

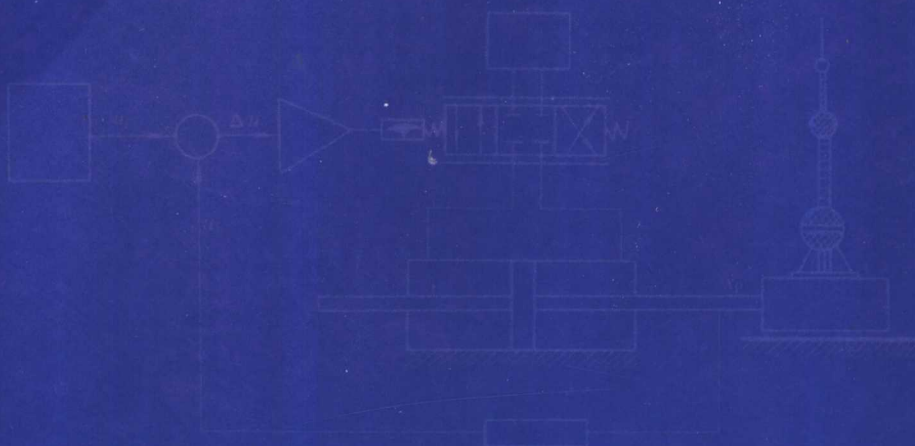
机电液控制技术

关景泰 编著

温济全 主审



JIDIANYEKONGZHISHU



同济大学出版社

机电液控制技术

关景泰 编著
温济全 主审

同济大学出版社

内 容 提 要

本书的基础内容是:液压放大元件,液压动力执行元件,电—机械转换元件;重点内容是:机电液控制系统的动态建模和分析,其中有机液伺服系统,电液伺服控制系统,电液比例控制系统及机电液伺服系统性能改善的相关技术。本书在编写上力求系统、实用,并注意通用性和创新性。

本书可作为大专院校教学用书和培训教材,也可作为机械行业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

机电液控制技术/关景泰编著. —上海:同济大学出版社,2003.2

ISBN 7-5608-2560-5

I. 机… II. 关… III. 机电一体化—液压控制—控制系统 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 110125 号

机电液控制技术

关景泰 编著 温济全 主审

责任编辑 王有文 责任校对 郁 峰 封面设计 陈益平

出 版 同济大学出版社
发 行 (上海四平路 1239 号 邮编 200092 电话 021-65985622)
经 销 全国各地新华书店
印 刷 常熟市华顺印刷有限公司
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 15.25
字 数 305000
印 数 1—3000
版 次 2003 年 2 月第一版 2003 年 2 月第一次印刷
书 号 ISBN 7-5608-2560-5/TH·52
定 价 18.00 元

本书若有印装质量问题,请向本社发行部调换

前 言

随着科学技术的高速发展,机电液控制技术在各个行业得到了广泛的应用。在机械制造业中,机电液控制技术用于电液自动控制的机器人,以替代人完成海底作业和有毒现场的施工;用于电液控制的机械手,以替代人完成自动生产线上的焊接、喷漆、装配等;用于自动生产线的位置、速度与时间的控制;用于加工机械零件的加工中心(数控机床),以实现六面体的高精度自动加工。在汽车及工程车辆中,机电液控制技术用于机液伺服转向系统;用于汽车的无人驾驶、自动换挡。在军事工业中,机电液控制技术用于飞机的操纵系统;雷达跟踪和舰船的舵机装置;导弹的位置控制和发射架自动控制等。近年来,我国机械自动化技术发展十分迅速,自动控制理论、液压传动技术、微电子及计算机控制技术的相互融合,有力地推动了我国机械工业的飞速发展。

面对机械工业发展的大好形势,我国需要大量的机电一体化复合型人才,为了满足社会的需求,我们根据机械类本科生学习的需要,编写了《机电液控制技术》一书,该书既注重基础知识,又重视工程运用。在编写时,力求基础理论系统化,在基本概念、基本理论、基本分析方法诸方面尽可能做到由浅入深,详细阐述。通过工程实例、例题、实验数据、曲线图表,使读者更好地理解 and 掌握学习的内容。“机电液控制技术”是继流体力学、液压传动、电工电子学、控制论课程之后的一门新课程。本书作为该课程的教材已试用多年,并几经修改。书中除参考经典著作外,同时将科研成果及应用实例编入其中,使全书具有可读性和实用性。

