電容測試程序

修訂版 **1.1**

作者：**Aristeidis Bitziopoulos**

賽普勒斯，尼古西亞

2025 年 9 月

修訂歷史

版本	發布日期	備註
1.0	2025 年 2 月	初稿
1.1	2025 年 9 月	新增高電壓與低電壓電容的效能評分

目錄

定義 3

電容值 3

損耗因數（D） 3

等效串聯電阻（ESR） 3

相位角（Θ） 3

品質因數（Q） 4

前言 5

測試設備 5

電容失效 7

測試軟體 8

測試方法 8

整體效能評分計算 9

結語 10

參考文獻 10

定義

電容值

這是元件（通常為電容器）儲存電荷的能力。其定義為電容器某一極板上所儲存的電荷（Q）與兩極板間電壓（V）之比值，表示為：

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

電容值以法拉（F）為單位，一法拉即為在一伏特電壓下可儲存一庫侖電荷的電容器所具有的電容值。電容值取決於極板表面積、極板間距，以及極板之間的介電材料等因素。[1][2]

損耗因數（D）

這是衡量電容器或其他介電材料中能量損耗的指標。它是交流電路中所消耗的實功率（因電阻造成）與所儲存的虛功率（因電容器的電抗造成）之比值。在數學上，它與 tan δ（損耗角的正切值）相關，其中 δ 為電壓與電流之間的相位角。損耗因數越高，代表電容器的能量損耗越大、效率越差。

損耗因數與介電材料的品質成反比；數值越低越理想，可在高頻應用中獲得更好的表現。[3][4]

等效串聯電阻（ESR）

它指的是電容器或其他電子元件的內部電阻，會影響其效率，在交流電路中尤其明顯。它代表元件內部電阻性損耗的綜合效應，包括引線、電極與介電材料的電阻。ESR 在電源應用中相當重要，因為過高的 ESR 值會導致能量損耗、發熱與效能劣化，在濾波應用或電源供應系統中尤其如此。

對電容器而言，較低的 ESR 通常較為理想，可獲得更好的表現，在高頻或大電流應用中尤其如此。[5][6]

相位角（Θ）

它指的是交流電路中電壓與電流波形之間的角度差。其單位為度（°）或弧度（rad），代表兩個波形之間的時間偏移。相位角為 0° 表示電壓與電流同相，而相位角為 90° 或 -90° 則表示電流與電壓完全異相（例如在純電感性或純電容性電路中）。

相位角在判定交流電力系統的功率因數與效率時至關重要。[7][9]

品質因數（Q）

這是元件（通常為電容器）儲存電荷的能力。其定義為電容器某一極板上所儲存的電荷（Q）與兩極板間電壓（V）之比值，表示為：

$$C = \frac{f_0}{\Delta f}$$

其中 為共振頻率，而 為頻寬（電路能有效共振的頻率範圍）。$f_0 \Delta f$

在電容器、電感器及其他共振系統中，Q 值越高代表共振越尖銳、能量耗散越少。[8][9]

前言

在當今的電子產品中，電容器無所不在，並在每項產品的生命週期中扮演重要角色。因此，能夠以不需長時間測試的科學方法評估其品質與耐受濫用的能力，就顯得格外重要。

電容器是一種在電路中儲存並釋放電能的電子元件。它由兩片導電極板組成，中間以稱為介電質的絕緣材料隔開。當兩極板間施加電壓時會形成電場，使電容器儲存能量。電容器在電子電路中有多種常見用途，例如平滑電源電壓、濾除訊號雜訊以及計時應用。其特性以電容值表示，單位為法拉（F）。

優質電容器對任何電子元件而言都不可或缺，其中也包括電源供應器；如今許多電子裝置都會用到電源供應器，而不僅限於 PC。一般而言，高階 PSU 採用 Chemi-Con 電容，中階 PSU 則採用 Teapo 或 Elite 等較平價的電容。

電容器的額定電壓代表電容器可安全承受而不致崩潰的最高電壓。超過此額定電壓可能導致絕緣崩潰，使電容器失效甚至損壞。為電路挑選電容器時，務必選擇額定電壓高於該電容器在此應用中將承受之最高電壓的型號。這可提供安全裕度，並有助於確保電容器在其規格參數範圍內可靠運作。

