



应用型高等学校规划教材

YINGYONGXING GAODENG XUEXIAO GUIHUA JIAOCAI

Yeya yu Qiya Chuandong 液压与气压传动

主 编 薛永杰 范素英

副主编 赵秋园 周凤敏 盖永革

主 审 仇桂玲



中国石化大学出版社
CHINA UNIVERSITY OF PETROLEUM PRESS

图样(913)目录编查井图

：管流一，能下英家第，杰永菊，海并和产已和路

8. 1103, 封盖出学大南国中

液压与气压传动

主 编 薛永杰 范素英
副主编 赵秋园 周凤敏 盖永革
主 审 仇桂玲

海并和产已和路：各 井
英家第 杰永菊：能 主
革永盖 敏凤周 园秋赵：能 主 幅
仇桂玲：审 主

表：薛永杰
书：仇桂玲

(28218028-2820 部申)吉 南 部表曹 国中：香 册 出
同公期查数并告一：支部曹 址：网

仇桂玲 12：薛永杰
青：香 册 印
中：香 行 发

(28218028-2820 部申)吉 南 部表曹 址：本 开
同公期查数并告一：支部曹 36：灾 册

元 00.88：付 宝

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/薛永杰,范素英主编.—东营:
中国石油大学出版社,2014. 8

ISBN 978-7-5636-4445-2

I. ①液… II. ①薛… ②范… III. ①液压传动—高
等学校—教材②气压传动—高等学校—教材 IV.

①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 161315 号

书 名: 液压与气压传动

主 编: 薛永杰 范素英

副 主 编: 赵秋园 周凤敏 盖永革

主 审: 仇桂玲

责任编辑: 曹秀丽 隋 芳(电话 0532—86981532)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@126.com

印 刷 者: 青岛炜瑞印务有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 86983437)

开 本: 185 mm×260 mm 印张: 19.5 字数: 448 千字

版 次: 2014 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 39.00 元



21 世纪是产品和技术不断推陈出新的创新的世纪。这些新产品、新技术综合了各方面的知识,因此不管处于什么岗位,良好扎实的基础是做好一切工作的根本。《液压与气压传动》就是基于这样一个良好的愿望编写的,希望学生通过学习,除掌握扎实的理论基础外,还能够培养分析、设计液压与气动基本回路的能力,通过相应的实训获得安装、调试、使用、维护液压与气压传动系统的能力,具有一定诊断和排除系统故障的能力。

本教材在编写过程中突出了以下特点:

1. 注重理论联系实际,以必需和够用为原则,力求做到理论深入浅出,知识前后衔接,总体系统完整,便于学生自学。
2. 各章节重点部分均以下划线标识,便于学生学习时抓住重点。
3. 各章节附练习题,便于学生巩固和深入探析所学知识。
4. 液压与气压传动符号严格按照现行国家标准标识。

本教材共分为 14 章,主要包括液压与气压传动的基础知识、液压与气压元件结构原理、液压与气压传动的基本回路及典型回路的分析应用、液压与气压系统设计以及故障分析及排除等。

本教材由青岛港湾职业技术学院薛永杰、范素英担任主编;青岛港湾职业技术学院赵秋园、青岛滨海学院机电学院周凤敏、中国石油大学(华东)机电工程学院盖永革担任副主编;由青岛港湾职业技术学院仇桂玲教授主审。本教材在三年的试用过程中几易其稿,根据授课教师的意见和建议不断修改完善,以期获得便于学生学习和教师授课的良好效果。

液压与气压传动技术的发展日新月异,尽管编者做了诸多努力,但是由于视野及学识有限,教材中不可避免地存在疏漏和不妥之处,敬请使用本教材的教师和同学提出宝贵意见和建议,便于修订时改进。所有的意见和建议请发送至 xueyj.qg@163.com。

编 者

2014 年 5 月 26 日

CONTENTS 目录

第一章 液压传动概述	1
第一节 液压传动概况	1
第二节 液压传动系统的工作原理及组成	2
第三节 液压传动的优缺点	5
第二章 液压传动的工作介质	7
第一节 流体的物理性质	7
第二节 工作介质的种类	10
第三节 工作介质的选择	12
第三章 流体力学基础	15
第一节 液体静力学	15
第二节 液体动力学	19
第三节 液体流动时的压力损失	25
第四节 液体流经缝隙和小孔时的流量	31
第五节 液压冲击与气穴现象	36
第四章 液压动力元件	42
第一节 液压泵概述	42
第二节 齿轮泵	46
第三节 叶片泵	53
第四节 柱塞泵	63
第五节 螺杆泵	69
第六节 液压泵的选用	71
第五章 液压执行元件	75
第一节 概 述	75
第二节 液压马达分类及性能参数	75

