

Design Guide: TIDA-020069

汽车级高电压互锁环路 (HVIL)

参考设计



说明

在混合动力汽车或电动汽车 (HEV/EV) 中，电池管理系统、牵引逆变器、直流/直流转换器、车载充电器和在高电压下运行的其他子系统需要具有高电压互锁环路 (HVIL)。HVIL 是一个低电压、低电流环路，可监控连接器的物理状态。HVIL 确定连接器和电线是处于闭合连接、开路连接、电池短路故障，还是处于接地短路故障状态。此 HVIL 故障信号会报告给车辆内的安全逻辑，以便将高压电路置于安全状态。该设计包括 HVIL 系统的生成和监控机制。

资源

TIDA-020069	设计文件夹
TLV9002-Q1、TLV9034-Q1	产品文件夹
TPS7B69-Q1、SN74HCS08-Q1	产品文件夹
SN74HCS86-Q1	产品文件夹



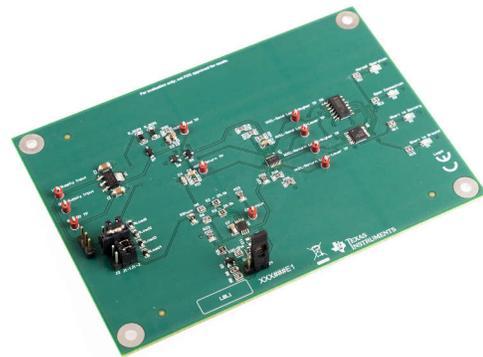
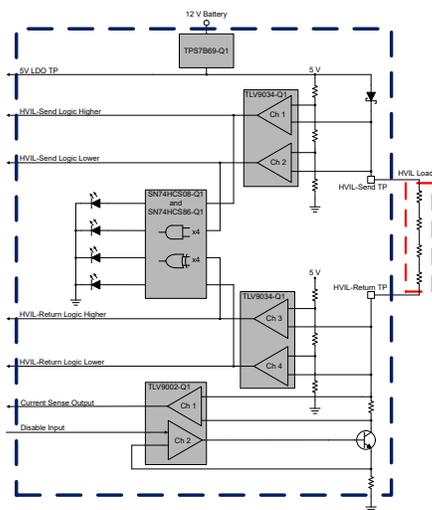
请咨询我司 TI E2E™ 支持专家

特性

- 广泛的互锁环路故障诊断以及 LED 指示功能：
 - 闭合连接 (正常运行)
 - 开路连接
 - 电池短路
 - 接地短路
- 可配置恒定电流生成
- 模拟或数字输出信号选项
- 用于故障状态监测的可调阈值
- 单向互锁系统

应用

- 混合动力汽车/电动汽车电池管理系统 (BMS)
- 混合动力汽车/电动汽车 OBC 和直流/直流转换器
- 混合动力汽车/电动汽车逆变器和电机控制



1 系统说明

高压互锁环路 (HVIL) 是混合动力汽车或电动汽车 (HEV/EV) 中的一项安全功能, 可在正常运行、维护或维修期间保护与高压电池连接器接触的人员。HVIL 系统会监测高压电池与整个车辆各个子系统之间的电缆物理连接的完整性。HVIL 系统会指明高压连接器处于以下哪种状态: 闭合连接 (正常运行)、开路连接 (维护期间特意断开电池或因连接故障而意外断开电池)、电池短路或接地短路状态。

HVIL 连接器经过特殊设计, 可使 HVIL 信号电路独立于高压电力输送电路之外。当拔出连接器时, HVIL 信号电路在高压电力输送电路之前断开。如果存在开路连接, HVIL 电路会向电池管理系统 (BMS) 发出提醒, 并让 BMS 可以立即关断高压电源, 从而防止在断开期间出现电弧。这样还可防止因电线松动或接触不良而产生浮动高电压。

为了实现这种工作原理, HVIL 系统使用了一个低压、恒定电流信号, 该信号通过高压电池和子系统之间的电缆单独传输。HVIL 设计包含一个恒流发生器、一个电流检测块、负载连接器和钳位、一个修改后的窗口比较器和数字逻辑门。本参考设计中详细说明了每个块的设计和实现。

除汽车系统外, HVIL 还可用于以高电压运行的各种工业应用, 例如重型机械厂设施、高压智能电网以及使用了重型电气设备或装置的相关应用。HVIL 用于避免在使用系统时对人员造成伤害和损坏设备。

如图 1-1 所示, 可以将多个子系统串联到 HVIL 电路中。在示例图中, 牵引逆变器、直流/直流转换器和车载充电器都在高电压下运行, 所以需要具有互锁环路。或者, 这些子系统中的一个都有唯一的 HVIL 电路, 一次仅连接到一个子系统。

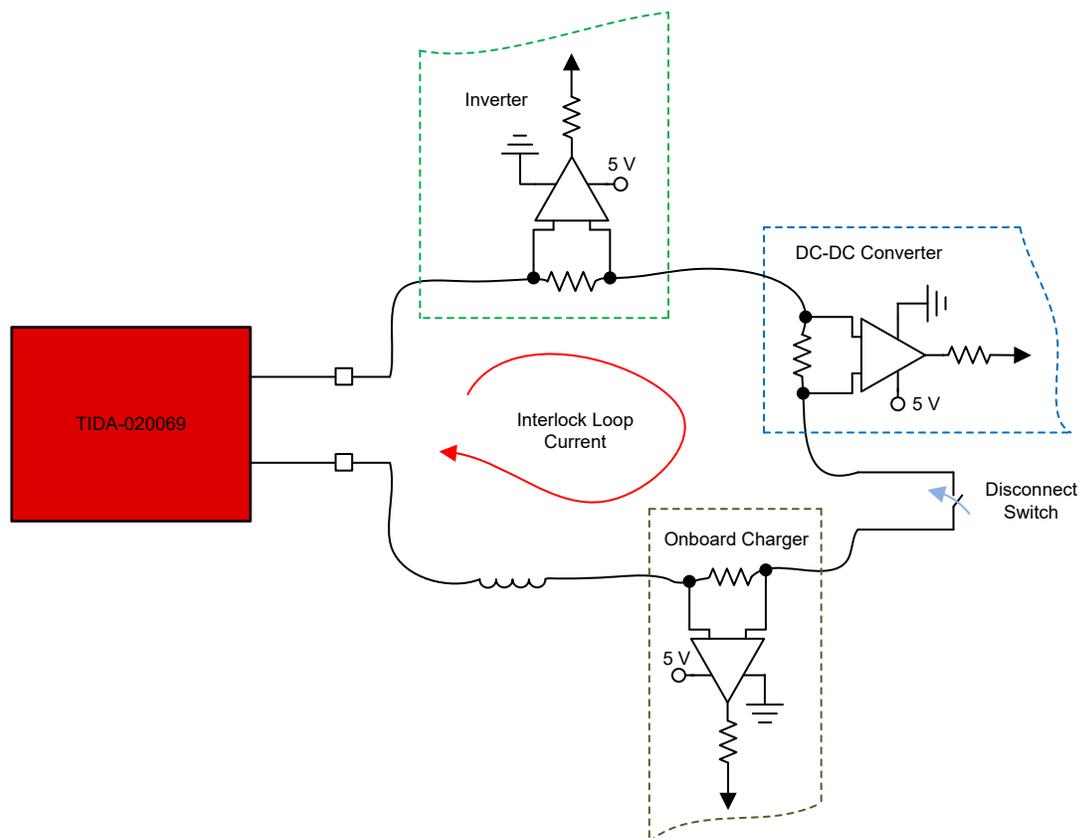


图 1-1. 典型互锁系统

1.1 主要系统规格

表 1-1. 主要系统规格

参数	条件	典型值	单位
输入电压	直流电池电压	12	V
互锁电压	用于环路的 LDO 电压输出	5	V

表 1-1. 主要系统规格 (续)

参数	条件	典型值	单位
互锁回路电流	HVIL 生成的恒定电流 (可配置)	10	mA
负载电阻间的关系	四个高压连接器的预期负载电阻	200	Ω
接地短路电流	接地短路的预期电流	15 - 45	mA
电池短路电流	电池短路的预期电流	15 - 25	mA
禁用电流	处于禁用模式时的预期电流	< 1	mA

2 系统概述

2.1 方框图

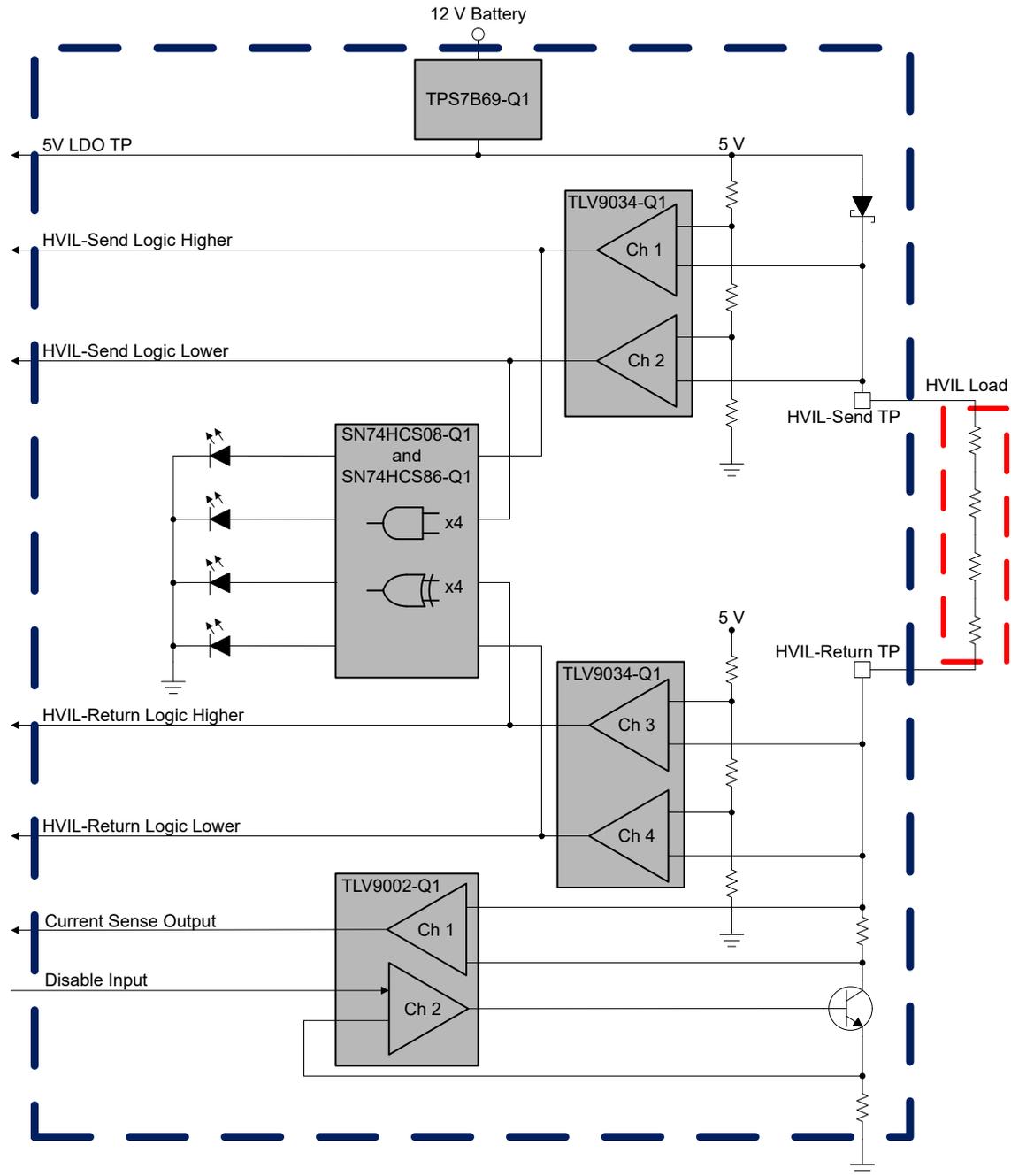


图 2-1. TIDA-01445 方框图

2.2 主要产品

2.2.1 TLV9002-Q1

TLV900x-Q1 系列包括单通道 (TLV9001-Q1)、双通道 (TLV9002-Q1) 和四通道 (TLV9004-Q1) 低压 (1.8V 至 5.5V) 运算放大器, 具有轨至轨输入和输出摆幅功能。这些运算放大器为空间受限、需要低压运行和高容性负载驱动的汽车应用 (例如信息娱乐系统和照明) 提供了一种具有成本效益的解决方法。TLV900x-Q1 系列的容性负载驱动器具有 500pF 的电容, 而电阻式开环输出阻抗使其能够在更高的容性负载下更轻松的实现稳定。这些运算放大器专为低工作电压 (1.8V 至 5.5V) 而设计, 性能规格类似于 TLV600x-Q1 器件。

TLV900x-Q1 系列的稳健设计可简化电路设计。这些运算放大器具有单位增益稳定性, 集成了 RFI 和 EMI 抑制滤波器, 并且在过驱情况下不会出现相位反转。

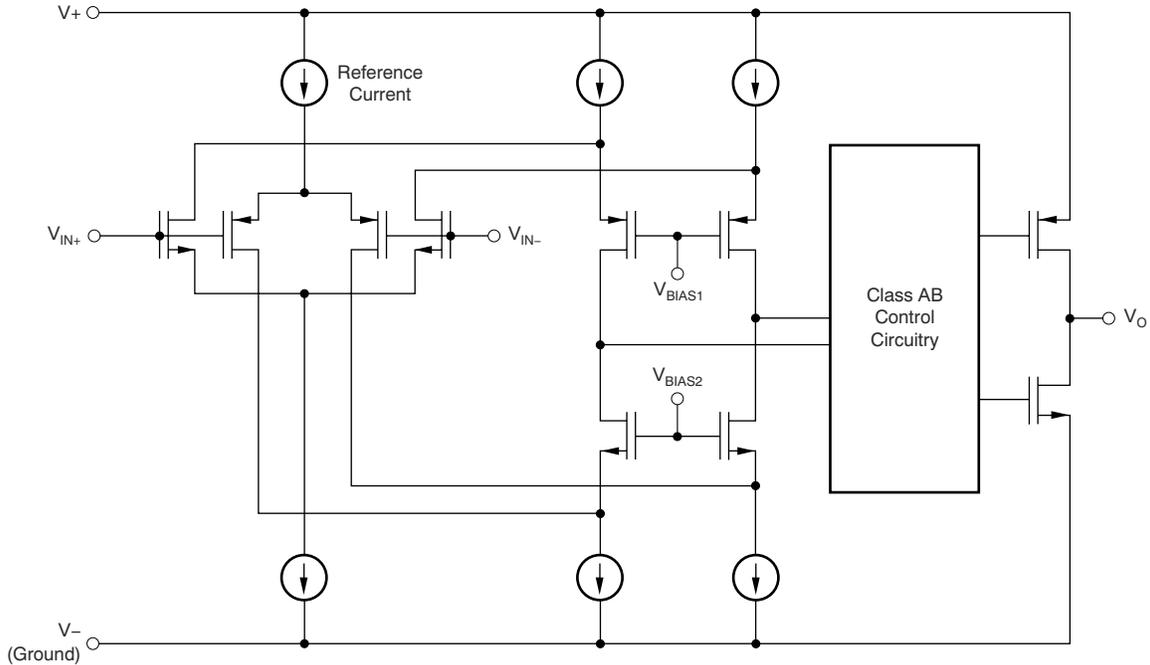


图 2-2. TLV9002-Q1 方框图

TLV9002-Q1 的主要特性包括：

- 符合面向汽车应用的 AEC-Q100 标准：
 - 器件温度等级 1：-40°C 至 125°C, T_A
 - 器件 HBM ESD 分类等级 2
 - 器件 CDM ESD 分类等级 C6
- 可扩展 CMOS 放大器, 适用于低成本应用
- 轨到轨输入和输出
- 低输入失调电压： $\pm 0.4\text{mV}$
- 单位增益带宽：1MHz
- 低宽带噪声： $27\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$
- 低输入偏置电流： 5pA
- 低静态电流： $60\mu\text{A}/\text{通道}$
- 单位增益稳定
- 内置 RFI 和 EMI 滤波器
- 可在电源电压低至 1.8V 的情况下运行
- 由于具有电阻式开环输出阻抗, 因此在较高的容性负载下更易稳定
- **功能安全型**

