

一种可靠性新理论——确信可靠性

康 锐

可靠性与系统工程学院



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY

可靠性与系统工程学院



教学

80 本科生/年
150 硕士生/年
30 博士生/年
120 专任教师+100 工程师

科研

140万元/人年
自然科学基金
重大研发计划
企业合作



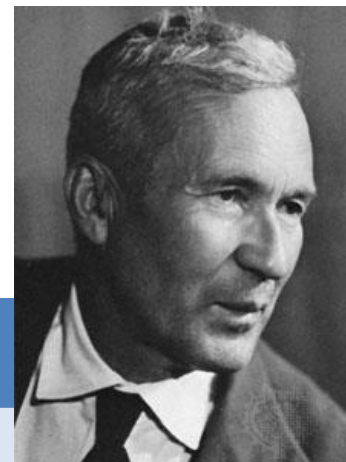
国家智库

装备通用质量特性技术与管理发展规划
国家863计划可靠性技术发展规划
中国制造2025可靠性系统工程发展战略

工程

国家授权的可靠性试验鉴定机构
(航空航天元器件/软件/设备)

可靠性科学的起源



概率论 (Kolmogorov, 1933)

Axiom1. 规范性公理: 对于全集 Ω , $\Pr\{\Omega\} = 1$.

Axiom2. 非负性公理: 对于任意一个事件 A , $\Pr\{A\} \geq 0$.

Axiom3. 可加性公理: 对于可数个互不相交的事件 $\{A_i\}$, 有

$$\Pr\left\{\bigcup_{k=1}^{\infty} A_k\right\} = \sum_{k=1}^{\infty} \Pr\{A_k\}.$$

乘积概率定理: 设 $(\Omega_k, \mathcal{A}_k, \Pr_k)$ 是一系列概率空间, A_k 是 \mathcal{A}_k 中的任意事件, $k = 1, 2, \dots$, 则乘积概率测度满足

$$\Pr\left\{\prod_{k=1}^{\infty} A_k\right\} = \prod_{k=1}^{\infty} \Pr_k\{A_k\}.$$

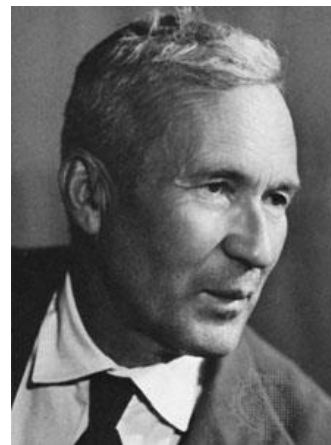
可靠性科学的起源



J. Bernoulli



P. Chebyshev



A. Kolmogorov

Bernoulli大数定律 (Bernoulli, 1713)

设 μ 为事件 A 在 n 次独立试验中的发生次数。若事件 A 在每次试验中发生的概率为 p , 那么对于任意正数 ε , 有:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \Pr \left\{ \left| \frac{\mu}{n} - p \right| < \varepsilon \right\} = 1.$$

可靠性科学的起源

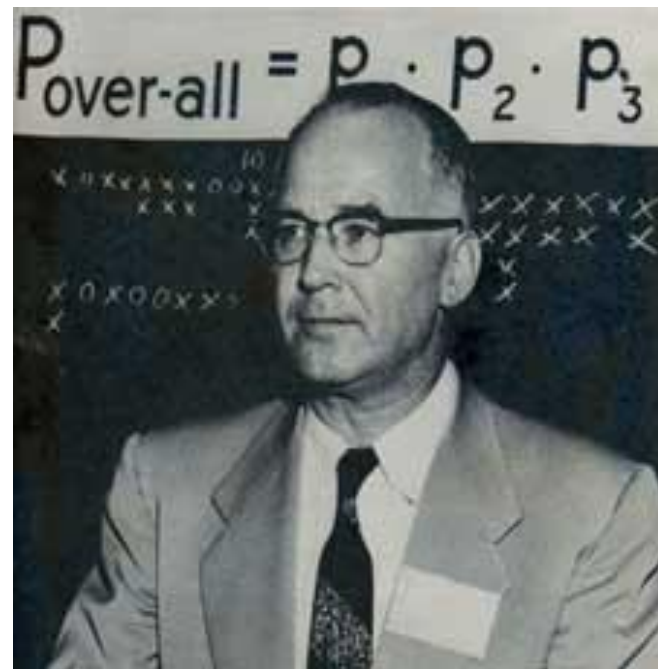
可靠性的概率测度

Robert Lusser在二战末期

- 统计计算火箭飞行失败概率
- 火箭飞行成功概率=1-失败概率
- 用概率乘积法则计算多枚火箭飞行成功的概率



- 系统和单元的可靠度是一个概率测度
- 统计计算单元的故障概率
- 单元的可靠度=1-故障概率
- 系统的可靠度是各单元可靠度的乘积（串联模型）



R. Lusser (1899-1969)
德国火箭专家

可靠性科学的起源

1957：美国国防部AGREE报告

1. 理论话语

- ① 正式定义了可靠度：系统在规定条件下、规定时间内完成规定功能的概率，给出了可靠度的数学表达，即 $R(t)=Pr(T>t)$ ， t 为规定的时间， T 表示产品的寿命；
- ② 建立了可靠性指标体系，如平均故障间隔时间（MTBF）、故障率、可靠寿命等；
- ③ 给出了可靠性指标分配（设计）和预计（分析）的方法；
- ④ 给出了可靠性鉴定试验和可靠性验收试验方法（统计试验方法）。

2. 实践话语

- ① 提出了可靠性设计措施（如减振、散热等），降低冲击、振动、温度等工作载荷与环境载荷对产品造成的应力；
- ② 提出了关键的元器件冗余设计要求；
- ③ 提出了采取切实措施保证所选用（采购）电子元器件可靠性水平的要求；
- ④ 提出了加强故障信息反馈，改进产品设计，实现可靠性增长的要求。



可靠性统计方法



故障数据的统计分析——产品组成零部件故障数百分比

子系统	零部件	故障百分比 %
电气设备	集成电路	77.5
	电线	12.5
	接头	10.0
	其他	63.8
脚蹼	挡泥板	21.8
	液压缸	14.4
	动力设备	65.5
液压系统	液压配管	20.2
	装配件	14.3
伸缩系统	限位开关	90.3
	缸	9.7

可靠性统计方法

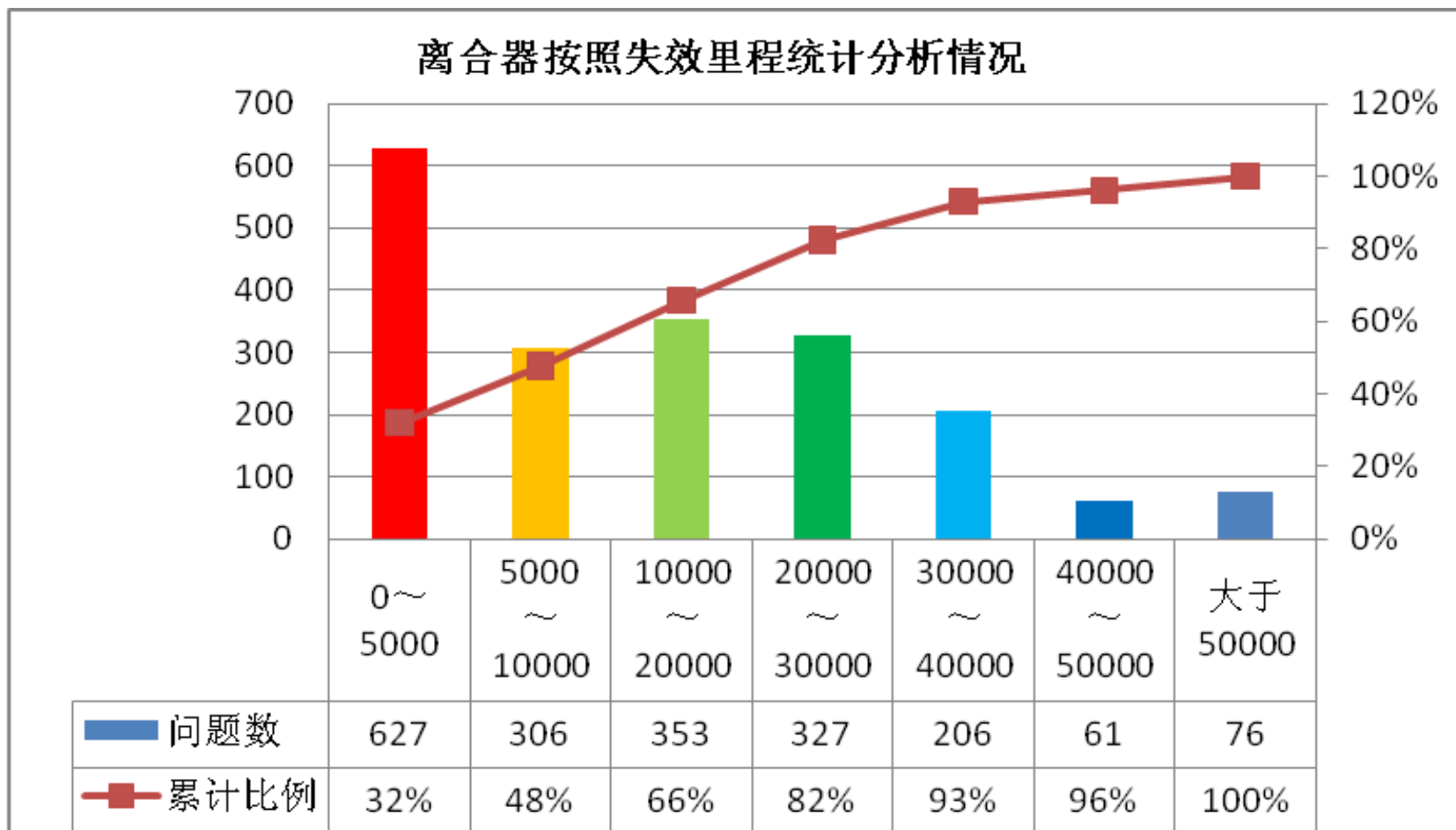
故障数据的统计分析——产品故障模式百分比

单片集成电路故障模式百分比

类型	故障模式	百分比 %
双极数字电路	逻辑输出失效	32
	性能退化	43
	断路	20
	短路	5
MOS数字电路	性能退化	60
	断路	25
	短路	15
双极与MOS模拟电路	模拟输出失效	15
	性能退化	50
	断路	25
	短路	10

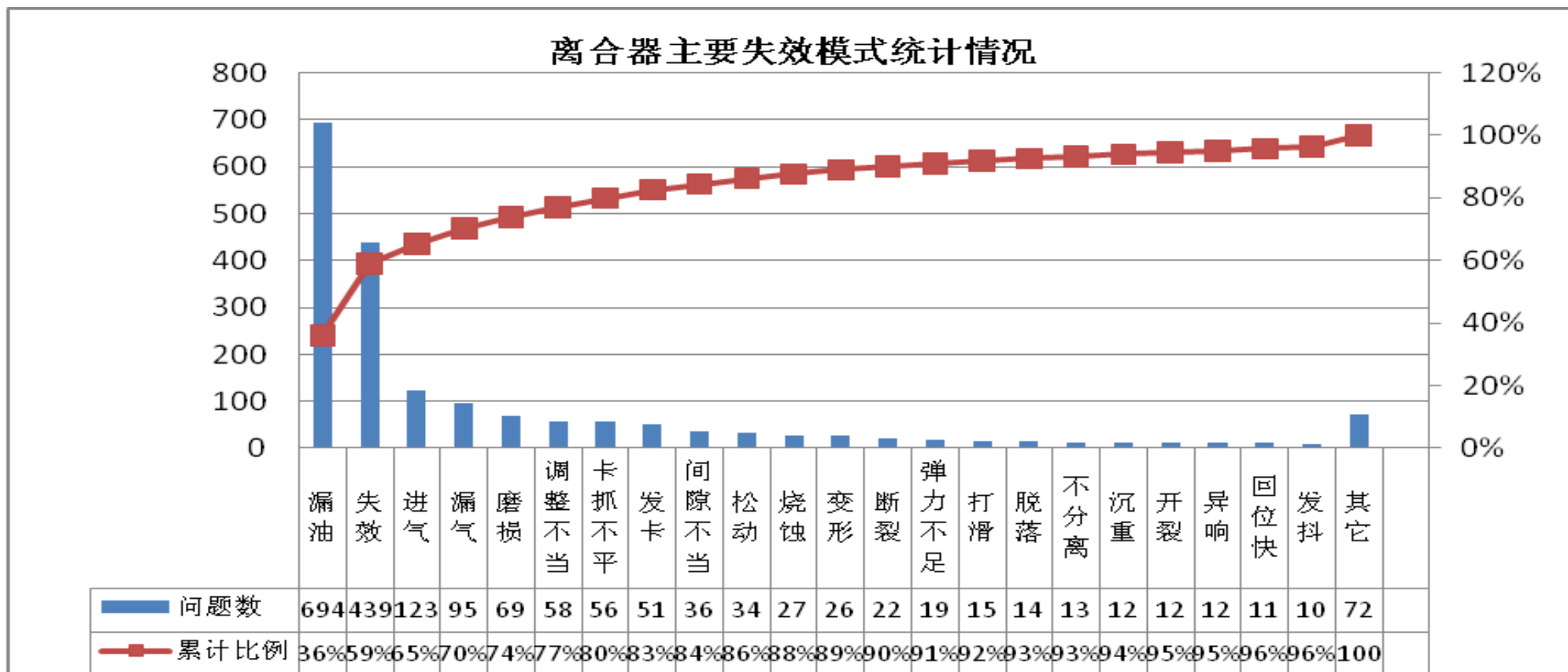
可靠性统计方法

故障数据的统计分析：故障数-使用时间、累积故障数百分比-使用时间



可靠性统计方法

故障数据的统计分析：故障模式数-累积百分比



可靠性统计方法

$$R(t) = \Pr\{T > t\},$$

故障率

平均故障间隔时间

可靠寿命

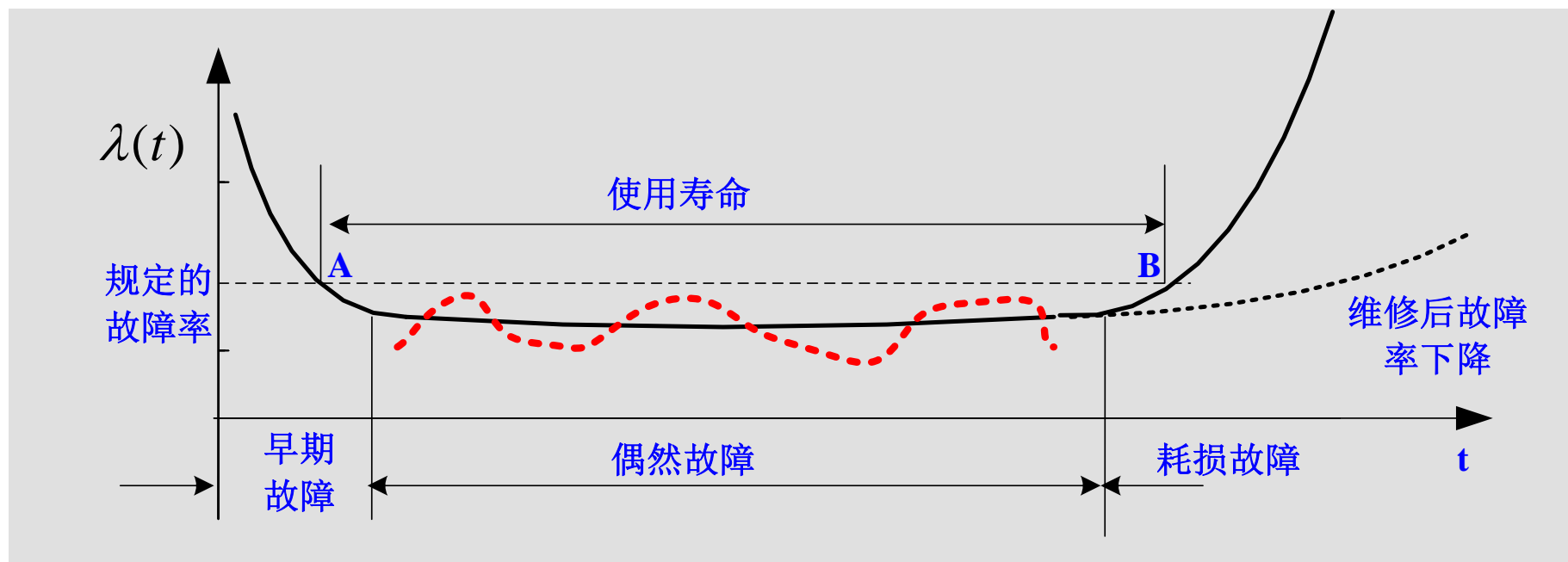
平均修复时间

故障检测率

故障隔离率

大修周期

可用度



可靠性统计方法

生产过程/设计过程的可靠性试验

环境应力筛选试验

可靠性验收试验

可靠性增长试验

可靠性鉴定试验

寿命试验

加速寿命试验

加速性能退化试验

可靠性鉴定试验：GJB899

- MTBF = 6000 (h)
- 总时间 4.3 MTBF

试验样本量	试验时间 (h)
1	25800
2	12900
3	8600

寿命试验：1325号文

- 试验时间：首翻期 1.5倍
- 样本数量：不少于2台（套）

可靠性统计方法

类别		工作失效率模型
单片双极与MOS数字电路、PLA和PAL电路		$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$
单片双极与MOS模拟电路		$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$
单片双极与MOS微处理器		$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$
存储器	SRAM、DRAM、ROM及CCD	$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$
	PROM	$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V \pi_{PT} + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$
	UVEPROM、EEPROM	$\lambda_p = \pi_Q [C_1 \pi_T \pi_V \pi_{CYC} + (C_2 + C_3) \pi_E] \pi_L$

