

本书比较全面地介绍了液压传动的基础知识、液压传动用油、液压设备中常用的各种液压元件和辅助装置、液压系统的基本油路等。本书最后一章介绍了一些液压技术在工业中的应用实例。

液 压 技 术 基 础

液 压 技 术 编 译 组

*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $7^{\circ}/_{16}$ ·字数 159 千字

1975 年 1 月北京第一版·1975 年 1 月北京第一次印刷

印数 00,001—64,000·定价 0.52 元

*

统一书号: 15033·4243

出版者的话

我国人民高举毛泽东思想伟大红旗，以无产阶级文化大革命中所焕发出来的革命精神，在阶级斗争，生产斗争和科学实验三大革命斗争中取得了伟大的胜利。广大革命职工遵照毛主席“我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国”的伟大教导，正在广泛开展技术革新和技术革命的群众运动。

液压传动是一门较新的技术，它与机械传动和电传动相比具有一系列的优点，例如输出功率大，重量轻，易于实现无级变速和自动控制等。近年来已被广泛的应用于矿山冶金机械，农业机械，机床，锻压设备，建筑机械，起重运输机械等各种机械中。

为了适应我国社会主义建设事业的需要和广大读者的要求，我们根据“洋为中用”的原则，以武汉汽车配件厂译印的《液压技术入门》为基础，并参考其它书刊上的有关材料重新汇编成本书。

在本书的编译、出版过程中，武汉汽车配件厂和北京冶金液压机械厂的同志做了很多工作。

为了使本书的内容更加完善，欢迎读者提出批评和修改意见。

1973年8月29日

目 录

第一章 液压的基础	1
1. 液压的原理	1
2. 油的性质	4
3. 油的流体力学理论	8
4. 流体的粘性流动	11
5. 油在狭缝中的流动	15
6. 液压系统中的空气	17
7. 气蚀现象	18
8. 冲击压力	20
9. 阀的流体卡死现象	21
10. 液压装置的发热	22
11. 噪音	24
第二章 液压传动用油	25
1. 液压油的种类	25
2. 液压传动用油的特性	29
第三章 油泵	39
1. 油泵的特征	39
2. 齿轮油泵	42
3. 叶片油泵	46
4. 柱塞油泵	51
5. 油泵的性能	57
第四章 油马达	63
1. 基本情况	63
2. 油马达的功率、扭矩和效率	71
3. 齿轮油马达	73
4. 叶片油马达	80

5. 轴向柱塞油马达	83
6. 径向柱塞油马达	86
第五章 油缸	92
1. 油缸的种类	92
2. 油缸各部分的结构	94
3. 性能	96
4. 使用油缸时应注意的事项	100
第六章 液压阀	101
1. 液压阀的分类	101
2. 种类、结构和工作原理	104
3. 液压阀的特性	120
第七章 管路和管接头	126
1. 管路	126
2. 管接头	130
第八章 密封	138
1. 密封的分类	138
2. 液压用密封	139
3. 固定密封	140
4. 动密封	146
5. 机械密封	150
6. 油密封	151
第九章 辅助元件	154
1. 油箱	154
2. 滤油器	159
3. 冷却器	165
4. 蓄能器	167
第十章 液压系统基本油路	171
1. 压力控制油路	171
2. 速度控制油路	176

3. 方向控制油路	182
第十一章 液压传动在工业中的应用	185
1. 磨床	185
2. 锻压机械	191
3. 注塑成形机	195
4. 压铸机	199
5. 船用舵操纵装置	203
6. 转炉活动烟罩升降用液压装置	207
7. 叉式升降机	213
8. 挖掘机	217
附 录	222
液压系统图形符号 (摘自 GB 786-65)	222

第一章 液压的基础

1. 液压的原理

1.1 什么叫液压

液压装置中的油泵将电动机或其它发动机的机械能转变成工作油的流体能量(主要是压力能), 给于工作油的流体能量具有压力、流量、方向三个基本参数, 这些参数可用控制阀按所定的目的进行调整, 然后再借助适当的执行机构(油缸或油马达), 重新变成直线运动或回转运动的机械能。这种可以控制的动力变换和传递的过程或方式称为液压传动。

