

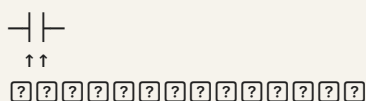
第 1 章 3：電容 (Capacitor)

電容是儲存電荷的元件，是電子電路中第二常見的被動元件，比電阻有更多「個性」。

一、電容的物理本質

結構

兩個導體（板）之間夾著「介電質」（dielectric）形成電容。



工作原理

當兩極板施加電壓時，正電荷累積在一板，負電荷累積在另一板，形成電場。電容「儲存了能量」。

電容值 (Capacitance, C)

定義：

$$C = \frac{Q}{V}$$

- 單位：法拉 (Farad, F) = 庫倫/伏特
- 1 F 是非常大的電容值，常見電容用 μF , nF, pF

電容值取決於物理結構：

$$C = \epsilon_r \epsilon_0 \frac{A}{d}$$

- ϵ_0 ：真空介電常數 $\approx 8.854 \times 10^{-12} \text{ F/m}$
- ϵ_r ：相對介電常數（無單位，依介電質而定）
- A：板面積
- d：板間距

重點：板面積大、介電常數高、板間距小 → 電容值大。

儲存的能量

$$E = \frac{1}{2}CV^2$$

1 μF 電容充電到 100V 儲存： $0.5 \times 10^{-6} \times 10^4 = 5 \text{ mJ}$

二、電容的核心特性

1. 充放電方程式

電容兩端電壓不能瞬間改變。

電流-電壓關係：

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

意義：要讓電容兩端電壓快速變化，需要大電流。

2. RC 充放電

電阻 R 與電容 C 串聯接電源 V_0 ：

充電：

$$v_C(t) = V_0(1 - e^{-t/RC})$$

放電：

$$v_C(t) = V_0e^{-t/RC}$$

時間常數： $\tau = RC$

時間	電壓變化
$t = \tau$	達到 63.2%
$t = 2\tau$	達到 86.5%
$t = 3\tau$	達到 95.0%
$t = 5\tau$	達到 99.3% (視為穩態)

3. 阻抗 (Impedance)

電容對交流的「阻力」：

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \angle -90^\circ$$

- 頻率越高，阻抗越低
- 直流 (f=0) 時阻抗無窮大 (開路)
- 高頻時阻抗趨近於零 (短路)

這讓電容能「讓 AC 通過、阻擋 DC」，是濾波器、耦合的核心。

例：1μF 電容在不同頻率的阻抗

頻率	Z _C
10 Hz	15.9 kΩ
100 Hz	1.59 kΩ
1 kHz	159 Ω
10 kHz	15.9 Ω
100 kHz	1.59 Ω
1 MHz	0.159 Ω
10 MHz	0.0159 Ω

三、電容的功能應用

功能	應用
儲存電荷	大型電解電容、超級電容
電源去耦 (Decoupling)	每顆 IC 旁的 0.1 μF + 10 μF
濾波	整流後的平滑電容、LC 濾波器
耦合 (DC blocking)	AC 訊號通過、隔離直流偏壓
旁路 (Bypass)	將高頻雜訊接地
諧振	LC 諧振電路、晶振負載
計時	RC 振盪器、555 計時器
能量緩衝	UPS、馬達啟動

四、電容的種類

電容是元件種類最多、特性差異最大的元件之一。選錯了會嚴重影響性能。

1. 陶瓷電容 (Ceramic Capacitor / MLCC)

最常見的 SMD 電容，無極性。

- MLCC：Multi-Layer Ceramic Capacitor 多層陶瓷電容
- 容量範圍：pF–100 μ F
- 體積小、低成本、高頻特性好

Class 1 (如 C0G/NP0)：- 介電質為順電性 (paraelectric) - 容量穩定、低損耗、低介電吸收 - 容量小 (< 100 nF) - TCC ± 30 ppm/ $^{\circ}$ C - 首選用於：諧振、計時、濾波器、精密電路

Class 2 (如 X7R, X5R, Y5V, Z5U)：- 介電質為鐵電 (ferroelectric, BaTiO₃) - 容量大、密度高 - 但有溫度漂移、DC bias 效應、老化效應

