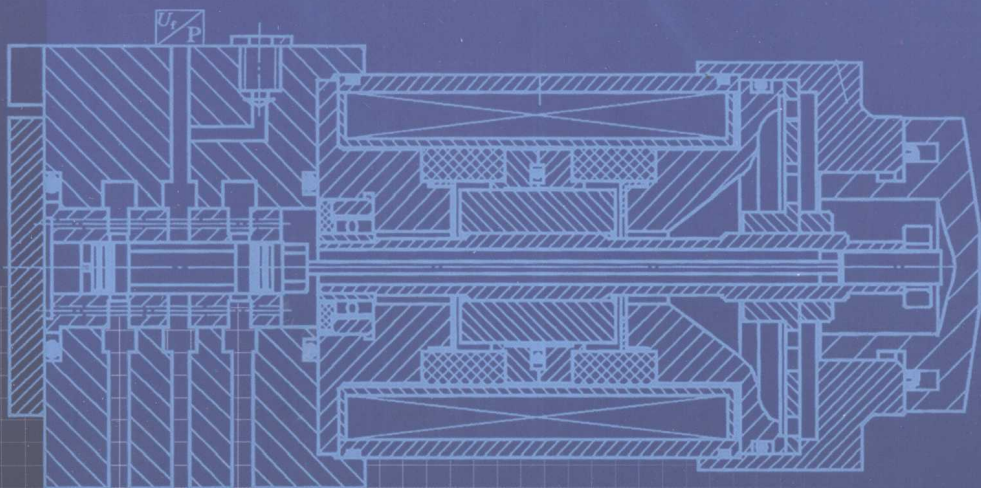




TECHNOLOGY OF
ELECTROHYDRAULIC
SERVOVALVES

电液伺服阀技术

田源道 著



航空工业出版社



电液伺服阀技术

田源道 著

姜继海 马扣根 审校

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书为电液伺服阀专著，主要介绍了双喷嘴挡板式和 DDV 型直驱式电液流量伺服阀及电液压力伺服阀的设计、分析、试验及疑难故障分析等内容，并介绍了如何正确使用伺服阀。

本书编排分为各型伺服阀设计和专题两部分。前 6 章为各型伺服阀设计，后 7 章为专题。伺服阀设计部分包括双喷嘴挡板力反馈两级电液流量伺服阀、双喷嘴挡板电反馈流量伺服阀和三级流量伺服阀、双喷嘴挡板动压反馈电液流量伺服阀、双喷嘴挡板压力伺服阀，以及 DDV 型直驱式电液流量伺服阀和电液压力伺服阀。专题部分探讨了各型伺服阀的一些共性问题：喷嘴挡板式电液伺服阀力矩马达的固有频率、阻抗、电感和衔铁组件转动惯量等，喷嘴挡板式伺服阀的啸叫原理及抑制，滑阀中液流流态切换现象产生机理，单边节流方孔阀芯结构的受力，以及伺服阀的性能测试、选型和使用等。

本书具有理论联系实际，在理论指导下总结经验的特点，可供从事机、电、液一体化的工程技术人员，高等学校的教师、研究生和高年级本科生参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

电液伺服阀技术/田源道著. —北京：航空工业出版社，
2008. 1
ISBN 978 - 7 - 80243 - 073 - 0

I. 电… II. 田… III. 电—液伺服阀 IV. TH134

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 190444 号

电液伺服阀技术 Dianye Sifufa Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话：010 - 64919539 010 - 64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2008 年 1 月第 1 版

2008 年 1 月第 1 次印刷

开本：787 × 1092 1/16

印张：9.75

字数：241 千字

印数：1—3000

定价：26.00 元

序

田源道高级工程师让我校阅他所著的《电液伺服阀技术》，并为它写个序。

20世纪80年代初，我就读于西北工业大学自动控制系统流体控制专业。那时，我就通过田源道高级工程师的论文而知道他。他是国内电液伺服阀研制的开拓者之一，也曾是中国航空学会自动控制专业委员会液压与气动学术组成员，负责撰写了由雷天觉院士主编的《液压工程手册》中有关电液伺服阀的章节，并发表了一系列相关论文，在电液伺服阀和电液伺服系统设计、分析、试验等方面具有非常丰富的理论与实践经验。

电液伺服控制技术是集机械、液压、电子、计算机、传感等于一体的自动化高技术，在精密机床、工程机械以及冶金、矿山、石化、电化、船舶、军工、建筑、起重、运输等主机产品中有着广泛的应用，是这些产品重要的控制手段。在工业发达国家，电液伺服控制技术的应用与发展被认为是衡量一个国家工业制造水平和现代工业发展的重要标志之一，是液压工业和机械自动化领域又一个新的技术热点和经济增长点。电液伺服阀是电液伺服控制系统中最关键的元件，其性能直接影响电液伺服系统的性能，国外已形成完整的电液伺服阀品种和规格系列，并在保持原基本性能与技术指标的前提下，向着简化结构、降低制造成本、提高抗污染能力和高可靠性方向发展。与之相比较，我国电液伺服阀技术仍有较大差距，主要表现在：性能水平较低，质量不够稳定，可靠性较差，品种规格不全，以及存在二次配套问题等。这些都阻碍了电液伺服技术的进一步扩大应用和发展。

《电液伺服阀技术》是首部系统论述电液伺服阀的专著。与散见于其他文献中的有关电液伺服阀的论述相比，它覆盖了多种型号电液伺服阀的设计、分析、试验及疑难故障分析，以及如何正确使用伺服阀等方面的内容，并对各型电液伺服阀的共性问题进行了专题讨论。它偏重于在理论指导下总结工程实践中的宝贵经验，是一本不可多得的好书。我相信，它的出版必将有助于电液伺服阀技术的提高和发展，促进更多具有自主知识产权产品的开发和技术创新。

