

液压 传动与控制

曹玉平 阎祥安 主编

YEYA CHUANDONG YU KONGZHI



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

液 压 传 动 与 控 制

曹玉平 阎祥安 主编

 天津大学出版社

内 容 提 要

本书以“回路”和“传动”为主,阐述了液压传动的理论基础,系统地介绍了液压元件,并将液压元件与基本回路有机地结合起来,阐述了典型液压系统的分析方法,讲授了液压系统的设计内容与步骤。它可作为高等工科院校的教材,也可供工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动与控制/曹玉平主编. —天津:天津大学出版社, 2003. 8

ISBN 7-5618-1806-8

I. 液… II. 曹… III. ①液压传动—高等学校—教材②液压控制—高等学校—教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 057263 号

出版发行	天津大学出版社
出 版 人	杨风和
地 址	天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
网 址	www.tjup.com
电 话	营销部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印 刷	河北省永清县印刷厂
经 销	全国各地新华书店
开 本	185mm × 260mm
印 张	15.75
字 数	393 千
版 次	2003 年 8 月第 1 版
印 次	2003 年 8 月第 1 次
印 数	1—3 000
定 价	20.00 元

前 言

《液压传动与控制》是为高等学校机械工程类专业编写的教材。为了适应培养 21 世纪应用型工程技术人才的需要,更充分地反映我国液压传动与控制技术的飞跃发展,更好地为工程实际服务,编者在《液压传动与控制教程》基础上,总结多年的教学实践经验,删繁就简,去旧添新,着重基本观点、基本原理、基本方法的介绍,在编写体系上没作大的变动,力求保持原书的风格,力求反映我国液压传动与控制技术的最新成果,力求体现教材应有的稳定性、先进性、理论性和系统性。

按地位和性质,本门课程应属于基础技术课。根据专业面适当放宽的原则,学习本课程应着重于基本内容的掌握和应用,而不应局限于对某个专业的典型设备的了解。

在课程体系上,本书以“回路和传动”为主,根据液压系统由基本回路组成,回路由元件组成的从属关系,把元件和基本回路紧密结合起来;对于元件,则侧重于基本原理及选用方面,而不过多讲述具体结构;对于辅助装置,则按应用归其所属,并使之与内容密切联系,从而达到学以致用之目的。

教材不是学术专著,不宜旁征博引、求深求全;教材也不是使用指南,不宜详论条文、细议守则。教材面对的是初学者,只能按照教学大纲要求,讲清基本内容、基本理论和基本方法,使学生受到启发,知道进一步探索问题的途径,为其科技创新打下坚实的理论基础。

对于液压标准元件,学生只需了解作用、特点、使用场合及选用原则即可,不必过多掌握结构和性能细节。对于液压伺服系统不作一般液压传动系统看待,因此本书只简要介绍它的原理及性能,不谈设计问题。

学习本课程的先修科目是《液压流体力学》,但机械类专业尚未单独设立此课。为了教学需要,本书编入了与本课程内容密切相关的流体力学内容。

本书在编写过程中吸纳了许多兄弟院校有关教材及同仁们专著中的精华,均将它们列于参考文献之中。在此谨向有关作者表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中会有不少缺点和错误,敬请读者批评指正。

编者
2003 年 5 月

目 录

前言

第1章 绪论	(1)
1.1 液压传动系统的工作原理及组成	(1)
1.2 液压传动的优缺点及应用	(4)
1.3 液压传动技术的发展概况	(5)
第2章 液压系统工作介质	(7)
2.1 液压油	(7)
2.2 液压介质的污染与控制	(15)
第3章 液压流体力学基础	(19)
3.1 静止液体的力学特性	(19)
3.2 流动液体基本方程	(22)
3.3 液体流动时的压力损失	(29)
3.4 小孔及间隙的流量计算	(34)
3.5 液压冲击、空穴与气蚀	(40)
第4章 液压系统动力元件及装置	(44)
4.1 液压泵的基本概念	(44)
4.2 齿轮式液压泵	(47)
4.3 叶片式液压泵	(54)
4.4 柱塞式液压泵	(62)
4.5 蓄能器	(68)
4.6 油箱及过滤器	(72)
第5章 液压系统执行元件	(76)
5.1 液压缸结构形式及输出参数计算	(77)
5.2 液压缸结构参数的计算与选择	(85)
5.3 液压马达	(88)

