

Power Supply Design Seminar

揭秘高压终端设备的电气间隙和爬电距离



Reproduced from
2024 Texas Instruments Power Supply Design Seminar
SEM2600
Topic 2
Wei Zhang and Thomas LaBella
Literature Number: ZHCP238

Power Supply Design Seminar resources
are available at:
www.ti.com/psds

在仍遵循安全和设计指南的同时，实现尽可能高的功率密度，需要更加谨慎地选择高压印刷电路板 (PCB) 间距和集成电路 (IC) 封装。本主题总结了常见终端设备的注意事项并提供了速查表，这些终端设备包括：电信、服务器和无线基础设施；电机驱动器、光伏逆变器和充电桩；消费类交流/直流应用以及电动汽车和混合动力电动汽车。

引言

为了实现尽可能高的功率密度，同时仍符合安全和设计指南，高压 PCB 间距和 IC 封装的选择变得越来越重要。然而，挑战来自诸多方面。作为设计人员，您必须了解：

- 许多技术术语及其对爬电距离和电气间隙的影响。
- 正常工作瞬态电压与偶发性瞬态电压之间的区别。
- 设备相对于初级侧能源的位置所产生的影响。
- 有多项行业标准涉及爬电距离、电气间隙和 PCB 间距，其中一些标准是互补的，一些标准是重复的，还有一些标准则是相互冲突的。
- 适用于不同终端设备类型的不同行业标准。
- 国际电工委员会 (IEC)、美国保险商实验室 (UL) 或德国标准化协会 (DIN) 德国电气工程师协会 (VDE) 提供的安全隔离场景旨在保护人身安全，而功能隔离则是为了保持设备的正常运行。
- 其他考虑因素，例如用例海拔、污染等级、IC 材料组、PCB 保形涂层、PCB 切口和常规瞬态测试。

在本白皮书中，我们将介绍技术术语及其物理含义，并说明与爬电距离和电气间隙的关系及其影响。然后，我们将提供指南和流程图，其中包括使用结构化方法确定适当爬电距离和电气间隙的分步说明。

定义

爬电距离和电气间隙

爬电距离是两个导电器件之间沿固体绝缘材料表面的最短距离，如图 1 所示，根据污染等级、材料组和工作电压（绝缘材料可以承受的最高均方根 (RMS) 电压）来确定，用于确保不会发生飞弧或绝缘击穿。除了工作电压外，对爬电距离影响很大的因素还有污染、湿度和冷凝。

电气间隙是两个导电器件之间在空气中的最短距离，如图 2 所示，用于防止在任何所需的瞬态过压期间产生空气电离或电弧。电气间隙的重要影响因素是气压（海拔）和污

染。对于海拔超过 2,000m 的高度，存在倍增系数，我们将在[确定爬电距离、电气间隙和高压 PCB 间距要求的方法](#)中介绍。

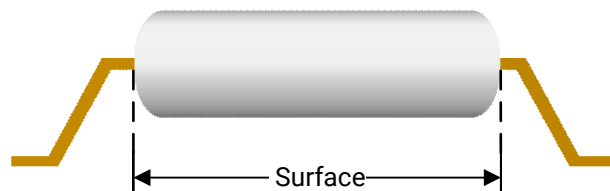


图 1. 爬电距离。

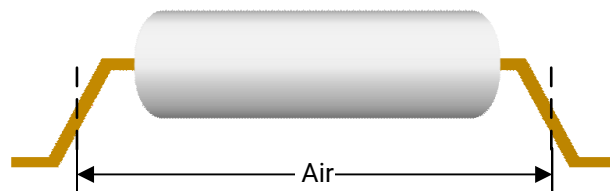


图 2. 电气间隙。

爬电距离涉及长期稳定的工作电压，而电气间隙涉及几毫秒或更短的短期瞬态电压。两者之间没有物理关系，但爬电距离不能小于电气间隙。务必尽可能地增大爬电距离和电气间隙，同时考虑在尺寸和成本之间进行权衡。

