电容器测试程序

修订版 **1.1**

作者：**Aristeidis Bitziopoulos**

塞浦路斯，尼科西亚

2025 年 9 月

修订历史

版本	发布日期	备注
1.0	2025 年 2 月	初稿
1.1	2025 年 9 月	新增高压与低压电容器的性能评分

目录

定义 3

电容 3

损耗因数（D） 3

等效串联电阻（ESR） 3

相位角（Θ） 3

品质因数（Q） 4

前言 5

测试设备 6

电容器失效 7

测试软件 8

测试方法学 8

综合性能评分计算 10

结语 10

参考文献 11

定义

电容

它是元件（通常为电容器）存储电荷的能力。其定义为电容器一个极板上所存储的电荷量（Q）与极板间电压（V）之比，表示为：

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

电容以法拉（F）为单位，一法拉是指在一伏电压下存储一库仑电荷的电容器所具有的电容。电容取决于极板表面积、极板间距以及极板之间的电介质材料等因素。[1][2]

损耗因数（D）

它是衡量电容器或其他电介质材料中能量损耗的指标。它是交流电路中所消耗的有功功率（源于电阻）与所存储的无功功率（源于电容器的容抗）之比。在数学上，它与 tan δ（损耗角的正切值）相关，其中 δ 为电压与电流之间的相位角。损耗因数越高，表明电容器的能量损耗越大、效率越差。

损耗因数与电介质材料的质量成反比；数值越低越理想，可在高频应用中获得更好的性能。[3][4]

等效串联电阻（ESR）

它指电容器或其他电子元件的内部电阻，会影响其效率，在交流电路中尤为明显。它代表元件内部电阻性损耗的综合效应，包括引线、电极和电介质材料的电阻。ESR 在电力应用中意义重大，因为过高的 ESR 值会导致能量损耗、发热和性能下降，在滤波应用或电源系统中尤其如此。

对于电容器而言，通常 ESR 越低性能越好，在高频或大电流应用中尤为如此。[5][6]

相位角（Θ）

它指交流电路中电压波形与电流波形之间的角度差。它以度（°）或弧度（rad）为单位，表示两个波形之间的时间偏移。相位角为 0° 表示电压与电流同相，而相位角为 90° 或 -90° 则表示电流与电压完全异相（例如在纯电感或纯电容电路中）。

相位角对于确定交流电力系统的功率因数和效率至关重要。[7][9]

品质因数（Q）

它是元件（通常为电容器）存储电荷的能力。其定义为电容器一个极板上所存储的电荷量（Q）与极板间电压（V）之比，表示为：

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

其中 为谐振频率， 为带宽（电路有效谐振的频率范围）。$f_0 \Delta f$

在电容器、电感器和其他谐振系统中，Q 值越高意味着谐振越尖锐、能量耗散越少。[8][9]

前言

在当今的电子产品中，电容器无处不在，在每一款产品的整个生命周期中都发挥着重要作用。因此，能够采用无需长时间测试的科学方法评估其质量和耐受滥用的能力就显得极为重要。

电容器是一种在电路中存储和释放电能的电子元件。它由两块导电极板构成，中间以称为电介质的绝缘材料隔开。当极板两端施加电压时会产生电场，使电容器存储能量。电容器在电子电路中有多种常见用途，例如平滑电源电压、滤波信号以及定时应用。其特性以电容表征，单位为法拉（F）。

优质电容器对任何电子元件都至关重要，包括电源在内；如今使用电源的电子设备众多，并不限于 PC。通常，高端 PSU 使用 Chemi-Con 电容器，而中端 PSU 则使用来自 Teapo 或 Elite 的更为经济的电容器。

电容器的额定电压表示电容器在不发生击穿的情况下所能安全承受的最高电压。超过该额定电压可能导致绝缘击穿，使电容器失效甚至损坏。在为电路选择电容器时，选用额定电压高于该电容器在应用中将承受的最高电压的型号至关重要。这样可提供安全裕量，并有助于确保电容器在其规定参数范围内可靠工作。

对电容器施加过压或超过其额定电压的电压，可能导致若干不良后果：

- 击穿与损坏：超过额定电压会导致电容器极板之间的电介质材料击穿。这种击穿可能造成短路，损坏电容器乃至电路中的其他元件。
- 电容量下降：过压会改变电容器的物理和电气特性，导致电容量减小。这一变化会影响电容器在电路中的表现。
- 漏电流：过压应力会增大流经电容器的漏电流。漏电流流过电介质材料，过大的漏电流会对电容器的性能产生不利影响。
- 电气失效：长期处于过压状态可能导致电容器逐渐劣化，最终造成电气失效。
- 安全隐患：在极端情况下，过压会导致电容器发生灾难性失效，出现冒烟、放气甚至爆裂。这会带来安全风险，尤其是在电容器靠近其他元件或处于封闭空间的应用中。

