

高等学校试用教材

621252

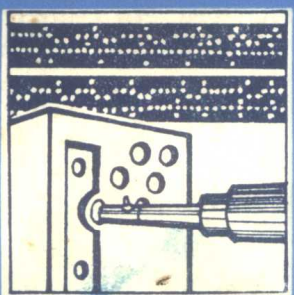
5768

1052



液压伺服控制系统

甘肃工业大学王春行 主编



机械工业出版社

621252

2768

1053

高等学校试用教材

液压伺服控制系统

甘肃工业大学王春行 主编



机械工业出版社

液压伺服控制系统

甘肃工业大学王春行 主编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

重庆印制一厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 787×1092 1/32·印张18.75·字数459千字

1981年7月重庆第一版·1981年7月重庆第一次印刷

印数00,001—10,000 定价1.95元

*

统一书号: 15033·5045

前 言

本书是根据1978年4月在天津召开的高等学校一机部对口专业座谈会的精神，及同年9月在兰州召开的水力机械、液压传动专业会议所拟订的“液压伺服控制系统”教材编写大纲编写的。

全书共分八章，前六章讲述液压伺服控制的基本原理、基本概念以及液压伺服控制元件和系统的分析、设计，后两章介绍了液压伺服控制的辅助装置及液压伺服控制的应用。

本书是“自动控制原理”、“液压元件”及“液压传动系统”的后继课程。总学时（包括实验课）为60学时。在编写中注意加强基础理论知识，同时也注意反映国内外先进技术和理论联系实际。为了便于读者学习，也配有分析计算和应用的实例。本书在分析和设计时，采用线性自动控制理论，并以频率法为主。

本书由甘肃工业大学王春行同志主编。参加编写的有王春行同志（第一、四、五、六章及附录）、**胡瑞圭**同志（第二、三章）和钟永隆同志（第七、八章）。

本书由东北重型机械学院王益群同志主审。1980年1月在广州举行的审稿会上，哈工大、北京工业学院、上海交通大学、华南工学院、上海铁道学院、陕西机械学院、重庆建筑工程学院、广州机床研究所等单位的代表对初稿进行了认真的审阅，并提出许多宝贵的意见。一机部教编室朱骥北同志对全书进行复审和修订，提出了宝贵的意见，并提供了有关的参考资料。

对所有为本教材进行审阅并提出宝贵意见以及在编写出版过程中给予热情帮助和支持的同志们，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，加之时间仓促，书中缺点和错误之处在所难免，殷切希望使用本教材的师生及其他读者，给予批评指正。

目 录

第一章 液压伺服控制概述	1	§ 5-1 电液伺服阀的工作原理及其构成	122
§ 1-1 液压伺服控制的发展概况	1	§ 5-2 电气机械转换器	124
§ 1-2 液压伺服控制的原理和系统构成	2	§ 5-3 力反馈两级电液伺服阀的分析	142
§ 1-3 液压伺服控制的分类	9	§ 5-4 电液伺服阀的特性和主要性能参数	154
§ 1-4 液压伺服控制的优缺点	11	§ 5-5 电液伺服阀的类型及其特点	161
第二章 液压放大元件	13	§ 5-6 电液步进马达和电液步进液压缸	170
§ 2-1 滑阀的结构形式	13	第六章 电液伺服控制系统	182
§ 2-2 滑阀的静特性	15	§ 6-1 电液伺服控制系统的类型	182
§ 2-3 滑阀的力特性	28	§ 6-2 电液位置伺服控制系统	184
§ 2-4 滑阀的功率输出及效率	38	§ 6-3 电液速度伺服控制系统	198
§ 2-5 滑阀的设计	40	§ 6-4 电液力(或压力)控制系统	202
§ 2-6 喷嘴挡板阀	42	§ 6-5 电液伺服控制系统的设计	208
§ 2-7 射流管阀	50	第七章 液压能源及辅件	224
§ 2-8 恒流液压放大器的静特性	54	§ 7-1 对能源装置的要求	224
第三章 液压动力元件	60	§ 7-2 能源装置的形式	225
§ 3-1 阀控动力元件的静特性	60	§ 7-3 恒压源的动态分析和参数选择	227
§ 3-2 阀控动力元件与负载的配合	65	§ 7-4 压力阀的动态分析	233
§ 3-3 阀控液压马达的动态特性	71	§ 7-5 蓄能器的动态分析	238
§ 3-4 阀控液压缸的动态特性	78	第八章 液压伺服控制的实际应用	244
§ 3-5 泵控液压马达	83	§ 8-1 液压仿形机床和数控机床	244
第四章 机液伺服系统	89	§ 8-2 在轧机上的应用	254
§ 4-1 系统的组成及方块图	89	§ 8-3 材料试验机的力控制系统	263
§ 4-2 系统的稳定性分析	90	§ 8-4 汽轮机调节系统	269
§ 4-3 系统的响应特性分析	100	附录	276
§ 4-4 系统的稳态误差	108	一、检测器	276
§ 4-5 系统性能的改善	110	二、伺服放大器	285
§ 4-6 恒流液压伺服系统的分析	115		
第五章 电液伺服阀和电液步进马达	122		

第一章 液压伺服控制概述

§ 1-1 液压伺服控制的发展概况

液压伺服控制是一门比较新兴的科学技术，它不但是液压技术中的一个新分支，而且也是控制领域中的一个重要组成部分。

人类使用水力机械及液压传动虽然已有很长的历史，但液压控制技术的发展却是近几十年的事。早在第二次世界大战期间及其以后，由于军事刺激，自动控制特别是武器和飞行器控制系统的研究发展工作得到很大的进展。液压系统由于反应速度快、重量轻、尺寸小及抗负载的刚性大，特别受到重视。尽管流体传动价格比较贵，且有许多不方便的地方，还是要研究如何更好地利用它。实践的需要推动了理论的研究工作，40年代开始了滑阀特性和液压伺服理论的研究。1940年底，首先在飞机上出现了电液伺服系统。但在那种系统中，滑阀由伺服电机拖动，作为电液转换器。由于伺服电机惯量大，使电液转换器成为系统中时间常数最大的环节，限制了电液伺服系统的响应速度。直到50年代初，出现了快速反应的永磁力矩马达，才形成了电液伺服阀的雏形。50年代末，又出现了喷嘴挡板阀作第一级的电液伺服阀，进一步提高了电液伺服阀的快速性。从而使电液伺服系统成为响应速度最快、控制精度最高的伺服系统。60年代，各种结构的电液伺服阀相继出现，特别是干式力矩马达的出现，进一步提高了电液伺服阀的性能。由于电液伺服阀和电子技术的发展，使电液伺服系统得到了迅速的发展。随着加工能力的提高和电液伺服阀工艺性的改善，使电液伺服阀的价格不断降低。出现了抗污染和工作可靠的工业用廉价电液伺服阀，使电液伺服系统开始向一般工业中推广。目前，液压伺服系统，特别是电液伺服系统已成了武器自动化和工业自动化的一个重要方面，应用非常广泛。