λ_p 工作失效率, $10^{-6}/h$

π_E 环境系数

π_Q 质量系数

π_L 成熟系数

π_T 温度应力系数

π_V 电压应力系数

π_{PT} PROM电路的可编程序工艺系数

π_{CYC} EEPROM电路的读/写循环率系数

C_1 电路复杂度系数

C_2 电路复杂度系数

C_3 封装复杂度系数

可靠性统计方法

质量等级		质量要求说明	质量要求补充说明	π_Q
A	A ₁	符合GJB 597A列入质量认证合格产品报告提纲的S级产品	——	
	A ₂	符合GJB 597A列入质量认证合格产品报告提纲的B级产品	——	0.10
	A ₃	符合GJB 597A列入质量认证合格产品报告提纲的B ₁ 级产品	——	0.14
	A ₄	符合GJB 4589.1的III类产品，或经中国电子元器件质量认证委员会认证合格的II类产品	按QZJ 840614~840615“七专”技术条件组织生产的I、I _A 类产品；符合SJ 331的I、I _A 类产品	0.25
B	B ₁	按GJB 597A的筛选要求进行筛选的B ₂ 质量等级产品；符合GB 4589.1的II类产品	按“七九〇五”七专质量控制技术协议组织生产的产品；符合SJ 331的II类产品	0.50
	B ₂	符合GB 4589.1的I类产品	符合SJ 331的III类产品	1.0
C	C ₁	——	符合SJ 331的IV类产品	4.0
	C ₂	抵挡产品		14

可靠性统计方法

可靠性统计方法的特征

- 理论基础：概率论和大数定律
- 技术基础：统计学
- 实践基础：故障数据

可靠性统计方法的挑战

- 获取故障数据的时机较晚：等着产品出故障
- 如果故障数据的数量较少：不符合大数定律
- 评估结果指导可靠性改进：不满足实践需求

可靠性物理方法

1

栅氧化层介质击穿E模型

$$TF = C \cdot \exp\left(-\frac{A \cdot V_g}{t_c}\right) \cdot \exp\left(\frac{E_a}{T_g}\right)$$

寿命时间

设计参数

t_c

芯片氧化层厚度

V_g

氧化层门电压

材料参数

C

E模型击穿系数

A

E模型场加速因子

E_a

击穿活化能

载荷参数

T_g

芯片工作温度

2

Archard磨损寿命模型

$$N = \frac{h_s H A}{\mu W_a L_m}$$

磨损次数

阈值参数

h_s

最大允许磨损量

材料参数

H

材料硬度

μ

动摩擦系数

A

两磨损面的接触面积

载荷参数

W_a

接触面正压力

可靠性物理方法

性能退化模型一般形式

$$P = f(t, \mathbf{x}, \dots), P_{th}$$

P 性能参数向量 \mathbf{x} 输入参数向量
 t 时间 P_{th} 性能参数阈值

振动冲击应力模型（一阶冲击振动）

输入参数

$$Z_{allow} = \frac{0.00665B}{Ch\sqrt{L}}$$

与时间相关

$$Z_{max} = \frac{386G_{in}P_F}{f_n^{1.5}} \cdot R_{xy}$$

当 $Z_{max} > Z_{allow}$ 时，失效发生

Z_{allow}	理想最大位移
Z_{max}	实际最大位移

参数	参数含义	量纲
L	元器件长度	mm
C	封装相关参数	无
h	PCB的厚度或高度	mm
B	平行于元器件长边的PCB边缘长度	mm
f_n	固有频率	Hz
R_{xy}	元器件处电路板相对曲率	无

可靠性物理方法

振动冲击应力模型（一阶冲击振动）

$$Z_{allow} = \frac{0.00665B}{Ch\sqrt{L}}$$

$$Z_{max} = \frac{386G_{in}P_F}{f_n^{1.5}} \cdot R_{xy}$$

当 $Z_{max} > Z_{allow}$ 时，失效发生

参数	参数含义	量纲
输出参数		
Z_{allow}	理想最大位移	in
Z_{max}	实际最大位移	in
计算参数		
P_F	放大系数	无

不同脉冲类型的 P_F 取值

脉冲类型 T_p	$f_n \cdot T$	P_F
半正弦脉冲	小于 0.5	$P_F = \frac{4f_nT}{1-(2f_nT)^2 \cos(\pi f_nT)}$
	0.5-1.5	$P_F = \frac{2f_nT}{2f_nT-1} \sin\left(\frac{2\pi}{2f_nT+1}\right)$
	1.5-2.5	$P_F = \frac{2f_nT}{2f_nT-1} \sin\left(\frac{4\pi}{2f_nT+1}\right)$
	大于 2.5	$P_F = 1$
终端锯齿脉冲	小于 3	$P_F = \sqrt{1 + \frac{1 - \cos(2\pi f_nT)}{2(\pi f_nT)^2} - \frac{\sin(2\pi f_nT)}{\pi f_nT}}$
	大于等于 3	$P_F = 1$
一步斜坡脉冲	小于 5	$P_F = 2 \sin(\pi f_nT)$
	大于等于 5	$P_F = 2$

P_F 与时间 T 有关

可靠性物理方法

可靠性物理方法的特征

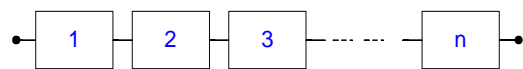
- 确定性模型可以依据因果律直接给出产品故障的根本原因
- 确定性模型参数随机化可以仿真得到产品的可靠性指标
- 克服了可靠性统计方法缺点（时机晚、数据少、改进难）

可靠性物理方法的挑战

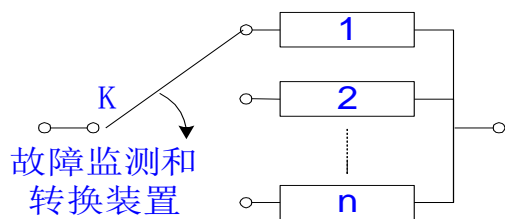
- 确定性模型的正确性
- 模型参数随机化的正确性

可靠性逻辑方法

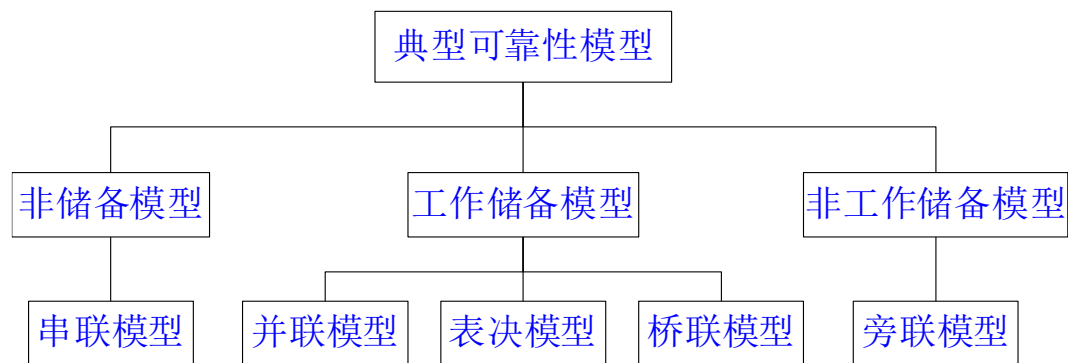
功能逻辑方法——可靠性框图



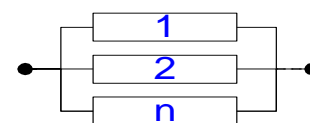
串联系统可靠性框图



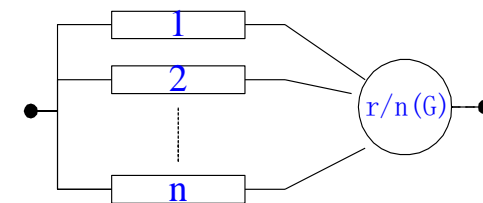
非工作贮备系统可靠性框图



可靠性模型分类

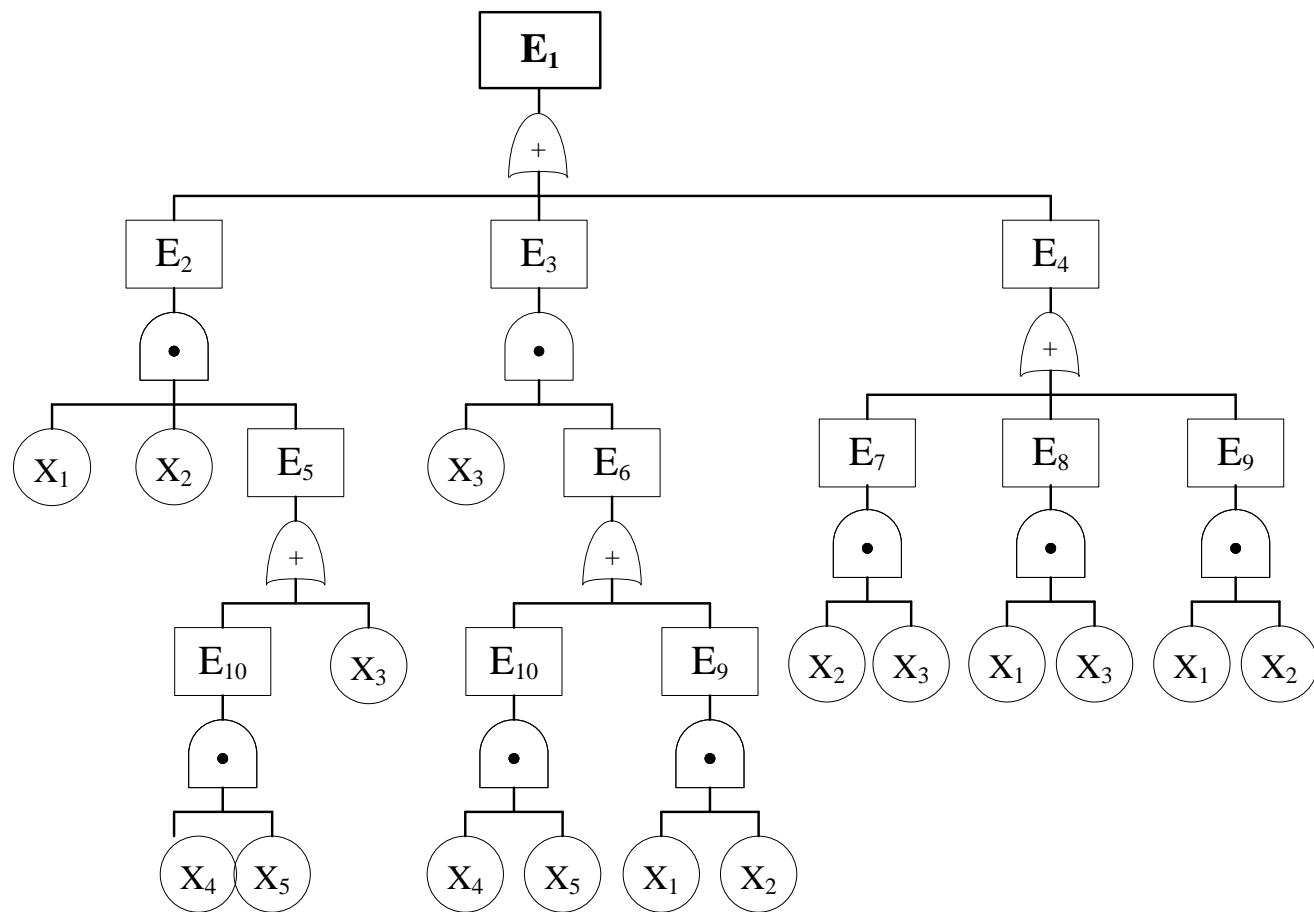


并联系统可靠性框图



$r/n(G)$ 系统可靠性框图

可靠性逻辑方法



中间事件：

- E_1 ——系统故障（电网失效）；
- E_2 ——站B输入线路上无电；
- E_3 ——站C输入线路上无电；
- E_4 ——站B或站C的负荷仅由同一条输出线承担；
- E_5 ——来自站C的输电线路无电；
- E_6 ——来自站B的输电线路无电；
- E_7 ——输电线2、3同时故障；
- E_8 ——输电线1、3同时故障；
- E_9 ——输电线1、2同时故障；
- E_{10} ——输电线4、5同时故障。

底事件为：

- X_1 ——线路1故障断电；
- X_2 ——线路2故障断电；
- X_3 ——线路3故障断电；
- X_4 ——线路4故障断电；
- X_5 ——线路5故障断电。

故障逻辑方法——故障树分析

可靠性逻辑方法

可靠性逻辑方法的特征

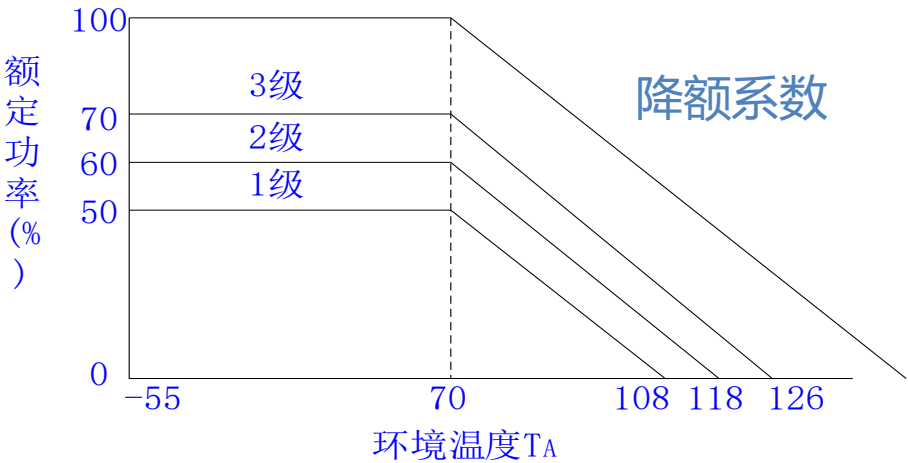
- 回答从单元成功到系统成功或从单元故障到系统故障的逻辑关系
- 按照分析得到的逻辑关系从单元的成功/故障概率计算系统的成功/故障概率

可靠性逻辑方法的挑战

- 单元之间的独立假设
- 系统成功/故障的逻辑关系模型的正确性
- 系统成功/故障概率迅速衰减

可靠性设计方法

电子产品降额设计

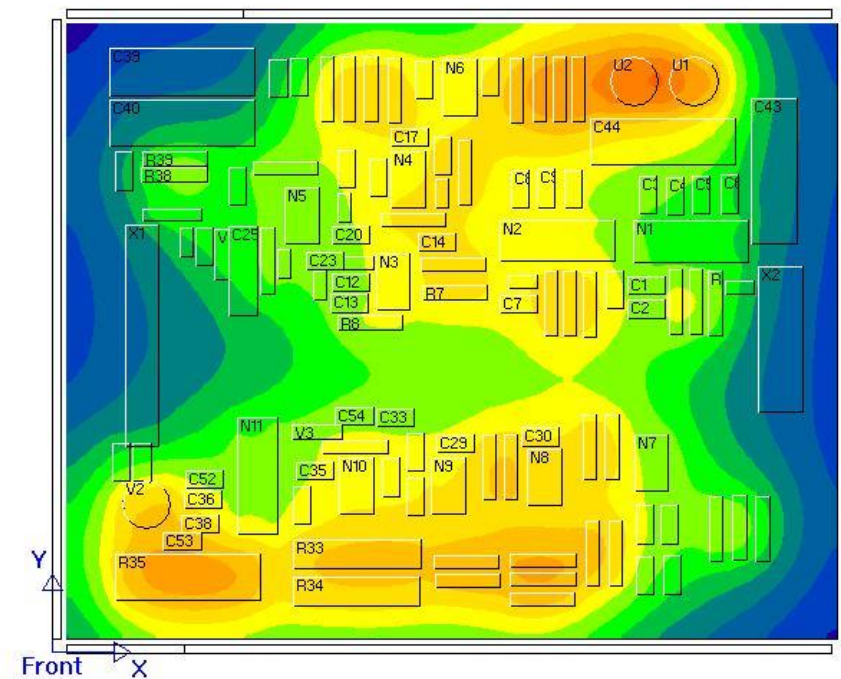
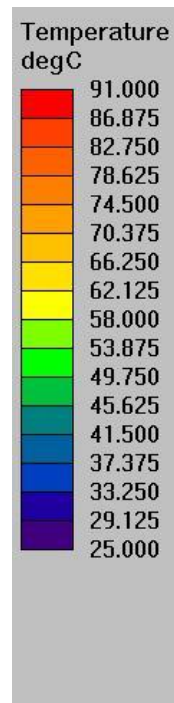


降额参数	降额等级		
	I 级	II 级	III 级
电源电压容限	±3%	±5%	
频 率	0.80	0.90	0.95
输出电压	0.80	0.90	0.95
最高结温	85	100	115

可靠性设计方法

电子产品的防护设计

- 热设计
- 电磁兼容设计
- 减振设计
- 抗辐射设计
-



可靠性设计方法

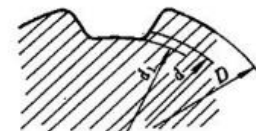
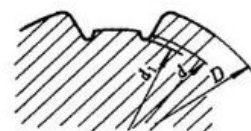
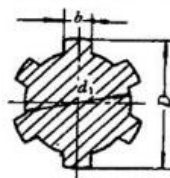
机械产品的安全系数设计

$$\text{安全系数} = \frac{\text{极限应力}}{\text{许用应力}} \geq 1$$

D /mm	b × h /mm × mm	单 键			双 键		
		W /cm ³	W _p /cm ³	A /cm ²	W /cm ³	W _p /cm ³	A /cm ²
180	45 × 25	521	1094	248	470	1042	241
190		619	1293	277	565	1238	270
200		728	1513	307	670	1455	301