还需要注意的是，在某些情况下，转角引脚靠近封装的边缘，最短爬电距离是沿着侧面，而非顶部或底部，如图 3 所示。

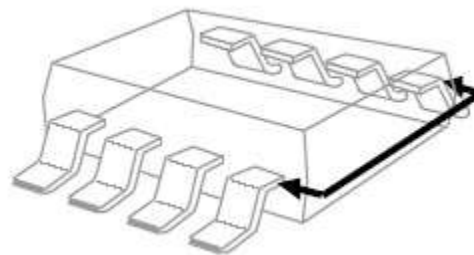


图 3. 最短爬电距离沿侧面而非顶部的示例。

爬电距离和电气间隙也可能相同。例如，在图 4 中，移除 UCC21551-Q1 双通道隔离式栅极驱动器的中间引脚会增大爬电距离和电气间隙。

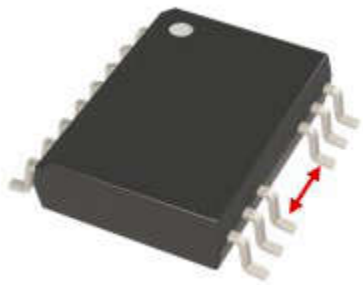


图 4. 爬电距离和电气间隙相同时的功能隔离示例。

材料组和相对漏电起痕指数

相对漏电起痕指数 (CTI) 根据发生电气击穿时的电压对绝缘材料进行分类。CTI 等级通过测试来确定，该测试在材料表面放置了 50 滴含有 0.1% 氯化铵的水，然后对材料施加电压。CTI 等级是在此测试过程中，材料所能承受的最大电压，此时漏电流低于 0.5A [1]。表 1 显示了根据 CTI 划分的绝缘材料类别。这些材料组可以帮助您确定在给定绝缘要求下所需的爬电距离，如确定爬电距离、电气间隙和高压 PCB 间距要求的方法中所述。

材料组	CTI 范围 (V _{RMS})
I	600 ≤ CTI
II	400 ≤ CTI < 600
IIIa	175 ≤ CTI < 400
IIIb	100 ≤ CTI < 175 或未指定时

表 1. 根据 CTI 划分的材料组。

PCB 制造中使用的大多数 FR4 材料属于材料组 IIIa。为帮助减小所需的封装尺寸和 PCB 占用空间，所有德州仪器 (TI) 隔离产品均属于材料组 I。

污染等级

确定所需爬电距离和电气间隙的下一个重要参数是污染等级。污染等级环境分为四类 [2]：

- 污染等级 1：无污染或仅存在干燥的非导电性污染。这些系统经过密封以防止灰尘和湿气进入，或者 PCB 使用了保形涂层，这样元件就不会受到湿度或温度相关冷凝的影响。
- 污染等级 2：由于偶尔出现冷凝，环境会暂时变得导电。归类为污染等级 2 的常见环境示例包括实验室、办公室以及服务器、电信设备和无线基础设施的外壳。

- 污染等级 3：环境受到导电污染或非导电污染的影响，而后者在预期的冷凝情况下可能变得导电。常见的示例包括工业应用、农业设备和没有供暖设施的工厂车间。
- 污染等级 4：因导电性粉尘、雨水或其他潮湿状况而导致的持久导电性污染。这在室外应用中很常见。

瞬态过压类别

在确定所需电气间隙时考虑的另一个因素是瞬态过压类别，该类别根据设备相对于主电源电压的连接位置对设备进行分类。该电压电平不是使用数学计算来分类，而是根据设备位置的概率含义来分类。

图 5 是一个住宅楼宇的示意图，图中标出了不同瞬态过压类别的位置示例。这四个类别为 [3]：

- 类别 I：此类别最低，适用于采用限制过电压瞬态的方式连接的电路。示例包括通过降压变压器连接到电源的 24V_{AC} 恒温器和喷淋系统等设备。
- 类别 II：此类别适用于通过固定装置供电的设备。示例包括插入与类别 III 设备距离 10m 远的电源插座的设备。
- 类别 III：此类别适用于使用固定装置且须满足特殊要求的设备。示例包括永久连接的设备，例如熔断器板内的开关、空调或硬接线到交流电源的工业机械。
- 类别 IV：此类别适用于在原始安装位置使用（指直接连接到电源电压）的设备。示例包括电表、配电板和电力变压器。

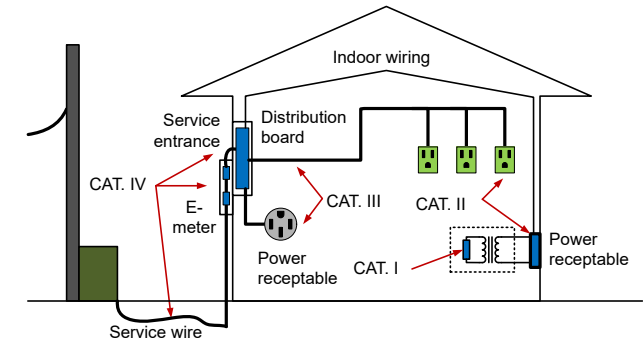


图 5. 示例瞬态过压类别。

爬电距离、电气间隙和 PCB 间距相关标准

有许多与爬电距离和电气间隙相关的标准。其中一些是互补的，一些是相互矛盾的，还有许多是重复的。没有一种

标准可以让您仅通过公式或查找表直接计算出所需的爬电距离和电气间隙。

在本节中，我们将介绍各种标准，并说明何时以及如何在[确定爬电距离、电气间隙和高压 PCB 间距要求的方法](#)中运用这些标准。但首先，我们将标准分为两类：与绝缘系统中用户安全相关的标准以及与 PCB 相关的标准。

