

电源设计研讨会

揭秘高电压终端设备中的电气间隙
和爬电距离

作者

Wei Zhang 和 Thomas LaBella



概要

- 爬电距离 (CPG)、电气间隙 (CLR) 和其他相关术语的定义
- 不同的绝缘等级和选择指南
- 确定 CLR 和 CPG 的流程图，以及终端设备示例
- 高电压印刷电路板 (PCB) 间距标准和指南
- 高电压间距的特例情况

高电压应用

电动汽车
D 类音频



适配器和充电器
器



服务器/电信设施/不间断电源



初级电路连接

固态照明



电机驱动器（变频驱动器）



可再生能源



CPG 和 CLR

CPG

防止在工作电压下产生绝缘击穿或漏电起痕（长期）



- 两个导电器件之间沿固体绝缘材料表面的最短距离
- 污染、湿度、冷凝是关键考虑因素
- 设计尺寸时考虑以下方面：
 - 均方根 (RMS) 工作电压
 - 污染等级
 - 材料组别（不会产生绝缘飞弧或击穿）

CLR

防止瞬态电压产生空气电离或电弧（短期）

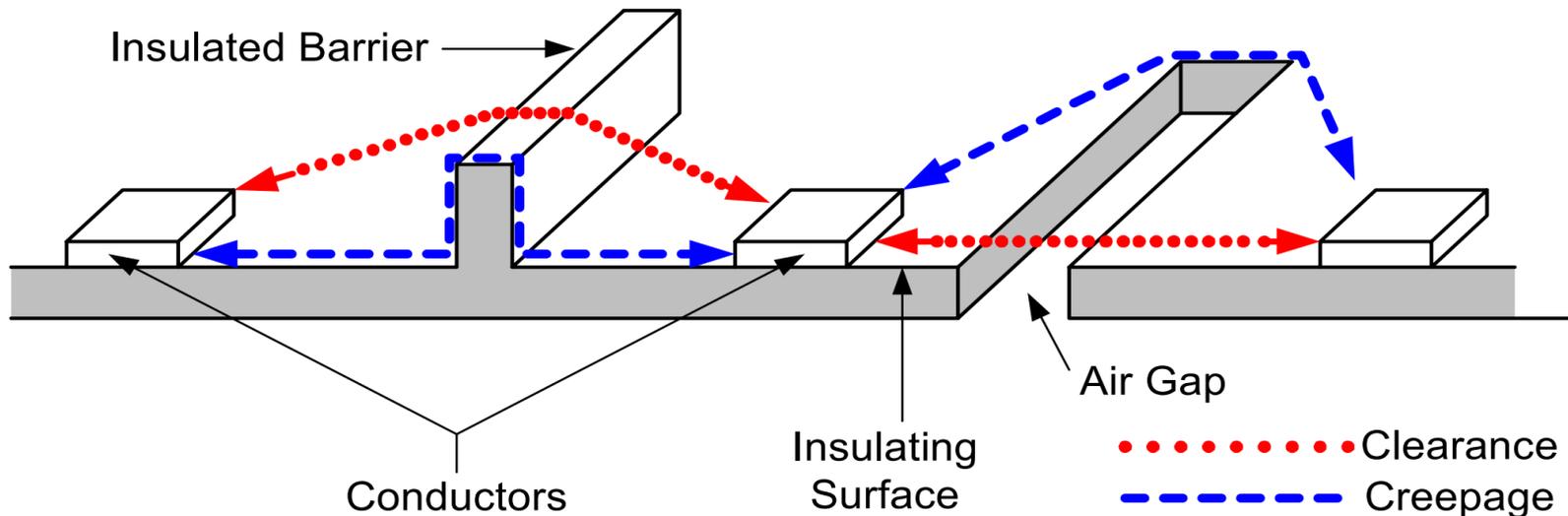


- 两个导电器件之间在空气中的最短距离
- 气压（海拔高度）、温度等是关键考虑因素
- 设计尺寸时考虑以下方面：
 - 瞬态电压
 - 污染等级
 - 海拔高度（海平面在 2,000m 以上需乘以倍增系数，例如，5,000m 时为 $\times 1.48$ ）

*瞬态电压 - 持续几毫秒或更短的短时过电压

CPG 和 CLR 之间的关系

- CPG 和 CLR 之间没有物理关系
 - 在大多数情况下，CPG 不能小于相关的 CLR
- 一个好的标准是什么？在保证尺寸和成本之间平衡的同时尽量扩大安全距离



材料组和 CTI

- 材料组取决于相对漏电起痕指数 (CTI)
- CTI 是绝缘材料可承受 50 滴（每 30s）受污染的水（0.1% 氯化铵）保证不漏电起痕最大的 V_{RMS}
 - 无漏电起痕 (<0.5A)（形成导电路径）

材料组	CTI 范围 (V_{RMS})
材料组 I	CTI \geq 600
材料组 II	400 \leq CTI < 600
材料组 IIIa	175 \leq CTI < 400
材料组 IIIb	100 \leq CTI < 175 或未指定时

