

# TI 参考设计 隔离式电流分流和电压测量套件



## TI 参考设计

TI 参考设计为您提供所需的基础方法、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

<a href="#">TIDA-00171</a>	包含设计文件的工具文件夹
<a href="#">AMC1304M05</a>	产品文件夹
<a href="#">AMC1304M25</a>	产品文件夹
<a href="#">CDCE906</a>	产品文件夹
<a href="#">SN6501</a>	产品文件夹
<a href="#">TPS7A3001</a>	产品文件夹
<a href="#">TLV70450</a>	产品文件夹
<a href="#">OPA211AI</a>	产品文件夹
<a href="#">INA826</a>	产品文件夹
<a href="#">TPS55340</a>	产品文件夹
<a href="#">LP38798</a>	产品文件夹
<a href="#">TPS54232</a>	产品文件夹
<a href="#">REF3012</a>	产品文件夹
<a href="#">DAC8564</a>	产品文件夹
<a href="#">TMS320F28377D</a>	产品文件夹

## 设计特性

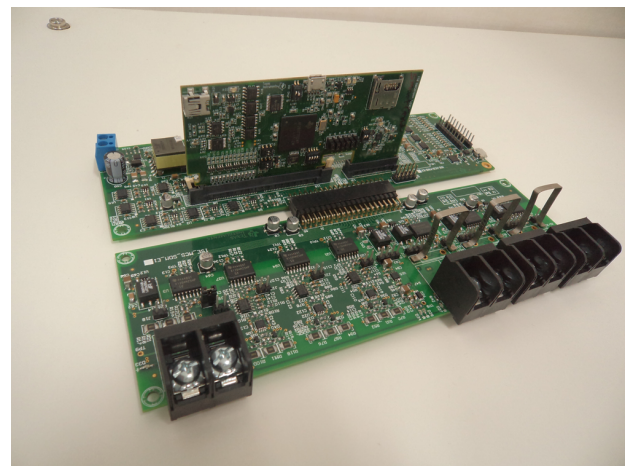
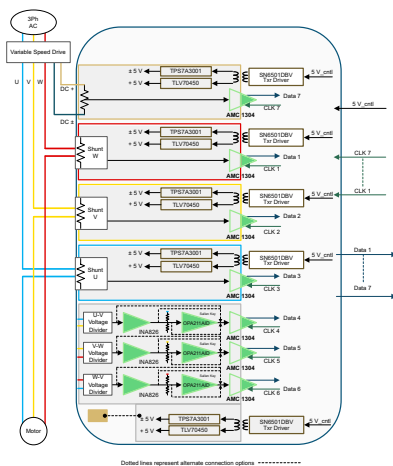
- 使用隔离型  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器 AMC130x 的三相电机电流和电压的隔离式分流反馈测量
- 采用新型 C2000™ F2837xD 双核 Delfino™ 微控制器的集成 Sinc<sup>3</sup> 数字滤波器
- 25°C 时未经校准的精度 < 2%
- 经过校准的精度为  $\pm 0.2\%$
- 保护响应时间 < 4 $\mu$ s
- 用于系统级测试的逆变器自举电源供电板选项
- 16 位 DAC 重新生成实时信号以进行分析
- 板上隔离式电源
- 通过运行时 GUI 对调制器时钟、正弦滤波器参数以及电流和电压波形进行全面的性能分析
- 经测试符合 IEC61800 (EMC 要求)

## 特色应用

- 交流电机驱动器
- 不间断电源
- 太阳能逆变器



请咨询我们的 E2E 专家  
[WEBENCH® 计算器工具](#)



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 系统描述

### 1.1 变频器中的测量简介

全世界政府法规正不断呼吁采用效率更高的工业电机驱动，因为工业电机驱动的能耗在当今总能耗中占有相当大的比例。要提高效率，就需要根据系统的实际需求对转矩和转子速度进行优化，而提高电机电流和电压测量精度可以在一定程度上实现这一目标。

电流测量是所有逆变器驱动的应用所固有的部分。对于电气驱动系统中的速度和转矩控制，必须捕捉转换器输出电流才能执行脉宽调制 (PWM) 模式在线计算。电流环路稳压器通常在 1kHz 至 8kHz 之间工作。用于此控制环路的信号必须包含从 10kHz 至 40kHz 的信息，所需分辨率为 12 至 16 位。

为提高可靠性并降低驱动成本，人们已付出巨大努力消除大部分高性能感应电机驱动应用中的转轴速度或位置传感器。感应电机驱动的转子速度估算器采用定子电压和电流测量结果并结合电机参数进行估算。感应电机磁场定向控制器的动态性能主要取决于模型参数精度，该性能也取决于测量精度。

电机控制与电网应用都采用旋转参考系在所谓的  $d$ - $q$  旋转坐标系下对电流进行控制。对  $d$  轴和  $q$  轴电流进行调节时，至少需要两相电流测量结果。电流分量变为准直流，控制简化为对带宽的最低要求。若提高电流和电压测量精度，可以降低电机转轴中的转矩纹波，从而提高电机驱动的性能。

使用  $\Delta$ - $\Sigma$  调制技术测量电流和电压，已然成为一项业内广泛推动的发展趋势。促成这一转变的主要原因是， $\Delta$ - $\Sigma$  调制技术能够降低系统总体成本，同时还能够提高性能。

霍尔效应传感器具备重要的电气隔离性能，因此，业内一直采用这种传感器执行电流和电压测量。霍尔效应传感器现在可由分流电阻和隔离型  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器代替，这是一种精度更高、成本更低的方案，而且能够直接测量电流和电压。 $\Delta$ - $\Sigma$  调制器可将模拟输入信号转换为具有带外噪声的单位高频流。将量化噪声移至更高频段的优势在于，可以简化抗混叠滤波，可以消除驱动器与滤波器的成本从而实现低成本解决方案，而且可以实现可扩展的性能。

TI 最新的隔离型  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器 AMC130x 专为直接连接分流电阻而设计，并具有电流隔离栅。AMC130x 器件一款增强隔离型二阶  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器，非常适用于电机控制。它具有两种变体，分别采用 50mV 和 250mV 输入。50mV 变体用于测量电流，而 250mV 变体用于测量电压。由于 50mV 的输入电压较低，因此能够显著降低分流电阻的功耗。图 1 和图 2 显示了新方案的方框图。

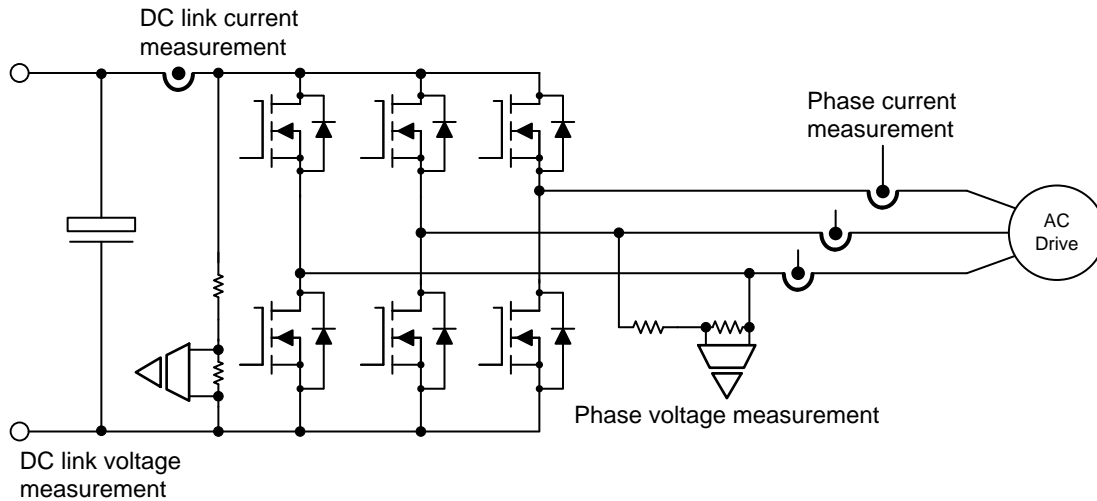


图 1. 三相逆变器中的电流和电压测量

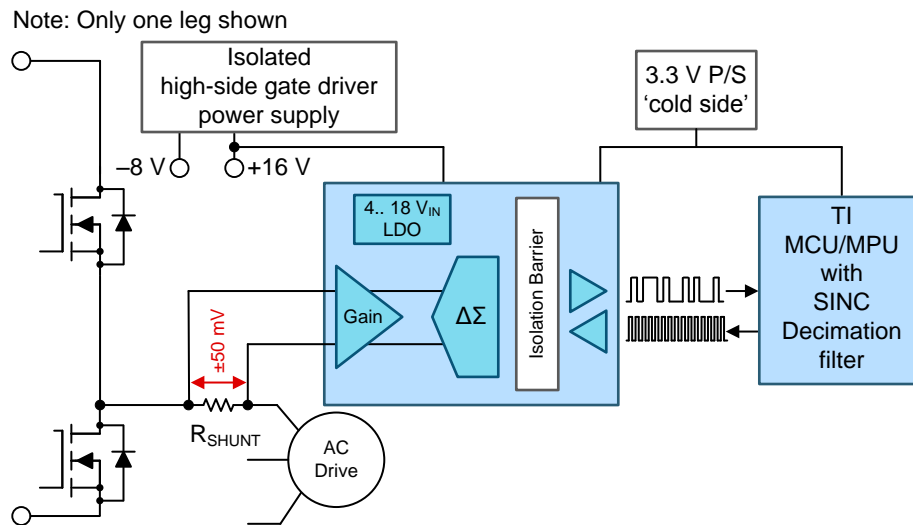


图 2. 三相逆变器中的  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器

在电机控制中，最多需要对八个信号进行监视。因此，将传感器及其数模转换的成本保持在较低水平最为重要。成本最低的电流测量方案是向电流路径中添加电阻（分流），并测量电阻两端的压降。 $\Delta$ - $\Sigma$  调制器用于将该压降转换为位流。AMC130x 会将分流电阻两端的分流电压（约等于电流）转换为数字高频 (20MHz) 位流，此位流可以通过 TI Delfino 控制器内置的 Sinc<sup>3</sup> 滤波器进行滤波。同样，一种具有成本效益的直流链路或逆变器电压测量方案是采用电阻分压器将电压降至  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器可接受的水平。

采用分流电阻测量电流时，可以使用具有  $\pm 50\text{mV}$  输入的 AMC1304M05 部件最大程度地降低分流电阻的功耗 ( $P = I \times V$ )。因此，分流电阻两端的压降需要尽可能小。AMC1304  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器相对噪声和偏移都非常稳定。即使是如此低的电压也可以转换成高分辨率。此外，分流电阻和调制器通常处于浮动电位，因此必须对调制器的数字输出（位流）进行电流隔离。AMC1304 具有增强型隔离功能，可为应用正常工作提供电流隔离，并能提供所需的安全性以保护用户安全。位流为两线制接口，包括数据和时钟信号。借助适当的低通滤波器 - Sinc<sup>K</sup> 滤波器从位流中提取高分辨率信号。滤波器结构可以根据应用对分辨率和速度的需求进行调整。

本参考设计基于 AMC130x 与 TI Delfino 控制器，提供测量如下电流和电压的方法。

- 三个电机电流
- 直流链路电压
- 三个逆变器电压（相电压和线电压）

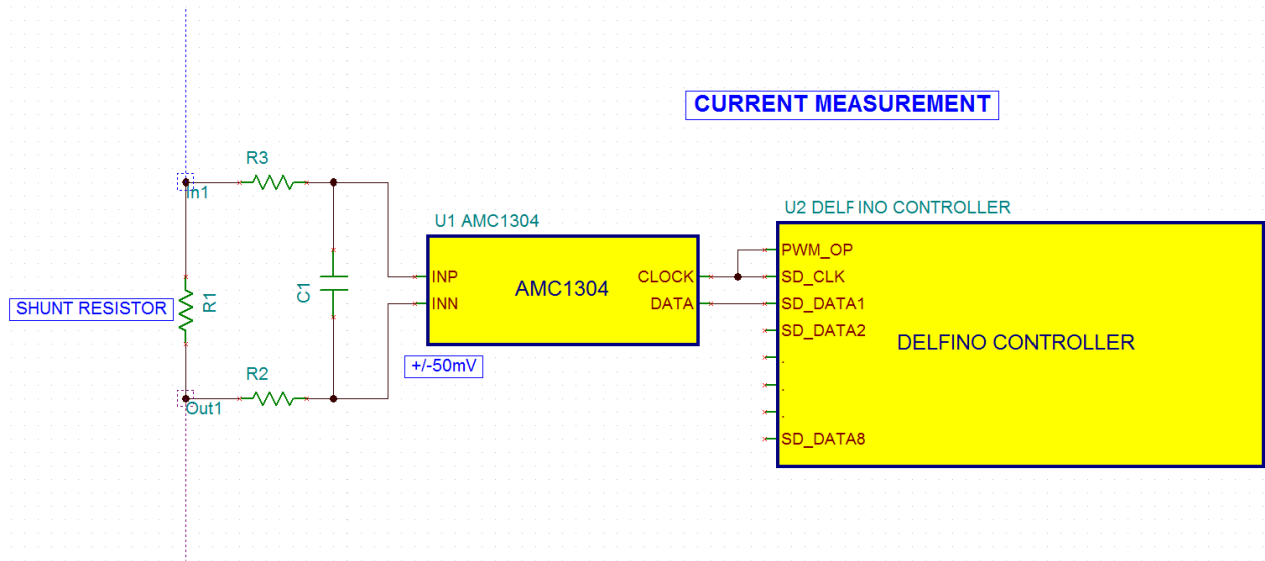


图 3. 采用 AMC130x 和 Delfino 控制器的电流测量方案

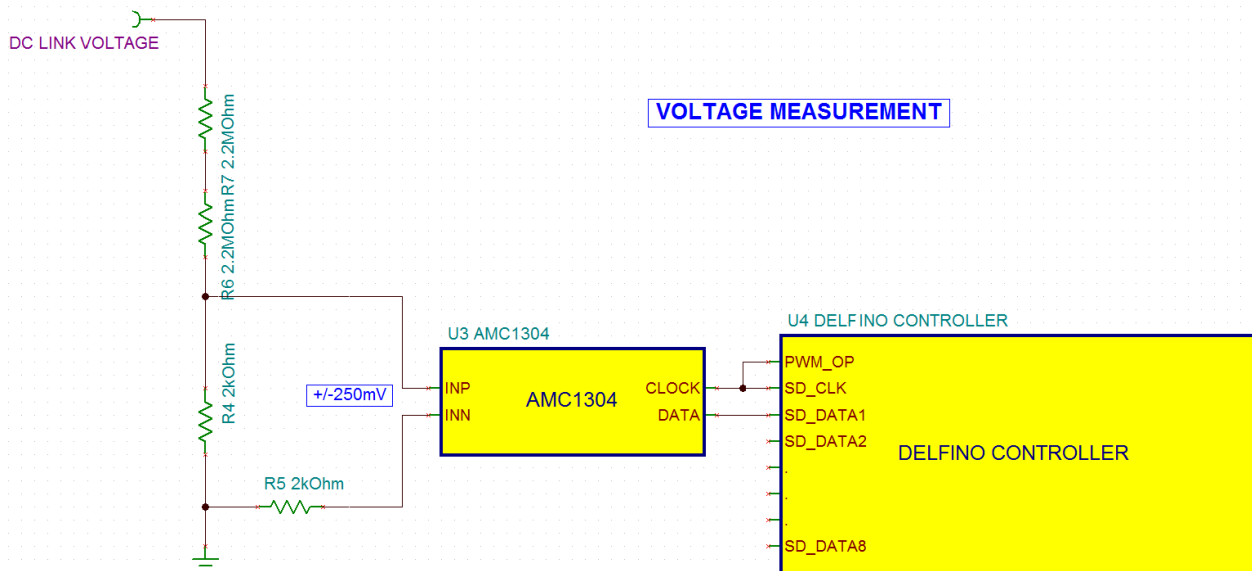


图 4. 采用 AMC130x 和 Delfino 控制器的电压测量方案

## 1.2 AMC130x $\Delta$ - $\Sigma$ 调制器

AMC130x 为单通道、二阶  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器系列，专用于中高分辨率的模数转换。调制器对模拟输入信号进行持续采样并将其与内部电压基准进行比较。转换器的隔离式输出 (DATA) 提供由数字 1 和 0 组成的比特流。此串行输出的平均时间与模拟输入电压成正比。

0V 差分输入信号在理想状态下会生成由 1 和 0 组成的比特流，且该比特流 50% 的时间处于高电平，50% 的时间处于低电平。1 与 0 之间的关系会随输入信号而有所变化。 $\pm 250\text{mV}$  部件的 250mV 正向输入电压（指定的满量程范围）可以产生高电平占 90% 的位流，而负满量程信号 ( $-250\text{mV}$ ) 产生的位流则只有 10% 的时间为高电平。这一指定的 FSR 也是调制器的线性范围，性能如本数据表中所述。

指定 FSR ( $\pm 250\text{mV}$  或  $\pm 50\text{mV}$ ) 与绝对 FSR ( $\pm 312.5\text{mV}$  或  $\pm 62.5\text{mV}$ ) 之间的范围为调制器的非线性范围。当输入小于或等于绝对 FSR 值的最小值时，调制器的输出削平为一连串只有零的位流；当输入大于或等于绝对 FSR 的正值时，调制器输出则为一连串只有一一的位流。图 6 给出了输入电压与输出调制器之间的关系。

AMC1304 器件的系统时钟经由 CLKIN 引脚从外部提供。数据在  $f_{\text{CLKIN}}$  频率下于 DATA 输出引脚同步提供。数据在 CLKIN 的下降沿发生变化。

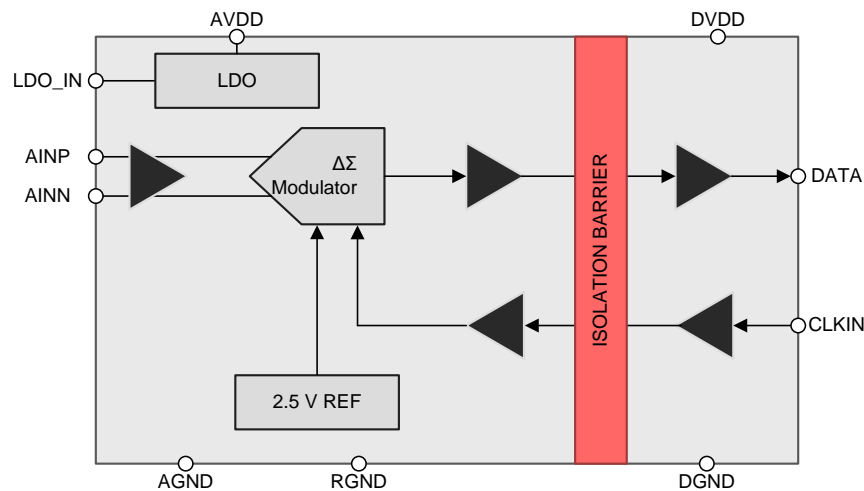


图 5. AMC1304 框图

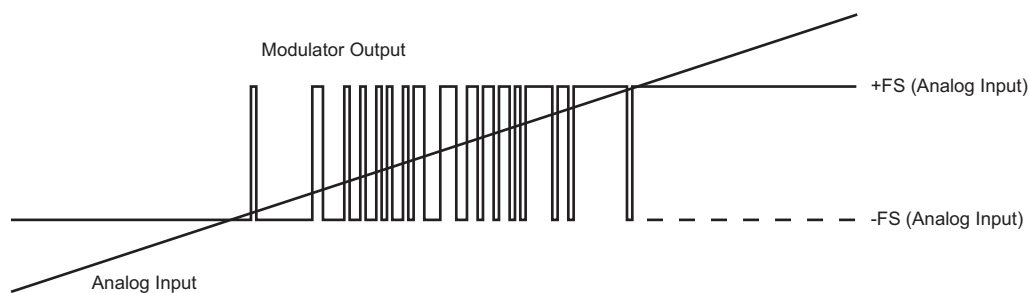


图 6. AMC130x 输入电压与输出的关系

使用 AMC130x 的益处：

- 电流隔离栅具有抗 EMI 干扰功能并提供稳定的隔离栅寿命
- 时钟范围广，可为客户提供灵活多变的采样率
- 输入电压范围更小，可增大分流

### 1.3 正弦 (CIC) 滤波器

级联积分梳状 (CIC) 滤波器是为速率滤波器，通常用于在数字系统中实现比较大的采样率变化。这类滤波器一般用于采样率巨大的应用中。即，系统采样率远大于所处理信号所占的带宽。CIC 滤波器实现方案的结构仅使用加法器、减法和延迟元件。这类结构要求 CIC 滤波器采用节省硬件的多速率滤波实现方案。

CIC 抽取滤波器由两部分组成：

1. 含 N 个积分器级且以采样率  $f_s$  处理输入数据样本的积分器部分
2. 以更低的采样率  $f_s / R$  工作的梳状部分

此梳状部分由 N 个梳状级组成，每级有 M 个样本差分延迟。下采样操作仅在每个第 R 次采样才将积分器部分的输出传递至滤波器的梳状部分，以此抽取积分器部分的输出。

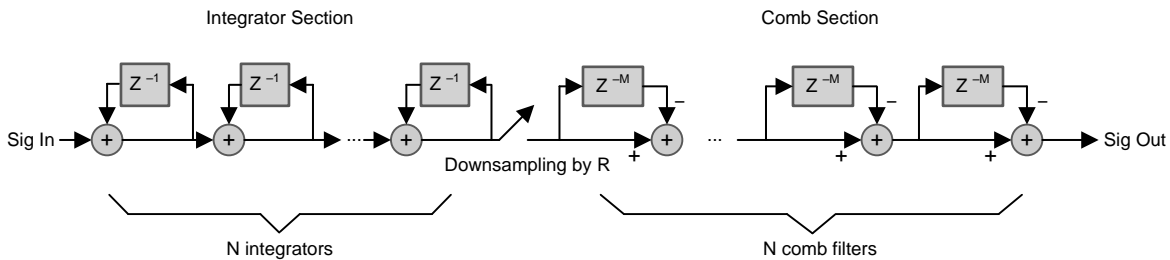


图 7. CIC 滤波器结构

#### 1.3.1 CIC 积分器级

单个 CIC 积分器级的方框图如图 8 所示。用于说明积分器级的差分方程式为：

$$y(n) = x(n) + y(n-1) \tag{1}$$

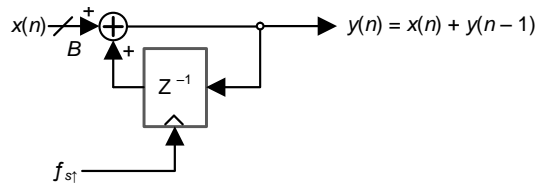


图 8. CIC 积分器部分

相应的 z 变换和传输函数可通过公式 2 计算。

$$Y(z) = X(z) + z^{-1} Y(z)$$

$$H_I(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$$

$$H_I(z) = \frac{1}{1-z^{-1}} \tag{2}$$

积分器第 N 个级联可通过公式 3 计算。

$$[H_I(z)]^N = \left[ \frac{1}{1-z^{-1}} \right]^N \tag{3}$$

### 1.3.2 CIC 梳状滤波器级

图 9 所示为梳状滤波器架构的一般形式，其中参数  $M$  用于指定可编程梳状滤波器的差分延迟。此结构产生的输出序列由公式 4 中的差值表示。

$$y(n) = x(n) - x(n - M) \quad (4)$$

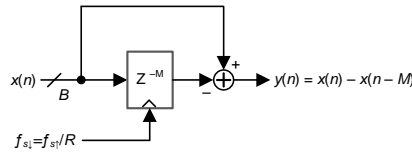


图 9. CIC 梳状滤波器部分

虽然  $M$  的取值可以为任意值，但将  $M$  限制为等于 1 或 2 可以获得最佳的 CIC 滤波器性能。

对方程式两边执行 Z 变换，可得公式 5。

$$Y(z) = (1 - z^{-M}) X(z) \quad (5)$$

将传输函数定义为公式 6。

$$H_C(z) = \frac{Y(z)}{X(z)}$$

$$H_C(z) = (1 - z^{-M}) \quad (6)$$

要获得用 Z 域表示的离散时间系统的频率响应，需要以  $Z = re^{j\omega}$  进行替换。

由于是对单位圆进行求值，幅值  $r$  等于单位一；因此， $Z = re^{j\omega}$ 。

将替换内容代入公式 6，可得公式 7。

$$H_C(z)|_{z=e^{j\omega}} = (1 - e^{-j\omega M}) = (1 - e^{-j2\pi M f_{\downarrow}}) \quad (7)$$

CIC 滤波器复合频率响应由梳状频率响应  $H_C(z)$  和积分器频率响应  $H_I(z)$  级联组成。对于单级滤波器，复合频率响应的计算式为  $H(z) = H_I(z)H_C(z)$ 。这两个频率响应分量中的每个分量均以不同的采样率进行工作。但在讨论 CIC 滤波器的复合频率响应时，应参考与积分器高采样率对应的梳状滤波器部分的频率响应。通过将高采样率频率代入公式 8，来推算出此高采样率参考值。

$$H_C(z)|_{z=e^{j\omega}} = (1 - e^{-j2\pi R M f_{\downarrow}}) \quad (8)$$

参考高采样率的梳状滤波器的相应 z 变换表示为公式 9。

$$H_C(z) = (1 - z^{-RM}) \quad (9)$$



### 1.3.3 CIC 滤波器

由于梳状部分和积分器部分相互级联，因此复合 CIC 滤波器的  $z$  变换表示为公式 10。

$$H(z) = [H_C(z)]^N [H_I(z)]^N = \left[ \frac{(1-z^{-RM})}{(1-z^{-1})} \right]^N \quad (10)$$

在  $z$  平面的单位圆中对公式 10 进行求值，具体方法是将复合变量  $z$  替换为复合指数  $Z = e^{j\omega}$ ，如公式 11 所示。

$$H_C(z) \Big|_{z=e^{j\omega}} = H(e^{j\omega}) = \left[ \frac{1-e^{-j\omega RM}}{1-e^{-j\omega}} \right]^N \quad (11)$$

对于差分延迟为 1 的三阶 CIC 滤波器 ( $N = 3, M = 1$ )，公式 11 可表示为公式 12。

$$H(e^{j\omega}) = \left[ \frac{1-e^{-j\omega R}}{1-e^{-j\omega}} \right]^3 \quad (12)$$

在  $\text{Sinc}^3$  滤波器响应中，第一个陷波位置出现在输出数据速率频率  $f_{\text{DATA}} = f_{\text{CLK}} / R$  处。 $-3\text{dB}$  点位于  $f_{\text{DATA}} / 4$  处。

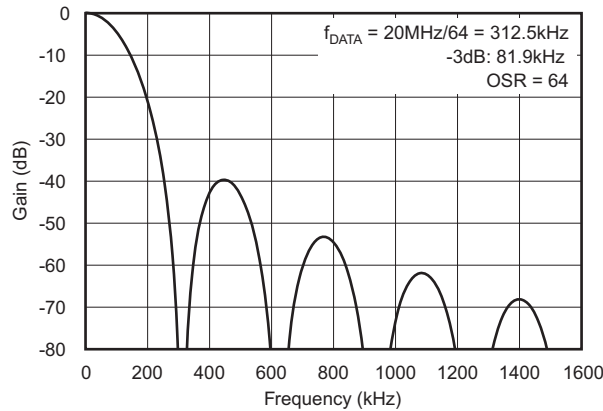


图 10.  $\text{Sinc}^3$  滤波器幅值与频率响应

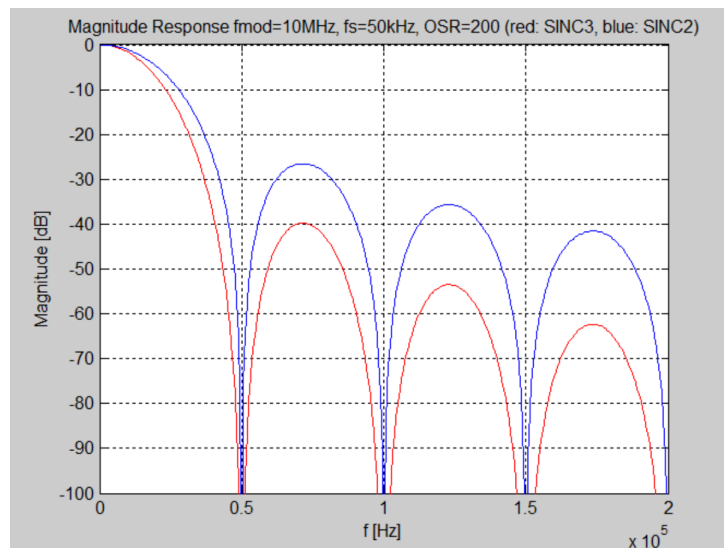


图 11.  $\text{Sinc}^2$  与  $\text{Sinc}^3$  滤波器幅值与频率响应对比

经验法则是指调制器时钟（或采样频率  $f_s$ ）、输出数据速率（或第一陷波频率）与抽取率  $R$  之间的关系，计算式如下：

- 数据速率 =  $F_s / R$
- Sinc<sup>3</sup> 滤波器 -3dB 响应点为数据速率的 0.262 倍
- 对于三阶正弦滤波器，阶跃函数响应需要三个时钟周期

采用 Sinc<sup>3</sup> 抽取滤波器架构时，输出信号更新速率取决于调制器时钟频率和抽取率。如果使用 20MHz 的调制器且抽取率为 256，则每 12.8 $\mu$ s 会更新一次当前信号。对于基于载波的 PWM 控制方案而言，只要此转换延迟远小于 PWM 子周期时间的持续时间 ( $TPWM / 2$ )，此延迟便可接受。对于 16kHz PWM 频率，此配置可提供四个现有样本。

如图 12 所示，TI 调制器 AMC1304 会提供 128 的过采样率 (OSR) 和 14 位精度 Sinc<sup>3</sup> 滤波器结果。OSR 降至 64 会使精度下降两位，即变为 12 位。将 OSR 增大到 256 不会明显提高精度，但会延长转换稳定时间。

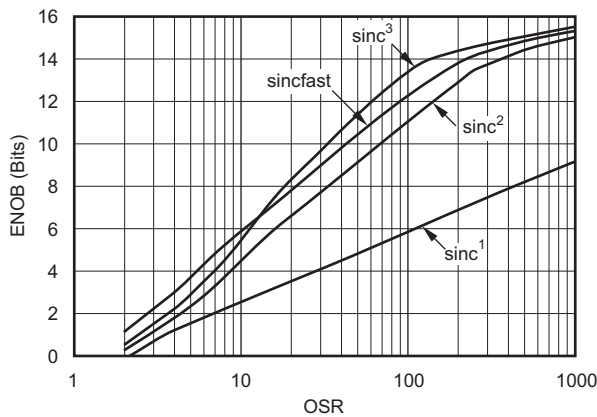


图 12. 测得的有效位数与过采样率的关系

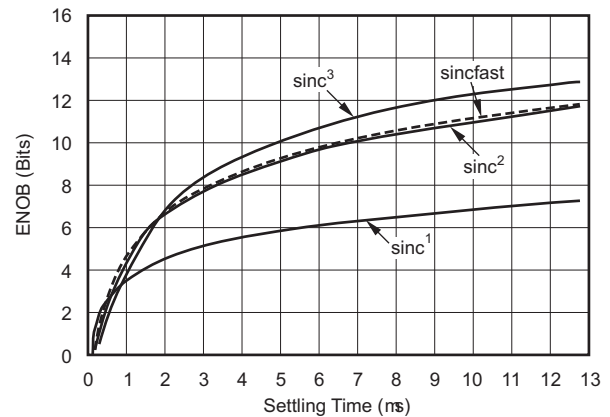


图 13. 测得的有效位数与稳定时间的关系

## 2 设计特性

下表为隔离式电流分流和电压测量套件参考设计的设计规格：

**表 1. TIDA-00171 设计规格**

参数	规格与特性
测量参数	三相电机电流 三相逆变器电压 直流链路电压 (共七条通道)
电流	7 A <sub>RMS</sub>
电压	对于直流链路测量为 550V DC 对于逆变器电压测量为 390V AC
测量精度, 后置校准	±0.2%, 温度范围: -25°C 至 75°C
分辨率	16 位
模块校准	AMC 偏移和增益校准
电源范围	18V DC 至 32V DC
隔离	增强型, IEC60747-5-2
ESD 抗扰度	<b>IEC 61000-4-2:</b> ±4kV 接触放电 ±8kV 空气放电
EFT 抗扰度	<b>IEC 61000-4-4:</b> 5kHz 时在 U、V、W 上为 ±4kV
浪涌瞬态抗扰度	<b>IEC 61000-4-5:</b> 在 U、V、W 输入上为 ±4kV CM、DM
工作温度范围	-25°C 至 75°C
模块	Δ-Σ 模块、滤波器模块板、Delfino 控制卡 这三个电路板都通过适当的板对板连接器集成。

### 3 系统配置和方框图

将电流和电压测量系统的实现方案拆分为三个电路板以实现模块化。

1. 滤波器模块板（即 FMB）包含电源、用于 Delfino 控制卡安装槽、数模转换器 (DAC)、PLL 和 Sallen-Key 滤波器。
  - 24V 输入转换为电路运行所需的 5V 和 3.3V。
  - 锁相环 (PLL) 生成  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器所需的时钟
  - DAC 输出测得的电流和电压
  - 配备的 Sallen-Key 滤波器会将  $\Delta$ - $\Sigma$  的一位数据流重新转换为模拟域
2.  $\Delta$ - $\Sigma$  调制器（即 DSM）包含用于电流和电压感测的整个信号链。此电路板有三条用于电机电流感测的通道，三条用于逆变器电压感测的通道和一条用于测量直流链路电压的通道。每条通道都配有 ESD 保护二极管和低通 RC 滤波器。经过滤波的信号由 AMC130xM05（最大输入  $\pm 50\text{mV}$ ）或 AMC130xM25（最大输入  $\pm 250\text{mV}$ ）转换为一位调制流。此位流随后由 Delfino 控制卡 C2000 处理器中的正弦滤波器进行解调。
3. Delfino 控制卡包含 Delfino 微控制器及相关外设。控制卡通过 USB 与 PC 相连，以进行编程和调试。这三个 PCB 通过隔离式电流分流和电压测量套中的板对板连接器进行集成，如图 14 所示。

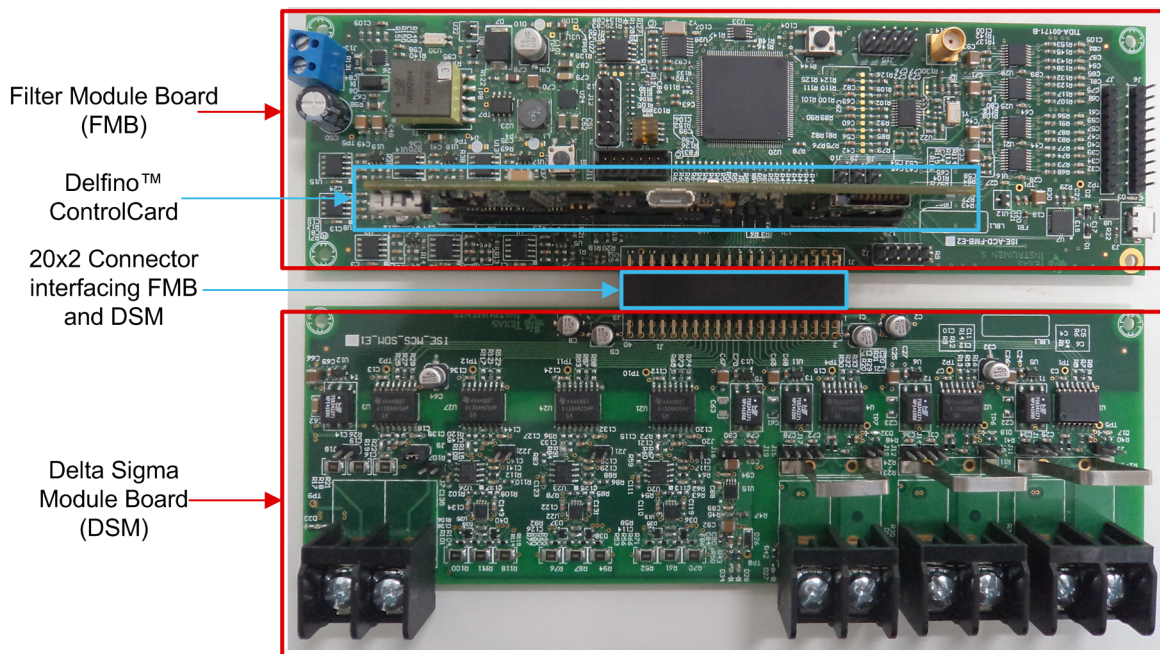


图 14. 隔离式电流和电压测量套件图片

### 3.1 DSM 电路板

DSM 电路板的高级方框图，如图 15 所示。

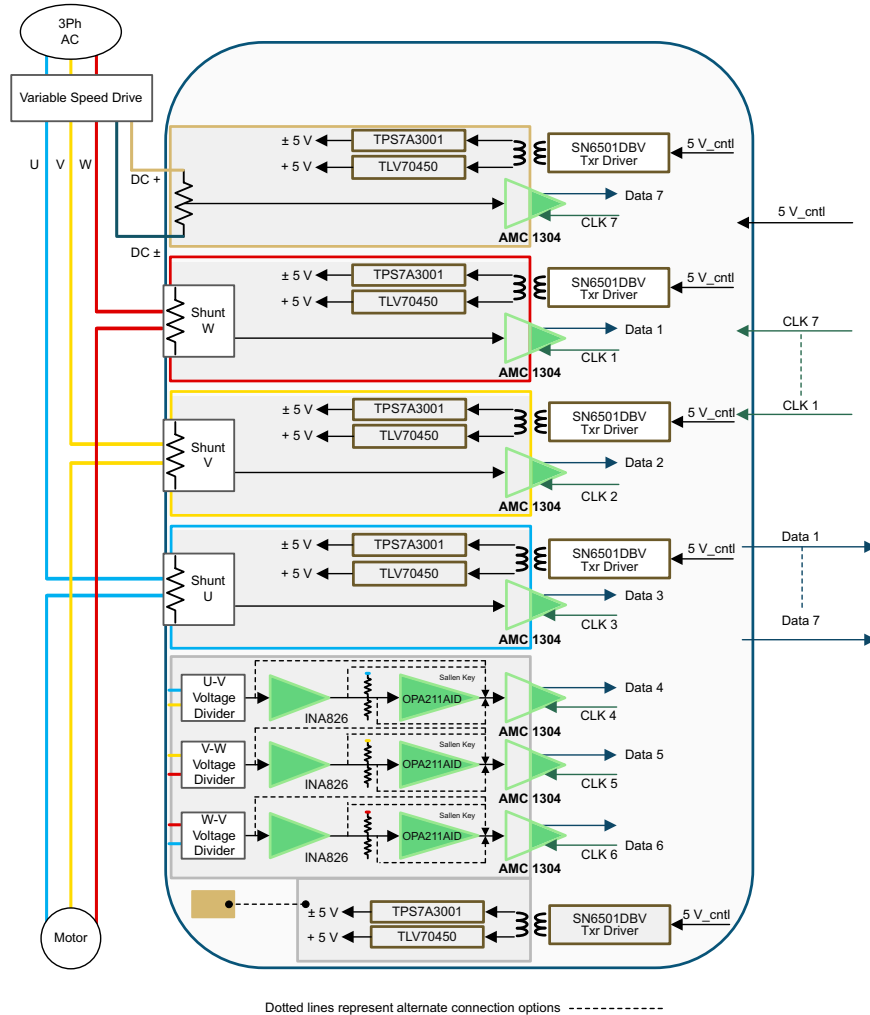


图 15. DSM 方框图

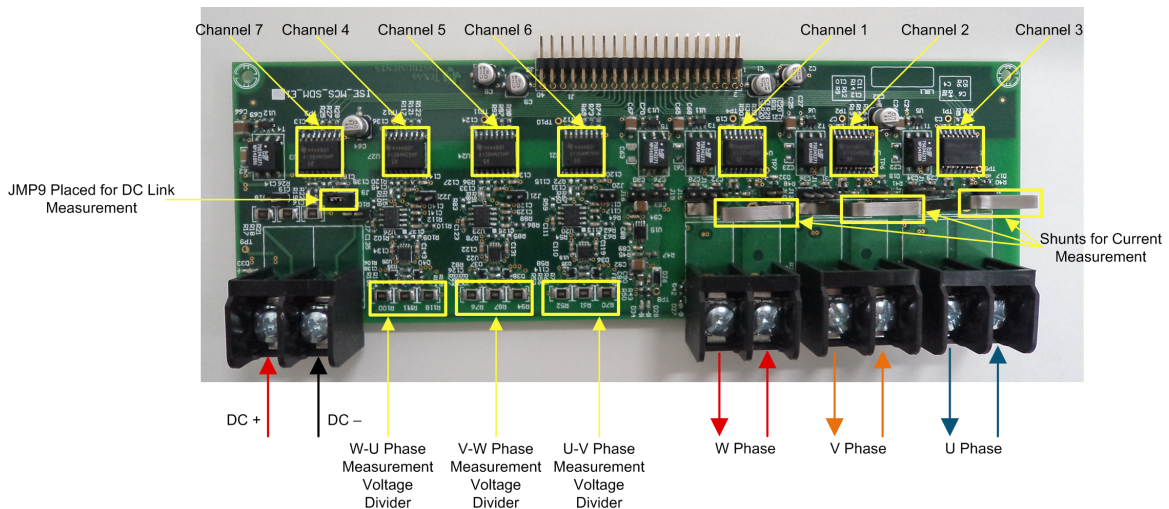


图 16. DSM 电路板

DSM 电路板具有以下特性:

1. **隔离电源:** 如图 15 所示, 五个隔离式直流电源为 AMC1304 器件高侧供电。三条电流通道分别配有独立的隔离式 5V 到 5V DC 转换器。还可以选择使用栅极驱动电源为 AMC130x 器件供电。交流电压测量通道都配有通用的隔离式 5V DC。直流链路电压测量通道具有自己的隔离式 5V DC 电源。
  2. **逆变器测量:** 交流电机由 3 相逆变器驱动。逆变器电压和电机电流通过隔离型  $\Delta$ - $\Sigma$  转换器 AMC130xM25 和 AMC130xM05 进行测量。调制器的七个 AMC130x 隔离式数字输出 (DOUT) 转换器均提供由数字 1 和 0 组成的数据流, 数据流与通过 CLKIN 引脚提供的频率范围为 5MHz 至 20.1MHz 的时钟源同步。此串行位流输出的平均时间与模拟输入电压成正比。
    - **逆变器电压测量:** U、V 和 W 线路中的 PWM 输出电压通过电阻分压器按比例降低, 然后进行滤波从而削弱噪声。可以选择包括或旁路附加 Sallen-Key 滤波功能。将滤波后的输出提供给三个 AMC1304M25 器件。Sallen-Key 滤波器将削弱 20Khz 以上的频率。此器件可测量高达  $\pm 250\text{mV}$  的电压, 相当于  $389\text{V}_{\text{RMS}}$  的相间交流电压。对于更宽的测量范围, 需要相应地修改分压电路。
    - **电机电流测量:** 流经电机绕组的电流根据  $5\text{m}\Omega$  分流电阻两端的电压进行测量。此电压由 AMC1304M05 进行测量。此器件可测量高达  $\pm 50\text{mV}$  的电压, 对应于高达  $7\text{A}_{\text{RMS}}$  的交流电流。对于更宽的测量范围, 必须相应地减小分流电阻。
- 注: 分流电阻的精度与 PCB 布局是影响整体测量精度的关键因素。对于高精度系统, 使用四线制接线的分流电阻。
3. **连接器:** DSM 电路板配有连接器, 用于连接 FMB 电路板以及驱动器和电机。跳线可以实现一些特定的可选功能。表 2 重点列出了连接器的布局。

表 2. DSM 电路板上的连接器

DSM 电路板上的连接器	功能	连接器类型
J1	连接 DSM 与 FMB	2x20 引脚, 直角, 插座, 板对板
J2, J4, J8	U、V、W 输入或输出	4x1, 引脚块, 2.54mm 间距
J6	直流链路输入	4x1, 引脚块, 2.54mm 间距
J3, J5, J9, J10, J20, J21, J22	将 AMC1304 的 AVDD 引脚连接至外部 AVDD (栅极驱动电源) 的跳线	2 引脚, 插头
J11, J12, J13, J14, J15, J16, J17, J18, J19	为相应低压降稳压器 (LDO) 使能或禁用隔离式 $\pm 5\text{V}$ 的跳线	2 引脚, 插头

### 3.2 滤波器模块电路板

FMB 的高级方框图如图 17 和图 18 显示。

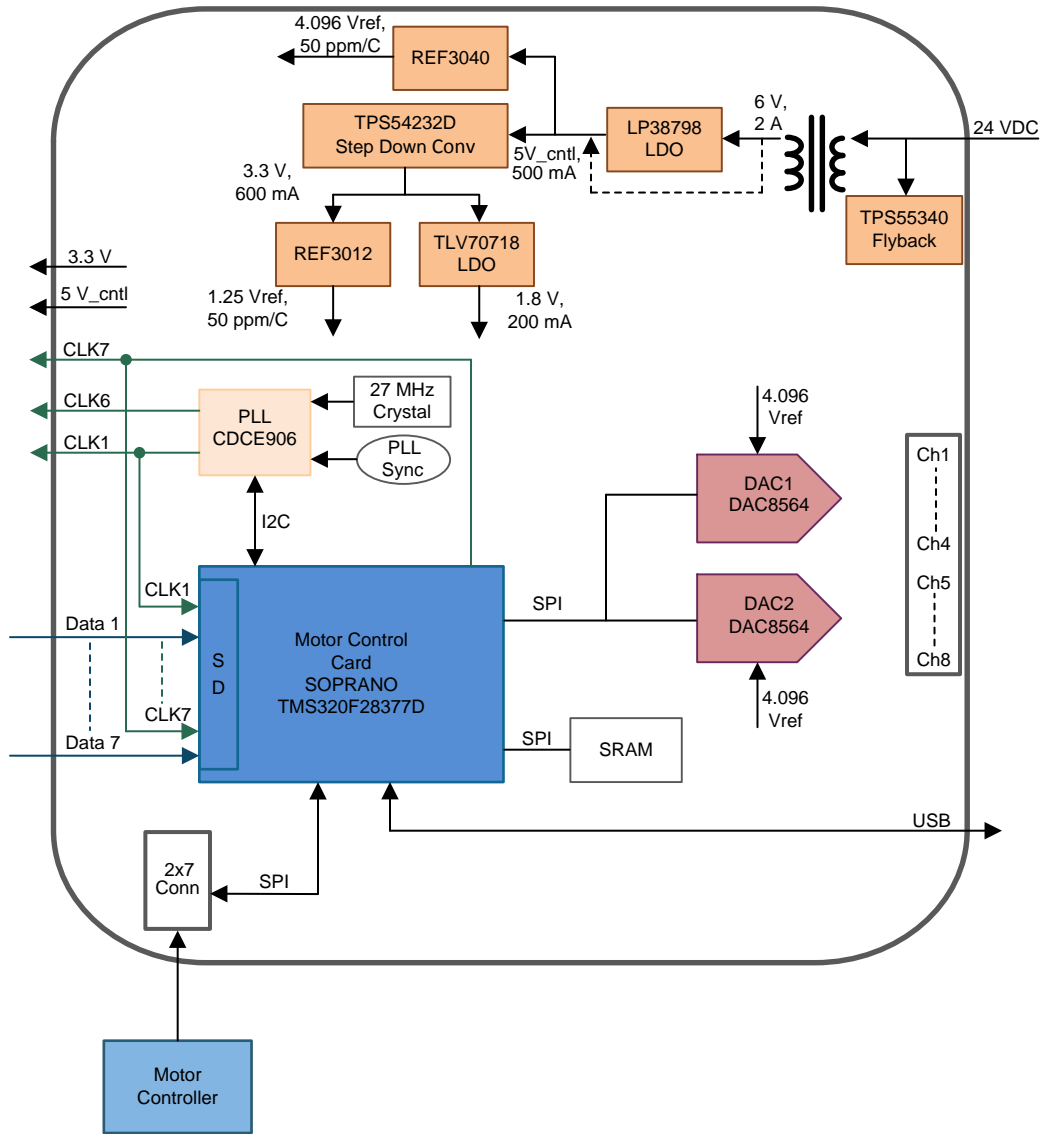


图 17. FMB 子系统方框图

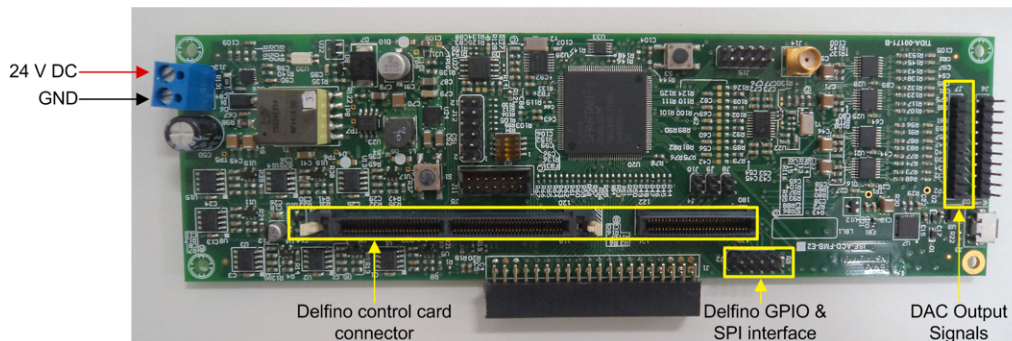


图 18. FMB

子系统 PCBA 包含以下模块：

- **电源：**将 24V DC 转换为 6V 的隔离型 DC-DC 转换器，采用 TI TOS55340 器件，基于反激式拓扑 5V、3.3V 和模拟参考电压等其它电压通过 TI TPS54232（降压转换器）、TLV70718 (LDO)、REF3040、REF3012 和可选的 LP38798 (LDO) 生成。本设计具备足够的缓冲器，客户可以加载和添加更多功能，而无需更改电源 IC。

