参考文献

*Design Guide: TIDA-010237*

# *交流和直流剩余电流故障检测参考设计*

## 说明

此参考设计可检测毫安级的交流和直流接地故障电流，用于剩余电流检测 (RCD) 和接地故障电流断路器 (GFCI)，旨在满足 UL2331-2 和 IEC62752 的时序与精度要求。DRV8220 H 桥构建自振电路，该桥会驱动磁芯进入和退出饱和状态。有源滤波电路识别故障电流信号及其电平。一组可通过电阻器调节的窗口比较器则提供数字故障输出。

## 资源

| | |
|---|---|
| TIDA-010237 | 设计文件夹 |
| DRV8220 | 产品文件夹 |
| INA600 | 产品文件夹 |
| OPA4383 | 产品文件夹 |
| INA293 | 产品文件夹 |
| SN74LVC2G74 | 产品文件夹 |
| TLV7011 | 产品文件夹 |
| TLV9022L | 产品文件夹 |

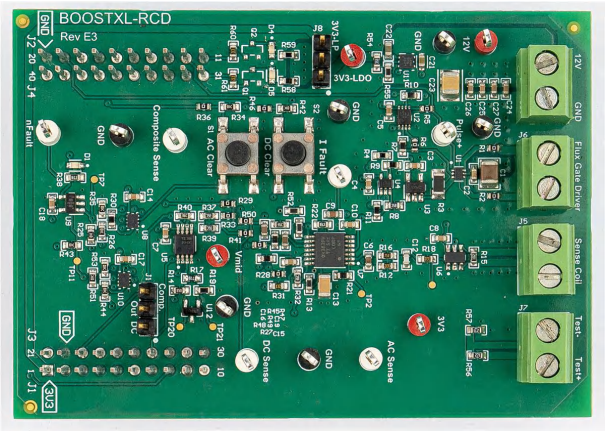
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

## 特性

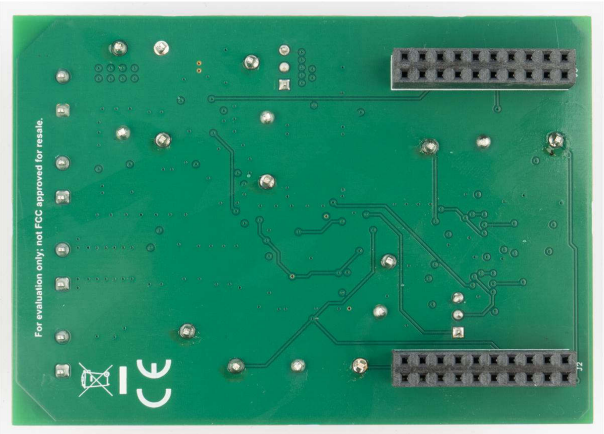
- 低成本分立式交流和直流接地故障检测电路
- 6mA 至 30mA 直流以及 $5mA_{RMS}$ 至 $30mA_{RMS}$ 交流泄漏电流检测阈值，支持对 UL2231、IEC62752 和 IEC62955 进行测试
- 检测到响应时间为 3-50ms（不包含继电器延迟时间）
- 可调节交流和直流跳变阈值
- 自振反馈电路可以驱动不同的磁芯材料，只需对硬件进行极少的改动
- 有源低通滤波器经过优化，可衰减自振频率并放大故障电流信号

## 应用

- 交流充电（桩）站
- 直流快速充电站
- 车载充电器
- GFCI/RCD 断路器
- 中央逆变器




电路板顶部

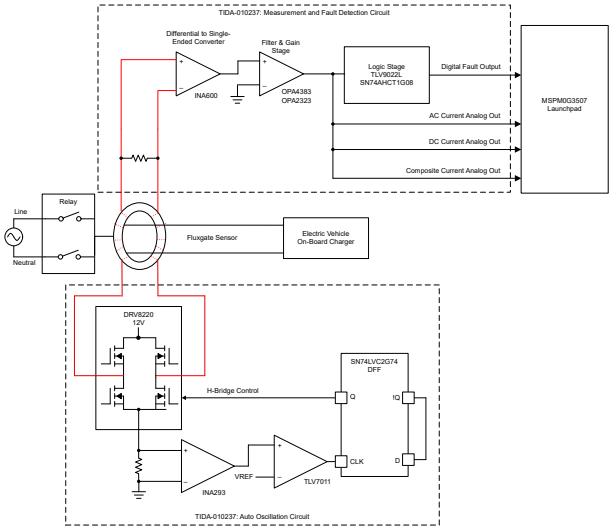



电路板底部



English Document: TIDUF03

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated




方框图

# 1 系统说明

电动汽车 (EV) 通过电动汽车供应设备 (EVSE) 从电网接收能量。为了便于向车辆输送电力，EVSE 位于电网和车辆之间。

如果发生接地故障，EVSE 必须做出响应并触发继电器以断开电网电源。在电动汽车充电期间提供保护的主要要求是能够检测交流和直流残余电流并降低电击风险。该系统通过磁通门传感器监控相线和零线，从而实现残余电流检测 (RCD)。在无故障条件的正常运行期间，电流总和等于零。在接地故障条件下，电流之和不等于零。该剩余电流表示系统短路，依据 IEC62752 与 IEC62955 标准，在 6mA 直流和 30$mA_{RMS}$ 下可能导致问题。

不只有 EV 存在测量交流和直流剩余电流的需求。太阳能、智能断路器以及其他存在直流负载或电源的应用，都可能需要进行剩余电流检测。

## 1.1 主要系统规格

| 参数 | 注意事项和条件 | 最小值 | 标称值 | 最大值 | 单位 | 详细信息 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **输入特性** | | | | | | |
| 线路频率 | 经过磁通门传感器 | | 60、50 | | Hz | |
| 相线电压 | | | 通用 | | V | |
| 相线电流 | | | 通用 | | A | |
| **跳变阈值** | | | | | | |
| 残余直流电流阈值 | | | 6 | | mA | 可通过电阻器调节 |
| 残余交流电流阈值 | | | 30 | | $mA_{RMS}$ | 可通过电阻器调节 |
| **负载点特征** | | | | | | |
| 电路板正电源电压 | | | +12 | | V | 由外部电源提供 |
| 磁通门传感器驱动电压 | DRV8220 | | +12 | | V | H 桥电压，用于驱动磁通门传感器达到饱和状态 |


Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

# 2 系统概述

## 2.1 方框图

图 2-1 所示为磁通门传感器、滤波电路、故障检测电路和自振电路之间的连接概述。

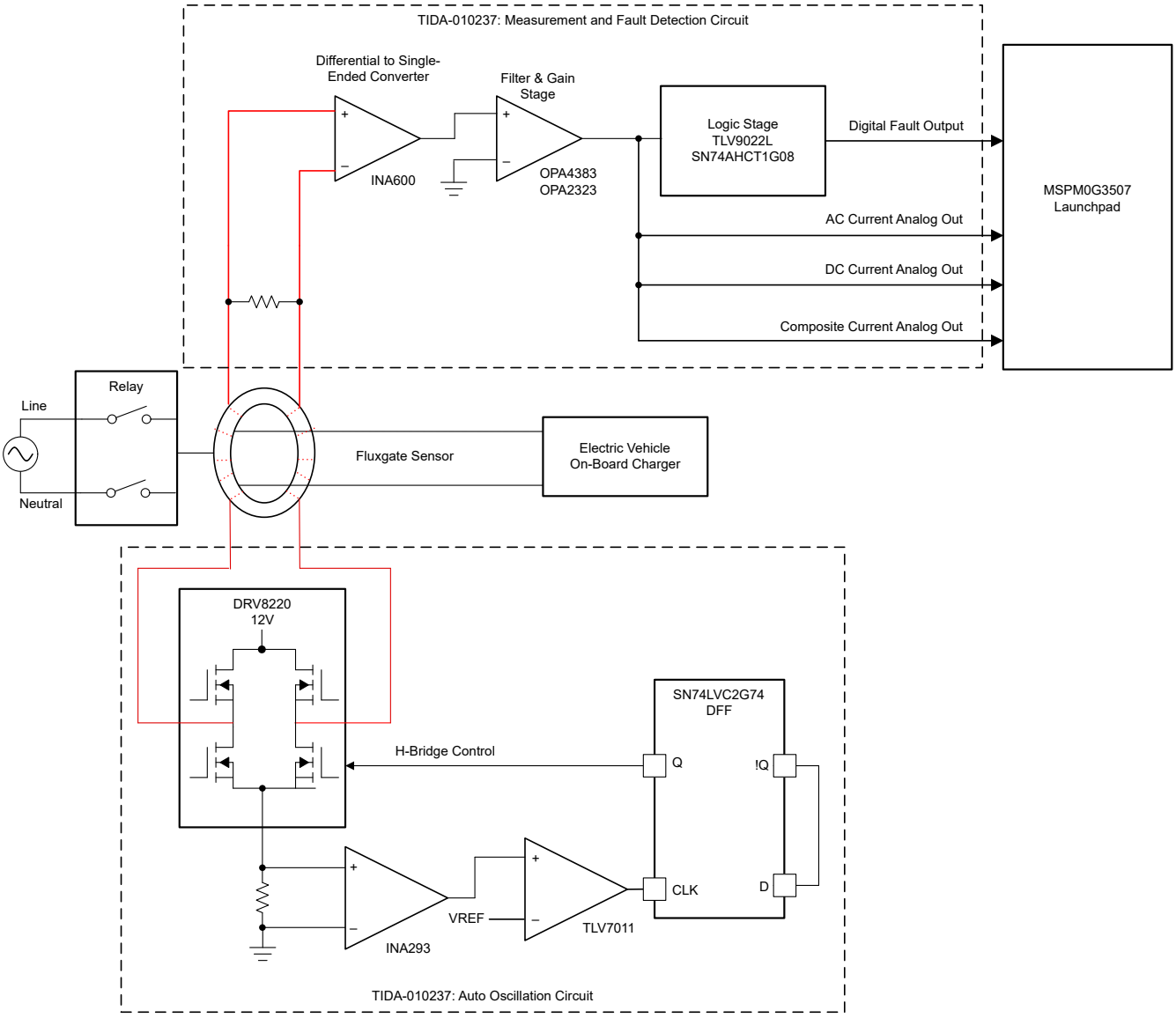



**图 2-1. 方框图**



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

## 2.2 系统设计原理

### 2.2.1 检测原理

如果离开电网的电流不等于返回的电流，则存在接地故障。该电流会意外地移动到某个位置，因此存在火灾或电击风险。

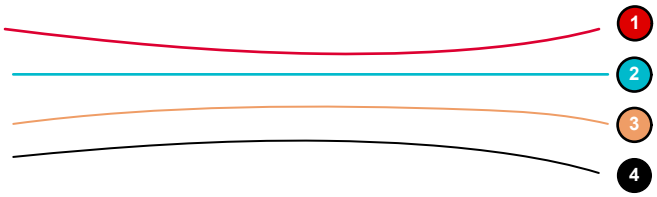



**图 2-2. 相线和零线**

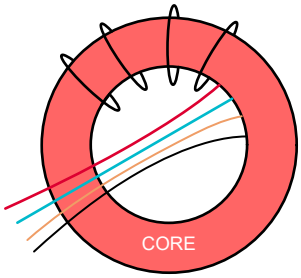



**图 2-3. 磁通门传感器正面视图**

在正常条件下：

$I_{TOTAL} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 = 0A$

在接地故障情况下：

$I_{TOTAL} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \neq 0A$

对于直流故障情况：$|I_{TOTAL}| > 6mA$

对于交流故障情况：$|I_{TOTAL}| > 30mA_{RMS}$

**备注**

6mA 和 $30mA_{RMS}$ 的阈值可通过电阻器调节。

### 2.2.2 饱和区

当所施加磁化*磁场 H* 的增加不能进一步增加材料的磁化时，会达到饱和状态，因此总磁性*磁场 B* 电平关闭。随着 H 场的增加，B 场逐渐接近最大值，即物质的饱和水平。磁场表示通过导体的现有电流。根据这个想法，激励的可饱和电感器能够测量电流。

铁磁材料的饱和点取决于磁导率和电流大小。磁芯磁导率会因外部磁场和通过传感器缠绕线圈的激励电流而变化。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

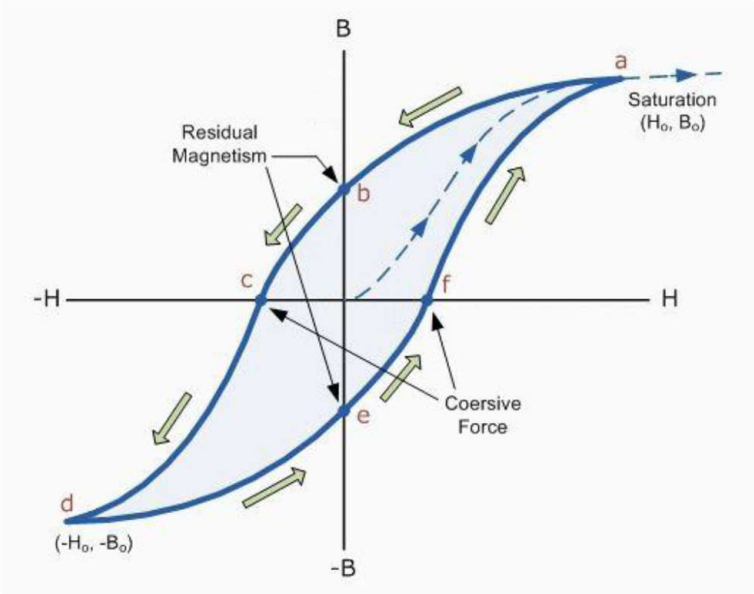



**图 2-4. 磁化曲线和 B-H 曲线**

### *2.2.3 常规工作模式*

流经导线的电流会产生磁场。在检测原理部分中进行了说明，接地故障会产生磁场。磁通门负载电阻器上的平均电压与接地故障磁场成正比。该平均电压经过滤波和读取，来确定是否存在接地故障。

磁芯由驱动器电路驱动至饱和状态。一旦达到饱和，驱动电路就会切换电流方向，直到磁芯再次达到饱和。每次磁芯达到饱和时，驱动电路都会不断地切换驱动电流方向。在饱和之前，由于高磁导率，环境磁场通过磁芯，从而产生高通量。在饱和点，磁芯磁导率下降到真空。在激励驱动电流的下半个周期内，磁芯从饱和状态恢复，并且由于环境磁场产生的磁通再次处于高电平，直到磁芯反方向饱和；然后重复该周期。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

## 2.3 重点产品

### 2.3.1 DRV8220

DRV8220 是具有多个控制接口选项的集成 H 桥驱动器：PWM（IN1、IN2）接口、PH、EN 或半桥接口。为了减少印刷电路板上的面积和外部元件，该器件集成了电荷泵稳压器及其电容器。

集成保护功能可在出现系统故障时保护该器件。这些保护功能包括欠压锁定（UVLO）、过流保护（OCP）和过热关断（TSD）。

### 2.3.2 TLV7011

TLV701x 和 TLV702x 器件是具有推挽和漏极开路输出的单通道微功耗比较器。TLV701x 和 TLV702x 的工作电压低至 1.6V，仅消耗 5μA，专为便携式和工业应用而设计。这些比较器采用无引线和引线式封装，可在空间受限的设计中显著节省布板空间。

### 2.3.3 INA293

INA293 是一款高侧或低侧电流检测放大器，具有宽共模范围、高精度、零漂移拓扑、出色的共模抑制比 (CMRR)、高带宽和快速压摆率。它有不同的增益版本，以便根据应用来优化输出动态范围。该器件采用带电流反馈放大器的跨导架构设计，可实现 20μA 的低偏置电流和 110V 的共模电压。

