

普通高等教育“十一五”国家级规划教材



TEXTBOOK

HIGHER

FOR

EDUCATION



JICHUANG YEYA CHUANDONG YU KONGZHI

机床液压传动与控制

(第3版)



主 编 卢光贤

副主编 王立伦

西北工业大学出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

机床液压传动与控制

(第3版)

主 编 卢光贤

副主编 王立伦

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书较系统地介绍了液压传动的流体力学基础理论;从正确选用的角度出发,介绍了各种液压元件的工作原理、性能、特点和典型结构;以调速回路为主,介绍了常用基本回路的原理、性能和应用,以及典型液压系统和液压系统设计的方法与步骤,并用实例加以说明;最后,除了介绍液压伺服系统的一般工作原理、特点外,还着重用具体实例介绍了液压伺服系统动、静态特性分析的基本方法与步骤。

本书可作为高等院校机械制造专业液压传动课程的教材,也可作为机械类其他专业的液压传动课程教材或参考书,也可供工厂和研究单位的技术人员学习、参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

机床液压传动与控制/卢光贤主编.--3版.--西安:西北工业大学出版社,2006.7
ISBN 7-5612-2103-7

I. 机… II. 卢… III. ①机床—液压传动②机床—液压控制 IV. TG502.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 068288 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:029-88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西丰源印务有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:14.125

字 数:343 千字

版 次:2006 年 7 月第 3 版 2006 年 7 月第 1 次印刷

定 价:21.00 元

前 言

本书初版是全国航空高等院校机械制造类专业统编教材。它是按照西北工业大学、北京航空航天大学、南京航空航天大学、沈阳航空工业学院、南昌航空工业学院五所航空院校共同拟定的有关航空机械加工专业“机床液压传动与控制”课程的教学大纲编写的教材。在教材中增添了飞行器制造专业及有关其他机械制造类专业需要的内容。

自 1984 年本书初版发行以来,经上述各航空院校以及其他院校使用,一致认为内容安排恰当,针对性强,编写方法深入浅出,图文并茂,便于自学。

1993 年,对本书进行了第一次修订(第 2 版),本着基本内容与讲授方法不变的指导思想,根据几年的教学实践和生产发展情况,将书中不适当之处进行了调整、修改。1993 年修订本发行以来,受到广大师生的欢迎,曾多次重印,并于 1996 年分别获得中国航空工业总公司第四届航空高校优秀教材一等奖和陕西省首届“优秀双效书奖”。

本次修订(第 3 版)按照“普通高等教育‘十一五’国家级教材规划”精神,对原书部分内容进行了更新,文字叙述也作了适当修改,并适当扩充了其他领域,以扩大使用范围。修定的主要内容是以液压传动系统的工作原理、设计方法和正确使用为着重点,适当地加强了液压传动理论和液压伺服控制的介绍。对于液压元件这部分内容,只从正确使用为出发点介绍主要元件的原理、特点和使用场合。液压伺服系统不作为一般液压系统看待,除介绍它的一般工作原理、特点和使用外,着重用具体的实例较详细地介绍了液压伺服系统动、静态特性分析的基本方法与步骤,而对其设计则不做介绍。由于近年来电液伺服系统的广泛应用,本次修订重新恢复了关于电液伺服系统的特性分析与计算内容。全书仍按 50 学时进行修订,有关液压系统和基础理论的内容约占 $3/5$,液压元件内容约占 $2/5$ 。

本书由西北工业大学卢光贤担任主编,王立伦担任副主编。参加本次修订的人员有西北工业大学胡粹华(绪论、第二章),姜万生(第三、七章),王立伦(第五、八章),卢光贤(第九章),北京航空航天大学李述楣(第一章),南京航空航天大学雷玉亮(第四、六章)。曾经参加编写和修订的同志还有计永心、曾贤启、宋学燕、骆茆文、陈佩琳、张晓坤等同志。

本书难免有疏漏和不足之处,欢迎读者批评指正。

编 者

2005 年 12 月

目 录

绪论.....	1
第一章 液压油及液压流体力学基础.....	6
1-1 液压油.....	6
1-2 液体静力学	12
1-3 流动液体的基本力学特性	14
1-4 流动液体的流量-压力特性.....	26
1-5 液压冲击和气穴现象	36
思考题和习题	40
第二章 液压泵和液压马达	43
2-1 概述	43
2-2 齿轮泵	47
2-3 叶片泵	49
2-4 柱塞泵和柱塞液压马达	55
2-5 液压泵的流量调节	60
2-6 其他类型的泵	63
思考题和习题	65
第三章 液压缸	67
3-1 液压缸的基本类型和特点	67
3-2 液压缸的构造	72
3-3 液压缸结构设计中应注意的问题	78
思考题和习题	79
第四章 控制阀	81
4-1 概述	81
4-2 方向控制阀	81
4-3 压力控制阀	90
4-4 流量控制阀.....	103

