

Chapter 7. Modern Design Methodology of Instr.

Lecture 4. Reliability Design Method

王代华，博士，教授，博士生导师

Dr. Dai-Hua, Wang, Professor

PILab

精密與智能實驗室

Precision and Intelligence Laboratory

<http://www.pilab.coe.cqu.edu.cn/>

Email: dhwang@cqu.edu.cn

Tel: 023-65112105(O), 65102511(Lab)

重庆大学，光电工程学院

© Copyright by D. H. Wang 2009 All Rights Reserved.

Outline

- ❑ Basic Concepts
- ❑ Characteristic Quantities
- ❑ Methods and Process
- ❑ Prediction of Reliability
- ❑ Assignment of Reliability



Copyright by D. H. Wang



Advantages

- 在对失效可能性的认识和评价上，常规的设计方法是用安全系数来保证仪器的安全性，而可靠性设计方法则是用可靠度（或其他可靠性指标）来保证仪器的安全性，因此可靠性设计对失效可能性的认识和评价都比常规设计更为合理
- 可靠性设计除了引入可靠度指标外，还对仪器的安全系数作了统计分析，这样得出的安全系数比常规的安全系数更科学，因为它已经是与可靠度相联系的安全系数了
- 常规设计对仪器安全度的评价只有一个指标，即安全系数，而可靠性设计对安全度的评价则有两个指标，即可靠度和安全系数（这是在一定可靠度条件下的），对安全性有了进一步的认识

Basic Concepts

□ 可靠性

- ✍ 指产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力
- ✍ 测控仪器产品的可靠性是衡量测控仪器产品质量的一个重要指标

