

1 概述

目的：给流体加入机械能

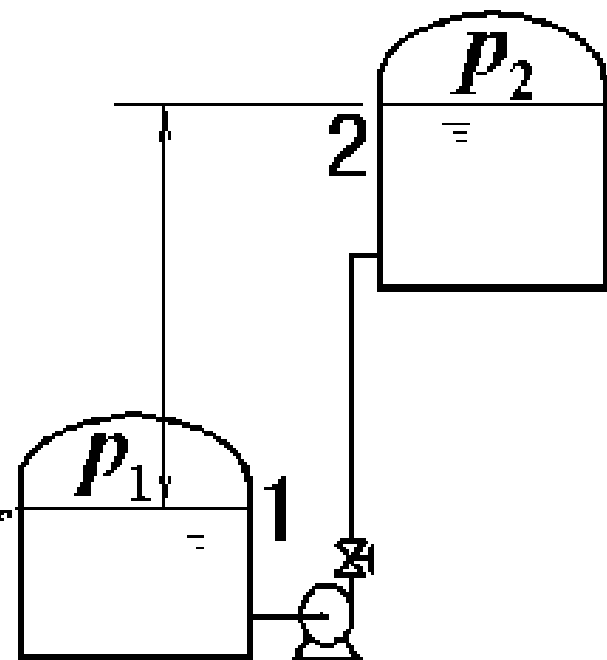
1.1 管路特性

流体对输送机械的能量要求
从1至2截面

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \Sigma H_f$$

$$\Sigma H_f = \Sigma \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta \right) \frac{u^2}{2g} = \Sigma \frac{8 \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta \right)}{\pi^2 d^4 g} q_v^2 = K q_v^2$$

$$H = (z_2 - z_1) + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \Sigma H_f = \frac{\Delta P}{\rho g} + K q_v^2$$



高度湍流，
K与流量无关

1.2 管路特性的影响因素

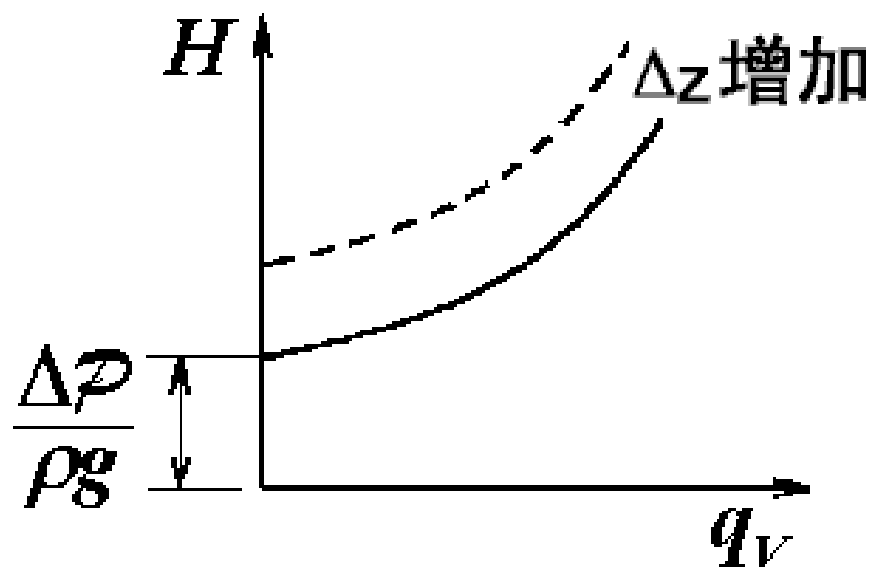
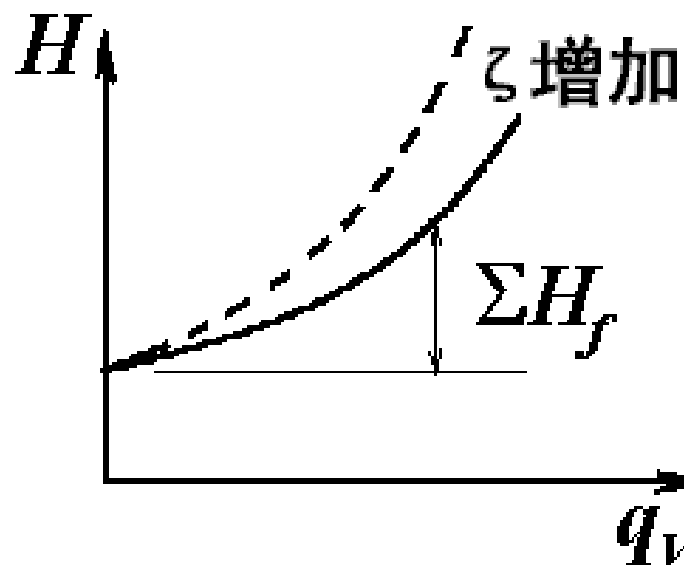
阻力部分:

- ① 管径 d
- ② 管长 l 、 l_e 或 ζ
- ③ 相对粗糙度 $\frac{\varepsilon}{d}$

势能增加部分:

- ① 位差 Δz
- ② 压差 Δp
- ③ 密度 ρ

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho g}$$



1.3 流体输送机械分类

按作用原理分：

动力式(叶轮式)： 离心式，轴流式；

容积式(正位移式)： 往复式，旋转式；

其它类型： 流体作用式等。

按流体可压缩性分：

液体输送机械(统称为泵)；

气体输送机械

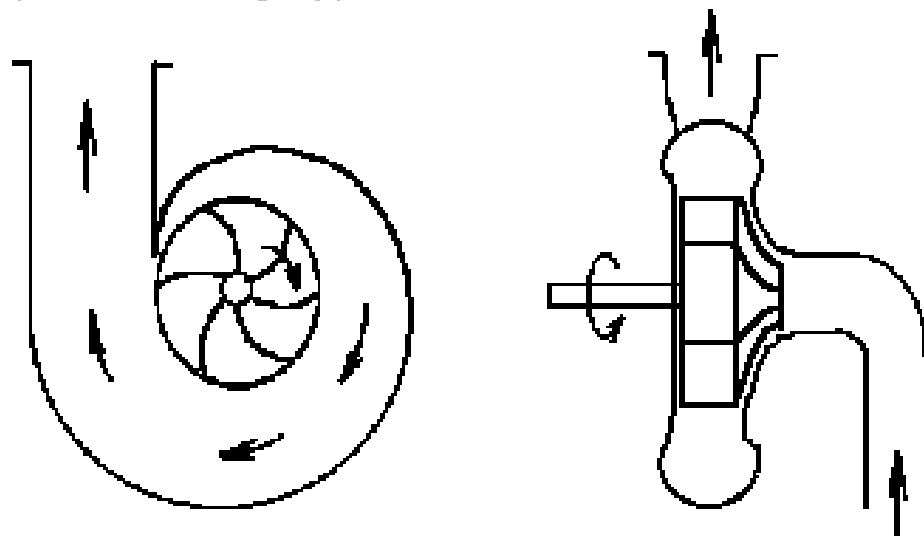
2 离心泵

2.1 离心泵的工作原理

1. 主要构件

叶轮：迫使液体高速旋转，形成
中心加入低势能、低动能液体
外缘输出高势能、高动能液体

蜗壳：流道逐渐扩大，将动能部分转化成势能



2. 等角速度旋转运动的流体能量关系

假定：①理想流体，定态流动

②叶片无限薄，无限多

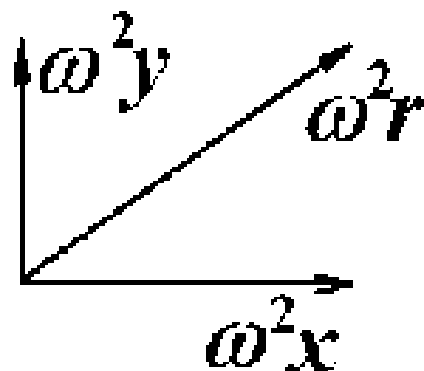
$$Xdx + Ydy + Zdz - \frac{dp}{\rho} = d\left(\frac{w^2}{2}\right)$$

$$X = \omega^2 x, \quad Y = \omega^2 y, \quad Z = -g$$

$$u = \omega r$$

$$\text{得} \quad \frac{p_1}{\rho g} + z_1 - \frac{u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 - \frac{u_2^2}{2g} + \frac{w_2^2}{2g}$$

$$\text{或} \quad \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g} + \frac{w_1^2 - w_2^2}{2g}$$



