

200轧机液压压下装置

冶金机械教研室 程建中 张忠波

摘 要

我院冶金机械实验室200轧机液压压下装置1980年4月经冶金部科技办组织技术鉴定,认为系统的动、静态指标是目前国内的最先进水平,可在有关工厂的板带轧机上推广应用。本文简要介绍了该装置的工作原理,控制系统和试验结果,着重介绍和分析了该装置的特点。

板带轧机液压压下装置是实现厚度自动控制的基本环节。它是在六十年代随着轧机速度和对产品精度要求的提高而发展起来的一项新技术。由于它比电动压下有调节速度快、调节精度高的特点,所以在国外已普遍被采用。我院冶金机械实验室200轧机液压压下装置于1979年10月试验成功,性能指标达到了较高的水平。下面对该装置的工作原理,试验结果、系统的特点作一简要的介绍和分析。

一、工作原理及控制系统

1. 工作原理

液压压下装置是通过精确控制压下油缸柱塞的位置 S 来控制轧辊辊缝 h 的。图1是液压压下装置工作原理示意图。

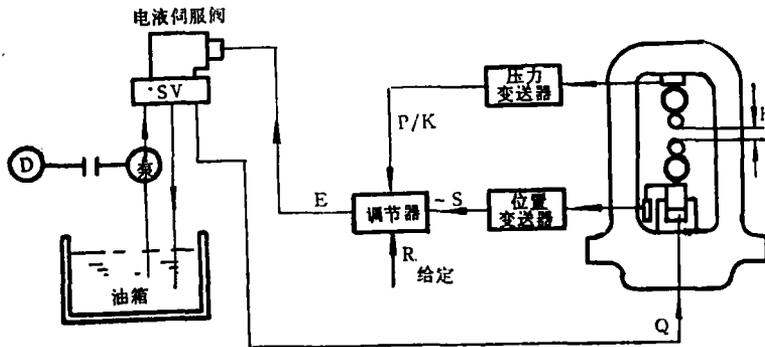


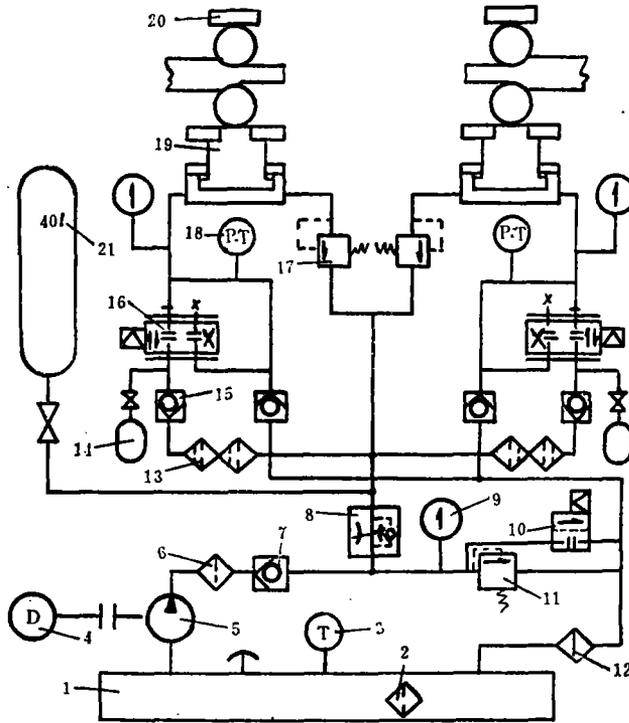
图1 液压压下装置工作原理图

位置调节器综合给定信号 R ,油缸柱塞位置反馈信号 S ,输出偏差信号 E ,控制电液伺服阀 SV 。液压油经过电液伺服阀向压下油缸充油或排油。当 R 与 $-S$ 相加为零时, $E=0$,伺服阀关闭,油缸柱塞位置 S 保持不变, h 也维持不变。即实现了位置闭环控制(APC)。