液压伺服控制已经发展成一门比较成熟的技术，一些基本的理论和技术问题得到了较好的解决。目前对一般的使用范围（频率在20赫左右以下）来说液压伺服系统的设计基础已大体上完成了。今后需要研究频率特性极好的液压伺服系统，以满足更高要求的应用场合，如特殊的材料试验机和振动试验机等。要进一步提高液压伺服系统的响应速度，需要解决在高频范围出现的一系列问题，如孔口节流的动特性、按分布参数计算管路的非定常流动问题、为了改善高频特性提高伺服系统供油压力所引起的高频振动问题和高频电液伺服阀的研制等。大惯量伺服电机的出现，使电气伺服系统又重新具有了竞争能力，在机床中液压伺服渐渐被电气伺服所取代。但目前大惯量伺服电机只能用于小功率的场合，所以在功率比较大的伺服控制中，电液伺服控制仍有着广阔的发展前途。如果说在位置伺服控制和速度伺服控制中，电液伺服受到电气伺服强有力的挑战的话，那么在力控制系统中电液伺服控制却取得越来越大的优势。今后，大功率电液伺服系统、高效率伺服系统、力控制电液伺服系统、伺服系统组成的简化、伺服控制理论的研究和系统参数优化设计的研究等都是需要解决的课题。

我国的液压伺服控制技术发展很快。在伺服元件方面，自60年代开始研制电液伺服阀，

70年代初,开始批量生产QDY系列和DY系列电液伺服阀。QDY系列伺服阀属于干式力矩马达喷嘴挡板滑阀式力反馈伺服阀,该系列电液伺服阀,无论性能和质量都具有一定的水平。DY系列伺服阀属于动圈双级滑阀式伺服阀,适用于某些冶金、轧钢、矿山和重型设备等工作环境恶劣,要求能可靠工作但动态性能不高的场合。除上述两种流量控制阀外,压力控制伺服阀和特殊用途的压力流量(PQ)伺服阀,动压反馈(DPF)伺服阀也已研制成功并开始应用。随着数控机床的发展,性能优良的电液步进马达也已批量生产。在伺服系统方面,不仅应用最早的军工方面,如飞机、雷达、火炮等系统有了新的发展,而且在工业应用方面,推广也很快。如机床方面的仿形机床、数控机床、电火花加工机床;船舶上的舵机操纵和消摆系统;冶炼方面的电炉电极自动升降恒功率控制系统;试验装置方面的振动试验台、材料试验机、轮胎试验机等;锻压设备中的挤压机速度伺服、油压机的位置同步伺服;轧制设备中的轧机液压压下带材连续生产机的跑偏控制、张力控制;动力设备中的燃气轮机转速自调系统、水轮机转速自调系统等。

§ 1-2 液压伺服控制的原理和系统构成

一、液压伺服控制的原理

伺服系统也叫随动系统,是控制系统的一种。在这种系统中,输出量(机械位移、速度、加速度或力)能够自动地、快速而准确地复现输入量的变化规律。与此同时还起到信号的功率放大作用,因此也是一个功率放大装置。由液压拖动装置作动力元件所构成的伺服系统叫液压伺服系统。

图 1-1 是一个简单的液压伺服系统原理图。

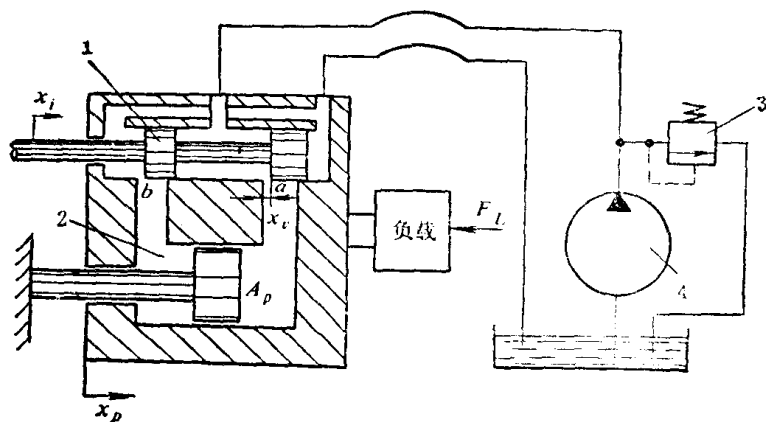


图 1-1 液压伺服系统原理图

图中液压泵4是系统的能源,以恒定的压力向系统供油,供油压力由溢流阀3调定。液压拖动装置由四通滑阀1和液压缸2组成。四通滑阀是一个转换放大元件,它将输入的机械信号转换成液压信号(流量、压力)输出并加以功率放大。液压缸是执行元件,输入是压力油的流量,输出是运动速度(或位移)。滑阀与液压缸的组合也称为伺服液压缸(或液压放大器)。在这个系统中阀

体与液压缸体作成一体,构成了反馈连接。

当滑阀处于中间位置(零位)时,阀的四个窗口均关闭,阀没有流量输出,液压缸不动,系统处于静止状态。给滑阀一个输入位移,如阀芯向右移动一个距离 x_i ,则窗口 a 、 b 便有一个相应的开口量 $x_o = x_i$,压力油经窗口 a 进入液压缸右腔,推动缸体右移,液压缸左腔油液经窗口 b 排出。因为阀体与缸体固连在一起,所以阀体也跟随缸体一起右移,使阀的开口量减小。当缸体位移 x_p 等于滑阀输入位移 x_i 时,阀的开口量 $x_o = 0$,阀的输出流量等于

零，液压缸体将停止运动，处在一个新的平衡位置上，从而完成了液压缸输出位移对滑阀输入位移的跟随运动。如果滑阀反向运动，则液压缸也反向跟随运动。

在这个系统中，滑阀不动，液压缸也不动；滑阀移动多少距离，液压缸也运动多少距离；滑阀移动速度多快，液压缸移动速度也就多快；滑阀向哪个方向移动，液压缸也就向哪个方向移动。可见执行元件的动作（系统的输出）能够自动地、准确地复现滑阀的动作（系统的输入），所以这个系统是一个自动跟踪系统。

