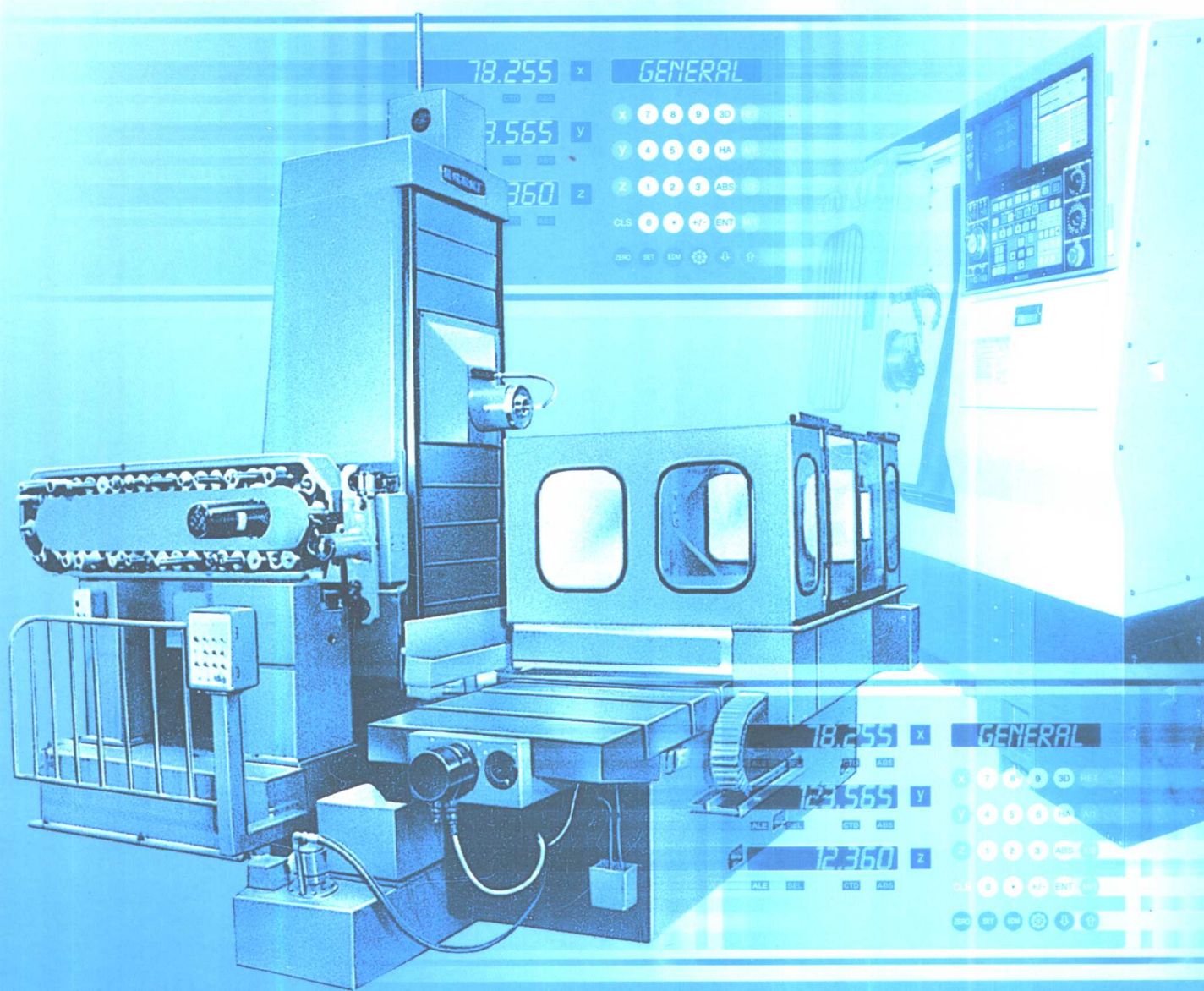


职业技术教育教材

机电一体化——数控机床加工技术专业

液气压传动



机械工业出版社
China Machine Press

职业技术教育教材

机电一体化——数控机床加工技术专业

液 气 压 传 动

季明善 主编

上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会组编



机械工业出版社

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。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。

本教材是先元件后回路、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最新国家标准。

本教材适用于高、中级职业技术院校的机电类各专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

液气压传动/上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会组编.
—北京:机械工业出版社,2001.9

职业技术教育教材

ISBN 7-111-09391-7

I. 液… II. 上… III. ①液压传动—技术教育—教材②气压传动—技术教育—教材 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 067125 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:李铭杰 版式设计:冉晓华 责任校对:张佳

