



第二章 原理方案的创新设计

主要内容

- 原理方案设计——确定产品工作原理
- 功能原理方案的创新设计——围绕功能分析而进行工作原理和工艺动作过程的构思，将机械产品的功能目标转化为工艺动作的过程
- 设计目录——设计信息库
- 原理方案创新设计的评价——评价内容、评价指标和评价方法
- 原理方案的创新设计实例——抓斗的原理方案创新设计



- **本章要求**

- 要求掌握原理方案创新设计的一般方法
- 1) 从功能分析入手
- 2) 通过总体方案分析，构思各功能的工作原理方案
- 3) 进行功能分解得到功能树，进而求出功能解，得出系统的多种原理解方案，
- 4) 运用系统工程的方法来分析机械各组成部分之间的有机联系和系统与外界环境的关系，
- 5) 进行技术经济评价，再经优化筛选，求得最佳原理方案。

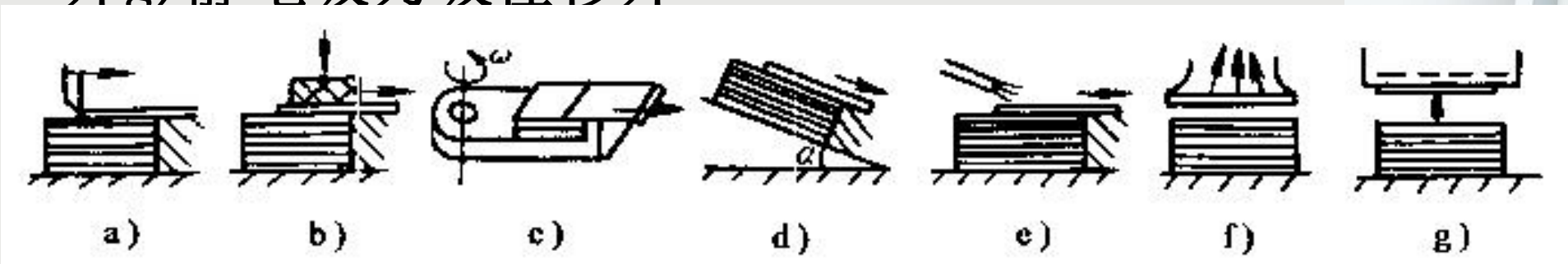
第一节 原理方案设计

• **原理方案设计**——构思机械产品的工艺动作和工艺动作实现功能目标的机理即工作原理。

• **重要特点：**方案的解具有多解性，即实现同一功能目标可以采用各种不同的工作原理。

• **如：要实现将一叠纸张逐一分开这一功能目标**

a) 切向力推开 b) 摩擦力“擦开” c) 离心力抛开
d) 重力落下脱开 e) 气体力吹开 f) 负压吸力吸住移开
g) 静电吸力吸住移开





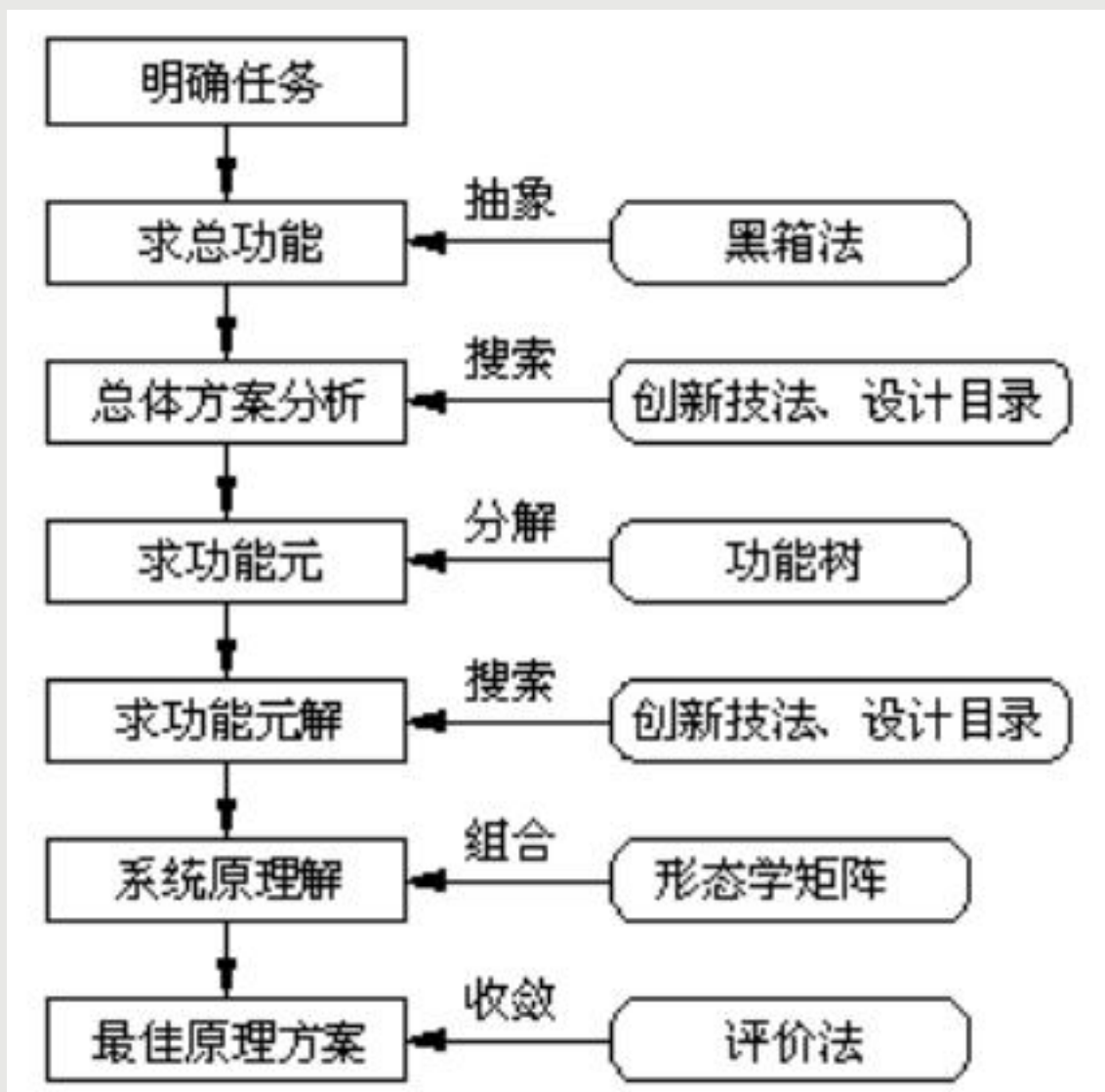
- 原理方案设计中采用的工作原理不同，所设计出来的机械产品具有的工艺动作不同，则机械产品的性能、结构及经济性也不相同。
- 如：在圆柱形工件表面加工出螺纹
 - 1) 采用车削加工的工作原理，所设计的机床应具有夹紧工件、旋转工件、刀具对准工件轴线沿轴线方向按一定速度运动的工艺动作，加工效率低，螺纹精度难以控制，但对机床要求低
 - 2) 采用板牙套丝的工作原理，设计出来的机床应具有夹紧工件、板牙中心轴线对准工件轴线加压后，或使刀具不动工件转动，或使工件不动刀具转动的工艺动作，加工效率较高
 - 3) 采用搓丝的工作原理，设计出来的机床应具有按一定位姿进送工件并让搓丝板压紧工件作平移运动的工艺动作，加工效率高，加工精度高，但对机床要求也高



