

## 第十讲 电液伺服阀

- 10.1 概念简述
- 10.2 工作原理
- 10.3 常见结构
- 10.4 特性分析
- 10.5 应用场景

## □ 电液伺服阀概述

“**伺服 (servo)**” 一词源于**希腊语** “奴隶” 的意思。人们想把 “**伺服机构**” 当个得心应手的驯服工具，服从**控制信号**的要求而动作。在讯号来到之前，转子静止不动；讯号来到之后，转子立即转动；当讯号消失，转子能即时自行停转。由于它的 “伺服” 性能，因此而得名——**伺服系统**。

(1) 伺服系统：是使物体的位置、方位、状态等输出，能够跟随输入量（或**给定值**）的任意变化而变化的**自动控制系统**。

(2) 在自动控制系统中，能够以一定的**准确度**响应控制信号的系统称为随动系统，亦称**伺服系统**。

## □ 电液伺服阀概述

- 定义：电液伺服阀是一种变电气信号为液压信号以实现流量或压力控制的转换装置。  
其控制灵活、精度高、快速性好、输出功率大，兼具电和液压的优点：
  - 信号传递快,线路连接方便,适于远距离控制,易于测量、比较和校正
  - 动力输出力大、惯性小、反应快
- 分类：按输出和反馈液压参数不同，分为流量伺服阀和压力伺服阀。



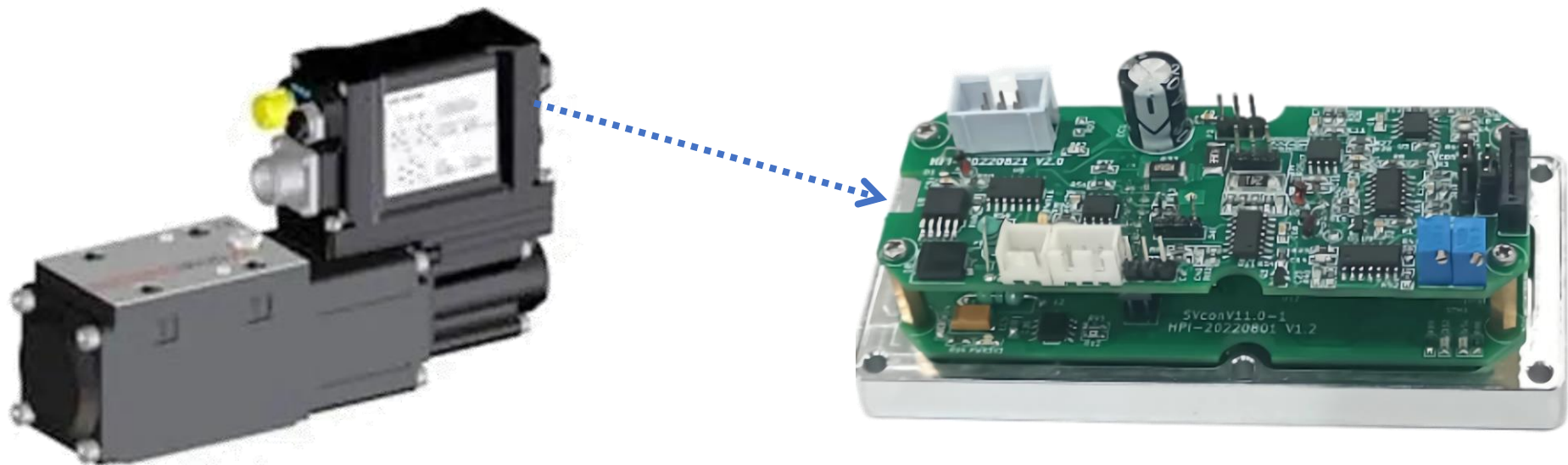
MOOG伺服阀



Parker伺服阀

### □ 电液伺服阀工作原理

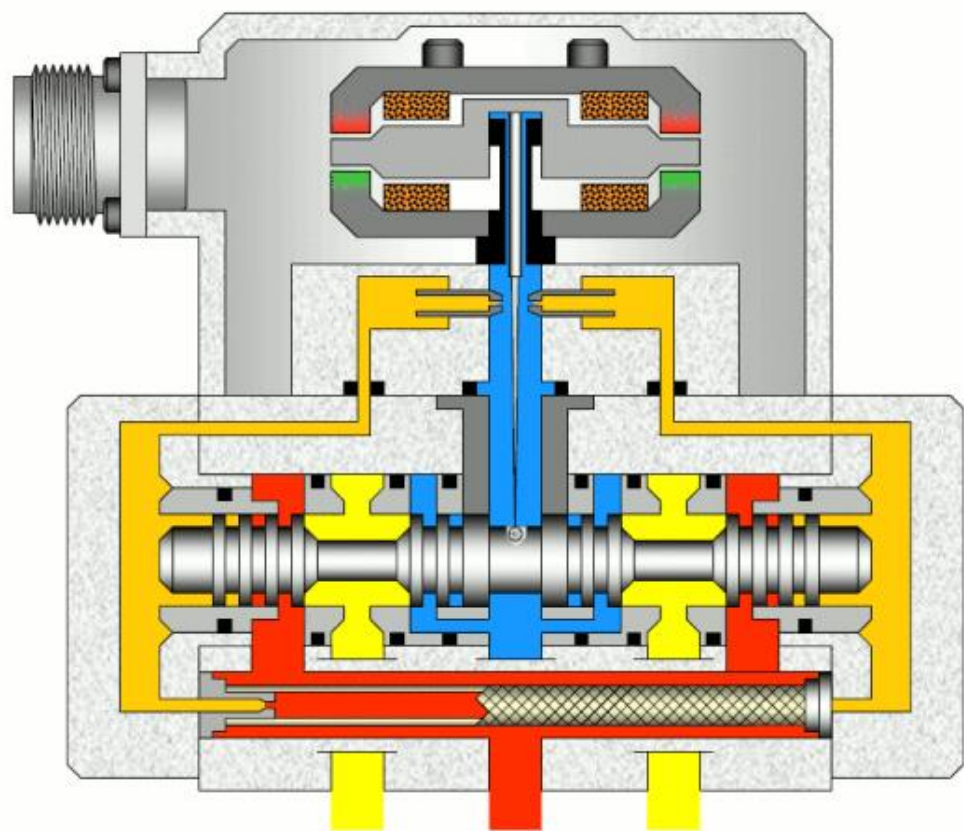
- 电液伺服阀用**伺服放大器**进行控制。其输出的电流与输入电压信号成正比。伺服放大器是具有深度电流**负反馈**的电子放大器,主要包括**比较元件**(即加法器或误差检测器)、**电压放大元件**和**功率放大元件**等三部分。
- 电液伺服阀的**电-机械转换器**的直接作用是将伺服放大器输入的电流转换为力矩或力,进而转化为运动部件的角位移或直线位移以**控制阀口的通流面积大小**。



