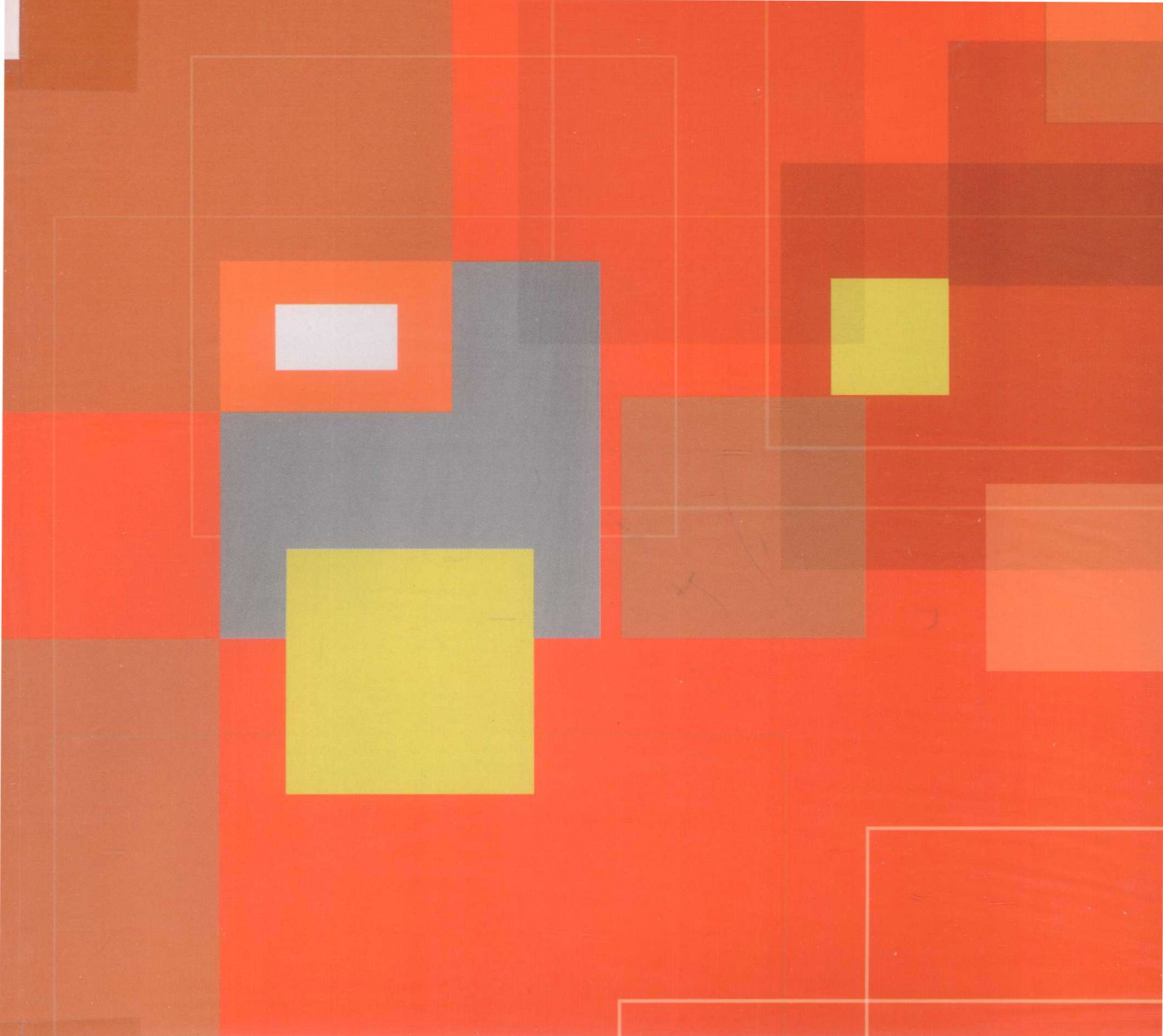




液 压 与 气 动 技 术

● 主 编 宋金虎

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

液压与气动技术

主 编 宋金虎

副主编 温 红 卢洪德 滕文建 姚传峰

主 审 钟宝华



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书主要介绍液压与气动技术的基础知识、理论以及与之相关的基本技能,注重基础理论教育的同时,突出实用性、针对性和先进性,体现高等教育的特点。按照“基于工作过程”的项目式教学的要求组织内容,包括液压油的选用及污染控制,液动力元件的选用及故障排除,液压执行元件的选用及故障排除,液压控制阀的选用及故障排除,液压辅助元件的选用和安装,液压系统基本回路的连接与安装,液压系统的安装、调试及故障排除,液压伺服系统的应用,气动系统元件的选用,气动系统的安装、调试及故障排除等10个项目,每个项目按照“项目导入—项目分析(学习内容、知识目标、能力目标)—相关知识—项目实施—知识拓展—综合训练”的学习流程进行体系设计。在“知识拓展”部分较深入地介绍了理论知识及其他拓展应用等。

本书可以作为高等院校机电类各专业及汽车类专业液压与气动技术课程的教材,也可以作为企业岗位培训教材,同时可作为广大自学者的自学用书及工程技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动技术/宋金虎主编. —北京:北京理工大学出版社,2016.8

ISBN 978-7-5682-2640-0

I. ①液… II. ①宋… III. ①液压传动—高等职业教育—教材 ②气压传动—高等职业教育—教材 IV. ①TH137 ②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第170551号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/<http://www.bitpress.com.cn>

经 销/全国各地新华书店

印 刷/北京国马印刷厂

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/14.5

字 数/338千字

版 次/2016年8月第1版 2016年8月第1次印刷