第 6 章 液压系统方向控制元件及回路	(98)
6.1 方向控制阀及方向控制回路	(98)
6.2 单向阀及控制回路	(106)
第 7 章 液压系统压力控制元件及回路	(111)
7.1 溢流阀	(112)
7.2 顺序阀	(117)
7.3 减压阀	(120)
7.4 压力继电器	(122)
7.5 压力控制回路	(123)
第 8 章 液压系统流量控制元件及回路	(131)
8.1 流量控制阀节流口特性及形式	(131)
8.2 节流阀节流调速	(135)
8.3 调速阀及其调速回路	(141)
8.4 溢流节流阀	(142)
8.5 分流阀	(143)
8.6 容积调速回路	(145)
8.7 容积节流调速	(149)
8.8 快速运动回路	(151)
8.9 速度换接回路	(153)
8.10 多缸控制回路	(155)
第 9 章 二通插装元件及系统	(157)
9.1 二通插装元件结构及工作原理	(157)
9.2 二通插装式方向控制阀	(158)
9.3 二通插装式压力控制阀	(161)
9.4 二通插装式流量控制阀	(163)
9.5 二通插装阀特殊功能单元	(164)
9.6 液压机二通插装阀液压控制系统	(167)
第 10 章 典型液压系统分析	(170)
10.1 以速度变换为主的液压系统	(170)
10.2 以换向精度为主的液压系统	(173)
10.3 以压力变换为主的液压系统	(179)
10.4 多个执行元件配合工作的液压系统	(183)

第 11 章 电液比例控制	(188)
11.1 电液比例控制系统的组成及分类	(188)
11.2 电液比例阀的组成及分类	(189)
11.3 比例压力控制阀	(190)
11.4 比例流量控制阀	(194)
11.5 比例方向控制阀	(195)
11.6 电液比例控制系统	(196)
11.7 电液比例控制系统应用举例	(201)
第 12 章 液压伺服控制	(205)
12.1 液压伺服控制概述	(205)
12.2 液压伺服阀	(208)
12.3 液压伺服系统	(213)
第 13 章 液压系统设计	(219)
13.1 液压系统的设计步骤	(219)
13.2 液压元件的计算和选择	(221)
13.3 液压系统性能的验算	(231)
13.4 液压装置的结构设计	(234)
13.5 液压传动系统设计示例	(236)
参考文献	(243)

第 1 章 绪 论

液压传动与控制是研究以有压液体为能源介质实现各种机械的传动与控制的学科。液压传动与控制以液压油或其他合成液体作为工作介质,并采用各种元件组成所需要的控制回路,再由若干回路有机组合成能完成各种控制功能的传动系统进行能量的转换、传递与控制。因此,要研究液压传动及其控制技术,就必须了解传动介质的基本物理性能及其静力学、运动学和动力学特性,了解组成系统的各类液压元件的结构、工作原理、工作性能以及由这些元件组成的各种控制回路的性能和特点,并在此基础上进行液压传动控制系统的设计。

相对于机械传动来说,液压传动是一门新兴的技术。由于它具有许多突出的优点,近些年来被广泛应用于机械制造、电子、工程机械、交通运输、军事器械、冶金、石油化工、航空、航海、轻工、农机等各个方面,也被应用在宇宙航行、海洋开发、核能建设等新的技术领域。

