

# 电液伺服阀制造工艺

任光融 张振华 周永强 编著

37.52

宇航出版社

## 内 容 简 介

本书具体介绍了电液伺服阀制造的全过程。书中对电液伺服阀各关键零、部件如阀芯、阀套、喷咀、节流孔和衔铁组件等的加工和装配作了详细的介绍。针对电液伺服阀制造的特点，重点讲述了各精密小孔的加工和计量，小孔流量、压力测量和配对，阀芯、阀套覆盖量气动流量测量和配磨，衔铁组件的压装及最佳过盈量值等。在调试方面，重点讲述了对电液伺服阀机械零位、液压零位、磁零位的关系和它们的检查、调整方法；讲述了用气体初步检查与调整机械零位的方法可提前发现电液伺服阀装配过程或零件加工中的问题。

本书可供从事液压控制伺服阀类元件研制、生产的工程技术人员及有关院校师生参考。

### 电液伺服阀制造工艺

任光融 张振华 周永强 编著

责任编辑 林茂燕

★

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

★

开本：850×1168 1/32 印张：6.75 字数：162千字

1988年10月第1版第1次印刷 印数：1—1400册

ISBN 7-80034-135-6/TB·036 定价：2.40元

## 前 言

电液伺服阀的发展是近30年的事。它是电液伺服控制系统中的重要元件，其加工制造有一定的难度。为了总结、交流电液伺服阀制造工艺方面的实践经验，以利于加速提高我国电液伺服阀制造工艺水平，编写了这本《电液伺服阀制造工艺》。

本书对电液伺服阀制造的全过程作了具体的介绍。全书共分六章，在内容安排上是按概述、零件加工与装配、调试与验收的顺序。由于组成伺服阀的力矩马达、前置放大级和功率级的零件加工和组装各有特点，所以分章介绍，即安排在第二、三、四章。第五章介绍伺服阀的装配，第六章介绍伺服阀的调试和验收。各章连带提到了有关技术管理问题。

本书由航天工业部精密加工技术交流站站长、高级工程师吴敏镜同志审阅，并提出了许多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，经验不足，书中错误和不当之处在所难免，敬希读者批评指正。

编 者

1986年8月

# 目 录

主要符号	1
第一章 电液伺服阀概述	2
§ 1 概 述	2
§ 2 结构及工作原理	4
§ 3 制造工艺的特点	10
第二章 永磁力矩马达的制造	14
§ 1 引 言	14
§ 2 弹簧管的加工工艺	15
§ 3 反馈杆的加工工艺	29
§ 4 挡板的加工工艺	39
§ 5 衔铁的加工工艺	45
§ 6 衔铁组件的组装	51
§ 7 永久磁铁的加工工艺	59
§ 8 导磁体的加工工艺	62
§ 9 控制线圈及外罩壳的加工工艺简述	67
第三章 前置放大级的制造	69
§ 1 引 言	69
§ 2 喷咀的加工工艺	70
§ 3 节流孔、阻尼孔件的加工工艺	81
§ 4 滤油器的制造	84
第四章 滑阀功率级的制造	91
§ 1 引 言	91
§ 2 阀套的加工工艺	93
§ 3 阀芯的加工工艺	113

§ 4	阀体的加工工艺.....	131
<b>第五章</b>	<b>电液伺服阀的装配.....</b>	<b>142</b>
§ 1	装前的准备工作.....	142
§ 2	组件的装配.....	145
§ 3	总装配.....	151
<b>第六章</b>	<b>电液伺服阀的调试与验收.....</b>	<b>156</b>
§ 1	引言.....	156
§ 2	标准试验条件.....	156
§ 3	常用名词术语.....	159
§ 4	技术要求.....	168
§ 5	试验方法.....	177
§ 6	调试.....	190
§ 7	验收规则.....	199
§ 8	包装与保管.....	202
§ 9	故障及排除方法.....	203
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>207</b>

## 主要符号

$C$	流量系数
$C_P$	压力增益
$d_p$	喷咀小孔直径
$d_j$	节流孔直径
$d_z$	阻尼孔直径
$I$	电 流
$I_c$	控制电流
$I_n$	额定电流
$I_B$	饱和电流
$I_o$	零偏电流
$K$	刚 度
$K_Q$	流量增益
$P$	压 力
$P_c$	腔 压 力
$P_s$	系统供油压力
$P_n$	额定供油压力
$P_o$	回油压力
$P_L$	负载压差
$Q$	流 量
$Q_B$	饱和流量
$Q_C$	控制流量
$Q_n$	额定流量
$Q_p$	负载腔的液体流量
$W$	面积梯度

