

# 液压系统的压力、流量和电液控制阀技术现况

吴根茂

## 第一专题要点:

1. 一个液压系统可区分为若干封闭容腔: 由相对运动器件的壁面、管壁、阀口所包围的液体在其中流动的容腔;

2. 同一容腔中到处压力相同, 故一个封闭容腔就是液压系统中的一个压力区;

3. 一个压力区中压力的变化 ( $\Delta P$ ) 除了压力区内液压元件本身的特性之外, 主要受压力区总容积  $V$ 、压力区油液总变化量  $\Delta V$  和油液管道等组合的有效体积弹性模量  $E_0$  的制约; 其关系式既压力的基本公式如下:

$$\Delta P = \frac{E \cdot \Delta V}{V}$$

4. 上述公式在以往的技术文献与教科书中, 只在进行动态特性计算论述油液的可压缩性和液阀动态特性实验时提到, 没有作为一个普遍适用的压力基本公式加以论述。因此, 在进行一般液压系统设计时常被忽视而使系统存在隐患。在寻找系统故障时又缺乏这方面的思路。锻造操作机的设计就是一个设计时被忽视、寻找原因时无从下手的实例; 而冷连轧机工作辊弯曲凸度控制系统就是一个正面重视的例子;

5. 压力基本公式可以说明老年人容易得高血压的成因: 老年人血管内常有脏物使血管系统的总容积  $V$  有所减少, 另一方面, 血管的不同程度硬化, 使弹性模量  $E_0$  增大, 如果心脏泵出的血量  $\Delta V$  基本不变的话, 则血压  $\Delta P$  明显要增高;

6. 根据压力基本公式 (参见压力区阶跃响应特性实验例) 可见, 在液压系统中液压元件的特性显然是受所在环境条件的影响, 即元件动态特性 (这里指时域的阶跃响应特性) 是个受环境条件影响的相对比较值, 系统设计时必须加予注意;

## 7. 液压传动/容积式液压传动

分元件的频域特性, 除了上述三大因数外, 还受工作信号幅值变化大小的很大影响。

## 第一专题 液压系统的压力、流量

### 一. 液压传动的的基本原则

1. 液压与液力 运动流体能量的3种基本方式: 压力能, 位置能, 速度能; 工程上区分为液压传动与液力传动两大类型, 其主要特点如下表1-1;

2. 静压传递的巴斯盖 (帕斯卡) 原理: 封

表1-1 液压传动与液力传动的区分

液压传动/容积式液压传动	利用液体的静压力来传递功率(转矩)		压力由负载决定	本报告所涉及的范围
液力传动/动力式液力传动	利用液体的动压力(冲击力,即速度能)进行工作		压力由原动机和工作轮尺寸决定	不属于本报告的领域
	液力耦合器 (液力联轴器)	输入和输出转矩相等,即不能改变原动机的输出转矩		
	液力变扭器	可以改变原动机的输出转矩		

闭容腔(连通器)中压力的等值传递与力的放大(连通器中到处压力相等);特征是:液体不流动;

3. 液压传动中“密闭容腔”的概念:由固定壁面、相对运动的壁面、管壁、阀口所包围的液体在其中流动的容腔;特征:液体在流动;

4. 大气压给泵充液,容积式泵产生流量(泵内封闭容腔周期性变化完成连续的吸压油过程);

5. 当液体的流动受到阻力时产生压力,阻力可能来自:执行器上的负载,控制器件的节流,管路中的节流(含管路流动阻力损失);

6. 压力由节流产生并受压力控制阀限制;

7. 并联油路——选择阻力最小的路径;串联油路——阻力压力相加。

## 二、封闭容腔的压力与流量特性

1. 封闭容腔(压力区)的划分——以集中参数为依据不按分布参数考虑,封闭容腔(压力区)的界面是液压泵、缸等的工作腔,壁面,阀口,节流器等。

2. 在界面所包围的封闭容腔中,即同一压力区中,压力到处相等。

3. 压力基本公式(由静压传递的封闭容腔导出,同样适用于液压传动中处于流动状态的封闭容腔),如图1-1所示。



图 1-1 封闭容腔中压力基本公式推导用图

一封闭容腔中压力为P时,体积为V;压力加大为P+ΔP时,体积为V-ΔV,由此,

$$\frac{-\Delta V}{V} = \beta \cdot \Delta P \quad \beta: \text{流体压缩率(压缩系数)}$$

$$\beta = -\frac{1}{V} \left( \frac{\Delta V}{\Delta P} \right) = -\frac{1}{V} \left( \frac{dV}{dP} \right) \quad (\text{米}^2/\text{牛顿})$$

