

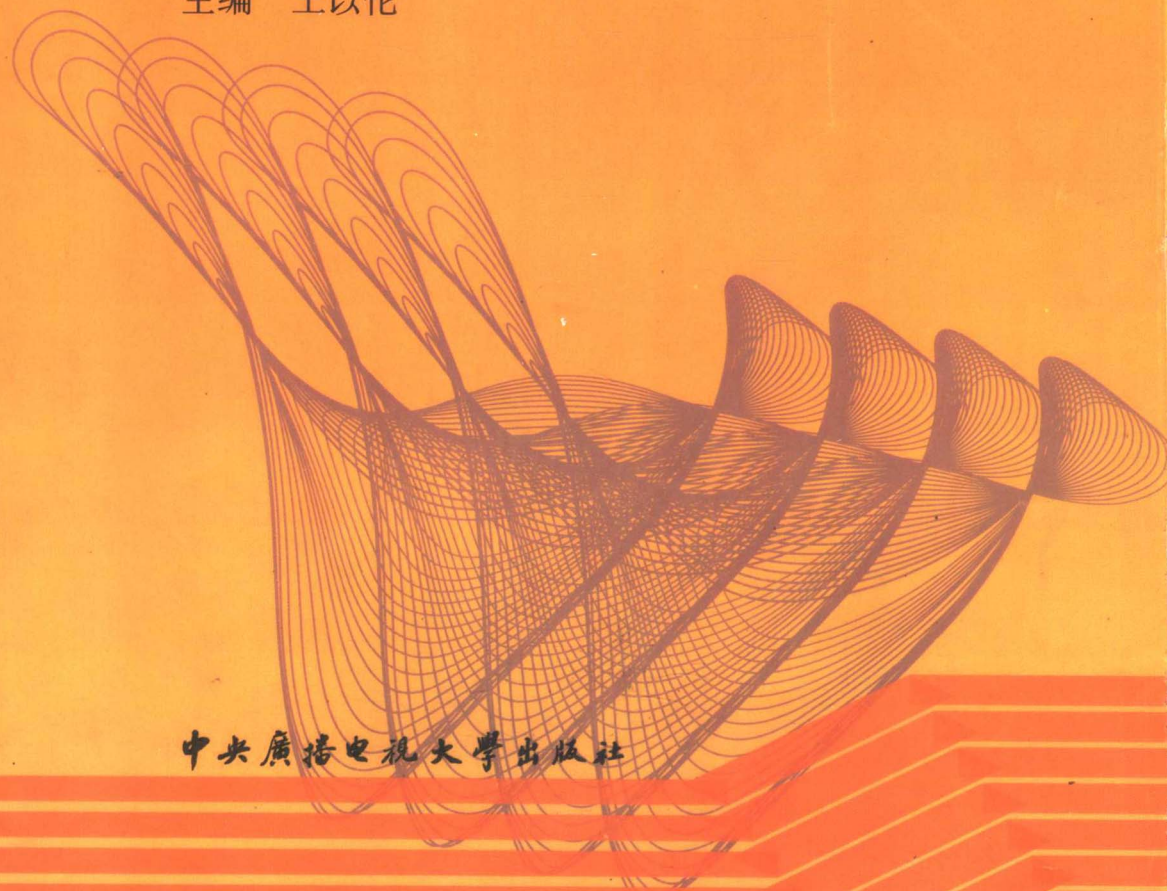


教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

液压气动技术

YEYA QIDONG JISHU

主编 王以伦



中央广播电视大学出版社

Yeya qidong jishu yeya qidong jishu

液 压 气 动 技 术

主 编 王 以 伦

中央广播电视大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

液压气动技术/王以伦主编. —北京: 中央广播电视
大学出版社, 2003. 1

ISBN 7-304-02340-6

I. 液… II. 王… III. ①液压传动: 电视大学—
教材②气压传动—电视大学—教材 IV. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 003250 号

版权所有, 翻印必究。

液压气动技术

主编 王以伦

出版·发行/中央广播电视大学出版社

经销/新华书店北京发行所

印刷/北京首师大印刷厂

开本/787×1092 1/16 印张/20.75 字数/474 千字

版本/2002 年 10 月第 1 版 2003 年 1 月第 1 次印刷

印数/0001-3000

网址/<http://www.crtvup.com.cn>

社址/北京市复兴门内大街 160 号 邮编/100031

电话/66419791 68519502

(本书如有缺页或倒装, 本社负责退换)