4-5 比例阀和逻辑阀.....	110
思考题和习题.....	113
第五章 辅助装置.....	117
5-1 蓄能器.....	117
5-2 滤油器.....	120
5-3 管道元件.....	123
5-4 油箱和热交换器.....	125
思考题和习题.....	127
第六章 液压传动系统的速度调节.....	128
6-1 调速回路.....	128
6-2 快速运动回路.....	144
6-3 速度换接回路.....	146
思考题和习题.....	149
第七章 典型液压系统.....	153
7-1 组合机床动力滑台液压系统.....	153
7-2 M1432A 型万能外圆磨床的液压系统.....	155
7-3 液压机的液压系统.....	159
思考题和习题.....	165
第八章 机床液压系统的设计与计算.....	167
8-1 概述.....	167
8-2 液压系统设计与计算举例.....	168
思考题和习题.....	186
第九章 液压伺服系统.....	188
9-1 液压伺服系统的工作原理与类型.....	188
9-2 液压放大器.....	192
9-3 机液伺服系统特性分析与计算.....	196
9-4 电液伺服阀.....	209
9-5 电液伺服系统特性分析与计算.....	214
思考题和习题.....	219
参考文献.....	220

绪 论

液压传动技术早在 18 世纪末就已开始应用,从 1795 年英国制成第一台水压机,至今已有 200 多年的历史。液压传动技术的研究被各国普遍重视,并应用于各个工业部门,只是近 60 年的事,因此液压传动与机械传动相比,还是比较年轻的技术。

第二次世界大战以后,液压元件迅速发展,性能也日趋完善,因而,液压传动技术开始得到广泛的应用。自从出现了精度高及快速响应的伺服阀和伺服控制系统以后,液压传动技术的应用就更为大家所重视。液压传动具有许多突出的优点,目前已广泛应用在机械制造、工程建设、交通运输、矿山、冶金、航空、航海、军事、轻工、农机等工业部门,也被应用到宇宙航行、海洋开发、预测地震等方面。在机床行业中,液压传动的应用更为普遍,如应用在磨床、车床、拉床、刨床、镗床、锻压机床、组合机床、数控机床、仿形机床、单机自动化、机械手和自动线等机械加工设备中。

从发展趋势来看,液压传动正向着高压化、高速化、集成化、大流量、大功率、高效率、长寿命、低噪声方向发展。为此,一些主要液压元件生产国,注意了在下述几方面进行理论性研究:液压回路中的动态特性;元件的噪声、振动和气蚀;液压油的难燃性、充气性、压缩性和污染;阀的稳定性、流量系数、液动力;元件的内、外泄漏;提高元件的低温特性;提高元件的寿命;微电子与数字计算机在电液自动控制系统的应用等。

一、机床液压传动系统

1. 液压传动的工作原理

液压传动在机床上应用很广,具体的结构也比较复杂。下面介绍一个简化了的机床液压传动系统,用以概括地说明液压传动的工作原理。

图 0-1 所示为简化了的机床工作台往复送进的液压系统图。液压缸 10 固定不动,活塞 8 连同活塞杆 9 带动工作台 14 可以做向左或向右的往复运动。图中所示为电磁换向阀 7 的左端电磁铁通电而右端的电磁铁断电状态,将阀芯推向右端。液压泵 3 由电动机带动旋转,通过其内部的密封腔容积变化,将油液从油箱 1 中,经滤油器 2、油管 15 吸入,并经油管 16、节流阀 5、油管 17、电磁换向阀 7、油管 20,压入液压缸 10 的左腔,迫使液压缸左腔容积不断增大,推动活塞及活塞杆连同工作台向右移动。液压缸右腔的回油,经油管 21、电磁换向阀 7、油管 19 排回油箱。当撞块 12 碰上行程开关 11 时,电磁换向阀 7 左端的电磁铁断电而右端的电磁铁通电,便将阀芯推向左端。这时,从油管 17 输来的压力油经电磁换向阀 7,由油管 21 进入液压缸的右腔,使活塞及活塞杆连同工作台向左移动。液压缸左腔的回油,经油管 20、电磁换向阀 7、油管 19 排回油箱。电磁换向阀的左、右端电磁铁交替通电,活塞及活塞杆连同工作台便

循环往复左、右移动。当电磁换向阀 7 的左、右端电磁铁都断电时，阀芯在两端的弹簧作用下，处于中间位置。这时，液压缸的左腔、右腔、进油路及回油路之间均不相通，活塞及活塞杆连同工作台便停止不动。由此可见，电磁换向阀是控制油液流动方向的。

调节节流阀 5 的开口大小，可控制进入液压缸的油液流量，改变活塞及活塞杆连同工作台移动的速度。

在进油路上安装溢流阀 6，且与液压泵旁路连接。液压泵的输出压力，可从压力表 4 中读出。当油液的压力升高到稍超过溢流阀的调定压力时，溢流阀开启，油液经油管 18 排回油箱，这时油液的压力不再升高，稳定在调定的压力值范围内。溢流阀在稳定系统压力和防止系统过载的同时，还起着把液压泵输出的多余油液排回油箱的作用。