在调节器上,再送入随轧制压力 P 变化的信号 $\frac{P}{K}$, K ——轧机的刚度,系统就可以自动补偿由轧制压力引起的轧机弹跳量。这种控制方式称压力补偿厚度自动控制(Bisra·AGC)。如在调节器上,加其他厚度检测的控制信号,则可构成各种不同的厚度自动控制方式,如测厚仪监控,予控等等。

2. 液压系统

液压压下装置的液压系统由液压油源,电液伺服阀和执行机构压下油缸组成。200轧机液压系统原理图示于图2。



1-油箱; 2-网式过滤器; 3-温度计; 4-电动机; 5-轴向泵; 6-粉末冶金烧结过滤器; 7-单向阀; 8-单向节流阀; 9-压力表; 10-二位二通阀; 11-溢流阀; 12-冷却器; 13-纸芯过滤器; 14-皮囊蓄能器; 15-单向阀; 16-电液伺服阀; 17-溢流阀; 18-压力传感器; 19-油缸柱塞; 20-测力计; 21-皮囊蓄能器

图2 液压系统原理图

电液伺服阀是系统的关键部件,它能以极快的速度和极高的精度把电信号转变为液压动力去操纵很大的负载——压下油缸。为了使电液伺服阀正常工作,液压油源必须保证对阀供油清洁,压力稳定。为了得到清洁的油液,除了采用密闭油箱和在油箱内设有二次网式过滤器外,在油液进入伺服阀之前还经过了一次粉末冶金烧结过滤器(40微米)和二次纸芯过滤器(10微米)。由于在伺服阀的另一侧没有过滤器,因此在油缸上设有两个油孔,可在安装阀之前,对油缸以及它到伺服阀之间的一段管路充分进行冲洗,保证工作时,从油缸返回伺服阀的油液仍然是清洁的。系统中稳定油源压力的方法主要是(1)选用性能较好的溢流阀,因为溢流阀的调节弹簧往往产生振动,引起油源压力很大波动。(2)在系统中装一个大容量(40l)的皮囊蓄能器,吸收油压的波动。

每台伺服阀前还装有一只1.8升的皮囊蓄能器,专门给伺服阀快速供油。二位二通阀是

使油泵在卸荷情况下启动和停车。单向节流阀主要是在停泵时，慢慢地释放储存在蓄能器内的油液，防止皮囊快速排空油液时产生过大的冲击力。在每个油缸的压力通道上接有安全阀，防止超过最大轧制压力。此外，在系统中还配有温度计、冷却器、压力表等附件，保证油温在30~40℃，监视油源，油缸和过滤器前后的压力。

油缸的顶部有一个泄油口直接接入油箱，这对柱塞缸也是完全必要的。有关油缸的其他结构后面再介绍。

3. 电控系统

200轧机电控系统总方块图示于图3。

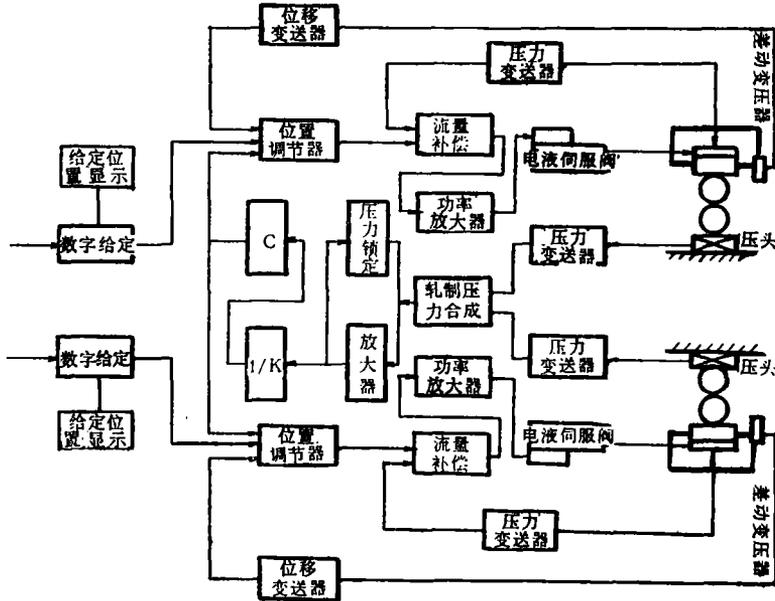


图 3

油缸位置给定采用数字给定，由脉冲发生器、计数器、数模转换和数码管组成。给定信号一路由数码管显示，另一路经数模转换输出给位置调节器作为给定信号。对传动侧和操作侧两油缸可给定同时升、同时降信号或一升一降的调偏信号。