### 2.3.4 SN74LVC1G74

这款单路上升沿触发 D 类触发器需在 1.65V 至 5.5V $V_{CC}$ 下运行。

NanoFree™ 封装技术是 IC 封装概念的一项重大突破，它将硅晶片用作封装。

预设 ($\overline{PRE}$) 或清零 ($\overline{CLR}$) 输入端的低电平将会设置或重置输出，而不受其他输入端的电平的影响。当 $\overline{PRE}$ 和 $\overline{CLR}$ 处于非活动状态（高电平）时，数据 (D) 输入处满足设置时间要求的数据将传输到时钟脉冲正向缘上的输出处。时钟触发在一个特定电压电平下发生，与时钟脉冲的上升时间没有直接关系。经过保持时间间隔后，可以更改 D 输入端的数据而不影响输出端的电平。

该器件完全符合使用 $I_{off}$ 的部分断电应用的规范要求。$I_{off}$ 电路禁用输出，从而可防止其断电时破坏性电流从该器件回流。

### 2.3.5 OPAx383

OPA383、OPA2383 和 OPA4383 (OPAx383) 精密放大器系列具有出色的性能。通过零漂移技术，OPAx383 的失调电压和温漂可提供出色的长期稳定性。仅需 65μA 的超低静态电流，OPAx383 就能实现 2.5MHz 的带宽、32nV/√Hz 的宽带噪声和在 650nVPP 的条件下 1/f 的噪声。这些规格对于在 16 位至 24 位模数转换器 (ADC) 中实现超高精度和不降低线性度至关重要。OPAx383 在温度范围内具有平坦的偏置电流；因此，高输入阻抗应用在温度范围内几乎不需校准。

### 2.3.6 INA600

INA600 是一款带有精密匹配电阻器的电压检测差分放大器，提供了多种衰减增益选项。精密匹配集成式电阻器消除了对精密和低容差外部电阻器的需求，从而节省了 BOM 成本和布板空间。

INA600 具有大于 1MΩ 的高输入阻抗和 65μA 的低静态电流。该器件可处理高达 –40V 至 +85V 的输入电压，能够以极高精度对电压进行衰减，并将其传递给低压 ADC，同时抑制共模误差，例如接地反弹、开关纹波、交流电源等。该器件实现了 ±0.05% 的最大增益误差和 5ppm/°C 的最大增益漂移，同时具备 89dB 的最小共模抑制比 (G = 1/5)。

### 2.3.7 TLV9022L

TLV902xL 和 TLV903xL 是一个单通道和双通道闩锁比较器系列。该系列还提供低输入失调电压，上电复位 (POR) 和容错的轨到轨输入。这些器件具有出色的速度功率组合，传播延迟为 110ns，每个通道的静态电源电流仅为 22μA。

TLV90xxL 具有输出闩锁的独特功能。输出会在首次跨越阈值时闩锁，以便在没有系统控制器完全关注的情况下捕获事件或错误状态。此功能允许在系统控制器仍在初始化或忙于其他任务期间时捕获启动期间的事件。借助下降


Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

沿触发的清除输入，系统控制器可以在执行任何所需的任务后复位闩锁，并满足安全关键要求。L1 和 L2 选项定义了上电闩锁行为。

这些比较器还具有容错输入，容错输入电压可升至 6V 而不会造成损坏，也不会产生输出相位反转。此功能使该系列的比较器适合在恶劣的嘈杂环境中进行精密电压监测。

TLV902xL 具有漏极开路输出，可上拉到低于或超过电源电压，旨在实现多路输出“或”(ORing) 逻辑或电平转换功能。在从高到低输出转换时会发生闩锁。TLV903xL 具有推挽输出级，能够灌入/拉出高达 85mA 的电流以驱动 MOSFET 栅极等电容负载。在从低到高输出转换时会发生闩锁。

### *2.3.8 TLV431B*

TLV431 器件是低电压 3 端子可调节电压基准，在适用的工业和商业级温度范围内具有额定热稳定性。可以通过两个外部电阻器，将输出电压设置为介于 VREF (1.24V) 和 6V 之间的任何值。这些器件具有比广泛使用的 TL431 和 TL1431 并联稳压器基准电压更低的工作电压 (1.24V)。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

# 3 硬件、测试要求和测试结果

## 3.1 硬件

### 3.1.1 电路板概述

TIDA-010237 采用 BoosterPack™ 插件模块外形，可连接到 MSPM0 LaunchPad™ 开发套件。图 3-1 展示了参考设计电路板的顶部，测得尺寸为 6cm × 8.5cm，并突出显示了交流/直流检测和振荡器子系统。