第三节	高速液压马达	77
第四节	低速液压马达	80
第五节	液压泵及液压马达的工作特点	83
第六节	液压缸类型及特点	84
第七节	液压缸的设计计算	92
第八节	液压缸的结构设计	94
第六章	液压辅助元件	101
第一节	滤油器	101
第二节	蓄能器	103
第三节	油箱	106
第四节	管件和管接头	108
第五节	热交换器	110
第七章	液压控制阀	112
第一节	方向控制阀	113
第二节	压力控制阀	132
第三节	流量控制阀	148
第四节	特殊用途液压阀	158
第八章	液压基本回路	173
第一节	调速回路	173
第二节	快速与速度换接回路	183
第三节	多缸工作控制回路	188
第四节	压力控制回路	192
第九章	典型液压系统及实例	201
第一节	液压系统的分类和分析方法	201
第二节	港口装卸机械系统	204
第三节	机床机械液压系统	215
第四节	装卸搬运机械液压系统	221
第十章	液压传动系统的设计和计算	228
第一节	液压传动系统的设计	228
第二节	液压系统设计举例	235
第十一章	气压传动基本元件	243
第一节	气源装置及辅助元件	243

第二节	气动执行元件·····	251
第三节	气动控制元件·····	255
第十二章	气动系统基本回路·····	265
第一节	方向控制回路·····	265
第二节	压力控制回路·····	266
第三节	速度控制回路·····	268
第四节	其他控制回路·····	270
第十三章	典型气压传动系统·····	274
第一节	气液动力滑台气压传动系统·····	274
第二节	气动机械手控制系统·····	275
第三节	气动夹紧控制系统·····	277
第四节	拉门自动开闭控制系统·····	278
第五节	公共汽车车门开闭控制气压传动系统·····	279
第十四章	液压与气压传动系统的安装与调试、使用及维护·····	281
第一节	液压传动系统的安装与调试、使用及维护·····	281
第二节	气压传动系统的安装与调试、使用及维护·····	294
参考文献	·····	302

第一章

液压传动概述

第一节 液压传动概况

一部完整的机器是由原动机、传动机构及控制部分、工作机(含辅助装置)组成的。原动机包括电动机、内燃机等。工作机是完成该机器工作任务的直接工作部分,如叉车的插刀、装载机的铲斗以及车床的车刀、卡盘等。由于原动机的功率和转速变化范围有限,为了适应工作机的工作力和工作速度变化范围较宽以及其他操纵性能的要求,在原动机和工作机之间设置了传动机构,其作用是把原动机输出功率经过变换后传递给工作机。

根据传递能量的工作介质的不同,传动机构通常分为机械传动、电气传动和流体传动机构。流体传动是以流体为工作介质进行能量转换、传递和控制的传动。它包括液压传动、液力传动和气压传动。

液压传动和液力传动均是以液体为工作介质来进行能量传递的传动方式。液压传动主要是利用液体的压力能来传递能量;而液力传动则主要是利用液体的动能来传递能量。由于液压传动有许多突出的优点,因此被广泛地应用于机械制造、工程建设、石油化工、交通运输、军事器械、矿山冶金、轻工、农机、渔业、林业等各方面。同时,也被应用到航天航空、海洋开发、核能工程和地震预测等各个工程技术领域。

相对于机械传动来说,液压传动是一门新学科。从 17 世纪中叶帕斯卡提出静压传动原理,18 世纪末英国制成第一台水压机算起,液压传动已有二三百年的历史了,只是由于早期技术水平和生产需求的不足,液压传动技术没有得到普遍的应用。随着科学技术的不断发展,对传动技术的要求越来越高,液压传动技术自身也在不断发展,特别是在第二次世界大战期间及战后,由于军事及建设需求的刺激,液压技术日趋成熟。