定 价/46.00元

责任编辑/李秀梅

文案编辑/杜春英

责任校对/周瑞红

责任印制/马振武

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

本书主要介绍液压与气动技术的基础知识、理论以及与之相关的基本技能,注重基础理论教育的同时,突出实用性、针对性和先进性,体现高等教育的特点。按照“基于工作过程”的项目式教学的要求组织内容,包括液压油的选用及污染控制,液压动力元件的选用及故障排除,液压执行元件的选用及故障排除,液压控制阀的选用及故障排除,液压辅助元件的选用和安装,液压系统基本回路的连接与安装,液压系统的安装、调试及故障排除,液压伺服系统的应用,气动系统元件的选用,气动系统的安装、调试及故障排除等10个项目,每个项目按照“项目导入—项目分析(学习内容、知识目标、能力目标)—相关知识—项目实施—知识拓展—综合训练”的学习流程进行体系设计。在“知识拓展”部分较深入地介绍了理论知识及其他拓展应用等。

编写本教材时,编者从高等教育的实际出发,本着“淡化理论,够用为度”的指导思想,以就业为导向,以学生为主体,能力要素与职业素养并重,有机嵌入职业标准,将新知识、新技能引入教材,以解决实践问题为纽带,实现理论与实践、知识与技能以及职业素养的有机整合,既满足学生就业(首岗就业、多岗迁移)的基本需求,又能奠定学生可持续发展的基础。

本书可作为高等院校机电类各专业及汽车类专业液压与气动技术课程的教材,也可以作为企业岗位培训教材,同时可作为广大自学者的自学用书及工程技术人员的参考书。

本教材按总课时80~90学时编写,在实际教学中,教师可根据情况适当增减。液压与气动技术课程的实践性比较强,建议授课教师根据教学内容和特点进行现场教学,教学环境可考虑移到专业实训室、企业生产车间中,尽量采用融“教、学、做”于一体的教学模式。

本教材由宋金虎主编。具体编写分工如下:绪论、项目一、项目二、项目三、项目十由宋金虎编写;项目四、项目五由卢洪德编写;项目六、项目七由温红编写;项目八由滕文建编写;项目九由姚传峰编写。宋金虎负责全书的统稿和定稿,钟宝华审阅了全书并提出了许多宝贵的意见和建议,一汽大众汽车有限公司尹奎伟、北汽福田汽车有限公司邹江涛、山东宏跃网架钢结构有限公司徐玉平对本教材的编写提供了技术支持和建设性意见并参与了部分内容的编写,在此深表感谢!另外,本教材在编写过程中参考了许多文献资料,在此向这些文献资料的作者及支持编写工作的单位和个人表示衷心的感谢!

