

Lecture 04

General Planning of Mechanical Systems

第四章 机械系统的总体方案设计

ME303 Introduction to Mechanical Design

Adapted from <https://www.icourse163.org/course/HUST-1206698847>

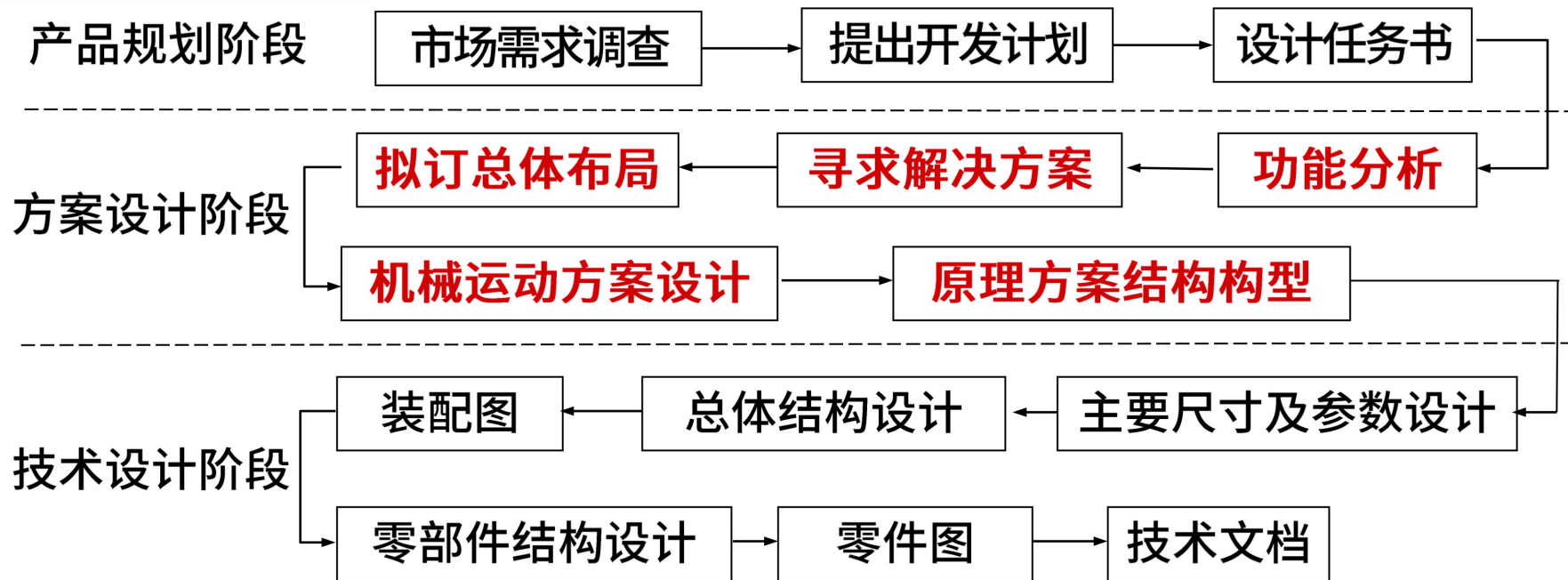
Mechanism Planning Design

原理方案设计

Procedures of Design Planning

总体方案设计的步骤

机械产品设计过程

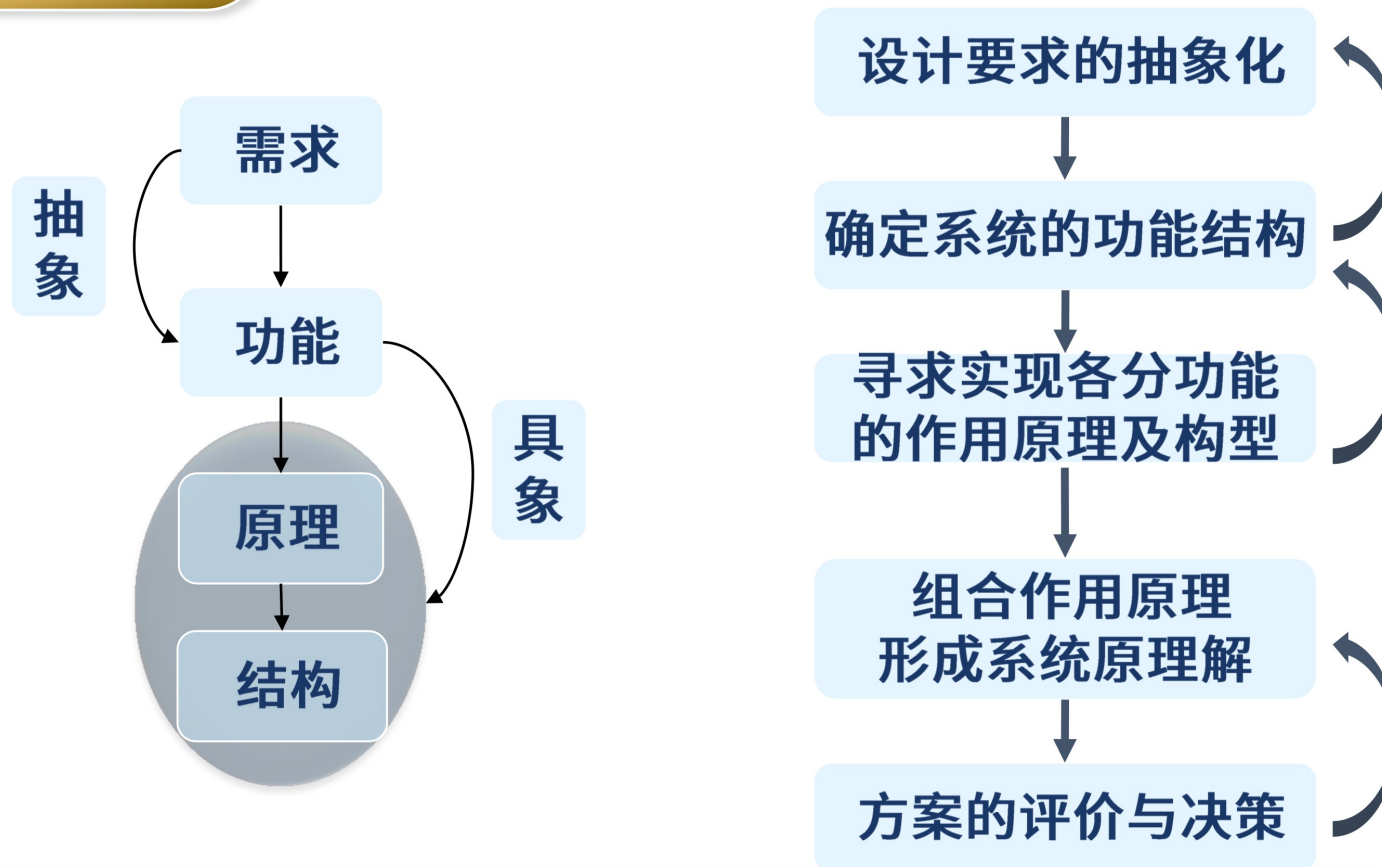


方案设计主要包括功能结构及其工作原理的设计，即：为了满足市场的具体需求，通过抽象化需求、建立机械系统的功能结构（树），寻求实现这些功能的原理方案及其相应的构型，组合优选出满足功能要求的总体方案。

Procedures of Design Planning

总体方案设计的步骤

方案设计的工作流程



Abstraction of Design Requirement

设计要求的抽象化

抽象化处理实例

- 容积：20 L-160 L
- 容器形状：未定
- 容器高度：150 mm-600 mm
- 油标与容器的连接在上部或侧面
- 汽油或柴油温度：-25-65°C
- 最大输出信号精度：±3%
- 油的液面高度随时间变动
- 最小测量值：最大值的3%

- 容积有一定范围
- 容器形状多样
- 连接方式多种
- 容器高度不一
- 液体的液面高度随时间变动
- 容积有一定范围
- 容器形状多样
- 测量液体连续变化量

