

过程控制原理应用I

(检测技术与过程控制原理)

主讲人：安剑奇 教授

中国地质大学（武汉） 自动化学院

2020年9月

第3章 执行器



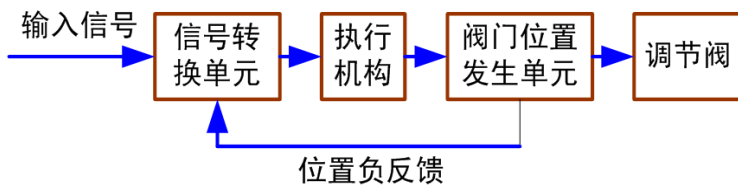
执行器

- 3.1 执行器的工作原理与分类
- 3.2 电动执行机构
- 3.3 气动执行机构
- 3.4 液动执行机构
- 3.5 调节机构
- 3.6 执行器的选择
- 3.7 其他执行设备
- 3.8 本章小结

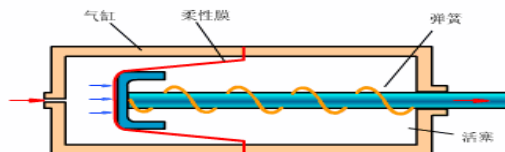
3.1 执行器的工作原理与分类

➤ 执行器

- 执行机构接受控制器的信号，转换成角位移或直线位移，改变调节机构的流通面积，从而调节流入或流出被控过程的物料或能量，实现对温度、压力、流量等过程被控参数的自动控制
- 执行器的组成：执行机构，调节机构（调节阀）



执行器工作原理图



滚动膜式气缸活塞执行器

3.1 执行器的工作原理与分类

► 执行器的分类

按使用能源分

电动执行器

- 输入DC 0~10mA或DC 4~20mA电流信号
- 方便、信号传输速度快、传输距离远
- 结构复杂、安全防爆性能差、推力小、价格贵

气动执行器

- 输入0.02~0.1MPa气压信号
- 结构简单、动作平稳可靠、推力较大、维护方便、价格便宜、安全防爆系数高
- 动作时间长，不适合远传（传输距离<150m）

液动执行器

- 输入液压信号
- 推力大，精度高，动作平稳可靠、适用于被控制压力
- 结构复杂、价格贵、易泄露、体积较大

3.1 执行器的工作原理与分类

► 执行器的分类

按输出
位移形式

- 转角型 90° (或 $<90^\circ$) 或多圈 ($>360^\circ$)
- 直线型 短行程和长行程

按动作
规律

- 开关型 全开和全关两种状态, 如电磁阀
- 积分型 正向等速运动、反向等速运动和停止三状态, 实现任意阀门开度的调节
- 比例型 输出位移和输入信号成比例关系

执行器

- 3.1 执行器的工作原理与分类
- 3.2 **电动执行机构**
- 3.3 气动执行机构
- 3.4 液动执行机构
- 3.5 调节机构
- 3.6 执行器的选择
- 3.7 其他执行设备
- 3.8 本章小结

3.2 电动执行机构

- 接收控制器DC 0~10mA或DC 4~20mA 电流信号，转换为角位移（输出力矩）或直线位移（输出力），操纵阀门、挡板等调节机构

角行程 电动机将直流电信号转为角位移（0~90°），操纵蝶阀、挡板之类的旋转式调节阀

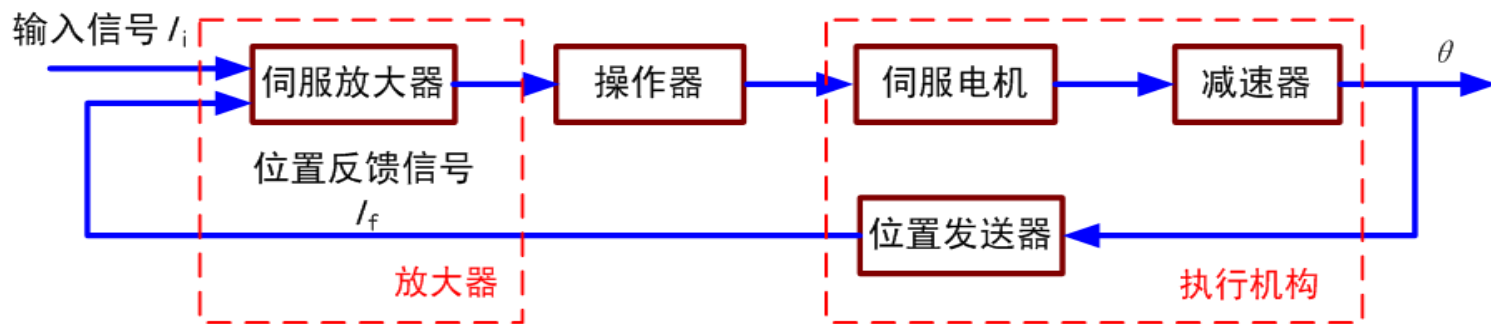
直行程 电动机和减速器将直流电信号，转为直线位移输出，适用于操纵单座、双座、三通等直线式调节阀

