

可靠度技術手冊

電子零件失效率預估技術



彭鴻霖 編著

中華民國八十九年十二月十八日

電子零件失效率預估技術

目 錄

1	前 言	1
2	微電路	1
2.1	微電路失效率模型	2
2.1.1	閘門 / 邏輯行列微電路及微處理器	2
2.1.2	記憶體微電路	2
2.1.3	VHSIC/類似 VHSIC 與 VLSI CMOS 微電路	3
2.1.4	GaAs MMIC 與數位元件微電路	3
2.1.5	混合微電路	4
2.2	微電路晶片基本失效率	4
3	分立式半導體	4
3.1	低頻二極體	6
3.2	高頻(微波、無線電波)二極體	6
3.3	低頻雙極性二極體	7
3.4	低頻 Si FET 電晶體	7
3.5	單一接面電晶體	8
3.6	低雜訊高頻雙極性電晶體	8
3.7	高頻高功率雙極性電晶體	8
3.8	高頻 GaAs FET 電晶體	9
3.9	高頻 Si FET 電晶體	9
3.10	熱敏電阻器與矽控整流器	10
3.11	檢知器隔離器及發射器光電裝置	10
3.12	文數顯示器光電裝置	10
3.13	雷射二極體光電裝置	11
4	電子管	11
4.1	除 TWT 及磁控管外之電子管	11
4.2	行波管(TWT)	12
4.2.1	磁控管	12
5	雷射元件	12
5.1	氦氣與氫氣雷射	12
6	電阻器	13
6.1	電阻器可靠度模型	13
6.1.1	固定電阻器零件失效率模型	13
6.1.2	可變電阻器失效率模型	14
6.2	電阻器基本失效率	14
6.2.1	固定電阻器	15
6.2.2	可變電阻器失效率模型	17

7 電容器	17
7.1 電容器零件失效率模型	18
7.2 電容器基本失效率模型	19
8 線圈	19
8.1 線圈	19
9 同步器與分解器	20
10 繼電器	20
10.1 機械式繼電器	20
11 開關	21
11.1 捺跳式或按鍵式開關	21
12 連接器	21
12.1 一般連接器	21
13 印刷電路板	21
13.1 印刷電路板及分立佈線	21
14 儀表板	22
14.1 儀表板	22
15 石英晶體	22
15.1 石英晶體	22
16 燈泡	23
17 電子濾波器	23
18 保險絲	23
19 微波鐵質元件	24
參考文獻	25

電子零件失效率預估技術

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，可靠度不僅是產品所應具有的重要特性之一，而且在研發初期與設計階段就必須能夠預估出來。可靠度預估(reliability prediction)是一種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，提供設計固有可靠度期望值的指引，定量評估與驗證其可靠度現況是否符合規定需求的技術。電子零件之種類非常多，大致上可分為微電路、半導體、電子管、雷射、電阻器、電容器、電感元件、旋轉元件、繼電器、開關、連接器、介面連接總成、接點、儀表、石英水晶、燈泡、電子濾波器、保險絲及雜項零件。由於電子零件標準化工作起源相當早，應用範圍多，資料較為齊全，近年來所有的裝備或多或少都會使用電子零件或裝置做為主要的元件，特別是在太空、國防、通信、與家電器材方面。電子零件之失效率模型的建立歷史也較久遠，美國國防部早在六十年代即推動政府與工業界資料交換計畫(government-industry data exchange program)，簡稱 GIDEP 計畫，建立了相當完善的裝備使用與維護資料庫，經過多年的努力與研究成果，對於零件失效率資訊的掌握，由先前的數據庫(data base)變成現代的模型庫(model base)，除更進一步電子裝備的使用品質與可靠度外，更輔助研發設計人員在設計初期即能掌握產品的特性，免除硬品製造後以測試驗證產品可靠度的必要性。這些研究成果反應在最新版的美軍可靠度預估手冊，MIL-HDBK-217F，這幾年 IC 產業朝向短小輕薄，功能更複雜、相對地產品也更強健，此一手冊也將進行 G 版之更新。由於資料齊全，配合資訊技術的發展，坊間有許多以零件失效率資料為基礎的可靠度預估軟體可資應用，不過在選用這些預估軟體之前，有必要瞭解各種零件失效率之架構與原理，否則無法掌握這些軟體的真正用途，反而得不到預期的效果。以下說明各種電子零件之失效率模型數學模型，以及相關修正因子。

