

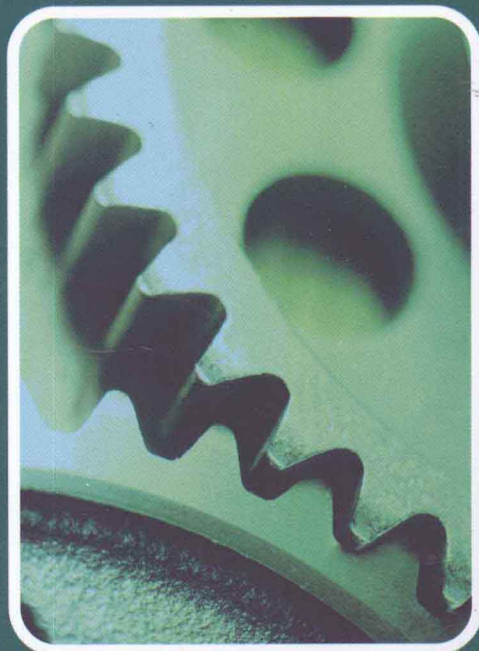


全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材

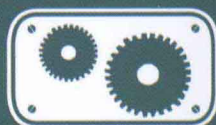
丛书顾问 李培根 林萍华

液压传动

张平格 主编



Y E Y A C H A O D O N G



J I X I E L E I * S H I E R W U



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材

液 压 传 动

主 编 张平格

副主编 卢军民 熊美华 苏学满

参 编 王 蕊 荀 杰 张维民 肖 鹏

华中科技大学出版社

中国·武汉

内 容 简 介

本书共分 11 章,分别介绍了液压流体力学、液压元件(如液压泵、液压马达、液压缸、开关控制阀、比例阀、逻辑阀和辅助元件等)的结构原理、液压基本回路、液压系统及其设计计算、液压系统的故障诊断与维修等内容。

针对目前高校的专业设置口径越来越宽、学生的就业范围也越来越广的实际情况,本书的内容兼顾了多种机械液压传动系统的特点及液压传动与控制技术在实际工程技术中的应用。

本书可作为高等学校机械类专业的教材,也可供有关科研、设计单位及工厂等有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动/张平格 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2013.7
ISBN 978-7-5609-8493-3

I. 液… II. 张… III. 液压传动-高等学校-教材 IV. TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 276980 号

液 压 传 动

张平格 主编

策划编辑:俞道凯

责任编辑:刘 勤

封面设计:范翠璇

责任校对:刘 竣

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)81321915

录 排:武汉市洪山区佳年华文印部

印 刷:武汉科源设计印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:16.75

字 数:439 千字

版 次:2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:32.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究

全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材

序

“十二五”时期是全面建设小康社会的关键时期,是深化改革开放、加快转变经济发展方式的攻坚时期,也是贯彻落实《国家中长期教育改革和规划纲要(2010—2020年)》的关键五年。教育改革与发展面临着前所未有的机遇和挑战。以加快转变经济发展方式为主线,推进经济结构战略性调整、建立现代产业体系,推进资源节约型、环境友好型社会建设,迫切需要进一步提高劳动者素质,调整人才培养结构,增加应用型、技能型、复合型人才的供给。同时,当今世界处在大发展、大调整、大变革时期,为了迎接日益加剧的全球人才、科技和教育竞争,迫切需要全面提高教育质量,加快拔尖创新人才的培养,提高高等学校的自主创新能力,推动“中国制造”向“中国创造”转变。

为此,近年来教育部先后印发了《教育部关于实施卓越工程师教育培养计划的若干意见》(教高[2011]1号)、《关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》(教高[2011]5号)、《关于“十二五”期间实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”的意见》(教高[2011]6号)、《教育部关于全面提高高等教育质量的若干意见》(教高[2012]4号)等指导性意见,对全国高校本科教学改革和发展方向提出了明确的要求。在上述大背景下,教育部高等学校机械学科教学指导委员会根据教育部高教司的统一部署,先后起草了《普通高等学校本科专业目录机械类专业教学规范》、《高等学校本科机械基础课程教学基本要求》,加强教学内容和课程体系改革的研究,对高校机械类专业和课程教学进行指导。

为了贯彻落实教育规划纲要和教育部文件精神,满足各高校高素质应用型高级专门人才培养要求,根据《关于“十二五”普通高等教育本科教材建设的若干意见》文件精神,华中科技大学出版社在教育部高等学校机械学科教学指导委员会的指导下,联合一批机械学科办学实力强的高等学校、部分机械特色专业突出的学校和教学指导委员会委员、国家级教学团队负责人、国家级教学名师组成编委

