

# 電源供應設計研討會

高電壓終端設備之沿面距離和間隙  
距離解密

作者

Wei Zhang 和 Thomas LaBella



# 略圖

- 沿面距離 (CPG)、間隙距離 (CLR) 及其他相關術語定義
- 不同絕緣等級與選擇指南
- CLR 與 CPG 判斷流程圖及終端設備範例
- 高壓印刷電路板 (PCB) 間距標準與指南
- 高電壓間距的其他例外

# 高壓應用



# CPG 與 CLR

## CPG

於工作電壓未發生絕緣故障或漏電起痕 (長期)



- 兩個導電零件之間沿著固態絕緣材料表面的最短距離
- 污染、濕度、冷凝影響最甚
- 尺寸設計考量以下因素：
  - 均方根 (RMS) 工作電壓
  - 污染等級
  - 材料群組 (不會發生閃絡或絕緣故障)

## CLR

無空氣電離或電弧來承受需要的暫態 (短期)

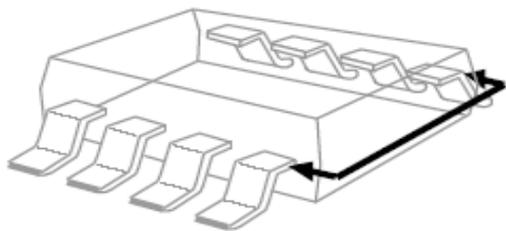


- 兩個導電零件之間在空氣中的最短距離
- 大氣壓力 (海拔)、溫度影響最甚
- 尺寸設計一併考慮因暫態過電壓\*而產生故障的可能性
- 海平面上方 2,000 m 以上的倍增因數
  - 例如，在 5,000 m 時為 x1.48

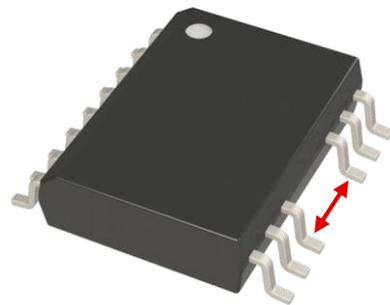
\*暫態電壓 – 數毫秒或更短時間內的短時間過電壓

# CPG 與 CLR 間的關係

- CPG 與 CLR 之間沒有物理關係
  - 大部分情況下，CPG 不能小於相關的 CLR
- 何謂足夠良好？盡可能最大化與考量尺寸和成本的比較



- 若角落針腳靠近封裝邊緣，則 CPG 可能會跨過封裝側邊



- 僅限適當操作下  $CPG = CLR$

# 材料群組與 CTI

- 材料群組取決於相對漏電起痕指數 (CTI)
- CTI 為絕緣材料承受 (每 30 秒) 50 滴污染水 (0.1% 氯化銨) 的最大  $V_{RMS}$ 
  - 無漏電起痕 (<0.5 A) (形成導電通路)

材料群組	CTI 範圍 ( $V_{RMS}$ )
材料群組 I	CTI $\geq$ 600
材料群組 II	400 $\leq$ CTI < 600
材料群組 IIIa	175 $\leq$ CTI < 400
材料群組 IIIb	100 $\leq$ CTI < 175 或者若未指定

TI 隔離積體電路

大部分 FR4 PCB

\*材料群組由依據國際電子電機委員會 IEC 60112 的測試資料評估來驗證

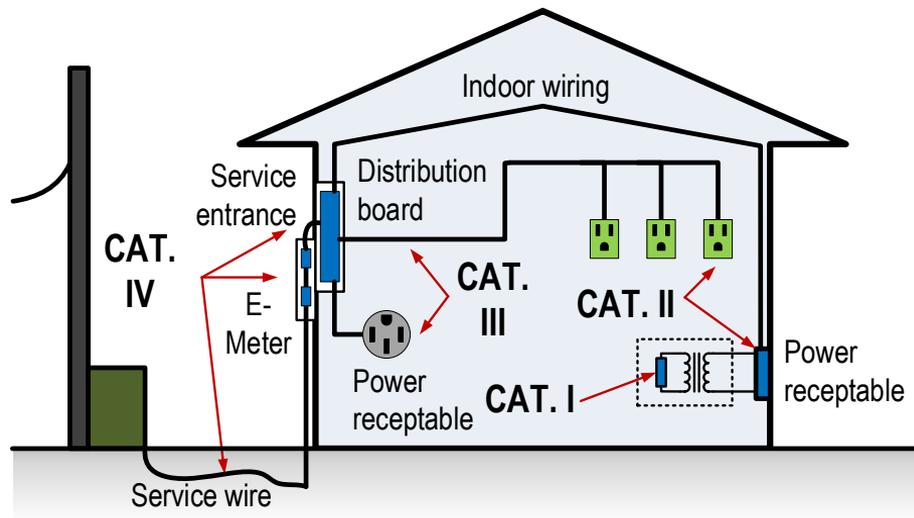
# 污染等級

分類	說明	範例
污染等級 1	<ul style="list-style-type: none"><li>沒有污染或只有乾燥、非導電性污染</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>密封元件(鍍膜 PCB)，無塵室</li></ul>
污染等級 2	<ul style="list-style-type: none"><li>由於偶發冷凝而短暫導電</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>依據 IEC 60950-1 或 IEC 62368-1 的電信機殼</li><li>實驗室、辦公室</li></ul>
污染等級 3	<ul style="list-style-type: none"><li>受到導電性污染</li><li>非導電性污染可能由於預期冷凝而變成導電性污染</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>無暖氣工業廠房與農業</li></ul>
污染等級 4	<ul style="list-style-type: none"><li>由於導電灰塵、雨水或其他潮濕條件而產生持續導電性</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>戶外應用</li></ul>