$$\text{得基本公式} \quad \Delta P = \frac{E \cdot \Delta V}{V}$$

$$\text{或} \quad P(t) = \frac{E_e(t)}{V} \int_0^t \sum q \cdot dt$$

式中:ΔV, Σq——压力区油液总变化量;

V——压力区(封闭容腔)的总容积;

E<sub>e</sub>——有效体积弹性模量

4. 有效体积弹性模量及其影响因素

$$\frac{1}{E_e} = \frac{1}{E_c} + \frac{1}{E_l} + \frac{V_g}{V} \cdot \frac{1}{E_g}$$

式中4个E: E<sub>e</sub>, E<sub>c</sub>, E<sub>l</sub>, E<sub>g</sub>依次分别为有效、管道、油液、气体的体积弹性模量V<sub>g</sub>的影响——区分油液中溶解和混入空气。

(1)空气溶解于油中

1)空气溶解于油中——对液体性质没有影响,压缩性、黏度都不变化!

2)溶解度与油液上方空气的绝对压力成正比;压力加大时,部分混入的空气,将溶解于液体中;已溶解液中的空气会随压力的降低而逸出(打开汽水瓶时逸出二氧化碳);

3)空气在水中的溶解度为2,在矿物油为10(每1大气压可溶解10%油体积的空气);

4)溶解是需要时间的。溶解速度决定于油的压力,油液若被搅动,则气泡溶解速度较快;

(2)油液中混入空气

1)对黏度影响较小,而可使体积弹性模量大为降低。

2)在压力变化速率很高的情况下,油中的气泡是不稳定的,它们在高压下可能被压破。这就产生所谓的气态气蚀,它与蒸汽气蚀相反。气泡破坏时产生的压力大到足以使机器破坏,常发生在齿轮泵的高压排油口。

## 5. 压力区阶跃响应特性实验例(图1-2)

测试时,基本条件不变,只是改变高速开关阀控制油路控制压力的高低或流量的大小。

曲线J——上升时间5mS

压力飞升速率3.8MPa/mS

曲线L——上升时间500mS

压力飞升速率0.04MPa/mS

压力飞升速率——单位时间压力的升高值

哪条曲线表征了溢流阀的阶跃响应特性?为什么?

总结:1)三条曲线代表了整个压力区的压力飞升速率,是溢流阀也是泵的压力飞升速率;

2)压力区压力飞升速率的主要影响因素有3个,如基本压力公式

$$\Delta P = \frac{\Delta V \cdot E}{V}$$

而在本试验中,V和E都可认为不变,起影响作用的是 $\Delta V$ !

可见特性是与环境相关的!——样本上注明容腔的大小(商业行为);元件出厂时特性好;在具体系统中动态特性差,是可能的,因为环境条件变了;

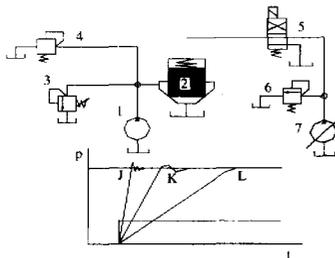


图1-2 溢流阀动态特性测试油路图

6. ISO有关压力飞升速率的规定(管理行为)

压力飞升速率含3个层次的问题:

1) 管理行为——统一测试标准(实际上用户认可是主要的);

2) 商业行为——为打官司;

3) 工程实用;

压力飞升速率区分为三个等级,介决元件阶跃响应特性的可比性——在相同压力飞升速率等级下测试。

A级——3000-4000 MPa/S

B级——600-800 MPa/S

C级——120-160 MPa/S

正面提出环境对动态特性的影响;提出了科学合理的解决动态特性可比性的办法;

