

液 压 工 程 学

〔日〕市川常雄 日比 昭 著

周兴业 译 丛庄远 校

国 防 工 业 出 版 社

内 容 简 介

“液压工程学”一书主要介绍液压流体力学的基础知识, 液压系统中的各主要元件(油泵、液压马达、各种控制阀和附属部件等)、传动系统、各种基本回路的构成, 其中还介绍了目前液压技术中的一部分最新研究成果。本书是液压技术的普及读物, 也是一本入门书籍。可作为大学和专科学校的教科书。也适用于工人和工程技术人员学习和科研、设计单位的有关人员参考。

油 压 工 学

市川常雄

日比 昭 著

朝 倉 書 店

1979年第一版

*

液 压 工 程 学

市川常雄

〔日〕 日比 昭 著

周兴业 译

丛庄远 校

*

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

850×1168¹/₃₂ 印张 5⁵/₁₆ 131千字

1984年3月第一版 1984年3月第一次印刷 印数: 00,001—10,500册

统一书号: 15034·2616 定价: 0.70元

译者的话

液压传动和控制有许多优点。体积小、重量轻、起动运转平稳、能有效地控制过载、系统响应速度快、比功率（即功率与重量之比）大、能在较大的范围内实现无级调速。因此，在车辆、船舶、机床、工程、矿山、起重、运输等机械上得到广泛应用。

液压技术已有很长的发展历史，但在近几十年才有了飞跃的进步，逐步地形成一门完整的学科。

本书作者一直在大学里从事液压技术方面的教学工作，而且具有大量的科研和实验室工作的实践经验。本书的许多内容（例如试验举例等）都是作者自己实践过、并且上升为理论的。结合他们长期的教学经验，使得本书成为一本系统性和逻辑性很强的教科书。结合各章的练习题，可使读者能很快掌握学习内容。

本着洋为中用的原则，把这本书翻译出来，介绍给读者参考学习。但由于水平有限，译文中一定会有许多错误和不当之处，希望广大读者批评指正。

序 (简译)

由液压元件组成的液压系统, 是通过液压油传递动力从而驱动负载的装置。它被广泛地用来实现各种机械设备的自动化和机械化。采用液压系统之所以能很容易地实现自动化和机械化的主要原因如下:

(1) 液压油与空气和电流一样, 都是连续流动的物质, 比较容易控制, 通过控制这些介质, 能够自由地控制负载的运动。

(2) 液压控制系统与电气、气动系统相比, 具有体积小、重量轻、输出功率大 (例如液压马达每马力的重量大约是 0.2 公斤/马力), 动态响应特性好等特点。这主要是因为近来液压系统使用的压力一般都已达到了 $200 \sim 300$ 公斤/厘米² 的高压。然而, 在控制性能方面, 电气控制也有比液压控制优越的地方。因此, 人们充分地利用了电、液二者的优点, 创造出电气——液压控制系统。

(3) 由于采用液压系统实现了自动化, 因此, 提高了各种机械设备的工作效率, 降低了生产成本, 而且还把操作人员从单调的工作中以及高温或有空气污染的恶劣环境里解放出来。

另一方面, 液压系统有噪声大、漏油等缺点。但是由于近年的研究, 这些缺点正在不断地得到改善。

现在, 液压技术已被广泛地应用于工程机械、工程车辆、机床、钢铁生产设备、锻压机械、农业机械、船舶、飞机、注塑机、汽车等各种工业部门里。液压系统这样广泛地应用还只是近二十年的事, 但液压元件的生产却已比其他工业产品更高的增长率在发展。