# 暫態過電壓分類

- 過電壓分類也稱為所需的脈衝承受電壓
- 適用由低壓電源直接供電的設備的**機率**影響

類別	說明	範例
IV	原始安裝	<ul style="list-style-type: none"><li>電量計</li><li><b>4 kV<sub>PK</sub>*</b></li></ul>
III	固定裝置，可用性受到特殊需求所影響	<ul style="list-style-type: none"><li>公用面板</li><li>配電板</li><li><b>2.5 kV<sub>PK</sub>*</b></li></ul>
II	由固定裝置供電的耗能設備	<ul style="list-style-type: none"><li>插座，距離 III 10 m</li><li><b>1.5 kV<sub>PK</sub>*</b></li></ul>
I	連接至電路，該電路採取措施將暫態電壓限制在較低等級	<ul style="list-style-type: none"><li>調溫器、</li><li>灑水器</li><li><b>24 V<sub>AC</sub></b></li><li><b>0.8 kV<sub>PK</sub>*</b></li></ul>



\*家用 120/240 V<sub>AC</sub> 線至中性線，假設為過電壓分類 II

# 並沒有適用於不同電壓分類與設備的單一解決方案

絕緣系統中的使用者安全		PCB
<ul style="list-style-type: none"><li>IEC 60664-1 – 絕緣協調，適用 <math>&lt;1.5\text{-kV}_{\text{DC}}</math> 或 <math>&lt;1\text{-kV}_{\text{AC}}</math> 系統<ul style="list-style-type: none"><li>CPG 與 CLR，電強度測試</li></ul></li></ul>		僅限適當操作或正常操作
IEC 62368-1 (IEC 60950-1)*	電子通訊、伺服器、音訊、影片通訊、雲端運算	印刷電路協會 (IPC) <ul style="list-style-type: none"><li>IPC 2221 – 一般需求</li><li>IPC 9592 – 電腦/電子通訊</li></ul>
IEC 61800-5	馬達驅動	IEC 60664-1 針對 PCB 的 CPG 指南
IEC 62109-1	太陽能	IEC 62368，無鍍膜與鍍膜之間的分隔距離

\*IEC 60950-1 於 2020 年 12 月撤銷

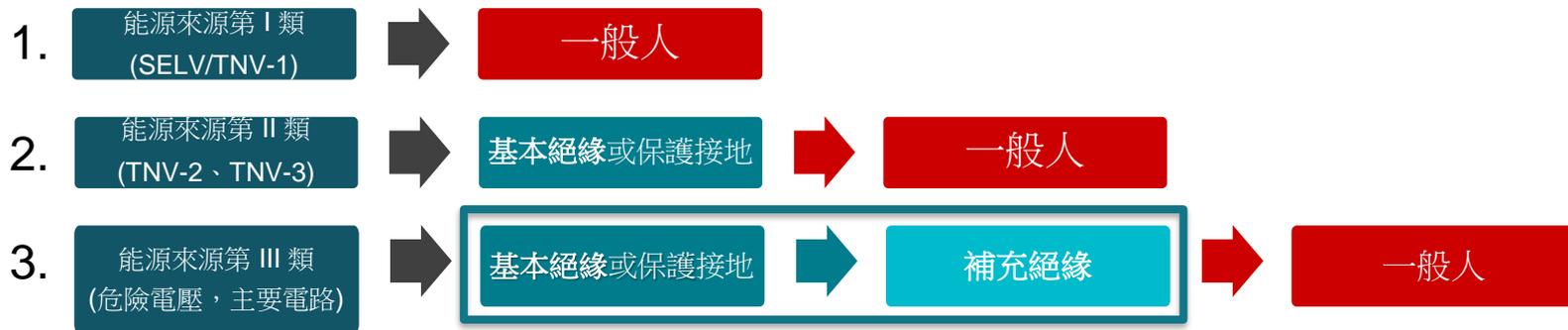
# CPG 與 CLR – 造成影響的參數

- 隔離元件 (例如絕緣式閘極驅動器) 的絕緣標準並未提及 **CPG 與 CLR**。反之其涉及絕緣層承受電氣、機械應力以及熱和環境影響的能力。範例包含：
  - IEC 60747-1 (Verband der Elektrotechnik [VDE] 0884-11) 適用歐洲；保險商實驗室 (UL) 1577 是用美國；中國質量認證中心(CQC) GB4943.1 適用中國。這些元件絕緣標準涉及  $V_{IOSM}$ 、 $R_{IO}$ 、 $C_{IO}$ 、 $q_{pd}$ 、絕緣距離 (DTI)、共模瞬態抗擾度 (CMTI) 等。
- 不過，絕緣等級 (基礎、強化型、功能絕緣) 確實會影響 CPG 與 CLR

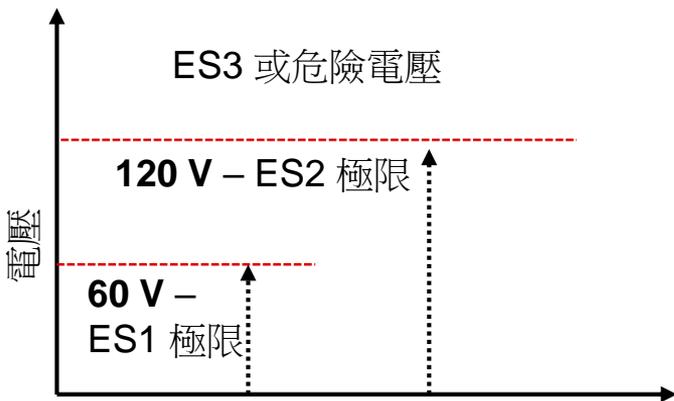
# 絕緣等級類型

- 功能絕緣或 PCB 高電壓間距
  - 針對電路的適當運作 – 接地反彈、高電壓、二次電路之間的暫態
- 基本絕緣
  - 在正常與異常操作條件下避免觸電的單層絕緣
- 補充絕緣
- 雙重絕緣
  - 基礎加上補充隔離，用於正常、異常及**單一故障條件**
- 強化絕緣
  - 提供與雙重絕緣同等額定值的單一絕緣系統

