

# 国外电液伺服系统

参考资料

北京机床研究所

一九七五年五月

## 出版说明

电液伺服系统的出现迄今已有三十多年的历史，最近十多年来，由于它具有反应快、控制精度高、工作可靠、功率/重量比大等优点，日益获得广泛的应用。到现在，电液伺服阀已应用于航空、机床、轧钢机、材料试验机等二十多个行业中，日本约有90%的数控机床采用电液步进马达。

我国已有一些单位，遵照毛主席关于“独立自主、自力更生”的教导，研制成功了电液伺服阀、电液步进马达等元件，现已成批生产，并用于不同的机械设备上。

为了宣传、推广电液伺服驱动技术，我们曾在《机床情报》杂志(1973年1—5期)上刊登了“电液伺服系统讲座”，共五讲。

为了满足需要，根据“洋为中用”的原则，选编、出版了《国外电液伺服系统参考资料》。本资料包括有关电液伺服系统设计、研究、制造等方面的文章共14篇，其内容仅仅反映了部分情况。

希有关同志对本资料中的错误和不当之处，提出批评、指正！

# 目 录

液压伺服装置的结构元件.....	( 1 )
电液伺服机构的设计程序要点.....	(11)
电液伺服机构的设计.....	(19)
使用伺服阀的电液伺服机构的简易设计法.....	(30)
数控机床步进电机驱动装置的设计.....	(41)
液压伺服控制机床的设计要点.....	(47)
液压马达的脉冲控制.....	(56)
一个高速伺服马达的特性.....	(62)
加速度场电液伺服阀的工作.....	(76)
数控机床用电液伺服马达.....	(89)
数控机床的功率伺服机构的使用实例和问题.....	(94)
电液伺服阀的制造工艺.....	( 103 )
“普莱特”电液步进马达及其加工法.....	( 109 )
数控系统工作油故障的排除法.....	( 115 )

# 液压伺服装置的结构元件

## 1. 前言

在应用液压伺服装置的液压机械中，起最重要作用的是伺服阀和执行元件。检

中最主要的是：

1. 空载流量特性；
2. 分辨率；
3. 压力增益特性；

4. 内部泄漏特性；  
5. 由于压力、温度变化而引起中点变动的特性；

6. 频率特性。

空载流量特性是由原点附近的特性、磁环、

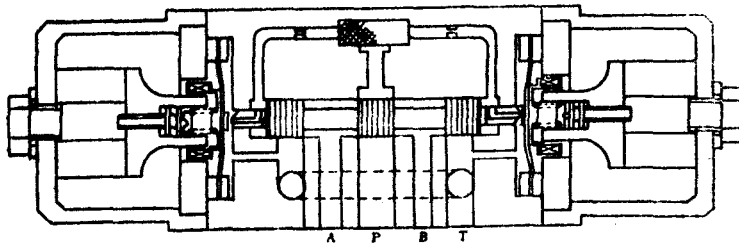


图1 YUKEN—DOWTY 伺服阀

测装置直接影响液压伺服装置的精度，所以，对它也要正确选择。再者，液压动力部件，在实际使用中也很重要。本文就以这些为中心，从控制技术角度上来试图对液压伺服装置的结构元件加以解说。

## 2. 伺服阀

电液伺服阀，在构造上由以下三部分组成：把微弱的电信号转换成力的力矩马达；把这个力或由这个力产生的位移转换成液压的放大部分；以及由这个压力驱动的主阀部。由于各自的构造机能不同，市场上销售的伺服阀的种类是很多的。图1是在放大部分应用喷嘴挡板的位移平衡式的伺服阀；图2也是用的喷嘴挡板，但又把滑阀位移变换成力再反馈给放大部分的力平衡式伺服阀；图3是在放大部分应用喷射管的力平衡式伺服阀。

## 3. 伺服阀的性能

伺服阀性能试验项目大约有10项，其

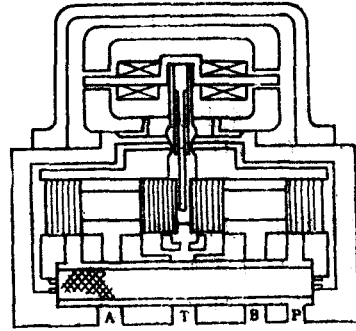


图2 MOOG 伺服阀

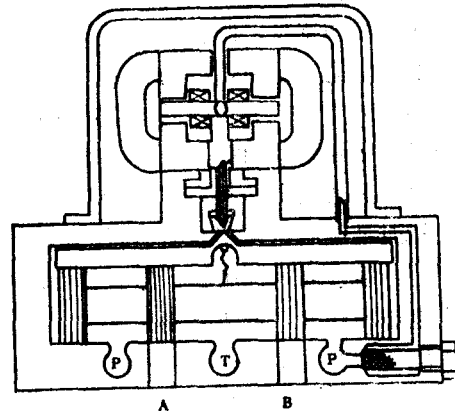


图3 ABEX 伺服阀

直线度三者来评定的。其中原点附近的特性是最重要的，可决定伺服阀的等级。该特性如图4所示，有三种特性曲线，它是

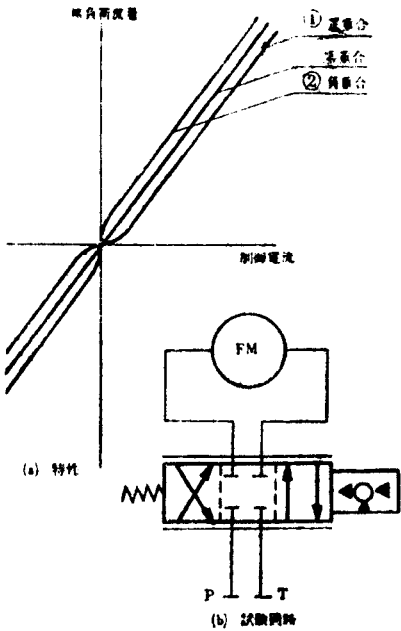


图4 空载流量特性  
①—负开口；②—正开口

由主阀部的阀芯台肩和阀套的开口量所决定。具有零开口（零遮盖）特性或一定负开口（正遮盖）特性的伺服阀是比较理想的，具有正开口（负遮盖）特性的伺服阀一般不耐用。零开口、负开口、正开口特性与阀芯台肩宽度、阀套孔口宽度的几何尺寸不一定完全一致，因为受到阀芯和阀套间间隙的影响。原点附近的空载流量特性的斜率在相对理想直线50~200%的范围内时在使用上是不会产生很大问题的，然而希望避免使用有明显死区和原点斜率显著地升高的伺服阀。磁环特性是对额定电流的评价，希望限制在2~3%以下。磁环的产生主要有两种：由力矩马达等产生的磁滞和由阀芯和阀套间的滑动摩擦而产生的磁环。不论磁环是由于什