电磁换向阀 7 的阀芯两端弹簧腔泄漏油，通过油管 22(泄漏口)排回油箱。

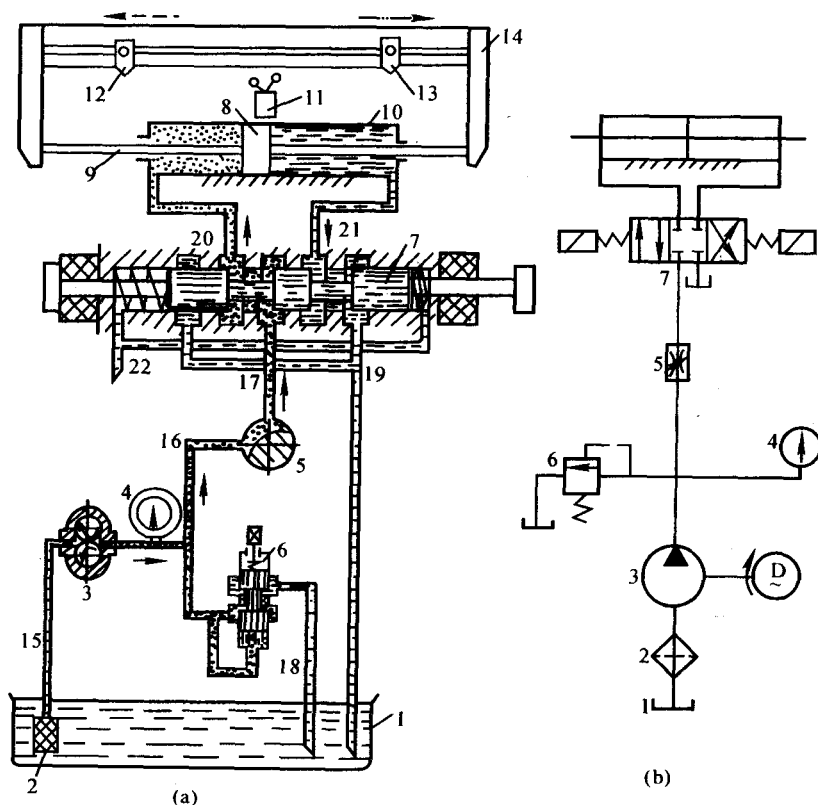


图 0-1 简化的机床液压系统图

1—油箱；2—滤油器；3—液压泵；4—压力表；5—节流阀；6—溢流阀；7—电磁换向阀；
8—活塞；9—活塞杆；10—液压缸；11—行程开关；12、13—撞块；14—工作台；15~22—油管

在图 0-1 所示液压系统中，所采用的液压泵为定量泵，即在单位时间内所输出压力油的体积(称为流量)为定值。定量泵所输出的压力油，除供给系统工作所需外，多余的油液由溢流阀排回油箱，能量损耗就增大。为了节约能源，可以采用在单位时间内所输出的流量根据系统工作所需而调节的变量泵。如果机床液压系统的工作是旋转运动，则可以将液压缸改用液压马达。

通过上述例子可以看到:

(1) 液压传动是以有压力的油液作为传递动力的介质, 液压泵把电动机供给的机械能转换成油液的液压能, 油液输入液压缸后, 又通过液压缸把油液的液压能转变成驱动工作台运动的机械能。

(2) 在液压泵中, 电动机旋转运动的机械能是依靠密封容积的变化转变为液压能, 即输出具有一定压力与流量的液压油。在液压缸中, 也是依靠其密封容积的变化, 把输入的液压能转换为活塞直线往复运动的机械能。这种依靠密封容积变化来实现能量转换与传递的传动方式称为液压传动, 它与主要依靠液体的动能来传递动力的“液力传动”(例如水轮机、离心泵、液力变矩器等)不同, 后者在机床上用得极少。液压传动与液力传动, 都是液体传动。

(3) 工作台运动时所能克服的阻力大小与油液的压力和活塞的有效工作面积有关, 工作台运动的速度决定于在单位时间内通过节流阀流入液压缸中油液体积的多少。

(4) 在液压传动系统中, 控制液压执行元件(液压缸或液压马达)的运动(速度、方向和驱动负载能力)是通过控制与调节油液的压力、流量及液流方向来实现的, 即液流是处在液压控制的状态下进行工作的, 因此液压传动与液压控制是不可分割的。然而通常所谓的液压控制系统是指具有液压动力机构的反馈控制系统。

2. 液压系统的组成

从分析上述系统可以看出, 液压传动系统均由以下四个部分所组成:

(1) 动力元件(液压泵)。液压泵的作用是向液压系统提供压力油, 是动力的来源。它是将原动机(电动机)输出的机械能转变为油液液压能的能量转换元件。

(2) 执行元件(液压缸或液压马达)。它的作用是在压力油的推动下, 完成对外做功, 驱动工作部件。它是将油液的液压能转变为机械能的能量转换元件。

(3) 控制元件。如溢流阀(压力阀)、节流阀(流量阀)及换向阀(方向阀)等, 它们的作用是分别控制液压系统油液的压力、流量及液流方向, 以满足执行元件对力、速度和运动方向的要求。

