

液 压 技 术 基 本 理 论

〔日〕市川常雄

鸡西煤矿机械厂 译

前 言

在无产阶级文化大革命和批林批孔运动的推动下，我国的社会主义建设事业欣欣向荣，科学技术迅猛发展，特别是液压技术，近年来在国民经济的各部门中日益得到了广泛的应用。为了适应这种大好形势的发展，我们遵照毛主席关于“洋为中用”的教导，翻译了《液压技术基本理论》这本书。本书初稿曾由黑龙江省科学技术情报所印刷并进行了情报交流。之后，我们又对本书译稿进行了进一步的审校。在本书的翻译和出版的过程中，承蒙哈尔滨工业大学和北京煤炭科学研究所的同志们提供了宝贵意见，特别是黑龙江省科学技术情报所给我们以很大的帮助与支持，对此，我们表示衷心感谢。由于我们水平有限，书中不当之处，在所难免，希望同志们不断提出改进意见。

本书由翟培祥、李清德同志翻译，董玉文同志审校。

鸡西煤矿机械厂

一九七四年十月

目 录

前 言	
第一章 绪 言	1
1-1 液压回路的原理	1
1-2 液压系统的特点	2
第二章 油液的物理性质	3
2-1 比重	3
2-2 粘度	3
2-3 压缩率	6
2-4 工作油液	6
第三章 粘性流体力学	9
3-1 压力	9
3-2 伯努利定理	10
3-3 动量法则	11
3-4 圆管内的流动	14
3-5 两面间的平行流动	18
3-6 两倾斜面间的流动	22
3-7 两圆板之间的放射流动	25
3-8 油液粘度变化时的间隙泄漏	27
第四章 润滑理论	29
4-1 滑动轴承	29
4-2 静压轴承	33
第五章 管内流动的动特性	36
5-1 基本公式	36
5-2 频率特性	40
5-3 过渡过程	45
第六章 气 穴	48
6-1 油液的蒸气压和空气分离压	48
6-2 节流气穴	50
6-3 液压泵中的气穴	53
第七章 液 压 泵	57
7-1 概述	57
7-2 齿轮泵	67
7-3 叶片泵	80
7-4 轴向柱塞泵	88
7-5 径向柱塞泵	103
第八章 液 压 换 能 器	107
8-1 种类	107
8-2 液压马达概述	107
8-3 内轮马达	112
8-4 叶片马达	115
8-5 轴向柱塞马达	117
8-6 径向柱塞马达	120
8-7 摆动液压缸	123
8-8 液缸缸	125
8-9 液压换能器的动特性	130
第九章 液 压 传 动 装 置	139
9-1 概述	139

9-2 变量液压泵与定量液压马达	143	10-6 滑阀的稳定性.....	172
9-3 定量液压泵与变量液压马达	147	10-7 滑阀的固着.....	174
9-4 变量液压泵与变量液压马达	149	第十一章 液压控制阀 ...	177
9-5 应用实例	150	11-1 种类.....	177
第十章 液压阀的力学 ...	153	11-2 压力控制阀.....	177
10-1 锥阀的流量系数.....	153	11-3 流量控制阀.....	183
10-2 锥阀的推力系数.....	157	11-4 方向控制阀.....	186
10-3 锥阀的超调压力.....	161	第十二章 附属装置	192
10-4 锥阀的稳定性.....	165	12-1 蓄压器.....	192
10-5 滑阀的静特性.....	169	12-2 过滤器.....	198
		12-3 冷却器.....	202
		12-4 油箱.....	206

第一章 绪 言

1-1 液压回路的原理

近年来，随着各种机械设备的自动化与机械化的程度不断提高，并向大型发展，日益广泛地应用了液压回路。如图 1.1 所示，机械动力经液压泵转变成油液的压力能，该压力油液经管路输送给液压换能器（液压马达及液压缸），油液的压力能又转变成机械能而拖动负载，液压回路就是这样一种装置。

