

Saleem Marwat

摘要

绝缘穿透距离 (DTI) 是评估数字隔离器高压特性的一个关键参数。由于数字隔离器使用的是带薄膜绝缘层的电容和电感隔离技术，与光耦合器和其他传统隔离器相比，市场上对更薄的电介质和由此产生的 DTI 存在很多误解。在本文中，我们探讨了几个国际安全标准中绝缘相关条款，并讨论了数字隔离器如何在 DTI 很薄的情况下获得基本和增强型绝缘等级认证。

内容

1 引言.....	2
2 固体绝缘.....	2
3 为什么高压组件的国际标准具有最小 DTI 要求.....	2
4 绝缘材料的质量.....	3
5 各种 IEC 标准及其 DTI 要求.....	3
5.1 IEC 60747-17.....	3
5.2 UL 1577.....	3
5.3 IEC 62368-1.....	3
5.4 IEC 60601-1.....	4
5.5 IEC 61010-1.....	5
6 结论.....	6
7 参考文献.....	6

插图清单

图 1-1. 间隙、爬电距离和 DTI.....	2
--------------------------	---

表格清单

表 4-1. 用于高压隔离的常用绝缘体.....	3
表 5-1. 电源瞬态电压.....	3
表 5-2. 提供患者保护措施的最小爬电距离和空气间隙.....	4
表 5-3. 构成保护措施的固体绝缘的测试电压.....	5
表 5-4. 过电压 II 类超过 300V 的电源电路的间隙和爬电距离.....	5
表 5-5. 过电压类别 II 超过 300V 的电源电路中的固体绝缘测试电压.....	5

商标

所有商标均为其各自所有者的财产。

1 引言

在高压安全认证方面，以下三个距离对于确定半导体组件的绝缘等级至关重要：间隙、爬电距离和 DTI。间隙是两个导电部件之间在空气中的最短距离，爬电距离是两个导电部件之间穿过隔离屏障且沿固体绝缘材料表面的最短距离。另一方面，DTI 是介于两个导电部件之间的绝缘材料内的最短距离。换言之，DTI 是在固体绝缘内部的距离，而间隙和爬电距离是固体绝缘外部的距离。有关间隙、爬电距离和 DTI 的典型描述，请参阅图 1-1。

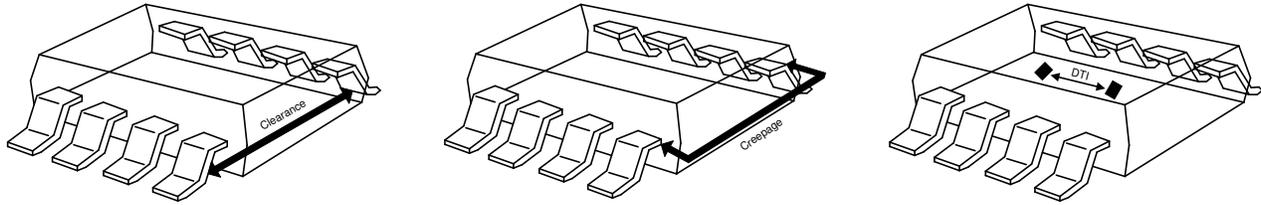


图 1-1. 间隙、爬电距离和 DTI

市场上对数字隔离器的 DTI 要求存在很多误解。这些误解是由国际终端设备标准的复杂性以及标准中对 DTI 要求和例外规定的多项条款造成的混淆引起的。一些设备制造商认为，其设备标准的某些条款中所概述的大 DTI 要求严格适用于数字隔离器；但实际并非如此。与光耦合器和其他传统隔离器相比，数字隔离器使用更薄但更坚固的绝缘材料，因此与传统隔离器相比，许多国际标准对具有薄 DTI 的隔离器规定了不同的测试标准。

