

习题课

杨建刚

2019.12

例 1 现有 1 台蜗壳式离心泵，转速 $n=1450\text{rpm}$, $q_{vT}=0.09\text{m}^3/\text{s}$, $D_2=400\text{mm}$, $D_1=140\text{mm}$, $b_2=20\text{mm}$, $\beta_{2a}=25^\circ$, $z=7$, $v_{1u\infty}=0$, 试计算无限多叶片叶轮的理论扬程 $H_{T\infty}$ (不计叶片厚度影响) 及有限叶片叶轮的理论扬程。(速度三角形, 基本题)

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{\pi \times 0.4 \times 1450}{60} = 30.35 \text{ m/s}$$

$$\text{轴面分速度: } v_{2m\infty} = \frac{q_{vT}}{A_2} = \frac{q_{vT}}{\pi D_2 b_2} = \frac{0.09}{\pi \times 0.4 \times 0.02} = 3.58 \text{ m/s}$$

$$v_{2u\infty} = u_2 - v_{2m\infty} \cdot \cot \beta_{2a} = 30.35 - 3.58 \times \cot 25^\circ = 22.67 \text{ m/s}$$

$$\text{则无限多叶片叶轮的理论扬程为: } H_{T\infty} = \frac{1}{g} (v_{2u\infty} u_2 - v_{1u\infty} u_1) = \frac{1}{9.81} \times (30.35 \times 22.67 - 0) = 70.14 \text{ m}$$

$$\text{根据斯基克钦公式: } K = \frac{1}{1 + \frac{2\pi}{3z} \frac{1}{1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2}} = \frac{1}{1 + \frac{2\pi}{3 \times 7} \frac{1}{1 - \left(\frac{140}{400}\right)^2}} = 0.746$$

$$H_T = K H_{T\infty} = 0.746 \times 70.14 = 52.32 \text{ m}$$

若将叶轮转速提高至2900rpm，则有限叶片叶轮的理论扬程为：

$$u_2 = \frac{\pi D_2 n}{60} = \frac{\pi \times 0.4 \times 2900}{60} = 60.74 m/s$$

$$v_{2u\infty} = u_2 - v_{2m\infty} \cdot \cot \beta_{2a} = 60.74 - 3.58 \times \cot 25^\circ = 53.06 m/s$$

$$H_{T\infty} = \frac{1}{g} (v_{2u\infty} u_2 - v_{1u\infty} u_1) = \frac{1}{9.81} \times (60.74 \times 53.06 - 0) = 328.53 m$$

$$H_T = KH_{T\infty} = 0.746 \times 328.53 = 245.08 m$$

计算结果表明，速度提高1倍，扬程大约是原来的4倍。

$$\begin{aligned} \frac{q_{vp}}{q_{vm}} &= \frac{n_p}{n_m} \\ \frac{H_p}{H_m} &= \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^2, \frac{P_p}{P_m} = \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^3 \\ \frac{P_p}{P_m} &= \left(\frac{n_p}{n_m}\right)^3 \end{aligned}$$

2. 已知某离心风机转速 $n=1450\text{r/min}$ ，理论流量 $q_{vT}=1.72\text{m}^3/\text{s}$ ，空气径向流入叶轮，空气密度为 1.2kg/m^3 。叶轮出口尺寸为： $D_2=500\text{mm}$ 、 $b_2=127\text{mm}$ 、 $\beta_{2a}=30^\circ$ （出口叶片安装角）。在满足与上述相同的 q_{vT} 和 $p_{T\infty}$ 情况下，将叶轮出口安装角 β_{2a} 增大到 120° ，叶轮转速和出口宽度不变，试计算此时叶轮外径，叶轮外径相对减小了多少？（15 分）

（速度三角形，基本题）

【例】现有 Y9-6.3(35)-12№10D 型锅炉引风机一台，铭牌参数为： $n_0=960\text{r/min}$ ， $p_0=1589\text{Pa}$ ， $q_{V0}=20000\text{m}^3/\text{h}$ ， $\eta=60\%$ ，配用电机功率22kW。现用此风机输送20℃清洁空气，转速不变，联轴器传动效率 $\eta_{\text{tm}}=0.98$ 。求在新工作条件下的性能参数，并核算电机是否能满足要求？

【解】锅炉引风机铭牌参数是以大气压 $10.13\times 10^4\text{Pa}$ ，介质温度为200℃条件下提供的。这时空气密度为 $\rho_0=0.745\text{kg/m}^3$ ，当输送20℃空气时， $\rho_{20}=1.2\text{kg/m}^3$ ，故工作条件下风机参数为：

$$q_V = q_{V0} = 20000(\text{m}^3/\text{h})$$

$$p_{20} = p_0 \frac{\rho_{20}}{\rho_0} = 1589 \times \frac{1.2}{0.745} = 2559.5$$

$$\eta_{20} = \eta_0 = 60\%$$

$$P_{\text{sh}20} = \frac{q_{V20} \cdot p_{20}}{\eta_{20}} = \frac{20000 \times 2559.5}{0.6} = 23.699(\text{kW})$$

电动机的功率为（安全系数取 $K=1.15$ ）：

$$P_{\text{gr}} = K \frac{P_{\text{sh}20}}{\eta_{\text{tm}}} = 1.15 \times \frac{23.699}{0.98} = 27.81(\text{kW}) > 22(\text{kW})$$