书号: ISBN 7-304-02340-6/TH·53

定价: 27.00 元

内 容 简 介

本书是中央广播电视大学机械设计制造及其自动化专业(专科起点升本科)必修的专业技术基础课教材。

全书共分15章。第2, 10章介绍液压气动的流体力学基本理论;第3, 4, 5, 6, 11, 12, 13章介绍液压、气动技术中常用元件的结构原理、性能和用途;第7, 8, 14章介绍液压、气动的基本回路和典型系统的应用与分析;第9, 15章介绍液压、气动系统的设计步骤和方法。

考虑到电大学生的特点,本书在内容安排上将液压部分与气动部分分开编写,使所学内容既“必须”又“够用”,突出理论联系实际,由浅入深,注意传授知识和培养能力并重。

前 言

本书是按照中央广播电视大学“开放教育试点”机械设计制造及其自动化专业本科教学计划编写的。主要内容包括液压、气动技术的流体力学基本理论；液压、气动元件的结构、工作原理及特点；液压、气动基本回路及典型系统；液压、气动系统的设计计算方法和步骤等。

作为电视大学的教材，它应该适合远程开放教育和学生来源面广的特点，教材应方便学生自学。为此，本书着重考虑了以下几个方面：

1. 为方便学生学习，将液压传动与气动技术分开编写并以液压传动为主。其基本思路均按“基本理论—元件—回路—系统”的顺序编排。

2. 各章节均按照“必须”、“够用”的原则，力求详简得当，重点突出。着重讲解基本理论和基本方法，不拘泥于具体繁杂的结构，通过传授基本知识培养学生的实际应用能力。

3. 除个别章外，每章正文前都有提要式说明，指出学习重点，章后均有小结，对本章主要内容作一归纳。

章末附有自测题解答和思考题与习题，附录给出了习题答案，便于学生复习和巩固学习效果。

4. 本书除可作为电视大学教材外，还适用于各类成人高校有关专业，并可供从事液压与气动的工程技术人员参考。

本书由哈尔滨工程大学王以伦任主编并修改定稿。参加本书编写的有：王以伦（第1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9章）、哈尔滨工业大学吴振顺（第11, 12, 13, 14, 15章）、哈尔滨工业大学王成敏（第2, 10章）、哈尔滨工程大学张文化（实验）。

本书由哈尔滨工业大学许耀铭教授主审，哈尔滨工业大学苏尔皇教授、哈尔滨工程大学孟庆鑫教授参加了本书的审定。专家们对书稿进行了认真仔细的审阅，并提出宝贵的修改意见。在本书编写过程中，得到了中央广播电视大学梁曼同志的大力支持和帮助，在此一并表示衷心感谢。

由于水平有限，书中难免出现错误和疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编 者
2002. 12

目 录

第1章 绪 论	(1)
1.1 液压传动的工作原理	(1)
1.2 液压传动系统的组成和表示方法	(3)
1.3 液压传动的优缺点及应用	(3)
本章小结	(4)
第2章 液压传动的流体力学基础	(5)
2.1 液压油的主要性质与选用	(5)
2.2 液体静力学	(11)
2.3 液体动力学基础	(13)
2.4 管路压力损失计算	(18)
2.5 孔口和缝隙流动特性	(23)
2.6 液压冲击和气穴现象	(27)
本章小结	(29)
自测题解答	(29)
思考题与习题	(31)
第3章 液压泵和液压马达	(34)
3.1 概 述	(34)
3.2 柱塞泵和柱塞马达	(38)
3.3 叶片泵	(41)
3.4 齿轮泵和齿轮马达	(44)
3.5 液压泵与液压马达的选用	(48)
本章小结	(48)
自测题解答	(49)
思考题与习题	(49)

