

TI 参考设计

用于可编程逻辑控制器 (PLC) 的 16 位模拟混合输入和输出模块



TI 参考设计

TI 参考设计为您提供了所需的基础方法、测试和设计文件，以便您快速评估和定制系统。TI 参考设计可帮助您缩短产品上市时间。

设计资源

[TIDA-00170](#)

I/P 和 O/P 模块设计

[TIDA-00123](#)

I/O 控制器设计文件

[ADS8688](#)

产品文件夹

[DAC8760](#)

产品文件夹

[ISO7421](#)

产品文件夹

[SN74HC595](#)

产品文件夹

[LM5069](#)

产品文件夹

[LM5017](#)

产品文件夹

[ISO7141](#)

产品文件夹

[TPS7A1650](#)

产品文件夹

[TPS7A3001](#)

产品文件夹

[TPS7A4700](#)

产品文件夹



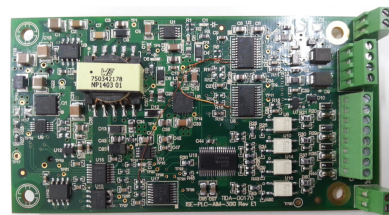
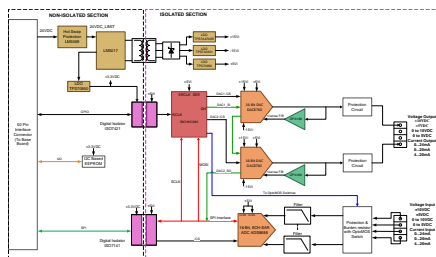
请咨询我们的 [E2E 专家](#)
[WEBENCH® 计算器工具](#)

设计特性

- 四通道用户可编程模拟输入：
 - 电压 I/P: (典型 ZIN 1MΩ) 高达 $\pm 10V$
 - 电流 I/P: (典型 ZIN 300Ω) 高达 $\pm 24mA$
 - 采样率高达 300kSPS (单通道)
 - 25°C 时精度高达 $\pm 0.1\%$ FSR
- 两个可选模拟输出通道：
 - 电流 O/P: 高达 24mA
 - 电压 O/P: 高达 $\pm 10V$
 - 25°C 时精度高达 $\pm 0.2\%$ FSR
- 具有浪涌电流保护的板载隔离式 Fly-Buck™ 电源
- 纤薄外形 96mm x 50.8mm x 10mm (长 x 宽 x 高)
- 可插接到 I/O 控制器平台 (TIDA-00123) 方便进行评估
- 基于 LabView™ 的图形用户界面 (GUI) 用于信号链分析和功能测试
- 设计符合 IEC61000-4 标准中关于静电放电 (ESD)、电快速瞬变脉冲群 (EFT) 和浪涌的要求

特色应用

- PLC: 电流和电压输入模块
- 远程 PLC 和分布式控制系统 (DCS)
- 数据采集系统
- 测试和测量



该 TI 参考设计末尾的重要声明表述了授权使用、知识产权问题和其他重要的免责声明和信息。

All trademarks are the property of their respective owners.

1 系统概述

TIDA-00170 是工业控制模拟混合 I/O 模块的参考设计。本参考设计适用于过程控制终端设备，例如可编程逻辑控制器 (PLC)、分布式控制系统 (DCS) 和数据采集系统 (DAS)。这类模块可对标准工业电压-电流输入（高达 $\pm 10\text{V}$ 的双极或单极电压范围）进行数字化，并使用模拟信号电压和电流执行控制操作。模拟输出通常用于控制工业环境下的驱动器、阀门和电机。这类模块支持标准模拟输出范围，例如， $\pm 5\text{V}$ 、 $\pm 10\text{V}$ 、 $0-5\text{V}$ 、 $0-10\text{V}$ 、 $4-20\text{mA}$ 、 $0-20\text{mA}$ 或 $0-24\text{mA}$ 。

在本参考设计中，模拟输入通道可测量所有电压最高达 $\pm 10\text{V}$ 、电流最高达 24mA 的标准工业输入。模块上提供四个通道，每个通道均可通过软件配置为电流或电压输入。ADS8688 ADC 采用基于 SAR 的架构，其采样率高于 $\Delta-\Sigma$ 架构，并且片上 PGA 可灵活支持各种输入范围。

该模块支持两个 16 位分辨率的同步输出；电压输出可用于为基于微处理器的数据采集或控制系统提供输入，电流输出可用于模拟传输、操作员接口或模拟备用系统。

为实现主机微控制器与测量端的数字信号功能隔离，尤其是要获得较高的共模性能，模块中使用了 ISO7141 和 ISO7421 这两款数字隔离器。电源使用基于 LM5017 的 Fly-Buck 转换器实现隔离。该模块配有板载 EEPROM 以存储校准数据和模块配置数据。本参考设计还重点介绍了多款德州仪器 (TI) 产品，例如浪涌电流限制控制器、隔离式 Fly-Buck 控制器、低噪声低压降 (LDO) 稳压器以及可用于 PLC 信号链的移位寄存器扩展器。

该模块设计为可插接到 I/O 控制器平台 (TIDA-00123)，方便快速测试和评估。输入和输出通道包含有保护电路，经测试和验证符合 IEC61000-4 标准中关于 I/O 控制器平台静电放电 (ESD)、电快速瞬变脉冲群 (EFT) 和浪涌要求。

此模块还随附有电路原理图、物料清单 (BOM)、印刷电路板 (PCB) 布局 (Altium 工具)、光绘文件、Tiva™ C 系列 MCU 软件以及用于易用型图形用户界面 (GUI) 的可执行代码 (请参见 9 节)。

2 设计规格

表 1 提供了模拟输入输出模块的规格。

表 1. 模拟输入输出模块的规格

参数	规格与特性	
模拟输入		
通道数	四通道（电压/电流可编程）	
I/O 范围	电压： <ul style="list-style-type: none"> • $\pm 10V$ • $\pm 5V$ • $\pm 2.5V$ • 0 至 10V • 0 至 5V 	电流： <ul style="list-style-type: none"> • 0 至 20mA • 4 至 20mA • 0 至 24mA
输入阻抗 (ZIN)	电压 > 1M Ω	电流 < 300 Ω
整体精度（未校准）	电压输入：25°C 时为 $\pm 0.1\%$ FSR	电流输入：25°C 时为 $\pm 0.1\%$ FSR
采样速度	300kSPS（带有数字隔离）	
模拟输出		
通道数	双通道（电压/电流可编程）	
输出范围	电压： <ul style="list-style-type: none"> • $\pm 10V$ • $\pm 5V$ • 0 至 10V • 0 至 5V 	电流： <ul style="list-style-type: none"> • 0 至 20mA • 4 至 20mA • 0 至 24mA
整体精度（未校准）	电压输入：25°C 时为 $\pm 0.2\%$ FSR	电流输入：25°C 时为 $\pm 0.2\%$ FSR
稳定时间	500ns	
电源隔离	250V DC（连续） 可承受 1500V AC 持续一分钟	
ESD 等级	IEC 61000-4-2： <ul style="list-style-type: none"> • 4kV 接触放电 • 8kV 空气放电 	
EFT 等级	IEC 61000-4-4： 5kHz 时为 $\pm 2kV$ （信号端口）	
浪涌瞬态等级	IEC 61000-4-5： $\pm 1kV$ 线路-地 (CM)（信号端口）	
工作温度范围	0°C 至 60°C	
存储温度	-40°C 至 85°C	
尺寸（长 x 宽）	90mm x 50.8mm（工业小尺寸）	

3 框图

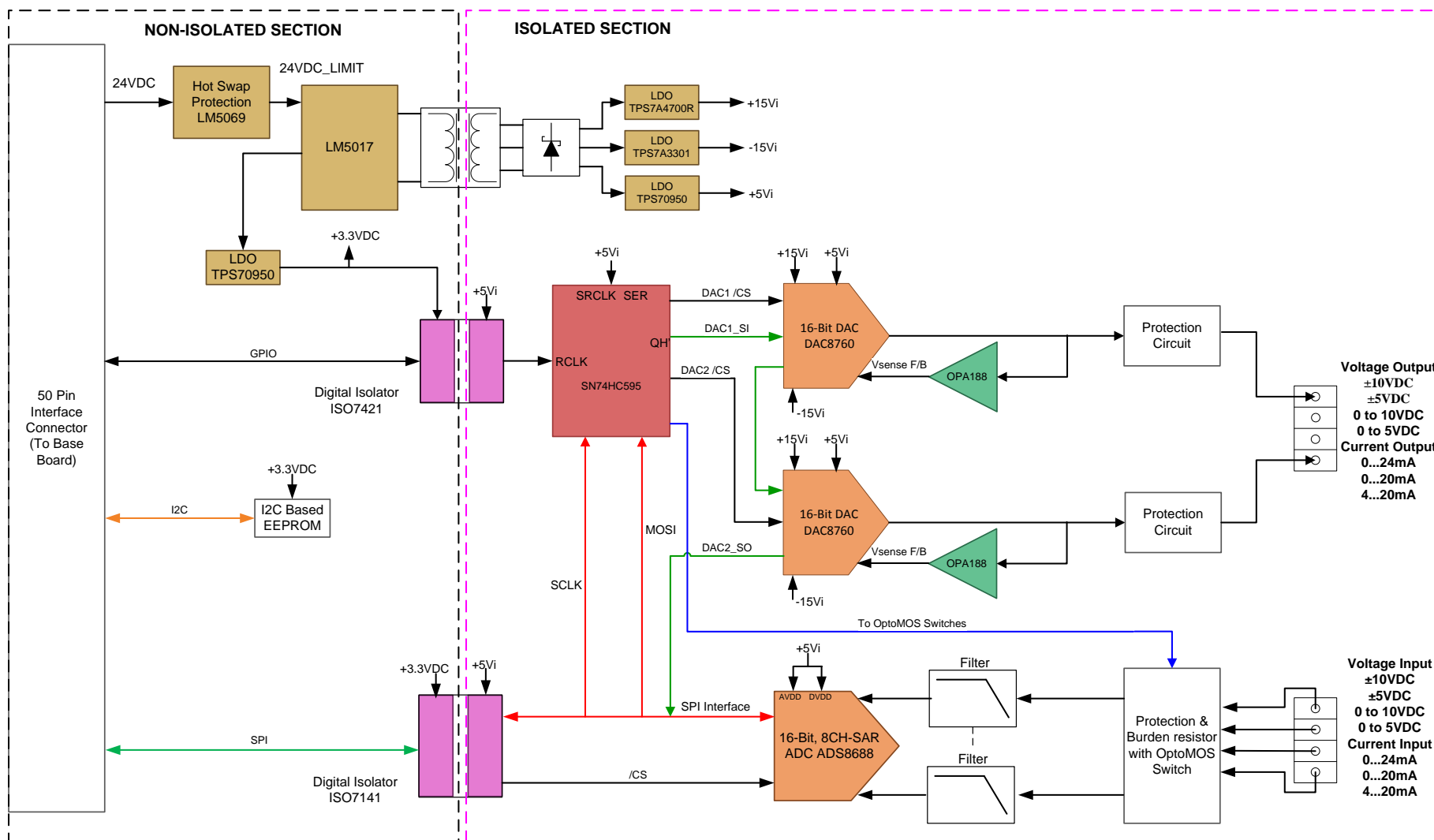


图 1. 系统框图

4 重点产品

该模块有四个模拟输入通道和两个模拟输出通道。每个模拟输入通道均可利用软件配置为电流或电压输入。本设计采用 ADS8688 这款配有片上 PGA 和基准的 16 位单电源逐次逼近寄存器 (SAR) ADC。片上 PGA 提供高输入阻抗 (典型值 $1\text{M}\Omega$)，滤波器抑制噪声干扰。片上 4.096V 超低漂移电压基准用作 ADC 内核的基准。

对于模拟输出，本设计采用 16 位分辨率的 DAC8760 数模转换器 (DAC)。该器件经编程可提供范围介于 4 至 20mA、0 至 20mA 或 0 至 24mA 的电流输出；或者范围介于 0 至 5V、0 至 10V、 $\pm 5\text{V}$ 或 $\pm 10\text{V}$ 的电压输出，并且允许超出范围 10% (0 至 5.5V、0 至 11V、 $\pm 5.5\text{V}$ 或 $\pm 11\text{V}$)。为确保接线灵活性，模块的电压和电流输出共用同一引脚，这样减少了连接器数量，进而节省了成本。

DAC 和 ADC 均可通过 SPI 接口进行配置。为节省使用的隔离器数量，移位寄存器 SN74HC595 与两个 DAC 配置为菊花链模式。ADC 具有单独的从选择线，直接由主机微控制器控制。数字隔离采用 ISO7141 和 ISO7421 实现。主机控制器通过 SPI 总线与用作 IO 扩展器的 SN74HC595 移位寄存器进行通信。该移位寄存器控制着 TLP3123 低 RON 光电开关，该开关用于切换电压和电流输入模式以及两 DAC 的 LATCH 引脚状态。输入通道配置在微控制器固件中完成。

低成本 LM5017 是一款采用 Fly-Buck 配置的恒定导通时间同步降压稳压器，配有外部变压器，用于提供隔离式电源。LM5017 具有宽输入电源范围，是接受 24V 工业电源的理想选择。该器件可承受高达 100V 的电压，在输入瞬变情况下仍可保持稳定。Fly-Buck 电源可对低至 6V、18V 和 -18V 的输入电压进行隔离与降压操作，并连接低压降 (LDO) 稳压器生成稳定的 5V、15V 和 -15V 电压轨，从而为 ADS8688、DAC8760 DVDD 以及其他电路供电。LM5017 还有大量的其他安全性和可靠性功能，例如欠压锁定 (UVLO)、热关断和峰值电流限制保护。该模块支持热插拔，无需断电即可在背板插座上进行插拔操作。热插拔特性通过 LM5069 实现。

该模块为 I/O 模拟信号提供了相关保护，可使其免遭工业环境下经常出现的高压快速瞬变事件的影响。保护电路使用 TVS 和 ESD 二极管。每个模拟输入都配有 RC 低通模式滤波器，模拟输入信号在到达 ADS8688 之前会通过该低通滤波器消除所有高频噪声干扰并最大限度减少混叠。

5 电路设计和组件选择

5.1 电源和隔离设计

该模块的标称电源输入额定值为 24V DC。为确保最大灵活性，模块支持 16V 至 36V DC 的宽电源电压范围。

LM5069 是一款正电压浪涌电流保护控制器，在模块插拔于带电系统或电源时可智能控制电源连接。LM5069 在负载接通期间限制浪涌电流，并在负载正常运行期间监视负载电流以防止发生故障。其他功能包括欠压锁定 (UVLO) 和过压锁定 (OVLO)，可确保仅在系统输入电压在指定范围内时为负载供电。模块的浪涌电流限制为 2.75A。可以对外部串联导通 N 沟道 MOSFET 中的电流限值 and 功耗进行编程，从而确保模块在安全工作区域 (SOA) 内运行。

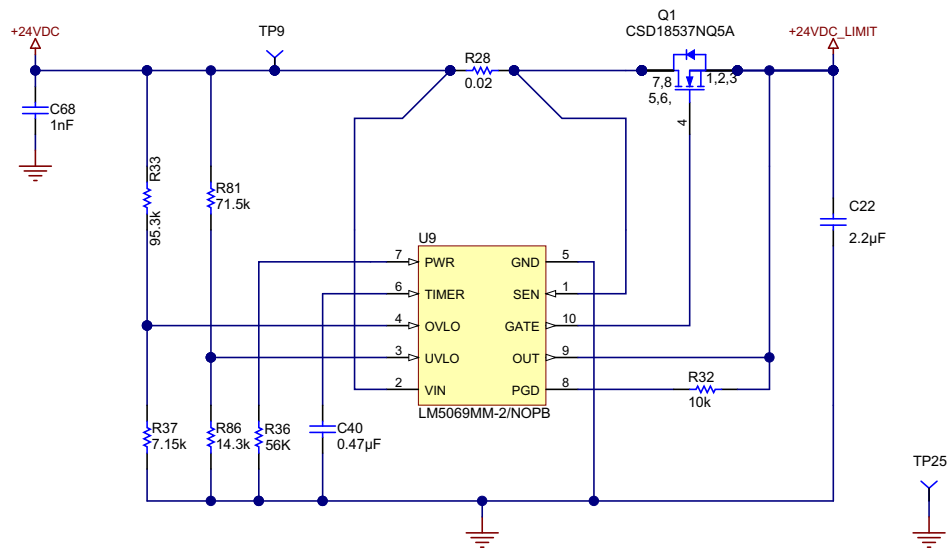


图 2. 浪涌电流限制

所需电流限制阈值如下：

$$I_{LIM} = \frac{55 \text{ mV}}{R28} = \frac{55 \text{ mV}}{20 \text{ m}\Omega} = 2.75 \text{ A} \quad (1)$$

为确保器件正常运行，感测电阻 R17 必须小于 100mΩ。

注：电流感测电阻 (R17) 必须靠近 LM5069 放置。R17 与 LM5069 之间的连接应采用开尔文接线技术实现。请参见图 3。

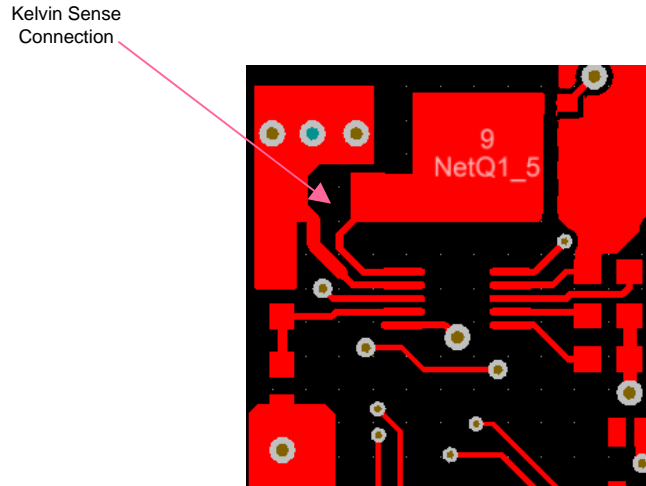


图 3. 感测电阻的开尔文感测连接

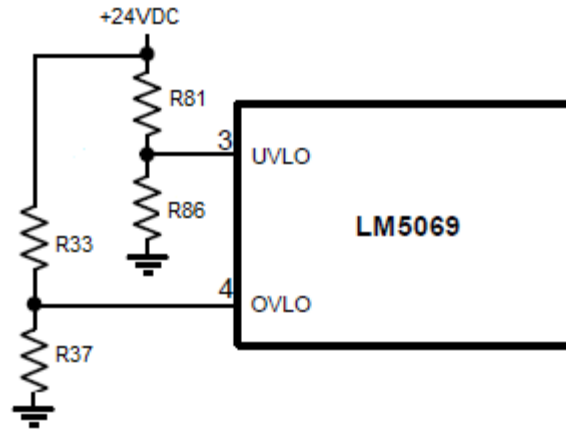


图 4. 使用外部电阻实现 UVLO 和 OVLO

为精确定义全部四个阈值，需为 UVLO 和 OVLO 使用四个电阻。UVLO 上限和下限阈值：

$V_{UV(HYS)}$

$$R65 = \frac{V_{UVH} - V_{UHL}}{21\mu A} = \frac{1.5V}{21\mu A} = 71.42k = 71.5k \text{ (standard value)} \quad (2)$$

$$R66 = \frac{2.5V \times R81}{V_{UVL} - 2.5V} = \frac{2.5 \times 71.5k}{15V - 2.5V} = 14.3k \quad (3)$$

因此， $V_{UVH} = 16.50V$ ， $V_{UVL} = 15V$ ，并且带 1.5V 滞后电压以防止器件在启动期间响应上电毛刺脉冲。

选择 OVLO 上限和下限阈值：

$$R23 = \frac{V_{OVH} - V_{OVL}}{21\mu A} = \frac{2V}{21\mu A} = 95.3k \quad (4)$$

$$R27 = \frac{2.5V \times R2}{V_{OVH} - 2.5V} = \frac{2.5V \times 95.3k}{36V - 2.5V} = 7.11k = 7.15k \text{ (standard value)} \quad (5)$$

