

Design Guide: TIDA-010016

八端口 IO-Link® 主站参考设计



说明

PLC 应用对快速定时和短循环时间的需求，现在可以通过本参考设计来实现，该设计实现了一个八端口 IO-Link® 主站。该设计还可用于构建远程 IO 网关以连接 OPC UA、Profinet、EtherCAT 或以太网 IP。基于 PRU 的帧处理程序可实现一种灵活的计时和同步方式。该设计有助于构建通用且可扩展的 IO-Link 主站。

资源

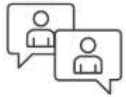
TIDA-010016	设计文件夹
TIOL111	产品文件夹
INA253	产品文件夹
TLC59282	产品文件夹
LM5165	产品文件夹
TPS4H160-Q1	产品文件夹

特性

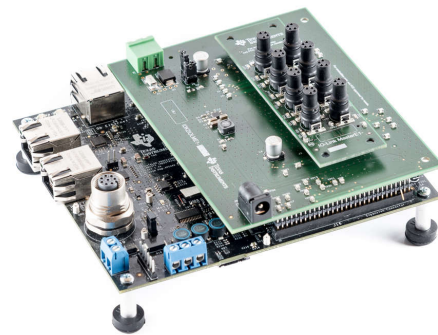
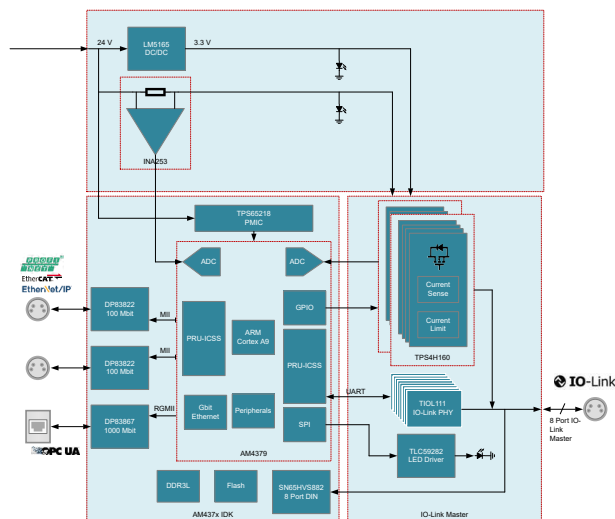
- 八个 IO-Link 端口
- 支持 COM1、COM2、COM3
- 支持 400µs 周期时间
- 每个端口提供 500mA 电流
- 所有端口都具有过流保护和限制功能
- PRU 帧处理程序可实现灵活的定时控制

应用

- 独立远程 IO
- 通信模块



咨询我们的 TI E2E™ 支持专家



1 系统说明

传感器和执行器是最基本的自动化单元，它们向网络系统提供信息，并根据网络系统的指令采取行动。在传统设计中，这些器件都通过各种接口来连接到控制单元，而这些接口几乎不存在任何智能功能，也就很少或根本不交换配置和诊断信息。于是，安装新器件时，就需要在使用现场进行手动配置，而且由于缺乏诊断功能，也就无法及时进行预防性维护。

IO-Link (国际电工委员会 [IEC] 61131-9) 是一种开放式标准协议，它可以满足对传感器、执行器等小型设备进行智能控制的需求。该标准可在设备与主机之间实现低速点对点串行通信，而主机通常会作为通往现场总线和 PLC 的网关。建立的智能链路可以轻松地交换数据、配置和诊断信息。

IO-Link 连接通过一根长度不超过 20 米的非屏蔽三芯电缆建立，通常采用 M12 连接器，最高数据传输速率为 230kbps，非同步最小循环时间为 400μs，+10%，四种工作模式支持双向输入/输出 (I/O)、数字输入、数字输出和禁用，未指定安全机制和确定性数据传输。该协议使用名为“IO 设备描述”(IODD) 的配置文件，其中包含通信属性、器件参数、标识、过程和诊断数据，以及有关器件和制造商的详细信息。

IO-Link 系统具有诸多优点，包括采用标准化布线、提高数据可用性、实现远程监控和配置、简化器件更换工作以及开展高级诊断。工厂管理者可以通过 IO-Link 接收不断更新的传感器数据，以为日后制定维护和更换计划提供重要依据。通过 IO-Link 主机，可以在无需手动设置的情况下，从 PLC 上更换传感或执行单元以及配置新器件，从而缩短停机时间。此外，还可以做到远程切换生产中所采用的配置，无需派人亲自下车间，因而能够简化定制产品的生产。工厂可以将生产线轻松升级为 IO-Link，因为它可以向后兼容现有的标准 I/O 装置和布线。总之，这些功能可降低总体成本、提高生产工艺效率，增加机器利用率。

1.1 主要系统规格

表 1-1. 主要系统规格

参数	规格	详细信息
输入电压	外部 24V 电源	节 2.3.4
输入电流	取决于连接的负载 (推荐 5A)	节 2.3.4
输出电压	24V	节 2.3.3
每端口输出电流	500mA	节 2.3.3
总输出电流	4A	节 2.3.3
IO-Link 主站端口数量	8	
以太网端口数	2	
支持的 IO-Link 数据速率	COM1、COM2、COM3	
支持的 IO-Link 循环时间	400μs	
帧处理程序		节 2.4.1
过采样因子	8 次	
采样频率	每通道最高可达 1.8432 MSPS (COM3)	
支持的 IO-Link 传输速率	COM3、COM2、COM1	
等效波特率	230.4kbaud、38.4kbaud、4.8kbaud	
RX 缓冲器大小	128 字节	
TX 缓冲器大小	2 x 128 字节 (双发送缓冲区)	
开始位和位滤波器	基于查找表 (可调整)	
奇偶效验检查	支持	
T1 时间 (UART 帧传输延迟，主站)	0 Tbit	
T2 时间检查 (UART 帧传输延迟，器件)	支持，硬编码为 5	
Ta 时间检查 (最大响应时间)	支持，可通过寄存器由用户设置	

2.1 方框图

图 2-1. TIDA-010016 方框图

下，该模式适用于低噪声、高电流、快速负载瞬态需求，器件以预测导通时间的开关脉冲工作。通过使用输入电压前馈设置导通时间，可在整个输入电压范围内实现准固定开关频率。另一种选择是脉冲频率调制 (PFM) 模式，结合可调峰值电流限制，可实现出色的轻载效率性能。两种工作模式均不需要控制环补偿，从而减少设计时间和外部元件数量。

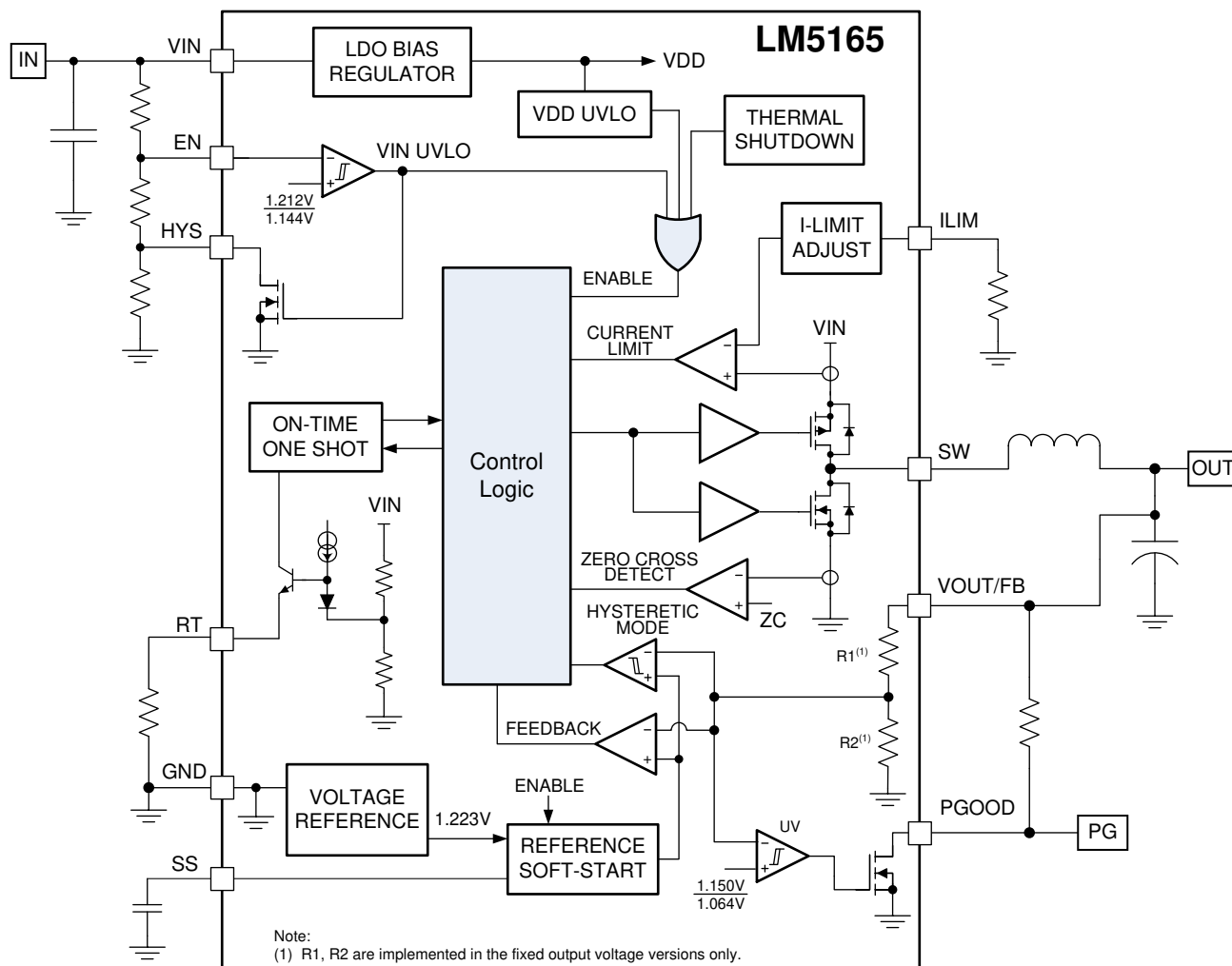


图 2-2. LM5165 方框图

本设计相关的主要特性包括：

- 3V 至 65V 的宽输入电压范围
- 3.3V 固定输出电压
- 150mA 同步降压转换器
- 集成式 2Ω PMOS 降压开关
- 集成式 1Ω NMOS 同步整流器
 - 无需使用外部整流二极管
- 可选 PFM 或 COT 模式工作
- 无环路补偿或自举元件

