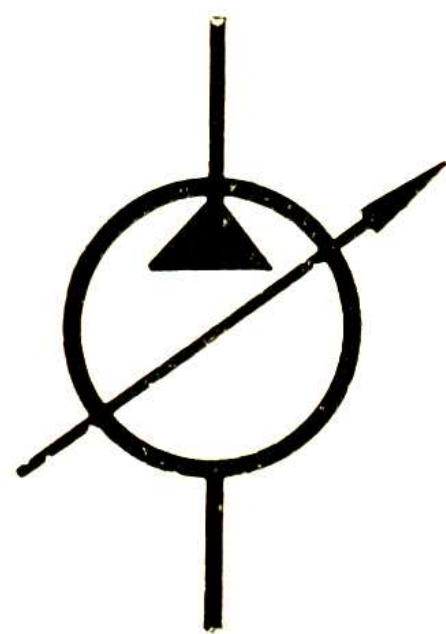




YE YA
CHUANDONG

液压传动

武汉工学院

高等学校交流讲义

液 压 传 动

宋尔涛 主编

流体传动与控制教研室

前 言

为适应教学的需要，我们编写了这本教材（交流讲义），供我院机制、汽车、拖拉机、内燃机、经济企业管理和农机等专业使用，也可作为电视大学机械类专业的教材。

随着科学技术日新月异地发展，液压传动无论作为工业动力，还是作为工业自动控制的手段，都已成为现代化机器制造业、工程机械、轻工机械、国防工业和工业生产过程自动化中不可缺少的重要组成部分。因此，对大多数工程技术人员来说，液压传动就成为一门必修课程。

本教材加强了基本理论部分，力图讲清液压传动中的主要概念，液压元件与回路的基本原理以及液压系统设计的常用方法，编写时尽力做到由浅入深，联系实际。为便于读者学习，有的章后面附有一定数量的习题。

本教材共分十一章：第一章和第二章为液压传动的基础知识，论述了液压流体力学的基本原理与计算；第三章至第六章阐述了各种液压泵、液压马达、液压缸、液压阀和辅助装置等液压元件的结构，原理和使用性能；第七章至第九章论述了液压系统的基本回路，典型液压系统及液压系统设计计算的基本方法和步骤；第十章介绍了液压伺服系统的工作原理，伺服阀的性能及液压伺服系统的设计方法；第十一章介绍了常用的试验方法，并分析了常见的故障。

本教材的编写工作由下列同志负责：第一章、第十章由宋尔涛编写；第二章由李彦璐编写；第三章由刘伯伦编写；第五章由肖植雄编写；第四章、第六章由容一鸣编写；第八章由刘伯伦、容一鸣编写；第七章、第九章由谭迪华编写；第十一章由赵树章编写。全书由宋尔涛同志任主编，由李彦璐、刘伯伦、肖植雄同志担任审稿，由张莉同志负责绘图。

在编写过程中，武汉市电视大学教学研究室刘培忠同志对本书的编写大纲提出了宝贵意见，谨在此表示衷心感谢。

限于编者水平，加之时间仓促，教材中一定有不少缺点和错误，我们恳切地希望兄弟院校师生和读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

第一章 绪 论 1	第六章 辅助装置 154
第二章 液压流体力学基础 5	§ 6—1 滤油器..... 154
§ 2—1 液压油..... 5	§ 6—2 蓄能器..... 159
§ 2—2 静止液体力学..... 14	§ 6—3 热交换器..... 163
§ 2—3 流动液体力学..... 22	§ 6—4 油箱..... 165
§ 2—4 管路中的液流和压力损失..... 31	§ 6—5 密封装置..... 167
§ 2—5 小孔液流与间隙液流..... 44	§ 6—6 管系元件..... 169
§ 2—6 液压冲击与气蚀现象..... 55	第七章 液压基本回路 172
习 题..... 62	§ 7—1 速度控制回路..... 172
第三章 液压泵和液压马达 65	§ 7—2 压力控制回路..... 196
§ 3—1 概述..... 65	§ 7—3 多缸工作控制回路..... 201
§ 3—2 齿轮泵和齿轮油马达..... 69	第八章 液压传动系统实例 209
§ 3—3 叶片泵和叶片油马达..... 73	§ 8—1 组合机床的液压系统..... 209
§ 3—4 柱塞泵和柱塞油马达..... 85	§ 8—2 工程机械液压系统..... 211
§ 3—5 其它形式的液压泵..... 90	§ 8—3 拖拉机液压悬挂系统..... 215
§ 3—6 液压泵的选用..... 91	§ 8—4 工业机械手液压系统..... 216
习 题..... 92	§ 8—5 磨床液压系统..... 222
第四章 液压缸 93	第九章 液压系统的设计与计算 232
§ 4—1 液压缸的分类与结构特点..... 93	§ 9—1 液压系统设计步骤..... 232
§ 4—2 液压缸的设计计算..... 103	§ 9—2 液压系统的设计要求..... 232
§ 4—3 摆动液压缸..... 112	§ 9—3 液压系统性能及参数 的初步确定..... 233
习 题..... 114	§ 9—4 液压系统图的拟定..... 238
第五章 液压阀 115	§ 9—5 液压元件的选择和设计..... 240
§ 5—1 方向控制阀..... 115	§ 9—6 液压系统性能的估计..... 242
§ 5—2 压力控制阀..... 125	§ 9—7 液压装置的设计..... 247
§ 5—3 流量控制阀..... 141	第十章 液压伺服系统 250
§ 5—4 电液比例控制阀..... 149	

§ 10—1	液压伺服系统的工作原 理及其分类.....	250
§ 10—2	液压伺服阀.....	253
§ 10—3	电液伺服阀.....	263
§ 10—4	液压伺服系统.....	270
§ 10—5	液压伺服系统设计 计算步骤.....	280
第十一章	液压设备的试验和维修.....	281

§ 11—1	液压元件的性能 试验.....	281
§ 11—2	液压系统的试验 及调整.....	294
§ 11—3	液压设备的维修.....	298
附 录		
国际单位制(SI)及其换算		