因此， $V_{OVH} = 35.82V$ ， $V_{OVL} = 33.82V$ ，带 2V 滞后电压。

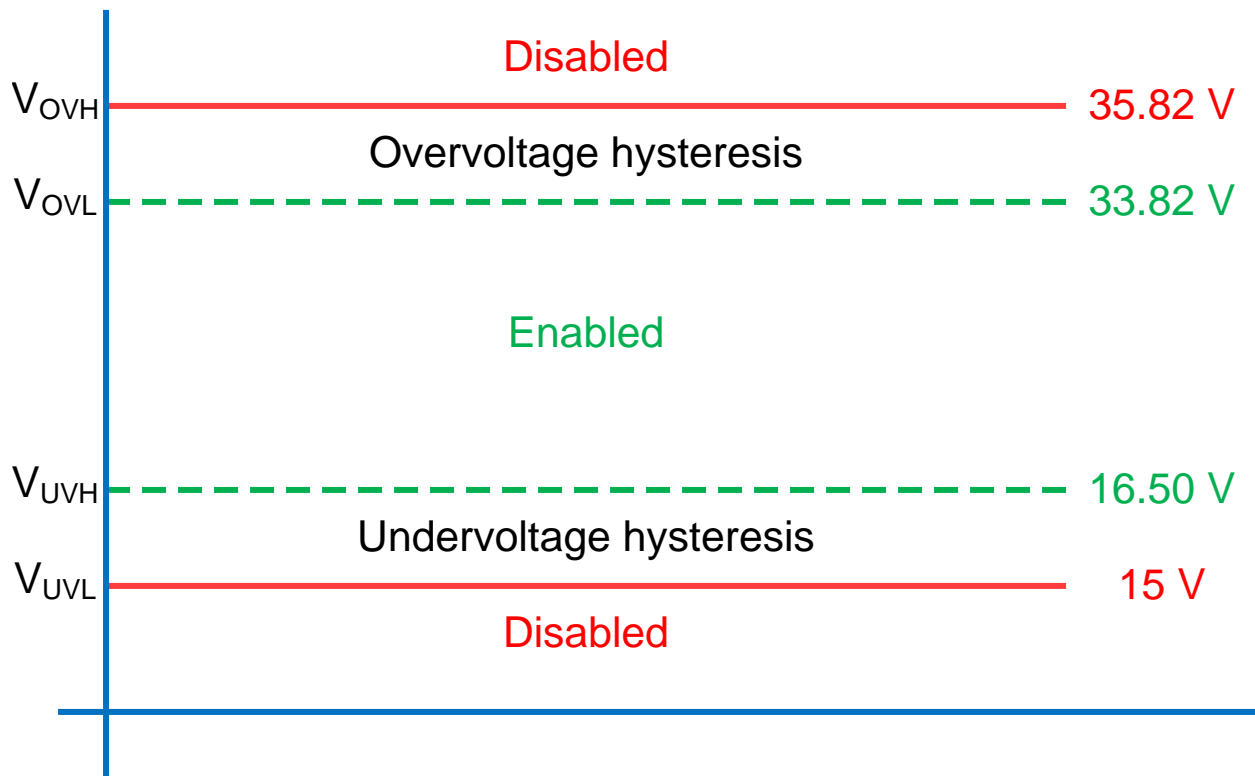


图 5. UVLO 和 OVLO 滞后

关于器件运行、设计程序和推荐的 PCB 布局准则，请参见 LM5069 数据手册和 LM5069EVAL 评估板。

在工业系统中，通常会将来自各类传感器的信号传输到中央控制器进行处理和分析。为保持用户接口的安全电压，防止电源发出瞬变电压，需要配备电流隔离。另外，隔离还可以避开接地环路。LM5017 是一款具有集成 MOSFET 的同步降压稳压器。LM5017 配置为 Fly-Buck 拓扑结构，可利用 24V DC 输入降压生成非隔离式 3.3V 和隔离式 5V、15V 和 -15V 电压。隔离式 Fly-Buck 转换器使用耦合电感绕组来生成隔离输出。在 Fly-Buck 拓扑结构中，无需光电耦合器或辅助绕组作为二次侧输出用于密切跟踪一次侧输出电压，因此可打造一套小尺寸的经济实用型解决方案。

表 2. Fly-Buck 设计规格

序号	设计规格	主要参数
1	输入电压范围 (VIN)	16V 至 36V
2	一次侧输出电压 (VOUT1)	10V (通过 LDO 降压后为 3.3V)
3	二次侧输出电压 (VOUT2)	5V
4	一次侧负载电流 (IOUT1)	30mA
5	二次侧负载电流 (IOUT2)	120mA
6	开关频率 (fsw)	1MHz

非隔离式输出电压 ($V_{CC_NON_ISO}$) 由两个外部电阻 ($R3$ 和 $R70$) 设置。经稳压的输出电压计算如下:

$$V_{CC_NON_ISO} = 1.225 \times \left(1 + \frac{R70}{R3} \right) = 1.225 \times \left(1 + \frac{196 \text{ K}}{28 \text{ K}} \right) = 10 \text{ V} \quad (6)$$

工作频率计算如下:

$$F_{SW} = \frac{V_{OUT}}{10^{-10} \times R_{ON}} \quad (7)$$

$$R_{ON} = \frac{10 \text{ V}}{10^{-10} \times 1 \text{ MHz}} = 100 \text{ K}\Omega \quad (8)$$

最大输入电压下, 建议的导通时间至少为 100ns。

$$T_{ON_MAX} = \frac{10^{-10} \times R_{ON}}{V_{IN_MIN}} = 0.67 \text{ }\mu\text{S} \quad (9)$$

同样,

$$T_{ON_MIN} = \frac{10^{-10} \times R_{ON}}{V_{IN_MAX}} = 0.29 \text{ }\mu\text{S} \quad (10)$$

$V_{CC_NON_ISO}$ 会输入到 TPS70933DBVT LDO 中以生成 $+3.3V_NON_ISO$, 并能够提供 30mA 的输出电流。 $+3.3V_NON_ISO$ 用于为 EEPROM 和两个数字隔离器供电。

选择整流二极管 D2:

高侧降压开关开启时, D2 两端的反向偏置电压:

$$V_{D2} = \frac{N_{sec}}{N_{pri}} \times V_{IN_MAX} = \frac{1}{1.55} \times 35 = 23 \text{ V} \quad (11)$$

考虑到安全裕量, 二次侧二极管的 PIV 应大于 35V, 因此选用了 60V 肖特基二极管 PMEG6010CEH,115。

二次侧的整流输出 ($+V_{CC_ISO}$) 为

$$+V_{CC_ISO} = \left(\frac{N_{sec}}{N_{pri}} \times V_{CC_NON_ISO} \right) - V_{FD2} = 6.45 - 0.4 \text{ V} = 6.05 \text{ V} \quad (12)$$

连接 D4 以生成 $-18V_ISO$, 用于检测传感器开路情况。相比 $+5V_ISO$, $-18V_ISO$ 电源轨的负载电流可以忽略不计。

关于器件运行, 请参见 [LM5017 数据手册](#); 关于 Fly-Buck 转换器设计步骤和建议的 PCB 布局准则, 请参见应用说明 [AN-2292](#)。

请勿直接用开关稳压器的输出为 ADC 和 DAC 供电，因为该输出含有开关频率纹波噪声以及电压/电流快速瞬变造成的高频噪声。直接为 ADC 供电会影响其性能。因此，需利用具有高电源电压抑制比 (PSRR) 的低噪声 LDO 为 ADC 供电。本设计中选用的 LDO 是 TPS7A16xx。该 LDO 的宽输入电压范围高达 60V，100kHz 时具有 30dB PSRR。因此，开关稳压器的纹波噪声可利用 TPS7A16xx 得到充分衰减。通常，LDO 的 PSRR 在低频条件下较高，在高频条件下会有所降低，在几兆赫兹时变为零。TPS7A16xx 在高频下的 PSRR 较优，无需使用大容量 LC 滤波器。

表 3. 设计规格和主要参数

序号	设计规格	主要参数
1	输入电压范围 (VIN)	6.2V DC
2	输出电压 (VOUT)	5V (固定)
3	输出电流 (IOUT)	80mA
4	VDO	80mA 时为 200mV 至 300mV
5	热关断	170°C
6	TJ_MAX	125°C
7	θ_{JA} 结至环境热阻	66.2°C/W

输入和输出电容

为确保 TPS7A16 系列线性稳压器的稳定性，至少需要 0.1 μ F 的输入电容和 2.2 μ F 的输出电容。本设计中选用的是 22 μ F X5R 陶瓷电容，既可以最大限度提升交流性能，又能确保整个温度范围内具有更好的稳定性。虽然无需连接大容量输入电容即可确保器件稳定性，但在模拟电路设计中，最好在 VIN 引脚和 GND 之间连接一个 1 至 22 μ F 的电容。本设计中在输入端连接了 22 μ F 电容。该电容可抵消电抗性输入源，并改善瞬态响应、输入纹波和 PSRR。

过热保护

当结温上升至大约 170°C 时，TPS7A1650 的过热保护会禁用输出以使器件冷却。当结温冷却至大约 150°C 时，输出电路将被重新使能。

功耗

脉冲功率耗散 P_p	$= (V_{IN} - V_{OUT}) \times I_{OUT}$
	$= (6.2 - 5) \times 120\text{mA}$
	$= 144\text{mW}$
T_J	$= T_A(\text{max}) + (\theta_{JA} \times P_D)$
	$= 70 + (212.1 \times 144\text{mW})$
	$= 100.54^\circ\text{C}$

$T_J < T_{JIC}$ ，因此无需对 TPS7A1650 使用散热器。

关于器件运行和建议的 PCB 布局准则，请参见 TPS7A1650 数据手册。

5.2 ADC

本设计中采用的是 ADS8688 这款 16 位 500kSPS 8 通道单电源 SAR ADC。ADS8688 能够以 500kSPS 的吞吐率运行，不会丢失编码且精度达 $\pm 0.75\text{LSB}$ 积分非线性 (INL)。ADS8688 在 5V 单电源供电下可接受双极和单极模拟输入信号。ADC 采用 5V 单电源供电可降低设计复杂度和成本。ADS8688 有五个可通过软件选择的输入范围： $\pm 10.24\text{V}$ 、 $\pm 5.12\text{V}$ 、 $\pm 2.56\text{V}$ 、0 至 5.12V 以及 0 至 10.24V。每个模拟输入通道均可单独编程设定为上述其中一个输入范围。该器件提供了一个 $1\text{M}\Omega$ 的恒定阻性输入阻抗（无论所选输入范围为何）。ADS8688 具有 4.096V 片上低漂移基准，用以实现精确转换。片上 PGA 可对增益进行编程，确保最大的 ADC 输入动态范围。根据输入信号范围的不同，可设置程序寄存器中的 Range_CHn 来调整 PGA 增益。

该器件还集成了前端信号处理功能，包括多路复用器、二阶抗混叠滤波器、ADC 驱动器放大器，并且支持扩展级工业温度范围，这使得 ADS8688 成为任何标准工业模拟输入测量的理想选择。图 6 给出了基本框图。

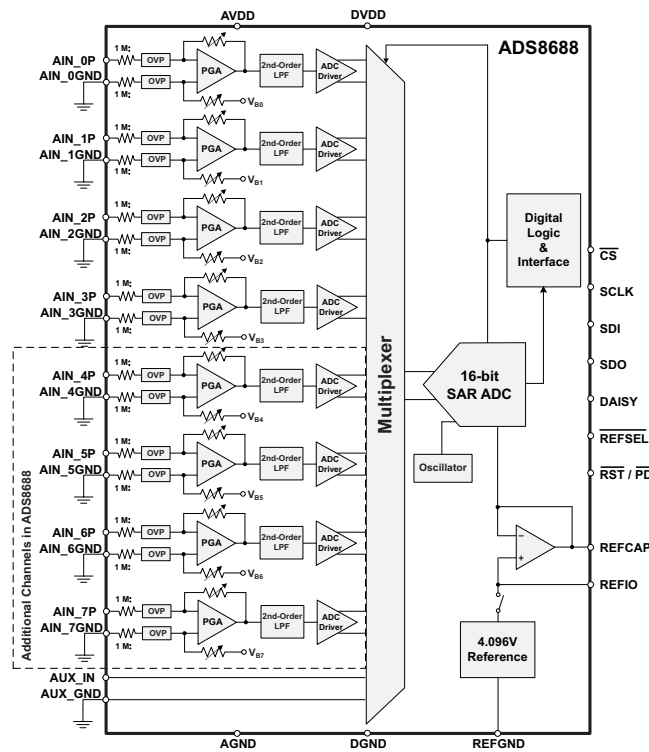


图 6. ADS8688 的内部框图

表 4 详细给出了采用 4.096V 片上基准时的模拟输入范围配置：

表 4. 输入范围选择位配置

模拟输入范围	Range_CHn [2:0]		
	BIT 2	BIT 1	BIT 0
$\pm 10.24\text{V}$	0	0	0
$\pm 5.12\text{V}$	0	0	1
$\pm 2.56\text{V}$	0	1	0
0 至 10.24V	1	0	1
0 至 5.12V	1	1	0

5.2.1 ADC 基准

ADS8688 可采用片上 4.096V 基准，也可选用外部基准。所使用的基准类型由 ADS8688 的外部/REFSEL 引脚设置。本参考设计中选用的是片上基准。另外，ADS8688 采用 R80 和 R85 电阻组合提供外部基准：

- 如果接入 R80 而未接入 R85，则 ADS8688 基于 4.096V 内部基准运行。
- 如果接入 R85 而未接入 R80，则在 TP14 和 TP18 (SGND) 之间连接外部基准。

内部基准缓冲器通过 REFCAP 引脚输出，该引脚使用 22 μ F 和 1 μ F 电容与 REFGND 引脚去耦，从而获得更好的性能。将这些去耦电容靠近 ADS8688 的 REFCAP 引脚放置，以将噪声分流到接地端并降低噪声对 ADC 的影响。并联使用多个不同容值的电容，以有效响应广泛的噪声范围。

5.2.2 模拟输入和滤波器

该模块含有一个引脚块，可连接四个模拟输入通道，这些通道专门用于连接模拟电流和电压输入信号。对于工业控制模块，模拟输入电压和电流范围包括 $\pm 10V$ 、 $\pm 5V$ 、 $\pm 2.5V$ 、0 至 5V、0 至 10V、4 至 20mA 以及 0 至 20mA。模块上的全部四个通道均可由软件配置为电流输入或电压输入，可选用上述工业电压范围。

主机微控制器通过相应的位装载移位寄存器 SN74HC595 以接通或关断 200 Ω 负载电阻。当输入设为接收 0-20mA 电流时，开关将被配置为在输入端接入 200 Ω 负载电阻，从而为 ADC（满量程电压为 5V）提供 0 至 4V 电压。

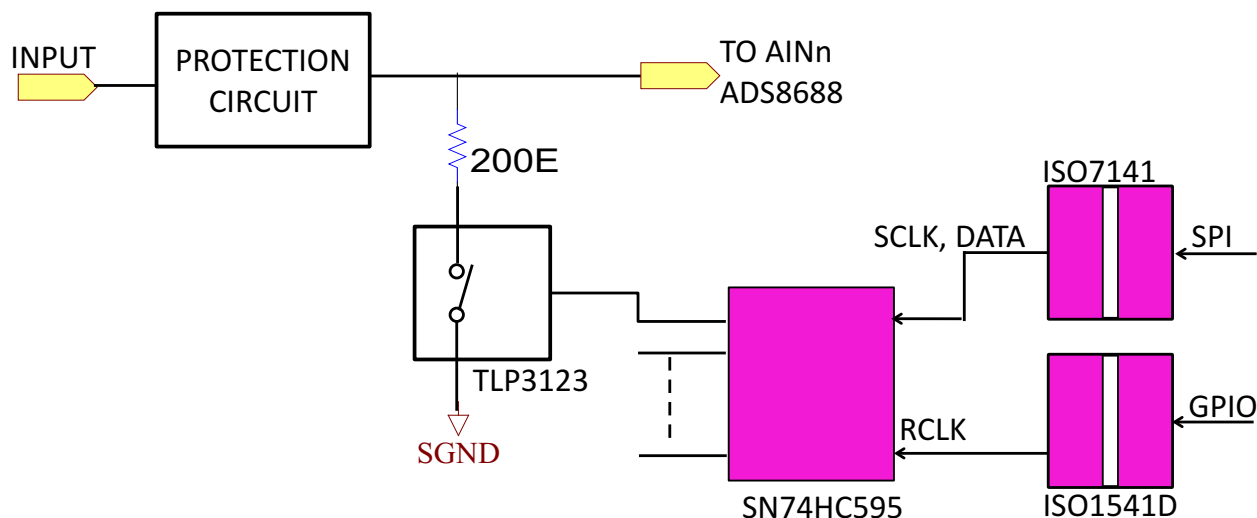
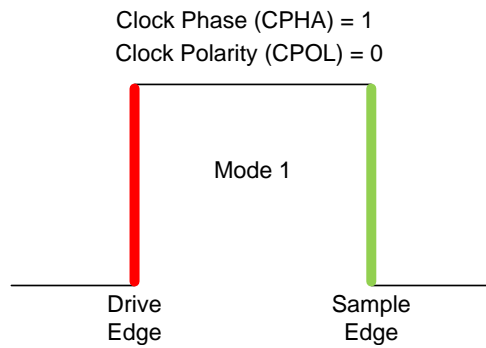


图 7. 模拟输入部分

ADS8688 片上输入电路由八个复用同一个 ADC 内核的单端模拟输入组成。该 ADC 会读取选定的输入信号，并将其转换为数字值。多路复用器负责开关 ADC 的每个输入通道。多路复用为单个 ADC 内核转换多路模拟信号提供了一种经济手段。不过，片上多路复用也会影响输入信号的切换速度，而且仍会被转换器检测到。

表 5. SPI 传播延迟

ADC 时钟到 DOUT 输出延迟	25ns (最大值)
隔离器传播延迟	23ns (最大值; 往返延迟)
需要的微控制器建立时间	17.15ns (最小值)
总延迟	88.15ns


图 8. SPI 时钟

因此，SPI 与隔离器一起使用时可达到的最大 SPI 时钟速度为 10MHz。

采样时间和 RC 滤波器设计

功能	值
最大 SPI 时钟频率	= 10MHz
一个 SPI 时钟周期 (CP)	= 100ns
单个通道正确读取 16 位 (吞吐量) 所需的时间	= (NSCLK × XCP) + tDV_CSDO ，其中
	<ul style="list-style-type: none"> NSCLK = 读操作所需的 SPI 时钟数 tDV_CSDO = 延迟时间：CS 下降到数据使能的时间 (ADS8688) CP = 一个 SPI 时钟周期
	= (33 × 100ns) + 10ns
	= 3.3μs + 10ns = 3.31μs
采样频率	= $\frac{1}{3.31 \mu\text{Sec}}$
	= 302kSPS
RC 低通滤波器截止频率 ≤ 采样频率/5	= $\frac{300 \text{ ksps}}{5}$
	= 60kHz
RC 低通滤波器截止频率 fC	= $\frac{1}{2 \times \pi \times RC}$
R4 = 100Ω, C12	= 27nF (标准值)
R4 和 C12 构成 RC 滤波器 1；R21 和 C23 构成 RC 滤波器 2。每阶滤波器的动态阻抗会影响其邻近的滤波器。为降低负载影响，可通过对上一级的电阻和电容进行 Rx10 和 C/10 计算获得下一级的电阻和电容，即 R21 = 10 × R4，C23 = C12/10。	
假设 R21 = 1k, C23	= 2.7nF (标准值)
两个 RC 滤波器构成二阶 RC 滤波器。对于 60kHz 及更高频率，频率每增加十倍，该滤波器都会具有 40dB 的衰减。	
RC 低通滤波器的稳定时间	= 5 × RFLT CFLT (时间常量)
	= 5 × (1000Ω × 2.7nF)
	= 13μs
外部 RFLT CFLT 低通滤波器网络必须在下一个采样采集时间内稳定。	
采样时间	= $\frac{1}{60 \text{ kHz}}$
	= 17μs
RC 低通滤波器的稳定时间 < 采样时间	
通道扫描时间	
包含四个采样的平均移动时间	= 4 × 17μs
	= 68μs
扫描全部四个通道所需的时间 (因为 ADS8688 中共有四个通道)	= 4 × 68μs = 272μs