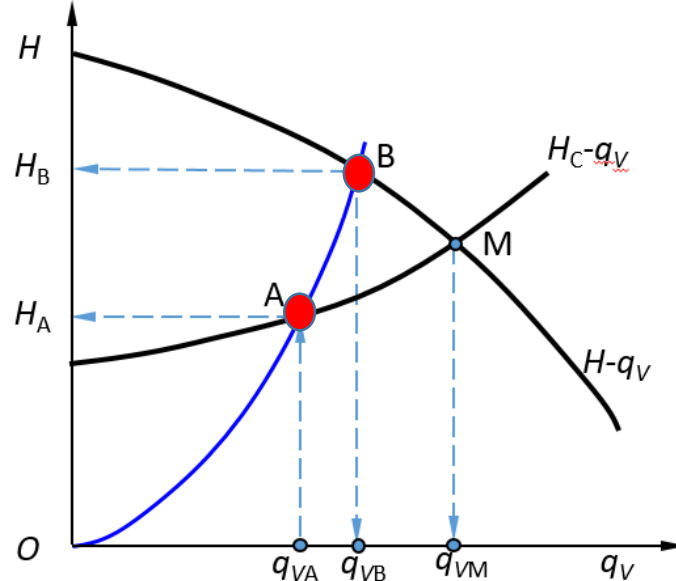
$$\frac{q_{vp}}{q_{vm}} = \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^3 \frac{n_p}{n_m}$$

$$\frac{H_p}{H_m} = \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^2 \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^2$$

$$\frac{p_p}{p_m} = \frac{\rho_p}{\rho_m} \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^2 \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^2$$

$$\frac{P_p}{P_m} = \frac{\rho_p}{\rho_m} \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^5 \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^3$$

【例题】 如图所示，某台可变速运行离心泵，转速 n_0 下的运行工况点为M，降转速后，流量减小到 q_{VA} ，试确定这时的转速。



【解】 ①变速后运行工况点 $A(q_{VA}, H_A)$ ；

②将 (q_{VA}, H_A) 代入下式以确定相似抛物线 k 值；

$$k = H_A / q_{VA}^2$$

③过A点作相似抛物线，求A点对应的相似工况点B，B点转速已知；

④利用比例定律对这两点的参数进行换算，以确定满足要求的转速：

$$\frac{n}{n_0} = \frac{q_{VA}}{q_{VB}} = \sqrt{\frac{H_A}{H_B}}$$

首先要找到相似工况点！

$$\frac{q_{vp}}{q_{vm}} = \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^3 \frac{n_p}{n_m}$$

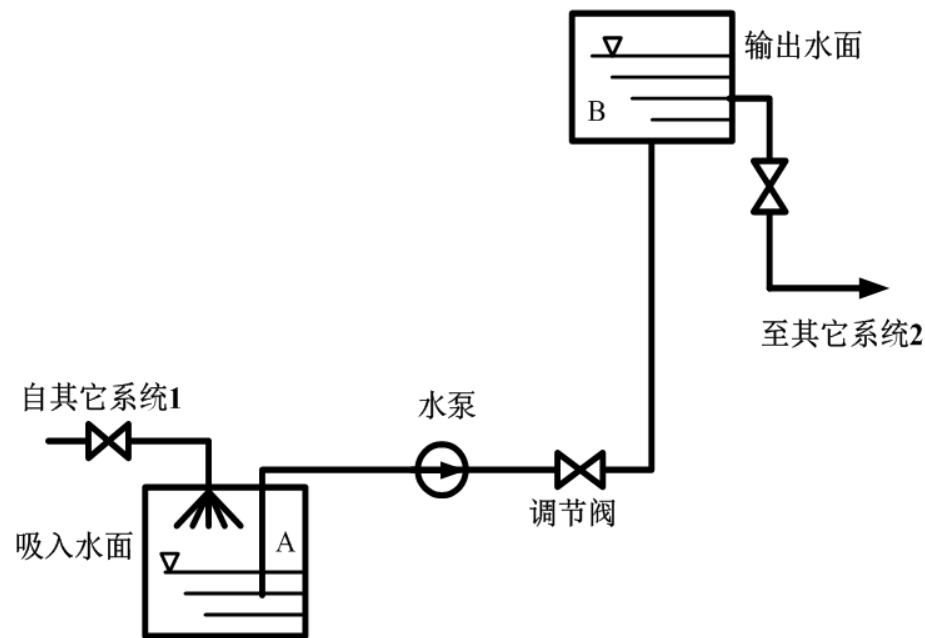
$$\frac{H_p}{H_m} = \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^2 \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^2$$

$$\frac{P_p}{P_m} = \frac{\rho_p}{\rho_m} \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^2 \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^2$$

$$\frac{P_p}{P_m} = \frac{\rho_p}{\rho_m} \left(\frac{D_{2p}}{D_{2m}} \right)^5 \left(\frac{n_p}{n_m} \right)^3$$