1.1 液压传动系统的工作原理及组成

1.1.1 液压传动系统的工作原理

液压传动的应用领域很广,具体的液压传动结构也比较复杂。下面仅以图 1-1 所示的液压千斤顶为例,简述液压传动的工作原理。图中,杠杆手柄 1、小缸体 2、小活塞 3 及单向阀 4 和 7 组成手动液压泵;大缸体 9 和大活塞 8 组成举升液压缸。当提起手柄使小活塞上移时,其下端油腔容积增大,形成局部真空,油箱中的油液在大气压作用下,通过吸油管 5,顶开单向阀 4,补充到小活塞下端,此即吸油过程;用力压下手柄时,小活塞下移,其下腔油液压力升高,单向阀 4 关闭,单向阀 7 开启,小活塞下腔的油液输入大缸体 9 的下腔,迫使大活塞 8 上移,重物被顶起。再次提起手柄完成吸油过程时,单向阀 7 自动关闭,使大活塞下腔油液不能倒流,从而保证了重物不会自行下落。不断地往复扳动手柄,就能不断地把油液压入举升缸下腔,使重物逐渐升起。千斤顶能顶多重,决定于施加的压力和两个大、小活塞的面积之比。重物举升的速度决定于小活塞的下移速度和大、小活塞的面积之比。

从以上分析可以看出,液压传动是以液体的压力能传递动力的。任何液压传动系统,都是通过处于密闭容积内的受压液体的流动传递机械能的。

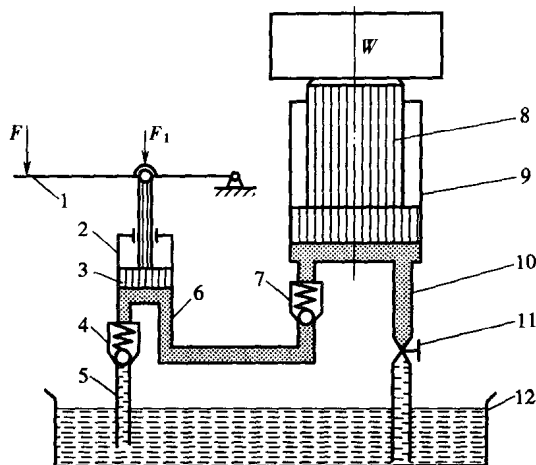


图 1-1 液压千斤顶原理

1—杠杆手柄;2—小缸体;3—小活塞;4、7—单向阀;5—吸油管;
6、10—管道;8—大活塞;9—大缸体;11—截止阀;12—油箱

1.1.2 液压传动系统的组成

图 1-2 所示为一个驱动机床工作台往复运动的液压传动系统。这是一幅半结构式的工作原理图。它由油箱 1、过滤器 2、液压泵 3、溢流阀 4、换向阀 5、节流阀 6、换向阀 7、液压缸 8 及连接这些元件的油管、管接头等组成。该系统的工作原理是：液压泵由电机驱动，油液经过滤器进入液压泵吸油腔，泵输出的压力油经换向阀 5、节流阀 6、换向阀 7 进入液压缸左腔。此时液压缸右腔的油液经换向阀 7 和回油管路排回油箱，液压缸推动工作台 9 向右移动。

当把换向阀 7 的手柄移动到图 1-2 b) 所示状态时，经节流阀 6 的压力油由换向阀 7 进入液压缸的右腔。此时液压缸左腔的油液经换向阀 7 和回油管排回油箱，液压缸推动工作台向左移动。因而换向阀 7 的主要功能是控制液压缸及工作台的运动方向。

工作台的移动速度是通过节流阀 6 调节的。当节流阀的开口大时，进入液压缸的油液流量就大，工作台的移动速度就快；反之，工作台移动速度将减小。因而节流阀 6 的主要功能是控制进入液压缸的流量，进而控制液压缸的运动速度。