2.2.2 TLV9034-Q1

TLV903x-Q1 是汽车级双通道和四通道比较器系列。该系列提供低输入失调电压、容错输入和出色的速度功率比等特性组合，传播延迟为 100ns，每个通道的静态电源电流仅为 18 μ A。

该系列还包含上电复位 (POR) 特性，这可确保输出处于已知状态，直到达到最小电源电压，从而防止系统上电和断电期间出现输出瞬变。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。因此，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。

TLV903x-Q1 具有推挽式输出级，能够灌入/拉取许多毫安级电流以驱动 LED 或 MOSFET 栅极等容性负载。该系列具有 -40°C 至 125°C 的汽车级额定温度范围，可采用标准的引线和无引线封装。

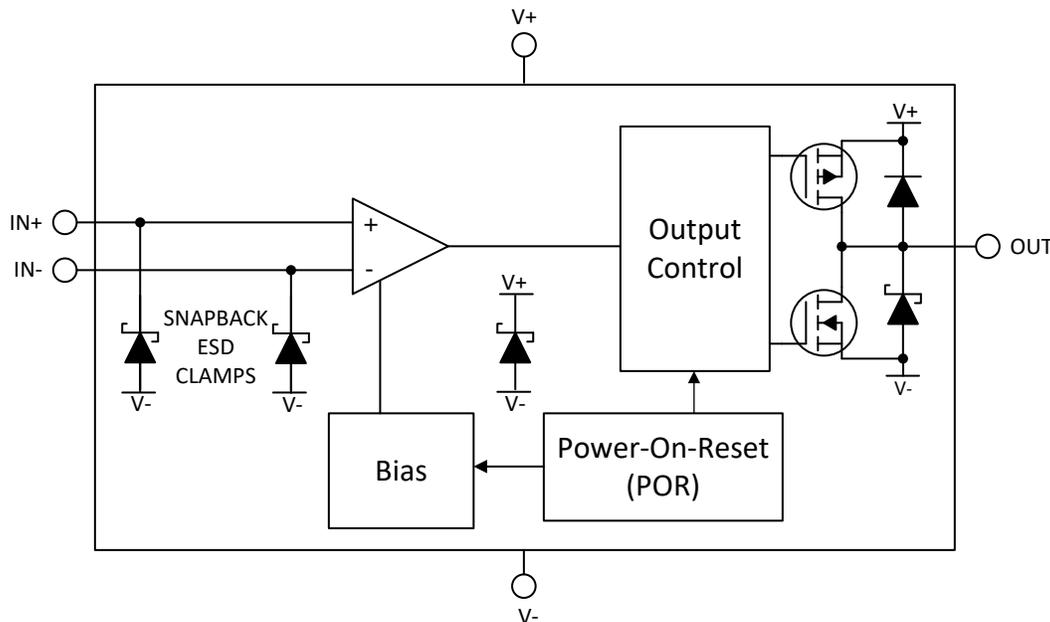


图 2-3. TLV9034-Q1 方框图

TLV9034-Q1 的主要特性包括：

- 符合汽车应用要求
- 具有符合 AEC-Q100 标准的下列特性：
 - 器件温度等级 1：-40°C 至 125°C 环境工作温度范围
 - 器件 HBM ESD 分类等级 2
 - 器件 CDM ESD 分类等级 C6
- 1.65V 至 5.5V 的电源电压范围
- 已知启动的上电复位 (POR)
- 精密输入失调电压为 300V
- 100ns 典型传播延迟
- 每通道的低静态电流为 16 μ A
- 轨至轨输入电压范围超过电源轨
- 开漏输出选项 (TLV902x-Q1)
- 推挽输出选项 (TLV903x-Q1)
- 备选单通道引脚排列选项 (TLV90x0)
- 2V ESD 保护

2.2.3 TPS7B69-Q1

TPS7B69xx-Q1 器件是一款低压降线性稳压器，其设计适用于高达 40V 的 V_I 运行。该器件在轻负载模式下的静态电流仅为 15 μ A（典型值），专为汽车应用中的待机微控制器系统而设计。

该器件具有集成短路保护和过流保护功能。TPS7B69xx-Q1 器件工作温度范围为 -40°C 至 125°C 。凭借这些特性，TPS7B6925-Q1、TPS7B6933-Q1 以及 TPS7B6950-Q1 器件都非常适合在多种汽车应用的电源中使用。

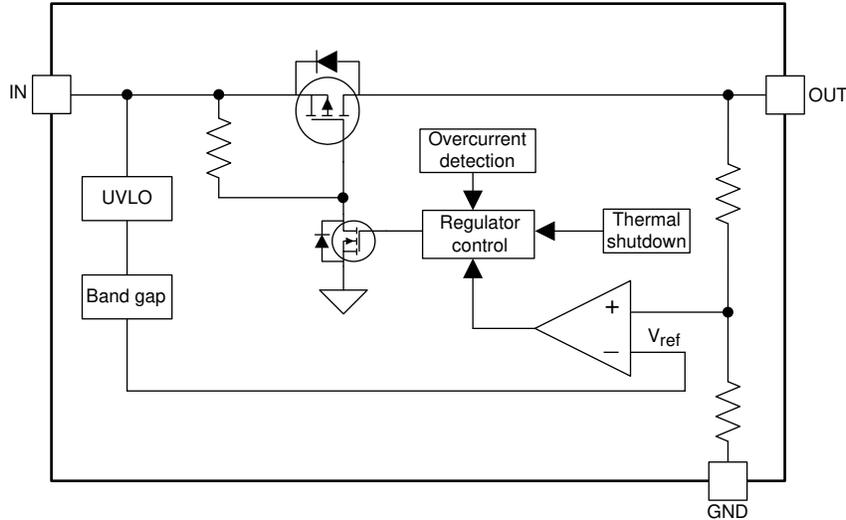


图 2-4. TPS7B69-Q1 方框图

TPS7B69-Q1 的主要特性包括：

- 符合汽车应用要求
- 具有符合 AEC-Q100 标准的下列特性：
 - 器件温度等级 1： -40°C 至 125°C 环境工作温度范围
 - 器件 HBM ESD 分类等级 2
 - 器件 CDM ESD 分类等级 C4B
- 4V 至 40V 宽 V_I 输入电压范围，瞬态电压高达 45V
- 最大输出电流：150mA
- 低静态电流 (I_Q)：
 - 轻负载时典型值为 15 μ A
 - 在整个温度范围内的最大值为 25 μ A
- 负载电流为 100mA 时，低压降电压典型值为 450mV
- 与低 ESR 陶瓷输出电容器搭配使用时可保持稳定：
 - 2.2 μ F 至 100 μ F
- 2.5V、3.3V 和 5V 固定输出电压选项
- 集成故障保护：
 - 热关断
 - 短路保护
- 封装
 - 4 引脚 SOT-223 封装
 - 5 引脚 SOT-23 封装

2.2.4 SN74HCS08-Q1

SN74HCS08-Q1 包含四个具有施密特触发输入的独立 2 输入与门。每个逻辑门以正逻辑执行布尔函数 $Y = A \times B$ 。

该器件包括平衡 CMOS 推挽输出。术语 *平衡* 表示器件可以灌入和拉出相似的电流。该器件的输出能够驱动比此器件能够承受的电流更大，而不会损坏器件。务必限制器件的输出功率，以避免因过电流而损坏器件。将未使用的推挽 CMOS 输出保持断开状态。

此器件包括具有施密特触发架构的输入。这些输入具有高阻抗。施密特触发输入架构可提供迟滞，因而此器件能够很好地耐受慢速或高噪声输入。

该器件的输入和输出同时具有正和负钳位二极管。

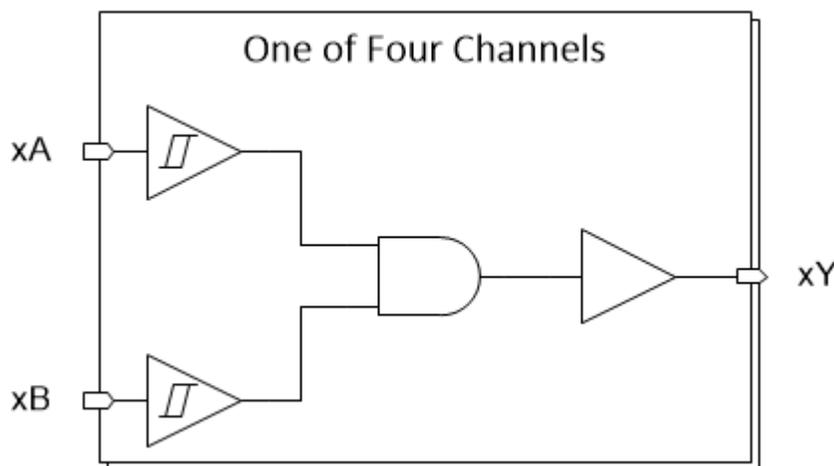


图 2-5. SN74HCS08-Q1 方框图

SN74HCS08-Q1 的主要特性包括：

- 符合面向汽车应用的 AEC-Q100 标准：
 - 器件温度等级 1：-40°C 至 +125°C， T_A
 - 器件 HBM ESD 分类等级 2
 - 器件 CDM ESD 分类等级 C6
- 宽工作电压范围：2V 至 6V
- 施密特触发输入可实现慢速或高噪声输入信号
- 低功耗
 - I_{CC} 典型值为 100nA
 - 输入漏电流典型值为 ± 100 nA
- 电压为 6V 时，输出驱动为 ± 7.8 mA

2.2.5 SN74HCS86-Q1

SN74HCS08-Q1 包含四个具有施密特触发输入的独立 2 输入异或门。每个逻辑门以正逻辑执行布尔函数 $Y = A \times B$ 。

该器件包括平衡 CMOS 推挽输出。术语 *平衡* 表示器件可以灌入和拉出相似的电流。该器件的输出能够驱动比此器件能够承受的电流更大，而不会损坏器件。务必限制器件的输出功率，以避免因过电流而损坏器件。将未使用的推挽 CMOS 输出保持断开状态。

此器件包括具有施密特触发架构的输入。这些输入具有高阻抗。施密特触发输入架构可提供迟滞，因而此器件能够很好地耐受慢速或高噪声输入。

该器件的输入和输出同时具有正和负钳位二极管。

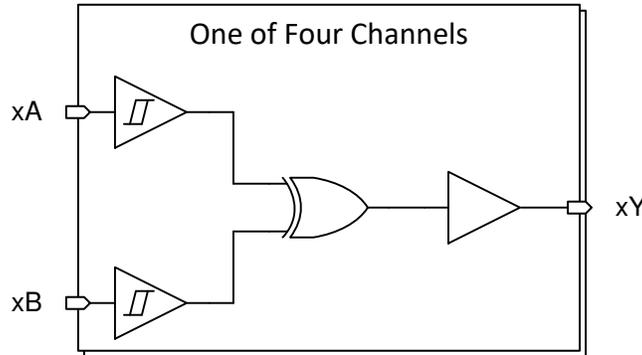


图 2-6. SN74HCS86-Q1 方框图

SN74HCS86-Q1 的主要特性包括：

- 符合面向汽车应用的 AEC-Q100 标准：
 - 器件温度等级 1：-40°C 至 125°C， T_A
 - 器件 HBM ESD 分类等级 2
 - 器件 CDM ESD 分类等级 C6
- 宽工作电压范围：2V 至 6V
- 施密特触发输入可实现慢速或高噪声输入信号
- 低功耗
 - I_{CC} 典型值为 100nA
 - 输入漏电流典型值为 ± 100 nA
- 电压为 6V 时，输出驱动为 ± 7.8 mA

2.3 系统设计原理

互锁系统设计依照 OEM 要求。此参考设计在给定的拓扑和诊断要求下可满足大多数用户要求。可以轻松调整参考设计的拓扑结构，从而获得所需的互锁系统性能。如图 1-1 所示，互锁连接到每个高压元件。因为电池可以快速关闭高压电源接触器，所以主要由电池生成并密切监控互锁信号。

2.3.1 TIDA-0020069 操作

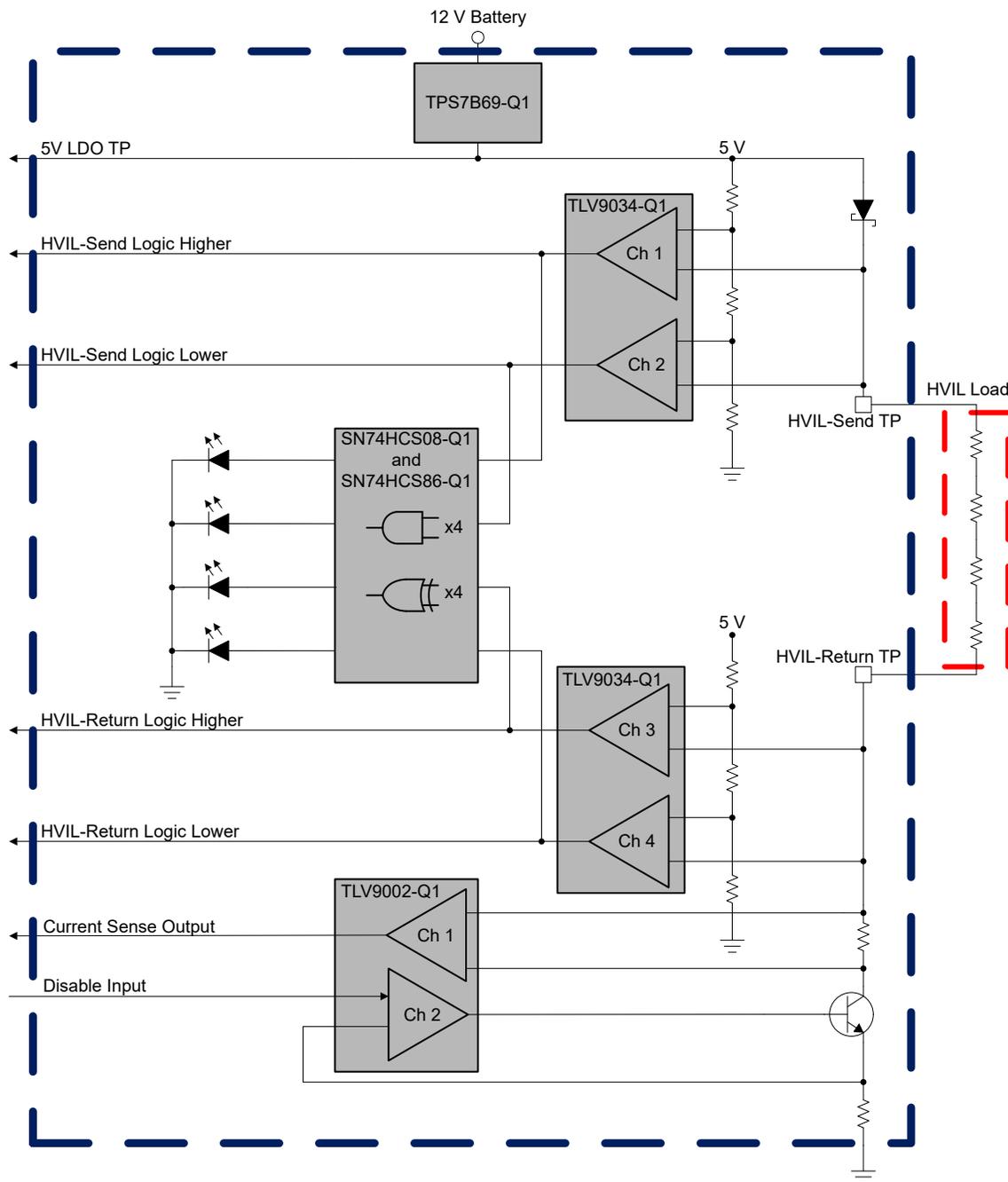


图 2-7. 功能方框图

如图 2-7 所示，TPS7B69-Q1 低压降 (LDO) 稳压器用于将电源电压从 12V 电池电压降至 5V。整个信号链中的所有其他元件 (包括 HVIL 信号) 通过这个 5V 电压轨供电运行。