3-3. 某小型定转速水泵安装在吸入水面之上，从容器 A 吸水输送至容器 B，输送系统示意图如下图。已知某工况时（记为工况 1），泵的几何安装高度为 3m ，泵的体积流量为 $1000\text{m}^3/\text{h}$ ，泵进口流速为 1.98m/s ，泵在该流量对应的必需汽蚀余量为 2.5m ，泵进口绝对压力为 49kPa ，水温对应的汽化饱和压头为 0.5m ，水的密度取 $1000\text{kg}/\text{m}^3$ ，重力加速度 g 取 $9.8\text{m}/\text{s}^2$ 。且已知工况 1 泵未发生汽蚀。

现生产上需要降低吸入水面压力，并通过增大图中调节阀的开度来维持泵的体积流量不变。问相对于工况 1 吸入水面的绝对压力降低多少 kPa 时，水泵刚好发生汽蚀？此时相对于工况 1，调节阀进出口压差是如何变化的？变化了多少 kPa ？（10 分）注：上述调节过程中设吸入水面、输出水面的水位不变，输出水面的压力不变，水温与密度不变。



【例】 试定性比较泵出口节流调节与变速调节的经济性。

【解】 变速后的运行工况点为A；节流后的运行工况点为B点；过A点的相似抛物线OAC交泵的性能曲线于C（ $A \sim C$ ）。

节流调节时的轴功率为：

$$P_{\text{sh节}} = \frac{\rho g q_{VA} H_B}{1000 \eta_B}$$

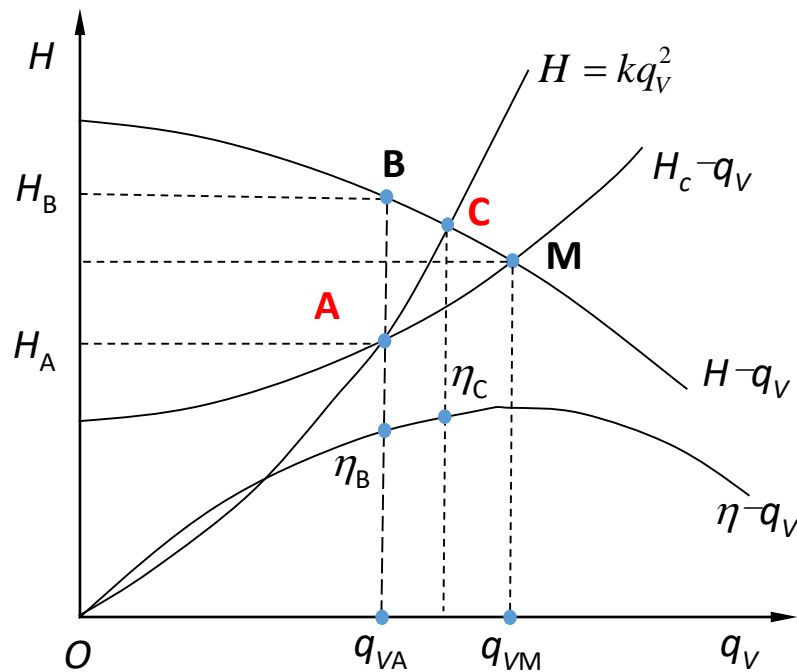
变速调节时的轴功率为

$$P_{\text{sh变}} = \frac{\rho g q_{VA} H_A}{1000 \eta_C}$$

由于 $H_B > H_A$ ，且 $\eta_C > \eta_B$

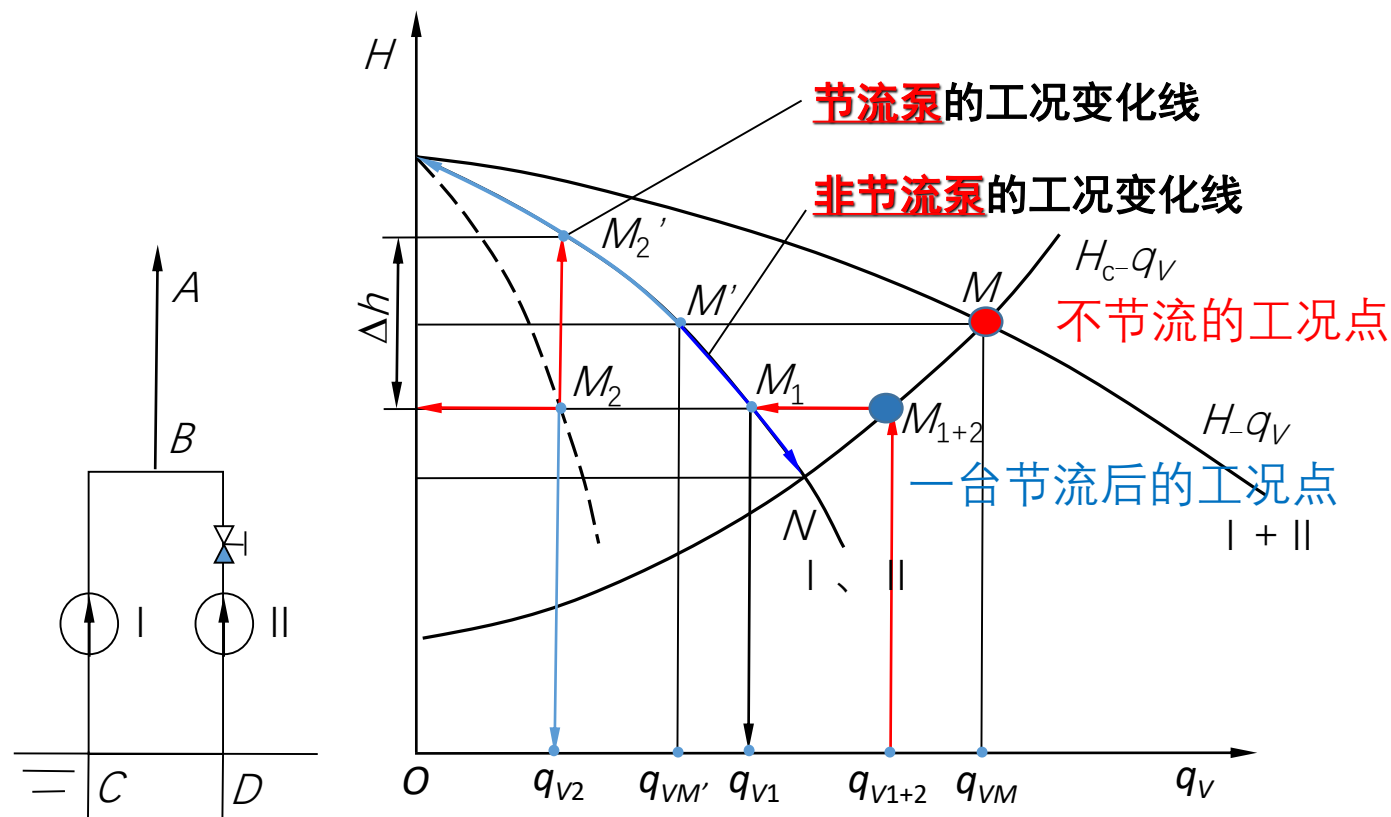
节能效果为

$$\Delta P = P_{\text{sh节}} - P_{\text{sh变}} = \frac{\rho g q_{VA}}{1000} \left(\frac{H_B}{\eta_B} - \frac{H_A}{\eta_C} \right) > 0$$