电压输入阻抗为 1MΩ，切换为电流输入时使用导通电阻较低的光电 MOS 接通较小的 200Ω 负载电阻。

5.2.3 针对模拟输入的 ESD、EFT 和浪涌保护

EMC 保护电路旨在用低阻抗将各种外部瞬变分流到接地端，保护模拟 I/O 模块不被损坏。该模块包含板载 EMC 保护电路，经测试和验证完全符合表 6 列出的规范。

表 6. IEC 61000 规范

测试和标准	测试等级
IEC 61000-4-2 静电放电 (ESD)	±4kV 接触放电 ±8kV 空气放电
IEC 61000-4-4 突发电快速瞬变脉冲群 (EFT)	5kHz 时为 ±2kV (信号端口)
IEC 61000-4-5 浪涌	±1kV CM (信号端口)

瞬态电压抑制器 (TVS) 二极管与高压电容 Y-cap 并联，用于将浪涌电压钳位在更安全的限值。此外，这两个 Y-cap 置于关键位置，可快速将瞬变电能分流到接地端。Y-cap 为快速瞬变提供低阻抗，TVS 二极管有助于抗高压尖峰干扰。

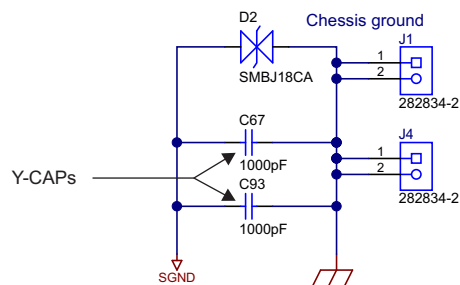


图 9. Y-Cap 放置

电压浪涌具有最高电能。假定输入线路上出现 8/20μs 的 1kV (CM) 浪涌。

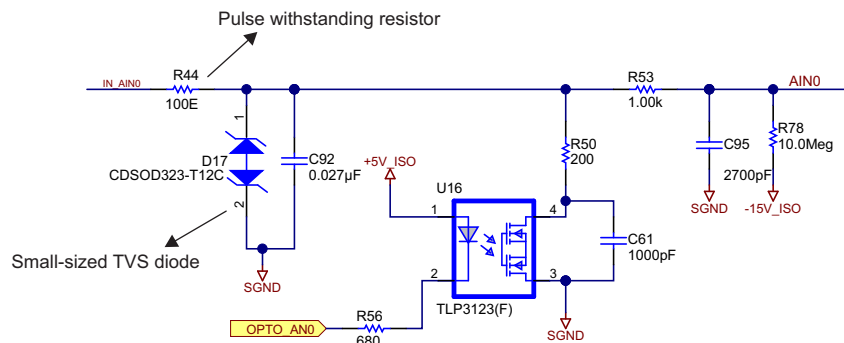


图 10. 模拟输入保护电路

线路阻抗

ZTOTAL	= Z _{SURGE_GENERATOR} + Z _{CON_NETWORK} + R _{SERIES_RESISTOR}
	= 2Ω + 40Ω + 100Ω
	= 142Ω

ADS8688 的内部过压保护电路在模拟输入引脚上最高可承受 $\pm 20V$ 。因此钳位电压必须小于 20V。

CDSOD323-T12SC 额定值: $V_{BR} = 13.3V$, $V_{C_{MAX}} = 27.3V$ (8/20 μs), $I_{PP} = 14A$, $PPP = 350W$, 最大泄漏电流 = 1 μA

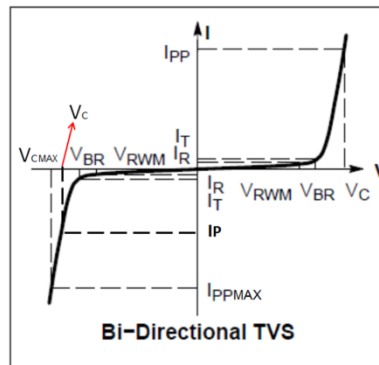


图 11. TVS 二极管特性

线性或直线等式:

$$V_C = \frac{I_P}{I_{PP}} (V_C - V_{BR}) + V_{BR} \quad (13)$$

$$I_P = \frac{(1000V - V_C)}{Z_{TOTAL}} \quad (14)$$

$$= \frac{(1000V - V_C)}{142\Omega}$$

将 I_P 代入 V_C 等式, 根据 CDSOD323-T12SC 数据手册中的值求解等式。

$$V_C = 20V$$

脉冲功率耗散:

$$P_P = V_C \times I_P$$

$$= 20 \times 6.9A$$

$$= 138W \quad (15)$$

5.3 DAC

DAC8760 针对工业和过程控制应用而设计。DAC8760 经编程可提供范围介于 4mA 至 20mA、0mA 至 20mA 或 0mA 至 24mA 的电流输出；或者范围介于 0 至 5V、0 至 10V、±5V 或 ±10V 的电压输出，并且允许超出范围 10%（0 至 5.5V、0 至 11V、±5.5V 或 ±11V）。电流输出与电压输出可同时使能，并由同一个数据寄存器控制。图 12 给出了 DAC8760 的内部框图。

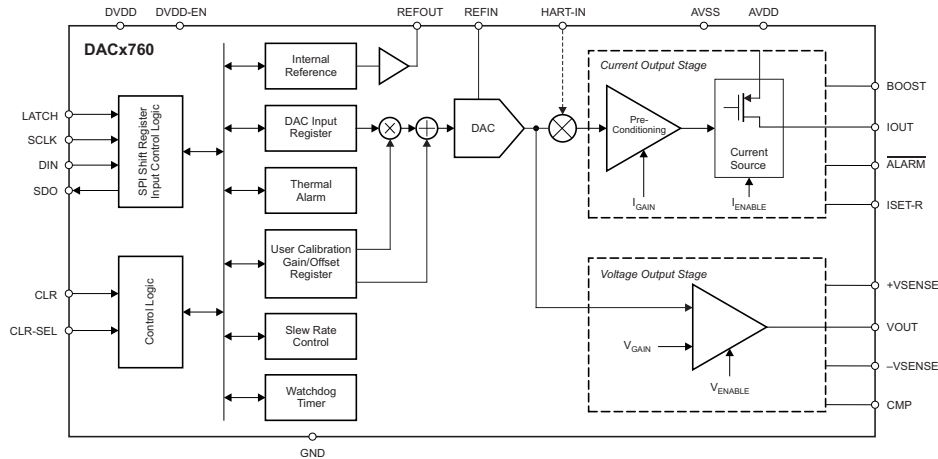


图 12. DAC8760 的内部框图

5.3.1 电压输出

当 DAC8760 配置为电压输出时，10mA 下允许的最大负载为 1kΩ。对于电压输出，该模块使用 ±15V 电源轨，提供 5V 余量。DAC8760 生成的 16 位编码与所需电压输出的换算公式如下：

对于单极输出模式：

$$V_{out} = V_{ref} \times Gain \times \frac{Code}{2^N} \quad (16)$$

对于双极输出模式：

$$V_{out} = V_{ref} \times Gain \times \frac{Code}{2^N} - Gain \times \frac{V_{ref}}{2}$$

其中

- Code 为装载到 DAC 的编码的等值十进制数
- N 为分辨率位数，DAC8760 为 16 位
- Vref 为基准电压；采用内部基准时 Vref = 5.0V
- Gain 为根据所需的电压输出范围自动选择的增益

(17)

5.3.2 电流输出

DAC8760 电流输出级包含一个预调节器和一个电流源。该级根据 DAC 编码提供电流输出。输出范围可编程设定为 0 至 20mA、0 至 24mA 或者 4 至 20mA。此外，可选择使用外部升压晶体管来降低器件功耗。引脚 IOUT 上的最大合规电压等于 AVDD 减去 2.5V。在单电源模式下，最大 AVDD 为 36V，最大合规电压为 33.5V。上电后，IOUT 引脚呈高阻态而无电流输出。在本设计中，ISET-R 引脚和 GND 之间连接了一个外部 15kΩ 0.1% 电阻。DAC 16 位编码与电流输出的换算公式如下：

对于 0 至 20mA 输出范围：

$$I_{out} = 20\text{mA} \times \frac{\text{Code}}{2^N} \quad (18)$$

对于 0 至 24mA 输出范围：

$$I_{out} = 20\text{mA} \times \frac{\text{Code}}{2^N}$$

其中

- Code 为装载到 DAC 的编码的等值十进制数
 - N 为分辨率位数，DAC8760 为 16 位
- (19)

5.3.3 电压感测

Vsense 和 -Vsense 可感测负载电压。理想情况下，Vsense 和 -Vsense 直接连接到 Vout 引脚上。由于用作电流输出时 Vout 和 Iout 连接在一起，这种连接会由于 Vsense 引脚的泄漏电流而产生增益误差。该泄漏电流会引入 -0.36% 的增益误差。利用高输入阻抗、低输入偏置电流的运算放大器可将这种误差降至最小。在本参考设计中，Vsense 经由使用 OPA188 的高阻抗缓冲器连接到 Vout，该运算放大器的输入偏置电流典型值为 160pA。这样可以将增益误差降至 0.008% 以下。

5.3.4 HART 选项

DAC8760 还可配置为提供 HART 输出。在本参考设计中，HART 引脚可作为测试点供用户使用。有关使用 HART 的详细信息，请参见 DAC8760 数据手册。

5.3.5 SPI 和菊花链 DAC

DAC8760 由通用四线制串行接口（SDI、SDO、SCLK 和 LATCH）控制，运行时钟速率高达 31MHz，并且与 SPI、QSPI™、Microwire™ 和数字信号处理 (DSP) 标准兼容。SPI 通信命令包含一个写地址字节和一个数据字，共 24 位。为节省使用的隔离器数量，移位寄存器 SN74HC595 与两个 DAC 配置为菊花链模式，如图 13 所示。

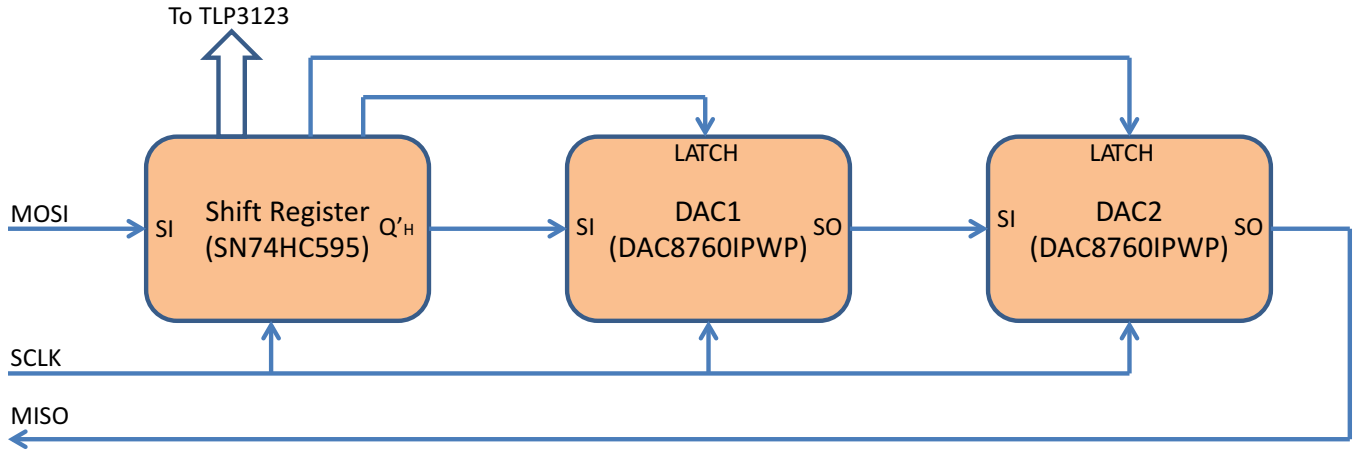


图 13. 菊花链配置

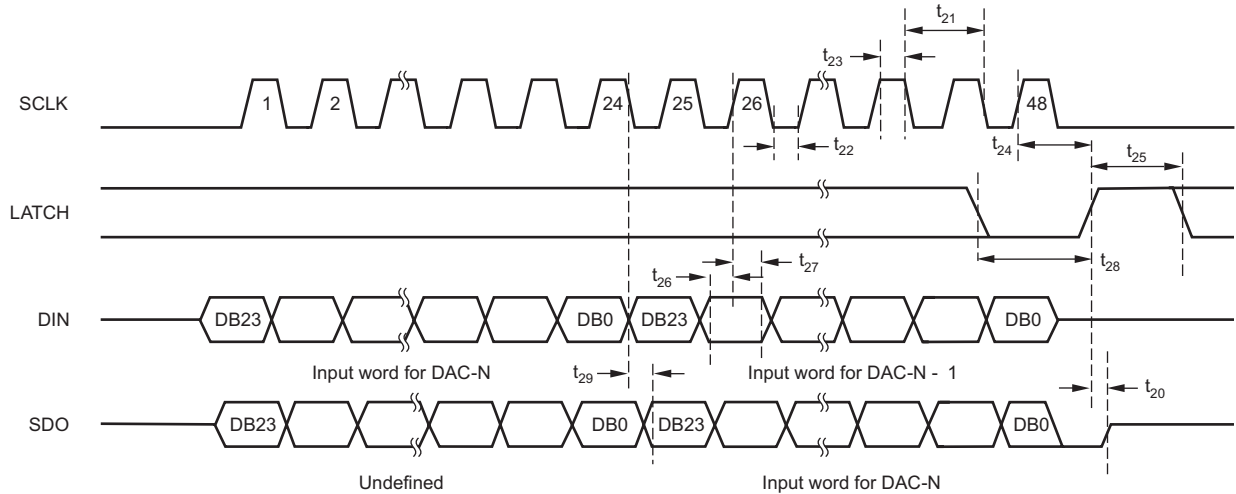


图 14. 菊花链模式 DAC8760 时序

Q'H 和 SDO 引脚用于将三个器件以菊花链形式连接在一起。SCLK 的上升沿随时钟移入输入帧的 MSB，用于标识写周期的起始位置。完成所有器件的串行传输后，会通过将移位寄存器的 RCLK 置为有效使 LATCH 变为高电平。这操作会将 SPI 移位寄存器中的数据传输到相应 DAC 的器件内部寄存器。在菊花链中，每个帧内的时钟数取决于器件数。每个帧有 56 个时钟。

双 DAC 设计中的总写入时间估计值：

$$T = (24 \times F_S) + T_{su} + T_{sr_o} + T_{1_2} + T_{pd}$$

其中

- F_S = SPI 时钟速率（单位为 Hz）
- T_{su} = 建立时间
- T_{sr_o} = 移位寄存器 SCLK 到 Q'H 的延迟
- T_{LE} = 用于更改 LATCH 线状态的主机软件开销（作为 I/O 端口引脚）
- T_s = 模拟输出稳定时间（请参见 DAC8760 的数据手册）

(20)

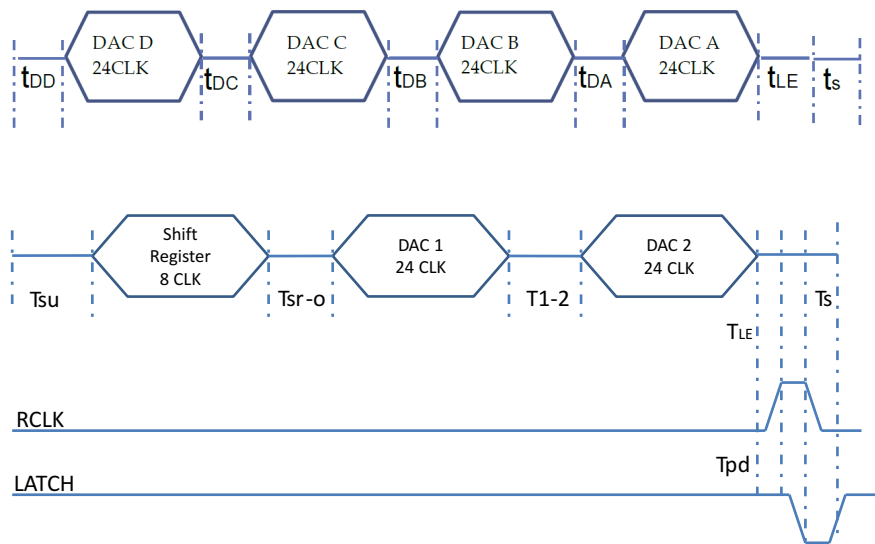


图 15. 菊花链模式时序

5.3.6 针对 ESD、EFT 和浪涌的滤波及保护

输出级经设计可承受 8kV ESD、1kV EFT 和 1kV 浪涌电压。每个通道都受到 TVS SMBJ18CA 保护。该电路将过压输入钳制在 25V 左右。ESD 保护二极管还可以防止过压输入。请务必遵循布线准则以确保符合 EMC 标准。

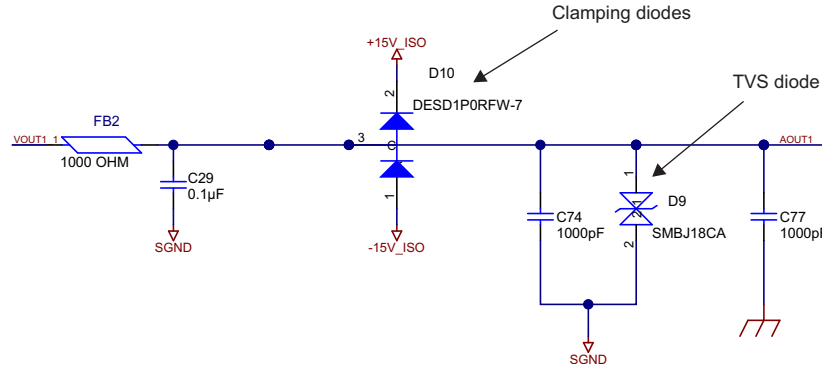


图 16. 模拟输出保护

5.3.7 数字隔离

在工业系统中，通常会将来自各类传感器的信号远程传输到中央控制器进行处理和分析。为保持用户接口的安全电压，防止电源发出瞬变电压，需要配备电流隔离。本设计中采用 ISO7141CC 和 ISO7421 两款高速数字隔离器将 SPI 主机连接到 ADS8688 SPI。利用这两个数字隔离器，基板上的主机处理器可在现场模拟 I/O 模块会出现的任何高压情况下保持一分钟的 2.5kV_{RMS} 电流隔离。

ISO7141CC 用于隔离 SPI 接口的 SCLK、MISO、MOSI 和 /CS 信号。ISO7421 用于隔离 ADC 和 DAC 的控制信号。这两款产品都已获得 UL、CSA 和 VDE 安全认证。

5.4 接口

该模拟 I/O 模块具有以下连接器：

1. J1 和 J4：2 引脚螺钉端子型、2.54mm 间距连接器，用于连接保护接地
2. J2：4 引脚螺钉端子型、2.54mm 间距连接器，用于连接模拟输出
3. J3：8 引脚螺钉端子型、2.54mm 间距连接器，用于连接外部模拟输入
4. J5：50 引脚连接器，用于连接 SPI、I²C 和电源到主机控制器