第4章 液 压 缸	(51)
4.1 液压缸的类型和工作原理	(51)
4.2 液压缸结构	(56)
4.3 液压缸的设计计算	(59)
本章小结	(61)
自测题解答	(61)
思考题与习题	(62)
第5章 液 压 阀	(64)
5.1 液压阀的分类	(64)
5.2 方向阀	(65)
5.3 压力阀	(73)
5.4 流量阀	(79)
5.5 比例阀与插装式锥阀	(82)
本章小结	(89)
自测题解答	(89)
思考题与习题	(90)
第6章 辅助元件	(92)
6.1 滤油器	(92)
6.2 蓄能器	(95)
6.3 密封装置	(97)
6.4 油箱与管件	(100)
本章小结	(104)
自测题解答	(104)
思考题与习题	(104)
第7章 基本回路	(106)
7.1 压力控制回路	(106)
7.2 速度控制回路	(111)
7.3 方向控制回路	(121)
7.4 其他基本回路	(122)
本章小结	(128)
自测题解答	(128)

思考题与习题	(129)
第8章 典型液压系统	(133)
8.1 组合机床液压系统	(133)
8.2 注塑机液压系统	(135)
8.3 船舶起货机液压系统	(139)
本章小结	(140)
思考题与习题	(141)
第9章 液压系统的设计与计算	(143)
9.1 液压系统设计的原则与依据	(143)
9.2 拟定液压系统原理图	(147)
9.3 计算和选择液压元件	(147)
9.4 液压系统性能估算	(149)
9.5 绘制工作图和编写技术文件	(151)
9.6 液压系统设计计算举例	(151)
本章小结	(160)
第10章 气动技术的基本知识	(161)
10.1 气动技术的应用及其优缺点	(161)
10.2 气动系统的组成	(165)
10.3 气体基本性质	(167)
10.4 气体一维定常流动基本方程	(177)
10.5 气体在管道中的流动特性	(180)
本章小结	(186)
自测题解答	(186)
思考题与习题	(189)
第11章 气源装置及辅助元件	(190)
11.1 气源装置概述	(190)
11.2 空气净化设备	(193)
11.3 油雾器	(196)
11.4 储气罐与消声器	(199)
本章小结	(201)
思考题与习题	(202)

第 12 章 气动执行元件	(203)
12.1 气动缸的分类及工作原理	(203)
12.2 气动缸的特性计算	(210)
12.3 气动马达	(222)
本章小结	(225)
思考题与习题	(225)
第 13 章 气动控制元件	(227)
13.1 压力控制阀	(227)
13.2 流量控制阀	(238)
13.3 方向控制阀	(243)
13.4 控制阀的选择和安装	(251)
本章小结	(252)
思考题与习题	(252)
第 14 章 基本回路和常用回路	(253)
14.1 基本回路	(253)
14.2 常用回路	(261)
本章小结	(266)
思考题与习题	(267)
第 15 章 程序控制系统	(268)
15.1 概 述	(268)
15.2 气动系统中的常用电气电路	(269)
15.3 行程程序控制系统的设计	(272)
15.4 可编程控制器及其在气动程序控制系统中的应用	(283)
本章小结	(297)
自测题解答	(297)
思考题与习题	(299)
附录 A 实 验	(301)
附录 B 液压与气压传动常用图形符号	(308)
附录 C 参考答案	(314)
参考文献	(321)