这个系统，输出位移之所以能够精确地复现输入位移的变化，是因为阀体与液压缸体固结在一起，构成了反馈控制系统。在控制过程中，液压缸的输出位移能够连续不断地回输到阀体上，与滑阀的输入位移相比较，得出两者之间的位置偏差。这个位置偏差就是滑阀的开口量，因为滑阀有开口量，油源的压力油就要进入液压缸，驱动液压缸运动，使阀的开口量（偏差）减小，直至输出位移与输入位移相一致时为止。可以看出，这个系统是靠偏差信号进行工作的，即以偏差来消除偏差，这就是反馈控制的原理。系统的工作原理可以用图 1-2 所示的方块图表示。

在这个系统中，反馈介质是机械连接，称为机械反馈。一般地讲，反馈介质可以是机械的、电气的、气动的、液压的或它们的组合形式。

综上所述，液压伺服控制的基本原理就是液压流体动力的反馈控制。即利用反馈连接得到偏差信号，再利用偏差信号去控制

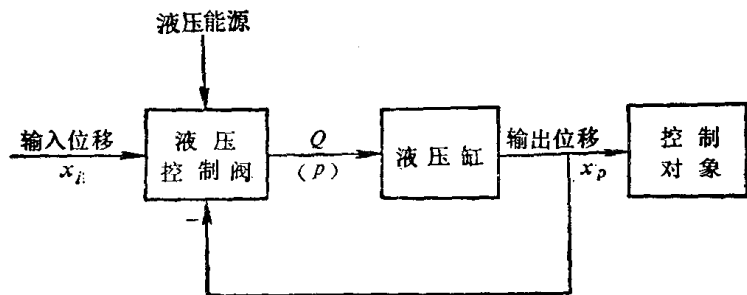


图 1-2 系统工作原理方块图

液压能源输入到系统的能量，使系统向着减小偏差的方向变化，从而使系统的实际输出与希望值相符。

这种系统，移动滑阀所需要的信号功率是很小的，而系统输出的功率（液压缸输出的速度和输出的力）却可以达到很大，因此这是一个功率放大装置。功率放大所需要的能量由液压能源供给，供给能量的控制是根据伺服系统偏差的大小自动地进行的。于是还可以作出以下的定义：

液压伺服系统是一个控制能源输出的装置，在其中输入量与输出量之间自动而连续地保持一定的符合一致的关系，并且用这两个量之差来控制能源的输出。

二、液压伺服系统的构成

实际的液压伺服系统无论多么复杂，都是由一些基本元件所组成的，并可以用图 1-3 所示的方块图来加以表示。

图中，输入元件给出输入信号，加于系统的输入端。反馈测量元件测量系统的输出量，并转换成反馈信号，加于系统的输入端与输入信号进行比较，从而构成了反馈控制。输入信号和反馈信号应转换成相同形式的物理量，以便进行比较。输入元件和反馈测量元件可以是机械的、电气的、气动的、液压的或它们的组合形式。

比较元件将反馈信号与输入信号进行比较，产生偏差信号加于放大装置。比较元件有时并不单独存在，而是与输入元件、反馈测量元件或放大装置一起，由同一结构元件来完成。

如图1-1中的滑阀，同时完成比较、放大两种功能。

在伺服系统中，输入元件、反馈测量元件和比较元件经常组合在一起，称为误差（或偏差）检测器。

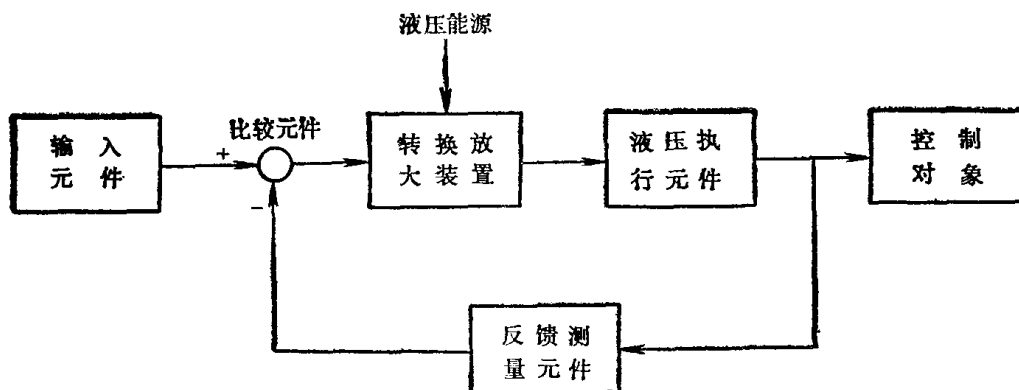


图 1-3 液压伺服系统的构成

转换放大装置的功用是将偏差信号的能量形式进行变换并加以放大，输入到执行机构。转换放大装置的输出级是液压的，前置级可以是电的、液压的、气动的、机械的或它们的组合形式。

执行机构产生调节动作加于控制对象上，实现调节任务。在液压伺服系统中，执行机构可以是液压缸、摆动液压缸或液压马达。

概括起来，液压伺服系统由以下四个最基本的部分组成，即偏差检测器、转换放大装置（包括能源）、执行机构和控制对象。

除此而外，为了改善伺服系统的性能，还可以增加串联校正装置和局部反馈装置。串联校正装置和局部反馈装置可以是电气的、机械的、气动的、液压的或它们的组合形式。

应当指出，以上我们是按组成元件的功能来研究系统的构成，这些组成元件的功能可以用不同方法来实现。功能元件与结构元件是有区别的，同一个结构元件有时可以完成几种功能，也可能几个结构元件组合在一起完成一个功能。把组成系统的结构元件化归为那一类功能元件都是有条件的，这主要看是否便于研究问题。

三、液压伺服控制举例

1. 恒压式液压仿形刀架

图 1-4 表示普通车床液压仿形刀架工作原理图。仿形刀架装在车床刀架横滑板的后方，这样可以保留车床上原来的方刀架，不影响车床原有的性能。样件（或样板）1 支持在床身的后侧面。仿形刀架在工作中随车床溜板作纵向进给。液压缸的活塞杆固定在刀架的底座上，液压缸体连同刀架 6 可在刀架底座的导轨上沿液压缸轴向移动。

