

Power Supply Design Seminar

高電壓終端設備的電氣間隙與爬電距離解密



Reproduced from
2024 Texas Instruments Power Supply Design Seminar
SEM2600
Topic 2
Wei Zhang and Thomas LaBella
Literature Number: NESP013

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

為了要盡可能實現最高功率密度，同時仍秉持安全與設計準則，需要更謹慎選擇高電壓印刷電路板 (PCB) 間距和積體電路 (IC) 封裝。本主題總結了各種考量，並提供常用終端設備的備忘錄，其中包括電信、伺服器與無線基礎設施；馬達驅動、太陽能逆變器和充電樁；消費性 AC/DC 應用；以及電動車與混合動力電動車。

簡介

為了達到可行的最高功率密度，同時仍符合安全與設計準則，高電壓 PCB 間距與 IC 封裝選擇漸趨重要。然而多方都會出現挑戰。身為設計師，您必須了解：

- 許多技術詞彙，以及其對爬電距離和電氣間隙的影響。
- 正常運作暫態電壓與非重複性暫態電壓之間的區別。
- 設備位置相對於一次側能量來源的影響。
- 數項業界標準均可因應爬電距離、電氣間隙和 PCB 間距，其中部分標準相輔相成、部分冗餘，部分則互相衝突。
- 對不同終端設備類型會採用不同的業界標準。
- 國際電子電機委員會 (IEC)、美國安全檢測實驗室 (UL) 或德國標準化學會 (DIN)、德國電氣工程電子資訊技術協會 (VDE) 提供了安全絕緣情境，以保護人類的安全與功能絕緣，進而維持運作正常。
- 其他考量包括使用案例海拔高度、污染等級、IC 材料組、PCB 三防塗層、PCB 切口和例行暫態測試。

在本文中，我們將介紹技術詞彙及其實際意義，並解釋其與爬電距離和電氣間隙的關係，以及對爬電距離和電氣間隙的影響。接著我們會提供準則和流程圖，其中包含逐步指示，以透過結構化方法來決定適當的爬電距離與電氣間隙。

定義

爬電距離與電氣間隙

爬電距離是兩個導電零件之間沿著固態絕緣材料表面的最短距離，如 **圖 1** 所示。此距離的尺寸以污染等級、材料組和工作電壓為準，也就是絕緣材料可能會承受的最高均方根 (RMS) 電壓。其定義為可確保不會發生閃絡或絕緣故障。除了工作電壓外，對爬電距離影響最大的因素為污染、濕度和凝結。

電氣間隙是兩個導電零件在空氣中的最短距離，如 **圖 2** 所示。此距離的尺寸是為了防止在任何必要的暫態過電壓期

間，發生空氣電離或電弧。對電氣間隙而言，最重要的因素是空氣壓力（海拔高度）和污染。高於 2,000 m 的海拔高度具有倍增因數，我們會在 [決定爬電距離、電氣間隙與高電壓 PCB 間距要求的方法](#) 中說明。

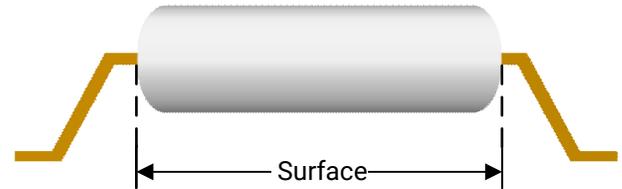


圖 1. 爬電距離。

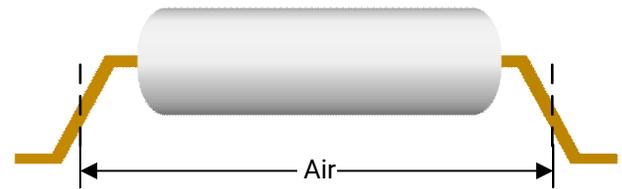


圖 2. 電氣間隙。

爬電距離可因應長期的穩定狀態工作電壓，電氣間隙則可因應數毫秒或更短的短期暫態。這兩者之間沒有物理關係，但是爬電距離不能小於電氣間隙距離。在考量尺寸與成本的取捨時，應盡可能將爬電距離與電氣間隙最大化，這點至關重要。