第1章 绪 论

液压与气压传动是以流体为工作介质，进行能量传递的一种传动形式。虽然液压传动已有较长的历史了，但相对机械传动而言仍是一门较新的技术。在近代工业领域液压技术得到了广泛应用。微电子技术的迅速发展及其与液压和气压技术的结合，使液压与气压传动技术的应用领域更加广阔，几乎遍及各个工业部门，是提高生产率，实现自动化等的重要技术手段。

1.1 液压传动的工作原理

我们以液压千斤顶为例，说明液压传动的工作原理。如图1-1所示。当使杠杆5向上运动时，它将带动小活塞缸内的活塞向上运动，因小活塞缸内的空间是密封容积，当此容积增大时，产生真空，存于油箱1中的油液在大气压力作用下，顶开单向阀2，进入小活塞缸。当杠杆5向下运动时，使小活塞向下移动，挤压油液使其顶开单向阀3，排入大活塞缸7中，油液被挤压，压力升高，当升高之压力能够克服大活塞上的负载时负载随杠杆向下运动而上升，不断重复上述过程就可以将负载（重物）举起来。打开放油阀8，可以使大活塞缸与油箱相通，使大活塞复位。这是最简单的液压系统，通过此例我们可以得到液压传动的一些重要基本概念。

设大、小活塞的面积为 A_2 ， A_1 ，作用于大活塞的负载为 G ，小活塞上的作用力为 F_1 ，根据帕斯卡原理，大小活塞缸中的压力（压强）是相等的，设为 p ，不计活塞运动过程中的摩擦力，则有

$$p = \frac{G}{A_2} = \frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1} \quad (1-1)$$

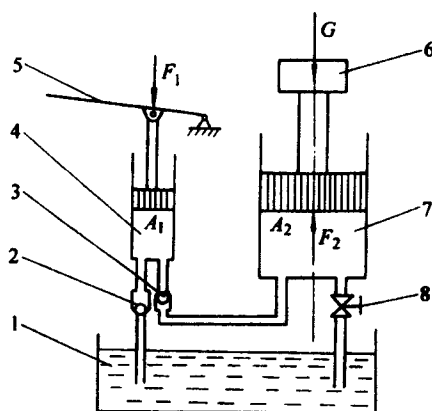


图1-1 液压千斤顶示意图

- 1—油箱 2—吸油阀 3—压油阀 4—小缸
5—手柄 6—负载 7—大缸 8—放油阀

或

$$F_2 = F_1 \frac{A_2}{A_1} \quad (1-2)$$

这说明, 液压系统中的压力 p 取决于负载 G 的大小, 即压力取决于负载, 这是液压传动的一个重要概念。当 $A_2 \gg A_1$ 时, 即使 F_1 很小, 仍然可以产生很大的 F_2 , 这就是力的放大作用。

如设大、小活塞的运动速度分别为 v_2, v_1 , 在稳定运动时 (不计泄漏) 有

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 = Q \quad (1-3)$$

式中: Q ——流量。

可得

$$v_2 = v_1 \frac{A_1}{A_2} = \frac{Q}{A_2} \quad (1-4)$$

大活塞的运动速度取决于输入的流量 (当 A_2 不变时), 这也是液压传动中的重要概念。

大活塞运动时, 其输出功率为

$$P = F_2 v_2 = p A_2 \cdot \frac{Q}{A_2} = p \cdot Q \quad (1-5)$$

由此可见, 液压系统中的功率就是压力与流量的乘积。

下面以磨床工作台液压系统为例, 说明其工作原理及液压系统的组成。

如图 1-2 所示。当电机 (图中未画出) 带动液压泵 4 旋转将油箱 1 中的油液经滤油器 2 吸上来, 经油管 10 送入系统。在图示状态下, 液压泵输出的油液经开停阀 9、节流阀 13、换向阀 15 进入工作台液压缸 18 的左腔, 推动活塞 17 带工作台 19 向右运动, 液压缸右腔的油液经换向阀 15 和油管 14 排回油箱。将换向阀手柄移动, 改变换向阀心位置时如图 1-2 (b), 可使液压泵输出的油液经开停阀、节流阀、换向阀进入工作台液压缸的右腔, 推动工作台向左移动, 并使左腔回油经换向阀 15、回油管 14 排回油箱。即工作台的往复运动是靠改变换向阀的位置实现的。