仿形刀架由控制滑阀（伺服阀）、液压缸和反馈机构三部分组成。控制滑阀是一个三通（双边）阀，阀体与液压缸体刚性连接，与杠杆一起构成反馈机构。滑阀一端有弹簧 3，经杆 4 使触头 2 压紧在样件 1 上。位置指令由样件 1 给出，经杠杆 5 和杆 4 作用在滑阀的阀芯上。液压缸体跟随滑阀运动，使刀架在液压缸轴线方向产生仿形运动。

液压缸前腔 I 与供油路相连，其压力等于液压泵的供油压力 p_s ，供油压力 p_s 由溢流阀调

定, 在工作过程中是不变的。液压缸后腔Ⅱ经滑阀开口 x_{v1} 、 x_{v2} 分别与供油路和回油路相通, 所以液压缸后腔Ⅱ中的压力 p_c 就由滑阀开口 x_{v1} 和 x_{v2} 的比例关系所决定。假定液压缸前腔Ⅰ的有效工作面积为 A , 液压缸后腔Ⅱ的有效工作面积为 $2A$ 。当滑阀处在中间位置时, $x_{v1} = x_{v2}$, $p_c = \frac{1}{2} p_s$, 液压缸处于相对平衡状态。

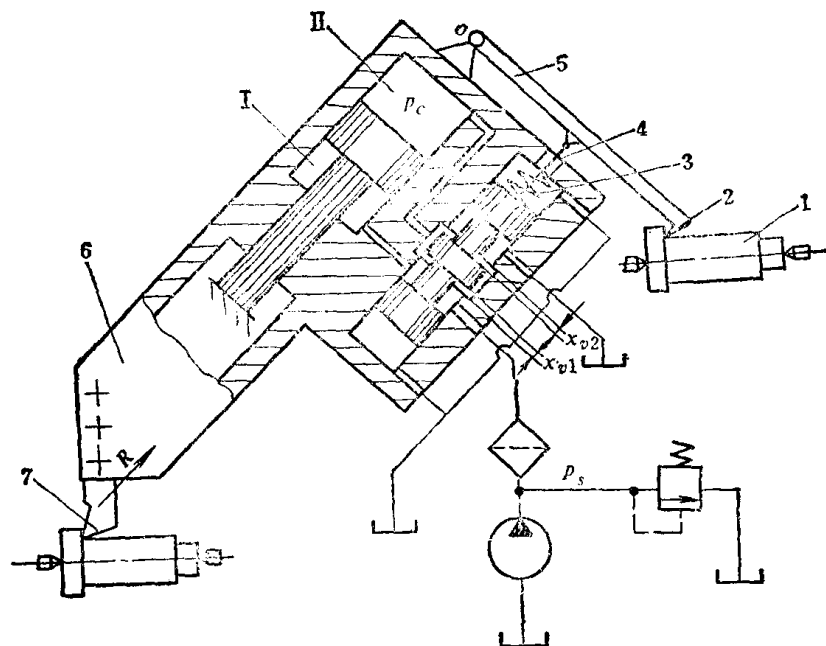


图 1-4 液压仿形刀架原理图

切削圆柱面时, 触头2沿样件1的圆柱表面滑动, 这时滑阀不动。但液压缸体在沿液压缸轴向的切削分力 R 的作用下, 要产生一个退让, 使滑阀开口 x_{v1} 减小, x_{v2} 增大, 从而使 p_c 减小, 则 $A p_s > 2A p_c$, 以便和切削分力 R 相平衡, 即有

$$A p_s = 2A p_c + R$$

这时仿形刀架又重新处于平衡状态, 由溜板带动仿形刀架纵向进给车出圆柱面 (见图 1-5 中的 a 点)。

车削台肩时, 触头碰到样件上的台肩, 触头就绕支点 o 抬起, 并经杆4向右上方牵动阀芯, 使开口 x_{v1} 增大, x_{v2} 减小, 于是液压缸后腔中的压力 p_c 增大, $2A p_c > A p_s$, 液压缸体带动车刀7后退, 这时溜板的纵向进给运动 $v_{纵}$ 和仿形刀架液压缸体的仿形运动 $v_{仿}$ 所形成的合成进给运动 $v_{合}$, 就使车刀车出工件的台肩部分 (见图 1-5 中的 b 点)。所以一般作为附件的仿形

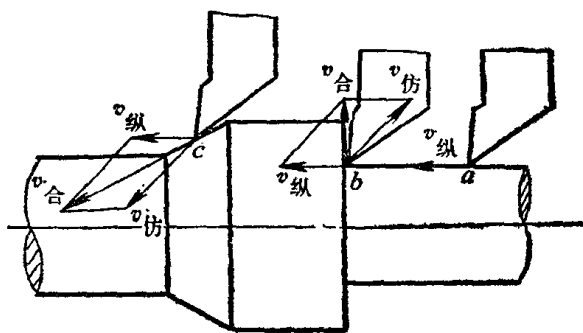


图 1-5 进给运动示意图

刀架的液压缸轴线多与主轴中心线安装成 $45^\circ \sim 60^\circ$ 的斜角, 目的就是为了车削直角的台肩。在液压缸体后退时, 一方面带动阀体后退, 另一方面通过触头的支点和杆4牵动阀芯也作较小的后退, 综合结果使开口 x_{v1} 减小, x_{v2} 增大, 这就是负反馈的过程。当开口 x_{v1} 和 x_{v2} 恢复到原来的大小时, 仿形刀架又处于平衡状态。在车台肩时, 由于样件的台肩不断将触头抬起 (不

断地发出指令信号), 使开口 x_{v1} 增大, x_{v2} 减小 (偏差增大), 连续使平衡状态受到破坏, 因此液压缸体也就带动车刀不断后退, 使开口 x_{v1} 减小, x_{v2} 增大 (减小偏差), 从而实现了刀具对触头的跟随运动。但是, 车刀上的切削力要比触头上的靠模力大得多, 所以仿形刀架是一个力放大器。

2. 恒流式液压仿形刀架

如图 1-6 所示, 仿形刀架由单边滑阀控制单活塞杆液压缸, 阀体与液压缸体刚性连接在一起构成反馈连接。仿形刀架由恒流液压能源供油, 即供油流量等于常数, 所以称之为恒流式液压仿形刀架。与液压泵相联的压力阀起安全阀作用, 限制系统的最大工作压力。

