

可靠度技術手冊

電容器可靠度技術



彭鴻霖 編著

中華民國九十年一月六日

# 電容器可靠度技術

## 目 錄

1	前 言 .....	1
2	電容器概論 .....	1
2.1	電容器構造 .....	1
2.2	電容器命名與分類 .....	1
2.3	電容器編號 .....	2
2.3.1	美軍編號系統 .....	2
3	電容器特性與應用準則 .....	3
3.1	標準電容器 .....	3
3.1.1	電容器選擇因素 .....	3
3.1.2	電容器選擇準則 .....	4
3.1.3	應用考量因素 .....	4
3.1.4	減額因子 .....	5
3.2	紙、塑膠、紙-塑膠和金屬化介質電容器 .....	5
3.2.1	設計特性 .....	5
3.2.2	一般應用考量 .....	5
3.2.3	使用說明 .....	6
3.2.4	密封 .....	7
3.3	雲母電容器 .....	7
3.3.1	設計特性 .....	7
3.3.2	一般應用考量 .....	7
3.3.3	使用說明 .....	8
3.4	玻璃電容器 .....	8
3.4.1	設計特性 .....	8
3.4.2	一般應用考量 .....	8
3.4.3	使用說明 .....	8
3.5	陶瓷電容器 .....	9
3.5.1	設計特性 .....	9
3.6	鉭質電容器 .....	9
3.6.1	設計特性 .....	9
3.7	鋁質電解電容器 .....	10
3.7.1	設計特性 .....	10
4	電容器可靠度模型 .....	10
4.1	電容器失效模式 .....	10
4.2	電容器零件失效率模型 .....	11
4.2.1	固定電容器 .....	11
4.2.2	可變電容器 .....	11
4.3	基本失效率 .....	12
4.3.1	電容量修正因子 .....	14

4.3.2	環境修正因子 .....	14
4.3.3	品質修正因子 .....	15
4.3.4	串聯電阻修正因子 .....	17
4.3.5	構造修正因子 .....	17
4.3.6	形態修正因子 .....	17
4.4	各種電容器之失效率模型 .....	18
4.4.1	紙質旁通固定電容器 .....	18
4.4.2	紙質饋通固定電容器 .....	18
4.4.3	紙質與塑膠膜固定電容器 .....	19
4.4.4	金屬化紙質、紙-塑膠及塑膠介質固定電容器 .....	20
4.4.5	塑膠及金屬化塑膠介質固定電容器 .....	21
4.4.6	超級金屬化塑膠介質固定電容器 .....	22
4.4.7	雲母固定電容器 .....	22
4.4.8	按鈕式雲母固定電容器 .....	23
4.4.9	玻璃固定電容器 .....	24
4.4.10	一般用陶瓷固定電容器 .....	24
4.4.11	溫度補償與晶片陶瓷固定電容器 .....	25
4.4.12	固態鉮質電解固定電容器 .....	26
4.4.13	非固態鉮質電解固定電容器 .....	26
4.4.14	鋁質電解固定電容器 .....	27
4.4.15	乾式鋁質電解固定電容器 .....	28
4.4.16	陶瓷可變電容器 .....	29
4.4.17	活塞可變電容器 .....	29
4.4.18	空氣調節可變電容器 .....	30
4.4.19	氣體或真空介電可變與固定電容器 .....	30
	參考資料 .....	32

# 電容器可靠度技術

## 1 前言

近年來，系統與裝備的性能不斷提高，構造也漸趨複雜，可靠度為產品所應具有的重要特性之一。在系統與裝備研製過程中，針對正在研發或已經存在的產品設計，必須運用各種技術以便驗證設計固有可靠度期望值，定量評估與驗證其可靠度現況是否符合規定需求。一般電子裝備係由零件所構成的，電子零件種類非常多，而且大多有完整的標準化程序，工程技術資料相當齊全、可靠度技術也早已成熟。因此，瞭解電子零件的失效模式與失效率模型，將有助於裝備可靠度作業的進行。

本報告主要在探討電容器可靠度相關技術資訊內容，首先概略地說明電容器之構造、命名與分類、編號，其次說明各種電容器的設計特性、應用準則與使用說明，最後說明電容器的失效模式與失效率模型通式、以及各種電容器型式的詳細失效率模型與參數等資訊，作為裝備與系統設計時選用電容器參考之用。

## 2 電容器概論

### 2.1 電容器構造

電容器是數量大、應用廣泛的電子零件之一，它的種類比電阻器更多，材料、結構與性能方面的差異更大。例如，陶瓷電容器的介質是陶瓷，電極是 Ag 或 Ni；有機電容器的介質是高分子薄膜，如聚乙烯、聚丙烯、聚脂等，電極多是鋁箔。在電解電容器中，鋁質電解電容器的陽極是鋁箔，介質是陽極鋁箔上形成的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜，陰極是工作電解液；鉭質電解電容器的陽極是金屬鉭粉燒結體，介質為在陽極鉭燒結體上形成的  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  膜，陰極則是工作電解液或  $\text{MnO}_2$ 。

### 2.2 電容器命名與分類

一般電子零件均依照其分類分式進行編號，通常分為型式(type)、樣式(style)、等(class)、級(grade)等四個考量方式。一般電子裝備所使用之電容器通常依其使用功能及製造方式而予以命名，依其功能電容器可分為固定電容器及可變電容器兩類，依據所使用的介質材料不同，可分為紙、塑膠、紙-塑膠和金屬化介質電容器，雲母介質電容器，玻璃介質電容器、陶瓷介質電容器，固體和非固體鉭質電解電容器，鋁介質電解電容器等型式。每一種型式再依據其電氣特性與尺寸等區分成各種不同的樣式，電容器之分類如表 1 所示。

## 2.3 電容器編號

### 2.3.1 美軍編號系統

美軍對於電容器的編號係以型式和樣式為基礎，一般為五碼，第 1 碼為 C，代表電容器；第 2 碼代表樣式，例如 CM 代表「雲母介質固定電容器」、CY 代表「玻璃介質固定電容器」；第 3 碼代表此一電容器為已建立可靠度水準，並且按其失效率水準等級予以分類，其代號為 R，第 4、5 碼代表電容值或尺寸；例如：CLR35、CLR79 為兩種已建立可靠度之非固態鉭質電解固定電容器樣式。若是某一電容器並未依照失效率水準進行分級，亦即屬於無建立可靠度水準產品，則其編號為四碼，例如：CL13、CL18 則為兩種無建立可靠度之非固態鉭質電解固定電容器樣式。

表 1：電容器分類

樣式	零件名稱	217F	適用規範	備 註
CP	紙質、旁通、濾波器、區塊、直流固定電容器	10.1	MIL-C-25	
CA	紙質、旁通、無線電減低、直流及交流固定電容器	10.1	MIL-C-12889	
CZ	紙質、金屬化紙質、金屬化塑膠介質 RFI 固定電容器	10.2	MIL-C-11693	
CPV	紙與塑膠膜介質固定電容器	10.3	MIL-C-14157	ER
CQ CQR	紙與塑膠膜介質固定電容器	10.3	MIL-C-19978	
CH CHR	金屬化紙、紙-塑膠、及塑膠介質固定電容器	10.4	MIL-C-18312 MIL-C-39022	
CFR	塑膠及金屬化塑膠介質固定電容器	10.5	MIL-C-55514	
CRH	超級金屬化塑膠介質固定電容器	10.6	MIL-C-83421	ER
CM CMR	雲母介質固定電容器	10.7	MIL-C-5 MIL-C-39001	
CB	按鈕式雲母介質固定電容器	10.8	MIL-C-10950	
CY CYR	玻璃介質固定電容器	10.9	MIL-C-11272 MIL-C-23269	
CK CKR	一般用陶瓷介質固定電容器	10.10	MIL-C-11015 MIL-C-39014	
CC CCR	溫度補償陶瓷介質固定電容器	10.11	MIL-C-20	
CDR	晶片陶瓷介質固定電容器	10.11	MIL-C-55681	
CSR	固態鉭質電解固定電容器	10.12	MIL-C-39003	
CL CLR	非固態鉭質電解固定電容器	10.13	MIL-C-3965 MIL-C-39006	
CU CUR	鋁質電解固定電容器	10.14	MIL-C-39018	
CE	乾式電解偏極化鋁質固定電容器	10.15	MIL-C-62	
CV	陶瓷介質可變電容器	10.16	MIL-C-81	
PC	活塞式可變電容器	10.17	MIL-C-14409	
CT	空氣調適可變電容器	10.18	MIL-C-92	
CG	氣體或真空介電、陶瓷或玻璃包封、可變及固定電容器	10.19	MIL-C-23183	