并联运行中的运行工况调节

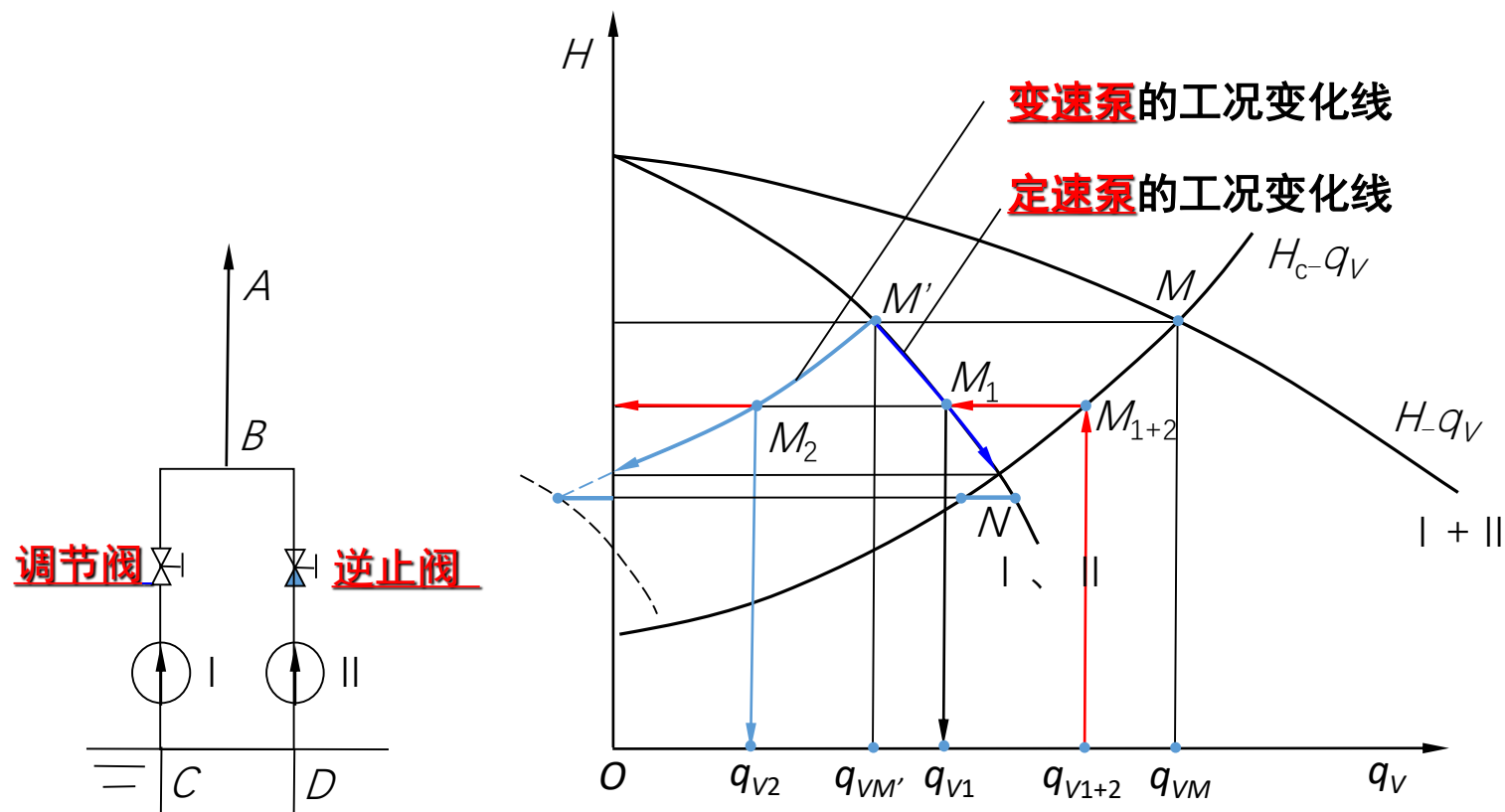
(一) 并联泵运行中一台进行节流的工况调节



并联泵中一台进行节流调节示意图

并联运行中的运行工况调节

(二) 并联泵运行中一台进行**变速**的工况调节



并联泵中一台进行变速调节示意图

切割定律的应用

【例】某输送常温水的单级单吸离心泵在转速 $n=2900\text{r/min}$ 时的性能参数如下表。管路性能曲线方程为： $H_c=20+78000q_v^2$ ，m；式中 q_v 的单位为 m^3/s 。泵的叶轮外径 $D_2=162\text{mm}$ ，水的密度 $\rho=1000\text{kg}/\text{m}^3$ 。求：

$q_v \times 10^3 \text{ (m}^3/\text{s)}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
$H \text{ (m)}$	33.8	34.7	35	34.6	33.4	31.7	29.8	27.4	24.8	21.8	18.5	15
$\eta \text{ (\%)}$	0	27.5	43	52.5	58.5	62.5	64.5	65	64.5	63	59	53

- (1) 此泵系统的最大流量及相应的轴功率；
- (2) 当若拟通过切割叶轮方式达到实际所需的最大流量 $q_v = 6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ ，问切割后叶轮直径 D_2' 为多少？
- (3) 设切割后对应工况泵效率不变，采用切割叶轮方式比采用出口节流调节能节约多少轴功率？

【解】首先，把泵的性能曲线和管路性能曲线按相同的比例尺画在同一坐标图上，则泵性能曲线 $H-q_v$ 和管路性能曲线 H_c-q_v 的交点即为运行工况点

切割定律的应用

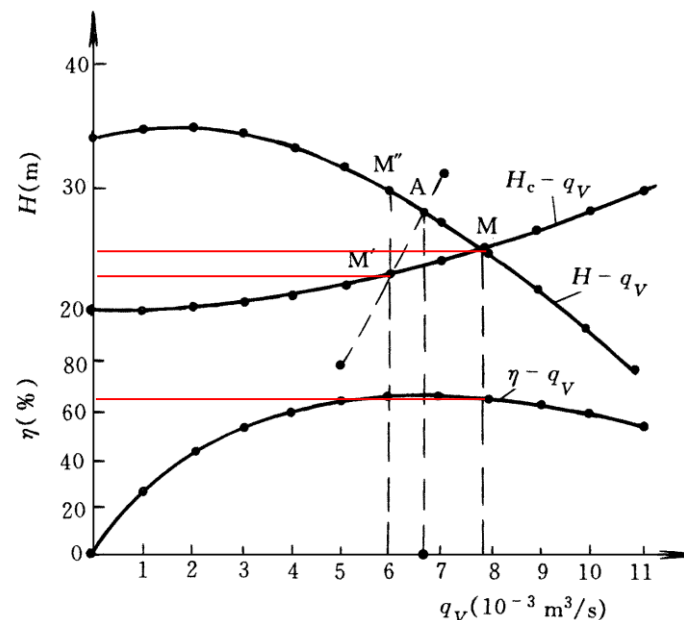
M点流量即为泵系统最大流量 $q_{V\max}$ 。

$M = (7.9 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}, 24.8 \text{m}, 64.5\%)$ 。

相应的轴功率为

$$P_{\text{sh}} = \frac{\rho g q_{V\max} H}{1000 \eta}$$

$$= \frac{1000 \times 9.806 \times 7.9 \times 10^{-3} \times 24.8}{1000 \times 0.645} = 3.04(\text{kW})$$