3. 理论压头

以静止系考察：势能 $\frac{\mathcal{P}}{\rho g}$ ，动能 $\frac{c^2}{2g}$ (c绝对速度)

总机械能变化

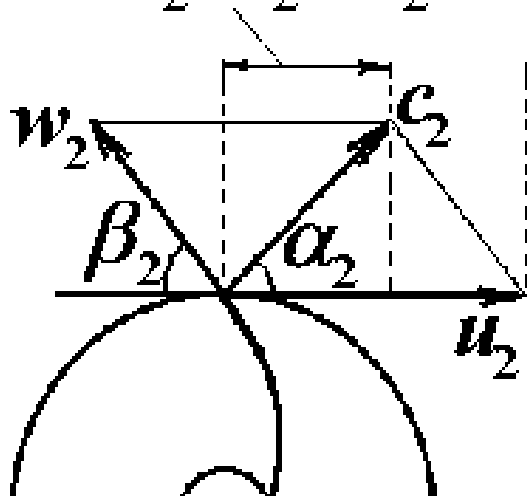
$$H_T = \frac{\mathcal{P}_2 - \mathcal{P}_1}{\rho g} + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2g} = \frac{u_2^2 + c_2^2 - w_2^2}{2g} - \frac{u_1^2 + c_1^2 - w_1^2}{2g}$$
$$= \frac{u_2 c_2 \cos \alpha_2 - u_1 c_1 \cos \alpha_1}{g}$$

$$c_2 \cos \alpha_2 = u_2 - w_2 \cos \beta_2$$

通常，泵设计点(额定流量) $\alpha_1 = 90^\circ$

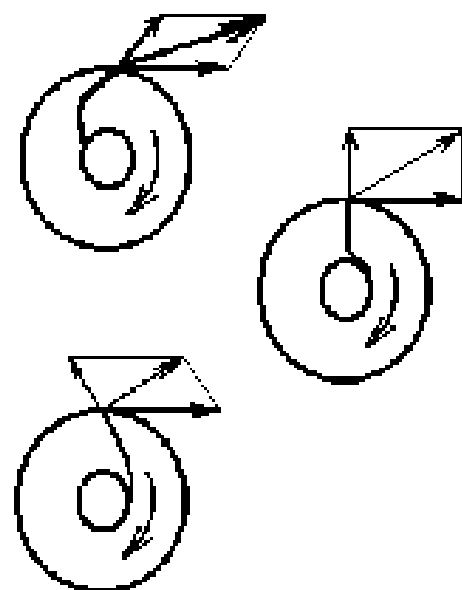
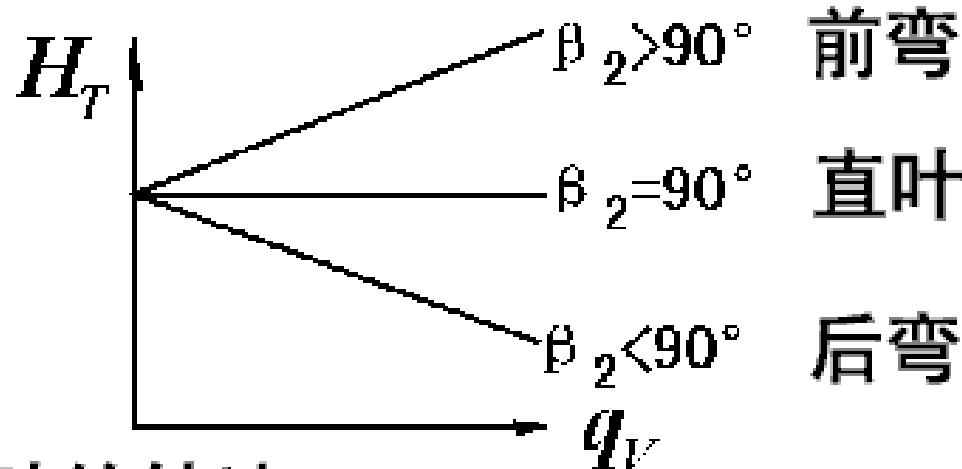
流量 $q_V = A_2 \sin \beta_2$ 或 $w_2 = \frac{q_V}{A_2 \sin \beta_2}$

$$H_T = \frac{u_2^2}{g} - \frac{u_2}{g A_2} q_V \operatorname{ctg} \beta_2$$



4. 理论压头的影响因素

① 叶片弯角 β_2 和流量 q_V



② 叶轮转速 n

$$u_2 = n \pi D_2 \quad \text{如果 } q_V \propto n \quad \text{那么 } H_T \propto n^2$$

③ 液体密度不出现 $\Delta p \propto \rho g H_T$ 气缚现象

灌泵——吸入管装单向阀, 泵启动前先灌液体
排除气体

2.2 离心泵的

1. 泵的有效压头特性曲线

泵内损失:

容积损失 部分流体漏回入口处

水力损失 $\mu \neq 0$, 叶片数目有限

机械损失 轴承、轴封的摩擦

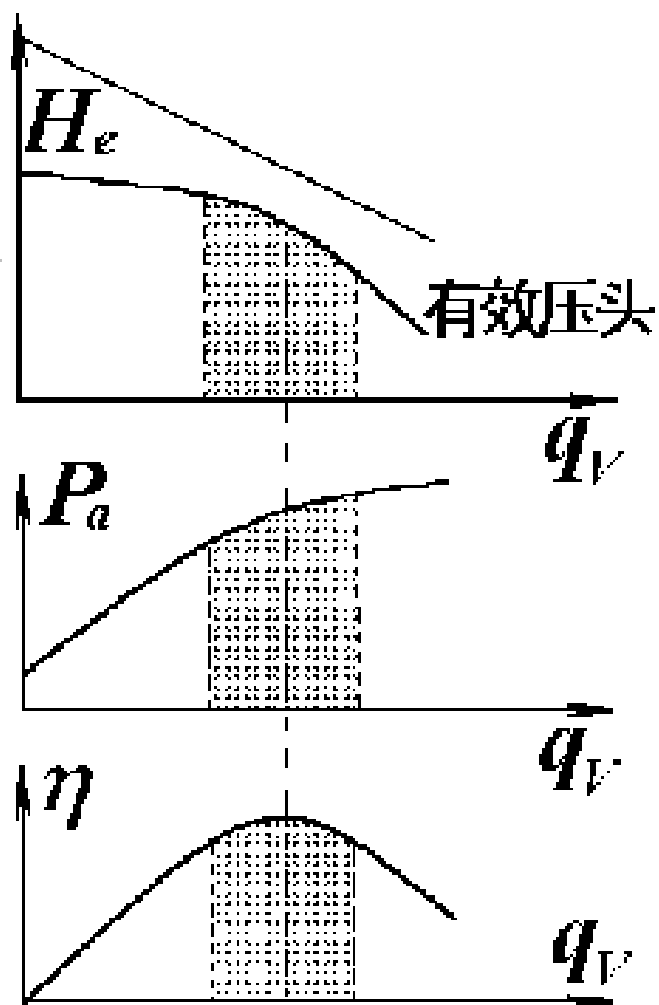
2. 泵的有效功率 $P_e = \rho g q_v H_e$

轴功率 P_a 基本上随
流量 q_v 单调上升

泵启动负荷?