会,邀请来自全国高校机械学科教学一线的教师组织编写全国普通高等学校机械类“十二五”规划系列教材,将为提高高等教育本科教学质量和人才培养质量提供有力保障。

当前经济社会的发展,对高校的人才培养质量提出了更高的要求。该套教材在编写中,应着力构建满足机械工程师后备人才培养要求的教材体系,以机械工程知识和能力的培养为根本,与企业对机械工程师的能力目标紧密结合,力求满足学科、教学和社会三方面的需求,在结构上和内容上体现思想性、科学性、先进性,把握行业人才要求,突出工程教育特色。同时注意吸收教学指导委员会教学内容和课程体系改革的研究成果,根据教学指导委员会颁布的各课程教学专业规范要求编写,开发教材配套资源(习题、课程设计和实践教材及数字化学习资源),适应新时期教学需要。

教材建设是高校教学中的基础性工作,是一项长期的工作,需要不断吸取人才培养模式和教学改革成果,吸取学科和行业的新知识、新技术、新成果。本套教材的编写出版只是近年来各参与学校教学改革的初步总结,还需要各位专家、同行提出宝贵意见,以进一步修订、完善,不断提高教材质量。

谨为之序。

国家级教学名师

华中科技大学教授、博导

2012年8月



前 言

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,编者在参阅了大量有关文献的基础上,结合多年的教学实践经验,删繁就简,去旧添新,本着将基本观点、基本理论、基本方法与实际应用相结合的原则,并考虑到本专业的通用性特点,力求体现液压技术的先进性和系统性。

本书为高等学校机械工程类专业的教材,也可供有关科研设计单位及工厂等有关技术人员参考。

本书内容包括:液压流体力学、液压元件(如液压泵、液压马达、液压缸、液压控制阀和辅助元件等)的结构原理、液压基本回路、液压系统、液压系统的设计计算、液压系统的故障诊断与排除等。

全书共 11 章,由河北工程大学张平格任主编,河北工程大学卢军民、湖南科技大学熊美华、安徽工程大学苏学满任副主编,河北工程大学王蕊、荀杰、张维民及湖南涉外经济学院肖鹏参编。张平格编写第 6、9 章,卢军民编写第 4、5 章,熊美华编写第 2、3 章,苏学满编写第 8、10 章,王蕊、荀杰、张维民、肖鹏编写第 1、7、11 章。张平格对全书进行统稿。

在本书的编写过程中,参考了大量文献,在此谨向有关作者表示衷心感谢;同时,在本书的编写过程中得到了有关领导和相关老师的大力支持和帮助,在此也表示感谢。

由于编者水平有限,书中难免有不少错误和缺点,敬请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 2 月

目 录

第 1 章 液压传动概述	(1)
1.1 液压传动的基本工作原理及系统组成	(1)
1.2 液压传动的优缺点及其发展方向	(3)
思考题与习题	(5)
第 2 章 液压传动中的工作液体	(6)
2.1 液体的主要物理性质	(6)
2.2 液压传动中的工作介质	(9)
2.3 工作介质的污染及其控制	(12)
2.4 液压冲击与气穴、气蚀现象	(15)
思考题与习题	(17)
第 3 章 液压流体力学	(18)
3.1 液体静力学	(18)
3.2 液体运动学	(21)
3.3 液体动力学	(23)
3.4 流动阻力	(31)
3.5 孔口和缝隙液流	(37)
思考题与习题	(40)
第 4 章 液压泵和液压马达	(42)
4.1 概述	(42)
4.2 液压泵和液压马达的主要性能参数	(43)
4.3 齿轮泵	(47)
4.4 叶片泵	(52)
4.5 柱塞泵	(58)
4.6 螺杆泵	(67)
4.7 液压马达	(68)
思考题与习题	(74)
第 5 章 液压缸	(76)
5.1 液压缸的类型	(76)
5.2 液压缸的结构	(80)
5.3 液压缸的设计	(82)
思考题与习题	(86)
第 6 章 液压控制阀	(87)
6.1 概述	(87)
6.2 压力控制阀	(88)
6.3 流量控制阀	(98)