作 者

目 录

第一章 液压油	1
1.1 液压油应当具备的性质	1
1.2 重度	2
1.3 粘度	3
1.4 压缩率和体积弹性系数	5
1.5 比热	6
1.6 饱和蒸汽压和空气分离压	6
1.7 液压油的污染	7
第二章 油的流动特性	10
2.1 节流特性	10
2.2 平行平板间的间隙流动	12
2.3 平行圆板间的间隙流动	14
2.4 堵塞现象	15
2.5 液压卡紧现象	15
2.6 挤压效应	19
2.7 静压支撑	20
2.8 气穴	23
第三章 油泵	30
3.1 种类与性能	30
3.2 效率	32
3.2.1 容积效率	32
3.2.2 扭矩效率	33
3.2.3 总效率	34
3.2.4 油的压缩性对效率的影响	36
3.2.5 用热力学方法测定总效率	37
3.3 噪声	39
3.4 齿轮泵	40
3.4.1 种类与构造	40
3.4.2 排量计算	42

3.4.3 困油现象及采取的措施	45
3.4.4 轴承的受力	46
3.5 叶片泵	46
3.5.1 种类与构造	46
3.5.2 排量计算	47
3.5.3 定子的过渡曲线	49
3.5.4 叶片的平衡	51
3.6 轴向柱塞泵	52
3.6.1 种类与构造	52
3.6.2 排量计算	53
3.6.3 配油盘工作表面的受力分析	56
3.6.4 柱塞、滑履和斜盘	57
3.6.5 困油现象	58
3.6.6 柱塞与柱塞孔之间的间隙	61
3.7 径向柱塞泵	61
3.7.1 种类与构造	61
3.7.2 排量计算	61
第四章 液压执行机构	65
4.1 种类	65
4.2 油缸	65
4.3 液压马达	66
4.3.1 液压马达的效率	68
4.3.2 齿轮马达	72
4.3.3 叶片马达	74
4.3.4 轴向柱塞马达	77
4.3.5 径向柱塞马达	80
4.4 摆动油缸	84
4.5 液压执行机构的力学	86
4.5.1 直线运动系统与旋转运动系统的相互关系	86
4.5.2 液压执行机构的固有频率	87
4.5.3 管路内油柱的等价惯性质量	90
4.5.4 爬行	91
4.5.5 液压系统动态特性的数学分析方法	92
第五章 液压控制阀	94
5.1 液压阀的力学	94
5.1.1 提升阀	94
5.1.2 滑阀	98
5.1.3 瞬态液动力	100
5.2 压力控制阀	101

5.2.1 溢流阀	101
5.2.2 减压阀	105
5.2.3 顺序阀	108
5.2.4 平衡阀	109
5.2.5 卸荷阀	111
5.3 流量控制阀	111
5.3.1 节流阀	111
5.3.2 调速阀	112
5.3.3 减速阀	115
5.4 方向控制阀	115
5.4.1 换向阀	115
5.4.2 控制滑阀	120
5.4.3 单向阀	122
5.5 伺服阀	123
第六章 液压传动装置	128
6.1 概述	128
6.2 基本公式	129
6.3 变量泵与定量马达共同工作	130
6.4 定量泵与变量马达共同工作	131
6.5 变量泵与变量马达共同工作	132
6.6 液压传动装置的特点	133
6.7 动态特性	134
第七章 辅助装置	138
7.1 蓄能器	138
7.1.1 蓄能器的作用	138
7.1.2 构造	138
7.1.3 蓄能器容积的选择方法	139
7.2 滤油器	140
7.3 冷却器	142
7.3.1 液压油的温度上升	142
7.3.2 冷却器的分类	143
7.3.3 冷却器所需要的传热面积	144
7.4 油箱	145
7.5 管、管接头	146
7.5.1 管、软管	146
7.5.2 管接头	147
第八章 液压回路	149