□ 论述产品的可靠性首先与其工作条件分不开

- ✍ 产品的可靠性与“规定的时间”密切相关

✍ 预期寿命

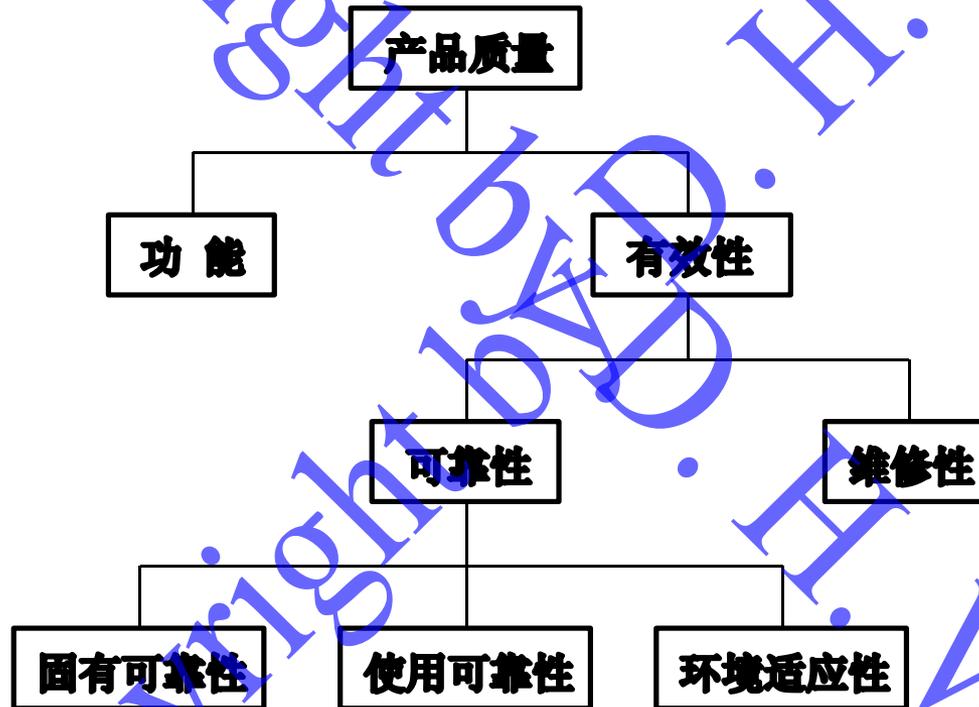
- ✍ 产品的可靠性与“规定的功能”有更密切的关系

✍ 失效

✍ 故障

Basic Concepts

□ 产品质量与可靠性的关系



Basic Concepts

□ 固有可靠性：通过设计、制造赋予产品的可靠性

✍ 影响产品固有可靠性的因素很多，主要有产品设计方案的选择，零部件的材料、结构、性能及制造工艺等

□ 使用可靠性：指使用时操作及维护人员对产品可靠性的影响

✍ 使用可靠性既受设计、制造的影响，又受使用条件的影响。包括使用与维护的程序、设备及人的因素等

□ 环境适应性：指产品所处的环境条件对产品可靠性的影响，如环境温度、相对湿度、大气压力、振动、冲击、辐射、烟雾、储存、运输等

□ Next Slide...

Basic Concepts

□ 维修性：表示对可修复产品进行维修的难易程度或性质

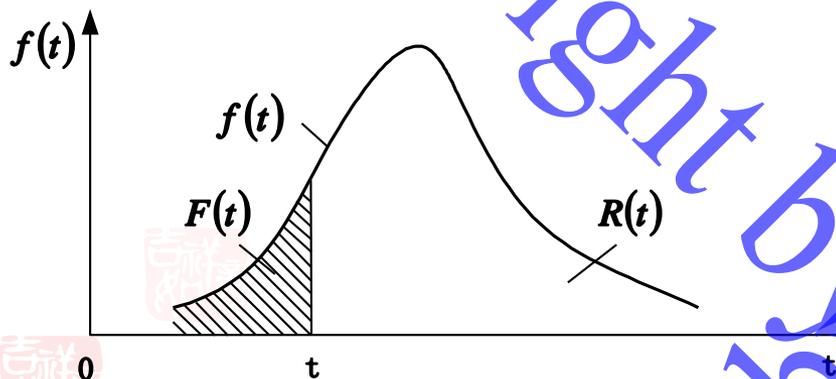
✍ 一个可靠性好的产品，不但要求平均无故障工作时间长，而且要求在出现故障后容易维修，即平均修复时间短