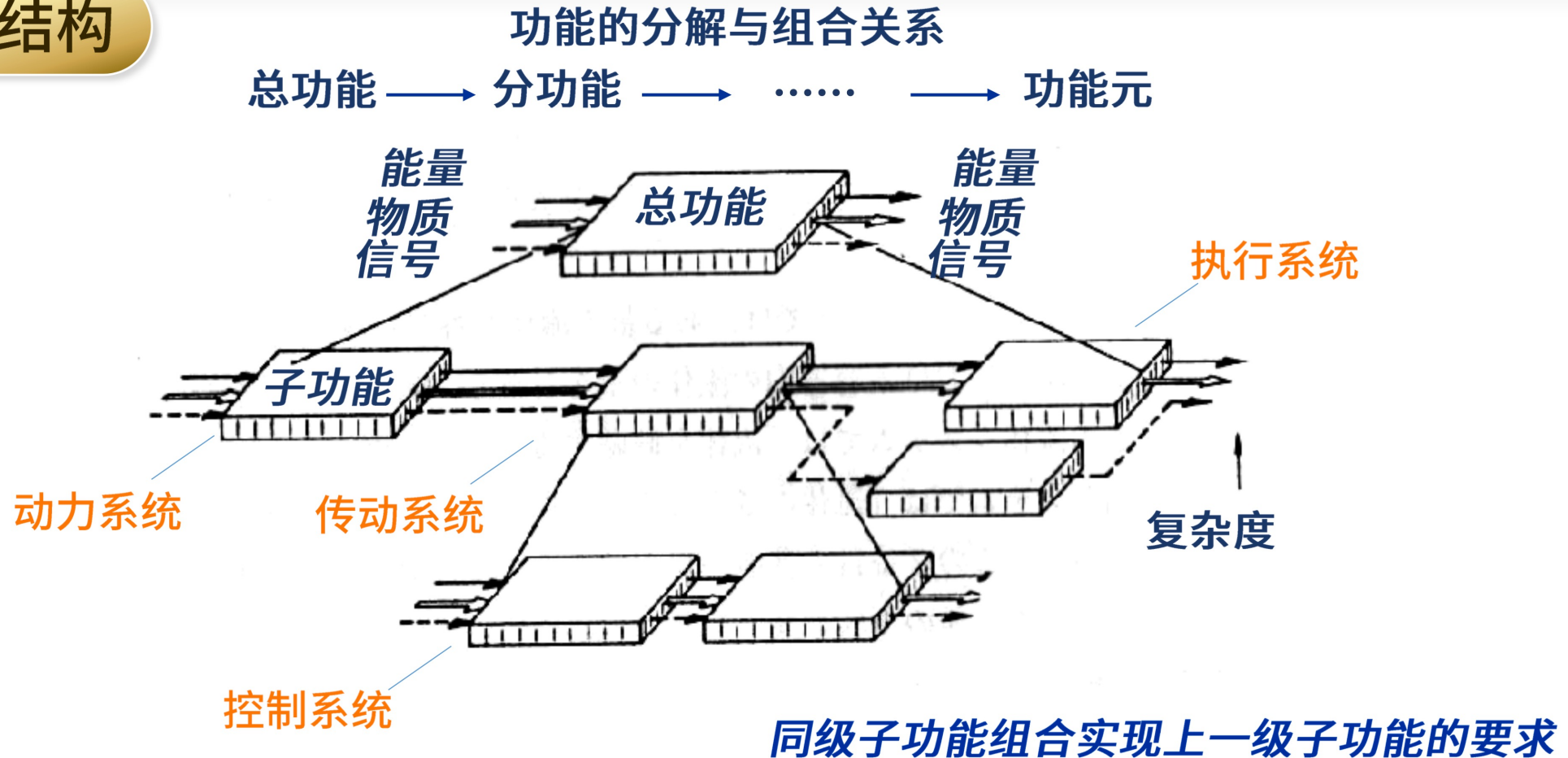
动态测量尺寸和形状都未定的容器中的液体变化量

测量液体变化量

Determine the System's Functional Structure

确定系统的功能结构

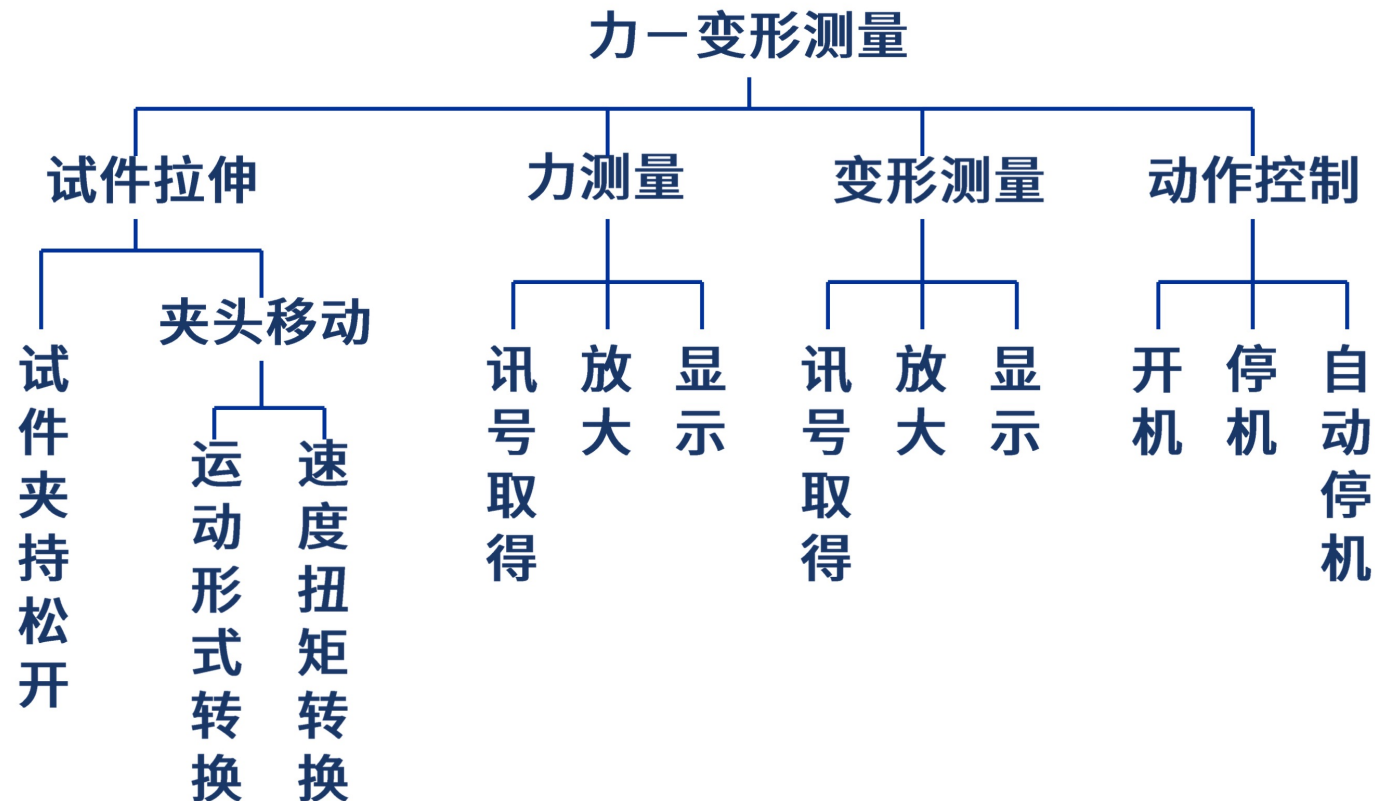
功能结构



Determine the System's Functional Structure

确定系统的功能结构

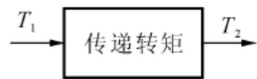
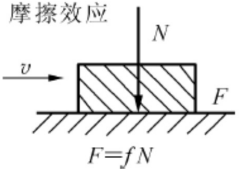
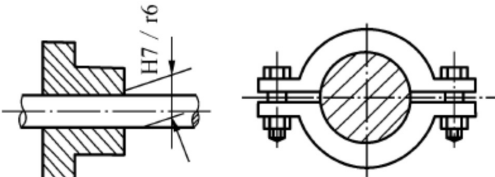

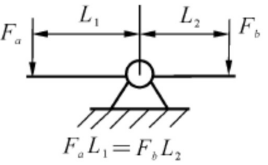

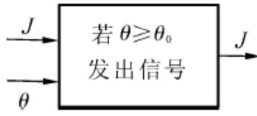
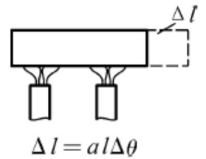
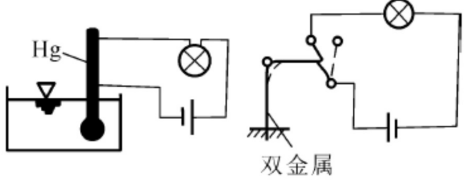
材料拉伸试验机的功能树



Mechanism Search for Sub-Functions

寻求实现分功能的作用原理

作用原理——在功能载体上利用某种或某些物理效应实现某一分功能的工作原理

| 分功能 | 物理效应 (不偏向于某种解) | 作用原理 |
|---|---|--|
|  | <p>摩擦效应</p>  <p>$F = fN$</p> |  |
|  | <p>杠杆效应</p>  <p>$F_a L_1 = F_b L_2$</p> |  |
|  | <p>膨胀效应</p>  <p>$\Delta l = a l \Delta \theta$</p> |  <p>双金属</p> |