2 微電路

美軍手冊 MIL-HDBK-217F 說明下列十種主要微電子元件分類之失效率預估模型：

- (1). 單晶雙極性數位及線性閘門 / 邏輯行列元件
- (2). 單晶 MOS 數位及線性閘門 / 邏輯行列元件
- (3). 單晶雙極性及 MOS 數位微處理器元件
- (4). 單晶雙極性及 MOS 記憶體元件
- (5). 極高速積體電路(VHSIC/類似 VHSIC、及 VLSI)CMOS 元件(閘門數 > 60K)
- (6). 單晶 GaAs 數位元件
- (7). 單晶 GaAs MMIC
- (8). 混合微電路

- (9). 表面聲波(SAW)元件
- (10). 磁性泡記憶體

2.1 微電路失效率模型

2.1.1 閘門/邏輯行列微電路及微處理器

美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 5.1 節說明閘門 / 邏輯行列微電路及微處理器之失效率模型，適用的微電路包括下列四種：

- (1). 雙極性元件，數位及線性之閘門/邏輯行列微電路；
- (2). MOS 元件，數位及線性之閘門/邏輯行列微電路；
- (3). 場可程式邏輯行列微電路及可程式行列邏輯微電路；
- (4). 微處理器。

其失效率公式為：

$$\lambda_p = (\lambda_{b,Chip} \pi_T + \lambda_{b,Pkg} \pi_E) \pi_Q \pi_L, fr/10^6 hr$$

其中： λ_p = 零件失效率， $fr/10^6 hr$ ；

$\lambda_{b,Chip}$ = 晶片基本失效率， $fr/10^6 hr$ ；

π_T = 溫度因子；

$\lambda_{b,Pkg}$ = 包裝基本失效率，

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子；

π_L = 學習因子。

2.1.2 記憶體微電路

MIL-HDBK-217F 第 5.2 節說明記憶體微電路之失效率模型為：

$$\lambda_p = (\lambda_{b,Chip} \pi_T + \lambda_{b,Pkg} \pi_E + \lambda_{cyc}) \pi_Q \pi_L, fr/10^6 hr$$

其中： λ_p = 零件失效率， $fr/10^6 hr$ ；

$\lambda_{b,Die}$ = 晶粒基本失效率，與微電路晶粒之複雜性有關， $fr/10^6 hr$ ；

π_T = 溫度因子；

$\lambda_{b,Pkg}$ = 封裝基本失效率，與微電路封裝之有功能作用接腳數有關， $fr/10^6hr$ ；

π_E = 環境因子；

λ_{cyc} = 讀寫次數失效率， $fr/10^6hr$ ；

π_Q = 品質因子；

π_L = 學習因子。

2.1.3 VHSIC/類似VHSIC 與VLSI CMOS 微電路

MIL-HDBK-217F 第 5.3 節說明 VHSIC/類似 VHSIC 與 VLSI CMOS 微電路之失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_{b,Die} \pi_{Mfg} \pi_T \pi_{CD} + \lambda_{b,Pkg} \pi_E \pi_Q \pi_{PT} + \lambda_{EOS} , fr/10^6hr$$

其中： λ_p = 零件失效率， $fr/10^6hr$ ；

$\lambda_{b,Die}$ = 晶粒基本失效率， $fr/10^6hr$ ；

π_{Mfg} = 製程因子；

π_T = 溫度因子；

π_{CD} = 晶粒複雜性因子，與晶粒之特徵尺寸及面積有關；

$\lambda_{b,Pkg}$ = 封裝基本失效率， $fr/10^6hr$ ；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子；