液压缸推动工作台移动时必须克服液压缸受到的各种阻力，因而液压缸必须产生一个足够大的推力。这个推力是由液压缸中的油液压力产生的。要克服的阻力越大，液压缸中的油液压力越高；反之，压力就越低。系统中输入液压缸的油液流量由节流阀调节，而液压泵输出的多余油液则经溢流阀排回油箱。只有在压力管路中的油液压力等于或略大于溢流阀中弹簧的预压力时，油液才能打开溢流阀流回油箱，所以图示系统中液压泵出口处的油液压力是由溢流阀调定的。一般情况下，液压泵出口处的压力值大于液压缸中的压力，因而溢流阀在液压系统中的主要功能是控制系统的工作压力。

当需要短期停止工作台运动时（如在装卸工件或测量尺寸时），可以拨动换向阀 5 的

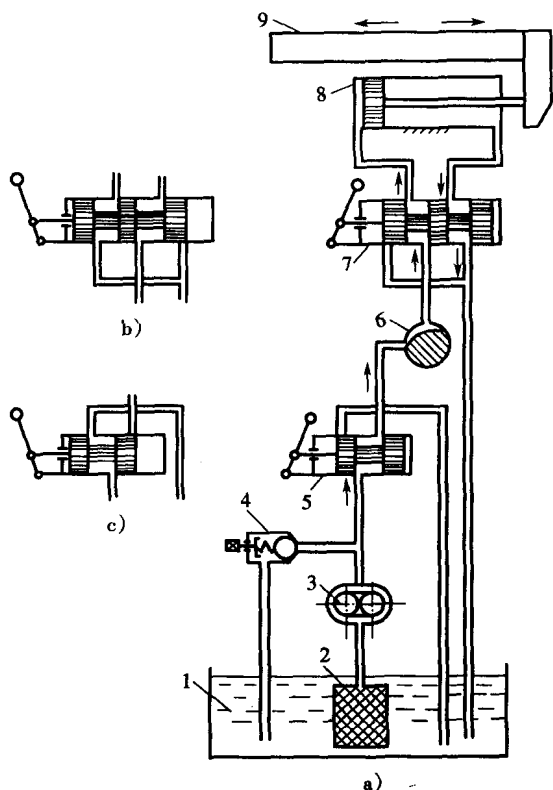


图 1-2 机床工作台液压系统的工作原理

1—油箱；2—过滤器；3—液压泵；4—溢流阀；5、7—换向阀；
6—节流阀；8—液压缸；9—工作台

操纵手柄,使其阀芯处于左位,如图 1-2 c) 所示状态。此时,液压泵输出的油液经换向阀 5 直接排回油箱,不再输到液压缸中去,工作台停止运动。此换向阀通常又称为开停阀。

液压系统中的过滤器 2 的作用是滤去油中的污染物,保证油液清洁,使系统工作正常。

从上面的示例可以看出,一个液压传动系统通常由以下几个部分组成。

- 1) 能源装置 它是把机械能转换成油液压力能的装置,一般最常用的就是液压泵。
- 2) 执行装置 它是把油液的压力能转换成机械能的装置。在上例中,它是作直线运动的液压缸;在其他情况下,也可以是作回转运动的液压马达等。
- 3) 控制调节装置 它们是控制液压系统中油液的压力、流量和油流方向的装置,如上例中的溢流阀、节流阀、换向阀等液压元件。这些元件是保证系统正常工作必不可少的组成部分。
- 4) 辅助装置 它们是除上述三项以外的其他装置,如上例中的油箱、过滤器、油管等。它们对保证液压系统可靠、稳定、持久的工作,有重大作用。
- 5) 传动介质 传动介质是指传递能量的流体,即液压油。

1.2 液压传动的优缺点及应用

1.2.1 液压传动的优缺点

与机械传动、电力传动等传动方式相比,液压传动具有下列优点:

① 在传递同等功率的情况下,液压传动装置的体积小、重量轻、惯性小、结构紧凑。据统计,液压马达的重量只有同功率电动机重量的 10% ~ 20%,而且能够传递较大的力或转矩。