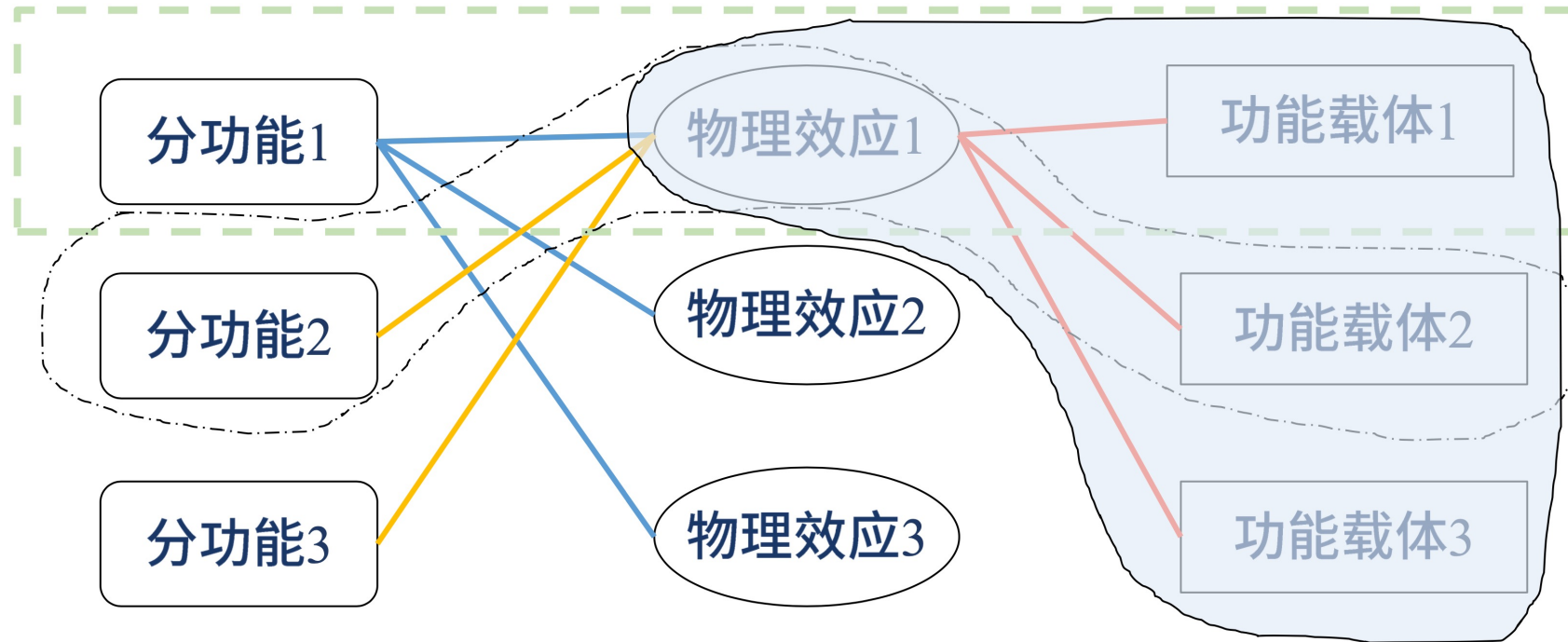
**分功能：
传递转矩**

**功能载体：
轴和毂**

**物理效应：
摩擦效应**

Mechanism Search for Sub-Functions

寻求实现分功能的作用原理



建立物理效应和功能载体的知识库

Theoretical Solution for Mechanism Planning

组合作用原理、形成方案设计的原理解

采用形态组合法进行组合

将各功能元的局部解 $\xrightarrow{\text{合理组合}}$ 多个系统原理解

目标的形态学矩阵

| 目标特征 \ 目标标记 | 1 | 2 | ... | |
|-------------|----------|----------|-----|-----------|
| F_1 | L_{11} | L_{12} | ... | $L_1 n_1$ |
| F_2 | L_{21} | L_{22} | ... | $L_2 n_2$ |
| F_3 | L_{31} | L_{32} | ... | $L_3 n_3$ |
| | | | | |

目标标记:

总功能分解为分功能

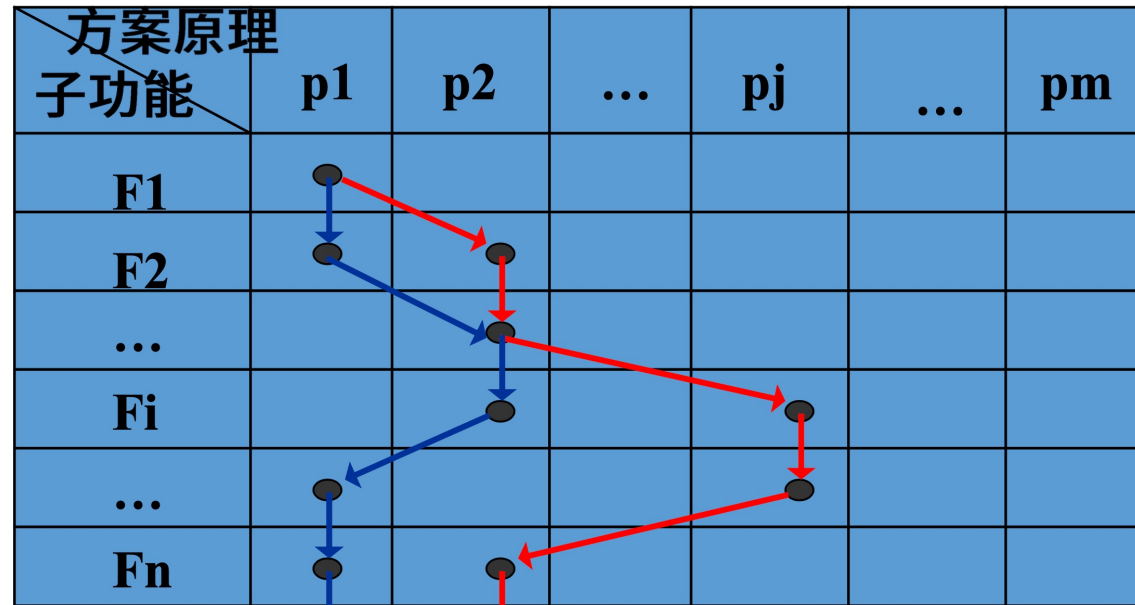
目标特征:

分功能相应的局部解

Theoretical Solution for Mechanism Planning

组合作用原理、形成方案设计的原理解

设计方案原理的组合



组合1

组合2

系统解的方案个数:

$$N = n_1 n_2 n_3 \cdots$$

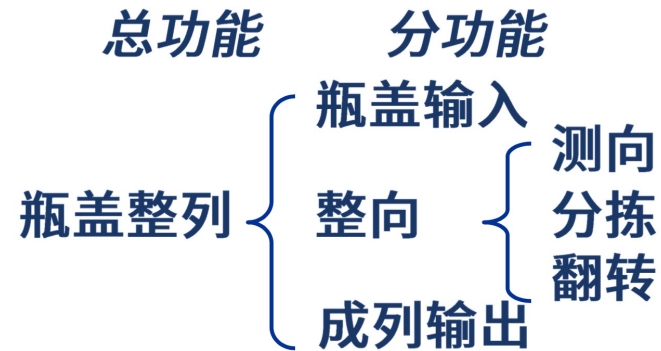
Theoretical Solution for Mechanism Planning

组合作用原理、形成方案设计的原理解

设计瓶盖整列(瓶口朝上)装置的原理方案

瓶盖整列装置形态学矩阵

| 分功能 | | 作用原理 | | | | | | | |
|-----|----|------|-----|----|------|----|------|---|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| A | 输入 | | | | | | | | |
| | | 重力 | | | 机械力 | | | | 液、气力 |
| B | 测向 | | | | | | | | |
| | | 机械测量 | | 气压 | 磁通密度 | 光测 | 气流 | | |
| C | 分拣 | | | | | | | | |
| | | 气流 | 负压 | 重力 | 机械式 | | | | |
| D | 翻转 | | | | | | | | |
| | | 重力 | 气流 | 导向 | | | | | |
| E | 输出 | | | | | | | | |
| | | 重力 | 机械式 | | | | 液、气力 | | |



| 目标特征 / 目标标记 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|-------------|----|----|----|----|----|----|----|----|
| A 输入 | A1 | A2 | A3 | A4 | A5 | A6 | A7 | A8 |
| B 测向 | B1 | B2 | B3 | B4 | B5 | B6 | | |
| C 分拣 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | | |
| D 翻转 | D1 | D2 | D3 | | | | | |
| E 输出 | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | |

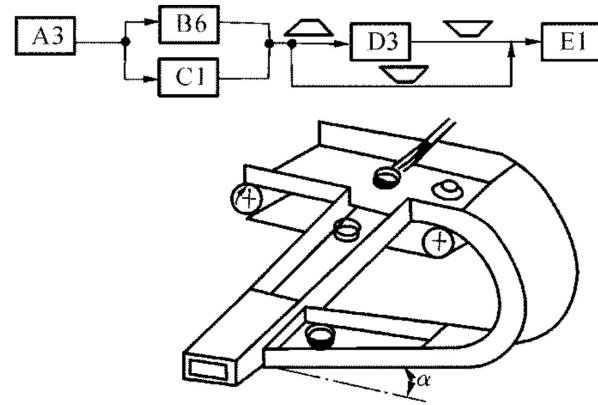
方案个数:

$$N = 8 \times 6 \times 6 \times 3 \times 7 = 6048$$

Theoretical Solution for Mechanism Planning

组合作用原理、形成方案设计的原理解

方案一



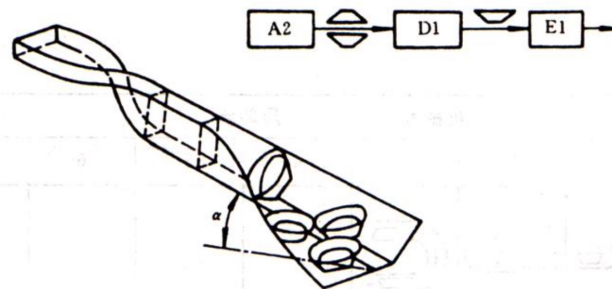
传输带——输入A3

气流吹拂 { 测向B6
分拣C1 } 分功能合并

导向——翻转D3

斜面下滑——输出E1

方案二



斜面下滑——输入A2

重力——翻转D1

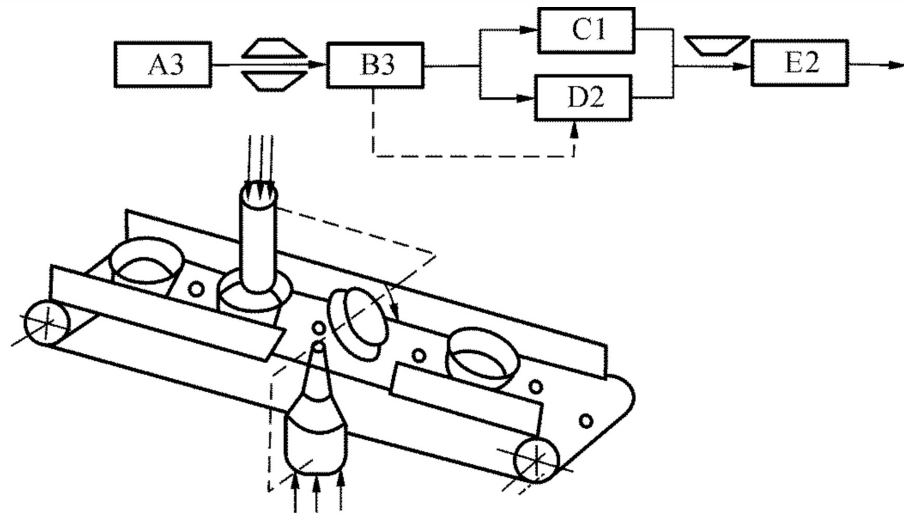
斜面下滑——输出E1

舍去测向、分拣

Theoretical Solution for Mechanism Planning

组合作用原理、形成方案设计的原理解

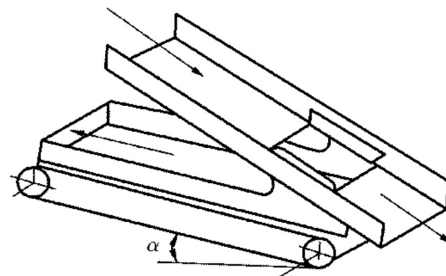
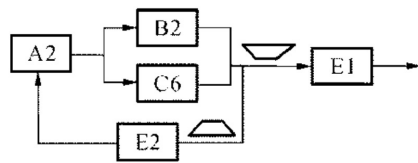
方案三



传输带——输入A3
 气压——测向B3
 气流喷嘴 { 分拣C1
 翻转D2
 传输带——输出E2

分功能合并

方案四



斜面下滑——输入A2
 特形槽 { 测向B2
 分拣C6

分功能合并

斜面下滑——输出E1
 传输带——输出E2
 (回收重新开始)