π_{PT} = 封裝類型因子；

λ_{EOS} = 電氣過應力失效率， $fr/10^6hr$ 。

2.1.4 GaAs MMIC 與數位元件微電路

MIL-HDBK-217F 第 5.4 節說明 GaAs MMIC 與數位元件微電路之失效率模型為：

$$\lambda_p = (\lambda_{b,Die} \pi_T \pi_A + \lambda_{b,Pkg} \pi_E) \pi_Q \pi_L , fr/10^6hr$$

其中： λ_p = 零件失效率， $fr/10^6hr$ ；

$\lambda_{b,Die}$ = 晶粒基本失效率， $fr/10^6hr$ ，與晶粒複雜性有關；

π_T = 溫度因子；

π_A = 裝置應用因子；

$\pi_{b, \text{pkg}}$ = 封裝基本失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子；

π_L = 學習因子。

2.1.5 混合微電路

MIL-HDBK-217F 第 5.5 節說明混合微電路之失效率模型為：

$$\lambda_p = (\sum N_C \lambda_C)(1 + 0.2\pi_E)\pi_F\pi_Q\pi_L, \text{fr}/10^6 \text{hr}$$

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

N_C = 混合微電路中所使用晶片電容器之數目；

λ_C = 混合微電路中所使用晶片電容器之失效率；

π_E = 環境因子；

π_F = 電路功能因子；

π_Q = 品質因子；

π_L = 學習因子。

2.2 微電路晶片基本失效率

晶片基本失效率和晶片的複雜性有關，又稱為晶片複雜性失效率(chip complexity failure rate)。一般而言，無論是雙極(bipolar)或是 MOS，數位閘門/邏輯行列微電路、可程式邏輯行列(programmable logic array, PLA)微電路及可程式行列邏輯(programmable array logic, PAL)微電路則是以閘門數(gates)表示其複雜性，雙極線性閘門/邏輯行列微電路是以電晶體數(transistors)表示其複雜性，微處理器則是以位元數(bits)表示其複雜性。

3 分立式半導體

分立式半導體包括電晶體(transistor)、二極體(diode)、光電裝置(opto-electric device)。此類電子元件的失效率與裝置的種類和構造有關，每種元件有其特定的失效率模型，除了特殊說明的情形之外，這些模型只適用於單一種半導體裝置，由多種半導體所組成的電子元件，其失效率模型則須參考有關混合微電路的模型。有關電晶體與光電裝置的主要參考美軍規範為 MIL-S-19500，MIL-S-19500 將軍規元件品質水級分為 JAN、JANTX、及 JANTXV 三級。在失效率模型中的溫度因子(π_T)，係根據裝置的電晶體接面溫度(junction temperature)加以計算，而接面溫度則是根據最惡劣狀況功率(或最

大散逸功率)及裝置接面對外殼之熱阻計算而得，有關接面溫度的決定須參考相關章節之說明。

美軍手冊將二極體(diode)分為低頻率(low frequency)二極體、高頻(high frequency)二極體兩類。電晶體分為低頻雙極性電晶體、低頻 Si FET 電晶體、單一接面電晶體、低雜訊高頻雙極性電晶體、高頻高功率雙極性電晶體、高頻 GaAs FET 電晶體、高頻 Si FET 電晶體、熱敏電阻器、矽控整流器(SCR)電晶體。光電子裝置包括：檢知器、隔離器及發射器；數字顯示器；雷射二極體。

分立式半導體之基本失效率公式為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_R \pi_{S2} \pi_C \pi_A \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6 \text{ hr}$$

