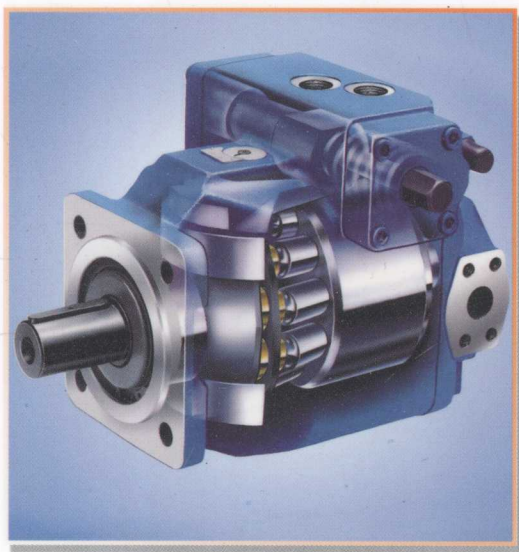


液压与气动技术

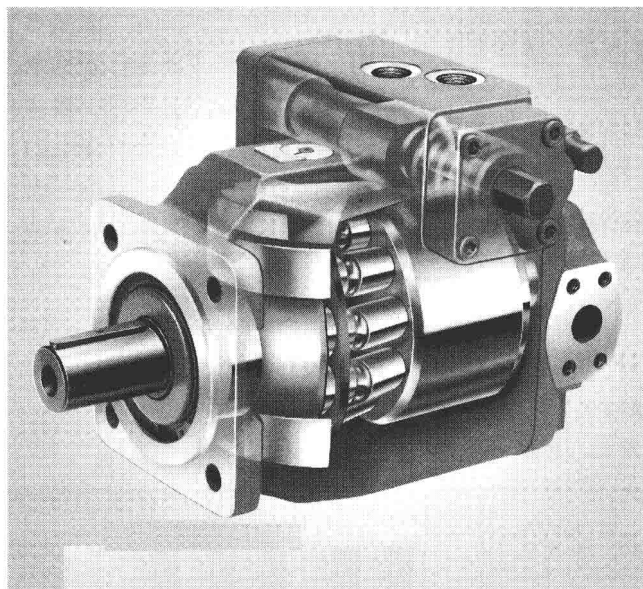
牟志华 张海军 主 编
刘加利 辛春红 副主编



YEYA YU QIDONG JISHU

液压与气动技术

牟志华 张海军 主 编
刘加利 辛春红 副主编
刘成好 张作状 褚彩萍 程麒文 参 编



YEYA YU QIDONG JISHU

内 容 简 介

本书是教育部高职高专自动化技术类专业教学指导委员会推荐教材,是围绕高职教育倡导的能力目标为主线编写的。本书以高等职业教育的实际要求为依据,以切实培养和提高职业院校机电类专业学生的专业技能为目的,突出实用性和针对性。编者不拘泥于理论研究,注重对液压与气动技术的理解及实际应用。对于重点要培养的能力点及知识点,均配备相应的实践教学任务,强化学生的动手操作能力及团队协作意识。

全书共五个项目,主要内容有液压传动的认识、液压工作介质认知、流体力学分析、液压气动系统运行中常见问题的分析及处理、液压系统组成及图形符号认识、液压系统动力元件、执行元件、控制元件及辅助元件的结构原理分析、液压基本回路工作原理及在工程中的典型应用、液压系统设计的方法步骤、气压传动的基础知识、气动组成部分的结构原理、常见气动回路的分析及应用等。

本书适合作为高职高专院校机电一体化、电气自动化、机械制造及自动化等相关专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

206207
液压与气动技术/牟志华,张海军主编. —北京:

中国铁道出版社, 2010.1 (2011.7 重印)

全国高职高专院校机电类专业规划教材

ISBN 978-7-113-10917-2

I. ①液… II. ①牟… ②张… III. ①液压传动—高等学校: 技术学校—教材②气压传动—高等学校: 技术学校—教材 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 018344 号

书 名: 液压与气动技术

作 者: 牟志华 张海军 主编

策划编辑: 严晓舟 祁 云

责任编辑: 秦绪好

编辑部电话: (010) 63560056

编辑助理: 胡京平

封面设计: 付 巍

封面制作: 李 路

版式设计: 于 洋

责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号) 邮政编码: 100054)

印 刷: 三河市华业印装厂

版 次: 2010年3月第1版 2011年7月第2次印刷

开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 14.25 字数: 346千

书 号: ISBN 978-7-113-10917-2

定 价: 24.00元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社计算机图书批销部联系调换。

全国高职高专院校机电类专业规划教材

编审委员会

主 任: 吕景泉

副主任: 严晓舟 史丽萍

委 员: (按姓氏笔画排序)