针对绝缘系统中用户安全的基本标准是 IEC 60664-1，该标准适用于高达 1.5kV_{DC} 或 1kV_{AC} 的系统。IEC 60664-1 涵盖了爬电距离、电气间隙和电气强度测试。还有其他几项特定于某些终端设备的标准，这些标准基于 IEC 60664-1，但添加了更多具体指南。这些标准包括适用于电信、服务器、音频和视频以及云计算的 IEC 62368-1 和 IEC 60950-1 [4]、[5]；适用于电机驱动器的 IEC 61800-5 [6]；以及适用于太阳能设备的 IEC 62109-1 [7]。

PCB 间距标准仅涉及正常运行或功能运行，而不涉及用户安全。主要标准是印刷电路学会 (IPC)-2221B，这是介绍通用要求的通用标准 [8]。另一个涉及 PCB 间距的常用标准是 IPC-9592B，该标准建立在 IPC-2221B 的基础上，但为计算机和电信行业增加了具体的指南 [9]。IPC-9592B 比 IPC-2221B 更严格一些。此外，IEC 62368-1 还为电信、服务器、音频和视频以及云计算的有涂层和无涂层 PCB 提供了指南。

绝缘标准

隔离器有各种绝缘标准，用于验证绝缘栅承受电气、机械和热应力以及环境影响的能力。这些标准包括欧盟的 DIN VDE V 0884-11、美国的 UL 1577 和中国质量认证 (CQC) GB4943.1 [10-12]。这些认证标准中涉及的参数描述了绝缘栅，与爬电距离和电气间隙没有直接关系。爬电距离和电气间隙的重要影响因素是隔离等级，例如基本隔离、增强型隔离和功能隔离。

隔离等级和指南

有五种类型的隔离等级 [13]：

- 功能隔离仅适用于在存在接地反弹、高工作电压和次级电路（非主电源）间瞬态等因素时使电路能够正常运行，与用户安全无关。

- 基本隔离是单级隔离，用于在正常和异常工作条件下保护用户免受电击。
- 补充隔离是一层额外的隔离保护，用于应对单一故障状况。如果第一层隔离失效，补充隔离会保护用户免遭电击。
- 双重隔离是基本隔离和补充隔离的组合。
- 增强型隔离提供的等级和保护效果与双重隔离相同，但它只需要使用一层绝缘材料来实现。

实践中最常见且[绝缘标准](#)中所述隔离标准所涉及的两种隔离类型分别是基本隔离和增强型隔离。任何所需的爬电距离和电气间隙都取决于设计是否需要基本隔离或增强型隔离。

IEC 60664-1、IEC 62368-1 和 IEC 60950-1 都提供了相关指南，有助于确定应用是否需要基本隔离或增强型隔离。在这些指南中，“普通人”和“用户”这两个术语可互换使用。这些标准还使用不同的术语来对不同的电压电平进行分类，但可以根据其电压将术语简化为三个能源级别：

- 能源级别 1 (ES1) 由电压高达 60V 的电路组成。这些电路可安全接触，无需与用户隔离。IEC 60950-1 将此电压级别定义为安全特低电压 (SELV)，此级别包括 IEC 60950-1 定义的第一级电信网络电压 (TNV-1) 电路。
- ES2 包括电压介于 60V 至 120V 之间的电路。这些电路需要在电路和用户之间使用基本隔离，其中包括 IEC 60950-1 定义的 TNV-2 和 TNV-3 级电路。
- ES3 包括电压高于 120V 的电路。这类电压视为危险电压，需要在电路和用户之间使用增强型隔离。

IEC 60950-1 中的图 2H 提供了一份极为全面的指南，可用于确定不同电路之间所需的隔离级别。该图显示了何时需要在初级电路、接地/未接地 SELV、接地/未接地 TNV-1、2 或 3，以及接地/未接地的危险电压之间实施功能隔离、基本隔离或增强型隔离。将电路接地通常可降低所需的隔离级别。[表 2](#) 是 IEC 60950-1 图 2H 的简化汇总，并附有一些常见示例。

隔离等级	隔离的器件		示例
功能	SELV	SELV	<60V 砖型模块
	增强型电路		

隔离等级	隔离的器件		示例
基本	初级、ES2、TNV-2、TNV-3、危险电压	接地 SELV	<ul style="list-style-type: none">• >60V 直流/直流• 具有 12V 或 48V 输出的交流/直流整流器。• 400V 车载充电器。
	初级	未接地，危险	
增强型	初级，危险	未接地 SELV	具有 12V 或 48V 输出的交流/直流整流器
	ES2、TNV-2、TNV-3		>60V 直流/直流