7. 锻造操作机油路实例——任何电液系统都存在动态问题,只是快速性的量级有所不同(工程实用),见图1-3。

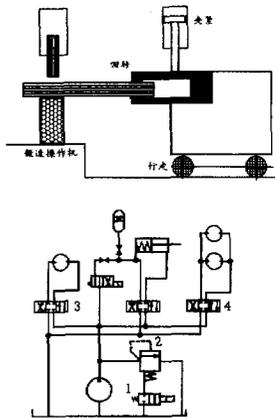


图1-3 锻造操作机机构及控制油路图

(1) 夹紧回路靠蓄能器保压;其余回路换向阀与电磁溢流阀联动,所有方向阀回中位时,系统卸荷;

(2)现场的问题是联动延迟后,失去可操作性;

(3)关键是压力飞升速率达不到联动的要求,设计时未进行快速性(动态响应)计算;

(4)现场可通过在溢流阀主阀上部加垫片,限制其最大开口度,以加快压力飞升速率——属于压力基本公式中的 $\Delta V$ ;在现场,无法改变 $V$ 。

(5)也可用可编程控制器使电磁溢流阀电铁与方向阀电铁之间设置时间差;

(6)在泵出口管路中溢流阀接口之后加单向阀,或再加蓄能器为治本措施之一;基本的还要通过计算,控制总容积,并配有合适的油源流量。

这里就引出一个非常重要的结论:并不是只有频率响应要求高的系统才存在动态特性问题,而是所有液压系统都存在动态特性问题(由压力基本公式反映的压力飞升速率问题),只是高低不同;系统设计时,必须用基本压力公式进行核算。下面的冷连轧机工作辊弯曲凸度控制系统设计就是一个主动设计的例子。

### 8、冷连轧机工作辊弯曲凸度控制系统(RC00342-1)

客户要求压缩流效应力和二次变形对系统稳定性的影响进行理论分析

是个典型的阀(压力伺服阀)控制系统,在压力伺服机构中,实际上出现的许多不稳定现象都是由于压力介质的压缩性所引起的,这种压缩

$$\Delta V = -\frac{V}{E} \cdot \Delta P$$

性表现为介质在一定温度下,压力变化引起的密度变化。

式中: $V$ ——( $\text{cm}^3$ )封闭的并在其中产生压力变化 $\Delta P$ 的容积

$E$ ——(bar)压缩模量(体积弹性模量)

$\Delta P$ ——(bar)压力变化量

$\Delta V$ ——( $\text{cm}^3$ )体积变化量

许多例证表明,在一定压力下,封闭腔内油液体积的减少量是一定的。

设有一容积为 $3550 \text{ cm}^3$ (设 $d=2 \text{ cm}$ ,则 $L=(3550 \times 4)/(3.14 \times 2^2)=1130 \text{ cm}=11.3 \text{ m}$ ,即3550的概念就是20毫米内径的圆管长11.3米)的封闭腔,油的体积弹性模量 $E=12500 \text{ bar}$ ,当压力变化为 $\Delta P=200 \text{ bar}$ 时,容积油液体积变化量为:

$$\Delta V = -3550 \times 200 / 12500 = -56.8 \text{ cm}^3 \quad (L = 18.1 \text{ cm})$$

上述结果若再用公式 $q_v = CV/tX60$ 来计算,如果 $\Delta P=200 \text{ bar}$ 的压力变化是发生在 $t=0.015$ 秒的时间内,则计算出来的产生上述压缩体积的油液流量将达到 $q_v=227.7 \text{ L/min}$ 之多。

$$\Delta V = V \Delta P / Et = 3550 \times 200 \times 60 / 12500 \times 0.015 \times 1000 = 227.2$$

如泵出口直连液压缸,则可以认为 $\Delta V$ 中流进的泵的流量减去液压缸活塞移动的体积;也可以认为 $\Delta V$ 仅为泵的流进流量,而 $V$ 增大了液压缸活塞移动的体积。

### 三、液压元件的动态特性与环境的关系 液压元件的动态特性-与环境条件有关!!

(1)阶跃响应特性——与三大因素 $E$ 、 $V$ 、 $\Delta V$ 有关!

(2)频率响应特性——幅值衰减(-3dB),相位滞后(-90°)

A. 实验输入信号幅值不同的影响;(白皮书246页,一般给出输出值和输入值两个极限值);

表1-2 某伺服比例阀的动态特性数据

规格	10通径		16通径		20通径	
输入值	±5%	±100%	±5%	±100%	±5%	±100%
幅频-3dB	35	20	40	13	35	12
相频-90°	60	18	48	18	44	16

- B. 幅频与相频不一定一致;  
C. 也与3大因素E、V、ΔV有关!

