

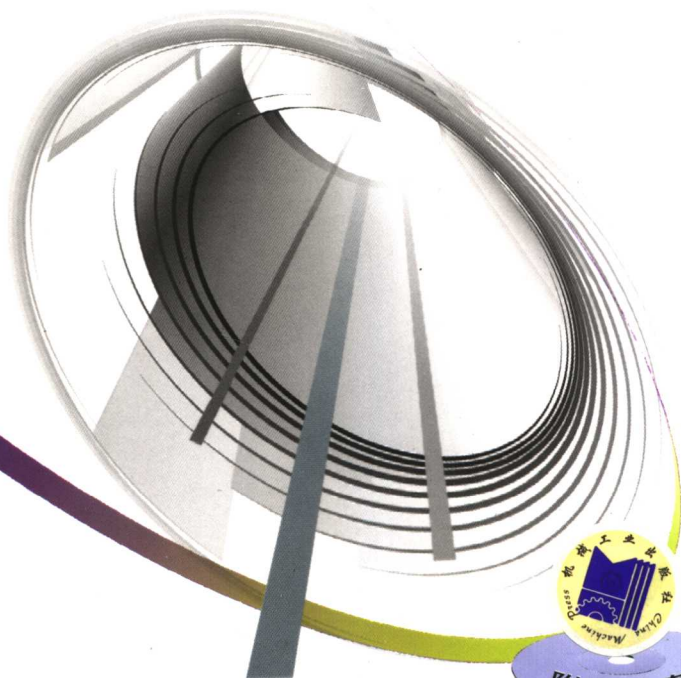


全国高等专科教育机械工程类专业规划教材

液压与气压传动



毛智勇 刘宝权 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



附赠光盘

全国高等专科学校教育机械工程类专业规划教材

液压与气压传动

主 编 毛智勇 刘宝权
副主编 马 霄
参 编 刘 建 纪 宏
主 审 黄迷梅



机械工业出版社

本教材是全国高职高专教育机械工程类专业规划教材,是根据高等职业教育和高等专科教育要求编写的。

全书包括液压传动和气动技术两部分内容,共分为15章,第1~11章为液压传动部分,第12~15章为气动技术部分。本书主要论述了液压和气动流体力学的基础知识;液压、气动元件的工作原理和结构特点;液压、气动基本回路的组成和分析,突出了典型系统在工业中的应用。根据技术应用性人才培养的特点,本教材特别在第10、11章和第14、15章重点介绍了液压、气动系统的安装维护、故障分析和系统综合模拟实训,通过教学和训练交替,可以加强学生对所学知识的理解和掌握,也适合于有关工程技术人员学习和参考。

本书在编写过程中,突出与实际应用相结合,注重引入最新的液压、气动技术内容,章节层次清晰,内容简洁易懂,实例以工业应用为主,并配有多媒体电子教案和演示动画,有利于广大读者学习和掌握。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动/毛智勇,刘宝权主编. —北京:机械工业出版社, 2007. 2

全国高等专科教育机械工程类专业规划教材

ISBN 978-7-111-20865-5

I. 液... II. ①毛... ②刘... III. ①液压传动—高等学校—教材 ②气压传动—高等学校—教材 IV. TH13

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第027354号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王海峰 版式设计:张世琴 责任校对:王欣

封面设计:姚毅 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷

2007年4月第1版 第1次印刷

184mm×260mm·16.75印张·412千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-20865-5

ISBN 978-7-89482-153-9(光盘)

定价:29.80元(含1CD)



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

前 言

培养符合生产一线需求的技术应用性人才已经成为目前我国高等职业技术教育和高等专科教育发展的首要任务。基于这种理念,本书在编写过程中,着重以当前工业生产中广泛应用的液压、气动主打产品和新技术为背景,突出教材的实用性和新颖性。考虑到当前液压技术的广泛应用,特别是气动技术的快速发展,本书以液压技术为主线、以气动技术为拓展,力求理论联系实际,基本理论和基本概念以必须和实用为度,专业知识突出针对性和应用性。

全书包括液压传动和气动技术两部分内容,共分为15章,第1~11章为液压传动部分,第12~15章为气动技术部分。本书主要论述了液压和气动流体力学的基础知识;液压、气动元件的工作原理和结构特点;液压、气动基本回路的组成和分析,突出了典型系统在工业中的应用。根据技术应用性人才培养的特点,本教材在第10、11章和第14、15章重点介绍了液压、气动系统的安装维护、故障分析和系统综合模拟实训,特别加强了培养学生现场分析问题和解决问题的能力,通过教学和训练交替,可以加强学生对所学知识的理解和掌握。

为了便于读者学习,本书在每章后均附有习题,并且配有多媒体电子教案和演示动画,有利于广大读者学习和掌握。本书可作为高等职业技术学院、高等专科学校、职工大学、成人教育学院等大专层次机电类及机械类专业的教学用书,也可供工程技术人员参考。