TI 隔离集成电路

大多数 FR4 PCB

*材料组是根据国际电工委员会 IEC 60112 对测试数据的评估来验证的

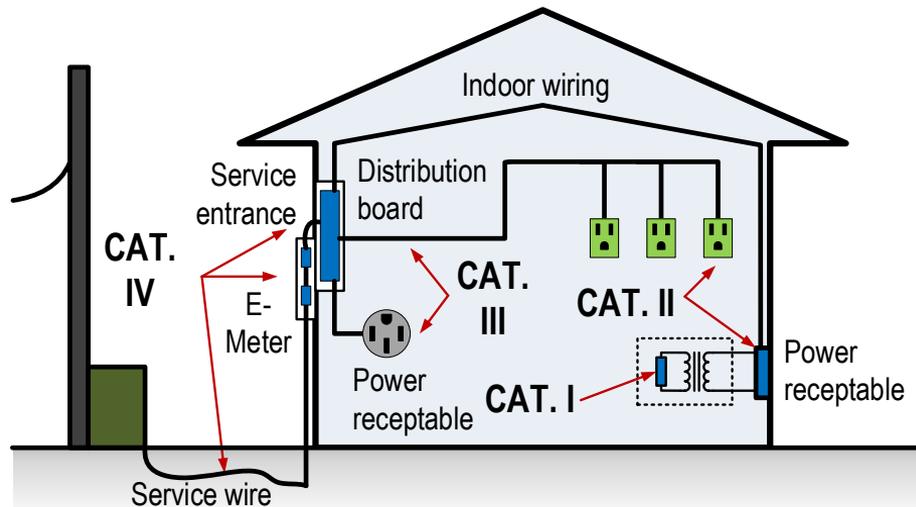
污染等级

类别	说明	示例
污染等级 1	<ul style="list-style-type: none">无污染或仅存在干燥的非导电性污染	<ul style="list-style-type: none">密封元件（有涂层的 PCB）、清洁室
污染等级 2	<ul style="list-style-type: none">由于偶尔出现冷凝而暂时变得导电	<ul style="list-style-type: none">符合 IEC 60950-1 或 IEC 62368-1 标准的电信设施外壳实验室、办公室
污染等级 3	<ul style="list-style-type: none">受到导电性污染非导电性污染，可能因预期冷凝而变成导电性污染	<ul style="list-style-type: none">工业、没有供暖的工厂房间和农场
污染等级 4	<ul style="list-style-type: none">由于导电性粉尘、雨水或其他潮湿状况而导致的持久导电性污染	<ul style="list-style-type: none">户外应用

瞬态过电压类别

- 过电压类别也指设备需承受的脉冲耐受电压
- 这是对直接由低电压电源供电的设备按可能遭受的过电压情况进行分类

类别	说明	示例
IV	原始安装	<ul style="list-style-type: none">• 电表• 4kV_{PK}^*
III	固定式安装，其中可用性受特殊要求限制	<ul style="list-style-type: none">• 公用电力面板• 配电板• $2.5\text{kV}_{\text{PK}}^*$
II	固定式安装供电的耗能设备	<ul style="list-style-type: none">• 电源插座，与 III 类设备相隔 10m• $1.5\text{kV}_{\text{PK}}^*$
I	连接到采取措施将瞬态电压限制在低电平的电路	<ul style="list-style-type: none">• 恒温器、洒水器（电压为 24V_{AC}）• $0.8\text{kV}_{\text{PK}}^*$



针对不同终端应用和电压等级的安全设计标准

绝缘系统中的用户安全		PCB间距（功能绝缘）
<ul style="list-style-type: none">IEC 60664-1 – $<1.5\text{kV}_{\text{DC}}$ 或 $<1\text{kV}_{\text{AC}}$ 系统的绝缘协调<ul style="list-style-type: none">CPG 和 CLR，电气强度测试		仅为了确保电气电路正常运行
IEC 62368-1 (IEC 60950-1)*	电信、服务器、音频、视频、通信、云计算	印刷电路学会 (IPC) <ul style="list-style-type: none">IPC 2221 – 一般要求IPC 9592 – 计算机/电信
IEC 61800-5	电机驱动	IEC 60664-1 - 适用于 PCB 的 CPG 指南
IEC 62109-1	太阳能	IEC 62368 - 无涂层、有涂层的间隔距离

*IEC 60950-1 已于 2020 年 12 月被撤销

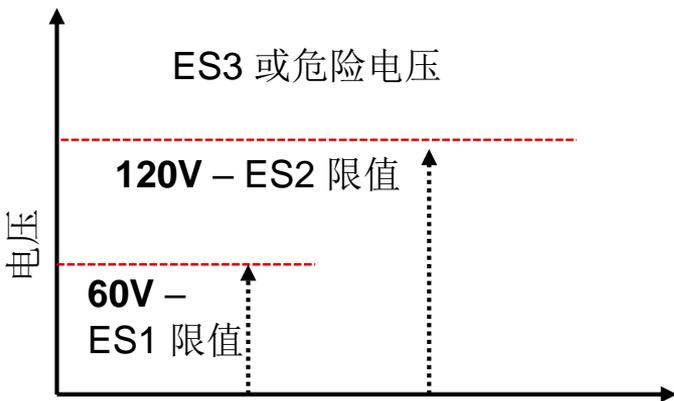
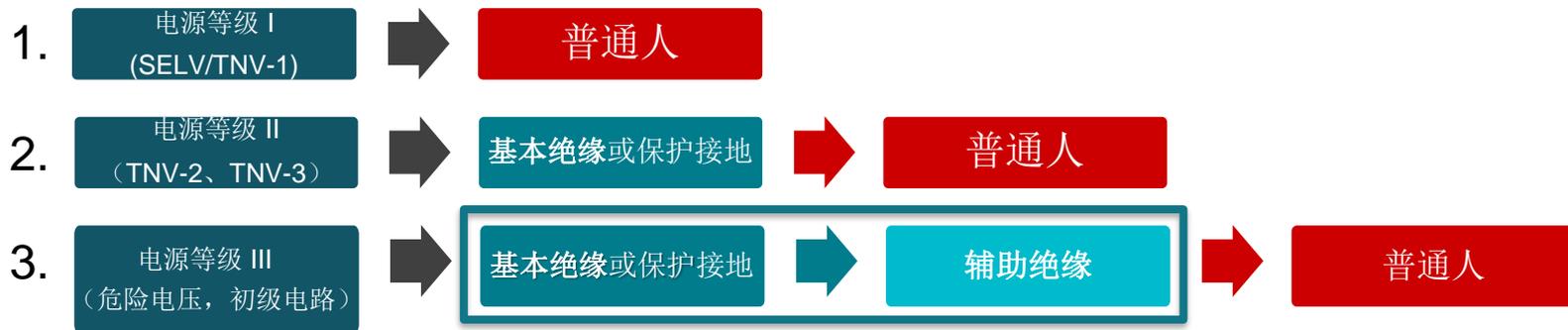
隔离元器件的标准