工作台移动的速度大小是靠节流阀调节的。节流阀口开大, 进入工作台液压缸中的油液增多, 工作台速度增大; 反之工作台速度减小。

使工作台移动, 必须有克服各种阻力的足够的推力。这个推力是由液压缸中的油液压力产生的。阻力越大, 缸中油液压力越高。液压泵出口处的压力由溢流阀 7 调定。

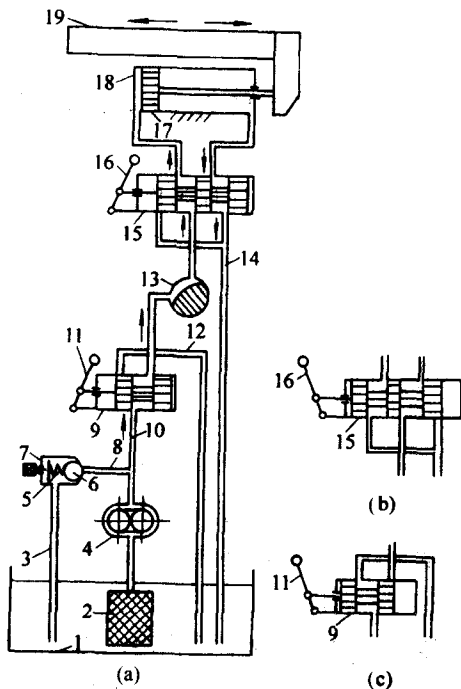


图 1-2 磨床工作台液压系统原理图

- 1—油箱 2—过滤器 3, 12, 14—回油管
4—液压泵 5—弹簧 6—钢球 7—溢流阀
8—压力油管 9—开停阀 10—压油管
11—开停手柄 13—节流阀 15—换向阀
16—手柄 17—活塞 18—液压缸 19—工作台

开停阀在图 1-2 (c) 状态时, 液压泵输出的油经管 12 流回油箱, 不能输入至工作台液压缸。此时, 工作台将停止运动, 而液压泵的出口与油箱相通, 液压泵出口压力降为零。

1.2 液压传动系统的组成和表示方法

1. 液压系统的组成

由磨床工作台液压系统的分析, 可以将液压系统分成四部分:

(1) 能源装置——是将机械能转换成液压能的能量转换装置, 即液压系统中的液压泵, 为系统提供压力油。

(2) 执行元件——把液压能转换成机械能的能量转换装置。常有作直线运动的液压缸和实现回转运动的液压马达。

(3) 控制调节元件——对系统中油液压力、流量进行控制调节及改变油液流动方向的各种调控元件, 统称为阀。主要有压力阀、流量阀、换向阀等。

(4) 辅助装置——起辅助作用的其他元件。如油管、油箱、过滤器等。

2. 液压系统中的元件符号

为了分析液压系统的方便起见, 系统中所用的元件都可以用图形符号来表示。一般液压系统原理图, 都是用符号画出的, 这种图形简单易懂, 方便绘图。各元件的图形符号, 请参阅附录。