尽管在探索教材特色的建设方面做出了许多努力,但由于编者水平有限,教材中仍可能存在一些疏漏和不妥之处,恳请各教学单位和读者在使用本教材时多提一些宝贵意见和建议,以便下次修订时改进。

编 者

目 录

绪 论	1
一、液压与气动技术的研究对象	1
二、液压与气动技术的工作原理	1
三、液压与气动系统的组成	1
四、液压与气动的优缺点	3
五、液压与气动技术的应用	4
六、液压与气动技术的发展趋势	4
综合训练	4
项目一 液压油的选用及污染控制	6
项目导入	6
项目分析	6
相关知识	6
一、液压油的种类	6
二、液压油的物理性质	7
三、液压油的污染	10
项目实施	12
一、液压油的选用	12
二、污染的控制	12
知识拓展	13
一、液体静力学	13
二、液体动力学	16
三、液体流动时的压力损失	21
四、液压冲击和气穴现象	23
综合训练	24
项目二 液压动力元件的选用及故障排除	27
项目导入	27
项目分析	27
相关知识	27
一、液压泵概述	27
二、齿轮泵	30
三、叶片泵	35
四、柱塞泵	39

项目实施	42
一、液压泵的选用及使用注意事项	42
二、齿轮泵的常见故障、原因和排除方法	45
三、叶片泵的常见故障、原因和排除方法	46
四、柱塞泵的常见故障、原因及排除方法	48
五、液压泵故障分析实例	49
综合训练	50
项目三 液压执行元件的选用及故障排除	53
项目导入	53
项目分析	53
相关知识	54
一、液压马达	54
二、液压缸	65
项目实施	76
一、液压马达的性能比较及其选用	76
二、液压马达常见故障及排除方法	76
三、液压缸常见故障分析及排除方法	77
知识拓展	77
一、液压缸的典型结构	78
二、液压缸设计中应注意的问题	79
三、主要尺寸的确定	79
综合训练	80
项目四 液压控制阀的选用及故障排除	82
项目导入	82
项目分析	82
相关知识	82
一、液压控制阀概述	82
二、方向控制阀	83
三、压力控制阀	92
四、流量控制阀	100
五、电液比例阀、二通插装阀和数字阀	104
项目实施	109
一、液压控制阀的选择	109
二、液压阀的具体选取	110
三、液压控制阀的故障诊断与排除	111
综合训练	116
项目五 液压辅助元件的选用和安装	120
项目导入	120
项目分析	120

相关知识	120
一、蓄能器	120
二、过滤器	121
三、油箱	122
四、油管及管接头	122
项目实施	123
一、蓄能器的选用及安装	123
二、过滤器的选用及安装	124
三、油箱的设计	128
四、油管及管接头的选用	129
综合训练	132
项目六 液压系统基本回路的连接与安装	134
项目导入	134
项目分析	134
相关知识	134
一、压力控制回路	134
二、方向控制回路	140
三、速度控制回路	141
四、多缸动作控制回路	150
项目实施	153
综合训练	154
项目七 液压系统的安装、调试及故障排除	158
项目导入	158
项目分析	158
相关知识	158
一、组合机床动力滑台液压系统	159
二、压力机液压系统	161
项目实施	164
一、液压系统安装、调试、使用和维护	164
二、液压传动常见故障的分析和排除方法	167
知识拓展	171
一、明确设计要求, 进行工况分析	171
二、拟定液压系统原理图	174
三、计算和选择液压元件	175
四、液压系统工作性能分析	177
综合训练	177
项目八 液压伺服系统的应用	178
项目导入	178
项目分析	178

相关知识	178
一、液压伺服控制系统概述	178
二、液压控制阀	180
三、电液伺服阀	183
项目实施	185
一、车床液压仿形刀架	185
二、钢带张力控制系统	186
综合训练	186
项目九 气动系统元件的选用	188
项目导入	188
项目分析	188
相关知识	189
一、气源装置	189
二、气动辅助元件	193
三、气动执行元件	194
四、气动控制元件	198
项目实施	204
一、空气压缩机的选用	204
二、过滤器的选用	205
三、油雾器的选用	205
四、气缸的选择和使用要求	205
五、气动马达的选择和使用要求	206
六、方向控制阀的选用	206
七、减压阀的选用	207
八、溢流阀的选用	207
综合训练	207
项目十 气动系统的安装、调试及故障排除	209
项目导入	209
项目分析	209
相关知识	209
一、气动基本回路	209
二、气动系统实例分析	216
项目实施	220
一、气动系统安装、调试、使用与维护	220
二、气动系统常见故障分析与排除方法	222
综合训练	223
参考文献	224