$$\text{电压} \propto \text{电流} \propto \text{力/力矩} \propto \text{位移} \propto \text{通流面积} \propto \text{流量}$$

## 10.2 工作原理

### □ 电液伺服阀工作原理



电磁力矩+弹簧管反力矩+喷嘴液动力矩+阀芯反馈力矩

如图所示电液伺服阀的  
三大组成部分

◆ 电-机械转换器

动铁式

◆ 液压控制阀

双喷嘴挡板先导阀控制  
的功率级滑阀式主阀

◆ 反馈机构

力反馈

滑阀移动带动挡板下端球头一起移动，从而在衔铁挡板组件上产生力矩，形成力反馈。输入电流越大，电磁力矩越大，阀芯位移即阀口通流面积也越大，在一定阀口压差（7MPa）下，阀流量近似于输入电流成正比。当输入电流极性反向时，输出流量也反向。

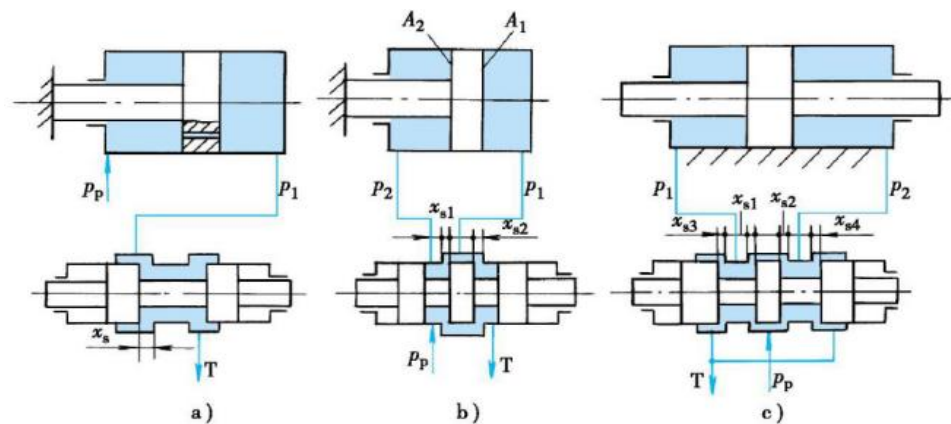
## □ 电液伺服阀常用液压控制元件结构形式

- 液压伺服阀中常用的液压控制元件的结构有滑阀、射流管和喷嘴-挡板三种。

### 滑阀

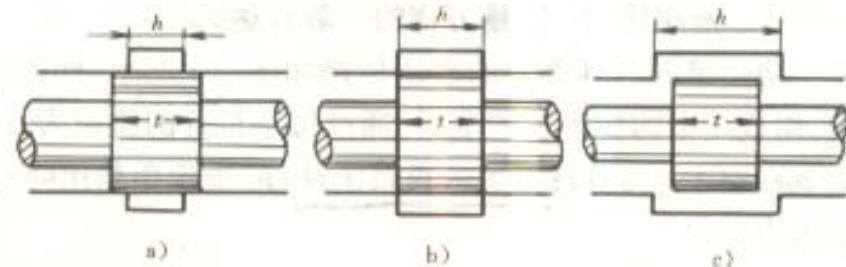
按滑阀控制边数（其控制作用阀口数）划分

- 四边滑阀：负预开口、零开口、正预开口
- 双边滑阀
- 单边滑阀



单边、双边和四边滑阀

a)单边 b)双边 c)四边



滑阀预开口形式

a)负开口 $t > h$  正遮盖

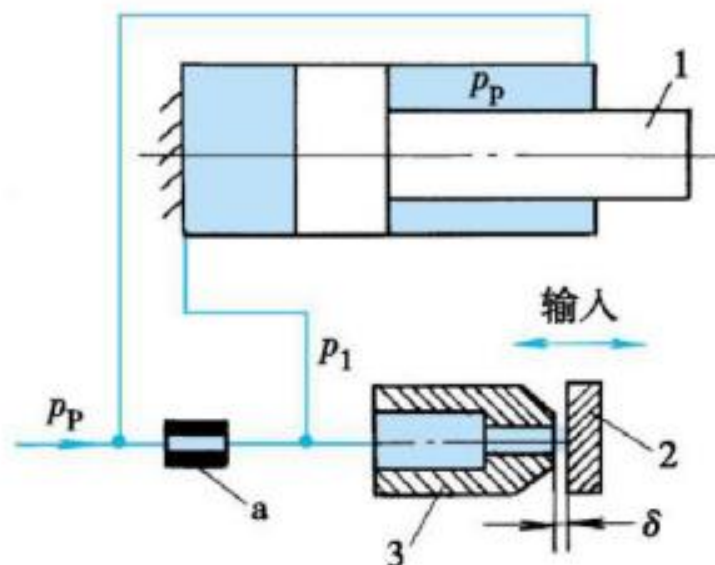
b)零开口 $t = h$  零遮盖

c)正开口 $t < h$  负遮盖



### □ 电液伺服阀常用液压控制元件结构形式

#### 喷嘴-挡板



喷嘴-挡板的工作原理

