

第五讲 柱塞泵、液压马达

- 5.1 柱 塞 泵
- 5.2 液 压 马 达
- 5.3 气 穴 现 象
- 5.4 噪 声 现 象
- 5.5 液压泵的选用

1.1.1 柱塞泵概述

柱塞泵是依靠**柱塞在缸体孔内作往复运动时产生的容积变化**进行吸油和压油的。由于柱塞和缸体内孔都是圆柱表面,容易得到高精度的配合,密封性能好,**在高压下工作仍能保持较高的容积效率和总效率**。因此,现在柱塞泵的形式众多,性能各异,应用非常广泛。

根据**柱塞的布置**和**运动方向与传动主轴相对位置**的不同,柱塞泵可分为轴向柱塞泵和径向柱塞泵两类。

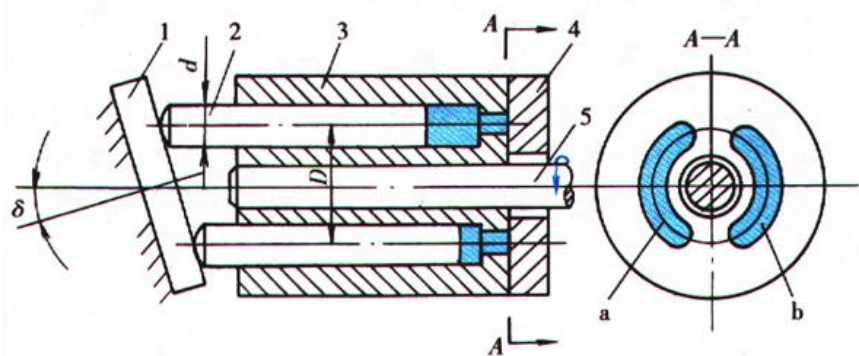


图 4-16 直轴式轴向柱塞泵的工作原理
1—斜盘 2—柱塞 3—缸体 4—配油盘 5—传动轴

轴向柱塞泵
(柱塞沿转子轴向运动)

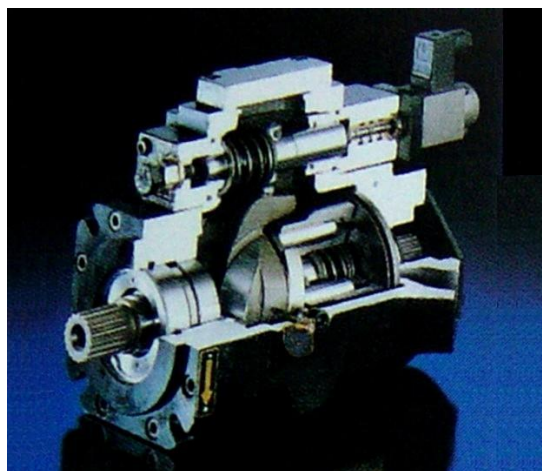


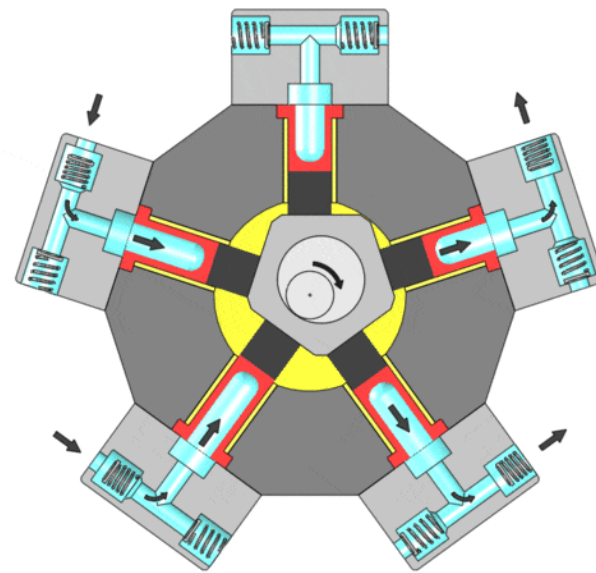
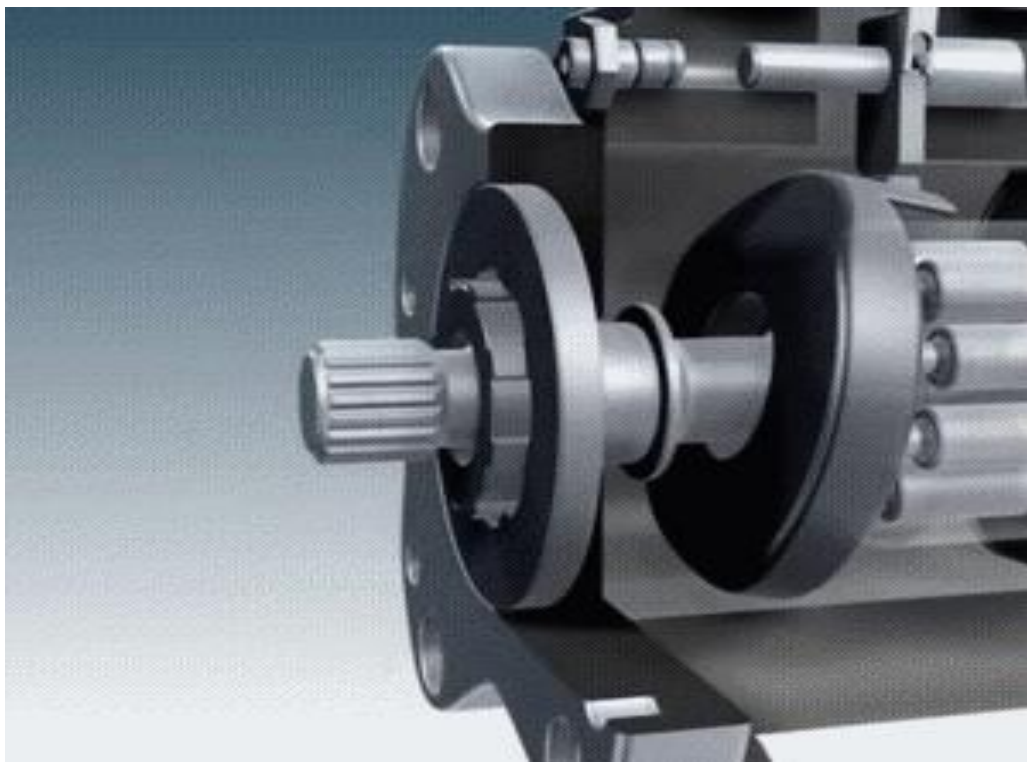
图 4-20 轴配油式径向柱塞泵
1—定子 2—转子 3—配油轴 4—衬套 5—柱塞
a—吸油腔 b—压油腔

径向柱塞泵
(柱塞沿转子径向运动)

1.1.1 柱塞泵概述

柱塞泵是依靠**柱塞在缸体孔内作往复运动时产生的容积变化**进行吸油和压油的。由于柱塞和缸体内孔都是圆柱表面,容易得到高精度的配合,密封性能好,**在高压下工作仍能保持较高的容积效率和总效率**。因此,现在柱塞泵的形式众多,性能各异,应用非常广泛。

根据**柱塞的布置**和**运动方向与传动主轴相对位置**的不同,柱塞泵可分为轴向柱塞泵和径向柱塞泵两类。



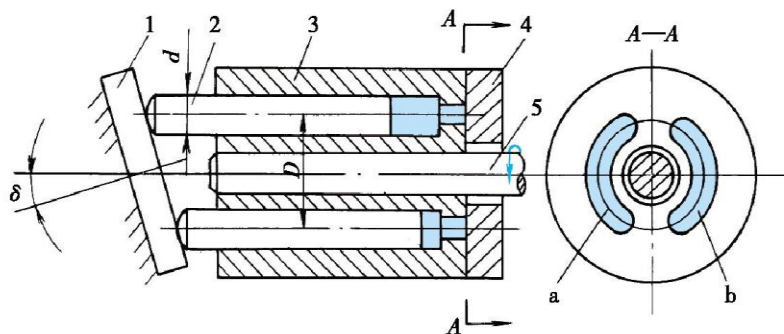
径向柱塞泵
(柱塞沿转子径向运动)

1.2.1 直轴式轴向柱塞泵



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

排量计算



由图4-16可看出,直轴式轴向柱塞泵的排量可按下式计算

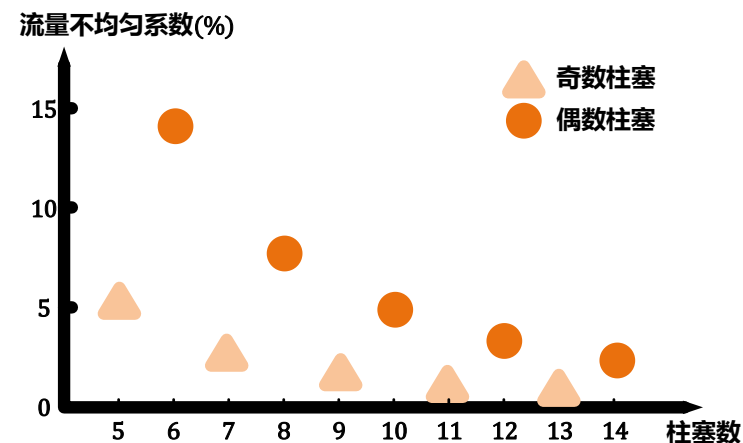
$$V = \frac{\pi}{4} d^2 D \tan \delta z \quad (4-24)$$