# 絕緣等級指南



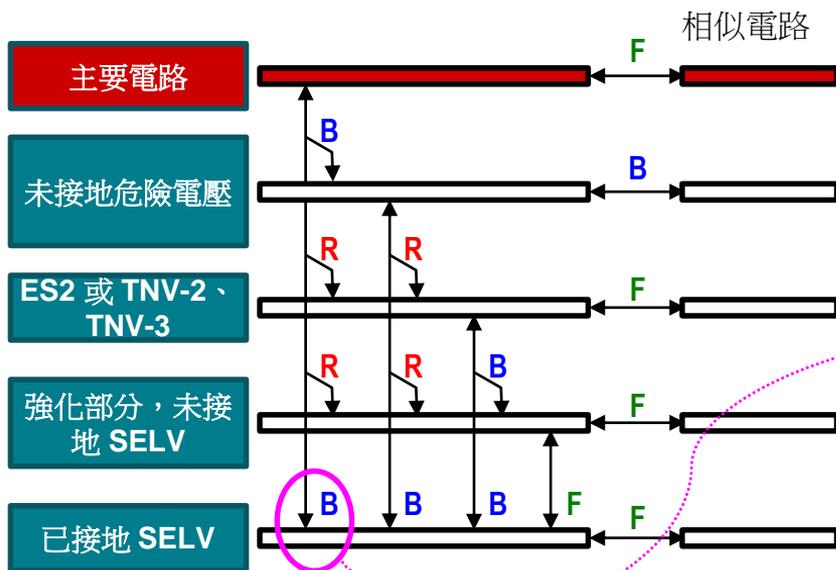
強化絕緣



IEC 62368-1	IEC 60664-1、IEC 60950-1
ES1	安全超低電壓 (SELV)
ES2	TNV-1、TNV-2、TNV-3*
ES3	危險主要電路 (連接至 AC 市電)
一般人	使用者

\*IEC 60950-1 章節 2.3 定義 TNV-1、TNV-2 與 TNV-3

# 絕緣等級範例



- **F**：功能絕緣、**B**：基礎絕緣、**R**：強化絕緣
- 圖 2H IEC 60950-1 2013

等級	分離零件		例
F	SELV	SELV	<60-V 磚模組
	強化部分		
B	主要、ES2、TNV-2/-3 危險電壓	SELV 已接地	<ul style="list-style-type: none"> <li>• &gt;60-V DC/DC</li> <li>• AC 至 DC 整流器，具備 12-V 接地輸出</li> <li>• 車載電池充電器</li> </ul>
	主要	未接地危險	
R	主要或危險電壓	SELV 未接地	AC 至 DC 整流器，具備 -48-V 輸出
	ES2、TNV-2/-3		>60-V DC/DC
	主要電路	強化部分	車載電池充電器

# CPG 與 CLR 判斷流程圖

開始

避免觸電的安全絕緣系統

CPG

判斷

工作電壓\*  
污染等級\*\*  
材料群組

基本還是強化

基本

IEC 60664-1 表 F.4  
• IEC 62368-1 表 17  
• IEC 61800-5-1 表 10  
• IEC 62109-1 表 14

強化

2 ×

基本

CLR

判斷

電源暫態  
(IEC 60664-1 表 F.1)  
- 電源額定電壓  
- 過電壓分類  
污染等級  
海拔 (海平面上)

基本還是強化

基本

IEC 60664-1 表 F.2  
• IEC 62368-1 表 10  
• IEC 61800-5-1 表 9  
• IEC 62109-1 表 13

強化

比表 F.2 高一級  
IEC 60664-1 章節 5.1.6

海拔  
>2,000 m?  
若超過，請  
使用 IEC  
60664-1 的  
校正因數  
表 A.2

PCB 高電壓  
間距 - 正常  
與適當操作

高壓間距

判斷

一般 PCB 指南  
目標終端設備  
其他例外

IPC 2221B (表 6-1)、IEC 60664-1 (表 F.4)

IPC 9592B (圖 4-3)、IEC 62368-1 (無鍍膜表 17/10)，鍍膜表 G.13

例行暫態測試 (高電位 [HiPot])，鍍膜 PCB，內部規則

\*工作電壓：絕緣部分上 AC 或 DC 電壓的最高 RMS 值，IEC 60664-1 章節 3.5

\*\*根據 IEC 62109-1 (遵照 IEC 60664-3) 或 IEC 62368，鍍膜 PCB 可幫助降低至污染等級 1，並使用表 G.13 縮短 CPG 距離

# 電源暫態電壓 – IEC60664-1 表 F.1

- 由 AC 電源判斷暫態電壓
  - 參考 IEC 60664-1 來指定其他所有終端設備的暫態電壓

線至中性線電壓 最高電壓，且包含 $V_{RMS}$	電源暫態/額定脈衝電壓 ( $V_{PK}$ )*			
	過電壓分類			
	I	II	III	IV
• $\leq 50$	330	500	800	1,500
• $\leq 150$ ，例如 120 (美國)	800	1,500	2,500	4,000
• $\leq 300$ ，例如 230 (歐盟、中國、日本)	1,500	<b>2,500</b>	<b>4,000</b>	6,000
• $\leq 600$ 例如工業馬達或船舶動力	2,500	4,000	6,000	8,000

