参考文献

Application Note

了解高压应用的安全要求和隔离需求（第二部分）：选择 ISO 器件的主要考量因素及阐明电气间隙与爬电距离

Yang Wu, Severi Zhou

摘要

{隔离元件广泛用于高压 (HV) 应用，以保护用户免受危险电压的伤害。然而，了解隔离电压、工作电压、电气间隙、爬电距离和认证等主要考量因素，并选择最合适的隔离器件，通常会令人感到困惑。本应用手册系列可以帮助工程师了解 HV 应用的安全要求和隔离需求，掌握如何设计整个系统的隔离以满足相应的安全标准，并最终选择合适的隔离器件。本系列共包含 3 个部分，第二部分重点讨论选择最合适的 ISO 器件的关键考量因素，以及深入理解 ISO 器件对电气间隙和爬电距离的要求。更多内容可参阅第一部分：*区分不同安全标准并了解安全要求的基本原则*和第三部分：*符合安全法规的太阳能和 ESS 系统设计示例*。}

内容

1 简介.....2
2 选择 ISO 器件的主要考量因素.....2
3 绝缘影响因素.....7
4 确定电气间隙和爬电距离.....13
5 更改爬电距离要求的方法.....19
6 总结.....20
7 参考资料.....21

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

1 简介

了解隔离器件的关键规格和应用安全法规要求，对于帮助工程师纠正在选择最合适隔离器件时的误区至关重要。本应用手册解读了 ISO 器件的关键规格、选择 ISO 器件所需的主要系统级信息，并根据 *IEC 62477-1:2022* 阐明了电气间隙和爬电距离。

“隔离”和“绝缘”常常可以互换使用，隔离是指两个系统或电压电平之间的分隔，而绝缘是指用于实现这种分隔的实际介质。在本应用手册系列中，我们认为二者具有相同的含义。

2 选择 ISO 器件的主要考量因素

1. 从一些示例和常见问题入手

   图 2-1 展示了 TI 关于增强绝缘、基础绝缘和功能绝缘以及不同封装的爬电距离和电气间隙数值的部分示例。

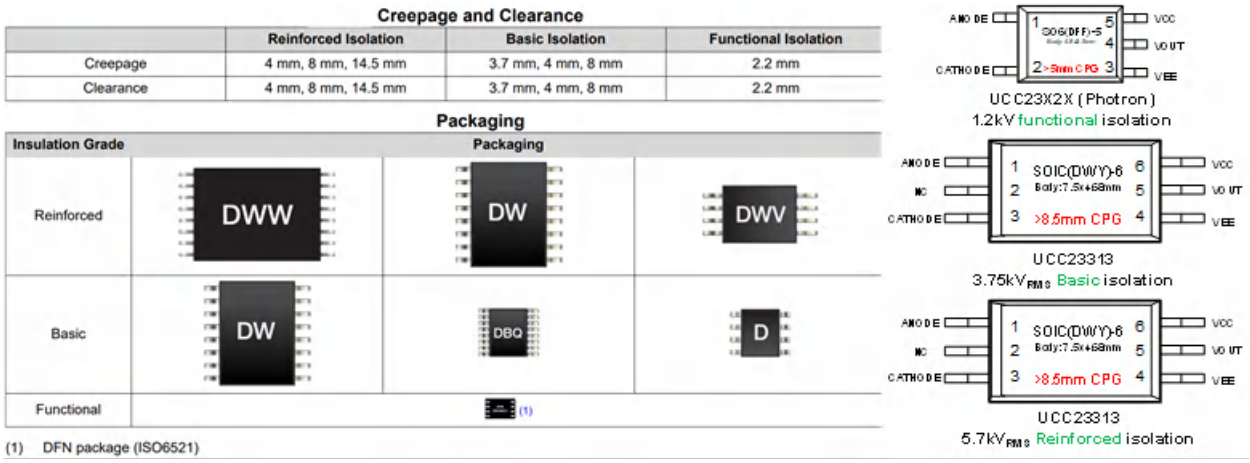

图 2-1. 部分 TI 爬电距离、电气间隙及封装示例

工程师们常有困惑，典型问题包括：

- 哪些因素决定器件采用功能绝缘、基础绝缘还是增强绝缘？
- 为什么绝缘等级相同的器件会采用不同的封装来实现不同的电气间隙和爬电距离规格？
- 如何为客户的安全保护应用选择合适的隔离器？应参考隔离电压、工作电压、认证还是相关标准？最关键的考量因素是什么？

1. 主要绝缘规格

   图 2-2 展示了 ISO 器件主要绝缘规格的示例，表 2-1 列出了相应的解释说明。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

UCC23513
SLUSD31E – OCTOBER 2018 – REVISED AUGUST 2020
TEXAS INSTRUMENTS www.ti.com

6.6 Insulation Specifications Coordination/support safety standard

PARAMETER		TEST CONDITIONS	SPECIFICATION	UNIT
CLR	External clearance(1)	Shortest terminal-to-terminal distance through air	>8.5	mm
CPG	External Creepage(1)	Shortest terminal-to-terminal distance across the package surface	>8.5	mm
DTI	Distance through the insulation	Minimum internal gap (internal clearance)	>17	µm
CTI	Comparative tracking index	DIN EN 60112 (VDE 0303-11); IEC 60112	>600	V
	Material Group	According to IEC 60664-1	I	
	Overvoltage category per IEC 60664-1	Rated mains voltage ≤ 600 V_{RMS}	I-IV	
		Rated mains voltage ≤ 1000 V_{RMS}	I-III	
DIN V VDE 0884-11 (VDE V 0884-11)(2)				
V_{IORM}	Maximum repetitive peak isolation voltage	AC voltage (bipolar)	1500	V_{PK}
V_{IOWM}	Maximum isolation working voltage	AC voltage (sine wave); time-dependent dielectric breakdown (TDDB) test; see Figure 1	1060	V_{RMS}
		DC voltage	1500	V_{DC}
V_{IOTM}	Maximum transient isolation voltage	$V_{TEST} = V_{IOTM}$, t = 60 sec (qualification) $V_{TEST} = 1.2 \times V_{IOTM}$, t = 1 s (100% production)	8000	V_{PK}
V_{IOSM}	Maximum surge isolation voltage(3)	Test method per IEC 62368, 1.2/50 ms waveform, $V_{TEST} = 1.6 \times V_{IOSM} = 12800\ V_{PK}$ (qualification)	8000	V_{PK}
q_{pd}	Component safety standard Apparent charge(4)	Method a: After I/O safety test subgroup 2/3, $V_{ini} = V_{IOTM}$, t_{ini} = 60 s; $V_{pd(m)} = 1.2 \times V_{IORM} = 1800\ V_{PK}$, t_m = 10 s	≤5	pC
		Method a: After environmental tests subgroup 1, $V_{ini} = V_{IOTM}$, t_{ini} = 60 s; $V_{pd(m)} = 1.6 \times V_{IORM} = 2400\ V_{PK}$, t_m = 10 s	≤5	
		Method b1: At routine test (100% production) and preconditioning (type test), $V_{ini} = V_{IOTM}$, t_{ini} = 1 s; $V_{pd(m)} = 1.875 \times V_{IORM} = 2813\ V_{PK}$, t_m = 1 s	≤5	
C_{IO}	Barrier capacitance, input to output(5)	$V_{IO} = 0.4 \times \sin(2\pi ft)$, f = 1 MHz	0.5	pF
R_{IO}	Insulation resistance, input to output(5)	V_{IO} = 500 V, T_A = 25°C	$>10^{12}$	Ω
		V_{IO} = 500 V, 100°C ≤ T_A ≤ 125°C	$>10^{11}$	
		V_{IO} = 500 V at T_S = 150°C	$>10^{9}$	
	Pollution degree		2	
	Climatic category		40/125/21	
UL 1577				
V_{ISO}	Withstand isolation voltage	$V_{TEST} = V_{ISO}$ = 5700 V_{RMS}, t = 60 s (qualification), $V_{TEST} = 1.2 \times V_{ISO}$ = 6840 V_{RMS}, t = 1 s (100% production)	5700	V_{RMS}