多转式 开启和关闭闸阀、截止阀等多转式阀门

3.2 电动执行机构

➤ 工作原理

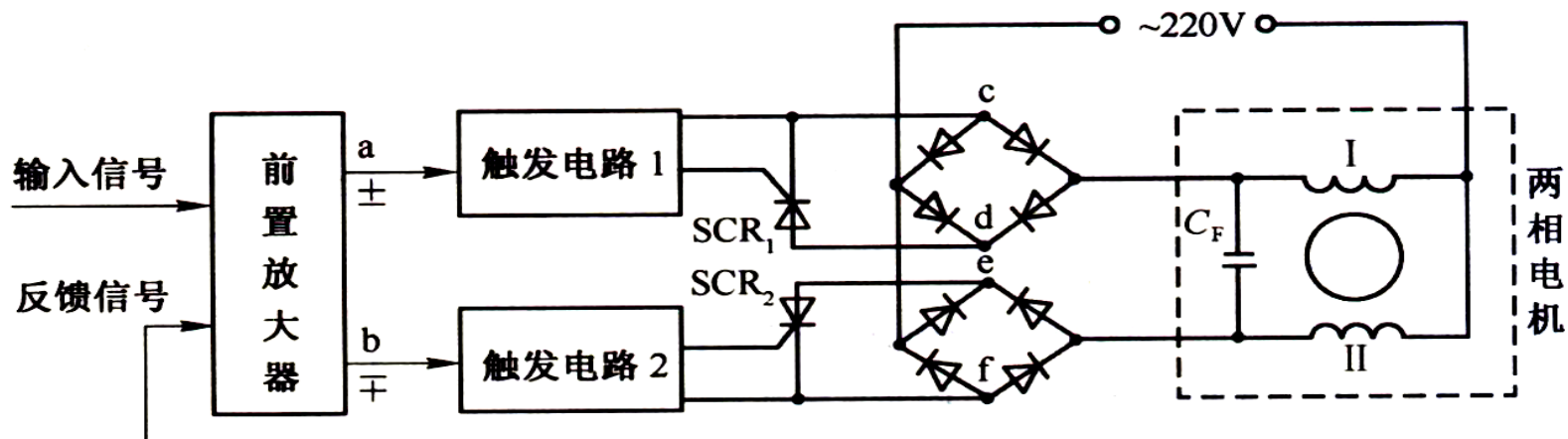
- 组成：执行机构，伺服放大器
- 可实现自动调节，还可实现自动和手动调节的相互切换
- 操作器的置于手动操作时，由正、反操作按钮直接控制电机的电源，以实现执行机构输出轴的正转或反转



3.2 电动执行机构

➤ 伺服放大器

□ 组成：前置放大器，触发器，交流晶闸管开关，校正网络，电源等



3.2 电动执行机构

➤ 执行机构

接受伺服放大器或操作器的输出信号，控制伺服电动机的正反转，经过减速器减速后，转换成输出力矩去推动调节机构动作

- **伺服电动机**：将伺服放大器输出的电功率转换成机械转矩
- **减速器**：把伺服电机高转速，小力矩的输出功率转换成执行机构输出轴的低转速，大力矩的输出功率
- **位置发送器**：将执行机构输出轴的位移线性地转换成DC 0~10mA或DC 4~20mA反馈信号，反馈到伺服放大器的输入端

执行器

- 3.1 执行器的工作原理与分类
- 3.2 电动执行机构
- 3.3 气动执行机构
- 3.4 液动执行机构
- 3.5 调节机构
- 3.6 执行器的选择
- 3.7 其他执行设备
- 3.8 本章小结

3.3 气动执行机构

➤ 气动执行机构

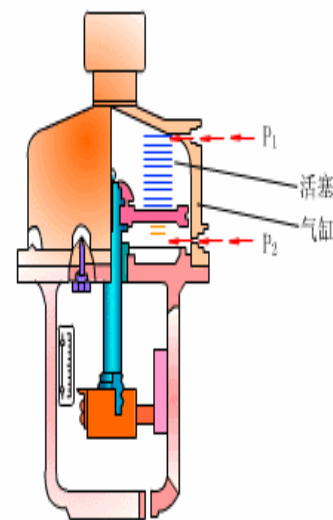
□ 根据控制器或阀门定位器的输出气压信号，推动调节机构的阀芯动作

活塞式

- 以气缸内的活塞输出推力；
- 输出推力大、行程长，价格高，只用于特殊需求场合

薄膜式

- 使用弹性膜片将输入气压转变为推力；
- 结构简单、价格低廉、运行可靠、维护方便

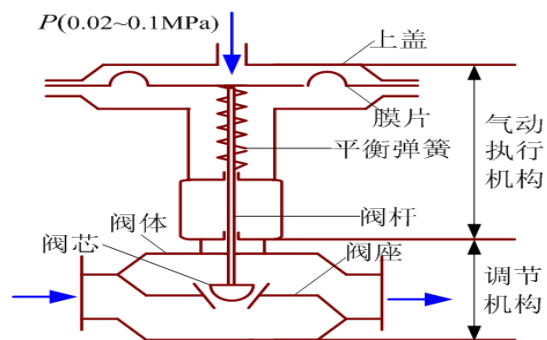


3.3 气动执行机构

➤ 正反作用

□ 正作用 (ZMA) : 当输入气压信号增加时, 推杆向下移动

□ 反作用 (ZMB) : 当输入气压信号增加时, 推杆向上移动



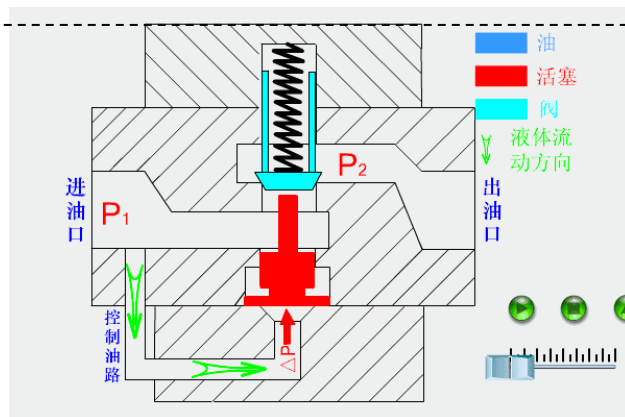
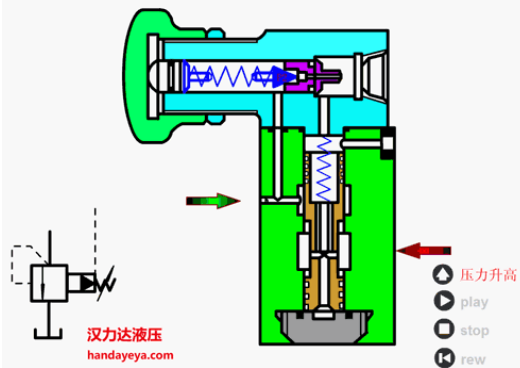
执行器