舍去翻转

Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

设计过程的主要步骤

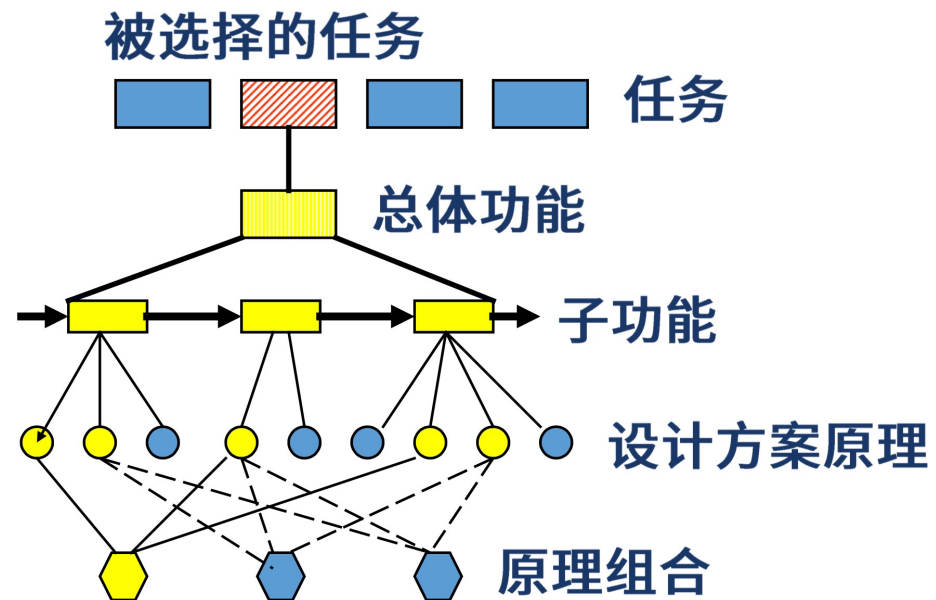
设计要求的抽象化

确定系统的功能结构

寻求实现各分功能的作用原理

组合作用原理形成原理解

方案的评价与决策

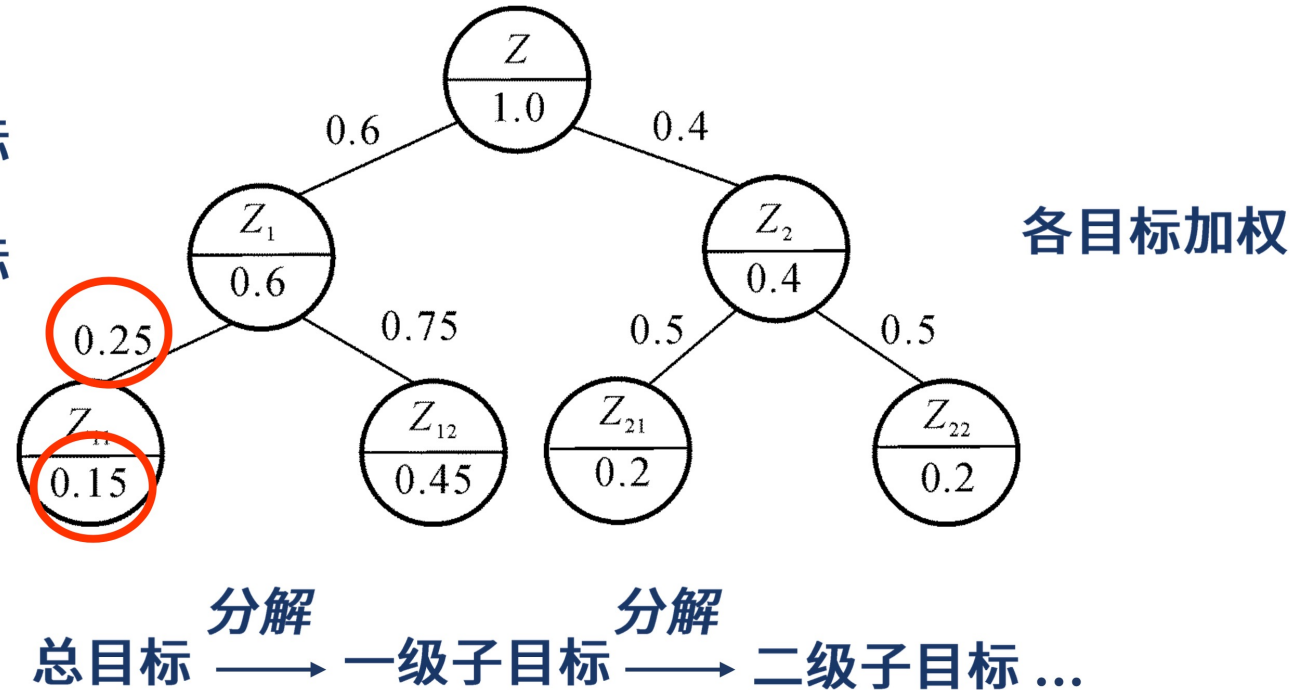


Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

建立评价目标

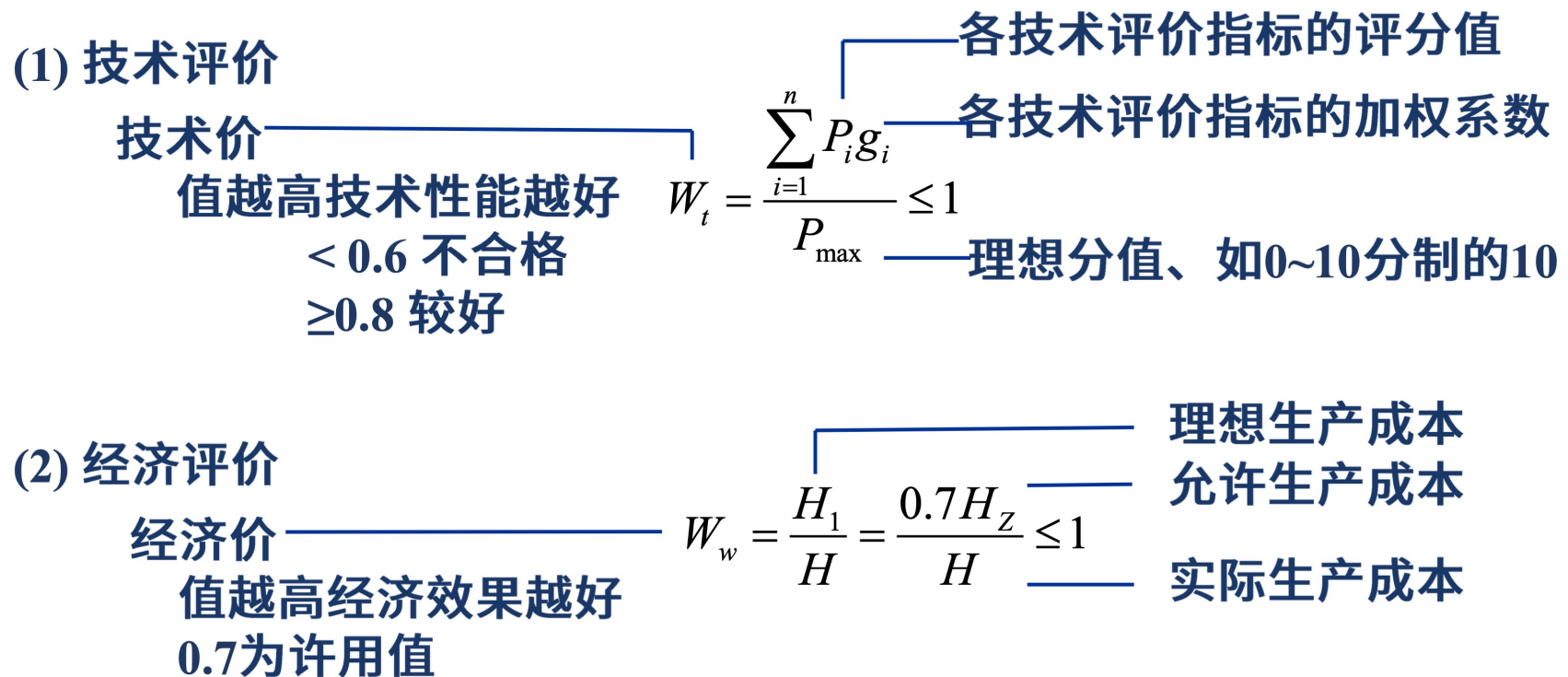
- 技术性评价目标
- 经济性评价目标
- 社会评价目标



Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

技术—经济综合评价方法



Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

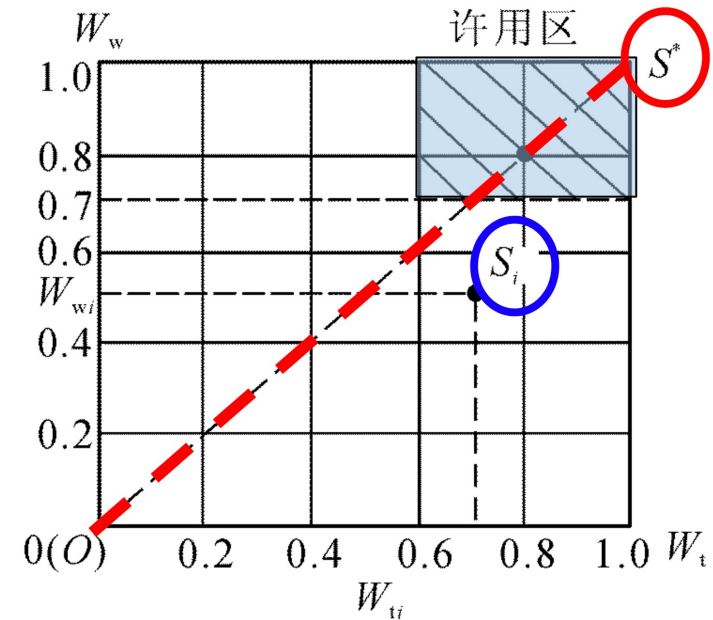
技术—经济综合评价方法

(3) 综合评价

➤ 双曲线法 $W = 0.5\sqrt{W_t \cdot W_w}$

➤ 优度图

决策



一般在各方案中，选总价值最高的方案

注意均衡性，例：尽管总价值高、但某些评价目标的评分低于平均值

Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

例：设计一连续工作的带式运输机的机械传动系统，要求运动平稳，结构紧凑，维护方便，效率高。已知：传递功率 $P = 4 \text{ kW}$ ，输入转速 $n_1 = 1000 \text{ r/min}$ ，输出转速 $n_2 = 85 \text{ r/min}$ 。试拟定传动系统的方案。

1. 明确任务要求

总传动比： $i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{1000}{85} = 11.76$ 选择两级减速传动

2. 功能分析，列出形态学矩阵

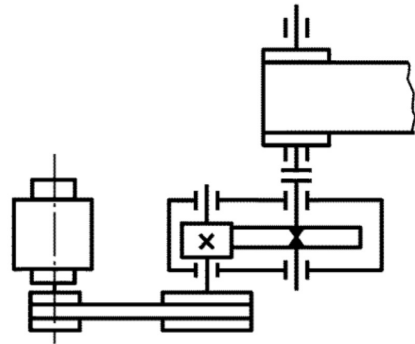
| 局部解 分功能 | | 摩擦传动 | 啮合传动 | | | | |
|------------|-------|------|------------|------------|----------|---------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A | 第一级传动 | V带传动 | 闭式直齿圆柱齿轮传动 | 闭式斜齿圆柱齿轮传动 | 闭式人字齿轮传动 | 闭式锥齿轮传动 | 蜗轮蜗杆传动 |
| B | 第二级传动 | | 闭式直齿圆柱齿轮传动 | 闭式斜齿圆柱齿轮传动 | 开式圆柱齿轮传动 | 闭式锥齿轮传动 | 链传动 |

功能原理解总数： $N = 6 \times 5 = 30$

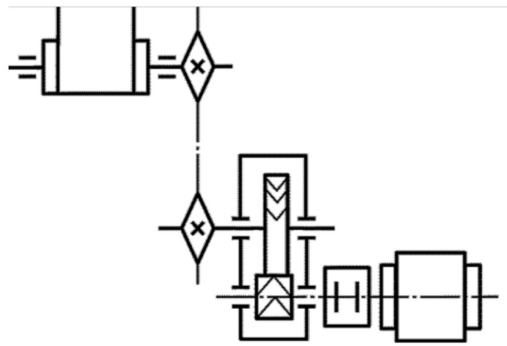
Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

组合原理解

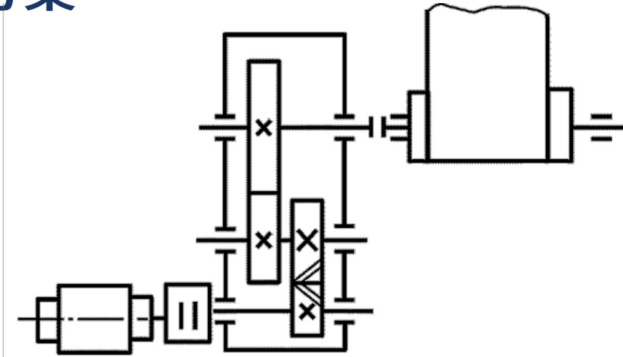


方案一：A1+B2

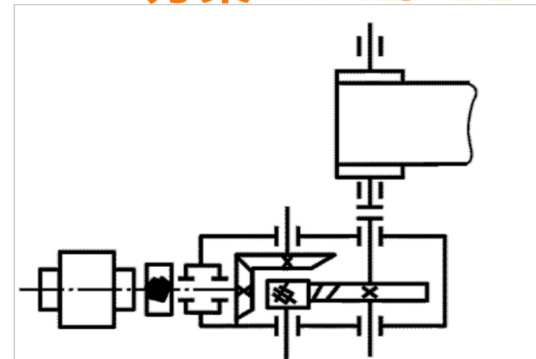


方案三：A4+B6

初选 4 种方案



方案二：A3+B2



方案四：A5+B3

Design Evaluation and Decision

方案的评价与决策

方案的评价与决策

| 评价目标 | 加权系数 | 方案一 | | 方案二 | | 方案三 | | 方案四 | |
|------|-------|------|-----|-------|------|-------|------|-------|-----|
| | | 评分 | 加权分 | 评分 | 加权分 | 评分 | 加权分 | 评分 | 加权分 |
| 结构紧凑 | 0.2 | 2 | 0.4 | 4 | 0.8 | 2 | 0.4 | 4 | 0.8 |
| 效率高 | 0.1 | 3 | 0.3 | 4 | 0.4 | 3 | 0.3 | 4 | 0.4 |
| 维护方便 | 0.1 | 3 | 0.3 | 3 | 0.3 | 3 | 0.3 | 3 | 0.3 |
| 制造简单 | 0.15 | 4 | 0.6 | 3 | 0.45 | 1 | 0.15 | 2 | 0.3 |
| 连续工作 | 0.2 | 4 | 0.8 | 3 | 0.6 | 3 | 0.6 | 3 | 0.6 |
| 运转平稳 | 0.05 | 4 | 0.2 | 3 | 0.15 | 2 | 0.1 | 2 | 0.1 |
| 寿命长 | 0.2 | 2 | 0.4 | 3 | 0.6 | 3 | 0.6 | 3 | 0.6 |
| 技术价值 | W_i | 0.75 | | 0.825 | | 0.612 | | 0.775 | |

方案设计阶段不易定出实际生产成本
技术评价中含有经济观点

Example

例 16-2 拟订轴、毂键连接冲击试验台的原理解答方案。这种试验台应能以规定的冲击性转矩对轴、毂键连接进行加载。要求：试验轴直径不大于 100 mm；载荷为大小可调（最大为 15 000 N·m）的纯转矩且在轴静止时输入，只受单向负荷，加载方向可选择；最大转矩至少保持 1 s 然后急剧下降，转矩变化过程能重复实现；能够测量转矩输入前后连接所受的转矩及键受载表面的应力，并可记录，测量应容易进行。

解 (1) 抽象化设计要求, 定出总功能。

根据 16.1 节所介绍的工作方法, 将设计要求逐步进行抽象化, 以便认识带有普遍意义的、本质的问题。经有意义的扩展, 最后将问题表述为: 以动态转矩对轴、毂键连接加载, 并测量其载荷及应力。

