



绵阳职业技术学院

1933

国家示范性高等职业院校建设项目成果

# 机床控制技术

主编 王建平 蒲定坤



武汉理工大学出版社

Wuhan University of Technology Press

高等职业院校建设项目成果

# 机床控制技术

主 编 王建平 蒲定坤  
副主编 唐天德 廖逸伟  
刘 军 杜正刚

武汉理工大学出版社

· 武汉 ·

## 图书在版编目(CIP)数据

机床控制技术/王建平,蒲定坤主编. —武汉:武汉理工大学出版社,2011.10  
ISBN 978-7-5629-3595-7

I. ① 机… II. ① 王… ② 蒲… III. ① 数控机床-控制系统-高等职业教育-教材 IV. ① TG 659

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 190743 号

项目负责人:王利永

责任编辑:汪浪涛 戴皓华

责任校对:戴皓华

装帧设计:牛力

出版发行:武汉理工大学出版社

社址:武汉市洪山区珞狮路 122 号

邮编:430070

网址:<http://www.techbook.com.cn>

经销:各地新华书店

印刷:湖北睿智印务有限公司

开本:787×960 1/16

印张:28.75

字数:548 千字

版次:2011 年 10 月第 1 版

印次:2011 年 10 月第 1 次印刷

定价:50.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请向出版社发行部调换。

本社购书热线电话:027-87394412 87383695 87384729 87397097(传真)

• 版权所有 盗版必究 •

# 绵阳职业技术学院

## 重点专业课程改革教材编审委员会

主 任:文晓璋

副主任:肖争鸣 郑学全

委 员:(材料工程技术专业)

左明扬 杨 峰 方久华 刘 成 况金华 胡 骅

王 伟 牟思蓉 邓小锋 梅朝鲜 石建屏 任冬燕

(电子信息工程技术专业)

王荣海 胥勋涛 陈思海 何小河 李 川 胡应洪

乔之勇 唐洪彦 霍维容 刘传辉

(机械设计与制造专业)

黄泽森 张 明 邓先智 王建平 蒲定坤 赵建中

梁春光 章 晓 李 平 刘文彦 刘 军 林慧敏

(旅游管理专业)

王 婷 陈 波 朱飞燕 魏丽亚 刘小兰 肖 昆

总责任编辑:王利永

## 前 言

本书是根据国家示范建设院校课程改革成果以及高职项目式教学要求,结合机械制造业职业岗位所需关键能力,基于工程过程系统化开发的机械设计与制造专业系列课程教材。本教材采用任务驱动的教学模式,加强教学的真实性和实践性。学习内容充分体现企业实际需要,让学生在任务实施的过程中训练操作技能、团队协作、交流能力、工作能力、方法能力,为学生可持续发展奠定基础。

机床控制技术中的液压技术、气动技术、电气技术、PLC 技术已有广泛的应用领域,近年来与其他技术的结合,使其进入了一个崭新的发展阶段。这些技术已成为对现代化机械装备技术进步有重要影响的基础技术。通过本课程的学习,学生能较全面地掌握液压技术、气动技术、电气技术、PLC 技术的基础知识与专业技能。

在本书编写过程中,自始至终贯彻实用性原则,努力减少对理论知识与计算公式的推导与演算,试图通过较浅显的工程语言分析各数学项的物理意义,达到帮助读者学习与理解的目的。书的最后部分是对液压与气压传动技术实用技术的介绍,对学生今后从事相关技术、掌握相应的应用技能是有帮助的。

本书主要内容有:液压组成件与基本回路分析、典型液压传动系统分析与维护、电气控制电路图的绘制与异步电动机的控制、典型生产机械的电气控制线路、PLC 程序编制、PLC 控制在设备中的应用。

本书由王建平、蒲定坤任主编,唐天德、廖逸伟、刘军、杜正刚任副主编,参加编写人员还有陈远、夏朝军、任岫芸。在教材编写过程中,得到了绵阳职业技术学院很多老师和多家企业同仁的大力支持和帮助,在此表示感谢。

