



清华大学

系统化产品设计与开发

第十五讲 稳健设计

成 晔

清华大学工业工程系

福特汽车公司：后座安全带

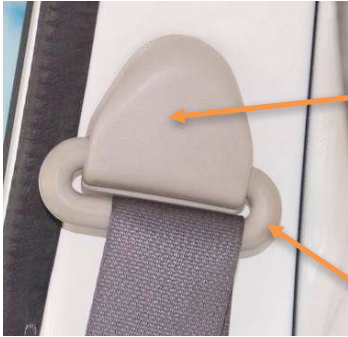


“下潜”现象

■ 影响后果的相关因素

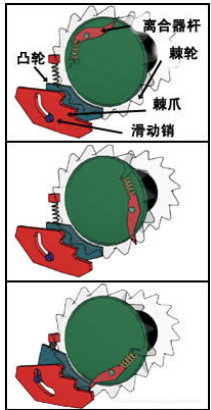
- 碰撞发生的方式与程度
- 车辆的设计
- 座椅和安全带的性能
- 其它条件

后座安全带的结构



上固定点

D形环



卷收器



织带

锁舌

锁扣

拉索



承载环

什么是稳健设计？

■ 稳健的产品（或过程）

- 即使在非理想的情况下，也能按预期设想执行



- 产品制造过程中的偏差
- 使用情况的可能变化范围
-

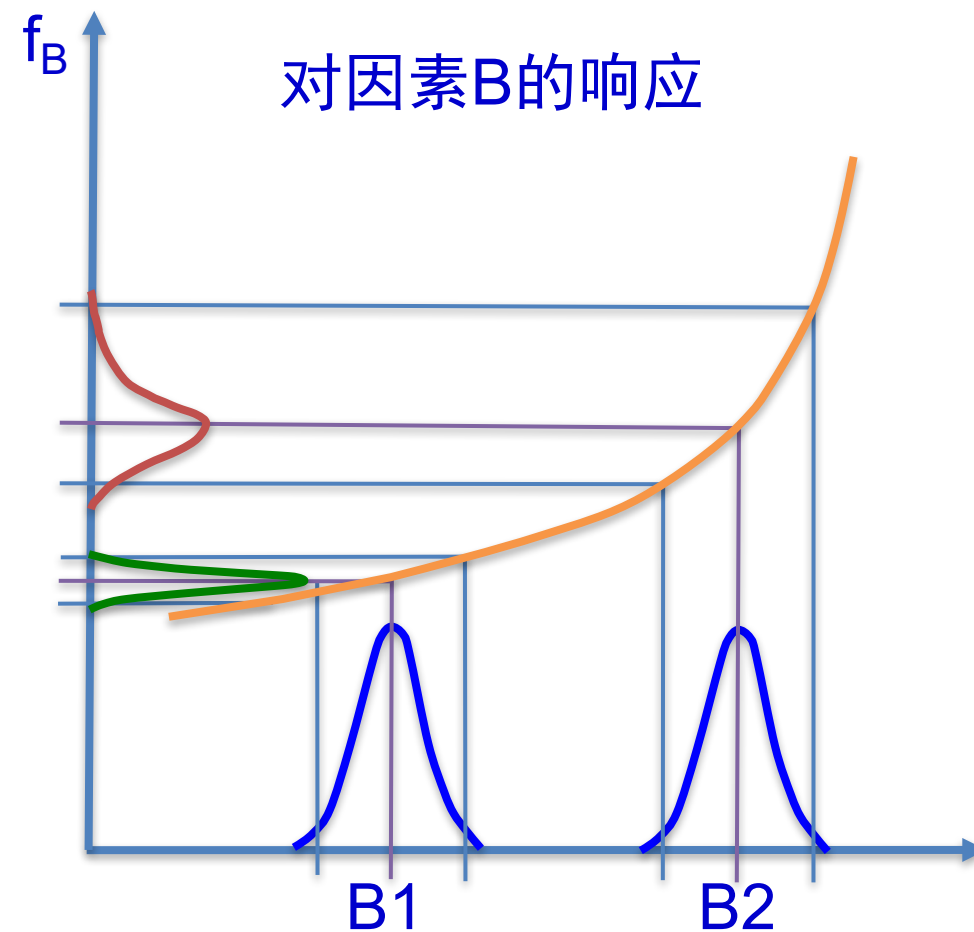
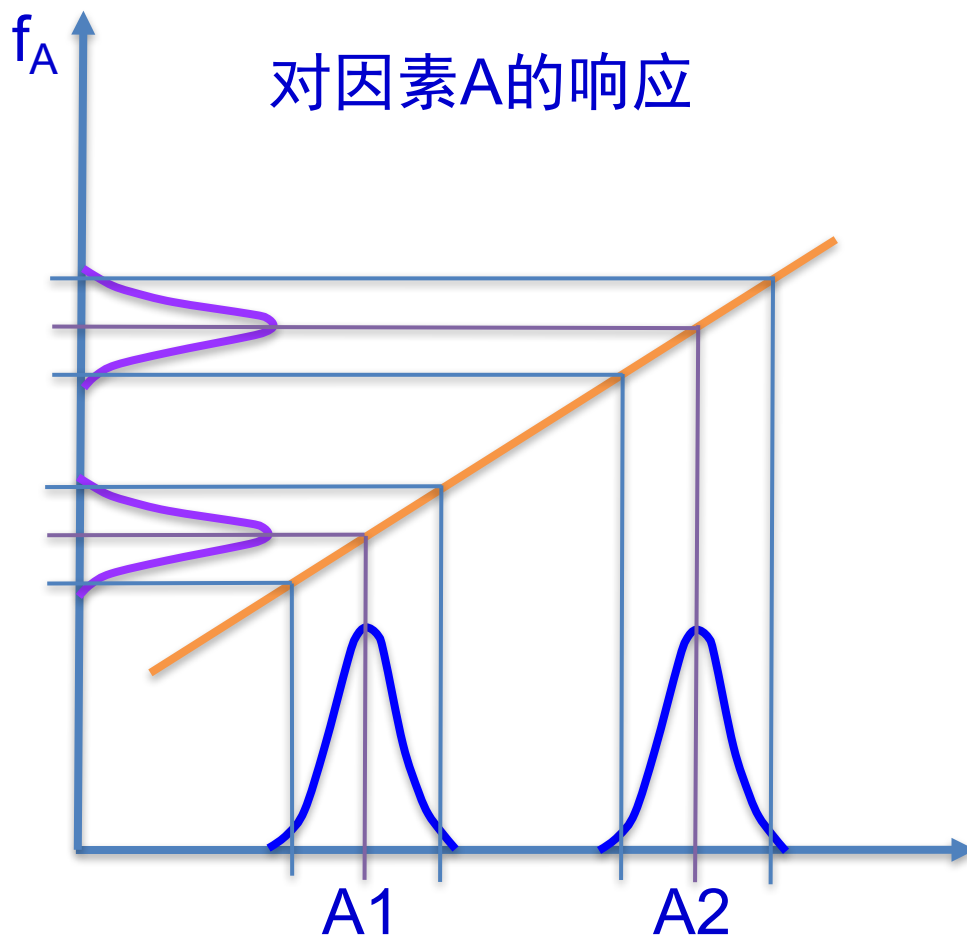
■ 稳健设计 (Robust design)

