第三章 可 靠 性 预 测 和 分 配

内 容 提 要

§3 -1系统可靠性指标的论证

一、常用可靠性指标

二、系统可靠性指标的论证方法

三、元器件的失效率

§3 - 2可靠性预测（预计）

一、可靠性预测的含义和作用

二、产品在投标阶段和设计阶段的可靠性预测

三、设计中的系统可靠性预测

上一章我们讲完了系统的可靠性模型，主要解决了已知组成系统各单元的可靠性求系统可靠性的方法。

单元的可靠性如何确定?

即是我们这一章（第三章）所讲的可靠性预计（预测）和分配。

在产品生产中不但要确定产品的目的和用途、所要求的功能，工作条件和环境条件，而且还要有可靠性指标的要求。

如果想得到高可靠性的产品，必须进行产品可靠性定量指标的控制。为了达到这个目的，就需要：

在设计时，对未来产品的可靠性进行定量的计算，合理地分配组成件的可靠性。使产品的可靠性定量指标达到设计要求。

在使用时，对产品进行可靠性指标评估，以论证其与设计可靠性的差距，从而科学地确定弥补措施。

可靠性预测和分配的目的是确定产品的可靠度。

§3—1系统可靠性指标的论证

一、常用可靠性指标

1.**电子元器件**、电子线路、电子设备(电子产品)：常用$\lambda(t)$ 失效率 。

2. 一般系统：

(1) **不可修产品**：常用**可靠度**$R(t)$ 或平均寿命**MTTF**（失效前的平均工作时间）。

(2) **可修产品**：常用可用性$A(t)$ 或平均无故障工作时间**MTBF**（故障间隔平均时间）。

二、系统可靠性指标的论证方法

1. 以各组成部分的可靠性指标来确定系统可靠性指标，有时（如做方案比较时）可不确定各方案系统的可靠性指标，只做各组成部分可靠性的比较。

2. 根据以往统计的同类产品实际达到的可靠性指标，只做宏观分析。

人所周知，产品，特别是一般可靠性不太好的电子产品大多是由很多元器件组成的，故知元器件是组成产品的最小、最基本的单元。元器件的失效率直接影响所组成产品的可靠性，故应了解元器件的失效率情况。