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6 \text{ hr}$ ；

λ_b = 基本或平均失效率， $\text{fr}/10^6 \text{ hr}$ ；

π_R = 額定因子，考慮最大功率或電流額定值之效應；

π_{S2} = 電壓應力因子；

π_C = 複雜性因子；

π_A = 應用因子，考慮電路功能之應用效應；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子，考慮不同品質水準之效應。

分立式半導體之基本失效率公式為：

$$\lambda_b = A \exp \left[\left(\frac{N_T}{273 + T + (\Delta T)S} \right) + \left(\frac{273 + T + (\Delta T)S}{N_S} \right)^P \right]$$

其中：A = 失效率形因子；

e = 自然對數底，2.718；

N_T = 形狀參數；

T_M = 形狀參數；

P = 形狀參數；

T = 操作溫度，，為週圍溫度或外殼溫度，依使用情形而定；

T = 無接面電流或功率（全額）典型最大允許溫度與全額接面電流或功率典型最大允許溫度之差值；

S = 操作電應力與額定電應力之應力比。

上述參數均可由 MIL-HDBK-217F 所提供表格查得，以矽質(Si)NPN 電晶體為例， $A = 0.0189$ 、 $N_T = -1052$ 、 $T_M = 448$ 、 $P = 10.5$ 、 $T = 150$ ；而矽質PNP 電晶體則為， $A = 0.0648$ 、 $N_T = -1324$ 、 $T_M = 448$ 、 $P = 14.2$ 、 $T = 150$ 。

3.1 低頻二極體

低頻二極體包括：一般目的類比二極體、切換二極體、快速復原功率整流器、功率整流器/史脫紀功率二極體、具高壓堆疊功能之功率整流器、暫態壓制器/變阻器、電流調節器、電壓調節器/電壓參考器(Avanlance 與濟納 zener)。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.1 節之說明，低頻二極體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6\text{hr}$ ；

λ_b = 基本失效率， $\text{fr}/10^6\text{hr}$ ；

λ_S = 電氣應力因子；

π_C = 接觸構造因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.2 高頻(微波、無線電波)二極體

美軍手冊 MIL-HDBK-217F 中所列高頻(微波、無線電波)二極體包括：小於 35 GHz 之 Si IMPATT 二極體、具有 Gunn/Bulk 效應之 Tunnel 與 Back 二極體(包括混合器、檢知器)、Schottky 障礙器(barrier)(包括檢知器)與頻率介於 200 Mhz 和 35 GHz 之間的點接觸二極體、varactor 及步進復原器等。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.2 節之說明，高頻(微波、無線電波)二極體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6\text{hr}$ ；

λ_b = 基本失效率， $\text{fr}/10^6\text{hr}$ ；

π_R = 額定功率因子；

π_A = 應用因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.3 低頻雙極性二極體

低頻雙極性二極體主要是指頻率在 200 Mhz 以下之 NPN 和 PNP 二極體。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.3 節之說明，低頻雙極二極體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_S = 電壓應力因子；

π_R = 額定功率因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.4 低頻Si FET 電晶體

低頻 Si FET 電晶體主要是指頻率在 400 MHz 以下之 N-channel 及 P-channel Si FET 電晶體，所使用的電晶體技術分為 MOSFET 及 JFET 兩種。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.4 節之說明，低頻 Si FET 電晶體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_A = 應用因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.5 單一接面電晶體

此處所討論的包括所有的單一接面電晶體。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.5 節之說明，單一接面電晶體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.6 低雜訊高頻雙極性電晶體

低雜訊高頻雙極性電晶體係指頻率大於 200 MHz、功率小於 1 W 之微波/無線電波雙極性電晶體。所提供的模型適用於單一晶粒的電晶體，若是多數晶粒的電晶體，其失效率模型則須參考有關混合微電路的章節。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.6 節之說明，低雜訊高頻雙極性電晶體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_S = 電壓應力因子；