3. 泵的效率

$$\eta = \frac{P_e}{P_a}$$



泵的特性曲线测定

$d_{\text{吸}}=38\text{mm}$, $d_{\text{出}}=25\text{mm}$,

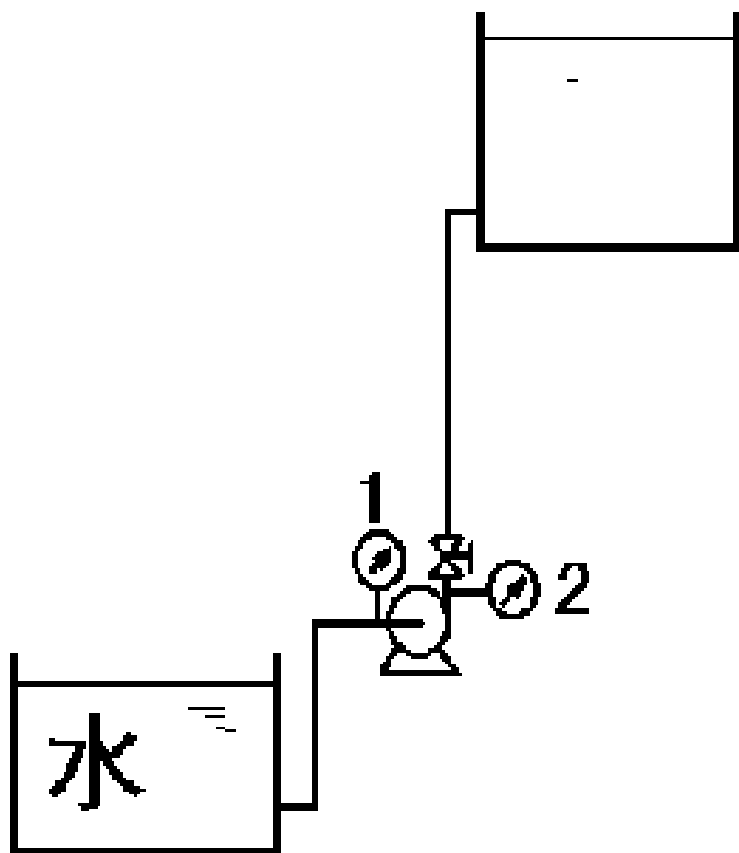
测得水流量

$q_v=5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$,

$p_{\text{压}}=0.2 \text{ MPa}$,

$p_{\text{真}}=27\text{kPa}$,

求: $H_e=?$



解：由泵进、出口列方程

$$H_e = z_2 - z_1 + \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$$

$$z_2 \approx z_1$$

$$u_1 = \frac{q_v}{0.785d_1^2} = \frac{5 \times 10^{-4}}{0.785 \times 0.038^2} = 0.44 \text{ m/s}, \quad \frac{u_1^2}{2g} = 0.01 \text{ m}$$

$$u_2 = \frac{q_v}{0.785d_2^2} = \frac{5 \times 10^{-4}}{0.785 \times 0.025^2} = 1.02 \text{ m/s}, \quad \frac{u_2^2}{2g} = 0.05 \text{ m}$$

$$H_e = \Delta z + \frac{P_{\text{压}} + P_{\text{真}}}{\rho g} + \frac{u_2^2 - u_1^2}{2g}$$

$$H_e = \frac{2 \times 10^5 + 27 \times 10^3}{1000 \times 9.81} + 0.05 - 0.01 = 23.2 \text{ m}$$

4. 特性曲线的影响因素

①密度 ρ 对 $H_e \sim q_v$, $\eta \sim q_v$ 无影响;

对 $P_a \sim q_v$ 有影响

②粘度 μ 对 $H_e \sim q_v$, $\eta \sim q_v$, $P_a \sim q_v$ 都有影响

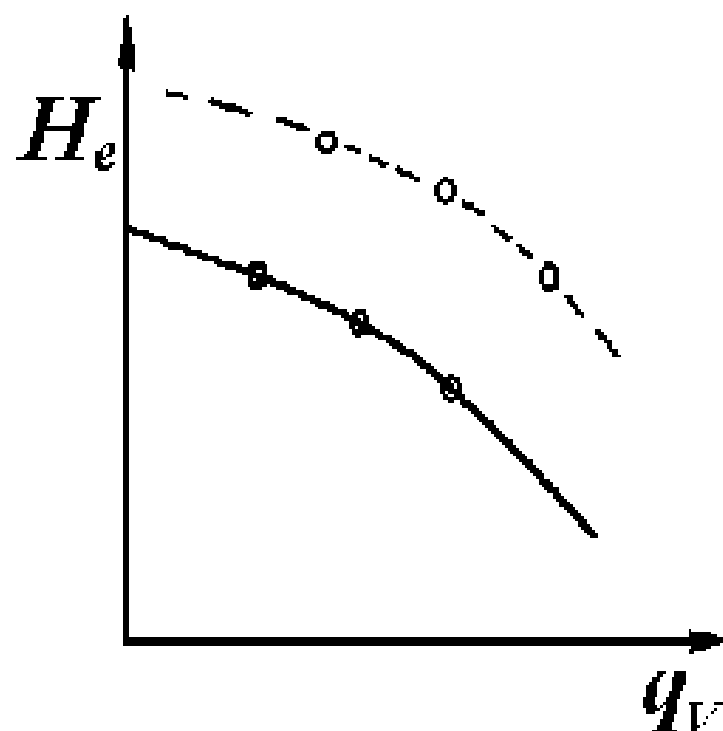
③转速 当 n 变化 $< 20\%$ 时,

比例定律:

$$\text{如果 } \frac{q'_v}{q_v} = \frac{n'}{n}$$

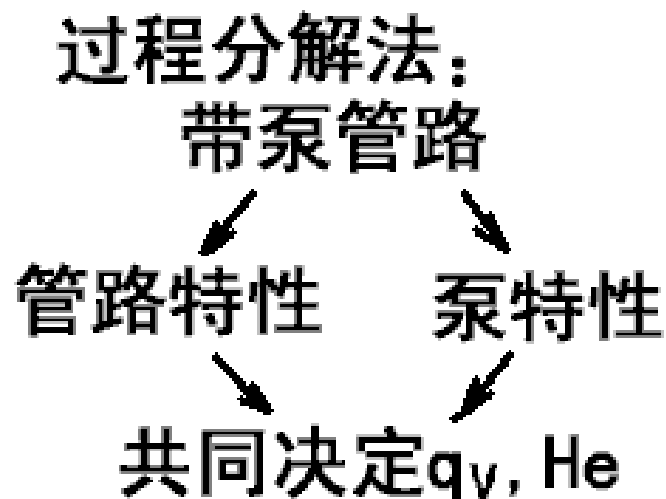
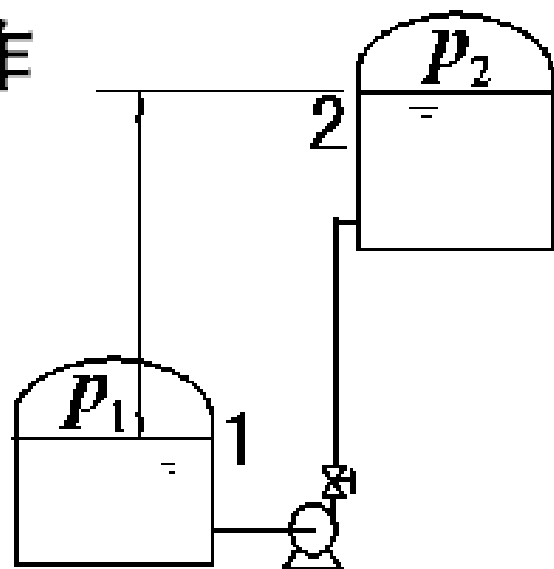
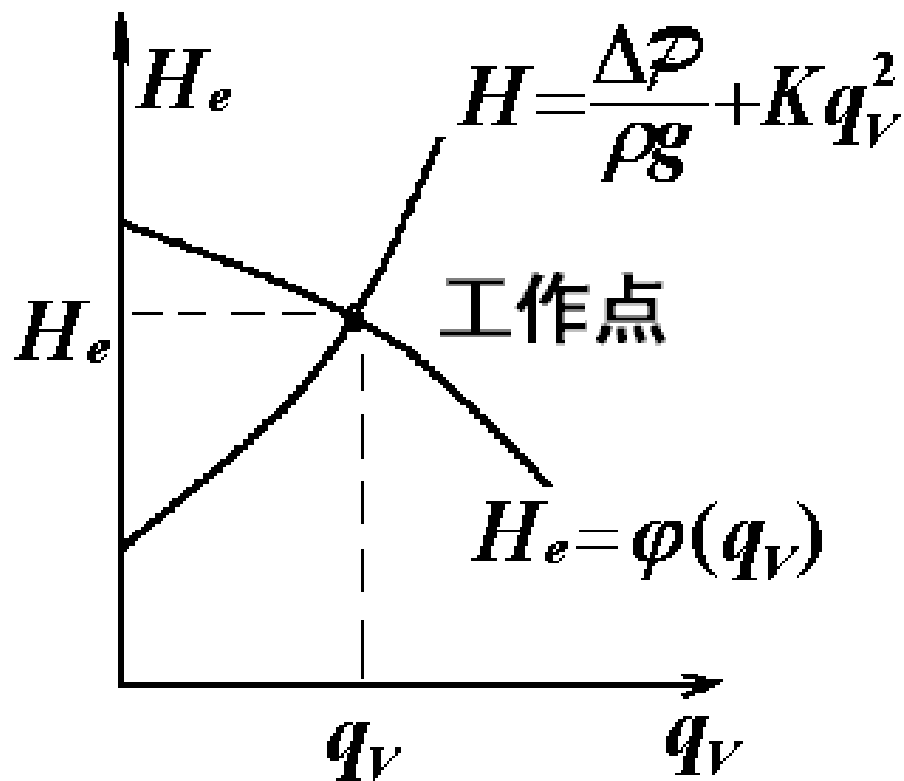
$$\text{则有 } \frac{H'_e}{H_e} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2$$