三、元器件的失效率

1. 元器件种类

(1) 集成电路（数字电路，模拟电路)；

(2) 半导体分立器件（晶体管、二、三极管等)；

(3) 电子管；

(4) 电阻器；

(5) 电容器；

(6) 电位器；

(7) 电感元件；

(8) 继电器；

(9) 开关；

(10) 连接器；

(11) 旋转电机；

(12) 印刷电路板；

(13) 焊接点；

(14) 其他元器件等。

2. 元器件失效率的预计

根据国标和国军标和应用有关手册进行预计。

(1) 我国民品手册《电子设备可靠性预计册》；

(2) 我国军品手册 《电子设备可靠性预计手册》－GJB299；

(3) 美国军品用手册 MIL－HDBK－217。

产品的**可靠性高低**并不取决于论证，而**决定于其本身**。

若想提高产品本身的固有可靠性，则**应在产品设计阶段对它进行可靠性的预测和分配**，

下面分别讨论**预测和分配**这两个问题。

§3—2可靠性预测（预计）

一、可靠性预测的含义和作用

1. 可靠性预测的含义

可靠性预测是指在设计阶段（当产品还只是图纸时）定量地估计未来产品的可靠性的一种方法。

2.可靠性预测的作用

（1）发现可靠性薄弱环节，对设计方案提出改进意见，以保障产品质量。

（2）为用一般元器件和一般设计代替昂贵元器件和特殊可靠性设计提供依据，以节约费用加快进度，降低成本。

二、产品在投标阶段和设计阶段的可靠性预测

1.预测方法

（1）相似设备法；
（2）有源组件估计法；
（3）功能预计法；

投标阶段

（4）元器件计数法； 产品设计早期

（5）元器件应力分析法。产品设计后期

以上方法（1）、（2）、（3）用于粗略估计，（5）用于具备了附有元器件应力数据清单的系统的可靠性预测；

方法（4）是常用的方法，我们在这里只讲元器件计数法方法（4）。

2. 元器件计数法

(1) 需要预先**采集的信息**

①产品所有通用元器件的**种类及数量**；

②元器件的**质量等级**；

③产品的**环境**。

(2) 基本**数学公式**

$$\lambda_{设备} = \sum_{i=1}^{n} N_i (\lambda_{G_i} \pi_{Q_i}) \qquad (3—1)$$

式中：λ_{G_i} ——第i种通用元器件的通用失效率；

π_{Q_i} ——第i种通用元器件的质量系数；

N_i ——第i种通用元器件数量；

n ——不同的通用元器件种类数。

为什么只统计通用元器件？

因为只有通用元器件才能在有关手册中查到它的 λ_{G_i} 和 π_{Q_i} ，可见这种估算方法是预测其可靠性最好情况。

(3）示例 ：某一电子设备，用五类元件，元件情 况如下表所示，请预测该设备工作50小时的可靠性。

种类	A	B	C	D	E
数量	1	16	200	300	50
通用失效率	100×10^{-6}/h	5×10^{-6}/h	20×10^{-6}/h	1.5×10^{-6}/h	1×10^{-6}/h

环境类别为地面良好，查表得各类元件 的质量系数 $\pi_{Q_i}=1 \quad (i=1,\cdots 5)$ ，

求：该设备的可靠性

种类	A	B	C	D	E
数量	1	16	200	300	50
通用失效率	100×10-6/h	5×10-6/h	20×10-6/h	1.5×10-6/h	1×10-6/h

解：∵ 式（3—1）

$$\lambda_{设备}=\sum_{i=1}^{5}N_i(\lambda_G\pi_Q)_i$$

$$=N_1\left(\lambda_G\pi_Q\right)_1+\cdots+N_5\left(\lambda_G\pi_Q\right)_5$$

$$=1\times100\times10^{-6}\times1+16\times5\times10^{-6}\times1+200\times20\times10^{-6}\times1$$

$$+300\times1.5\times10^{-6}\times1+50\times1\times10^{-6}\times1$$

$$=(100+16\times5+200\times20+300\times1.5+50)\times10^{-6}$$

$$=0.4681\times10^{-2}$$

$$\because\ R_{设备}(t) = e^{-\int_0^t \lambda_{设备} dt}$$

$$= e^{-\int_0^t 0.4681\times10^{-2} dt}$$

$$= e^{-0.4681\times10^{-2} t}$$

$$\therefore R(50)_{设备} = e^{-0.4681\times10^{-2}\times50}$$

$$= 0.79132$$

即预测该设备在工作50小时的时候

可靠概率为: 79.132%

三、设计中的系统可靠性预测

1. 预测方法

（1）概率法：按系统的可靠性框图，由单元可靠性计算系统可靠性，第二章所讲。

（2）边值法（上、下限法）；

（3）Monte-Carlo模拟法（蒙特-卡勒法）。

本章我们将重点介绍边值法（即上、下限法）。因为对于复杂系统用概率法是十分麻烦和不便的，而用上、下限法特别合适，因为它既省钱省力又能保证一定计算精度。曾用在阿波罗飞船的可靠性预测上。

2. 上、下限法预测系统可靠性

（1）基本思路：

对研究系统分别逐步做一些假设简化；分别计算出各步（上限*m*步和下限*n*步）的简化系统的可靠性上、下限可靠性数值 $R_{上限}^{(m)}$ 、$R_{下限}^{(n)}$ ；