位置闭环控制由位置调节器、流量补偿、功率放大器、位移变送器、电液伺服阀和油缸组成。位置调节器综合给定信号，位置反馈信号和压力补偿信号，并将综合后的偏差信号、适当加以校正，送给流量补偿环节，再经过功率放大，驱动电液伺服阀，完成位置闭环控制。油缸位置信号是用差动变压器检测的。

流量补偿环节用来补偿电液伺服阀流量随压力差而变化的非线性特征，因为滑阀的流量Q等于：

$$Q = C_d W X \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - p_L)} \text{ 厘米}^3/\text{秒 (对油缸充油时)}$$

$$Q = C_d W X \sqrt{-\frac{1}{\rho} p_L} \text{ 厘米}^3/\text{秒 (油缸卸油时)}$$

式中：
 C_d ——滑阀流量系数
 W ——阀芯圆周长 厘米

- X ——阀芯位移量 厘米
 ρ ——油液密度 公斤·秒²/厘米⁴
 P_s ——油源压力 公斤/厘米²
 P_L —— $P_L = \frac{P}{A}$ 负载压力 公斤/厘米²
 P ——轧制压力 公斤
 A ——油缸柱塞面积 厘米²

如果油源压力稳定不变，则流量 Q 是负载 P_L 的函数， $P_L = \frac{P}{A}$ ，是随轧制力 P 变化的，因此，在轧制过程中，相同的阀芯位移量，阀的流量是不同的，在闭环系统中，其开环放大倍数也是变化的，这就给系统的校正和展宽频带造成困难。流量补偿环节就是为了补偿这个变化量的。即将控制信号充油时乘以 $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{P_L}{P_s}}}$ 。卸油时乘以 $\frac{1}{\sqrt{\frac{P_L}{P_s}}}$ 。则得到：

$$Q = C_d W X \sqrt{\frac{1}{\rho} (P_s - P_L)} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{P_L}{P_s}}} = C_d W X \sqrt{\frac{1}{\rho}} \cdot \sqrt{P_s} \quad (\text{充油时})$$

$$Q = C_d W X \sqrt{\frac{1}{\rho} P_L} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{P_L}{P_s}}} = C_d W X \sqrt{\frac{1}{\rho}} \cdot \sqrt{P_s} \quad (\text{卸油时})$$

阀的流量 Q 只和恒定的油源压力 P_s 有关，而与负载压力 P_L 无关，使系统的稳定性提高。我们还可以看到，加入流量补偿环节后，在不同的负载压力下，油缸柱塞上升和下降将具有相同的运动速度。

流量补偿环节实际上是在不同的负载压力下，在电液伺服阀的控制电压信号上乘以相应的函数值，使阀芯的移动量增加或减小来补偿阀流量随负载压力不同的变化量。如果在控制系统中，很小的偏差信号，功率放大器输出或伺服阀的流量输出就达到饱和状态，流量补偿环节将不能起到补偿作用。因此使用中应适当选择系统总的开环放大系数和功率放大器输出的限幅值。

压力补偿控制回路是一个正反馈回路。它包括轧制压力剪幅式侧力计及其变送器、死区放大器、压力锁定，以及乘压力补偿系统 $\frac{1}{K}$ 和补偿的反馈系数 C ， $C \leq 1$ 。

