

## CDE 铝质电解质电容器的可靠性

Sam G. Parler, Jr., P.E.  
Cornell Dubilier  
140 Technology Place  
Liberty, SC 29657  
sparler@cde.com

**摘要**---所有考虑使用铝质电解质电容器的设计工程师都想知道电容器能持续工作多久，预计多少会失效。许多工程师没有意识到实际上这是两个不同但是彼此相关的问题。本文我们以一种希望能够澄清二者区别的方式来定义寿命和可靠性；以一种允许设计工程师从他们运用条件，不仅预测电容器在开始损耗之前能工作多久，而且预测电容器有效寿命中的期望失效率的方式对寿命和可靠性模型进行比较，对比，和联合。

### 损耗寿命回顾

铝质电解质电容器的寿命通常定义为在一定外加直流电压，脉动电流和环境条件(温度，气流，热耗散)下电容器的电气参数已经偏离某些特定限度的时间。ESR是首当其冲，可能它已经漂移如此的高以至于不久电容器要么过热运行导致突然短路或者安全释放口破裂，开始干化飘移至开路。该寿命叫损耗寿命，预期寿命，操作寿命，或者有用寿命。损耗过程很少由蒸发和电解质逃逸所驱动，除非安全释放孔由于高漏电电流和压力积累而损害。真正的干化的有效作用类似于损耗，但是通常发生在小于 20cm<sup>3</sup> 的电容器，或者封装技术较差的老式设计的电容器。

我们发表的损耗寿命模型来自于寿命试验的结果。温度作用也可以从阿仑尼乌斯方程推导出。在我们的论文“铝质电解质电容器寿命系数推导”中介绍了该推导以及电压降额方程的比较。该寿命模型是

$$L = L_b \times M_v \times 2^{((T_m - T_c)/10)} \quad (1)$$

这里，L<sub>b</sub> 是在某个升高的核心温度(T<sub>m</sub>)下的基础寿命，参看下面表 1。M<sub>v</sub> 是电压倍数，在满额定直流电压下通常等于单位 1；较低直流下大于 1。Cornell Dubilier 通常使用

$$M_v = 4.3 - 3.3V_a/V_r \quad (2)$$

这里 V<sub>a</sub> 是外加直流电压，V<sub>r</sub> 是额定直流电压。额定直流电压如此定义是要求施加峰值电压不应该超过该额定值。

Type	Lb	Tm
101C	8000 h	108 °C
300/301	6000 h	108 °C
325	3000 h	128 °C
330	12000 h	108 °C
380L/LX	5000 h	95 °C
380LQ	4000 h	95 °C
381L/LX	5000 h	110 °C
381LQ	4000 h	110 °C
381LR	5000 h	115 °C
400C	7500 h	98 °C
401C	8000 h	108 °C
420C	12000 h	103 °C
450C	15000 h	108 °C
4CMC	5000 h	95 °C
500C	7500 h	98 °C
520C	12000 h	103 °C
550C	15000 h	108 °C
DCMC	5000 h	95 °C
MLP up to 250V	12000 h	88 °C
MLP 300V & up	5000 h	88 °C
MLS	4000 h	125 °C

表 1: CDE 使用在寿命和可靠性模型中的 Lb 和 Tm 数值

一个复杂情况产生了，因为电解质电阻  $R_o$  是实际核心温度  $T_c$  的函数，核心温度是功率损失的函数，功率损失又是  $R_o$  的函数。我们在 Java 程序中使用一个迭代循环来模拟核心温度和寿命，因为 ESR 随温度和脉动电流而变化。

这导致以下的问题，寿命末日意味着什么？多少电容器允许失效？什么造成失效？例如，某生产商做出天真而且站不住脚的声明“我们的电容器在额定寿命到期前不会失效”。其他生产商也许声明不超过 10% 的电容器会早于它们额定寿命末期失效。其他生产商在类似的声明中添加一个置信区间。

进行寿命测试和指定可允许劣化的方法在电容器生产商中要有可比性，这一点很重要。我们使用 EIA 标准 IS-749，它明确电容器安装，最大气流，电容器间距，寿命末期的定义。它也指定寿命为由于参数失效（ESR 超过初始限的两倍）达到 10% 的电容器已经失效，而且不超过 10% 由于开路或者短路作用时的时间。