- 3.1 执行器的工作原理与分类
- 3.2 电动执行机构
- 3.3 气动执行机构
- 3.4 **液动执行机构**
- 3.5 调节机构
- 3.6 执行器的选择
- 3.7 其他执行设备
- 3.8 本章小结

3.4 液动执行机构

➤ 液动执行机构

- ❑ 以液压传递为动力，推动力大，体型笨重，只适用于需要大推动力的特定场合，如三峡的船阀
- ❑ 传动平稳可靠，有缓冲无撞击现象，适用于对传动要求较高环境
- ❑ 使用液压油驱动，液体本身有不可压缩的特性，因此液压执行器能轻易获得较好的抗偏离能力



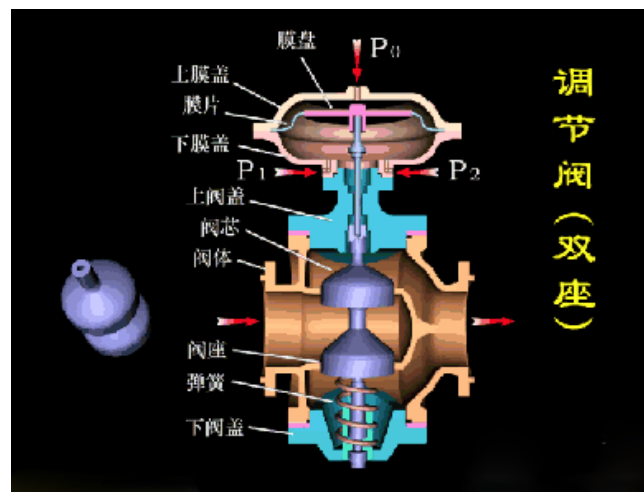
执行器

- 3.1 执行器的工作原理与分类
- 3.2 电动执行机构
- 3.3 气动执行机构
- 3.4 液动执行机构
- 3.5 **调节机构**
- 3.6 执行器的选择
- 3.7 其他执行设备
- 3.8 本章小结

3.5.1 调节阀的结构

➤ 调节机构

- 也称调节阀，控制阀，是执行器的调节部分
- **工作原理**：在执行机构输出力（力矩）作用下，阀芯在阀体内移动，改变阀芯与阀座之间的流通面积，从而使被控介质的流量发生相应变化，达到改变工艺变量的目的



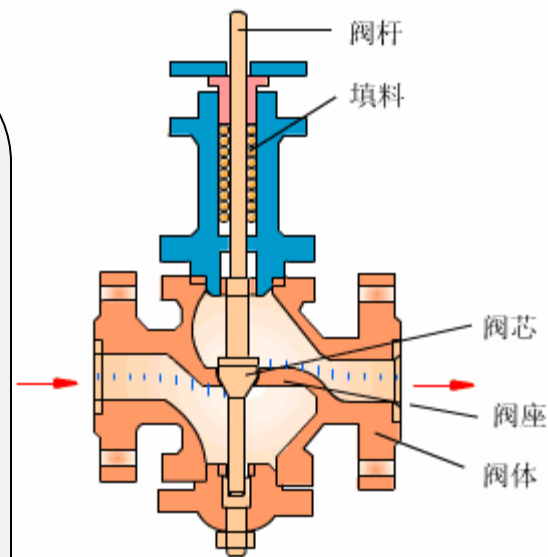
3.5.1 调节阀的结构

➤ 调节阀的结构

组成：上阀盖，下阀盖，阀座，阀芯，阀杆等零部件

□ 直通单座调节阀

- 只有一个阀芯与一个阀座
- 优点：结构简单、泄露量小，不平衡力大，易于保证关闭。
- 缺点：在压差比较大时，流体对阀芯上下作用推力不平衡，影响阀芯的移动
- 用于小口径、低压差场合

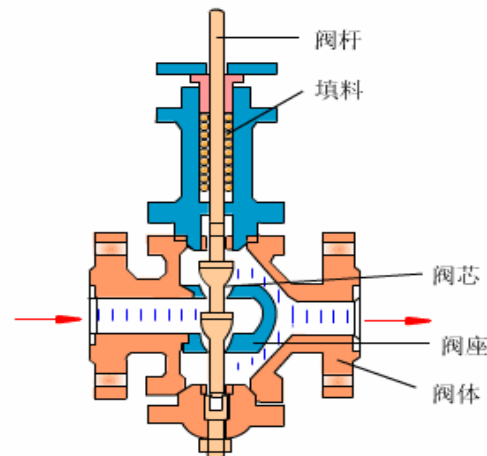


直通单座控制阀
化工707 剪辑制作

3.5.1 调节阀的结构

□ 直通双座调节阀

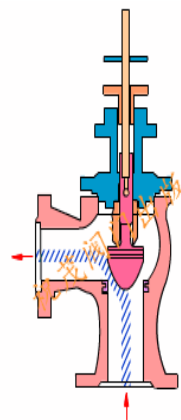
- 有两个阀芯和阀座
- 不平衡力小、允许压差大，但泄漏量也大
- 适用于阀两端压差较大、泄漏量要求不高的场合，不适用于高黏度场合