全书共分8章:第1章,液压控制系统概论;第2章,液压放大元件;第3章,液压动力执行元件。这三章是后面各章的基础。第4章,机液伺服阀系统;第5章,电—机械转换元件;第6章,电液伺服阀及伺服系统;第7章,电液比例阀及比例控制系统;第8章,机电液伺服系统性能改善的相关技术。全书的重点是机电液控制,在原基础上增加了电—机械转换元件的内容,并将伺服阀及伺服控制系统、比例阀及比例控制系统同时写入,提出了机电液控制系统性能改善的相关技术。全书内容系统、实用,具有通用性和创新性,可作为大专院校教学用书,也可作为机械行业广大技术人员的参考用书。

限于编者的水平,书中难免有疏漏和错误,诚请读者批评指正。

本书为同济大学“十五”规划教材之一,由同济大学教材、学术著作出版基金委员会资助。在编写过程中,机械电子工程研究所的同仁对本书提出了许多宝贵意见,上海大学温济全教授负责全书主审,同济大学出版社的同志给予热情的帮助,付出了辛勤的劳动,在此一并表示衷心感谢。

编者

2002年12月于同济大学

目 录

第1章 液压控制系统概论	(1)
1.1 液压控制系统组成及工作原理	(1)
1.2 液压控制技术的发展及应用	(4)
1.3 液压控制系统分类及特点	(4)
习题	(6)
第2章 液压放大元件	(7)
2.1 液压放大元件简介及一般分析	(7)
2.2 喷嘴挡板阀特性分析	(13)
2.3 零开口四边滑阀特性分析	(19)
2.4 正开口四边滑阀特性分析	(23)
2.5 滑阀的功率输出及效率	(26)
2.6 恒流液压放大器特性分析	(29)
习题	(33)
第3章 液压动力执行元件	(34)
3.1 四通阀控对称液压缸	(34)
3.2 三通阀控差动液压缸	(48)
3.3 阀控液压马达	(51)
3.4 泵控液压马达	(54)
3.5 液压动力执行元件与负载的匹配	(58)
习题	(64)
第4章 机液伺服系统	(66)
4.1 机液位置伺服系统	(66)
4.2 机液速度伺服系统	(79)
4.3 机液力伺服系统	(83)
4.4 机液伺服系统的校正	(88)
习题	(98)
第5章 电—机械转换元件	(100)
5.1 动圈式力马达	(100)
5.2 动铁式力矩马达	(103)
5.3 直流比例电磁铁	(113)
5.4 控制用电机简介	(119)

习题.....	(134)
第 6 章 电液伺服阀及伺服系统.....	(135)
6.1 电液伺服阀的结构形式及其特点	(135)
6.2 力反馈二级电液伺服阀	(146)
6.3 电液伺服阀主要性能、实验特性及选择应用.....	(151)
6.4 电液位置伺服系统	(161)
6.5 电液速度伺服系统	(175)
6.6 电液力伺服系统	(182)
6.7 电液伺服系统设计	(187)
习题.....	(196)
第 7 章 电液比例阀及比例控制系统.....	(199)
7.1 电液比例控制阀	(199)
7.2 电液比例阀主要性能及其选择	(204)
7.3 电液比例控制系统	(208)
习题.....	(216)
第 8 章 机电液伺服系统性能改善的相关技术.....	(217)
8.1 结构谐振与液压—机械综合谐振	(217)
8.2 蓄能器及其应用	(221)
8.3 典型非线性环节及其对策	(229)
8.4 液压能源	(234)
习题.....	(236)
参考文献.....	(238)

为了实现 θ_c 对 θ_i 一一对应关系的准确控制,系统中引入反馈机构,该机构包括转向节臂 7、纵拉杆 8、摇臂 9、扇形齿轮 10 及丝母等。当转向时,输出量 θ_c 会通过反馈机构的传递,反作用于丝杆 2,使与之相连的阀芯向相反方向移动,直到使阀关闭处于中位,液压缸在新的位置停止不动, θ_c 达到一个定值,此即输出量 θ_c 对输入量 θ_i 的反馈作用。 θ_c 对 θ_i 的响应过程以及反馈作用就是液压助力转向伺服控制系统的工作原理。其工作原理可以用图 1.2 液压转向系统结构方块图表示。