TLV9002-Q1 运算放大器用于为 HVIL 信号链生成恒定电流输出。这个输出在图 2-7 中显示为通道 2 的输出。可以通过改变无源器件来配置此恒定电流的值，如节 2.3.1.1 中所示。这个恒定电流流过高压连接器内的 HVIL 信号电缆。使用高压连接器和 HVIL 电缆的电阻来计算 HVIL-Send TP 和 HVIL-Return TP 测试点之间的预期压降。

也可以使用禁用输入逻辑信号来禁用放大器的这个恒定电流输出。禁用后，放大器的输出电流会降低 100 倍。这会产生类似于电池短路故障的故障条件，这时 HVIL-Send TP 和 HVIL-Return TP 之间的压差很小。这个禁用功能可用于省电，以及用于在输出端强制读取错误，直至所有其他系统准备好进行 HVIL 测量。TLV9061-Q1 和 OPA310-Q1 等其他放大器通过一个由逻辑输入控制的额外引脚来提供集成关断功能，也可以使用这些放大器来替代 TLV9002-Q1。

TLV9002-Q1 运算放大器的另一个通道用于电流检测。此通道配置为与负载电阻器串联的分流电阻器上的差分放大器。在正常运行 (所有高压连接器均为闭合连接) 时，此放大器的输出设置为 $1/2 V_s$ 。在开路连接 (高压电缆断开连接) 期间，流经分流电阻器的电流为零，放大器输出为 0V。在电池短路和接地短路这两种故障条件下，此放大器也会输出较低的电压。这种电流检测可提供反馈和冗余。

HVIL-Send TP 和 HVIL-Return TP 的模拟值可输出到带有集成模数转换器 (ADC) 的微处理器，用于确定 HVIL 状态。但是，此设计通过将这两个模拟值转换为四个二进制值来简化计算工作。TLV9034-Q1 是一款四通道比较器，用于将两个模拟值 HVIL-Send TP 和 HVIL-Return TP 转换为两个 2 位二进制值。节 2.3.1.4 中详述的修改后窗口比较器电路将 HVIL-Send TP 和 HVIL-RETURN TP 与阈值上限和阈值下限进行比较，以便生成 2 位二进制输出。修改后窗口比较器的四个二进制输出分别称为 HVIL-Send Logic-Higher、HVIL-Send Logic-Lower、HVIL-Return Logic-Higher 和 HVIL-Return Logic-Lower。窗口比较器的电压阈值使用电阻分压器进行设置，并可根据设计要求进行配置。

可以使用表 2-1 和表 2-2 中的逻辑来确定每个修改后窗口比较器的 2 位二进制输出。

表 2-1. HVIL-Send 二进制输出逻辑

参数	HVIL-SEND LOGIC-LOWER TP	HVIL-SEND LOGIC-HIGHER TP
HVIL-Send TP < 阈值下限	0V	0V
阈值下限 < HVIL-Send TP < 阈值上限	5V	0V
HVIL-Send TP > 阈值上限	5V	5V

表 2-2. HVIL-Return 二进制输出逻辑

参数	HVIL-RETURN LOGIC-LOWER TP	HVIL-RETURN LOGIC-HIGHER TP
HVIL-Return TP < 阈值下限	0V	0V
阈值下限 < HVIL-Return TP < 阈值上限	5V	0V
HVIL-Return TP > 阈值上限	5V	5V

图 2-8 展示了 HVIL-Send 和 HVIL-Return 相对于四种状态中每一种的阈值上限和阈值下限的预期值。每种状态的 HVIL-Send 和 HVIL-Return 布置都不相同。

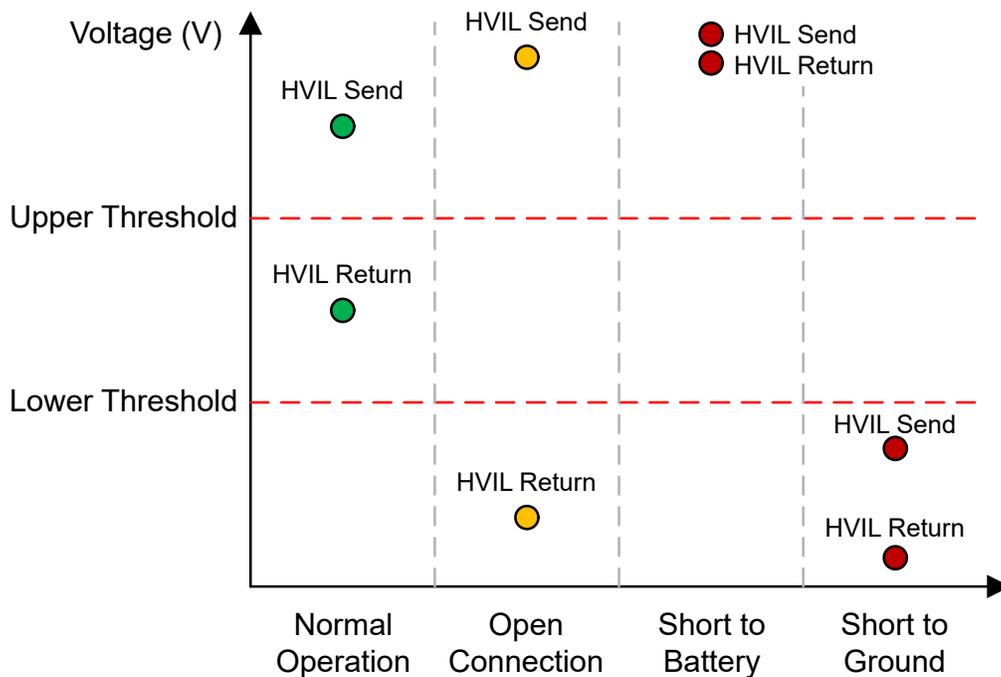


图 2-8. TIDA-020069 状态逻辑阈值

使用 SN74HCS08-Q1 与门和 SN74HCS86-Q1 异或门，根据修改后的窗口比较器的二进制输出 (HVIL-Send Logic-Higher、HVIL-Send Logic-Lower、HVIL-Return Logic-Higher 和 HVIL-Return Logic-Lower) 来控制电路板上的 LED 状态指示灯。节 2.3.1.5 详细介绍了逻辑树。一次只有一个状态 LED 指示灯亮起，遵循图 2-8。

2.3.1.1 恒流源

汽车 HVIL 设计的一个关键标准是生成恒定电流。该电流由 HVIL 电路产生，流经互锁信号电缆，经过所有高压连接器，然后返回 HVIL 电路。许多汽车 OEM 对 HVIL 恒定电流有不同的要求，恒定电流的范围通常为 5mA 至 30mA。此参考设计的一项优势是能够基于分立式元件调整电流输出。

图 2-9 中的原理图采用了 TLV9002-Q1，该器件使用一个通道来生成恒定的 HVIL 电流。此电路设计基于模拟工程师电路：具有 BJT 的电压转电流 (V-I) 转换器电路。请参考此模拟电路设计，了解有关该电路的更多详细信息，包括可下载的仿真模型。

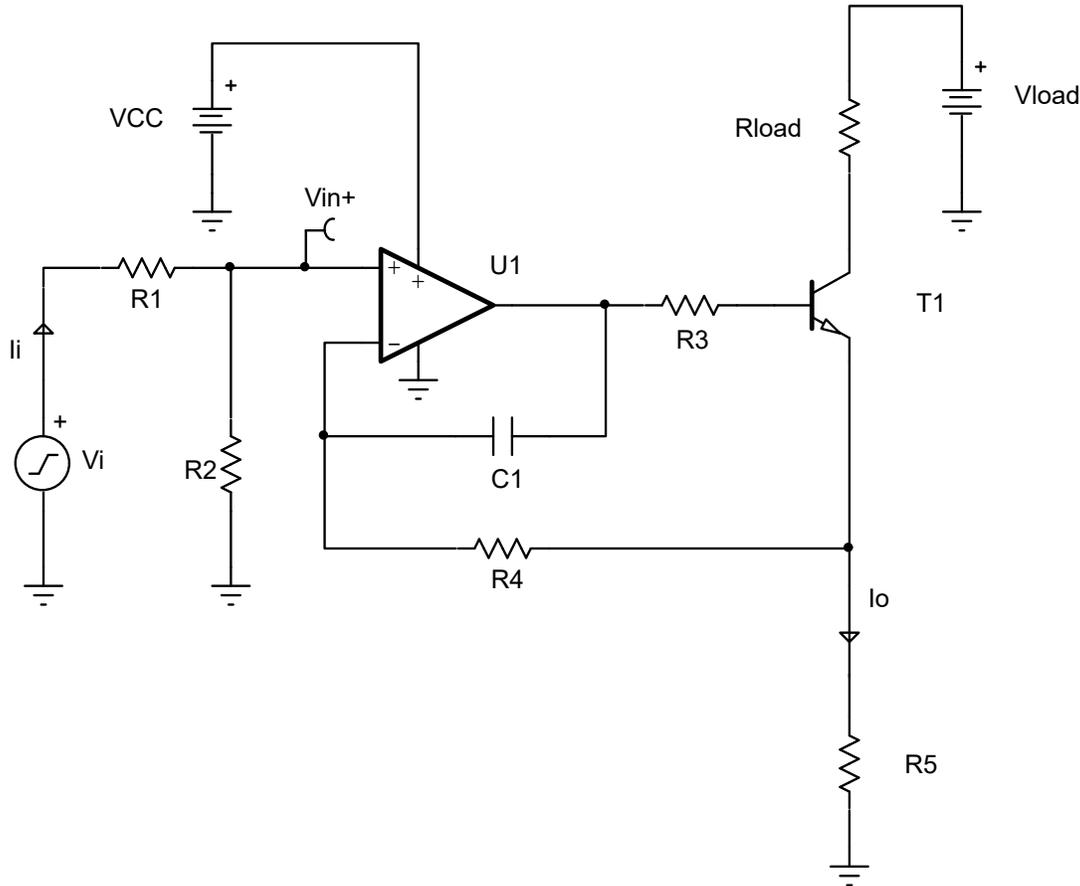


图 2-9. 恒流源电路

2.3.1.1.1 设计目标

输入	输出	电源电压		
V_i	I_o	V_{cc}	V_{ee}	V_{load}
5V	10mA	5V	0V	5V

2.3.1.1.2 设计说明

这个低侧电压至电流 (V-I) 转换器为 HVIL 负载发送一个良好调节的电流。该电路使用电阻分压器将由 TPA7B69-Q1 生成的 5V 电源电压降压并将此电压转换为 10mA 的电流。通过将低侧电流检测电阻器 (R_5) 上的压降反馈回运算放大器，可以精确地调节电流。此电流与负载电阻或负载电源电压无关，并可按照设计步骤修改为其他所需的电流电平。

2.3.1.1.3 设计说明

1. 电阻分压器 (R_1 和 R_2) 用于限制同相输入 V_{in+} 和检测电阻 R_5 在满量程时的最大电压。
2. 对于非轨到轨输入 (RRI) 的运算放大器，需要使用分压器来将输入电压降低到运算放大器的共模电压范围内。
3. 将 R_5 设为低电阻值，从而更大幅度地增加负载顺从电压并降低满量程时的功率耗散。

4. 使用高增益 BJT 可降低运算放大器的输出电流要求。
5. 反馈元件 R_3 、 R_4 和 C_1 提供补偿来提高稳定性。 R_3 隔离双极结型晶体管 (BJT) 的输入电容， R_4 直接在电流设置电阻 (R_5) 上提供直流反馈路径， C_1 提供绕过 BJT 的高频反馈路径。
6. 在线性运行区域内使用运算放大器。线性输出摆幅通常在器件数据表中 A_{OL} 测试条件下指定。

2.3.1.1.4 设计步骤

该电路的传递函数为：

$$I_o = \frac{R_2}{R_5 \times (R_1 + R_2)} \times V_i \quad (1)$$

1. 为输入端的分压器选择电阻 R_1 和 R_2 。这些电阻器的大小经过调整，以使放大器非反相输入端子上的共模输入电压 V_i 小于节 2.3.1.4 部分中设置的阈值下限电压。在本设计中，阈值下限设为 1.33V，因此 V_i 的值设为 1V。

$$V_{in+} = V_i \times \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (2)$$

$$\text{Let } R_1 = 10\text{k}\Omega \text{ (Standard value)}, \frac{R_2}{10\text{k}\Omega + R_2} = \frac{1\text{V}}{5\text{V}} \quad (3)$$

$$R_2 = 4 \times R_1 = 40\text{k}\Omega \quad (4)$$

2. 计算检测电阻 R_5 。使检测电阻器的大小尽可能小，以便更大限度地提高负载顺从电压并降低功率耗散。将检测电阻器的电压设置为 1V。将压降限制为 1V，将满量程输出时的检测电阻内的功率耗散限制为 100mW。

$$\text{Let } V_{in+} = 1\text{V and } I_o = 10\text{mA } R_5 = \frac{V_{in+}}{I_o} = \frac{1\text{V}}{10\text{mA}} = 100\Omega \quad (5)$$

3. 有关如何正确调整补偿元件 R_3 、 R_4 和 C_1 大小的设计过程，请参阅 [TI 高精度实验室](#)。

2.3.1.2 电流检测

电流检测是汽车 HVIL 设计的关键元件。过去，电流检测是在 HVIL 环路中检测闭合连接（而不是检测开路连接）的主要模式。在分流电阻器两端测量到电流可以确定电路中存在闭合连接，即电流正在流动。相反，无电流表示在电池断开的情况下连接开路。但是，仅依赖于电流检测的设计没有考虑到整个负载发生短路时的故障情况。例如，当 HVIL-Send 和 HVIL-Return 引脚短接在一起时，无论负载是闭合（正常运行）还是打开（电池断开），电流都会流过电流检测分流电阻器。因此，务必通过测量这些电压并与预先确定的阈值进行比较来考虑 HVIL-Send 和 HVIL-Return 的电压值。对于此参考设计，电流检测电路提供冗余来提高系统的整体安全性。对于需要精确、稳定 HVIL 电流的精密设计而言，电流检测电路的输出电压还可用作反馈来生成恒定电流。

此设计采用与恒定电流沉降发生器相关联的高侧电流检测电路。分流电阻器位于恒流发生器电路中的 HVIL-Return 信号和 BJT 集电极之间。TLV9002-Q1 的一个通道配置为分流电阻器上的差分放大器。

图 2-10 中的原理图采用了 TLV9002-Q1，该器件使用一个通道来测量 HVIL 电流。电路设计基于[模拟工程师电路：高侧电流检测电路设计](#)。请参考此模拟电路设计，了解有关该电路的更多详细信息，包括可下载的仿真模型。

