



高等职业技术教育试用教材

液压与气压传动

第2版

袁承训 主编



 机械工业出版社
China Machine Press

高等职业技术教育试用教材

液压与气压传动

第 2 版

主 编	袁承训
副主编	张宝海
参 编	邱 力
主 审	陈志强

机械工业出版社

本书为高等职业技术教育试用教材。全书包括液压传动与气压传动两部分内容。第一篇液压传动部分共分十章：液压传动概述、液压传动的基本知识、液压泵和液压马达、液压缸、液压控制阀、液压系统的辅助装置、液压基本回路、~~液压传动系统~~、~~液压伺服系统~~简介及液体静压支承简介。第二篇气压传动共分六章：气压传动基本知识、气源装置及辅助元件、气缸和气马达、气动控制元件、气动基本回路及气动系统与气动程序系统设计。

附录列出常用液压与气动元件的图形符号。

书后备有例题和习题。

本书可作为高等职业技术教育机电一体化专业及机械类专业的教材，也可供其它成人高校师生、工程技术人员或中专相应专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

液压与气压传动/袁承训主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2000.7

高等职业技术教育试用教材

ISBN 7-111-04704-4

I. 液... II. 袁... III. ①液压传动-高等学校-教材②气压传动-高等学校-教材 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 02583 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:王世刚 版式设计:霍永明 责任校对:孙志筠

封面设计:姚毅 责任印制:何全君

北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2000 年 7 月第 2 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·17.75 印张·434 千字

35001-41000 册

定价:20.00 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

前 言

《液压与气压传动》一书于1995年出版后受到高等职业学校师生及广大读者的欢迎，同时也提出了宝贵意见，希望尽快修订出版。我们在广泛吸收读者意见后进行了修订。在编写中对原书内容做了较大幅度的调整，增加了新内容，使气动部分进一步充实完善。全书以液压传动为主，气压传动为辅，共分两篇十六章。第一篇为液压传动，共十章。主要内容包括液压传动的基础理论、液压元件、液压基本回路、典型系统及系统设计、安装与维修。第二篇为气压传动，共六章。主要内容为气压传动基本知识、气源装置、气动元件、气动基本回路及典型气动回路、气动系统设计。

为了配合教学，方便读者，将思考题和习题放在书后，同时出版。

本书在编写中全面贯彻国家标准，并力求体现高等职业学校的特点，着眼于学生在应用技术方面的培养，适应机电一体化专业的要求，注意引用新技术成就，并尽力做到通俗易懂，便于自学。

本书除供高等职业院校和其它成人高等学校机电一体化专业和机械类专业使用外，也可供普通大学大专学生使用。中等专业学校师生及有关工程技术人员也可参考。

本书由袁承训、张宝海、邱力共同编写。袁承训编写第一、十一~十六章，张宝海编写第三、四、八~十章，邱力编写第二、五~七章。

全书在编写过程中得到有关院校和工厂，特别是内蒙古第一机械制造厂的大力支持，在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平所限，且编写时间紧迫，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编 者

常用量及其符号、单位和换算

量的名称	符 号	法定计量单位		非法定计量单位		换算关系
		单位名称	单位符号	单位名称	单位符号	
质量	m	千克(公斤) 吨	kg t			1t = 1000kg
长度	L	米	m			
面积	A	平方米	m ²			
体积, 容积	V	立方米 升	m ³ L			1m ³ = 1000L 1L = 1000cm ³
时间, 时 间间隔	t	秒 分 时	s min h			1h = 60min 1min = 60s
力 重力	F $W(G)$	牛〔顿〕	N	千克力	kgf	1kgf ≈ 10N
力矩转矩	M_T	牛〔顿〕米	N·m			
功, 能〔量〕	W	焦〔耳〕	J			
功率	P	瓦〔特〕	W			
压力	p	帕〔斯卡〕	Pa	巴 千克力每平方 厘米	bar kgf/cm ²	1bar = 10 ⁵ Pa 1kgf/cm ² ≈ 10 ⁵ Pa
排量	V	升每转 毫升每转	L/r mL/r			1L/r = 1000mL/r
流量 ^①	qv	立方米每秒 升每分	m ³ /s L/min			1L/min = 1.67 × 10 ⁻⁵ m ³ /s