绪 论

一、液压与气动技术的研究对象

液压与气动技术是以压力油或压缩空气为传递能量的载体,来实现各种传动和控制的一门技术。本课程的主要任务是介绍传动介质的基本物理性质及其静力学、动力学、热力学特性,掌握组成系统的各类液压与气动元件的结构、工作原理,以及由这些元件组成的各种控制回路的特点及应用,熟悉液压与气动装置的安装、调试、故障分析与排除方法,并在此基础上进行液压与气动系统的分析与设计。

二、液压与气动技术的工作原理

液压与气动实现传动和控制的方法基本相同,现以液压千斤顶为例,简述液压与气压传动的工作原理。

如图 0-1 所示,大、小活塞可以分别在大、小缸体内上下移动,由于活塞与缸体内壁间有着良好的密封,形成一个容积可变的密封空间,当提起手柄时,小活塞在小缸体内上移,其下部缸体内容积增大,形成局部真空,这时大活塞上的重物使大缸体内的液压油作用在单向阀 6 上,单向阀 6 关闭,而油箱内的液压油在大气压作用下冲开单向阀 2 进入小缸体,完成吸油;用力压下手柄,小活塞下移,其下腔内压力升高,单向阀 2 关闭,液压油冲开单向阀 6 进入大缸体,迫使大活塞上移,顶起重物 G 。再次提起手柄,大缸体内压力油使单向阀 6 自动关闭,小缸体下腔继续从油箱吸油。不断往复提压手柄,就能不断把油液压入大缸体下腔,使重物逐渐升起。如果将放油阀 9 转过 90° ,油液流回油箱,则大活塞下移,重物回落。可见手柄、小缸体、小活塞、两个单向阀组成了手动液压泵。

如果将图 0-1 中液压缸换成气缸,油液换成空气,并去掉油箱,就成为简单的气压装置,生活中的打气筒就是这个原理。

综上所述,液压与气动是以油液或空气作为工作介质,依靠密封容积的变化传递运动,依靠介质内压力传递动力的。其实质是能量转换,先将机械能转换成压力能,通过各种元件组成的控制回路实现能量控制,再将压力能转换成机械能。

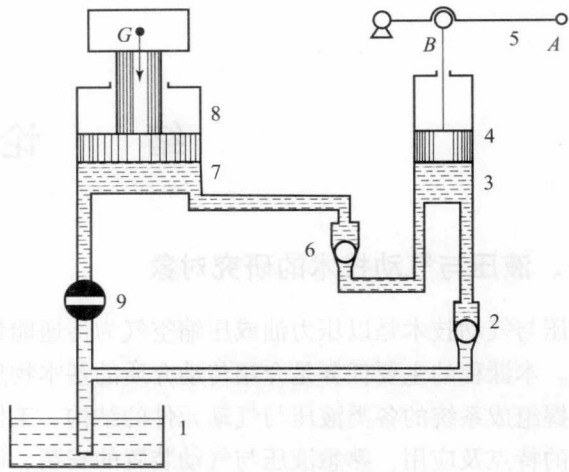
三、液压与气动系统的组成

图 0-2 所示为机床工作台的液压传动系统,其工作原理是电动机带动液压泵 2 从油箱中吸油,油液经过过滤器进入液压泵,在液压泵出口向系统输出一定压力和流量的液压油,通过节流阀 4、换向阀 5 进入液压缸 6 的右腔,推动活塞带动工作台左移,液压缸左腔里的油液经换向阀流回油箱。如果换向阀手柄扳向右位,可以实现液压缸左腔进油,右腔回油,

工作台向右移动。可见，换向阀用于控制液压缸工作台的运动方向。



(a)



(b)

