

**LWSIM**  
蓝威数值



# 新研接触件可靠性正向设计方法与应用

蓝威数值（珠海）科技有限公司

深圳市为民可靠性系统工程研究院

报告人：李若彪 15995833687

邮 箱：liruobiao@buaa.edu.cn





# 简介

**北京蓝威技术有限公司** 成立于2014年，是北京市专精特新中小企业，与母公司 **蓝威数值(珠海)科技有限公司** 是专业从事**产品可靠性提升服务** 的民营高科技企业，客户主要集中在军民口的电子、机电、能源等各个领域。

**深圳市为民可靠性系统工程研究院** 成立于2021年，是由 **顺络电子、杰普特光电、英维克、豪恩科技、乔合里、安宏基集团** 共同发起，**CATL、鸿荣源** 做为理事单位的新型民非科研机构，旨在推动 **可靠性正向设计技术** 在企业创新转型升级过程中的应用，服务创新科技、普惠中国智造。





01  
Part

# 背景介绍





# 研究对象

## 新型扭簧电连接器

**电连接器**是用于传输信号、接通电流的关键器件，其性能降级或失效对整个系统都有重要影响，按结构和出现时间大致分为片簧、冠簧、转簧、线簧、扭簧电连接器。

**扭簧电连接器**因载流改善能力强、接触力稳定性高，在追求小型化、大电流可靠传输的市场中广受关注。

### 技术壁垒

国产材料、工艺  
实现复杂扭簧结构

### 市场需求

低成本、高可靠性  
市场竞争优势



必须开展 **可靠性正向设计**！

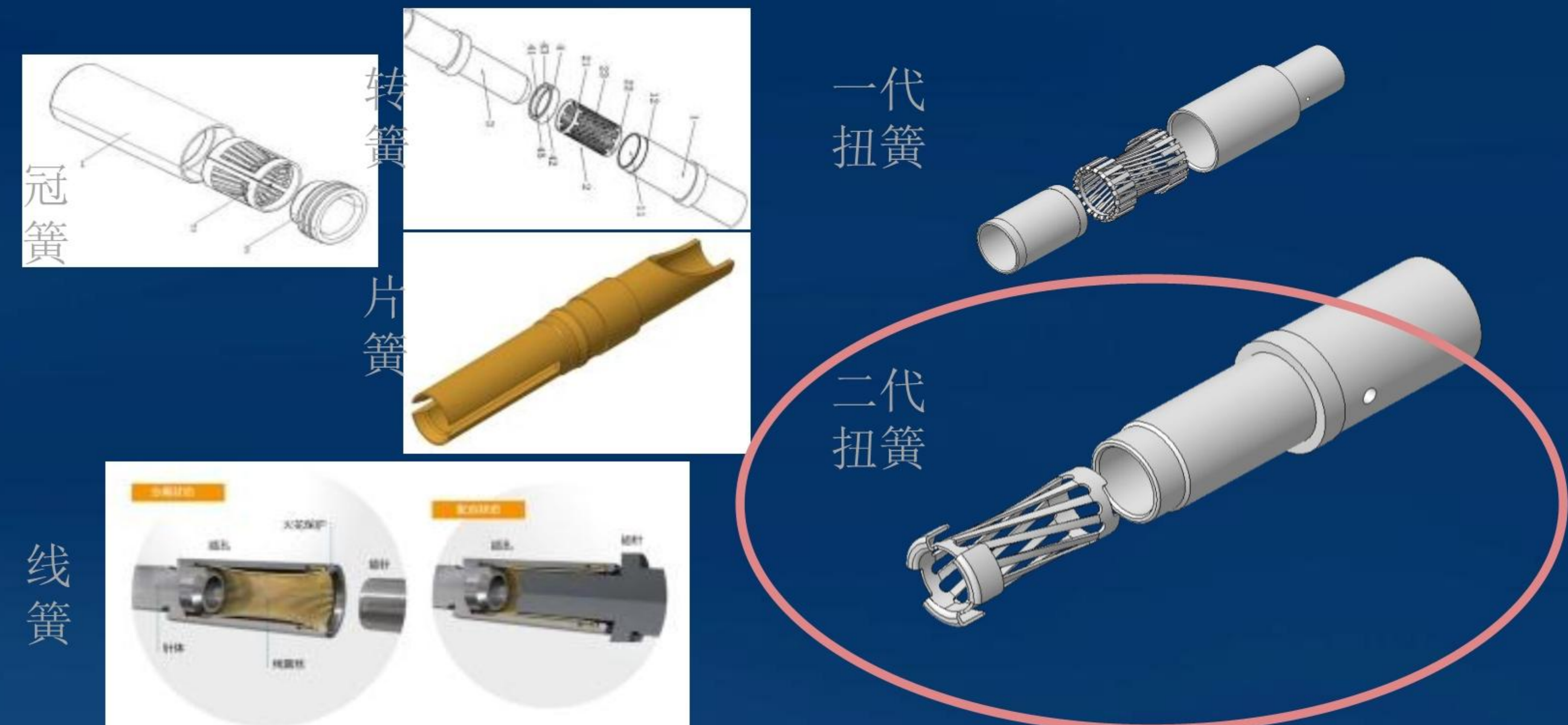


图. 常见的电连接器结构

**可靠性正向设计是产品推陈出新的必由之路！**



# 问题与挑战

新产品从原料采买到加工装配整个过程往往存在**多维离散-连续变量**，  
可靠性受选材、工艺、手册标准、外界环境、工作条件等**多源不确定性**影响  
**如何保证产品的可靠性水平？**