现在我们来了解一下这种能量变换和传递过程的典型例子。图1.1是最简单的液压装置的机能示意图。三相感应电动

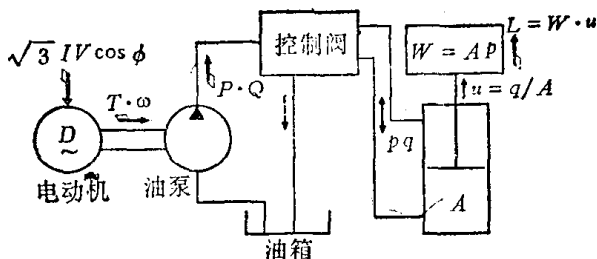


图1.1 液压装置的机能示意图

机的输入电流为 I , 电压为 V , 故输入电功率为 $\sqrt{3} IV \cos \phi$, 电动机效率为 η_n , 电动机的输出功率为 $T \omega$ (这里 T 为输出扭矩, ω 为角速度), 也是油泵的输入功率。油泵从油箱吸油, 输出压力为 P 、流量为 Q 的压力油, 其功率为 $P Q$ 。然

后按应用的目的，由几个控制阀控制其压力、流量和方向，并输入执行机构（如油缸）推动负载。设推动负载的力为 W ，速度为 u ，则输出的机械能为：

$$L = W u$$

因此，全效率 η_r 可由下式表示：

$$\eta_r = W u / \sqrt{3} IV \cos \phi$$

1.2 压力和力

在静止的理想流体中，压力的传递具有以下三个基本性质：

(1) 压力和作用面垂直。

(2) 在各方向的压力都相等。

(3) 在密闭的容器中加在静止流体的一部分上的压力，以相等的强度传给流体的其它部分。

如图 1.2 所示，在液体中垂直地放置一个无底圆筒，其底部面积为 A ，故筒内液体的重量 $W = \gamma H A$ 。因为流体在静止时是平衡的，所以必然有一个大小相等方向相反的力

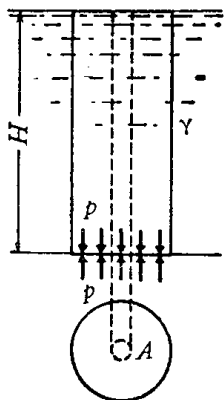


图 1.2

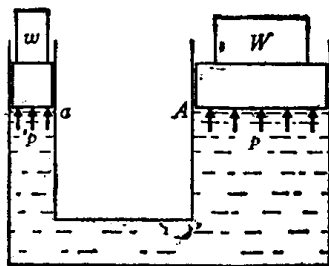


图 1.3

与筒内液体的重量平衡。设在圆筒底部的水压力为 p ，则有 $\gamma H A = p A$ ，因此 $p = \gamma H$ ，这就是流体柱的高度和压力的关系。

如图 1.3 所示，小直径油缸的面积为 a ，压在它上面的重量为 w ，产生的压力为 p ，应用上面的原理，这个压力以同样的大小传给大直径油缸，所以大直径油缸能得到 $W = p A = w A / a$ 的推力，比小直径油缸的推力增大了 A / a 倍。这是液压传动的重要特征。

在液压技术中，压力单位用公斤/厘米²，公斤/米²或磅/吋²，磅/呎²等。最近也有采用绝对单位系的如下单位的：

1 巴 = 750.06 毫米汞柱高 = 0.98693 大气压。

大气压的单位为：

1 标准大气压 = 760 毫米汞柱高 = 1.01325 巴 = 1.03323 公斤/厘米²。

1 工程大气压 = 735.52 毫米汞柱高 = 0.9606 巴 = 1 公斤/厘米² = 10 米水柱高。

1.3 流体的力和功

图 1.4 所示为用柱塞泵来提升重物的液压千斤顶的原理图。设柱塞 a 的移动距离为 x ，由于它的移动而使柱塞 A 向上移动的距离为 X ，因为它们所作的功应当相等（这里假定工作液体为忽略了粘性和压缩性的理想流体），则