另外也務必注意，在角落針腳靠近封裝邊緣的部份情況下，最短的爬電距離可能是跨越側邊，而不是頂部或底部，如 **圖 3** 所示。

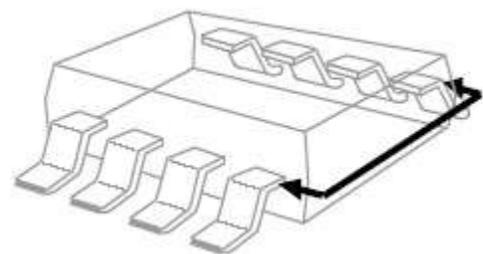


圖 3. 最短爬電距離為跨越側邊而非頂部的範例。

爬電距離和電氣間隙也可能相同。例如，在 **圖 4** 中，將 UCC21551-Q1 雙通道隔離式閘極驅動器的中間針腳去耦，就會增加爬電距離和電氣間隙。

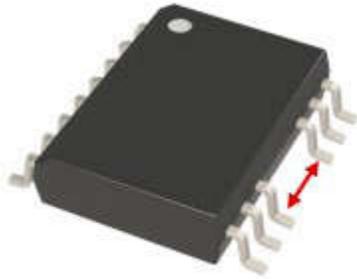


圖 4. 爬電距離與電氣間隙相同的功能絕緣範例。

材料組和相對漏電起痕指數

相對漏電起痕指數 (CTI) 會根據發生電擊穿的電壓來分類絕緣材料。CTI 等級為透過測試決定，該測試會對上有受 0.1% 氯化銨污染的材料，施加電壓。CTI 等級是材料可在此測試期間承受的最大電壓，其中流動的漏電起痕電流小於 0.5 A [1]。表 1 顯示根據 CTI 而定的絕緣材料類別。這些材料組可協助您決定特定絕緣要求所需的爬電距離，如 **決定爬電距離、電氣間隙與高電壓 PCB 間距要求的方法** 所討論的內容。

材料組	CTI 範圍 (V _{RMS})
I	600 ≤ CTI
II	400 ≤ CTI < 600
IIIa	175 ≤ CTI < 400
IIIb	100 ≤ CTI < 175 或若未指定

表 1. 根據 CTI 而定的材料組。

PCB 製造中使用的大多數 FR4 材料，均符合材料組 IIIa 的等級。所有德州儀器隔離產品均為材料組 I，以協助縮減所需的封裝尺寸和 PCB 佔用空間。

污染等級

下一個決定所需爬電距離和電氣間隙距離的重要參數，是污染等級。污染等級環境分為四個類別 [2]：

- 污染等級 1：沒有污染，或是只有乾燥、非導電性污染。這類系統皆經密封以排除灰塵和濕氣，或是 PCB 採用三防塗層，因此元件不會受到濕度或溫度相關凝結影響。

- 污染等級 2：環境會因偶爾發生的凝結，暫時變得導電。根據污染等級 2 分類的常見環境範例，包括實驗室、辦公室，以及伺服器、電信設備和無線基礎設施的機殼。
- 污染等級 3：環境容易受到導電性污染影響，或是非導電性污染可能會因預期凝結而變得導電。常見的範例包括工業應用、農業設備和無暖氣的工廠廠房。
- 污染等級 4：由於導電灰塵、雨水或其他潮濕條件，而發生連續導電性。這在戶外應用中相當常見。

暫態過電壓類別

另一個用來決定所需電氣間隙的因素是暫態過電壓類別，這會根據設備相對於主電源電壓的連接位置，對設備進行分類。此電壓位準不會依數學分類，而是根據設備位置，依機率影響來分類。

圖 5 是住宅建築的圖表，其中包含標記了不同暫態過電壓類別的位置範例。這四個類別是 [3]：

- 類別 I：這個最低類別所適用的電路，是在連接時會採取措施以限制過電壓暫態的電路。範例包括透過降壓變壓器連接到主電源的 24-V_{AC} 恆溫器及噴水系統等設備。
- 類別 II：此類別適用於從固定安裝供電提供的設備。範例包括其插頭插入的插座距離類別 III 有 10 m 遠的設備。
- 類別 III：這適用於採用固定安裝且受到特殊要求規範的設備。範例包括永久連接的設備，例如保險絲面板內的開關、空調，或是以硬線連接至 AC 主電源的工業機械。
- 類別 IV：這適用於在安裝來源位置使用的設備，也就是直接連接至主電源電壓。範例包括電表、配電板和公共事業變壓器。

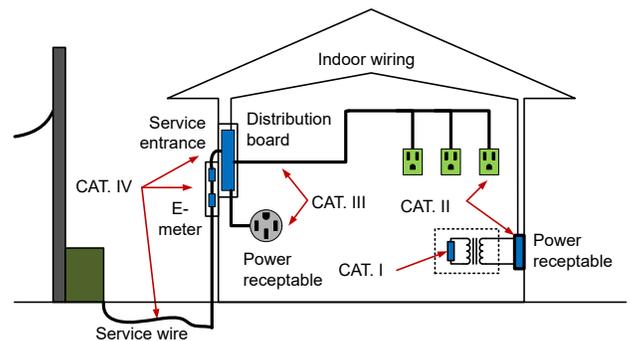


圖 5. 暫態過電壓類別範例。

與爬電距離、電氣間隙和 PCB 間距相關的標準

有數項標準與爬電距離和電氣間隙有關。其中部分為相輔相成，部分為相互矛盾，此外還有許多是冗餘的。沒有一項標準可以讓您只使用單一方程式或查找表格，就能釐清所需的爬電距離和電氣間隙。

在本節中，我們會介紹各種標準，並在 [決定爬電距離、電氣間隙與高電壓 PCB 間距要求的方法](#) 中說明使用這些標準的時機和方式。不過首先我們將標準分為兩類：與絕緣系統使用者安全相關的標準，以及與 PCB 相關的標準。