本书由毛智勇、刘宝权主编。参加编写的有北京联合大学毛智勇(第12~15章),辽宁科技学院刘宝权(第1、2、5、8、11章),河南机电高等专科学校马霄(第3、4章),北京联合大学刘建(第7章),辽宁科技学院纪宏(第6、9、10章)。全书由北京联合大学黄迷梅教授主审,提出了许多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。在本书的编写过程中曾得到SMC中国有限公司、德国FESTO中国有限公司、北京华德液压集团的大力支持和帮助,编者一并深表感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在缺点和错误,恳请广大读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 绪论	1	5.3 流量控制阀	63
1.1 液压与气压传动的应用与发展	1	5.4 插装阀	65
1.2 液压与气压传动的工作原理	1	5.5 电液伺服阀和电液比例阀	67
1.3 液压与气压传动的组成	2	思考题及习题	71
1.4 液压与气压传动的优缺点	3	第6章 辅助装置	73
思考题及习题	3	6.1 密封装置	73
第2章 液压流体力学基础	4	6.2 蓄能器	76
2.1 工作介质	4	6.3 油箱	79
2.2 液体静力学	7	6.4 过滤器	81
2.3 液体动力学	9	6.5 热交换器	85
2.4 液体流动中的压力损失	12	6.6 油管与管接头	86
2.5 孔口与缝隙流动	15	思考题及习题	89
2.6 液压冲击和气穴现象	16	第7章 液压基本回路	90
思考题及习题	17	7.1 压力控制回路	90
第3章 液压泵与液压马达	19	7.2 速度控制回路	95
3.1 概述	19	7.3 快速运动回路	105
3.2 齿轮泵与齿轮马达	24	7.4 速度换接回路	106
3.3 叶片泵与叶片马达	27	7.5 方向控制回路	108
3.4 柱塞泵与柱塞马达	33	7.6 多缸动作回路	109
3.5 螺杆泵	38	思考题及习题	113
思考题及习题	39	第8章 液压系统实例	116
第4章 液压缸	40	8.1 组合机床液压系统	116
4.1 液压缸的类型和特点	40	8.2 液压机液压系统	118
4.2 液压缸的结构	44	8.3 汽车起重机液压系统	120
4.3 液压缸的设计与计算	49	思考题及习题	122
4.4 液压缸常见故障及分析	52	第9章 液压传动系统设计与计算	123
思考题及习题	53	9.1 液压系统的设计步骤	123
第5章 液压控制阀	55	9.2 明确设计要求、进行工况分析	123
5.1 方向控制阀	55	9.3 拟定液压系统原理图	126
5.2 压力控制阀	60	9.4 计算和选择液压元件	127
		9.5 液压系统性能的验算	133

9.6 绘制正式工作图和编写技术文件	134
9.7 液压系统设计计算举例	134
思考题及习题	139

第 10 章 液压系统的安装、调试和故障

分析	140
10.1 液压系统的安装和调试	140
10.2 液压系统的使用维护	144
10.3 液压系统的常见故障及排除方法	150
思考题及习题	160

第 11 章 液压系统综合模拟实训

11.1 自动车床液压系统	161
11.2 包裹举升设备液压系统	162
11.3 拉深压力机液压系统	163
11.4 纸张压送设备液压系统	164
11.5 淬火炉液压系统	165
11.6 锅炉门启闭液压系统	167
11.7 输送带张紧装置液压系统	168
11.8 冷库门液压系统	169
11.9 圆周自动进给机床液压系统	171

第 12 章 气动基础及元件

12.1 气压传动基本知识	173
12.2 气源装置及附件	179
12.3 气动执行元件	188

12.4 气动控制元件	199
12.5 气动比例、伺服阀	213
12.6 气动机械手模块	215
思考题及习题	218

第 13 章 气动基本回路及气动系

统	220
13.1 气动基本回路	220
13.2 气动系统实例	232
思考题及习题	239

第 14 章 气动系统的维护保养及故障

分析	240
14.1 维护保养	240
14.2 气动系统常见故障及排除方法	242

第 15 章 气动系统综合模拟实训

15.1 油漆桶振动器	247
15.2 传输带分送装置	249
15.3 送料及夹紧装置	251
15.4 激光切割机卡具装置	254

附录 常用液压与气动元件图形

符号	257
----------	-----

参考文献

261

第1章 绪 论

1.1 液压与气压传动的应用与发展

液压与气压传动是一门新技术，它具有其他传动方式无法比拟的优越性，得到了迅猛发展，已广泛应用在国民经济的各个领域。

液压与气压传动实现传动与控制的方法基本相同，但它们又具有各自的特点和应用。

液压传动传递动力大、运动平稳、结构紧凑，但由于液体粘性大，在传递过程中阻力损失较大，不宜作远距离的传动和控制。液压传动广泛应用于工程机械、冶金、汽车、航空、制造等行业。液压技术正向高压、高速、高效、大功率、低能耗、高度集成化等方向发展。