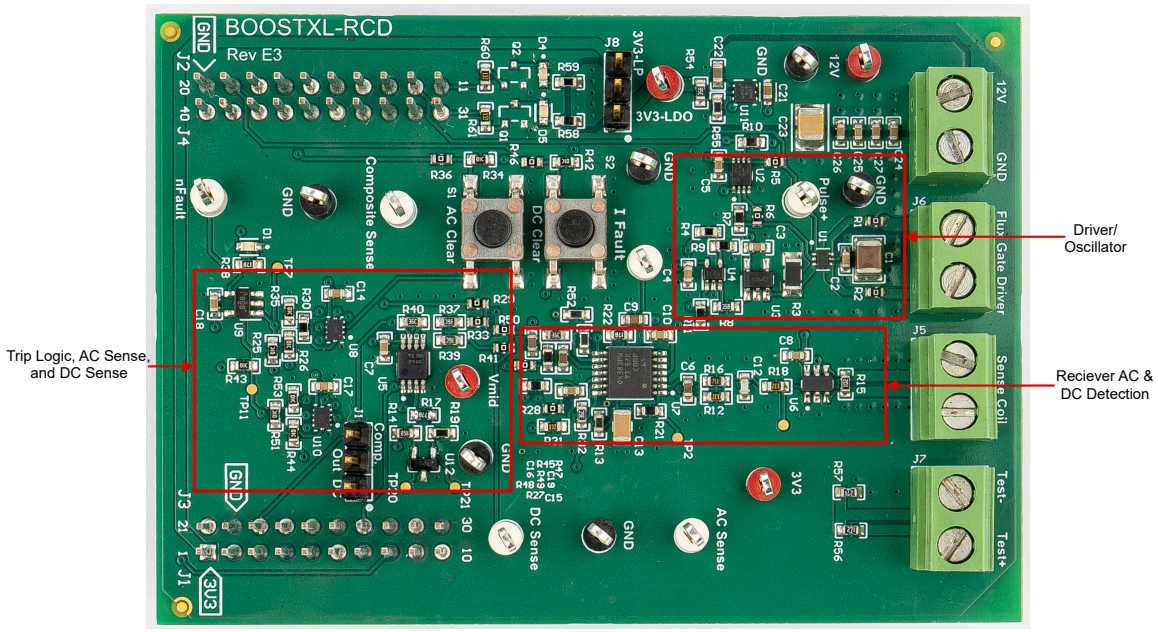



图 3-1. 板载硬件上的子系统位置

图 3-2 突出显示了电源、传感器和测试输入与电路板的连接。端子接头 J4 用于连接外部 +12V 和 GND 电源。

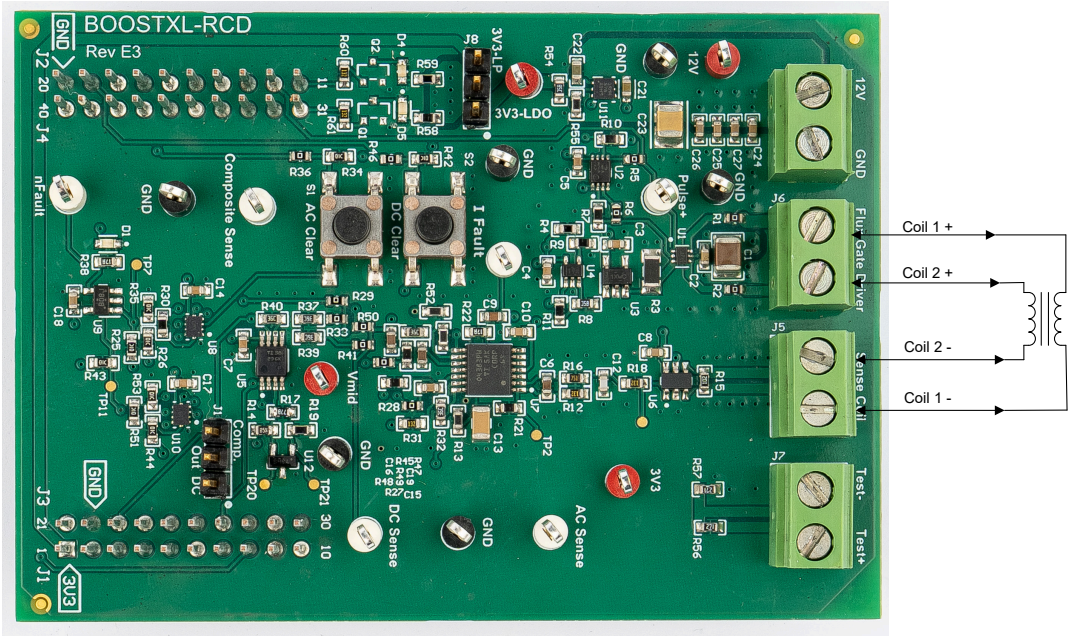



图 3-2. 电源和传感器板连接



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

连接器 J5 和 J6 用于连接纳米晶磁芯磁通门传感器上的驱动线圈。J6 将两个驱动线圈的一侧连接到 DRV8220 输出。J5 将驱动线圈的另一侧连接到接收检测电路的 1kΩ 检测电阻器。J7 连接到测试输入。Test+ 有一个电阻器连接到 Test – ，可用于交流测试。Test – 还有一个接地电阻器，可用于直流测试。

### 3.1.2 滤波器级

滤波器级的目标是获取交流和直流接地故障检测信号，并滤除自振电路产生的噪声。

需要滤除信号路径中的噪声。噪声过大可能会触发误跳变。噪声的主要来源是由产生 DRV8220 开关的自振电路引起的开关。自振开关频率随磁通门传感器磁导率、负载电阻或调节饱和检测电路而变化。用于测试的纳米晶磁芯频率范围为 600Hz 至 800Hz，配有 1kΩ 负载电阻器和两组 100 匝线圈。

在故障期间，滤波器级输出可被 ADC 读取的可检测信号。共有三种不同的滤波输出。一种用于交流接地故障，一种用于直流接地故障，还有一种是叠加交流和直流接地故障信号的组合输出。组合输出是交流和直流信号的加权组合，旨在实现符合 UL2332-2 所定义的复合跳变电平。

设有一个窗口比较器，当交流、直流或复合故障信号超过预定阈值时，提供数字故障输出。共有两个窗口比较器，一个用于交流信号，另一个根据跳线 J1 的位置可用于直流或复合信号。窗口比较器故障为闩锁型，因此设计中还包括按钮，可在不对电路板断电的情况下清除故障并重新测试。每个窗口比较器的输出均作为一个与门的输入。无故障时，该与门输出高电平；存在故障时，输出低电平。

在此设计中，6mA 的直流故障会输出 130mV 偏移电压。30$mA_{RMS}$ 的交流故障会输出以 1.65V 为中心、峰值间电压为 2.86V 的信号。可以增大增益，确保跳变阈值低于运算放大器的电源轨。

滤波器级旨在获取故障信号并衰减 70Hz 以上的频率。图 3-3 突出显示了由差分到单端转换器、有源低通滤波器和有源高通滤波器组成的接收器电路。

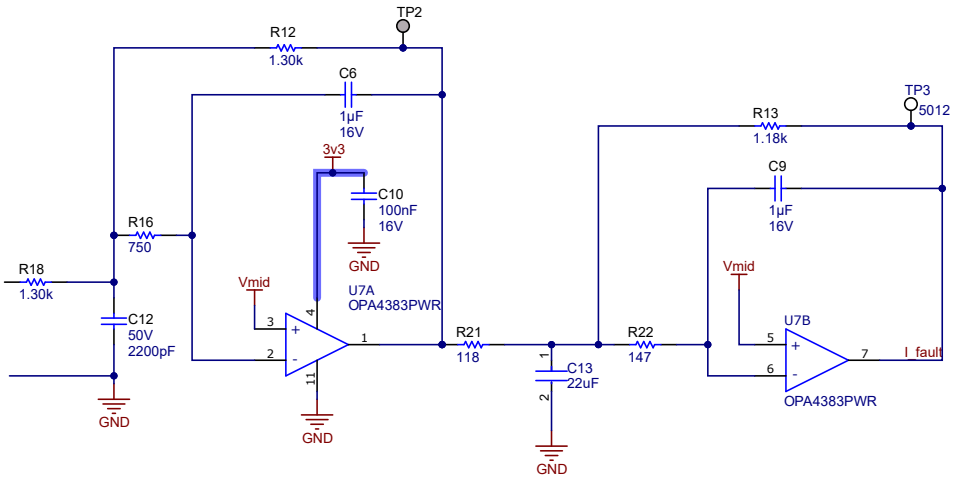



**图 3-3. 滤波器级原理图**

使用的滤波器拓扑结构是 MFB 拓扑结构（有时称为无限增益或 Rauch），由于对元件变化的敏感性较低，因此通常是首选。MFB 拓扑可创建一个反相二阶级。这种反相可能是滤波器应用中的一个问题。根据元件选择，MFB 滤波器电路可配置为低通滤波器、高通滤波器或带通滤波器。对于此应用，使用了具有巴特沃斯型响应的四阶低通滤波器。

### 3.1.3 差分至单端转换器

信号链的第一部分执行差分至单端转换。INA600 衰减差分放大器将磁通门负载电阻器两端的差分信号转换为单端信号。这一转换简化了后续的信号调节，并允许 ADC 读取接地基准信号。R15 是磁通门传感器线圈上的负载电阻器。

运算放大器输入具有阻抗匹配对于更大限度地减小误差非常重要。阻抗不匹配会增加故障检测信号的误差。R15 至 U6 应采用相似的走线，以减少误差。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

由于电阻分压器效应，与负载电阻器 (R22) 相关的更高阻抗会提供更高的接地故障信号。INA600 具有大于 1MΩ 的输入阻抗。

图 3-4 中的第一个滤波器级用于将负载电阻器上的差分信号转换为单端信号。磁通门传感器的负载电阻器 (R22) 与 TIDA-010237 之间的这些接口。

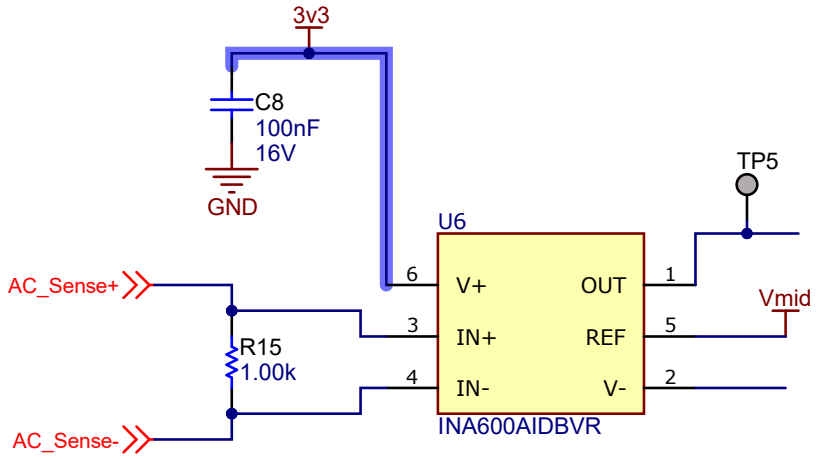



**图 3-4. 差分至单端原理图**

### *3.1.4 低通滤波器*

低通滤波器经过优化，可衰减自振频率。目标是降低噪声以防止误跳闸。对于直流信号，使用了 TI 的 Webench™ 滤波器设计器来创建具有巴特沃斯响应的单端 Sallen 和 Key 低通滤波器。增益通过 R47 和 R52 进行调节。截止频率为 10Hz。在 600Hz 时衰减为 –50dB。

