



瑞盈智能  
Wit Forever

# 电子产品可靠性评估云平台 CRAFE的理论基础

主讲人：陈颖





## 1、CARFE的理论基础



## 2、电子产品的故障机理



## 3、故障物理元模型

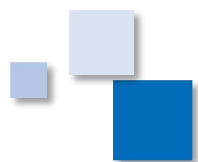


## 4、可靠性指标MTTF计算方法



## 5、如何生成仿真实验样本？





01  
Part

# CRAFE的理论基础







# CARFE的理论基础——故障物理学

## 理论基础

### 故障物理

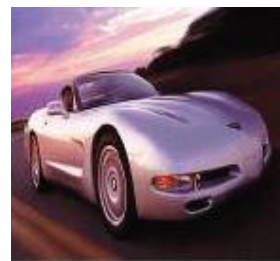
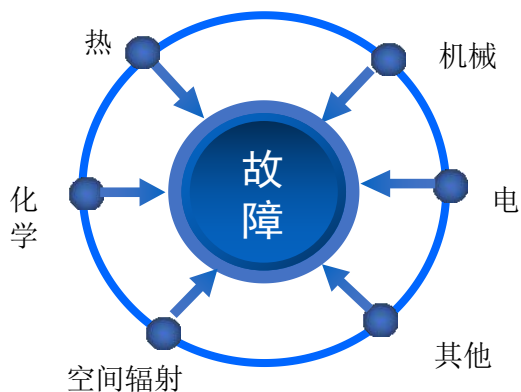
从物理、化学的微观结构的角度出发，研究材料、零件（元器件）和结构的故障机理，并分析工作条件、环境应力及时间对产品退化或故障的影响，建立物理模型定量描述故障行为，为可靠性设计、分析、预测和评估提供方法和数据。

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



1940-1957

• 可靠性萌芽

1957-1962

• PoF方法萌芽

1962-1970

• PoF方法稳步发展

1970-1980

• PoF方法长足发展

1980-2004

• PoF方法成熟和专业化

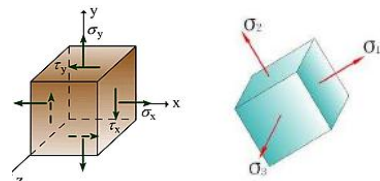


# CARFE的理论基础——故障物理学

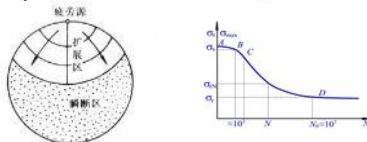
理论基础

不同学科领域

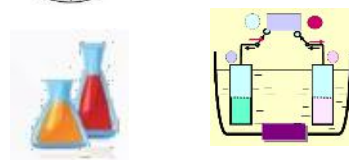
力学



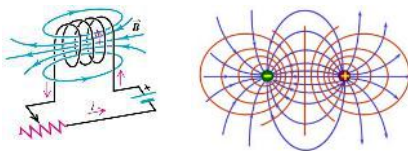
疲劳学



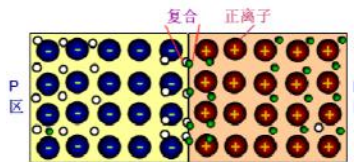
电化学



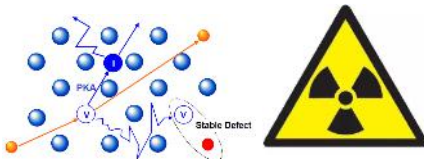
电磁学



半导体物理学



空间辐射学



传统学科



$t=0$ 时刻

产品性能和功能的实现

$t>0$ 后

故障的产生和发展

故障物理

# CARFE的理论基础——故障物理学

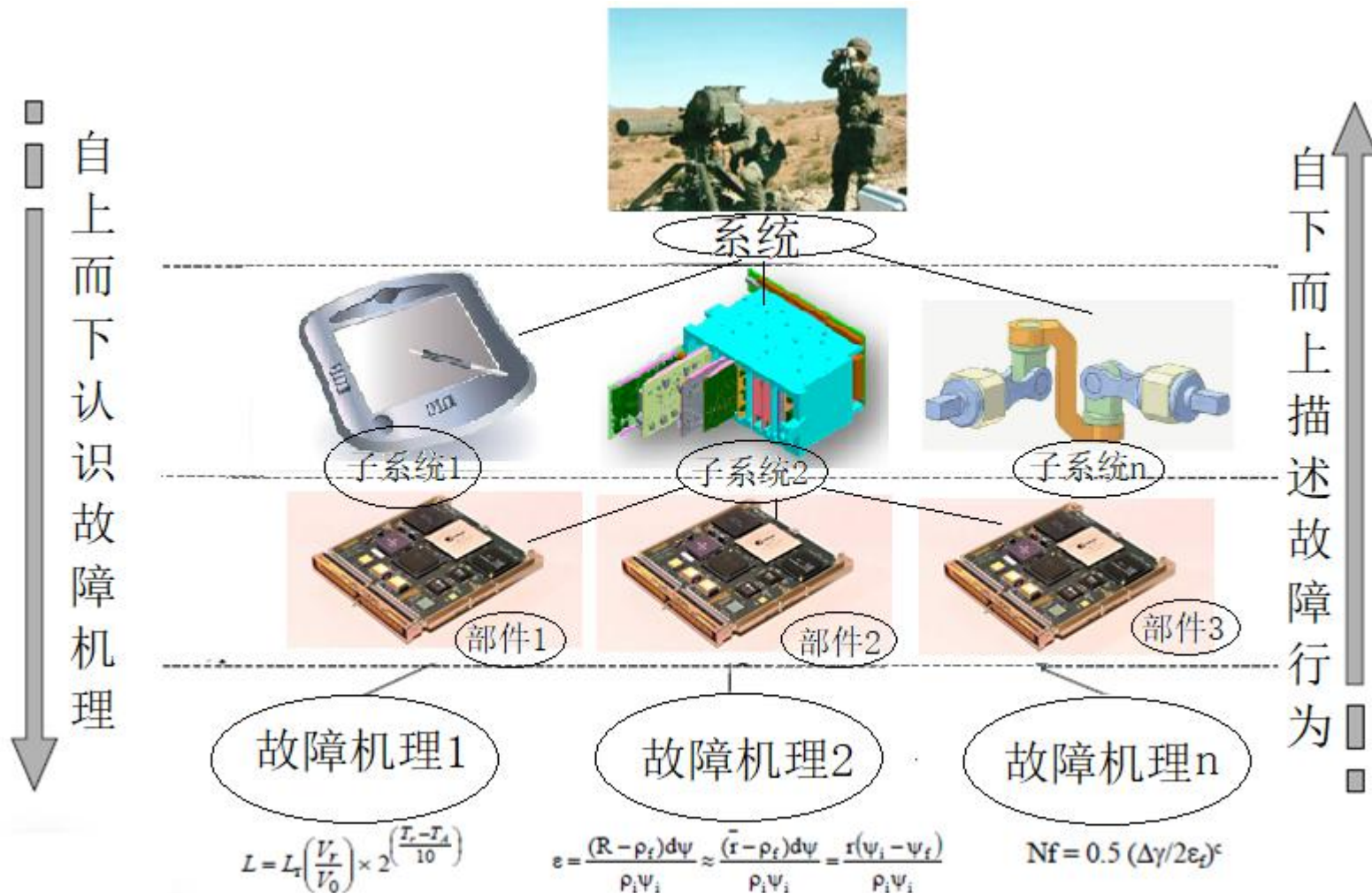
## 理论基础

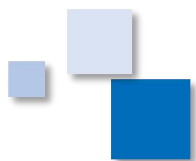
电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

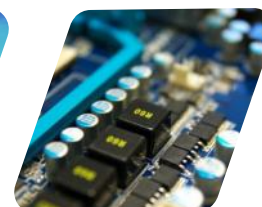




瑞盈智能  
Wit Forever

02  
Part

# 电子产品的故障机理





# 电子产品的故障机理

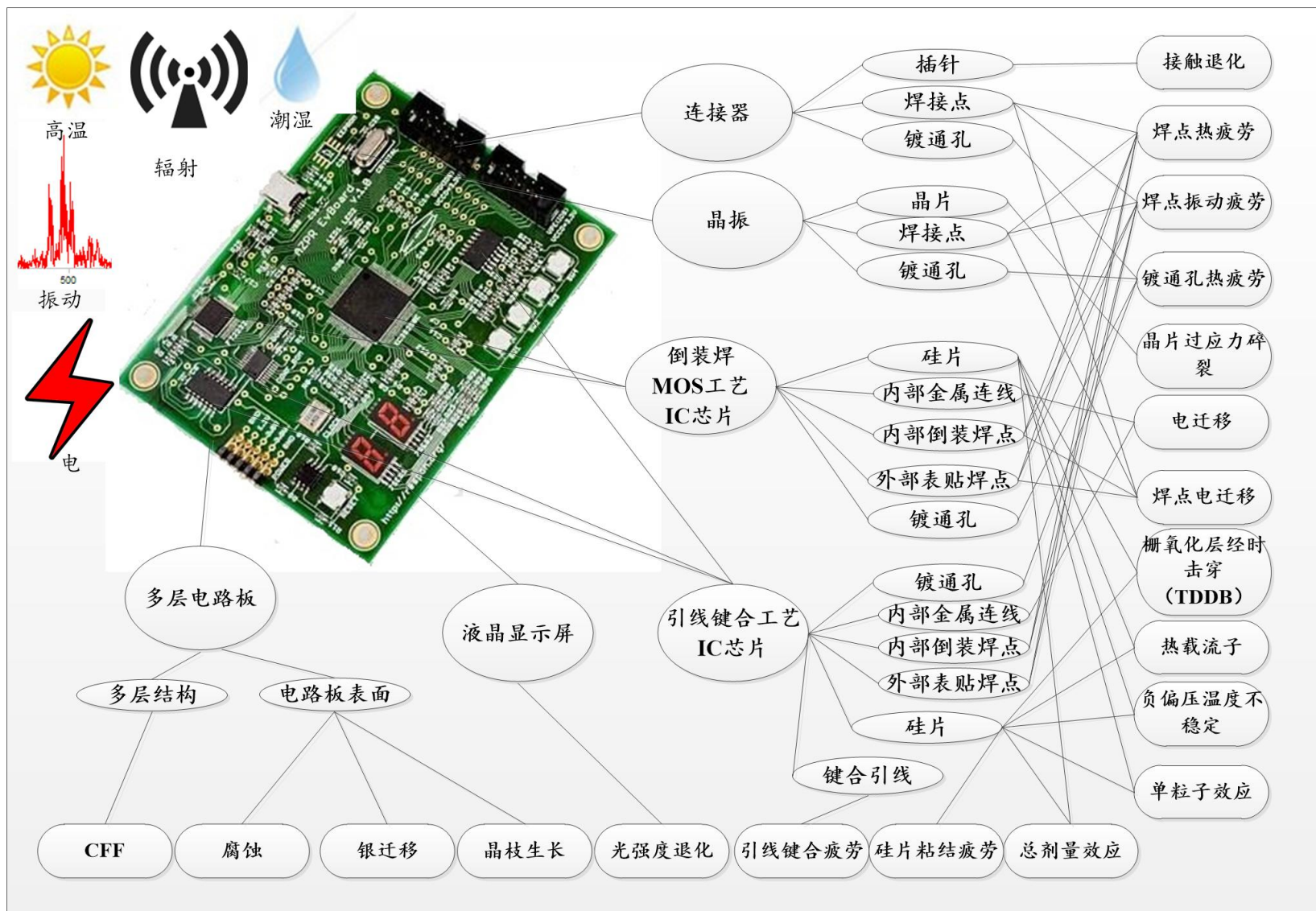
理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本