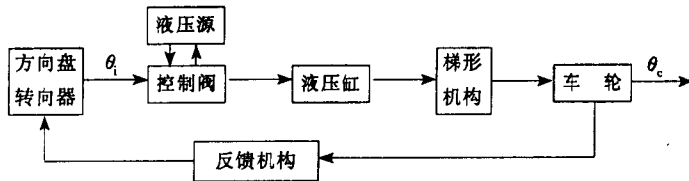


图 1.2 液压转向系统结构方块图

1.1.2 电液伺服系统举例

图 1.3 所示为电液伺服模拟振动试验系统。

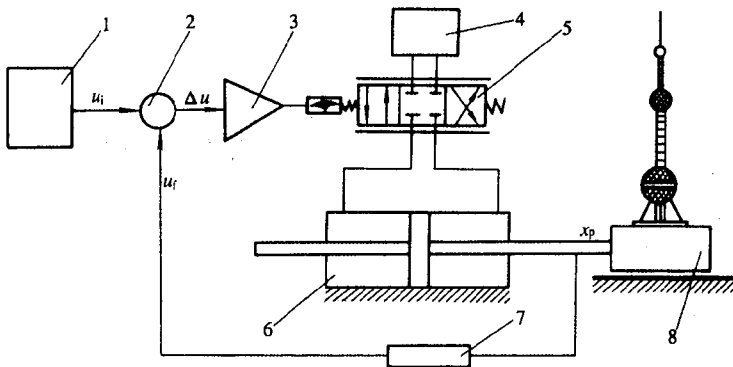


图 1.3 电液伺服模拟振动试验系统

1. 输入电装置; 2. 比较器; 3. 运算放大器; 4. 液压源
5. 电液伺服阀; 6. 液压缸; 7. 检测反馈传感器; 8. 台面

试验系统包括被试对象,振动台面,驱动液压缸,控制阀,放大器,输入电装置和检测反馈电器元件等。振动模拟试验时,输入电装置 1 产生电信号 u_i ,运算放大器 3 将 u_i 转换放大后驱动电液伺服阀 5,受控于伺服阀的液压缸 6 产生运动输出 x_p ,台面 8 上的被试对象实现预期的运动。此即系统输出 x_p 对系统输入 u_i 的响应过程。为了实现 x_p 对于 u_i 的一一对应的控制特性,加入检测反馈传感器 7。运动时,传感器将随时检测 x_p ,通过变换成电信号,反馈于输入端,并通过比较器 2 进行比较,当比较后的信号近似于零时,系统输出 x_p 达到预期值。 x_p 对 u_i 的响应过程以及反馈作用即是电液伺服模拟振动试验系统的工作原理。其工作原理可以用图 1.4 的结构方

块图表示。

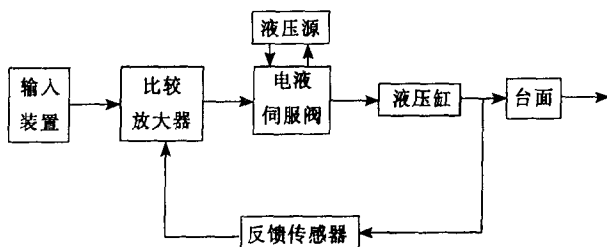


图 1.4 电液伺服振动台结构方块图

1.1.3 机电液控制系统一般构成及工作原理

本书所研究的机电液控制系统,不管是简单的还是复杂的,都可抽象为是由一些基本元件组成的,见图 1.5。

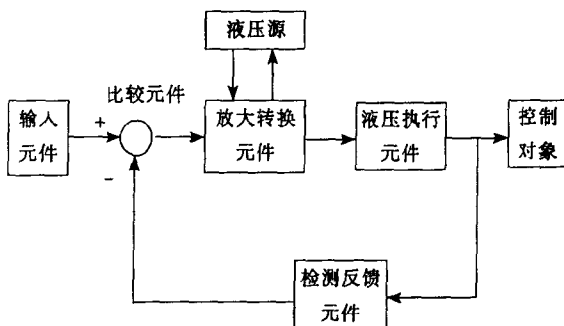


图 1.5 液压伺服系统一般构成

输入元件,也称指令元件,其给定信号加入系统的输入端。如前例中的方向盘,上例中的输入电装置或计算机等。

检测反馈元件,检测被控制量,产生反馈信号。如前例中的机械反馈机构、上例中的电反馈传感器。

比较元件,将反馈信号与输入信号进行比较,给出偏差信号。比较元件有时并不单独存在,而是由几类元件有机组合,实现比较功能。如前例中的反馈机构和机液伺服阀的相互作用进行比较。

