

交流电机驱动器中的隔离：了解 IEC 61800-5-1 安全标准



了解可调速电气电源驱动系统的 IEC 61800-5-1 安全标准，有助于为交流电机驱动应用选择合适的隔离解决方案。

电机广泛应用于工业领域。它们用于风扇、传送带、印刷机、造纸设备、起重机、搅拌机、提升机、升降机、冷却和再循环泵、鼓风机、压缩机、工厂机器人以及许多其他应用。全球正在使用的工业电机超过 3 亿台，且该数量每年仍在稳定增长。

可调速电力驱动系统（也称为变频驱动器或交流电机驱动器）是一种智能电机控制系统。这些系统使用先进的电力电子器件来控制电机的速度、扭矩和位置，而不是以固定速度运行电机并使用机械元件来控制这些参数。可调速驱动器广泛用于电机驱动应用，可显著提高电机驱动系统的效率和控制。

电机驱动系统的输出功率范围从几千瓦到数千千瓦不等。其运行依赖交流线路电压，电压范围为数百伏至数千伏。由于涉及如此高的电压和功率等级，设计人员必须采取措施确保参与电机驱动系统操作人员的人身安全。

国际电工委员会 (IEC) 61800-5-1 是适用于可调速电力驱动系统的安全标准。它涵盖电气安全、热安全和能量安全。作为电气安全的一部分，该标准定义了相关要求，确保连接到高于 50V 电压的电路与人员可接触的任何驱动系统器件或连接器之间实现充分绝缘。

隔离器是可调速电力驱动器中使用的关键电子元件之一。作为隔离式栅极驱动器，隔离器用于控制功率级中功率晶体管（绝缘栅双极晶体管 [IGBT] 或金属氧化物半导体场效应晶体管 [MOSFET]）导通和关断的。作为隔离式模数转换器 (ADC) 和隔离式放大器，隔离器传输来自逆变器输出的电压和电流反馈。作为通用通信链路，隔离器将信息从以高压为基准的电路传输到接地电路和元件。隔离器还充当高压器件与人员可接触的器件之间的绝缘体。因此，绝缘是隔离器的两大功能之一。

本文论述了 IEC 61800-5-1 安全标准的电气方面要求，分析了其在绝缘要求方面的规定如何转化为电机驱动器所用隔离器的规格。本讨论仅限于一些选定的配置，并使用示例案例帮助理解与隔离器相关的 IEC 61800-5-1 的主要原理。例如，仅讨论额定电源电压高达 $1000V_{RMS}$ 的三相系统。如需更全面地了解这些要求，请参阅 [IEC 61800-5-1 标准](#)。

基本隔离概念和术语

本节简要介绍与隔离相关的基本概念与术语。

- 基本隔离（或绝缘）可在绝缘层或隔离栅保持完整的情况下提供高压防护。IEC 61800-5-1 等安全标准要求增加一个辅助隔离栅作为冗余。即使第一个隔离栅发生故障，附加的隔离栅也可提供安全保护。这称为双重隔离。
- 就高压安全防护而言，增强隔离本身与双重隔离同样有效。增强型隔离栅的损坏可能危及人类生命，因此需要更严格的要求。
- 临时过压是一种隔离器必须能够承受而不会发生击穿的短时高压（根据 IEC 61800-5-1 标准为 5 秒）。这表示电源电网上可能因负载开关、故障或电弧而出现过压。
- 浪涌或脉冲电压是指具有特定瞬态波形（ $1.2/50\mu s$ ，参见 IEC 60060-1 或 IEC 61000-4-5）的峰值电压，用于表示在直接和间接雷击期间电源线路中的感应电压。
- 工作电压是指设备在整个使用寿命期间正常工作时持续存在于隔离器两端的电压。

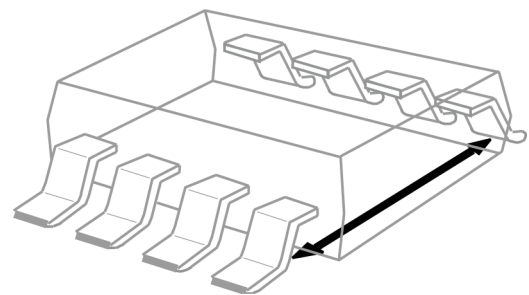


图 1. 电气间隙图示。

- 电气间隙是指隔离器集成电路 (IC) 中高压侧引脚与低压侧引脚之间通过空气的最短距离 (图 1)。电气间隙必须足够高，以防止脉冲电压峰值和临时过压导致引脚之间