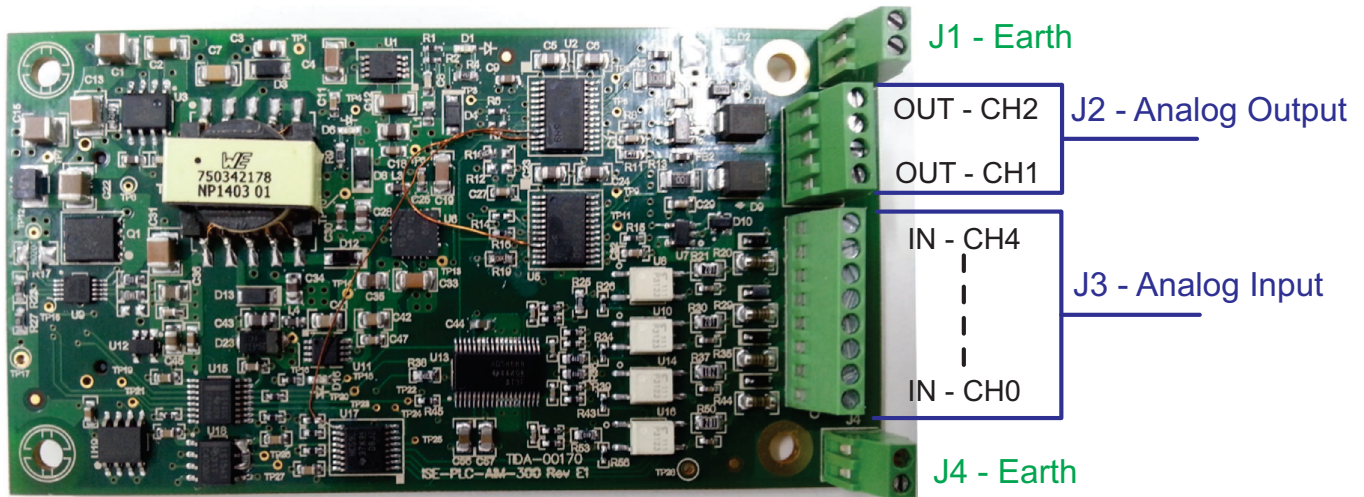


图 17. 板顶视图

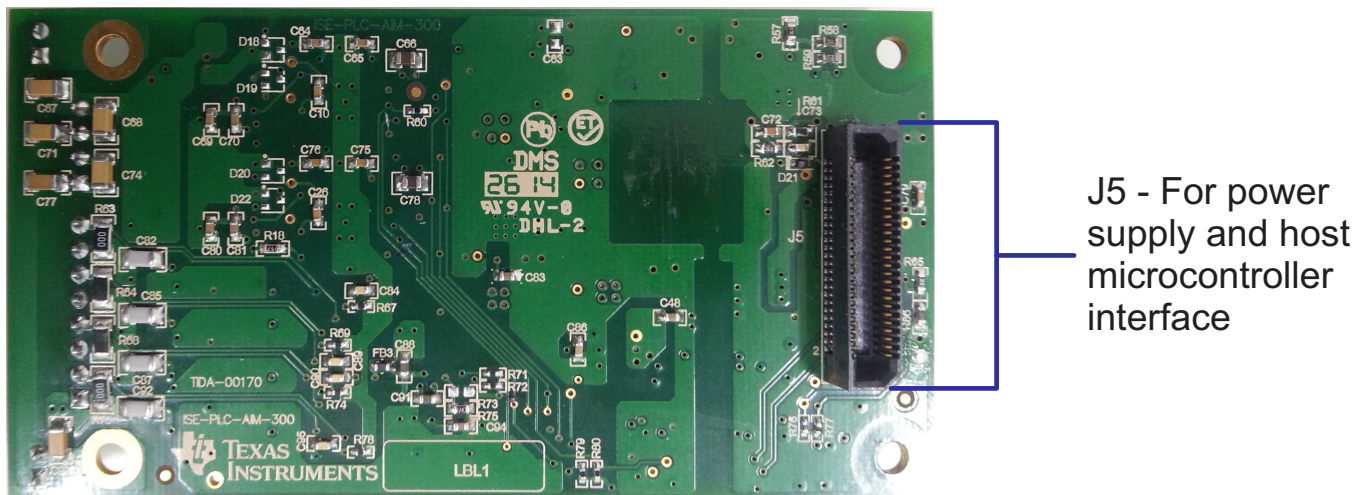


图 18. 板底视图

6 测试设置

6.1 硬件测试设置

TIVA C 系列 I/O 控制器平台 (TIDA-00123) 配有连接模拟 I/O 模块所需的连接器和 MCU。模块的 24V 电源输入由 Tiva C 系列 I/O 控制器平台提供。

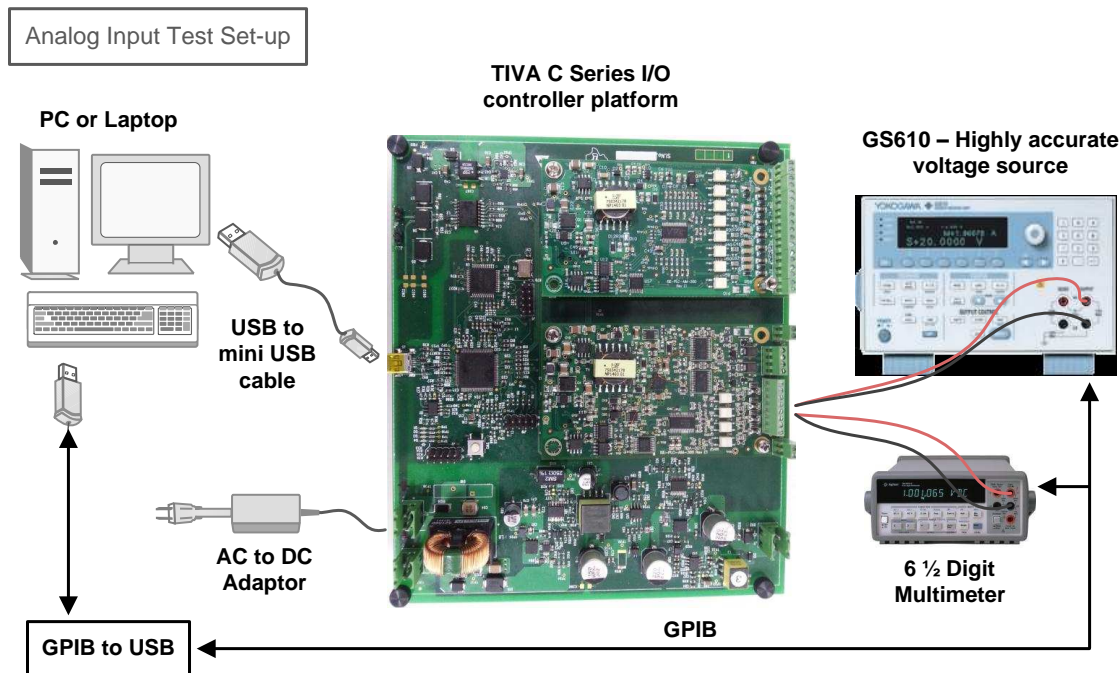


图 19. 模拟输入测试设置

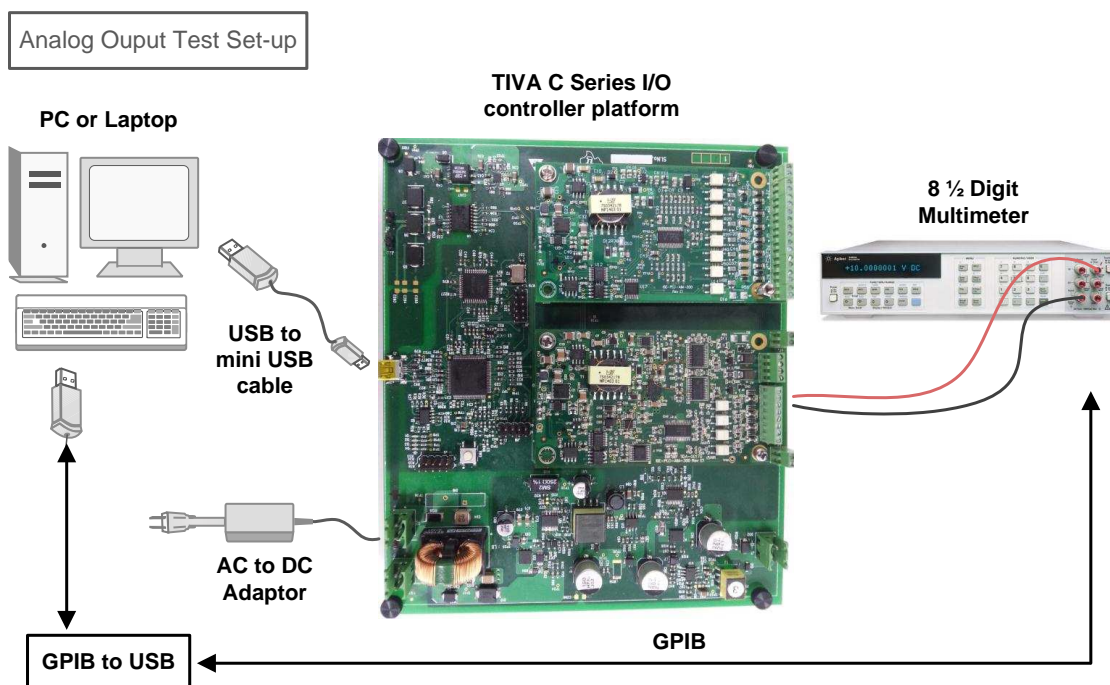


图 20. 模拟输出测试设置

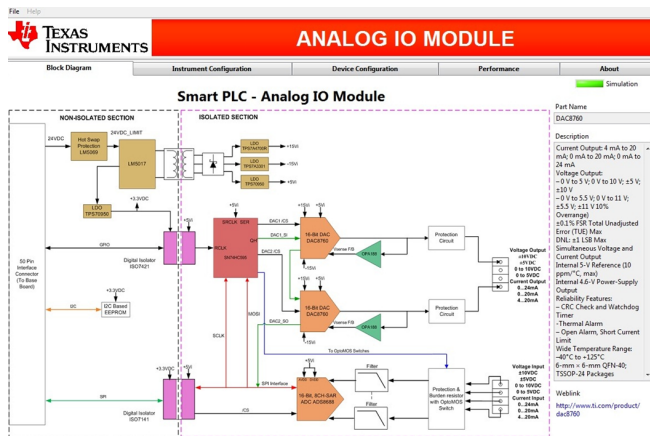


图 21. 信号链信息显示 GUI

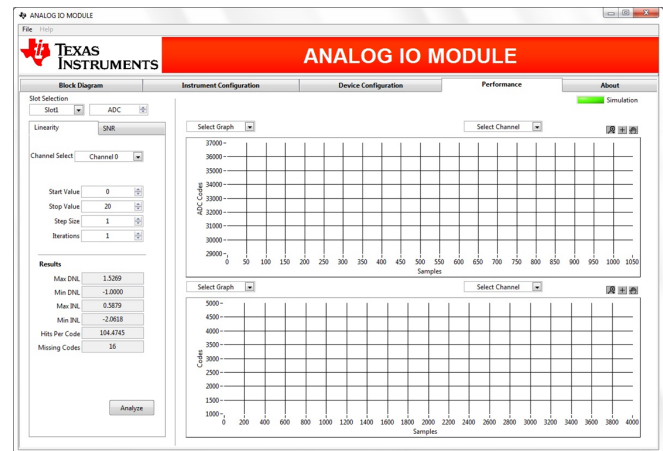


图 22. 结果显示 GUI

完整信号链性能可通过基于 LabVIEW 的 GUI 进行评估。PC 上的 GUI 通过 USB 接口连接到 Tiva C 系列 I/O 控制器平台。Tiva C 串行 I/O 控制器平台通过 SPI 接口控制模拟输入卡。该设置采用精密的信号发生器 (DS360, Stanford Research Systems 公司出品), 将模拟输入信号馈送到模拟输入模块。该信号通过 6½ 数字万用表 (DMM) 读取。生成的数字输出由 Tiva C 系列 I/O 控制器平台测量。GUI 会对结果进行后续处理和计算。GUI 是基于 LabVIEW 的软件。其可以设置以下功能:

- 配置 ADS8688 中的所有寄存器
- 将通道配置为电压输入或电流输入
- 读取模块中的数字化数据
- 对数据进行后续处理
- 结果选项: SNR、ENOB、DNL 和 INL

同样, 生成的模拟输出也由 8½ DMM 测量。GUI 执行结果计算。GUI 是基于 LabVIEW 的软件, 可设置以下功能:

- 模拟输出通道: 每个卡含两个通道
- 模拟输出类型: 每个模拟输出均可选择作为电压或电流类型
- 零点误差校正寄存器
- 增益校正寄存器
- 结果选项: DNL、INL 或 TUE

7 测试结果

7.1 典型性能特性

整体精度取决于不同子系统的性能。以下结果针对包含 ADC、DAC、电源、滤波器和保护功能的集成模拟 I/O 模块。采用两点线性校准（一点设为 0V，另一点设为满量程）可减少偏移误差和增益误差。

模拟输入精度测试图

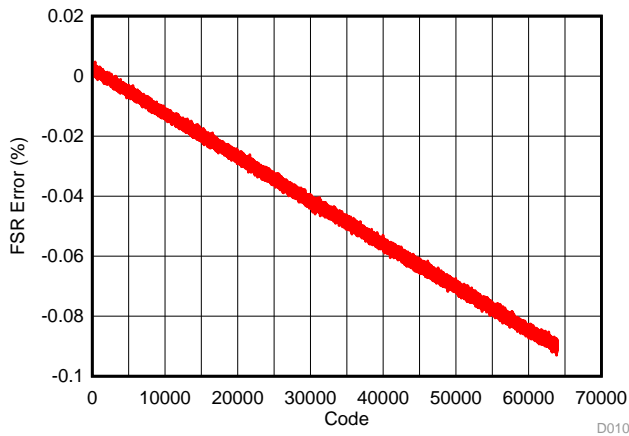


图 23. 0 至 5V 范围，编码与 FSR 误差间的关系（未校准）

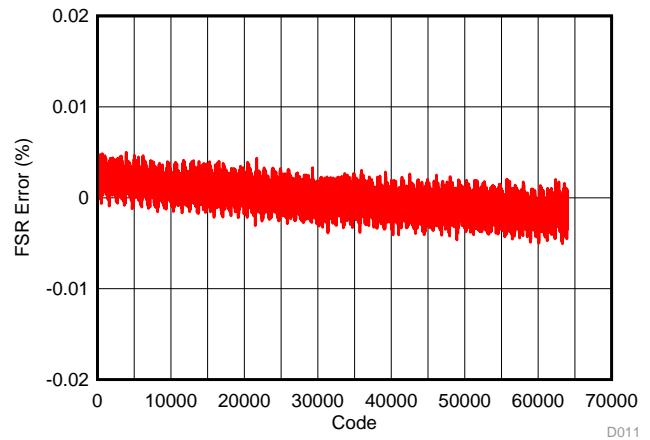


图 24. 0 至 5V 范围，编码与 FSR 误差间的关系（已校准）

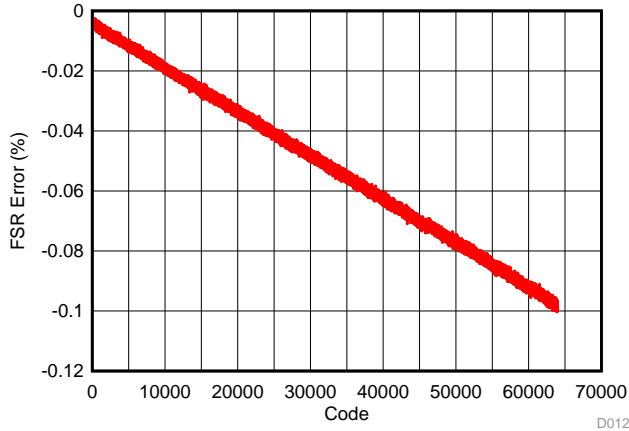


图 25. 0 至 10V 范围，编码与 FSR 误差间的关系（未校准）

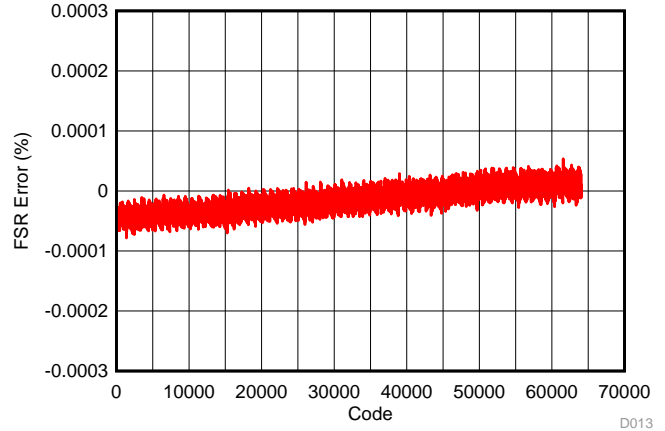


图 26. 0 至 10V 范围，编码与 FSR 误差间的关系（已校准）

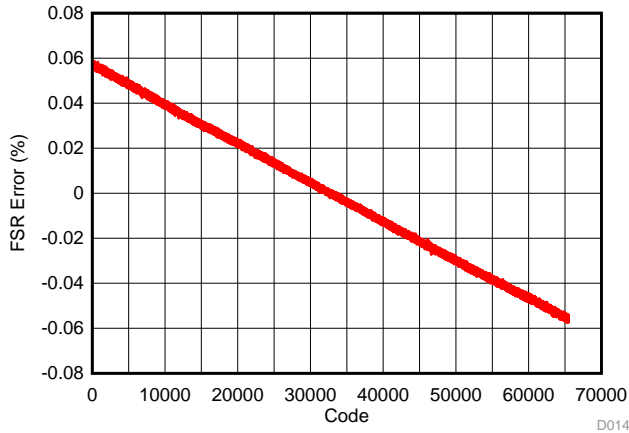


图 27. ±10V 范围，编码与 FSR 误差间的关系（未校准）

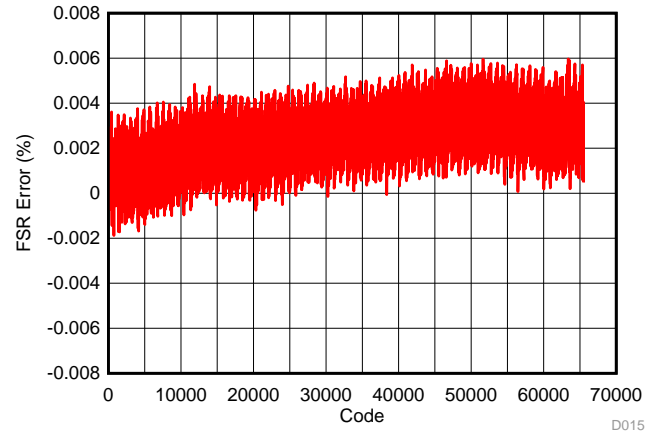


图 28. ±10V 范围，编码与 FSR 误差间的关系（已校准）

7.2 结果汇总

表 7. 模拟输入的测量结果汇总

序号	参数	最大值 FSR 误差 (%) (校准前)		最大值 FSR 误差 (%) (校准后)	
		最小值	最大值	最小值	最大值
1	0 至 5V 范围	-0.093	0.0047	-0.005	0.005
2	0 至 10V 范围	-0.1	0.9×10^{-6}	-0.7×10^{-6}	0.5×10^{-6}
3	±10V 范围	-0.0576	0.0588	-0.0019	0.006