□ 有效性：可靠性与维修性相结合，就是产品的有效性，也称为广义可靠性



Characteristic Quantities

$$R(t) = P(T > t) = \int_t^{\infty} f(t) dt$$



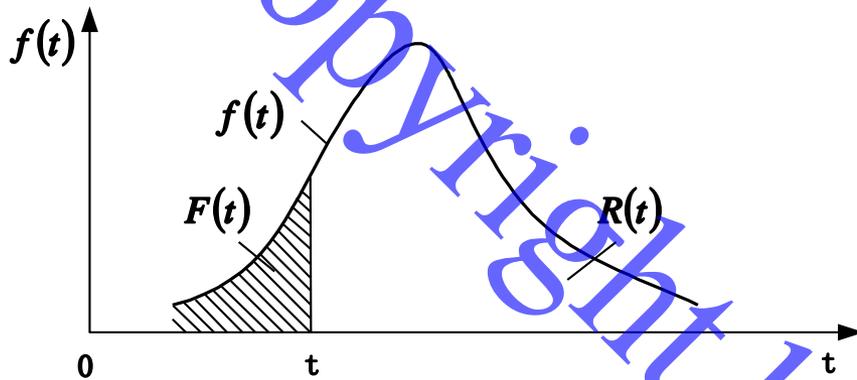
$$0 \leq R(t) \leq 1$$

$f(t)$ —概率密度函数

□ 可靠度

产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的概率，一般用符号R表示

Characteristic Quantities

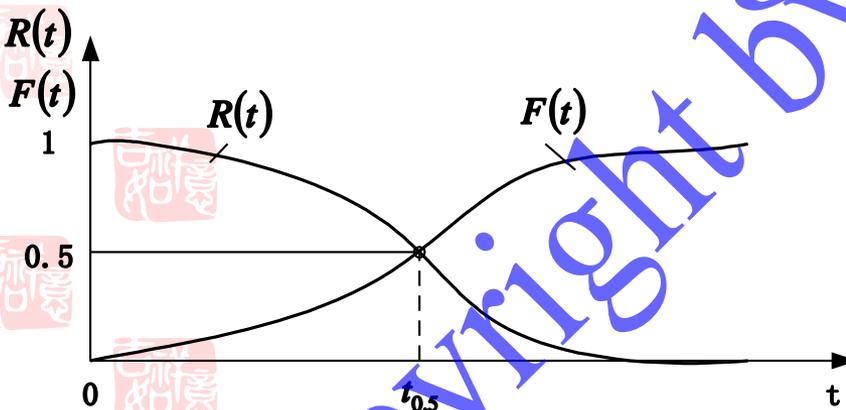


$$F(t) = P(T \leq t) = \int_{-\infty}^t f(t) dt$$

累积失效概率

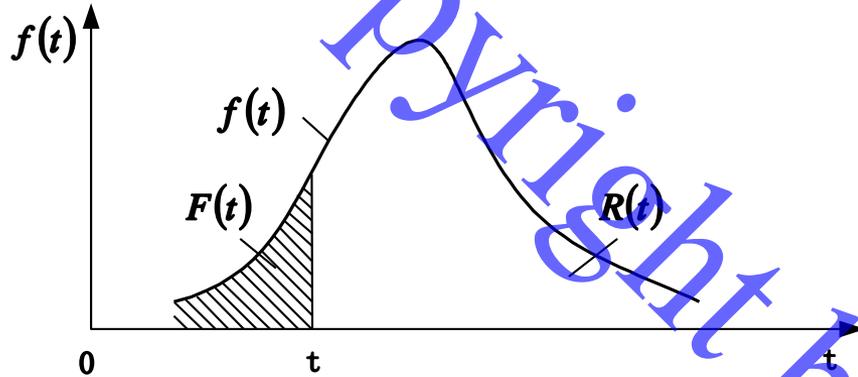
累积失效概率是产品在规定条件下和规定时间内未完成规定功能（即发生失效）的概率，也称为不可靠度

一般用符号 F 或 $F(t)$ 表示



$$F(t) = 1 - R(t)$$

Characteristic Quantities



□ 失效率

失效率是工作到某时刻尚未失效的产品在该时刻后单位时间内发生失效的概率

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} P(t < T \leq t + \Delta t | T > t)$$

$\lambda(t)$ --在 t 时刻尚未失效, 在 $t+\Delta t$ 的单位时间内发生失效的条件概率

可靠性特征量间的关系

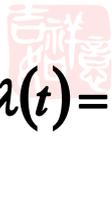
$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt}$$

$$\lambda(t) = \frac{F(\Delta t/t)}{\Delta t} = \frac{1-R(\Delta t/t)}{\Delta t}$$

$$R(t+\Delta t) = R(t) \cdot R(\Delta t/t)$$

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t) - R(t+\Delta t)}{\Delta t \cdot R(t)} = -\frac{1}{R(t)} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{R(t+\Delta t) - R(t)}{\Delta t} = -\frac{1}{R(t)} \cdot \frac{dR(t)}{dt} = -\frac{d[\ln R(t)]}{dt}$$

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt} = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]$$



可靠性特征量中四个基本函数间的关系

	$R(t)$	$F(t)$	$f(t)$	$\lambda(t)$
$R(t)$	—	$1 - F(t)$	$\int_t^{\infty} f(t) dt$	$\exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]$
$F(t)$	$1 - R(t)$	—	$\int_0^t f(t) dt$	$1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]$
$f(t)$	$-\frac{dR(t)}{dt}$	$\frac{dF(t)}{dt}$	—	$\lambda(t) \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right]$
$\lambda(t)$	$-\frac{d}{dt} \ln R(t)$	$\frac{dF(t)/dt}{1 - F(t)}$	$\frac{f(t)}{\int_t^{\infty} f(t) dt}$	—