- 由短暫的暫時過電壓判斷暫態電壓：
  - 額定線至中性線電壓 +1,200 V，持續時間最高達 5 秒 (IEC 60664-1 5.3.3.2.3)

\*在具備 1.2/50- $\mu$ s 波型的電壓下進行脈衝承受測試

# 間隙 – IEC 60664-1 表 F.2

要求的暫態電壓 (kV <sub>PK</sub> )	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)		

海拔 (m)	校正因數
2,000	1.0x
3,000	1.14x
4,000	1.29x
<b>5,000</b>	<b>1.48x</b>
6,000	1.70x
10,000	3.02x

- 括號內的間隙取自 IEC 62368-1 表 10，用於伺服器電信
- 依據 IEC 60664-1 表 F.2，該間隙假設為非均勻場，適用海拔最高 2,000 m 的基本絕緣
- 強化絕緣的 CLR 大小依據表 F.2 中指定的額定脈衝電壓，但更高一級
- 參考 IEC 60664-1 來指定其他所有設備的電氣間隙

# 沿面距離 – IEC60664-1 表 F.4

V <sub>RMS</sub> <sup>*</sup> (V)	避免因漏電起痕 (mm) 導致故障而設計的 CPG **			
	污染等級			
	1	2		
	所有材料群組	材料群組		
I		II	III	
63	0.20	0.63	0.90	1.25
400	1.0	<b>2.0</b>	2.8	<b>4.0</b>
800	2.4	4.0	5.6	8.0
1,000	3.2	5.0	7.1	10.0

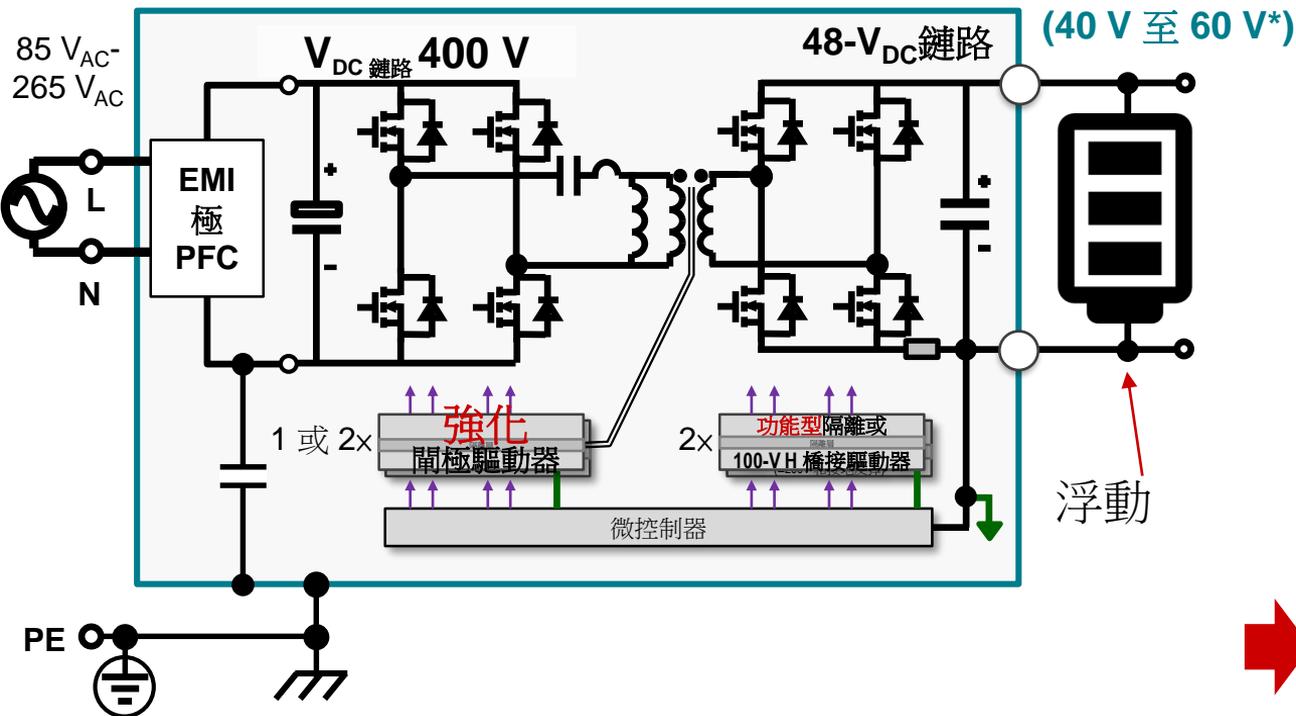
- 強化絕緣的 CPG 應為表 F.4 中基本絕緣的 CPG 的兩倍
- 表 F.4 的數值基於現有經驗數據，且適用大部分的應用。不過對功能絕緣來說可能適合採取表 F.4 以外的 CPG 值
- 參考 IEC 60664-1 來指定其他所有設備的沿面距離