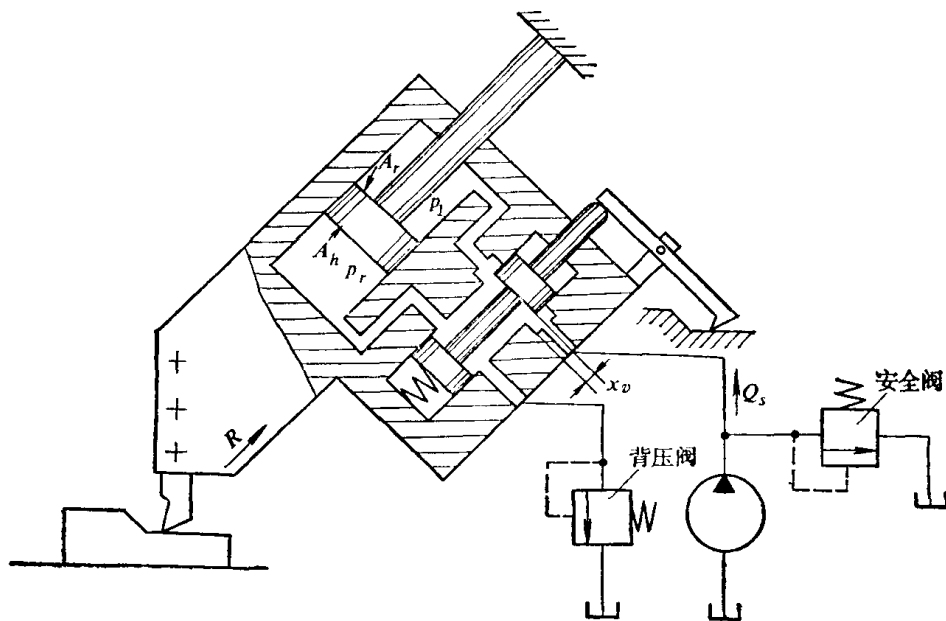


图 1-6 恒流式液压仿形刀架

液压缸活塞杆侧的压力 p_1 由单边滑阀控制, 无活塞杆侧的压力 p_r 由背压阀调定, 为一常数, 作为参考压力, 以使液压缸能够产生反向运动。在空载平衡位置时, $p_1 A_1 = p_r A_2$, 滑阀的开口量为 x_{v0} 。在切削圆柱面时, 由于切削力 R 的作用, 液压缸体沿轴线方向要产生一个退让, 使滑阀开口量增大, 从而使控制压力 p_1 减小, 以便和切削分力 R 相平衡, 此时, $p_r A_2 = p_1 A_1 + R$, 仿形刀架又重新处于平衡状态, 由溜板带动仿形刀架纵向进给车出圆柱面。仿型刀架在切削分力 R 的作用下产生退让, 改变了刀具相对于触头的位置, 这个位置变化量称为负载误差。在切削圆锥面时, 样板通过触头、杠杆将滑阀阀芯压下, 滑阀开口量 x_v 减小, 控制压力 p_1 升高, 推动液压缸体后退, 刀具切出圆锥面。为了保证液压缸体后退的速度, 滑阀开口量要有一个变化, 由此引起的刀具位置的变化量称为速度误差。

比较恒压和恒流液压仿形刀架可以看出, 恒压系统与恒流系统的工作原理是相似的。不同的是, 恒压系统的供油压力是恒定的, 而供油流量是变化的; 恒流系统的供油流量是恒定的, 而供油压力是变化的。恒压系统, 与液压泵相联的压力阀是常开的, 起溢流阀作用; 恒流系统, 与液压泵相联的压力阀是常闭的, 起安全阀作用。在恒流系统中, 必须采用正开口的阀, 以便构成旁路泄漏通道, 这样才能改变输入液压机的流量。在恒压系统中, 溢流阀起旁路泄漏通道的作用, 因此对控制阀不一定有此要求。

3. 电液位置伺服控制

图 1-7 是双电位器电液伺服系统原理图,该系统控制工作台的位置,使之按照指令电位器给定的规律变化。

该系统由指令电位器、反馈电位器、电气放大器、电液伺服阀和液压缸组成。

指令电位器将滑臂的位置指令 x_g 转换成电压 u_g 。被控制的工作台位置 x_f 由反馈电位器检测,转换成电压 u_f 。两个相同的线性电位器接成桥式电路,该电桥的输出电压 $\Delta u = u_g - u_f = K(x_g - x_f)$, $K = \frac{E}{x_0}$ 为电位器增益。当

工作台位置 x_f 与指令位置 x_g 相一致时,电桥输出偏差电压 $\Delta u = 0$,此时电放大器输出电流为零,电液伺服阀处于零位,没有流量输出,工作台不动,系统处在一个平衡状态。

当指令电位器滑臂位置发生变化时,如向右移动一个位移 Δx_g ,在工作台位置变化之前,电桥输出的偏差电压 $\Delta u = K \Delta x_g$,该偏差电压经放大器放大后变为电流信号去控制电液伺服阀,电液伺服阀输出压力油,推动工作台右移。随着工作台的移动电桥输出偏差电压逐渐减小,当工作台位移 Δx_f 等于指令电位器滑臂位移 Δx_g 时,电桥又重新处于平衡状态,输出偏差电压为零,工作台停止运动。如果指令电位器滑臂反向运动时,则工作台也反向跟随运动。在该系统中工作台位置能够精确地跟随指令电位器滑臂位置的任意变化,实现位置的伺服控制。图 1-8 表示该系统的工作原理方块图。