- 提升产品的性能，并同时降低噪声因素的影响

■ 稳健设定点

- 设计参数值优化组合
- 当使用条件和制造偏差在一定范围内波动时，产品仍能实现期望的性能

影响产品性能的因素



- 两个因素A与B，影响安全带的某项性能

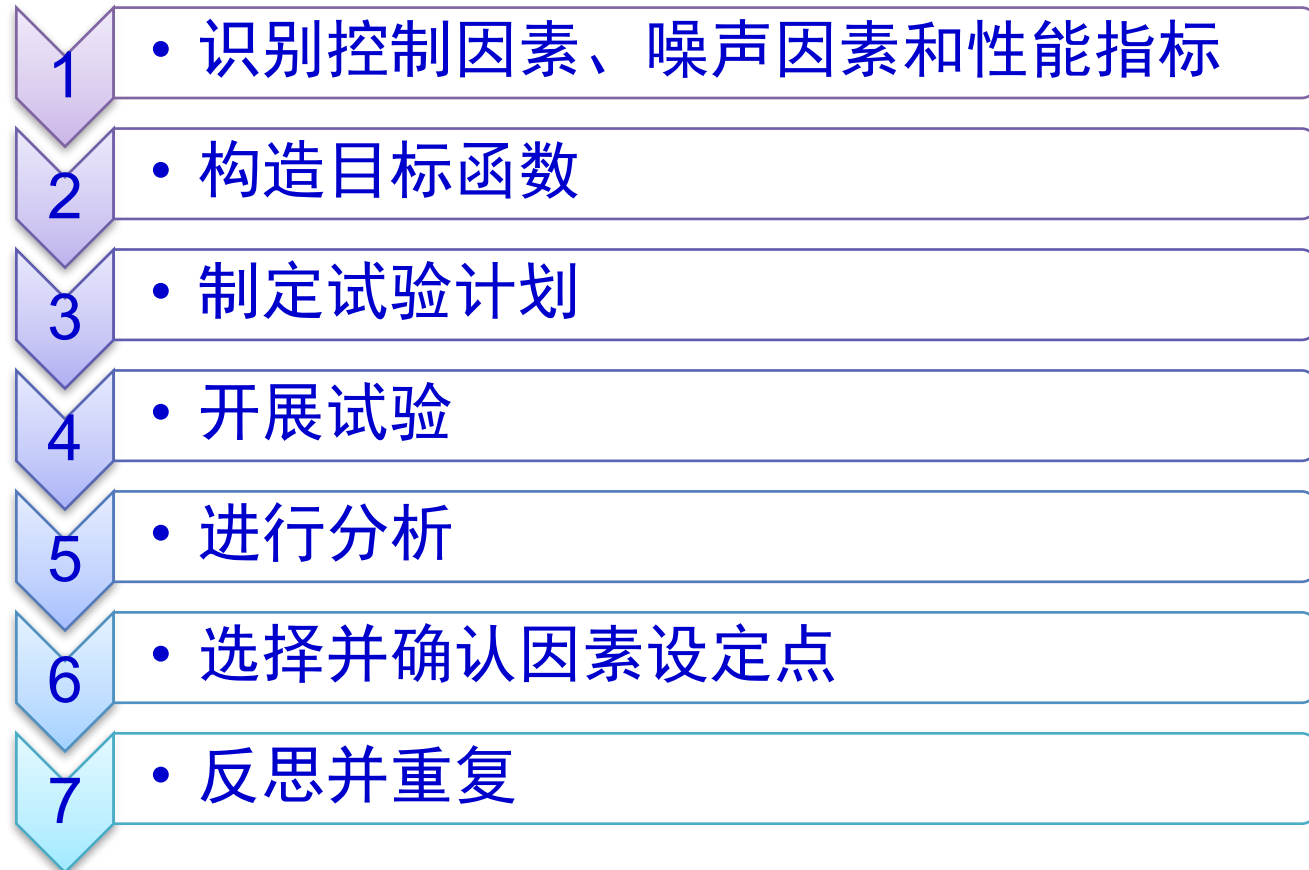
- f_A 与 f_B 的效果是累加效应
- $(A1 + B2) \approx (A2 + B1)$

- B1 比 B2 灵敏度低
- $(A2 + B1)$ 组合，更为稳健

试验设计 (Design of Experiments, DOE)

- 田口玄一提出,
1950~1960,
日本
- 改善产品及其
制造工艺质量
水平的方法

应用DOE的稳健设计流程



识别控制因素、噪声因素和性能指标

控制因素

- 产品制造与使用操作中可指定的参数
 - 通常对每个因素，在2~3个离散水平上开展试验

噪声因素

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">■ 制造偏差■ 材料性质变动 | <ul style="list-style-type: none">■ 各种用户场景、工作条件■ 产品老化，滥用误用 |
|---|---|