再用

$$R_S = f(R_{上限}^{(m)},\ R_{下限}^{(n)})$$

计算被研究系统的可靠性 R_s ，见图3—1。

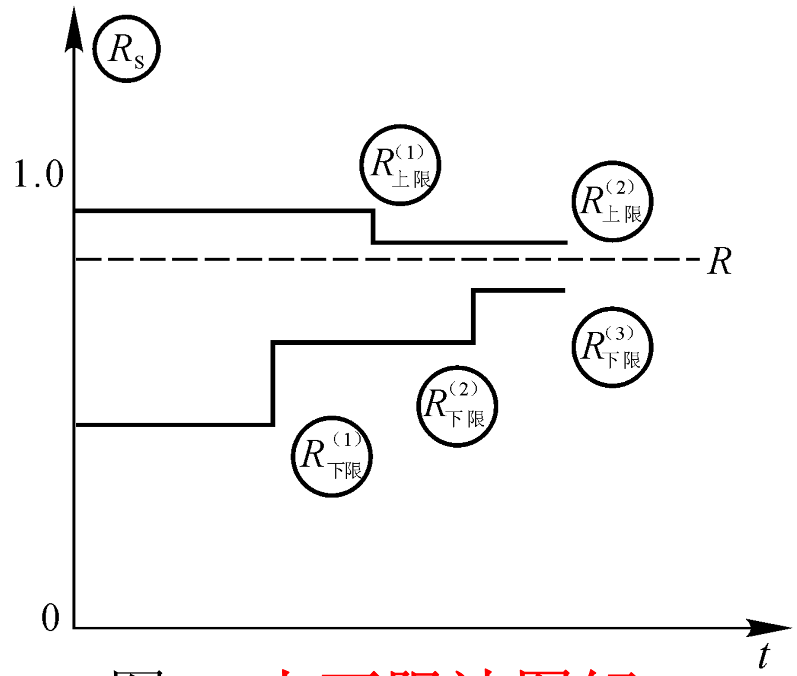


图3-1上下限法图解

（2）数学公式

设有一系统由 k_1 个串联单元和 k_2 个非串联单元组成。其系统可靠性R_S计算公式见式(3-11）。

$$R_s = 1 - \sqrt{(1 - R_{上限}^{(m)})(1 - R_{下限}^{(n)})} \quad （3—11）$$

（m=1，2，3…　$m \leqslant k_2$-1）

（n=1，2，3…　$n \leqslant k_2$ ）

① $R_{上限}^{(m)}$ ： 第 m 次假设简化后计算的系统可靠性上限 。

$$R_{上限}^{(m)} = R_{上限}^{(1)} - Q_{上限}^{(2)} - Q_{上限}^{(3)} \cdots Q_{上限}^{(m)} \quad （3—5）$$

$R_{上限}^{(1)}$——第一次假设简化后计算的可靠性上限值，系统可靠性保险不能超过的值，但又$\neq 1$，是何值？

$$R_{上限}^{(1)} = \prod_{i=1}^{k_1} R_i \qquad i = 1 \sim k_1 \qquad (1)$$

上式为系统串联单元可靠性计算式，（非串联单元认为可靠性为1）。

$Q^{(2)}_{上限}$——系统串联单元可靠性确定的情况下，在实际系统中**非串联单元中任何2个单元同时失效引起系统失效的概率**，（注意此时其他非串联单元可靠度仍均为1），设该种组合有 n_2 种。

$Q^{(2)}_{上限}$ 计算式为：

$$Q^{(2)}_{上限} = \prod_{i=1}^{k_1} R_i \prod_{j=1}^{k_2} R_j \left(\sum_{j,k=1}^{n_2} \frac{q_j q_k}{R_j R_k} \right) \qquad (2)$$

$Q^{(3)}_{上限}$ ——系统串联单元可靠性确定的情况下，在实际系统中**非串联单元中任何3个单元同时失效引起系统失效的概率**，（注意此时其他非串联单元可靠度仍均为1），设该种组合有 n_3种。

$Q^{(3)}_{上限}$ 计算式为：

$$Q^{(3)}_{上限} = \prod_{i=1}^{k_1} R_i \prod_{j=1}^{k_2} R_J \left(\sum_{j,k,n=1}^{n_3} \frac{q_j q_k q_n}{R_j R_k R_n} \right) \quad (3)$$