图 0-1 液压千斤顶的实物和工作原理

(a) 实物；(b) 工作原理

1—油箱；2、6—单向阀；3—小油缸；4—小活塞；5—手柄；
7—大油缸；8—大活塞；9—放油阀

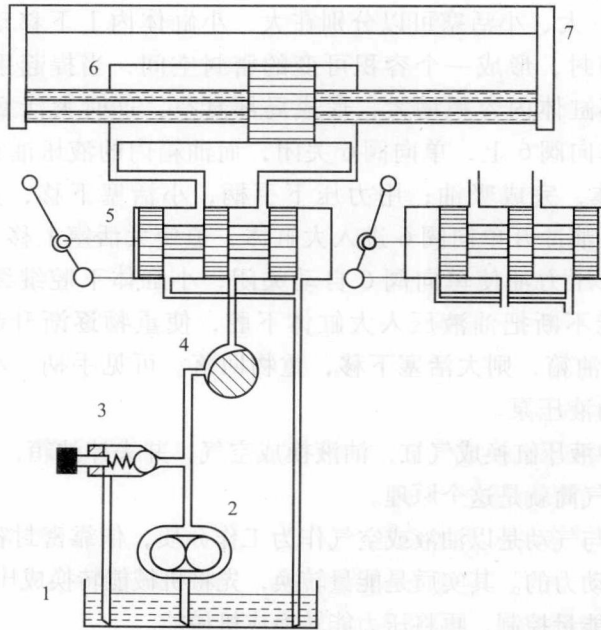


图 0-2 机床工作台的液压传动系统

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

工作台的运动速度可以通过节流阀 4 来调节，当节流阀阀口开大时，进入缸内的油液流量增大，工作台运动速度加快。

工作台运动时必须克服各种阻力，如切削力和摩擦力等，要求液压缸必须产生足够大的推力，而推力的大小由液压缸内油液压力保证，因此液压油的压力应根据克服负载的大小进行调

节,这主要由溢流阀3调定,同时,当节流阀阀口一定时,多余的油液需经溢流阀流回油箱。

综上所述,液压与气动系统主要由以下几部分组成:

(1) 动力装置。把机械能转换成压力能的装置,如液压泵和空气压缩机。

(2) 执行装置。把压力能转换成机械能的装置,如液压缸、液压马达、气压缸和气压马达。

(3) 控制调节装置。对液压与气压系统中流体的压力、流量和流动方向进行控制和调节的装置,如单向阀、换向阀、节流阀和溢流阀等。

(4) 辅助装置。包括油箱、过滤器、蓄能器和管件等。

(5) 工作介质。传递能量的载体,即液压油和压缩空气。

四、液压与气动的优缺点

传动与控制方式可分为机械传动、电力传动、液压和气压传动。与机械传动、电力传动相比,液压与气动有以下特点。

1. 液压传动的优点

(1) 在相同功率的情况下,液压传动的体积和质量较小。

(2) 液压传动可以实现无级调速,调速范围广(可达1:2 000)。

(3) 液压传动工作平稳,换向冲击小,反应速度快,易于实现频繁的换向。

(4) 液压传动便于实现过载保护,液压油使元件自润滑,使用寿命长。

(5) 液压传动对液体的压力、流量和流动方向进行控制和调节,容易实现自动化,操纵方便。

(6) 液压元件已标准化、系列化、通用化。

2. 液压传动的缺点

(1) 液压传动存在泄漏及液体可被压缩,使传动不准确。

(2) 液压传动中存在流量损失、压力损失及摩擦损失,传动效率不高,且不宜做远距离传动。

(3) 液压传动对油温、油污比较敏感,不能在较高温度和较低温度下工作,对油液质量要求较高。

3. 气压传动的优点

(1) 空气取自大气,用之不竭,无介质费用,使用后排入大气,处理方便。

(2) 空气黏度小,管路中阻力损失少,宜于远程传动和控制。

(3) 工作压力低,元件制造精度要求低,成本低。

(4) 维护简单,使用安全,无油的气动控制适用于无线电元器件的生产及食品、医药的生产过程。

(5) 气动元件可以根据不同场合采用相应材料,在易燃、高温、强振动、强腐蚀和强辐射等恶劣条件下工作。

4. 气压传动的缺点

(1) 气压传动的信号传递速度限制在声速范围内,其工作频率和响应速度不如电子装置,且信号会产生较大失真和延滞,不宜用于复杂的回路。

(2) 空气压缩性大,在动作响应能力及工作速度平稳性方面不如液压传动。

(3) 气压传动输出力较小，传动效率低。

五、液压与气动技术的应用

液压与气动控制越来越广泛地应用于工业领域的各个方面，如表 0-1 所示。

表 0-1 液压与气动控制的应用

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	凿岩机、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	压力机、模锻机、空气锤	纺织机械	织布、抛砂机、印染机
机械制造	组合机床、冲床、自动生产线、气动扳手	汽车制造	冲床、自动生产线、气动扳手、压力机

液压与气动技术的应用主要由其本身的特点决定，如工程机械、矿山机械、建筑机械中主要考虑液压传动结构简单、体积和质量小、输出力大；金切机床、自动生产线、数控设备、加工中心等应用液压传动是取其能方便地实现无级调速，冲击小，工作平稳，可以频繁地换向，易于实现自动化；电子工业、食品机械等行业，应用气压传动主要是因为其操作方便，无油、无污染。

六、液压与气动技术的发展趋势

液压技术自 18 世纪末英国制造出世界上第一台水压机，距今已有约 300 年的历史，但其真正的发展是在第二次世界大战后的 50 余年的时间内，战后液压技术迅速转向民用工业，在机床、工程机械、农业机械、汽车等行业逐步推广。20 世纪 60 年代以来，随着原子能、空间技术、计算机技术的发展，液压技术得到了极大的推广，并渗透到各个工业领域。当前液压技术正向高压、高速、高效、高寿命、低噪声、大功率、高度集成化方向发展。同时，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）、计算机直接控制技术、机电一体化技术、可靠性技术、计算机仿真和优化设计技术以及污染控制技术等方面也是当前液压传动与控制技术的发展与研究方向。

气压传动技术在科技迅猛发展的今天得到迅速推广，已从汽车、采矿、钢铁、机械工业扩展到化工、轻工、食品、军事等各行业。气动技术的发展包含传动、控制与检测在内的自动化技术。当前气动元件的发展特点是节能化、小型化、轻量化、位置控制的高精度化，以及与电、液相结合的综合控制技术。

综合训练

一、填空题

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

2. 液压与气动是以_____为工作介质, 依靠_____的变化传递运动, 依靠介质内_____传递动力的。其实质是_____, 先将_____能转换成_____能, 通过各种元件组成的_____实现能量控制, 再将_____能转换成_____能。

二、选择题

1. 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 ()。
 - A. 液压泵
 - B. 液压马达
 - C. 液压缸
 - D. 控制阀
2. 液压泵将 ()。
 - A. 液压能转换成机械能
 - B. 电能转换成液压能
 - C. 机械能转换成液压能
 - D. 机械能转换成动能
3. 液压系统利用液体 () 来传递动能。
 - A. 位能
 - B. 动能
 - C. 压力能
 - D. 热能

三、简答题

1. 液压与气动的工作原理是什么?
2. 液压传动主要由哪几部分组成? 各部分的主要作用是什么?
3. 液压传动有何优缺点?
4. 气压传动有何优缺点?

项目一 液压油的选用及污染控制



项目导入 ○○○

液压油作为液压传动的工作介质，在液压系统中起着能量传递、润滑、防腐、防锈及冷却等作用。



项目分析 ○○○

掌握液压油的种类、物理性质，熟悉液体的静力学特征、运动学和动力学规律，对于理解液压传动的工作原理、合理选用液压元件和正确使用液压系统是非常有必要的。

主要学习内容：

液压油的种类、物理性质及液压油的选用；液压油的污染及控制；液体静力学；液体动力学；液体流动时的压力损失；液压冲击和气穴现象。

知识目标：

1. 掌握液压油的种类、物理性质及液压油的选用方法。
2. 熟悉液体的静力学特征、运动学和动力学规律。
3. 熟悉液压冲击和气穴现象的原因、危害及预防措施。
4. 掌握液压油的污染原因、危害及控制措施。

能力目标：

1. 能够根据液压油的种类、物理性质、选用原则及液体的静力学特征、运动学和动力学规律，合理选用液压油。
2. 能够根据液压油的污染原因及危害，正确采取控制液压油污染的措施。