缺少经验认知

缺少样本数据



多维设计变量

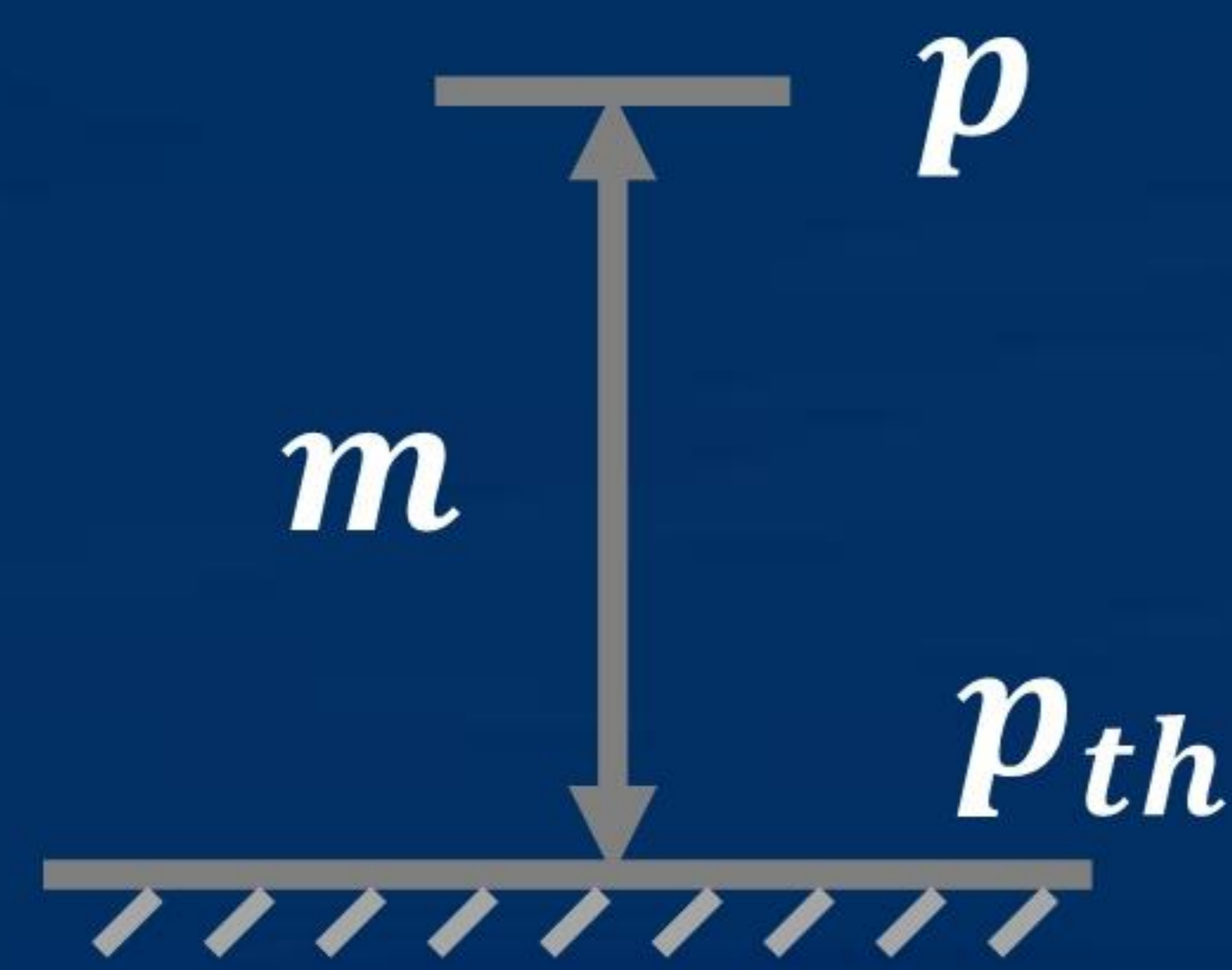
多源不确定性



需要系统化、全局化的设计



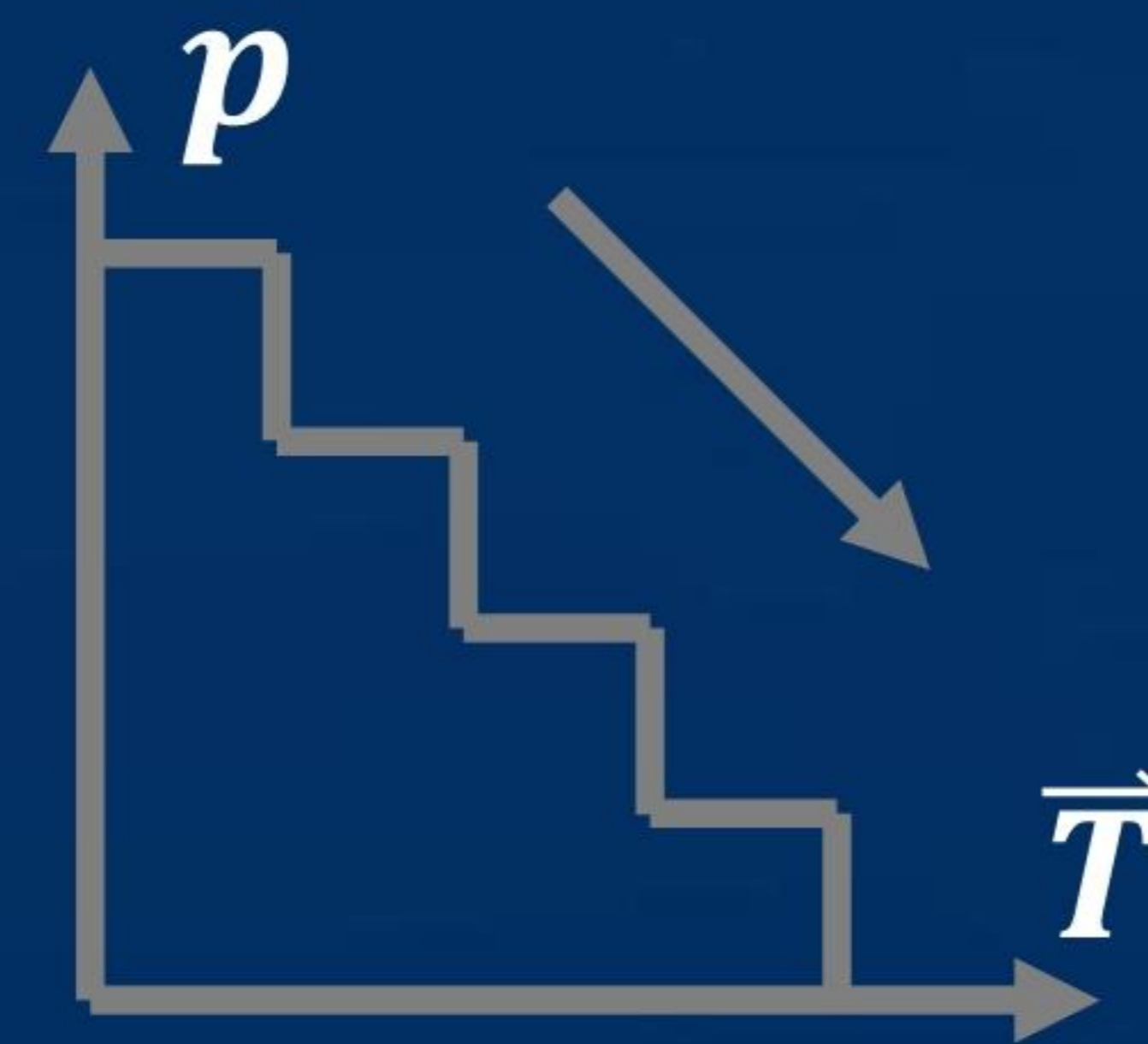
# 可靠性的科学原理



裕量可靠



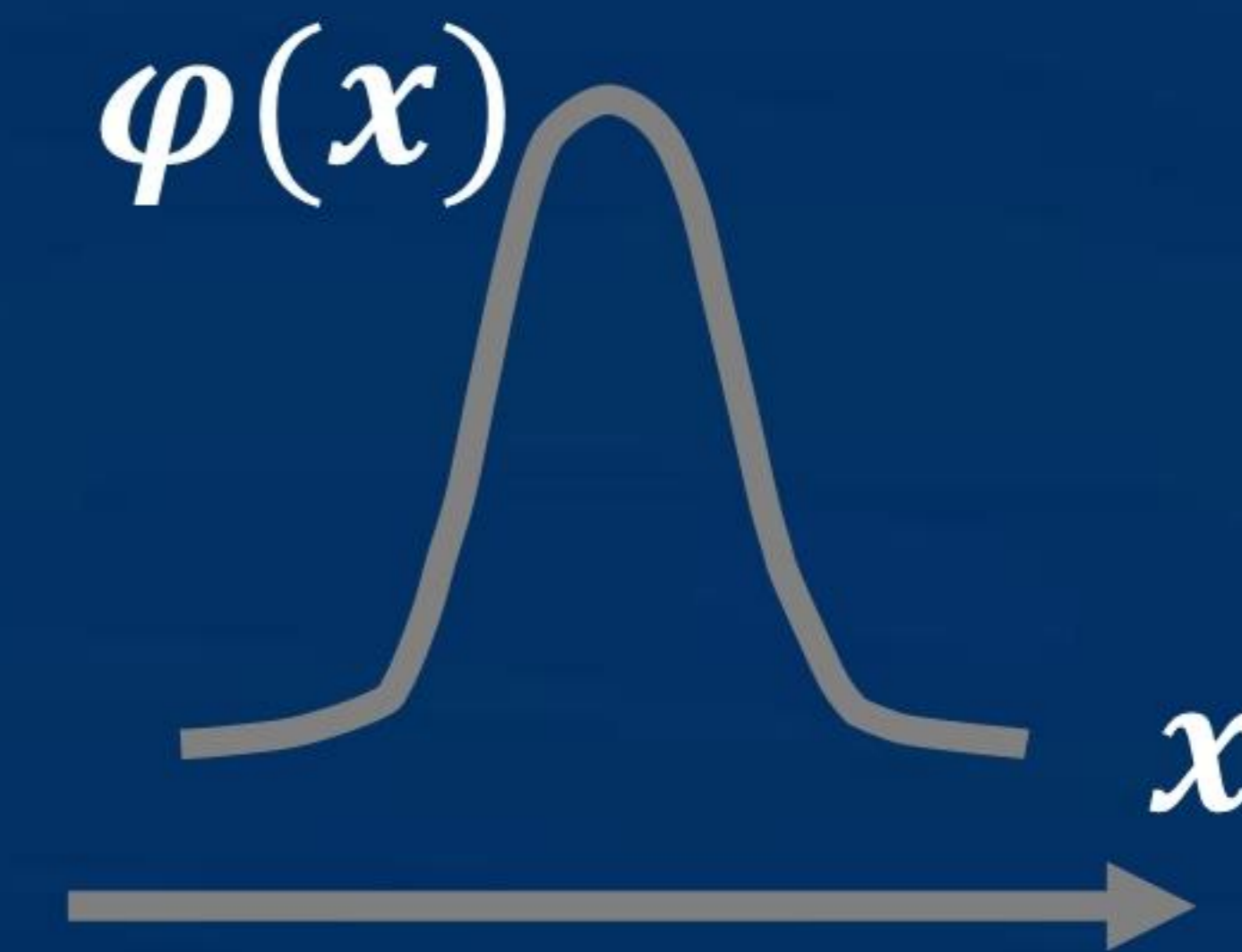
认识确定性的规律



退化永恒



量化不确定性的要素



不确定性



可靠性：确定性与不确定性的综合



# 可靠性科学的数学表达



学科交叉方程

$$P(t) = f(X, Y, t) \quad (0)$$



退化方程

$$P(\vec{T}) = g(X, Y, t, \vec{T}) \quad (1)$$



裕量方程