$$\frac{P'_a}{P_a} = \left(\frac{n'}{n}\right)^3$$



2.3 离心泵的流量调节和组合操作

1. 工作点



2. 流量调节

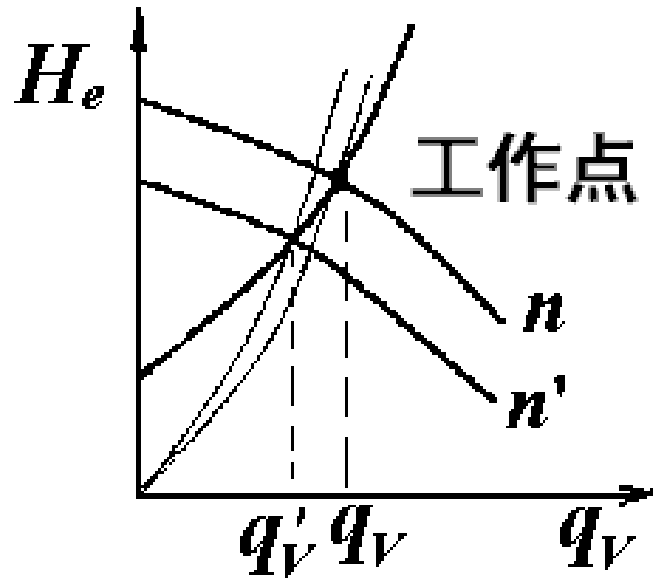
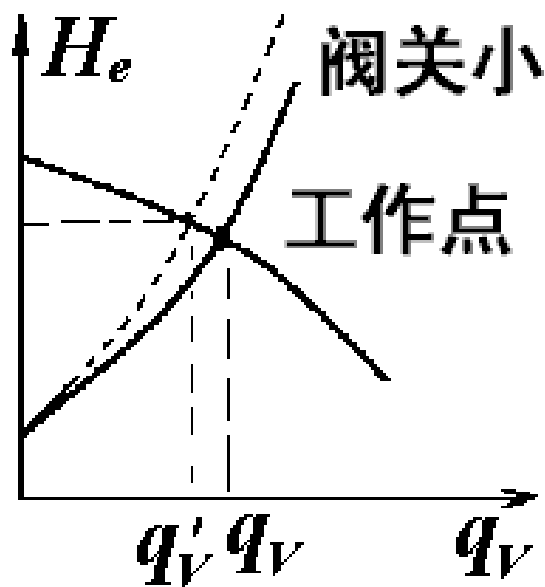
① 出口阀开度

优点：调节简便、灵活

缺点：能耗

② 改变转速 n

节能，但不方便



新老泵特性曲线关系

$$\frac{q'_v}{q_v} = \frac{n'}{n} \text{ 时 } \frac{H'}{H} = \left(\frac{n'}{n}\right)^2 = \left(\frac{q'_v}{q_v}\right)^2$$

$$\therefore H' = \frac{H}{q_v^2} q_v'^2 \text{ (等效率点)}$$

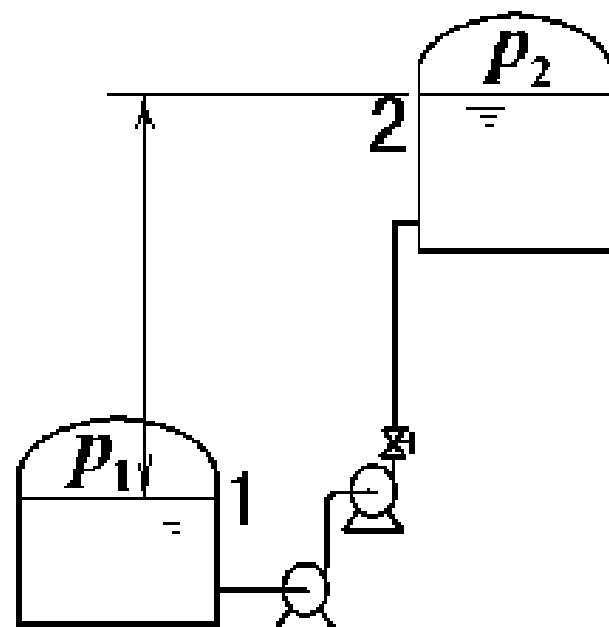
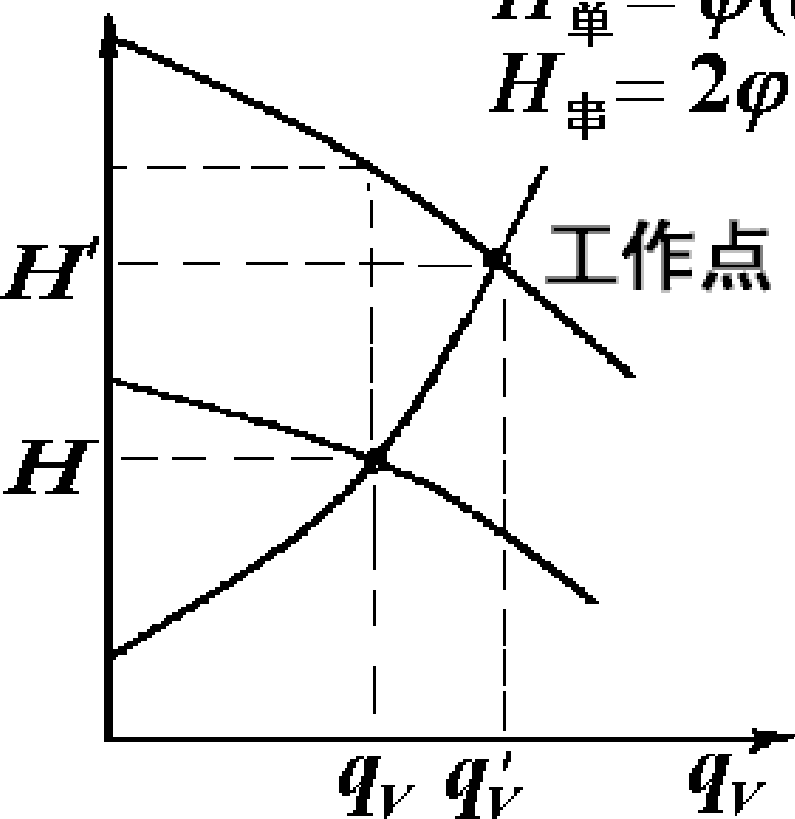
3. 组合操作

