



# 液压传动及控制I

## — 液压阀（上）

### 方向、压力、流量阀

浙江大学机械电子控制工程系  
流体动力与机电系统国家重点实验室

2021. 12



- 液压阀概述
- 液压阀的共性问题
- 方向控制阀
- 压力控制阀
- 流量控制阀



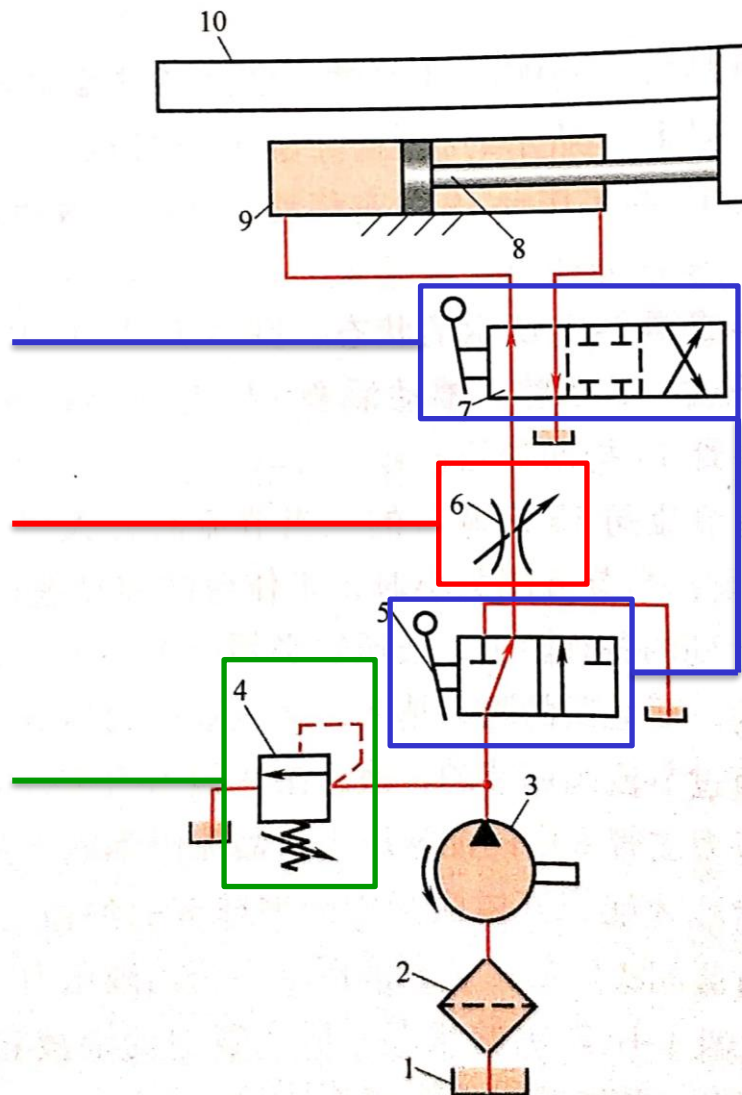
# 液壓閥概述

## □ 機床工作臺液壓系統中的液壓閥

方向閥：利用通流通道的  
更換控制流體的流動方向

流量閥：利用通流截面的  
節流作用控制系統的流量

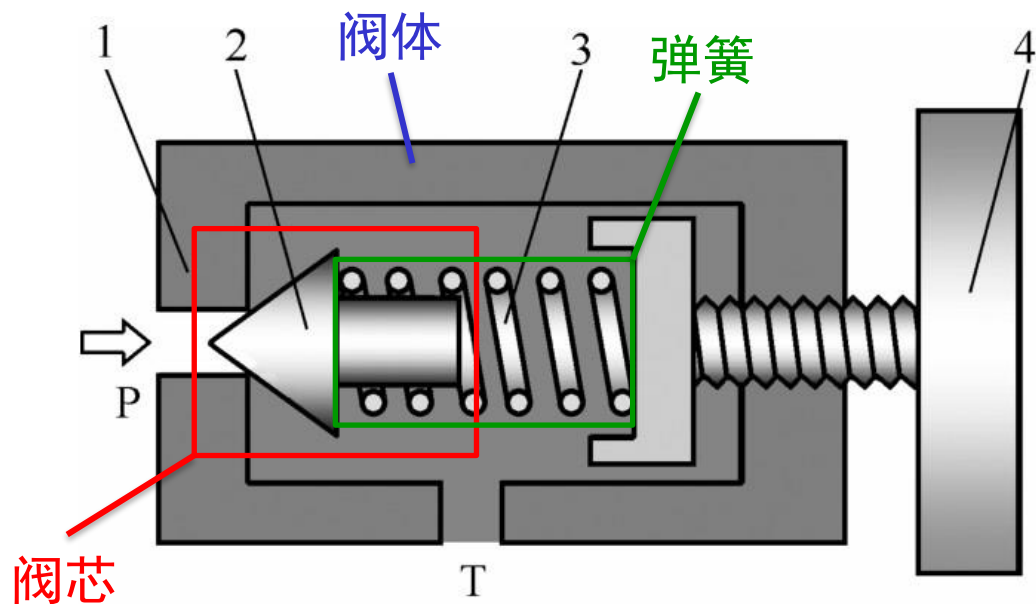
壓力閥：利用通流截面的  
節流作用控制系統的壓力



# 液壓閥概述

## □ 共同點

- 結構：閥體，閥芯，驅使閥芯動作的元、部件
- 工作原理：閥的開口大小，閥進、出口間的壓差以及流過閥的流量之間的關係都符合孔口流量公式



液壓閥結構

$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

$C_d$ ——流量係數

$A$ ——閥口通流面積

$\rho$ ——液體密度

$\Delta p$ ——閥口前後壓差

# 液压阀概述

## □ 分类

分类方法	种类	详细分类
按机能分类	压力控制阀	溢流阀、减压阀、顺序阀、卸荷阀、平衡阀、比例压力控制阀、缓冲阀、仪表截止阀、限压切断阀、压力继电器等
	流量控制阀	节流阀、单向节流阀、调速阀、分流阀、集流阀、比例流量控制阀等
	方向控制阀	单向阀、液控单向阀、换向阀、行程减速阀、充液阀、梭阀、比例方向控制阀等
按结构分类	滑阀	圆柱滑阀、旋转阀、平板滑阀
	座阀	锥阀、球阀
	射流管阀	
	喷嘴挡板阀	单喷嘴挡板阀、双喷嘴挡板阀
按操纵方法分类	手动阀	手把及手轮、踏板、杠杆
	机/液/气动阀	挡块及碰块、弹簧、液压、气动
	电动阀	普通/比例电磁铁控制、力马达/力矩马达/步进电动机/伺服电动机控制

# 液压阀概述

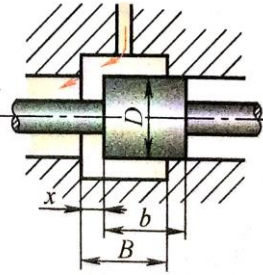
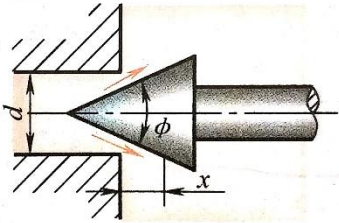
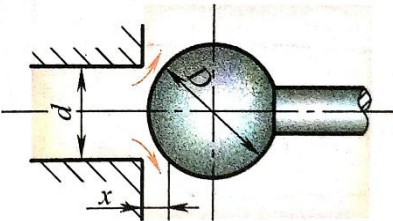
## □ 分类

分类方法	种类	详细分类
按连接方式分类	管式连接	螺纹式连接、法兰式连接
	板式/叠加式连接	单层连接板式、双层连接板式、油路块式、叠加阀、多路阀
	插装式连接	螺纹式插装（二、三、四通插装阀）、盖板式插装（二通插装阀）
按控制方式分类	比例阀	电液比例压力阀、电液比例流量阀、电液比例换向阀、电液比例复合阀、电液比例多路阀
	伺服阀	单级电液流量伺服阀、两级（喷嘴挡板式、滑阀式）电液流量伺服阀、三级电液流量伺服阀、电液压力伺服阀、气液伺服阀、机液伺服阀
	数字控制阀	数字控制压力阀、数字控制流量阀与方向阀
按输出参数可调节性分类	开关控制阀	方向控制阀、顺序阀、限速切断阀、逻辑阀
	输出参数连续可调的阀	溢流阀、减压阀、节流阀、调速阀、各类电液控制阀（比例阀、伺服阀）



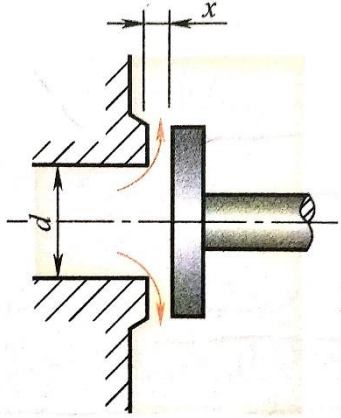
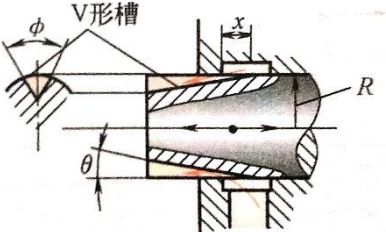
# 液压阀的共性问题

## □ 常用阀口的形式及其通流截面的计算公式

类型	阀口形式	通流截面计算公式
圆柱滑阀式		$A = \pi D x$
锥阀式		$A = \pi d x \sin \frac{\phi}{2} \left( 1 - \frac{x}{2d} \sin \phi \right)$
球阀式		$A = \pi d x \left( \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2} + \frac{x}{2} \right) / \sqrt{\left( \frac{d}{2} \right)^2 + \left( \sqrt{\left( \frac{D}{2} \right)^2 - \left( \frac{d}{2} \right)^2} + x \right)^2}$

# 液压阀的共性问题

## □ 常用阀口的形式及其通流截面的计算公式

类型	阀口形式	通流截面计算公式
截止阀式		$A = \pi dx$
轴向三角槽式		$A = n \frac{\phi}{2} x^2 \tan 2\theta$ $n$ 为槽数



- 

### 某溢流阀油路原理图

# 稳态液动力

- 产生机理：阀芯移动完毕、开口固定之后，液流流过阀口时因动量变化而作用在阀芯上的力
- 计算公式：
$$F_{bs} = 2C_d C_v w \sqrt{c_r^2 + x_v^2} \Delta p \cos \phi$$
  
 $C_d$ ——流量系数， $C_v$ ——速度系数， $w$ ——阀口周向长度， $\Delta p$ ——阀口前后压差
- 影响：相当于复位力，使滑阀工作趋于稳定；加大操纵滑阀所需的力