第一章 绪 论

液压传动和其它传动不同，它是一种以液体为介质来实现能量传递或进行控制的传动形式。

根据能量传递形式的特点，液压传动可分为两大类：液力传动（或称动液传动）和容积式液压传动（或称静液传动）。

液力传动是将机械能转换为液体的动能，并依靠液体的动能来实现能量的传递，如液力偶合器、液力变矩器等。

容积式液压传动是将机械能转换为液体的压力能，并依靠封闭容积中液体的压力能来实现能量的传递。

本书所讨论的就是容积式液压传动，简称“液压传动”，它的理论基础是液压流体力学。

一、液压传动系统的工作原理和组成

液压千斤顶是一种简单的液压传动装置，如图1—1所示。它由小油缸1、大油缸2、油箱6以及它们之间的连接通道构成一个具有封闭的油路的装置。在开关5关闭的情况下，提起手柄时，小油缸1的柱塞上移，使其工作容积增大，形成真空，油箱6里的油液在大气压力的作用下，通过滤油器7和单向阀3进入小油缸。压下手柄时，小油缸的柱塞下移，挤压其下腔的油液，由于单向阀3自动关闭，这部分压力油便顶开单向阀4进入大油缸2，推动大柱塞，从而顶起重物。再提起手柄时，单向阀4阻止大油缸内的压力油倒流入小油缸保证了重物不致自动落下。反复提、压手柄，小油缸内不断交替地进行着上述的吸油和排油过程，这样压力油便源源不断地进入大油缸，重物也就会渐渐地被顶起。当需要放下重物时，则可打开开关5，这时大油缸的柱塞便在重物作用下下移，将其内的油液挤回油箱6。

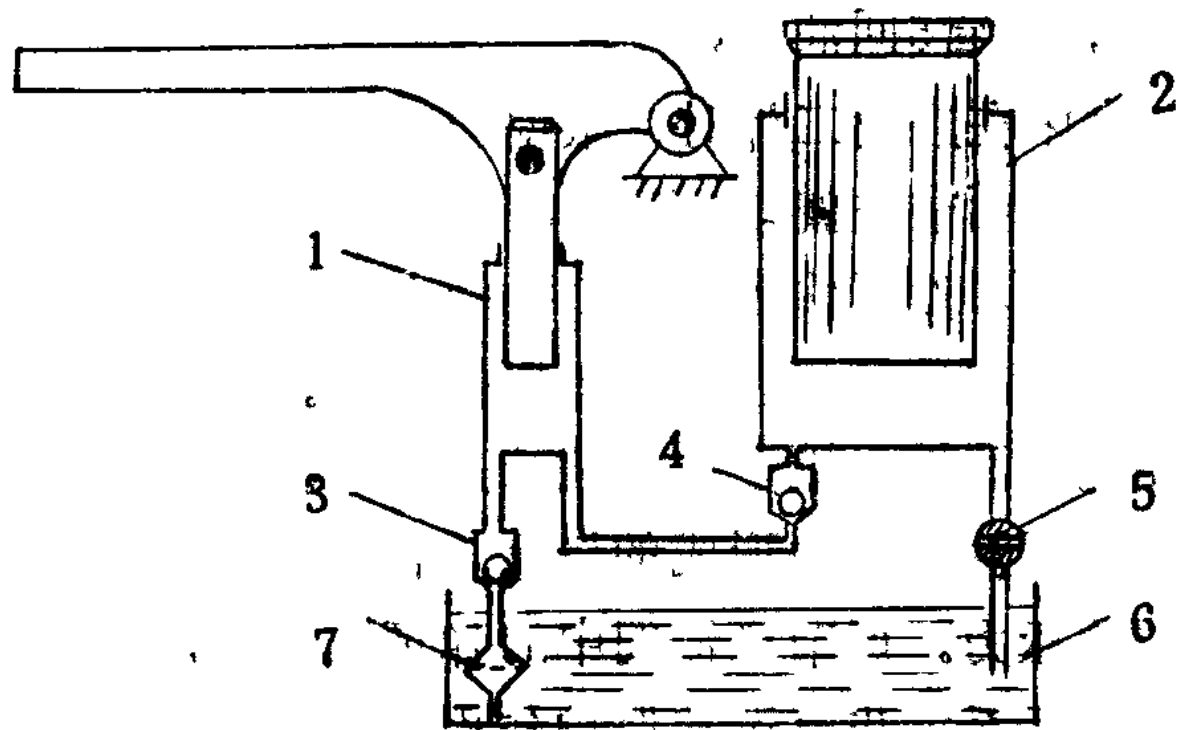


图1—1 液压千斤顶工作原理图

由液压千斤顶的传动原理可以看出，小油缸把柱塞作用的机械能转换成液体的压力能，大油缸则把这个液体的压力能转换成顶起重物的机械能。在液压传动中，凡是把机械能转换成液压能的装置通称为液压泵，而把液压能转换成机械能的装置称为液动机（或液压执行机构），它们以液压油为工作介质，在液压泵和液动机之间配以各种用途的阀件和油箱、油管

等辅助装置，组成一个液压系统。

机床的液压传动系统比液压千斤顶要复杂得多，为使机床能满足一定的使用要求，需由许多不同的液压元件构成各种油路。下面再以简化了的磨床工作台液压系统为例，来说明液压传动的工作原理及液压传动系统的组成，见图1—2(a)。

电动机带动油泵3从油箱1经滤油器2吸油，油泵打出的压力油经节流阀4、换向阀6、油管11进入油缸8的左腔。由于油缸8是固定在床身上不动的，因此在压力油的推动下，活塞带动工作台10向右运动。与此同时，油缸右腔的油被排出，经油管7，换向阀6和油管5流回油箱。不难看出，从齿轮泵的排油口到液压油缸左腔构成了一个封闭工作容积，且此容积是变化的。

当工作台的运动换向时，手柄12将换向阀6的阀芯移到左端，如图1—2(b)。

此时，齿轮泵输出的压力油经过节流阀4，再经过换向阀6，油管7进入油缸8的右腔，工作台向左运动，油缸左腔的油液经油管11，换向阀6，油管5回油箱。

磨床在磨削工件时，根据加工要求不同，工作台运动的速度必须调整。调节工作台的运动速度是由节流阀4和溢流阀13配合实现的。改变节流阀开口的大小，就能调节通过节流阀的油液流量，油泵输出的多余油液经溢流阀排回油箱，以此，控制工作台的运动速度。

溢流阀13是起溢流和稳压作用的。因为齿轮泵的输油量为定值，而节流阀只允许部分压力油进入油缸，则多余的油液通过溢流阀返回油箱，同时，必须克服弹簧阻力才能顶开钢球，根据油液压力形成的概念，有阻力才有压力，因此，溢流阀可使齿轮泵的输出油液保持一定的压力。调节溢流阀中的弹簧压紧力，可以控制油泵输出油液的压力，不言而喻，溢流阀对液压系统也有过载保护作用。