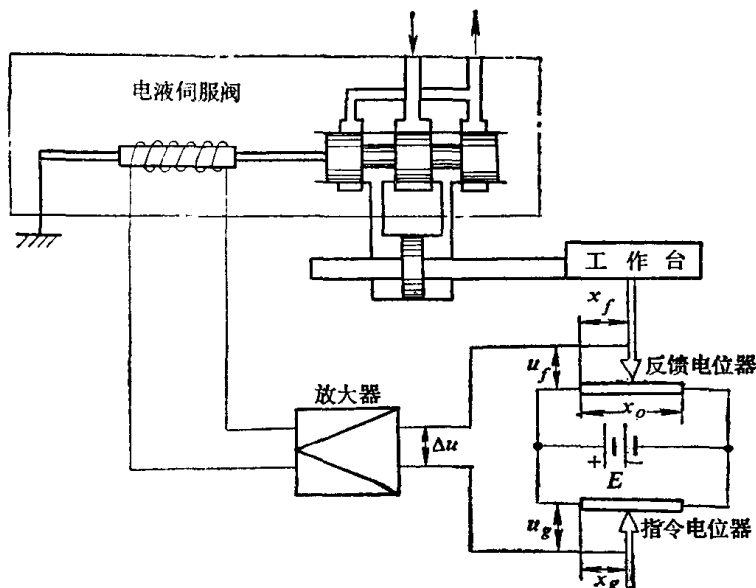


图 1-7 双电位器位置控制电液伺服系统

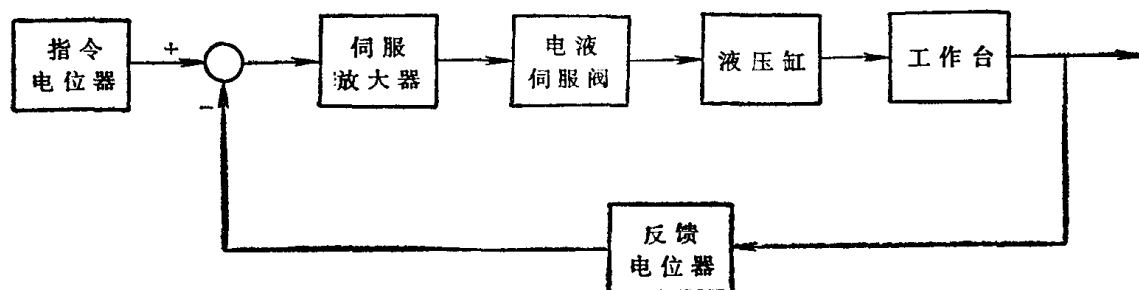


图 1-8 位置控制系统工作原理方块图

4. 电液速度伺服控制

图 1-9 表示速度控制电液伺服系统的原理图,该系统控制滚筒的转速,使之按照速度指令变化。

该系统的液压拖动装置由变量泵和液压马达组成,变量泵既是液压能源又是主要的控制元件。由于操纵变量泵机构所需要的力较大,通常采用一个小功率的放大装置作为变量控制机构。图 1-9 所示系统采用阀控制电液位置伺服系统（与图 1-7 所示系统相似）作为泵的控制

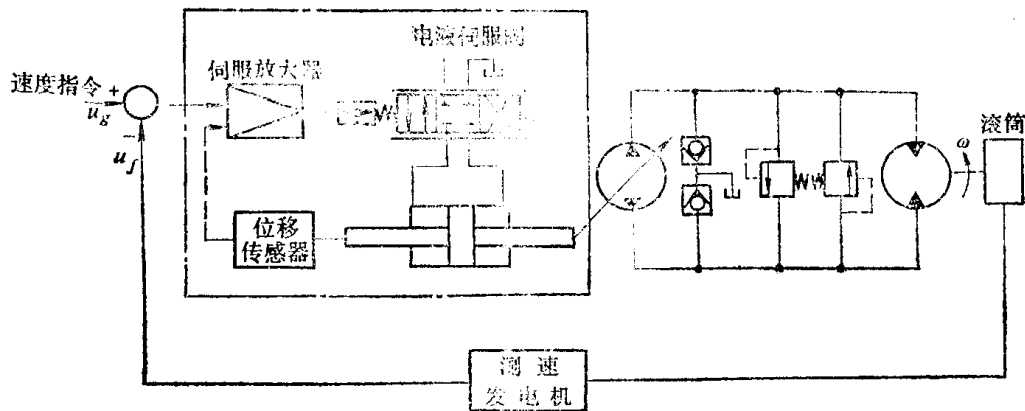


图 1-9 电液速度伺服控制原理图

机构。系统输出速度由测速发电机检测，转换为反馈电压信号 u_f ，与输入速度指令信号 u_g 相比较，得出偏差电压信号 $\Delta u = u_g - u_f$ ，作为变量控制机构的输入信号。

当速度指令 u_g 一定时，滚子以某个给定速度 ω_0 工作，测速机输出电压为 u_{f0} ，则偏差电压 $\Delta u_0 = u_g - u_{f0}$ ，这个偏差电压对应于一定的液压缸位置，从而对应于一定的泵流量输出，此流量为保持速度 ω_0 所需之流量。可见偏差电压 Δu_0 是保持工作速度 ω_0 所需要的，这是个一阶有差系统。在工作过程中，如果负载、摩擦力、温度或其它原因引起速度变化时，则 $u_f \neq u_{f0}$ ，假如 $\omega > \omega_0$ ，则 $u_f > u_{f0}$ ，而 $\Delta u = u_g - u_f < \Delta u_0$ ，使液压缸输出位移减小，于是泵输出流量减小，液压马达速度便自动下调至给定值。反之，如果速度下降，则 $u_f < u_{f0}$ ，因而 $\Delta u > \Delta u_0$ ，使液压缸输出位移增大，于是泵输出流量增大，速度便自动回升至给定值。可见速度是根据指令信号 u_g 自动加以调节的。

在这个系统中，内部控制回路（图 1-9 中的虚线）可以闭合也可以不闭合。当内部控制回路不闭合时，该系统是个速度伺服系统。若闭合内部控制回路，便消除了变量控制机构中液压缸的积分作用，系统实际上不再是一个速度伺服系统，而成了一个速度调节器。但是，在本书中，我们按照习惯，把液压伺服系统、液压程序控制系统和液压定值控制系统统称为液压伺服系统。

图 1-9 所示的系统，在内部控制回路闭合的情况下，将速度指令变为位置指令，测速机改为位移传感器，就可以进行位置的伺服控制。

系统的方块图表示在图 1-10。该系统的指令信号、反馈信号以及小功率信号是电量，而液压拖动装置的控制元件是变量泵，所以称为泵控制电液伺服系统。

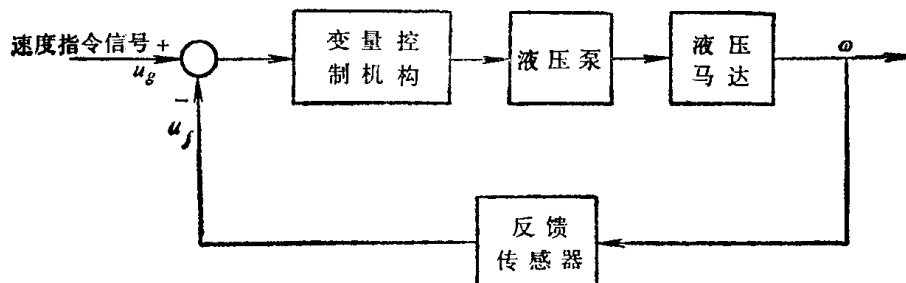


图 1-10 泵控制电液伺服系统方块图

5. 气液位置伺服控制

图 1-11 表示一个气液伺服系统的原理图，该系统用来控制带材的边缘位置，一般称为跑

偏控制。

系统由气动检测器、气液伺服阀、液压缸、卷取机和液压能源装置所组成。气液伺服阀由膜盒、射流管放大器和滑阀组成，膜盒将气压信号转换为机械力推动射流管运动，射流管放大器与滑阀组成一个两级液压放大器。卷取机由电机和卷筒组成，作卷取带材之用。