#### 四、流量基本公式

##### 1. 电液类比

表1-3 电液类比

电	电压U	电压V	电阻R	$I=V/R$
液	流量Q	压降ΔP, 压力P	液阻R	$Q=KA\Delta P^n$

$$2. \text{细长孔 } q = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128 \mu l} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

3. 各种缝隙泄漏量计算公式(液压习题集-煤炭P. 23)

例如:同心圆柱环形间隙无相对运动

$$q = \frac{\pi \cdot d \cdot h^3}{12 \mu \cdot l} \Delta P$$

##### 4. 控制阀口

非薄壁孔 $m=1$ , 薄壁孔 $m=0.5$

薄壁孔:局部阻力损失起主导作用,沿程阻力损失几乎不起作用。

$$Q = \alpha \cdot A \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P}$$

$$Q = \alpha \cdot X \cdot W \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta P} \quad (\text{滑阀式方向阀})$$

阀口、节流孔、液阻,从本质上讲,都是液阻。

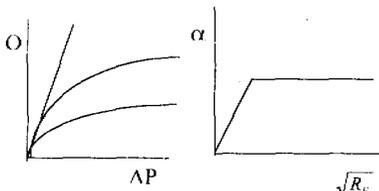


图1-4 阀口压差流量特性曲线

a—流量系数;

A—阀口流通面积;

X—阀口轴向开度(位移);

W—阀口周向开度;

$\rho$ —液体密度;

$\Delta P$ —阀口前后压力差;

##### 5. 关于流量系数

雷诺数见P18, 流态判断

固定液阻、阀口流量系数见白皮书P21-22

$$\text{雷诺数 } R_e = \frac{v d}{\nu}$$

$v$ —流体在导管截面上的平均流速, cm/s;

$d$ —导管内径, cm;

$\nu$ —运动黏度, cm<sup>2</sup>/s

## 第二专题 电液控制阀技术现状

-----从开关技术、比例技术到伺服比例技术

### 一、电液比例技术概述

1. 含义:广义而言凡输出能随输入的变化而变化的控制,均可认为是比例控制。电液控制时其输入为电子信号,输出为液压执行元件的参数位移、速度、加速度和力,或者转角、角速度、角加速度和转矩等。

#### 2. 发展简史(表2-1)

3. 液压控制阀按控制原理与性能特点的分类,见图2-1、表2-2。

4. 开关控制、电液比例控制、电液伺服控制的关系(电控; $H_2$ ;遮盖量;加工精度;过滤;能耗;可靠性),参见表2-3。

#### 5. 液压技术的特点

(1) 功率重量比大(比电磁执行元件大1个数量级),可构成体积小、重量轻、响应速度快的大功率控制单元;

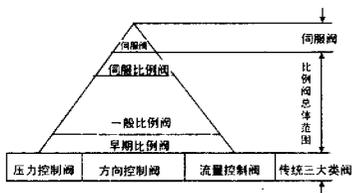
(2) 液压系统负载刚性大(液压马达为电机的5倍),精度高;

(3) 可安全可靠并快速实现频繁的带载启动和制动;

表2-1 电液控制技术发展简表

电液伺服阀技术	1940年代第2次世界大战期间由于武器和飞行器自动控制需要而出现至1960年代日臻成熟	其特点见表2-1；但由于对流体介质的清洁度要求十分苛刻，制造成本和维修费用比较高，系统能耗也比较大（分别对应表2-1的第六、第五与第六、第七项），难以被各工业用户所接受	
电液比例阀技术	1960年代后期，各类民用工程对电液控制技术的需求显得迫切与广泛，因此，人们希望开发一种可靠、价廉，控制精度和响应特性均能满足工业控制系统实际需要的电液控制系统，1960年代出现了工业伺服技术（在伺服阀基础上）与电液比例技术（在传统开关阀基础上）		
	工业伺服阀	1960年代后期出现	在伺服阀基础上，增大电机转换器功率，适当简化伺服阀结构，降低制造成本，应用面不广
	早期比例阀	1960年代后期出现	仅将比例电磁铁用于控制阀，控制阀原理未变，性能较差，频响1-5Hz，滞环4-7%，用于开环
	比例阀	1980年代初期出现	完善控制阀设计原理，采用各种内外反馈、电校，耐高压比例电磁铁，电控器特性大为提高，稳态特性接近伺服，频响5-30Hz，但有零位死区；既用于开环，也用于闭环
	伺服比例阀	1990年代中期出现	制造精度、过滤精度矛盾淡化，首级阀口零遮盖无零位死区，用比例电磁铁为电机转换器，2级阀主级阀口小压差，频响30-100，用于闭环
传统的电液开关控制技术		不能满足高质量控制系统的要求	