$$a p x = A p X$$

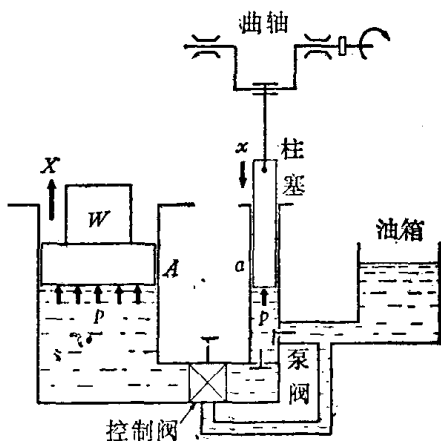


图 1.4 用柱塞泵的液压千斤顶工作原理

由此

$$ax = AX, \quad X = ax/A$$

这里 a/A 的值越小，千斤顶能提升的物体就越重，但提升的距离就越小。为了弥补这个缺点，如图所示，将柱塞和曲轴机构相连，由于曲轴的转动，柱塞就连续往复的运动，并送出压力油。如在柱塞泵的输油侧安装控制阀，对流量、压力、方向进行控制，这便构成了一般的液压装置。

2. 油的性质

2.1 粘性

当液体之间发生相对运动时，沿着液体的边界面就产生阻碍运动的力，这个性质称为流体的粘性。图 1.5 中和流线平行的平行板间的距离为 dy ，平行板的速度差为 du ，则在平行板间作用着和 $\frac{du}{dy}$ 成正比的切应力 τ 。假定比例常数为 μ ，则

$$\tau = \frac{\mu du}{dy}$$

这里 μ 为流体特有的值，它是流体的温度、压力的函数，称为粘性系数。

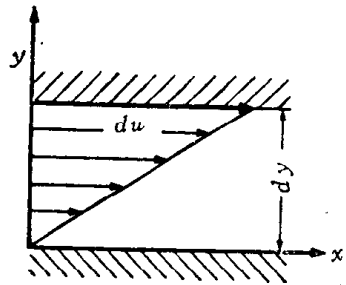


图 1.5

粘性系数 μ 的工程单位用公斤·秒/米²，在厘米·克·秒制单位系中的单位为泊，1 泊 = 1 克/厘米·秒，1 泊的 1/100 为 1 厘泊。

在流体力学中使用运动粘性系数 ν 的场合较多。

$$\nu = \mu / \rho$$

这里 ρ 为流体的密度。

运动粘性系数的工程单位和绝对单位是相同的，都为米²/秒或厘米²/秒。其中 1 厘米²/秒为 1 司，1/100 司为 1 厘司

(可用 c.st 表示)。

2.2 油的粘度

为测定液体的粘度和动粘度,一般是测出被测定的液体,在规定的头下,从毛细管中流出一定的量所需要的时间(秒),将这个值乘以这个毛细管所特有的常数就能算出动粘度。这种粘度计称为绝对粘度计。

为了消除因测定时间长和相应于不同的粘度要使用各种直径的毛细管所带来的不方便,应用了口径较大的毛细管,使测定容易。这样的粘度计称为工业粘度计。工业粘度计有雷德伍特(英)粘度计,塞布尔托(美)粘度计,恩格勒(德)粘度计等。用这种粘度计得到的测定值,除了液体的粘度较小的场合外,是和绝对粘度计的测定值成比例的。雷德伍特、塞布尔托粘度是在规定的条件下测定使一定量的流体流出所需要的时间(秒),其单位分别为雷德伍特秒和塞布尔托秒。这些值和动粘度的关系可以近似的用下式表示

$$v(\text{c.st}) = \alpha t - \frac{\beta}{t}$$

式中 t ——各粘度计的秒数,或度数;

α, β ——系数(由粘度计所确定)。

表 1.1 中为相应于各工业粘度计的 α, β 值。

表 1.1 各工业粘度计的 α, β 值

	工 业 粘 度 计		
	塞布尔托万能粘度计	雷德伍特粘度计	恩格勒粘度计
α	0.22	0.26	0.14
β	180	170	374

油的动粘度 v 和温度 t 的关系在 $20 \sim 80^\circ\text{C}$ 范围内,用下面的式子较合适

$$\lg \lg (v + 0.8) = A - B \lg (t + 273)$$

在10~70°C范围内下式和实验值较一致

$$\lg \lg v = A' - B't$$

在以上的公式中， A 、 A' 为表示油的浓度的常数， B 、 B' 为表示油的产地的常数，即由油的组成分子的基本构造所确定的常数。 B 、 B' 的值对由同一种原油所得的各种石油产品都是相同的。