1—液压缸 2—挡板 3—喷嘴

优点:

- ① 结构简单
- ② 运动部分惯量小、位移小、反应快
- ③ 精度和灵敏度高
- ④ 加工要求不高，没有径向不平衡力
- ⑤ 工作可靠

缺点:

- ① 无功损耗大
- ② **喷嘴挡板件距离很小时抗污染能力差**

**喷嘴-挡板常用作多级放大元件中第一级（前置级）控制。**

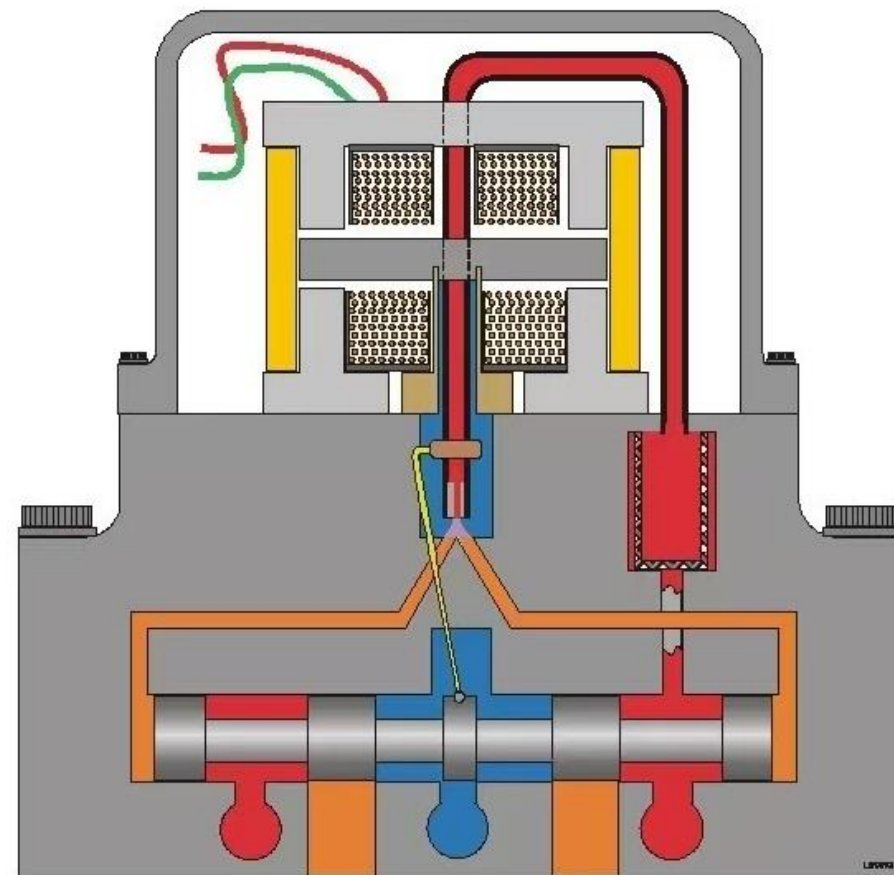
### □ 电液伺服阀常用液压控制元件结构形式

#### 射流管

主要由射流管、接收器和液压缸组成

特点：

- 结构简单、加工精度要求低
- **出口面积大、抗污染能力强**
- 压力恢复系数和流量恢复系数高
- 其特性不易预测，主要靠实验测得
- 当油液粘性变化时对特性影响较大，低温特性较差
- 射流管的惯性较大
- 零位泄漏量大



**射流管主要用于多级伺服阀的第一级的场合。**



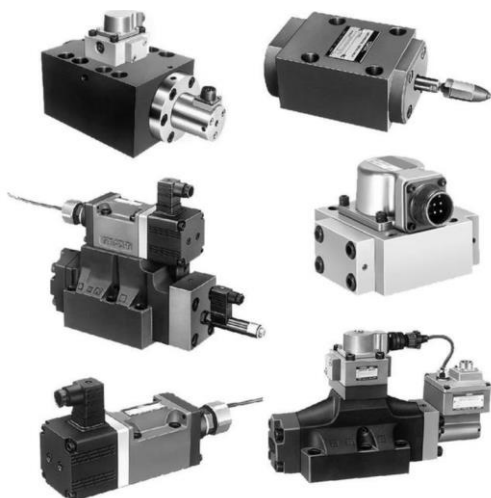
## □ 电液伺服阀特性分析

静态特性

- 伺服阀流量压力特性
- 流量特性
- 压力特性
- 内泄漏特性

动态特性

- 频率特性



主要参数

- |        |        |
|--------|--------|
| • 控制流量 | • 对称度  |
| • 额定流量 | • 滞环   |
| • 流量增益 | • 遮盖度  |
| • 空载流量 | • 压力增益 |
| • 内泄漏  | • 零位   |
| • 负载压降 | • 零偏   |
| • 阀压降  | • 零漂   |
| • 线性度  | • 频率响应 |