编 者

2010 年 12 月

# 目 录

## 第一部分 液压与气动

|                                             |      |
|---------------------------------------------|------|
| 学习任务 1 液压组成件与基本回路分析 .....                   | (1)  |
| 1.1 液压传动概述 .....                            | (1)  |
| 1.1.1 液压传动的工作原理、系统组成及图形符号 .....             | (1)  |
| 1.1.2 液压传动的特点 .....                         | (3)  |
| 1.2 液压流体力学基础 .....                          | (4)  |
| 1.2.1 液压油 .....                             | (4)  |
| 1.2.2 流体静力学 .....                           | (8)  |
| 1.2.3 流体动力学 .....                           | (10) |
| 1.2.4 管路中液体的压力损失 .....                      | (14) |
| 1.2.5 液体流经孔口及缝隙的流量—压力特性管路中液体的压力<br>损失 ..... | (17) |
| 1.2.6 液压冲击及气穴现象 .....                       | (21) |
| 习题 .....                                    | (22) |
| 1.3 液压泵和液压马达 .....                          | (23) |
| 1.3.1 液压泵和液压马达概述 .....                      | (23) |
| 1.3.2 齿轮泵 .....                             | (25) |
| 1.3.3 叶片泵 .....                             | (28) |
| 1.3.4 柱塞泵 .....                             | (32) |
| 1.3.5 液压泵常见故障及其排除方法 .....                   | (34) |
| 1.3.6 液压马达 .....                            | (36) |
| 1.3.7 液压泵的选用 .....                          | (37) |
| 习题 .....                                    | (38) |
| 1.4 液压缸 .....                               | (39) |
| 1.4.1 液压缸的类型及特点 .....                       | (39) |
| 1.4.2 液压缸的设计计算 .....                        | (42) |

|                      |       |
|----------------------|-------|
| 1.4.3 液压缸结构设计        | (45)  |
| 1.4.4 液压缸常见故障及其排除方法  | (48)  |
| 习题                   | (49)  |
| 1.5 液压控制阀            | (50)  |
| 1.5.1 方向控制阀          | (50)  |
| 1.5.2 压力控制阀          | (57)  |
| 1.5.3 流量控制阀          | (64)  |
| 1.5.4 插装阀与叠加阀        | (66)  |
| 1.5.5 电液伺服阀          | (69)  |
| 1.5.6 电液比例控制阀        | (71)  |
| 习题                   | (74)  |
| 1.6 辅助装置             | (75)  |
| 1.6.1 蓄能器            | (75)  |
| 1.6.2 过滤器            | (78)  |
| 1.6.3 油箱             | (79)  |
| 1.6.4 热交换器           | (82)  |
| 1.6.5 密封装置           | (83)  |
| 1.6.6 油管与管接头         | (86)  |
| 习题                   | (88)  |
| 1.7 基本回路             | (88)  |
| 1.7.1 速度控制回路         | (88)  |
| 1.7.2 方向控制回路         | (100) |
| 1.7.3 压力控制回路         | (101) |
| 1.7.4 多缸动作回路         | (107) |
| 1.7.5 液压基本回路故障分析     | (110) |
| 习题                   | (113) |
| 学习任务2 典型液压传动系统分析与维护  | (115) |
| 2.1 典型液压系统           | (115) |
| 2.1.1 组合机床动力滑台液压系统   | (115) |
| 2.1.2 液压机液压系统        | (118) |
| 2.1.3 Q2—8型汽车起重机液压系统 | (120) |
| 2.1.4 液压系统常见故障及其排除方法 | (124) |
| 2.2 液压系统的设计计算        | (125) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 2.2.1 液压传动系统的设计 .....           | (126) |
| 2.2.2 液压系统设计计算实例 .....          | (130) |
| 习题 .....                        | (138) |
| 2.3 气压传动概述 .....                | (139) |
| 2.3.1 气压传动系统的工作原理及组成 .....      | (139) |
| 2.3.2 气压传动的特点 .....             | (140) |
| 2.4 气动元件 .....                  | (140) |
| 2.4.1 气压传动系统的工作原理及组成执行元件 .....  | (140) |
| 2.4.2 控制元件 .....                | (144) |
| 2.4.3 逻辑元件 .....                | (155) |
| 2.4.4 气源装置及辅件 .....             | (161) |
| 习题 .....                        | (168) |
| 2.5 气动基本回路 .....                | (168) |
| 2.5.1 方向控制回路 .....              | (169) |
| 2.5.2 压力控制回路 .....              | (170) |
| 2.5.3 速度控制回路 .....              | (170) |
| 2.5.4 其他回路 .....                | (171) |
| 习题 .....                        | (173) |
| 2.6 气压传动系统 .....                | (174) |
| 2.6.1 气动系统设计 .....              | (174) |
| 2.6.2 气动系统实例 .....              | (179) |
| 习题 .....                        | (182) |
| 2.7 气动系统的安装调试、使用及维护 .....       | (182) |
| 2.7.1 气动系统的安装与调试 .....          | (182) |
| 2.7.2 气动系统的使用与维护 .....          | (183) |
| 2.7.3 气动系统主要元件的常见故障及其排除方法 ..... | (185) |