在选择油时，重要的物理性状是粘度指数。粘度指数表示当温度变化时液体粘度变化的大小。供试油，以及在温度为210°F (98.8°C) 时和供试油有同样粘度的卡路夫·高斯特系油（粘度变化最大的油）和宾夕法尼亚系油（粘度变化最小的油），在温度为100°F (37.7°C) 时的 $S \cdot U \cdot S$ 粘度（塞布尔托万能粘度）分别用 U ， L ， H 来表示，则粘度指数可用下式表示

$$V.I = (L - U) / (L - H) \times 100(\%)$$

因此卡路夫·高斯特产的油的粘度指数($V.I$)为0%，宾夕法尼亚产的油的 $V.I$ 为100%。

普通的油的粘度大体上在这两者之间，当然 $V.I$ 值在100%以上者也有。

2.3 压缩率

和固体相比，液体具有较大的压缩性。但在压力变化比较小的情况下，作为非压缩性物体来考虑也没关系。然而在液压传动的高压油路内所用的工作油，不考虑其压缩性是不行的。

一般，体积为 V_1 ，压力为 P_1 的液体，当压力为 P_2 时其体积 V_2 可用下式表示：

$$V_2 = V_1 [1 - \beta (P_2 - P_1)]$$

$$\beta = \frac{V_2 - V_1}{P_2 - P_1} \cdot \frac{1}{V_1} = \frac{\Delta V}{\Delta P} \cdot \frac{1}{V_1}$$

这里 β 称为液体的压缩率，其单位用厘米²/公斤。 β 的倒数为体积弹性系数 K ，用 K 来表示液体压缩性的情况也很多

$$K = 1/\beta$$

2.4 油的压缩率

20°C 的水在压力为 100 公斤/厘米² 以下时的 β 值约为 4.6~4.4 × 10⁻⁵ 厘米²/公斤，对于油来讲因为其种类不同所以多少有些差异，但在 20~80°C 时其 β 值大约均为 6.5~9.5 × 10⁻⁵ 厘米²/公斤。

可是在液压装置工作过程中工作油中多少总会混进一些气泡进去的，这样就会使压缩率产生相当大的变化。现假定在大气压下油中混入的气泡量为 $a\%$ ，气泡和油的体积分别为 V_a 、 V_o ，当压力由大气压 P_o 变到 P 时，混合流体的体积 V 可用下式来表示

$$V = \frac{P_o V_a}{P} + V_o [1 - \beta (P - P_o)]$$

将上式微分得

$$-\frac{dV}{dP} = \frac{P_o V_a}{P^2} + \beta V_o$$

因此，混合流体的平均压缩率 β' 为

$$\begin{aligned} \beta' &= \frac{\beta V_o + P_o V_a / P^2}{V_a - V_o} = \beta \left(1 - \frac{a}{100}\right) + \frac{a}{100} \cdot \frac{P_o}{P^2} \\ &= \beta + \frac{a}{100} \left(\frac{P_o}{P^2} - \beta\right) \end{aligned}$$

在绝热变化的场合

$$\beta' = \beta + \frac{a}{100} \left(\frac{P_o \frac{1}{n}}{nP \frac{n+1}{n}} - \beta \right)$$

当压力 P 增大时，在油中要溶解相当量的气泡，还有因气泡的温度也是变化的，所以油的压缩率也会随压力的变化而有若干变化，所以 β' 值必然是一个大概值。

3. 油的流体力学理论

如前所述，液压传动是将机械能变成流体的压力能，然后经过输送、控制再将流体的压力能合理的变换为机械能的过程。因此对液压传动的高速、高压、高性能化的研究需要材料力学、金属学、热工学等各方面的知识。可是最基础最重要的是弄清有关流体流动的各种问题。本章将叙述其中最重要的几个问题。