$$M(\vec{T}) = d(P(\vec{T}), P_{th}(\vec{T})) \quad (2)$$

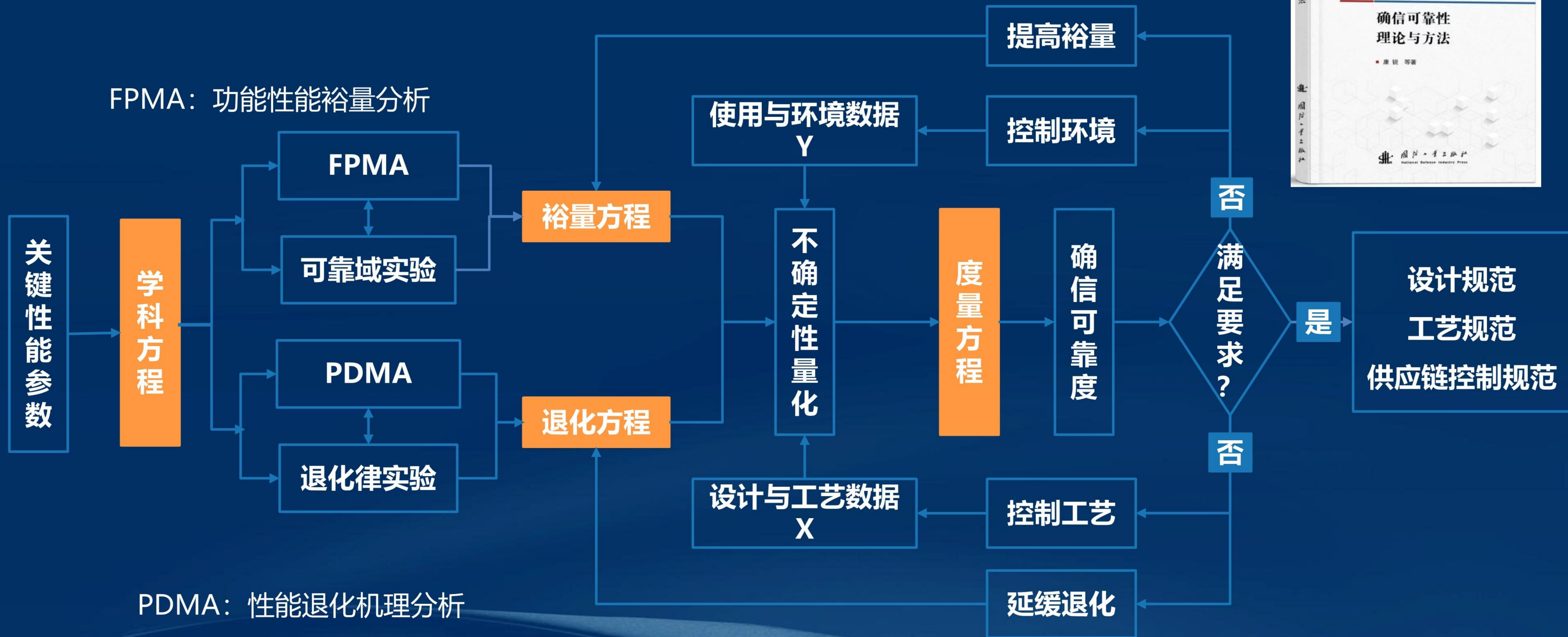
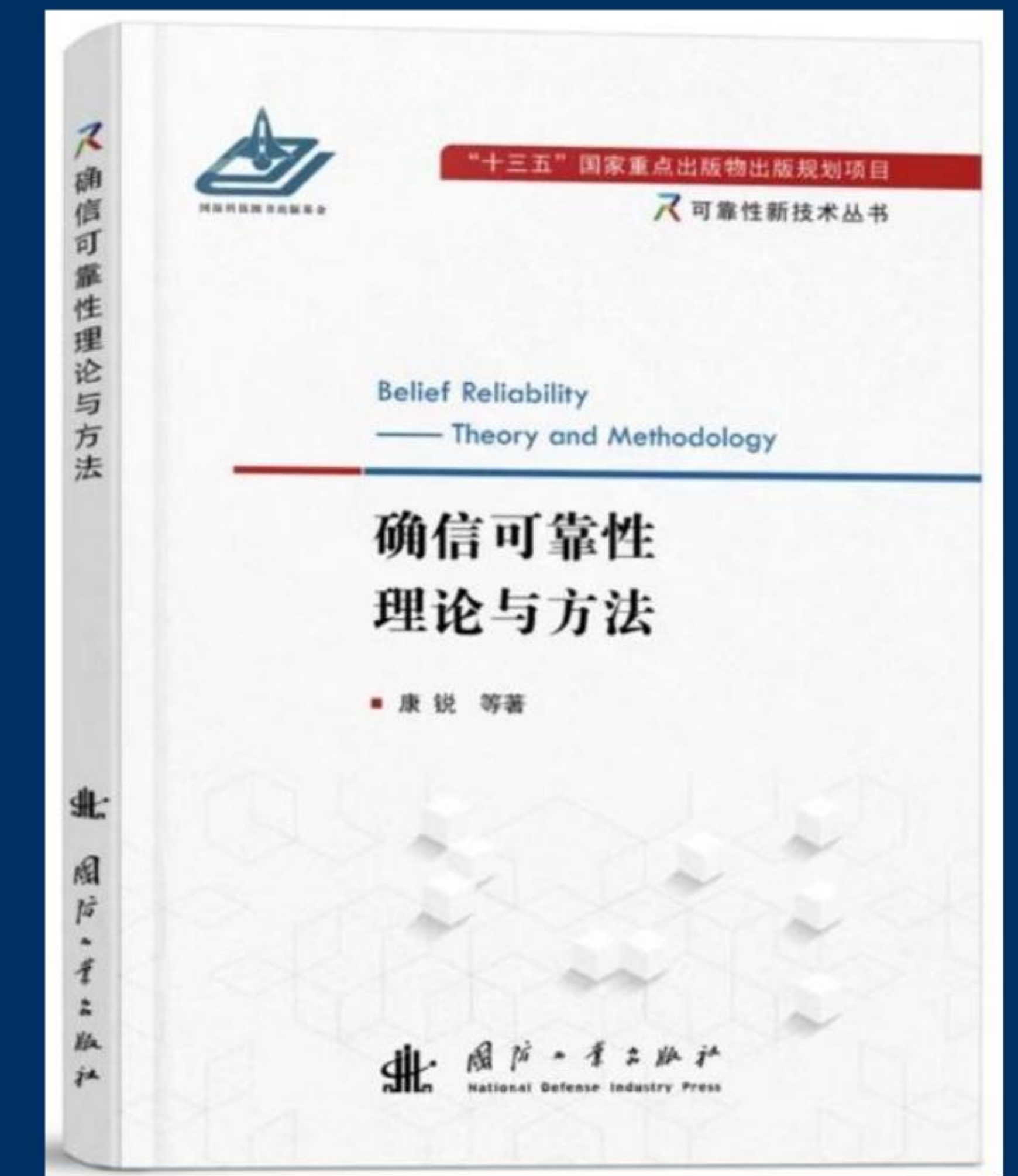


度量方程

$$R(\vec{T}) = c(\tilde{M} > 0) \quad (3)$$



# 可靠性正向设计技术框架与流程







02 |  
Part

# 正向设计





# 正向设计流程

## 核心步骤

- 设计变量初值优选
- 性能裕量建模
- 不确定性量化
- 确信可靠度分析与优化

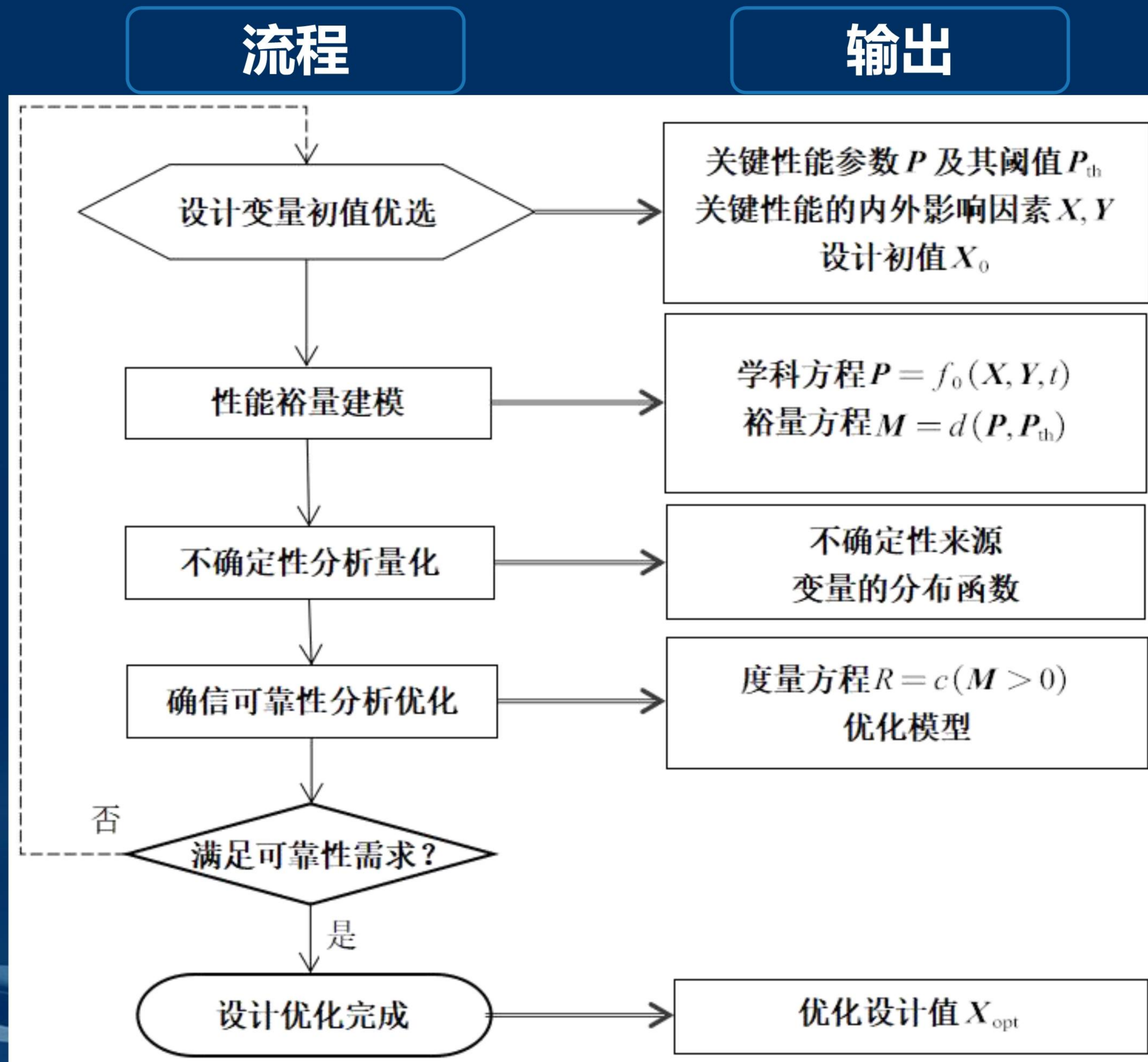
## 理论基础

学科方程  $P = f_0(X, Y, t)$  (0)

