

# 第六章 电子系统的可靠性设计

## 内 容 提 要



### § 6-1 元器件的选用与控制

- 一、元器件的失效率函数曲线和产品失效规律
- 二、电子元件的**减额**使用（降额使用）

### § 6-2 电路与系统的可靠性设计

- 一、电路与系统可靠性设计的基本原则
- 二、电路边缘性能设计
  - 1. 最坏情况分析
  - 2. 电路漂移分析
  - 3. 元器件误差统计分析

从上述可知,系统的可靠性和其组成单元的可靠性有相当密切的关系。对于**单元的可靠性**,有的可以使用有关预计手册查出“组阁”元器件的失效率来进行可靠性保证。

但是工程中有的产品的“组阁成员”的**可靠性指标一概不知**（情况不明），如何办？则应在这些“组阁成员”**设计中保证**。

当前最多的产品是机电一体化的产品，其中最重要的“组阁成员”是**电子系统和机械结构**。

下面我们将讲它们的可靠性设计：

**第六章讲电子系统的可靠性设计，  
第七章讲机械结构的可靠性设计。**

## 第六章 电子系统的可靠性设计

电子系统的可靠性设计**主要包括**：

**元器件的选用与控制；电路系统的可靠性设计**；电子设备的热设计、抗辐射设计、抗静电放电设计、电磁兼容性设计、潜电路分析、三次设计等内容。书中介绍了前三部分和最后一部分内容。这四方面内容，我们**重点讲前两部分**。

### § 6-1 元器件的选用与控制

**元器件失效**对于不同的产品在不同的生产阶段出现失效，代来的损失是极不同的。

例如，一个由10万件元器件组成的串联系  
统， $R_{s求} = 0.9$ ，则所用每个元器件 $R_{i求} = 0.96$   
的。若不合格的元器件装入系统，不但可靠性  
不能满足要求，而且要付出**极大的代价来维  
修**，如表6-1所示。

表 6-1 元器件失效造成的损失 美元

设备类型	失 效 阶 段			
	元器件购进时	装在印刷电路上	系统试验时	现场使用时
消费者产品	2	5	5	50
工业用设备	4	25	45	215
军用设备	7	50	120	1 000
航天设备	15	75	300	$2 \times 10^6$

因此，首先应了解其**失效规律**。

## 一、元器件的失效率函数曲线和产品失效规律。

人们在很多产品的使用和试验中得到大量数据，发现失效率函数常呈现以下曲线形式，见图6-1。

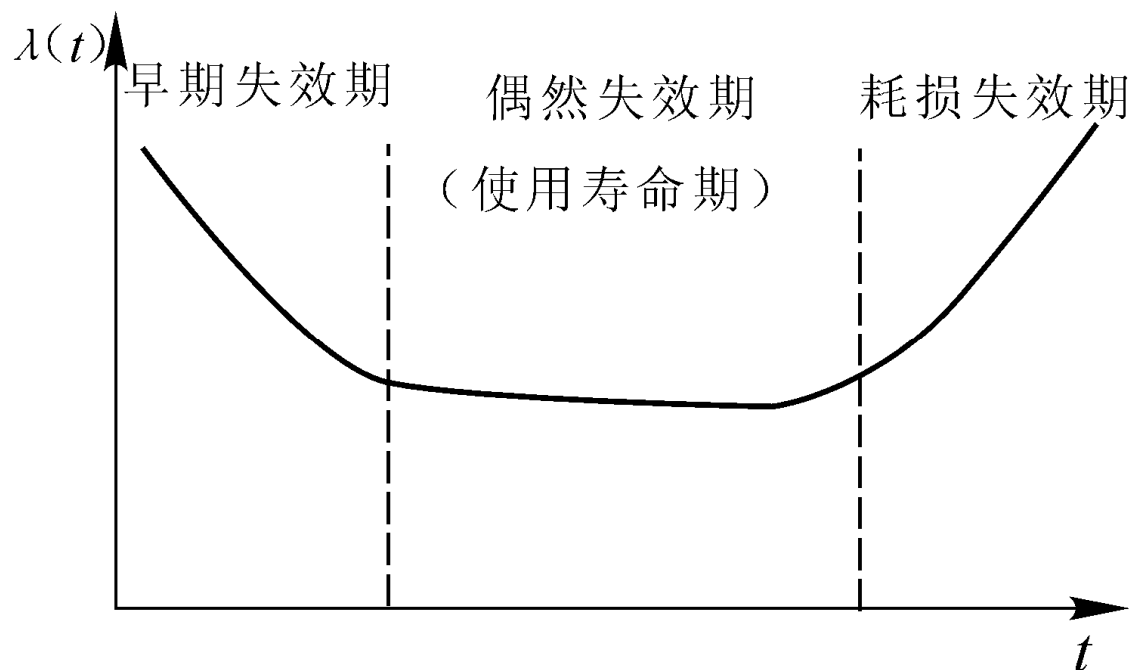
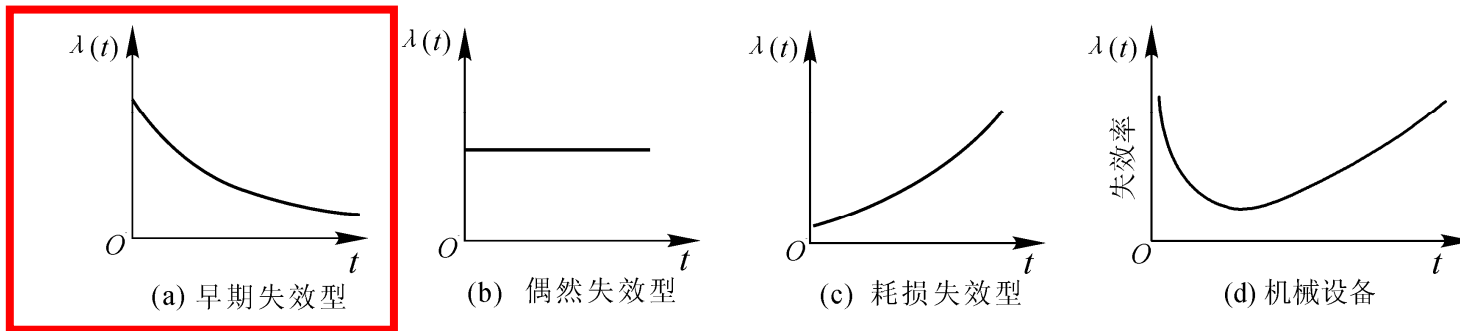