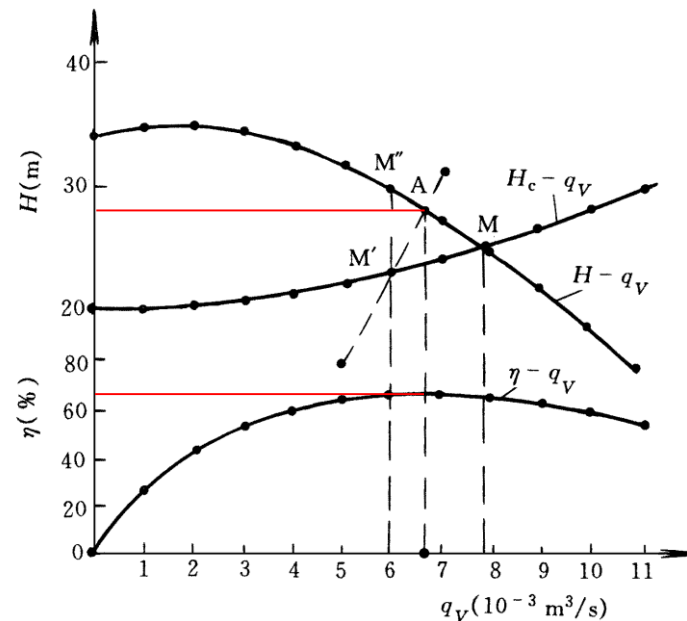
其次, 求泵系统最大流量为 $6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时的叶轮直径 D_2' 。切割叶轮后管路性能曲线不变, 故其运行工况点必在管路性能曲线流量为 $q_V' = 6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 这一点 M' 上。从图可读出: $M'(q_V, H) = (6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}, 22.8 \text{m})$, 但点 M' 与 M 点不是切割前、后的对应点, 故需求出在 $H-q_V$ 上即 $D_2=162 \text{mm}$ 时的性能曲线上与 M' 点的对应工况点。该离心泵的比转速 n_s 为

$$n_s = \frac{3.65 n \sqrt{q_V}}{H^{3/4}} = \frac{3.65 \times 2900 \sqrt{7.9 \times 10^{-3}}}{24.8^{3/4}} = 85$$

切割定律的应用

属于中、高比转速离心泵，对应工况点均在切割抛物线上，过 M' 点的切割抛物线为

$$\begin{aligned} H &= k_D q_V^2 = \frac{H'}{q_V'^2} q_V^2 \\ &= \frac{22.8}{(6 \times 10^{-3})^2} q_V^2 = 630000 q_V^2 \end{aligned}$$



在图上作切割抛物线与泵性能曲线交于 A 点，则 M' 点与 A 点为切割前、后的对应点。从图可读出： $A(q_V, H, \eta) = (6.7 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}, 28 \text{ m}, 65\%)$ ，由切割定律可得

$$D_2' = D_2 \frac{q_V'}{q_V} = 162 \times \frac{6.7}{6} = 145.1 \text{ (mm)} \quad \text{或} \quad D_2' = D_2 \sqrt{\frac{H'}{H}} = 162 \times \sqrt{\frac{22.8}{28}} = 146.2 \text{ (mm)}$$

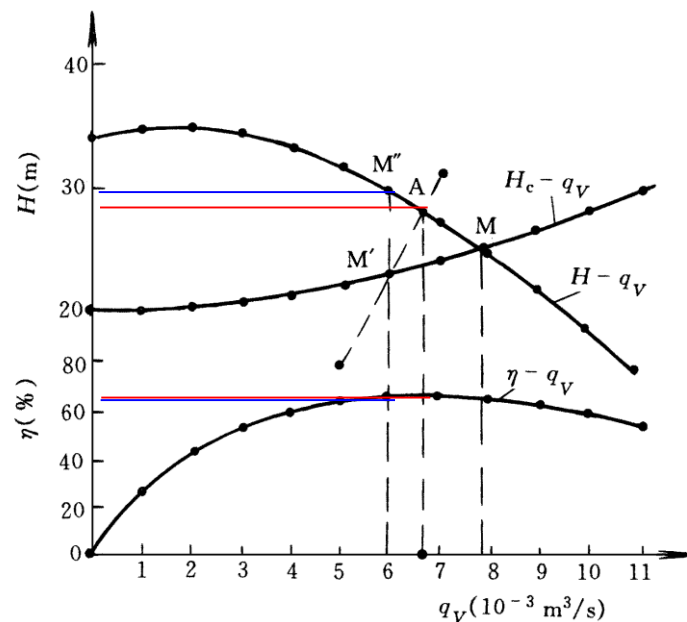
其误差由图解法作图和读数误差产生，现取 $D_2' = 146 \text{ mm}$ 。

现比较切割叶轮法和出口节流调节法使 $q_V' = 6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ 时各自的轴功率。

切割定律的应用

M' 的效率应与对应点 A 相同（假设切割后效率不变），故 $\eta' = \eta_A = 65\%$ ，则

$$P'_{sh} = \frac{\rho g q'_V H'}{1000 \eta'} = \frac{1000 \times 9.806 \times 6 \times 10^{-3} \times 22.8}{1000 \times 0.65} = 2.07(\text{kW})$$



节流调节时泵性能曲线不变，运行工况点为 M' 点，可读得 $M' = (6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}, 29.8 \text{ m}, 64.5\%)$ ，节流调节时轴功率为

$$P''_{sh} = \frac{\rho g q''_V H''}{1000 \eta''} = \frac{1000 \times 9.806 \times 6 \times 10^{-3} \times 29.8}{1000 \times 0.645} = 2.72(\text{kW})$$