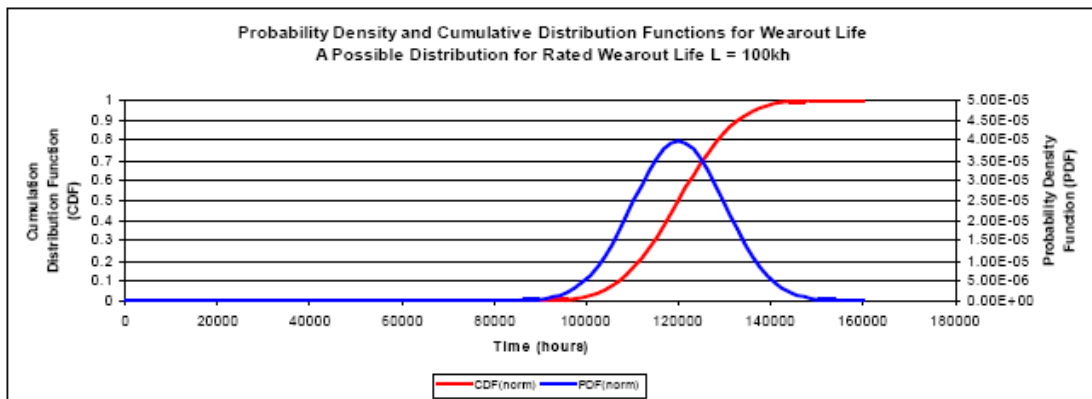
损耗寿命的 CDE 模型假设电容寿命由损耗机理（参数飘移）所限制，不是限制于在电容器寿命过程中突然发生的随机失效。损耗倾向于发生在一组电容器中作为一个总体过程，并不是均匀分布在整个电容器寿命中。参看图 1，电容器组磨损的时间对该组中电容器的数量相当不敏感。

我们已经发现典型的损耗寿命分布是“钟”形，我们把它模拟成一个平均值为  $1.2L$  标准偏差为  $0.1L$  的正态分布。我们努力能够声明该平均值大于  $1.2L$  有 90% 的置信度。用另一种方法声明：我们有 90% 的置信度不超过 10% 的电容器将会在到达寿命  $L$  之前已经因损耗失效。由于这种预期的分布，这将会是与以下声明大致一样，我们有 90% 置信度不超过 1% 电容会在达到寿命 90% 之前会因损耗而失效。

### 电容器寿命的提高

如果观察大铝质电解质电容器的额定寿命的历史，人们会发现寿命值从 40 年前 65℃ 下的 1000 小时提高到今天 105℃ 下的 15000 小时。尽管在同样包装中提供更大电容量和更高的脉动电流处理，这是一个 240 的寿命因子。好几个因素对该成就做出贡献。其中包括所有电容器材料和组件（特别是电解质）的纯度和稳定性的提高；同样也要归功于封装技术的提高。

因此，已经表述过的寿命模型表达既独立于也不受电容量和额定电压的影响，而且对电容器组中电容器的数量相对不敏感。



（图中标题：损耗寿命的概率密度和累集分布函数，对于额定损耗寿命 L=100kh 的可能分布）

图 1：损耗寿命的概率密度函数和累计分布函数

### 区分寿命与可靠性

电容器寿命被以相当可预见方式进行的电化学劣化所限制，温度和电压负荷加速这种劣化。然而，沿着这条途径，如果群体数目足够大，随机失效注定发生。这些通常与损耗无关，相反与一些潜在的如纸，箔，或者连接中缺陷有联系。这些失效多数经常是短路，可以没有警告地突然发生，尽管偶尔电容器开始吸收过多的漏电电流以及产生足够的氢气压力使安全口破裂，随后干化和开路失效。

在电容器生产期间，额定电压和温度在陈化过程中施加。电容量，漏电电流，和 ESR 被 100% 测试。通常，我们采用额外筛选技术来努力去除夭折率。这些方式包括内烧，峰值电压试验，以及热直流漏电试验。目前在 CDE，这些筛选方法可以筛除额外 0.1-0.5% 的现场可能早期失效的坏电容器。较大的高电压电容器产率已经从 1990 年的 92% 增加到今天的超过 98%。如果内烧或者其他高负荷筛选过程被多次重复，可以期待每次较小的失效百分比（0.02-0.2%）。

### 电容器组考虑

在现场经常会有几个或许多电容器以串联和并联连接的情形。由于不利的熔断作用（电阻，成本，尺寸，电感）通常仅仅实际是以一种不幸产生该情况的方式这样做，当一个电容器短路失效，电容器组系统停止运作。这种情况下，电容组的失效率近似等于组中电容器的数目乘以每个电容器的失效率。