2 固体绝缘

固体绝缘是指完全由固体材料组成的绝缘。固体绝缘材料的内在特性直接影响其绝缘性能。由于固体绝缘的介电强度远大于空气的介电强度，因此固体绝缘的穿透距离远小于间隙，从而导致高电应力。在绝缘系统中，电极和绝缘之间以及不同绝缘层之间可能会出现间隙或空隙。在电压远低于击穿电平时，这些空隙会发生局部放电，从而影响固体绝缘的使用寿命。与空气相反，固体绝缘不是可再生的绝缘介质，因此，偶尔出现的高压峰值会对固体绝缘产生非常具有破坏性且不可逆转的影响。在使用过程中以及常规高压测试期间可能会发生这种情况。设备的物理和地理位置可显著影响绝缘系统。需要考虑海拔高度、温度、振动和湿度等环境因素，以确保绝缘在设备的使用寿命期间保持可靠。

3 为什么高压组件的国际标准具有最小 DTI 要求

许多国际电工委员会 (IEC) 系统级安全标准对于提供高压绝缘的组件都具有最小 DTI 要求。这是因为介电厚度和质量决定了隔离器的电场耐受能力。历史上，光耦合器一直在高压应用中用作隔离器，因此许多安全标准最终要求更厚的 DTI，例如最小 0.4mm、0.6mm 或 1mm，以提高额定工作电压。这些 DTI 厚度要求与光耦合器和其他传统隔离器使用的低质量绝缘材料的耐压能力相对应。由于数字隔离器使用较新的隔离技术和高质量的介电材料，例如二氧化硅 (SiO₂)，因此它们不需要很厚就能提供高质量的绝缘。

4 绝缘材料的质量

并非所有绝缘体都是一样的。绝缘质量取决于其介电强度。如表 4-1 所示，空气的介电强度较低，而环氧树脂、硅填充模塑料、聚酰亚胺和 SiO₂ 等固体绝缘体的介电强度依次增高。SiO₂ 是一种出色的绝缘体，因为它与聚酰亚胺和其他聚合物绝缘体不同，基于 SiO₂ 的绝缘体在暴露于湿气环境时不会降解。基于 SiO₂ 的绝缘体在组件的寿命期内往往具有很高的工作电压。

表 4-1. 用于高压隔离的常用绝缘体

绝缘体	介电强度
空气	~ 1V _{RMS} /μm
环氧树脂	~ 20V _{RMS} /μm
硅填充模塑料	~ 100V _{RMS} /μm
聚酰亚胺	~ 300V _{RMS} /μm
SiO ₂	~ 500V _{RMS} /μm

5 各种 IEC 标准及其 DTI 要求

下面讨论一些通用的国际标准及其相关条款，这些标准及条款允许 DTI 超薄的数字隔离器通过基本和增强型绝缘等级的认证。组件和标准均包含在下述讨论中。

5.1 IEC 60747-17

这项半导体元件标准面向磁性耦合器和电容耦合器，以符合基本和增强绝缘性能。该标准对半导体元件进行了一系列环境和高压测试，并提供了基本绝缘或增强绝缘标识。该标准不使用 DTI 作为基本或增强评级的标准。此外还有其他标准，例如 10kV_{PEAK} 浪涌和绝缘寿命测试，用于确定元件是否可声称具有基本或增强型绝缘等级。

5.2 UL 1577

UL 1577 是美国保险实验室 (Underwriters Laboratories) 对光隔离器的安全标准，但也用于认证数字隔离器等半导体组件。该标准基于多项环境和介电耐受电压测试将组件识别为单一保护或双重保护。该标准没有规定最小 DTI 认证标准，根据绝缘材料的介电强度对组件进行评级。

5.3 IEC 62368-1

IEC 62368-1 版本 3.0 是一项国际标准，规定了音频/视频、信息和通信技术设备的安全要求。该标准的第 5.4.4 条是关于固体绝缘的。尽管第 5.4.4.2 子条款规定基本绝缘没有最小 DTI 要求，增强型绝缘的 DTI 最小为 0.4mm，但在下述专门规定半导体器件固体绝缘要求的第 5.4.4.4 子条款中，该标准明确指出，只要增强型组件通过了第 5.4.7 条的型式试验和检验标准 (基本上是对三个样片进行热循环序列)，则无最小 DTI 要求。热循环之后，对一个样片进行第 5.4.9.1 条规定的介电强度测试，但试验电压应乘以 1.6。换句话说，在已经很高的瞬态电压 (例如，可能为 4kV_{PEAK}、6kV_{PEAK} 或 8kV_{PEAK}) 上增加了 60% 的裕度。其他两个样片在经受额外的湿度调节测试后，以 60% 的裕度进行相同的高压测试。