3.1 连续性方程式

对于流体的流动来讲，建立在质量守恒定律基础上的连续性方程式是非常重要的。

对于定常的流体来说，如一个管路的任意断面处的管路断面面积、平均速度和密度分别用 A 、 w 、 ρ 来表示，因为流过断面 1、2 …… 的质量流量 G 是一定的，故

$$A_1 w_1 \rho_1 = A_2 w_2 \rho_2 = \dots = G = \text{常数}$$

以上式子就是连续性方程式。

如把水和油这样的流体看成非压缩性流体，则 ρ 可以看成常数，于是得

$$A_1 w_1 = A_2 w_2 = \dots = Q = \text{常数}$$

即体积流量为常数。

因此 $w_1/w_2 = A_2/A_1$ ；或 $w_2 = w_1(A_1/A_2)$
这是流道断面面积变化和平均流速之间的关系式。

3.2 流体的运动方程式

作用在运动流体上的力有如下四种：

- 1) 由流体的质量和加速度的乘积来表示的惯性力;
- 2) 由压力差所引起的力;
- 3) 作用在流体质量上的质量力, 也叫外力;
- 4) 由粘性所引起的粘性力。

现在来看图 1.6 所示的断面为 dA 、长度为 dS 的微小流体单元。设其密度为 ρ 、速度为 w 、压力为 P 、流动形式为定常流动, 并且忽略了粘性力。1) 惯性力项为 $\rho \cdot dA \cdot dS \cdot w \frac{dw}{dS}$; 2) 由压力差所引起的力为 $dA \left[P - \left(P + \frac{dP}{dS} dS \right) \right] = -dAdS \frac{dP}{dS}$; 3) 当只有重力加速度时质量力为 $-\rho dAdS \frac{dZ}{dS} g$ 。因为流体在这些力的作用下平衡, 故

$$\rho dAdS w \frac{dw}{dS} = -\rho dAdS \frac{dZ}{dS} g - dAdS \frac{dP}{dS}$$

因此得

$$w \frac{dw}{dS} = -g \frac{dZ}{dS} - \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dS}$$

这就是欧拉的运动方程式。

与上面的方程式相应, 考虑了粘性力的非定常流动的更一般化的方程式称为纳威尔-斯托克斯运动方程式, 这个方程式是实际流体的基本方程式。

3.3 伯努利方程式

在流体运动时, 假定忽略了粘性, 并认为流体是不

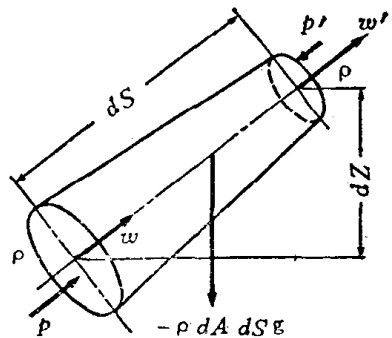


图 1.6

可压缩的，流体的运动是定常的，并假定外力只有重力，流道中任意二个断面所通过的流体所具有的能量总值在其运动的过程中没有损失也没有进入，则

$$\gamma Q w_1^2 / 2g + Q P_1 + \gamma Q H_1 = \gamma Q w_2^2 / 2g + Q P_2 + \gamma Q H_2$$

式中第一项为动能，第二项为压力能，第三项为位置能。

用 γQ 除以上式，得

$$w_1^2 / 2g + P_1 / \gamma + H_1 = w_2^2 / 2g + P_2 / \gamma + H_2 = \text{常数}$$

这个关系式表示了单位重量流体所具有的能量。它是前面的欧拉运动方程式在上述假定下的积分，是适合于流体运动的能量守恒定律，这个方程式称为伯努利方程式。

实际的流动由于具有粘性而有能量损失 h_e ，故下式可用于一般场合

$$w_1^2 / 2g + P_1 / \gamma + H_1 = w_2^2 / 2g + P_2 / \gamma + H_2 + h_e$$

3.4 动量理论

质量 m 和速度 w 的积 mw 称为动量，动量对时间的导数等于作用于该质点上的力，即

$$F = d(mw) / dt$$

这个式子就是牛顿第二定律在运动流体中的应用。

下面来看图 1.7 中的流束，经过时间 dt 后断面 A_1 移动了 $w_1 dt$ 达到 A_2 处，同时断面 B_1 移到了 B_2 处，因此这段流束的总的动量变化为