由剪幅式测力计检测得到的轧制压力信号，经压力变送器放大，送入死区放大器，轧辊两侧的轧制压力在死区放大器相加，得到合成的轧制压力，并扣除死区值，（为了扣除轧机刚度曲线中非线性段的影响）然后与压力锁定值相比较，其差值乘以 $\frac{1}{K}$ 即为轧机弹跳的补偿量，这个压力补偿信号在进入位置调节器之前，再乘以反馈系数 C ，取弹跳量的某一百分值进行补偿。如 $C = 1$ ，则可 100% 补偿由轧制压力波动造成的轧机弹跳值。选用不同的 C 值，相当轧机处在不同的刚度值 K 下工作，即可实现“轧机模数可调”。

压力锁定是为了采用压力补偿时有一个给定的基本压力值，系统只对大于或小于基准压力的偏差量进行补偿。基准压力设定愈接近实际轧制压力，偏差的补偿量就愈小，从而缩短

偏差补偿的调节时间和提高补偿的精度。

压力锁定环节由A/D模数——D/A数模变换器，采样和保持开关，以及予设定电位器组成。可以予设定压力锁定值，也可以采用轧件头部的轧制压力为压力锁定值。

二、系统性能测试结果

1980年4月由冶金部科技办组织鉴定测试小组，对200轧机液压压下装置的动态、静态特性压力补偿的效果进行了测试。测试结果表明该装置动、静态特性都达到了较高的水平，压力补偿也取得了显著效果。

1. 动态特性

(1) 用英国1172频率响应分析仪(1172 Frequency Response)测试系统的频率响应，伯德图见图4、图5。在100公斤/厘米²油缸压力下输入幅值 ± 0.05 毫米的正弦波信号，幅值比(-3db时)频宽为44.5赫芝，90°相角差频宽为28赫芝；输入幅值 ± 0.076 毫米时，幅值比频宽(-3db时)为30赫芝，90°相角差频宽为28赫芝。国外先进水平输入幅值 ± 0.05 毫米时，幅值比频宽(-3db时)为20~30赫芝。

