

高等学校“十一五”规划教材 / 机械类



液压传动

(第4版)

姜继海 主编

哈尔滨工业大学出版社

高等学校“十一五”规划教材/机械类

液 压 传 动

(第4版)

姜继海 主 编

哈尔滨工业大学出版社

内 容 提 要

全书共分 11 章。第 1 章简述液压传动的工作原理、组成、特点及应用;第 2 章介绍液压传动系统所用工作介质;第 3 章介绍液压流体力学基础;第 4、5、6 和 7 章分别介绍液压传动系统所使用的动力元件、执行元件、控制元件和辅助元件;第 8 章介绍主要液压回路;第 9 章介绍典型液压传动系统;第 10 章介绍液压传动系统的设计计算和液压传动系统原理图的拟定等;第 11 章简单地介绍了液压伺服系统。

本书既可作为高等学校机械类专业本科学生的教材,也可作为成人教育学院和高职高专机械类专业及相近专业学生的教材,还可供相关专业的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压传动/姜继海主编.—4 版.—哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2007.8
ISBN 978-7-5603-1237-8

I.液… II.姜… III.液压传动 IV.TH137

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 111872 号

责任编辑 黄菊英
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 肇东粮食印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 13.25 字数 318 千字
版 次 2007 年 8 月第 4 版 2007 年 8 月第 6 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-1237-8
定 价 22.80 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

第3版前言

本书是以姜继海主编的《液压传动》(2004年第2版)内容为基础,根据原国家教委制定的高等工程教育基础课程和技术基础课程“教学基本要求”,结合使用本书的教学体会和兄弟院校的反馈意见,以及哈尔滨工业大学机械设计制造及自动化专业液压传动课程多年的教学经验进行修订的。在修订过程中,依然贯彻基础理论以必需、够用为度,注重应用性、综合性的原则,全书以流体力学为基础,以液压传动系统为主线,以能初步设计液压传动系统为目的,以液压传动回路为基本框架,以实验教学和习题为巩固学习内容的手段,力求通俗易懂,学以致用,强调能力的培养和基本技能的训练。本书在修订过程中注意吸收了部分兄弟院校在教学中的教学经验和教学内容。

本次修订主要进行了以下几方面的工作:

(1)结合国家有关最新标准,对原版中过时的名词、术词、符号、量纲和图形符号等进行了修正;

(2)改正了原版中的文字、插图和图形符号错误;

(3)对原版中的部分内容进行了充实、调整和补充;

(4)为了适应多媒体教学的需要,本次修订增加了与本书配套的电子版教学内容(部分教学动画、教材插图(表)、电子教案),可免费以 E-mail 形式赠送给使用本书的教师(联系电话:86416203、86418760),有问题可与主编联系(e-mail:jjhlxw@hit.edu.cn)。同时,近期将出版与本书配套的《同步辅导和习题精解》,以供广大读者进一步理解和巩固课堂所学知识。

参加本书修订工作的有:姜继海(第1、2、3、4、5、6、7章、各章习题、思考题和附录)、李尚义(第8、9章)、赵克定(第10、11章)。本书由姜继海主编,吴盛林主审,王昕参与了校对工作。

由于编者水平有限,书中难免有疏漏和不当之处,敬请广大读者予以批评指正。

编者

2006年8月于哈尔滨

目 录

第1章 概论	(1)
1.1 液压传动系统的工作原理及组成	(1)
1.2 液压传动的特点	(4)
1.3 液压传动的应用	(5)
思考题和习题	(5)
第2章 液压油液	(6)
2.1 液压油液的性质和选择	(6)
2.2 液压油液的污染及控制	(14)
思考题和习题	(16)
第3章 液压流体力学基础	(18)
3.1 液体静力学	(18)
3.2 液体动力学	(22)
3.3 液体流动时的压力损失	(27)
3.4 孔口和缝隙流量	(32)
3.5 液压冲击和气穴现象	(38)
思考题和习题	(40)
第4章 液压泵和液压马达	(42)
4.1 液压泵的基本工作原理及分类	(42)
4.2 液压泵的基本性能参数和特性曲线	(42)
4.3 齿轮泵	(45)
4.4 叶片泵	(49)
4.5 柱塞泵	(54)
4.6 螺杆泵	(58)
4.7 各类液压泵的性能比较及应用	(59)
4.8 液压马达	(59)
思考题和习题	(63)
第5章 液压缸	(65)
5.1 液压缸的分类和特点	(65)
5.2 液压缸的结构	(71)
5.3 液压缸的设计与计算	(77)
思考题和习题	(78)
第6章 液压控制阀	(80)
6.1 概述	(80)
6.2 方向控制阀	(81)