通常，较小的电容器（CV 额定值）要比较大电容更可靠。但是当需要大容量电容时，

通常使用数量少的大容量电容可以取得最高可靠性。这里有两个原因。第一，较低数目的终端，焊接点，联结点，较少的大电容器潜在的失效位置，是固有的可靠性优点。第二，为了承担大能量小阻抗的应用这种电容组场合，大电容的设计，制造和筛选不同于小电容。那就是说，电容设计工程师能够裁剪大小电容器的设计满足大电容器组中电容的应用。但是，较大电容器在这方面具有内在的优点。

对于大小电容器，额定损耗寿命几乎是一样。总而言之，就可靠性来说，高能电容组价格高，但是损耗寿命本质上是能量非弹性的。

### 可靠性模型

即使生产工艺，材料和筛选方法是艺术级，随机失效仍然在现场发生。预测湿铝质电解电容器可靠性的经典方法是 MIL-HDBK-217 和 Bellcore。我们熟悉 MIL-HDBK-217 而且经常使用它。但是我们认为它在较温和温度预测的 FIT 速率是过时的。这一点如同该手册被编辑成册同一时代铝质电解电容器的寿命模型。有趣的是，寿命和可靠性提高的因子几乎一样。

MIL 手册基本上从最大额定条件开始，然后声明对于外加直流电压每降低 20%，核心温度每降低 20°C，随机失效发生率降低一半。

我们发现对于小电容器在较高温度时预测的失效率有些高，通常相差 2--10 因子；但是对于大电容器，MIL 手册预测失效率太高，超过 10 倍。部分原因在于不正确的折算系数。例如，一个电容器的失效率实际上与它的贮存能量紧密相关，储能与额定电压的平方成正比。然而在 MIL 手册里，只有电容量可靠性因子，而没有额定电压的因子。这个仅仅考虑电容量因子 ( $C^{0.18}$ ) 是不正确的，因为它忽视了额定电压的作用。

我们也发现可靠性每 10°C 增加一倍，而不是每 20°C。我们不是不同意电压降额因子，但是我们选择使用三次方关系。

所有这些意思是，对于典型 45°C--65°C 大电解质应用，MIL 手册可以指示一个超过实际 CDE 电容器 100 倍的失效率。我们认为原因可能在于军事手册的温度和电压因子过分保守，过去 30 年伴随我们铝质电解电容器性能可靠性的真正提高，在于我们已经讨论过寿命性能某些进展。人们可以争论生产量与现场可靠性相关，这种情况我们特别注意到 400VDC 或者更高额定电压大电容（大于 300 焦耳）产量的提高。

### 可靠性数据

我们依靠客户现场失效率数据，因为从经济和实际的观点，不可能从我们实验室获得充分的最新可靠性信息来评价我们目前现场客户设备经历的典型降额条件可靠性能水平。这是因为需要数十亿单位小时，要求百万组件和 50 员工。相反，关于他们的应用（电容组数量，温度，脉动电流，外加电压）和现场返回历史，我们和一些主要的客户已经做过详细的讨论。某些情况下，不太可能识别某些失效由一个电容器失效引起，或者是否有其他原因，例如 IGBT 短路引起该电容损毁。这些案例中，我们承担有 50% 责任对于可靠性估计目的。

这样努力导致我们在多种应用中获得百亿单位小时数据，从而给我们好的基线置信度在 45—75°C 核心温度范围，该范围是我们最需要的数据。大多数现场数据经历了 0.5--20FIT 速率，它们来自多电容器组（2-24 电容）中 2-3 英寸直径高压电容器。

关于电容器尺寸，设计标准（基本上额定寿命和温度），核心温度，和电压降额的作用，我们把丰富的现场数据与实验室的观察联合起来。我们联合的 QA 和工程实验室包括约 60 台炉子，170 动力供应，其中超过 80% 正在使用。我们也考虑一些发表的先前研究和少量已发表的铝质电解电容器可靠性模型。我们使用所有这些信息资源一起来开发我们目前电容器

可靠性经验的最佳估计可靠性模型。

### 折算系数事宜

关于各种电容器类型和尺寸的性能我们发现：1.优等级电容器更加可靠；2.相等能量贮存量导致相等的可靠性。

以上第二个结果有进一步的含意，即 3.对于给定的电容量，较低的额定电压更加可靠；4.对于给定的电压，较低的电容量更加可靠；5.对于给定的 CV 额定值，较低的电压更可靠。