马扣根 博士
美国夏威夷大学机械工程系
2007年10月20日

前 言

20世纪40年代,西方国家的工业迅猛发展,液压传动系统和电气传动系统均已普遍使用。从应用实践中人们意识到,液压传动的执行机构其运动惯量远远小于电气传动中电机的惯量,因此对大功率、大惯量且响应要求又比较高的系统,采用液压传动有明显的优越性;而电气传动具有信号传递迅速、信号校正处理方便、易于实现各种反馈和控制策略以及能实现远程控制等优点。对这两类传动系统如能做到取长补短,把两者的优点有机结合起来,做成机、电、液一体化伺服控制系统,无疑会将工业自动化水平推上一个新台阶。要实现机、电、液一体化,必须研制出一种能直接将电信号转换成液压信号并能实现功率放大的特殊关键元件(这一元件后来被人们称为电液伺服阀),科技工作者们为此做了大量的理论研究工作。在20世纪四五十年代,各种结构形式的电液伺服阀专利陆续出现,典型的有双喷嘴挡板对中弹簧式、双喷嘴挡板力反馈式、射流管力反馈式、动圈式直接反馈型等电液伺服阀专利。50年代后期,这些专利均已研制成较为成熟的产品并在市场上出售。其后,在这些产品的基础上,又不断开发了三级电液流量伺服阀、电液压力伺服阀、电液压力-流量伺服阀、动压反馈伺服阀、电反馈伺服阀,以及MOOG DDV直驱型伺服阀、MK型和PG型伺服阀等,基本上满足了工业发展的需要。

为了追赶世界科学技术发展步伐,不断提高我国一般工业和国防工业自动化水平,早在20世纪60年代初,我国有关单位,如航天部一院一部6室、航空部609所、上海704所、一机部自动化所等就着手组织有关科技人员开始研制这类产品。60年代后期,我国首次将双喷嘴对中弹簧式电液伺服阀应用于某型号试飞飞机上。70~80年代,我国伺服阀又有了进一步发展,国产双喷嘴挡板力反馈式、射流管力反馈式、动圈式直接反馈型各种电液流量和压力伺服阀,在市场上均有出售。目前我国生产伺服阀的厂家较多,生产的品种和型号也较多,基本上满足了我国民用工业和国防工业的需要。从伺服阀的生产数量和品种规格上评估,目前南京609所液压公司仍然是我国研制电液伺服阀的主力军。不过;与国际水平相比,以及从我国日益发展的工业需求考虑,无论从产品品种上,还是从产品的性能和质量上,国产电液伺服阀还有一些差距,仍有大量的工作需要去做。因此,总结以往几十年伺服阀的设计研制经验,明确今后的努力发展方向,是很有必要的。

作者自20世纪60~70年代与吕怀斌、应关龙、戎品顺、陈镇汉、王同信、何荷香、容同生、杨庆善等在原航空部609所设计研制双喷嘴挡板式电液伺服阀起,就一直从事电液伺服阀设计、分析、试验和电液伺服系统的研发工作,积累了

丰富的伺服阀设计和使用经验，在此将这些经验汇集成这本专著，以期为进一步推动我国电液伺服阀设计和应用再上一个新台阶起到抛砖引玉的作用。

本书着重介绍了双喷嘴挡板式电液伺服阀的设计及研制，其中对双喷嘴挡板力反馈两级电液流量伺服阀、双喷嘴挡板电反馈流量伺服阀和三级电液流量伺服阀、双喷嘴挡板动压反馈电液流量伺服阀、双喷嘴挡板压力伺服阀等的工作原理和设计研制作了较为详细的介绍。对与喷嘴挡板式电液伺服阀的性能和使用有密切关系的重要参数，诸如力矩马达的固有频率、阻抗、电感和衔铁组件转动惯量等，则以专题形式进行了深入分析和论述。喷嘴挡板式伺服阀容易产生高频啸叫，国外制造的此型伺服阀也不例外，因此对此型阀的啸叫根源，以及有效抑制啸叫产生所采取的措施，本书也作了深入详细分析。与喷嘴挡板式电液伺服阀相比，DDV型直驱式电液伺服阀问世较晚，此型阀具有结构简单、静动态性能优良、抗污染能力强等优点。本书对DDV型电液流量伺服阀和电液压力伺服阀的设计原理分别作了详细分析。滑阀型液压放大器几乎是所有伺服阀的通用放大器，如设计不当，有可能导致在滑阀中发生液流状态切换现象，使阀的性能变差，本书对滑阀中的液流状态切换现象产生机理作了深入的试验性分析。对滑阀液压放大器的重要要求之一是滑阀的摩擦力应尽可能小。为此，本书对单边节流方孔这种特殊结构的阀芯受力作了详细分析，以期有助于指导滑阀的设计。伺服阀的性能指标较多，制造者应采用设计合理的检测设备对阀的各项性能进行准确简便的检测，本书对常用的测试设备的工作原理及设计要点作了介绍。随着机、电、液一体化日益普及推广，伺服阀用户愈来愈多，然而一部分伺服阀使用者还不能正确选型和正确使用，为此，本书最后一章介绍了这方面内容，供广大伺服阀使用者参考。