π_R = 電阻因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.7 高頻高功率雙極性電晶體

高頻高功率雙極性電晶體係指平均功率大於等於 1 W 之微波/無線電波雙極性功率電晶體。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.7 節之說明，高頻高功率雙極性電晶體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；
 λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；
 π_A = 應用因子；
 π_M = 網路配合因子；
 π_T = 溫度因子；
 π_E = 環境因子；
 π_Q = 品質因子。

3.8 高頻GaAs FET 電晶體

頻率大於等於 1 GHz 之 GaAs 低雜訊驅動器及功率 FET。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.8 節之說明，高頻 GaAs FET 電晶體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；
 λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；
 π_A = 應用因子；
 π_M = 網路配合因子；
 π_T = 溫度因子；
 π_E = 環境因子；
 π_Q = 品質因子。

3.9 高頻Si FET 電晶體

高頻 Si FET 電晶體係指頻率大於 400 MHz、平均功率小於 300 mW 之 Si FET 電晶體。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.9 節之說明，高頻 Si FET 電晶體之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；
 λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；
 π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.10 熱敏電阻器與矽控整流器

此類電晶體包括熱敏電阻器(thyristor)及矽控整流器(SCR)。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.10 節之說明，熱敏電阻器與矽控整流器之零件失效模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_S = 電壓應力因子；

π_R = 額定電流因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.11 檢知器隔離器及發射器光電裝置

此類電子元件包括檢知器、隔離器及發射器等光電裝置。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.11 節之說明，檢知器、隔離器與發射器等光電裝置之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.12 文數顯示器光電裝置

此類電子零件包括所有的文數顯示器。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.12 節之說明，文數顯示器等光電裝置之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

3.13 雷射二極體光電裝置

此類電子元件包括光通密度小於 3 MW/cm²、前向電流小於 25 amps 之雷射二極體。根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 6.13 節之說明，雷射二極體光電裝置之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_I = 前向電流修正因子；

π_A = 應用因子；

π_P = 功率退化因子；

π_T = 溫度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

4 電子管

4.1 除TWT 及磁控管外之電子管

MIL-HDBK-217F 第 7.1 節說明電子管（除 TWT 及磁控管外）之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

π_E = 環境因子；

π_L = 學習因子。

4.2 行波管(TWT)

MIL-HDBK-217F 第 7.2 節說明行波管(TWT)之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

λ_b = 基本或平均失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

π_E = 環境因子。

4.2.1 磁控管

MIL-HDBK-217F 第 7.3 節說明磁控管之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

λ_b = 基本或平均失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

π_U = 利用因子；

π_C = 構造因子；

π_E = 環境因子。

5 雷射元件

5.1 氦氣與氬氣雷射

MIL-HDBK-217F 第 8.1 節說明氦與氬氣雷射之失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_{\text{media}} \pi_E + \lambda_{\text{coupling}} \pi_E, \quad \text{fr}/10^6 \text{hr}$$

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

λ_{media} = 雷射媒體失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

$\lambda_{\text{coupling}} = \text{耦合失效率, fr}/10^6\text{hr}$;

$\pi_E = \text{環境因子}$ 。

6 電阻器

電阻器在結構上包括安裝在基體上的電阻體、環境保護塗層及電路安裝用引線。一般電子裝備所使用之電阻器通常依其使用功能及製造方式而予以命名，依其功能電阻器可分為固定電阻器、可變電阻器、及特殊電阻器三大類；依據製造材料與方法的不同，可分為合成型(composition)、皮膜型(film)、及繞線型(wirewound)等三種。

固定電阻器包括組合型固定電阻器、皮膜型固定電阻器、及繞線型固定電阻器三種。其中繞線型固定電阻器又分為繞線型精密固定電阻器和繞線型功率固定電阻器兩類；皮膜型固定電阻器又再分為皮膜型精密固定電阻器、皮膜型半精密固定電阻器、及皮膜型特殊固定電阻器三種。