資料來源：本研究報告參考 MIL-HDBK-217F 整理

### 3 電容器特性與應用準則

#### 3.1 標準電容器

美軍對於標準電容器的標準要求規定在美軍標準 MIL-STD-198「電容器選擇與應用」，此一標準介紹了設計軍用裝備選用電容器時所需的詳細資訊，所介紹的資訊內容包括：術語、電容器選擇、環境對特性與壽命的影響、應用場合、應用數據、失效率與老化曲線。此外，對於每一種類型的電容器提供了詳細的設計資訊。

##### 3.1.1 電容器選擇因素

在選擇電容器時，應考慮的因素包括：

- (1). 溫度；
- (2). 濕度；
- (3). 氣壓；
- (4). 施加的電壓：
  - A. 循環/脈動電流；
  - B. 頻率；
  - C. 散逸因素；
  - D. 等效串聯電阻；
  - E. 反向電壓水準。
- (5). 振動；
- (6). 電流；
- (7). 壽命；
- (8). 穩定性；
- (9). 逆向特性；
- (10). 尺寸；
- (11). 體積；
- (12). 安裝方式；

### (13).價格。

類似電阻器，此一軍用標準對電容器的工作特性也作了透徹的研究，確定了它的形狀、功能與適用的額定值，並在軍用標準與規範中說明了有關電容器的採購、試驗、允收審查、品質管制與標準化等作業規定。與電阻器一樣，電容器通常需要大量生產，以便使單位價格更便宜、並且有助於標準化。

## 3.1.2 電容器選擇準則

電容器的選擇準則包括：

- (1). 參考美軍標準 MIL-STD-198 「電容器選擇與應用」；
- (2). 依照一系列已建立可靠度之軍用規範；
- (3). 參考有關電容器的其他軍用規範；
- (4). 使用取自類似應用場合的歷史試驗數據，或確保零件在應用時具有足夠牢固可靠的工程資訊和(或)數據。

## 3.1.3 應用考量因素

### (1). 介質與體積的關係

在電解電容器中，介質所佔的體積部份幾乎可以忽略；但在利用雲母、塑膠、陶瓷及玻璃等介質所製成的其他電容器中，介質幾乎構成了電容器的整個體積。理論上，除電解電容器以外，由於所有的電容器差不多整個電容器的體積部份都是有效介質，其體積( $v$ )與  $CV^2$  成正比(此處  $C$  為電容量， $V$  為最大額定電壓值)，其比例常數取決於材料的介質常數與介質強度、以及電容器的預期壽命。跟據經驗顯示，電解型電容器的體積較為接近於隨  $CV$  變化的關係，而不是隨  $CV^2$  的變化關係。

### (2). 工作頻率

由於介質特性與其他結構特徵的關係，所有電容器都有工作頻率範圍的限制。聚碳酸酯、聚四氟乙烯、聚苯乙烯等介質電容器的標準工作頻率範圍為小於  $10^9$  Hz，透過專門的設計或工藝技術有可能擴展達到小於  $10^{10}$  Hz；玻璃介質電容器的標準工作頻率範圍介於  $10^5$  Hz 與  $10^9$  Hz 之間，有可能擴展達到  $10^3$  Hz 至  $10^{10}$  Hz 之間；陶瓷介質電容器的標準工作頻率範圍介於  $10^3$  Hz 與  $5 \times 10^8$  Hz 之間，有可能擴展達到  $10^2$  Hz 至  $10^{10}$  Hz 之間；雲母介質電容器的標準工作頻率範圍介於  $10^4$  Hz 至  $10^8$  Hz 之間，有可能擴展達到  $10^3$  Hz 至  $10^{10}$  Hz 之間；聚脂樹脂介質電容器的標準工作頻率範圍介於  $5 \times 10^2$  Hz 至  $10^6$  Hz 之間，有可能擴展達到  $5 \times 10^1$  Hz 至  $5 \times 10^6$  Hz 之間；鉭介質電容器的標準工作頻率範圍為小於  $5 \times 10^2$  Hz，有可能擴展達到小於  $8 \times 10^6$  Hz。

### (3). 電壓額定值與壽命

由於電容器的致命性失效通常是由於介質失效所引起的，因此，非電解電容器的電壓額定值是根據最高環境溫度與電壓應力條件下所得到的壽命期望值而確定的。介質失效通常是一種化學效應，對於密封性良好、介質不受空氣污染的電容器，介質失效是時間、溫度與電壓的函數。時間與溫度的關係影響化學作用或退化率，也就是說，溫度每上升  $10^{\circ}\text{C}$ ，性能即為退化一半。例如，在  $100^{\circ}\text{C}$  溫度環境下工作的電容器，其壽命為在  $90^{\circ}\text{C}$  溫度環境下工作的同樣電容器的壽命的一半。根據對某些有機介質所作的廣泛研究發現，電容器的退化與電壓的五次冪方(亦即  $V^5$ )成正比，例如，在 20 伏特電壓下工作的電容器，其壽命為在 40 伏特電壓下工作的同型電容器的 32 倍。當然， $10^{\circ}\text{C}$  準則只適用於一定的溫度範圍，即在此溫度範圍內不應發生影響介質的重大狀態變化，也就是不產生凍結、融化、沸騰、凝結、膨脹、或收縮，穩定的晶體結構不發生晶態或其他變化。當考慮到下述情況時，五次冪方( $V^5$ )準則也需要進行修改，即：當電壓應力超過某一特定界限時，可能造成介質突然被擊穿；以及當有其他電場明顯地圍繞在突出導電板的介質的邊緣時，即使主要介質沒有失效，也會發生擊穿現象。

#### 3.1.4 減額定因子

減額定(derating)方法是提高零件與裝備可靠度的一種手段，各種電容器建議的減額定準則如表 2 所示。

### 3.2 紙、塑膠、紙-塑膠和金屬化介質電容器

#### 3.2.1 設計特性

紙、塑膠、紙-塑膠和金屬化介質電容器廣泛使用於滿足中等要求的電容器應用場合。此類電容器包括各式各樣的介質型式、樣式、電壓額定值和溫度特性。介質材料、設計方法與製造工藝的不斷發展，致使此類零件成為適用性極為廣泛的電容器系列。整組電容器都具有高的絕緣電阻、相當良好的穩定性和能夠在  $125^{\circ}\text{C}$  以下的溫度環境下工作。某些類型的塑膠介質，例如聚碳酸酯、聚苯乙烯，也具有優良的溫度係數特性。