本书具有理论紧密联系实际，在理论指导下总结经验的特点，可供大专院校相关专业师生，机、电、液一体化工程技术人员，尤其是从事伺服阀设计技术人员参考。

电液伺服阀是一种涉及知识面很广的产品。一个优秀的电液伺服阀设计工程师除应具有机械、电磁、液压方面专业知识外，还应具有模拟电子电路、数字电路和系统方面知识。由于本人水平有限，书中难免存在不完善和不妥之处，欢迎读者指正。在本书撰写过程中，得到原航空部609所吴建民副总工程师及伺服阀专业组全体同志大力支持和协助；哈尔滨工业大学流体控制及自动化系姜继海教授和美国夏威夷大学机械工程系马扣根博士审校了全部书稿并提供了很好的建议；邹小舟、黄英玲、葛声宏工程师为本书编排做了大量工作，笔者在此谨致衷心感谢。

田源道

2007年10月

目 录

第 1 章 电液伺服阀概论	(1)
1.1 电液伺服阀组成	(1)
1.2 电液伺服阀分类	(7)
1.3 电液伺服阀发展展望	(9)
第 2 章 双喷嘴挡板力反馈两级电液流量伺服阀	(11)
2.1 工作原理	(11)
2.2 静态特性	(12)
2.3 动态特性	(13)
2.4 伺服阀设计	(16)
第 3 章 电反馈和三级电液流量伺服阀	(25)
3.1 电反馈电液流量伺服阀	(25)
3.2 三级电液流量伺服阀	(30)
第 4 章 电液压力伺服阀	(35)
4.1 双喷嘴挡板式双向输出两级电液压力伺服阀	(35)
4.2 双喷嘴挡板式带死区单向正增益输出两级电液压力伺服阀	(45)
4.3 电反馈电液压力伺服阀	(47)
第 5 章 动压反馈电液流量伺服阀	(50)
5.1 动压反馈电液流量伺服阀的结构及工作原理	(50)
5.2 动压反馈伺服阀设计	(51)
第 6 章 直驱式电液伺服阀	(61)
6.1 直驱式电液流量伺服阀	(61)
6.2 直驱式电液压力伺服阀	(70)
第 7 章 电液伺服阀计算机辅助设计	(75)
7.1 动态仿真模型	(75)
7.2 频率特性计算	(78)
7.3 阶跃响应和频率响应 FORTRAN 仿真程序	(80)
7.4 Matlab/Simulink 仿真	(85)
第 8 章 力矩马达固有频率、阻抗、电感及衔铁组件转动惯量	(92)
8.1 力矩马达固有频率	(92)
8.2 力矩马达阻抗、电感	(97)
8.3 衔铁组件转动惯量	(100)
第 9 章 伺服阀啸叫	(103)
9.1 啸叫现象简要回顾	(103)
9.2 啸叫根源	(104)

9.3	抑制啸叫应采取的措施	(110)
第10章	滑阀中液流流态切换现象	(112)
10.1	问题的提出	(112)
10.2	滑阀中液流流态	(112)
10.3	某型滑阀模型的试验结果和分析	(113)
10.4	结论	(115)
第11章	单边节流方孔的阀芯受力分析	(116)
11.1	作用在阀芯上的液压侧向不平衡力表达式	(116)
11.2	中间位置时阀芯受力(径向力)计算	(118)
11.3	额定行程时阀芯受力情况	(119)
11.4	负载腔关死时阀芯受力计算	(120)
11.5	阀芯受力后变形计算	(121)
11.6	相关试验	(123)
11.7	结论	(123)
第12章	电液伺服阀的检验和检验装置	(124)
12.1	静态试验装置	(124)
12.2	零漂测试装置	(128)
12.3	频率特性测试	(128)
12.4	液压CAT技术	(131)
第13章	电液伺服阀的选型和使用	(133)
13.1	伺服阀特点简介	(133)
13.2	位置系统用伺服阀	(138)
13.3	施力系统用伺服阀	(143)
13.4	使用中应注意的问题	(143)
参考文献		(146)

第1章 电液伺服阀概论

电液伺服阀是电液伺服控制系统中的重要控制元件，在系统中起着电液转换和功率放大作用。具体地说，系统工作时，它直接接收系统传递来的电信号，并把电信号转换成具有相应极性的、成比例的、能够控制电液伺服阀的负载流量或负载压力的信号，从而使系统输出较大的液压功率，用以驱动相应的执行机构。电液伺服阀的性能和可靠性将直接影响系统的性能和可靠性，是电液伺服控制系统中引人注目的关键元件。

由于系统服务对象和使用环境各式各样，相应地为系统服务的电液伺服阀型号、结构、性能也多种多样。它们有个性，也有共性。本章将对常见电液伺服阀的结构原理、组成、分类及有关特点作简要介绍。

1.1 电液伺服阀组成

电液伺服阀本身是一个闭环控制系统，一般由下列部分组成：

- (1) 电 - 机转换部分；
- (2) 机 - 液转换和功率放大部分；
- (3) 反馈部分；
- (4) 电控器部分。

大部分伺服阀仅由前三部分组成，只有电反馈伺服阀才含有电控器部分。

1.1.1 电 - 机转换部分

电 - 机转换部分的工作原理是把输入电信号的电能通过特定设计的元件转换成机械运动的机械能，进而驱动液压放大器的控制元件，使之转换成液压能。通常，人们将电能转换为机械能的元件称为力矩马达（输出为转角）或力马达（输出为位移）。力矩马达和力马达有动铁式和动圈式两种结构。常用的典型结构见图 1-1。

图 1-1 (a) 为永磁桥式动铁式力矩马达。它结构紧凑，体积小，固有频率高，但是输出转角线性范围窄，适用于驱动喷嘴挡板液压放大器的挡板、射流管液压放大器的射流管或偏转板射流放大器的偏转板。