6.4	方向控制阀	(104)
6.5	电液比例阀	(115)
6.6	逻辑阀	(119)
	思考题与习题	(126)
第 7 章	液压传动系统辅件	(127)
7.1	油箱	(127)
7.2	滤油器	(129)
7.3	蓄能器	(134)
7.4	油管及管接头	(136)
7.5	密封装置	(137)
7.6	冷却器和加热器	(140)
	思考题与习题	(142)
第 8 章	液压基本回路	(143)
8.1	压力控制回路	(143)
8.2	速度控制回路	(148)
8.3	方向控制回路	(156)
8.4	多执行元件工作控制回路	(158)
8.5	其他回路	(161)
	思考题与习题	(162)
第 9 章	液压传动系统	(165)
9.1	液压系统分类	(165)
9.2	典型液压系统	(166)
	思考题与习题	(176)
第 10 章	液压系统的设计计算	(178)
10.1	明确系统的设计要求	(178)
10.2	进行工况分析、确定主要参数	(178)
10.3	拟定液压系统原理图	(181)
10.4	液压元件的计算与选择	(182)
10.5	液压系统的性能验算	(184)
10.6	液压系统的设计计算举例	(185)
	思考题与习题	(190)
第 11 章	液压系统故障诊断、维修及保养	(191)
11.1	液压系统故障诊断步骤与方法	(191)
11.2	常用液压元件故障原因与消除对策	(201)
11.3	液压回路的故障诊断与排除	(219)
11.4	液压系统常见故障及排除方法	(234)
	思考题与习题	(248)
附录 A	常用液压元件图形符号	(249)
	部分思考题与习题参考答案	(254)
	参考文献	(255)

第 1 章 液压传动概述

本章要求:掌握液压传动的基本工作原理、液压传动的主要工作特征及液压传动系统的组成和各部分的作用;了解液压传动系统的优缺点及其发展方向。

一部完整的机器一般主要由三部分组成:原动机、传动机构和工作机构。

原动机为机器提供动力,如电动机、内燃机等。

工作机构是机器完成工作任务的直接工作部分,如剪床的剪刀,车床的刀架、车刀、卡盘,工程起重机的起升机构、回转机构等。

传动机构是原动机和工作机构的桥梁,通过传动机构改变原动机输出轴上的转矩和转速,以适应对机器工作性能的要求。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。它包括液体传动和气体传动。液体传动又包括液力传动和液压传动。

液力传动主要是利用液体的动能进行能量转换、传递和控制的传动。

液压传动主要是利用液体的压力能进行能量转换、传递和控制的传动。

1.1 液压传动的基本工作原理及系统组成

1.1.1 液压传动的基本工作原理

以液压千斤顶为例,说明液压传动的工作原理及其系统组成。

图 1-1 所示为液压千斤顶工作原理图。

当手柄 1 带动活塞向上运动时,手动泵 2 的容积增大形成局部真空,使排油单向阀 3 关闭,油箱 5 中的液体在大气压力的作用下,从油箱经管道及吸油单向阀 4 进入手动泵 2,此为吸油过程;当手柄 1 带动活塞下压时,吸油单向阀 4 关闭,手动泵 2 中的液体推开排油单向阀 3 经管道进入液压缸 7,迫使活塞克服外负载 G 向上运动从而对外做功,此为排油过程;当手动泵 2 的活塞在手柄 1 的带动下不断上下往复运动时,负载 G 就不断上升;当需要液压缸 7 的活塞停止时,使手柄 1 停止运动,此时排油单向阀 3 在液压力作用下关闭,液压缸 7 的活塞就自锁不动。工作时截止阀 6 关闭,当需要液压缸 7 的活塞放下时,打开此阀,液体在重力作用下经此阀流回油箱 5。这就是液压千斤顶的工作原理。

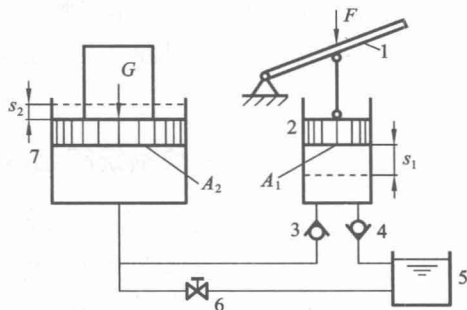


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

1—手柄;2—手动泵;3—排油单向阀;
4—吸油单向阀;5—油箱;6—截止阀;7—液压缸

1.1.2 液压传动的主要工作特征

1. 力(或力矩)的传递靠液体压力来实现

在图 1-1 中,手动(液压)泵 2 的活塞面积为 A_1 ,驱动力为 F_1 ,液体压力为 p_1 ,液压缸 7 的

活塞面积为 A_2 , 负载力为 G , 液压力为 p_2 。

稳态时, 手动(液压)泵 2 的活塞和液压缸 7 的活塞的静力平衡方程式为

$$\begin{cases} F_1 = p_1 A_1 \\ G = p_2 A_2 \end{cases} \quad (1-1)$$

如不考虑管道的压力损失, 则

$$p_1 = p_2 \quad (1-2)$$

于是输出力, 即所能克服的外负载为

$$G = p_2 A_2 = p_1 A_1 \quad (1-3)$$

式(1-3)即为力传递的基本方程式。由此可知

$$p_1 = \frac{G}{A_2} = p_2 \quad (1-4)$$

从以上分析可得出以下结论:

液压泵的工作压力 p_1 取决于外负载(执行元件的结构尺寸一定)。

2. 液压泵速度(或转速)的传递遵循液体“容积变化相等”的原则

图 1-1 中, s_1 表示液压泵 2 活塞的行程, s_2 表示液压缸 7 活塞的行程。如不考虑泄漏、液体的压缩及管路的变形, 则

$$A_1 s_1 = A_2 s_2 \quad (1-5)$$

将式(1-5)两端同时除以时间 t , 即 $\frac{A_1 s_1}{t} = \frac{A_2 s_2}{t}$, 可得 $A_1 v_1 = A_2 v_2$

$$v_2 = \frac{A_1}{A_2} v_1 = \frac{Q_1}{A_2} \quad (1-6)$$

式(1-6)即为运动速度传递的基本方程式。由此可得出如下结论: 执行元件的运动速度(或转速)只与输入流量大小有关(执行元件的结构尺寸一定), 理论上讲与外负载无关。

在实际工作中, 泄漏是不可避免的, 泄漏量与液体压力有关, 压力越大, 泄漏越多, 因此, 当负载发生变化时, 由于泄漏量的变化, 实际流量将发生变化, 从而影响执行元件运动速度的变化。

1.1.3 液压传动系统的组成

图 1-2 所示为机床工作台液压传动示意图。

要求工作台 12 实现慢速向右进给, 然后向左快速退回的动作循环。

图 1-2 中液压缸 9 的活塞 10 通过活塞杆 11 与工作台 12 固定在一起, 液压缸 9 的缸体固定在床身上, 图示电磁换向阀 6 处于不通电状态。当电磁换向阀 6 通电换向时, 液压泵 3 排出的液体通过电磁换向阀 6 的左位直接输入液压缸 9 的左腔, 使其容积不断扩大, 推动活塞和工作台向右作进给运动。这时, 液压缸 9 右腔的容积缩小回液, 它排出的液体经管道及节流阀 8、电磁换向阀 6 返回油箱 1。调节节流阀 8 的阀口通流面积, 便可控制液压缸右腔的回液流量, 达到控制进给速度的目的。

如果令电磁阀断电, 则阀芯便在弹簧力的作用下左移, 使电磁换向阀 6 处于右位工作。这时液压泵排出的液体经过电磁换向阀 6 的右位、单向阀 7 输入液压缸右腔, 推动活塞杆和工作台向左返回。而其左腔容积不断缩小回液, 回液经电磁换向阀 6 右位直接流回油箱。在此过程中, 液体不受节流阀的控制, 工作台快速返回。

溢流阀4与液压泵的排液口并联。当活塞进给速度较慢时,系统中积累的多余液体将使其压力升高。压力上升到足以克服溢流阀阀芯的弹簧力作用时,就将阀芯推开,使多余的液体直接返回油箱,防止系统过载。

系统中压力表5用于监测系统的工作压力;吸液口滤油器2可以防止工作液体中的大颗粒固体杂质进入液压泵和传动系统,避免损坏液压元件。

由上述液压千斤顶和机床的液压传动系统可以看出,一个完整的液压传动系统包括以下五个基本组成部分。

1. 液压动力元件

液压动力元件是将原动机(常用的有手动机构、电动机和内燃机等)提供的机械能转变为工作液体的液压能的机械装置,通常称为液压泵或油泵。

2. 液压执行元件

液压执行元件是将液压泵所提供的工作液体的液压能转变为机械能的装置。作直线往复运动的执行元件称为液压缸或油缸;作连续旋转运动的执行元件称为液压马达或油马达。

3. 液压控制元件

液压控制元件是对液压系统中工作液体的压力、流量和流动方向进行调节控制的机械装置,通常简称为液压控制阀或液压阀,如压力控制阀、流量控制阀、方向控制阀等。

4. 液压辅助元件

液压辅助元件是指除上述三个组成部分以外的其他元件,如油箱、管道、管接头、密封元件、滤油器、蓄能器、冷却器、加热器以及各种液体参数的监测仪表等。它们的功能是多方面的,各不相同。

