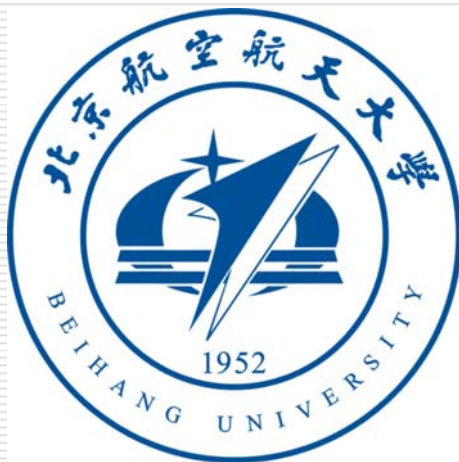


可靠性分配

Reliability Allocation



北京航空航天大学工程系统工程系



可靠性分配

□ 可靠性分配概念

- 系统可靠性分配就是将使用方提出的，在系统设计任务书(或合同)中规定的可靠性指标，从上而下，由大到小，以整体到局部，逐步分解，分配到各分系统，设备和元器件。

□ 可靠性分配目的、用途与分类

□ 可靠性分配与可靠性预计的关系

□ 可靠性分配程序

□ 可靠性分配的原理与准则

□ 可靠性分配方法

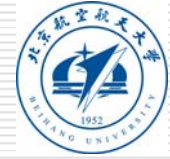
□ 可靠性分配的注意事项



可靠性分配目的、用途与分类

□ 可靠性分配目的与用途

- 可靠性分配的目的在于使各级设计人员明确其可靠性设计要求，根据要求估计所需的人力、时间和资源，并研究实现这个要求的可能性及办法。
- 如同性能指标一样，是设计人员在可靠性方面的一个设计目标。