既然电容器尺寸（体积）近似正比于  $CV^{1.5}$ ，我们也可以观察：6. 对于给定的尺寸，较低的额定电压更加可靠。

已经在前面提到，我们已经观察到 7. 对于给定的电容组储存的能量，较少的电容器数给与更高的可靠性；8. 一组电容器的随机（预损耗）失效率等于电容器的数目乘以单个电容器的失效率。

最后，正如我们已经声明，我们相信：9. 电容核心操作温度每  $10^{\circ}\text{C}$  过热，失效率加倍；10. 失效率正比于外加电压和额定电压比率的三次方。

### CDE 的可靠性模型

我们已经开发了一个针对 FIT 速率  $\lambda$  对于满足前面部分所述 10 项标准的预损耗随机失效半经验模型。

$$\lambda = 400000 \cdot N \cdot V_a^3 \cdot C^{0.5} \cdot 2^{(T_c - T_m)/10} / L_B \cdot V_r^2 \quad (3)$$

该公式基本意思是对于给定的电容型号（类型，例如 CDE550 $^{\circ}\text{C}$ ），温度和电压降额，失效率正比于额定电压和电容量平方根的乘积。所有这些变量除了名义电容量 C（法拉第）和组中电容器的数目 N 外，都已经包含在该寿命方程中。FIT 速率  $\lambda$  能够用作指数分布的参数。这一点我们将在下一节讨论。

### 预损耗失效率的可靠性模型

失效发生的按时间分布方式决定了适当的失效分布。现在有许多标准分布，其中一些是另一些的特例。我们将使用的两种分布是：用于讨论随机失效的  $\lambda$  参数的指数分布；和讨论损耗失效的正态分布。

概率分布的形状依赖于是否观察归一化初始群体的及时失效速率。它已知为概率密度函数， $f(t)$ ，曲线下的总面积归一化为单位 1；从初始已经失效群体的元件比例，就是 PDF 从 0 时刻到所绘的时间坐标的积分，换句话说，PDF 曲线下的面积表示为积累分布函数(CDF)  $F(t)$ ；或者幸存群体的及时失效率，已知为危害函数(HF)  $h(t)$ 。对于任何分布，

$$h(t) \equiv f(t) / [1 - F(t)] \quad (4)$$

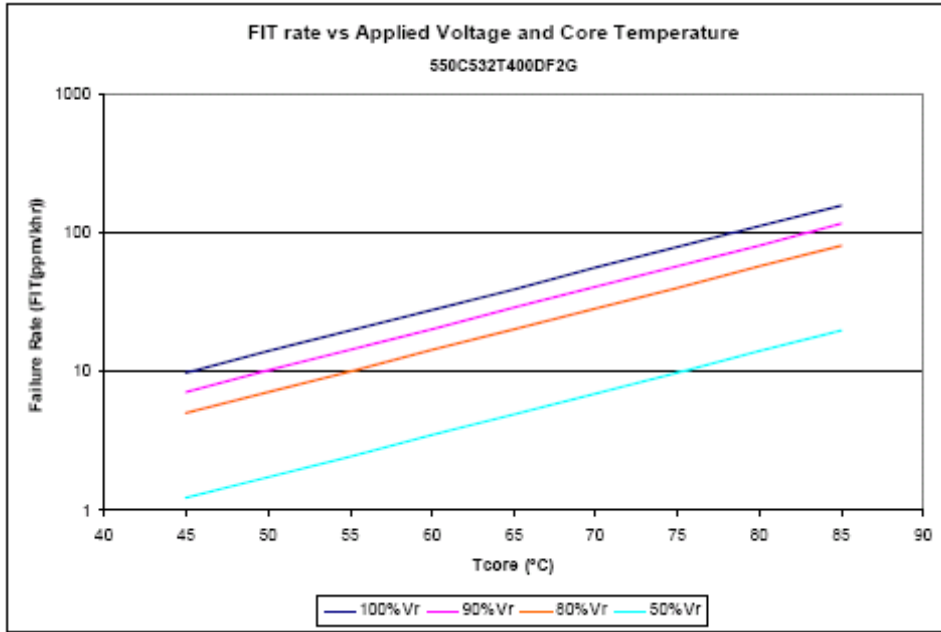


图 2：对各种外加电压和核心温度的失效速率模型预测  
（图中标题：FIT 速率 vs. 外加电压和核心温度）

指数分布的本质是它的危害速率是个常数值  $\lambda$ 。这意味着初始失效率是  $\lambda$ ，即使元件失效，剩余元件的失效率保持相同的  $\lambda$  值。