王文义	刘建超	肖方晨	李向东	狄建雄
汪敏生	宋淑海	张 耀	明立军	陈铁牛
钟江生	胡学同	凌艺春	秦绪好	钱逸秋
梁荣新	常晓玲	程 周	谭有广	

王 立	王龙义	王建明	牛云陞	关 健
朱凤芝	牟志华	汤晓华	刘薇娥	李 文
李 军	张文明	张永花	陆建国	陈 丽
林 嵩	金卫国	宝爱群	姚 吉	姚永刚
祝瑞花	徐国林	秦益霖	韩 丽	曾照香

随着我国高等职业教育改革的不断深化发展,我国高等职业教育改革和发展进入一个新阶段。教育部下发的《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》教高[2006]16号文件旨在进一步适应经济和社会发展对高素质技能型人才的需求,推进高职人才培养模式改革,提高人才培养质量。

教材建设工作是整个高等职业院校教育教学工作中的重要组成部分,教材是课程内容和课程体系的知识载体,对课程改革和建设既有龙头作用,又有推动作用,所以提高课程教学水平和质量的关键在于建设高水平高质量的教材。

出版面向高等职业教育的“以就业为导向的,以能力为本位”的优质教材一直以来就是中国铁道出版社优先开发的领域。我社本着“依靠专家、研究先行、服务为本、打造精品”的出版理念,于2007年成立了“中国铁道出版社高职机电类课程建设研究组”,并经过2年的充分调查研究,策划编写、出版了本系列教材。

本系列教材主要涵盖高职高专机电类的公共平台课和6个专业及相关课程,即:电气自动化专业、机电一体化专业、生产过程自动化专业、数控技术专业、模具设计与制造专业以及数控设备应用与维护专业,既自成体系又具有相对独立性。本系列教材在研发过程中邀请了高职高专自动化教指委专家、国家级教学名师、精品课负责人、知名专家教授、学术带头人及骨干教师。他们针对相关专业的课程设置融合了多年教学中的实践经验,同时吸取了高等职业教育改革的成果,无论从教学理念的导向、教学标准的开发、教学体系的确立、教材内容的筛选、教材结构的设计,还是教材素材的选择都极具特色。

归纳而言,本系列教材体现如下几点编写思想:

(1)围绕培养学生的职业技能这条主线设计教材的结构,理论联系实际,从应用的角度组织内容,突出实用性,同时注意将新技术、新工艺等内容纳入教材。

(2)遵循高等职业院校学生的认知规律和学习特点,对于基本理论和方法的讲述力求通俗易懂,多用图表来表达信息,以解决日益庞大的知识内容与学时偏少之间的矛盾;同时增加相关技术在实际生产和生活中的应用实例,引导学生主动学习。

(3)将“问题引导式”、“案例式”、“任务驱动式”、“项目驱动式”等多种教学方法引入教材体例的设计中,融入启发式教学方法,务求好教好学爱学。

(4)注重立体化教材的建设,通过主教材、配套素材光盘、电子教案等教学资源的有机结合,提高教学服务水平。

总之,本系列教材在策划出版过程中得到了教育部高职高专自动化技术类专业教学指导委员会以及广大专家的指导和帮助,在此表示深深的感谢。希望本系列教材的出版能为我国高等职业院校教育改革起到良好的推动作用,欢迎使用本系列教材的老师和同学提出宝贵的意见和建议。书中如有不妥之处,敬请批评指正。

中国铁道出版社

本书是根据2009年5月教育部高职高专自动化技术类教学指导委员行动导向教学工作研讨会会议精神编写的。在本次会议上,来自全国各个省(自治区、直辖市)多所高校的自动化类院系领导和具有丰富专业教学经验的骨干教师,以及自动化教育界专家对我国当前高职教育发展的形势与挑战进行了充分的讨论,一致认为本系列教材针对学生就业以及社会要求,突出专业特色,注重专业基础知识以及技术应用,培养21世纪高素质、高技能人才。

本书对液压与气动技术的知识进行了较为详尽的阐述,对较深的理论分析与计算进行了适当删减,突出了教学研究中的一些成果与特色;编写过程中注重实际常用技术的分析与应用,强化学生的工程意识,培养学生掌握专业理论与解决实际问题的能力。

本书在内容取材及安排上具有以下特点:

- 以培养学生能力为主线,以实际应用为目的,做到用理论指导实践,培养学生解决实际工程问题的能力。
- 注重培养学生对理论知识的运用能力,每个单元的内容均以任务形式出现,对应培养相关的能力目标与知识目标;正文中的知识点大多针对工程实际中遇到的问题,具有很高的工程实用性。
- 注重锻炼学生的实际工作能力,任务配备相关的项目来加深学生对理论知识的理解,任务实施后根据评价表的能力点进行考核,给出优、良、一般等形成性评价,在工作过程中培养学生的团队协作意识及独立学习的能力。
- 本书编写时采用国际通用的图形符号、名词与术语,并利用拓展任务来反映国内外现代液压与气动技术的最新成就和发展趋势。

本书由日照职业技术学院牟志华任第一主编,并编写了项目一中的任务2~5;日照职业技术学院张海军任第二主编,编写了项目二中的任务4;刘加利为副主编,编写了项目五;辛春红为副主编,编写了项目一中的任务1;刘成好编写了项目二中的任务1、任务2;张作状编写了项目三,程麒文编写了项目四,山东水利职业学院的褚彩萍编写了项目二中的任务3、任务5。全书由牟志华、张海军统稿并定稿。

作者在编写本书的过程中,得到了日照海大自动化科技有限公司、天津中德职业技术学院、广西轻工职业技术学院、平顶山工业职业技术学院等单位同仁的大力支持,在此表示衷心的感谢!