测试设备

- 台式电源：GW INSTEK PS800-2.88 [10]
- LCR 表：Sourcetronic ST2832 [11]

LCR 表是一类电子测试设备，用于测量电子元件的电感（L）、电容（C）和电阻（R）。

电压处理

电容器的电压处理通常称为化成或初始化，是指在电容器用于电路（本例中为我们的测试台）之前，对其施加受控电压以稳定其特性的过程。这一处理对电解电容器尤为重要，因为若未经适当调理，电解电容器容易发生劣化。

在测试前对电容器进行处理十分重要，原因如下：

- 形成适当的电介质层：在电解电容器中，施加电压时会在阳极表面形成一层薄的电介质氧化层。该层起绝缘作用，使电容器能够存储电荷。如果该电介质层未能正确形成，电容器可能无法按预期工作，甚至可能提前失效。电压处理有助于正确形成该氧化层，并确保电容器长期可靠运行。

- 防止漏电：在电介质层未能正确形成的情况下，电解电容器可能出现较大的漏电流，即随时间流逝而损失电荷。电压处理可确保电介质层稳定有效，从而降低漏电的可能性并提高整体可靠性。

- 提升性能与寿命：当电容器经过“处理”后，可确保其电容值长期保持稳定一致。适当的电压处理有助于电容器达到最佳工作状态，从而改善其性能（如效率和电容稳定性）并延长使用寿命。未经电压处理的电容器可能提前失效或劣化更快。

- 降低损坏风险：曾承受高于额定值电压或未正确初始化的电解电容器可能发生击穿甚至短路。电压处理可确保电容器逐步适应其额定电压，而不会产生可能导致击穿的应力。

Cybenetics 的电压处理流程如下：

- 受控施加电压：将电容器连接至设定为该电容器额定电压的电源。

- 电流监测：在电容器处理过程中监测流经电容器的电流，以确保其处于安全限值之内。
- 稳定化：施加电压 30 分钟，以确保氧化层趋于稳定且电容器的特性得以确定。

此外，仅在处理期间，必须将一个额定值为 1KOhm 的电阻与被测电容器串联。

电容器失效

电容器可能以多种方式失效，最常见的失效原因如下：

- 电压过高：过压会击穿电介质材料。
- 过热：高纹波电流或温度应力会使电容器劣化。
- 老化与磨损：电容器会随时间劣化，电解电容器尤为明显。
- 极性错误：有极性电容器的极性接反会导致失效。

失效的迹象取决于电容器的类型和失效的性质。以下是电容器失效的一些常见指标：

1. 外观迹象
    - 鼓包或膨胀：表明内部压力升高，常见于电解电容器。
    - 变色或漏液：电解液泄漏的迹象，通常出现在电解电容器上。
    - 外壳开裂或损坏：电容器外壳的物理损伤，表明存在应力或过热。

2. 电气症状
    - ESR（等效串联电阻）升高：电阻增大会导致效率降低、发热并可能引发失效。
    - 电容量损失：电容显著下降意味着电容器已无法正常存储电荷。
    - 短路：内部短路会导致电流过大，损坏其他元件。
    - 开路：电容器在电气上断开，从而完全失去功能。

3. 漏电流增大
    - 漏电流升高：若漏电流显著增大，说明电容器正在失效，应予更换。

4. 电路行为变化
    - 过热：由过大的纹波电流或电压引起，导致电容器进一步劣化。

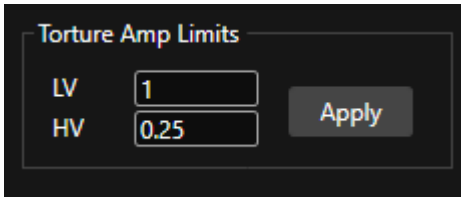
- 噪声或失真：音频或信号电路中失效的电容器可能引起交流声、失真或不稳定。
- 电路失效或故障：电容器失效会导致供电不稳定或电路完全故障。

5. 通过测试判定

- ESR 测试：测量 ESR 可以识别内部劣化或失效。
- 电容测试：电容显著下降表明已经失效。
- 使用红外测温仪进行目视检查：温度升高可能表明过热或失效。

在这些检测失效的各种方法中，Cybenetics 选择监测流经电容器的电流。当电容器逐渐衰弱时，它会开始让更多电流通过，这是劣化的迹象。一旦电流达到我们在软件中设定的限值，测试即会停止，以免电容器即将失效时造成混乱。