(4) 辅助元件。如油箱、油管、管接头、滤油器、蓄能器、压力表等, 分别起储油、输油、连接、过滤、储存压力能、测压等作用, 是液压系统中不可缺少的重要组成部分。但从液压系统的工作原理来看, 它们是起辅助作用的, 故因此而得名。

上述各类元件, 将在以后章节中分别予以介绍。

3. 液压系统图的职能符号

图 0-1(a)所示的液压系统, 各元件的图形基本上表示了它们的结构原理, 称结构式原理图。它直观性强, 容易理解, 发生故障时按此类图来检查和判断故障原因比较方便, 但图形复杂, 不便绘制。为了简化液压原理图的绘制以适应液压技术的迅速发展, 我国国家标准(GB 786—76)规定了液压系统图的图形符号。这些符号只表示元件的职能、连接系统的通路, 并不表示元件的具体结构和参数, 是职能符号。图 0-1(b)所示为该液压系统的职能符号式原理图。当无法用职能符号表示, 或必须特别说明系统中某一重要元件的结构及动作原理时, 也允许局部用结构式原理图表示。

国家标准规定: 图中各元件的符号均以静止状态(或零工位)表示; 工作油路(包括主压油路和主回油路)以标准实线表示。泄漏油路以细实线表示, 控制油路以虚线表示。

二、液压传动的优、缺点及在机床上的应用

液压传动系统中的传动介质是油,油本身的物理特性(将在第一章中讲到),使液压传动与机械传动、电气传动、气压传动相比,具有以下优点:

(1)能方便地实现无级调速,调速范围大。在液压传动中,可以在工作时进行无级调速,调速方便且调整范围大,可达 $100:1 \sim 200:1$ 。

(2)运动传递平稳、均匀。液压传动中的工作介质为液体,是无间隙传动且有吸振的能力,使液压传动工作平稳、均匀。不像机械传动装置,由于加工和装配误差总会存在传动间隙,从而会引起振动和冲击。

(3)易于获得很大的力或力矩。液压传动的工作压力较高(可达 $350 \times 10^5 \text{ Pa}$ 甚至更高),液压缸或液压马达的有效承压面积亦可取得较大,因此可获得很大的力或力矩。

(4)单位功率的重量轻,体积小,结构紧凑,反应灵敏。在同等功率的情况下,液压泵或液压马达的重量为一般电机的 $10\% \sim 20\%$,外形尺寸为电机的 15% 左右。液压马达的运动惯量不超过同等功率电机的 10% ,启动中等功率的一般电动机需要 $1 \sim 2 \text{ s}$,而启动同功率的液压马达时间不超过 0.1 s 。液压传动反应灵敏,易于平稳地实现频繁的启、停、换向或变速。

(5)易于实现自动化。液压传动的控制、调节比较简单,操纵比较方便、省力,易于实现自动化。当与电气或气压传动相配合使用时,更能实现远距离操纵和自动控制。

(6)易于实现过载保护,工作可靠。在液压传动中,作为工作介质的油液压力很容易由压力控制元件来控制。只要设法控制油液压力在规定限度就可达到防止过载及避免事故的目的,使工作可靠。

(7)自动润滑,元件寿命长。液压元件相对运动的表面因有液压油,能自行润滑,所以使用寿命较长。

(8)液压元件易于实现通用化、标准化、系列化,便于设计、制造和推广使用。

液压传动的主要缺点:

(1)液压传动以液体作为工作介质,在相对运动的表面间无法避免泄漏,再加上液体具有微小的压缩性及油管产生弹性变形等原因,使液压传动不能实现严格的定比传动。泄漏使液压系统能量损失增加,效率降低;泄漏造成油液的浪费,污染环境。

(2)温度对液压系统的工作性能影响较大。液体的黏度和温度有密切关系,当黏度因温度的变化而变化时,将直接影响液压系统的泄漏、液压损失和通过节流元件的流量等。故一般的液压系统不宜用于高温或低温的条件下。

(3)传动效率较低。液压传动在能量转换及传递过程中存在着机械摩擦损失、压力损失和泄漏损失,传动效率往往较低。这一缺点,使液压传动在大功率系统中的使用受到限制,也不宜作远距离传动。

(4)空气混入液压系统后引起工作不良,如发生振动、爬行、噪声等,因此,必须采取措施防止空气渗入。

(5)为了防止泄漏以及满足某些性能上的要求,液压元件的制造精度要求高,使成本增加。

(6)液压设备故障原因不易查找。液压传动的大部分故障都是由于油液不洁所造成的,因此要求工作液体清洁、无杂质。液压传动中的工作液体一般为各种矿物油,经过一段时间的使用后会变质,并可能混入铁屑、尘埃等杂物,油液在压力状况下通过液压泵及控制阀的缝隙,分