#### 3.2.2 一般應用考量

此類電容器可用於要求電容器在高溫下具有高而穩定的絕緣電阻、並在寬的溫度範圍內具有良好的電容穩定性的場合。這就可以使它們能在從計算機到導引飛彈的廣闊範圍內使用。某些塑膠介質電容器的介電強度比較高，從而使它們的外形尺寸相當小，這是很有吸引力的。在這些電容器中，相對應於等效的 CV 額定值，除了符合 MIL-C-19978 的聚苯乙烯型電容器是中等到大型尺寸外，都屬於小尺寸的電容器。金



屬化紙介質電容器的絕緣電阻值很小，容易發生介質擊穿。塑膠介質電容器具有優良的耐濕特性，因為它們不會吸濕。

表 2：電容器減額因子

零件名稱	軍用規範	樣式	減額定電壓 最大百分數 <sup>(註1)</sup>	減額定電流 最大百分數 <sup>(註2)</sup>	減額定溫度 ( ) <sup>(註3)</sup>
雲母介質固定	MIL-C-39001	CMR	0.5	0.7	10
玻璃介質固定	MIL-C-23269	CYR	0.5	0.7	10
非固態鉭質電解固定 <sup>(註10)</sup>	MIL-C-39006	CLR	0.5 <sup>(註8)</sup>	0.7	20 <sup>(註4)</sup>
固態鉭質電解固定	MIL-C-39003	CSR	0.6 <sup>(註6)</sup>	0.7 <sup>(註5)</sup>	20 <sup>(註4)</sup>
鋁質電解固定	MIL-C-39018	CUR	0.8 <sup>(註11及12)</sup>	0.7	10
紙、塑膠與金屬化介質 固定	MIL-C-19978	CQR	0.5	0.7	10
	MIL-C-39022	CHR	0.5	0.7	10
	MIL-C-55514	CFR	(註7)		
	MIL-C-83421	CHR			
陶瓷介質溫度補償固定	MIL-C-20	CCR	0.5	---	10
陶瓷介質固定	MIL-C-39014	CKR	0.1~0.5 <sup>(註9)</sup>	0.7	10
陶瓷介質可變	MIL-C-81	CV	0.5	0.7	10
玻璃介質可變	MIL-C-14409	PC	0.5	0.7	10

備註：

- 減額定電壓適用於直流極化電壓與交流峰值電壓之和。
- 初始浪湧電流與脈動電流。
- 零件溫度(脈動電流引起的周圍和內部溫升)不應超過額定溫度減去減額定溫度值。
- 在應用減額因子之前，CLR 與 CSR 型電容器的最大額定電壓必須在 85 與 125 之間減額定。
- 要求的最小有效串聯電阻為 3 歐姆/伏特。
- 反向電壓不應超過額定電壓的 2 %。
- 最好不要對金屬化薄膜電容器施加過度的減額電壓。所加電壓應足以(等於或大於 0.10 伏特及電路的串聯電阻小於 1 仟歐姆)維持自愈現象。
- 有極性的 CLR 型電容器具有極低的或零反向偏壓限制(後者的例子是 CLR65 與 CLR69)。設計師必須對所選定的型號核實其反向偏壓限制，並嚴格遵守。即使在瞬態條件下超出反向偏壓限制，也會迅速導致災難性失效。
- 避免高壓與高濕複合所引起的鍍銀層位移現象。
- CLR25、CLR27、CLR35 與 CLR37 型箔片鉭質電解電容器和 CLR79 型塊狀鉭質電解電容器須經核可才能使用。所有其他型號的電容器須經判斷使用合理與核可後才能使用。
- 鋁質電解電容器未經核可不得使用。
- 鋁質電解電容器建議不要減額過多。直流工作電壓應儘量接近實際需要，但不要超過  $0.8 \times$  電容器浪湧電壓額定值。

資料來源：

### 3.2.3 使用說明

此類電容器包括 CA、CP、CZ、CPV、CQ、CQR、CH、CHR、CFR、CRH 等型式，其中 CA、CP、CH 等型式為老舊裝備所使用之電容器，目前只有這些裝備的備件適用此型式電容器，對於新設計則是無效的，依規定不能選用，CP 型電容器由 CQR 型取代，CP 型及 CH 型由 CHR 型取代，。

常用的 CQR 型固定電容器有 CQR07, 09, 12, 13, 29, 32, 33 等樣式，此類電容器適用於工作溫度範圍相當寬，且要求絕緣電阻高、介質吸收或損耗係數低的應用場合，以及外加電壓的交流分量小於直流電壓額定值的場合。如果存在著交流分量，則直流峰值電壓與交流峰值電壓之和決不可超過額定的直流電壓；交流峰值電壓在 60 Hz 時不能超過直流額定電壓的 20 %，在 120 Hz 時不能超過 15 %，或在 10000 Hz 時不能超過 1.0 %。

常用的 CHR 型固定電容器有 CHR09 和 CHR19 兩種樣式，主要用於交流電壓分量小於額定直流電壓的場合，以及在容許絕緣電阻偶而降低和瞬間擊穿的地方。如果存在有交流分量，所施加的直流電壓與峰值交流電壓之和不得超過額定的電壓，交流電壓不得超過額定直流電壓的 20 %。

常用的 CFR 型固定電容器有 CFR02, 03, 04, 05, 06, 08 等樣式，主要適合於工作溫度範圍寬廣，且要求絕緣電阻高、介質吸收或損耗因數低的場合下使用，也適合在交流電壓小於額定直流電壓的條件下使用。這種電容器的耐濕能力有限，建議不要使用在瞬態或脈衝電流比較強的地方。

### 3.2.4 密封

所有此類電容器都應當加以氣密封處理，因為少量便會加速電容器材料內部的化學反應。

## 3.3 雲母電容器

### 3.3.1 設計特性

雲母(mica)是少數幾種可以直接用作電容器介質的天然材料之一，它的物理和電氣性能，以及近乎完美的劈開特性，使它可能成為已知的電容器介質中最好的一種。它在尺寸和電氣性能兩方面都具有固有的穩定性。因此，雲母電容器具有極好的溫度係數特性，而且在使用時不易老化。

### 3.3.2 一般應用考量

雲母電容器與玻璃電容器一樣，都具有很高容量的每單位體積或重量，且長期穩定性高、溫度係數低、及可靠度歷史良好。雲母電容器在 500 兆赫頻率以內的性能良好，當要求在交流電工作時，峰值交流電壓與直流偏壓之和不得超過根據減額定準則選定的減額值，凡遇到瞬變現象的地方，還應考慮這些瞬變過程的影響。在長期使用過程中，為避免產生銀離子位移，鍍銀雲母電容器決不能受到直流電壓與高溫和高濕的組合應力。

### 3.3.3 使用說明

雲母電容器包括 CM、CMR、CB 等型式，常用的 CM 型雲母固定電容器有 CM05, 06, 07, 08, 15, 20, 30, 35, 45, 50 等樣式，其中 CM05, 06, 07, 08 等四種樣式為老式裝備所使用之電容器，目前只有這些裝備的備份件才適用，對於新設計裝備則以 CMR 型電容器取代之。

樣式為 CM15, 20, 30, 35, 45, 50 等之 CM 型雲母固定電容器主要用於：要求精密的高頻濾波和旁通的電路中使用；在因溫度、頻率與老化效應而必須有嚴格的阻抗限制的場合，例如在控制頻率、電抗或相位的調諧電路中；在調諧電路中作為微調電容器、次級電容量標準和高頻諧調。此外，用於延遲線路和穩定的小功率網路，這種電容器價格低廉且穩定可靠。

常用的 CMR 型雲母固定電容器有 CMR03, 04, 05, 06, 07, 08 等樣式，主要用於要求可靠度水準等級的場合，此種電容器的失效率取決於電容器的應用條件，例如：(1). 在恒溫條件，電容器壽命與所加直流電壓的 8 次幂方成反比；(2). 在恒定的直流電壓下，溫度每上升 10℃，壽命約縮短 50 %。在額定條件下，壽命的期望值至少為 50000 小時。

