

高等职业技术教育规划教材
机电一体化——数控技术应用专业

液气压传动

第2版

季明善 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



赠电子教案

高等职业技术教育规划教材

机电一体化——数控技术应用专业

液 气 压 传 动

第 2 版

主 编	季明善	
副主编	齐人光	徐文文
参 编	王振华	
主 审	严金坤	
参 审	高云生	



机械工业出版社

本书介绍液气压传动的基本知识、机电设备液气压传动中常用的液压与气压元件、基本回路、典型系统,同时较详细地介绍液压与气压传动设备的安装、调试及维修技术。

本教材先元件后回路、先基础后应用。在讲清元件的原理、结构的基础上,着重于回路的组合、应用及其故障分析和排除。将液气压传动融为一体,但也可根据需要分别讲述。

本教材合理安排基础知识和实践知识比例,符合高职高专学生的学习特点和认知规律,通过主教材电子教案、配套光盘及习题汇编等教学资源的有机结合,为高素质技能型人才培养创造良好的条件。

本教材适用高职高专、职业技术学院的机电类、汽车类各专业师生。也可供有关工程技术人员参考。

本书配有电子教学课件、教学指导、习题库等教学资源,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话: 010-88379375。

图书在版编目(CIP)数据

液气压传动/季明善主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2012. 8
高等职业技术教育规划教材. 机电一体化. 数控技术应用专业
ISBN 978-7-111-39400-6

I. ①液… II. ①季… 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(2012)第185291号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)
策划编辑:王英杰 责任编辑:王英杰 武晋
版式设计:霍永明 责任校对:胡艳萍
责任印制:杨曦
北京京丰印刷厂印刷
2012年9月第2版·第1次印刷
184mm×260mm·15.75印张·388千字
0 001—3 000册
标准书号:ISBN 978-7-111-39400-6
定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
电话服务

社服务中心:(010) 88361066
销售一部:(010) 68326294
销售二部:(010) 88379649
读者购书热线:(010) 88379203

网络服务

教材网: <http://www.cmpedu.com>
机工官网: <http://www.cmpbook.com>
机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>
封面防伪标均为盗版

第2版编者的话

本书是在2002年出版的职业技术教育教材《液气压传动》的基础上,根据当前科学技术的迅猛发展和职业教育人才培养更注重现场技能的特点而进行修订的。《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006~2020年)》在发展先进制造业方面对液压传动和气压传动技术的应用提出了更高的要求。

经过十几年的发展,高职高专院校已成为我国高等教育大众化的重要生力军。经过广大教育工作者的辛勤探索和实践,具有高职高专特色的人才培养模式已经形成,其基本特征是:以培养适应生产建设、管理服务第一线需要的高等技术应用型人才为根本任务;以社会需求职业应用能力为目标构建高职高专教学体系和教学方案;基础理论教学以应用为目的,以“必需、够用”为度,注重实践教学,培养学生的技术应用能力;确定以就业为导向的高等职业教育的发展策略。为此,结合多年来从事高职教学的实践经验,我们对本书进行了认真和细致地修订。

在本书的修订过程中,编者对内容进行了整合,力求反映我国液压与气压传动的最新发展情况,在内容上尽量贴近机械工程实际,将新知识、新技术、新工艺和新案例纳入教材。同时本书注重吸收新的教学理念,积极进行教材立体化建设,配备了电子教学课件、教学指导、习题库等教学资源,提高了教学服务水平,为高素质技能型人才的培养提供了良好的条件。

本书第一、二、三、六、八、九章及课程设计素材由上海第二工业大学季明善编写,第四、五和七章由齐人光编写,第十章由王振华编写。上海震旦职业学院徐文文编写并制作了本书的电子教学课件、教学指导、习题库、试题库等,并参加了本书第2版各章的修订工作。全书由季明善担任主编,齐人光、徐文文担任副主编。本书由上海交通大学严金坤教授主审,他为本书提供了许多宝贵的修改意见。上海第二工业大学教育研究室高云生也参与了本书的审阅,付出了辛勤劳动。同时,本书编写过程中得到了兄弟院校、企业的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免存在不妥之处,恳请广大同仁和读者批评指正。

本书配有电子教学课件、教学指导、习题库等教学资源,凡使用本书作为教材的教师可登录机械工业出版社教材服务网 www.cmpedu.com 注册后下载。咨询邮箱: cmpgaozhi@sina.com。咨询电话:010-88379375。

编者

第1版编者的话

本教材是根据1998年3月由上海职业技术教育机械专业教材编审委员会审定的《液压与气压传动》的课程标准编写的,适用于高、中等职业技术学院机电类各专业。

本教材在编写过程中,力求贯彻理论联系实际和能力本位的原则,加强针对性,注重实践应用。突出重点章节和内容,力求层次清晰、通俗易懂。注意处理好四对关系,即液压与气动、元件与回路、通用与专用、传统知识与发展趋势的关系。