第二次世界大战期间,在兵器上采用了功率大、反应快、动作准的液压传动和控制装置,成功地将液压传动装置用于舰艇炮塔转向器,大大提高了兵器的性能,也大大促进了液压技术的发展。战后,液压技术迅速转向民用,出现了液压六角车床和磨床。随着各种标准的不断制订和完善及各类元件的标准化、规格化、系列化,液压技术在工程机械、农业机械、汽车制造等行业中推广开来。近几十年来,由于原子能技术、航空航天技术、控制技术、材料科学、微电子技术等学科的发展,再次将液压技术推向前进,使其发展成为包括传

动、控制、检测在内的一门完整的自动化技术,在国民经济的各个部门(如港口机械、矿山机械、工程机械、数控加工中心、冶金自动线等)都得到了应用。采用液压传动的程度已成为衡量一个国家工业水平的重要标志之一。

我国的液压工业开始于 20 世纪 50 年代,其产品最初只用于机床和锻压设备,后来才用到拖拉机等工程机械上。自 1964 年从外国引进一些液压元件生产技术,并自行设计液压产品以来,我国的液压件已在各种机械设备上得到广泛的使用。20 世纪 80 年代起我国加速了对国外先进液压产品和技术有计划引进、消化、吸收和国产化工作,以确保我国的液压技术能在产品质量、经济效益、研究开发等各个方面全方位地赶上世界先进水平。

当前,液压技术在实现高压、高速、大功率、高效率、低噪声、经久耐用、高度集成化等各项要求方面都取得了重大进展,在完善比例控制、伺服控制、数字控制等技术上也有许多新成就。此外,在液压元件和液压系统的计算机辅助设计、计算机仿真和优化以及微机控制等开发性工作方面,日益显示出显著的成绩。

微电子技术的进展渗透到液压技术中并与之相结合,创造出了很多高可靠性、低成本的微型节能元件,为液压技术在工业各部门中的应用开辟了更为广阔的前景。

最新技术的发展促进了液压技术不断创新,提高和改进元件和系统的性能,以满足日益变化的市场需求。液压技术的持续发展体现在如下重要特征上:

- (1) 提高元件性能,创制新型元件,且使其不断小型化和微型化。
- (2) 高度的组化、集成化和模块化。
- (3) 和微电子技术相结合,走向智能化。
- (4) 研发特殊传动介质,推进工作介质多元化。

第二节 液压传动系统的工作原理及组成

一、液压传动系统的工作原理

液压传动是基于帕斯卡原理,利用密闭系统中的受压液体来传递运动和动力的一种传动方式。根据帕斯卡静压传动原理,在一个密闭的容器内,液压力(中学课本称压强,液压传动中称压力)是等值传递的,根据执行元件的不同,输出的运动和动力也不相同。对于液压缸来讲,输出的是直线运动速度和推拉力;对于马达和摆动缸来讲,输出的是转矩和旋转角速度。

(一) 液压千斤顶的工作原理

图 1-1 为液压千斤顶的工作原理图,图中小缸体 2、小活塞 3、单向阀 4 与 7 和杠杆机构等组成手动液压泵;大缸体 9、大活塞 8 组成升举液压缸;11 为截止阀,12 为油箱。假设活塞能在缸体内滑动,且液体不会通过配合处产生泄漏。当杠杆上提时,小活塞 3 上移,小活塞 3 和小缸体 2 之间形成的密封腔的容积增大,腔内压力下降,形成局部真空,这时单向阀 7 关闭,单向阀 4 被打开,于是小缸体 2 下腔从油箱 12 中吸油。当杠杆下压时,

小活塞 3 下降,小缸体 2 和小活塞 3 形成的密封腔的容积减小,压力升高,这时由于单向阀 4 关闭,而单向阀 7 被打开,小缸体的油液被压向液压缸 9 和大活塞 8 形成的密封腔,于是驱动活塞 8 使重物 W 的位置升高。当再次向上提升小活塞 3 时,小缸体 2 又经单向阀 4 从油箱中吸油;小活塞 3 压下时,油腔的油液再次经单向阀 7 向大液压缸 9 下端的密封腔供油,大活塞 8 又升高一段距离。如此反复使小活塞 3 作上、下运动,大活塞 8 便作间断的上升运动,将重物 W 的位置不断升高。截止阀 11 在千斤顶工作时是关闭的,如果打开阀 11,则大缸体内油液即和油箱连通,大活塞 8 可以在外力和自重的作用下实现回程,所以阀 11 实际上是一个控制大活塞 8 运动方向的控制阀。以上是液压千斤顶的工作过程。