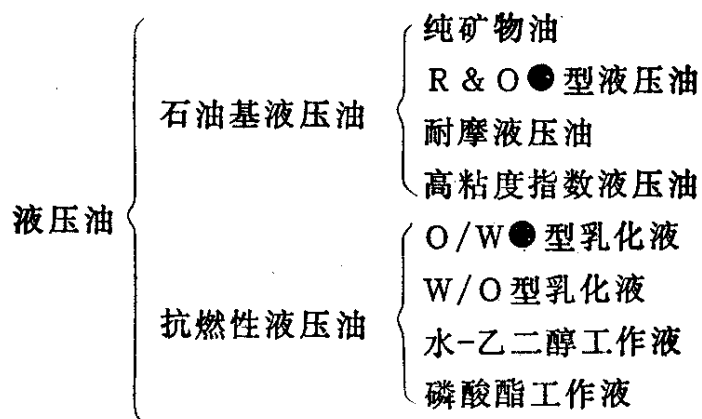
VIII

8.1 液压系统图图形符号	149
8.2 液压基本回路	152
8.3 应用举例	154
练习题答案	159
参考资料	161

第一章 液 压 油

1.1 液压油应当具备的性质

液压装置用的液压油分类如下:



液压油应当具备的性质如下:

(1) 粘度 应具有适当的粘度 (大体为 30~60 厘沲), 并且要求粘度随温度变化很小。

(2) 氧化稳定性 即使长时期使用, 也不易受氧化而变质。

(3) 防锈作用 对于金属能防锈、无腐蚀, 而且对于密封填料及涂料等的影响也要小。

(4) 消泡性 起泡少, 气泡容易消失。

(5) 润滑性 附在金属滑动表面上具有润滑性和耐磨损性。

(6) 抗燃性 在高温环境中使用时要有抗燃性。现有合成型和水成型抗燃性液压油。

利用各种添加剂例如提高粘度指数的添加剂、氧化稳定剂、

● R&O型液压油是一种经常使用的石油基液压油。其中添加有防锈剂和抗氧化剂, R&O是两个字头。

● O/W和W/O指水包油型和油包水型。——译注

防锈剂、消泡剂以及其他提高油性能的添加剂，能使液压油具备以上各种性质。

1.2 重 度

油液的单位体积质量即密度 ρ 与单位体积的重量即重度 γ 有如下关系

$$\gamma = \rho g \quad (1-1)$$

式中 g ——重力加速度；

ρ ——公斤/米³ (公斤力·秒²/米⁴)；

γ ——公斤力/米³。

随着温度的升高，油液膨胀、重度变小。设某温度下的重度为 γ_0 ，当油温升高 $\Delta\theta$ 时，重度为 γ ，则

$$\gamma = \gamma_0 (1 - \alpha \Delta\theta) \quad (1-2)$$

上式中的 α 是油液的热膨胀系数。对于石油基油液， $\alpha = (6.3 \sim 7.8) \times 10^{-4} (1/^\circ\text{C})$ 。当油温升高 50°C 时， γ 减小 3 % 左右。

机械行业一直使用重力单位制。然而，近来在各国都倾向于采用 SI 国际标准单位制。本书使用了重力单位制（即力用公斤力表示）。为便于读者参考对照，在表 1.1 中列出与液压有关的 SI 单位。重力单位制与 SI 单位制的换算关系见表 1.2。表 1.3 表明词冠函意

表1.1 SI 单 位

基本单位	长 度	m	
	质 量	kg	
	时 间	s	
导出单位	力	N (牛顿)	$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
	压 力	Pa (帕斯卡)	$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$
	能量、热量、功	J (焦耳)	$1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$
	功 率	W (瓦)	$1\text{W} = 1\text{J}/\text{s}$

表1.2 换算表

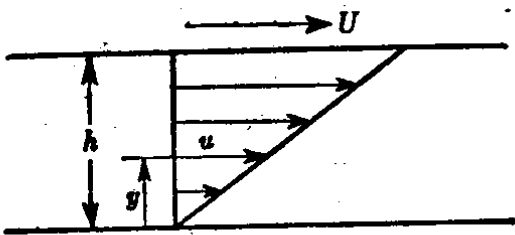
1kgf = 9.80665N
1bar = 10 ⁵ Pa = 1.01972kgf/cm ²
1kgf·m = 9.80665J
1cal = 4.18605J
1kgf·m/s = 9.80665W