气压传动工作压力较低（压力 1.0MPa 以下），传递动力不大，传动平稳性也不如液压传动，但由于空气粘性小，传递阻力小，传递速度快，反应灵敏。因而，气压传动更适合于远距离的传动和控制。气压传动已广泛应用在电子、轻工、纺织、食品、汽车等行业。气压技术正向节能化、小型化、轻易化、控制高精度化等方向发展。

目前，随着世界科技飞速发展，液压与气压技术在我国的应用已进入到一个崭新的发展阶段，正朝着研究开发系统的控制和机、电、计、液、气的综合技术方向发展。

1.2 液压与气压传动的工作原理

图 1-1 为液压千斤顶工作原理示意图。

当手提起杠杆 1 时，小活塞 2 下腔密封容积增大，腔内压力下降，形成部分真空，油箱 10 中的油液就在大气压力的作用下推开钢球 4 进入小缸的下腔，完成一次吸油动作。压下杠杆 1，小活塞下移，下腔密封容积减小，腔内压力升高，这时钢球 4 自动关闭了油液流回油箱的通路，油液就推开钢球 5 挤入大缸 6 的下腔，推动大活塞将重物 8 向上顶起。如此反复地提压杠杆 1，就可以使重物不断升起，达到起重的目的。将放油阀 9 旋转 90°，则在重物 8 的自重作用下，大缸的油液流回油箱，活塞下降到原位。

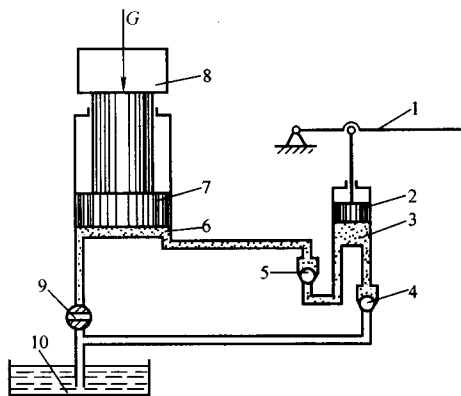


图 1-1 液压千斤顶的工作原理

1—杠杆 2—小活塞 3、6—液压缸 4、5—钢球
7—大活塞 8—重物 9—放油阀 10—油箱

液压与气压传动的基本工作原理是相似的，都是以流体的压力能来传递动力的。以液体（液压油）为工作介质，靠液体的压力能进行工作的称为液压传动。以压缩空气为工作介质，靠气体压力能进行工作的称为气压传动。

1.3 液压与气压传动的组成

图 1-2 所示为机床工作台的液压系统图。当电动机（图中未画出）带动液压泵旋转时，油箱 1 中油液经过滤器 2 后吸入液压泵并向上输出，油液经溢流阀 4，节流阀 5 和换向阀 6 进入液压缸 7 的左腔，推动活塞连同工作台 8 向右移动。同时，液压缸右腔油液经过换向阀 6 排回油箱 1。

如图 1-2b 所示，换向阀 6 起到改变油液流向的作用。将换向阀手柄扳到左边位置，则带有压力的油液（泵输出的油液）经换向阀进入液压缸的右腔，推动活塞连同工作台向左移动。这时，液压缸左腔的油液也经换向阀和回油管排回油箱。

节流阀起控制工作台移动速度的作用。当节流阀开口较大时，进入液压缸的流量较大，工作台的移动速度较快；反之，当节流阀开口较小时，工作台移动速度则较慢。

溢流阀 4 起控制调节油液压力的作用。调节溢流阀弹簧的预压力就能调整泵出口油液压力，并让多余的油液在相应压力下打开溢流阀，经回油管流回油箱。

图 1-3 所示为某气压传动系统

图。它主要依靠气压推动气缸动作进行控制，实现其自动工作循环。

由上面的例子可以看出，液压与气压传动系统主要由以下五部分组成：

- (1) 能源装置 将机械能转换成流体的压力能的装置，常见的是液压泵或空气压缩机。
- (2) 执行装置 将流体的压力能转换成机械能的装置，一般指作直线运动的液（气）压缸、作回转运动的液（气）压马达等。
- (3) 控制调节装置 对液（气）压系统中流体的压力、流量和流动方向进行控制和调节的装置。例如溢流阀、节流阀、换向阀等。
- (4) 辅助装置 指除以上三种以外的其他装置，如油箱、过滤器、分水滤气器、油雾器、蓄能器等。它们为液（气）压系统可靠和稳定地工作提供了必要的保障。
- (5) 传动介质 指传递能量的流体，即液压油或压缩空气。

