

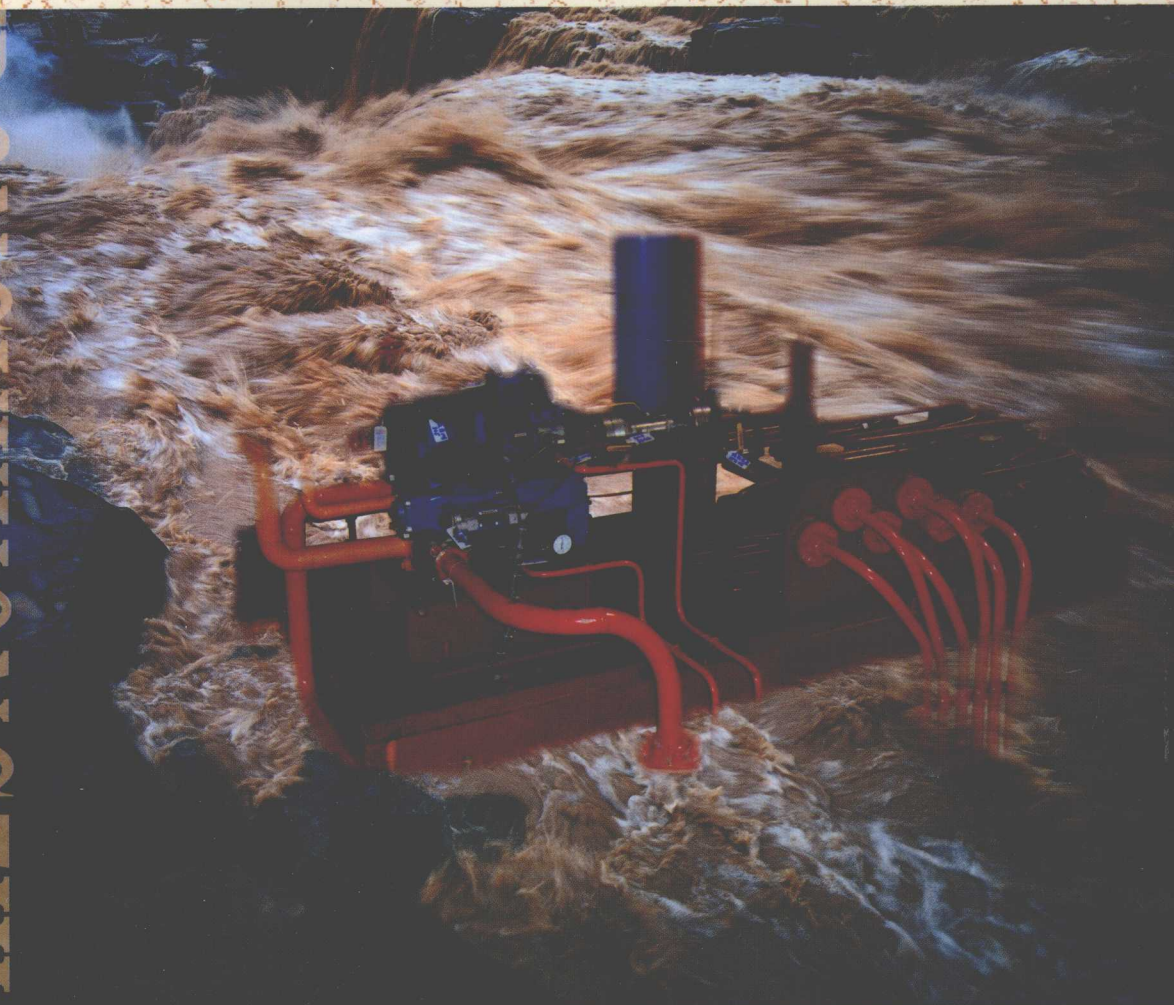
机械设计制造及其自动化专业系列教材

液压传动与控制

(新版)

曹玉平 阎祥安 主编

DONGYU KONGZHI



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

机械设计制造及其自动化专业系列教材

液 压 传 动 与 控 制

(新版)

曹玉平 阎祥安 主编

 天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

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;系统介绍了液压元件;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。本书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:新版/曹玉平,阎祥安主编. —天津:
天津大学出版社,2009.9

ISBN 978-7-5618-3082-6

I. 液… II. ①曹… ②阎… 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(2009)第 125976 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 天津泰宇印务有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 15.75
字 数 394 千
版 次 2009 年 9 月第 1 版
印 次 2009 年 9 月第 1 次
印 数 1-3 000
定 价 30.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