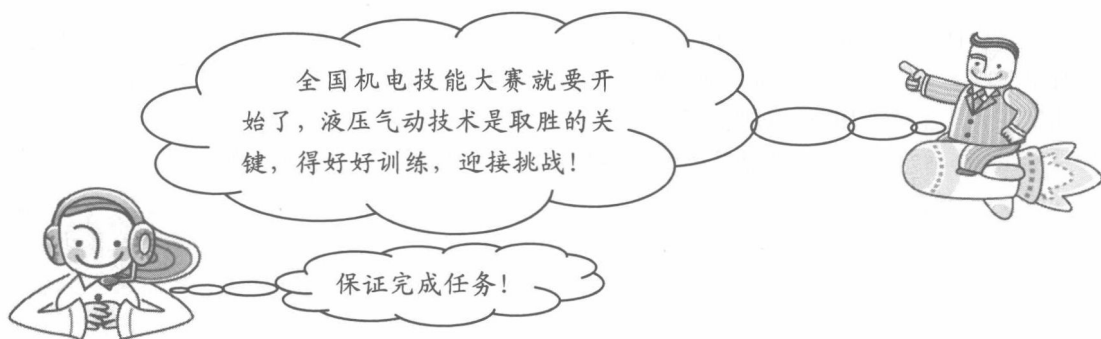
由于编者水平有限,加上时间仓促,书中的错误以及疏漏在所难免,欢迎广大读者批评指正。

编 者

2010年2月

项目一 液压传动基础知识	1
任务 1 液压传动系统的认识	1
任务 2 了解液压油	4
任务 3 了解流体力学基础知识	11
任务 4 液压系统运行中常见问题分析与处理	22
任务 5 孔口及缝隙流量分析	26
项目二 液压系统组成元件	31
任务 1 液压系统组成及图形符号的认识	31
任务 2 液动力元件的认识	34
子任务 1 液压泵原理分析及参数的认识	34
子任务 2 外啮合齿轮泵的结构分析	37
拓展任务 内啮合齿轮泵及螺杆泵结构原理分析	41
子任务 3 叶片泵的结构原理分析	43
子任务 4 柱塞泵的结构原理分析	48
子任务 5 液压泵的选用	53
任务 3 液压执行元件的认识	55
子任务 1 活塞式液压缸的结构原理分析	55
拓展任务 柱塞式液压缸及其他类型液压缸结构原理分析	60
子任务 2 液压马达结构原理分析	62
任务 4 液压控制元件的认识	66
子任务 1 液压控制阀原理分析及参数的认识	66
子任务 2 方向控制阀结构原理分析	68
子任务 3 压力控制阀结构原理分析	79
子任务 4 流量控制阀结构原理分析	89
拓展任务 1 插装阀与叠加阀结构原理分析	96
拓展任务 2 电液比例阀、伺服阀与电液数字阀结构原理分析	102
任务 5 液压辅助元件的认识	107
项目三 液压基本回路及典型应用	120
任务 1 液压基本回路分析与组建	120
子任务 1 压力控制回路分析与组建	120
子任务 2 速度控制回路分析与组建	126
子任务 3 方向控制回路分析与组建	142

子任务 4 多缸动作回路分析与组建.....	145
任务 2 典型液压系统分析.....	149
子任务 1 组合机床动力滑台液压系统分析	150
子任务 2 汽车起重机液压系统分析	154
子任务 3 数控加工中心液压系统分析	160
项目四 液压传动系统设计与计算.....	165
任务 1 卧式钻镗组合机床动力滑台液压系统设计.....	165
任务 2 卧式钻镗组合机床动力滑台液压系统计算.....	167
项目五 气压传动.....	173
任务 1 气压传动基础知识的认识	173
任务 2 气压传动组成部分结构原理分析.....	176
子任务 1 气源装置的认识.....	177
子任务 2 使用气动执行元件	186
子任务 3 使用气动控制元件	189
任务 3 气压传动常用回路分析及应用.....	195
子任务 1 常用气动回路及 FluidSIM 气动系统仿真与调试.....	196
子任务 2 气动系统的安装与调试	201
子任务 3 气动系统的使用和维护及故障排除	202
附录 常用液压图形符号	207
参考文献.....	217



项目一

液压传动基础知识

液压传动是以压力油为工作介质来实现各种机械的传动和控制的。它利用各种元件组成基本控制回路, 再由若干基本控制回路有机组合成能完成一定控制功能的传动系统, 以此来进行能量的传递、转换及控制, 在工业生产中得到了广泛的应用。