相关知识 ○○○

一、液压油的种类

液压系统常用的液压油主要有三大类：矿油型、乳化型和合成型。矿油型液压油是由提炼后的石油制品加入各种添加剂精制而成的，具有品种多、润滑性好、腐蚀性小、化学稳定性好、成本低、使用范围广等优点，为大多数液压系统所采用。矿油型液压油的主要缺点是易燃，在高温、易燃、易爆的工作环境应使用难燃的液体，如水包油、油包水乳化液或水-乙二醇液、磷酸酯合成液。

液压油的详细分类、代号和应用如表 1-1 所示。

表 1-1 液压油的分类

分类	名称	代号	组成和特性	应用
矿油型	精制矿物油	L-HH	无抑制剂的精制矿物油, 不含添加剂, 稳定性差, 易氧化、易起泡, 易生成胶块, 阻塞元件小孔	主要用于润滑要求不高的低压系统, 液压代用油
	普通液压油	L-HL	精制矿物油加抗氧化、防锈添加剂, 提高了抗氧化和防锈性能	用于一般设备的中低压系统
	抗磨液压油	L-HM	L-HL 加抗磨剂、金属钝化剂、消泡剂, 改善抗磨性	适用于工程机械、车辆液压系统
	低温液压油	L-HV	L-HM 加添加剂, 改善黏温特性	适用于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高压系统
	高黏度指数液压油	L-HR	L-HL 加黏度指数添加剂, 改善黏温特性, 黏度指数达 175 以上	适用于环境温度变化较大的低压系统、数控机床液压系统
	液压导轨油	L-HG	L-HM 加抗黏滑剂, 具有良好的防锈、抗氧化、抗磨性, 改善黏滑性能, 低速下防爬行	适用于机床中液压和导轨润滑合用的系统
	其他液压油			
乳化型	水包油乳化液	L-HFAE	高水基液, 难燃, 黏温特性好, 但润滑性差, 易泄漏	适用于有抗燃要求、用量较大的液压系统
	油包水乳化液	L-HFB	抗磨、防锈、抗燃性能好	适用于有抗燃要求的中压系统
合成型	水-乙二醇液	L-HFC	难燃, 黏温特性和抗蚀性好, 能在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下使用	适用于有抗燃要求的中低压系统
	磷酸酯合成液	L-HFDR	难燃, 具有良好的润滑性、抗磨性和抗氧化性, 能在 $-54\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 135\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用, 但有毒	适用于有抗燃要求的高压精密液压系统

二、液压油的物理性质

1. 密度

单位体积液体的质量称为液体的密度, 用 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。设液体体积为 V (单位为 m^3)、质量为 m (单位为 kg), 则该液体的密度 ρ 为

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

液体密度随温度的升高而减小, 随压力的升高而增大。但是, 由于温度和压力对密度的影响都很小, 一般情况下可视液体的密度为常数。矿油型液压油的密度 $\rho = 850 \sim 900\text{ kg}/\text{m}^3$ 。

2. 可压缩性

液体受压力作用其体积减小的性质称为液体的可压缩性, 用体积压缩系数 κ 表示, 即在

单位压力变化下液体体积的相对变化量。设体积为 V 的液体，当压力增大 Δp 时，体积减小了 ΔV ，则体积压缩系数 κ 为

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

式中，负号表示 Δp 与 ΔV 的变化相反，即压力增大体积减小。

实际应用中，常用体积弹性模量 K 值的大小反映液体抵抗压缩的能力。液体体积弹性模量 K 为体积压缩系数 κ 的倒数，即

$$K = \frac{1}{\kappa} = -\frac{V_0}{\Delta V} \Delta p \quad (1-3)$$

体积弹性模量 K 的单位为 Pa。

K 表示产生单位体积相对变化量所需的压力增量。常温下，纯净液压油 $K = (1.4 \sim 2.0) \times 10^3$ MPa，是钢的 100 ~ 150 倍。在一般液压系统中，认为液压油是不可压缩的。但是，如果油液中混有游离空气，液体体积弹性模量会显著降低，将严重影响液压系统的工作性能。如果油液中混有 1% 的气体，其 K 值只是纯净油液的 30%；如果油液中混有 4% 的气体，其 K 值仅为纯净油液的 10%。由于油液中的气体难以完全排除，实际计算中，常将油液的体积弹性模量 K 值取为 $(0.7 \sim 1.0) \times 10^3$ MPa。