# 电子产品的故障机理

理论基础

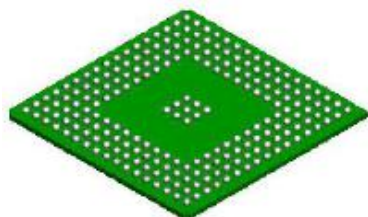
## 集成电路--封装相关故障机理

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



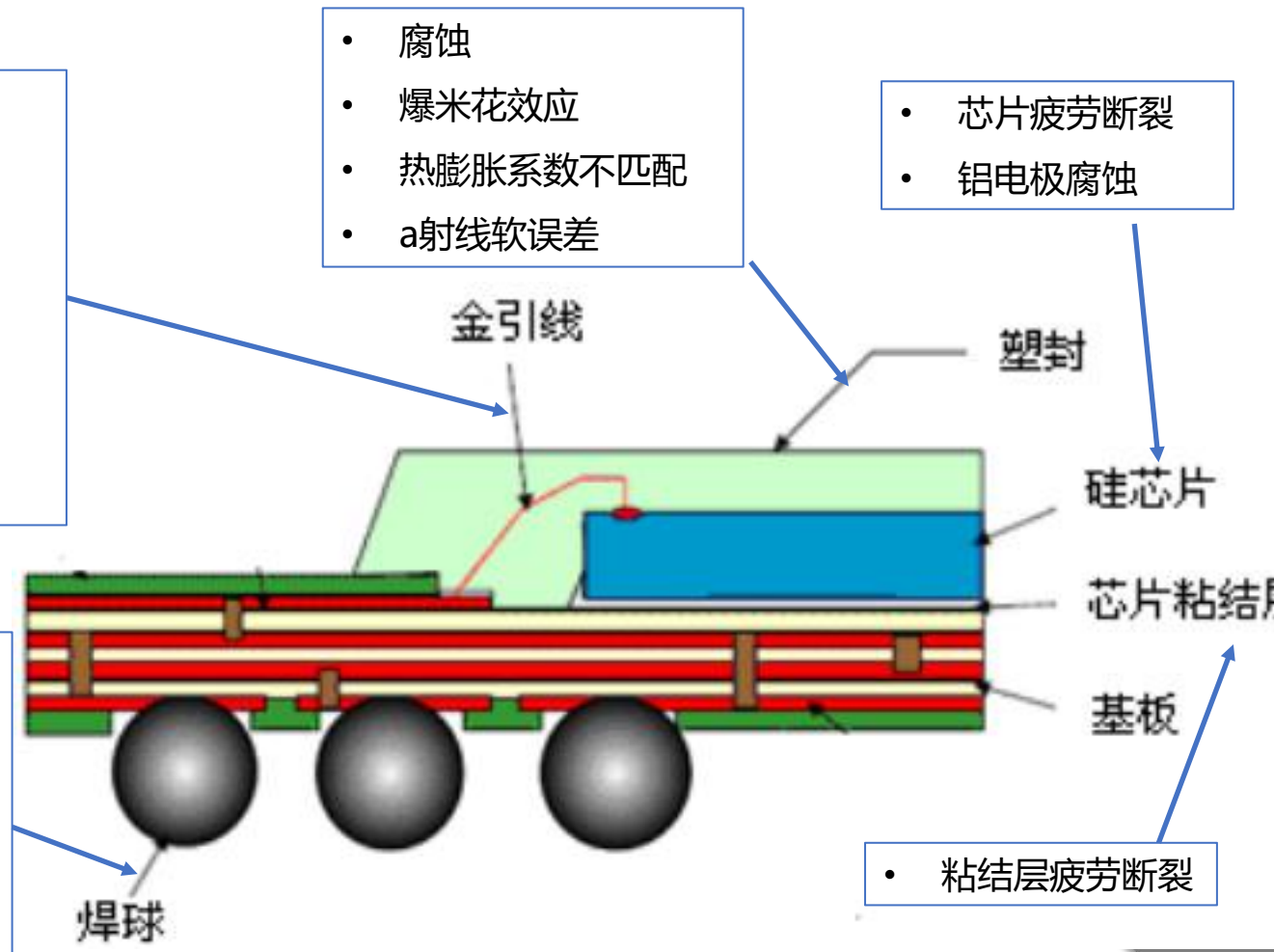
- 拉伸疲劳
- 剪切疲劳
- 金属间化合物
- 柯肯达尔效应
- SDDV
- 应力迁移
- 腐蚀

- 热疲劳
- 蠕变
- 振动疲劳
- 电迁移
- 金属间化合物
- 柯肯达尔效应

- 腐蚀
- 爆米花效应
- 热膨胀系数不匹配
- a射线软误差

- 芯片疲劳断裂
- 铝电极腐蚀

- 粘结层疲劳断裂



# 电子产品的故障机理

理论基础

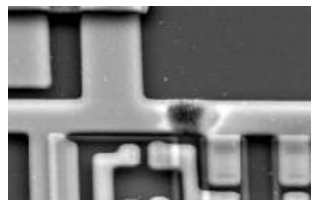
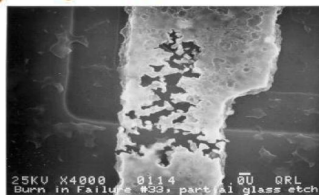
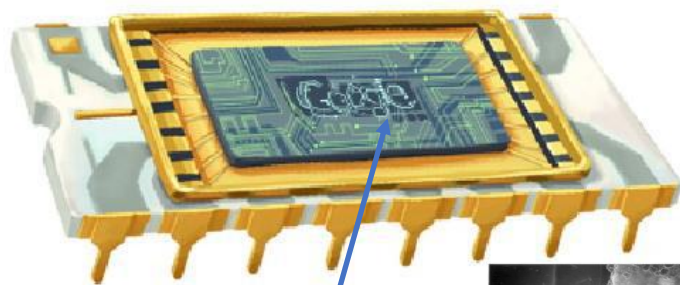
## 集成电路—芯片相关故障机理

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



- 热载流子
- TDDDB
- NBTI
- 界面效应
- 电迁移
- 金属间化合物
- 柯肯达尔效应
- ESD击穿
- 二次击穿

部位	故障机理	诱发外因	故障模式
CMOS 芯片互连线	电迁移	电流密度、温度	互连线开路
双极型芯片	热载流子	电压、温度	电流增益下降、PN 结击穿电压蠕变
MOS 器件	热载流子	电压、温度	平带电压 $V_{FB}$ ，阈值电压 $V_{th}$ 漂移，跨导 $g_m$ 减小
MOS 器件	与时间相关的栅氧化层击穿	电压、温度	氧化层击穿，短路
PMOS 器件	负偏压温度不稳定	负偏栅压 温度	逻辑电路信号延时增加 阈值电压增加
介质膜和铝线	界面效应	温度	PN 结短路
PN 结与 $Si/SiO_2$ 界面处	界面效应	温度	PN 结短路
金引线与铝互连线	金与铝的金属间化合物	温度	接触电阻增加，开路失效
金铝键合处	金与铝的 Kirkendall 效应	温度	空洞，铝膜脱落，高阻或者开路
PN 结	二次击穿	电压、温度	PN 结短路
PN 结	ESD 损伤	静电	PN 结短路
连线	ESD 损伤	静电	击穿短路
多晶硅电阻	ESD 损伤	静电	击穿放电短路
栅氧化层	ESD 损伤	静电	击穿



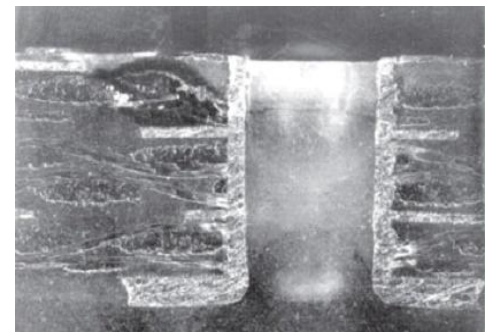


# 电子产品的故障机理

理论基础

## 电路板故障机理

- 镀通孔热疲劳
- 导电阳极细丝
- 晶枝生长
- 锡须
- 银迁移
- 腐蚀

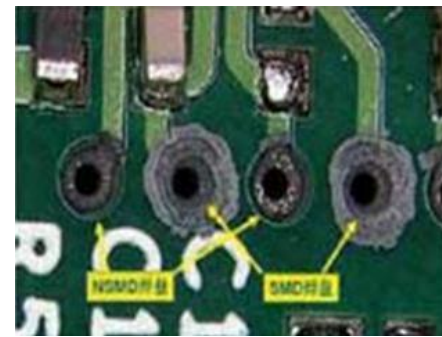
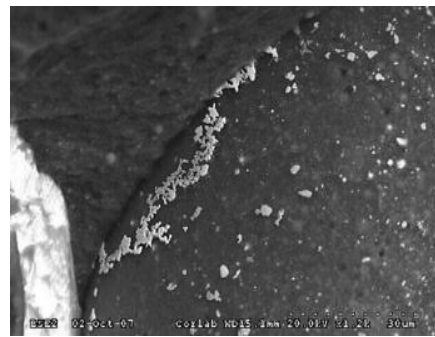
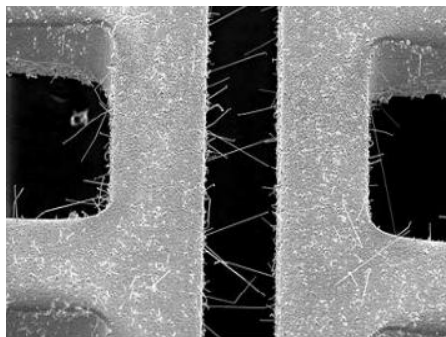
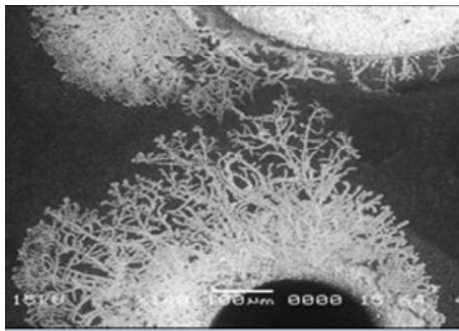
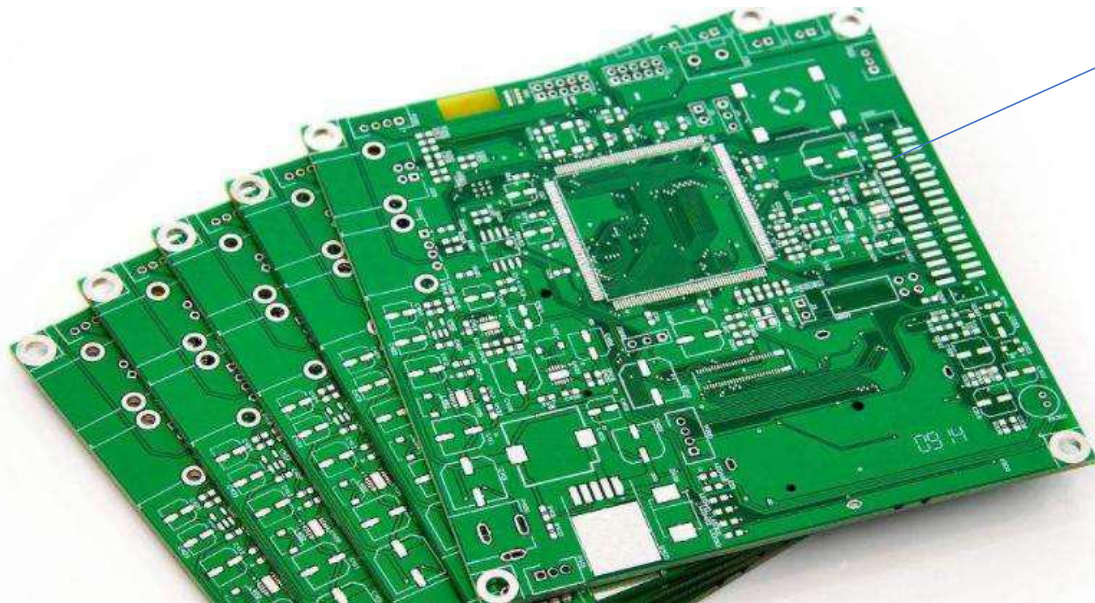