- 隔离式元件（例如隔离式栅极驱动器）的绝缘标准不涉及 **CPG** 和 **CLR**。相反，它们规定**绝缘栅**承受电气、机械应力以及热和环境影响的能力。标准示例：
 - 适用于欧洲的 IEC 60747-1（德国电气工程师协会[VDE] 0884-11）；适用于美国的美国保险商实验室 (UL) 1577；适用于中国的中国质量认证中心 (CQC) GB4943.1。这些元件绝缘标准涉及 V_{IOSM} 、 R_{IO} 、 C_{IO} 、 q_{pd} 、绝缘穿透距离 (DTI)、共模瞬态抗扰度 (CMTI) 等。
- 不过，**绝缘等级** – 基本绝缘、增强绝缘、功能绝缘 – 对于 **CPG** 和 **CLR** 确实很重要

绝缘等级类型

- 功能绝缘或 PCB 高电压间距
 - 为了确保电路正常运行 - 接地反弹、高电压、次级电路之间的瞬态
- 基本绝缘
 - 单层绝缘，用于防止在正常和异常运行条件下触电
- 辅助绝缘
 - 除了基本绝缘之外，增加的额外一层独立绝缘
- 双重绝缘
 - 用于正常、异常和单一故障情况下的基本绝缘+辅助绝缘
- 增强绝缘
 - 单一绝缘系统，提供与双重绝缘相同的保护等级

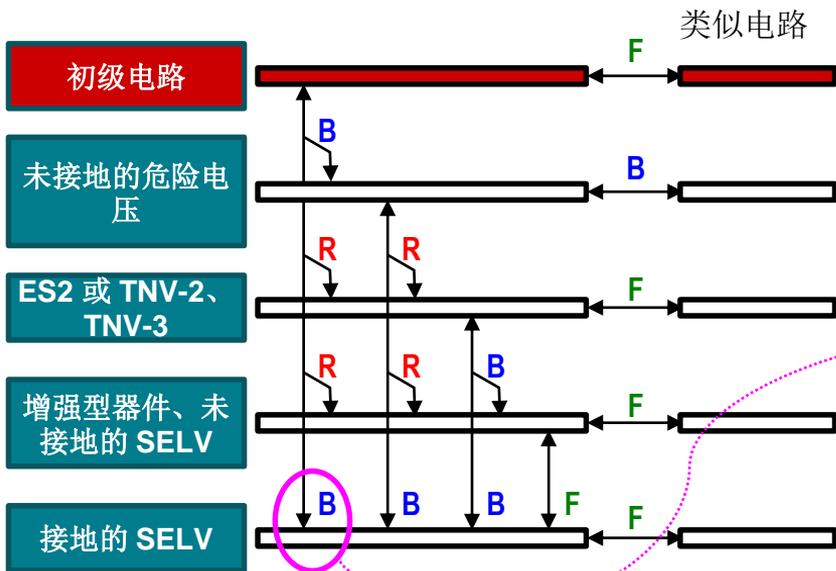
绝缘等级指南



IEC 62368-1	IEC 60664-1、IEC 60950-1
ES1	安全特低电压 (SELV)、TNV-1
ES2	TNV-2、TNV-3*
ES3	危险、初级电路 (连接至交流电源)
普通人	用户

*IEC 60950-1 的第 2.3 节定义了 TNV-1、TNV-2 和 TNV-3

绝缘等级示例



- **F**: 功能绝缘; **B**: 基本绝缘; **R**: 增强绝缘
- 图 2H IEC 60950-1 2013

等级	隔离的器件		示例
F	SELV	SELV	<60V 砖型模块
	加强隔离部件		
B	初级、ES2、TNV-2/-3 危险电压	接地的 SELV	<ul style="list-style-type: none"> • 具有接地的 12V 输出的交流/直流整流器 • 车载电池充电器 • >60V 直流/直流设计
	初级	未接地, 危险(电压)	
R	初级或危险电压	未接地的 SELV	具有 -48V 输出的交流/直流整流器
	ES2、TNV-2/-3		>60V 直流/直流
	初级电路	加强隔离部件	车载电池充电器

确定 CPG 和 CLR 的流程图

开始

用于防触电的绝缘系统

CPG

确定

工作电压*
污染等级**
材料组

基本还是增强?

基本

IEC 60664-1 表 F.4 (版本 2.0)
或者表 F.5 (版本 3.0)

- IEC 62368-1 表 17
- IEC 61800-5-1 表 10
- IEC 62109-1 表 14

增强

2 ×

基本

CLR

确定

电源瞬态
(IEC 60664-1 表 F.1)
- 电源标称电压
- 过压类别
污染等级
高度 (海平面以上)

基本还是增强?