可靠性分配目的、用途与分类

□ 可靠性分配的分类

■ 可靠性分配包括

□ 基本可靠性分配

□ 任务可靠性分配

■ 特点

□ 这两者有时是相互矛盾的，提高产品的任务可靠性，可能会降低基本可靠性，反之亦然。

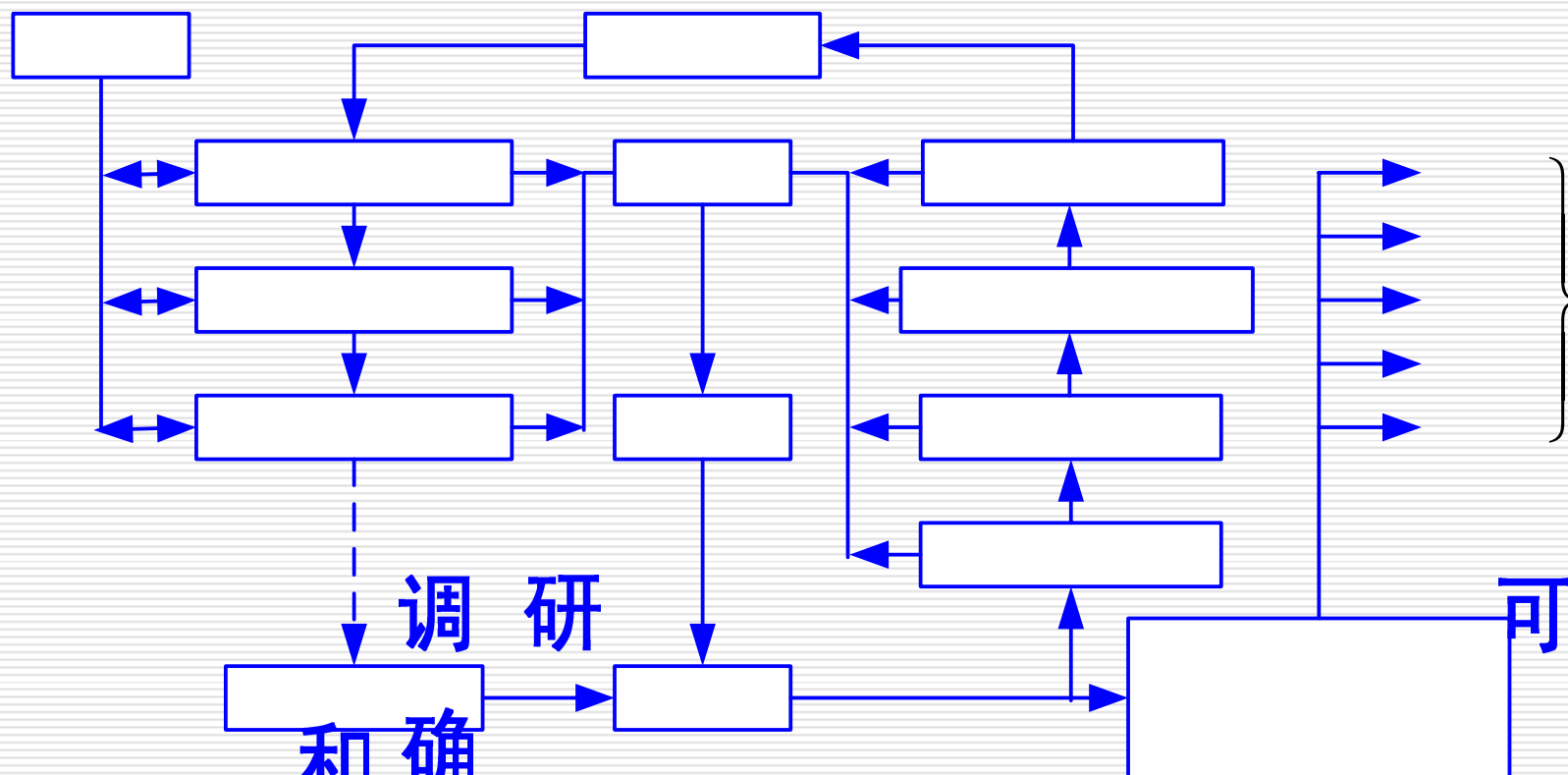
□ 在可靠性分配时，要两者之间的符合权衡，或采取其他不相互影响的措施。

[返回](#)



可靠性分配与可靠性预计的关系

可靠性分配结果是可靠性预计的依据和目标
可靠性预计相对结果是可靠性分配与指标调整的基础



调研
和确定
设计可靠

系统可靠性指标
Reliability Allocation

可靠性目标

返回
比较



可靠性分配程序

□ 可靠性分配程序

- 明确系统可靠性参数指标要求
- 分析系统特点
- 选取分配方法 (同一系统可选多种方法)
- 准备输入数据
- 进行可靠性分配
- 验算可靠性指标要求

[返回](#)



可靠性分配的原理

□ 可靠性分配的原理

- 系统可靠性分配是求解下面的基本不等式

$$R_S(R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n) \geq R_S^*$$

$$\vec{g}_S(R_1, R_2, \dots, R_i, \dots, R_n) < \vec{g}_S^*$$

- 对于简单串联系统而言，上式就转换为

$$R_1(t) \cdot R_2(t) \cdot \dots \cdot R_i(t) \cdot \dots \cdot R_n(t) \geq R_S^*(t)$$

- 如果对分配没有任何约束条件，则上两式可以有无数个解；有约束条件，也可能有多个解。因此，可靠性分配的关键在于要确定一个方法，通过它能得到合理的可靠性分配值的唯一解或有限数量解。



可靠性分配的准则

□ 分配准则

- 可靠性分配的要求值应是成熟期的规定值。
- 为了减少分配的反复次数，并考虑到分配中存在忽略不计的其他因素项目，因此可靠性分配时应该留出15%~20%的余量。
- 某些非电子组件故障率很低时，可以不直接参加可靠性分配，而归并在其他因素项目中一并考虑。
- 进行可靠性指标分配时，应保证基本可靠性指标分配值与任务可靠性指标分配值的协调，使系统的基本可靠性和任务可靠性指标同时得到满足。
- 可靠性分配应在研制阶段早期即开始进行。
- 根据不同研制阶段，选定分配方法进行分配。