么原因产生，如果往伺服阀的控制电流中叠加高频交流电流（高频颤动信号），就都会使磁环现象得到明显的改善。一般情况下，动圈式的力矩马达的磁滞现象较少。阀芯、阀套间的滑动摩擦所产生的磁环现象也受工作油的污染状态的影响，然而使用过一段时间的伺服阀比刚组装起来的伺服阀的磁环会有所改善。直线度是将空载流量特性曲线相对理想直线的偏差换算成电流来评价，一般允许偏差为10~20%。但是它在原点附近的直线性也是很重要的，在额定电流的 $\frac{1}{3}$ 以下时，希望偏差在3%以内。

分辨率是用使控制流量发生变化所需最小控制电流来评价，它必须在额定电流1%以下。

压力增益特性是从另外角度对空载流量特性在原点附近的特性的评价。当关闭伺服阀的出口使之流量为零时，测量控制电流同出口的压力差(图5)。在控制电流

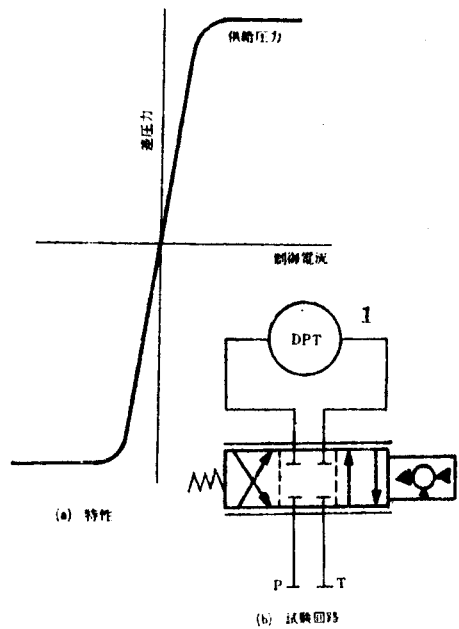


图5 压力增益特性  
①—压力差计

比较大时，在出口产生比较大的供给压力，而在原点附近产生和电流成比例的压力。这是由于开口量及阀芯、阀套间有径向间隙而造成的。负开口时压力增益斜率很陡，正开口时，压力和电流成比例的区域较宽。通常，在原点附近控制电流变化1%，供给压力的斜率变化为30~80%的伺服阀比较多。希望在空载流量特性的不灵敏区以外的范围内，压力增益特性的斜率要马上升高，它直接决定伺服系统对外力作用的刚性。在使用流量伺服阀进行压力控制时则与此正相反，它要求压力增益特性中成比例的区域比较宽才好。

内部泄漏特性也是检验伺服阀质量方面很重要的内容。它是在关闭伺服阀出口时，测量控制电流和回油口排油量的关系。图6所示的内部泄漏特性是在原点具有一峰值而在控制电流比较大时特性比较平坦。平坦特性是喷嘴、喷嘴等放大部份的耗油量，峰值部份是阀芯和阀套间隙处的泄漏量，负开口时峰值高度小、正开口时峰值高度大。峰值如果是逐渐展开的，说明阀芯、阀套的径向间隙大，峰值急剧上升和下降意味着阀芯、阀套的径向间隙比较小。可以用力增益特性作为判定伺服阀寿命的资料。

由压力、温度变化引起的零偏，是决定伺服阀稳定精度的重要原因。严格地说，往伺服阀上的供油压力和回油压力并不是恒定的，工作油的温度也绝不是恒定的。这些条件的变化是破坏伺服阀的平衡的原因，它就以零点变动的形式表现出来。这个零点变动主要反映在放大部份的流量特性上，由部件的质量决定其变动量。对于20°~30°C的温度变化和±15%的供油压力变化，希望零点移动范围换算成控制电流的变化为3%以下。

频率特性是把控制流量相对控制电流

变化的时间追踪特性用正弦波成分来评价的，它是用在90°相位时的频率或波特图来表示的。市场上出售的伺服阀在90°相位时频率达30~200赫芝，而最好使用频率数较高的伺服阀。在波特图上共振频率的峰值大的伺服阀应尽量少用，可以采用峰值在5dB(分贝)以下的伺服阀。表1示出了YUKEN—DOWTY伺服阀的规格。

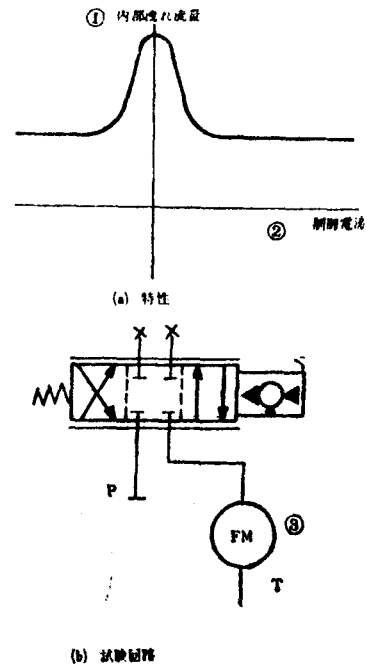


图6 内部泄漏特性

- ①—内部泄漏量；②—控制电流；  
③—流量计

其它性能指标，如最高使用压力，回油侧耐压，也都是使用时重要的参数。还有力矩马达的阻抗、电感也都对伺服放大器有重要关系。也就是说，由于线圈电阻和电感的作用，电流相对电压具有一定的时间常数。