3. 黏性

(1) 黏性的物理意义。

液体在外力作用下流动时，分子间的内聚力阻碍其相对运动而产生内摩擦力，这一性质称为液体的黏性。

由于液体内部黏性以及液体与固体壁面间的附着力，液体内部各处的速度不相等。如图 1-1 所示，设两平行平板间充满液体，下平板不动，上平板以速度 u_0 向右平移。由于液体存在黏性，紧靠下平板的液层速度为零，紧贴上平板的液层速度为 u_0 ，而中间各液层的速度从下到上呈线性递增。

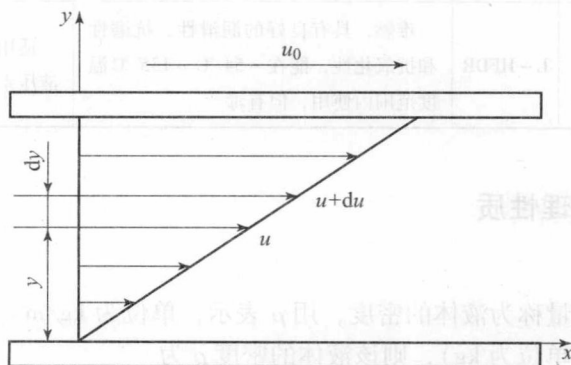


图 1-1 液体黏性示意图

实验表明，液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F 与液层接触面积 A 、液层间相对速度 du 成正比，与液层间距离 dy 成反比，即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中 μ ——比例常数,称为黏性系数或动力黏度。

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度。

若以 τ 表示切应力,则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-5)$$

即液层间单位面积上的内摩擦力,这就是牛顿液体内摩擦定律。

在静止液体中,由于速度梯度为零,内摩擦力为零,所以静止液体不呈现黏性。

(2) 黏度的表示方法。

①动力黏度。动力黏度又称为绝对黏度,是指单位速度梯度下流动时单位面积上产生的内摩擦力。

$$\mu = \frac{F}{A} \frac{du}{dy} \quad (1-6)$$

动力黏度的国际单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

②运动黏度。动力黏度 μ 与液体密度 ρ 的比值称为液体的运动黏度,用 ν 表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-7)$$

运动黏度没有明确的物理意义,由于它的量纲只与长度和时间有关,所以称为运动黏度。

运动黏度的国际单位为 m^2/s , 工程中常用 mm^2/s , $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^6 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

国际标准化组织 ISO 规定统一采用运动黏度表示液压油的黏度等级。我国生产的液压油采用 40°C 时的运动黏度 (mm^2/s) 为黏度等级标号。如牌号为 L-HL22 表示普通液压油在 40°C 时的运动黏度平均值为 $22 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

③相对黏度。相对黏度又称条件黏度,它是在一定测量条件下测定的。中国、德国等都采用恩氏黏度 E , 美国采用赛氏黏度 SSU, 英国采用雷氏黏度 R 。

恩氏黏度用恩氏黏度计测定,将 200 mL 温度为 T 的被测液体装入黏度计,在自身重力作用下流过黏度计下部 $\phi 2.8 \text{ mm}$ 的小孔,测出液体流尽所需时间 t_1 , 其与温度为 20°C 的 200 mL 蒸馏水在同一黏度计中流尽所需时间 t_0 标定值之比,称为恩氏黏度。即

$$E_t = \frac{t_1}{t_0} \quad (1-8)$$

一般以 20°C , 50°C , 100°C 作为测定液体黏度的标准温度。

恩氏黏度与运动黏度间的换算关系为

$$\nu = \left(7.31 E_t - \frac{6.31}{E_t} \right) \times 10^{-6} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (1-9)$$

(3) 影响黏度的因素。

油液对温度的变化十分敏感,温度升高,黏度降低。油液黏度随温度变化的性质称为黏温特性。图 1-2 所示为几种典型液压油的黏温特性曲线。