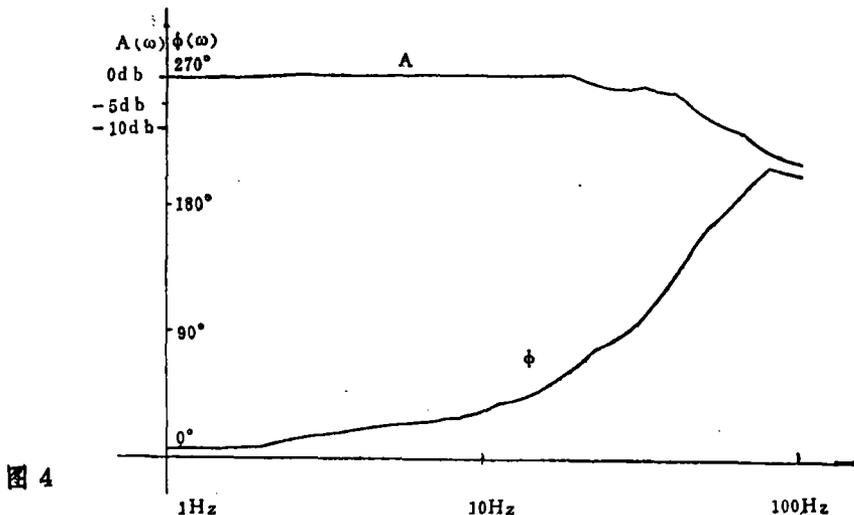


图4

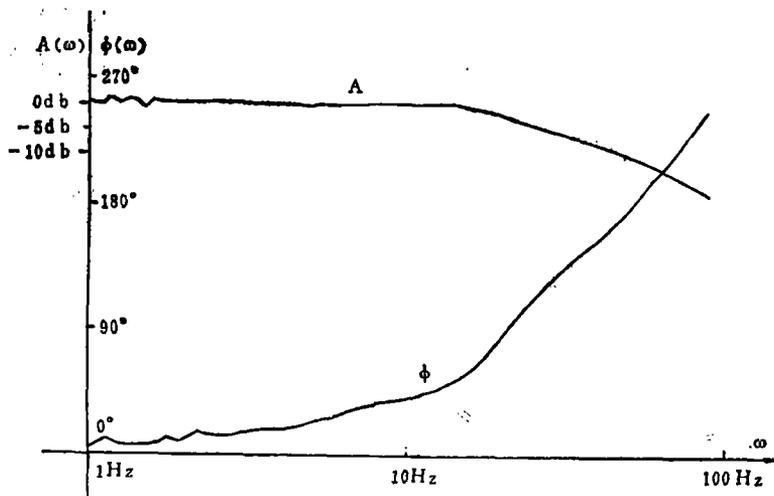


图5

(2) 用示波器测试了幅值0.1毫米的阶跃响应。示波图照相曲线见图6。响应时间为17 ms, 国外为30~50 ms。

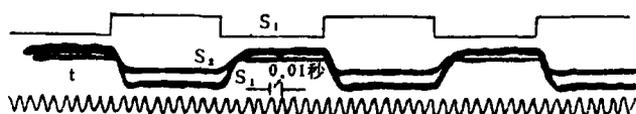


图 6

2. 静态特性

(1) 2毫米量程定位精度为0.75%。

(2) 零位死区分辨率<1.2微米, 其他量程分辨率<0.5微米。

3. 压力补偿效果

把3.0毫米厚, 宽85/115毫米宽度突变的铝板, 轧制为1.3毫米的薄板:

(1) 无补偿时全长厚度最大偏差: 0.16~0.17毫米, 有补偿时全长厚度最大偏差: 0.03~0.04毫米。

(2) 无补偿时在宽度变化处厚度最大偏差: 0.12~0.15毫米, 有补偿时在宽度变化处厚度最大偏差0.01~0.02毫米。

有补偿时全长厚度偏差0.03~0.04毫米, 是按周期波动出现的最大偏差, 这是由于上下辊偏心造成的(实际测量上下辊合计的偏心量也约为0.04毫米)。投入压力补偿后, 在变宽度处厚度偏差减小为无补偿时的10%左右, 即加补偿后偏差减小了约90%。补偿的效果是很明显的。

由于压力正反馈系统的时间常数决定于位置闭环系统的时间常数, 并比它大很多倍, 所以要求尽可能提高位置系统的响应速度, 以便减小压力补偿系统的时间常数, 缩短调节时间, 提高成品率。

三、200轧机液压压下装置的特点

液压压下装置要求的性能指标应根据轧机的生产工艺以及对产品精度的要求来确定。200轧机液压压下装置是一套工业试验装置, 为了得到高性能指标的经验 and 参数, 我们予期达到国外先进的指标——幅值比频宽30赫芝。试验结果表明: 该装置的性能已超过了这一指标。在设计和试验过程中除了采用流量补偿, 压力锁定等电器环节和采用大蓄能器, 保证稳定的油源压力等措施外, 主要还采取了以下措施:

1. 合理选用电液伺服阀及其流量

由于电液伺服阀是电液信号转换并驱动油缸运动的部件, 它的性能将直接影响整个系统的特性。液压压下系统要求电液伺服阀应该:

(1) 线性度好、迟滞小、零飘小、分辨率高、动态响应高等优点。200轧机选用的是襄樊609所生产的FF102型电液伺服阀。

(2) 阀的流量应满足系统最大频宽时所需的流量, 即伺服阀在最大负载下的流量 q , 它等于:

$$q = \sqrt{2} Q_0 \sqrt{\frac{\Delta P}{P_s}} \quad (1)$$

q ——阀在最大负载压力 P_L 下的流量 l/min

Q_0 ——阀的额定流量 l/min

$\Delta P = P_s - P_L$ ——油源压力与最大负载压力之差公斤/厘米²

式中 $\sqrt{2}$ 是考虑系统中把四通阀的一个负载腔堵死后，实际流量比未堵的四通阀流量大

$\sqrt{2}$ 倍。如最大负载压力 P_L ，按伺服阀在 $\frac{P_L}{P_s} = \frac{2}{3}$ 时效率最高来选用，(1)式则可简化为：