图 1-1 (b) 为高能永磁动铁式直线力马达。它体积大，加工工艺性好；驱动力大、行程较大；固有频率较低，小于 300Hz，适用于直接驱动功率级滑阀。

图 1-1 (c) 为永磁动圈式力马达。它又有内磁型和外磁型两种结构形式。图 1-1 (d) 为激磁动圈式力马达。它们的共同特点是体积大，加工工艺性好；但是同样的体积下输出力小；机械支撑弹簧的刚度通常不是很大，在同样的惯性下，动圈组件固有频率低。为提高固有频率，可增加支撑刚度及激磁和控制线圈功率，但这样会使尺寸大、功耗大。该型力马达的磁环小，线性范围宽，输出位移大，适用于直接驱动滑阀液压放大器的阀芯运动。

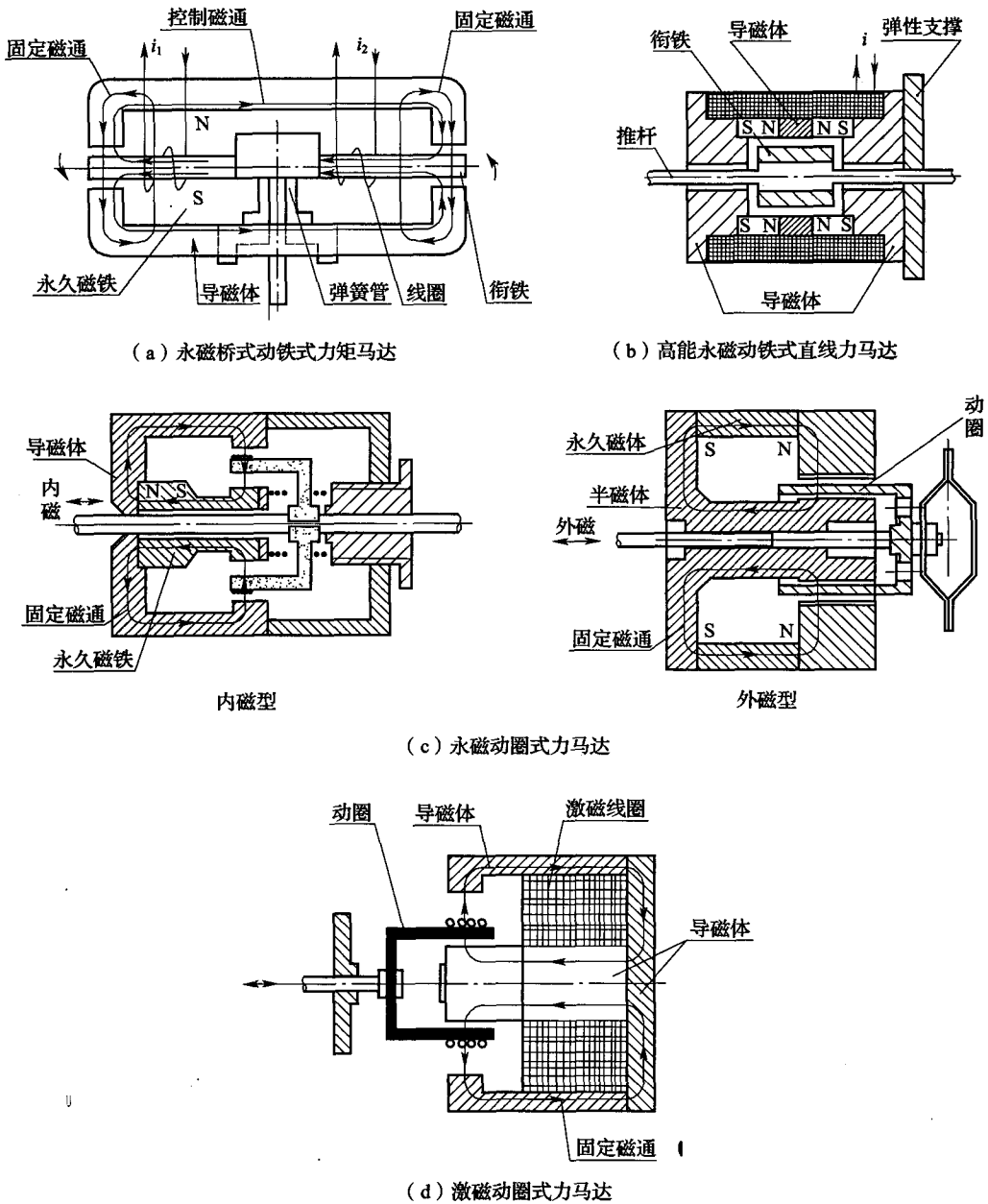


图 1-1 典型力（矩）马达

1.1.2 机 - 液转换和功率放大部分

机 - 液转换及功率放大部分，实质上是专门设计的液压放大器，放大器的输入为力矩马达或力马达输出力矩或力，放大器的输出为负载流量和负载压力。

伺服阀常用的液压放大器见图 1-2。

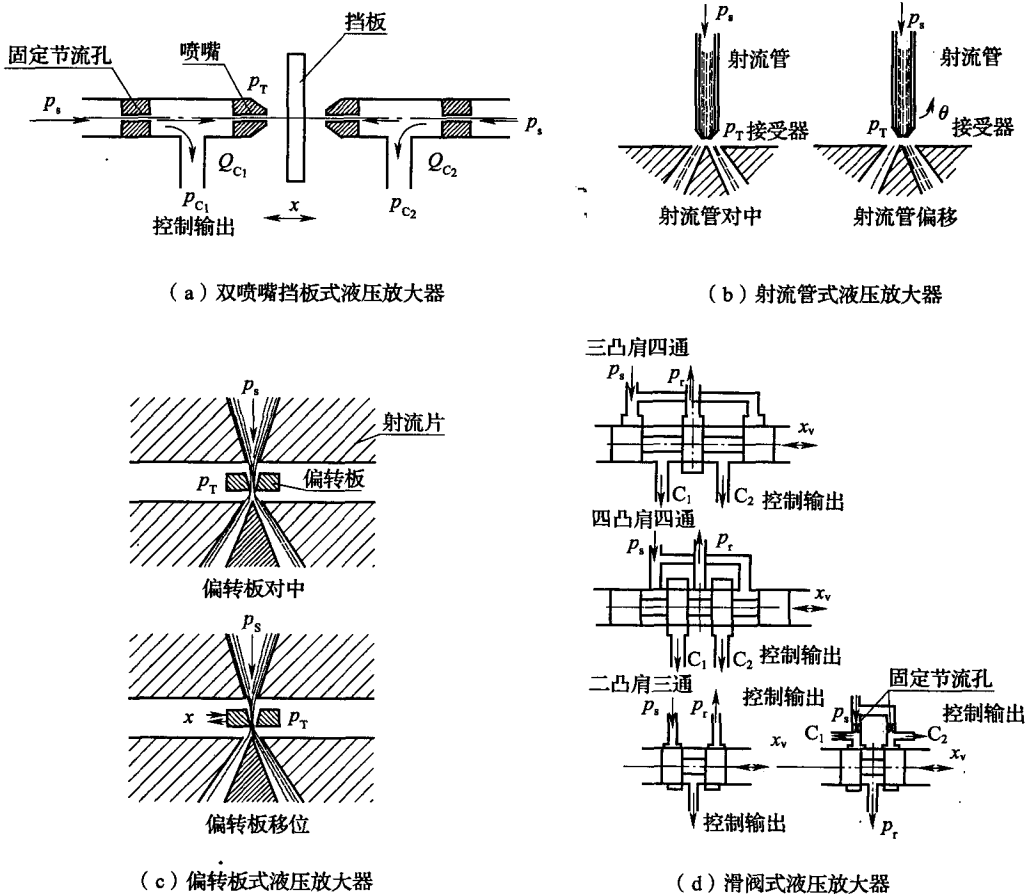


图 1-2 液压放大器

图 1-2 (a) 为双喷嘴挡板式液压放大器，由两个固定节流孔和两个可变节流孔组成液压全桥，按节流原理工作。其特点是结构简单、体积小，运动件惯量小，所需驱动力小，无摩擦，灵敏度高；但中位泄漏大，负载刚度差；输出流量小；固定节流孔的孔径和喷嘴挡板之间的间隙小，易堵塞，抗污染能力差；适于小信号工作，常用作两级伺服阀的前置放大级。

图 1-2 (b) 为射流管式液压放大器，按动量转换原理工作。射流管孔径及射流管喷嘴与接受器之间的间隙较喷嘴挡板式大，不易被污物堵塞，抗污染能力强；射流喷嘴有失效对中功能；放大器效率高；但结构复杂，加工调试难；运动件惯量大；射流管的引压管刚度差，易振动；常用作两级伺服阀的前置放大级。