5. 工作液体

工作液体是液压传动中能量传递载体,也是液压传动系统中最本质的一个组成部分。

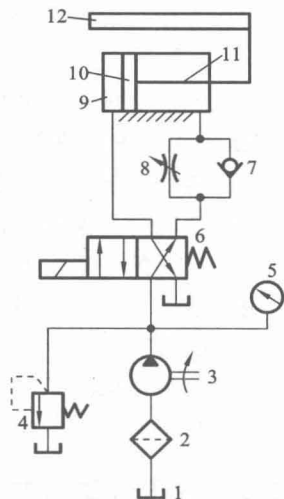


图 1-2 机床工作台液压传动示意图

1—油箱;2—滤油器;3—液压泵;
4—溢流阀;5—压力表;6—电磁换向阀;
7—单向阀;8—节流阀;9—液压缸;
10—活塞;11—活塞杆;12—工作台

1.2 液压传动的优缺点及其发展方向

1.2.1 液压传动的优缺点

液压传动与机械传动、电力传动相比,具有以下特点。

1. 液压传动的主要优点

- (1) 可实现大范围的无级调速(调速范围可达 2 000 : 1)。
- (2) 同功率比较时,液压传动具有质量小、体积小、运动惯量小、反应速度快、运动平稳等特点。
- (3) 液压传动的各元件,可根据需要方便、灵活地来布置。
- (4) 操纵省力,控制方便,易于实现自动化或遥控。
- (5) 易于实现过载保护。

(6) 工作介质一般采用矿物油,相对运动表面可自行润滑,因此可提高系统和元件的使用寿命。

(7) 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。

2. 液压传动的主要缺点

(1) 液压传动系统同时存在压力损失、容积损失和机械损失,因此传动效率较低。

(2) 工作性能易受温度变化的影响,因此不宜在较高或较低的温度条件下工作。

(3) 液压元件的制造精度要求较高,因而价格较贵。

(4) 由于液体介质的泄漏及可压缩性影响,不能得到严格的定传动比。

(5) 系统的故障诊断比较困难,使用和维修要求有较高的技术水平。

总的说来,液压传动的优点较为突出,且一些缺点所带来的影响,可以随着科学技术的发展,得到相应的改善。

1.2.2 液压传动的主要应用及发展方向

1. 液压传动的主要应用

在机床上,液压传动常应用在以下的一些装置中。

(1) 进给运动传动装置 磨床砂轮架和工作台的进给运动机构大部分采用液压传动;车床(如六角车床、自动车床等)的刀架或转塔刀架的驱动也采用液压传动;铣床、刨床、组合机床工作台等的进给运动机构也都采用液压传动。这些部件有的要求快速移动,有的要求慢速移动,有的则既要求快速移动,又要求慢速移动,这些运动多半要求有较大的调速范围,要求在工作中能实现无级调速;有的要求持续进给,有的要求间歇进给;有的要求在负载变化下速度恒定,有的要求有良好的换向性能等。所有这些要求都可以采用液压传动来实现。

(2) 往复主体运动传动装置 龙门刨床的工作台、牛头刨床或插床的滑枕,由于要求作高速往复直线运动,并且要求换向冲击小、换向时间短、能耗低,因此都可以采用液压传动。

(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完成。其精度可达 $0.01 \sim 0.02 \text{ mm}$ 。此外,磨床上的成形砂轮修正装置也可采用这种系统。

(4) 辅助装置 如机床上的夹紧装置、齿轮箱变速操纵装置、丝杠螺母间隙消除装置、垂直移动部件平衡装置、分度装置、工件和刀具装卸装置、工件输送装置等均可采用液压传动。采用液压传动后,有利于简化机床结构,提高机床自动化程度。

(5) 静压支承重型机床、高速机床、高精度机床上的轴承、导轨、丝杠螺母机构等采用液体静压支承后,可以提高工作平稳性和运动精度。

由于液压传动的显著优点,如今,液压传动已被广泛地应用在各个领域之中。液压传动在其他机械工业部门的应用情况如表 1-1 所示。

表 1-1 液压传动在各类机械行业中的应用实例

行业名称	应用场所举例
工程机械	挖掘机、装载机、推土机、压路机、铲运机等
起重运输机械	汽车吊、港口龙门吊、叉车、装卸机械、皮带运输机等
矿山机械	凿岩机、开掘机、开采机、破碎机、提升机、液压支架等
建筑机械	打桩机、液压千斤顶、平地机等

续表

行 业 名 称	应用场所举例
农业机械	联合收割机、拖拉机、农具悬挂系统等
冶金机械	电炉炉顶及电极升降机、轧钢机、压力机等
轻工机械	打包机、注塑机、校直机、橡胶硫化机、造纸机等
汽车工业	自卸式汽车、平板车、高空作业车、汽车中的转向器、减振器等
智能机械	折臂式小汽车装卸器、数字式健身锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等