因此，对于预损耗失效我们有概率密度函数

$$f_{\text{exp}}(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t} \quad (5)$$

以及一个积累分布函数

$$F_{\text{exp}}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (6)$$

导致一个危害函数

$$h_{\text{exp}}(t) = \lambda = \text{FIT Rate (ppm/kh)} \quad (7)$$

### FIT 速率和 MTBF 的例子

失效之间的平均时间是 FIT 速率的倒数，

$$\text{MTBF} = 1/\lambda = 1/\text{FIT} \quad (\text{Gh}) \quad (8)$$

可以直接了当地归纳出它的单位和意义。参见表 2 常用单位的总结。FIT 的单位是 ppm/kh，每十亿单位小时的失效数，或者每小时的十亿分之一的失效数。当对该单位取倒数，我们获得 G 小时数。保持尺度一致的主要方法是如果他们单位已经给定就用它；如果它们给定为 FIT，记住 FIT 表达为 ppm/kh，所以其倒数为数十亿单位小时。

Reliability and MTBF Unit Conversions			
$\lambda$ FIT (ppm/kh)	$\lambda$ f / 10 <sup>8</sup>	$\lambda$ % / kh	MTBF = 1 / $\lambda$ kh
0.1	0.0001	0.00001	10,000,000
1.0	0.001	0.0001	1,000,000
10	0.01	0.001	100,000
100	0.1	0.01	10,000
1,000	1.0	0.1	1,000
10,000	10	1.0	100

表 2: 常用失效速率  $\lambda$  和 MTBF 尺度的总结  
(表中首行: 可靠性和 MTBF 的单位转换)

作为一个例子, 假设我们含有 10 只电容的电容组有只电容在  $\lambda=200\text{FIT}$  下操作, 每年运行 4300 小时。

(A). 单个电容器和整组的 MTBF 是多少?

对于电容器, 由方程(8)  $\text{MTBF}=1/(200\text{FIT})=1\text{Gh}/200=5$  百万小时。对于电容组, 把单个电容器的 MTBF 值除以组中电容器的数目, 结果获得 500kh。

(B). 在什么时间我们预计有  $\alpha=1\%$  的电容器已经失效? 这会近似为  $0.01*\text{MTBF}=50\text{kh}$ 。为了更精确的计算, 我们设定方程(6)等于  $F(t_\alpha) = 0.01$  解得  $t_\alpha$  如下:

$$t_\alpha = -\ln(1 - \alpha) / \lambda = 50252h \quad (9)$$

(C)当 1% 的电容已经失效的时候, 电容组将会失效的百分率是多少?

既然每一组有 10 只电容器, 1% 的电容已经失效, 我们预测将会有 10% 的电容组失效。这是近似对的。精确计算电容组失效积累比例  $\beta$  的最好方法是当我们期待  $\alpha$  比例的电容器已经失效, 从单位 1 中减去所有 10 只电容器的生存概率。这样我们有一个积累电容组失效值

$$\beta = 1 - (1 - \alpha)^N = 1 - (1 - 0.01)^{10} = 9.6\% \quad (10)$$

电容组在  $t=50\text{kh}$  时失效。

(D)我们有 1000 个电容组在现场运行 4300 小时每年。我们预期每年多少现场返回? 电容器的 FIT 速率是 200, 电容组的速率是  $200N=2000\text{FIT}$ , 于是我们预计每一千电容组每一千小时有 2 组失效。对于每年 4300 小时运行, 大约每年 9 组失效。

幸运的是, 大多数 CDE 电容器在现场正展现出比 200 低得多的 FIT 速率。

### 计算磨损寿命

现场实际中, 很显然大组电容器寿命也许比由方程 1 计算的额定损耗寿命  $L$  要短。当寿命以一种方式定义为描述大电容器组中小百分比发生失效的时间, 这种情况可以发生。例如, 如果能容忍仅仅 1% 累积电容组失效, 而且电容组含有 24 个大的高压电容, 非常有可能产生比损耗寿命计算值较短期限的磨损寿命, 如同前面章节中揭示的 10 只电容器组的计算实例。