该器件便于实现宽输入电压范围的小型电源方案。

2.2.2 TLC59282

TLC59282 是一款 16 通道恒流吸收器 LED 驱动程序。每个通道可通过向内部寄存器写入串行数据进行开关控制。所有 16 个通道的恒定电流值由一个外部电阻器设定。

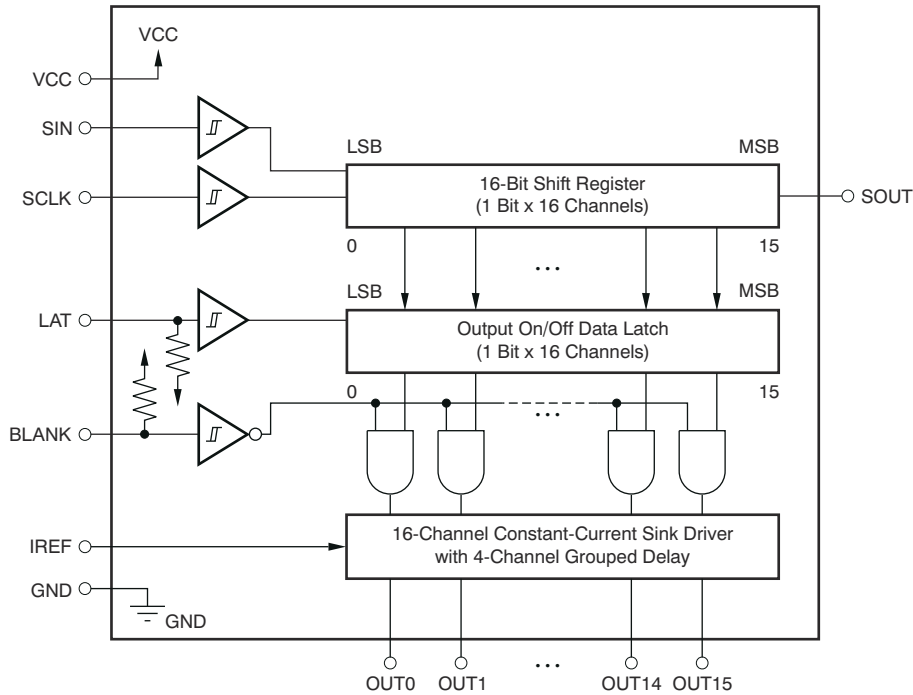


图 2-3. TLC59282 方框图

本设计相关的主要特性：

- 16 通道恒流吸收器输出，支持开关控制
- 35mA 电流能力 (恒流吸收器)
- VCC = 3.0V 至 5.5V
- 串行外设接口 (SPI)

2.2.3 TPS4H160-Q1

TPS4H160-Q1 器件是一款具有内部电荷泵和四通道集成式 NMOS 功率 FET 的智能高侧开关。该器件具有丰富的诊断功能以及高精度电流检测特性，能够对负载实施智能控制。可调节电流限制功能能够极大地提高整个系统的可靠性。该器件的两个版本具有不同诊断报告方式，即开漏数字输出 (版本 A) 和电流检测模拟输出 (版本 B)。

对于版本 A，该器件以开漏结构实现数字故障报告。当故障发生情况时，该器件将 STx 下拉至 GND。需要使用一个 3.3V 或 5V 的外部上拉电阻来匹配微控制器的电源电平。每个通道的数字状态可以单独报告，也可以通过将 STx 引脚连接在一起进行全局报告。

对于版本 B，高精度电流检测可使诊断更加准确，无需进一步校准。一个集成的电流镜可以提供 $1/K(CS)$ 的负载电流。镜像电流流入 CS 引脚电阻器，成为电压信号。 $K(CS)$ 在整个温度和电源电压范围内是一个恒定值。0V 至 4V 的宽线性区域可实现更好的实时负载电流监测。CS 引脚还可以报告 VCS(H) 上拉电压的故障。

外部高精度电流限制功能允许根据应用设置电流限制值。当发生过流时，该器件通过有效钳制浪涌电流来提高系统可靠性。此外，该器件还可以通过减少 PCB 布线、连接器尺寸和前一个功率级的容量来节省系统成本。此外，该器件还实现了具有固定值的内部电流限制。

对于电感负载 (继电器、螺线管、阀)，该器件在漏极和源极之间实现了有源钳位，以保护自身。在电感关断周期期间，电源和负载的能量都耗散在高侧电源开关上。该器件还会在钳位处于工作状态时优化开关压摆率，通过尽可能降低瞬态功率和 EMI 的影响，来帮助进行系统设计。

TPS4H160-Q1 器件是一款智能高侧开关，适用于各种电阻负载、电感负载和容性负载，包括低瓦数灯泡、LED、继电器、螺线管、加热器和子模块。

如果输出驱动器级需要更小的解决方案，现在有一款新的、更小尺寸的 TPS4H160-Q1 QFN 器件版本可用。TPS274160 提供与 TPS4H160-Q1 相同的性能，优势在于采用更小的 QFN 封装。与 TPS4H160-Q1 相比，TPS274160 可将解决方案尺寸缩小 67%。

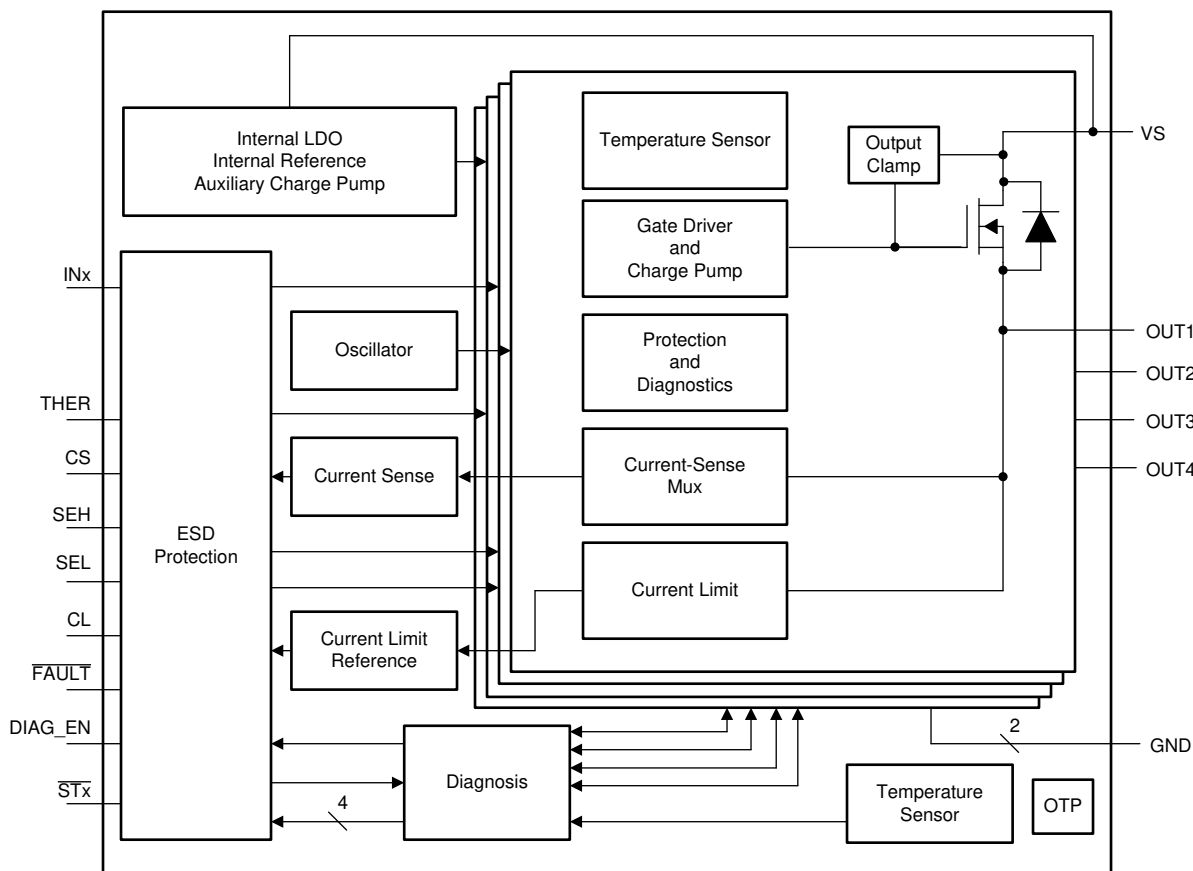


图 2-4. TPS4H160 方框图

此处关注的关键特性包括：

- 具有丰富诊断功能的四通道 160mΩ 智能高侧开关
 - 版本 A：开漏数字输出
 - 版本 B：电流检测模拟输出
- 宽工作电压范围：3.4V 至 40V
- 高精度电流检测：在大于 25mA 负载下 ±15%
- 可通过外部电阻器调节电流限制，在大于 500mA 负载下 ±15%
- 保护
 - 通过限制电流实现 GND 短路保护（内部或外部）
 - 具有锁闭选项的热关断以及热调节
 - 转换率经过优化的电阻负载负电压钳位
 - 接地失效保护和电池损耗保护
- 诊断
 - 过流和接地短路检测
 - 开路负载和电池短路检测
 - 用于实现快速中断的全局故障报告