$Q_{上限}^{(m)}$——系统串联单元可靠性确定的情况下，在实际系统**中非串联单元中任何*m*个单元同时失效引起系统失效的概率**，设该种组合有 n_m 种。

$Q_{上限}^{(m)}$ 计算式为：

$$Q_{上限}^{(m)} = \prod_{i=1}^{k_1} R_i \prod_{j=1}^{k_2} R_j \left(\sum_{j,k\ldots m=1}^{n_m} \frac{q_j q_k \cdots q_m}{R_j R_k \cdots R_m} \right) \quad (4)$$

取 $m = 2$ 时，则

$$
\begin{aligned}
&R_{\text{上限}}^{(2)} \\
&= R_{\text{上限}}^{(1)} - Q_{\text{上限}}^{(2)} \\
&= \prod_{i=1}^{k_1} R_i \left[1 - \prod_{j=1}^{k_2} R_j \left(\sum_{j,k=1}^{n_2} \frac{q_j q_k}{R_j R_k} \right) \right]
\end{aligned}
$$

(3-7)

② $R_{下限}^{(n)}$ 第n次假设简化后计算的系统可靠性下限

$$R_{下限}^{(n)} = R_{下限}^{(1)} + \Delta R_{下限}^{(1)} + \Delta R_{下限}^{(2)} + \cdots + \Delta R_{下限}^{(n\text{-}1)}$$ （3—8.）

$R_{下限}^{(1)}$ — 第一次假设简化后计算，系统可靠性保险超过的值（但≠0），是何值？显然是：

$$R_{下限}^{(1)} = \prod_{i=1}^{k_1+k_2} R_i \qquad i = 1 \sim k_1 + k_2$$ (5)

$i = 1 \sim k_1 + k_2$ 是系统的全部单元（ 串联 ）。

$\Delta R^{(1)}_{下限}$——在系统串联单元可靠性确定的情况下，在实际**系统中非串联单元中任意1个单元失效系统仍可靠的概率**，设非串联单元中第j个单元失效，系统仍工作，此时有n_1种组合。

若非串联单元中第j个单元失效系统仍工作,

该系统工作概率为：

$$R_1R_2\cdots R_{k_1}\cdots q_j\cdots R_{k_1+k_2}=\prod_{i=1}^{k_1+k_2}R_i\frac{q_j}{R_j}$$

有n_1种时, 则：

$$\Delta R^{(1)}_{下限}=\prod_{i=1}^{k_1+k_2}R_i(\sum_{j=1}^{n_1}\frac{q_j}{R_j}) \tag{6}$$

$\Delta R^{(2)}_{下限}$ ——在系统串联单元可靠性确定的情况下，在实际系统中非串联单元中任意2个单元失效系统仍可靠的概率，设非串联单元中第j个和第k单元失效，系统仍工作，此时有n_2种组合，则：

$$\Delta R^{(2)}_{下限} = \prod_{i=1}^{k_1+k_2} R_i \left(\sum_{j,k=1}^{n_2} \frac{q_j q_k}{R_J R_K} \right)$$

(7)

$\Delta R_{\text{下限}}^{(n-1)}$——在串联单元可靠性确定的情况下，在实际系统中非串联单元中任何（*n*-1）单元个失效系统仍可靠的概率，设此种组合有 n_{n-1} 种，则：

$$\Delta R_{\text{下限}}^{(n-1)} = \prod_{i=1}^{k_1+k_2} R_i \left(\sum_{j,k,\cdots n=1}^{n-1} \frac{q_j q_k \cdots q_{n-1}}{R_j R_k \cdots R_{n-1}} \right) \tag{8}$$