图 2-2. ISO 器件的主要绝缘规格示例

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 2-1. ISO 器件的主要绝缘规格解释说明

参数	定义	解释说明	客户主要关注点
协调/支持安全标准			
CLR	电气间隙	通过空气测量的两个导电材料（引脚）之间的最短距离	器件的 CLR 是否满足客户系统的安全要求
CPG	爬电距离	沿绝缘表面测量的两个导电材料（引脚）之间的最短距离	器件的 CPG 是否满足客户系统的安全要求
CTI	相比漏电起痕指数	描述绝缘体表面电荷迁移难易程度的参数，仅与材料本身有关。数值越高，表明材料表面越不易产生漏电。	CTI 等级越高（电压越高），爬电距离要求越低
OVC	过电压类别	根据浪涌保护级别，将市电供电电气设备的运行环境划分为四个过电压类别	器件的 OVC 是否满足客户系统的安全要求
元件安全标准			
V_{IORM}	最大重复峰值隔离电压 (V_{PK})	隔离器件在其使用寿命内必须承受的最大重复电压（峰值）	隔离器件在正常工作条件下必须满足的参数
V_{IOWM}	最大隔离工作电压（V_{RMS} 或 V_{DC}）	隔离器件在其使用寿命内必须承受的最大连续工作电压（rms 或 DC）	
V_{IOTM}	最大瞬态隔离电压 (V_{PK})	隔离器件在其使用寿命内必须承受的最大瞬态电压（通常是非重复的）	一般与实际所需的瞬态隔离电压、工作母线电压及相应的 OVC 要求相关
V_{IOSM}	最大浪涌隔离电压 (V_{PK})	基于 1.2μs/50μs 标准浪涌波形，隔离器件所能承受的最大峰值电压	表征器件对雷击浪涌电压的抗扰能力

2. 区分电气间隙与爬电距离

图 2-3 展示了电气间隙与爬电距离的差异。关于电气间隙，容易理解它是通过空气测得的两个导电材料（引脚）之间的最短距离。但对于爬电距离，需注意它是沿绝缘表面测得的两个导电材料（引脚）之间的最短距离。绝缘表面可以是芯片顶面、侧面或底面。

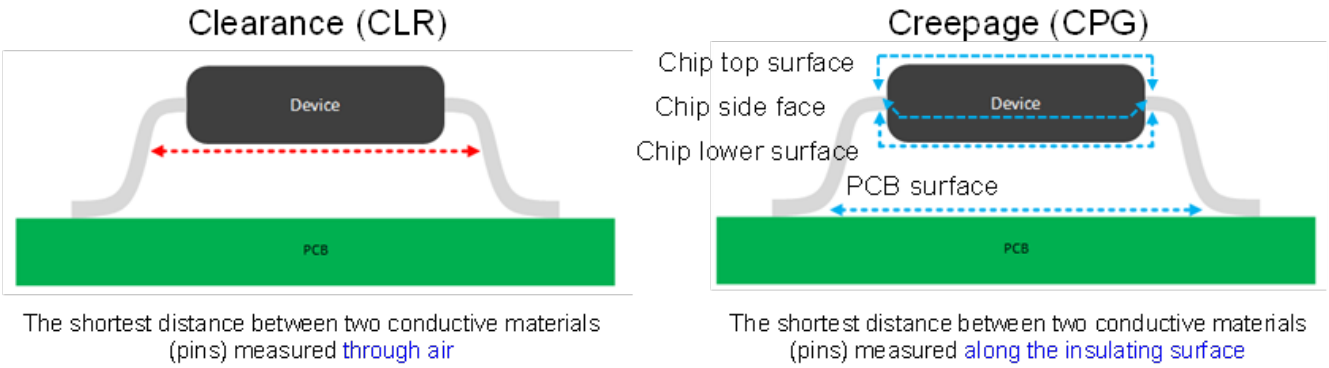

图 2-3. 电气间隙与爬电距离的差异

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3. 区分元件级与系统级绝缘要求

回到第 2.1 节中的常见问题：增强隔离器件是否也意味着客户产品能获得增强绝缘？答案并非总是如此。工程师必须始终区分元件级和系统级的绝缘要求。

- 哪些因素决定器件采用功能绝缘、基础绝缘还是增强绝缘？
  - 绝缘等级与芯片的绝缘材料、绝缘层及其他特性相关。不同的设计将器件划分为功能绝缘、基础绝缘或增强绝缘类型，这进一步定义了器件所能承受的最大隔离电压。
  - 器件符合基础绝缘或增强绝缘标准时存在特定的电压限值，表明器件在相应电压范围内满足对应的绝缘要求。
- 为什么绝缘等级相同的器件会采用不同的封装来实现不同的电气间隙和爬电距离规格？
  - 如上所述，绝缘等级由芯片绝缘材料和层数决定，与实际能实现的电气间隙和爬电距离无关。
- 如何为客户的安全保护应用选择合适的隔离器？应参考隔离电压、工作电压、认证还是相关标准？最关键的考量因素是什么？
  - 最重要的是，不要将系统级安全规范与隔离器件（元件）本身的绝缘等级定义混淆。器件具有增强绝缘等级，并不意味着终端应用系统能够直接满足增强绝缘要求。
  - 客户关注的是隔离器的关键参数（如电气间隙和爬电距离）能否满足其应用系统的安全要求。合规与否取决于工作电压、过电压类别、相对漏电起痕指数、污染等级、海拔以及其他实际因素。
  - 在高压应用中尤为常见的是，客户采用增强绝缘器件来实现系统级的基础绝缘甚至功能绝缘。

图 2-4 展示了 ISO-CAN 设计的 1,500V 太阳能或 ESS 示例。ISO1050 和 ISO1042 都是增强型 ISO-CAN 收发器。然而，ISO1050 的最大隔离工作电压为 1,200V，无法满足 1,500V 系统的隔离要求。