每个电源轨的预估功耗如表 3 所示。

表 3. 电源轨的预估功耗

负载或电源轨	5V	3.3V	1.2V REF	4.096V REF
FMB 上的 AMC1304	100mA	不适用	不适用	不适用
控制卡	200mA	不适用	不适用	不适用
时钟 CDCE906	不适用	125mA	不适用	不适用
FMB 上的 DAC	50mA	不适用	不适用	最大 25mA, 75PPM/C
放大器或滤波器	5mA	不适用	最大 25mA, 75PPM/C	不可用
进一步扩展	150mA	375mA	不适用	不适用
总计	500mA	600mA	最大 50μA, 50PPM/C	最大 50μA, 50PPM/C

- **时钟：**DSM 电路板上的调制器需要高达 20MHz 的时钟来生成高达 16 位精确测量的同步位流。FMB 通过 PLL 合成器 CDCE906 生成时钟。CDCE906 器件既可以从本机晶体获得高精度时钟输入，也可以通过 SMA 连接器 (J14) 从外部时钟源获得高精度时钟输入。CDCE906 的输出为 Delfino 控制器以及  $\Delta\Sigma$  调制器提供时钟。PLL 的六个时钟输出供六个调制器用于测量电机电流和逆变器电压。第七个调制器（直流链路测量）使用 Delfino 控制器生成的时钟。
- **DAC：**测得的输入电压和电流可通过两个 16 位四通道电压输出 DAC DAC8564 器件同时显示。
- **放大器和 Sallen-Key 滤波器：**这些滤波器作为选件提供，用于将调制器数字流重新转换成模拟信号，进而可以在经由 SAR ADC 处理后用于电机控制回路。
- **连接器：**FMB 配有连接 DSM 电路板、控制卡、时钟输入、JTAG 和 DAC 的连接器接口。表 4 重点列出了连接器的功能。

表 4. FMB 上的连接器

FMB 上的连接器	功能	连接器类型
J1	连接 FMB 与 DSM	2x20 引脚，直角，插头，板对板
J2, J15	SPI 接口	2x5 引脚，插座
J3	USB（当前未使用）	USB 微型 AB
J4	连接 FMB 与控制卡	60 引脚，高速边缘插接
J5	连接 FMB 与控制卡	120 引脚，高速边缘插接
J8、J9、J10	控制器 GPIO	2x5 引脚，插座
J13	24V DC 输入	2 引脚
J14	外部时钟输入	SMA 插座



### 3.3 Delfino 控制卡

TI 的 Delfino F28377D controlCARD (TMDSCNCD28377D) 提供了一种学习和尝试 F2837x 器件系列以及 TI C2000 系列微控制器 (MCU) 的极佳方法。此 180 引脚控制卡采用稳固的设计, 滤波效果良好, 能够用于大多数工业环境中。

### 3.4 F28377D controlCARD 特性

- **Delfino F28377D MCU** - 控制卡上的高性能 C2000 微控制器
- **180 引脚 HSEC8 边缘插接接口** - 可与所有的 C2000 180 引脚控制卡应用套件和控制卡兼容。利用 TMD SADAP180TO100 适配器卡与 100 引脚控制卡实现兼容 (单独销售)。
- **内置隔离 JTAG 仿真** - 通过 XDS100v2 仿真器提供的接口轻松连接 Code Composer Studio™, 而不需要使用额外的硬件。只需切换开关即可改为使用外部 JTAG 仿真器。
- **连接** - 控制卡包含各种连接器, 用户在使用 F2837x MCU 器件时, 可以借助连接器尝试使用 USB、microSD 卡和隔离式 UART/SCI。
- **关键信号分接头** - 大多数 GPIO、ADC 及其它关键信号都连接到硬件连接器金手指。
- **稳固的电源滤波** - 需要一个 5V 输入电源, 卡上 3.3V LDO。所有 MCU 输入随后通过器件附近的 LC 滤波器去耦合。
- **ADC 钳位** - ADC 输入由保护二极管进行钳位。
- **抗混叠滤波器** - 可以在多个 ADC 输入引脚上轻松添加噪声滤波器 (小型 RC 滤波器)。

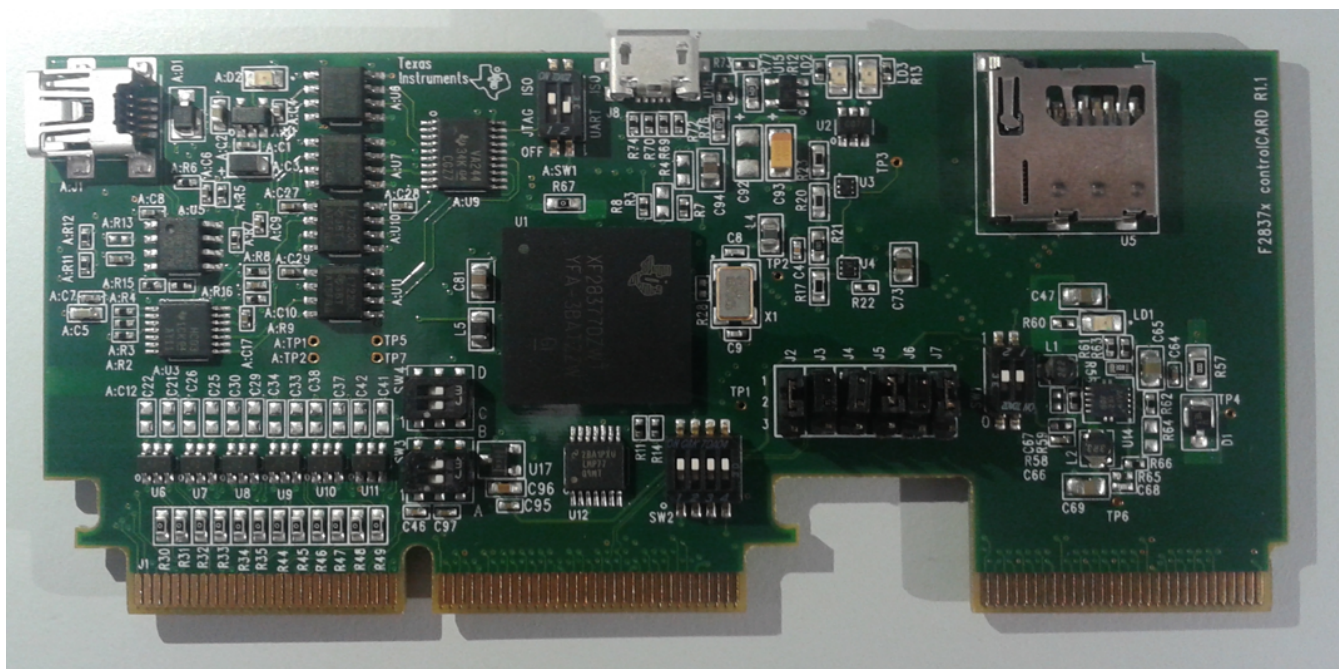


图 19. Delfino 控制卡

## 4 电路设计和组件选择

隔离式电流和电压测量套件采用模块化方式设计，可以大大提高客户对交流电机驱动系统中 AMC130x 进行评估的灵活性。本节将介绍本设计中的各个子系统模块。

### 4.1 DSM

DSM 由信号调节电路、调制器和隔离电源组成。该电路板的输入为电机端电压和相应的电机绕组电流。AMC1304 会将这些输入转换为位流。然后，将位流发送至 Delfino 控制卡，由该卡对位流进行解调和滤波从而获取数据。

#### 4.1.1 AMC1304

AMC1304 系列为高精度 DSM，输出与输入电路通过高磁场抗扰度的电容式隔离栅进行隔离。根据 UL1577 与 IEC60747-5-5 标准，该隔离栅认证可提供高达  $7000 V_{Peak}$  的增强型隔离。当与隔离电源配合使用时，该器件可防止共模高电压线路上的噪声电流进入本地接地并干扰或损坏敏感电路。

AMC1304 输入针对直接连接至分流电阻器或其它低电压等级信号源进行了优化。器件具有独特的低输入电压范围，既可通过分流大幅降低功耗，又能提供出色的交流和直流性能。

简化的电路原理图如图 20 所示。

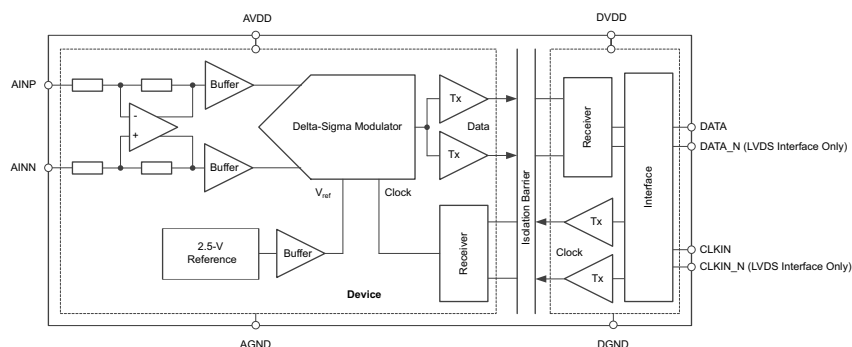


图 20. AMC1304 引脚分配

AMC1304 器件包含一个前端电路，其中配有差分放大器与采样级，之后是 DSM。

模拟输入信号  $V_{INP}$  和  $V_{INN}$  受到以下两种限制：

1. 如果输入电压超出  $-6V_{AGND}$  至  $0.3V_{AVDD}$  这一范围，输入电流必须限制为  $10mA$ ，原因是转换器前端的输入保护二极管开始导通。
2. 只有在 AMC1304M25 或 AMC1304M05 的差分模拟输入电压分别保持在  $\pm 250mV$  或  $\pm 50mV$  以内时，才能保证器件的线性特征和噪声性能。

对于衍生器件，若指定输入电压范围为  $\pm 250mV$  (AMC1304M25)，则差分放大器级会将差分输入信号  $V_{IN} = (V_{INP} - V_{INN})$  放大四倍，若输入电压范围为  $\pm 50mV$  (AMC1304M05)，则会放大 20 倍。

在本参考设计中，AMC1304M05 用于测量分流电流，而 AMC1304M25 用于测量电压。

AMC1304M05 的差分输入阻抗为  $5k\Omega$ ，而 AMC1304M25 的差分输入阻抗为  $25k\Omega$ 。设计中采用高输入阻抗信号源时，需考虑输入阻抗。这类高阻抗可能会降低增益（可通过系统级校准降低），线性和 THD 性能。

### 4.1.1.1 AMC1304M25 用于电流测量 - 信号链设计

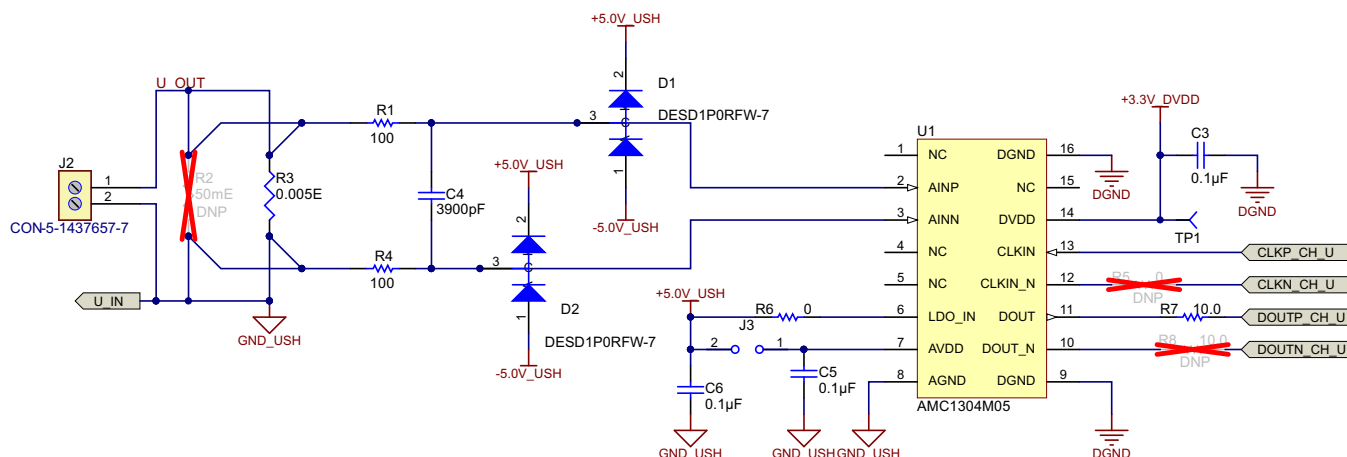


图 21. AMC1304 直流接口

分流电阻值根据驱动要求进行选择。假设采用 0.55kw/3Ø-230V 驱动，其连续输出电流为 3.5A。通常，该驱动能够提供 200% 的短时间过载，这需要测量高达 7 A<sub>RMS</sub> 的电流。对于 AMC1304 50mV 部件，分流电阻值可通过公式 13 进行计算。

$$R_s = \frac{50\text{mV}}{7 \times 1.414} = 5\text{m}\Omega \quad (13)$$

选择分流电阻时需要考虑的其它指标包括：

- 电阻具备足够的功率额定值 [在本示例中，选择 0.25W(7<sup>2</sup>\*0.005)]
- 电阻由于自发热导致的标称电阻值变化较小
- 电阻电感低、容差性能 (<1%) 良好且温度系数低
- 双引脚电流感测电阻用于低成本应用
- 四引脚电流感测电阻用于高精度应用

选择的分流电阻为 5mΩ，5W，1%。

此电路板上提供的分流电阻支持高达 10W 的功率，这有助于按比例调节测得的电流。

RC 滤波器会实现所需的低通滤波以提高 SNR。TVS 二极管 DESD1P0RFW-7 通常会将瞬态脉冲钳位在 4V。该电压对于 AMC 的 AIN 和 AINN 引脚是安全的。

如果希望瞬态脉冲对 5.0V<sub>xx</sub> 和 -5.0V<sub>xx</sub> 电源轨没有影响或影响很小，则需要在相应层放置电容值足够大的去耦电容，用于提供或吸收二极管钳位操作引起的突发充电浪涌电流。

#### 4.1.1.2 AMC1304M25 用于直流链路电压测量 - 信号链设计

欠压检测、过压检测等多种功能都需要测量直流链路电压，以接通制动电阻并估算逆变器输出电压。假设采用 AMC1304 250mV 部件测量电压。

若采用 200V AC 至 240V AC 3 相输入驱动，直流链路电压可以高达 450V。直流链路电压还有 100V 的额外裕量，因此直流链路测量电路的电压应能够达到 550V DC。

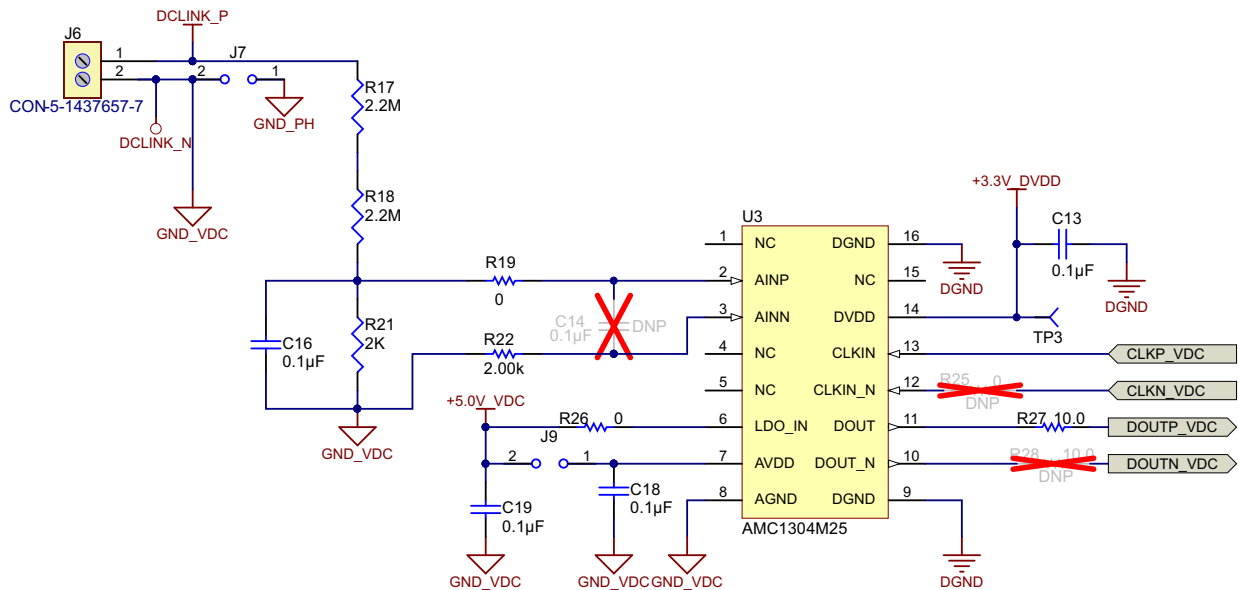
选择电阻分压器网络，以便将此 550V DC 降压至 250mV。假设图 22 中的 R21 = 2kΩ，分压器网络的电阻值可以通过公式 14 进行计算。

$$R = \left( \frac{V_{dc}}{250mV} - 1 \right) R_{21} \quad (14)$$

$$R = \left( \frac{550V}{250mV} - 1 \right) 2K\Omega = 4.4M\Omega \quad (15)$$

R17 和 R18 如图 22 所示。

将 4.4MΩ 电阻分为两个 2.2MΩ 的电阻，每个都可以承受高达 300V DC 的电压。



执行该测量时，需要断开跳线 (J7)。

图 22. 直流链路测量

AMC1304M25 已经过优化，可以与输入端阻抗极低的分流电阻配合使用。若使用的信号源输入阻抗较高且不匹配，将因输入电流而导致产生系统偏移和增益误差。

### AMC1304 偏置电流的影响

AMC1304 包含 PGA，用于放大输入电压并驱动调制器。输入偏置电流因采用阻性反馈网络（R1、R2；每个约 31.25 $\mu$ A）而从输入引脚流出，这会导致分流电阻两端出现偏移电压。偏置电流对电流测量的影响可以忽略不计，但会对电压测量产生明显影响，会产生偏移误差。在负向信号路径中添加阻值与 R21 相同的附加电阻（R22），可以补偿此偏置电流的影响。

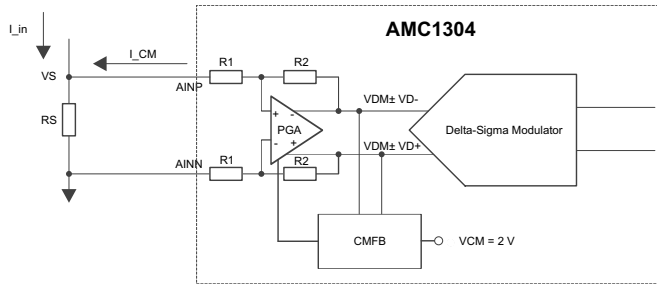


图 23. AMC1304 输入方框图

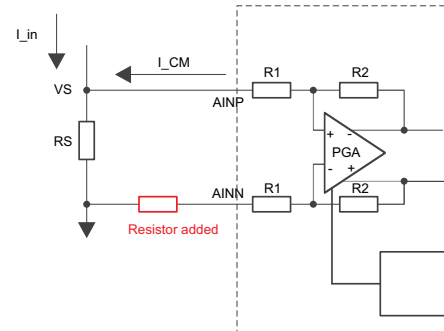


图 24. 因偏置电流所致的 AMC1304 输入偏移补偿电路

### AMC1304 输入阻抗的影响

AMC1304M25 输入前置放大器包含一个全差分运算放大器，它采用 50k $\Omega$  反馈电阻和 12.5k $\Omega$  输入电阻，因此反馈电阻共计 62.5k $\Omega$ 。由于此应用中差分放大器的负向输入经 2k $\Omega$  电阻接地，可知输入阻抗为 12.5k $\Omega$ 。12.5k $\Omega$  输入阻抗与 R21 并联，会形成增益误差，采用正确的电阻值 (2k $\Omega$  || 12.5k $\Omega$ ) 进行电压计算可以补偿该误差。

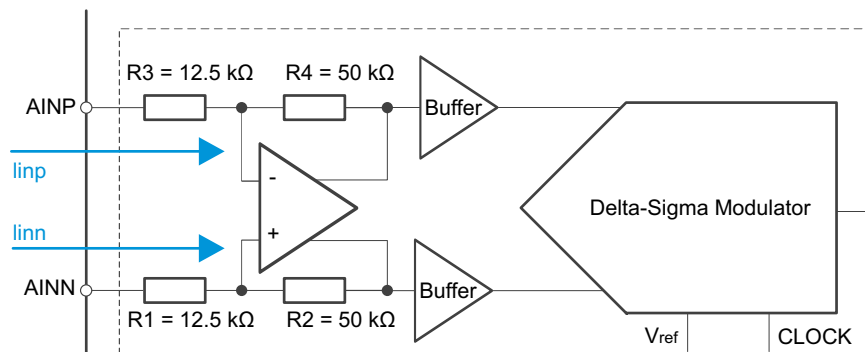


图 25. AMC1304 输入放大器

### 4.1.1.3 AMC1304M25 用于交流电压测量 - 信号链设计

AMC1304M25 器件用于测量交流电压。本参考设计用于测量相间电压或相对 DC\_MINUS 电压。

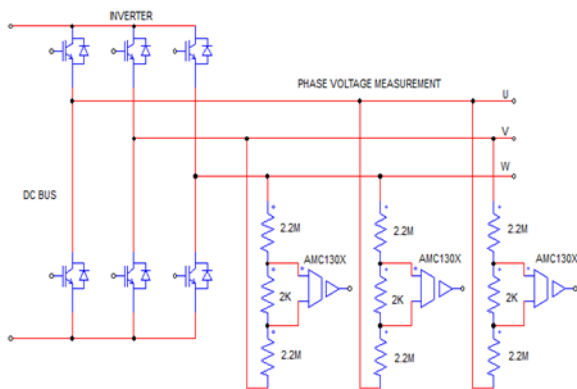


图 26. AMC1304 用于测量相间电压

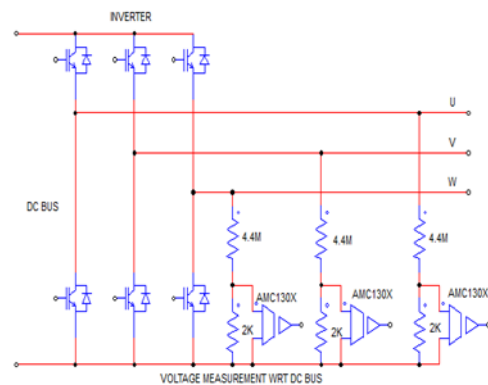


图 27. AMC1304 用于测量相对 DC\_MINUS 电压

电阻分压器网络将交流电压转换为最大值  $\pm 250\text{mV}$ （峰值）。本参考设计旨在测量高达  $390\text{V}_{\text{RMS}}$  的 RMS 电压。电阻分压器网络中的元件值以选定，以便将  $390\text{V}_{\text{RMS}}$  降至  $250\text{mV}$ （峰值）。

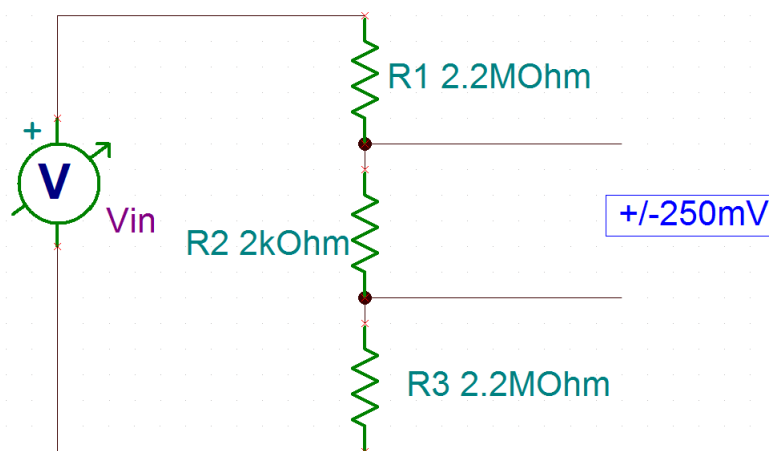


图 28. 相间电阻分压器

$$R2 \times \frac{V_{\text{IN}}}{R1 + R2 + R3} = 250\text{mV}$$

(16)

因此，所选的 R1、R2 和 R3 的值为

- R1 = R3 = 2.2MΩ
- R2 = 2kΩ

相间测量

可采用下列方式执行相间测量：

1. 直接测量：本参考设计的物料清单 (BOM) 在默认情况下已配置为直接测量差分相间电压。

表 5. 直接测量配置

可选元件	已连接
R57, R65, R81, R89, R105, R113	是
R67, R91, R107	否
R54, R78, R102	否
R63, R85, R109	否
R51, R75, R99	否
R59, R83, R107	否
R58, R82, R106	否

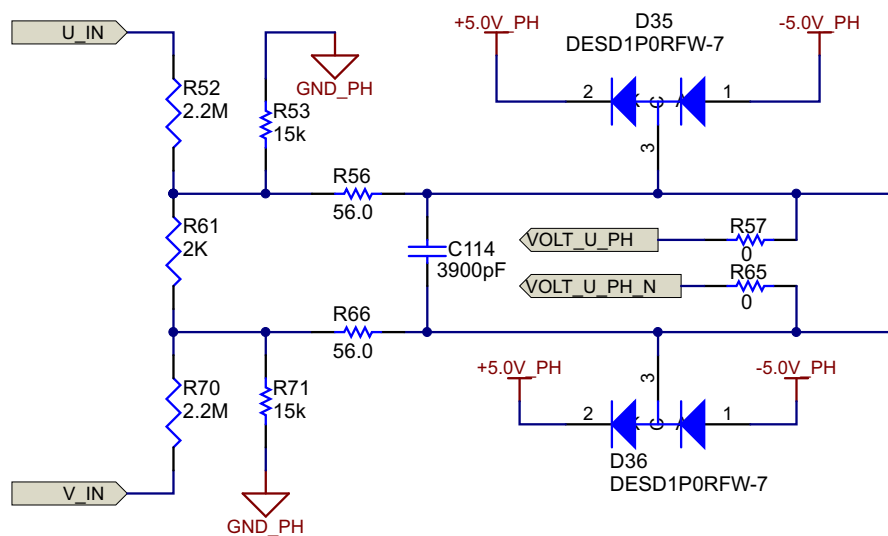


图 29. 直接测量相间交流电压

将电网电压  $VOLT_{x\_PH}$  和  $VOLT_{x\_PH\_N}$  直接连入 AMC1304M25 器件。AMC1304M25 的内部阻抗 (25k $\Omega$ ) 与 2k $\Omega$  电阻并联，计算换算系数时需要考虑这一点。

AMC1304 内部的 56 $\Omega$  和 25k $\Omega$  电阻以及 3.9nF 电容构成了一个带宽为 -3dB，频率为 22kHz 的低通滤波器。因此，将相应地削弱电机驱动器的 PWM 频率。根据 PWM 频率，可进一步调节此滤波器，从而提高所测电压的 SNR。

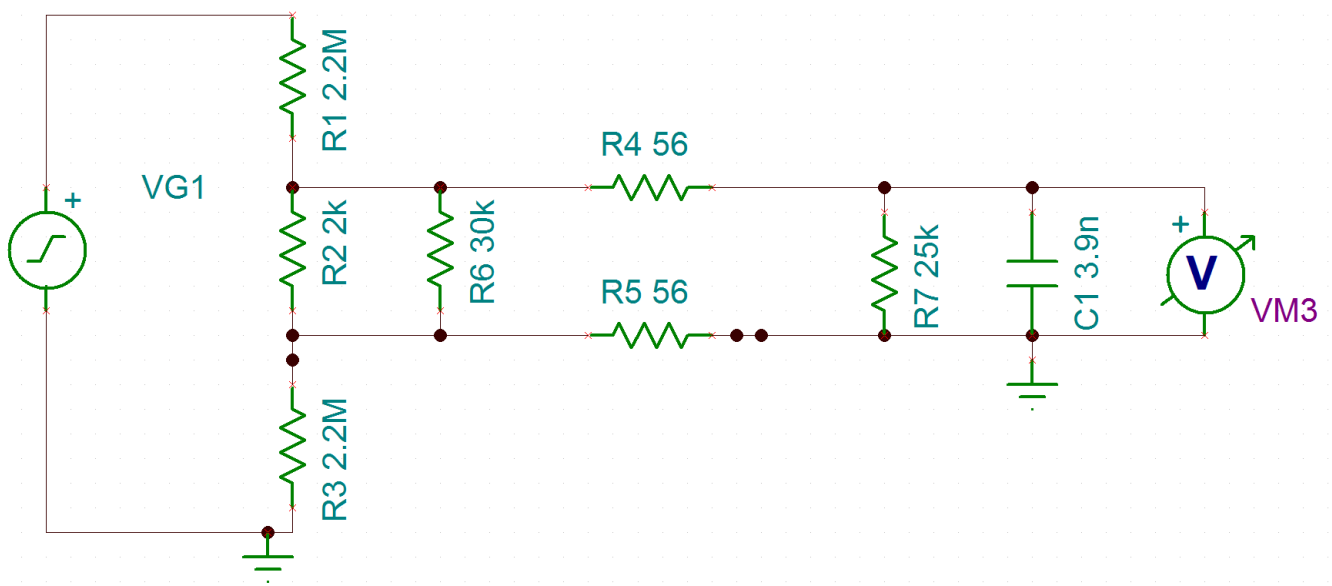


图 30. 直接测量滤波器仿真

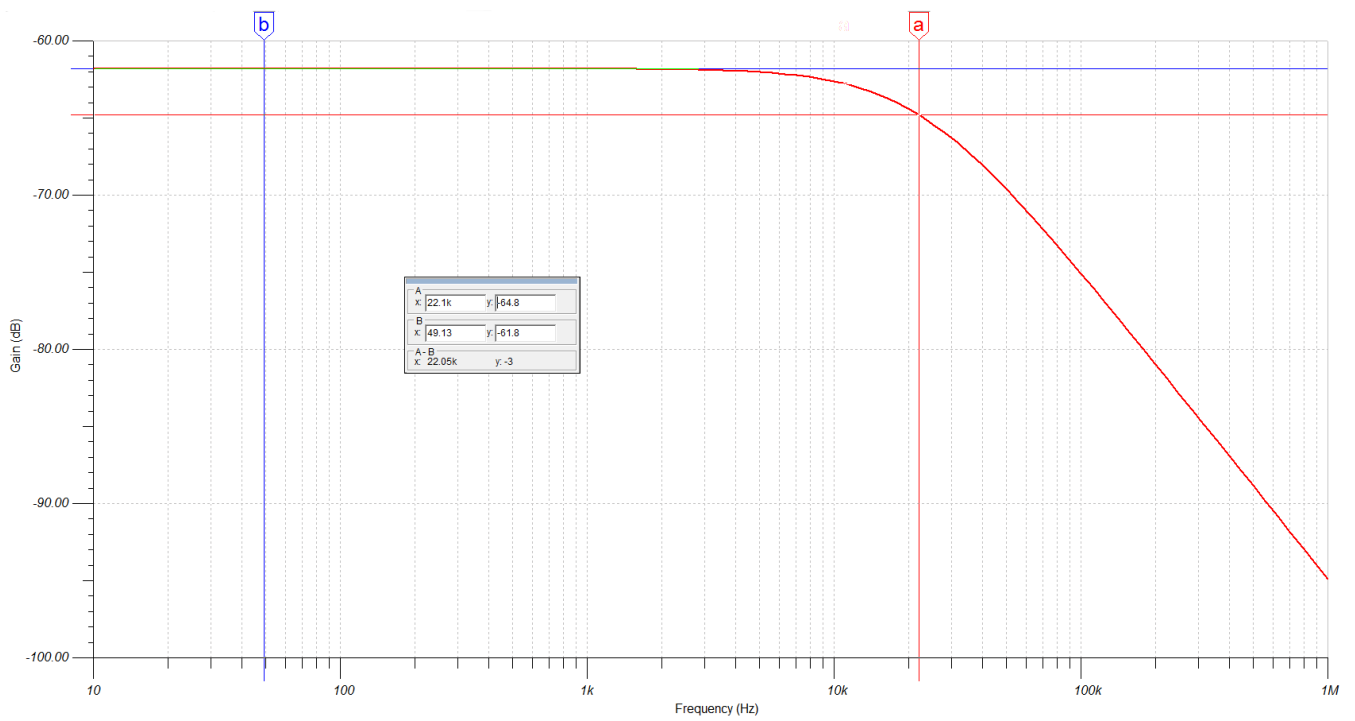


图 31. 仿真结果



2. **通过输入放大器进行测量：**电路板上的仪表放大器用于放大信号、向 **AMC130x** 提供低阻抗源，并可针对共模噪声提高共模抑制比 (**CMRR**)。在很多情况下，不需要仪表放大器，而将 **AMC130x** 直接连接到电阻分压器。

要配置使用仪表放大器的电路，请按表 6 调整相应元件：

表 6. 使用仪表放大器时对电路所做的调整

可选元件	已连接
R57, R65, R81, R89, R105, R113	否
R67, R91, R107	是
R54, R78, R102	是
R63, R85, R109	否
R51, R75, R99	否
R59, R83, R107	否
R58, R82, R106	否

3. **采用 Sallen-Key 滤波器测量：**在仪表放大器后添加 **Sallen-Key** 滤波器可以进一步提高 **SNR**。借助基于 **Sallen-Key** 的低通滤波器，将进一步削弱仪表放大器传递的 **PWM** 频率噪声。要实现此配置，需要调整以下元件：

表 7. Sallen-Key 测量时对元件所做的调整

可选元件	已连接
R57, R65, R81, R89, R105, R113	否
R67, R91, R107	是
R54, R78, R102	否
R63, R85, R109	是
R51, R75, R99	否
R59, R83, R107	是
R58, R82, R106	否

相对 C\_MINUS 测量

本参考设计还可以测量相对 C\_MINUS 电压。本参考设计旨在测量 390V RMS 电压。此配置中 AMC1304M25 的输入阻抗为 12.5kΩ，因此需要相应地计算换算系数。

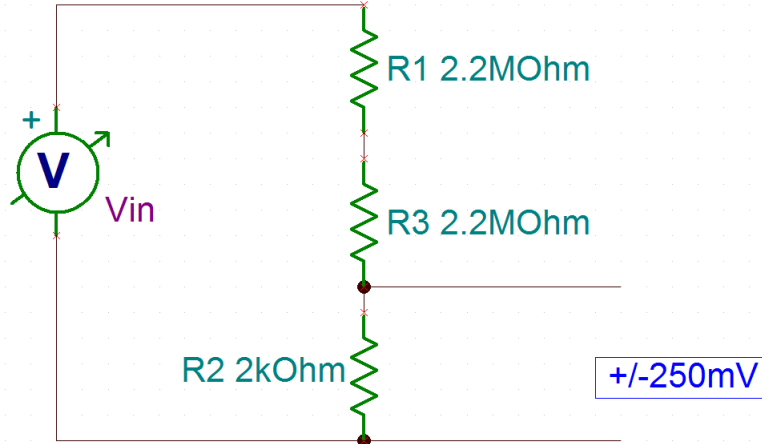


图 32. 相对 C\_MINUS 电阻分压器

$$R2 \times \frac{V_{IN}}{R1+R2+R3} = 250\text{mV} \tag{17}$$

要实现此配置，需要调整以下元件：

表 8. 使用相对 DC\_MINUS 电阻分压器时对元件所做的调整

可选元件	已连接
R57, R65, R81, R89, R105, R113	否
R67, R91, R107	是
R54, R78, R102	否
R63, R85, R109	否
R51, R75, R99	是
R59, R83, R107	是
R58, R82, R106	否

本电路板具备基于 Sallen-Key 的有源滤波器，可以将 20kHz 的 PWM 频率衰减 3dB 甚至更多。TINA-TI-V9 仿真中显示了衰减与频率的关系（图 33 和图 34）。

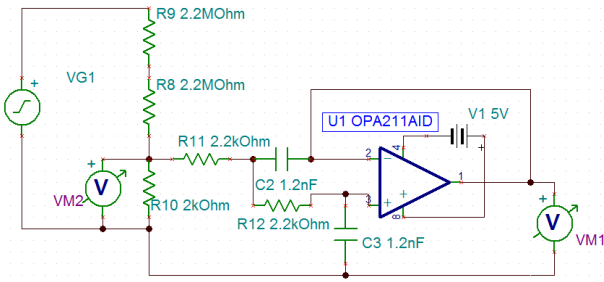


图 33. 相对 C\_MINUS Sallen-Key 仿真

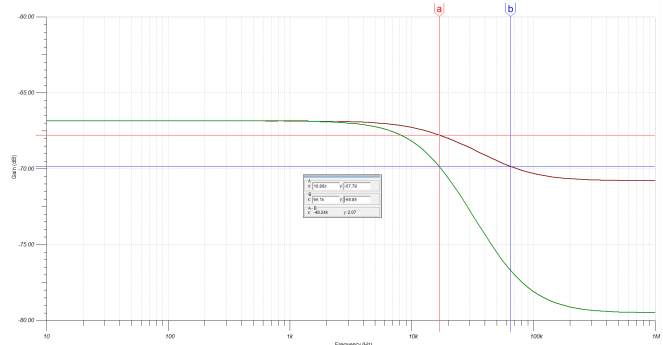


图 34. 仿真结果

注： 在设置此配置前需要连接跳线 J7。

#### 4.1.2 隔离式电源

AMC130x 采用增强型隔离。因此，需要隔离高侧 (AVDD) 和低侧 (DVDD) 部分电源。

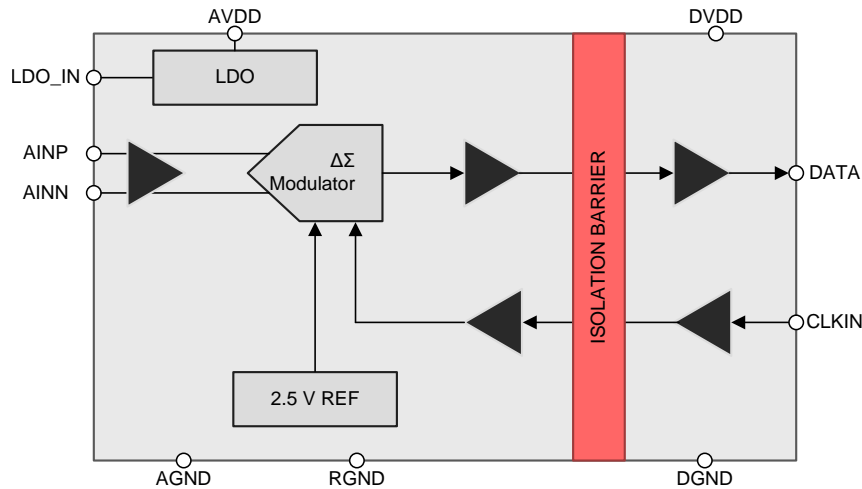


图 35. AMC1304 方框图

器件的 AVDD 由上方栅极驱动器的电源提供或或通过专用的增强隔离型电源提供。AMC1304 器件拥有内置 LDO，可以通过高达 18V 的栅极驱动电源直接供电。AMC1305 不具备内置 LDO，但可以使用简单的外部齐纳二极管或通过 LDO 来为其供电。

评估模块具有三条电流通道和四条电压通道。所有电流通道的电源彼此之间相互隔离。用于逆变器电压测量的电压通道共用一个电源，而直流链路电压测量部分则拥有自己的电源。SN6501 变压器驱动器用于生成隔离式电源。SN6501 会将控制电路板的 5V 输入转换为隔离式 6V 和 -6V 电压。

SN6501 是一款单片振荡器和电源驱动器，专门设计用于隔离接口应用中的小外形尺寸、隔离电源。SN6501 通过 5V 直流电源驱动薄型、中间抽头的变压器一次侧。本设计采用匝数比为 1:64:1 的变压器来获得 ±6V 电压。

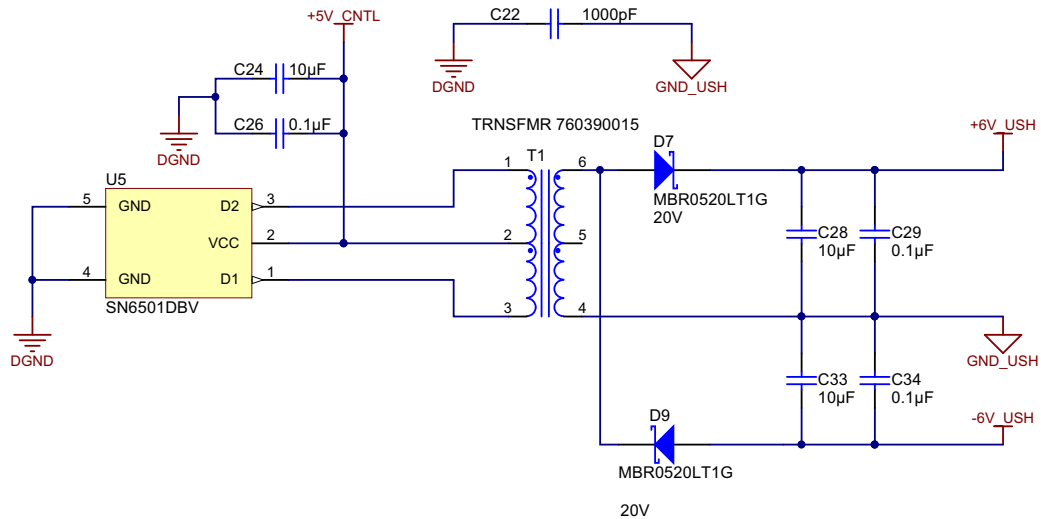


图 36. 基于 SN6501 的电源隔离

TLV70450DBV 是一款具备超低  $I_q$ 、高  $V_{IN}$  的低压降稳压器 (LDO)，用于将 6V 电压转换为调制器工作所需的 5V 电压。系统中采用栅极驱动电源经 J13 为此稳压器供电。

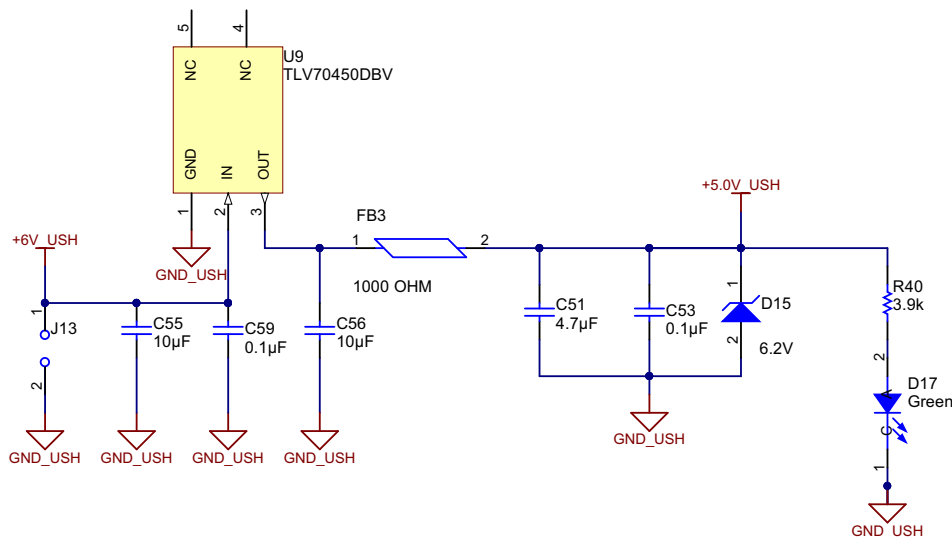


图 37. 5V LDO

TPS7A3001DGNR 是一款高压超低噪声线性负压稳压器，用于将 -6V 电压转换为 -5V。该电源仅用于提供保护，调制器的运行并不需要该电源。

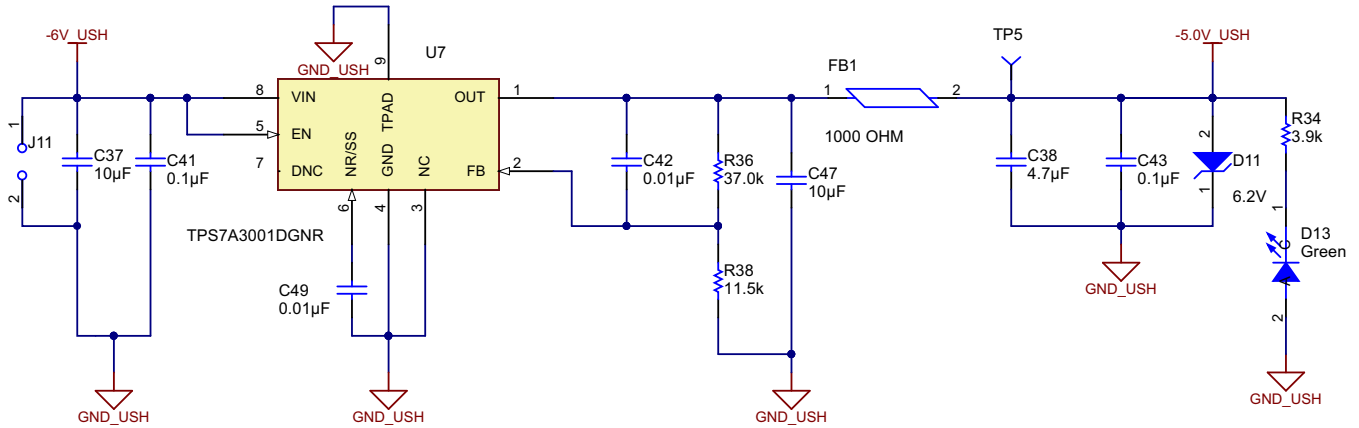
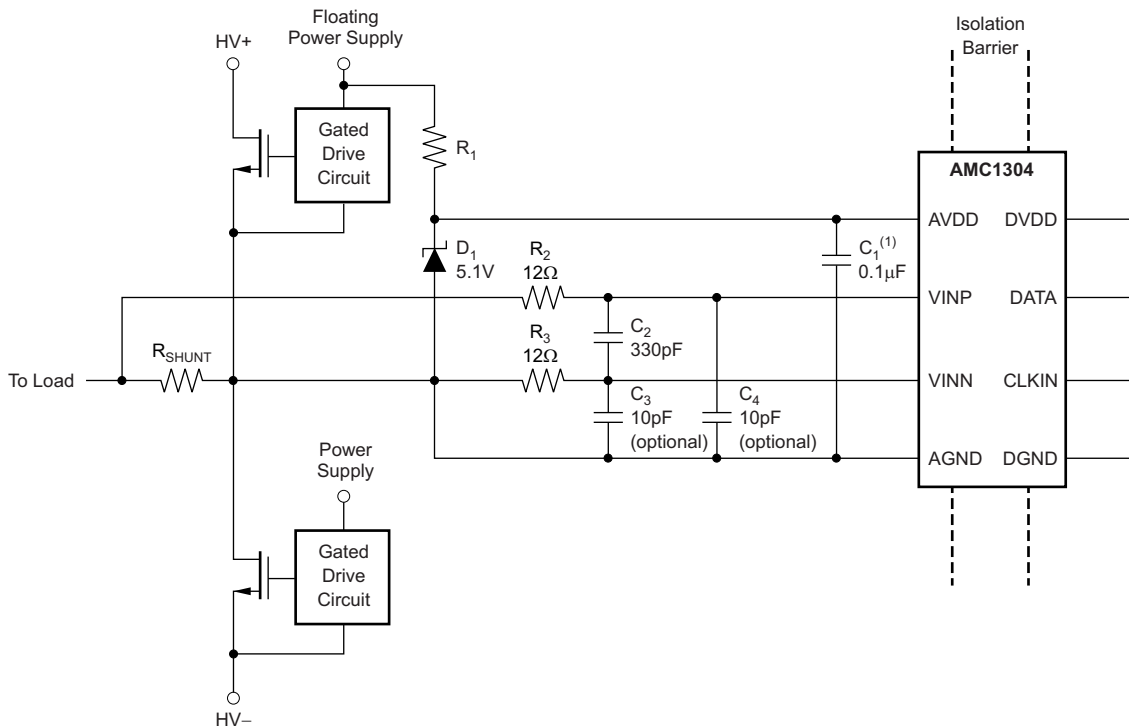