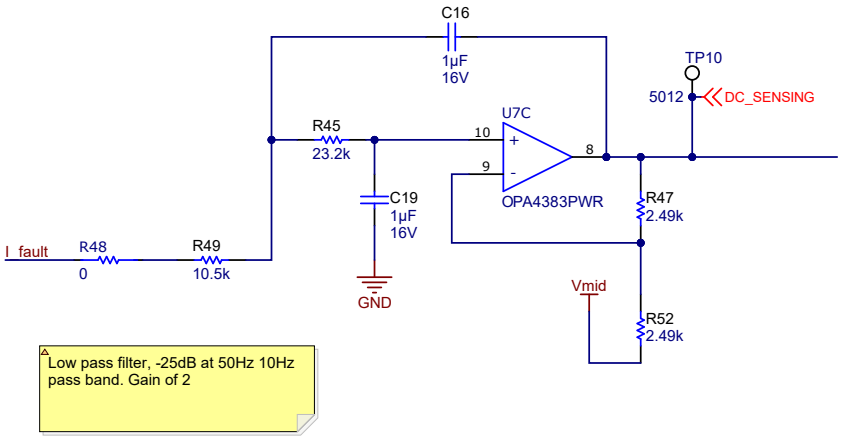



**图 3-5. 低通滤波器**

交流信号通过高通滤波器进行交流耦合，以将信号与直流偏移隔离开来。此外，还包含一个可调增益且截止频率为 70Hz 的单极点低通滤波器，用于减少自振纹波。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

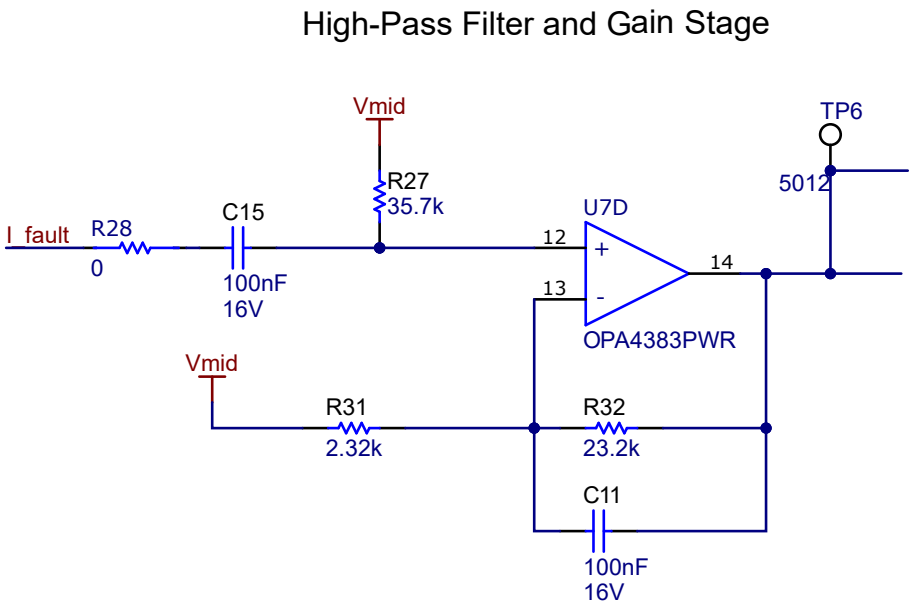



**图 3-6. 高通滤波器原理图**



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

### 3.1.5 自振电路

自振子电路会检测磁通门传感器何时达到饱和，然后使电流反向流动。达到饱和时，电流检测电压会超过比较器阈值，这会导致 D 类触发器将控制信号翻转到 DRV8220 H 桥。这种翻转将使磁通门传感器磁芯在相反的方向上达到饱和。

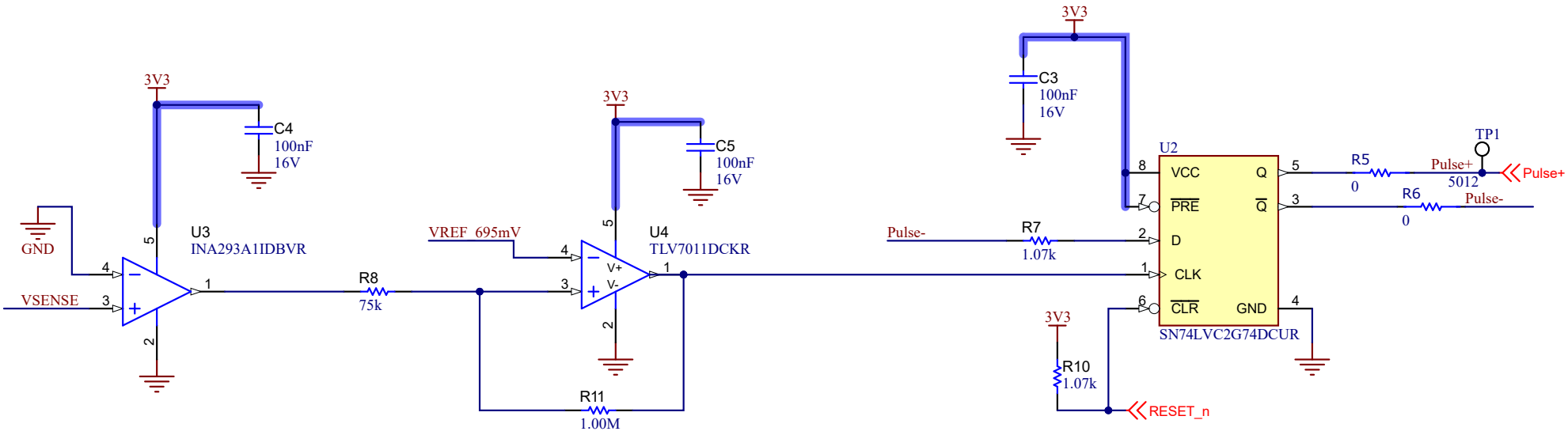



**图 3-7. 自振电路原理图**

该电路会监控流过磁通门的电流，并在达到饱和后反转驱动电流方向。需要使用自振电路来检测直流故障。

相线和零线会穿过磁通门传感器。在无故障条件的正常运行期间，电流总和等于零。

在接地故障条件下，电流之和不等于零。在直流故障期间，流过线路的电流和流过零线的电流存在不平衡。磁通门对稳定的直流电流视而不见。振荡的驱动电流将压过磁通门传感器线圈。该直流故障电流会产生磁场，该磁场会在一个方向上阻止磁通门驱动，并在相反方向上帮助磁通门驱动，从而导致占空比偏移。在正常条件下，开关的占空比为 50%。在直流故障期间，占空比会发生变化。

振荡频率取决于 R3 与 DFF 引脚 1 之间的信号链。匹配电流检测放大器增益和 VREF 电压，确保磁芯达到饱和状态。使磁芯更深地达到饱和会降低噪声，从而无需消磁。当磁芯完全饱和时，磁芯内的所有材料都磁性对齐。当所有材料均对齐时，材料中没有杂散磁场会产生噪声。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