## 第二部分 电气控制与可编程控制器

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| 学习任务3 电气控制电路图的绘制与异步电动机的控制 ..... | (190) |
| 3.1 常用低压电器 .....                | (190) |
| 3.1.1 概述 .....                  | (190) |
| 3.1.2 手控电器 .....                | (195) |

|                                  |              |
|----------------------------------|--------------|
| 习题.....                          | (198)        |
| 3.1.3 接触器 .....                  | (198)        |
| 习题.....                          | (202)        |
| 3.1.4 继电器 .....                  | (202)        |
| 习题.....                          | (209)        |
| 3.1.5 主令电器 .....                 | (209)        |
| 3.1.6 熔断器 .....                  | (215)        |
| 习题.....                          | (218)        |
| 3.1.7 断路器 .....                  | (218)        |
| 习题.....                          | (221)        |
| 3.1.8 低压电器的产品型号 .....            | (221)        |
| 3.2 电气控制系统的基本环节 .....            | (224)        |
| 3.2.1 电气控制电路图的绘制 .....           | (224)        |
| 3.2.2 三相笼型异步电动机直接启动控制电路 .....    | (228)        |
| 习题.....                          | (233)        |
| 3.2.3 三相笼型异步电动机减压启动控制电路 .....    | (234)        |
| 习题.....                          | (240)        |
| 3.2.4 三相笼型异步电动机能耗制动控制 .....      | (240)        |
| 习题.....                          | (243)        |
| 3.2.5 其他典型控制环节 .....             | (243)        |
| 3.2.6 电气控制保护环节简介 .....           | (249)        |
| 习题.....                          | (252)        |
| <b>学习任务4 典型生产机械的电气控制线路 .....</b> | <b>(253)</b> |
| 4.1 继电器控制系统设计简介 .....            | (253)        |
| 4.1.1 机床电气电路的一般分析方法 .....        | (253)        |
| 4.1.2 继电器控制系统设计的基本内容 .....       | (254)        |
| 4.1.3 继电器控制系统的设计 .....           | (254)        |
| 4.2 普通车床的电气控制 .....              | (257)        |
| 4.2.1 主要结构及运动形式 .....            | (257)        |
| 4.2.2 电气控制线路分析 .....             | (258)        |
| 4.2.3 常见电气故障分析 .....             | (259)        |
| 4.3 平面磨床的电气控制 .....              | (260)        |
| 4.3.1 主要结构和运动形式 .....            | (260)        |

|                                       |              |
|---------------------------------------|--------------|
| 4.3.2 电气控制线路分析 .....                  | (261)        |
| 4.3.3 电气线路常见故障分析 .....                | (264)        |
| 习题 .....                              | (265)        |
| <b>学习任务 5 PLC 程序编制 .....</b>          | <b>(268)</b> |
| 5.1 可编程序控制基础知识 .....                  | (268)        |
| 5.1.1 可编程序控制概述 .....                  | (268)        |
| 5.1.2 PLC 控制系统与继电器控制系统的比较 .....       | (272)        |
| 5.1.3 PLC 的基本组成 .....                 | (274)        |
| 5.1.4 PLC 的基本工作原理 .....               | (280)        |
| 5.1.5 PLC 的分类 .....                   | (281)        |
| 习题 .....                              | (282)        |
| 5.2 SIMATIC S7-200 系列 PLC 的程序编制 ..... | (283)        |
| 5.2.1 西门子 PLC 简介 .....                | (283)        |
| 5.2.2 S7-200 系列 PLC 的软继电器及其编号 .....   | (288)        |
| 5.2.3 基本指令及编程方法 .....                 | (294)        |
| 习题 .....                              | (302)        |
| 5.2.4 基本指令(与、或、非逻辑功能实验)实验 .....       | (303)        |
| 5.2.5 定时器、计数器指令及编程方法 .....            | (304)        |
| 习题 .....                              | (312)        |
| 5.2.6 定时器、计数器功能实验 .....               | (313)        |
| 5.2.7 置位/复位、脉冲生成指令及编程方法 .....         | (316)        |
| 习题 .....                              | (322)        |
| 5.2.8 微分和置位功能实验 .....                 | (323)        |
| 5.2.9 跳转/标号、取反、空操作和结束指令及编程方法 .....    | (325)        |
| 习题 .....                              | (328)        |
| 5.2.10 跳转、分支功能实验 .....                | (328)        |
| 5.2.11 数据传送、移位寄存器指令及编程方法 .....        | (330)        |
| 习题 .....                              | (335)        |
| 5.2.12 移位寄存器功能实验 .....                | (336)        |
| 5.2.13 顺序控制继电器指令及编程方法 .....           | (337)        |
| 习题 .....                              | (347)        |
| 5.2.14 S7-200 系列 PLC 其他指令 .....       | (347)        |