① 串联组合

同样流量下, 两泵压头相加

$$H_{\text{单}} = \varphi(q_v)$$

$$H_{\text{串}} = 2\varphi(q_v)$$



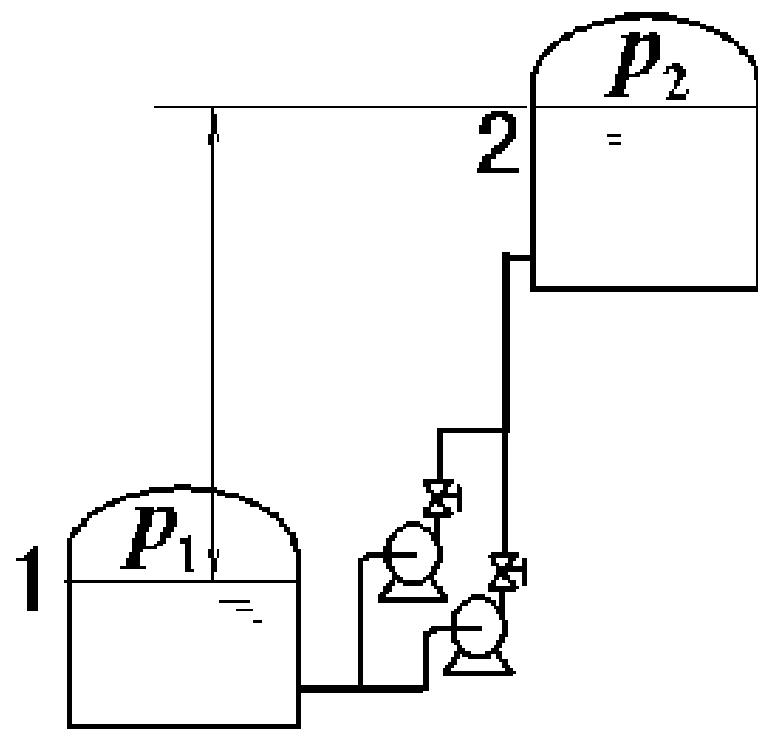
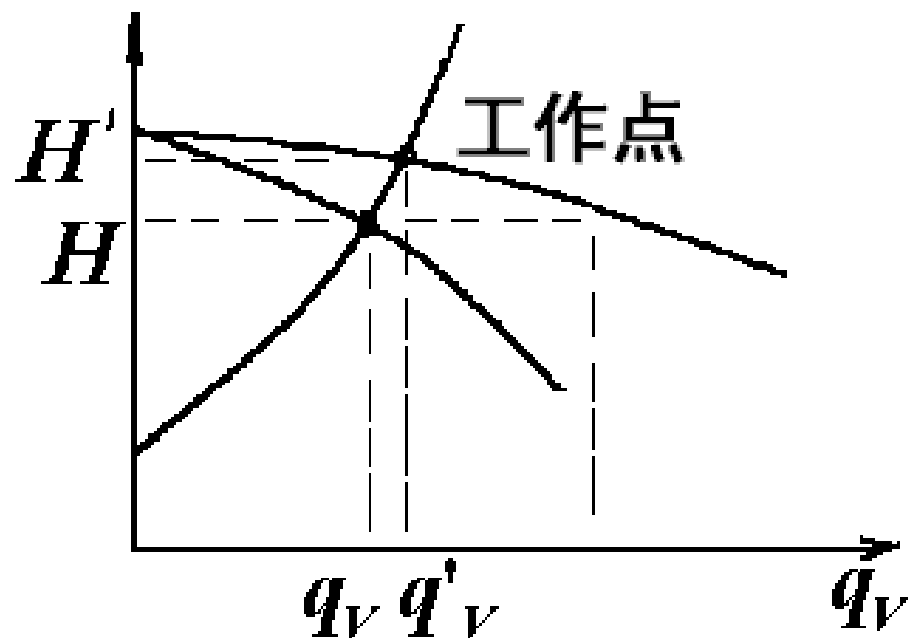
工作点
 $H' \neq 2H$

② 并联组合

同样压头下, 两泵流量相加

$$H_{\text{单}} = \varphi(q_v)$$

$$H_{\text{并}} = \varphi\left(\frac{q_v}{2}\right)$$

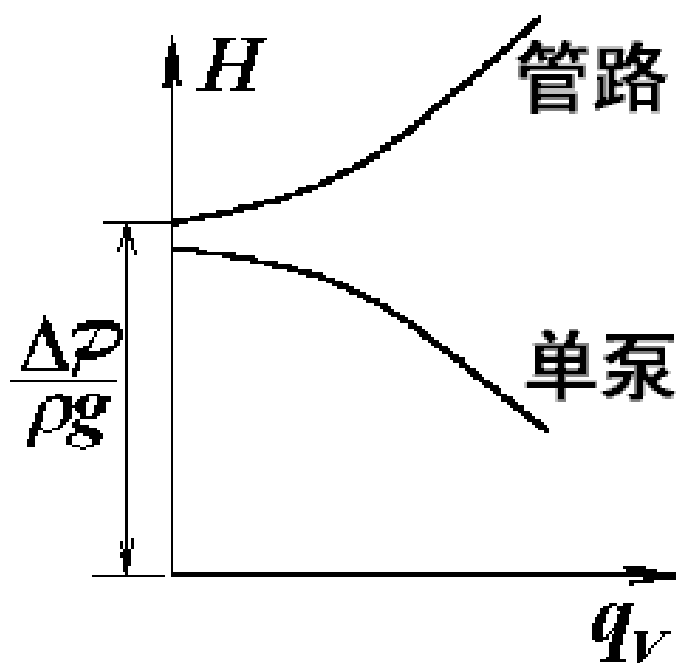
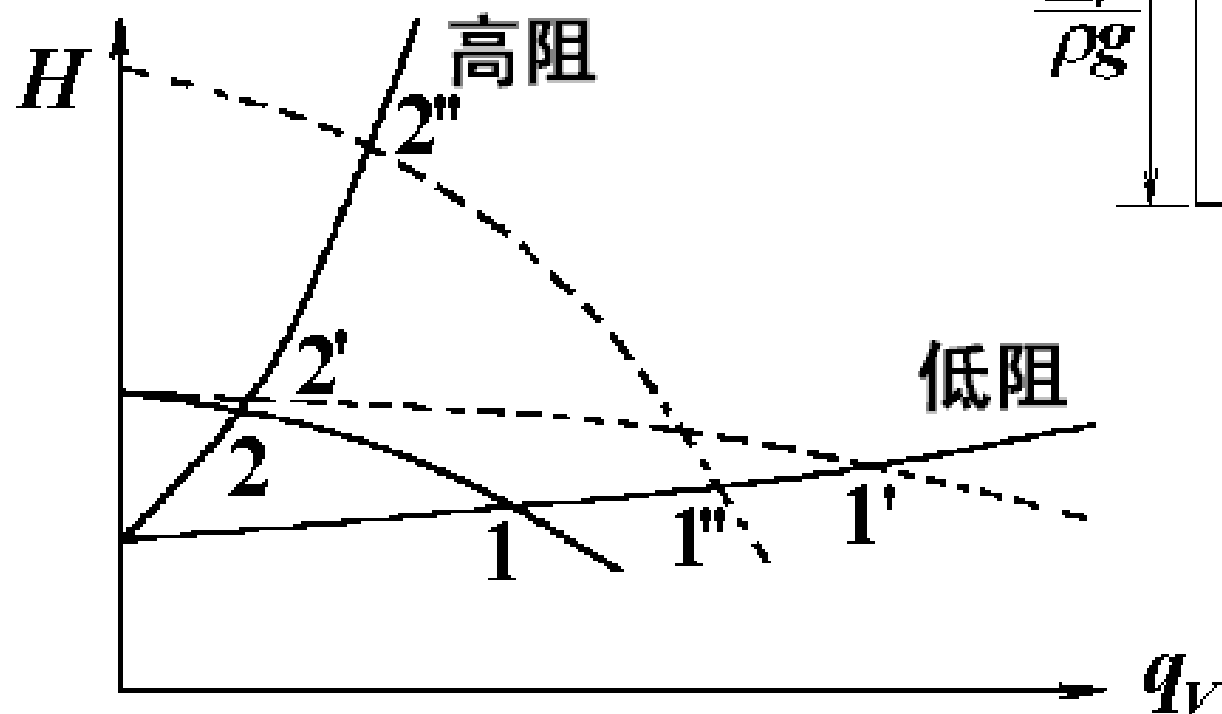