② 液压传动装置工作比较平稳、反应快、冲击小,能高速启动、制动和换向。液压传动装置的换向频率高,对于回转运动每分钟可达 500 次,直线往复运动每分钟可达 400 ~ 1 000 次。这是其他传动控制方式无法比拟的。

③ 液压传动装置能在运动过程中进行无级调速,调速方便,调速范围大,而且调速性能好。其传动比可达 100:1 至 2 000:1。

④ 液压传动装置的控制、调节比较简单,操纵比较方便,易于实现自动化,如与电气控制相配合,可方便地实现复杂的程序动作和远程控制。

⑤ 液压传动装置易于实现过载保护。由于采用油液作为工作介质,液压传动装置能自行润滑,故使用寿命较长。

⑥ 液压元件已标准化、系列化和通用化,便于设计和选用。

液压传动的主要缺点如下:

① 液压传动装置以液体作为传动介质,无法避免泄漏。液体的泄漏和液体的可压缩性使液压传动无法保证严格的传动比。

② 液压传动装置由于在能量转换过程中存在着机械摩擦损失、压力损失和泄漏损失等,不易作远距离传输。

③ 液压传动装置对油温比较敏感,不易在低温和高温条件下工作。液压传动装置对油液的污染比较敏感,要求有良好的过滤设施。

④ 液压元件制造精度要求高,使用维护要求严;液压传动装置出现故障时不易追查原因,不易迅速排除。

1.2.2 液压传动技术的应用

由于液压传动技术优点很多,因而在国民经济的各个部门得到了广泛应用。目前,其应用领域仍在不断扩展,从组合机床、机械手、自动加工及装配线到金属及非金属压延、注射成型设备,从材料及构件强度试验机到电液仿真试验平台,从建筑、工程机械到农业、环保设备,从能源机械调整控制到热力与化工设备过程控制,从橡胶、皮革、造纸机械到建筑材料生产自动线,从采煤机械到石油钻探及采收设备,从航空航天器控制到船舶、火车、汽车等运输设备等等,液压传动与控制技术已成为现代机械工程制造业的基本要素和工程

控制关键技术之一。

液压传动与控制技术在各个领域和部门中应用的出发点不尽相同。例如,工程机械、矿山机械、起重运输机械、压力机械等领域采用液压传动技术的重要原因是取其结构简单、体积小,可输出大力、大功率;航空、航天等领域采用液压传动技术的主要原因是取其单位功率的重量轻、结构尺寸小;机床及其加工自动线上采用液压传动技术是取其能在工作过程中实现无级调速,易于实现频繁启动、制动及换向,易于实现自动化等等。

液压传动技术在各类机械行业中的应用见表 1-1。

表 1-1 液压传动在各类机械行业中的应用

行业名称	应 用 举 例	行业名称	应 用 举 例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机	轻工机械	打包机、注塑机
矿山机械	凿石机、开掘机、提升机、液压支架	灌装机械	食品包装机、真空镀膜机、化肥包装机
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机	汽车工业	高空作业车、自卸式汽车、汽车起重机
冶金机械	轧钢机、压力机、步进加热炉	铸造机械	砂型压实机、加料机、压铸机
锻压机械	液压机、模锻机、空气锤	纺织机械	织布机、抛砂机、印染机
机械制造	组合机床、车床、自动线	电子机械	IC 制造业

1.3 液压传动技术的发展概况

相对于机械传动来说,液压传动是一门新兴技术。如果从 17 世纪中叶帕斯卡(B. Pascal)提出静压传递原理、18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起,液压传动已有三百年的历史。然而,液压传动的真正推广使用却只是近四五十年之事。