6.3 压力控制阀	(91)
6.4 流量控制阀	(101)
6.5 比例阀、二通插装阀和数字阀	(104)
思考题和习题	(109)
第7章 液压传动系统辅助元件	(112)
7.1 液压蓄能器	(112)
7.2 滤油器	(115)
7.3 油箱	(118)
7.4 管件	(120)
思考题和习题	(123)
第8章 调速回路和多缸运动回路	(124)
8.1 调速回路	(124)
8.2 多缸运动回路	(140)
思考题和习题	(144)
第9章 典型液压传动系统	(149)
9.1 YT4543 型组合机床动力滑台液压传动系统	(149)
9.2 M1432 型万能外圆磨床液压传动系统	(153)
9.3 YB32-200 型液压机液压传动系统	(158)
9.4 Q2-8 型汽车起重机液压传动系统	(162)
9.5 SZ-250A 塑料注射成型机液压传动系统	(164)
思考题和习题	(171)
第10章 液压传动系统的设计和计算	(173)
10.1 明确设计要求,进行工况分析	(173)
10.2 执行元件主要参数的确定	(175)
10.3 液压传动系统原理图的拟定	(178)
10.4 液压元件的计算和选择	(178)
10.5 液压传动系统技术性能的验算	(181)
10.6 绘制正式工作图和编制技术文件	(183)
10.7 液压传动系统设计计算举例	(183)
思考题和习题	(188)
第11章 液压伺服系统	(189)
11.1 概述	(189)
11.2 典型的液压伺服控制元件	(192)
11.3 电液伺服阀	(194)
11.4 液压伺服系统实例	(195)
思考题和习题	(198)
附录 部分常用液压系统图形符号(摘自 GB/T 786.1—93)	(199)
参考文献	(204)

第 1 章 概 论

一部完整的机器是由动力装置、传动装置、控制调节装置和工作装置四部分组成。传动装置只是一个中间环节,其作用是把动力装置(电动机、内燃机等)的输出功率传送给工作装置。传动有多种类型,如机械传动(齿轮、轴、曲轴等)、电力传动(感应电动机、直线电动机、转矩电动机等)、液体传动、气体传动以及它们的组合——复合传动等。

用液体作为工作介质来进行能量传递的传动方式称为液体传动。按照其工作原理的不同,液体传动可分为液压传动和液力传动。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。液压传动又可分为容积式液压传动。由于液压传动有许多突出的优点,因此它被广泛地应用于机械制造、工程机械、建筑机械、石油化工、交通运输、军事器械、矿山冶金、航海、轻工、农机、渔业、林业等各方面。同时,它也被应用到航天航空、海洋开发、核能工程、地震预测等各个技术领域中。

本书主要论述以液压油为工作介质的液压传动技术以及作为液压传动技术的基础理论——液压流体力学基础。液压传动利用液压泵,将动力装置的机械能转变为液体的压力能,利用液压缸或液压马达将液体的压力能再转变为机械能,用来驱动负载,并获得工作装置需要的运动速度和运动方向。

液压传动相对于机械传动来说是一门新学科,但相对于计算机等,它又是一门较老的技术。如果从 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。只是由于在早期还没有成熟的液压传动技术和液压元件,而使它没得到普遍的应用。随着科学技术的不断发展,各行各业对传动技术都有了不同的需求,特别是第二次世界大战后,以军用液压传动技术为基础,通过不断地改进和创新,并根据具体需要进行各种研究和降低成本等,才使液压传动得到广泛应用。

本章介绍液压传动的工作原理、组成、优缺点及液压传动的应用。

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

图 1.1 所示为一台驱动机床工作台运动的液压传动系统。这个系统可使工作装置作直线往复运动、克服阻力和调节工作台的运动速度。下面以它为例来了解一般液压传动系统的工作原理和基本组成。

在图 1.1(a)中,液压泵 4 由电动机驱动旋转,从油箱 1 中吸油。油液经滤油器 2 进入液压泵 4,液压泵输出的压力油经管 10、开停阀 9、节流阀 13、换向阀 15 进入液压缸 18 左腔,推动活塞 17 和工作台 19 向右移动。这时,液压缸 18 右腔的油经换向阀 15 和回油管 14 排回油箱。

如果将换向手柄 16 转换成图 1.1(b)所示的状态,则液压泵 4 输出的油将经过开停阀

9、节流阀 13 和换向阀 15 进入液压缸 18 右腔,对活塞 17 产生推力。与此同时,液压缸 18 右腔的油液可经换向阀 15 和回油管 14 排回开式油箱。这样,活塞 17 在其左侧油液压力推动下(这时右侧油液的压力很小)带着工作台 19 向右运动。其中,开停阀 9 的阀芯有两个(左、右)工作位置,换向阀 15 的阀芯有三个(左、中、右)工作位置。

工作台 19 的运动速度是由节流阀 13 来调节的。当节流阀口开大时,单位时间内进入液压缸 18 的油液增多,工作台的运动速度增大;当节流阀口关小时,工作台的运动速度减小。

为了克服移动工作台所受到的各种阻力,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,液压缸中的油压越高;反之压力就越低。为了使液压缸中的油液能产生克服负载的阻力,液压泵的工作压力必须高于液压缸中油液的压力。因此要调节液压泵的工作压力。单位时间输入液压缸油液的多少是通过节流阀 13 调节的,定量液压泵 4 输出的多余油液须经溢流阀 7 和回油管 3 排回油箱,这只有在压力支管 8 中的油液压力对溢流阀钢球 6 的作用力等于或略大于溢流阀中弹簧 5 的预紧力时,油液才能顶开溢流阀中的钢球流回油箱。所以,在图 1.1 所示液压传动系统中,液压泵出口处的油液压力是由溢流阀决定的,调节溢流阀 7 中弹簧 5 的预压缩量,就可以调节液压泵的工作压力。过滤器 2 用来滤去油液中的杂质,保护液压泵 4 及液压传动系统。