性能指标

- 1~2个关键产品规格
- 寻找控制因素设定值

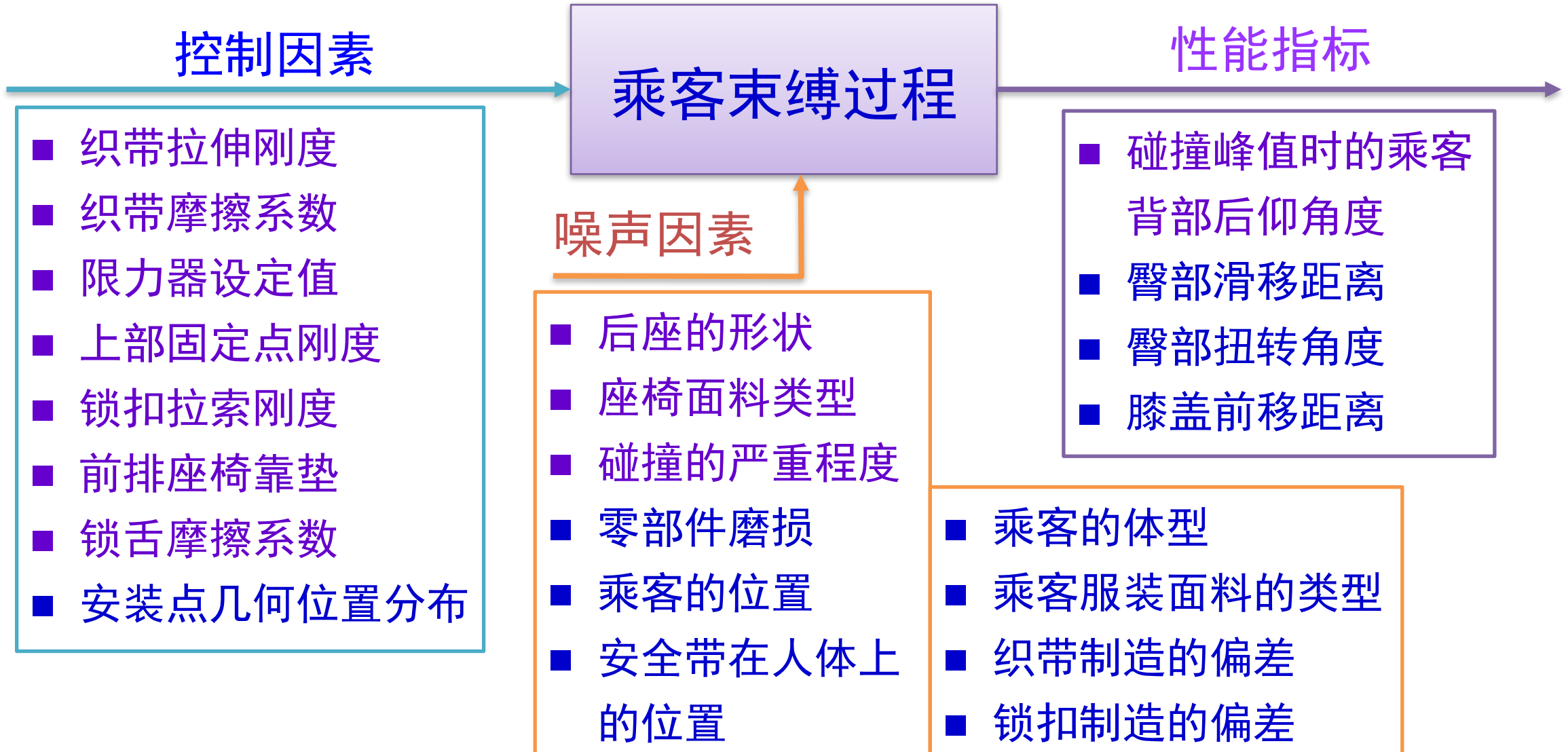
后座安全带

- 织带拉伸刚度
- 织带摩擦系数

- 座椅的形状
- 座椅的面料

- 碰撞发生时，乘客背部或臀部向前滑移的距离

后座安全带参数图



构造目标函数 (1/2)

最大化

■ “数值越大越好”

- 例：安全带打滑之前的最大负加速度

■ 目标函数

$$\max \eta = \mu \text{ or } \eta = \mu^2$$

- μ : 试验观测值的平均值
 - ◆ 给定测试条件下

最小化

■ “数值越小越好”

- 例：负加速度峰值时的乘客背部后仰角度

■ 目标函数

$$\min \eta = \mu \text{ or } \eta = \sigma^2$$

$$\max \eta = \frac{1}{\mu} \text{ or } \eta = \frac{1}{\sigma^2}$$

- σ^2 : 试验观测值的方差
 - ◆ 给定测试条件下

构造目标函数 (2/2)

目标值

- “越接近目标值越好”
 - 例：束缚动作之前的安全带松弛量
- 目标函数

$$\max \eta = \frac{1}{(\mu - t)^2}$$

- t : 目标值 (Target)

信噪比

- “对噪声的响应越低越好”
 - 例：负加速度峰值时乘客背部后仰角
- 目标函数

$$\max \eta = 10 \log \left(\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right)$$