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| 学习任务 6 PLC 控制在设备中的应用 .....   | (366) |
| 6.1 PLC 程序设计 .....           | (366) |
| 6.1.1 编程方法指导 .....           | (366) |
| 6.1.2 功能表图设计法 .....          | (369) |
| 6.1.3 程序设计举例 .....           | (376) |
| 习题 .....                     | (383) |
| 6.2 PLC 控制在机床中的应用 .....      | (384) |
| 6.2.1 PLC 控制系统设计简介 .....     | (384) |
| 6.2.2 减少 I/O 点数的措施 .....     | (392) |
| 6.2.3 PLC 应用中应注意的若干问题 .....  | (397) |
| 6.2.4 PLC 控制系统对安装的要求 .....   | (400) |
| 6.2.5 PLC 的维护和故障诊断 .....     | (402) |
| 6.2.6 PLC 通信网络简介 .....       | (404) |
| 习题 .....                     | (439) |
| 6.2.7 可编程控制器控制电动机正反转电路 ..... | (439) |
| 6.2.8 可编程控制器在机床中的应用 .....    | (440) |
| 参考文献 .....                   | (446) |

## 第一部分 液压与气动

# 学习任务 1 液压组成件与基本回路分析

## 1.1 液压传动概述

### 1.1.1 液压传动的工作原理、系统组成及图形符号

#### 1.1.1.1 液压传动的工作原理

图 1.1 (a) 为磨床工作台液压系统工作原理图。液压泵 4 在电动机(图中未画出)的带动下旋转,油液由油箱 1 经过滤器 2 被吸入液压泵,由液压泵输入的压力油通过手动换向阀 9、节流阀 13、换向阀 15 进入液压缸 18 左腔,推动活塞 17 和工作台 19 向右移动,液压缸 18 右腔的油液经换向阀 15 排回油箱。如果将换向阀 15 转换成如图 1.1 (b) 所示的状态,则压力油进入液压缸 18 的右腔,推动活塞 17 和工作台 19 向左移动,液压缸 18 左腔的油液经换向阀 15 排回油箱。

工作台 19 的移动速度由节流阀 13 来调节。当节流阀开大时,进入液压缸 18 的油液增多,工作台的移动速度增大;当节流阀关小时,工作台的移动速度减小。液压泵 4 输出的压力油除了进入节流阀 13 以外,其余的通过溢流阀 7 流回油箱。

如果将手动换向阀 9 转换成如图 1.1 (c) 所示的状态,液压泵输出的油液经手动换向阀 9 流回油箱,这时工作台处于停止状态。

从上述分析可知,液压传动是利用液体的压力能来传递动力的一种传动形式,液压传动的过程是将机械能进行转换和传递的过程。

#### 1.1.1.2 液压系统的组成

从上述例子可以看出,一个完整的液压系统由以下四部分组成:

(1) 动力装置——最常见的形式就是液压泵,是将电动机输出的机械能转换成油液液压能的装置。其作用是向液压系统提供压力油。

(2) 执行装置——包括液压缸和液压马达,是将油液的液压能转换成驱动负载运动的机械能的装置。

(3) 控制调节装置——包括压力、流量、方向等控制阀,是对系统中油液压力、

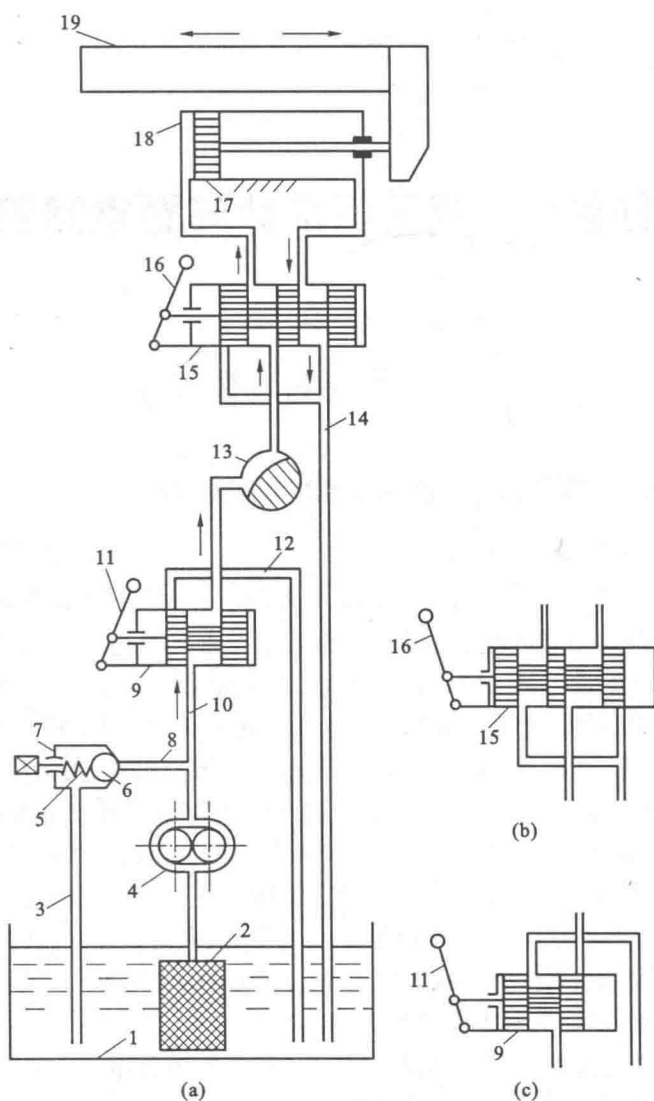


图 1.1 磨床工作台液压系统工作原理图

- 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—压力支管;9—手动换向阀;10—压力管;11、16—换向手柄;13—节流阀;  
15—换向阀;17—活塞;18—液压缸;19—工作台

流量或流动方向进行控制或调节的装置。

(4) 辅助装置——包括上述三部分以外的其他装置,例如油箱、过滤器、油管等。它们对保证液压系统正常工作起着重要的作用。

### 1.1.1.3 液压系统的图形符号

如图 1.1(a)所示的液压系统图是一种半结构式的工作原理图。它直观性强,容易理解,但难于绘制。在实际工作中,除少数特殊情况外,一般都采用国家标准 GB/T 786.1—93所规定的液压与气动图形符号来绘制,如图 1.2 所示。图形符号是表示元件的功能,而不表示元件的具体结构和参数。使用图形符号既便于绘制,又可使液压系统简单明了。

### 1.1.2 液压传动的特点

液压传动与机械传动、电气传动、气压传动相比有以下主要特点。

#### 1.1.2.1 液压传动的优点。

(1) 液压传动装置运动平稳、反应快、惯性小,能高速启动、制动和换向。

(2) 在同等功率情况下,液压传动装置体积小、质量轻、结构紧凑。例如同功率液压马达的质量只有电动机的 10%~20%。

(3) 液压传动装置能在运行中方便地实现无级调速,且调速范围最大可达 1:2 000(一般为 1:100)。

(4) 操作简单、方便,易于实现自动化。当它与电气联合控制时,能实现复杂的自动工作循环和远距离控制。

(5) 易于实现过载保护。液压元件能自行润滑,使用寿命较长。

(6) 液压元件实现了标准化、系列化、通用化,便于设计、制造和使用。

#### 1.1.2.2 液压传动的缺点

(1) 液压传动不能保证严格的传动比,这是由于液压油的可压缩性和泄漏造成的。

(2) 液压传动对油温变化较敏感,这会影响它的工作稳定性。因此液压传动不宜在很高或很低的温度下工作,一般工作温度在  $-15\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$  范围内较合适。