内容上以液压为主,气动为辅,突出二者特点和结构区别;将液气压传动融为一体进行了大胆尝试,但也可以分别集中讲述。

方式上先元件后回路,先基础后应用。在讲清元件的原理、结构的基础上,着重于回路的组合、应用及其故障分析与排除。重点是通用元件、回路组合及应用。专用元件及回路则简略,为后继教育留下空间。

同时,保留元件——回路——系统的液气压传动的格局,但又兼顾液压和气动技术的发展趋势,编入插装阀、伺服阀和电液数字阀等新技术。

在编写过程中,力求反映我国液压、气动技术发展的新成果;统一采用法定单位和1993年国家技术监督局颁布的GB/T 786.1—93绘制要求。

本书一、二、三、六、八和九章由上海第二工业大学季明善编写;四、五和七章由上海邮电学校齐人光编写;十章由上海第二工业大学王振华编写。全书由季明善担任主编,齐人光任副主编。

本书由上海交通大学严金坤教授主审。严教授认真、细致地进行了审阅,对书中的不足之处,一一指出,并提出了许多宝贵意见。在严教授的指导下,对全书作了再次修改。在编写的过程中,上海第二工业大学教育研究室高云生同志担任审阅,付出了辛勤的劳动;同时得到兄弟院校、企业的大力支持和帮助,在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平,书中难免存在缺点和错误,恳请读者批评指正。

编者

目 录

第2版编者的话	
第1版编者的话	
第一章 绪论	1
本章小结	6
复习思考题	6
第二章 液气压传动基础知识	7
第一节 液压油	7
第二节 液体的性质	14
第三节 压力损失计算及液压冲击	18
第四节 气压传动基础知识	23
本章小结	26
复习思考题	27
第三章 液压泵和液压马达	29
第一节 概述	29
第二节 齿轮泵	32
第三节 叶片泵	37
第四节 柱塞泵和柱塞式液压马达	43
本章小结	48
复习思考题	49
第四章 液压缸及气缸和气马达	50
第一节 液压缸性能参数及结构	50
第二节 气缸和气马达	57
本章小结	65
复习思考题	65
第五章 液气压控制阀	67
第一节 液压方向控制阀	67
第二节 液压压力控制阀	75
第三节 液压流量控制阀	83
第四节 液压比例阀、插装阀和叠加阀	88
第五节 电液伺服阀和电液数字阀	97
第六节 气压控制阀	102
本章小结	117
复习思考题	118
第六章 液气压辅助装置	120
第一节 液压辅助装置	120
第二节 气源装置及气动辅助元件	127
本章小结	132
复习思考题	132
第七章 液气压基本回路	133
第一节 液压压力控制回路	133
第二节 液压速度控制回路	138
第三节 液压顺序控制回路	149
第四节 气压基本回路	153
本章小结	162
复习思考题	163
第八章 典型液气压传动系统	167
第一节 M1432A 万能外圆磨床液压系统	167
第二节 数控机床及加工中心液压系统	172
第三节 液压伺服系统	177
第四节 气动系统及应用	181
本章小结	184
复习思考题	185
第九章 常见液气压系统故障与修理	186
第一节 液压系统的振动和“爬行”	186
第二节 液压冲击和液压卡紧	192
第三节 温升与泄漏	195
第四节 气动系统常见故障及排除	198
本章小结	201
复习思考题	201
第十章 液压系统的设计与计算	202
第一节 液压系统的设计步骤和内容	202
第二节 液压系统设计计算实例	210
本章小结	216
复习思考题	216
附录	217
附录 A 常用单位换算表	217
附录 B 液压控制元件图形符号 (摘自 GB/T 786.1—2009)	218
附录 C 气动控制元件图形符号 (摘自 GB/T 786.1—2009)	233
参考文献	246

第一章 绪 论

液压与气压传动是以流体（液压油或压缩空气）为工作介质进行能量传递和控制的一种传动技术。液压与气压传动，简称液气压传动，都是利用各种元件组成所需的基本回路，再由若干个基本回路有机地组合成能完成一定控制功能的传动系统来进行能量的传递、转换和控制，是一门较新兴的应用学科。

进入 21 世纪，液气压传动与微电子、计算机技术相结合，进入了机、电、液、气一体化的新阶段，已成为机械设备中发展最快的应用技术之一。

一、液压传动的工作原理及组成

液压传动与气压传动的基本原理相似，现以图 1-1 所示液压千斤顶为例来简述液压传动的工作原理。液压千斤顶由杠杆 1、小活塞 2、泵体 3 等组成的手动柱塞液压泵和由大活塞 6、缸体等组成的液压缸 7 构成。提起杠杆 1，小活塞 2 上升，泵体 3 下腔的工作容积增大（此时单向阀 5 关闭），腔内形成局部真空，油箱 9 中的油液在大气压力的作用下，推开单向阀 4，进入并充满泵体 3 的下腔。压下杠杆 1，小活塞 2 向下移动，压力油使单向阀 4 关闭，并使单向阀 5 的钢球受一个向上的作用力。当此力大于液压缸 7 的下腔对它的作用力时，钢球被推开，油液便进入液压缸 7 的下腔（转阀 8 关闭），推动大活塞 6 将重物 G 升起。反复提压杠杆 1，就可使重物不断上升，达到起重的目的。