图6-1 典型失效曲线

人们形象地将其称做**浴盆曲线**，根据  $\lambda(t)$  的变化情况明显分为**三阶段**：

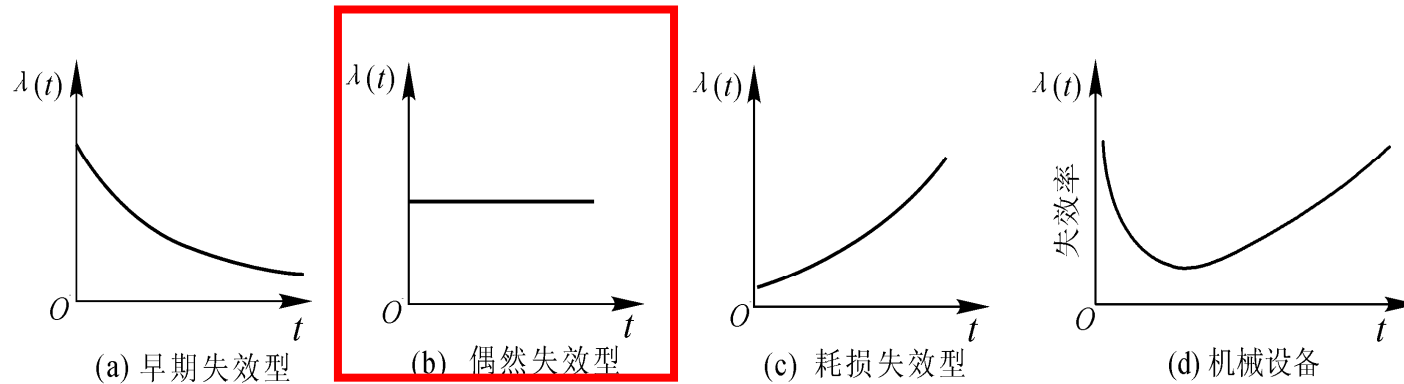
1. **早期失效期** —— 失效率很高，随时向迅速降低见下图 (a)。



### 失效原因：

设计、制造、原材料缺陷。在厂内进行筛选老练试验并**剔除早期失效产品**，使产品进入偶然失效期后再交付使用。

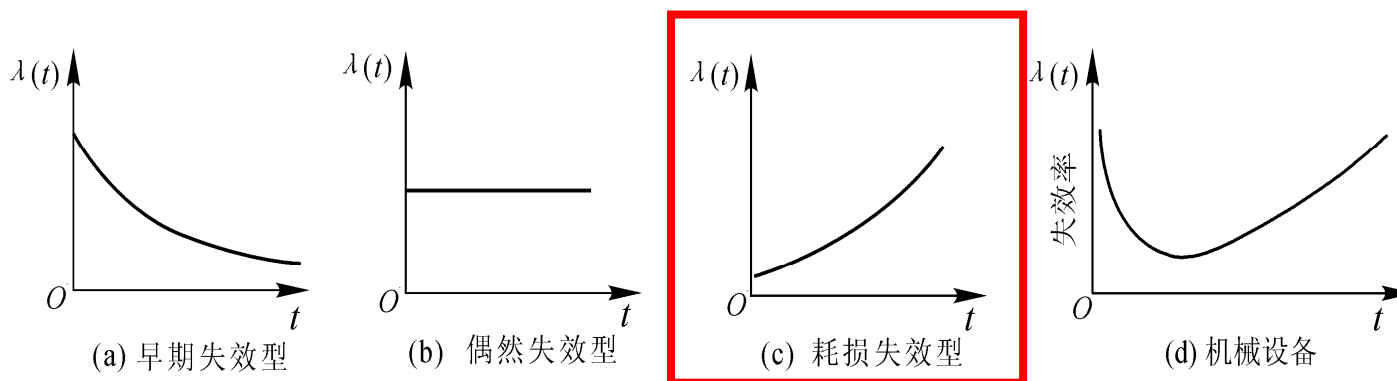
## 2. 偶然失效期 —— 失效率很低而变化稳定（常数）见下图（b）。



### 失效原因:

多种偶然因素。批量产品的工作寿命越长，偶然失效期越长，如半导体器优质产品偶然失效期可达 $10^6$ 小时以上，这是最良好的工作时期。

3. **耗损失效期**——失效率随时间迅速加大。  
见下图 (c)。

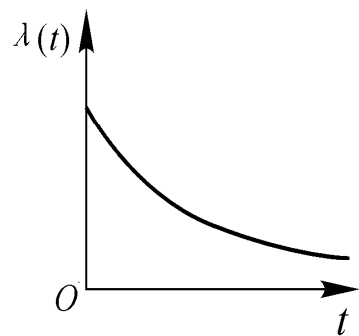


**失效原因:**

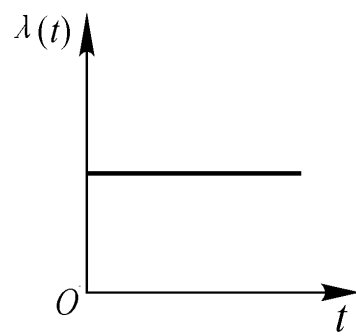
耗损，产品在此阶段应更换。



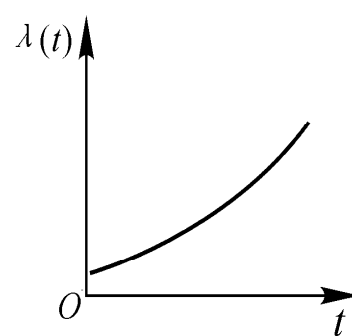
很多产品失效规律均有类似浴盆曲线(图6-1), 但不尽相同, 例如机械设备的失效规律, 见下图 (d)。其三个失效阶段不明显。