- 在传统的原理方案设计中，纯机械式的工作原理应用十分广泛，能表现出性能稳定、工作可靠的特性。
- 综合运用机、光、电、磁、热、化等各种物理效应来构思方案可以收到全新的、更理想的设计效果。
- 如：在清洗回收玻璃瓶的方案设计中，采用化学液浸泡、高压水冲洗、超声波去污比用刷子作机械运动来清洗的效果更好。
- 如：机械式的钟表用纵擒机构和物理摆的工作原理来控制钟表的走时精度，钟表的结构不仅复杂，而且实现高精度的报时十分困难。用石英晶体振荡来控制电磁摆摆动的频率，制成了机电结合的石英钟表，钟表的结构得到简化，报时精度也得到很大提高。引入液晶显示技术，进一步省掉电磁摆和钟表的指针，获得一种用液晶显示时间的纯电子工作原理的电子钟表，使钟表的体积进一步缩小，报时精度得到显著提高，产品的品质发生了质的飞跃。



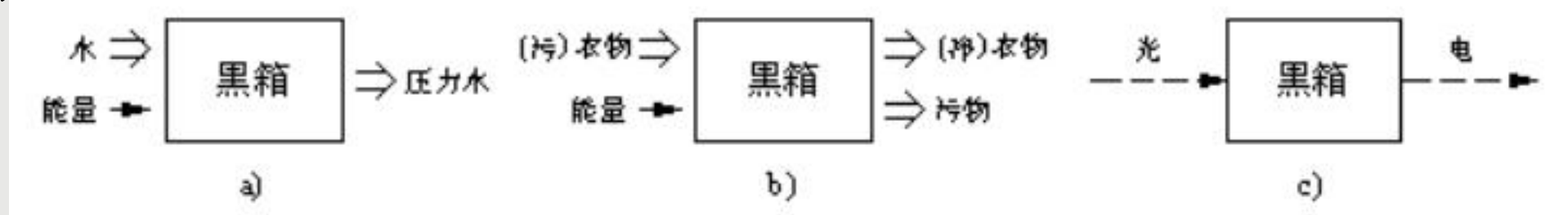
• 原理方案设计步骤



第二节 功能原理方案的创新设计

一、功能的描述

- 功能是产品或技术系统特定工作能力抽象化的描述。在功能原理方案设计时，对设计对象中功能的描述要准确、简洁，要合理抽象，抓住本质。
- “黑箱法”（Black Box）——利用外部观测，通过分析黑箱与周围环境的联系、输入和输出，了解其功能、特性，从而进一步探求其内部原理和结构。



a) 液体增压 (物料与能量结合) b) 物料分离 c) 信号转换



• 二、功能分类

- **驱动部分**相当于人的心肌，为系统提供能量，其功能载体为各种形式的原动机。
- **传动部分**反映驱动与执行部分间运动和动力的传递，包括运动形式、方向、大小、性质的变化，它的功能载体可以是电力、液压、气压或机械式的。
- **执行部分**相当于人的手和足，各种机器以不同的执行元件完成执行功能，达到它的工作目的。
- **测控部分**包含传感和控制功能。传感部分相当于人的眼、耳、鼻等感觉器官。它把机器工作过程中各种参数和状况检测出来，变成可测定和控制的物理量，传送到信息处理部分。此处相当于人的大脑，经过信息处理，发出对各部分工作的指令和控制信号。



• 三、原理方案的总体分析

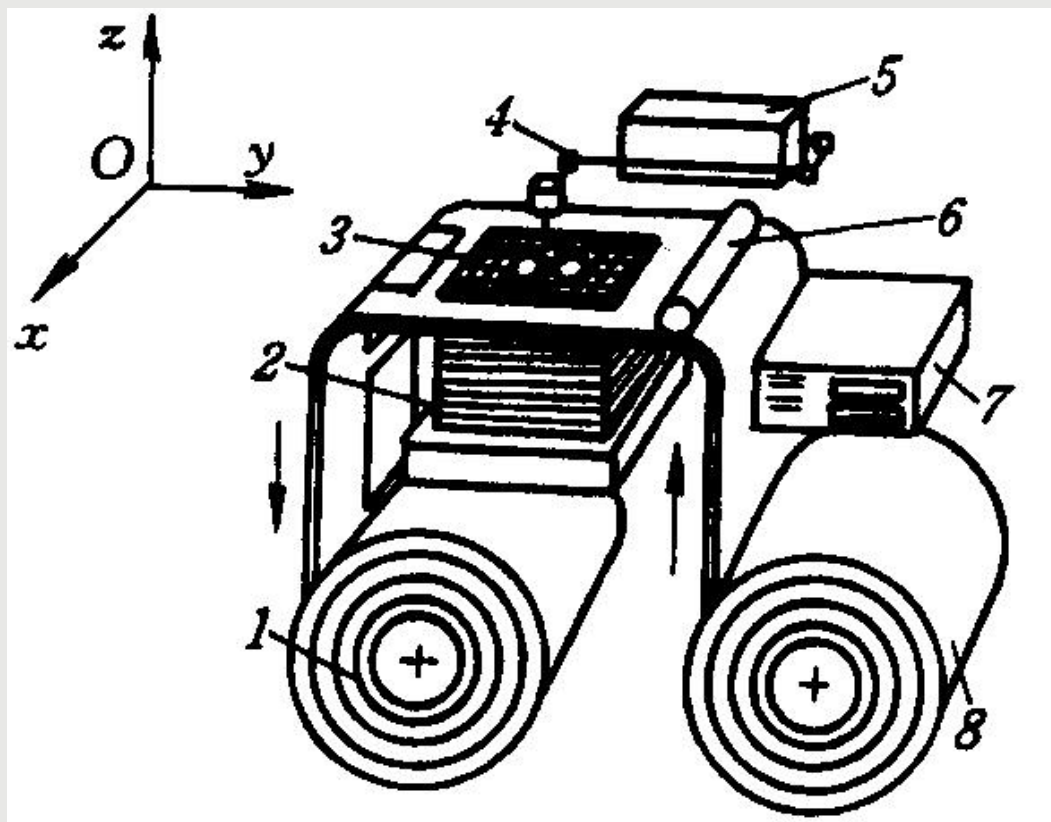
- 分析其工艺过程，在较大的领域内进行工作原理的搜索。
- 如：石墨电极加工设备总体原理方案的分析。
- 根据石墨电极形状复杂和石墨材质的特点可提出以下几种加工原理：
 - 1) 数控加工成型法：编程加工。数控铣床
 - 2) 研磨成型法：研具研磨石墨电极。研磨机
 - 3) 离散堆积成型法：分层堆积石墨材料和胶接剂而直接成型。快速成型机
 - 4) 激光束聚焦法：在充满 C_2H_2 的密闭容器中采用激光束聚焦，聚焦点处 C_2H_2 分解，碳原子沉积下来堆积成电极。激光加工机



- **四、功能分解**——用系统工程分解性原理将功能系统按总功能、分功能、……、功能元进行分解，化繁为简，通过各功能元解的有机组合求得技术系统解。
- **功能树**——功能分解图示为树状的功能结构。功能树起于总功能，按分功能、二级分功能……分解，其末端为功能元。
- **功能元**——可以直接求解的系统最小组成单元。
- **如：激光快速成型机的功能分析。**