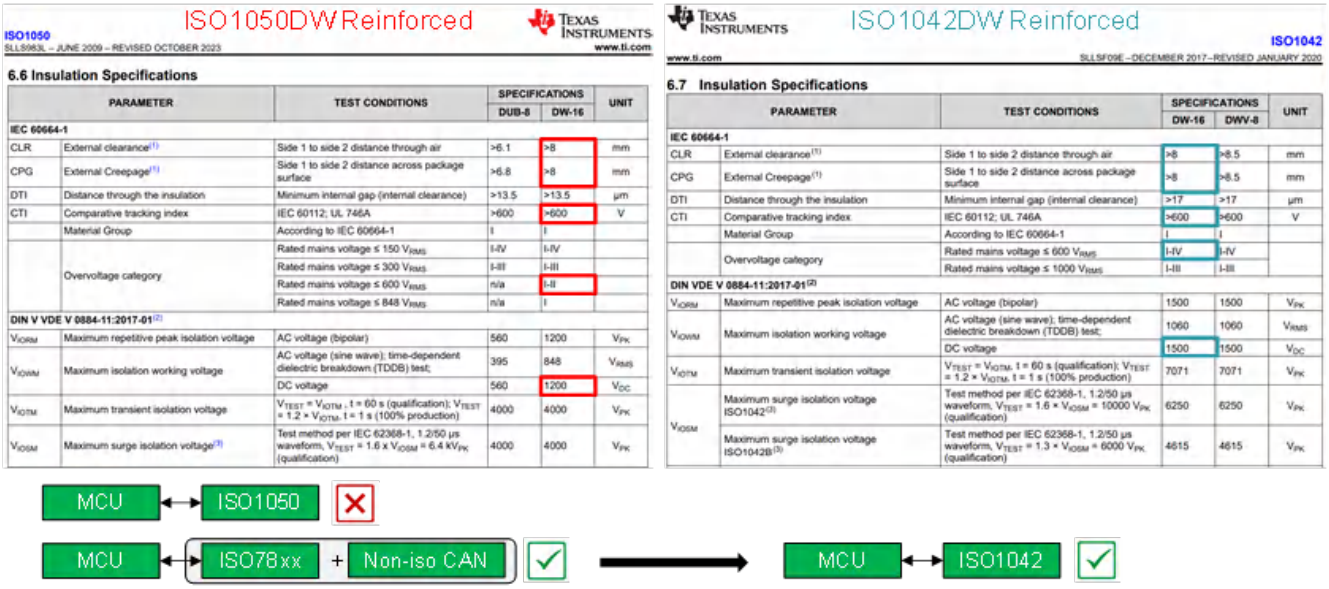

图 2-4. ISO-CAN 的 1,500V 太阳能或 ESS 示例

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4. 选择合适的 ISO 器件的必答问题

表 2-2 列出了选择 ISO 器件时必须回答的问题。第 3 节将详细讨论这些问题，以确定电气间隙和爬电距离。

表 2-2. 选择首选 ISO 器件的必答问题

问题	注释
1.系统电压是多少（交流还是直流）？	用于确定 CLR。
2.OVC 是什么？	
3.是否允许通过某些方法（如 SPD）降低脉冲耐受电压？	
4.污染等级是多少？	
5.EE 可以支持的最大工作海拔是多少？	
6.工作电压是多少（交流还是直流）？	用于确定 CPG。
7.污染等级是多少？是否接受通过灌封来降低污染等级？	
8.CTI 是什么？	

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

3 绝缘影响因素

本节基于 *IEC 62477-1:2022* 讨论绝缘的影响因素。

IEC 62477-1:2022 适用于电力电子转换器系统 (PECS)、任何规定的附件及其用于电力电子转换和电力电子开关的元件，包括其控制、保护、监测和测量方法，主要目的是转换电能，额定系统电压不超过额定系统电压不超过 1,000VAC 或 1,500VDC。

在新能源领域，IEC 62477 适用于电力电子转换器系统中的太阳能、风能、潮汐能等发电应用。光伏、储能系统和充电桩等产品的具体标准在很大程度上引用了这一标准。

请注意，2022 年发布了 IEC 62477-1:2022，以取代之前的版本 IEC 62477-1:2012（及其修订版 IEC 62477-1:2016）。与绝缘及我们的 ISO 产品相关的最重要更新是脉冲耐受电压和暂态过电压与系统电压间的关系。对于 1,500VDC 系统电压，IEC 62477-1:2022 中的脉冲耐受电压比 IEC 62477-1:2012 中的要求高一级。IEC 62477-1:2022 与 IEC 60664-1:2020 的脉冲耐受电压要求保持一致。

根据 IEC 62477-1:2022，存在许多影响因素，该标准针对电气间隙和爬电距离的确定提供了复杂的指南。我们不会讨论所有因素，只关注与常见高压应用最相关的那些因素，包括：

- 系统电压与工作电压
- 过电压类别 (OVC)
- 脉冲耐受电压与暂态过电压
- 绝缘材料组别
- 污染等级
- 高度

1. 系统电压与工作电压

   系统电压是整个系统的额定电压，用于确定绝缘水平和电气间隙。无论工作条件如何，该值均固定不变。例如，ESS 具有 690VAC 和 1,500VDC 系统电压。

   工作电压是在正常和最恶劣工作条件下，局部电路两点之间出现的最大实际电压（直流平均值、交流 RMS 和重复峰值电压），用于确定爬电距离，并会随工作状态而变化。例如，直流母线电容器两端的电压、IGBT 两端的电压。

   通常系统电压与工作电压相同，但也存在例外。例如，太阳能逆变器的系统电压为 1,500V（MPPT 最大输入电压），但工作电压可高达 1,600V（经过升压电路之后，直流母线电容器两端的电压），如图 3-1 所示。

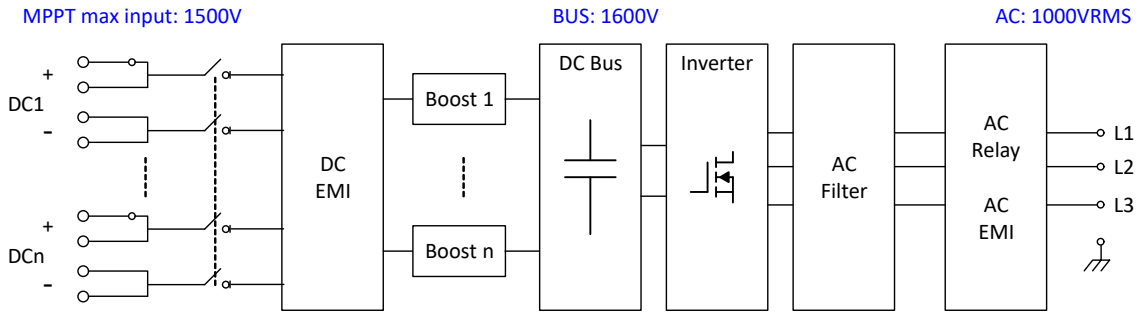

图 3-1. 关于系统电压与工作电压的太阳能逆变器示例

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

2. 过电压类别 (OVC)