表 2. 常见应用所需的隔离等级示例。

确定爬电距离、电气间隙和高压 PCB 间距要求的方法

流程图

我们介绍了一些定义、分类、等级、标准和复杂指南。现在，为了简化和加快开发过程，我们将所有这些信息整合到一个流程图中（请参阅图 6），并逐步说明如何确定适合应用的爬电距离和电气间隙。

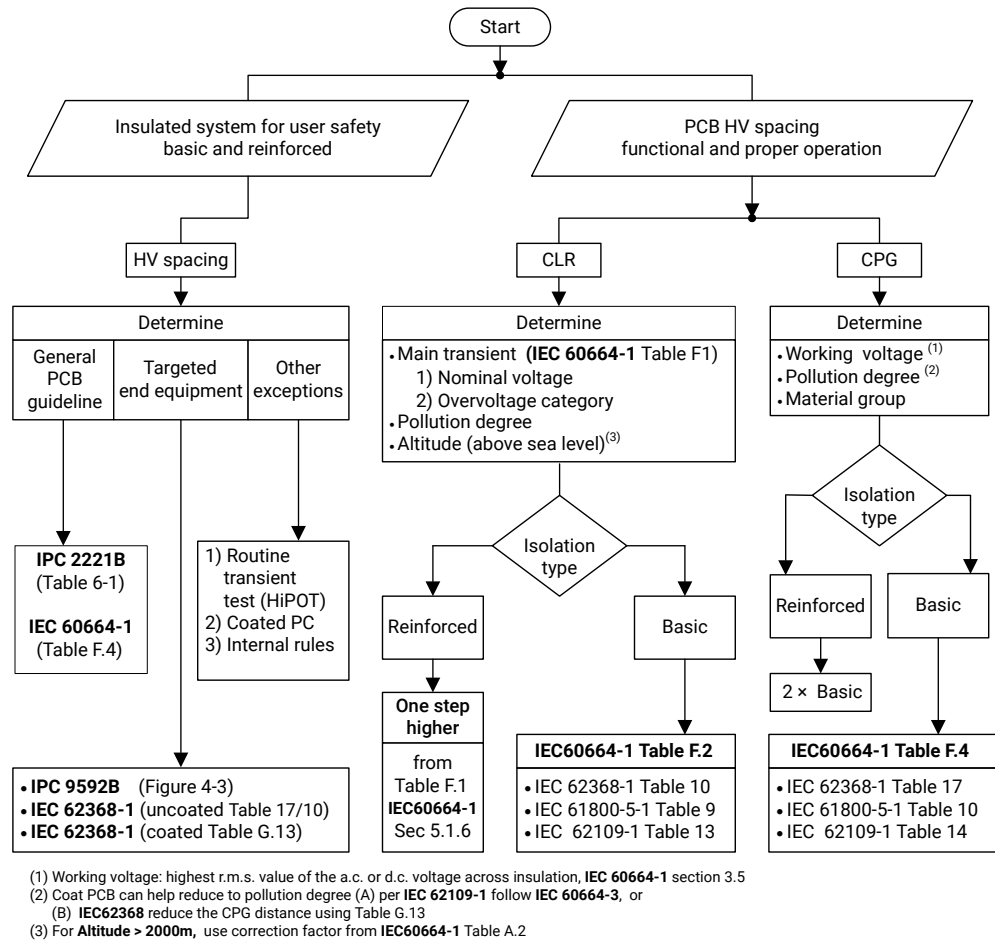


图 6. 确定应用所需爬电距离和电气间隙的流程图。

该流程图有两条主要路径：一条涉及确保用户安全的绝缘系统，一条涉及 PCB 间距。确保用户安全的路径有两个子

路径：一个用于确定爬电距离，另一个用于确定电气间隙。

我们下面说明如何使用此流程图来确定爬电距离、电气间隙来确保用户安全，以及高压 PCB 间距。

确定绝缘系统中的爬电距离以确保用户的安全

对于爬电距离，需要知道应用的工作电压、绝缘材料的材料组以及环境的污染等级。下一步是使用 IEC 60950-1 中的图 2H 来确定是否需要基本隔离或增强型隔离。如果需要基本隔离，请使用下一步确定的爬电距离值。如果需要增强型隔离，请将下一步中确定的距离加倍。

根据您的终端设备，查找所需的爬电距离；对于通用终端设备，请使用 IEC 60664-1 中的表 F.4。对于音频、视频以及信息和电信设备，请使用 IEC 62368-1 中的表 17。对于电机驱动器，请使用 IEC 61800-5-1 中的表 10。对于太阳能应用，请使用 IEC 62109-1 中的表 14。