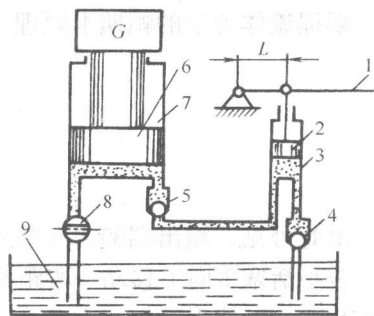


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

- 1—杠杆 2—小活塞 3—泵体
4、5—单向阀 6—大活塞
7—液压缸 8—转阀 9—油箱

将转阀 8 转动 90° ，液压缸 7 下腔直通油箱，在重物的作用下，大活塞 6 向下移动，下腔的油液排回油箱 9。显然，液压千斤顶利用油液作为工作介质实现了能量的传递。

通过以上分析可知，液压传动有以下几个特点：

- 1) 以液体为传动介质，传动必须经过两次能量交换。
- 2) 液压传动必须在密封容器（缸或管等）内进行，而且容积要发生变化。若容器不密封、容积不变化，就不能实现液压传动的目的。
- 3) 这种传动是靠受静压力的液体进行，是基于物理学中帕斯卡原理来工作的。

1. 液压传动系统的组成

由图 1-1 可以看出，一个最简单的液压传动系统必须由四个部分组成：

- (1) 动力元件 它是将原动机所提供的机械能转变为工作液体的液压能的转换装置，通常为液压泵。
- (2) 执行元件 它是把液压能转换为机械能的装置。作直线往复运动的执行元件称为液压缸；作旋转运动的执行元件称为液压马达。
- (3) 控制元件 对液压系统中油液的压力、流量和流向进行调节、控制的机械装置，

称为控制元件，或称液压阀。

(4) 辅助元件 液压辅助元件包括油箱、管接头、过滤器以及各种液压参数监测仪表等。

2. 液压传动的力比和速比

由图 1-1 可知，当系统处于平衡时，小活塞 2 单位面积上受到的液体压力为

$$p_1 = \frac{F}{A_1}$$

式中 A_1 ——小活塞 2 的面积 (m^2)；

F ——杠杆 1 施加给小活塞 2 的力 (N)。

大活塞 6 受到的液体压力为

$$p_2 = \frac{G}{A_2}$$

式中 A_2 ——大活塞 6 的面积 (m^2)。

根据流体力学的帕斯卡原理，平衡液体内某一点的液体压力等值地传递到各处，则有

$$p_1 = p_2 = \frac{F}{A_1} = \frac{G}{A_2}$$

故

$$\frac{G}{F} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1-1)$$

由此可见，输出端的力和输入端的力之比等于两个活塞面积之比。

若小活塞 2 向下移动一段距离 h_1 ，则泵体 3 内被挤出的液体体积为 $A_1 h_1$ 。这些液体进入液压缸 7 内，使大活塞 6 上升 h_2 ，让出体积为 $A_2 h_2$ 。若不计泄漏和液体的可压缩性，则

$$A_1 h_1 = A_2 h_2 \text{ 或 } \frac{h_2}{h_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-2)$$

两活塞的移动为同一时间 t 秒内进行，则小活塞 2 和大活塞 6 的移动速度分别为

$$v_1 = \frac{h_1}{t} \quad v_2 = \frac{h_2}{t}$$

将 h_1 和 h_2 代入式 (1-2)，则有

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{A_1}{A_2} \quad (1-3)$$

由式 (1-2) 和式 (1-3) 可知，输入、输出的位移和速度都与两活塞的面积成反比。将式 (1-3) 改写成

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (1-4)$$

此式在流体力学中称为流体的连续性方程。在液压传动中，液体流经的管道可看作是流管，其横截面即为过流断面。这个方程表明，流过不同断面的流量是不变的。

将式 (1-1) 和式 (1-3) 相乘，则有

$$G v_2 = F v_1 \quad (1-5)$$

式 (1-5) 左右边分别代表输出和输入的功率，说明能量守恒定律同样适用于液压传动。

3. 液压传动的两个重要特性

由液压千斤顶工作原理图可知,只有当大活塞6上有了负载 G ,小活塞2上才能施加作用力。有了负载和作用力,才会产生液体压力。所以说,负载是第一性的,压力是第二性的,压力的大小取决于负载。