適用於絕緣系統使用者安全的基本標準是 IEC 60664-1，其適用於最高 1.5 kV_{DC} 或 1 kV_{AC} 的系統。IEC 60664-1 涵蓋爬電距離、電氣間隙和電強度測試。另外也有其他幾項專屬於特定終端設備的標準以 IEC 60664-1 為基礎，不過增加了更具體的準則。這類標準包括 IEC 62368-1 及 IEC 60950-1，其適用於電信、伺服器、音訊與視訊，以及雲端運算 [4]、[5]；IEC 61800-5，其適用於馬達驅動器 [6]；以及 IEC 62109-1，其適用於太陽能 [7]。

PCB 間距標準僅因應正常或功能操作，並未因應使用者安全。主要標準是印刷電路協會 (IPC)-2221B，這是涵蓋通用要求的一般標準 [8]。另一項因應 PCB 間距的常用標準是 IPC-9592B，這是以 IPC-2221B 為基礎的標準，但是增加了適用於電腦與電信產業的具體準則 [9]。IPC-9592B 比 IPC-2221B 略為嚴格一些。此外，IEC 62368-1 也針對電信、伺服器、音訊與視訊以及雲端運算的鍍膜與無鍍膜 PCB，提供了相關準則。

絕緣標準

隔離器有各種絕緣標準，可驗證絕緣層承受電氣、機械和熱應力以及環境影響的能力。其中包括歐盟的 DIN VDE V 0884-11、美國的 UL 1577 和中國的中國質量認證 (CQC) GB4943.1 [10-12]。這些認證標準中提及的參數說明了絕緣層，並且與爬電距離和電氣間隙沒有直接關係。對爬電距離與電氣間隙而言，重點在於絕緣等級，例如基本、強化與功能等。

絕緣等級與準則

絕緣等級有五種類型 [13]：

- 功能絕緣僅適用於當二次電路 (非主要主電源) 之間存在接地反彈、高操作電壓和暫態等情況下的正常電路運作。功能絕緣與使用者安全無關。
- 基本絕緣是單一絕緣層級，可在正常與異常操作條件下，保護使用者免於觸電。
- 補充絕緣是額外的絕緣保護層，可因應單一故障狀況。如果第一層絕緣失效，則補充絕緣層可保護使用者免於觸電。
- 雙重絕緣結合了基本絕緣與補充絕緣。
- 強化絕緣提供與雙重絕緣相同的額定值與保護，但是在單一絕緣材料層中實作。

在實務中最常見且以 [絕緣標準](#) 中介紹的絕緣標準因應的兩種絕緣類型，是基本絕緣與強化絕緣。任何所需的爬電距離與電氣間隙距離，均取決於設計需要的是基本絕緣或強化絕緣。

IEC 60664-1、IEC 62368-1 與 IEC 60950-1 皆提供了相關準則，可協助決定應用需要的是基本絕緣或強化絕緣。在這些準則中，會互換使用「普通人」和「使用者」等詞。這些標準也使用不同的詞彙來分類不同的電壓位準，但可根據電壓將這些詞彙簡化為三種能源來源類別：

- 能源來源 1 類 (ES1) 包含電壓最高 60 V 的電路。這類電路可安全觸摸，不需要與使用者絕緣。IEC 60950-1 將此電壓類別定義為安全超低電壓 (SELV)。此類別包括電信網路電壓一類 (TNV-1) 中的電路，如 IEC 60950-1 所定義。
- ES2 包括電壓介於 60 V 至 120 V 之間的電路。這類電路需要在電路與使用者之間進行基本絕緣。這包括 TNV-2 與 TNV-3 類別中的電路，如 IEC 60950-1 定義。
- ES3 包括電壓高於 120 V 的電路。這類電壓視為危險電壓，需要在電路與使用者之間進行強化絕緣。

IEC 60950-1 中的圖 2H 提供了非常完整的指南，以決定不同電路間所需的絕緣層級。該圖顯示了在主要電路；接地/未接地 SELV；接地/未接地 TNV-1、2 或 3；以及接地/未接地危險電壓之間，何時需要功能絕緣、基本絕緣或強化絕緣。將電路連接至接地通常會降低所需的絕緣層級。[表 2](#) 是 IEC 60950-1 圖 2H 的簡化摘要，並且具有常見範例。

絕緣等級	分離的零件		範例
功能	SELV	SELV	<60-V 磚型模組
	強化電路		
基本	主要、ES2、TNV-2、TNV-3、危險	接地 SELV	<ul style="list-style-type: none"> >60-V DC/DC。 具有 12-V 或 48-V 輸出的 AC/DC 整流器。 400-V 車載充電器。
	主要	未接地危險	
強化	主要、危險	未接地 SELV	具有 12-V 或 48-V 輸出的 AC/DC 整流器

絕緣等級	分離的零件	範例
	ES2、TNV-2、TNV-3	>60-V DC/DC

表 2. 常見應用所需的絕緣等級範例。

決定爬電距離、電氣間隙與高電壓 PCB 間距要求的方法

流程圖

我們已介紹了數項定義、分類、等級、標準和複雜準則。現在，為了簡化並加快開發程序，我們將前述所有項目整合到單一流程圖中 (請參閱 圖 6)，其中包含逐步指示，以決定應用的適當爬電距離和電氣間隙。