① GB3100~3102—93 中名称为体积流量，本书简称流量。

目 录

前言

常用量及其符号、单位和换算

第一篇 液 压 传 动

第一章 液压传动概述	1
第一节 液压传动的工作原理、系统组成及图形符号	1
第二节 液压传动的特点	2
第二章 液压传动的基本知识	4
第一节 液压油	4
第二节 液体静力学基础	8
第三节 液体动力学方程	11
第四节 液体流动时的压力损失	18
第五节 液体流经小孔和缝隙的流量计算	21
第六节 液压冲击和空穴现象	24
第三章 液压泵和液压马达	26
第一节 概述	26
第二节 齿轮泵和齿轮马达	29
第三节 叶片泵和叶片马达	35
第四节 柱塞泵和柱塞马达	42
第五节 其他形式的液压泵	47
第六节 液压泵和液压马达的选用	49
第四章 液压缸	51
第一节 液压缸的类型及其特点	51
第二节 液压缸的结构设计	57
第三节 液压缸的设计计算	62
第五章 液压控制阀	67
第一节 概述	67
第二节 方向控制阀	67
第三节 压力控制阀	75
第四节 流量控制阀	85
第五节 二通插装阀及叠加式液压阀	90
第六节 比例控制阀	95
第七节 电液数字阀	97
第六章 液压系统的辅助装置	98
第一节 蓄能器	98

第二节 过滤器	100
第三节 油箱	103
第四节 其它辅件简介	104
第七章 液压基本回路	107
第一节 压力控制基本回路	107
第二节 速度控制基本回路	112
第三节 多缸动作控制回路	123
第八章 液压传动系统	127
第一节 液压传动系统实例	127
第二节 液压传动系统设计计算简介	132
第三节 液压传动系统的安装、使用和维护	141
第九章 液压伺服系统	144
第一节 概述	144
第二节 液压伺服系统的基本类型	146
第三节 电液伺服阀	149
第四节 液压伺服系统的应用	150
第十章 液体静压支承简介	152
第一节 概述	152
第二节 液体静压轴承	152
第三节 液体静压导轨	156
第四节 液体静压螺母	158
第五节 静压支承供油系统	161

第二篇 气 压 传 动

第十一章 气压传动基本知识	163
第一节 气压传动系统的工作原理及组成	163
第二节 气压传动的特点	164
第三节 空气的基本性质	165
第四节 气体流动的规律	169
第十二章 气源装置及辅助元件	174
第一节 空气压缩机	174
第二节 气源的净化及净化装置	176
第三节 辅助元件	182
第四节 气源装置的组成	184
第十三章 气缸和气马达	186

第一篇 液压传动

第一章 液压传动概述

第一节 液压传动的工作原理、系统组成及图形符号

一、液压传动的工作原理

液压传动是以液体为工作介质，利用压力能来驱动执行机构的传动方式。

图 1-1 为驱动机床工作台的液压传动系统原理图（结构式）。它由油箱 1、过滤器 2、液压泵 3、溢流阀 4、开停阀 5、节流阀 6、换向阀 7、液压缸 8 以及连接这些元件的油管、接头等组成。

其工作原理是：电动机驱动液压泵从油箱中吸油，将油液加压后输入管路。油液经开停阀、节流阀、换向阀进入液压缸左腔，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和回油管①流回油箱。

如果将换向阀手柄转换成图 1-1b 所示状态，则有压力的油液经过换向阀后进入液压缸右腔，推动活塞而使工作台向左移动，并使液压缸左腔的油液经换向阀和回油管①流回油箱。

工作台的移动速度是通过节流阀来调节的。当节流阀口开大时，进入液压缸的油量增多（在单位时间内），工作台的移动速度就增大；反之，当节流阀口关小时，单位时间内进入液压缸的油量减少，则工作台的移动速度减小。由此可见，速度是由单位时间内进入液压缸的油量即流量决定的。

为了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。这种现象正说明了液压传动的一个基本原理——压力决定于负载。