Characteristic Quantities

□ 平均寿命

✍ 平均寿命是寿命的平均值，表示无故障工作时间 T 的期望值 $E(T)$

$$\bar{t} = E(T) = \int_0^t t f(t) dt$$

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} R(t) dt$$

✍ 用MTBF (Mean Time between Failures) 表示可修复产品的平均寿命，称“无故障工作时间”

✍ 用MTTF (Mean Time to Failure) 表示不可修复产品的平均寿命，称“失效前的平均工作时间”

Contents

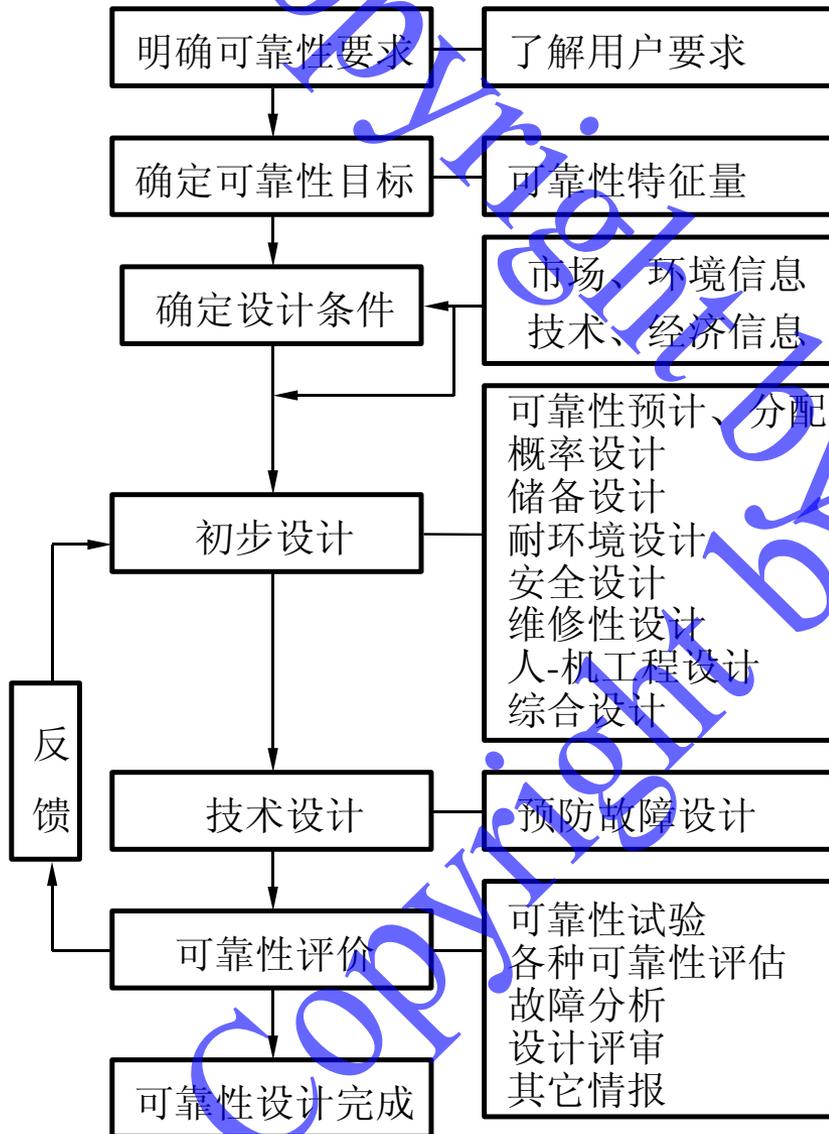
□ 建立可靠度模型

 主要研究测控仪器产品使用过程中零件材料的老化规律及其模型

□ 确定可靠性指标等级及其量值

□ 对可靠性指标进行合理或最优分配

Methods and Process



Prediction of Reliability

□ 可靠性预测

✍ 以所得到的失效率数据预报一个元件、部件或仪器系统实际可能达到的可靠度

□ 可靠性预测的目的

✍ 协调设计参数和指标，提高仪器产品的可靠性

✍ 对设计方案进行比较，选择最佳的系统结构

✍ 预示薄弱环节，提出改进措施

□ 可靠性预测的类型

✍ **Next slide...**

Prediction of Reliability

- 可靠性预测
- 可靠性预测的目的
- 可靠性预测的类型

✍ 元件的可靠性预测

实效率修正系数

应用失效率

$$\lambda = K_F \lambda_G$$

基本失效率

$$R(t) = e^{-\lambda t} = e^{-K_F \lambda_G t}$$

✍ 仪器系统的可靠性预测

✍ Next Slide...



