



中等职业学校电子信息类教材 机电技术专业

液压与气动

王新兰 主编
李祥生 审稿

137-43
37



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

349

TH137-43

w³⁷

中等职业学校电子信息类教材(机电技术专业)

液压与气动

王新兰 主编

李祥生 审稿

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为中等专业学校机电专业系列教材之一,全书分为液压传动和气压传动两部分,共六章。第1章至第4章为液压传动;第5章至第6章为气压传动。本书主要介绍液压传动和气压传动的基本知识;常用元件、装置与传动系统的工作原理;常用基本回路;典型系统分析,液压、气压系统常用故障及排除方法等。在内容编写中注重基本技能训练,加强针对性和实用性,体现职业技术教育特色。书中采用了国家标准推荐使用的《液压气动图形符号》(GB/T 786.1-1993)。

本书可作为中等职业学校机电设备安装及维修专业教材,也可供有关技术、管理人员参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气动/王新兰主编. —北京:电子工业出版社,2003.1

中等职业学校电子信息类教材(机电技术专业)

ISBN 7-5053-8126-1

I. 液… II. 王… III. ①液压传动-专业学校-教材 ②-气压传动-专业学校-教材 IV. ①TH137 ②TH138

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 100288 号

责任编辑:刘文杰 特约编辑:孙 俊

印 刷:北京兴华印刷厂

出版发行:电子工业出版社 <http://www.phei.com.cn>

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:8.25 字数:212 千字

版 次:2003 年 1 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印 数:4 000 册 定价:12.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010)68279077

前 言

本教材是为落实教育部《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的要求，根据机电设备安装及维修专业《液压与气动》课程教学大纲组织编写的。

本教材的选材是在着重介绍基本知识和基本技能的基础上，适当拓宽知识面；在编写中突出重点章节和重点内容，深入浅出，通俗易懂；同时根据理论与实际相结合的原则，注重了实际应用性，以培养学生解决实际问题的能力。

本教材共六章，参考学时数为 40~45 学时。

参与本书编写的有：天津电子信息职业技术学院吴春玉编写第 2 章和第 6 章；王新兰编写第 3 章和第 4 章；陈艳编写第 5 章；李璐编写第 1 章及附录部分。全书由王新兰主编，天津轻工职业技术学院李祥生审稿。

本书在编写过程中得到了天津电子信息职业技术学院许多老师的大力支持和帮助，在此表示衷心感谢。

由于编者水平有限，书中不足和错误之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2002 年 8 月

目 录

第 1 章 液压传动概论	(1)
1.1 液压传动的工作原理及组成	(1)
1.1.1 液压传动的工作原理	(1)
1.1.2 液压传动的组成	(2)
1.1.3 液压传动系统的图形符号	(2)
1.2 液压传动的优缺点	(3)
1.2.1 液压传动的优点	(3)
1.2.2 液压传动的缺点	(3)
1.3 液压传动的应用和发展	(3)
习题与思考题	(4)
第 2 章 液压传动基础	(5)
2.1 液压油	(5)
2.1.1 液压油的主要物理性质	(5)
2.1.2 液压油的要求及选用	(7)
2.2 静止液体的力学性质	(8)
2.2.1 液体静压力及其特性	(8)
2.2.2 液体静力学基本方程	(9)
2.2.3 静止液体内压力的传递	(10)
2.2.4 压力的表示方法	(10)
2.2.5 液体静压力对固体壁面的作用力	(10)
2.3 液体动力学	(11)
2.3.1 流动液体的一些基本概念	(11)
2.3.2 连续性方程	(13)
2.3.3 伯努利方程	(13)
2.3.4 动量方程	(14)
2.4 液体流动时的压力损失	(14)
2.4.1 沿程压力损失	(14)
2.4.2 局部压力损失	(14)
2.5 液流流过小孔及间隙的流量	(15)
2.5.1 液体流经小孔的流量	(15)
2.5.2 液体流经间隙的流量	(16)
习题与思考题	(17)
第 3 章 液压元件	(19)
3.1 液压泵与液压电动机	(19)
3.1.1 液压泵	(19)