激光快速成型机用激光对箔材（涂复纸）进行切割获得一个层面的形状，将层面叠加胶接起来获得三维实体。

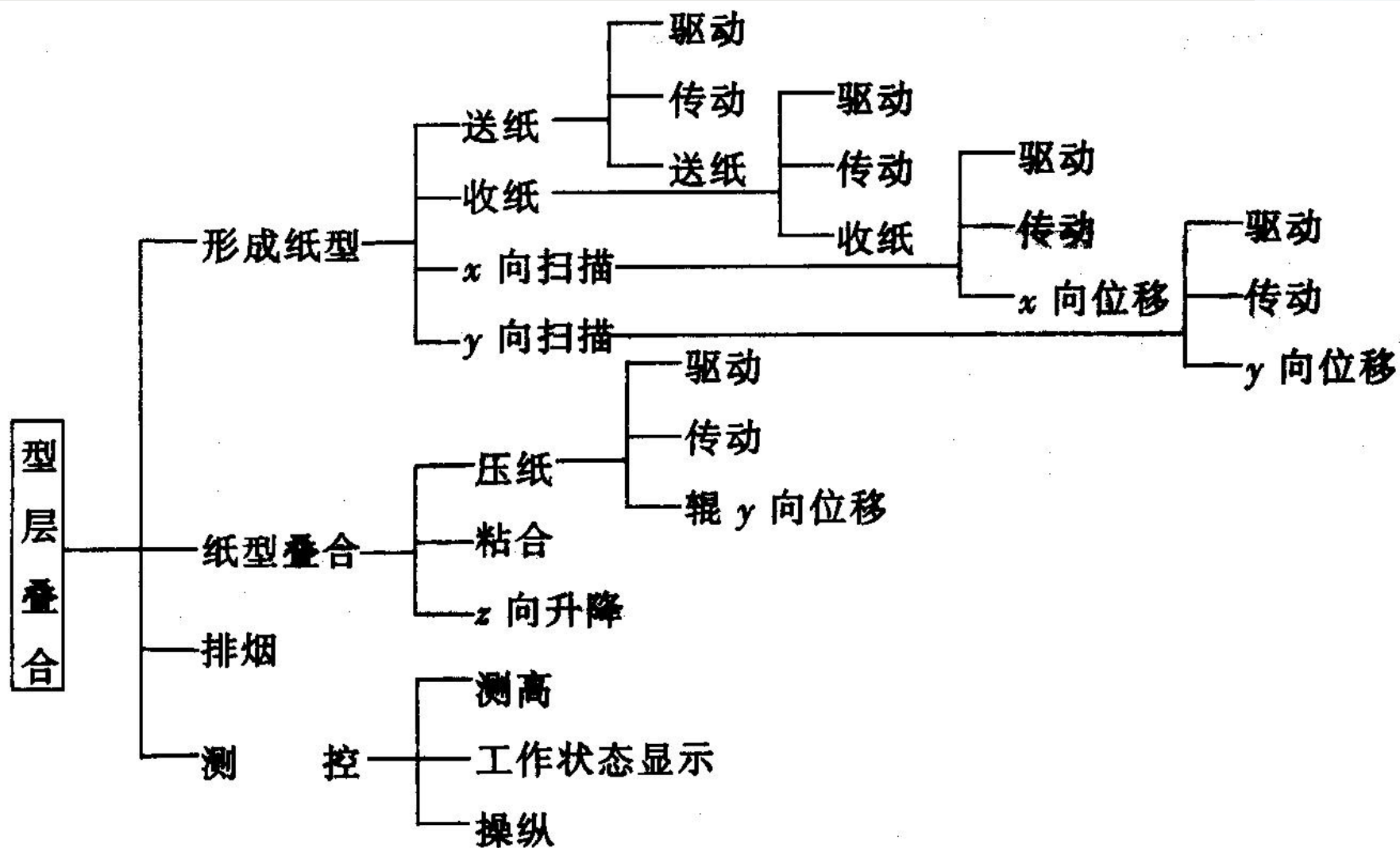
- 采用激光束聚焦的能量气化切痕以得到一定精度轮廓的纸型，并用压辊加热逐层粘合各层纸。