图 38. -5V LDO

为最大程度地降低成本，可以使用齐纳二极管将电压限制在  $5V \pm 10\%$  的范围内。使用  $0.1\mu F$  去耦电容对此电源路径进行滤波。此电容 (C1) 应尽可能靠近 AVDD 引脚放置，以获得最佳性能。如果需要更好的滤波效果，则可以额外使用  $1\mu F$  至  $10\mu F$  电容。浮动接地基准 (AGND) 由分流电阻端提供，且连接至器件的反向输入端 (VINN)。

图 39 给出了 AMC1304 从电源偏置为栅极驱动电源的电路图。应用中已经存在三个独立栅极驱动电源时，可以采用该方法。



(1) Place C<sub>1</sub> close to the AMC1304

图 39. AMC1304 偏置为栅极驱动电源

### 4.1.3 连接器

#### 4.1.3.1 输入引脚连接器

U、V、W 和直流链路接口的引脚连接器分别是 J2、J4、J8 和 J6。

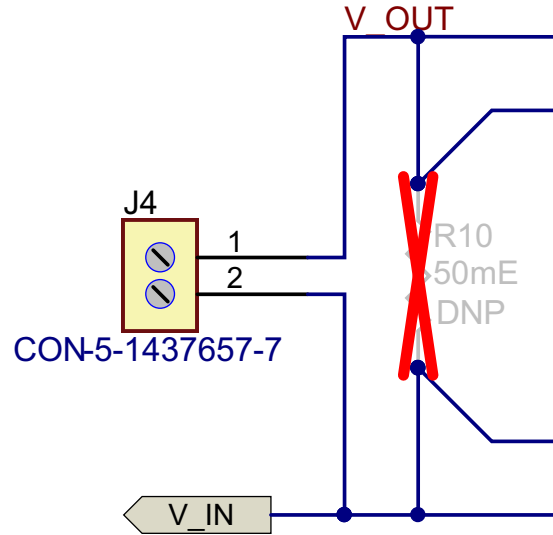


图 40. 引脚连接器

#### 电流测量连接

U、V 和 W 相应分别通过 J2、J4 和 J8 连接器连接至电机绕组。

#### 交流电压测量

- 相间测量：应按以下方式完成 3 相接线：
  - J2-2 用于 U 相回路。
  - J4-2 用于 V 相回路。
  - J8-2 用于 W 相回路。
- 相对 DC\_MINUS 测量：应按以下方式完成 3 相和 DC\_MINUS 接线：
  - J2-2 用于 U 相
  - J4-2 用于 V 相
  - J8-2 用于 W 相
  - J6-2 用于 DC\_MINUS

注： 在此配置中需要连接跳线 (J7)。

#### DC 电压测量

- 应按以下方式连接为逆变器提供的直流链路电压：
  - J6-1 用于直流链路
  - J6-2 用于 DC\_MINUS

注： 在此配置中需要断开跳线 (J7)。

### 4.1.3.2 板对板连接器

40 引脚接口连接器由以下各部分组成：

- 所有七个调制器的差分或单端时钟
- 七个调制器的差分或单端 DOUT 信号
- 供七个调制器数字侧正常工作的 3.3 V 电压
- 为实现隔离调制器工作和保护而生成隔离 5V 和 -5V 的 5V 电压

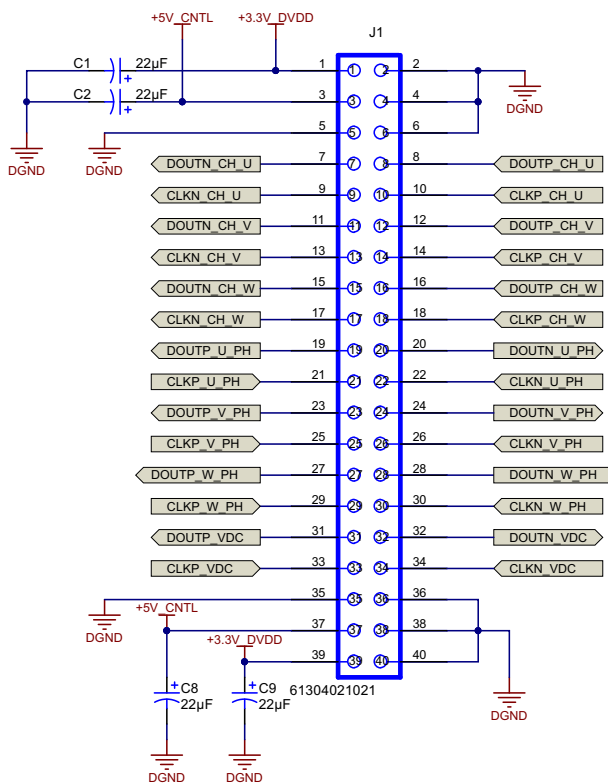


图 41. 板对板连接器

## 4.2 FMB

FMB 用作基板，用于放置 Delfino 控制卡与电源电路。

### 4.2.1 输入极性保护

隔离式电流分流和电压测量套件的直流输入受到保护，可以免受因任何意外错误接线而造成的损坏。二极管 (D23) 用于提供这种极性保护，其峰值电流可达 4A。由于输入电容接近 125µF，浪涌电流在最初的几毫秒内可能非常高，只受到 24V DC 总线和电源阻抗的限制。

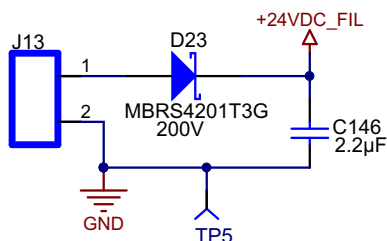


图 42. 输入极性保护

## 4.2.2 24V DC 至 6V DC 反激转换器

在实际工业条件下，24V DC 的变化可以高达  $\pm 20\%$ ，所以选择 TPS55340 器件作为本参考设计的 DC-DC 转换器 IC，该器件的最大连续输入电压为 32V。开关频率在外部设置为标称 350kHz。TPS54232 封装内部采用了 40V、5A 低侧 MOSFET 以及栅极驱动器电路。MOSFET 的漏源电阻阻值较低，可支持 TPS55340 高效运行。补偿元件位于集成电路外部。

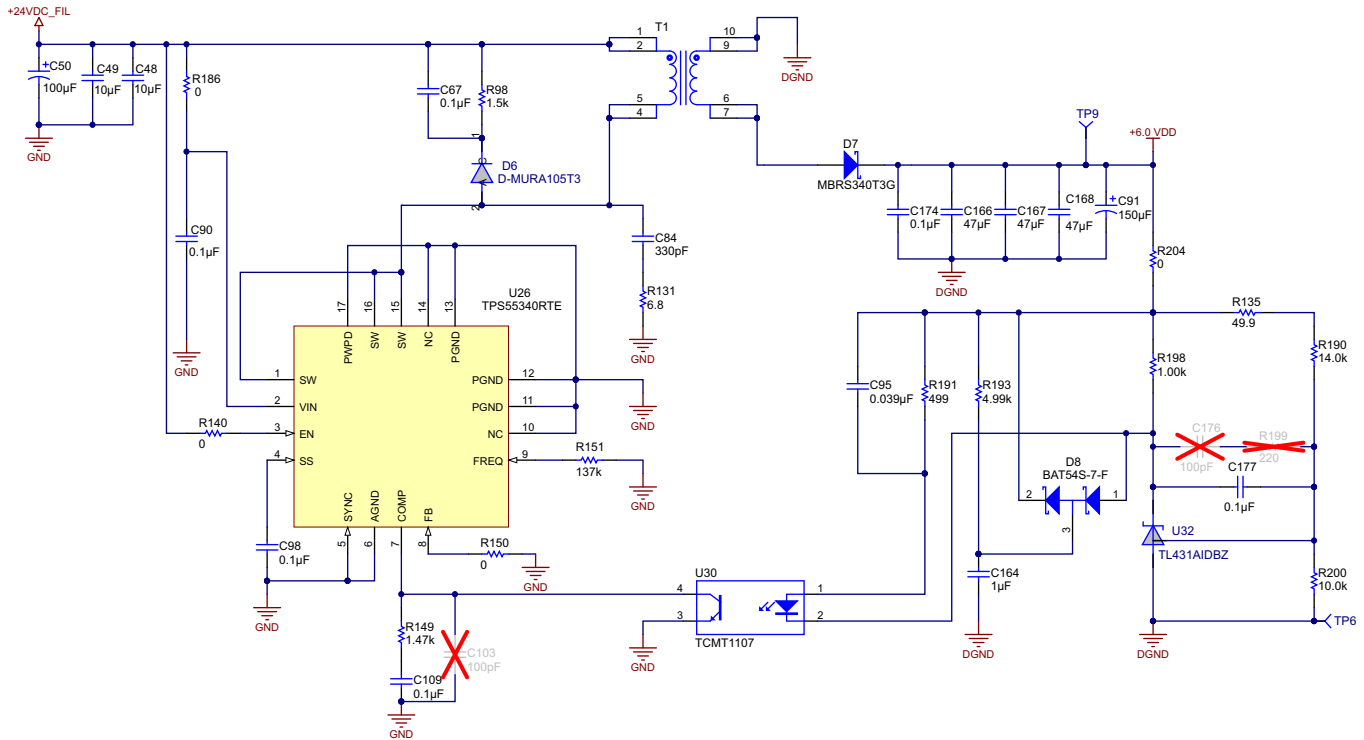


图 43. 24V DC 至 6V DC 反激转换器

### 输出电压选择

所需的输出电压为 6V。因此，使用 TL431 且  $V_{ref}$  为 2.495V 时，分别将 R190 和 R200 选定为 14k $\Omega$  和 10k $\Omega$ 。

$$R190 = R200 \times \left( \frac{V_{out}}{V_{ref}} \right) - 1$$

其中

- $V_{out} = 6V$
- $V_{ref} = 2.495V$

(18)

### 设置开关频率

必须针对所需的开关频率计算 R151 的电阻值。

$$R_{FREQ}(k\Omega) = 57500 \times f_{sw}(kHz) - 1.03$$

其中

- $f_{sw} = 350kHz$

因此，

- $R151 = 137k\Omega$

(19)



效率

本设计的效率在负载电流大约为 1.5A，输入为 24V 时达到最高，随着负载电流向满负载增大而降低。图 44 所示为一般情况下的效率，图 45 所示为进行半对数调节后的轻负载效率。

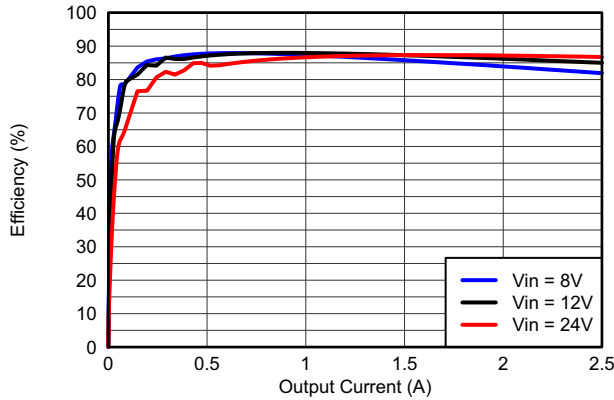


图 44. 效率

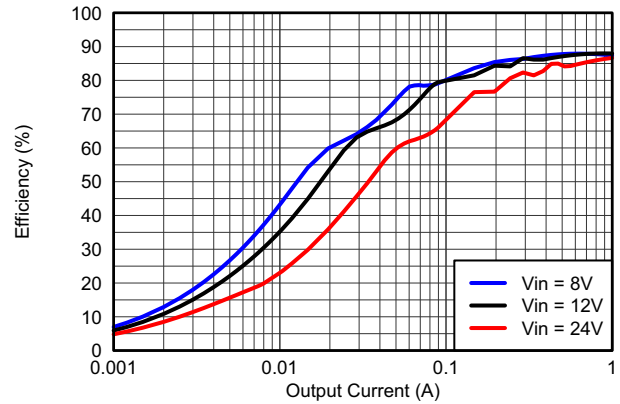


图 45. 轻负载效率

4.2.3 6V 至 3.3V 开关稳压器

3.3V 电压由基于 TPS54232 器件的降压转换器生成。PLL 合成器 CDCE906 器件需要此 3.3V 电压。进一步而言，还可以选择扩展至 385mA。当用户希望连接另一个在 3.3V 下工作的主机控制器时，该选项非常有用。

开关频率在内部设置为 1000kHz 标称频率。TPS54232 封装内部采用了高端 MOSFET 以及栅极驱动器电路。MOSFET 的漏源电阻阻值较低，可支持 TPS54232 高效运行，并在输出电流较高的情况下帮助保持低结温。补偿元件位于集成电路 (IC) 外部，而外部分压器能够实现可调节的输出电压。此外，TPS54232 还提供可调节慢启动和欠压锁定输入。

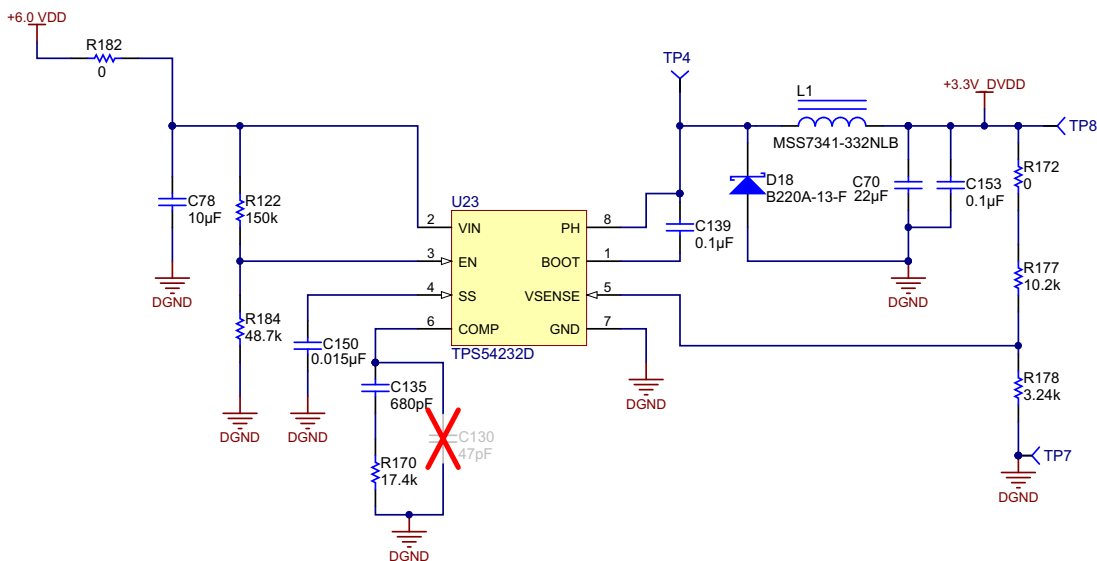


图 46. 6V 至 3.3V 降压转换器

## 4.2.4 基准电压

$V_{ref}$  电压作为作为一个稳定的无噪声电压基准提供给模拟电路。

### 4.2.4.1 1.2 $V_{ref}$

1.2  $V_{ref}$  用于为基于运算放大器的滤波器电路提供稳定的基准电压，如图 46 所示。REF3012 是一款采用小外形尺寸晶体管 (SOT23-3) 封装的精密低功耗低压降电压基准。其他重要规范包括：

- 高准确度：0.2%
- 低漂移：-75°C 至 125°C 时为 75PPM/C
- 高输出电流：25mA

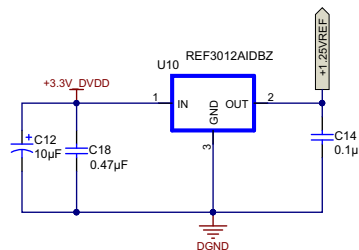


图 47. 1.2  $V_{ref}$

### 4.2.4.2 4.096 $V_{ref}$

4.096  $V_{ref}$  为 DAC8564 提供稳定的外部电压基准。此基准作为选项提供，在用户需要最大 4V 的 DAC 输出时使用。DAC8564 的内部  $V_{ref}$  为 2.5V；因此，激活内部  $V_{ref}$  后，最大 DAC 输出应为 2.5V。

REF3040 是一款采用小外形尺寸晶体管 (SOT23-3) 封装的精密低压降电压基准。

其他重要规范包括：

- 高准确度：0.2%
- 低漂移：-75°C 至 125°C 时为 75PPM/C
- 高输出电流：25mA

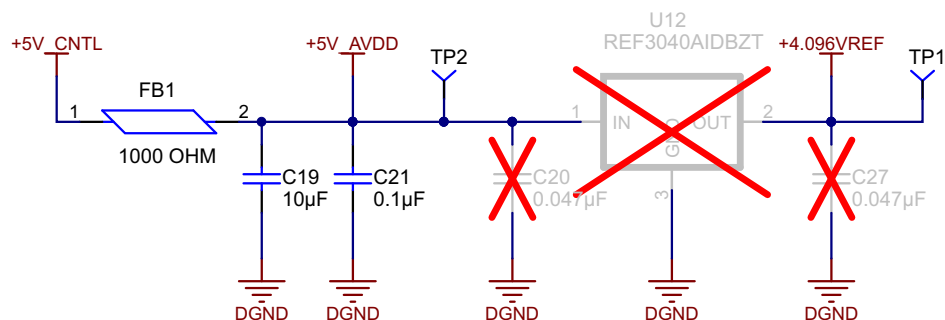


图 48. 4.096  $V_{ref}$

#### 4.2.5 基于 PLL 合成器 CDCE906 的可编程时钟

CDCE906 器件是当前市售的最为小型、但功能强大的 PLL 合成器/乘法器/除法器之一。虽然物理外形较小，但 CDCE906 具有最高灵活性。该器件能够生成几乎独立于给定输入频率的输出频率。

输入频率可由 LVCMOS、差分输入时钟或单晶振提供。相应的输入波形可通过 SM 总线数据接口控制器来选择。

要实现独立的输出频率，每个 PLL 的基准分频器 (M) 和反馈分频器 (N) 可分别设置为 1 至 511 的值 (M 分频器) 以及 1 至 4095 的值 (N 分频器)。PLL-VCO (压控振荡器) 频率随后可从空闲的可编程输出开关矩阵输出到六个输出中的任意一个。开关矩阵针对每个输出配备一个额外的 7 位后分频器 (1 至 127) 和一个反向逻辑单元。

深 M/N 分频比可通过诸如 27MHz 的基准输入频率生成 0ppm 时钟。

CDCE906 器件包含三个 PLL。在三个 PLL 中，其中一个支持 SSC (扩频时钟)。PLL1、PLL2 和 PLL3 专用于高达 300MHz 的时钟频率并针对具有多个分频系数的零 ppm 应用进行了优化。

PLL2 还支持中心扩频和向下扩频时钟 (SSC)。该方法经实践证明，可以有效减少选定频率范围的能量。将大幅降低电磁干扰 (EMI)。此外，转换率可控 (SRC) 的输出沿会最大限度地减少 EMI 噪声。根据 PLL 频率和分频器设置，内部环路滤波器组件将自动调整，以使 PLL 实现高稳定性和优化的抖动传输特性。

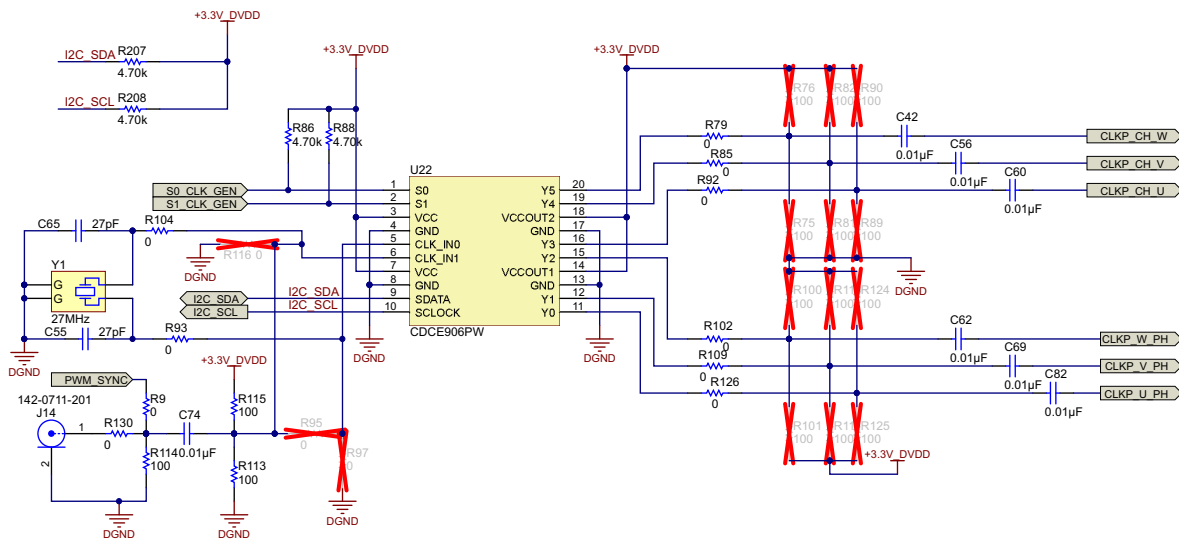


图 49. PLL 生成

在本参考设计中，PLL 用于为 AMC1304 生成基准时钟。时钟速率越高，OSR 越高；因此，精度也越高。AMC 的最高工作频率为 20.1MHz。

### 4.2.6 DAC8564

两个 DAC8564 器件用于复制 AMC1304 器件的模拟输入信号。

DAC8564 是一款四通道的 16 位高分辨率串行输入 DAC，内置有 2.5V 内部基准电压，默认情况下启用该基准电压。该 DAC 具有一个串行接口，用于与主机微处理器进行通信。

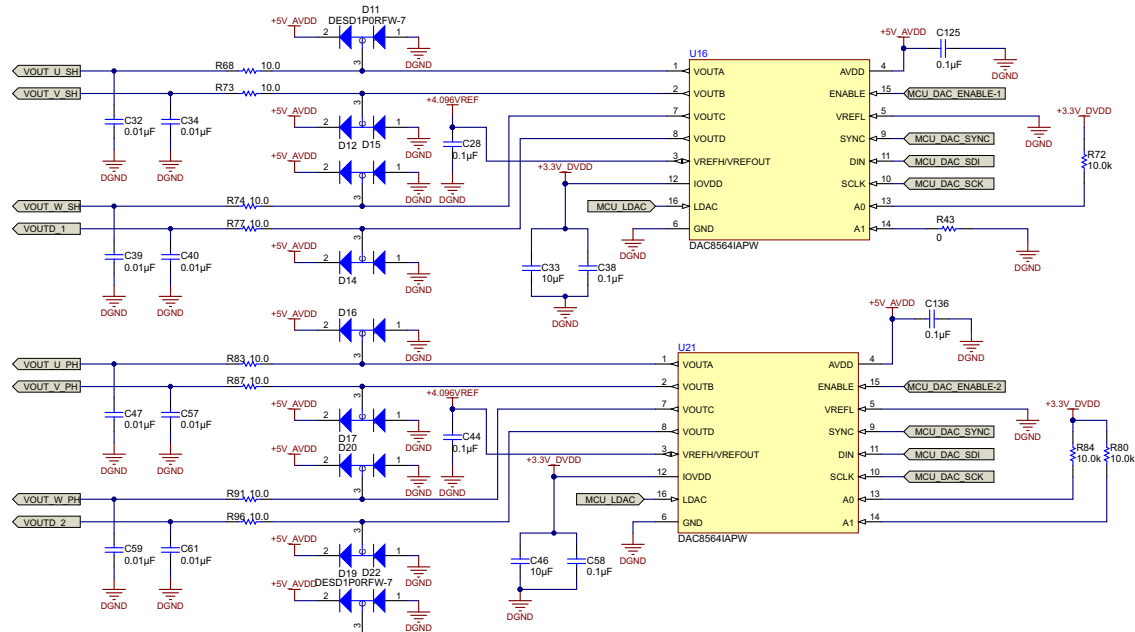


图 50. 16 位 DAC 输出

### 4.2.7 放大器和滤波器

本参考设计采用的放大器和滤波器部分提供了用于将数字位流从每个 AMC1304 器件传递至 SAR ADC 的选项。

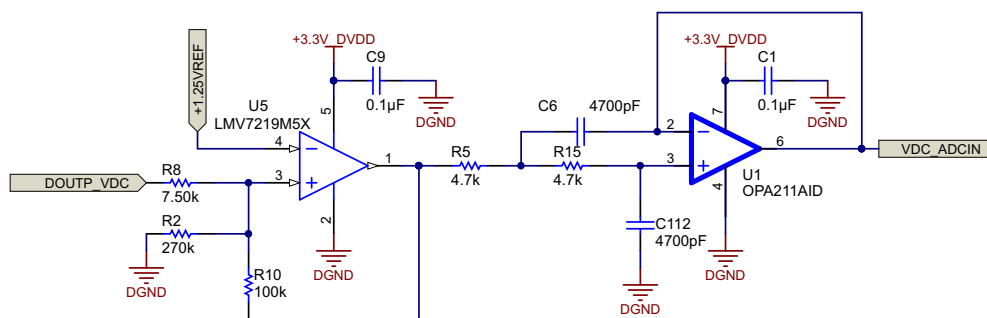


图 51. 放大器和 Sallen-Key 滤波器

### 4.2.8 连接器

FMB 附带连接器，能够连接 24V DC 输入、Delfino 控制卡和 DSM。其他一些连接器也可提供诊断功能。

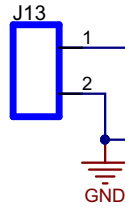


图 52. 24V DC 输入

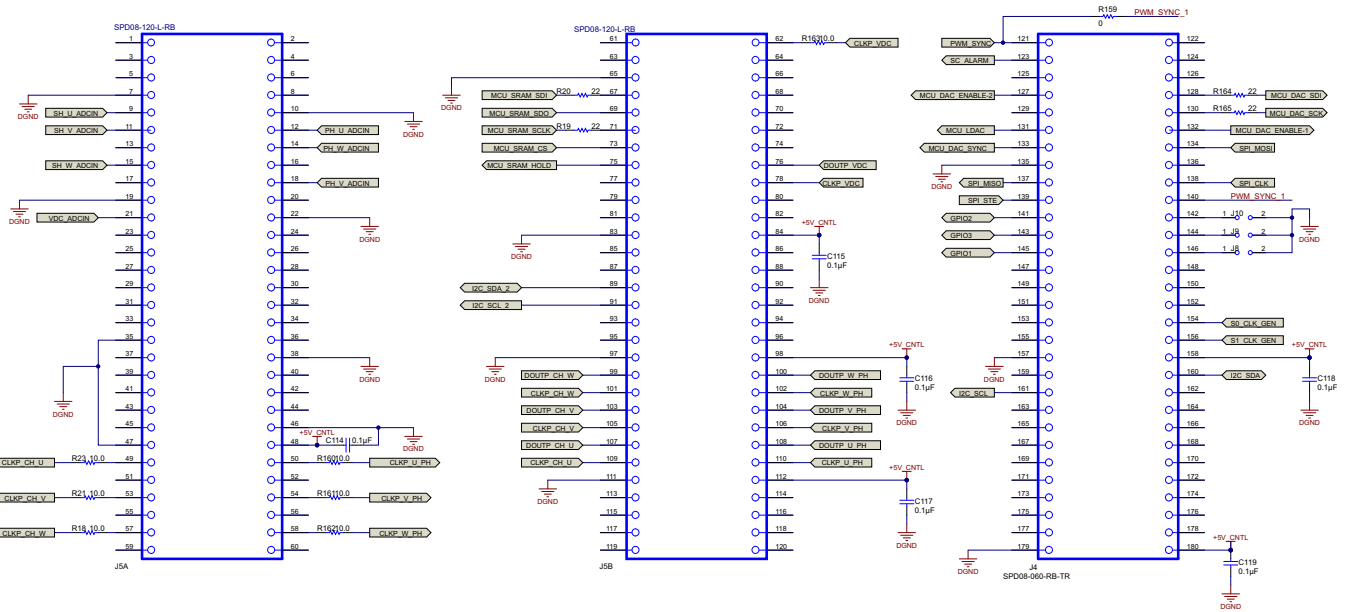


图 53. 连接 Delfino 基础控制卡的 120 和 60 引脚连接器

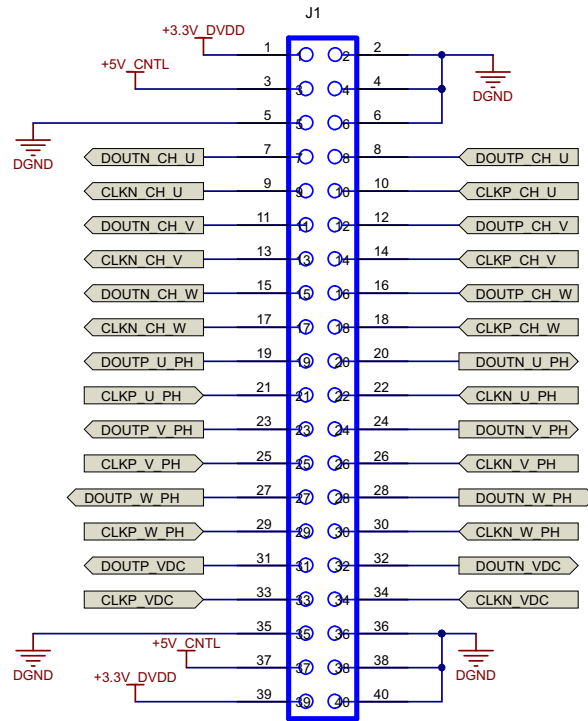


图 54. 连接 DSM 电路板的 2x20 引脚连接器

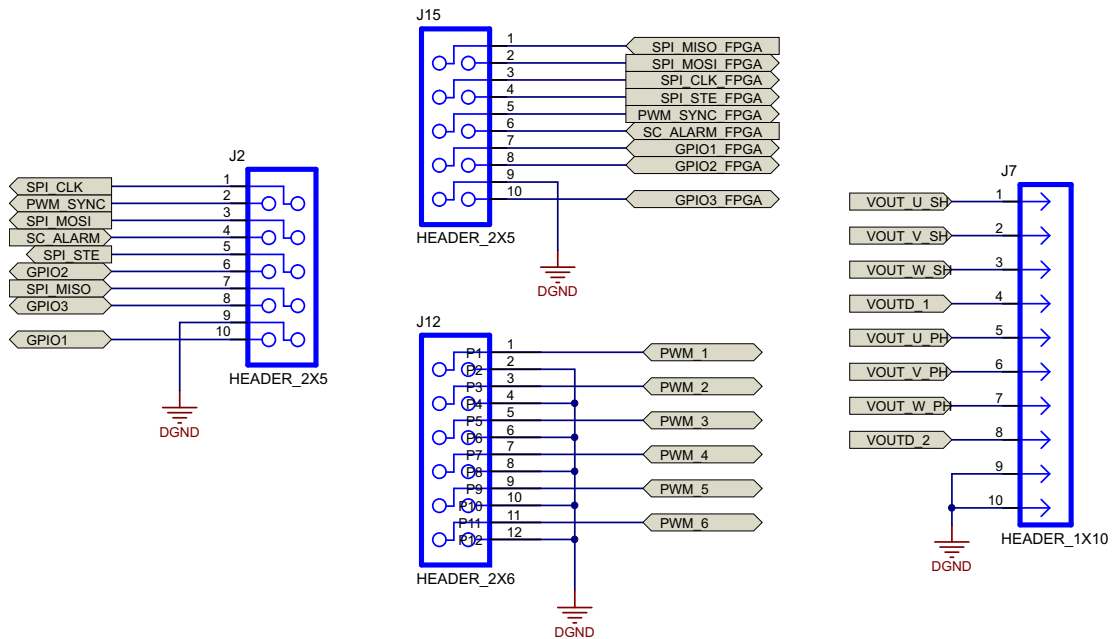


图 55. 其他连接器: DAC、JTAG

### 4.3 Delfino 控制卡

基于 Delfino 的控制卡电路板上配有 TMS320F28377D 微控制器，这是一款 C2000 系列双核 Delfino 微控制器。图 56 概括了该器件及集成外设。

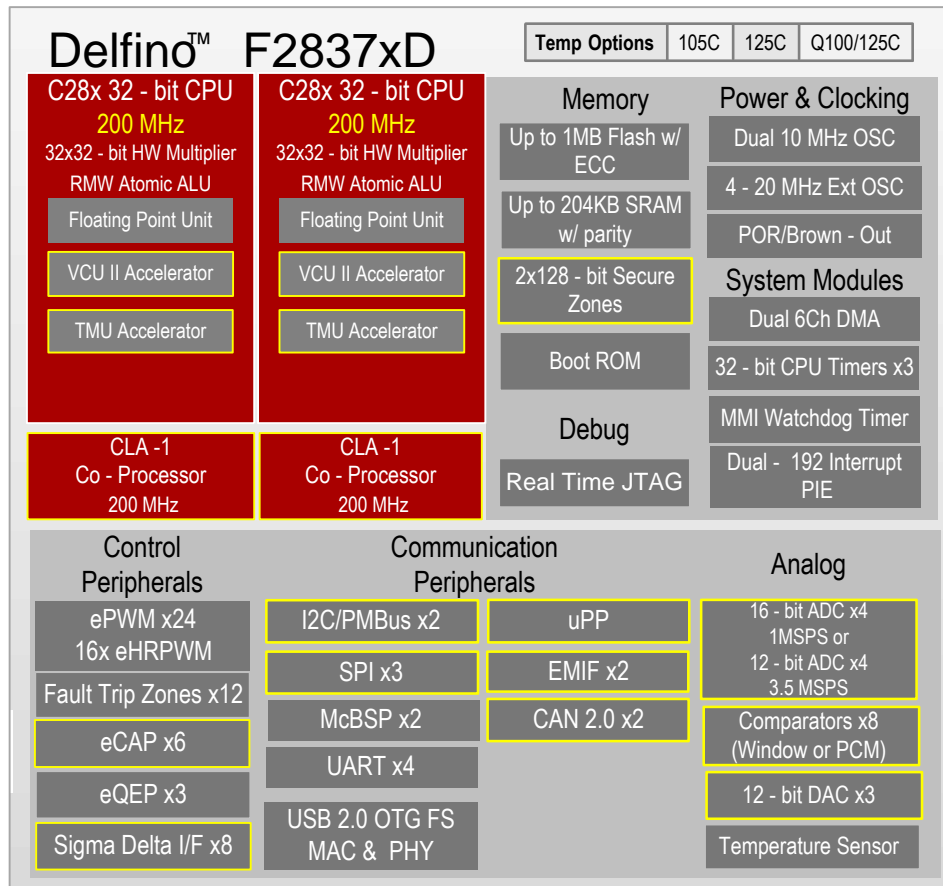


图 56. TMS320F28377D 概览

表 9 列出了控制器应用的外设以及分配给外设的主 CPU。

表 9. 外设列表

MCU 资源	主 CPU	用途
Σ-Δ 滤波器模块 (SDFM1 和 SDFM2)	CPU1	连接 AMC1304
USB	CPU1	连接 PC GUI
ePWM8	CPU1	为与 SDFM2 第三通道相连的 AMC1304 生成时钟
ePWM1、ePWM2、ePWM3、ePWM4、ePWM5、ePWM7	CPU1	可选时钟源，适用于在 SDFM1 和 ADFM2 上连接的其他 AMC1304 <sup>(1)</sup>
SPI-B	CPU2	连接 DAC8564
SPI-C	CPU2	外部控制器接口
I <sup>2</sup> C-A	CPU1	连接 CDCE906 PLL 合成器

<sup>(1)</sup> 指示硬件中分配的资源，不用于 GUI 固件。

#### 4.3.1 SDFM 外设

控制器具有两个集成 Σ-Δ 滤波器模块 (SDFM1、SDFM2)。每个 SDFM 模块均支持四通道 Σ-Δ 解调。控制器提供的八条通道用于对三个电流输入、三个电压输入和一个直流链路电压进行采样。

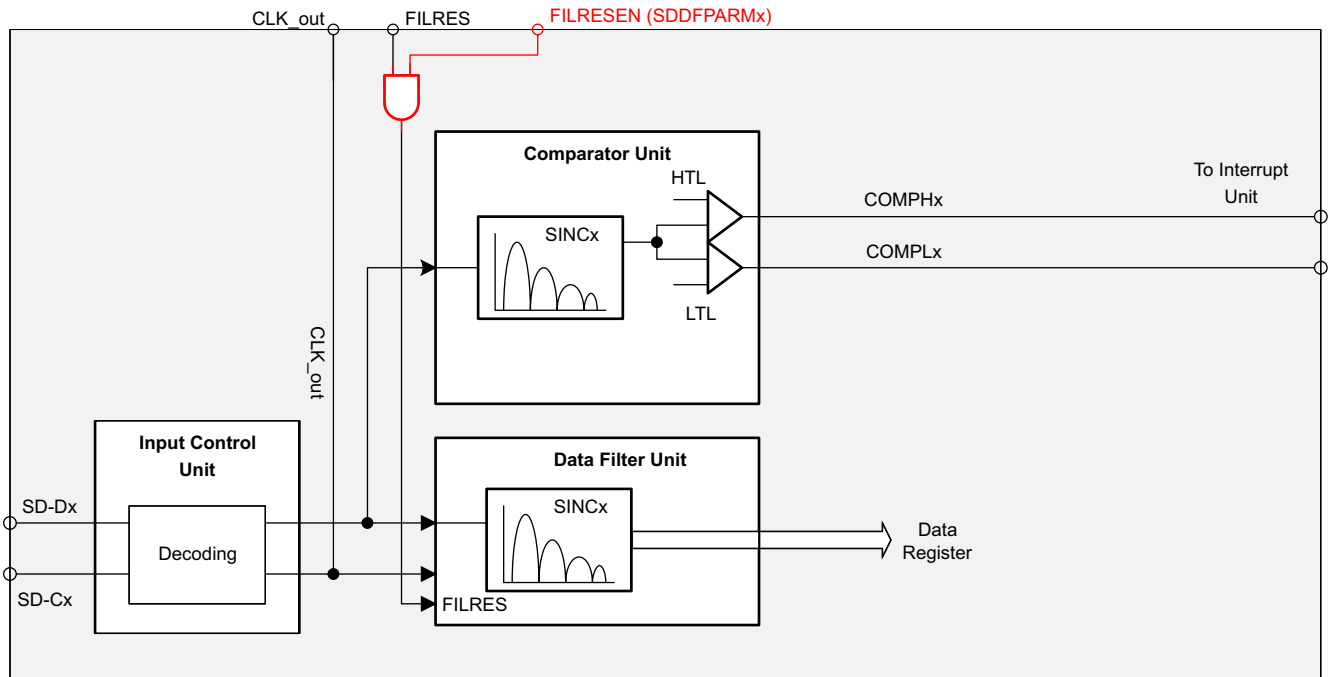


图 57. 单个滤波器模块的方框图

图 57 所示为 SDFM 上一条通道的滤波器模块。每个 SDFM 外设具有四个滤波器模块。SDFM 中的主要子模块分别为数据滤波器单元、输入控制单元以及比较器单元。请参见 [TMS320F28377D TRM](#)，详细了解外围设备中的不同模块。。

输入控制模块支持不同类型的比特流。输入控制模块支持位流，其运行速率可与时钟输入、时钟输入的两倍、时钟输入速率的一半或者曼彻斯特编码位流的速率相同。AMC1304 的数据速率与时钟输入相同。调制器模式下，输入控制模块需配置为模式 0。

数据滤波器单元通过硬件实现正弦滤波器，用于对位流进行转换。转换结果在结果寄存器中提供。数据滤波器单元支持 Sinc<sup>1</sup>、Sinc<sup>2</sup>、Sinc<sup>3</sup> 和 Sincfast 滤波器结构，OSR 为 1 至 256。GUI 具有根据需要设置调制器和正弦结构的功能。

滤波器的采样率按照公式 20 进行计算。

$$f_{\text{DATA}} (\text{Sinc filter output rate}) = \frac{\text{Modular data rate}}{\text{SOSR}} \quad (20)$$

注：SOSR：正弦滤波器的过采样率



在电机驱动应用中，最低要求为在单个栅极驱动 PWM 周期中采样一次或每次交替 PWM 周期时采样一次。此类应用还可能需要在每个 PWM 周期进行两次以上的采样。表 10 列出了采用不同时钟与 OSR 设置时的栅极驱动开关频率以及一些采样频率。

表 10. 所需 OSR 设置和时钟输入下不同采样率对应的标准电机驱动开关频率

栅极驱动 开关频率	采样率	时钟频率	OSR
10kHz	20Ksps	5.120MHz	256
16kHz	20Ksps	8.192MHz	256

正弦滤波器单元的输出寄存器为 32 位宽，但提供和使用 16 位模式。在 16 位模式下，32 位的输出右移为 16 位二进制补码表示形式。SDFIPARM 中的 SH 域用于控制转换期间的右移操作。在 32 位模式下，MSB 的位置取决于滤波器结构和 OSR。在获取 16 位数据时，应将 SH 设为一定值来获取寄存器 MSB 数据中的 MSB。

数据位宽度取决于正弦结构和 OSR。表 11 给出了结果范围。OSR 最大值为 256 的 Sinc<sup>3</sup> 滤波器类型提供的分辨率为 24 位。Sinc<sup>3</sup> 和 256 OSR 提供最佳分表率。

表 11. 不同 DOSR/滤波器组合对应的数据峰值

DOSR	Sinc <sup>1</sup>	Sinc <sup>2</sup>	Sinc <sup>3</sup>	Sincfast
x	x	x <sup>2</sup>	x <sup>3</sup>	2x <sup>2</sup>
4	-4 至 4	-16 至 16	-64 至 64	-32 至 32
8	-8 至 8	-64 至 64	-512 至 512	-128 至 128
16	-16 至 16	-256 至 256	-4096 至 4096	-512 至 512
32	-32 至 32	-1024 至 1024	-32,768 至 32,768	-2048 至 2048
64	-64 至 64	-4096 至 4096	-262,144 至 262,144	-8192 至 8192
128	-128 至 128	-16,384 至 16,384	-2,097,152 至 2,097,152	-32,768 至 32,768
256	-256 至 256	-65,536 至 65,536	-16,177,216 至 16,177,216	-131,072 至 131,072

将调制器频率选为  $2 \times$  逆变器开关频率  $\times$  OSR。

图 58 中给出了滤波器结构的频率响应。请注意，Sinc<sup>3</sup> 提供的衰减和噪声抑制程度更高。因此，Sinc<sup>3</sup> 滤波器最适用于高精度应用。

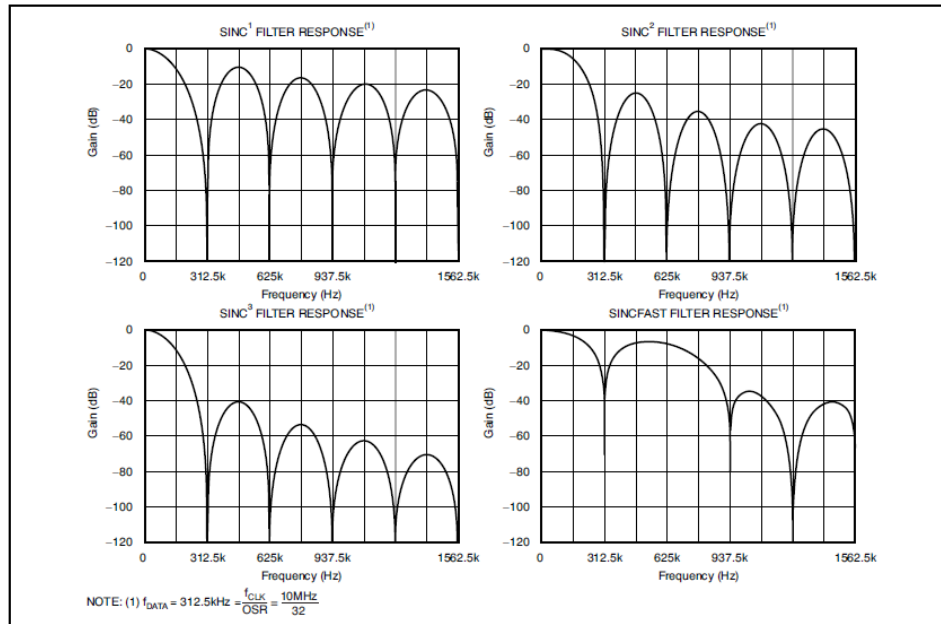


图 58. 各种正弦滤波器的频率响应

比较器单元实现了另一个正弦滤波器。转换结果以数字方式与阈值寄存器（SDFCMPHx 和 SDFCMLx 寄存器）中的阈值进行比较。比较器单元用于检测过压和短路。在各个滤波器模块中，比较器均用于检测过压和短路。

#### 4.4 短路检测

保护 IGBT 是逆变器控制的一项主要任务。逆变器故障条件，如相间短路或接地故障等需要检测并在损坏 IGBT 前尽快修正。通常，在短路状态下，IGBT 需要在 10 $\mu$ s 或更短的时间内关断。这就必须采用非常快速的 AD 转换，在发生短路时对 IGBT 进行保护。

数据滤波器单元用于获取转换结果，它具有转换延迟。该延迟取决于 OSR 和正弦滤波器的类型。选择更高的 OSR 和更高阶的正弦滤波器可以满足精度要求；然而，若要快速对短路进行响应，需要选择较低的 OSR 和较低阶的滤波器。由于响应时间较短，必须采用比较器单元，与数据滤波器单元并联。要通过 AMC1304 满足此类短路检测要求，比较器过采样率通常设置为 8 至 32 之间，滤波器结构则采用 Sinc<sup>1</sup> 或 Sincfast。

比较器滤波器结构固定为 Sinc<sup>1</sup>，在固件中将 OSR 设为 32。Sinc<sup>1</sup> 响应时间更快，而将 OSR 设为 32，可实现 5 位输出宽度分辨率以设置阈值。阈值寄存器采用的格式为无符号整数。达到阈值时，故障标志置 1；这会触发中断，在该中断中，固件会在 GPIO 上指示这一事件。该事件也会存储在 MCU 中以供 GUI 或外部控制器读取。阈值可按下列示例所示的方法进行计算：

- 示例 1：采用 50mV 部件，SDFCMPHx = 32，SDFCMLx = 0。阈值为 62.5mV 和 -62.5mV；如果分流电阻值为 50m $\Omega$ ，则电流阈值为 (62.5mV)/50m $\Omega$  = 1.25A 和 (-62.5mV)/50m $\Omega$  = -1.25A。
- 示例 2：同样，若分流电阻值为 5m $\Omega$ ，对应的电流阈值为 (62.5mV)/5m $\Omega$  = 12.5A 和 (-62.5mV)/5m $\Omega$  = -12.5A。

## 4.5 换算系数

GUI 从 Delfino 控制器获得原始计数。GUI 通过将原始计数与换算系数相乘来计算施加的电压或电流。首先，计算目标换算系数。该结果称为理论换算系数。得出理论换算系数后，应执行校准。请按以下步骤执行校准：

### 电机电流测量的换算系数

电流测量采用的部件为  $\pm 50\text{mV}$  部件。AMC1304M05 数据表中该部件的总满量程偏转为  $62.5\text{mV}$  至  $-62.5\text{mV}$ 。此偏转与 16 位结果寄存器的范围 32767 至  $-32768$  相对应。分辨率可通过公式 21 进行计算。

$$\frac{62.5\text{mV} - (-62.5)\text{mV}}{32767 - (-32768)} = 0.0019073\text{mV} / \text{count} \quad (21)$$

采用  $5\text{m}\Omega$  分流电阻时，换算系数通过公式 22 进行计算，单位为 A/Div。

$$\frac{0.00190734\text{mV}}{5\text{m}\Omega} = 3.8146 \times 10^{-4} \text{ A} / \text{count} \quad (22)$$