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,充分地反映我国改革开放 30 年液压传动与控制技术的成就,更好地为工程实际服务,编者在原版《液压传动与控制》基础上,总结多年的教学和实践经验,删繁就简,去旧增新,着重突出基本观点、基本原理、基本元件、基本回路,在编写体系上,力求反映我国液压传动与控制技术的最新成果,力求体现教材的稳定性、先进性、理论性和系统性。

“液压传动与控制”课程属于技术基础课。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典型设备的了解。

本书以“回路和传动”为主线,根据液压系统由基本回路组成,回路由基本元件组成的从属关系,将元件和基本回路紧密结合。对于标准元件,则侧重于基本原理及选用原则介绍,不过多地讲述具体结构,读者可根据原理自行分析具体结构。对于辅助元件,按其在系统中的功能分述,使之与内容密切联系,学以致用。对于液压伺服系统不按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。

因教材面对初学者,所以应按照教学大纲要求,讲清基本内容、基本理论和基本方法,使学生受到启发后了解进一步探索问题的途径,为科技创新打下坚实的理论基础。

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程。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。

参加本书编写工作的有郑炜、徐健、肖聚亮、张承谱等同志。

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

由于编者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2009 年 5 月

目 录

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	(18)
3.1 静止液体的力学特性	(18)
3.2 流动液体基本方程	(21)
3.3 液体流动时的压力损失	(28)
3.4 小孔及间隙的流量计算	(33)
3.5 液压冲击、空穴与气蚀	(39)
第4章 液压系统动力元件及装置	(42)
4.1 液压泵的基本概念	(42)
4.2 齿轮式液压泵	(45)
4.3 叶片式液压泵	(52)
4.4 柱塞式液压泵	(60)
4.5 蓄能器	(67)
4.6 油箱及过滤器	(70)
第5章 液压系统执行元件	(74)
5.1 液压缸结构形式及输出参数计算	(75)
5.2 液压缸结构参数的计算与选择	(83)
5.3 液压马达	(87)
第6章 液压系统方向控制元件及回路	(95)
6.1 方向控制阀及方向控制回路	(95)
6.2 单向阀及控制回路	(104)
第7章 液压系统压力控制元件及回路	(108)
7.1 溢流阀	(109)
7.2 顺序阀	(114)
7.3 减压阀	(117)
7.4 压力继电器	(120)
7.5 压力控制回路	(121)
第8章 液压系统流量控制元件及回路	(129)
8.1 流量控制阀节流口特性及形式	(129)
8.2 节流阀节流调速	(133)

8.3	调速阀及调速回路	(138)
8.4	溢流节流阀	(140)
8.5	分流阀	(141)
8.6	容积调速回路	(142)
8.7	容积节流调速	(147)
8.8	快速运动回路	(149)
8.9	速度换接回路	(151)
8.10	多缸控制回路	(152)
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	(174)
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	(184)
第11章	电液比例控制	(189)
11.1	电液比例控制系统的组成及分类	(189)
11.2	电液比例阀的组成及分类	(190)
11.3	比例压力控制阀	(192)
11.4	比例流量控制阀	(195)
11.5	比例方向控制阀	(196)
11.6	电液比例控制系统	(199)
11.7	电液比例控制系统应用举例	(203)
第12章	液压伺服控制	(207)
12.1	液压伺服控制概述	(207)
12.2	液压伺服阀	(209)
12.3	液压伺服系统	(215)
第13章	液压系统设计	(221)
13.1	液压系统的设计步骤	(221)
13.2	液压元件的计算和选择	(223)
13.3	液压系统性能的验算	(233)
13.4	液压装置的结构设计	(236)
13.5	液压传动系统设计示例	(238)
参考文献		(246)

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传动与控制的学科。液压传动与控制是以液压油或其他合成液体为工作介质,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,以进行能量的转换、传递与控制。因此,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,并在此基础上设计液压传动控制系统。

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、发电、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,具体的液压传动系统结构也比较复杂。现以图 1-1 所示