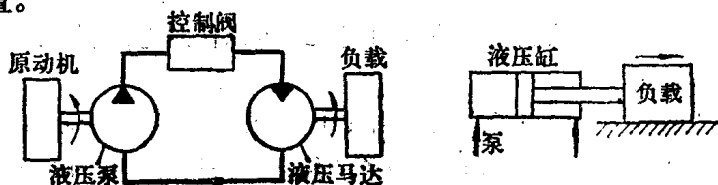


图 1.1

象这种以油液压力作为媒介传递动力的情况，其压力油液的流动可借助阀加以控制，能够任意地控制负载的运动，所以，对于提高各种机械设备的自动化程度是十分有利的。由于高压泵及液压换能器的创制，小型大功率的传递便成为可能，这也就适应了不断提高机械设备的自动化与机械化的程度，以及向大型发展的要求，因而，其应用迅速扩大。于是，各种工作母机的自动化、自动线及其它工厂内各种机械设备的自动化，建筑机械与车辆，塑料成型机械及其它各种专业设备，起重机与绞车等等，都广泛应用着液压传动。

除了以压力油液作为媒介传递动力的液压驱动之外，还采用作为自动控制用的液压装置。前者的液压驱动，以传递动力为主要目的，所以，压力高，功率大；后者的液压控制，以压力油液传递信号为主要目的，一般压力低，功率小。可是，为了提高液压驱动回路的动特性，广泛采用反馈之类的自动控制方法，所以，两者难以截然区分开。

1-2 液压系统的特点

液压驱动和液压控制系统的优点如下：

(1) 可借助油管向任意位置传递动力(信号)。皮带与齿轮等机械传动方法，在传输距离和方向上多半受到限制，而液压回路却不受任何限制。

(2) 借助控制压力油液的流动，可以任意地控制负载的运动。

(3) 由于采用了高压泵和液压换能器，使小型大功率的传递成为可能。上述(1)、(2)条的优点，采用发电机-电动机的电气回路虽然同样能够实现，可是远没有液压泵和液压换能器那样轻小，因之也没有液压驱动的反应速度快。液压泵和液压马达的单位马力重量约低至 0.2 公斤/马力。