- 1—收纸卷
- 2—块体
- 3—层框和正交小块
- 4—透镜系统
- 5—激光器
- 6—热压辊
- 7—计算机
- 8—供纸卷



• 激光快速成型机功能分析



• 五、功能求解

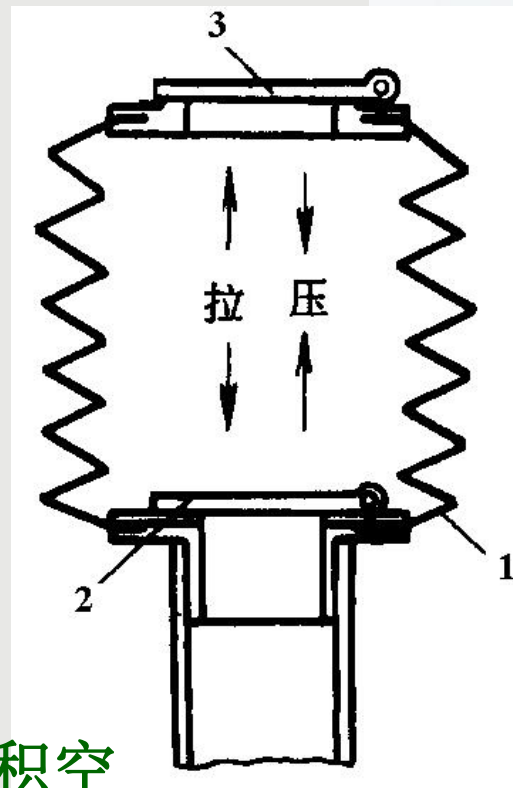
• 1. 功能元解

- 1) 参考借鉴有关产品资料或专利；
- 2) 利用“设计目录”；
- 3) 运用各种创造技法探索新解法。

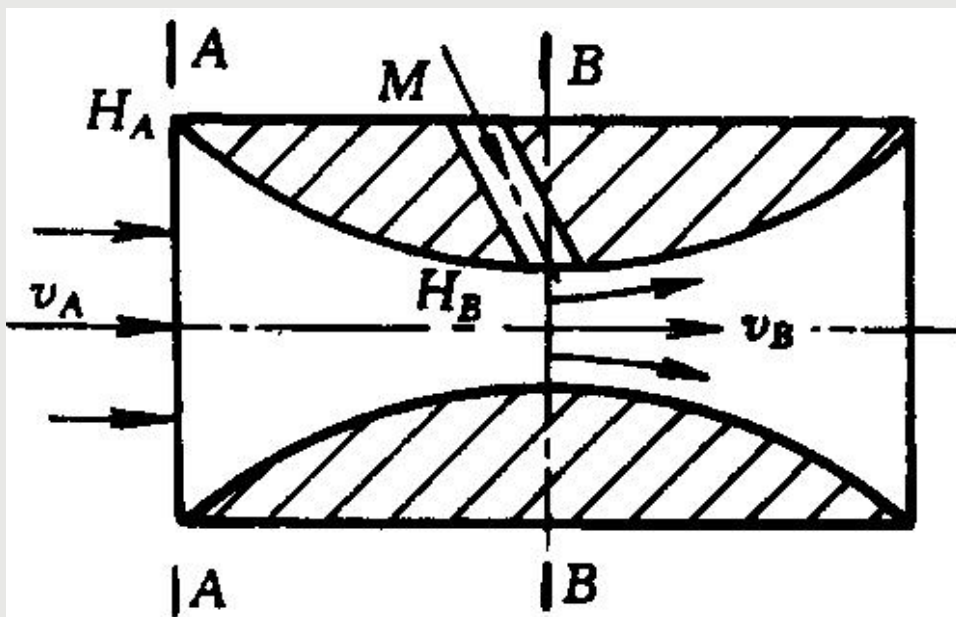
• 如：输送液体原理解法分析。

• (1) 负压效应

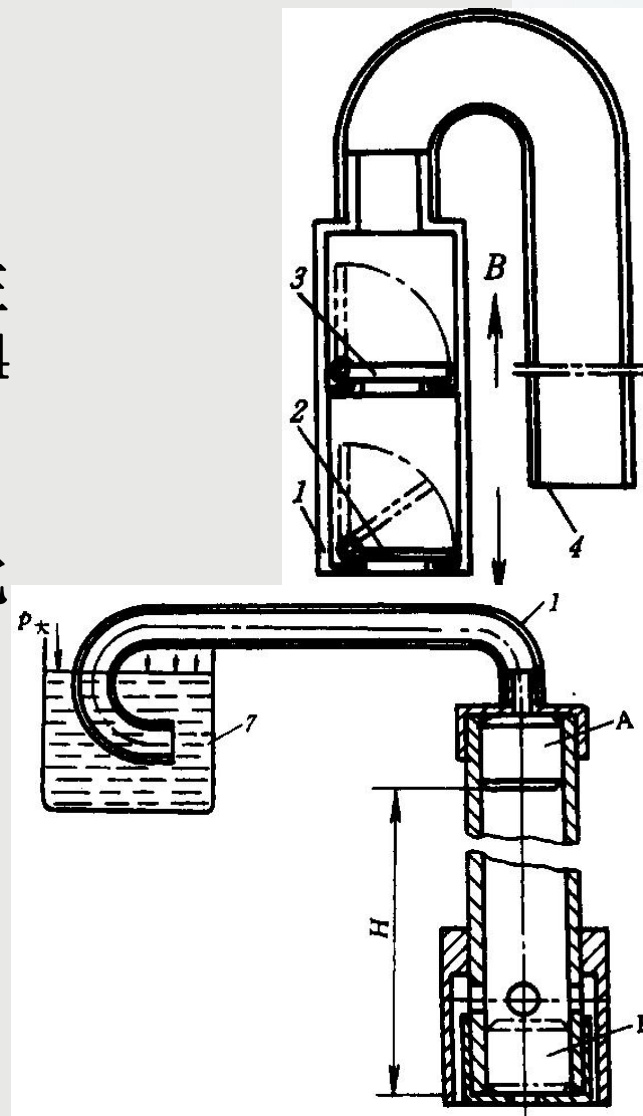
- ❖ 1) 利用压力 p 与容积 V 的关系($pV=\text{常数}$)，增大容积空间形成负压吸入液体，减小容积空间形成高压输出液体。如波纹管水泵，拉压塑料波纹管1改变其容积，液体从单向阀2吸入，从单向阀3压出，水头可达3m多。



- 2) 利用流速与压力的关系即文丘里喉管原理，使流体（液体或气体）流经变截面喉管，在狭窄处流速增大，形成负压。被输送液体就可从小孔M抽进喉管，当流速达 $600\sim 700\text{m/s}$ 时，水头可达 $5\sim 6\text{m}$ 。

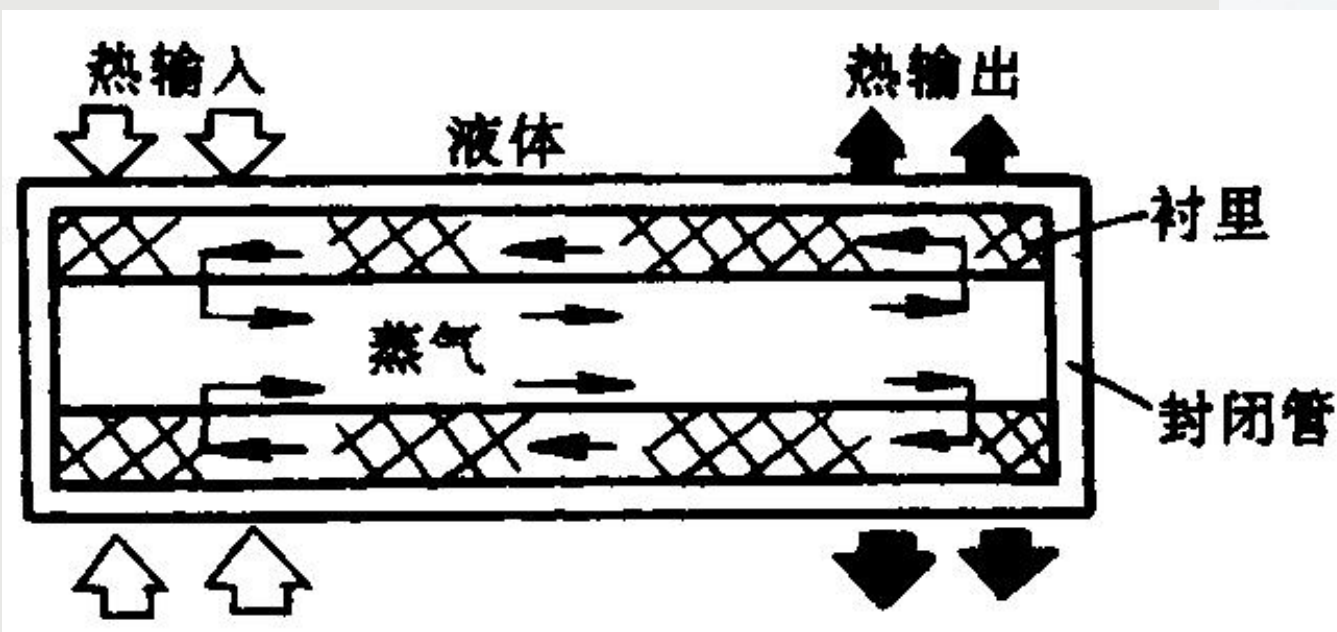


- (2) 惯性力效应
- 1) 利用离心惯性力将水引出。一般离心泵、化工系统的考拉泵都是应用这种原理。
- 2) 利用往复运动的惯性力。将管1置于水中，在A、B方向往复运动，水即通过单向阀2、3由管4输出。
- 3) 虹吸原理。将软管1插入盛液桶7中，反举吸液器缸套使活塞到A位置，放下缸套使其位置比液面低，活塞由位置A落至B，上部形成真空，盛液桶中的液体在大气压作用下进入软管到达吸液器底部流出，形成虹吸流。



• (3) 毛细管效应

高性能的轻质热管为两端封闭的管子，衬里为数层金属丝网，管内封装液体，在高温端液体吸热蒸发，蒸气流至低温端放热，冷凝后的液体由毛细管效应通过金属丝网流回热端。此种热管用于人造卫星和冻土层输油管保温等。