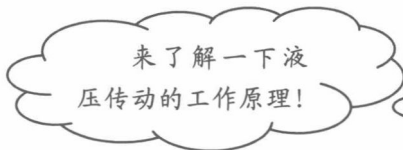
任务 1 液压传动系统的认识

任务目标

- 通过液压千斤顶的工作过程掌握液压传动的基本工作原理;
- 了解液压传动的优缺点;
- 了解液压传动的应用与发展。

任务描述

观察、使用液压千斤顶, 了解液压系统工作原理及组成部分。



知识与技能

1. 液压传动的工作原理

首先我们通过生产中经常见到的液压千斤顶来了解液压传动的工作原理, 图 1-1 所示为该液压千斤顶的工作原理示意图。由图可知, 该系统由举升液压缸和手动液压泵两部分组成, 大油缸 6、大活塞 7、单向阀 5 和卸油阀 9 组成举升液压缸, 活塞和缸体之间既保持良好的配合关系, 又能实现可靠的密封; 杠杆手柄 1、小活塞 2、小油缸 3、单向阀 4 和 5 组成手动液压泵。

提起杠杆手柄 1 使小活塞 2 向上移动,小活塞 2 下端密封的油腔容积增大,形成局部真空,这时单向阀 5 关闭并阻断其所在的油路,而单向阀 4 打开使其所在油路畅通,油箱 10 中的液压油就在大气压的作用下通过吸油管道进入并充满小油缸 3,完成一次吸油动作;用力压下杠杆手柄 1,小活塞 2 下移,小活塞 2 下腔容积减小,腔内压力升高,这时单向阀 4 关闭同时阻断其所在的油路,当压力升高到一定值时单向阀 5 打开,小油缸 3 中的油液经管道输入大油缸 6 的下腔,由于卸油阀 9 处于关闭状态,大油缸 6 中的液压油增多迫使大活塞 7 向上移动,顶起重物。再次提起杠杆手柄 1 吸油时,单向阀 5 自动关闭,使油液不能倒流,从而保证了重物不会自行下落。不断地往复扳动杠杆手柄,就能不断地把油液压入大油缸 6 下腔,使重物 8 逐渐地升起。如果打开卸油阀 9,大活塞 7 在其自重和重物 8 的作用下下移,大油缸 6 下腔的油液便通过管道流回油箱 10 中,重物 8 就向下运动。这就是液压千斤顶的工作原理。

通过对上面液压千斤顶工作过程的分析,可以初步了解到液压传动的基本工作原理:

- ① 液压传动是利用有压力的液体(液压油)作为传递运动和动力的工作介质;
- ② 液压传动中要经过两次能量转换,先将机械能转换成油液的压力能,再将油液的压力能转换成机械能;
- ③ 液压传动是依靠密封容器或密闭系统中密封容积的变化来实现运动和动力的传递。

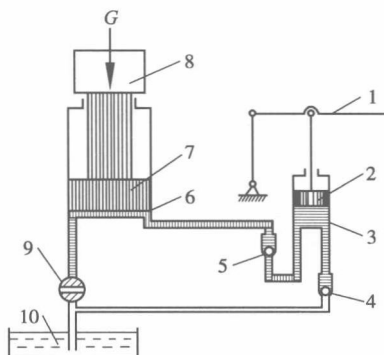


图 1-1 液压千斤顶的工作原理示意图

1—杠杆手柄; 2—小活塞; 3—小油缸; 4、5—单向阀;
6—大油缸; 7—大活塞; 8—重物; 9—卸油阀; 10—油箱

2. 液压传动的优缺点

(1) 优点

① 液压传动装置的重量轻、结构紧凑、惯性小。例如,相同功率液压马达的体积为电动机的 12%~13%。液压泵和液压马达单位功率的重量指标,目前是发电机和电动机的 1/10,液压泵和液压马达可小至 0.0025N/W(牛/瓦),发电机和电动机则约为 0.03N/W。

② 利用液压传动可以方便灵活地布置传动机构。例如,在井下抽取石油的泵可采用液压传动来驱动,由于液压传动使用油管连接,所以借助油管的连接可以方便灵活地布置传动机构,克服长驱动轴效率低的缺点。

③ 可在大范围内实现无级调速。借助阀或变量泵、变量马达,可以实现无级调速,调速范围可达 1:2000,并可在液压装置运行的过程中进行调速。

人们为什么使用液压来传动呢?