工作点
 $q'_v \neq 2q_v$

③组合方式的选择

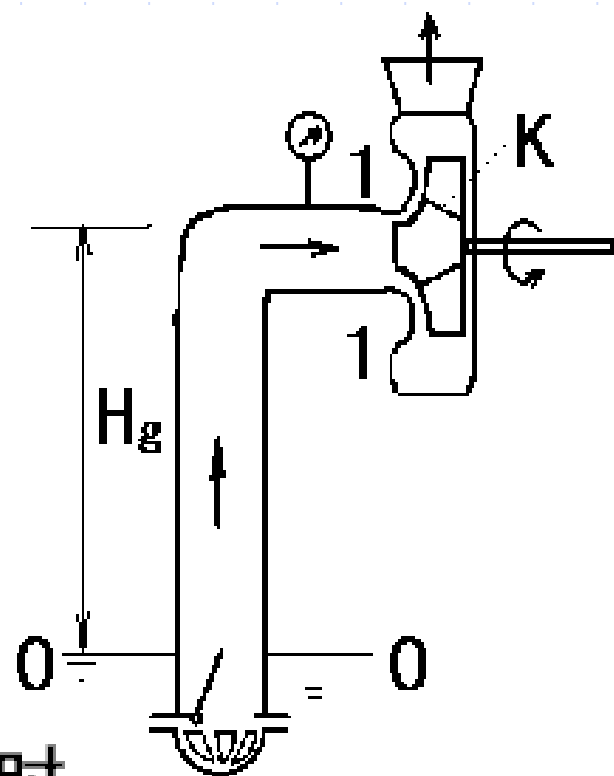
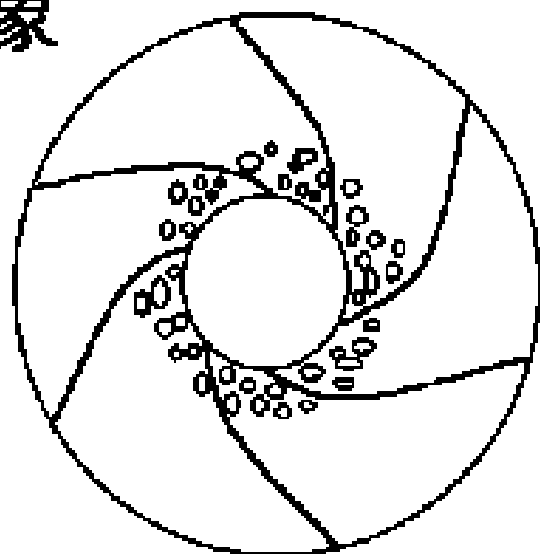
当 $\frac{\Delta P}{\rho g} > H_{\text{单 max}}$ 时, 必须串联

高阻管路 (K值较大) 串联较优
低阻管路 (K值较小) 并联较优



2.4 离心泵的安装高度

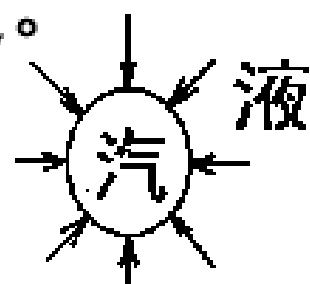
1. 汽蚀现象



叶轮入口K处压强最低, H_g 太大时,
 $p_K \leq p_v$, 液体汽化, 形成汽泡, 受压缩后溃灭。

后果: 叶轮受冲击而出现剥落

泵轴振动强烈, 甚至振断



2. 汽蚀余量NPSH

由1至K:
$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = \frac{P_k}{\rho g} + \frac{u_k^2}{2g} + \Sigma H_{f1-K}$$

$P_K = P_V$, 发生汽蚀, 这时 P_1 最小, 定义临界汽蚀余量

$$(NPSH)_c = \frac{P_{1\min}}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} - \frac{P_V}{\rho g} = \frac{u_k^2}{2g} + \Sigma H_{f1-K}$$

由0至K:
$$\frac{P_0}{\rho g} = H_g + \Sigma H_{f0-1} + \Sigma H_{f1-K} + \frac{P_k}{\rho g} + \frac{u_k^2}{2g}$$

$P_K = P_V$ 时

$$H_{g\max} = \frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_V}{\rho g} - \Sigma H_{f0-1} - \left(\Sigma H_{f1-K} + \frac{u_k^2}{2g} \right)$$

$$H_{g\max} = \frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_V}{\rho g} - \Sigma H_{f0-1} - (NPSH)_c$$

规定必需汽蚀余量

$$(NPSH)_r = (NPSH)_c + \Delta,$$

写进泵样本，它与流量有关

实际汽蚀余量
$$NPSH = \frac{P_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g}$$

须比 $(NPSH)_r$ 大0.5m以上，最大允许安装高度 $[H_g]$ 为

$$[H_g] = \frac{P_0}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} - \sum H_{f0-1} - [(NPSH)_r + 0.5]$$

3. 安装要求:

- ① 吸入管径常大于压出管径
- ② 吸入管不装调节阀
- ③ 实际安装高度 $H_g < [H_g]$

2.5 离心泵的类型与选用

1. 类型

- ① 清水泵——单级、多级、双吸
- ② 耐腐蚀泵——用耐腐蚀材料
- ③ 油泵——密封良好
- ④ 液下泵——轴封要求不高
- ⑤ 屏蔽泵——无密封、无泄漏

2. 选用

需考虑：

- ① 泵的工作条件，如腐蚀性、潜水等
- ② q_v 额, H 额, 略大于要求
- ③ 安装高度, 现场是否可以
- ④ 先定泵, 再配电机

3. 往复泵

3.1 主要构件： 泵缸、活塞、活门

3.2 工作原理： 直接提供压强能

3.3 流量特点：

1. 正位移特性

流量由泵决定, 与管路特性无关

2. 流量 $q_v = ALn\eta_v$

A 泵缸截面, L 活塞行程,

n 转速, η_v 容积效率

3. 不均匀性 加气室, 双动, 多缸

4. 流量调节

① 旁路阀

② 改变转速和行程

3.4 扬程

在电机功率范围内，
由管路特性决定

3.5 操作

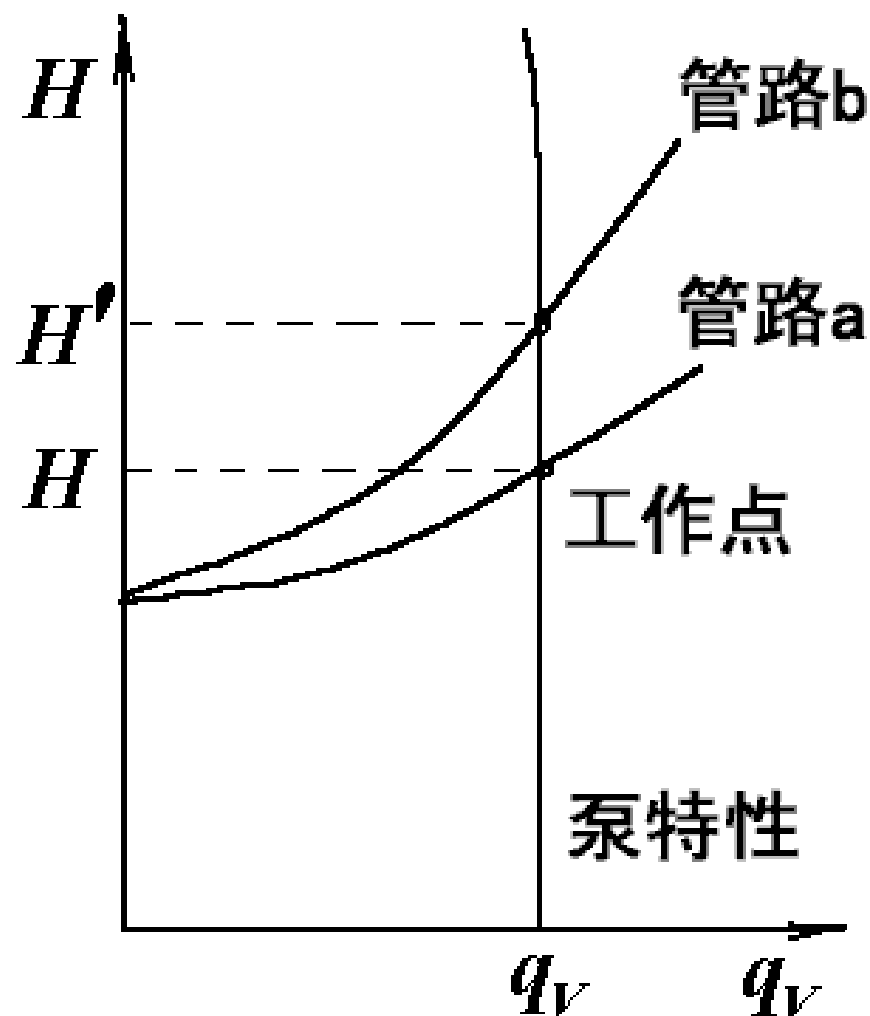
一般无气缚，能自吸

3.6 安装

不装出口调节阀

所有输送液体的泵

都有汽蚀问题



4 其它化工用泵

4.1 非正位移泵

1. 轴流泵
2. 旋涡泵

4.2 正位移泵

1. 隔膜泵
2. 计量泵
3. 齿轮泵
4. 螺杆泵

5. 气体输送机械

5.1 气体输送特点:

1. 流量 $\rho_{液} \approx 1000 \rho_{气}$,
当质量流量相同时, $q_{V气} \approx 1000 q_{V液}$

2. 经济流速 水1~3m/s, 空气15~25m/s
 $u_{气} \approx 10 u_{液}$, 动能项大

3. 管径 $d = \sqrt{\frac{q_m}{\frac{\pi}{4} u \rho}}$, q_m 相同时, $u \uparrow 10$ 倍, $\rho \downarrow \frac{1}{1000}$ 倍,
 $d \uparrow 10$ 倍

4. 阻力损失压头 $h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2g}$

$d \uparrow 10$ 倍, $u^2 \uparrow 100$ 倍, $h_f \uparrow 10$ 倍,

特点: 大流量, 高压头

5.2 气体输送机械分类

按结构分:

离心式	例: 离心风机
往复式	往复式压缩机
旋转式	罗茨风机
流体作用式	喷射泵(喷射风机)

一般按进出口压强差分:

通风机: 出口压强 $\leq 15\text{kPa}$ (表), 压缩比 $1\sim 1.15$

鼓风机: 出口压强 $15\text{kPa}\sim 0.3\text{MPa}$ (表), 压缩比 $1.15\sim 4$

压缩机: 出口压强 $> 0.3\text{MPa}$ (表), 压缩比 > 4

真空泵: 生成负压, 进口 $< 0.1\text{MPa}$, 出口 0.1MPa

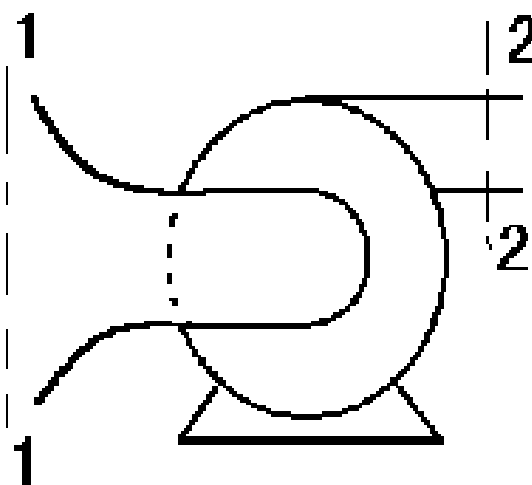
5.3 通风机

1. 常用类型: 轴流式通风机
离心式通风机

2. 离心式通风机

基本原理与离心泵完全相同, 不同之处:

- ① 叶轮直径大, 叶片有前弯、直叶的, 大多为后弯的
- ② 风压 $p_T \propto \rho$
- ③ 动能在总机械能中所占比重明显



由1至2

$$P_T = \rho g H = (p_2 - p_1) + \rho \frac{u_2^2}{2}$$

全压

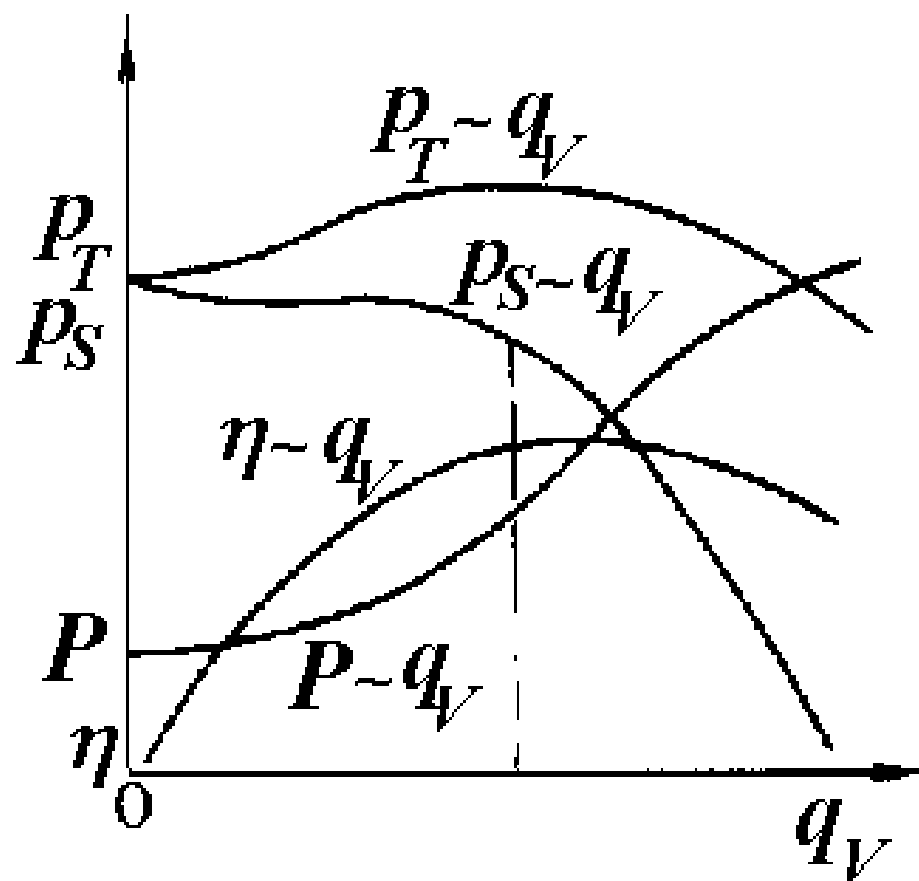
静风压

动风压

$$P_T = P_s + P_k$$

3. 特性曲线

参数：风量 q_V ，风压 p_T, p_S ，功率 P ，效率 η



出厂标准：

0.1MPa, 20°C空气，
 $\rho = 1.2 \text{kg/m}^3$

以入口状态为基准：

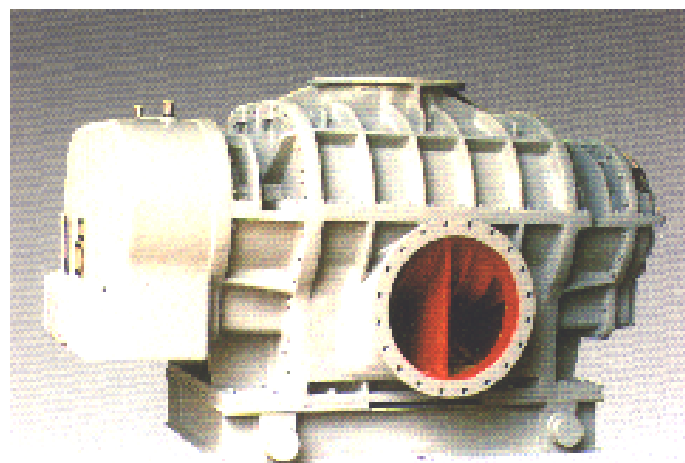
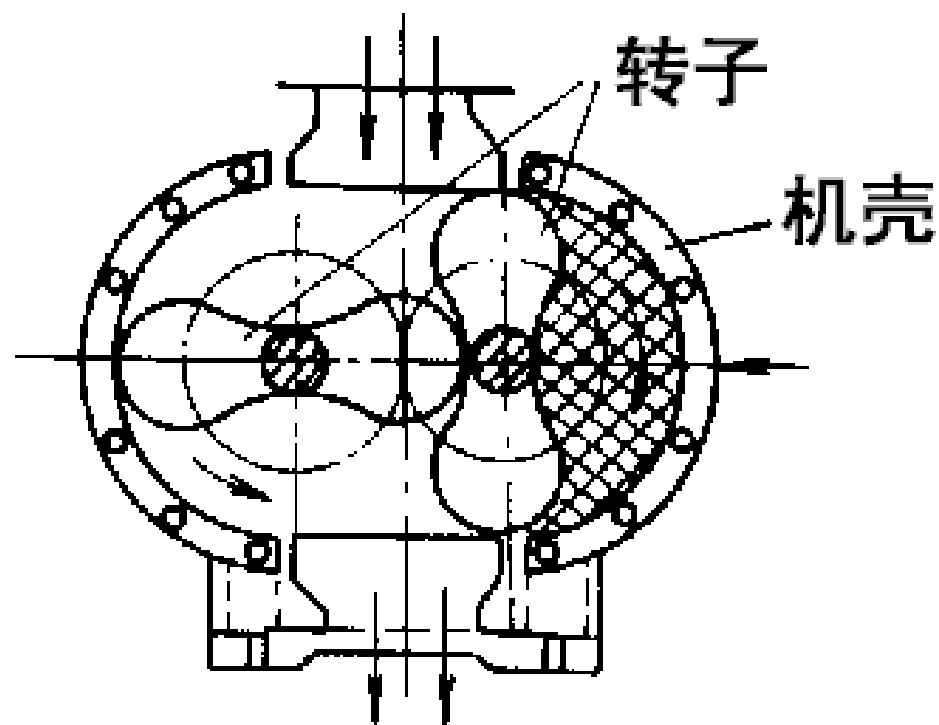
① q_V ，② ρ ，③ p_T ，

使用中注意换算

$$p'_T = p_T \frac{\rho'}{\rho}$$

5.4 鼓风机

1. 罗茨鼓风机



注意：①正位移特性

②温度过高会使转子卡住

5.5 压缩机

1. 往复式压缩机

原理与往复泵相同

余隙容积

当压缩比 $\frac{P_2}{P_1}$ 达到上限时，

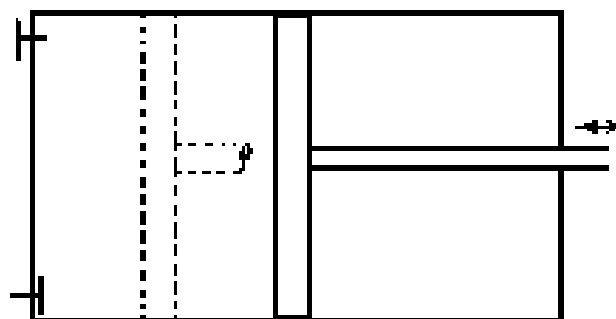
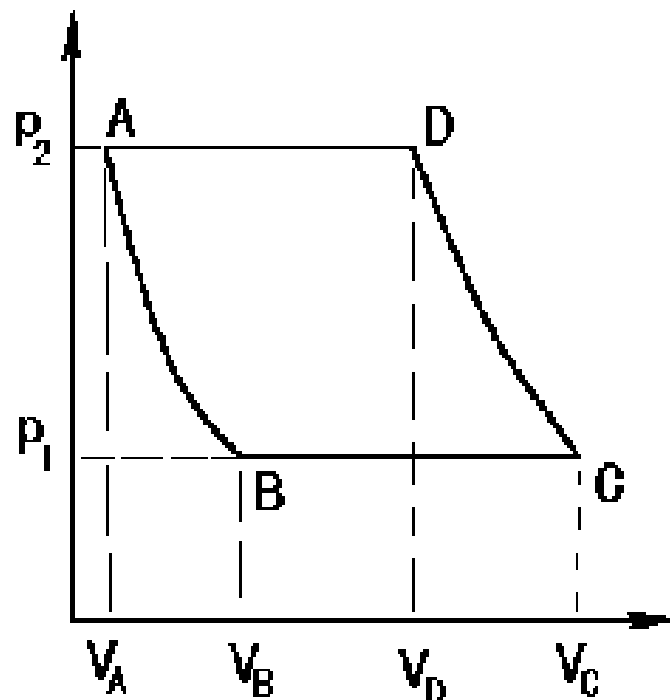
$V_B = V_C$ ，吸不进新的气体，
流量为零。

主要指标：

① 生产能力 q_v ，

以吸入常温常压空气测定

② 排出压强 p_2 ，

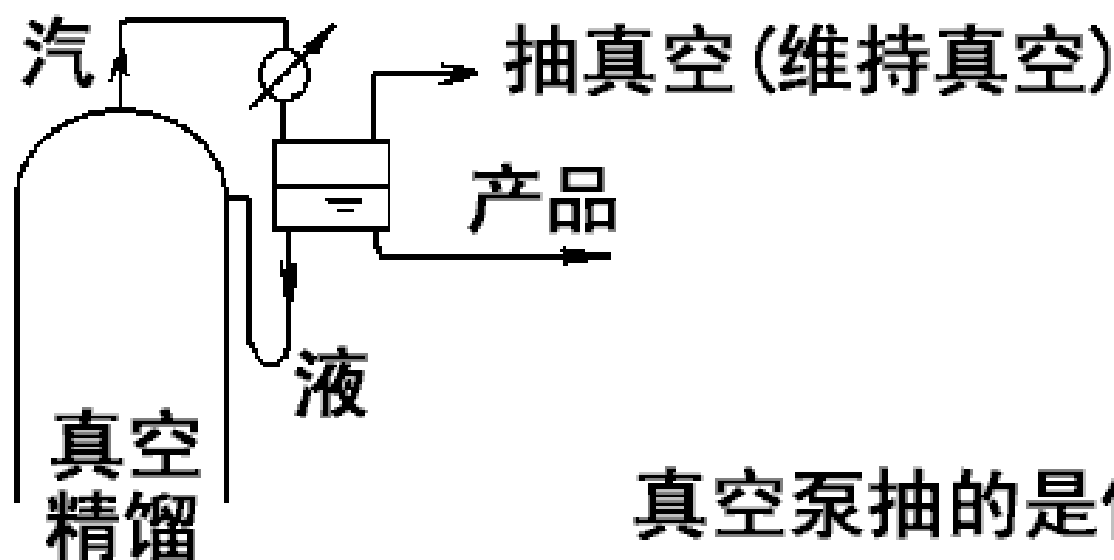


5.6 真空泵

目的：获得和维持负压

主要性能参数：

1. 极限真空：能达到的稳定的最低压强，用绝对压强表示
2. 抽气速率：以吸入口状态为基准， m^3/h



真空泵抽

- ①漏入系统的空气
- ②系统内产生的不凝性气体
- ③部分物料(占有一定的分压)

选真空泵时注意:

1. 抽气速率要大于漏气速率
2. 被带走的物料量的多少

5.7 流体输送机械的安全问题

现象: 烧保险丝、烧电机、毁坏输送机械

认识三点: ① $P \sim q_v$ 曲线的趋势

②正位移特性

③密度 ρ 的大小(以入口状态为基准)