根据浪涌保护水平，将市电供电电气设备的工作环境划分为四个过电压类别 (OVC) 区域。图 3-2 展示了 OVC IV 到 OVC I 环境的图解表示。

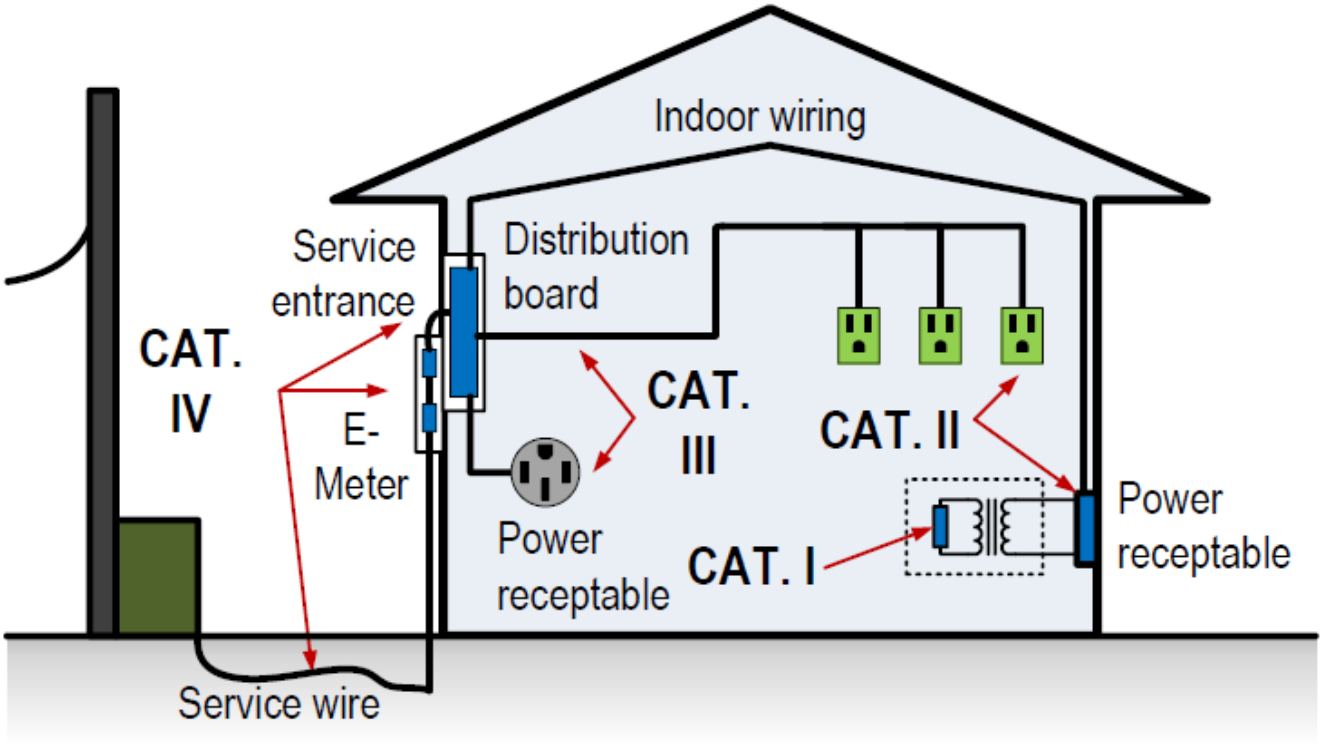

图 3-2. OVC IV 到 OVC I 环境的图解表示

在住宅、商业和工厂环境中，器件从墙上插座获取电力，市电电源通常相对稳定，没有会损坏终端设备的过高电压瞬变。然而，沿配电线路向上游配电盘和建筑主交流进线端移动时，过电压浪涌的风险显著增加。此类危害主要源于外部干扰，包括雷击和公共电网的突然甩负载。

某些应用（如太阳能逆变器和 ESS）直接硬连接到中央配电盘。这些转换器暴露于更高幅值和更大能量的瞬变之中，相比常规插电式电源适配器，需要增强的过压保护。

表 3-1 列出了符合 *IEC 60664-1:2020* 的 OVC。通常在大多数客户应用中，交流侧要求 OVC III，直流侧要求 OVC II。

请注意，在某些情况下，隔离设计难以满足相应 OVC 等级下要求的脉冲耐受电压，客户会通过某些方法降低脉冲耐受电压，例如通过浪涌保护器件 (SPD) 降低 OVC（将在第 4.4 节讨论）。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 3-1. IEC 60664-1:2020 规定的 OVC

过电压类别	相关设备
OVC I	连接到已采取措施将瞬态过压限制到适当低水平的电路的设备。
OVC II	由固定装置供电的耗能设备。此类设备的例子包括家电、便携式工具及其他类似家用负载。
OVC III	固定装置中的设备，以及设备的可靠性和可用性须满足特殊要求的场合。此类设备的例子包括固定装置中的开关，以及永久连接至固定装置的工业用设备。
OVC IV	连接到装置电源进线端的设备。此类设备的示例包括电表和初级过流保护设备。

3. 确定脉冲耐受电压和暂态过电压

图 3-3 展示了使用所考虑电路的系统电压和过电压类别来确定脉冲耐受电压的步骤。系统电压还用于确定市电电源的暂态过电压。

如红线标注所示，在确定市电电源的脉冲耐受电压时，不允许对系统电压进行插值计算。在确定市电电源的暂态过电压时，允许对系统电压进行插值计算。例如，住宅用逆变器的实际系统电压通常为 1,100VDC，必须参照表格中的 1,250VDC 系统电压来确定脉冲耐受电压。不允许在 900VDC 和 1,250VDC 之间插值来得到插值后的脉冲耐受电压。

Table 7 – *Impulse withstand voltage* and *temporary overvoltage* versus *system voltage*

Column 1		2	3	4	5	6
System voltage [a] Step 1 V (see 4.4.7.1.7) Up to and including		*Impulse withstand voltage* Step 2 V				*Temporary overvoltage* [b] V Step 3
		Overvoltage category (OVC)				
		I	II	III	IV	
AC	DC					RMS/peak
50	75	330	500	800	1 500	1 250/1 770
100	150	500	800	1 500	2 500	1 300/1 840
150	225	800	1 500	2 500	4 000	1 350/1 910
300	450	1 500	2 500	4 000	6 000	1 500/2 120
600	900	2 500	4 000	6 000	8 000	1 800/2 550
1 000	1 250	4 000	6 000	8 000	12 000	2 200/3 110
--	1 500[c]	6 000	8 000	10 000	15 000	2 200/3 110

[a] Interpolation of *system voltage* is not permitted when determining the *impulse withstand voltage* for *mains supply*. Interpolation of *system voltage* is permitted when determining the *temporary overvoltage* for *mains supply*.

[b] The RMS values are derived using the formula 1 200 V + U_0 (where U_0 is the *system voltage*, see 4.4.7.1.7) from IEC 60664-1:2020.

[c] For DC values only.