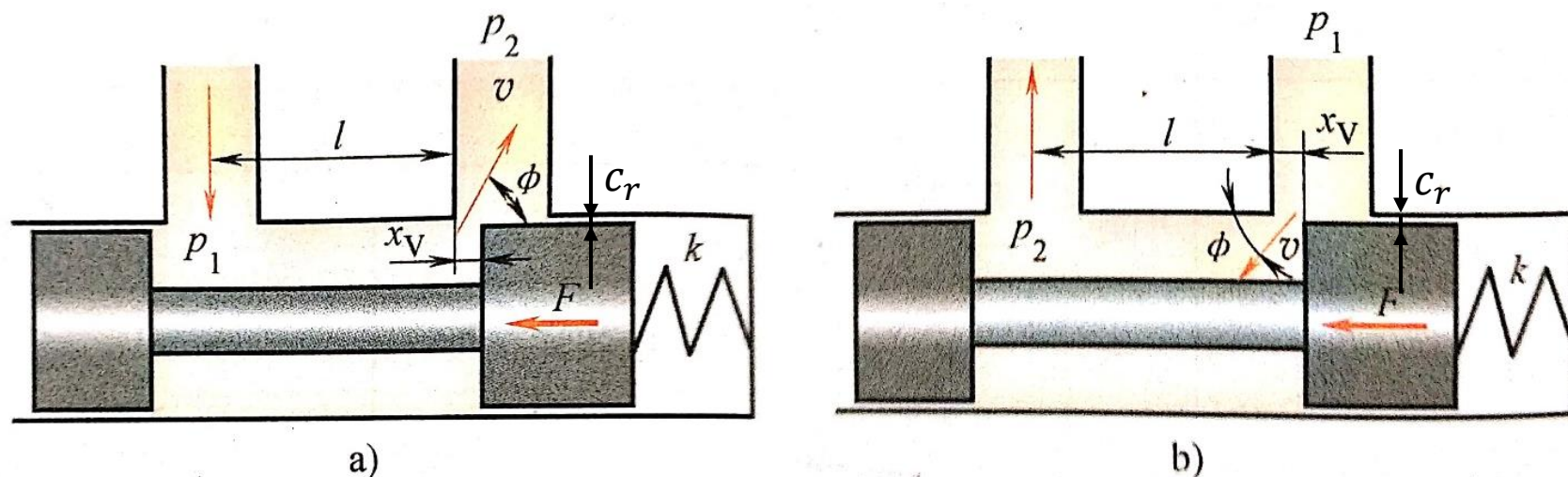
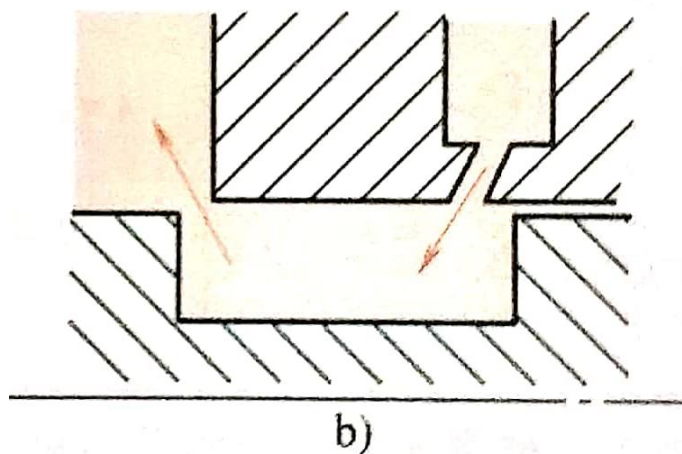
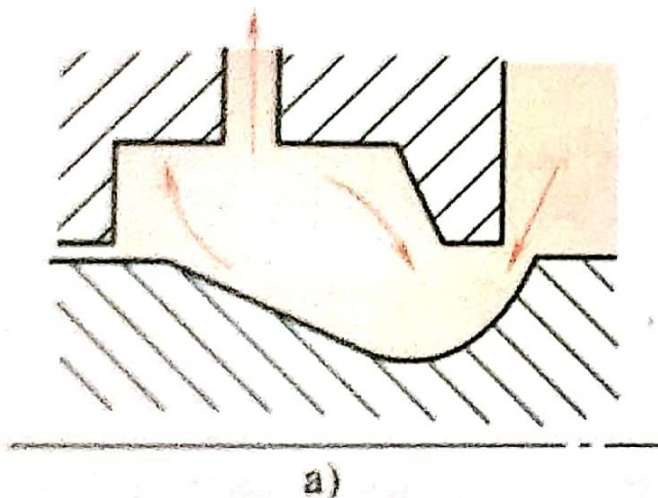


图6-1 滑阀的稳态液动力  
 a) 液流流出阀口    b) 液流流入阀口

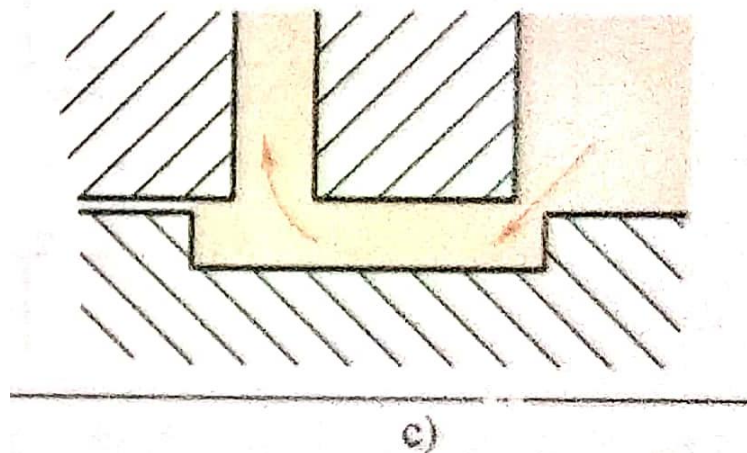
# 稳态液动力

- 补偿办法

采用特种形状的阀腔



在阀套上开斜孔，使流出和流入阀腔液体的动量互相抵消



液流产生压降，通过不平衡液压力抵消轴向液动力

图6-2 稳态液动力的补偿办法

# 瞬态液动力

- 产生机理：滑阀在移动过程中液流因轴向速度变化而作用在阀芯上的力
- 只与阀芯移动速度有关，与阀口开度本身无关
- 计算公式：
$$F_{bt} = -C_d w l \sqrt{2\rho \Delta p} \frac{dx_v}{dt}$$

$C_d$ ——流量系数， $w$ ——阀口周向长度， $\rho$ ——液体密度， $\Delta p$ ——阀口前后压差

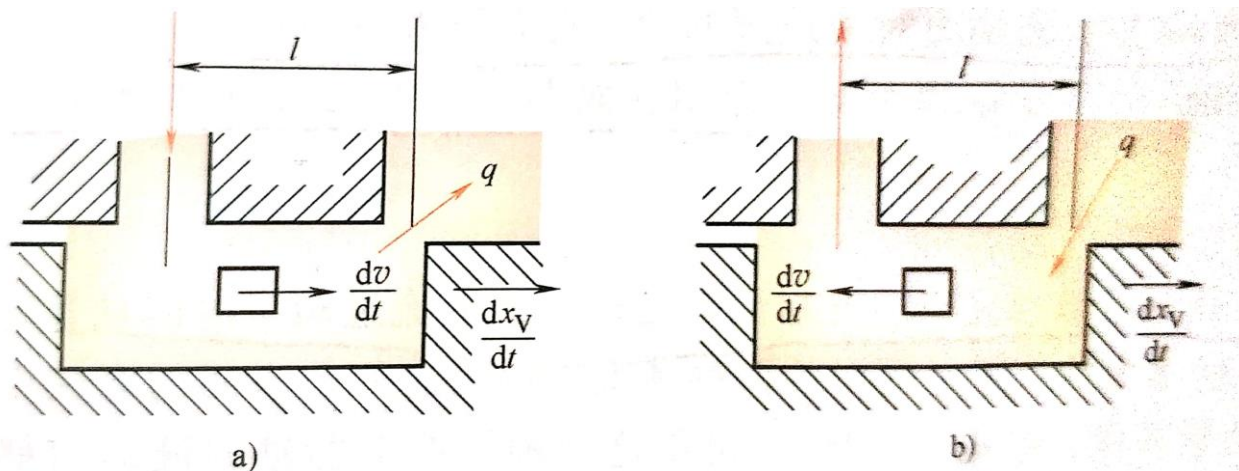


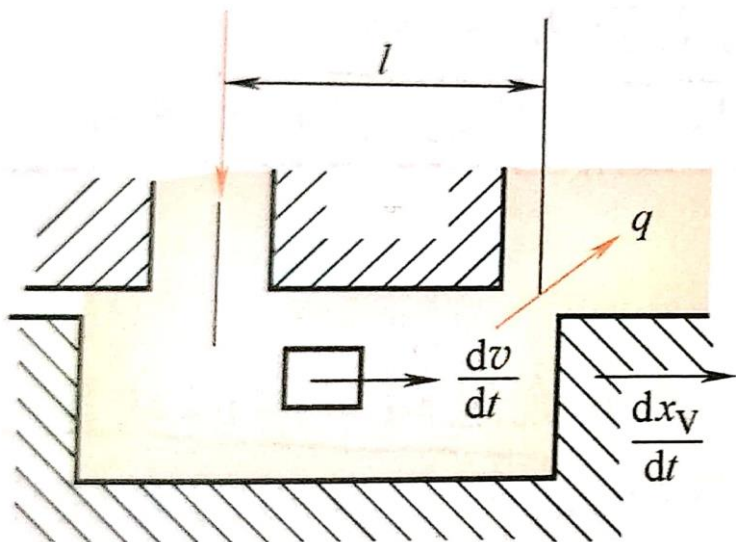
图6-3 瞬态液动力

a) 开口加大，液流流出阀口    b) 开口加大，液流流入阀口



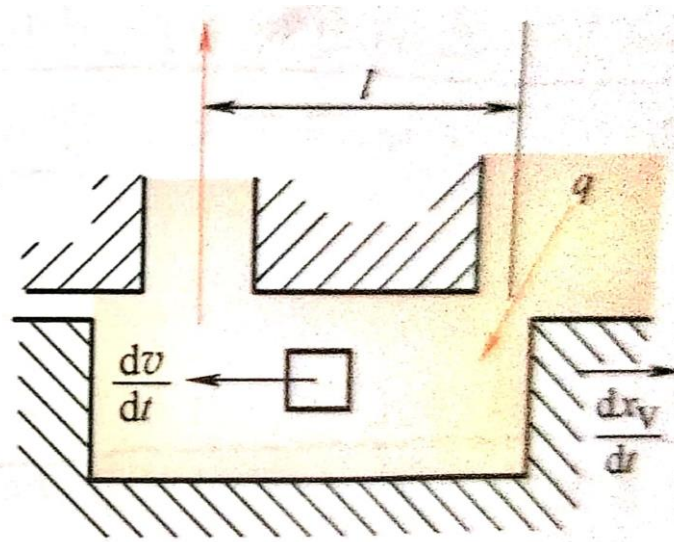
# 瞬态液动力

- 方向：视油液是**流入**还是**流出**阀腔而定



a)

瞬态液动力作用方向与阀芯移动方向**相反**，**阻止**阀芯移动，相当于**阻尼力**， $l$ 称为“**正阻尼长度**”



b)

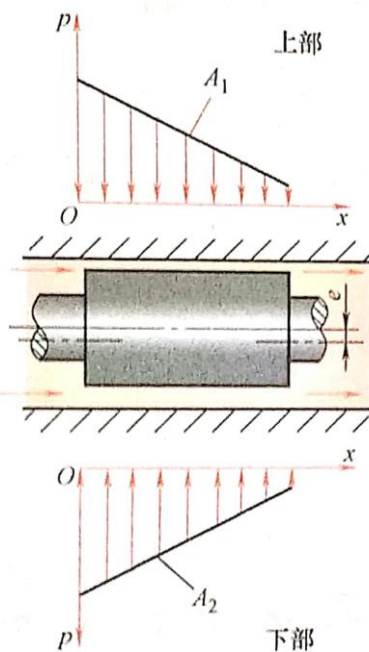
瞬态液动力作用方向与阀芯移动方向**相同**，**帮助**阀芯移动，相当于**负阻尼力**， $l$ 称为“**负阻尼长度**”