在式(1-4)中,若令

$$Q = A_1 v_1$$

则 Q 表示小活塞2以速度 v_1 运动时,单位时间内从泵体3中排出液体的体积,称为流量,单位为 L/min 。

流量 Q 进入液压缸7时,大活塞6的运动速度为

$$v_2 = \frac{Q}{A_2}$$

通过以上分析可以得出液压传动的两个工作特性:

- 1) 液压传动中的液体压力取决于负载。压力只随负载的变化而变化,与流量无关。
- 2) 负载的运动速度取决于输入的流量,与压力无关。当 A_1 、 A_2 确定后,若使 v_1 连续变化,即可使 v_2 连续变化,可实现液压传动的无级调速。

利用上述公式得出

$$Gv_2 = pA_2 \frac{Q}{A_2} = pQ$$

输出功率等于压力 p 和流量 Q 的乘积。因此 p 、 Q 是液压传动中最重要的参数。

二、气压传动的工作原理与组成

图1-2所示为常用于实现断续生产过程的典型气动系统。一般气动系统由传动部分与控制部分构成。其中,控制部分是由若干气动元件组成的气动逻辑回路。它可以根据气缸活塞杆的始末位置,由行程开关等传递信号,在作出逻辑判断后,指令气缸下一步动作,以实现预定的自动工作循环。

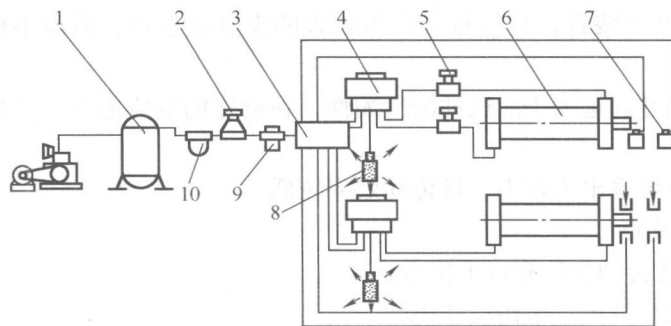


图1-2 气动系统的组成

- 1—气压发生装置 2—压力控制阀 3—逻辑元件 4—方向控制阀 5—流量控制阀 6—气缸 7—行程开关
8—消声器 9—油雾器 10—过滤器

由上述可知,气压传动系统一般由四个部分组成:

- (1) 气站装置 把机械能转换为气体压力能的装置,常用的是空气压缩机。一般都专门建立压缩空气站,通过输送管道统一向各用气站分配压缩空气,以实现经济有效地供气。
- (2) 执行元件 把气体的压力能转换成机械能的装置,一般指作直线运动的气缸或作旋转运动的气动马达等。

(3) 控制元件 对气压系统中的空气压力、流量和流向进行控制和调节的装置,如压力控制阀和流量控制阀等。

(4) 辅助元件 除上述三类装置(或元件)以外,其余元件统称为辅助元件,如过滤器、干燥器、消声器、油雾器和管件等。

对比液压系统与气压系统,二者组成部分大致相同,所不同的是传动介质,即液压油和压缩空气。

三、气压和液压传动的优缺点

1. 气压传动的优点

气压传动与液压传动相比,也有一些独特的优点:

1) 空气取自周围大气,无介质费用和供应上的困难。传动介质泄漏后,除引起部分功率损失外,不会污染环境。

2) 空气粘度很小,在回路中的压力损失远远小于液压传动系统,因此压缩空气便于集中供应和远程运输。

3) 压缩空气工作压力低(一般 1.0MPa 以下),对元件材料和制作精度要求较低。

4) 维护简单,使用安全,无油的气动系统特别适用于电子器件、食品、医药、棉纺织行业的生产过程。

5) 气压元件采用相应材料,使其能够在恶劣的环境下正常工作(如强腐蚀、强辐射和强振动等)。

2. 气压传动的缺点

气压传动与电气传动、液压传动相比有以下缺点:

1) 气压传动装置的信号传递速度限制在声速(约 340m/s)范围内,所以它的工作频率和响应速度不如电子装置,且信号会产生较大的失真和迟滞,因而不便构成较复杂的网络。

2) 空气的压缩性远远大于液压油的压缩性,在动作的响应能力、速度的平稳性上不如液压传动。

3) 气压传动系统输出力较小,且传动效率较低。

3. 液压传动的优点

液压传动与其他传动相比有以下优点:

1) 单位功率的重量轻、结构尺寸小。

2) 惯性小、反应快,易实现快速起动、制动和频繁的换向。液压马达的转动惯性远小于电动机转动惯性,所以在加速中同等功率的电动机需 1s 到几秒的时间,而液压马达只需 0.1s。因此,液压传动可以在高速下起动、制动和换向。液压装置的换向频率,在旋转运动时可达 500 次/min,在实现往复直线运动时可达 1000 次/min。