方程(9)得出的磨损寿命  $t_\alpha$  将小于方程(1)的损耗寿命  $L$  的水平依赖于电容器失效率  $\alpha$  的最大可容忍比例以及  $L/\text{MTBF}$  的比例。它证明通过实施一些近似和代数运算, 我们得到一个近

似关系：电容器的磨损寿命将小于损耗寿命L，当随机预损耗失效率 $\alpha$ 的可容忍比例符合以下条件：

$$\alpha < \frac{N \cdot V_r \cdot \sqrt{C}}{25000(V_a/V_r)^6} \quad (11)$$

例如，一个电容组中有 N=10 只电容器，每个在 500 伏(DC)额定容量 10mF，外加直流电压 429V(DC) 时，我们会经历一个电容组寿命，当我们限制随机组失效率为 5%时该寿命比预测的损耗寿命短。看待这个问题的另一种方法是说：我们预测在到达预期损耗寿命之前电容组失效的比例约为 5%

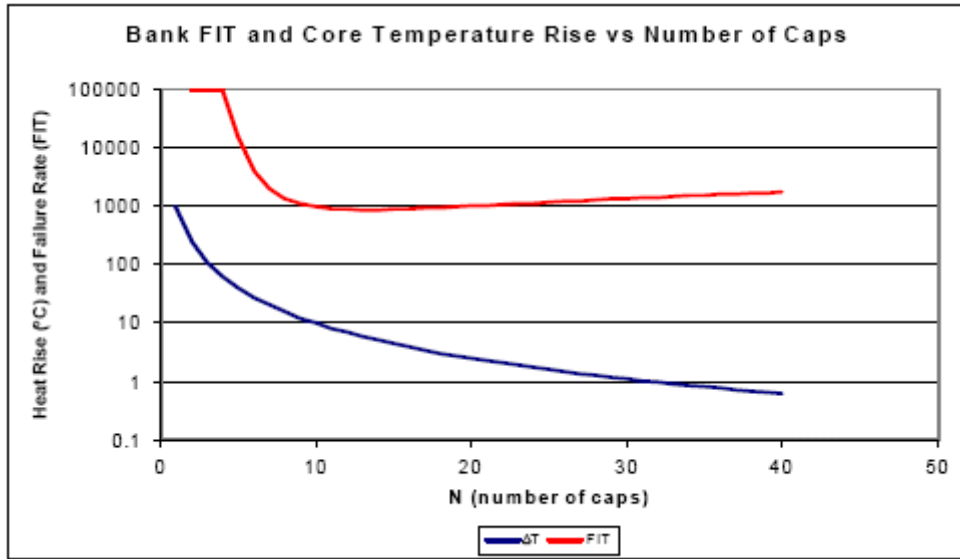


图 3：核心温升和失效速率与电容器数目的关系例子  
(图中标题：电容组 FIT 和核心温升 vs. 电容的数量)

### 优化可靠的电容器组

注意，方程(3)的失效速率模型不仅仅对高操作温度有惩罚，而且对高储存能量和电容组中大数量电容有惩罚。很明显，使用较少数量大容量电容如同实施电压降额以及保持较小的热温升  $\Delta T$  一样有利。

继续上文的推理，可能存在一个优化的电容数量去保持较温和的来自脉动电流加热作用的温度，同时储存仅仅所需的能量。鉴于电容器组的尺寸和电容器的数量，增加更多的电容器将不再可靠。使用更少的电容器会导致足够的来自脉动电流自热作用，使得该电容组不再可靠。

基于我们的可靠性模型，可以证明的确存在一个电容器优化数量，以取得最低电容组失效率。这可以推导如下。忽略相互加热作用，ESR随温度变化，热传导系数随温度变化，热阻随电容器在组中位置而变化，降低电容组阻抗的可能性会改变对电容组的总脉动电流，伴随固定量脉动电流的电容组中电容器的核心温升 $\Delta T$ 反比于组中电容器数目的平方。让我们假设：只有一个电容器的电容组的热温升为 $\Delta T_1$ 。实际上，该数值也许高于铝的熔点，但是并不使该论证无效。我们有

$$\Delta T = \Delta T_1 / N^2 \quad (12)$$

由方程(2)

$$\lambda = \gamma \cdot N \cdot 2^{\Delta T_1 / N^2} \quad (13)$$

确定常数  $\gamma$ 。设定

$$\frac{\partial \lambda}{\partial N} = 0 \quad (14)$$

我们得到

$$N = \sqrt{\frac{\Delta T_1 \ln 2}{5}} \quad (15)$$

因此

$$\Delta T_{OPT} = 5 / \ln 2 = 7.2C \quad (16)$$

这样，我们有了优化可靠的电容组结果，针对于固定电容组脉动和给定电容设计，电容器的优化数目是导致核心温度升高 7.2°C 的电容数目。图 2 显示对于某特定应用场合，温升和 FIT 速率对组中电容数目的关系。