$$Q_0 = 1.225q \quad (2)$$

在给定油缸幅值 ± 0.05 毫米正弦信号，信号频率30赫芝

时，油缸在每个周期 T 的运动如图7，油缸在 $\frac{T}{4}$ 内需要的油量 W 为：

$$W = 0.005 \times \frac{\pi D^2}{4} = 0.883 \text{厘米}^3$$

式中 D ——油缸内经厘米 $D = 15$ 厘米

满足频宽30赫芝时，油缸需要的平均流量 q 为：

$$q = \frac{W}{\frac{T}{4}} = 6.36 l/min$$

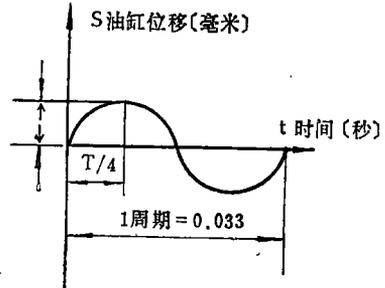


图7 30赫芝时油缸位置运动图

由于考虑试验中阀的寿命，系统中最大阀电流 I_{max} 被限幅在 $\frac{1}{2}$ 额定电流 I_0 ，即 $I_{max} = \frac{1}{2} I_0$ ，故系统要求阀的额定流量 Q_0 等于：

$$Q_0 = 2 \times 1.225q = 15.6 l/min$$

实际选用 $Q_0 = 20 l/min$ ，由于选用了足够的阀的流量，就为系统获得高响应提供了基本条件。试验证明，系统换用 $Q_0 = 10 l/min$ 的阀后，幅值比频宽立即降到18赫芝。

当压下系统要求一定压下速度时，则应按最大压下速度来计算油缸需要的流量。

2. 尽可能减小油缸摩擦力*

油缸是整个系统的执行机构，除了结构尺寸方面的考虑之外，一个重要问题是要尽可能减小油缸柱塞的摩擦力，因为过大的摩擦力将严重威胁系统的稳定性。当系统有较小的偏差信号时，随着伺服阀电流的变化，阀芯产生微小的位移，油缸内的压力也随之变化，当这个压力增量产生的总推力还不足以克服油缸柱塞的静摩擦力时，柱塞仍然保持不动。如偏差信号或积分调节器随时间给阀的控制电流信号继续加大，使产生的总推力足以克服静摩擦力时，柱塞开始运动，静摩擦变为动摩擦，摩擦力突然减小，油缸柱塞受一实加推力，产生一跳动。油缸摩擦力越大，跳动量也越大。当跳动量过大，就可以产生过大的反向偏差，迫使柱塞又产生反向跳动，以致使柱塞往返跳动，即所谓极限环振荡。在试验初期，就曾因为油缸摩擦力过大，系统出现2~3赫芝的振荡，使系统无法正常工作。带有积分调节器或开环放大倍数的系统，更容易发生这种情况。因此过大的油缸摩擦力会大大限制系统动特性的提高。

油缸摩擦力主要是指在工作压力下的静摩擦力，它由两部分组成：(1) 密封圈与油缸各运动部件的摩擦力。(2) 由于柱塞的歪斜引起的各部件间的附加摩擦力。

200轧机压下油缸的结构示于图8。密封全部采用聚四氟乙稀环和“O”型橡胶圈组合式密封圈。聚四氟乙稀与金属材料接触的摩擦系数很小，可大大减小摩擦力。“O”型圈压紧聚四氟乙稀环起密封作用。对旧轧机改造，油缸的高度一般都会受到位置的限制。为了取得这方面的经验，200轧机的压下油缸也设计成矮油缸。这种矮油缸在工作过程中不可能防止歪斜，为了避免由于柱塞歪斜造成部件间互相挤压而产生过大的附加摩擦力，缸体和缸盖与柱塞的配合面都使之不接触，孔比轴大1毫米。柱塞运动的导向衬也采用聚四氟乙稀环。使在最大歪斜情况下，部件之间也互不接触。实际测试：在最大工作压力140公斤/厘米²下，油缸的摩擦力不超过最大工作压力的2%，满足了试验的要求。