放大转换元件,将比较后的偏差信号进行放大并进行能量形式的转换。其前置输入级可以是机械的、电的、液压的、气动的或它们的组合形式,但功率输出级是液压的。

液压执行元件,按指令规律进行运动,驱动控制对象做功。在液压伺服系统中,执行元件是液压缸或液压马达。

控制对象,又称负载。如前例中的车轮、上例中的台面和模型。

此外,不包含在控制回路中的液压能源是必不可少的。有时系统中还可能有各

种校正装置等。

液压伺服控制系统工作原理的一般描述如下:输入元件向系统输入一个正的指令信号,与同时检测系统输出并反作用于输入端的负反馈信号进行比较,比较后的偏差信号经放大转换元件的放大转换,变成较大功率的液压信号(压力、流量),驱动液压执行元件,并带动负载运动。

1.2 液压控制技术的发展及应用

液压控制技术是早已成熟的液压传动技术的新发展,是自动控制领域一个重要组成部分。

技术进步的需要是液压控制技术发展的推动力。20世纪40年代由于军事刺激,高速喷气式飞行器要求响应快且精度高的操纵控制,1940年底,在飞机上出现了电液伺服系统,坦克装甲车上开始应用机液伺服转向系统。作为电液转换器,当时滑阀由伺服电机驱动,由于电机惯量大,所构成的电液转换器时间常数大,限制了整个系统的响应速度。到了20世纪50年代初,出现了快速响应的永磁力矩马达,该力矩马达拖动滑阀,提高了电液伺服阀的响应速度。60年代,结构多样的电液伺服阀相继出现,尤其是干式力矩马达的研制成功,使得电液伺服阀的性能日趋完善,促使电液伺服系统迅速发展。近20年来,随着材料和工艺技术的进步,电液伺服阀的成本不断降低,性能明显提高,使得电液伺服系统应用更加广泛。但是,由于电液伺服阀对液体的清洁度要求十分苛刻,系统效率低,能耗大,综合费用还是相当高。由此,一种可靠、价廉、控制精度和响应速度均能满足工业控制需要的电液比例控制技术应运而生。得到比电液伺服阀远为广泛的应用。

液压控制在军事工业中,用于飞机的操纵系统、雷达跟踪和舰船的舵机装置、导弹的位置控制、坦克火炮的稳定装置等。在民用工业中,用于仿形或数控机床,船舶舵机和消摆系统,冶金方面的钢带跑偏控制、张力控制、工程车辆转向系统,汽车的无人驾驶、自动变速、主动悬挂,试验装置方面的抗震试验台、材料试验机、道路模拟实验系统等。总之,液压控制技术应用愈来愈加广泛,在各个工业部门发挥着重要作用。尤其是计算机的应用促使液压控制技术得到更迅速的发展和更广泛的应用。

1.3 液压控制系统分类及特点

1.3.1 液压控制系统分类

液压控制系统可按下列原则进行分类:

1. 按信号的产生和传递方式分为:

- 1) 机械-液压控制系统;
- 2) 电气-液压控制系统;

- 3) 气动-液压控制系统;
- 4) 机、电、气、液混合控制系统。

2. 按控制元件的类型分为:

1) 阀控系统 即由伺服阀或比例阀利用节流原理控制流入执行元件的流量或压力的系统;

2) 泵控系统 即利用伺服变量泵改变排量的办法控制流入执行元件的流量压力的系统。

3. 按被控物理量的性质分为:

- 1) 位置控制系统;
- 2) 速度控制系统;
- 3) 加速度控制系统;
- 4) 力控制系统;
- 5) 压力控制系统;
- 6) 其他物理量控制系统。

4. 按输入信号的变化规律分为:

1) 伺服系统 本书主要讲述该类系统。指输入信号是任意变化的系统,它通常用于要求快速响应的控制;

2) 定值调节系统 输入信号为常量,且要求干扰作用时输出量也是常量;

3) 程序控制系统 输入量按所需程序进行设定,实现对输出的程序控制。

1.3.2 液压控制系统的优缺点

以液体为介质传递功率能量的机液或电液控制系统存在的优缺点,可概括如下:

1. 液压控制系统优点:

1) 液压元件的功率-重量比和力-质量比(或力矩-惯量比)大。由此可组成体积小、重量轻、响应快的伺服系统。如优质电磁铁每平方厘米能产生的最大力约为175N,而液压缸的最大工作压力可达每平方厘米3200N甚至更高。又如一般电动机受磁饱和限制,其功率-重量比约为70W/N,而液压马达的功率-重量比可达约700W/N,后者是前者的10倍。

2) 液压控制系统响应速度快。常见负载情况下,液压执行元件动特性,基本上是一个固有频率很高的二阶振荡环节。因为油的压缩性很小,所以液压弹簧负载质量耦合而成的固有频率很高,由此构成的系统回路增益得以调高,频带加宽,系统响应速度加快。

3) 液压伺服系统的控制精度高。这一点是电动和气动控制系统所不能比拟的。因为液压弹簧刚度大,泄漏小,开环速度刚度大,构成位置闭环时的位置刚度也大,所以受外负载影响小,位置精度高。

4) 液压油能兼起润滑剂作用,从而使元件寿命延长,远比气动系统优越。

2. 液压控制系统缺点:

1) 液压控制用元件的制造精度要求高。高的精度,不仅制造成本高,而且对油液的清洁度有特殊要求,要求系统采用精细过滤器。

2) 液体的体积弹性模数会随温度和混入油中的空气含量而发生变化,以至于明显影响系统的动态控制性能。因此,需要对系统进行温度控制,严格防止空气侵入。

3) 液压元件密封设计、制造或使用不当时,容易引起油液外漏,造成环境污染。

4) 液压能源的获得不像电能那样方便,也不像气源那样容易储存。

习 题

1. 举例说明液压控制系统的组成和工作原理。
2. 液压控制系统包括哪几类元件?各自功能是什么?
3. 机液伺服系统和电液伺服系统有什么不同?
4. 液压控制系统有哪几类?
5. 试述液压控制系统的优缺点。

第2章 液压放大元件

液压放大元件也称液压放大器,是一种以机械运动去控制动力的元件。在液压伺服系统中,它把输入的机械信号(位移或转角)转换为液压信号(流量、压力)输出,并进行功率放大,因此它也是一种功率放大器。液压放大元件是液压伺服系统中的一种主要控制元件,它们的性能直接影响到液压伺服系统的工作品质,因此必须对它们的特性及设计准则进行仔细的研究。液压放大元件可以是液压伺服阀或伺服变量泵。本章只讨论液压伺服阀,包括滑阀、喷嘴挡板阀和射流管阀。首先研究恒压油源情况,然后研究恒流源情况,以恒压源情况为主,除特别指出外,一般均指恒压源情况。

2.1 液压放大元件简介及一般分析

2.1.1 液压放大元件简介

液压伺服系统中常用的典型控制阀是圆柱滑阀和喷嘴挡板阀,在某些场合也采用射流管阀。为了传输信号功率的放大,往往采用它们的组合,如最常见的喷嘴挡板阀和圆柱滑阀组成的两级阀。

2.1.1.1 圆柱滑阀

滑阀是利用阀芯与阀体间的相对运动改变液流方向并依据节流原理对液体流量或压力进行控制。这类阀具有最优良的控制特性,在伺服系统中应用最广。按滑阀的结构形式可分为:

1. 按阀的进出油通道数划分,有四通阀(图 2.1(a),(b),(c),(d)),三通阀(图 2.1(e))和二通阀(图 2.1(f))。常用的是四通阀,而二通阀和三通阀只有一个负载通道,故只能控制差动油缸的往复运动。

2. 按节流工作棱边数目划分,有四边滑阀(图 2.1(a),(b),(c)),双边滑阀(图 2.1(d),(e))和单边滑阀(图 2.1(f))。控制性能方面,四边阀最好,双边阀居中,单边阀最差。制造工艺性方面,四边阀复杂、成本高,单边阀较容易、成本低。