现实中我们发现：由于成本和尺寸限制，非常少的客户设计他们的电容器组达到如此小的温升。 $\Delta T=15-20^\circ C$  实际上更加典型。但是大多数有经验的组件工程师可能会承认这些情况中增加电容器不仅降低操作温度而且提高可靠性。

### 损耗寿命分布模型

明显地不是所有的电容器在它们到达预测的损耗寿命  $L$  时精确失效。一些会早失效（通常小于 10%），许多晚失效。这带来问题：损耗失效是如何在时间上分布。

对于损耗我们假设一个平均值  $\mu=1.2L$  标准偏差  $\sigma=0.1L$  正态分布。

从平均时间  $\mu$  和标准偏差  $\sigma$ ，我们计算归一化坐标

$$z = \frac{t - \mu}{\sigma} \quad (17)$$

从这里我们计算 PDF 为

$$f_{nor}(t) = \phi_{nor}(z) / \sigma = \frac{e^{-z^2/2}}{\sigma \sqrt{2\pi}} \quad (18)$$

对于正态分布的 CDF 没有闭式公式，但是它内驻于大多数工作簿和工程软件中。累积分布函数当然定义为

$$F_{NOR}(t) = \Phi_{NOR}(z) = \int_{-\infty}^z \phi_{nor}(w) dw \quad (19)$$

和危害函数

$$h_{nor}(t) = \phi_{nor}(z) / [1 - \Phi_{nor}(z)] \quad (20)$$

当人们看图 1，他也许想知道电容群体的损耗分布如何影响较大电容组的失效率。毕竟，如果我们说高达 10% 的电容器失效于磨损不迟于时间  $t=L$ ，然后我们可以推断 1% 会在某个以前的时间已经失效，这样大电容组的失效比例将在电容器额定损耗寿命之前可能超过 10%。幸运的是正态分布允许我们考虑这个问题如下。

为了预测  $N$  个电容的电容器组损耗失效时间分布，对于单个电容器我们应该把正态分

布曲线的平均值  $\mu$  稍微向左平移足够时间量,使得累积分布函数值等于数值  $\alpha/N$  而不是 0.1。我们发现

$$\Delta\mu = F_{nor}^{-1}(0.1) - F_{nor}^{-1}(\alpha/N) \quad (21)$$

然后调整数值  $\mu$  为

$$\mu' = \mu - \Delta\mu \quad (22)$$

因为 PDF 函数的尾巴减少得如此快速(如同  $e^{-t^2}$  衰减),我们通常发现这会降低预测的损耗寿命在 10-20%之间,不会再高。

### 合并预损耗和损耗分布

我们已经讨论了电容器寿命分布的两个主要成分,而且我们计算了电容组寿命从损耗限制到磨损限制的交叉点。不是需要在这两个区域来回转移,我们问自己是否他们可以合并成单一杂化分布,其具有明确的概率密度,累计密度,和危害函数的性质。Cornell Dubilier 已经成功地完成这个任务,其开发过程介绍如下。

我们用来开发一个明确的杂化 CDF,称之为指数-正态杂化 (ENH) 分布的这种方式要定义

$$F_{enh}(z) \equiv 1 - [1 - \Phi_{nor}(z')]e^{-\lambda t} \quad (23)$$

上式引出一个明确的 PDF

$$f_{enh}(z) = [\lambda(1 - \Phi_{nor}(z')) + \phi_{nor}(z')]e^{-\lambda t} \quad (24)$$