的空气发生电离并产生电弧。通过空气击穿是一种快速现象；对电气间隙的要求取决于系统中可能出现的峰值电压。

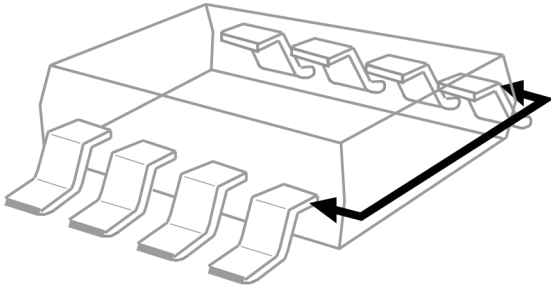


图 2. 爬电距离图示。

- 爬电距离是指沿隔离器封装表面从高压侧到低压侧的距离 (图 2)。根据系统的运行条件，爬电距离要求与隔离器两端工作电压的均方根 (RMS) 值成正比。在某些情况下，可能需要增加爬电距离以满足电气间隙要求。爬电距离取决于污染等级以及封装模塑化合物或材料的相对漏电起痕指数 (CTI)。
- 污染等级表示隔离器预期工作的环境中可能存在的灰尘、湿气或沉淀。污染等级 2 是工业环境中的典型等级，在该环境下通常仅存在非导电性污染；但在系统停止运行时，也可能出现导电性污染。污染等级越高，对爬电距离和电气间隙的要求就越高。
- CTI 是绝缘材料的一种特性，表明其在表面抗劣化的能力。如果持续对其施加高电压，这种劣化可能会导致形成导电漏电路径。根据 CTI，材料分为四组。CTI 越高（材料组编号越低）的材料，在相同爬电距离下可承受更高的工作电压。相反，在给定的工作电压下，CTI 越高的材料可能具有越短的爬电距离（封装尺寸越小）。
 - 材料组 I: $600V < CTI$
 - 材料组 II: $400V < CTI < 600V$
 - 材料组 IIIa: $175V < CTI < 400V$
 - 材料组 IIIb: $100V < CTI < 175V$

隔离器的元件级标准（例如 VDE 0884-10 或 IEC 60747-5-5）和系统级标准（例如 IEC 60664-1）同时定义了隔离参数及其测试方法。参考文献 [2 和 3] 详细讨论了这些参数和测试方法。数字隔离器数据表明确指定了这些参数的值。这些值可以与 IEC 61800-5-1 等终端设备标准设定的要求进行比较。

电机驱动器中的隔离

图 3 描述了调速电机驱动系统的简化示例方框图。

输入电源或电网输入（通常为三相）为系统供电。这就是电网或市电电源。示例电压为 $400V_{RMS}$ 、 $690V_{RMS}$ 或 $830V_{RMS}$ ，频率为 50Hz 或 60Hz。功率二极管的整流器级将输入交流电压转换为直流电源轨（DC+ 和 DC-）。高压直流链路电容器为整流器提供滤波，并为逆变器级提供开关电流。一个 IGBT 模块或一组 IGBT 构成了一个三相逆变器。虽然本文以 IGBT 为例，但也可用 MOSFET 代替 IGBT。隔离式栅极驱动器提供导通和关断 IGBT 所需的驱动电压。通常，使用 15V 的栅极-发射极电压来导通 IGBT，并使用 -8V 的负栅极-发射极电压使其关断。隔离式电流和电压检测元件为闭环控制系统提供电流和电压反馈。编码器模块提供有关电机轴位置和速度的反馈。

电机驱动器提供一个连接到电机的三相输出。这种三相输出的幅值和频率与传入电网电源有很大不同，且完全取决于电机所需的速度和扭矩输出。简而言之，这种差异正是可调速驱动器无需齿轮或皮带等机械部件即可控制电机机械输出的方式。

包含微处理器或现场可编程门阵列 (FPGA) 的控制模块，以正确的频率为 IGBT 栅极驱动器提供正确的脉宽调制 (PWM) 控制序列，从而控制电机驱动输出端产生的电压和电流波形。这些波形控制电机的速度和扭矩输出。电机驱动器是一种闭环系统。控制模块接收来自电压和电流检测电路的反馈，在某些应用中还接收来自编码器的位置和速度反馈。