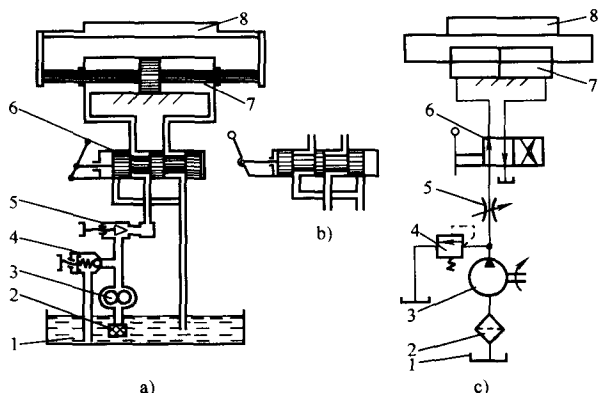


图 1-2 机床工作台液压传动系统

a) 半结构式工作原理图 b) 换向阀结构原理图 c) 图形符号图

1—油箱 2—过滤器 3—液压泵 4—溢流阀
5—节流阀 6—换向阀 7—液压缸 8—工作台

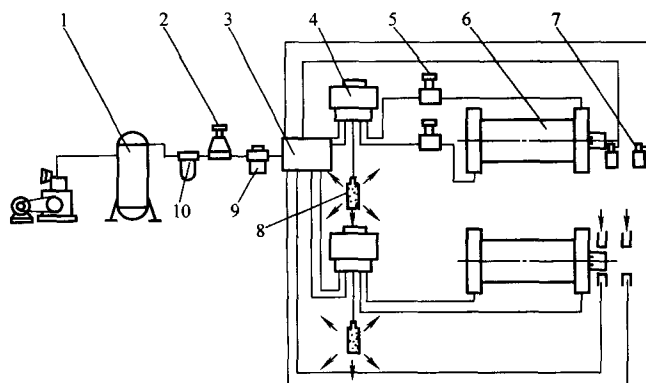


图 1-3 气压传动系统

1—气压发生装置 2—压力控制阀 3—逻辑元件 4—方向控制阀 5—流量控制阀 6—气缸 7—行程开关 8—消声器 9—油雾器 10—过滤器

图 1-2a 所示的液压系统图,是一种半结构式工作原理图。它直观性强,容易理解,但难于绘制。所以在实际工作中,一般都采用国标 GB/T 786.1—1993 规定的液压与气压图形符号(参看附录 A)来绘制液(气)压系统原理图。

如图 1-2c 所示为采用图形符号绘制的液压系统图。这些图形符号既便于绘制,又使液(气)压系统简单明了。

1.4 液压与气压传动的优缺点

1. 液(气)压传动与其他传动方式相比

主要优点:

- 1) 易实现较大范围内的无级调速,传动比达 $100:1 \sim 2000:1$ 。
- 2) 易实现复杂的顺序动作和远程控制。
- 3) 运动均匀、平稳、速度快、冲击小,便于频繁换向。
- 4) 体积小、重量轻、结构紧凑。
- 5) 操作简单,便于实现自动化。
- 6) 元件易于实现系统化、标准化和通用化。

主要缺点:

- 1) 传动介质易泄漏和可压缩性,无法保证严格的传动比。
- 2) 由于传递过程中压力损失和泄漏,使传动效率降低。
- 3) 温度影响比较敏感,不宜高温操作。
- 4) 系统出现故障时,不易找出原因。

2. 液压传动与气压传动比较

- 1) 液压传动传递动力大,传动效率较气压传动高。
- 2) 因为油液压缩性较空气压缩性小,故液压传动较气压传动运动更平稳。
- 3) 由于油液粘性大,阻力损失大,故液压传动不如气压传动更易于远程传输与控制。
- 4) 液压与气压传动中都存在泄漏,但液压油泄漏会污染环境。
- 5) 由于气压系统简单、安全,使其更适合多个行业如食品、卫生等。

思考题及习题

- 1-1 什么是液压传动?什么是气压传动?
- 1-2 液压与气压传动系统分别由哪几部分组成?各部分的作用是什么?
- 1-3 液压与气压传动主要优缺点有哪些?

第2章 液压流体力学基础

本章主要介绍液压油的基本性质及其运动规律，为分析、使用及设计液压系统打下必要的理论基础。

2.1 工作介质

液压传动是以液体作为工作介质来进行能量传递的，最常见的工作介质是液压油。

2.1.1 液压油的主要性质

1. 密度

单位体积的质量称为密度，通常用“ ρ ”来表示，一般液压油 ρ 取值为 900kg/m^3 。

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

式中 m ——液体的质量 (kg)；

V ——液体的体积 (m^3)。

液压油的密度随液体压力的增大而加大，随温度升高而减小，但这种变化量通常不大，可以忽略不计。

2. 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 κ 表示，设体积为 V 的液体，其压力变化量为 Δp ，液体体积减小 ΔV ，则

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

由于压力增大时液体的体积减小，因此上式加负号，体积压缩系数 κ 为正值。液体的可压缩性很小，在很多情况下可以忽略不计。当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 $\kappa = (5 \sim 7) \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$ 。

3. 粘性

液体在外力作用下流动时，分子间的内聚力会阻止分子相对运动，因而产生一种内摩擦力，这一特性称为液体的粘性。粘性是液体重要的物理性质，也是选择液压用油的主要依据之一。