封面设计:姚毅 责任印制:郭景龙

北京铭成印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2002 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm¹/₁₆·13.5 印张·329 千字

0 001—4 500 册

定价:21.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010) 68993821、68326677—2527

上海市职业技术教育机械专业 教材编审委员会名单

主 任 夏毓灼
副 主 任 徐韵发 吴志清
委 员 （按姓氏笔画排列）
 吉广镜 刘际远 金瑞樑
 徐孝远 高奇玲 谢卫华
秘 书 相雅蓉
本书主编 季明善
本书副主编 齐人光
本书参编 王振华
本书主审 严金坤
本书参审 高云生

序

我国的现代化建设不但需要高级科学技术专家，而且迫切需要职业技术人才、管理人员和技术工人，而这类人才的培养主要是通过职业技术教育来实现的，所以党和国家非常重视职业技术教育的改革和发展。努力培养出各行各业所需的职业人才，是社会、经济发展对职业技术教育提出的迫切要求。我国的职业技术教育长期实行的是“学科本位”的教学模式，这种模式重理论轻实践，重知识轻技能，培养出的学生不适应社会、经济发展的要求。因此，职业技术教育要深化改革，办出特色，为社会培养出既有理论又有技能，德、智、体全面发展的一代新人。

职业技术教育要办出自己的特色，关键在于课程改革与教材建设。为此，1996年上海市教委启动了职业技术教育课程改革与教材建设工程（简称“10181”工程），即用5年左右的时间，完成10门普通文化课程的改革及示范教材的编写工作；完成18个典型专业（工种）的课程改革以及同步编写出部分典型示范性教材；经过10年左右的改革实践，基本形成一个具有职教特色的课程结构和教材体系。

这次课程改革与教材建设是以社会和经济发展的需要为出发点，以职业（岗位）需求为直接依据，以现行职业技术教育课程、教材的弊端为突破口，积极学习并借鉴国外职业技术教育课程、教材改革的有益经验，以实现办出职教特色的根本目的。在充分研究和广泛征求意见的基础上，确立了“能力为本位”的改革指导思想。目的是为了克服职教长期存在的重理论轻实践、重知识轻技能的倾向、真正培养出经济和社会发展所需要的职业技术人才。

在各方面的共同努力下，新的教材终于与广大师生见面了。这些新的教材并不是职业技术教育课程改革与教材建设的全部，它只是典型的示范性教材，因为职业技术教育的专业门类繁多，不可能在较短的时间内，依靠少数编写人员解决职教中全部的课程、教材问题。职业技术教育的课程改革和教材建设是一项系统的长期的工作，只有充分发挥广大教师的改革积极性，在教学过程中不断用“能力本位”的教育思想，主动进行课程与教材的改革，我们的课程、教材改革才能全面、持续而深入，才可能真正全面提高教学质量和效益，以不断适应社会、经济发展的需要。

新的教材代表新的思想、新的教法和学法。希望通过这些教材给大家一些启迪，同时也希望大家对新教材提出宝贵的意见。

在课程改革与教材建设过程中，得到了各方面的大力支持，特别是广大编审人员为此付出了辛勤的劳动。在此，向他们表示衷心的感谢！

上海市教育委员会副主任

上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会主任 **薛喜民**

前 言

“机电一体化——数控机床加工技术专业”教材，全套共14本，经过5年的努力，终于付梓出版了。这套教材是上海市教委组织的“10181”课程改革和教材建设工程的重要组成部分，也是机械专业课程改革和教材建设的可喜成果。

随着科学技术的高速发展，传统的机械工业呈现出了新的技术发展趋势，进入了智能化领域。机电一体化的迅猛发展和数控机床加工技术在企业的普遍应用，对生产一线操作人员的知识和能力要求越来越高，客观上要求一线操作人员应由经验型向智能型转变。这套新教材正是为顺应这一发展趋势而组织编写的。

近5年来，我们机械专业教材编审委员会为此付出了辛勤的劳动。首先组织了长达半年的调查研究，并且参照加拿大CBE经验，制作了DACOM表，就数控机床加工技术专业职业技术人员的知识、能力要求，在五大行业、72个企业中问卷调查了780人次，从而明确了该专业的知识和能力结构。其次，认真进行了课程改革方案的讨论和研究，确定了机电结合，“以机为主，以电为辅”；在课程安排中“以机为主，突出工艺”、“以电为辅，够用为度”的原则。然后对传统的课程体系进行重组优化，如对陈旧老化的知识予以删除，对烦琐的内容予以简化，对某些课程进行重新组合，针对新知识，特别是新的能力需求，设置了新课程。最后，我们按照教材的编写要求，组织了14个编写组，实施主编负责制。所聘的编写人员都是具有改革创新精神、有丰富教学经验、熟悉专业技术的专业人才；同时聘请了有较高造诣的高校教授任主审。为了确保教材质量，对每本教材的编写提纲都组织有关专家进行了逐一论证。从而保证了这套教材的科学性、针对性、实用性。