(3) 为了减少泄漏,液压元件在制造精度上要求较高,因此它的造价高,且对油液的污染比较敏感。

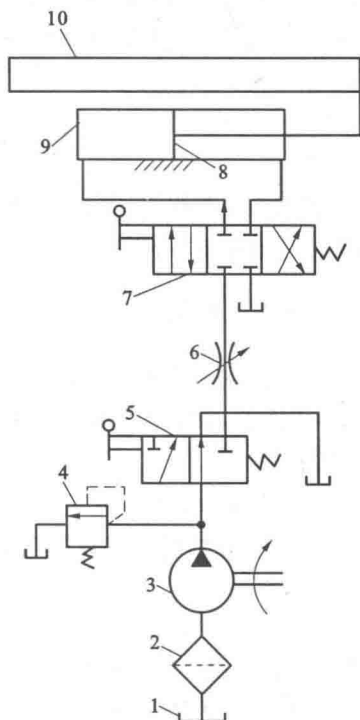


图 1.2 用图形符号表示的磨床工作台液压系统图

- 1—油箱;2—过滤器;3—液压泵;  
4—溢流阀;5—手动换向阀;6—节流阀;  
7—换向阀;8—活塞;  
9—液压缸;10—工作台

(4) 液压传动装置出现故障时不易查找原因。

(5) 液压传动在能量转换(机械能  $\rightarrow$  压力能  $\xrightarrow{\text{还原}}$  机械能)的过程中,特别是在节流调速系统中,其压力、流量损失大,故系统效率较低。

## 1.2 液压流体力学基础

流体力学是研究流体平衡及其运动规律的学科。本节主要研究液压油的物理性质及其力学规律,为以后分析、设计以至使用液压传动系统打下必要的理论基础。

### 1.2.1 液压油

液压传动所用的液压油一般为矿物油。它不仅是液压系统传递能量的工作介质,而且还起润滑、冷却和防锈的作用。液压油质量的优劣直接影响液压系统的工作性能。

#### 1.2.1.1 液体的密度

液体单位体积内的质量称为密度,通常用“ $\rho$ ”表示:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中  $m$ ——液体质量,kg;

$V$ ——液体体积, $\text{m}^3$ 。

液压油的密度随压力的增加而加大,随温度的升高而减小,一般情况下,由压力和温度引起的这种变化都较小,可将其近似地视为常数。

#### 1.2.1.2 液体的粘性

液体在外力作用下流动时,分子间的内聚力会阻碍分子间的相对运动而产生一种内摩擦力。这一特性称作液体的粘性。粘性的大小用粘度表示,粘性是液体重要的物理特性,也是选择液压油的主要依据。

粘性使流动液体内部各液层间的速度不等。如图 1.3 所示,两平行平板间充满液体,下平板不动,而上平板以速度  $v_0$  向右平动。

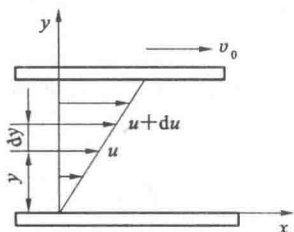


图 1.3 液体粘性示意图

由于粘性,紧贴于下平板的液体层速度为零,紧贴于上平板的液体层速度为  $v_0$ ,而中间各液体层的速度按线性分布。因此,不同速度流层相互制约而产生内摩擦力。

实验测定指出,液体流动时相邻液层间的内摩擦力  $F$  与液层间的接触面积  $A$  和液层间的相对运动速

度  $du$  成正比,而与液层间的距离  $dy$  成反比,即

$$F = \mu A \frac{du}{dy}$$

式中  $\mu$ ——比例常数,称为粘性系数或粘度;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度。

如以  $\tau$  表示切应力,即单位面积上的内摩擦力,则

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.2)$$

这就是牛顿的液体内摩擦定律。在流体力学中,把粘性系数不随速度梯度变化而发生变化的液体称为牛顿液体,反之称为非牛顿液体。除高粘度或含有特殊添加剂的油液外,一般液压油均可视为牛顿液体。

粘度是衡量流体粘性的指标。常用的粘度有动力粘度、运动粘度和相对粘度。

#### (1) 动力粘度

动力粘度可由式(1.2)导出,即

$$\mu = \tau \frac{dy}{du} \quad (1.3)$$

由此可知动力粘度的物理意义是:液体在单位速度梯度下流动时,液层间单位面积上产生的内摩擦力。动力粘度又称绝对粘度。

在 SI 中,动力粘度  $\mu$  的单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒)或  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 。