电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本





# 电子产品的故障机理

理论基础

## 电子元件故障机理

贴片电阻

电感线圈

电位器



电阻器



电连接器

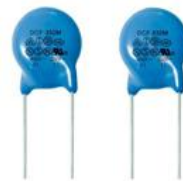
- 电阻值退化
- 固体钽电容退化
- 电解液干涸
- 介质击穿
- 接触退化
- 接点老化
- 介质氧化膜晶化
- 热膨胀系数不匹配
- 银离子迁移
- 电化学腐蚀



电连接器



电解电容器



陶瓷电容器



固态钽电容器

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



# 电子产品的故障机理

理论基础

电子产品的故障  
机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

## 怎样确定产品的故障机理呢？





# 故障机理分析方法-FMMEA

理论基础

故障模式、机理以及影响分析 (FMMEA) 是一种系统的分析方法，它是FMECA向故障机理层的延伸，通过分析故障的内因和外因，确定产品故障机理并量化其风险的方法。

电子产品的故障机理

故障物理元模型



可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

人工分析  
Manual Analysis

通过技术人员和可靠性工程师的经验给出可能发生的故障机理，不借助任何辅助工具。

专家辅助  
Experts Analysis

可靠性专家制定相应的推理规则，软件根据用户输入的信息使用预设规则进行自动判断。

智能推理  
Intelligent Analysis

软件使用机器学习算法，从以往的产品失效数据中学习推理，智能推荐可能发生的故障机理。



# 故障机理分析方法-FMMEA

理论基础

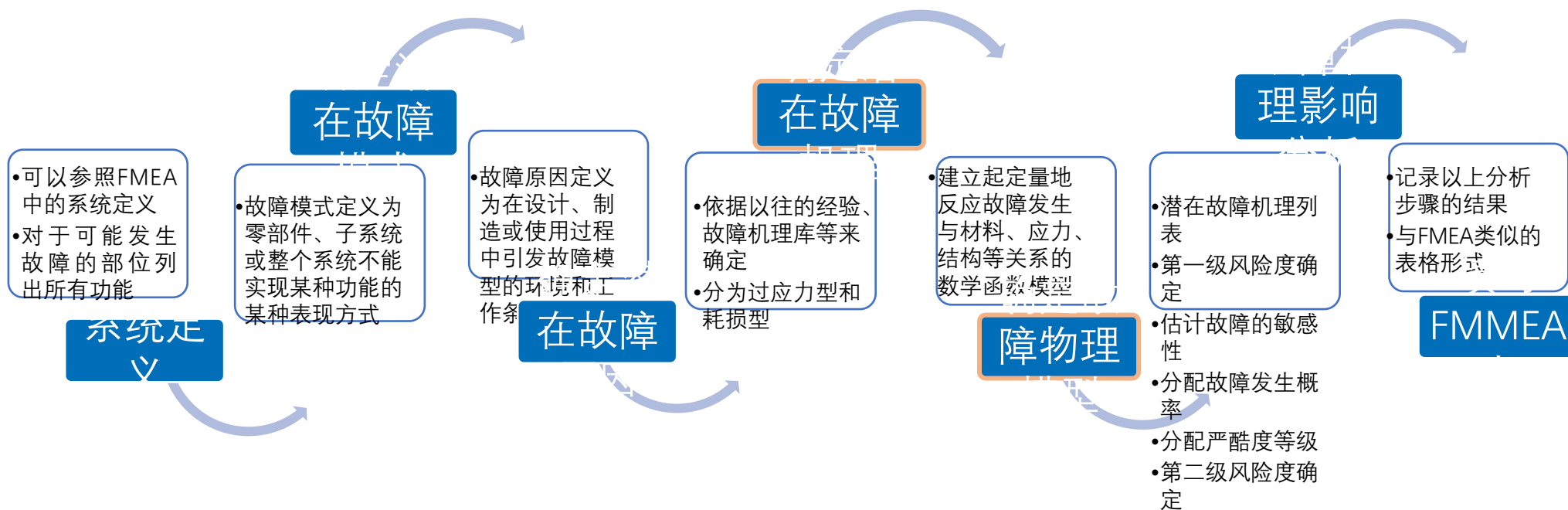
## FMMEA分析方法

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



# 故障机理分析方法--FMMEA

理论基础

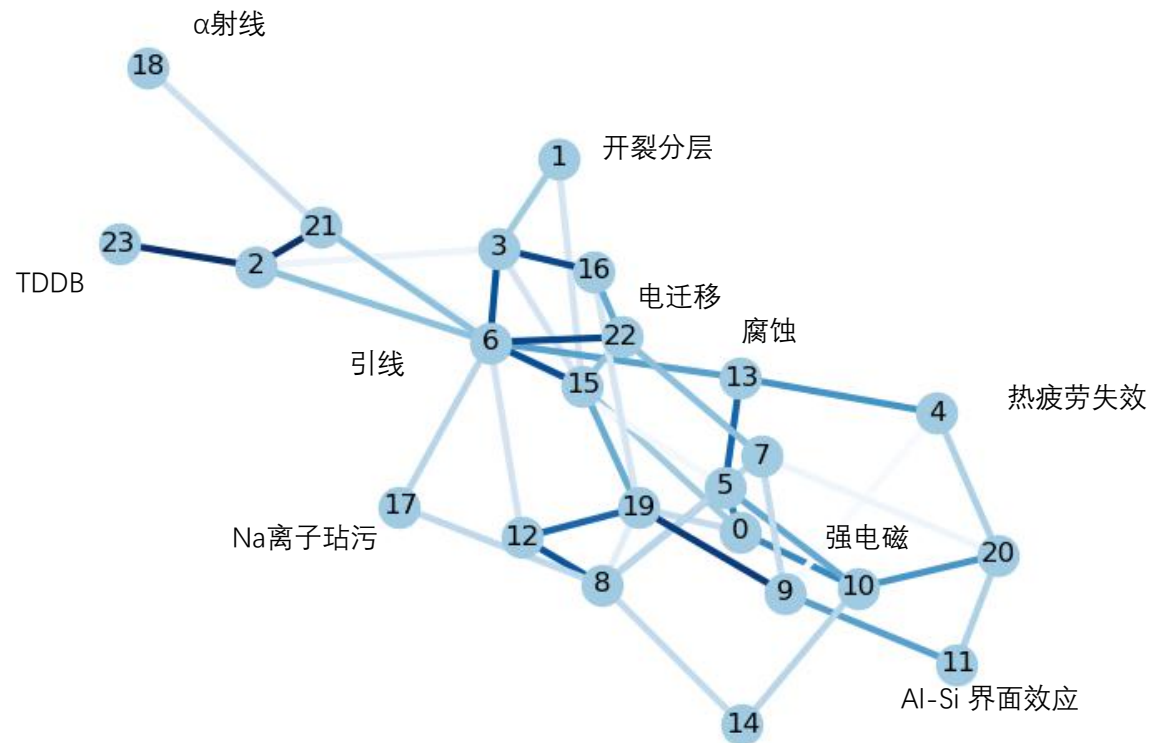
## FMMEA专家辅助

分析特点：

- 由专家从知识中提炼出推理规则；
- 避免由于缺乏相关经验导致机理分析错误；
- 显著提高分析效率。

工作原理：

- 使用谓词逻辑表示法表示推理逻辑；
- 综合元器件信息、环境条件为证据信息；
- 专家系统的推理引擎机制。



部分推理逻辑连接关系图

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

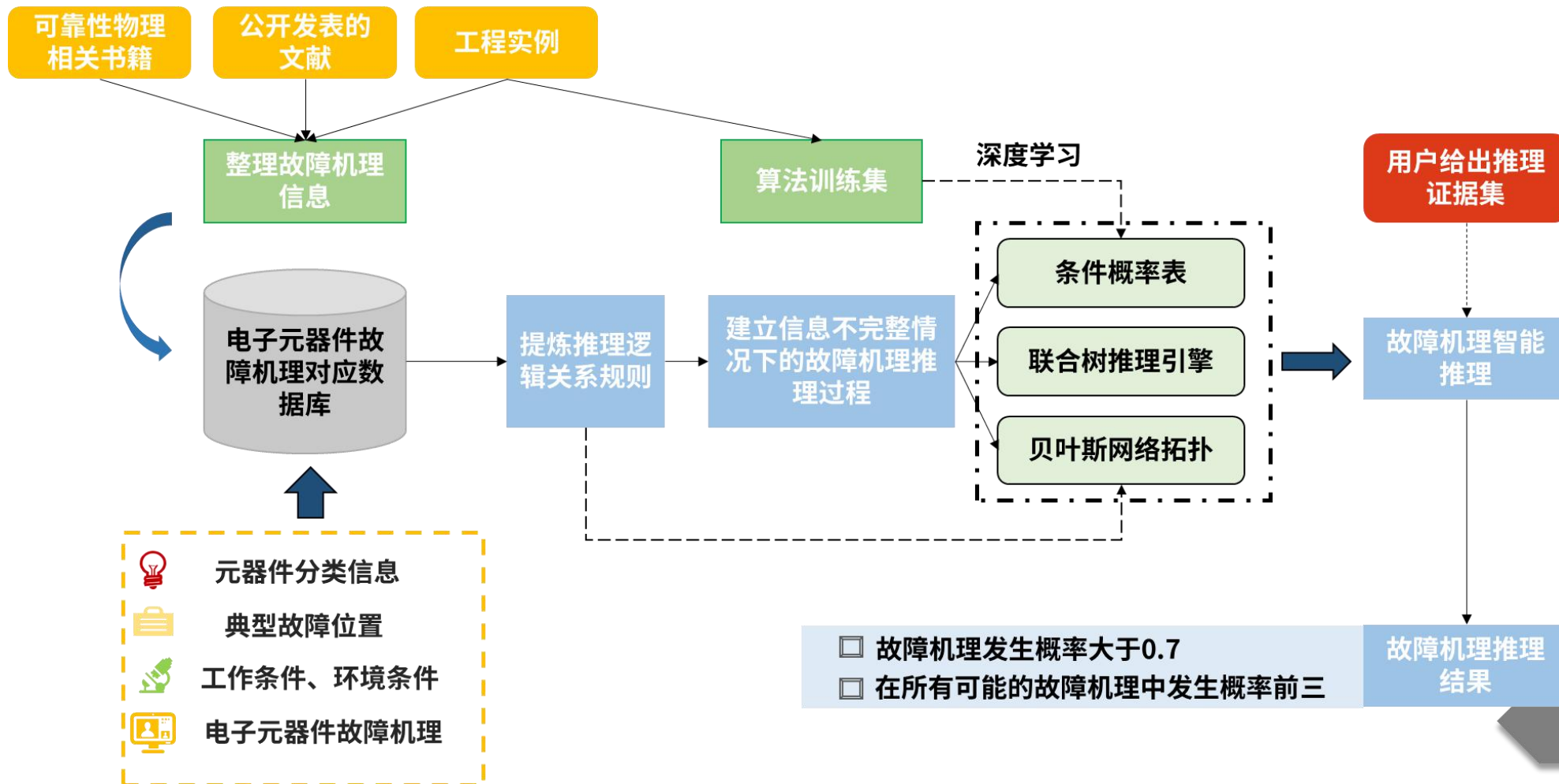
仿真实验样本

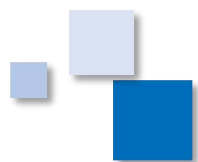


# 故障机理分析方法-FMMEA

理论基础

## FMMEA智能分析

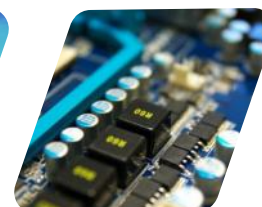




瑞盈智能  
Wit Forever

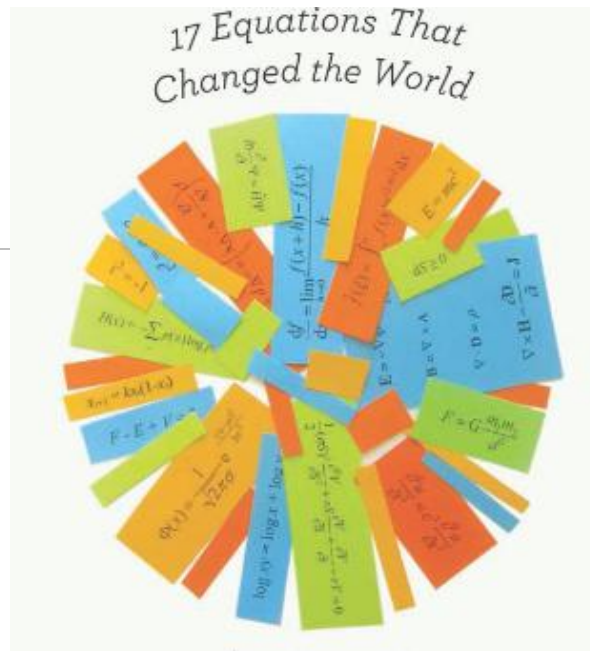
03  
Part

# 故障物理元模型





# 改变世界的十七个等式



理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

## 改变世界的 17 个等式

Ian Stewart

- |          |   |                     |
|----------|---|---------------------|
| 1. 勾股定理  | $a^2 + b^2 = c^2$   | Pythagoras, 530 BC  |
| 2. 对数公式  | $\log xy = \log x + \log y$   | John Napier, 1610   |
| 3. 微积分   | $\frac{df}{dt} = \lim_{\Delta \rightarrow 0} \frac{f(t+h) - f(t)}{h}$       | Newton, 1668        |
| 4. 万有引力  | $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$   | Newton, 1687        |
| 5. 复数    | $i^2 = -1$  | Euler, 1750         |
| 6. 多面体定理 | $V - E + F = 2$   | Euler, 1751         |
| 7. 正态分布  | $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\rho}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\rho^2}}$        | C.F. Gauss, 1810    |
| 8. 微分方程  | $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ | J. d'Alembert, 1746 |
| 9. 傅里叶变换 | $f(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{-2\pi i x \omega} dx$          | J. Fourier, 1822    |

- |               |  |                            |