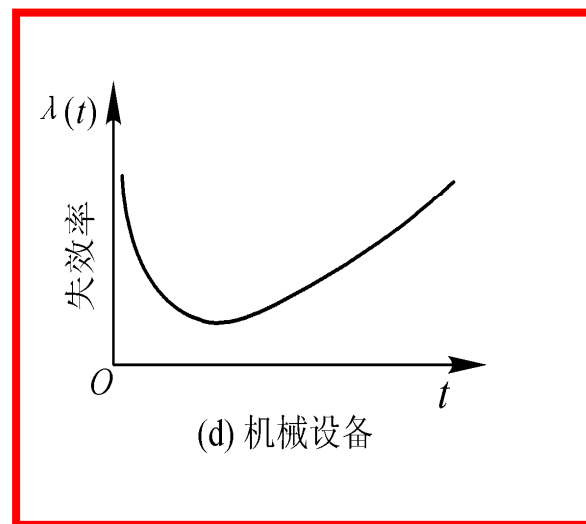
(a) 早期失效型



(b) 偶然失效型



(c) 耗损失效型



(d) 机械设备

## 二、电子元件的**减额**使用（降额使用）

**降额**就是使元器件在**低于其额定值**的应力条件下工作。

人所皆知，任何电子元器件在任何情况下（包括稳态和瞬态）原则上都不应超定额使用。因此进行线路的应力分析对元器件**降额使用是提高电子线路可靠性的一个重要手段**。

为了保证电子元件正确的降额使用，应做好以下两方面工作：

1. 进行电子元器件的应用评审

对于所有新设计的或有更改的部件都应进行电子元件的**应用评审**。

评审应包括一个详细而**完整的电子元件表**，该表应有以下内容：

- (1) 元件类型；
- (2) 线路符号；
- (3) 额定值；
- (4) 制造厂家；
- (5) 最大电应力和热应力水平。

应尽量应用计算机管理系统，建立数据库，定出**减额水平**，使所有元件的**定额标准化**。

## 2. 使用电子元件的减额准则

### (1) 减额准则

对各电子元件减额水平的选用，应依据有关技术标准文献。当前我国不少有关部门采用美军标准MIL—HDBK—338—2。

对电容器、电阻器和热敏电阻、二极管、三极管、变压器和电感线圈、接插件、继电器、保险丝、微电路等电子元件进行减额使用。

如RCA广播卫星的电容器和微电路的降额使用航天标准QJ1417-88，见表6-2(摘录)。

## (2) 降额技术

### 在电子系统设计中如何降额？

#### ① 降额图法

$T_s$ :

应力降额点

$T_{max}$ :

应力最大值

$ABC$ 折线为降额开始的基准线。

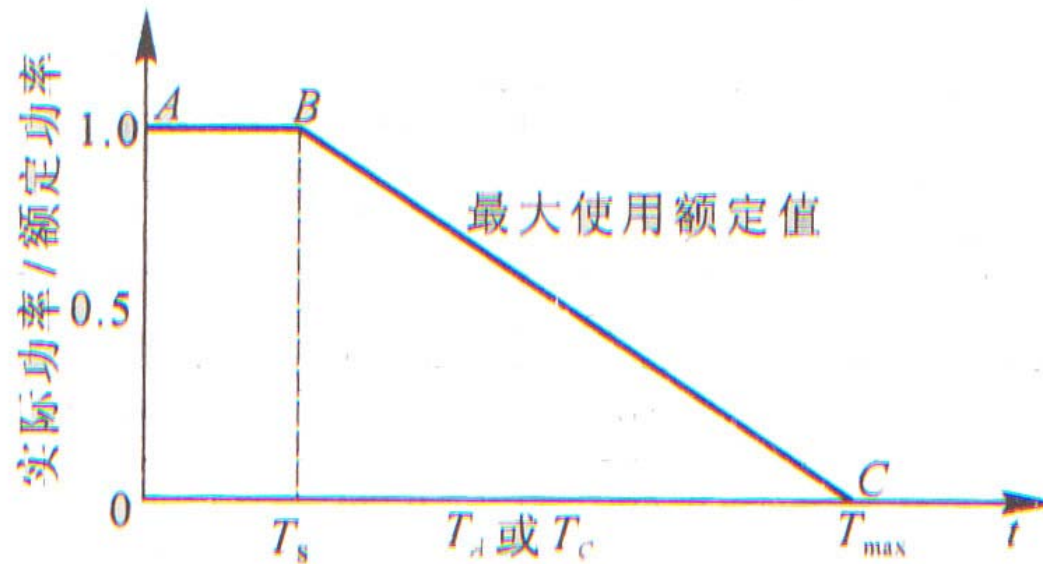


图 6—3 半导体器件典型降额曲线

## ② 降额因子法(见表6-2)

表 6-2 元器件降额因子

元器件种类		降额参数	降额等级		
			I 级	II 级	III 级
集 成 电 路	线性电路 双极性或 MOS (中小规模)	电源电压(最大绝对值)	0.70	0.80	0.80
		输入电压(最大绝对值)	0.60	0.70	0.70
		输出电流(最大功能值)	0.70	0.80	0.80
		最高结温/°C	80	95	105
	双极性数字电路 (中小规模)	电源电压容限(标称值)	±3%	±5%	见技术条件
		频率(最大值)	0.80	0.90	0.95
		输出电流(最大值)	0.80	0.90	0.90
		最高结温/°C	85	100	115
	MOS、CMOS 数字电路 (中小规模)	电源电压(最大绝对值)	0.70	0.80	0.80
		频率(电源电压最大值)	0.80	0.80	0.90
		输出电流 缓存器触发器	0.80	0.90	0.90
		最高结温/°C	85	100	110
	电压调整器	电源电压(最大绝对值)	0.70	0.80	0.80
		输入电压(最大绝对值)	0.70	0.802	0.80
		输入输出电压差	0.70	0.80	0.80
		输出电流(最大绝对值)	0.70	0.75	0.80
最高结温/°C		80	95	105	

表中可见降额等级3级(I、II、III, )I降的最多, III最少。

### 如何选择?

并非降额越多越好,  $\because$ 降额过多增加设备体积重量及成本。有的也不是在任何情况下都能用, 故知降额有限度和局限性。

- (1) 当 $R$ 已达到要求时, 再用降额来 $\uparrow R$ 多余了。
- (2) 降额是有限的。
- (3) 有些元器件过度降额反而有害。
- (4) ……