取 $n = 3$ 时,则：

$$R_{下限}^{(3)} = R_{下限}^{(1)} + \Delta R_{下限}^{(1)} + \Delta R_{下限}^{(2)}$$

$$= \prod_{i=1}^{k_1+k_2} R_i \left(1 + \sum_{j-1}^{n_1} \frac{q_j}{R_j} + \sum_{j,k=1}^{n_2} \frac{q_j q_k}{R_j R_k} \right)$$

(3-10)

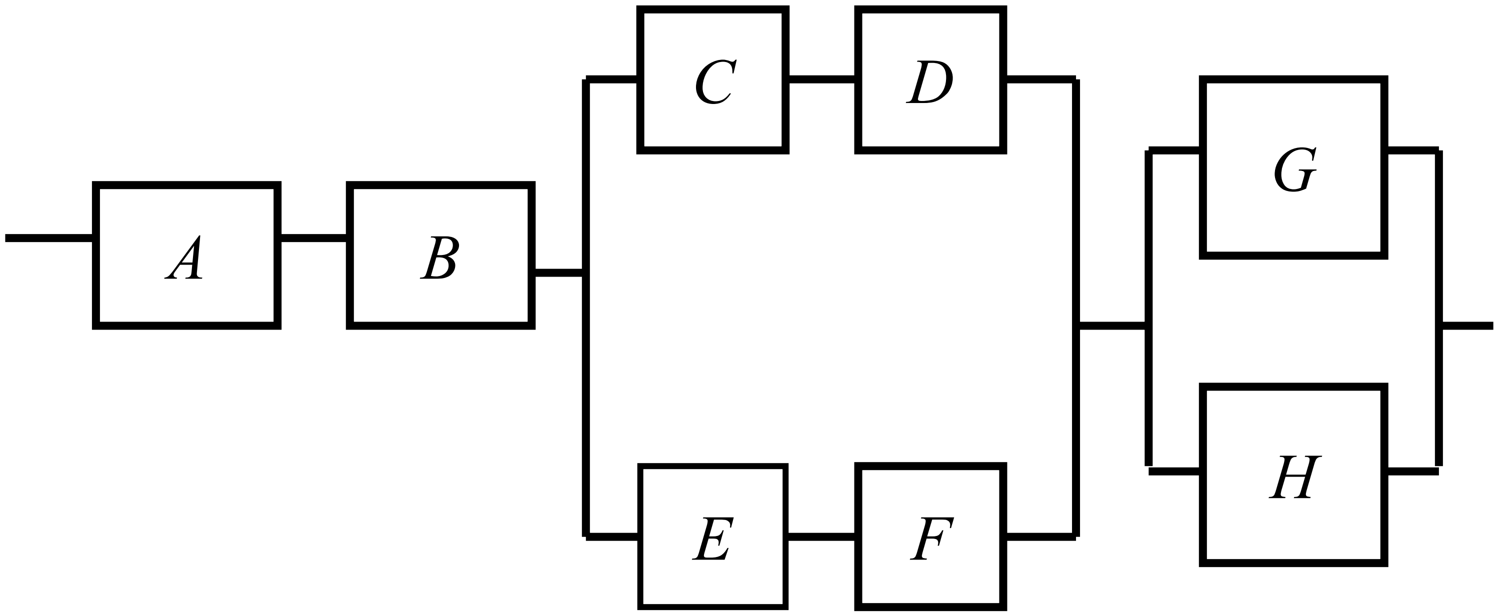
$$R_S = 1 - \sqrt{\left(1 - R_{上限}^{(m)}\right)\left(1 - R_{下限}^{(n)}\right)}$$

(3-11)

注意：上式中，一般取 $m \leq 2$ ，$\boldsymbol{n}$ 的取值根据算出的可靠性下限值与上限值是否接近（即区间是否小到可以保证精度）而定之 。