- 减少方差比改变均值更困难

福特后座安全带

- 开发团队建议两个目标函数：
 - 峰值时的背部后仰角平均值最小化
 - 峰值时背部后仰角的范围最小化
 - ◆ 两种待测噪声条件下，后仰角最大最小值之差

第三步：制定试验计划

- 如何在一系列试验中，改变各因素的水平，探索系统的行为？
 - 控制因素的数值
 - 某些噪声因素的数值

试验设计

■ 全因素试验

- 每种因素各个水平的所有组合

■ 正交试验

- 最小的部分因素试验计划

■ 部分因素试验

- 各因素各水平的部分组合

■ 单因素实验

- 每次试验，只改变一个因素的水平

全因素试验计划

■ 除了考察每个因素对产品性能的基本影响，还要识别所有的多因素交互影响

- 适用的情况
- 因素与水平的个数较少
 - 试验成本很低

- k 个因素，每因素 n 个水平
- 需要试验次数： n^k
 - $k < 4$ 或 5，尚可行

全因素矩阵

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E 1	F 1	G1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		G2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	F 2	G1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		G2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
E 2	F 1	G1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		G2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	F 2	G1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
		G2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

部分因素试验计划

■ 牺牲了分析所有交互影响的能力

- 某些交互影响与其它交互影响混淆

■ 仍要保持平衡

- 在任一给定因素及水平上的试验次数，与每个其它因素、在每个水平进行的试验次数要相等

1/2

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1	X			X		X	X			X	X		X			X
		G2		X	X		X			X	X		X	X				
	F2	G1		X	X		X			X	X		X	X		X	X	
		G2	X			X		X	X			X	X		X			X
E2	F1	G1		X	X		X			X	X		X	X		X	X	
		G2	X			X		X	X			X	X		X			X
	F2	G1	X			X		X	X			X	X		X			X
		G2		X	X		X			X	X		X	X				

1/4

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1	X			X		X	X			X	X		X			X
		G2																
	F2	G1																
		G2	X			X		X	X			X	X		X			X
E2	F1	G1																
		G2		X	X		X			X	X			X		X	X	
	F2	G1		X	X		X			X	X			X		X	X	
		G2																

1/8

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E1	F1	G1	X												X			
		G2				X												X
	F2	G1						X					X					
		G2							X				X					
E2	F1	G1						X					X					
		G2							X					X				
	F2	G1				X												X
		G2	X												X			

正交试验计划

- 最小的部分因素试验计划
 - 旨在识别每个因素的主要影响
 - 尽管与许多其它交互影响混淆在一起
 - 由于效率高，被广泛使用
 - 根据行数命名：L4，L8，L9，L27

福特后座安全带

- 开发团队选择使用L8正交阵列
- 一种快速有效的试验方法
 - 7个因素，每因素2个水平

L8正交阵列 (1/16部分因素计划)

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E 1	F 1	G1	X															
		G2														X		
	F 2	G1											X					
		G2						X										
E 2	F 1	G1							X									
		G2										X						
	F 2	G1												X				
		G2		X														

单因素试验计划

- 是一种不平衡的试验计划
 - 基准试验：所有因素取水平1
 - 其余试验：只有一个因素取水平2，其它因素都取水平1
- 进行多因素影响空间探索时，是一种低效率方法
- 在多因素交互影响显著的系统 中，可用于细节的参数优化

单因素计划

			A1								A2							
			B1				B2				B1				B2			
			C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2	
			D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2
E 1	F 1	G1	X	X	X		X				X							
		G2	X															
	F 2	G1	X															
		G2																
E 2	F 1	G1	X															
		G2																
	F 2	G1																
		G2																

L8 正交阵列试验设计

因素	说明
A	织带拉伸刚度：在拉伸试验机上测量得到弹性变形
B	织带摩擦：摩擦系数，与编织物和涂层性质有关
C	限力器设定值：达到一定受力程度时，允许可控地释放安全带
D	上部固定点刚度：上部固定点（D形环）安装处的弹性变形
E	锁扣拉索刚度：将带扣与车体相连的拉索之弹性变形
F	前排座椅靠背：后座乘客膝部可能顶到的前座靠背，其轮廓、硬度
G	锁舌摩擦：织带在扣舌承载环上滑动时的摩擦系数

正交试验计划

	A	B	C	D	E	F	G	N-	N+
1	1	1	1	1	1	1	1		
2	1	1	1	2	2	2	2		
3	1	2	2	1	1	2	2		
4	1	2	2	2	2	1	1		
5	2	1	2	1	2	1	2		
6	2	1	2	2	1	2	1		
7	2	2	1	1	2	2	1		
8	2	2	1	2	1	1	2		