这里,我们在  $z$  和  $z'$  之间作出区分,可以通过回忆正态分布的平均值需要作出微小调整如同方程(22)中讨论和介绍。我们也可以推导出危害函数

$$h_{enh}(t) = \lambda + \phi_{nor}(z)/[\sigma(1 - \Phi_{nor}(z))] \quad (25)$$

表 3 总结了本文中使用和推导的分布。下一页的图 4 显示成功融合的杂化 ENH 分布。

Distribution	PDF $f(t)$	CDF $F(t)$	HF $h(t)$
Exponential	$\lambda e^{-\lambda t}$	$1 - e^{-\lambda t}$	$\lambda$
Normal	$\phi_{nor}(z)/\sigma$	$\Phi_{nor}(z)$	$\phi_{nor}(z)/[1 - \Phi_{nor}(z)]$
Expo-Normal Hybrid	$[\lambda(1 - \Phi_{nor}(z)) + \phi_{nor}(z)/\sigma] e^{-\lambda t}$	$1 - [1 - \Phi_{nor}(z)] e^{-\lambda t}$	$\lambda + \phi_{nor}(z)/[\sigma(1 - \Phi_{nor}(z))]$

$$z \equiv \frac{t - \mu}{\sigma} \quad \phi_{nor}(z) = \frac{e^{-z^2/2}}{\sqrt{2\pi}} \quad \Phi_{nor}(z) = \int_{-\infty}^z \phi_{nor}(w) dw$$

表 3: 相关于随机和损耗失效的统计分布性质的总结

### 总结

我们已经介绍了 CDE 损耗寿命模型并且讨论了损耗寿命和磨损寿命的差别,磨损寿命定义为达到一定开环或短路失效比例所限制的寿命。我们介绍了一个模型来计算失效速率  $\lambda$ ,也已知为 FIT 速率,以及 MTBF  $1/\lambda$ 。我们讨论了寿命和单个电容器可靠性对电容组的关系。我们考察了在实际应用中的电容器具有一个寿命被可靠性和磨损所限制的环境。最后我们开

发和介绍了一个磨损-可靠性联合模型，我们称之为指数-正态杂化（ENH）可靠性模型。

希望这些模型将为成功的电容器应用提供指导帮助。在设计和应用开发过程中涉及CDE将会帮助确保取得适当的可靠性。

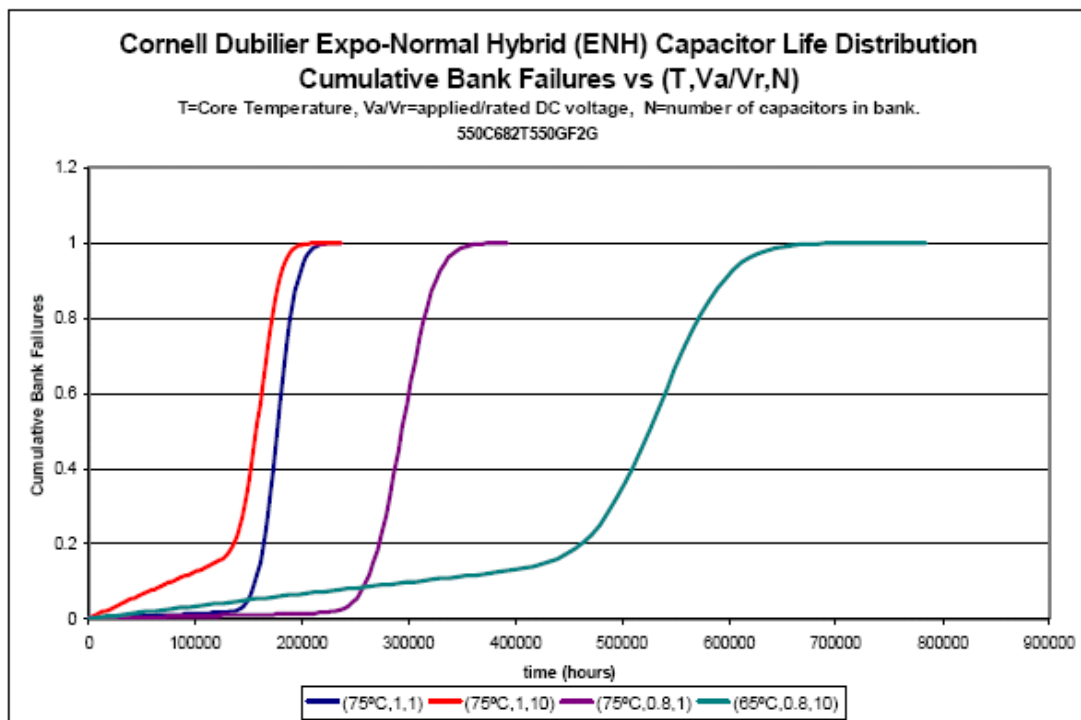


图 4: CDE 杂化寿命模型分布的例子

(图中标题: Cornell Dubilier 指数-正态杂化(ENH)电容寿命分布  
累积电容组失效 vs. (T, Va/Vr, N) )