# 第一章 电液伺服阀概述

## §1 概 述

电液伺服阀是电液伺服控制系统中的重要元件。它能将几毫安的微弱电控信号转换成几十马力以上的巨大液压功率输出，驱动各样的负载，进行位置控制、速度控制或施力控制等。电液伺服阀有机地结合了精密机械、电子技术和液压技术，具有控制精度高、响应快、体积小、重量轻、功率放大系数高和直线性好等优点，所以得到了广泛的应用。目前，电液伺服控制系统已成了武器自动化和工业自动化的一个重要方面。由于电液伺服阀在电液伺服控制系统中起着有如“心脏”的作用，所以在国内外受到特别重视。

电液伺服阀的发展是近30年的事，早在第二次世界大战期间，在飞机上出现了电液伺服系统。但在那种系统中，电液伺服阀是由一个伺服电机拖动，作为电液转换器。由于伺服电机惯量大，使伺服阀成为控制回路中响应最慢的元件。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，又出现了喷咀挡板阀作为第一级的伺服阀，进一步提高了电液伺服阀的快速性。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年代中又出现了干式力矩马达，解决了油液中金属微粒被吸附在磁隙中的难题，使得电液伺服阀性能趋于完善。

近年来，世界上许多技术先进国家根据不同的使用要求，相继扩展和完善了一批通用系列产品。例如：美国摩格 (Moog) 公司的30~35和76系列；美国泰克司特朗 (Textron) 公司的

HR25、26 系列；英国道蒂 (Dowty) 公司的4550、4553系列；日本东京精测的3F·4F系列；法国梭贝朗 (Sopelem) 公司的6206~6501系列等产品；均已大量生产和使用。这些系列产品的规格较齐全，适应范围较广。

我国自60年代中期开始设计研制、生产和使用伺服阀以来，发展非常迅速。军工开始，扩展到民用。先是从类似东京精测3F型伺服阀的结构形式入手。由于这类伺服阀采用湿式力矩马达和组合式阀套结构，抗污染能力和稳定可靠性差，所以不久后开始设计研制与美国摩格31型相类似的干式力矩马达、整体阀套结构的伺服阀。随着国内各部门对伺服阀的需求日益增长，研制和生产的单位也不断增多。近年来国内研制生产的伺服阀品种规格日益增加，产品质量不断提高，并已有一大批产品在各种军事装备和民用设施上长期使用。

国内外生产和使用的电液伺服阀有多种多样的结构型式，从不同的角度有几种分类方法：

1. 如按液压放大器的级数划分，有单级、两级、三级等类伺服阀。单级伺服阀使用流量受到限制，三级伺服阀通常只用在要求流量很大的地方。这两类伺服阀使用得较少。而两级伺服阀是最常用的型式。

2. 如按第一级的结构分类，有滑阀、单喷咀挡板阀、双喷咀挡板阀、射流管阀、射流元件等类伺服阀。其中采用双喷咀挡板阀的为最多。

3. 如按反馈的形式分类，有滑阀位置反馈、负载压力反馈、负载流量反馈等类伺服阀。其中绝大多数是滑阀位置反馈式伺服阀。

4. 如按阀的类型分类，有射流管阀、射流阀、平板阀等。平板阀仍属节流式，而射流管阀与射流阀则是非节流式伺服阀。由于它们消耗功率大，在液压伺服系统中很少单独使用，一般多作为第一级液压放大器来使用。



还有其他的分类法，这里不一一列述。

伺服阀的种类繁多，而两级流量伺服阀占多数。两级流量伺服阀由力矩马达、喷咀挡板或射流放大器等前置放大级和滑阀功率输出级组成。目前国际市场上的典型两级流量伺服阀多采用干式力矩马达、无摩擦的双喷咀挡板前置放大器、四通滑阀功率放大器和反馈结构。且因力反馈方式具有线性好、零漂小、冲击振动加速度的影响小等优点，所以高性能的伺服阀又多采用此方式。我们称它为两级电液流量控制伺服阀（以下简称电液伺服阀）。这种阀使用广泛，加工工艺有代表意义，本书针对这种伺服阀的典型结构介绍其制造工艺。