图6-3 瞬态液动力

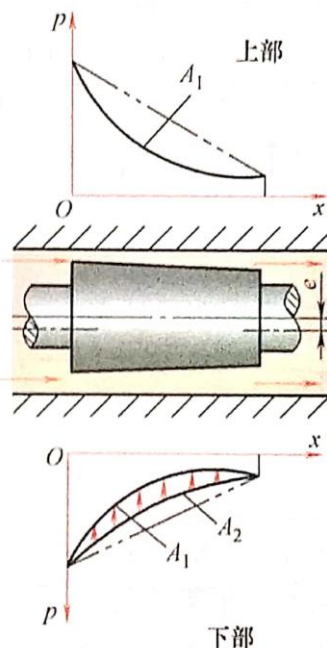
a) 开口加大，液流流出阀口    b) 开口加大，液流流入阀口

# 卡紧力

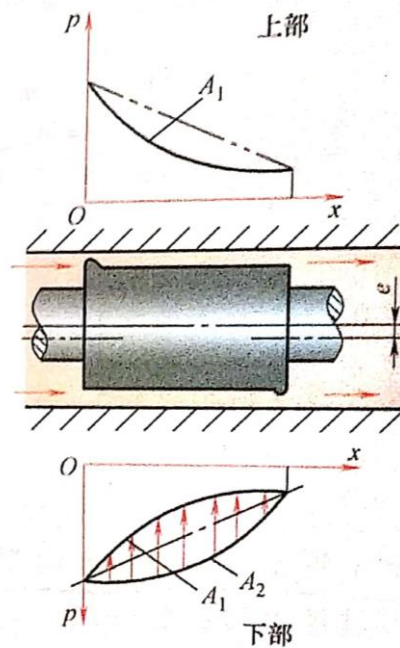
- **液压卡紧现象**：当阀芯停止运动一段时间后，存在大到几百牛的阻力，使阀芯重新移动十分费力
- **形成原因**：滑阀副几何形状误差和同轴度变化引起的**径向不平衡液压力**，即**液压卡紧力**



无锥度，轴线平行，有偏心  
无径向不平衡力



有倒锥，轴线平行，有偏心  
有径向不平衡力



阀芯表面有凸起，有偏心  
有径向不平衡力

图6-4 滑阀上的径向力



# 卡紧力

• 计算公式：

$$F = \frac{2\pi l r_1 \Delta r \Delta p}{4e} \left[ \frac{1}{\sqrt{1 - \left( \frac{2e}{2h_0 + \Delta r} \right)^2}} - 1 \right]$$

$\Delta p = p_1 - p_2$ ,  $\Delta r = r_1 - r_2$ ,  $h_0$ ——阀芯与阀套同心时大端的缝隙值

• 当阀芯大端接触阀套,  $e = h_0$ ,  $D = 2r_1$ ,

$$\frac{F}{lD\Delta p} \approx \frac{\pi}{4} \left( \frac{\Delta r}{h_0} \right) \left[ \frac{2 + \frac{\Delta r}{h_0}}{\sqrt{4 \frac{\Delta r}{h_0} + \left( \frac{\Delta r}{h_0} \right)^2}} - 1 \right]$$

• 当  $\Delta r/h_0 = 0.9$  时有极值：

$$F_{max} \leq 0.27 l D \Delta p$$

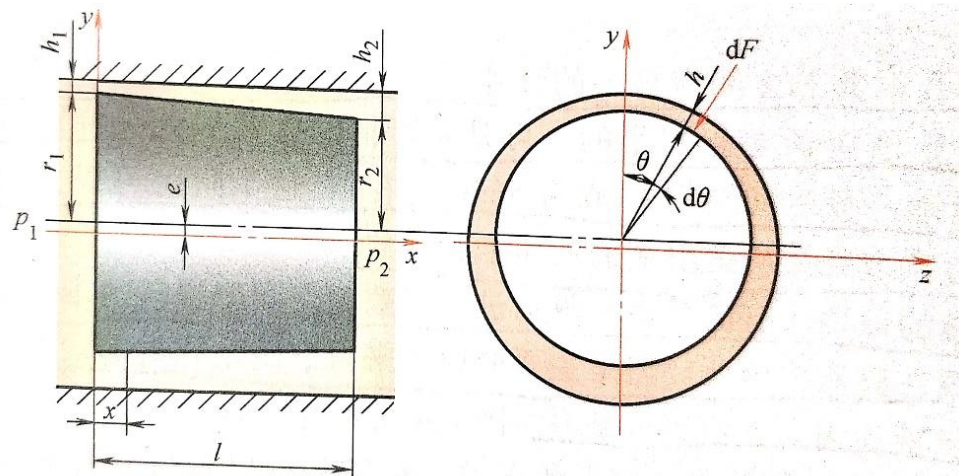


图6-5 径向不平衡力计算图

# 卡紧力

## □ 减小卡紧力的措施

- 提高阀的加工和装配精度，避免出现偏心
- 在阀芯台肩上开出平衡径向力的均压槽
- 使阀芯或阀套在轴向或圆周方向上产生高频小振幅的振动或摆动
- 精细过滤油液

$$F_{max} \leq 0.27lD\Delta p$$

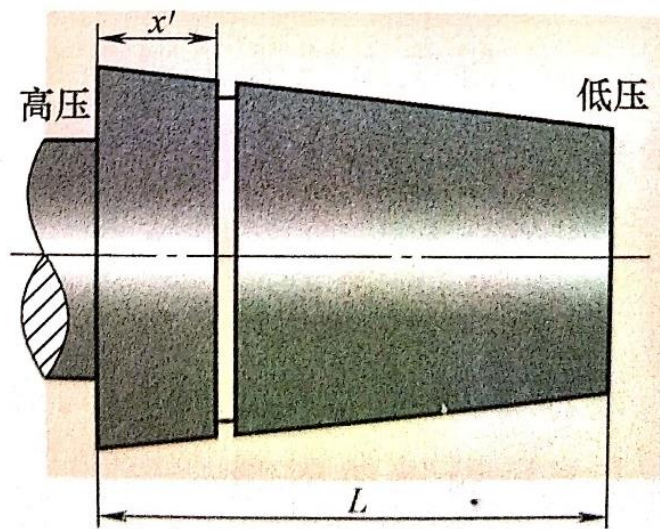
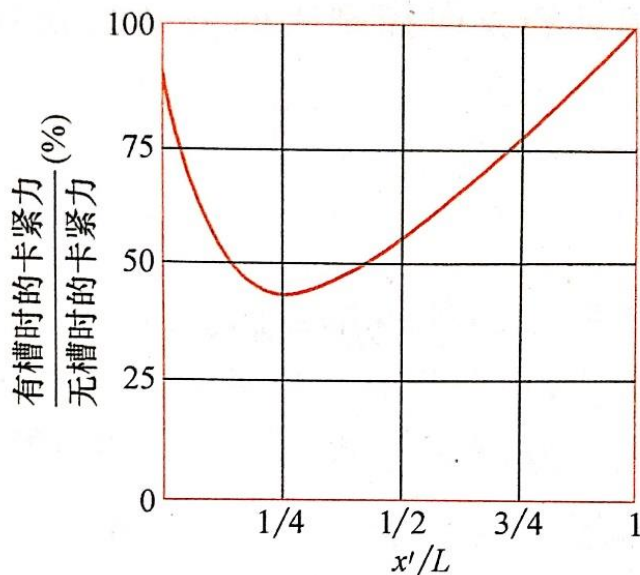


图6-6 均压槽的位置

# 阀的泄漏特性

- 同心环形缝隙流量公式:

$$q_0 = \frac{\pi d h^3}{12 \mu l} \Delta p + \frac{\pi d h}{2} u_0$$

- 泄漏的影响:

- 不利: 降低容积效率
- 有利: 增大阻尼, 提高稳定性

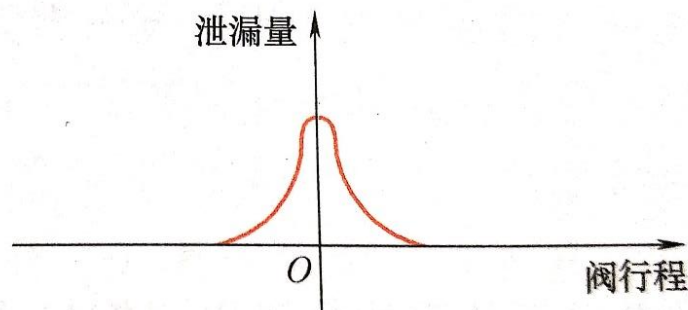
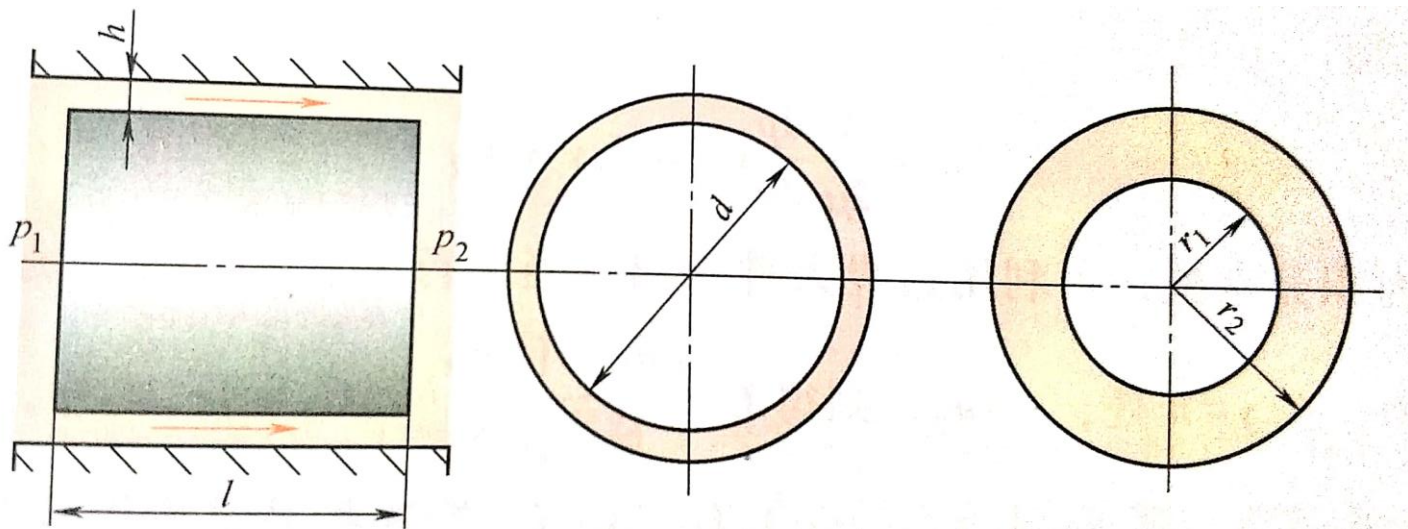