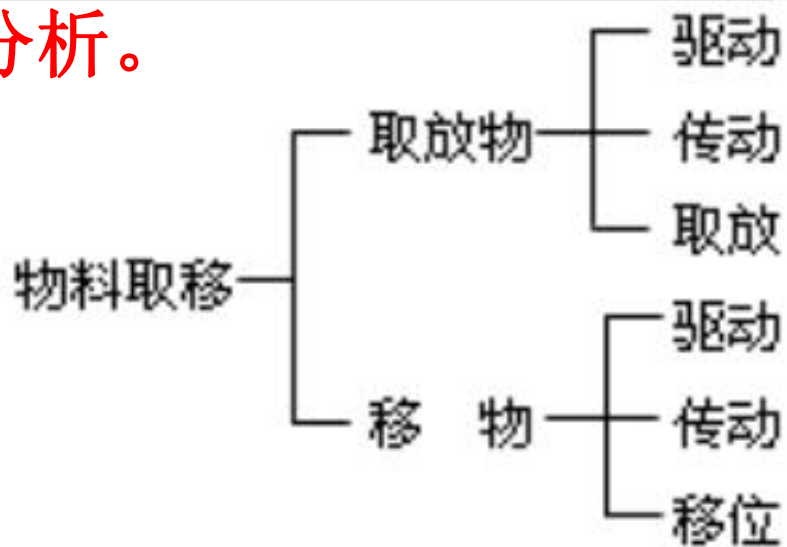
- **2. 系统解**——将各功能元解合理组合可以得到多个系统原理解。

若各功能元的解分别为 n_1 、 n_2 、 $\cdots$ 、 n_m 个时，最多可以组合出 N 种方案：

$$N = n_1 n_2 \cdots n_j \cdots n_m$$

如：行走式挖掘机的原理方案分析。

(1) 功能分析



(2) 探索功能元解并列出形态学矩阵



功能元	功能元解					
	1	2	3	4	5	6
A 动力源	电动机	汽油机	柴油机	蒸汽透平	液动机	气动马达
B 移位传动	齿轮传动	蜗杆传动	带传动	链传动	液力耦合器	
C 移位	轨道及车轮	轮 胎	履 带	气 垫		
D 取物传动	拉 杆	绳传动	气压传动	液压传动		
E 取物	挖 斗	抓 斗	钳式斗			

(3) 方案组合 可能组合的方案数为:

$$N = 6 \times 5 \times 4 \times 4 \times 3 = 1440$$

如: A1—B4—C3—D2—E1→履带式挖掘机

A5—B5—C2—D4—E2→液压轮胎式挖掘机



• 3. 最佳系统解

在多个系统解中，首先根据不相容性和设计边界条件的限制删去不可行方案和明显的不理想方案。选择较好的几个方案通过定量的评价方法评比、优化，最后求得最佳原理方案。

如上例中的A1—B4—C3—D2—E1→履带式挖掘机就是一种较好的行走式挖掘机原理方案。



第三节 设计目录

• 一、原理解法的设计目录

- 用功能设计法进行原理方案设计，功能元解是组合原理方案的基础。工程系统的基本功能元可归结为物理功能元、逻辑功能元和数学功能元三类。
- (1) 逻辑功能元——“与”、“或”、“非”三元，主要用于控制功能。基本逻辑关系如表2-3所示。
- 由机械、强电、电子、射流、气体、液体等领域可寻找相应的“与”、“或”、“非”逻辑动作的各种解法，其部分解法目录列于表2-4。
- (2) 数学功能元——可分为加减、乘除、乘方和开方、积分和微分四组，也可按机、强电、电子各领域列出有关解法目录。



- (3) 物理功能元——物理功能元反映系统中能量、物料及信号变化的物理基本作用。
- 1) 功能元“变换”包括各种类型能量或信号形式的转变、运动形式转变、物态的转变等。
- 2) 功能元“缩放”指各种能量、信号向量（力、速度等）或物理量的缩小和放大。
- 3) 功能元“联接分离”包括能量、物料、信号、同质或不同质数量上的结合和分离。
- 4) 功能元“传导”和“离合”反映能量、物料、信号的位置变化。
- 5) 功能元“储存”体现一定时间范围内对能量、物料、信号保存的功能。



- 工程系统中常用的物理效应有：
- 力学效应：重力、弹性力、惯性力、离心力、摩擦力等；
- 液气效应：流体静压、流体动压、毛细管效应、帕斯卡效应、虹吸效应等；
- 电力效应：静电、压电效应，电动力学等；
- 磁效应：电磁效应、永磁效应等；
- 光学效应：反射、折射、衍射、光干涉、偏振、激光效应等；
- 热力学效应：膨胀、热传导、热存储、绝热效应等；
- 核效应：辐射、同位素效应等。



- 二、设计目录的编制

- 例：机械传动系统的设计目录编制

- 如图2-17所示为机械传动系统的功能分析。
- 如表2-8为运动方向变化基本机构目录，表2-9为运动形式变化的常用机构目录。
- 设计目录是计算机辅助设计系统中知识库的重要内容，为了更好地描述知识还有必要将每个基本机构作为特定的功能模块列出其基本性能特点（如传动比、功率范围等）、特殊性能（如远距离传动、自锁等）、评价数据（如对性能、成本、工艺性等基本评价目标的评分或隶属度）等。每个功能模块也列为一个基本目录，这将是具体选择并确定方案的依据。



- 例如：设计化工厂双杆搅拌器的机械传动装置。该传动装置中已知电动机转速 $n=960\text{r/min}$ ，要求两搅拌杆以 240次/min 同步往复摆动（摆动方向不限）。

- (1) 功能分析



- (2) 机械传动方案综合——双杆搅拌器传动方案的形态学矩阵

分功能解		1	2	3	4
分功能					
I	降速($i=4$)	齿轮传动	带传动	链传动	摩擦轮传动
II	回转→摆动	曲柄摇杆机构	摆动导杆机构	凸轮机构(摆动从动件)	
III	双杆同摆	平行四边形机构	对称凸轮(摆动从动件)		

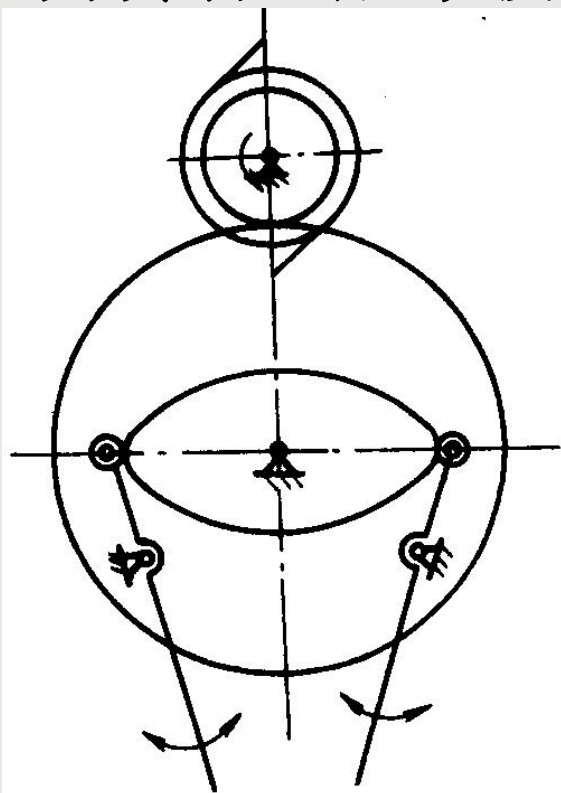
可组合的最多方案数为： $N = 4 \times 3 \times 2 = 24$

- (3) 方案评选

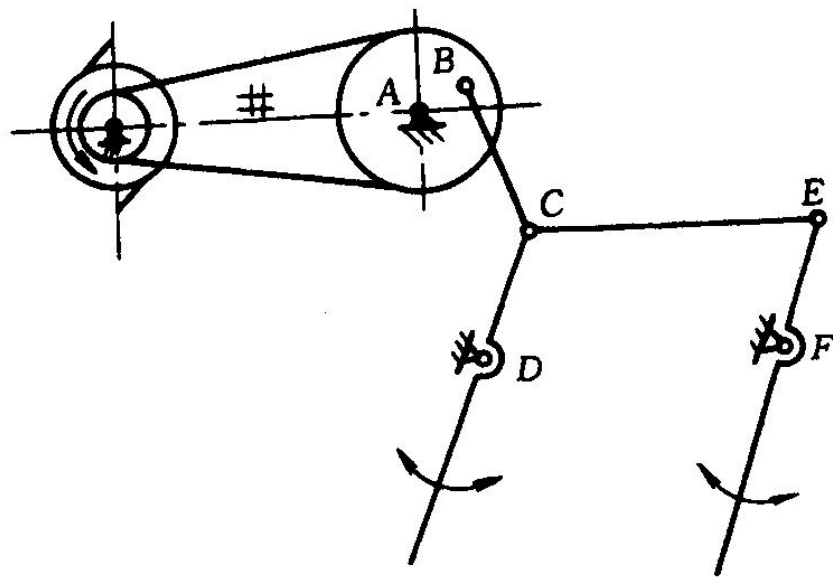
考虑化工厂工作环境恶劣，且摩擦传动体积相对较大，故选用啮合传动，有两方案可供进一步选择。