图 1-2 (c) 为偏转板式液压放大器，按动量转换原理工作。射流喷嘴及偏转板与射流盘之间的间隙大，不易堵塞，抗污染能力强；射流喷嘴有失效对中功能；运动件惯量小。缺点是在高温及低温时性能差。可用于两级伺服阀的前置放大级。

图 1-2 (d) 为滑阀式液压放大器，按节流原理工作。其特点是允许位移大；节流边为矩形或圆周开口时，线性好，输出流量大；流量增益和压力增益高；结构稍复杂，体积大；轴向及径向配套要求高；运动件惯量大，液动力大，要求驱动力大。通常与动圈式或高能永

磁直线力马达直接连接，构成单级伺服阀或用作两级伺服阀的前置级，它也是两级和三级伺服阀功率放大级的主要形式。

1.1.3 反馈部分

它通常有几种反馈形式：力反馈、直接位置反馈、压力反馈和电反馈。

1.1.3.1 力反馈

典型的双喷嘴挡板力反馈两级电液流量伺服阀的工作原理见第2章。该型力反馈伺服阀具有以下特点：

(1) 衔铁及挡板工作在零位附近，对力矩马达的线性度要求不那么严格，而阀仍具有良好的线性；

(2) 喷嘴挡板及输出驱动力大，增加了阀芯的抗污染能力；

(3) 阀芯基本处于浮动状态，附加摩擦力小；

(4) 阀的性能稳定，抗干扰能力强，零漂小；

(5) 力反馈回路包围力矩马达，限制了阀的动态响应。

1.1.3.2 直接位置反馈

动圈式滑阀直接位置反馈两级电液流量伺服阀是典型的直接位置反馈形式，见图1-3。它由永磁式动圈力马达、马达直接驱动的双边滑阀式前置控制阀和三通滑阀式功率级组成。前置控制滑阀的两个预开口节流控制边与阀体上两个固定节流孔组成液压全桥，类似于喷嘴挡板放大器。滑阀副的阀芯直接与马达的动圈骨架相连。前置级的阀套又是功率放大级的阀芯。