表1.3 接头符号

10 ⁶	M(百万)
10 ³	k(千)
10 ⁻²	c(厘)
10 ⁻³	m(毫)
10 ⁻⁶	μ(微)

1.3 粘 度

如图1.1所示，有一流体在距离为 h 的二平行平板间流动。其中一平面静止，另一平面以速度 U 平行移动，则距静止平面为 y 的点的流速 u 呈直线状态分布。
即



$$u = U \frac{y}{h} \tag{1-3}$$

图1.1 相对滑动的平行二平板间的流速分布

设作用在流体单位面积上的摩擦力为 τ ， μ 为粘度系数（粘度, viscosity），则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-4}$$

图 1.1 中的 τ 可用下式表示

$$\tau = \mu \frac{u}{y} = \mu \frac{U}{h} \tag{1-5}$$

μ 的绝对单位是克/厘米·秒，称泊（P）。泊的百分之一称厘泊（cP）。 μ 的重力单位是公斤力·秒/米²。两种单位的换算关系为

$$1 \text{ 公斤力} \cdot \text{秒} / \text{米}^2 = 98 \text{ 泊}$$

粘度系数 μ 除以密度 ρ 称为运动粘度●系数，用 ν 表示。单位是厘米²/秒，称为沱（St）。沱的百分之一是厘沱（cSt）。 ν 与 μ 的关系为

● 原文称 ν 为动粘度。我国习惯称 ν 为运动粘度系数。 μ 则相应地为动力粘度系数或绝对粘度系数。——译注

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$

如图 1.2 所示, 运动粘度 ν 是随温度而变化的。 ν (cSt) 与绝对温度 T ($^{\circ}\text{K}$) 之间有如下关系

$$\ln \ln \bullet (\nu + 0.8) = -m \ln T + k \quad (1-7)$$

式中的 m 和 k 都是由油液决定的常数。

如图 1.3 所示, 环烷基液压油的运动粘度随温度变化非常大,

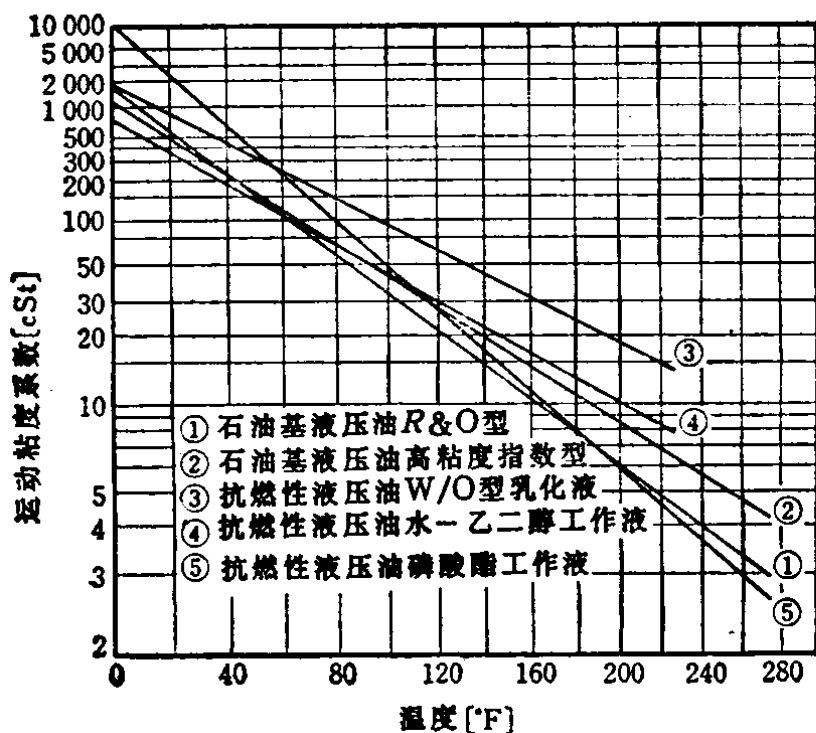


图 1.2 运动粘度随温度改变的情况

而石蜡基液压油的运动粘度随温度变化很小。大多数液压油的运动粘度随温度的变化在这二者之间。当温度是 98.9°C (210°F) 时, 环烷基液压油、石蜡基液压油以及试样油的运动粘度相同。设该三种油在 37.8°C (100°F) 时的运动粘度为 L 、 H 、 U , 则把下式中的 VI 称为粘度指数