## 3.4 玻璃電容器

### 3.4.1 設計特性

玻璃電容器乃是利用玻璃為介質材料製成的電容器零件，其電氣特性與雲母電容器非常相似，具有極高的長期穩定性、低的溫度係數、和良好的可靠度歷史。

### 3.4.2 一般應用考量

玻璃電容器比雲母電容器的電容量高得多，其實體經常是由介質材料所構成的，它們具有良好的耐濕熱能力，然而，非氣密封的電容器所承受的相對濕度不得高於 80 %，由於這種電容器所使用的結構與材料都非常容易破裂，當受到大的衝擊或振動就會損壞。

### 3.4.3 使用說明

玻璃固定電容器有 CY 和 CYR 兩種型式，其中 CY 型式是老式裝備所使用之玻璃電容器，目前只有這些裝備的備份件才使用，對於新設計裝備則以 CYR 型取代之。

常用的 CYR 型玻璃固定電容器有 CYR10, 13, 15, 17, 20, 22, 30, 32, 41, 42, 43, 51, 52, 53 等樣式，主要應用於給定可靠度要求的條件下，以及需要考慮不同的溫度係數和介質損耗的場合。這種電容器應當用來取代雲母電容器，它們在極值環境條件下具有穩定的性能，它們的壽命長，一般高達 30000 小時或以上，並且能在飛彈與太空用裝備上非常滿意地工作。這種外形尺寸比較小的電容器具有耐高 G 載荷的能力，但是容

易受到輕度機械衝擊的損害。因此，對它們應當謹慎使用。它們在較寬的電容量範圍內比雲母電容器高出相當多的電容量  $Q$  值。

### 3.5 陶瓷電容器

#### 3.5.1 設計特性

陶瓷電容器乃是以無機化合物為介質材料，利用高溫燒結技術製造完成的電容器零件。目前市面上有各種外形的陶瓷電容器可供選購使用，所有類型的陶瓷電容器比其他任何一種介質材料所製成的電容器系列的應用都廣泛。其原因是它們的價格低、特性範圍廣、容積效率高、以及頻率容量極高。然而，任何一種型式的電容器都不可能具有所有預期的使用特性。

### 3.6 鉭質電容器

#### 3.6.1 設計特性

鉭質電容器乃是以鉭為介質材料製成的電容器零件，又分為固態和非固態兩類。固態鉭質電容器是軍用電子裝備所使用的電零件中應用最廣的一種電解電容器。這種電容器具有高的容積效率、在溫度與時間變化時具有良好的穩定性。當使用得當時，它們是非常可靠的零件。因為所使用的介質是乾的和固體狀態，所以這種電容器具有比其他任何電解電容器更穩定的電容溫度特性。它們的缺點是洩漏電流較大，因此可應用的電壓範圍有限。這種電容器有的是有極性的，也有的是無極性的。

非固態鉭質電解電容器又分為塊狀(slug)和箔片(foil)兩種樣式：箔片非固態鉭質電解電容器也許是所有電容器中用途最廣的，它們具有有極性和無極性兩種結構，並且具有很寬的電壓額定值範圍。在適當的減額設計條件下，它們能在 125℃ 溫度下工作，其電氣特性在三種基本的鉭質電解電容器中最穩定的。與其他類型的鉭質電解電容器相比，它們的主要缺點是尺寸比較大，容量隨溫度的變化相當大，特別是在低溫時有較大的等效串聯電阻。

將電解液燒結成陽極的非固態鉭質電解固定電容器通常稱為塊狀，它是第一種以大量生產方式研製的鉭質電解固定電容器。這種電容器的開始生產意謂著，在中等電壓額定值應用場合仍然可以要求較大的電容值，初步擺脫了基本上完全依賴鋁質電解固定電容器的情況。塊狀非固態鉭質電解固定電容器的特殊優點是容積效率高，對於給定的電壓額定值容量為微法拉範圍的電容器而言，這種電容器的外殼尺寸通常可以製作得最小，然而有下述兩項缺點：(1).無論是樣式 CLR65 或是 CLR79，都不能承受甚至是極短時間的反向電壓；(2).這種電容器的電解液是液態或膠狀的硫酸溶液，其腐蝕性很強，電解液稍有洩漏，就會毀壞鄰近的電路。由於這種原因，除了裝在鉭外殼內的電容器(如樣式 CLR79)外，建議不採用塊狀非固態鉭質電解固定電容器。

## 3.7 鋁質電解電容器

### 3.7.1 設計特性

儘管鋁質電解電容器的容積效率比不上鉮質電解電容器，但它們每微法拉所花的費用卻最低。它們無氣密設計，因此建議不要應用於飛機用裝備上，因為在高空中它們會受到低氣壓。過去，一直認為鋁質電解電容器的儲存壽命有限，低溫特性也差，近年來，這些特性已經獲得明顯的改進，但是缺點仍然還沒有完全克服。鋁質電解電容器有一項獨特的特性，就是有可能失去其未使用的額定電壓部份，因此，不宜對鋁質電解電容器採用過度的減額定。

## 4 電容器可靠度模型

電容器標準化工作起源相當早，因此，其失效率模型的建立歷史也較久遠。以下說明電容器之失效率模型數學模型，以及相關修正因子。

### 4.1 電容器失效模式

電容器的失效模式有三種：開路、短路和性能老化。

開路失效模式表現為電容器無電容量、絕緣電阻無限大。失效原因是：引線疲勞斷裂、引線脆硬折斷、引線氧化、接觸電阻增大等；浪湧電流過大使引線或鋁箔燒毀；陶瓷電容器引線與 Ag 電極焊接不牢脫落。

短路失效模式是電極之間發生短路，它的失效機制為陶瓷電容器絕緣邊過小，Ag 離子遷移形成短路；介質膜有針孔使電極局部聯通；介質擊穿後電極聯通；由於腐蝕、結構不良、浪湧電流過大等引起介質擊穿。

電容器性能老化失效表現為電容量漂移、介質損耗增大、絕緣電阻減小、和擊穿電壓下降，其原因是浸漬材料性能老化、浸漬物或電解液消耗及受潮等。

交流浸漬型有機介質電容器因局部放電，使浸漬材料受焦耳熱沸騰，產生大量氣體，造成電容器內部壓力不斷增大，引起電容器鼓脹或爆裂，大容量電解電容器最易發生這種失效。

鋁質電解電容器最常見的失效現象是工作電解液洩漏，這種電容器是非密封結構，工作電解液是電容器的直接陰極，電解液漏液與乾涸會使陰極失去作用。工作電解液並不是中性材料，它滲漏到電路板上時會腐蝕電路和其他零件，直接影響電子裝備的可靠度。

金屬化聚脂薄膜電容器是彩色電視機回歸變壓器用耐高壓電容器，耐電壓值可高達 24 KV。在進行 40、1000 小時耐久性試驗時，發生的失效有電容量減小、完全無電容量、和損耗增大。將失效的電容器解剖之後，可發現鋁膜電極有發黑、發花、或脫落現象。通過電子顯微鏡分析得知，鋁膜發黑是由於碳和氧的嚴重污染，使反光率

下降而引起損耗增大。鋁膜發花或脫落是在生產過程中受潮，鋁膜發生氧化與腐蝕造成的。

## 4.2 電容器零件失效率模型

### 4.2.1 固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.1 節至 10.15 節之說明，除了固態鉭質電解電容器(第 10.12 節 CS 型)及非固態鉭質電解電容器(第 10.13 節 CL 型)等兩種固定電容器之外，大部份固定電容器的零件失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_{CV} \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