例 3—1设有一系统可靠性框图见下图所示。

用上、下限法求系统可靠性（m=2　n=3）



图例3-1图

解：（1）求 $R^{(m)}_{上限}$

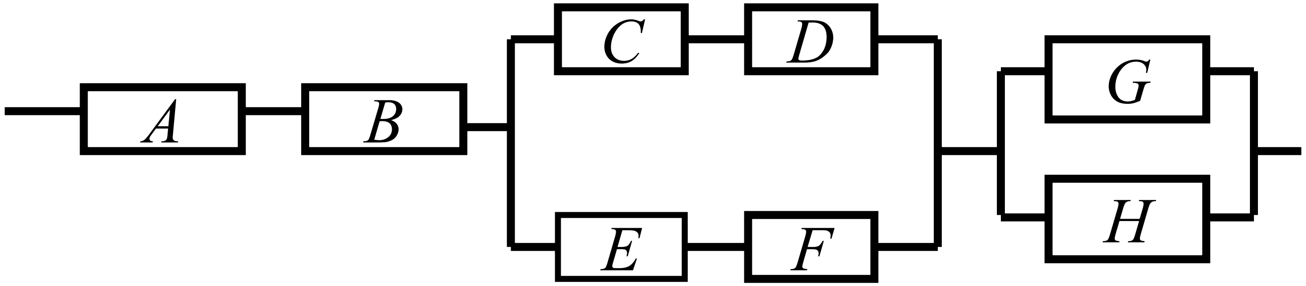
$\because$ 一般 $m \le 2$

即求 $R^{(2)}_{上限}$

由式(3-7) $R^{(2)}_{上限} = R^{(1)}_{上限} - Q^{(2)}_{上限}$

$$R^{(1)}_{上限} = R_A R_B$$

$Q_{上限}^{(2)}$ —— 系统A、B单元可靠情况下，上图非串联系统，任何**2个**单元失效引起系统失效的概率。



根据上图可得（CE），（CF），（DE），（DF），（GH）(5个二阶MCS)任何一组失效引起系统失效。

$\therefore$

$$Q_{上限}^{(2)} = R_A R_B R_D R_F R_G R_H Q_C Q_E + R_A R_B R_D R_E R_G R_H Q_C Q_F + R_A R_B R_C R_F R_G R_H Q_D Q_E + R_A R_B R_C R_E R_G R_H Q_D Q_F + R_A R_B R_C R_D R_E R_F Q_G Q_H$$

$$R^{(2)}_{上限} = R^{(1)}_{上限} - Q^{(2)}_{上限}$$

$$= R_A R_B \left[1 - \left(R_D R_F R_G R_H Q_C Q_E + R_D R_E R_G R_H Q_C Q_F\right)\right]$$

$$+ R_C R_F R_G R_H Q_D Q_E + R_C R_E R_G R_H Q_D Q_F$$

$$+ R_C R_D R_E R_E R_F Q_G Q_H)]$$

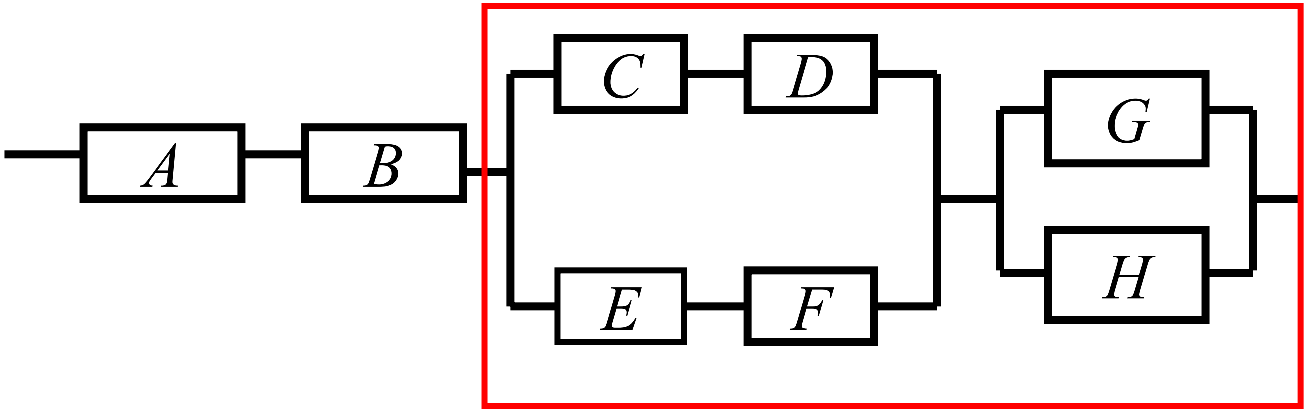
—(1)

