

高压设计基础-电气间隙与爬电距离

引言

在追求更高功率密度的同时，确保高压电路板（PCB）设计符合安全规范，是每位工程师面临的挑战。其中，电气间隙和爬电距离是两个最为关键的设计参数。它们虽常被并列讨论，但其物理意义、影响因素和设计考量却截然不同。

爬电距离与电气间隙

定义与关系

1.爬电距离：指两个导电部件之间沿绝缘材料表面的最短路径距离（如图1）。主要适用长期施加的工作电压，防止因污染、湿度或冷凝在绝缘表面形成漏电痕迹而导致的失效。

2.电气间隙：指两个导电部件之间通过空气的最短距离（如图1）。主要防范在任何所需的瞬态过压期间产生空气电离或电弧。

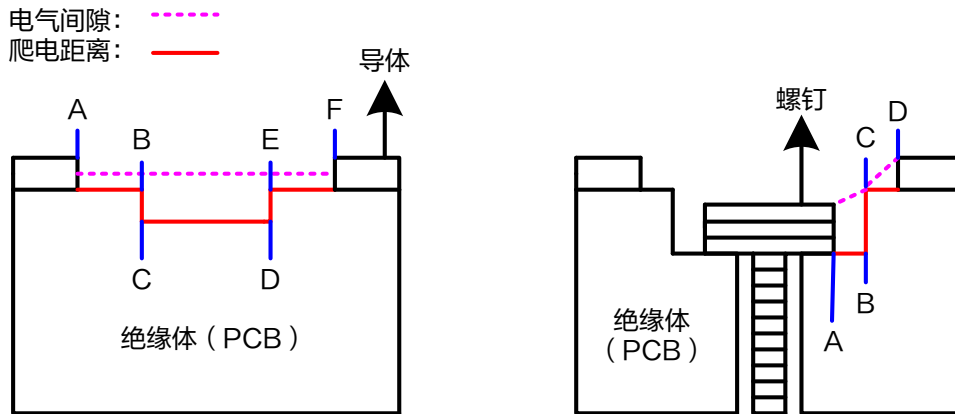


图1.爬电距离与电气间隙

3.爬电距离与电气间隙的关系：设计时必须确保爬电距离不得小于电气间隙，考虑在尺寸和成本时，尽可能地增大爬电距离和电气间隙。

影响设计的关键参数

一、确定这两个距离需要综合考量以下多个方面：

1.材料组与相对漏电起痕指数（CTI）：CTI 衡量绝缘材料的抗漏电起痕能力，数值越高，耐压性越好，所需爬电距离越小。材料按 CTI 分为 I、II、IIIa、IIIb 四组（见表1）。例如，普通 FR4 PCB 板材通常属于 IIIa 组。

表1.CTI 划分的绝缘材料类别

材料	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

2.污染等级：环境中的污染程度直接影响表面的导电性，分为 1 至 4 级：

- (1) 等级 1：密封或灌胶环境，干燥、无污染；
- (2) 等级 2：仅偶尔出现冷凝（如办公室、通信设备、服务器等）；
- (3) 等级 3：存在导电污染或会受潮的非导电污染（如工业车间）；
- (4) 等级 4：持续导电污染（如室外环境）。

3. 瞬态过压类别：根据设备在电网中的位置划分，决定了可能遭遇的浪涌电压强度，从受保护的 I 类（如 24V_{AC} 恒温

器)到直接连接电网的 IV 类(如电表)。

二、常用工作电压、污染等级与脉冲电压等级(见表 2):

表 2.常用工作电压、污染等级与脉冲电压等级(IEC 60664-1)

V _{RMS} (V)	爬电距离 (mm)				所需的脉冲 耐受电压 (kV)	电气间隙 (mm)		
	污染等级 1	污染等级 2				污染等级		
	所有材料组	材料组			1	2	3	
		I	II	III	0.5	0.04	0.2	0.8
63	0.2	0.63	0.9	1.25	1.5	0.5		0.8
400	1.0	2.0	2.8	4.0	2.5	1.5		
800	2.4	4.0	5.6	8.0	4.0	3.0		
1000	3.2	5.0	7.1	10.0	6.0	5.5		

安全隔离等级

隔离不仅是功能需求,更是人身安全的保障。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。爬电距离和电气间隙的重要影响因素是隔离等级,主要隔离等级包括:

- 1.功能隔离:仅保证电路正常运行,与用户安全无关;
- 2.基本隔离:单层绝缘,提供基本的电击防护;
- 3.补充隔离:额外的一层隔离保护,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;
- 4.双重隔离:基本隔离和补充隔离的组合;
- 5.增强型隔离:单层绝缘,但其保护等级等效于双重隔离,是应对危险电压的最高安全等级。

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。而所需的是基本隔离还是增强型隔离,取决于被隔离电路的电压等级以及是否接地,如 ES1: <60V, 这些电路可安全接触,无需与用户隔离; ES2: 60-120V, 这些电路需要在电路和用户之间使用基本隔离; ES3: >120V, 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。

不同类别标准体系

涉及爬电距离与电气间隙的标准众多,且可能互补或冲突。设计师需根据终端设备类型选择主标准:

- 1.基本标准: IEC 60664-1 (适用于高达 1.5kV_{DC}/1kV_{AC} 系统);
- 2.音视频、IT 设备: IEC 62368-1/IEC 60950-1;
- 3.电机驱动: IEC 61800-5-1;
- 4.太阳能设备: IEC 62109-1。

结论

综上所述,高压 PCB 布局中,电气间隙与爬电距离是保障安全与可靠性的核心基石。二者物理机制不同:电气间隙防范空气中瞬态击穿,爬电距离则抑制表面漏电起痕。

理解这些概念、标准与适用场景,通过对材料类别、污染等级、过压类别及安全隔离要求等多重因素的综合考量,可使设计师在追求功率密度的同时,实现稳健高效的设计。