如果将换向阀手柄 16 转换成图 1.1(c) 所示的位置,液压泵 4 输出的油液全部经溢流阀 7 和回油管 3 排回油箱,不输送到液压缸中去,这时工作台停止运动,而系统保持溢流阀调定的压力。

如果将开停手柄 11 转换成图 1.1(d) 所示的位置,液压泵 4 输出的油液将经开停阀 9 和回油管 12 排回油箱,这时工作台就停止运动,而液压传动系统卸荷。

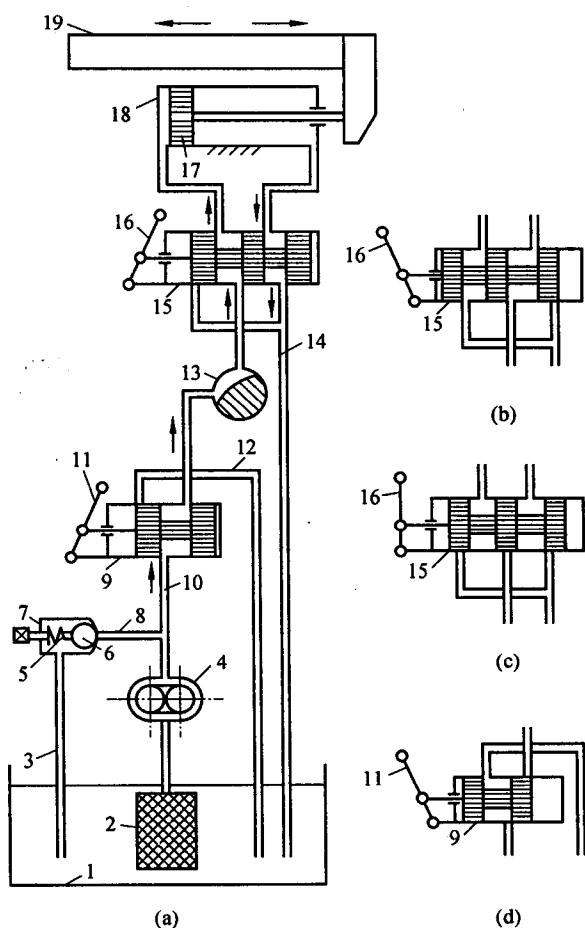


图 1.1 机床工作台液压传动系统工作原理图

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—压力支管;9—开停阀;10—压力管;11—开停手柄;13—节流阀;15—换向阀;16—换向手柄;17—活塞;18—液压缸;19—工作台

从上面的例子可以看出：

- (1) 液压传动是以液体作为工作介质来传递动力的。
- (2) 液压传动是以液体在密封容腔(泵的出口到液压缸)内所形成的压力能来传递动力和运动的。
- (3) 液压传动中的工作介质是在受控制、受调节的状态下进行工作的。

液压传动系统中的能量转换和传递情况如图 1.2 所示,这种能量的转换能够满足生产中的需要。

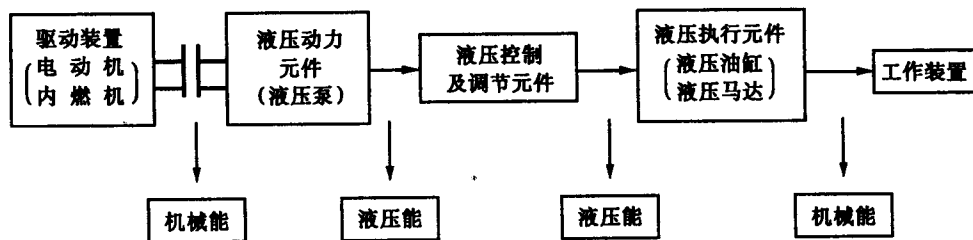


图 1.2 液压传动系统中的能量传递和转换图

1.1.2 液压传动系统的组成

从液压传动系统工作原理图 1.1 和液压传动系统中的能量转换图 1.2 可以看出,液压传动系统由以下五部分组成:

- (1) 液压动力元件。液压动力元件指液压泵,它是将动力装置的机械能转换成为液压能的装置,其作用是向液压传动系统提供压力油,是液压传动系统的动力源。
- (2) 液压执行元件。液压执行元件指液压缸或液压马达,它是将液压能转换为机械能的装置,其作用是在压力油的推动下输出力和速度或转矩和转速,以驱动工作装置做功。
- (3) 液压控制调节元件。它包括各种阀类元件,其作用是用来控制液压传动系统中油液的流动方向、压力和流量,以保证液压执行元件和工作装置完成指定工作。
- (4) 液压辅助元件。液压辅助元件如油箱、油管、滤油器等,它们对保证液压传动系统正常工作有着重要的作用。
- (5) 液压工作介质。工作介质指传动液体,通常被称为液压油或液压液。