通过上面的介绍，液压传动的基本原理可概述如下：以有压力的油液作为传递动力的工作介质。电动机带动油泵输出压力油，是将电动机供给的机械能转换成油液的压力能。压力油经过管道及一些控制调节装置等进入油缸(形成封闭工作容积)，推动工作台运动，又将油液的压力能转换成机械能。工作台运动时所能克服的阻力大小与油液的压力和活塞的有效面积有关。工作台速度决定于通过节流阀流入密封油缸中油液容积的多少。

应当指出，图1—2所示的液压原理图，其中各元件的图形基本上表示了它的结构原理，称为结构式原理图。这种原理图直观性强，容易理解。但绘图比较麻烦，特别是当液压元件比较多时，更是如此。为了简化液压原理图的绘制，另有一种职能符号式液压原理图。各液压元件都用符号表示，这些符号只表示元件的职能，连接系统的通路，并不表示元件的具体

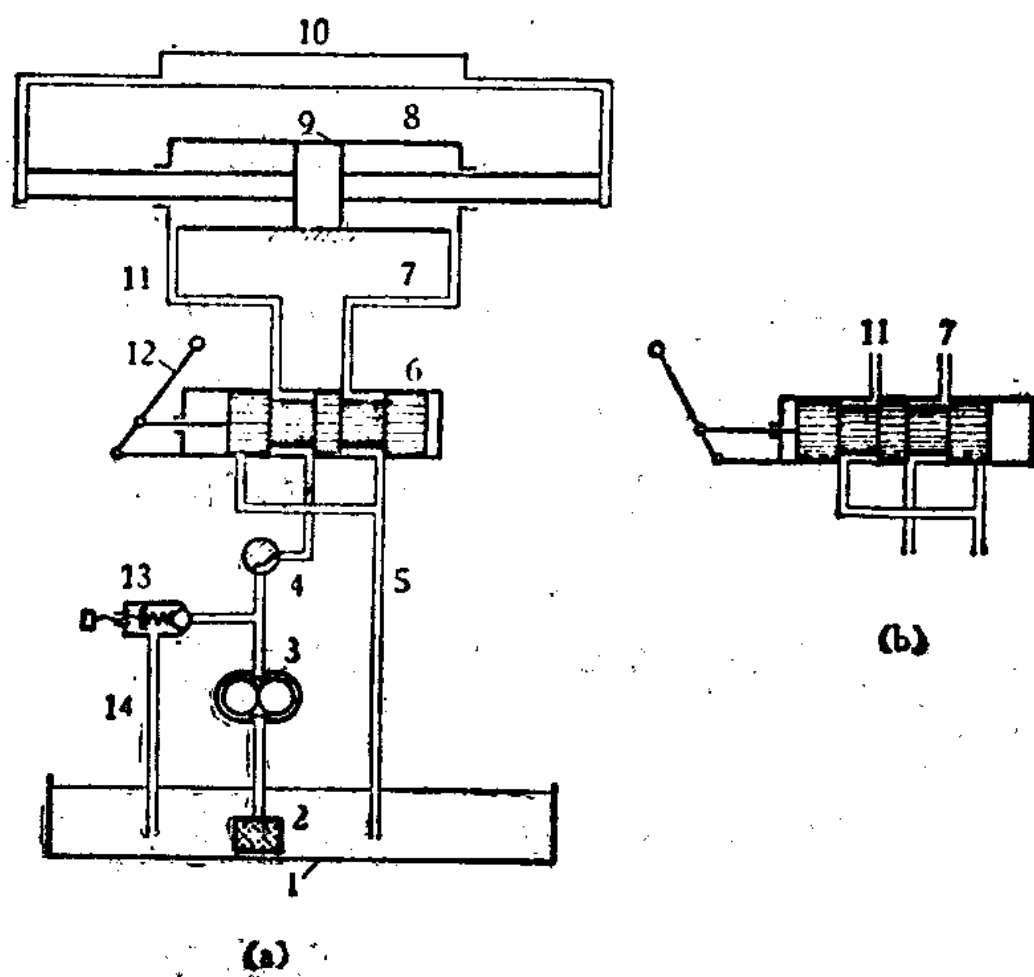


图1—2简单的磨床工作台液压系统图

结构。我国制定的液压系统图图形符号 (GB 786—65) 就是属于职能符号。当无法用职能符号表示时, 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简图表示。

图1—2 所示的液压原理图如用职能符号表示如图1—3所示。图中元件编号和图 1—2 中所示一致, 以便对照。

从上面的实例可以看出, 液压传动系统由以下四个主要部分组成:

1. 油泵供给液压系统压力油, 将电动机输出的机械能转换为油液的压力能, 为能源装置。

2. 液动机 (或称执行机构) 是将油液的压力能转换为机械能的装置。实现直线运动的执行机构叫做油缸; 实现旋转运动的执行机构叫做液压马达。

3. 控制阀是控制调节装置。有压力控制阀、流量控制阀和方向控制阀。

4. 辅助装置包括油箱、滤油器、蓄能器、热交换器、管件与密封装置。

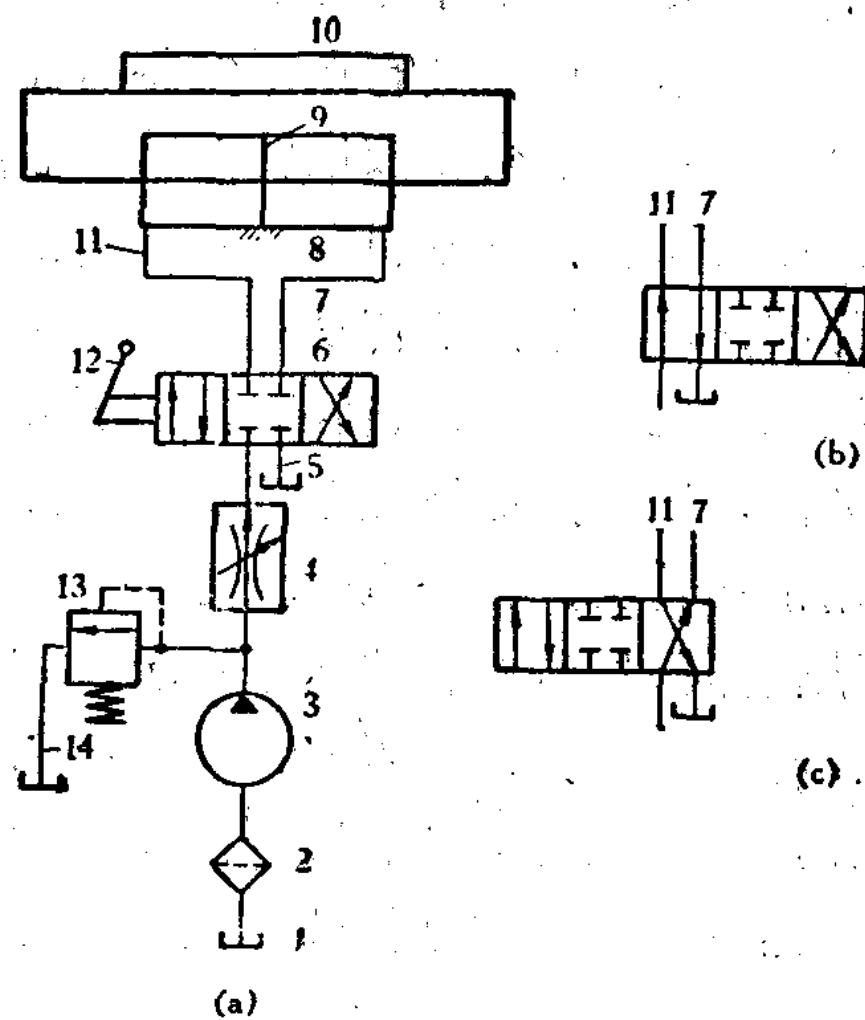


图1—3 用职能符号表示的液压系统原理图

二、液压传动的优缺点

液压传动与机械传动, 电力传动相比较, 有下列优点:

1. 在输出同等功率的条件下, 液压传动装置体积小、重量轻、结构紧凑、承载能力大。
2. 工作平稳, 由于油液本身有吸振能力, 换向时冲击小, 能实现频繁的换向。液压传动的换向频率, 对直线往复运动可达400~1000次/分; 对回转运动可达500转/分。
3. 较易实现无级调速, 调速比大。一般可达100:1, 甚至达到2000:1。
4. 易于实现自动化, 特别是采用电—液联合传动时能实现较复杂的自动工作循环。
5. 具有自润滑能力, 磨损小, 寿命长, 易于实现过载保护。
6. 液压元件易于实现系列化、标准化, 便于大批生产。

液压传动的缺点是:

1. 由于液压系统有内泄漏和外泄漏, 而且液体有压缩性, 管壁有弹性变形, 所以液压传动不宜用在传动比要求严格的情况下, 例如螺纹加工机床中螺纹内联系运动和齿轮加工机床中范成运动等。

2. 油液在管路中流动要有压力损失, 当管路长和流速大时, 压力损失也增大, 因此不适于远距离传动。

3. 油温变化会影响液压系统运动速度的稳定性。在低温和高温条件下, 采用液压传动有一定困难。

4. 液压元件制造精度要求较高。

5. 发生故障不易检查和排除。

三、液压传动的发展和应用

从世界上第一台水压机算起到现在已经有180余年的历史了，然而，广泛应用于工业生产中，只是近五十年左右的事。

由于液压传动具有很多独特的优点，在工业部门中获得了广泛的应用。如在农业机械上应用液压悬挂系统和液压转向助力器；在大中型汽车上车轮采用静液压驱动；在工程机械上，如推土机、挖掘机等，也逐渐液压化；在起重机械上，载荷的起升和回转，臂架的变幅和伸缩，均采用液压传动；在矿山机械中，液压传动广泛用于钻探机、凿岩机、掘进机、竖井钻机和运输机械，自移式液压支架的应用已使煤炭工业发生了第一次技术革命；在铸锻机械方面，压铸机及控制高炉中炉顶加料、炉前泥炮以及旋压成形、剪板机和油压机广泛采用液压传动；在冶金工业方面，例如在电炉上用随动阀自动控制电极的送进，在轧钢机用电液伺服阀控制轧辊的压下系统，钢带跑偏的自动控制等。在轻工业方面，用于塑料注射机、橡胶压型机、造纸机、印刷机和纺织机上。此外，如飞机上起落架的收放，舵面的助力操作，船舶上的操舵装置，起重装置，螺旋桨变螺距系统，军舰上炮塔的俯仰与回转装置以及海洋开发所用的钻探船和铺管船等均广泛采用液压传动，而液压传动用于各类机床上则更为普遍。

由于液压技术在工业部门中的应用越来越广泛，因此对液压元件的性能提出更高的要求，总的发展趋势为高压、高速、微型化、集成化。

第二章 液压流体力学基础

§ 2—1 液压油

液压油是液压传动的工作介质。在液压传动装置中通常都采用矿物油作为工作介质，它不但能传递能量，而且对液压装置的机构与另件起润滑作用。在液压系统中液压油的压力、流速和温度在很大范围内变化着，油的质量好坏，直接影响液压系统的工作性能和液压元件的寿命。因而对工作液体性质的研究，特别是其力学性质的研究，将是我们研究液压传动技术的基础。

一、液压油的物理性质

(一) 单位制

对任何一个单位制都包含一些独立的基本单位，而其他量的单位可以由基本单位组合而成。例如选定了长度和时间单位后，速度和加速度的量度就可以用长度和时间组合起来的单位来计量。组合后的单位称为导出单位，基本单位和导出单位的总和称为单位制。

目前在世界上使用的单位制，主要有公制（米制）单位和英制（吋制）单位。在公制单位和英制单位中又各分有绝对制和工程制，绝对制多用于物理学中，而一般工程中则常使用工程制。

绝对制和工程制的区别在于质量和力（重量）这两个单位中选取那一个作为基本单位，在绝对制中以质量、长度和时间作为基本单位，而在工程制中则以力、长度和时间作为基本单位。根据牛顿第二定律 $F=ma$ ，在质量 m 及力 F 中只要选取一个作为基本单位，另一个的单位也就可以确定了。在公制绝对单位制中由于选取的基本单位中所取的“单位”不同，又有CGS制（厘米·克·秒制）和MKS制（米·千克·秒制）之分。如表2—1所示。

我国于1959年国务院发布了《关于统一计量制度的命令》确定使用公制单位。

为了便于世界各国间科学技术交流和经济贸易，1956年国际度量衡局通过了一个国际单位制 (*Système International d'Unités*)，规定用SI为其国际单位制符号，1960年第11届国际度量衡会议批准了这个单位制，从1976年以来世界各主要国家都相继决定采用国际单位