固態鉭質電解固定電容器的零件失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_{CV} \pi_{SR} \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

非固態鉭質電解固定電容器的零件失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_{CV} \pi_C \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中： $\lambda_p$  = 零件失效率，fr/10<sup>6</sup>hr；

$\lambda_b$  = 基本失效率，fr/10<sup>6</sup>hr；

$\pi_{CV}$  = 電容值修正因子；

$\pi_{SR}$  = 串聯電阻修正因子；

$\pi_C$  = 構造修正因子；

$\pi_E$  = 環境修正因子；

$\pi_Q$  = 品質修正因子。

### 4.2.2 可變電容器

陶瓷(CV)、活塞式(PC)、空氣調節(CT)等可變電容器的零件失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

氣體或真空介電、陶瓷或玻璃包封的可變與固定電容器(CG)的零件失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_{CF} \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中： $\lambda_p$  = 零件失效率，fr/10<sup>6</sup>hr；

$\lambda_b$  = 基本失效率，fr/10<sup>6</sup>hr；

$\pi_{CF}$  = 形態修正因子；

$\pi_E$  = 環境修正因子；

$\pi_Q$  = 品質修正因子。

### 4.3 基本失效率

電容器之基本失效率( $\lambda_b$ )之公式如下所示：

$$\lambda_b = A \exp \left\{ \left( \frac{S}{S_R} \right)^H + 1 \right\} \exp \left\{ B \left( \frac{T_A + 273}{T_R} \right)^G \right\}$$

其中：A = 將每一類型電容器失效率模型調整至適宜的失效率水準之調整因子；

B = 形狀參數；

G, H = 加速常數；

$S_R$  = 應力常數或額定應力；

S = 電應力，為操作電壓與額定電壓之比值。操作電壓等於施加之直流電壓與交流電壓峰值( $= \sqrt{2} \times V_{\text{rms}}$ )之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，；

$T_R$  = 溫度常數或額定溫度。

表 3 說明各種電容器基本失效率模型之參數值。

表 3：各種電容器基本失效率模型之參數值

零件樣式	217F	A	B	T <sub>R</sub>	G	S <sub>R</sub>	H
CP	10.1	0.00086	2.5	358	18	0.4	5
CA	10.1	0.00086	2.5	398	18	0.4	5
CZ,CZR, 特性 E,W	10.2	0.00115	2.5	358	18	0.4	5
CZ,CZR, 特性 K	10.2	0.00115	2.5	398	18	0.4	5
CZ,CZR, 特性 P	10.2	0.00115	2.5	423	18	0.4	5
CPV07; CQ,CQR, 特性 P,L	10.3	0.00050	2.5	338	18	0.4	5
CPV09; CQ,CQR, 特性 K,Q,S	10.3	0.00050	2.5	398	18	0.4	5
CPV17; CQ,CQR, 特性 E,F,G,M	10.3	0.00050	2.5	358	18	0.4	5
CQ,CQR, 特性 T	10.3	0.00050	2.5	443	18	0.4	5
CH 特性 R; CHR 特性 9,12,49	10.4	0.00069	2.5	358	18	0.4	5
CH 特性 N; CHR 特性 1,10,19,29,59	10.4	0.00069	2.5	398	18	0.4	5
CFR 特性 M,N	10.5	0.00099	2.5	358	18	0.4	5
CFR 特性 Q,R,S	10.5	0.00099	2.5	398	18	0.4	5
CRH	10.6	0.00055	2.5	398	18	0.4	5
CM 溫度範圍 R	10.7	$8.6 \times 10^{-10}$	16	343	1.0	0.4	3
CM,CMR 溫度範圍 O	10.7	$8.6 \times 10^{-10}$	16	398	1.0	0.4	3
CM 溫度範圍 N	10.7	$8.6 \times 10^{-10}$	16	358	1.0	0.4	3
CM,CMR 溫度範圍 P	10.7	$8.6 \times 10^{-10}$	16	423	1.0	0.4	3
CB50	10.8	0.0053	1.2	358	6.3	0.4	3
所有 CB(除 CB50 外)	10.8	0.0053	1.2	423	6.3	0.4	3
CY,CYR 溫度範圍 C	10.9	$8.25 \times 10^{-10}$	16	398	1.0	0.5	4
CY 溫度範圍 D	10.9	$8.25 \times 10^{-10}$	16	473	1.0	0.5	4
CK 溫度範圍 A; CKR13,48,64,72	10.10	0.0003	1.0	358	1.0	0.3	3
CK 溫度範圍 B; CKR05-12,14-19,73,74	10.10	0.0003	1.0	398	1.0	0.3	3
CK 溫度範圍 C	10.10	0.0003	1.0	423	1.0	0.3	3
CC20,25,30,32,35,45,85,95-97	10.11	$2.6 \times 10^{-9}$	14.3	358	1.0	0.3	3
CC5-9,13-19,21,22,26,27,31,33,36,37,47,50-57,75-79,81-83 ; CCR05-09,13-19,54-57,75-79,81-83,90 ; 所有的 CDR	10.11	$2.6 \times 10^{-9}$	14.3	398	1.0	0.3	3
CSR	10.12	0.00375	2.6	398	9.0	0.4	3
CL24-27,34-37	10.13	0.00165	2.6	358	9.0	0.4	3
CL20-23,30-33,40-43,46-56,64-67,70-73 所有的 CLR	10.13	0.00165	2.6	398	9.0	0.4	3
CU71; CUR71	10.14	0.00254	5.09	358	5.0	0.5	3
CU16,17; CUR16,17	10.14	0.00254	5.09	378	5.0	0.5	3
所有 CU,CUR(除 71,16,17 之外)	10.14	0.00254	5.09	398	5.0	0.5	3
CE	10.15	0.0028	4.09	358	5.9	0.55	3
CV11,14,21,31,32,34,40,41	10.16	0.00224	1.59	358	10.1	0.17	3
CV35,36	10.16	0.00224	1.59	398	10.1	0.17	3
PC 特性 G,H,J,L,T	10.17	$7.3 \times 10^{-7}$	12.1	398	1.0	0.33	3
PC 特性 Q	10.17	$7.3 \times 10^{-7}$	12.1	423	1.0	0.33	3
CT	10.18	$1.92 \times 10^{-6}$	10.8	358	1.0	0.33	3
CG20,21,30-32,40-44,51,60-64,67	10.19	0.0112	1.59	358	10.1	0.17	3
CG65,66	10.19	0.0112	1.59	376	10.1	0.17	3
CG50	10.19	0.0112	1.59	398	10.1	0.17	3

資料來源：本報告參考 MIL-HDBK-217F 整理



### 4.3.1 電容量修正因子

在電容器零件失效率模型的各項修正因子中，與電氣特性有關的修正因子為電容量修正因子(capacitance factor) ,  $\pi_{CV}$  , 其基本數學模型為：

$$\pi_{CV} = F C^P$$

其中： $\pi_{CV}$  = 電容量修正因子；

C = 電容器零件之電容量，單位為微法拉( $\mu F = 1.0 \times 10^6 pF$ )；

F, P = 為零件參數，詳如表 4 所示。

表 4：各種電容器基本失效率模型之參數值

零件樣式	軍用規範	217F	F	P
CP	MIL-C-25	10.1	1.20	0.095
CA	MIL-C-12889	10.1	1.00	0.000
CZ,CZR	MIL-C-11693	10.2	1.40	0.120
CPV	MIL-C-14157	10.3	1.60	0.130
CQ,CQR	MIL-C-19978	10.3	1.30	0.077
CH	MIL-C-18312	10.4	1.20	0.092
CHR	MIL-C-39022	10.4	1.20	0.092
CFR	MIL-C-55514	10.5	1.10	0.085
CRH	MIL-C-83421	10.6	1.20	0.092
CM	MIL-C-5	10.7	0.45	0.140
CMR	MIL-C-39001	10.7	0.45	0.140
CB	MIL-C-10950	10.8	0.31	0.230
CY	MIL-C-11272	10.9	0.62	0.140
CYR	MIL-C-23269	10.9	0.62	0.140
CK	MIL-C-11015	10.10	0.41	0.110
CKR	MIL-C-39014	10.10	0.41	0.110
CC, CCR	MIL-C-20	10.11	0.59	0.120
CDR	MIL-C-55681	10.11	0.59	0.120
CSR	MIL-C-39003	10.12	1.00	0.120
CL	MIL-C-3965	10.13	0.82	0.091
CLR	MIL-C-39006	10.13	0.82	0.091
CU, CUR	MIL-C-39018	10.14	0.34	0.180
CE	MIL-C-62	10.15	0.32	0.190