④ 传递运动均匀平稳, 负载变化时速度较稳定。正因为此特点, 金属切削机床中的磨床传动现在几乎都采用液压传动。

⑤ 液压装置易于实现过载保护。液压系统中采取了很多安全保护措施, 能够自动防止过载, 避免发生事故。例如溢流阀、蓄能器等。

⑥ 液压传动容易实现自动化。液压系统中, 液体的压力、流量和方向是非常容易控制的, 再加上电气装置的配合, 很容易实现复杂的自动工作循环。

⑦ 液压元件已实现了标准化、系列化和通用化, 便于设计、制造和推广使用。

(2) 缺点

① 液压系统中漏油、液压油的可压缩性等因素, 影响运动的平稳性和正确性, 使得液压传动不能保证严格的传动比。

② 液压传动对油温的变化比较敏感, 温度变化时, 液体黏性变化, 引起运动特性的变化, 使得工作的稳定性受到影响, 所以它不宜在温度变化很大的环境条件下工作。

③ 为了减少泄漏, 以及为了满足某些性能上的要求, 液压元件的配合件制造精度要求较高, 加工工艺较复杂。

④ 液压传动要求有单独的动力源, 不像电源那样使用方便。

⑤ 液压系统故障不易检查和排除。

总之, 液压传动的优点是主要的, 随着设计制造和使用水平的不断提高, 有些缺点正在逐步加以克服, 液压传动有着广泛的发展前景。

了解一下
液压经常用在
什么地方吧!



3. 液压传动的应用

驱动机械运动的机构以及各种传动和操纵装置有多种形式。根据所用的部件和零件分类, 可分为机械的、电气的、气动的、液压的传动装置。经常还将不同的形式组合起来运用。由于液压传动具有很多优点, 所以这种新技术发展得很快。液压传动应用于金属切削机床也不过四五十年历史。航空工业在 1930 年以后才开始采用。特别是最近二三十年液压技术在各种工业中的应用越来越广泛。

液压传动在各类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

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、传送带运输机械等
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
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、减震器等
智能机械	折臂式小汽车装卸器、数字式体育锻炼机、模拟驾驶舱、机器人等

4. 液压传动的发展

自 18 世纪末英国制成世界上第一台水压机算起, 液压传动技术已有二三百年的历史。直到 20 世纪 30 年代它才较普遍地用于起重机、机床及工程机械。在第二次世界大战期间, 由于战争需要, 出现了由响应迅速、精度高的液压控制机构所装备的各种军事武器。第二次世界大战结束后, 战后液压技术迅速转向民用工业, 液压技术不断应用于各种自动机及自动生产线。

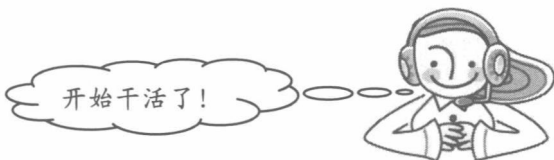
20 世纪 60 年代以后, 液压技术随着原子能、空间技术、计算机技术的发展而迅速发展。因此, 液压传动真正的发展也只是近四五十年。当前液压技术正向高速、高压、大功率、高效、低噪声、经久耐用、高度集成化的方向发展。同时, 新型液压元件和液压系统的计算机辅助设计 (CAD)、计算机辅助测试 (CAT)、计算机直接控制 (CDC)、机电一体化技术、可靠性技术等方面也是当前液压传动及控制技术发展和研究的方向。

我国的液压技术最初应用于机床和锻压设备上, 后来又用于拖拉机和工程机械。现在, 我国已经从国外引进了一些液压元件、生产技术并且进行自行设计, 形成了系列, 在各种机械设备上得到了广泛的使用。



任务实施

- 操作使用液压千斤顶;
- 观察并指出千斤顶的组成部分;
- 熟悉液压千斤顶的工作原理。



任务评价

序 号	能 力 点	掌 握 情 况	序 号	能 力 点	掌 握 情 况
1	操作规程		4	工作原理理解	
2	操作能力		5	优缺点理解	
3	组成部分理解				



思考与练习

1. 什么是液压传动? 什么是液压传动的基本原理?
2. 与其他传动方式相比, 液压传动有哪些主要优点和缺点?
3. 试举出几个生产生活中用到的液压设备或者液压装置。

任务 2 了解液压油



任务目标

- 了解液压油的作用;
- 掌握液压油黏性的物理意义;
- 掌握液压油的黏温特性及可压缩性;
- 掌握液压油的选择原则。

任务描述

测量液压油黏度，清洗滤油器，熟悉液压油的性质。

知识与技能

液压油是液压传动系统中的工作介质，用来实现能力的传递，并且还还对液压装置的机构、零件起着润滑、冷却和防锈作用。液压油的质量优劣直接影响液压系统的工作性能，因此合理地选用液压油也是很重要的。



1. 液压油的物理性质

(1) 液压油的密度

单位体积某种液压油的质量称为该种液压油的密度，以 ρ 表示，即

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

式中： V ——液压油的体积 (m^3)；

m ——体积为 V 的液压油质量 (kg)。

液压油的密度随压力的升高而增大，随温度的升高而减小，但一般情况下，由压力和温度引起的这种变化都较小，可以忽略不计，故在实际应用中可认为液压油的密度不受压力和温度变化的影响。