认识主要问题后, 可确定试验台的总功能, 如图 16-11 所示。

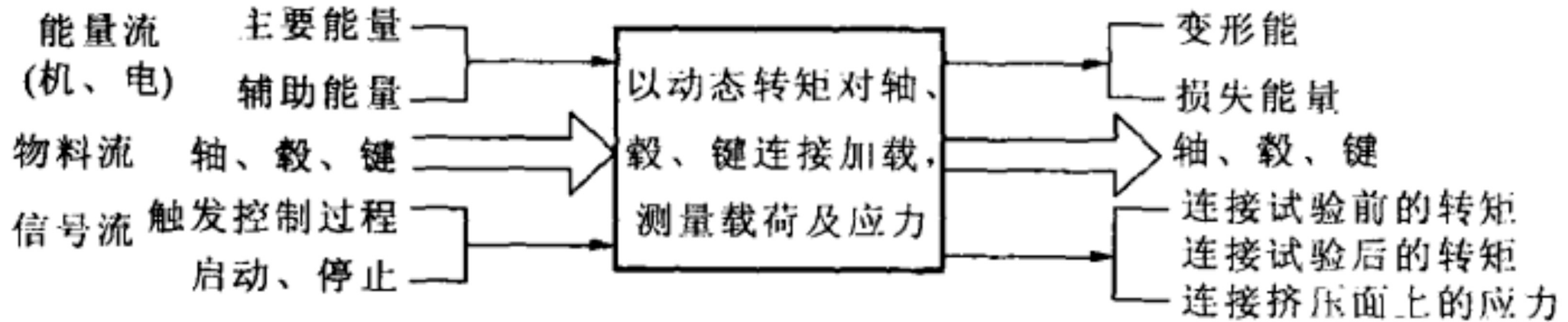


图 16-11 冲击试验台的总功能

例 16-2 拟订轴、毂键连接冲击试验台的原理解答方案。这种试验台应能以规定的冲击性转矩对轴、毂键连接进行加载。要求: 试验轴直径不大于 100 mm; 载荷为大小可调(最大为 15 000 N·m)的纯转矩且在轴静止时输入, 只受单向负荷, 加载方向可选择; 最大转矩至少保持 1 s 然后急剧下降, 转矩变化过程能重复实现; 能够测量转矩输入前后连接所受的转矩及键受载表面的应力, 并可记录, 测量应容易进行。

(2) 建立功能结构。

将上述总功能分解成分功能以建立功能结构。此例中重要的分功能与能量流密切相关,测量问题则与信号流有关。总功能可分解成几个主要的分功能:能量转换(原动机)、能量储存及释放、能量分量放大或转换、能量大小及时间控制、能量转换成转矩、加载、载荷及应力测量等。次要分功能有试件安装、拆卸等。为使问题简化易于理解,这里建立功能结构时不考虑测量功能。功能结构如图 16-12 所示。

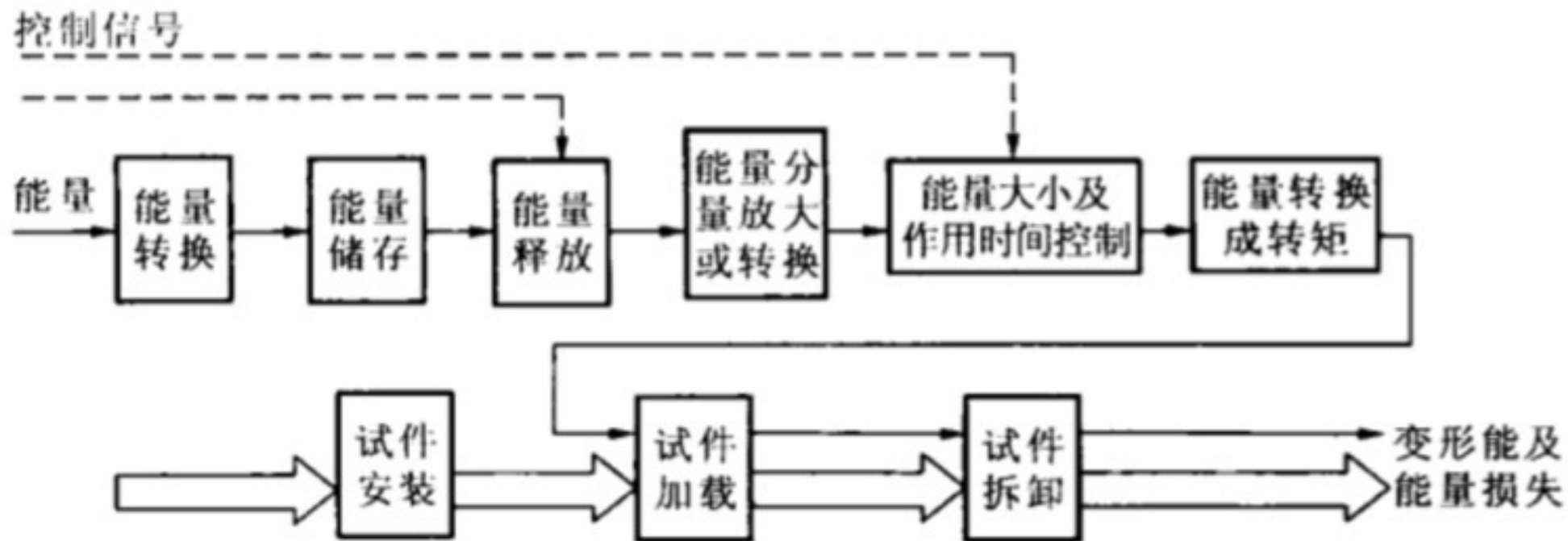


图 16-12 冲击试验台的功能结构

(3) 寻求作用原理,建立形态学矩阵。

根据设计者的经验并采用 16.1 节所介绍的方法,对每一个分功能找出尽可能多的作用原理,并按分功能的连接顺序建立形态学矩阵,以便对作用原理进行综合,如表 16-8 所示。限于篇幅,表中仅列入了最主要的分功能和作用原理(省略了原理简图)。对于表中未表示出的分功能可采用相应的作用原理,如:能量释放可采用可控离合器或棘轮机构;加载可采用带有某种连接方式及刚性联轴器的轴。通过分析比较,应将那些不合适的作用原理尽早划掉(见表中的斜线)。

表 16-8 冲击试验台的形态学矩阵(仅包括主要功能)

| 分 功 能 | | 作用原理 | | | | | |
|-------|---------------|------------|--------------------------|--------------|-----------------|-------|----------------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A | 能量转换 (原动机) | 交流电动机 | 直流电动机 | 同步电动机 | 液压马达 | 气动马达 | 内燃机 |
| B | 能量储存 | 飞轮 (回转) | 质量惯性 (平移) | 位能 | 变形能 (如弹簧) | 电池 | |
| C | 能量分量放 大或转换 | 杠杆 | 齿轮传动 | 利用流体 压力放大 | 螺旋传动 | | |
| D | 控制能量大 小与时间 | 平面凸轮 | 空间凸轮 | 可控制动器 | 可控硅 | 可控流量阀 | |
| E | 能量转换成 转矩 | 齿轮齿条 传动 | 曲柄机构 | 杠杆 | 拉曳传动 | | |

(4) 组合作用原理,形成原理方案解答。

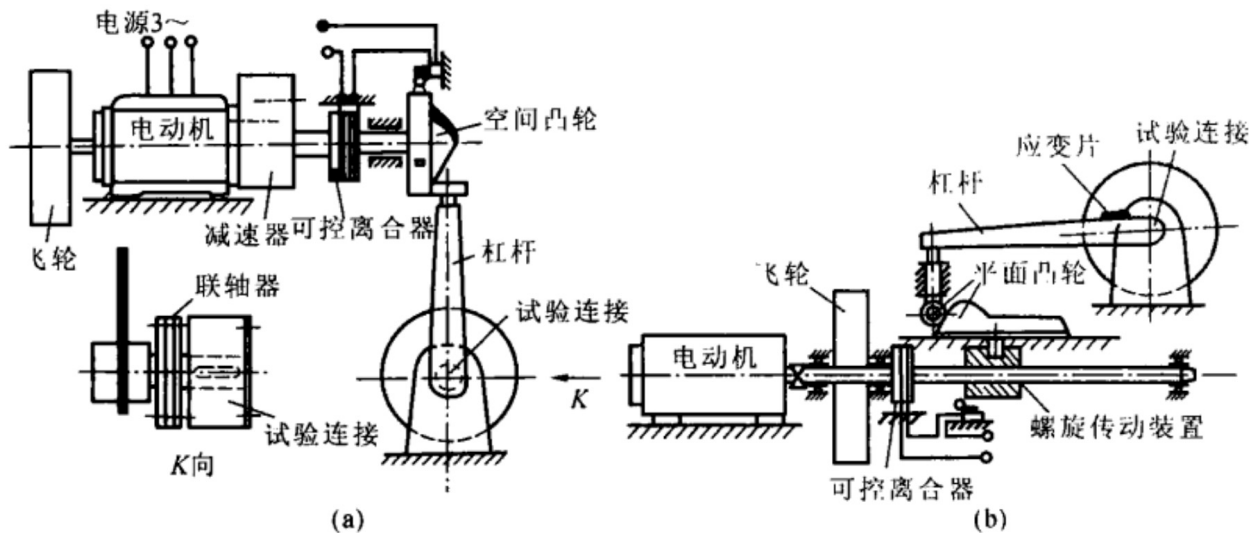
参照功能结构,将形态学矩阵中各分功能的作用原理(局部解)进行综合,形成系统的总解,此时分功能的排列顺序还可改变。组合过程中要考虑局部解的相容性和技术上实现的可能性。然后在众多的原理方案解答中挑选出值得继续进行开发的少数几个方案作为备选方案。在本例中选择以下三个方案。