裕量方程  $M = d(P, P_{th})$  (1)

退化方程  $P = f_{\tilde{t}}(X, Y, t)$  (2)

度量方程  $R = c\{\tilde{M} > 0\}$  (3)







03 |  
Part

# 应用案例





# 设计变量初值优选

## 1 设计变量初值优选

## 2 性能裕量建模

## 3 不确定性量化

## 4 确信可靠度分析与优化

### Step1 确定关键性能和阈值

关键性能  $P$  : 温升  $\Delta T$

阈值  $P_{th}$  : 规定阈值  $\Delta T_{th,c}$  由用户需求和电动车行业标准 IEC60320、SAE/USCar2、GB/T20234-2011 等确定;

工作场景集<sup>1</sup>

规定阈值

$$V = \left\{ \begin{array}{l} \mu_I = \{40, 60, 70\} \\ \sigma_I = 0.05\mu_I/3 \\ \mu_{T_e} = [-40, 125] \\ \sigma_{T_e} = 5/3 \end{array} \right\} \Delta T_{th,c}^i = \begin{cases} 30 & i = \{\mu_I = 40, -40 \leq \mu_{T_e} \leq 125\} \\ 50 & i = \{\mu_I = 60, -40 \leq \mu_{T_e} \leq 125\} \\ 55 & i = \{\mu_I = 70, -40 \leq \mu_{T_e} \leq 125\} \end{cases}$$

破坏阈值  $\Delta T_{th,d}$  : 焊锡在熔点 (183 °C) 90%的温度下 (即  $T_{max} = 164.7^\circ\text{C}$ ) 就将发生松脱。

$$\Delta T_{th,d} = T_{max} - T_e$$

**注:** 1)  $3\sigma$  原则: 又称为拉依达准则, 由于在正态分布假设下, 数值分布在  $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$  之间的概率为0.9973, 因此在给定波动范围  $\pm\epsilon$  后, 可认为  $\epsilon = 3\sigma$



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step2 内外影响因素分析

内部因素  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$  : 共13个设计变量

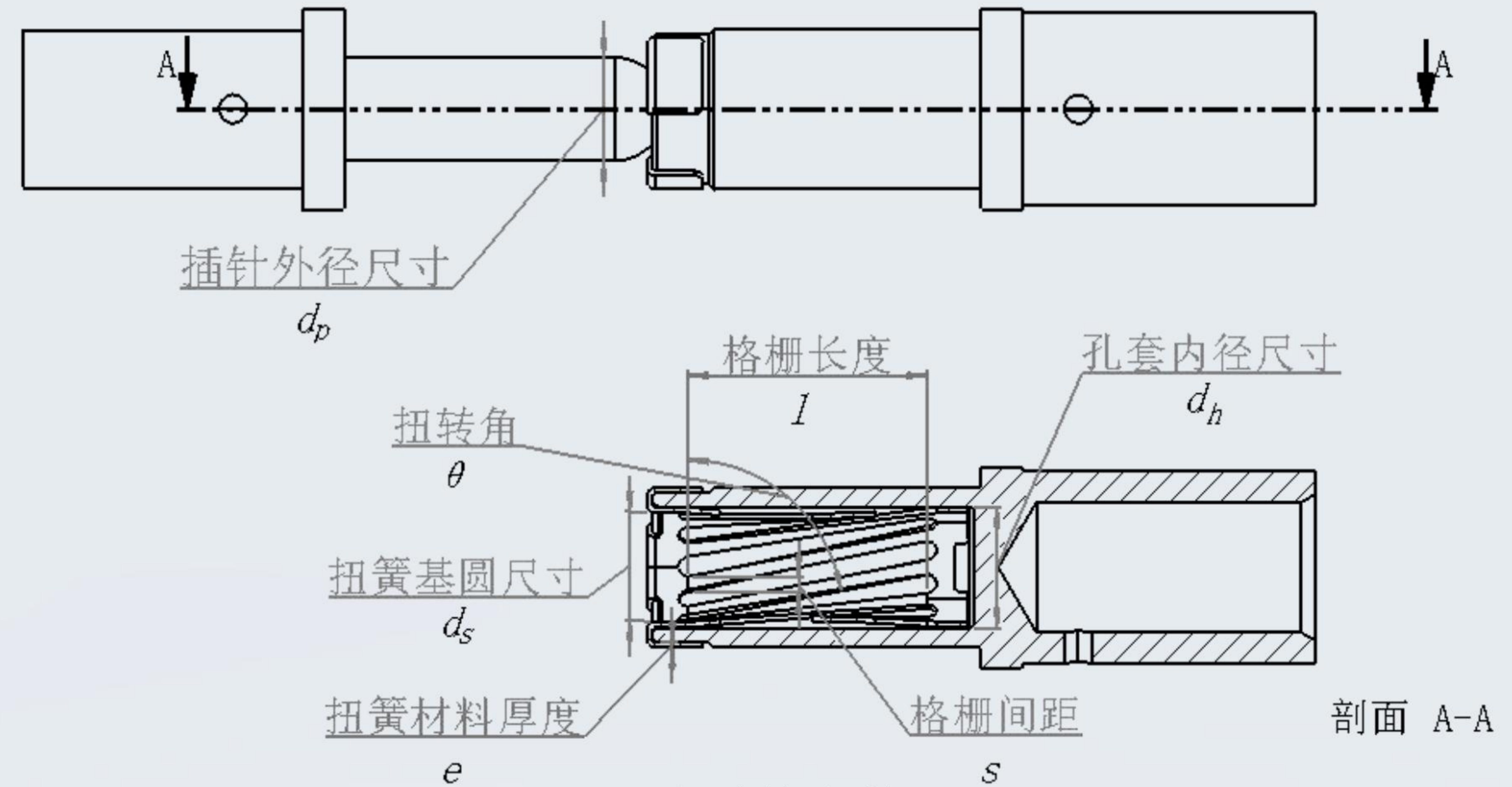


图. 结构参数

外部因素  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_s)^T$  : 环境温度  $T_e$ 、电流  $I_i, i \in V$



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

表. 内因变量及水平

序号	影响因素	变量类型	水平数	水平
1	加工工艺	D	2	工艺A、工艺B
2	粗糙度Ra	D	3	0.8、1.6、3.2
3	镀层材料	D	3	金、银、镍
4	插针材料	D	3	T2、碲铜、H62
5	孔套材料	D	3	T2、碲铜、H62
6	扭簧材料	D	3	C17410、C17510、QBe2.0
7	扭簧材料厚度 $\delta$ /mm	C	2	0.2、0.25
8	扭转角 $\theta$ /°	C	3	45、50、55
9	格栅间距 $s$ /mm	C	3	0.6、0.7、0.8
10	插针外径 $d_p$ /mm	C	3	3.57、3.60、3.63
11	扭簧基圆直径 $d_s$ /mm	C	3	3.75、3.80、3.85
12	孔套内径 $d_h$ /mm	C	3	$2\delta + \{3.75, 3.80, 3.85\}$
13	格栅长度 $l$ /mm	C	3	7.25、9.25、11.25

单独考虑



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

表. 内因变量及水平

序号	影响因素	变量类型	水平数	水平
1	加工工艺	D	2	工艺A、工艺B
2	插针材料	D	3	T2、碲铜、H62
3	孔套材料	D	3	T2、碲铜、H62
4	扭簧材料	D	3	C17410、C17510、QBe2.0
5	扭簧材料厚度 $\delta$ /mm	C	2	0.2、0.25
6	扭转角 $\theta$ /°	C	3	45、50、55
7	格栅间距 $s$ /mm	C	3	0.6、0.7、0.8
8	插针外径 $d_p$ /mm	C	3	3.57、3.60、3.63
9	扭簧基圆直径 $d_s$ /mm	C	3	3.75、3.80、3.85
10	孔套内径 $d_h$ /mm	C	3	$2\delta + \{3.75, 3.80, 3.85\}$
11	格栅长度 $l$ /mm	C	3	7.25、9.25、11.25