模拟输出：电压输出性能图

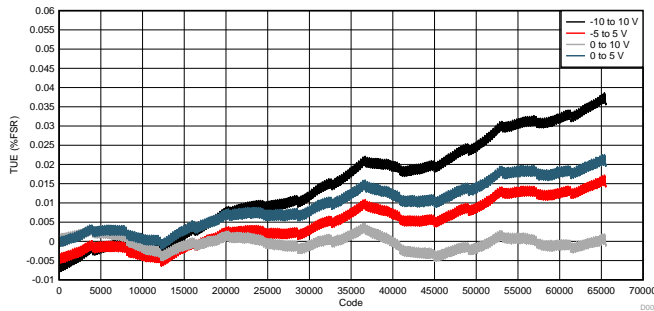


图 29. TUE (%FSR) 与编码间的关系

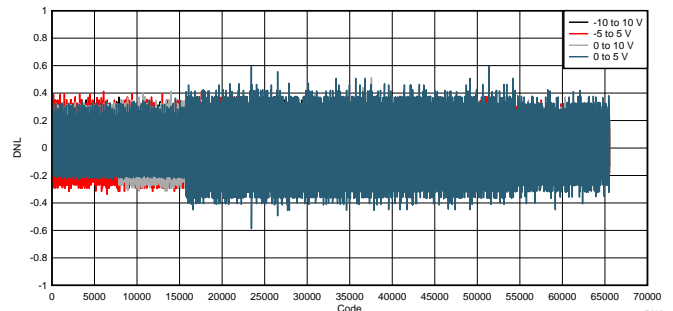


图 30. DNL 与编码间的关系

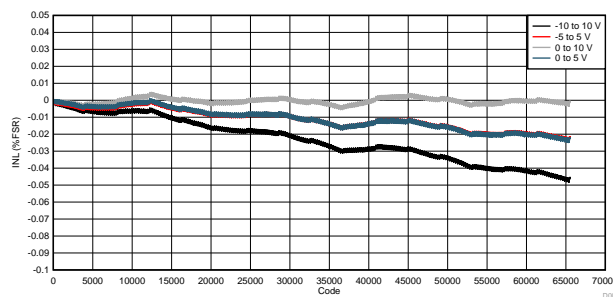


图 31. INL 与编码间的关系

模拟输出：电流输出性能图

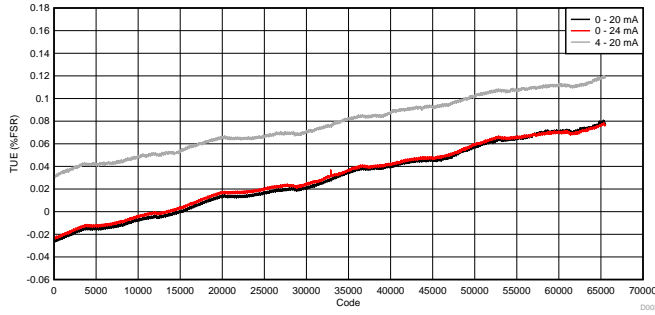


图 32. TUE (%FSR) 与编码间的关系

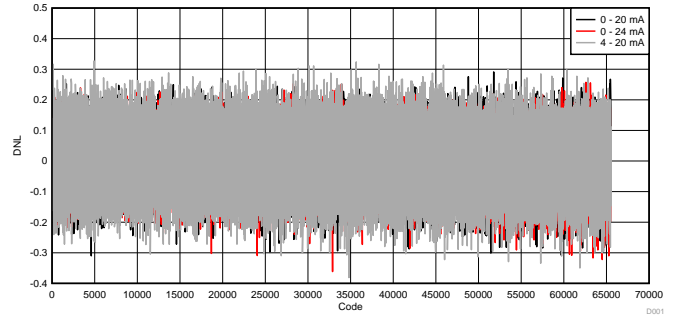


图 33. DNL 与编码间的关系

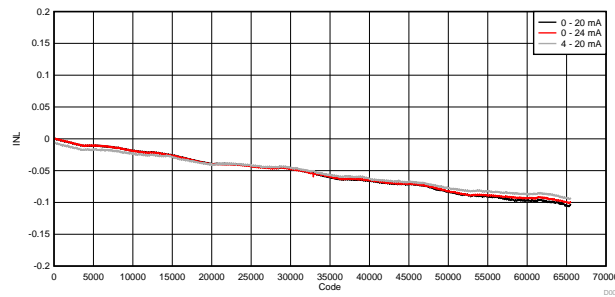


图 34. INL 与编码间的关系

表 8. 模拟电压输出的测量结果

序号	参数	±10V	0 至 10V	±5V	0 至 5V
1	TUE (%FSR) 最大值	0.038	0.035	0.017	0.019
2	TUE (%FSR) 最小值	-0.0083	-0.0019	-0.0064	-0.005
3	INL (%FSR) 最大值	0.00045	0.00851	0.00039	0.0047
4	INL (%FSR) 最小值	-0.04845	-0.0249	-0.024	-0.0055
5	DNL 最大值	0.381	0.587	0.415	0.511
6	DNAL 最小值	-0.555	-0.587	-0.473	-0.357

表 9. 模拟电流输出的测量结果

序号	参数	4 至 20mA	0 至 20mA	0 至 24mA
1	TUE (%FSR) 最大值	0.327	0.291	0.257
2	TUE (%FSR) 最小值	-0.532	-0.309	-0.361
3	INL (%FSR) 最大值	0	0.0007	0.0009
4	INL (%FSR) 最小值	-0.106	-0.106	-0.101
5	DNL 最大值	0.12	0.08	0.078
6	DNAL 最小值	0.024	-0.024	-0.024

7.3 认证前测试

此模拟 I/O 模块的设计符合工业 PLC 应用的标准 EMC 要求。

已执行以下 EMC 测试。

表 10. EMC 测试和标准

测试	标准
ESD	IEC 61000-4-2
EFT	IEC 61000-4-4
浪涌	IEC 61000-4-5

表 11. IEC61131-2 规定的标准和性能

标准	性能（通过）标准
A	模拟 I/O 模块应按预期继续运行。测试过程中无功能或性能损失。
B	允许性能暂时下降。 测试完成后，模拟 I/O 模块在无人工干预的情况下必须能够按预期继续运行。
C	允许测试期间存在功能损失，但硬件或软件不得损坏。 测试完成后，模拟 I/O 模块经手动重启或者掉电/上电后必须能够自动按预期继续运行。

标准 A 的目标精度如下

- 电压输入：25°C 时为满量程的 $\pm 0.2\%$
- 电流输入：25°C 时为满量程的 $\pm 0.2\%$

后续章节将介绍测试设置、步骤和观察结果。

7.3.1 测试设置



图 35. 认证前测试设置

7.3.2 ESD: IEC61000-4-2

7.3.2.1 测试等级和预期性能

I/O 连接器的 ESD 等级和预期性能标准如下：

表 12. ESD 测试等级和性能标准

通用测试标准	测试等级	性能
ESDIEC 61000-4-2	4kV 接触放电 - 2 级 8kV 空气放电 - 3 级	标准 B (测试完成后, 模拟 I/O 模块按预期继续运行)

7.3.2.2 说明

设置

采用两种方式向 EUT 注入 ESD: 接触放电或空气放电。

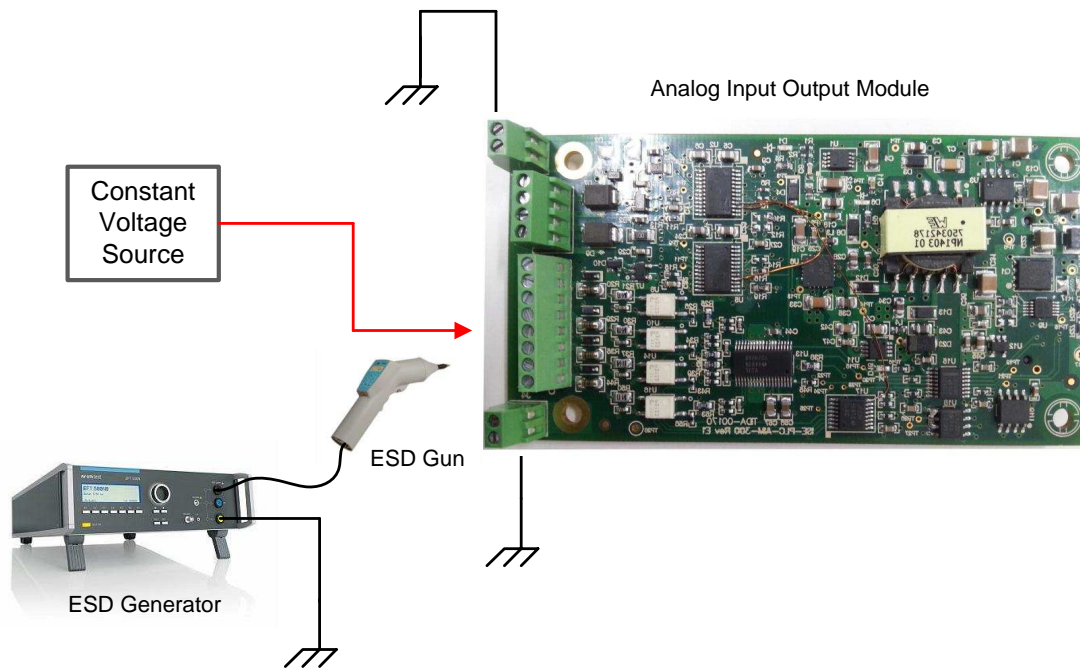


图 36. ESD 测试设置

在接地参考平面上方的 80cm 高木桌上放置一个 160cm × 80cm 的水平耦合板 (HCP)，然后将 EUT 放置在该板上。用一个厚度为 0.5mm 的绝缘支架将 EUT 及其连接电缆与 HCP 隔离。使用 ESD 枪（通过接触放电或空气放电）直接施加 ESD，或者（通过水平耦合板）间接施加 ESD。测试完成后监视 EUT 运行。在 I/O 端口上连接非屏蔽 3m 电缆以对处于激活模式的 EUT 进行测试。

模拟输入：

1. 按 6 节所示连接 EUT。屏蔽引脚按测试信号发生器那样连接到本地接地端。
2. 为 EUT 上电。
 - 配置测试软件，以检查模拟输入电平是否在容差限制 0.2% 范围内。
 - 如果输入电平超出容差限制，I/O 控制器上的 LED 将会闪烁。
3. 设置 3V DC 电压电平和电流电平。
4. 按表 13 列出的测试等级执行 ESD 测试。
5. 测试完成后，执行性能测试以检查性能是否下降。
6. 将输入电压电平改为 6V DC，然后重新执行测试。

模拟输出：

1. 按 6 节所示连接 EUT。屏蔽引脚按 ESD 发生器那样连接到本地接地端。
2. 为 EUT 上电。
 - 测试软件配置为两秒内交替生成 2.5V 和 7.5V 输出。
 - 测试前后请检查相应通道。
3. 按表 13 列出的测试等级执行 ESD 测试。
4. 测试完成后，执行性能测试以检查性能是否下降。

7.3.2.3 结果

表 13. ESD 测试结果

测试编号	测试模式	观察结果
1	空气放电 2kV	通过
2	空气放电 -2kV	通过
3	空气放电 4kV	通过
4	空气放电 -4kV	通过
5	空气放电 6kV	通过
6	空气放电 -6kV	通过
7	空气放电 8kV	通过
8	空气放电 8kV	通过
9	接触放电 1kV	通过
10	接触放电 -1kV	通过
11	接触放电 2kV	通过
12	接触放电 -2kV	通过
13	接触放电 4kV	通过
14	接触放电 -4kV	通过
15	HCP 2kV	通过
16	HCP -2kV	通过
17	HCP 4kV	通过
18	HCP -4kV	通过
22	HCP -4kV	通过

7.3.3 EFT: IEC61000-4-4

测试等级和预期性能

I/O 连接器的 EFT 突发和预期性能标准如下:

表 14. EFT 测试等级和性能标准

通用测试标准	测试等级	性能
EFT/B IEC 61000-4-4	5kHz、100kHz 时为 $\pm 2\text{kV}$ (信号端口)	标准 A

说明

设置

使用电容耦合夹将突发信号注入所有电缆。使用非屏蔽电缆将 EUT 连接到辅助源。将电缆长度设为 3m，并将电缆置于参考平面上方 10cm 的位置。将 EUT 分别置于绝缘材料参考平面上方 10cm 的位置上以及参考平面上进行测试。

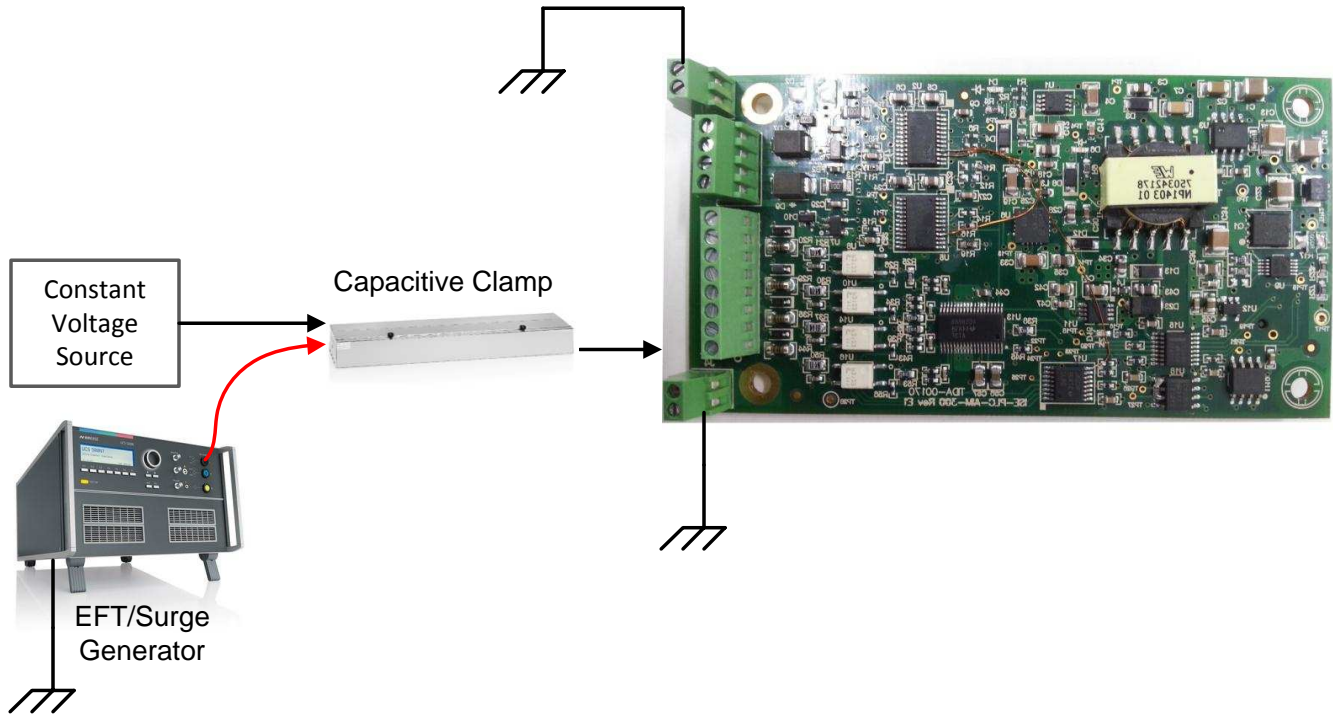


图 37. EFT 测试设置

监视

模拟输入：

1. 按6节所示连接 EUT。屏蔽引脚按测试信号发生器那样连接到本地接地端。
2. 为 EUT 上电。
 - 配置测试软件，以检查模拟输入电平是否在容差限制 0.2% 范围内。
 - 如果输入电平超出容差限制，I/O 控制器上的 LED 将会闪烁。
3. 设置 3V DC 电压电平。
4. 按表 15 列出的测试等级执行 EFT 测试。
5. 测试完成后，执行性能测试以检查性能是否下降。
6. 将输入电压电平改为 6V DC，然后重新执行测试。

模拟输出：

1. 按6节所示连接 EUT。屏蔽引脚按 EFT 发生器那样连接到本地接地端。
2. 为 EUT 上电。
 - 测试软件配置为两秒内交替生成 2.5V 和 7.5V 输出。
 - 测试前后请检查相应通道。
3. 按表 15 列出的测试等级执行 EFT 测试。
4. 测试完成后，执行性能测试以检查性能是否下降。

结果

表 15. EFT 测试结果

测试编号	测试模式	观察结果
1	0.5kV, 5kHz	通过
2	-0.5kV, 5kHz	通过
3	1kV, 5kHz	通过
4	-1kV, 5kHz	通过
5	1.5kV, 5kHz	通过
6	-1.5kV, 5kHz	通过
7	2kV, 5kHz	通过
8	-2kV, 5kHz	通过
9	0.5kV, 100kHz	通过
10	-0.5kV, 100kHz	通过
11	1kV, 100kHz	通过
12	-1kV, 100kHz	通过
13	1.5kV, 100kHz	通过
14	-1.5kV, 100kHz	通过
15	2kV, 100kHz	通过
16	-2kV, 100kHz	通过

7.3.4 浪涌: IEC61000-4-5

测试等级和预期性能

I/O 连接器的共模浪涌和预期性能标准如下:

表 16. 浪涌测试等级和性能标准

通用测试标准	测试等级	性能
浪涌 IEC 61000-4-5	$\pm 1\text{kV}$ CM (信号端口)	标准 B (测试完成后, 模拟 I/O 模块无需人工干预即可按预期继续运行)

说明

设置

将 EUT 和模拟 I/O 电缆放置在参考接地层上方 10cm 的不导电支架上。通过耦合去耦网络将浪涌注入模拟 I/O 电缆以进行测试。测试前后监视 EUT 运行。

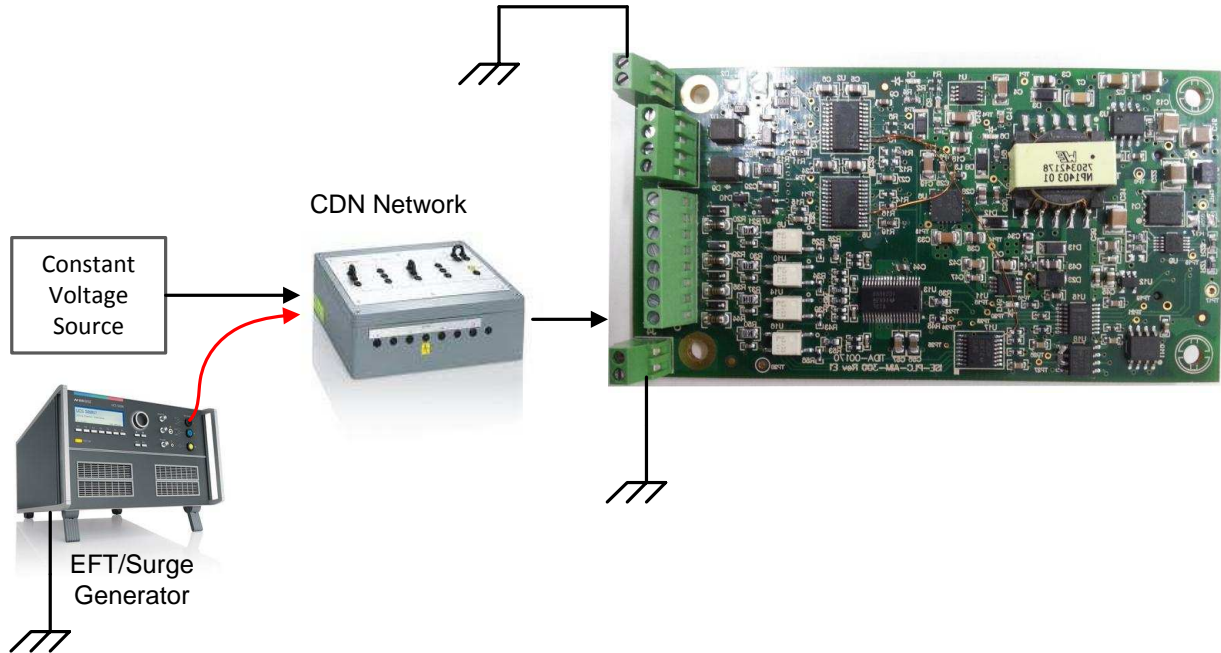


图 38. 浪涌测试设置

测试完成后监视 EUT 运行。经过（I/O 控制器上的）MCU 测试后监视全部四个通道并与设定值（等效于外部恒压源或恒流源）进行比较。误差应满足 7.3 节中所述的精度。