请根据您的终端设备，查找所需的爬电距离：

- 对于通用终端设备，请使用 IEC 60664-1 中的表 F.4。
- 对于音频、视频以及信息和电信设备，请使用 IEC 62368-1 中的表 17。
- 对于电机驱动器，请使用 IEC 61800-5-1 中的表 10。
- 对于太阳能应用，请使用 IEC 62109-1 中的表 14。

表 3 是 IEC 60664-1 表 F.4 的一小分子集，经简化，显示常用的工作电压和污染等级。您可以看到，污染等级 1 表示没有污染，所以材料组无关紧要。对于污染等级 2 和材料组 I，具有 400V 工作电压的应用需要 2mm 的爬电距离实现基本隔离，或 4mm（加倍）的爬电距离实现增强型隔离。对于污染等级 2 和材料组 III，具有 400V 工作电压的应用需要 4mm 的爬电距离实现基本隔离，或 8mm（加倍）的爬电距离实现增强型隔离。

V _{RMS}	用于避免因爬电现象导致失效的爬电距离 (mm)			
	污染等级 1	污染等级 2		
	所有材料组	材料组		
		I	II	III
63	0.2	0.63	0.9	1.25
400	1.0	2.0	2.8	4.0
800	2.4	4.0	5.6	8.0
1,000	3.2	5.0	7.1	10.0

表 3. IEC 60664-1 表 F.4 显示常用工作电压、污染等级和材料组的子集。

确定绝缘系统中的电气间隙以确保用户安全

为了计算电气间隙，您需要知道应用所需的瞬态电压，该电压取决于电源标称电压和瞬态过压类别。您还需要知道环境的污染等级和预期的工作海拔高度（高于海平面的米数）。

使用电源标称电压和瞬态过压类别时，请参阅 IEC 60664-1 中的表 F.1 来确定所需的脉冲电压等级。如果需要基本隔离，则需要使用该电压来确定电气间隙。如果您的应用是用于音频、视频或信息和电信设备，则需要使用 IEC 62368-1，该标准给出了上述类型终端设备基本隔离和增强型隔离的电气间隙。对于任何其他终端设备类型，您可使用仅提供基本隔离对应值的表格。因此，对于增强型隔离，您需要使用 IEC 60664-1 表 F.1 中比您的应用电压高一个等级的脉冲电压。IEC 60664-1 中的第 5.1.6 节更详细地描述了这个过程。

表 4 是 IEC 60664-1 表 F.1 的一小分子集，经简化，显示常用的工作电压。使用此表确定所需脉冲电压额定值。例如，如果使用 IEC 62368-1 以外的任何其他标准，则瞬态过压类别为 II 的 230V 相电压应用的基本隔离需要 2,500V 脉冲电压，增强型隔离需要 4,000V 脉冲电压。

相电压 (V _{RMS})	电源瞬态/额定脉冲电压 (V _{PEAK})			
	过压类别			
	I	II	III	IV
≤50	330	500	800	1,500
≤150（例如，美国为 120V）	800	1,500	2,500	4,000
≤300（例如，欧盟、中国为 230V）	1,500	2,500	4,000	6,000
≤600（例如，工业电机或船舶电力）	2,500	4,000	6,000	8,000

表 4. IEC 60664-1 表 F.1 显示常用工作电压的子集。

对于某些系统，可能不会遇到交流电源瞬变。在这些情况下，如 IEC 60664-1 第 5.3.3.2.3 节所述，可通过使标称相电压增加 1,200V 来计算所需的脉冲电压等级。

得到所需的脉冲电压后，接下来可以根据您的终端设备类型，从相应的表格中为海拔高达 2,000m 的应用查找所需的电气间隙。对于通用终端设备，请使用 IEC 60664-1 中的表 F.2。对于音频、视频以及信息和电信设备，请使用 IEC 62368-1 中的表 10。对于电机驱动器，请使用 IEC 61800-5 中的表 9。对于太阳能应用，请使用 IEC 62109-1 中的表 13。

表 5 是 IEC 60664-1 表 F.2 的一小分子集，经简化，显示常用的脉冲电压等级。为了进行比较，我们在括号中包括了 IEC 62368-1 表 10 中的值。您可以看到，对于音频、视频、信息和电信应用，要求更严格一些。

所需的脉冲耐受电压 (kV)	最小电气间隙 (mm)		
	污染等级		
	1	2	3
0.5	0.04	0.2	0.8
1.5	0.5 (0.76)		0.8
2.5	1.5 (1.8)		
4.0	3.0 (3.8)		
6.0	5.5 (7.9)		