可靠性分配的准则

□ 分配准则

- 对于复杂度高的分系统、设备等，应分配较低的可靠性指标，因为产品越复杂，其组成单元就越多，要达到高可靠性就越困难并且更为费钱。
- 对于技术上不成熟的产品，分配较低的可靠性指标。对于这种产品提出高可靠性要求会延长研制时间，增加研制费用。
- 对于处于恶劣环境条件下工作的产品，应分配较低的可靠性指标，因为恶劣的环境会增加产品的故障率。
- 当把可靠度作为分配参数时，对于需要长期工作的产品，分配较低的可靠性指标，因为产品的可靠性随着工作时间的增加而降低。



可靠性分配的准则

□ 分配准则

- 对于重要度高的产品，应分配较高的可靠性指标，因为重要度高的产品的故障会影响人身安全或任务的完成。
- 分配时还应结合维修性、保障性，如可达性差的产品，分配较高的可靠性指标，以实现较好的综合效能等。
- 对于已有可靠性指标的货架产品或使用成熟的成品，不再进行可靠性分配，同时，在进行可靠性分配时，要从总指标中剔除这些单元的可靠性值。

[返回](#)



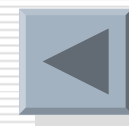
可靠性分配方法

□ 无约束分配法

- 等分配法
- 评分分配法
- 比例组合法
- 考虑重要度和复杂度的分配方法
- 冗余系统的比例组合法可靠性分配
- 可靠度的再分配法

□ 有约束分配法

- 拉格朗日乘数法
- 动态规划法
- 直接寻查法





等分配法

□ 等分配法的原理

- 串联系统中各单元的可靠性水平相同

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i = R^n$$

$$R_i^* = \sqrt[n]{R_S^*}$$

$$\lambda_i^* = \lambda_i^* / n$$



等分配法

□ 等分配法举例

- 某型抗荷服是由衣面、胶囊、接链三个部分串联组成。若要求该抗荷服的可靠度指标为0.9987，试用等分配法确定衣面、胶囊、接链的可靠度指标。

$$R_{\text{衣面}}^* = R_{\text{胶囊}}^* = R_{\text{接链}}^* = \sqrt[3]{R_S^*} = \sqrt[3]{0.9987} = 0.99957$$





评分分配法

□ 评分分配法含义

在可靠性数据非常缺乏的情况下，通过有经验的设计人员或专家对影响可靠性的几种因素评分，对评分进行综合分析而获得各单元产品之间的可靠性相对比值，根据评分情况给每个分系统或设备分配可靠性指标。



评分分配法

□ 评分因素

- 复杂度，技术水平，工作时间，环境条件

□ 评分原则

■ 复杂度

- 最复杂的评10分，最简单的评1分。

■ 技术水平（成熟程度）

- 水平最低的评10分，水平最高的评1分。

■ 工作时间

- 单元工作时间最长的评10分，最短的评1分。

■ 环境条件

- 单元工作过程中会经受极其恶劣而严酷的环境条件的评10分，环境条件最好的评1分。



评分分配法

□ 评分分配法原理

$$\omega_i = \prod_{j=1}^4 r_{ij}$$

$$\omega = \sum_i^n \omega_i$$

$$C_i = \omega_i / \omega$$

$$\lambda_i^* = C_i \cdot \lambda_s^*$$



评分分配法

□ 分配步骤

- 确定系统的基本可靠性指标，对系统进行分析，确定评分因素。
- 确定该系统中“货架”产品或已单独给定可靠性指标的产品。
- 聘请评分专家，专家人数不宜过少（至少5人）。
- 产品设计人员向评分专家介绍产品及其组成部分的构成、工作原理、功能流程、任务时间、工作环境条件、研制生产水平等情况；或专家通过查阅相关技术文件获得相关信息。