监视

模拟输入：

1. 按 6 节所示连接 EUT。屏蔽引脚按测试信号发生器那样连接到本地接地端。
2. 为 EUT 上电。
 - 配置测试软件，以检查模拟输入电平是否在容差限制 0.2% 范围内。
 - 如果输入电平超出容差限制，I/O 控制器上的 LED 将会闪烁。
3. 设置 3V DC 电压电平。
4. 按表 17 列出的测试等级执行浪涌测试。
5. 测试完成后，执行性能测试以检查性能是否下降。
6. 将输入电压电平改为 6V DC，然后重新执行测试。

模拟输出：

1. 按 6 节所示连接 EUT。屏蔽引脚按浪涌发生器那样连接到本地接地端。
2. 为 EUT 上电。
 - 测试软件配置为两秒内交替生成 2.5V 和 7.5V 输出。
 - 测试前后请检查相应通道。
3. 按表 17 列出的测试等级执行浪涌测试。
4. 测试完成后，执行性能测试以检查性能是否下降。

结果

表 17. 浪涌测试结果

测试编号	测试模式	观察结果
1	0.5kV	通过
2	-0.5kV	通过
3	1kV	通过
4	-1kV	通过

8 参考文献

1. AN-2292 《设计隔离式降压 (Fly-buck™) 转换器》 (文献编号: [SNVA674B](#))
2. AN-2040 《使用 LM5069 热插拔控制器实现输出电压钳位》 (文献编号: [SNVA430B](#))
3. TIDA-00123 《采用 Tiva C 系列 ARM Cortex-M4 MCU 的 PLC I/O 模块前端控制器》 (文献编号: [TIDU191](#))
4. TIDA-00118 《用于可编程逻辑控制器 (PLC) 的 16 位模拟输出模块参考设计》 (文献编号: [TIDU189](#))

8.1 术语

信噪比 (SNR)

SNR 为所需信号级别与背景噪声级别之比。SNR 定义为信号功率与噪声功率之比。SNR 规范提供噪声能量相关信息, 不包括特定输入频率的频谱中出现的基波和谐波能量。SNR 计算通常涉及奈奎斯特频率之前的噪声。

$$\text{SNR} = \frac{P_{\text{SIGNAL}}}{P_{\text{NOISE}}} \quad (21)$$

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \left[\frac{P_{\text{SIGNAL}}^2}{(\text{Sum of all harmonic amplitudes} - F_{\text{IN}} - \text{DC}) \times 2} \right] \quad (22)$$

差分非线性 (DNL) 和积分非线性 (INL)

DNL 是相邻两输入数字值对应的模拟值之间的偏差。理想状态下, 任意两相邻数字编码对应的输出模拟电压恰好相隔一个 LSB。与理想步长宽度 (LSB) 之间的偏差即为 DNL。累积的 DNL 误差生成总的 INL。DNL 和 INL 值通常采用以下单位之一: LSB 或 %FSR。

总未调整误差 (TUE)

TUE 属于测量误差, 未进行任何增益或偏移误差补偿。TUE 可准确测量系统级误差。选择合适的组件并进行适当的 PCB 布局可省去出厂校准过程, 从而能够在批量生产中节省时间和成本。

$$\text{TUE} = \sqrt{(\text{Offset Error})^2 + (\text{Gain Error})^2 + (\text{DNL})^2 + (\text{INL})^2} \quad (23)$$