式中 d ——柱塞直径;
 D ——柱塞在缸体上的分布圆直径;
 δ ——斜盘倾角;
 z ——柱塞数。

流量脉动

实际上,轴向柱塞泵的输出流量是脉动的,当柱塞数 z 为单数时,脉动较小,其脉动率为

$$\sigma = \frac{\pi}{2z} \tan \frac{\pi}{4z} \quad (4-25)$$



柱塞数对流量不均匀系数的影响

一般常用的柱塞数视流量大小,取7、9或11

1.1.2 柱塞泵优缺点



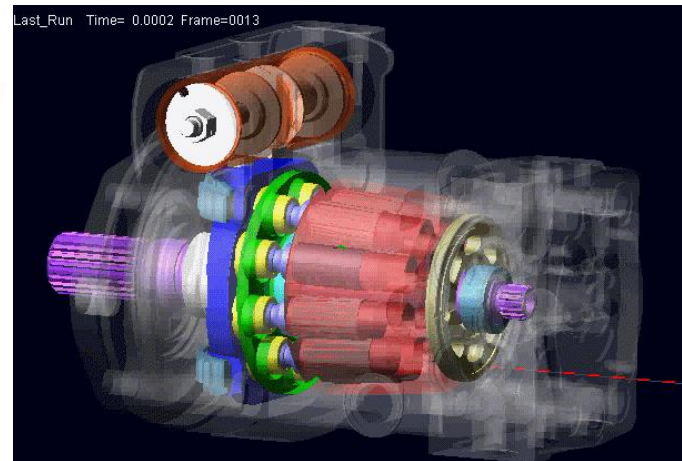
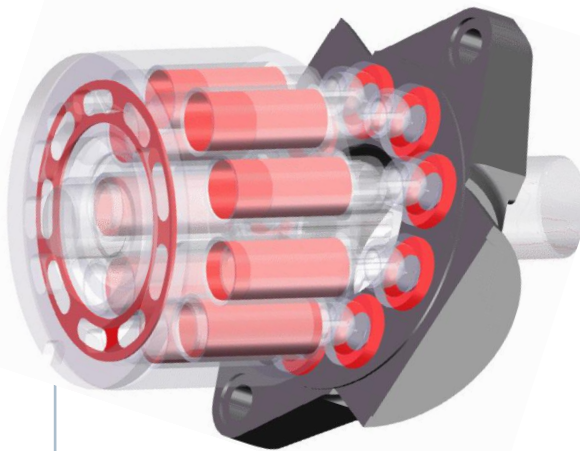
浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

柱塞泵优点

- 工作压力高，容积效率高，功率密度大
- 易于实现变量，变量种类丰富

柱塞泵缺点

- 结构较复杂，零件数较多
- **对介质清洁度**要求高，要求较高的过滤精度，对使用和维护要求较高
- 制造工艺要求较高，成本较贵



柱塞泵仿真示意

柱塞泵广泛的应用于各类高性能的主机装备中，尤其在移动机器领域占据了**垄断地位**。

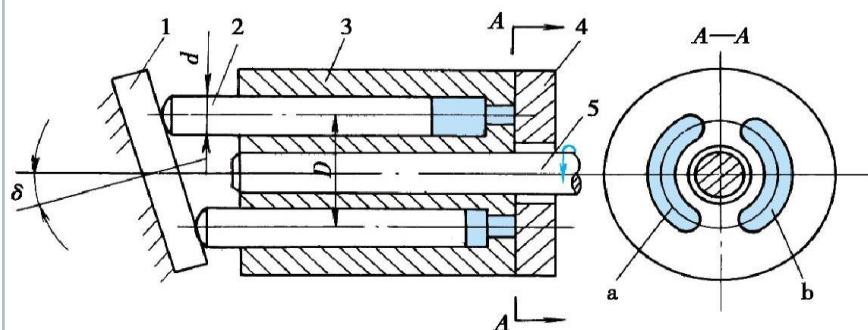
1.2 轴向柱塞泵



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

柱塞往复运动轴线基本平行于转子轴线方向，又可分为**直轴式**（又名斜盘式）和**斜轴式**两种

优点：变量容易



斜盘倾角：15~20°

图4-16 直轴式轴向柱塞泵的工作原理

1—斜盘 2—柱塞 3—缸体 4—配油盘 5—传动轴
(传动轴与缸体中心线在同一轴线上)

优点：效率高

倾角：25~40°

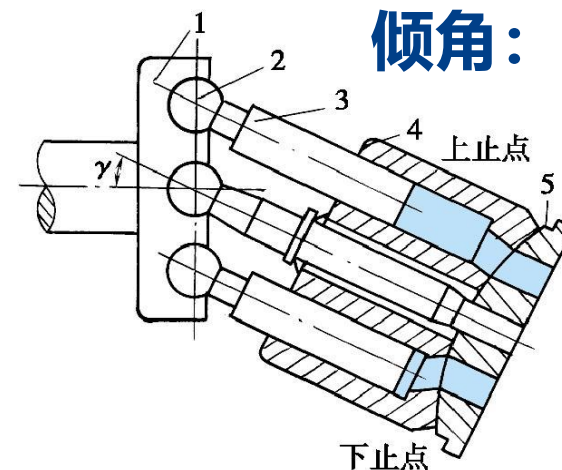


图4-17 无铰斜轴式柱塞泵工作原理
1—主轴 2—连杆 3—柱塞 4—缸体
5—配流盘
(传动轴与缸体中心线存在夹角)

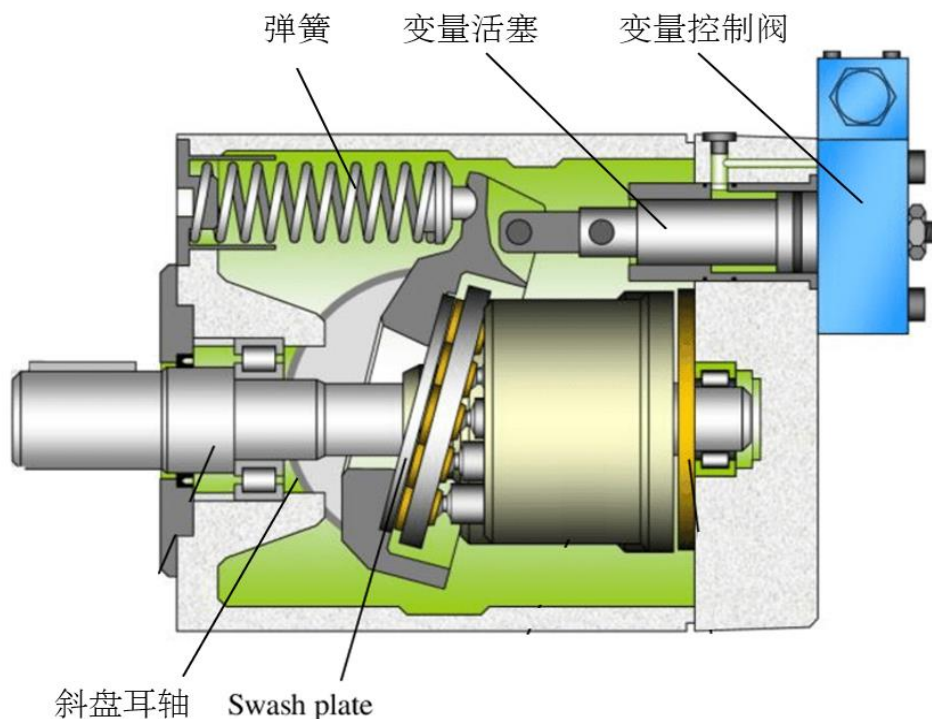
1.2 轴向柱塞泵



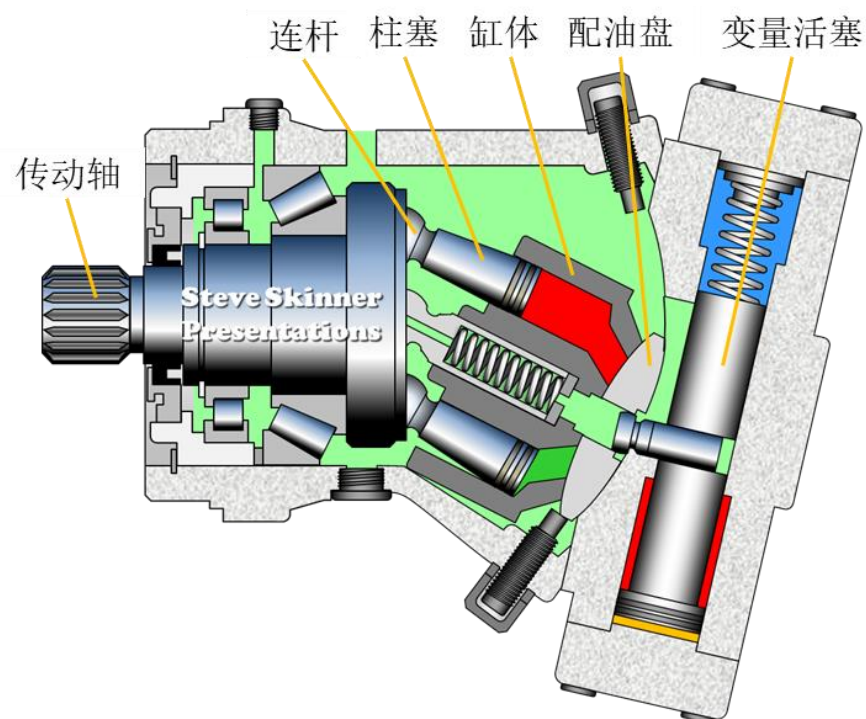
浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

