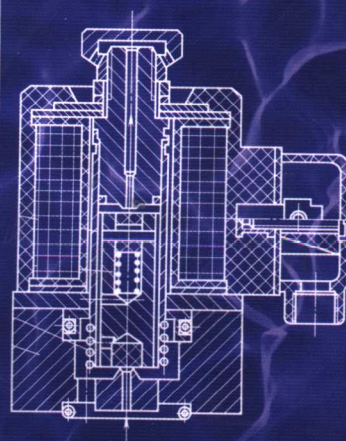
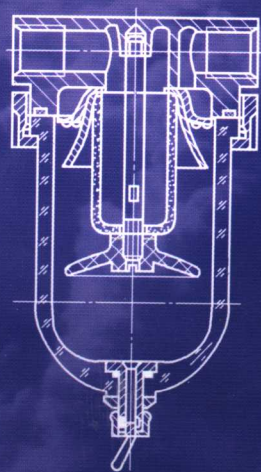


高职高专“十一五”规划教材

液压与气压传动

李建蓉 徐长寿 主编 陶亦亦 主审



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

液压与气压传动

李建蓉 徐长寿 主编
陶亦亦 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书内容包括液压传动控制基础、液压基本回路、气压传动控制基础、气动基本回路、典型气液电控系统、液压与气压控制系统设计。从应用的角度出发,综合液压与气压传动技术,结合电器控制技术,贯彻理论结合实际的原则,注重培养分析问题和解决问题的能力,内容精练,基本观点清楚,重点突出。书中元件的图形符号和原理图均采用国家最新图形符号标准绘制,并在章节后附有丰富的例题、习题及其答案。

本书是高等职业院校机械类专业的教材,同时适合工程专科、职工大学、业余大学的机械类专业,并可供有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/李建蓉,徐长寿主编. —北京:化学工业出版社,2007

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5025-9784-9

I. 液… II. ①李…②徐… III. ①液压传动-高等学校:技术学院-教材②气压传动-高等学校:技术学院-教材 IV. TH13

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第007103号

责任编辑:高钰
责任校对:顾淑云

文字编辑:李玉峰
装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装订:三河市前程装订厂装订

787mm×1092mm 1/16 印张13 字数336千字 2007年1月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:21.00元

版权所有 违者必究

前 言

液压与气压传动技术随着社会的发展、科学技术的进步有了很大的发展，在机械工程、汽车工程、物流工程、采矿工程、冶金工程等领域有了很好的应用。为了进一步推动液压与气压传动技术的普及和发展，同时为适应高职高专院校机械和机电类专业的教学改革需要，编者根据高等职业技术教育为生产第一线培养应用型专业技术人才的基本要求编写了本书。

编写本书的指导思想是：从应用的角度综合液压与气压传动技术；以成熟的实用技术为出发点，结合电气控制技术，贯彻理论联系实际的原则，注重培养分析问题和解决问题的能力。本书叙述简明，内容深入浅出，通俗易懂，图文并茂，例题、习题丰富并有习题答案和附录，便于教与学，内容精练，基本观点清楚，重点突出，力图满足教师与学生的需要。书中元件的图形符号和原理图均采用国家最新图形符号标准绘制。

本书是高等职业院校机械类专业的教材，同时适合工程专科、职工大学、业余大学的机械类专业，并可供有关工程技术人员参考。

本书由李建蓉、徐长寿主编，陶亦亦主审。本书第一章由李建蓉、潘丽敏编写，第二章至第六章由徐长寿、潘丽敏编写，各章例题、习题及相关答案由李建蓉编写。全书由潘丽敏、徐长寿统稿。

本书经陶亦亦副教授认真、仔细审阅，并对全书提出许多有益的建议，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，且编写时间紧迫，书中不当之处谨希望读者不吝指正。

编 者
2006年10月

欢迎加入化学工业出版社读者俱乐部

您可以在我们的网站 (www.cip.com.cn) 查询、购买到数千种化学、化工、机械、电气、材料、环境、生物、医药、安全、轻工等专业图书以及各类专业教材, 并可参与专业论坛讨论, 享受专业资讯服务, 享受购书优惠。欢迎您加入我们的读者俱乐部。

两种入会途径 (免费)

- ◇ 登录化学工业出版社网上书店 (www.cip.com.cn) 注册
- ◇ 填写以下会员申请表寄回 (或传真回) 化学工业出版社

四种会员级别

- ◇ 普通会员
- ◇ 银卡会员
- ◇ 金卡会员
- ◇ VIP 会员

化学工业出版社读者俱乐部会员申请表

姓名:	性别:	学历:
邮编:	通讯地址:	
单位名称:	部门:	
您从事的专业领域:	职务:	
电话:	E-mail:	

- 您希望出版社给您寄送哪些专业图书信息? (可多选)
 化学 化工 生物 医药 环境 材料 机械 电气 安全 能源 农业
 轻工 (食品/印刷/纺织/造纸) 建筑 培训 教材 科普 其他 ()
- 您希望多长时间给您寄一次书目信息?
 每月 1 次 每季度 1 次 半年 1 次 一年 1 次 不用寄
- 您希望我们以哪种方式给您寄送书目? 邮寄纸介质书目 E-mail 电子书目

此表可复印, 请认真填写后发传真至 **010-64519686**, 或寄信至: 北京市东城区青年湖南街 13 号化学工业出版社发行部 读者俱乐部收 (邮编 100011)

联系方法:

热线电话: 010-64518888; 64518899 电子信箱: hy64518888@126.com

目 录

1 液压传动控制基础	1
1.1 液压传动的工作原理	1
1.1.1 液压传动系统	1
1.1.2 液压油的性质	3
1.1.3 油液的选用	5
1.1.4 液体静力学基础	6
1.1.5 液体动力学基础	9
1.1.6 管路压力损失	13
1.1.7 液压冲击	13
1.1.8 气穴现象	14
1.1.9 例题与习题	14
1.2 液压动力元件	20
1.2.1 液压泵概述	20
1.2.2 齿轮泵	23
1.2.3 叶片泵	27
1.2.4 轴向柱塞泵	30
1.2.5 液压泵的选用	32
1.2.6 例题与习题	33
1.3 液压执行元件	35
1.3.1 液压马达	35
1.3.2 液压缸	37
1.3.3 例题与习题	47
1.4 液压控制元件	53
1.4.1 方向控制阀	53
1.4.2 压力控制阀	60
1.4.3 流量控制阀	65
1.4.4 二通插装阀	69
1.4.5 叠加式液压阀	71
1.4.6 电液比例控制阀	72
1.4.7 伺服阀与数字阀简介	73
1.4.8 液压阀的连接	74
1.4.9 例题与习题	76
1.5 液压辅助元件	81
1.5.1 滤油器	81
1.5.2 蓄能器	83
1.5.3 密封装置	83
1.5.4 其他液压辅件	84
1.5.5 习题	86
2 液压基本回路	87
2.1 方向控制回路	87
2.1.1 换向回路	87
2.1.2 锁紧回路	87
2.2 压力控制回路	88
2.2.1 调压回路	88
2.2.2 卸荷回路	89
2.2.3 减压回路	90
2.2.4 增压回路	90
2.2.5 保压回路	91
2.2.6 平衡回路	91
2.3 速度控制回路	92
2.3.1 调速回路	92
2.3.2 快速运动回路	95
2.3.3 速度换接回路	96
2.4 其他控制回路	98
2.4.1 同步回路	98
2.4.2 顺序动作回路	99
2.4.3 互不干扰回路	101
2.5 液压基本回路的应用	102
2.5.1 液压动力滑台的控制	102
2.5.2 定位夹紧的控制	103
2.6 例题与习题	103
2.6.1 例题	103
2.6.2 习题	111
3 气压传动控制基础	117
3.1 气压技术基本原理与气源装置	117
3.1.1 气压传动系统的工作原理	117
3.1.2 空气的基本性质	119
3.1.3 气源装置	120
3.1.4 其他辅助装置	124
3.2 气动执行元件	126

3.2.1 气缸	127	3.3.2 流量控制阀	134
3.2.2 气马达	131	3.3.3 方向控制阀	135
3.3 气动控制元件	131	3.3.4 气动逻辑元件	141
3.3.1 压力控制阀	131	3.4 习题	144
4 气动基本回路	146		
4.1 换向回路	146	4.5.1 延时控制回路	150
4.1.1 单作用气缸换向回路	146	4.5.2 同步回路	151
4.1.2 双作用气缸换向回路	146	4.5.3 安全保护回路	151
4.2 速度控制回路	147	4.5.4 往复运动回路	151
4.2.1 单作用气缸速度控制回路	147	4.5.5 冲击回路	152
4.2.2 双作用气缸速度控制回路	147	4.5.6 基本逻辑回路	153
4.3 压力控制回路	148	4.6 基本气动回路的应用	153
4.4 气液联动回路	149	4.6.1 夹紧回路	153
4.4.1 气液速度回路	149	4.6.2 液面自动控制装置气动回路	153
4.4.2 气液增压回路	149	4.7 习题	154
4.5 其他常用回路	150		
5 典型气液电控制系统	155		
5.1 组合机床的电液控制	155	5.3.1 可移式气动通用机械手的结构和工作 循环	164
5.1.1 双面单工位组合机床的结构及工作 循环	155	5.3.2 可移式气动通用机械手的气动 系统	164
5.1.2 双面单工位组合机床液压系统	156	5.3.3 可移式气动通用机械手的电气控制 线路	164
5.1.3 双面单工位组合机床电气控制 线路	157	5.4 制动气缸气压系统	166
5.2 液压压力机的电液控制	159	5.4.1 制动气缸水平安装的基本回路	166
5.2.1 YB32-200 型液压压力机基本结构	159	5.4.2 制动气缸垂直向下安装的基本 回路	166
5.2.2 YB32-200 型液压压力机液压系统工作 原理	160	5.4.3 制动气缸垂直向上安装的基本 回路	167
5.2.3 YB32-200 型液压压力机电液控制 系统	162	5.4.4 其他	167
5.3 可移式气动通用机械手	164		
6 液压与气压控制系统设计	169		
6.1 液压系统的设计	169	6.2.1 气动系统设计流程	179
6.1.1 液压系统的设计步骤	169	6.2.2 设计气动系统时应注意的事项	183
6.1.2 组合机床液压系统设计实例	170	6.3 习题	184
6.2 气动控制系统设计	179		
部分习题参考答案	186		
附录	188		
附录 A 常用液压与气动元件图形符号	188	照表	191
附录 B 常用电气图图形文字符号新旧对 照表		附录 C 叠加阀系列型谱	196
参考文献	199		