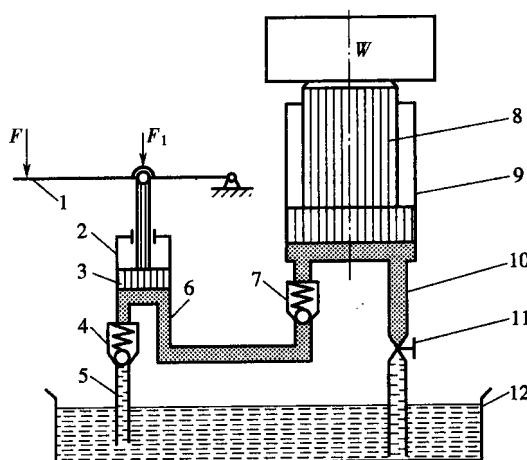


图 1-1 液压千斤顶工作原理

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

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,补充到小活塞下腔,此即吸油过程;压下手柄时,小活塞下移,其下腔容积缩小油液压力升高,关闭单向阀4,开启单向阀7,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 W 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。千斤顶能顶升多重的物体,决定于施加的压力和两个大、小活塞的面积比。重物举升的速度决定于小活塞的下移速度和大、小活塞的面积比。

从以上分析可以看出,液压传动以液体的压力能传递动力。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。

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作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进入液压缸右腔。此时液压缸左腔的油经换向阀7和回油管排回油箱,液压缸推动工作台向左移动。换向阀7的主要功能是控制液压缸及工作台的运动方向。

工作台的移动速度通过节流阀6调节。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,工作台移动速度就慢。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,液压缸必须具有足够大的推力。该推力由液压缸中的油液压力产生。要克服的阻力越大,液压缸中的油液压力越大;反之,压力就越小。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油液压力由溢流阀调定。一般情况下,液压泵出口压力大于液压缸中的压力。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(如装卸工件或测量尺寸)时,可以拨动换向阀5的操纵手柄,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的作用是滤除油液中的污染物,保证油液清洁,使系统正常工

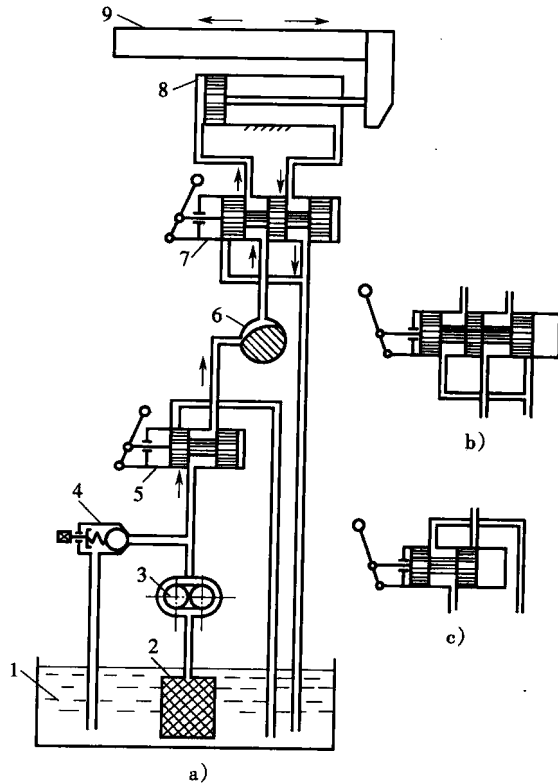


图 1-2 机床工作台液压系统的工作原理

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

作。

从上面示例可以看出,一个液压传动系统通常由以下部分组成。

- 1) 能源装置 它是把机械能转换成油液压力能的装置,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 除上述三项以外的其他装置,如油箱、过滤器、油管等,对保证液压系统可靠、稳定、持久工作有重大作用。
- 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、质量轻、惯性小、结构紧凑。据统计,液压马达的质量只有同功率电动机质量的 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;对于直线往复运动,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、调节简单,操纵方便,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 液压传动装置是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难以保证严格的传动比。

② 液压传动装置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,故不易用作远距离传输。

③ 液压传动装置对油温比较敏感,不宜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,要求有良好的过滤装置。

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诊断和排除。

1.2.2 液压传动技术的应用

由于液压传动技术的独特优势,因而在国民经济的各个领域得到广泛应用。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被采用的原因不尽相同。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其结构简单、体积小、输出力大、功率大;航空、航天等领域采用液压传动技术的主要原因是其单位功率的质量轻、结构尺寸小;机床及其加工自动线上采用液压传动技术的原因是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 世纪中期帕斯卡提出静压传递原理、18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起,液压传动已有二三百年的历史。然而,液压传动的真正推广使用却是近四五十年的事。