## §2 结构及工作原理

电液伺服阀有两级液压放大器。第一级可采用滑阀、喷咀挡板阀、射流元件等已如上述，这里只举双喷咀挡板阀。第二级通常采用滑阀。电液伺服阀主要由下列三部分组成：

1. 动铁式永磁力矩马达
2. 喷咀挡板前置放大级
3. 四通滑阀功率级

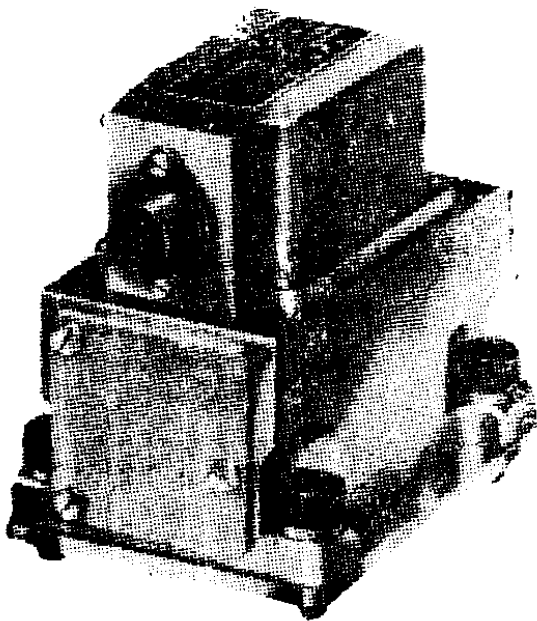


图1-1 QDY系列电液伺服阀

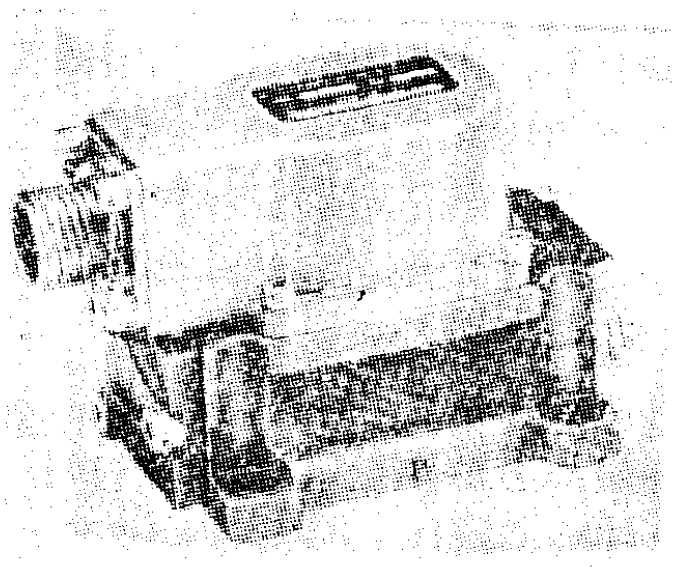


图1-2 摩格31系列电液伺服阀

图1-1是我国QDY系列电液伺服阀的外形照片。图1-2是美国摩格31系列电液伺服阀的外形照片。它们的上半部是力矩马达，下半部装有四通滑阀，中间装喷嘴挡板。三者通过其中反馈杆建立协调关系。

电液伺服阀的液压连接口称为通油窗口，共有四个，即供油窗口、回油窗口和两个控制窗口。这些通油窗口安置在阀的底面，它们分别标着代号。按我国航天工业部和航空工业部的伺服阀标准：供油窗口标“P”，回油窗口标“R”，两个控制窗口分别标“1”及“2”。

图1-3是摩格30系列电液伺服阀的剖视图。图1-4是电液伺服阀各组成部分的结构示意图。现按各部分别说明于下。

力矩马达的作用就是将电控信号转换为机械运动。它利用电磁原理进行工作，如图1-5磁路所示。永久磁铁产生固定磁场，输入的电控信号通过控制线圈产生控制磁场，这两个磁场相互作用产生与电控信号成比例并能反应电控信号极性的力矩，使衔铁转动。