Prediction of Reliability

□ 可靠性预测的类型

- ✍ 元件的可靠性预测
- ✍ 仪器系统的可靠性预测
 - ✍ 串联系统
 - ✍ 并联系统
 - ✍ 混联系统
 - ✍ 表决系统
 - ✍ 旁联系统
 - ✍ 复杂系统

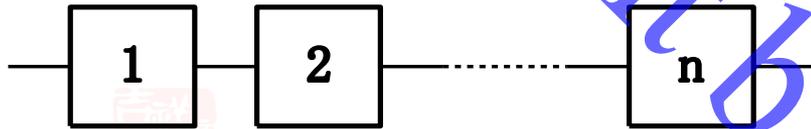


Copyright by D. H. Wang

Prediction of Reliability

□ 仪器系统的可靠性预测

✍ 串联系统



考虑补偿和相同单元数等因素

α —补偿因子, $\alpha = 0.1$

K—加速因子, $K=1$

m_i —相同单元数

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i$$
$$R_s = e^{-\sum_{i=1}^n \lambda_i t}$$

$$\bar{t}_s = \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}$$
$$\bar{t}_s = \frac{1}{(1+\alpha)K \sum_{i=1}^n m_i \lambda_i}$$



Prediction of Reliability

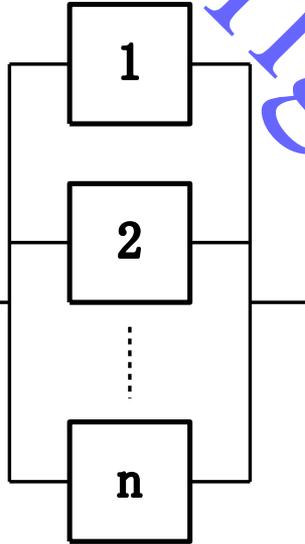
□ 仪器系统的可靠性预测

 串联系统

 并联系统

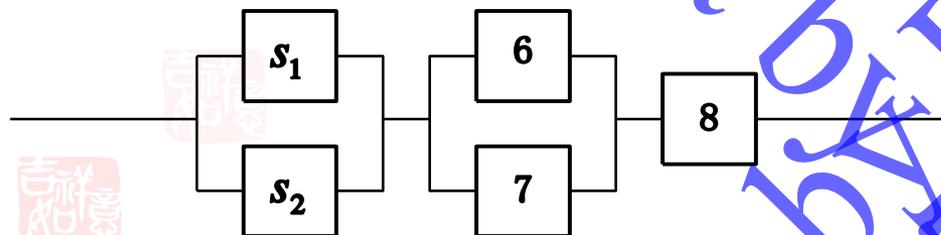
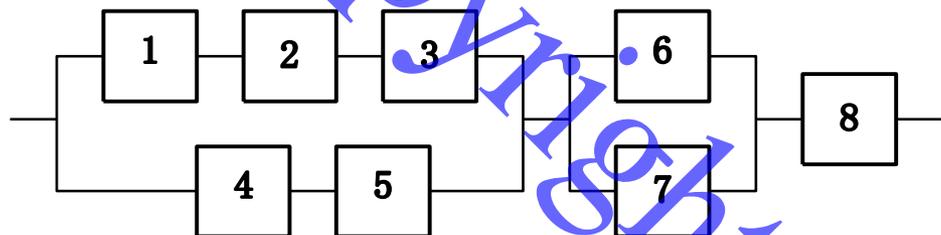
$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^n F_i = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i)$$