可變電阻器包括繞線型可變電阻器及非繞線型可變電阻器兩種。其中繞線型可變電阻器又分為一般用途、半精密、精密、及可調整(定時器)四型；非繞線型可變電阻器又分為一般用途、精密、及可調整(定時器)三型。

特殊電阻器包括變阻器(varistors)、熱敏電阻(thermistor)、網路電阻(network resistors)三種。其中網路電阻器又分為表面黏著及非繞線型兩種。

組合型電阻是由一些電阻材料，例如碳素和凝結物混合後，壓鑄成適當的形狀與電阻值。皮膜型電阻是將具有電阻性的皮膜，沉積或覆被在絕緣柱或纖維上。繞線型電阻則是將電阻絲纏繞於絕緣物上。

各種類型的電阻器，除了上述一些基本構造不同外，又因其尺寸大小、電阻值範圍、額定功率、製造成本及一般其它特性的不同而加以分等或分級。某種電阻器也許具有一些較優的特性，但是沒有一種電阻器可以在所有特性都優於其他電阻器。因此，電路設計者必須瞭解每一種電阻器的特性，並基於電路上的要求及環境因素等條件，在比較過各類型電阻器的特性後，擇優而應用之。

6.1 電阻器可靠度模型

6.1.1 固定電阻器零件失效率模型

組合型、皮膜型、皮膜型功率、繞線型精密、繞線型功率、基座安裝式繞線型功率等固定電阻器的零件失效率模型為：

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

皮膜型網路固定電阻器的零件失效率模型為：

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

熱敏電阻器的零件失效率模型為：

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

6.1.2 可變電阻器失效率模型

繞線型螺桿驅動、繞線型半精密等可變電阻器的零件失效率模型為：

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

繞線型精密、繞線型功率、非繞線型、組合型、非繞線皮膜型、非繞線皮膜型精密等可變電阻器的零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6\text{hr}$ ；

λ_b = 基本失效率， $\text{fr}/10^6\text{hr}$ ；

π_{TAPS} = 電位計 TAPS 數因子；

π_C = 結構因子；

π_R = 電阻因子；

π_V = 電壓因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子；

π_{NR} = 網路電阻器中的電阻器數目因子。

6.2 電阻器基本失效率

電阻器之基本失效率(λ_b)之公式如下所示：

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

其中：A = 將每一類型電阻器失效率模型調整至適宜的失效率水準之調整因子；

T_A = 週圍操作溫度，；

T_R = 溫度常數或額定溫度；

B = 形狀參數；

G、H、J=加速常數；

S_R = 應力常數或額定應力；

S = 電應力，為操作功率與額定功率之比值。

6.2.1 固定電阻器

6.2.1.1 組合型固定電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.1 節之說明，組合型固定電阻器(RCR、RC)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 4.5 \times 10^{-9} \exp \left[12 \left(\frac{T_A + 273}{343} \right) \right] \exp \left[\left(\frac{S}{0.6} \right) \left(\frac{T_A + 273}{273} \right) \right], \text{ fr}/10^6 \text{ hr}$$

6.2.1.2 皮膜型固定電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.2 節之說明，皮膜型固定電阻器(RLR、RL、RNR、RNC、RNN、RN)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 3.25 \times 10^{-4} \exp \left[\left(\frac{T_A + 273}{343} \right)^{3.0} \right] \exp \left[\left(\frac{S}{1.0} \right) \left(\frac{T_A + 273}{273} \right) \right], \text{ fr}/10^6 \text{ hr}$$

6.2.1.3 皮膜型功率固定電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.3 節之說明，皮膜型功率固定電阻器(RD)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 7.33 \times 10^{-3} \exp \left[0.202 \left(\frac{T_A + 273}{298} \right)^{2.6} \right] \exp \left\{ \left[\left(\frac{S}{1.45} \right) \left(\frac{T_A + 273}{273} \right)^{0.89} \right]^{1.3} \right\}, \text{ fr}/10^6 \text{ hr}$$