表2—1 不同单位制的基本单位

物理量名称	基 本 单 位			
	CGS制	MKS制	工 程 制	SI制
长 度	厘米(Cm)	米 (m)	米 (m)	米(m)
质 量	克 (g)	千克(kg)	—	千克(kg)
力	—	—	公斤力(kgf)	—
时 间	秒 (S)	秒 (S)	秒(S)	秒 (S)

制。我国于1977年颁发了《计量管理条例(试行)》，明确规定“我国的基本计量制是公制，逐步采用国际单位制”。目前在许多科技书中公制单位和国际单位都有所采用，要求我们必须了解这两种单位制，并能掌握它们之间的换算方法。

在工程单位制中，力的单位为公斤力(kgf)。1公斤力定义为：处于45°纬度海平面上(重力加速度 $g=9.81$ 米/秒²)真空中1公斤质量的物体所受的重力。在国际单位制(SI)中，力是导出单位，选取使1公斤质量的物体能获得1米/秒²加速度的力，作为它的单位量度称为牛顿，用符号N表示。

即 $1\text{牛顿}=1\text{公斤}\cdot\text{米}/\text{秒}^2=10^5\text{达因}$

因此 $1\text{公斤力}=9.81\text{公斤}\cdot\text{米}/\text{秒}^2=9.81\text{牛顿}$

在国际单位制中，压力用“牛顿/米²”(N/m²)为单位，称为“帕斯卡”简称“帕”(pa)。因为这个单位量值太小，在某些工程技术上使用不便，欧洲油空压协会(CETOP)建议采用“巴”(bar)为压力单位。

$1\text{巴}=10^5\text{帕}=10^6\text{达因}/\text{厘米}^2$

$1\text{巴}=1.02\text{公斤力}/\text{厘米}^2$

$1\text{公斤力}/\text{厘米}^2=0.981\text{巴}=0.981\times 10^5\text{帕}$

(二) 液体的重量和密度

1、**重度**：对于均质液体来说，单位体积的重量称为重度。

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (\text{牛顿}/\text{米}^3) \quad (2-1)$$

式中 G —液体的重量(牛顿)

V —液体的体积(米³)

矿物油的重度 $\gamma=8400\sim 9500$ 牛顿/米³

2、**密度**：对于均质液体来说，单位体积的质量称为密度。

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{千克}/\text{米}^3) \quad (2-2)$$

式中 m —液体的质量(千克)

V —液体的体积(米³)

矿物油的密度 $\rho=850\sim 960$ 千克/米³

由于重量(G)等于质量(m)乘重力加速度(g)

即

$$G = mg$$

所以

$$\gamma = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (2-3)$$

上式表明了重度与密度的关系。

因为液压油的体积随压力和温度的变化而变化，所以液压油的密度和重度也随压力和温度而变化，在一般情况下它们随压力增加而增大，随温度的升高而减小。在实用中，由于温度和压力引起的重度和密度变化甚微，可近似地认为液压油的密度和重度是不变的。

(三) 液体的粘性

1、粘度的定义及其单位

液体在流动时，由于液体分子间的内聚力所呈现出来的内摩擦力，阻碍液体分子间相对运动，这种特性叫粘性。粘性的大小用粘度来表示。

例如两平行平板间液体的流动，如图2—1所示。设上平板以速度 v 相对于下平板运动，由于液体与固体壁面的附着力作用，紧贴着上平板的油液，其速度为 v ，紧贴着下平板的油液，其速度为零。而中间油液的流动速度，则由于液体分子间的内聚力作用，使各液体层的流动速度各不相同，但按一定规律分布。当平板间的距离较小时，各液体层的速度按线性分布，距离较大时，则按曲线规律分布。运动较快的液体层可以带动运动较慢的液体层，反之运动较慢的液体层却又阻滞运动较快的液体层，任意两层间都将产生内摩擦力。实验测定，液层间的内摩擦力 F_τ 与液层的接触面积 A 及液层的相对运动的速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 成正比。即

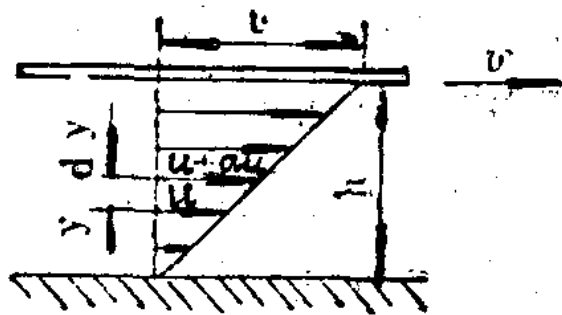


图2—1平行平板间液体的流动

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

以 $\tau = \frac{F_\tau}{A}$ 表示切应力，则有

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

上式称为牛顿内摩擦定律。速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 即液流在垂直于速度方向上的速度变化率，它充分表征液流层间速度差异的程度。 μ 是比例系数，称为动力粘度，当速度梯度变化时， μ 为常数的液体，称为牛顿液体；而 μ 为变数的液体，称为非牛顿液体。除高粘度或含有特种添加剂的油液外，一般液压油均可视为牛顿液体。

动力粘度 μ 的物理意义，是面积各为1厘米²和相距1厘米的两层液体，当其中一层液体以1厘米/秒的速度与另一层液体作相对运动时所产生的摩擦力。

动力粘度的公制单位为达因·秒/厘米²又称“泊”(P)。百分之一“泊”，称为厘泊(CP)，在国际单位制中采用帕·秒(Pa·S)。

$$1 \text{ 厘泊} = 10^{-2} \text{ 泊} = 10^{-3} \text{ 帕} \cdot \text{秒}。$$

在计算中经常采用运动粘度，它是液体的动力粘度与它的密度之比值。

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \text{ (米}^2\text{/秒)} \quad (2-6)$$

式中 μ —液体的动力粘度(帕·秒)

ρ —液体的密度(千克/米³)

运动粘度的公制单位为(厘米²/秒)称为沱(st)，百分之一“沱”称为“厘沱”(cst)，在国际单位制中采用米²/秒。

$$1 \text{ 厘沱} = 10^{-2} \text{ 沱} = 10^{-6} \text{ 米}^2\text{/秒}$$

运动粘度不是一个粘度的量，只是因为是在液压流体力学的理论分析和计算中，常会遇到 $\frac{\mu}{\rho}$ 比值，因而采用运动粘度 ν 来代替它，它之所以称为运动粘度，是因为在它的单位中