评分分配法

□ 分配步骤

- 评分。首先由专家按照评分原则给各单元打分，填写评分表格。再由负责可靠性分配的人员，将各专家对产品的各项评分总和，即每个单元的4个因素评分为各专家评分的平均值，填写表格。
- 按公式分配各单元可靠性指标。



评分分配法

□ 评分分配法举例

- 某飞机共由18个分系统组成，其中五个分系统是已使用过的成件并已知其MFHBF，见下表。规定飞机的可靠性指标MFHBF=2.9(飞行小时)。试用评分分配法对其余13个分系统进行分配。

分系统名称	已知的MFHBF
发动机	50
前缘襟槽	80
应急系统	500
飞控系统	142
弹射救生系统	280
总计	22. 166



评分分配法



□ 评分分配法举例

$$MFHBF^* = 1 / \left(\frac{1}{2.9} - \frac{1}{22.166} \right) = 3.337$$

分系统名称	复杂度	技术水平	工作时间	环境条件	各单元评分数	各单元评分系数	分配给各单元的MFHBF
结构	8	4	10	4	1280	0.1276	26.15
动力装置	8	1	10	8	640	0.0638	52.30
发动机接口	3	2	8	4	192	0.0191	174.71
燃油系统	5	2	10	8	800	0.0797	41.87
液压系统	5	2	8	7	560	0.0558	59.80
前轮结构	4	5	8	3	480	0.0478	69.81
...
航空电子	9	7	8	7	3528	0.3516	9.49
其他	2	5	5	5	250	0.0249	134.02
总计					10034	1.0	3.337



比例组合法

□ 比例组合法原理

- 一个新设计的系统与老的系统非常相似，也就是组成系统的各单元类型相同。
- 对这个新系统只是提出新的可靠性要求。
- 可以根据老系统中各单元的故障率，按新系统可靠性的要求，给新系统的各单元分配故障率。

$$\lambda_{i\text{新}}^* = \lambda_{S\text{新}}^* \cdot \frac{\lambda_{i\text{老}}}{\lambda_{S\text{老}}}$$

- 如果有老系统中各分系统故障数占系统故障数百分比的统计资料，可以按下式进行分配

$$\lambda_{i\text{新}}^* = \lambda_{S\text{新}}^* \cdot K_i$$



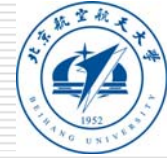
比例组合法

□ 比例组合法举例一

- 一个液压动力系统，原故障率为 $256.0 \times 10^{-6}/h$ ，改进设计要求故障率为 $200.0 \times 10^{-6}/h$ ，试把这指标分配给各分系统。

序号	分系统名称	原故障率($10^{-6}/h$)	新故障率($10^{-6}/h$)
1	油箱	3.0	2.3
2	拉紧装置	1.0	0.78
3	油泵	75.0	59.0
..
8	联轴节	1.0	0.78
9	导管	3.0	2.3
10	启动器	67.0	52.0
	总计(系统)	256.0	199.6