\*所選擇的電壓應適用該設備的最高額定電壓

\*\*可於距離最近的兩點之間使用線性插值法

# 範例 1：電信 AC/DC 前端

## AC/DC-DC/DC

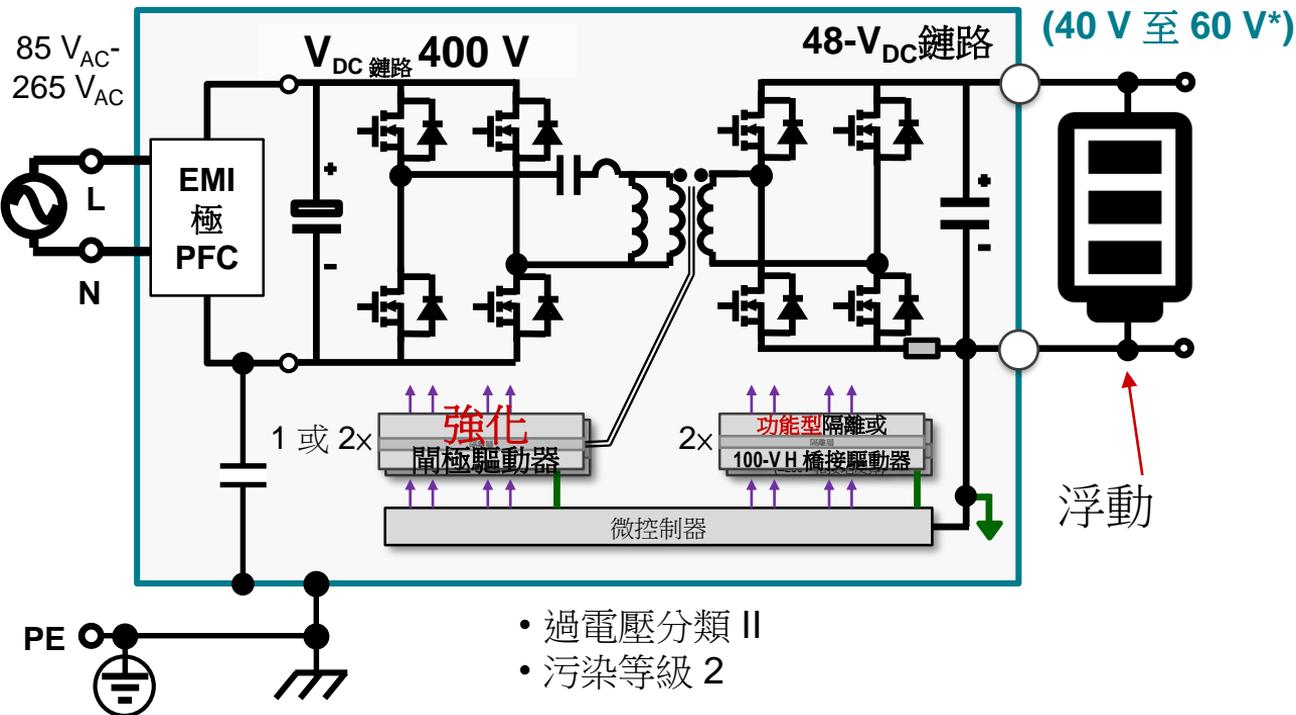


等級	分離零件	
F	SELV	SELV
	強化部分	
B	主要、ES2、TNV-2、TNV-3、危險電壓	SELV 已接地
	主要	未接地危險
R	主要或危險電壓	SELV 未接地
	ES2、TNV-2、TNV-3	

\*-48 V<sub>DC</sub> 電源系統電壓範圍為 40.5 V<sub>DC</sub> 至 57 V<sub>DC</sub> (ETSI EN 300 132-2)