$$VI = \frac{L - U}{L - H} \times 100 \quad (1-8)$$

环烷基液压油 $VI = 0$, 石蜡基液压油 $VI = 100$ 。我们希望液压

● 原文为 $\log$ 。按我国习惯自然对数应记为 $\ln$ 。——译注

油的 VI 值大一些。因此，在油液中加入提高粘度指数的添加剂，使 VI 值达到 100 以上的情况也不少见。

设某温度下的液压油粘度为 μ_0 ，当油温升高 $\Delta\theta$ 时，粘度 μ 可以近似地表示为

$$\mu = \mu_0 e^{-\lambda \Delta\theta} \quad (1-9)$$

对于石油基液压油 $\lambda = (1.8 \sim 3.6) \times 10^{-2} (1/^\circ\text{C})$ 。

此外，液压油的粘度又是随压力变化的。设在大气压下的粘度为 μ_0 ，当压力为 p （表压）时粘度 μ 表示为

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p} \quad (1-10)$$

对于石油基液压油， $\alpha = (2 \sim 3) \times 10^{-3} \text{厘米}^2/\text{公斤力}$ 。如图 1.4 所示，当在 100 公斤力/厘米² 以上的高压时，不能忽视压力变化对粘度的影响。

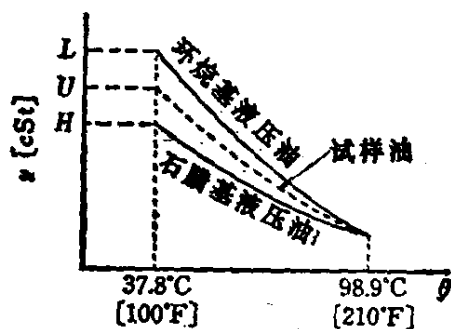


图1.3 粘度指数的定义

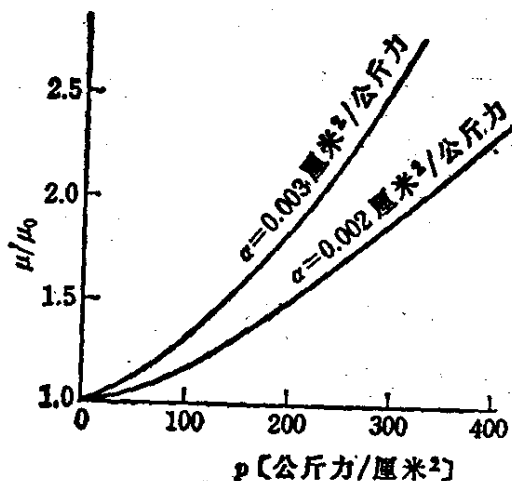


图1.4 粘度随压力的变化

1.4 压缩率和体积弹性系数

如图 1.5 所示，对于压力为 p_0 时体积为 V_0 的液压油，当压力升高 Δp ，液压油的体积减少 ΔV 时，把用下式表示的 β 称作压缩率。

$$\beta = \frac{1}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1-11)$$

对于石油基液压油， $\beta = (6 \sim 7) \times 10^{-6} \text{厘米}^2/\text{公斤力}$ 。当 Δp 为 150 公斤力/厘米² 时，油液的体积减少约 1%。