代碼解讀：例「X7R」- 第 1 碼 (X)：低溫範圍 (X = -55° C) - 第 2 碼 (7)：高溫範圍 (7 = $+125^{\circ}$ C) - 第 3 碼 (R)：容量變化 (R = $\pm 15\%$)

代碼	範圍	容差	用途
C0G/NP0	$-55 \sim +125^{\circ}$ C	± 30 ppm/ $^{\circ}$ C	高頻精密
X7R	$-55 \sim +125^{\circ}$ C	$\pm 15\%$	一般去耦
X5R	$-55 \sim +85^{\circ}$ C	$\pm 15\%$	一般去耦 (低成本)
Y5V	$-30 \sim +85^{\circ}$ C	$+22\%/-82\%$	不建議使用！
Z5U	$+10 \sim +85^{\circ}$ C	$+22\%/-56\%$	同上

 警告：Y5V/Z5U 看起來容量大又便宜，但溫度與電壓變化下實際容量可能掉到標稱值的 20%。設計時嚴禁用於關鍵電源去耦。

MLCC 的隱藏陷阱：DC Bias 效應

施加直流偏壓時，X7R/X5R 的容量會大幅下降。

範例：標稱 10 μ F / 16V X5R 0805 在 5V 直流下，實際容量可能只剩 5 μ F；在 10V 下可能只剩 2.5 μ F。

設計重要電源時，必須查 datasheet 的「Capacitance vs DC Bias」曲線，並依工作電壓選用。經驗法則：選 2 倍以上容量、選大尺寸（1206 比 0603 較不縮）、選高耐壓型。

2. 鋁電解電容 (Aluminum Electrolytic)

大容量、有極性，常用於電源濾波。

- 結構：兩片鋁箔捲繞，中間電解液
- 容量：1 μF –數十萬 μF
- 耐壓：2.5V – 500V+
- 有極性！反接會爆炸或漏液

特性：- 容量大、密度高 - ESR 較高 - 頻率特性差（高頻容抗下降） - 壽命有限（與溫度強相關） - 老化會漏液

子類：

- 標準型：通用，幾百~幾千小時 @ 105° C
- 長壽命型：5000–10000 小時 @ 105° C
- 低 ESR 型：開關電源用
- 固態電解 (Polymer)：壽命長、低 ESR、稍貴

阿瑞尼斯定律 (Arrhenius' s Law)

電解電容壽命每降 10° C，壽命延長 2 倍：

$$L = L_0 \times 2^{(T_0 - T)/10}$$

- L_0 ：105° C 額定壽命
- T_0 ：105° C
- T ：實際工作溫度

例：5000h @ 105° C 的電容，在 65° C 工作 $\rightarrow 5000 \times 2^4 = 80000\text{h} \approx 9$ 年

3. 鉭電容 (Tantalum)

體積小、容量穩定，但價格高、有極性。

- 容量：0.1 μF –1000 μF
- 耐壓：6.3V–50V

- ESR 比鋁電解低
- 頻率特性好

特性： - 體積小、長壽命 - 不會漏液 - 過電壓會起火爆炸！ 必須降額使用 50% 以上 - 因為原料鉭 (Ta) 部分產地有戰爭爭議，價格波動大

子類：

- 標準鉭： MnO_2 電解質
- 聚合物鉭 (Polymer Tantalum)：聚合物電解質，更低 ESR、更安全

4. 薄膜電容 (Film Capacitor)

高品質、無極性，常見於音響、電源、馬達。

介電質：聚酯 (PET)、聚丙烯 (PP)、聚苯乙烯等。

特性： - 容量穩定、低損耗 - 自我修復 (self-healing) - 容量範圍：1 nF–100 μF - 體積較大 - 耐壓高 (可達 kV)

子類：

- PP：聚丙烯，高頻、低損耗
- PET：聚酯，性價比高
- PPS：聚苯硫醚，高溫穩定
- 金屬化薄膜：薄膜上蒸鍍金屬，容量大但 ESR 稍高

應用： - 音響交越網路 (crossover) - AC 電源濾波 (X capacitor、Y capacitor) - 馬達啟動 - 開關電源 (Snubber)

5. 超級電容 (Supercapacitor / Ultracapacitor)

超大容量 (F 級！)，介於電容與電池之間。

- 容量：0.1 F–數千 F
- 耐壓低 (2.5–3 V，串聯使用)
- 充放電快 (比電池快)
- 循環壽命長 (百萬次)