 混联系统



Prediction of Reliability

□ 仪器系统的可靠性预测



串联系统

并联系统

混联系统

$$R_{s1} = R_1 R_2 R_3$$

$$R_{s2} = R_4 R_5$$

$$R_{s3} = 1 - (1 - R_{s1})(1 - R_{s2})$$

$$R_{s4} = 1 - (1 - R_6)(1 - R_7)$$

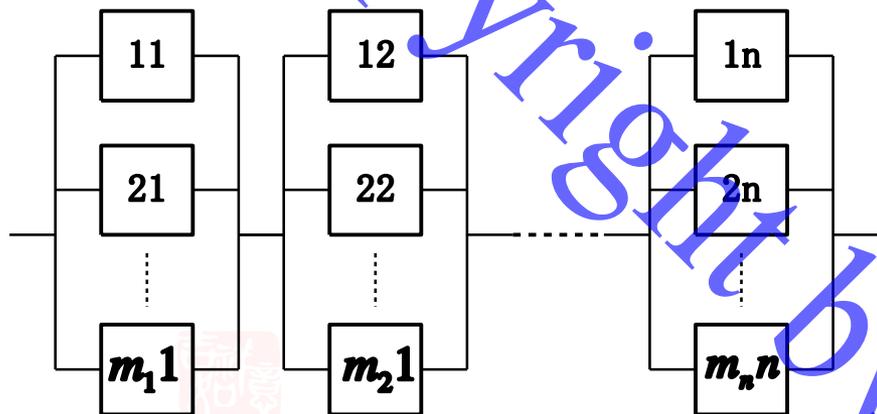
$$R_s = R_{s3} R_{s4} R_8$$



Prediction of Reliability

□ 仪器系统的可靠性预测

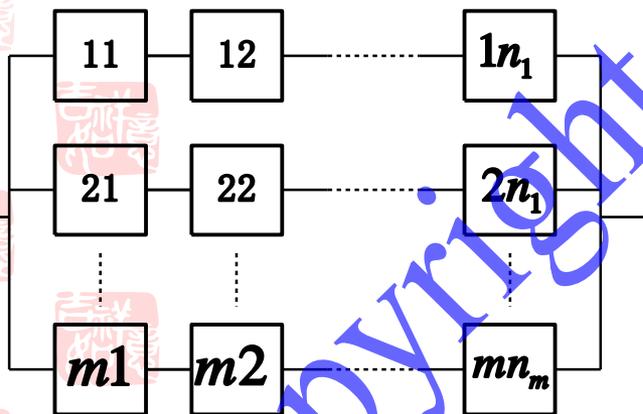
✍ 串并联系统



$$R_s = \prod_{j=1}^n \left[1 - \prod_{i=1}^{m_j} (1 - R_{ij}) \right]$$

$$R_s = [1 - (1 - R)^m]^n$$

✍ 并串联系统



$$R_s = 1 - \prod_{i=1}^m \left(1 - \prod_{j=1}^{n_j} R_{ij} \right)$$

$$R_s = 1 - (1 - R^n)^m$$

Assignment of Reliability

□ 可靠性分配

 将设计任务书上规定的系统可靠度指标合理地分配给系统（仪器）各组成单元（零部件、子系统）的一种设计方法

□ 可靠性分配的目的

 确定每一单元的合理的可靠度指标，它是单元设计的一个重要参数

□ 可靠性分配原则

 **Next Slide...**

Assignment of Reliability

□ 可靠性分配原则

- ✍ 对技术成熟的单元，能够保证实现较高的可靠性，或预期投入使用时可靠性可有把握地增长到较高水平，则可分配给较高的可靠度
- ✍ 对较简单的单元，组成该单元零部件数量少，组装容易保证质量或发生故障后易于修复，则可分配给较高的可靠度
- ✍ 对重要的单元，该单元失效将产生严重的后果，或该单元失效常会导致全系统失效，则应分配给较高的可靠度
- ✍ 对整个任务时间内均需连续工作以及工作条件严酷，难以保证很高可靠性的单元，则应分配给较低的可靠度

Assignment of Reliability

□ 串联系统的可靠度分配

✍ 根据资料查出单元的基本失效率 λ_G 和修正系数 K_F ，求出应用失效率

$$\lambda = K_F \lambda_G$$

✍ 估计单元在系统工作期间的实际工作时间 t_i ，计算出单元的预计可靠度和预计失效概率（预计不可靠度）

$$R_i' = e^{-\lambda_i t_i} \quad F_i' = 1 - R_i'$$

✍ 算出单元的相对失效概率

$$\omega_i = \frac{F_i'}{\sum F_i'}$$

...

Assignment of Reliability

□ 串聯系統的可靠度分配

✍ ...

✍ 根據系統要求的可靠度指標 R_s 計算系統容許的失效概率

$$F_s = 1 - R_s$$

✍ 求出單元的容許失效概率

$$F_i = \omega_i F_s = \frac{F_i'}{\sum F_i'} F_s$$

✍ 得到單元所分配到的可靠度值

$$R_i = 1 - F_i$$

Assignment of Reliability

□ 并联系统的可靠度分配

✍ 设分配到的容许失效概率为 F_A

$$F_A = F_1 F_2 F_3 \cdots F_n = \prod_{i=1}^n F_i$$

✍ 利用各并联单元已求得的预计失效概率，可以建立 $n-1$ 个相对关系式

$$F_2 = \frac{F_2'}{F_1'} F_1 \quad F_3 = \frac{F_3'}{F_1'} F_1 \quad \cdots \quad F_n = \frac{F_n'}{F_1'} F_1$$