9 设计文件

9.1 电路原理图

要下载电路原理图，请参见 [TIDA-00170](#) 的设计文件。

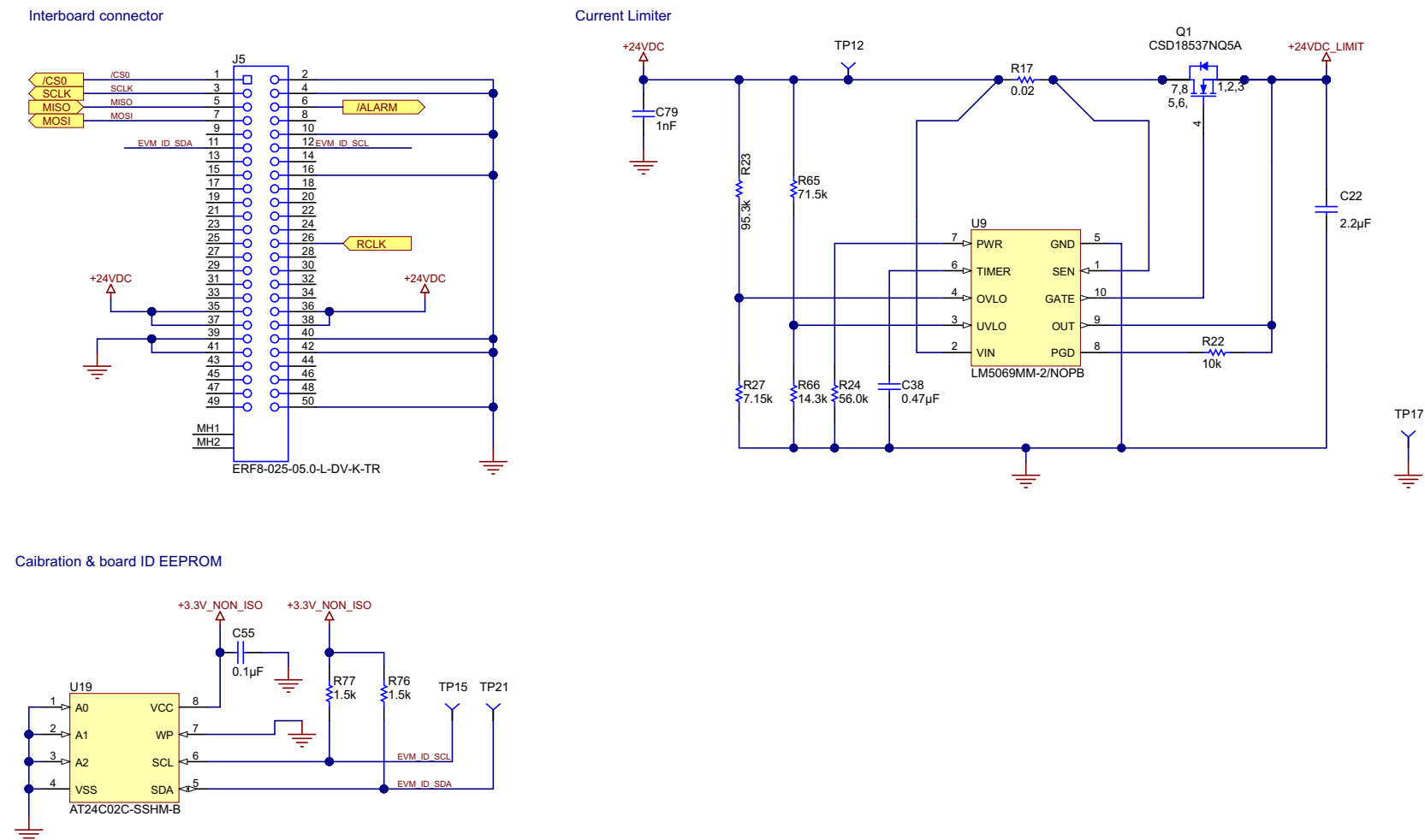


图 39. 板间连接器，浪涌电流限制和 EEPROM 电路原理图

Isolated power supply and Signal Isolation

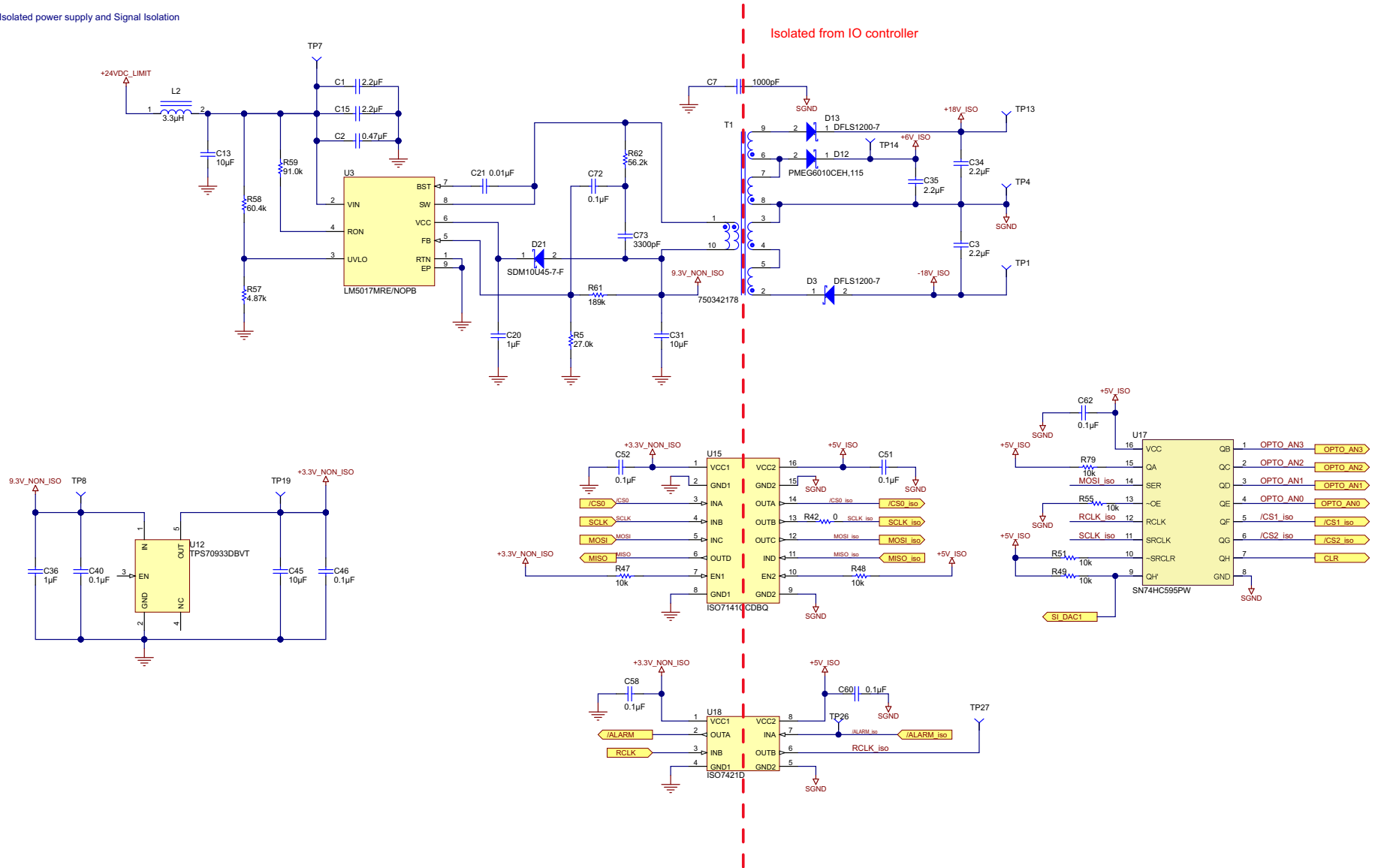


图 40. 隔离式 PS (Fly-Buck)、数字隔离和移位寄存器原理图

LDO

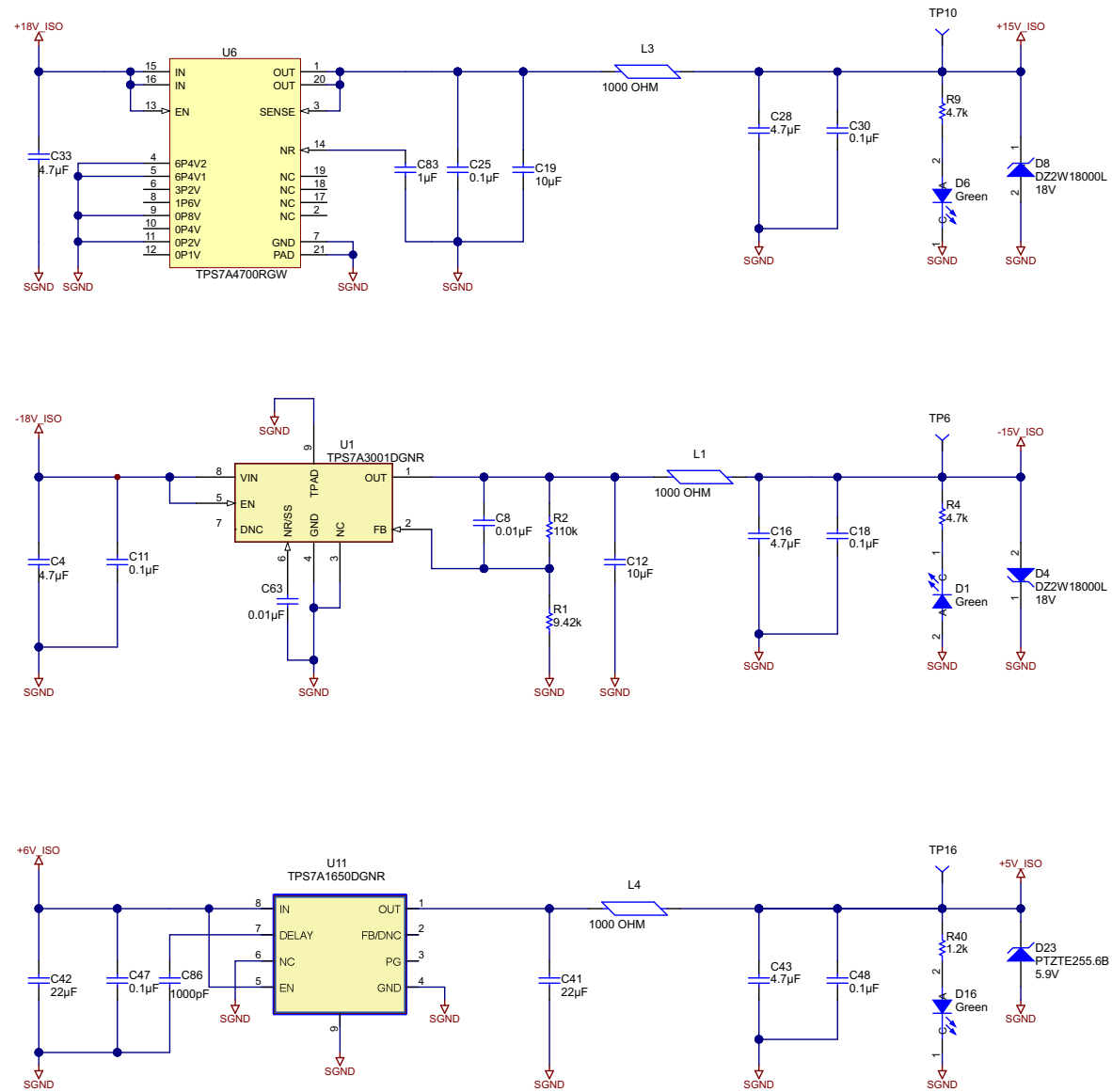


图 41. LDO 电路原理图

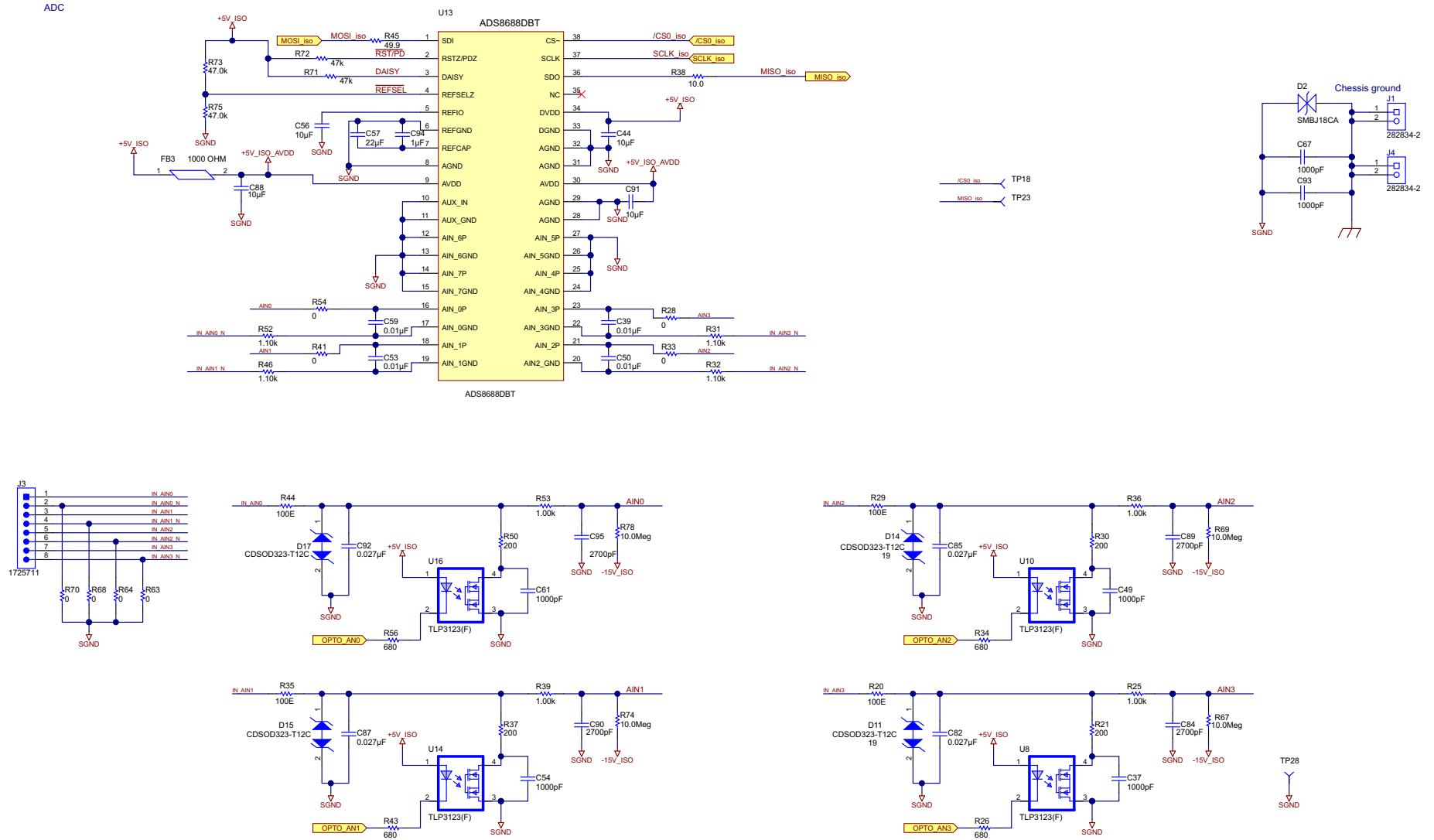


图 42. ADS8688 和输入保护电路原理图

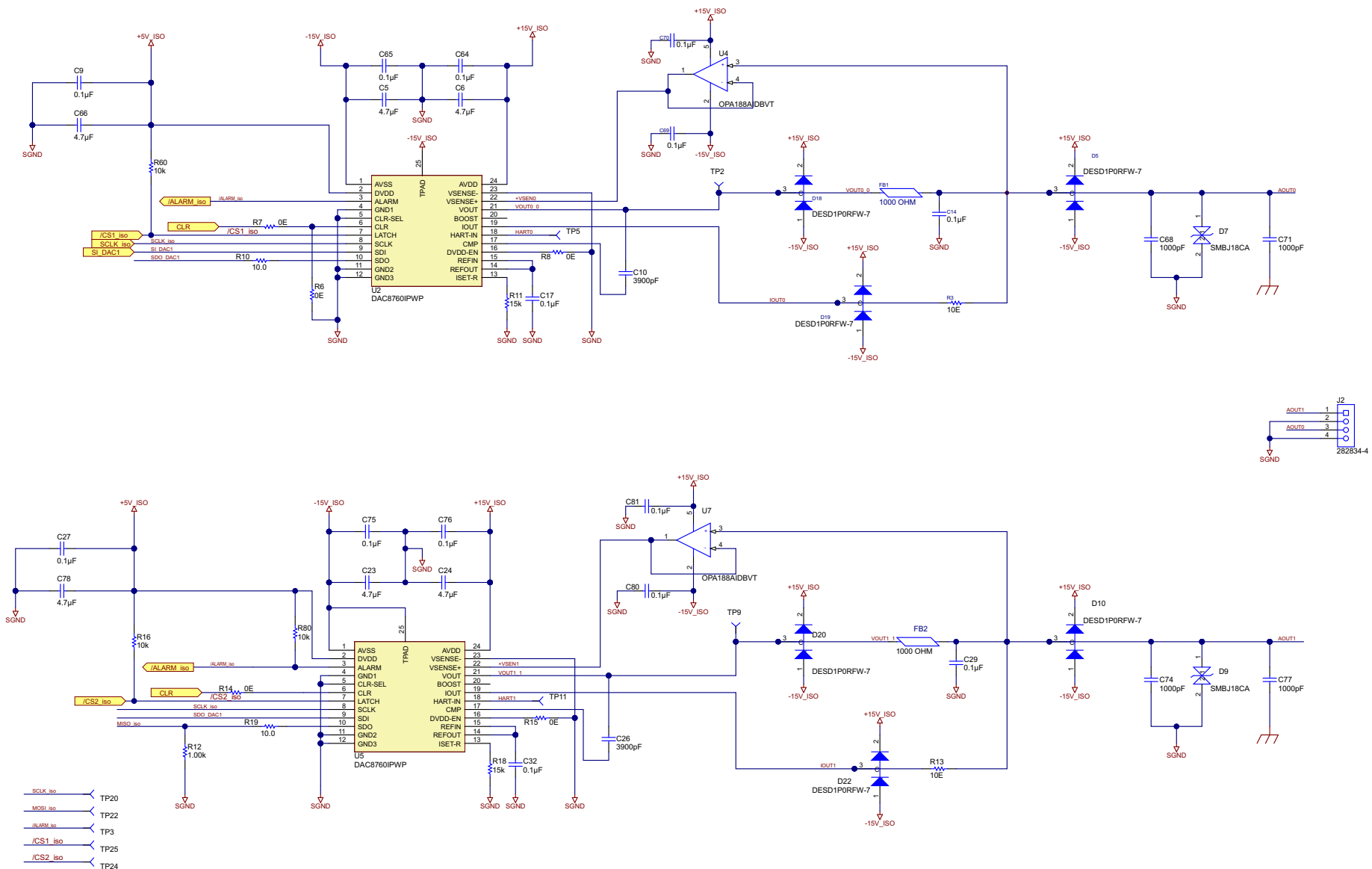


图 43. DAC8760 和输出保护电路原理图

9.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM), 请参见 [TIDA-00170](#) 的设计文件。

表 18. BOM

项目	标识符	说明	制造商	部件号	数量
1	C1, C15, C22	电容, 陶瓷, 2.2uF, 100V, ±10%, X7R, 1210	村田 (MuRata)	GRM32ER72A225KA35L	3
2	C2	电容, 陶瓷, 0.47uF, 100V, ±10%, X7R, 1206	村田 (MuRata)	GRM31MR72A474KA35L	1
3	C3, C34, C35	电容, 陶瓷, 2.2uF, 25V, ±10%, X7R, 0805	村田 (MuRata)	GRM21BR71E225KA73L	3
4	C4, C33	电容, 陶瓷, 4.7uF, 50 V, ±10%, X7R, 1206	村田 (MuRata)	GRM31CR71H475KA12L	2
5	C5, C6, C16, C23, C24, C28, C43, C66, C78	电容, 陶瓷, 4.7uF, 50V, ±10%, X5R, 0805	TDK	C2012X5R1H475K125AB	9
6	C7, C67, C68, C71, C74, C77, C93	电容, 陶瓷, 1000pF, 2KV, 10%, X7R, 1206	Johanson Dielectrics Inc	202R18W102KV4E	7
7	C8, C21	电容, 陶瓷, 0.01uF, 100V, ±5%, X7R, 0603	AVX	06031C103JAT2A	2
8	C9, C11, C14, C17, C18, C25, C27, C29, C30, C32, C47, C48, C64, C65, C69, C70, C75, C76, C80, C81	电容, 陶瓷, 0.1μF, 50 V, ±10%, X7R, 0603	AVX	06035C104KAT2A	20
9	C10, C26	电容, 陶瓷, 3900pF, 50V, ±10%, X7R, 0603	村田 (MuRata)	GRM188R71H392KA01D	2
10	C12, C19	电容, 陶瓷, 10uF, 25V, ±10%, X7R, 1206	村田 (MuRata)	GRM31CR71E106KA12L	2
11	C13	电容, 陶瓷, 10uF, 50V, ±10%, X7R, 1210	村田 (MuRata)	GRM32ER71H106KA12L	1
12	C20	电容, 陶瓷, 1uF, 50V, ±10%, X5R, 0603	村田 (MuRata)	GRM188R61H105KAALD	1
13	C31	电容, 陶瓷, 10uF, 35 V, ±20%, X7R, 1210	太阳诱电 (Taiyo Yuden)	GMK325AB7106MM-T	1
14	C36	电容, 陶瓷, 1uF, 50 V, ±10%, X7R, 0805	AVX	08055C105KAT2A	1
15	C37, C49, C54, C61	电容, 陶瓷, 1000pF, 50V, ±20%, X7R, 0402	TDK	C1005X7R1H102M	4
16	C39, C50, C53, C59	电容, 陶瓷, 0.01μF, 50V, ±10%, X7R, 0402	村田 (MuRata)	GRM155R71H103KA88D	4
17	C40, C46, C51, C52, C55, C58, C60, C62	电容, 陶瓷, 0.1μF, 50 V, ±10%, X7R, 0603	基美 (Kemet)	C0603C104K5RACTU	8
18	C41, C42	电容, 陶瓷, 22μF, 16V, ±20%, X5R, 0805	村田 (MuRata)	GRM21BR61C226ME44	2
19	C44	电容, 陶瓷, 10μF, 25V, ±20%, X5R, 0603	TDK	C1608X5R1E106M080AC	1
20	C45, C56	电容, 陶瓷, 10μF, 16V, ±20%, X5R, 0805	AVX	0805YD106MAT2A	2
21	C57	电容, 陶瓷, 22μF, 16V, ±10%, X5R, 0805	TDK	C2012X5R1C226K125AC	1
22	C72	电容, 陶瓷, 0.1μF, 100V, ±10%, X7R, 0603	村田 (MuRata)	GRM188R72A104KA35D	1
23	C73	电容, 陶瓷, 3300pF, 100V, ±5%, X7R, 0603	AVX	06031C332JAT2A	1
24	C79	电容, 陶瓷, 1000pF, 100V, ±20%, X7R, 0603	AVX	06031C102MAT2A	1
25	C82, C85, C87, C92	电容, 陶瓷, 0.027μF, 50V, ±5%, C0G/NP0, 1206	村田 (MuRata)	GRM3195C1H273JA01D	4
26	C83	电容, 陶瓷, 1μF, 25V, ±10%, X7R, 0603	TDK	C1608X7R1E105K080AB	1
27	C84, C89, C90, C95	电容, 陶瓷, 2700pF, 100V, ±5%, X7R, 0603	AVX	06031C272JAT2A	4

表 18. BOM (continued)

项目	标识符	说明	制造商	部件号	数量
28	C86	电容, 陶瓷, 1000pF, 100V, $\pm 5\%$, X7R, 0603	AVX	06031C102JAT2A	1
29	C88, C91	电容, 陶瓷, 10 μ F, 16V, $\pm 20\%$, X5R, 0603	太阳诱电 (Taiyo Yuden)	EMK107BBJ106MA-T	2
30	C94	电容, 陶瓷, 1 μ F, 16V, $\pm 10\%$, X7R, 0603	太阳诱电 (Taiyo Yuden)	EMK107B7105KA-T	1
31	D1, D6, D16	LED SmartLED 绿色 570NM	欧司朗 (OSRAM)	LG L29K-G2J1-24-Z	3
32	D3, D13	二极管, 肖特基, 200V, 1A, PowerDI123	Diodes Inc.	DFLS1200-7	2
33	D4, D8	二极管, 齐纳, 18V, 1W, SOD-123	松下 (Panasonic)	DZ2W18000L	2
34	D5, D10	二极管, P-N, 70V, 0.2A, SOT-323	Diodes Inc	DESD1P0RFW-7	2
35	D7, D9	TVS 18V, 600W BI-DIR SMB	力特公司 (Littelfuse Inc)	SMBJ18CA	2
36	D11, D14, D15, D17	二极管, TVS, 阵列, 19V, SOD323	Bourns Inc.	CDSOD323-T12C	4
37	D12	二极管, 肖特基, 60V, 1A, SOD-123F	恩智浦半导体 (NXP Semiconductor)	PMEG6010CEH,115	1
38	D21	二极管, 肖特基, 45V, 0.1A, SOD-523	Diodes Inc.	SDM10U45-7-F	1
39	D23	齐纳二极管 5.9V, 1W PMDS	罗姆半导体 (Rohm Semiconductor)	PTZTE255.6B	1
40	FB1, FB2, FB3	铁氧体芯片 1000 Ω , 300mA 0603	TDK 株式会社 (TDK Corporation)	MMZ1608Y102B	2
41	L1, L3, L4	铁氧体芯片 1000 Ω , 300mA 0603	TDK 株式会社 (TDK Corporation)	MMZ1608B102C	4
42	J1, J4	引脚块, 2x1, 2.54mm, TH	TE 互联 (TE Connectivity)	282834-2	2
43	J2	插座, 100 mil, 4x1 TH	TE 互联 (TE Connectivity)	282834-4	1
44	J3	引脚块, 8x1, 2.54mm, TH	菲尼克斯 (Phoenix Contact)	1725711	1
45	J5	插座, 0.8mm, 25x2, SMT	申泰 (Samtec)	ERF8-025-05.0-L-DV-K-TR	1
46	L2	电感, 芯片, $\pm 10\%$	EPCOS INC.	B82422H1332K	1
47	Q1	MOSFET, N 沟道, 60V, 50A, 5x6mm	德州仪器 (TI)	CSD18537NQ5A	1
48	R1	电阻, 9.42k Ω , 1%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	TNPW04029K42BEED	1
49	R2	电阻, 110k Ω , 1%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW0402110KFKEA	1
50	R3, R13	电阻, 10 Ω , 5%, 0.25W, 1206	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW120610R0JNEA	2
51	R4, R9	电阻, 4.7k Ω , 5%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW06034K70JNEA	2
52	R5	电阻, 27.0k Ω , 1%, 0.1W, 0603	Yageo America	RC0603FR-0727KL	1
53	R6, R8, R15, R28, R33, R41, R54	电阻, 0 Ω , 5%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW04020000Z0ED	7
54	R10, R19, R38	RES, 10.0 Ω , 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW060310R0FKEA	3
55	R11, R18	电阻, 15k Ω , 0.1%, 1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	RT0603BRB0715KL	2
56	R16, R47, R48, R49, R51, R55, R60, R79, R80	电阻, 10k Ω , 5%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW040210K0JNED	9
57	R17	电阻, 0.02 Ω , 1%, 1W, 1206	Susumu Co Ltd	PRL1632-R020-F-T1	1

表 18. BOM (continued)

项目	标识符	说明	制造商	部件号	数量
58	R20, R29, R35, R44	电阻 100Ω 4W 1% 0204 MELF	威世贝士拉革 (Vishay Beyschlag)	MMA02040C1000FB300	4
59	R21, R30, R37, R50	电阻, 200Ω, 0.1%, 0.125W, 0805	Susumu Co Ltd	RG2012P-201-B-T5	4
60	R22	电阻, 10kΩ, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW060310K0JNEA	1
61	R23	电阻, 95.3kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW060395K3FKEA	1
62	R24	电阻, 56.0kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	Susumu Co Ltd	RG1608P-563-B-T5	1
63	R25, R36, R39, R53	电阻, 1.00kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW06031K00FKEA	4
64	R26, R34, R43, R56	电阻, 680Ω, 5%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW0402680RJNED	4
65	R27	电阻, 7.15kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW06037K15FKEA	1
66	R31, R32, R46, R52	电阻, 1.10kΩ, 1%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW04021K10FKED	4
67	R40	电阻, 1.2kΩ, 5%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW04021K20JNED	1
68	R42	电阻, 0Ω, 5%, 0.063W, 0402	Yageo America	RC0402JR-070RL	1
69	R45	电阻, 49.9Ω, 1%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW040249R9FKED	1
70	R57	电阻, 4.87kΩ, 1%, 0.1W, 0603	Yageo America	RC0603FR-074K87L	1
71	R58	电阻, 60.4kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	Yageo America	RT0603BRD0760K4L	1
72	R59	电阻, 91.0kΩ, 1%, 0.1W, 0603	Yageo America	RC0603FR-0791KL	1
73	R61	电阻, 189kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	Yageo America	RT0603BRD07189KL	1
74	R62	电阻, 56.2kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	Yageo America	RT0603BRD0756K2L	1
75	R63, R64, R68, R70	电阻 0.0Ω.5W Jump 1206 SMD	威世达勒 (Vishay Dale)	CRCW12060000Z0EAHP	4
76	R65	电阻, 71.5kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW060371K5FKEA	1
77	R66	电阻, 14.3kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW060314K3FKEA	1
78	R67, R69, R74, R78	电阻, 10.0MΩ, 1%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW040210M0FKED	4
79	R71, R72	电阻, 47kΩ, 5%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW040247K0JNED	2
80	R75	电阻, 47.0kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	Yageo America	RT0603BRD0747KL	1
81	R76, R77	电阻, 1.5kΩ, 5%, 0.063W, 0402	威世达勒 (Vishay-Dale)	CRCW04021K50JNED	2
82	T1	变压器, 50μH, SMT	Würth Elektronik eiSos	750342178	1
83	U1	-36V, -200mA, 超低噪声, 负线性稳压器	德州仪器 (TI)	TPS7A3001DGNR	1
84	U2, U5	用于 4-20mA 电流回路应用的单通道 16 位可编程电流/电压输出 DAC	德州仪器 (TI)	DAC8760IPWP	2
85	U3	100V、600mA 恒定导通时间同步降压稳压器, DDA0008B	德州仪器 (TI)	LM5017MRE/NOPB	1
86	U4, U7	高精度、低噪声、轨到轨输出、36V、零漂移运算放大器	德州仪器 (TI)	OPA188AIDBVT	2
87	U6	36V、1A、4.17μV _{RMS} 、RF LDO 稳压器, RGW0020A	德州仪器 (TI)	TPS7A4700RGW	1
88	U8, U10, U14, U16	光电继电器 MOSFET 1A 4-SOP	东芝半导体和存储产品公司 (Toshiba Semiconductor and Storage)	TLP3123(F)	4

表 18. BOM (continued)

项目	标识符	说明	制造商	部件号	数量
89	U9	具有功率限制的正高电压热插拔/浪涌电流控制器, 10 引脚 MSOP, 无铅	美国国家半导体公司 (National Semiconductor)	LM5069MM-2/NOPB	1
90	U11	具有使能和电源正常指示功能的 IC 60V、6 μ A IQ、100mA LDO 稳压器	德州仪器 (TI)	TPS7A1650DGNR	1
91	U12	IC REG LDO 3.3V, 0.15A SOT23-5	德州仪器 (TI)	TPS70933DBVT	1
92	U13	16 位 400KSPS 8 通道 SAR ADC	德州仪器 (TI)	ADS8688DBT	1
93	U15	4242-VPK 小型封装低功耗四通道数字隔离器, DBQ0016A	德州仪器 (TI)	ISO7141CCDBQ	1
94	U17	IC, 具有三态输出寄存器的 8 位移位寄存器	德州仪器 (TI)	SN74HC595PW	1
95	U18	低功耗双通道数字隔离器, D0008A	德州仪器 (TI)	ISO7421D	1
96	U19	IC, EEPROM, 2KB, 1MHZ, SOIC-8	爱特梅尔 (Atmel)	AT24C02C-SSHM-B	1

9.3 PCB 布局

此模拟 I/O 模块采用四层 PCB 实现。为获得最优设计性能，请遵循标准 PCB 布局准则，包括靠近所有集成电路进行适当去耦以及利用大面积覆铜提供足够的电源和接地连接。另外，还需考虑提供稳定的 EMC 和 EMI 抗扰度。将所有保护元件尽可能靠近输出连接器放置，以为瞬变电流提供可控的返回路径，防止其流过敏感组件。为实现最优电流量，需沿输出信号路径和保护元件使用低阻抗低电感走线。尽可能使用覆铜代替走线。覆铜可在 PCB 周围提供返回路径，有助于降低辐射干扰。

9.3.1 布局布线准则

为确保高性能，请遵照以下布局准则：

1. 为模拟和数字信号使用公共接地层。
2. 对所有信号进行路由时假定模拟和数字信号分别采用单独接地层。另外，最好在初始布线时分离这两种信号的接地层。铺设所有模拟和数字信号走线，使走线沿第二层始终连接相应的接地端。然后短接两个接地端，形成一个公共接地层。
3. 将 ADC 接地引脚通过多个过孔 (PTH) 接回接地层。
4. 确保 TVS 二极管和电容之类的保护元件尽可能靠近连接器放置，防止返回的高能瞬变电流损坏敏感器件。另外，使用粗大走线以确保为高能瞬变电流提供低阻抗路径。
5. 将去耦电容靠近 IC 的电源引脚放置。
6. 使用多个过孔实现去耦电容供电和接地。
7. 采用开尔文感测连接方式连接电流感测电阻。
8. SPI 线路：为确保信号完整性，请将端接电阻放置在电源附近。
9. 将去耦电容分别放在每个 AVDD 和 AVSS 的对应引脚附近。
10. 将基准电容放在电压基准输入引脚附近。