除了这些性能外，还要考虑伺服阀对尘埃的敏感性。伺服阀对工作油中的脏物是十分敏感的，这是由于为使伺服阀具有上述的性能，加工精度是很严格的，不能超

表1. YUKEN—DOWTY电液伺服阀的一般规格

型 号	SVD—F <sub>1</sub> —10
额 定 流 量	4、10、20、40、60升/分(阀压降: 70公斤/厘米 <sup>2</sup> )
额 定 电 流	100毫安(串联线圈电阻80欧)
最 大 使 用 压 力	210公斤/厘米 <sup>2</sup>
回 油 侧 耐 压 力	210公斤/厘米 <sup>2</sup>
内 部 流 量	在额定流量5%以下
磁 环	2%以下(无颤动)
分 辨 度	1%以下
压 力 增 益	供油压力50%/额定电流1%
频 率 特 性	50赫芝以上(90°相位滞后)
供油压力引起的零点偏移	供油压力变化为-15%~+15%时, 在20%以内
油温变化引起的零点偏移	温度变化为20°C~50°C时, 在3%以内

过3~5微米。对工作油中的尘埃最敏感的地方,是液压放大部分的喷咀挡板、喷管和阀芯、阀套之间的滑动面。在喷咀挡板处,挡板距喷咀的距离只有喷咀直径的1/4以下那么小。从这点来看,喷管方式由于其口径较大而有利一些,但无论如何放大部分的前面都要装设滤油器,以减少这部份的故障。比较常见的故障,是由于在阀芯、阀套之间混入了尘埃,而引起所谓“咬住”现象。这种故障不论对那种伺服阀都有同样的危险性。若因此而将阀芯、阀套间隙设计加大,则会使性能劣化,所以是不允许的。解决办法,充其量不过是加大主控制滑阀的驱动力,以避免动作不良。加大主控制阀的驱动力,就得增大阀芯直径和加大控制压力,然而这要给动特性带来坏影响,所以它还不是根本的对策。最近,美国研究出用(数瓦功率的)放大器直接驱动的(没有喷咀挡板等液压

放大级)伺服阀,据说频率特性也很好,这也许是今后的发展方向吧。

#### 4. 伺服驱动装置

伺服阀通常与液压马达或油缸等执行元件组合,用于位置控制、速度控制和力的控制等;有时与液压马达、检测器组合,作为伺服驱动装置,用于数控机床等自动化机械和试验机等的精密控制上。液压伺服驱动,与电气伺服驱动相比较,具有以下优点:

(1)在同样的输出功率情况下,这种马达的惯量小,和机械系统组合时,其共振频率较高;

(2)作为执行元件,它的刚性高,闭环系统的环路增益可以更大;

(3)从最低速度到最高速度这样广泛的转速范围内能简单地进行速度控制;

(4) 由于工作油的循环, 有自己冷却的作用。

这些特点在输出功率大时更为显著。

组装到伺服驱动装置里的液压马达, 比通常使用的液压马达要求更严格。

- (1) 每一转时工作油容量的变化要少;
- (2) 内部泄漏和外部泄漏都要少;
- (3) 起动压力和内部阻力要小;
- (4) 回转部份的惯量要小;
- (5) 马达内部包含的工作油容量要少, 等等。

每一转时工作油容量的变化, 是在低转速范围内产生转速变化的原因, 从而它限制了马达可以使用的速度范围,

内、外部的泄漏, 是使伺服阀的压力增益特性劣化的原因, 使驱动装置的扭矩增益降低, 在驱动静摩擦比较大的负载系统时, 分辨率降低, 严重情况下会引起爬行。这些当然都使得装置本身的效率降低。

降低起动压力, 对提高马达本身的分辨率是很有效的, 可从而得到比较高的环增益。

回转部份的惯量和马达内部包含的工作油容量, 决定马达的共振频率。马达的共振频率为:

$$F_m = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\beta \left(\frac{D_M}{2\pi}\right)^2}{V_{MJM}}} \quad (\text{赫芝})$$

所以, 减小马达惯量及其所含工作油容量, 可以提高其固有振动频率。

图7是为适应这个要求而研究出来的YUKEN—WS1动叶片式液压马达的原理图。

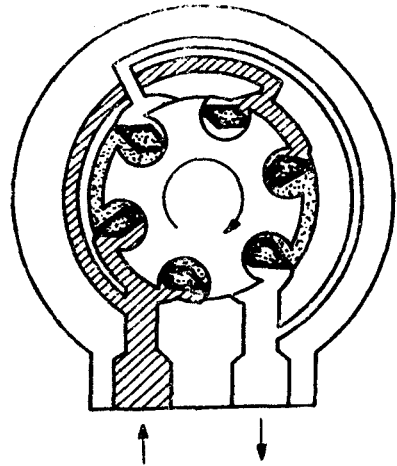


图7 YUKEN—WS1 动叶片式马达的基本构造

由于它是点对称形的构造, 回转中工作油的容量变化较少, 特别应该注意的地方是叶片和转子共同回转, 并且由导向凸

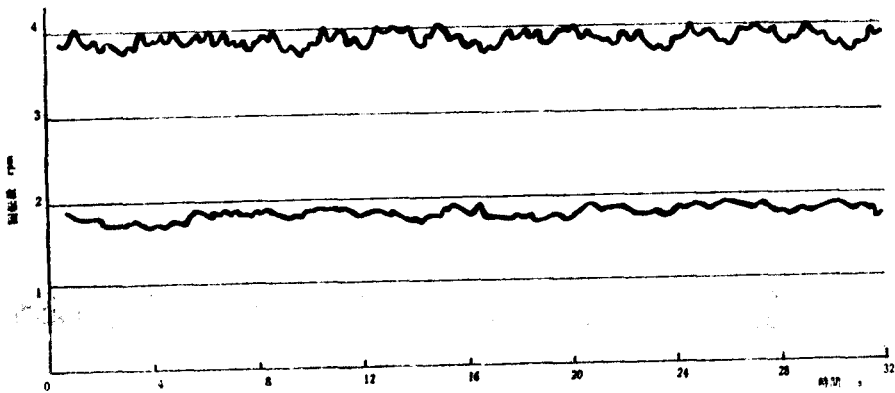


图8 YUKEN—WS1 液压马达的低速性能



轮来使其摇动，避免了和凸轮环的机械接触。因此几乎排除了机械的静摩擦，起动力压力不超过1.5公斤/厘米<sup>2</sup>，在1公斤/厘米<sup>2</sup>以下的也不少。即使在每分钟一转这样低的转速下也不会产生爬行，对于闭环来说可以得到十分广泛的控制范围。图8是在开环状态下在低速区间运转的不均匀度测定的结果。图9表示了空载时的起动力和内部阻力。