控制模块通过 RS-485、CAN 或工业以太网等标准通信接口与控制网络的其余部分（例如，可编程逻辑控制器 [PLC]、计算机或人机界面 [HMI]）进行交互。

控制模块包含人员可接触的器件，例如通信接口的连接器和编码器接口的输入端口。这些外露器件和高压电路（连接到直流母线和传入电源线的电路）之间需要足够的安全隔离。这种隔离可通过隔离式栅极驱动器以及隔离式电压和电流检测放大器实现。在控制模块与通信接口之间还可增加额外隔离，但图 3 中未示出。图 3 中以蓝色显示的线是低压或安全信号，这些信号与高压之间进行了安全隔离。

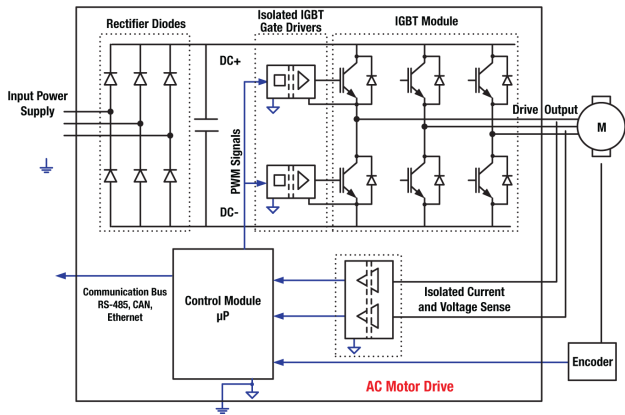


图 3. 交流电机驱动的典型方框图。

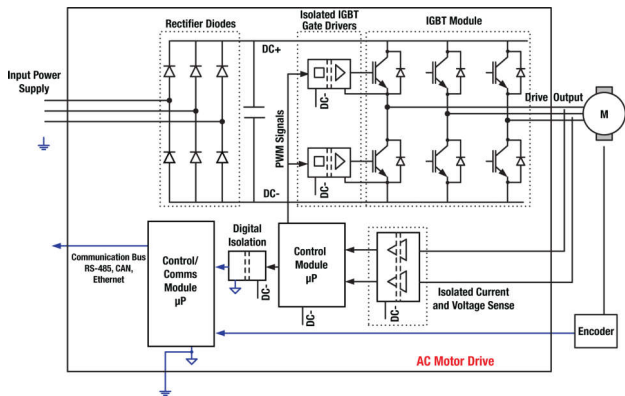


图 4. 交流电机驱动器的替代隔离方案。

图 4 显示了控制模块不以接地为基准的另一种可能配置。实际上，它被偏置到直流母线。在这种情况下，其他数字隔离可为该控制模块（连接到高电压）和作为接地基准的次级控制或通信模块之间提供安全隔离。人员可接触的器件或接口位于第二个控制模块上。在此架构中，栅极驱动器以及隔离式电流和电压检测模块仍需要隔离，但其目的并非出于电气安全考虑，而是为了实现功能需求。在此情况下，隔离使第一控制模块（以 DC- 为参考）能够与 IGBT 及检测元件进行通信，而这些器件的接地参考点为逆变器输出端，该输出端相对于直流母线会切换高压。

IEC 61800-5-1 定义

在将 IEC 61800-5-1 标准应用于任何给定的电机驱动设计时，设计人员需要了解以下定义。

系统电压

这是输入或电网电源的某一相与接地端之间的 RMS 电压。系统电压非常依赖于电源系统的接地方案。对于星形

接地的 TN 网络 (图 5a)，相位和接地之间的 RMS 电压等于相间电压除以 $\sqrt{3}$ 。但是，对于角接地 TN 系统 (图 5b)，系统电压与相间电压相同。隔离（或绝缘）的安全要求直接取决于系统电压。