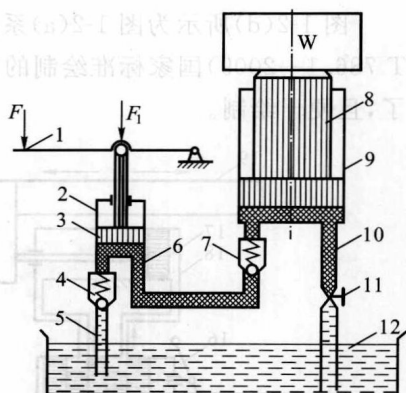


图 1-1 液压千斤顶工作原理

- 1—杠杆;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

(二) 磨床的工作原理

图 1-2 为磨床工作台液压传动系统工作原理图。液压泵 4 在电动机(图中未画出)的带动下旋转,油液由油箱 1 经过滤器 2 被吸入液压泵 4,由液压泵输入的压力油通过手动换向阀 9、节流阀 13、换向阀 15 进入液压缸 18 的左腔,推动活塞 17 和工作台 19 向右移动,液压缸 18 右腔的油液经换向阀 15 排回油箱。如果将换向阀 15 转换成如图 1-2(b)所示的状态,则压力油进入液压缸 18 的右腔,推动活塞 17 和工作台 19 向左移动,液压缸 18 左腔的油液经换向阀 15 排回油箱。工作台 19 的移动速度由节流阀 13 来调节。当节流阀开大时,进入液压缸 18 的油液增多,工作台的移动速度增大;当节流阀关小时,工作台的移动速度减小。液压泵 4 输出的压力油除了进入节流阀 13 以外,其余的打开溢流阀 7 流回油箱。如果将手动换向阀 9 转换成如图 1-2(c)所示的状态,液压泵输出的油液经手动换向阀 9 流回油箱,这时工作台停止运动,液压系统处于卸荷状态。

二、液压传动系统的图形符号

图 1-2 所示的是一种半结构式的液压系统工作原理图,它具有直观性强、容易理解的优点,当液压系统发生故障时,根据原理图检查十分方便,但图形比较复杂,绘制比较麻烦。我国已经制定了用规定的图形符号来表示液压原理图中的各元件和连接管路的国家标准,即《流体传动系统及元件图形符号和回路图》(GB/T 786.1—2009)。该标准有以下几条基本规定:

(1) 符号只表示元件的职能、连接系统的通路,不表示元件的具体结构和参数,也不表示元件在机器中的实际安装位置。

(2) 元件符号内的油液流动方向用箭头表示,线段两端都有箭头的,表示流动方向可逆。

(3) 符号均以元件的静止位置或中间零位置表示,当系统的动作另有说明时,可作例外。

图 1-2(d)所示为图 1-2(a)系统根据《流体传动系统及元件图形符号和回路图》(GB/T 786.1—2009)国家标准绘制的工作原理图,使用这些图形符号可使液压系统图简单明了,且便于绘制。