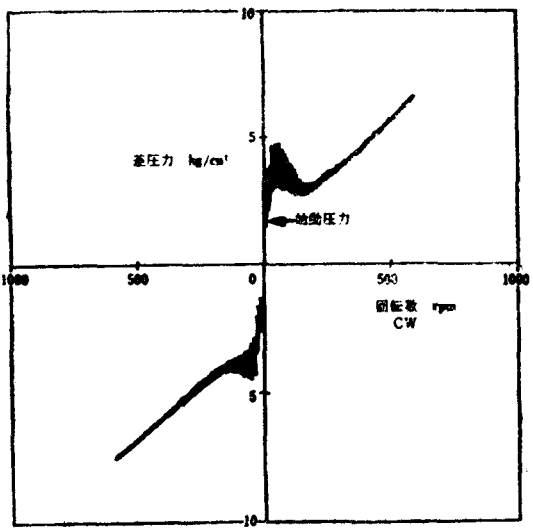


图9 YUKEN—WS1 马达的起动力

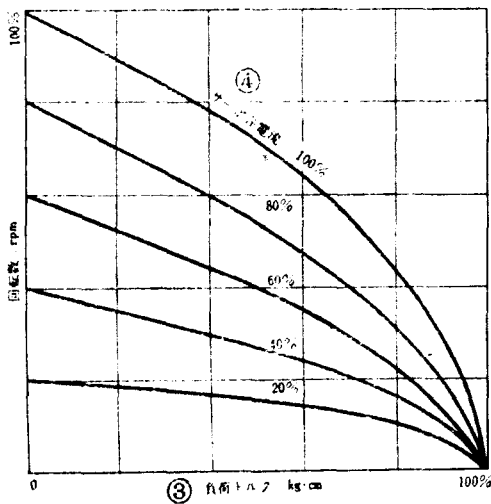


图10 扭矩—速度曲线

③—负载扭矩；④—伺服阀电流

驱动装置的基本特性可用图10所示之扭矩—速度曲线来表示。它和伺服阀的负载—流量曲线是等价的，仅仅差一个马达效率那样的数值。选择驱动装置时以此值为基准较好。

作为驱动装置，还要在伺服阀和马达之间加入一定的组件，同时还要根据需要加上相应的检测器。加入的这个组件如图11所示，有四种基本回路；加入的目的

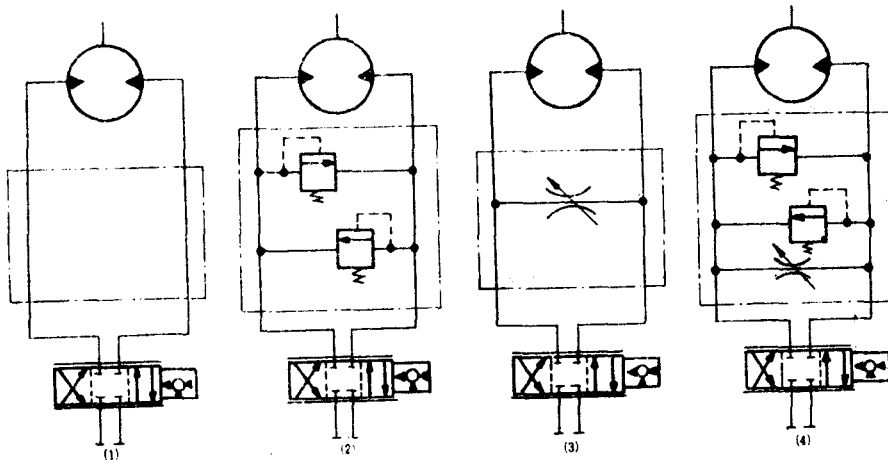


图11 伺服阀和马达的连接组件

表2. YUEN伺服驱动装置的规格

型号	排量 D <sub>m</sub> 厘米 <sup>3</sup> /转	最大 流量 (升/分)	最高 转速 (转/分)	重量 (公斤·厘米·秒 <sup>2</sup> )	理论静 止力矩 (公斤·厘米)	最大 输出 (瓦)	单腔 容积 (厘米 <sup>3</sup> )	共振 频率 (赫芝)	油刚性 公斤·厘米/弧度
SDD-10S-4	16.4	5.1	311	4.4 × 10 <sup>-3</sup>	3.67	0.45			
10S-10	16.4	14	854			1.23			
★ 20	16.4	29	1770			2.55			
★ 40	16.4	57	3470			5.02			
SDD-25S-4	41	5.1	124	3.02	9.14	0.45	43.8	107.2	12.43
10	41	14	342	× 10 <sup>-2</sup>		1.23			× 10 <sup>3</sup>
20	41	29	707			2.55			
40	41	57	1390			5.02			
★ 60	41	80	1950			7.07			
★ 100	41	134	3190			11.5			
SDD-35S-4	57	5.1	90	4.56	12.7	0.45	58.8	107.2	19.53
10	57	14	246	× 10 <sup>-2</sup>		1.23			× 10 <sup>3</sup>
20	57	29	509			2.55			
40	57	57	1000			5.02			
60	57	80	1405			7.07			
★ 100	57	134	2340			11.5			
SDD-50S-4	82	5.1	60	4.56	18.3	0.45	87.8	122.5	26.9
10	82	14	171	× 10 <sup>-2</sup>		1.23			× 10 <sup>3</sup>
20	82	29	354			2.55			
40	82	57	695			5.02			
60	82	80	975			7.07			
★ 100	82	134	1628			11.5			
★ 140	82	188	2270			16.3			
SDD-70S-10	115	12	104	5.30	19.2	0.54	122.8	131.3	38.3
20	115	24.8	216	× 10 <sup>-2</sup>		1.53			× 10 <sup>3</sup>
40	115	50.4	438			3.06			
60	115	69	600			4.59			
100	115	115	1161			7.66			
△ 140	115	162	1618			10.7			