3.1.2	齿轮泵	(21)
3.1.3	叶片泵	(22)
3.1.4	柱塞泵	(26)
3.2	液压电动机	(27)
3.2.1	叶片式液压电动机	(27)
3.2.2	斜盘式轴向柱塞液压电动机	(28)
3.2.3	液压电动机的主要性能参数	(29)
3.3	液压缸	(30)
3.3.1	活塞式液压缸	(30)
3.3.2	其他缸简介	(33)
3.3.3	液压缸的密封、缓冲和排气	(35)
3.4	液压控制阀	(37)
3.4.1	方向控制阀	(37)
3.4.2	压力控制阀	(44)
3.4.3	流量控制阀	(51)
3.4.4	比例阀、插装阀和数字阀	(55)
3.5	液压辅件	(57)
3.5.1	油箱	(57)
3.5.2	油管和管接头	(58)
	习题与思考题	(62)
第4章	液压回路	(64)
4.1	液压基本回路	(64)
4.1.1	压力控制回路	(64)
4.1.2	速度控制回路	(69)
4.1.3	方向控制回路	(74)
4.1.4	顺序动作回路	(75)
4.1.5	同步回路	(78)
4.1.6	多缸互不干扰回路	(78)
4.2	典型液压传动系统	(79)
4.2.1	动力滑台的液压系统	(79)
4.2.2	SZ-250/160 型塑料注射成型机液压系统	(82)
	习题与思考题	(86)
第5章	气压传动	(88)
5.1	气压传动基本知识	(88)
5.1.1	气压传动系统的组成及工作原理	(88)
5.1.2	空气的基本性质和气体状态方程	(89)
5.1.3	气源系统	(92)
5.1.4	气动辅助元件	(93)
5.2	气动执行元件	(95)
5.2.1	汽缸	(95)

5.2.2 气动电动机	(100)
5.3 气动控制元件	(102)
5.3.1 压力控制阀	(102)
5.3.2 流量控制阀	(102)
5.3.3 方向控制阀	(103)
习题与思考题	(104)
第 6 章 气动回路	(106)
6.1 气压基本回路	(106)
6.1.1 压力控制回路	(106)
6.1.2 换向回路	(107)
6.1.3 速度控制回路	(108)
6.1.4 延时控制回路	(109)
6.1.5 往复动作回路	(109)
6.1.6 安全保护回路	(110)
6.2 典型气压传动系统	(111)
习题与思考题	(112)
附录	(113)
附录 A 液压图形符号 (摘自 GB/T786.1-1993)	(113)
附录 B 气动图形符号 (摘自 GB/T786.1-1993)	(116)
附录 C 液压系统常见故障及排除方法	(117)
附录 D 气动系统主要元件常见故障及排除方法	(120)
参考文献	(124)

第1章 液压传动概论

液压传动是以液体（油、合成液体）作为工作介质，利用液体的压力能来进行能量传递的传动方式，它与机械传动、电气传动等相比，具有许多优点，因此，液压传动被广泛应用。

1.1 液压传动的工作原理及组成

1.1.1 液压传动的工作原理

液压千斤顶是液压传动的一例，其工作原理图如图 1.1 所示。图中，大小两个缸体 9 和 2 内分别装有活塞 10 和 3，活塞和缸体之间配合良好，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，液体不会产生泄漏，加之单向阀 4、5 和截止阀 8 的作用，便形成两个密封容腔。当上提杠杆 1 时，小活塞 3 被带动上移，于是小缸下腔 A 的密封容积增大，腔内压力降低，形成局部真空，这时压油单向阀 4 关闭，大活塞 10 保持不动，而吸油单向阀 5 打开，油箱 7 中的油液就在大气压力 p_a 的作用下吸入小缸的下腔 A 并填满空间，便完成一次吸油动作。当压下杠杆 1 时，小活塞 3 下移，小缸下腔 A 的密封容积减小，腔内油液受到挤压作用压力升高，这时单向阀 5 关闭，防止了油液向油箱倒流，而单向阀 4 则被打开，A 腔的油液经管道 6 被压入大缸下腔 B，推动大活塞 10 向上移动，顶起重物 G （负载）。如此反复提、压杠杆 1，便可使重物不断地升高，达到起重的目的。适当地选择大、小活塞面积和杠杆比，就可以很小的外力 F 升起很重的负载 G 。