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。由于无成熟的液压元件,一些通用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标准化、模块化概念与技术的形成和发展,车辆、舰船、航空器、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,液压传动技术迅速转向民用,在机床、工程机械、汽车等行业中逐步推广。20 世纪 60 年代,随着原子能、空间技术、计算机技术的发展,液压传动技术已渗透到国民经济的各个领域,并且得到了长足发展。

我国的液压工业起步较晚,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广泛应用。

回顾历史可见,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、计算机技术的结合,使液压技术进入了一个崭新的发展阶段,预计未来的液压技术将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,从而使元器件的效率、寿命得以极大提高。

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,在应用中占据主导地位。此外还有各种特性不同的液压介质可供选择,以满足各类系统应用需要。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

单位体积均质液体所具有的质量称为密度(ρ),即

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

式中 m ——液体质量;

V ——液体的体积。

单位体积均质液体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 $G = m g$, 所以 $\gamma = \rho \cdot g$ 。

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,可忽略不计。计算时取 $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$, $\gamma = 8.83 \times 10^3 \text{ N/m}^3$ 。

2. 压缩性

液体受压力作用体积缩小的性质称为压缩性。压缩性的大小用体积压缩系数 K 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

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

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。为使 K 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模量,用 E 表示,即

$$E = \frac{1}{K} \tag{2-4}$$

液压油的体积压缩系数 $K = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$,其体积模量 $E = (1.4 \sim 2.0) \text{ GPa}$ 。钢的体积模量 $E = 2.06 \times 10^2 \text{ GPa}$,液压油的体积模量为钢的 $\frac{1}{140} \sim \frac{1}{100}$ 。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、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。常用液压系统工作介质体积模量如表 2-1 所示。

表 2-1 常用液压系统工作介质体积模量 (GPa)

水	油包水	水—乙二醇	磷酸酯	矿物油	甘油	硅酮油
2.12	2.3	3.45	2.05	1.4~2.0	4.0	1.0

实际液压系统中,油液中混有空气,使压缩性显著增加,体积模量显著减小。

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 ,这时油液等效体积模量 E' 的表达式为

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

则

$$\frac{1}{E'} = -\frac{\Delta V_1 + \Delta V_c}{\Delta p \cdot V} = -\frac{\Delta V_1}{\Delta p \cdot V} - \frac{\Delta V_c}{\Delta p \cdot V} = \frac{1}{E} + \frac{1}{E_c} \tag{2-5}$$

式中 E ——油液的体积模量;

E_c ——封闭容器的体积模量。

3. 黏性

液体在外力作用下流动时,由于液体分子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。

如图 2-1 所示,设两平行平板间充满油液,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,运动快的流层拖动运动慢的流层,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

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

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,对于静止液体来说, $du=0$,则 $F_{\tau}=0$,所以静止液体不呈现黏性。

如以 $\tau = \frac{F_{\tau}}{A}$ 表示切应力,则有

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

当 $\frac{du}{dy} > 0$ 时,取“+”;当 $\frac{du}{dy} < 0$ 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, 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)得动力黏度

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

式(2-8)的物理意义是,液体以单位速度梯度流动时,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($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。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为

$$1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 10^3 \text{ cP}$$

动力黏度 μ 与液体密度 ρ 之比值叫做运动黏度(ν),即

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

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。

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

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

我国液压油的黏度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

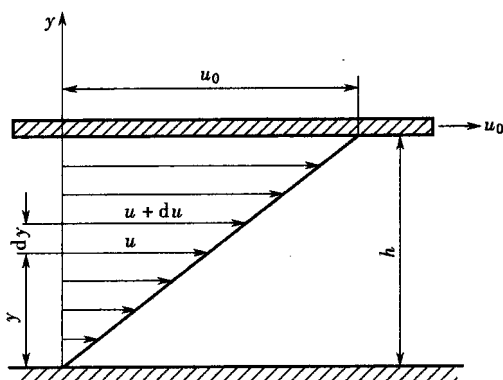


图 2-1 相对运动与黏性

号上。每一种机械油的牌号,就表示这种油在 40 ℃ 时以 mm²/s 为单位的运动黏度 ν 的平均值。例如,N32 机械油,表示在 40 ℃ 时其运动黏度的平均值为 32 mm²/s。

动力黏度和运动黏度都难以直接测量。工程上常用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,中国、俄罗斯和德国用恩氏黏度 $^{\circ}\text{E}_t$ 表示,美国用国际赛氏粘度表示,英国用商用雷氏粘度表示。