例如，如果我们使用最小爬电距离和间隙为 8mm、材料组 I 塑封材料的半导体元件，并尝试确定其在海拔高度高达 2000m 时的最大基本绝缘工作电压和增强型绝缘工作电压，那么我们需要翻到 IEC 62368-1 的表 12，表 5-1 显示了该表的一部分。在本文中，我们假设预期的终端设备在过电压类别 II 和污染等级 2 的环境中运行。过电压类别 II 设备是指由建筑物配线供电的可插拔或永久连接的设备。污染等级 2 是指除偶尔出现由冷凝引起的暂时导电外，平时不导电的污染环境。

表 5-1. 电源瞬态电压

交流电源电压高达并包括 (V _{RMS})	电源瞬态电压 (V _{PEAK})			
	过电压类别			
	I	II	III	IV
50	330	500	800	1500
100	500	800	1500	2500
150	800	1500	2500	4000
300	1500	2500	4000	6000

表 5-1. 电源瞬态电压 (continued)

交流电源电压高达并包括 (V _{RMS})	电源瞬态电压 (V _{PEAK})			
	过电压类别			
	I	II	III	IV
600	2500	4000	6000	8000

根据 IEC 62368-1 的表 5-1，交流电源电压和半导体组件的工作电压可高达 600V_{RMS}，但可以参考 IEC 60664-1 以达到标准允许的更高工作电压。表 5-1 显示了基本工作电压相对于瞬态电压的关系。对于过电压类别 II，600V_{RMS} 工作电压对应于基本绝缘的 4000V_{PEAK} 瞬态电压。对于增强型绝缘，瞬态电压必须提高一级至 6000V_{PEAK}。因此，对瞬态电压应用 60% 裕度便可得到 9600V_{PEAK} 或 6789V_{RMS} 电压电平，3 个样片在热循环和湿度调节测试后必须满足这个电压电平才能按照 IEC 62368-1 要求获得 600V_{RMS} 增强型工作电压。同样地，对于更高的工作电压，参考 IEC 60664-1 的表 F.1，其下一个高工作电压为 1000V_{RMS} 或 V_{DC}，且对应的过电压类别 II 冲击耐受电压为 6000V_{PEAK}，用于基本绝缘。

因此，只要半导体器件在热循环和湿度调节测试后能够通过 6789V_{RMS} 耐压测试，便可以要求获得 600V_{RMS} 增强型绝缘和 1000V_{RMS} 基本绝缘。为了检查间隙和爬电距离要求是否也得到满足，翻到该标准的表 14 和表 17。根据表 14，对于最小间隙为 8mm 的组件，其增强型绝缘和基本绝缘分别要求 6000V_{PEAK} 和 8000V_{PEAK} 耐受电压。同样地，表 17 允许爬电距离为 8mm 的组件具有 800V_{RMS} 的最高工作电压，用于增强型绝缘，1600V_{RMS} 的最高工作电压，用于基本绝缘。正如之前所见，表 5-1 根据组件的过电压类别和介电强度进一步限制工作电压，并应用 60% 裕度。

总之，只要半导体元件能够满足热循环这一严格标准，并且与额定电压相比耐压性高出 60%，对于基本或增强型绝缘等级，则不需要最小 DTI 要求。

5.4 IEC 60601-1

IEC 60601-1 版本 3 是一项国际标准，对医用电气设备的基本安全和基本性能提出了通用要求。该标准有自己的医学术语，其中绝缘称为保护措施，基本绝缘是指采用一种保护措施，增强型绝缘是指采用两种保护措施。对正在接受医用电气设备的保护对象进一步划分为：手术者或患者。两种患者保护措施 (2 MOPP) 提供最高级别保护，相当于对患者实施增强型绝缘。