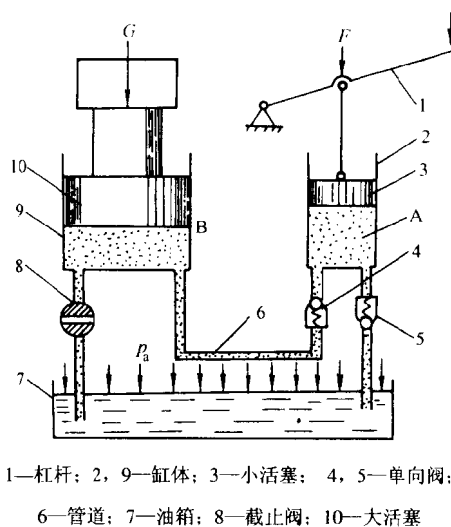


图 1.1 液压千斤顶工作原理图

千斤顶工作时，截止阀 8 关闭。当需要将大活塞（重物）放下时，打开截止阀 8，大缸中的油液在重力作用下经此阀流回油箱，大活塞下降到原位实现回程。

液压千斤顶是一个简单的液压传动装置。小缸、小活塞、单向阀 4、5 和杠杆机构等组成手动液压泵，不断地从油箱吸油并将油液压入大缸，向大缸提供具有一定流量的压力油液。大活塞和大缸用以带动负载，使之获得所需要的运动，所以称为执行元件，此例是一个实现直线运动的液压缸，其活塞的运动速度由流入液压缸的流量决定。从分析液压千斤顶的工作过程可知，液压传动是以密封容腔中的液体作为工作介质，利用密封容积变化过程中的液体压力能来实现动力和运动传递的一种能量转换装置。液压泵将输入的机械能转换为便于输送

的液体压力能，然后液体压力能转换为机械能输出而做功。所以，在液压传动中，在传递能量的同时，还存在着能量形式的转换。

1.1.2 液压传动的组成

由图 1.1 可以看出，液压传动系统一般由四部分组成。

1. 动力装置

液压泵，它供给液压系统压力油，是将电动机输出的机械能转换为油液的液压能的装置。

2. 液动机（执行元件）

液压缸或液压电动机，是将油液的液压能转换为驱动工作部件的机械能的装置。实现直线运动的执行元件叫液压缸；实现旋转运动的执行元件叫做液压电动机。

3. 控制调节装置

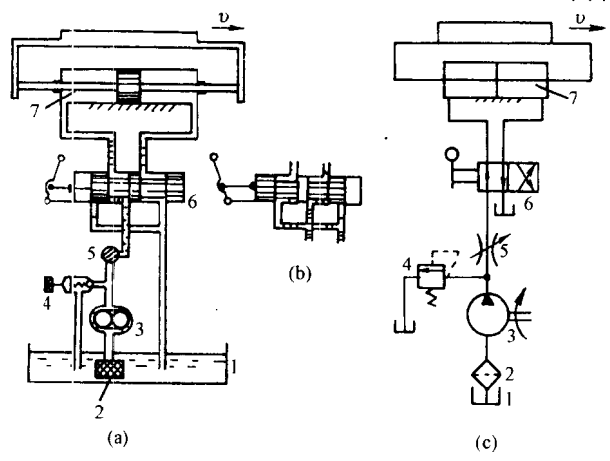
各种控制阀，如方向控制阀、压力控制阀、流量控制阀等，用以控制调节液压系统中油液的流动方向、压力和流量，以满足执行元件运动的要求。

4. 辅助装置

辅助装置包括油箱、滤油器、蓄能器、热交换器、压力表、管件和密封装置等。

1.1.3 液压传动系统的图形符号

图 1.2 (a) 所示，液压传动系统图中各元件的图形基本上表示了它的结构原理，故称为结构原理图。这种原理图直观性强，容易理解，但图形比较复杂，特别是当系统中元件较多时，绘制很不方便。为了简化原理图的绘制，液压系统图中各元件可采用图形符号来表示。一般液压系统图应按照 GB/T 786.1-1993 所规定的液压图形符号来绘制。图 1.2 (a) 所示的液压系统，若用图形符号绘制时，其系统图如 1.2 (c) 所示。利用图形符号绘制结构原理图可以使液压系统简单明了，便于绘制。换向阀有图 1.2 (a) 和 (b) 两种连接形式。