溢流阀的作用是调节与稳定系统的最大工作压力并溢出多余的油液。当工作台工作进给时，液压缸活塞（工作台）需要克服大的负载和慢速运动。进入到液压缸的压力油必须有足

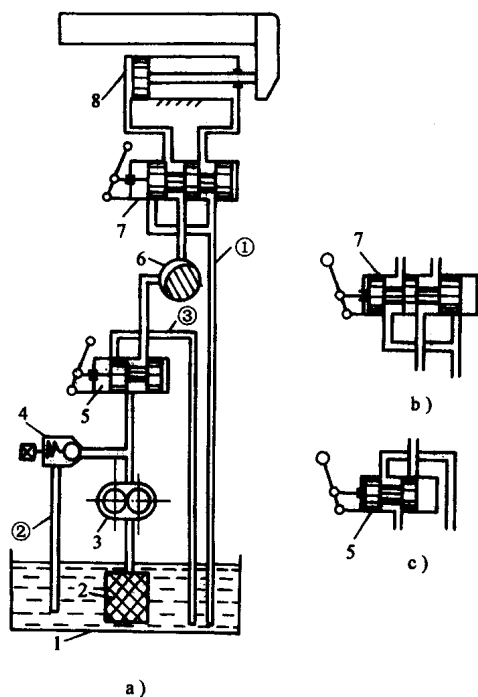


图 1-1 机床工作台液压系统原理图

够的稳定压力才能推动活塞带动工作台运动。调节溢流阀的弹簧力，使之与液压缸最大负载力相平衡，当系统压力升高到稍大于溢流阀的弹簧力时，溢流阀便打开，将定量泵输出的部分油液经油管②溢回油箱。这时系统压力不再升高，工作台保持稳定的低速运动（工作进给）。当工作台快速退回时，因负载小所以油的压力低，溢流阀打不开，泵的流量全部进入液压缸，工作台则实现了快速运动。

如果将开停阀手柄转换成图 1-1c 所示的状态，则压力管中的油液将经开停阀和回油管③排回油箱，这时工作台停止运动。

从上面这个例子中可看到：液压泵将电动机（或其它原动机）的机械能转换为液体的压力能，然后通过液压缸（或液压马达）将液体的压力能再转换为机械能以推动负载运动。液压传动的过程就是机械能—液压能—机械能的能量转换过程。

二、液压传动系统的组成

由上述例子可以看出液压传动系统的基本组成为：

1) 能源装置——液压泵。它将动力部分（电动机或其它原动机）所输出的机械能转换成液压能，给系统提供压力油液。

2) 执行装置——液压机（液压缸、液压马达）。通过它将液压能转换成机械能，推动负载做功。

3) 控制装置——液压阀（流量阀、压力阀、方向阀等）。通过它们的控制或调节，使液流的压力、流量和方向得以改变，从而改变执行元件的力（或力矩）、速度和方向。

4) 辅助装置——油箱、管路、蓄能器、滤油器、管接头、压力表开关等。通过这些元件把系统联结起来，以实现各种工作循环。

5) 工作介质——液压油。绝大多数液压油采用矿物油，系统用它来传递能量或信息。

三、液压传动系统图及图形符号

图 1-1 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，目前各国均用元件的图形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，而不表示其结构。目前我国的液压系统图采用 GB786.1 所规定的图形符号绘制，见图 1-2。

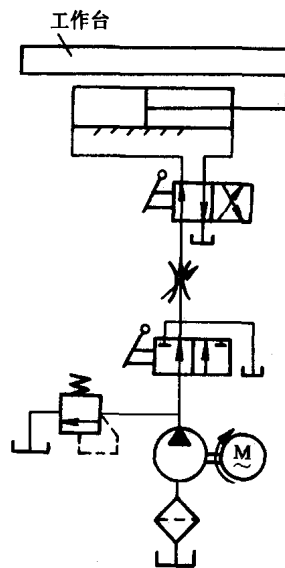


图 1-2 机床工作台液压系统的图形符号图

第二节 液压传动的特点

液压传动与机械传动、电气传动、气压传动等相比较，具有以下特点。

1) 在同等功率的情况下，液压传动装置的体积小、重量轻、结构紧凑，如液压马达的重量只有同等功率电动机重量的 10% ~ 20%。当液压传动采用高压时，则更容易获得很大的力或力矩。

2) 液压系统执行机构的运动比较平稳，能在低速下稳定运动。当负载变化时，其运动

速度也较稳定。同时因其惯性小、反应快，所以易于实现快速起动、制动和频繁地换向。在往复回转运动时换向可达每分钟 500 次，往复直线运动时换向可达每分钟 1000 次。

3) 液压传动可在大范围内实现无级调速，调速比一般可达 100 以上，最大可达 2000 以上，并且可在液压装置运行的过程中进行调速。

4) 液压传动容易实现自动化，因为它是对液体的压力、流量和流动方向进行控制或调节，操纵很方便。当液压控制和电气控制或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) 液压装置易于实现过载保护且液压件能自行润滑，因此使用寿命较长。