|---------------|--|----------------------------|
| 10. 纳维-斯托克斯方程 | $\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \nabla \cdot T + f$                                  | C. Navier, G. Stokes, 1845 |
|               | $\nabla \cdot E = 0 \quad \nabla \cdot H = 0$  |                            |
| 11. 麦克斯韦方程组   | $\nabla \times E = -\frac{1}{c} \frac{\partial H}{\partial t} \quad \nabla \times H = \frac{1}{c} \frac{\partial E}{\partial t}$         | J.C. Maxwell, 1865         |
| 12. 热力学第二定律   | $dS \geq 0$  | I. Boltzmann, 1874         |
| 13. 相对论       | $E = mc^2$   | Einstein, 1905             |
| 14. 薛定谔方程     | $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi$  | E. Schrodinger, 1927       |
| 15. 信息理论      | $H = -\sum p(x) \log p(x)$   | C. Shannon, 1949           |
| 16. 混沌理论      | $x_{t+1} = kx_t(1 - x_t)$  | Robert May, 1975           |
| 17. 布莱克-斯科尔斯  | $\frac{1}{2} \sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 V}{\partial S^2} + rS \frac{\partial V}{\partial S} + \frac{\partial V}{\partial t} - rV = 0$ | F. Black, M. Scholes, 1900 |





# 故障物理元模型

理论基础

## 故障物理学 8 个元模型

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

1.	低周疲劳寿命	$\Delta \varepsilon_p N_f^a = C$ 或 $\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)$	Coffin-Mason, 1960	
2.	高周疲劳寿命	$N_f S^b = C$ 或 $S = A(N_f)^b$	Basquin, 1910	➔ 结构破坏模型
3.	裂纹扩展	$\frac{d\alpha}{dN} = C(\Delta K)^m$	Paris, 1961	
4.	反应论模型	$\frac{\partial M}{\partial t} = R(t) A e^{-E/RT}$	Arrhenius, 1889	
5.	艾林模型	$R(T, S) = R_0 f_1 f_2$	Eyring, 1935	➔ 反应论模型
6.	逆幂律模型	$\xi = AS^{-n}$	Nelson, 1972	
7.	扩散模型	$J_A = -D_A \frac{dC_A}{dx}$ 及 $\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_A \frac{\partial C_A}{\partial x} \right)$	Fick, 1855	➔ 扩散模型
8.	线性累加模型	$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$	Miner, 1945	➔ 损伤累计模型

# 故障物理元模型

理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

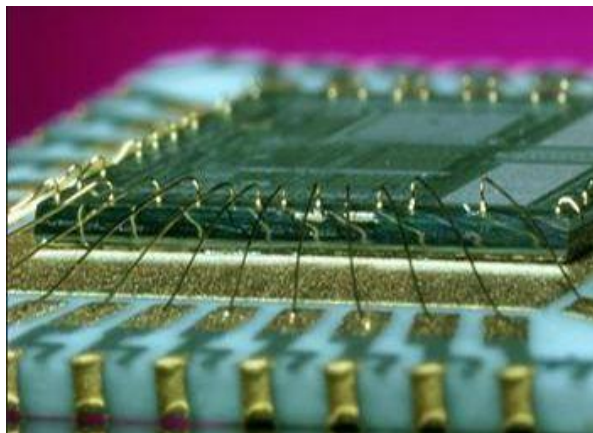
可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

## 低周疲劳模型

$$\frac{\Delta \varepsilon_p}{2} = \varepsilon'_f (2N_f)^c$$

$$N_f = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta \gamma}{2\varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{c}}$$



1983年贝尔实验室的  
Werner Engelmaier修正适用于焊点热疲劳



1991修正后适用于镀通孔  
热疲劳预测



引线剪切疲劳

焊盘剪切疲劳

芯片粘结部位疲劳

# 故障物理元模型

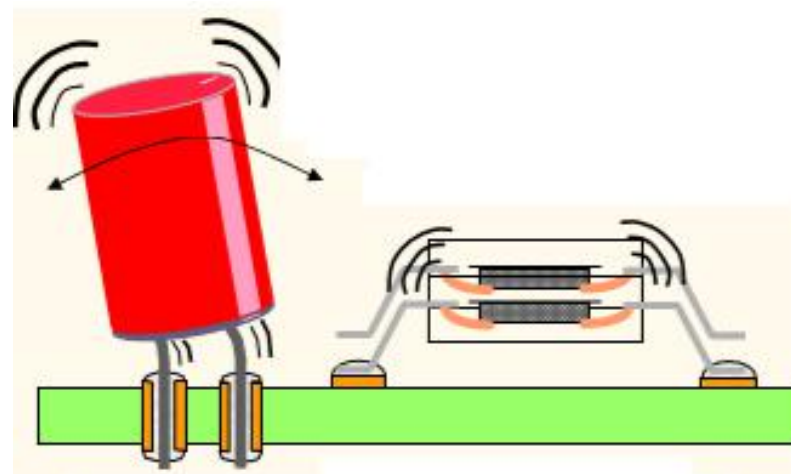
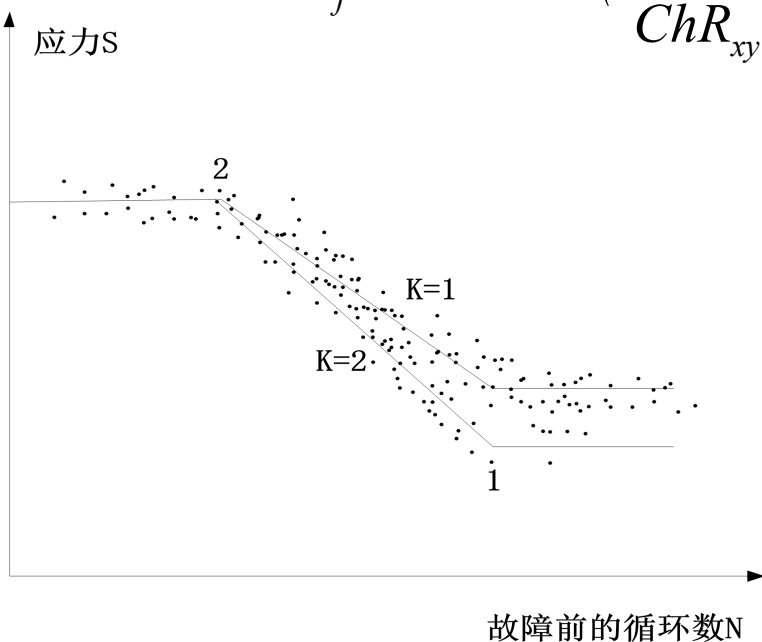
理论基础

## 高周疲劳模型

$$N_f S^b = C$$

$$N_f = 2 \times 10^7 \times \left( \frac{0.00022B}{ChR_{xy} \sqrt{L}} \cdot \frac{f_n^{1.25}}{36.85 \sqrt{P}} \right)^b$$