1.1.3 液压传动系统的图形符号

图 1.1 中组成液压传动系统的各个元件是用半结构式图形绘制出来的。这种图形直观性强,容易理解,但绘制起来比较麻烦,特别是当液压传动系统中的液压元件比较多时更是如此。所以,在工程实际中,除某些特殊情况外,一般都是用简单的图形符号来绘制液压传动系统工作原理图。对图 1.1 所示的液压传动系统,其系统工作原理图如果用国家标准 GB/T 786.1-93 所规定的液压图形符号(见附录)绘制时,如图 1.3 所示。在这里,图中的符号只表示元(辅)件的功能、操作(控制)方法及外部接口,不表示元(辅)件的具体结构和参数,也不表示接口的实际位置和元(辅)件的安装位置。在绘制液压元件的图形符号时,除非特别说明,图中所示状态均表示元(辅)件的静止位置或零位置,并且除特别注明的符号或

有方向性的元(辅)件符号外,它们在图中可根据具体情况水平或垂直绘制。使用这些图形符号后,可使液压传动系统图简单明了,便于绘制。

当有些液压元件无法用图形符号表达或在国家标准中未列入时,可根据标准中规定的符号绘制规则和所给出的符号进行派生。当无法用标准直接引用或派生时,或有必要特别说明系统中某一元(辅)件的结构和工作原理时,可采用局部结构简图或采用它们的结构或半结构示意图表示。在用图形符号来绘制液压传动系统原理图时,符号的大小应以清晰美观为原则,绘制时可根据图纸幅面的大小酌情处理,但应保持图形本身的适当比例。

1.2 液压传动的特点

液压传动相对于其他传动有以下主要优点:

(1) 在同等体积下,液压装置能产生出更大的动力,也就是说,在同等功率下,液压装置的体积小、质量小、结构紧凑,即它具有大的功率密度或力密度。

(2) 液压装置容易做到对执行元件速度的无级调节,而且调速范围大,并且对速度的调节还可以在工作过程中进行。

(3) 液压装置工作平稳,换向冲击小,便于实现频繁换向。

(4) 液压装置易于实现过载保护,能实现自润滑,使用寿命长。

(5) 液压装置易于实现自动化,可以很方便对液体的流动方向、压力和流量进行调节和控制,并能很容易地与电气、电子控制或气动控制结合起来,实现复杂的运动和操作。

(6) 液压元件易于实现标准化、系列化和通用化。液压装置便于设计、制造和推广使用。

当然,液压传动还存在以下一些明显缺点:

(1) 液压传动中的泄漏和液体的可压缩性使其无法保证严格的传动比。

(2) 液压传动有较多的能量损失(泄漏损失、摩擦损失等),因此,传动效率相对低。

(3) 液压传动装置的工作性能对油温的变化比较敏感,不宜在较高或较低的温度下工作。

(4) 液压传动在出现故障时不易找出原因。

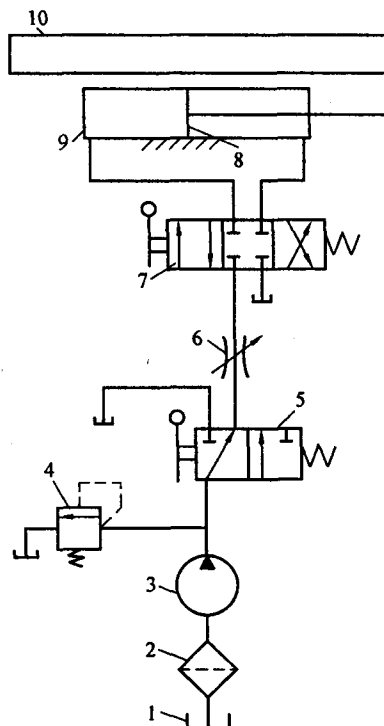


图 1.3 用图形符号绘制的机床工作台液压传动系统工作原理图

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

1.3 液压传动的应用

液压传动主要应用如下:

(1) 一般工业机械:包括塑料加工机械(注塑机)、压力机械(锻压机)、重型机械(废钢压块机)、机床(全自动六角车床、平面磨床)等。

(2) 行走机械:包括工程机械(挖掘机)、起重机械(汽车吊)、建筑机械(打桩机)、农业机械(联合收割机)、汽车(转向器、减振器)等。

(3) 钢铁工业机械:包括冶金机械(轧辊调整装置)、提升装置(电极升降机)、薄板轧机等。

(4) 土木工程机械:包括防洪闸门及堤坝装置(浪潮防护挡板)、河床升降装置、桥梁操纵机构和矿山机械(凿岩机)等。

(5) 发电设备:包括涡轮机(调速装置)等。

(6) 特殊装备:包括巨型天线控制装置、测量浮标、飞机起落架的收放装置及方向舵控制装置、升降旋转舞台等。

(7) 船舶装备:包括甲板起重机械(绞车)、船头门、舱壁阀、船尾推进器等。

(8) 军事装备:包括火炮操纵装置、舰船减摇装置、飞行器仿真装置等。

上述的概略说明还不能包括所有应用的可能性。用液压传动系统传递动力、运动和控制的应用范围相当广泛,它在当今的各个领域中都占有一席之地。目前,液压传动技术在实现高压、高速、大功率、高效率、低噪声、长寿命、高度集成化等方面都取得了很大的进展。与此同时,由于它与微电子技术密切配合,能在尽可能小的空间内传递出尽可能大的功率并加以准确地控制,从而使得它在各行各业中发挥更巨大的作用。