資料來源：本報告參考 MIL-HDBK-217F 整理

### 4.3.2 環境修正因子

裝備的使用環境條件會影響其可靠度，所有電子零件的可靠度模型都是透過環境修正因子，(environmental factor) ,  $\pi_E$  , 來涵蓋除了離子輻射以外的各種環境應力效應。由於溫度為電子零件操作特性之一，大多數的環境修正因子不必考慮零件本身操作使用的溫度效應。環境修正因子係按照裝備的用途加以分類，美軍手冊 MIL-HDBK-217F 共分為 14 類，分別為陸用溫和(GB)、陸用固定(GF)、陸用運度(GM)、海用有遮

(NS)、海用無遮(NU)、空用貨機有人區(AIC)、空用戰鬥機有人區(AIF)、空用貨機無人區(AUC)、空用戰鬥機無人區(AUF)、空用螺旋槳(ARW)、太空用飛行(SF)、飛彈用飛行(MF)、飛彈用發射(ML)、加農砲用發射(CL)等。美軍手冊 MIL-HDBK-217F 對於各種電容器在不同使用環境條件下的環境修正因子建議值如表 5 所示。

表 5：各種電容器之環境修正因子

樣式	軍用規範 MIL-C-	217F	GB	GF	GM	NS	NU	AIC	AIF	AUC	AUF	ARW	SF	MF	ML	CL
CP	25	10.1	1.0	2.0	9.0	5.0	15	6.0	8.0	17	32	22	0.50	12	32	570
CA	12889	10.1	1.0	2.0	9.0	5.0	15	6.0	8.0	17	32	22	0.50	12	32	570
CZ,CZR	11693	10.2	1.0	2.0	9.0	7.0	15	6.0	8.0	17	28	22	0.50	12	32	570
CPV	14157	10.3	1.0	2.0	8.0	5.0	14	4.0	6.0	11	20	20	0.50	11	29	530
CQ,CQR	19978	10.3	1.0	2.0	8.0	5.0	14	4.0	6.0	11	20	20	0.50	11	29	530
CH	18312	10.4	1.0	2.0	8.0	5.0	14	4.0	6.0	11	20	20	0.50	11	29	530
CHR	39022	10.4	1.0	2.0	8.0	5.0	14	4.0	6.0	11	20	20	0.50	11	29	530
CFR	55514	10.5	1.0	2.0	10	5.0	16	6.0	11	18	30	23	0.50	13	34	610
CRH	83421	10.6	1.0	4.0	8.0	5.0	14	4.0	6.0	13	20	20	0.50	11	29	530
CM	5	10.7	1.0	2.0	10	8.0	16	5.0	7.0	22	28	23	0.50	13	34	610
CMR	39001	10.7	1.0	2.0	10	8.0	16	5.0	7.0	22	28	23	0.50	13	34	610
CB	10950	10.8	1.0	2.0	10	5.0	16	5.0	7.0	22	28	23	0.50	13	34	610
CY	11272	10.9	1.0	2.0	10	6.0	16	5.0	7.0	22	28	23	0.50	13	34	610
CYR	23269	10.9	1.0	2.0	10	6.0	16	5.0	7.0	22	28	23	0.50	13	34	610
CK	11015	10.10	1.0	2.0	9.0	5.0	15	4.0	4.0	8.0	12	20	0.40	13	34	610
CKR	39014	10.10	1.0	2.0	9.0	5.0	15	4.0	4.0	8.0	12	20	0.40	13	34	610
CC, CCR	20	10.11	1.0	2.0	10	5.0	17	4.0	8.0	16	35	24	0.50	13	34	610
CDR	55681	10.11	1.0	2.0	10	5.0	17	4.0	8.0	16	35	24	0.50	13	34	610
CSR	39003	10.12	1.0	2.0	8.0	5.0	14	4.0	5.0	12	20	24	0.40	11	29	530
CL	3965	10.13	1.0	2.0	10	6.0	16	4.0	8.0	14	30	23	0.50	13	34	610
CLR	39006	10.13	1.0	2.0	10	6.0	16	4.0	8.0	14	30	23	0.50	13	34	610
CU, CUR	39018	10.14	1.0	2.0	12	6.0	17	10	12	23	35	27	0.50	14	38	690
CE	62	10.15	1.0	2.0	12	6.0	17	10	12	28	35	27	0.50	14	38	690
CV	81	10.16	1.0	3.0	13	8.0	24	6.0	10	37	70	36	0.40	20	52	950
PC	14409	10.17	1.0	3.0	12	7.0	18	3.0	4.0	20	30	32	0.50	18	46	830
CT	92	10.18	1.0	3.0	13	8.0	24	6.0	10	37	70	36	0.50	20	52	950
CG	23183	10.19	1.0	3.0	14	3.0	27	10	18	70	108	40	0.50	----	----	----

資料來源：本報告參考 MIL-HDBK-217F 整理

### 4.3.3 品質修正因子

電容器零件失效率模型中的品質修正因子(quality factor),  $\pi_Q$ , 主要反映各種電容器規範有關詳細的品質保證作業需求對於失效率的影響, 美軍規範中對於電容器的品質等級分為已建立可靠度(established reliability, ER)與無建立可靠度(non-established reliability, Non-ER)兩大類。

已建立可靠度等級表示電容器零件在進行生產製造時, 其品質保證作業中有安排壽命試驗或耐久性試驗程序, 可以根據抽樣試驗的統計分析結果訂定該電容器零件之可靠度水準。美軍將電容器依其型式不同, 將電容器零件的可靠度水準分為九個等

級，其所使用的符號分別為 D、C、T、S、B、R、P、M、及 L，其中較常用者為 S、R、P、M、及 L 等五個等級。

無建立可靠度等級主要是一些依照較為老舊的軍規要求所製造的電容器零件，在其生產製造過程中的品質保證作業並沒有安排壽命試驗或耐久性試驗程序，以抽樣檢驗的方式驗證其可靠度水準。此類零件之可靠度水準只能概略分為軍規等級(mil-spec)及較低等級(lower)兩個等級，假如所採購的電容器完全符合適用規範品保條款的規定，表示其可靠度水準為軍規等級；假如品保條款的規定中有任何一項需求被擱置，或者所採購的零件為商用等級，則此一電容器的可靠度水準屬於較低等級。美軍手冊 MIL-HDBK-217F 中所訂定各種電容器依照其可靠度水準所訂定之品質等級及相對應之品質修正因子如表 6 所示。