2. 液压传动的发展方向

(1) 液压传动正向着高压、高速、高效、大功率、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。

(2) 与计算机科学相结合 新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计(CAD)、计算机辅助测试(CAT)、计算机直接控制(CDC)、计算机实时控制技术、机电一体化技术、计算机仿真技术和优化技术相结合。

(3) 与其他相关科学结合 如污染控制技术和可靠性技术等方面也是当前液压技术发展和研究的方向。

(4) 开辟新的应用领域。

思考题与习题

- 1-1 何为液压传动(即液压传动的定义是什么)? 液压传动有哪两个工作特征?
- 1-2 液压传动系统由哪几个基本部分组成? 它们的基本功能是什么? 试用示意图说明。
- 1-3 试比较液压传动与机械传动和电力传动的主要优缺点。
- 1-4 试用附录 A 中液压系统图形符号表示如图 1-1 所示液压千斤顶的原理图。
- 1-5 试说明如图 1-2 所示的机床工作台传动系统,若用机械传动来实现同样功能,至少应由哪些部分和零件组成? 试用简图表示之。
- 1-6 如图 1-1 所示,某液压千斤顶(设效率为 1)可顶起 10 t 重物。试问:在 30 MPa 压力下,液压缸 7 的活塞面积 A_2 为多大? 当人的输入功率为 100 W 时,将 10 t 重物提起 0.2 m 高所需的时间为多少?

第 2 章 液压传动中的工作液体

本章要求:掌握液压传动系统中工作液体的主要物理性质,尤其是液体的黏性和黏-温特性;了解工作液体的类型及其主要性能;掌握选用工作液体的基本原则;了解工作液体的污染及其危害;掌握液压冲击、气穴、气蚀现象的产生机理及其预防措施。

工作液体是液压传动系统中的传动介质,是能量转换过程的中间媒介,用来传递运动和动力,而且还对液压装置的机构、零件起着润滑、冷却和防锈的作用。

2.1 液体的主要物理性质

2.1.1 液体的压缩性

压缩性是指液体受压时,其体积缩小、密度增大,但除去外力后能恢复原状的性质。压缩性实际上是指液体的弹性。

1. 压缩系数

液体的压缩性可用体积压缩系数 β 来量度。它表示液体体积的相对缩小值与压强增值之比,即当压强增大一个单位值时,液体体积的相对减小值。

若在一定温度下,液体的体积为 V ,压强增加 $d p$ 后体积减小 $d V$,则压缩系数为

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{d V}{d p} \quad (2-1)$$

式中: β ——压缩系数, m^2/N ;

V ——体积, m^3 ;

p ——压强, N/m^2 。

由于液体受压体积减小, $d p$ 和 $d V$ 异号,在式(2-1)右侧加负号,以使 β 为正值,其值愈大,愈容易压缩。

根据液体压缩前后,质量 ρV 不变,有

$$-\frac{d V}{V} = \frac{d \rho}{\rho}$$

则

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d \rho}{d p} \quad (2-2)$$

式中: ρ ——液体密度(kg/m^3)。

水在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,不同压强下的压缩系数如表 2-1 所示。

表 2-1 水在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$,不同压强下的压缩系数

压强/ Pa	4.9×10^5	9.8×10^5	19.6×10^5	39.2×10^5	78.5×10^5
压缩系数 $\beta/(\text{m}^2/\text{N})$	0.538×10^{-9}	0.536×10^{-9}	0.531×10^{-9}	0.528×10^{-9}	0.515×10^{-9}

2. 体积模量

压缩系数的倒数称为体积模量,即

$$K = \frac{1}{\beta} = -V \frac{dp}{dV} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (2-3)$$

式中: K ——体积模量, N/m^2 。

例 2-1 输水管 $l=200 \text{ m}$, 直径 $d=400 \text{ mm}$, 做水压试验, 使管中压强达到 $p_1=5.39 \times 10^6 \text{ Pa}$ 后停止加压, 经历 1 h , 管中压强降到 $p_2=4.9 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。如不计管道变形, 问: 在上述情况下, 经管道漏缝流出的水量平均每秒是多少? 水的体积压缩系数 $\beta=4.83 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

解 水经管道漏缝泄出后, 管中压强下降, 于是水体膨胀, 其膨胀的水体积为

$$dV = -\beta V dp = -4.83 \times 10^{-10} \times \left(\frac{\pi}{4} \times 0.4^2 \times 200 \right) \times (4.9 - 5.39) \times 10^6 = 5.95 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