正交表  $L_{36}(3^9 \times 2^2)$  36组仿真实验



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

11个变量的仿真实验



镀层、粗糙度的验证实验

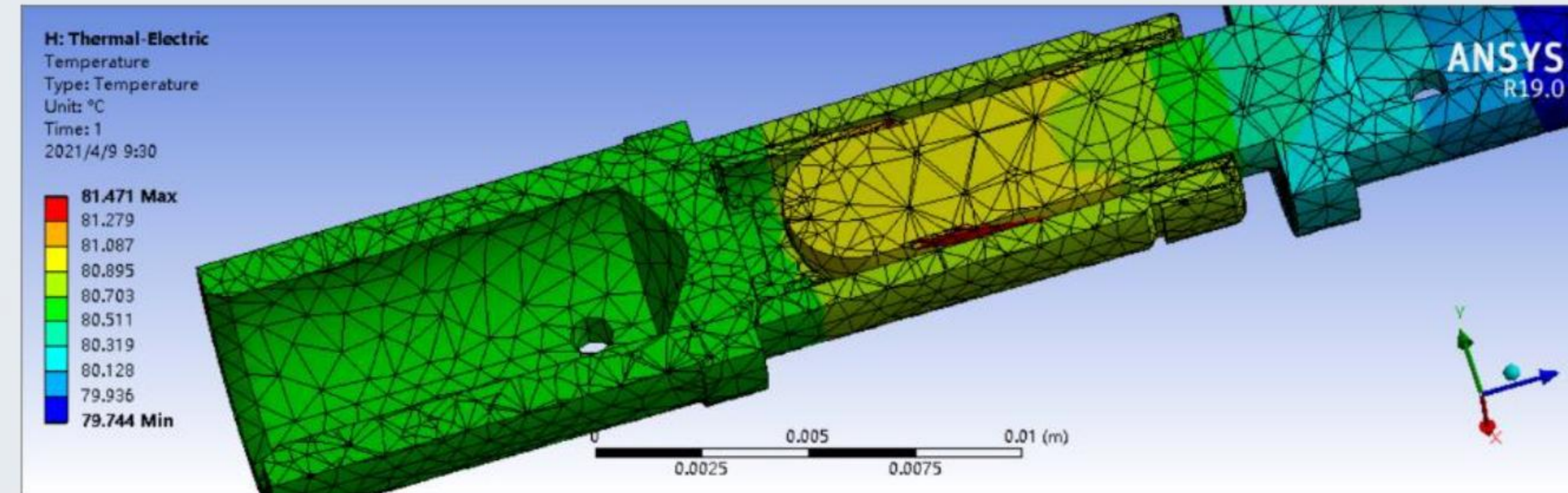
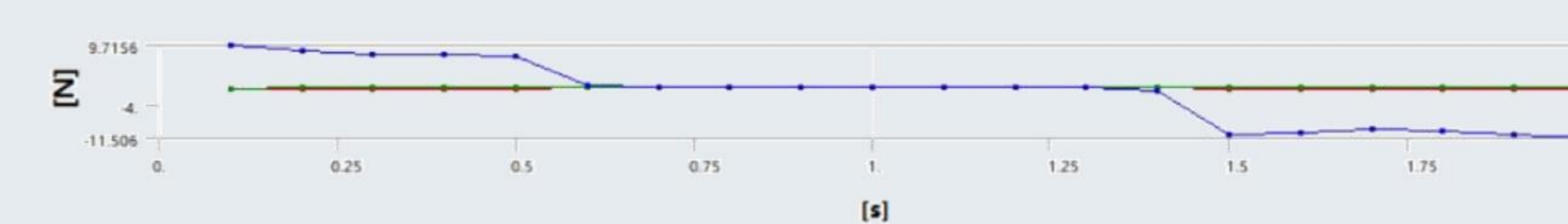


图.某次机械-电热仿真实验结果



图.扭簧电连接器的插孔端子



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

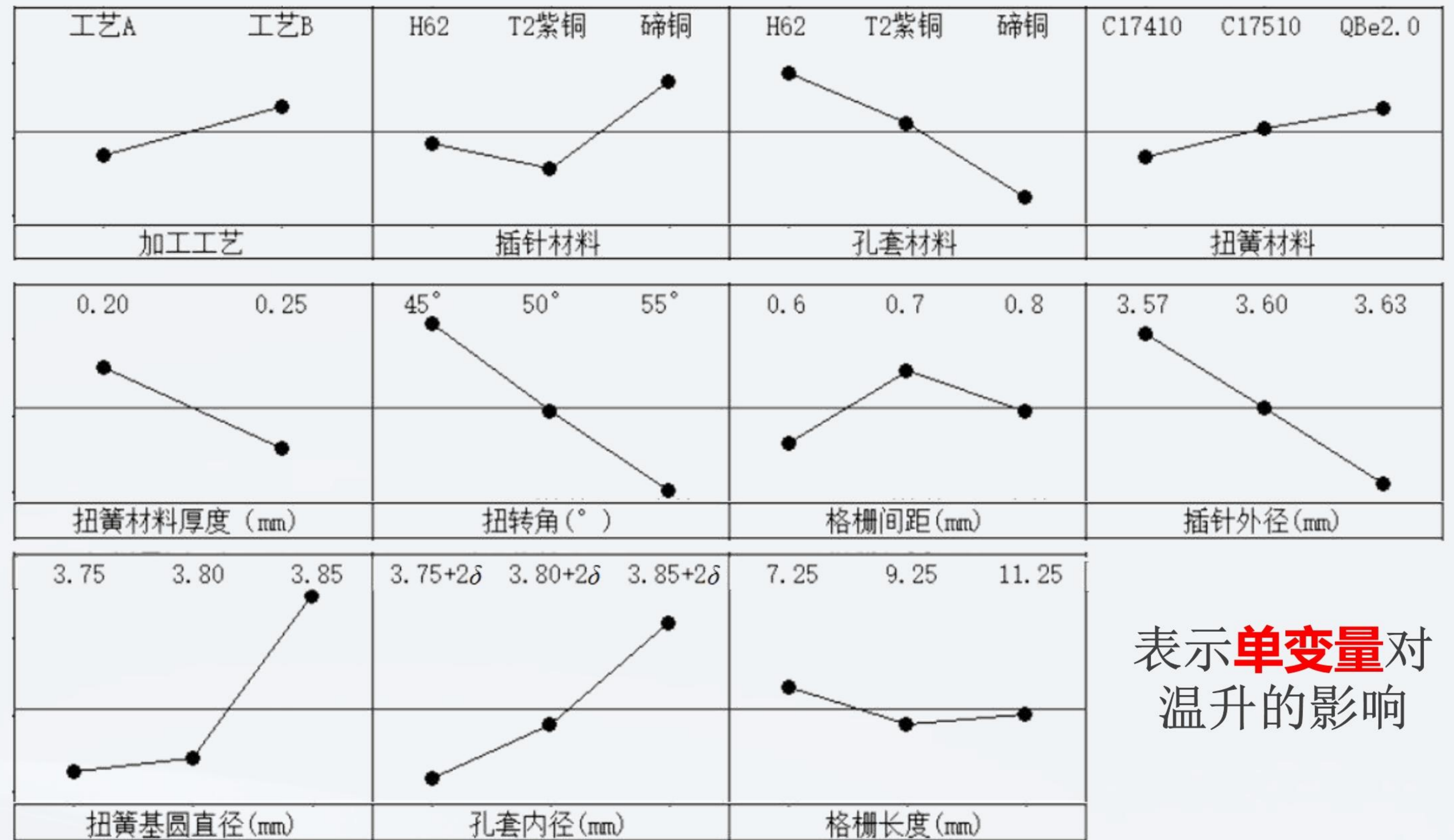
步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

1) 识别各项内因变量对性能的影响程度和变量间的交互作用;



表示单变量对温升的影响

图. 主效应图



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

1) 识别各项内因变量对性能的影响程度和变量间的交互作用;