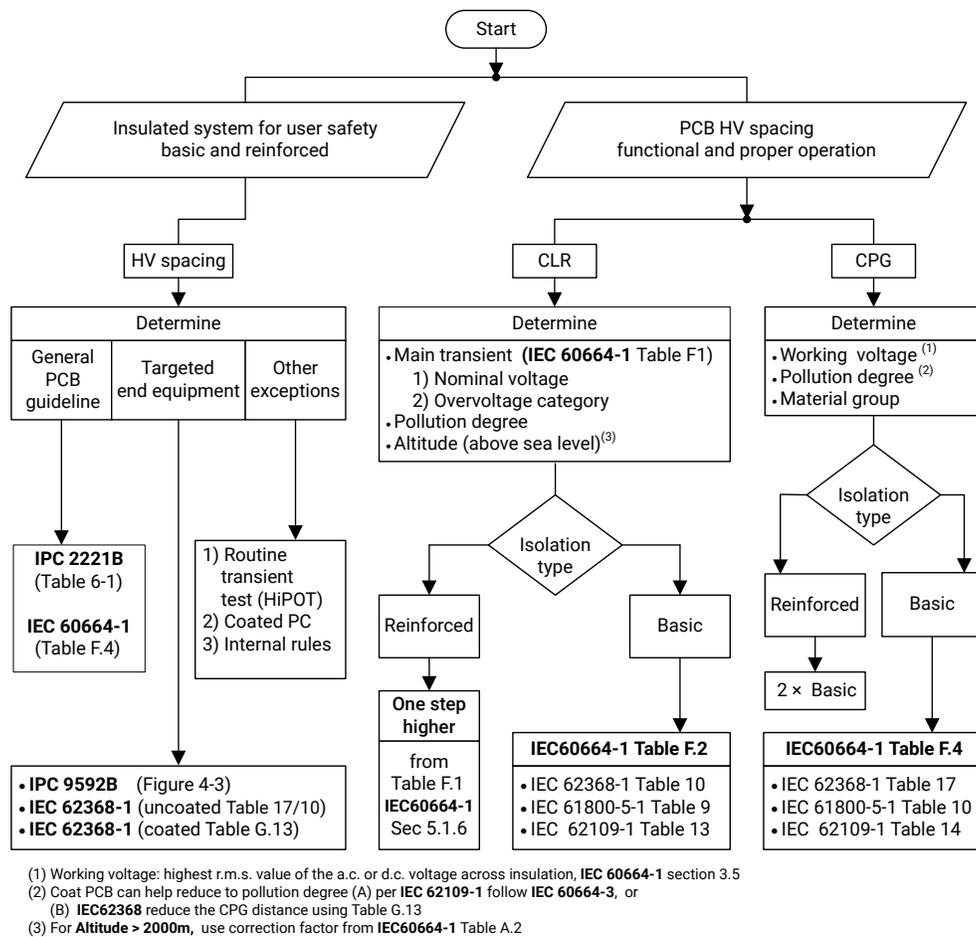


圖 6. 決定應用所需爬電距離與電氣間隙的流程圖。

此流程圖有兩種主要路徑：一種適用於確保使用者安全的絕緣系統，另一種適用於 PCB 間距。適用於使用者安全的路徑有兩條子路徑：一條用於決定爬電距離，另一條則用於間隙距離。

現在讓我們說明如何使用此流程圖來決定確保使用者安全的爬電距離、確保使用者安全的電氣間隙，以及適用於 PCB 的高電壓間距。

決定絕緣系統中的爬電距離，以確保使用者安全

就爬電距離而言，您需要知道應用的工作電壓、絕緣材料的材料組，以及環境的污染等級。下一步是使用 IEC 60950-1 的圖 2H，決定您需要的是基本絕緣還是強化絕緣。如果您需要基本絕緣，請使用在下一步中決定的爬電距離值。如果您需要強化絕緣，請將在下一步中決定的距離加倍。

請根據您的終端設備，查找所需的爬電距離；如為通用終端設備，請使用 IEC 60664-1 的表 F.4。對於音訊、視訊影片以及資訊和電信設備，請使用 IEC 62368-1 的表 17。對於馬達驅動，請使用 IEC 61800-5-1 的表 10。對於太陽能應用，請使用 IEC 62109-1 的表 14。

請根據您的終端設備，查找所需的爬電距離：

- 對於通用終端設備，請使用 IEC 60664-1 的表 F.4。
- 對於音訊、視訊影片以及資訊和電信設備，請使用 IEC 62368-1 的表 17。
- 對於馬達驅動，請使用 IEC 61800-5-1 的表 10。
- 對於太陽能應用，請使用 IEC 62109-1 的表 14。

表 3 是 IEC 60664-1 表 F.4 的小型子集，以簡化的方式顯示常見工作電壓和污染等級。您可看到就污染等級 1 而言，因為沒有污染，所以材料組不重要。對於污染等級 2 與材料組 I 而言，具有 400-V 工作電壓的應用需要 2 mm 的爬電距離以進行基本絕緣，或是 (加倍) 4 mm 的爬電距離以進行強化絕緣。對於污染等級 2 與材料組 III，具有 400-V 工作電壓的應用需要 4 mm 的爬電距離以進行基本絕緣，或是 (加倍) 8 mm 的爬電距離以進行強化絕緣。