# 10.4 特性分析

## □ 静态特性

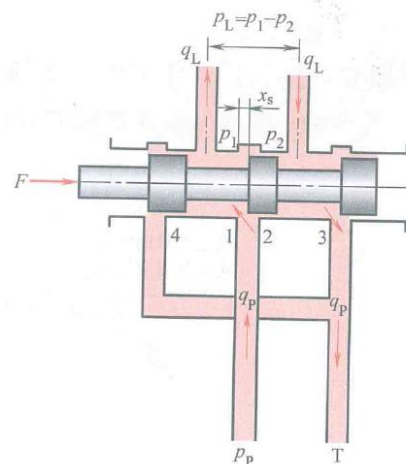
### 伺服阀流量-压力特性

定义：在负载下阀心作某一位移时通过阀口的流量与负载压力之间的关系

假定阀口棱边锋利，油源压力稳定，油液理想液体  
阀芯和阀套间的径向间隙忽略不计，双杆液压缸  
进油压力从 $p_p$ 降为 $p_1$ ，回油开口从 $p_2$ 降为零，可得

$$q_p = q_1 = q_L = q_3$$

$$q_1 = C_d A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_p - p_1)} \quad q_3 = C_d A_3 \sqrt{\frac{2}{\rho} p_2}$$



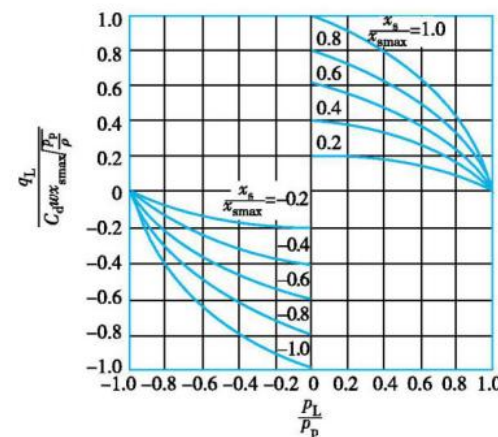
零开口伺服阀简图

伺服阀各控制口大多是配作且对称的，且负载压力  $p_L = p_1 - p_2$ ，则有

$$q_L = C_d A_1 \sqrt{\frac{2}{\rho} \left( \frac{p_p - p_L}{2} \right)} = C_d \omega x_s \sqrt{\left( \frac{p_p - p_L}{\rho} \right)}$$

同乘  $x_{smax}$ ，化成无量纲式

$$\frac{q_L}{P_p} = 1 - \frac{\left( \frac{q_L}{C_d \omega x_s \sqrt{\frac{p_p}{\rho}}} \right)^2}{\left( \frac{x_s}{x_{smax}} \right)^2}$$

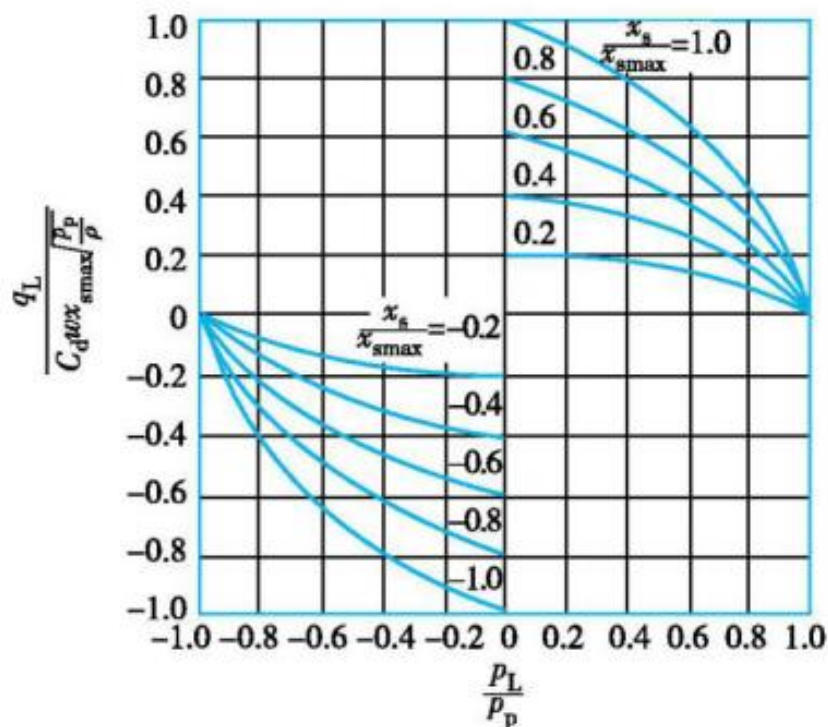


流量-压力曲线

## 10.4 特性分析

### □ 静态特性 伺服阀流量-压力特性

- 图7中上半部是伺服阀右移时的情况,下半部是伺服阀左移时的情况。由图可见,伺服阀的“流量-压力”曲线是**关于零点对称**的,亦即是阀的控制性能在两个方向上是一样的。
- 其他开口形式伺服阀的“流量-压力”特性可以仿照上述方法进行分析。