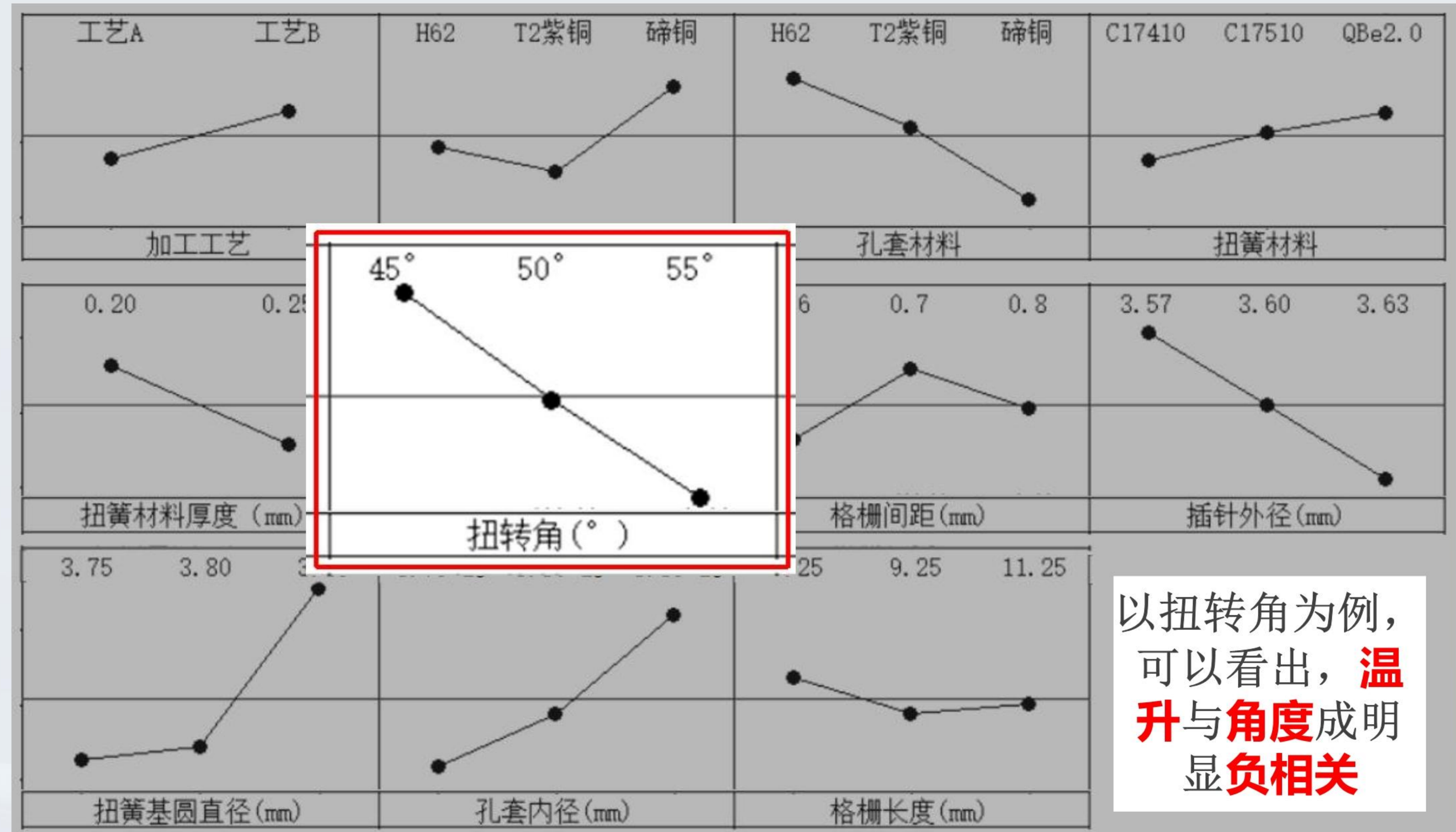


图. 主效应图



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

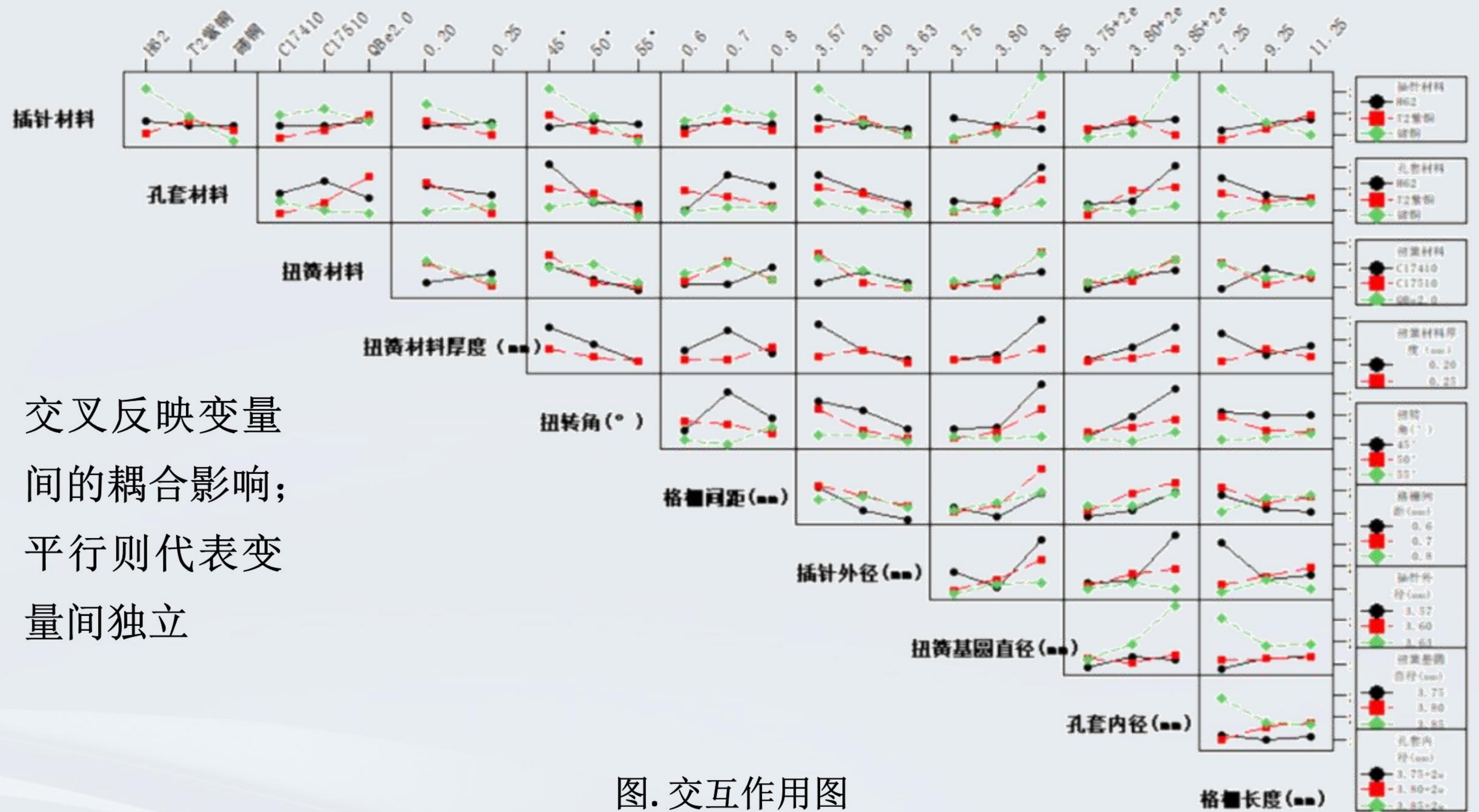
步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

1) 识别各项内因变量对性能的影响程度和变量间的交互作用;



交叉反映变量间的耦合影响; 平行则代表变量间独立

图. 交互作用图



# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

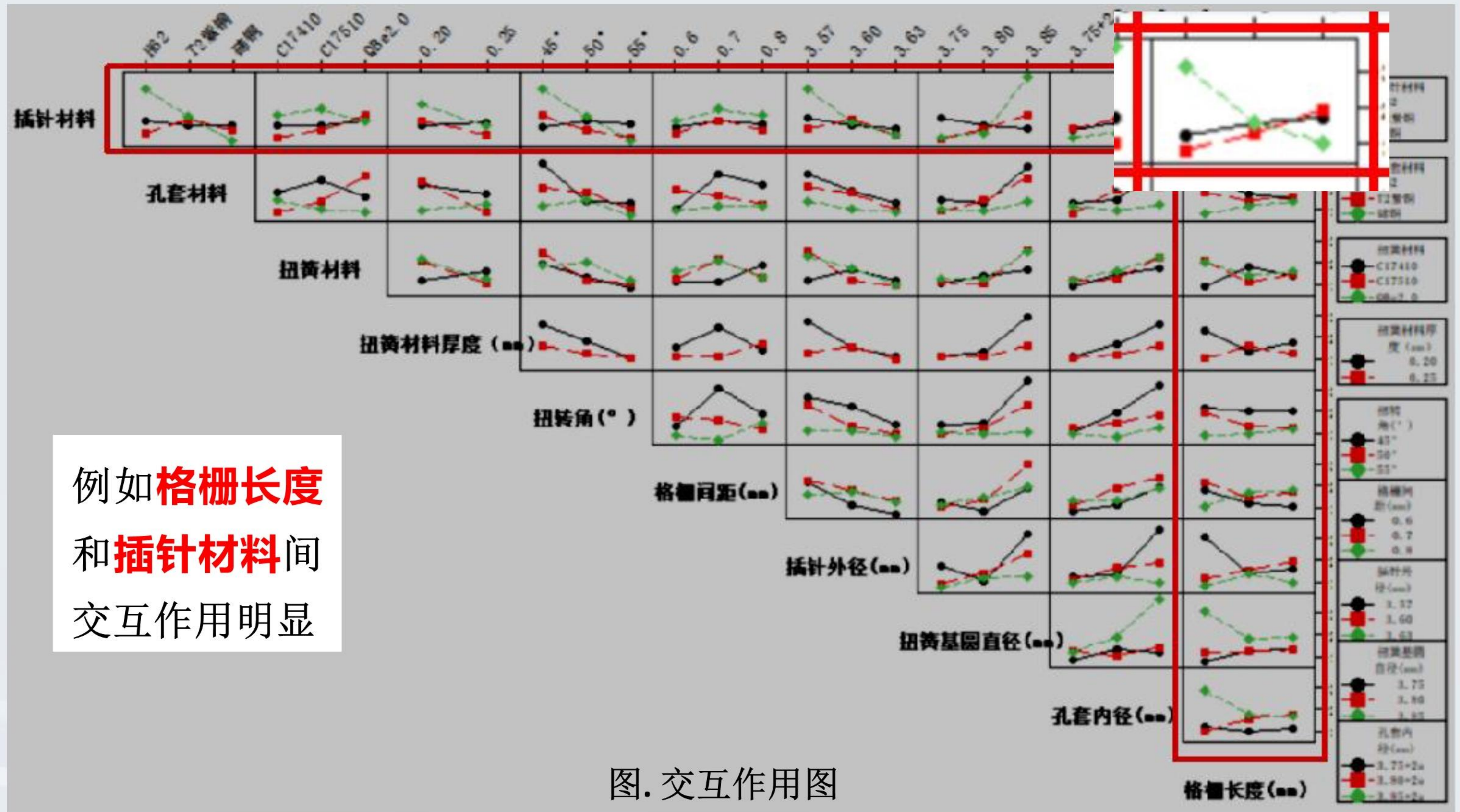
步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