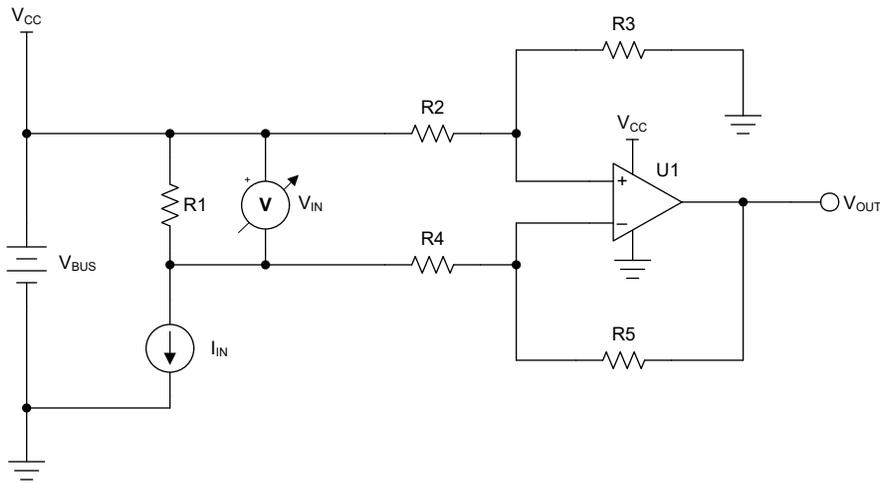


图 2-10. 高侧电流检测电路

2.3.1.2.1 设计目标

输入	输出	电源电压	
I_{IN}	V_{OUT}	V_{CC}	V_{EE}
10mA	2.5V	5V	0V

2.3.1.2.2 设计说明

这个单电源、高侧电流检测电路可检测 10mA 的负载电流并将电流转换为 2.5V 的输出电压。高侧感应使系统能够识别接地短路，并且不会对负载造成接地干扰。

2.3.1.2.3 设计步骤

1. 下面提供了电路的完整传递函数。

$$V_o = I_{in} \times R_1 \times \frac{R_5}{R_4}$$

Given $R_2 = R_4$ and $R_3 = R_5$

2. 计算分流电阻。将分流电压设置为 100mV。

$$R_1 = \frac{V_{IN}}{I_{IN}} = \frac{100\text{mV}}{10\text{mA}} = 10\Omega \quad (6)$$

3. 计算增益以将输出电压设置为 2.5V (1/2 Vs)。

$$\text{Gain} = \frac{V_{OUT}}{I_{IN} \times R_1} = \frac{2.5\text{V}}{10\text{mA} \times 10\Omega} = 25\frac{\text{V}}{\text{V}} \quad (7)$$

4. 计算增益设置电阻器以设置步骤 3 中计算的增益。

$$\text{Choose } R_2 = R_4 = 1\text{k}\Omega \text{ (Standard value)} \quad R_3 = R_5 = R_2 \times \text{Gain} = 1\text{k}\Omega \times 25\frac{\text{V}}{\text{V}} = 25\text{k}\Omega \quad (8)$$

2.3.1.3 负载连接和钳位

TIDA-020069 使用钳位二极管来防止出现过压和欠压状况、如图 2-11 所示。标记为 $D2$ 、 $D3$ 、 $D4$ 和 $D5$ 的二极管将 $HVIL-Send$ 和 $HVIL-Return$ 电压钳制到接地或 V_{CC} 。在这种情况下， V_{CC} 是 TPS7B69-Q1 生成的 5V 信号，而不是 12V 电源输入电压。发生电池短路或接地短路故障状况时，这些二极管可保护互锁电流环路，防止它们超过 5V 或接地。这些钳位二极管还保护可直接连接到 $HVIL-Send$ 和 $HVIL-Return$ 引脚的任何下游器件，例如 ADC 或微控制器。

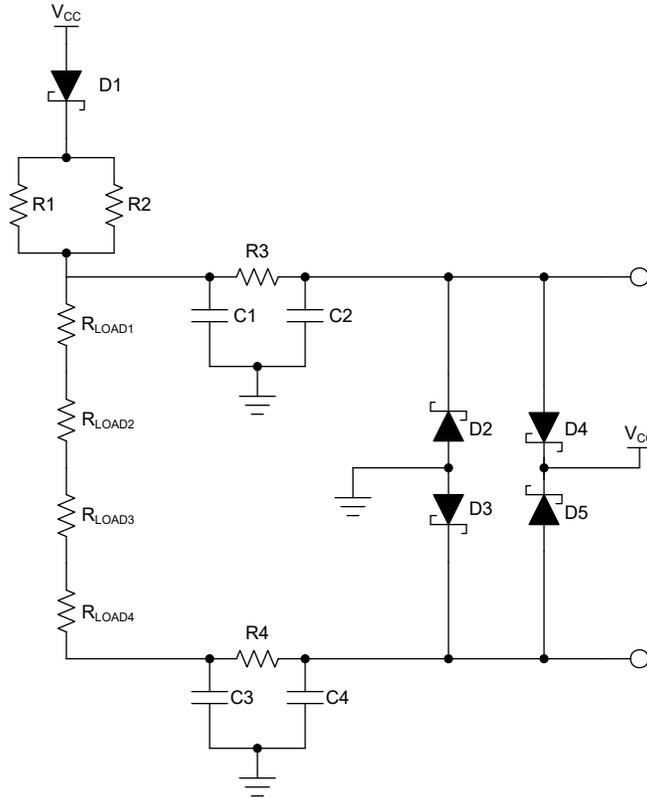


图 2-11. 钳位和负载电路

二极管 $D1$ 将互锁电流从 TPS7B69-Q1 LDO 引向 $HVIL-Send$ 端子，通过负载电阻器并到达 $HVIL-Return$ 引脚。这会产生单向电流，从而保护 TPS7B69-Q1 LDO。不同连接器状态（正常运行、开路连接、电池短路和接地短路）的所有逻辑均基于单向电流。

电阻器 $R1$ 和 $R2$ 是尺寸较大的 1206 分流电阻器，用于帮助防止出现过流状况。标有 R_{LOAD1} 、 R_{LOAD2} 、 R_{LOAD3} 和 R_{LOAD4} 的电阻器表示车辆内具有 HVIL 信号的每个高压连接器的电阻。

2.3.1.4 修改后的窗口比较器

TIDA-020069 通过使用修改后的窗口比较器电路，将 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 的模拟输出电压转换为二进制数字值。在硬件中将模拟值转换为数字，无需使用微控制器中的内部 ADC，从而简化了总体系统设计。

TIDA-020069 的以下输出引脚都具有该设计的二进制数字输出：*HVIL-Send Logic-Higher TP*、*HVIL-Send Logic-Lower TP*、*HVIL-Return Logic-Higher TP* 和 *HVIL-Return Logic-Lower TP*。四个二进制输出用作 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 模拟信号的两个 2 位数字表示。

图 2-12 中的原理图采用了在修改后的窗口比较器电路中配置的 TLV9034-Q1。TIDA-020069 具有两个此类电路，每个电路需要两个比较器，因此选择了四通道 TLV9034-Q1。此电路需要推挽输出比较器，如 TLV9034-Q1。这样就不需要在每个通道添加输出上拉或下拉电阻器。

电路设计基于[模拟工程师电路：窗口比较器电路](#)。请参考此模拟电路设计，了解有关该电路的更多详细信息，包括可下载的仿真模型。

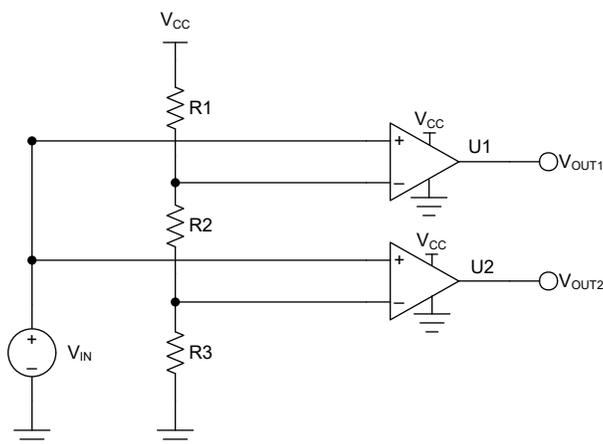


图 2-12. 修改后的窗口比较器电路

预期输出电压 V_{OUT1} 和 V_{OUT2} 可通过下面的表 2-3 和表 2-4 得出：

表 2-3. HVIL-Send 二进制输出逻辑

参数	HVIL-SEND LOGIC-LOWER TP	HVIL-SEND LOGIC-HIGHER TP
HVIL-Send TP < 阈值下限	0V	0V
阈值下限 < HVIL-Send TP < 阈值上限	5V	0V
HVIL-Send TP > 阈值上限	5V	5V

表 2-4. HVIL-Return 二进制输出逻辑

参数	HVIL-RETURN LOGIC-LOWER TP	HVIL-RETURN LOGIC-HIGHER TP
HVIL-Return TP < 阈值下限	0V	0V
阈值下限 < HVIL-Return TP < 阈值上限	5V	0V
HVIL-Return TP > 阈值上限	5V	5V

在此设计中，电阻器 $R1$ 、 $R2$ 和 $R3$ 均设置为相同的值： $10k\Omega$ 。这会将 $5V$ 电源电压 V_{CC} 分成三份。并将比较器 $U2$ 的基准电压设置为 $1.67V$ ，将比较器 $U1$ 的基准电压设置为 $3.33V$ 。这些基准电压分别对应于图 2-13 中数据的阈值下限和阈值上限。选择这些电阻器值是为了通过使用更多类似的元件来简化物料清单 (BOM)。为满足 TIDA-020069 状态逻辑阈值的要求，在正常运行模式下将阈值上限设置为低于 $HVIL-Send$ 。状态逻辑还要求 $HVIL-Return$ (开路连接) < 阈值下限 < $HVIL-Return$ (正常运行)。

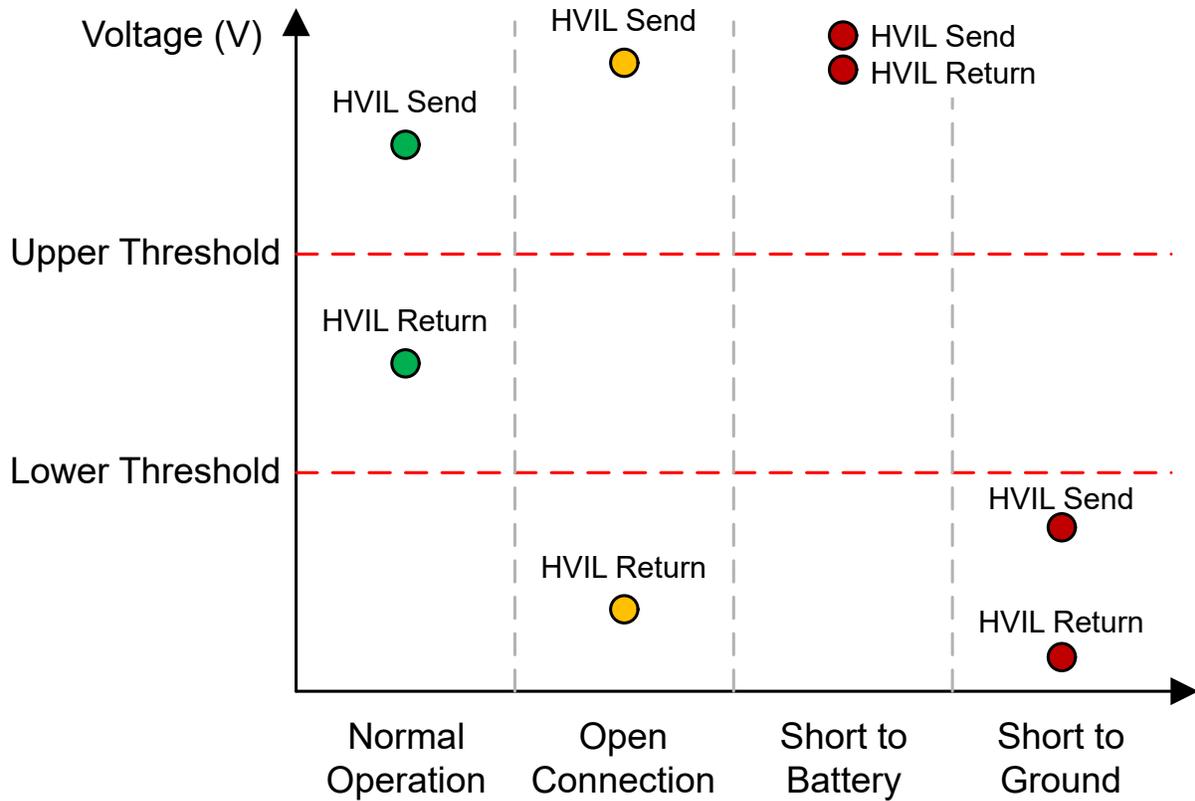


图 2-13. TIDA-020069 状态逻辑阈值

2.3.1.5 数字逻辑门

TIDA-020069 将 节 2.3.1.4 电路生成的二进制数字信号输出转换为 HVIL 系统的四种状态：正常运行、开路连接、电池短路或接地短路。SN74HCS08-Q1 四通道与门和 SN74HCS86-Q1 四通道异或门将两个 2 位二进制数字值转换为输出状态。这些逻辑门还控制板载 LED，从而在无需外部测量硬件的情况下实时直观地指示板上的每个状态。为了进一步优化系统集成，这四种状态值可以转换为 2 位二进制值，其中每个组合代表这四种状态中的一种。这种转换从模拟 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 信号转换成二进制，然后再转换成状态值，通过在硬件中而不是软件中处理状态识别，从而简化系统级设计。

以下电路展示了 TIDA-020069 中使用的逻辑门配置：

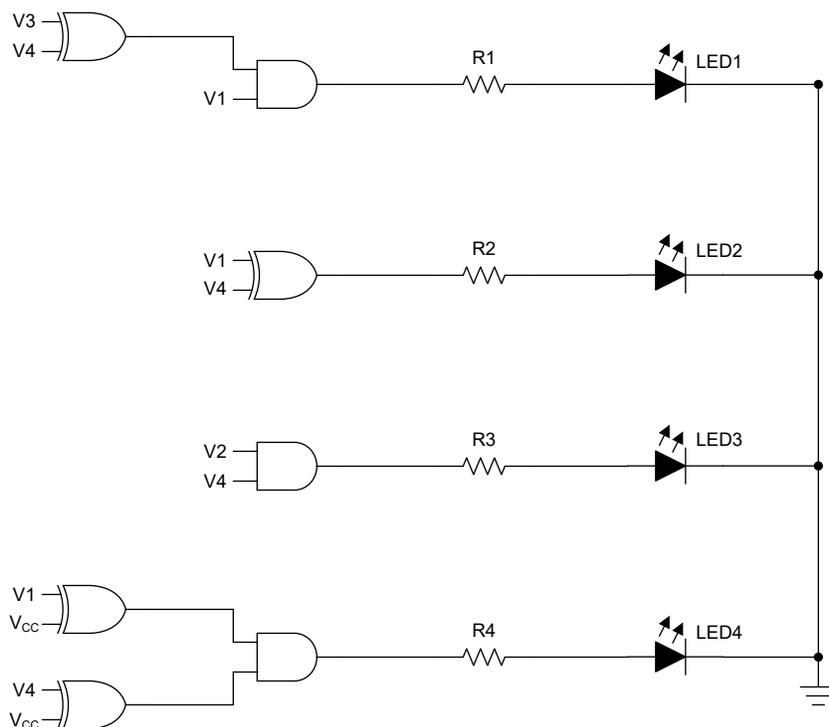


图 2-14. 数字逻辑门

在此原理图中，V1 代表 HVIL-Send Logic-Higher，V2 代表 HVIL-Send Logic-Lower，V3 代表 HVIL-Return Logic-Higher，V4 代表 HVIL-Return Logic-Lower。LED1 表示正常运行 LED，LED2 表示开路连接 LED，LED3 表示电池短路 LED，LED4 表示接地短路 LED。

测试了此电路的逻辑，结果如节 3.3 所示。表 2-5 展示了此设计的完整真值表。请务必注意，这是此数字逻辑电路的所有理论可能性的完整真值表，但并非所有输入组合都适用于 TIDA-020069。例如，当 V2 等于 1 时，V1 不可能等于 0。这是因为当 HVIL-Send Logic-Higher (V1) 为 1 时，HVIL-Send Logic-Lower (V2) 必须为 1。V3 和 V4 的情况也是如此。表中列出了 4 种不同状态不会生成的其他可能情况，即使在发生电池短路或负载短路的位置进行移位也不会生成这些可能情况。在任何给定时刻，只有一个状态 LED 指示灯亮起。