1973年，UCLA的Dave S Steinberg利用Basquin模型得到了电子产品振动疲劳模型，包括随机振动疲劳、正弦振动疲劳

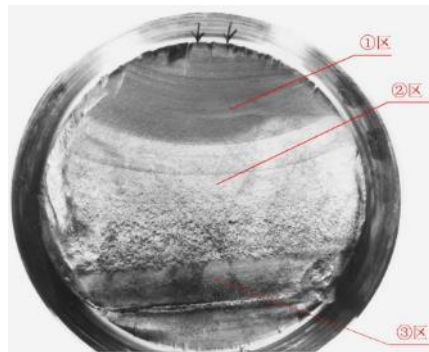




# 故障物理元模型

理论基础

## ▣ 裂纹扩展模型



Motorola的Darveaux提出基于初始裂纹产生和裂纹扩展的焊点寿命模型，还可用于描述由于残余应力释放造成的裂纹扩展

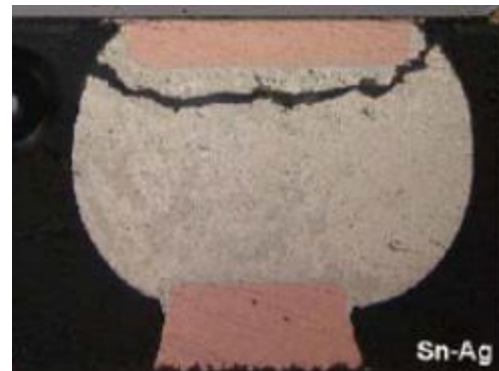
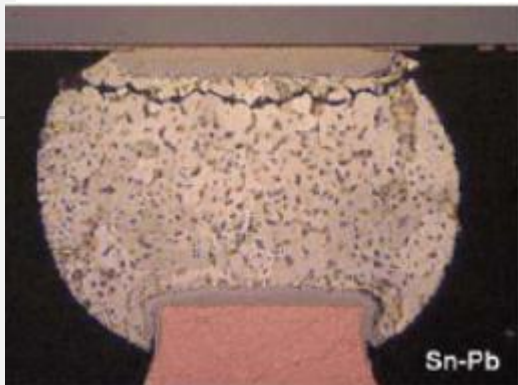
$$\frac{d\alpha}{dN} = C(\Delta K)^m$$



$$N_f = N_0 + a / \frac{d\alpha}{dN}$$

$$N_0 = K_1 (\Delta W_{ave})^{K_2}$$

$$\frac{d\alpha}{dN} = K_3 (\Delta W_{ave})^{K_4}$$



电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

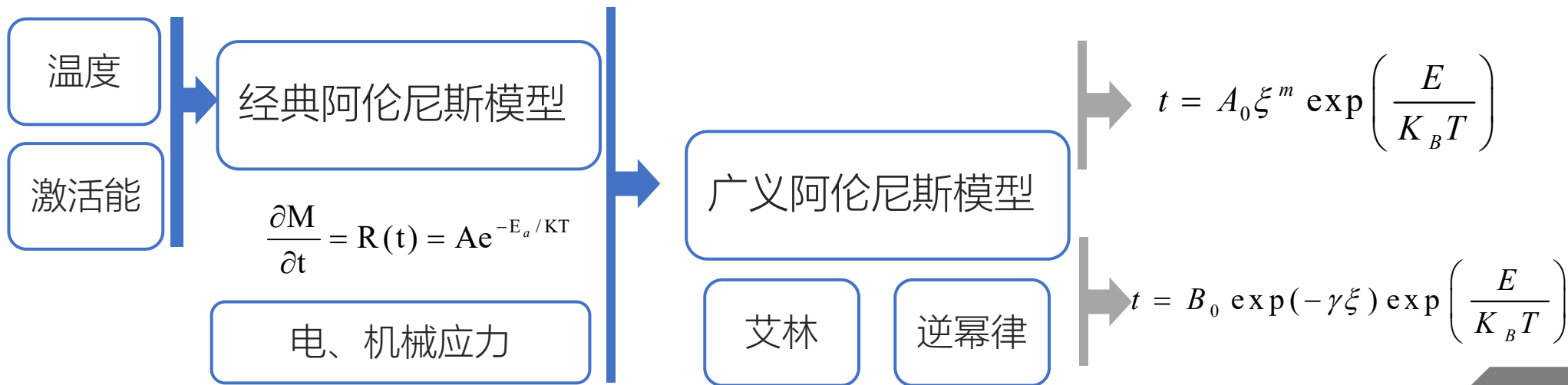
仿真实验样本

# 故障物理元模型

理论基础

## ▣ 反应论模型

元器件的特性退化直至失效，是由于构成其物质的原子或分子因物理或化学原因随时间发生了变化，这种变化或反应使器件的一些特性变化，当**反应的结果使变化积累到一定程度**时就产生失效。



电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



# 故障物理元模型

理论基础

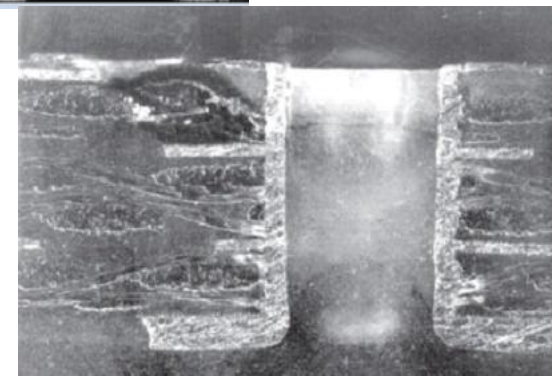
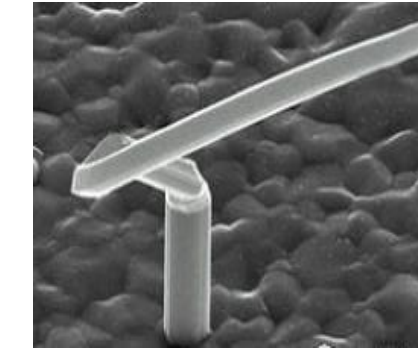
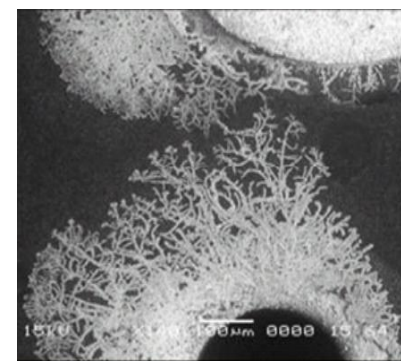
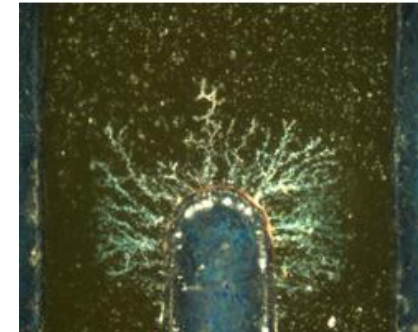
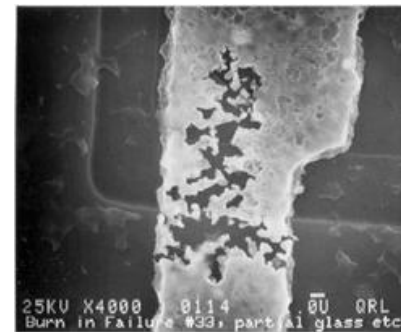
## ▣ 反应论模型

**温度+电流密度**----电迁移Black模型

**温度+电流**-----热载流子模型

**温度+电压**-----栅氧化层击穿模型、  
多层陶瓷电容介电退化模型、固体钽  
电容退化模型

**温度+湿度+电压**---腐蚀、晶枝生长、  
CFF、银迁移模型



电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



# 故障物理元模型

理论基础

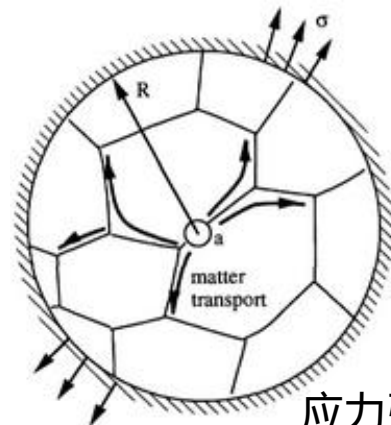
## 扩散模型

**Fick第一定律**

$$J_A = -D_A \frac{dC_A}{dx}$$

**Fick第二定律**

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_A \frac{\partial C_A}{\partial x} \right)$$



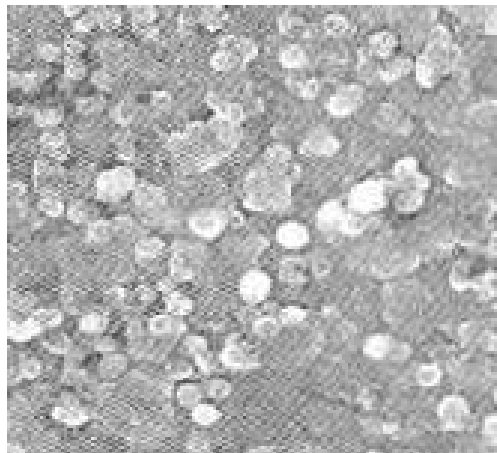
应力引起的自扩散  
SDDV(空位扩散)

电子产品的故障机理

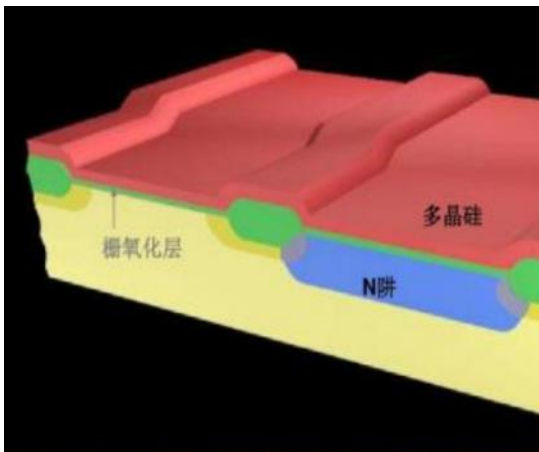
故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

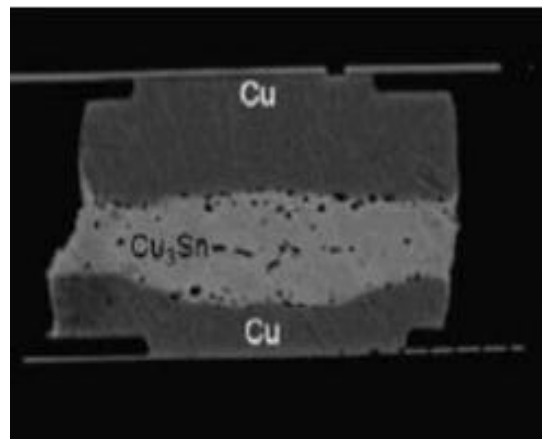
仿真实验样本



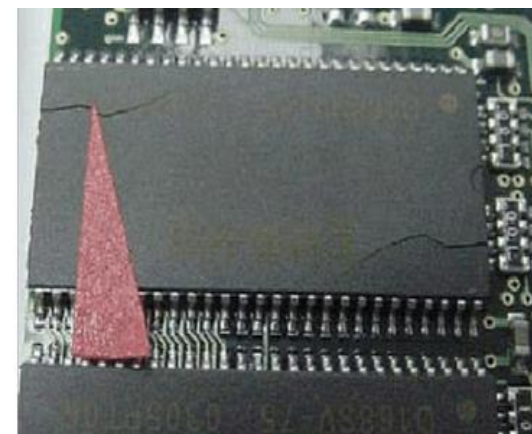
欧姆接触退化 ( Au/Ga, Au/GaAs, Ni/GaAs )



栅金属下沉 ( Au/GaAs )



Kirkendall空洞 ( Au/Al, Au/Cu, Al/Ag, )



Popcorn效应 (水汽扩散)



# 故障物理元模型

理论基础

## ▣ 损伤累加模型

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad \rightarrow$$

各级应力相互**独立**，造成的损伤**线性累加**，当累积的损伤达到临界值时，材料或构件会发生疲劳破坏。

$$N = \frac{N_1}{\left(1 + (N_2 / N_1)^b\right)^{\frac{1}{a}}}$$

$$N = \left(1 - \frac{N}{N_1}\right)^{\frac{\ln N_2}{\ln N_1}} N_2$$

$$\frac{1}{N} = \left(\frac{n_T}{N_T}\right)^{0.47} + \left(\frac{n_v}{N_v}\right)^{0.70}$$

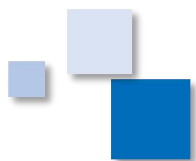
$$\frac{1}{N} = \left(\frac{n_v}{N_v}\right)^{0.93} + \left(\frac{n_T}{N_T}\right)^{0.91}$$