衔铁固定在弹簧管上端。弹簧管是衔铁的弹性支座，可作微小的弯转运动。在衔铁的左右两臂上各套有控制线圈。衔铁两臂的端部（极靴）与上下导磁体形成四个工作气隙 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 。当磁通通过气隙时，便在此处产生电磁吸力。磁通大，电磁吸力也大。由于力矩马达结构上是左右对称的，因此当没有控制电流 $I_c$ 输入时，即 $I_1 = I_2$ 时，永久磁铁将在四个工作气隙 $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$ 中形成大小相等的固定磁通，使衔铁两端所受的电磁吸力相同而处于力平衡状态，衔铁保持在中立位置。当有控制电流 $I_c$ 通过线圈时，即 $I_1 \neq I_2$ 时，便在衔铁上形成控制磁通。控制磁通也通过四个工作气隙。如 $I_1 > I_2$ ，控制磁通在衔铁上是由左向右通过的，则在气隙 $a$ 、 $d$ 中两个磁通叠加，电磁吸力大，而在气隙 $b$ 、 $c$ 中两个磁通相减，电磁吸力小。使衔铁左端向上右端向下，顺时针转动。衔铁的转动使弹簧管产生弹性变形，形成一个与电磁

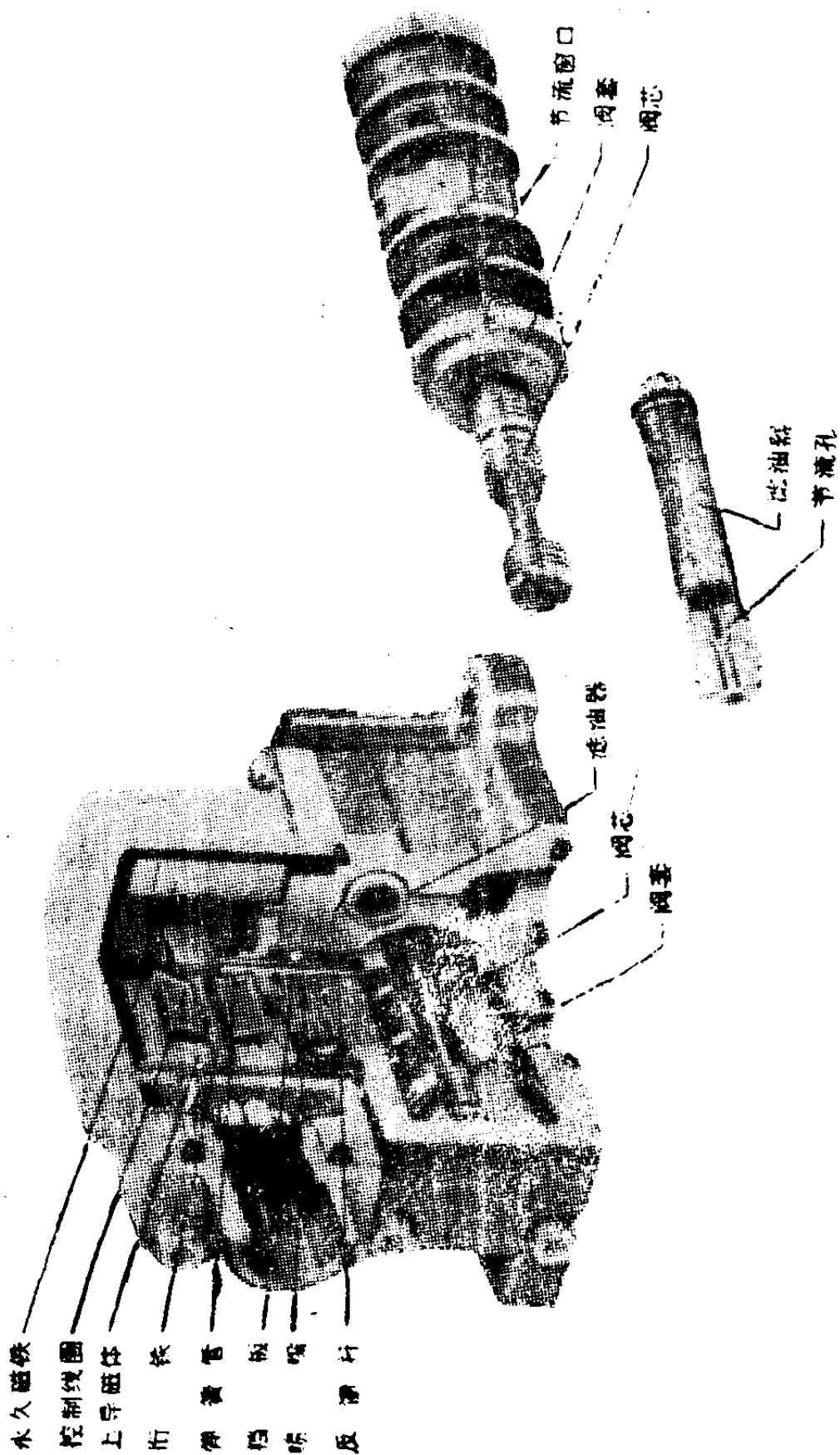


图1-3 摩格30系列电液伺服阀剖视图

力矩方向相反的力矩。当弹簧管的力矩达到与电磁力矩平衡时，衔铁即停止转动并保持在此转角上。弹簧管保证了衔铁的转角比例于控制电流。