- **方案A:** I 1 + II 3 + III 2, 电动机—齿轮传动—凸轮机构—对称凸轮（双摆动杆），其特点是结构紧凑。
- **方案B:** I 3 + II 1 + III 1, 电动机—链传动—曲柄摇杆机构—平行四边形机构（双摆动杆），其特点是可远距离传动，成本较低。



方案 A



方案 B



第四节 原理方案创新设计的评价

• 一、评价内容

- (1) **功能性**——是否能顺利完成机械产品的预期功能目标，与同类产品比较是否具有先进性和新颖性，其工作原理是否有创新或突破。
- (2) **经济性**——从产品的设计制造成本、运行成本两方面评价。
- (3) **可操作性**——产品操作是否方便、简单，人机关系的协调性能如何等。
- (4) **安全性**——包括产品本身的安全性和对人身、对环境的安全性问题。如产品是否具有安全保护装置，对操作者或使用有无采取安全防护措施，有否考虑环境保护问题等。
- (5) **可推广性**——从方案实施的市场效应、社会影响、可持续发展情况等方面评价。



• 二、评价指标

- 评价指标是由机械运动方案设计所应满足的要求而确定的，评价指标的总数不易过多，否则容易掩盖主要影响因素，不利于运动方案的选出。
- 表2-12为原理方案的评价指标。

• 三、评价方法

- 对各个评价指标进行定性或定量的评价。具体评价方法有多种，如评分法、模糊综合评价法、系统工程评价法等。
- 评分法是用分值作为衡量方案优劣的定量评价。首先对参评的各项指标进行评分，然后再求各项指标分值的总分，作为方案评价的得分，并以此来衡量原理方案的优劣，分值高者为优。



• 1. 评分

- 根据评分标准确定出相应的分值。评分标准可采用5分制或10分制，如采用5分制，则“理想状态”取为5分，“太差”或“不能用”取为0分。具体可见表2-12。
- 在评分时，一般采用集体评分法，以减少由于个人主观因素对分值的影响。对几个评分者所评的分数取平均值或去除最大、最小值后的平均值作为有效分值。

• 2. 加权计分法

- 对于多评价目标的方案，在求其方案总分时常采用加权计分法。

$$N = \sum P_i g_i$$

- 式中， N 为方案总分； P_i 为各评价指标的分值； g_i 为各评价指标的加权系数。
- 表2-13为三种方案汽车发动机的三项基本性能评分表



第五节 原理方案的创新设计实例

- 抓斗的原理方案创新设计
- **设计背景：**抓斗是重型机械的一种取物装置，主要用来就地装卸大量散粒物料，用于港口、车站、矿山、林场等处。目前使用的一些抓斗，还不能完全满足装卸要求，长撑杆双颚板抓斗虽应用广泛，但由于其具有闭合结束时闭合力呈减小趋势的致命弱点，影响抓取效果。其他类型的抓斗虽有使用，但不很普通，也存在各自的缺点，故市场上希望有一种装卸效率高、作业快、功能全、适用广的散货抓斗。

- 一、设计任务

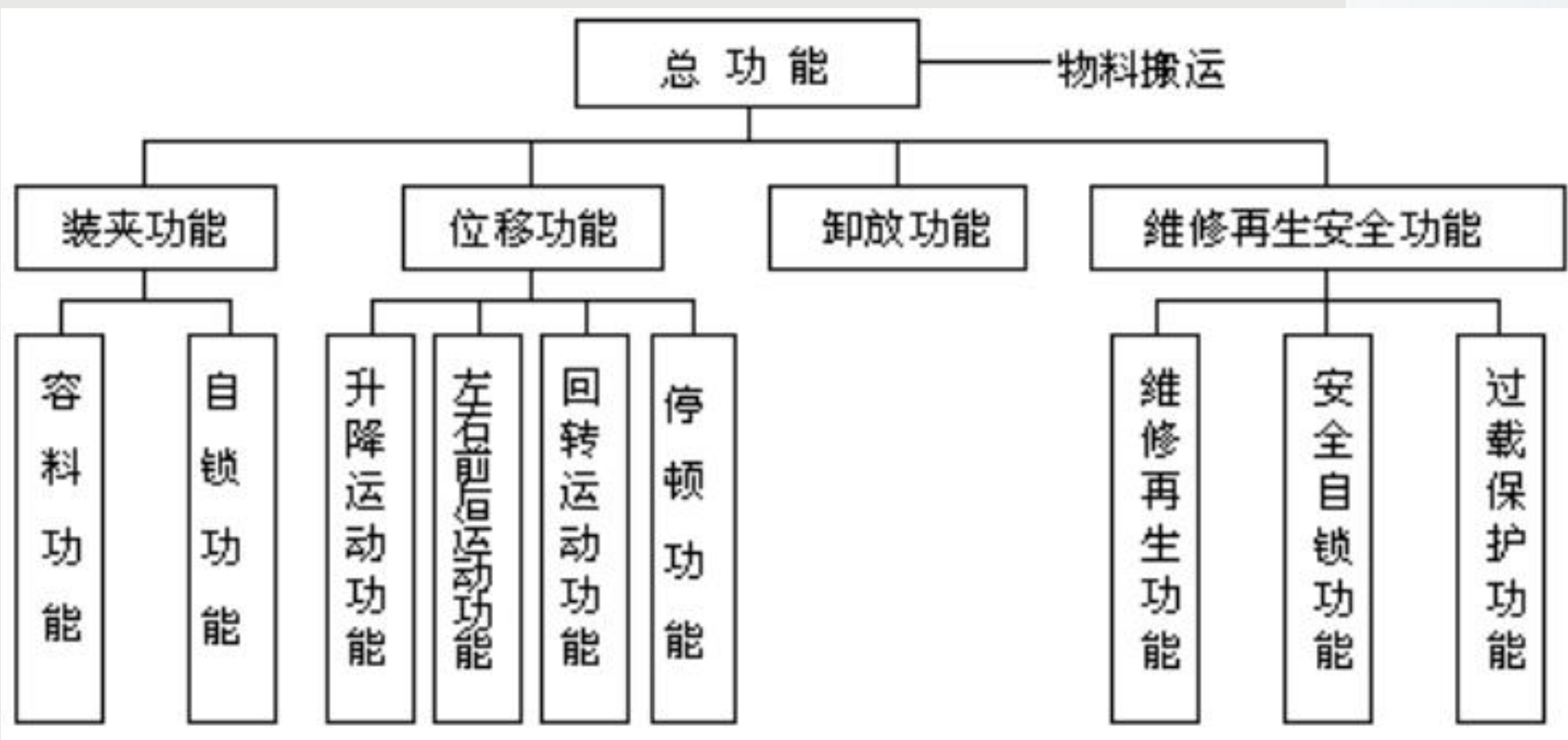
- 在分析调查的基础上，运用缺点列举法、实现希望法等创新技法，制定抓斗开发设计任务书如表所示。