只有长度和时间的量纲，但习惯上它却被用来标志液体粘度。例如，机械油的牌号就是这种油在50℃(323°K)时运动粘度 ν 的平均值，20号机械油就是指这种油在50℃时运动粘度平均为20厘沱。

液体的动力粘度和运动粘度又称为绝对粘度，实际上难以直接测定，因此工程上常采用一种可以用仪器直接测量的相对粘度，又称为条件粘度。它是采用特定的粘度计，在规定条件下测出来的液体粘度。各国采用的相对粘度单位是不同的，美国采用赛氏粘度(°SSU)，英国采用雷氏粘度(°R)，我国和德国、苏联都采用恩氏粘度(°E)。

恩氏粘度是用恩氏粘度计测定的；将200厘米³的被测液体，装入一底部有 $\phi 2.8$ 毫米小孔的恩氏粘度计容器中，在规定的温度 t ℃下（一般以20℃，50℃和100℃为标准温度），测定其流过小孔所需的时间 t_1 ，然后测出同体积的蒸馏水在20℃时流过同一小孔所需的时间 t_2 ，则 t_1 和 t_2 的比值便是该液体在 t ℃下的恩氏粘度。

$$^{\circ}E_{t^{\circ}C} = \frac{t_1}{t_2}$$

利用下列的经验公式，可将恩氏粘度换算成运动粘度。

$$\nu = (7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{^{\circ}E}) \times 10^{-6} (\text{米}^2/\text{秒}) \quad (2-7)$$

2、压力对液压油粘度的影响

当油液所受的压力加大时，其分子间的距离就缩小，液体的粘度随着增大，但是当压力较低时，所增之量甚微，实用时可以忽略不计。若压力的变化值大于200大气压，则粘度的变化不容忽视，一般可用下列近似式表示。

$$\mu_p = \mu_0 e^{\alpha p} \quad (2-8)$$

式中 μ_p —压力为 p 时的粘度。

μ_0 —压力为1大气压时粘度。

α —粘性压力系数。一般液压油为 $(0.002 \sim 0.004) \times 10^{-5}$ 牛顿/米²

3、温度对液压油粘度的影响

液体的粘性随温度的增高显著降低，粘度随温度变化的特性，直接影响着液压系统的性能和泄漏量、因此必须要求液压油的粘度，随温度的变化越小越好，已成为选用液压油的重要指标之一。

（温度对油液粘度的影响的表达式很多，但它们都有局限性。在一般液压系统中，可使用下列经验公式

$$\mu_t = \mu_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad (2-9)$$

式中 μ_t —温度为 t ℃时的动力粘度(帕·秒)

μ_0 —温度为 t_0 ℃时的动力粘度(帕·秒)

λ —油液的粘温系数 $\frac{1}{^{\circ}C}$ 对于矿物油系的液压油来说 $\lambda = (1.8 \sim 3.6) \times 10^{-2} \frac{1}{^{\circ}C}$