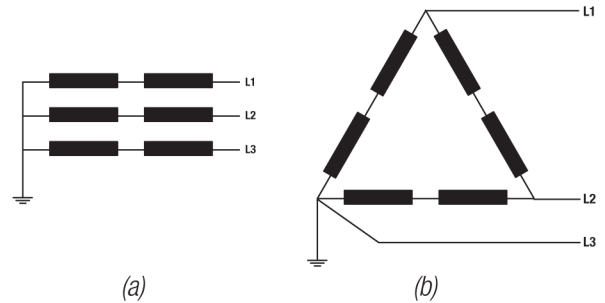


图 5. 中性点接地的星形接地 TN 系统 (a)；以及一相接地的角接地 TN 系统 (b)。

过压类别

根据 IEC 61800-5-1 标准，设备根据其电源的连接方式分为四类：

- 类别 I：适用于连接到采取措施减少浪涌和瞬态过压的电路的设备。
- 类别 II：适用于便携式工具和未永久连接到主电网的插接式设备。
- 类别 III：适用于永久连接到配电板下游电源主电网中的设备。
- 类别 IV：适用于永久连接到主配电板上游安装入口处的设备。

类别越高的设备，越可能承受更高等级的电压干扰。因此，它需要满足对临时过压和脉冲或浪涌电压的更高要求。

大多数工业电机驱动器属于 III 类。

工作电压

工作电压是指设备运行期间持续存在于隔离器两端的电压。该值不直接跟随系统电压或跟随输入电源的相间电压。相反，它取决于驱动器本身的架构。下一节将对此进行进一步讨论。

将 IEC 61800-5-1 标准应用于电机驱动设计

现在您已经了解了隔离以及接地概念和术语，接下来您可以逐步将 IEC 61800-5-1 要求应用到给定的电机驱动设计

计。除非另有说明，否则我们在本次讨论中使用过电压类别 III 和污染等级 2。此外，本文档仅讨论栅极驱动系统中隔离器相关要求，不涉及其他元件（例如电源模块和散热器）。

步骤 1 – 确定系统中存在的隔离器，并确定每种隔离器需要功能隔离、基本隔离，还是增强隔离。

连接到高压的电路与人员可接触的任何器件或连接器之间需要有足够的安全隔离（或 IEC 61800-5-1 中所称的保护隔离）。设计人员可通过以下方式实现保护隔离：1) 两个串联的基本隔离器（双重隔离）；或 2) 通过一个增强型隔离器。

在 **图 3** 所示的电机驱动系统中，隔离式栅极驱动器以及隔离式电压和电流反馈电路都需要支持增强隔离。如果在通向外部接口或连接器的信号路径中增加额外的基本隔离器（例如隔离式 RS-485），则基本隔离即可满足要求。在

图 4 所示的电机驱动系统中，数字隔离器需要支持增强隔离。在 **图 4** 中，隔离式栅极驱动器和隔离式反馈电路都以直流母线为基准，每侧都有高电压，无需采用保护隔离设计。

步骤 2 – 确定工作电压。如前所述，该值取决于传入的电网电源电压以及接地方案。三相 400V_{RMS} TN 电源（中性点接地）的系统电压为 230V_{RMS}。三相 830V_{RMS} 角接地系统的系统电压为 830V_{RMS}。

步骤 3 – 使用 IEC 61800-5-1 [1] 中的 **表 7** [4]，确定每个隔离器的临时过压和脉冲/浪涌电压要求。此表不允许进行内插。下一个更高的系统电压，例如 230V_{RMS} 被视为 300V_{RMS} 系统电压，而 830V_{RMS} 被视为 1000V_{RMS} 系统电压。

表 7 列出了基本隔离的要求。对于增强隔离，请将对临时过压的要求加倍。对于浪涌电压，使用下一个更高的脉冲电压。要确定增强隔离的电气间隙（步骤 4），请使用基本要求 1.6 倍（而非两倍）的临时过压以及下一个更高的脉冲电压。

步骤 4 – 确定设计中使用的每个隔离器所需的电气间隙。IEC 61800-5-1 [1] 中的 **表 9** [4] 列出了给定临时过压和浪

涌/脉冲电压的电气间隙要求。使用此表，并根据步骤 3 确定的临时过压和浪涌要求，您可以获得电气间隙要求。

表 9 中给出的数值适用于海拔 2000m 及以下。要在更高的海拔下运行，需将电气间隙乘以一个特定系数，这是因为空气在更高海拔下更容易被击穿。更高海拔的这一修正系数在 IEC 61800-5-1 的 **表 D.1** [4] 中定义。例如，要在 5000m 海拔运行，请将从 **表 9** 中获得的电气间隙乘以 1.48。