1 液压传动控制基础

1.1 液压传动的工作原理

1.1.1 液压传动系统

1.1.1.1 液压传动工作原理

液压传动是以液体压力进行能量传递和自动控制的一种传动方式。现以图 1.1 所示液压千斤顶来说明液压传动的工作原理。在图中，大、小两液压缸 9 和 2 内分别装有活塞 10 和 3，活塞与缸体之间具有良好的配合关系，不仅活塞能在缸体内滑动，而且配合面之间又能实现可靠的密封。当上提杠杆 1 时，小活塞 3 向上移动，使活塞下腔密封容积增大而形成局部真空。这时油箱 7 中的油液在大气压力作用下，顶开单向阀 5 进入小液压缸的下腔，完成一次吸油动作。当用力 F 压下杠杆 1 时，小活塞 3 下移，小液压缸下腔密封容积减小，油液受到挤压作用而使压力升高，这时单向阀 5 关闭，单向阀 4 则被打开，油液进入大液压缸，推动大活塞 10 向上移动，顶起重物 G 。如此反复提、压杠杆 1，便可使重物不断提高，达到起重的目的。若将截止阀 8 打开，活塞可在重力作用下实现回程。这就是液压千斤顶的工作原理。由此可知，液压传动是以密封容积中受压液体作为工作介质来传递运动和动力的一种传动。它先将机械能转换为油液的压力能，再由压力能转为机械能做功。

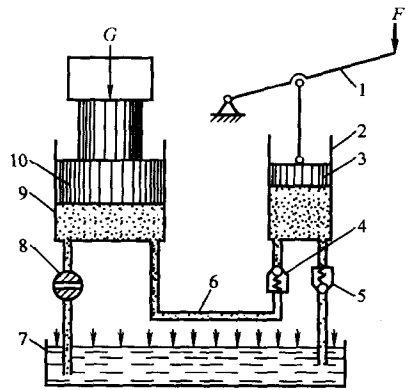


图 1.1 液压千斤顶工作原理图

- 1—杠杆；2—小液压缸；3—小活塞；4,5—单向阀；6—管道；7—油箱；8—截止阀；9—大液压缸；10—大活塞

液压传动的应用范围非常广，但就其工作原理来讲是相同的。下面以图 1.2 所示机床工作台液压控制系统的工作原理图为例进行分析。

图中电动机驱动液压泵 3，经滤油器 2 从油箱 1 吸油，油液被泵加压后，从泵的输出油口进入管路，在图 1.2 (a) 所示状态下，油液经换向阀 5、节流阀 6、换向阀 7 进入液压缸 8 左腔，推动活塞而使工作台向右移动。这时液压缸右腔的油液经换向阀 7 排回油箱。

如果将换向阀手柄转换成图 1.2 (b) 所示状态，则压力油将经换向阀 5、节流阀 6 和换向阀 7 进入液压缸右腔，推动活塞而使工作台向左移动，液压缸左腔油经换向阀 7 回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀开大时，进入液压缸的油液流量增多，工作台的移动速度增大；反之，工作台的移动速度减小。由此可见，进入液压缸的油液

流量控制活塞的运动速度，说明速度取决于流量。

为克服移动工作台时受到的各种阻力，液压缸必须产生一个足够大的推力，这个推力是由液压缸中的油液压力所产生的。要克服的阻力越大，缸中的油液压力越高；阻力小，压力就低，这种现象说明了压力取决于负载。

系统中输入液压缸的油液是通过节流阀 6 来调节的，因此节流阀起到调节液压缸活塞速度的作用。泵所输出的多余油液达到规定压力即打开溢流阀 4 回到油箱，因此溢流阀起到调压、溢流的作用。

如果将换向阀手柄转换成图 1.2 (c) 所示状态，则压力管中的油液通过换向阀 5 和回油管回油箱，这时工作台停止运动。

从上例可知，液压系统由如下五部分组成。

- (1) 动力元件 将机械能转换为液压能的装置，给整个系统提供压力油，如液压泵。
- (2) 执行元件 将液压能转换为机械能的装置，以克服负载做功，如液压缸、液压马达。
- (3) 控制元件 控制和调节液压系统的压力、流量及液流方向，以改变执行元件输出的力（或转矩）、速度（或转速）及运动方向，如各种控制阀。
- (4) 辅助元件 为液压系统正常工作起辅助保证作用的元件，如油箱、滤油器、蓄能器、油管、管接头和压力表等。
- (5) 工作介质 传递压力的工作介质，同时还起润滑、冷却和防锈作用，通常为液压油。

1.1.1.2 液压传动系统图及图形符号

在图 1.2 所示的液压系统中，各元件是以结构符号表示的，称为结构式原理图。它直观性强，容易理解，但图形复杂，绘制困难。为了简化液压系统图，目前各国均采用元件的职能符号或简化符号来绘制液压系统图。这些符号只表示元件的职能及连接通路，而不表示结构。目前我国的液压系统原理图采用国标 GB 786.1—93 所规定的图形符号绘制，图 1.3 是把图 1.2 用对应的图形符号绘制的系统原理图。