### 直接测量逆变器相间电压的换算系数

用于直流链路电压的部件为  $\pm 250\text{mV}$  部件，数据表中该部件的总满量程偏转为  $312.5\text{mV}$  至  $-312.5\text{mV}$ 。此偏转与 16 位结果寄存器的范围 32767 至  $-32768$  相对应。分辨率为：

$$\frac{312.5\text{mV} - (-312.5)\text{mV}}{32767 - (-32768)} = 0.0095367\text{mV} / \text{count} \quad (23)$$

要计算电压分压比，假设 AMC1304 每个输入引脚上的输入阻抗都为  $12.5\text{k}\Omega$ 。假设电路已配置为差动端，并与两个串联的  $15\text{k}\Omega$  电阻并联。因此，AMC1304 引脚上的总阻抗为  $(2\text{k}\Omega \parallel 25\text{k}\Omega \parallel 30\text{k}\Omega)$ 。计算出图 28 中的电压分压比为

$$\frac{4.4\text{M}\Omega + (2\text{k}\Omega \parallel 25\text{k}\Omega \parallel 30\text{k}\Omega)}{(2\text{k}\Omega \parallel 25\text{k}\Omega \parallel 30\text{k}\Omega)} = 2523.66 \quad (24)$$

直接测量交流相间电压时采用的换算系数为  $2523.66 \times 0.0095367 = 0.024067 \text{ V/div}$

### 使用仪表放大器测量交流相间电压时采用的换算系数

用于交流电压的部件为  $\pm 250\text{mV}$  部件，数据表中该部件的总满量程偏转为  $312.5\text{mV}$  至  $-312.5\text{mV}$ 。此偏转与 16 位结果寄存器的范围 32768 至  $-32768$  相对应。分辨率为：

$$\frac{312.5\text{mV} - (-312.5)\text{mV}}{32767 - (-32768)} = 0.0095367\text{mV} / \text{count} \quad (25)$$

仪表放大器的输入阻抗非常高，增益为单位增益。因此，要计算电压分压比，图 28 中提供的电压分压比为

$$\frac{4.4\text{M}\Omega + (2\text{k}\Omega)}{(2\text{k}\Omega)} = 2201 \quad (26)$$

使用仪表放大器测量交流相间电压时采用的换算系数为  $2201 \times 0.0095367 = 0.02099 \text{ V/计数}$

### 使用仪表放大器和 Sallen Key 测量交流相间电压时的换算系数

该换算系数与仅使用仪表放大器测量相间电压时采用的换算系数相同，因为添加 Sallen Key 不会更改分压器，对输入阻抗也没有任何影响。无论低频时的增益是否为单位增益，Sallen Key 均能实现低通滤波器。

使用仪表放大器测量交流相对 **C\_MINUS** 电压时采用的换算系数

该换算系数与仅使用仪表放大器测量相间电压时采用的换算系数相同；此时，Sallen Key 会以更低的频率提供滤波和单位增益。分压器与仅使用仪表放大器测量相间电压时采用的分压器相同。

测量直流链路电压时采用的换算系数

用于直流链路电压的部件为  $\pm 250\text{mV}$  部件，数据表中该部件的总满量程偏转为  $312.5\text{mV}$  至  $-312.5\text{mV}$ 。此偏转与 16 位结果寄存器的范围 32767 至  $-32768$  相对应。分辨率为：

$$\frac{312.5\text{mV} - (-312.5)\text{mV}}{32767 - (-32768)} = 0.0095367\text{mV} / \text{div} \quad (27)$$

要计算电压分压比，假设 AMC1304 每个输入引脚上的输入阻抗为  $12.5\text{k}\Omega$ 。考虑到已将电路配置为单端，因此总输入阻抗为  $12.5\text{k}\Omega$ 。图 21 中为直流链路电压提供的电压分压比为

$$\frac{4.4\text{M}\Omega + (2\text{k}\Omega \parallel 12.5\text{k}\Omega)}{(2\text{k}\Omega \parallel 12.5\text{k}\Omega)} = 2533 \quad (28)$$

直流链路电压的换算系数为  $2533 \times 0.0095367 = 0.024347 \text{ V/Div}$

## 4.6 校准

上一节中的换算系数为理论值，在根据预期读数实施的性能测试中会产生误差。产生误差的原因包括：

- AMC130x 的偏移误差
- AMC130x 的增益误差
- 感测电阻容差

如果是 2 线制分流电阻，焊接电阻会计入分流值，使读数产生偏差。对于电流通道，这需要采取增益补偿。

在交流电压测量中，出现的误差取决于用于分压器的元件的容差。未校准误差的百分比误差大致与部件容差相等。此外，计算结果还取决于 AMC1304 输入阻抗，而每个器件的输入阻抗各不相同。校准也会补偿 AMC1304 输入阻抗，每个器件的输入阻抗各不相同。交流电压测量配置中的偏移误差可忽略不计，且不需要偏移误差。

由于直流链路测量时电路采用的是单端配置，这会导致输入引脚上的偏置不均等，从而在输入引脚上出现直流偏移电压，并会影响 Delfino SDFM 外设的转换结果。即使采用节 4.1.1.2 中介绍的补偿方法，也无法完全消除偏移偏置，因为无法配备完全匹配的电阻。因此，在硬件中进行偏移补偿后，需要在软件中执行进一步的偏移校正才能进行直流链路测量。

### 4.6.1 校准步骤

根据所要校准的通道，在测量电流时采用与节 7.2.3 相同的设置，在测量交流电压时采用与节 7.1.1 相同的设置，在测量直流链路时采用与节 7.1.3 相同的设置。在所有情况下，均根据基准仪表执行校准。

表 12 给出了两点校准的执行步骤。首先，获取两个读数。如果两个读数采用如下格式，则其可能对应于两个读数范围的最大值和最小值：

表 12. 两点校准格式

仪表读数	PC GUI 的读数
Xa	Ya
Xb	Yb

修改之前按新换算系数 =  $(Xa - Xb)/(Ya - Yb) \times$  旧换算系数计算出的换算系数，完成增益校准。

对于偏移校准，可通过  $(YbXa - YaXb) /$  旧换算系数计算原始计数所需的偏移。

确定新的换算系数值和偏移值后，可以按 6.5 节所述更新换算系数。

## 5 软件描述

固件利用 controlSUITE 中包含的 F2837xD 的器件支持包开发，提供器件寄存器定义、外设驱动程序库和 USB 库。这些库位于 controlSUITE 的安装目录中。该固件的用途是配置正弦滤波器、设置 PLL 频率、接收正弦滤波器的数据，以及连接 PC 的 GUI 以帮助用户验证 AMC1304 性能。该固件支持对 Delfino 控制器中的正弦滤波器参数进行配置更改。该固件包括 GUI 接口、DAC8564 接口、连接 AMC1304 的 SDFM1 和 SDFM2、连接 CDCE906 以生成时钟的借口，生成时钟的 ePWM 以及故障检测。

Delfino 控制器中的 SDFM1 和 SDFM2 外设与 AMC130x 相连。固件支持对滤波器类型和 OSR 值故障检测阈值进行更新。SDFM1 和 SDFM2 通道在 GUI 上重新命名，遵循共同的命名约定。命名约定为“通道 1”至“通道 7”，如图 15 所示。

启动时，固件将控制器配置为采用 SDFM 比较器单元并使用默认阈值执行故障检测。GUI 可用于更新阈值设置。检测到过载时，该事件将记录在中断程序中，且插头 J2 上的 GPIO1 也将置 1。只要发生故障，GUI 就会定期读取固件。

GUI 界面通过 F28377D 中集成的 USB 来实现。该器件配置为原始批量器件模式。之所以选用该原始批量器件，是因为其配备的接口可轻松连接到 LabVIEW GUI。原始批量描述符和配置与 controlSUITE 示例的名称相同，都为“usb\_dev\_bulk”。为便于 USB 器件和 GUI 进行交互，实现了定制应用协议。在描述内部工作的文件“GUI.h”和“GUI.c”中可以看到此协议的实现方法。

有关器件配置寄存器和定义，请参见 CDCE906 (SCAS814I) 数据表。Delfino 与 I<sup>2</sup>C 总线上的时钟合成器 CDCE906 相连。固件上电后，CDCE906 将设置为 1MHz 的最小时钟输出，时钟输出可以通过 GUI 更改。用户在 GUI 中更新开关频率后，GUI 会计算新的时钟频率，并在内部计算需要写入 CDCE906 中的配置值。Delfino 接收来自 GUI 的时钟配置，并通过 I<sup>2</sup>C 接口更新 CDCE906 中的寄存器设置。

ePWM8 生成的时钟仅用于调制器监视电路板上的直流链路电压。该电路板需要七个独立的时钟；其中的六个时钟由时钟合成器 CDCE906 提供。最后一条通道的时钟由 ePWM 外设提供。该通道生成的输出时钟固定在 5MHz。

两个 DAC8564 用于调试。Delfino 将更新 DAC 输出，通过 SDFM 外设表示转换结果。这样，用户便可以在示波器上查看波形。DAC8564 连接到 SPI-B，CPU2 则为 SPI-B 的主控处理器。有关 SPI 帧的格式，请参见 DAC8564 (SBAS403D)。要更新 DAC 的一个通道，请写入一个 24 位的字；前 8 位包含 DAC 寻址、通道寻址和负载命令，后 16 位为以 16 位直接二进制表示的 DAC 值。

固件对所有通道使用立即加载命令，并选择适当的 DAC 地址和通道地址。未使用 LDAC 功能。固件将 DAC8564 设置为使用内部 2.5V 基准电压。CPU1 通过将 SDFM 结果写入一个共享的 RAM 来将结果传递给 CPU2。地址位置在 CPU1 和 CPU2 中采用硬编码形式，并保持一致。SDFM 的输出配置为 16 位有符号输出，范围为 -32768 至 32767。向 SDFM 输出加 32767，将该输出转换为 16 位直接二进制表示形式。即，DAC 的 1.25V 代表 0，2.5V 代表 32767，而 0V 代表 SDFM 外设中的 -32768。

图 59 所示为固件流程图以及 CPU1 和 CPU2 之间的任务分配。

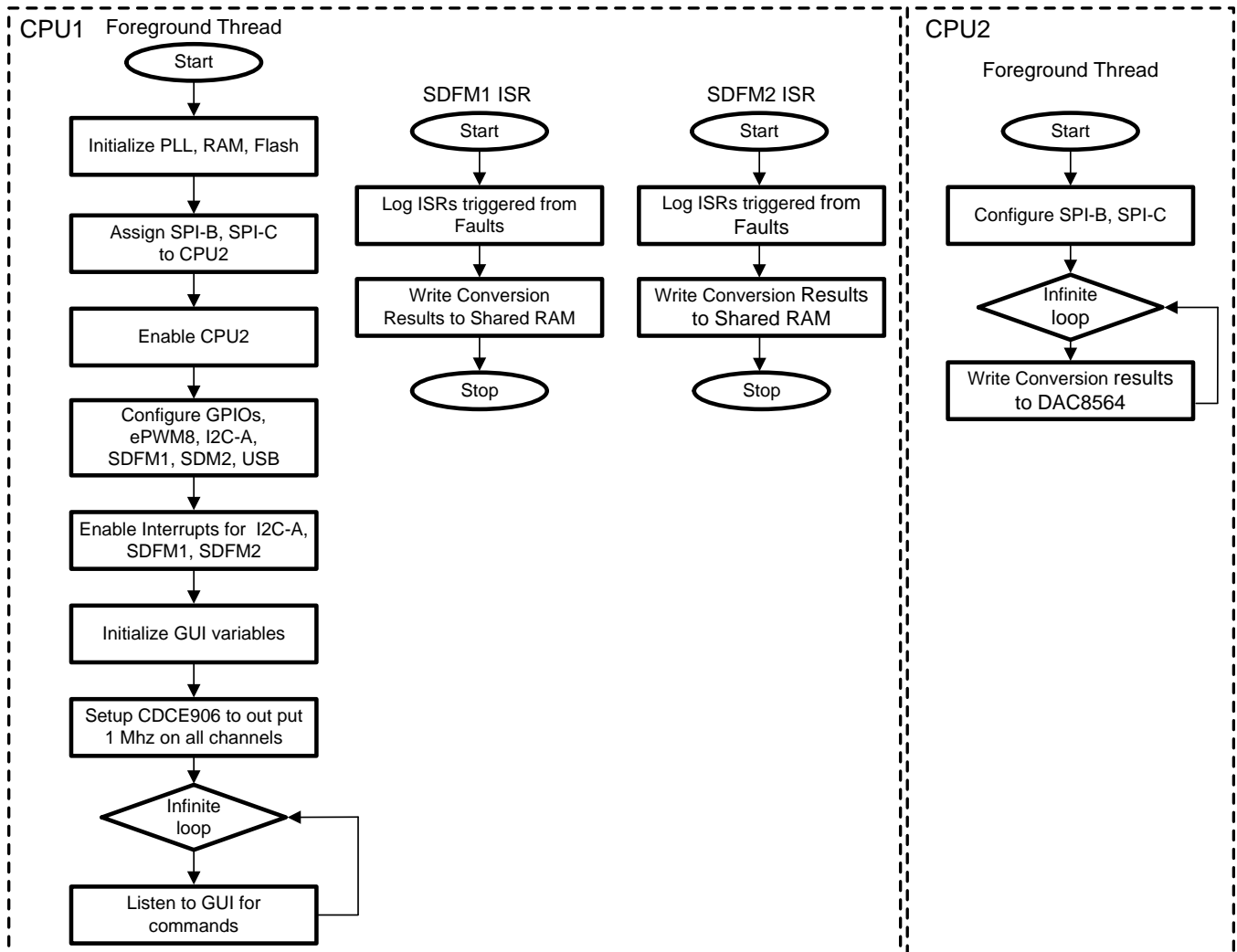


图 59. 固件流程图

## 6 GUI 用户指南

本节介绍了隔离式电流和电压测量测试台的功能。

### 6.1 安装 GUI 软件

以下各节介绍了正确安装软件的位置和步骤。GUI 假设已利用 [TIDA-00171](#) 中提供的固件对 Delfino 控制器的 CPU1 和 CPU2 进行了编程。

#### 6.1.1 安装 Run-Time Engine

要使用 IVIM 测试台，必须下载并安装 LabVIEW Run-Time Engine。

1. 单击此链接，安装 LabVIEW Run-Time Engine 2010 SP1（32 位标准版 RTE）。  
<http://www.ni.com/download/labview-run-time-engine-2010-sp1/2292/en/>
2. 运行 LVRTE2010\_SP1f5std.exe，安装 LabVIEW 2010 SP1 Run-Time Engine（32 位）。
3. 按照安装向导进行操作，完成安装。

Run-Time Engine 的安装文件被自动提取并存放于相应磁盘目录中。安装完成后，安装程序不会删除这些文件。如果要从磁盘上删除这些文件，需要确保在解压缩的过程中记下了它们的位置。

#### 6.1.2 安装 VISA

下载并安装 VISA 驱动程序方可与器件进行通信。

1. 请点击链接 <http://www.ni.com/download/ni-visa-5.0.3/2251/en/> 安装 NI-VISA 5.0.3。
2. 运行 visa503full\_downloader.exe。
3. 按照安装向导进行操作，完成安装。

#### 6.1.3 安装 IVIM Test Bench

GUI 相关信息，请参见 [TIDA-00171](#)。

1. 选择 IVIM Test Bench 的目标目录，并单击下一步 (Next)。

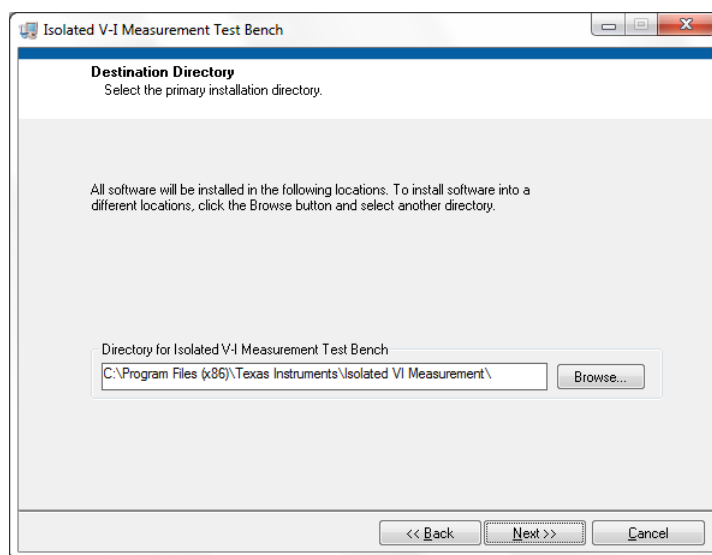


图 60. IVIM Test Bench 目标目录选择窗口



2. 图 61 列出了将在本次安装过程中添加或修改的文件列表。单击下一步 (*Next*)。

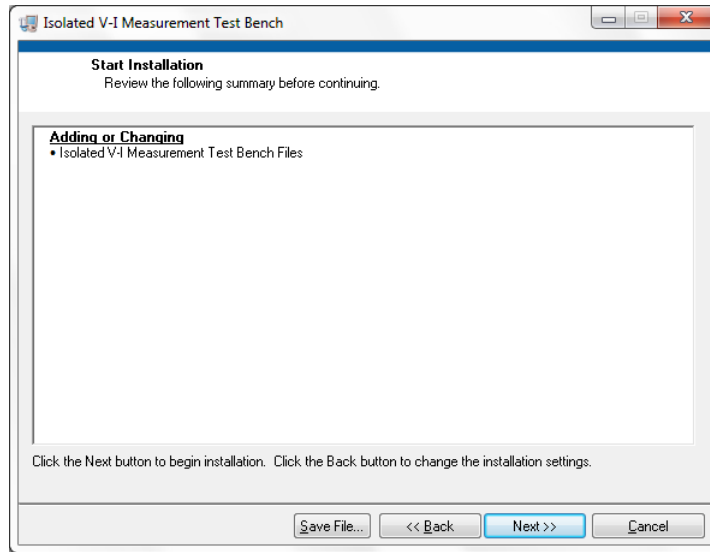


图 61. 安装过程中添加或修改的文件列表

3. 安装完成后，结束界面如图 3 所示，单击完成 (*Finish*)。

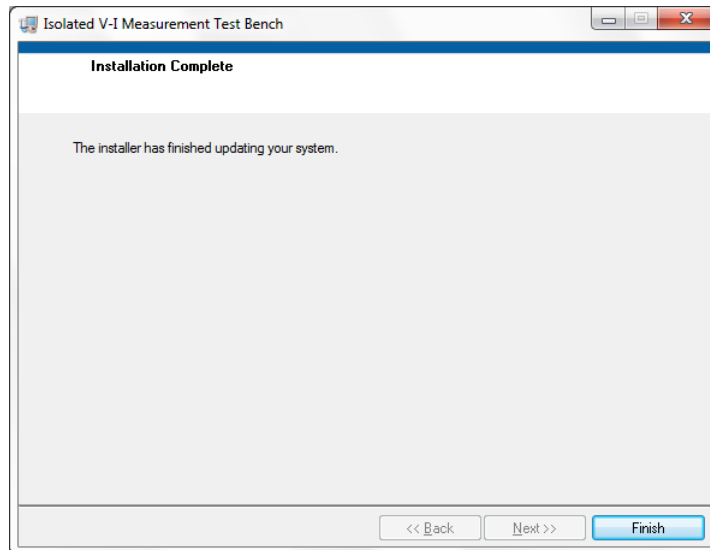


图 62. 成功安装后的窗口

## 6.2 启动 IVIM Test Bench

按照以下步骤启动 IVIM Test Bench。

1. 请通过以下任意方法找到 IVIM Test Bench:

- 桌面快捷方式
- 开始 (Start) 菜单快捷方式
- 安装文件夹位置。Win 7 系统中的默认位置为: C:\Program Files (x86)\Texas Instruments\Isolated VI Measurement\

2. 双击 Isolated V-I Measurement.exe

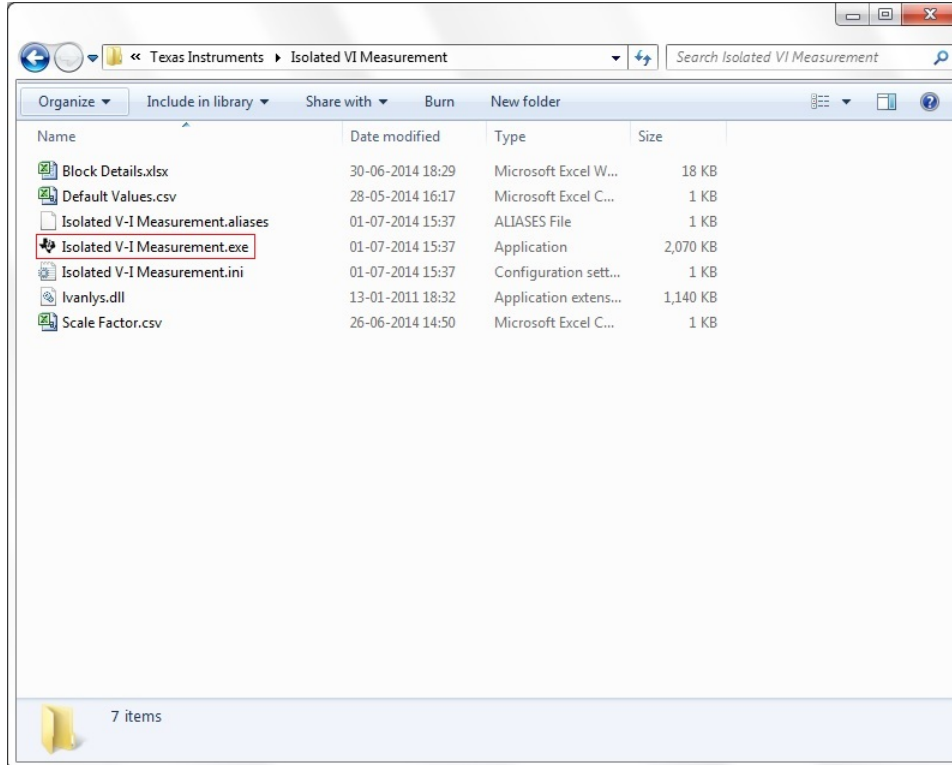


图 63. 隔离式 VI 测量文件夹结构

### 6.3 模式选择

应用程序启动后将弹出选择模式 (Select a Mode) 对话框 (图 5)。选择 MCU 和相应的 VISA 资源名称。

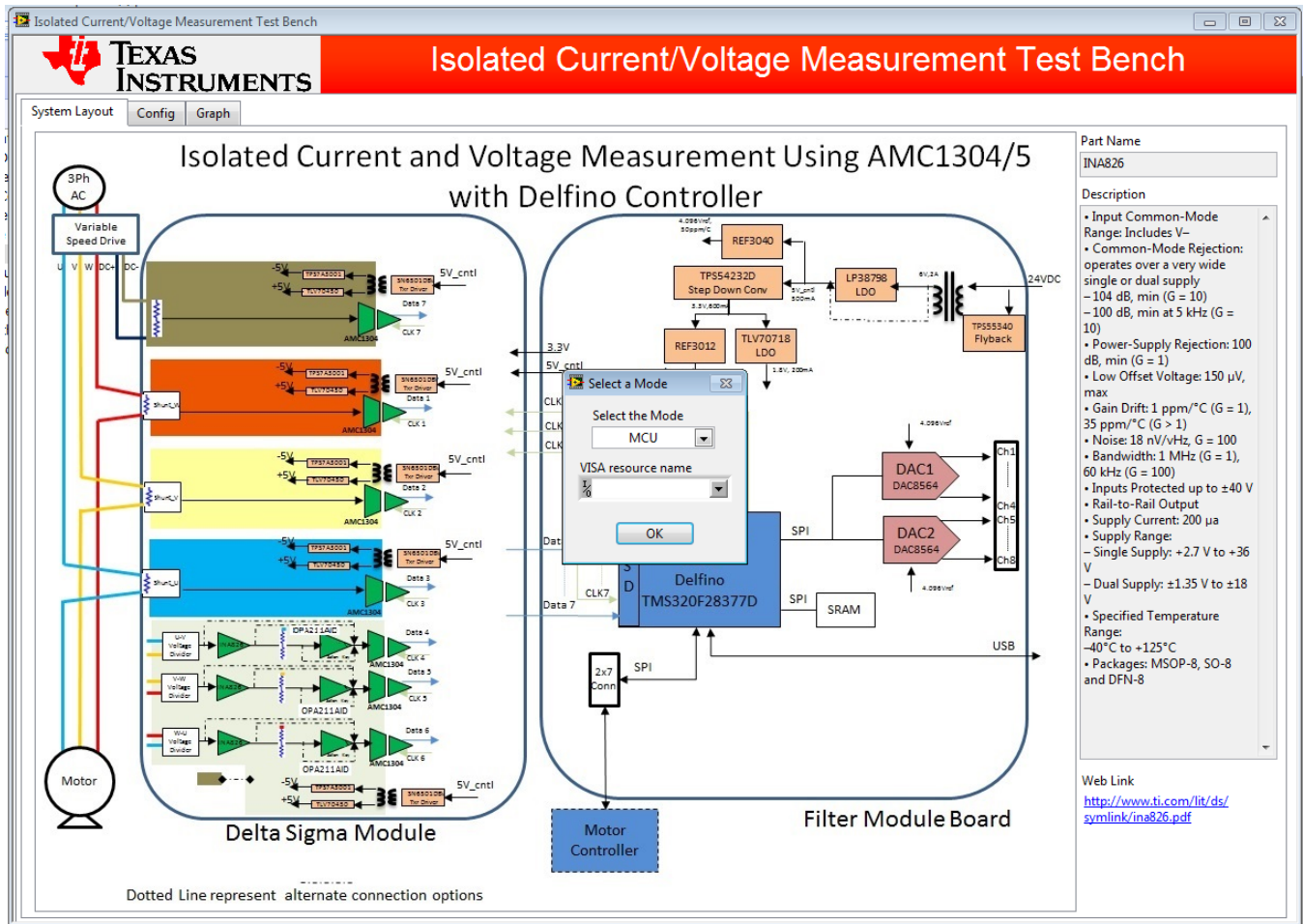


图 64. 模式选择

GUI 在用户选择相应模式后进行初始化。

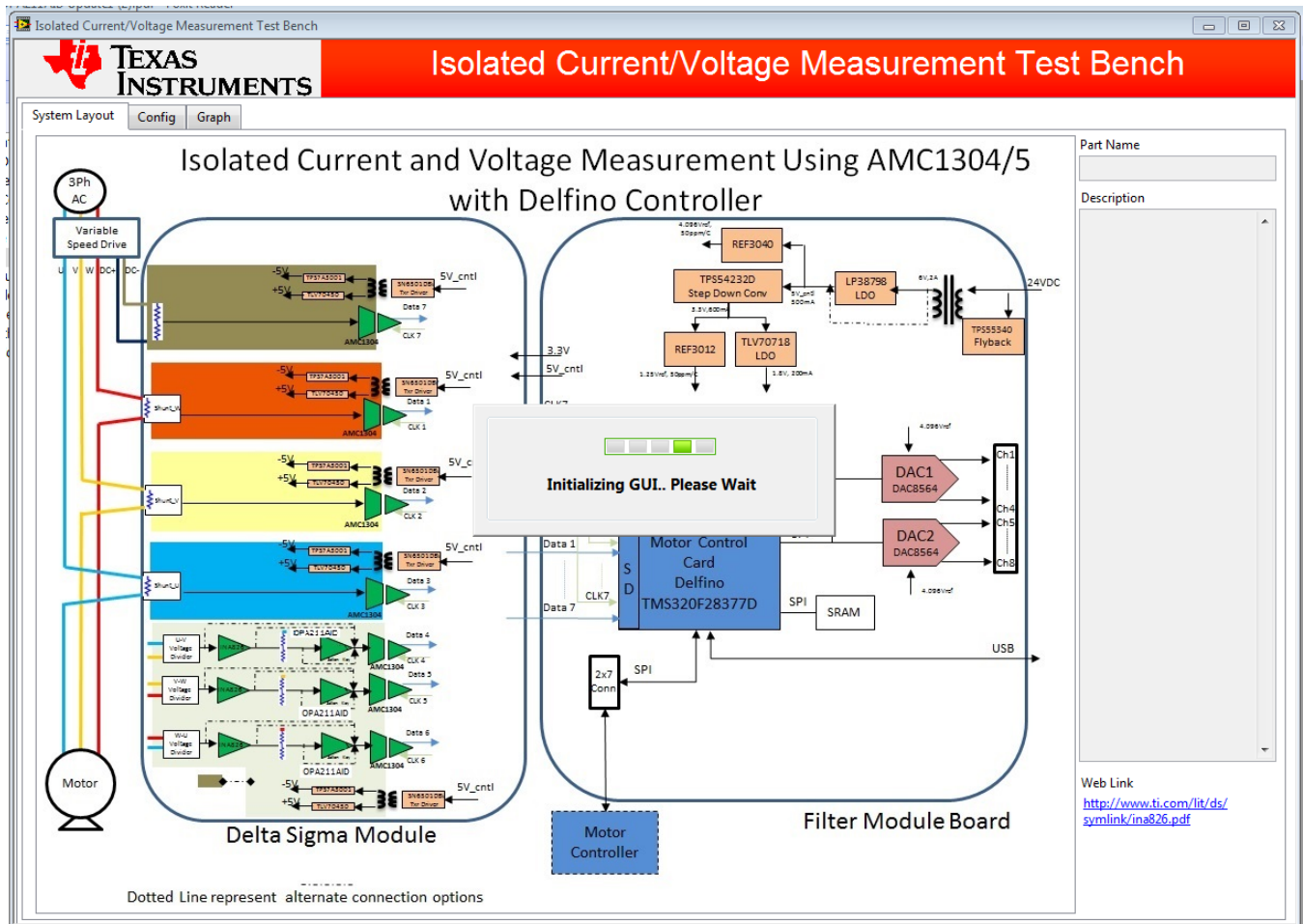


图 65. GUI 初始化

初始化完成后，继续使用 GUI。

## 6.4 IVIM 页面

IVIM Test Bench 包含以下三个页面：

1. 系统布局
2. 配置页面
3. 图形页面

### 6.4.1 系统布局

系统布局页面包含一个框图，并对隔离式电流/电压测量中所用的部件进行了说明。将鼠标指针移至任何模块上后，将在页面右侧显示该模块的说明，并提供网络链接供参考。请参见图 66。

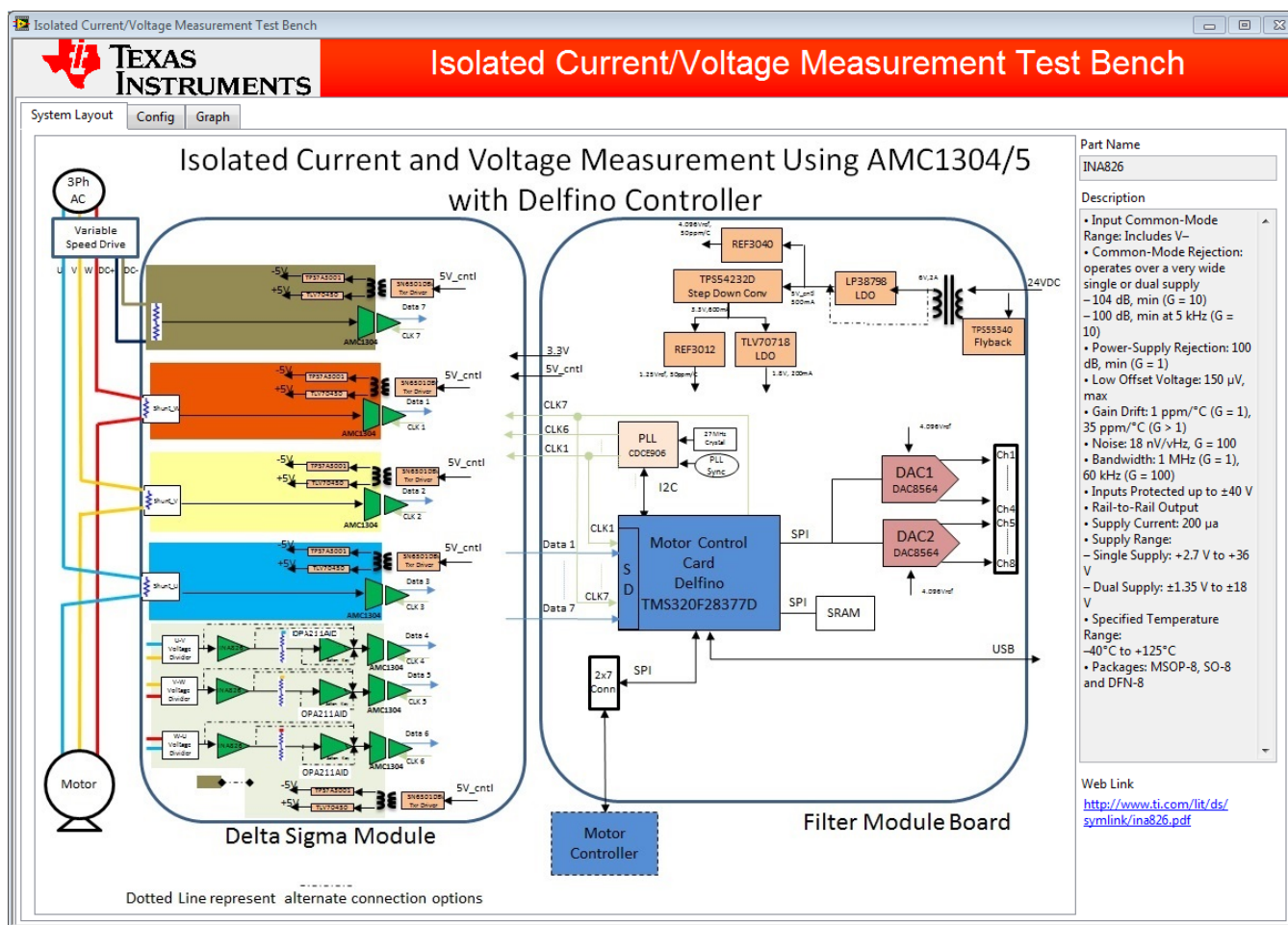


图 66. 系统布局

- 方框图：方框图详细介绍了隔离式电流和电压测量测试中所用的部件。
- 部件名称 (Part Name)：此框会显示所选部件的名称。
- 说明 (Description) 框：此框显示方框图中部件的简要说明。
- 网络链接 (Web Link) 框：此框显示部件的网络参考。

## 6.4.2 配置页面

用户可通过此页面配置  $\Sigma$ - $\Delta$  滤波器参数。

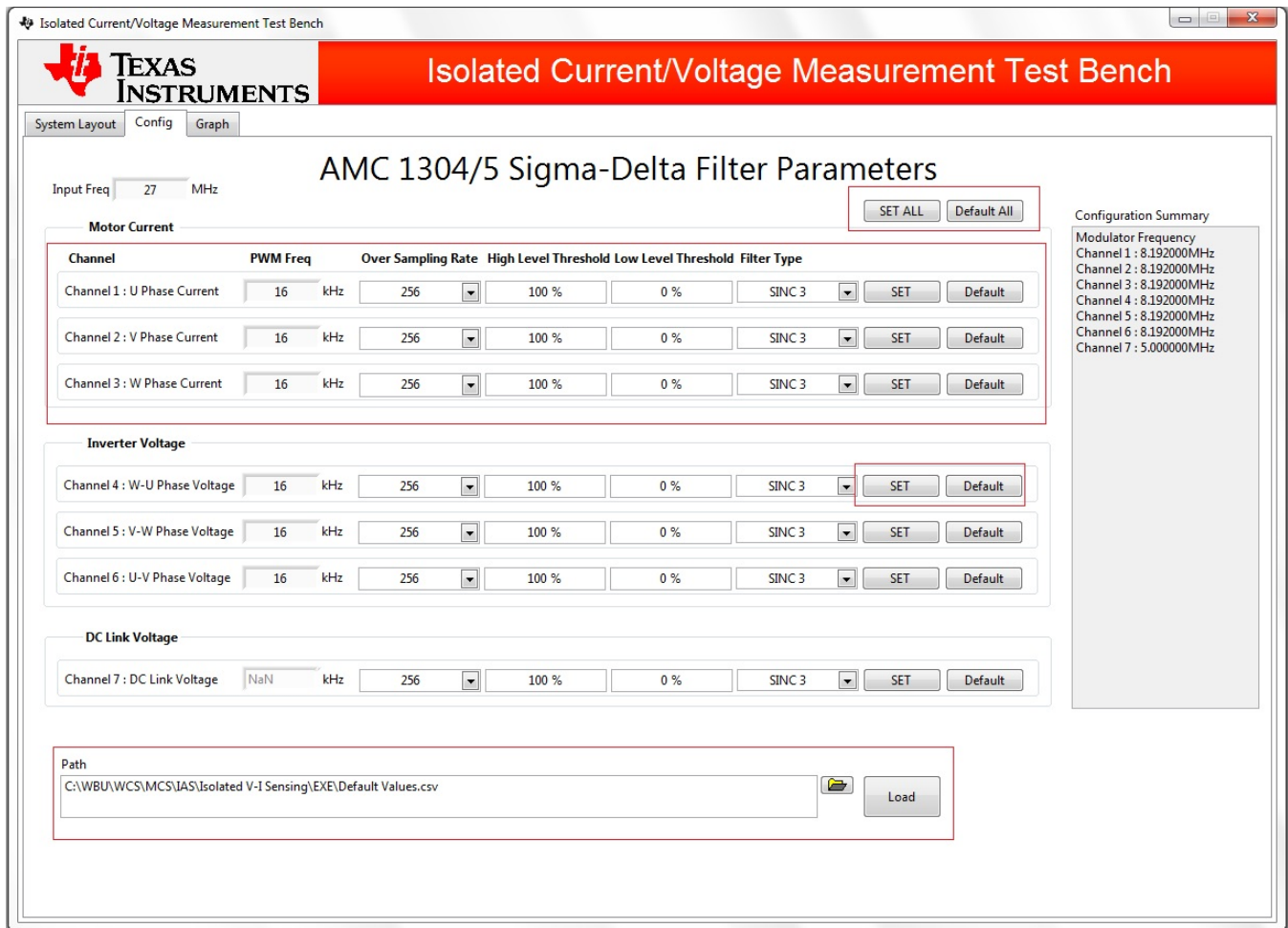


图 67. 配置页面

- **电机电流 (Motor Current):** 此选项包含三条通道用于测量相应相电流的设置。
- **逆变器电压 (Inverter Voltage):** 此选项包含三条通道用于测量相应相电压的设置。
- **直流链路电压 (DC Link Voltage):** 此选项包含一条通道用于测量直流链路电压的设置。
- **设置 (Set):** 此按钮用于设置相应行的已配置设置。
- **全部设置 (Set All):** 此按钮用于设置所有通道的配置值。
- **全部默认 (Default All):** 此按钮用于设置所有通道的默认值。
- **加载 (Load):** 此按钮用于从路径对话框中指定的文件内加载各个参数的值。
- **配置汇总 (Configuration Summary):** 此选项用于显示各个通道的调制频率。

### 6.4.2.1 设置 PWM 频率和过采样率

- **PWM 频率：**此频率值可以在指定文本框中以 kHz 为单位输入。
- **过采样率：**可以从列表中选择过采样率。

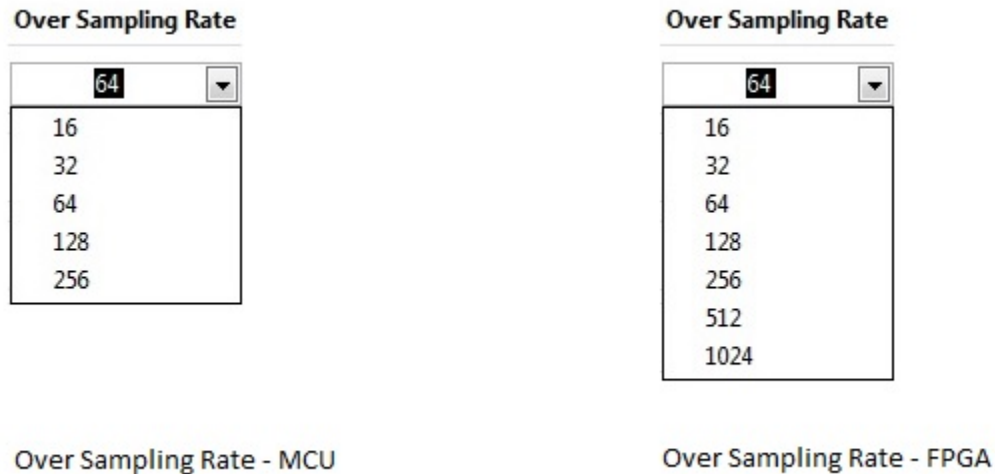


图 68. 过采样率选择

- **调制器频率：**调制器频率取决于 PWM 频率和过采样率。调制器频率限制为 20MHz。

### 6.4.2.2 设置滤波器类型

各个通道的滤波器类型可通过列表设置（如图 69 所示）。

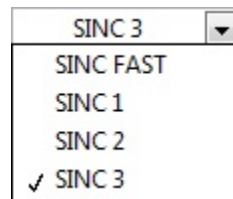


图 69. 通道滤波器类型

### 6.4.2.3 设置默认值

通过每条通道的默认 (*Default*) 按钮可将其配置为相应默认值。用户也可使用全部默认 (*Default All*) 按钮将全部通道设为默认值。

### 6.4.2.4 配置汇总

配置汇总框显示了各个通道计算所得的调制器频率。调制器频率限制在 5MHz 到 20MHz 之间。设置值超出限值后，将强制采用该值而且配置汇总框将以通知形式指示错误，如图 70 所示。

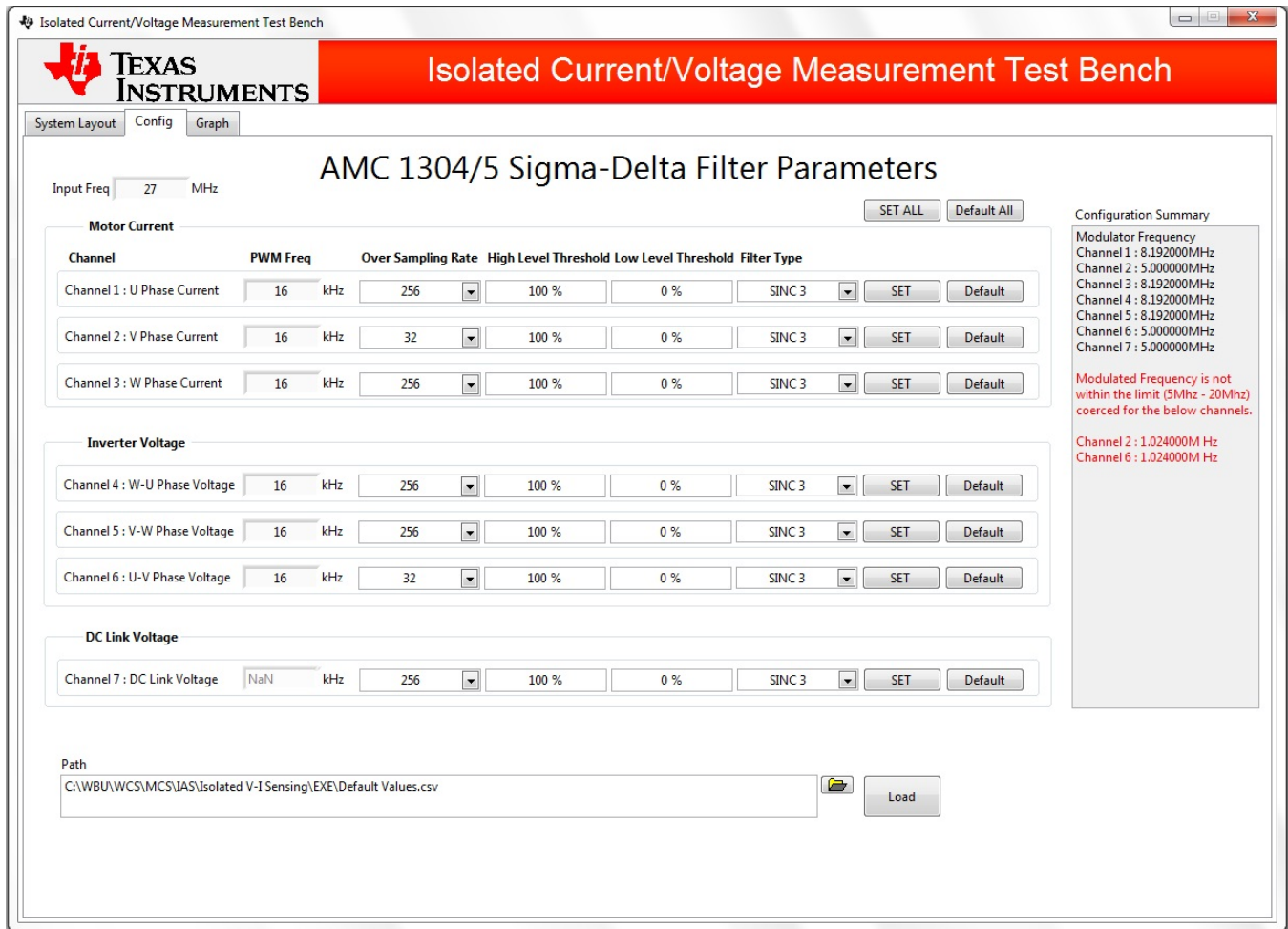


图 70. 配置汇总

### 6.4.2.5 加载默认值文件

使用可用的路径控制来选择默认值文件。单击加载 (*Load*) 按钮，可以将设置加载至用户界面。



图 71. 加载默认值文件

### 6.4.2.6 设置配置

使用为各个通道提供的设置 (*Set*) 按钮设置最终通道配置，也可以使用全部设置 (*Set All*) 按钮来设置所有通道配置。按下全部设置 (*Set All*) 按钮时，配置页面中的所有详细信息会按照之前选定的内容发送至 MCU。



### 6.4.3 图形页面

图形页面为结果显示和处理页面。捕获的值将在本页面以时域或频率域图形显示。

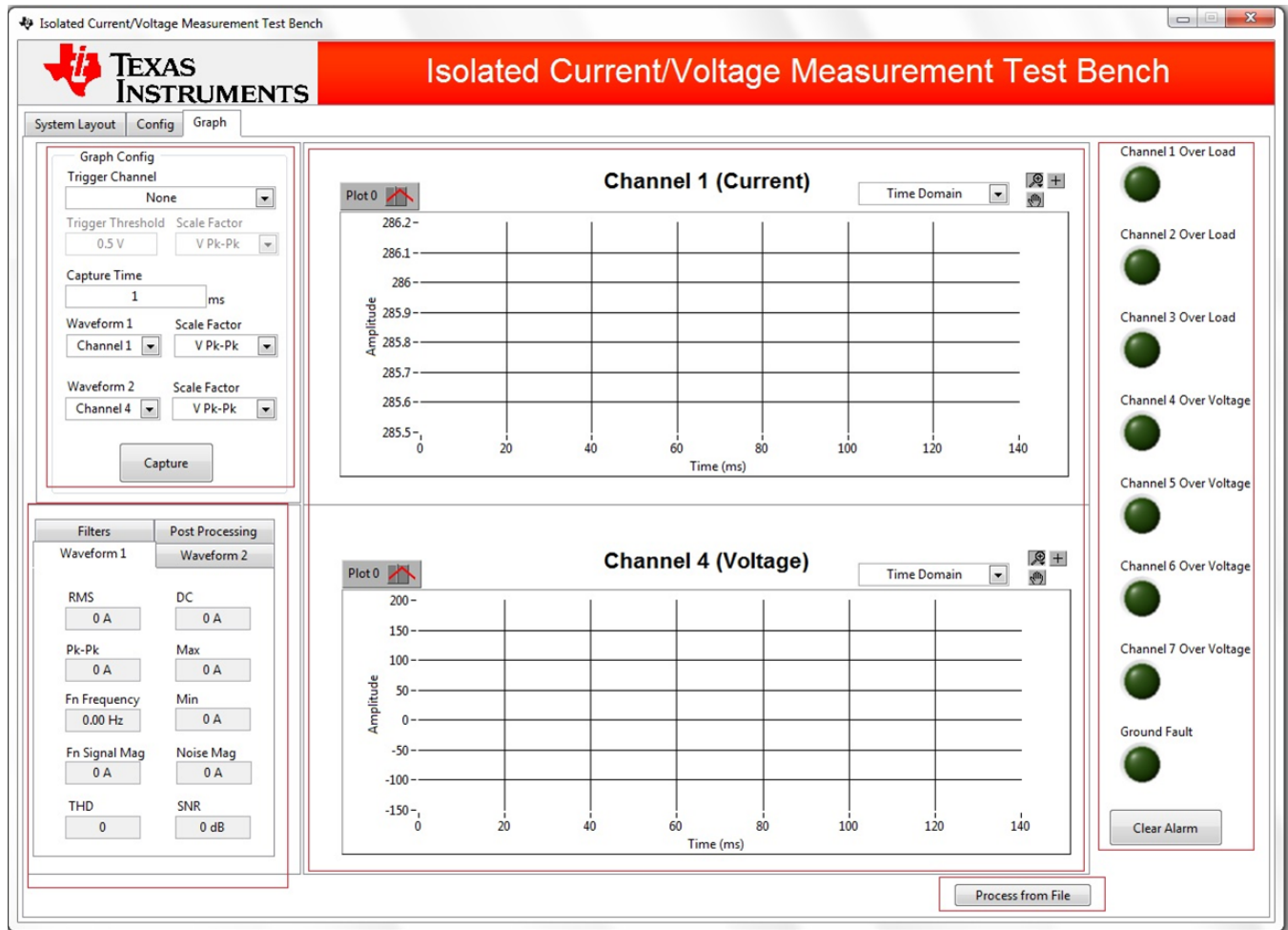


图 72. 图形页面

- **图形配置 (Graph Config):** 此窗格用于设置触发模式并选择要显示的波形。
- **波形参数 (Waveform Parameter):** 此窗格用于显示所选波形的参数。
- **图形窗格 (Graph Pane):** 此窗格以图形方式绘制捕获的数据。
- **错误指示器 (Error Indicators):** 此图形页面中具有八个用于详细说明错误的指示器。清除报警 (Clear Alarm) 用于清除指示。
- **从文件中处理 (Process from File):** 此按钮以图形方式绘制文件中的数据。