表 2-5. 数字逻辑门真值表

V1	V2	V3	V4	LED1	LED2	LED3	LED4
0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	1	0	1	0	0
0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	1	1	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	0
0	1	0	1	0	1	1	0
0	1	1	0	0	0	0	0
0	1	1	1	0	1	1	0
1	0	0	0	0	1	0	0
1	0	0	1	1	0	0	0
1	0	1	0	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0	0	0
1	1	0	0	0	1	0	0
1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	1	0	0
1	1	1	1	0	0	1	0

2.3.2 状态指示

2.3.2.1 正常运行 (闭合连接) 状态

当所有负载电阻器串联连接时，TIDA-020069 处于正常运行 (闭合连接) 状态。在此状态期间，标记为 *正常运行的板载 LED* 亮起，如图 3-7 测试结果图所示。此状态表示 HVIL 系统中所有高压连接器的连接均已闭合且安全。在混合动力汽车/电动汽车中，当车辆通电时，此状态被视为正常运行。在此状态下，因为 TIDA-020069 指明所有高压连接器的连接均安全，所以会启用高压电池。

图 2-15 显示了正常运行期间 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 的预期行为。为高压连接器建模，将其视为与 TIDA-020069 串联的电阻器。在此状态下，电流流经互锁环路，流经每个高压连接器，然后返回到 TIDA-020069。

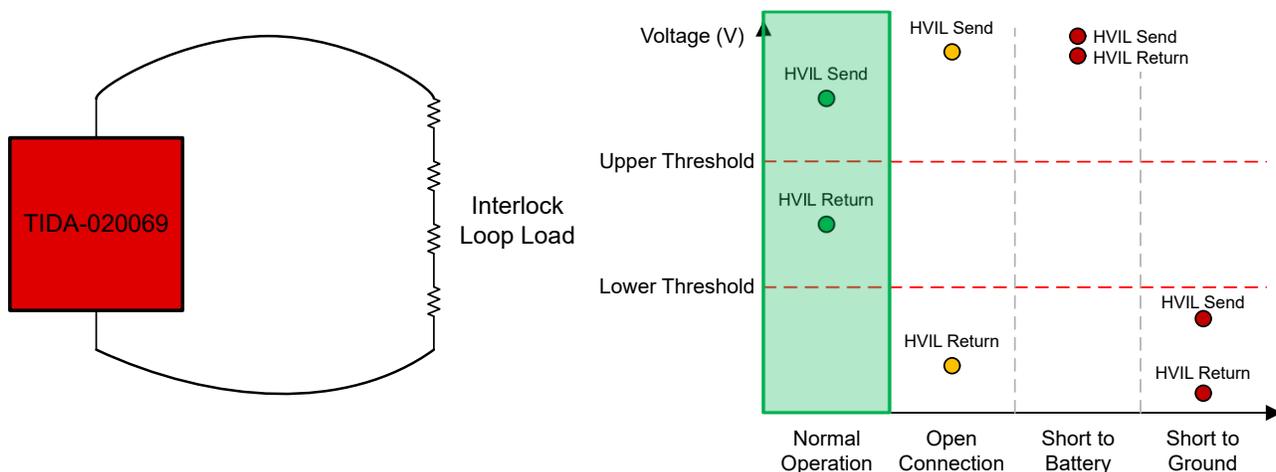


图 2-15. 正常运行 (闭合连接) 状态

在正常运行时，*HVIL-Send* 预计大于 *阈值上限* 电压电平，而 *HVIL-Return* 预计介于 *阈值下限* 和 *阈值上限* 电压电平之间。*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 之间的差分电压为：

$$V_{DIF} = V_{HVIL - SEND} - V_{HVIL - RETURN} = I_{LOAD} \times R_{LOAD} \quad (9)$$

此差分电压 V_{DIF} 以及电流检测放大器的精确测量值 $V_{CS-OUTPUT}$ 均表明 TIDA-020069 正常运行。

TIDA-020069 旨在提供灵活性，以便满足 HVIL 系统的各种 OEM 要求。可以调节许多变量来满足各个系统的要求，这些变量包括：环路电流 (I_{load})、环路电阻 (R_{load}) 和电源电压。尽管这些变量会发生变化，但在闭合连接期间，*阈值下限* 电压电平需要小于 *HVIL-Return*，而 *阈值上限* 电压电平需要小于 *HVIL-Return* 且大于 *阈值下限*，这样 TIDA-020069 才能正确解读正常运行状态。必须选择节 2.3.1.4 中所选的电阻分压器比率才能满足这些要求。

2.3.2.2 开路连接状态

当其中一个高压连接器断开连接或整个互锁环路中存在开路连接时，TIDA-020069 处于开路连接状态。在此状态期间，标记为开路连接的板载 LED 亮起，如测试结果图所示。由于服务断开开关、断开高压连接器或接线线束中的连接松动，可能会出现开路负载状况。因为无论环路中的哪个位置出现开路，都会表现出相同的行为，所以会很难找到由于连接器碰撞或故障造成的负载意外开路。在此状态期间，因为 TIDA-020069 指明高压连接器连接不当，所以禁用混合动力汽车/电动汽车的高压电池。

图 2-16 显示了开路负载状态下 HVIL-Send 和 HVIL-Return 的预期行为。为高压连接器建模，将其视为在它们之间存在开路的电阻器。这种开路可能在互锁环路内的任意一点发生：在负载之前、负载电阻器之间或负载之后。在此状态下，没有电流流经互锁环路，如 CS-Output 电流检测测试点的变化所示。

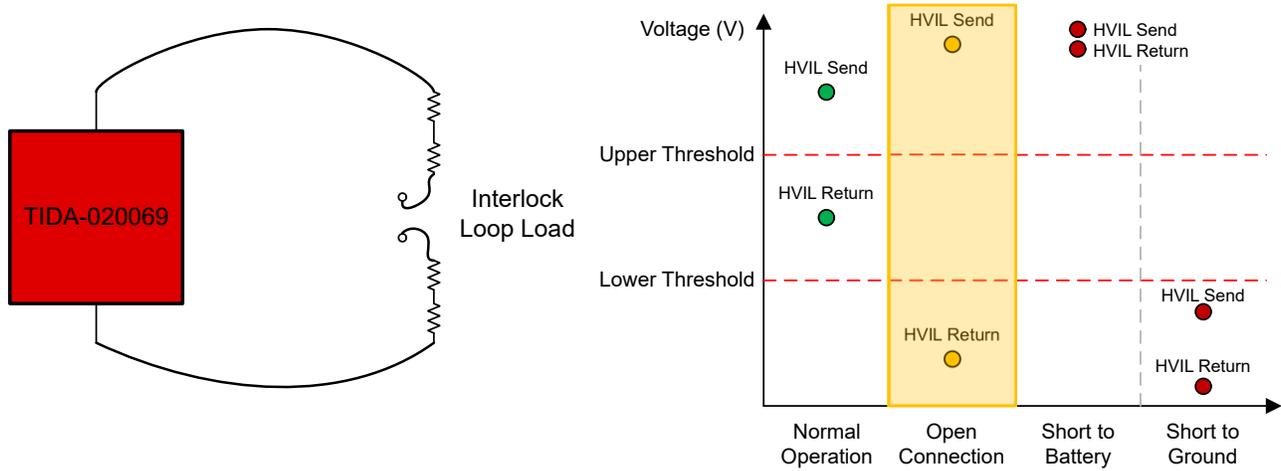


图 2-16. 互锁线路开路负载

在开路连接状态下，HVIL-Send 预计会大于节 2.3.1.4 电路级设定的阈值上限电压电平，而 HVIL-Return 预计会小于阈值下限电压电平。因为 HVIL-Send 上拉至接近来自 TPS7B69-Q1 的 5V V_{CC} 电源电压，而 HVIL-Return 下拉至更接近地电平，所以在此状态下，HVIL-Send 与 HVIL-Return 之间的差分电压会增大。因为 HVIL-Return 通过节 2.3.1.1 电路中 BJT 晶体管的集电极接地，所以在这种情况下，HVIL-Return 并不会完全拉至接地。节 2.3.1.1 电路中使用的 TLV9002-Q1 的非反相输入端子的输入电压 V_{IN} 设置为 1V。该电压通过闭环反馈系统中的虚拟短路概念反射到反相端子的输入上，并连接到 BJT 的发射极。因此，连接到 BJT 集电极的 HVIL-Return 的值为：

$$V_{\text{HVIL-Return}} = V_{\text{IN-}} + V_{\text{CE-SAT}} = V_{\text{IN+}} + V_{\text{CE-SAT}} = \left(V_i \times \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) \right) + V_{\text{CE-SAT}} \quad (10)$$

TIDA-020069 旨在提供灵活性，以便满足 HVIL 系统的各种 OEM 要求。可以调节许多变量来满足各个系统的要求，这些变量包括：环路电流 (I_{load})、环路电阻 (R_{load}) 和电源电压。然而，TIDA-020069 要求在修改后的窗口比较器级中设置的阈值下限电压大于在开路状况下计算出的这个 HVIL-Return 电压。设置阈值下限的电阻分压器产生的电压必须高于为 TLV9002-Q1 设置 V_{IN+} 的电阻分压器的电压。

2.3.2.3 电池短路状态

当在互锁环路内的任意点插入 12V 电池电压短路时，TIDA-020069 处于电池短路状态。此短接可以在 *HVIL-Send* 和负载之间、任意负载电阻器 (HV 连接器) 之间，或负载和 *HVIL-Return* 之间插入。在此状态期间，标记为 **电池短路** 的板载 LED 亮起，如 **测试结果图** 所示。接线连接不正确、连接器磨损或检修过程中处理不当 (12V 电池短接到互锁引脚) 会导致出现这种电池短路状态。此状态表示一种故障模式，并且 TIDA-020069 指明需要立即禁用混合动力汽车/电动汽车的高压电池。

图 2-17 显示了在电池短路故障状态下 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 的预期行为。为高压连接器建模，将其视为与 TIDA-020069 串联的电阻器，但互锁环路中插入了 12V 电池短路。

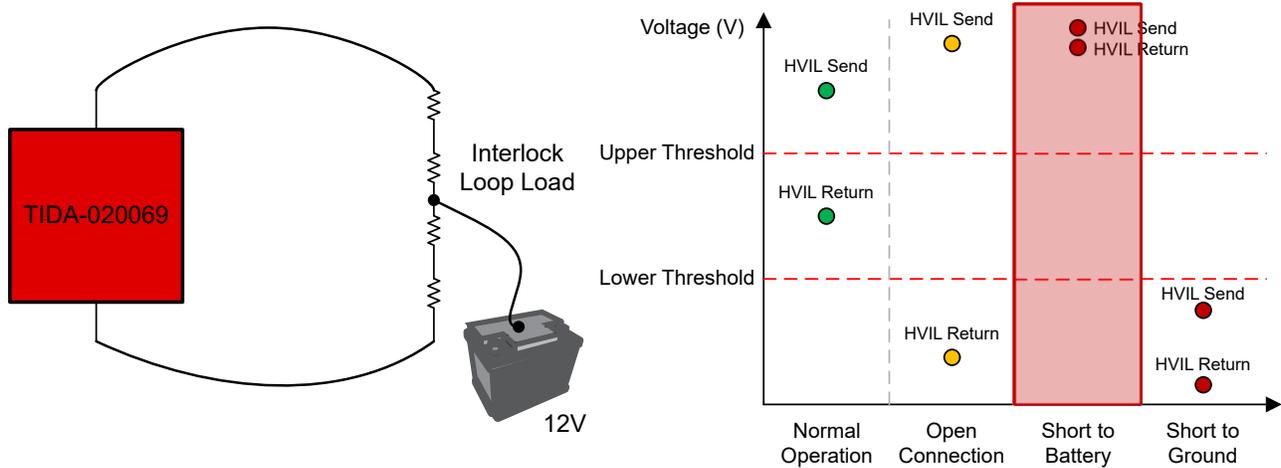


图 2-17. 互锁线路 12V 电池短路

在此故障状态下，*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 电压均拉至高电平。设计的节 2.3.1.3 部分的钳位二极管将 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 钳位到 5V (由 TPS7B69-Q1 调节的电源电压)。这可以防止出现过压效应并保护可以连接到 *HVIL-Send* 和 *HVIL-RECEIVE* 的下游器件 (如 MCU)。

无论短路插入互锁环路中的什么位置，在这种故障模式下，*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 之间的差分电压 V_{DIF} 都非常小。*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 的电压都必须大于 **阈值上限** 电压，这样 TIDA-20069 状态逻辑才能正常工作。然而，在这种状态下，*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 的电压都高于 $HVIL-Send_{Normal\ Operation}$ 和 $HVIL-Send_{Open\ Connection}$ 。因此，当前设计已经符合节 2.3.2.1 和节 2.3.2.2 的设计指南，不需要额外的设计要求。

可以在 **测试结果** 部分验证此状态的结果。

2.3.2.4 接地短路状态

当在互锁环路内的任意点插入接地短路时，TIDA-020069 处于接地短路状态。此短接可以在 *HVIL-Send* 和负载之间、任意负载电阻器 (HV 连接器) 之间，或负载和 *HVIL-Return* 之间插入。在此状态期间，标记为接地短路的板载 LED 亮起，如测试结果图所示。接线连接不正确、连接器磨损或检修过程中处理不当 (接地短接到互锁引脚) 会导致出现这种接地短路状态。此状态表示一种故障模式，并且 TIDA-020069 指明需要立即禁用混合动力汽车/电动汽车的高压电池。

图 2-18 显示了在接地短路故障状态下 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 的预期行为。为高压连接器建模，将其视为与 TIDA-020069 串联的电阻器，但互锁环路中插入了接地短路。

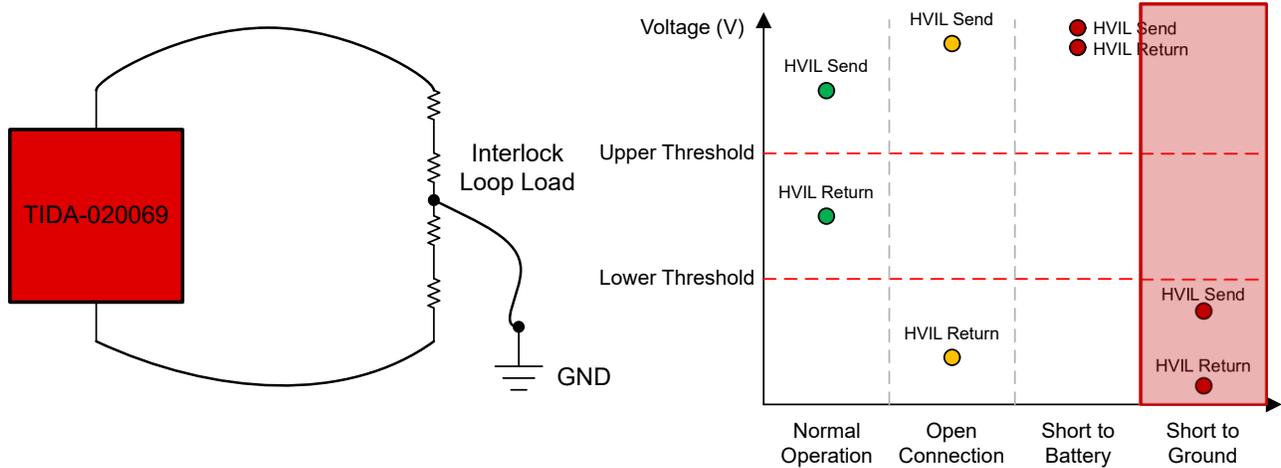


图 2-18. 互锁线路接地短路

在此故障状态下，*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 电压均拉至低电平。设计的节 2.3.1.3 部分的钳位二极管将 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 钳位到接地，并防止这些引脚拉至任何低于接地的电平。这可以防止出现欠压效应并保护可以连接到 *HVIL-Send* 和 *HVIL-RECEIVE* 的下游器件 (如 MCU)。