對電容器施加過電壓，或施加超過其額定電壓的電壓，可能導致下列多種不良後果：

- 崩潰與損壞：超過額定電壓可能導致電容器極板之間的介電材料崩潰。此崩潰可能造成短路，損壞電容器，並可能波及電路中的其他元件。
- 電容值下降：過電壓可能改變電容器的物理與電氣特性，導致電容值降低。此變化會影響電容器在電路中的表現。
- 漏電流：過電壓應力可能增加通過電容器的漏電流。漏電流會流經介電材料，而過大的漏電流會對電容器的表現造成負面影響。
- 電氣失效：長時間處於過電壓狀態可能導致電容器逐漸劣化，最終造成電氣失效。
- 安全危害：在極端情況下，過電壓可能導致電容器發生災難性失效，冒出煙霧、氣體甚至爆裂。這會帶來安全風險，尤其是在電容器鄰近其他元件或位於密閉空間的應用中。

測試設備

- 桌上型電源供應器：GW INSTEK PS800-2.88 [10]
- LCR 錶：Sourcetronic ST2832 [11]

LCR 錶是一種電子測試設備，用於量測電子元件的電感（L）、電容（C）與電阻（R）。

電壓處理

電容器的電壓處理（常稱為賦能或初始化）是指在電容器用於電路（在此即我們的測試平台）之前，對其施加受控電壓以穩定其特性的程序。此處理對電解電容尤其重要，因為它們若未經妥善調理便容易劣化。

在測試前對電容器進行處理相當重要，原因如下：

- 建立適當的介電層：在電解電容中，施加電壓時會在陽極表面形成一層薄的介電氧化層。此層作為絕緣體，使電容器得以儲存電荷。若此介電層未妥善形成，電容器可能無法如預期般運作，甚至提早失效。電壓處理有助於正確形成此氧化層，並確保電容器長期可靠運作。

- 防止漏電：若缺乏妥善形成的介電層，電解電容可能出現較高的漏電流，也就是會隨時間流失電荷。電壓處理可確保介電層穩定且有效，降低漏電的可能性並提升整體可靠度。

- 提升效能與壽命：電容器經過「處理」後，可確保其電容值長期保持穩定且一致。適當的電壓處理有助於電容器達到最佳工作狀態，從而提升其表現（例如效率與電容值穩定度）並延長壽命。未經電壓處理的電容器可能提早失效或劣化得更快。

- 降低損壞風險：曾承受高於額定值電壓、或未經妥善初始化的電解電容可能崩潰甚至短路。電壓處理可確保電容器逐步適應其額定電壓，而不致產生可能導致崩潰的應力。

Cybenetics 的電壓處理程序如下：

- 受控施加電壓：將電容器連接至電源供應器，並將其設定為以該電容器的額定電壓運作。

- 電流監控：在電容器處理過程中，持續監控通過電容器的電流，以確保其維持在安全範圍內。
- 穩定化：持續施加電壓 30 分鐘，以確保氧化層趨於穩定且電容器的特性定型。

此外，僅在處理期間，必須將一顆額定 1KOhm 的電阻與受測電容器串聯連接。

電容失效

電容器的失效方式有很多種，最常見的失效原因如下：

- 電壓過高：過電壓可能使介電材料崩潰。
- 過熱：高紋波電流或溫度應力可能使電容器劣化。
- 老化與磨耗：電容器會隨時間劣化，電解電容尤其明顯。
- 極性錯誤：有極性電容若極性接反可能造成失效。

失效徵兆可能因電容器類型與失效性質而異。以下是一些常見的電容失效指標：

1. 外觀徵兆
    - 鼓起或膨脹：表示內部壓力累積，常見於電解電容。
    - 變色或液體滲漏：電解液洩漏的跡象，通常出現在電解電容上。
    - 外殼龜裂或破損：電容器外殼的物理損傷，代表曾承受應力或過熱。

2. 電氣徵兆
    - ESR（等效串聯電阻）上升：電阻升高會導致效率下降、發熱，並可能造成失效。
    - 電容值流失：電容值大幅下降代表電容器已無法正常儲存電荷。
    - 短路：內部短路可能造成過大的電流流通，損壞其他元件。
    - 開路：電容器在電氣上形同斷開，完全失去功能。