19 世纪是液压传动技术走向工业应用的世纪。18 世纪以前奠定的流体力学、热力学、摩擦学、机构学及控制理论等科学基础及机器制造工艺基础,为 20 世纪流体传动与控制技术的发展提供了科学与技术条件。值得一提的是,1905 年美国人 Janney 首先将矿物油引入液体传动作为传动介质,并设计研制了第一台轴向柱塞泵及其液压驱动装置。液压油的引入,为改善液压元件的摩擦、润滑和泄漏,为提高液压系统工作压力创造了条件。由于没有成熟的液压元件,一些通用的机床设备及机械直到 20 世纪 30 年代才开始采用液压传动技术,而且很不普遍。第二次世界大战期间,大规模的武器生产促进了机械制造工业化、模块化概念与技术的形成和发展,车辆、舰船、航空、兵器等采用了反应快、动作准、功率大的液压传动装置,推动了液压元件功率密度和控制性能的提高,推动了液压技术的发展。战后,液压技术迅速转向民用,在机床、工程机械、汽车等行业中逐步推广。20 世纪 60 年代以后,随着原子能、空间技术、计算机技术等的发展,液压技术已渗透到国民经济的各个领域,得到了长足发展。

我国的液压工业起步较晚,开始于 20 世纪 50 年代,从仿制苏联产品起步,附属于机床制造业、农业机械制造业、工程机械制造业等主机行业,当时没有专业生产厂。自 1964

年从国外引进液压元件制造技术,同时自行设计液压产品以来,我国的液压元件生产已从低压到高压形成系列,并在各种机械设备上得到了广泛应用。

通过回顾历史可以看出,液压传动技术是机械设备中发展速度最快的技术之一。特别是近年来液压与微电子、计算机技术相结合,使液压技术进入了一个新的发展阶段,使未来的液压技术变得更为机械电子一体化、模块化、智能化和网络化。按照可持续发展理念,未来液压传动介质、材料、工艺及产品应符合生态与环保要求,符合可再生、可持续发展要求,新的液压传动介质将可能具有自洁净、自补偿(压敏、场敏、温敏)、自降解(光敏或生物降解),更适应传动、润滑和生态环境友好的要求。随着材料科学的发展,新材料、新工艺引入液压技术,将使液压传动与控制元器件加工精度及表面质量达到新的量级,从而使元器件效率、寿命得以数量级的提高。

第2章 液压系统工作介质

在液压传动系统中,石油型介质——液压油具有优良的润滑性能,在应用中占主导地位。此外还有各种特性不同的液压介质可供选择,以满足各类应用需要。为合理选择与使用液压油,必须了解它的一些重要特性。

2.1 液压油

2.1.1 液压油的主要物理性质

1. 密度与重度

均质液体中单位体积所具有的质量称为密度(ρ),即

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

式中 m ——液体的质量;

V ——液体的体积。

均质液体中单位体积所具有的重量称为重度(γ),即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2-2)$$

式中 G ——液体的重量;

V ——液体的体积。

因为 $G = mg$, 所以 $\gamma = \rho g$ 。

在国际单位制(SI)中,液体的密度单位用 kg/m^3 , 重度单位用 N/m^3 。

液体的密度和重度随着压力和温度的变化而变化。在一般工作条件下,压力和温度对石油型液压油的密度和重度的影响很小,可以忽略。在计算时可取 $\rho = 900 \text{ kg}/\text{m}^3$, $\gamma = 8.83 \times 10^3 \text{ N}/\text{m}^3$ 。