基本

IEC60664-1 表 F.2
• IEC 62368-1 表 10
• IEC 61800-5-1 表 9
• IEC 62109-1 表 13

增强

比表 F.2 更高一级
IEC 60664-1 第 5.1.6 节

高度 >2,000m?
如果是, 则使用 IEC 60664-1 中的校正因数表 A.2

PCB 高电压间距 - 正常运行

高电压间距

确定

通用 PCB 指南
目标终端设备
其他例外情况

IPC 2221B (表 6-1)、IEC 60664-1 表 F.4 (版本 2.0) 或者表 F.5 (版本 3.0)

IPC 9592B (图 4-3)、IEC 62368-1 (无涂层表 17/10)、有涂层表 G.13

常规测试 (耐压 [HiPot]), 增加 PCB 涂层, 内部规则

*工作电压: 绝缘体上交流或直流电压的最高 RMS 值, IEC 60664-1 Ed 3.0 3.1.7 小节

**有涂层的 PCB 有助于降至 IEC 62109-1 (遵循 IEC 60664-3) 或 IEC 62368 规定的污染等级 1, 使用表 G.13 减小 CPG 距离

电源瞬态电压 – IEC60664-1 表 F.1

- 确定由交流电源产生的瞬态电压
 - 对于所有其他终端设备，请参考 IEC 60664-1 指定瞬态电压

相电压 V_{RMS}	电源瞬态/额定脉冲电压 (V_{PK})*			
	过压类别			
	I	II	III	IV
• ≤ 50	330	500	800	1,500
• ≤ 150 ，例如 120（美国，日本）	800	1,500	2,500	4,000
• ≤ 300 ，例如 230（欧洲、中国）	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

*脉冲耐受测试是使用波形持续时间为 1.2/50 μ s 的电压执行的

电气间隙 – IEC 60664-1 表 F.2

所需的瞬态电压 (kV _{PK})	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)		

高度 (m)	校正因数
2,000	1.0×
3,000	1.14×
4,000	1.29×
5,000	1.48×
6,000	1.70×
10,000	3.02×

- 括号中的电气间隙取自 IEC 62368-1 表 10，适用于服务器和电信设备
- 根据 IEC 60664-1 表 F.2，基本绝缘的电气间隙假定在高度最大为 2,000m 的环境下适用于非均匀电场
- 对于增强绝缘，按照表 F.2 中规定的额定脉冲电压设计 CLR 尺寸，但更高一级
- 对于所有其他终端设备，请参考 IEC 60664-1 指定电气间隙

爬电距离 – IEC60664-1 表 F.5

V_{RMS} (V)	避免漏电起痕导致故障的 CPG (mm)**			
	污染等级			
	1	2		
	所有材料组	材料组		
I		II	III	
63	0.20	0.63	0.90	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

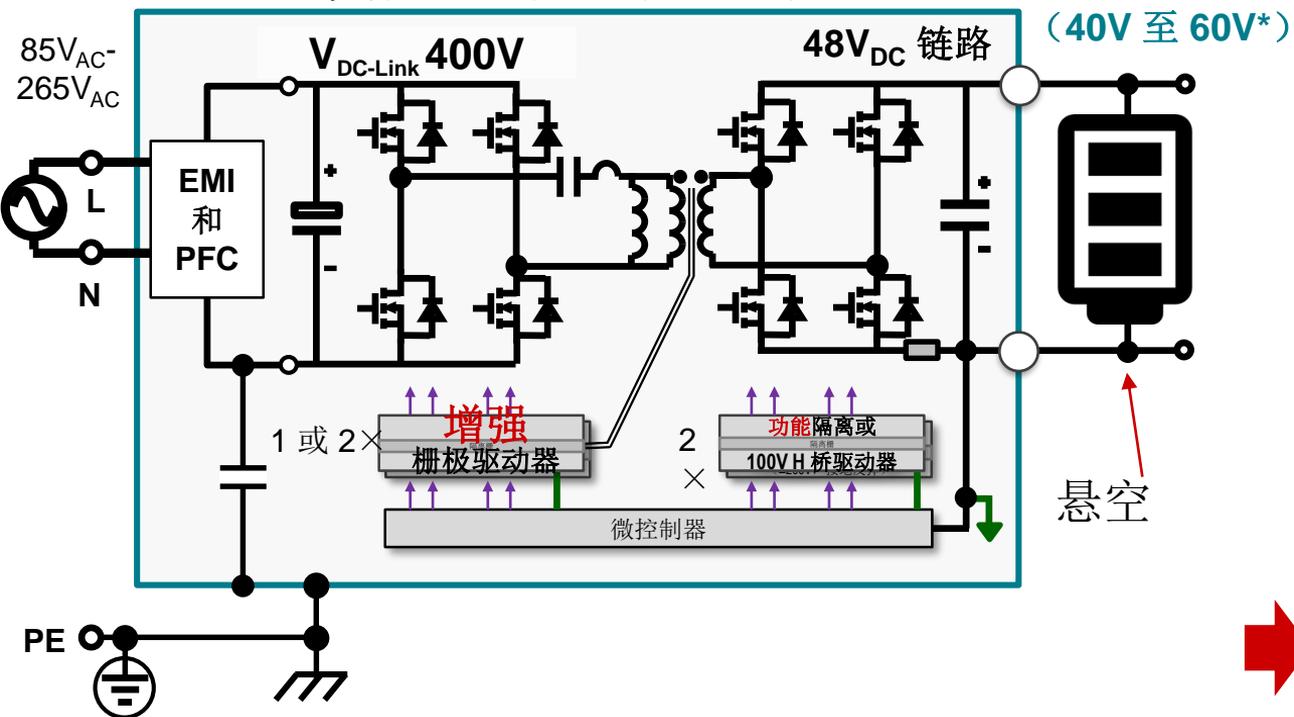
- 增强绝缘的 CPG 应为表 F.4 中基本绝缘的 CPG 的两倍
- 表 F.4 的值基于现有经验数据，适用于大多数应用。然而，对于功能绝缘，表 F.4 以外的 CPG 值可能是合适的
- 对于所有其他终端设备，请参考 IEC 60664-1 指定爬电距离