直通双座控制阀
化工707 剪辑制作

□ 角形调节阀

- 特点：**流路简单、阻力小**，适用于安装现场管道要求用直角连接，或高压差、高黏度、含有悬浮物和固体颗粒状物料流量的场合

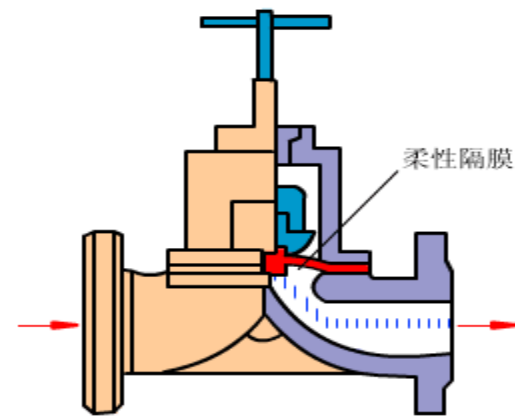


角式调节阀动画由上海祝茂阀门有限公司提供

3.5.1 调节阀的结构

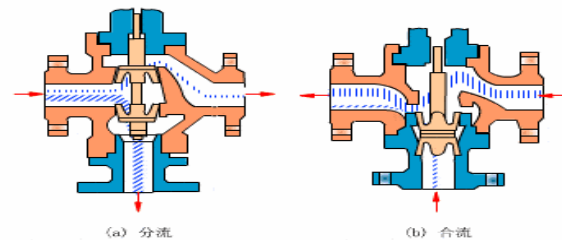
□ 隔膜调节阀

- 特点：结构简单、流阻小、流通能力大。隔膜与外界隔离，适用于强酸、强碱、强腐蚀性物料和高黏度、含悬浮颗粒状介质



□ 三通调节阀

- 合流型：两种介质混合成一路
- 分流型：一种介质分成两路



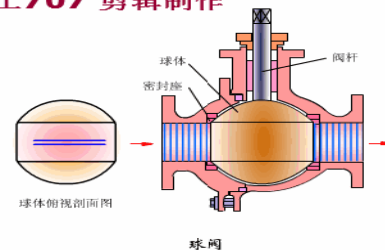
三通阀

3.5.1 调节阀的结构

□ 球阀

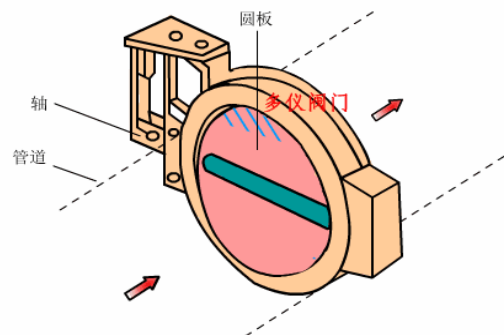
- O型球阀是带圆孔的球形体，用于位式调节。
- V型球阀是V型缺口球形体，适用于高黏度物料

化工707 剪辑制作



□ 蝶阀

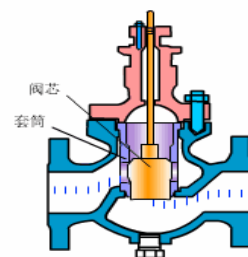
- 结构紧凑、成本低、流阻小、流通能力大，泄漏量大
- 实用于大口径、大流量、低压差和少量悬浮颗粒介质的场合



3.5.1 调节阀的结构

□ 套筒型调节阀

- 可调比大、振动小、不平衡力小、互换性好，阀内部件所受气蚀小、噪音小
- 适用于要求噪音低、压差大的场合
- 但不宜用于高温、高黏度物料

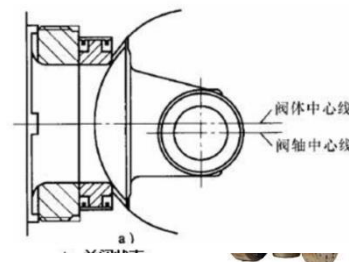


套筒阀

东方仿真COPYRIGHT

□ 偏心旋转阀

- 重量轻、体积小、安装方便
- 适用于高黏度或含悬浮物的物料



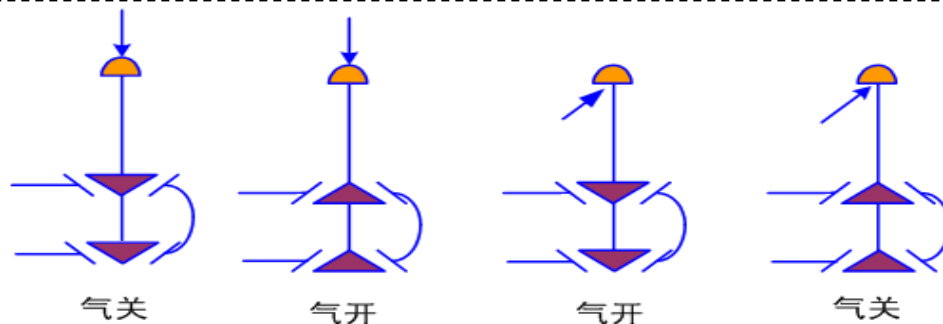
3.5.1 调节阀的结构

控制阀结构形式的选择

阀结构形式	特点及使用场合
直通单座	阀前后压降低, 适用于要求泄露量小的场合
直通双座	阀前后压降大, 适用于要求泄露量较大的场合
角阀	适用于高压, 高粘度的, 含悬浮物或颗粒状物质的场合
高压阀	适用于高压控制的特殊场合
蝶阀	适用于有悬浮物的液体、大流量气体、压差低、允许泄露量大的场合
隔膜阀	适用于有腐蚀介质的场合
三通阀	适用于分流或合流的控制场合