3) 液压传动可在大范围内实现无级调速,且调速性能好,调速范围可达 100:1 到 2000:1。电气传动无级调速范围小,角速度低。液压马达可在极低的转速下输出很大的转矩,转速可低到 1r/min。

4) 能传递较大的力或转矩,易实现自动化,特别当和电气控制、气动控制结合使用时,能实现较复杂的顺序动作和远程控制。

5) 液压传动易实现过载保护。液压油能自行润滑,使用寿命较长。

6) 液压元件易实现系列化、标准化和通用化。

4. 液压传动的缺点

液压传动目前尚有一些缺点, 如:

1) 有一定泄漏现象, 不易实现定比传动。会污染环境。

2) 液压传动对油温的变化比较敏感。高压、高速下会使油温升高, 影响油的粘性和元件寿命。

3) 液压元件制造精度高, 使用维护比较严格, 故障原因不易查明。

总而言之, 气压和液压传动的优点是最主要的, 它们的缺点将随着现代技术的发展得到克服和改善。

四、液压气动技术的发展与展望

液压与气压传动相对于机械传动是一门新技术, 17 世纪、18 世纪是液压理论发展的鼎盛时期。17 世纪中叶, 法国物理学家、数学家帕斯卡·布里斯确立了“在密封容器内, 流体压力沿各个方向等值传递”的静压传动原理, 成为液压气动技术的理论基础。17 世纪末期, 著名的科学家、英国的伊萨克·牛顿对液体的粘度及其阻力的研究, 提出了剪切应力与剪切速率的概念, 是现代流体动力润滑理论的基础。18 世纪中叶, 瑞士的伯努利·丹尼尔提出了用流束传递能量的理论, 得出了理想液体常态运动方程, 即伯努利方程。18 世纪末, 英国制造出世界上第一台水压机。液压与气压传动在工业上的应用和发展, 却是 20 世纪中期以后的事情。

第二次世界大战期间, 军事工业的需要促使液压技术迅速发展, 相继在军舰、飞机上得到推广使用。战后液压技术转为民用, 在机床、工程机械、冶金机械、塑料机械、农林机械、汽车、船舶等行业得到了广泛的使用。

20 世纪 60 年代以来, 随着原子能、空间技术、电子技术和计算机技术等方面的发展, 液压技术发展成为包括传动、控制和检验在内的一门完整的自动化技术。电液伺服控制和电液比例控制技术发展很快, 20 世纪 80 年代, 我国浙江大学路甬祥博士在电液控制技术上的五项发明, 为此作出了重要贡献。

气动技术是以空气压缩机为动力源, 以压缩空气为工作介质, 进行能量传递或信号传递的工程技术, 是实现各种生产控制、自动控制的重要手段之一。

1880 年, 人们第一次利用气缸做成气动制动装置, 将它成功地用到火车的制动上。20 世纪 30 年代, 气动技术成功地应用于自动门的开闭和各种机械的辅助动作上。尤其是 20 世纪 70 年代初, 随着工业机械化和自动化的发展, 气动技术广泛应用于生产自动化的各个领域。近年来气动技术的应用, 已从机械、汽车、钢铁等重工业迅速扩展到化工、轻工和食品等行业。空气作为工作介质具有防火、防爆、防电磁干扰、抗振、耐冲击等优点, 在包装设备、自动生产线、机器人、加工中心和自动检测等方面越来越显示出其优越性。

近十多年来, 液压技术在高压、高速、大功率、低噪声、节能、高效和使用寿命长等方面取得进展; 气动技术在向高质量、高精度、高速度、小型化、轻量化、复合集成化方向发展。同时, 新型液气压元件和液气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、优化设计技术等方面推动了液气压技术的发展与研究。液气压传动技术以提高系统可靠性, 降低总成本为目标, 研究和开发系统控制技术和机、电、液、气一体化综合技术, 日益向各个工业领域内渗透并协同发展。

我国液压、气动制造工业在国家宏观调控的指导下,将适应主机综合需要,并随着微电子技术、计算机和传感器技术的发展,使液气压元件及系统向着集成化、高速化、精确化、节能化和智能化的方向发展,在实现工业自动化方面发挥日益重要的作用。

本章小结

(1) 液气压传动是以液体或气体为工作介质,依靠流动着的液体或气体的压力能来传递能量和动力。它有两个工作特性:液气压传动的压力取决于外界负载;执行元件的速度取决于系统的流量。

(2) 液气压传动系统都是由动力元件、执行元件、调节控制元件、辅助元件和传动介质等部分组成,每一部分都有各自的功能和用途。

(3) 本章还介绍了液气压传动系统的优缺点。其中,液压传动的主要优点是:方便实现无级调速且调速范围大;调节控制简单、方便、省力,且容易实现自动化控制和过载保护。液压传动的主要缺点是:泄漏、振动、对温度等环境要求高;元件加工精度要求高;故障难排查。