注：表中键槽尺寸适用于 GB1095 平键。

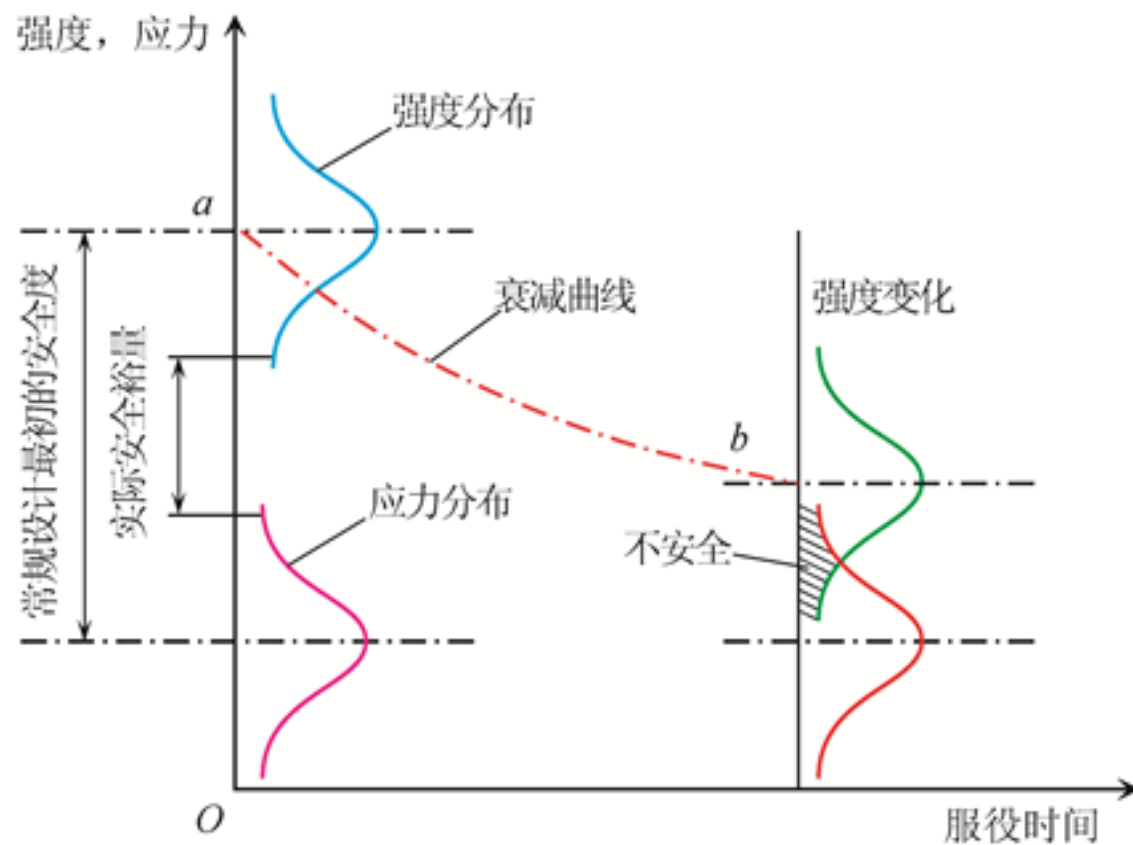
表 12.3-21 矩形花键轴的截面系数及截面积 ($W_p = 2W$)



公 称 尺 寸 $\tau_h - D \times d \times b$ /mm × mm × mm	按 D 定 心		按 d 定 心	
	W /cm ³	A /cm ²	W /cm ³	A /cm ²
轻 系 列				
4—15 × 12 × 4	0.187	1.28	0.208	1.37
4—18 × 15 × 5	0.358	1.96	0.389	2.06
4—20 × 17 × 6	0.529	2.53	0.564	2.63
4—22 × 19 × 8	0.773	3.22	0.810	3.31
6—26 × 22 × 6	1.28	4.52	1.36	4.69
6—30 × 26 × 6	1.79	5.70	1.96	6.03

可靠性设计方法

机械产品的应力=强度设计



可靠性设计方法

可靠性设计方法的特征

- 性能是产品功能的内在基础，功能是产品性能的实践外化
- 产品功能反映了人对产品的需求，可以通过某个或某些特定的性能参数进行刻画
- 产品是否能够完成规定功能又取决于人为功能留出多少性能裕量
- 环境试验、可靠性强化试验是对性能裕量的验证

可靠性设计方法面临的挑战

- 性能裕量反映了人们在特定领域的知识和经验的积累，存在着相当大的不确定性
- 在应力-强度设计中假设的应力和强度概率分布，往往缺乏可信的基础，引发不确定性
- 环境试验、可靠性强化试验对性能裕量的验证结果无法支撑可靠性量化

可靠性科学方法的理论挑战

不确定性的分类：固有不确定性、认知不确定性



固有不确定性

现实世界固有存在的、无法被消除的随机性特征，也被称为随机不确定性。



认知不确定性

由于人的知识不完备导致的非确定性。通过各种科学实践，能够提高对客观世界的认知，降低不确定性。

可靠性科学方法的理论挑战



可靠性统计方法

大量数据：固有不确定性：概率测度

少量数据：认知不确定性：？测度



可靠性物理方法

模型自身：认知不确定性：？测度

模型参数：固有不确定性：概率测度；认知不确定性：？测度



可靠性逻辑方法

逻辑模型：认知不确定性：？测度

模型算法：概率测度快速衰减



可靠性设计方法

裕量类型：认知不确定性：？测度

模型算法：概率分布假设：？

应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量



非精确概率可靠性度量

贝叶斯理论	—	贝叶斯可靠度
证据理论	—	证据可靠度
区间分析理论	—	区间可靠度



能双可靠性度量

可能性理论	—	能双可靠度
-------	---	-------

应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量



非精确概率可靠性度量

贝叶斯理论	—	贝叶斯可靠度
证据理论	—	证据可靠度
区间分析理论	—	区间可靠度



能双可靠性度量

可能性理论	—	能双可靠度
-------	---	-------

应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

非精确概率度量：贝叶斯可靠度

■ 理论基础——贝叶斯定理

Diagram illustrating Bayes' Theorem components:

- 似然函数 (Likelihood function) points to $f(y|\theta)$
- 先验分布函数 (主观信息) (Prior distribution function (subjective information)) points to $p(\theta)$
- 后验分布函数 (Posterior distribution function) points to $p(\theta|y)$
- 样本密度函数 (Sample density function) points to $m(y)$

$$p(\theta|y) = \frac{f(y|\theta)p(\theta)}{m(y)}$$

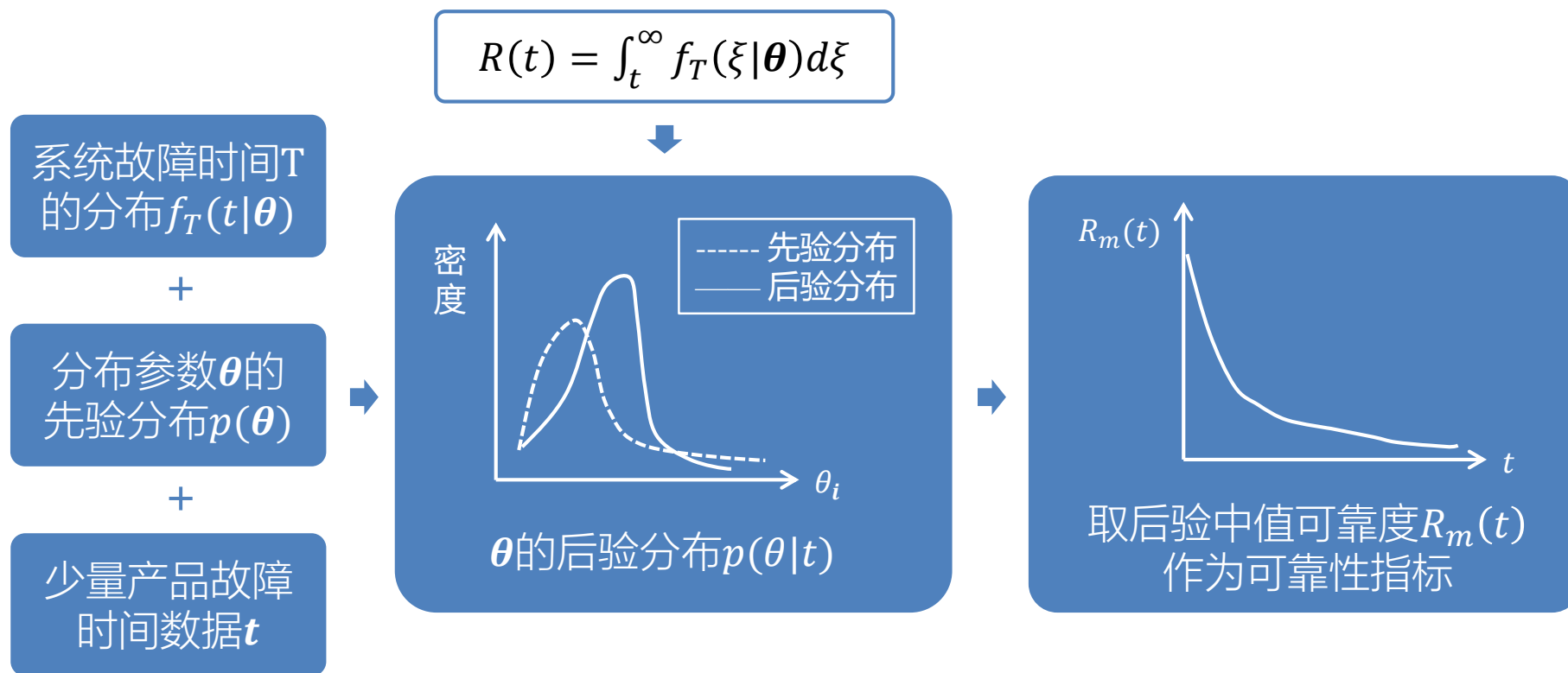
■ 考虑认知不确定性的方式

通过选择不同形式的先验分布，体现对单元或系统故障规律的认知。

应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

非精确概率度量：贝叶斯可靠度

■ 获取可靠性指标的方法



应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

非精确概率度量：证据可靠度

■ 理论基础——证据理论

- A.Dempster和G.Shafer共同提出，由Shafer完善
- 利用证据计算Belief(信度)和 Plausibility(似然度)→概率区间

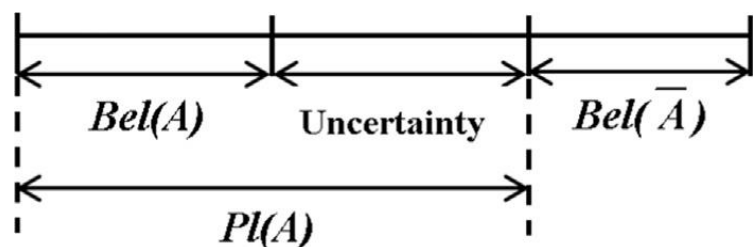


Fig. 信度和似然度的图示

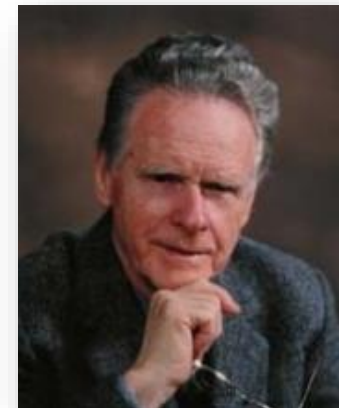
Bel : 证据支持 A 发生的程度

Pl : 证据不支持 \bar{A} 发生的程度

$$Bel(A) \leq P(A) \leq Pl(A)$$

■ 考虑认知不确定性的方式

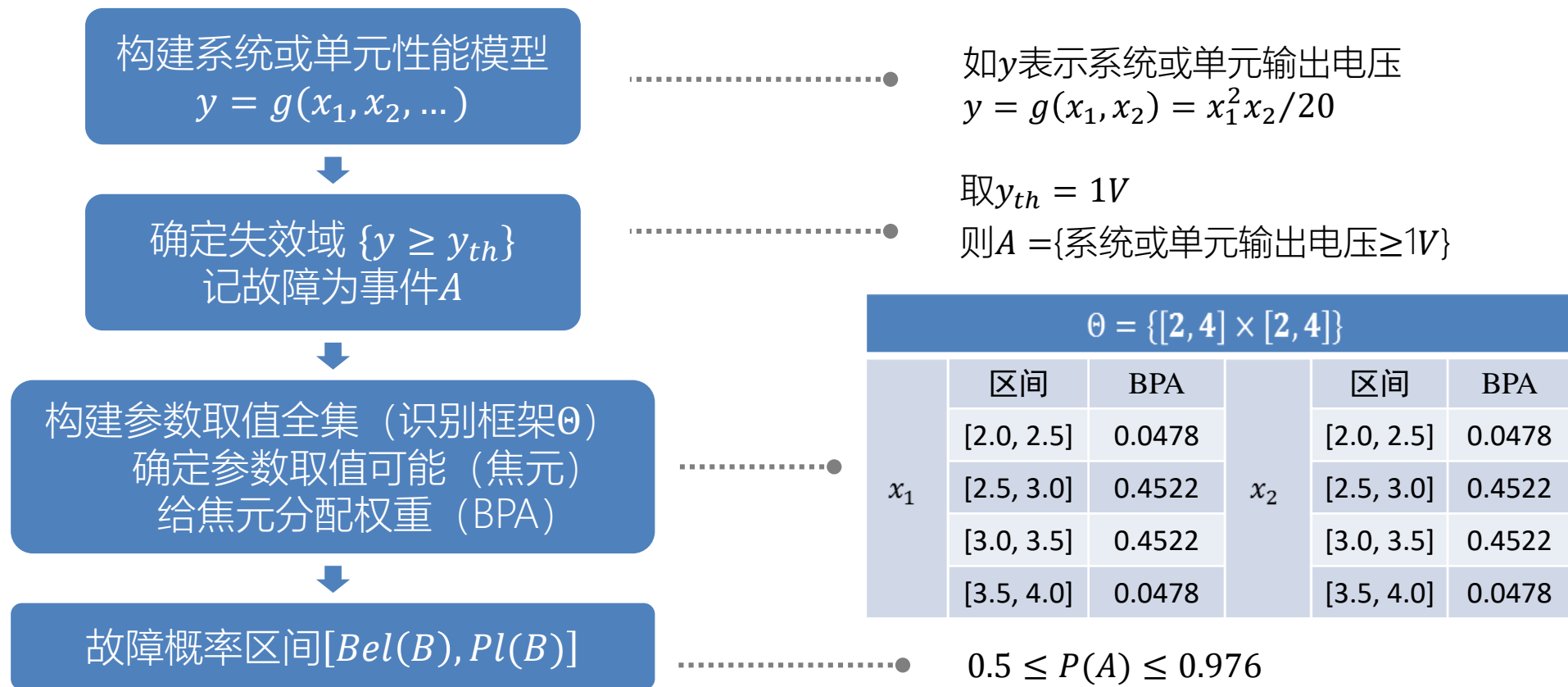
专家根据经验或相似产品信息给模型参数的不同取值可能设置基本概率分配(BPA, Basic probability assignment), 反映对相应取值的信任程度。



应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

非精确概率度量：证据可靠度

■ 获取可靠性指标的方法

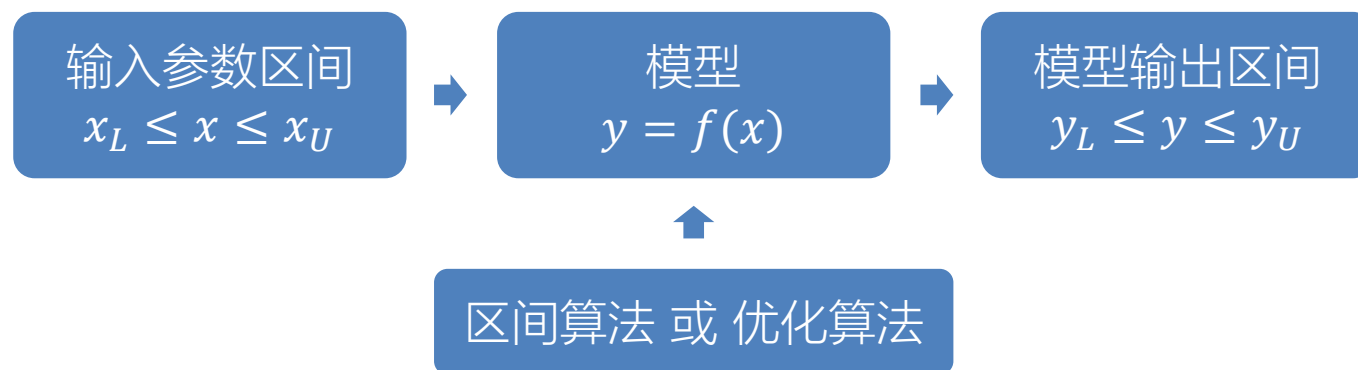


应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

非精确概率度量：区间可靠度

■ 理论基础——区间分析

- Ramon E. Moore提出
- 利用区间分析算法，根据输入参数区间得到模型输出区间



■ 考虑认知不确定性的方式

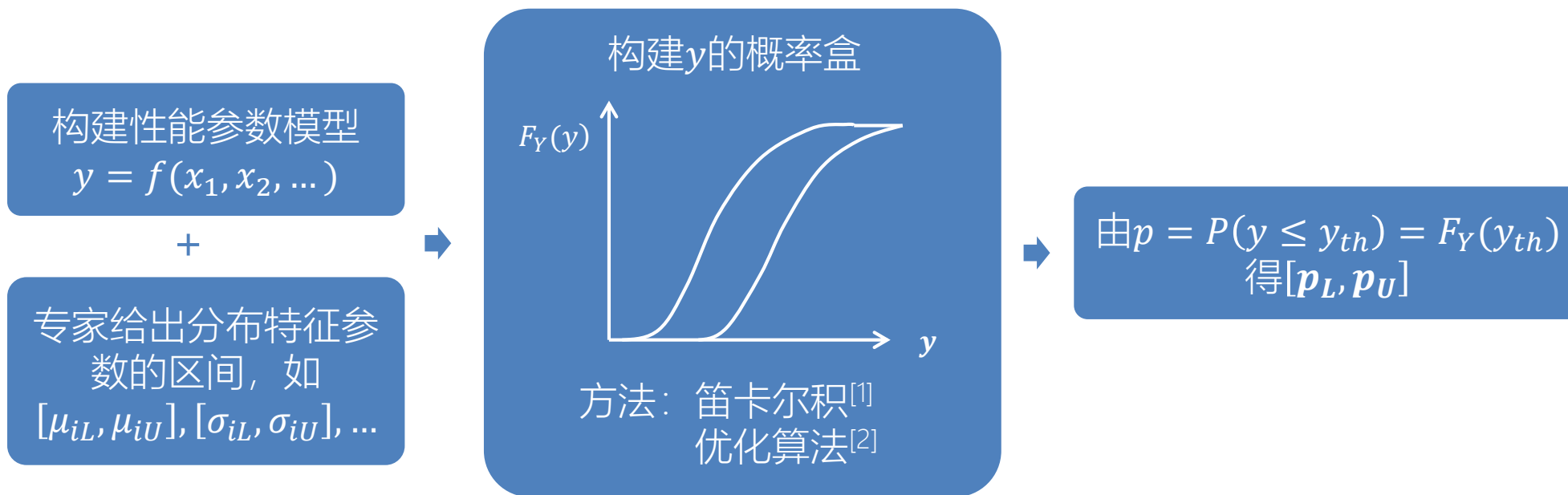
专家根据经验或相似产品信息给出模型参数的取值上下界，参数可以在给定区间内取得任何值，**区间的宽度体现了认知不确定性的大小。**