2.2.4 INA253

INA253 集成了 $2\text{m}\Omega$ 精密电流检测电阻和 80V 共模、零漂移拓扑的高精度电流检测放大器，具有出色的共模抑制比 (CMRR)，并增强了对脉宽调制 (PWM) 干扰的抑制能力，所有功能集成在单一封装内。通过匹配分流电阻值与电流检测放大器增益，实现高精度测量，提供系统级校准的高精度解决方案。增强型 PWM 抑制降低了共模瞬变对与 PWM 信号相关的输出信号的影响。多个增益版本可用于根据应用中预期的目标电流范围优化所需的满量程输出电压。

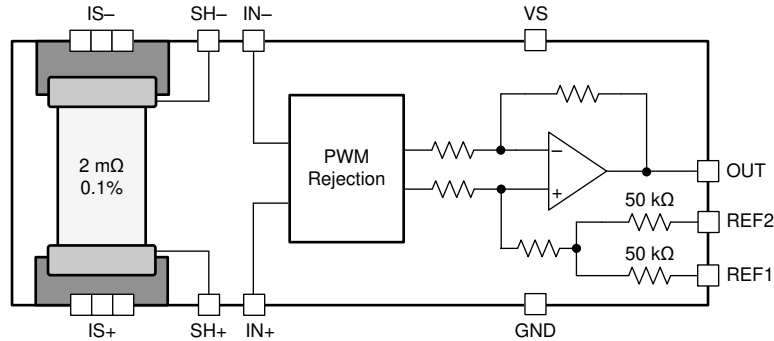


图 2-5. INA253 方框图

器件主要特性如下：

- 精集成分流电阻
 - 分流电阻器： $2\text{m}\Omega$
 - 采样电阻容差：0.1% (最大值)
 - $\pm 15\text{A}$ 连续测量 (-40°C 至 85°C)
 - 0°C 至 125°C 温度系数： $10\text{ppm}/^\circ\text{C}$
- 精度：
 - 增益误差：0.25% (最大值)
 - 增益漂移： $10\text{ppm}/^\circ\text{C}$ (最大值)
 - 失调电压： $\pm 2\text{mV}$
 - 温漂： $125\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ (最大值)
- 宽共模范围： -4V 至 80V
- 可用增益： $100\text{mV}/\text{A}$ 、 $200\text{mV}/\text{A}$ 和 $400\text{mV}/\text{A}$

2.2.5 TIOL111

TIOL111 系列收发器具有坚固的设计，可实现用于工业点对点通信的 IO-Link 接口。当此器件通过一个三线制接口连接至一个 IO-Link 主器件时，主器件能够发起通信并与远程节点交换数据，而此时 TIOL111 则用作一个完整的通信物理层。

这些器件能够承受高达 1kV (500Ω) 的 IEC 61000-4-5 浪涌，并具有集成的反向极性保护功能。

只需通过一个简单的引脚可编程接口，便可轻松连接到控制器电路。可使用外部电阻器配置输出电流限值。

器件还具备欠压、短路电流及过热的故障报告与内部保护功能。

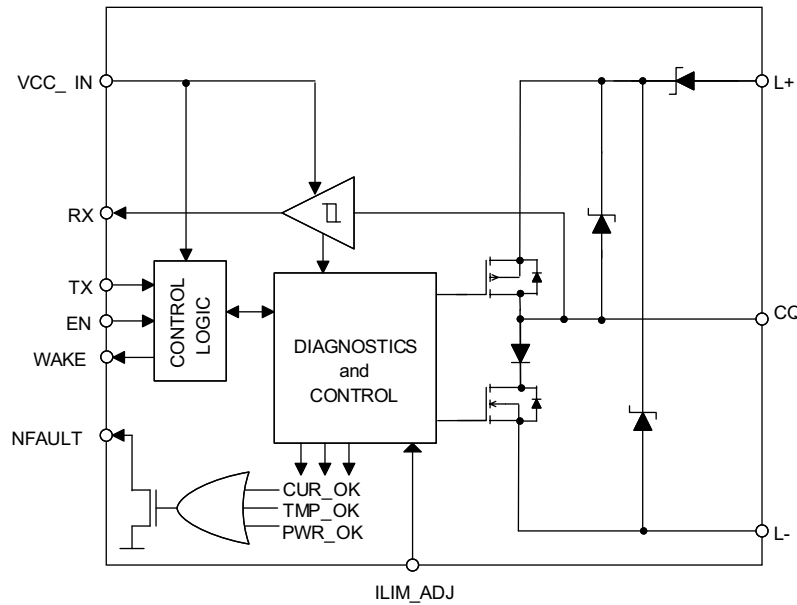


图 2-6. TIOL111 方框图

精选 TIOL111 器件的特性：

- PNP、NPN 或 IO-Link 可配置输出
 - IEC 61131-9 COM1、COM2 和 COM3 数据速率支持
- 50mA 至 350mA 可配置电流限制
- 能耐受 $\pm 65\text{ V}$ 、持续时间小于 $100\mu\text{s}$ 的瞬态电压
- 在 L+、CQ 和 L- 引脚上具备最高 55V 的反极性接保护
- L+ 和 CQ 上的集成式 EMC 保护
- 集成式 LDO 选项可支持高达 20mA 的电流

2.3 系统设计原理

本参考设计使用 TIOL111 器件 PHY 和构建完整 IO-Link 主站设计所需的周边元件实现 IO-Link 主站。因此，在物理层面，除了 TIOL111 器件外，还需要端口电源和电流吸收器。此外，硬件必须能够驱动唤醒脉冲。

另一方面，有必要拥有支持所有三种通信速度的硬件和帧处理程序。这里用作 PHY 的 TIOL111 器件可以处理所有速度 (COM1、COM2、COM3)，八端口帧处理程序在 AM437x 的 PRU 中实现。

要实现八端口主站，需要八个 TIOL111 器件；每四个端口需要一个 TPS4H160。每个端口还需要一个灌电流。因此，只需要八个 TIOL111 器件 (IO-Link PHY)、两个 TPS4H160 器件 (高边开关) 和一个 TLC59282 器件 (LED 驱动器)。

2.3.1 IO-Link® PHY

TIOL111 器件在此设计中主要用于在 3.3V 逻辑侧和 24V 接口之间进行电平转换。可选的内部 LDO、唤醒检测及过流检测未被使用。

然而，在主站配置下，TIOL111 器件必须能够驱动符合 IO-Link 标准的唤醒脉冲。IO-Link 设备启动时处于 SIO 模式，必须在通信前配置为 IO-Link 模式。输出要么为低电平（约 0V），要么为高电平（约 24V）。切换模式时，主站必须发送 80μs 的脉冲，并在此脉冲期间能够驱动 500mA，同时达到规定电压。检测到此脉冲后，器件将切换至 IO-Link 模式，通信即可开始。

测试参数请见 [IO-Link® 测试规范版本 1.1.2](#)，请参阅 [表 2-1](#) 和 [表 2-2](#)。两部分规范均需满足以确保合规。

表 2-1. 唤醒脉冲测试规范 —— 高脉冲

测试用例属性	识别信息、参考
标识 (ID)	SDCI_TC_0021
名称	TCM_PHYL_INTF_IQWUH
用途 (短)	唤醒脉冲的驱动能力 — 高侧驱动程序
受测设备 (EUT)	主站及旧主站
测试用例版本	1.0
类别、类型	主站协议测试；测试通过（正向测试）
规范（条款）	请参阅 IO-Link 接口和系规范版本 1.1.2.2 中 表 9 的 第 5.3.3.3 节
配置、设置	-
测试用案例	条件、性能
用途（详细）	主站需驱动电阻负载超过接收器阈值高电平。在 SDCI 配置下测量主站 C/Q 端口的脉冲电压。脉冲电压测量时，C/Q 与 L- 之间接有电阻负载。
前置条件	主站配置为 SDCI 模式
过程	a) 给主站施加最小电源电压 (VSM = 20 V) b) 在 C/Q 与 L- 之间施加电阻负载 Rload： $Rload = VTHHM_{max} / IQPKHM_{min} = 26 \Omega$ (51 Ω 并联 51 Ω) c) 触发唤醒请求 d) 测量唤醒请求期间 C/Q 端口电压 e) 检查 VIM 是否超过 $VTHHM_{max}$ f) 重复测试，使用最大电源电压 (VSM = 30V)
输入参数	-
后置条件	-
测试用例结果	检查、反应
评估	-
测试通过	C/Q 端口在唤醒请求期间的电平：大于或等于 $VTHHM_{max}$
测试失败（示例）	C/Q 端口在唤醒请求期间的电平低于 $VTHHM_{max}$
结果	VIM@WURQ (VSM = 18V) : <value> VIM@WURQ (VSM = 30 V) : <value>

表 2-2. 唤醒脉冲测试规范低脉冲

测试用例属性	识别信息、参考
标识 (ID)	SDCI_TC_0023
名称	TCM_PHYL_INTF_IQWUL
用途 (短)	唤醒脉冲的驱动能力 — 低侧驱动程序
受测设备 (EUT)	主站及旧主站
测试用例版本	1.0
类别、类型	主站协议测试；测试通过 (正向测试)
规范 (条款)	请参阅 IO-Link 接口和系规范版本 1.1.2.2 中表 9 的第 5.3.3.3 节
配置、设置	-
测试用例案例	条件、性能
用途 (详细)	主站需驱动电阻负载低于接收器阈值低电平。在 SDCI 配置下测量主站 C/Q 端口的脉冲电压。脉冲电压测量时，C/Q 与 L+ 之间接有电阻负载。
前置条件	主站配置为 SDCI 模式
过程	a) 向主站施加最小供电电压 (VSM = 20V) b) 在 C/Q 与 L+ 之间施加电阻负载 Rload： $R_{load} = (VSM - V_{THLM_{min}}) / I_{QPKLM_{min}} = 24 \Omega$ (47 Ω 并联 51 Ω) c) 触发唤醒请求 d) 测量唤醒请求期间 C/Q 端口的电压 e) 检查 VIM 是否低于 $V_{THLM_{min}}$ f) 使用最大电源电压 (VSM = 30V) 对主站重复测试： $R_{load} = 44 \Omega$ (82 Ω 并联 100 Ω)
输入参数	-
后置条件	-
测试用例结果	检查、反应
评估	-
测试通过	唤醒请求期间 C/Q 的电平小于或等于 $V_{THLM_{min}}$
测试失败 (示例)	唤醒请求大于 $V_{THLM_{min}}$ 期间 C/Q 处的电平
结果	VIM@WURQ (VSM = 20V) : <value> VIM@WURQ (VSM = 30 V) : <value>