根据公式(2-8)和(2-9)，温度和压力对粘度的影响可写成下式：

$$\mu = \mu_0 e^{\alpha p - \lambda(t-t_0)} \quad (2-10)$$

式中 μ — 压力为 p ，温度为 t 时的粘度；

μ_0 — 压力为 1 大气压，温度为 t_0 时的粘度。

实用上，用来表示液体粘性随温度变化特性的最普通的方法，就是利用粘度—温度曲线图。部分国产油的粘温图见图2—2。

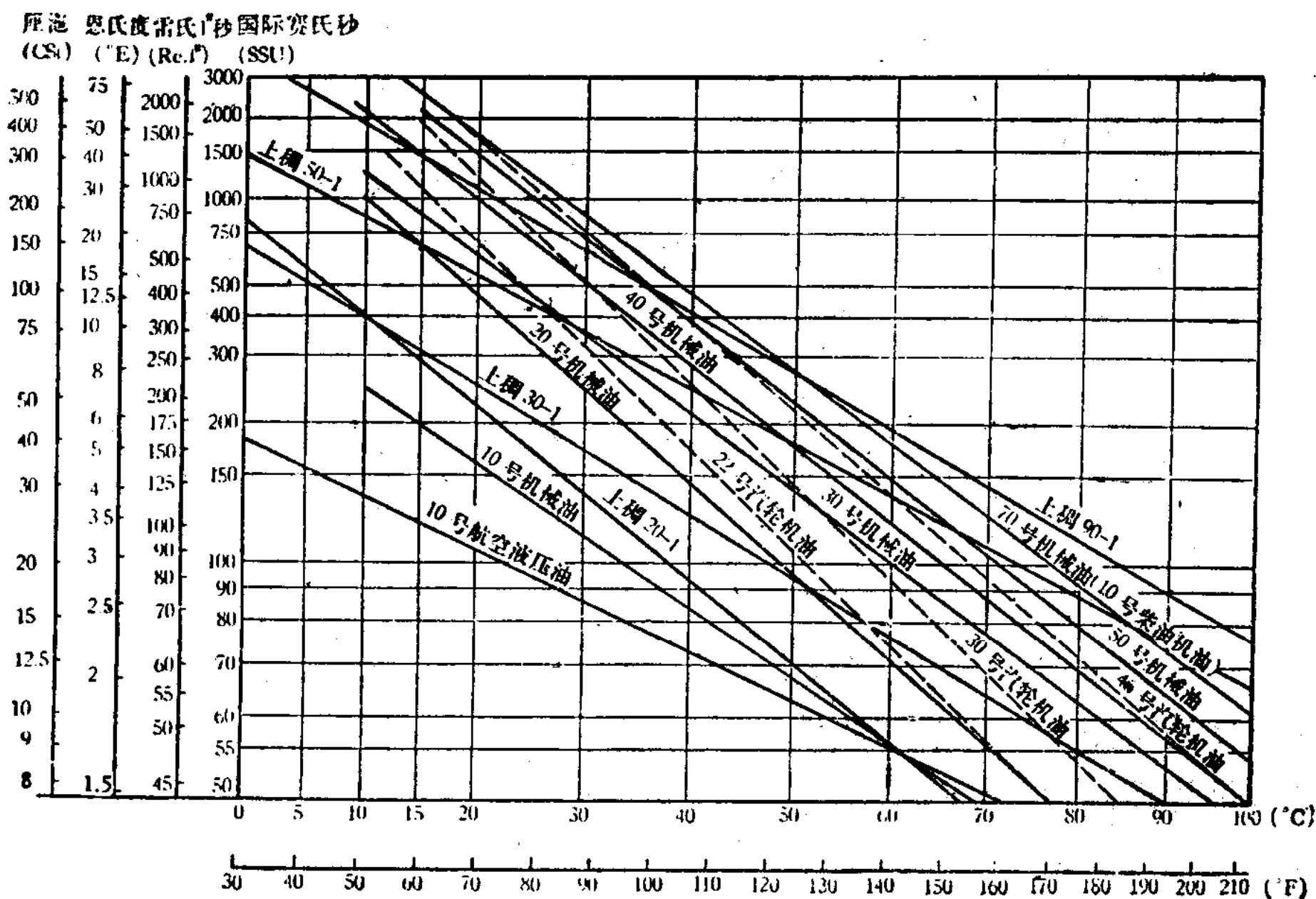


图 2—2 国产油的粘温图

油的粘温性能在国外常用粘度指数 ($V.I$) 表示。它表示被试油液的粘度随温度变化的程度同标准油液粘度变化程度比较的相对值，如图2—3所示。如果被试油液（图中虚线所示的）在 $210^{\circ}F$ 和 $100^{\circ}F$ 时粘度已知，取两种标准油液（图中实线所示的）在 $100^{\circ}F$ 时，一种油的粘度指数为100，另一种油的粘度指数为零，它们在 $210^{\circ}F$ 时的粘度与被试油液的粘度相同。当这种被试油液的粘度指数 ≤ 100 时便可用下式求出：

$$V.I. = \frac{L-U}{L-H} \times 100 \quad (2-11)$$

式中 U — 被试油液在 $100^{\circ}F$ 时的运动粘度；

L — $V.I. = 0$ 的标准油液在 $100^{\circ}F$ 时的粘度，而这种在 $210^{\circ}F$ 时的粘度与被试油液的粘度相同；

H — $V.I. = 100$ 的标准油液在 $100^{\circ}F$ 时的运动粘度，而这种油在 $210^{\circ}F$ 时的粘度与被试油液的粘度相同。

L 和 H 的数值随被试油液在 $210^{\circ}F$ 时粘度的不同而改变，可在一般液压手册中查得。

粘度指数高，表示粘温曲线平缓，即粘温性

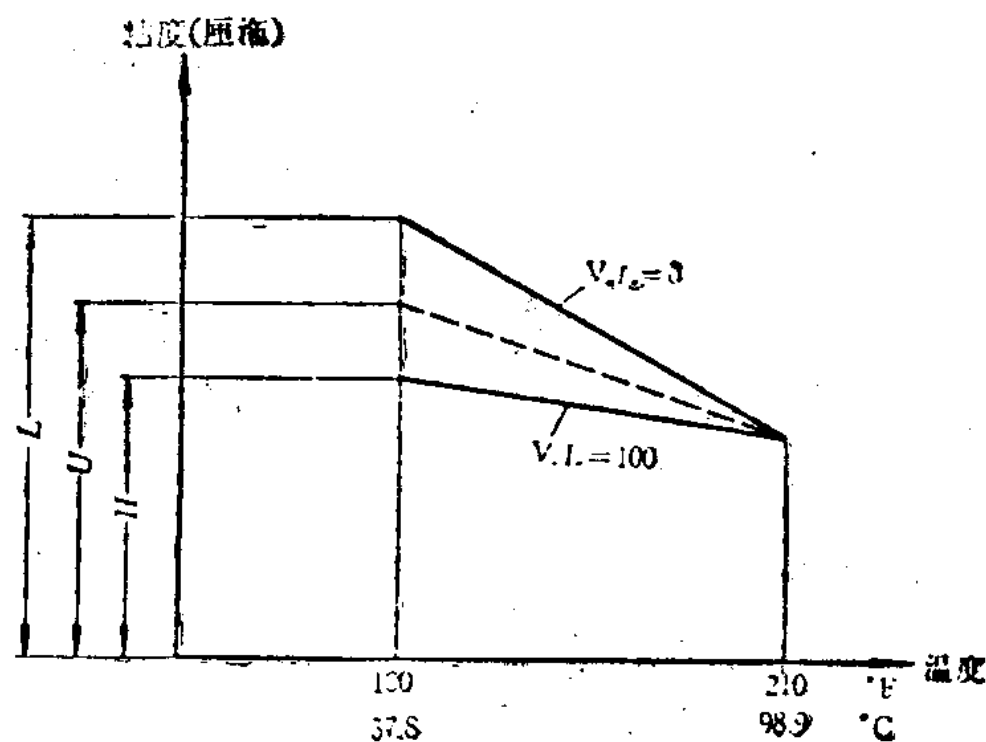


图 2—3 粘度指数计算简图

能好，也就是这种油的粘度随温度的变化较小。目前精制油液及添加有添加剂的油液，粘度指数可大于100。液压用油的粘度指数值一般要求在90以上。

4、调合油粘度的计算

当两种不同粘度的油液混合时，混合出来的调合油的粘度，可按下列经验公式进行计算

$$^{\circ}E = \frac{a^{\circ}E_1 + b^{\circ}E_2 - c(^{\circ}E_1 - ^{\circ}E_2)}{100} \quad (2-12)$$

式中 $^{\circ}E$ —调合油的恩氏粘度

$^{\circ}E_1$ 、 $^{\circ}E_2$ —第一种、第二种油的恩氏粘度 ($^{\circ}E_1 > ^{\circ}E_2$)。

a 、 b —第一种、第二种油的体积百分数 ($a+b=100$)。

c —实验系数。见表2—2

表2—2 调合油的系数 C 的数值

$a\%$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$b\%$	90	80	70	60	50	40	30	20	10
c	6.7	13.1	17.9	22.1	25.5	27.9	28.2	25	17

(四) 液体的可压缩性和热膨胀性

1、液体的可压缩性

液体具有可压缩性。也就是说液体受压后，体积会缩小。压缩性的大小用体积压缩系数 β 表示，其定义为，每增加一个单位压力的变化时，液体体积的相对变化量。即

$$\beta = -\frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta p} = -\frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (\text{米}^2/\text{牛顿}) \quad (2-13)$$

式中 ΔV —液体被压缩后体积的变化值(米³)。

V —液体压缩前的体积(米³)。

Δp —液体压力的变化值(牛顿/米²)。

压力增大时，液体体积减小，反之则增大，为了使 β 是一正值，故在上式前面加上了一个负号。

压缩系数 β 的倒数，称为体积弹性模量 K ，如下式所示。

$$K = \frac{1}{\beta} = -V \frac{\Delta p}{\Delta V} \quad (\text{牛顿/米}^2) \quad (2-14)$$