✍ 解上述方程式可以求得各并联单元应分配到的容许失效概率 F_i 值



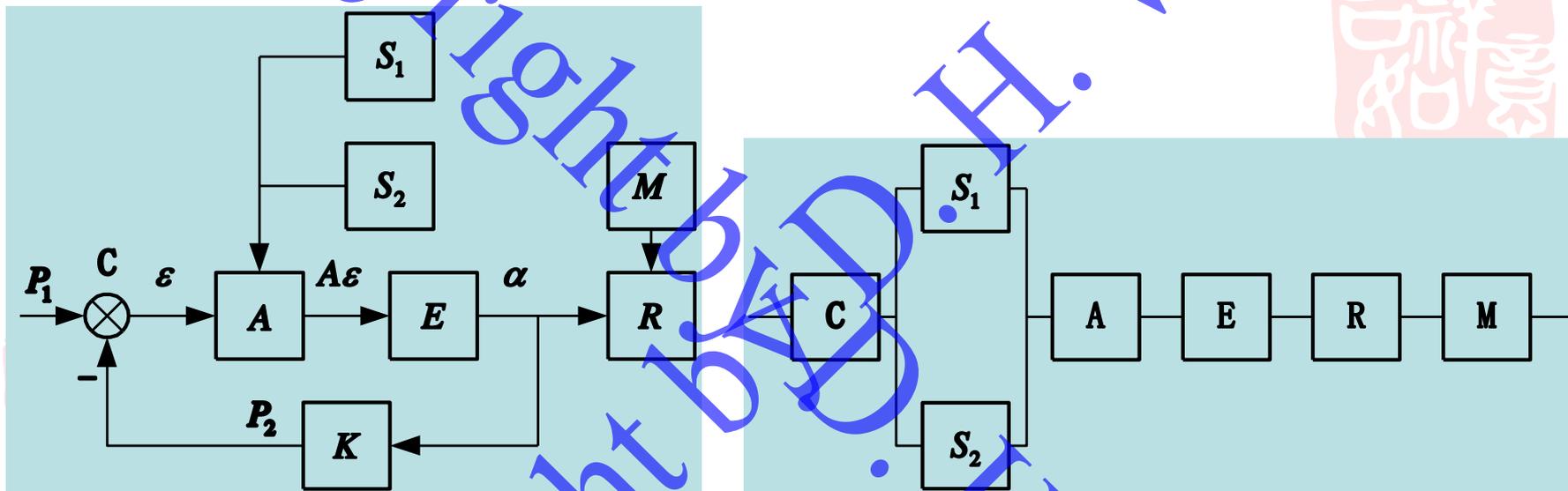
Assignment of Reliability

□ 混联系统的可靠度分配

- ✍ 对于串并联系统，则可以利用上述方法将系统的容许失效概率先分配给各个串（或并）联系统，然后确定并（或串）联分支中每个单元的容许失效概率

平衡电桥记录仪的可靠性分配方法

□ 平衡电桥记录仪的原理及可靠性模型



Copyright © D.H. Wang

Assignment of Reliability

□ 已知各单元的故障率： $\lambda_C=0.03/\text{kh}$ ， $\lambda_{S1}=\lambda_{S2}=0.31/\text{kh}$ ， $\lambda_A=0.42/\text{kh}$ ， $\lambda_E=0.069/\text{kh}$ ， $\lambda_M=0.093/\text{kh}$ ， $\lambda_R=0.30/\text{kh}$ 。

✍ 求出在**1kh**内各部件的预计可靠度和预计失效概率（预计不可靠度）

$$R'_i = e^{-\lambda_i t} \quad F'_i = 1 - R'_i$$

$$R'_C = 0.97 \quad R'_{S1} = 0.73 \quad R'_{S2} = 0.73 \quad R'_A = 0.65$$

$$R'_E = 0.94 \quad R'_M = 0.91 \quad R'_R = 0.74 \quad F'_C = 0.03$$

$$F'_{S1} = 0.27 \quad F'_{S2} = 0.27 \quad F'_A = 0.35 \quad F'_E = 0.06$$

$$F'_M = 0.09 \quad F'_R = 0.26$$

Assignment of Reliability

□ 求出并联单元的预计可靠度和预计失效概率

$$R'_s = 1 - (1 - R'_{s1})^2 = 1 - (1 - 0.73)^2 = 0.93$$

$$F'_s = 1 - R'_s = 0.07$$

□ 求出各单元的相对失效概率

$$\omega_i = F'_i / \sum F'_i$$

$$\omega_C = 0.03 / \sum F'_i = 0.03 / 0.86 = 0.035$$

$$\omega_s = 0.12 \quad \omega_A = 0.41 \quad \omega_M = 0.07 \quad \omega_{MS} = 0.11$$

$$\omega_R = 0.30$$



Assignment of Reliability

□ 已知容许的失效概率为0.1，求出各单元的容许失效概率

$$F'_s = 0.1 \quad F_i = \omega_i F'_s$$

$$F_C = 0.0035 \quad F_S = 0.012 \quad F_A = 0.041 \quad F_M = 0.007$$

$$F_{MS} = 0.011 \quad F_{MS} = 0.011 \quad F_R = 0.030$$

□ 求出各单元的可靠性指标

$$R_i = 1 - F_i$$

$$R_C = 0.9965 \quad R_S = 0.988 \quad R_A = 0.959 \quad R_M = 0.993$$

$$R_{MS} = 0.989 \quad R_R = 0.97$$

Summary

Copyright by D. H. Wang



Acknowledgement

*Thank you very much for
your attention!*



Copyright © D. H. Wang