在设计前，需要验证 TIOL111 器件能够产生唤醒脉冲。在四种测试选项之一 [图 2-7](#) 中显示了测试结果。在此测试中，高侧驱动器在 VCC = 30V 时进行测试。CQ 端口负载 26 Ω 电阻，此时 CQ 线几乎达到 30V，CQ 电流大于 500mA。这符合要求。

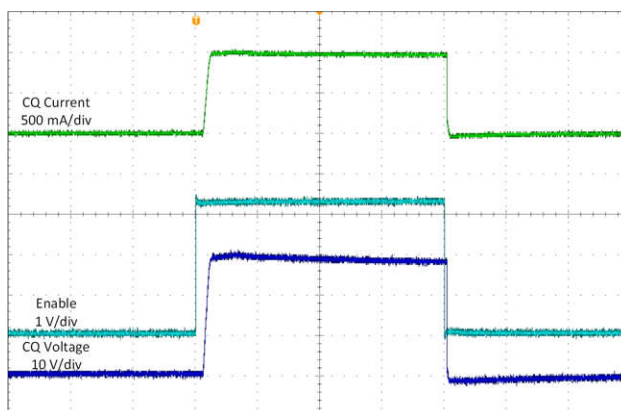


图 2-7. TIOL111 器件唤醒脉冲的测试结果

根据设计，TIOL111 器件设备能够提供唤醒脉冲所需的电流，因此可用作主站 PHY。

2.3.2 电流吸收器

除了唤醒脉冲外，主机 PHY 与设备 PHY 的另一重要差异是必须包含电流吸收器，如 图 2-8 中所示。它必须包含一个电流吸收器。由于 TIOL111 器件芯片内未集成该功能，因此在板级实现。

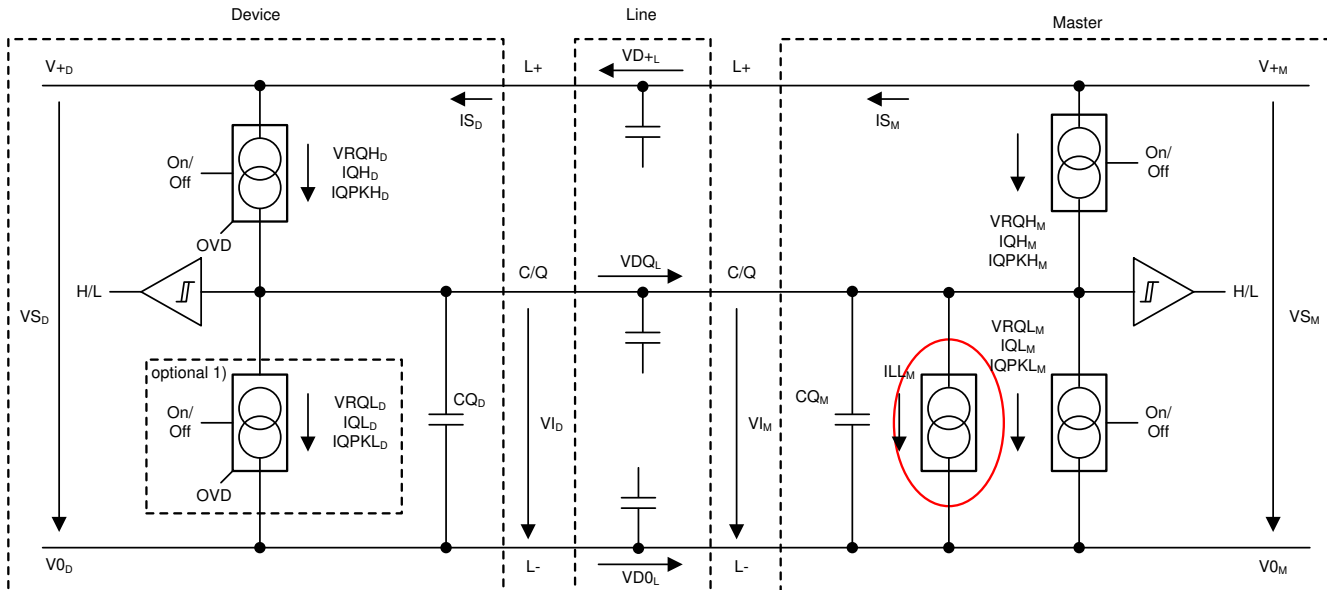


图 2-8. IO-Link® 系统方框图

如 表 2-3 中所示，电流需在 5mA 至 15mA 之间。

表 2-3. IO-Link® 主站电流吸收器规范 ⁽¹⁾

ILL _M	以下项的负载或放电电流： 0 V < V _{I_M} < 5 V 5 V < V _{I_M} < 15 V 15 V < V _{I_M} < 30 V	0 5 5	不适用 不适用 不适用	15 15 15	mA mA mA
------------------	---	-------------	-------------------	----------------	----------------

(1) 这些电流值与 IEC 61131-2 中类型 1 数字输入定义兼容。但对于 5V < V_{I_M} < 15V 的范围，最小电流为 5mA，而非 2mA，以确保纯 p 开关器件具有足够快的上升/下降速率。

实现这种仅在发射器禁用时工作的微小可容忍电流吸收器，可使用简单 NPN 晶体管完成。

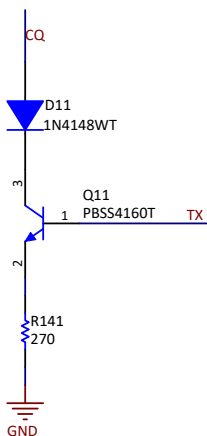


图 2-9. 简单电流吸收器

图 2-9 展示了原理图。电流吸收器由 MCU 发出的 TX 线控制，并连接至 TIOL111 器件。由于 TIOL111 器件逻辑为反向，TX 线在空闲状态下默认高电平，因此每当驱动器被禁用或 CQ 线上传输 0V 时，电流吸收器即被使能。因此，在正常运行中不会增加电流消耗。

2.3.3 L+ 电源

IO-Link 主站必须为 L+ 线路提供至少 200mA 电流能力，并可在 50ms 内提供 400mA 脉冲。该规范在 表 2-4 中有明确规定。

表 2-4. L+ 电源规范

属性	参数名称	最小值	典型值	最大值	单位	注释
VS _M	器件的电源电压	20	24	30	V	请参阅 IO-Link 接口和系统规范版本 1.1.2.2 中的电平定义
IS _M	器件的电源电流	200	不适用	不适用	mA	超过 200mA 需要外部电源
ISIR _M	器件的电流脉冲能力	400	不适用	不适用	mA	在端口供电上电后，主站必须保证在 18V 下至少 50ms 的电流能力

为实现这一功能，本设计使用了 TPS4H160 器件。该器件为四通道高侧开关，提供可编程电流限值，并带有电流检测输出，连接至 MCU。因此，每个通道具备短路保护，MCU 可监测各端口电流并检测故障。

满足 IS_M 要求相对容易，只需使用 R_{(DS)on} 足够低的任意器件即可实现。然而，要满足 ISIR_M 要求更为困难，因为结到环境的功率耗散是限制因素。当输出短路或需要给大电容器充电时，器件短时功率耗散可达 $400\text{mA} \times 30\text{V} = 12\text{W}$ 。若设计驱动超过最小 400mA 电流，功耗可能更高。

在 L+ 线路上给带有静态负载的大电容器充电（IO-Link 器件的常见场景）会稍微缓解功率耗散压力，因为 L+ 电压升高，FET 压降下降，功率耗散也随之减少。

然而，由于功率无法快速传导至 PCB 或散热器，主要限制因素仍在器件封装上。

请参阅 [IO-Link 套件 2015](#) 及 [修订版 1.0](#) 第 4.4 节中的 上电最大器件消耗 表格，以查看详细规范及其对“上电后前 50ms 内产生 20mAs 的 400mA 电流”的定义。