零开口伺服阀“流量-压力”曲线

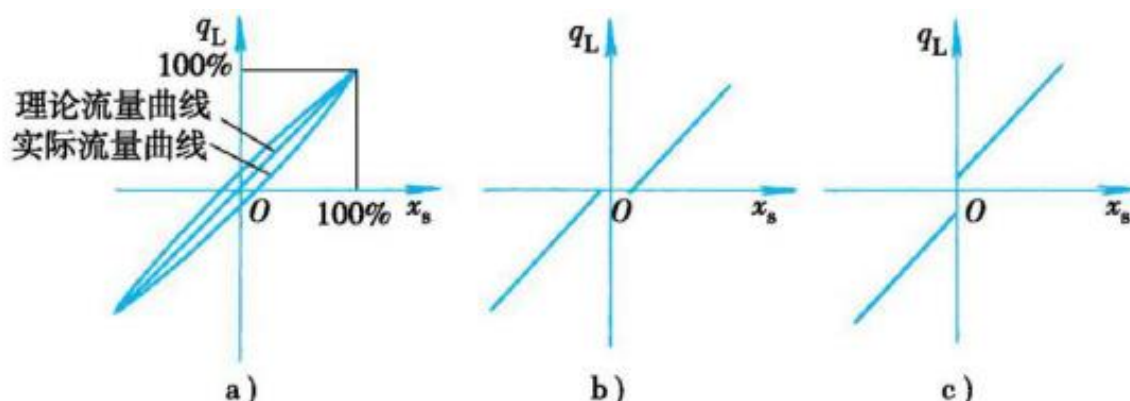
阀的流量-压力系数

$$K_c = - \frac{\partial q_L}{\partial P_L} \Big|_{x_s = \text{const}} = \frac{C_d \omega x_s}{2 \sqrt{\rho (p_P - p_L)}}$$

# 10.4 特性分析

## □ 静态特性      流量特性

- 伺服阀的流量特性如图8所示,其中图8a所示为零开口阀的理论流量曲线和实际流量曲线,图8b和图8c所示分别为负预开口阀和正预开口阀的流量曲线。



伺服阀的流量特性曲线

a)零开口阀   b)负预开口阀   c)正预开口阀

### 流量增益 (流量放大系数)

由图8可得阀的流量增益(流量放大系数),定义

$$K_q = - \frac{\partial q_L}{\partial x_s} \Big|_{P_L = \text{const}}$$

对理想零开口阀,得

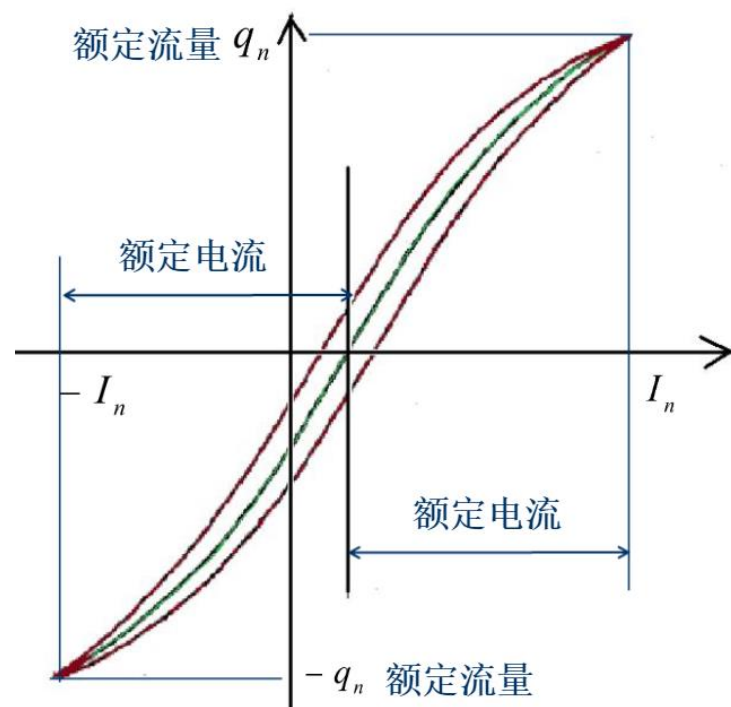
$$K_q = C_d \omega \sqrt{\frac{p_p - p_L}{\rho}}$$