## § 6-2 电路与系统的可靠性设计

### 一、电路与系统可靠性设计的基本原则

#### 1. 尽可能采用优选电路的原则

尽量**多采用标准化的或经过考验 $R$ 高**的电路。少用新研制、未经定型和考验电路。

#### 2. 尽可能简化的原则

(1) 在保证原设计功能指标的情况下，尽可能简化电路设计。

即用有**最简单的电路和最少量的元器件**来达到技术指标的要求；



(2) 在设计中应注意**加入提高电路稳定性、可靠性、可测试性和可维修性的措施，不应为简化而省略**；

(3) 不能为了一点点性能的改善而增加大量元器件，方案论证应以**可靠性为主要指标**，而不能把性能指标定的过高；

(4) 减少元器件数量的同时，还应**压缩其品种和规格**，以便于控制质量、减少备件数量和便于维修。

**品种数和元器件总数之比应尽量低**，如美国SPY-1雷达该比值仅为0.25%；

(5) 在逻辑电路设计时，应**尽可能用高可靠及集成度高的电路**，而不用分立元件或小规模集成电路，因为这样可以减少器件的数目（块数）；

(6) 在可能情况下，尽量**用数字电路代替模拟集成电路**，否则应定量地进行可靠性预测，以详细地比较选择最优方案。

这是由于模拟电路较之数字电路**有失效率高和特性易随时间漂移等特点**；

(7) 宁可降低电路性能也要选用那些元器件失效引起电路灾害性的后果较少的电路。

下面以例6-1来说明电路简化的原则。

例 6 - 1如有数字逻辑电路见图6-5所示，将其简化成功能相同的数字逻辑电路。

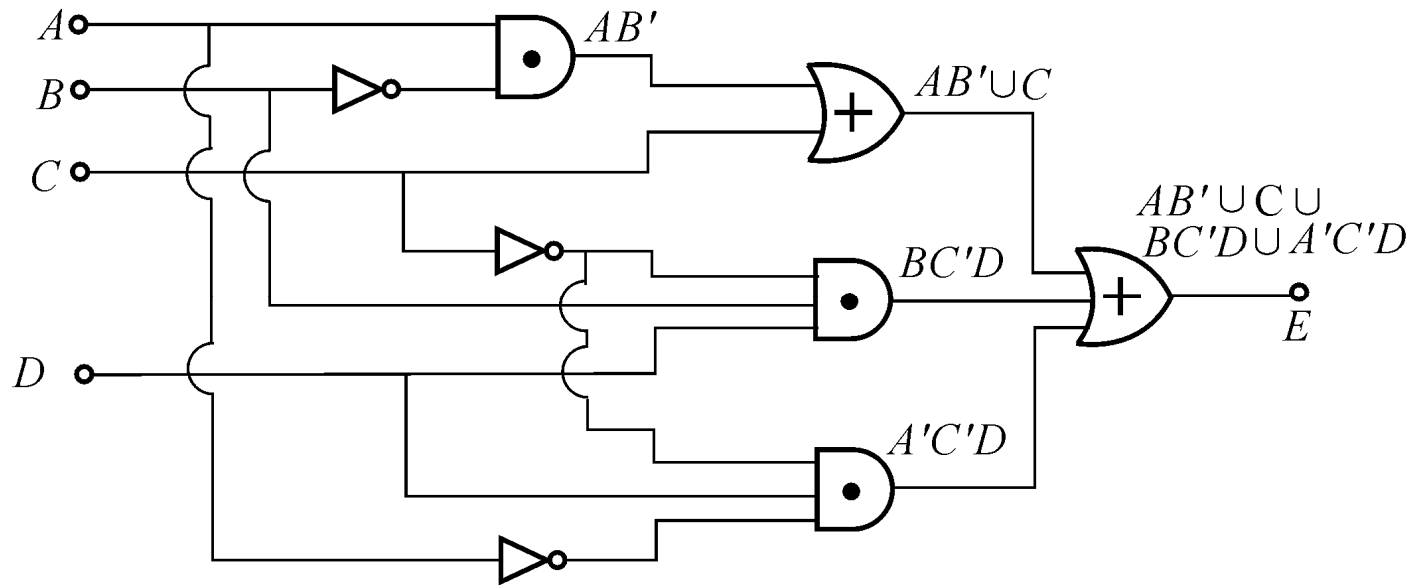


图6-5 数字逻辑线路

解： (1)使用布尔代数简化图6-5:

$$E = AB' \cup C \cup BC'D \cup A'C'D = AB' \cup C \cup D$$

因此可简化成图6-6。

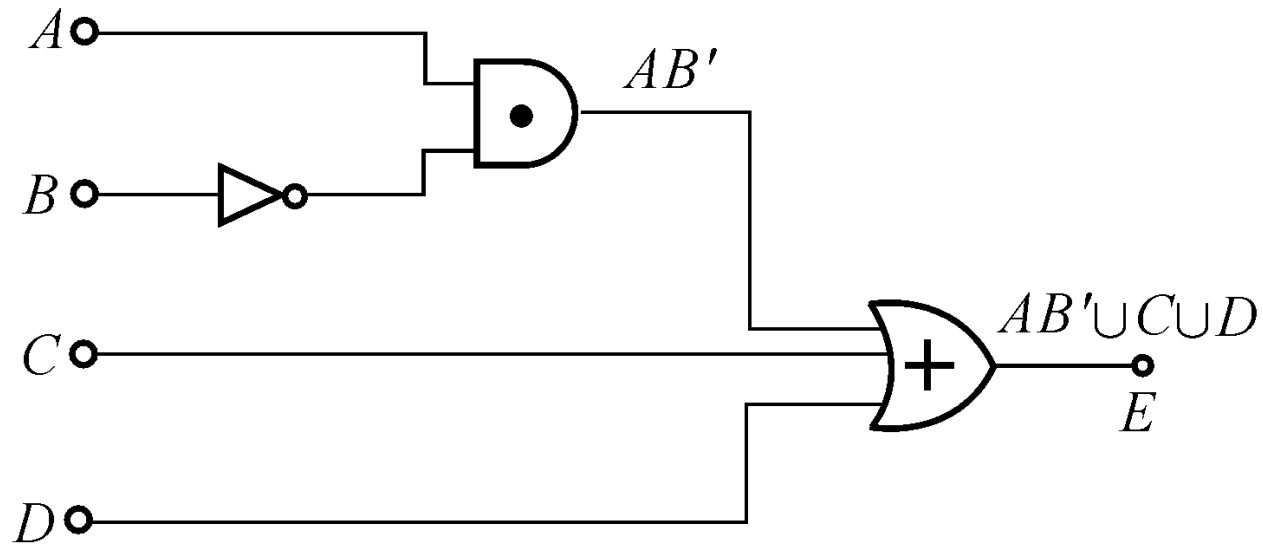


图 6-6 简化数字逻辑线路

则大大提高了其可靠度。

(2) 证明:

$$AB' \cup C \cup BC'D \cup A'C'D = AB' \cup C \cup D$$

$$\begin{aligned}
 & AB' \cup C \cup BC'D \cup A'C'D \\
 &= AB' \oplus C \oplus BC'D \oplus A'C'D \\
 &= AB' + (AB')'C + (A' + AB)BC'D + A'(B'C)C'D \\
 &= AB' + (AB')'C + (A'B + AB + A'B')C'D \\
 &= AB' + (AB')'C + (B + A'B')C'D \\
 &= AB' + (AB')'C + [(B')' + A'B']C'D \\
 &= AB' + (AB')'C + (AB')'C'D \\
 &= AB' \cup C \cup D
 \end{aligned}$$