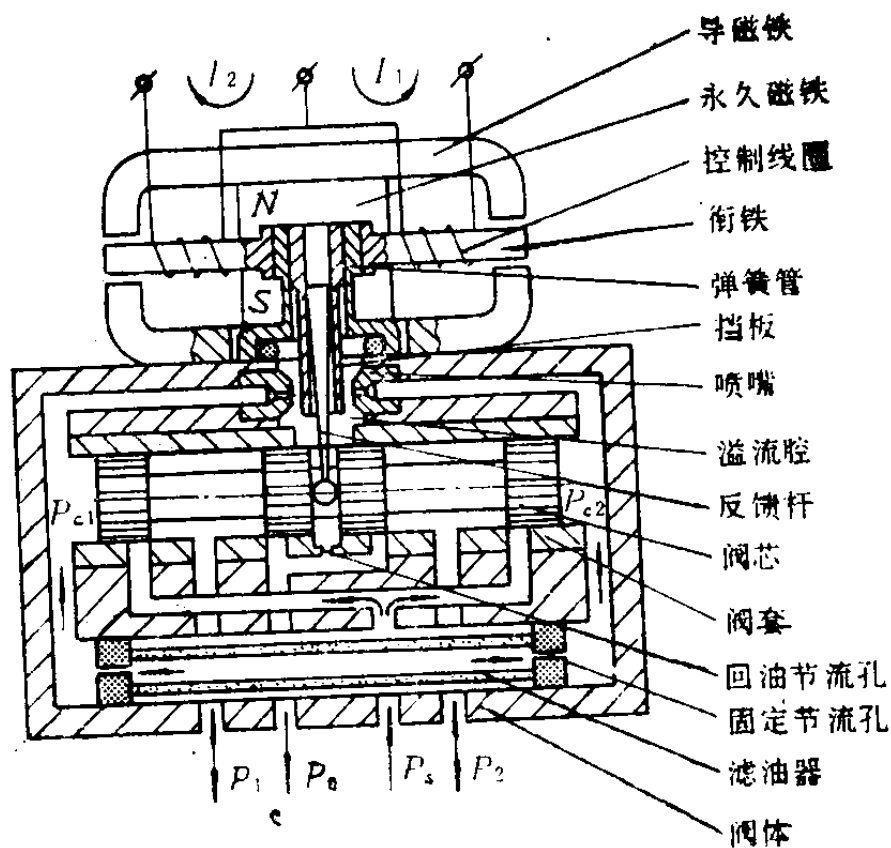


图1-4 电液伺服阀结构示意图

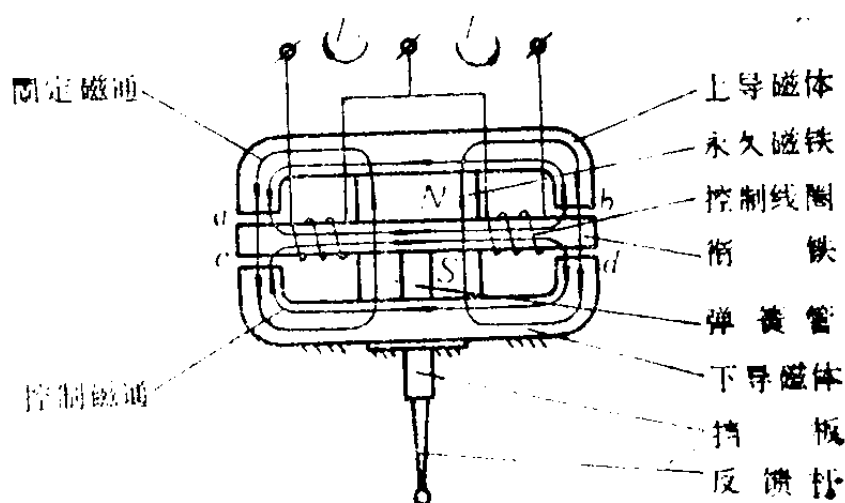


图1-5 力矩马达工作原理图

如果控制电流的极性相反，即 $I_1 < I_2$ ，则衔铁所受的电磁力矩将是逆时针方向的。可见衔铁的转动方向反应了控制电流的极

性。

前置放大级包括喷咀、挡板和固定节流孔等。功率级由阀芯和阀套等组成。见图1-4。

衔铁与弹簧管、挡板、反馈杆组成一个组件，称为衔铁组件，见图2-1。所以衔铁转动，弹簧管、挡板、反馈杆也相应转动。

反馈杆是一根具有特定弹力的金属杆，在其端部有一小球头，此球头直接与阀芯的中槽啮合。弹簧管是一个薄壁弹性零件，也具有特定弹力，其下端有个法兰盘，用螺钉紧固在阀体上。弹簧管除对衔铁组件起支撑作用外，还将电液伺服阀的液压部分和电气部分隔离密封。在阀体中，有四通滑阀（滑阀指阀芯和阀套）、两个对称的喷咀、两个对称的固定节流孔和一个回油节流孔等。

不给力矩马达电控信号时，挡板处于两喷咀间的中间位置。这时两喷咀腔的压力相等，即 $P_{c1} = P_{c2}$ ，（图1-4）阀芯处于中间位置不动，滑阀的各节流窗口关闭，没有输出。当给力矩马达输入一个电控信号时，衔铁转动，挡板向某一方向偏摆，致使通过某一个喷咀的液流阻力加大，另一个减小，两喷咀前腔形成压力差，即 $P_{c1} \neq P_{c2}$ ，从而推动了阀芯移动。