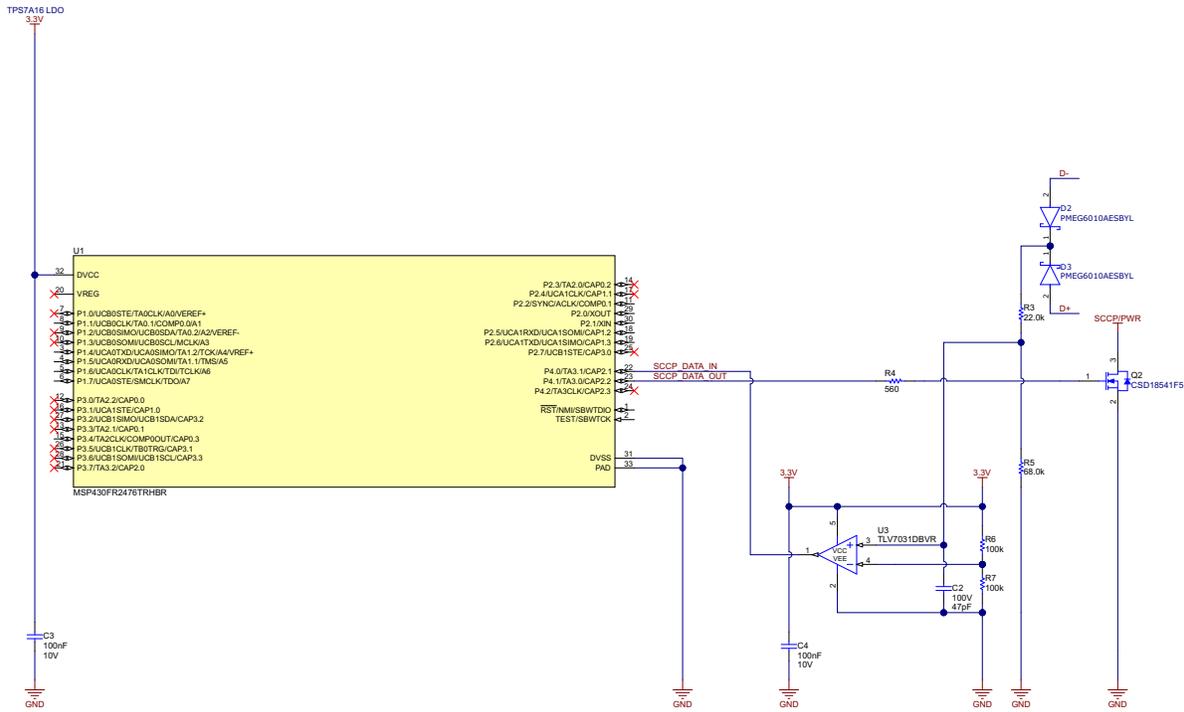


图 3-6. PD 简化的最终 SSCP 电路

需要注意的是，在复位脉冲期间，SSCP 线路被拉低长达 11ms。该线路为 LDO 供电，而后者又为 PD 中的微控制器提供 3.3V 电压。因此，LDO 的输出电容器中必须存储足够的能量，以便在复位脉冲期间为 MCU 供电。经发现 PD 板上的 10 $\mu$ F 电容器是可靠的。

在复位脉冲和所有通信期间，电流将从输出电容器流入 LDO 的输出引脚，这也是一个问题。为了防止这种情况，可以使用在输出端具有反向电流阻断功能的 LDO。此 PD 设计利用具有反向电流保护功能的 TPS798-Q1 汽车类 50mA LDO。当使用没有反向电流保护功能的 LDO 时，可以使用理想二极管控制器（例如 LM66100）作为替代方案。

图 3-7 显示了 PD LDO 电路。

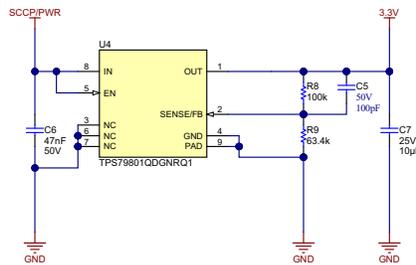


图 3-7. PD LDO 电路

图 3-8 和图 3-9 中的示波器屏幕截图显示了 PSE 端的启动波形。首先，PSE 为 PD 提供 3.3V 的预偏置电压，以便 PD 可以在其低功耗模式下运行。PSE 使用检测电流脉冲来测试链路并检测 4.05V 至 4.55V 范围内的有效电压特征。随后是由 PSE 启动的复位脉冲，在此期间 PD 微控制器必须保持正常工作，然后启动 SSCP 通信。