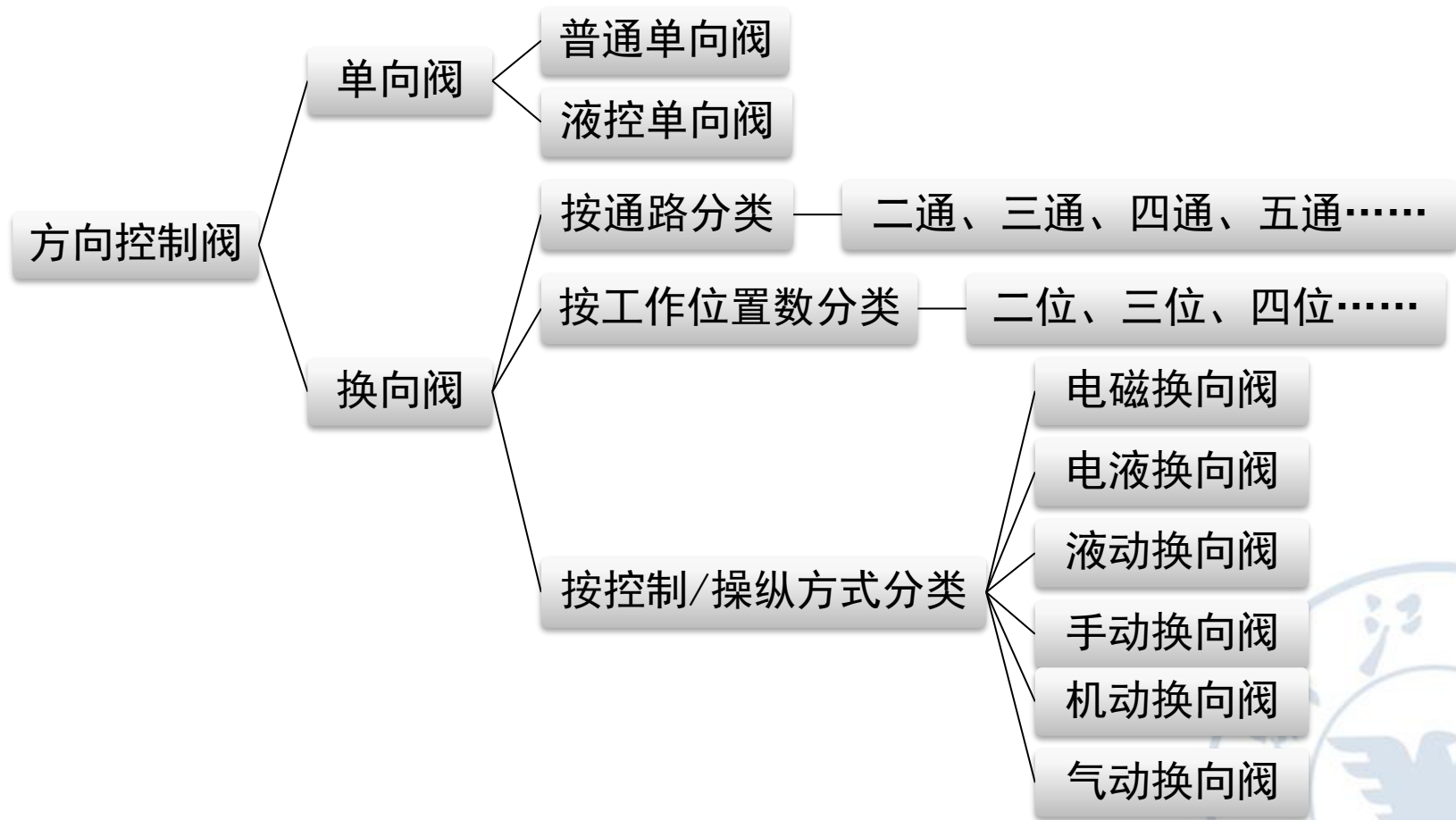
图6-7 滑阀的泄漏量曲线



同心环形缝隙间的液流

# 方向控制阀

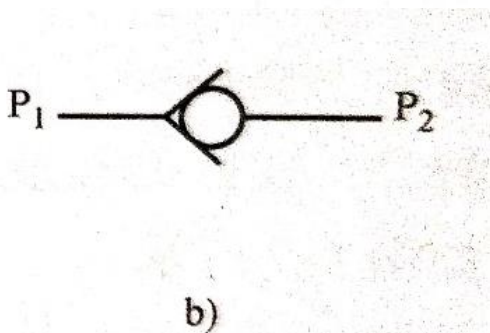
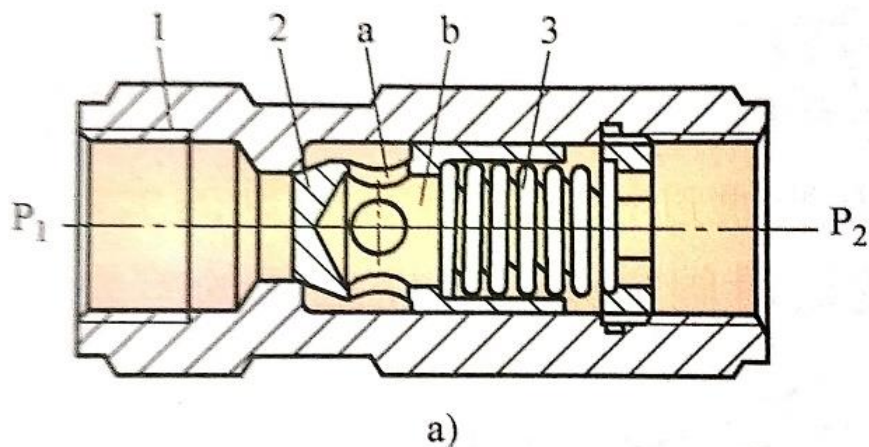
## □ 常见方向控制阀的类型



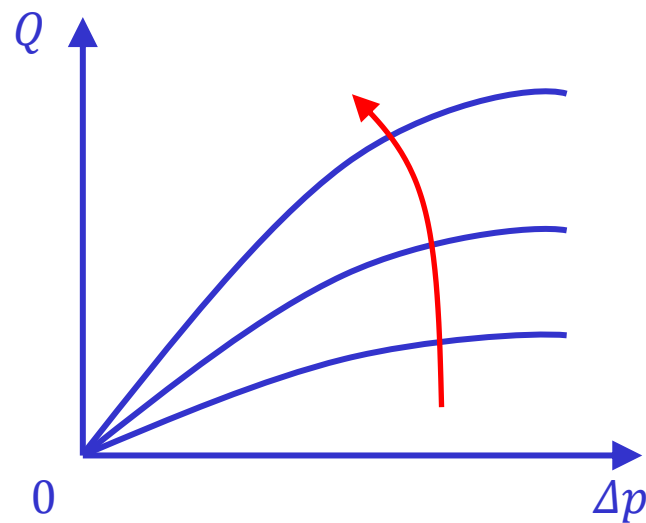


# 单向阀

- 作用：使油液只能沿一个方向流动



$$Q = C_d A \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p}$$

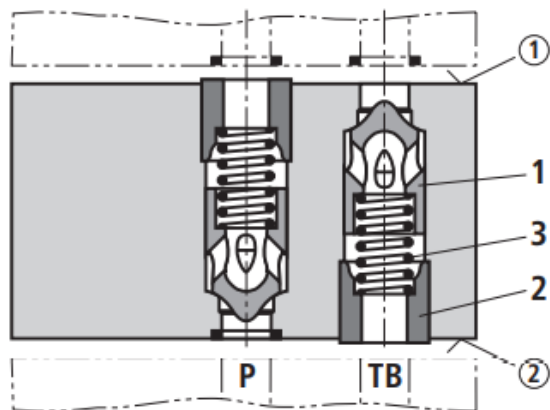


流量-压力关系始终满足孔口流量公式，随着通流面积变化，开启过程中每一时刻单向阀都工作在不同的流量-压力特性曲线上

图6-8 管式普通单向阀结构

a) 结构图 b) 图形符号 1-阀体 2-阀芯 3-弹簧

# 单向阀



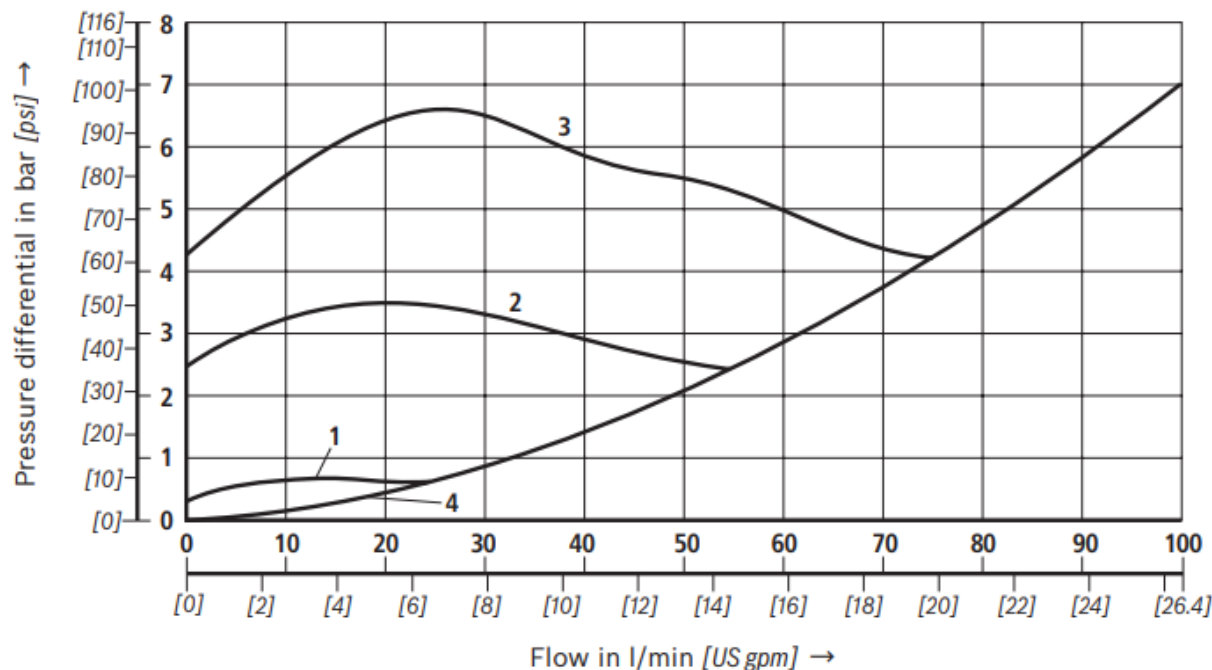
Bosch Rexroth Z1S 10单向阀

最大工作压力: 350bar

最大流量: 100L/min

开启压力: 0.5bar、

3.0bar、5.0bar



1 Cracking pressure 0.5 bar [7.25 psi]

2 Cracking pressure 3.0 bar [43.51 psi]

3 Cracking pressure 5.0 bar [72.52 psi]

4 Without check valve

不同开启压力下的流量-压力特性曲线



# 液控单向阀

- 有普通型和带卸荷阀芯型两种，每种按控制活塞泄油腔的连接方式分为内泄式和外泄式两种

当控制口无压力通入时，作用和普通单向阀一样

当控制口有足够大的控制压力油，油液可在两个方向自由流通

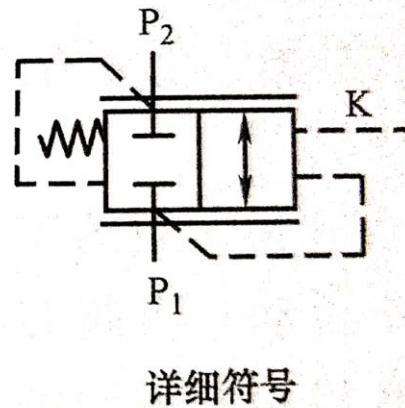
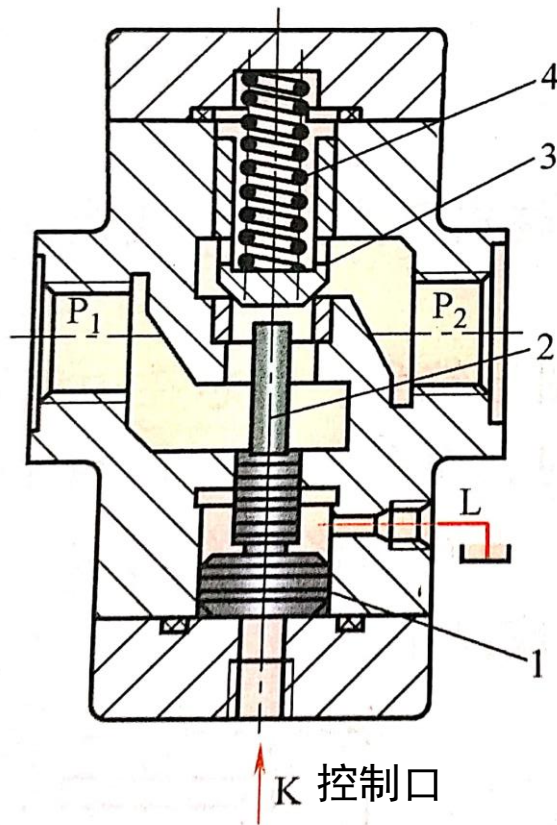
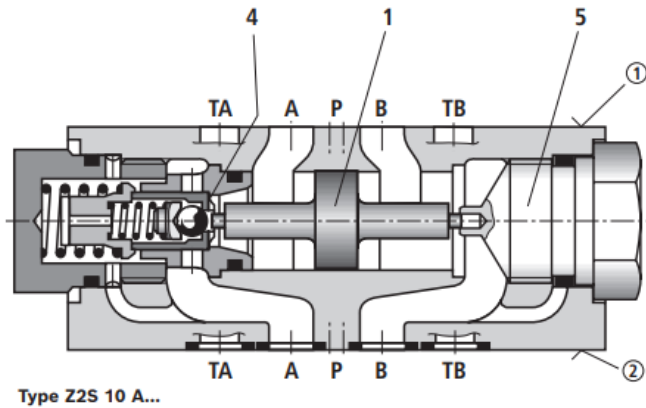