压缩率 β 的倒数 K 称为体积弹性系数。

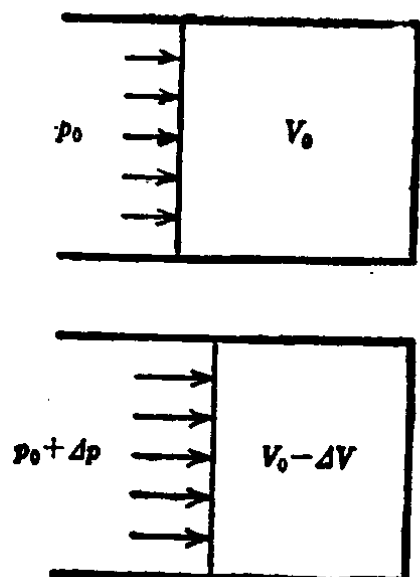


图1.5 压缩率的定义

表1.4 液压油的体积弹性系数(20°C, 大气压)

油的种类	K [公斤力/厘米 ²]
石油基	1.9×10^4
水-乙二醇型	3.15×10^4
W/O型	1.95×10^4
磷酸酯型	2.65×10^4

$$K = \frac{1}{\beta} \quad (1-12)$$

K 值如表 1.4 所示。温度升高, K 值减少, 压力升高, K 值增加。当压力急剧变化(绝热过程)时, 其 K 值比压力缓慢变化(等温过程)时要大。如果油中混入了气泡, 则 K 值变得很小。

1.5 比 热

石油基液压油的定压比热 $C_p = (0.4 \sim 0.5)$ 千卡/公斤力·度。但是, 温度为 θ 时的比热可由下式¹⁾表示

$$C_p = \frac{1}{\sqrt{\gamma}} (0.403 + 0.00081 \theta) \text{ 千卡/公斤力·度} \quad (1-13)$$

式中 γ 是 15°C 时油的重度[克力/厘米³]。例如 $\theta = 50^\circ\text{C}$, $\gamma = 0.88$ 克力/厘米³ 时, $C_p = 0.434$ 千卡/公斤力·度。

1.6 饱和蒸汽压和空气分离压

透平油的饱和蒸汽压数值如表 1.5²⁾ 所示。实际上当压力比饱和蒸汽压高许多时, 往往已经开始从液压油中产生气泡了。这是由于溶解于油中的空气分离后成为气泡的缘故。一般说来, 溶解于油中的空气量与压力成比例(亨利法则)。图 1.6 就是空气溶解量测量结果的一个例子³⁾。在一个大气压下, 石油基液压油的空气溶解量(体积比)为 6~12%, 比水中的空气溶解量(约

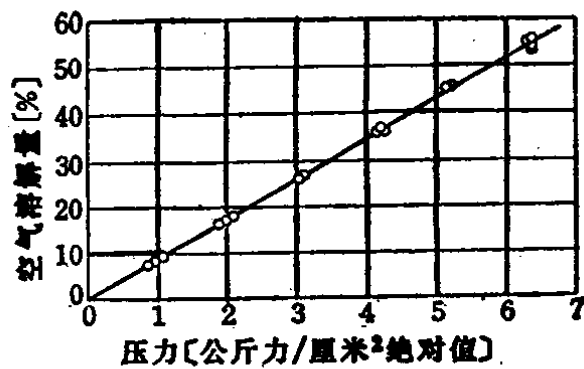


图1.6 压力与空气溶解量

表1.5 透平油的饱和蒸汽压

温度[℃]	20	40	60	80	100	120	140
饱和蒸汽压 [公斤力/ 厘米²绝对]	9×10^{-8}	6×10^{-7}	4×10^{-6}	2×10^{-5}	8×10^{-5}	3×10^{-4}	3×10^{-4}