表 5. IEC 60664-1 表 F.2 显示常用脉冲电压和污染等级的子集。括号中的数字是 IEC 62368-1 表 10 中的电气间隙值。

最后，如果工作海拔大于 2,000m，请使用 IEC 60664-1 表 A.2 为电气间隙确定适当的倍增系数。

确定高压 PCB 间距

对于高压 PCB 间距，您需要根据终端设备查找所需的间距。此外，您可能还需要考虑其他例外情况，包括在无法满足所需电气间隙时使用 PCB 保形涂层、在生产期间定期进行瞬态高电势测试以确保电介质耐压强度，或任何其他可能适用的内部规则。

IEC 60664-1 表 F.4（用于确定爬电距离的同一表格）和 IPC-2221B 表 6-1 给出了通用 PCB 指南。IEC 60664-1 表 F.4 的前两列涵盖了“印刷布线材料”或 PCB 走线。这些数值与 IPC-2221B 表 6-1 中未使用保形涂层的 PCB 外层上的导体的数值非常接近。IPC-2221B 包括 PCB 内层、带有和不带有保形涂层的 PCB 外层的电气间隙要求，以及外部元件组件的电气间隙。IPC-9592B 为计算机和电信终端设备提供了特定指南。与更为通用的 IPC-2221B 相

比，这些电气间隙指南略微保守一点，其规定，如果任何导体无法满足所需的电气间隙，则必须使用保形涂层。

图 7 显示了以下不同标准所要求的电气间隙与峰值电压：IEC 60664-1、IPC-2221B（针对外层未涂覆）、IPC-2221B（针对外层已涂覆）、IPC-2221B（针对内层）以及 IPC-9592B。您可以看到 PCB 内层所需的间距远远小于外层，而采用保形涂层的外层所需的间距小于未采用保形涂层的外层。例如，如果应用的峰值电压为 400V，则根据 IPC-2221B，PCB 内层只需要 0.25mm 的电气间隙。对于无保形涂层的外层，电气间隙范围为 2mm 至 2.6mm，具体取决于标准。对于通用标准，IEC 60664-1 需要 2mm 电气间隙，IPC-2221B 标准需要 2.5mm 电气间隙。在这种情况下，我们建议您使用更保守的 2.5mm。对于计算机或电信应用，根据 IPC-9592B，电气间隙需要为 2.6mm。如果无法满足这些电气间隙，则需要使用保形涂层。采用保形涂层时，外层只需 0.8mm 的电气间隙。

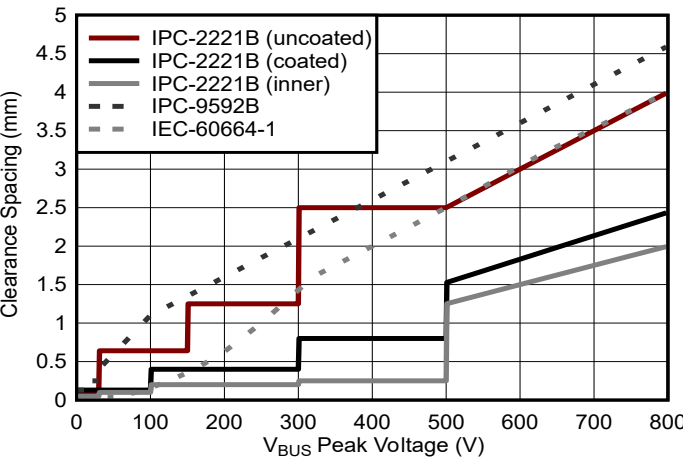


图 7. 根据不同标准给出的 PCB 高压电气间隙要求。

流程图使用示例：电信交流/直流前端

我们浏览了流程图并描述了如何使用多个标准中的相关表格。现在，我们来看一个电信交流/直流前端的示例，如图 8 所示。此应用具有通用 85V 至 265V_{AC} 输入和 40V 至 60V_{DC} 输出，相对于大地保持悬空。

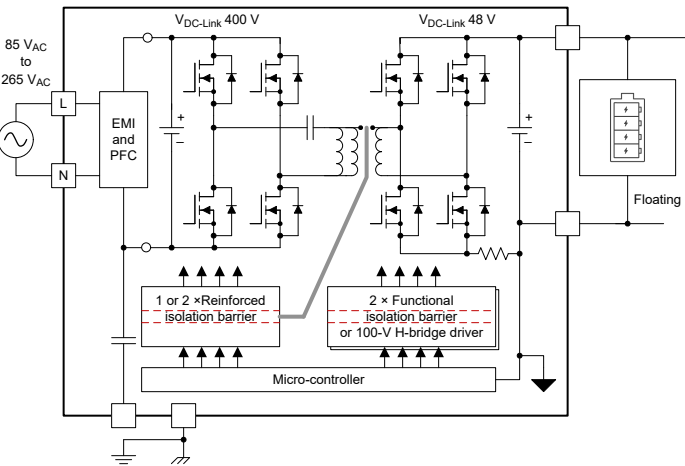


图 8. 电信设备的交流/直流前端示例。

第一步是确定所需的爬电距离，这要知道工作电压、污染等级和材料组。由于直流链路电压为 400V，所以此转换器内部的最高工作电压也为 400V。因此电源将位于电信设备外壳内，所以污染等级为 2。