**流量增益：** 正开口 (负遮盖) > 零开口 (零遮盖) > 负开口 (正遮盖)

# 10.4 特性分析

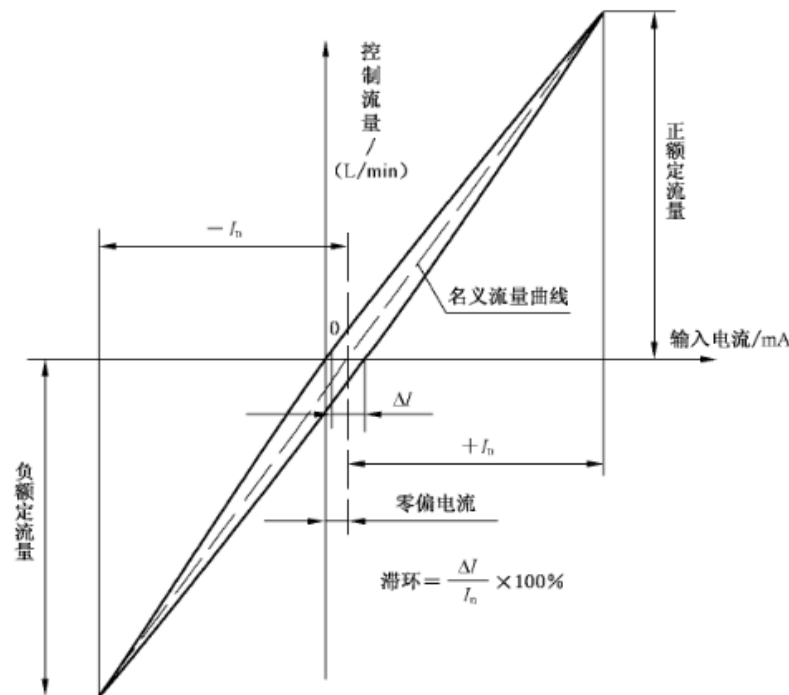
## □ 静态特性      流量特性

阀额定电流、额定流量值



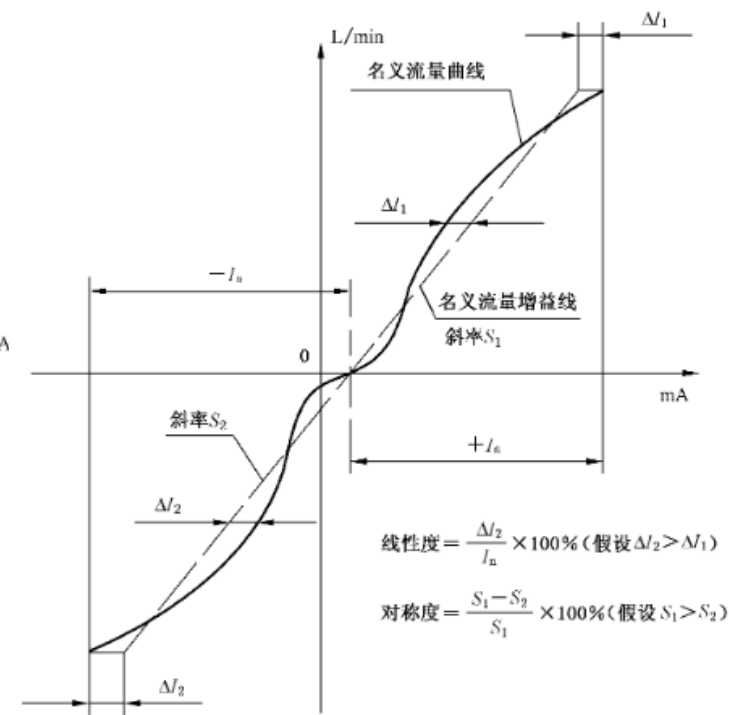
额定电流、额定流量曲线

滞环、零偏



滞环、零偏特性说明曲线

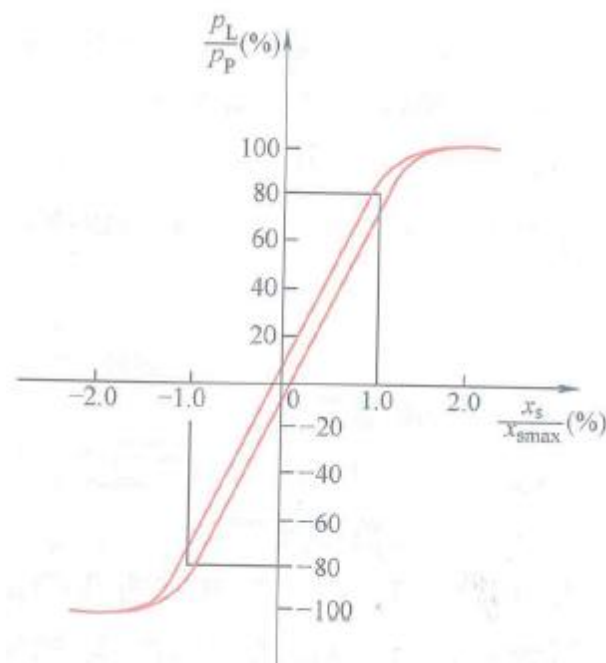
线性度、对称度



线性度、对称度说明曲线

## □ 静态特性 压力特性

- 定义：输出流量为零（即将两负载口关闭）负载压降与输入控制信号呈回环状的函数
- 影响伺服系统的**承载能力**和**系统刚度**



伺服阀压力特性曲线

### 压力增益

阀的流量压力增益定义为

$$K_q = - \frac{\partial q_L}{\partial x_s} \Big|_{P_L = \text{const}}$$

可得

$$K_q = \frac{K_q}{K_c}$$

对理想零开口阀

$$K_p = \frac{2(p_p - p_L)}{x_s}$$

上述三个系数称为液压伺服阀的特性系数。这些系数不仅表示了液压伺服系统的静特性，而且在分析伺服系统的动特性时也非常重要。



## □ 静态特性      伺服阀特性系数

- 流量增益  $K_q$ ：影响系统稳定性
- 流量-压力系数  $K_c$ ：影响系统阻尼比和系统刚度
- 压力增益  $K_p$ ：阀芯很小位移时系统起动较大负载能力，影响灵敏度