阀芯中槽与反馈杆球头啮合，阀芯移动带着反馈杆移动。反馈杆变形产生的力矩加上弹簧管变形产生的力矩，与力矩马达在电流 $I_c$ 作用下产生的力矩达到平衡，同时反馈杆端球对阀芯的反作用力及阀芯开口后的液动力平衡阀芯两端的压力差，使阀芯停止运动而保持其位移量。这样，滑阀的节流窗口就对应的开启，就能输出一个对应的流量 $Q$ 。因此，达到了用差动控制电流 $I_c$ 控制流量 $Q$ 的目的。如果 $I_c = 0$ ，阀芯在反馈杆反变形力作用下回到零位，节流窗口关闭。当信号电流变化时，阀芯位移及输出流量也发生相应的变化。信号电流愈大，阀芯位移也愈大，从而输出流量也愈大。

归纳起来说，设输入一个控制电流 $I_c$ ，使衔铁逆时针旋转一

角位移后，右喷嘴挡板间隙减小，而左喷嘴挡板间隙增加，则  $P_{c2}$  增大而  $P_{c1}$  减小，导致阀芯左移，并带动衔铁组件顺时针转动，直到作用在衔铁组件上的诸力平衡为止。阀芯左移，开启了左腔，使来自高压能源的高压油  $P_s$  流入  $P_1$ ，推动作动筒或旋转马达等执行部件工作。如输入控制电流反向时，流量方向也相反。

目前，电液伺服系统组合中的转换元件，普遍地采用电液伺服阀来完成。电液伺服阀将很小的电控信号转变为阀的运动，阀的运动又去控制流向液压执行装置的流量和压力。下面举两个例子说明。一是位置伺服控制系统，如用在飞机舵机和导弹摆动发动机的位置控制等；二是速度伺服控制系统，如用在各种恒速装置上等。