（2）求 $R_{下限}^{(n)}$ 设求到 $n=3$

根据式(3-10)：

$$R_{下限}^{(3)} = R_{下限}^{(1)} + \varDelta R_{下限}^{(1)} + \varDelta R_{下限}^{(2)}$$

$$R_{下限}^{(1)} = R_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H$$

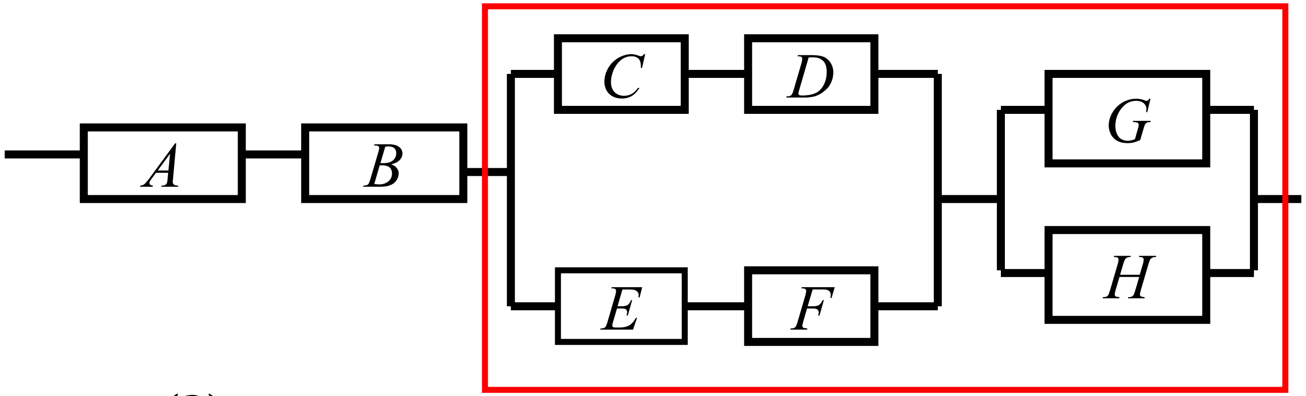


$\Delta R_{下限}^{(1)}$：因为上图在串联单元A、B正常的时候**非串联单元中的任何一个失效系统仍正常，这种概率为**：

$$\Delta R_{下限}^{(1)} = R_A R_B Q_C R_D R_E R_F R_G R_H + R_A R_B R_C Q_D R_E R_F R_G R_H$$

$$+ R_A R_B R_C R_D Q_E R_F R_G R_H + R_A R_B R_C R_D R_E Q_F R_G R_H$$

$$+ R_A R_B R_C R_D R_E R_F Q_G R_H + R_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G Q_H$$



$\Delta R^{(2)}_{下限}$：上图非串联单元中，两个失效系统正常的集合：(CD)，（CG），（CH），（DG），（DH），（EF），（EG），（EH），（FG），（FH）此时概率为：

$$
\begin{aligned}
\Delta R^{(2)}_{下限} = & R_A R_B Q_C Q_D R_E R_F R_G R_H + R_A R_B Q_C R_D R_E R_F Q_G R_H \\
& + R_A R_B Q_C R_D R_E R_F R_G Q_H + R_A R_B R_C Q_D R_E R_F Q_G R_H \\
& + R_A R_B R_C Q_D R_E R_F R_G Q_H + R_A R_B R_C R_D Q_E Q_F R_G R_H \\
& + R_A R_B R_C R_D Q_E R_F Q_G R_H + R_A R_B R_C R_D Q_E R_F R_G Q_H \\
& + R_A R_B R_C R_D R_E Q_F Q_G R_H + R_A R_B R_C R_D R_E Q_F R_G Q_H
\end{aligned}
$$

$$\therefore \quad R^{(3)}_{\text{下限}} = R^{(1)}_{\text{下限}} + \Delta R^{(1)}_{\text{下限}} + \Delta R^{(2)}_{\text{下限}}$$