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

图 1.2 机床工作台液压传动系统图

液压系统图中的图形符号只表示各元件的功能、操作（控制）方法和外接口，不表示元件的具体结构和参数；液压系统图只表示各元件的连接关系，而不表示系统管道布置的具体位置或元件在机器中的实际安装位置；液压系统图中的图形符号通常以元件的静止位置或零位置来表示。当无法用图形符号表示或者有必要特别说明系统中某一重要元件的结构及动作原理时，也允许局部采用结构原理图表示。关于各种元件的图形符号将在以后讲述元件时具体介绍。

1.2 液压传动的优缺点

1.2.1 液压传动的优点

- (1) 液压传动可以在大范围内实现无级调速，而且调速性能好。
- (2) 液压传动装置工作平稳，反应速度快、冲击小，能快启动、制动和频繁换向。
- (3) 在相同输出功率的情况下重量轻，结构尺寸小。
- (4) 控制调速比较简单，操作比较方便、省力，易于实现自动化，特别是电、液联合应用时，易于实现复杂的自动工作循环。
- (5) 液压传动工作安全性好，易于实现过载保护，同时因采用油液为工作介质，相对运动表面间能自行润滑，故使用寿命较长。
- (6) 液压元件已标准化、系列化和通用化，便于设计、制造、维修和推广使用。

1.2.2 液压传动的缺点

- (1) 在相对运动表面间有一定的泄漏现象，无法保证严格的传动比。
- (2) 当油温（影响到油的黏度）或载荷变化时，往往不易保持运动速度的稳定。
- (3) 液压元件制造精度要求高，使用维护比较严格。
- (4) 系统的故障原因有时不易查明。

1.3 液压传动的应用和发展

液压传动是一门新的技术，它的发展历史虽然较短，但发展的速度却非常之快。自从英国 1795 年制造了第 1 台水压机起，液压技术进入了工业、农业等领域，1906 年开始应用于国防武器。20 世纪 30 年代前后一些国家生产了液压元件，开始应用于铣床、拉床和磨床上。第 2 次世界大战期间，由于军事工业迫切需要反应快、精度高的自动控制系统，因而出现了液压伺服系统。战后到 20 世纪 50 年代，液压技术很快转入民用工业，在机床、工程机械、农业机械、汽车、船舶、轻纺、冶金等行业都得到了较大的发展。20 世纪 60 年代后，随着原子能科学、空间技术、电子技术的发展，不断对液压技术提出新的要求，液压技术便得到了更大的发展，使液压技术的应用与发展进入了一个崭新的历史阶段。

随着科学技术的进步和生产力的发展，液压技术正向高压、高速、大流量、大功率、高效率、低噪声、高度集成化和小型化、轻型化方向发展。近几年，又出现了太阳跟踪系统，海浪模拟装置、飞机驾驶装置、飞机驾驶模拟、船舶驾驶模拟、宇航环境模拟、高层建筑防

震系统及紧急刹车装置等，均采用了液压技术。

我国的液压工业始于 20 世纪 50 年代初期，虽然起步较晚，但发展很快，现已初步形成了具有一定独立开发设计能力，能生产一批技术先进、质量较好的液压元件和系统，产品门类比较齐全，具有一定技术水平和相当规模的液压工业体系。

习题与思考题

- 1.1 何谓液压传动？试叙述液压千斤顶的工作原理。
- 1.2 液压传动由哪几部分组成？试说明各组成部分的作用。
- 1.3 液压传动有哪些优点和缺点？

第2章 液压传动基础

液压传动是以液体（通常都是矿物油）作为工作介质来传递动力和信号的。因此液压油的质量——物理、化学性质的优劣，尤其是其力学性质对液压系统工作的影响很大。所以在研究液压系统之前，必须对系统中所用的液压油及其力学性质进行较深入的了解，以便进一步理解液压传动的基本原理。本章将着重介绍液压流体力学的一些基础知识。

2.1 液压油

2.1.1 液压油的主要物理性质

1. 密度

液体密度是单位体积所含液体物质的质量，通常以 ρ 表示，即

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (2-1)$$

式中， m ——液体质量；

V ——液体的体积。

液压油的密度因油的牌号而不同，并随温度升高而减小，随压力的提高而增大。由于液压系统中工作压力和油温变化不大，密度变化甚微，所以可将液压油视为常数。在计算时，常取 20℃ 时的密度 $\rho_{20} = 880 \text{ kg/m}^3$ 。