1.3 液压传动的优缺点及应用

1. 优点

(1) 功率质量比大。在同等功率条件下, 液压装置质量轻体积小, 结构紧凑。如液压马达的质量和体积是同功率电机的 10% ~ 12% 左右。

(2) 能在大范围内无级调速。

(3) 易实现过载保护。元件自行润滑。

(4) 易于实现自动化。与电气控制相结合, 可实现复杂的顺序动作, 也方便远距离调控。

(5) 元件已实现标准化、系列化、通用化。方便系统设计, 设备维护。

(6) 实现直线运动, 比机械传动简单。

2. 缺点

(1) 泄漏。液压系统中存在泄漏, 造成能量损失, 污染环境。

(2) 对温度变化敏感。由于液压传动中所用介质多为矿物油, 当温度变化时, 其黏度变化大, 故影响工作稳定。

(3) 元件制造精度要求高, 造价贵。

(4) 不易查找故障发生的原因。

3. 液压传动技术的应用

工业领域应用液压传动技术，根据各自的特点不尽相同。目前，液压技术在各机械工业部门的应用主要有：

- (1) 机床 内、外圆磨床，平面磨床，仿形车，龙门刨等。
- (2) 工程机械 挖掘机，储运机，装载机等。
- (3) 农业机械 拖拉机的悬挂装置，联合收割机等。
- (4) 汽车工业 自卸卡车，平板车，高空作业车等。
- (5) 船舶机械 起货机，锚机，舵机，消摆装置等。
- (6) 智能机械 水下机械手，模拟驾驶舱，机器人等。
- (7) 航空航天 起落架，尾翼，机翼等。

本章小结

本章提出了液压传动技术的三个重要概念，即压力取决于负载，速度取决于流量，在液压技术中，压力与流量的乘积即为功率。介绍了两个液压传动系统，学习中应了解液压系统的工作原理，应知道液压传动技术的主要优缺点及应用。

第2章 液压传动的流体力学基础

本章介绍了液压传动中所涉及到的流体力学基础知识。本章基本概念多，公式多，理论性强，是学习液压传动技术的理论基础，也是重点和难点较多的一章。要求掌握液压油的特性、内摩擦定律及静压力基本方程；掌握流动的基本概念和三个重要方程并能正确应用；会判断流态和两种能量损失的计算；熟悉孔口和缝隙流动特性。其他内容可作一般了解。

2.1 液压油的主要性质与选用

2.1.1 液压油的主要性质

1. 密度

单位体积液体所具有的质量叫做该液体的密度，即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中： V ——液体的体积；

m ——液体的质量；

ρ ——液体的密度。

密度是液压油的一个重要的参数，密度随压力或温度变化而发生变化，但其变化很小，可以忽略。工程上一般可取液压油的密度为 900 kg/m^3 。

2. 可压缩性

液体压力增高而发生体积缩小的性质称为可压缩性。若体积为 V 的液体，当压力增大 Δp 时，体积减小 ΔV ，则液体在单位压力下的体积相对变化量为

$$k = -\frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V} \quad (2-2)$$

式中， k 为压缩系数。当压力增大时，体积减小，故在式前加一负号，以使 k 为正值。

液体压缩系数的倒数称为体积模量，以 K 表示。

$$K = \frac{1}{k} = -\frac{\Delta p}{\Delta V} V \quad (2-3)$$

液体的体积模量越大表明该液体抵抗压缩能力越强。工程上取液压油的体积模量 $K =$

$(1.4 \sim 2) \times 10^3 \text{ MPa}$, 其数值很大, 一般认为液压油是不可压缩的。

但在系统压力很高或分析研究系统的动态特性时, 则必须考虑液压油的可压缩性。

由于空气的可压缩性很大, 当液压油中混入空气时, 其 K 值大大减小, 严重影响系统的性能, 因此, 应力求减少液压油中的含气量及不使液压油中混入空气。由于液压油中的气体不可能完全排除, 实际计算中常取液压油的体积模量 $K = (0.7 \sim 1.4) \times 10^3 \text{ MPa}$ 。

3. 黏 性

(1) 黏性的物理本质

液体在外力作用下流动或具有流动趋势时, 分子间的内聚力会阻碍分子间的相对运动, 从而沿其界面产生内摩擦力, 这一特性称为液体的黏性。黏性是液体的重要物理性质, 也是选用液压油的主要依据。