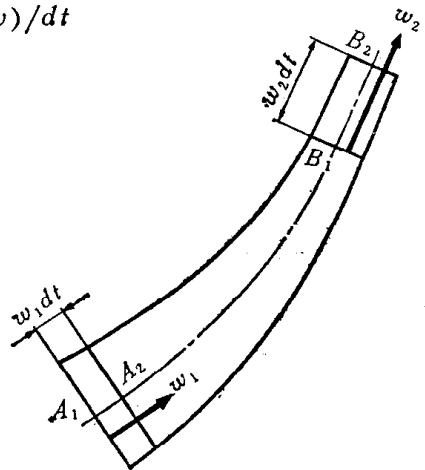


图 1.7

$$d(mw) = (A_2 \rho_2 w_2 dt) w_2 - (A_1 \rho_1 w_1 dt) w_1$$

根据连续性方程式

$$Q\rho = A_2 w_2 \rho_2 = A_1 w_1 \rho_1$$

故

$$\frac{d(mw)}{dt} = Q\rho(w_2 - w_1) = F$$

引起这个动量变化的力 F 为作用于流道断面上的压力的合力 F_p 、由重力引起的质量力 F_g 以及流体所受的其它外力 F_i 的合力，即

$$F = F_p + F_g + F_i$$

因为以上的动量理论可以不知道流体内部的流动状态，而只要知道流体边界面处的状态，便可进行力的计算，所以在流体力学中被广泛的用来分析因流动作用而产生的力。所以动量理论和质量守恒，能量守恒定律都是很重要的。

4. 流体的粘性流动

4.1 层流与紊流

像工作油这样的实际流体，因为具有粘性，所以在它流动的过程中具有摩擦阻力。一般流体的流动有层流和紊流二种完全不同的流动状态。前者产生于流体的粘度较大，流动的速度较小的场合，如流体在细管、狭缝内的流动，流体粒子沿着流线运动，没有横向的运动。在液压技术中所讨论的流动问题，由于工作油的粘度较大，而且流动的缝隙较狭等原因，所以流动状态为层流的场合较多。紊流存在于流体的粘度较小，流速较大的场合，在这种流动内包含有无数不规则的旋涡。

假定流体的流速为 w ，物体的大小为 l （对管路来讲即

为管内内径), 流体的运动粘度为 ν , 当管内的流动使无因次量 $R_e = wl/\nu$ 大致达到一常数 2000 时, 流动状态就由层流变为紊流。其中 R_e 称为雷诺数。当流动由层流转变为紊流后, 不仅流体的阻抗增大了, 而且固体和流体之间的热传导, 药品的溶解度都急剧地增加。这是由于在紊流的情况下, 流体的分子团具有和流动方向成直角的运动成分的缘故。

4.2 边界层

粘性较小的流体沿着固体的壁面流动时, 由于流体的粘度, 和壁面接近的一薄层流体的速度减慢, 但离开壁面较远处的流动和理想流体的流动相似。这个受到粘性影响的一薄层就称为边界层, 这一部分的厚度 δ 就称为边界层的厚度。由实际测量知, 在边界层内的流动有层流也有紊流, 当达到临界雷诺数以上时, 流动状态便由层流变为紊流。

4.3 圆板的摩擦阻抗

回转的圆板和流体之间所产生的摩擦阻抗, 如齿轮泵和叶片泵的转子体和侧板之间所产生的摩擦阻抗称为圆板摩擦阻抗。

设圆板表面的流体摩擦系数为 f , 圆板的角速度为 ω , 则在任意半径 r 处的切向速度 $u = \omega r$ 。圆板旋转所必须的回转扭矩 T 为

$$T = \int_{R_1}^{R_2} f \cdot 2\pi r \cdot dr \cdot \gamma \frac{u^2}{2g} r = 2\pi f \gamma \frac{\omega^2}{2g} \int_{R_1}^{R_2} r^4 dr$$

和分, 并考虑到 $R_2^5 \gg R_1^5$, 则

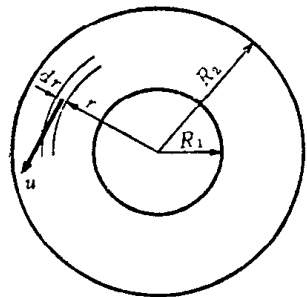


图 1.8