柱塞往复运动轴线基本平行于转子轴线方向，又可分为**直轴式**（又名斜盘式）和**斜轴式**两种

优点：变量容易



优点：效率高



1.2.2 斜轴式轴向柱塞泵



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

这种轴向柱塞泵的传动轴中心线与缸体中心线倾斜一个角度 γ ,故称斜轴式轴向柱塞泵。
目前应用比较广泛的是无铰斜轴式柱塞泵

工作原理

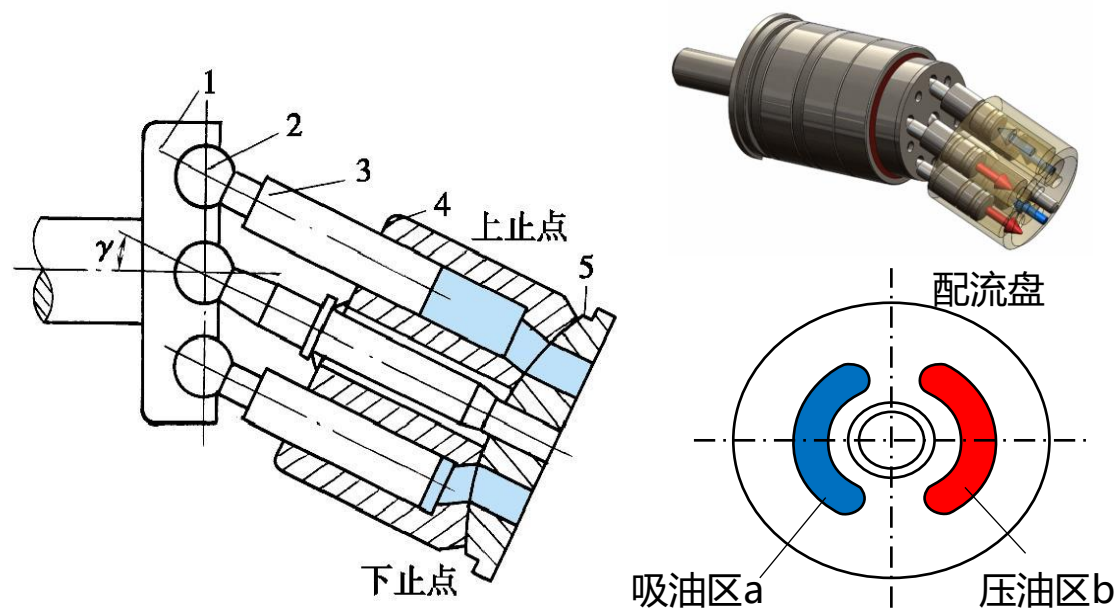


图4-17 无铰斜轴式柱塞泵工作原理

1—主轴 2—连杆 3—柱塞 4—缸体 5—配流盘

- 当主轴1转动时,通过连杆2的侧面和柱塞3的内壁接触带动缸体4转动。同时,柱塞在缸体的柱塞孔中作往复运动,实现吸油和压油。
- 当主轴1转动时,通过连杆2的侧面和柱塞3的内壁接触带动缸体4转动。同时,柱塞在缸体的柱塞孔中作往复运动,实现吸油和压油。
- 排量计算公式与直轴式轴向柱塞泵相同

1.2.3 变量方式- 手动控制

轴向柱塞泵上可以安装各种各样的变量控制机构来变更斜盘或斜轴相对于缸体轴线的夹角,以达到调节流量的目的。这种装置按**控制方式**分有**手动控制**、**液压控制**、**电气控制**等多种;按**控制目的**分有**恒压控制**、**恒流量控制**、**恒功率控制**等多种。

它是由手轮1带动螺杆2旋转,使变量活塞4上下移动并通过销轴5使斜盘6绕其回转中心 O ,从而改变倾角 δ 的大小,达到调节流量的目的。这种变量机构结构简单,但操纵费力,仅适用于中小功率的液压泵,如我国的SCY14-1B型轴向柱塞泵。

直接式手动控制

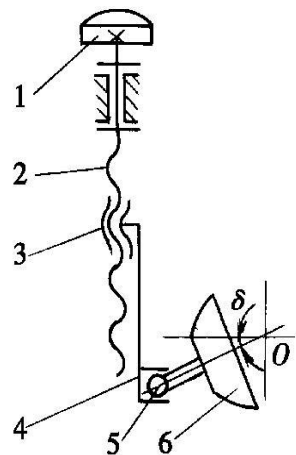


图4-18 直接式手动变量机构原理图

1—手轮 2—螺杆 3—螺母
4—变量活塞 5—销轴 6—斜盘

1.2.3 变量方式- 手动控制



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

伺服式手动控制

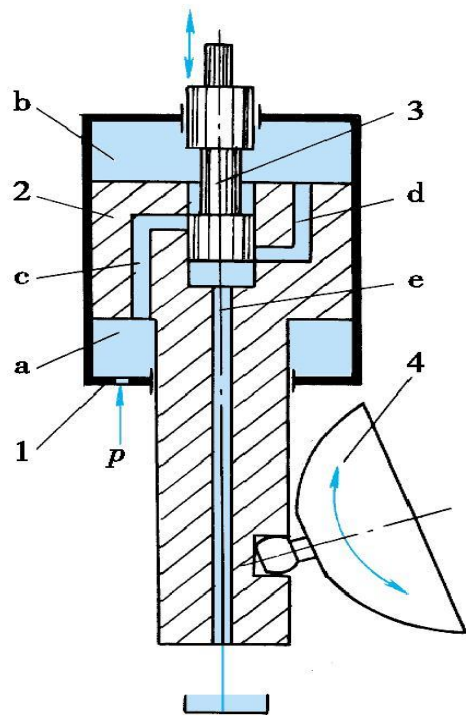


图4-19 伺服式手动变量机构

a—缸筒下腔 b—缸筒上腔 c、d、e—孔道;
1—缸筒 2—变量活塞 3—伺服阀心 4—斜盘

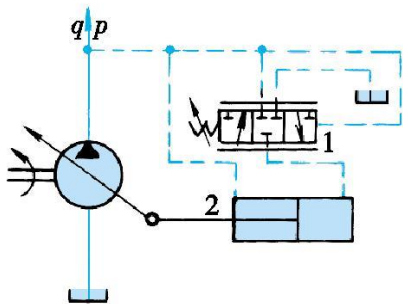
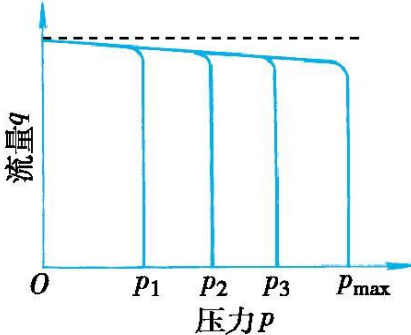
- 由缸筒1、变量活塞2和伺服阀心3组成。
- 泵上的斜盘或缸体通过适当的机构(图中为球铰)与活塞下端相连,借变量活塞的上下移动来改变其倾角。
- **变量活塞的移动量与手柄(通过伺服阀心)的位移量相等。**
- 当手柄上移时,斜盘倾角变小,泵的排量减小;反之,则泵的排量增大。这种变量机构操纵省力,适用于高压大流量液压泵。

1.2.3 变量方式-恒压控制

为了满足液压系统对油源提出的多种要求,泵的变量机构可以做使其输出量(压力、流量、功率等)按一定变化规律进行控制,使输出量完全适应系统运行的需要。——**降低系统能耗，所供即所需**

恒压、恒流量、恒功率控制

压力控制变量泵，通常称为恒压泵，变量泵所维持的泵的出口压力，能随输入信号的变化而变化。

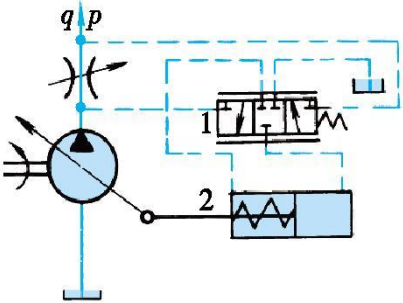
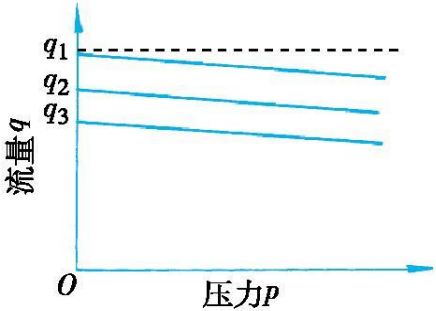
变量控制方式	原 理 图 ^①	特 性 曲 线	说 明
恒压变量			<p>调节伺服阀1左端的弹簧力, 可改变泵的工作压力值</p>

① 原理图中液压泵上的箭头代表轴向柱塞泵斜盘倾角 δ 。箭头顺时针转动, δ 变小,流量减少;反之, δ 变大,流量增加。图中:1—伺服阀心;2—变量活塞。

1.2.3 变量方式-恒流量控制

恒压、恒流量、恒功率控制

流量控制变量泵，通常也被称为恒流泵，其基本特征是泵输给系统的流量只与输入控制信号相关，而不受负载压力变化或原动机转速波动的影响。

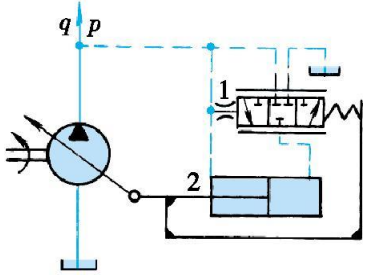
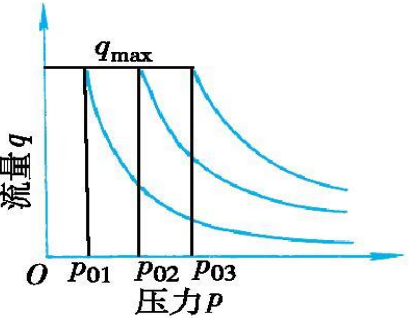
变量控制方式	原 理 图 ^①	特 性 曲 线	说 明
恒 流 量 变 量			改变节流孔口的大小， 可调整泵的输出流量值