表 6：各種電容器之品質修正因子

樣式	軍用規範 MIL-C-	217F	D	C	T	S	B	R	P	M	L	MIL SPEC	Lower
CP	25	10.1	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	7.0
CA	12889	10.1	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	7.0
CZ,CZR	11693	10.2	----	----	----	----	----	----	----	1.00	----	3.0	10.0
CPV	14157	10.3	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	3.00	10.0	30.0
CQ,CQR	19978	10.3	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	3.00	10.0	30.0
CH	18312	10.4	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	3.00	7.00	20.0
CHR	39022	10.4	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	3.00	7.00	20.0
CFR	55514	10.5	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	----	----	10.0
CRH	83421	10.6	----	----	----	0.02	----	0.10	0.30	1.00	----	----	10.0
CM( 浸 製)	5	10.7	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	15.0
CM( 模 製)	5	10.7	----	----	----	----	----	----	----	----	----	6.0	15.0
CMR	39001	10.7	----	----	0.01	0.03	----	0.10	0.30	1.00	1.50	----	----
CB	10950	10.8	----	----	----	----	----	----	----	----	----	5.0	15.0
CY	11272	10.9	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	10.0
CYR	23269	10.9	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	3.00	----	----
CK	11015	10.10	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	10.0
CKR	39014	10.10	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	3.00	----	----
CC, CCR	20	10.11	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	----	3.00	10.0
CDR	55681	10.11	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	----	3.00	10.0
CSR	39003	10.12	0.001	0.01	----	0.03	0.03	0.10	0.30	1.00	1.50	----	10.0
CL	3965	10.13	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.00	10.0
CLR	39006	10.13	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	1.50	----	----
CU, CUR	39018	10.14	----	----	----	0.03	----	0.10	0.30	1.00	----	3.00	10.0
CE	62	10.15	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	10.0
CV	81	10.16	----	----	----	----	----	----	----	----	----	4.0	10.0
PC	14409	10.17	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	10.0
CT	92	10.18	----	----	----	----	----	----	----	----	----	5.0	20.0
CG	23183	10.19	----	----	----	----	----	----	----	----	----	3.0	20.0

資料來源：本報告參考 MIL-HDBK-217F 整理

#### 4.3.4 串聯電阻修正因子

固態鉮質電解電容器的零件失效率模型中有一項修正因子稱為串聯電阻修正因子 (series resistance factor),  $\pi_{SR}$ , 主要是考慮電路電阻對於失效率的效應。所謂電路電阻 (circuit resistance, CR)係指「電容器與電源供應器之間的有效電阻值」與「施加於電容器的電壓值」之比值,單位為歐姆/伏特。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 之說明,此項修正因子與電路電阻有關,其間的關係如表 7 所示。

#### 4.3.5 構造修正因子

非固態鉮質電解電容器的零件失效率模型中有一項修正因子稱為構造修正因子 (construction factor),  $\pi_C$ , 主要是考慮此類電容器的構造與密封方式對於零件失效率的效應。非固態鉮質電解電容器的構造依其製造方式分為塊狀(slug)與箔狀(foil)兩種方式;而其密封方式分為永久密封式(hermetic)與非永久密封式(non-hermetic)兩種,永久密封式的代號為 G,非永久密封式的代號為 E,例如零件編號為 CL10BC700TPG 即表示此一非固態鉮質電容器為永久密封式。若同時考量構造與密封方式,非固態鉮質電解電容器可分為全鉮質塊狀、永久密封式箔狀、永久密封式塊狀、非永久密封箔狀、及非永久密封式塊狀等五類型,這五種電容器的構造修正因子如表 8 所示。

表 7：串聯電阻修正因子

電路電阻, CR (歐姆/伏特)	$\pi_{SR}$
>0.8	0.066
>0.6 至 0.8	0.10
>0.4 至 0.6	0.13
>0.2 至 0.4	0.20
>0.1 至 0.2	0.27
0 至 0.1	0.33

資料來源：MIL-HDBK-217F

表 8：構造修正因子

構造方式	$\pi_C$
全鉮質塊狀	0.30
永久密封式箔片	1.0
永久密封式塊狀	2.0
非永久密封式箔片	2.5
非永久密封式塊狀	3.0

資料來源：MIL-HDBK-217F

#### 4.3.6 形態修正因子

陶瓷或玻璃包封、氣體或真空介電固定及可變電容器的零件失效率模型中有一項修正因子稱為形態修正因子(configuration factor),  $\pi_{CF}$ , 主要是在於區別其為固定電容器或是可變電容器。若為固定電容器,則  $\pi_{CF} = 0.1$ ; 若為可變電容器,則  $\pi_{CF} = 1.0$ 。

## 4.4 各種電容器之失效率模型

### 4.4.1 紙質旁通固定電容器

紙質旁通濾波器直流固定電容器(MIL-C-25, CP 型)與紙質旁通無線電減低交直流電容器(MIL-C-12889, CA 型)是一些較為老舊裝備所使用的固定電容器，只適用於此類老舊裝備備份件，對於新設計是無效的。目前 CP 型已為 CQ 型或 CQR 型(MIL-C-19978)所取代、CA 型已為 CHR 型(MIL-C-39022)所取代。

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.1 節之說明，特性 E 與 F(包括樣式 CP25-29, 40, 41, 67, 69, 70, 72, 75-78, 80-82)之 CP 型以及所有 CA 型紙質旁通固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，這些電容器的基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00086 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

特性 K(包括樣式 CP04, 05, 08-13)之 CP 型之紙質旁通固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，這些電容器的基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00086 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

### 4.4.2 紙質饋通固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.2 節之說明，特性 E 與 W 之 CZ 型及 CZR 型紙質、金屬化紙質、金屬化塑膠介質等無線電干擾饋通固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00115 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

特性 K 之 CZ 型及 CZR 型固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00115 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

特性 P 之 CZ 型及 CZR 型固定電容器的最大額定溫度為 150 ( $= 423^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00115 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{423} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.3 紙質與塑膠膜固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.3 節之說明，樣式 CPV07 之 CPV 型及特性 P、L 之 CQ 型與 CQR 型等紙質與塑膠膜固定電容器的最大額定溫度為 65 ( $= 338^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0005 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{338} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CPV09 之 CPV 型及特性 K、Q 與 S 之 CQ 型與 CQR 型等固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0005 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CPV17 之 CPV 型及特性 E、F、G 與 M 之 CQ 型與 CQR 型等固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0005 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

特性 T 之 CQ 型與 CQR 型等固定電容器的最大額定溫度為 170 ( $= 443^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0005 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{443} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.4 金屬化紙質、紙-塑膠及塑膠介質固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.4 節之說明，特性 R 之 CH 型及特性 9、12(50 V 額定電壓)與特性 49 之 CHR 型等固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00069 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

特性 N 之 CH 型及特性 9、12(額定電壓大於 60 V)與特性 1, 10, 19, 29, 59 之 CHR 型等固定電容器的最大額定溫度為 125 (= 398 °K)，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00069 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.5 塑膠及金屬化塑膠介質固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.5 節之說明，特性 M 與 N 之 CFR 型固定電容器的最大額定溫度為 85 (= 358 °K)，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00099 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

特性 Q、R 與 S 之 CFR 型固定電容器的最大額定溫度為 125 (= 398 °K)，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00099 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；



$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.6 超級金屬化塑膠介質固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.6 節之說明，CRH 型固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00055 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^5 + 1 \right] \exp \left[ 2.5 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^{18} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.7 雲母固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.7 節之說明，溫度範圍 M 之 CM 型雲母固定電容器的最大額定溫度為 70 ( $= 343^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 8.6 \times 10^{-10} \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 16 \left( \frac{T_A + 273}{343} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

溫度範圍 N 之 CM 型雲母固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 8.6 \times 10^{-10} \exp \left[ 16 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right) \right] \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

溫度範圍 O 之 CM 型及 CMR 型等雲母電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 8.6 \times 10^{-10} \exp \left[ 16 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right) \right] \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