(4) 由于油液具有弹性而能吸收冲击，虽然负载有冲击，但它不致传及输入端。

(5) 借助设置溢流阀等，易于实现机械设备的过负载保护。

液压系统的缺点：

(1) 漏油；

(2) 噪音。

可是这两点，近几年来正在研究改进。

第二章 油液的物理性质

2-1 比 重

油液单位体积的重量,称为比重,一般以 γ 表示。单位体积的质量,称为密度,即

$$\rho = \frac{\gamma}{g} \quad (2.1)$$

式中 g 为重力加速度。

假定 15°C 的 γ 值为 γ_{15} ,则任意温度 $t^{\circ}\text{C}$ 的比重 γ_t 为

$$\gamma_t = \frac{\gamma_{15}}{1 + \alpha(t - 15)} \quad (2.2)$$

式中 α 为油液的膨胀系数,约为 $0.00065/^{\circ}\text{C}$ 。

2-2 粘 度

如图 2.1 所示,在两平行平板之间(间隙 h)有油液流入,其一平板以速度 U 相对另一平板平行运动。油液借其粘性附着于平板之上,则任一点 y 的速度为

$$u = U \frac{y}{h} \quad (2.3)$$

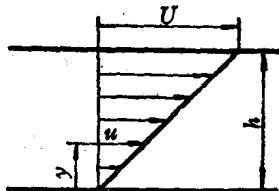


图 2.1

速度的梯度为 $u/y = U/h$ 。图中所示的上平板以速度 U 运动所需的单位面积上的力为

$$\tau = \mu \frac{u}{y} = \mu \frac{U}{h} \quad (2.4)$$

式中 μ 称之为粘度, 其单位, 在实用单位制中, 由式(2.4)得公斤秒/米², 而在绝对单位制中, 为克/厘米秒。

1 克/厘米秒 = 1 泊 = 100 厘泊。实用单位制的公斤秒/厘米² 和绝对单位制的泊之间有下列换算式

$$1 \text{ 公斤秒/厘米}^2 = 98 \text{ 泊}$$

由下式而定的 ν , 称之为运动粘度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.5)$$

ν 的单位为厘米²/秒, 米²/秒。

1 厘米²/秒 = 1 沱 = 100 厘沱。

如图 2.2 所示, 油液的运动粘度随温度而显著地变化, 依华尔瑟 (Walther), 有下列关系式

$$\log_{10} \log_{10} (\nu + 0.8) = -n \log_{10} T + C \quad (2.6)$$

式中 ν 为厘沱; T 为绝对温度; n, C 为与油液种类有关的常数。

在油温 $t = 10 \sim 75^\circ\text{C}$ 范围内, 有下列近似式

$$\log_{10} \log_{10} \nu \approx A - Bt \quad (2.7)$$

式中 A, B 为与油液有关的常数。

一般希望液压工作油液的粘度不要随温度发生较大的变化, 式(2.6)中的 n 值越小越好。采用粘度指数 VI 作为衡量

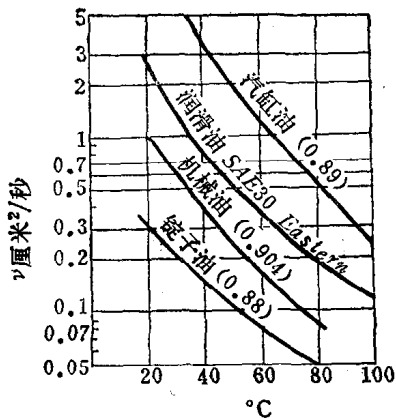


图 2.2 油液的运动粘度与温度的关系
(括弧内数值为相对 4°C 水的比重)

粘度随温度而变化的标准, 即

$$VI = \frac{L-U}{L-H} \times 100 \quad (2.8)$$

式中 U 为欲求粘度指数的待测油液在 37.8°C 时的运动粘度(厘沲);

L 为在 98.9°C 和待测油液为同一粘度, 且粘度指数为 0 的油液在 37.8°C 时的运动粘度(厘沲);

H 为在 98.9°C 和待测油液为同一粘度, 且粘度指数为 100 的油液在 37.8°C 时的运动粘度(厘沲)。

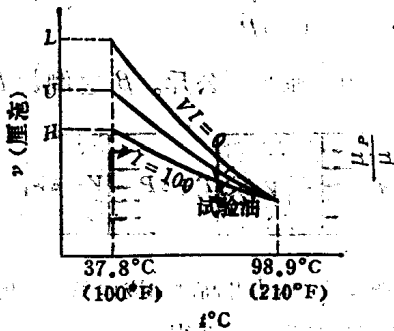


图 2.3 粘度指数

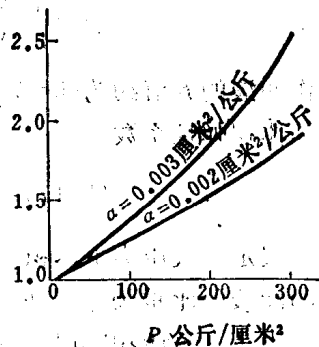


图 2.4 粘度与压力的关系曲线

通常, 环烷基油液的 $VI \approx 0$; 石蜡基油液的 $VI = 100$ 。图 2.3 为粘度指数说明图, VI 值越大的油液, 其粘度随温度变化就越小。

再者, 油液的粘度也是随压力变化的。假定在大气压下的粘度为 μ , 则任意压力 P 公斤/厘米² 下的粘度 μ_p 为

$$\mu_p = \mu e^{\alpha P} \quad (2.9)$$

式中 α 为与油液种类有关的常数, 约为 $0.002 \sim 0.003$ 厘米²/公斤。上式可由图 2.4 所示之曲线表示, 在压力

200 公斤/厘米²以上时, 压力对粘度的影响是不能忽视的。

2-3 压缩率

如图 2.5 所示, 假定压力为 P 时, 油液的体积为 V ; 压力为 $P+\Delta P$ 时, 油液的体积为 $V-\Delta V$, 则得

$$\frac{\Delta V}{V} = \beta \Delta P$$

式中 β 称为压缩率, 由上式得

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta P} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dP} \quad (2.10)$$