要 求	内 容
1.功能方面	1)抓取性能好，有较大的抓取力 2)装卸效率高 3)装卸性能好，空中任一位置颚板可闭合、打开 4)闭合性能好，能防散漏 5)适用范围广，既可抓小颗粒物料，也可抓大颗粒物料
2.结构方面	1)结构新颖 2)结构简单、紧凑
3.材料方面	1)材料耐磨性好 2)价格便宜
4.人机工程方面	操作方便，造型美观
5.经济、使用安全等方面	1)尽量能在各种起重机、挖掘机上配套使用 2)维护、安装方便，工作可靠，使用安全 3)总成本低廉



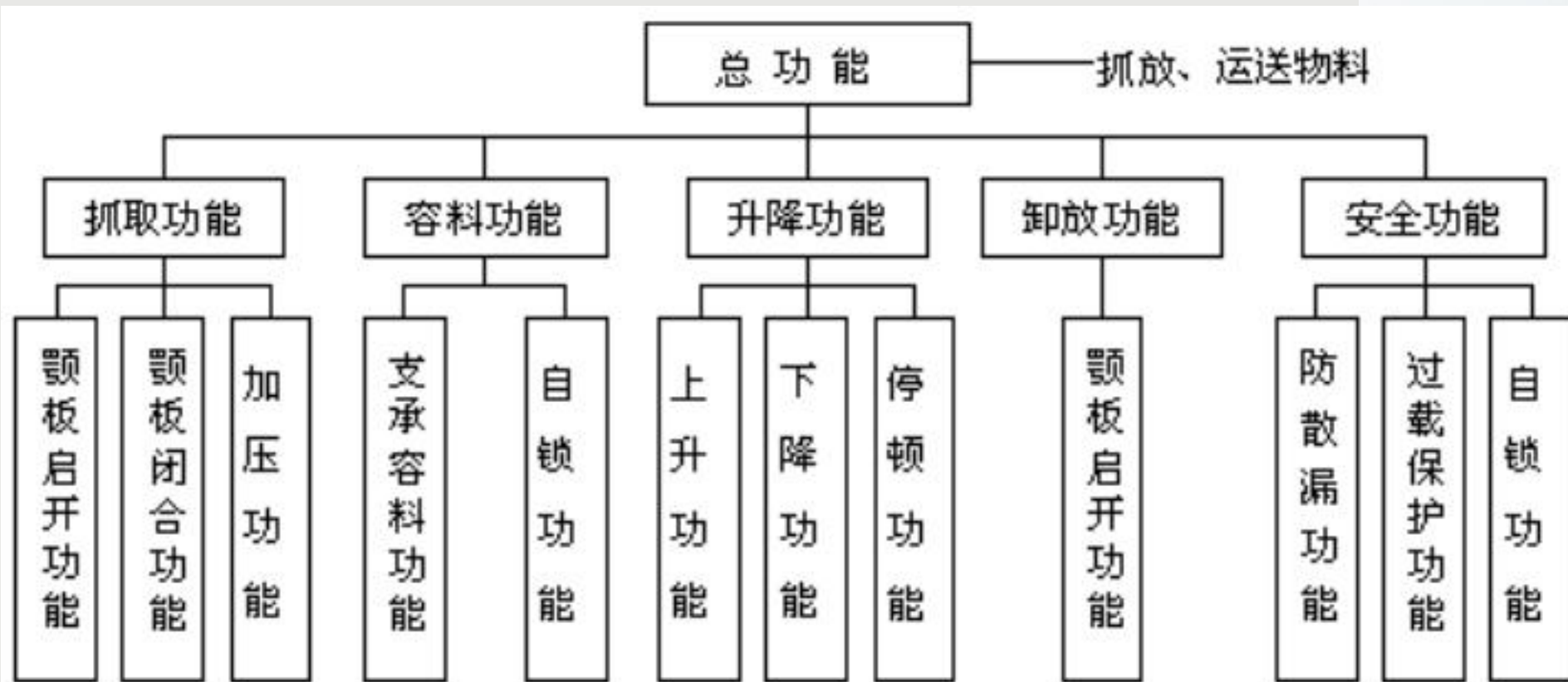
• 二、功能分析

起重机功能树

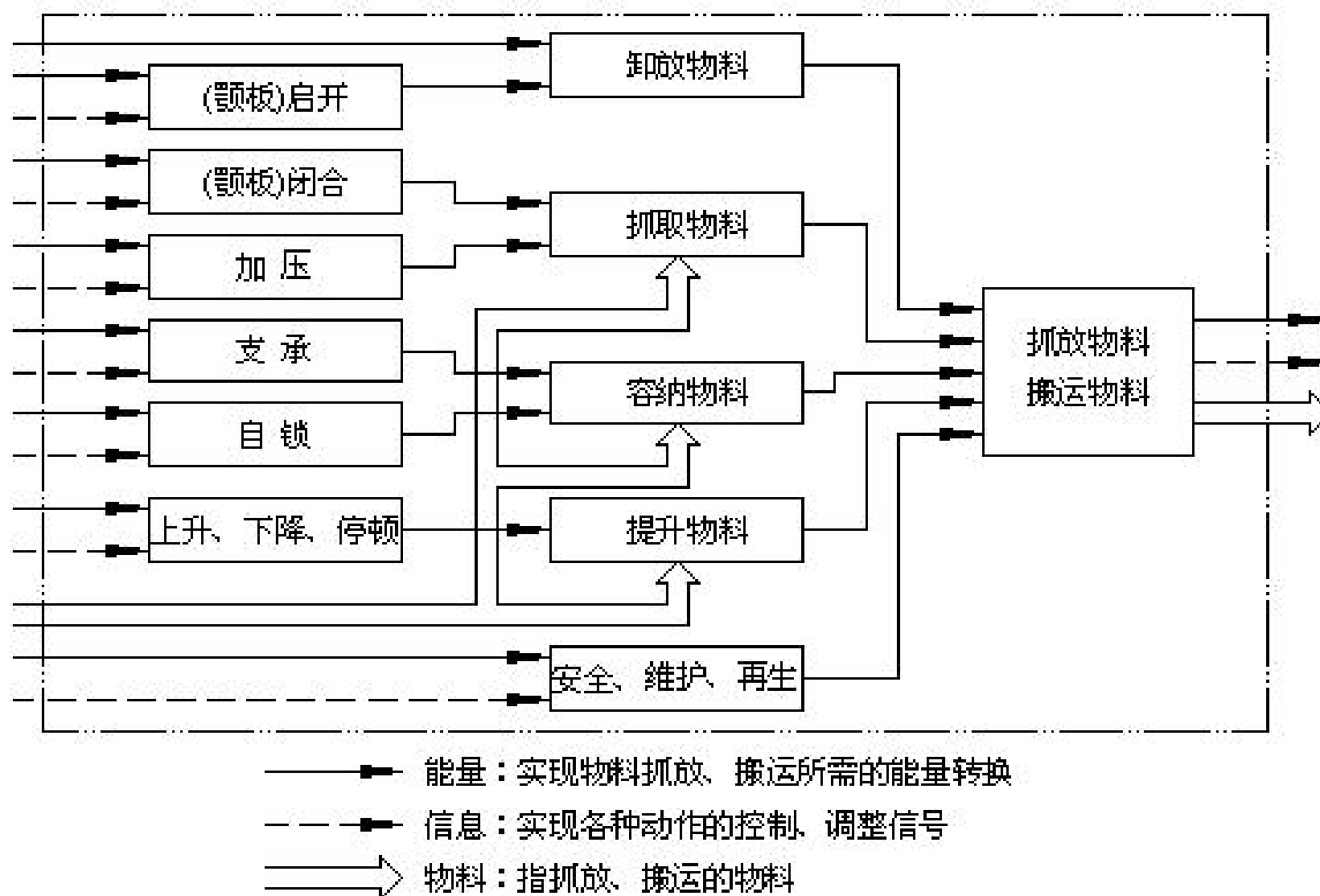




抓斗功能树



抓斗功能结构图





• 三、功能求解

- 运用反求工程设计方法，确定抓斗可变元素为：
- A——能实现支承、容料和启闭运动的原理机构
- B——能完成启闭动作、加压、自锁的动力装置（即动力源形式）
- 运用各种创新技法，对可变元素进行变换（即寻找作用效应），建立形态矩阵表（见表2-15）。
- 理论上可以组合出 $5 \times 5 = 25$ 种原理方案，其中包括明显不能组合在一起的方案。经分析得出明显不能组合在一起的方案有： A_2B_{22} 、 A_4B_1 、 A_4B_{22} 、 A_4B_3 、 A_4B_4 、 A_5B_1 、 A_5B_{21} 、 A_5B_3 、 A_5B_4 ，把这些方案排除，剩16种方案。



• 四、方案评价

- 从矩阵表中抽象出抓斗的评价准则为：
- A ——抓取力大，适应难抓物料
- B ——可在空中任一位置启闭
- C ——装卸效率高
- D ——技术先进
- E ——结构易实现
- F ——经济性好，安全可靠

根据这六项评价准则，对抓斗可行原理方案进行初步评价，见表2-16。