应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

非精确概率度量：区间可靠度

■ 获取可靠性指标的方法



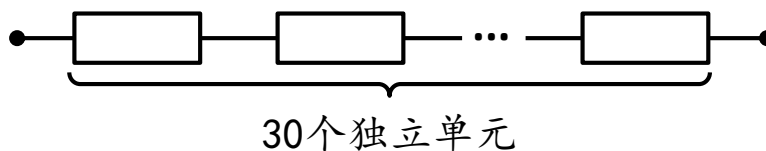
应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

非精确概率度量存在的问题

■ 区间扩张问题

例（系统级指标过保守问题）

考虑下图所示的由30个独立单元构成的串联系统，由于认知不确定性的影响，每个单元的可靠性均用可靠度区间 $[0.9, 1]$ 描述。易计算整个系统的可靠度区间为 $[0.9^{30}, 1^{30}] = [0.04, 1]$ ，这个区间范围显然太宽了。



■ 宏观与微观脱节问题

- 不能给出可靠性度量与产品设计参数的定量关系，对产品可靠性改进的指导有限。

应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量



非精确概率可靠性度量

贝叶斯理论	—	贝叶斯可靠度
证据理论	—	证据可靠度
区间分析理论	—	区间可靠度



能双可靠性度量

可能性理论	—	能双可靠度
-------	---	-------

应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

能双可靠性度量

■ 理论基础——可能性理论

可能性理论 (Zadeh, 1978)

可能性理论定义了可能性测度 Π ，并满足以下三条公理：

Axiom1. 对于空集 \emptyset ， $\Pi(\emptyset) = 0$ ；

Axiom2. 对于全集 Γ ， $\Pi(\Gamma) = 1$ ；

Axiom3. 对于全集 Γ 中的任意集合 Λ_1 和 Λ_2 ，
$$\Pi(\Lambda_1 \cup \Lambda_2) = \max(\Pi(\Lambda_1), \Pi(\Lambda_2))$$

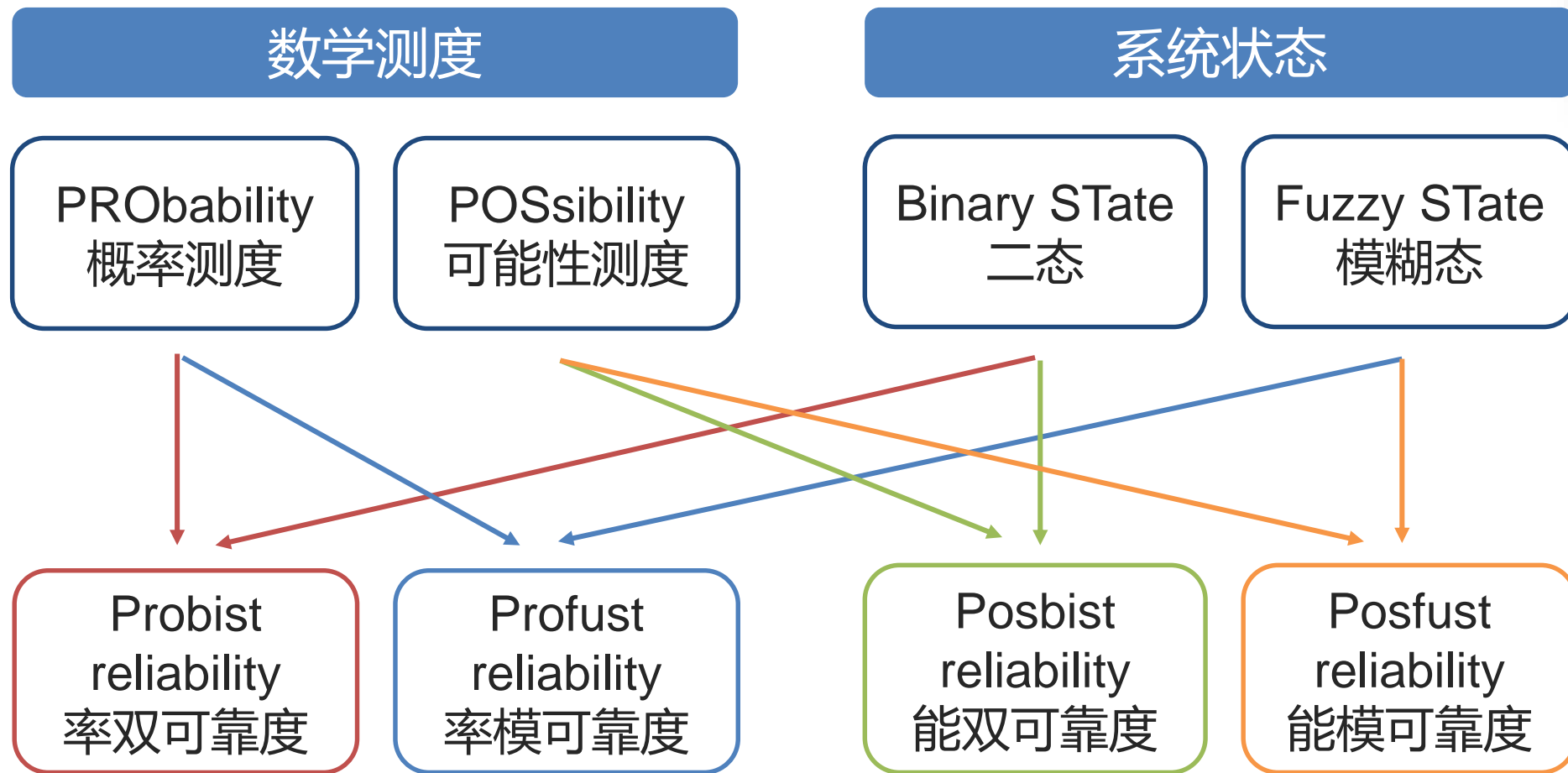
■ 考虑认知不确定性的方式

产品故障时间为模糊变量，用故障时间的可能性分布刻画认知不确定性的大小。



应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

能双可靠性度量



应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

能双可靠性度量

■ 基本假设

- 可能性假设 (Possibility assumption)
系统的故障行为可以完全在可能性测度下刻画；
- 二态假设 (Binary-State assumption)
系统只有两种状态：正常与故障。

■ 定义

能双可靠度定义 (Cai, 1991)

设系统故障时间 T 为一个模糊变量，则 t 时刻系统的能双可靠度定义为系统故障时间 T 大于等于 t 的可能性测度，即：

$$R(t) = \Pi(T \geq t)$$

应对挑战：考虑认知不确定性的可靠性度量

能双可靠性度量存在的问题

■ 非对偶性/非规范性问题

例（不满足对偶性）

考虑两个互不相容的事件： $\Lambda_1 = \{\text{系统工作正常}\}$ ， $\Lambda_2 = \{\text{系统故障}\}$ 。显然，全集 $\Gamma = \{\Lambda_1, \Lambda_2\}$ 。此时，可以计算能双可靠度和能双不可靠度分别为 $R_{pos} = \Pi(\Lambda_1)$ ， $\overline{R_{pos}} = \Pi(\Lambda_2)$ 。

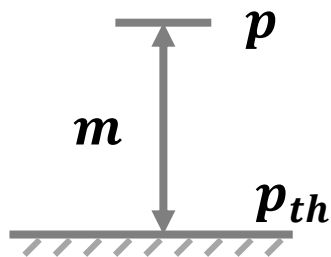
根据可能性理论的公理2和公理3，有：

$$\Pi(\Gamma) = \Pi(\Lambda_1 \cup \Lambda_2) = \max(\Pi(\Lambda_1), \Pi(\Lambda_2)) = \max(R_{pos}, \overline{R_{pos}}) = 1$$

因此，若 $R_{pos} = 0.8$ ，则 $\overline{R_{pos}}$ 必等于1；反之，若 $\overline{R_{pos}} = 0.8$ ，则 R_{pos} 必为1。这个结果与直观认知是不相符的。

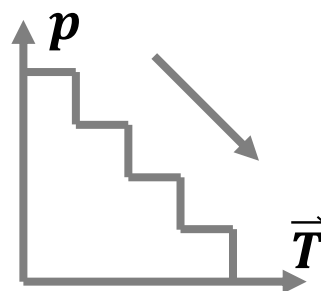
可靠性科学原理

可靠性科学的三个原理



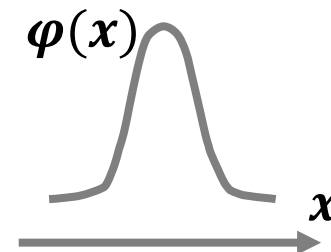
裕量可靠原理

客体的性能裕量决定着客体的可靠程度



退化永恒原理

客体的性能沿着退化时矢进行不可逆退化



不确定原理

客体的退化过程和性能裕量是不确定的

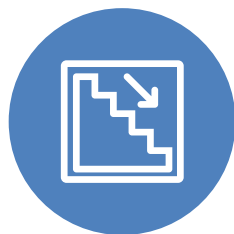
可靠性科学的理论话语

可靠性科学的理论话语



裕量方程

$$\mathbf{M} = G(\mathbf{P}, \mathbf{P}_{th}) > 0$$



退化方程

$$\mathbf{P} = F(\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \vec{T})$$



度量方程

$$R = \mu(\tilde{\mathbf{M}} > 0)$$

可靠性度量的合法性准则

可靠性度量需满足的四个准则



规范性准则

可靠性度量在数学上和逻辑上应当是自治的，即可靠度与不可靠度之和应为1。



慢衰性准则

可靠性度量应用于具有层次结构的客体时应当是慢衰的，即从部分到整体的可靠性度量不应过快衰减。



可控性准则

可靠性度量应用于客体时应保证影响客体可靠性的要素是可控的，调节这些可控要素可以得到预期的可靠性度量。



融合性准则

可靠度量应该兼容固有不确定性度量、认知不确定性度量以及二者的混合度量。

确信可靠性度量框架

理论基础——不确定理论



不确定测度 (Liu, 2010)

不确定理论定义了不确定测度 \mathcal{M} ，并满足以下四条公理：

Axiom1. 规范性公理：对于全集 Γ ， $\mathcal{M}\{\Gamma\} = 1$ ；

Axiom2. 对偶性公理：对于事件 Λ ， $\mathcal{M}\{\Lambda\} + \mathcal{M}\{\Lambda^c\} = 1$

Axiom3. 次可加公理：对于一系列可数的事件序列 $\Lambda_1, \Lambda_2, \dots$,

$$\mathcal{M}\left\{\bigcup_{k=1}^{\infty} \Lambda_k\right\} \leq \sum_{k=1}^{\infty} \mathcal{M}\{\Lambda_k\}.$$

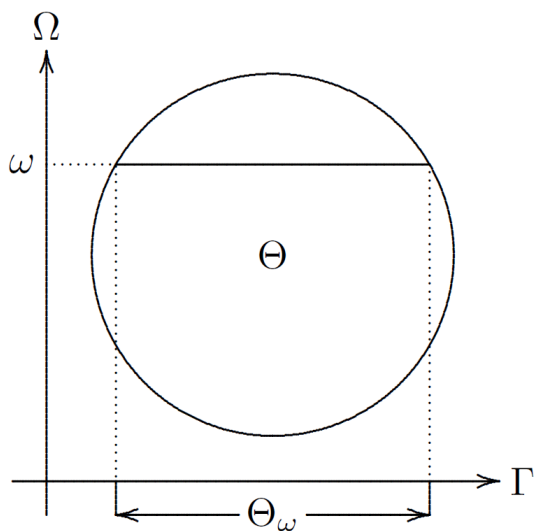
Axiom4. 乘积公理：对一系列不确定空间 $(\Gamma_k, \mathcal{L}_k, \mathcal{M}_k), k = 1, 2, \dots$,

$$\mathcal{M}\left\{\prod_{k=1}^{\infty} \Lambda_k\right\} = \bigwedge_{k=1}^{\infty} \mathcal{M}\{\Lambda_k\}.$$

其中， Λ_k 是从 \mathcal{L}_k 中任意选取的事件， $k = 1, 2, \dots$ 。

确信可靠性度量框架

理论基础——不确定理论

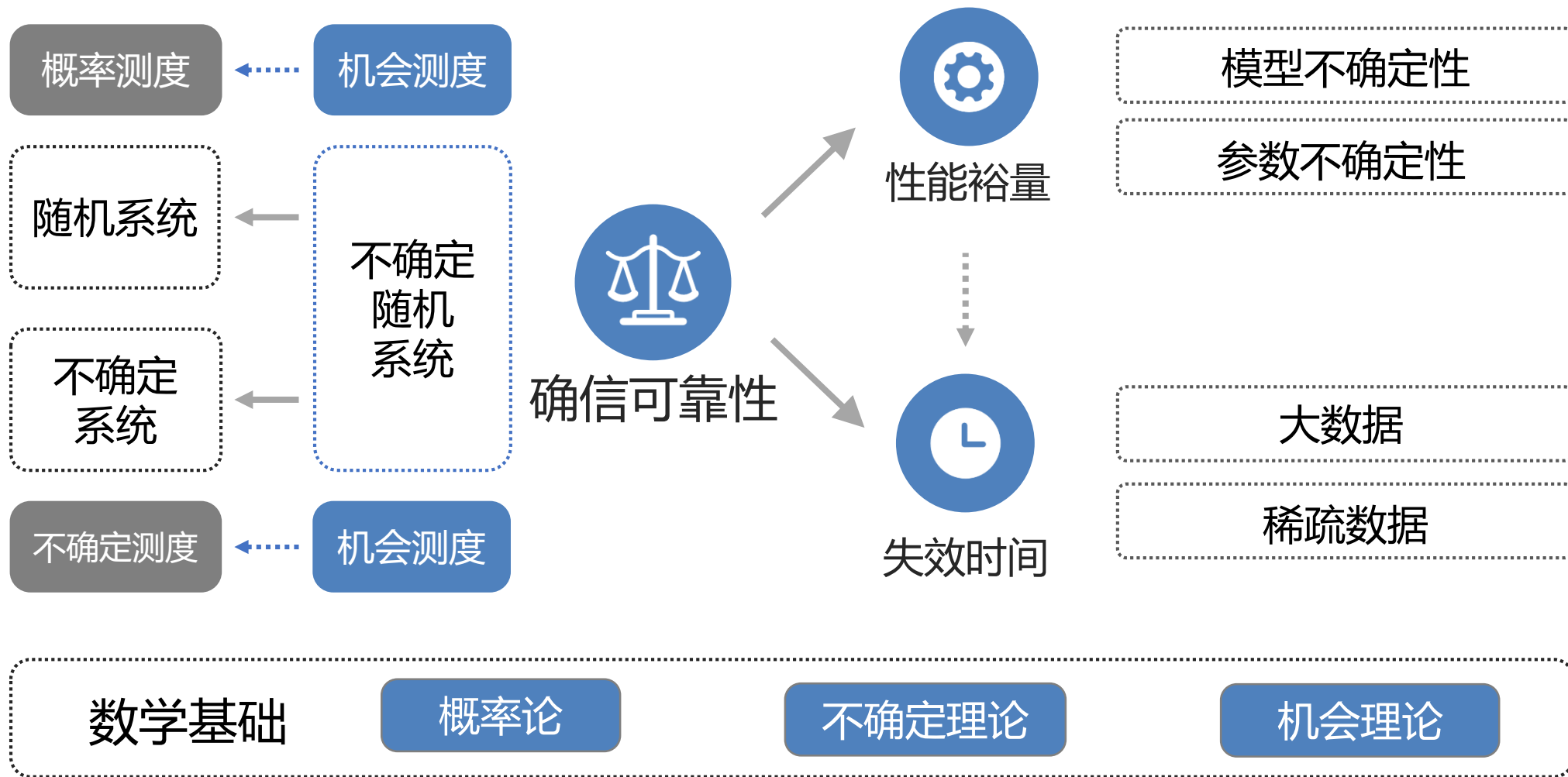


机会测度 (Liu, 2013)

机会测度Ch可以看做是不确定测度和概率测度的一种混合测度。设 $(\Gamma, \mathcal{L}, \mathcal{M}) \times (\Omega, \mathcal{A}, \text{Pr})$ 为一个机会空间，令 $\Theta \in \mathcal{L} \times \mathcal{A}$ 为该空间上的一个事件，那么 Θ 的机会测度被定义为：

$$\text{Ch}\{\Theta\} = \int_0^1 \text{Pr}\{\omega \in \Omega \mid \mathcal{M}\{\gamma \in \Gamma \mid (\gamma, \omega) \in \Theta\} \geq x\} dx$$