表2-2 液压控制阀按控制原理与性能特点的分类



液压控制阀按控制原理与性能特点的分类	控制性质	输入方式	控制特性	输入模式
	开关控制	手动		
电磁				
比例控制	手动控制	电液伺服控制	电液伺服控制	模拟式
			电液比例控制	数字式
	电液控制	电液比例控制	电液比例控制	模拟式
			电液比例控制	数字式

表2-3 开关控制、电液比例控制、电液伺服控制基本特点的对比

对比项目	一	二	三	四	五	六	七
电液控制阀	电子或继电器控制	电机转换器	动态响应Hz	零位死区	加工精度要求	过滤精度要求	阀口压降
伺服阀	电子控制	力马达 力矩马达	高 > 100	无	$\mu$	3-10 $\mu$	1/3油源总压力
比例阀	伺服比例阀	电子控制	中 30-100	无	$\mu$	3-10 $\mu$	单级或首级： 1/3油源总压力 主级：0.3-1MPa
	一般比例阀	电子控制	一般	有	10 $\mu$	25 $\mu$	0.3-1MPa
传动开关阀	继电器控制	开关电磁铁	1-30	有	10 $\mu$	25 $\mu$	0.3-1MPa

(4) 方便地进行正反向直线或回转运动和动力控制, 而且具有很大的调速范围;

电气或电子技术与液压传动与控制技术相结合的产物——电液控制系统兼备了电气和液压的双重优势, 形成了具有竞争力的自身技术特点。

#### 6. 电液比例控制系统的特点与技术优势

- (1) 简化系统, 可复杂程控;
- (2) 电信号遥控——引进微电子技术的优势;
- (3) 电液控制的快速性——开关阀无能为力;
- (4) 利用反馈, 提高控制精度;
- (5) 机电一体化;

电气或电子技术在信号的检测、放大、处理和传输等方面比其他方式具有明显的优势, 特别是现代微电子集成技术和计算机科学的进展使得

这种优势更显突出。因此, 工程控制系统的指令及信号处理单元和检测反馈单元几乎无一例外地采用了电子器件。而在功率转换放大单元和执行部件方面, 液压元件则有更多的优越性。

#### 7. 关于零位死区

工作状态:

伺服阀——用于闭环, 工作在零点附近;

比例阀——用于开环, 也用于闭环; 工作于阀口开度变化很大的区域, 也工作于零位附近; 采用阶跃信号发生器等特殊措施, 快速通过零位死区, 实现闭环控制;