3.5.2 调节阀特性--气开、气关

- 执行机构：正、反两种作用形式
- 调节阀：正装、反装两种方式
- 因此存在4种组合方式实现气动执行器的气开、气关调节



气开 { 信号压力增加，阀门开度大
信号压力减小，阀门开度小
无信号压力，阀门全关

气关 { 信号压力增加，阀门开度小
信号压力减小，阀门开度大
信号压力，阀门全开

3.5.2 调节阀特性--流量特性

调节阀的流量特性：被控介质流过阀门的相对流量与阀门的相对开度（相对位移）之间的关系。即：

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = f\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)$$

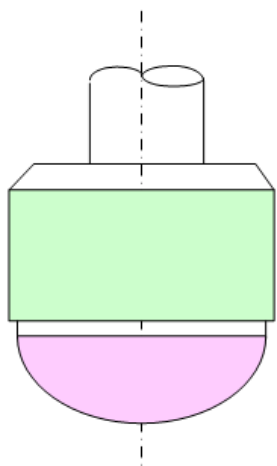
相对开度：某一开度的阀芯位移与全开时阀芯位移之比

相对流量：某一开度时流量与全开时流量之比

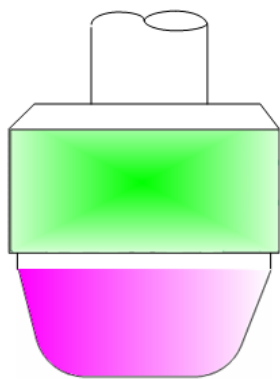
- 流过调节阀的流量大小不仅与阀门开度有关，还与阀前后的压差有关
- 理想流量特性：阀前后压差不变时的流量特性
- 工作流量特性：阀前后压差变化时的流量特性

3.5.2 调节阀特性--理想流量特性

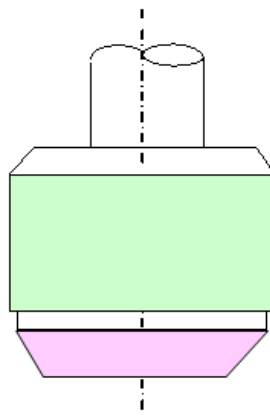
➤ **理想流量特性**：假设阀前后压差固定，根据阀芯开关不同，分为直线、等百分比（对数），抛物线、快开



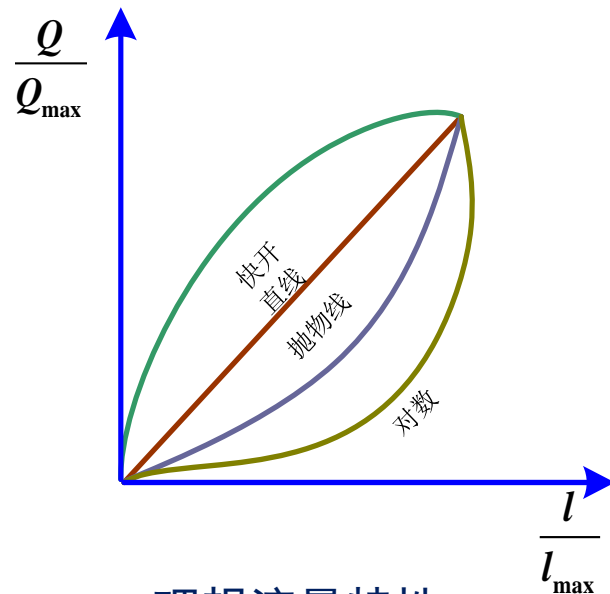
直线阀芯
形状



对数阀芯形
状



快开阀芯形
状



3.5.2 调节阀特性--理想流量特性

□ 直线流量特性：调节阀相对流量与阀芯相对开度成**直线关系**

$$\frac{d\left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)}{d\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)} = K \Rightarrow \frac{Q}{Q_{\max}} = K \frac{l}{l_{\max}} + C$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{边界} \\ \text{条件} \end{array} \right\} \begin{cases} l = 0, & Q = Q_{\min} \\ l = l_{\max}, & Q = Q_{\max} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} C = \frac{Q_{\min}}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \\ K = 1 - C = 1 - \frac{1}{R} \end{cases} \Rightarrow \frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left[1 + (R-1) \frac{l}{l_{\max}} \right]$$

- K --常数，调节阀放大系数；
- C --积分常数；
- R --最大流量和最小流量的比值，称为调节阀的**可调范围**或者**可调比**

3.5.2 调节阀特性--理想流量特性

- 假设 $R=30$,阀门相对开度 l/l_{max} 变化为10%,则相对流量 Q/Q_{max} 的增量为

$$\Delta\left(\frac{Q}{Q_{max}}\right) = \left(1 - \frac{1}{R}\right) \Delta\left(\frac{l}{l_{max}}\right) = 9.67\%$$

- 在10%开度时,相对流量的变化量为 $\frac{22.7-13}{13} \times 100\% = 75\%$
- 在50%开度时,相对流量的变化量为 $\frac{61.3-51.7}{51.7} \times 100\% = 19\%$
- 在80%开度时,相对流量的变化量为 $\frac{90.3-80.6}{80.6} \times 100\% = 11\%$

- 在小开度工作时,控制作用过于灵敏,不易稳定(易引起振荡)
- 在大开度工作时,控制作用过于迟钝,调节效果不明显

3.5.2 调节阀特性--理想流量特性

□ **等百分比(对数)流量特性**：指单位相对开度变化所引起的流量变化与该点相对流量成正比，即

$$\frac{d\left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)}{d\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)} = K \cdot \left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right) \Rightarrow \frac{d(Q/Q_{\max})}{Q/Q_{\max}} = K d\left(\frac{l}{l_{\max}}\right) \Rightarrow \ln(Q/Q_{\max}) = K \frac{l}{l_{\max}} + C$$