① 图中液压泵上的箭头代表轴向柱塞泵斜盘倾角 δ 。箭头顺时针转动， δ 变小，流量减少；反之， δ 变大，流量增加。1—伺服阀心；2—变量活塞。

1.2.3 变量方式-恒流量控制

恒压、恒流量、恒功率控制、其它类型（负流量、负载敏感、电液流量匹配等）

功率控制变量泵，通常也被称为功率泵，其基本特征是根据出口压力调定泵的输出流量，使**泵的输出流量与压力的乘积近似保持不变**，因而使原动机输出功率大致保持不变，稳定在高效率区域运转。

变量控制方式	原 理 图①	特 性 曲 线	说 明
恒功率变量			改变伺服阀心1 右端弹簧的预压缩量， 可调节泵的输出功率值

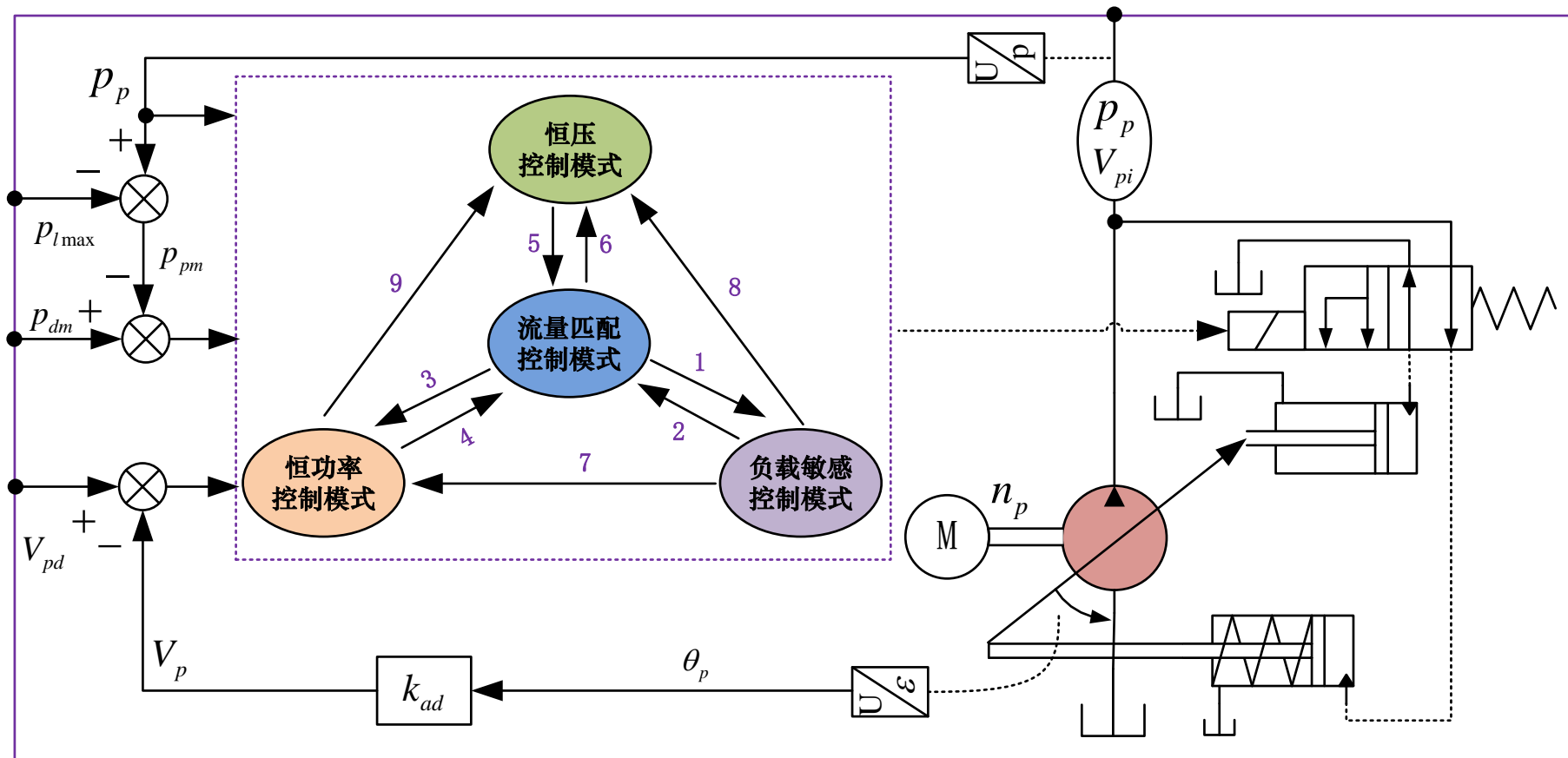
① 图中液压泵上的箭头代表轴向柱塞泵斜盘倾角 δ 。箭头顺时针转动， δ 变小，流量减少；反之， δ 变大，流量增加。1—伺服阀心；2—变量活塞。