根据此规范扩展，L+ 输出测试定义为并联 1000μF 大电容器和 150 Ω 电阻的负载，用于模拟具有静态负载和大输入电容器的器件。

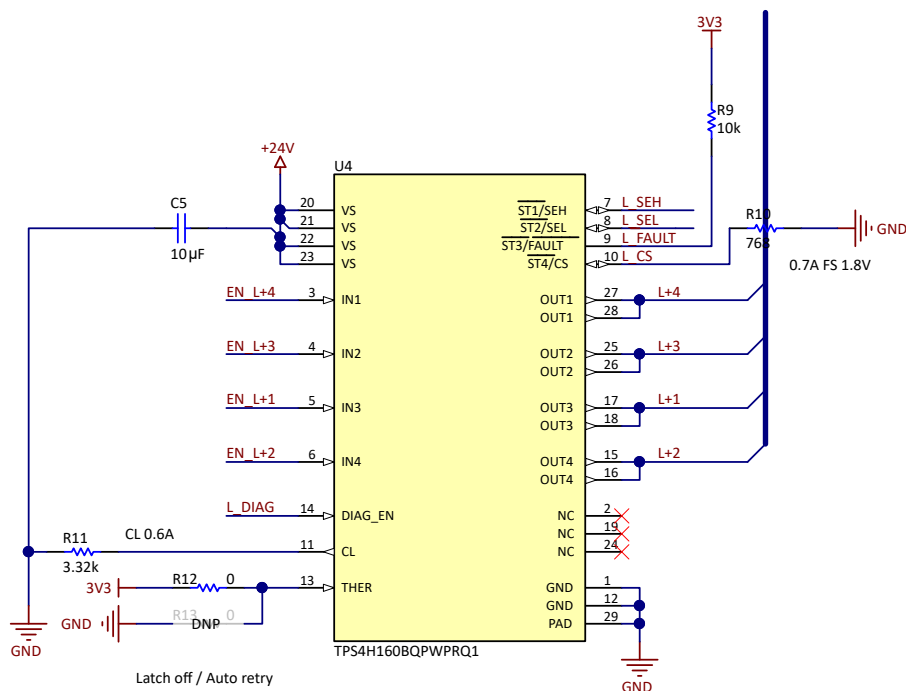


图 2-10. 高侧开关原理图

高侧开关配置为将电流限制在 0.6A，此电流值用于满足 L+ 启动特性要求。若电流过高，器件封装无法承受电容器充电期间的电功率耗散，器件将关闭以降温，并重新启动。

电流检测配置为在最大输出电压 1.8V 时可测量到 0.7A (由 IDK 上 AM4379 器件的 ADC 提供)。由此形成的原理图如 图 2-10 中所示。TPS4H160 器件在出现热错误后可设置两种行为：自动重试或关闭，本设计配置为关闭，直至再次使能。

若有其他需求，或允许带中断的启动行为，则每端口 1A 的较高电流是可行的，并可在启动时正常工作。

2.3.4 电源

IO-Link 主站由 24V 电源供电。由于该设计使用 AM437x IDK，且 IDK 也由 24V 供电，因此可以使用同一个电源或两个不同的 24V 电源为两块板供电。但是，需要相应地设置转接板上的跳线。

当电源连接到 IDK，并且 IO-Link 主站应通过该电源供电时，转接板上的 J7 需短接。用户需注意，所有端口的总电流限制为 0.5A。此配置未经测试，不推荐使用。

推荐方式是通过转接板为 IDK 供电，因此应将一个 24V 电源连接到 J5 或 J8。跳线 J6 和 J9 需为短接。为给 IDK 供电，J7 也需短接。如果 IDK 使用独立电源，J7 则需断开。

表 2-5. 电源跳线设置

配置	电源	J6、J9	J7
通过 IDK 供电	仅连接到 IDK	开路	短路
通过适配器供电	连接至 J8 或 J5	短路	短路
独立电源	已连接到 IDK 和 J8 或 J5	短路	开路

TLC59282 和 TIOL111 器件需要 3.3V 电源。为避免给 IDK 的电压稳压器增加负载，转接板上有一个额外的 LM5165 器件来提供所需的电压。为了确保在所有电压稳定之前 IO-Link 主站不会向 IDK 发送信号，LM5165 将由 IDK 的 3.3V 电源开启。

2.3.5 引脚排列

AM437x IDK 的 IO-Link 主站扩展板通过 IDK 上的两个引脚排针进行连接。为了将一些必要的信号引至接口，需要对电路板进行修改。图 2-11 展示了引脚排列，改动列表如表 2-6 中所示。

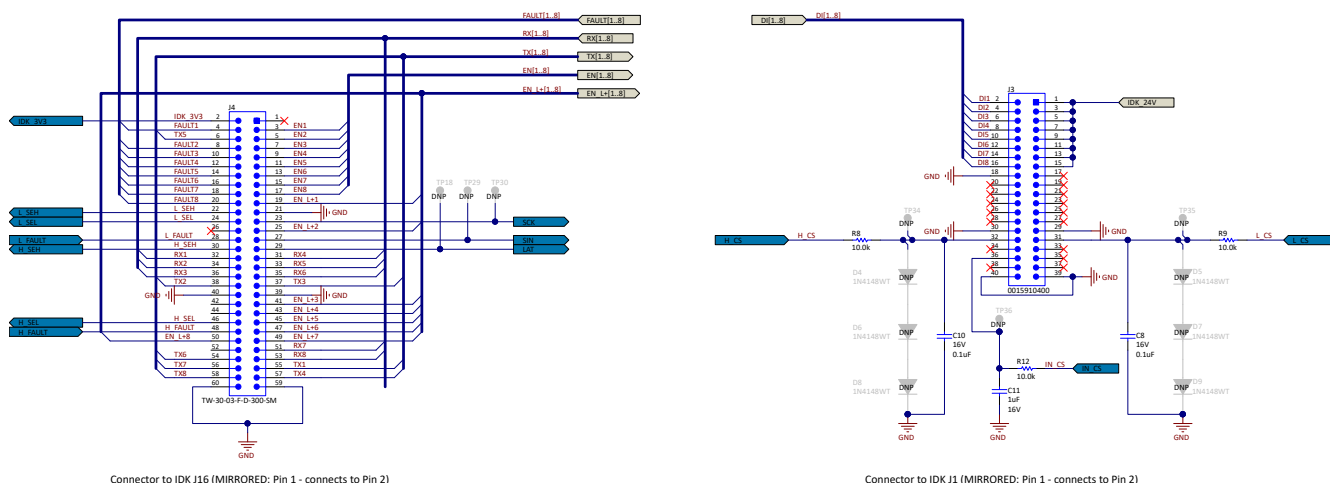


图 2-11. 连接到 IDK 的 IO-Link® 板的引脚排列

表 2-6. 更改

引脚	信号	删除	向
J16 - 5	TX4	R187、R264	从 R187 接线至 R264 (J16-5)
J16 - 23	GPIO5_20	-	10k Ω 电阻器 R343
J16 - 34	RX4	R541	-
J16 - 36	RX5	R541	-
J16 - 49	GPIO2_12	R406	-
J16 - 52	RX6	R541	-
J16 - 53	TX5	R179、R465	从 R179 接线至 R465 (J16-53)
J16 - 54	RX7	R541	-
J16 - 55	TX6	R177、R471	从 R177 接线至 R471 (J16-55)
J16 - 57	TX7	R70、R468	从 R70 接线至 R468 (J16-57)
J1 - 31	AIN0	R454	0 Ω 电阻器 R450
J1 - 32	AIN4	R109	0 Ω 电阻器 R104
J1 - 35	AIN2	R561	0 Ω 电阻器 R435

2.4 软件帧处理程序

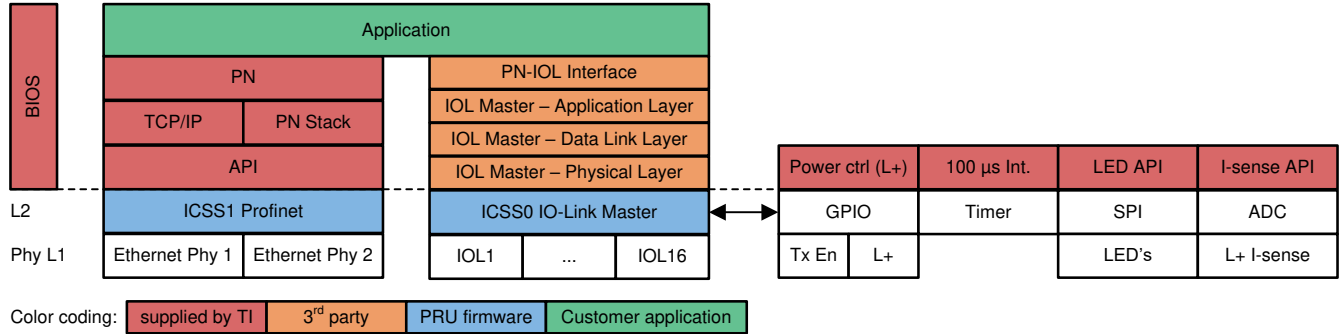


图 2-12. PRU-ICSS IO-Link® 主站项目

图 2-12 显示了 PRU-ICSS IO-Link 主站项目的简化结构。它可以分为六个独立的部分：

- PRU 固件是项目的核心组件，用于执行帧处理。它本质上是一个多通道 UART 实现，带有增强功能。
- IO-Link 驱动程序：位于 PRU 固件与第三方提供的各层堆栈之间
- TI 提供的附加 RTOS 驱动程序功能：支持 IO-Link 主站特定功能，如电源和 LED 控制
- 第三方提供的堆栈
- 客户指定的应用程序
- 可选第二接口，例如 Profinet (可能由 TI 提供)

2.4.1 PRU-ICSS IO-Link® 帧处理程序

IO-Link 帧处理程序是本设计的核心软件组件。它通过软件实现替代硬件 UART，从而无需额外的处理硬件。

2.4.1.1 性能优势和优点

可编程实时单元和工业通信子系统 (PRU-ICSS) 硬件允许用户编写并运行高度可预测和确定性的软件，能够替代那些对于普通微控制器而言时间要求过于苛刻的解决方案。这种硬件化行为使八通道 IO-Link 主站能够非常快速响应，并几乎无抖动。

IO-Link 帧处理程序每八个通道需要一个 PRU，每个 ICSS 最多可支持 16 个通道。通常可用的第二个 ICSS 可以用于处理其他任务，例如实时以太网。