即为经管道漏缝流出的水量, 这是在 1 h 内流出的。设经管道漏缝平均每秒流出的水体积以 V_1 表示, 则

$$V_1 = \frac{5.95 \times 10^{-3}}{3600} \text{ m}^3/\text{s} = 1.65 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

实际液体都是可压缩的, 然而液体的压缩系数很小(体积模量很大), 在相当大的压强变化范围内, 密度几乎不变。因此一般的液体平衡和运动问题, 都可按不可压缩流体进行理论分析。对于某些特殊的流动现象, 如有压管流的水击、水中爆炸波的传播等, 压缩性起着关键作用, 则必须考虑液体的压缩性。

2.1.2 液体的黏性

1. 黏性

液体的黏性是指液体所具有的抵抗剪切变形的性质。如图 2-1 所示, 两平行平板, 其间充满静止流体, 两平板间距离 h , 以 y 方向为法线方向。保持下平板固定不动, 使上平板沿所在平面以速度 u 运动, 于是黏附于上平板表面的一层流体, 随平板以速度 u 运动, 并逐层向内影响, 各层相继流动, 直至黏附于下平板的流层速度为零。在 u 和 h 都较小的情况下, 各流层的速度沿法线方向呈直线分布。

上平板带动黏附在板上的流层运动, 而能影响到内部各流层运动, 说明内部各流层间存在着剪切力, 即内摩擦力, 这就是黏性的宏观表象。

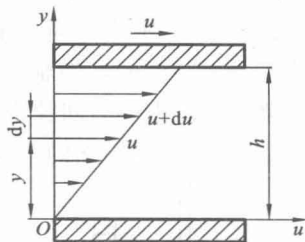


图 2-1 流体的黏性

2. 牛顿内摩擦力定律

牛顿在 1686 年提出, 并经后人验证: 流体的内摩擦力(剪切力) F 与流速梯度 $u/h = du/dy$ 成正比, 与流层的接触面积 A 成正比, 与流体的性质有关, 与接触面上的压力无关, 即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-4)$$

以应力形式表示为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

式中: du/dy ——流速在法线方向的变化率, 称为速度梯度。式(2-4)、式(2-5)称为牛顿内摩擦定律。

μ 是比例系数,具有动力学的量纲,所以称为动力黏度(又称动力黏性系数),单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。动力黏度是流体黏性的度量, μ 值越大,流体越黏,流动性越差。

在分析黏性流体运动规律时,经常以动力黏度 μ 和密度 ρ 之比的形式出现, ν 具有运动学的量纲,故将其定义为流体的运动黏度,表示为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-6)$$

在国际单位制中,运动黏度的单位为 m^2/s ,而在实用中,油的黏度常用 mm^2/s (cSt,厘斯)表示。

动力黏度和运动黏度是理论分析和计算时经常使用到的黏度单位,但它们都难以直接测量。因此,在工程上常使用相对黏度。相对黏度又称条件黏度,它是采用特定的黏度计在规定的条件下测量出来的黏度。用相对黏度计测量出油的相对黏度后,再根据相应的关系式换算出运动黏度或动力黏度,以便于使用。中国、德国等采用的相对黏度为恩氏黏度 $^{\circ}\text{E}$,美国使用赛氏黏度,英国使用雷氏黏度等。

用恩氏黏度计测定液压油的恩氏黏度过程如下:把 200 mL 温度为 $t^{\circ}\text{C}$ 的被测液体装入恩氏黏度计的容器里,测出液体经容器底部直径为 2.8 mm 的小孔流尽所需的时间 t_1 ,并将它 and 同体积蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需时间 t_2 (通常 $t_2 = 51 \text{ s}$)相比,其比值即为被测液体在温度 $t^{\circ}\text{C}$ 的恩氏黏度,即 $^{\circ}\text{E}_t = t_1/t_2$ 。一般以 20°C 、 40°C 及 100°C 作为测定恩氏黏度的标准温度,由此得到被测液体的恩氏黏度分别用 $^{\circ}\text{E}_{20}$ 、 $^{\circ}\text{E}_{40}$ 和 $^{\circ}\text{E}_{100}$ 来标记。

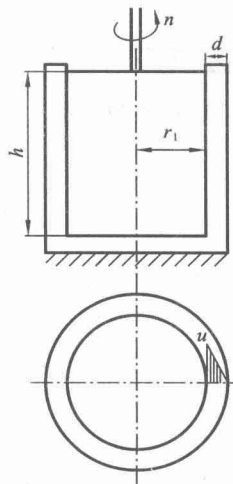
运动黏度与恩氏黏度的换算经验公式为

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

式中,运动黏度 ν 的单位为 m^2/s 。

例 2-2 旋转圆筒黏度计,外筒固定,内筒由同步电动机带动旋转,内外筒间充入实验液体(见图 2-2)。已知内筒半径 $r_1 = 1.93 \text{ cm}$,外筒半径 $r_2 = 2 \text{ cm}$,内筒高 $h = 7 \text{ cm}$,实验测得内筒转速 $n = 10 \text{ r/min}$,转轴上的扭矩 $T = 0.0045 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。试求该实验液体的动力黏度。