图 3-3. 确定脉冲耐受电压和暂态过电压的步骤

图 3-4 展示了 ISO64xx 过电压类别示例。请注意，并非所有测试条件都已在数据表中列出。设计人员只需关注最大值，例如，在额定市电电压 ≤ 600VRMS 和 ≤ 1,000VRMS 的测试条件下，脉冲耐受电压为 8,000V。尽管数据表未列出市电电压 ≤ 1,500VDC 的测试条件，但其最大隔离工作电压为 1,500VDC，可与 OVC II 下的 8,000V 脉冲耐受电压保持一致。最终，脉冲耐受电压决定了绝缘水平和电气间隙。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Column 1		2	3	4	5	6
System voltage [a] V (see 4.4.7.1.7) Up to and including		*Impulse withstand voltage* V				*Temporary overvoltage* [b] V
		Overvoltage category (OVC)				
		I	II	III	IV	
AC	DC					RMS/peak
50	75	330	500	800	1 500	1 250/1 770
100	150	500	800	1 500	2 500	1 300/1 840
150	225	800	1 500	2 500	4 000	1 350/1 910
300	450	1 500	2 500	4 000	6 000	1 500/2 120
600	900	2 500	4 000	6 000	8 000	1 800/2 550
1 000	1 250	4 000	6 000	8 000	12 000	2 200/3 110
--	1 500[c]	6 000	8 000	10 000	15 000	2 200/3 110

PARAMETER		TEST CONDITIONS	PACKAGE 16-DW	UNIT
IEC 60664-1				
CLR	External clearance(1)	Side 1 to side 2 distance through air	>8.15	mm
CPG	External creepage(1)	Side 1 to side 2 distance across package surface	>8.15	mm
DTI	Distance through the insulation	Minimum internal gap (internal clearance)	>17	µm
CTI	Comparative tracking index	IEC 60112	>600	V
	Material Group	According to IEC 60664-1	I	
	ISO64xx Overvoltage category	Rated mains voltage ≤ 150V_{RMS}	I-IV	
		Rated mains voltage ≤ 300V_{RMS}	I-IV	
		Rated mains voltage ≤ 600V_{RMS}	I-IV	
		Rated mains voltage ≤ 1000V_{RMS}	I-III	
DIN EN IEC 60747-17 (VDE 0884-17)(2)				
V_{IORM}	Maximum repetitive peak isolation voltage	AC voltage (bipolar)	1500	V_{PK}
V_{IOWM}	Maximum isolation working voltage	AC voltage (sine wave); time-dependent dielectric breakdown (TDDB) test.	1061	V_{RMS}
		DC voltage	1500	V_{DC}

图 3-4. ISO64xx 过电压类别示例

4. **绝缘材料组别**

根据 IEC 60112:2020 第 11 条进行测试时，绝缘材料按其相对漏电起痕指数 (CTI) 分为四个组别：

- 绝缘材料组 I：CTI ⩾ 600；
- 绝缘材料组 II：600 > CTI ⩾ 400；
- 绝缘材料组 IIIa：400 > CTI ⩾ 175；
- 绝缘材料组 IIIb：175 > CTI ⩾ 100。

CTI 是用于衡量绝缘材料漏电起痕击穿性能的指标。漏电起痕发生在绝缘材料表面。由于电介质损耗，电介质会发热和升温，从而使电介质分解和碳化。最终，碳化痕迹延伸至电极并导致短路。

材料的 CTI 值与其绝缘性能正相关。CTI 值越高，所需的爬电距离就越小，从而使两个导体的间距可以更短。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

通常在大多数 HV 应用中，要求隔离器件或元件达到 CTI-I。不过，FR4 PCB (CTI IIIa) 最为常用。因此，隔离器件和 PCB 的爬电距离要求可能不同。

5. 污染等级

根据浪涌保护水平，将市电供电电气设备的工作环境划分为四个过电压类别 (OVC) 区域。图 3-2 展示了 OVC IV 到 OVC I 环境的图解表示。

电力电子转换器系统预期生命周期内出现的污染会对绝缘产生影响。应根据图 3-5 针对绝缘施加微环境条件。

污染等级应根据产品规定的环境条件来确定。

通常在大多数客户应用中，要求污染等级达到 2 级。污染等级越低（例如，环境越清洁，可能降低绝缘性能的杂质越少），绝缘要求就越低。

Table 6 – Definitions of *pollution degrees*

Pollution degree	Description
1	No pollution or only dry, non-conductive pollution occurs. The pollution has no influence.
2	Normally, only non-conductive pollution occurs. Occasionally, however, a temporary conductivity caused by condensation is to be expected.
3	Conductive pollution or dry non-conductive pollution occurs which becomes conductive due to condensation which is to be expected.
4	The pollution generates persistent conductivity caused, for example by conductive dust or rain or snow.
NOTE These definitions are from IEC 60664-1:2020.	

图 3-5. 污染等级的定义

6. 高度

电气间隙与海拔相关。对于功能绝缘、基础绝缘或附加绝缘，以及增强绝缘，在海拔 2,000m 至 20,000m 之间使用时，应使用符合 IEC 60664-1:2020 的修正系数来计算电气间隙，如图 3-5 所示。

以往，太阳能逆变器和 ESS 电站通常最高支持 4,000m 海拔。然而，现在越来越多的太阳能逆变器和 ESS 电站将部署在 5,000m 海拔的高原地区。由于隔离设计限制，以前的产品无法支持在 5,000m 海拔全功率运行。如果希望支持在 5,000m 海拔全功率运行，电气间隙要求会更高（修正系数从 1.29 变为 1.48）。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Table E.1 – Correction factor for *clearances* at altitudes between 2 000 m and 20 000 m

Altitude m	Normal barometric pressure kPa	Multiplication factor for *clearances*
2 000	80,0	1,00
3 000	70,0	1,14
4 000	62,0	1,29
5 000	54,0	1,48
6 000	47,0	1,70
7 000	41,0	1,95
8 000	35,5	2,25
9 000	30,5	2,62
10 000	26,5	3,02
15 000	12,0	6,67
20 000	5,5	14,50

Source: IEC 60664-1:2020, Table A.2.

Linear interpolation is permitted. See IEC 60664-1:2020, 5.2.3.4.

图 **3-6.** 电气间隙的海拔修正

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

4 确定电气间隙和爬电距离

本节基于 *IEC 62477-1:2022* 标准阐明电气间隙和爬电距离。

1. 电气间隙

   对于功能绝缘、基础绝缘或附加绝缘，应直接根据图 4-1 确定电气间隙。

   增强绝缘的脉冲耐受电压比基本绝缘高一级。例如，如果基础绝缘的脉冲耐受电压为 6,000V，则增强绝缘的耐受电压应为 8,000V。

   请注意，图中所示为海拔 2,000m 及以下空气中的最小电气间隙。对于海拔超过 2,000m 的应用，需考虑第 3.6 节所述的海拔修正系数。

Table 8 – *Clearances* for *functional insulation*, *basic insulation* or *supplementary insulation* for inhomogeneous fields

Column 1	2	3	4	5	6	7
Impulse withstand voltage [d] (from Table 7) V	*Temporary overvoltage* [f g] (peak) (from Table 7) V	*Working voltage* [f] (recurring peak) [a] V	Minimum *clearances* in air up to 2 000 m above sea level mm			
			Pollution degree			
			1	2	3	4
330	330	260	0,01	0,2 [b, c]	0,8 [c]	1,6 [c]
500	500	400	0,04			
800	710	560	0,10			
1 500	1 270	1 010	0,5	0,5		
2 500	2 220	2 000	1,5	1,5	1,5	
4 000	3 430 [e]	3 090 [e]	3,0	3,0	3,0	3,0
6 000	4 890 [e]	4 410 [e]	5,5	5,5	5,5	5,5
8 000	6 060 [e]	5 460 [e]	8,0	8,0	8,0	8,0
12 000	9 500 [e]	8 550 [e]	14	14	14	14
15 000	11 780 [e]	10 600 [e]	18	18	18	18