在正常运行时，带材处在气动检测器的中间位置（带材遮住接收孔的一半），检测器接收孔的压力大约为供气压力的一半，调节射流管的偏置弹簧，使射流管处于中间位置（零位），此时伺服阀没有液压信号输出，液压缸不动，系统处于平衡状态。

当跑偏时，带材偏离检测器的中间位置，如带材向右窜动，检测器接收孔压力增高，通过膜片推动射流管向左偏转，射流管放大器左边接收孔压力增高，右边接收孔压力降低，推动滑阀右移输出压力油，使液压缸活塞拖动卷取机沿导向装置向右移动，跟踪带材的跑偏位移，实现带材自动卷齐。由于检测器安装在卷取机移动部件上实现位置反馈，所以当纠偏位移等于跑偏位移时，带材又重新处在检测器的中间位置，射流管恢复零位，系统又处于一个新的平衡状态下进行卷取。这是一个典型的自动跟踪系统，带材跑偏位移是输入信号，随时间作任意的变化，而卷取机自动跟踪使带材自动卷齐。

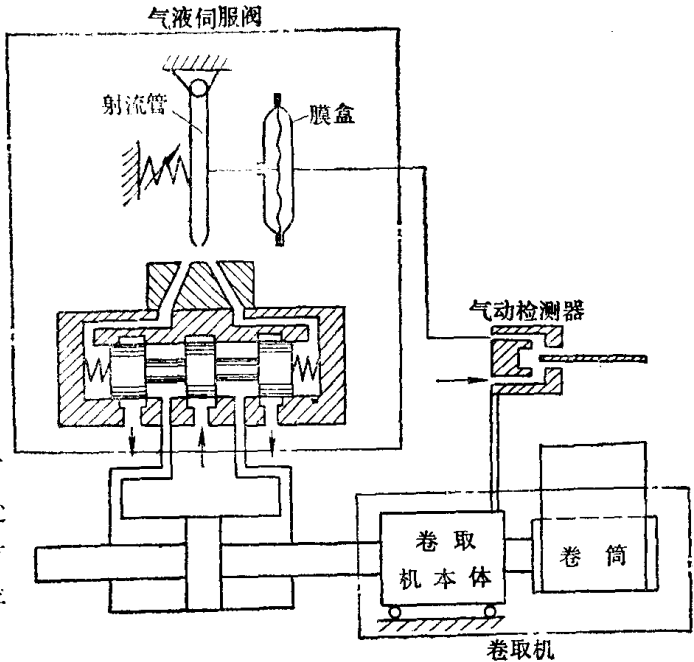


图 1-11 气液伺服系统原理图

§ 1-3 液压伺服控制的分类

自动调节系统按输入信号的变化规律可分为：定值控制系统、程序控制系统和随动系统三类。在液压控制中，习惯上把上述三类系统统称为液压伺服系统。液压伺服系统的种类很多，可以从不同的角度分类，每一种分类的方法都代表一定的特点。

一、按系统输出量的名称分类

液压伺服系统按输出量的名称可分为：位置控制、速度控制、加速度控制和力（或压力）控制等。

二、按系统输出功率的大小分类

伺服系统按输出功率的大小可分为：功率伺服和仪器伺服两种。功率在 200 瓦以下的，通常称为仪器伺服，这种系统主要用来完成一定的动作或计算功能，不考虑负载动态的影响。在大功率伺服系统中，功率范围由几十马力到几百马力。

三、按拖动装置的控制方式和控制元件的类型分类

液压伺服系统按拖动装置的控制方式和控制元件的形式可分为：节流式（阀控制式）和容积式（变量泵控制或变量马达控制）两大类。在节流式液压伺服系统中，主要的控制元件

是伺服阀或电液伺服阀。在容积式液压伺服系统中，主要的控制元件是变量泵，目前变量马达控制用的尚不多。

阀控制伺服系统的优点是响应速度快、控制精度高，缺点是效率低。由于它的性能优越，得到广泛应用，特别是在中小功率快速高精度伺服系统中采用。泵控制伺服系统的优点是效率较高、系统的刚度较大，缺点是响应速度慢、结构复杂，另外，操纵泵变量机构所需的力较大，需要一套专门的操纵机构，使系统复杂化。泵控制伺服系统特别适合大功率（20马力以上）而响应速度要求又不高的场合。

液压伺服系统根据拖动装置的对称性可分为：具有对称控制参数的系统和非对称控制参数的系统。对称系统的特点是系统在两个运动方向的运动速度和输出力或力矩是相同的，而且在两个运动方向可用同一精度来进行控制。非对称系统的特点是系统的运动速度和输出力的大小以及可能达到的精度随运动方向的不同而变化，系统本身的特性同样地也依赖于系统的运动方向。

阀控制伺服系统还可以进一步的分类：

根据液压能源的形式可分为：恒压系统和恒流系统。在恒压系统中能源以恒定的压力向系统供油，在恒流系统中能源以恒定的流量向系统供油。一般来说，恒压系统的性能比恒流系统的性能好，所以大多数的系统都是恒压系统。

根据液压放大的级数可分为：单级、双级和多级的液压伺服系统。

四、按系统中信号传递介质的形式分类

按系统中信号传递介质的形式或信号的能量形式，伺服系统可分为：机械液压伺服系统、电气液压伺服系统和气动液压伺服系统。

在机液伺服系统中，系统的给定、反馈和比较环节都是由机械构件实现。其优点是简单可靠，缺点是偏差信号的校正以及系统增益的调正都不如电的方便，另外反馈机构中的摩擦和间隙都会对系统的性能产生不利的影响。

在电液伺服系统中，偏差信号的检测、校正和初始放大等都是采用电气、电子元件来实现。电气、电子元件具有很大的灵活性，对信号的测量、校正和放大都比较方便。而液压动力元件响应速度快、抗负载刚性大。把两者结合起来，组成以电子、电气为神经，以液压为筋肉的电液伺服系统，具有很大的灵活性和广泛的适应性，成为目前响应速度和控制精度最优的伺服系统。