解 充入内外筒间隙中的实验液体,在内筒带动下作圆周运动。因间隙很小,速度近似直线分布,不计内筒端面的影响,内筒切应力为



$$\tau = \mu \frac{du}{dy} = \mu \frac{\omega r_1}{\delta}$$

式中,内外筒间隙 $\delta = r_2 - r_1$,内筒旋转角速度 $\omega = 2\pi n/60$ 。

又扭矩

$$T = \tau 2\pi r_1 h r_1 = \frac{\mu \omega 2\pi r_1^3 h}{\delta}$$

由以上两式解得动力黏度

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{T\delta}{2\pi\omega r_1^3 h} = \frac{0.0045 \times (0.02 - 0.0193)}{2 \times 3.14 \times \frac{2 \times 3.14 \times 10}{60} \times 0.0193^3 \times 0.07} \text{ Pa} \cdot \text{s} \\ &= 0.0952 \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

3. 压力、温度对黏性的影响

对液压传动工作液体来说,压力增大时,黏度增大。在一般液压系统使用的压力范围内,增大的数值很小,可以忽略不计。但液压传

图 2-2 旋转圆筒黏度计

动工作液体的黏度对温度的变化十分敏感,这个变化率的大小直接影响液压传动工作液体的使用,其重要性不亚于黏度本身。不同温度水的黏度见表 2-2。

表 2-2 不同温度水的黏度

$t/^{\circ}\text{C}$	$\mu/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	$\nu/(\text{m}^2/\text{s})$	$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$
0	1.792×10^{-3}	1.792×10^{-6}	1 000
5	1.519×10^{-3}	1.519×10^{-6}	1 000
10	1.308×10^{-3}	1.308×10^{-6}	1 000
15	1.145×10^{-3}	1.146×10^{-6}	999.13
20	1.005×10^{-3}	1.007×10^{-6}	998.02
25	0.895×10^{-3}	0.897×10^{-6}	997.77
30	0.801×10^{-3}	0.804×10^{-6}	996.26
35	0.721×10^{-3}	0.725×10^{-6}	994.48
40	0.656×10^{-3}	0.661×10^{-6}	992.41
45	0.597×10^{-3}	0.603×10^{-6}	990.05
50	0.549×10^{-3}	0.556×10^{-6}	987.41
60	0.469×10^{-3}	0.477×10^{-6}	981.17
70	0.406×10^{-3}	0.415×10^{-6}	978.31
80	0.357×10^{-3}	0.367×10^{-6}	972.75
90	0.317×10^{-3}	0.328×10^{-6}	966.46
100	0.284×10^{-3}	0.296×10^{-6}	959.46

由表 2-2 可见,液体的黏度随温度升高而减小。其原因是,液体分子间的距离很小,分子间的引力即内聚力是构成黏性的主要因素,温度升高,分子间距离增大,内聚力减小,黏度随之减小。黏性是引起能量损失的根源,它只有在运动的状态下体现出来。

2.2 液压传动中的工作介质

液压传动系统中的工作介质是液体,一般称为液压油(有部分液压介质已不含油的成分)。

2.2.1 液压传动系统对工作介质的基本要求

液压油是液压传动系统的重要组成部分,液压传动系统工作时压力、温度和流速变化很大,液压油品质的优劣直接影响液压系统的工作性能,液压系统对工作介质的基本要求如下。

(1) 适宜的黏度和良好的黏-温性能 黏度是选择工作介质的首要因素。液压油的黏性对减少间隙的泄漏、保证液压元件的密封性能都起着重要作用。黏度过高,各部件运动阻力增加,温升快,泵的自吸能力下降,同时,管道压力降和功率损失增大。反之,黏度过低会增加系统的泄漏,并使液压油膜支承能力下降,而导致摩擦副间产生摩擦。所以工作介质要有合适的黏度范围,同时在温度、压力变化和剪切力作用下,油的黏度变化要小。

(2) 润滑性能好 在液压传动机械设备中,除液压元件外,其他一些有相对滑动的零件也要用液压油来润滑,因此,液压油应具有良好的润滑性能。为了改善液压油的润滑性能,可加