工作油液的 β 值约为 $(5\sim 7) \times 10^{-5}$ 厘米²/公斤。 β 之倒数 K 称为体积弹性系数

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (2.11)$$



假定大气压力下体积

V 的油液的比重为 γ , 任意压力 P 时的体积为 $V-\Delta V$, 比重为 γ_p , 则得

$$\gamma V = \gamma_p (V - \Delta V)$$

$$\therefore \frac{\gamma_p}{\gamma} = \frac{V}{V - \Delta V} = \frac{1}{1 - \Delta V/V} = \frac{1}{1 - \beta P} \quad (2.12)$$

2-4 工作油液

液压回路中使用的工作油液, 不同于一般的润滑油, 应当具有适合其目的的性质。通常多半是以矿物油为主 (主要是透平油), 也有用合成油液或乳化油液的。对于工作油液应考虑下述特性:

(1) 粘度

工作油液应有适宜的粘度，并且受温度变化的影响要小（粘度指数大）。如果工作油液的粘度过低，则漏损增加；反之，粘度过高，则粘性摩擦增大，因而希望有适宜的粘度，一般采用粘度 20~40 厘沱的油液。在寒冷地方，所使用的油液的低温粘度不要过高，为此，制备有低温用的工作油液。工作油液由于受剪切作用会恶化而使粘度有变低的趋势，所以应具有较高的剪切稳定性。

(2) 氧化稳定性

作为工作油液，其氧化稳定性要好，以便长期使用，也不致因氧化而恶化。为此，可加入各种氧化稳定剂。一般说来，油液的温度升高 10°C ，其化学反应速度约提高一倍，所以工作油液的使用温度应在 65°C 以下，短时允许达至 90°C 左右。

(3) 防锈作用

从维护机器的使用期限出发，油液不得使金属产生锈蚀，而且对密封和涂料的不良影响也要尽量减小，为此，油液中应加入各种防锈剂。

(4) 消泡性

液压回路中发生的气泡，应使其升浮到油池上面。可是，微小气泡升浮的时间非常长，难以升浮到油池上面。如果气泡混入工作油液中，其压缩率变得相当大，成为机器反应迟缓，发生冲击压力和不稳定振动等等的原因。所以，应加入消泡剂以便及早消除气泡。

(5) 耐摩性

液压机器的滑动表面，应当具有良好的润滑作用和耐摩性。为了在金属表面形成稳固的油膜，以便降低摩擦系数，防止滑动表面的金属咬合，须在油液中加入增滑剂。特别是在

高温、高压时,应使用减少该滑动部分摩擦的极性剂和各种耐摩剂作为添加剂。

(6) 防火性

压铸机、焊接机、热处理炉、钢铁工业之类所用的工作油液,特别要求防火性,现在正在研制合成油液或乳化液作为防火工作油液。在飞机中,已使用防火工作油液。

第三章 粘性流体力学

3-1 压 力

如图 3.1 所示, 面积为 A 的平板承受液体压力作用, 其作用力为 F , 则得

$$P = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

P 值称之为压力。

任意一点的压力, 假定在包含该点的微分面积 ΔA 上的作用力为 ΔF , 则以下式定义

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA}, \quad (3.2)$$

压力单位采用公斤/厘米²或磅/吋², 这两种单位的关系如下:

$$1 \text{ 公斤/厘米}^2 = 14.22 \text{ 磅/吋}^2$$

$$1000 \text{ 磅/吋}^2 = 70 \text{ 公斤/厘米}^2$$

液压泵等采用的标准压力为下述诸值:

公斤/厘米 ²	35	70	105	140	175	210	280	350
磅/吋 ²	500	1000	1500	2000	2500	3000	4000	5000

液体压力的性质:

- (1) 压力恒垂直作用于固体壁的表面;
- (2) 任一点的压力为一定值, 与方向无关;