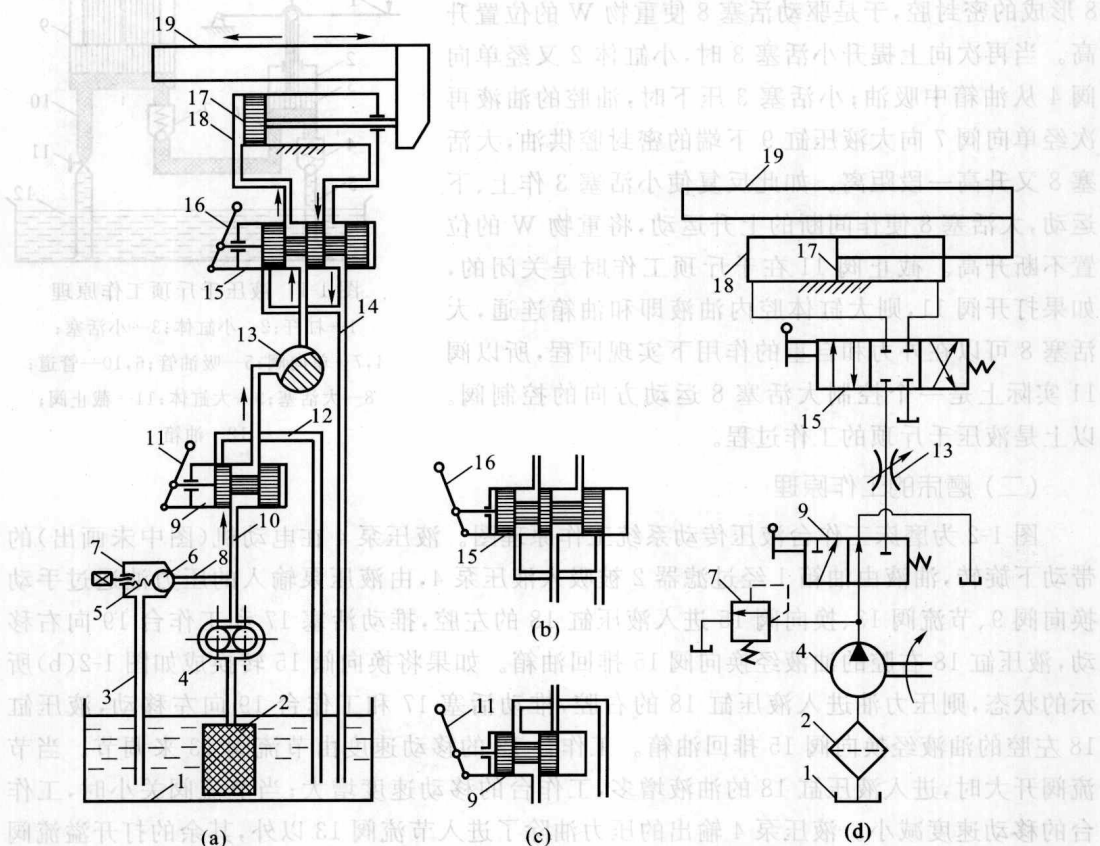


图 1-2 磨床工作台液压传动系统工作原理

1—油箱;2—过滤器;3,12,14—回油管;4—液压泵;5—弹簧;6—钢球;7—溢流阀;8,10—压力油管;
9—手动换向阀;11,16—换向手柄;13—节流阀;15—换向阀;17—活塞;18—液压缸;19—工作台

三、液压传动系统的组成

从上述例子可以看出,液压传动是以液体作为工作介质来进行工作的,一个完整的液压传动系统由以下几部分组成:

1. 动力元件

动力元件是将原动机所输出的机械能转换成液体压力能的元件,其作用是向液压系统提供压力油。液压泵是液压系统的核心。

2. 执行元件

执行元件是把液体压力能转换成机械能以驱动工作机构的元件,包括液压缸和液压马达。

3. 控制元件

控制元件包括压力、方向、流量控制阀,是对系统中油液压力、方向、流量进行控制和

调节的元件。如图 1-2 中换向阀 15 即属控制元件。

4. 辅助元件

上述三个组成部分以外的其他元件(如管道、管接头、油箱、滤油器等)称为辅助元件。

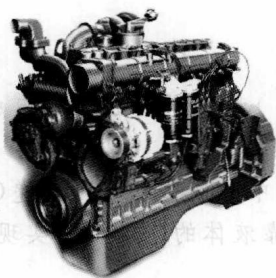
5. 工作介质

对于液压系统,工作介质为液压油;气压系统的工作介质为压缩空气。

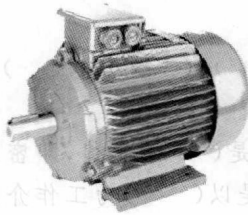
第三节 液压传动的优缺点

一、液压传动系统的主要优点

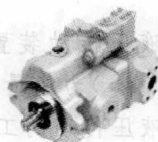
图 1-3 为同为 300 kW 的内燃机、电动机、液压马达的外形尺寸与质量对比。可以看出,在功率相等的情况下,液压马达的外形尺寸最小,重量也最轻(约为电动机和内燃机的 1/7)。



(a) 内燃机质量约 1 500 kg



(b) 电动机质量约 1 600 kg



(c) 液压马达质量约 210 kg

图 1-3 300 kW 的内燃机、电动机和液压马达的外形与质量对比

液压传动元件与机械传动、电气传动元件相比还有以下主要优点:

- (1) 在同等功率情况下,液压执行元件体积小、重量轻、结构紧凑。
- (2) 液压传动的各种元件可根据需要方便、灵活地布置。
- (3) 液压装置工作比较平稳,由于重量轻、惯性小、反应快,液压装置易于实现快速启动、制动和频繁的换向。
- (4) 操纵控制方便,可实现大范围的无级调速(调速范围达 2 000 : 1),它还可以在运行的过程中进行调速。
- (5) 一般采用矿物油为工作介质,相对运动面可自行润滑,使用寿命长。
- (6) 容易实现直线运动。
- (7) 既易于实现机器的自动化,又易于实现过载保护,当采用电液联合控制甚至计算机控制后,可实现大负载、高精度、远程自动控制。
- (8) 液压元件实现了标准化、系列化、通用化,便于设计、制造和使用。

二、液压传动系统的主要缺点

液压传动系统的缺点主要是:

- (1) 液压传动不能保证严格的传动比,这是由于液压油的可压缩性和易泄漏性造成的。
- (2) 工作性能易受温度变化的影响,因此不宜在很高或很低的温度条件下工作。
- (3) 由于流体流动的阻力损失和泄漏较大,所以效率较低。如果处理不当,泄漏不仅污染场地,还可能引起火灾和爆炸事故。
- (4) 为了减少泄漏,液压元件在制造精度上要求较高,因此它的造价高,且对油液的污染比较敏感。

总的说来,液压传动的优点比较突出,它的一些缺点有的现已大为改善,有的将随着科学技术的发展而进一步得到改进。

思考题

1-1 液压传动装置由()、()、()、()和()五部分组成,其中()和()为能量转换装置。

1-2 液压传动的工作原理是()定律,即密封容积中的液体既可以传递(),又可以传递()。液压传动是以()为工作介质,依靠液体的()来实现运动和动力传递的一种传动方式。

1-3 将发动机输入的机械能转换为液体的压力能的液压元件是()元件。

1-4 液压符号只表示元件的()、连接系统的(),不表示元件的具体结构和参数,也不表示元件在机器中的实际()位置。

1-5 液压元件符号内的油液流动方向用()表示,线段两端都有箭头的,表示流动方向()。

1-6 液压符号均以元件的()位置或()位置表示,当系统的动作另有说明时,可作例外。

1-7 液压传动与其他传动方式相比,有哪些优缺点?

1-8 根据图 1-2(d)画出液压泵、液压缸、节流阀、过滤器的图形符号。

第二章

液压传动的工作介质

第一节 流体的物理性质

液压传动的工作介质是液压油,此外还有乳化型传动液和合成型传动液等。流体本身的性质直接影响流体的运动规律,因此应首先介绍流体的物理特性。

一、流体的密度

单位体积流体的质量称为该流体的密度,即:

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

式中 ρ ——流体的密度;

V ——流体体积;

m ——流体质量。

二、流体的黏性

(一) 黏性的概念

流体在外力作用下流动时,由于流体分子与固体壁面之间的附着力和分子之间内聚力的作用,导致流体分子间产生相对运动,从而在流体中产生内摩擦力。流体在流动时产生内摩擦力的性质称为黏性。

黏性使流动流体内部各处的速度不相等,以图 2-1 为例,若两平行板间充满流体,下平板不动,而上平板以速度 u_0 向右平动。由于流体的黏性,使紧靠下平板和上平板的流体层速度分别为 0 和 u_0 ,而中间各流层的速度则从上到下按递减规律呈线性分布。

实验测定表明:流体流动时相邻层间的摩擦力 F 与流层接触面积 A 、流层间相对运动的速度梯度 du/dy 成正比(牛顿液体内摩

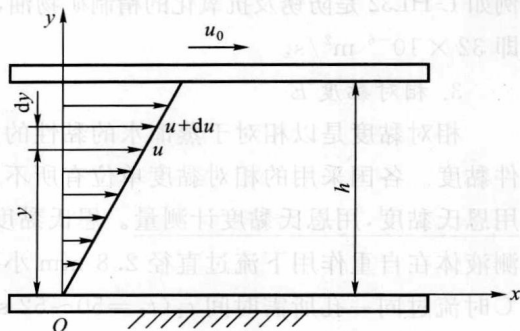


图 2-1 液体的黏性示意图

擦定律)。

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

若以单位面积上的摩擦力 τ (切应力) 来表示, 则:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-3)$$