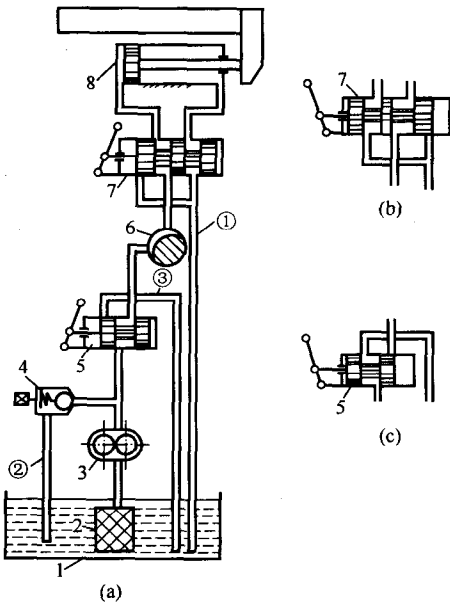


图 1.2 机床工作台液压控制系统工作原理图

1—油箱；2—滤油器；3—液压泵；4—溢流阀；5,7—换向阀；
6—节流阀；8—液压缸；①~③—油管

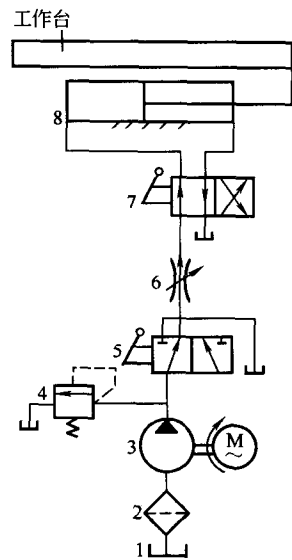


图 1.3 机床工作台液压控制系统的图形符号图

1—油箱；2—滤油器；3—液压泵；4—溢流阀；
5,7—换向阀；6—节流阀；8—液压缸

1.1.1.3 液压传动的优缺点

与机械、电气传动相比，液压传动具有以下优点：

- ① 可以在运行过程中实现大范围的无级调速；
- ② 在同等输出功率下，液压传动装置体积小、重量轻、运动惯性小、反应速度快；
- ③ 可实现无间隙传动，运动平稳；
- ④ 便于实现自动工作循环和自动过载保护；
- ⑤ 由于一般采用油作为传动介质，对液压元件有润滑作用，因此设备可有较长的使用寿命；
- ⑥ 液压元件都是标准化、系统化产品，可直接从市场上购买，有利于液压系统的设计、制造和推广应用；
- ⑦ 可以采用大推力的液压缸或大转矩的液压马达直接带动负载，从而省去中间减速装置，使传动简化。

液压传动的主要缺点为：

- ① 液压传动不能保证严格的传动比，这是由液压油的可压缩性和泄漏等因素造成的；
- ② 液压传动在工作过程中常有较多的能量损失（摩擦损失、泄漏损失等）；
- ③ 液压传动对油温的变化比较敏感，它的工作稳定性容易受到温度变化的影响，因此不宜在温度变化很大的环境中工作；
- ④ 为了减少泄漏，液压元件在制造精度上要求比较高，因此其造价较高，且对油液的污染比较敏感；
- ⑤ 液压传动出现故障的原因较复杂，而且查找困难。

1.1.2 液压油的性质

1.1.2.1 密度

单位体积液体的质量称为该液体的密度，用 ρ (kg/m^3) 表示。对均质液体，其密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中， m 为液体的质量， kg ； V 为液体的体积， m^3 。

液体的密度随压力和温度的不同而有微小的变化，但在一般使用条件下，近似地认为油液的密度不变，计算时可取 15°C 时的液压油密度 $\rho = 900 \text{kg}/\text{m}^3$ 。

1.1.2.2 黏性

液体在外力作用下流动时，液体分子间的内聚力会阻碍其分子产生相对运动，即分子间存在摩擦力。该摩擦力是发生在液体内部的，因此称之为内摩擦力。液体流动时，在其内部呈现摩擦力的性质，称为液体的黏性。静止液体不呈现黏性。

液体黏性的大小用黏度来衡量。黏度是选择液压油的主要指标，是影响液体流动的重要物理性质。

(1) 黏度 液体流动时，由于它和固体壁面间的附着力以及它的黏性，会使其内部各液层间的速度不同。设在两个平行平面之间充满液体，两平行平板间的距离为 h ，如图 1.4 所示。当上平面以速度 V 相对于静止的下平面向右移动时，紧贴于上平板极薄的一层液体，在附着力的作用下，随着上平面一起以 V 的速度向右运

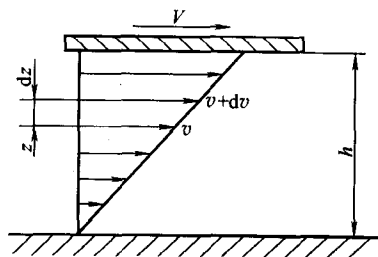


图 1.4 黏性的作用

动，而紧贴下平面的液体保持不动，两平面间各层液体的速度各不相同，当两平面间的距离较小时，各液层的速度按线性规律分布。

据研究，液体流动时，其液层间的内摩擦力 F 与接触面积 A 和速度差 dv 成正比，而与液层间距离 dz 成反比，即

$$F = \mu A \frac{dv}{dz} \quad (1.2)$$

或

$$\tau = \mu \frac{dv}{dz} \quad (1.3)$$

式中， μ 为液体动力黏度，也称为液体内部摩擦系数； $\tau = \frac{F}{A}$ 为单位面积上的摩擦力即剪应力， N/m^2 ； $\frac{dv}{dz}$ 为速度梯度，即液层间相对速度对液层距离的变化率。

上式又称为牛顿内摩擦定律，由式中可以看到液体动力黏度 μ 具有明确的物理意义：它表示了液体在以单位速度梯度流动时单位面积上的摩擦力。在我国 μ 的法定计量单位是帕·秒 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$)。

如果动力黏度只与液体种类有关而与速度梯度无关，这种液体称为牛顿液体，否则为非牛顿液体，液压油一般为牛顿液体。

液体动力黏度与液体密度之比为运动黏度 ν ，即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.4)$$