在这里，我觉得有必要对本专业的设计作一概要介绍。

本专业强调实务能力，学生通过本专业的学习后，可具有中级水平的数控机床操作能力；具有编制中等复杂程度零件数控加工程序的能力；具有数控机床的刀具选用、调整、工件装夹等技能；具有数控机床维护、保养，并能排除简单故障的能力；具有正确解决零件在数控机床加工过程中质量问题的能力。

这套教材能得以顺利出版，无疑是集体智慧的结晶，是团队合作的成果。在此，我要感谢上海市职业技术教育课程改革与教材建设委员会的正确领导和指导；要感谢上海工业系统各行业、企业的支持和通力合作；要感谢为此呕心沥血、伏案疾书的近百名编审人员；最后还要感谢机械工业出版社的同志们。

当今，我们正处在改革的年代，正是这个年代催生了这套具有改革精神、时代特色和专业个性的新教材。愿随着这套教材的教学实施，能造就一批又一批新的职业技术人才，以服务于国家、造福于企业。

上海市职业技术教育机械专业教材编审委员会副主任 徐韵发

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/T786.1—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

序	
前言	
编者的话	
第一章 绪论	1
复习思考题	4
第二章 液气压传动基础知识	5
第一节 液压油	5
第二节 液体的性质	11
第三节 压力损失计算及液压冲击	15
第四节 气压传动基础知识	20
复习思考题	22
第三章 液压泵和液压马达	24
第一节 概述	24
第二节 齿轮泵	27
第三节 叶片泵	31
第四节 柱塞泵和柱塞式液压马达	38
复习思考题	42
第四章 液压缸及气缸和气马达	44
第一节 液压缸性能参数及结构	44
第二节 气缸和气马达	50
复习思考题	58
第五章 液气压控制阀	60
第一节 液压方向控制阀	60
第二节 液压压力控制阀	67
第三节 液压流量控制阀	75
第四节 液压插装阀	80
第五节 液压伺服阀和电液数字阀	89
第六节 气压控制阀	93
复习思考题	108
第六章 液气压辅助装置	110
第一节 液压辅助装置	110
第二节 气源装置及气动辅件	116
复习思考题	121
第七章 液气压基本回路	122
第一节 液压压力控制回路	122
第二节 液压速度控制回路	126
第三节 液压顺序控制回路	136
第四节 气压基本回路	140
复习思考题	147
第八章 典型液气压传动系统	152
第一节 M1432A 万能外圆磨床液压系统	152
第二节 数控机床及加工中心液压系统	156
第三节 液压伺服系统	161
第四节 气动系统及应用	165
复习思考题	169
第九章 常见液气压系统故障与修理	170
第一节 液压系统的振动和爬行	170
第二节 液压冲击和液压卡紧	175
第三节 温升与泄漏	179
第四节 气动系统常见故障及排除	181
复习思考题	184
第十章 液压系统的设计与计算	186
第一节 液压系统的设计步骤和内容	186
第二节 液压系统设计计算实例	193
复习思考题	199
附录	200
附录 A 常用单位换算表	200
附录 B 液压气动图形符号	
(摘自 GB/T 786.1—93)	201
参考文献	206

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，是一门较新兴的应用学科。

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 7 等组成的液压缸构成。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。

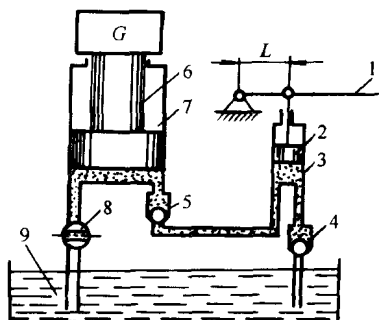


图 1-1 液压千斤顶工作原理图

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，通常称为液压泵。

(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

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

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

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

由此可知, 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、液压传动的优缺点

1. 优点 液压传动与其它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，易于实现快速启动、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启动、制动和换向。液压装置的换向频率，在旋转运动时可达每分钟 500 次，在实现往复直线运动时可达每分钟 1000 次。
- 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) 液压传动易于实现过载保护。液压油能自行润滑，使用寿命较长。

6) 液压元件易于实现系列化、标准化和通用化。

2. 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。

三、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·布利斯确立了“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。但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。20世纪70年代液压与气动元件的产值比约为9:1,但30多年后的今天,在工业技术发达的国家该比例已达到6:4,并且出现了相互渗透,协同发展的趋势。

我国液压和气动工业,经过40多年的发展已形成了门类齐全和具有一定技术水平的生产科研体系。1996年液压件产值为23.8亿元,气压件产值也达到近5亿元,可满足机械工业的一般要求。

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,缩短与国外同类产品上的差距,在实现工业自动化方面发挥日益重要的作用。

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. 液压传动与其它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?