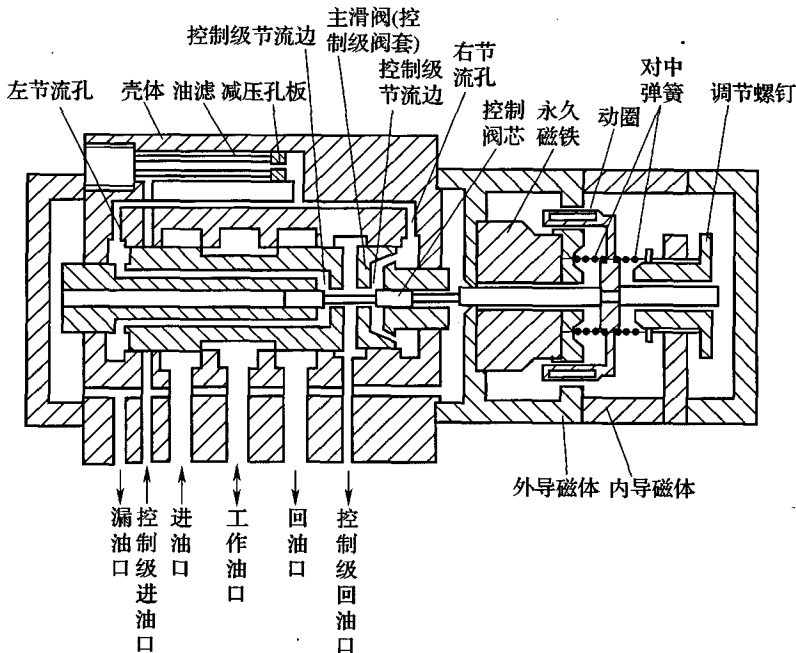


图1-3 动圈式滑阀两级电液流量伺服阀（直接位置反馈）

输入控制电流给力马达动圈，则力马达动圈产生电磁力，此电磁力将克服对中弹簧的弹簧力，使动圈和前置级阀芯移动，其位移量与动圈电流成正比。前置阀芯位移将使液压桥的两个可变液阻发生变化，因而液压桥将产生负载压力和负载流量，驱动功率级阀芯（即前置级的阀套）移动，且功率级阀芯一边移动一边逐渐消减前置级滑阀的原开启面积的变化量，直到前置级滑阀两个可变节流控制口的面积相等，此时功率级阀芯将停留在某一预定的位置上。这种直接位置反馈的作用，使功率级滑阀阀芯跟随前置级滑阀阀芯运动，功率级滑阀阀芯的位移与动圈输入电流大小成正比。

直接位置反馈式动圈伺服阀的特点是：

- (1) 结构简单，工作可靠；
- (2) 力马达线性范围宽，调整方便；
- (3) 前置级滑阀流量增益大，输出流量大；
- (4) 和喷嘴挡板型力矩马达相比，力马达体积大、工作电流大；
- (5) 由于力马达动圈和滑阀阀芯直接连接，运动部分惯量较大，一般固有频率低。

1.1.3.3 压力反馈

一般情况下，压力反应用于压力伺服阀对输出压力的控制，使阀的输入信号与阀输出压力成一一对应关系，个别情况下用于流量伺服阀内部动压反馈校正。电液压力伺服阀通常有两种压力反馈结构形式：阀芯力综合式电液压力伺服阀和反馈喷嘴式电液压力伺服阀。

(1) 阀芯力综合式电液压力伺服阀

该阀的工作原理见图 1-4。给伺服阀输入某一信号，则喷嘴挡板产生压差，此压差作用到功率级滑阀的阀芯上，使阀输出负载压力，此负载压力反馈到阀芯两端。设喷嘴挡板级输出压力的作用面积为 A_v ，输出压差为 p_e ，功率级阀芯的反馈面积为 A_f ，输出负载压力为 p_L ，则当 $p_L A_f = p_e A_v$ 时，阀芯将停留在这一平衡位置上，使得对应一个输入便有一个负载压力输出，且输出压力与输入信号成正比。这种反馈结构形式的特点是：

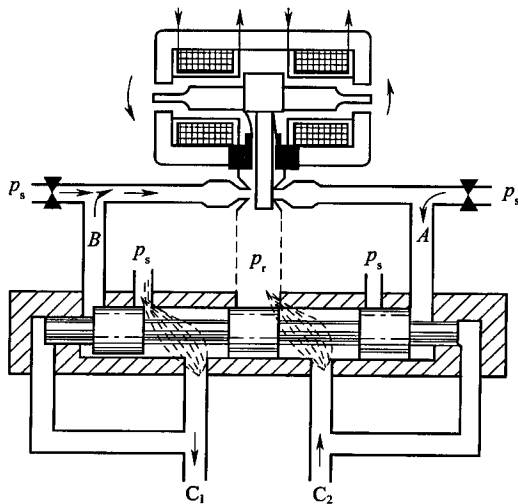


图 1-4 阀芯力综合式电液压力伺服阀

①压力反馈增益由喷嘴挡板级输出压力的作用面积 A_v 和反馈面积 A_f 之比决定，因此压力反馈有固定的线性增益；

②用对力矩马达进行充、退磁的方法调整阀的压力增益；

③必须采用台阶式阀芯，加工较难。

(2) 反馈喷嘴式电液压力伺服阀

这种伺服阀的工作原理见图 1-5。当给阀输入某一信号时，阀的负载油口 C_1 和 C_2 便有负载压力输出。设 C_2 油口输出压力大于 C_1 油口输出压力，这个压力差通过反馈喷嘴作用到挡板上，形成对力矩马达的反馈力矩。此力矩与负载油口压差成正比，作用方向与输入信号使力矩马达产生的电磁力矩相反。当反馈力矩等于电磁力矩时，衔铁挡板组件回到对中位置，阀芯也将停留在某一平衡位置，此时滑阀输出某一固定压差，且输出压差与输入信号成正比。这种压力反馈的反馈力矩在力矩马达上与输入信号产生的电磁力矩相综合。

该阀的优点是结构简单、体积小；静态性能优良，工作可靠；挡板在零位附近工作线性好。其缺点是反馈喷嘴有泄漏，增加了功耗；负载腔有泄漏流量，影响阀的动态响应；反馈喷嘴对挡板的反馈力与反馈喷嘴腔感受的负载压力不是严格线性的，因此，阀的压力特性线性度稍差；压力反馈的增益调整较困难；增加了一对喷嘴，抗污染能力也有所下降。