图 4-1. 电气间隙确定表

2. **爬电距离**

   功能绝缘、基础绝缘和附加绝缘的爬电距离应根据图 4-2 确定值。

   增强绝缘的爬电距离应为基础绝缘所需距离的两倍。例如，如果基础绝缘的爬电距离为 8mm，则增强绝缘的爬电距离应为 16mm。

   请注意，在所有情况下，相关的爬电距离不得小于所需的电气间隙（即 CPG 始终大于或等于 CLR）。

   请注意，允许对工作电压进行插值计算。例如，此处未列出 1,500V，但可以利用 1,250V 与 1,600V 之间的插值来确定爬电距离（在污染等级 2、CTI I 条件下，对 6.3mm 与 8mm 进行插值）。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Table 9 – *Creepage distances*

Column 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Working voltage (AC RMS or DC mean) [e]	PWBs [a]		Other insulators								
	Pollution degree		*Pollution degree*								
	1	2	1	2				3			
	All material groups	All material groups except IIIb	All material groups	Insulating material group				Insulating material group			
				I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb
V	mm	mm	mm	mm	mm	mm		mm	mm	mm	
≤ 2	0,025	0,04	0,056	0,35	0,35	0,35		0,87	0,87	0,87	
5	0,025	0,04	0,065	0,37	0,37	0,37		0,92	0,92	0,92	
10	0,025	0,04	0,08	0,40	0,40	0,40		1,0	1,0	1,0	
25	0,025	0,04	0,125	0,50	0,50	0,50		1,25	1,25	1,25	
32	0,025	0,04	0,14	0,53	0,53	0,53		1,3	1,3	1,3	
40	0,025	0,04	0,16	0,56	0,80	1,1		1,4	1,6	1,8	
50	0,025	0,04	0,18	0,60	0,85	1,20		1,5	1,7	1,9	
63	0,04	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25		1,6	1,8	2,0	
80	0,063	0,10	0,22	0,67	0,95	1,3		1,7	1,9	2,1	
100	0,10	0,16	0,25	0,71	1,0	1,4		1,8	2,0	2,2	
125	0,16	0,25	0,28	0,75	1,05	1,5		1,9	2,1	2,4	
160	0,25	0,40	0,32	0,80	1,1	1,6		2,0	2,2	2,5	
200	0,40	0,63	0,42	1,0	1,4	2,0		2,5	2,8	3,2	
250	0,56	1,0	0,56	1,25	1,8	2,5		3,2	3,6	4,0	
320	0,75	1,6	0,75	1,6	2,2	3,2		4,0	4,5	5,0	
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0		5,0	5,6	6,3	
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0		6,3	7,1	8,0	
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3		8,0	9,0	10,0	
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0		10,0	11	12,5	[b]
1 000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0		12,5	14	16	
1 250	4,2	6,3	4,2	6,3	9	12,5		16	18	20	
1 600	[c]	[c]	5,6	8,0	11	16		20	22	25	
2 000			7,5	10,0	14	20		25	28	32	
2 500			10,0	12,5	18	25		32	36	40	
3 200			12,5	16	22	32		40	45	50	
4 000			16	20	28	40		50	56	63	
5 000			20	25	36	50		63	71	80	
6 300			25	32	45	63		80	90	100	
8 000			32	40	56	81		100	110	125	
10 000 [d]			40	50	71	100		125	140	160	

Interpolation is permitted.

图 4-2. 爬电距离确定表

3. **确定 CLR 和 CPG 的简化流程图**

根据 IEC 62477-1:2022，确定电气间隙和爬电距离的准则非常复杂，因为需要考虑所有场景。对于大多数高压应用，如太阳能逆变器和 ESS，可简化为图 4-3 和图 4-4 所示。

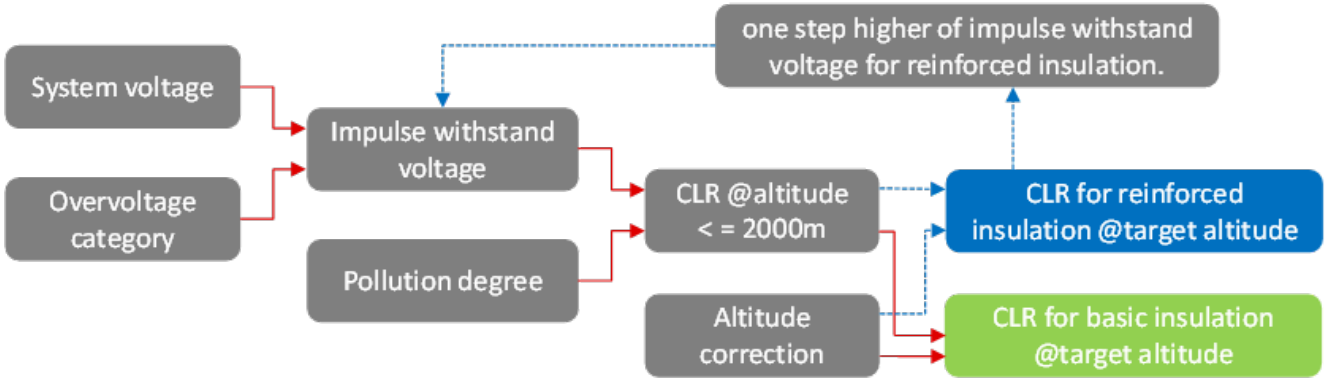

图 4-3. 确定 CLR 的简化流程图

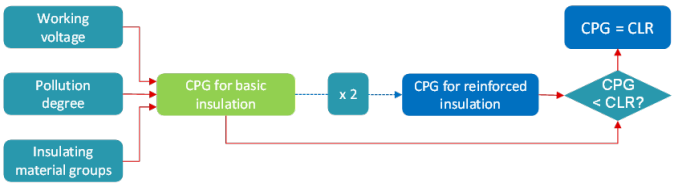

图 4-4. 确定 CPG 的简化流程图

4. **CLR 和 CPG 确定示例**

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

图 4-5 展示了 1,500VDC 太阳能逆变器或 ESS 的电气间隙逐步确定示例。

图 4-6 展示了爬电距离的逐步确定示例。在第 4 步中，插值计算如下：(8 - 6.3)/(1,600 - 1,250) × (1,500 - 1,250) + 6.3 = 7.514mm。

表 4-1 汇总了 1,500VDC、OVC II、CTI-I、污染等级 2 条件下的结果。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Table 7 – *Impulse withstand voltage* and *temporary overvoltage* versus *system voltage*

Column 1		2	3	4	5	6
System voltage [a] V (see 4.4.7.1.7) Up to and including		*Impulse withstand voltage* V				*Temporary overvoltage* [b] V
		Overvoltage category (OVC)				
		I	II Step 2	III	IV	
AC	DC					RMS/peak
50	75	330	500	800	1 500	1 250/1 770
100	150	500	800	1 500	2 500	1 300/1 840
150	225	800	1 500	2 500	4 000	1 350/1 910
300	450	1 500	2 500	4 000	6 000	1 500/2 120
600	900	2 500	4 000	6 000	8 000	1 800/2 550
1 000	1 250	4 000	6 000	8 000	12 000	2 200/3 110
--	1 500[c] Step 1	6 000	8 000 Step 3	10 000	15 000	2 200/3 110

Table 8 – *Clearances* for *functional insulation*, *basic insulation* or *supplementary insulation* for inhomogeneous fields