图6-9 普通型外泄式液控单向阀  
1-控制活塞 2-推杆 3-阀芯 4-弹簧

# 液控单向阀



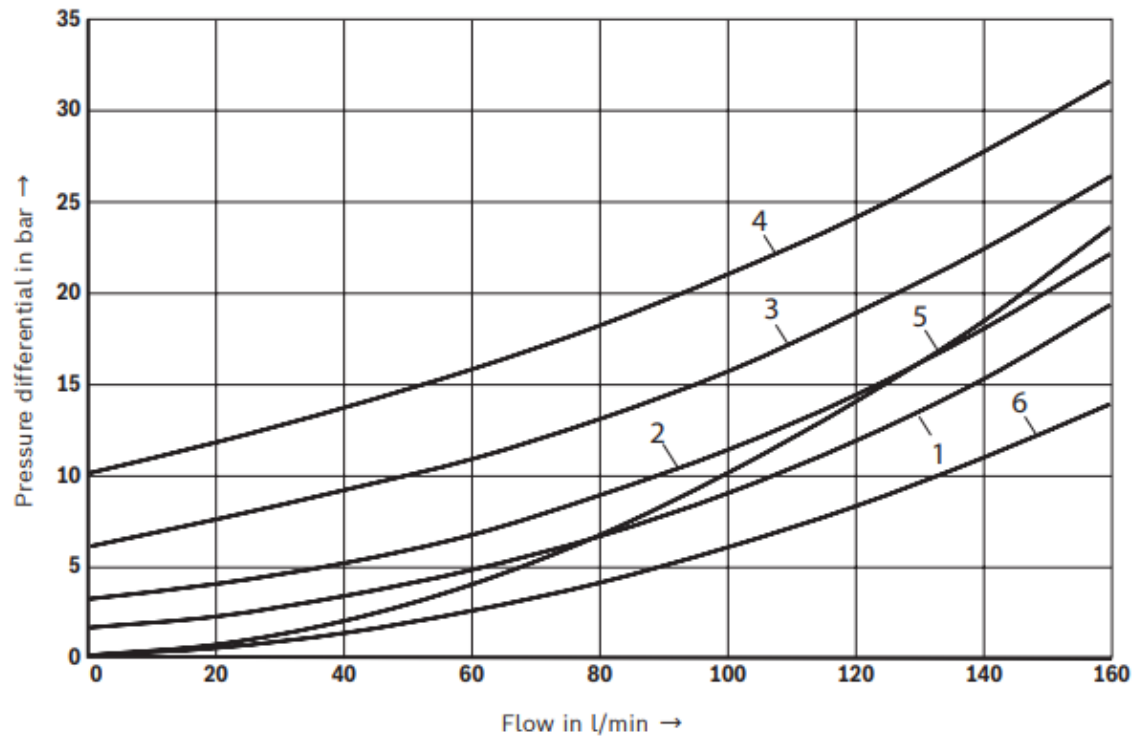
Bosch Rexroth Z2S 10液控单向阀

最大工作压力: 350bar

最大流量: 160L/min

开启压力: 1.5bar、3.0bar、

6.0bar、10.0bar



## Cracking pressure:

1 1.5 bar

2 3 bar

3 6 bar

4 10 bar

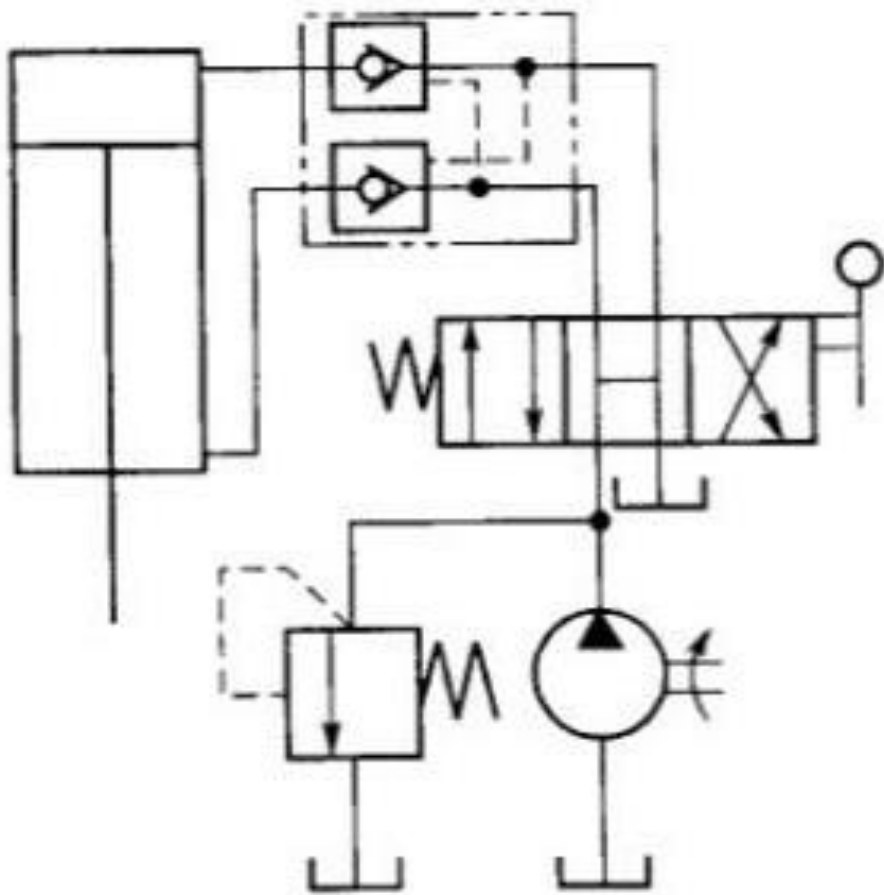
5 Check valve controlled open via control spool

6 Free flow (without check valve use), version "A" and "B"

不同开启压力下的流量-压力特性曲线

# 液控单向阀

- 典型应用：液锁



使用液控单向阀的锁紧回路

两个液控单向阀取对方油路的压力作为先导油，当一方管路没有压力时，另一方同时关闭

通常使用在承重液压缸或马达油路中，防止液压缸或马达在重物作用下自行下滑

需要动作时，向另一路供油，通过内部控制油路打开单向阀使油路接通，液压缸或马达才能动作

# 换向阀

- 利用阀芯在阀体中的相对运动，使液流的通路接通、关断，或变换流动方向，从而使执行元件启动、停止或变换运动方向
- 功能由控制通路数及工作位置所决定

## 三位四通阀：

3个工作位置，  
4条通路（P、  
A、B、T）

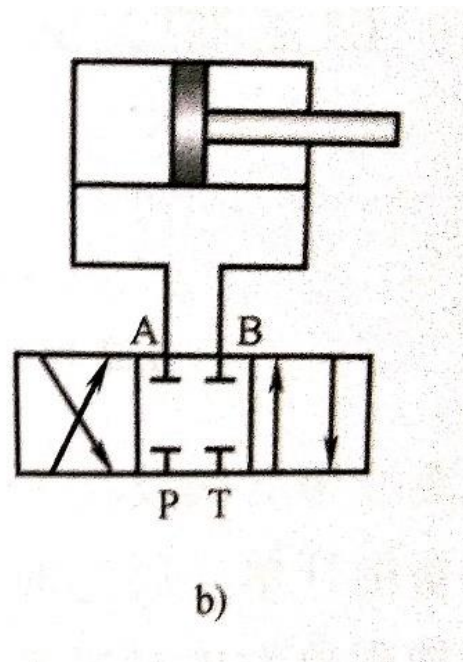
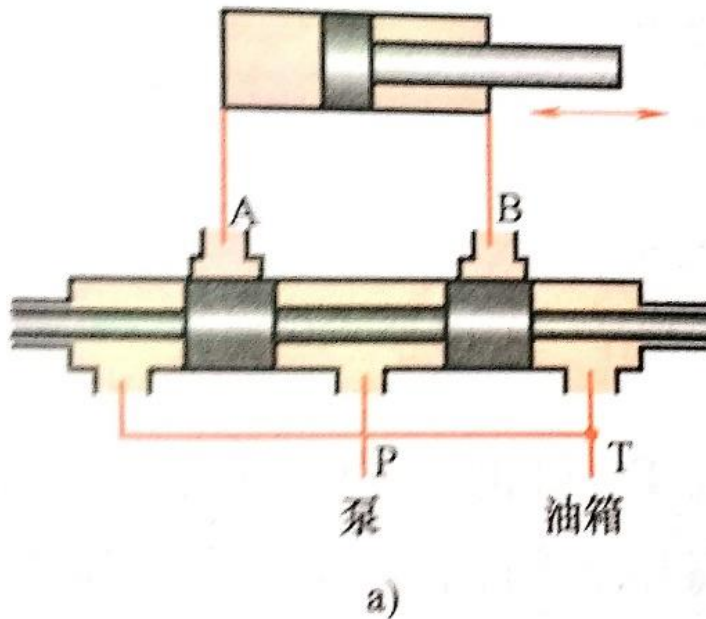