阀在 origin 附近的特性系数为 **零位特性系数**

表1 几种伺服阀的零位特性系数

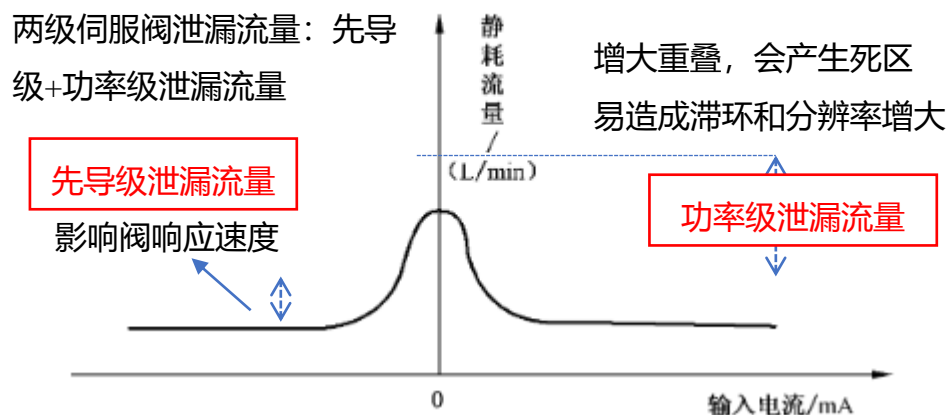
伺服阀种类零位特性系数	单边滑阀	双边滑阀	零开口四边滑阀	正开口四边滑阀
$K_{q0}$	$C_d W \sqrt{\frac{p_p}{\rho}}$	$2 C_d W \sqrt{\frac{p_p}{\rho}}$	$C_d W \sqrt{\frac{p_p}{\rho}}$	$2 C_d W \sqrt{\frac{p_p}{\rho}}$
$K_{c0}$	$\frac{2 C_d W x_{s0}}{\sqrt{\rho p_p}}$	$\frac{2 C_d W x_{s0}}{\sqrt{\rho p_p}}$	0	$\frac{2 C_d W x_{s0}}{\sqrt{\rho p_p}}$
$K_{p0}$	$\frac{p_p}{2 x_{s0}}$	$\frac{p_p}{x_{s0}}$	$\infty$	$\frac{2 p_p}{x_{s0}}$

表1中，单边滑阀和双边滑阀零位特性系数表达式是指其驱动的液压缸是小腔有效作用面积和大腔有效作用面积之比为0.5；单边滑阀  $x_{s0}$  为平衡状态下开口量，正开口四边滑阀  $x_{s0}$  为其预开口量