子链被剪切,黏度会逐步下降,因此必须定期换油。液压传动中的各种元件和工作液体都在封闭的油路内工作,故障原因一般较难查找。

总的说来,液压传动的优点较多,随着生产的发展,缺点正在逐步加以克服,因此液压传动有着广阔的发展前途。

液压传动的优点很多,在工程中的应用很广。在现代飞机的襟翼、尾舵、起落架等的操纵中,采用液压传动是为了获得大的力和力矩,并且单位功率重量轻。在机床中,采用液压传动主要是为了在工作过程中便于无级变速、实现自动化和实现换向频繁的往复运动。液压传动在机床上的应用如下:

(1)进给运动。液压传动在机床上的进给运动中应用最为广泛,例如:车床、六角车床、自动车床的刀架及转塔刀架的进给;组合机床的动力头、动力滑台的进给等,要求有较大的调整范围,且在工作中能无级调节;C7120车床的纵向进给,最小工作进给量为 25 mm/min ,而纵向快进可达 $5\,000\text{ mm/min}$;磨床、刨床工作台往复一次,用液压控制,周期地实现定量进给一次,进给量可进行无级调节。

(2)主体运动。龙门刨床的工作台、牛头刨床或插床的滑枕,都可采用液压传动实现所需的高速往复运动,并可减少换向冲击,缩短换向时间。液压传动也可用于自动车床、数控机床等的主轴旋转运动。

(3)仿形装置。车床、铣床、刨床上的仿形加工可以采用液压伺服系统来实现。液压仿形精度可达 $0.01\sim0.02\text{ mm}$,灵敏性好,靠模接触力小,寿命长。

(4)辅助装置。工件与刀具的装卸、输送、转位、变速操纵,垂直移动的部件平衡等,都可采用液压传动来实现。采用液压传动可以简化机床结构,提高机床自动化程度。

(5)数控机床。在数控机床的拖动系统中广泛地采用液压传动,如电液脉冲马达及电液伺服阀等的电液伺服装置。

(6)静压支承。在重型机床、高速机床、高精度机床上采用液体静压轴承、液体静压导轨及液体静压丝杆,可以使其工作平稳,运动精度高,是近年来的一项新技术。

随着液压技术的发展,液压传动在机床上的应用将得到不断的扩大和完善。

第一章 液压油及液压流体力学基础

液压传动是以油液作为工作介质来传递动力的,为此必须了解油液的物理性质,研究油液的运动规律。这一章主要介绍这两方面的内容,着重介绍液压流体力学的一些基础知识。

由于流体力学只研究流体的宏观运动,因此假设流体是连续的,即假设流体是由无限多个一个紧挨着一个的流体质点组成的,流体质点之间没有任何间隙,这种假定称做连续介质假定。根据这一假定就可以把油液的运动参数看做是时间和空间的连续函数,从而可用解析数学去描述这种流体的运动规律,以解决工程实际问题。

液压油同其他流体一样,没有确定的几何形状,它在受切应力作用时,会产生连续不断的变形,即表现出流动性。另外,当流体四周同时受到压力作用时,它具有弹性的性质,即流体能承受压应力。相反,由于流体分子间内聚力很小,基本上不能承受拉应力。

1-1 液压油

下面要介绍的液压油的物理性质(密度、比容、压缩性、黏性等)都是与流体的力学特性关系很密切的性质。

一、流体的密度和比容

单位体积内所含有的流体质量称为(质量)密度,用符号 ρ 表示。设有一均质流体的体积为 V ,所含有的质量为 m ,则其密度

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

密度的倒数称为比容,用符号 v 表示,它是单位质量流体所占的体积,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-2)$$

流体的密度和比容将随着它们所在处的压力和温度而变化,而压力和温度又都是空间点坐标和时间的函数,即

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

$$v = v(x, y, z, t)$$

由于液体的密度随压力和温度的变化改变极小,一般情况下可忽略不计,因此,常令 ρ 为常数;同样比容也是如此。

二、流体的压缩性及液压弹簧刚性系数

流体受压力作用其体积减小的性质称为压缩性。流体压缩性的大小用体积压缩系数 κ 来表征。一定体积 V 的流体,当压力增大 dp 时,体积减小了 dV ,则体积压缩系数

$$\kappa = -\frac{dV}{V} \frac{1}{dp} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (1-3)$$

式中, dV/V 表示流体的体积相对变化量,负号表示 dV 与 dp 的变化方向相反,即压力增加时,体积是减少的,反之亦然。

压缩系数 κ 的倒数称为体积弹性模量,用符号 K 表示,即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -V \frac{dp}{dV} \quad (1-4)$$

流体的压缩系数和体积弹性模量的值都是随压力和温度而变化的。对液体来说,它们的变化是很小的,一般忽略不计。

纯液体的压缩系数很小,即其体积弹性模量很大,例如,当压力为 $(1 \sim 500) \times 10^5 \text{ Pa}$ 时,纯水的平均体积弹性模量 $K \approx 2.1 \times 10^3 \text{ MPa}$,纯液压油的平均体积弹性模量 K 值则在 $(1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{ MPa}$ 范围内。如果液体中含有非溶解的气体,则其体积弹性模量就会下降较多。在一定压力下,油液中混有 1% 的气体时,其体积弹性模量将降低为纯油的 30% 左右;如果混有 4% 的气体,则其体积弹性模量仅为纯油的 10% 左右。由于油液在使用中很难避免不混入气体,因此工程上常将油液的 K 值取为 700 MPa。