*所选电压应适合设备的最高额定电压

**可以在最近的两点之间使用线性插值

示例 1: 通信电源直流/交流前端

交流、直流/直流、直流



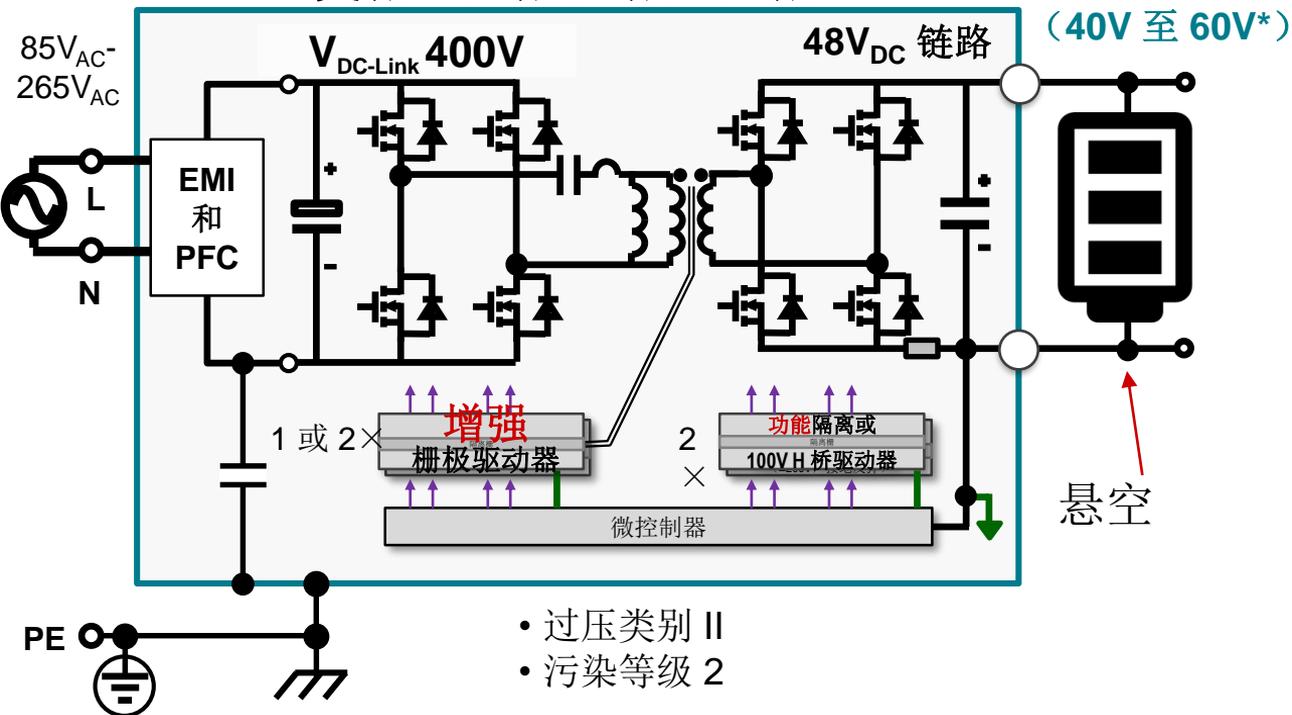
等级	隔离的器件	
F	SELV	SELV
	加强隔离部件	
B	初级、ES2、TNV-2、TNV-3、危险电压	接地的 SELV
	初级	
R	初级或危险电压	未接地的 SELV
	ES2、TNV-2、TNV-3	



*-48V_{DC} 电源系统电压范围为 40.5V_{DC} 至 57V_{DC} (ETSI EN 300 132-2)