V _{RMS}	避免因漏電起痕而導致故障的爬電距離 (mm)			
	所有材料組	污染等級 2		
		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 的子集，顯示常見工作電壓、污染等級和材料組。

決定絕緣系統中的電氣間隙，以確保使用者安全

對於電氣間隙，您需要知道應用所需的暫態電壓，這是主電源額定電壓和暫態過電壓類別的函數。您也需要知道環境的污染等級和預期的運作海拔高度（高於海平面的公尺數）。

請使用主電源額定電壓和暫態過電壓類別，並參閱 IEC 60664-1 的表 F.1，以決定所需的脈衝電壓額定值。如果您需要基本絕緣，則此電壓就是您在決定電氣間隙時所需要的電壓。如果您的應用適用於音訊、視訊或資訊與電信設備，則必須使用 IEC 62368-1，其針對這類終端設備中的基本與強化絕緣，提供了電氣間隙。若為任何其他類型的終端設備，您會使用僅提供基本絕緣值的表。因此，就強化絕緣而言，您需要使用的脈衝電壓，應高於您的應用在 IEC 60664-1 表 F.1 中的脈衝電壓。IEC 60664-1 的第 5.1.6 節更詳細地說明了前述程序。

表 4 是 IEC 60664-1 表 F.1 的小型子集，以簡化的方式顯示常見工作電壓。請使用此表以決定所需的脈衝電壓額定值。例如，以暫態過電壓類別 II 安裝的 230-V 線至中性線應用，其基本絕緣需要 2,500 V 的脈衝電壓，或若使用 IEC 62368-1 以外的標準，則其強化絕緣需要 4,000 V。

線至中性線 電壓 (V _{RMS})	主電源暫態/額定脈衝電壓 (V _{PEAK})			
	過電壓類別			
	I	II	III	IV
≤50	330	500	800	1,500
≤150 (例如 美國為 120 V)	800	1,500	2,500	4,000
≤300 (例如 歐盟、中國 為 230 V)	1,500	2,500	4,000	6,000
≤600 (例如 工業馬達、 船舶動力)	2,500	4,000	6,000	8,000

表 4. IEC 60664-1 表 F.1 的子集，顯示常見工作電壓。

在部分系統中，可能不會受到 AC 主電源暫態的影響。在這種情況下，您可將額定線至中性線電壓增加 1,200 V，以計算所需的脈衝電壓額定值，如 IEC 60664-1 第 5.3.3.2.3 節所述。

現在您已知道所需的脈衝電壓，接著請根據您的終端設備類型，從適用表格中查找海拔高度最高 2,000 m 之應用所需的電氣間隙。對於通用終端設備，請使用 IEC 60664-1

的表 F.2。對於音訊、視訊影片以及資訊和電信設備，請使用 IEC 62368-1 的表 10。對於馬達驅動，請使用 IEC 61800-5 的表 9。對於太陽能應用，請使用 IEC 62109-1 的表 13。

表 5 是 IEC 60664-1 表 F.2 的小型子集，以簡化的方式顯示常見的脈衝電壓額定值。為了進行比較，我們將 IEC 62368-1 表 10 中的值以括號括起。您可以看到對音訊、視訊、資訊和電信應用的要求稍微嚴格一些。

所需脈衝耐受電壓 (kV)	最小電氣間隙 (mm)		
	污染等級		
	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 的子集，顯示常見脈衝電壓和污染等級。括號中的數字為 IEC 62368-1 表 10 中的電氣間隙值。

最後，如果運作海拔高度高於 2,000 m，請使用 IEC 60664-1 的表 A.2，以決定電氣間隙的適當倍增因數。

決定高電壓 PCB 間距

對於 PCB 高電壓間距，您需要根據終端設備查找所需的間距。此外，您可能需要考慮其他例外情況。這些例外情況包括：在無法符合所需間隙距離的情況下，需採用 PCB 三防塗層；在生產期間進行例行暫態高電位測試，以確保介電可耐受高電壓的強度；或是任何其他適用的內部規則。

IEC 60664-1 的表 F.4（用於決定爬電距離的相同表格）及 IPC-2221B 的表 6-1 提供了一般 PCB 準則。IEC 60664-1 表 F.4 的前兩欄包含「印刷佈線材料」，也就是 PCB 佈線。這些值非常接近 IPC-2221B 表 6-1 中適用於外部 PCB 層未使用三防塗層之導體的值。IPC-2221B 包括的電氣間隙要求適用於內部 PCB 層、具有或不具三防塗層的外部 PCB 層，以及外部元件組件的電氣間隙。IPC-9592B 提供適用於電腦與電信終端設備的特定準則。這些電氣間隙準則比較為一般的 IPC-2221B 略為保守一些。其規定如果任何導體無法滿足所需的電氣間隙，就必須使用三防塗層。