應用： - 短時備援電源 (停電後保持 RTC) - 能量回收 (電動公車剎車) - 脈衝功率 (電子閃光燈)

6. 雲母電容 (Mica Capacitor)

超穩定、高頻、高壓，但容量小。

- 容量：1 pF–10 nF
- 耐壓：100V–10 kV
- 用於高頻、高壓、軍工應用

7. 可變電容 (Variable Capacitor / Trimmer)

- 早期收音機調諧用
- 現多被變容二極體 (Varactor) 取代

五、電容的關鍵規格

1. 容量與容差

E 系列同電阻，容差通常更大：

容差	標示
±1%	F
±5%	J
±10%	K
±20%	M
-20% / +80%	Z

電解電容容差 ±20% 很常見。

2. 額定電壓 (Rated Voltage)

絕對不能超過。建議降額：

- 陶瓷電容：使用 50–80% 額定
- 鋁電解：使用 70–80% 額定
- 鉭電容：使用 ≤ 50% 額定（不然容易燒）
- 薄膜電容：使用 70–80% 額定

3. 等效串聯電阻 (ESR)

實際電容包含一個「等效串聯電阻」：

$$Z = \text{ESR} + \frac{1}{j\omega C}$$

ESR 影響：- 開關電源輸出 ripple - 旁路效率 - 電容自身發熱

典型 ESR (10 μF)：- MLCC：< 10 $\text{m}\Omega$ - 聚合物鋮：10–50 $\text{m}\Omega$ - 標準鋮：100 $\text{m}\Omega$ - 鋁電解：500 $\text{m}\Omega$ –數 Ω

4. 等效串聯電感 (ESL)

引線與內部結構造成的寄生電感。影響高頻去耦能力。

典型 ESL：- 0402 MLCC：~ 0.5 nH - 0603 MLCC：~ 0.8 nH - 1206 MLCC：~ 1 nH - 通孔電解：5–10 nH 以上

5. 自諧振頻率 (SRF)

ESL 與電容形成 LC 諧振：

$$f_{\text{SRF}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

超過 SRF 後，電容變成「電感性」，去耦失效。

典型 SRF (10 nF, 0603)：~ 30 MHz 典型 SRF (100 nF, 0603)：~ 10 MHz 典型 SRF (1 μF , 0603)：~ 3 MHz

這就是為什麼高頻去耦要用「小電容並聯大電容」：大電容處理低頻、小電容處理高頻。

6. 漏電流 (Leakage Current)

電容並非完美絕緣，總有微小漏電：

- MLCC：可忽略 (pA 級)
- 鋁電解： μA 至 mA 級
- 鋮電容：< 標稱容量 $\times$ 額定電壓的特定比例

漏電流會影響電池應用、計時電路。

7. 介電吸收 (Dielectric Absorption, DA)

放電後，電容會「自己回升」一小部分電壓，類似「記憶效應」。

介電質	DA
C0G/NP0	~ 0.1%
Polypropylene	~ 0.02%
Polyester	~ 0.5%
X7R	~ 2.5%
Tantalum	~ 5%
Aluminum	~ 10%

取樣保持電路 (Sample-and-Hold) 必須選低 DA 的電容 (C0G、PP)。

8. 溫度特性

不同類型差異極大：

- C0G/NP0：±30 ppm/° C (極穩定)
- X7R：±15% over -55° C ~ +125° C
- 電解：容量隨溫度大幅變化，低溫時 ESR 大增

六、實務應用範例

例 1：IC 電源去耦 (最常見應用)

每顆 IC 的電源腳必須加旁路電容。

標準做法：- 1 顆 0.1 μF (100 nF) X7R 0402/0603 緊靠電源腳 (< 5 mm) - 1 顆 10 μF X5R/X7R 在距離稍遠處 - IC 整體區域可能有 1 顆 100 μF 電解或聚合物作為「儲池」

為什麼這麼配？

?? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ? ?

DC ~ kHz 100 μF ? ? ?

kHz ~ MHz 10 μF MLCC

MHz ~ 100MHz 0.1 μF MLCC

> 100 MHz ? ? ? PCB ? ? plane ? ?