方案一: $A1 + B1 + C2 + D2 + E3$

方案二: $A1 + B1 + C4 + D1 + E3$

方案三: $A1 + B3 + C2 + D3 + E3$

例如在方案一中,组合的结果是由交流电动机实现能量转换、用飞轮储存能量、由齿轮减速器将能量分量放大、用空间凸轮控制能量大小及作用时间、用杠杆将能量转变成转矩。



- 方案一： A1+B1+C2+D2+E3
 方案二： A1+B1+C4+D1+E3
 方案三： A1+B3+C2+D3+E3

表 16-8 冲击试验台的形态学矩阵(仅包括主要功能)

| 分功能 | 作用原理 | 作用原理 | | | | | |
|--------------|------|---------|-----------|----------|-----------|-------|-----|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| A 能量转换 (原动机) | | 交流电动机 | 直流电动机 | 同步电动机 | 液压马达 | 气动马达 | 内燃机 |
| B 能量储存 | | 飞轮 (回转) | 质量惯性 (平移) | 位能 | 变形能 (如弹簧) | 电池 | |
| C 能量分量放大或转换 | | 杠杆 | 齿轮传动 | 利用流体压力放大 | 螺旋传动 | | |
| D 控制能量大小与时间 | | 平面凸轮 | 空间凸轮 | 可控制动器 | 可控硅 | 可控流量阀 | |
| E 能量转换成转矩 | | 齿轮齿条传动 | 曲柄机构 | 杠杆 | 拉曳传动 | | |

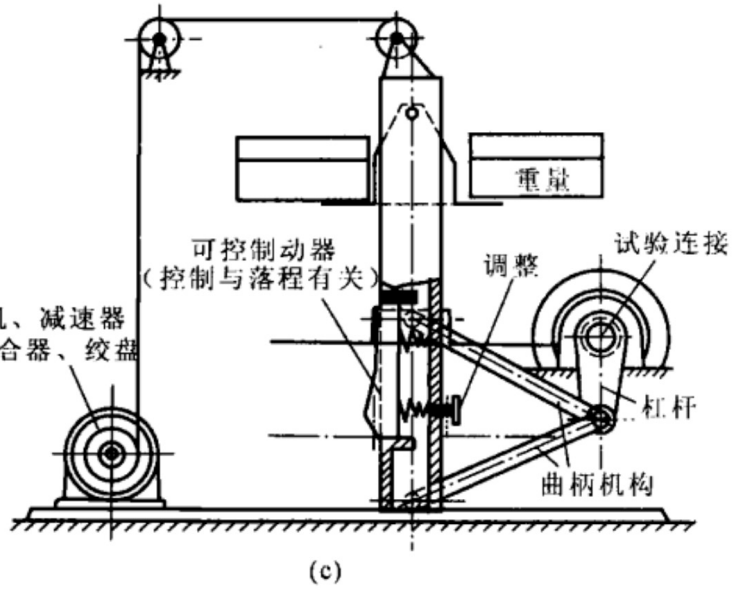


图 16-13 冲击试验台原理解答方案简图
 (a) 方案一; (b) 方案二; (c) 方案三

(5) 方案评价与决策。

首先,从设计中的重要要求出发,建立一系列复杂程度不同的评价目标。然后,分别按技术、经济的观点建立目标树(见图 16-14、图 16-15),并对各目标的重要性进行评估,选定加权系数。

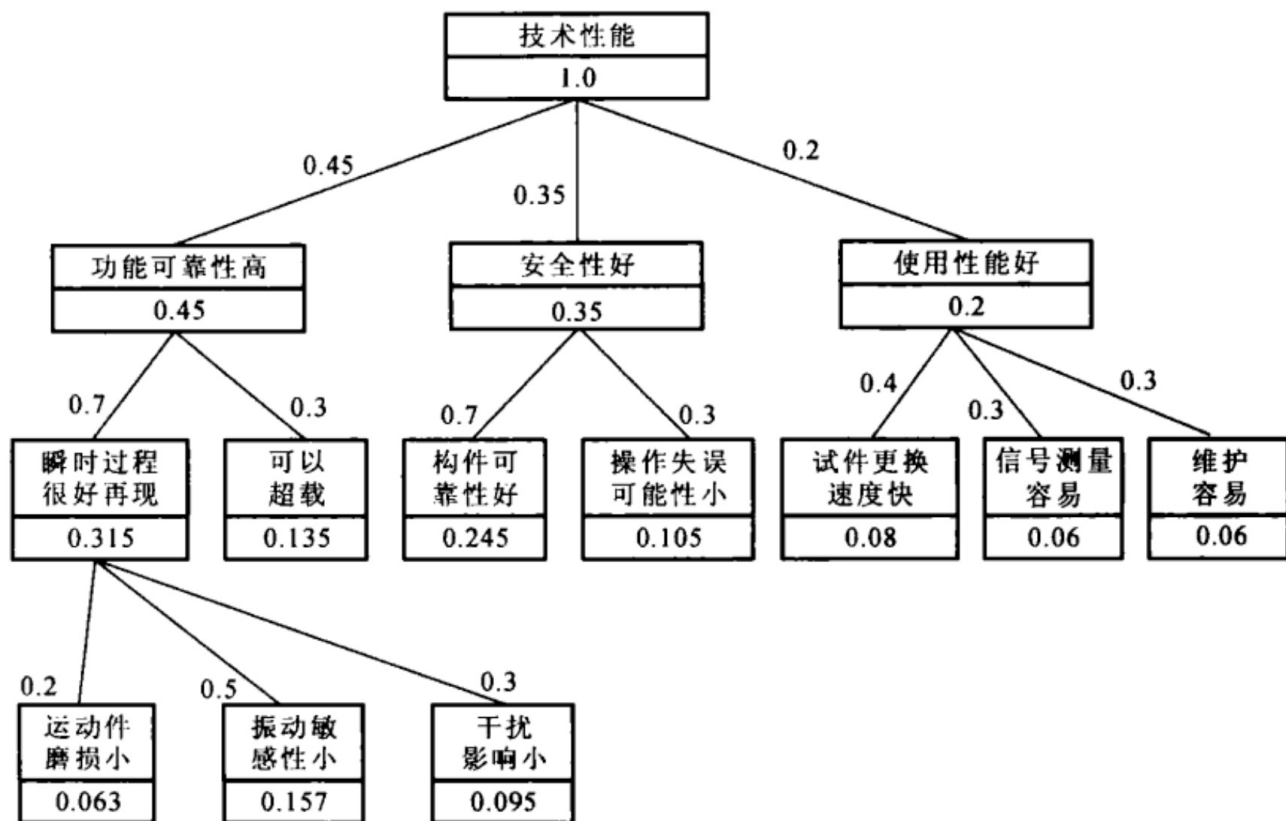


图 16-14 冲击试验台技术目标树

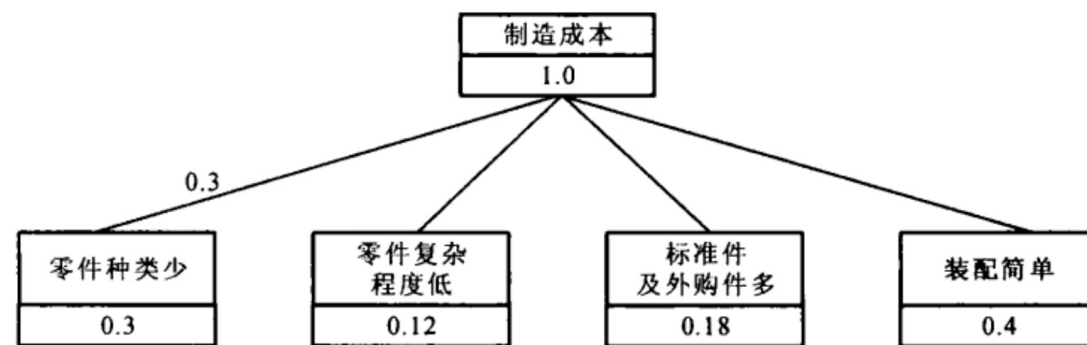


图 16-15 冲击试验台经济目标树

根据目标树,分别建立如表 16-9 及表 16-10 所示的评价表,按 0~10 分的评价尺度对各个评价目标打分,得出各方案的加权分值总和。根据式(16-4),三个方案的技术价和经济价分别为

$$W_{t1} = \frac{6.997}{10} = 0.6997, \quad W_{t2} = \frac{6.611}{10} = 0.6611, \quad W_{t3} = \frac{3.8}{10} = 0.38$$

$$W_{w1} = \frac{7.12}{10} = 0.712, \quad W_{w2} = \frac{5.7}{10} = 0.57, \quad W_{w3} = \frac{5.02}{10} = 0.502$$