故得切割叶轮法比出口节流调节法节约轴功率

$$\Delta P = P''_{sh} - P'_{sh} = 2.72 - 2.07 = 0.65(\text{kW})$$

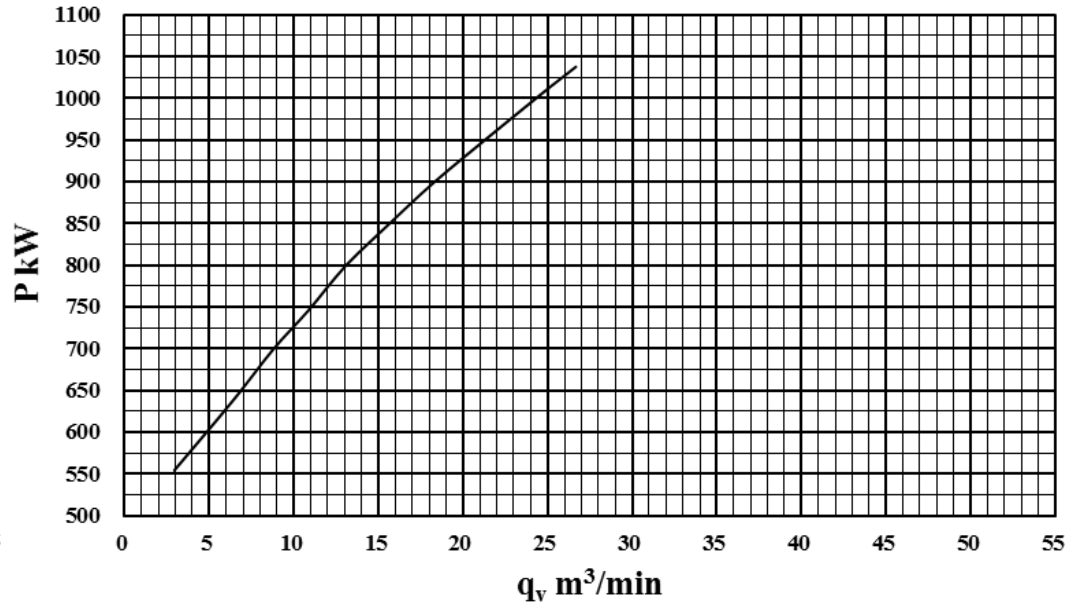
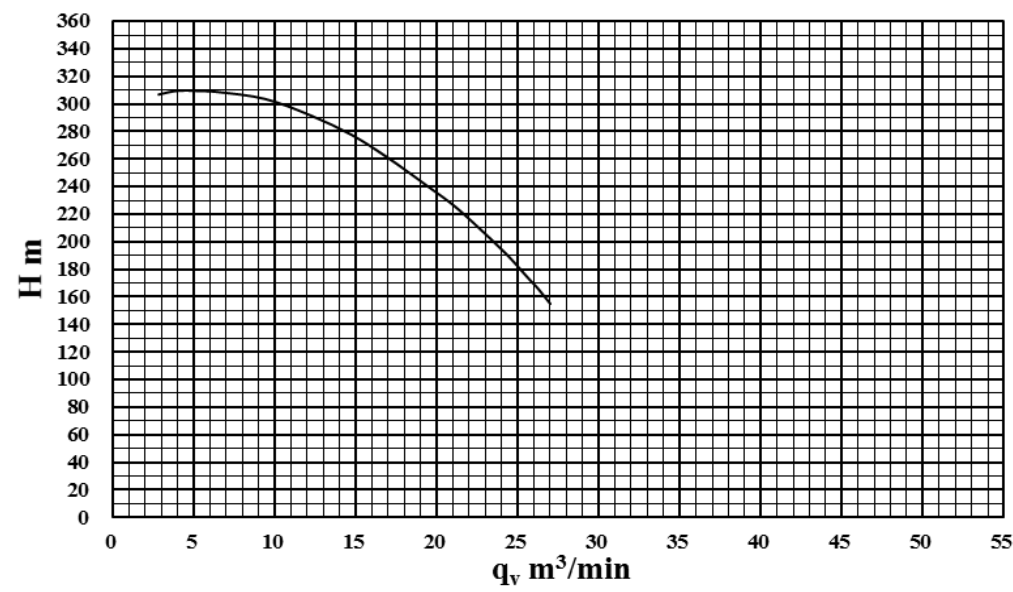
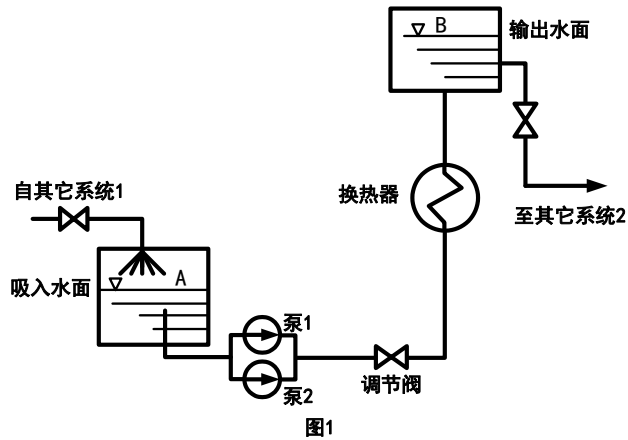
若考虑到 $\Delta D/D_2 = (162 - 146)/162 = 9.8\%$ 时效率下降1%，即 $\eta' = 64\%$ ，则