示例 1: 通信电源直流/交流前端

交流、直流/直流、直流

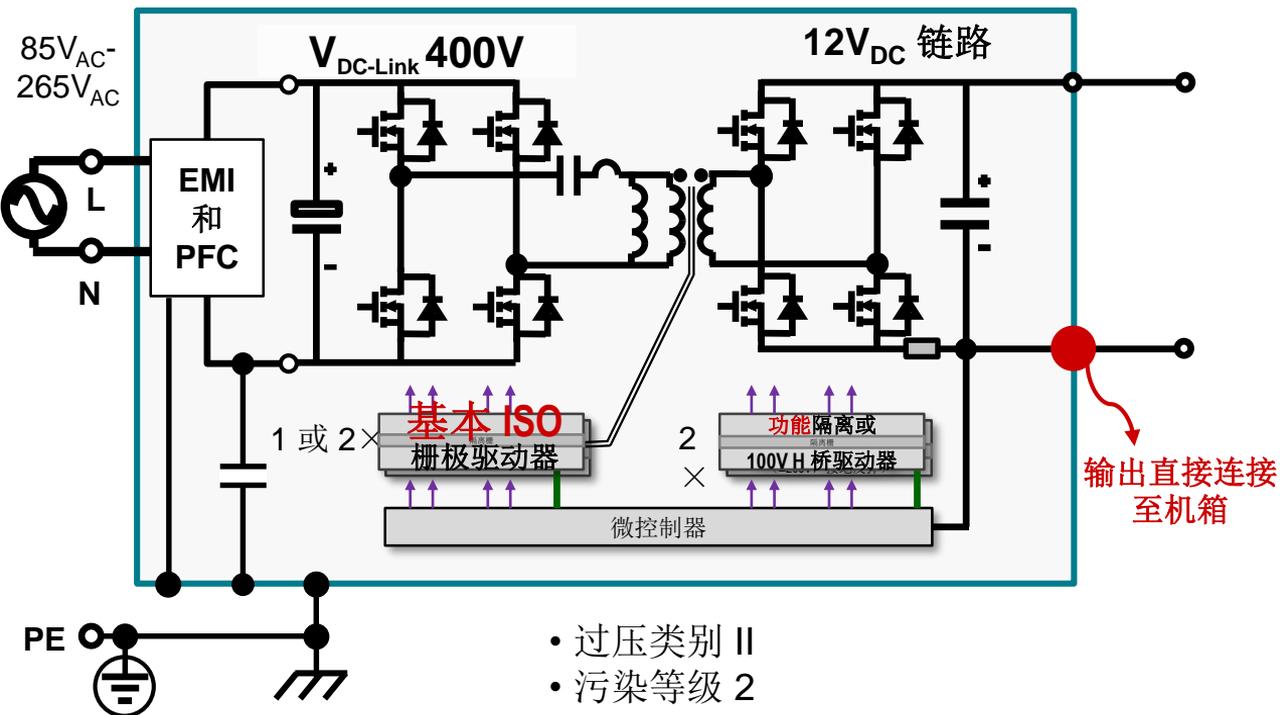


项目	要求
绝缘等级	增强
交流电源瞬态	4,000V
5,000m 处的电气间隙	5.7mm (3.8mm × 1.48)
爬电距离 (MG I)	4.0mm (2mm × 2)
爬电距离 (MG II)	5.6mm (2.8mm × 2)
爬电距离 (MG III)	8.0mm (4.0mm × 2)

*-48V_{DC} 电源系统电压范围为 40.5V_{DC} 至 57V_{DC} (ETSI EN 300 132-2)

示例 2: 具有 12V 输出的服务器

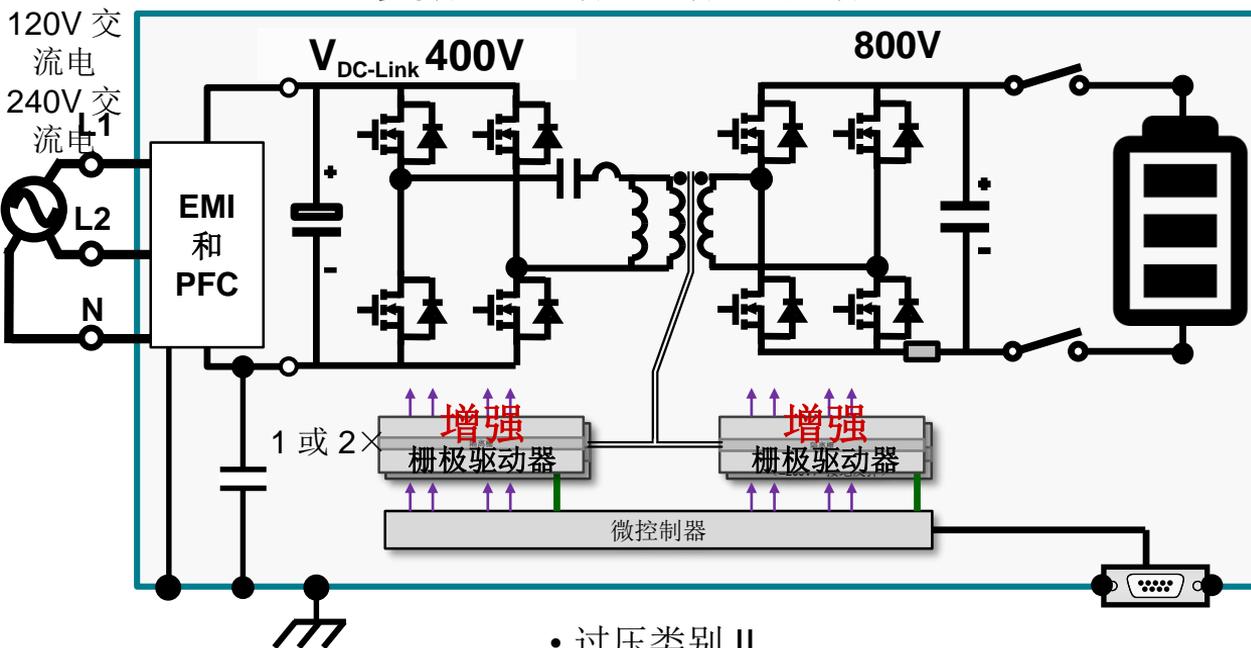
交流、直流/直流、直流



项目	要求
绝缘等级	Basic
交流电源瞬态	2,500V
5,000m 处的电气间隙	2.7mm (1.8mm × 1.48)
爬电距离 (MG I)	2mm
爬电距离 (MG II)	2.8mm
爬电距离 (MG III)	4.0mm