(3) 若以一压力加于密闭容器中的液体之一部分, 则以同样大小的压力向容器所有各点传递。这种现象称为巴斯加原理。如在图 3.2 所示的小活塞(断面积为 a)上加以力 f ,

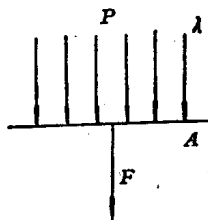


图 3.1 压力

则在该活塞下面产生的压力为 $P=f/a$, 此压力便作用于和液体相接触的全部固体壁上。因此, 大活塞(断面积为 A)承受的力为 $F=PA$, 即

$$P = \frac{f}{a} = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

该式的关系表明了这样一个原理: 将较小的力 f 放大为较大的力 F 。

如图 3.3 所示, 油液压力 P 使重量 W 以速度 v 上升, 其单位时间所做的功, 即功率为

$$L = Wv$$

假定活塞断面积为 A , 则 $W = AP$, 压力油液单位时间的流量为 $Av = Q$, 故得

$$L = AP \frac{Q}{A} = PQ \quad (3.4)$$

PQ 即表示油液所完成的功率。

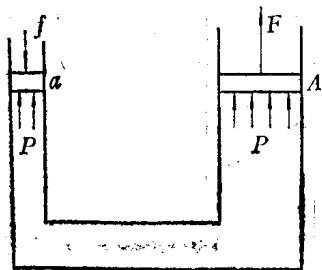


图 3.2

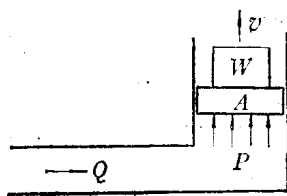


图 3.3

3-2 伯努利定理

图 3.4 所示为一流体管道, 取该管上的任意两个断面①和②, 假定其压力分别为 P_1 、 P_2 , 断面积为 A_1 、 A_2 , 流速为 v_1 、

p_2 , 由基准面计起的标高为 Z_1, Z_2 , 对于稳态流动, 依流动的连续性得

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (3.5)$$

单位时间流过两个断面的流体压能为 $P_1 Q, P_2 Q$, 动能为 $\gamma Q v_1^2 / 2g, \gamma Q v_2^2 / 2g$, 位能为 $\gamma Q Z_1, \gamma Q Z_2$, 按着能量守恒法则, 得出下式

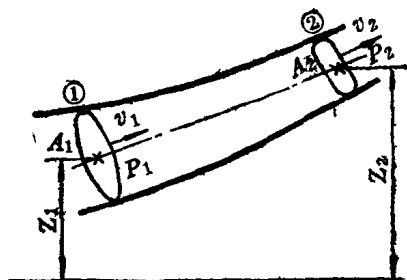


图 3.4

$$P_1 Q + \frac{\gamma Q}{2g} v_1^2 + \gamma Q Z_1 = P_2 Q + \frac{\gamma Q}{2g} v_2^2 + \gamma Q Z_2$$

$$\therefore P_1 + \frac{\gamma v_1^2}{2g} + \gamma Z_1 = P_2 + \frac{\gamma v_2^2}{2g} + \gamma Z_2 \quad (3.6)$$

上式的关系称之为伯努利定理。

现在研究一下如图 3.5 所示的水平流动的情形, 即 $Z_1 = Z_2$, 则

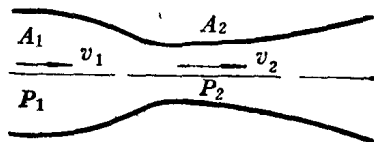


图 3.5

$$P_1 + \frac{\gamma v_1^2}{2g} = P_2 + \frac{\gamma v_2^2}{2g}$$

$$\therefore P_1 - P_2 = \frac{\gamma}{2g} (v_2^2 - v_1^2) = \frac{\gamma Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_2^2} - \frac{1}{A_1^2} \right) \quad (3.7)$$