# 範例 1：電信 AC/DC 前端

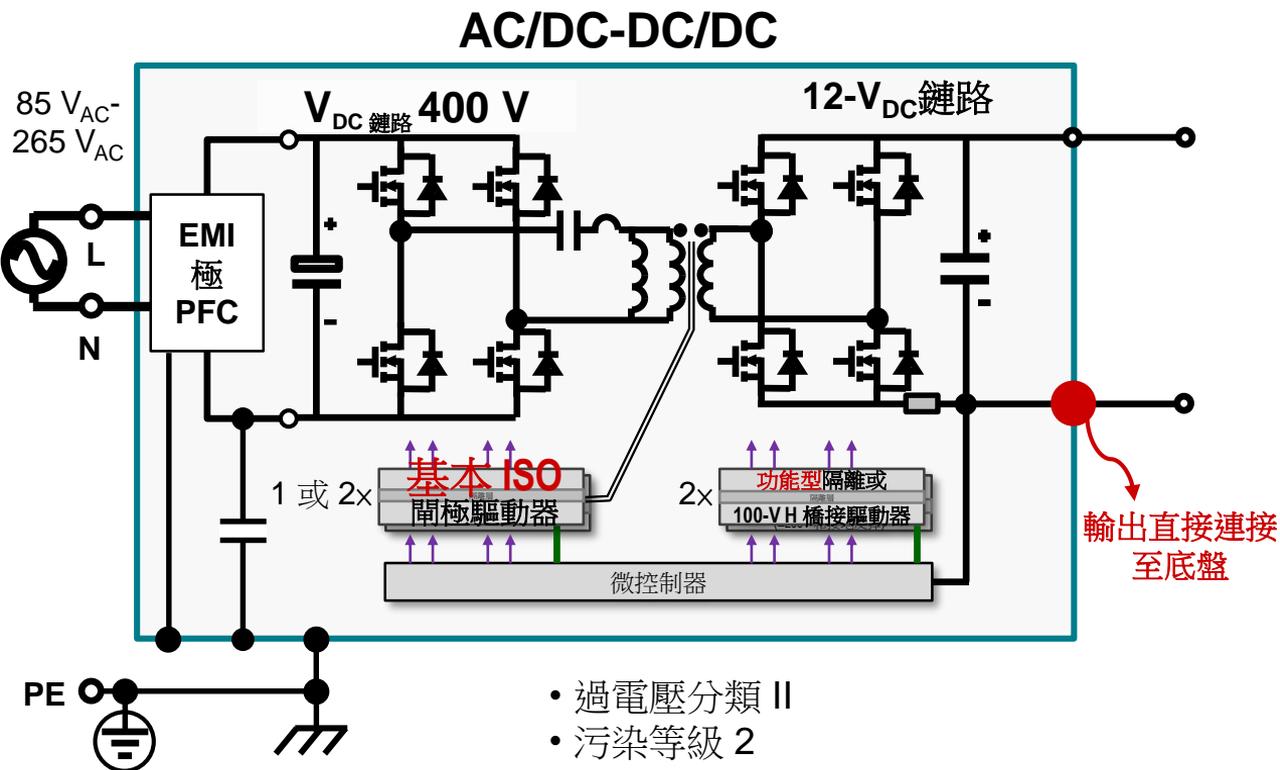
## AC/DC-DC/DC



項目	必填
絕緣等級	強化
AC電源暫態	4,000 V
於 5,000 m 的 電氣間隙	5.7 mm (3.8 mm × 1.48)
沿面距離(MG I)	4.0 mm (2 mm × 2)
沿面距離 (MG II)	5.6 mm (2.8 mm × 2)
沿面距離(MG III)	8.0 mm (4.0mm × 2)

\*-48 V<sub>DC</sub> 電源系統電壓範圍為 40.5 V<sub>DC</sub>至 57 V<sub>DC</sub>(ETSI EN 300 132-2)

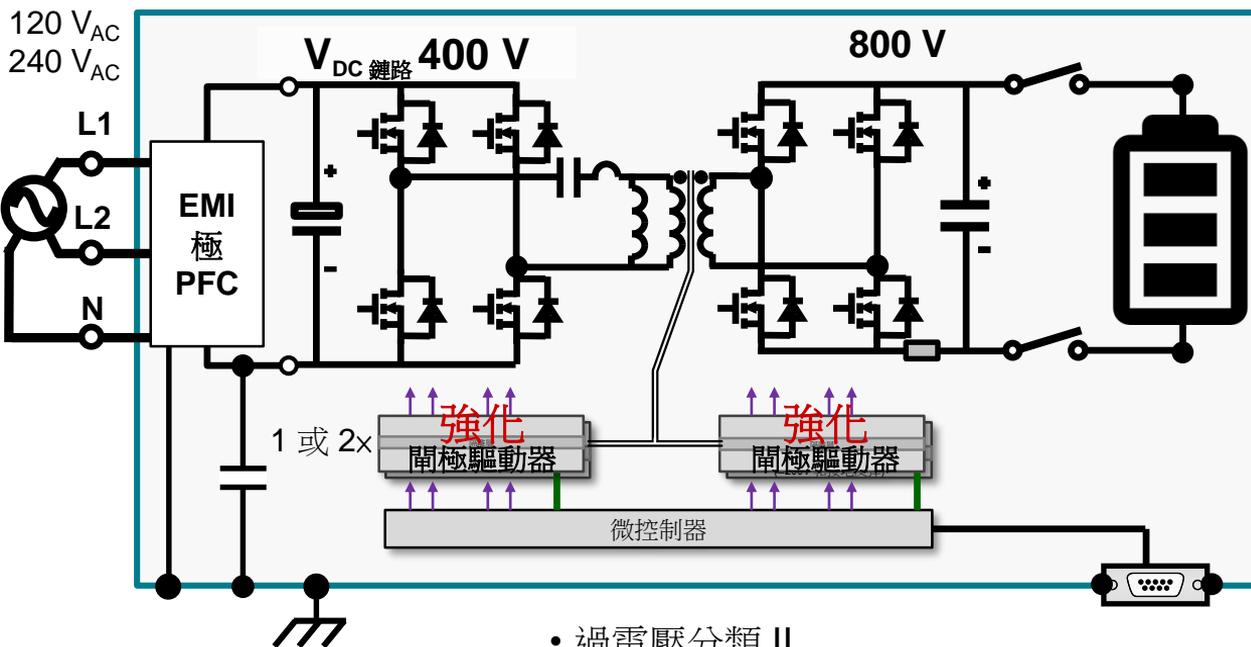
# 範例 2：具有 12-V 輸出的伺服器



項目	必填
絕緣等級	基本
AC 電源暫態	2,500 V
於 5,000 m 的 電氣間隙	2.7 mm (1.8 mm × 1.48)
沿面距離 (MG I)	2 mm
沿面距離 (MG II)	2.8 mm
沿面距離 (MG III)	4.0 mm