测试噪声因素

■ 在正交阵列中分配额外的列

- 将噪音视为另一个因素
- 分析噪声因素的影响

■ 使用外部阵列

- 对于主阵列中的每一行，测试噪声因素的数种组合
 - 每行对应于数次试验

■ 每一行试验重复多次

- 试验过程中，让噪声自然、不受控地进行变化
- 测度性能波动方差

■ 以复合噪声进行试验

- 创建数种代表性或极端性的噪声条件
 - 每行对应于数次试验
- 测度性能波动方差

福特后座安全带

■ 使用3种噪声因素的2种组合

- 最好情况
- 最差情况

■ 按L8试验计划，进行16次试验

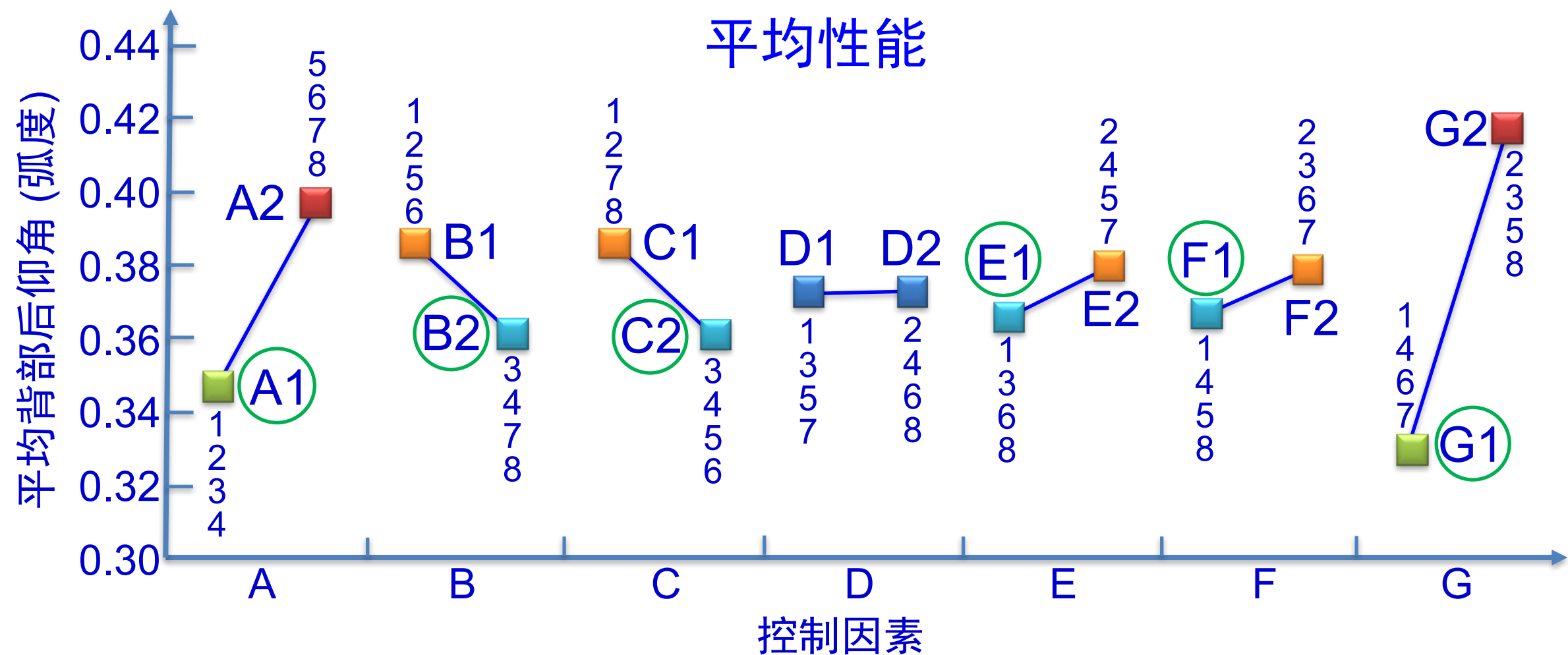
第四步：开展试验

- 在各种设定条件下，对产品进行测试
- 随机地决定进行试验的次序
- 确保系统性趋势与试验的结果，不产生关联

	A	B	C	D	E	F	G	N-	N+	均值	极差
1	1	1	1	1	1	1	1	0.3403	0.2915	0.3159	0.0488
2	1	1	1	2	2	2	2	0.4608	0.3984	0.4296	0.0624
3	1	2	2	1	1	2	2	0.3682	0.3627	0.3655	0.0055
4	1	2	2	2	2	1	1	0.2961	0.2647	0.2804	0.0314
5	2	1	2	1	2	1	2	0.4450	0.4398	0.4424	0.0052
6	2	1	2	2	1	2	1	0.3517	0.3538	0.3528	0.0021
7	2	2	1	1	2	2	1	0.3758	0.3580	0.3669	0.0178
8	2	2	1	2	1	1	2	0.4504	0.4076	0.4290	0.0428