由于爬电距离特定于系统中使用的各个元件，所以务必查找所有三个材料组所需的爬电距离。例如，德州仪器 (TI) 的隔离式栅极驱动器可能采用材料组 I 绝缘材料，而另一家供应商的光耦合器可能采用材料组 II 绝缘材料，PCB FR4 材料可能为材料组 IIIa。目标是设计可在海拔 5,000m 的高度运行的电源。

下一步是确定是否需要增强型隔离或基本隔离。输入是主电源，根据 IEC 60950-1，输出为未接地 SELV。从主电源到未接地 SELV 的路径中，IEC 60950-1 中的图 2H 指明需要增强型隔离。请注意，从输出地到大地的连接只需要基本隔离，因而要求的爬电距离和电气间隙更小。但此电源的输出端未连接大地，因此采用了增强型隔离规则。IEC 62368-1 中的表 17 列出了所需的爬电距离，因为此应用需要增强型隔离，所以应将此距离翻倍。表 17 规定，对于材料组 I，需要 4mm 的爬电距离；对于材料组 II，需要 5.6mm 的爬电距离；对于材料组 III，需要 8mm 的爬电距离。这包括增强型隔离的加倍因子。

现在需要确定所需的电气间隙。已知污染等级为 2，需要设计的海拔高度为 5,000m，所以下一步是确定所需的电源瞬态脉冲电压。因为此电源转换器将插入电源插座，所以电源标称相电压高达 265V，瞬态过压类别为 II。从 IEC 60664-1 的表 F.1 中，您可以看到，在过压类别 II 下的额

定脉冲电压为 2.5kV。因为此应用适合采用增强型隔离，如果使用了 IEC 60664-1 表 F.2 的电气间隙通用规则，则需要使用下一个最高值 4kV。但由于这是用于电信应用，因此可使用 IEC 62368-1 中的表 10，该表给出了基本隔离和增强型隔离的值。从表中可以看出，对于 2.5kV 额定脉冲电压，增强型隔离需要 3.6mm 的电气间隙。这比使用 IEC 60664-1 表 F.2 中的 4kV 时得到的 3mm 电气间隙更保守。

现在，您需要应用 IEC 60664-1 表 A.2 中的海拔校正因数。对于 5,000m 海拔，校正因数为 1.48。该应用所需的电气间隙为 5.33mm (3.6mm × 1.48)。

表 6 汇总了爬电距离和电气间隙，及其数值确定所需的参数和对标准中相关表格的引用。

参数	值	来源
电源标称电压	235V _{AC}	应用特定
最大工作电压	400V _{DC}	
海拔	5,000m	
瞬态过压类别	II	
污染等级	2	
绝缘等级	增强型	IEC 60950-1 图 2H
材料组	I II III	元件数据表
爬电距离	4mm (2mm × 2) 5.6mm (2.8mm × 2) 8mm (4mm × 2)	IEC 62368-1 表 17
额定脉冲电压	2.5kV	IEC 60664-1 表 F.1
海拔校正因数	1.48	IEC 60664-1 表 A.2
电气间隙	5.33mm (3.6mm × 1.48)	IEC 62368-1 表 10

表 6. 电信交流/直流前端示例的爬电距离和电气间隙要求汇总。

无法满足所需爬电距离和电气间隙时的例外情况

我们讨论了在无法满足电气间隙要求时，如何对 PCB 应用保形涂层。此外，在无法满足爬电距离时，可以实施 PCB 切口；在无法满足爬电距离和/或电气间隙要求且仅需功能隔离的情况下，执行常规瞬态测试。

有时，PCB 上可能无法满足所需的爬电距离，在 IC 绝缘材料属于材料组 I 时尤其如此，但 PCB 属于材料组 IIIa。例如，电信交流/直流前端示例针对材料组 I 所需的爬电距

离为 4mm，针对材料组 IIIa 所需的爬电距离为 8mm。在某些情况下，爬电距离为 4mm 的封装不支持在 PCB 上使用 8mm 的间距。此时，可以在 PCB 中切割一个凹槽来增大爬电距离。这样做不会对电气间隙产生影响，但可以增大爬电距离（爬电距离是沿绝缘材料表面测量的最短距离）。IEC 60664-1 的第 6.2 节提供了有关增大爬电距离的指南。如果槽的宽度为 X，则根据污染等级，最小值为 X。图 9 是带有切口的 PCB 的横截面，表 7 展示了槽所需的最小宽度（根据污染等级来确定）。