### 6.4.3.1 设置触发通道

触发通道可使用触发通道 (*Trigger Channel*) 控件进行设置。选择任一可用通道。

在触发阈值 (*Trigger Threshold*) 控件中设置所选通道的触发阈值，并通过换算系数 (*Scale Factor*) 控件选择换算系数。

在捕获时间 (*Capture Time*) 控件中设置捕获时间（单位为毫秒 (ms)）。

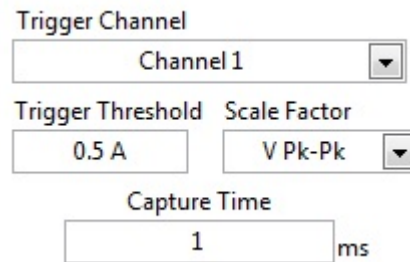


图 73. 触发配置

### 6.4.3.2 选择波形和换算系数

可以从波形 1 (*Waveform 1*) 和波形 2 (*Waveform 2*) 控件中选择要显示的波形及其对应的换算系数。换算系数通过各自控件进行选择。

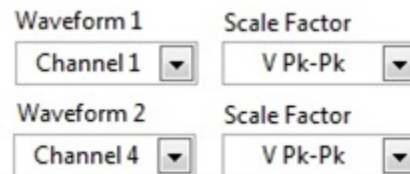


图 74. 波形设置

### 6.4.3.3 选择滤波器

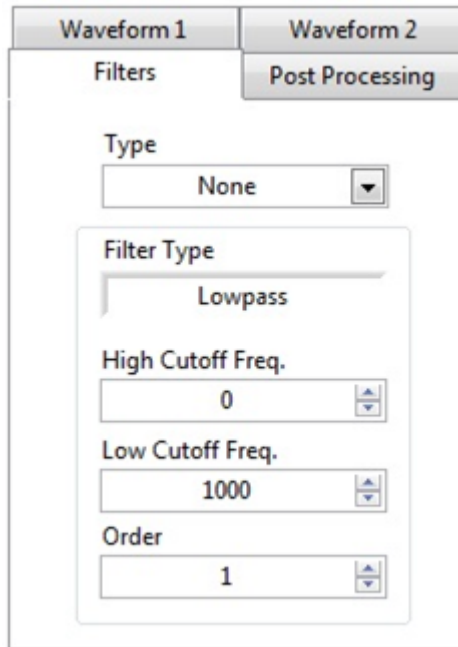


图 75. 滤波器选择

滤波器可以从类型 (*Type*) 控件中选择。

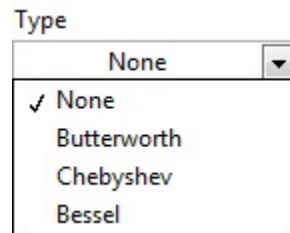


图 76. 滤波器类型选择

可以使用滤波器类型 (*Filter Type*)、截止频率上限 (*High*) 与截止频率下限 (*Low Cutoff Freq.*)以及阶数 (*Order*) 控件设置滤波器特性。

#### 6.4.3.4 FFT 窗口选择

FFT 窗口可以使用后期处理 (Post Processing) 选项卡中的 FFT 窗口 (FFT-Window) 控件进行选择。

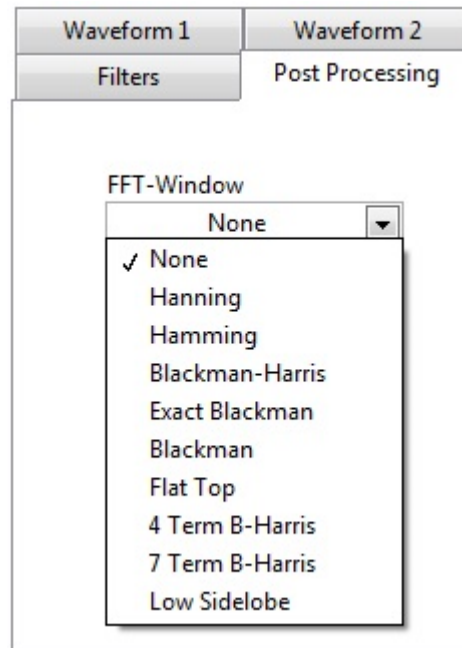


图 77. FFT 窗口选择

#### 6.4.3.5 波形参数显示

选定通道波形的参数可通过波形页面记录，该页面如图 78 所示。

Filters	Post Processing
Waveform 1	Waveform 2
RMS	DC
0 A	0 A
Pk-Pk	Max
0 A	0 A
Fn Frequency	Min
0.00 Hz	0 A
Fn Signal Mag	Noise Mag
0 A	0 A
THD	SNR
0	0 dB

图 78. 波形参数显示

### 6.4.3.6 数据捕获

单击图 79 所示的捕获 (Capture) 按钮可以获取结果。

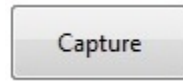


图 79. 数据捕获按钮

捕捉 (Capture) 模式将向 MCU 发送相应的设置，获取指定时间内的数据并在图形中显示一次这些数据。

### 6.4.3.7 选择域

通过为每个图形提供的控件选择图形域，使用此控件可以选择时域 (Time Domain)/频域 (Frequency Domain) (请参见图 17)。

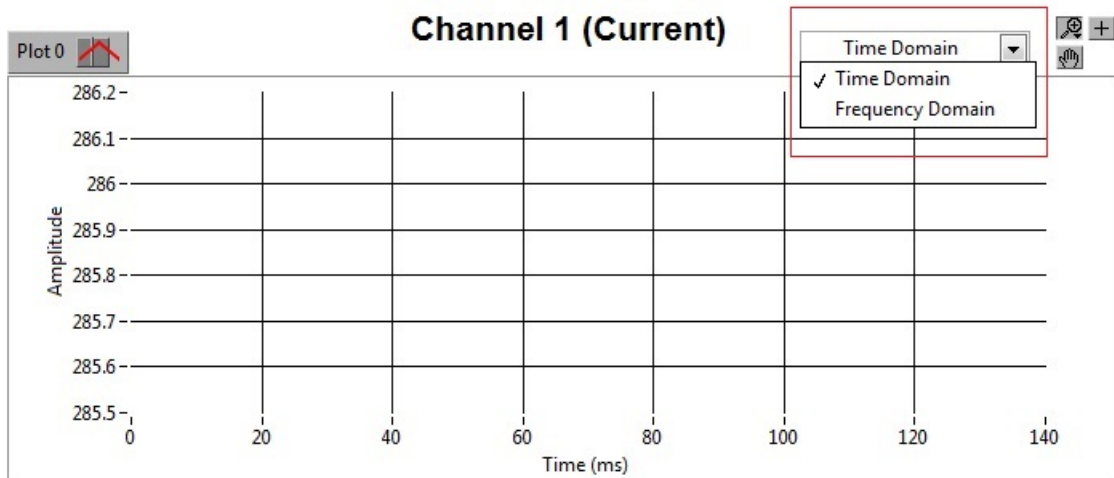


图 80. 图形域选择

### 6.4.3.8 紧急指示器

紧急指示器会在过载和过压条件下激活。按下用户界面中的清除报警 (Clear Alarm) 按钮，可以清除这些指示器。

## 6.5 编辑换算系数

换算系数从 *Scale Factor.csv* 文件中读取，然后加载到用户界面中。

换算系数文件与可执行文件位于同一文件夹中。

Win 7 系统中的位置为：C:\Program Files (x86)\Texas Instruments\Isolated VI Measurement\

- 换算系数值用于将原始数据转换为用户指定的等效电压或电流。
- 偏移值用于校准固定的偏移误差。用从 MCU 收到的原始值减去此值。

换算系数文件结构如表 13 所示：

表 13. 换算系数结构

换算标签	换算系数	偏移
V Pk-Pk	0.023103	0
APC 上的 V	0.00021	0
电流	3.81E-05	0
V_Inamp	0.021437137	0
原始	1	0
CH1 CAL	3.83E-05	0
CH2 CAL	3.81E-05	0

用户可以指定适合的换算标签和相应的换算系数以及偏移值。

---

注： 请勿添加或删除任意列，从而更改文件结构。用户仅可添加或删除行。

---

## 6.6 编辑默认值

各个通道的默认值从 *Default Values.csv* 文件读取。此文件的结构如表 14 所示：

表 14. 默认值结构

通道名称	调制器时钟频率	OSR	高电平阈值	高电平阈值	滤波器类型
1	16	256	100	0	SINC 3
2	16	256	100	0	SINC 3
3	16	256	100	0	SINC 3
4	16	256	100	0	SINC 3
5	16	256	100	0	SINC 3
6	16	256	100	0	SINC 3
7	16	256	100	0	SINC 3

用户可编辑所需字段并保存更改结果。

---

注： 请勿添加或删除任意列或行，从而更改文件结构。

---

## 7 测试结果

针对 3 相电机电压、直流链路电压和交流电流测量的精度要求，对电路板进行了测试。此处给出了测试结果。对于 3 相交流电压测量，分别对相间和相对 DC\_MINUS 电压配置执行了测试。此外，此处还给出了对电源、DAC、时钟、数据和 EMC 进行功能测试的测试结果。

### 7.1 电压测量精度

#### 7.1.1 交流电压精度测试设置

用于验证交流电压测量精度的测试设置，如图 71 所示。将隔离式电流分流和电压测量套件置于热处理室内。采用 Agilent 的 6 ½ 数字万用表 (34401A) 作为基准仪表，执行测试。在 25°C 条件下，读取第一个读数。利用 4.5 节中讨论的理论换算系数计算结果。

对于交流电压测量，执行增益校正。在 25°C、-25°C 和 75°C 条件下，读取读数。此电路板具备灵活性，可以向信号链中添加仪表放大器和 Sallen-Key 滤波器。对于四种可能的配置执行测试：采用直接与 AMC1304 相连的分压器测量相间电压；采用仪表放大器测量相间电压；采用仪表放大器和 Sallen-Key 滤波器测量相间电压；以及采用仪表放大器和 Sallen-Key 滤波器测量相对 DC\_MINUS 电压。图 81 介绍了为实现各个配置对电路板所做的修改。

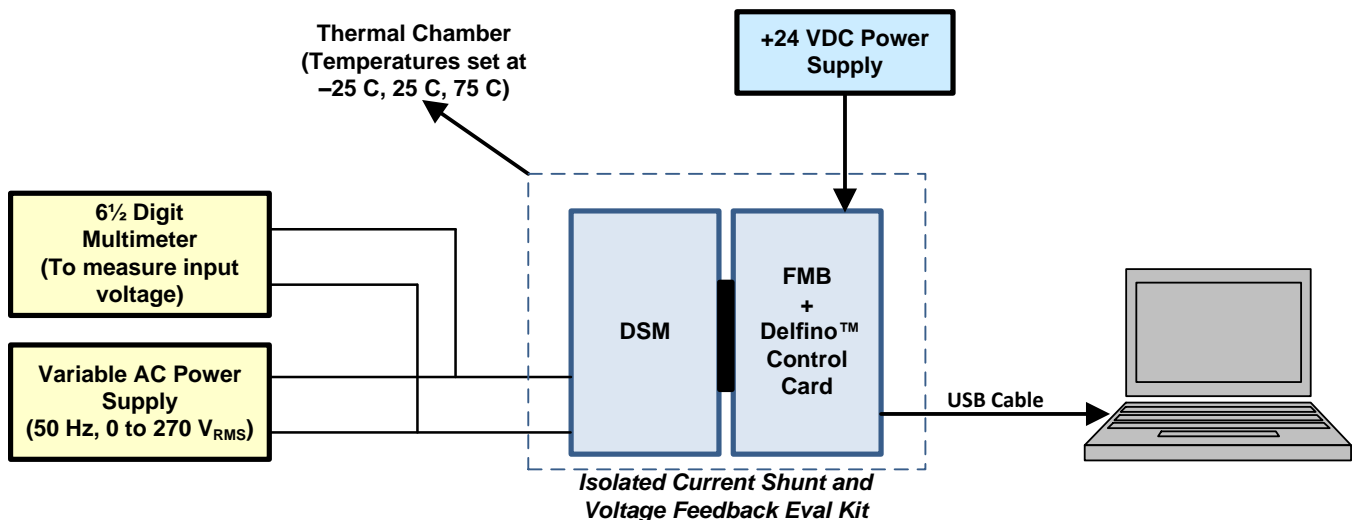


图 81. 交流电压测量精度测试设置

### 7.1.2 结果

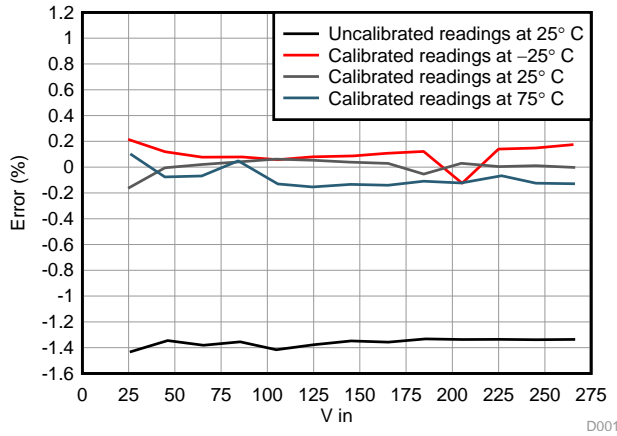


图 82. 相间电压与误差的关系

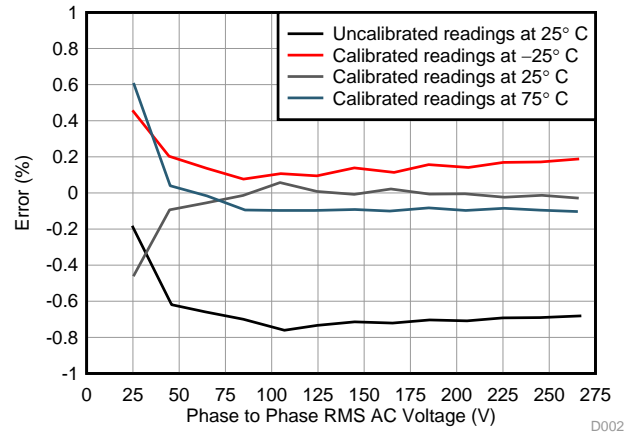


图 83. 使用仪表放大器进行测量时相间电压与误差的关系

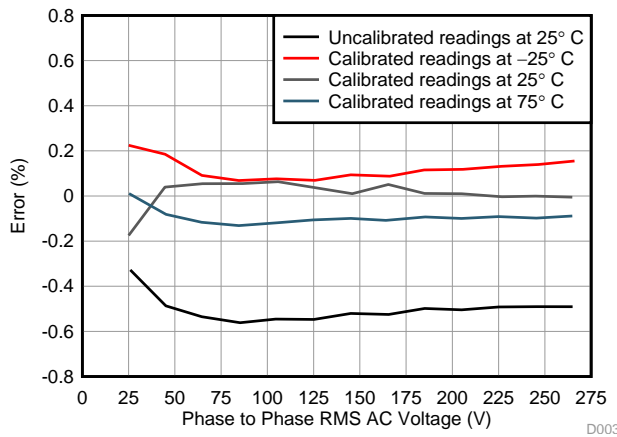


图 84. 使用仪表放大器和 Sallen Key 进行测量时相间电压与误差的关系

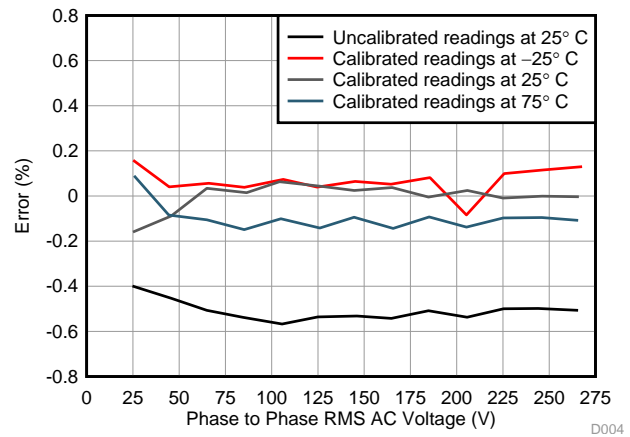


图 85. 使用 Sallen Key 进行测量时相对 DC\_MINUS 电压与误差的关系

AMC130X 具有 4LSB 的积分非线性 (INL)，可能导致增益误差的温度漂移更小 (20ppm/°C)，搭配集成 SINC 数字滤波器 (TMS320F2837x) 用于抽取位流，使系统获得 16 位分辨率与 13 ENOB，从而在 -25°C 至 75°C 的温度范围内达到 0.2% 精度。



### 7.1.3 直流链路电压测量精度测试设置

用于验证直流链路电压测量精度的测试设置，如图 86 所示。将隔离式电流分流和电压测量套件置于热处理室内。Agilent 的 6 ½ 数字万用表 (34401A) 用作计算误差的基准仪表。在 25°C 条件下，读取第一个读数。利用 4.5 节中讨论的理论换算系数计算结果。对于直流链路测量，执行了偏移误差校正和增益校正。在 25°C、-25°C 和 75°C 条件下，读取读数。

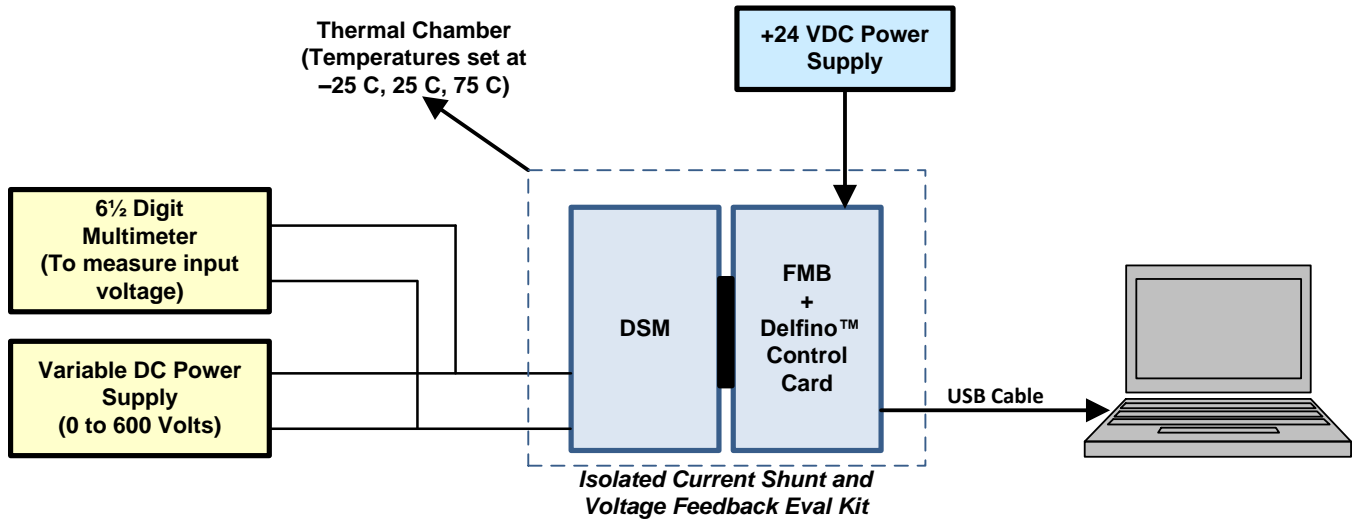


图 86. 直流链路电压测量精度测试设置

### 7.1.4 结果

图 87 和图 88 显示了误差与施加的直流链路电压的关系。电压较低时出现未校准误差是由于存在偏移误差。

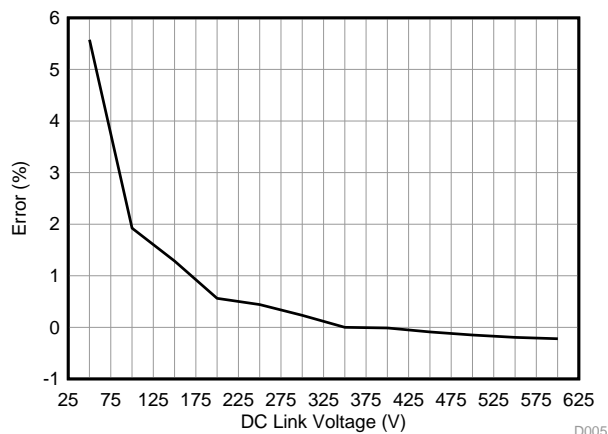


图 87. 25°C 时的未校准读数

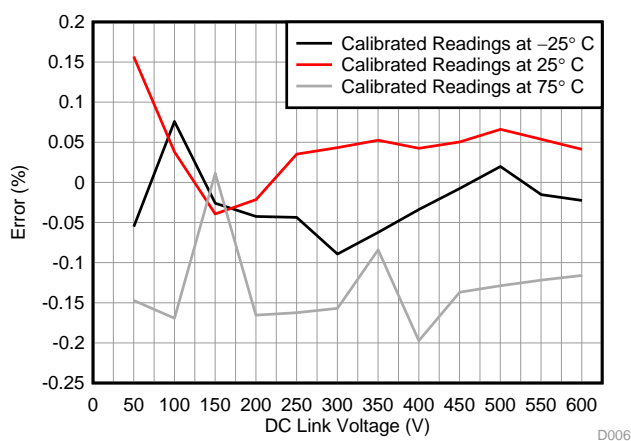


图 88. 直流链路电压与误差的关系

## 7.2 电流测量精度

### 7.2.1 直流测量精度测试设置

用于验证直流测量精度的测试设置，如图 89 所示。将隔离式电流分流和电压测量评估套件置于热处理室内。所用的直流电源为 Keithley 2420。两个电源并联使用以获得所需的最大电流。该电源具有内置高精度计量仪，可用作基准仪表。在 25°C 条件下，读取第一个读数。利用 4.5 节中讨论的理论换算系数计算结果。对于直流测量，执行了增益校正。在 25°C、-25°C 和 75°C 条件下，读取读数。执行此测试时，使用 Agilent 的 6 ½ 数字万用表 (34401A) 测量分流电压。分流电压和分流电流用于计算分流阻抗。所得结果，如表 15 所示。

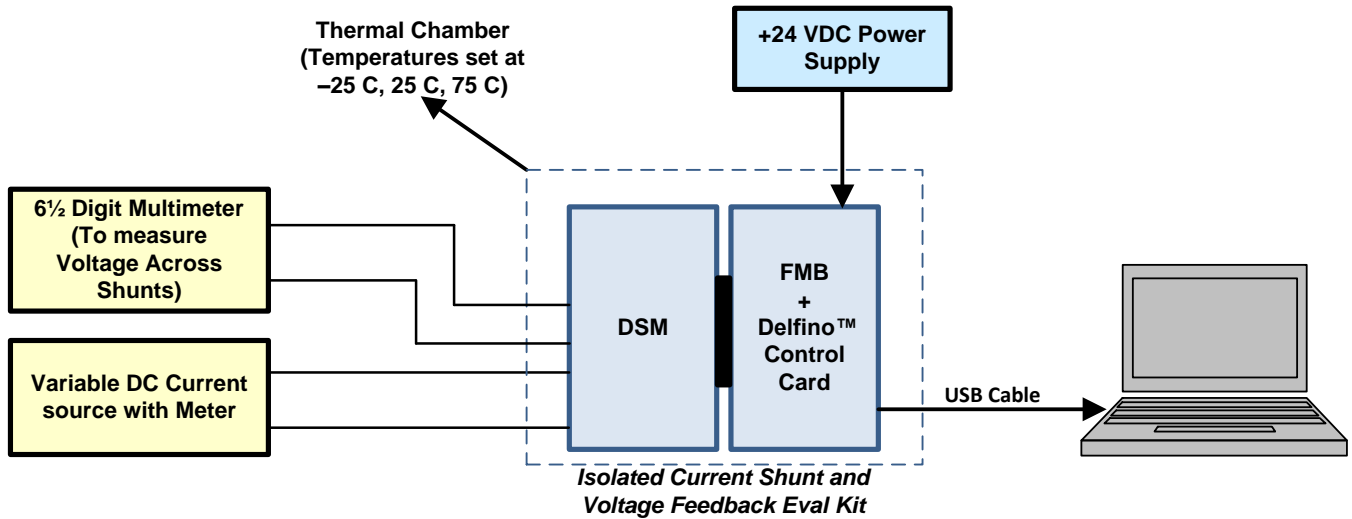


图 89. 直流测量精度测试设置

## 7.2.2 结果

表 15. 有效分流电阻

测试	值
-25°C 时的有效分流电阻	5.131mΩ
25°C 时的有效分流电阻	5.2104mΩ
75°C 时的有效分流电阻	5.2865mΩ

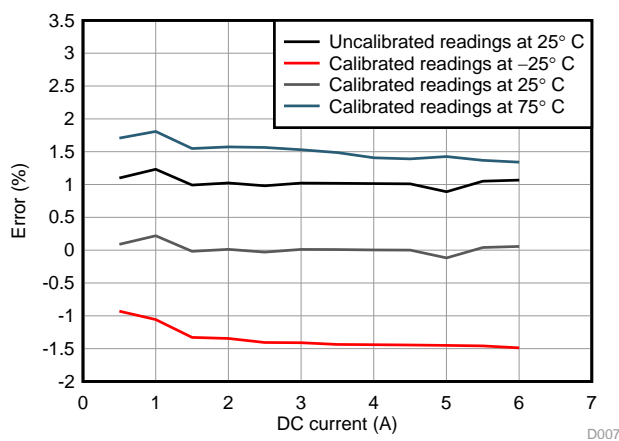


图 90. 直流电流与误差的关系

注: 由于分流电阻中焊点电阻的变化导致观察到的误差更大。若妥善布线或使用 4 线制分流电阻, 校准后的精度在 -25°C 至 75°C 温度范围内将处于 0.2% 以内。

### 7.2.3 交流测量精度测试设置

用于验证交流测量精度的测试设置，如图 91 所示。将隔离式电流分流和电压测量评估套件置于热处理室内。使用 Agilent 的 6 1/2 数字万用表 (34401A) 测量交流量，并将该仪表用作基准仪表。在 25°C 条件下，读取第一个读数。利用 4.5 节中讨论的理论换算系数计算结果。对于交流测量，执行了增益校正。在 25°C、-25°C 和 75°C 条件下，读取读数。

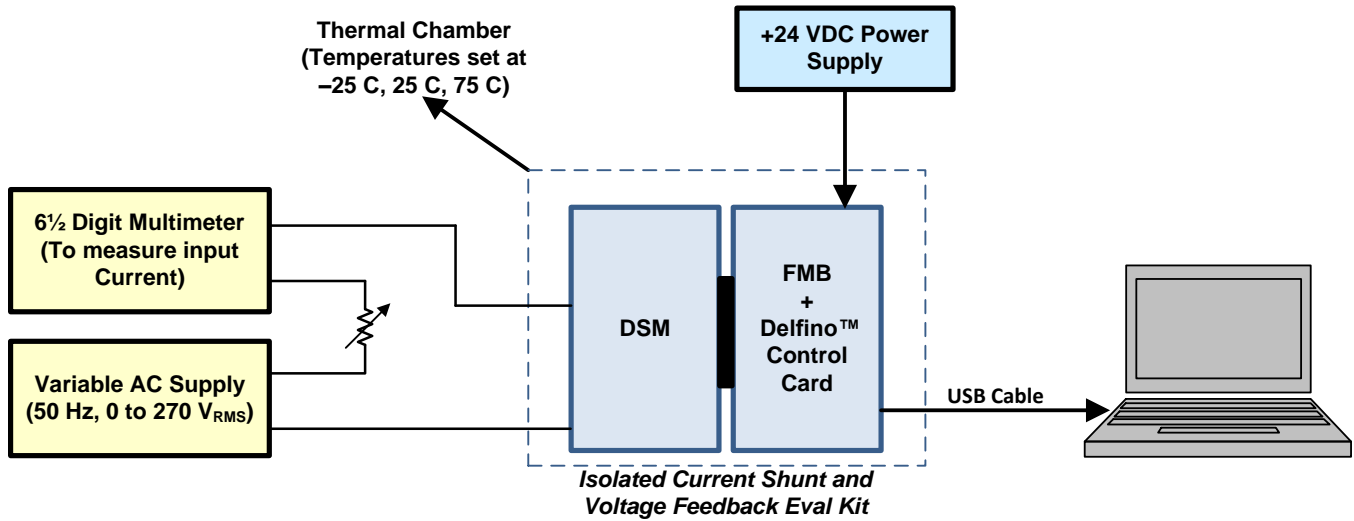


图 91. 交流电流测量精度测试设置

### 7.2.4 结果

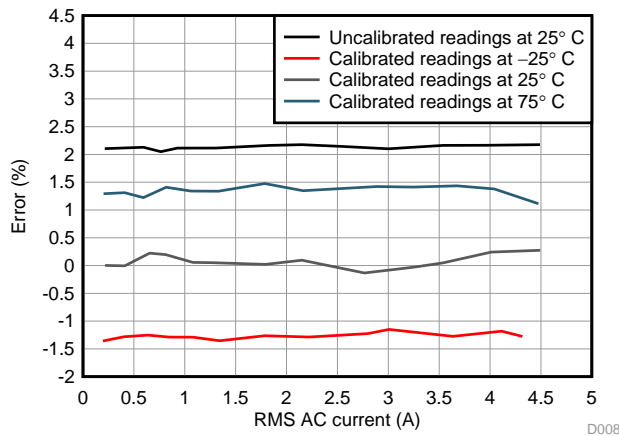


图 92. 交流电流与误差的关系

注：由于分流电阻中焊点电阻的变化导致观察到的误差更大。若妥善布线或使用 4 线制分流电阻，校准后的精度在 -25°C 至 75°C 温度范围内将处于 0.2% 以内。

### 7.3 电机驱动与负载设置测试

#### 7.3.1 测试设置

用于验证电机驱动交流测量精度的测试设置，如图 93 所示。对电机执行测试时，在上一测试中获得的同一校准数据会保留。

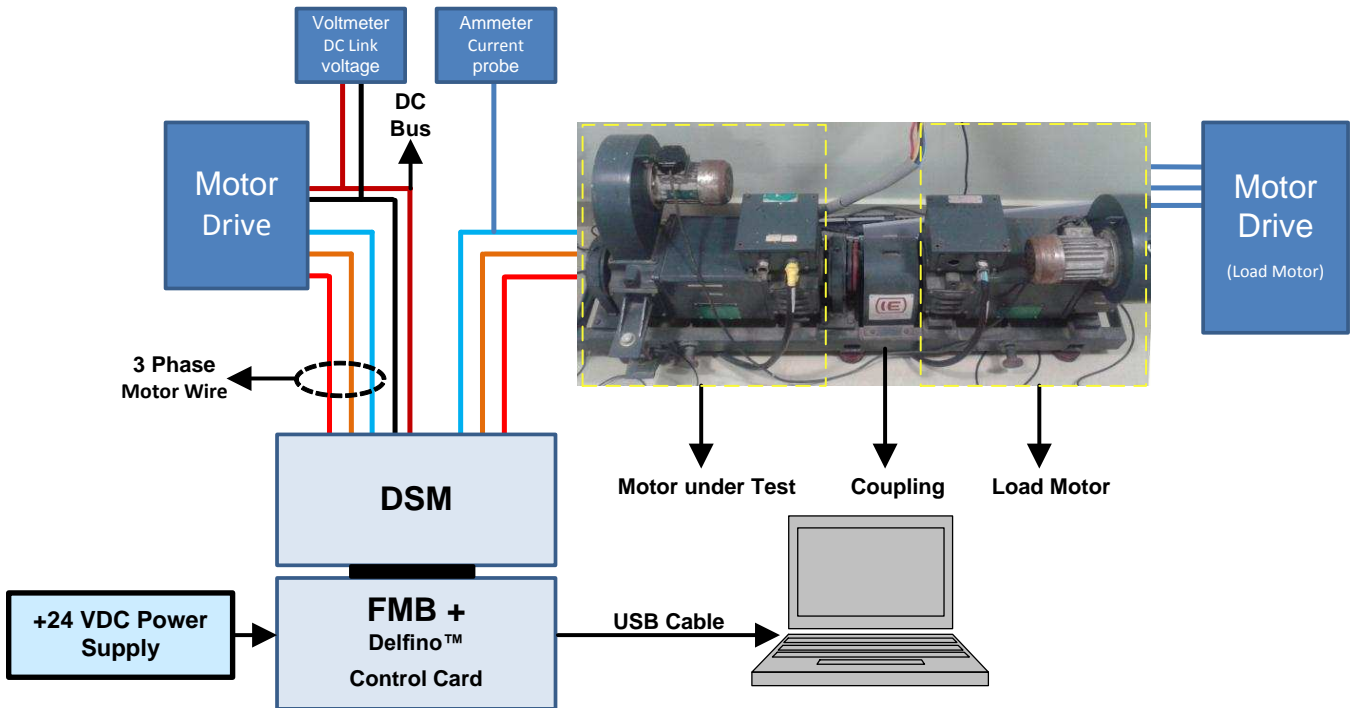


图 93. 电机驱动与负载设置测试

#### 7.3.2 结果

误差与电机电流的关系，如图 94 所示，误差与直流链路电压的关系，如图 95 所示。请注意，误差未呈现任何趋势；最大误差位于  $\pm 0.2\%$  误差范围内。

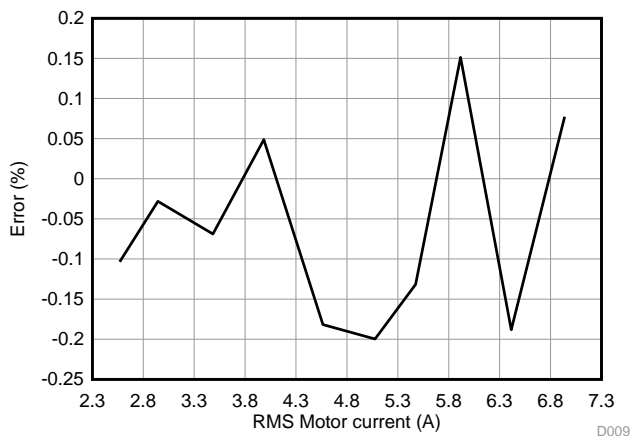


图 94. 电机电流与误差的关系，采用电机驱动与负载设置进行测试

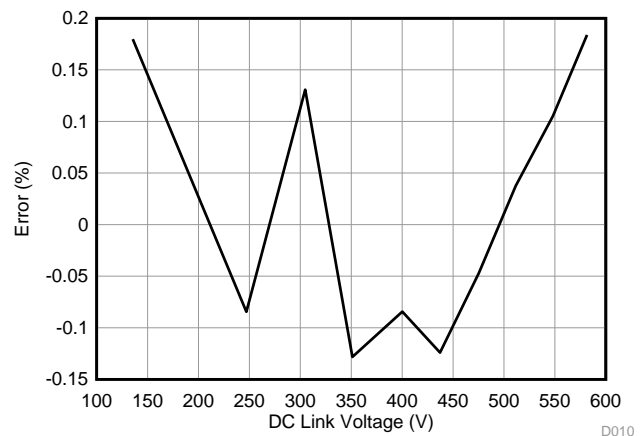


图 95. 直流链路电压与误差的关系，采用电机驱动与负载设置进行测试

### 7.4 短路精度和响应时间

分流电阻用于验证短路报警是否为 50mΩ。按 4.4 节所述，将阈值设为 1.25A。用于短路测试的测试设置，如图 96 所示。PC GUI 用于设置阈值设置，并将调制器时钟频率设为 8.192MHz。将电路中的初始电流设为低于阈值。闭合开关后，电路中的电流会超过 1.25A。

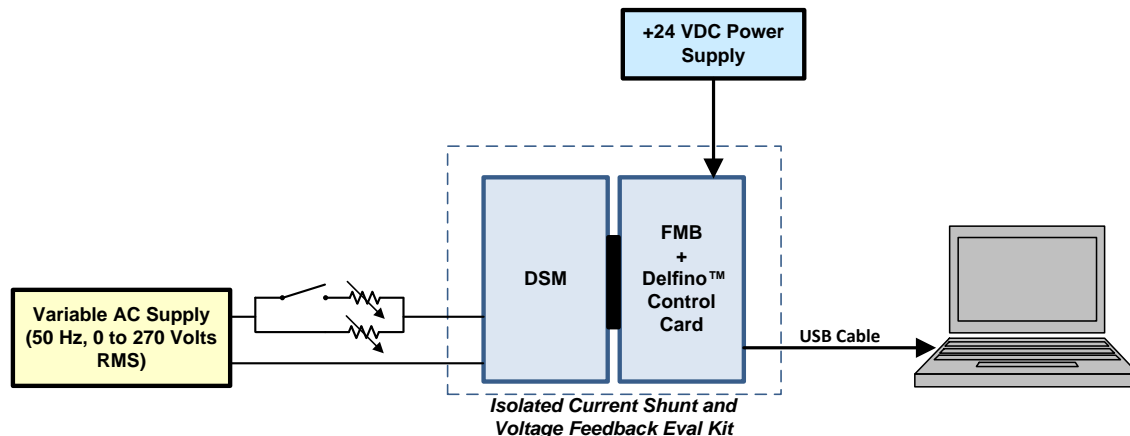


图 96. 用于短路测试的测试设置

图 97 显示了开关闭合时，利用电流探针在示波器上捕获的电流波形。波形以黄色显示。以红色显色的另一条波形来自跳线 J2.10 上的 GPIO。在 FMB 上，此 GPIO 用于指示短路事件。电流探针会在测量信号时实现不同接地基准之间的隔离，若要安全执行此测试，需要采用电流探针。在瞬时电流超过阈值时，使用修改后的固件将 GPIO 设置为高电平。该固件提供了一种检查短路检测精度的简便方法。在图形中比较短路检测精度时，值 1.110A 表示 1.25A，因为电流探针具有衰减。

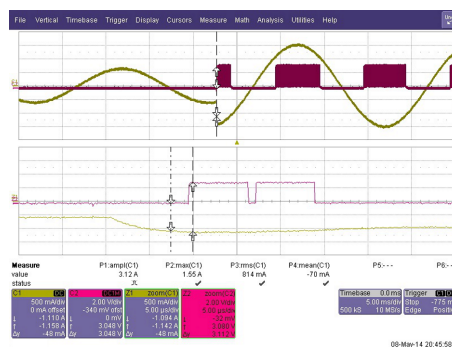


图 97. 短路电流波形（黄色）和 FMB 电路板 J2 插头 GPIO1 引脚 10 上来自 MCU 的信号（红色）

采用这种方法，很难确定发生短路事件的确切位置。开关闭合时波形的形状确实会发生变化，但此时输入端电流未达到阈值。请不要将外部电路中电流达到阈值所花费的时间计入短路响应时间中。因此，本设计需要理想的电源波形，以实现从低于阈值到高于阈值的瞬时跳变。移除交流电源和分流电阻并使用信号发生器后，可以打破这一限制。信号发生器用于在 AMC 输入端施加一个表示短路条件的信号。将信号发生器设置为峰值超过 ±62.5mV 的方波，以表示等效电流 1.25A。

图 98 显示了捕获的波形。蓝色波形表示信号发生器的波形，黄色波形表示 GPIO 上由控制器生成的短路信号。信号发生器方波信号的边沿表示开始出现短路。信号发生器的下降沿与检测到事件的时间差为 4.4μs。理论时间延迟等于 SDFM 外设中比较器模块完成一次采样转换所用的时间。比较器的过采样率设置为 32；因此，sinc1 滤波器时间延迟可以通过以 8.192MHz 频率完成 32 个调制器时钟周期所用的时间进行计算。即为 1/(32 × 8.192MHz) = 3.8μs。附加延迟是由 GPIO 上升时间和 ISR 执行时间所引起的。

请注意，输入信号与 GPIO 信号的接地端不同，因此可能处于不同的电势下。在上述测试中，两个探针均需要隔离以保证测试安全进行。否则，在电路板上使用常规探针会导致电路板上经过探针的不同接地点之间发生短路。上述测试所用的示波器在各通道之间已进行隔离。

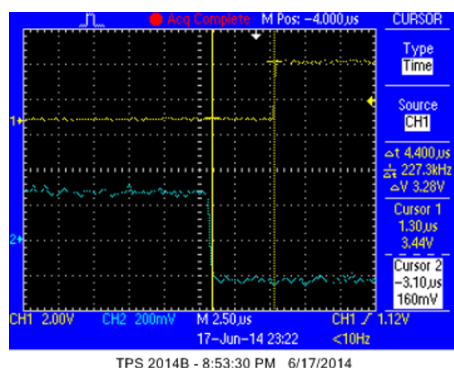


图 98. 施加于 **AMC1304** 的短路信号（蓝色）和 **FMB** 电路板 **J2** 插头 **GPIO1** 引脚 **10** 上来自 **MCU** 的信号（黄色）



## 7.5 功能测试

### 7.5.1 测试设置

本参考设计可与 TI 的高压电机控制和 PFC 开发者套件 (TMDSHVMTRPFCKIT) 搭配使用, 以此驱动相应电机并对本设计的功能进行评估。该套件具有用于控制电机的 GUI 并具有速度输入。