图6-11 滑阀式换向阀的工作原理和图形符号

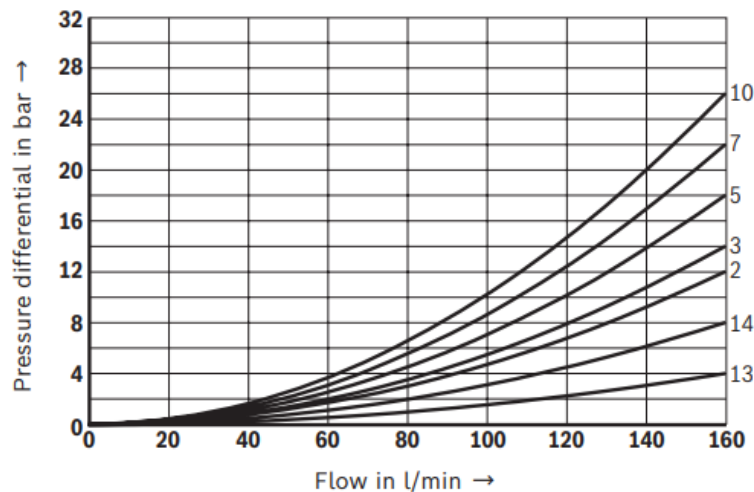
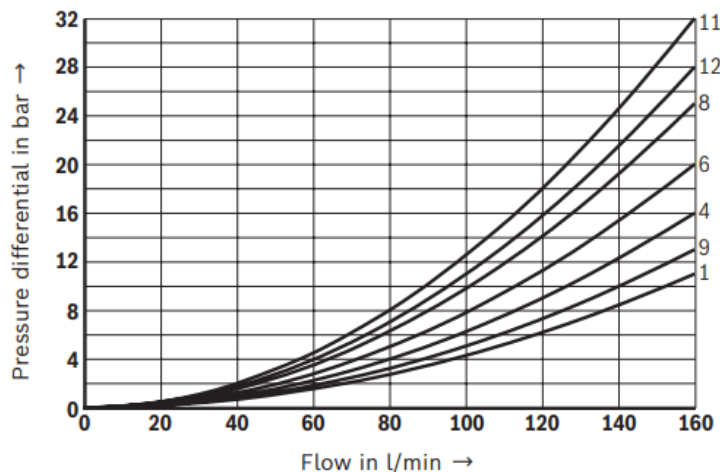
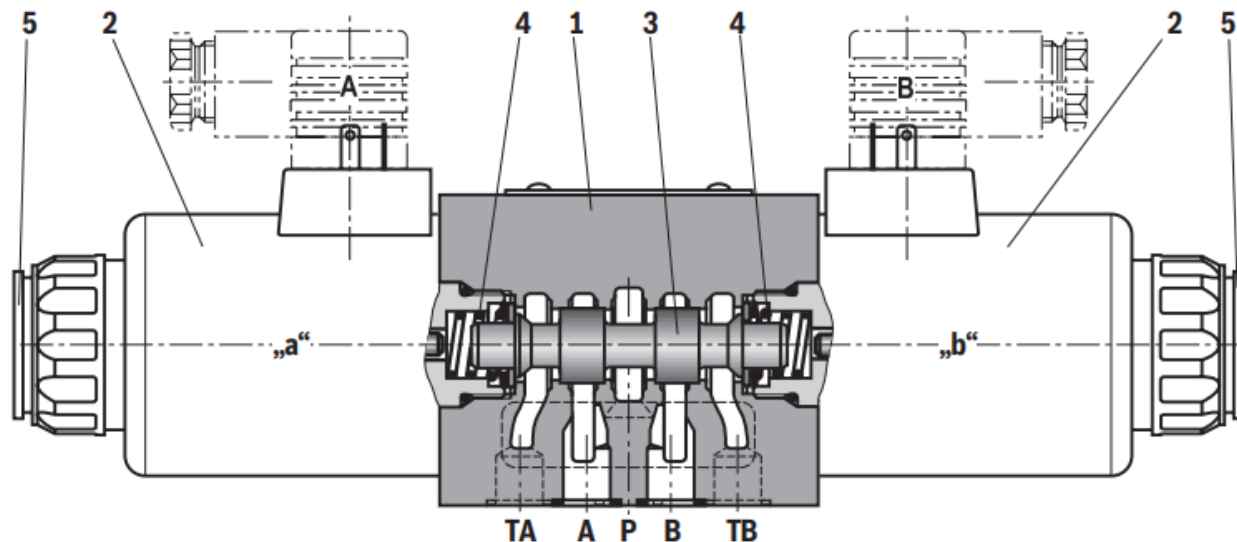
a) 工作原理 b) 图形符号

# 换向阀

Bosch Rexroth WE 10换向阀

最大工作压力: 350bar

最大流量: 160L/min





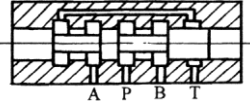
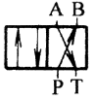

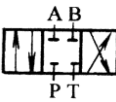
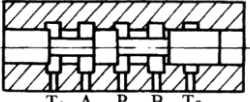

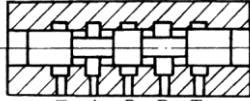



该系列不同型号换向阀各通道的流量-压力特性曲线



# 换向阀

- 结构主体：阀体和滑阀阀芯

名 称	结构原理图	图形符号	使用场合		
二位 二通阀			控制油路的接通与切断（相当于一个开关）		
二位 三通阀			控制液流方向（从一个方向变换成另一个方向）		
二位 四通阀			控制 执行 元件 换向	不能使执行元件在任一位置上停止运动	执行元件正反向运动时回油方式相同
三位 四通阀				能使执行元件在任一位置上停止运动	
二位 五通阀				不能使执行元件在任一位置上停止运动	执行元件正反向运动时可以得到不同的回油方式
三位 五通阀				能使执行元件在任一位置上停止运动	



# 换向阀的操纵方式

## □ 手动换向阀

- **弹簧自动复位结构：**适用于动作频繁、持续工作时间较短的场合，常用于工程机械
- **弹簧钢球定位结构：**适用于机床、液压机、船舶等需保持工作状态时间较长的情况

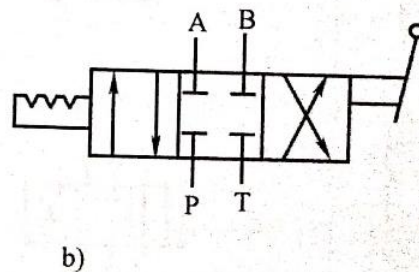
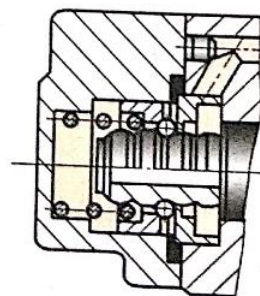
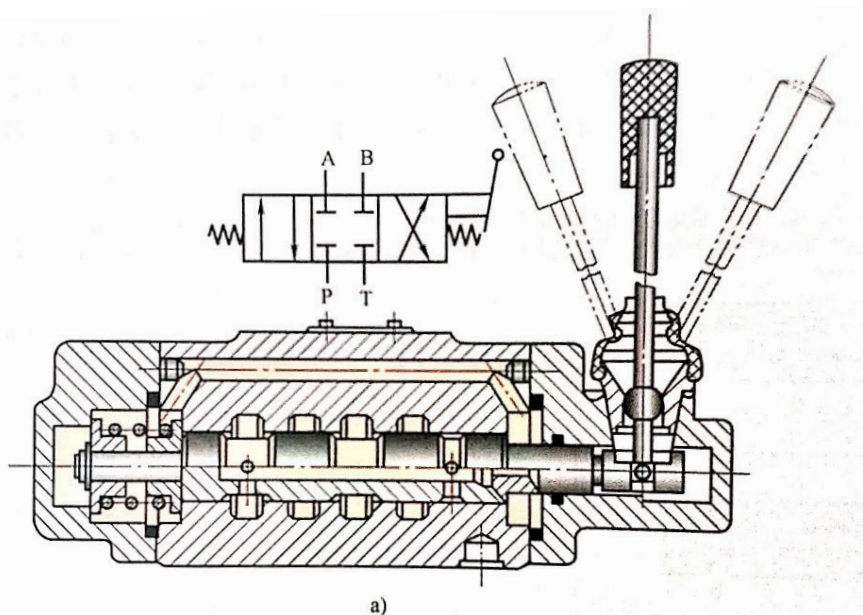


图6-12 手动换向阀（三位四通）及其图形符号  
a) 弹簧自动复位结构 b) 弹簧钢球定位结构

# 换向阀的操纵方式

## □ 机动换向阀

- 依靠挡铁或凸轮来压迫阀芯移动，实现液流通、断或改变流向

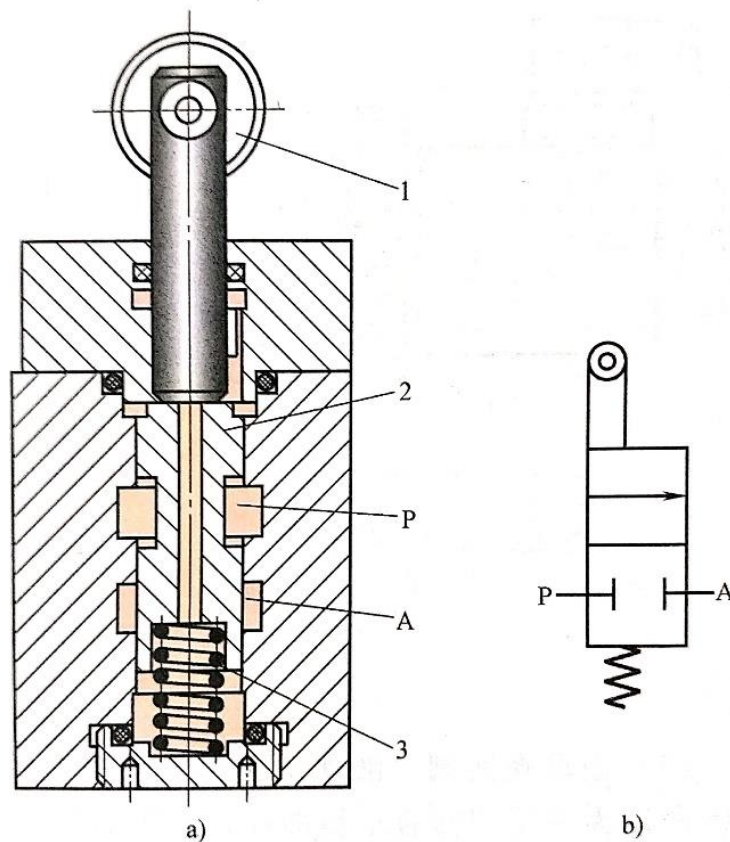


图6-13 机动换向阀及其图形符号

1-滚轮 2-阀芯 3-弹簧

# 换向阀的操纵方式

## □ 电磁换向阀

- 通过**电磁铁吸力**推动阀芯动作来改变液流流向

图6-14 交流二位三通电磁换向阀及其干式电磁铁的结构

1-衔铁 2-线圈 3-密封圈 4-推杆  
5-阀芯 6-弹簧 7-阀体

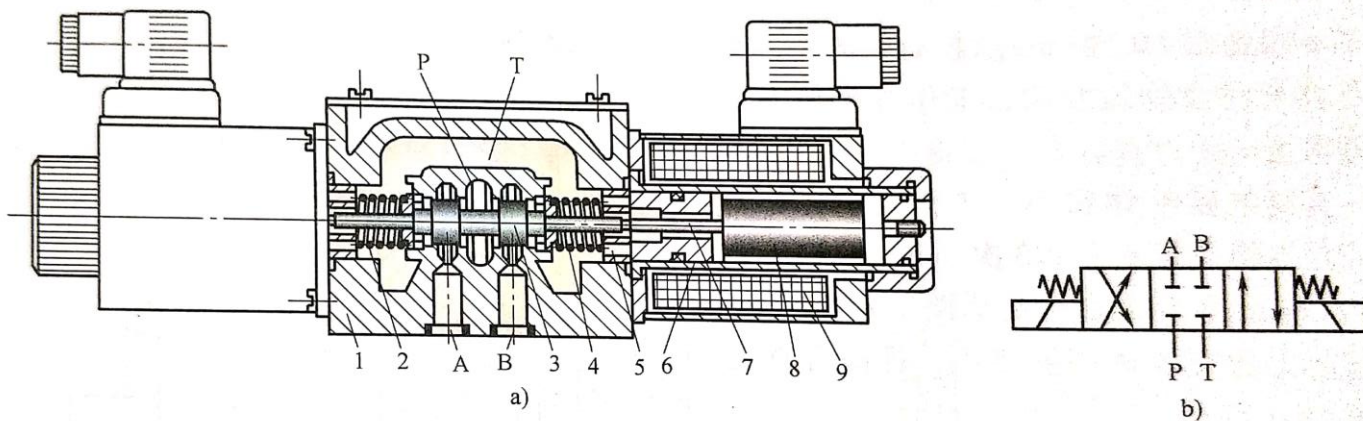
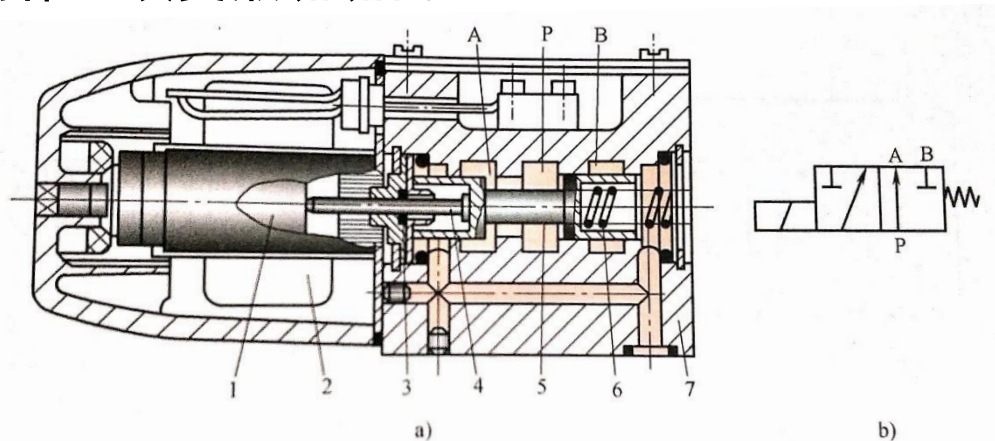