由此可以看出, 当 $A_1 > A_2 (v_1 < v_2)$ 时, $P_1 > P_2$ 。

3-3 动量法则

假定物体的质量为 m , 速度为 v , 其动量为 mv , 而外力 F 作用于该物体使之动量变化, 依动量法则, 得

$$F = \frac{d(mv)}{dt} \quad (3.8)$$

也就是说，物体动量的单位时间增量等于外力。这条动量法则适用于流体的流动，这样，流体与固体壁之间的作用力便可以简单地求得。

例如，图 3.6 中所示的射流（断面积为 a ）以速度 v 垂直射向平板，其流量 $Q=av$ ，平板所承受的力为

$$F = \frac{\gamma Q}{g} v \quad (3.9)$$

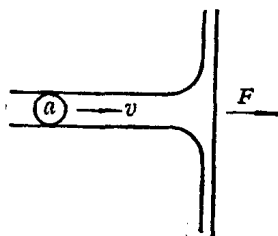


图 3.6

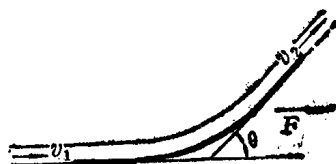


图 3.7

如图 3.7 所示，射流沿曲面射出，则

$$F = \frac{\gamma Q}{g} (v_1 - v_2 \cos \theta) \quad (3.10)$$

由于这种射流的冲击作用，使图 3.8 所示的平板承受推力而运动。但如图 3.9 所示的情形，假定流体从液箱孔射出的速度为 v ，流量为 Q ，则依动量法则可得与式(3.9)同样大小的力反作用于液箱，使其向后移动。

【滑阀之例】

如图 3.10 (甲)所示，滑阀内的油液为控制容积(适用动量法则)，流入阀口的流速为 v ，其方向为 ϕ ，流量为 Q 。压力油液作用于滑阀的轴向力为 F (图中向右)，而滑阀作用于控制容积内油液的作用力 F 是向左的，则可适用下述动量法则。

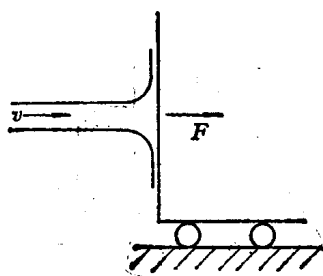


图 3.8

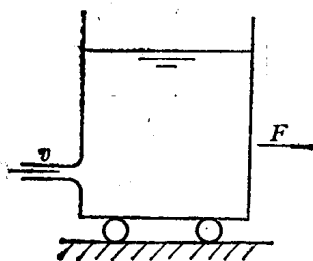


图 3.9

$$F = \frac{\gamma Q}{g} v \cos \phi \quad (3.11)$$

图 3.10 (乙) 所示是流向相反的情形, 其轴向力是完全相同的, 都是作用于使滑阀关闭的方向。图 3.10 (甲)、(乙) 相当于图 3.8 和 3.9。

【锥阀之例】

在图 3.11 所示的锥阀中, 压力油液作用于阀的轴向力为 F , 阀座孔的断面积为 A , 压力为 P , 阀座孔内的流速为 v_0 , 从阀射出的速度为 v , 阀外的压力为大气压, 因为动量法则也适用于图中控制容积内的油液, 则得

$$PA - F = \frac{\gamma Q}{g} (v \cos \phi - v_0)$$

$$\therefore F \approx PA - \frac{\gamma Q}{g} v \cos \phi \quad (3.12)$$

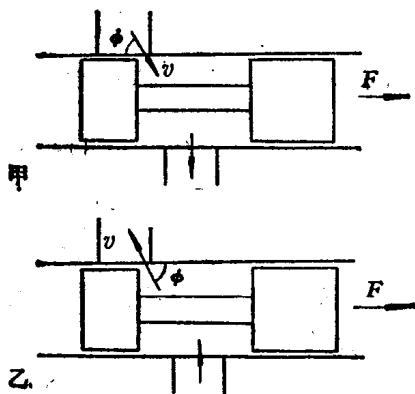


图 3.10 滑阀