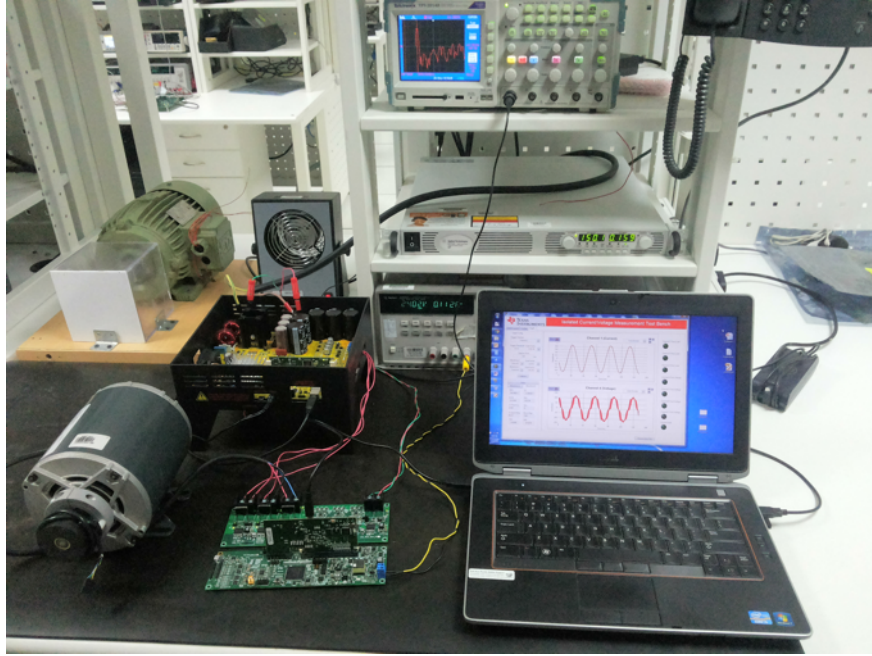


图 99. 隔离式电流分流和电压测量评估套件与高压 (HV) 逆变器套件和交流电机

7.5.2 电源

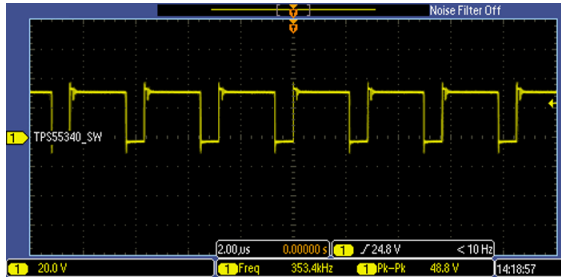


图 100. TPS5534 24V 至 6V、DC-DC 转换器的开关节点波形

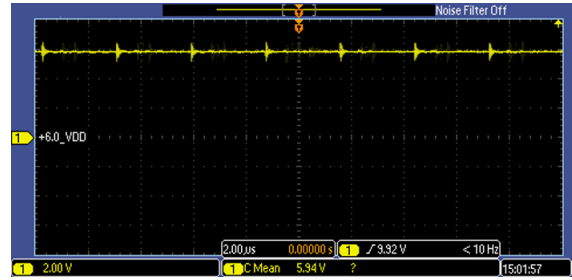


图 101. FMB 电路板上的 6.0\_VDD 电源轨

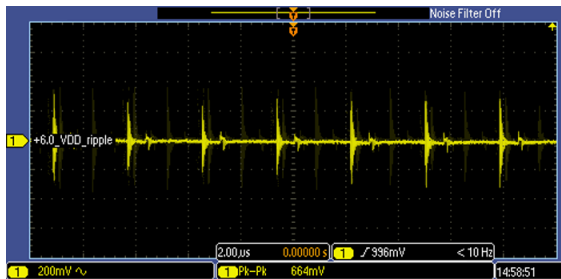


图 102. FMB 电路板 6.0\_VDD 电源轨上的纹波

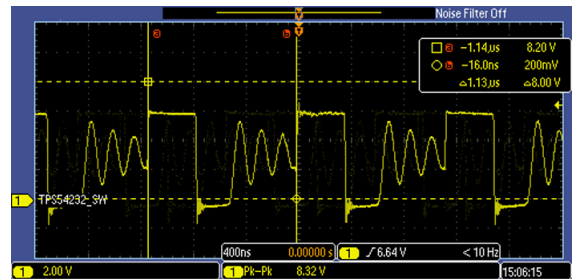


图 103. FMB 电路板上 TPS54232 6V 至 3.3V、DC-DC 转换器的开关节点波形

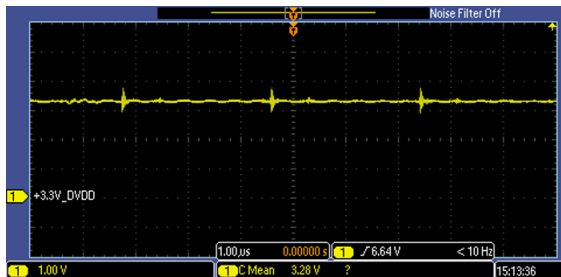


图 104. FMB 电路板上的 3.3V\_DVDD 电源轨

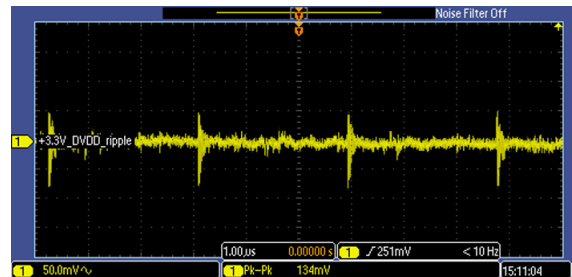


图 105. FMB 电路板 3.3V\_DVDD 电源轨上的纹波

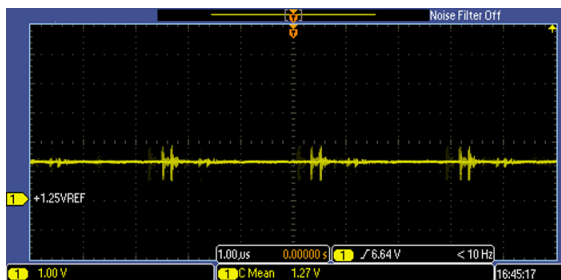


图 106. FMB 电路板上来自 REF3012 的 1.25V 基准电压

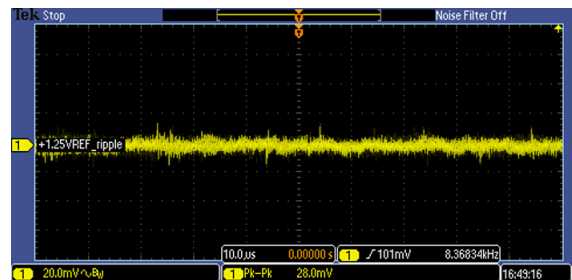


图 107. FMB 电路板上来自 REF3012 的 1.25V 基准电压的纹波

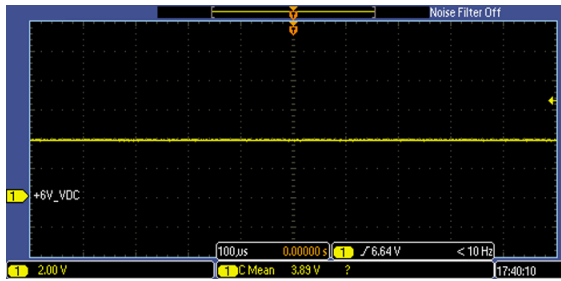


图 108. 在电容 C73 两端测量的 DSM 电路板 6V\_VDC 电源轨

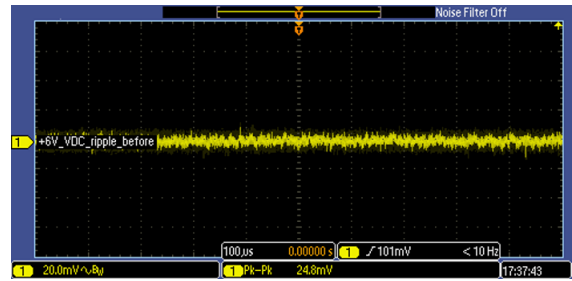


图 109. 电机断开时, 在电容 C73 两端测量的 DSM 电路板 6.0V\_VDC 电源轨的纹波

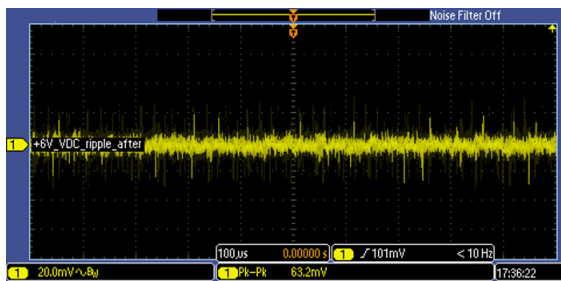


图 110. 电机接通时, 在电容 C73 两端测量的 DSM 电路板 6.0V\_VDC 电源轨的纹波

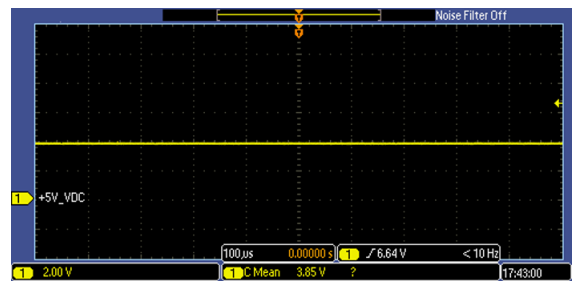


图 111. DSM 电路板上的 5.0V\_DVDD 电源轨

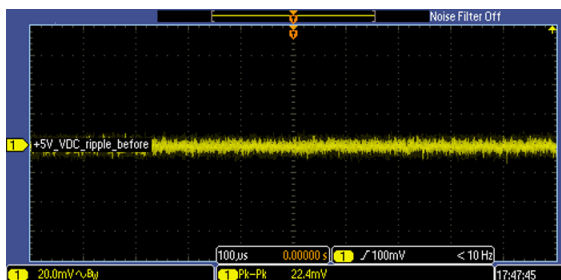


图 112. 电机断开时, 在电容 C96 两端测量的 DSM 电路板 5.0V\_PH 电源轨的纹波

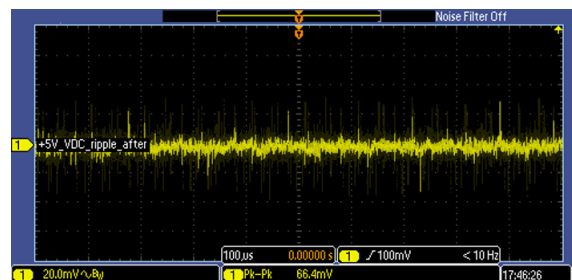


图 113. 电机接通时, 在电容 C96 两端测量的 DSM 电路板 5.0V\_PH 电源轨的纹波

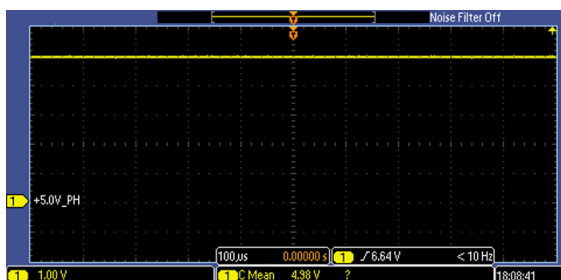


图 114. 电机接通时, 在电容 C103 两端测量的 DSM 电路板 5.0V\_PH 电源轨

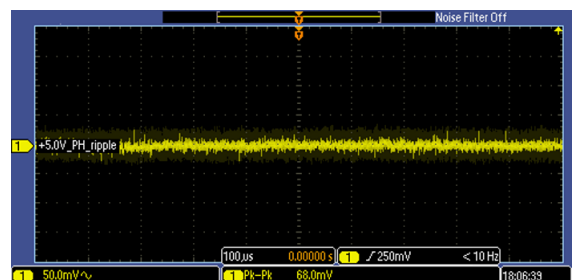


图 115. 电机接通时, 在电容 C103 两端测量的 DSM 电路板 5.0V\_PH 电源轨的纹波

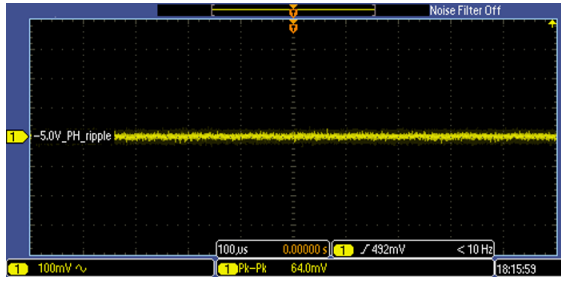


图 116. 电机接通时，在电容 C84 两端测量的 DSM 电路板 - 5.0V\_PH 电源轨

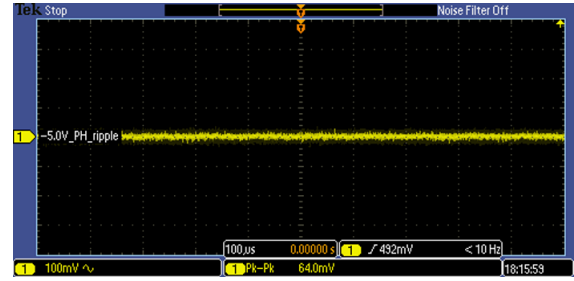


图 117. 电机接通时，在电容 C84 两端测量的 DSM 电路板 - 5.0V\_PH 电源轨的纹波

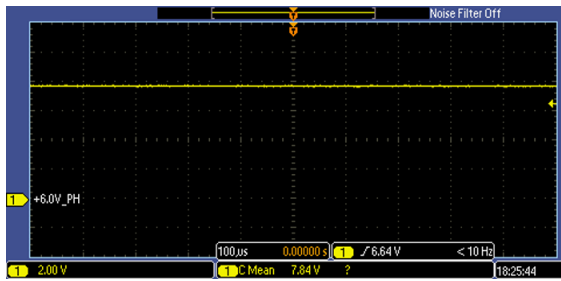


图 118. 电机接通时，在电容 C107 两端测量的 DSM 电路板 6.0V\_PH 电源轨

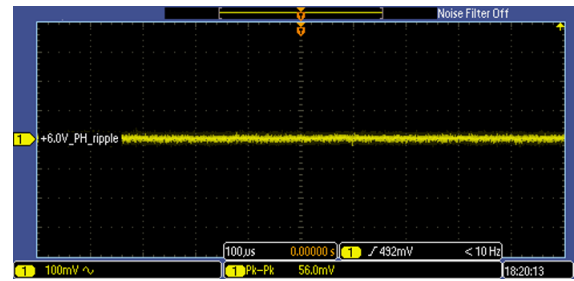


图 119. 电机接通时，在电容 C107 两端测量的 DSM 电路板 6V\_PH 电源轨的纹波

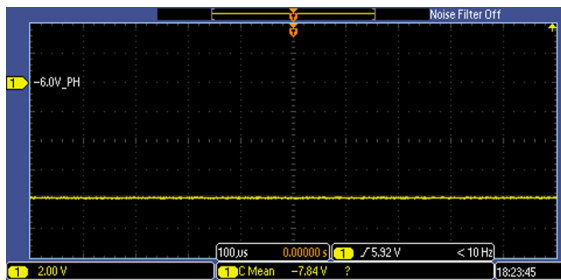


图 120. 电机接通时，在电容 C83 两端测量的 DSM 电路板 - 6.0V\_PH 电源轨

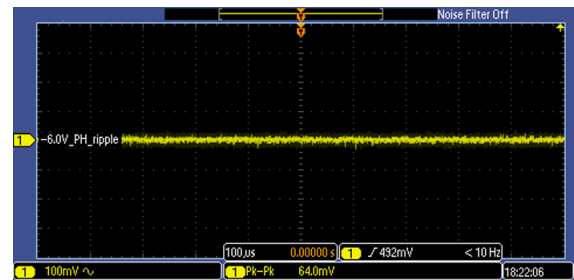


图 121. 电机接通时，在电容 C83 两端测量的 DSM 电路板 - 6V\_PH 电源轨的纹波

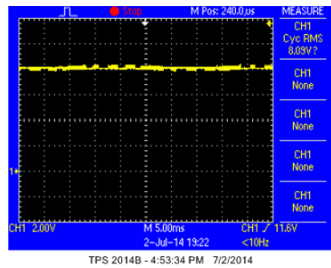


图 122. 电机接通时，在电容 C28 两端测量的 DSM 电路板 6V\_USH 电源轨

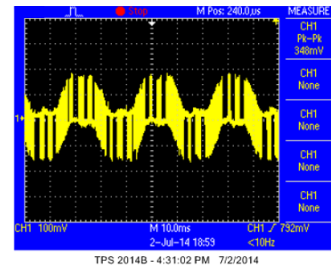


图 123. 电机接通时，在电容 C28 两端测量的 DSM 电路板 6.0V\_USH 电源轨的纹波

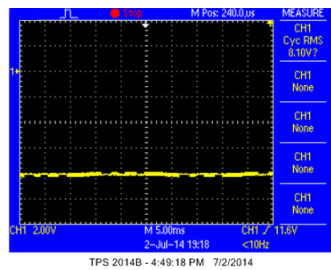


图 124. 电机接通时，在电容 C33 两端测量的 DSM 电路板 - 6.0V\_USH 电源轨

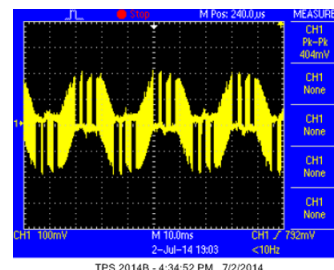


图 125. 电机接通时，在电容 C33 两端测量的 DSM 电路板 - 6.0V\_USH 电源轨的纹波

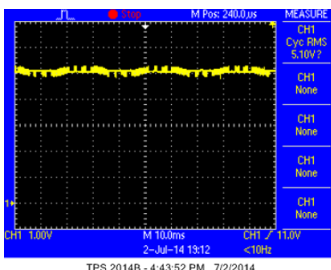


图 126. 电机接通时，在电容 C38 两端测量的 DSM 电路板 5.0V\_USH 电源轨

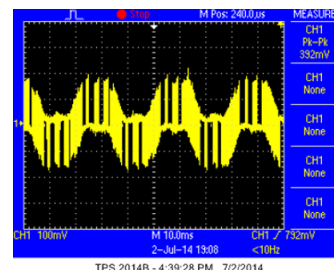


图 127. 电机接通时，在电容 C38 两端测量的 DSM 电路板 5.0V\_USH 电源轨的纹波

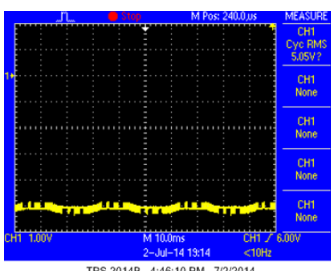


图 128. 电机接通时，在电容 C51 两端测量的 DSM 电路板 - 5.0V\_USH 电源轨

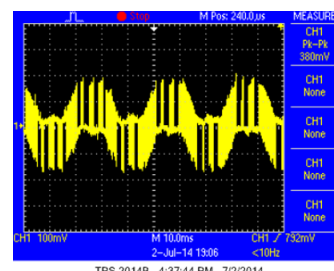


图 129. 电机接通时，在电容 C51 两端测量的 DSM 电路板 - 5.0V\_USH 电源轨的纹波

### 7.5.3 AMC1304 时钟与数据图

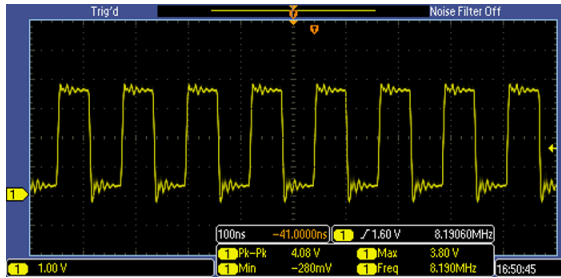


图 130. AMC1304 的输入时钟

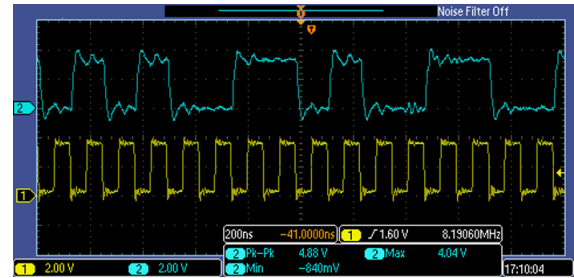


图 131. AMC1304 的数据输出（蓝色波形）和输入时钟（黄色波形）

### 7.5.4 DAC 输出信号

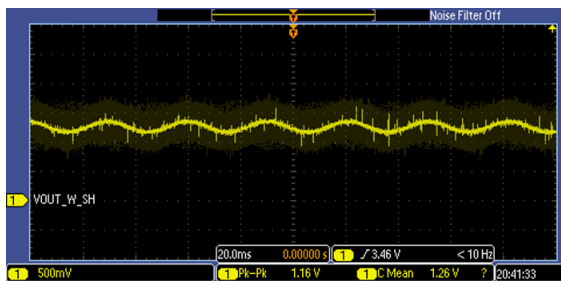


图 132. 分流电阻值为 5mΩ 时，DAC 的输出 VOUT\_W\_SH

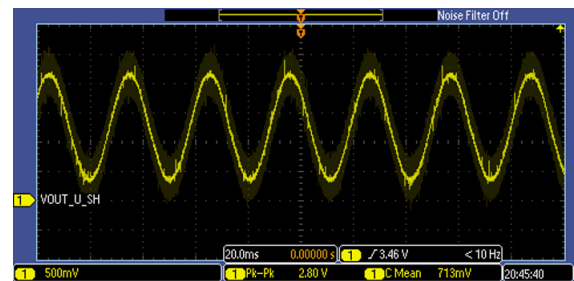


图 133. 分流电阻值为 50mΩ 时，DAC 的输出 VOUT\_U\_SH

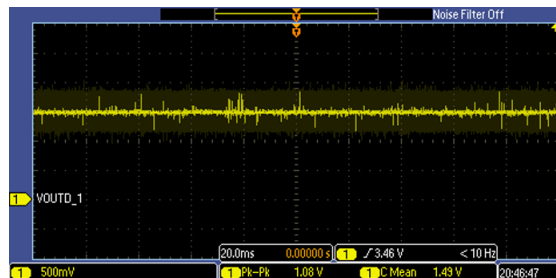


图 134. DAC 输出，VOUTD\_1；代表直流链路电压；直流链路电压为 150V

## 7.6 EMC 测试结果

根据 IEC61800-3 标准中关于 ESD、电快速瞬变脉冲群 (EFT) 和浪涌的要求，并参考 IEC61000-4-2、IEC61000-4-4 和 IEC61000-4-5 标准，分别对本设计进行测试。要查看 EMC 测试结果文档，请访问 [TIDA-00171](http://www.ti.com/lit/tid00171)。

## 8 设计文件

### 8.1 电路原理图

要下载电路原理图，请参见 [TIDA-00171](#) 的设计文件。

#### 8.1.1 DSM

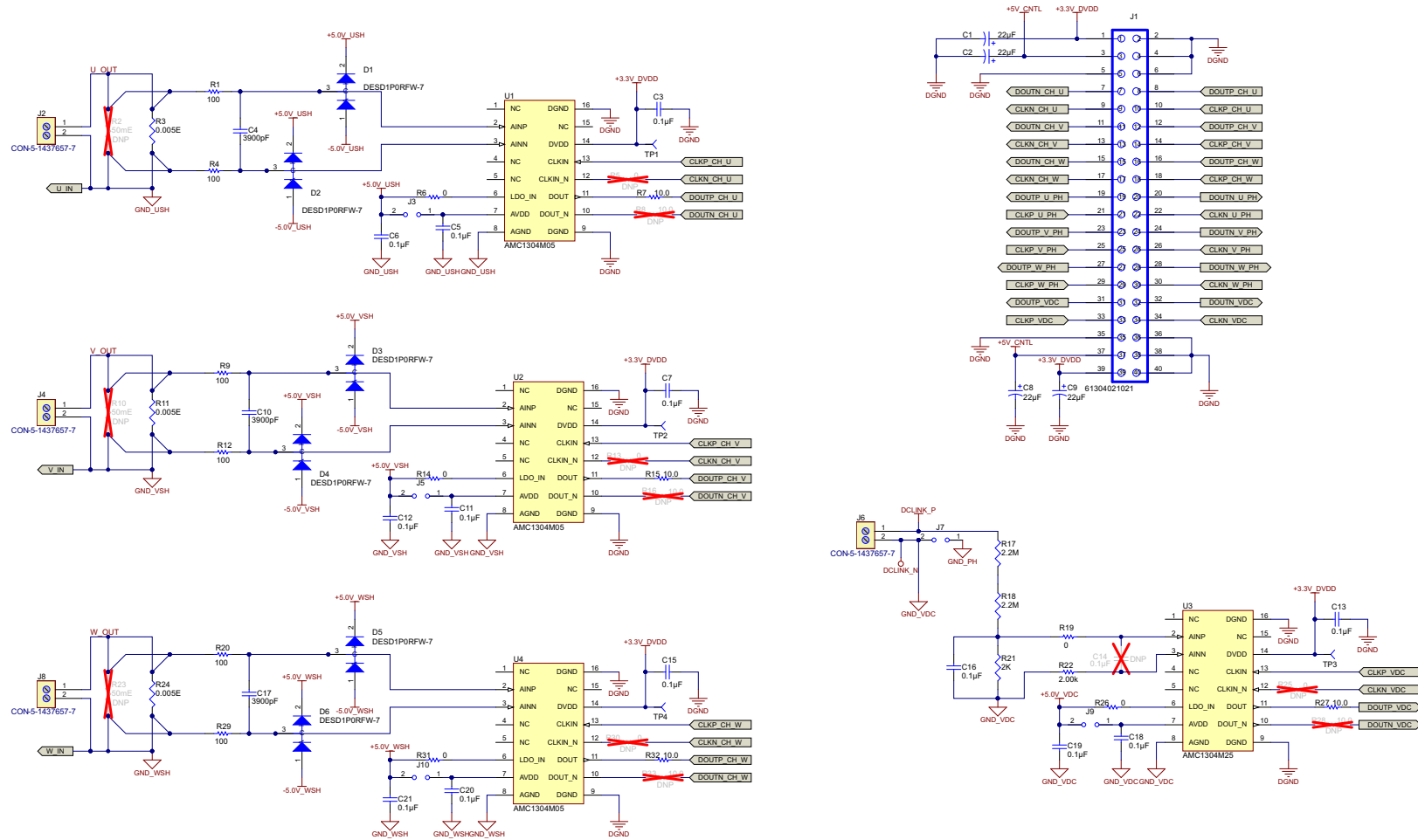


图 135. 电流感测电路原理图

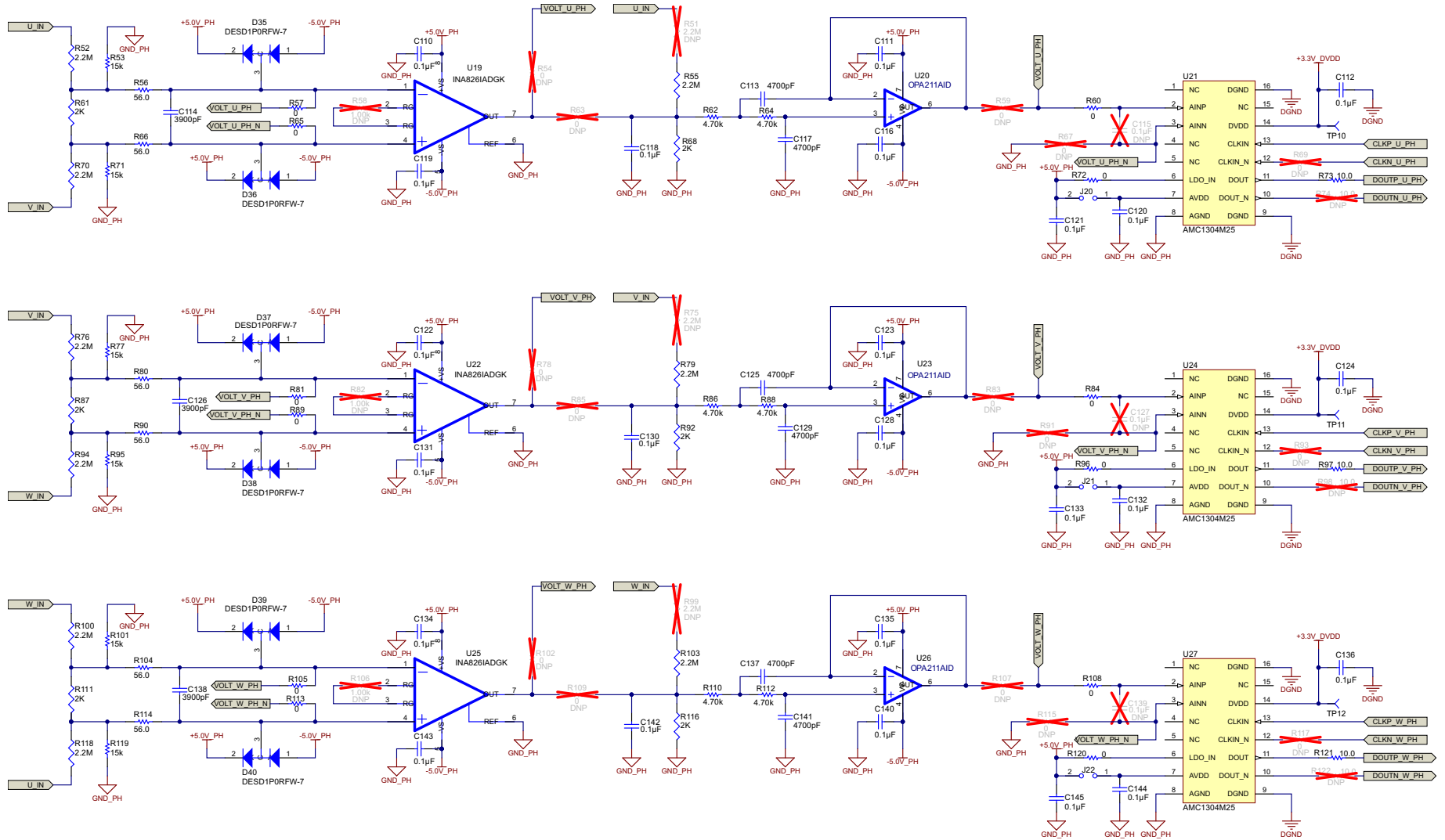


图 136. 电压调节电路原理图



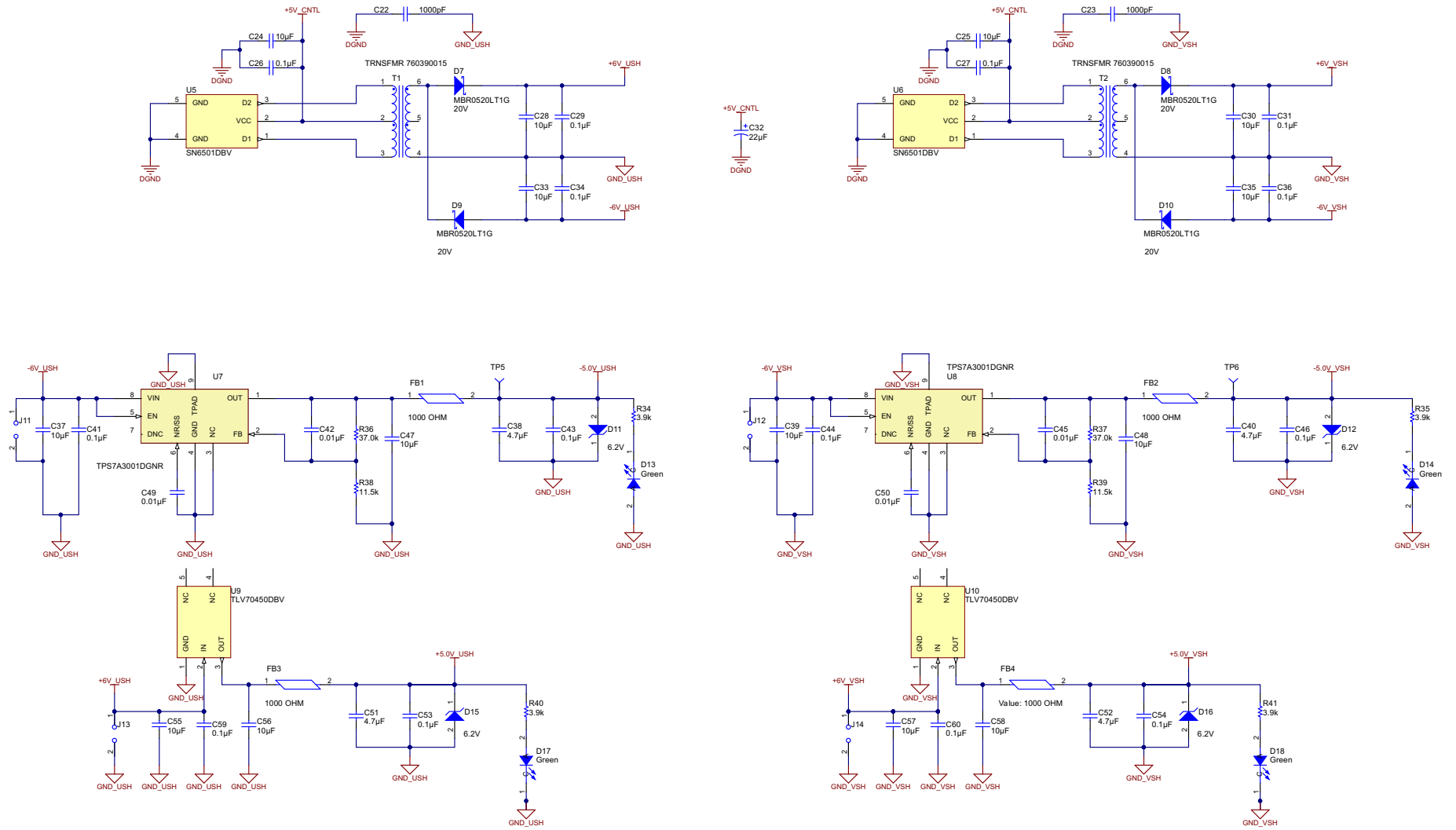


图 137. 电源 1 电路原理图

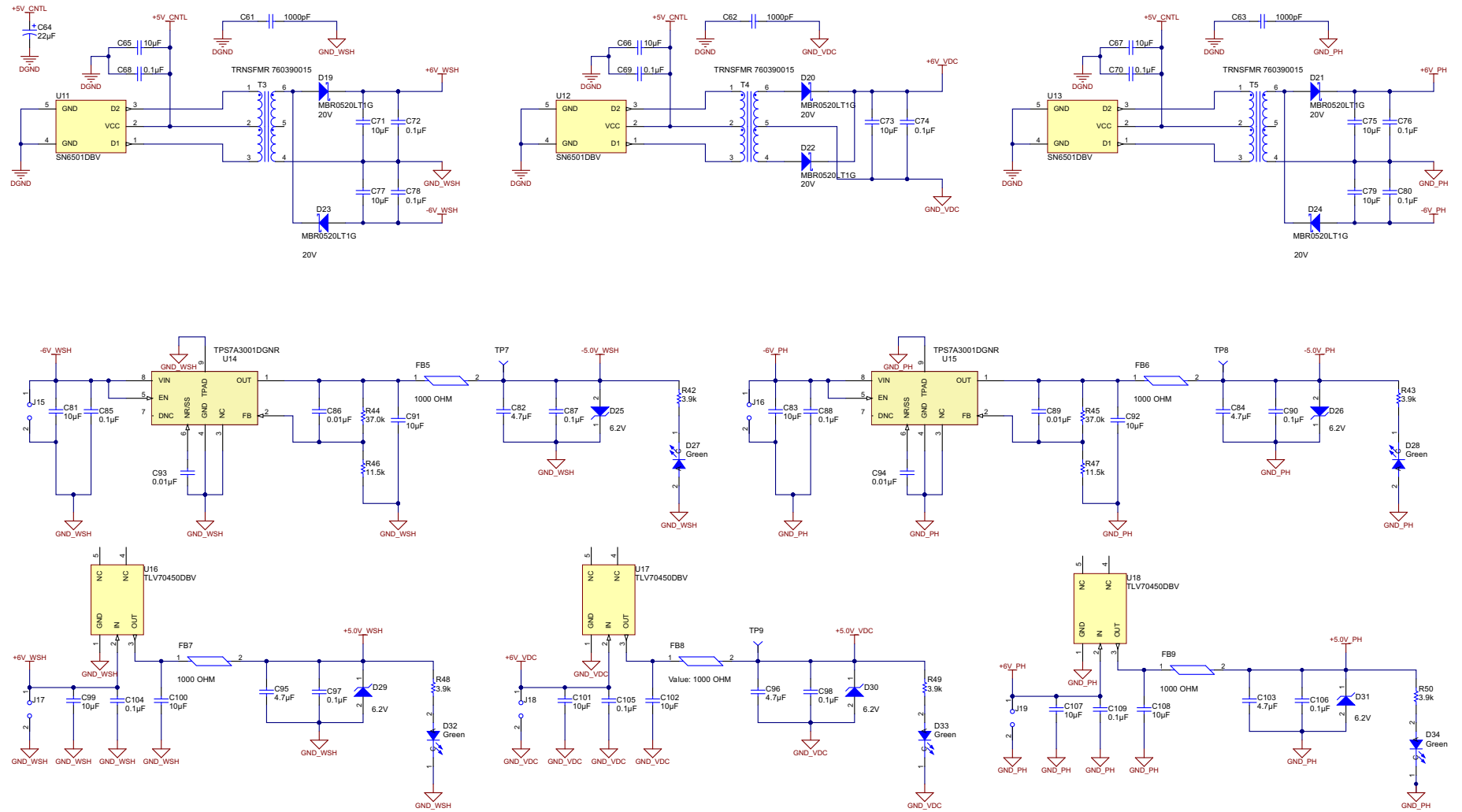


图 138. 电源 2 电路原理图

8.1.2 FMB

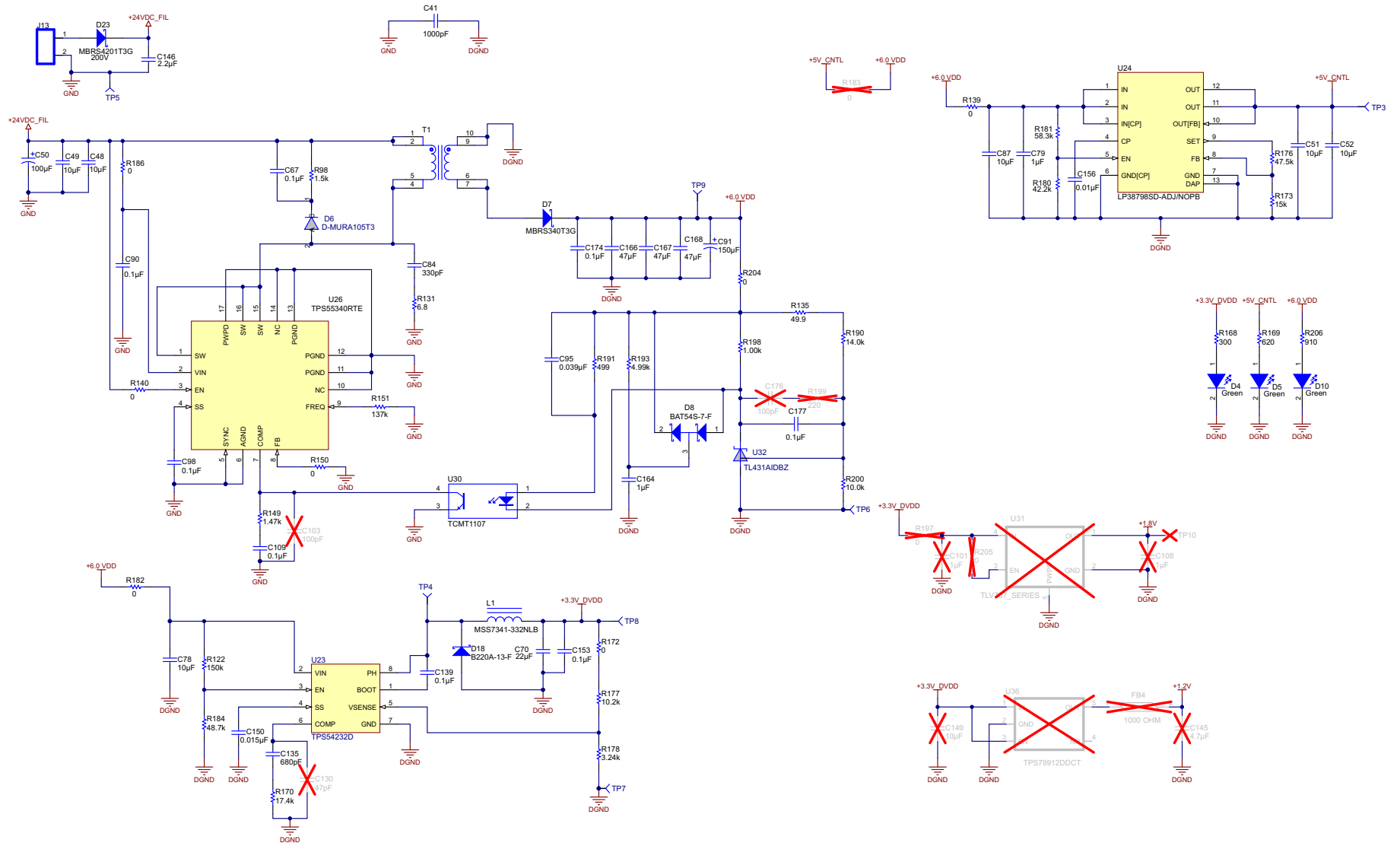


图 139. 电源电路原理图

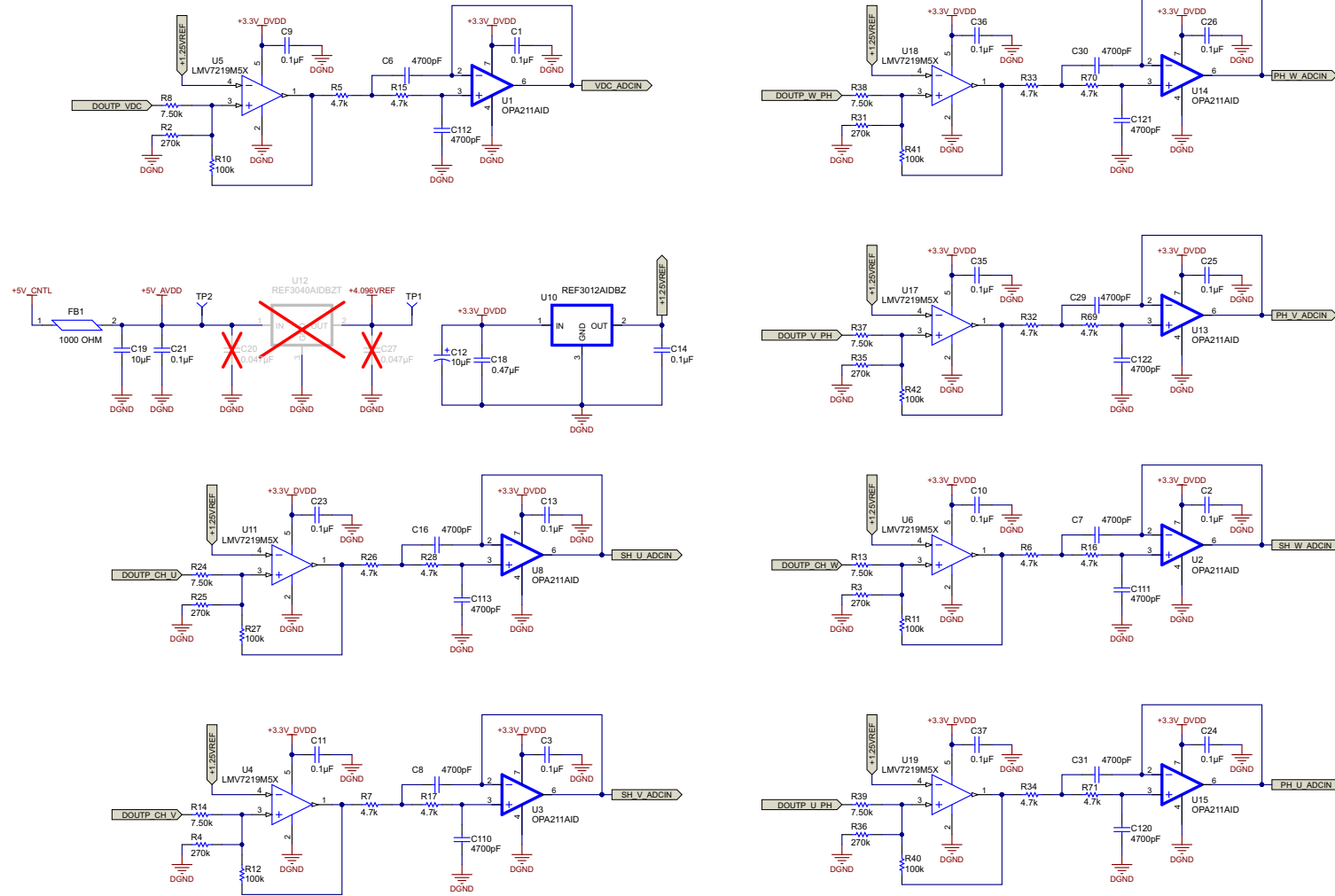


图 140. SDM OP 滤波电路原理图

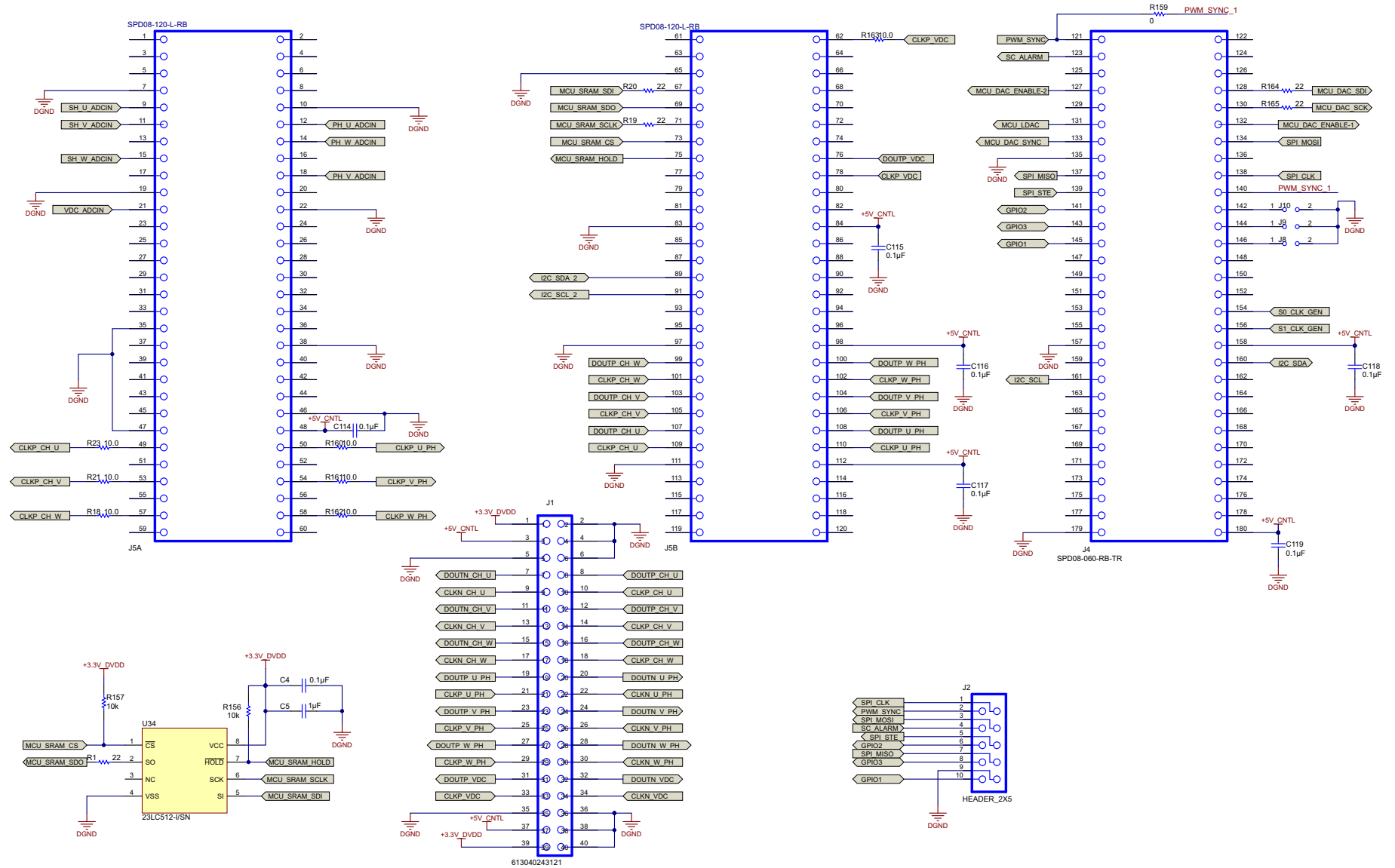


图 141. 控制卡连接器



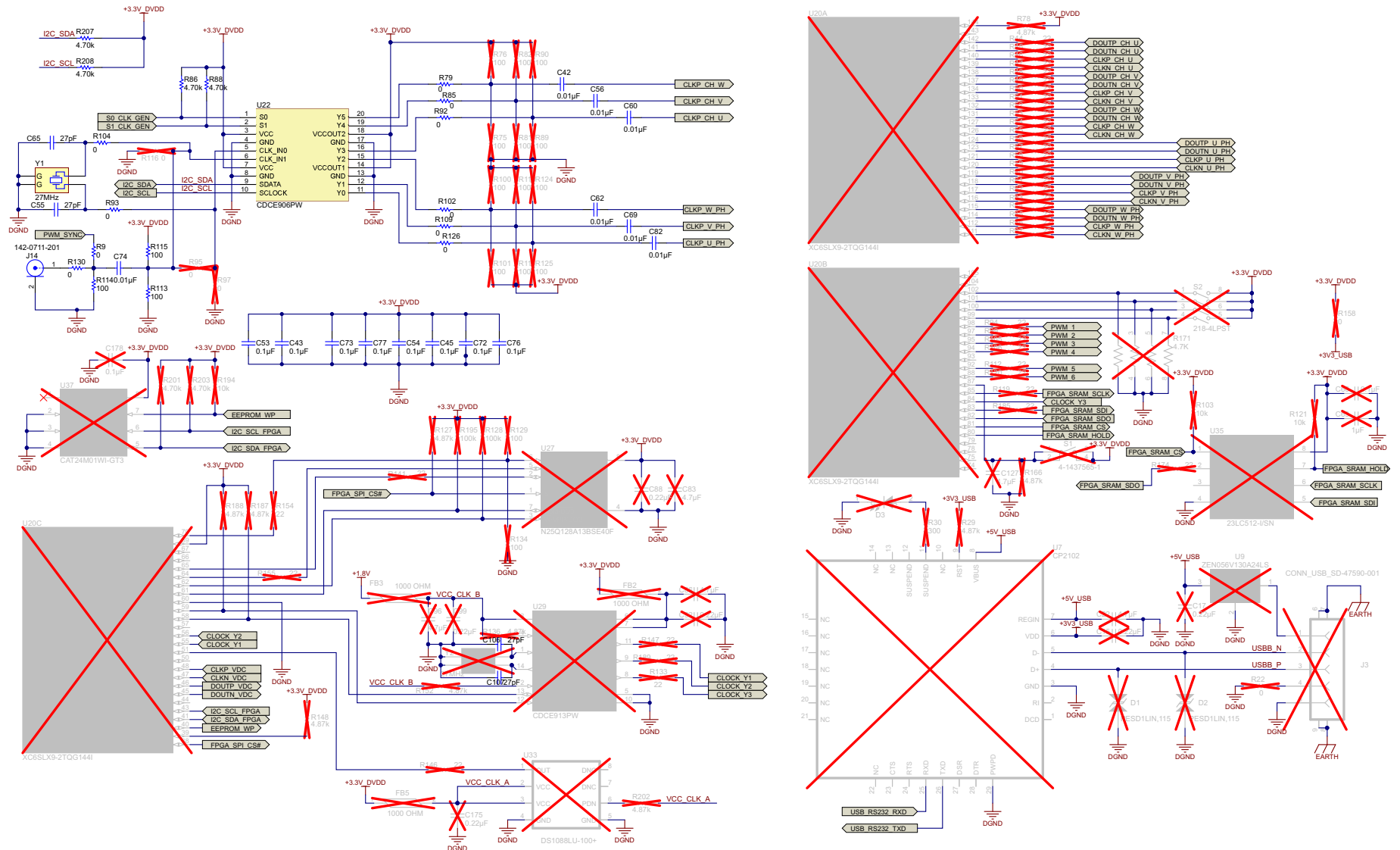


图 143. FPGA 时钟 USB 电路原理图

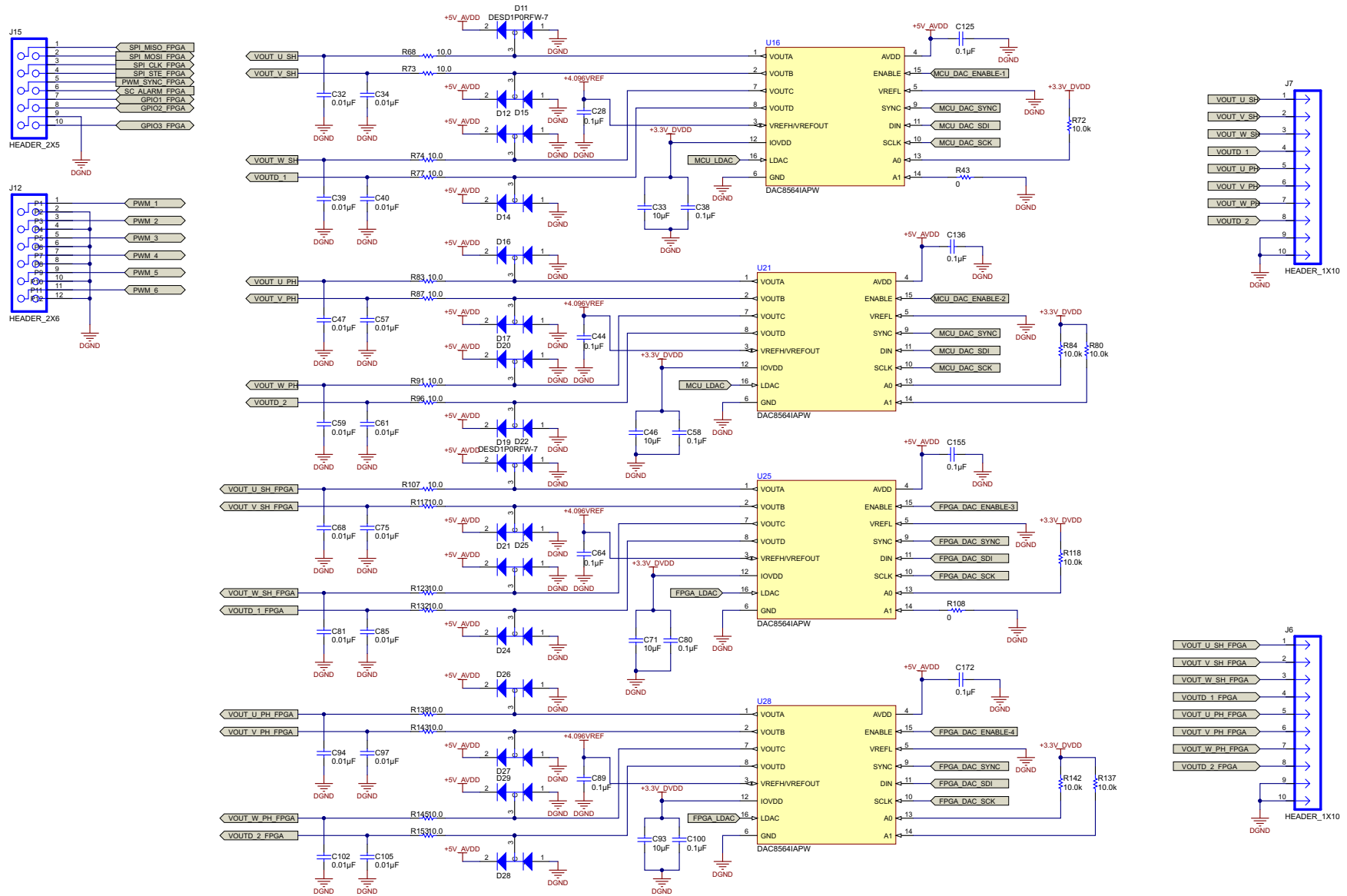


图 144. DAC 电路原理图



## 8.2 BOM

要下载物料清单 (BOM)，请参见 [TIDA-00171](#) 的设计文件。

表 16. DSM 物料清单

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
6	C1, C2, C8, C9, C32, C64	电容, 铝, 22 $\mu$ F, 25V, $\pm$ 20%, 0.76 $\Omega$ , SMD	尼吉康 (Nichicon)	UUD1E220MCL1GS	5x5.8	已安装
7	C3, C7, C13, C15, C112, C124, C136	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 25 V, $\pm$ 5%, X7R, 0603	AVX	06033C104JAT2A	0603	已安装
6	C4, C10, C17, C114, C126, C138	电容, 陶瓷, 3900pF, 25V, $\pm$ 5%, C0G/NP0, 0603	TDK	C1608C0G1E392J	0603	已安装
62	C5, C6, C11, C12, C16, C18, C19, C20, C21, C26, C27, C29, C31, C34, C36, C41, C43, C44, C46, C53, C54, C59, C60, C68, C69, C70, C72, C74, C76, C78, C80, C85, C87, C88, C90, C97, C98, C104, C105, C106, C109, C110, C111, C116, C118, C119, C120, C121, C122, C123, C128, C130, C131, C132, C133, C134, C135, C140, C142, C143, C144, C145	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	Kemet (基美)	C0603C104K5RACTU	0603	已安装
5	C22, C23, C61, C62, C63	电容, 陶瓷, 1000pF, 2KV, 10%, X7R, 1206	Johanson Dielectrics Inc	202R18W102KV4E	1206	已安装
32	C24, C25, C28, C30, C33, C35, C37, C39, C47, C48, C55, C56, C57, C58, C65, C66, C67, C71, C73, C75, C77, C79, C81, C83, C91, C92, C99, C100, C101, C102, C107, C108	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 35V, $\pm$ 20%, X7R, 1210	太阳诱电 (Taiyo Yuden)	GMK325AB7106MM-T	1210	已安装
9	C38, C40, C51, C52, C82, C84, C95, C96, C103	电容, 陶瓷, 4.7 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 10%, X5R, 0805	TDK	C2012X5R1H475K125AB	0805	已安装
8	C42, C45, C49, C50, C86, C89, C93, C94	电容, 陶瓷, 0.01 $\mu$ F, 100V, $\pm$ 5%, X7R, 0603	AVX	06031C103JAT2A	0603	已安装
6	C113, C117, C125, C129, C137, C141	电容, 陶瓷, 4700pF, 100V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	AVX	06031C472KAT2A	0603	已安装
2	D1, D2	二极管, P-N, 70V, 0.2A, SOT-323	Diodes Inc	DESD1P0RFW-7	SOT-323	已安装
10	D3, D4, D5, D6, D35, D36, D37, D38, D39, D40	二极管, P-N, 70V, 0.2A, SOT-323	Diodes Inc	DESD1P0RFW-7	SOT-323	已安装
10	D7, D8, D9, D10, D19, D20, D21, D22, D23, D24	二极管, 肖特基, 20V, 0.5A, SOD-123	安森美半导体	MBR0520LT1G	SOD-123	已安装