式中 μ ——比例系数, 又称为动力黏度;

du/dy ——速度梯度, 即相对运动速度对液层间距离的变化率, 或称剪切率。

静止的液体中, 由于速度梯度 $du/dy = 0$, 所以内摩擦力等于 0, 因此液体在静止状态不呈现黏性。

(二) 液体的黏度

液体黏性的大小用黏度表示。常用的黏度有三种, 即动力黏度、运动黏度和相对黏度。

1. 动力黏度 μ

由式(2-3)可知, μ 是表征液体黏性的内摩擦系数, 可由下式表示:

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy} \quad (2-4)$$

由此可知, 动力黏度 μ 的物理意义是: 当速度梯度等于 1 时, 接触流层间单位面积上的内摩擦力 τ , 即为动力黏度。

动力黏度 μ 的法定(SI 制)计量单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒) 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ (牛·秒/米²)。

2. 运动黏度 ν

动力黏度 μ 和该流体密度 ρ 的比值称为运动黏度, 即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-5)$$

在 SI 制中, 运动黏度的单位为 m^2/s (米²/秒)。由于该单位偏大, 实际上常用 cm^2/s (厘米²/秒) 或 mm^2/s (毫米²/秒)。 cm^2/s 通常称为 St (斯); mm^2/s 通常称为 cSt (厘斯), 工程上常用 cSt。换算关系: $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} = 10^6 \text{ cSt}$ 。

运动黏度 ν 没有明确的物理意义, 但国际标准化组织(ISO)规定统一采用运动黏度来表示流体黏度, 液压油的牌号就是采用液压油在 40 °C 时的运动黏度的中心值表示的。例如 L-HL32 是防锈及抗氧化的精制矿物油, 该油在 40 °C 时的运动黏度中心值为 32 mm^2/s , 即 $32 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

3. 相对黏度 $^\circ E$

相对黏度是以相对于蒸馏水的黏性的大小来表示该液体的黏性的。相对黏度又称条件黏度。各国采用的相对黏度单位有所不同, 有的用赛氏黏度, 有的用雷氏黏度, 我国采用恩氏黏度, 用恩氏黏度计测量。恩氏黏度的测定方法如下: 测定某一温度的 200 cm^3 被测液体在自重作用下流过直径 2.8 mm 小孔所需时间 t_1 , 然后测出同体积的蒸馏水在 20 °C 时流过同一孔所需时间 t_2 ($t_2 = 50 \sim 52 \text{ s}$), t_1 与 t_2 的比值即为流体的恩氏黏度值。恩氏黏度用符号 $^\circ E$ 表示。被测液体在温度 t 时的恩氏黏度用符号 $^\circ E_t$ 表示。

$$^{\circ}E_t = t_1/t_2 \quad (2-6)$$

工业上一般以 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 $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 和 $^{\circ}E_{100}$ 来表示。恩氏黏度和运动黏度可利用下式进行换算:

$$\nu = \left(7.31^{\circ}E_t - \frac{6.31}{^{\circ}E_t} \right) \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2-7)$$

(三) 黏度与温度的关系

液压油的黏度对温度的变化很敏感,随着油液温度升高,黏度将明显下降。油的黏度对温度变化的性质称为黏温特性。液压油的黏度直接影响液压系统的工作性能,因此希望油液的黏度随温度的变化越小越好。不同种类的液压油有不同的黏温特性,黏温特性好的液压油,黏度随温度变化较小,因而油温变化对液压系统性能的影响较小。液压油黏度与温度的关系可以用下式表示:

$$\mu_t = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \approx \mu_0 (1 - \lambda \Delta t) \quad (2-8)$$

式中 μ_t ——油液在温度 t 时的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

μ_0 ——油液在温度 t_0 时的动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

λ ——油液的黏温系数,对于一般油液取 $\lambda = (1.8 \sim 3.6) \times 10^{-2}, 1/^{\circ}\text{C}$ 。

通常液压油的黏温特性可以用黏度指数 VI 来表示, VI 值越大,表示油液黏度随温度的变化率越小,即黏温特性越好。一般液压油要求 VI 值在 90 以上,精制的液压油及加有添加剂的液压油的 VI 值可大于 100。液压系统的工作温度一般希望保持在 30~50 °C 的范围之内,最高不超过 65 °C,最低不低于 15 °C。