然后,用双曲线法(式(16-7))进行技术-经济综合评价:

$$W_1 = \sqrt{0.6997 \times 0.712} = 0.706, \quad W_2 = \sqrt{0.6611 \times 0.57} = 0.614$$

$$W_3 = \sqrt{0.38 \times 0.502} = 0.437$$

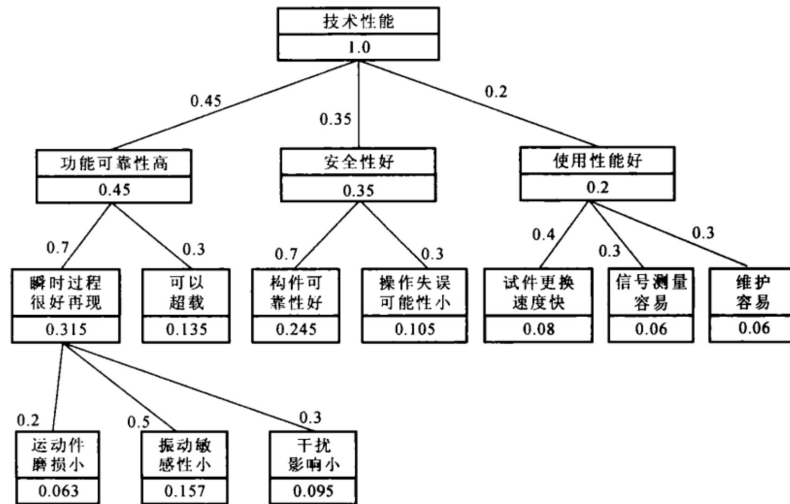


图 16-14 冲击试验台技术目标树

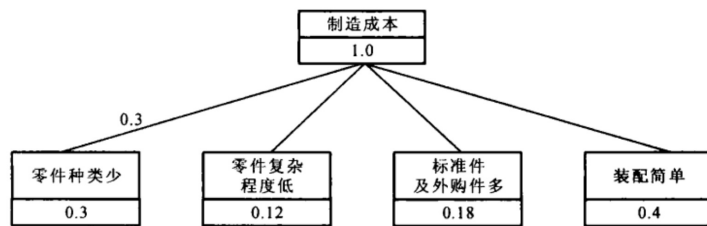


图 16-15 冲击试验台经济目标树

表 16-9 冲击试验台技术性能评价表

| 序号 | 评价目标 | 加权系数 | 特性值 | 方案一 | | | 方案二 | | | 方案三 | | |
|----|----------|-------|-----------------------|---------|----|-------|---------|----|-------|---------|----|-------|
| | | | | 特性 | 评分 | 加权分 | 特性 | 评分 | 加权分 | 特性 | 评分 | 加权分 |
| 1 | 磨损少 | 0.063 | 磨损量 | 中 | 6 | 0.378 | 中 | 4 | 0.252 | 大 | 3 | 0.189 |
| 2 | 振动敏感性小 | 0.157 | 固有角频率/s ⁻¹ | 2 370 | 7 | 1.099 | 2 370 | 7 | 1.099 | 410 | 3 | 0.471 |
| 3 | 干扰影响小 | 0.095 | 干扰影响 | 小 | 7 | 0.665 | 小 | 6 | 0.57 | 大 | 2 | 0.19 |
| 4 | 可以超载 | 0.135 | 载荷裕度 | 10% | 7 | 0.945 | 10% | 7 | 0.945 | 5% | 5 | 0.675 |
| 5 | 构件可靠性高 | 0.245 | 预计机械可靠性 | 高 | 7 | 1.715 | 高 | 7 | 1.715 | 中 | 4 | 0.98 |
| 6 | 操作失误可能性小 | 0.105 | 操作失误可能性 | 小 | 7 | 0.735 | 小 | 6 | 0.63 | 大 | 3 | 0.315 |
| 7 | 试件更换速度快 | 0.08 | 估计试件更换时间 | 120 min | 7 | 0.56 | 120 min | 7 | 0.56 | 180 min | 4 | 0.32 |
| 8 | 信号测量容易 | 0.06 | 测量系统的可及性 | 好 | 7 | 0.42 | 好 | 7 | 0.42 | 好 | 7 | 0.42 |
| 9 | 维护容易 | 0.06 | 维修时间长短 | 短 | 8 | 0.48 | 短 | 7 | 0.42 | 中 | 4 | 0.24 |
| 总和 | | 1 | | | 63 | 6.997 | | 58 | 6.611 | | 35 | 3.8 |

表 16-10 冲击试验台经济性评价表

| 序号 | 评价目标 | 加权系数 | 特性值 | 方案一 | | | 方案二 | | | 方案三 | | |
|----|----------|------|------------|-----|----|------|-----|----|------|-----|----|------|
| | | | | 特性 | 评分 | 加权分 | 特性 | 评分 | 加权分 | 特性 | 评分 | 加权分 |
| 1 | 零件种类少 | 0.3 | 零件种类 | 少 | 7 | 2.1 | 中 | 5 | 1.5 | 中 | 6 | 1.8 |
| 2 | 零件复杂程度低 | 0.12 | 零件复杂程度 | 低 | 8 | 0.96 | 中 | 6 | 0.72 | 低 | 6 | 0.72 |
| 3 | 标准件及外购件多 | 0.18 | 标准件外购件所占比例 | 高 | 7 | 1.26 | 中 | 6 | 1.08 | 低 | 5 | 0.9 |
| 4 | 装配简单 | 0.4 | 装配简单程度 | 中 | 7 | 2.8 | 中 | 6 | 2.4 | 低 | 4 | 1.6 |
| 总和 | | 1 | | | 29 | 7.12 | | 23 | 5.7 | | 21 | 5.02 |

也可用优度线图(见图 16-16)来表示方案的优劣,图中 S_1 、 S_2 、 S_3 分别表示三个方案的优度。

根据目标树,分别建立如表 16-9 及表 16-10 所示的评价表,按 0~10 分的评价尺度对各个评价目标打分,得出各方案的加权分值总和。根据式(16-4),三个方案的技术价和经济价分别为

$$W_{t1} = \frac{6.997}{10} = 0.6997, \quad W_{e2} = \frac{6.611}{10} = 0.6611, \quad W_{t3} = \frac{3.8}{10} = 0.38$$

$$W_{w1} = \frac{7.12}{10} = 0.712, \quad W_{w2} = \frac{5.7}{10} = 0.57, \quad W_{w3} = \frac{5.02}{10} = 0.502$$

然后,用双曲线法(式(16-7))进行技术-经济综合评价:

$$W_1 = \sqrt{0.6997 \times 0.712} = 0.706, \quad W_2 = \sqrt{0.6611 \times 0.57} = 0.614$$

$$W_3 = \sqrt{0.38 \times 0.502} = 0.437$$

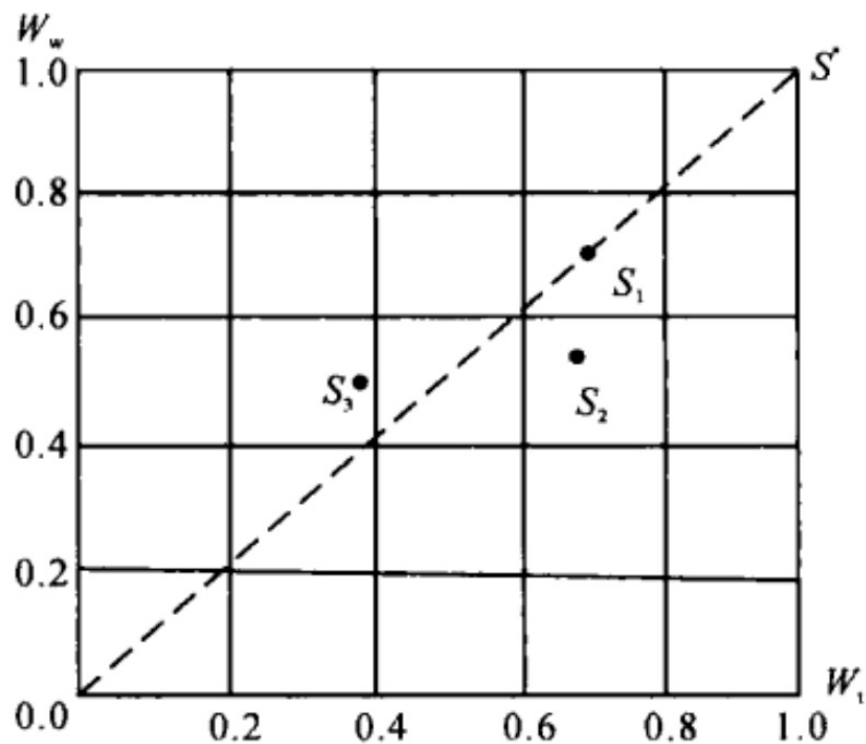


图 16-16 冲击试验台优度线图

对评价结果进行比较,方案一的总价值最高,方案三最低。故决定采用方案一作为最终系统方案,并由此转入技术设计阶段,进行系统的结构设计。

Assignment 04

Link will be closed before this Sunday noon. No late submission.

- 寻找你身边的四连杆机构，对其绘制机构运动简图，并简要分析其方案的合理性
- Identify a four-bar linkage mechanism within your reach, draw the kinematic diagram of this mechanism and analyze its kinematic behaviors in terms of motion and force.
- Scan the code using Feishu to submit
- <https://wenjuan.feishu.cn/m?t=s37xzlbitbwi-7pvf>

21年秋季ME303第四次作业提交链接



打开飞书“扫一扫”

Thank you~

ME303 Introduction to Mechanical Design

Adapted from <https://www.icourse163.org/course/HUST-1206698847>