与电池短路故障模式不同，*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 之间的差分电压 V_{DIF} 有明显的变化，具体取决于在互锁环路中插入短路的位置。在图 2-18 中，*HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 在此状态下的电压均低于阈值下限电压。然而，*HVIL-Send* 的电压在故障状态下会发生变化，具体取决于接地短路的位置。当 *HVIL-Send* 节点和第一个负载电阻之间发生接地短路时，*HVIL-Send* 将下拉至地电平。当插入接地短路的位置更靠近 *HVIL-Return* 节点时，*HVIL-Send* 处的电压会增加。这个 *HVIL-Send* 电压会增大至高于阈值下限电压电平。为使 TIDA-020069 正常运行，*HVIL-Send* 必须低于阈值上限电压电平，而 *HVIL-Return* 必须低于阈值下限电压电平。

可以在测试结果部分验证此状态的结果。

3 硬件、测试要求和测试结果

3.1 硬件要求

TIDA-020069 分为四个部分，从应用角度说明设计：

- 信号链
- 数字逻辑
- 电源
- 接头连接器

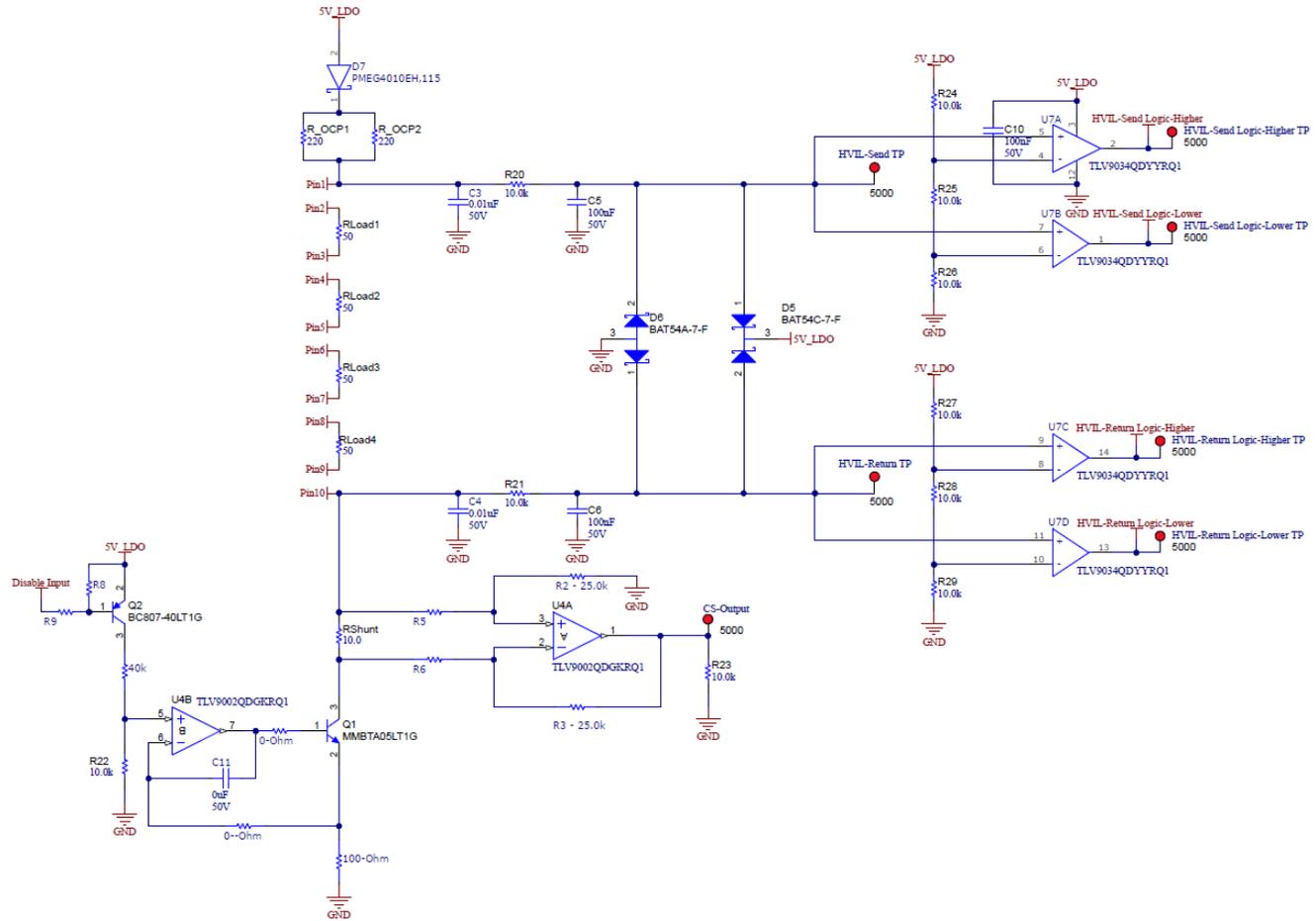


图 3-1. TIDA-020069 原理图：信号链

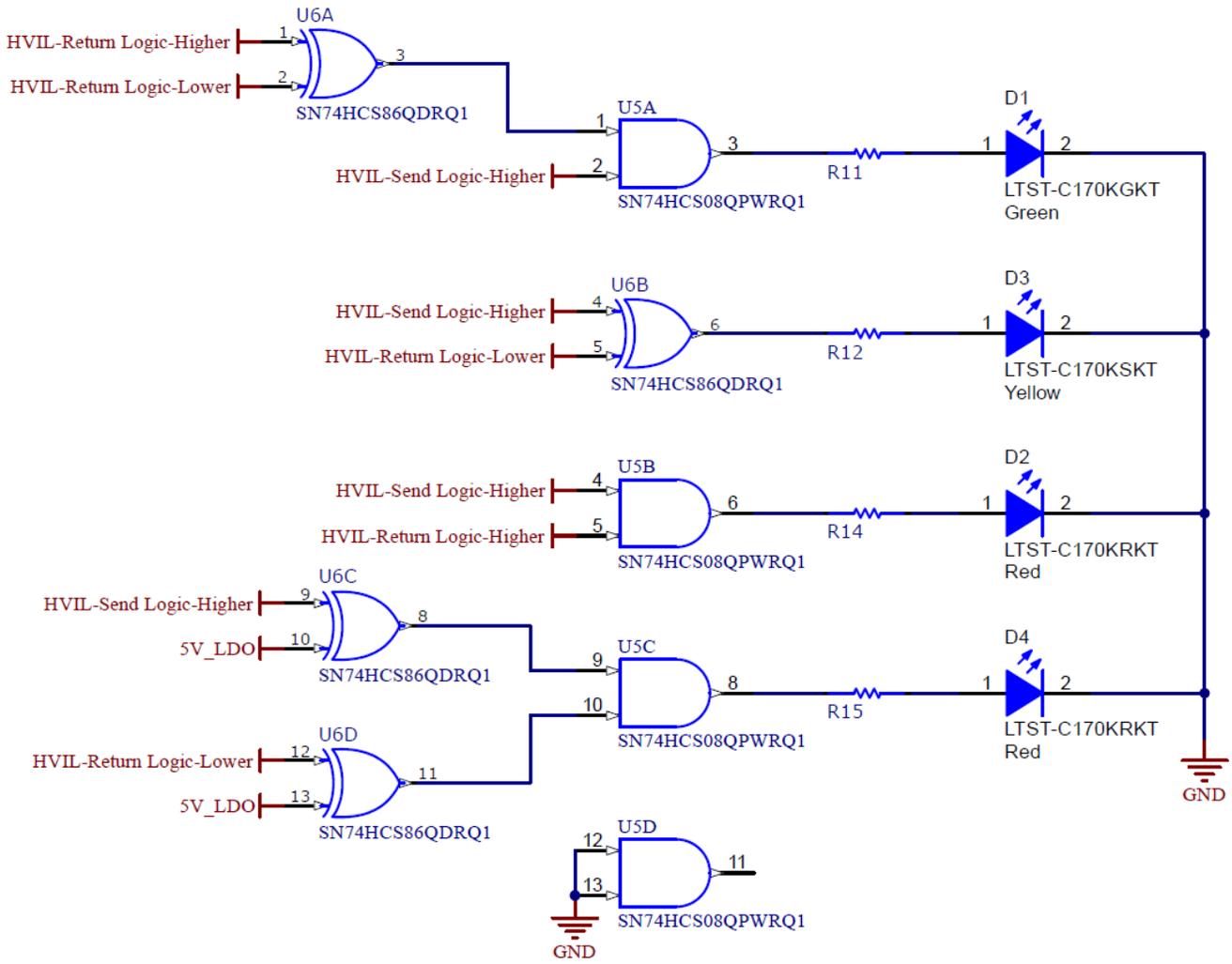


图 3-2. TIDA-020069 原理图：数字逻辑

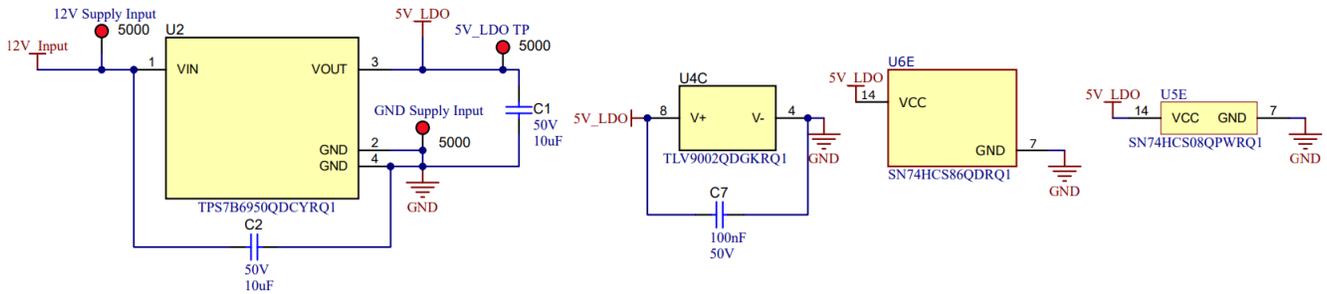


图 3-3. TIDA-020069 原理图：电源

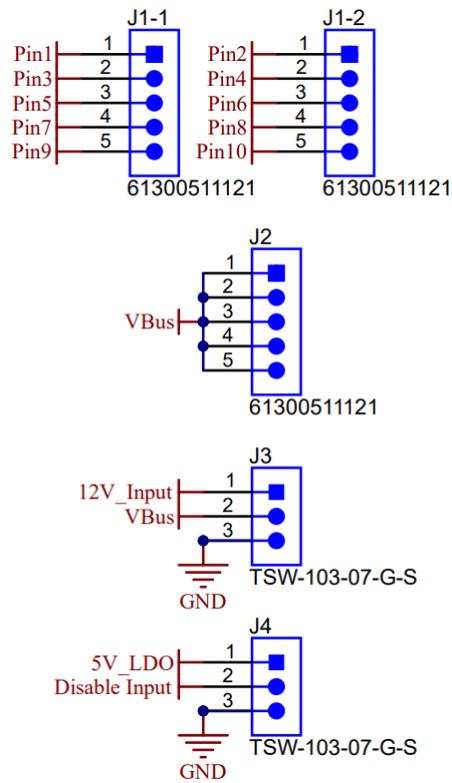


图 3-4. TIDA-020069 原理图：接头连接器

3.2 测试设置

此参考设计仅需单个 12V 电源即可运行和测试。此设计中包括板载 LED 指示器，用于直观地显示互锁状态。这些 LED 标记为：*正常工作*、*开路连接*、*电池短路*和*接地短路*，并且这些 LED 会亮起以指明 HVIL 信号负载的相应状态。

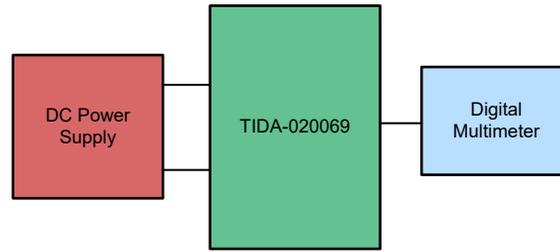


图 3-5. TIDA-020069 测试设置

使用此参考复制和测试多个状态，以便验证是否正常运行，以及验证诊断不同互锁状态的能力。该设计采用四个 $50\ \Omega$ 电阻器来表示 HVIL 连接器的阻抗。这些负载电阻器可串联、保持开路连接或在它们之间插入短路。将 PCB 跳线短接与 PCB 接头引脚配合使用来配置不同的运行模式。

图 3-6 展示了不同引脚接头在 PCB 上的位置。标有 *J1-1* 和 *J1-2* 的 1×5 引脚接头列连接到负载电阻器的每个端点：*RLoad1*、*RLoad2*、*RLoad3* 和 *RLoad4*。通过 2 引脚 PCB 分流连接器将全部五排 *J1-1* 一起连接到 *J1-2*，在所有四个负载电阻器之间形成串联连接。此连接用于*正常运行*情况。断开 *J1-1* 和 *J1-2* 之间的任何 2 引脚 PCB 分流连接器都会形成开路连接（断开），用于“*开路连接*”情况。

标有 *J2* 的 1×5 引脚接头列在所有引脚之间短接，从而使 *J2* 表现得像一个电源电压总线轨。标有 *J3* 的 1×3 引脚接头列的第 1 排连接到 12V 电源输入，第 2 排连接到 *J2*，第 3 排连接到地。当在 *J3* 的第 1 排和第 2 排之间连接单个 2 引脚 PCB 分流连接器时，*J2* 成为 12V 电源电压的总线轨。当在 *J3* 的第 2 排和第 3 排之间连接单个 2 引脚 PCB 分流连接器时，*J2* 成为接地电源电压的总线轨。*J2*、*J1-1* 和 *J1-2* 列之间的 3 引脚 PCB 分流连接器将 12V 电源电压或接地电源短接至相应的排。该短接可以插入四个负载电阻器之前、任意电阻器之间或负载之后。

标有 *J4* 的 3×1 引脚接头排用于控制电路板的关断功能。第 1 列通过上拉电阻器 *R8* 连接到 5V 电压。第 2 列连接到作为开关运行的晶体管 *Q2* 的基极。第 3 列连接到接地电源电压。当在第 1 列和第 2 列之间插入一个 2 引脚 PCB 分流连接器时，关断功能开启（高电平有效），电流源进入关断模式。当在第 2 列和第 3 列之间插入 2 引脚 PCB 分流连接器时，关断功能处于非活动状态（低电平有效），系统按预期运行。