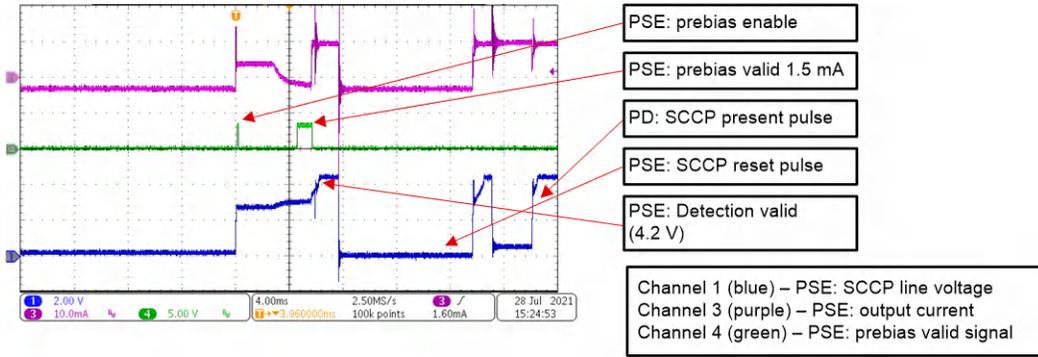


图 3-8. PSE 启动行为

SCCP 通信如前所述进行，在此期间 PSE 和 PD 协商功率等级。在 SCCP 通信之后，PSE 向链路供电。

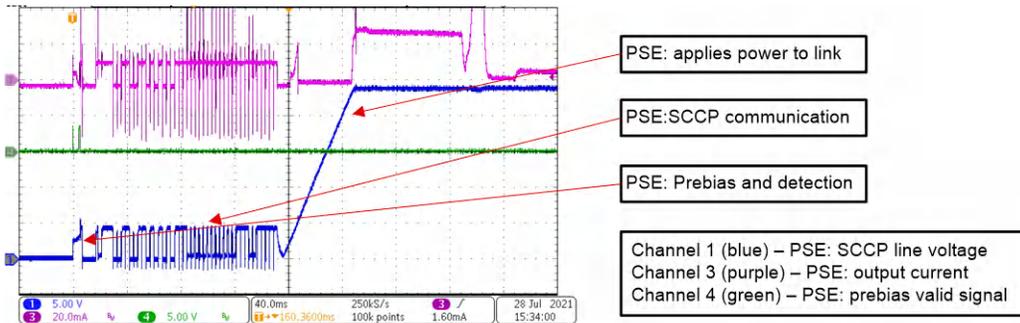


图 3-9. PSE 以 SCCP 启动

### 3.5 保护特性

PD 包括 TPS2660 电子保险丝，这是一款具有全套保护功能的宽电源输入电压保护器件。该元件提供过流、过压和欠压保护以及压摆率控制。此外，电子保险丝提供反极性保护并集成了背靠背 FET，可提供反向电流阻断。电子保险丝由带有关断引脚的微控制器启用和禁用。对于系统状态监控，该器件提供了故障和电流监视器输出，该输出被馈送至微控制器的其中一个模拟引脚。PD 将电子保险丝配置为自动重试模式。

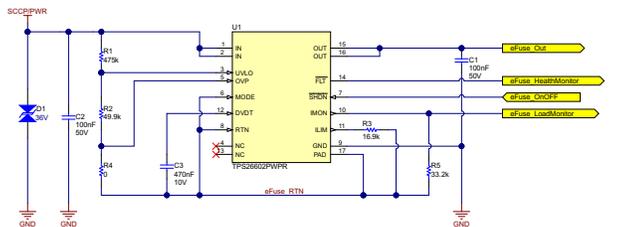


图 3-10. PD 电子保险丝电路

电子保险丝直接由 SCCP 线路供电，并放置在隔离式直流/直流转换器系统块之前。

需要注意的是，连接到具有旁路电容器的 SCCP 线路中的每个器件都会增加该线路的总电容，该线路也是系统中的 SCCP 通信总线。IEEE 802.3bu 和 802.3cg 标准规定，检测期间 PSE 输出端 SCCP 线路上的总电容必须低于 2.64 $\mu$ F (A-D 型) 和 400nF (E 型)。PD 的输入电容必须低于 200nF (A-D 型) 和 400nF (E 型)。

### 3.6 电源和可扩展性

隔离式直流/直流转换器系统块负责为连接的现场设备提供经过调节和隔离的 24V 电压。为纳入此功能，PD 包含反激设计，该设计利用带有 CSD19531Q5A 外部 N 沟道 MOSFET 的 LM5155 反激式控制器。