### 3.1.6 DRV8220 H 桥

DRV8220 驱动流经磁芯的电流，使磁芯饱和。该器件是能够驱动足够电流的最小、最具有成本效益的器件。

DRV8220 是一款集成电机驱动器，具有四个 N 沟道功率 FET、电荷泵稳压器和保护电路。该器件可以提供高达 1.76A 的输出电流，工作电源电压范围为 4.5V 至 18V。该驱动器具有强大的内部保护功能，包括欠压锁定、输出过流和器件过热保护。

低侧电流检测电阻 (R3) 可检测流经 DRV8220 的电流。磁芯达到饱和时的电流尖峰，饱和检测电路可以读取该值。

DRV8220 的输出由引脚 1 和 2 控制。这些引脚的状态决定了磁性线圈内电流的流向。超过饱和检测电路阈值后，引脚 1 和 2 的控制信号翻转，从而翻转 DRV8220 输出。

DRV8220 输出 1 和 2 用于驱动磁通门传感器线圈达到饱和状态。饱和检测电路使用低侧电流感应电阻器来获知何时达到饱和。

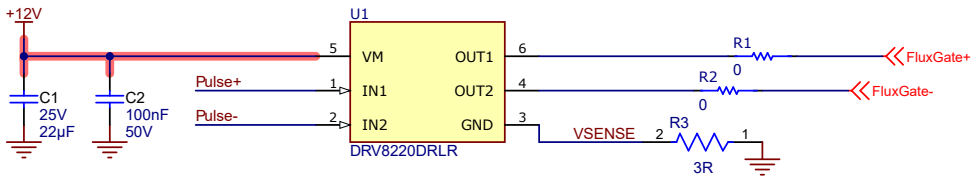



**图 3-8. DRV8220 原理图**

当磁芯达到饱和时，流经 VSENSE 的电流达到峰值。

### 3.1.7 饱和检测电路

饱和检测电路由低侧电流检测电阻 (R3)、电流检测放大器 INA293 和比较器 TLV7011 组成。当磁通门传感器线圈达到饱和时，比较器输出高电平。

该电路用于确定磁通门传感器何时达到饱和。

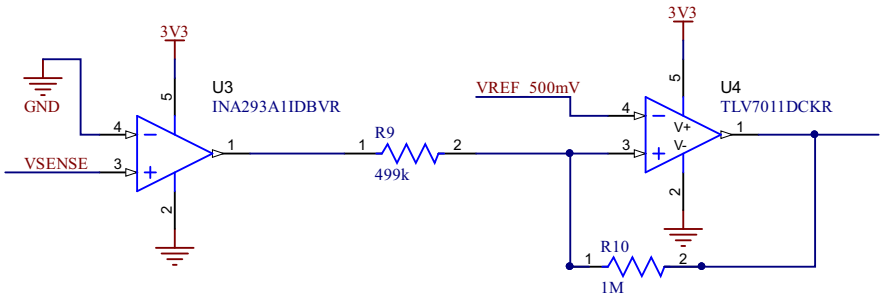



**图 3-9. 饱和检测原理图**

从 DRV8220 的低侧分流电阻器读取 $V_{SENSE}$。$V_{SENSE}$ 提供流经磁通门传感器线圈的电流。该信号由电流检测放大器 INA293 以 20V/V 的固定增益获得。增益信号与 695mV 的 $V_{REF}$ 基准电压进行比较，该基准电压由电阻分压器提供。当电流检测信号超过 $V_{REF}$ 电压时，磁芯已饱和，DRV8220 必须交换输出方向。比较器 TLV7011 的输出馈入 DFF 中。有关更详细的说明，请参阅由 DFF 控制的 H 桥。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

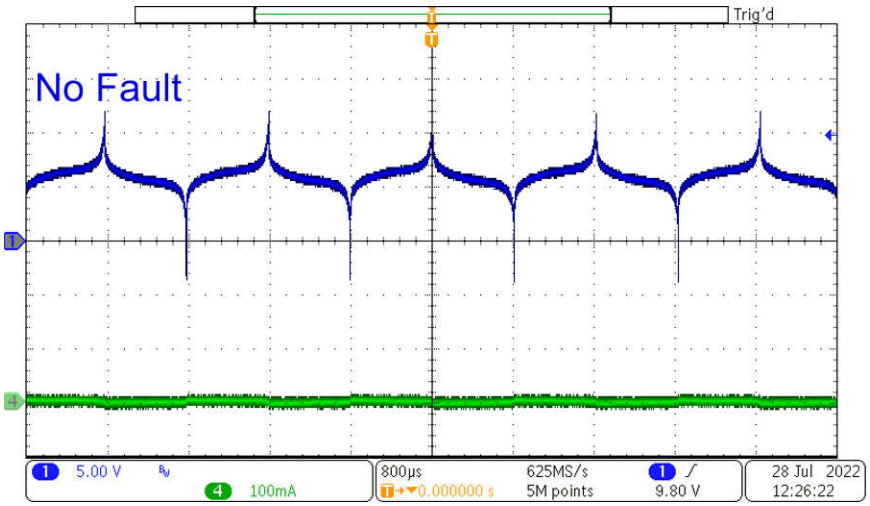



**图 3-10. 负载电阻器进入饱和状态**

### *3.1.8 由 DFF 控制的 H 桥*

数字触发器使用输出逻辑来控制 DRV8220 输出电流方向。触发器电路会在每个正 CLK 边沿改变输出 Q。可通过确认输出端 Q 在不到 20mS 内持续翻转来监测自振电路的状态。将 reset_n 拉至低电平即可复位电路。

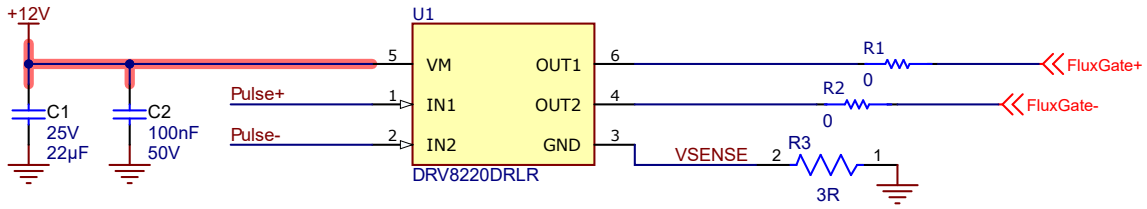



**图 3-11. DFF SN74LVC2G74 电路**

反相输出 !Q 连接到输入数据 D，因此每个正时钟边沿将输出反相。

### *3.1.9 放弃计时器采集*

计时器采集是一种通过从自振电路读取占空比变化来读取直流故障的方法。这是 RCD 模块中的常见测量技术。在直流故障条件下，DRV8220 的占空比会随着 B-H 曲线或磁化曲线环路的变化而变化。流经磁芯的直流故障电流在一个方向上导致饱和的速度比在另一个方向上稍快。这种差异将转化为可测量的占空比变化。

这种方法对元件、振荡器和磁芯中的噪声很敏感。这种方法需要更昂贵的元件、具有更短的延迟和更快的 MCU 时钟速度。占空比变化存在很大的不一致性，具体取决于所用的磁芯。在许多情况下，由噪声引起的抖动会使信号闪烁，从而导致误跳变。

通过从窗口比较器读取数字故障输出，或使用 ADC 读取模拟信号，可降低 BoM 成本，并在更广泛的磁通门传感器材料类型选择范围内获得更精确的读数。

### *3.1.10 磁通门传感器*

磁通门传感器通过定期交替使一块铁磁芯材料饱和来测量磁场。当存在外部磁场时，周期性饱和会偏移并进行测量。磁芯饱和时来自磁芯的固有磁噪声会限制磁通门性能。

由于流经线路的电流和流经零线的返回电流不平衡，接地故障会产生磁场。

流经导线的电流会产生磁场。当相等的电流反向流动时，磁场之和会抵消。要检测毫安 (mA) 级的故障电流，需要使用具有高磁导率和低矫顽性的软磁性材料。此设计中使用的 Hitachi 磁芯是 FT-3K70T F2520C，这是一种纳米晶磁芯。磁芯绕有两组各 100 匝的 34 号线规漆磁线。磁性元件 CMC020012008h 是另一种纳米晶磁芯方案。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