恩氏黏度的测定方法如下:测定 200 cm³ 温度为 t (℃) 时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 ℃ 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温度为 t (℃) 时的恩氏黏度值,表示为

$$^{\circ}\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2}$$

(2-10)

工业一般以 20 ℃、50 ℃ 和 100 ℃ 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。

各种黏度的单位名称、符号、采用国家与换算公式见表 2-2。

表 2-2 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	采用国家和地区	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	俄罗斯	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
运动黏度	黏性运动系数 (绝对黏度)	ν	厘 沲 cst(俄罗斯) cst(英国)	中国、俄罗斯、 英国、美国、日本	
恩氏黏度	相对黏度	$^{\circ}\text{E}_t$	度	中国、欧洲	$\nu = 7.31^{\circ}\text{E}_t - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}_t}$ (乌别洛德近似公式)
赛氏粘度	通用赛波尔、 特 秒	S	秒	美国	$\nu = 0.225S$
雷氏粘度	雷氏秒	R_1	秒	英国、美国	$\nu = 0.26R_1 - \frac{172}{R_1}$

液压油黏度对温度的变化十分敏感,温度升高,油的黏度下降。不同种类的油液的黏度随温度变化的规律也不同。不同黏度等级的油液黏度与温度的关系(黏度指数=95)如图 2-2 所示。

液压油的黏度指数(VI)表明液压油的黏度随温度变化的程度同标准油黏度变化程度比值的相对值。黏度指数高,则黏温特性好。一般液压油的黏度指数要求在 90 以上,优异的在 100 以上。

油液的黏度也受压力变化的影响。压力增加,其分子间距离缩小,黏度增大。但压力

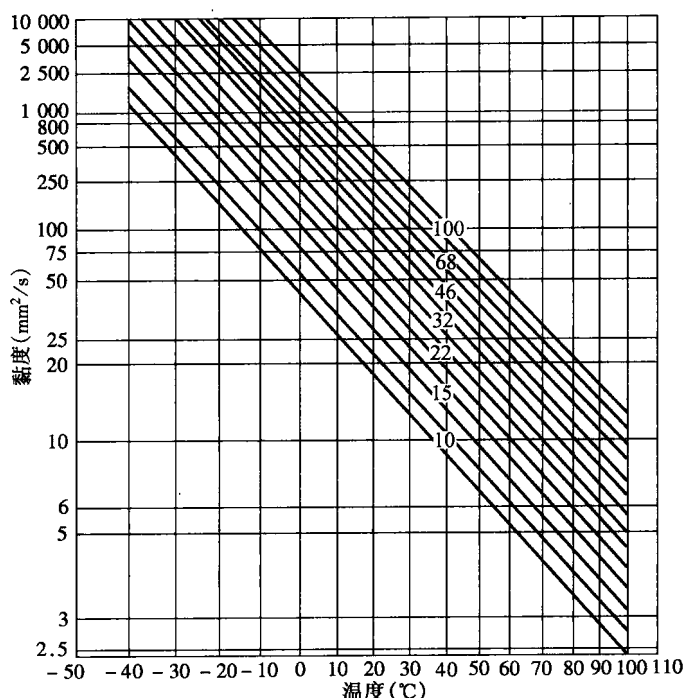


图 2-2 油液的黏度与温度特性

在 20 MPa 以下时,黏度变化不大,实际应用中可忽略不计。当压力很高时,黏度将急剧增大,不容忽视。矿物油系液压油的黏度与压力的关系可用经验公式表示,即

$$\nu_p = \nu_0 e^{bp} \quad (2-11)$$

式中 ν_p ——压力为 p 时的运动黏度;

ν_0 ——压力为 1 个大气压时的运动黏度;

b ——系数,对于一般液压传动油为 $(0.002 \sim 0.004) \times 10^{-5} \text{ Pa}^{-1}$;

p ——油的压力,Pa。

2.1.2 对液压油的要求

液压介质是液压系统中最重要的材料,是系统的生命线。它将系统中各元件沟通起来成为一个有机整体。液压系统对所用油液的要求如下。

1) 黏度适宜和黏温特性好 适宜的黏度和良好的黏温特性对液压系统十分重要。一般液压系统所用的液压油的黏度范围为

$$\nu = (11.5 \sim 35.3) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

2) 润滑性能好 在液压机械设备中,除液压元件外,还有一些相对运动的零件也需要润滑,因此,液压油应具有良好的润滑性和很高的油膜强度。

3) 稳定性好 即对热、氧化、水解和剪切都有良好的稳定性,使用寿命长。油液抵抗