2.4.1.2 操作原理

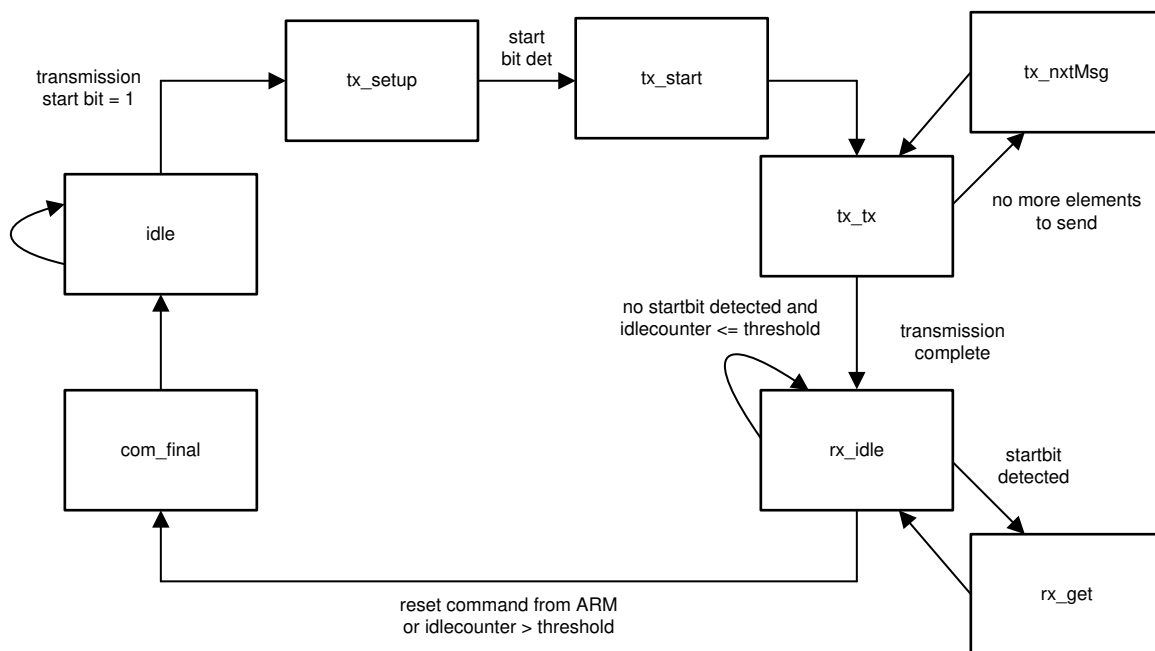


图 2-13. 帧处理程序的状态机简化概述

图 2-13 展示了帧处理程序的状态机概览。这并非固件的完整描述，而是对通信周期的示意说明。

帧处理程序由“传输开始位”启动，该信号会触发选定发送缓冲区的新一轮传输。随后，系统会持续发送，直至发送缓冲区指针到达当前传输的最后一个字节。传输结束后，系统状态将切换至接收状态，以接收数据直至整个传输完成。传输可能出现错误，也可能无错误完成。这些错误将仅通过状态位报告。错误响应与应对措施由 IO-Link 主站协议栈负责。完整通信周期的结束由标志位及可选中断指示。

3 硬件、软件、测试要求和测试结果

3.1 所需的硬件和软件

3.1.1 硬件

要开始使用，需将两块 IO-Link 主站板叠加，并与 AM437x IDK 叠装。需将 24V、5A 电源连接至 J8 或 J5。转接板上的跳线 J6、J7 和 J9 需短接。图 3-1 中显示了相关的跳线和连接器。当相应电压存在时，24V 和 3.3 V 指示灯应点亮。在正常运行时，两个 LED 都亮起。

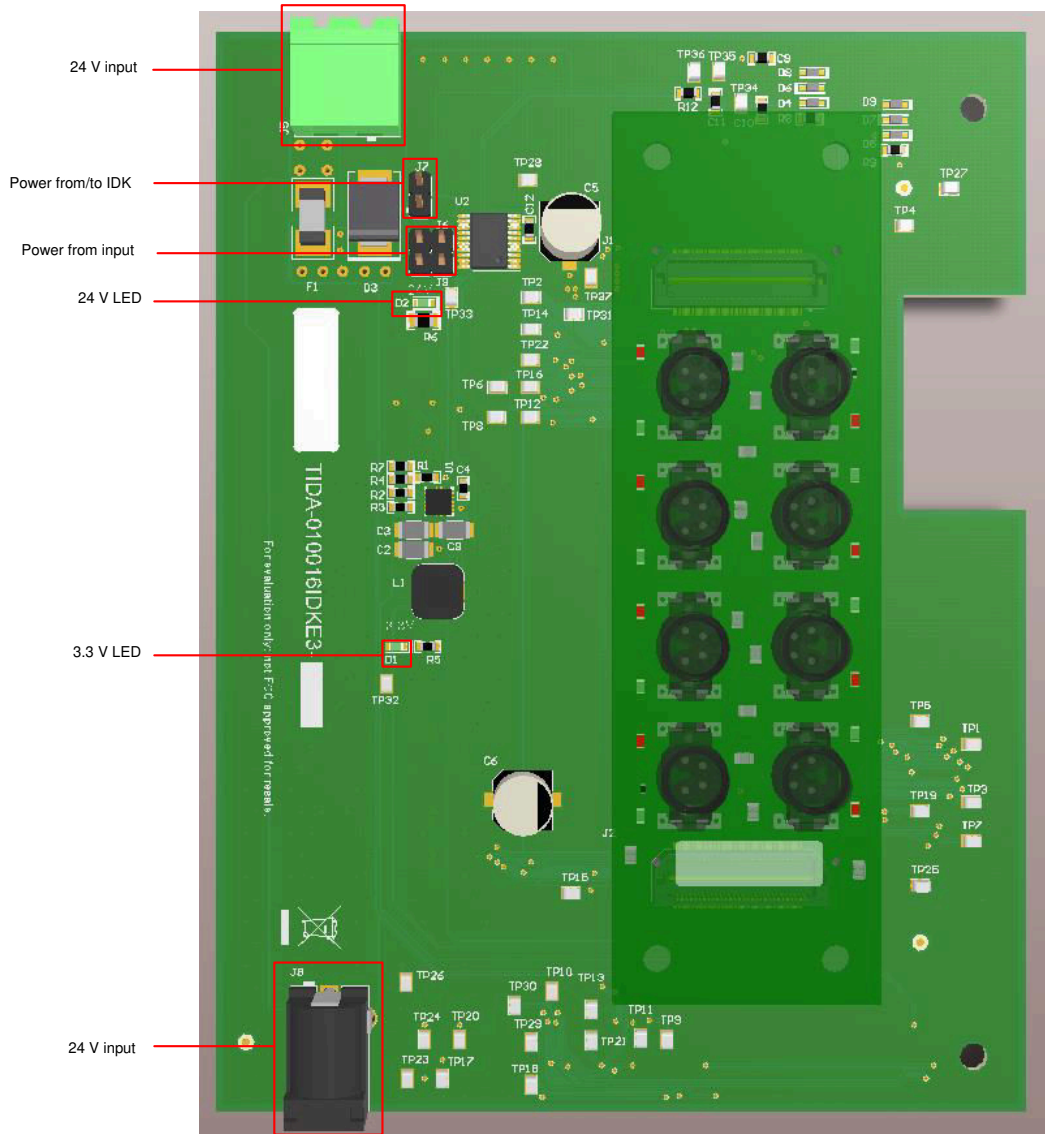


图 3-1. 电源连接器与跳线

3.1.2 软件

为简化测试，可手动将对应 GPIO 接到所需电平。在完整 IO-Link 应用中，PRU 上实现了帧处理器，ARM 核心运行 IO-Link 协议栈。

3.2 测试和结果

3.2.1 测试设置

为测试不同的物理参数，IO-Link 板在未连接 IDK 的情况下接入 24V 电源。后续章节将介绍每次测试所需的信号。

3.2.2 测试结果

3.2.2.1 IO-Link® 唤醒脉冲

如前所述，PHY 必须提供 80 μ s、500mA 的唤醒脉冲。为测试此功能，将使能信号连接至 3.3V，TX 信号由函数发生器提供。测试会在不同极性、负载和电压下重复进行。

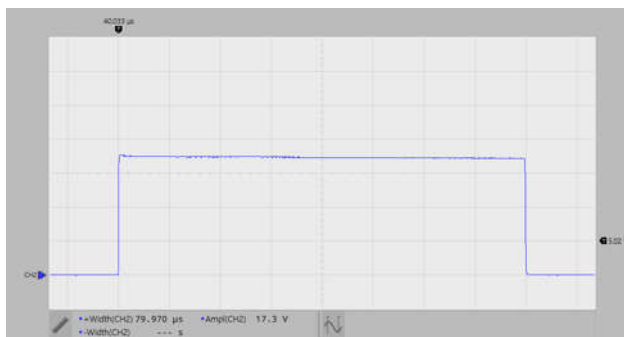


图 3-2. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQWUH：高侧驱动程序、负载= 26 Ω 、20V 电源、5V/div、10 μ s/div

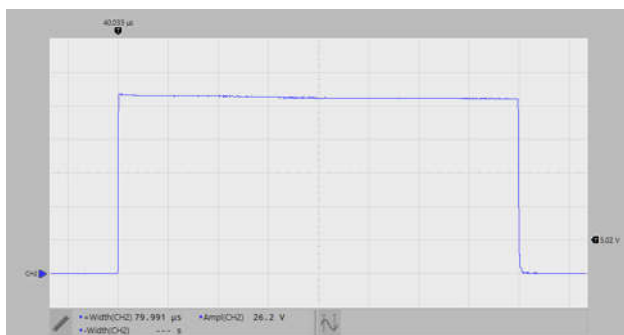


图 3-3. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQWUH：高侧驱动程序、负载= 26 Ω 、30V 电源、5V/div、10 μ s/div

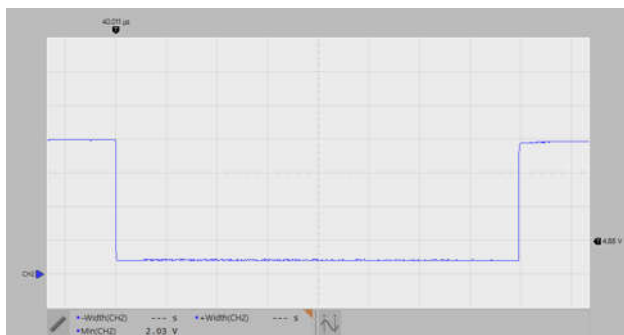


图 3-4. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQWUL：低侧驱动程序、负载= 24 Ω 、20V 电源、5V/div、10 μ s/div