圖 7 顯示不同標準的所需電氣間隙相對於峰值電壓的關係：適用於無塗層外部層的 IEC 60664-1、IPC-2221B；適用於具塗層外部層的 IPC-2221B；適用於內層的 IPC-2221B；以及 IPC-9592B。您可看到內部 PCB 層所需的間距遠低於外部層，而相較於不具三防塗層的外部層，具有三防塗層的外部層所需的間距較小。例如，如果應用具有 400-V 峰值電壓，則根據 IPC-2221B，內部 PCB 層只需要 0.25 mm 的電氣間隙。對於未塗覆三防塗層的外部層，則根據標準，電氣間隙範圍為 2 mm 至 2.6 mm。就通用標準而言，IEC 60664-1 要求 2 mm，IPC-2221B 則要求 2.5 mm。在這種情況下，我們建議您使用較保守的 2.5 mm。若為電腦或電信應用，則根據 IPC-9592B，電氣間隙必須為 2.6 mm。如果無法滿足這些電氣間隙要求，即需要使用三防塗層。若使用三防塗層，則外部層只需要 0.8 mm 的電氣間隙。

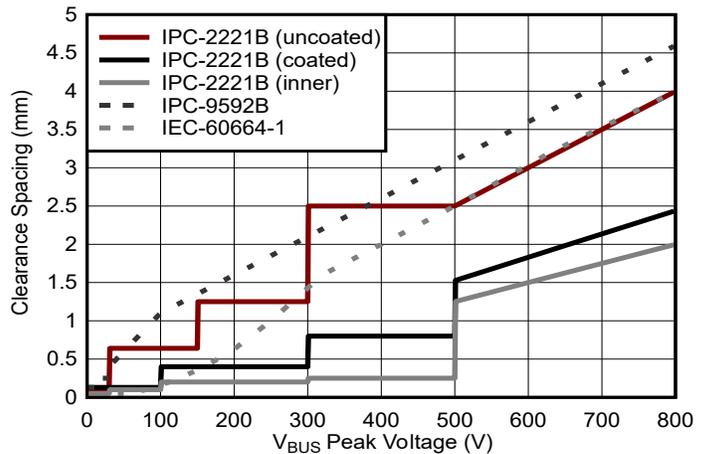


圖 7. 不同標準所指定的 PCB 高電壓電氣間隙要求。

使用流程圖的示例：電信 AC/DC 前端

我們已檢視了流程圖，並且說明了如何使用多項標準的相關表格。現在，讓我們來檢視電信 AC/DC 前端的範例，如 **圖 8** 所示。此應用具有通用 85 至 265-V_{AC} 輸入和 40 至 60-V_{DC} 輸出，其會相對於接地浮動。

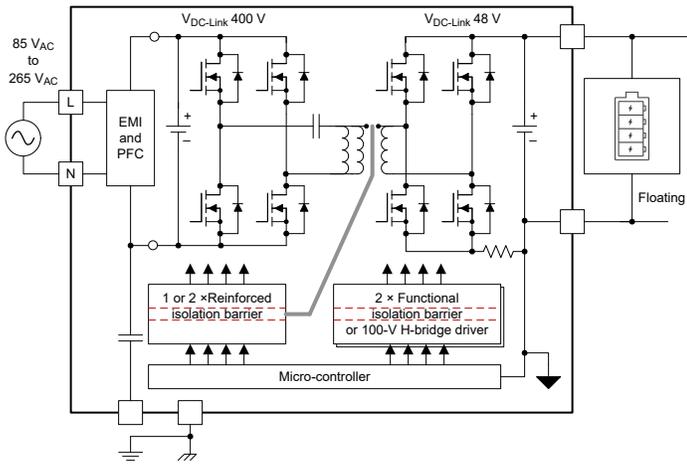


圖 8. 電信設備的 AC/DC 前端範例。

第一步是決定所需爬電距離，這需要知道工作電壓、污染等級和材料組。此轉換器內部的最高工作電壓為 400 V，因為 DC 鏈路電壓為此值。污染等級是 2，因為此電源供應器會位於電信設備的機殼內。

請務必查看所有三種材料組所需的爬電距離，因為此爬電距離會因系統中使用的個別元件而異。例如，德州儀器的隔離式開極驅動器可能具有材料組 I 絕緣，但是另一家廠商的光耦合器可能具有材料組 II 絕緣，而 PCB FR4 材料則可能具有材料組 IIIa。目標是設計能在海拔高度最高 5,000 m 處運作的電源供應器。

下一步是決定您需要的是強化絕緣或基本絕緣。根據 IEC 60950-1，輸入為主要主電源，輸出則為未接地 SELV。IEC 60950-1 的圖 2H 指出從主要主電源至未接地 SELV，需要採用強化絕緣。請注意，從輸出接地到接地的連線僅需要基本絕緣，因此會導致爬電距離和電氣間隙要求較小。不過此電源供應器的輸出並未接地至接地，因此適用強化絕緣規則。IEC 62368-1 的表 17 列出了所需爬電距離，而您需將其加倍，因為此應用需要強化絕緣。表 17 指出對於材料組 I，需要 4 mm；對於材料組 II，需要 5.6 mm；對於材料組 III，則需要 8 mm 的爬電距離。這包含強化絕緣的加倍因數。