2. 可压缩性

液体所受压力增加时体积变小的性质叫液体的可压缩性。液体的可压缩性大小一般通用体积压缩率 k （单位压力变化下的体积相对变化量）或体积弹性模量 K （ $K=1/k$ ）表示。

在实际应用中，常用 K 值来表示液体抵抗压缩能力的大小。液压油液的 K 值与温度、压力有关：温度升高， K 值减小。在液压油液的正常工作温度范围内， K 值会有 5%~25% 的变化。

在一般液压传动中，油液的可压缩性可以忽略不计。但是当受压油液容积较大、压力变化较大、液压执行机构的传动精度要求较高时，则必须考虑油液可压缩性的影响。另外，在分析液压冲击时，液体的可压缩性也是一个重要的因素。

3. 液体的黏性

（1）液体黏性的意义。液体在外力作用下流动时，液体分子间的内聚力阻碍分子间的相对运动而产生内摩擦力。液体的这种性质，叫做液体的黏性。液体只有在流动时表现出黏性，静止液体是不呈现黏性的。液体黏性的大小是用黏度来表示的。黏度大，液层间内摩擦力就大，油液就稠；反之，油液就稀。

（2）液体的黏度。黏度是表示液体黏性大小的物理量，在液压系统中所用液压油常根

据黏度来选择。常用的黏度表示方式有三种：动力黏度、运动黏度、条件黏度。

① 动力黏度。由图 2.1 所示，以两平行平板中液体的流动情况为例，观察黏性的作用。

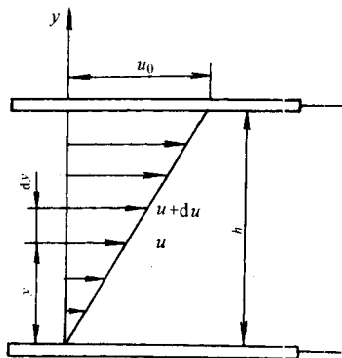


图 2.1 液体黏性示意图

当上平板以速度 u_0 相对于下平板向右移动时，紧贴在上平板上极薄的一层液体，在附着力的作用下，以相同的速度 u_0 随上平板一起向右运动。紧贴在下平板上一层液体黏附在下平板上而保持静止。中间各层液体则从上到下按递减的速度向右移动，这是因为相邻两薄层液体间存在内摩擦力的缘故，该力对上层液体起阻滞作用，而对下层液体起拖曳作用。当两平板间的距离较小时，各液层间的速度按线性规律分布。

试验测定指出，液体流动时，相邻层间的内摩擦力 F 与液层间接触面积 A 和液层间相对速度 du 成正比，而与液层间的距离 dy 成反比，即

$$F = \eta A \frac{du}{dy} \quad (2-2)$$

η 是衡量液体黏性的比例系数称动力黏度。

如以 τ 表示剪切应力，即单位面积上的内摩擦力，则有

$$\tau = \eta \frac{du}{dy} \quad (2-3)$$

上式称为牛顿液体内摩擦定律。

式中， du/dy 称为速度梯度，即液体层相对速度对液体层距离的变化率。

由此可知动力黏度 η 的物理意义：当速度梯度等于 1 时，接触液层间单位面积上内摩擦力即为动力黏度。动力黏度的法定计量单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ （帕·秒， $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ ）。

② 运动黏度。运动黏度是指液体在同一温度下的动力黏度与该液体密度的比值，以 ν 表示，即

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2-4)$$

运动黏度 ν 没有明确的物理意义，但它是工程实际中经常用到的物理量。因为在其单位中只有长度和时间的量纲，是类似于运动学的量，所以称为运动黏度。

运动黏度的法定计量单位为 m^2/s 和 mm^2/s 。

液压油的牌号，用它在 40°C 时的运动黏度 ν (mm^2/s) 的平均值来表示。YA-N46 号液压油，就是指这种液压油在 40°C 时的运动黏度平均值为 $46 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

③ 条件黏度。条件黏度又称为相对黏度，它是采用特定的黏度计在规定的条件下测量出来的黏度。由于测量条件的不同，各国所用的相对黏度也不同，我国和欧洲一些国家采用恩氏黏度 $^\circ\text{E}$ ，美国采用国际赛氏黏度 SSU ，英国采用商用雷氏黏度 R 等。