式中， ν 的法定计量单位是米²/秒 (m^2/s)，运动黏度因单位中只含运动参数而得名。

运动黏度 ν 并不是一个黏度的量，但工程中液体的黏度常用运动黏度来表示。如液压油的牌号，就是这种油液在 40°C 时的运动黏度 ν (mm^2/s) 的平均值。如抗磨性液压油 L-HM32，就是指这种液压油在 40°C 时的运动黏度 ν 的平均值为 $32\text{mm}^2/\text{s}$ 。

工业中还常用条件黏度来度量液体的黏性。它采用特定黏度计在规定条件下测定，又称相对黏度。按各国的习惯，采用不同的条件黏度，如恩氏度 ($^\circ\text{E}$ ，前苏联、欧洲)、赛氏秒 (SUS，英国、美国)、雷氏秒 (RS，英国、美国) 和巴氏度 ($^\circ\text{B}$ ，法国) 等。它们和运动黏度间有确定的换算关系，可参阅有关手册。

(2) 温度对黏度的影响 液体黏度对温度很敏感，温度略有升高，其黏度即显著下降，这可用温度升高使液体内部聚力减小来解释。每种液体的黏度随温度而变化的特性不同，人们希望其变化愈小愈好。图 1.5 示出了五种典型液压油液的黏-温特性曲线。

(3) 压力对黏度的影响 当压力增加时，液体分子间距离缩小，内聚力增加，其黏度也有所增加。因压力对黏度的影响不大，一般情况下，特别是当压力较低时，可不予考虑。

1.1.2.3 液体的可压缩性

液体受压力作用而发生体积变化的性质称为液体的可压缩性。当压力增大时，液体体积减小；反之则增大。对于一般液压系统，由于压力变化引起的液体体积变化不大，故可认为液体是不可压缩的。只有在研究液压系统的动态特性和高压情况下，才考虑油液的可压缩性，这可参考有关手册。必须指出，当液体中混入空气时，其可压缩性将显著增加，故应尽可能使液压系统中油液空气的含量减小到最低限度。

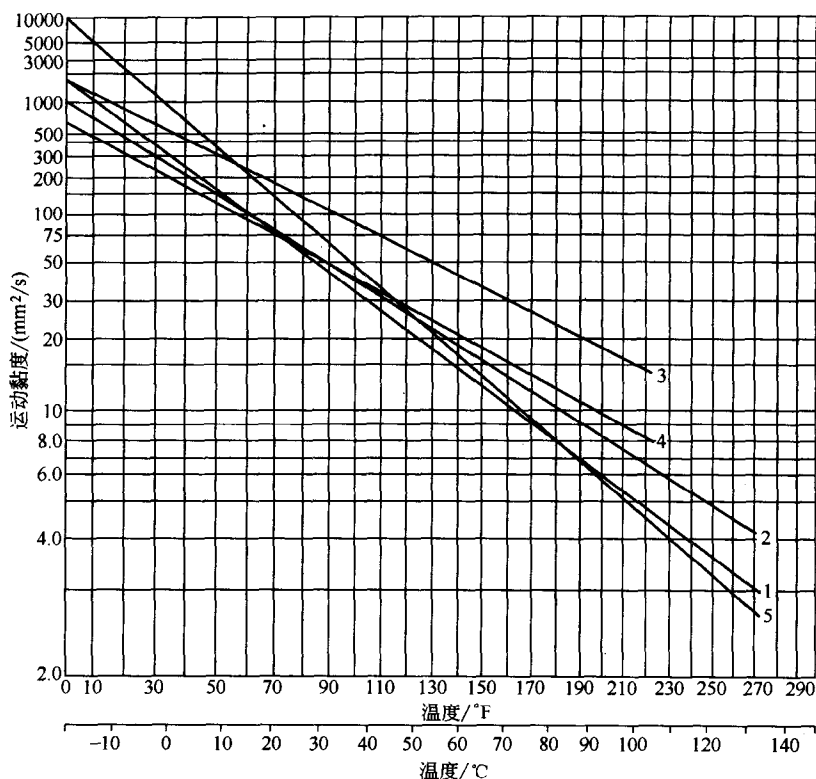


图 1.5 五种典型液压油液的黏-温特性曲线

1—石油型普通液压油；2—石油型高黏度指数液压油；3—水包油乳化液；4—水-乙二醇液；5—磷酸酯液

1.1.3 油液的选择

1.1.3.1 液压油的分类

液压控制系统中按常用的工作介质一般可分为石油型、合成型和乳化型三大类。石油型是以机械油为原料，精炼后按需要加入添加剂而成。当前我国几乎 90% 以上的液压设备是使用石油型液压油，这类液压油润滑性能好，但抗燃性较差。在一些高温、易燃、易爆的工作场合，应在系统中使用合成型或乳化型。液压油的分类及其性质和选用见表 1.1。

1.1.3.2 液压油的选择

正确、合理地选用液压油施压系统适应各种工作条件、工作环境对延长系统和元件的寿命、提高设备运转的可靠性、防止事故发生等方面都有着重要影响。液压油的合理选用，实质上就是对液压油的类型和牌号的选择。

(1) 液压油类型的选择 应根据设备中液压系统的工作性质和工作环境要求及液压油的特性来选择，选择时可参考表 1.1。

(2) 液压油牌号的选择 液压油的黏度对系统的影响最大。黏度过大，使油的流动阻力增大，功率损失大；黏度过小，容积效率降低，系统效率降低，易污染环境。在选择时主要根据液压系统的工作条件选用适宜的黏度。一般在温度、压力较高及工作部件速度较低时，可采用黏度较高的液压油；反之宜选用黏度较低的液压油。选择时可参考表 1.2。