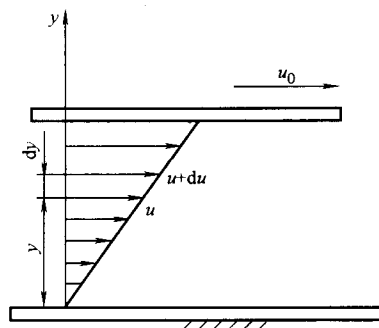


图 2-1 液体的粘性

如图 2-1 所示，液体流动时，粘性会使液体内部各层间的速度大小不等。设两平行平板间充满液体，下平板不动，上平板以速度 u_0 向右平移。由于液体的粘性作用，紧贴下平板的液体层速度为零，紧贴上平板的液体层速度为 u_0 ，而中间各层液体的速度近似呈线性规

律分布。

实验测定结果指出, 液体流动时相邻液层间的内摩擦力 F 与液层接触面积 A 、液层间的相对速度 du 成正比, 与层间距离 dy 成反比, 即

$$F = \mu A \frac{du}{dy} \quad (2-3)$$

式中, μ 是比例常数, 称为动力粘度。若以 τ 表示内摩擦切应力, 即液层间在单位面积上的内摩擦力, 则

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

这就是牛顿液体内摩擦定律。

液体粘性的大小用粘度来表示。常用的粘度有三种, 即动力粘度、运动粘度和条件粘度。

(1) 动力粘度 μ 动力粘度又称绝对粘度, 由式 (2-3) 可得

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

动力粘度的物理意义是: 液体在单位速度梯度下流动时, 接触液层间单位面积上产生的内摩擦力。

动力粘度的法定计量单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕·秒, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$), 它与以前沿用的非法定计量单位 P (泊, $\text{dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$) 之间的关系是

$$1 \text{Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{P} = 10^3 \text{cP} \text{ (厘泊)}$$

(2) 运动粘度 ν 动力粘度与液体密度的比值称为运动粘度, 以 ν 表示, 即

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

运动粘度无物理意义, 但它却是工程实际中经常用到的物理量。

运动粘度的法定计量单位是 m^2/s (米²/秒), 它与以前沿用的非法定计量单位 cSt (厘斯) 之间的关系是

$$1 \text{m}^2/\text{s} = 10^6 \text{mm}^2/\text{s} = 10^6 \text{cSt}$$

我国液压油采用 40°C 时运动粘度值 (mm^2/s) 为其粘度等级标号即油的牌号。例如牌号 L-HL22 普通液压油, 就是指这种油液在 40°C 时运动粘度平均值为 $22 \text{mm}^2/\text{s}$ 。

(3) 条件粘度 $^\circ E$ 条件粘度又称相对粘度。它随相对测量条件不同而不同。

例如, 恩氏粘度用恩氏粘度计测定。其方法是: 将 200mL 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 2.8mm 的小孔流出, 测出液体流尽所需时间 t_1 , 再测出 200mL 温度为 20°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

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

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

恩氏粘度和运动粘度的换算关系式为

$$\nu = \left(7.31^{\circ}E_t - \frac{6.31}{^{\circ}E_t} \right) \times 10^{-6} \quad (2-8)$$

液体的粘度随液体的压力和温度而变化。当液体压力增大时,分子间内聚力会增大,其粘度也增大。但增大的数值很小,可以忽略不计。

温度变化对液体的粘度影响较大,液体的温度升高其粘度显著下降,液体粘度随温度变化的性质称为粘温特性。几种典型液压油的粘温特性曲线如图 2-2 所示。

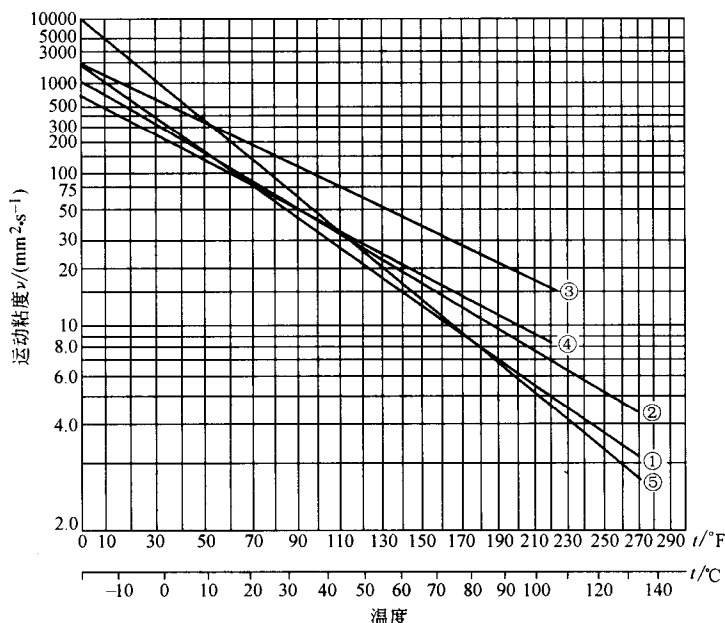


图 2-2 典型液压油的粘度-温度特性曲线

- ① 矿油型普通液压油 ② 矿油型高粘度液压油 ③ 水包油乳化液
④ 水-乙二醇液 ⑤ 磷酸酯液

(4) 其他性质

液压油还有其他一些物理化学性质,如抗燃性、抗凝性、抗氧化性、抗泡沫性、抗乳化性、防锈性、润滑性、导热性、相容性(主要是指对密封材料不侵蚀、不溶胀的性质)以及纯净性等,都对液压系统工作性能有重要影响。对于不同品种的液压油,这些性质的指标也有所不同,具体可查阅油类产品手册。