(四) 黏度与压力的关系

除温度对黏度有影响外,压力对黏度也有影响。油液所受压力增大时,其内聚力增大,黏度也随之增大。油液的黏度与压力之间的关系称为黏压特性,不同液压油有不同的黏压特性。对于一般的液压系统,当工作压力低于 10 MPa 时,压力对黏度的影响可忽略不计;但当压力较高或压力变化较大时,油液黏度的变化则不容忽视。石油型液压油的黏度与压力的关系可用下列公式表示:

$$\nu_p = \nu_0 (1 + 0.003p) \quad (2-9)$$

式中 ν_p ——液压油在压力 p (Pa) 时的运动黏度;

ν_0 ——液压油在相对压力为 0 (Pa) 时的运动黏度。

(五) 黏度与液阻的关系

在液压传动系统中,为了控制执行元件(例如液压缸或马达)的运动,常用节流阀或调速阀来调节流量,从而调节执行元件的速度。其本质是调节液压油通过节流口的液体阻力(液阻)来调整通过的流量的大小。

由于液压油具有黏性,液阻无处不在,表现为管路的阻力、经过阀口的阻力等。类似于电器的电阻一样,有液流通过液阻以后,在液阻两端产生压差。我们可以利用此压差来控制阀芯的开与关,也可以利用可变阀芯(如减压阀的阀芯等)开口度的大小来改变液阻的大小,以稳定局部的压力。一般来讲,节流口开口度越大,则液阻越小。根据对可变液阻的控制,液阻变化又可分为两种情况:一种是液阻随外控液压力的增加而增加,如减压

阀的主阀芯处液阻;另一种则随外控液压力的增加而减少,如溢流阀的主阀芯处液阻。

三、液体的可压缩性

液体受压力作用而发生体积变化的性质称为液体的可压缩性。一般情况下,液体的可压缩性很小,在有些场合下可以忽略不计。但在高压下或受压体积较大以及对液压系统进行动态分析时,就要考虑液体的可压缩性。

液体受到压力作用时,其相对压缩量与压力增量成正比,即:

$$-\frac{\Delta V}{V} = K \Delta p \quad (2-10)$$

式中 V ——增压前液体的体积, m^3 ;

ΔV ——压力增加 Δp 时液体体积的变化量, m^3 ;

Δp ——压力的变化量, Pa ;

K ——液体的压缩率或称为液体的压缩系数, m^2/N 。

式(2-10)亦可写成下式:

$$K = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V} \quad (2-11)$$

当压力增量 Δp 增大时,液体体积总是减小,故 ΔV 为负值。为了使 K 为正值,因此在上式中加了一个负号。压缩率 K 的物理意义是:当液体所受的压力增加一个单位的增量时,其体积的相对变化率。常用液压油的压缩率 $K = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 。液体的压缩率 K 的倒数称为液体的体积弹性模量,用 E_0 表示。其值为:

$$E_0 = \frac{1}{K} \quad (2-12)$$

一般液压油的体积弹性模量为 $(1.4 \sim 1.9) \times 10^3 \text{ MPa}$,而钢的弹性模量为 $(2 \sim 2.1) \times 10^5 \text{ MPa}$ 。两者相比,液体的可压缩性比钢大 $100 \sim 150$ 倍。但是,对于一般液压系统,由于压力变化引起的液体体积变化不大,故可认为液体是不可压缩的。当混入空气时,其可压缩性将显著增加,并将严重影响液压系统的工作性能,故应限制液体中空气的含量至最低值。在有动态性能要求或压力变化很大的高压系统中,应考虑液体的压缩性影响,故实际计算时,弹性模量取 $E_0 = 0.7 \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

四、液体的其他性质

液压系统的工作介质还有许多性质,物理性质有润滑性、缓蚀性、闪点、凝点、抗燃性、抗凝性、抗泡沫性以及抗乳化性等;化学性质有热稳定性、氧化稳定性、水解稳定性和对密封材料不侵蚀性、不溶胀性等,以上均可在液压工程手册中查到。

第二节 工作介质的种类

液压传动介质按照 GB/T 7631.2—1987(等效采用 ISO 6743/4)进行分类,工作介质