1.2.3 变量方式-恒流量控制



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

● 电控泵多模式切换控制方法



□ 流量匹配：泵排量根据执行器需要调节

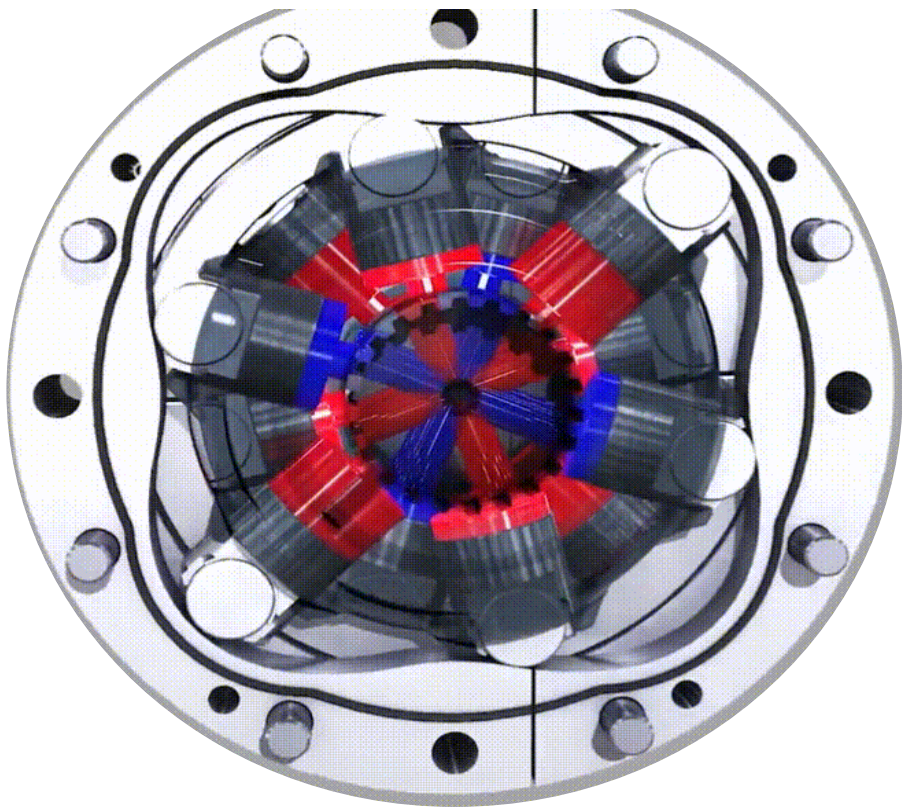
□ 负载敏感：维持压力裕度为一恒定值

□ 恒功率控制：使系统功率不超过设定值

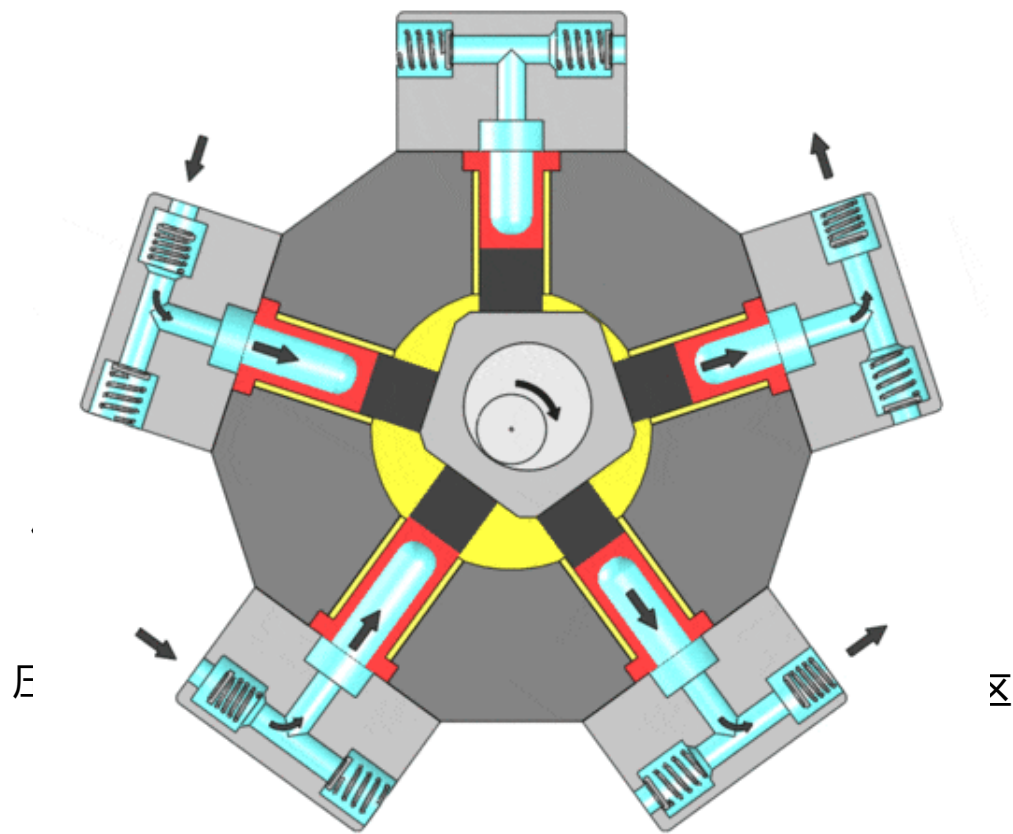
□ 恒压控制：使系统压力不超过设定值

1.3 径向柱塞泵

径向柱塞泵按配油方式不同可分为**阀配油式**、**轴配油式**和**轴/阀联合配油式**三种。下面仅简单介绍前两种。

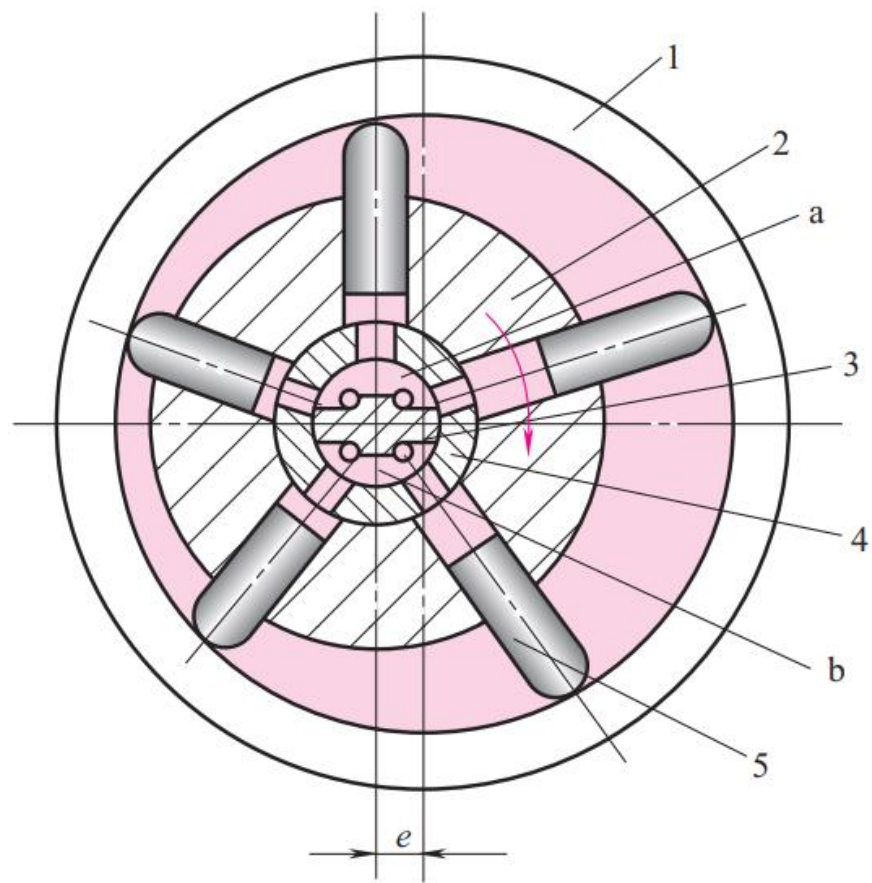


轴配油式

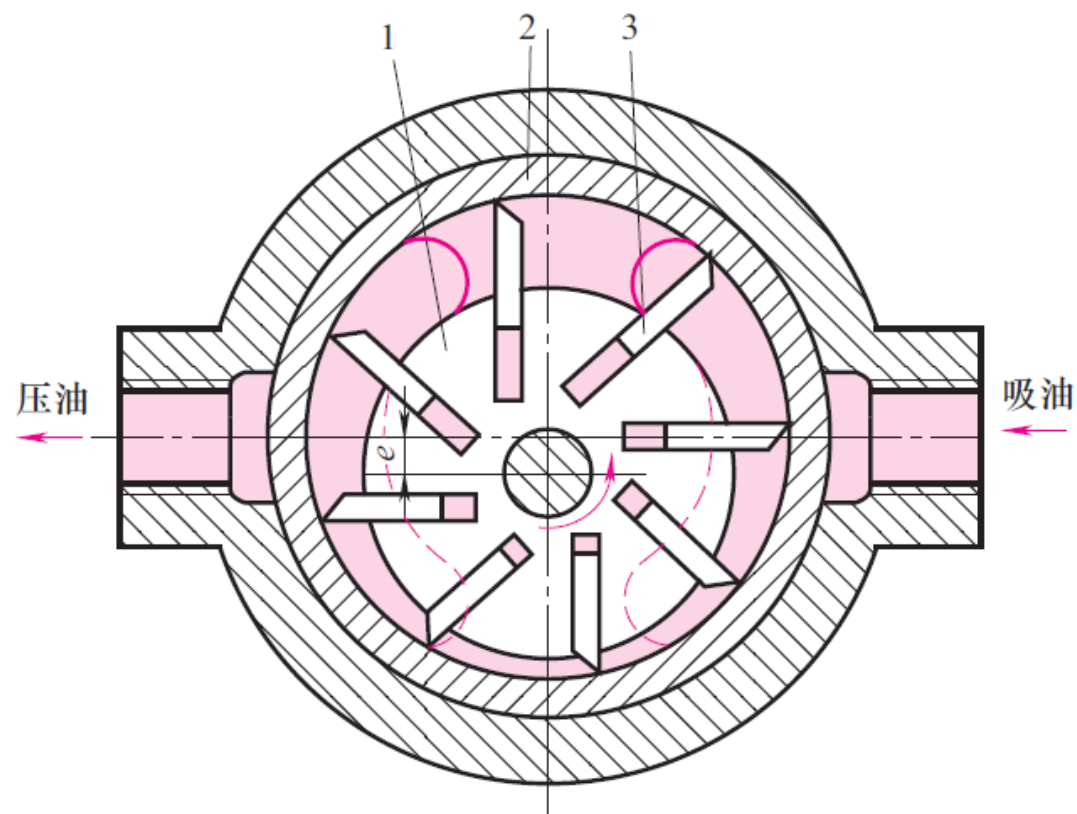


阀配油式

1.3 径向柱塞泵



径向柱塞泵

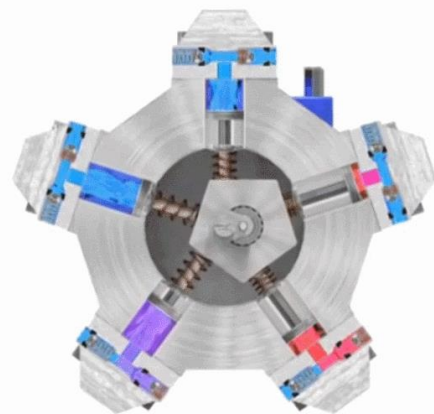


叶片泵

1.3.1 阀配油式径向柱塞泵

阀配油式径向柱塞泵

实际上,图4-1所示的便是最简单的阀配油式径向柱塞泵的工作原理图,只不过其柱塞只有一个而已。图中吸油阀5和压油阀6就是**配油阀**。为增大泵的排量、减小流量脉动,在工程产品中柱塞数有2个、4个和6个的泵。2个和4个柱塞的泵常采用**对置式布置**,它们的偏心轮的偏心相位差为 180° ;6个柱塞的泵常呈星形配置,并分成2组,相当于双联泵,泵轴上3个偏心轮的偏心相位互差 120° 。在阀配油式径向柱塞泵中通常用滑阀作吸油阀,而用座阀作压油阀,因为后者的密封性能好。



阀配油式径向柱塞泵工作演示

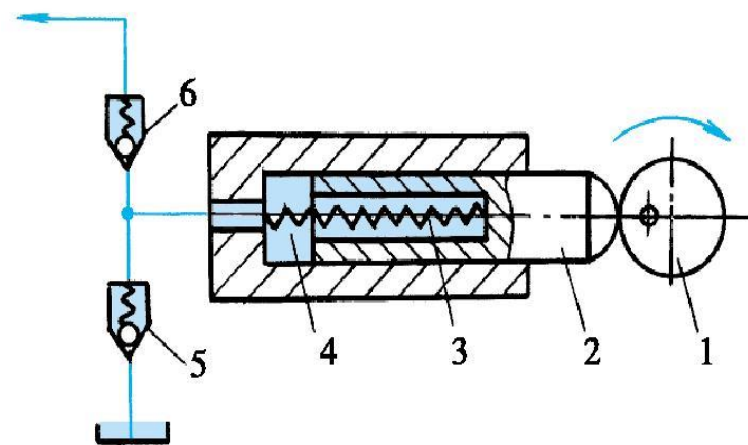


图4-1 容积式泵的工作原理
1—凸轮 2—柱塞 3—弹簧 4—密封工作腔
5—吸油阀 6—压油阀

1.3.2 轴配油式径向柱塞泵

工作原理

- 定子1、转子2(缸体)、配油轴3、衬套4和柱塞5等主要零件组成。
- 衬套紧配在转子孔内,随转子一起旋转,而**配油轴则不动**。
- 转子顺时针方向转动时,柱塞靠离心力或在低压油液的作用下,从缸孔中伸出压紧在定子的内表面上。
- 由于偏心距 e ,柱塞转到上半周时,逐渐向外伸出,缸孔内的工作容积逐渐增大, a腔吸油。