(2) 液压油的黏性

① 物理意义：液体在外力作用下流动时，由于液体分子间的内聚力要阻碍液体分子之间相对运动，因而产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的黏性。黏性的大小用黏度表示，黏性是液体重要的物理特性，也是选择液压油的重要依据之一。

液体流动时，由于液体的黏性及液体和固体壁面间的附着力，流动液体内部各层间的速度大小不等。如图 1-2 所示，设两平行平板间充满液体，下平板不动，而上平板以速度 v_0 向右平动。由于液体的黏性作用，紧贴于下平板的液体层速度为零，紧贴于上平板的液体层速度为 v_0 ，而中间各层液体的速度则根据该层到下平板的距离大小近似呈线性规律分布。因此，不同速度流层相互制约而产生内摩擦力。

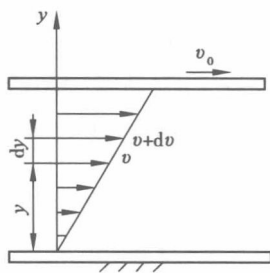


图 1-2 液体黏性示意图

实验测定结果指出，液体流动时相邻液层之间的内摩擦力 F 与液层间的接触面积 A 和液层间的相对速度 dv 成正比，而与液层间的距离 dy 成反比，即

$$F = \mu A \frac{dv}{dy} \quad (1-2)$$

式中： μ ——比例常数，称为液体的黏性系数或黏度；

$\frac{dv}{dy}$ ——速度梯度。

若以 τ 来表示单位接触面积上的内摩擦力, 即切应力, 则由式 (1-2) 可得

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{dv}{dy} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表达的是牛顿的液体内摩擦定律。

在液体静止时, 由于 $dv/dy=0$, 液体内摩擦力 F 为零, 因此静止的液体不呈现黏性。

② 黏度: 流体黏性的大小用黏度来表示。常用的黏度有动力黏度、运动黏度和相对黏度。

● 动力黏度 μ : 动力黏度又称绝对黏度, 可由式 (1-2) 导出, 即

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

由式 (1-4) 可知动力黏度 μ 的物理意义是: 液体在单位速度梯度 ($\frac{dv}{dy}=1$) 下流动时, 单位接触面积上的内摩擦力的大小。

动力黏度的国际单位制 (SI) 计量单位为牛·秒/米², 符号为 N·s/m² 或帕·秒, 符号为 Pa·s。

● 运动黏度 ν : 某种液体的运动黏度是该液体的动力黏度 μ 与其密度 ρ 的比值, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

在 SI 中, 液体的运动黏度的单位为米²/秒, 符号为 m²/s, 由于该单位偏大, 实际上常用 cm²/s、mm²/s 以及以前沿用的非法定计量单位 cSt (厘斯), 它们之间的关系是 1m²/s=10⁴cm²/s=10⁶mm²/s=10⁶cSt。

运动黏度 ν 没有什么明确的物理意义, 因在理论分析和计算中常遇到 μ/ρ 的比值, 为方便起见用 ν 表示。国际标准化组织 ISO 规定, 各类液压油的牌号是按其在一定温度下运动黏度的平均值来标定的。我国生产的全损耗系统油和液压油采用 40℃ 时的运动黏度值 (mm²/s) 为其黏度等级标号, 即油的牌号。例如, 牌号为 L-HL32 的液压油, 就是指这种油在 40℃ 时的运动黏度的平均值为 32 mm²/s。

● 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条件下测出来的液体黏度。各国采用的相对黏度单位有所不同, 美国采用赛氏黏度, 英国采用雷氏黏度, 法国采用巴氏黏度, 我国采用恩氏黏度。

恩氏黏度用符号 °E 表示, 被测液体温度为 t ℃ 时的恩氏黏度用符号 °E _{t} 表示。恩氏黏度用恩氏黏度计测定。其方法是: 将 200mL 温度为 t ℃ 的被测液体装入黏度计的容器, 经其底部直径为 2.8mm 的小孔流出, 测出液体流尽所需时间 t_A , 再测出 200mL 温度为 20℃ 的蒸馏水用同一黏度计流尽所需时间 t_B (通常 $t_B=51s$); 这两个时间的比值即为被测液体在温度 t 下的恩氏黏度, 即

$$^{\circ}E_t = \frac{t_A}{t_B} = \frac{t_A}{51s} \quad (1-6)$$

工业上一般以 20℃、50℃ 和 100℃ 作为测定恩氏黏度的标准温度, 相应地以符号 °E₂₀、°E₅₀、°E₁₀₀ 来表示。

恩氏黏度与运动黏度 (mm²/s) 的换算关系为

$$\text{当 } 1.3 \leq ^\circ\text{E} \leq 3.2 \text{ 时} \quad v = 8^\circ\text{E} - \frac{8.64}{^\circ\text{E}} \quad (1-7)$$

$$\text{当 } ^\circ\text{E} > 3.2 \text{ 时} \quad v = 7.6^\circ\text{E} - \frac{4}{^\circ\text{E}} \quad (1-8)$$