6) 由于液压元件已实现了标准化、系列化和通用化，所以液压系统的设计、制造和使用都比较方便。

液压传动的缺点是：

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所造成的。

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的要求比较高，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。

第二章 液压传动的基本知识

液体是液压传动的工作介质，因此，了解液体的某些基本物理性质，研究液体的静力学、运动学和动力学规律，对理解和掌握液压传动的基本原理是十分重要的。同时，这些内容也是液压系统的合理使用及设计计算的理论基础。

第一节 液 压 油

一、液压油的性质

(一) 密度

单位体积液体的质量称为该液体的密度，用 ρ 表示。即

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

式中 m ——体积为 V 的液体的质量；

V ——液体的体积。

液体的密度随温度的升高而下降，随压力的增加而增大。对于液压传动中常用的液压油（矿物油）来说，在常用的温度和压力范围内，密度变化很小，可视为常数。在计算时，常取 15℃ 时的液压油密度 $\rho = 900 \text{kg/m}^3$ 。

(二) 可压缩性

液体受压力作用而发生体积减小的性质称为液体的可压缩性。可压缩性的大小用体积压缩系数 κ 来表示，其定义为：液体在单位压力变化下的体积相对变化量。即

$$\kappa = -\frac{1}{\Delta p} \left(\frac{\Delta V}{V} \right) \quad (\text{m}^2/\text{N}) \quad (2-2)$$

式中 V ——增压前液体的体积；

ΔV ——压力变化 Δp 时液体体积的变化量；

Δp ——液体压力的变化量。

由于压力增大时液体的体积减小，因此上式的右边须加一负号，使 κ 为正值。常用液压油的体积压缩系数 $\kappa = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

液体的体积压缩系数 κ 的倒数称为液体的体积弹性模量，用 K 表示，即

$$K = 1/\kappa = -\frac{V\Delta p}{\Delta V} \quad (\text{N/m}^2) \quad (2-3)$$

在实际应用中，常用 K 值说明液体抵抗压缩能力的大小，它表示产生单位体积相对变化量所需的压力增量。

液压油的体积弹性模量为 $K = (1.4 \sim 2) \times 10^9 \text{N/m}^2$ ，其数值很大，故对于一般液压系统，可认为油液是不可压缩的。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。但是，若液压油中混入空气，其压缩性将显著增加，并将严重影响液压系统的工作性能，故在液压系统中尽量减少油液中的空气含量。在实际液压系统的液压油中，难免

会混有空气，通常对矿物油型液压油取 $K = (0.7 \sim 1.4) \times 10^9 \text{ (N/m}^2\text{)}$ 。

(三) 粘性

1. 粘性的意义

液体在外力作用下流动时，分子间的内聚力阻碍分子间的相对运动而产生内摩擦力的性质称为粘性。粘性是液体的重要物理性质，也是选择液压用油的主要依据。

液体流动时，由于它和固体壁面间的附着力以及它的粘性，会使其内各液层间的速度大小不等。设在两个平行平板之间充满液体，两平行平板间的距离为 h ，如图 2-1 所示。当上平板以速度 u_0 相对于静止的下平板向右移动时，紧贴于上平板极薄的一层液体，在附着力的作用下，随着上平板一起以 u_0 的速度向右运动；紧贴于下平板极薄的一层液体和下平板一起保持不动；而中间各层液体则从上到下按递减的速度向右运动，这是因为相邻两薄层液体间存在内摩擦力，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，各液层的速度按线性规律分布。