1) 识别各项内因变量对性能的影响程度和变量间的交互作用;





# 设计变量初值优选

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step3 基于正交实验的设计变量优选

步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

- 1) 识别各项内因变量对性能的影响程度和变量间的交互作用；

表. 确定最优设计初值

序号	内因变量	数值特征	初步优选水平
1	加工工艺	D	工艺A
2	粗糙度Ra	D	0.8
3	镀层材料	D	金
4	插针材料	D	T2
5	孔套材料	D	碲铜
6	扭簧材料	D	C17410
7	扭簧材料厚度 $\delta$ /mm	C	0.2
8	扭转角 $\theta$ /°	C	55
9	格栅间距 $s$ /mm	C	0.6
10	插针外径 $d_p$ /mm	C	3.63
11	扭簧基圆直径 $d_s$ /mm	C	3.75
12	孔套内径 $d_h$ /mm	C	$2\delta + 3.75$
13	格栅长度 $l$ /mm	C	7.25



# 设计变量初值优选

## 1 设计变量初值优选

## 2 性能裕量建模

## 3 不确定性量化

## 4 确信可靠度分析与优化

### Step3 基于正交实验的设计变量优选

步骤

确定所有内因变量和水平

根据正交表设计开展实验

确定内因变量的最优水平组合

- 2) 考虑用户需求、生产加工条件和成本等因素，判断所选水平组合是否可行；
- 3) 考虑水平选取的范围是否过于保守或粗放，更新水平组合并实验验证。

表. 确定最优设计初值

序号	内因变量	数值特征	初步优选水平	变更理由	初值组合 $X_0$
1	加工工艺	D	工艺A	加工条件	工艺B
2	粗糙度Ra	D	0.8		0.8
3	镀层材料	D	金		金
4	插针材料	D	T2		T2
5	孔套材料	D	铍铜		铍铜
6	扭簧材料	D	C17410		C17410
7	扭簧材料厚度 $\delta$ /mm	C	0.2		0.2
8	扭转角 $\theta/^\circ$	C	55	水平保守	65
9	格栅间距 $s$ /mm	C	0.6		0.6
10	插针外径 $d_p$ /mm	C	3.63	需求变更	3.57
11	扭簧基圆直径 $d_s$ /mm	C	3.75		3.75
12	孔套内径 $d_h$ /mm	C	$2\delta + 3.75$	水平粗放	4.2
13	格栅长度 $l$ /mm	C	7.25		7.25



# 性能裕量建模

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step1 学科方程的构建 $P = f_0(X, Y, t)$

① 确定变量及取值范围:

6 × 内因变量 + 2 × 外因变量

② 确定采样点:

电流平方采样 (放大响应)

$$I_i^{2*} = \frac{2I_i^2 - ((I_i^u)^2 + (I_i^l)^2)}{(I_i^u)^2 - (I_i^l)^2}$$

{40A, 60A, 70A} → [1600A<sup>2</sup>, 4900A<sup>2</sup>]

环境温度提高上界 (强化条件)

[-40°C, 125°C] → [-40°C, 150°C]

③ 建立代理模型:

$$\Delta T = f(\theta^*) = a_0 + A\theta^* + \theta^{*T} B\theta^* + \varepsilon$$

表. 响应面采样点

变量	符号/单位	采样边界	
		-1	1
扭转角	$\theta/^\circ$	55	75
格栅间距	$s/mm$	0.5	0.9
插针外径	$d_p/mm$	3.57	3.60
扭簧基圆直径	$d_s/mm$	3.75	3.80
孔套内径	$d_h/mm$	4.2	4.25
格栅长度	$l/mm$	5.25	9.25
电流	$I_i^2/A^2$	1600	4900
环境温度	$T_e/^\circ C$	-40	150



# 性能裕量建模

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## Step1 学科方程的构建 $P = f_0(X, Y, t)$

$$\Delta T = f(\theta^*) = a_0 + A\theta^* + \theta^{*T} B\theta^* + \varepsilon$$

④ 确定核心变量:

显著性检验

$$w_i = \begin{cases} 0 & \theta_i \text{不显著} \\ 1 & \theta_i \text{显著} \end{cases}$$

$$\omega_{ij} = \begin{cases} 0 & \theta_i, \theta_j \text{不显著} \\ 1 & \theta_i, \theta_j \text{显著} \end{cases}$$

$\forall i, j = 1, 2, \dots, m+r$

$$\Delta T = \varepsilon + a_0 + \sum_{i=1}^{m+r} w_i \alpha_i \theta_i^* + \sum_{i=1}^{m+r-1} \sum_{j=i+1}^{m+r} [\omega_{ii} \beta_{ii} (\theta_i^*)^2 + \omega_{ij} \beta_{ij} \theta_i^* \theta_j^*]$$

$$\theta^* = (\theta, d_h, s, d_s, I_i, T_e)$$

$$X_C^* = (\theta, d_h, s, d_s), Y^* = Y = (I_i, T_e)$$

⑤ 拟合优度检验: 拟合效果较好

$$\Delta T = \varepsilon + 29.17 - 3.79\theta^* + 2.49d_h^* + 2.07s^* + 14.91I_e^{*2} - 1.37T_e^* - 3.37d_s^* \cdot d_h^* - 2.14\theta^* \cdot I_e^{*2} + 3.23d_s^{*2} + 3.53\theta^{*2} + 2.22d_h^{*2}$$

• F-value: 111.4;  $R^2$ : 0.8541; 有效信噪比: 39.06

## Step2 裕量方程的建立 $M = d(P, P_{th})$

$$M = \Delta T_{th} - (\varepsilon + 29.17 - 3.79\theta^* + 2.49d_h^* + 2.07s^* + 14.91I_e^{*2} - 1.37T_e^* - 3.37d_s^* \cdot d_h^* - 2.14\theta^* \cdot I_e^{*2} + 3.23d_s^{*2} + 3.53\theta^{*2} + 2.22d_h^{*2})$$



# 不确定性量化

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

## ➤ 模型形式及系数的不确定性

随机扰动  $\varepsilon$

分布  $\Phi_\varepsilon$

残差拟合

$$\hat{\sigma}^2 = \sum e_i^2 / (n - p - 1)$$

## ➤ 内外因变量的不确定性

内因变量  $X_C^*$

分布  $\Phi_\theta, \Phi_{d_s}, \Phi_s, \Phi_{d_h}$

极大似然估计

外因变量  $Y^*$

分布  $\Phi_I, \Phi_{T_e}$

手册标准 —— 3 $\sigma$  原则

## ➤ 性能阈值的不确定性

性能阈值  $P_{th}$

分布  $\Phi_{\Delta T_{th}}$



# 不确定性量化

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

残差拟合

极大似然估计

3σ原则

表. 随机变量的分布

变量	符号/单位	分布	$\mu$	$\sigma$
随机扰动	$\varepsilon / ^\circ\text{C}$	$\Phi_\varepsilon$	0	5.35
扭簧基圆直径	$d_s / \text{mm}$	$\Phi_{d_s}$	$\mu_{d_s}$	0.001
扭转角	$\theta / ^\circ$	$\Phi_\theta$	$\mu_\theta$	4
孔套内径	$d_h / \text{mm}$	$\Phi_{d_p}$	$\mu_{d_p}$	0.01
格柵间距	$s / \text{mm}$	$\Phi_s$	$\mu_s$	0.01
电流	$I_i / \text{A}$	$\Phi_{I_i}$	$\mu_{I_i}$	$0.05\mu_{I_i} / 3$
环境温度	$T_e / ^\circ\text{C}$	$\Phi_{T_e}$	$\mu_{T_e}$	5 / 3
温升阈值	$\Delta T_{th} / ^\circ\text{C}$	$\Phi_{\Delta T_e}$	$E[\Delta T_e(I, T_e)]$	$\sqrt{D[\Delta T_{th}(I, T_e)]}$

模型精度

测量加工精度

环境变化波动

工作场景变化



# 确信可靠度分析与优化

1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

Step1 建立度量方程  $R = c\{\tilde{M} > 0\}$

$$\begin{aligned} R_i &= \Pr\{\tilde{M} > 0\} \\ &= \Pr\{d(g(\mathbf{x}_k, I_i, T_e), \Delta T_{th}) > 0\} \\ &= 1 - \Phi(v_M) \end{aligned}$$

Step2 建立优化模型 (以优化初始确信可靠度为例)