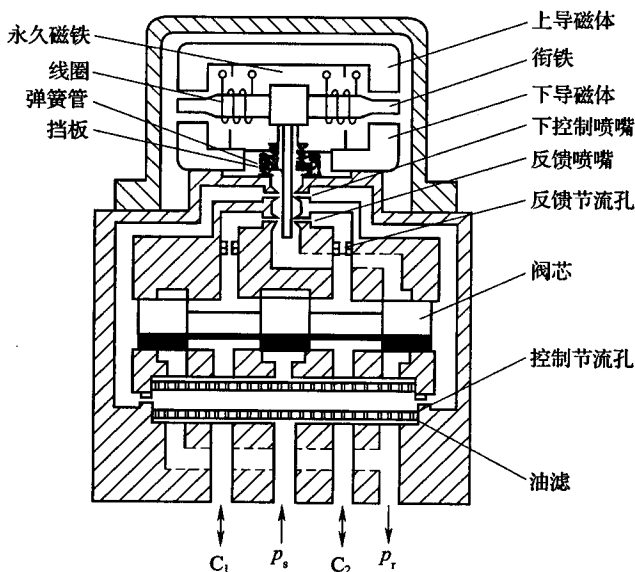


图 1-5 反馈喷嘴式电液压力伺服阀

1.1.3.4 电反馈

电反馈式在伺服阀中也有广泛应用，如双喷嘴挡板两级电反馈电液流量伺服阀和三级电液流量伺服阀、直驱式电液流量伺服阀和直驱式电液压力伺服阀等，它们的工作原理分别见第 3 章和第 6 章。

电反馈伺服阀的特点是回路增益较高，可以针对阀回路加必要的校正环节，阀的静、动态性能好；阀的最高动态受一级液压控制阀流量增益或力矩马达固有频率限制；反馈增益可

调, 改变阀的额定流量方便。由于采用电反馈, 使阀中带有电控器成为可能。对电控器的基本要求是:

- (1) 带载能力强, 频带宽;
- (2) 功率放大级功耗小;
- (3) 抗干扰能力强;
- (4) 输入、输出参数连接端口和外形尺寸标准化、规范化;
- (5) 元器件微型化, 体积小。

为此, 控制器功率级应采用恒流型, 它可以消除在高频工作时由于阀线圈感抗变化造成伺服阀高频动态增益的变化, 并将线圈电感引起的相位滞后减到最小。对阀线圈输入电流比较大的电控器功率级, 宜采用脉宽调制 (PWM) 型开关式功率放大级。

大部分电反馈伺服阀采用模拟式电子控制器, 也有一些伺服阀, 如 MOOG D636、D638 型直驱式电液伺服阀采用数字式可编程伺服控制器, 它既可以接受模拟信号, 也可以直接接受数字信号, 阀回路的优良性能完全由控制器的软件控制, 设置和调整控制参数方便灵活, 能自动消除由于环境变化而导致阀零位漂移的影响。

1.2 电液伺服阀分类

电液伺服阀的品种、型号规格很多, 结构原理也各式各样, 本节仅对常用的一些伺服阀进行分类。

按使用功能可分成三类: (1) 电液流量伺服阀; (2) 电液压力伺服阀; (3) 电液压力流量伺服阀, 也称 PQ 阀。

1.2.1 电液流量伺服阀

按其结构和工作原理, 进一步分成三类: 单级伺服阀、两级伺服阀和三级伺服阀。

1.2.1.1 单级伺服阀

常见的有动圈式力马达 - 滑阀电反馈型; 永磁力马达 - 滑阀电反馈型, 如 MOOG DDV 直驱型电液流量伺服阀。

1.2.1.2 两级伺服阀

(1) 永磁式力矩马达

有双喷嘴挡板力反馈型、双喷嘴挡板直接反馈型、双喷嘴挡板电反馈型和双喷嘴挡板动压反馈型。

(2) 射流管式

有力反馈型和直接反馈型。

(3) 动圈式

有滑阀式直接反馈型和滑阀式电反馈型。

1.2.1.3 三级伺服阀

有前置级为双喷嘴挡板力反馈型、前置级为射流管式力或直接反馈型以及前置级为动圈式滑阀型。

1.2.2 电液压力伺服阀

电液压力伺服阀有三种类型：(1) 双喷嘴挡板阀芯力综合式；(2) 双喷嘴挡板反馈喷嘴式；(3) 永磁式力马达 - 滑阀电反馈型（如 MOOG D635K）。

通常使用的压力流量伺服阀也有如下两种类型：(1) 压力反馈式压力 - 流量伺服阀；(2) 电反馈式压力 - 流量伺服阀。

1.2.2.1 压力反馈式压力 - 流量伺服阀

典型的压力反馈式压力 - 流量伺服阀结构原理见图 1-6。由图 1-6 可见，它是在双喷嘴力反馈电液流量伺服阀的基础上，在阀芯两端引入负载压力反馈构成的。当负载腔短接时，即 $p_L = 0$ ，阀的输出流量 q_L 与输入电流信号 i 成比例，即有线性流量特性；而当负载腔关闭时，即 $q_L = 0$ ，阀的输出负载压力 p_L 与电流信号 i 成比例，即具有线性压力特性。以市场上出售的 FF118-30 型 PQ 阀为例，该阀的压力流量特性见图 1-7。由图可见，该型阀的流量 - 压力系数高于一般流量伺服阀，低于压力伺服阀。