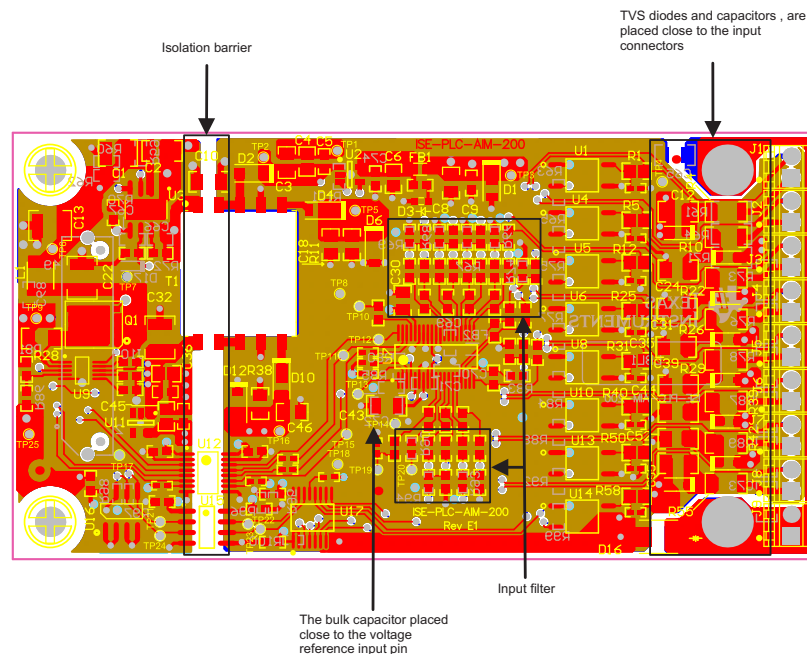


图 44. PCB 布局布线准则

9.3.2 布局图

要下载板层图，请参见 [TIDA-00170](#) 的设计文件。

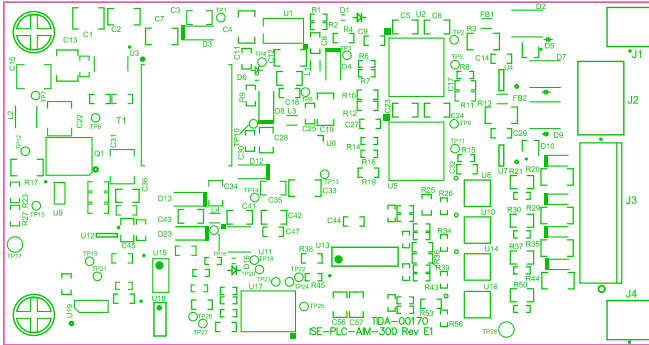


图 45. 顶部覆盖层

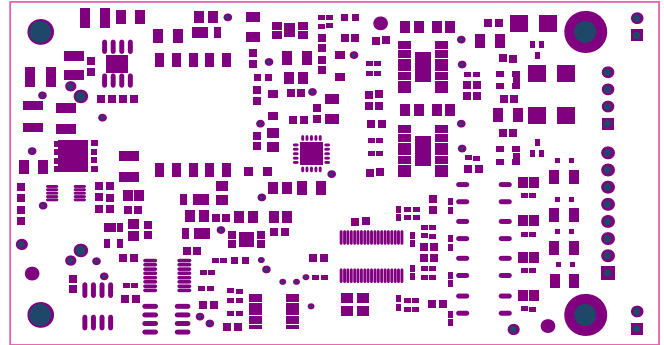


图 46. 顶部焊接掩模

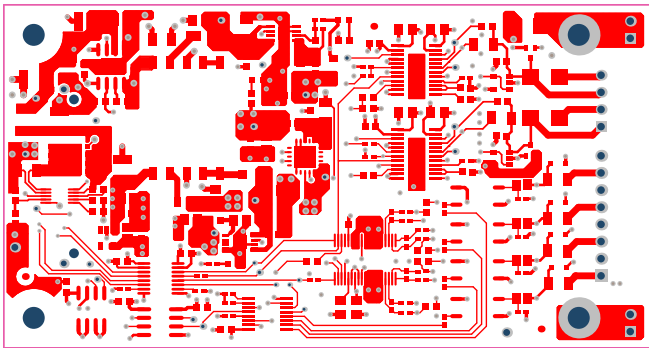


图 47. 顶层

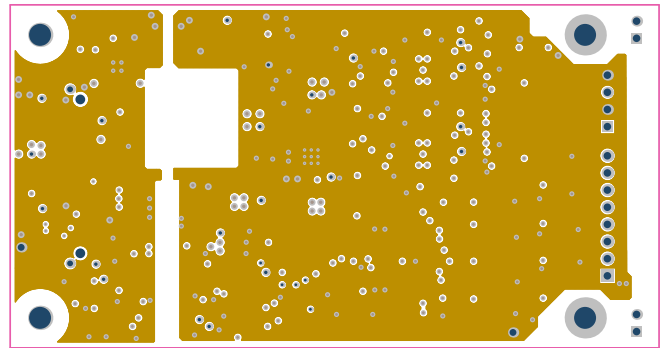


图 48. 第 2 层

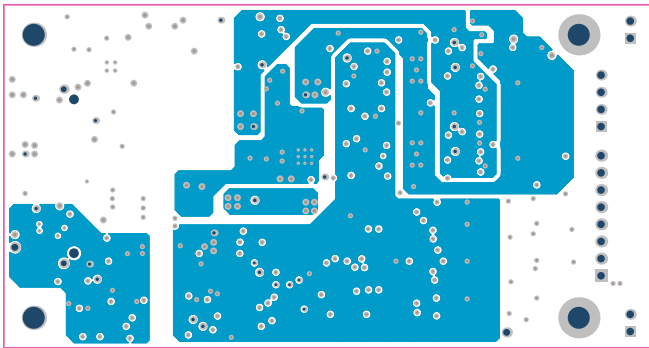


图 49. 第 3 层

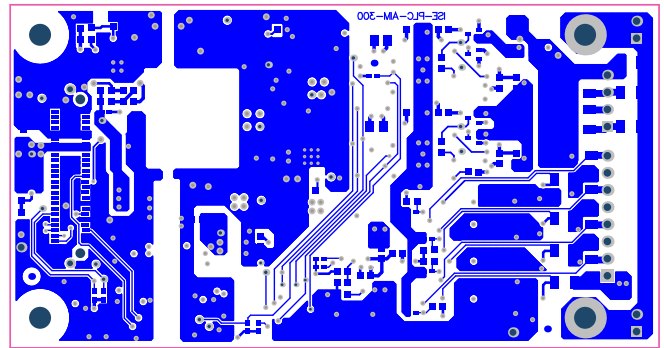


图 50. 底层

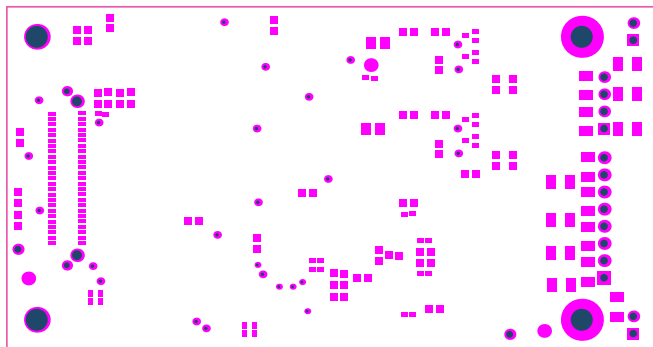


图 51. 底部焊接掩模

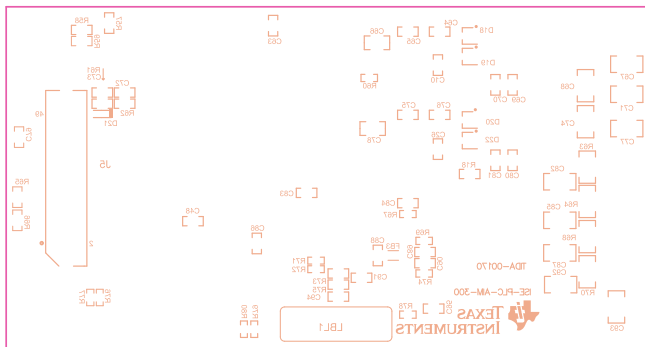
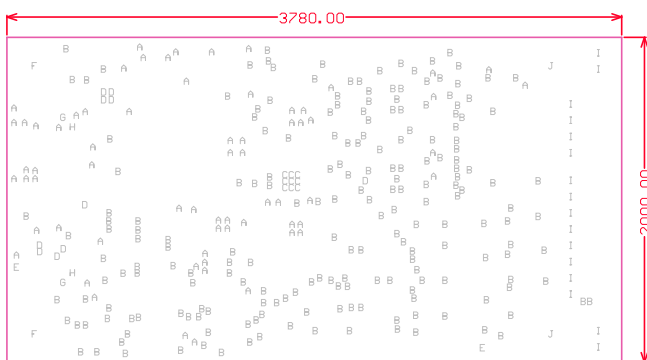


图 52. 底部覆盖层



Symbol	Hit Count	Tool Size	Plated	Hole Type
C	9	8mil (0.203mm)	PTH	Round
D	10	12mil (0.305mm)	PTH	Round
B	202	16mil (0.406mm)	PTH	Round
A	67	20mil (0.508mm)	PTH	Round
G	2	33mil (0.838mm)	PTH	Round
E	2	40mil (1.016mm)	PTH	Round
I	16	43.307mil (1.1mm)	PTH	Round
H	2	57.087mil (1.45mm)	NPTH	Round
J	2	128mil (3.251mm)	PTH	Round
F	2	128mil (3.251mm)	NPTH	Round
	314 Total			

Drill Table
 FOR 8MIL DRILL +0/-8MIL
 FOR 12MIL DRILL +0/-12MIL
 FOR 16MIL DRILL +0/-16MIL

图 53. 钻孔图

9.4 Altium 项目

要下载 Altium 项目文件，请参见 [TIDA-00170](http://www.ti.com/lit/tid00170) 的设计文件。

9.5 光绘文件

要下载光绘文件，请参见 [TIDA-00170](#) 的设计文件。

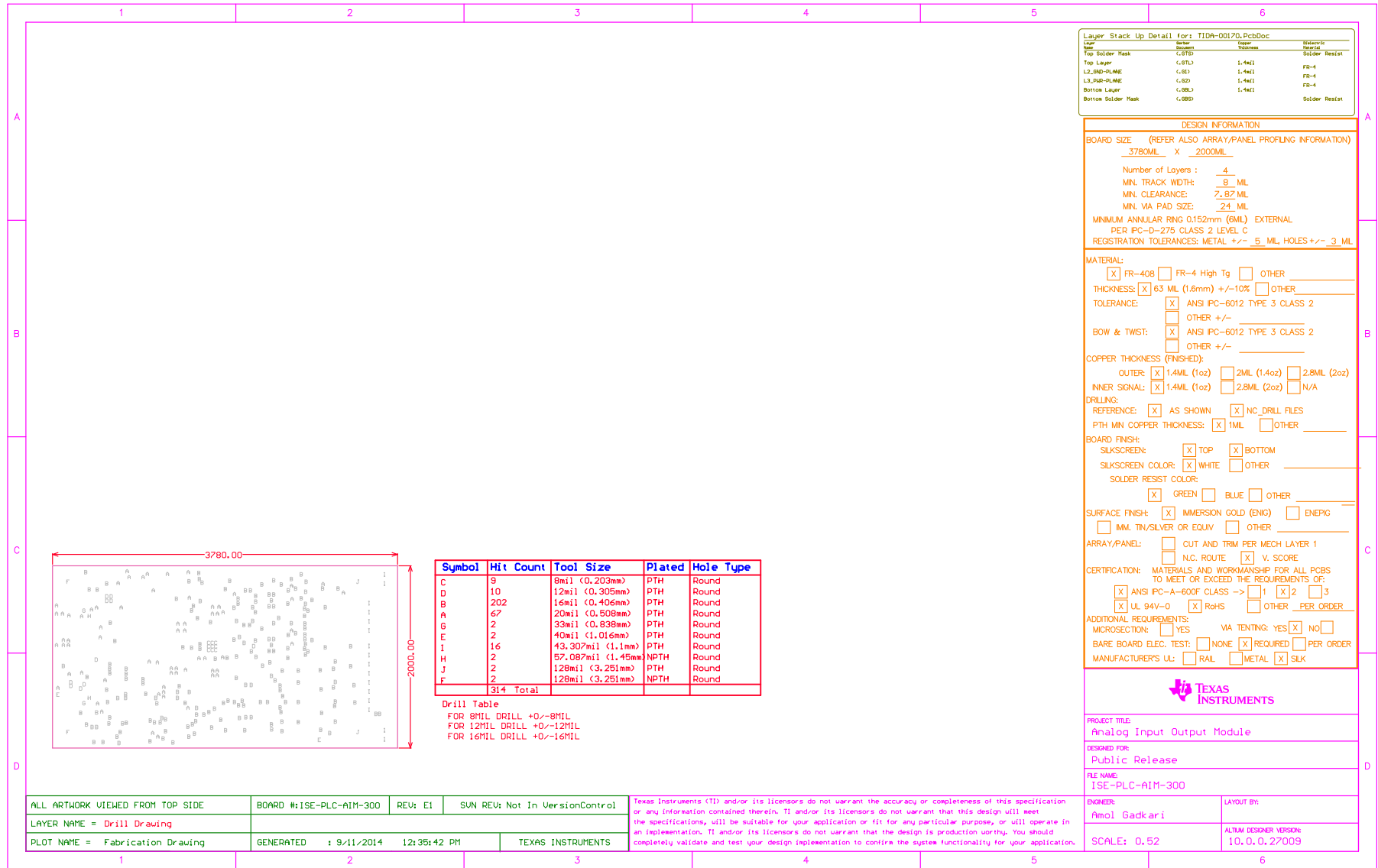


图 54. 制造图纸

9.6 软件文件

要下载软件文件，请参见 [TIDA-00170](#) 的设计文件。

10 关于作者

AMOL GADKARI是德州仪器（印度）的系统工程师，负责开发面向工业领域的参考设计解决方案。Amol 拥有八年的混合信号板设计、模拟电路设计和 EMC 保护电路设计经验。您可以通过电子邮箱 (a-gadkari@ti.com) 与他联系。

SANKAR SADASIVAM 是德州仪器 (TI) 工业系统工程设计首席技术专家，负责工业领域的架构和开发参考设计解决方案。Sankar 在模拟、RF、无线、信号处理、高速数字和电力电子设备领域拥有丰富经验。Sankar 拥有印度马德拉斯理工学院电气工程 (MS) 理学硕士学位。

针对 TI 参考设计的重要声明

德州仪器公司 ("TI") 参考设计只用于帮助设计人员 ("客户") 开发包含 TI 半导体产品的系统 (在这里也指"组件")。客户理解并同意他们对设计客户系统和产品中的独立分析、评估和判断负责。

TI 参考设计已经使用标准实验室条件和工程实践创建。TI 未采取任何测试, 除非那些在已发布文档中针对一个特定参考设计所专门描述的测试。TI 也许会对它的参考设计进行修正、提高、改进和其它改变。

客户被授权使用具有每个特定参考设计中确认的 TI 组件的 TI 参考设计, 并且在他们的终端产品开发中修改参考设计。然而, 在这里不授予任何其它 TI 知识产权的直接或隐含, 默许或其它方式的许可, 和任何第三方技术或知识产权的许可, 其中包括但不限于任何专利权、版权、屏蔽作品权、或者与采用了 TI 产品或服务的任何集成、机器或工艺相关的知识产权。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息不能构成使用此类产品或服务的许可或与其相关的保证或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

TI 参考设计按"原样"提供。对于参考设计或者包括精度和完整性在内的直接、隐含或者法律规定的参考设计的使用, TI 不作出任何保证或声明。TI 不对任何隐含的适销性、针对特定用途的适用性、平静受益权、无干扰享有权, 以及与 TI 参考设计或其使用相关的任何第三方知识产权的非侵权作出任何保证。TI 不对任何与 TI 参考设计中提供的产品组合相关的或基于这些产品组合的第三方侵权声明负责, 并且不应为客户提供辩护或赔偿。不论是何原因造成任何实际的、特殊的、意外的、相应发生的或间接的损坏, 并且不论 TI 是否已经告知了 TI 参考设计的任何使用或 TI 参考设计的客户使用所造成的此类损坏的可能性, TI 都不应对此负责。

TI 保留根据 JESD46 最新标准, 对所提供的半导体产品和服务进行更正、增强、改进或其它更改的权限, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的 TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种产品的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

对于 TI 数据手册、数据表或参考设计中的 TI 信息, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任。第三方信息可能受到其它限制条件的制约。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独力负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在客户的安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。借助于这样的组件, TI 的目标是帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或"增强型塑料"的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的组件。客户认可并同意, 对还未指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独力负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的组件, 这些组件主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 将不承担任何责任。

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2015, Texas Instruments Incorporated

重要声明

德州仪器(TI) 及其下属子公司有权根据 JESD46 最新标准, 对所提供的产品和服务进行更正、修改、增强、改进或其它更改, 并有权根据 JESD48 最新标准中止提供任何产品和服务。客户在下订单前应获取最新的相关信息, 并验证这些信息是否完整且是最新的。所有产品的销售都遵循在订单确认时所提供的TI 销售条款与条件。

TI 保证其所销售的组件的性能符合产品销售时 TI 半导体产品销售条件与条款的适用规范。仅在 TI 保证的范围内, 且 TI 认为有必要时才会使用测试或其它质量控制技术。除非适用法律做出了硬性规定, 否则没有必要对每种组件的所有参数进行测试。

TI 对应用帮助或客户产品设计不承担任何义务。客户应对其使用 TI 组件的产品和应用自行负责。为尽量减小与客户产品和应用相关的风险, 客户应提供充分的设计与操作安全措施。

TI 不对任何 TI 专利权、版权、屏蔽作品权或其它与使用了 TI 组件或服务的组合设备、机器或流程相关的 TI 知识产权中授予的直接或间接版权限作出任何保证或解释。TI 所发布的与第三方产品或服务有关的信息, 不能构成从 TI 获得使用这些产品或服务的许可、授权、或认可。使用此类信息可能需要获得第三方的专利权或其它知识产权方面的许可, 或是 TI 的专利权或其它知识产权方面的许可。

对于 TI 的产品手册或数据表中 TI 信息的重要部分, 仅在没有对内容进行任何篡改且带有相关授权、条件、限制和声明的情况下才允许进行复制。TI 对此类篡改过的文件不承担任何责任或义务。复制第三方的信息可能需要服从额外的限制条件。

在转售 TI 组件或服务时, 如果对该组件或服务参数的陈述与 TI 标明的参数相比存在差异或虚假成分, 则会失去相关 TI 组件或服务的所有明示或暗示授权, 且这是不正当的、欺诈性商业行为。TI 对任何此类虚假陈述均不承担任何责任或义务。

客户认可并同意, 尽管任何应用相关信息或支持仍可能由 TI 提供, 但他们将独自负责满足与其产品及其应用中使用的 TI 产品相关的所有法律、法规和安全相关要求。客户声明并同意, 他们具备制定与实施安全措施所需的全部专业技术和知识, 可预见故障的危险后果、监测故障及其后果、降低有可能造成人身伤害的故障的发生机率并采取适当的补救措施。客户将全额赔偿因在此类安全关键应用中使用任何 TI 组件而对 TI 及其代理造成的任何损失。

在某些场合中, 为了推进安全相关应用有可能对 TI 组件进行特别的促销。TI 的目标是利用此类组件帮助客户设计和创立其特有的可满足适用的功能安全性标准和要求的终端产品解决方案。尽管如此, 此类组件仍然服从这些条款。

TI 组件未获得用于 FDA Class III (或类似的生命攸关医疗设备) 的授权许可, 除非各方授权官员已经达成了专门管控此类使用的特别协议。

只有那些 TI 特别注明属于军用等级或“增强型塑料”的 TI 组件才是设计或专门用于军事/航空应用或环境的。购买者认可并同意, 对并非指定面向军事或航空航天用途的 TI 组件进行军事或航空航天方面的应用, 其风险由客户单独承担, 并且由客户独自负责满足与此类使用相关的所有法律和法规要求。

TI 已明确指定符合 ISO/TS16949 要求的产品, 这些产品主要用于汽车。在任何情况下, 因使用非指定产品而无法达到 ISO/TS16949 要求, TI 不承担任何责任。

	产品		应用
数字音频	www.ti.com.cn/audio	通信与电信	www.ti.com.cn/telecom
放大器和线性器件	www.ti.com.cn/amplifiers	计算机及周边	www.ti.com.cn/computer
数据转换器	www.ti.com.cn/dataconverters	消费电子	www.ti.com.cn/consumer-apps
DLP® 产品	www.dlp.com	能源	www.ti.com.cn/energy
DSP - 数字信号处理器	www.ti.com.cn/dsp	工业应用	www.ti.com.cn/industrial
时钟和计时器	www.ti.com.cn/clockandtimers	医疗电子	www.ti.com.cn/medical
接口	www.ti.com.cn/interface	安防应用	www.ti.com.cn/security
逻辑	www.ti.com.cn/logic	汽车电子	www.ti.com.cn/automotive
电源管理	www.ti.com.cn/power	视频和影像	www.ti.com.cn/video
微控制器 (MCU)	www.ti.com.cn/microcontrollers		
RFID 系统	www.ti.com.cn/rfidsys		
OMAP应用处理器	www.ti.com.cn/omap		
无线连通性	www.ti.com.cn/wirelessconnectivity	德州仪器在线技术支持社区	www.deyisupport.com

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2016, Texas Instruments Incorporated