如不特殊指明,一般 K 值都是表示等效体积弹性模量,也即是综合考虑了盛放液压油的封闭容器(包括管道)受压变形引起的容积变化、液压油本身的可压缩性以及混入油中的气体的可压缩性。为了叙述简单,将 K 值就叫液体的体积弹性模量。

液体的压缩性在液压机械中会产生“液压弹簧效应”。如图 1-1 所示,当对活塞一端施加的外力变化 ΔF 时,由于液体是可压缩的,活塞便会沿受力方向产生一个位移量 Δl ,使容器中的液体受到压缩。外力消除后,被压缩的液体就会膨胀,活塞就会向反方向移动 Δl ,恢复到原来位置。这一现象与机械弹簧受力变形的情况类似,被称之为“液压弹簧效应”。液压弹簧的刚性系数按如下方法计算。

由式(1-4)得出

$$dp = \frac{KdV}{V} = \frac{KA dl}{V}$$

又

$$dF = dpA = \frac{KA^2}{V} dl$$

故有

$$K_h = \frac{dF}{dl} = \frac{KA^2}{V} \quad (1-5)$$

式中 A ——活塞的有效面积;
 dl ——活塞的微小位移量;

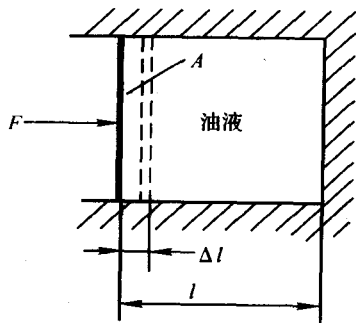


图 1-1 液压弹簧的刚性计算简图

dF ——作用在活塞上外力的变化量；

K_b ——液压弹簧刚性系数。

一般在作液压系统静态分析和计算时,可以不考虑液体的压缩性。但在进行动态分析和计算时,例如液压系统动态性能计算和液压冲击最大压力峰值的计算等,必须重视油的可压缩性这一因素的影响。“液压弹簧效应”还是造成液压传动装置产生低速爬行的一个重要原因。

三、流体的黏性

1. 黏性及其表示方法

液体在外力作用下流动时,液体分子间的内聚力阻碍分子间的相对运动而产生内摩擦力的性质,就是液体的黏性。

以图 1-2 所示的两块平行平板流动情况为例,观察黏性的作用。上平板以速度 u_0 相对于下平板向右运动,下平板固定不动。经测量平板某法线 y 上各点的流速发现,紧贴在上平板上极薄的一层液体,在流体分子与平板表面的附着力作用下,以相同的速度 u_0 随上平板一起向右运动。紧贴在下平板上极薄的一层液体黏附在下平板上而保持静止。中间各层液体流速则由零逐渐增加,流动快的流层会拖动流动慢的流层,而流动慢的流层又阻止流动快的流层流动,这样层与层之间就因为存在黏性而产生了内摩擦力。这种摩擦力是产生在两流层接触表面之间的剪切力,因此,流体的黏性又可说成是决定流体反抗剪切力程度的一种性质。

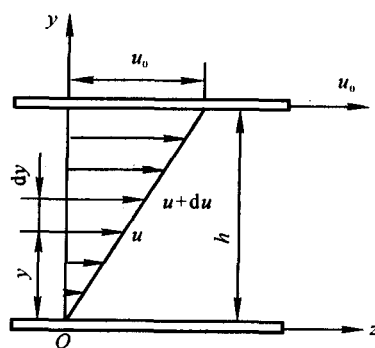


图 1-2 液体黏性示意图

实验还表明,流体层相对运动时产生的内摩擦力的大小,与流体黏性的大小和接触面积的大小以及流速沿法线的变化率(即速度梯度)有关。其数学表达式为

$$F_f = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

式中 F_f —— 流体层相对运动时的内摩擦力；

μ —— 液体黏性的比例系数；

A —— 流层之间的接触面积；

$\frac{du}{dy}$ —— 流层相对运动时的速度梯度。

内摩擦力 F_f 除以接触面积 A , 即得液体内的切应力

$$\tau = \frac{F_f}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-7)$$

式(1-7)又称为牛顿液体内摩擦定律。

表示液体黏性大小程度的参数称为黏度,流体的黏度有三种表示方法:

(1) 动力黏度(又称绝对黏度)。动力黏度以 μ 表示,这就是式(1-6)中的黏性比例系数。它直接表示了流体内摩擦力的大小,其物理意义为:两相邻流体层以单位速度梯度流动时,在单位接触面积上所产生的内摩擦力的大小,即

$$|\mu| = \left| \frac{\tau}{du/dy} \right|$$

μ 的国际单位是 $\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$ 或 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