在 CGS 中, $\mu$  的单位为  $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ,又称 P(泊)。  $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P} = 10^3 \text{ cP}$ (厘泊)。

#### (2) 运动粘度

动力粘度与液体密度之比叫做运动粘度,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.4)$$

运动粘度  $\nu$  没有明确的物理意义。因在理论分析和计算中常遇到  $\mu$  与  $\rho$  的比值,为方便起见用  $\nu$  表示。其单位中有长度和时间的量纲,故称为运动粘度。

在 SI 中,运动粘度  $\nu$  的单位为  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

在 CGS 中, $\nu$  的单位为  $\text{cm}^2/\text{s}$ ,又称为 St(斯)。  $1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^2 \text{ St} = 10^4 \text{ cSt}$ (厘斯)。

工程中常用运动粘度  $\nu$  作为液体粘度的标志。机械油的牌号就是用机械油在  $40^\circ\text{C}$  时的运动粘度  $\nu$  的平均值来表示的。如 10 号机械油就是指其在  $40^\circ\text{C}$  时的运动粘度  $\nu$  的平均值为  $10 \text{ cSt}$ 。

#### (3) 相对粘度

相对粘度又称条件粘度。根据测量条件不同,各国采用的相对粘度的单位也不同。我国、前苏联、德国等采用恩氏粘度  $^\circ\text{E}$ ,美国采用赛氏粘度 SSU,英国采用

雷氏粘度 R。

恩氏粘度用恩氏粘度计测定。其方法是:将 200 mL 温度为  $t$  (以 $^{\circ}\text{C}$ 为单位)的被测液体装入粘度计的容器,经其底部直径为 2.8 mm 的小孔流出,测出液体流尽所需时间  $t_1$ ,再测出 200 mL 温度为  $20^{\circ}\text{C}$  的蒸馏水在同一粘度计中流尽所需时间  $t_2$ ;这两个时间的比值即为被测液体在温度  $t$  下的恩氏粘度,即

$$^{\circ}E_t = \frac{t_1}{t_2} \quad (1.5)$$

工业上常用  $20^{\circ}\text{C}$ 、 $50^{\circ}\text{C}$ 、 $100^{\circ}\text{C}$  作为测定恩氏粘度的标准温度,其相应恩氏粘度分别用  $^{\circ}E_{20}$ 、 $^{\circ}E_{50}$ 、 $^{\circ}E_{100}$  表示。

工程中常采用先测出液体的相对粘度,再根据关系式换算出动力粘度或运动粘度。恩氏粘度和运动粘度的换算关系式为

$$\nu = \left( 7.31^{\circ}E_t - \frac{6.31}{^{\circ}E_t} \right) \times 10^{-6} \quad (1.6)$$

#### 1.2.1.3 液体的可压缩性

液体受压力作用而体积缩小的性质称为液体的可压缩性。可压缩性用体积压缩系数  $K$  表示,并定义为单位压力变化下的液体体积的相对变化量。设体积为  $V_0$  的液体,其压力变化量为  $\Delta p$ ,液体体积减小  $\Delta V$ ,则

$$k = - \frac{1}{\Delta p} \frac{\Delta V}{V_0} \quad (1.7)$$

体积压缩系数  $k$  的单位为  $\text{m}^2/\text{N}$ 。由于压力增大时液体的体积减小,因此式 (1.7) 右边须加负号,以使  $k$  为正值。液体的可压缩性很小,在很多情况下可以忽略不计。但受压液体体积较大或进行液压系统动态分析时,必须考虑液体的可压缩性。常用液压油的压缩系数  $k = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$ 。

液体的压缩系数  $k$  的倒数称为液体的体积弹性模数,用  $K$  表示,即

$$K = \frac{1}{k} = \frac{\Delta p V_0}{\Delta V} \quad (1.8)$$

液压油的体积弹性模数为  $(1.4 \sim 1.9) \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。

#### 1.2.1.4 其他性质

##### 1. 粘度与压力的关系

液体分子间的距离随压力增加而减小,内聚力增大,其粘度也随之增大。当压力不高且变化不大时,压力对粘度的影响较小,一般可忽略不计。当压力较高(大于  $10^7 \text{ Pa}$ )或压力变化较大时,需要考虑这种影响。

##### 2. 粘温特性

温度变化对液体的粘度影响较大,液体的温度升高其粘度下降。液体粘度随温度变化的性质称为粘温特性。几种国产液压油的粘温特性曲线如图 1.4 所示。