确信可靠性度量框架



确信可靠性技术方法

可靠性指标体系



可靠性分配方法



单元确信可靠性建模与分析



系统确信可靠性建模与分析



确信可靠性设计优化方法



确信可靠性实验方法



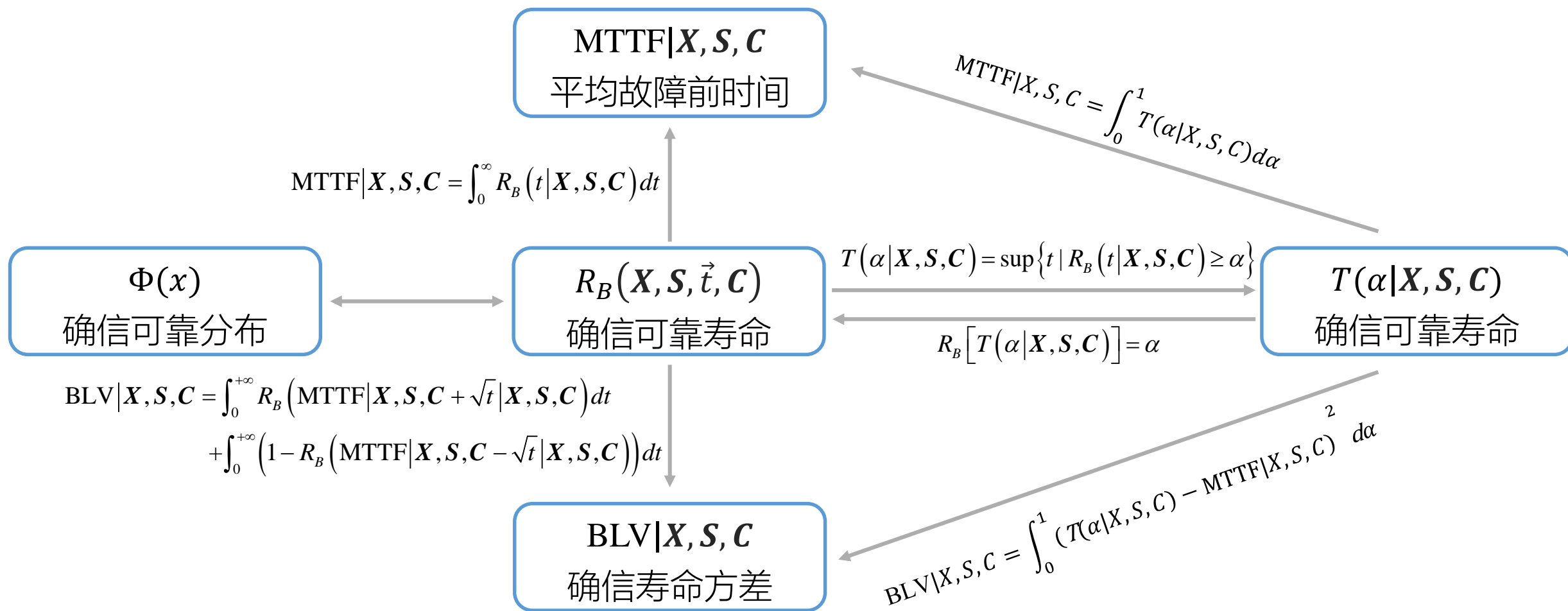
确信可靠性评估方法



功能-性能-裕量分析方法



确信可靠性指标体系



确信可靠性分配方法

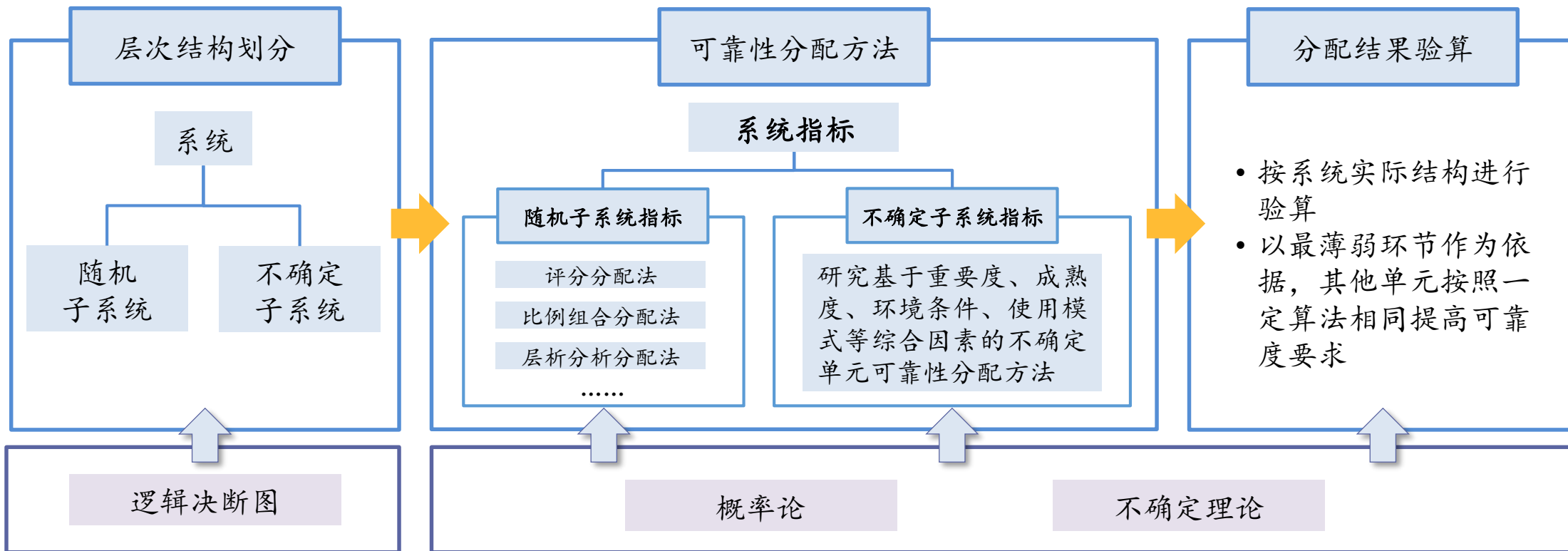
不确定随机系统的可靠性分配

研究
目标

研
究
内
容

理论
依据

案例
验证



某不确定随机系统的确信可靠性分配案例

单元确信可靠性建模与分析

原理

性能裕量模型

$$m = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$$



参数不确定性

性能裕量模型中参数的取值由于自身分散性及工作条件的不确定性而具有不确定性，因此描述为不确定随机变量。



$$m = g(x_1(\eta_1), x_2(\eta_2), \dots, x_n(\eta_n))$$



模型不确定性

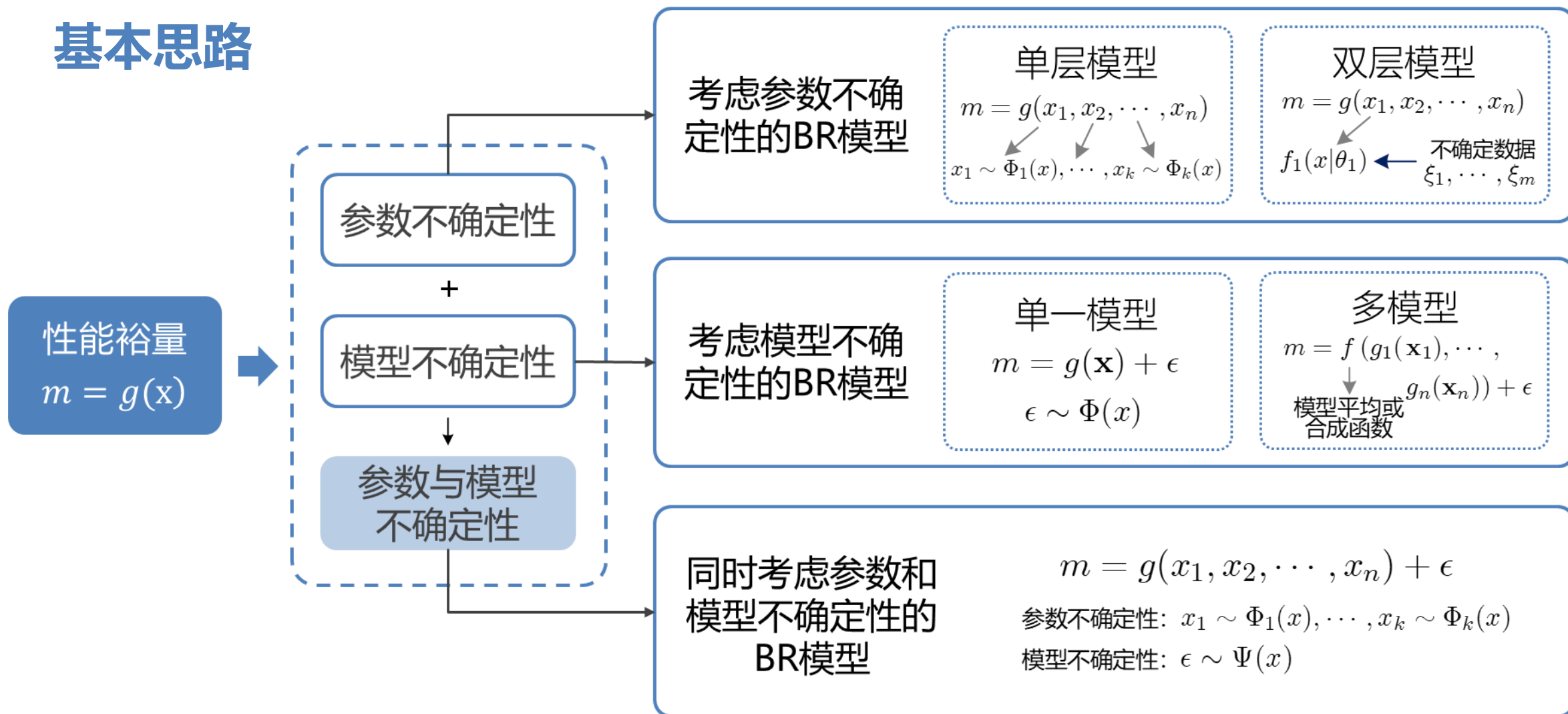
性能裕量模型不能完全准确描述系统的功能行为，需要加入一个不确定随机变量 E 来量化模型不确定性。



$$m = g(x_1, x_2, \dots, x_n, E)$$

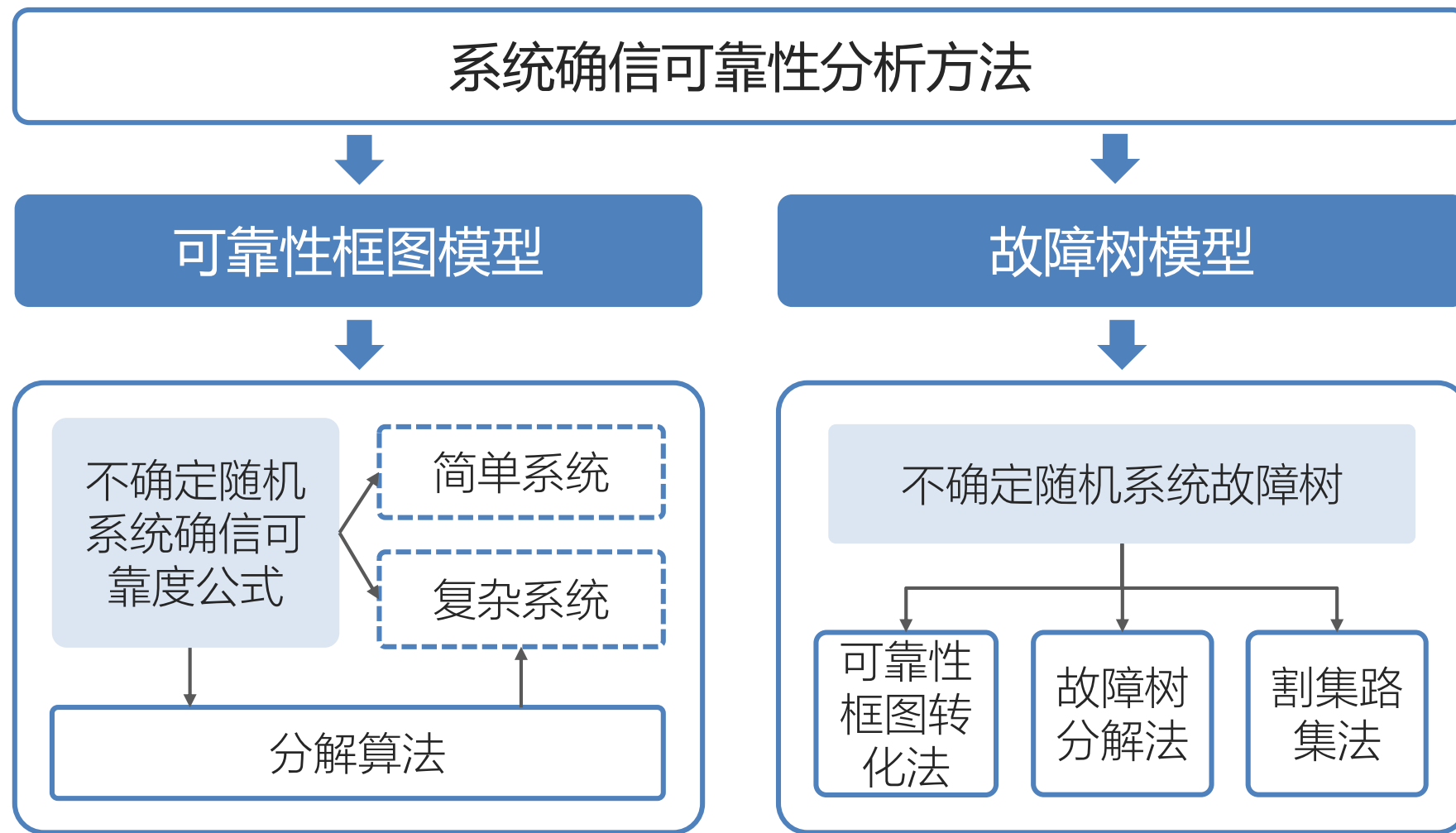
单元确信可靠性建模与分析

基本思路



系统确信可靠性建模与分析

基本思路



系统确信可靠性建模与分析

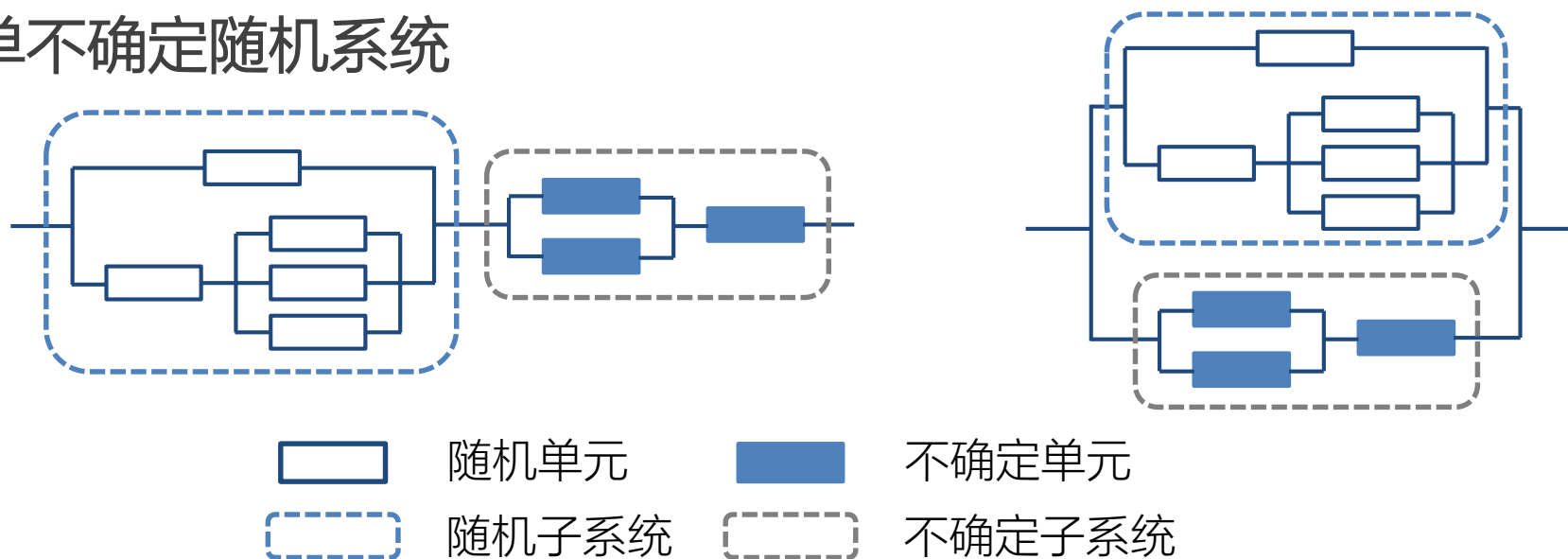
可靠性框图方法

I 不确定随机系统——由随机单元和不确定单元组成的系统

随机单元主要受固有不确定性影响，故障时间为随机变量；

不确定单元主要受认知不确定性影响，故障时间为不确定变量。

II 简单不确定随机系统



系统确信可靠性建模与分析

I 不确定随机系统的确信可靠性分析

■ 简单不确定随机系统

定理

设一不确定随机系统能够被简化为由一个随机分系统和一个不确定分系统组成，且二者的确信可靠度分别为 $R_{B,R}^{(P)}(t)$ 和 $R_{B,U}^{(U)}(t)$ 。若两个分系统串联连接，则系统确信可靠度为

$$R_{B,S}(t) = R_{B,R}^{(P)}(t) \cdot R_{B,U}^{(U)}(t).$$

若两个分系统并联连接，则系统确信可靠度为

$$R_{B,S}(t) = 1 - \left(1 - R_{B,R}^{(P)}(t)\right) \cdot \left(1 - R_{B,U}^{(U)}(t)\right).$$

注1：假设影响确信可靠度的内因 \mathbf{x} 和外因 \mathbf{s} 为常量；

注2：证明及详细阐述见论文[1]