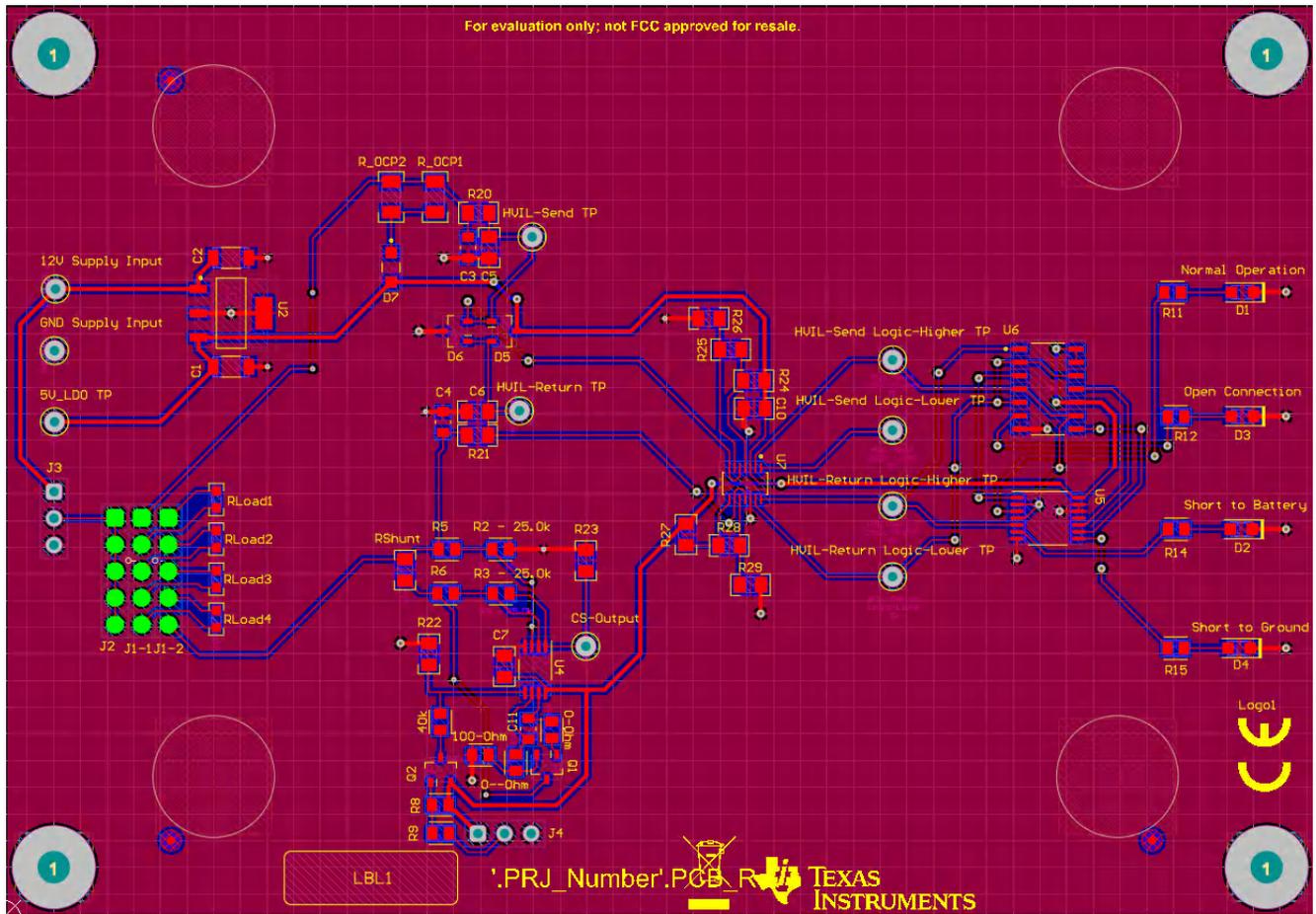


图 3-6. TIDA-020069 PCB 接头连接

使用数字万用表在电路板上的多个点进行直流电压和电流测量。在多种运行模式下测量了以下测试点：5V_LDO TP、HVIL-Send TP、HVIL-Return TP、HVIL-Send Logic-Higher TP、HVIL-Send Logic-Lower TP、HVIL-Return Logic-Higher TP、HVIL-Higher Logic-Lower TP 和 CS-Output。以下部分包含了测试结果：[测试结果](#)。

3.3 测试结果

使用数字万用表测量 TIDA-020069 的几个测试点的电压和电流。将结果与通过电路 TINA-TI 仿真获得的仿真值进行比较。可以使用 PCB 接头分流连接器将该电路板配置为 16 种不同状态。

表 3-1. 测得的测试结果

条件	5V_LDO TP (V)	HVIL-SEND (V)	HVIL-RETURN (V)	HVIL-SEND LOGIC-HIGHER (V)	HVIL-SEND LOGIC-LOWER (V)	HVIL-RETURN LOGIC-HIGHER (V)	HVIL-RETURN LOGIC-LOWER (V)	CS-OUTPUT (V)	环路电流 (mA)	电源电流 (mA)
正常运行	5.00	3.68	1.69	5.00	5.00	0.00	5.00	2.47	9.97	18
开环	5.00	4.98	1.00	5.00	4.99	0.00	0.00	1.77	0.00	18
电池短路 (第 1 排)	5.00	5.26	5.24	5.00	5.00	5.00	5.00	0.33	15.98	20
电池短路 (第 2 排)	5.00	5.26	5.25	5.00	5.00	5.00	5.00	0.01	17.23	21
电池短路 (第 3 排)	5.00	5.26	5.25	5.00	5.00	5.00	5.00	0.01	18.70	21
电池短路 (第 4 排)	5.00	5.26	5.25	5.00	5.00	5.00	5.00	0.01	20.43	22
电池短路 (第 5 排)	5.17	5.44	5.44	5.18	5.18	5.18	5.18	0.01	22.53	23
接地短路 (第 1 排)	5.28	0.01	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	44.00	70
接地短路 (第 2 排)	5.19	1.55	0.98	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	29.81	56
接地短路 (第 3 排)	5.16	2.34	0.94	0.00	5.15	0.00	0.00	0.00	22.77	51
接地短路 (第 4 排)	5.18	2.84	0.86	0.00	5.16	0.00	0.00	0.00	18.57	54
接地短路 (第 5 排)	5.27	3.23	0.01	0.00	5.23	0.00	0.00	0.00	15.86	62
关断 (正常运行)	5.00	4.82	4.75	5.00	5.00	5.00	5.00	0.02	0.37	4
关断 (开环)	5.00	4.99	0.01	5.00	5.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3
关断 (电池短路)	6.49	6.75	6.74	6.49	6.49	6.49	6.49	0.01	-0.53	9
关断 (接地短路)	5.01	2.27	0.00	0.00	5.01	0.00	0.00	0.00	22.13	26

3.3.1 正常运行 (闭合连接) 测试结果

图 3-7 展示了配置为正常运行 (闭合连接) 状态的 TIDA-020069 电路板。在这种状态下，所有 HVIL 负载电阻器均串联，电流流经负载。这种情况复制了混合动力汽车/电动汽车内的正常运行，即所有高压连接器均已安全连接且 HVIL 环路闭合。

在图 3-7 中，正常运行 LED 指示灯亮起，这符合此状态的预期。这验证了 HVIL-Send 和 HVIL-Return 电压在此状态下的逻辑解读。

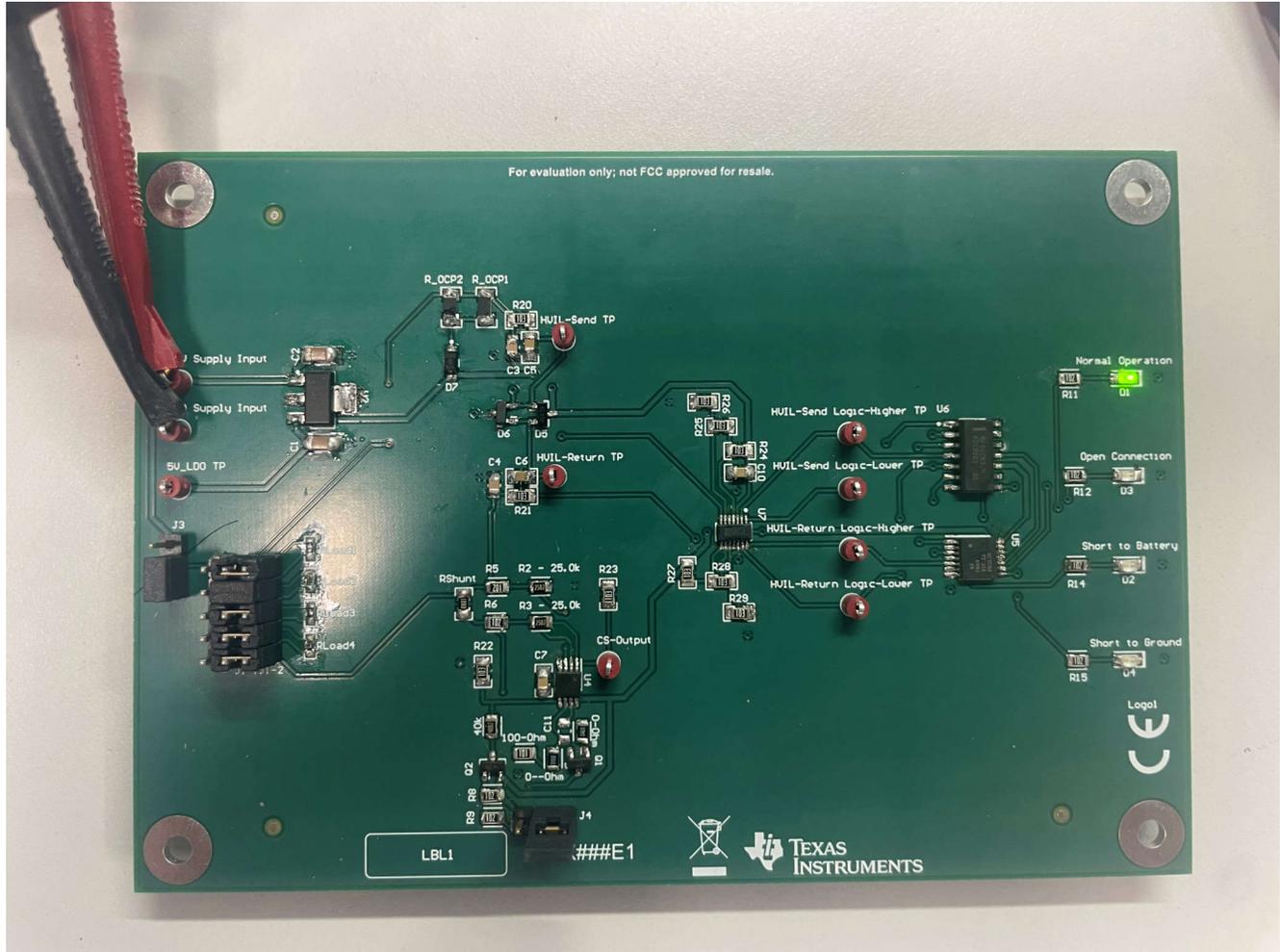


图 3-7. 正常运行 (闭合连接) 测试结果

3.3.2 开路连接测试结果

图 3-8 展示了配置为开路连接状态的 TIDA-020069 电路板。在这种状态下，HVIL 负载电阻器在 HVIL 环路内的某个点断开，并且没有电流流过负载。这种情况复制了混合动力汽车/电动汽车内高压连接器断开的情况。在车辆维护期间或发生碰撞时可能会出现开路连接。在这种状态下，未连接高压连接器，HVIL 环路被视为开路连接。

在图 3-8 中，开路连接 LED 指示灯亮起，这符合此状态的预期。这验证了 HVIL-Send 和 HVIL-Return 电压在此状态下的逻辑解读。

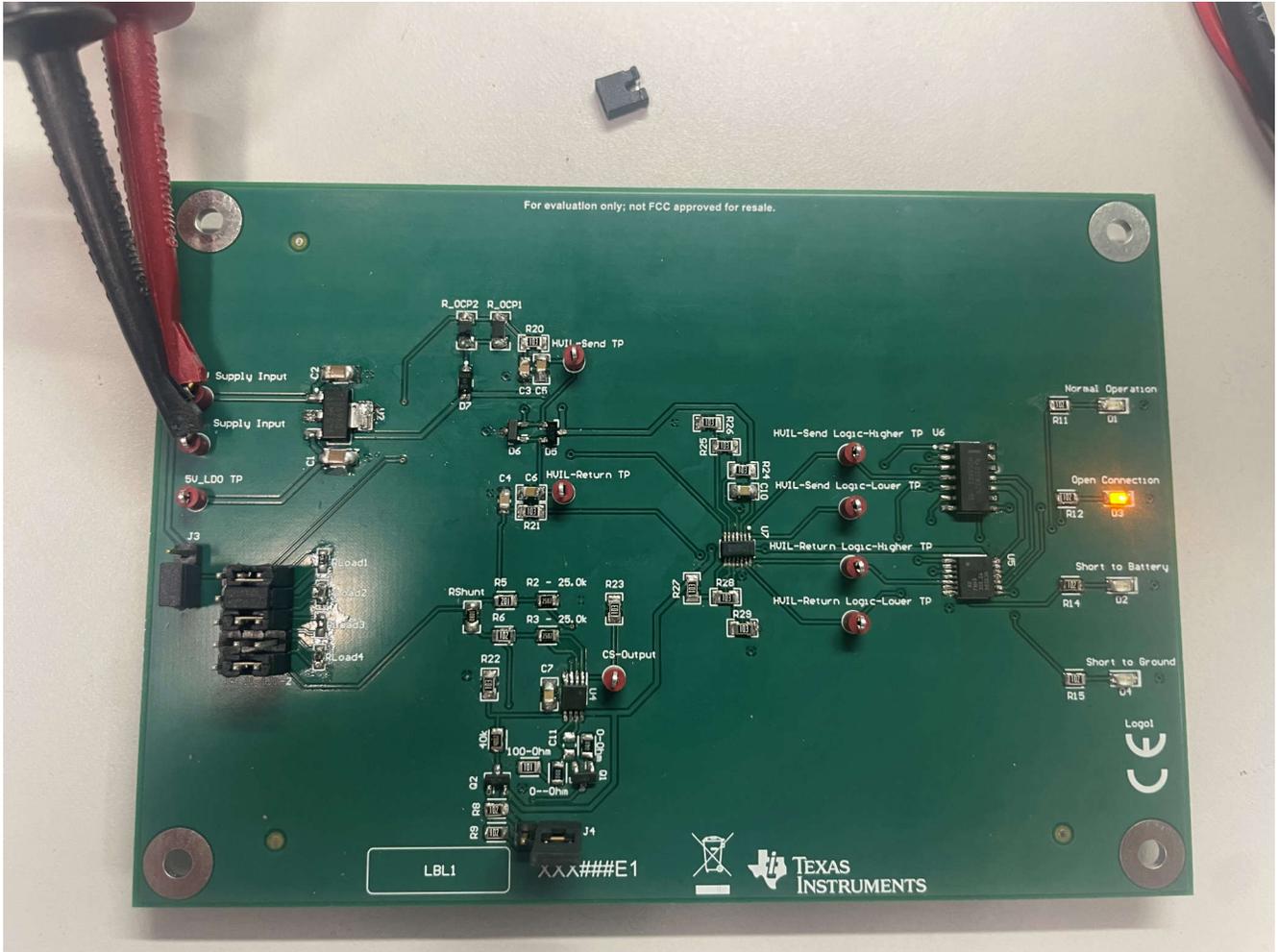


图 3-8. 开路连接测试结果

3.3.3 电池短路测试结果

图 3-9 展示了配置为电池短路故障状态的 TIDA-020069 电路板。在这种状态下，HVIL 负载在环路中的某个点短路至 12V 电池电压。此短路可能发生在负载电阻器之前、之后或之间。这种情况复制了混合动力汽车/电动汽车内的故障模式，因为在这个短路故障期间，HVIL 系统无法确定连接器是处于闭合还是开路配置。当 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 引脚短接在一起时也会发生此故障。在这种情况下，在分流电阻器上仍测得电流，但没有电流流过 HVIL 负载电阻器。此参考设计考虑了这个故障场景。

在图 3-9 中，**电池短路 LED** 指示灯会亮起，符合此状态的预期。这验证了 *HVIL-Send* 和 *HVIL-Return* 电压在此状态下的逻辑解读。