6.2.1.4 皮膜型網路固定電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.4 節之說明，皮膜型網路固定電阻器(RZ)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00006, \text{ fr}/10^6 \text{ hr}$$

6.2.1.5 繞線型準確固定電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.5 節之說明，繞線型準確固定電阻器(RBR、RB)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0031 \exp \left[\left(\frac{T_A + 273}{398} \right)^{10} \right] \exp \left\{ \left[\left(\frac{S}{1.0} \right) \left(\frac{T_A + 273}{273} \right) \right]^{1.5} \right\}, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

6.2.1.6 繞線型功率固定電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.6 節之說明，繞線型功率固定電阻器(RWR、RW)之基本失效率模型為：

$$0.00148 \exp \left[\left(\frac{T_A + 273}{298} \right)^{2.0} \right] \exp \left\{ \left(\frac{S}{0.5} \right) \left(\frac{T_A + 273}{273} \right) \right\}, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

6.2.1.7 基座安裝式繞線型功率固定電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.7 節之說明，基座安裝式繞線型功率固定電阻器(RER、RE)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.00015 \exp \left[2.64 \left(\frac{T_A + 273}{298} \right) \right] \exp \left\{ \left(\frac{S}{0.466} \right) \left(\frac{T_A + 273}{273} \right) \right\}, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

6.2.1.8 熱敏電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.8 節之說明，珠狀(bead)熱敏電阻器(RTH)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.021, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

碟狀(disk)熱敏電阻器(RTH)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.065, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

桿狀(rod)熱敏電阻器(RTH)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.005, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

6.2.2 可變電阻器失效率模型

6.2.2.1 繞線型可變電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.9 節之說明，繞線型可變電阻器(RTR、RT)之基本失效率模型為：

$$\lambda_b = 0.0062 \exp \left[\left(\frac{T + 273}{358} \right)^{5.0} \right] \exp \left\{ \left(\frac{S}{1.0} \right) \left(\frac{T + 273}{273} \right) \right\}, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

6.2.2.2 繞線型精密可變電阻器

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 9.10 節之說明，繞線型精密可變電阻器()之基本失效率模型為：

7 電容器

電容器分為固定電容器與可變電容器兩大類。常用的軍規固定電容器，包括：

- (1). 紙質旁通(CP, MIL-C-25; CA, MIL-C-12889)；
- (2). 紙質、金屬化紙質、金屬化塑膠質 RFI 饋通(CZ/CZR, MIL-C-11693)；
- (3). 紙質與塑膠質皮膜(CPV, MIL-C-14157; CQR/CQ, MIL-C-19978)；
- (4). 金屬化紙質、紙-塑膠質、塑膠質(CH, MIL-C-18312; CHR, MIL-C-39022)；
- (5). 塑膠質、金屬化塑膠質(CFR, MIL-C-55514)；
- (6). 超金屬化塑膠質(CRH, MIL-C-83241)；
- (7). 滴製或模鑄雲母質(CM, MIL-C-5)；
- (8). 滴製雲母質(CMR, MIL-C-39001)；
- (9). 按鈕式雲母質(CB, MIL-C-10950)；
- (10). 玻璃質(CY, MIL-C-11272; CYR, MIL-C-23269)；
- (11). 一般用陶磁質(CK, MIL-C-11015; CKR, MIL-C-39014)；
- (12). 溫度補償陶磁質；
- (13). 晶片陶磁質；

- (14). 固態鉮質電解；
- (15). 非固態鉮質電解(CL/CLR, MIL-C-3965)；
- (16). 氧化鋁電解(CUR/CU, MIL-C-39018)；
- (17). 偏極化鋁質乾式電解(CE, MIL-C-62)。

7.1 電容器零件失效率模型

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.1 節至第 10.15 節之說明，除固態鉮質電解(第 10.12 節)及非固態鉮質電解(第 10.13 節)等兩種固定電容器之外、大部份固定電容器之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_{CV} = 電容值因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.12 節固態鉮質電解固定電容器之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_{CV} = 電容值因子；