## 二、电路边缘性能设计

电路边缘性能设计内容为：

最坏情况设计；  
电路性能漂移分析；  
元器件误差统计分析。

**电路的设计通常**总是从要完成的功能指标出发，首先要达到所要求的增益、频率、频带、灵敏度、线性度等技术指标。

**初步设计**时先从理想的模型出发，并根据实际情况调整参数使之满足所要求的技术指标。

**随后**则要考虑元件参数公差、漂移及参数随环境条件的变化等，以保证电路设计能允许这些变化。

参数变化是不可避免的，其情况如下：

### ① 参数公差

由于元件的制造公差所致，一般为正态分布，可用平均值（数学期望）和标准偏差来表示。

### ② 漂移

由于老化引起的参数随时间的变化。此时元件参数的平均值及标准偏差均随时间而改变。

### ③ 参数随环境条件的变化

由于外界环境因素而引起的参数改变，它是随环境因素的规律而变化的，这个变化的准确值可从元件手册中找到。

由于元件生产时质量控制不佳，不同批次元件之间参数常常有较大的差异，除了选用参数公差、标准偏差较小的批次的元件外，**最好能把购到的元件进行抽样实测**，取得平均值及标准偏差，以便设计时使用。



上面讲到的初步设计即传统的功能设计方法，随后进行的工作即**电路边缘性能设计**，为了保证电子线路的可靠性。

电路边缘性能设计是很有必要的，即应进行以下的分析。

### 1. 最坏情况分析

当仅知道参数变化的最大范围时，我们可以使用这种分析方法。现举例说明如下：

例6-2 图6-7为反相器电路中电阻有 $\pm 10\%$ 的极限偏差，三极管的参数 $h_{fe}$ （共发射极放大系数）的变化为20~70， $E_C=5V$ ， $V_{bes}=0.8V$ ， $V_{ces}=0.3V$ 均不变。

问：如何选择驱动信号 $V_S$ 才能使电路可靠地工作？

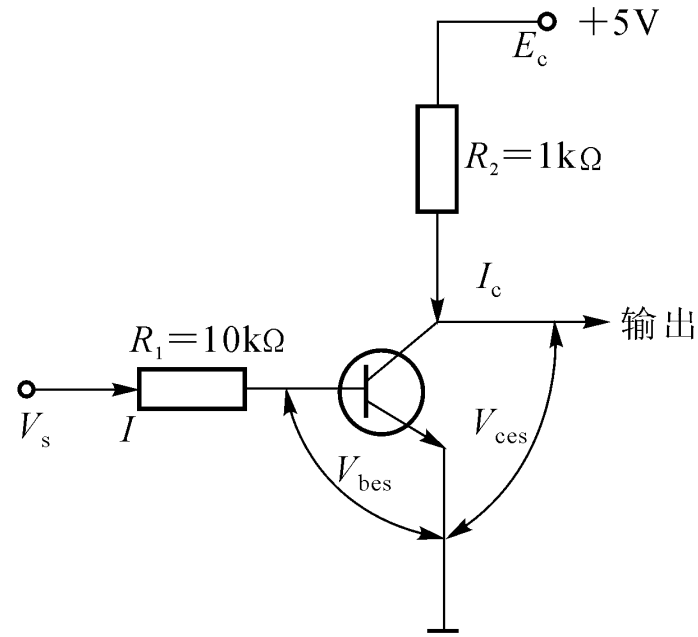


图 6-7 反相器电路

注：在最坏情况设计中，**上方有横线**的参数字母表示该参数的**最大值**，**下方有横线**者为该参数的**最小值**。

解：由于 
$$I_C = \frac{E_c - V_{ces}}{R_2}$$

故有 
$$I_b = N \frac{I_c}{h_{fe}} = \frac{N}{h_{fe}} \times \frac{E_c - V_{ces}}{R_2} \quad (1)$$

上式中 $N$ 为保证可靠地驱动该电路的系数，一般情况取  $N = 2$ 。

另外实际电路的驱动电流：

$$I = \frac{V_s - V_{bes}}{R_1} \quad (2)$$

为了可靠地驱动该电路，必须任何情况下：

$$I > I_b$$

即  $I_{\min} > I_{b \max}$  (3)

由 (1) 可得：

$$\begin{aligned}
 I_{b\max} &= N \frac{I_c}{h_{fe}} = \frac{N \cdot E_c - V_{ces}}{h_{fe} R_2} \\
 &= \frac{2}{20} \times \frac{5 - 0.3}{1000 - 1000 \times 0.1} \\
 &= 0.000522(\text{A}) \quad (4)
 \end{aligned}$$

由 (2) 可得:

$$\begin{aligned}
 I_{\min} &= \frac{V_s - V_{bes}}{R_1} = \frac{V_s - 0.8}{1000 + 1000 \times 0.1} \\
 &= \frac{V_s - 0.8}{1100} (\text{A}) \quad (5)
 \end{aligned}$$

将（4）、（5）分别带入（3）得：

$$\begin{aligned} I_{\min} > I_{b\max} &= \frac{V_s - V_{bes}}{R_1} > 0.000522 \\ &= \frac{V_s - 0.8}{11000} > 0.000522 \end{aligned}$$

所以

$$\underline{V_s} > 0.000522 \times 11000 + 0.8 = 6.542$$

可见，如果选  $V_s = 7 \text{ V}$  则可保证该电路能可靠地工作。

在最坏情况分析中还应考虑寿命末期（EOL）元件电参数的预期变化，这种变化是用初始的最小值或最大值的百分数来表示的。

根据有关美军标准对于各种元器件都规定了寿命末期设计界限，大家在进行线路最坏情况分析时，请注意使用有关数据。

## 2. 电路漂移分析

随着元器件随时间的**老化**，电路的性能指标也不断下降。当性能指标 $W$ 下降到一定程度时，即**当 $W < W_L$ 时**，电路就失效，这个 $W_L$ 值称之为**失效阈值**。