该标准中的最低 DTI 要求也与 IEC 62368-1 有点相似。虽然第 8.8.2 条要求在超过 71V 的峰值工作电压下，辅助或增强型绝缘的最低 DTI 为 0.4mm，但第 8.9.3 条还规定，如果固体绝缘元件通过了热循环、湿度调节测试并符合第 8.8.3 条规定的高交流耐受电压（测试电压乘以 1.6 除外），则可忽略上述 DTI 要求。

以前述描述的半导体器件为例，我们首先确定在 8mm 最小爬电距离和间隙距离下可能的最大工作电压。为此，参考 IEC 60601-1 的表 12。表 5-2 显示了表 12 的一部分。

表 5-2. 提供患者保护措施的最小爬电距离和空气间隙

工作电压 V _{DC}	工作电压 V _{RMS}	提供一种 MOPP 的间隙		提供两种 MOPP 的间隙	
		爬电距离 (mm)	间隙 (mm)	爬电距离 (mm)	间隙 (mm)
17	12	1.7	0.8	3.4	1.6
43	30	2	1	4	2
85	60	2.3	1.2	4.6	2.4
177	125	3	1.6	6	3.2
354	250	4	2.5	8	5
566	400	6	3.5	12	7

因此，在最小爬电距离为 8mm 的情况下，限制该组件的工作电压最大为 354V_{DC} 或 250V_{RMS}，以提供两种患者保护措施。接着，确定组件在热循环和湿度预处理后必须通过的固体绝缘介电强度。第 8.8.3 条参考 IEC60601 - 1 的表 6 (表 5-3 显示了一部分) 来解决这个问题。

表 5-3. 构成保护措施的固体绝缘的测试电压

峰值工作电压 (U) V _{PEAK}	峰值工作电压 (U) V _{DC}	交流测试电压 (V _{RMS})			
		患者保护措施			
		电源部分的保护		次级电路的保护	
		一种 MOPP	两种 MOPP	一种 MOPP	两种 MOPP
U < 42.4	U < 60	1500	3000	500	1000
42.4 < U ≤ 71	60 < U ≤ 71	1500	3000	750	1500
71 < U ≤ 184	71 < U ≤ 184	1500	3000	1000	2000
184 < U ≤ 212	184 < U ≤ 212	1500	3000	1000	2000
212 < U ≤ 354	212 < U ≤ 354	1500	4000	1500	3000

该组件必须通过 6400V_{RMS} (= 1.6 x 4000V_{RMS}) 的介质耐受电压, 才能从主电路中获得具有 2 种 MOPP 的 250V_{RMS} 或 354V_{PEAK} 工作电压。

5.5 IEC 61010-1

IEC 61010-1 版本 3 是一项国际标准, 对测量、控制和实验室使用的电气设备提出了通用安全要求。第 6.7.2.1 条 (IEC 61010-1 的表 4) 规定了过电压 II 类高达 300V (RMS 或 DC) 的电源电路的爬电距离和间隙距离要求。对于过电压 II 类超过 300V 的电压, 将参考该标准的表 K.2。表 5-4 显示了 IEC 61010-1 中表 K.2 的一部分。

表 5-4. 过电压 II 类超过 300V 的电源电路的间隙和爬电距离

线与中性点电压 AC RMS 或 DC	间隙值	爬电距离值		
		其他绝缘材料		
		污染等级 2		
		材料组 I	材料组 II	材料组 III
V	mm	mm	mm	mm
> 300 ≤ 600	3.0	3.0	4.3	6.0
> 600 ≤ 1000	5.5	5.5	7.2	10.0

注意, 上表中显示的爬电距离值适用于基本绝缘。对于增强型绝缘, 爬电距离值必须翻倍。因此, 根据此表, 具有 8mm 的最小爬电距离和间隙且属于材料组 I 的半导体组件示例可以要求高达 600V (RMS 或直流) 的增强型绝缘和 1000V (RMS 或直流) 的基本绝缘。