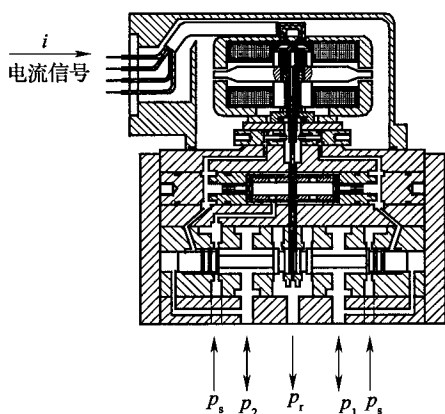


图 1-6 压力反馈式压力 - 流量伺服阀

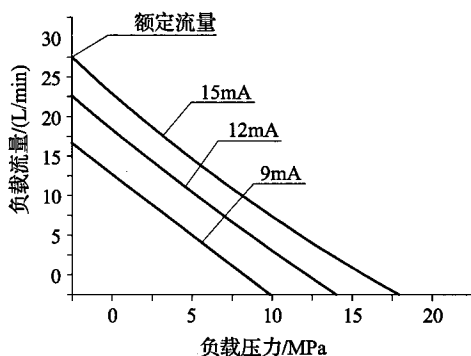


图 1-7 压力流量特性

1.2.2.2 电反馈式压力 - 流量伺服阀

MOOG D651 电反馈式压力 - 流量伺服阀的结构原理见图 1-8。滑阀的阀芯上装有 LVDT，阀的输出负载腔 A 装有压力传感器，当选择开关的 1 与 2 接通，此阀按电反馈流量伺服阀工作；选择开关 1 与 3 接通，此阀按电反馈压力伺服阀工作。阀的信号传递和转换关系框图见图 1-9。此阀还有一个功能，即当流量阀使用时，可以根据系统工作需要设置一个限制压力，在阀控缸或阀控马达过程中，能使伺服阀的输出负载压力限制在指定范围内，其工作原理见图 1-10。当阀输出实际压力 u_{p1} 小于预先设定压力 u_{ps} 时，限压电子控制器无信号输出到流量控制阀的信号输入口，只有当实际负载 u_{p1} 大于 u_{ps} 时，限压电子控制器将输出一干预信号作用到流量控制阀的输入口，使阀的输出负载流量减小，系统输出速度降低，迫使阀的实际的输出压力 u_{p1} 限制到指定压力 u_{ps} 。

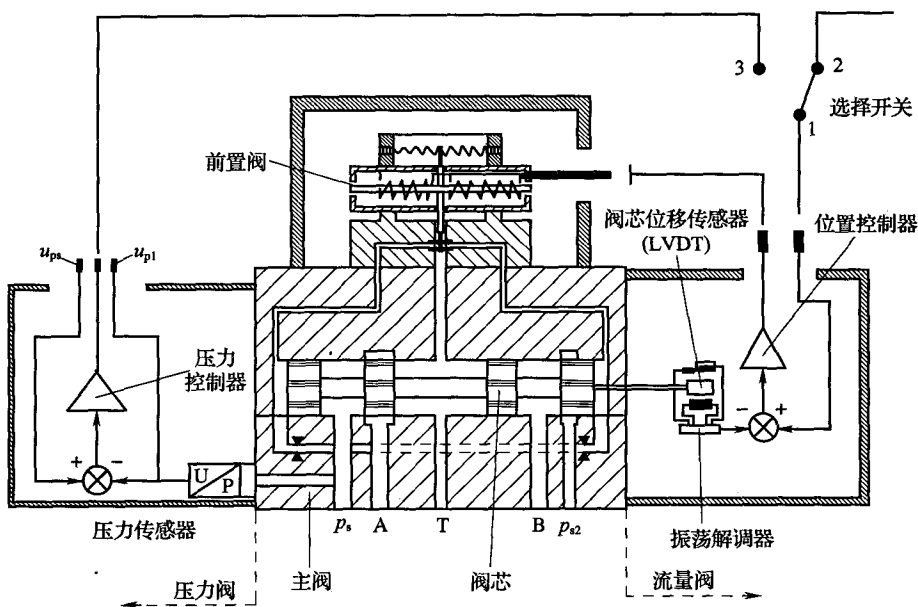


图 1-8 MOOG D651 电反馈式压力-流量伺服阀

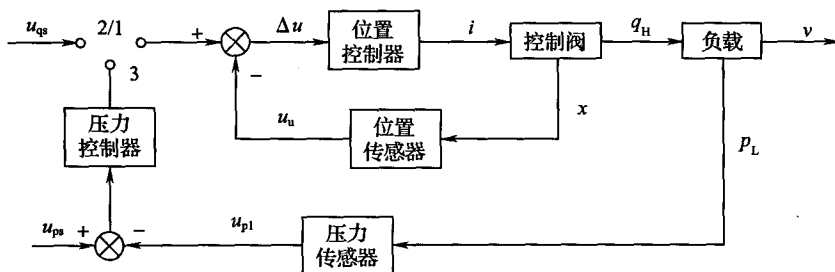


图 1-9 信号传递和转换关系框图

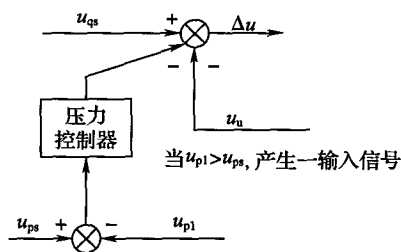


图 1-10 负载压力限定回路

1.3 电液伺服阀发展展望

从电液伺服阀的发展历史和当前现状中，可以看出电液伺服阀的发展与满足工业需求是分不开的，也与当时相关科学技术发展水平与发展阶段分不开。如在航空航天领域，要求电