为2%)要多得多。

液压油的压力如果比大气压低得多时，处于过饱和状态的空气就变成气泡分离出来。图1.7是测量液压油空气分离压的一个例子⁴⁾。

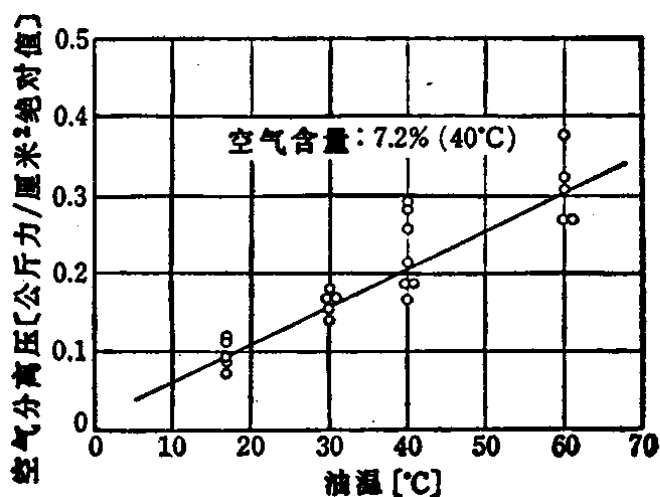


图1.7 液压油的空气分离压

1.7 液压油的污染

液压设备发生的故障大部分是由于液压油的污染造成的。可见，控制液压油的污染是极其重要的。一般来说，机械的滑动部分都有间隙。当污物大小与该间隙大小差不多时，磨损最严重。

液压油的污染程度的标准列于表 1.6。测量方法有两种，其一，数出在一定容积的液压油中含污染颗粒的个数。其二，称出在一定容积的液压油中含污染颗粒的重量⁵⁾。

目前，对于控制液压油的污染已经制定出各种标准。一般说来，用于伺服阀的油液污染标准为NAS 6 ~ 8 级，用于高压、高速液压系统的油液污染标准为NAS 8 ~ 9 级，用于普通液压系统的油液可以是NAS 10~12 级左右。

表1.6 NAS 1638污染标准
(容积为100ml内含污染颗粒个数)

等级 \ 颗粒大小	5 ~ 15 μ	15 ~ 25 μ	25 ~ 50 μ	50 ~ 100 μ	100 μ 以上
00	125	22	4	1	0
0	250	44	8	2	0
1	500	89	16	3	1
2	1000	178	32	6	1
3	2000	356	63	11	2
4	4000	712	126	22	4
5	8000	1425	253	45	8
6	16000	2850	506	90	16
7	32000	5700	1012	180	32
8	64000	11400	2025	360	64
9	128000	22800	4050	720	128
10	256000	45600	8100	1440	256
11	512000	91200	16200	2880	512
12	1024000	182400	32400	5760	1024

参 考 文 献

- 1) E. M. Khaimovich : Hydraulic Control of Machine Tools, Pergamon Press, p.78.
- 2) J. Thoma : Ölhydraulik, Carl Hanser Verlag, p.27.
- 3) A. T. J. Hayward : Aeration in Hydraulic System, Oil Hydraulic Power Transmission and Control, *Inst. of Mech Engrs.*, London (1961), p.216~224.
- 4) 伊吹, 日比, 市川, 横手 : アキシアルピストンポンプの自吸性能 (第2報), 日本機械学会論文集, 42-363 (1976-11), p.3491~3499.
- 5) NAS 1638 または MIL STD 1246 A.

练 习 题

1. 把重度为 0.85 的油的密度用重力单位制表示出来。
2. 粘度系数为 0.5×10^{-6} 公斤力·秒/厘米²，重度为 0.85 的油的运动粘度系数是多少？
3. 面积为 30 厘米²的二平板水平放置，其间隙均为 10 微米。当间隙内油的粘度系数为 0.5×10^{-6} 公斤力·秒/厘米²时，使平板沿水平方向的移动速度为 1 米/秒所需要的力是多少？
4. 有一油缸，其缸筒内径为 2 厘米，柱塞长度为 8 厘米，二者的直径间隙为 15 微米，间隙内油的粘度系数为 0.4×10^{-6} 公斤力·秒/厘米²。当柱塞与缸筒同心时，试计算柱塞以 1 米/秒的速度移动时的摩擦力。
5. 在一个大气压下，体积为 200 升的油，当压力达到 100 公斤力/厘米²时，体积缩小多少？其中油的压缩率为 6×10^{-6} 厘米³/公斤力。