3. 按阀的预开口形式划分,有正开口(负重叠),零开口(零重叠)和负开口(正重叠),如图 2.2 所示。各自的流量增益特性如图 2.3 所示。

在一般情况下,伺服系统应尽可能具有线性增益特性,因此零开口阀得到最广泛的应用。负开口阀由于流量增益特性具有死区,将导致稳态误差,并且有时还可能引起游隙,以至于产生稳定性问题,因此很少采用。正开口阀用于要求有一个连续的液流以便使油液维持合适温度的场合,或用于要求采用恒流量油源的系统中。不过,正

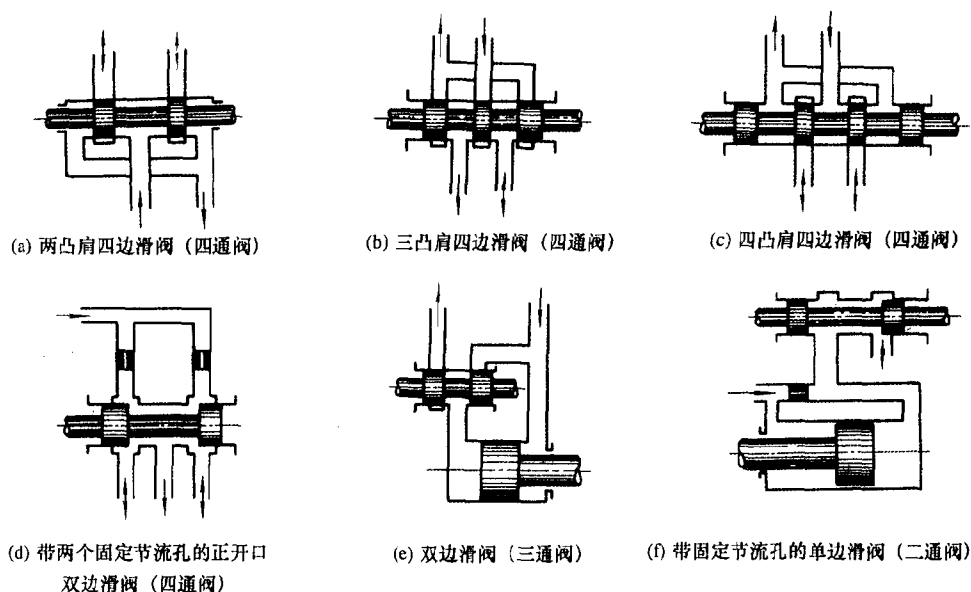


图 2.1 滑阀的结构形式

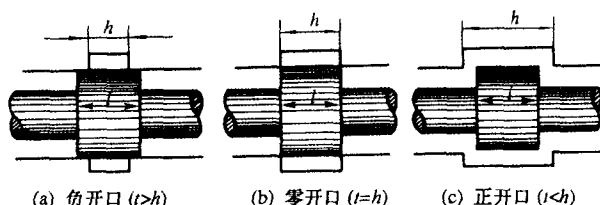


图 2.2 滑阀的预开口形式

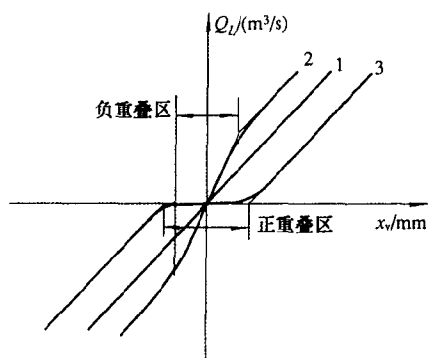


图 2.3 不同开口形式的流量特性
1—零开口; 2—正开口; 3—负开口

开口阀在零位时有较大的功率损耗,而且由于正开口以外区域增益降低和压力灵敏度低等缺点,使它只能用于某些特殊场合。

2.1.1.2 喷嘴挡板阀

挡板阀可制成单喷嘴和双喷嘴两种,如图 2.4 所示。单喷嘴挡板的挡板处于图示水平位置时,液压缸上、下腔的压力之比等于上、下腔活塞面积的反比,活塞杆不动。当挡板绕支轴偏转时,不再维持上述的比例关系,则活塞杆受不平衡液压力的作用而运动。对于双喷嘴挡板阀(图 2.4(b)),当挡板在中间位置时,与两喷嘴的间隙相等,则该