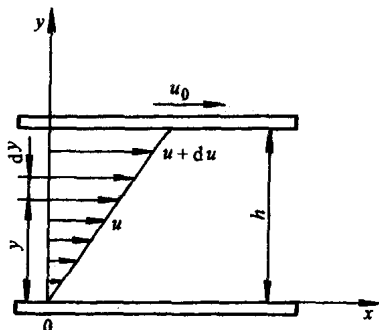


图 2-1 液体粘性示意图

实验测定指出：液体流动时，相邻液层间的内摩擦力 F 与液层间的接触面积 A 和液层间相对运动的速度 du 成正比，而与液层间的距离 dy 成反比。即

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

若用单位面积上的摩擦力 τ （切应力）来表示，则上式可以改写成

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

式中 μ ——比例系数，称为动力粘度；

du/dy ——速度梯度，即相对运动速度对液层距离的变化率。

上式称为牛顿液体内摩擦定律。

由上式可知，在静止液体中，因速度梯度 $du/dy = 0$ ，故内摩擦力为零，因此液体在静止状态下是不呈现粘性的。

2. 液体的粘度

液体粘性的大小用粘度表示。常用的粘度有三种，即动力粘度、运动粘度和相对粘度。

(1) 动力粘度 μ 动力粘度又称绝对粘度，它表征液体粘性的内摩擦系数，由式 (2-5) 可得：

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

由此可知，液体动力粘度的物理意义是：当速度梯度等于 1 时，流动液体液层间单位面积上的内摩擦力，即为动力粘度。

动力粘度 μ 的法定计量单位是 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 或用 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 表示。

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

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

运动粘度 ν 没有明确的物理意义。因为在单位中只有长度和时间的量纲，所以称为运动粘度，它在液压分析和计算中是一个经常遇到的物理量。

运动粘度 ν 的法定计量单位是 m^2/s 。

就物理意义来说，运动粘度 ν 并不是一个粘度的量，但工程中常用它来标志液体的粘度。如液压油的牌号，就是这种油液在 40°C 时的运动粘度 ν (mm^2/s) 的平均值。例如 YA-N32 液压油就是指这种液压油在 40°C 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。它是采用特定的粘度计，在规定的条件下测出来的液体粘度。根据测量条件不同，各国采用的相对粘度的单位也不同。如美国采用国际赛氏秒 (SSU)，英国采用商用雷氏秒 ($^\circ\text{R}$)，我国和欧洲一些国家采用恩氏粘度 ($^\circ\text{E}$)。

恩氏粘度由恩氏粘度计测定，即将 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，在某一特定温度 t ($^\circ\text{C}$) 时，测定全部液体在自重作用下流过小孔所需的时间 t_1 与同体积的蒸馏水在 20°C 时流过同一小孔所需的时间 t_2 ($t_2 = 50 \sim 52\text{s}$) 之比值，便是该液体在 t ($^\circ\text{C}$) 时的恩氏粘度。恩氏粘度用符号 $^\circ\text{E}_t$ 表示

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

恩氏粘度和运动粘度之间可用下面经验公式换算

$$\nu = \left(7.31^\circ\text{E} - \frac{6.31}{^\circ\text{E}} \right) \times 10^{-6} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2-9)$$

3. 粘度与压力的关系

当压力增加时，液体分子间距离减小，内聚力增加，其粘度也有所增加，液压油的动力粘度 μ 与压力 (MPa) 的关系为

$$\mu = \mu_0 e^{kP} \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (2-10)$$

式中 μ_0 ——大气压力下液压油的动力粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)；

k ——随液压油而异的指数，对矿油型液压油 $k = 0.015 \sim 0.03$ 。

在液压系统中，若系统的压力不高，压力对粘度的影响较小，一般可忽略不计。当压力高于 50MPa 时，压力对粘度的影响较明显，则必须考虑压力对粘度的影响。

4. 粘度与温度的关系

液压油的粘度对温度的变化很敏感，温度升高，粘度将显著降低。油液粘度的变化直接影响液压系统的性能和泄漏量，因此希望粘度随温度的变化越小越好。不同的油液有不同的粘度温度变化关系，这种关系叫做油液的粘温特性。

对于液压系统常用的矿物油型液压油，若 40°C 时的运动粘度小于 $135\text{mm}^2/\text{s}$ ，温度在 $30 \sim 150^\circ\text{C}$ 范围内，可用下列经验公式计算温度为 t 时的运动粘度

$$\nu_t = \nu_{40} \left(\frac{40}{t} \right)^n \quad (2-11)$$

式中 ν_{40} ——温度 40°C 时液压油的运动粘度 (mm^2/s)；

n ——指数，见表 2-1。

表 2-1 n 值

$\nu_{40}/(\text{mm}^2/\text{s})$	3.4	9.3	14	18	33	48	63	76	89	105	119	135	207	288	368	447	535	771
n	1.39	1.59	1.72	1.79	1.99	2.13	2.24	2.32	2.42	2.49	2.52	2.56	2.76	2.86	2.96	3.06	3.10	3.17

图 2-2 为一些典型液压油的粘—温曲线。

液压油的粘温特性可以用粘度指数 VI 来表示, VI 值越大, 表示油液粘度随温度的变化率越小, 即粘温特性越好。一般液压油要求 VI 值在 90 以上, 精制的液压油及加有添加剂的液压油, 其 VI 值可大于 100。