一般地说，电路性能指标是**正态分布**的，它将整个地随时间而**漂移**。



电路的**可靠性**（即可靠度）为性能正态分布曲线在**失效阈值以上部分的面积**，见图6-8。

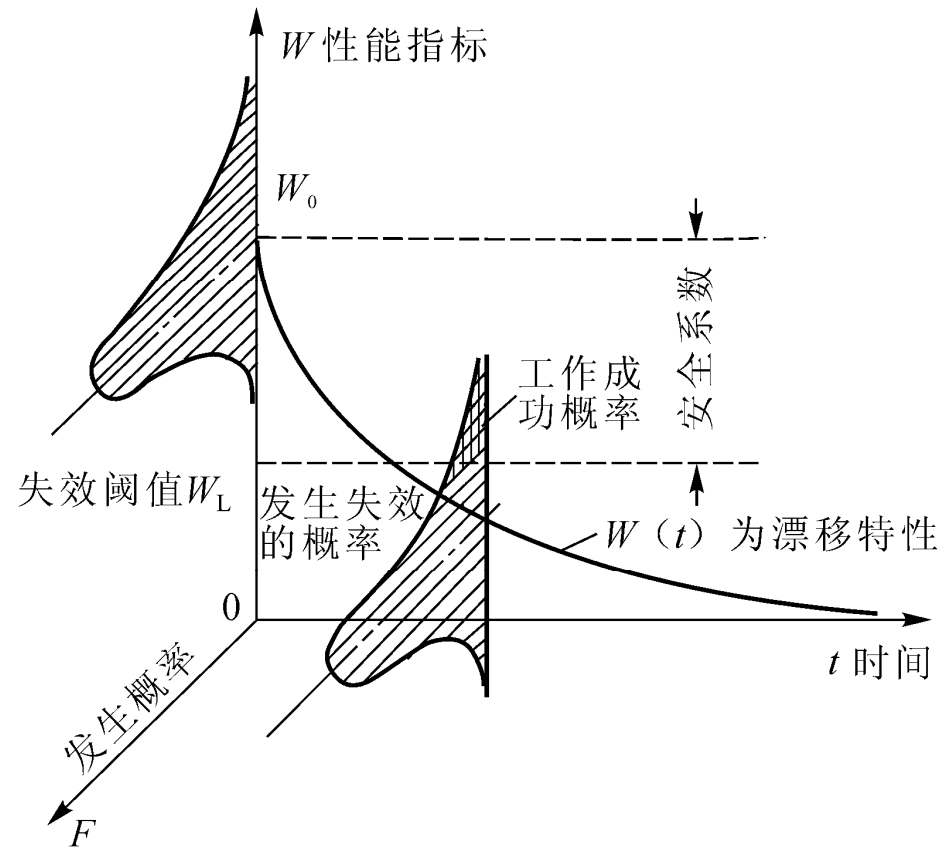


图6-8 电路性能指标漂移图

为了简化分析，假定性能  $W$  的分布为矩形，其高度为  $h$ ，宽度为  $2\Delta W$ ，且性能随时间漂移

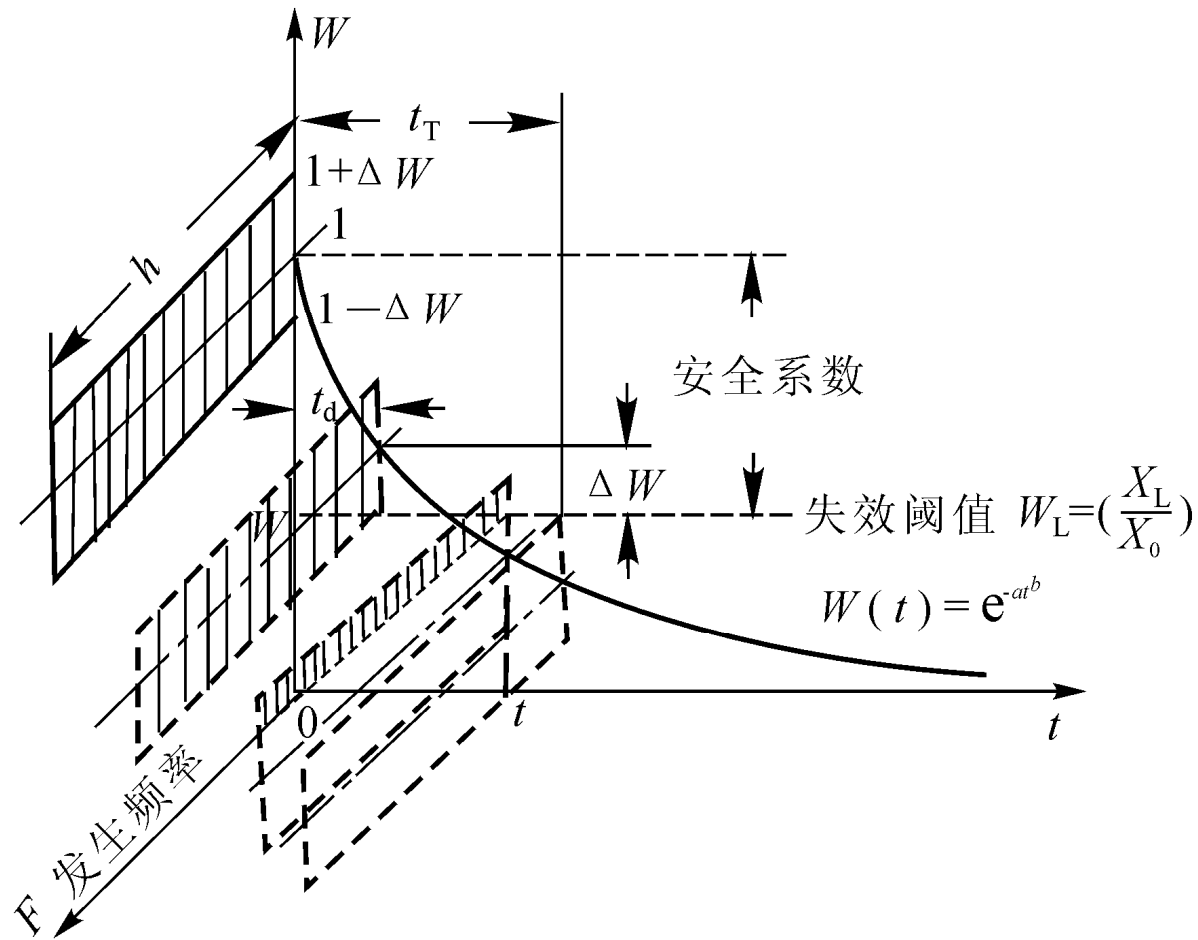


图6-9 电路性能指标漂移图

若把性能指标 $X$ 按 $t = 0$ 时的性能指标 $X_0$ 归一化，即有性能：

$$W_0 = \frac{X_0}{X_0} = 1$$

$$W = \frac{X}{X_0} \quad \text{则} \quad \Delta W = \frac{\Delta X}{X_0}$$

由概率论概念，可有：

$$h(2\Delta W) = 1$$

则 
$$h = \frac{1}{2 \Delta W} = \frac{1}{2 \frac{\Delta X}{X_0}} = \frac{X_0}{2 \Delta X}$$