边界条件 $\begin{cases} l=0, & Q=Q_{\min} \\ l=l_{\max}, & Q=Q_{\max} \end{cases} \Rightarrow C = -\ln R, C = -K$

$$\Rightarrow \ln(Q/Q_{\max}) = \frac{l}{l_{\max}} \ln R - \ln R = \ln R^{(l/l_{\max}-1)} \Rightarrow \frac{Q}{Q_{\max}} = R^{(\frac{l}{l_{\max}}-1)}$$

3.5.2 调节阀特性--理想流量特性

- 假设 $R=30$, 阀门相对开度 l/l_{max} 变化为10%, 则相对流量 Q/Q_{max} 的增量为

$$\frac{Q}{Q_{max}} = R \left(\frac{l}{l_{max}} - 1 \right)$$

- 在10%开度时, 相对流量的变化量为 $\frac{6.58-4.67}{4.67} \times 100\% = 40\%$
- 在50%开度时, 相对流量的变化量为 $\frac{25.6-18.3}{18.3} \times 100\% = 40\%$
- 在80%开度时, 相对流量的变化量为 $\frac{71.2-50.8}{50.8} \times 100\% = 40\%$

- 流量特性曲线的斜率随着流量增大而增大, 但流量相对变化不变, 调节灵敏度在整个调节范围内不变
- 在阀门小开度时, 放大系数 K 小, 调节缓和平稳; 在大开度时, 放大系数 K 大, 控制及时有效

3.5.2 调节阀特性--理想流量特性

□ **抛物线流量特性**：指单位相对开度变化所引起的流量变化与该点相对流量的平方根成正比关系，即

$$\frac{d\left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)}{d\left(\frac{l}{l_{\max}}\right)} = K \cdot \sqrt{\frac{Q}{Q_{\max}}}$$

对上式积分并带入边界条件可得

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = \frac{1}{R} \left[1 + \left(\sqrt{R} - 1 \right) \frac{l}{l_{\max}} \right]^2$$

3.5.2 调节阀特性--理想流量特性

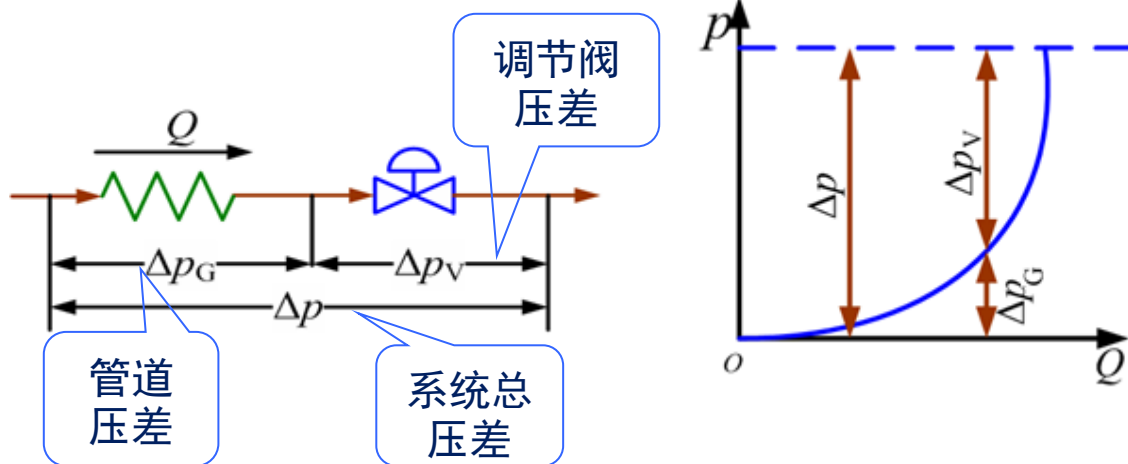
□ **快开流量特性**：阀门在小开度时流量增量比较大，随着开度增加，流量很快达到最大。即

$$\frac{Q}{Q_{\max}} = 1 - \left(1 - \frac{1}{R}\right) \left(1 - \frac{l}{l_{\max}}\right)^2$$

其有效位移一般为阀座的1/4，当开度继续增加时，阀的流通面积不再增加，从而失去控制作用，因此，快开特性调节适用于**迅速启闭的切断阀或位式控制**

3.5.2 调节阀特性--工作流量特性

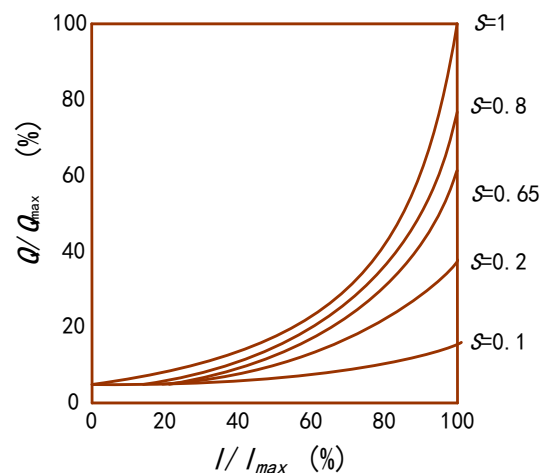
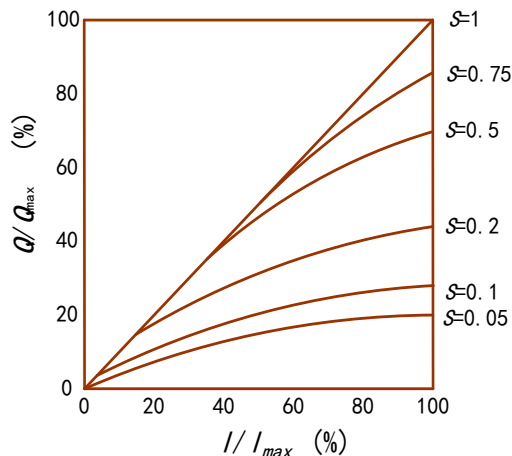
- 工作流量特性：阀前后压差变化时，流量与开度之间关系
- 串联管道
 - 总压差一定，随着阀门开度增大，流量增大，压差与流量平方成正比
 - 随着流量的增大，阀门前后的压差逐步减少
 - 实际工作流量比理想情况下小