(2) 运动黏度。运动黏度以 ν 表示,它是动力黏度 μ 与密度 ρ 的比值,没有什么特殊的物理意义,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-8}$$

ν 的国际单位是 m^2/s ,常用 mm^2/s 。

我国目前常用运动黏度 ν 来表示油液的黏度,普通机械油的牌号就是用该油液在 50°C (323 K) 时运动黏度 $\nu(\text{mm}^2/\text{s})$ 的平均值来标志的。例如,10 号机械油就是该油的运动黏度为 $10\text{ mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 相对黏度。液体的动力黏度及运动黏度都难以直接测量,一般多用于理论分析和计算。相对黏度是一种以被测液体的黏度相对于同温度下水的黏度之比值来表示黏度的大小的。相对黏度按其测试方法的不同,有多种名称。我国习惯采用恩氏黏度,以符号 $^\circ\text{E}_t$ 表示。它们是在某标定温度(如 20°C 或 50°C) 下将 200 cm^3 的被测油液在自重作用下从恩氏黏度计中直径为 2.8 mm 的小孔流出的时间 $t_1(\text{s})$,与 200 cm^3 蒸馏水在 20°C 时从恩氏黏度计中流出所需时间 $t_2(\text{s})$ 之比,即

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \tag{1-9}$$

恩氏黏度计只能用来测定比水黏度大的液体。恩氏黏度与运动黏度的换算关系如下:

$$\nu = (7.31\text{ }^\circ\text{E}_t - \frac{6.31}{^\circ\text{E}_t}) \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s} \tag{1-10}$$

2. 温度和压力对黏度的影响

液压油的黏度随温度的增加而减小,这是因为液体的黏性是由于分子之间的相互作用力而引起的,这种作用力随着温度升高引起分子间的距离增大而减小。油液黏度的变化直接影响液压系统的工作性能,因此希望黏度随温度的变化越小越好。当其运动黏度不超过 $76 \times 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$,温度变化在 $30 \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内时,可用下式计算温度为 t 时的运动黏度:

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \tag{1-11}$$

- 式中 ν_t —— 温度为 t 时油液的运动黏度;
 ν_{50} —— 温度为 50°C 时油液的运动黏度;
 n —— 根据油液种类而定的常数。其值可参考表 1-1。

表 1-1 指数 n 的数值

$\nu_{50}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	2.5	6.5	12	21	30	38	45	52	60	68	76
n	1.39	1.59	1.72	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49	2.52	2.56