图1-6是一个采用伺服阀控制、作动筒驱动的位置控制系统实例。如把输入电控信号加给伺服系统，经过伺服放大器放大后进入伺服阀，伺服阀把与输入信号成比例的流量送入作动筒驱动作动筒活塞运动。如果将负载连接在这个活塞杆上，就可以使负载位移与输入信号成比例。假如负载没有按着输入指令信号准确地改变位移，则反馈装置检测出它的实际位移量并加到输入端与指令信号进行比较，然后用二者之间的差值对活塞位移进行修正，直到输入信号与反馈信号之差等于零为止。用这种方法可高精度地控制负载的位移。

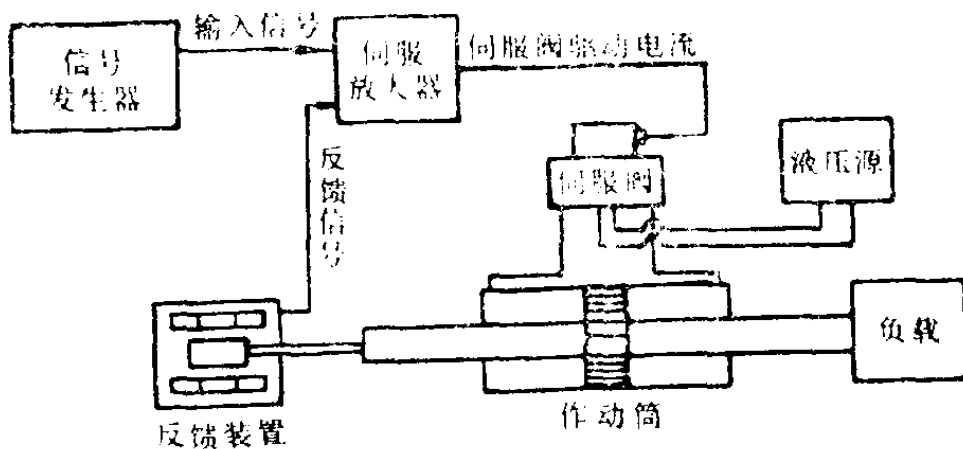


图1-6 位置伺服控制系统

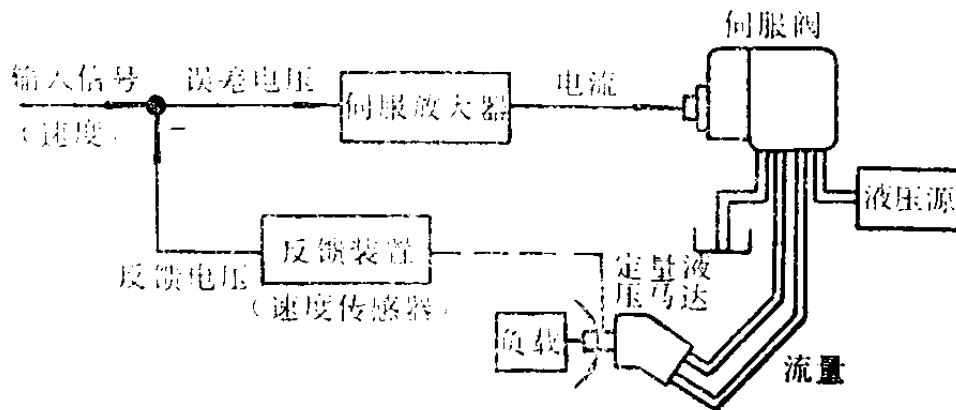


图1-7 速度伺服控制系统

图1-7是速度伺服控制系统实例。负载的速度用速度传感器转换成电压，这个电压即为反馈信号。它与速度输入信号进行比较，所得差值即误差电压，通过伺服放大器放大后成为伺服阀的输入电流。从液压源来的具有一定压力的液压油经过伺服阀流入液压马达，液压油的流量及流动方向受伺服阀控制，使液压马达按照误差电压的方向与大小旋转，使负载跟踪输入信号进行运动。

根据不同的应用场合，电液伺服系统可以有各种各样的组成形式。基本上由以下几部分组成：给定信号、比较及检测、放大与变换、伺服阀、执行机构、反馈装置及液压能源等。为了改善系统的动态品质，还可能加入各种校正装置。

### §3 制造工艺的特点

电液伺服阀的制造工艺具有如下特点：

#### 1. 尺寸精度、几何精度高

随着工作性质的不同，电液伺服阀的技术要求亦不尽相同。通常许多零部件的尺寸精度都很高。例如阀芯和阀套，决定径向间隙尺寸的阀芯外径和阀套孔径尺寸，保证所需覆盖量的轴向尺