恩氏黏度用恩氏黏度计测量，即将 200 mL (cm^3) 的被测液体装入底部有 $\phi 2.8 \text{ mm}$ 小孔的恩氏黏度计的容器内，在某一特定温度 $t^\circ\text{C}$ 时，测出液体经容器底部小孔流尽所需时间 t_1 ，再测出 200 mL 温度为 20°C 的蒸馏水在同一黏度计中流尽的时间 t_2 ，这两个时间的比值称为被测液体在 $t^\circ\text{C}$ 时的恩氏黏度 $^\circ\text{E}_t$ ，即

$$^{\circ}E_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-5)$$

各个国家采用的黏度单位及其换算近似公式可参见有关手册。

(3) 黏度与压力的关系。当液体所受的压力增大时，其分子之间的距离缩小，内聚力增大，黏度也增大。在一般情况下，压力对黏度的影响较小，可不考虑。当压力变化超过 20MPa 时才需考虑压力对黏度的影响。

(4) 黏度与温度的关系。液体黏度对温度的变化极为敏感，温度升高，黏度显著下降，而液体的黏度变化又直接影响液压系统的工作性能，因此希望黏度随温度变化越小越好。液体的黏度随温度变化的特性称为黏温特性。不同黏度的液压油有不同的黏温特性，黏温特性较好的液压油，黏度随温度的变化较小。液压油的黏度与温度的关系可以用图 2.2 所示的黏温特性图来查找。

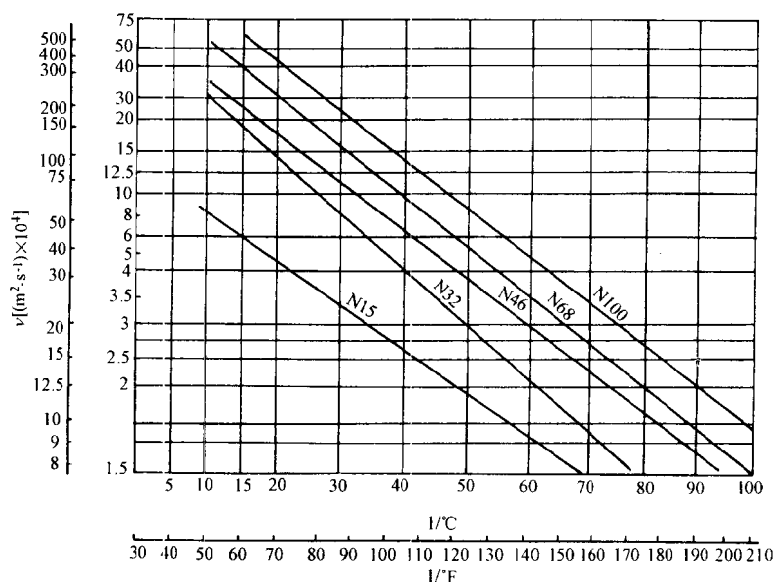


图 2.2 几种国产油液黏温特性图

2.1.2 液压油的要求及选用

1. 液压油液的要求

液压油液是液压系统的重要组成部分，它除了传递能量外，还起着润滑摩擦的作用，故要求液压油液具有如下特性。

(1) 合适的黏度，良好的黏温特性（一般要求黏度指数值在 90 以上）。

(2) 良好的抗泡性和空气释放性，即要求油液在工作中产生的气泡少且气泡能很快破灭和溶混于油中的微小气泡容易释放出来。

(3) 较低的凝点或倾点（一般使用温度应比凝点高 5℃~7℃，比倾点高 3℃），即要求油液有良好的低温流动性。

(4) 良好的氧化安全性（抗氧化性）。

(5) 良好的抗磨性。

(6) 良好的防腐、防锈性。

优质液压油液不仅要具有上述几种特性，还要求有良好的水解安全性、热安定性、抗乳化性、过滤性和抗剪切性等。

2. 液压油液的选用

正确而合理的选用液压油，是保证液压设备高效率正常运转的前提。

选择液压油时，可以根据液压元件生产厂样本和说明书所推荐的品种、顿号牌号来选用液压油，或者根据液压系统的工作压力、工作温度、液压元件种类及经济性等因素全面考虑，一般是先确定使用的黏度范围，再选择合适的液压油品种。同时还要考虑液压系统工作条件的特殊要求，如在寒冷地区工作的系统则要求油的黏度指数高、低温流动性好、凝固点低；高压系统则要求油液抗磨性好。