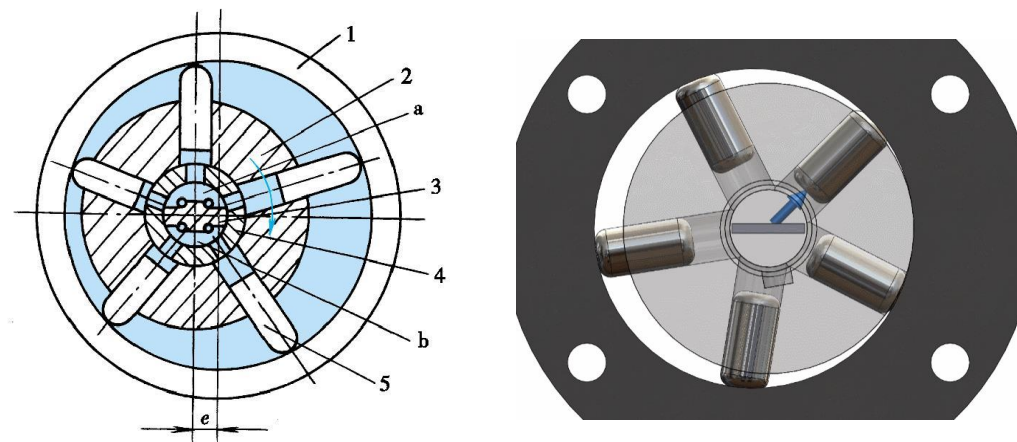


图4-20 轴配油式径向柱塞泵
1—定子 2—转子 3—配油轴
4—衬套 5—柱塞
a—吸油腔 b—压油腔

□ 径向尺寸大, 结构较复杂, **自吸能力差**。容积效率和机械效率都比较高。

1.3.2 轴配油式径向柱塞泵



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

排量计算

- 当转子和定子间的偏心距为 e 时，转子转一整转，柱塞在缸孔内的行程就为 $2e$ ，柱塞数为 z ，则泵的排量为

$$V = \frac{\pi}{4} d^2 2ez \quad (4-26)$$

- 径向柱塞泵的流量也是脉动的,情况和轴向柱塞泵类似。
- 径向柱塞泵上也可以安装**各种变量控制机构**,其情况与轴向柱塞泵相似。

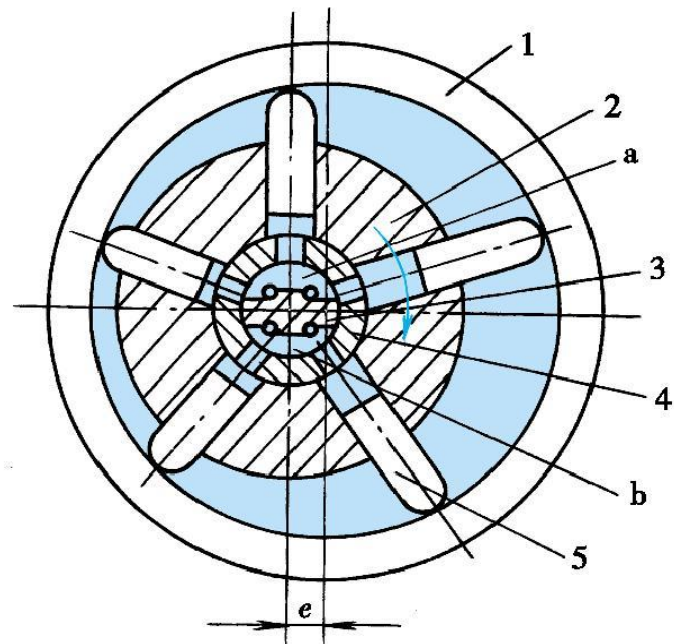
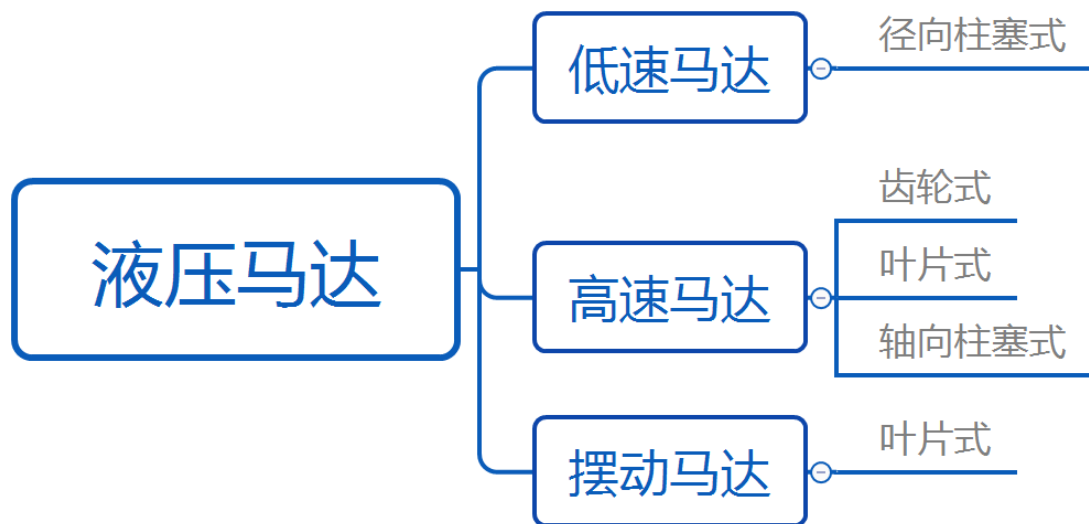


图4-20 轴配油式径向柱塞泵
1—定子 2—转子 3—配油轴
4—衬套 5—柱塞
a—吸油腔 b—压油腔

2.1 液压马达分类



液压马达是把液压能转换为机械能的元件,分为**高速小转矩**和**低速大转矩**两大类。一般认为,额定转速高于500r/min的属于高速马达;额定转速低于500r/min的属于低速马达。



液压马达与液压泵区别

- 吸入性能要求：泵有（进油口真空，进油口比出油口大），马达没有（进油口有压力油、进油口与出油口一样大）
- 转速要求：泵一般不要换向，泵的工作转速变化小，马达要有很宽的工作转速范围
- 换向要求：泵一般不要正、反转，马达需要正、反转（结构必须对称）
- 针对马达的使用性能要求：起动性能（起动转矩和起动机械效率）、制动性能（设计制动装置）和最低稳定转速马达具有较大的驱动扭矩和脉动
- 液压泵一般恒速运转，而液压马达的专转速是大范围变化的。

2.2 液压马达的主要参数性能



1、压力 P

工作压力：指马达输入油液的实际压力，大小取决马达的负载；

额定压力：按试验标准规定，能使马达连续正常运转的最高压力称额定压力。

2、排量 V

指在不考虑泄漏的情况下，马达每转一周由密封容腔几何尺寸变化计算得到的液体体积。

3、流量 q

(1)理论流量 q_{Mt}

理论流量是在不考虑泄漏的情况下，马达在单位时间内所需输入液体的体积。

(2)实际流量 q_M

$$q_M = q_{Mt} + \Delta q$$

实际流量是在考虑泄漏的情况下，马达在单位时间内所需输入液体的体积。

4、功率

(1) 输入功率 P_{Mi}

$$P_{M \rightarrow i} = \Delta p q_M \quad \Delta p \text{ 为马达的进出口的压差。}$$

(2) 输出功率 P_{Mo}

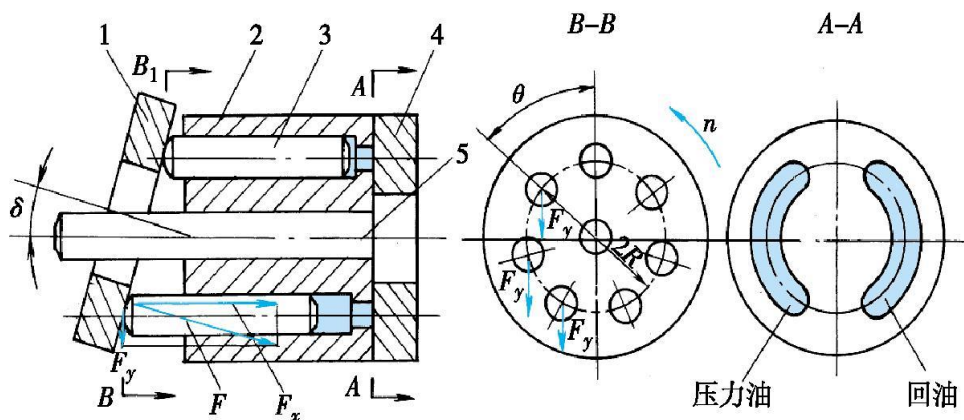
$$P_{M \rightarrow o} = T_M \omega = T_M \times 2\pi n$$