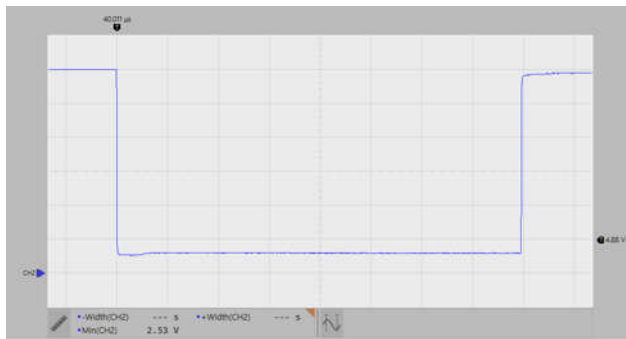


图 3-5. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQWUL : 低侧驱动程序、负载= 44 Ω、30V 电源、5V/div、10μs/div

如 图 3-2 至 图 3-5 所示，TIOL111 器件通过了测试。

3.2.2.2 L+ 导通行为

L+ 线路的启动测试通过在其上接入一个 1000μF 电容 (并联 150 Ω 电阻负载) 进行。IO-Link 主机需在 50ms 内提供至少 400mA 电流才能通过该测试。该负载用于模拟具有较大输入电容器和静态负载的 IO-Link 设备。

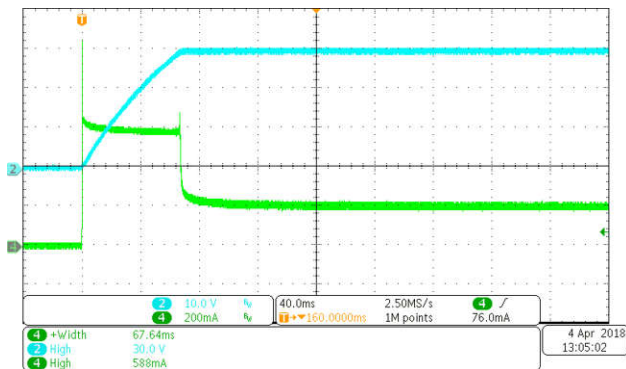


图 3-6. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_ISIRM : - 通电电源电流能力

图 3-6 展示了测试结果。通道 2 显示 L+ 线路上的电压，通道 4 显示 L+ 上的电流。由于负载同时具有电容性和电阻性，开始时高侧开关会将电流限制在 600mA，持续约 70ms。此后，仅剩电阻负载，电流稳定在 200mA。由于此时能量超过所需的 $400\text{mA} \times 50\text{ms} = 20\text{mA}$ ，该测试通过。

但不同 IO-Link 主机的实现方式在此测试中的表现可能存在较大差异。

3.2.2.3 CQ 端口电流吸收器

在测试电流吸收器时，需要将待测端口定义为输入端。因此，将 TIOL111 器件的使能信号接低电平，并将 TX 信号设置为 3.3V 以使能电流吸收器。随后在端口的 CQ 线上施加可变电压。测试用例 TCM_PHYL_INTF_ILLM 定义了具体测试流程。电流要求如下：电压低于 5.1V 时小于 15mA，电压在 5.1V 至 30V 时电流在 5 至 15mA 之间。

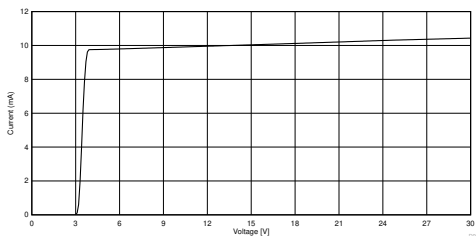


图 3-7. CQ 线输入电流

当吸收器电流在规定范围内时，测试通过。

3.2.2.4 残余电压

测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQPKHM 用于测试 IO-Link PHY 高侧在唤醒脉冲期间的压降。因此，将 CQ 线加载 $26\ \Omega$ ，并产生唤醒脉冲。CQ 线上的电压需超过 13V 才能通过该测试。该测试在 L+ 电压为 20V 和 30V 的条件下进行。

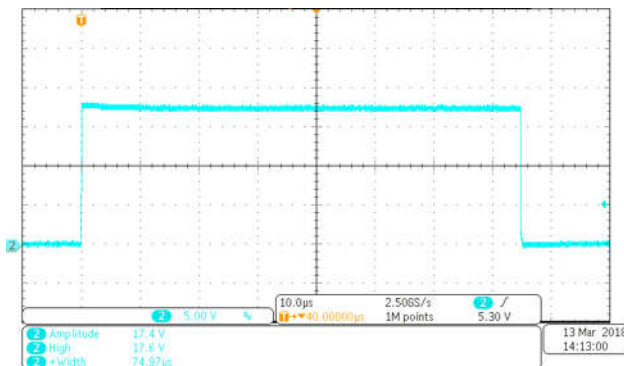


图 3-8. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQPKHM : 20V L+ 条件下的高侧唤醒电流，结果为 17.4V

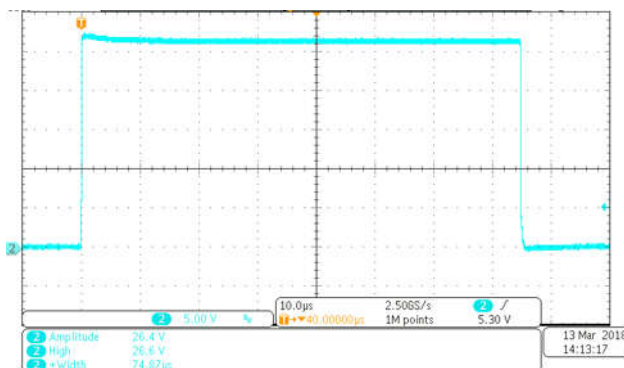


图 3-9. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQPKHM : 30V L+ 条件下的高侧唤醒电流，结果为 26.4V

如 图 3-8 和 图 3-9 所示，电压均高于 13V，因此高侧驱动测试通过。

下一个相关测试用例为 TCM_PHYL_INTF_IQPKLM。该测试与前一个类似，但用于测试低侧开关。因此，在 L+ 电压为 20V 时，负载为 $24\ \Omega$ ；在 30V 时，负载为 $44\ \Omega$ 。为测试低侧，电阻需连接在 L+ 与 CQ 之间。电压必须低于 8V 才能通过该测试。

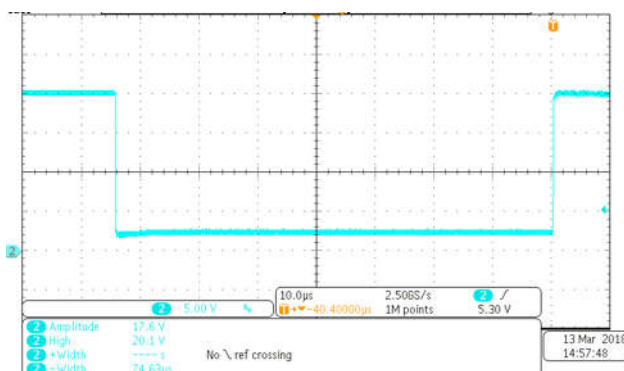


图 3-10. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQPKLM : 20V L+ 条件下的低侧唤醒电流，结果为 2V