我国常用液压油的黏度与温度的关系可参阅图 1-3 所示国产油黏度温度曲线。

液压油的黏度随压力的升高而变大,其原因是由于分子之间距离缩小,内聚力增大所致。其关系可以表示为

$$\nu_p = \nu_0 e^{bp} \tag{1-12}$$

式中 ν_0 —— 压力为 10^5 Pa 时液体的运动黏度；

ν_p —— 压力为 p (相对压力) 时的运动黏度；

p —— 油液的压力 (10^5 Pa)；

b —— 根据液体种类不同而定的系数, 一般 $b = (0.002 \sim 0.003) \frac{1}{10^5 \text{ Pa}}$ 。

若压力变化不大 (变化值在 5 MPa 以下), 液体的黏度变化甚微, 可忽略不计。如果压力变化大于 20 MPa, 则液体黏度的变化就不容忽视了。

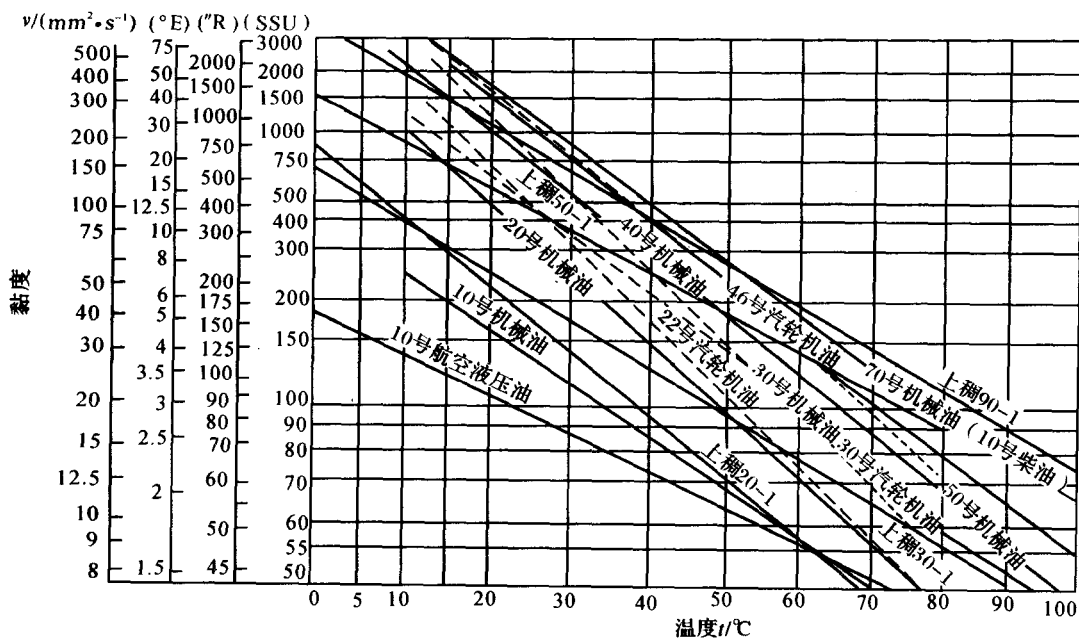


图 1-3 国产液压油黏度温度曲线

°E—恩氏黏度; °R—商用雷氏秒; SSU—国际赛氏秒

四、对液压油的要求和选用

在液压传动中, 液压油既是传递动力的介质, 又是润滑剂, 油液还可以将系统中的热量扩散出去。在这三点作用中前两点是主要的。

随着液压技术的日益广泛应用, 液压系统的工作条件、周围环境以及所控制的对象也越来越复杂, 因此, 要保证液压系统工作可靠、性能优良, 对液压油必须提出以下几项要求:

(1) 应具有合适的黏度, 且黏温性要好, 即黏度随温度的变化要小。黏性过大, 油液流动时阻力大, 功率损失大, 系统效率低。黏度过小, 将引起泄漏增加, 系统效率也要降低。

(2) 可压缩性要小, 即体积弹性模量要大, 释放空气性能要好, 这是由于油中混入空气时, 将大大降低油的体积弹性模量, 降低系统的动态性能指标。

(3) 润滑性要好, 保证在不同的压力、速度和温度条件下, 都能形成足够的油膜强度。

(4) 具有较好的化学稳定性, 不易氧化和变质, 以免造成元件或机件的损坏, 影响系统的正常工作。

(5) 质量应纯净, 应尽量减小机械杂质、水分和灰尘的含量。水混入液压油中, 会降低液压

油的润滑性、防锈性；其他杂质混入液压油中，会堵塞节流小孔和缝隙或导致运动部件卡死，这些都影响系统工作的可靠性和准确性。

(6) 对密封材料的影响要小。液压油对密封材料的影响主要是使密封材料产生溶胀、软化或硬化，结果都会使密封装置密封性能降低，系统泄漏增加。

(7) 抗乳化性要好，不易起泡沫。油中如果混入水则在泵及其他液压元件的作用下，会产生乳化液，引起油的变质、劣化，生成油泥和沉淀物，降低使用寿命。

(8) 流动点和凝固点要低，闪点（明火能使油面上油蒸气闪燃，但油本身不燃烧的温度）和燃点应高。

在机床液压系统中，目前使用最多的是矿物油，常用的像机械油、汽轮机油等。随着液压技术的发展，对液压油提出了更高的要求，油液经过精炼或在其中加入各种改善其性能的添加剂——抗氧化、抗泡沫、抗磨损、防锈等的添加剂，以提高其使用性能。如精密机床液压油、稠化液压油以及航空液压油等，其使用性能超过一般的机械油。

选用液压油时首先考虑的是它的黏度。在确定黏度时应考虑下列因素：工作压力的高低；环境温度的高低；工作部件运动速度的高低。例如，当系统工作压力较高、环境温度较高、工作部件运动速度较低时，为减少泄漏，宜采用黏度较高的液压油。此外，各类泵对液压油的黏度有一个许用范围，其最大黏度主要取决于该类泵的自吸能力，而其最小黏度则主要考虑润滑和泄漏。各类液压泵的许用黏度范围可查阅有关液压手册。

几种国产液压油的主要质量指标见表 1-2。

表 1-2 几种国产液压油的主要质量指标

主要指标		运动黏度(50℃)	闪点(开口)	凝点	酸值	机械杂质
		$10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	℃ (不低于)	℃ (不高于)	mg/g (不大于)	%
牌号						
汽轮机油	22 号	20 ~ 30	180	- 15	0. 02	无
	30 号	28 ~ 32	180	- 10	0. 02	无
机械油	10 号	7 ~ 13	165	- 15	0. 14	0. 005
	20 号	17 ~ 23	170	- 15	0. 16	0. 005
	30 号	27 ~ 33	180	- 10	0. 20	0. 007
	40 号	37 ~ 43	190	- 10	0. 35	0. 007
精密机床 液压油	20 号	17 ~ 23	170	- 10		无
	30 号	27 ~ 33	170	- 10		无
	40 号	37 ~ 43	170	- 10		无
稠化 液压油	上稠 20 ~ 1	12. 51	163. 5	- 33	0. 237	无
	上稠 30 ~ 1	18. 67	185. 5	- 49	0. 131	无
	上稠 50 ~ 1	40. 56	174	- 48. 5	0. 123	无
	上稠 90 ~ 1	60. 81	217	- 27. 5	0. 063	无
航空 液压油	10 号	10	92	- 70	0. 05	无