表 16. DSM 物料清单 (continued)

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
9	D11, D12, D15, D16, D25, D26, D29, D30, D31	二极管, 齐纳, 6.2V, 1W, PowerDI123	Diodes Inc.	DFLZ6V2-7	PowerDI123	已安装
9	D13, D14, D17, D18, D27, D28, D32, D33, D34	LED SmartLED 绿色 570NM	欧司朗	LG L29K-G2J1-24-Z	0603	已安装
9	FB1, FB2, FB3, FB4, FB5, FB6, FB7, FB8, FB9	铁氧体芯片, 1000Ω, 300mA, 0603	TDK 株式会社 (TDK Corporation)	MMZ1608B102C	0603	已安装
5	FID4, FID5, FID6, FID7, FID8	基准标记。没有需要购买或安装的元件。	不可用	不可用	基准	已安装
1	J1	连接器, 直角 2×20 引脚, 100mil 间距	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	61304021021		已安装
4	J2, J4, J6, J8	引脚块, 4x1, 2.54mm, TH	TE 互联 (TE Connectivity)	5-1437657-7	TERM_BLK, 2pos, 2.54mm	已安装
17	J3, J5, J7, J9, J10, J11, J12, J13, J14, J15, J16, J17, J18, J19, J20, J21, J22	插头, 公头 2 引脚, 100mil 间距	Sullins	PEC02SAAN	0.100 英寸 × 2	已安装
1	LBL1	热转印打印标签, 0.650" (宽) × 0.200" (高) - 10,000/卷	布雷迪 (Brady)	THT-14-423-10	PCB 标签, 0.650" (高) × 0.200" (宽)	已安装
4	MH1, MH2, MH3, MH4	安装孔, NPTH 钻孔 3.2mm			螺钉	已安装
6	R1, R4, R9, R12, R20, R29	电阻, 100Ω, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603FR-07100RL	0603	已安装
6	R56, R66, R80, R90, R104, R114	电阻, 56.0Ω, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603FR-0756RL	0603	已安装
3	R3, R11, R24	电阻, 金属, 0.005Ω, 5W, 1% 径向	TT 电子/IRC	OAR5R005FLF	径向	已安装
17	R6, R14, R19, R26, R31, R57, R60, R65, R72, R81, R84, R89, R96, R105, R108, R113, R120	电阻, 0Ω, 5%, 0.1W, 0603	Vishay-Dale	CRCW06030000Z0EA	0603	已安装
7	R7, R15, R27, R32, R73, R97, R121	电阻, 10.0Ω, 1%, 0.1W, 0603	Vishay-Dale	CRCW060310R0FKEA	0603	已安装
11	R17, R18, R52, R55, R70, R76, R79, R94, R100, R103, R118	电阻, 2.2MΩ, 1/3W, 1%, 1210	罗姆半导体 (Rohm Semiconductor)	KTR25JZPF2204	1210	已安装
7	R21, R61, R68, R87, R92, R111, R116	电阻, 2KΩ, 1/3W, 1%, 1210	罗姆半导体 (Rohm Semiconductor)	KTR25JZPF2001	1210	已安装
1	R22	电阻, 2.00kΩ, 0.5%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RT0603DRE072KL	0603	已安装
9	R34, R35, R40, R41, R42, R43, R48, R49, R50	电阻, 3.9kΩ, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒	CRCW06033K90JNEA	0603	已安装
4	R36, R37, R44, R45	电阻, 37.0kΩ, 0.1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RT0603BRD0737KL	0603	已安装
4	R38, R39, R46, R47	电阻, 11.5kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒	CRCW060311K5FKEA	0603	已安装

表 16. DSM 物料清单 (continued)

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
6	R53, R71, R77, R95, R101, R119	电阻, 15.0kΩ, 1/10W, 0.1%, SMD, 0603	国巨 (Yageo America)	RT0603BRD0715KL-ND	0603	已安装
6	R62, R64, R86, R88, R110, R112	电阻, 4.70kΩ, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603FR-074K7L	0603	已安装
5	T1, T2, T3, T4, T5	变压器, 475μH, SMD	Würth Electronics Midcom	750342271	10.05mm (长) × 6.73mm (宽)	已安装
12	TP1, TP2, TP3, TP4, TP5, TP6, TP7, TP8, TP9, TP10, TP11, TP12	测试点, 0.040 孔	STD	STD		已安装
4	U3, U21, U24, U27	20MHz, 隔离型 Δ-Σ 调制器, CMOS 接口	德州仪器 (TI)	AMC1304M25	DW0016A	已安装
3	U1, U2, U4	20MHz, 隔离型 Δ-Σ 调制器, CMOS 接口	德州仪器 (TI)	AMC1304M05	DW0016A	已安装
5	U5, U6, U11, U12, U13	用于隔离电源的变压器驱动器, DBV0005A	德州仪器 (TI)	SN6501DBV	DBV0005A	已安装
4	U7, U8, U14, U15	-36V, -200mA, 超低噪声, 负线性稳压器	德州仪器 (TI)	TPS7A3001DGNR	MSOP-PowerPAD (DGN)   8	已安装
5	U9, U10, U16, U17, U18	稳压器, LDO, 5V, 0.15A, SOT23-5	德州仪器 (TI)	TLV70450DBV	DBV0005A	已安装
3	U19, U22, U25	IC, 高精度, 200μA, 36V 电源, 仪表放大器。	德州仪器 (TI)	INA826IADGK	MSOP-8	已安装
3	U20, U23, U26	IC, 1.1nV/√Hz 噪声, 低功耗, 精密运算放大器	德州仪器 (TI)	OPA211AID	小外形尺寸 (SO)	已安装
0	C14, C115, C127, C139	电容, 陶瓷, 0.1μF, 50V, ±10%, X7R, 0603	Kemet (基美)	C0603C104K5RACTU	0603	未安装
0	FID1, FID2, FID3	基准标记。没有需要购买或安装的元件。	不可用	不可用	基准	未安装
0	R2, R10, R23	电阻, 50mΩ, 3W, 0.5%, TO-247, TH	ISOTEK	PBH-R050-F1-0.5	TO-247	未安装
0	R5, R13, R25, R30, R54, R59, R63, R67, R69, R78, R83, R85, R91, R93, R102, R107, R109, R115, R117	电阻, 0Ω, 5%, 0.1W, 0603	Vishay-Dale	CRCW06030000Z0EA	0603	未安装
0	R8, R16, R28, R33, R74, R98, R122	电阻, 10.0Ω, 1%, 0.1W, 0603	Vishay-Dale	CRCW060310R0FKEA	0603	未安装
0	R51, R75, R99	电阻, 2.2MΩ, 1/3W, 1%, 1210	罗姆半导体 (Rohm Semiconductor)	KTR25JZPF2204	1210	未安装
0	R58, R82, R106	电阻, 1.00kΩ, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603FR-071KL	0603	未安装

表 17. FMB 物料清单

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
37	C1, C2, C3, C9, C10, C11, C13, C21, C23, C24, C25, C26, C28, C35, C36, C37, C38, C44, C58, C64, C67, C80, C89, C90, C100, C109, C114, C115, C116, C117, C118, C119, C125, C136, C155, C172, C177	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	Kemet (基美)	C0603C104K5RACTU	0603	已安装
2	C4, C139	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 5%, X7R, 0603	AVX	0603YC104JAT2A	0603	已安装
1	C5	电容, 陶瓷, 1 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 10%, X5R, 0603	TDK	C1608X5R1C105K080AA	0603	已安装
14	C6, C7, C8, C16, C29, C30, C31, C110, C111, C112, C113, C120, C121, C122	电容, 陶瓷, 4700pF, 100V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	AVX	06031C472KAT2A	0603	已安装
1	C12	电容, 铝, 10 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 20%, 3 $\Omega$ , SMD	松下 (Panasonic)	EEEF1C100R	SMT 径向 B	已安装
9	C14, C43, C45, C53, C54, C72, C73, C76, C77	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 25V, $\pm$ 5%, X7R, 0603	AVX	06033C104JAT2A	0603	已安装
1	C18	电容, 陶瓷, 0.47 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 10%, X7R, 0805	AVX	0805YC474KAT2A	0805	已安装
5	C19, C33, C46, C71, C93	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 35V, $\pm$ 20%, X7R, 1210	太阳诱电 (Taiyo Yuden)	GMK325AB7106MM-T	1210	已安装
16	C32, C34, C39, C40, C47, C57, C59, C61, C68, C75, C81, C85, C94, C97, C102, C105	电容, 陶瓷, 0.01 $\mu$ F, 100V, $\pm$ 5%, X7R, 0603	AVX	06031C103JAT2A	0603	已安装
1	C41	电容, 陶瓷, 1000pF, 2kV, 10%, X7R, 1206	Johanson Dielectrics Inc	202R18W102KV4E	1206	已安装
7	C42, C56, C60, C62, C69, C74, C82	电容, 陶瓷, 0.01 $\mu$ F, 100V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	AVX	06031C103KAT2A	0603	已安装
2	C48, C49	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 10%, X7R, 1210	MuRata	GRM32ER71H106KA12L	1210	已安装
1	C50	电容, 铝, 100 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 20%, 0.17 $\Omega$ , TH	尼吉康 (Nichicon)	UHE1H101MPD1TD	8.0mm x 10.5mm	已安装
3	C51, C52, C87	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 10%, X7R, 1206	MuRata	GRM31CR71C106KAC7L	1206	已安装
4	C55, C65, C106, C107	电容, 陶瓷, 27pF, 50V, $\pm$ 5%, COG/NPO, 0603	AVX	06035A270JAT2A	0603	已安装
1	C70	电容, 陶瓷, 22 $\mu$ F, 10V, $\pm$ 20%, X5R, 1210	TDK	C3225X5R1A226M230AA	1210	已安装
1	C78	电容, 陶瓷, 10 $\mu$ F, 35V, $\pm$ 10%, X7R, 1206	太阳诱电 (Taiyo Yuden)	GMK316AB7106KL-TR	1206	已安装
1	C79	电容, 陶瓷, 1 $\mu$ F, 25V, $\pm$ 10%, X7R, 1206	AVX	12063C105KAT2A	1206	已安装
1	C84	电容, 陶瓷, 330pF, 50V, $\pm$ 5%, COG/NPO, 0603	AVX	06035A331JAT2A	0603	已安装
1	C91	电容, 铝, 150 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 20%, 0.34 $\Omega$ , SMD	尼吉康 (Nichicon)	EEEFK1C151XP	6.3x7.7	已安装
1	C95	电容, 陶瓷, 0.039 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	MuRata	06035C393KAT2A	0603	已安装
1	C98	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	AVX	06035C104KAT2A	0603	已安装
1	C135	电容, 陶瓷, 680pF, 25V, $\pm$ 5%, COG/NPO, 0603	MuRata	MCMT18N681F250CT	0603	已安装
1	C146	电容, 陶瓷, 2.2 $\mu$ F, 100V, $\pm$ 10%, X7R, 1210	MuRata	GRM32ER72A225KA35L..	1210	已安装
1	C150	电容, 陶瓷, 0.015 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	MuRata	MC0603B153K160CT	0603	已安装
2	C153, C174	电容, 陶瓷, 0.1 $\mu$ F, 10V, $\pm$ 10%, X7R, 0603	基美 (Kemet)	0603ZC104KAT2A	0603	已安装
1	C156	电容, 陶瓷, 0.01 $\mu$ F, 50V, $\pm$ 10%, X7R, 0805	AVX	08055C103KAT2A	0805	已安装
1	C164	电容, 陶瓷, 1 $\mu$ F, 16V, $\pm$ 10%, X5R, 0603	Kemet	C0603C105K4PACTU	0603	已安装
3	C166, C167, C168	电容, 陶瓷, 47 $\mu$ F, 10V, $\pm$ 10%, X5R, 1210	MuRata	GRM32ER61A476KE20L	1210	已安装
3	D4, D5, D10	LED SmartLED 绿色 570 NM 0603	OSRAM Opto Semiconductors Inc	KPT-1608CGCK	0603	已安装

**表 17. FMB 物料清单 (continued)**

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
1	D6	整流器, 超快速电源, 50V, 1A	安森美半导体 (ON-Semiconductor)	MURA105T3G	403D	已安装
1	D7	二极管, 肖特基, 40V, 3A, SMC	安森美半导体 (ON Semiconductor)	MBRS340T3G	SMC	已安装
1	D8	二极管, 肖特基, 30V, 0.2A, SOT-23	Diodes 公司	BAT54S-7-F	SOT-23	已安装
16	D11, D12, D14, D15, D16, D17, D19, D20, D21, D22, D24, D25, D26, D27, D28, D29	二极管, P-N, 70V, 0.2A, SOT-323	Diodes Inc		SOT-323	已安装
1	D18	二极管, 肖特基, 20V, 2A, SMA	Diodes Inc.	B220A-13-F	SMA	已安装
1	D23	二极管, 肖特基, 200V, 4A, SMC	安森美半导体 (ON Semiconductor)	MBRS4201T3G	SMC	已安装
1	FB1	铁氧体芯片 1000Ω, 300 MA 0603	TDK 株式会社 (TDK Corporation)		0603	已安装
1	J1	连接器, 直角, 公头, 2 x 20 引脚, 100mil 间距	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)			已安装
2	J2, J15	插头, 公头 2x5 引脚, 100mil 间距	Sullins		0.100 英寸 x 5 x 2	已安装
1	J4	连接器高 SPD 边缘插接 60 POS	3M		28.6mm x 7mm	已安装
1	J5	连接器高 SPD 边缘插接 120 POS	3M		7mm x 56 mm	已安装
2	J6, J7	插头, 公头 10 引脚, 100mil 间距	Sullins		0.100 英寸 x 10	已安装
3	J8, J9, J10	插头, 公头 2 引脚, 100mil 间距	Sullins		0.100 英寸 x 2	已安装
1	J12	插头, 公头 2x6 引脚, 100mil 间距	Sullins		0.100 英寸 x 2 x 6	已安装
1	J13	引脚块, 2 引脚, 15A, 5.1mm	OST		0.40 x 0.35 英寸	已安装
1	J14	连接器, SMA 插孔, 垂直, 镀金, SMD	爱默生网络电源	142-0711-201	SMA	已安装
1	L1	电感, 隔离组合式磁芯元件, 铁氧体, 3.3μH, 3.72A, 0.02Ω, S MD	Coilcraft	MSS7341-332NLB	MSS7341	已安装
1	LBL1	热转印打印标签, 0.650" (宽) x 0.200" (高) - 10,000/卷	布雷迪 (Brady)	THT-14-423-10	PCB 标签, 0.650" (高) x 0.200" (宽)	已安装
4	MH1, MH2, MH3, MH4	安装孔, NPTH 钻孔, 3.2mm			螺钉	已安装
5	R1, R19, R20, R164, R165	电阻, 22Ω, 5%, 0.063W, 0402	威世达勒	CRCW040222R0JNED	0402	已安装
7	R2, R3, R4, R25, R31, R35, R36	电阻, 270kΩ, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603FR-07270KL	0603	已安装
14	R5, R6, R7, R15, R16, R17, R26, R28, R32, R33, R34, R69, R70, R71	电阻, 4.7kΩ, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒	CRCW06034K70JNEA	0603	已安装
7	R8, R13, R14, R24, R37, R38, R39	电阻, 7.50kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒	CRCW06037K50FKEA	0603	已安装
16	R9, R43, R79, R85, R92, R102, R108, R109, R126, R130, R139, R140, R150, R159, R186, R204	电阻, 0Ω, 5%, 0.1W, 0603	Vishay-Dale	CRCW06030000Z0EA	0603	已安装
7	R10, R11, R12, R27, R40, R41, R42	电阻, 100kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒	CRCW0603100KFKEA	0603	已安装
23	R18, R21, R23, R68, R73, R74, R77, R83, R87, R91, R96, R107, R117, R123, R132, R138, R143, R145, R153, R160, R161, R162, R163	电阻, 10.0Ω, 1%, 0.1W, 0603	Vishay-Dale	CRCW060310R0FKEA	0603	已安装
7	R72, R80, R84, R118, R137, R142, R200	电阻, 10.0kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒	CRCW060310K0FKEA	0603	已安装
4	R86, R88, R207, R208	电阻, 4.70kΩ, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603FR-074K7L	0603	已安装

表 17. FMB 物料清单 (continued)

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
2	R93、R104	电阻 ， 0Ω， 5%， 0.063W， 0402	威世达勒	CRCW04020000Z0ED	0402	已安装
1	R98	电阻 ， 1.5kΩ， 5%， 0.25W， 1206	威世达勒	CRCW12061K50JNEA	1206	已安装
3	R113、R114、R115	电阻 ， 100Ω， 5%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW0603100RJNEA	0603	已安装
1	R122	电阻 ， 150kΩ， 1%， 0.1W， 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603FR-07150KL	0603	已安装
1	R131	电阻 ， 6.8Ω， 5%， 0.25W， 1206	威世达勒	CRCW12066R80JNEA	1206	已安装
1	R135	电阻 ， 49.9Ω， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW060349R9FKEA	0603	已安装
1	R149	电阻 ， 1.47kΩ， 1%， 0.1W， 0603	国巨 (Yageo America)	ERJ3EKF1471V	0603	已安装
1	R151	电阻 ， 137kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW0603137KFKEA	0603	已安装
2	R156、R157	电阻 ， 10kΩ， 5%， 0.1W， 0603	Vishay-Dale	CRCW060310K0JNEA	0603	已安装
1	R168	电阻 ， 300Ω， 5%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW0603300RJNEA	0603	已安装
1	R169	电阻 ， 620Ω， 1%， 0.1W， 0603	国巨 (Yageo America)	MC0063W06031620R	0603	已安装
1	R170	电阻 ， 17.4kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW060317K4FKEA	0603	已安装
1	R172	电阻， 0Ω， 5%， 0.1W， 0603	国巨 (Yageo America)	RC0603JR-070RL	0603	已安装
1	R173	电阻 ， 15kΩ， 5%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW060315K0JNEA	0603	已安装
1	R176	电阻 ， 47.5kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW060347K5FKEA	0603	已安装
1	R177	电阻 ， 10.2kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW060310K2FKEA	0603	已安装
1	R178	电阻 ， 3.24kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW06033K24FKEA	0603	已安装
1	R180	电阻 ， 42.2kΩ， 1%， 0.1W， 0603	国巨 (Yageo America)	ERJ3EKF4222V	0603	已安装
1	R181	电阻 ， 58.3kΩ， 0.1%， 0.1W， 0603	国巨 (Yageo America)		0603	已安装
1	R182	电阻， 0Ω， 5%， 0.25W， 1206	威世达勒	CRCW12060000Z0EA	1206	已安装
1	R184	电阻 ， 48.7kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW060348K7FKEA	0603	已安装
1	R190	电阻 ， 14.0kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW060314K0FKEA	0603	已安装
1	R191	电阻 ， 499Ω， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW0603499RFKEA	0603	已安装
1	R193	电阻 ， 4.99kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW06034K99FKEA	0603	已安装
1	R198	电阻 ， 1.00kΩ， 1%， 0.1W， 0603	威世达勒	CRCW06031K00FKEA	0603	已安装

**表 17. FMB 物料清单 (continued)**

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
1	R206	电阻 ， 910Ω, 0.1%, 0.1W, 0603	Susumu Co Ltd	CPF0603B910RE1	0603	已安装
1	T1	变压器	伍尔特电子 (Wurth Elektronik)	750342354	17.75mm x 12.7mm x 13.46mm	已安装
2	TP1, TP2	测试点, 0.040 孔	STD			已安装
7	TP3, TP4, TP5, TP6, TP7, TP8, TP9	测试点, 0.020 孔	STD			已安装
7	U1, U2, U3, U8, U13, U14, U15	IC, 1.1nV/vHz 噪声, 低功耗, 精密运算放大器	德州仪器 (TI)	OPA211AID	小外形尺寸 (SO)	已安装
7	U4, U5, U6, U11, U17, U18, U19	7ns, 具有轨到轨输出的 2.7V 至 5V 比较器, 5 引脚 SOT-23	德州仪器 (TI)	LMV7219M5	MF05A	已安装
1	U10	IC, 电压基准, 50ppm/°C (最大值), 50μA	德州仪器 (TI)	REF3012AIDBZT	SOT 23	已安装
4	U16, U21, U25, U28	具有 2.5V、2ppm/°C 内部参考的 16 位、四通道、超低短时脉冲、电压输出 DAC, PW0016A	德州仪器 (TI)	DAC8564IAPW	PW0016A	已安装
1	U22	可编程 3-PLL 时钟合成器/乘法器/除法器	德州仪器 (TI)	CDCE906PW	TSSOP (PW) 20	已安装
1	U23	具有 3.5V 至 28V 输入和 0.8V 至 25V 输出的降压稳压器, -40°C 至 150°C, 8 引脚 SOIC (D), 绿色环保 (RoHS, 无锡/溴)	德州仪器 (TI)	TPS54232D	D0008A	已安装
1	U24	用于 RF/模拟电路的超低噪声、800mA 线性稳压器, DNT0012B	德州仪器 (TI)	LP38798SDE-ADJ/NOPB	DNT0012B	已安装
1	U26	集成式 5A 40V 宽输入范围升压/SEPIC/反激式 DC-DC 稳压器, RTE0016C	德州仪器 (TI)	TPS55340RTET	RTE0016C	已安装
1	U30	光耦合器, 3.75kV RMS, SMT	威世半导体 (Vishay-Semiconductor)	TCMT1107	SOP-4	已安装
1	U32	IC, 精密可调节分流稳压器	德州仪器 (TI)	TL431AIDBZR	SOT23-3	已安装
1	U34	IC, SRAM, 512KB, 20MHZ, 8SOIC	Microchip Technology		8-SOIC (0.154", 3.90mm 宽)	已安装
1	Y1	晶振 ， 10.000MHz, 10pF, SMD	TXC Corporation	7B-27.000MEEQ-T	5mm x 0.9mm x 3.2mm	已安装
0	C15, C17, C88, C92, C99, C126, C128, C129, C131, C132, C133, C134, C140, C141, C142, C151, C152, C154, C157, C158, C163, C165, C169, C170, C171, C173, C175	电容, 陶瓷, 0.22μF, 6.3V, +/-10%, X7R, 0603	MuRata		0603	未安装
0	C20, C27	电容, 陶瓷, 0.047μF, 25V, ±5%, X7R, 0603	AVX		0603	未安装
0	C22, C83, C86, C96, C104, C124, C127, C137, C145, C147, C148, C159, C162	电容, 陶瓷, 4.7μF, 6.3V, ±10%, X5R, 0603	基美 (Kemet)		0603	未安装
0	C63	电容, 陶瓷, 1μF, 16V, ±10%, X5R, 0603	TDK		0603	未安装
0	C66, C178	电容, 陶瓷, 0.1μF, 16V, ±5%, X7R, 0603	AVX		0603	未安装
0	C101, C108	电容, 陶瓷, 1μF, 10V, ±10%, X7R, 0603	MuRata		0603	未安装
0	C103, C176	电容, 陶瓷, 100pF, 50V, ±5%, COG/NPO, 0603	TDK		0603	未安装
0	C123, C138, C143, C144, C160, C161	电容, 陶瓷, 100μF, 6.3V, ±20%, X5R, 1206	MuRata		1206	未安装
0	C130	电容, 陶瓷, 47pF, 25V, ±5%, COG/NPO, 0402	MuRata		0402	未安装
0	C149	电容, 陶瓷, 10μF, 35V, ±20%, X7R, 1210	太阳诱电 (Taiyo Yuden)		1210	未安装
0	D1, D2	二极管, TVS, 双向, 15V, 160W, SOD-323	恩智浦半导体		SOD-323	未安装
0	D3, D9	LED, SmartLED, 绿色, 570 NM	欧司朗		0603	未安装

表 17. FMB 物料清单 (continued)

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
0	D13	二极管, 超快速, 75V, 0.3A, SOT-23	Diodes Inc.		SOT-23	未安装
0	FB2, FB3, FB4, FB5	铁氧体芯片 1000Ω, 300 MA 0603	TDK 株式会社 (TDK Corporation)		0603	未安装
0	J3	连接器, Micro USB, AB 类	Molex		5.3mm x 7.5mm	未安装
0	J11	连接器插头, 14-Pos, 2mm, VERT, 镀金	Molex Inc		2.00mm	未安装
0	R22, R158, R192	电阻, 0Ω, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒		0603	未安装
0	R29, R78, R127, R136, R144, R148, R152, R166, R187, R188, R202	电阻, 4.87kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒		0603	未安装
0	R30	电阻, 300Ω, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒		0603	未安装
0	R44, R45, R46, R47, R48, R49, R50, R51, R52, R53, R54, R55, R56, R57, R58, R59, R60, R61, R62, R63, R64, R65, R66, R67, R94, R99, R105, R106, R112, R119, R120, R133, R141, R146, R147, R154, R155, R174, R175, R179, R185, R189	电阻, 22Ω, 5%, 0.063W, 0402	威世达勒		0402	未安装
0	R75, R76, R81, R82, R89, R90, R100, R101, R110, R111, R124, R125, R129, R134	电阻, 100Ω, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒		0603	未安装
0	R95, R97, R116	电阻, 0Ω, 5%, 0.063W, 0402	威世达勒		0402	未安装
0	R103, R121	电阻, 10kΩ, 5%, 0.1W, 0603	威世达勒		0603	未安装
0	R128, R195	电阻, 100kΩ, 1%, 0.1W, 0603	威世达勒		0603	未安装
0	R167, R171	电阻, 芯片阵列, 4.7KΩ, 4-RES, 0612	威世 (Vishay)		0612	未安装
0	R183	电阻, 0Ω, 5%, 0.25W, 1206	威世达勒		1206	未安装
0	R194	电阻, 10kΩ, 5%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)		0603	未安装
0	R196	电阻, 301Ω, 0.5%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)		0603	未安装
0	R197, R205	电阻, 0Ω, 5%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)		0603	未安装
0	R199	电阻, 220Ω, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)		0603	未安装
0	R201, R203	电阻, 4.70kΩ, 1%, 0.1W, 0603	国巨 (Yageo America)		0603	未安装
0	S1, S3	开关, 触控式, 单刀单掷-常开, 0.05A, 12V, SMT	TE 互联 (TE Connectivity)		SW, SPST 6mm x 6mm	未安装
0	S2	开关, 滑动式, SPST 4 极, SMT	CTS Electrocomponents		SW, SMT 半间距 4SPST, 5.8mm x 2.7mm x 6.25mm	未安装
0	TP10	测试点, 0.020 孔	STD			未安装
0	U7	IC, 单芯片 USB 至 UART 桥接器	Silicon Laboratories		QFN-28	未安装
0	U9	Polyzen, 5.6V, PPTC/齐纳, SMD	TE		SMD 4mm x 4mm	未安装
0	U12	电压基准, SRS PREC 4.096V SOT23-3	德州仪器 (TI)		SOT 23	未安装
0	U20	IC FPGA SPARTAN, 102 I/O, 144TQFP	Xilinx		TQG-144	未安装
0	U27	单路 LVDS 发送器	Micron Technology		SO8W	未安装
0	U29	具有 1.8V、2.5V 和 3.3V 输出的可编程 1-PLL VCXO 时钟合成器, PW0014A	德州仪器 (TI)		PW0014A	未安装



**表 17. FMB 物料清单 (continued)**

数量	基准	部件描述	制造商	制造商部件号	PCB 封装	注释
0	U31	IC, 150mA, 低 IQ, LDO 稳压器	德州仪器 (TI)		uDFN	未安装
0	U33	IC, 100MHz, EconOscillator, 2.7V 至 3.6V, 8 uSOP	美信		8 uSOP	未安装
0	U35	IC, SRAM, 512KB, 20MHz, 8SOIC	Microchip Technology		8-SOIC (0.154", 3.90 mm 宽)	未安装
0	U36	IC, 超低噪声, 高 PSRR, 200mA, LDO, 1.2V, 0.2A, 5SOT	德州仪器 (TI)		SOT23-5	未安装
0	U37	IC EEPROM 1MB, 1MHz 8SOIC	安森美半导体		8-SOIC (0.154", 3.90 mm 宽)	未安装
0	Y2	晶振, 10.000MHz, 10pF, SMD	TXC Corporation		5mm x 0.9mm x 3.2mm	未安装