2.1.2 液压油的选用

1. 液压油的分类

液压油的品种很多,主要分为矿油型、乳化型和合成型三大类。

(1) 矿油型 包括普通液压油、抗磨液压油、低温液压油、高粘度液压油、液压导轨油、其他专用液压油等。

(2) 乳化型 包括水包油乳化液和油包水乳化液两类

(3) 合成型 包括水-乙二醇液、磷酸酯液两种。

常用的普通液压油代号为 L-HL, 其他液压油的具体代号及其特性和用途, 可查阅相关油类产品手册。

2. 液压油的使用要求

- 1) 合适的粘度和良好的粘温特性。一般液压系统用油粘度 $\nu_{40} = (15 \sim 68) \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。
- 2) 润滑性能好。
- 3) 纯净度好, 杂质少。
- 4) 对热、氧化、水解都有良好的稳定性, 使用寿命长。
- 5) 对金属及密封件材料等有良好的相容性。
- 6) 抗泡沫性、抗乳化性和防锈性好, 腐蚀性小。
- 7) 比热容和传热系数大, 体积膨胀系数小。
- 8) 闪点和燃点高, 流动点和凝固点低。

3. 液压油的选用

选用液压油时, 首先是液压油品种的选择。一般根据液压系统的使用性能和工作环境等因素来确定液压油的品种。品种确定之后, 就要选择油的粘度等级。在液压系统中选择油液粘度是关键, 应注意以下几方面的影响:

- (1) 工作压力 工作压力较高的系统宜选用粘度较大的液压油, 以减少泄漏。
- (2) 运动速度 当液压系统的工作部件运动速度较高时, 宜选用粘度较小的液压油, 以减轻液流的摩擦损失。
- (3) 环境温度 环境温度较高时, 宜选用粘度较大的液压油。

在液压系统的所有元件中, 以液压泵对液压油的性能最为敏感。它温升高, 工作压力也最高, 因此, 通常根据液压泵的类型及其要求来选择液压油的粘度。

2.2 液体静力学

液体静力学是研究静止液体的力学性质及规律。

2.2.1 液体的静压力

液体单位面积上所受的垂直力称为压力, 也称为压强。在液压传动中习惯称为压力, 用 p (单位 Pa) 表示。

液体静压力的特性:

- 1) 液体静压力垂直于受压表面, 且方向与该面的内法线方向一致。
- 2) 静止液体内部任意一点的压力在各个方向上都相等。

2.2.2 液体静力学基本方程

如图 2-3a 所示, 密度为 ρ 的液体在容器内处于静止状态。为求任意深度 h 处压力 p , 可以假想从液面往下切取一个垂直小液柱作为研究体, 设液柱的面积为 ΔA , 高为 h , 如图 2-3b 所示。由于液体静止, 则平衡方程为

$$p\Delta A = p_0\Delta A + \rho gh\Delta A$$

因此得

$$p = p_0 + \rho gh \quad (2-9)$$

式(2-9)称为液体静力学基本方程。

由式(2-9)可知,静止液体内任意点的压力由两部分组成,即液面上压力 p_0 和液体自重对该点的压力 ρgh 。静止液体内的压力随液体的深度呈线性规律分布。静止液体内同一深度的各点压力相等,组成等压面。在重力作用下静止液体的等压面是一个水平面。

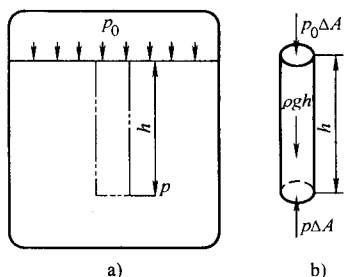


图 2-3 重力作用下的静止液体

a) 容器内的液体 b) 假想的小液柱

2.2.3 压力的表示方法及单位

1. 压力的表示方法

压力的表示方法有绝对压力和相对压力(表压力)两种。绝对压力以绝对真空为基准来进行度量。相对压力是以大气压 p_0 为基准进行度量。当液体中某点处的绝对压力 p 小于大气压力时,就会产生真空,并将绝对压力小于大气压力的数值称为该点的真空度。如图 2-4 所示,绝对压力、相对压力、真空度的关系是:

$$\text{绝对压力} = \text{相对压力} + \text{大气压力}$$

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

绝大多数压力表测得的压力都是相对压力。

2. 压力单位

压力的法定计量单位为帕斯卡,简称帕,符号为 Pa, $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。由于此单位很小,因此常采用兆帕,符号 MPa