处的流体阻力相等,因而两个控制油路的压力相等,此时输出压力差和流量均为零,

活塞杆不动。当输入信号使挡板偏转时,挡板与两喷嘴间的间隙不等,流体阻力不等,阀有压力差和负载流量输出,活塞杆运动。

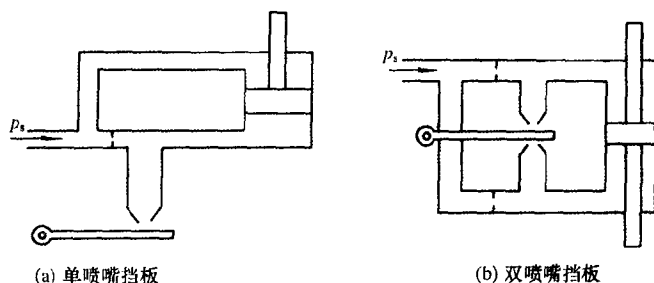


图 2.4 喷嘴挡板阀

挡板阀的优点是抗污染能力强,也不像滑阀那样需要保证严格的制造公差,故成本也较低,而且它的惯量小,响应速度高,它的主要缺点是零位泄漏量大,因此只能在小功率系统中使用。挡板阀通常用于两级电液伺服阀的第一级。

2.1.1.3. 射流管阀

如图 2.5 所示,主要由射流管、接受器、输入装置等组成。当射流管相对于接受器在中位时,两接受孔的压力相等,活塞不动。当射流管在输入信号作用下偏离中位时,一个接受孔中的液体压力高于另一个,活塞运动。射流管阀由于零位泄漏量大、特性不易预测以及响应较慢等原因,因此使用受到限制。由于它对油液污染不敏感,随着该项技术的成熟,用于伺服阀的前置级,还是可行的。

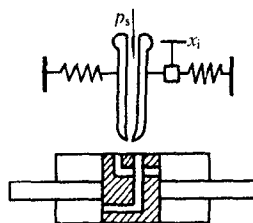


图 2.5 射流管阀

2.1.2 液压控制阀的一般分析

以滑阀为例分析液压控制的压力-流量方程和阀系数,所涉及的以及所导出的一般关系式也适用于其他各种类型的伺服阀的分析。

2.1.2.1 一般流量方程

设有一个四边滑阀如图 2.6(a)所示,其中的液流通液阻可用图中(b)所示。设通过每个节流口的流量为 Q_i ($i=1,2,3,4$); 通过每个节流口的压降为 p_i ($i=1,2,3,4$); Q_L 表示负载流量; p_L 表示负载压降; p_s 为供油压力; Q_s 为供油流量; p_0 为回油压力。

为简化分析,作以下假定:恒压源供油时 p_s 为常数,恒流源供油时 Q_s 为常数;忽略管道和阀腔内的压力损失;假设液体是不可压缩的来分析阀的稳态特性;设各节流口的流量系数相等,即 $C_{d1} = C_{d2} = C_{d3} = C_{d4}$

根据桥路的压力平衡可得

$$p_1 + p_4 = p_s \quad (2.1)$$

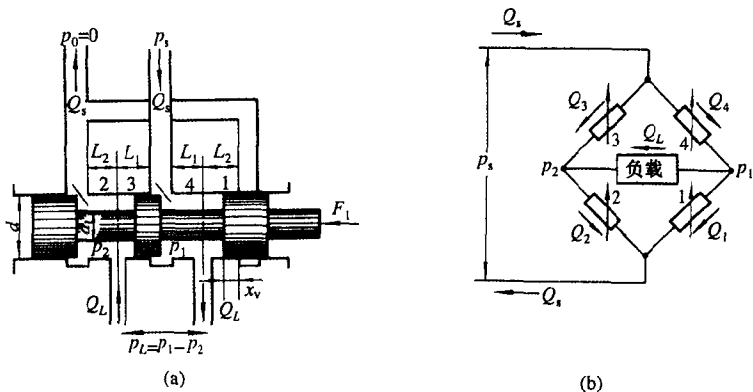


图 2.6 三位四通滑阀

$$p_2 + p_3 = p_s \quad (2.2)$$

$$p_1 - p_2 = p_L \quad (2.3)$$

$$p_3 - p_4 = p_L \quad (2.4)$$

根据桥路的流量平衡可得:

$$Q_1 + Q_2 = Q_s \quad (2.5)$$

$$Q_3 + Q_4 = Q_s \quad (2.6)$$

$$Q_4 - Q_1 = Q_L \quad (2.7)$$

$$Q_2 - Q_3 = Q_L \quad (2.8)$$

最后可写出各桥臂的流量方程为:

$$Q_1 = g_1 \sqrt{p_1} \quad (2.9)$$

$$Q_2 = g_2 \sqrt{p_2} \quad (2.10)$$

$$Q_3 = g_3 \sqrt{p_3} \quad (2.11)$$

$$Q_4 = g_4 \sqrt{p_4} \quad (2.12)$$

式中

$$g_i = C_d A_i \sqrt{\frac{2}{\rho}} \quad (2.13)$$

g_i 称为节流口的液导。在流量系数 C_d 和液体密度 ρ 一定时,它随节流口开口面积 A_i 变化,即是阀芯位移 x_v 的函数,其变化规律决定于节流口的几何形状。

对于一个具体的四边滑阀和已确定的使用条件,参数 g_i 和 p_i 或 Q_i 是已知的。在推导压力—流量方程时,对恒压源,可略去方程式(2.5)和(2.6),对恒流源,可略去

方程式(2.1)和(2.2),联立解这些方程,消掉中间变量 p_i 和 Q_i ,可以得到负载流量 Q_L 、负载压降 p_L 和阀芯位移 x_v 之间的函数关系:

$$Q_L = f(x_v, p_L) \quad (2.14)$$

虽然式(2.14)可从理论上得到,但在一般情况下,由于各桥臂的流量方程是非线性的,因此这些方程联解起来很麻烦,而且使一般公式无法简化。但实际使用的阀不会这样复杂,我们可以利用一些特殊的条件使问题得到简化。在大多数情况下,阀的窗口都是匹配的和对称的,则有:

$$g_1(x_v) = g_3(x_v) \quad (2.15)$$

$$g_2(x_v) = g_4(x_v) \quad (2.16)$$

$$g_2(x_v) = g_1(-x_v) \quad (2.17)$$

$$g_4(x_v) = g_3(-x_v) \quad (2.18)$$

式(2.15)和式(2.16)表示阀是匹配的,式(2.17)和式(2.18)表示阀是对称的。

对于匹配且对称的阀,通过桥路斜对角线上的两个桥臂的流量是相等的,即

$$Q_1 = Q_3 \quad (2.19)$$

$$Q_2 = Q_4 \quad (2.20)$$

这个结论可证明如下:如果 $Q_1 \neq Q_2$,假设 $Q_1 > Q_2$,由式(2.15)、式(2.16)、式(2.9)~式(2.12)和式(2.3)、(2.4)可得 $p_1 > p_2$ 及 $p_1 < p_2$,显然这两个结论是矛盾的,所以 Q_1 不能大于 Q_2 。同样 Q_1 也不能小于 Q_2 ,只能是 $Q_1 = Q_2$ 。同理可以证明 $Q_1 = Q_3$ 。

将式(2.9)和式(2.11)代入式(2.19),考虑到式(2.15)的关系,可得 $p_1 = p_3$ 。同样 $p_2 = p_4$ 。因此,对于匹配且对称的阀,通过桥路斜对角线上的两个桥臂的压降也是相等的,将 $p_1 = p_3$ 代入式(2.2)得

$$p_s = p_1 + p_2 \quad (2.21)$$

将上式与式(2.3)联立解得

$$p_1 = \frac{p_s + p_L}{2} \quad (2.22)$$

$$p_2 = \frac{p_s - p_L}{2} \quad (2.23)$$

这说明,对于匹配且对称的阀,在空载($p_L = 0$)时,液压缸两侧管道中的油压均为 $\frac{1}{2}p_s$ 。

当加上负载后,一个管道中的油压升高值恰好等于另一个管道中的压力降低值。

在恒压源的情况下,由式(2.7)、式(2.20)、式(2.9)、式(2.10)、式(2.22)和式