2. 压缩性

液体受压力作用体积缩小的性质叫压缩性。压缩性的大小用体积压缩系数 β 表示。其定义为:体积压缩系数即单位压力变化时,液体体积的相对变化量。其表示式为

$$\beta = -\frac{1}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (2-3)$$

式中 Δp ——液体压力的变化值；

ΔV ——液体体积在压力变化 Δp 时的变化量；

V ——液体的初始体积。

式中负号是因为压力增大时,液体的体积减小,反之则增大。为了使 β 值为正值,故加一负号。

液体体积压缩系数的倒数称为液体体积弹性模量,用 K 表示,即

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (2-4)$$

液压油的体积压缩系数 $\beta = (5 \sim 7) \times 10^{-10} (\text{Pa}^{-1})$, 其体积弹性模量 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^9 \text{ Pa}$ 。钢的体积弹性模量 $K = 2.06 \times 10^{11} \text{ Pa}$, 液压油的弹性模量为钢的 $\frac{1}{140} \sim \frac{1}{100}$ 。因此,在系统压力变化不大时,液压油的压缩性可以忽略不计,即认为液压油是不可压缩的。当系统压力变化较大,或研究液压系统的动态性能、设计液压伺服系统时,则必须考虑其压缩性。

在实际液压系统中,油中混有空气,使压缩性显著增加,体积弹性模量显著减小。

设封闭容器中压力增加 Δp 后,油液体积缩小了 ΔV_1 ,而容器体积增大了 ΔV_c ,这时油液的等效体积弹性模量 K' 的表达式为

$$K' = - \frac{\Delta p \cdot V}{\Delta V_1 + \Delta V_c}$$

则

$$\frac{1}{K'} = - \frac{\Delta V_1 + \Delta V_c}{\Delta p \cdot V} = - \frac{\Delta V_1}{\Delta p \cdot V} - \frac{\Delta V_c}{\Delta p \cdot V} = \frac{1}{K} + \frac{1}{K_c} \quad (2-5)$$

式中 K ——油液的体积弹性模量；

K_c ——封闭容器的体积弹性模量。

3. 黏性

液体在外力作用下流动时,由于液体分子间的内聚力而产生阻止液体分子相对运动的内摩擦力,液体的这种特性称为黏性。黏性的大小用黏度表示。黏度是液体最重要的物理特性之一,是选择液压油的主要依据。

在图 2-1 中,设两平行平板之间充满油液,上平板以速度 u_0 向右运动,下平板固定不动,紧贴在上平板的油液在附着力的作用下随上平板以相等的速度 u_0 向右运动,紧贴在下平板的油液保持静止不动。当两平板间距离较小时,中间油液层的速度按线性分布。由于各层的速度不同,运动快的流层拖动慢的流层,运动慢的流层阻滞运动快的流层。流层之间产生相互作用力,即内摩擦力。

实验测定,流层间的内摩擦力 F_r 与流层接触面积 A 及流层间相对运动速度 du 成正比,而与流层间的距离 dy 成反比,即

$$F_r = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-6)$$

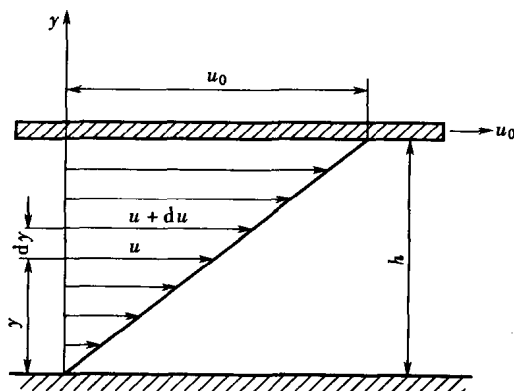


图 2-1 相对运动与黏性

式中 μ ——比例系数,称为动力黏度;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度,即流层相对速度对流层距离的变化率。

由式(2-6)知,对静止液体来说, $du = 0$,则 $F_r = 0$ 。所以静止液体不呈现黏性。

如以 $\tau = \frac{F_r}{A}$ 表示切应力,则有

$$\tau = \frac{F_r}{A} = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (2-7)$$