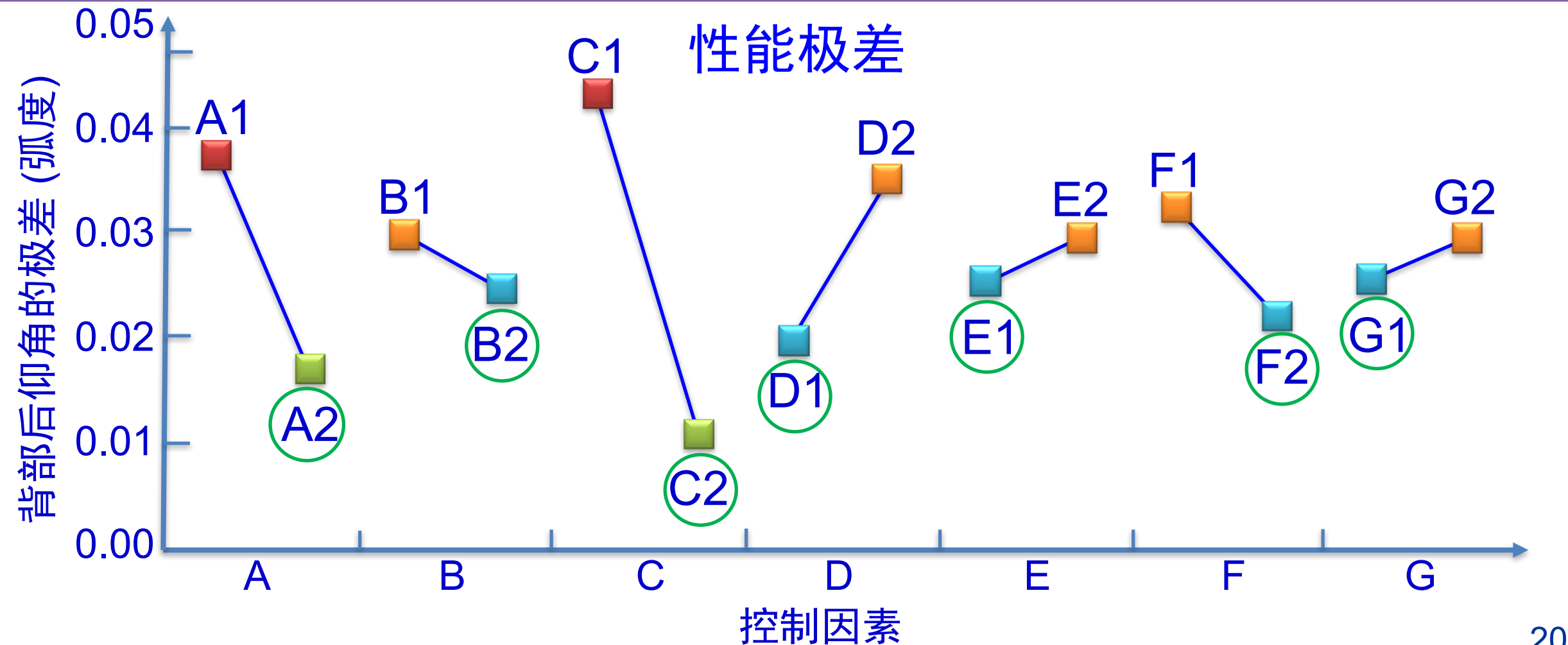
第五步：进行分析 (1/2)