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

压力的法定计量单位与非法定计量单位的换算关系为

$$1\text{at} (\text{工程大气压}) = 1\text{kgf/cm}^2 = 9.8 \times 10^4\text{N/m}^2$$

$$1\text{mH}_2\text{O} (\text{米水柱}) = 9.8 \times 10^3\text{N/m}^2$$

$$1\text{mmHg} (\text{毫米汞柱}) = 1.33 \times 10^2\text{N/m}^2$$

$$1\text{bar} (\text{巴}) = 1 \times 10^5\text{N/m}^2 = 0.1\text{MPa}$$

例 2-1 如图 2-5 所示,容器内盛有油液。已知油的密度 $\rho = 900\text{kg/m}^3$,活塞上的作用力 $F = 1000\text{N}$,活塞的面积 $A = 1 \times 10^{-3}\text{m}^2$,假设活塞的重量忽略不计。问活塞下方深度为 $h = 0.5\text{m}$ 处的压力等于多少?

解 活塞与液体接触面上的压力

$$p_0 = \frac{F}{A} = \frac{1000}{1 \times 10^{-3}}\text{N/m}^2 = 10^6\text{N/m}^2$$

深度为 h 处的液体的压力为

$$\begin{aligned} p &= p_0 + \rho gh = (10^6 + 900 \times 9.8 \times 0.5)\text{Pa} \\ &= 1.0044 \times 10^6\text{Pa} \approx 1\text{MPa} \end{aligned}$$

由此可以看出,液体在受外界压力作用的情况下,由液体自重所形成的那部分压力 ρgh

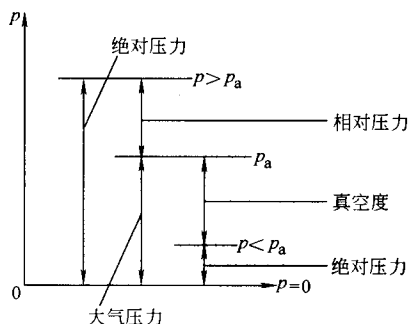


图 2-4 绝对压力、相对压力和真空度

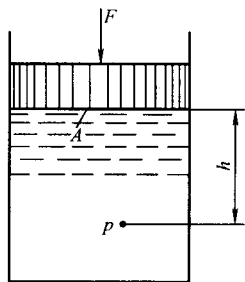


图 2-5 静止液体内的压力

相对甚小，在液压系统中常可忽略不计。以后在分析液压系统的压力时，一般都可以采用这种结论。

2.2.4 帕斯卡原理

如图 2-5 所示密闭容器内的液体，当外力 F 变化引起外加压力 p_0 发生变化时，只要液体仍保持原来的静止状态不变，则液体任一点的压力将发生同样大小变化。这就是说，在密闭容器内，施加于静止液体的压力可以等值地传递到液体各点。这就是帕斯卡原理，或称静压传递原理。

根据帕斯卡原理，容器内液体的压力 p 与负载 F 之间总是保持着正比关系

$$p = \frac{F}{A} \quad (2-10)$$

可见，液体内的压力是由外界负载作用所形成的，即压力决定与负载，这是液压传动中的一个重要的基本概念。

2.2.5 液体对固体壁面的作用力

在液压传动计算中，由于液体自重压力 ρgh 可以忽略，静压力处处相等，所以可认为作用于固体壁面上的压力是均匀分布的。

当固体壁面是一个平面时，如图 2-6a 所示，则压力 p 作用在活塞上的力 F 为

$$F = pA = \frac{\pi D^2}{4} p \quad (2-11)$$

当固体壁面是一个曲面时，作用在曲面各点的液体静压力是不平行的，但是静压力的大小是相等的，如图 2-6b、c 所示的球面和圆锥面，液体静压力 p 沿垂直方向作用在球面和圆锥面上的力 F ，就等于作用于该部分曲面在垂直方向的投影面积 A 与压力 p 的乘积，即