在选用液压油时，黏度是一个重要的参数。黏度的高低将影响运动部件的润滑、缝隙的泄漏以及造成流动时的压力损失、系统的发热升温等。所以，在环境温度较高，工作压力较高或运动速度较低时，为减少泄漏，应选用黏度较高的液压油，否则相反。

在选用油的品种时，一般要求不高的液压系统可选用机械油、汽轮机油或普通液压油。对于要求条件较高或专用液压传动设备可选用各种专用液压油，如抗腐蚀液压油、稠化液压油、低温液压油、航空液压油等。这些油都加入了各种改善性能的添加剂而使其性能较好，部分国产液压油质量指标列于表 2.1 中。

表 2.1 普通液压油的主要质量指标

代 号	YA-N32	YA-N46	YA-N68	YA-N32G	YA-N68G
密度 (kg/m³)	850~900				
运动黏度 m²/s 40℃	28.8~35.2	41.4~50.6	61.2~74.8	28.8~35.2	61.2~74.8
黏度指数不小于	90				
闪点 (开口) (℃) 不低于	170				
凝点 (℃) 不高于	-10				
水分	无				
机械杂质	无				
水溶性酸或碱	无				

总之，应尽量选用较好的液压油，这样做虽然初始成本要高些，但由于优质油使用寿命长，对元件损害小，所以从整个使用周期看，其经济性要比选用劣质油好些。

2.2 静止液体的力学性质

静止液体是指液体内部质点间无相对位移，而处于相对平衡状态的液体。静止液体不呈现黏性，也不显示切应力。

2.2.1 液体静压力及其特性

作用在液体上的力有两种类型：一种是质量力，另一种是表面力。

质量力作用在液体所有质点上，它的大小与质量成正比，属于这种力的有重力和惯性力等。

表面力作用在所研究液体的表面上，如法向力和切向力。表面力可以是其他物体作用

在液体上的力，也可以是一部分液体作用在另一部分液体上的力。对于液体整体来说，前一种情况下的表面力是一个外力，如大气压和外加力等；后一种情况下的表面力是一个内力。

静压力是指液体处于静止状态时，液体单位面积上所承受的法向作用力，称为压力，而在物理学中称为压强。设液体在 A 上所受的力为 F_n ，则液体的压力 p 为

$$p = \frac{F_n}{A} \text{ (Pa)} \quad (2-6)$$

在液压传动中常用到液体在某一点处的压力。液体处于静止状态时，作用在任一点上的法向作用力 ΔF_n ，围绕该点取一微小面积 ΔA ，当微小面积无限缩小而趋近于该点时， $\Delta F_n / \Delta A$ 的极限值叫做该点的液体静压力，即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A} \text{ (Pa)} \quad (2-7)$$

应该指出，静止液体不能抵抗拉力和切向力，即使是微小的拉力或切向力都会使液体流动。因为静止液体不存在质点间相对运动，也就不存在拉力或切向力，所以静止液体只能承受压缩力。

在国际单位制中，压力的法定计量单位是 Pa，称为帕斯卡，简称帕。由于此单位太小，在工程中使用不方便，因此常用它的倍数单位 MPa 和 kPa。

液体静压力有一重要特性：静止液体内任一点处的压力在各个方向上都相等。

2.2.2 液体静力学基本方程

如图 2.3 (a) 所示，密度为 ρ 的液体在容器内处于静止状态。为求任意深度 h 处的压力 p ，可从液体内部取出如图 2.3 (b) 所示垂直小液柱作为研究体，其顶面与液面重合，面积为 ΔA ，高为 h ，其体积为 $h \Delta A$ 。液柱顶面受外加压力 p_0 作用，底面上所受压力为 p ，液柱所受重力 $G = \rho g h \Delta A$ ，并作用于液柱的重心上，液柱侧面受力相互抵消。由于液柱处于静止状态，相应液柱也处于平衡状态，于是有

$$\begin{aligned} p \Delta A &= p_0 \Delta A + \rho g h \Delta A \\ p &= p_0 + \rho g h \end{aligned} \quad (2-8)$$