不同温度循环载荷的损伤累加

不同随机振动载荷的损伤累加

先温度后振动载荷的损伤累加

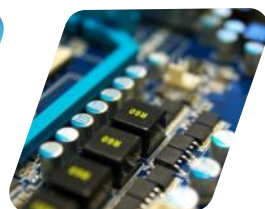
先振动后温度载荷的损伤累加



瑞盈智能  
Wit Forever

04  
Part

# 产品可靠性指标MTBF仿真计算





# MTBF概念和计算方法

理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

## MTBF 平均故障间隔时间

对于可修产品，若使用过程中发生  $N_0$  次故障，每次故障修复后又重新投入使用，测得第  $i$  次工作时间为  $t_i$ ，则MTBF为

$$T_{BF} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i.$$

- 对于不可修产品：
- 对于完全修复产品：

$$MTBF = MTTF$$

## MTTF 平均故障前时间

对  $N_0$  个不可修产品在相同条件下进行试验，测得第  $i$  个产品的故障时间为  $t_i$ ，则MTTF为

$$T_{TF} = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i.$$

当  $N_0$  趋向于无穷时，MTTF为产品故障时间这一随机变量的数学期望，因此

$$T_{TF} = \int_0^{\infty} R(t) dt.$$





# MTBF概念和计算方法

理论基础

MTBF的计算方法：

(1) 可靠性预计：军品和高可靠性产品大多采用MIL-STD-217F和GJB 299C这两个标准，民品则用TelcordiaSR-332手册。

$$\lambda_i = \lambda_{bi} \pi_{Ei} \pi_{Qi} \pi_{Ai} \pi_{Ri} \pi_{Ci} \quad \lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad MTTF = \frac{1}{\lambda}$$

(2) 实验室：设N0个可修产品在相同的给定条件下进行试验，测得其全部故障时间为t1,t2...tn，其平均故障前时间为：

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i = \frac{T}{N_0}$$

(3) 现场故障数据统计：产品在现场真实工作条件下的故障数据，环境条件多样，产品随机。

$$MTBF = \frac{1}{N_0} \sum_{i=1}^{N_0} t_i$$

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

# 外场统计MTBF和故障的类型

理论基础

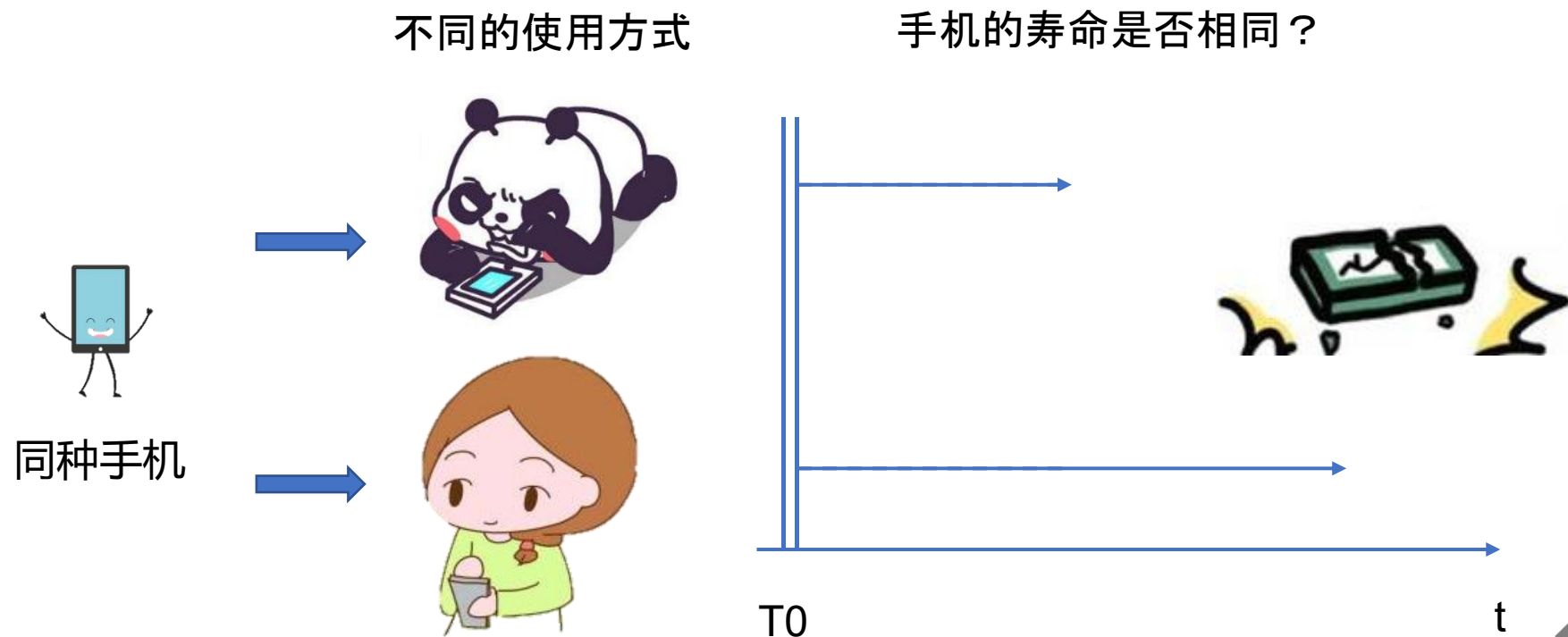
电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

- 同一批次产品，不同的使用方式及任务，MTBF统计结果差异很大，且主故障机理也不相同



# MTBF的仿真计算方法

理论基础

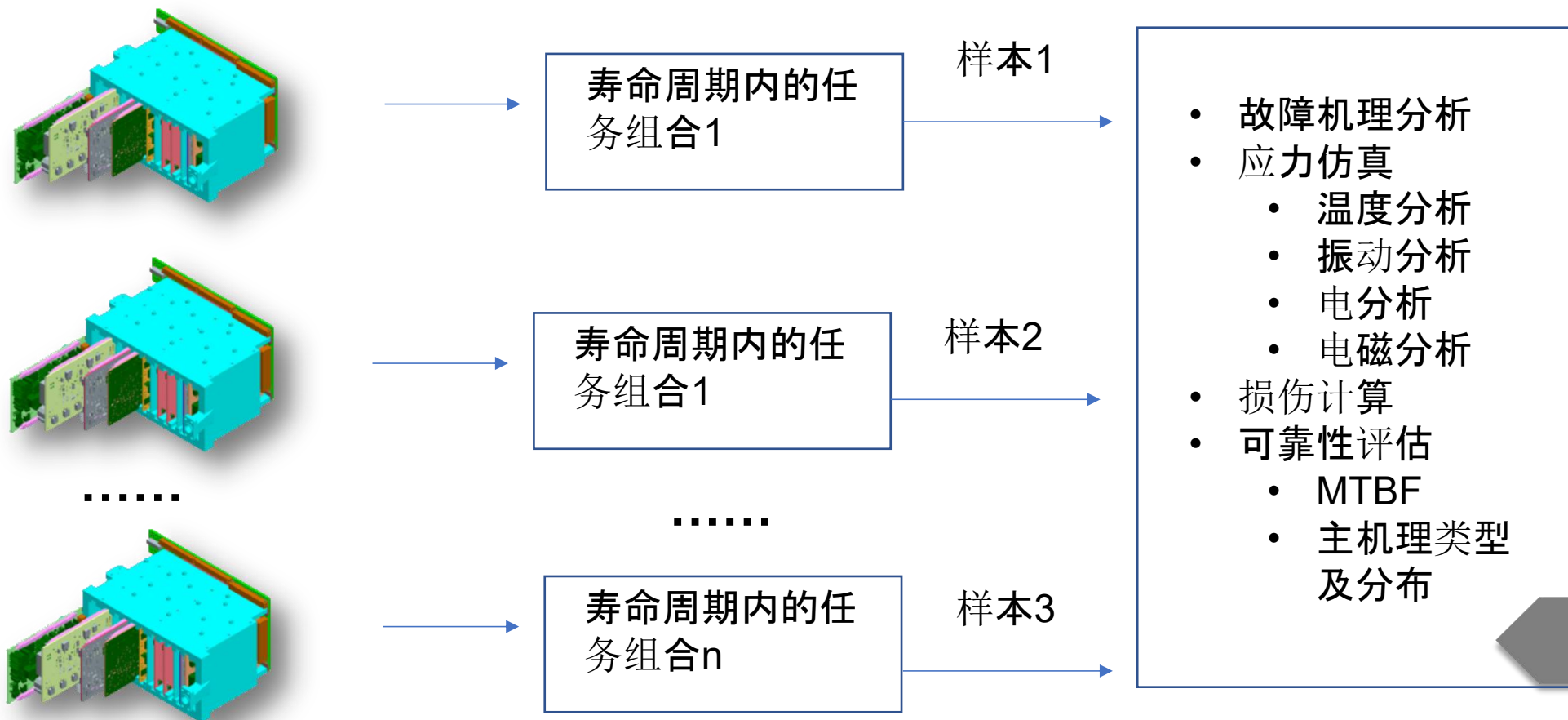
电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

- 通过对仿真试验样本进行故障物理分析、损伤计算，利用系统关系，预测产品的MTBF





理论基础

电子产品的故障  
机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

# 现有可靠性仿真软件能计算MTBF吗？



# 国外可靠性虚拟仿真软件

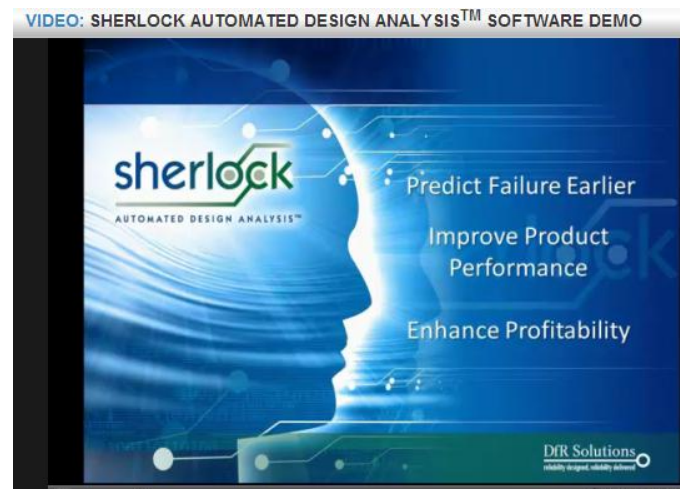
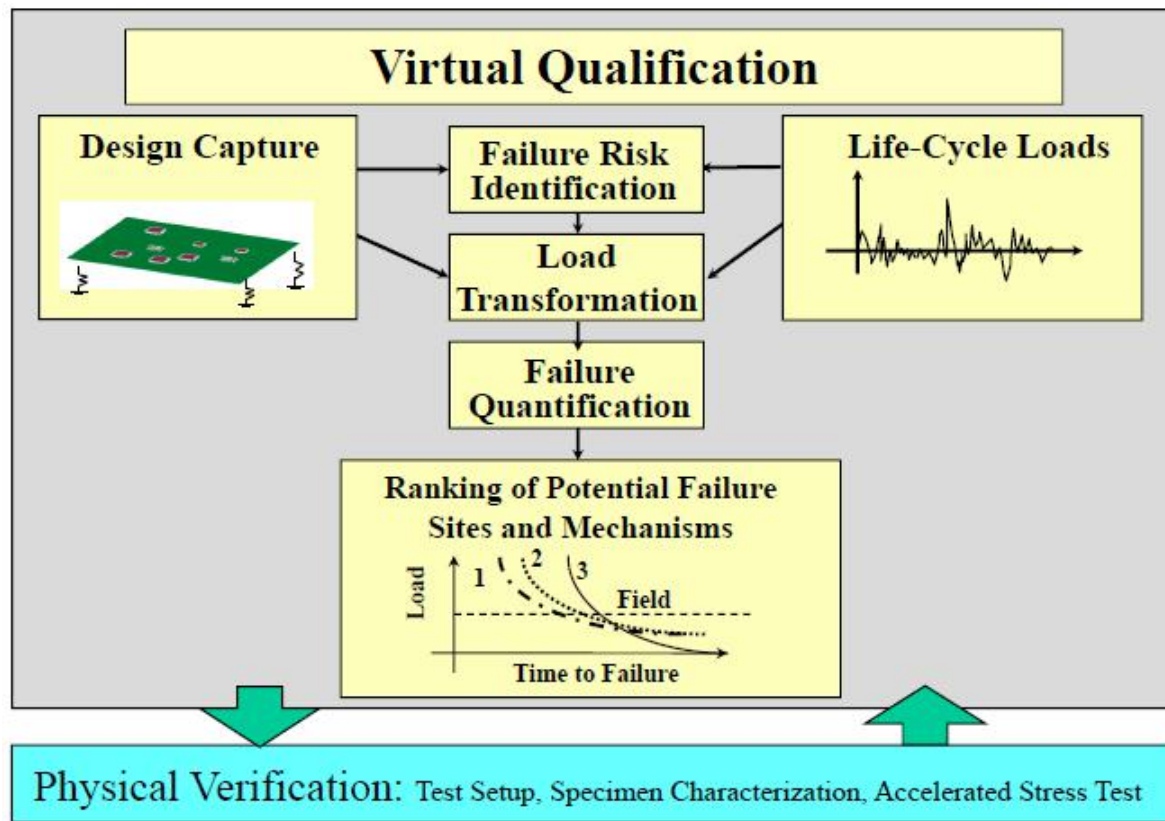
理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