3. 漏電流增加
    - 漏電流升高：若漏電流顯著增加，代表電容器正在失效，應予更換。

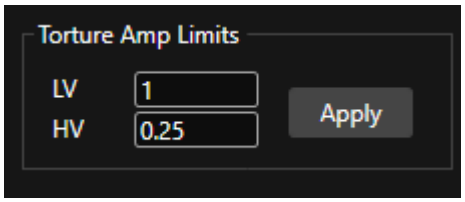
4. 電路行為改變
    - 過熱：由過大的紋波電流或電壓所致，會使電容器進一步劣化。
    - 雜訊或失真：音訊或訊號電路中失效的電容器可能造成哼聲、失真或不穩定。
    - 電路失效或故障：電容失效可能導致電源不穩定或電路完全故障。

5. 透過測試

    - ESR 測試：量測 ESR 可辨識內部劣化或失效。
    - 電容值測試：電容值大幅下降即代表失效。
    - 以紅外線測溫儀進行目視檢查：溫度偏高可能代表過熱或失效。

在這些偵測失效的方法中，Cybenetics 採用監控流經電容器之電流的方式。當電容器逐漸衰弱時，會開始容許更多電流通過，這正是劣化的徵兆。一旦電流達到我們在軟體中設定的上限，測試便會停止，以免電容器即將失效而造成髒亂。

Cybenetics 所採用的上限如下：



其中 LV 代表低電壓（Low Voltage），HV 代表高電壓（High Voltage）。

測試軟體

為了操作與監控測試設備，並檢視、記錄及分析測試結果，Cybenetics 開發了專屬軟體。

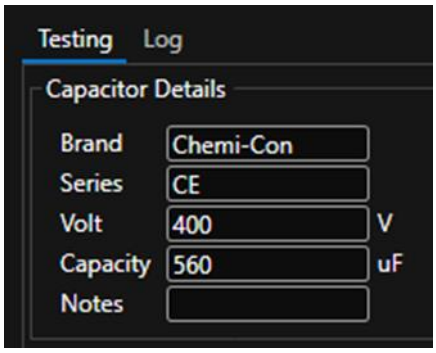
該軟體讓使用者能輸入測試資料、連接桌上型電源供應器、加以控制並監控結果。

測試方法

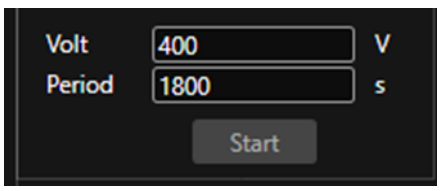
第一步是開啟 LCR 錶，依照製造商的說明，讓其運作至少 30 分鐘後才開始使用。在此同時，電壓處理程序即可開始進行。

要將電容器連接至桌上型電源供應器，我們必須辨識電容器的正負極端子。若電容器是全新未使用的，可藉由引腳長度辨識，較長的一支為正極。否則，電容器外殼上可能印有負號與正號標示。

電容器連接完成並放入測試箱後，我們會開啟桌上型電源供應器以及電腦上的測試軟體。接著，我們必須輸入電容器的特性，具體而言包括品牌、系列、電壓與容量。



接著，我們輸入電壓處理的相關資訊。



連接電容器並輸入資訊之後，電壓處理即可開始。啟動之後，我們必須確認桌上型電源供應器上的讀值與我們在軟體中輸入的設定相符。

電壓處理完成時，LCR 錶也已有足夠的暖機時間，可以開始進行量測。

LCR 錶用於量測品質因數（Q）、損耗因數（DF）與等效串聯電阻（ESR）。我們將電容器連接至 LCR 錶的測試治具，並透過其選單將頻率設定為 120Hz，用以量測 Q 與 DF；至於 ESR，我們則會將頻率改為 1KHz。

測試的最後階段是過電壓或極限摧殘階段。在此階段，我們對電容器施加過電壓以找出其失效點。為此，我們必須將電容器重新連接至桌上型電源供應器。

對於低電壓電容器，從標稱電壓開始，以 20% 為級距逐步提高。電容器會在每個測試電壓下運作五（5）分鐘，此程序透過軟體自動執行。

對於高電壓電容器，我們先以 10V 運作一（1）分鐘，接著以 500V 運作一（1）分鐘，然後每次將電壓提高 10V，每個測試各執行一分鐘。唯一的例外是 520V 設定，在此電壓下我們讓電容器運作 30 分鐘。
當電容器如前所述失效時，我們會記錄測試持續時間（）與所能施加的最高電壓。
t_{DUT}