- 计算目标函数，分析均值，评估各因素对产品性能的影响

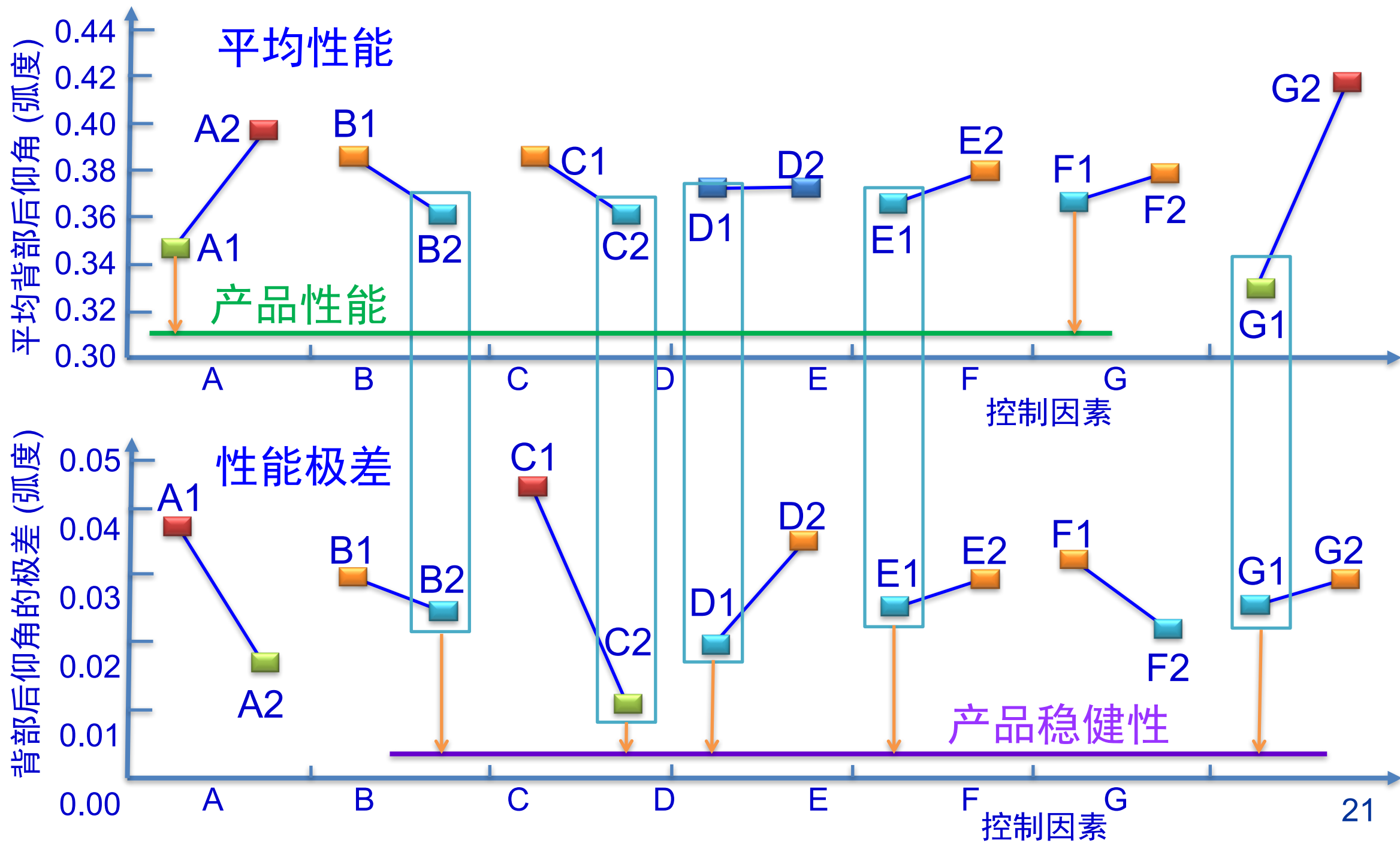


第五步：进行分析 (2/2)

- 分析极差，评估各因素对产品性能变动范围的影响



第六步：选择并确认因素设定点



第七步：反思并重复

- 进一步的优化，可能需要再进行几轮试验

- 折中选择的设计点，需要重新考虑
- 探究某些因素之间的相互影响
- 对参数设计点，进行精细调整
- 研究其它噪声因素、控制因素

- 我们是否开展了正确的试验？
- 我们获得了可接受的结果吗？
- 结果能否更好些？
- 我们是否应该重复这一过程，以实现性能和稳健性的进一步改进？

本讲小结

- 稳健的产品：即使在有噪声影响的情况下，也能正常运行、操作
- 噪声：不受控制的变化
- 试验设计 (DOE)

- 正交阵列提供了有效的方法，探索每个因素的主要影响
- 使用目标函数，计算性能的均值和方差
- 选择稳健的参数设定点

稳健设计七步法

1. 识别控制因素、噪声因素和性能指标
2. 构造目标函数
3. 制定试验计划
4. 开展试验
5. 进行分析
6. 选择并确认因素设定点
7. 反思并重复