## 3.2 测试设置

### *3.2.1 接地故障模拟*

使用一根附加导线通过具有三相和零线的磁环形磁芯对故障进行了仿真。附加导线连接到单独的电源和可控负载，以控制故障电流振幅并确认 6mA 直流或 $30mA_{RMS}$ 的电路跳变电平。除了阈值测试，还测量了 nFault 与门的输出，以确认系统何时检测到故障并确定系统响应时间。

## 3.3 测试结果

### *3.3.1 温度范围内的线性度*

此设计在 –40°C 至 110°C 温度范围内进行了测试，并在模拟直流输出端进行了测量，以便测量输出电压与故障电流。测得的故障电流输入范围为 –50mA 至 +50mA。图 3-12 展示了有源滤波器的输出电压与不同温度下的故障电流（ –8mA 至 8mA ）。最坏情况下的温漂为 432mV，即 ±0.26mA。

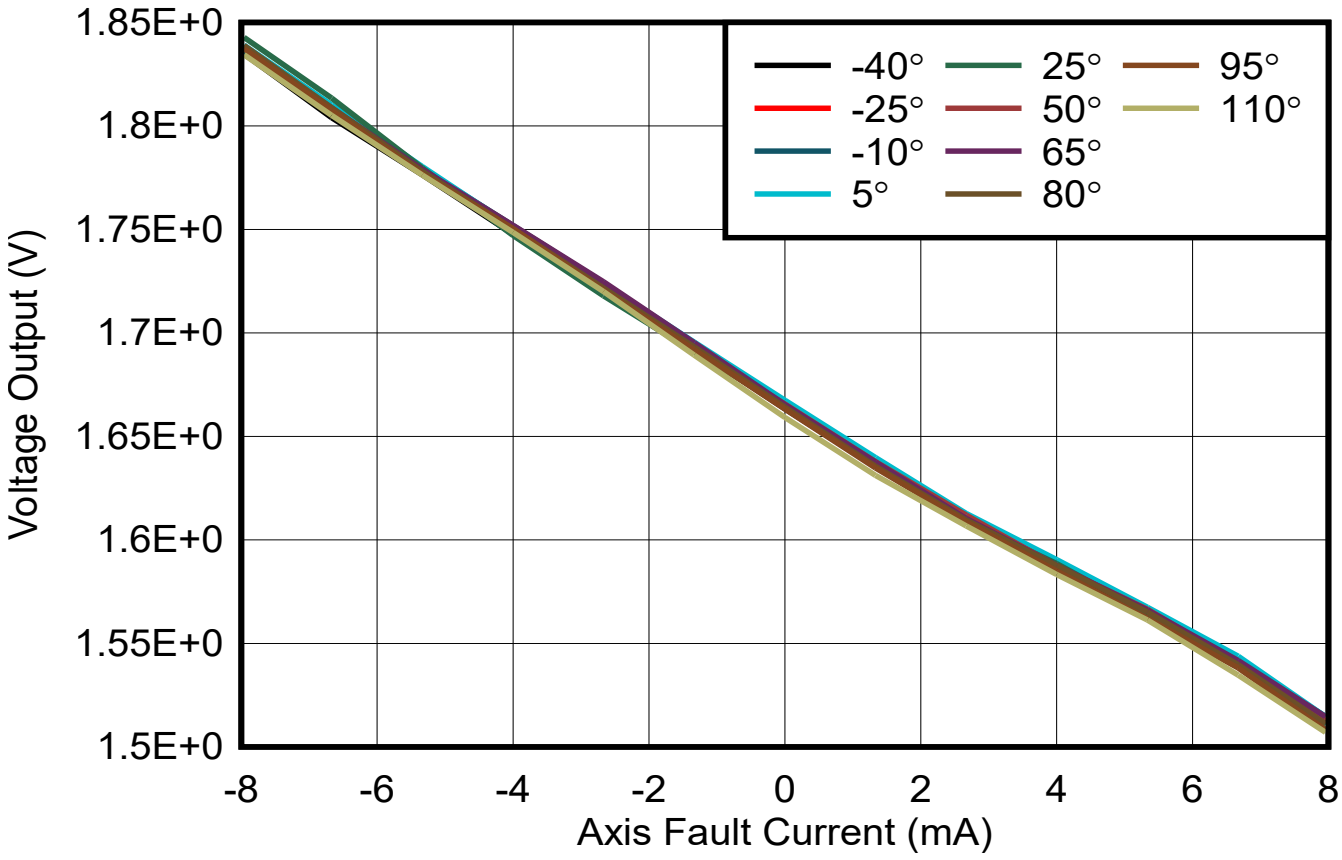



**图 3-12. 滤波器输出与故障电流间的关系**


Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

## 3.4 故障响应结果

测量了交流和直流故障电流的响应时间。在图 3-13 中，TIDA-010237 检测到 30mA$_{RMS}$，结果响应时间约为 11ms。

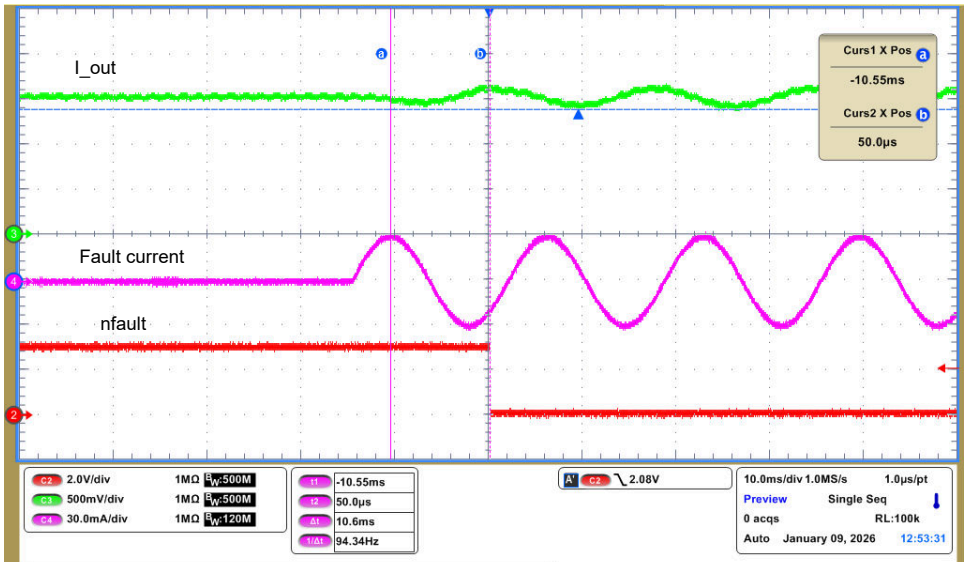



**图 3-13. 系统对 30mA$_{RMS}$ 故障电流的响应**

在图 3-14 中，TIDA-010237 检测到 50mA 直流故障电流，导致响应时间约为 2.47ms

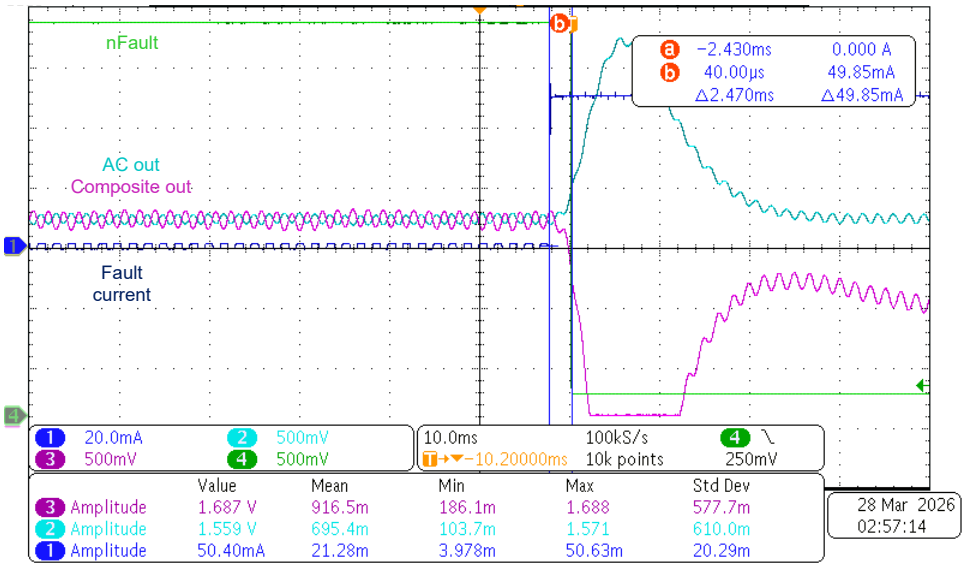



**图 3-14. 50mA 直流故障**

在图 3-15 中，TIDA-010237 检测到 6mA，结果响应时间约为 47ms。


Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

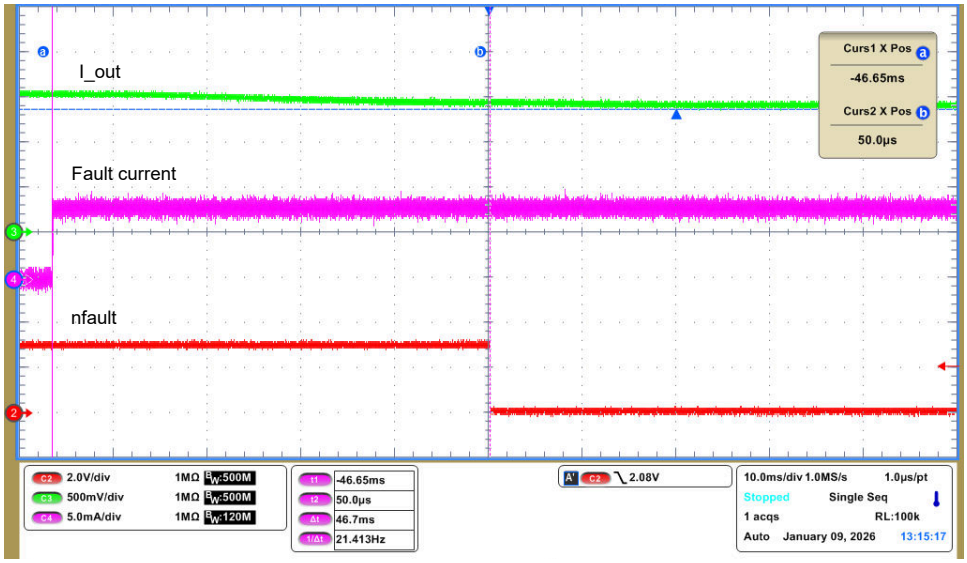



**图 3-15. 系统对 6mA 故障电流的响应**



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

# 4 设计和文档支持

## 4.1 设计文件

### 4.1.1 原理图

要下载原理图，请参阅 TIDA-010237 中的设计文件。

### 4.1.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 TIDA-010237 中的设计文件。

## 4.2 文档支持

1. 德州仪器 (TI)，*DRV8220 具有 PWM、PH/EN 以及半桥控制接口和低功耗睡眠模式的 18V H 桥电机驱动器*数据表
2. 德州仪器 (TI)，*INA186 具有使能功能的双向、低功耗、零漂移、宽动态范围电流检测放大器*数据表
3. 德州仪器 (TI)，*OPAx323 20MHz 高带宽、114dB CMRR、低压 ( 1.7V 至 5.5V ) RRIO 零交叉运算放大器*数据表
4. 德州仪器 (TI)，*TLV902xL 和 TLV903xL 精密自锁比较器系列*数据表
5. 德州仪器 (TI)，*INA293 –4V 至 110V、1.3MHz 超精密电流检测放大器*数据表
6. 德州仪器 (TI)，*SN74LVC1G74 具有清零和预设功能的单路上升沿触发式 D 类触发器*数据表
7. 德州仪器 (TI)，*TLV701x 和 TLV702x 小尺寸、低功耗、低电压比较器*数据表
8. 德州仪器 (TI)，*TLV767 1A、16V 精密线性稳压器*数据表

## 4.3 支持资源

TI E2E™ 中文支持论坛是工程师的重要参考资料，可直接从专家处获得快速、经过验证的解答和设计帮助。搜索现有解答或提出自己的问题，获得所需的快速设计帮助。

链接的内容由各个贡献者“按原样”提供。这些内容并不构成 TI 技术规范，并且不一定反映 TI 的观点；请参阅 TI 的使用条款。