系统确信可靠性建模与分析

I 不确定随机系统的确信可靠性分析

■ 复杂不确定随机系统

定理

设一不确定随机系统是一个二态系统，其结构函数为 f 。该系统中，随机单元的确信可靠度为 $R_{B,i}^{(P)}(t), i = 1, 2, \dots, m$ ，不确定单元的确信可靠度为 $R_{B,j}^{(U)}(t), j = 1, 2, \dots, n$ ，则系统确信可靠度为

$$R_{B,S}(t) = \sum_{(y_1, \dots, y_m) \in \{0,1\}^m} \left(\prod_{i=1}^m \mu_i(y_i, t) \right) \cdot Z(y_1, y_2, \dots, y_m, t),$$

其中， $Z(y_1, y_2, \dots, y_m, t)$

$$= \begin{cases} \sup_{f(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n(t))=1} \min_{1 \leq j \leq n} \nu_j(z_j, t), & \text{if } \sup_{f(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=1} \min_{1 \leq j \leq n} \nu_j(z_j, t) < 0.5, \\ 1 - \sup_{f(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=0} \min_{1 \leq j \leq n} \nu_j(z_j, t), & \text{if } \sup_{f(y_1, \dots, y_m, z_1, \dots, z_n)=1} \min_{1 \leq j \leq n} \nu_j(z_j, t) \geq 0.5, \end{cases}$$

$$\mu_j(y_i, t) = \begin{cases} R_{B,i}^{(P)}(t), & \text{if } y_i = 1, \\ 1 - R_{B,i}^{(P)}(t), & \text{if } y_i = 0, \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, m), \quad \nu_j(z_j, t) = \begin{cases} R_{B,j}^{(U)}(t), & \text{if } z_j = 1, \\ 1 - R_{B,j}^{(U)}(t), & \text{if } z_j = 0, \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n).$$

系统确信可靠性建模与分析

I 不确定随机系统的确信可靠性分析：算例

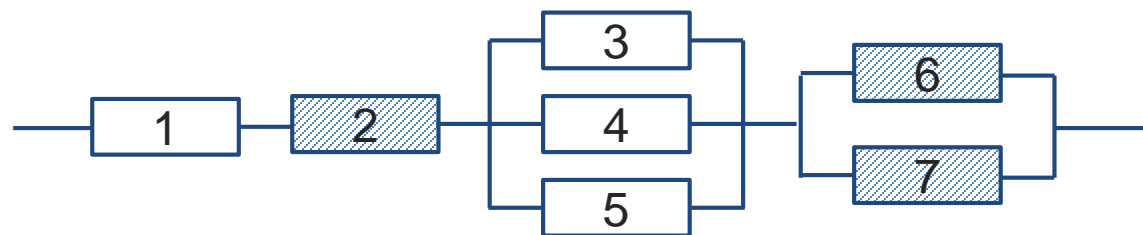
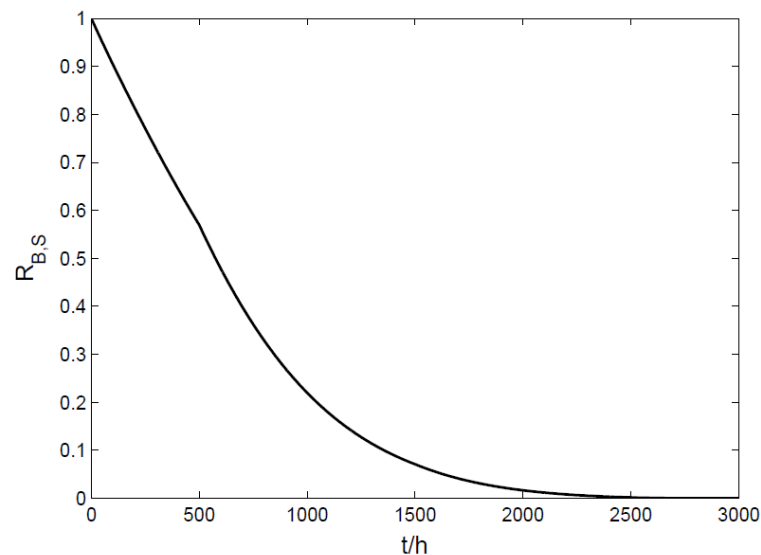


表. 各单元故障时间分布

No.	单元类型	故障时间分布
1,3,4,5	随机单元	$Exp(\lambda = 10^{-3}h^{-1})$
2	不确定单元	$L(500h, 3000h)$
6,7	不确定单元	$L(700h, 2700h)$



系统确信可靠度函数

系统确信可靠性建模与分析

II 不确定系统的确信可靠性分析

■ 不确定系统——仅由不确定单元组成的系统

不确定系统的确信可靠度公式由最小割集定理给出。

最小割集定理

考虑一个由 n 个单元组成的单调关联不确定系统，各单元的确信可靠度为 $R_{B,i}^{(U)}, i = 1, 2, \dots, n$ 。若系统包含 m 个最小割集 C_1, C_2, \dots, C_m ，则系统确信可靠度为

$$R_{B,S} = \bigwedge_{1 \leq i \leq m} \bigvee_{j \in C_i} R_{B,j}^{(U)} .$$

注：证明及详细阐述见论文

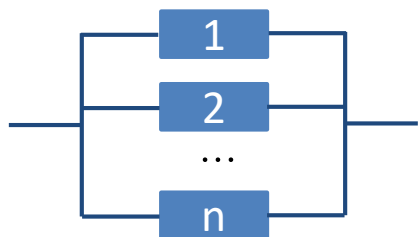
系统确信可靠性建模与分析

II 不确定系统的确信可靠性分析——算例



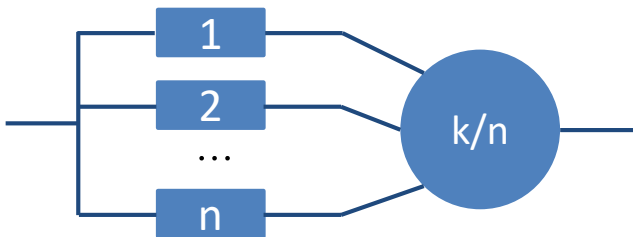
不确定串联系统共有 n 个最小割集，即 $C_1 = \{1\}, C_2 = \{2\}, \dots, C_n = \{n\}$ ，则确信可靠度为

$$R_{B,S} = \min_{1 \leq i \leq n} \max_{j \in C_i} R_{B,j} = \min_{1 \leq i \leq n} R_{B,i}$$



不确定并联系统只有1个最小割集，即 $C_1 = \{1, 2, \dots, n\}$ ，则确信可靠度为

$$R_{B,S} = \max_{1 \leq i \leq n} R_{B,i}$$



不确定 n 中取 k 系统有 C_n^{n-k+1} 个最小割集，每个最小割集是任意 $n - k + 1$ 个单元的组合。设 $R_{B,1} \geq R_{B,2} \geq \dots \geq R_{B,n}$ ，则确信可靠度为

$$R_{B,S} = R_{B,k}$$

系统确信可靠性建模与分析

故障树方法：不确定环境下的故障树分析原理

■ 割集定理

割集定理

考虑一个由 n 个单元组成的单调关联不确定系统，各单元的确信可靠度为 $R_{B,i}^{(U)}, i = 1, 2, \dots, n$ 。若系统包含 l 个割集（包含所有最小割集） CS_1, CS_2, \dots, CS_l ，则系统确信可靠度为

$$R_{B,S} = \bigwedge_{1 \leq i \leq l} \bigvee_{j \in CS_i} R_{B,j}^{(U)}$$

注：证明及详细阐述见论文

系统确信可靠性建模与分析

故障树方法：不确定环境下的故障树分析算法

故障树分析算法

1. 对故障树的所有逻辑门进行深度优先搜索；
2. 对每个逻辑门，都计算其输出的确信可靠度，若后续还有逻辑门，则输出的确信可靠度作为下一个逻辑门的输入；

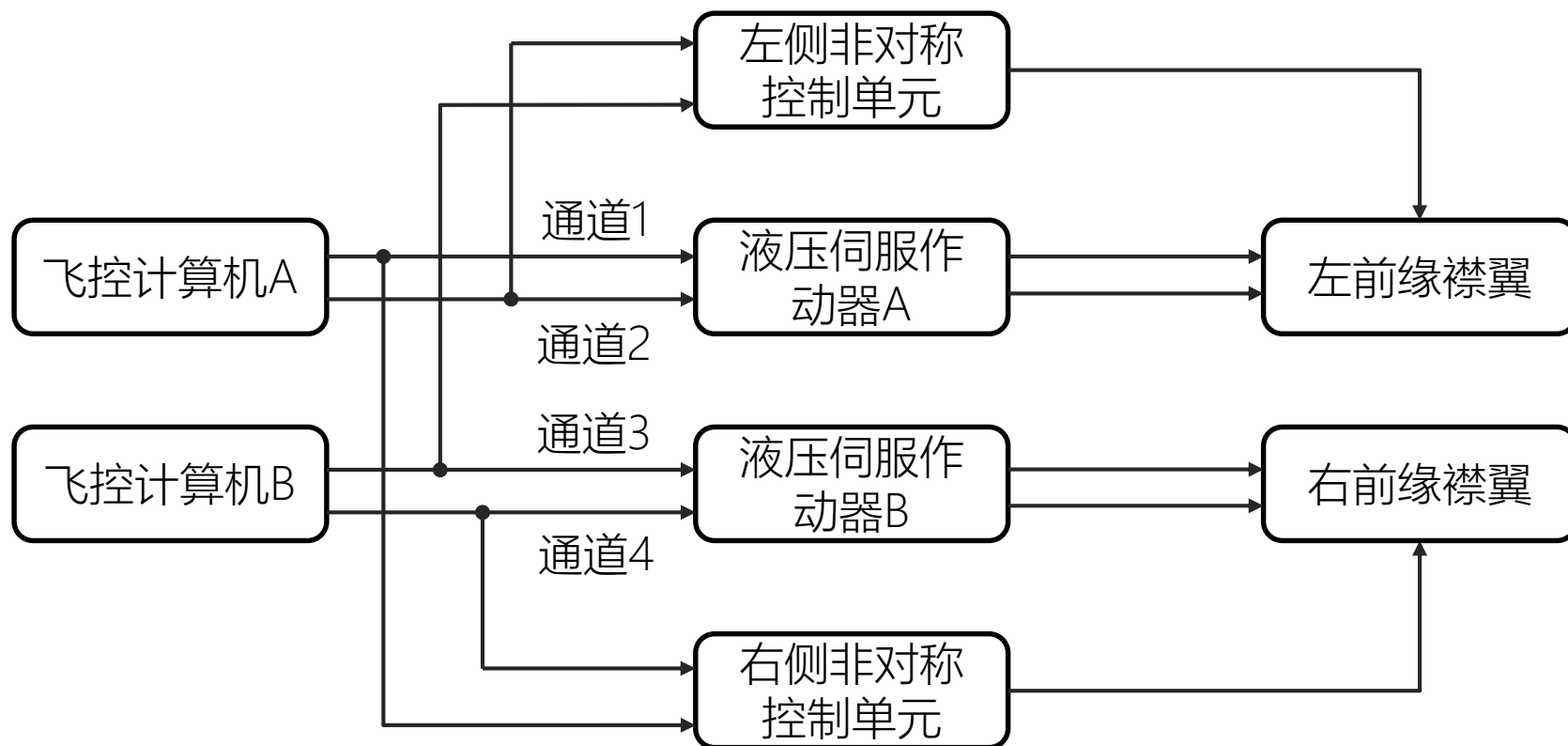
$$R_{B,out} = \begin{cases} \bigwedge_{1 \leq i \leq n} R_{B,in,i}, & \text{对于或门} \\ \bigvee_{1 \leq i \leq n} R_{B,in,i}, & \text{对于与门} \end{cases}$$

3 $R_{B,S} \leftarrow R_{B,out,TE}$

4 返回 $R_{B,S}$ 的值

系统确信可靠性建模与分析

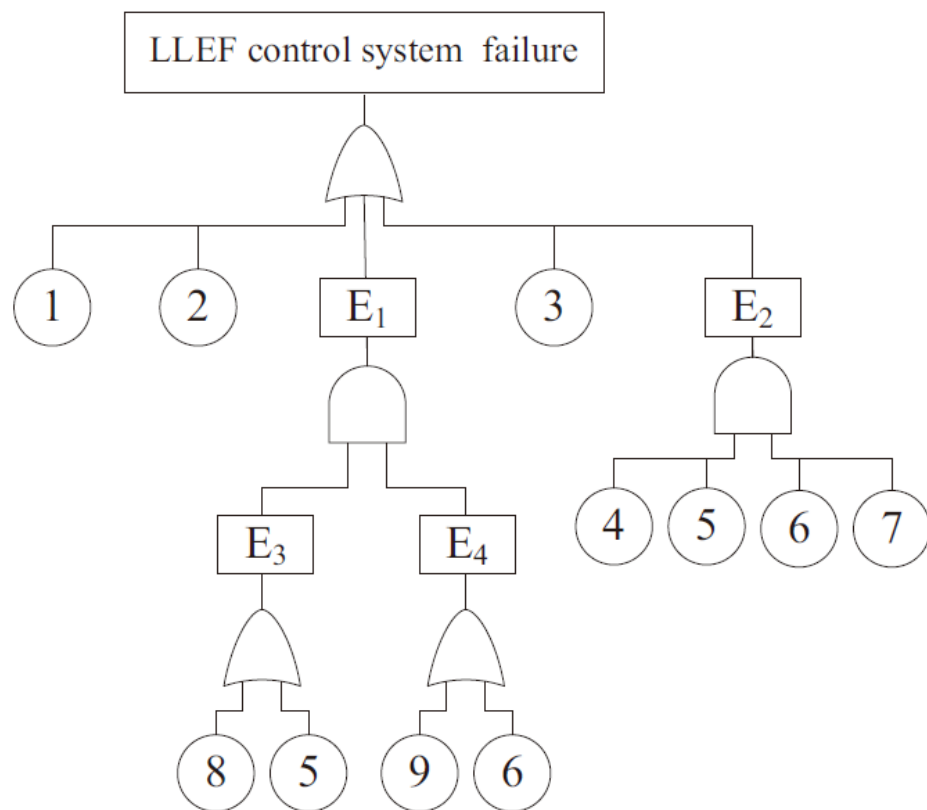
案例 — F18飞机左前缘襟翼控制分系统



左右前缘机翼控制系统的原理图

系统确信可靠性建模与分析

案例 — F18飞机左前缘襟翼控制分系统



注：

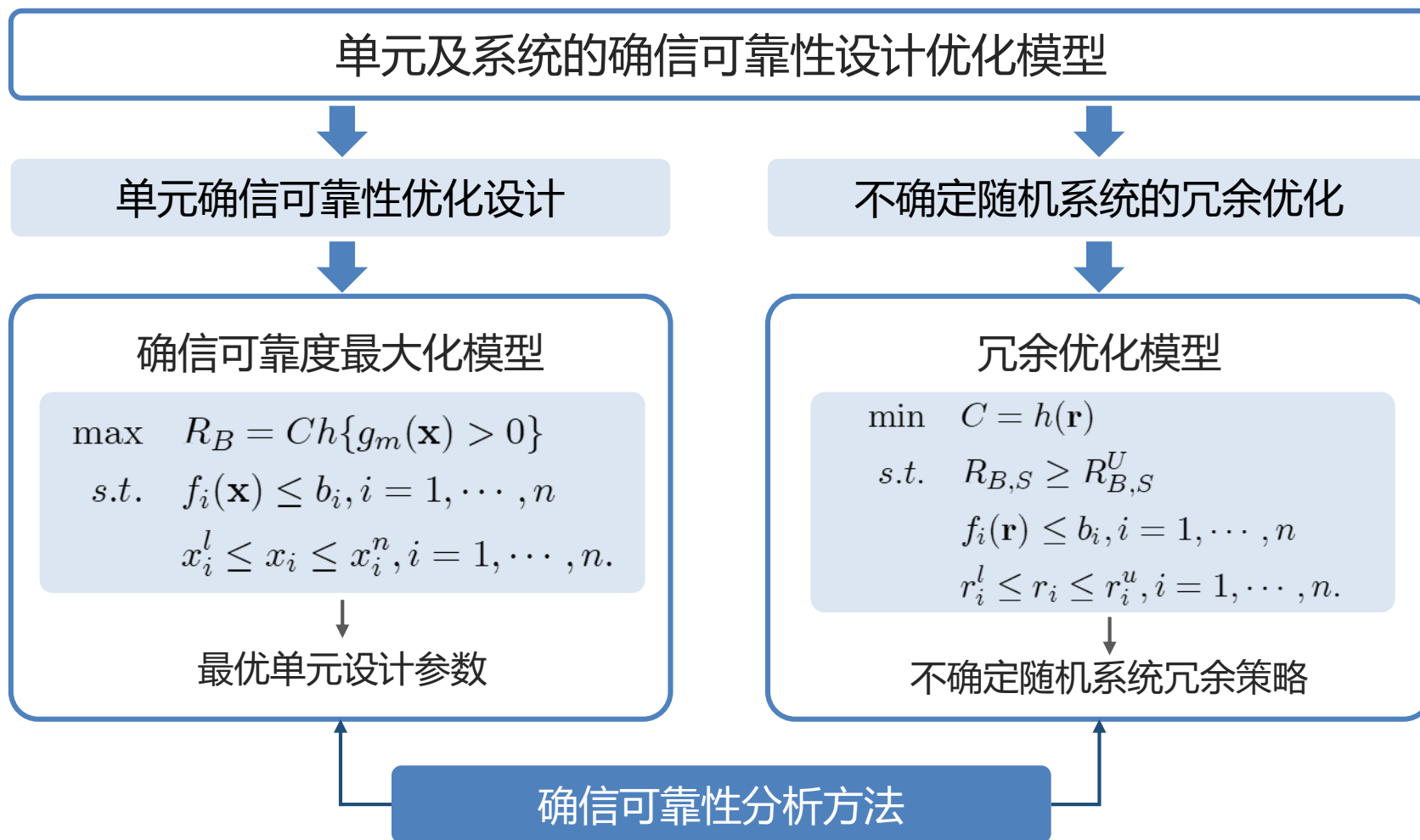
- 1-液压伺服作动器A故障 2-左侧非对称控制单元故障
3-左前缘襟翼故障 4~7-通道1~4故障
8-飞控计算机A故障 9-飞控计算机B故障