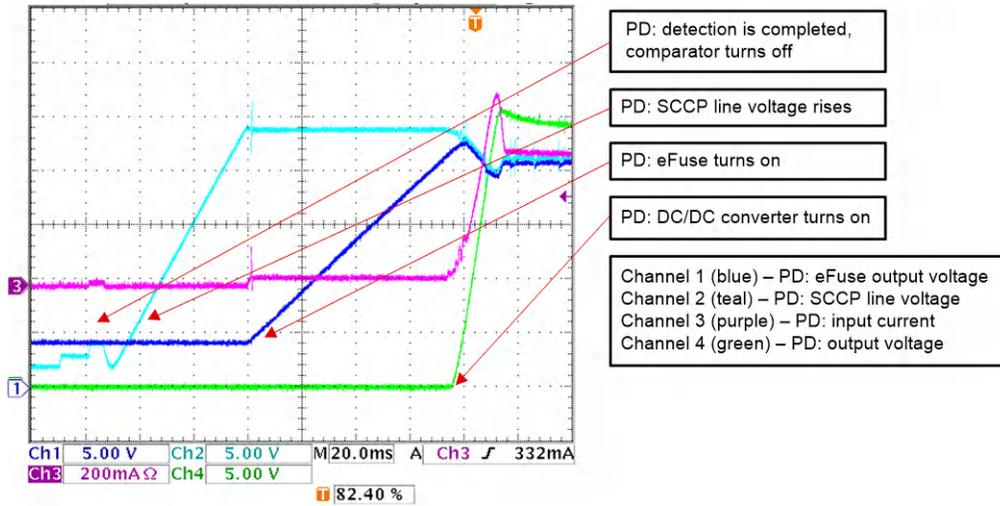


图 3-11. PD 电源启动

在图 3-11 中捕获的示波器屏幕截图中，可以看到 PD 电源的启动在没有 SCCP (快速启动) 的情况下完成检测。SCCP 线路电压随着受 PSE 控制的压摆率而上升。一旦该电压上升到电子保险丝欠压锁定 (UVLO) 阈值以上，电子保险丝就会开启，并且电子保险丝输出电压会随由其 DVDT 电容器设置的压摆率而上升。最后，一旦超过 LM5155 控制器的 UVLO 阈值，直流/直流转换器就会开启，其压摆率受其软启动电容器的控制。对 PD 上的 TPS2660 和 LM5155 压摆率控制进行了调整，以使浪涌电流不会超过电子保险丝中的过流保护限值 ( $I_{LIM}$ )。

由于 IEEE 802.3bu 和 802.3cg 标准存在各种功率等级，这种设计的可扩展性和适应性都非常重要。

以下列表显示了 PD 兼容的功率等级：

表 3-3. PD 兼容的功率等级

802.3bu

4 类：12V 至 36V，97mA

5 类：12V 至 36V，339mA

6 类：26V 至 36V，215mA

7 类：26V 至 36V，461mA

802.3cg

10 类：20V 至 30V，92mA

11 类：20V 至 30V，240mA

**12 类：20V 至 30V，632mA**

通过更改 UVLO、OVP 和其他压摆率或保护无源器件，PD 可以在 12V 至 36V 的输入电压和至少 632mA 的电流下运行，因此支持所有 24V 等级。

## 4 参考文献

- 德州仪器 (TI), “如何使用 LM5155 设计隔离型反激式转换器” 应用报告
- 德州仪器 (TI), “使用 IEEE 802.3cg 10BASE-T1L 以太网 PHY 扩大网络覆盖范围” 应用报告
- 德州仪器 (TI) E2E™ 设计支持, 10Base-T1L 单线对以太网如何使用更少的电缆实现可靠联网
- 德州仪器 (TI), “在楼宇自动化领域利用单线对以太网” 技术白皮书
- 德州仪器 (TI), MSP430FR267x、MSP430FR247x 代码示例
- 德州仪器 (TI), “使用 MSP430FR4xx 和 MSP430FR2xx ADC 进行设计” 应用报告
- 德州仪器 (TI) E2E™ 设计支持, 电子保险丝在工厂自动化领域中的应用: 一体化系统电源保护
- 德州仪器 (TI), “简化 PLC 系统中的 EFT、浪涌和电源故障防护电路” 应用报告
- [快速查看带 PoDL 的方框图](#)

## 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 * (January 2022) to Revision A (July 2022)	Page
• 更新了图 3-3 中的原理图。针对不正确的测试电流范围修改了图 3-4。.....	5

## 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