### 8.3 板层图

要下载板层图，请参见 [TIDA-00171](#) 的设计文件。

#### 8.3.1 DSM

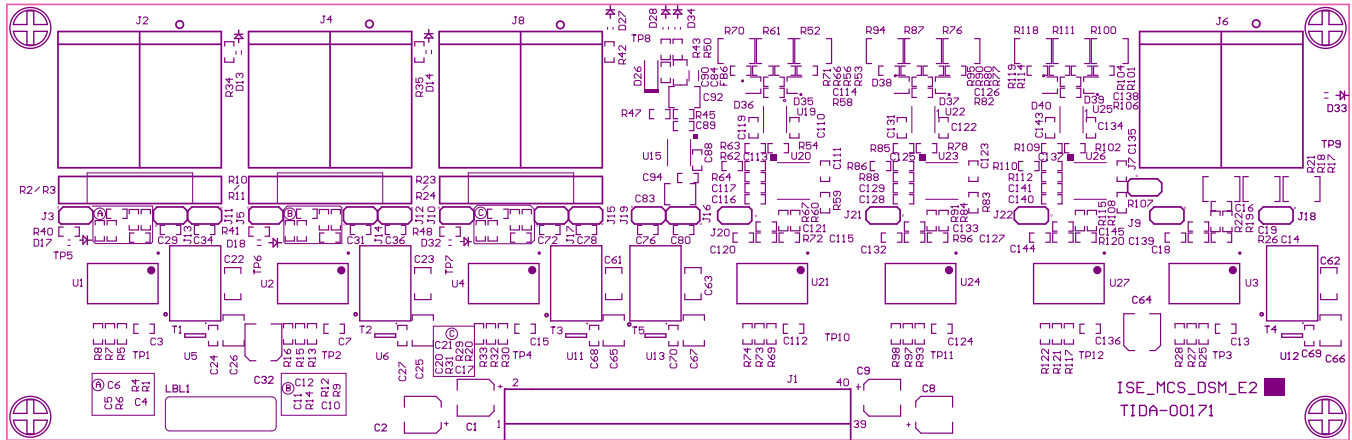


图 145. 顶部覆盖层

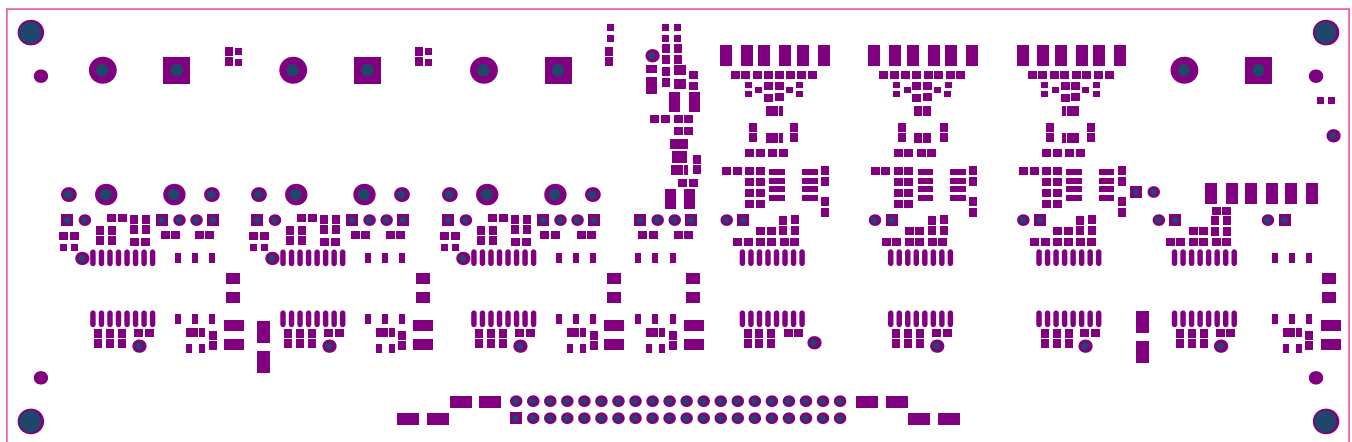


图 146. 顶层阻焊层

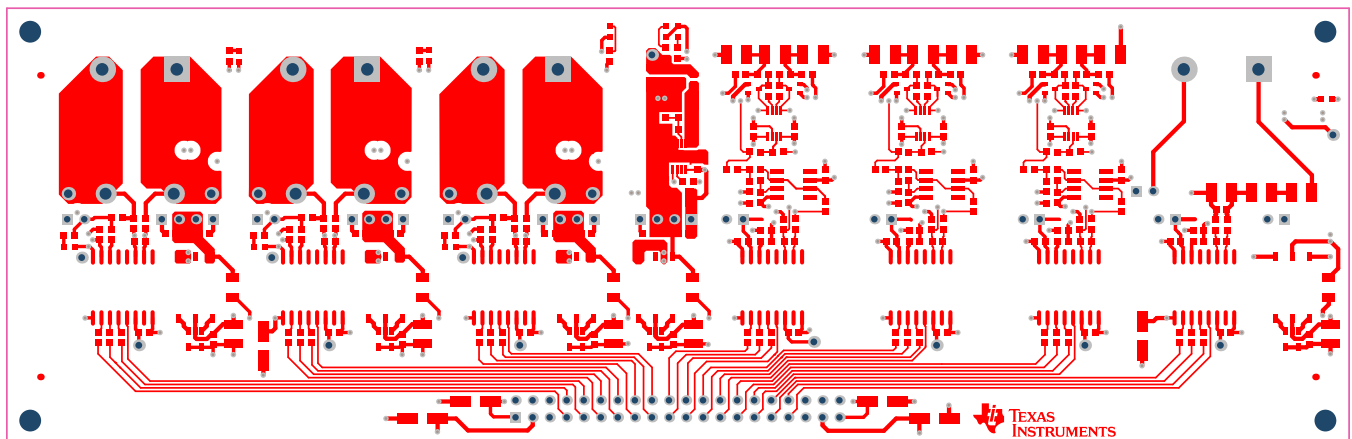


图 147. 顶层

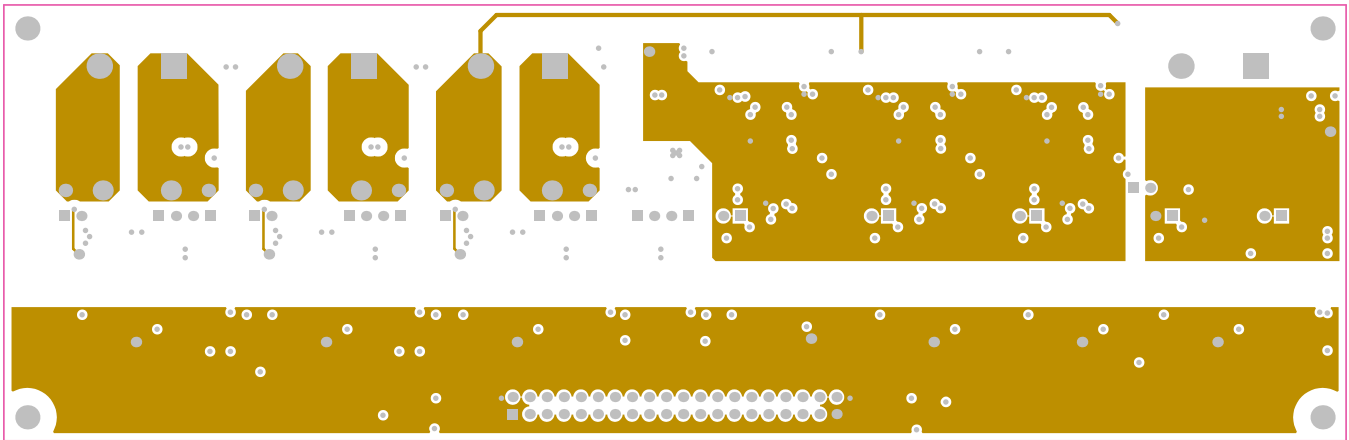


图 148. 中间层 1

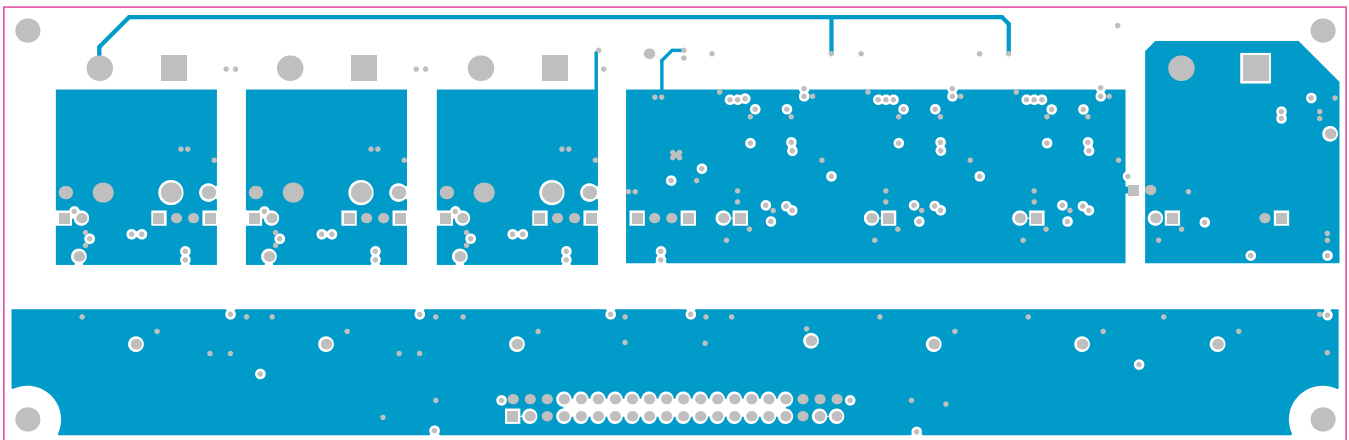


图 149. 中间层 2

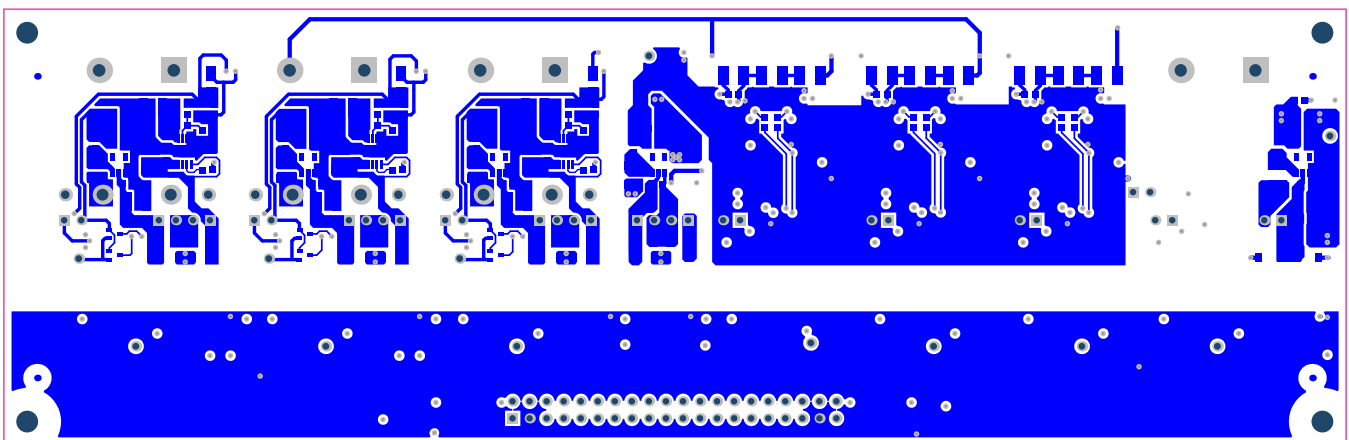


图 150. 底层

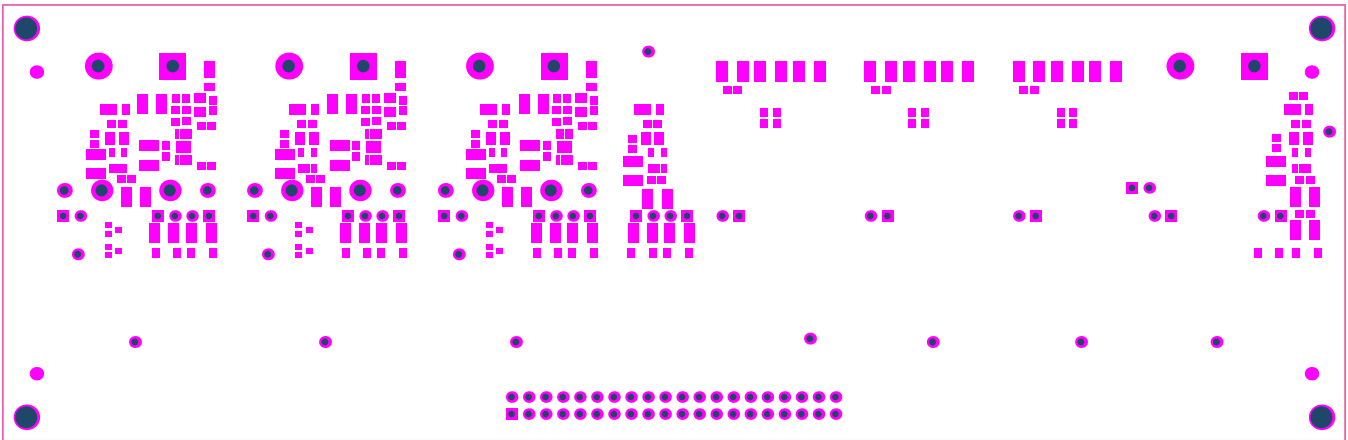


图 151. 底层阻焊层

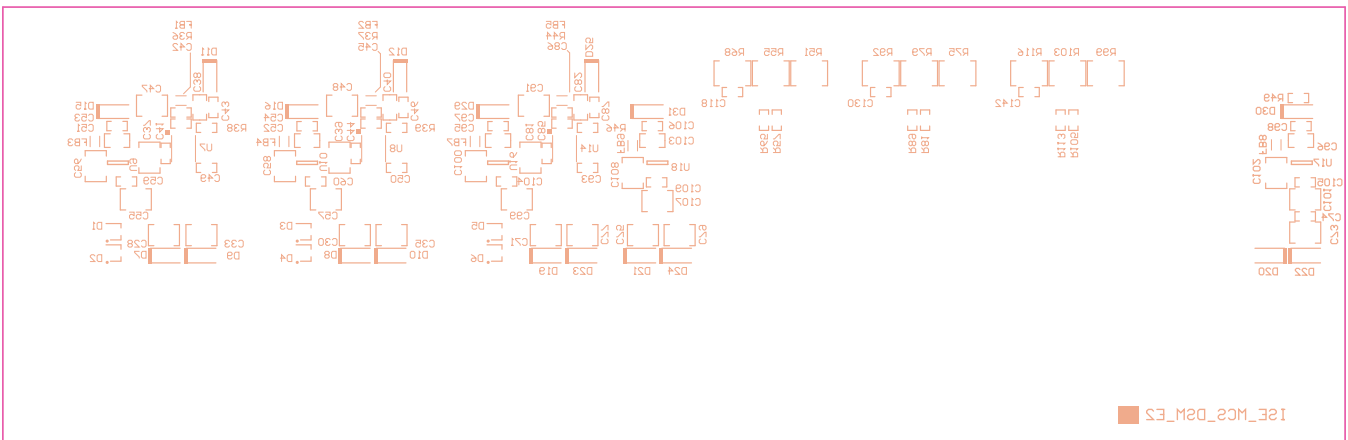


图 152. 底部覆盖层

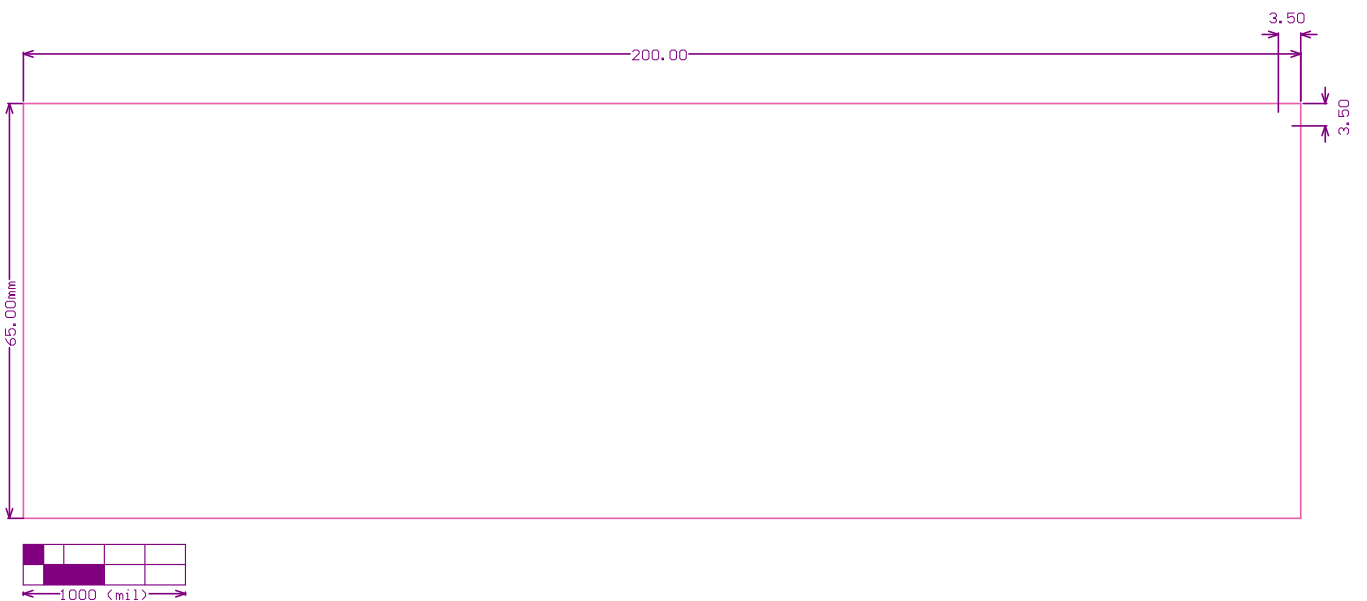


图 153. 电路板尺寸

8.3.2 FMB

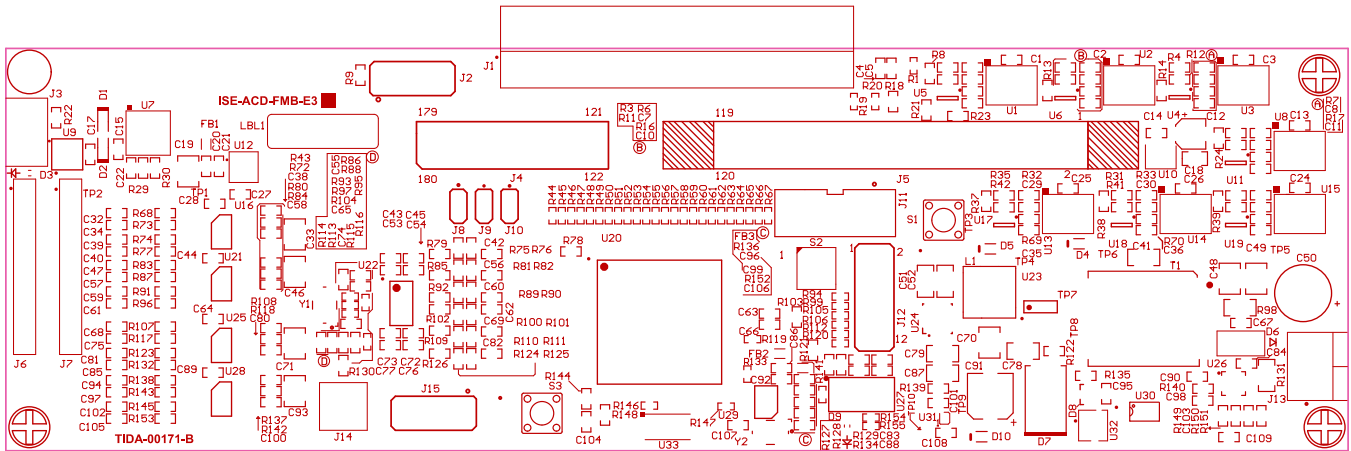


图 154. 顶部覆盖层

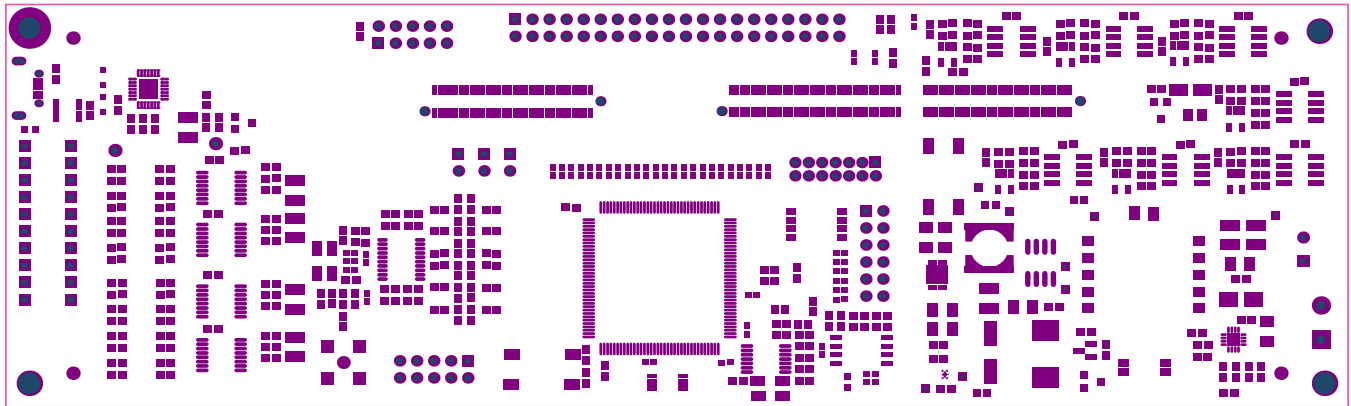


图 155. 顶层阻焊层

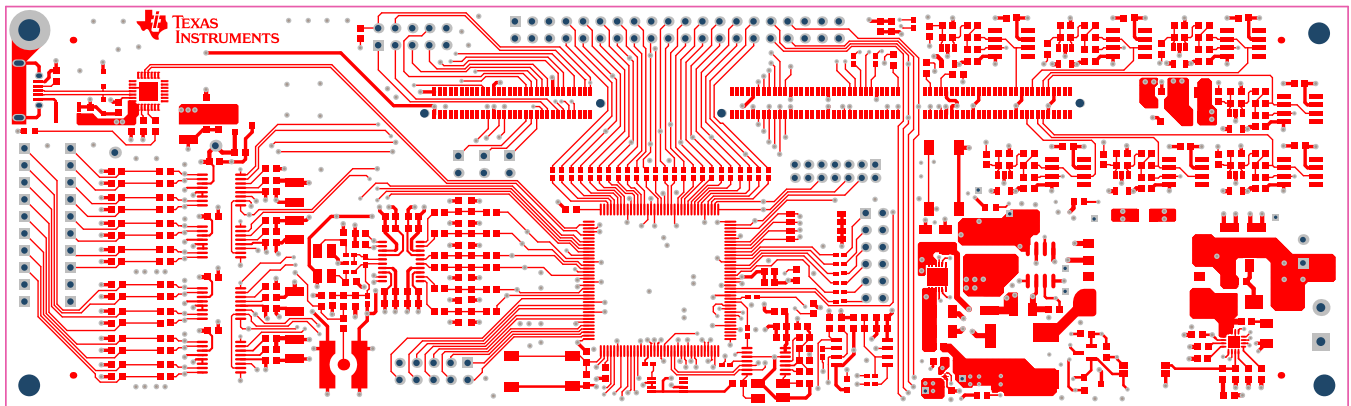


图 156. 顶层

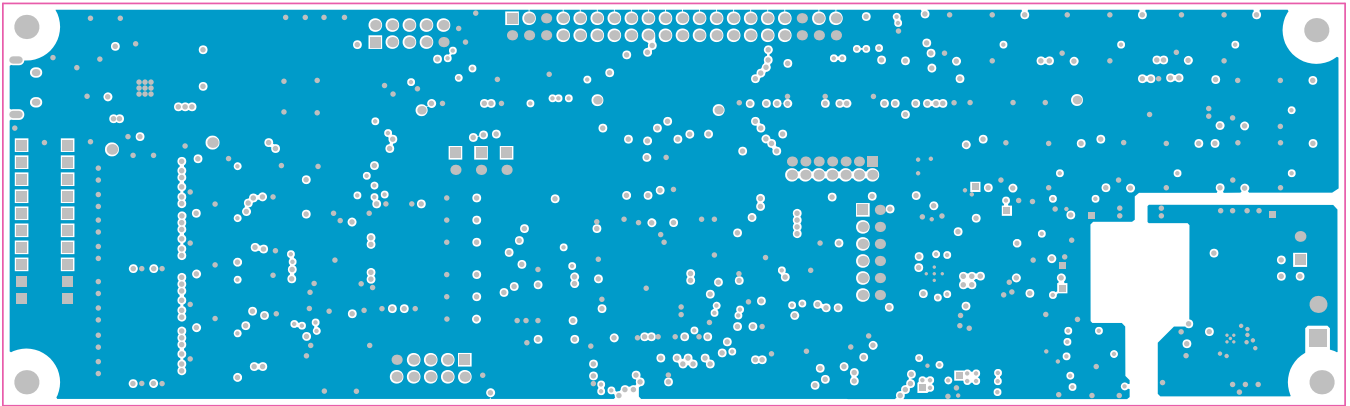


图 157. 中间层 1

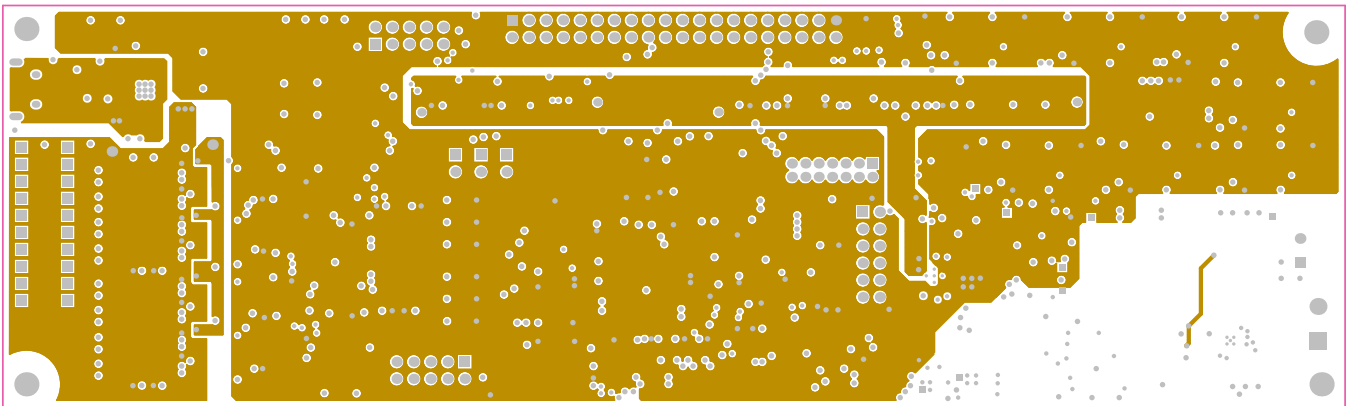


图 158. 中间层 2

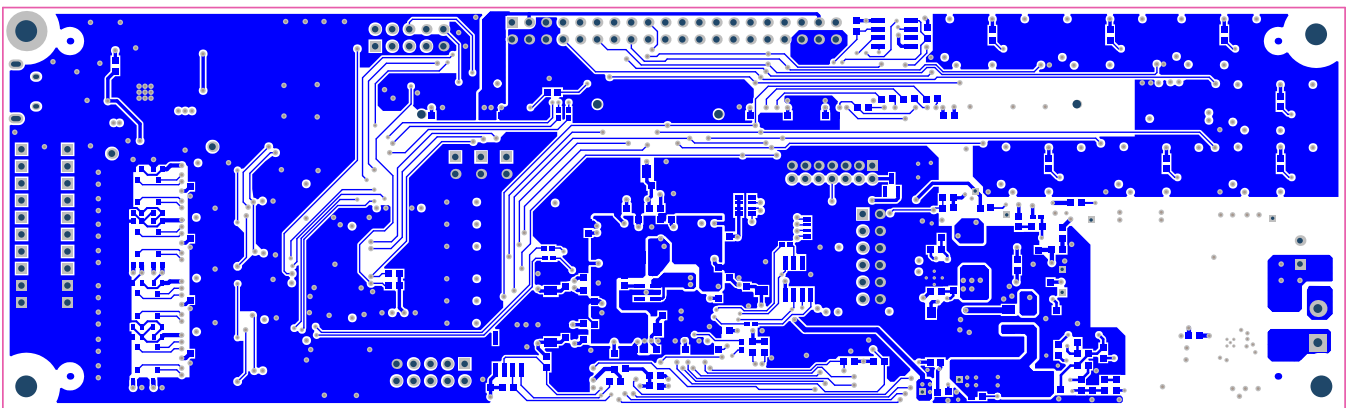


图 159. 底层

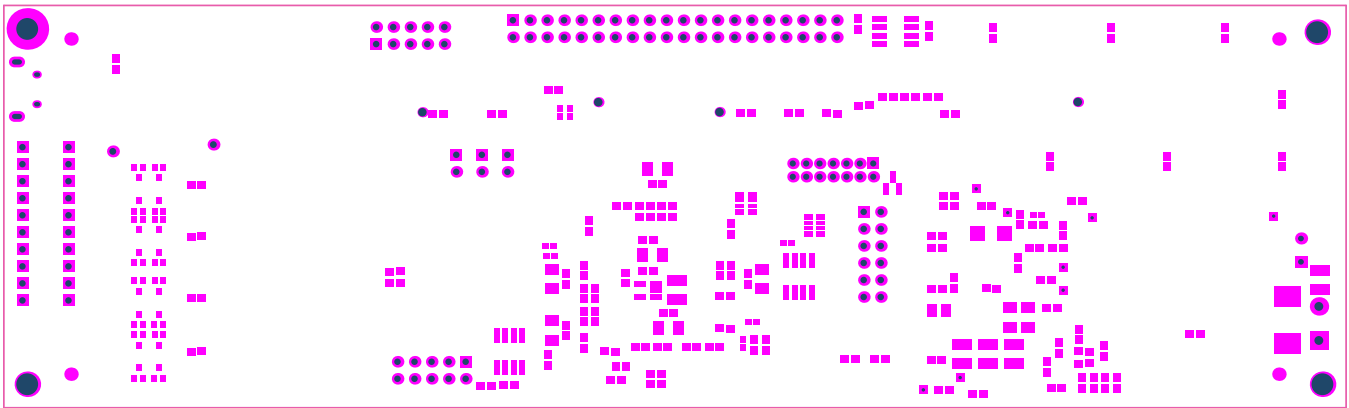


图 160. 底层阻焊层

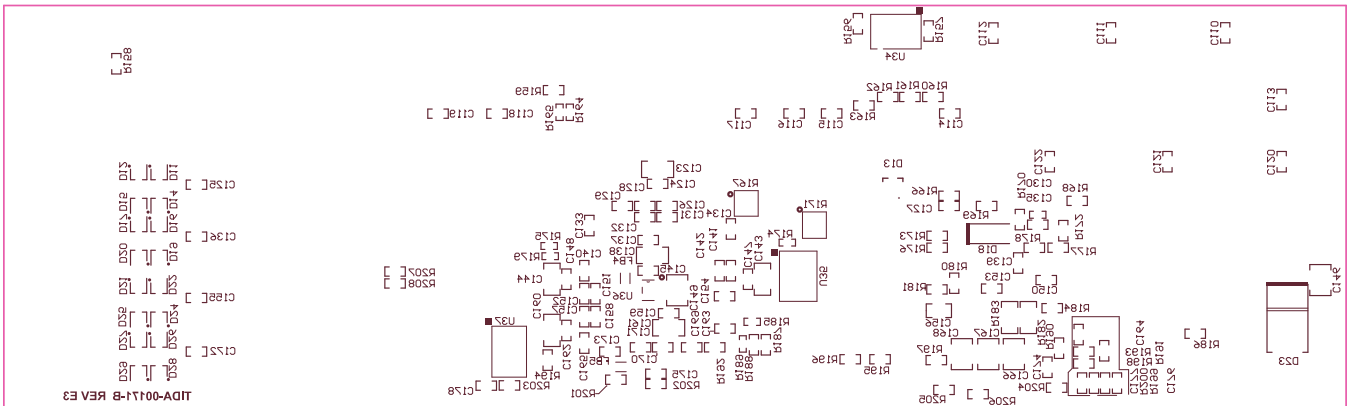


图 161. 底部覆盖层

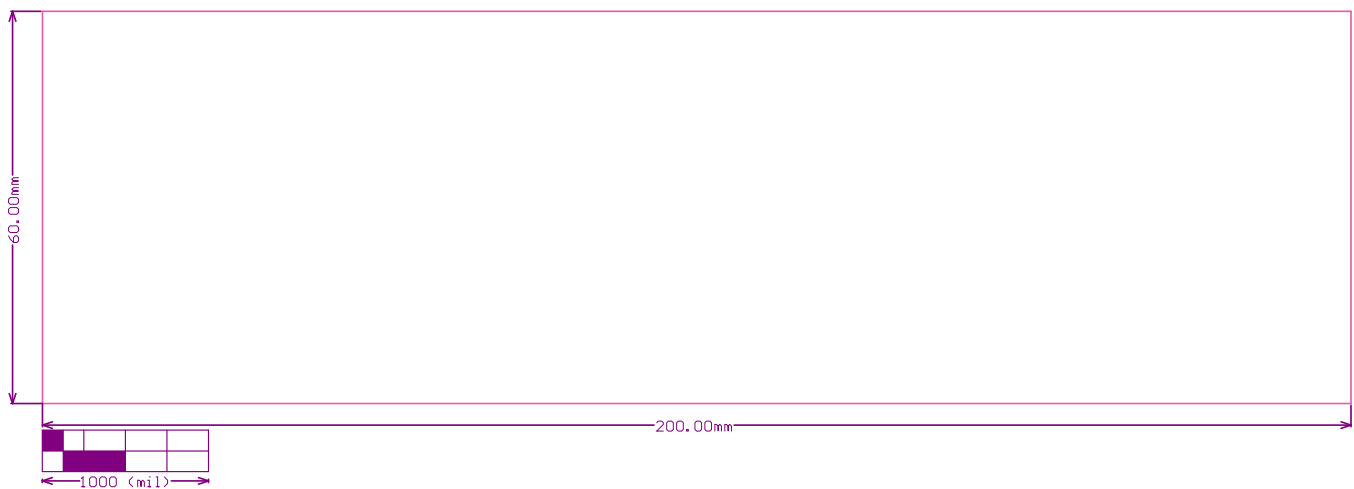


图 162. 电路板尺寸

## 8.4 Altium 项目文件

要下载 Altium 项目文件，请参见 [TIDA-00171](#) 的设计文件。

### 8.4.1 DSM

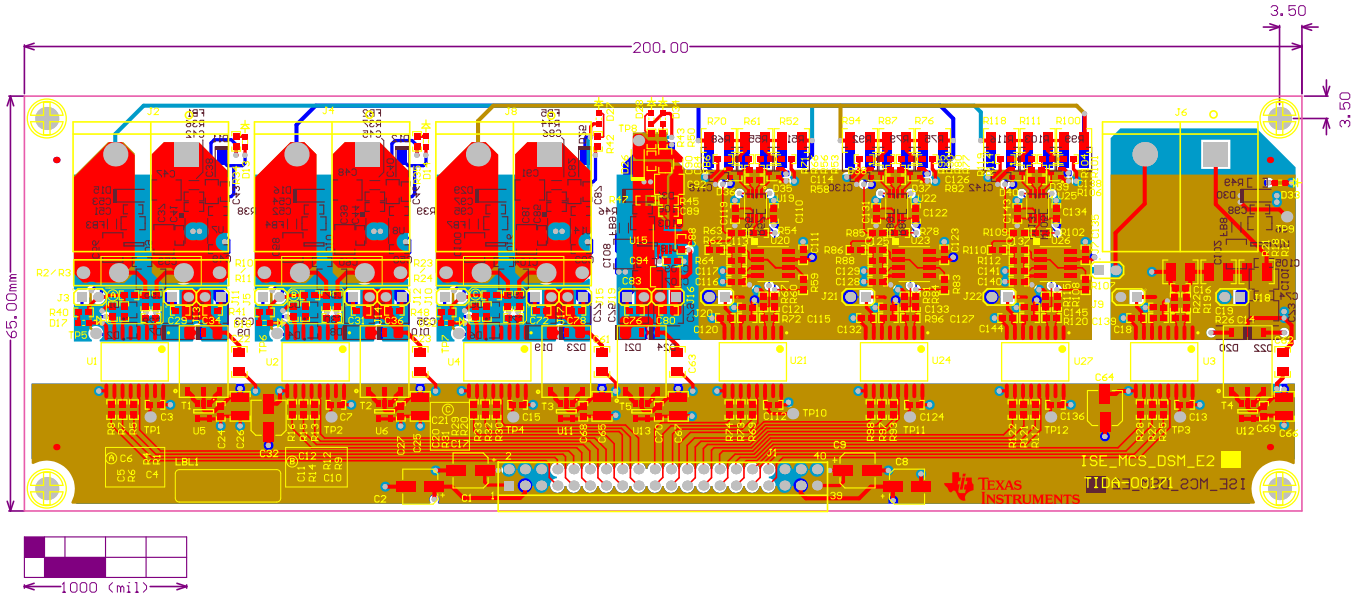


图 163. 多层复合印刷

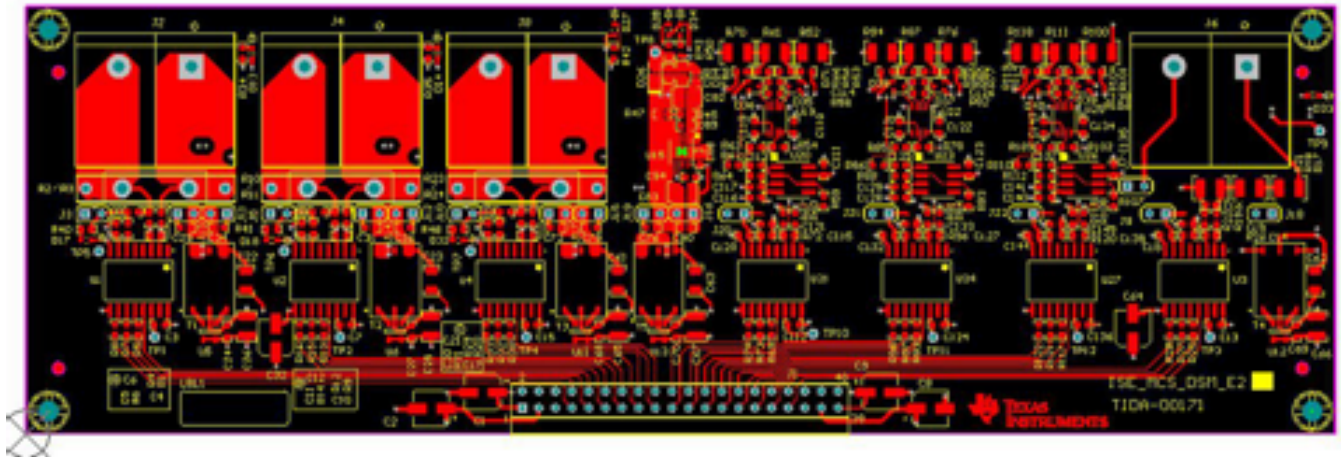


图 164. 顶层



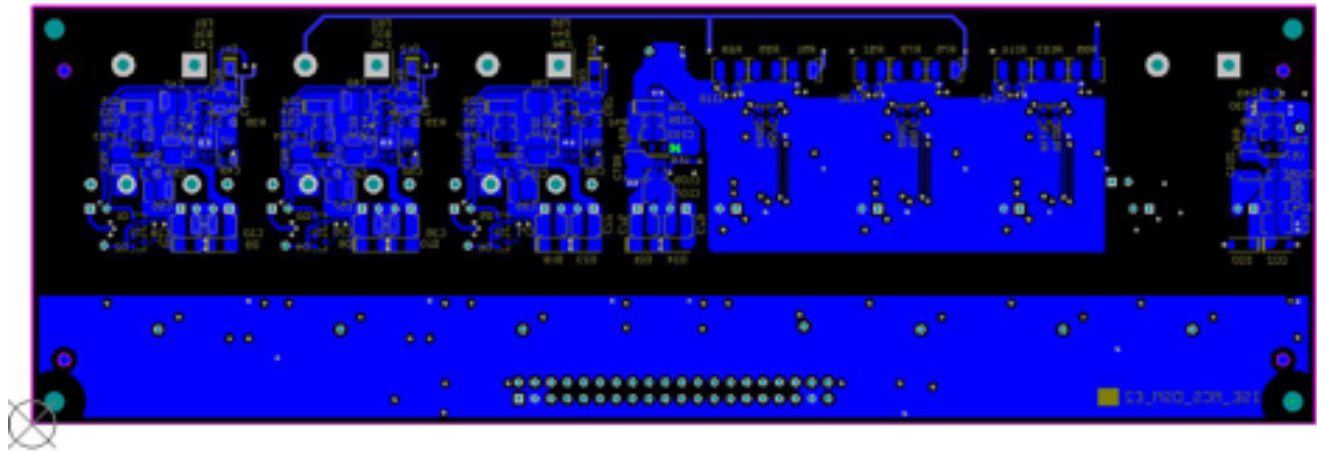


图 165. 底层

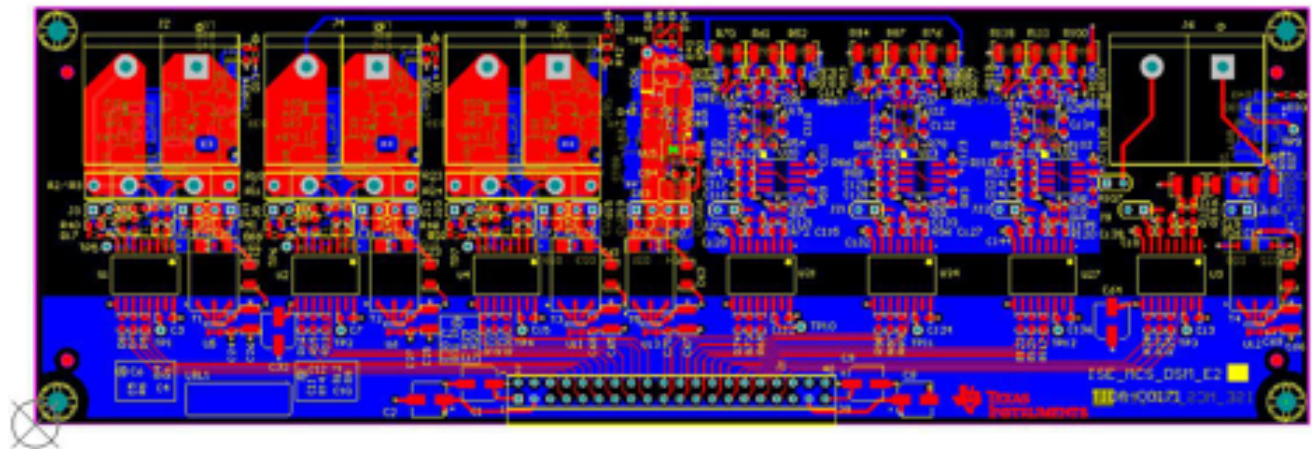


图 166. 顶层和底层组合视图

8.4.2 FMB

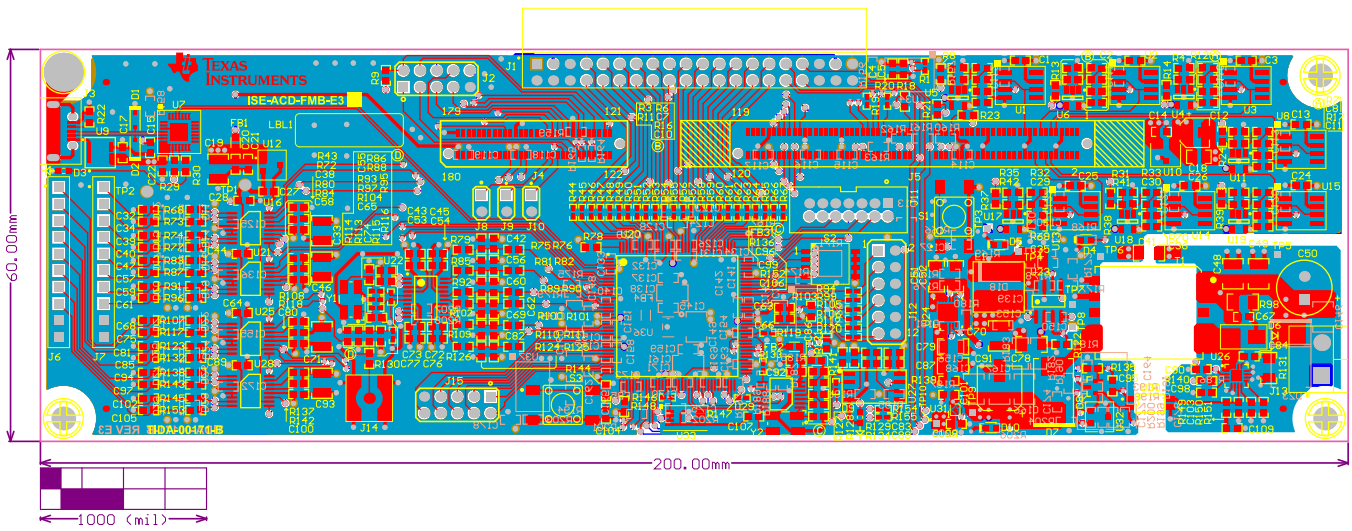


图 167. 多层复合印刷

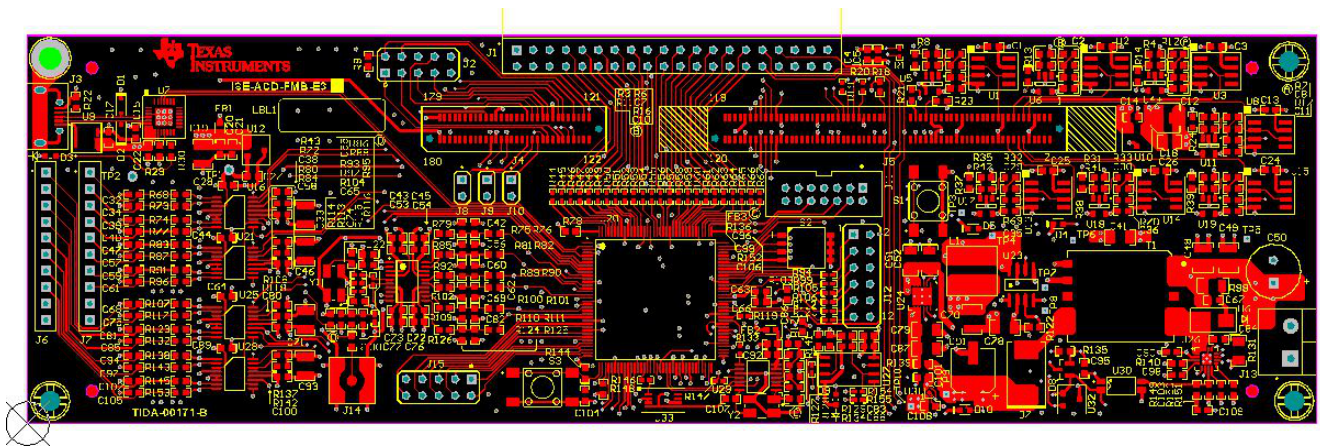


图 168. 顶层

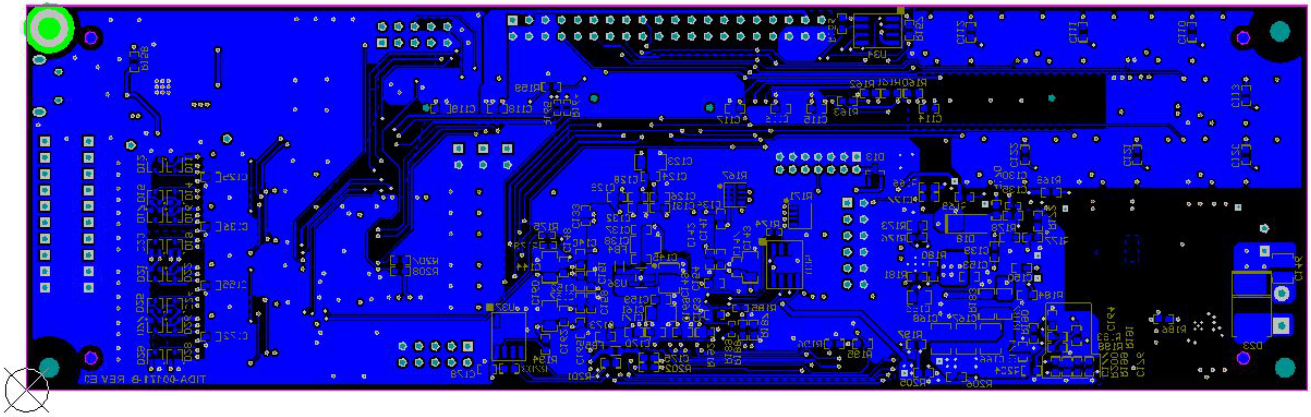


图 169. 底层

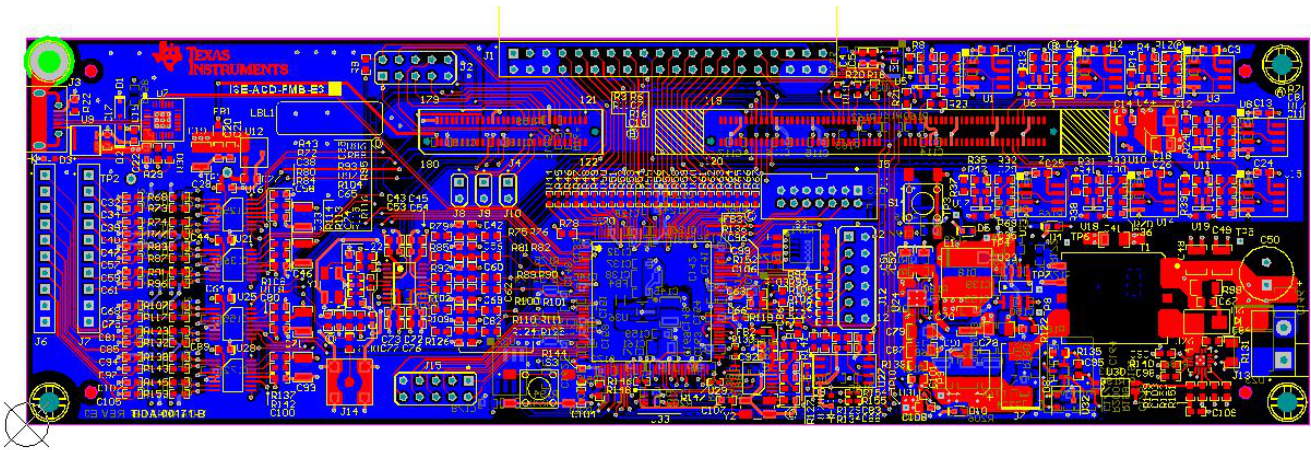


图 170. 顶层和底层组合视图

## 8.5 光绘文件

要下载光绘文件，请参见 [TIDA-00171](#) 的设计文件。

### 8.5.1 DSM

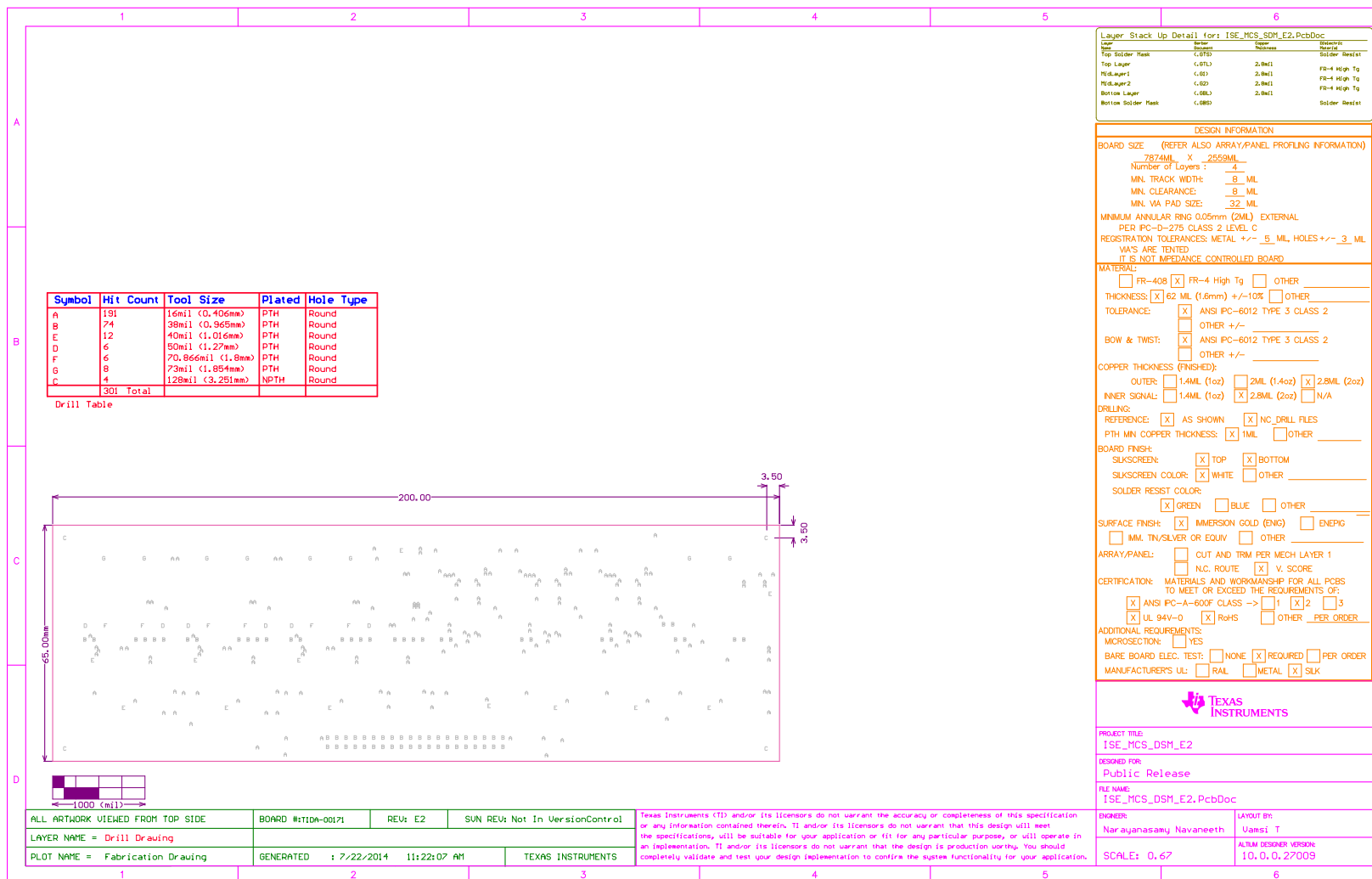


图 171. 制造图纸

8.5.2 FMB

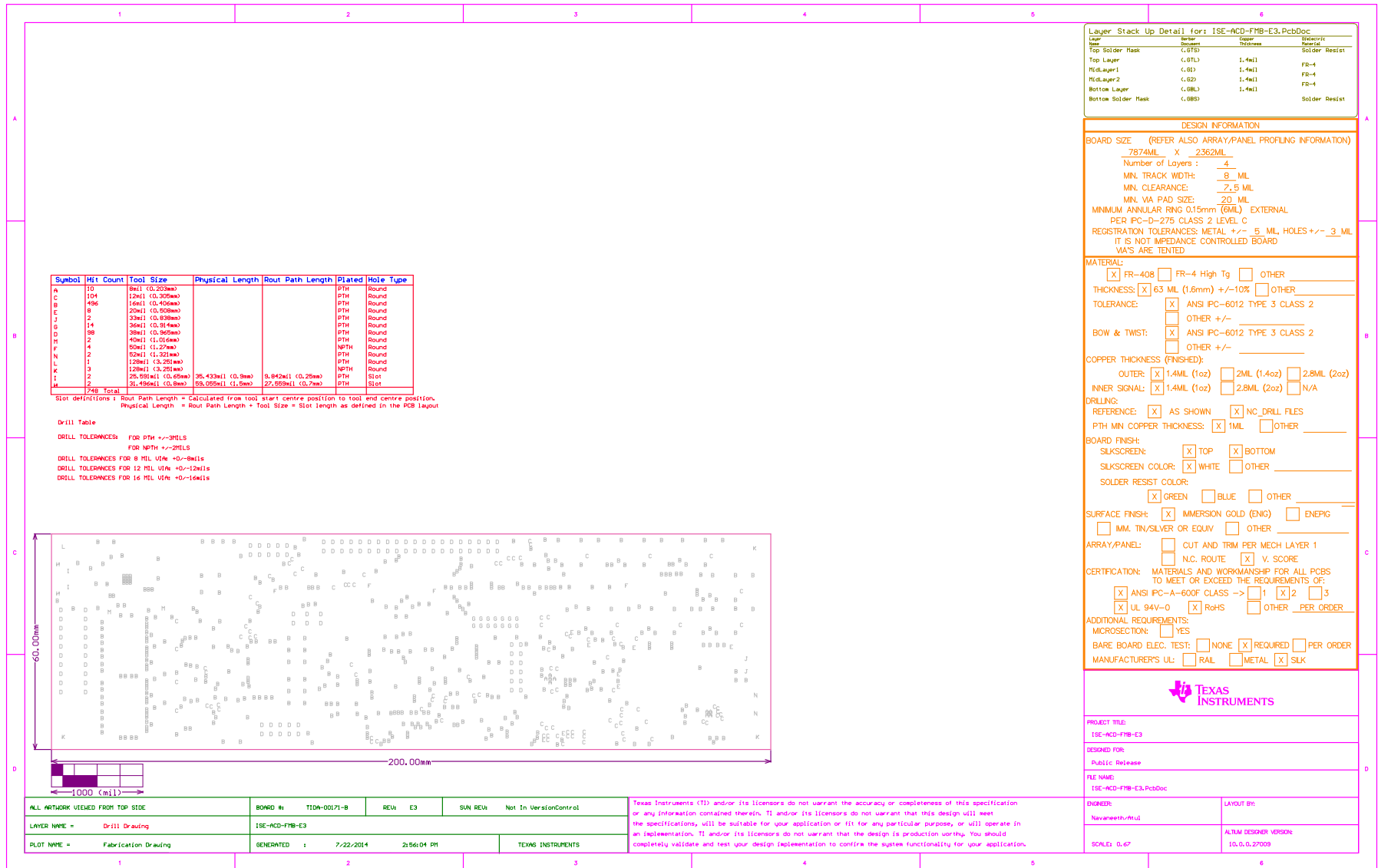


图 172. 制造图纸



8.6.2 FMB

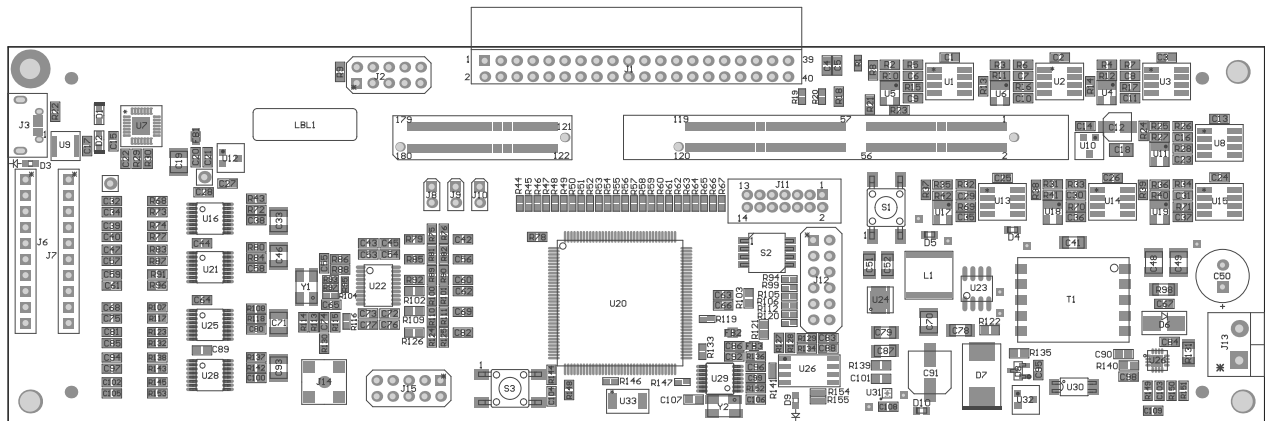


图 175. 顶层装配图

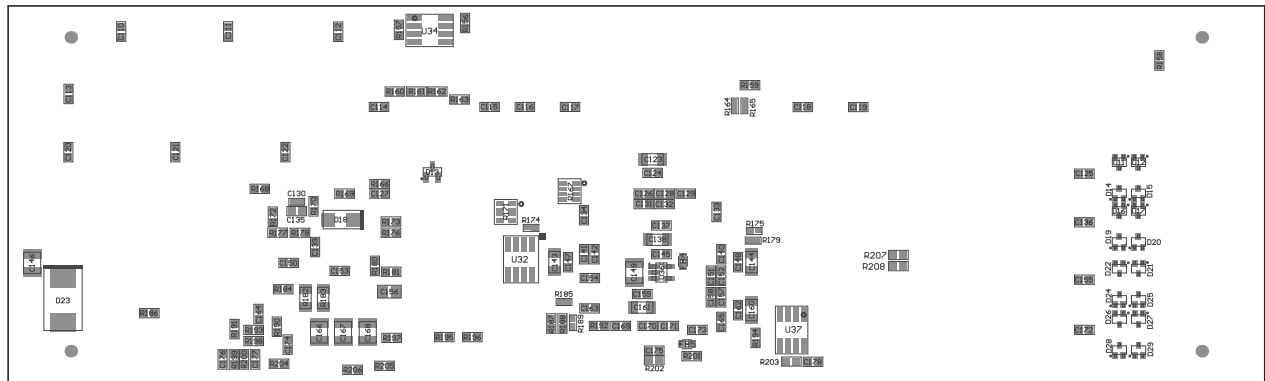


图 176. 底层装配图

## 9 参考文档

1. 《工业驱动产品中的精密电流测量》，作者：Arek Kacprzak 和 Marc Royer，德州仪器 (TI) ([TI 博客](#))
2. 《ADS1202 与 FPGA 数字滤波器组合用于电机控制应用中的电流测量》 - 作者 Miroslav Oljaca 和 Tom Hendrick，德州仪器 (TI) (文献编号: [SBAA094](#))
3. 《数字信号处理中的实际应用》，作者 Richard Newbold，Prentice Hall 出版 (书籍)
4. 《AMC1304 数据表》 (文献编号: [SBAS655](#))
5. 《AMC1305 数据表》 (文献编号: [SBAS654A](#))
6. 《TMS320F2837xD 双核 Delfino™ 微控制器数据表》 (文献编号: [SPRS880A](#))
7. [SPRUHM8A](#) — 《TMS320F2837xD Delfino™ 微控制器技术参考手册》

## 10 关于作者

**N. NAVANEETH KUMAR** 是德州仪器 (TI) 的系统架构师，负责开发适用于工业系统电机控制的子系统解决方案。N. Navaneeth 在电力电子设备、EMC、模拟和混合信号设计领域拥有丰富经验。他拥有驱动器、太阳能逆变器、UPS 和保护继电器领域的系统级产品设计经验。N. Navaneeth 拥有印度巴拉蒂尔大学的电子与通信工程学士学位以及英国博尔顿大学的电子产品开发理学硕士学位。

**NELSON ALEXANDER** 是德州仪器的系统工程师，负责开发面向工业电机驱动领域的子系统设计解决方案。Nelson 自 2011 年起在 TI 工作，参与设计智能电网和基于微控制器的嵌入式系统相关产品。Nelson 拥有班加罗尔 MSRIT 电气工程专业的技术学士学位。



## 修订历史记录

Changes from Original (October 2014) to A Revision	Page
• 已更改 LVDS 接口为 CMOS 接口 .....	91
• 已更改 LVDS 接口为 CMOS 接口 .....	91

注：之前版本的页码可能与当前版本有所不同。

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

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