# 10.4 特性分析

## □ 静态特性 内泄漏特性

- 定义：输出流量为零，回油口流出的内泄漏量，也叫**静耗流量**
- 特点：随输入电流变化，零位时最大
- 作用：衡量新阀制造质量，反映旧阀磨损情况



阀的内泄漏特性曲线

零开口滑阀，中位径向缝隙  
泄漏量

$$q = \frac{\pi \omega c_r^3}{32 \mu} p_P$$

$\omega$ -阀的面积梯度;  $c_r$ -阀芯  
和阀孔间半径向间隙

$\mu$ -油液的动力粘度;  $p_P$ -供  
油压力

正开口滑阀，中位泄漏量

$$q = 2C_d \omega x_{s0} \sqrt{\frac{p_P}{\rho}}$$

$C_d$ -流量系数;  $x_{s0}$ -阀中位时  
预开口量;  $\rho$ -油液密度

实际零开口四边滑阀

- 零位流量-压力系数  
不为0
- 零位压力放大系数  
不是无穷大

零位流量-压力系数

$$K_{c0} = \frac{\pi \omega c_r^2}{32 \mu}$$

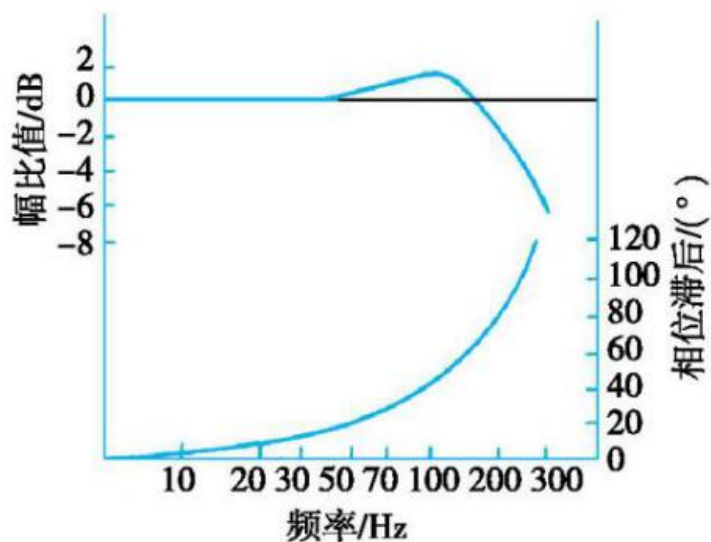
零位压力放大系数

$$K_{p0} = \frac{32 \mu C_d \sqrt{\frac{p_P}{\rho}}}{\pi C_r^2}$$

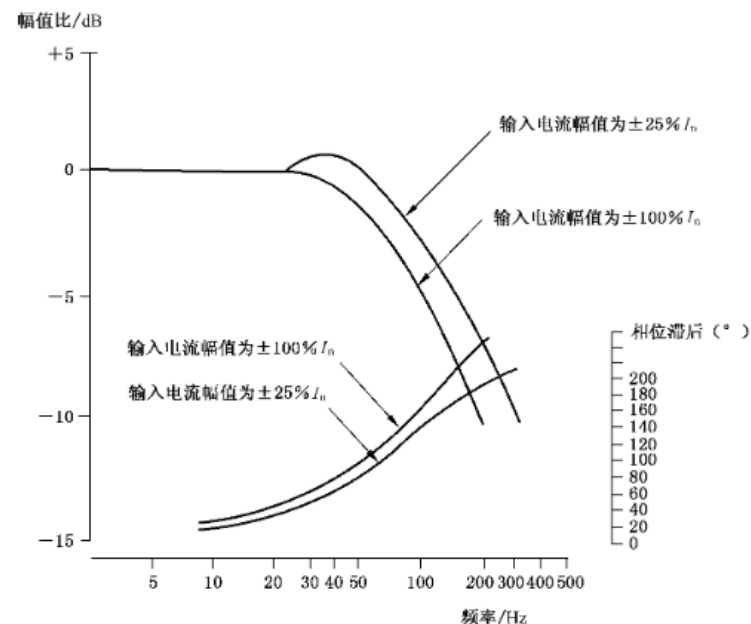
## □ 动态特性

### 频率特性

- 伺服阀的动态特性一般用频率特性表示
- 频宽：幅值比为-3dB和相位差为-90°时所对应的频率
- 频宽是衡量伺服阀动态特性的重要参数



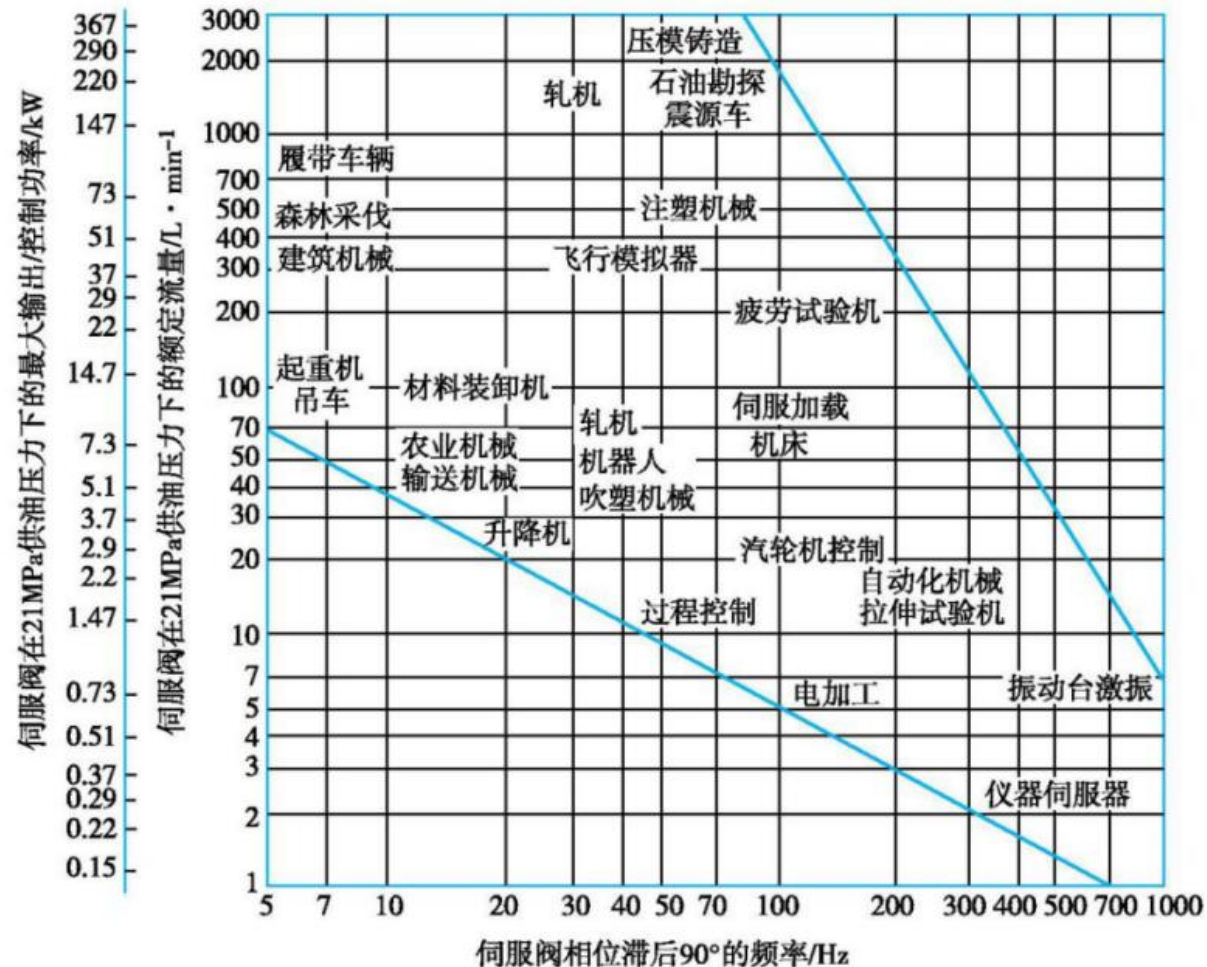
阀的动态特性曲线



不同电流下的动态特性曲线

# 10.5 应用场景

## □ 电液伺服阀的选用



伺服阀的应用:

- 控制精度高, 响应速度快
- 实现电液位置、速度、加速度和力控制
- 工业设备、**航天航空**、**军事装备**广泛应用

图为依传递功率和动态指标要求 (以-90°时相频宽标识) 应用伺服阀的情况