步骤 5 – 确定设计中使用的每个隔离器的工作电压。工作电压不直接跟随系统电压或输入电源的相间电压，而是取决于电机驱动架构。**图 2** 中的栅极驱动器在电机驱动最大输出电压下，承受的是一个正弦双极性隔离电压（经高频梯形 PWM 载波调制），其摆幅在 DC+ 与 DC- 之间。或者，**图 4** 中的栅极驱动器偏置到 DC-。该栅极驱动器承受 0 到 2 × DC+ 的单极电压摆幅。

接地方案同样会起到作用。例如，**图 4** 中数字隔离器两端的电压曲线取决于输入电源是星形接地还是角接地。在第一种情况下，DC- 母线相对于地电位保持较为稳定的电压；而在第二种情况下，DC- 母线也会出现高压摆动。

多个因素使工作电压的计算变得复杂。首先，逆变器输出端的高频梯形 PWM 调制会改变隔离式栅极驱动器及隔离式检测元件的工作电压 RMS。其次，在电机制动期间增加直流母线电压可能意味着隔离器中偶尔会出现更高的电压。因此，应仔细确定每个隔离器的工作电压。

隔离器必须在设备预期寿命内维持工作电压曲线的峰值和 RMS 值。通常，RMS 和直流工作电压能力等于输入相间电压的 RMS 和峰值的隔离器，应涵盖大多数情况。然而，一些裕度为各种工作电压瞬态曲线的影响提供了缓冲，从而提高设计的稳健性和可靠性。

步骤 6 – 根据 IEC 61800-5-1 中的 **表 10** [4]，使用工作电压的 RMS 值确定爬电距离。此表显示了基本隔离的结果。对于增强隔离，请将爬电距离要求加倍。

爬电距离要求取决于隔离器的污染等级和 CTI，该关系在 **表 10** 中有所体现。

保形涂层或灌封可以降低涂层下的污染等级，以及阻断引脚之间的电弧路径，有助于降低对爬电距离和电气间隙的

要求。请注意，这些方法会增加成本，需要额外的检查步骤来检查涂层的质量，并且对支持的最大电压电平存在限制。选择具有更高 CTI 以及更大爬电距离和电气间隙值的隔离器，通常是更便宜、更可靠的替代方案。

当爬电距离要求低于电气间隙要求时，需要增大爬电距离以满足电气间隙要求。

此调整很有必要，因为沿封装表面的爬电路径也是一条会发生空气击穿的路径。

步骤 7 – 选择满足步骤 3 至步骤 6 所有要求的隔离器。 **表 1** 汇总了若干示例三相系统在过电压 III 类、污染等级 2 以及海拔 <2000m 条件下的相关要求。此处假设工作电压与输入相间电压相同，该假设适用于大多数架构。但是，隔离器所需的实际工作电压取决于隔离器在系统架构中的适用位置。

用于电机驱动应用的隔离器

为了满足这些需求，德州仪器 (TI) 为电机驱动应用提供了多种隔离产品。这些产品包括隔离式 IGBT 栅极驱动器、

交流相间电压 (V _{RMS})	接地方案	系统电压 (V _{RMS})	依据 IEC 61800-5-1 确定的系统电压 (V _{RMS})	基本/增强	临时过压 (V _{RMS} / V _{PK})	脉冲/浪涌电压 (V _{PK})	最小电气间隙	工作电压 (V _{RMS} / V _{PK})	最小爬电距离 (mm)		
									材料组		
									I	II	III
400	中性点接地	230	300	基础	1500/2120	4000	3	400/566	2	2.8	4
830	中性点接地	480	600	基础	1800/2550	6000	5.5	830/1174	4.2	5.8	8.3
830	角接地	830	1000	基础	2200/3110	8000	8	830/1174	4.2	5.8	8.3
1000	角接地	1000	1000	基础	2200/3110	8000	8	1000/1414	5	7.1	10
400	中性点接地	230	300	增强	3000/4240	6000	5.5	400/566	4	5.6	8
830	中性点接地	480	600	增强	3600/5100	8000	8	830/1174	8.4	12.6	16.6
830	角接地	830	1000	增强	4400/6220	12000	14	830/1174	8.4	12.6	16.6
1000	角接地	1000	1000	增强	4400/6220	12000	14	1000/1414	10	14.2	20