液压油的体积弹性模量，也常被用来衡量液体的可压缩性。纯液体的压缩系数很小，即体积弹性模量很大，它与压力和温度等因素有关。温度升高， K 值减小，在液压油正常工作的温度范围内， K 值会有5~25%的变化。压力加大时， K 值加大，但其变化不呈线性关系，当 $p \geq 30$ 巴时， K 值基本上不再加大，当 $p < 30$ 巴时，其 K 值可用 $p \geq 30$ 巴时的 K 值乘上体积弹性模量折算系数 λ_k 而得到。

$$K_{p < p_k} = \lambda_k K_{p \geq p_k} \quad (2-15)$$

式中 $K_{p < p_k}$ 、 $K_{p \geq p_k}$ —液压油在压力 $p < 30$ 巴, $p \geq 30$ 巴时 K 值。

λ_k —液压油体积弹性模量折算系数, 典型的 λ_k — p 关系曲线如图 2—4 所示, 它是 20 号矿物油在 293°K (20°C) 时的实验结果。

通常总把液体看成是不可压缩的, 但在研究液压系统的动特性时, 液体的可压缩性成为影响系统稳定的重要因素。一般对于不混有空气的矿物系液压油 $K = (1.4 - 2.0) \times 10^4$ 巴, 如果液体中混有不溶解的气体, 则 K 值就会有很大降低, 在一定压力下油液夹带 1% 气体时, 弹性模量降为纯油的 35.6%, 夹带 4% 气体时, 则降为纯油的 12.2%, 所以在液压系统计算中常用 $K = 7000$ 巴。

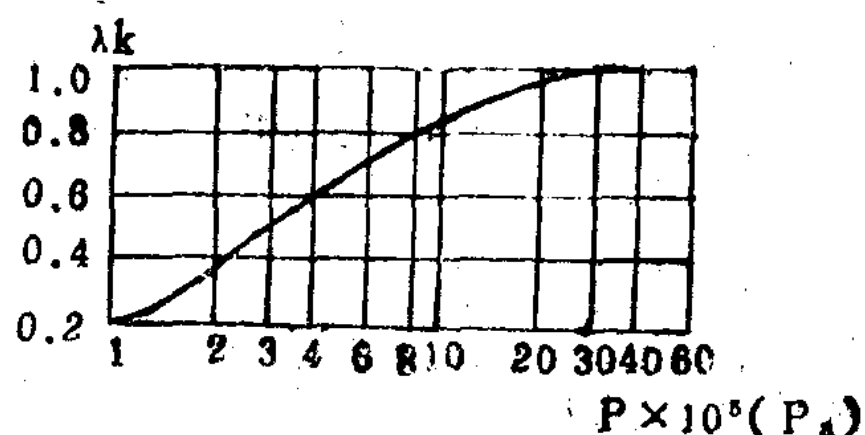


图 2—4 λ_k — p 关系曲线

2、热膨胀性

液体体积随温度变化而变化的性质, 称为热膨胀性, 热膨胀性的大小可用热膨胀系数 α 表示。其定义为: 每增加一单位温度的变化时, 液体体积的相对变化量。即

$$\alpha = \frac{\frac{\Delta V}{V}}{\Delta T} = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \left(\frac{1}{^\circ\text{K}} \right) \quad (2-16)$$

式中 ΔT —绝对温度的变化值

液压油的热膨胀系数很小, 一般不予考虑, 但当温度变化很大时, 也必须给予足够的重视, 以免导致很大的误差。

二、对液压传动所用油液的要求和选用

在液压系统中, 液压油是传递动力的介质, 除了传递能量外, 它还起着润滑运动部件和保护金属不被锈蚀的作用, 液压油的性能会直接影响到液压传动的工作, 有人认为液压系统的故障中有 75% 是由液压油引起的, 这说明合理选择与使用液压用油的重要性。

一般所用的液压油应满足下列要求:

(一) 适宜的粘度和良好的粘温性能。在工作温度变化范围内, 粘度的变化范围要小, 一般液压系统所用的液压油粘度大多在 $11.5 \times 10^{-6} - 63 \times 10^{-6}$ (米²/秒)。

(二) 具有对热、氧化、水解的良好稳定性, 油液的使用寿命要长。所谓热稳定性, 就是当温度升高时发生化学变化的程度。良好的热稳定性, 意味着当油液温度升高时, 抵抗油液分子裂化和聚合的能力增强, 就不容易产生一些树脂状沥青、焦油、焦炭, 氧化稳定性就是液压油与空气或其它氧化物发生反应的程度。不易氧化变质的油使用寿命就长, 水解稳定性就是液压油遇水分解变质的程度。总之油温升高将是造成液压油氧化变质的最重要的因素, 为保证系统正常工作, 既要提高油质, 又要严格控制油液工作温度, 一般不得超过 65°C。

(三) 具有良好的润滑性能, 使系统中各运动构件的滑动表面上形成强度较高的油膜, 以便构成液体润滑, 减小磨损。

(四) 不得含有蒸气, 空气及其容易汽化和产生气体的杂质, 起泡性要小而消泡性要好。

表2—3 几种常用国

国产油 名 称	上稠 30—1	上稠 50—1	兰稠 40—1	10号航空 液 压 油	专 用 锭子油	舵 机 液压油	10号 机械油	20号 机械油	30号 机械油
50℃时运动 粘度(厘施)	18.67	40.56	27.35	≥ 10	12~14	7~8	7~13	17~23	27~33
100℃时运 动粘度(厘施)	5.578	12.09							
粘 度 指 数	>130	>130	140						
凝 点(℃)	-49	-48.5	-37	≤ -70	≤ -45	≤ -40	≤ -15	≤ -15	≤ -10
闪点(开口) (℃)不低于	185.5	174	146	≥ 92	≥ 163	≥ 135	≥ 165	≥ 170	≥ 180
水 分	无	痕迹	无	无	无	无	无	无	无
反 应	中性	中性	中性						
酸 值(毫克 KOH/克)	0.131	0.123	0.0398	0.05	0.07	0.05	0.14	0.16	0.20
机械杂值(%)	无	无	0.0048	无	无	无	0.005	0.005	0.007
铜 片 腐 蚀	合格	合格	合格	合格					
抗泡沫试验	25毫 升/0	15毫 升/0	1个泡 (中期) (毫升)						
防 锈 试 验	通过	通过	无锈						
氧化试验(酸 值达到2.0毫 克KOH/克的 小时不小于)									