$$\Delta P = P''_{sh} - P'_{sh} = 2.72 - 2.10 = 0.62(\text{kW})$$

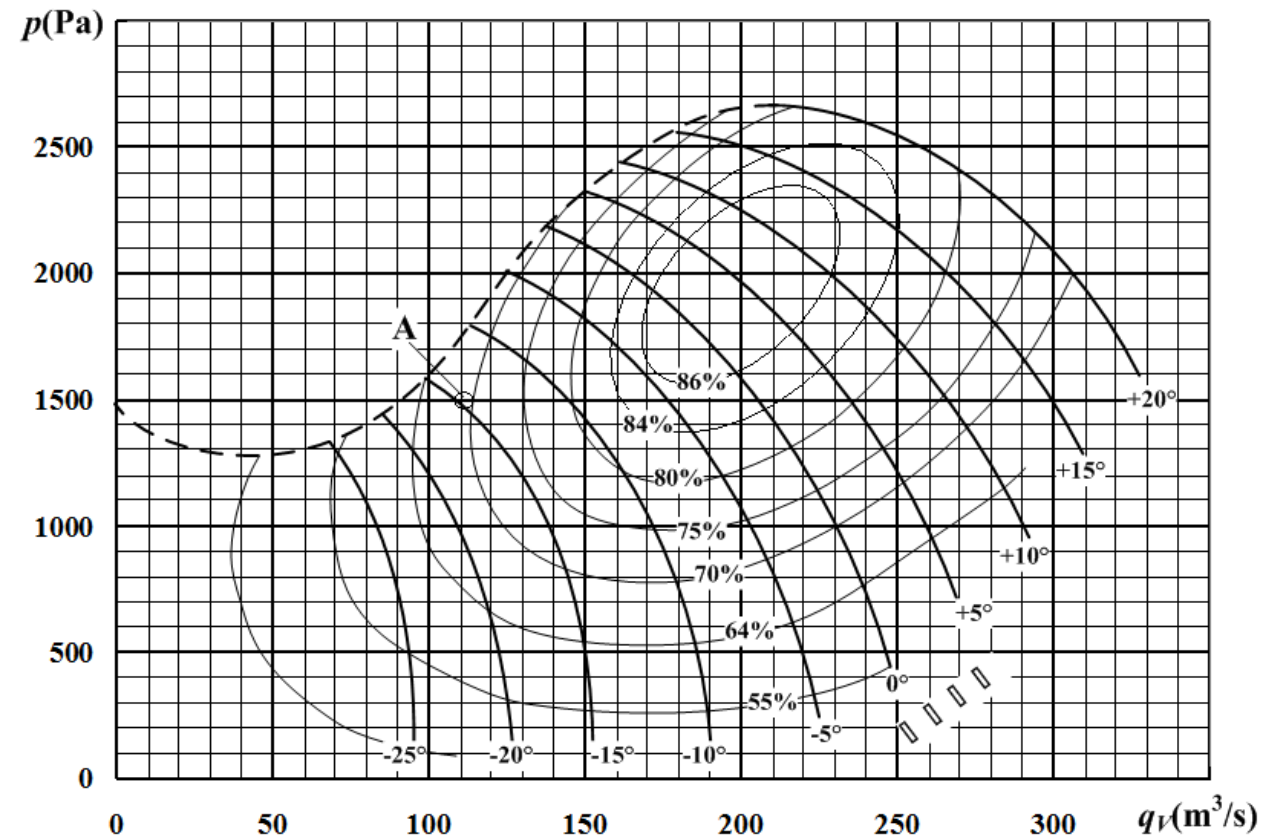
两台并联、结构相同变速泵，单台泵在最高转速2980r/min时扬程和轴功率曲线如图所示。已知：输出水面比吸入水面高25m，输出水面压头比吸入水面压头高60m，调节阀全开且每台泵均为2980r/min并联运行时，系统总流量为34m³/min。请问：

1) 此时每台泵流量为多少？输送系统所消耗轴功率共为多少？

2) 流量降为多少时，一台泵就能满足要求？此时系统所消耗轴功率为多少？如果此流量下采用出口节流运行方式，仍采用两台泵并联运行且转速均为2980r/min，系统所消耗轴功率共为多少？如果此流量下调节阀全开，改变泵转速，两台泵并联运行，且转速相同，系统所消耗轴功率共为多少？



某锅炉所配两台风机均为相同的动叶可调轴流风机。50%负荷运行时，风机常采用两台风机并联运行方式，各风机工作点为图中A点，流量 $110\text{ m}^3/\text{s}$ ，全压 1500 Pa ，请（1）画出管路特性曲线；（2）计算并联运行时各风机的轴功率；（3）如50%负荷时采用单台风机运行方式，在图中标出单台风机运行的工作点，动叶角度应调整为多少？该运行工作点的流量、全压、效率。



某凝泵1480rpm时的性能曲线如图所示。该泵从绝对压力为0.008MPa的冷凝器热井中吸水，水面与地面等高，水密度 990kg/m^3 ；该泵出口连接到除氧器，除氧器内绝对压力为0.6MPa，进入除氧器的管口位置比地面高30m，水密度 910kg/m^3 。阀门全开时，泵流量 $q_v=800\text{m}^3/\text{h}$ ， $H=258\text{m}$ 。请：1) 画出管路特性曲线。2) 保持管路特性曲线不变，单泵运行若采用变速调节，要达到 $1000\text{m}^3/\text{h}$ 流量，泵转速应到多少？3) 相同性能的两台泵并联工作时，总输送流量与总轴功率分别为多少？