目标

$$\text{Maximize } \bigwedge_{i \in V} R_i$$

$i \in V$  : 工作场景集

约束

$$\text{Subject to } \sigma_X = \sigma_{X_0}$$

经济成本

$$3.75 \leq \mu_{d_s} \leq 3.80$$

$$55 \leq \mu_{\theta} \leq 75$$

$$4.2 \leq \mu_{d_h} \leq 4.25$$

$$0.5 \leq \mu_s \leq 0.9$$

设计范围

注: 1) 经济成本约束: 由于加工工艺和材料已确定, 因此工艺公差不变, 即标准差不变



# 确信可靠度分析与优化

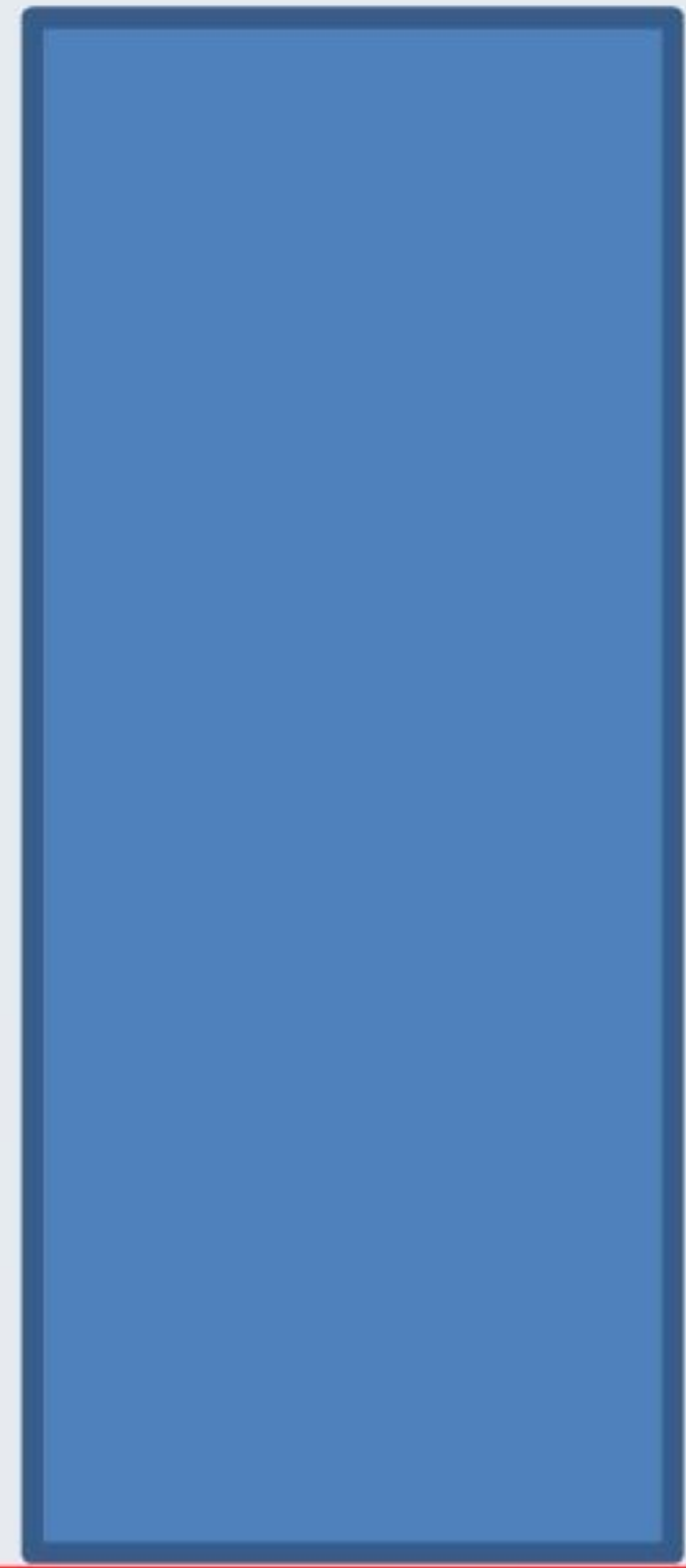
1 设计变量初值优选

2 性能裕量建模

3 不确定性量化

4 确信可靠度分析与优化

表. 确信可靠度优化结果

变量	符号/单位	取值范围	正向设计优化	
			初值 $X_0$	优化值 $X_{opt}$
扭簧基圆直径	$d_s / \text{mm}$	[3.75, 3.80]	3.75	
扭转角	$\theta / ^\circ$	[55, 75]	65	
孔套内径	$d_h / \text{mm}$	[4.20, 4.25]	4.2	
格栅间距	$s / \text{mm}$	[0.5, 0.9]	0.6	
确信可靠度理论值	$R$	—	0.9785	0.9947

优化结果



# 优化效果

## 温升裕量对比

由于不确定性的作用，扭簧电连接器虽然在设计初值下能保持较低的温升，但仍存在较大的温升超过阈值的风险。

基于上述优化模型得到的优化值，本质上是降低了温升的均值，从而增大了裕量，使产品更可靠

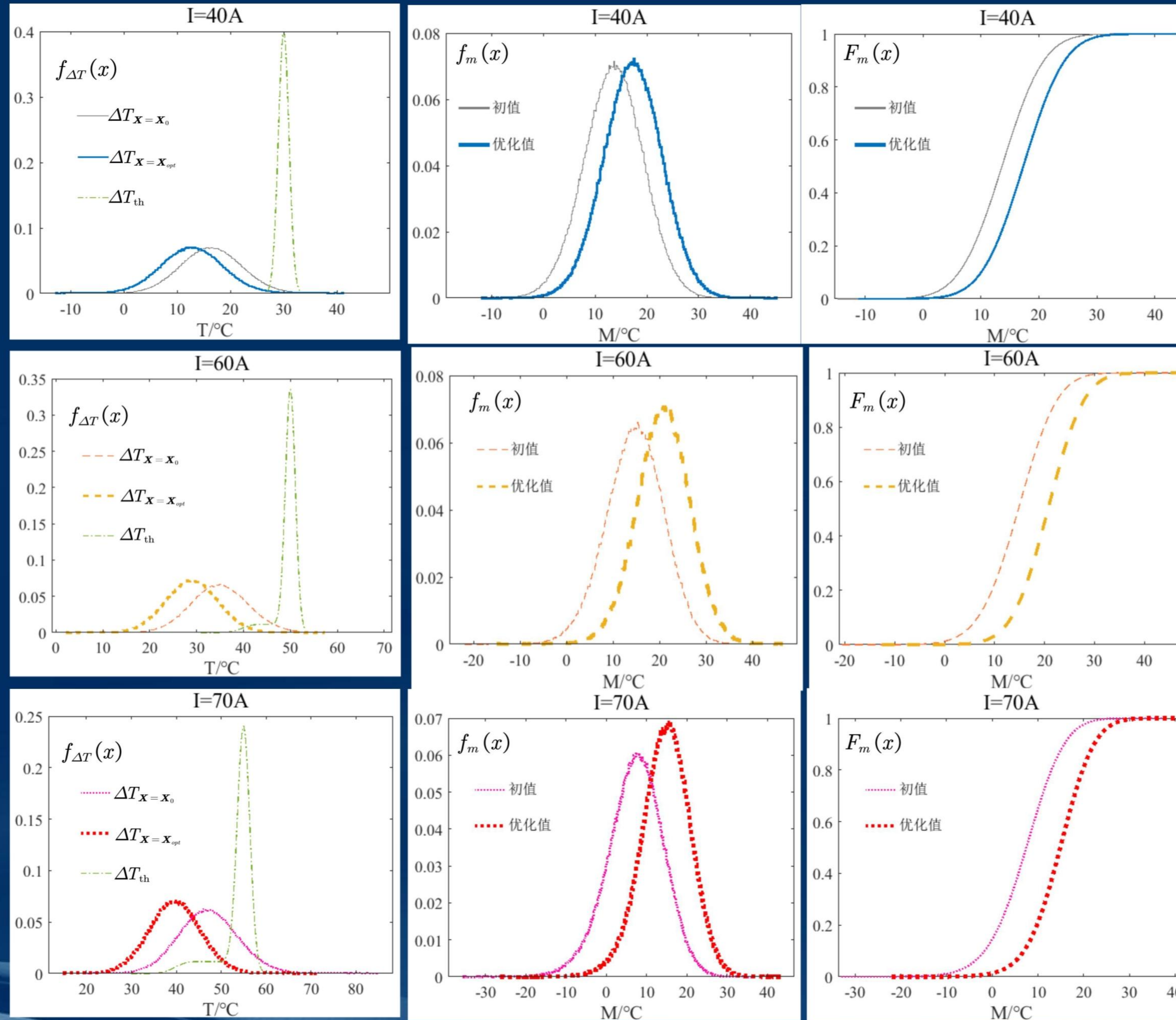


图. 优化前后温升分布对比图

图. 优化前后裕量分布对比图



# 正向设计本质：优化确定性、控制不确定性





04 |  
Part

# 方法总结





# 可靠性正向设计方法论

以设计参数、工艺参数、载荷参数、环境参数为设计变量  
以成本、规范为约束、以可靠度为目标的定量设计

需要掌握

功能性能裕量分析方法 (FPMA)

有限元分析方法 (FEA)

试验设计方法 (DOE)

统计回归方法

蒙特卡洛仿真方法



# 谢谢

蓝威数值（珠海）科技有限公司

深圳市为民可靠性系统工程研究院

李若彪