溫度範圍 P 之 CM 型及 CMR 型等雲母電容器的最大額定溫度為 150 ( $= 423^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 8.6 \times 10^{-10} \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 16 \left( \frac{T_A + 273}{423} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.8 按鈕式雲母固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.8 節之說明，樣式 CB50 之 CB 型按鈕式雲母固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0053 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 1.2 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^{6.3} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

除了樣式 CB50 以外之所有 CB 型按鈕式雲母固定電容器的最大額定溫度為 150 ( $= 423^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0053 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 1.2 \left( \frac{T_A + 273}{423} \right)^{6.3} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.9 玻璃固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.9 節之說明，溫度範圍 C 之 CY 型及 CYR 型玻璃電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^\circ\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 8.25 \times 10^{-10} \exp \left[ 16 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right) \right] \exp \left[ \left( \frac{S}{0.5} \right)^4 + 1 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

溫度範圍 D 之 CY 型玻璃電容器的最大額定溫度為 200 ( $= 473^\circ\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 8.25 \times 10^{-10} \exp \left[ \left( \frac{S}{0.5} \right)^4 + 1 \right] \exp \left[ 16 \left( \frac{T_A + 273}{473} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.10 一般用陶瓷固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.10 節之說明，額定溫度 A 之 CK 型及樣式 CKR13, 48, 64, 72 之 CKR 型等一般用陶瓷固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^\circ\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0003 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.3} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ \left( \frac{T_A + 273}{358} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

額定溫度 B 之 CK 型及樣式 CKR05-12, 14-19, 73, 74 之 CKR 型等一般用陶瓷固定電容器的最大額定溫度為 125 (= 398 °K)，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0003 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.3} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ \left( \frac{T_A + 273}{398} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

額定溫度 C 之 CK 型一般用陶瓷固定電容器的最大額定溫度為 150 (= 423 °K)，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0003 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.3} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ \left( \frac{T_A + 273}{423} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.11 溫度補償與晶片陶瓷固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.11 節之說明，樣式 CC20, 25, 32, 35, 45, 85, 95, 97 之 CC 型溫度補償陶瓷固定電容器的最大額定溫度為 85 (= 358 °K)，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 2.6 \times 10^{-9} \exp \left[ \left( \frac{S}{0.3} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 14.3 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CC05-09, 13-19, 21-22, 26-27, 31, 33, 36-37, 47, 50-57, 75-79, 81-83 之 CC 型、樣式 CCR05-09, 13-19, 54-57, 75-79, 81-83, 90 之 CCR 型等溫度補償陶瓷固定電容器及所有的 CDR 型晶片陶瓷固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 2.6 \times 10^{-9} \exp \left[ \left( \frac{S}{0.3} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 14.3 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right) \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.12 固態鉮質電解固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.12 節之說明，CSR 型固態鉮質電解固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00375 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 2.6 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^9 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.13 非固態鉮質電解固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.13 節之說明，樣式 CL24-27, 34-37 之 CL 型非固態鉮質電解固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00165 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 2.6 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^9 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CL20-23, 30-33, 40-43, 46-56, 64-67, 70-73 之 CL 型及所有 CLR 型等非固態鉭質電解固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00165 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 2.6 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^9 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CL10, 13, 14, 16-18 之 CL 型非固態鉭質電解固定電容器的最大額定溫度為 175 ( $= 448^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00165 \exp \left[ 2.6 \left( \frac{T_A + 273}{448} \right)^9 \right] \exp \left[ \left( \frac{S}{0.4} \right)^3 + 1 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.14 鋁質電解固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.14 節之說明，樣式 CU71 之 CU 型及樣式 CUR71 之 CUR 型等鋁質電解固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00254 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.5} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 5.09 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^5 \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CU16、CU17 之 CU 型及樣式 CUR16、CUR17 之 CUR 型等鋁質電解固定電容器的最大額定溫度為 105 ( $= 378^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00254 \exp\left[\left(\frac{S}{0.5}\right)^3 + 1\right] \exp\left[5.09\left(\frac{T_A + 273}{358}\right)^5\right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中： $T_A$  = 週圍操作溫度， $^{\circ}\text{C}$ ；

$S$  = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和。

除了樣式 CU16、CU17、CU71 以外之所有 CU 型及樣式 CUR16、CUR17、CUR71 以外之所有 CUR 型等鋁質電解固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00254 \exp\left[\left(\frac{S}{0.5}\right)^3 + 1\right] \exp\left[5.09\left(\frac{T_A + 273}{398}\right)^5\right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中： $S$  = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.4.15 乾式鋁質電解固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.15 節之說明，CE 型乾式鋁質電解固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0028 \exp\left[\left(\frac{S}{0.55}\right)^3 + 1\right] \exp\left[4.09\left(\frac{T_A + 273}{358}\right)^{5.9}\right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中： $S$  = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度， $^{\circ}\text{C}$ 。

#### 4.4.16 陶瓷可變電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.16 節之說明，樣式 CV11、CV14、CV21、CV31、CV32、CV34、CV40、CV41 等 CV 型陶瓷可變電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00224 \exp\left[\left(\frac{S}{0.17}\right)^3 + 1\right] \exp\left[1.59\left(\frac{T_A + 273}{358}\right)^{10.1}\right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CV35 與 CV36 等 CV 型陶瓷可變電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00224 \exp\left[\left(\frac{S}{0.17}\right)^3 + 1\right] \exp\left[1.59\left(\frac{T_A + 273}{398}\right)^{10.1}\right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.17 活塞可變電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.17 節之說明，樣式 G、H、J、L、T 等 PC 型活塞可變電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 7.3 \times 10^{-7} \exp\left[\left(\frac{S}{0.33}\right)^3 + 1\right] \exp\left[12.1\left(\frac{T_A + 273}{398}\right)\right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

特性為 Q 之 PC 型活塞可變電容器的最大額定溫度為 150 ( $= 423^{\circ}\text{K}$ )，其基本失效率模型為：



$$\lambda_b = 7.3 \times 10^{-7} \exp \left[ \left( \frac{S}{0.33} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 12.1 \left( \frac{T_A + 273}{423} \right) \right], \text{ fr/10}^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.18 空氣調節可變電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.18 節之說明，CT 型空氣調節可變電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^\circ\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 1.92 \times 10^{-6} \exp \left[ \left( \frac{S}{0.33} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 10.8 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right) \right], \text{ fr/10}^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

#### 4.4.19 氣體或真空介電可變與固定電容器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.19 節之說明，樣式 CG20, 21, 30, 31, 32, 40-44, 51, 60-64, 67 等 CG 型氣體或真空介電可變與固定電容器的最大額定溫度為 85 ( $= 358^\circ\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0112 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.17} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 159 \left( \frac{T_A + 273}{358} \right)^{10.1} \right], \text{ fr/10}^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CG65 與 CG66 等 CG 型氣體或真空介電可變與固定電容器的最大額定溫度為 100 ( $= 373^\circ\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0112 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.17} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 159 \left( \frac{T_A + 273}{373} \right)^{10.1} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

樣式 CG50 氣體或真空介電可變與固定電容器的最大額定溫度為 125 ( $= 398 \text{ } ^\circ\text{K}$ )，其基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0112 \exp \left[ \left( \frac{S}{0.17} \right)^3 + 1 \right] \exp \left[ 159 \left( \frac{T_A + 273}{398} \right)^{10.1} \right], \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中：S = 操作電壓與額定電壓之比值，操作電壓為施加之直流電壓值與交流電壓峰值之和；

$T_A$  = 週圍操作溫度，。

## 參考資料

1. MIL-HDBK-338-2, Reliability Design Handbook, vol. 2
2. MIL-HDBK-217F, notice 1, Reliability Prediction of Electronic Equipment, 10 July, 1992.