供油压力140公斤/厘米<sup>2</sup>

(SDD-70S—为105公斤/厘米<sup>2</sup>)

★最大允许转速1500转/分

△最大允许转速1200转/分

$$F_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{J}}$$

$$K = \frac{2\beta}{V} \left( \frac{D_m}{2\pi} \right)^2$$

式中:

β—工作油体积弹性系数  
V—D型伺服部件的压缩容积<sup>1/2</sup>

是用旁通安全阀吸收在急剧地起动、停止时产生的冲击压力，并起有旁路节流的作用，使马达的阻尼增大。显然在评价传动装置的动特性时所讲的工作油容量，要包括这个组件内的油的容量。

作为检测器来说，速度检测器多用直流发电机，其它的位置（角度）检测装置，往往是装有同步器、分相器、脉冲发生器等，直流发电机的使用速度范围广，波动小，但是它要用碳刷或起碳刷作用的东西。内部若装有其它增速、减速的齿轮时，一定要没有侧隙才行。表2是伺服驱动装置的性能表。

## 5. 伺服油缸

一般用液压马达作执行元件，把液压马达同伺服阀组合成配套，叫做伺服驱动装置；而同样的结构用油缸作执行元件也可以。但是用油缸时，由于活塞直径、行程、装配等问题，作为伺服驱动装置的整体配套是有困难的。对油缸的要求内容和液压马达一样，然而由于其内部包含的工作油的容量多少是由活塞直径和行程来决定的，即使不是相当大，其共振频率一般都较低。

活塞部份要避免使用V、U型密封，不用密封或用聚四氟乙烯类的环可以减小滑动摩擦。活塞杆部的防尘圈是不能去掉的，所以那部份的滑动阻力是很难避免的。

但是用油缸来作驱动装置的执行元件，在使用上是很容易的，所以对定位精度要求不是十分高的场合用它是合适的，共振频率低的问题可以由控制系统给予一定程度的补偿。最近见到有用不带密封的油缸能达到数微米定位精度的例子。

## 6. 伺服放大器

为了驱动伺服阀，一般还要用伺服放

大器。伺服放大器的种类很多，只是模拟式的就有：（1）直流输入型；（2）调幅交流输入型；（3）调制相位交流输入型。

直流输入型，是将2~3个系统的直流电压进行加减运算，再将斩波放大后的信号由差动回路进行直流放大。当然，斩波放大器在电气上是要稳定的，而最近生产的集成电路运算式放大器的性能相当稳定，所以可以放心地当作直流放大器使用。其输出是直流电流，希望在伺服阀的线圈电阻有若干变动时电流也不要改变。

交流输入型，不管是调幅的，还是调制相位的，都是经同步频率整流而得到直流输出的，但是对调制相位的那种，同步信号的相位是个问题。

往直流输出中叠加200~500赫兹的交流成份（高频颤动信号）可以改善伺服阀的性能，在必要的时候，它甚至是伺服放大器必须具备的机能。伺服放大器在控制系统中不只是起伺服阀的驱动源的作用，还要充当调节器，所以要具有比例积分（P、I、D）运算机能。

随温度、时间等的偏移是伺服放大器的评价基准，需要有 $0.1\%F \cdot S / ^\circ C$ 和 $0.5\%F \cdot S / \text{时}$ 以下的稳定性。放大倍数的稳定性和直线性也是重要的，然而目前市场上销售的放大器对这些都不必担心。

数字信号输入型的伺服放大器，是在前述直流放大型伺服放大器中附加有D—A变换器的。作为伺服运算装置的D—A变换器应该考虑的地方很多，在此就略去不讲了。

## 7. 检测器和放大器

伺服装置上用的检测器有各种各样的，对其全部都加以说明是不容易的。本文因篇幅的关系仅谈谈一些基本的事项。

从反馈控制的基本构成来看，检测器

的特性可代表控制系统的特性。也就是说，在这以前所讲的那些结构元件都是控制环路以前的结构元件。这些结构元件的某些特性误差；如果环路增益取得比较大，就可以被消去。与此相反，检测器是个反馈元件，它具有使控制系统和检测器的性能相接近的特性。例如，伺服阀的磁环通常是3~5%，而闭环系统几乎没有磁环了。但是，如果检测器有磁环，闭环系统就按检测器的磁环量而滞后，因此对检测的基本要求是：

- (1) 直线度和磁环特性都很好；
- (2) 对于温度等环境变化，没有特性差异；
- (8) 频带要宽；

对检测器来说，有的需要放大器，有的不需要放大器。上述的直流发电机等就不需要放大器，而电位计、同步机、分相等需要另外的供电电源。对这些供电电源或放大器，必须十分注意其稳定性，要求比伺服放大器的技术规格还要严格。最近已能得到稳定性十分好的供电电源，但是能在各种环境中长时间稳定使用的放大器却比较少。为确保放大器的稳定性，防止偏差，必须严格地控制周围温度。模拟式检测器的稳定性、精度，要相对全刻度值(即全量程)来定，一般多为0.5~1%，但是全量程范围大时，精度误差的绝对值也大，这是其缺点。

与此相反，数字式检测器就排除了供给电源和放大器方面的问题，精度也与全量程范围无关，它是由最小分辨率来定的，所以比模拟式检测器有明显的优越性。但是并不是所有的检测都能数字化，数字检测的事后处理装置费用也相当高，这是其缺点。目前既有模拟式的，也有数字式的，按其各自特点来选用，效果最好。还有，对检测信号的传递手段是容易被

忽略的，但是不管是模拟式的还是数字式的检测器，这都是十分重要的事。不注意从外界来的感应和杂音以及电缆对信号的衰减，就不能使检测器的本来性能充分发挥出来。希望尽量使用屏蔽线和同轴软线。