思考题和习题

- 1.1 液体传动有哪两种形式? 它们的主要区别是什么?
- 1.2 什么叫液压传动? 液压传动所用的工作介质是什么?
- 1.3 液压传动系统由哪几部分组成? 各组成部分的作用是什么?
- 1.4 液压传动的主要优缺点是什么?
- 1.5 结合图 1.3 简述工作台左右运动时, 阀 5 和阀 7 的位置及进、回油液的流动路线。
- 1.6 图 1.3 液压系统的工作压力和液压缸 9 活塞的运行速度是怎样调节的?

第2章 液压油液

液压传动是以液体作为工作介质来传递能量的。在液压传动系统中,液压油液用来传递动力和信号,并起到润滑、冷却和防锈等作用。液压传动系统能否可靠、有效长期地工作,在很大程度上取决于系统中所使用的液压油液。因此,必须对液压油液有一清晰的了解。

2.1 液压油液的性质和选择

2.1.1 液压油液的种类

液压油有两大类,即石油基液压油和难燃液压油。在液压传动系统中所使用的液压油液大多数是石油基的矿物油。它们的种类细分如表 2.1 所示。

表 2.1 液压油液的种类

液 压 油 液	石 油 基 液 压 油	无抗氧化剂的精制矿物油(L-HH)		
		专 用 液 压 油	抗氧防锈油,HH+抗氧化剂、防锈剂(L-HL)	
			抗磨液压油,HL+抗磨剂(L-HM)	
			高粘度指数液压油,HL+增粘剂(L-HR)	
			低温液压油,HM+增粘剂(L-HV)	
			液压导轨油,HM+防爬剂(L-HG)	
	难 燃 液 压 油	含 水 液 压 油	高含水液压力 (L-HFA)	水包油乳化液(L-HFAE)
				水的化学溶液(L-HFAS)
			油包水乳化液(L-HFB)	
			含聚合物水溶液(水-乙二醇液)(L-HFC)	
	合 成 液 压 油	合 成 液 压 油	磷酸酯无水合成液(L-HFDR)	
			氯化烃无水合成液(L-HFDS)	
			HFDR+HFDS混合液(L-HFDT)	
			其他成分的无水合成液(L-HFDU)	

其中,L代表润滑剂类液压油。

石油基的液压油是以机械油为基料,精炼后按需要加入适当的添加剂而制成。所加入的添加剂大致有两类:一类是用来改善油液化学性质的,如抗氧化剂、防锈剂等;另一类是用来改善油液物理性质的,如增粘剂、抗磨剂等。石油基的液压油润滑性好,但抗燃性差。由此又研制出难燃型液压液(含水型、合成型等)供选择,以满足轧钢机、压铸机、挤压机等对耐高温、热稳定、不腐蚀、无毒、不挥发、防火等方面的要求。

我国目前的液压传动系统中仍有采用机械油和汽轮机油的。机械油是一种工业用润滑油,价格低,但物理化学性能较差,使用时易生成粘稠胶质堵塞液压元件,影响液压传动系统的性能,压力越高,越容易出现问題。

无(或含有少量)抗氧化剂的精制矿物油(HH)的品质比机械油高,适用于无低温性能、防锈性、抗乳化性和空气释放能力等特殊要求的一般循环润滑系统。

抗氧防锈油(HL)中加有抗氧化、防锈等添加剂,常用于低压传动系统,在液压传动系统中使用最广。

抗磨液压油(HM)是在抗氧防锈油的基础上改善了抗磨性的液压油,适用于低、中、高压传动系统。

高粘度指数液压油(HR)是在抗氧防锈油的基础上改善了粘温性能的液压油,适用于环境温度变化较大和工作条件恶劣的低压传动系统。

低温液压油(HV)是在抗磨液压油的基础上改善了粘温性能的液压油,适用于环境温度变化大和工作条件恶劣的低、中、高压传动系统。

液压导轨油(HG)是在抗磨液压油的基础上改善了粘-滑性的液压油,适用于液压系统和导轨润滑系统合用的设备。

水包油(O/W)乳化液(HFAE)是一种乳化型高水基液,通常含水 80%以上,低温性、粘温性和润滑性差,但难燃性好,价格便宜。适用于煤矿液压支柱液压传动系统和其他不要求回收废液和不要求有良好润滑性但有良好难燃性要求的机械设备中的低压传动系统。

水的化学溶液(HFAS)是一种含有化学品添加剂的高水基液,低温性、粘温性和润滑性差,但难燃性好,价格便宜,适用于需要难燃液的低压传动系统或金属加工设备。

油包水(W/O)乳化液(HFB)通常含油 60%以上,其余为水和添加剂,低温性差、难燃性比磷酸酯无水合成液差,适用于冶金、煤矿等行业的中、高压及高温和易燃场合的传动系统。