示例 3: 车载电池充电器

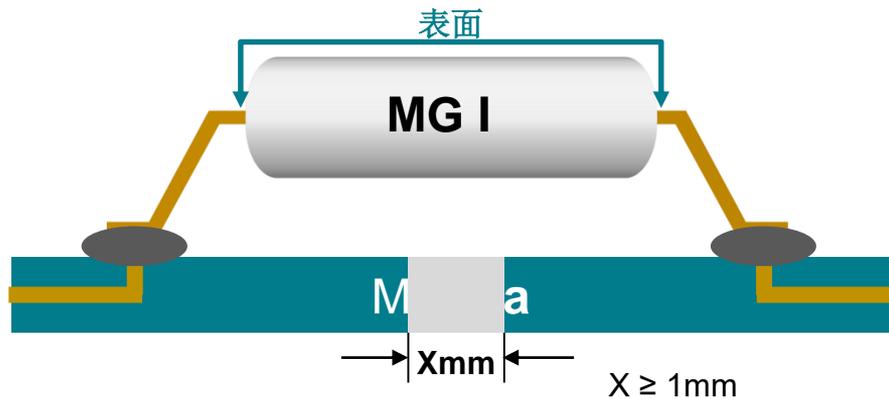
交流、直流/直流、直流



- 过压类别 II
- 污染等级 2

项目	要求
绝缘等级	增强
交流电源瞬态	4,000V
5,000m 处的电气间隙	4.5mm (3mm × 1.48)
爬电距离 (MG I) 400V	4.0mm (2mm × 2)
爬电距离 (MG II) 400V	5.6mm (2.8mm × 2)
爬电距离 (MG I) 800V	8.0mm (4mm × 2)
爬电距离 (MG II) 800V	11.2mm (5.6mm × 2)

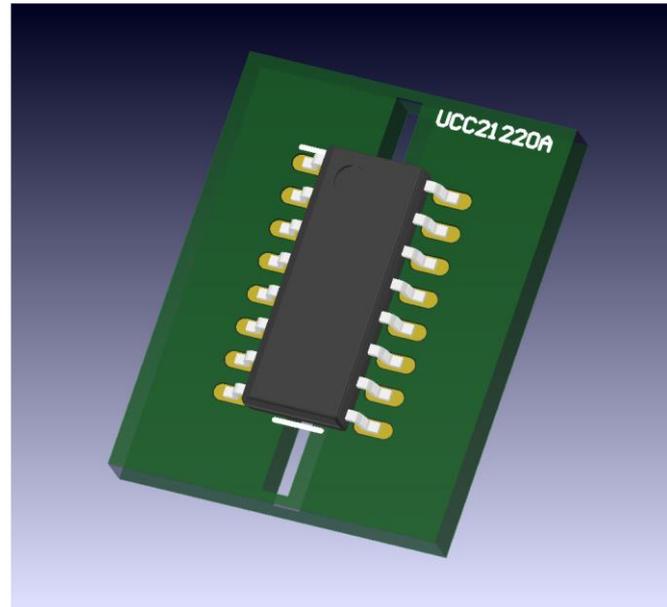
使用 PCB 切口来增加 PCB 爬电距离



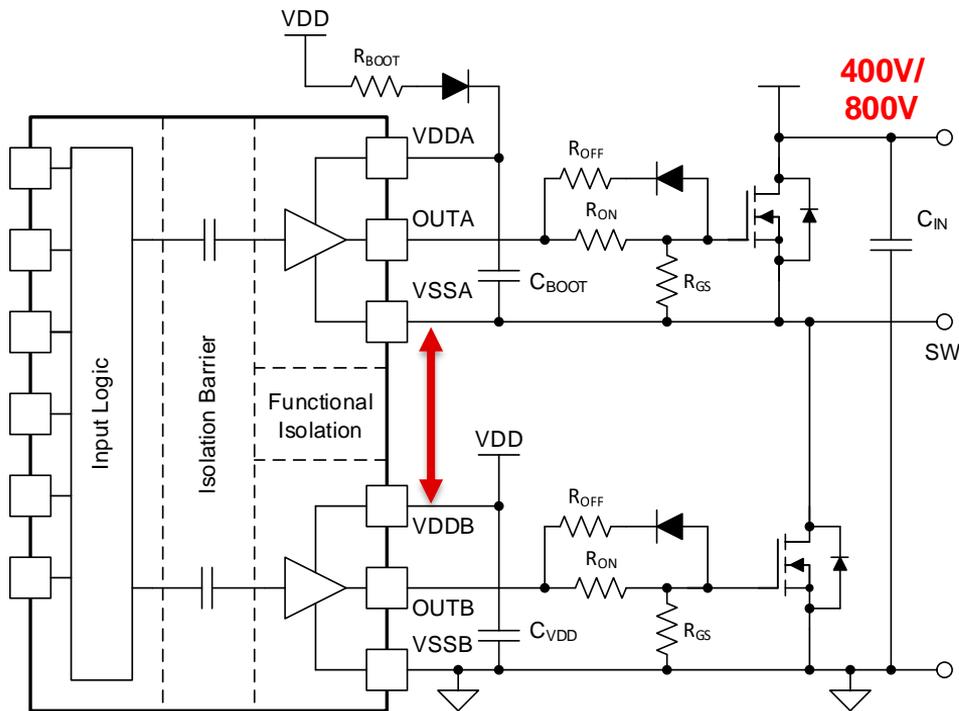
污染等级	尺寸 × 最小值*
1	0.25mm
2	1.0mm
3	1.5mm

*IEC 60664-1 第 6.2 节 (版本 3.0)