2.3 液压马达工作原理



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

轴向柱塞式液压马达——高速马达



斜盘1和配油盘4固定不动,柱塞3可在缸体2的孔内移动,斜盘中心线与缸体中心线相交一个倾角 δ 。

斜盘对柱塞的反作用力 F 可分解为两个分力,轴向分力 F_x 和作用在柱塞上的液压力平衡,垂直分力 F_y 使缸体产生转矩,带动马达轴5转动。

设第 i 个柱塞和缸体的垂直中心线夹角为 θ ,则在柱塞上产生的转矩为

$$T = \sum F_x R \tan \delta \sin \theta$$

式中 R ——柱塞在缸体中的分布圆半径。

$$T_i = F_y r = F_y R \sin \theta = F_x R \tan \delta \sin \theta$$

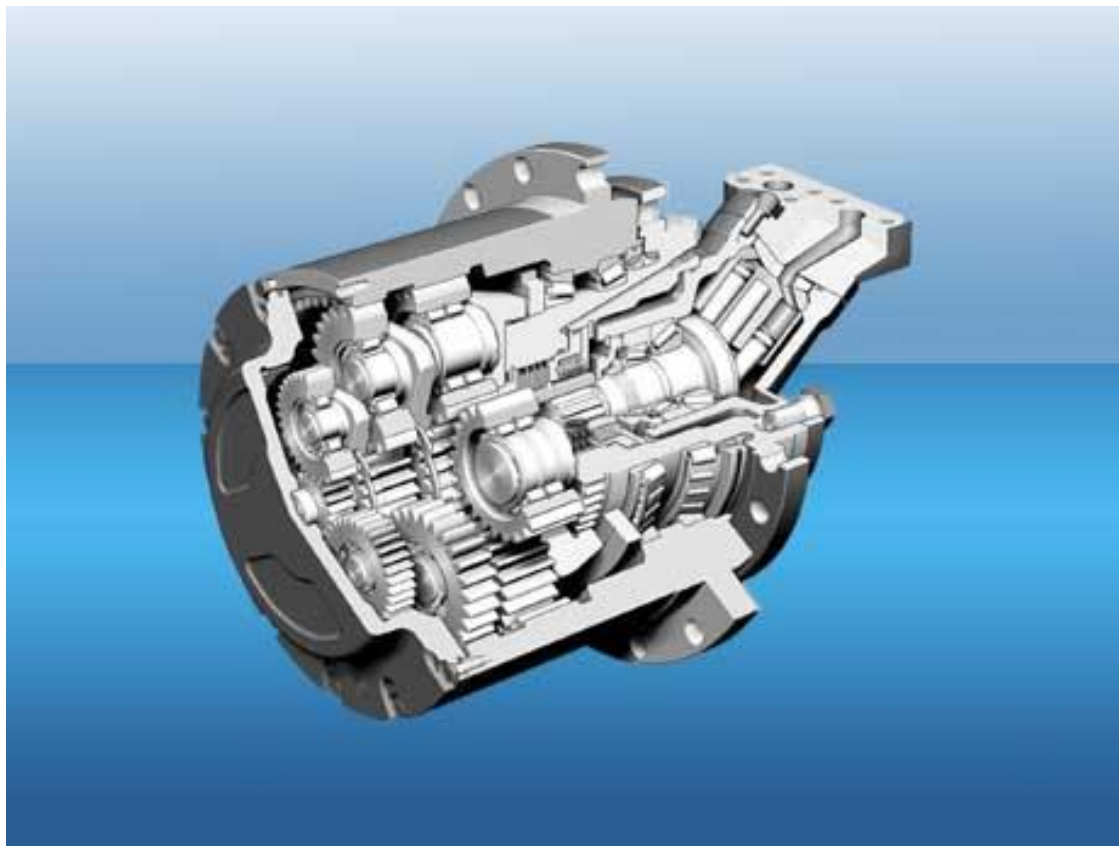
图4-21 轴向柱塞式液压马达的工作原理
1—斜盘 2—缸体 3—柱塞 4—配油盘
5—马达轴

2.3 液压马达工作原理



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

轴向柱塞式液压马达



高速液压马达+减速器

2.3 液压马达工作原理



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

径向柱塞式液压马达——低速马达

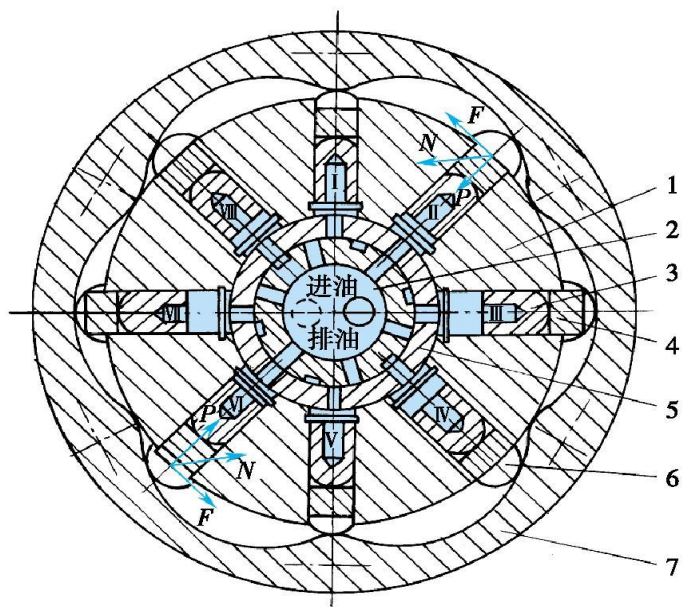


图4-22 多作用内曲线径向柱塞液压马达结构原理

1—缸体 2—配油轴 3—柱塞 4—横梁
5—衬套 6—滚轮 7—定子

马达的配油轴2是固定的,其上有进油口和排油口。压力油经配油窗口穿过衬套5进入缸体1的柱塞孔中,并作用于柱塞3的底部,柱塞3与横梁4之间无刚性连接,在液压力的作用下,柱塞3的顶部球面与横梁4的底部相接触,从而使横梁4两端的滚轮6压向定子7的内壁。定子内壁在与滚轮接触处的反作用力N的周向分力F对缸体产生转矩,使缸体及与其刚性连接的主轴转动;而径向分力P则与柱塞底部的液压力相平衡。由于**定子内壁由多段曲面构成,滚轮每经过一段曲面,柱塞往复运动一次,也即马达作用一次,故称多作用式。**