3.5.2 调节阀特性--工作流量特性

➤ 调节阀全开时前后压差与系统总压差的比值 $S = \frac{\Delta p_{1\min}}{\Delta p}$

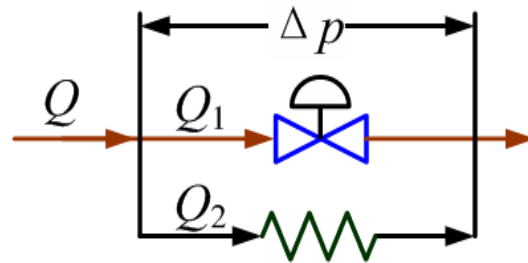
- $S = 1$ 时，为理想流量特性
- $S < 1$ 时，由于串联阻力影响， S 越小，特性趋于快开特性
- S 越小，畸变越严重，要求 S 不低于0.3~0.5



3.5.2 调节阀特性--工作流量特性

➤ 并联管道

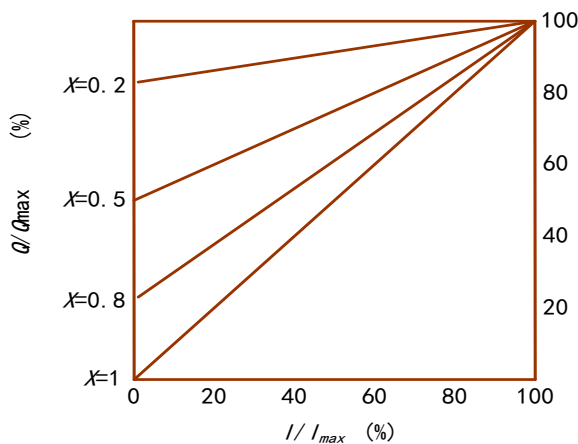
- 很多调节阀都装有旁路阀，以便手动操作和维护
- 管道总流量是调节阀和旁路阀流量之和



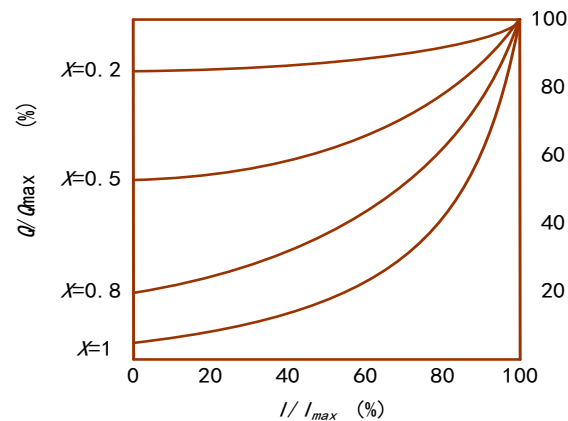
3.5.2 调节阀特性--工作流量特性

➤ X 表示调节阀全开时的流量与总管最大流量之比 $X = \frac{Q_{1\max}}{Q_{\max}}$

- $X = 1$ 时，旁路阀全关，为理想特性曲线
- 随着旁路阀逐渐打开， X 逐渐下降，可调范围随之下降
- 一般要求 $X > 0.8$



直线调节阀



等百分比调节阀

3.5.2 调节阀特性--**工作流量特性**

➤ **串并联管道工作流量特性总结**

- 都会使理想流量特性发生畸变，串联管道的影响尤为**严重**
- 都会使可调范围降低，并联管道尤为**严重**
- 串联管道使系统总流量减少，并联管道使系统总流量增加
- 都会使调节阀的放大系数减小
- 串联管道，若阀处于大开度，则S值降低对放大系数影响更为**严重**
- 并联管道，若阀处于小开度，则X值降低对放大系数影响更为**严重**

执行器

- 3.1 执行器的工作原理与分类
- 3.2 电动执行机构
- 3.3 气动执行机构
- 3.4 液动执行机构
- 3.5 调节机构
- 3.6 执行器的选择
- 3.7 其他执行设备
- 3.8 本章小结

3.6 执行器的选择

- 根据生产工艺，工况条件和系统要求，确定执行器结构，调节阀流量特性及调节阀口径

气动执行机构和电动执行机构的比较

	可靠性	驱动能源	价格	输出力	防爆性
气动执行机构	高	压缩气体，气源装置	低	小	好
电动执行机构	较低	电，方便	高	大	差
液动执行机构	高	液压油	高	大	差

- 要充分考虑流体性质（如黏度、腐蚀、毒性等）、工艺条件（如温度、压力、流量等）和系统要求，兼顾经济性和工艺要求

3.6 执行器的选择

► 调节阀流量特性

先根据系统的特点确定阀门预期的工作流量特性，然后再根据工艺管道情况选择理想流量特性

工艺管道与流量特性的关系

配管情况	$S=0.6-1$			$S=0.3-0.6$		
阀的工作流量特性	直线	抛物线	等百分比	直线	抛物线	等百分比
阀的理想流量特性	直线	抛物线	等百分比	等百分比	直线	等百分比