表 1.1 液体油的分类及其性质和选用

液压油分类和代号		组成特性	应用场合
石油型	汽轮机油 L-HH	精制矿物油(或加少量抗氧化剂)	适用于对润滑无特殊要求的一般循环润滑系统及机床低压液压系统,作为液压系统代用油
	普通液压油 L-HL	精制矿物油,改善其防锈抗氧化性	适用于中、低压液压系统及精密机床液压系统,如磨床等精密机床
	抗磨液压油 L-HM	L-HL 油,改善其抗磨性	适用于中、高压液压系统,如高压、高速工程机械、车辆液压系统
	低温液压油 L-HV	L-HM 油,改善其黏-温特性	适用于-25℃以上的环境温度变化大和工作条件恶劣的低压或中、高压液压系统
	高黏度指数液压油 L-HG	L-HM 油,改善其黏-温特性	适用于液压和导轨润滑系统合用的机床,也可用于数控精密机床的液压系统
乳化型	水包油乳化液 L-HFAE	水的质量分数大于80%	适用于要求抗燃、经济、不回收废液的低压液压系统,如煤矿液压支架、冶金轧辊、水压机的液压系统
	油包水乳化液 L-HFB	水的质量分数小于80%	适用于要求抗燃、有良好的防锈、润滑性的中压液压系统,如连续采煤机、凿岩机等液压系统
合成型	水的化学溶液 L-HFAS	水的质量分数大于80%,抗燃性好	适用于要求抗燃、经济的低压系统,如金属切削机床、加工等机械的液压系统
	水的聚合物溶液 L-HFC	水的质量分数45%左右,抗燃性好	适用于要求抗燃、清洁的中、低压液压系统;也可在低温环境下使用,如自动进料机等液压系统
	磷脂酸无水溶液 L-HFDR		适用于要求抗燃、高压、精密的液压系统,如压铸机、民航飞机液压系统、电液伺服控制系统等

表 1.2 各类液压泵推荐的液压油

液压泵类型		40℃时油液黏度/(10 ⁻⁶ m ² /s)		适应液压油的种类和黏度牌号
		液压系统温度 5~40℃	液压系统温度 40~80℃	
叶片泵	7MPa 以下	30~50	40~75	L-HM32、L-HM46、L-HM68
	7MPa 以上	50~70	55~90	L-HM46、L-HM68、L-HM100
齿轮泵		30~70	95~165	中、低压时用:L-HL32、L-HL46、L-HL68、L-HL100、L-HL150 中、高压时用:L-HM32、L-HM46、L-HM68、L-HM100、L-HM150
径向柱塞泵		30~50	65~240	
轴向柱塞泵		30~70	70~150	

1.1.3.3 液压油的使用

① 液压系统投入运行前应按有关规定严格冲洗,使用中按规定及时更换新油,加新油时也需过滤。

② 液压系统密封应良好,以防止泄漏和外界各种尘土、杂物和水的侵入。

③ 应控制液压油的温度。油温过高,油液氧化变质,产生各种生成物。一般系统的液压油的温度应控制在60℃以下。

1.1.4 液体静力学基础

1.1.4.1 液体静压力及其特性

静压力是指液体处于静止状态时,单位面积上所受的垂直作用力。静压力在液压传动中

简称压力，在物理学中则称为压强。

静止液体中某一微小面积 ΔA 上作用有法向力 ΔF ，则该点压力可定义为

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (1.5)$$

如法向作用力 F 均匀地作用在面积 A 上，则压力可用下式表示

$$p = \frac{F}{A} \quad (1.6)$$

我国法定的压力单位为牛顿/米² (N/m²)，称为帕斯卡，简称帕 (Pa)。由于此单位太小，在液压技术中使用不便，因此常采用兆帕 (MPa)，1MPa=10⁶Pa。目前国际上仍常用的单位为巴 (bar)，1bar=10⁵Pa=0.1MPa。

静压力有两个重要性质：

① 液体静压力垂直于作用面，其方向和该面的内法线方向一致。这是因液体只能受压，而不能受拉之故；

② 静止液体中任何一点受到各个方向的压力都相等。如果液体中某一点受到的压力不相等，那么液体就要运动，这就破坏了静止的条件。

1.1.4.2 液体静压力基本方程

(1) 静压力基本方程 图 1.6 所示容器中盛有液体，作用在液面上的压力为 p_0 。如要求得液面下深 h 处 A 点的压力 p ，可用下式：

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1.7)$$

式中， g 为重力加速度； ρ 为液体的密度。

式 (1.7) 即为静压力基本方程，它说明了：

① 静止液体中任一点的压力是液面上的压力 p_0 和液柱重力所产生的压力 ρgh 之和。当液面上只受大气压力 p_a 作用时，该点的压力为

$$p = p_a + \rho gh \quad (1.7a)$$

② 静止液体内的压力随着深度 h 的增加而线性地增加；

③ 同一液体中，深度 h 相同的各点压力相等。由压力相等的点组成的面称为等压面。显然，在重力作用下静止液体中的等压面是水平面。

(2) 静压力基本方程的物理意义 设图 1.7 所示为盛有液体的密闭容器，液面压力为 p_0 。选择一基准水平面 ($O-x$)，根据静压力基本方程可确定距液面深度 h 处 A 点的压力 p ，即