現在該決定所需電氣間隙了。您知道污染等級為 2，且需設計的海拔高度為 5,000 m，因此下一步是決定所需的主電源暫態脈衝電壓。主電源額定線至中性線電壓最高 265 V，而暫態過電壓類別為 II，因為此電源轉換器會插入插座。從 IEC 60664-1 的表 F.1 可看出過電壓類別 II 的額定脈衝電壓為 2.5 kV。如果您使用通用 IEC 60664-1 表 F.2

的電氣間隙規則，則需使用下一個最高值 4 kV，因為此應用適用強化絕緣。然而，由於這是電信應用，因此您應使用 IEC 62368-1 的表 10，其中提供了基本絕緣與強化絕緣的值。您可從表格中發現對於 2.5-kV 額定脈衝電壓而言，需要 3.6 mm 的電氣間隙以進行強化絕緣。這比在 IEC 60664-1 表 F.2 中使用 4 kV 時所得到的 3 mm 電氣間隙更為保守。

現在，您需要套用 IEC 60664-1 表 A.2 中的海拔高度校正因數。對於 5,000 m，校正因數為 1.48。此應用所需的電氣間隙為 5.33 mm (3.6 mm × 1.48)。

表 6 摘要列出了爬電距離和電氣間隙距離、決定這些項目所需的參數，以及參考的標準相關表格。

參數	值	來源
主電源額定電壓	235 V _{AC}	應用詳細資料
最大工作電壓	400 V _{DC}	
海拔高度	5,000 m	
暫態過電壓類別	II	
污染等級	2	IEC 60950-1 圖 2H
絕緣等級	強化	
材料組	I II III	元件產品規格表
爬電距離	4 mm (2 mm × 2) 5.6 mm (2.8 mm × 2) 8 mm (4 mm × 2)	IEC 62368-1 表 17
額定脈衝電壓	2.5 kV	IEC 60664-1 表 F.1
海拔高度校正因數	1.48	IEC 60664-1 表 A.2
電氣間隙	5.33 mm (3.6 mm × 1.48)	IEC 62368-1 表 10

表 6. 電信 AC/DC 前端範例的爬電距離與電氣間隙要求摘要。

無法滿足所需爬電距離和電氣間隙時的例外情況

我們已探討如何在無法滿足電氣間隙要求時，對 PCB 採用三防塗層。此外，您可在無法滿足爬電距離的情況下使用 PCB 切口，並在無法滿足爬電距離、電氣間隙或兩者的情況下，執行例行暫態測試，且只需要具備功能絕緣。

有時可能無法滿足 PCB 上所需的爬電距離。尤其當 IC 絕緣為材料組 I，但是 PCB 為材料組 IIIa 類時，更容易有此情況。例如，電信範例的 AC/DC 前端對材料組 I 的所需爬電距離為 4 mm，對材料組 IIIa 的所需爬電距離則是 8 mm。因此若為爬電距離 4 mm 的封裝，就無法在 PCB 上

使用 8 mm 的間距。在這種情況下，可以在 PCB 中裁切一個槽，以增加爬電距離。這麼做不會影響電氣間隙，但是可增加爬電距離，因為爬電距離是沿著絕緣材料表面所測量的最短距離。IEC 60664-1 第 6.2 節提供了增加爬電距離的準則。如果槽寬度 = X，則根據污染等級，最小值 = X。圖 9 是有切口的 PCB 截面，而表 7 則顯示根據污染等級，槽所需的最小寬度。

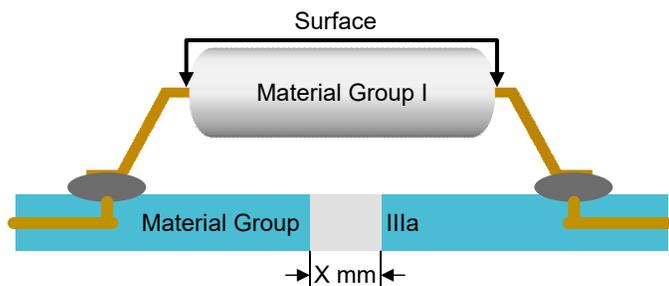


圖 9. 具有槽切口以增加 PCB 爬電距離的 PCB 截面面積。

污染等級	最小尺寸
1	0.25 mm
2	1.0 mm
3	1.5 mm

表 7. 為了增加爬電距離而在 PCB 中裁切槽時的槽寬最小值。

若您只需要功能絕緣，可在無法滿足所需爬電距離與電氣間隙距離時，於生產中使用例行暫態 (高電位) 測試。此測試會在刻意絕緣的兩個導體間施加高電壓，並測量因此造成的漏電流。如果漏電流超過特定閾值，裝置就會故障。在高電位測試期間施加的電壓，通常是兩倍的工作電壓加上 1,000 V。