比例组合法



比例组合法举例二

- 要求设计一种飞机，在5h的飞行任务时间内可靠度为0.9。根据这种类型飞机各分系统故障百分比的统计资料，将指标分配给各分系统。

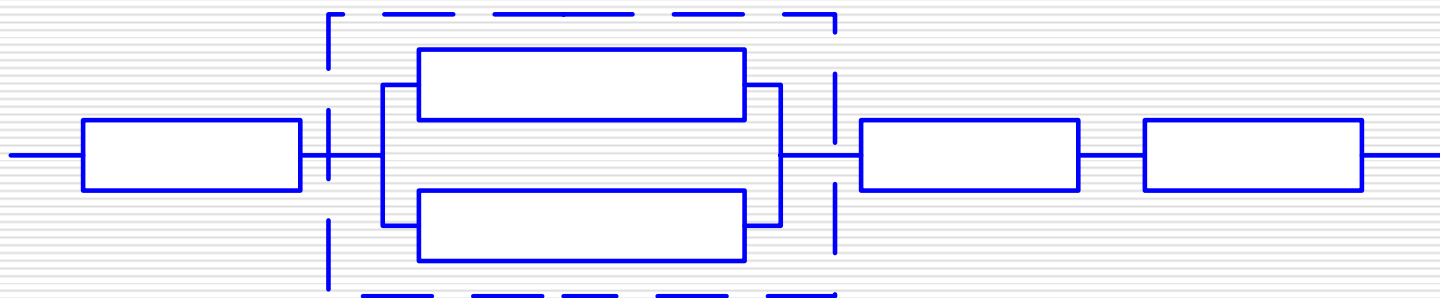
$$\lambda_{S_{\text{新}}}^* = \frac{-\ln R_S^*}{5} = \frac{-\ln 0.9}{5} = 0.021072$$

序号	分系统名称	按历史资料占飞机故障数的百分比	新飞机分系统分配的故障率 (1/h)	分配给分系统的可靠度指标
1	机身与货舱	12.0	0.002529	0.9874
2	起落架	7.0	0.001475	0.9927
3	操纵系统	5.0	0.001054	0.9947
4	动力装置	26.0	0.005479	0.9930
...
13	通讯、导航	5.0	0.001054	0.9947
14	其他各项	5.0	0.001054	0.9947
	总计	100.0	0.021072	≈0.90



考虑重要度和复杂度分配法

□ 重要度和复杂度概念示例说明



$$\omega_{21} = \frac{N_2}{r_{21}} = \frac{N_2}{F_{21} \cdot N_0} = \frac{F_2 \cdot N_0}{F_{21} \cdot N_0} = \frac{F_2}{F_{21}}$$

$$F_2 = \omega_{21} \cdot F_{21}$$

$$R_2 = 1 - \omega_{21} F_{21}$$

$$R_S = \prod_{i=1}^n R_i = \prod_{i=1}^n (1 - \omega_{i(j)} F_{i(j)})$$

$$= \prod_{i=1}^n [1 - \omega_{i(j)} (1 - R_{i(j)})]$$

$$= \prod_{i=1}^n [1 - \omega_{i(j)} (1 - e^{-t_{i(j)}/\theta_{i(j)}})]$$

机体

左发动机

右发动机



考虑重要度和复杂度分配法

□ 重要度关系分析

$$\begin{aligned} R_S &= \prod_{i=1}^n (1 - \omega_{i(j)} t_{i(j)} / \theta_{i(j)}) & R_i^* &= \sqrt[n]{R_S^*} \approx e^{-\omega_{i(j)} t_{i(j)} / \theta_{i(j)}} \\ &\approx \prod_{i=1}^n e^{-\omega_{i(j)} t_{i(j)} / \theta_{i(j)}} & \frac{1}{n} \ln R_S^* &= - \omega_{i(j)} t_{i(j)} / \theta_{i(j)} \\ &= e^{-\sum_{i=1}^n \omega_{i(j)} t_{i(j)} / \theta_{i(j)}} & \theta_{i(j)} &= \frac{n \cdot \omega_{i(j)} t_{i(j)}}{-\ln R_S^*} \end{aligned}$$