通过该故障树可以得到系统可靠度为：

$$R_{B,S} = R_{B,1} \wedge R_{B,2} \wedge R_{B,3} \wedge \left((R_{B,5} \wedge R_{B,8}) \vee (R_{B,6} \wedge R_{B,9}) \right) \wedge (R_{B,4} \vee R_{B,5} \vee R_{B,6} \vee R_{B,7})$$

左前缘机翼控制分系统的故障树

确信可靠性设计优化方法 单元及系统优化模型



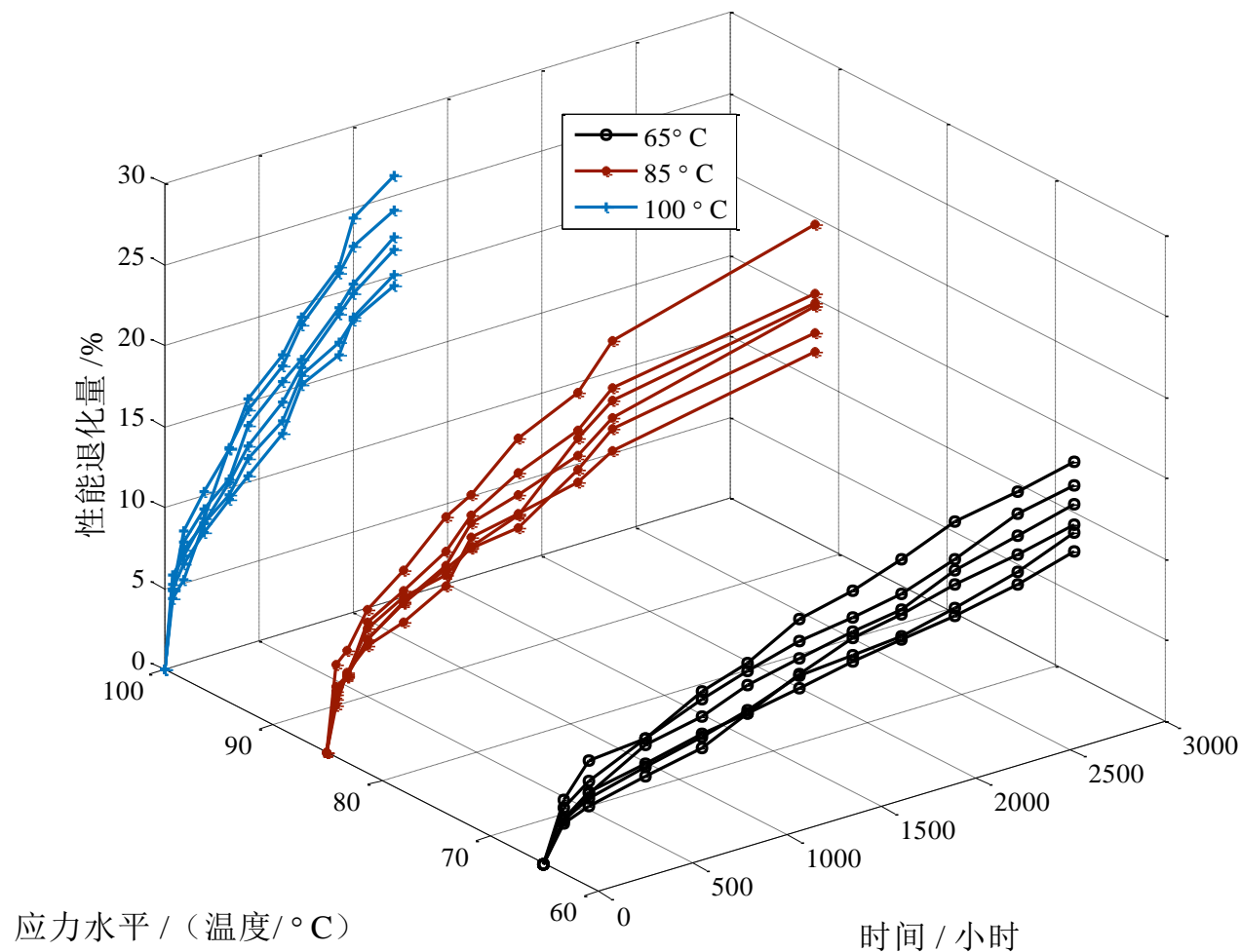
确信可靠性实验方法

性能退化数据本质

□ 确定性退化规律

□ 不确定性的维度

- 样品维
- 时间维
- 应力维



确信可靠性实验方法

裕量方程

$$M(s, t) = |c_Y - Y(s, t)|$$

退化方程

确定性退化规律

时间维度认知不确定性

$$Y(s, t) = X(s, t) + Y_0 = \exp(a + b\varphi(s))\Lambda(t) + \sigma C(\Lambda(t)) + Y_0$$

可靠度方程

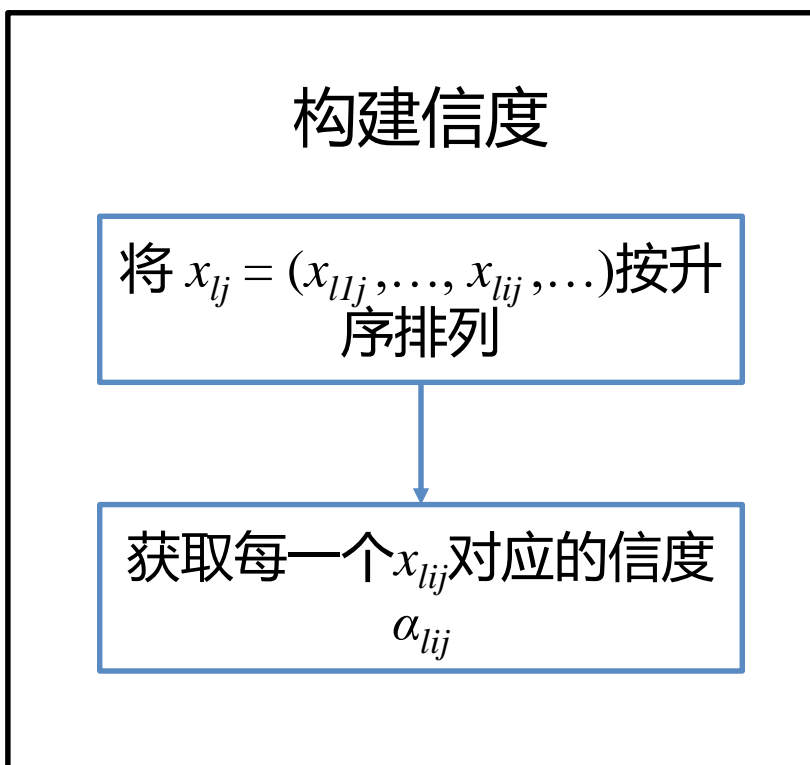
$$R_B(s, t) = \mathcal{M}\{t_0 \geq t\} = 1 - \mathcal{M}\{t_0 < t\} = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(\exp(a + b\varphi(s))\Lambda(t) - c_X)}{\sqrt{3}\sigma\Lambda(t)} \right) \right)^{-1}$$

$Y(s, t)$ —性能; s —应力; t —不可逆时间; Y_0 —性能初值; $X(s, t)$ —性能退化量; $\Lambda(t)$ —时间尺度函数; a, b —参数; σ —扩散系数; $C(\Lambda(t))$ —刘过程, 服从正态不确定分布 $\mathcal{N}(0, \Lambda(t))$; $\varphi(s)$ — s 的函数; $M(s, t)$ —性能裕量; c_Y —性能临界值

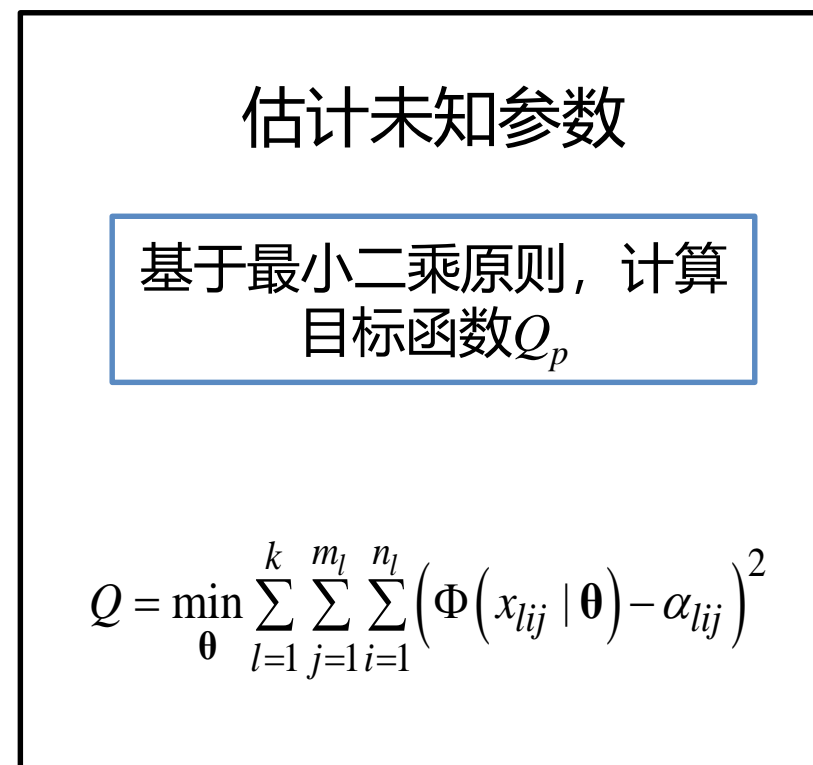
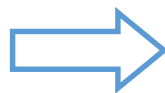
确信可靠性实验方法

统计分析方法

未知参数向量为: $\theta = \{a, b, \sigma, \beta\}$



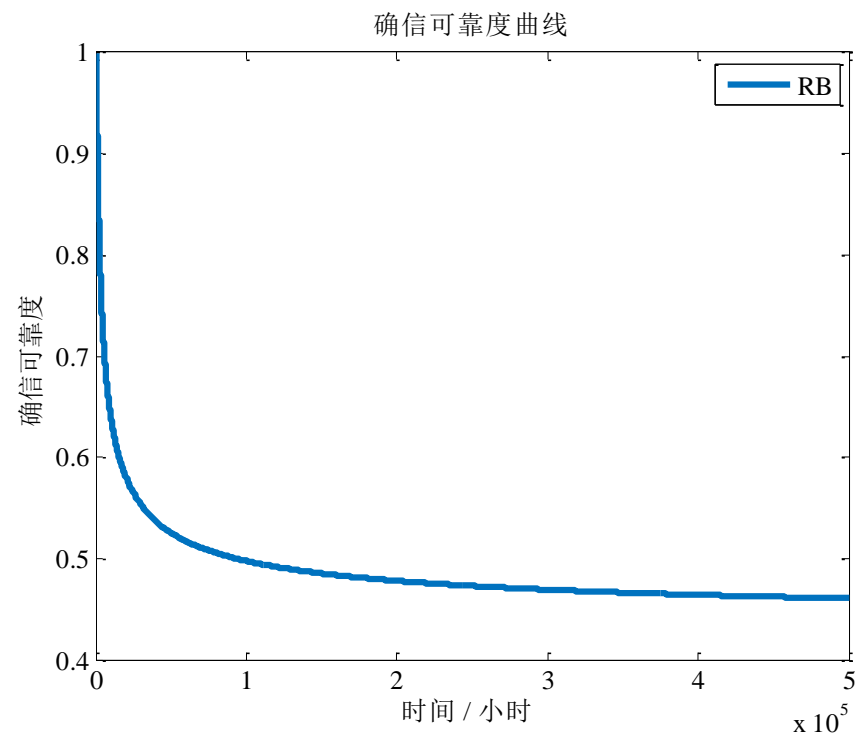
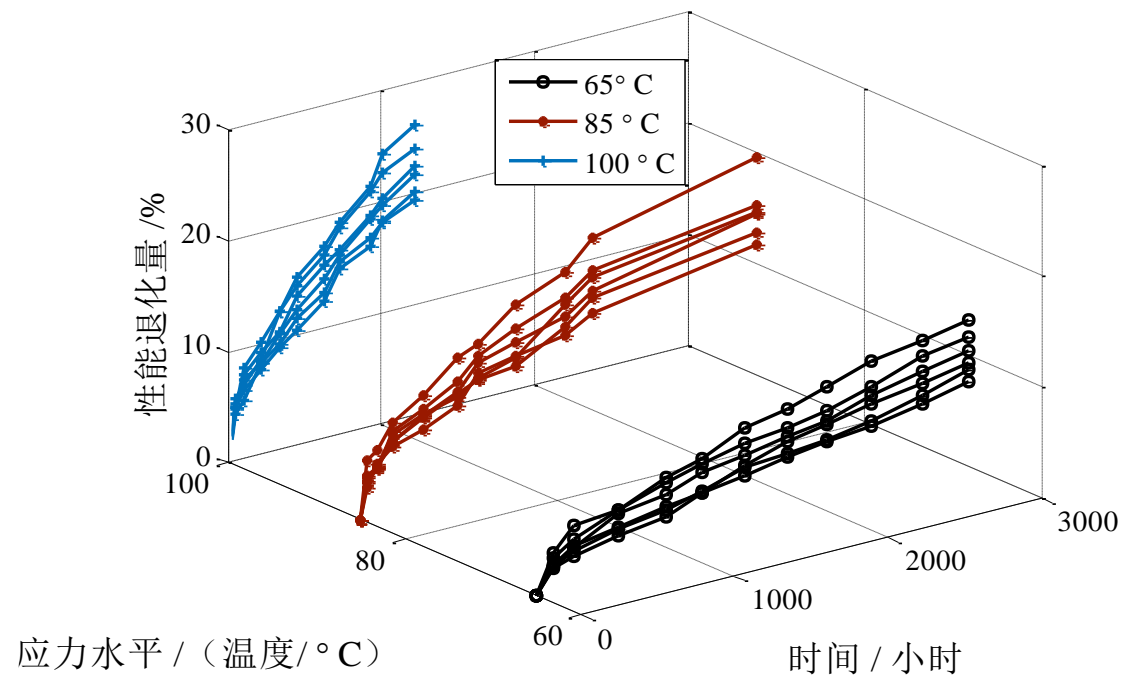
步骤 1



步骤 2

确信可靠性实验方法

电连接器案例 – 可靠度估计



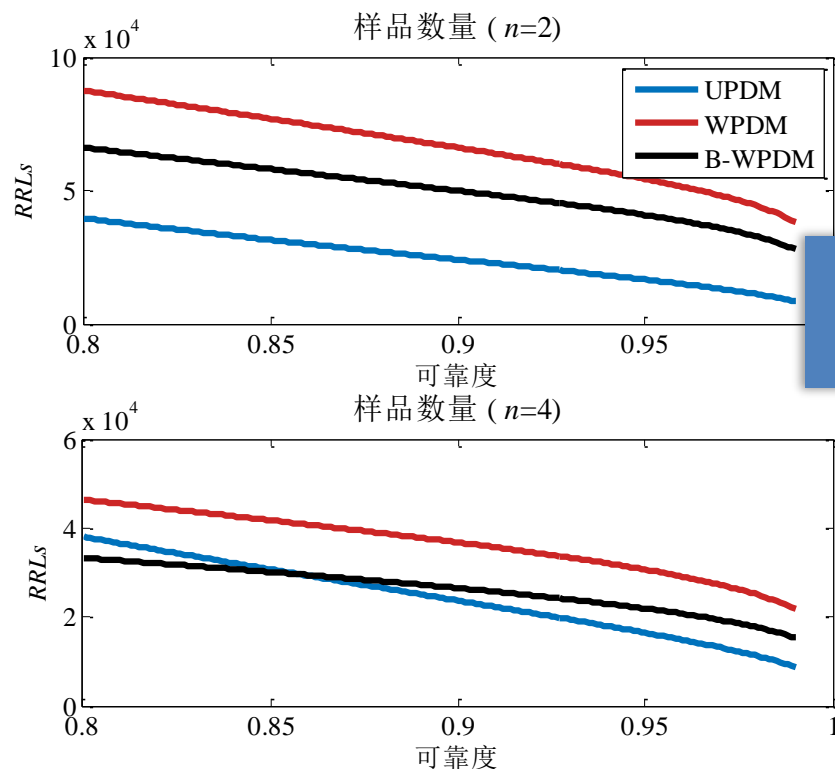
模型参数	a	b	σ	β
估计结果	-2.0251	1.8626	0.1195	0.4496