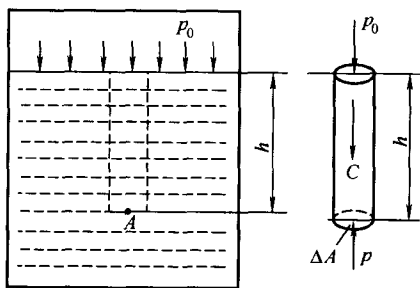


图 1.6 液面下深 h 处的压力

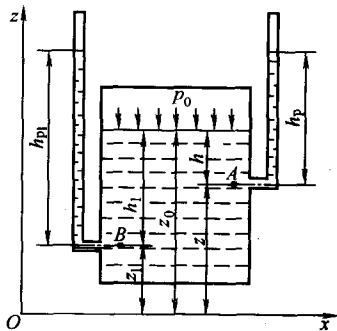


图 1.7 静压力基本方程的物理意义

$$p = p_0 + \rho gh = p_0 + \rho g(z_0 - z)$$

式中, z_0 为液面与基准水平面间距离; z 为液体内 A 点与基准水平面之间的距离。整理后可得

$$\frac{p}{\rho g} + z = \frac{p_0}{\rho g} + z_0 = \text{常数} \quad (1.8)$$

这是从能量角度表示静压力基本方程的一种形式。式中, z 实质上表示了 A 点单位重量液体相对于基准平面的位能。设 A 点处液体质点的质量为 m , 重量为 mg , 相对于基准水平面的位置势能为 mgz , 则单位重量液体的位能就是 $\frac{mgz}{mg} = z$, 故 z 又常称作位置水头; $\frac{p}{\rho g}$ 表示了单位重量液体的压力能。如果在与 A 点等高的容器壁上, 接一根上端封闭并抽去空气的玻璃管 (见图 1.7), 可以看到在静压力的作用下, 液体将沿玻璃管上升至高度 h_p 。根据式 (1.7), 有 $p = \rho gh_p$, 即 $\frac{p}{\rho g} = h_p$ 。这说明了 A 点处液体质点由于受到静压力作用而具有 mgh_p 的势能, 或单位重量液体具有的势能为 h_p 。又因为 $h_p = \frac{p}{\rho g}$, 故 $\frac{p}{\rho g}$ 为单位重量液体的压力能, 也常称为压力水头。

1.1.4.3 压力的表示方法

压力有两种表示方法: 一种是以绝对零压力作为基准所表示的压力, 称为绝对压力; 另一种是以当地大气压力为基准所表示的压力, 称为相对压力。绝大多数测压仪表都是以大气压力为基准测得的压力, 故相对压力常称为表压力。

压力关系如图 1.8 所示, 图中 p_a 为大气压力, 1 个标准大气压等于 101325Pa, 约等于 0.1MPa。显然

$$\text{绝对压力} = \text{大气压力} + \text{相对压力 (表压力)} \quad (1.9)$$

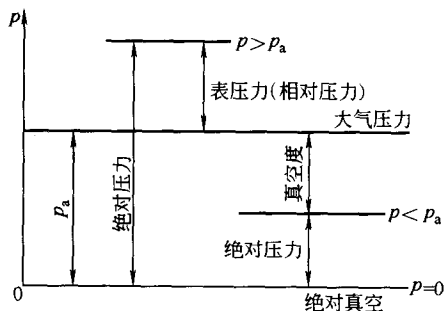


图 1.8 绝对压力、相对压力与真空度间的相互关系

通常情况绝对压力是高于大气压力的, 但在工程上也会遇到绝对压力低于大气压力的情况, 如当液压泵运转时, 吸油管内液体的绝对压力就低于大气压力, 这时相对压力为负值。当相对压力为负值时, 工程上称为真空度。真空度就是大气压力和绝对压力之差, 即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力} \quad (1.10)$$

必须指出, 分析问题时, 式 (1.7) 和式 (1.8) 中的 p 和 p_0 既可用绝对压力也可用相对压力, 但在同一式中应该一致。

1.1.4.4 压力的传递

由静压力基本方程 $p = p_0 + \rho gh$ 可知, 液体中任何一点的压力都包含有液面压力 p_0 , 如压力 p_0 变化时, 只要液体仍保持其原来的静止状态不变, 根据静压力基本方程, 液体任一点的压力均将发生同样大小的变化。也就是说, 在密闭容器内, 施加于静止液体任一点的压力能等值地传递到液体中所有的地方, 这称为帕斯卡原理或静压传递原理。

通常在液压传动系统的压力管路和压力容器中，由外力所产生的压力 p_0 要比由液体自重所产生的压力 ρgh 大许多倍。例如，液压缸、管道的配置高度一般不超过 10m，如取油液密度为 900kg/m^3 ，则由油液自重所产生的压力 $\rho gh = 900 \times 9.8 \times 10 = 88200\text{Pa} = 0.0882\text{MPa}$ ，而液压系统内的压力通常在几到几十兆帕之间。因此，液压传动系统中，为使问题简化，通常忽略不计由液体自重所产生的压力，一般可认为静止液体各处的压力都是相等的。这一提法虽然欠严格，但对解决实际工程问题颇为实用，为以后分析某些控制阀和液压系统的工作原理时所常用。