寸，决定流量特性的节流工作边的尺寸和形状以及各节流工作边的相互位置等。其他如喷咀、衔铁、弹簧管、挡板和反馈杆等的尺寸精度也很高。

电液伺服阀许多零部件的几何精度要求高是和它们的使用或工作情况有关的，如在伺服阀生产过程中，有三种配合，即：间隙配合、无间隙配合和过盈配合，需要高的尺寸精度和几何精度。

阀芯和阀套的配合属于间隙配合。由于工作性质关系，规定间隙很小，通常仅 $2\sim 4\mu\text{m}$ 。在这样小的间隙中，要保证阀芯在阀套中灵活运动，必须对它们工作面的几何精度严格要求，即它们工作面的总偏差要远小于配合间隙，通常要求它们的圆度、直线度和圆柱度等在 $1\mu\text{m}$ 之内。如果几何形状不正确，由液压而产生的不平衡压力，有使阀芯压向阀套一边的趋势，这将增加摩擦力，影响系统的灵敏度和寿命等，严重时会造成阀芯卡死。

反馈杆端头小球与阀芯中槽的配合，属于无间隙配合性质。它们间不允许有间隙，这也是工作性质所决定。因此对于小球和槽的几何精度要求非常高。

在衔铁组件中，衔铁和弹簧管、弹簧管和挡板、挡板和反馈杆的配合，属于过盈配合。它们一个套一个压合成组件，不仅要配合牢固，而且要对高压油密封。所以尺寸精度和几何精度要求严格。喷咀和阀体的配合也属于过盈配合，除加工要达到图纸设计要求精度使压配合良好外，还有严格的压到规定位置的要求。

## 2. 要求对称性

力反馈电液伺服阀采取对称的结构，对许多零部件有严格的对称性要求。例如为保证力矩马达正反方向输出的对称，对其组成的各零件在尺寸上和装配上都要求对称。以弹簧管和反馈杆等弹性件为例，除加工精度应达到设计工艺规定的要求外，还要求它们向左弯和向右弯的刚度相对称。其他如上、下导磁体和衔铁组件等，都必须在尺寸上保证对称。在前置放大级中，喷咀和节



流孔要求成对相对称，就是成对的两个零件要一样，安装要对称。功率级上许多地方同样要求对称。

### 3. 要求锐边和无毛刺

阀套节流工作边与其圆柱面形成的角度，及阀芯凸肩节流工作边处的角度，对控制系统的工作情况有很大影响。为了使控制系统获得高的工作精度，这些角设计规定为直角而且其棱边要求尖锐的，不能有圆角。棱边上微小的圆角、倒钝均将改变伺服阀的特性。

阀芯和阀套上所有节流工作边的棱边不得留有显微毛刺，否则在有毛刺处出现压力降。因为当毛刺出现在部分圆周上时，造成径向压力不平衡，会产生卡住现象，影响流量，从而改变流量特性曲线。

其他零件也不允许有毛刺，例如喷咀端面和各过盈配合的零件的孔沿与圆柱端沿等。此外各交叉集成油孔要清除毛刺，特别是交叉处的毛刺要清除干净，这些油孔小而长交叉在阀体的内部，须采取措施清除毛刺。

### 4. 复杂的调试和测试

调试工艺比较复杂，需要测试的参数比较多。

### 5. 零件小，形状特殊

伺服阀是个小元件，组成伺服阀的零件都很小。其中有许多零件形状又很特殊。例如反馈杆是根细而长的弹性杆，最大直径只有1.5mm，而长度却大于30mm，其长径比达二十余倍之多。反馈杆的一端为圆柱体，另一端为一个毫米的球体，中部为圆锥体。又如弹簧管和挡板等也是小而特殊的零件。弹簧管的中部壁厚只有0.05~0.07mm，要求能承受30MPa的压力（一般工作油压为20MPa，设计规定弹簧管须能承受大于1.5倍的额定压力。）挡板也是一个细长的零件，其大端外径只有3mm，而中间有个1.5mm直径的精密通孔，小端有两个对称的小平面。其他如喷咀、阻尼孔、节流孔等零件也都是小而特殊的零件。