确信可靠性实验方法

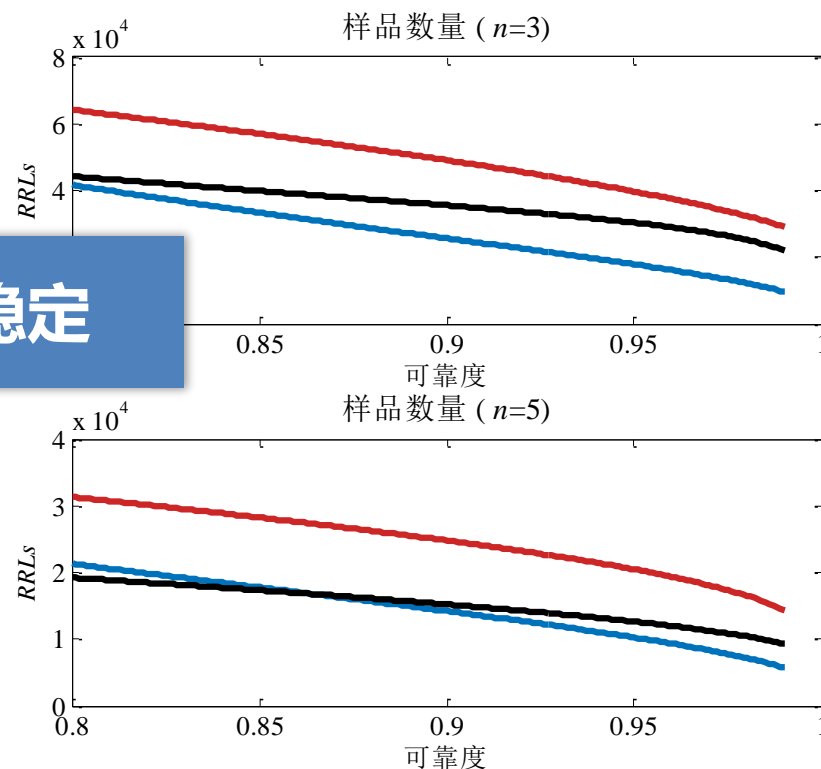
电连接器案例 – 敏感性分析

可靠寿命置信区间宽度: $RRL_n(R) = t_n^U(R) - t_n^L(R), n = 2, 3, 4, 5$

$t_n^L(R)$ 和 $t_n^U(R)$ - 样品数量为 n 的情况下, 可靠度下限和上限曲线中指定可靠度 R 时对应的寿命



更稳定



$t_n^L(R)$ 和 $t_n^U(R)$ - 样品数量为 n 的情况下, 可靠度下限和上限曲线中指定可靠度 R 时对应的寿命

确信可靠度评估方法

研究
目标

基于多源失效时间数据的确信可靠性分析与评价

研
究
内
容

确信
可靠性
分析

确信
可靠性
评价

稀疏同源
失效时间数据



多源失效时间数据

- 基于K阶原点矩的确信可靠分布获取方法
- 基于K阶原点矩的确信可靠分布获取方法
- 基于修匀公式确信可靠分布获取方法

不同环境应力

- 多源失效时间数据等效假设研究
- 多源失效时间数据等效方法研究
- 基于等效失效时间数据的确信可靠分布获取方法研究

相似母体

- 基于可靠性特征的母体相似模型研究
- 可融合的相似度阈值判定方法研究
- 基于相似度模型的确信可靠分布获取方法研究

不同获取方式

- 不同获取方式的可信度模型研究
- 基于可信度模型的确信可靠分布获取方法研究



可靠度

可靠寿命

平均故障间时间

案例
验证

稀疏同源失效时间数据的
确信可靠性分析与评价案例

多源失效时间数据的
确信可靠性分析与评价案例



确信可靠度评估方法

稀疏同源失效时间数据
确信可靠分布获取

基于k阶原点矩的
确信可靠分布获取方法

基于k阶中心矩的
确信可靠分布获取方法

基于修匀公式的
确信可靠分布获取方法

稀疏同源失效时间数据
确信可靠性评价

可靠度

$$R_B(t) = 1 - \Phi(t).$$

可靠寿命

$$T(\alpha) = \sup \{t | R_B(t) \geq \alpha\}.$$

平均故障前时间

$$\text{MTTF} = E[T] = \int_0^{+\infty} R_B(t) dt.$$

确信可靠度评估方法

稀疏同源失效时间数据确信可靠分布获取

I 基于k阶原点矩的确信可靠分布获取方法

确信可靠分布模型

1. 基本假设：最大熵假设
2. 适用情况：原点矩已知



$$\begin{cases} \max H = \int_{-\infty}^{+\infty} -\Phi(x) \ln \Phi(x) - (1 - \Phi(x)) \ln (1 - \Phi(x)) dx \\ s.t. \\ \int_{-\infty}^{+\infty} x^k d\Phi(x) = \mu_k, k = 1, 2, 3, \dots \end{cases}$$

模型解法

线性插值

$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x < x_1 \\ \alpha_i + \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)(x - x_i)}{x_{i+1} - x_i}, & \text{if } x_i \leq x \leq x_{i+1} \\ 1, & \text{if } x > x_n \end{cases}$$
$$\alpha = (2i - 1)/2n$$



遗传算法

确信可靠度评估方法

稀疏同源失效时间数据确信可靠分布获取

II 基于k阶中心矩的确信可靠分布获取方法

确信可靠分布模型

1. 基本假设：最大熵假设
2. 适用情况：中心矩已知



$$\left\{ \begin{array}{l} \max H = \int_{-\infty}^{+\infty} -\Phi(x) \ln \Phi(x) - (1 - \Phi(x)) \ln (1 - \Phi(x)) dx \\ s.t. \\ \int_{-\infty}^{+\infty} x d\Phi(x) = \mu_1, \\ \int_{-\infty}^{+\infty} (x - \mu_1)^k d\Phi(x) = \mu_k, k = 2, 3, \dots \end{array} \right.$$

模型解法

坐标系平移

转化为原点矩模型



$$\Phi(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } x < x_1 \\ \alpha_i + \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)(x - x_i)}{x_{i+1} - x_i}, & \text{if } x_i \leq x \leq x_{i+1} \\ 1, & \text{if } x > x_n \end{cases}$$
$$\alpha = (2i - 1)/2n$$



遗传算法

确信可靠度评估方法

稀疏同源失效时间数据确信可靠分布获取

III 基于修匀公式的确信可靠分布获取方法

已知信息

稀疏失效时间数据: x_1, x_2, \dots, x_n ($x_1 < x_2 < \dots < x_n$).

基本假设

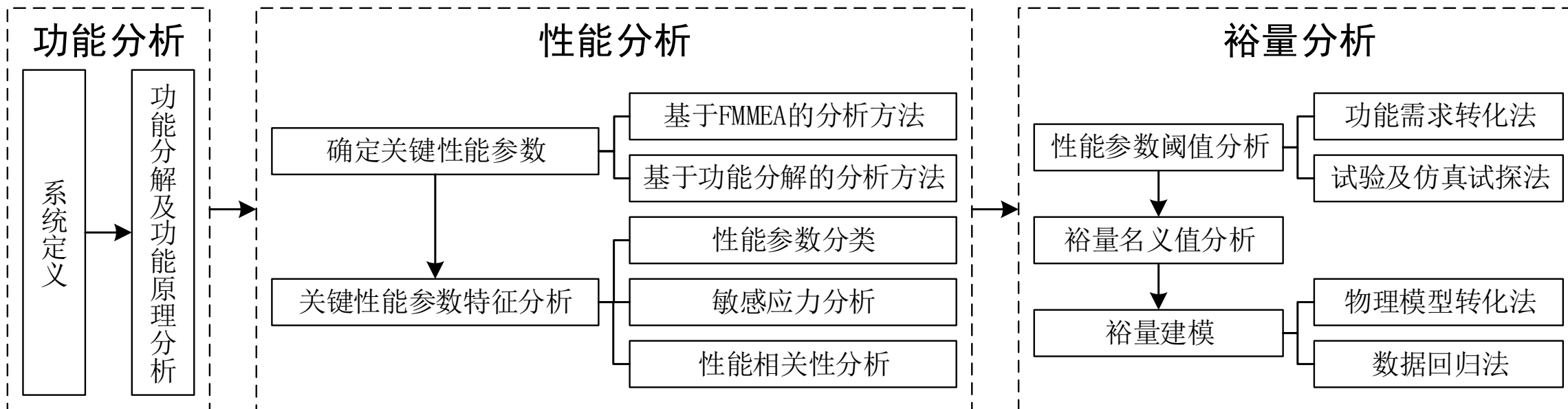
正态不确定分布 (最大熵定理) $\Phi(x) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(e-x)}{\sqrt{3}\sigma}\right)\right)^{-1}$

修
匀
公
式

$$\Phi(x) = \left(1 + \exp\left(\frac{\pi(e-x)}{\sqrt{3}\sigma}\right)\right)^{-1} \text{ for } i = 1, 2, \dots, n$$

$$\text{where } \begin{cases} e = \frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} x_1 + \sum_{i=2}^{n-1} \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_{i-1}}{2} x_i + \left(1 - \frac{\alpha_{n-1} + \alpha_n}{2}\right) x_n, \\ \sigma = \sqrt{\alpha_1 (x_1 - e)^2 + \frac{1}{3} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=0}^2 (\alpha_{i+1} - \alpha_i) (x_i - e)^j (x_{i+1} - e)^{2-j} + (1 - \alpha_n) (x_n - e)^2}. \end{cases}$$

功能-性能-裕量分析 (FPMA)



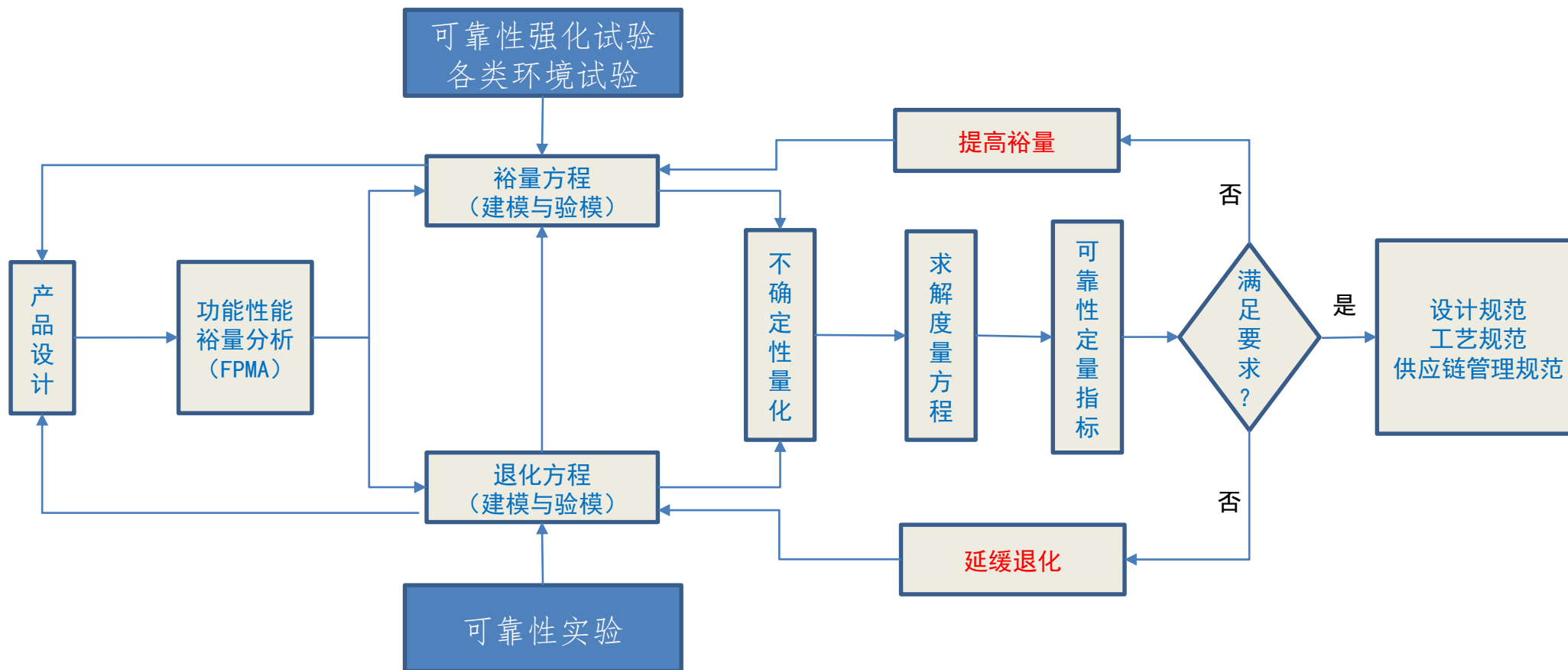
功能、性能及裕量分析步骤

功能-性能-裕量分析（FPMA）

功能性能裕量分析表（示例）

功能分析			性能分析							裕量分析			
主功能	功能层次		性能参数	是否关键	性能参数类别	敏感应力			相关性	性能参数名义值	性能参数阈值	裕量名义值	裕量模型
						类型	设计值	极限值					
主功能 A	功能 A1	功能 A11	性能 A11	是	望大	温度	20℃	70℃	C22 抑制	15	8	7	
		功能 A12	性能 A12	否									
	功能 A2	功能 A21	性能 A21	是	望目	电压				0.8	未知	45℃ (*)	
						温度	20℃	65℃					
主功能 B	功能 B1		性能 B1	否									
主功能 C	功能 C1		性能 C1	否									
	功能 C2	功能 C21	性能 C21	是	望小	运动载荷			A11 抑制				
		功能 C22	性能 C22	是	望目								
...

可靠性定量设计模式



发展展望

抽象对象

生命系统
信息物理社会系统
信息物理系统
网络
硬件+软件
硬件/软件



方法论

分析裕量
认识退化
量化不确定性

确信可靠性度量

论文清单

1. Xiaoyang Li, Jipeng Wu, Le Liu, Meilin Wen, Rui Kang. Modeling Accelerated Degradation Data Based on the Uncertain Process, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2019, 27(8): 1532-1542. (Q1, IF:8.759)
2. Qingyuan Zhang, Rui Kang, Meilin Wen. Decomposition Method for Belief Reliability Analysis of Complex Uncertain Random Systems, IEEE Access, 2019, 7: 132711-132719. (Q1, IF:4.098)
3. Jiutong Zhang, Qingyuan Zhang, Rui Kang, Reliability is A Science: A Philosophical Analysis of Its Validity, Applied Stochastic Models in Business and Industry, 2019, 35(2): 275-277. (Q2, IF: 1.124)
4. Qingyuan Zhang, Rui Kang, Meilin Wen, Belief Reliability for Uncertain Random Systems, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(6): 3605-3614. (Q1, IF: 8.759)
5. Zhiguo Zeng, Rui Kang, Meilin Wen, Enrico Zio. Uncertainty theory as a basis for belief reliability. Information Sciences, 2018, 429: 26-36. (Q1, IF: 5.524)
6. Meilin Wen, Tianpei Zu, Miaomiao Guo, Rui Kang, Yang Y., Optimization of Spare Parts Varieties Based on Stochastic DEA Model, IEEE Access, 2018, 6: 22174-22183. (Q1, IF: 4.098)
7. Qingyuan Zhang, Rui Kang, Meilin Wen, A New Method of Level-2 Uncertainty Analysis in Risk Assessment Based on Uncertainty Theory, Soft Computing, 2018, 22(17): 5867-5877. (Q2, IF: 2.784)
8. Meilin Wen, Qingyuan Zhang, Rui Kang, Yi Yang, Some New Ranking Criteria in Data Envelopment Analysis Under Uncertain Environment, Computers and Industrial Engineering, 2018, 110: 498-504. (Q1, IF: 3.518)
9. Tianpei Zu, Rui Kang, Meilin Wen, Qingyuan Zhang, Belief Reliability Distribution Based on Maximum Entropy Principle, IEEE Access, 2017, 6: 1577-1582. (Q1, IF: 4.098)
10. Zhiguo Zeng, Rui Kang, Meilin Wen, Enrico Zio. A model based reliability metric considering aleatory and epistemic uncertainty. IEEE Access, 2017, 5: 15505-15515. (Q1, IF: 4.098)
11. Qingyuan Zhang, Zhiguo Zeng, Enrico Zio, Rui Kang. Probability box as a tool to model and control the epistemic uncertainty in multiple dependent competing failure processes. Applied Soft Computing, 2017, 56: 570-579. (Q1, IF: 4.873)
12. Meilin Wen, Qiao Han, Yi Yang, Rui Kang, Uncertain Optimization Model for Multi-Echelon Spare Parts Supply System, Applied Soft Computing, 2017, 56: 646-654. (Q1, IF: 3.907)
13. Tianpei Zu, Meilin Wen, Rui Kang, An Optimal Evaluating Method for Uncertainty Metrics in Reliability Based on Uncertain Data Envelopment Analysis, Microelectronics Reliability, 2017, 75: 283-287. (Q3, IF: 1.236)
14. Rui Kang, Qingyuan Zhang, Zhiguo Zeng, Enrico Zio, Xiao-yang Li, Measuring reliability under epistemic uncertainty: Review on non-probabilistic reliability metrics, Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(3): 571-579. (Q1, IF: 1.614)
15. Meilin Wen, Rui Kang, Reliability Analysis in Uncertain Random System, Fuzzy Optimization and Decision Making, 2016, 15(4): 491-506. (Q2, IF: 2.022)
16. Meilin Wen, Zhongfeng Qin, Rui Kang, Yi Yang, Sensitivity and Stability Analysis of the Additive Model in Uncertain Data Envelopment Analysis, Soft Computing, 2015, 19(7): 1987-1996. (Q2, IF: 2.367)
17. Meilin Wen, Zhongfeng Qin, Rui Kang, Yi Yang, the Capacitated Facility Location - Allocation Problem Under Uncertain Environment, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, 2015, 29(5): 2217-2226. (Q3, IF: 1.426)
18. Linhan Guo, Jiujiu Fan, Meilin Wen, Rui Kang, Joint Optimization of LORA and Spares Stocks Considering Corrective Maintenance Time, Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(1): 85-95. (Q4, IF: 0.572)
19. Meilin Wen, Zhongfang Qin, Rui Kang, the Alpha-Cost Minimization Model for Capacitated Facility Location-Allocation Problem with Uncertain Demands, Fuzzy Optimization and Decision Making, 2014, 13(3):345-356. (Q2, IF: 2.022)
20. Meilin Wen, Linhan Guo, Rui Kang, Yi Yang, Data Envelopment Analysis with Uncertain Inputs and Outputs, Journal of Applied Mathematics, 2014, 17(3): 357-373. (Q3, IF: 1.033)
21. Zhiguo Zeng, Meilin Wen, Rui Kang, Belief reliability: a new metrics for products' reliability, Fuzzy Optimization and Decision Making, 2013, 12(1): 15-27. (Q2, IF: 2.022)



克拉苏·锐
美国 洛杉矶市



扫一扫上面的二维码图案，加我微信

敬请批评指正



康 锐, 13701324522



kangrui@buaa.edu.cn



北京航空航天大学可靠性与系统工程学院