在气液伺服系统中，误差信号的检测和初始放大采用气动元件完成。气动测量灵敏度高、工作可靠，可在恶劣的环境（高温、振动、易爆等）中工作，结构简单。但需要有气源和附属的设备。

五、按输出量是否进行反馈测量分类

按输出量是否进行反馈测量可分为：闭环液压伺服系统和开环液压伺服系统。

闭环控制系统就是反馈控制系统。前面所介绍的几个例子都是闭环控制系统。闭环控制系统受到外界干扰和系统内部参数变化的影响小，控制精度高。但系统复杂，而且存在稳定性的问题。

开环液压伺服系统如图1-12所示，数控装置根据穿孔纸带上的数据和指令值，经过运算发出指令脉冲信号，经电液步进马达驱动装置送到电液步进马达（电液步进马达由步进电机和液压扭矩放大器组成，液压扭矩放大器是一个四通滑阀控制一个液压马达，带内部位置反

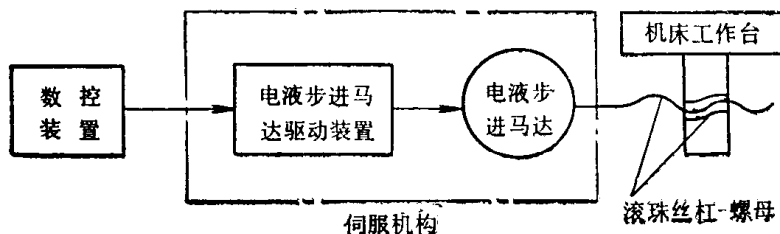


图 1-12 开环伺服系统原理图

馈)，使其转过一定的角度，带动丝杠螺母使工作台移动一定的距离。在这种系统中，没有位置检测和反馈信号，也不将被控制量的实际值与指令值进行比较。应当指出，液压扭矩放大器本身是一个小的伺服系统，在整个系统中作为一个积分部件。

§ 1-4 液压伺服控制的优缺点

液压伺服控制与其它类型的控制相比，具有许多优点。这些优点十分重要，都是工程上所需要的，因而使它获得广泛的应用。但是，液压伺服控制也存在一些缺点，这些缺点限制了它的应用范围。

一、液压伺服控制的优点

液压伺服控制的主要优点如下：

1. 液压元件的功率-重量比和力矩-惯量比（或力-质量比）大，传递的力（或力矩）和功率可以很大。因而可以组成体积小、重量轻、加速能力强和快速动作的伺服系统，来控制大功率和大负载。

为说明这一优点，我们把液压元件和电气元件作一比较。电气元件的最小尺寸取决于最大的有效磁通密度和功率损耗所产生的发热量。由于最大有效磁通密度受磁性材料的磁饱和限制，而发热量的散发又比较困难。因此，电气元件的结构尺寸比较大，功率-重量比和力矩-惯量比（或力-质量比）都较小。液压元件，由于功率损耗所产生的热量可以由油液带到散热器中去散发，所以它的最小尺寸不受发热量的限制，仅仅取决于最大工作压力，而最大工作压力只受安全应力值的限制。所以液压元件的尺寸小、重量轻，功率-重量比大。作为执行元件（液压马达与液压缸）能够在较小的结构尺寸下产生较大的力或力矩，因此力矩-惯量比（或力-质量比）大。现在，液压泵与液压马达的功率-重量比可以达到 4 马力/千克以上。液压马达的力矩-惯量比，一般为相当容量电动机的十至二十倍。力矩-惯量比大，加速性能好，可以组成快速动作的系统。这种要求在许多场合中正在不断提高。

2. 液压执行元件响应速度快，在伺服控制中采用液压执行元件可以使回路增益提高，频带加宽。这是液压伺服控制最主要的优点。

电动机就电压-速度而言，基本上是一个简单的滞后环节。而液压执行元件就流量-速度而言，基本上是一个固有频率很高的二阶振荡环节。因而液压执行元件响应速度快、能高速起动、制动与反向。液压执行元件工作腔内的油液具有一定的压缩性，可看成液压弹簧，这个液压弹簧与负载质量组成一个弹簧-质量系统。由于油液的压缩性很小，所以液压弹簧刚度很大，而液压执行元件的力矩-惯量比（或力-质量比）又比较大，从而使液压固有频率很高。这个固有频率就为液压执行元件的响应速度规定了一个上限。就目前的技术水平而言，

液压伺服控制的响应速度是最快的，在许多应用场合非用它不可。

3. 抗负载的刚性大，因此控制精度高。

由于油液的压缩性很小，所以液压执行元件的刚度较高。由于泄漏所引起的速度柔度也比较小，或者说速度刚度比较大，即速度-力矩曲线斜率的倒数比较大。因此，当加上负载后，速度只是稍许有些下降。用在闭环控制系统中，其结果就是定位刚度（位置刚度）比较大，位置误差比较小。这个优点也是液压伺服控制得到广泛应用的原因之一。与液压传动相比，电气传动或气动传动的刚性都比较小。在闭环控制时，为了得到同样的定位刚度所需要的回路增益要大得多。

除了这些主要的优点，还有一些优点，如元件的润滑性好、寿命长；调速范围宽、低速稳定性好；借助油管，动力的传输比较方便；借助蓄压器，能量储存比较方便；借助泵和阀，液压执行元件的开环和闭环控制都很简单；液压执行元件有直线位移式和旋转式两种，这就提高了它的适应性；过载保护容易等。

二、液压伺服控制的缺点

1. 液压系统采用油液作工作介质总是不太干净的，泄漏是难免的，因此比较脏。设计得好，制造得好，维护得好，可以使液体的泄漏减小到最低限度。

2. 液压元件的加工精度高，因而价格贵。

3. 不可能使油液完全不含污物和完全不受污染。污染的油液会使阀和执行元件堵塞。如果污物是磨料的话，还会使这些元件的性能受到永久性的损伤，甚至可能失效。污染的油液是液压伺服系统发生故障的主要原因。在液压伺服系统中，清洁的油液与可靠性可以说是两个同义词。

4. 液压系统有爆破和起火爆炸的危险，特别是起火爆炸是最严重的危险。采用耐高温和防燃油液可使这种危险减小。

5. 就处理小功率信号的数学运算、误差检测、放大、测试与补偿等功能而言，液压装置不如电子、电气装置那样灵活、线性、准确和便宜。因而在控制系统的小功率部分一般不宜采用。

根据液压装置的特点，它在控制系统中作为动力元件是很合适的。而系统的小功率部分一般都采用电气、机械或气动装置。