例 2：RC 低通濾波器

要濾除 1 MHz 以上雜訊：

選 $R = 100\ \Omega$, $C = ?$

$$f_{-3dB} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 100 \times 10^6} \approx 1.6\text{nF}$$

選 C0G 1.5 nF。

例 3：開關電源輸出電容

5V/2A 的 buck 轉換器，輸出 ripple 要求 $< 50\text{ mV}$ ：

需要的電容 ESR 與容量計算：

$$\text{ripple} \approx \Delta I \times \text{ESR} + \Delta I / (8 \times f \times C)$$

開關電源細節在 03-中級篇/05-電源供應器設計.md 詳細討論。

例 4：耦合電容

音訊放大器級間：

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{in} C}$$

要 $R_{in} = 10\text{ k}\Omega$ 上 20 Hz 不衰減：

$$C = \frac{1}{2\pi \times 20 \times 10000} \approx 0.8\mu\text{F}$$

選 1 μF 薄膜或 X7R MLCC。

例 5：去耦電容並聯效應

假設 PCB 上並聯 100 nF + 10 nF + 1 nF + 100 pF。

由於各 SRF 不同，總阻抗在不同頻率有局部極小值，整體在很寬頻寬內保持低阻抗。

但要注意「反諧振」：兩個電容之間頻率會出現阻抗高峰，可能造成 EMI。高速設計應依阻抗設計法則選擇電容組合。

七、電容的常見錯誤

1. 極性接反

電解、鉮電容反接 → 爆炸、起火、漏液。PCB 設計時要清楚標示極性。

2. 用了 Y5V/Z5U

關鍵電源用 Y5V，溫度與電壓變化下幾乎沒有去耦效果。

3. DC Bias 沒考慮

設計 5V 時用了 6.3V 額定的 X5R，DC Bias 下容量大降。建議：耐壓選 2 倍工作電壓，或選大封裝的高耐壓型。

4. 容量「越大越好」誤解

對於開關電源，太大的輸出電容會：- 變慢的暫態響應 - 啟動時瞬間衝擊大 - 與電源迴路形成不穩定

5. ESR 太低也有問題

某些 LDO 為了穩定要求一定 ESR 範圍。從鉮電解換成 MLCC（更低 ESR）可能造成振盪。

6. 去耦電容放錯位置

距離 IC 太遠 (> 5 mm) 或路徑寄生電感太大，高頻去耦失效。

7. 電解電容用在高頻

電解電容自諧振頻率低 (kHz-MHz 等級)，高頻完全無效。

八、本章總結

✅ 您應該掌握：

- [x] 電容的物理本質： $i = C \, dv/dt$
- [x] RC 充放電與時間常數
- [x] 阻抗 $Z_C = 1/(j\omega C)$ ，高頻短路、低頻開路
- [x] 各種電容類型與選用準則
- [x] MLCC 的 Class 區別、DC Bias、SRF
- [x] 電解電容的極性、壽命、阿瑞尼斯定律

- [x] ESR、ESL 的影響
- [x] 實務應用：去耦、濾波、耦合

自我檢測

1. 為什麼 IC 電源要並聯 $0.1\ \mu\text{F}$ 與 $10\ \mu\text{F}$ ？
2. 標稱 $10\ \mu\text{F}/6.3\text{V}$ 的 X5R MLCC 用在 5V 上，實際容量約多少？
3. $RC = 100\ \Omega \times 1\ \mu\text{F}$ ，時間常數多少？充電到 95% 需要多少時間？
4. 為什麼電解電容不能用於高頻去耦？
5. 你會用什麼電容做 RTC 的 $32.768\ \text{kHz}$ 振盪器負載？

解答

1. 不同電容有不同 SRF，並聯可在更寬頻寬內保持低阻抗去耦
2. 約 $5\ \mu\text{F}$ 左右 (DC Bias 效應，依 datasheet 而定)
3. $\tau = 100\ \mu\text{s}$ ；達到 95% 需 $3\tau = 300\ \mu\text{s}$
4. 電解電容 SRF 低 (kHz–MHz)，高頻時電感性主導，無法去耦
5. C0G/NP0 陶瓷電容 (容量穩定、Q 值高、低 DA)，通常 $12\ \text{pF}$ 或 $22\ \text{pF}$

下一章

04-.md 一 電感與磁性元件。