考虑重要度和复杂度分配法

□ 复杂度关系分析

$$C_i = n_i / N = n_i / \sum_{j=1}^n n_j$$

$$R_i^* = [(R_S^*)^{1/N}]^{n_i} = (R_S^*)^{n_i / N}$$



考虑重要度和复杂度分配法

□ 综合考虑重要度和复杂度分配

- 分配给第*i*个分系统(第*j*个设备)的可靠性指标与该分系统的重要度成正比, 与它的复杂度成反比。

$$R_i^* \approx e^{-\omega_{i(j)}t_{i(j)}/\theta_{i(j)}} = [(R_S^*)^{1/N}]^{n_i} = (R_S^*)^{n_i/N}$$

$$-\omega_{i(j)}t_{i(j)}/\theta_{i(j)} = \frac{n_i}{N} \ln R_S^*$$

$$\theta_{i(j)} = \frac{N \cdot \omega_{i(j)}t_{i(j)}}{n_i(-\ln R_S^*)}$$



考虑重要度和复杂度分配法

□ 考虑重要度和复杂度分配法举例

- 某机载电子设备要求工作12h的可靠度0.923，这台设备的各分系统(设备)的有关数据见下表，试对各分系统(设备)进行可靠度分配。

序号	分系统(设备)名称	分系统构成部件数	工作时间	重要度
1	发动机	102	12.0	1.0
2	接收机	91	12.0	1.0
3	起飞用自动装置	95	3.0	0.3
4	控制设备	242	12.0	1.0
5	电源	40	12.0	1.0
	共计	570		



考虑重要度和复杂度分配法

□ 考虑重要度和复杂度分配法举例

■ 计算结果

$$\theta_1 = \frac{-570 \times 1.0 \times 12}{102 \times \ln 0.923} = 837(\text{h})$$

$$R_1 = e^{-12/837} = 0.9858$$

$$\theta_2 = \frac{-570 \times 1.0 \times 12}{91 \times \ln 0.923} = 938(\text{h})$$

$$R_2 = e^{-12/938} = 0.9678$$

$$\theta_{31} = \frac{-570 \times 0.3 \times 3}{95 \times \ln 0.923} = 67(\text{h})$$

$$R_{31} = e^{-3/67} = 0.9562$$

$$\theta_4 = \frac{-570 \times 1.0 \times 12}{242 \times \ln 0.923} = 353(\text{h})$$

$$R_4 = e^{-12/353} = 0.9666$$

$$\theta_5 = \frac{-570 \times 1.0 \times 12}{40 \times \ln 0.923} = 2134(\text{h})$$

$$R_5 = e^{-12/2134} = 0.9944$$

$$R_S = \prod_{i=1}^5 (1 - \omega_{i(j)} (1 - R_{i(j)})) = 0.9232 > R_S^*$$





冗余系统的比例组合法可靠性分配

□ 方法说明

- 常规的比例组合法只适用于基本可靠性指标的分配，即只适用于串联模型。
- 对于简单的冗余系统来说，可采用的分配方法有：考虑重要度、复杂度的分配法；拉格朗日乘数法；动态规划法；直接寻查法等。
- 这些方法多是从数学优化的角度并考虑某些约束条件来研究系统的冗余问题，在工程上往往不是简易可行的，而且不能应用于含有冷贮备等多种模型的情况。
- 下面介绍如何把比例组合法应用于含有串、并、旁联等混和模型的方法。



冗余系统的比例组合法可靠性分配

□ 可靠性分配原理

- 新系统各组成单元故障率的分配值与老系统相似单元的故障率之比值相等

$$\frac{\lambda_i^*}{\lambda_i} = K$$

- 系统各组成单元的寿命服从指数分布

$$R_i(t) = e^{-K\lambda_i t}$$

$$f[e^{-K\lambda_1 t}, e^{-K\lambda_2 t}, \dots, e^{-K\lambda_n t}] = R_S^*(t) \Big|_{t=t_0}$$