(四) 其它特性

液压油还有其它一些物理化学性质, 如抗燃性、抗氧化性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、抗磨性等, 这些性质对液压系统的工作性能也影响较大。对于不同品种的液压油, 这些性质的指标是不同的, 具体应用时可查油类产品手册。

二、对液压油的要求和选用

(一) 要求

液压油既是液压传动与控制的工作介质, 又是各种液压元件的润滑剂, 因此液压油的性能会直接影响液压系统的性能, 如工作可靠性、灵敏性、稳定性、系统效率和零件寿命等。选用液压油时应满足下列要求:

- 1) 粘温性好。在使用温度范围内, 粘度随温度的变化愈小愈好。
- 2) 润滑性能好。在规定的范围内有足够的油膜强度, 以免产生干摩擦。
- 3) 化学稳定性好。在贮存和工作过程中不易氧化变质, 以防胶质沉淀物影响系统正常工作; 防止油液变酸, 腐蚀金属表面。
- 4) 质地纯净, 抗泡沫性好。油液中含有机杂质易堵塞油路, 若含有易挥发性物质, 则会使油液中产生气泡, 影响运动平稳性。
- 5) 闪点要高, 凝固点要低。油液用于高温场合时, 为了防火安全, 闪点要求高; 在温度低的环境下工作时, 凝固点要求低。一般液压系统中所用的液压油的闪点约为 130 ~ 150℃, 凝固点约为 -10 ~ -15℃。

(二) 种类和选用

液压油的品种很多, 主要可分为三大类型: 矿物油型、合成型和乳化型。液压油的主要品种及性质见表 2-2。

正确选用液压油, 是保证液压设备高效率正常运转的前提。目前, 90% 以上的液压系统采用矿物油型液压油为工作介质, 选用时, 普通液压油优先考虑, 有特殊要求时, 则选用抗磨、低温或高粘度指数的液压油, 如没有普通液压油, 则可用汽轮机油或机械油代用; 合成型液压油价格贵, 只有在某些特殊设备中, 例如在对抗燃性要求高并且使用压力高、温度变化范围大等情况下采用; 在工作压力不高时, 高水基乳化液也是一种良好的抗燃液。在选用液压油时, 合适的粘度有时更为重要。粘度的高低将影响运动部件的润滑、缝隙的泄漏以及

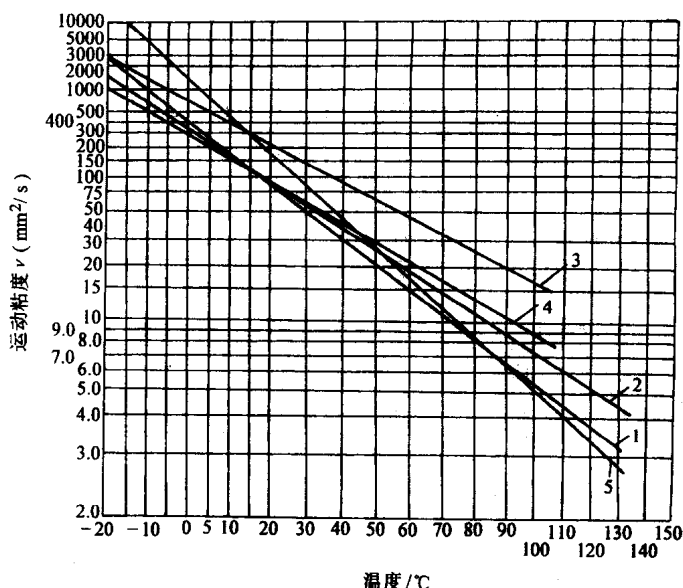


图 2-2 液压介质的粘温曲线
1—YA 液压油 2—YD 液压油 3—YRB 液压油
4—YRC 液压油 5—YRD 液压油

表 2-2 液压油的主要品种及其性质

性能 \ 种类	可燃性液压油			抗燃性液压油			
	矿物油型			合成型		乳化型	
	通用液压油	抗磨液压油	低温液压油	磷酸脂液	水-乙二醇液	油包水液	水包油液
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	850~900			1100~1500	1040~1100	920~940	1000
粘度	小~大	小~大	小~大	小~大	小~大	小	小
粘度指数 VI 不小于	90	95	130	130~180	140~170	130~150	极高
润滑性	优	优	优	优	良	良	可
防锈蚀性	优	优	优	良	良	良	可
闪点($^{\circ}\text{C}$)不低于	170~200	170	150~170	难燃	难燃	难燃	不燃
凝点($^{\circ}\text{C}$)不高于	-10	-25	-35~-45	-20~-50	-50	-25	-5