(4) 液压气动技术的发展与展望:高压、高速、低噪声、节能、高效、寿命长、高度集成化。

复习思考题

1. 什么叫液压传动?怎么实现能量传递?它有哪些两个工作特性?
2. 液压传动的基本组成有哪些?各部分的作用是什么?
3. 液压传动与其他传动相比有哪些优缺点?
4. 如图 1-1 所示,千斤顶的小活塞直径为 10mm,行程 20mm,大活塞直径 40mm,重物为 50kN,杠杆 $l = 25\text{mm}$,杠杆全长 $L = 500\text{mm}$ 。求:(1) 杠杆端需加多大力才能顶起重物 G ?(2) 此时密封容积中的液体压力是多少?(3) 杠杆上下动作一次重物的上升距离是多少?
5. 气压传动与液压传动相比,有哪些独特的优点和缺点?

第二章 液气压传动基础知识

液压油是传递能量的工作介质，同时还起到润滑、冷却和防锈的作用。因此必须对液压油的物理性质和如何选用作必要的了解。

流体力学是研究流体平衡及其运动规律的一门学科。液气压传动实际是流体力学在工程上的应用。本章主要叙述与液气压传动有关的流体力学最基本内容和液压油的基本知识。

第一节 液 压 油

一、液压油的主要物理性质

1. 流体的密度

液体单位体积的质量称为密度，用符号 ρ 表示

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

式中 ρ ——密度 (kg/m^3)；

m ——液体的质量 (kg)；

V ——液体的体积 (m^3)。

密度是液体的一个重要物理参数。矿物油型液压油的密度随温度的上升而有所减小，随温度的下降而有所增加，但变动值很小，可以忽略不计。我国采用 20°C 时油液的密度作为标准密度，一般液压油的密度为 $900\text{kg}/\text{m}^3$ 。

2. 液体可压缩性

液体受压力作用后发生体积变化的性质称为液体的可压缩性。液体本身的可压缩性很小，因而在很多场合下可忽略不计。但液压系统的实际工作油液中常常存在着可压缩性很大的游离气泡，当受压体积较大、工作压力过高或对液压系统进行动态分析时，必须考虑液压油的压缩性。

受压力作用的液体，其相对压缩量与压力增量成正比

$$\frac{-\Delta V}{V} = \beta \Delta p$$

故

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

式中 ΔV ——液体受压后体积相对减小量 (m^3)；

V ——液体增压前的体积 (m^3)；

Δp ——压力的变化量 (Pa)；

β ——液体的压缩率或压缩系数 (m^2/N)。

常用液压油的压缩系数 $\beta = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。当压力增量 Δp 增大时，体积 ΔV 总是减小，故 ΔV 为负值。但为了使 β 值为正，公式前加一负号。

压缩系数 β 的倒数称为液体的体积弹性模量。常用液压油的体积弹性模量为

$$E = \frac{1}{\beta} = (1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{ MPa} \quad (2-3)$$

钢的弹性模量 $E = (2 \sim 2.1) \times 10^5 \text{ MPa}$ ，二者相比，液压油的可压缩性大约是钢的 100 ~ 150 倍。当液压油中混有不溶解的气体时，弹性模量降为纯油的 35.6%；夹带 4% 的气体时，则仅为纯油的 12%。因此，在使用和设计液压系统中，要尽力使液压油中不混入空气。

3. 粘性和粘度

当油在外力作用下流动时，由于油液分子间内聚力的作用，产生阻碍其分子相对运动的内摩擦力，这种现象称为液体的粘性。因此，只有当油液在运动时，才显示出油液的粘性，而静止液体是不显示粘性的。

图 2-1 所示为平行平板间液体流动。上平板以速度 u_0 向右运动，而下平板固定不动。紧挨着上平板的油液在粘附力的作用下其速度为 u_0 ，粘附于下平板上的油液其速度为零，而中间油液的速度由上到下逐渐减小。当两平板距离较小时，速度递减近似为线性规律。可把中间油液视为许多薄层，由于各层的速度不同，流动快的流层会拖动慢的流层，而流动慢的流层又会阻滞流动快的流层，这样流层之间就产生了相互作用力，即内摩擦力。由实验得知，流层间的内摩擦力 F_τ 与流层的接触面积 A 及流层间的相对速度 du 成正比，而与流层间的距离 dy 成反比，即