PCB 切口示例



高电压间距: PCB

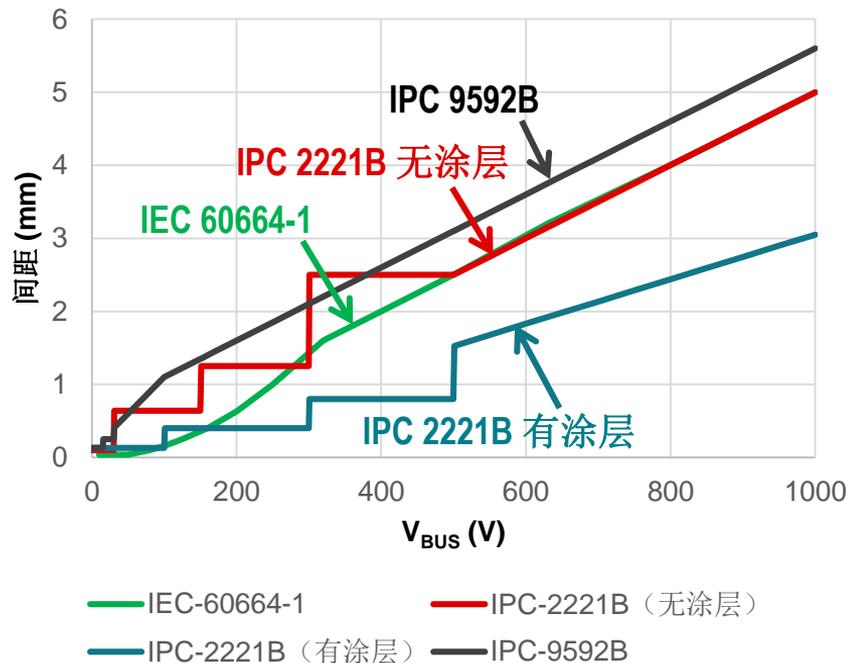


- IEC 60664-1 提供了 CPG 指南以避免漏电起痕导致故障
- IPC-2221“印制电路板设计通用标准”
 - 该标准根据环境条件和保形涂层提供了有关 PCB 间距的广泛指南
- IPC-9592“对计算机和电信行业电源转换器件的要求”
 - 提供了非绝缘导体间距要求的指南

*UL 796, “安全标准: 印刷线路板” 提供了垂直层间距指南

高电压间距(功能绝缘): PCB 间距要求

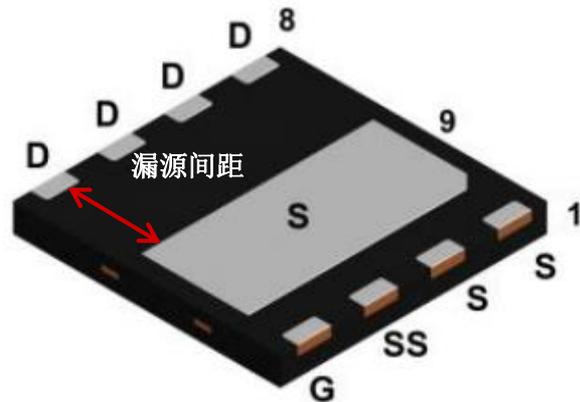
电压	IEC 60664-1	IPC 9592B $0.6 + V_{PK} \times 0.005$	IPC 2221B	
			无涂层	有涂层
(V)	(mm)			
20	0.04	0.7	0.1	0.13
32	0.04	0.75	0.64	0.13
63	0.063	0.9	0.64	0.13
125	0.25	1.2	0.64	0.4
400	2	2.6	2.5	0.8
800	4	4.6	4	2.44
1000	5	5.6	5	3.05



现有高压MOSFET封装示例

- 即使对于相同的应用，行业中也存在不一致性

制造商	封装	绝对最大值 (直流)	高电压间距
I1	8 × 8 DFN	650V	2.325mm
I2	8 × 8 DFN	600V	2.8mm
G1	8 × 8 DFN	650V	2.8mm
G2	8 × 8 DFN	650V	2.74mm
T1	8 × 8 DFN	650V	2.5mm
T1	TO247-3	650V	2.7mm
T1	TO220-3	650V	1.11mm
T2	7 × 9 QFN	650V	2.1mm



高电压间距的特例情况

功能绝缘（用于实现高压环境、爬电距离和电气间隙下的正常运行）或高电压间距应满足以下要求*：

- 两者满足上述的爬电距离和电气间隙要求

或

- 两者能够承受电气强度**例行测试**（HiPot 测试）
 - 峰值工作电压或所需的耐受脉冲电压可以决定电气强度测试电压

*根据 IEC 60664-1 版本3.0, 5.3.1和5.2.3.3 小节

结论

- 述评了关键术语的定义，列出了每个参数的影响，并通过实例确定 **CPG** 和 **CLR**
- 总结了确定 **CPG** 和 **CLR** 的两种方法：绝缘安全和高电压 **PCB** 间距
- 介绍了如何确定绝缘等级
- 展示了确定绝缘系统 **CPG** 和 **CLR** 以及 **PCB** 高电压间距的流程图，并评述了流程图中使用的 **IEC 60664-1** 关键表
- 讨论了三个示例：电信、服务器和车载电池充电器
- 根据 **IPC** 和 **IEC** 标准总结和比较了不同的高电压间距
- 提供了当不满足所需的 **CPG** 和 **CLR** 时有关功能绝缘的特例情况处理方法

资源

- IEC 60664-1 Insulation coordination for equipment within low-voltage supply systems – part 1: principles, requirements and tests
- IEC 62368-1 Audio/video, information and communication technology equipment – part 1: safety requirements
- IEC 60950-1 Information technology equipment – safety – part 1: general requirements
- IEC 62109-1 Safety of power converters for use in photovoltaic power systems – part 1: general requirements
- IEC 61800-5-1 Adjustable speed electrical power drive systems – part 5-1: safety requirements – electrical, thermal and energy
- IPC 2221B Generic standard on printed board design
- IPC 9592B Requirements for power conversion devices for the computer and telecommunications industries



© Copyright 2024 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved.

This material is provided strictly “as-is,” for informational purposes only, and without any warranty.
Use of this material is subject to TI’s **Terms of Use**, viewable at [TI.com](https://www.ti.com)

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