当 $\frac{du}{dy} > 0$ 时取“+”; $\frac{du}{dy} < 0$ 时,取“-”。

动力黏度 μ 为常数的液体称为牛顿液体;速度梯度变化而 μ 值也随之变化的液体称为非牛顿液体。除高黏度或含有特殊添加剂的油液外,一般液压油均可视为牛顿液体。

由式 2-7 可得动力黏度

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (2-8)$$

式(2-8)的物理意义是,液体在单位速度梯度下流动时单位面积上产生的内摩擦力。

在国际单位制(SI)中,动力黏度 μ 的单位是帕斯卡·秒(Pa·s),代号为帕·秒。在工程制中用泊(P)表示,即 $1\text{P} = 1\text{ dyn}\cdot\text{s}\cdot\text{cm}^{-2}$,或用厘泊(cP)表示。之所以称为动力黏度,是因为在其量纲中有动力学的要素——力的缘故。两种单位制的换算关系是: $1\text{ Pa}\cdot\text{s} = 10\text{ P} = 10^3\text{ cP}$ 。

动力黏度 μ 与液体密度 ρ 之比值叫做运动黏度(ν),即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-9)$$

在国际单位制(SI)中运动黏度 ν 以 m^2/s 为单位,在 CGS 制中以 cm^2/s 为单位,通常称为“沱”(Stokes), $1\text{ St} = 100\text{ cSt}$,又有

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^6 \text{ cSt} = 10^6 \text{ mm}^2/\text{s}$$

运动黏度并无特殊的物理意义,只是因为理论分析和计算中常遇到 $\frac{\mu}{\rho}$,为方便起见采用 ν 表示。它的量纲中只有长度与时间,故称其为运动黏度。

我国液压油一般都采用运动黏度表示。机械油的运动黏度直接表示在它的牌号上;每一种机械油的牌号,就是表示这种油在 40°C 时以 mm^2/s 为单位的运动黏度 ν 的平均值。例如,N32机械油,就表示其在 40°C 时的运动黏度平均值为 $32 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。ISO规定统一采用运动黏度。

动力黏度和运动黏度都难以直接测量。工程上常用的是便于测量的相对黏度。相对黏度又称条件黏度。根据测量条件不同,我国、俄罗斯和德国用恩氏黏度 $^\circ\text{E}$,美国用国际赛氏秒SSU,英国用商用雷氏秒。

恩氏黏度的测定方法如下:测定 200 cm^3 温度为 $t^\circ\text{C}$ 的被测液体在重力作用下流过直径为 2.8 mm 小孔所需的时间 t_1 ,然后测出同体积的蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需时间 t_2 。 t_1 与 t_2 的比值即为被测液体在 $t^\circ\text{C}$ 的恩氏黏度值,表示为

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-10)$$

工业一般以 20°C 、 50°C 和 100°C 作为测定恩氏黏度的标准温度,并相应地以符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 和 $^\circ\text{E}_{100}$ 表示之。

各种黏度的单位名称、符号、采用国家与换算公式见表2-1。

表2-1 各种黏度单位名称、符号、采用国家与换算公式

黏度单位名称	又 名	符 号	单 位	采用国家	与运动黏度(mm^2/s)之换算公式
动力黏度	黏性动力系数 (绝对黏度)	μ	厘 泊	俄	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
运动黏度	黏性运动系数 (绝对黏度)	ν	厘 沲 cst(苏) cst(英)	中、俄、英、美、日	
恩氏黏度	相对黏度	$^\circ\text{E}$ $^\circ\text{BY}(\text{俄})$	度	中、欧洲	$\nu = 7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}}$ (乌别洛德近似公式)
国际赛氏秒	通用赛波尔 特 秒	SSU (SUB)	秒	美	$\nu = 0.22\text{SSU} - \frac{180}{\text{SSU}}$
商用雷氏秒	雷氏 1° 秒	$^\circ\text{R}$ (RSS) ($\text{R}_s \cdot 1^\circ$)	秒	英	$\nu = 0.26^\circ\text{R} - \frac{172}{^\circ\text{R}}$

液压油黏度对温度的变化是十分敏感的,温度升高,油的黏度下降。不同种类的油的