同时可得(均匀分布):

$$\sigma^2 = \frac{(2\Delta W)^2}{12} = \frac{(\Delta W)^2}{3} = \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta X}{X_0} \right)^2$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{3}} \left( \frac{\Delta X}{X_0} \right) = 0.577 \left( \frac{\Delta X}{X_0} \right)$$

由于 $W$ 的分布为矩形，在矩形下缘碰到 $W_L$ 以前电路不会失效（见图6-9）。所以电路的绝对无故障时间 $t_d$ 可如下推导：

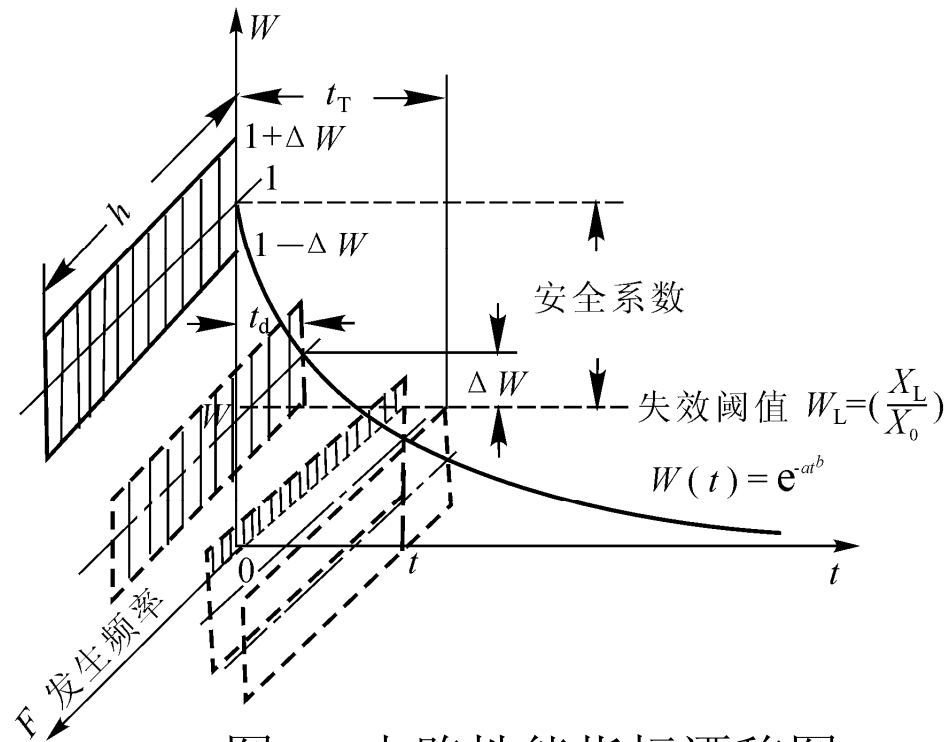


图6-9 电路性能指标漂移图

$$e^{-at_d^b} - \Delta W = e^{-at_d^b} - \frac{\Delta X}{X_0} = W_L = \frac{X_L}{X_0}$$

$$\therefore e^{-at_d^b} = \frac{X_L}{X_0} + \frac{\Delta X}{X_0} = \frac{X_L + \Delta X}{X_0}$$

即 
$$e^{at_d^b} = \frac{X_0}{X_L + \Delta X}$$

两边取以e为底的对数

$$at_d^b = \ln\left(\frac{X_0}{X_L + \Delta X}\right)$$

$$t_d = \sqrt[b]{\frac{1}{a} \ln\left(\frac{X_0}{X_L + \Delta X}\right)}$$

当  $t > t_d$  时，性能正常的概率  $P_s$  应为矩形在  $W_L$  以上部分的面积：

$$\begin{aligned}
 P_s &= h(e^{-at^b} + \Delta W - W_L) = h\left(e^{-at^b} + \Delta W - \frac{X_L}{X_0}\right) \\
 &= h\Delta W + h\left(e^{-at^b} - \frac{X_L}{X_0}\right) \\
 &= \frac{1}{2} + \frac{X_0}{2\Delta X} \left(e^{-at^b} - \frac{X_L}{X_0}\right)
 \end{aligned}$$

性能漂移刚至性能正常概率为0时的时间  $t_T$  可如下推导。

$$P_S = \frac{1}{2} + \frac{X_0}{2\Delta X} \left( e^{-at_T^b} - \frac{X_L}{X_0} \right) = 0$$

$$\frac{X_0}{2\Delta X} \left( e^{-at_T^b} - \frac{X_L}{X_0} \right) = -\frac{1}{2}$$

$$e^{-at_T^b} = \frac{X_L}{X_0} - \frac{\Delta X}{X_0} = \frac{X_L - \Delta X}{X_0}$$

即

$$e^{at_T^b} = \frac{X_0}{X_L - \Delta X}$$



对上式两边以e为底取对数得:

$$\left( \frac{X \nabla - X}{X} \right) \frac{b}{1} \sqrt[1]{q} = \frac{1}{1}$$

当  $t \leq \sqrt[1]{\frac{1}{a} \ln\left(\frac{X_0}{X_L + \Delta X}\right)}$  时,  $R_S = 1$

当  $\sqrt[1]{\frac{1}{a} \ln\left(\frac{X_0}{X_L + \Delta X}\right)} < t < \sqrt[1]{\frac{1}{a} \ln\left(\frac{X_0}{X_L - \Delta X}\right)}$  时

$$R_S = \frac{1}{2} + \frac{X_0}{2\Delta X} \left( e^{-at^b} - \frac{X_L}{X_0} \right) \quad \text{即 } 0 < R_S < 1$$

$$\text{当 } t \geq b \sqrt{\frac{1}{a} \ln\left(\frac{X_0}{X_L - \Delta X}\right)} \text{ 时, } R_S = 0$$