但此措施未能妥善解决问题, 所以比例阀用于速度控制闭环不成问题, 而用于位置、力闭环就有缺陷。

#### 二、从比例阀到伺服比例阀

##### 1. 比例阀的主要缺陷是不能很好用于位

表2-4 比例阀的特点、对伺服比例阀的说明

比例阀的特点	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 过滤精度要求、阀口压降、价格接近开关阀;</li> <li>● 滞环、重复精度等稳态特性接近伺服阀;</li> <li>● 频宽(动态特性)比伺服阀低一个档次, 但已可满足70%工业部门的需要;</li> <li>● 有中位死区(零位死区), 与开关阀相同;</li> </ul>
对例	<p>1. 伺服比例阀是基于下述的历史变迁并弥补一般比例阀用于要求无零位死区的闭环控制存在一定缺陷而出现: 原来伺服阀加工精度高的缺陷, 由于制造技术的发展而淡化; 原来伺服阀要求过滤精度高的矛盾由于过滤技术的进步也淡化, 以及对电液器而言, 处理大电流的技术水平已大为提高。</p> <p>2. 伺服比例阀的结构特点: 利用(大电流的)比例电磁铁(不采用伺服阀常用的力马达或力矩马达)为电机转换器, 加上首级采用伺服阀机械结构(首级用伺服阀的阀心阀套), 以及(首级、主级)阀口零位、</p> <p>3. 根据其动态频响比一般比例阀高, 伺服比例阀被称为高频响比例阀; 根据其更适应与像速度控制、位置控制、压力控制等要求无零位死区的闭环系统, 伺服比例阀又被称为闭环比例阀, 这两种叫法都有一定道理, 但也都避免不了其片面性。实际上, 随着技术的发展, 伺服控制与比例控制将越来越难以区分, 伺服比例阀集中了原本伺服阀与比例阀的长处, 是这种发展趋势的重要标志</p>

表2-5 开关控制、电液比例控制、电液伺服控制适应性的基本情况对比

伺服(方向)阀	开环控制	位置、压力闭环	
		速度闭环	位置、压力闭环
伺服比例阀(高频响比例阀、闭环比例阀)		伺服阀一般只用于闭环系统, 且工作在零点附近	
比例(方向)阀	用于开环系统, 也用于闭环系统; 工作于阀口开度变化很大的区域, 也工作于零位附近	采用阶跃信号发生器等特殊措施, 快速通过零位死区, 可用于要求无零位死区的闭环控制; 但特性不如无零位死区的伺服阀或闭环比例阀	
传统开关式方向阀	仅用于开环系统		

置、力控制闭环。由于客观条件的变化和工程应用的要求,导致了伺服比例阀的出现。

2. 伺服比例阀解决位置、压力等要求无零位死区的闭环控制。

3. 历史变迁:

(1) 原来伺服阀加工精度高的缺陷,由于制造技术的发展而淡化了!

(2) 原来伺服阀要求过滤精度高的矛盾也淡化了!

(3) 对电器,处理大电流的技术水平,大为提高;

(4) 1/3油源压力用于控制阀口的问题:小通径问题不大;调节阀的主阀口保留比例阀的水平(5-7bar);

4. 结构特点:利用(大电流)比例电磁铁(不采用伺服阀的力马达或力矩马达)为控制动力+首级伺服阀(首级用伺服阀的阀心阀套);

(首级、主级)阀口零遮盖;

5. 性能特点:无零位死区;频响较一般比例阀为高;可靠性比伺服阀高;

6. 伺服比例阀实际上只有方向节流阀(流量阀)!

### 三、工程应用一般选用原则

在满足性能要求的前提下,应尽量选用更简单更可靠的技术方案;就液压系统而言,优先采用的顺序为:

传统开关控制系统,

比例控制系统,

伺服比例控制系统,

伺服控制系统

作者简介:

吴根茂:浙江大学教授、博士生导师

## 《第七届中国专利奖》评审结果 我厂《夹片式群锚拉索及安装方法》荣获金奖

《第七届中国专利奖》评审日前结束,我厂和上海市基础工程公司、同济大学共同开发的发明专利:《夹片式群锚拉索及安装方法》荣获金奖(专利号ZL92108579.6)。这是我厂乃至广西专利项目首次获得国家级专利金奖。

《夹片式群锚拉索及安装方法》是一种新型的适用于大、中跨径斜拉桥、拱桥吊杆、系杆、弹性索、体外预应力索及各类悬臂结构建筑的主要载荷构件和工法。由于制索、施工安装合二为一,不仅大大简化了制造和安装工艺,降低了施工风险,而且节约成本30%。该项目开发成功,填补了国内拉索制造空白,技术上属国内领先、

世界先进。几年来先后在天津彩虹桥、金华金婺大桥和湖南浏阳河大桥等国内、外重大工程中应用,社会和经济效益十分明显。

中国专利奖每两年评选一次,本届中国专利奖是从各地知识产权局、部委及院士推荐的176项专利项目中,经过初审、专业评审组评审、评审委员会评议后产生的。此次共评出专利金奖12项,其中,发明专利10项,实用新型专利1项,外观设计专利1项。初审、专业评审和委员会评议结束后都进行了全国范围的公示,充分体现了公开、公平、公正的评比原则。

(杨金秀)