下面介绍固体绝缘的 DTI 要求。IEC 61010-1 的第 6.7.2.2.2 条和表 K.9 对于高达 300V、600V 和 1000V 的 RMS 或直流工作电压要求最小 DTI 分别为 0.4mm、0.6mm 或 1mm。因此, 基于这些 DTI 要求, 具有薄电介质的半导体组件似乎无法通过此标准的认证, 但大多数观察者未意识到的是, 该标准的第 14.1a 条允许相关 IEC 标准 (例如 IEC 62368-1) 的适用安全要求, 以忽略该标准的最小 DTI 要求。由于 IEC 62368-1 允许进行热循环和湿度预调节测试, 然后进行介电测试, 并有 60% 的裕度, 以忽略最小 DTI 要求, 因此根据 14.1a 条, IEC 61010-1 亦可如此。

为了确定热循环和湿度预调节测试后的测试电压, 工作电压高达 300V 时, 应遵循该标准的第 6.7.2.2.1 条; 对于过电压类别 II 中的 300V 至 1000V 的电压, 应遵循表 K.5。表 5-5 代表 IEC 61010-1 的表 K.5。

表 5-5. 过电压类别 II 超过 300V 的电源电路中的固体绝缘测试电压

线与中性点电压 AC RMS 或 DC (V)	测试电压			
	5s 交流测试 (V _{RMS})		脉冲测试 (V _{PEAK})	
	基本绝缘和辅助绝缘	增强型绝缘	基本绝缘和辅助绝缘	增强型绝缘
> 300 ≤ 600	2210	3510	4000	6400
> 600 ≤ 1000	3310	5400	6000	9600

正如已确定的, 如果组件通过测试, 示例器件可以根据爬电距离和间隙距离要求 600V 增强型绝缘工作电压和 1000V 基本绝缘工作电压, 之后需要将表 5-5 中各自的交流测试电压或脉冲测试电压乘以 1.6, 以要求相应的工作电压。

6 结论

尽管许多国际标准根据光耦合器和其他传统隔离器规定了 DTI 要求，但这些标准具有替代条款，允许使用 DTI 更薄的数字隔离器来通过热循环和湿度测试以及超高电介质耐受电压的严格测试标准。德州仪器 (TI) 的数字隔离器通过了 VDE、CSA、TUV、CQC 等多个安全机构的全面认证，符合基本和增强型等级的要求。有关德州仪器 (TI) 认证隔离器的完整列表，请参阅[数字隔离器 - 证书](#)。总之，更厚的 DTI 并不是数字隔离器在安全关键型应用中的先决条件。当涉及到安全-关键型应用中的高压绝缘时，绝缘质量与绝缘数量同样重要，甚至更重要。

7 参考文献

- IEC 60747-17 Edition 1.0, Semiconductor devices - Part 17: 2020 年 9 月，Magnetic and capacitive coupler for basic and reinforced insulation
- 2014 年 4 月，UL 1577 Edition 5, Standard for Safety - Optical Isolators
- IEC 62368-1 Edition 3.0, Audio/video, information and communication technology equipment - Part 1: 2018 年 10 月，Safety requirements
- IEC 60601-1 Edition 3.0+A1, Medical electrical equipment - Part 1: 2005 年 12 月与 2012 年 7 月，General requirements for basic safety and essential performance
- IEC 61010-1 Edition 3.0+A1, Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use - Part 1: 2010 年 6 月与 2016 年 12 月，General requirements
- 德州仪器 (TI)，《实现高质量和可靠的高压信号隔离》白皮书，Tom Bonifield，017

重要声明和免责声明

TI 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安全、安保或其他要求。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 (<https://www.ti.com/legal/termsofsale.html>) 或 [ti.com](https://www.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。

邮寄地址: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265

Copyright © 2021, 德州仪器 (TI) 公司

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 © 2022，德州仪器 (TI) 公司