1.1.4.5 液体对固体壁面上的作用力

如上所述，如不考虑自重产生的那部分压力，则在密封的容器中压力也是均匀分布的，并且垂直作用于承受压力的表面上，如图 1.9 所示。当承受压力作用的表面是一个平面时，静止液体对该平面的总作用力 F 为液体的压力 p 与该平面面积 A 的乘积，其方向与该平面相垂直，即

$$F = pA \quad (1.11)$$

当固体壁面为一曲面时，液体压力在该曲面 x 方向上的总作用力 F_x 只等于液体压力 p 与曲面在该方向投影面积 A_x 的乘积，即

$$F_x = pA_x \quad (1.12)$$

式 (1.12) 适用于任何曲面。

1.1.5 液体动力学基础

液体动力学是研究液体在外力作用下的运动规律，即研究作用于液体上的力与液体运动间的关系。由于液体具有黏性，液体流动时有内摩擦力，因此研究液体流动时必须考虑黏性的影响。流动液体的连续性方程、伯努利方程（能量方程）和动量方程是流动液体力学的三个基本方程。本节只介绍连续性方程和伯努利方程。

1.1.5.1 几个基本概念

(1) 理想液体与稳定流动 液体具有黏性，并且只有在液体流动时才呈现黏性，但黏性阻力的有关规律比较复杂。所以在开始分析时，往往先在假设液体不具有黏性的基础上推导出基本方程，再考虑黏性的影响，然后通过实验验证的方法对基本方程给予修正。对于液体的压缩性亦采用同样方法处理。通常把既无黏性又不可压缩的液体称为理想液体，而把事实上既有黏性又可压缩的液体称为实际液体。

液体流动时，液体中任何一点的压力、流速和密度都不随时间而变化的流动称为稳定流动；反之，如流动时压力、流速和密度中任何一个参数会随时间而变化的，则称为非稳定流动。

(2) 通流截面、流量和平均流速 垂直于液体流动方向的截面称为通流截面，单位时间内流过某通流截面 A 的液体体积称为流量，即

$$q = \frac{V}{t} \quad (1.13)$$

式中， q 为流量， m^3/s ； V 为液体体积， m^3 ； t 为该液体通过该通流截面 A 所需的时间， s 。

液体在管道内流动时，实际上由于液体具有黏性，液体流动时，通流截面上各点的流速

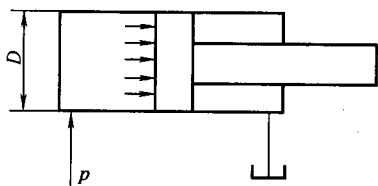


图 1.9 压力作用在活塞上的力

是不等的, 管道中心处流速最大, 越靠近管壁流速越小, 管壁处的流速为零。为计算方便, 假想通流截面上各点的流速均匀分布, 且以均匀流速 v 流动, 此时的流速 v 定义为平均流速, 且

$$v = \frac{q}{A} \quad (1.14)$$

式中, v 为平均流速, m/s ; A 为通流截面面积, m^2 。

1.1.5.2 流动液体的连续性方程

当理想液体在管中作稳定流动时, 由于假定液体是不可压缩的, 即密度 ρ 是常数, 液体是连续的, 不可能有空隙存在, 在稳定流动时, 根据质量守恒定律, 液体在管内既不增多, 也不能减少, 因此在单位时间内流过管子每一个截面的液体质量一定是相等的。这就是液流的连续性原理, 如图 1.10 所示。

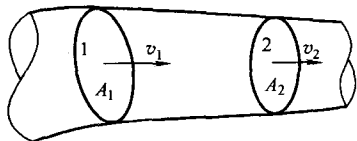


图 1.10 液流的连续性原理示意图

设图中截面 1 和 2 的面积分别为 A_1 和 A_2 , 两个截面中液体的平均流速分别为 v_1 和 v_2 , 根据液流的连续性原理, 在同一单位时间内, 流经截面 1 和 2 的液体质量应完

全相同, 即

$$\rho v_1 A_1 = \rho v_2 A_2 = \text{常量} \quad (1.15)$$

式 (1.15) 即为流动液体的连续性方程。由式 (1.15) 和式 (1.14) 可得

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = q = \text{常量}$$

或

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{A_2}{A_1} \quad (1.16)$$

式 (1.16) 表明, 液体在管中的流速与截面积成反比, 即在稳定流动时管子细的地方流速大, 管子粗的地方流速小。

1.1.5.3 流动液体的能量方程 (伯努利方程)

(1) 理想液体的伯努利方程 理想液体没有黏性, 它在管内作稳定流动时没有能量损失。根据能量守恒定律, 同一管道在各个截面上液体的总能量都是相等的。

在图 1.11 中, 液体在管道内作稳定流动, 任意取两个截面 A_1 、 A_2 , 它们距离基准水平面的高度分别为 z_1 、 z_2 , 流速分别为 v_1 、 v_2 , 压力分别为 p_1 、 p_2 。根据能量守恒定律, 由

$$p_1 + \rho g z_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho g z_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2$$

可以推出

$$\frac{p_1}{\rho g} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1.17)$$

因两截面是任意取的, 故式 (1.17) 可改写为

$$\frac{p}{\rho g} + z + \frac{v^2}{2g} = \text{常量} \quad (1.18)$$

以上两式即为理想液体的伯努利方程,

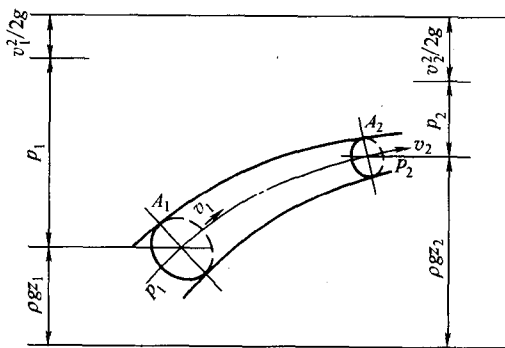


图 1.11 伯努利方程示意图