流动时的压力损失、系统的发热等。一般根据粘度选择液压油的原则是：运动速度高或配合间隙小时，宜采用粘度较低的液压油以减少摩擦损失；工作压力高或温度高时，宜采用粘度较高的液压油以减少泄漏。实际上系统中使用的液压泵对液压油粘度的选用往往起决定性作用。此时可根据表 2-3 的推荐来选用油液粘度。

表 2-3 液压泵采用油液的粘度表

液压泵类型		环境温度 5~40 $^{\circ}\text{C}$ $\nu \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s}) (40^{\circ}\text{C})$	环境温度 40~80 $^{\circ}\text{C}$ $\nu \times 10^{-6} (\text{m}^2/\text{s}) (40^{\circ}\text{C})$
叶片泵	$p < 7\text{MPa}$	30~50	40~75
	$p \geq 7\text{MPa}$	50~70	55~90
齿轮泵		30~70	95~165
轴向柱塞泵		40~75	70~150
径向柱塞泵		30~80	65~240

第二节 液体静力学基础

液体静压力是研究液体处于相对平衡状态下的力学规律以及这些规律的应用。这里所说的相对平衡，是指液体内部质点之间没有相对运动，至于液体整体，完全可以像刚体一样作各种运动。

一、液体的压力

(一) 液体的静压力及其特性

静止液体在单位面积上所受的力称为静压力，如果在液体内某点处微小面积 ΔA 上作用有法向力 ΔF ，则 $\Delta F/\Delta A$ 的极限就是该点的静压力，用 p 表示。即

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} \quad (2-12)$$

若在液体的面积 A 上，所受的为均匀分布的作用力 F 时，则静压力可表示为

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-13)$$

液体的静压力在物理学上称为压强，但在液压传动中习惯称为压力。

液体的静压力有如下特性：

- 1) 液体静压力垂直于作用面，其方向与该面的内法线方向一致。
- 2) 静止液体内，任意点处的静压力在各个方向上都相等。

(二) 静压力基本方程

在重力作用下的静止液体，其受力情况如图 2-3a 所示，除了液体重力、液面上的外加压力之外，还有容器壁面作用在液体上的反压力。如要计算离液面深度为 h 处某一点的压力时，可以取出底面包含该点的一个微小垂直液柱来研究，如图 2-3b 所示。液柱顶面受外加压力 p_0 作用，底面上所受的压力为 p ，微小液柱的端面积为 ΔA ，高为 h ，其体积为 $h\Delta A$ ，则液柱的重力为 $\rho gh\Delta A$ ，并作用于液柱的重心上。作用于液柱侧面上的力，因为对称分布而相互抵消。由于液体处于平衡状态，在垂直方向上的力存在如下关系

$$p\Delta A = p_0\Delta A + \rho gh\Delta A \quad (2-14)$$

等式两边同除以 ΔA ，则得

$$p = p_0 + \rho gh \quad (2-15)$$

上式即为液体静压基本方程，由上式可知：

- 1) 静止液体任一点处的压力由两部分组成：一部分是液面上的压力 p_0 ，另一部分是该点以上液体的自重所产生的压力 ρgh 。当液面上只受大气压力 p_a 时，式 (2-15) 可改写为