- 输出：给定条件下，产品大样本量寿命值。
- 主故障机理

# 国内的可靠性仿真实验平台

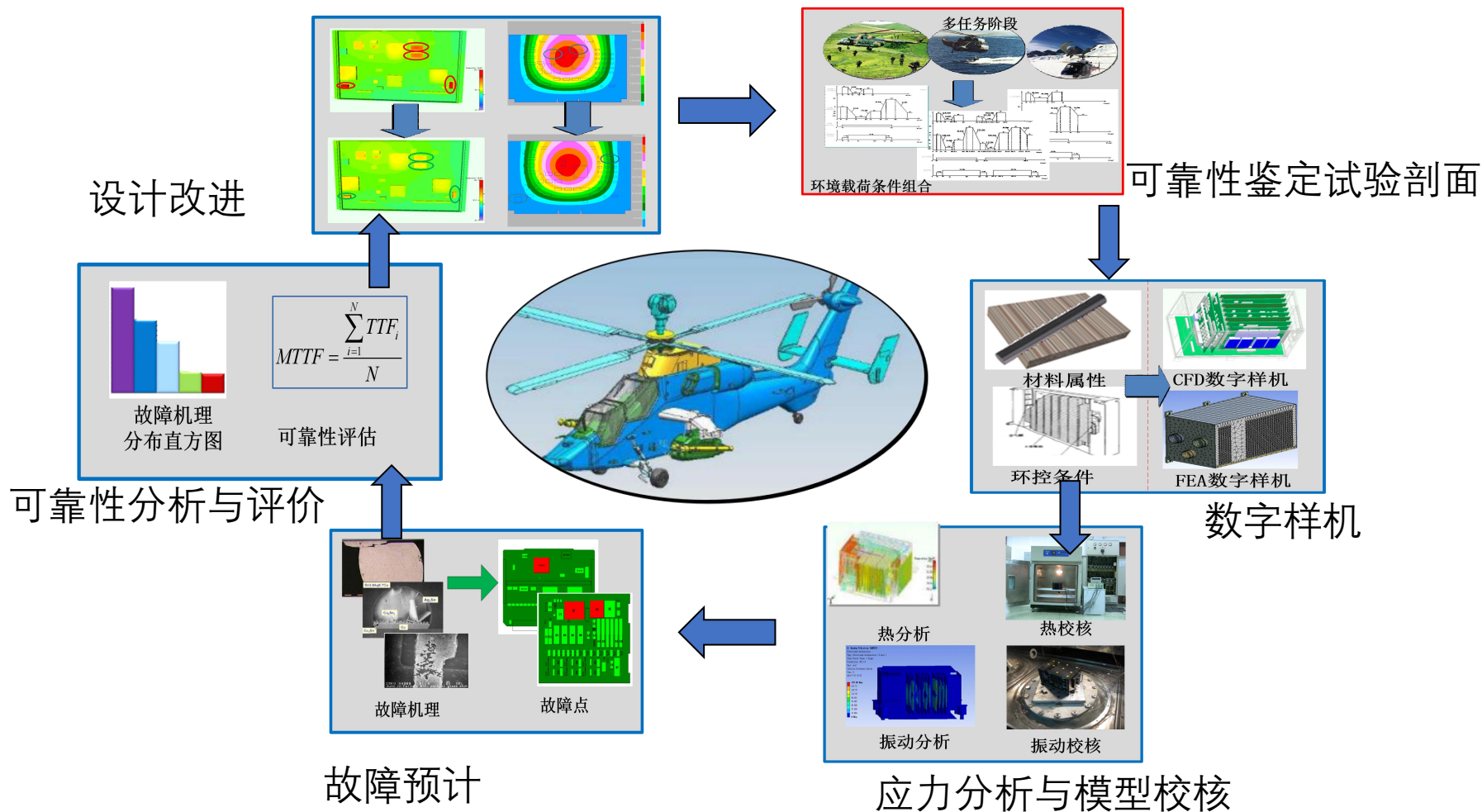
理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本





# 国内的可靠性仿真实验平台

理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本

潜在故障点

单点故障

元器件

单点故障

单点故障

单点故障

模块/设备/系统

元器件

元器件

相关仿真软件分析

故障信息矩阵

单点故障  
分布拟合

确定故障机理的  
故障时间分布

多点故障  
分布融合

确定元器件的故  
障时间分布

多点故障  
分布融合

确定模块级/设备级/  
系统级产品的首次  
故障时间分布

模块级/设备级/系统  
级产品的可靠性评价

- 给定条件下，产品首次故障时间的平均值，即MTTFF ( Mean Time To First Failure )
- 主故障机理



# 电子产品可靠性云评估--CARFE

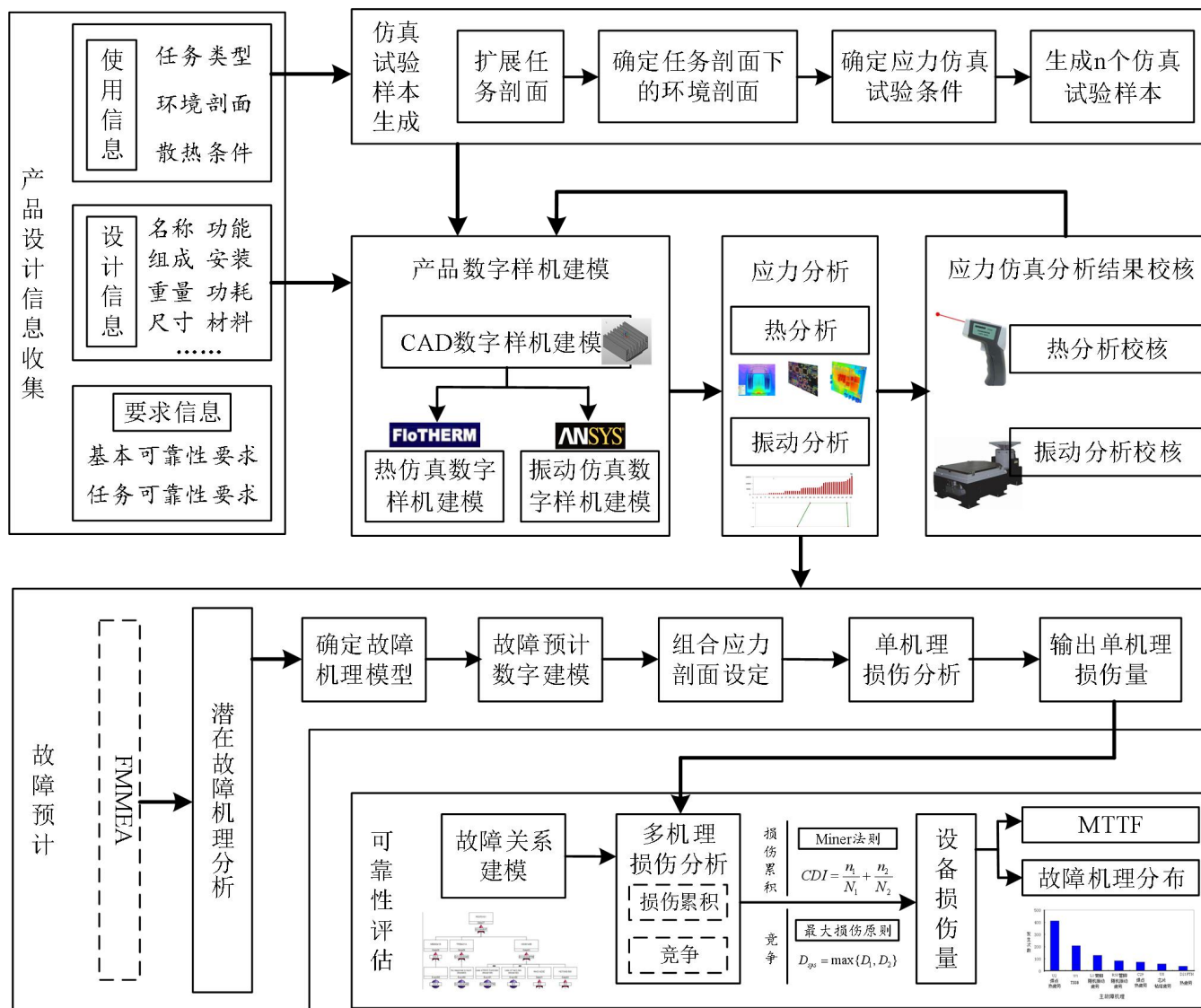
理论基础

电子产品的故障机理

故障物理元模型

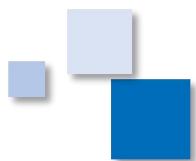
可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