图6-15 直流三位四通电磁换向阀及其湿式电磁铁的结构

1-阀体 2、4-弹簧 3-阀芯 5-挡块 6-导磁套 7-推杆 8-衔铁 9-线圈

# 换向阀的操纵方式

## □ 电磁换向阀的分类

按电源分类	交流型	直流型	交流本整型
特点	使用方便，起动力大，吸合、释放快，动作时间最快约为10ms；冲击和噪声较大，起动力大，工作寿命仅数百万次至一千万次以内	体积小，工作可靠，冲击小，使用寿命可高达两千万次以上；起动力小，且需有直流电源	自身带有整流器，可以直接使用交流电源，又具有直流电磁铁的性能

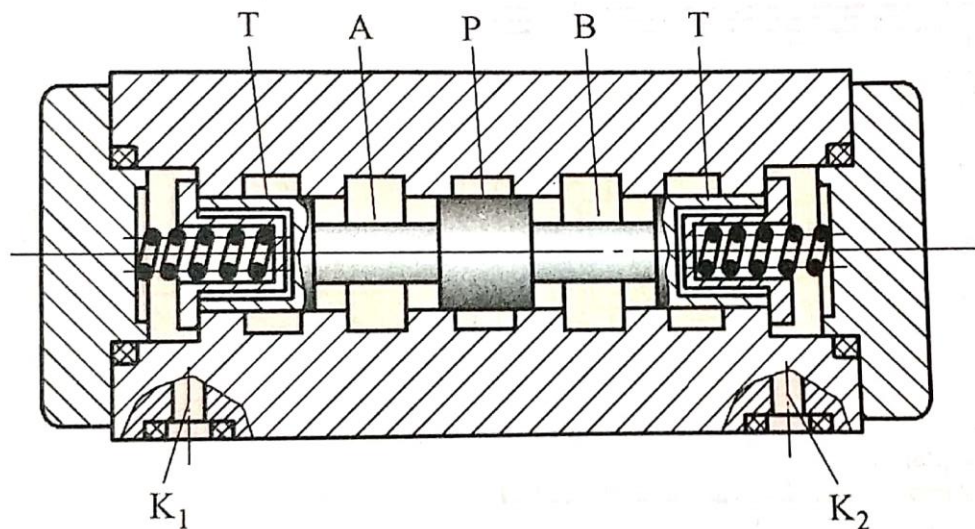
按电磁铁内部是否有油浸入分类	干式	湿式	油浸式
特点	为避免油液侵入电磁铁，推杆外周装有密封圈，密封圈的摩擦力影响电磁铁的换向可靠性	具有吸合声小、散热快、可靠性好、效率高、寿命长等优点，已逐渐取代传统的干式电磁铁	散热更快、换向更平稳可靠、效率更高、寿命更长；结构复杂、造价较高



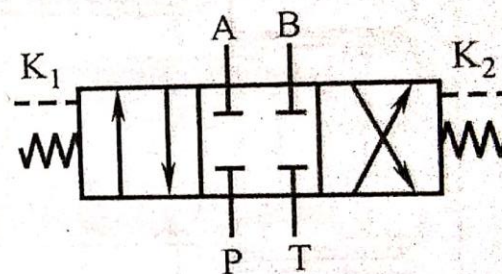
# 换向阀的操纵方式

## □ 液动换向阀

- 利用控制油路的压力油改变阀芯位置
- 需另一个阀来操纵控制油路的方向



a)



b)

图6-16 三位四通液动换向阀及其图形符号

# 换向阀的操纵方式

## □ 电液换向阀

- 阀芯靠**电磁铁**操纵**控制油路**上的压力油液推动
- 推力大，操纵方便，有较好的换向性能，适用于高压、大流量的场合

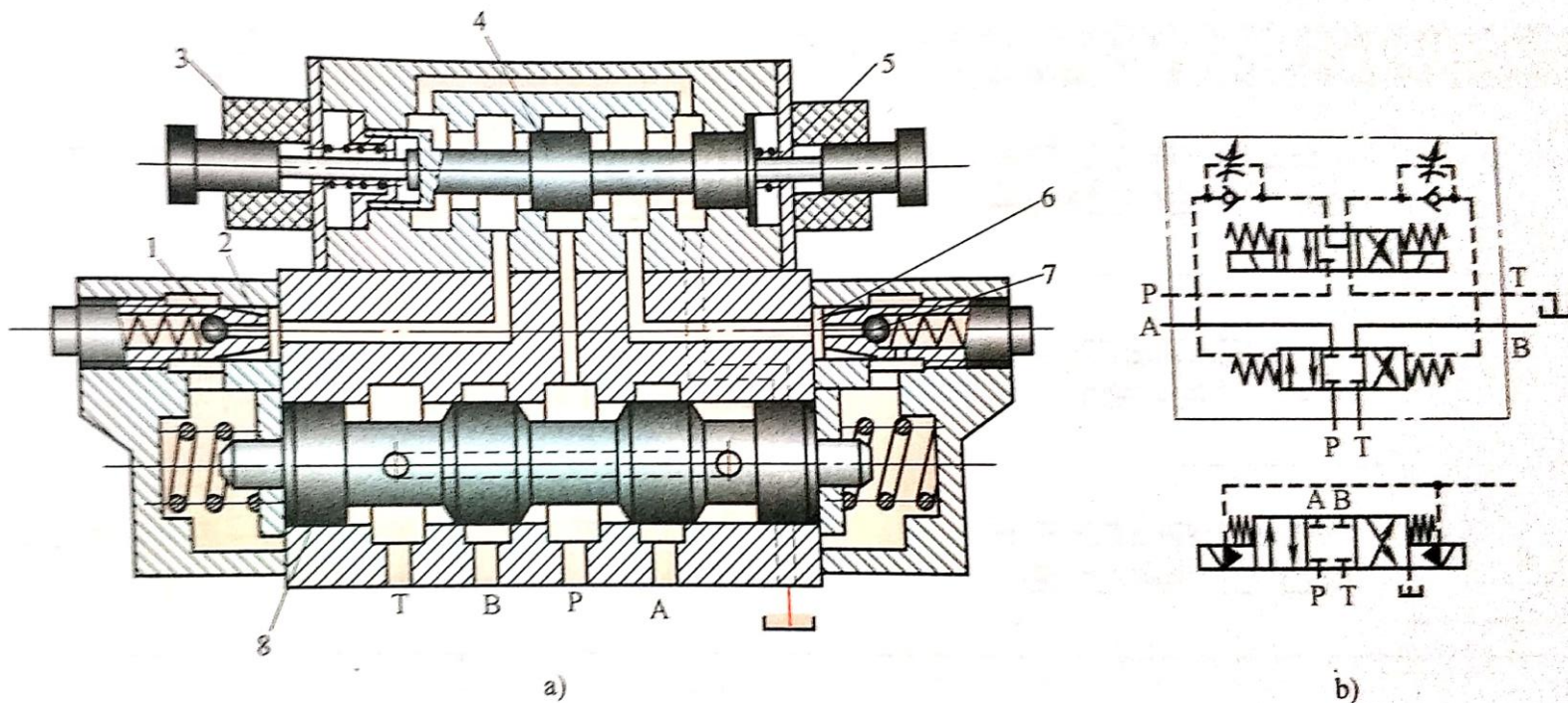


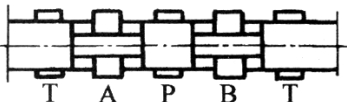






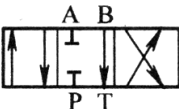
图6-17 电液换向阀及其图形符号

1、7-单向阀 2、6-节流阀 3、5-电磁铁 4-电磁阀阀芯 8-液动阀（主阀）阀芯

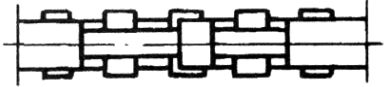
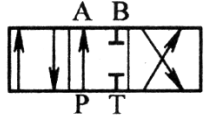




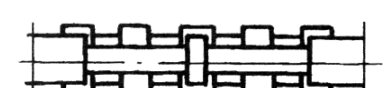
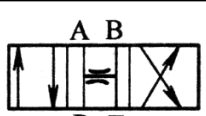

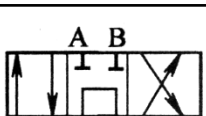

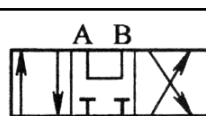

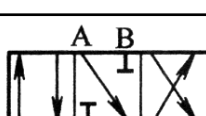


# 滑阀机能

- 工作位置机能**：滑阀处于某个工作位置时，其各个油口的连通关系
- 过渡状态机能**：滑阀从一个工作位置变换到另一个工作位置的过渡过程中，它的各个油口的瞬时连通关系

滑阀性能代号	滑阀中位状态	图形符号	中位特点
O			各油口全封闭，系统不卸载，缸封闭
H			各油口全连通，系统卸载
Y			系统不卸载，缸两腔与回油连通
J			系统不卸载，缸一腔封闭，另一腔与回油连通

# 滑阀机能

C			压力油与缸一腔连通，另一腔及回油皆封闭
P			压力油与缸两腔连通，回油封闭
K			压力油与缸一腔及回油连通，另一腔封闭，系统可卸载
X			压力油与各油口半开启连通，系统保持一定压力
M			系统卸载，缸两腔封闭
U			系统不卸载，缸两腔连通，回油封闭
N			系统不卸载，缸一腔与回油连通，另一腔封闭

# 电磁球阀

- 以**电磁铁推力**为驱动力推动**钢球**来实现油路通断
- 密封性能好，换向、复位速度快，换向频率高，对工作介质的适应范围广，换向、复位所需力很小，抗污染性好，加工、装配精度要求较高