π_{SR} = 串聯電阻因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

根據美軍手冊 MIL-HDBK-217F 第 10.13 節非固態鉮質電解固定電容器之零件失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

π_{CV} = 電容值因子；

π_C = 構造因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

7.2 電容器基本失效率模型

$$\lambda_b = A \left[\left(\frac{S}{S_R} \right)^H + 1 \right] \exp \left\{ B \left(\frac{T + 273}{T_R} \right)^G \right\}, \text{ fr}/10^6\text{hr}$$

其中： λ_b = 基本失效率，fr/10⁶hr；

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；

S = 操作電壓與額定電壓之比值；

S_R = 額定應力常數；

H,G = 加速參數；

B = 形狀參數；

T = 操作溫度，°C；

T_R = 額定溫度，°C。

8 線圈

8.1 線圈

MIL-HDBK-217F 第 11.1 節說明線圈之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶hr；

π_C = 構造因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

9 同步器與分解器

MIL-HDBK-217F 第 12.2 節說明同步器與分解器之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶hr；

π_S = 尺寸因子；

π_N = 碳刷數因子；

π_E = 環境因子。

10 繼電器

10.1 機械式繼電器

MIL-HDBK-217F 第 13.1 節說明機械式繼電器之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶hr；

π_L = 負荷應力因子；

π_C = 接觸方式因子；

π_{cyc} = 循環因子；

π_F = 應用與構造因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

11 開關

11.1 捺跳式或按鍵式開關

MIL-HDBK-217F 第 14.1 節說明捺跳或按鍵開關之失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_{cyc} \pi_L \pi_C \pi_E, \quad \text{fr}/10^6 \text{hr}$$

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

λ_b = 基本或平均失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

π_{cyc} = 循環因子；

π_L = 負荷應力因子；

π_C = 接觸方式與品質因子；

π_E = 環境因子。

12 連接器

12.1 一般連接器

MIL-HDBK-217F 第 15.1 節說明一般連接器之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

λ_b = 基本或平均失效率， $\text{fr}/10^6 \text{hr}$ ；

π_K = 接合次數因子；

π_P = 主動接觸端子數因子；

π_E = 環境因子。

13 印刷電路板

13.1 印刷電路板及分立佈線

MIL-HDBK-217F 第 16.1 節說明印刷電路板及分立佈線之失效率模型為：

$$\lambda_p = \lambda_b [N_1 \pi_C + N_2 (\pi_C + 13)] \pi_E \pi_Q, \text{ fr}/10^6 \text{ hr}$$

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶hr；

N_1 = 電波焊接功能電鍍穿孔數目；

N_2 = 手焊電鍍穿孔數目；

π_C = 複雜度因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

14 儀表板

14.1 儀表板

MIL-HDBK-217F 第 18.1 節說明儀表板之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶hr；

π_A = 應用因子；

π_F = 功能因子；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

15 石英晶體

15.1 石英晶體

MIL-HDBK-217F 第 19.1 節說明石英晶體之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶ hr；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

16 燈泡

MIL-HDBK-217F 第 20.1 節說明燈泡之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶ hr；

π_U = 利用因子；

π_A = 應用因子；

π_E = 環境因子。

17 電子濾波器

MIL-HDBK-217F 第 21.1 節說明電子濾波器之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶ hr；

π_E = 環境因子；

π_Q = 品質因子。

18 保險絲

MIL-HDBK-217F 第 22.1 節說明保險絲之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶ hr；

π_E = 環境因子。

19 微波鐵質元件

MIL-HDBK-217F 第 23.1 節說明微波鐵質元件之失效率模型為：

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

其中： λ_p = 零件失效率，fr/10⁶hr；

λ_b = 基本或平均失效率，fr/10⁶hr；

π_E = 環境因子。

參考文獻

1. MIL-HDBK-217, Reliability Prediction of Electronic Equipment