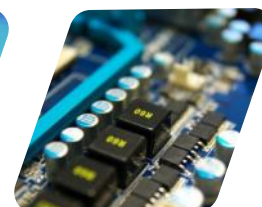
- 输出：MTBF
- 主故障机理分布





05  
Part

# 可靠性仿真样本的生成



# 可靠性仿真样本的组成

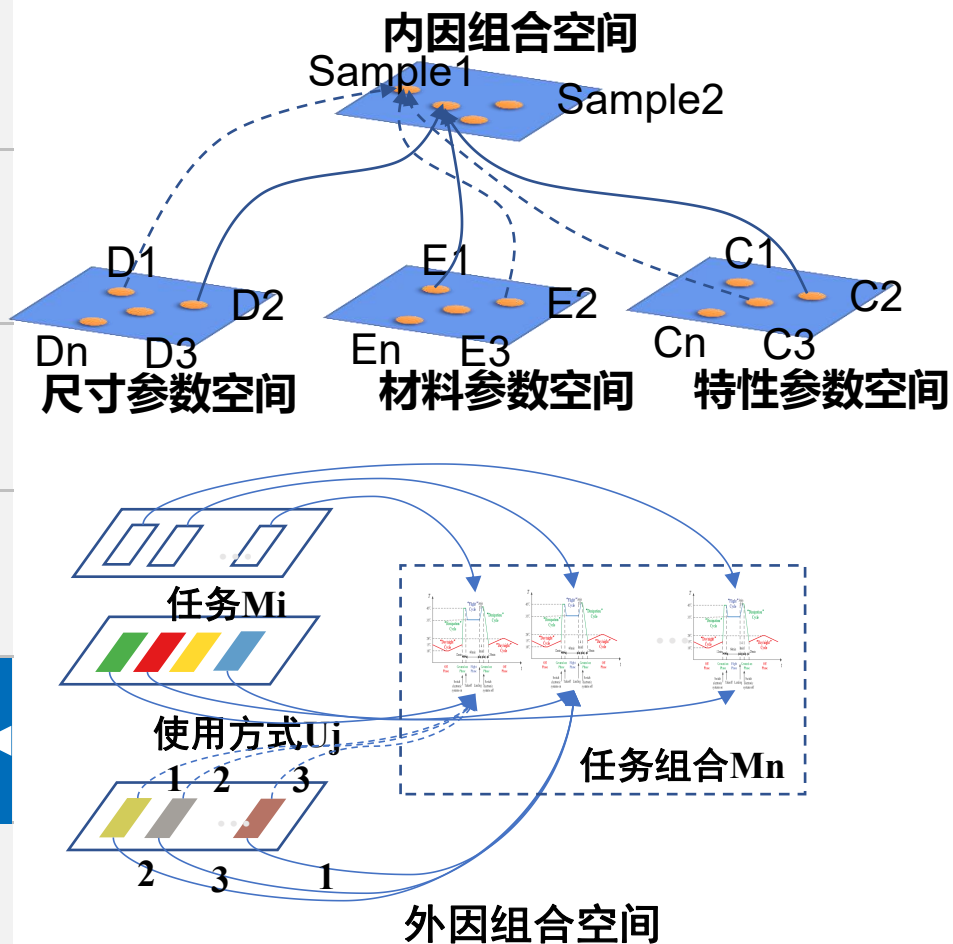
理论基础

电子产品的故障机理

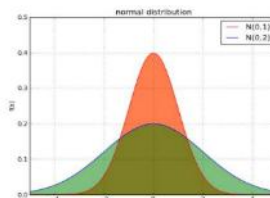
故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



内外因组合



仿真样本	内因和外因的组合
样本1	$M_{111}, M_{121}, \dots, D_1, E_1, C_1$
样本2	$M_{111}, M_{121}, \dots, D_1, E_1, C_1$
样本3	$M_{111}, M_{121}, \dots, D_1, E_1, C_1$
.....	.....
样本n	$M_{111}, M_{121}, \dots, D_n, E_n, C_n$

一个完整的可靠性仿真样本包括**产品**和产品经历的**任务组合**。

# 可靠性仿真样本的组成

理论基础

## 内因不确定性

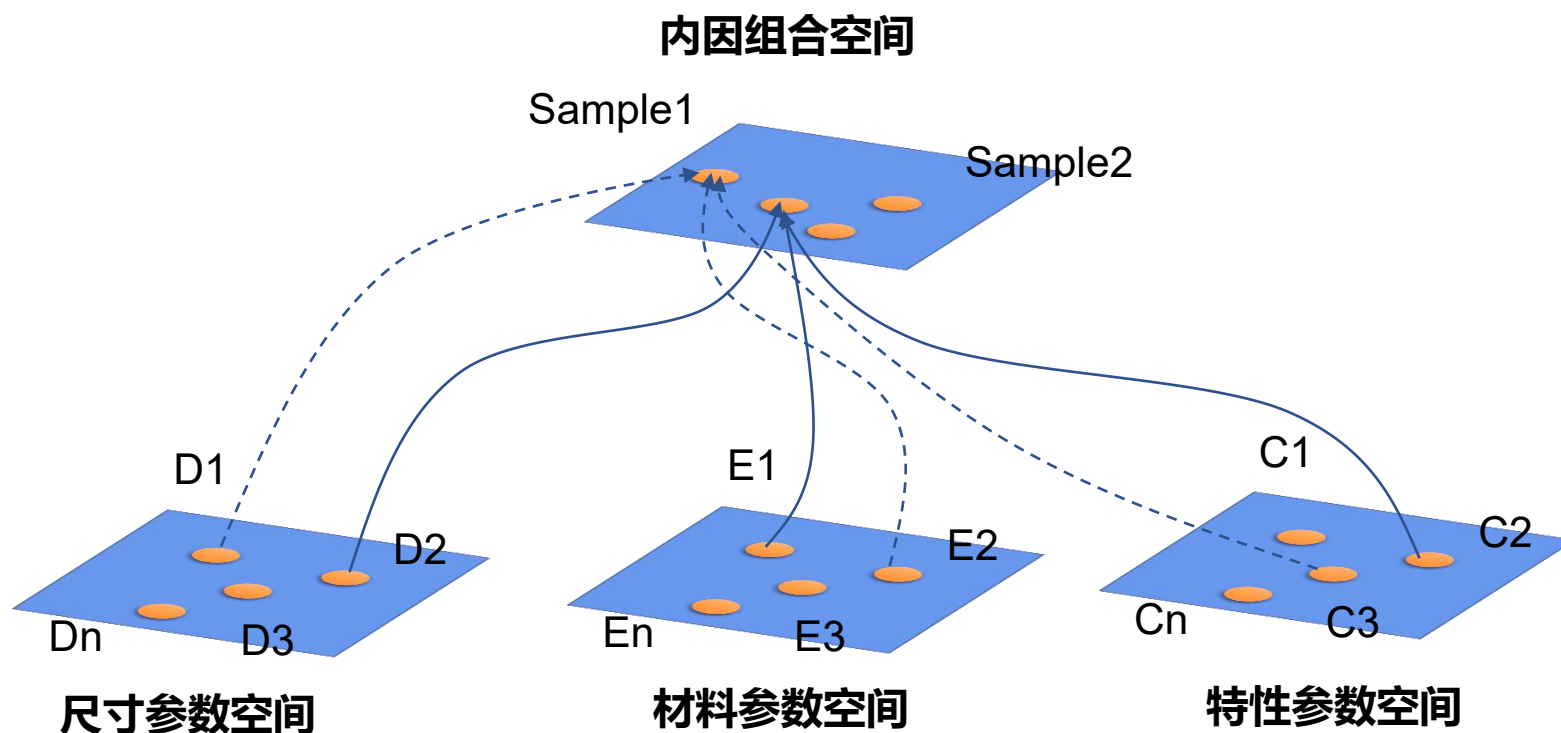
在由于工艺误差等因素导致的产品参数波动，包括尺寸、材料和特性参数，属于内因不确定性。

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本



# 可靠性仿真样本的组成

理论基础

## 外因不确定性

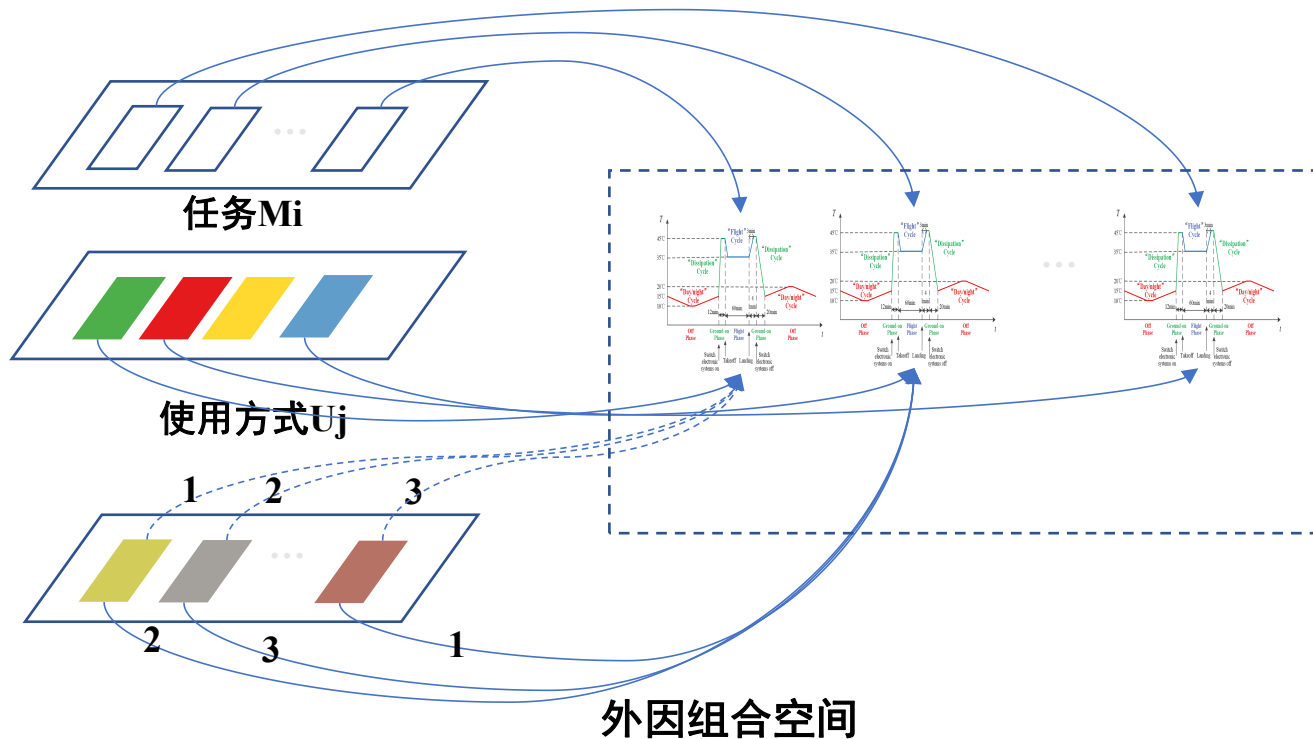
同一批次产品在使用过程中由于完成的任务不同，使用的地区、季节不同，用户使用方式不同，导致产品经历的环境应力具有不确定性，称为外因不确定性。

电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

仿真实验样本





# 可靠性仿真样本的生成

理论基础

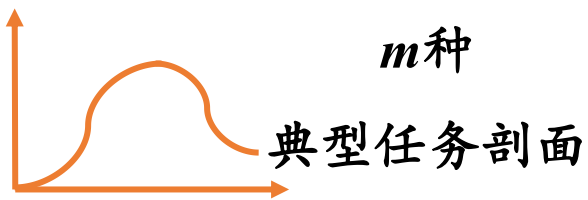
电子产品的故障机理

故障物理元模型

可靠性指标  
MTBF计算方法

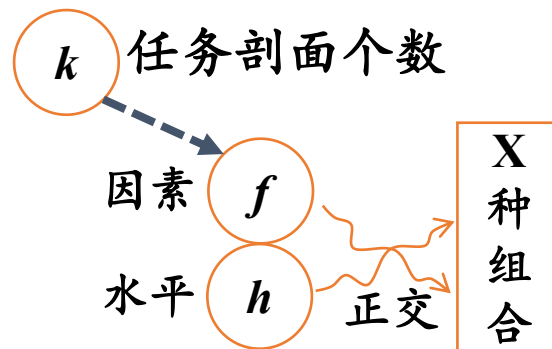
仿真实验样本

确定典型任务剖面



确定	任务	1	2	...	$m$
概率	概率	$p_1$	$p_2$	...	$p_m$

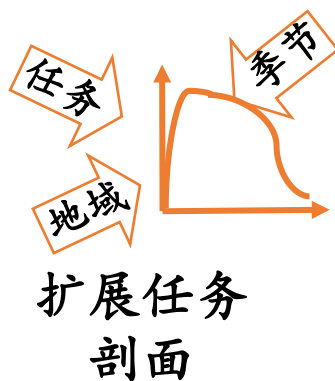
内外因分散性组合



蒙特卡洛抽样

任务剖面个数

1	地域	季节
2	使用方式	



任务剖面、使用方式组合



提取应力仿真条件



瑞盈智能  
Wit Forever

感谢您的聆听  
谢谢！