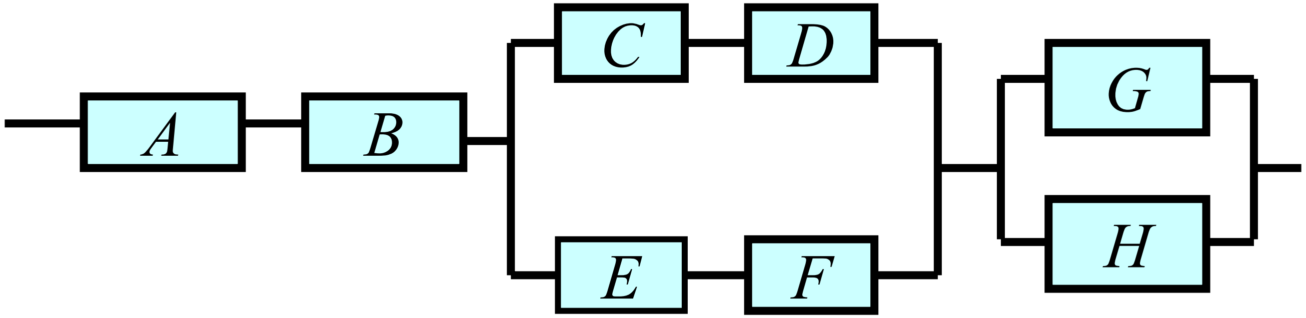
$$= R_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H \left[1 + \left(\frac{Q_c}{R_c} + \frac{Q_D}{R_D} + \frac{Q_E}{R_E} + \frac{Q_F}{R_F} + \frac{Q_G}{R_G} + \frac{Q_H}{R_H} \right) \right.$$

$$+ \left(\frac{Q_c Q_D}{R_c R_D} + \frac{Q_C Q_G}{R_C R_G} + \frac{Q_C Q_H}{R_C R_H} + \frac{Q_D Q_G}{R_D R_G} + \frac{Q_D Q_H}{R_D R_H} + \frac{Q_E Q_F}{R_E R_F} + \frac{Q_E Q_G}{R_E R_G} + \frac{Q_E Q_H}{R_E R_H} \right.$$

$$\left. \left. + \frac{Q_F Q_G}{R_F R_G} + \frac{Q_F Q_H}{R_F R_G} \right) \right]$$

$$= R_A R_B R_C R_D R_E R_F R_G R_H \left[1 + \sum_{j=1}^{n_1} \frac{Q_j}{R_j} + \sum_{j,k=1}^{n_2} \frac{Q_j}{R_j} \cdot \frac{Q_k}{R_k} \right]$$

（2）



图例3-1图

式中：R_j 是非串联单元可靠性，n_1 是非串联单元数，图例3-1图中 n_1 =6，（j，k）非串联单元对，图例3-1图中 n_2 =10 。

（3）求 $R_{系统}$

$$R_{系统} = 1 - \sqrt{(1 - R_{上限}^{(2)})(1 - R_{下限}^{(3)})}$$

将（1）、（2）式分别代入得之。

(4) 补充说明：

① 本例题（串并联系统）本应用概率法求最简单，此处举出是为了简易的说明上下限法的使用。书中例3—1为一般网络系统，用上、下限法计算例子。

② 为什么说上、下限法预测复杂系统的可靠性是省力？这是因为：

（a）上、下限接近到一定程满足要求即可，是近似值。

（b）便于使用计算机。