如果不计附加摩擦力，则油缸的摩擦力与缸体内径D成正比，而克服摩擦的总推力则与缸体内径的平方D²成正比。因此在摩擦系数相同时，用来克服油缸摩擦力的油缸压力增量的绝对值，大直径油缸比小直径油缸要小，而且与缸体内径D成反比。也即大直径油缸比小直径油缸只需用较小的阀电流就能克服油缸的摩擦力。因此更有利于系统的稳定，所以200轧机压下油缸的结构应用到大油缸上去，可望会得到更为理想的效果。

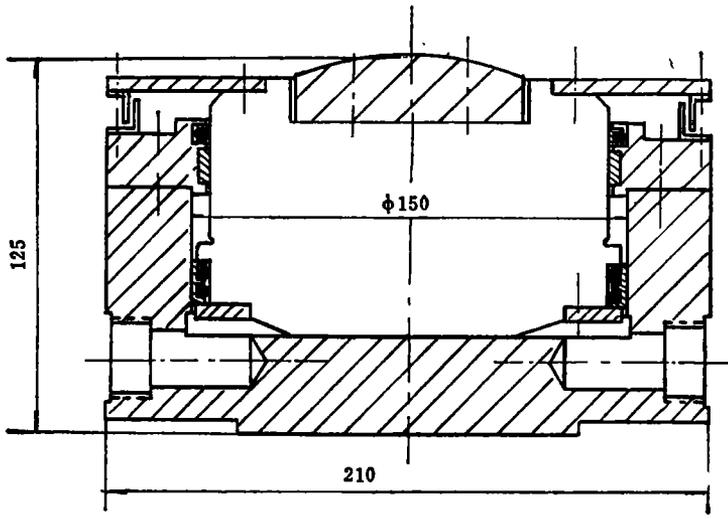


图 8

*系统中执行机构的摩擦力还应包括轧辊轴承座与机架窗口间的摩擦力，因此在装配过程中也应尽力减小这项摩擦力。

3. 采用了带变增益放大器的位置调节器

变增益放大器的特性曲线示于图9。在位置偏差较小时，放大器的放大系数较小，在位置偏差较大时，放大器的放大系数增加。这种放大器有利于提高位置闭环系统的稳定性，展宽系统的频宽。

在位置偏差较小时，系统的开环放大系数较小，即在位置接近调定值的时候，控制信号以较慢的速度减小，油缸运动也减慢，可以减小或防止产生超调。减小放大系数对克服由摩擦引起的振荡，也是有利的。因为在相同的摩擦力下，位置偏差越小，相移则越大，减小开环放大系数就可以抑制系统的振荡，所以这种放大器有利于提高系统的稳定性。

在位置偏差较大时，系统的增益也变大，从而提高了系统的响应速度。在低频段由于油缸运动可以跟上给定信号，反馈信号的幅值没有衰减，这时偏差信号很小，放大器在低增益区工作，随着工作频率的提高，油缸运动的幅值逐渐衰减，偏差信号加大，放大器在大增益区工作，加快了油缸运动的速度，使油缸运动的幅值加大，即展宽了频带。

4. 采用高性能指标的位移变送器和压力变送器

(1) 位移变送器

位移变送器是位置系统的主要检测仪表，为了精确地把油缸位置移动信号快速地反馈给位置调节器。它应具有响应速度高、灵敏度高、飘移小、线性度好等特点，否则就会降低整个系统的品质。由于差动变压器输出信号较小，所以通常位移变送器需要把差动变压器输出的载波信号先解调，复现成位移信号，经直流放大后，再反馈给控制系统。为此，位移变送器需要解决以下三个问题①减小滤波器的时间常数；②减小或避免信号放大时的零点飘移；③有稳定的输出幅值。