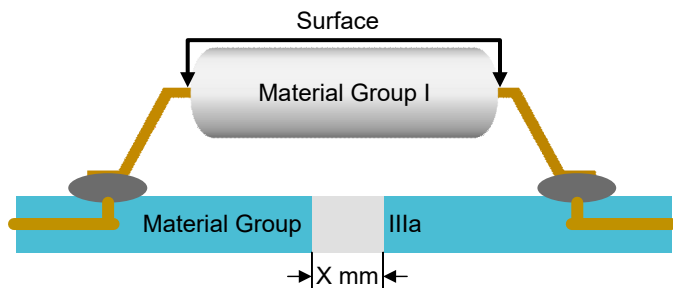


图 9. 通过槽切口来增加 PCB 爬电距离的 PCB 横截面积。

污染等级	最小尺寸
1	0.25mm
2	1.0mm
3	1.5mm

表 7. PCB 上用于增大爬电距离的槽切口的最小宽度。

如仅需要功能隔离，则可以在无法满足所需的爬电距离和电气间隙时，在生产中使用常规瞬态（高电势）测试。本测试在两个特意隔离的导体之间施加高电压，然后测量产生的漏电流。如果漏电流超过某个阈值，则器件会失效。在高电势测试期间施加的电压通常是工作电压的两倍加上 1,000V。

例如，某应用的最大工作电压为 265V_{AC} 时，将在 $2 \times 265 + 1,000 = 1,530\text{V}$ 条件下进行测试。因此，1.5kV 是常用的测试电压。多项标准提供了在无法满足爬电距离和电气间隙时进行高电势测试的指南：IEC 60664-1 中的第 5.2.2.1 和 5.1.3.3 节；IEC 60950-1 中的第 5.3.4 节；IEC 62368-1 中的第 B.4.4 节。

结论

许多标准都涉及爬电距离和电气间隙以及许多技术术语，设计人员需要理解这些术语才能正确地应用这些标准。本

文介绍的流程图和方法可帮助您更好地理解爬电距离、电气间隙和高压间距，并有助于加快开发过程。借助这些知识，您可以在仍遵循安全设计指南的同时提高功率密度。

参考资料

1. **Method for the Determination of the Proof and the Comparative Tracking Indices of Solid Insulating Materials.** IEC 60112. IEC: Geneva, Switzerland, Oct. 27, 2020.
2. **Insulation Coordination for Equipment Within Low-Voltage Supply Systems – Part 1: Principles, Requirements and Tests.** IEC 60664-1. IEC: Geneva, Switzerland, May 26, 2020.
3. **Electrical Installations for Buildings.** IEC 60364. IEC: Geneva, Switzerland.
4. **Audio/Video, Information and Communication Technology Equipment – Part 1: Safety Requirements.** IEC 62368-1. IEC: Geneva, Switzerland, May 26, 2023.
5. **Information Technology Equipment – Safety – Part 1: General Requirements.** IEC 60950-1. IEC: Geneva, Switzerland, May 28, 2013.
6. **Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems – Part 5-1: Safety Requirements – Electrical, Thermal and Energy.** IEC 61800-5. IEC: Geneva, Switzerland, Aug. 31, 2022.
7. **Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems – Part 1: General Requirements.** IEC 62109-1. IEC: Geneva, Switzerland, April 28, 2010.
8. **Generic Standard on Printed Board Design.** IPC-2221B. IPC: Bannockburn, Illinois, November 2012.
9. **Requirements for Power Conversion Devices for the Computer and Telecommunications Industries.** IPC-9592, Revision B. IPC: Bannockburn, Illinois, Jan. 14, 2013.

10. Semiconductor Devices – Part 11: Magnetic and Capacitive Coupler for Basic and Reinforced Isolation. DIN VDE V 0884-11. VDE: Frankfurt, Germany, January 2017.
11. **Optical Isolators**, UL 1577. UL: Northbrook, Illinois, April 25, 2014.
12. Audio/Video, Information and Communication Technology Equipment – Part 1: Safety Requirements. CQC GB4943.1. People's Republic of China Certification and Accreditation Administration: Beijing, China, Aug. 1, 2022.
13. “**隔离相关术语**。”德州仪器 (TI) 文献编号 SLLA353A, 2017 年 9 月。

重要声明: 本文所提及德州仪器 (TI) 及其子公司的产品和服务均依照 TI 标准销售条款和条件进行销售。建议客户在订购之前获取有关 TI 产品和服务的最新和完整信息。TI 对应用帮助、客户的应用或产品设计、软件性能或侵犯专利不负任何责任。有关任何其它公司产品或服务的发布信息均不构成 TI 因此对其的认可、保证或授权。

所有商标均为其各自所有者的财产。

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