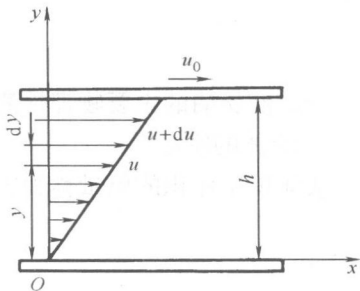


图 2-1 相对运动与粘性

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

式中 μ ——比例系数，称为动力粘度；

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度，即流层相对速度对流层距离的变化率。

如以 $\tau = \frac{F_\tau}{A}$ 表示切应力，则有

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

式 (2-5) 称为牛顿液体内摩擦定律。

液体粘性的大小用粘度来表示，液体中常用的粘度有动力粘度、运动粘度和相对粘度。

(1) 动力粘度 动力粘度又称绝对粘度，由式 (2-5) 得出

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

由式 (2-6) 可知， μ 的物理意义是当速度梯度 $\frac{du}{dy} = 1$ 时，互相接触的流层间单位面积上的内摩擦力。

在国际单位制（SI）中， μ 的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ （帕·秒）；在（CGS）单位制中， μ 的单位是 P（泊）。泊的 1/100 为 cP（厘泊），其换算关系为

$$1\text{cP} = 10^{-2}\text{P} = 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$$

(2) 运动粘度 动力粘度 μ 和液体密度 ρ 的比值称为运动粘度 ν ，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{2-7}$$

在国际单位制（SI）中， ν 的单位是 m^2/s ；在（CGS）单位制中，单位为 cm^2/s （厘米²/秒），通常称为 St（斯）。斯的 1/100 为 cSt（厘斯），其换算关系为

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

运动粘度没有明确的物理意义，只是在理论计算和分析中，经常碰到 μ/ρ 的比值，因而采用运动粘度这样一个单位来代替 μ/ρ 。之所以称它为运动粘度，是因为它的单位中，只有长度与时间的运动学上的量。

液压油一般采用一定温度下运动粘度的平均值来表示，通常直接表示在它的牌号上。我国生产的全损耗系统用油采用 40℃ 时以 mm^2/s 为单位的运动粘度 ν 的平均值来标定牌号。例如 L-HL32 就是指这种油在 40℃ 时的运动粘度 ν 的平均值为 $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 相对粘度 相对粘度又称条件粘度，是用一定量的液体，在一定条件下通过测量仪器的时间来间接表示液体粘性。由于不需要测定液体的内摩擦力数值，因而测定方法简便实用。各国采用的相对粘度的单位是不同的，我国采用恩氏粘度（°E）。

恩氏粘度的测定方法如下：将 200cm^3 的被测液体装入底部有 $\phi 2.8\text{mm}$ 小孔的恩氏粘度计的容器中，测出在一定温度（ t ）下流过小孔的时间 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 $t^\circ\text{C}$ 的恩氏粘度值，表示为

$$^\circ\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \tag{2-8}$$

工业上常用 20℃、50℃ 和 100℃，作为测定恩氏粘度的标准温度，并分别以相应的符号 $^\circ\text{E}_{20}$ 、 $^\circ\text{E}_{50}$ 和 $^\circ\text{E}_{100}$ 表示。

各种粘度的单位名称、符号、采用的国家与换算公式见表 2-1。

表 2-1 各种粘度单位名称、符号、采用的国家与换算公式

粘度单位名称	又名	符号	单位	采用国家	与运动粘度/ (mm^2/s) 之换算公式
动力粘度	粘性动力系数 绝对粘度	μ	cP（厘泊）	俄罗斯	$\nu = \frac{\mu}{\rho}$
运动粘度	粘性运动系数 （绝对粘度）	ν	cst cSt（厘斯）	前苏联 美	
恩氏粘度	相对粘度	$^\circ\text{E}$	度	中国、欧洲	$\nu = 7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}}$
国际塞氏秒	通用塞波尔特秒	SSU (SUB)	s（秒）	美	$\nu = 0.22\text{SSU} - \frac{180}{\text{SSU}}$
商用雷氏秒	雷氏 1# 秒	"R (RSS)	s（秒）	英	$\nu = 0.26"R - \frac{172}{"R}$

液体的粘度随液体压力和温度的变化而变化,当液体压力增高,分子间距离缩小,液体粘度随之增大。一般情况下, $p \leq 50\text{bar}$ ($1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$) 时,压力对粘度的影响可以忽略不计;但当 $p \geq 100\text{bar}$ 时,则需考虑压力的影响。

粘度与压力的关系是按指数规律变化,即

$$\nu_p = \nu_o e^{bp} \quad (2-9)$$

式中 ν_p ——压力为 p 时该液体的运动粘度;

ν_o ——在大气压力下该液体的运动粘度;

b ——粘度-压力系数。液压传动常用的矿物油的 b 值为 $(0.002 \sim 0.004) \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{N}$;

e ——自然对数之底。

但在实际使用中,当 $p = 0 \sim 50\text{MPa}$ 时,常用式 (2-10) 计算 ν_p

$$\nu_p = \nu_o (1 + 0.003p) \quad (2-10)$$

液体粘度随温度的变化是非常敏感的,当温度升高,液体的粘度显著下降。不同种类的油,其粘度随温度变化的规律不同。我国常用粘温图表示油液粘度随温度变化的关系。部分国产液压油的粘温曲线见图 2-2。