## 8. 液压动力部件

也有必要把液压动力部件作为伺服装置的结构元件来考虑。这是由于现在市场上销售的伺服阀有程度上的差异，对尘埃也十分敏感，并且容易受工作油粘度、温度的影响。

对于工作油中的尘埃，首先要考虑从液压部件本身不能产生污垢，由内部产生的污垢以锈为最多。对此最有效的方法是用不锈钢等不生锈的材料来制造液压部件。用不锈钢时价格就十分高，所以除了特殊用途外还是对普通的钢材进行防锈处

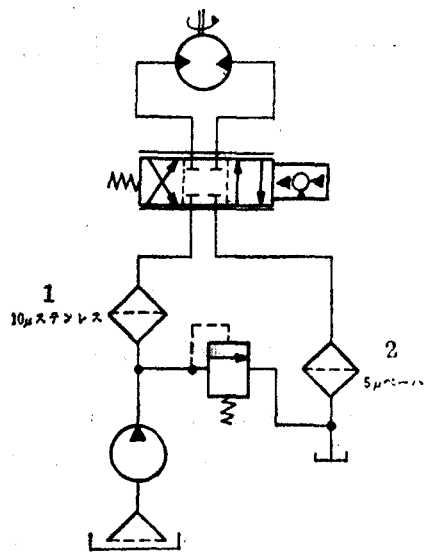


图12 液压功率装置中的滤油器

- ①—10微米不锈钢滤油器；
- ②—5微米纸质滤油器

理。对于从外部空气中混入到液压部件中的尘埃，可以采用加压式油箱，即油箱中充以比外界气压略高的氮气则能够予以防止。

滤油器有各种方式的，但是限于用在伺服阀上的通常是用5~10微米的不锈钢丝或纸制成的。图12是典型的安放滤油器的例子，在回油路中用纸质的过滤器来去除从传动装置中混进来的污垢，别的滤油器是用不锈钢丝制造的。

无论何时，部件装配后需再清洗。对于其它诸如组装材料的前处理、焊接方法、配管方法甚至往液压机上安装都有其独特的方法，与一般液压部件不同。伺服装置使用的工作油相当于JIS-K2213涡轮机油，也有使用磷酸脂系的难燃性工作油。

邹有洪译自日刊《油压技术》

1971, No.5, P.25

(上接第18页)

即，当定位指令的移动量很小时，可用0.22秒时间完成定位。

#### 4. 全行程所需时间

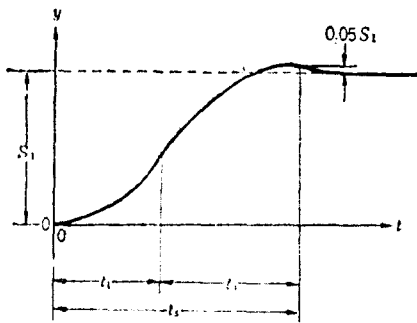


图13 阶跃响应图(例)

图4中假设的加速、减速时间之和( $t_1 + t_2$ )为0.5秒，而讨论设计进行的结果，如前述(3)节，为0.22秒左右；另一方面，可以看到在饱和区间最大移动速度也是充裕的，所以全行程时间要求参数3秒，可充分有余地满足要求。

其它，本例中为控制位置定位，所以精度等的讨论上面已讲完；若在随动控制

等情况，除此之外，必须讨论：①稳态误差；②动态跟随轨迹（波形变形）等。

## 结 束 语

为使本文说明简单起见：

- (1) 有关控制理论从略；
- (2) 有关维修、成本—性能问题等从略；
- (3) 特别是在例题中，准备了可满足每个设计程序所要求的参数。

对于(1)根据需要可从有关的专业书刊得到补充；(2)是设计业务的共同问题，希望靠广泛知识与经验来加以处理；关于(3)在具体进行伺服系统设计时，前一步确定的参数，而在以后讨论时，不一定满足提出的要求，所以在这种情况，必须再重复前一步，以改变各参数，来满足要求。

姜学文译自《油压化设计》

1971, Vol.9 No.12

# 电液伺服机构的设计程序要点

本文以具体例子对电液伺服机构的设计程序作了说明。希望使人对电液伺服机构的设计有一个概括的了解。但本文所讲的不是设计时所需要的基础知识。

## 设计程序

利用图1所示的设计工作流程图，设计电液伺服机构，其效率是很高的。这些业务可以归纳如下：

- 第一步 从控制要求出发，对参数加以整理，确定意义。
- 第二步 考虑控制方式，同时研究伺服机构的组装。
- 第三步 确定所需驱动负载的量（速度对力）。
- 第四步 选定伺服执行元件的各种参数（供给压力、执行元件的容量、伺服阀容量）。
- 第五步 求出滑阀~负载系统的动特性（传递函数、频率特性）。
- 第六步 求出各元件的传递函数（频率特性）。
- 第七步 求出开环频率特性，进一步确定保证闭环稳定性的环路放大系数。
- 第八步 检查静精度和跟随精度。

## 要求的参数

给我们提出这样一个课题，即“采用电液伺服机构对专用机床工作台进行位置控制”，其具体要求的参数如下：

(1)控制重量为1吨的工作台；

(2)工作台在水平方向移动，其最大行程为200毫米；

(3)工作台导轨面的摩擦阻力，可假定其摩擦系数在0.15以下；

(4)工作台的驱动力除摩擦阻力外，可认为是切削力，其值可取50公斤；

(5)工作台的定位信号是电气的，即由指令装置发出的位置信号；

(6)指令装置与反馈用的位移检测器，可以另外来准备，所以不加讨论；

(7)定位精度在 $\pm 0.1$ 毫米以内；

(8)还要确定全部行程由一端到另一端的位置，这时定位所需时间应在指令发出后3秒以内。

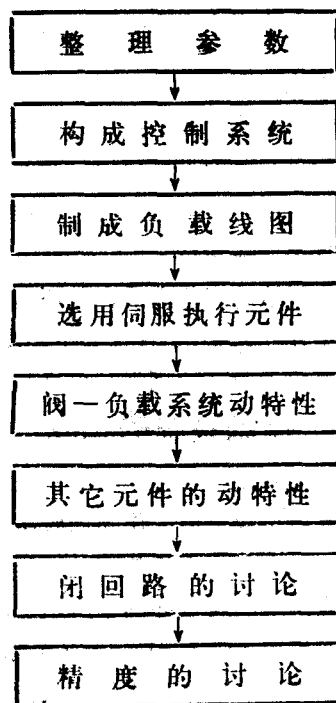


图1 设计工作流程

## 参数的整理

前节 1 的要求参数，是由任务书或协商得来的，将这些按控制要求加以整理。

### 1、需要控制的负载：

(1) 工作台重量 (包括工件重量)