③ 黏度与压力、温度的关系：当液体所受压力升高时，其分子间的距离减小，内聚力增大，黏度也随之增大。但对于一般的液压系统，当压力在 10MPa 以下时，油液的黏度受压力变化的影响很小，可以忽略不计。

油液的黏度对温度变化十分敏感，温度升高，黏度将显著降低。油液的黏度随温度变化的性质称为油液的黏温特性。不同种类的液压油具有不同的黏温特性。油液黏温特性的好坏常用黏度指数 VI（黏温变化程度与标准油相比较所得的相对数值）来表示，黏度指数 VI 值越大，说明其黏度随温度变化越小，黏温特性越好。一般液压油的 VI 值要求在 90 以上，优质的在 100 以上。几种常用油液的黏度指数如表 1-2 所示。

表 1-2 几种常用油液的黏度指数

油 液 种 类	黏 度 指 数	油 液 种 类	黏 度 指 数
通用液压油 L-HL	90	高含水液压油 L-HFA	130
抗磨液压油 L-HM	95	油包水乳化液 L-HFB	130~170
低温液压油 L-HV	130	水-乙二醇液 L-HFC	140~170
高黏度指数液压油 L-HR	160	磷酸酯液 L-HFDR	130~180

（3）液体的可压缩性

液体受压力增大而发生体积减小的特性称为液体的可压缩性。可压缩性用体积压缩系数 k 表示，并定义为单位压力变化下的液体体积的相对变化量。设体积为 V 的液体，当压力增大 Δp ，液体体积减小 ΔV ，则

$$k = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-9)$$

由于压力增加时液体的体积减小（ $\Delta V < 0$ ），因此式（1-9）中等号右边加一负号，以使 k 为正值。

液体的压缩系数 k 的倒数称为液体的体积弹性模数，用 K 表示。即

$$K = \frac{1}{k} = -\Delta p \frac{V}{\Delta V} \quad (1-10)$$

K 表示产生单位体积产生相对变化量时所需要的压力增量。在实际应用中，常用 K 值说明液体抵抗压缩能力的大小。在常温下，纯净油液的体积模量 $K = (1.4 \sim 2) \times 10^9 \text{ MPa}$ ，其可压缩性是钢的 100~150 倍（钢的弹性模量为 $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$ ）。

在中、低压系统中，液体的可压缩性对液压系统的性能影响很小，故可将液压油看成不可压缩的，但在高压系统中或研究液压系统的动态特性时，就得考虑液压油的可压缩性。另外，由于空气的可压缩性很大，所以当液压油中混有空气时，其抗压缩能力会大大降低，这会严重影响液压系统的工作性能。在有较高要求或压力变化较大的液压系统中，应采取措施尽量减少工作介质中混入空气及其他易挥发物质（如汽油、煤油和乙醇等）的含量。

2. 对液压油的要求及选用

(1) 液压传动工作介质的要求

液压油是液压传动系统的重要组成部分，是用来传递能量的工作介质。除了传递能量外，它还起着润滑运动部件和保护金属不被锈蚀的作用。液压油的质量及其各种性能将直接影响液压系统的工作。一般来说，液压油应具备以下性能：

- ① 合适的黏度，较好的黏温特性；
- ② 良好的润滑性能及防锈能力；
- ③ 质地纯净，杂质少；
- ④ 对金属和密封件有良好的相容性；
- ⑤ 氧化稳定性好，长期工作不易变质；
- ⑥ 抗泡沫性和抗乳化性好；
- ⑦ 比热大，体积膨胀系数小；
- ⑧ 燃点高，凝固点低。