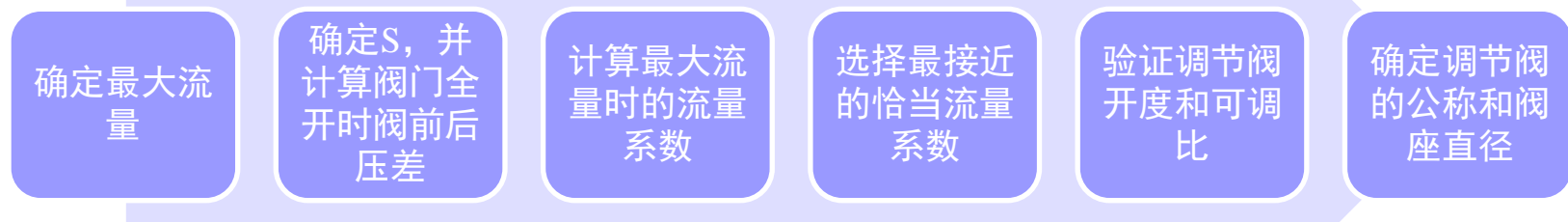
- S 越大，对调节越有利；但阀门压差损失越大，会造成动力消耗
- 一般选取 $S=0.3\sim 0.5$ 。对于高压系统，考虑到节约动力， S 可以小于 0.3
- 对于气体，考虑到阻力损失较小，一般选取 $S > 0.5$

3.6 执行器的选择

➤ 调节阀口径

- 依据调节阀流量系数 C 确定。 C 表示容量为阀全开, $\Delta p=0.1\text{Mpa}$, 流体重度为 1g/cm^3 时, 每小时通过阀门流体流量
- 选择过小, 在大干扰情况下, 会因介质流量不足而失控
- 选择过大, 浪费设备投资, 调节性能变差, 系统振荡, 降低阀门寿命

➤ 选取口径的具体步骤为

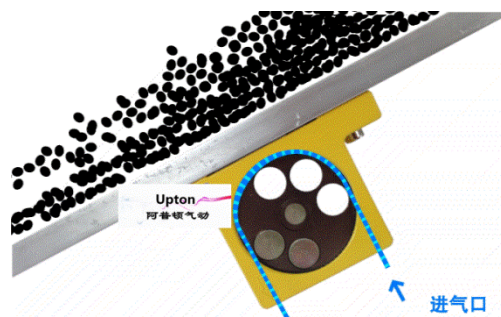
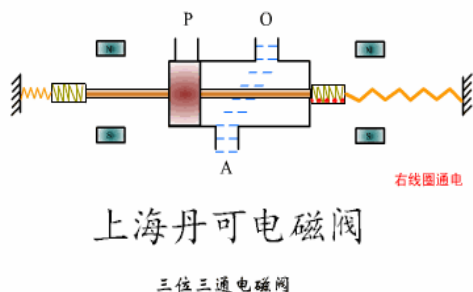


执行器

- 3.1 执行器的工作原理与分类
- 3.2 电动执行机构
- 3.3 气动执行机构
- 3.4 液动执行机构
- 3.5 调节机构
- 3.6 执行器的选择
- 3.7 其他执行设备
- 3.8 本章小结

3.7 其他执行设备

➤ 其他执行设备

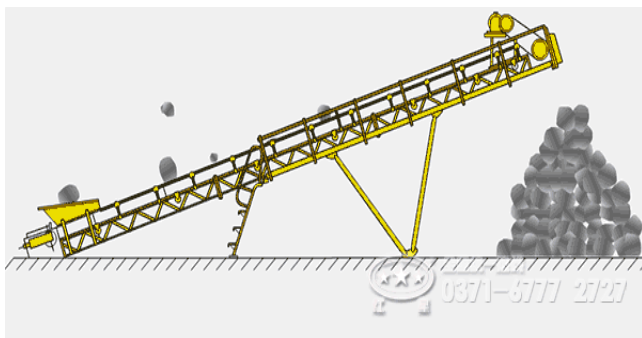


电磁阀：用电磁控制的工业设备，是用来控制流体的自动化基础元件，属于执行器，并不限于液压、气动。用在工业控制系统中调整介质的方向、流量、速度和其他的参数

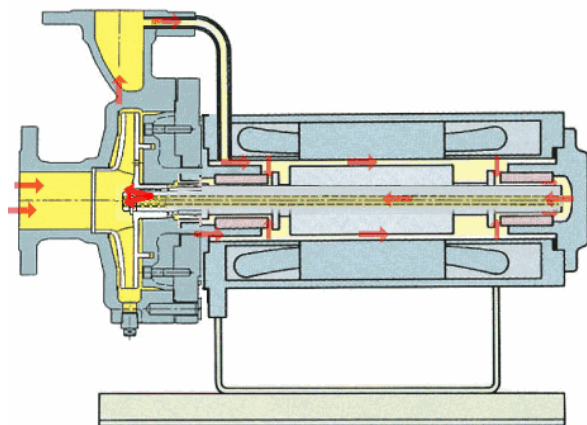
气动振动器：在电动机带动下高速转动而产生高频微幅的振动，振动频率及振动力度可通过调整压缩空气流量以及气压来精确控制

3.7 其他执行设备

➤ 其他执行设备



传送带：一种摩擦驱动以连续方式运输物料的机械。它可以将物料在一定的输送线上，从最初的供料点到最终的卸料点间形成一种物料的输送流程



潜水泵：深井提水的重要设备。使用时整个机组潜入水中工作，把地下水提取到地表，是生活用水、矿山抢险、工业冷却、农田灌溉、海水提升、轮船调载，还可用于喷泉景观

本章小结

- 介绍了执行器的**组成和分类**
- 着重阐述了组成执行器的**执行机构和调节机构**
- 重点分析了电动执行机构和气动执行机构的**工作原理和组成结构**
- 简要说明了几种常用调节机构
- 深入阐述了调节机构的**气开、气关形式和流量特性**
- 介绍了工业生产中常用的**其他执行设备**
- 给出了**执行器选择的基本方法**

作业

P99: 4-1、4-3、4-4、4-6、4-11

致谢

- 感谢研究生彭佳佳、尹枫、郑文国、江博涛、董文佳等同学参与本PPT的制作
- PPT中部分图片和视频来自互联网，感谢原作者的制作