$$W = 1000 \text{ 公斤}$$

(2) 工作台的行程  $S = 200$  毫米

(3) 需要驱动的负载力  $F$ ：

$$\text{切削力 } F_c = 50 \text{ 公斤}$$

$$\text{重力 } F_g = 0 \text{ 公斤 (水平)}$$

$$\text{摩擦力 } F_t = \mu \cdot W = 0.15 \times 1000 \text{ 公斤} = 150 \text{ 公斤}$$

惯量 ( $F_a$ ) 不特别指定，边设计边考虑。

### 2、怎样控制负载：

(1) 位置控制 可以给出在行程 200 毫米内任何一个位置的定位，根据这个来确定程序位置。

(2) 位置定位精度 对于指令值误差在  $\pm 0.1$  毫米以内。但是不必考虑指令装置和位置检出器的误差。

(3) 位置定位速度 最大指令值 (行程 200 毫米) 时在 3 秒以内，因为没有其它特别的指定，所以不管是什么样指令也都在 3 秒内完成定位。

完成了这些工作以后，是否可以进行下面的工作尚未知，姑且移到下一步，中间如有必需的参数，等到那时再行讨论。

## 控制系统的构成

为了了解用什么元件和怎样来进行控制，在具体讨论之前，作为伺服系统是什么样的，先看一下它的构成：

伺服系统的构成如图 2 所示。即由指令装置发出输入信号  $E_i$ ，将这个输入信号  $E_i$  与由位移检出器出来的负载位置反馈信号  $E_o$  的差  $e$ ，用伺服放大器加以放大，

给伺服阀以输入电流  $I$ ，根据输入电流的大小来控制从油压源来的压力油，以改变执行元件的速度。做为执行元件与油缸和负载工作台直接连结起来。油缸、负载工作台的运动结果  $y$  用位移检出器向输入侧进行反馈。

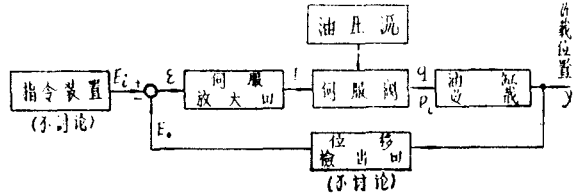


图 2 伺服系统的构成

这样，大致构成了伺服系统，在原理上 (定性的) 能够实现与输入信号  $E_i$  相适应的工作台定位，而具体的 (定量的) 参数，要在下一步进行讨论。

## 负载曲线图的制成

为了详细知道驱动执行元件 (油缸) 所必需的负载，制作负载速度与力的关系图 ( $F-v$  曲线图、负载曲线图)。

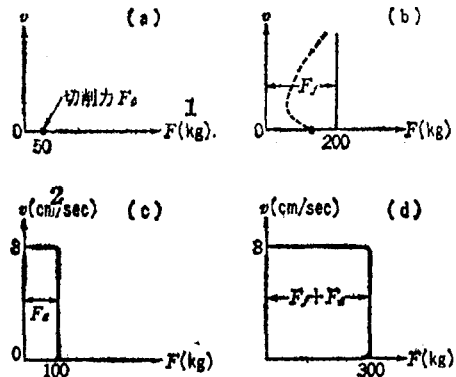


图 3 负载曲线图

1— $F$  (公斤)；2— $v$  (厘米/秒)

1、切削力 (根据参数  $F_0 = 50$  公斤)

因为定位移动时不进行切削，而只在停止时切削，所以用图 3 (a) 来表示。但

是，这种力并不是驱动油缸所需要的，而是保持它用的，实际上因为这个值比摩擦力小，所以用不着考虑。

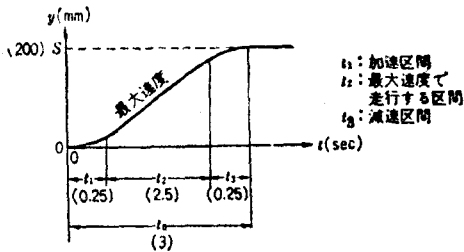


图4 假想的响应曲线图

$t_1$ —加速区间； $t_2$ —用最大速度运行的区间； $t_3$ —减速区间

2、摩擦力(根据参数定,  $F_f = 150$  公斤)

摩擦力可以考虑工作台导轨面的摩擦力和油缸本身的摩擦力。不管在那一个滑动面上工作都有摩擦力，所以变化特性可以如图3(b)的虚线那样，为了简化，可以认为与速度无关系，是定值，用图3(b)的实线来表示。

$F_f = 150$ 公斤(工作台) + 50公斤(油缸) = 200公斤)

3、惯量 $F_a$ (参数未定)

惯量按下面的假定来求出。

全部行程(200毫米)移动定位时的运动状态，大致如图4那样。因为按照参数规定，位置定位必须在3秒以内，所以假设的加速、减速时间值写在图4的括弧内。

此时的负载的最大速度 $V_{max}$ ，大致可用下式求出：

$$V_{max} = \frac{S}{t_2} = \frac{200 \text{ 毫米}}{2.5 \text{ 秒}} = 80 \text{ 毫米/秒} = 8 \text{ 厘米/秒} \dots \dots (1)$$

当时间为 $t_1$ 时，如果达到了这个速度时，其平均加速度 $\alpha_{平均}$ 可用下式表示：

$$\alpha_{平均} = \frac{V_{max}}{t_1} = \frac{8 \text{ 厘米/秒}}{0.25 \text{ 秒}} = 32 \text{ 厘米/秒}^2 = 0.032g \dots \dots (2)$$