含聚合物水溶液,即水-乙二醇液(HFC)是含乙二醇或其他聚合物的水溶液,低温性、粘温性和对橡胶适应性好,难燃性好,但比磷酸酯无水合成液差,适用于冶金和煤矿等行业的低、中压传动系统。

磷酸酯无水合成液(HFDR)是以无水的各种磷酸酯为基础加入各种添加剂制成,难燃性较好,但粘温性和低温性较差,使用温度范围宽,对大多数金属不会产生腐蚀作用,但能溶解许多非金属材料,因此必须选择合适的密封材料,此外,这种液体有毒,适用于冶金、火力发电、燃气轮机等高温高压下操作的液压传动系统。

其他几类难燃液,如:氯化烃无水合成液(HFDS)、HFDR + HFDS 混合液(HFDT)和其他成分的无水合成液(HFDU)等也都各有其特点,在使用时要充分了解其特性后恰当应用。

2.1.2 液压油液的物理性质

1. 液压油液的密度和重度

(1) 密度:对于均质液体,单位体积内的液体质量被称为密度 ρ 。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.1)$$

式中 m ——液体的质量(kg);

V ——液体的体积(m^3)。

液压油液的密度因液体的种类而异。常用液压油液的密度数值见表 2.2。

表 2.2 几种液压油液在 15℃、101 325 Pa 下的密度

种 类	液压油 L-HM32	液压油 L-HM46	水包油乳化液 (L-HFAE)	油包水乳化 液(L-HFB)	水-乙二醇 (L-HFC)	磷酸酯 (L-HFDR)
$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	0.87×10^3	0.875×10^3	0.9977×10^3	0.932×10^3	1.06×10^3	1.15×10^3

石油基液压油在 15℃时的密度可取为 $900(\text{kg}/\text{m}^3)$ 左右。在实际使用中可认为它不受温度和压力的影响。

(2) 重度:对于均质液体,单位体积内的液体重量被称为重度 γ 。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (2.2)$$

或

$$\gamma = \rho g \quad (2.3)$$

式中 G ——液体的重量(N);

g ——重力加速度(m/s^2)。

2. 液压油液的可压缩性

液体在受压力作用时,其体积减小。液体受压力的作用而使液体体积发生变化的性质被称为液体的可压缩性。

液体可压缩性的大小可以用体积压缩系数 κ 来表示,其定义为:受压液体在单位压力变化时发生的体积相对变化量,即

$$\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V} \quad (2.4)$$

式中 Δp ——压力变化量(Pa);

ΔV ——在 Δp 作用下,液体体积的变化量(m^3);

V ——压力变化前的液体体积(m^3)。

因为压力增大时液体的体积减小,所以上式的等号右边必须冠一负号,以便使液体的体积压缩系数 κ 为正值。

液体体积压缩系数的倒数被称为液体的体积弹性模量,简称体积模量,用 K 表示,即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{V}{\Delta V} \Delta p \quad (2.5)$$

体积弹性模量 K 的数值等于液体的压力增量与体积相对变化量的比值。在使用中,可用 K 值来说明液体抵抗压缩的能力的大小。表 2.3 给出了几种常用液压油液的体积弹性模量。由表 2.3 可知,石油基液压油体积模量的数值是钢($K = 2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$)的 $1/(100 \sim 150)$,即它的可压缩性是钢的 100 ~ 150 倍。

表 2.3 几种液压油液在 20℃、101 325 Pa 个大气压下的体积弹性模量

种 类	石油基液压油	水-乙二醇基	乳化液型	磷酸酯型
K/MPa	$(1.4 \sim 2.0) \times 10^3$	3.15×10^3	1.95×10^3	2.65×10^3

在实际使用中,由于在液体内不可避免地会混入未溶解的空气等原因,使其抗压能力显著降低,在一定压力下,油液中混入体积分数为 1% 的气体时,其体积弹性模量降低为纯油的 50% 左右,如果混有体积分数为 10% 的气体,则其体积弹性模量仅为纯油的 10% 左右。这会严重影响液压传动系统的工作性能。因此,在有较高要求或压力变化较大的液压传动系统中,应尽量减少油液中混入的气体及其他易挥发性物质(如煤油、汽油等)的含量。由于油液

中的气体难以完全排除,在工程计算中常取液压油的体积弹性模量为 $K = 7 \times 10^2 \text{ MPa}$ 左右。

液压油液的体积弹性模量和温度、压力有关。温度升高时, K 值减小;压力增大时, K 值增大。在液压油液正常的工作压力范围内, K 值会有 5% ~ 25% 的变化,但这种变化不成线性关系,当压力大于 3 MPa 时, K 值基本上不再增大。