# 範例 3：車載電池充電器

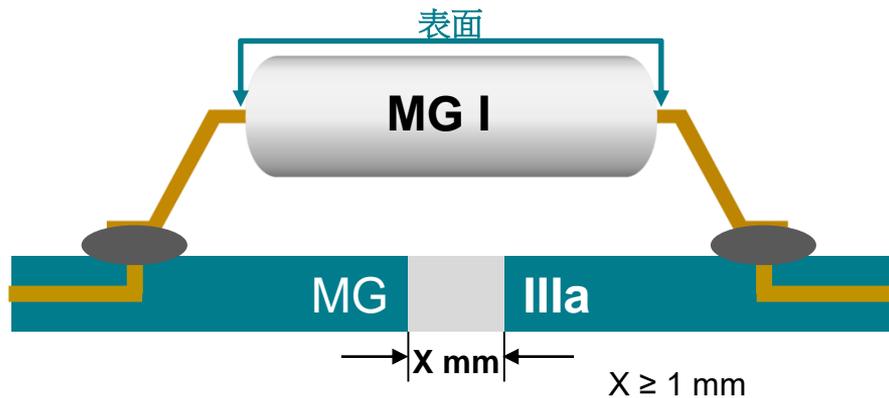
## AC/DC-DC/DC



- 過電壓分類 II
- 污染等級 2

項目	必填
絕緣等級	強化
AC電源暫態	2,500 V (美國) 4,000 V (歐盟)
於 5,000 m 的電氣間隙	2.3 mm 或 4.5 mm (1.5 或 3 mm x 1.48)
沿面距離 (MG I) 400 V	4.0 mm (2 mm x 2)
沿面距離 (MG II) 400 V	5.6 mm (2.8 mm x 2)
沿面距離 (MG I) 800 V	8.0 mm (4 mm x 2)
沿面距離 (MG II) 800 V	11.2 mm (5.6 mm x 2)

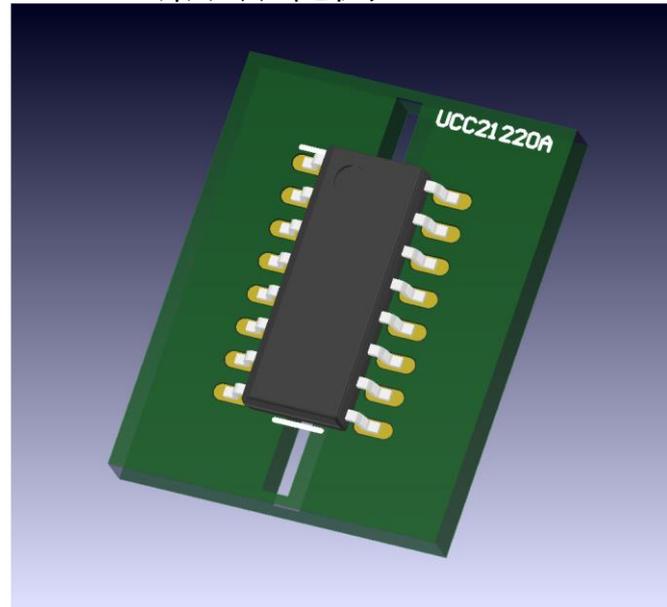
# 增加 PCB 沿面距離的 PCB 斷路器



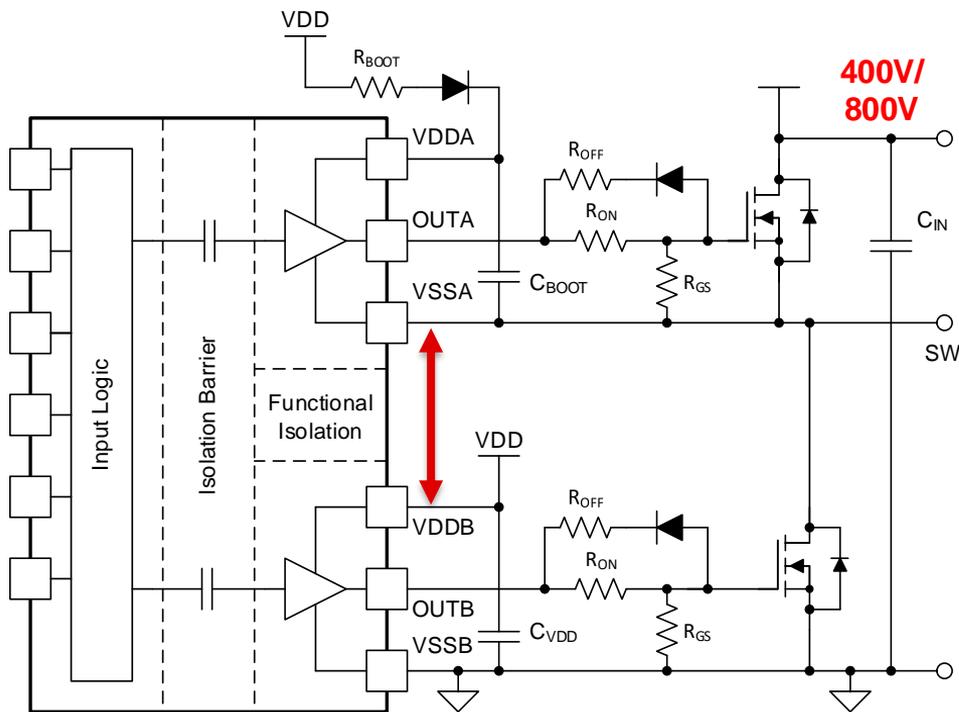
污染等級	尺寸x 最小值*
1	0.25 mm
2	1.0 mm
3	1.5 mm