多作用内曲线径向柱塞液压马达的排量为 $V = \frac{\pi}{4} d^2 l n z$

式中 d 、 l ——柱塞直径和行程; n ——定子内壁曲面段数; z ——柱塞数

这种液压马达的**优点**是输出转矩大,转速低,平稳性好。

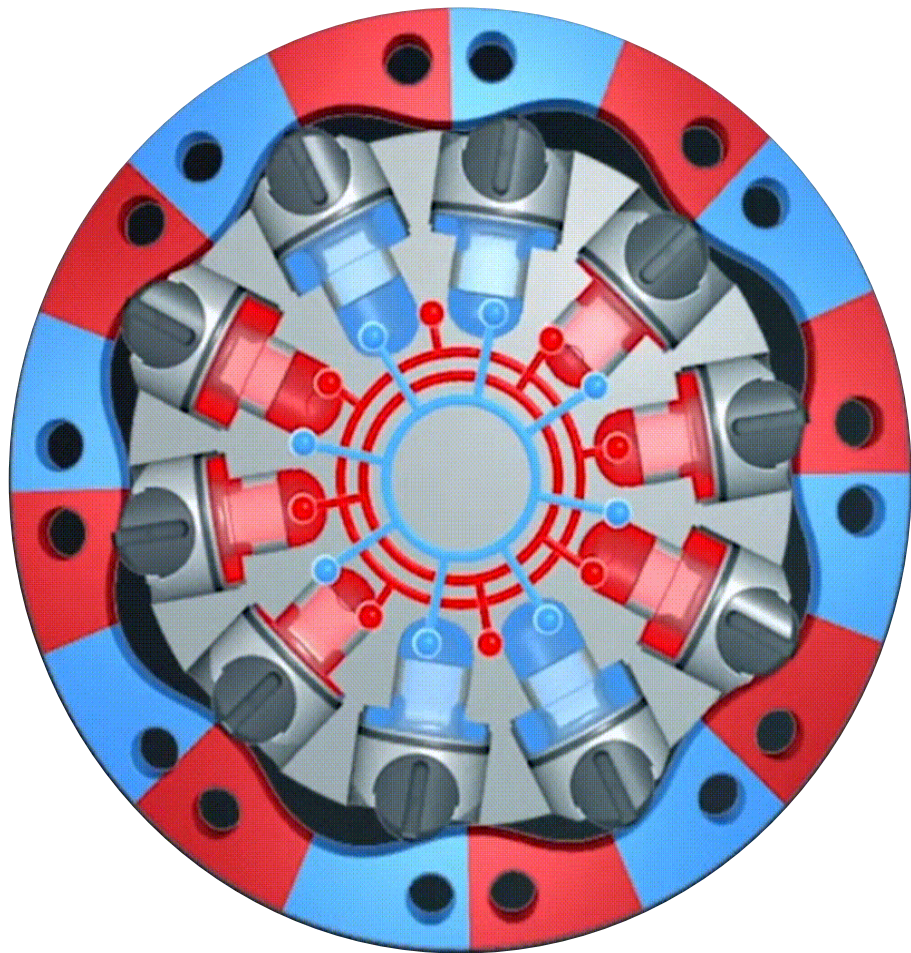
其**缺点**是配油轴磨损后不能补偿,使效率下降。

2.3 液压马达工作原理

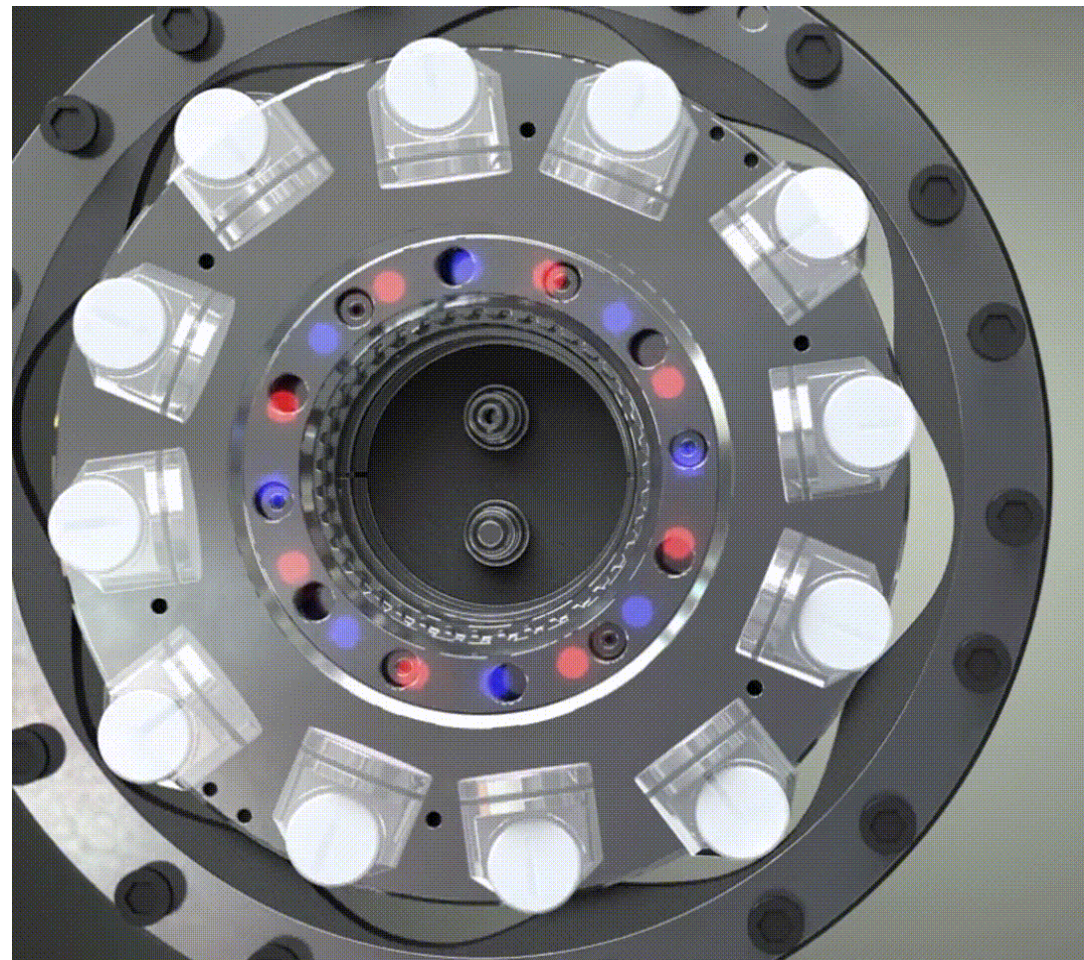


浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

径向柱塞式液压马达——低速马达



轴转马达

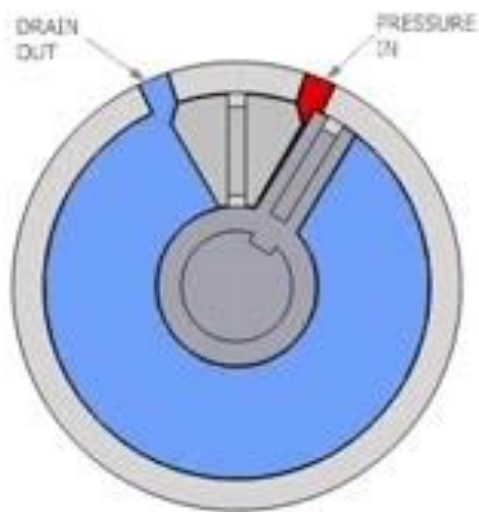


壳转马达

2.4 摆动液压马达



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY



MakeAGIF.com

图4-23 摆动液压马达

a)单叶片式 b)双叶片式

1—叶片 2—分隔片 3—缸筒

□ 摆动液压马达是**实现往复摆动的执行元件**

□ 输入为压力和流量，输出为转矩和角速度

□ **摆动液压马达的结构**比连续旋转的液压马达结构简单

□ 叶片式摆动液压马达使用得较多

3.1 气穴现象



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

□ 液压泵在吸油过程中，吸油腔中的绝对压力会低于大气压。

➤ 液压泵离油面很高

➤ 过滤器和管道阻力大

➤ 油液的粘度过大

□ 液压泵吸油腔中的压力就很容易低于油液的空气分离压，

从而出现**气穴现象**；

□ 产生噪声，引起振动，使泵的零件腐蚀损坏。

3.1 气穴现象



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

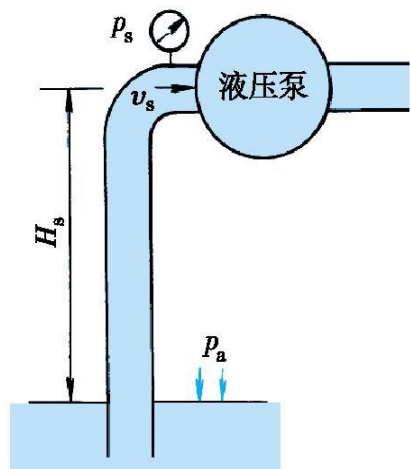
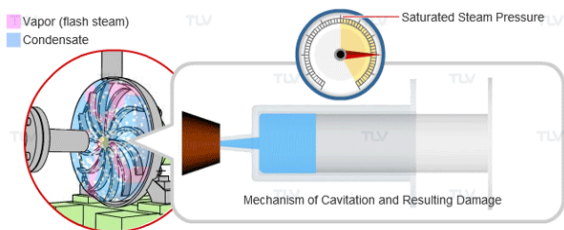


图4-24 液压泵的吸入管路



按伯努利方程,泵入口处的能量为(取动能修正系数 $\alpha=1$)

$$\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} = \frac{p_a}{\rho g} - H_s - \sum \zeta \frac{v_s^2}{2g} \quad (4-34)$$

式中 p_a ——大气绝对压力; H_s ——吸入高度; p_s ——泵吸入口绝对压力; v_s ——泵吸入口处的流速; $\sum \zeta \frac{v_s^2}{2g}$ ——吸入管道内的总损失。

则式(4-34)中 $\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g}$ 必须大于 $\frac{p_g}{\rho g}$ 才不会产生气穴

定义有效吸入压力头NSPH为 $\frac{p_s}{\rho g} + \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p_g}{\rho g} = \text{NSPH} \quad (4-35)$

该值表征了液压泵产生气穴的倾向。如果在泵内由于油液加速或其他损失引起的压力降为 Δp ,且在 $\text{NSPH} = \frac{\Delta p}{\rho g}$ 时泵内最低压力达到 p_g ,即产生气穴现象。

4 液压泵的噪声



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

原因

- 泵的流量脉动引起压力脉动，造成泵振动和噪声的动力源。
- 吸油容积突然和压油腔接通，会产生流量和压力的突变而产生噪声；
- 泵转动部分不平衡、轴承振动等引起的噪声；
- 管道、支架等机械连接部分因谐振而产生的噪声；
- 气穴现象；
- 泵内流道具有突然扩大或收缩、急拐弯、通道面积过小等而导致油液湍流、旋涡而产生噪声。

措施

- 吸收泵的流量和压力脉动，在泵的出口处安装蓄能器或消声器；
- 消除泵内液压急剧变化，如在配油盘吸、压油窗口开三角形阻尼槽；
- 装在油箱上的电动机和泵使用橡胶垫减振；
- 安装时电动机轴和泵轴的同轴度要好；
- 要采用弹性联轴器；或采用泵电动机组件；
- 防止气穴现象和油中掺混空气现象；
- 压油管的某一段采用橡胶软管，对泵和管路的连接进行隔振。

5.1 液压泵的选用原则

根据所要求的工作情况合理选择液压泵

性能	外啮合齿轮泵	双作用叶片泵	限压式变量叶片泵	径向柱塞泵	轴向柱塞泵	螺杆泵
输出压力	低压、中高压	中压、中高压	中压、中高压	高压、超高压	高压、超高压	低压、中高压 超高压
流量调节	不能	不能	能	能	能	不能
效率	低	较高	较高	高	高	较高
输出流量脉动	很大	很小	一般	一般	一般	最小
自吸特性	好	较差	较差	差	差	好
对油的污染敏感性	不敏感	较敏感	较敏感	很敏感	很敏感	不敏感
噪声	大	小	较大	大	大	最小

表4-2 液压系统常用液压泵的性能比较

- 一般在负载小、功率小的机械设备中,用齿轮泵和双作用叶片泵;
- 精度较高的机械设备(例如磨床)可用螺杆泵和双作用叶片泵;
- 负载较大并有快速和慢速行程的机械设备(例如组合机床)可用限压式变量叶片泵;
- 负载大、功率大的机械设备可使用柱塞泵;
- 机械设备的辅助装置,如送料、夹紧等要求不太高的地方,可使用价廉的齿轮泵。

5.2 液压泵的参数选用



浙江大学
ZHEJIANG UNIVERSITY

1) 液压泵的额定压力

液压泵的工作压力 p_p 应根据**执行元件所达到的最高工作压力**来 p_{\max} 确定：

$$p_p \geq K \cdot p_{\max}$$

K -考虑管道压力损失增设的系数，一般为1.1 ~ 1.5

所选取的泵的额定压力应大于或等于 p_p 。

2) 液压泵的额定流量

液压泵的输出流量 q_p 应满足同时工作的**执行元件所需的最大流量之和** Σq_{\max} ：

$$q_p \geq K \cdot \Sigma q_{\max}$$

K -系统泄漏系数，一般为1.1 ~ 1.3

所选取的泵的额定流量应等于或稍大于 q_p 。