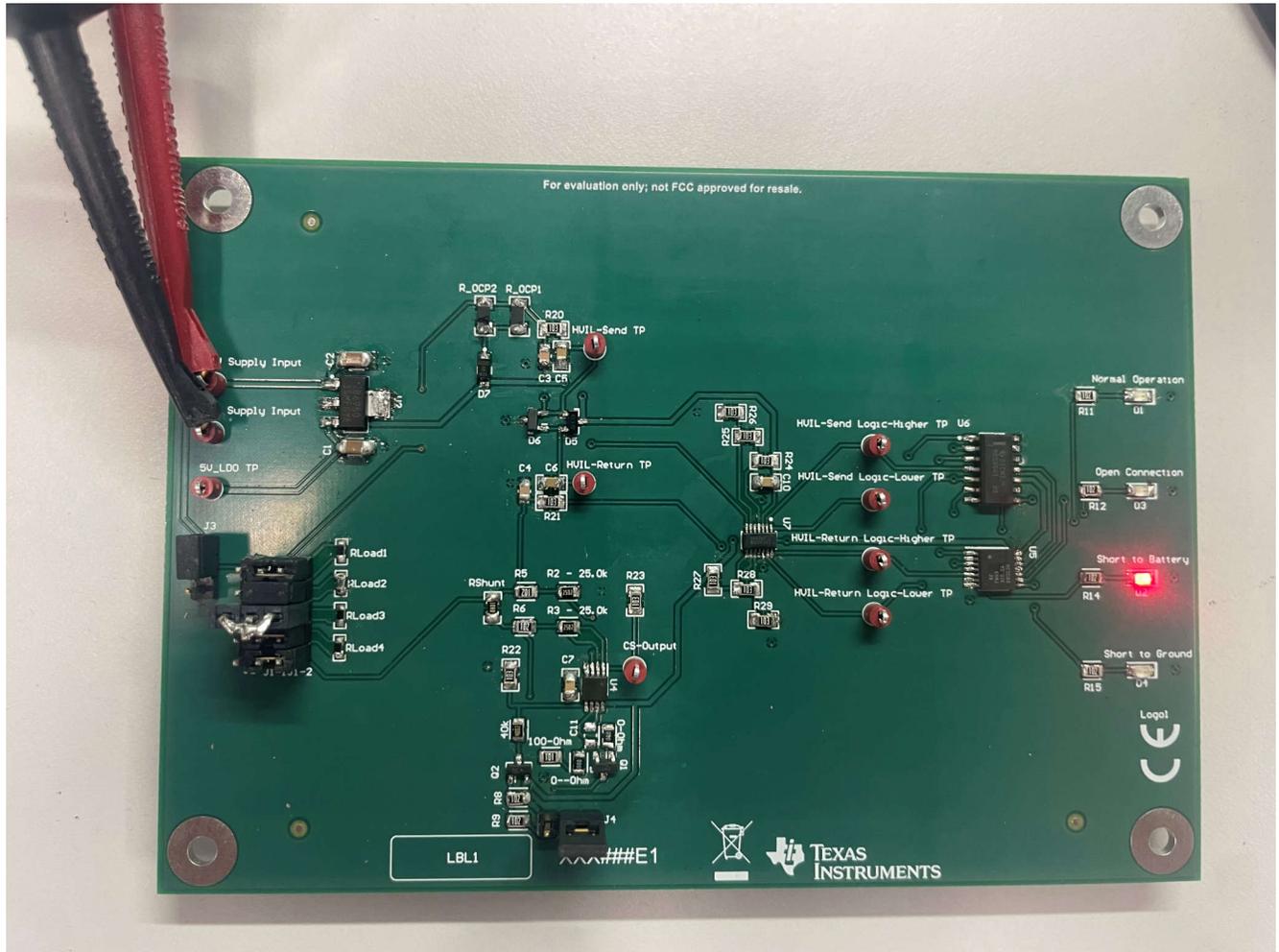


图 3-9. 电池短路测试结果

3.3.4 接地短路测试结果

图 3-10 展示了配置为接地短路故障状态的 TIDA-020069 电路板。在这种状态下，HVIL 负载在环路中的某个点出现接地短路。此短路可能发生在负载电阻器之前、之后或之间。这种情况复制了混合动力汽车/电动汽车内的故障模式，因为在这个短路故障期间，HVIL 系统无法确定连接器是处于闭合还是开路配置。

在图 3-10 中，接地短路 LED 指示灯会亮起，符合此状态的预期。这验证了 HVIL-Send 和 HVIL-Return 电压在此状态下的逻辑解读。

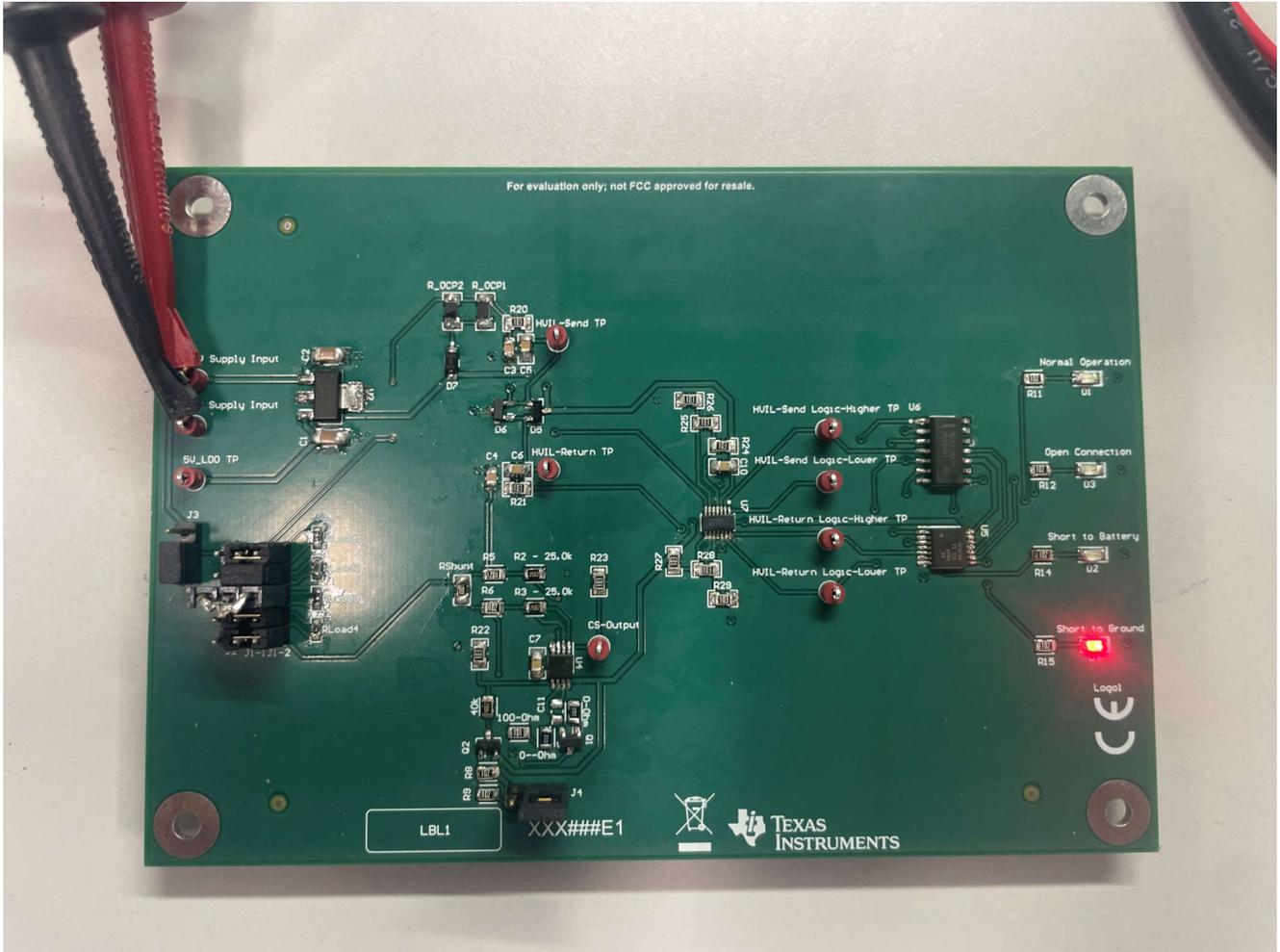


图 3-10. 接地短路测试结果

3.3.5 禁用 (关断) 测试结果

图 3-11 展示了配置为禁用 (关断) 模式的 TIDA-020069 电路板。在这种状态下，连接器 J4 上的禁用电压拉至逻辑高电平。当此信号为高电平有效时，禁用放大器。恒流源的输出电流减小 100 倍。在禁用模式中，HVIL 负载上的压降也会减小 100 倍，而 HVIL-Send 和 HVIL-Return 的电压范围看起来与电池短路故障模式类似。这个可选输入信号可用于手动覆盖，从而强制 HVIL 设计进入故障状态，直至整个系统准备好继续读取 HVIL。

在图 3-11 中，电池短路 LED 指示灯会亮起，符合此状态的预期。这验证了 HVIL-Send 和 HVIL-Return 电压在此状态下的逻辑解读。

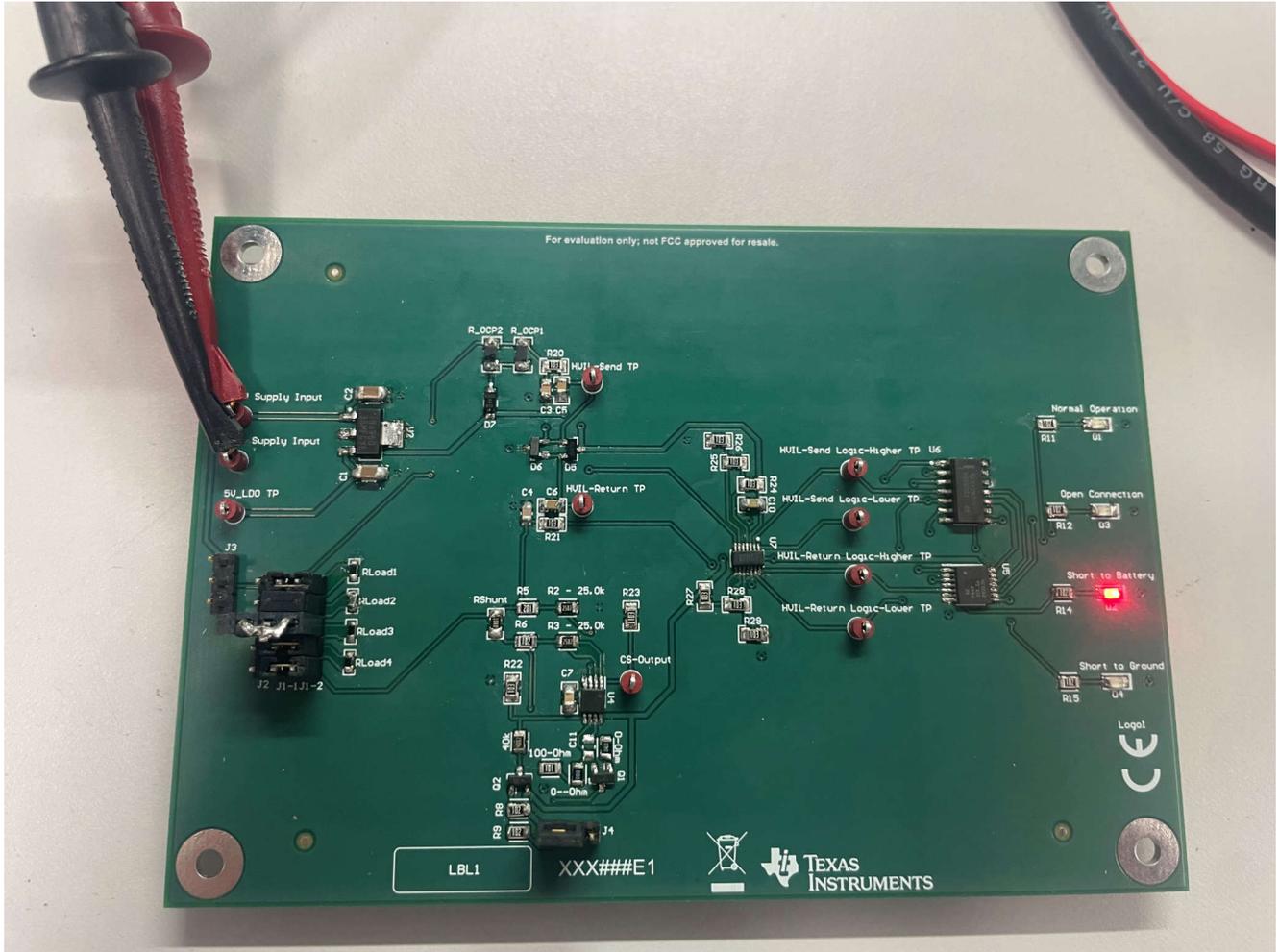


图 3-11. 禁用 (关断) 测试结果

4 设计文件

4.1 原理图

要下载原理图，请参阅 [TIDA-020069](#) 中的设计文件。

4.2 物料清单

要下载物料清单 (BOM)，请参阅 [TIDA-020069](#) 中的设计文件。

4.3 PCB 布局建议

必须根据完整 PCB 的布局和平面图来完成互锁模块的 PCB 布局。

- 将旁路电容器 C1、C2、C7、C8、C9 和 C10 放置在尽可能靠近对应元件的位置。
- 不组装元件 C11。
 - 出于稳定性调试目的，如果需要，可以在此处组装一个电容器。
- 对电阻器元件使用 0Ω 跳线：0-Ohm 和 0--Ohm
 - 出于稳定性调试目的，如果需要，可以在此处组装电阻器。

对于以下元件，请遵循数据表中列出的布局指南：

- [TLV9002-Q1](#)
- [TLV9034-Q1](#)
- [TPS7B69-Q1](#)
- [SN74HCS08-Q1](#)
- [SN74HCS86-Q1](#)

4.3.1 布局图

要下载板层图，请参阅 [TIDA-020069](#) 中的设计文件。

4.4 Altium 工程

要下载 Altium 工程文件，请参阅 [TIDA-020069](#) 中的设计文件。

4.5 Gerber 文件

要下载 Gerber 文件，请参阅 [TIDA-020069](#) 的设计文件。

4.6 装配图

要下载装配图，请参阅 [TIDA-020069](#) 中的设计文件。

5 工具与软件

工具

[模拟工程师电路设计指导手册：放大器](#)

全面的放大器电路集合，包含分步说明和公式

[TI 高精度实验室 \(TIPL\) 培训系列](#)

TI 面向模拟信号链设计人员的按需课程和教程的综合性在线课堂

软件

[TINA-TI](#)

基于 SPICE 的模拟仿真程序

[PSPICE-FOR-TI](#)

PSpice for TI™ 设计和仿真工具

6 文档支持

1. 德州仪器 (TI), [TI 高精度实验室 - 运算放大器 TI 培训](#)
2. 德州仪器 (TI), [模拟工程师电路设计指导手册：放大器](#)
3. 德州仪器 (TI), [具有双极性结型晶体管 \(BJT\) 的高侧 V-I 电路](#) 电路设计
4. 德州仪器 (TI), [带有分立式差分放大器的高侧电流检测电路](#) 电路设计

7 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](#)。

8 商标

TI E2E™ is a trademark of Texas Instruments.

所有商标均为其各自所有者的财产。

9 作者简介

KIERNAN FARMER 是德州仪器 (TI) 放大器业务部门的系统工程师和产品定义者，工作地点位于德克萨斯州达拉斯。Kiernan 将模拟信号链（特别是放大器相关电路）方面的经验应用到汽车领域。Kiernan 在佛罗里达立大学获得了电气工程学士学位。

重要声明和免责声明

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

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

这些资源如有变更，恕不另行通知。TI 授权您仅可将这些资源用于研发本资源所述的 TI 产品的应用。严禁对这些资源进行其他复制或展示。您无权使用任何其他 TI 知识产权或任何第三方知识产权。您应全额赔偿因在这些资源的使用中对 TI 及其代表造成的任何索赔、损害、成本、损失和债务，TI 对此概不负责。

TI 提供的产品受 [TI 的销售条款](#) 或 [ti.com](#) 上其他适用条款/TI 产品随附的其他适用条款的约束。TI 提供这些资源并不会扩展或以其他方式更改 TI 针对 TI 产品发布的适用的担保或担保免责声明。

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

邮寄地址：Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024，德州仪器 (TI) 公司