\*IEC 60664-1 章節 6.2 第 2.0 版

## PCB 斷路器範例



# 高壓間距：PCB

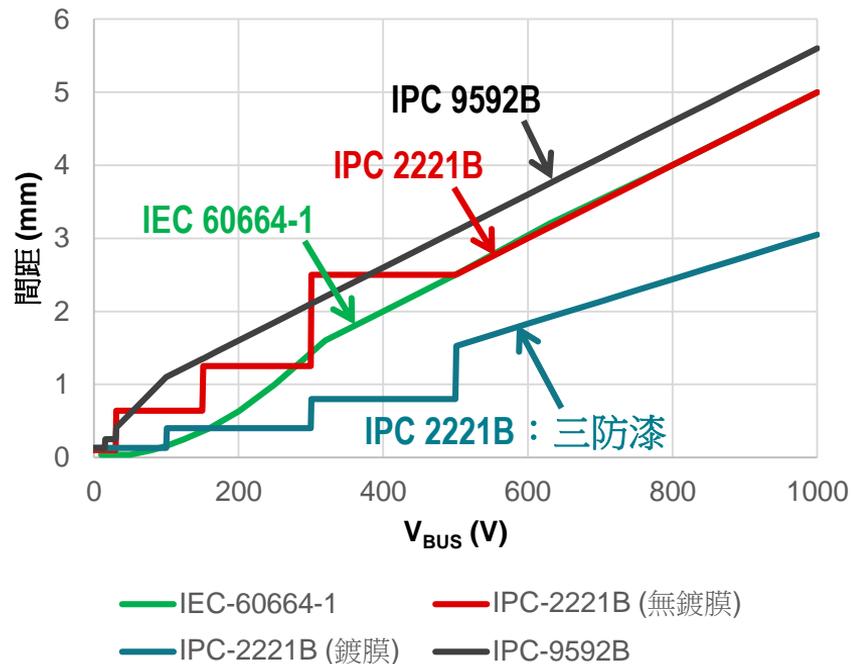


- IEC 60664-1 提供 CPG 指南以避免因漏電起痕導致故障
- IPC-2221 「印刷電路板設計一般標準」
  - 相標準依據環境條件與三防漆，提供了 PCB 間隔的廣泛指南
- IPC-9592 「適用電腦與電信產業之電源轉換裝置需求」
  - 提供非絕緣導體間距需求的指南

\*UL 796，「安全標準：印刷線路板」提供垂直層間距指南

# 高壓間距：PCB 間距需求

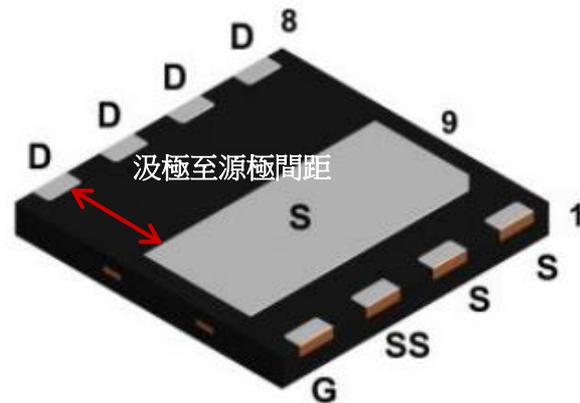
電壓	IEC 60664-1	IPC 9592B $0.6 + V_{PK} \times 0.005$	IPC 2221B	
			無鍍膜	鍍膜
(V)	(mm)			
20	0.04	0.7	0.1	0.13
32	0.04	0.75	0.64	0.13
63	0.063	0.9	0.64	0.13
125	0.25	1.2	0.64	0.4
<b>400</b>	<b>2</b>	<b>2.6</b>	2.5	0.8
<b>800</b>	<b>4</b>	4.6	<b>4</b>	2.44
1,000	5	5.6	5	3.05



# 現有高電壓封裝範例

- 縱使為相同應用，在產業當中也會存在不一致之處

製造商	封裝	最大絕對值 (DC)	高壓間距
I1	8 × 8 DFN	650 V	2.325 mm
I2	8 × 8 DFN	600 V	2.8 mm
G1	8 × 8 DFN	650 V	2.8 mm
G2	8 × 8 DFN	650 V	2.74 mm
T1	8 × 8 DFN	650 V	2.5 mm
T1	TO247-3	650 V	2.7 mm
T1	TO220-3	650 V	1.11 mm
T2	7 × 9 QFN	650 V	2.1 mm



# 高電壓間距的其他例外

為了在高電壓環境下正常操作，**功能絕緣**的沿面間距與電氣間隙，或者**高電壓間距**必須滿足下列條件\*：

- 符合上述的沿面距離和電氣間隙要求

**或**

- 可承受電強度例行測試 (HiPot 測試)
  - 峰值工作電壓或所要求的脈衝承受電壓，決定了電強度測試電壓
    - 範例：手機或 PC 變壓器可接受 1 kV/1 mm 的 HiPot 測試

\*依據 IEC 60664-1 5.2.2.1 及 5.1.3.3、IEC 60950-1 5.3.4 及 IEC 62368-1 B.4.4 的功能絕緣說明

# 結論

- 審視重要術語定義，列出判斷 CPG 與 CLR 的各參數產生的影響，並舉出實際範例
- 統整判斷 CPG 與 CLR 的兩種方法：絕緣安全性與高電壓 PCB 間距
- 介紹如何判斷絕緣等級
- 呈現判斷絕緣系統 CPG 與 CLR 以及 PCB 相關高電壓間距的流程圖，並審視流程圖使用的 IEC 60664-1 重要表格
- 討論三個範例：電信、伺服器與車載電池充電器
- 統整並比較 IPC 與 IEC 標準的不同高電壓間距
- 提供不符合 CPG 與 CLR 規範情況下的功能絕緣相關例外情況

# 資源

- IEC 60664-1 絕緣協調，適用具備低壓供應系統的設備 – 第 1 部分：原則、要求與測試
- IEC 62368-1 音訊/影片、資訊與通訊技術設備 – 第 1 部分：安全需求
- IEC 60950-1 資訊技術設備 – 安全性 – 第 1 部分：一般需求
- IEC 62109-1 電源轉換器安全性，用於光電電源系統 – 第 1 部分：一般需求
- IEC 61800-5-1 可調速度電力驅動系統 – 第 5-1 部分：安全需求 – 電力、熱與能源
- IPC 2221B 印刷電路板設計一般標準
- IPC 9592B 適用電腦與電信產業之電源轉換裝置需求



© 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)

## 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