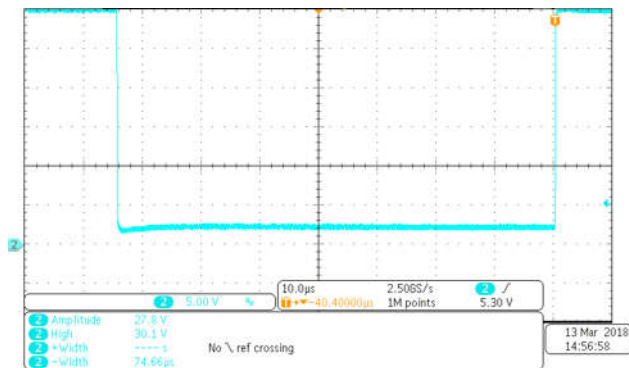


图 3-11. 测试用例 TCM_PHYL_INTF_IQPKLM : 30V L+ 条件下的低侧唤醒电流，结果为 2V

因此，所有唤醒脉冲期间的电流能力测试均已通过。

3.2.2.5 IO-Link® 物理层测试汇总

表 3-1 列出了物理层测试汇总及结果。

表 3-1. IO-Link® 物理层测试

ID	名称	配置	规范 (条款)	注释	结果
SDCI_TC_0001	TCM_PHYL_INTF_ISM	监控主站端口的电源电流。	请参阅 IO-Link 接口和系统规格版本 1.1.2.2 中表 6 的第 5.3.2.3 节	用 200mA 测试	20V : 通过 30V : 通过
SDCI_TC_0002	TCM_PHYL_INTF_ISIRM	监控主站端口的电源电流。		用 500mA 测试	20V : 通过 30V : 通过
SDCI_TC_0003	TCM_PHYL_INTF_ILLM	监控主站端口 C/Q 上的输入电流。			ILLM (VIM = 5V , VSM = 20V) : 9.77mA 通过 ILLM (VIM = 5,1V , VSM = 20V) : 9.77mA 通过 ILLM (VIM = 15V , VSM = 20V) : 10.04mA 通过 ILLM (VIM = VSM = 20V) : 10.17mA 通过 ILLM (VIM = 5V , VSM = 30V) : 9.77mA 通过 ILLM (VIM = 5,1V , VSM = 30V) : 9.77mA 通过 ILLM (VIM = 15V , VSM = 30V) : 10.04mA 通过 ILLM (VIM = VSM = 30V) : 10.43mA 通过
SDCI_TC_0004	TCM_PHYL_INTF_VRES 高电平	测量主站 C/Q 输出端的输出电平。			VRQHM (VSM = 20V) : 1.003V VRQHM (VSM = 30V) : 1.002V 通过
SDCI_TC_0005	TCM_PHYL_INTF_VRESLOW	测量主站 C/Q 输出端的输出电平。			VRQLM (VSM = 20V) : 0.984V VRQLM (VSM = 30V) : 0.983V 通过
SDCI_TC_0006	TCM_PHYL_INTF_VTHHM	对 C/Q 输入端的数字输入信号进行监控	请参阅 IO-Link 接口和系统规格版本 1.1.2.2 中表 5 的第 5.3.2.2 节		VIM@VTHHM (VSM = 20V) : 11.47V VIM@VTHHM (VSM = 30V) : 11.47V 通过
SDCI_TC_0007	TCM_PHYL_INTF_VTHLM	对 C/Q 输入端的数字输入信号进行监控			VIM@VTHLM (VSM = 20V) : 10.75V VIM@VTHLM (VSM = 30V) : 10.75V 通过
SDCI_TC_0008	TCM_PHYL_INTF_VHYSM	SDCI_TC_0006 和 SDCI_TC_0007 中的值比较			VHYSM (VSM = 20V) : 0.72V VHYSM (VSM = 30V) : 0.72V 通过
SDCI_TC_0009	TCM_PHYL_INTF_IQPKHM	测量主站 C/Q 输出端的输出电平。			VIM (VSM = 20 V) : 17.4 V VIM (VSM = 30 V) : 26.4V 通过
SDCI_TC_0010	TCM_PHYL_INTF_IQPKLM	测量主站 C/Q 输出端的输出电平。	请参阅 IO-Link 接口和系统规格版本 1.1.2.2 中表 6 的第 5.3.2.3 节		VIM (VSM = 20 V) : 2.2 V VIM (VSM = 30 V) : 2.2V 通过
SDCI_TC_0299	TCM_PHYL_INTF_VOLTRAN GECQ	测试通过 1Ω 将 CQ 连接到 0V 和 30V 后是否工作	请参阅 IO-Link 接口和系统规格版本 1.1.2.2 中表 5 - VIL 和 VIH 的第 5.3.2.2 节		通过
SDCI_TC_0021	TCM_PHYL_INTF_IQWUH		请参阅 IO-Link 接口和系统规格版本 1.1.2.2 中表 9 的第 5.3.3.3 节	函数发生器中的唤醒脉冲	VIM@WURQ (VSM = 20V) : 17.3V VIM@WURQ (VSM = 30V) : 26.2V 通过
SDCI_TC_0022	TCM_PHYL_INTF_TWUH			函数发生器中的唤醒脉冲	TWUH@WURQ (VSM = 20V) : 80μs TWUH@WURQ (VSM = 30V) : 80μs 通过
SDCI_TC_0023	TCM_PHYL_INTF_IQWUL			函数发生器中的唤醒脉冲	VIM@WURQ (VSM = 20V) : 2V VIM@WURQ (VSM = 30V) : 2.5V 通过
SDCI_TC_0024	TCM_PHYL_INTF_TWUL			函数发生器中的唤醒脉冲	TWUL@WURQ (VSM = 20V) : 80μs TWUL@WURQ (VSM = 30V) : 80μs 通过

3.2.2.6 各端口电流检测

为测试 TPS4H160 器件的电流检测功能，需要通过设置所选引脚来选择各通道。器件使用 24V 电源供电，每个通道接入一个可调灌电流。电流检测输出端连接到电压表。每次测试一个通道，结果绘制在 图 3-12 和 图 3-13 中。

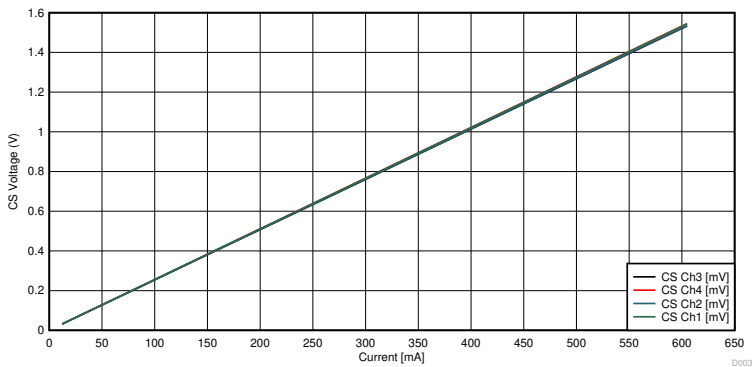


图 3-12. TPS4H160 的输出电压与电流的关系

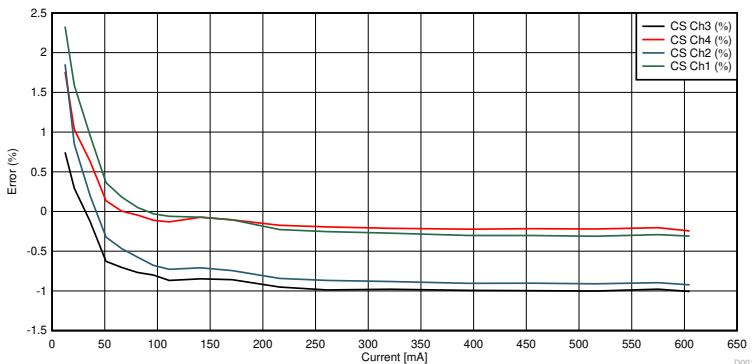


图 3-13. 电流测量误差

误差计算通过将输出电压转换为电流实现： $I[\text{mA}] = 300 / 768 \times U \times 1000$. 随后通过公式计算误差： $E[\%] = (I_{\text{TPS}} - I_{\text{IS}}) / I_{\text{IS}}$ 。

3.2.2.7 TPS4H160 热特性

TPS4H160 器件的每个端口加载 1A 电流，8 个端口全部开启。图 3-14 展示了电路板在室温下的热成像结果。该设计还能够在环境温度为 85°C 时承受 1A 电流负载而不发生过热。

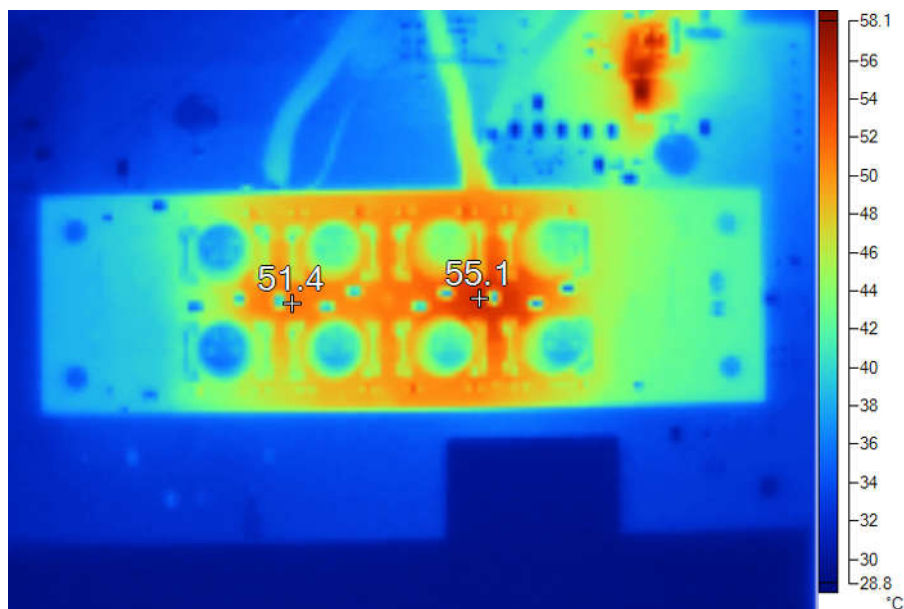


图 3-14. 每端口 1A 负载下的 IO-Link® 主站热成像

4 设计文件

4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-010016](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-010016](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

4.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-010016](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

要下载 Altium Designer® 工程文件，请参阅 [TIDA-010016](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-010016](#) 的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-010016](#) 中的设计文件。

5 软件文件

要下载软件文件，请参阅 [TIDA-010016](#) 中的设计文件。

6 相关文档

1. IO-Link Consortium, [IO-Link 测试规范版本 1.1.2](#)
2. IO-Link Consortium, [IO-Link 接口和系统规范版本 1.1.2](#)
3. IO-Link Consortium, [IO-Link 套件 2015 及修订版 1.0](#)
4. 德州仪器 (TI), [为传感器选择合适的工业通信标准](#)

6.1 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

IO-Link® are registered trademarks of Profibus User Organization.

Altium Designer® is a registered trademark of Altium LLC or its affiliated companies.

所有商标均为其各自所有者的财产。

7 作者简介

STEFFEN GRAF 是德州仪器 (TI) 的一名系统工程师，负责开发工业领域中的参考设计解决方案。他获得了德国达姆施塔特应用科学大学的电气工程理学硕士学位。

8 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 B (December 2018) to Revision C (March 2021)	Page
--	------

- | | |
|------------------------------------|---|
| • 更新了整个文档中的表格、图和交叉参考的编号格式..... | 1 |
| • 添加了对较小解决方案 TPS274160 器件的支持。..... | 5 |
-

Changes from Revision A (November 2018) to Revision B (December 2018)	Page
---	------

- | | |
|---|---|
| • 已将 <i>scaleable</i> 更正为 <i>scalable</i> | 1 |
|---|---|
-

Changes from Revision * (July 2018) to Revision A (November 2018)	Page
---	------

- | | |
|---|---|
| • 将 <i>O-Link</i> 更改为了 <i>IO-Link</i> | 2 |
|---|---|
-

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、与某特定用途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安全、安保法规或其他要求。

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。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 销售条款](#)、[TI 通用质量指南](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款或 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。除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2025，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月