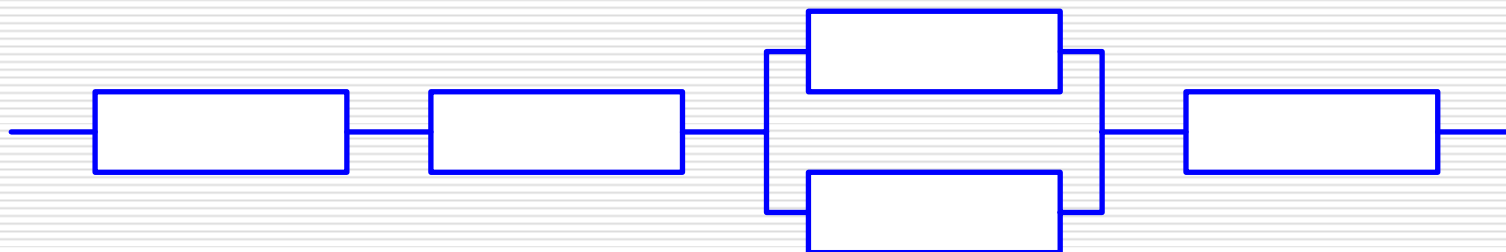
$$\lambda_i^* = K \cdot \lambda_i$$



冗余系统的比例组合法可靠性分配

□ 分配举例

- 某系统由A、B、C、D、E 5个单元组成，如下图所示，由相似系统可得各单元故障率如图中所示，若要求的系统可靠度为0.9(在任务时间内)，试将此指标分配给各单元。





冗余系统的比例组合法可靠性分配

□ 分配举例

■ 计算结果

$$\begin{aligned}R_S(t) &= f[R_A(t), R_B(t), \dots, R_E(t)] \\ &= e^{-\lambda_1 t} e^{-\lambda_2 t} [1 - (1 - e^{-\lambda_3 t})^2] e^{-\lambda_4 t}\end{aligned}$$

$$e^{-\lambda_1 Kt} e^{-\lambda_2 Kt} [1 - (1 - e^{-\lambda_3 Kt})^2] e^{-\lambda_4 Kt} = R_S^* = 0.9$$

$$Kt = 14.78$$

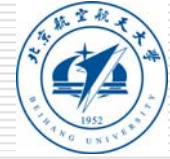
$$R_A^* = e^{-\lambda_1 Kt} = e^{-0.001 \times 14.78} = 0.9853$$

$$R_B^* = e^{-\lambda_2 Kt} = 0.9709$$

$$R_C^* = R_D^* = e^{-\lambda_3 t} = 0.9566$$

$$R_E^* = e^{-\lambda_4 Kt} = 0.9426$$





可靠性分配注意事项

- 可靠性分配应在研制阶段早期即开始进行
 - 使设计人员尽早明确其设计要求，研究实现这个要求的可能性。
 - 为外购件及外协件的可靠性指标提供初步依据。
 - 根据所分配的可靠性要求估算所需人力和资源等管理信息。



可靠性分配注意事项

- 可靠性分配应反复多次进行
 - 在方案论证和初步设计工作中，分配是较粗略的，经粗略分配后，应与经验数据进行比较、权衡。
 - 与不依赖于最初分配的可靠性预测结果相比较，确定分配的合理性，并根据需要重新进行分配。
 - 随着设计工作的不断深入，可靠性模型逐步细化，可靠性分配亦须随之反复进行。
 - 为了尽量减少可靠性分配的重要次数，在规定的可靠性指标的基础上，可考虑留出一定的余量。
- 这种做法为在设计过程中增加新的功能单元留下余地，因而可以避免为适应附加的设计而必须进行的反复分配。



各研制阶段可靠性分配方法的选择

选择依据

■ 要进行分配，首先必须明确设计目标、限制条件、系统下属各级定义的清晰程度及有关类似产品可靠性数据等信息。随着研制阶段的进展，产品定义越来越清晰，则可靠性分配也有所不同。

■ 方案论证阶段

等分配法

■ 初步设计阶段

评分分配法、比例组合法

■ 详细设计阶段

评分分配法、考虑重要度和复杂度分配法、可靠度再分配法



谢谢