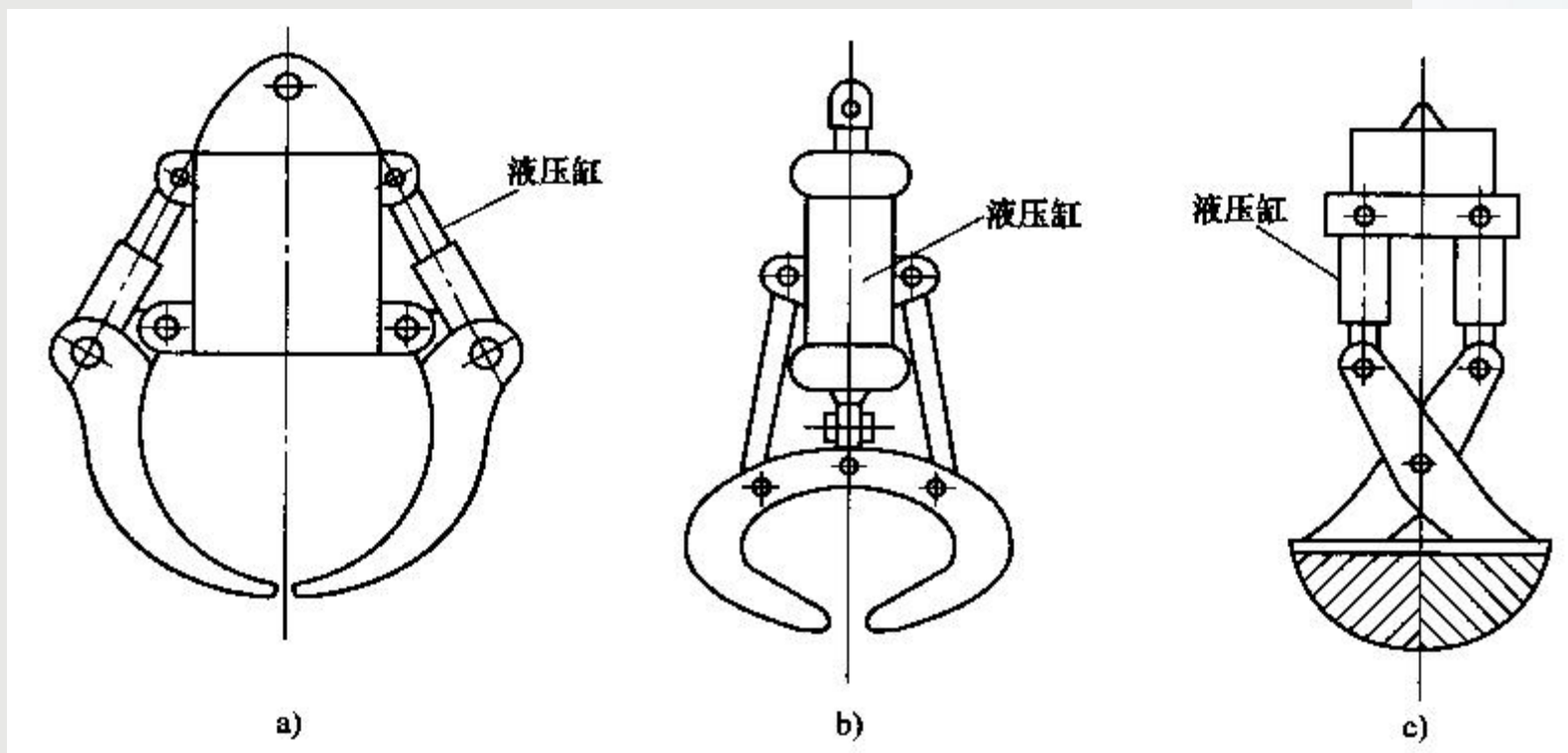


- 从表2-16中可知，能满足6项准则的有6种方案，即 A_1B_3 、 A_1B_4 、 A_2B_3 、 A_2B_4 、 A_3B_3 、 A_3B_4 。为进一步缩小搜索区域，在确定最佳原理方案之前，应及时进行全面的技术经济评价和决策。
- 研究这6种初步评价获得的可行方案，发现：为了实现装卸效率较高，动力源形式选择液压或气压。

比较内容	气动	液动	比较内容	气动	液动
输出力	中	大	同功率下结构	较庞大	紧凑
动作速度	快	中	对环境温度适应性	较强	较强
响应性	小	大	对湿度适应性	强	强
控制装置构成	简单	较复杂	抗粉尘性	强	强
速度调节	较难	较易	能否进行复杂控制	普通	较优
维修再生	容易	较难			



- 液压传动相比气压传动具有明显的优点，液压传动的抓斗功率密度大，结构紧凑，重量轻，调速度性能好，运转平稳、可靠，能自行润滑，易实现复杂控制。
- 经过筛选，剩三种方案，即A1B3、A2B3、A3B5。将这三种方案大概构思，画出其简图。





- A₁B₃组合为液压双颚板或多颚板抓斗，需二个或二个以上液压缸。
- A₂B₃组合为液压长撑杆双颚板或多颚板抓斗，只需一个液压缸。
- A₃B₃组合为液压剪式抓斗，二个液压缸。
- 通过以上的分析，经过评价、筛选确定了这三种抓斗原理方案。对这三种方案，可以对照设计任务书作进一步定性分析。

	抓取性能	闭合性能	适用范围	液压缸行程	结构复杂程度
A ₁ B ₃	好	好	广	较小	较复杂（二个以上液压缸）
A ₂ B ₃	好	差	一般	较小	简单（一个液压缸）
A ₃ B ₃	好	好	一般	大	一般（二个液压缸）

A₁B₃能较好地满足设计要求，其不足是结构稍复杂；A₂B₃无法防止散漏这至关重要的性能要求；A₃B₃液压缸行程大，这在技术上很难实现，故最后确定A₁B₃为最佳原理设计方案。