以上是在假定性能分布为矩形，漂移函数为  $e^{-at^b}$  的情况下推导出来的结论，对于其它不同分布和漂移函数也可这样进行推导，此处不再介绍。

### 3. 元器件误差统计分析

设各元件参数  $X_1, X_2, \dots, X_n$  是随机变量, 且在统计上互相独立, 各自服从正态分布, 标准偏差  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$ , 与各自的均值  $m_1, m_2, \dots,$

$m_n$  相比很小, 则电路的性能指标  $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  的均值  $m_y$  和方差 有下值:

$$m_y = f(m_1, m_2, \dots, m_n) \quad (6-1)$$

$$\sigma_y^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1}\right)_{x_i=m_i}^2 \cdot \sigma_1^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2}\right)_{x_i=m_i}^2 \cdot \sigma_2^2 \dots$$

$$+ \left(\frac{\partial f}{\partial x_n}\right)_{x_i=m_i}^2 \cdot \sigma_n^2$$

(6-2)

例6-4 有8个 $1\text{K}\Omega$ 电阻，其极限偏差分别是 $\pm 1\%$ ， $\pm 2\%$ ， $\pm 3\%$ ， $\pm 4\%$ ， $\pm 5\%$ ， $\pm 6\%$ ， $\pm 7\%$ ， $\pm 8\%$ ，将它们串联起来，见图6-10，其性能参数服从正正态分布。问总电阻公差是多少？以百分比表示。

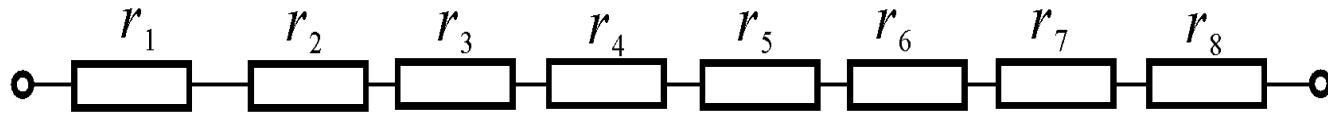


图 6-10 电 路 图

解：由于各电阻性能均符合正态分布，故其标准偏差与其离散范围的关系见图6-11。

因此各电阻的标准偏差分别为：

$$\sigma_1 = \frac{1}{3}(1000 \times 2\%) = \frac{10}{3}(\Omega)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{3}(1000 \times 2\%) = \frac{20}{3}(\Omega)$$

同理可得：

$$\sigma_3 = \frac{30}{3}, \quad \sigma_4 = \frac{40}{3}, \quad \sigma_5 = \frac{50}{3},$$

$$\sigma_6 = \frac{60}{3}, \quad \sigma_7 = \frac{70}{3}, \quad \sigma_8 = \frac{80}{3}$$

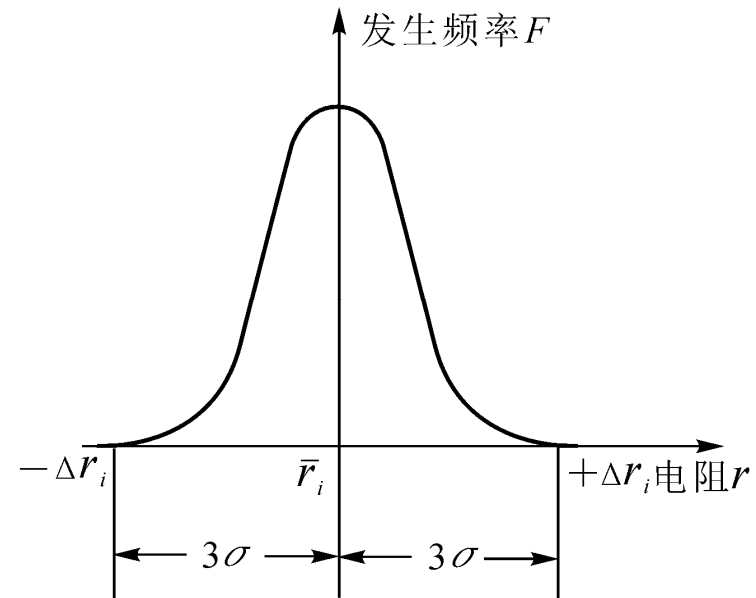


图 6-11 电阻正态分布图

因为串联电路，故总电阻 $R_S$ 有：

$$\begin{aligned} R_S &= R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_7 + R_8 \\ &= f(R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6, R_7, R_8) \end{aligned}$$

由式(6-2)可得总电阻的方差：

$$\begin{aligned} \sigma_{R_S}^2 &= \left(\frac{\partial R_S}{\partial R_1}\right)^2 \sigma_1'^2 + \left(\frac{\partial R_S}{\partial R_2}\right)^2 \sigma_2'^2 + \dots + \left(\frac{\partial R_S}{\partial R_8}\right)^2 \sigma_8'^2 \\ &= \sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_8^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \sigma_{R_S} &= \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_8^2} \\ &= \sqrt{\left(\frac{10}{3}\right)^2 + \left(\frac{20}{3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{80}{3}\right)^2} \\ &= 47.61 \end{aligned}$$

因为几个正态分布的随机变量之和仍为一个正态分布的随机变量，即随机变量 $R_S$ 为正态分布。根据图6-11， $\Delta R_S$ 和 $\sigma_{R_S}$ 的关系有：

$$\begin{aligned}\Delta R_S &= \pm 3\sigma_{R_S} = \pm 3 \times 47.61 \\ &= \pm 142.83(\Omega)\end{aligned}$$

由式(6-1)总电阻的均值为：

$$\begin{aligned}m_{R_S} &= f(m_1, m_2, \dots, m_8) \\ &= m_1 + m_2 + \dots + m_8 \\ &= 1000 \times 8 = 8000(\Omega)\end{aligned}$$

用百分数表示其极限偏差：

$$\frac{3\sigma_{R_S}}{m_{R_S}} = \frac{142.83}{8000} = 1.8\%$$

故

$$R_S = (8 \pm 1.8\%)(\text{k}\Omega)$$





中国可靠性网

<http://www.kekaoxing.com>

感谢 [kingdodoo](#) 分享