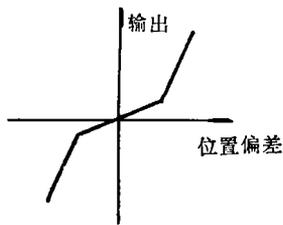


图9 变增益放大器特性曲线

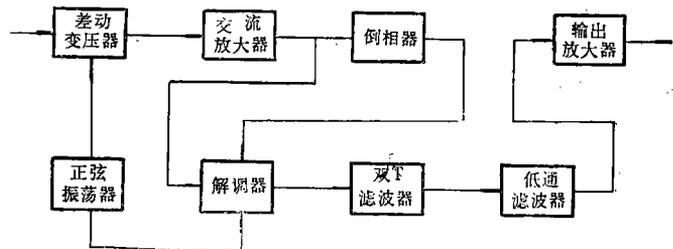


图10

200轧机液压压下装置中，设计使用的位移变送器原理方块图见图10。由于差动变压器输出是载波的交流信号，所以采用了交流放大器，从而避免了直流放大器的零点飘移问题。为了减小滤波器的时间常数，应尽可能提高载波频率。从差动变压器输出特性曲线看，5KC频率激磁，输出仍保持最大。因此选用了5KC文式振荡器作为载波的频率。同时还采用双T带阻滤波器有选择的把解调后纹波的基波滤掉，再用时间常数较小的低通滤波器把高次谐波滤掉，使整体的滤波时间大为减少。试验中发现解调器的输入变压器也限制仪器频宽的提，因此采用了无输入变压器的解调器。交流放大器输出一路直接送到解调器，另一路经过倒相器再送到解调器，于是解调器就得到了一对相位相反的5KC载波信号。文式振荡器的振荡频率比较稳定，也可以很方便地加稳幅电路，所以它的输出幅值也比较稳定。变送器最后一级是输出放大器，主要是作阻抗转换用的。实际测试位移变送器的频宽达到500赫芝，±3.0毫米行程内最大误差0.01毫米（包括差动变压器的误差）。这些指标为提高整个系统的特性创造了有利的条件。

(2) 压力变送器

压力变送器也是液压压下系统中重要的检测仪表，它应用在流量补偿及压力补偿回路中。它同样要求高响应，高精度，同时由于压力传感器输出的信号是极其微弱的，满量程才能达到10-20mV，容易受到外界的干扰。为了适应控制系统的要求，200轧机液压压下装置采用了如图11的压力变送器。

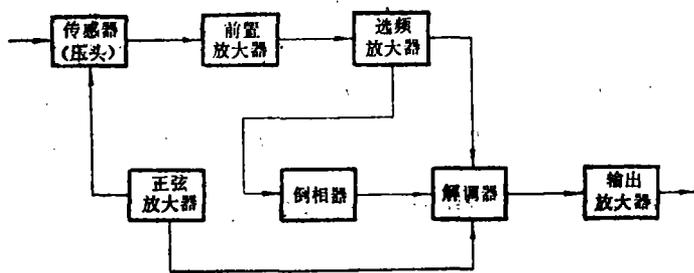


图11

压力变送器设计的基本思想与上述的位移变送器相同，只是把位移变送器中的一个交流放大器分成前置放大器和选频放大器，这样除了可提高变送器总的输出幅值外，在压力传感器附近装置前置放大器，可避免微弱信号远距离输送造成衰减或受到外界干扰，降低信噪比。在前置放大器中，信号经两级放大，既提高了信号的幅值，减少失真，又提高了传输能力和抗外界干扰的能力。采用选频放大器则能使偏离10KC中心频率的其他谐波成分迅速衰减，使带有毛刺或有些失真的信号，经选频放大后能得到较好的正弦波波形，同时它还能抑制各种不同频率的振荡。这一特性对放大倍数较高的压力变送器也是很重要的。实际测试压力变送器的频宽达到了1000赫芝，证明特性较好，满足了液压压下系统的要求。

综上所述，要获得液压压下装置较高的性能指标，系统中每一个环节都应有特定的要求和优良的特性，要求技术人员综合运用机械、电器、轧制工艺几方面的专业技术知识。