$$p = p_a + \rho gh \quad (2-16)$$

- 2) 静止液体内的压力沿液深呈线性规律分布，如图 2-3c 所示。

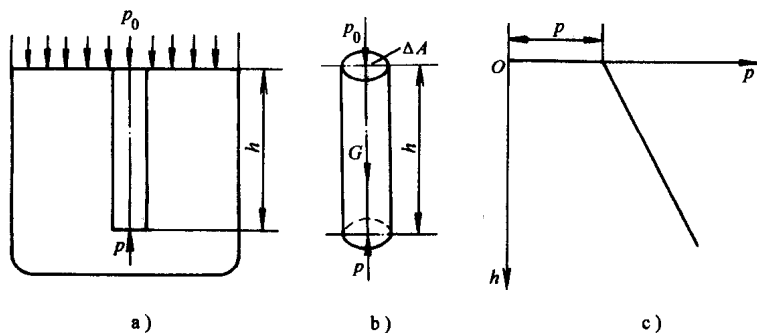


图 2-3 静止液体内的压力分布规律

- 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。在重力作用下静止液体中的等压面是一个水平面。

- 4) 对静止液体，若液面压力为 p_0 ，液面与基准水平面的距离为 h_0 ；液体任一点的压力为 p ，与基准水平的距离为 h ，则由静压力基本方程式可得

$$\frac{p_0}{\rho g} + h_0 = \frac{p}{\rho g} + h = \text{常数} \quad (2-17)$$

式中， $p_0/\rho g$ 为静止液体中单位重量液体的压力能， h 为单位重量液体的势能。公式的物理意义为静止液体中任一质点的总能量保持不变，即能量守恒。

(三) 压力的表示方法及单位

根据度量基准的不同, 液体压力分为绝对压力和相对压力两种。绝对压力是以绝对零压力作为基准来进行度量, 相对压力是以当地大气压为基准来进行度量。显然

$$\text{绝对压力} = \text{大气压力} + \text{相对压力}$$

因大气中的物体受大气压的作用是自相平衡的, 所以大多数压力表测得的压力值是相对压力。故相对压力又称表压力。在液压技术中所提到的压力, 如不特别指明, 均为相对压力。当绝对压力低于大气压时, 绝对压力不足于大气压力的那部分压力值称为真空度。真空度就是大气压力和绝对压力之差, 即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

绝对压力、相对压力和真空度的关系也可如图 2-4 所示。

压力的单位为 Pa (帕斯卡, 简称帕), $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$, 由于 Pa 的单位量值太小, 在工程上常采用它的倍数单位 kPa (千帕) 和 MPa (兆帕) 表示。它们之间的换算关系是

$$1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$$

压力的单位还有标准大气压 (atm) 以及以前沿用的单位 bar (巴)、工程大气压 at (即 kgf/cm^2), 水柱高或汞柱高等, 各压力的换算关系为

$$1\text{atm} = 0.101325 \times 10^6\text{Pa}$$

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{at} = 0.981 \times 10^5\text{Pa}$$

$$1\text{m H}_2\text{O} = 9.8 \times 10^3\text{Pa}$$

$$1\text{mm Hg (毫米汞柱)} = 1.33 \times 10^2\text{Pa}$$

二、压力的传递

由静力学基本方程可知, 静止液体中任意一点处的压力都包含了液面上的压力 p_0 。这说明在密闭的容器中, 由外力作用所产生的压力可以等值地传递到液体内部的所有各点。这就是帕斯卡原理。

通常在液压传动系统中, 由外力产生的压力 p_0 要比由液体自重所产生的压力 ρgh 大很多。例如液压缸、管道的配置高度一般不超过 10m, 如取油液的密度为 900kg/m^3 , 则由油液自重所产生的压力 $\rho gh = 900 \times 9.8 \times 10 = 0.0882 \times 10^6\text{Pa} = 0.882\text{MPa}$, 而液压系统内的压力常常在几 MPa 到几十 MPa 之间。因此, 为使问题简化, 在液压系统中, 由液体自重所产生的压力常忽略不计, 一般认为静止液体内部压力处处相等。

图 2-5 为两个面积分别为 A_1 、 A_2 的液压缸, 缸内充满液体并用连通管使两缸相通。作用在大活塞上的负载为 F_1 , 缸内液体压力为 p_1 , $p_1 = F_1/A_1$; 小活塞上作用一个推力 F_2 , 缸内的压力为 p_2 , $p_2 = F_2/A_2$ 。

根据帕斯卡原理 $p_1 = p_2 = p$, 则

$$F_1/A_1 = F_2/A_2 = p$$

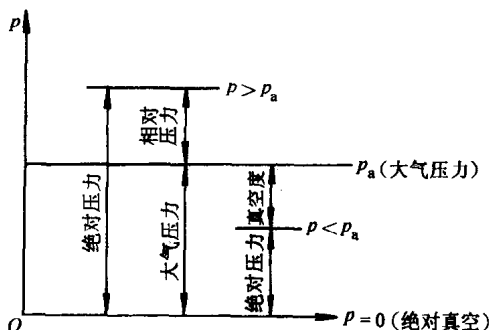


图 2-4 绝对压力、相对压力及真空度