整體效能評分計算

完成所有測試並記錄結果後，我們必須計算受測電容器的整體效能。為此，我們使用一套效能公式，低電壓（低於 100V）與高電壓（高於 100V）電容器所適用的公式並不相同。

在計算電容器整體效能時，我們會考量下列基本參數：

- RC：實際容量百分比（標示容量／實際容量百分比）
- 品質因數（Q）@ 120 Hz
- ESR @ 1 kHz
- DS：介電強度／過電壓耐受度（秒）

$$Capacitor\ Performance_{\ Low\ Voltage} = \frac{DS}{12.5} + \frac{(1500 - ESR * 3000)}{15} + Q * 6 + RC$$

$$Capacitor\ Performance_{\ High\ Voltage} = \frac{DS}{18} + \frac{(1500 - ESR * 600)}{20} + Q * 4.5 + RC$$

從上述方程式可以看出，我們對低電壓與高電壓電容器並未使用相同的乘數與除數，因為在我們的測試樣本群中，所考量各項因子的平均量測值並不相同。

一旦取得整體效能數值的清單，便可相當容易地以單一電容器的整體效能作為基準（100% 效能），使用下列方程式將所有讀值正規化。

$$Relative\ Performance_{Sample\ Capacitor} = \frac{100}{Overall\ \ Performance_{Reference\ Capacitor}} * Overall\ \ Performance_{Sample\ Capacitor}$$

結語

電容測試是確保電子電路可靠度與功能性的關鍵程序，同時也讓我們得以比較不同製造商所提供的品質。鑑於電容器應用於每一種電子裝置，是其中至關重要的一部分，並影響可靠度與效能，因此取得關於其效能與耐受濫用能力的實際測試數據就顯得十分重要。

透過我們的測試與電容效能資料庫，我們將試圖破除一些迷思，例如「X」品牌的電容平庸而「Y」品牌的電容優良之類的說法。首先，每個品牌都有不同的電容型號，不同的規格會影響其效能。因此，你不能拿一顆電容去和規格不同的另一顆比較。其次，關於電容品質，我們不能再依賴網路上流傳的傳言與使用者的主觀意見，我們需要的是實際數據，而評估電容最簡單也最好的方法已在本文中說明。

我們希望電容資料庫能幫助製造商、品牌與使用者找出最佳產品，並期望它能帶來生產成本的降低，因為資料庫將顯示某些昂貴且不易取得的電容型號，可以用成本較低且供應量較大的其他型號取代。這正是我們建立電容資料庫的最終目標：協助整個產業向前邁進。畢竟並非所有製造商、尤其是品牌業者，都具備檢驗電容品質與效能的能力，因此他們無法掌握完整資訊，為自家產品挑選最合適的零組件。

參考文獻

[1] R. L. Boylestad, "Electronic Devices and Circuit Theory," Pearson, 2012.
[2] National Instruments, "Capacitance Measurement Fundamentals," Application Note, 2020.
[3] S. M. Sze, "Semiconductor Devices: Physics and Technology," Wiley, 2002.
[4] Murata Manufacturing, "Capacitor Characteristics and Applications," Technical Information, 2021.
[5] J. R. Williams, "The Importance of ESR in Capacitors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003.
[6] Texas Instruments, "Understanding Capacitor ESR and Its Effect on Power Supply Performance," Application Note, 2018.
[7] E. Hughes, "Electrical and Electronic Technology," Pearson, 2015.
[8] A. B. Williams, "Fundamentals of Electrical Engineering," Wiley, 2005.
[9] P. Horowitz and W. Hill, "The Art of Electronics," Cambridge University Press, 2015.
[10] PSW-Series Programmable Switching D.C. Power Supply. https://www.gwinstek.com/en-global/products/detail/PSW-Series (last accessed on 28 February 2025)

[11] Compact LCR Meter ST2832. (last accessed on 28 February 2025)https://www.sourcetronic.com/shop/uk/lcr-meter-st2832.html