Column 1	2	3	4	5	6	7
Impulse withstand voltage [d] (from Table 7) V	*Temporary overvoltage* [f g] (peak) (from Table 7) V	*Working voltage* [f] (recurring peak) [a] V	Minimum *clearances* in air up to 2 000 m above sea level mm			
			Pollution degree			
			1	2	3	4
330	330	260	0,01	0,2 [b, c]	0,8 [c]	1,6 [c]
500	500	400	0,04			
800	710	560	0,10			
1 500	1 270	1 010	0,5	0,5		
2 500	2 220	2 000	1,5	1,5	1,5	
4 000	3 430 [e]	3 090 [e]	3,0	3,0	3,0	3,0
6 000 Step 4	4 890 [e]	4 410 [e]	5,5	5,5 Basic	5,5	5,5
8 000	6 060 [e]	5 460 [e]	8,0	8,0	8,0	8,0
12 000	9 500 [e]	8 550 [e]	14	14	14	14
15 000 Step 5	11 780 [e]	10 600 [e]	18	18 Reinforced		18

Table E.1 – Correction factor for *clearances* at altitudes between 2 000 m and 20 000 m

Altitude m	Normal barometric pressure kPa	Multiplication factor for *clearances*
2 000	80,0	1,00
3 000	70,0	1,14
4 000	62,0	Step 6 1,29
5 000	54,0	1,48
6 000	47,0	1,70
7 000	41,0	1,95
8 000	35,5	2,25
9 000	30,5	2,62
10 000	26,5	3,02
15 000	12,0	6,67
20 000	5,5	14,50

图 4-5. CLR 确定步骤

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

Table 9 – *Creepage distances*

Column 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Working voltage (AC RMS or DC mean) [e]	PWBs [a]		Other insulators								
	Pollution degree			Step 2	*Pollution degree*						
	1	2	1	2				3			
	All material groups	All material groups except IIIb	All material groups	Insulating material group				Insulating material group			
				I	II	IIIa	IIIb	I	II	IIIa	IIIb
V	mm	mm	mm	mm	Step 3	mm		mm	mm	mm	
≤ 2	0,025	0,04	0,056	0,35	0,35	0,35		0,87	0,87	0,87	
5	0,025	0,04	0,065	0,37	0,37	0,37		0,92	0,92	0,92	
10	0,025	0,04	0,08	0,40	0,40	0,40		1,0	1,0	1,0	
25	0,025	0,04	0,125	0,50	0,50	0,50		1,25	1,25	1,25	
32	0,025	0,04	0,14	0,53	0,53	0,53		1,3	1,3	1,3	
40	0,025	0,04	0,16	0,56	0,80	1,1		1,4	1,6	1,8	
50	0,025	0,04	0,18	0,60	0,85	1,20		1,5	1,7	1,9	
63	0,04	0,063	0,20	0,63	0,90	1,25		1,6	1,8	2,0	
80	0,063	0,10	0,22	0,67	0,95	1,3		1,7	1,9	2,1	
100	0,10	0,16	0,25	0,71	1,0	1,4		1,8	2,0	2,2	
125	0,16	0,25	0,28	0,75	1,05	1,5		1,9	2,1	2,4	
160	0,25	0,40	0,32	0,80	1,1	1,6		2,0	2,2	2,5	
200	0,40	0,63	0,42	1,0	1,4	2,0		2,5	2,8	3,2	
250	0,56	1,0	0,56	1,25	1,8	2,5		3,2	3,6	4,0	
320	0,75	1,6	0,75	1,6	2,2	3,2		4,0	4,5	5,0	
400	1,0	2,0	1,0	2,0	2,8	4,0		5,0	5,6	6,3	
500	1,3	2,5	1,3	2,5	3,6	5,0		6,3	7,1	8,0	
630	1,8	3,2	1,8	3,2	4,5	6,3		8,0	9,0	10,0	
800	2,4	4,0	2,4	4,0	5,6	8,0		10,0	11	12,5	[b]
1 000	3,2	5,0	3,2	5,0	7,1	10,0		12,5	14	16	
1 250	4,2	6,3	4,2	6,3	9	12,5		16	18	20	
1 600	[c] Step 1	[c]	5,6	8,0	Step 4 11	16		20	22	25	
2 000			7,5	10,0	14	20		25	28	32	
2 500			10,0	12,5	18	25		32	36	40	
3 200			12,5	16	22	32		40	45	50	
4 000			16	20	28	40		50	56	63	
5 000			20	25	36	50		63	71	80	
6 300			25	32	45	63		80	90	100	
8 000			32	40	56	81		100	110	125	
10 000 [d]			40	50	71	100		125	140	160	

Interpolation is permitted.

图 4-6. CPG 确定步骤

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

表 4-1. 电气间隙和爬电距离汇总 1

1,500VDC、OVC II、CTI-I、污染等级 2				
	电气间隙		爬电距离	
高度	基础型	增强型	基础型	增强型
4000m	10.32mm (8*1.29)	18.06mm (14*1.29)	7.514mm 10.32mm	15.028mm (7.514*2) 18.06mm
5000m	11.84mm (8*1.48)	20.72mm (14*1.48)	7.514mm 11.84mm	15.028mm (7.514*2) 20.72mm

在某些情况下，隔离设计可能难以满足相应 OVC 等级下的脉冲耐受电压要求。一种实用的方法是将脉冲耐受电压降低一级，例如通过增加 SPD 将 8,000V 降至 6,000V（即从 OVC II 降至 OVC I），以降低隔离设计难度。更多示例可参考 *IEC 62477-1:2022* 中的附录 I（资料性）*过电压类别*降低示例。

表 4-2 汇总了将 OVC II 降至 OVC I 的结果。此时可见，在海拔 5,000m 时，基础绝缘要求电气间隙与爬电距离均为 8.14mm。现在，TI 最新的数字隔离器 ISO64xx 现已支持此要求，如图 4-7 所示。

表 4-2. 电气间隙和爬电距离汇总 2

1,500VDC、OVC I、CTI-I、污染等级 2				
	电气间隙		爬电距离	
高度	基础型	增强型	基础型	增强型
4000m	7.095mm (5.5*1.29)	10.32mm (8*1.29)	7.514mm	15.028mm (7.514*2)
5000m	8.14mm (5.5*1.48)	11.84mm (8*1.48)	7.514mm 8.14mm	15.028mm (7.514*2)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	PACKAGE 16-DW	UNIT
IEC 60664-1				
CLR	External clearance(1)	Side 1 to side 2 distance through air	>8.15	mm
CPG	External creepage(1)	Side 1 to side 2 distance across package surface	>8.15	mm

图 4-7. ISO64xx 电气间隙与爬电距离

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

5 更改爬电距离要求的方法

爬电距离定义为沿绝缘表面测量的两个导电材料（引脚）之间的最短距离。这意味着，在某些情况下如果爬电距离不足，可以对其进行更改。

图 5-1 展示了通过 PCB 开槽来增加爬电距离的方法。例如，如果为了节省成本而使用 CTI IIIa 或 CTI IIIb PCB 替代 CTI I 或 CTI II PCB，则 PCB 的爬电距离可能不够，此时就需要通过 PCB 开槽来增加爬电距离。