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，必须考虑液压油的可压缩性。

受压力作用的液体，其相对压缩量与压力增量成正比

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

故

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

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 的倒数称液体的体积弹性模量。常用液压油的弹性模量为

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

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，而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。所以，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

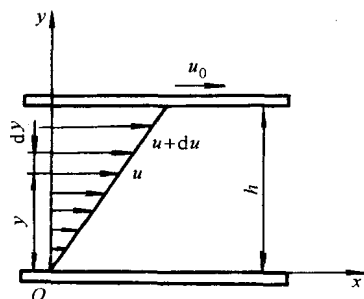


图 2-1 相对运动与粘性

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

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

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-7)$$

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 , 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。

我国液压油一般采用运动粘度来表示, 通常直接表示在它的牌号上, 每一种 GB443—1989 的牌号, 即表示这种机械油 (全损耗系统用油, GB443—1989。下同) 在 40℃ 时以 mm^2/s 为单位的运动粘度 ν 的平均值。例如 N32 ($\leq$ —AN) 机械油, 就是指这种机械油在 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 ($^{\circ}\text{E}$)。

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, 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

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

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	$\nu = 0.26^{\circ}\text{R} - \frac{172}{^{\circ}\text{R}}$

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

$$\nu_p = \nu_0 e^{bp} \quad (2-9)$$

式中 ν_p ——压力为 p 时该液体的运动粘度;

ν_0 ——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

$$\nu_p = \nu_o (1 + 0.003 p)$$

(2-10)

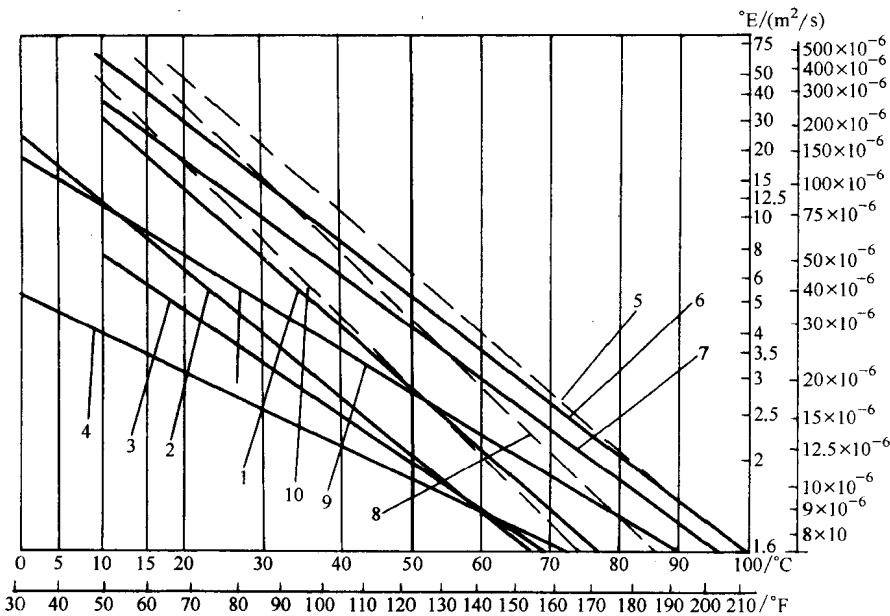


图 2-2 几种国产液压油的粘温曲线

- 1—N32 机械油 2—YC—N32 低温液压油 3—N15 机械油
- 4—N15 航空液压油 5—HU—45 汽轮机油 6—N68 机械油 7—N46 机械油
- 8—HU—30 汽轮机油 9—YC—N46 低温液压油 10—HU—20 汽轮机油

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，它的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。部分国产油的粘温曲线见图 2-2。

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，见式 (2-11)

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

(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，见式（2-12）

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

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，液压油的粘度一般在 $2^{\circ}\text{E}_{50} \sim 8^{\circ}\text{E}_{50}$ 之间。

2) 具有良好的化学稳定性。主要指在高温下（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本质和内在联系与区别，经过综合分析等效地采用了有关国际标准。表 2-4 列出了有关国产液压油的产品符号及其主要性能、使用范围，可供选用时参考。