## 4.4 商标

TI E2E™, NanoFree™, BoosterPack™, LaunchPad™, and Webench™ are trademarks of Texas Instruments.
所有商标均为其各自所有者的财产。



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

## 5 关于作者

**NATHAN NOHR** 于 2023 年毕业于密歇根大学，获得 BSEE 和 MSEE 学位。就职于德州仪器 (TI) 能源基础设施团队，专攻故障检测与断路器。

**JULIUS BURTELL** 于 2024 年毕业于密歇根大学，获得 BSEE 学位。就职于德州仪器 (TI) 能源基础设施团队，专攻电动汽车充电故障检测。具备模拟前端信号链和电池管理方面的经验。

**ERROL LEON** 于 2015 年毕业于圣路易斯奥比斯波的 Cal Poly，获得了 BSEE 和 MSEE 学位。Errol 与德州仪器 (TI) 电网基础设施团队合作，专注于电动汽车充电和智能仪表。具有模拟前端信号链、PLC 和通信协议方面的经验。

## 6 修订历史记录

注：以前版本的页码可能与当前版本的页码不同

| Changes from Revision A (April 2026) to Revision B (October 2026) | Page |
|---|---|
| • 添加了作者信息 | 1 |

| Changes from Revision * (December 2022) to Revision A (April 2026) | Page |
|---|---|
| • 更新了接收前端，添加了基于比较器的数字故障输出。 | 1 |
| • 添加了 UL2231 基准 | 1 |
| • 更新了*电路板顶部*图、*电路板底部*图、*方框图*、图 2-1、图 3-1 至 3-9 以及图 3-11 至 3-15 | 1 |
| • 更新了方框图以包含交流输出、直流输出和数字故障 | 3 |
| • 删除了 MSPM430 基准 | 8 |
| • 添加了有关直流和交流滤波器的信息 | 10 |
| • 添加了第二个磁芯选项 | 14 |



English Document: TIDUF03
Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

# 重要通知和免责声明

TI“按原样”提供技术和可靠性数据（包括数据表）、设计资源（包括参考设计）、应用或其他设计建议、网络工具、安全信息和其他资源，不保证没有瑕疵且不做出任何明示或暗示的担保，包括但不限于对适销性、与某特定用途的适用性或不侵犯任何第三方知识产权的暗示担保。

这些资源可供使用 TI 产品进行设计的熟练开发人员使用。您将自行承担以下全部责任：(1) 针对您的应用选择合适的 TI 产品，(2) 设计、验证并测试您的应用，(3) 确保您的应用满足相应标准以及任何其他安全、安保法规或其他要求。

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的相关应用。严禁以其他方式对这些资源进行复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。对于因您对这些资源的使用而对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，您将全额赔偿，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 TI 销售条款)、TI 通用质量指南 或 ti.com 上其他适用条款或 TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。 除非德州仪器 (TI) 明确将某产品指定为定制产品或客户特定产品，否则其产品均为按确定价格收入目录的标准通用器件。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月