此外，还有无毒性、价格便宜等要求。对于具体的液压系统，则需根据情况突出某些方面的性能要求。

(2) 液压传动工作介质的选用

各种液压油都有其特性，对应一定的适用范围。正确而合理地选用液压油，可提高液压传动系统工作的可靠性，延长液压元件的使用寿命。

① 液压油品种的选择：液压油的品种很多，主要可分为矿油型、乳化型和合成型。液压油的主要品种及其特性和用途如表 1-3 所示。

表 1-3 液压油的主要品种及其特性和用途

类 型	名 称	ISO 代号	特 性 和 用 途
矿油型	普通液压油	L-HL	精制矿油添加剂，提高抗氧化和防锈性能，适用于室内一般的中低压系统
	抗磨型液压油	L-HM	L-HL 油加添加剂，改善抗磨性能，适用于工程机械、车辆液压系统
	低温液压油	L-HV	L-HM 油加添加剂，改善黏温特性，可用于环境温度在 $-40\sim-20^{\circ}\text{C}$ 的高压系统
	高黏度指数液压油	L-HR	L-HL 油加添加剂，改善黏温特性，VI 值达 175 以上，适用于对黏温特性有特殊要求的低压系统，如数控机床液压系统
	液压导轨油	L-HG	L-HM 油加添加剂，改善黏-滑性能，适用于机床中液压和导轨润滑合用的系统
	全损耗系统用油	L-HH	浅度精制矿油，抗氧化性、抗泡沫性较差，主要用于机械润滑，可做液压代用油，用于要求不高的低压系统
	汽轮机油	L-TSA	深度精制矿油加添加剂，改善抗氧化、抗泡沫等性能，为汽轮机专用油，可做液压代用油，用于一般液压系统
乳化型	水包油乳化液	L-HFA	又称高水基液，特点难燃、黏温特性好，有一定的防锈能力，润滑性差，易泄漏。适用于有抗燃要求、油液用量大且泄漏严重的系统
	油包水乳化液	L-HFB	既具有矿油型的抗磨、防锈性能，又具有抗燃性，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 $-54\sim60^{\circ}\text{C}$ 温度下使用，适用于有抗燃要求的中低压系统
	磷酸酯液	L-HFDR	难燃，润滑抗磨性能和抗氧化性能良好，能在 $-54\sim135^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用；缺点是有害。适用于有抗燃要求的高压精密液压系统

液压油品种的选择可参考表 1-5, 具体还应根据液压传动系统所处的工况条件, 主要是温度、压力和液压泵类型等来确定。

- 工作温度: 工作温度主要对液压油的黏温特性和热稳定性提出要求, 选用时可参照表 1-4。

表 1-4 按工作温度选择液压油的品种

液压油工作温度/℃	<-10	-10~80	>80
液压油品种	L-HR、L-HV、L-HS	L-HH、L-HL、L-HM	优等 L-HM、L-HV、L-HS

- 工作压力: 工作压力主要对液压油的润滑性(抗磨性)提出要求, 选用时可参照表 1-5。
- 液压泵类型: 液压泵类型较多, 常见的有齿轮泵、叶片泵和柱塞泵。一般而言, 齿轮泵对液压油的抗磨性要求比叶片泵和柱塞泵低, 因此齿轮泵可选用 L-HL 或 L-HM 液压油, 而叶片泵和柱塞泵一般选择 L-HM 液压油。

表 1-5 按工作压力选择液压油的品种

工作环境	工况		
	压力 $p \leq 7.0\text{MPa}$ 温度 $t < 50^\circ\text{C}$	$7.0 < p \leq 14.0\text{MPa}$ 温度 $t < 50^\circ\text{C}$	$p > 14.0\text{MPa}$ 温度 $50 \leq t \leq 100^\circ\text{C}$
室内、固定液压设备	HL	HL、HM	HM
露天寒冷和严寒区	HV	HV、HS	HV、HS
高温热源或明火附近	HFAE	HFB、HFC	HFDR

② 黏度等级的选择: 液压油的品种选定之后, 还必须确定其黏度等级。黏度对液压系统工作稳定性、可靠性、效率、温升及磨损都有影响。黏度过高对系统润滑有利, 但增加系统的阻力, 使得系统压力损失增大, 效率降低; 黏度过低会增加设备的外泄漏, 导致系统工作压力不稳定, 严重时会使泵的磨损加剧。在选择黏度等级时应注意以下几个方面:

- 工作压力: 工作压力较高的液压系统宜选用黏度较高的液压油, 以减少泄漏; 反之, 选用黏度较低的液压油。
- 环境温度: 环境温度较高的液压系统宜选用黏度较高的液压油, 以减少泄漏; 反之, 选用黏度较低的液压油。
- 运动速度: 当液压系统的运动部件的运动速度较高时, 宜选用黏度较低的液压油, 以减少液流的摩擦损失; 反之, 选用黏度较高的液压油。

在液压系统的所有元件中, 以液压泵对液压油的性能最为敏感, 因为其转速最高, 工作压力最大, 温度也较高, 因此液压系统常根据液压泵的类型及其要求来选择液压油的黏度。各类液压泵适用的黏度范围如表 1-6 所示。

表 1-6 各种液压泵适用的黏度范围

液压泵类型		黏度/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}(40^\circ\text{C})$		液压泵类型	黏度/ $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}(40^\circ\text{C})$	
		系统温度为 $5 \sim 40^\circ\text{C}$	系统温度为 $40 \sim 80^\circ\text{C}$		系统温度为 $5 \sim 40^\circ\text{C}$	系统温度为 $40 \sim 80^\circ\text{C}$
叶片泵	$P < 7.0\text{MPa}$	$30 \sim 50^\circ\text{C}$	$40 \sim 75^\circ\text{C}$	齿轮泵	$30 \sim 70^\circ\text{C}$	$95 \sim 165^\circ\text{C}$
	$P \geq 7.0\text{MPa}$	$50 \sim 70^\circ\text{C}$	$50 \sim 90^\circ\text{C}$	径向柱塞泵	$30 \sim 50^\circ\text{C}$	$65 \sim 240^\circ\text{C}$
螺杆泵		$30 \sim 50^\circ\text{C}$	$40 \sim 80^\circ\text{C}$	轴向柱塞泵	$30 \sim 70^\circ\text{C}$	$70 \sim 150^\circ\text{C}$