式中： $g = 980$ 厘米/秒<sup>2</sup>重力加速度。

这里我们可以看到是十分充裕的，设最大加速 $\alpha_{max}$ 约为3倍的平均加速度。

$$\alpha_{max} = 0.1g$$

因此，惯量 $F_a$ 得出下值，其负载曲线图，如图3(c)所示。

$$F_a = \frac{W}{g} \cdot \alpha_{max} = W \times 0.1 = 1000 \text{ 公斤} \times 0.1 = 100 \text{ 公斤} \dots \dots (3)$$

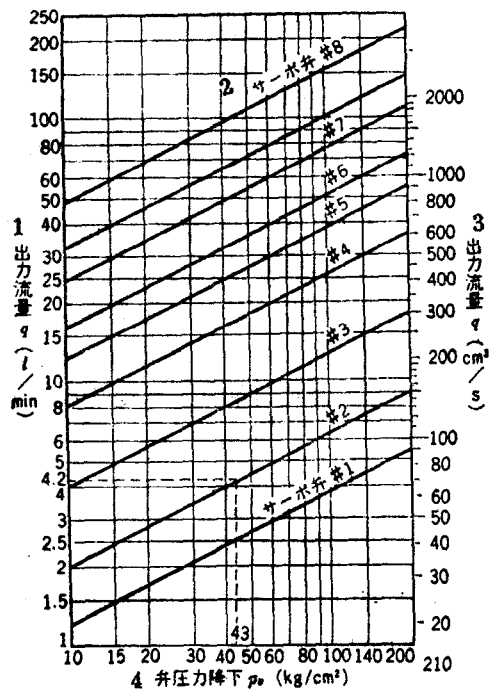


图5 伺服阀压力降与输出流量的关系  
1—输出流量(升/分)；2—8号伺服阀；  
3—输出流量(厘米<sup>3</sup>/秒)；4—阀压降(公斤/厘米<sup>2</sup>)

负载速度与力的关系见图3(b)与(c)，(a)为(b)、(c)之和。

### 伺服执行元件的选定

确定前节中驱动负载的执行元件的各种参数。

(1) 供油压力 $P_s$

因为在所要求的参数中没有特别的规



定，所以，取机床常用的以下数值：

$$P_s = 70 \text{ 公斤/厘米}^2$$

(2) 油缸面积 A

前节中所求出的负载 300 公斤，是以供油压力的一半<sup>①</sup>来维持的。所以，油缸的有效面积为：

$$A = \frac{F}{P_L} = \frac{300 \text{ 公斤}}{70 \text{ 公斤/厘米}^2 \times \frac{1}{2}} \approx 8.6 \text{ 厘米}^2 \dots\dots\dots (4)$$

(3) 伺服阀的容量

负载以最大速度进行运动时所必须的流量  $q_0$ ，可用(1)式和(2)式的数值来求出：

$$q_0 = A \cdot V_{\max} = 8.6 \text{ 厘米}^2 \times 8 \text{ 厘米/秒} \approx 69 \text{ 毫升/秒} = 4.1 \text{ 升/分} \dots\dots\dots (5)$$

负载以最大速度运行时的负载力，可由图 4 得知，可以只考虑惯量为零时摩擦力为 200 公斤，此时油缸所承受负载压力为：

$$P_L = \frac{F_f}{A} = \frac{200 \text{ 公斤}}{8.6 \text{ 厘米}^2} \approx 23 \text{ 公斤/厘米}^2 \dots\dots\dots (6)$$

伺服阀内的阀压降  $P_v$ ，如果管路的压力降略而不计，则为：

$$P_v = P_s - P_L = 70 - 23 = 47 \text{ 公斤/厘米}^2$$

因此，当阀压降为 47 公斤/厘米<sup>2</sup>时，则可选定(5)式的 4.1 升/分以上的输出流量。图 5 是各种容量的伺服阀压降与输出流量的关系图。根据该图使用 2 \* 伺服阀。如果使用这种阀，当  $P_v = 43$  公斤/厘米<sup>2</sup>时，则流量约为 4.2 升/分，是相当一致的。

(4) 考 察

由(1)~(3)确定  $P_s$ 、A、伺服阀的容量时，根据图 3(d)的负载来研究一下伺服机构执行元件的驱动能力是多少，用  $F = A \cdot P_L$ ， $V = q/A$  ( $q$ —伺服阀的输出流量)

的关系式以及伺服阀的阀压降与输出流量的关系，来求出执行元件的驱动速度与力的关系。其负载曲线图如图 6 所示。如果观察一下图 6，如果执行元件的驱动能力曲线，将负载曲线围住，则可知执行元件能充分驱动负载。

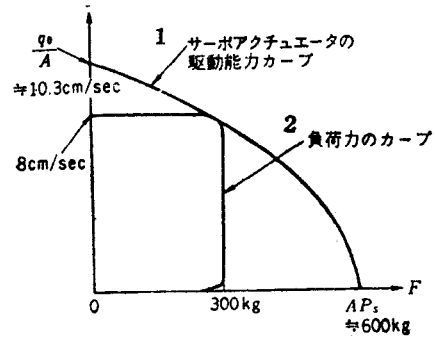


图 6 负载曲线图

- 1—伺服执行元件的驱动能力曲线；
- 2—负载力的曲线

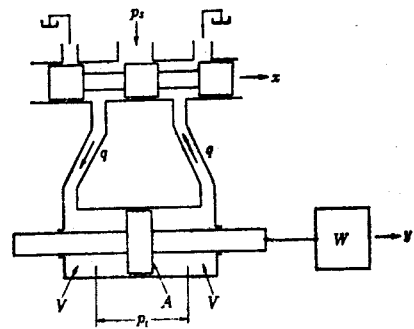


图 7 滑阀—负载系统

### 滑阀—负载系统的动特性

按上述(5)、(6)式，在动力方面可以满足；而在动特性方面，伺服系统各要素不够好，不能达到预期的精度。

为要讨论动特性，需要控制理论知识。但本文只讲程序和结论，要详细了解，请看其它专门书刊。

<sup>①</sup>通常取供油压力 2/3 以内的数值