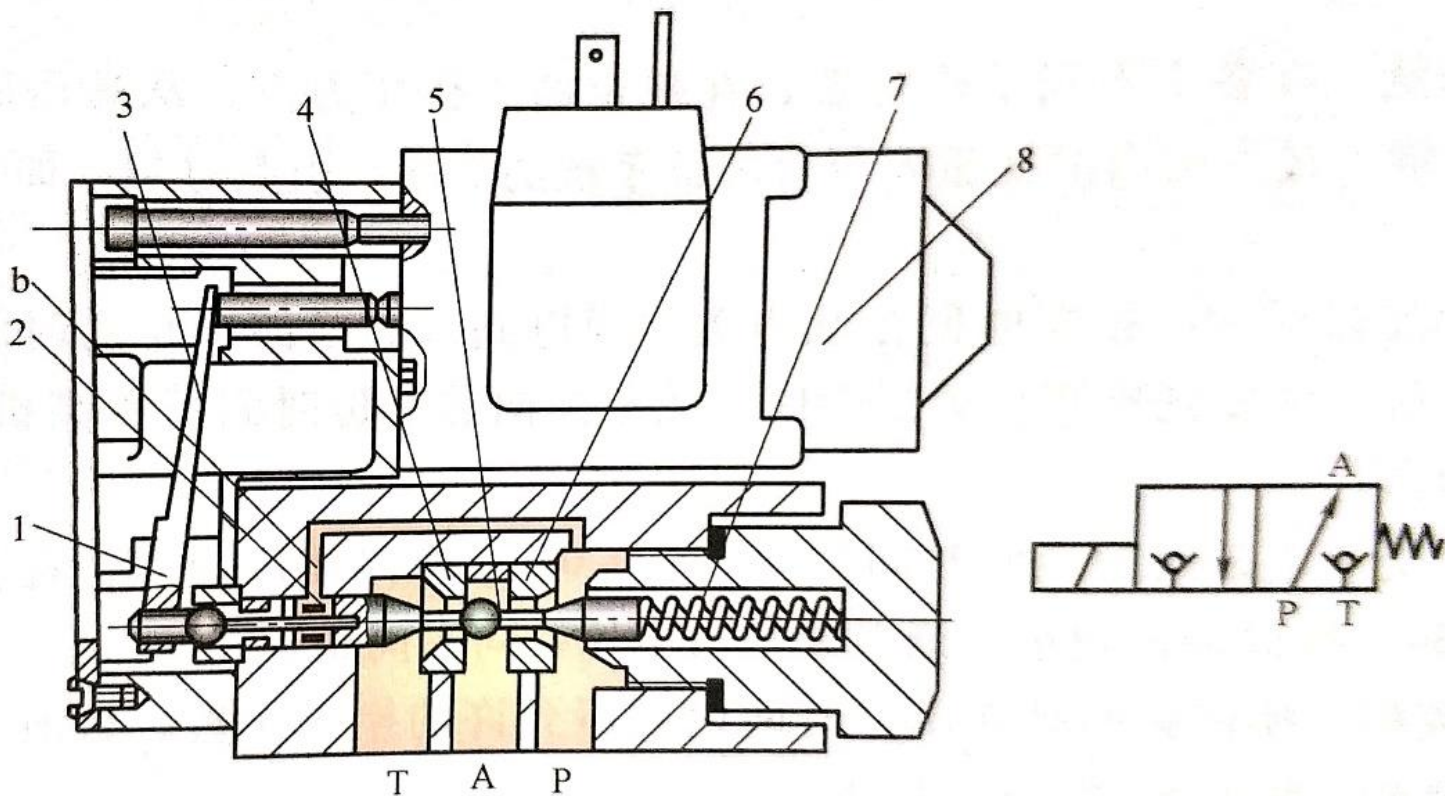


图6-18 二位三通电磁球阀及其图形符号

1-支点 2-操纵杆 3-杠杆 4-左阀座 5-钢球 6-右阀座 7-弹簧 8-电磁铁

# 电磁换向阀的主要性能

- **工作可靠性**：电磁铁通电以后能否可靠地换向，断电后能否可靠地复位
- **压力损失**
- **内泄漏量**：从高压腔漏到低压腔的泄漏量

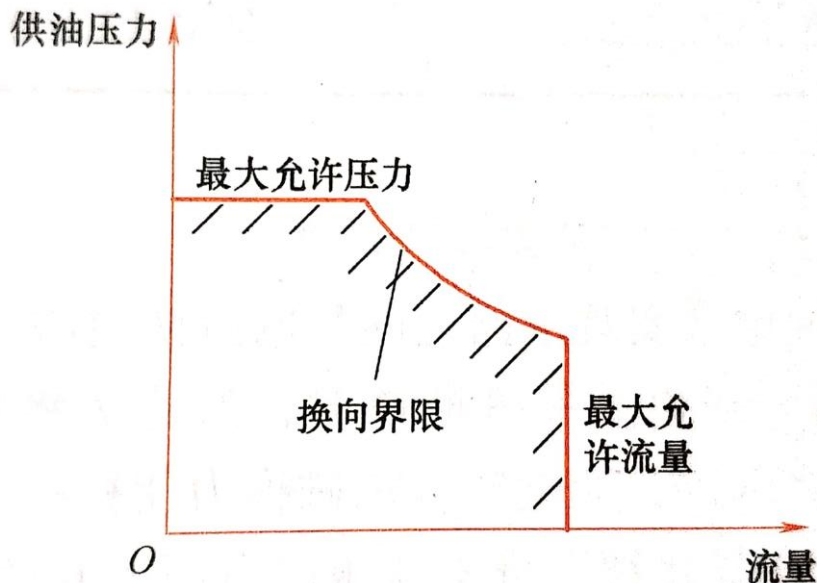


图6-19 电磁阀的换向界限

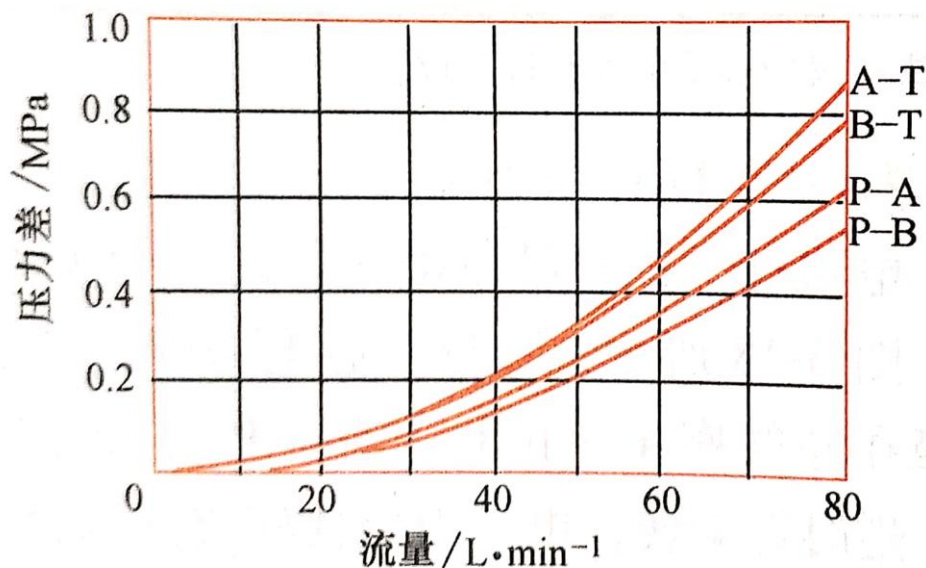


图6-20 某电磁阀的压力损失曲线

# 电磁换向阀的主要性能

- **换向时间**：从电磁铁通电到阀芯换向终止的时间
- **复位时间**：从电磁铁断电到阀芯恢复到初始位置的时间
- **换向频率**：单位时间内阀所允许的换向次数
- **使用寿命**：电磁阀用到它某一零件损坏，不能进行正常的换向或复位动作或使用到电磁阀的主要性能指标超过规定指标时经历的换向次数

Bosch Rexroth WE 10电磁换向阀的换向时间和换向频率

电源类型		直流电源	交流电源
换向时间 (ms)	开启, 压力变化5%	60—104	17—20
	开启, 压力变化95%	90—165	48—57
	关闭, 压力变化5%	12—50	19—26
	关闭, 压力变化95%	48—104	47—77
最大换向频率 (Hz)		4.2	2



# 多路换向阀

- 将两个以上的阀块组合在一起，用以操纵多个执行元件的运动
- 结构紧凑，管路简单，压力损失小，安装简便，广泛应用于工程机械、起重运输机械和其它要求操纵多个执行元件运动的行走机械

多路换向阀的分类

按结构形式分类	整体式、分片式
按油路连接方式分类	并联、串联、串并联、复合油路
按液压泵卸荷方式分类	中位卸荷、采用安全阀卸荷

# 多路换向阀

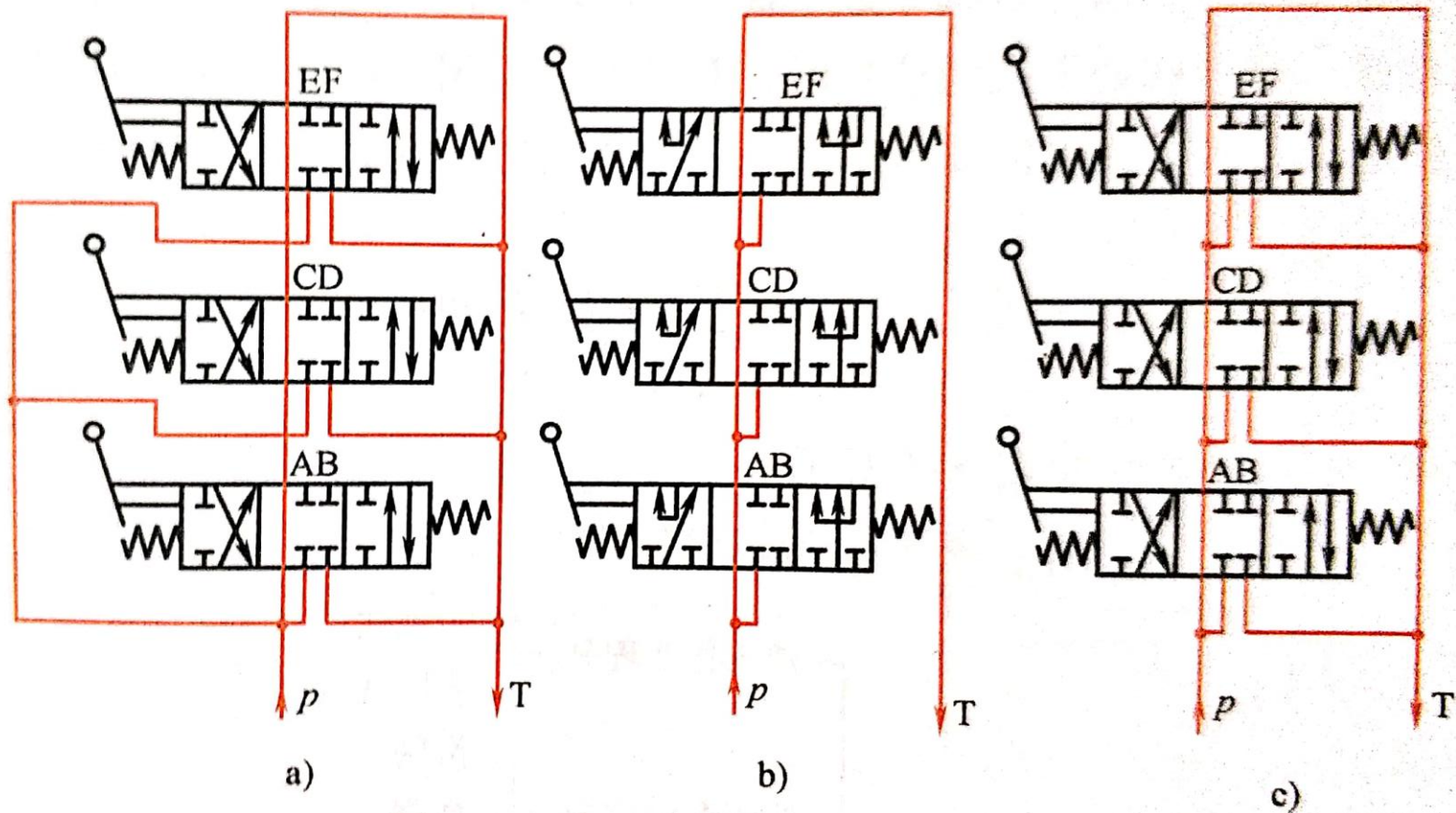


图6-21 多路换向阀的基本油路形式  
 a) 并联油路 b) 串联油路 c) 串并联油路