$$F = pA = p \frac{\pi}{4} d^2 \quad (2-12)$$

式中 d ——承压部分曲面投影圆的直径。

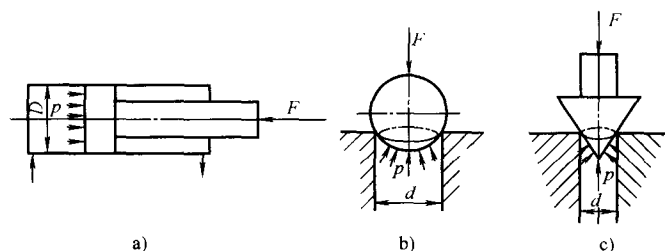


图 2-6 液压力作用在固体壁面上的力

a) 活塞平面 b) 球面 c) 圆锥面

2.3 液体动力学

液体动力学主要研究液体流动时的运动规律、能量转换及流动液体对固体壁面的作用力

等问题。

2.3.1 基本概念

1. 理想液体和恒定流动

(1) 理想液体 理想液体是一种假想的无粘性, 不可压缩的液体, 而实际液体既有粘性又可压缩。

(2) 恒定流动 液体流动时液体中任意点处的压力、流速和密度都不随时间而变化, 称为恒定流动; 反之, 称为非恒定流动。

2. 流线、流束和通流截面

(1) 流线 流线是表示某一瞬时液流中各处质点运动状态的一条条曲线。在此瞬时, 流线上各液体质点速度方向与该曲线相切, 如图 2-7a 所示。

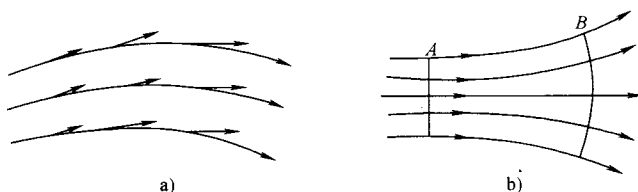


图 2-7 流线和流束

a) 流线 b) 流束和通流截面

(2) 流束 流线的集合构成流束, 如图 2-7b 所示。当通过截面的面积 A 很小时, 该流束称为微小流束, 可以认为微小流束截面上各液体质点的速度是相等的。

(3) 通流截面 流束中与所有流线正交的截面称为通流截面, 该截面上每点处的流束都垂直于此面, 如图 2-7b 中的 A 面与 B 面。

3. 流量和平均流速

(1) 流量 单位时间内流过通流截面的液体体积称为流量, 用 q (单位为 m^3/s) 表示。对于微小流束, 通过该通流截面的流量为

$$dq = u dA$$

实际液体流过整个流通截面的流量为

$$q = \int_A u dA$$

(2) 平均流速 假设流通截面上流速均匀分布, 称之为平均流速, 用 v (单位为 m/s) 表示。则

$$q = \int_A u dA = vA$$

由此得到平均流速为

$$v = \frac{q}{A} \quad (2-13)$$

可见, 平均流速与液体流量成正比关系, 即速度决定于流量, 这是液压传动中又一重要的基本概念。在液压系统中, 液压缸的有效面积是一定的, 活塞运动的速度就是由进入液压缸的流量所决定。

2.3.2 连续性方程

连续性方程是质量守恒定律在流体力学中的表达形式。

如图 2-8 所示, 液体在管道中作恒定流动。任取 1、2 两个通流截面, 两截面处面积为 A_1 和 A_2 , 平均流速为 v_1 和 v_2 , 液体密度为 ρ_1 和 ρ_2 , 则根据质量守恒定律, 在单位时间内流过两通流截面的液体质量相等, 即

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

当忽略液体的可压缩性时, $\rho_1 = \rho_2$, 则得

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

或写成

$$vA = q = \text{常数} \quad (2-14)$$

式 (2-14) 就是液体的连续性方程。它说明液体在管道中流动时, 流过各个截面的流量是相等的, 而流速和通流面积成反比。

2.3.3 伯努利方程

伯努利方程是能量守恒定律在流体力学中的表达形式。

1. 理想液体的伯努利方程

在理想液体恒定流动中, 任取两截面 A_1 和 A_2 , 如图 2-9 所示。截面 A_1 的平均流速为 v_1 , 压力为 p_1 , 位置高度为 h_1 ; 截面 A_2 的平均流速为 v_2 , 压力为 p_2 , 位置高度为 h_2 。

由理论推导可得到理想液体的伯努利方程为

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2-15)$$

或写成

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{常数} \quad (2-16)$$

上式各项分别代表单位体积液体的压力能、位能和动能, 或称比压能、比位能和比动能。

式 (2-16) 表明, 理想液体作恒定流动时, 在同一流束内, 任意截面上的三种能量的总和等于常数, 且三种能量之间可以互相转换。

2. 实际液体的伯努利方程

实际液体是有粘性的, 流动时产生内摩擦力而消耗部分能量; 同时, 管道局部形状和尺寸的骤然变化使液流产生扰动, 亦消耗能量。因此, 实际液体流动时存在能量损失。另外, 在推导理想液体伯努利方程时, 认为任取微小流束通流截面的速度相等, 而实际液体的粘性使流束在通流截面上各点的真实流速是不相等的。因此, 用平均流速计算动能时, 必然会产生误差。为了修正这个误差, 需引入动能修正系数 α 。

因此, 实际液体的伯努利方程为

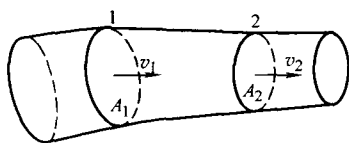


图 2-8 液流的连续性原理

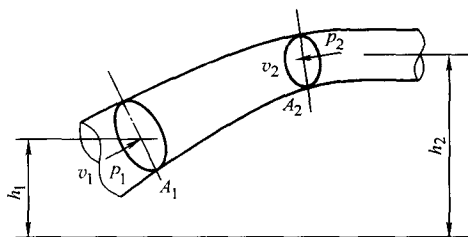


图 2-9 伯努利方程示意图