例如，若應用的最大工作電壓為 265 V_{AC}，就會在 2 × 265 + 1,000 = 1,530 V 下進行測試。因此，1.5 kV 是常用的測試電壓。若無法滿足爬電距離與電氣間隙要求，有數項標準均提供進行高電位測試的準則：IEC 60664-1 的第 5.2.2.1 節和第 5.1.3.3 節；IEC 60950-1 的第 5.3.4 節；以及 IEC 62368-1 的第 B.4.4 節。

結論

許多標準皆可因應爬電距離與電氣間隙距離，而設計師必須了解許多技術詞彙才能利用這些標準。本報告中呈現的流程圖與方法，應可協助您更深入了解爬電距離、電氣間隙與高電壓間距，且有助於加快開發程序。有了這些知識，您就可在提升功率密度之際，一樣秉持安全設計準則。

參考資料

1. [Method for the Determination of the Proof and the Comparative Tracking Indices of Solid Insulating Materials](#)。IEC 60112。IEC：瑞士日內瓦，2020 年 10 月 27 日。
2. [Insulation Coordination for Equipment Within Low-Voltage Supply Systems – Part 1: Principles, Requirements and Tests](#)。IEC 60664-1。IEC：瑞士日內瓦，2020 年 5 月 26 日。
3. [Electrical Installations for Buildings](#)。IEC 60364。IEC：瑞士日內瓦。
4. [Audio/Video, Information and Communication Technology Equipment – Part 1: Safety Requirements](#)。IEC 62368-1。IEC：瑞士日內瓦，2023 年 5 月 26 日。
5. [Information Technology Equipment – Safety – Part 1: General Requirements](#)。IEC 60950-1。IEC：瑞士日內瓦，2013 年 5 月 28 日。
6. [Adjustable Speed Electrical Power Drive Systems – Part 5-1: Safety Requirements – Electrical, Thermal and Energy](#)。IEC 61800-5。IEC：瑞士日內瓦，2022 年 8 月 31 日。
7. [Safety of Power Converters for Use in Photovoltaic Power Systems – Part 1: General Requirements](#)。IEC 62109-1。IEC：瑞士日內瓦，2010 年 4 月 28 日。
8. [Generic Standard on Printed Board Design](#)。IPC-2221B。IPC: 伊利諾州班諾克本，2012 年 11 月。

9. **Requirements for Power Conversion Devices for the Computer and Telecommunications Industries**。IPC-9592，修訂版 B。IPC：伊利諾州班諾克本，2013 年 1 月 14 日。
10. Semiconductor Devices – Part 11: Magnetic and Capacitive Coupler for Basic and Reinforced Isolation。DIN VDE V 0884-11。VDE：德國法蘭克福，2017 年 1 月。
11. **Optical Isolators**，UL 1577。UL：伊利諾州諾斯布魯克，2014 年 4 月 25 日。
12. Audio/Video, Information and Communication Technology Equipment – Part 1: Safety Requirements。CQC GB4943.1。中華人民共和國國家認證認可監督管理委員會：中國北京，2022 年 8 月 1 日。
13. 「**隔離詞彙**」。德州儀器文獻編號 SLLA353A，2017 年 9 月。

重要聲明：本文所述德州儀器及其子公司相關產品與服務經根據 TI 標準銷售條款及條件。建議客戶在開出訂單前先取得 TI 產品及服務的最新完整資訊。TI 不負責應用協助、客戶的應用或產品設計、軟體效能或侵害專利等問題。其他任何公司產品或服務的相關發佈資訊不構成 TI 認可、保證或同意等表示。

所有商標均為其各自所有者的財產。

IMPORTANT NOTICE AND DISCLAIMER

TI PROVIDES TECHNICAL AND RELIABILITY DATA (INCLUDING DATA SHEETS), DESIGN RESOURCES (INCLUDING REFERENCE DESIGNS), APPLICATION OR OTHER DESIGN ADVICE, WEB TOOLS, SAFETY INFORMATION, AND OTHER RESOURCES "AS IS" AND WITH ALL FAULTS, AND DISCLAIMS ALL WARRANTIES, EXPRESS AND IMPLIED, INCLUDING WITHOUT LIMITATION ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY, FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE OR NON-INFRINGEMENT OF THIRD PARTY INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS.

These resources are intended for skilled developers designing with TI products. You are solely responsible for (1) selecting the appropriate TI products for your application, (2) designing, validating and testing your application, and (3) ensuring your application meets applicable standards, and any other safety, security, regulatory or other requirements.

These resources are subject to change without notice. TI grants you permission to use these resources only for development of an application that uses the TI products described in the resource. Other reproduction and display of these resources is prohibited. No license is granted to any other TI intellectual property right or to any third party intellectual property right. TI disclaims responsibility for, and you will fully indemnify TI and its representatives against, any claims, damages, costs, losses, and liabilities arising out of your use of these resources.

TI's products are provided subject to [TI's Terms of Sale](#) or other applicable terms available either on [ti.com](https://www.ti.com) or provided in conjunction with such TI products. TI's provision of these resources does not expand or otherwise alter TI's applicable warranties or warranty disclaimers for TI products.

TI objects to and rejects any additional or different terms you may have proposed.

Mailing Address: Texas Instruments, Post Office Box 655303, Dallas, Texas 75265
Copyright © 2024, Texas Instruments Incorporated