表 1. IEC 61800-5-1 对几个示例系统的要求汇总 (III 类、污染等级 2、海拔 <2000m)。

表 2 概述了这些器件在应用于 IEC 61800-5-1 标准的各种要求时的性能。通过将固有的隔离强度与采用宽封装的材料组 I 模塑化合物相结合，TI 器件能够应对额定电源电压高达 1000V_{RMS} 的产品，并且留有裕量。

结语

隔离器是现代电机驱动系统的重要元件，必须仔细选择隔离器以确保实现最佳的绝缘协调。在本文中，我们探讨了

数字隔离器、隔离式 Δ-Σ ADC 和放大器，以及诸如隔离式 RS-485 和隔离式 CAN 等隔离式通信链路。

最新推出的产品包括 **UCC23513** 和 **ISO5852S** 增强型隔离式栅极驱动器以及 ISO77xxDW 和 ISO78xxDWW 系列数字隔离器。

除 ISO78xxDW 系列外，这些隔离器系列均具有 60 秒 5kV_{RMS} 或更高的临时过压；双极性、单极性直流工作电压分别为 1.5kV_{RMS} 和 2121V_{PK}；浪涌电压为 12.8kV_{PK}。ISO78xxDW 系列采用超宽 14.5mm 爬电距离和电气间隙封装，适用于更高电压系统。此外，与具有相同爬电距离的竞品器件相比，这些器件使用 CTI 大于 600 (材料组 I) 的成型材料封装，使其能在系统级的更高工作电压下运行。

为电机驱动系统选择隔离器时要考虑的几个方面，以符合 IEC 61800-5-1 标准。这包括对瞬态过压、脉冲电压、工作电压、爬电距离和间隙的要求。得益于固有的隔离强度、出色的模塑化合物和提供的宽封装选项，TI 器件能够满足额定电源电压高达 1000V_{RMS} 的电机驱动设计的要求。

参考资料

1. IEC 61800-5-1 版本 2.0。可调速电力驱动系统、安全要求、电气、热和能量。2007 年 7 月。
2. Anant S Kamath、Kannan Soundarapandian。高电压增强型隔离：定义和测试方法。德州仪器 (TI) 白皮书，2014 年 11 月。
3. 隔离相关术语。德州仪器 (TI)，2014 年 10 月。
4. 参考表 7、表 9、表 10 和表 D.1 可从 IEC 61800-5-1 出版物中获得，该出版物可从 IEC 网上商店购买。
5. 下载这些数据表：[UCC23513](#)、[ISO5852SDW](#)、[ISO7741](#) 和 [ISO7841DWW](#)。
6. 具有集成电源的信号隔离器产品文件夹 [ISOW64xx](#)、[ISOW3080](#)、[ISOW1050](#)
7. 德州仪器 (TI)，[利用集成电源与数字隔离设计提升设计性能](#)，应用简报。
8. 德州仪器 (TI)，[利用集成电源实现信号隔离器的出色 EMC 性能](#)，应用手册。

器件	功能	爬电距离/电气间隙 (mm)	基本/增强	支持的最高系统电压, V_{RMS}	支持的最高工作电压, V_{RMS}/V_{PK}
UCC23513DWW ISO5852SDW	栅极驱动器	8	基础	1000	1500/2121
			增强	600	800/1130
ISO77xxDW	数字隔离器	8	基础	1000	1500/2121
			增强	600	800/1130
ISO78xxDWW	数字隔离器	14.5	基础	>1000	1500/2121
			增强	1000	1450/2050
ISOW64xx	带有集成电源的数字隔离器	8	增强	1000	1000/1414
ISOW3080	带有集成电源的隔离式 RS485	8	增强	1000	1000/1414
ISOW1050	带有集成电源的隔离式 CAN	8	增强	1000	1000/1414

表 2. TI 隔离器件在 IEC 61800-5-1 下的性能 (III 类、污染等级 2、海拔 <2000m)。

1

¹ 有时，封装的爬电距离和电气间隙会限制所支持的系统电压与工作电压。有关隔离器的固有功能，请参阅相应的产品数据表和参考资料 [2]。例如，可以通过保形涂层或灌封在系统级别实现隔离器的固有功能。

重要通知和免责声明

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

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

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

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

TI 反对并拒绝您可能提出的任何其他或不同的条款。

版权所有 © 2026，德州仪器 (TI) 公司

最后更新日期：2025 年 10 月