因此在讨论液压传动系统的静态性能时,通常将液体看成是不可压缩的;而在研究液压元件和系统的动态特性时,液体的体积弹性模量将成为影响其动态特性的重要因素,不能忽略。当考虑液体的可压缩性时,封闭在容器内的液体在外力作用下的情况极像一根弹簧,外力增大,体积减小;外力减小,体积增大。这种液压弹簧的刚度 k_h 在液体承压面积 A 不变时(图2.1),可以通过压力变化 $\Delta p = \Delta F/A$ 、体积变化 $\Delta V = A\Delta l$ (Δl 为液柱长度变化值)和式(2.5)求出,即

$$k_h = - \frac{\Delta F}{\Delta l} = \frac{A^2 K}{V} \quad (2.6)$$

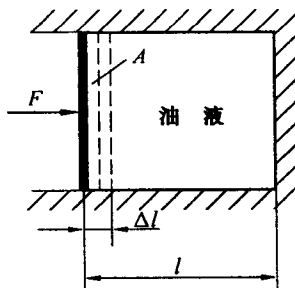


图 2.1 液压弹簧刚度计算

3. 液压油液的粘性

液体在外力作用下流动或有流动趋势时,液体分子间的内聚力要阻止液体质点的相对运动,由此产生一种内摩擦力或切应力,这种性质被称为液体的粘性。

液体的粘性所起的作用是阻滞、延缓液体内部液层的相互滑动,即反映了液体抵抗剪切流动的能力。粘性的大小可以用粘度来度量。

液体流动时,由于液体的粘性以及液体和固体壁面间的附着力,会使液体内部各液层间的流动速度大小不等。如图 2.2 所示,设两平行平板间充满液体,下平板固定不动,上平板以速度 u_0 向右运动。由于液体的粘性作用,紧贴下平板液体层的速度为零,紧贴上平板液体层的速度为 u_0 ,而中间各液层的速度则视它距下平板距离的大小按线性规律或曲线规律变化。其中速度快的液层带动速度慢的液层;而速度慢的液层对速度快的液层起阻滞作用。不同速度的液层之间相对滑动必然在层与层之间产生内部摩擦力。这种摩擦力作为液体内力,总是成对出现,且大小相等、方向相反地作用在相邻两液层上。实验表明,液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F_f 与液层接触面积 A 和液层间的速度梯度 du/dy 成正比,即

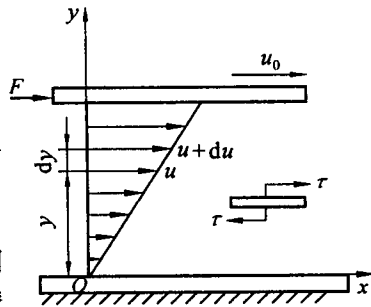


图 2.2 液体粘性示意图

$$F_f = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2.7)$$

式中 μ ——比例常数,称为粘度系数或动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$);

A ——各液层间的接触面积 (m^2);

du/dy ——速度梯度,即在速度垂直方向上的液体流动速度的变化率 (s^{-1})。

这就是牛顿液体内摩擦定律。若液体的动力粘度 μ 只与液体种类有关,而与速度梯度无关,则这种液体称为牛顿液体。一般石油基液压油都是牛顿液体。

如以 τ 表示液体的内摩擦切应力,即液层间单位面积上的内摩擦力,则有

$$\tau = \frac{F_f}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2.8)$$

或改写成

$$\mu = \frac{F_f/A}{du/dy} = \frac{\tau}{du/dy} \quad (2.9)$$

由此可见,在一定的切应力 τ 的作用下,动力粘度 μ 越大,速度梯度 du/dy 越小,则液体发生剪切变形越小,也就是说,液体抵抗液层之间发生剪切变形的能力越强,即粘性是液体在流动时抵抗变形能力的一种度量。

由上式可知,在静止液体中,因速度梯度 $du/dy = 0$,内摩擦力 τ 也为零,所以液体在静止状态下不呈现粘性。

粘性是液体最重要的物理性质之一,粘性大小会直接影响系统的工作,其大小用粘度来表示,它是液压系统选择液压油液的主要指标。常用的液体粘度有三种,即动力粘度、运动粘度和相对粘度。

(1) 动力粘度。动力粘度 μ 又称为绝对粘度,由式(2.9)可得

$$\eta = \frac{F_f}{A \frac{du}{dy}} \quad (2.10)$$

由式(2.10)可知液体动力粘度 μ 的物理意义是:液体在单位速度梯度下流动或有流动趋势时,相接触的液层间单位面积上产生的内摩擦力。动力粘度的法定计量单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$),以前沿用的单位为 P (泊, $\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$),它们之间的关系是

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$$

(2) 运动粘度。液体的动力粘度 μ 与其密度 ρ 的比值被称为液体的运动粘度 ν ,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.11)$$

液体的运动粘度没有明确的物理意义,但它在工程实际中经常用到。因为它的单位只有长度和时间的量纲,类似于运动学的量,所以被称为运动粘度。它的法定计量单位为 m^2/s ,以前沿用的单位为 St (斯),它们之间的关系是

$$1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St} = 10^6 \text{ cSt(厘斯)}$$