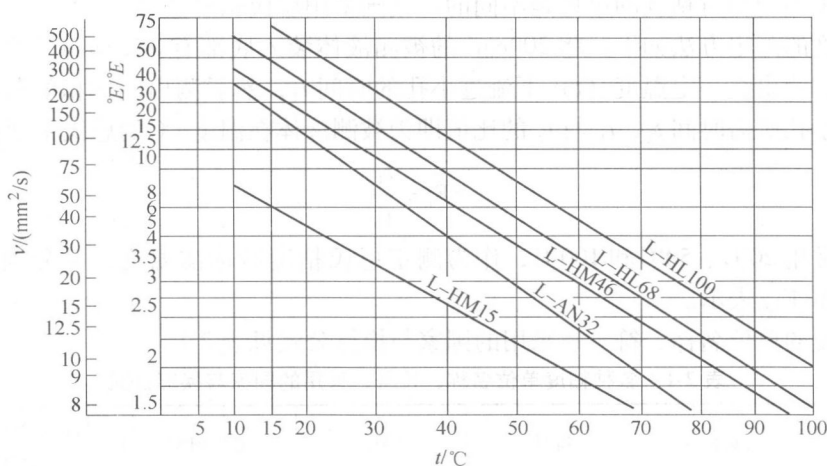


图 2-2 几种国产液压油的粘温曲线

对于一般常用的液压油,当运动粘度不超过 $76\text{mm}^2/\text{s}$ 、温度在 $30 \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内时,可用近似公式计算其温度为 $t^\circ\text{C}$ 的运动粘度

$$\nu_t = \nu_{50} \left(\frac{50}{t} \right)^n \quad (2-11)$$

式中 ν_t ——温度为 $t^\circ\text{C}$ 时油的运动粘度;

ν_{50} ——温度为 50°C 时油的运动粘度;

n ——与液体粘度有关的特性系数,其值见表 2-2。

表 2-2 与液体粘度有关的特性系数

$\nu_{50}/(\text{mm}^2/\text{s})$	2.5	6.5	9.5	12	21	30	38	45	52	60
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49

有时为了使油液具有所需要的粘度，把两种不同的油混合使用，称为调合油。调合油的粘度可用下列经验公式计算

$$^{\circ}\text{E} = \frac{a^{\circ}\text{E}_1 + b^{\circ}\text{E}_2 - c(^{\circ}\text{E}_1 - ^{\circ}\text{E}_2)}{100} \quad (2-12)$$

式中 $^{\circ}\text{E}_1$ 、 $^{\circ}\text{E}_2$ ——混合前的两种液压油的粘度，取 $^{\circ}\text{E}_1 > ^{\circ}\text{E}_2$ ；

$^{\circ}\text{E}$ ——调合油的粘度；

a 、 b ——两种油各占百分比， $a + b = 100$ ；

c ——实验系数，其值按表 2-3 选择。

表 2-3 调合油的系数

a	10	20	30	40	50	60	70	80	90
b	90	80	70	60	50	40	30	20	10
c	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

二、液压油的质量指标

液压油除了上述与传动有关的主要物理性质外，还有下述几项常见的标志液压油质量的参数。

(1) 酸值 表示油中的含酸量，即中和 1g 石油产品所需氢氧化钾的毫克数。液压油的酸值越低，质量越高。

(2) 闪点 将液压油在一定条件下加热，油蒸气与周围空气形成的混合气体同火焰接触开始闪火时的最低温度叫做闪点。如果使闪火时间延长 5s，这时的温度称为燃点。闪点的高低可以确定油液工作时允许的最高温度，以及油液使用时的蒸发状况和受热的安定性。

(3) 凝点 液压油在低温下停止移动的最高温度称为凝点。

(4) 灰分 油试样在规定条件完全燃烧后的残留物占试样质量的百分数。

(5) 机械杂质 油中的沉淀和悬浮物，经过溶解过滤后的残留物。

三、对液压油的要求和选用

(1) 对液压油的要求 实践表明，液压传动系统工作性能好坏，在很大程度上取决于工作液体的选择和管理，液压传动系统 70% 以上的故障直接或间接与液压油有关。

1) 具有适当的粘度和良好的粘温性能。在工作温度范围内，粘度变化要小，液压油的粘度一般为 $2^{\circ}\text{E}_{50} \sim 8^{\circ}\text{E}_{50}$ 。

2) 具有良好的化学稳定性。主要指液压油在高温下（抗热）、与空气长期接触（抗氧化）、在高速通过缝隙小孔（抗剪切）仍能保持原有化学成分不变的性质。

3) 凝点低、闪点高，不含或含有极少量的机械杂质、水分，有良好的抗乳化性和消泡性。

(2) 液压油的分类及其使用范围 液压油的分类多种多样，我国为了反映液压油的