现以图 2-1 为例, 说明液体的黏性。两平行平板间充满液体, 下平板固定, 上平板以 u_0 的速度向右运动, 由于液体黏性的作用, 紧贴下平板的一薄层液体速度为零, 紧贴上平板的一薄层液体以 u_0 的速度与上平板一样向右运动, 而中间各层液体速度按线性规律变化。速度快的上层液体会拖带下层液体运动, 而速度慢的下层对速度快的上层起阻滞作用。

实验结果表明, 流动液体层间的摩擦力 F_f 与液层的接触面积 A , 液层间的速度梯度 du/dy 成正比, 即

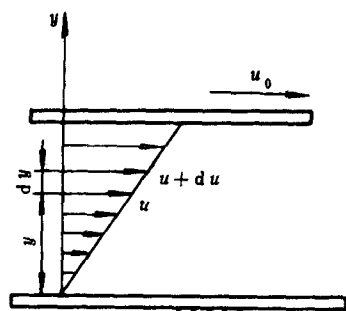


图 2-1 液体的黏性

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

式中: μ ——比例系数, 称为黏性系数或动力黏度。

若以 τ 表示液层间的切应力, 即单位面积上的内摩擦力, 则式 (2-4) 可写成

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

这就是牛顿液体内摩擦定律。

由式 (2-5) 可知, 在静止液体中, 速度梯度 $du/dy = 0$, 故内摩擦力为零, 因此, 静止液体不呈现黏性, 也就是说液体的静摩擦力是不存在的。这是液体与固体的重要区别之一。

(2) 黏度的表示方法

常用黏度有三种表示方法, 即动力黏度、运动黏度和条件黏度。

① 动力黏度

动力黏度 μ , 由式 (2-4) 给出。其物理意义是: 液体在单位速度梯度下流动时, 液层间单位面积上的内摩擦力。

动力黏度的法定计量单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒) 或用 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 表示。

② 运动黏度

运动黏度用 ν 表示, 它是动力黏度与密度的比值, 即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-6)$$

运动黏度无物理意义，但在工程计算时经常使用。运动黏度的法定计量单位是 m^2/s (米²/秒)。

我国采用 40 °C 时液压油的运动黏度值 (mm^2/s) 为其黏度等级标号，即油的牌号。例如牌号为 L-HL32 的液压油，其在 40 °C 时的运动黏度平均值为 32 mm^2/s 。

③ 条件黏度

条件黏度是根据不同测定条件得到的相对黏度。我国采用恩氏度 $^{\circ}\text{E}$ 。恩氏黏度是用恩氏黏度计测定的，即将 200 mL 温度为 T °C 的被测液体倒入恩氏黏度计，测量其流经黏度计底部 $\phi 2.8$ mm 小孔时流尽所用的时间 t_1 ，再测相同体积的蒸馏水在 20 °C 时流经相同小孔所用的时间 t_2 ，这两个时间比值即为被测液体在 T °C 下的恩氏黏度，即

$$^{\circ}\text{E}_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (2-7)$$

恩氏黏度与运动黏度之间可用经验公式换算，即

$$\nu = \left(7.31^{\circ}\text{E} - \frac{6.31}{^{\circ}\text{E}} \right) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s} \quad (2-8)$$