在我国,运动粘度是划分液压油牌号的依据。国家标准 GB/T 3141—1994 中规定,液压油的牌号就是用它温度为 40°C 时的运动粘度平均值(单位为 mm^2/s)来表示的。例如 32 号液压油,就是指这种油在 40°C 时的运动粘度平均值为 $32 \text{ mm}^2/\text{s}$,其运动粘度范围为 $28.8 \sim 35.2 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 相对粘度。动力粘度和运动粘度是理论分析和计算时经常使用到的粘度单位,但它们都难以直接测量。因此,在工程上常常使用相对粘度。相对粘度又称为条件粘度,它是采用特定的粘度计在规定的条件下测量出来的粘度。用相对粘度计测量出它的相对粘度后,再根据相应的关系式换算出运动粘度或动力粘度,以便于使用。中国、德国等采用的相对粘度为恩氏粘度 $^\circ\text{E}$,美国用赛氏粘度 SSU ,英国用雷氏粘度 R ,等等。

用恩氏粘度计测定液压油的恩氏粘度:把 200 mL 温度为 $t^\circ\text{C}$ 的被测液体装入恩氏粘度计的容器内,测出液体经容器底部直径为 2.8 mm 的小孔流尽所需时间 $t_1(\text{s})$,并将它和同体

积的蒸馏水在 20℃ 时流过同一小孔所需时间 t_2 (s) (通常 $t_2 = 51$ s) 相比, 其比值即是被测液体在温度 t ℃ 下的恩氏粘度, 即 $E_t = t_1/t_2$ 。一般以被测液体 20℃、40℃ 及 100℃ 作为测定其恩氏粘度的标准温度, 由此而得到的恩氏粘度分别用 E_{20} 、 E_{40} 和 E_{100} 来标记。

恩氏粘度与运动粘度之间的换算关系式为

$$\nu = \left(7.31^\circ E - \frac{6.31}{^\circ E} \right) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (2.12)$$

例 2.1 如图 2.3 所示的粘度计, 若 $D = 100$ mm, $d = 98$ mm, $l = 200$ mm, 外筒转速 $n = 8$ r/s 时, 测得的转矩 $T = 40$ N·cm, 试求油液的动力粘度是多少 (忽略粘度计底部液体粘性的影响)?

解 在公式 (2.7) 两端乘以旋转粘度计的旋转半径 $D/2$, 可得到转矩 T , 即

$$T = \frac{D}{2} F_t = \frac{D}{2} \mu A \frac{du}{dy}$$

由此可得到油液的动力粘度

$$\mu = \frac{2T dy}{DA du} = \frac{2T}{DA \frac{du}{dy}}$$

假设各液层间的速度按线性规律分布, 即速度梯度为常数时, 则有

$$\frac{du}{dy} = \frac{\pi D n}{(D - d)/2}$$

同时将上式和 $A = \pi D l$ 代入上面得到的动力粘度公式, 则有

$$\mu = \frac{2 \times 40 \times 10^{-2}}{100 \times 100 \times 200 \times 10^{-9} \pi} \times \frac{(100 - 98) \times 10^{-3}}{2 \times 8 \times 100 \times 10^{-3} \pi} = 0.051 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

事实上, 液体的粘度是随着液体的压力和温度而变化的。对液压油来说, 压力增大时, 粘度增大。但在一般液压系统使用的压力范围内, 粘度增大的数值很小, 可以忽略不计。

当压力大于 50 MPa 时, 粘度将急剧增大。压力对粘度的影响可用下式计算

$$\nu_p = \nu_a e^{cp} \approx \nu_a (1 + cp) \quad (2.13)$$

式中 ν_p ——压力为 p 时液体的运动粘度 (m^2/s);

ν_a ——大气压下液体的运动粘度 (m^2/s);

e ——自然对数的底;

c ——系数, 对于石油基液压油, $c = 0.015 \sim 0.035$;

p ——液体的压力 (MPa)。

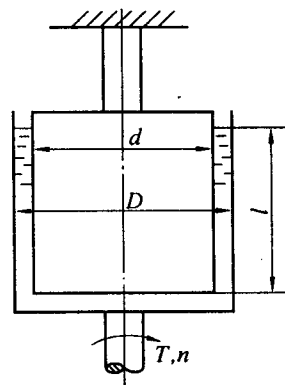


图 2.3 例题 2.1 附图

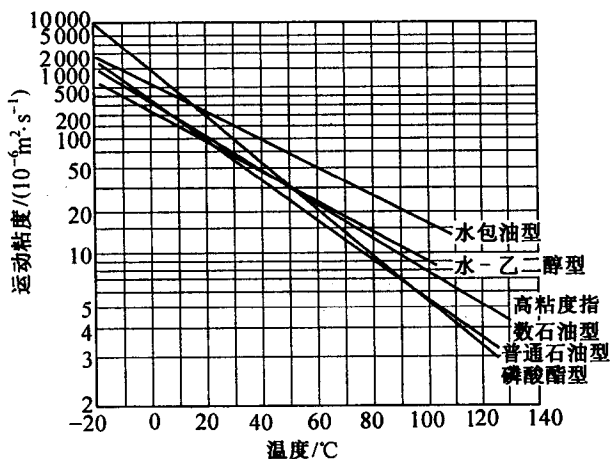


图 2.4 液压油粘度和温度之间的关系