请注意，PCB 开槽只能增加 PCB 的爬电距离，而无法增加隔离器件或元件的爬电距离。

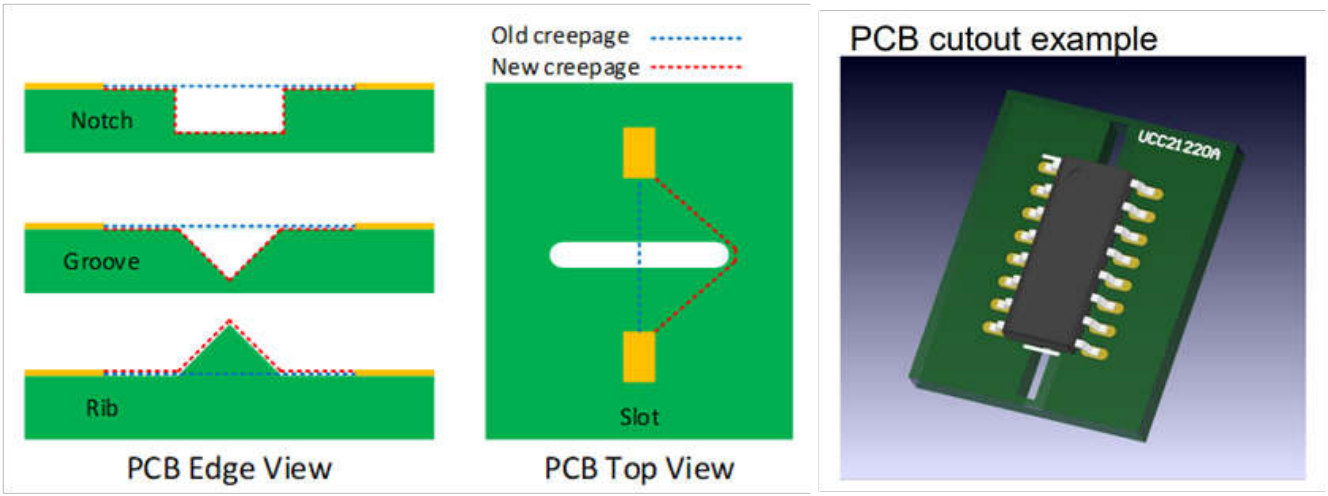

图 5-1. 用于增加爬电距离的 PCB 开槽方法

图 5-2 展示了用于降低 PCB 污染等级的 PCB 敷形涂层方案，该方案可降低爬电距离要求。

这并未消除导电材料（引脚）之间的空气间隙，意味着绝缘形式仍为空气绝缘。在此类保护下，图 4-1 和图 4-2 中规定的污染等级 1 的电气间隙和爬电距离标准适用。值得注意的是，只有污染等级可以降低，而电气间隙值无法减小。此外，只有满足污染等级降级条件的 1 类涂层，才能根据污染等级 1 来减小所需的爬电距离。涂覆质量差（如存在针孔、气泡或覆盖不全）会导致安全合规性失效，此时仍应采用原污染等级进行计算。

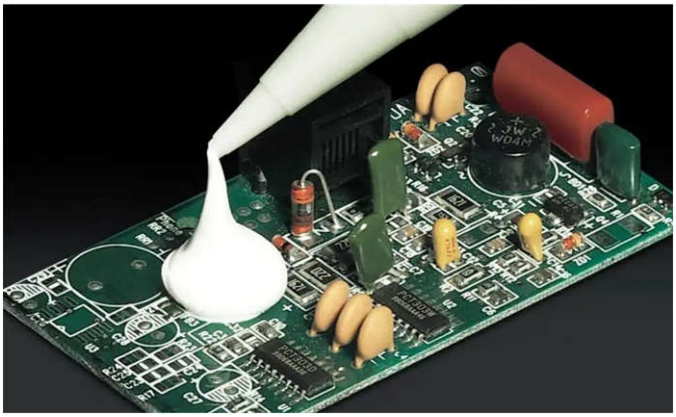

图 5-2. 用于降低污染等级的 PCB 敷形涂层

当空气绝缘设计无法满足规定的电气间隙和爬电距离限值时，可采用图 5-3 中所示的灌封方法来实现固体绝缘。

灌封属于 2 类保护（定义见 IEC 60664-3:2016），即完全以固体绝缘材料替代空气绝缘。因此，图 4-1 和图 4-2 中所述的常规电气间隙和爬电距离要求不再适用。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

一般来说，灌封能提供比敷形涂层更高的绝缘性能，但它涉及额外的设计工作、复杂的制造流程，并且成本会显著增加。此外，固体绝缘的合规性必须通过权威机构（如 VDE 和 TUV）的官方认证测试来全面验证，例如交流/直流耐压测试、脉冲耐受电压测试、局部放电测试和热循环测试，而非仅依赖理论计算。

因此，除非没有其他备选设计方案，否则设计人员倾向于选用本身即满足绝缘规格的隔离器和元件，而非采用灌封方案。

图 5-3. 实现固体绝缘的灌封方法

6 总结

许多工程师在选择合适的隔离元件和确定所需的电气间隙与爬电距离时常常感到困难。本应用手册深入解析了隔离器件的关键绝缘特性，分析了影响绝缘性能的因素，并提供了计算电气间隙和爬电距离的分步指南。

Copyright © 2026 Texas Instruments Incorporated

7 参考资料

1. 德州仪器 (TI)，*选择 ISO 器件的主要考量因素及阐明电气间隙与爬电距离*，应用手册。
2. 德州仪器 (TI)，*符合安全法规的太阳能和 ESS 系统设计示例*，应用手册。
3. 德州仪器 (TI)，*数字隔离器设计指南* 应用手册。
4. 德州仪器 (TI)，*关于本隔离术语表*，应用手册。
5. 德州仪器 (TI)，*ISO644x 通用型、基础型和增强型四通道数字隔离器*，数据表。
6. 德州仪器 (TI)，*UCC23513 4A 拉电流、5A 灌电流、5.7kVRMS 光兼容单通道隔离式栅极驱动器*，数据表。
7. 德州仪器 (TI)，*ISO1050 隔离式 CAN 收发器*，数据表。
8. 德州仪器 (TI)，*具有 70V 总线故障保护功能和灵活数据速率的 ISO1042 隔离式 CAN 收发器*，数据表。
9. 德州仪器 (TI)，*ISO774x 高速、EMC 性能优异的增强型和基础型四通道数字隔离器*，数据表。
10. 德州仪器 (TI)，*ISO7842x 高性能、8,000VPK 增强型四通道数字隔离器*，数据表。
11. IEC，*IEC 60747-17:2020*。
12. VDE，*VDE 0884-17:2021-10*。
13. UL，*UL 1577*。
14. IEC，*IEC 62368-1:2023*。
15. IEC，*IEC 61010-1:2010*。
16. IEC，*IEC 60601-1:2025 SER*。
17. 中华人民共和国国家标准 *GB 4943.1-2022*。
18. IEC，*IEC 62477-1:2022*。
19. IEC，IEC 62477-2:2018。
20. IEC，*IEC 62109-1:2010*。
21. IEC，*IEC 60950-1:2005+AMD1:2009+AMD2:2013*。
22. VDE，*VDE 0884-5:2015-11*。
23. IEC，*IEC 60747-5-5:2020*。
24. IEC，*IEC 60664-1:2020*。
25. UL，UL 60950-1。

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