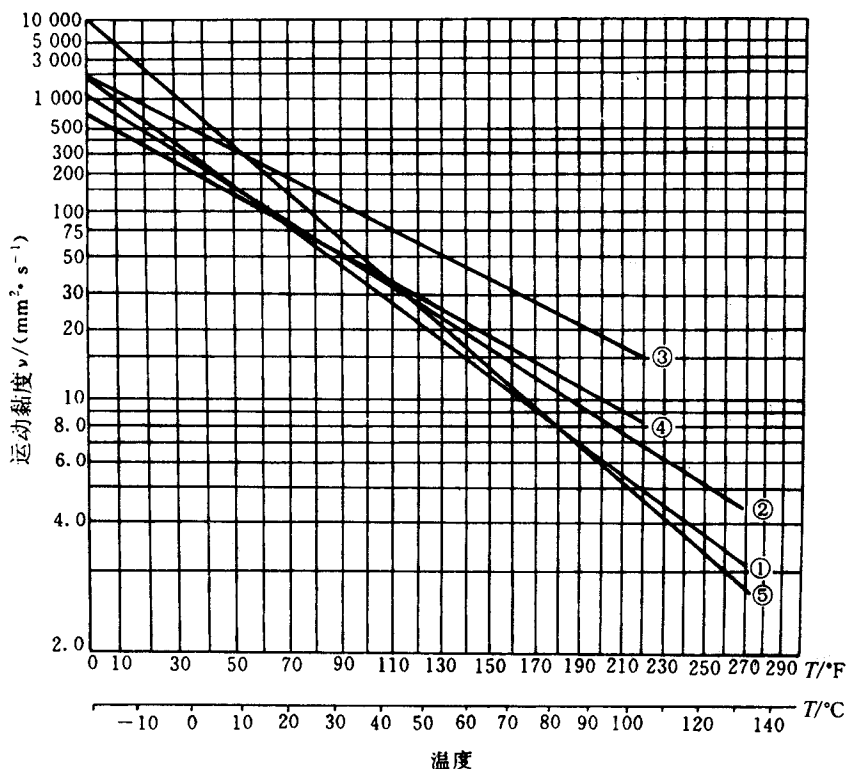


图 2-2 典型液压油的黏温特性曲线

①—矿油型普通液压油 ②—矿油型高黏度指数液压油 ③—水包油乳化液 ④—水—乙二醇液 ⑤—磷酸酯液

④温度对黏度的影响

液压油对温度变化极敏感,温度升高,黏度降低。这一特性称为黏温特性。图 2-2 为几种典型液压油的黏温特性曲线。黏温特性常用黏度指数 VI 来度量。黏度指数 VI 越大,表示油液黏度随温度的变化越小,即黏温特性越好。一般要求液压油的黏度指数 VI 在 90 以上。

⑤压力对黏度的影响

一般的中、低压系统压力的变化对油液黏度影响甚小,可以忽略。

2.1.2 液压油的选用

正确选用液压油对于液压系统达到设计要求,提高工作可靠性,延长使用寿命,防止事故发生等有重要的影响。

1. 对液压油的使用要求

液压传动系统所用的油液应满足如下要求:

- (1) 黏度适当,黏温特性好。
- (2) 具有润滑、防锈能力。
- (3) 对金属和密封材料有良好相容性。
- (4) 化学稳定性好,不易变质。
- (5) 燃点高,凝点低。
- (6) 对人体无害。

表 2-1 所列是常用的液压油的主要品种及其特性和用途。

表 2-1 液压油的主要品种及其特性和用途

类型	名 称	ISO 代号	特 性 和 用 途
矿 油 型	普通液压油	L-HL	精制矿油加添加剂,提高抗氧化和防锈性能,适用于室内一般设备的中低压系统
	抗磨液压油	L-HM	L-HL 油加添加剂,改善抗磨性能,适用于工程机械、车辆液压系统
	低温液压油	L-MV	L-HM 油加添加剂,改善黏温特性,可用于环境温度在 $-20 \sim -40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高压系统
	高黏度指数液压油	L-HR	L-HL 油加添加剂,改善黏温特性,VI 值达 175 以上,适用于对黏温特性有特殊要求的低压系统,如数控机床液压系统
	液压导轨油	L-HG	L-HM 油加添加剂,改善黏-滑性能,适用于机床中液压和导轨润滑合用的系统
	全损耗系统用油	L-HH	浅度精制矿油,抗氧化性、抗泡沫性较差,主要用于机械润滑,可作液压代用油,用于要求不高的低压系统
	汽轮机油	L-TSA	深度精制矿油加添加剂,改善抗氧化、抗泡沫等性能,为汽轮机专用油,可作液压代用油,用于一般液压系统