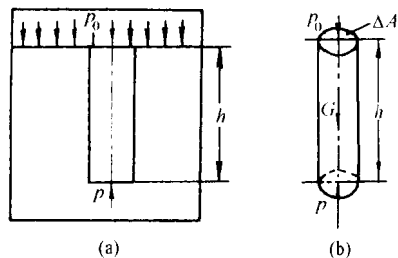


图 2.3 静止液体内的压力分布规律

上式称为液体静力学基本方程，它表示了重力作用下静止液体的压力分布规律。其压力分布有如下特征：

(1) 静止液体内任意点处的静压力由两部分组成：一部分是液面上的压力 p_0 ，另一部分是该点以上液体自重（质量力）所形成的压力 $\rho g h$ 。当液面上只受大气压力 p_a 作用时，则液体任一点处的压力为

$$p = p_a + \rho g h \quad (2-9)$$

(2) 静止液体内的压力随液体深度呈线性规律分布。

(3) 离液面深度相同处各点的压力相等。压力相等的所有点组成的面称为等压面（等压面为一水平面）。

2.2.3 静止液体内压力的传递

由静力学基本方程式(2-8)可知,静止液体中任一点的压力都包含了液面上的压力 p_0 。这说明在密封容器内,由外力施加于静止液体表面所产生的压力,能等值地传递到液体中的各点。这就是静止压力传递原理(又称帕斯卡原理)。

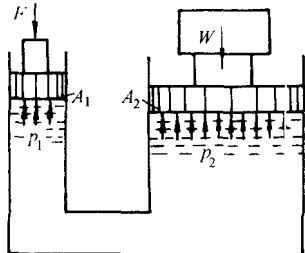


图 2.4 帕斯卡原理应用

在液压系统中,通常由外力所产生的压力远远大于液体自重所产生的压力,因此常常将液体自重所产生的压力忽略不计,而认为在密封容器内的静止液体的压力处处相等。

图 2.4 所示为应用帕斯卡原理的液压千斤顶工作原理简图。在两个相互连通的液压缸密封腔中充满油液,大小活塞的面积分别是 A_2 和 A_1 ,在大活塞上有重物 W ,小活塞上施加一平衡重力 W 的外力 F 时,则小液压缸中液体的压力 p_1 为 F/A_1 ,大液压缸中液体的压力 p_2 为 W/A_2 。由于两缸互通

而构成一个密封容器,根据帕斯卡原理则有 $p_1=p_2$,相应有

$$W = \frac{A_2}{A_1} F \quad (2-10)$$

如果大活塞上没有负载,即 $W=0$,当略去活塞重力及其他阻力时, F 也为零。因此无论怎样推动小活塞,也不可能在液体中形成压力。由此得出一个重要概念:液压系统的压力决定于负载。

由式(2-10)可知,当两活塞的面积比 A_2/A_1 较大时,在小活塞上施加较小的力,就可以通过大活塞抬起较大重物。液压千斤顶就是利用这一原理进行起重。

2.2.4 压力的表示方法

液体压力的表示方法有两种:一种是以绝对真空为基准表示的绝对压力,另一种是以大气压为基准表示的相对压力。在液压技术中,如未特别说明,压力均指相对压力。绝对压力和相对压力的关系为

绝对压力=大气压力+相对压力

当液体中某处绝对压力低于大气压力(即相对压力为负值)时,习惯上称为具有真空度,绝对压力小于大气压力的那部分数值,称为真空度。它们的关系为

真空度=大气压力-绝对压力

绝对压力、相对压力和真空度之间的相互关系,如图 2.5 所示。

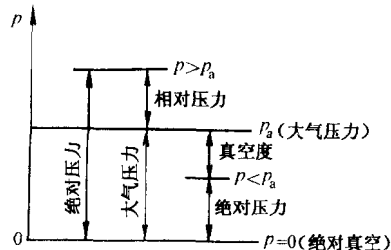


图 2.5 绝对压力、相对压力与真空度之间的关系图

2.2.5 液体静压力对固体壁面的作用力

静止液体和固体壁面相接触时,固体壁面上各点在某一方向上所受静压作用力的总和,便是液体在该方向上作用于固体壁面上的作用力。

当固体壁面为一平面时,液体对该平面的作用力 F 等于液体压力 p 与该平面面积 A 的