Cybenetics 采用的限值如下：



其中 LV 代表低压，HV 代表高压。

测试软件

为操作和监测测试设备，以及查看、记录和分析测试结果，Cybenetics 开发了专有软件。

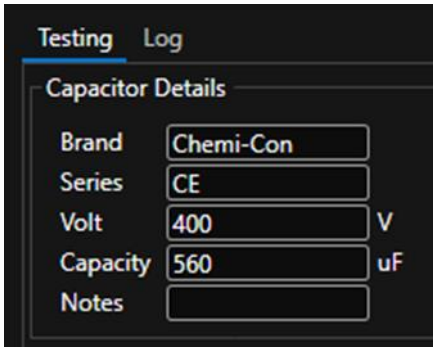
该软件允许用户输入测试数据、连接台式电源、对其进行控制并监测结果。

测试方法学

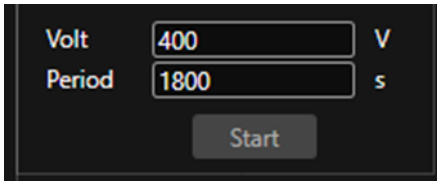
第一步是打开 LCR 表，按照制造商的说明，在开始使用前让其运行至少 30 分钟。与此同时，可以开始电压处理流程。

要将电容器连接到台式电源，我们必须识别电容器的正极和负极。如果电容器是全新未使用的，则可通过引脚长度识别，较长的一端为正极。否则，电容器外壳上可能印有负号和正号标识。

电容器连接好并放入测试箱后，我们打开台式电源以及计算机上的测试软件。接着，我们需要输入电容器的特性，具体包括品牌、系列、电压和容量。



然后，我们输入电压处理信息。



连接好电容器并录入信息后，电压处理即可开始。启动后，我们必须检查台式电源上的读数是否与我们在软件中的输入相符。

电压处理完成时，LCR 表也已有足够的时间预热，可以进行测量。

LCR 表用于测量品质因数（Q）、损耗因数（DF）和等效串联电阻（ESR）。我们将电容器连接至 LCR 表的测试夹具，并通过其菜单将频率设定为 120Hz，用于测量 Q 和 DF；而测量 ESR 时，我们会将频率改为 1KHz。

测试的最后阶段是过压（破坏性）阶段。在该阶段，我们对电容器施加过压以找出其失效点。为此，我们必须将电容器重新连接至台式电源。

对于低压电容器，从标称电压开始，以 20% 的步进递增。电容器在每个测试电压下运行五（5）分钟，该流程通过软件自动执行。

对于高压电容器，我们从 10V 开始运行一（1）分钟，随后在 500V 下运行一（1）分钟，之后每次将电压提高 10V，每项测试运行一分钟。唯一的例外是 520V 设定，在该电压下我们让电容器运行 30 分钟。
当电容器按前述方式失效时，我们记录测试持续时间（）以及所能施加的最高电压。
t_{DUT}

综合性能评分计算

完成所有测试并记录结果后，我们需要计算被测电容器的综合性能。为此，我们使用一个性能公式，低压（低于 100V）与高压（高于 100V）电容器所用的公式不同。

在计算电容器综合性能时，我们考虑以下基本参数：

- RC：实际容量百分比（标称/实际容量百分比）
- 品质因数（Q）@ 120 Hz
- ESR @ 1 kHz
- DS：介电强度/耐过压能力（秒）

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

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

从上述公式中可以看到，我们对低压和高压电容器并未采用相同的乘数和除数，因为在我们的测试样本池中，所考虑各因子的平均实测值并不相同。

一旦得到综合性能值的列表，就可以相当容易地以某一只电容器的综合性能（100% 性能）为参考，使用以下公式将所有读数归一化。

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

结语

电容器测试是确保电子电路可靠性与功能性的关键环节，同时也使我们能够比较不同制造商所提供产品的质量。鉴于电容器用于每一种电子设备，并且是其中至关重要的组成部分，影响着可靠性与性能，因此获得有关其性能和耐受滥用能力的实际测试数据至关重要。

通过我们的测试和电容器性能数据库，我们将努力破除一些迷思，例如“X”品牌生产平庸的电容器而“Y”品牌生产优质电容器之类的说法。首先，每个品牌都有不同的电容器型号，其规格各异，进而影响性能。因此，不能拿一只电容器去与另一只规格不同的电容器相比较。其次，我们不能再依赖互联网上流传的传闻以及用户对电容器质量的主观看法，我们需要实际数据，而评估电容器最简便、最好的方法已在本文中作了说明。

我们希望我们的电容器数据库能够帮助制造商、品牌和用户找到最优秀的产品，并有望降低生产成本，因为它将表明某些价格昂贵且不易采购的电容器型号可以由成本更低、供货量更大的其他型号替代。这正是我们建立电容器数据库的最终目标——推动整个行业向前发展；因为并非所有制造商、尤其是品牌，都具备检验电容器质量与性能的能力，因而无法掌握完整信息来为其产品选择最合适的元件。

参考文献

[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