

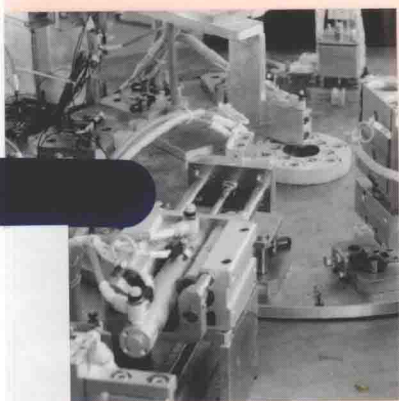
普通高等教育“十三五”规划教材

Study and Experimental Guide of Hydraulic and
Pneumatic Transmission

液压与气压传动学习 及实验指导

第②版

苏杭 刘延俊 ◎ 主 编
秦月霞 李海燕 ◎ 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十三五”规划教材

液压与气压传动学习 及实验指导

第2版

主 编	苏 杭	刘延俊	
副主编	秦月霞	李海燕	
参 编	赵 新	张 坤	孔祥臻
	周 军	刘维民	陈正洪
	彭建军	罗华清	贾 瑞
主 审	李宏伟		



机械工业出版社

本书是“十三五”普通高等教育本科国家级规划教材《液压与气压传动》(第3版)(刘延俊主编)的配套教学参考书,也可作为已出版的各种版本的《液压与气压传动》教材的辅助参考书。

本书共分13章,包括教学辅导、实验指导、综合练习三部分,绝大部分章又分为重点、难点分析,典型例题解析,练习题三方面内容。前12章分别对应教材各章节,对课本内容做进一步的辅导。第13章为实验指导部分,包含“液压与气压传动”11个实验,液压传动综合教学实验台实验和气动PLC控制综合教学实验台实验,每个实验均配有详细的实验步骤。教材最后配有综合测试题,涵盖了全书内容,可作为对全书内容掌握程度的综合检验与练习。

本书的特点是:内容范围广、实用性强、例题精炼、习题恰当、实验全面、启发性强、通俗易懂,不但适合于一般工科院校机械类、近机类本科生学习使用,也可供高等职业学院、成人教育学院相关专业师生和工程技术人员参考。

本书附有各章练习题及综合练习题的参考答案,教师可通过机工教育服务网(<http://www.cmpedu.com>)下载。

图书在版编目(CIP)数据

液压与气压传动学习及实验指导书/刘延俊主编. —2版. —北京:机械工业出版社, 2015.8

普通高等教育“十三五”规划教材

ISBN 978-7-111-51009-3

I. ①液… II. ①苏… III. ①液压传动—高等学校—教学参考资料②气压传动—高等学校—教学参考资料 IV. ①TH137②TH138

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第174724号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘小慧 责任编辑:刘小慧 孙阳 李超 余晖

版式设计:赵颖喆 责任校对:陈越

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京玥实印刷有限公司印刷

2015年10月第2版第1次印刷

184mm×260mm·12.5印张·303千字

标准书号:ISBN 978-7-111-51009-3

定价:27.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

策划编辑:010-88379733

封面防伪标均为盗版

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

前 言

本书是根据全国高校教学指导委员会审定的“液压与气压传动课程教学基本要求”编写的，与刘延俊教授主编的“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《液压与气压传动》第3版配套使用，也可作为已经出版的各种版本的《液压与气压传动》教材的辅助参考书。

本书共分13章，包括教学辅导、实验指导、综合练习三部分内容。其中，前12章是教学辅导部分，与主教材的章节内容相对应，绝大部分章又分为重点、难点分析，典型例题解析，练习题三方面内容。第13章为实验指导部分，包含液压与气压传动11个实验、液压传动综合教学实验台实验和气动PLC控制综合教学实验台实验，每一个实验分为实验目的、实验设备、实验原理、实验参考步骤、实验报告等内容。教材最后设置了两套涵盖全书内容的综合测试题，据此作为对全书内容掌握程度的综合检验与练习。

本书的主要特点是：

1) 深入分析了各章的重点、难点内容，根据编者多年的教学积累和对全书内容的把握，通过深入浅出的分析，将各章的重点与难点内容进行了剖析，为学生掌握这些内容提供了有益的提示。

2) 精心编排并解析了各章的典型例题，通过对知识点的把握与分析，结合历届学生在学习中经常遇到的问题，精选了部分例题进行分析、解答。在解题过程中力争做到详略得当、思路清晰、要点突出、方法得当，对于引导学生正确运用所学的理论知识与知识解决实际问题起到抛砖引玉的作用。

3) 较全面地筛选了部分练习题。由于专业技术课程难以用恰当的练习题覆盖所有的知识点，为便于教师在教学过程中选题和学生在学习过程中练习，较为宽泛地编选了练习题。将能够通过练习的方式涵盖的知识点的习题尽可能编入教材；对所选的习题均进行了解算与验证，努力保证所选习题的正确性。

4) 较为宽泛地筛选了实验项目与实验内容。因为各高校的实验条件不同、实验设备各异，无法选择适合于所有高校的实验内容，目前流行的插装式实验台，使实验的多样性更为突出。基于这种条件，为便于教学，我们选择各高校使用较为普遍的几种固定回路的实验台为代表，着重介绍各项实验的原理和目的。对于实验步骤，书中只提供必要的参考步骤，具体的实际操作则可由实验者根据已有的实验台和对实验原理的理解自行设计。

5) 根据教材内容，编入了两套综合测试题，以综合练习的形式供学习者检查自己对教材内容的掌握程度，也为课程的考试提供了参考题型。

6) 本书在编写过程中注重理论性与实用性，启发性与通俗性的结合，不但适合于一般工科院校机械类、近机类本科生学习使用，也可供高等职业学院、成人教育学院相关专业师生和工程技术人员参考。

本书由山东建筑大学苏杭和山东大学刘延俊任主编，山东建筑大学秦月霞与李海燕任副主编。山东大学周军、刘维民、罗华清、贾瑞，山东建筑大学赵新、张坤，河南科技大学彭建军以及山东交通学院孔祥臻、陈正洪也参加了本书的编写工作。

由于编者水平有限，书中难免存在不足之处，敬请广大读者批评指正。

编 者
于山东济南

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 重点、难点分析	1
1.2 典型例题解析	2
1.3 练习题	2
第2章 液压油与液压流体力学基础	3
2.1 重点、难点分析	3
2.2 典型例题解析	5
2.3 练习题	9
第3章 液压泵与液压马达	15
3.1 重点、难点分析	15
3.2 典型例题解析	18
3.3 练习题	21
第4章 液压缸	24
4.1 重点、难点分析	24
4.2 典型例题解析	28
4.3 练习题	31
第5章 液压控制阀	33
5.1 重点、难点分析	33
5.2 典型例题解析	36
5.3 练习题	40
第6章 液压辅助元件	43
6.1 重点、难点分析	43
6.2 典型例题解析	45
6.3 练习题	46
第7章 液压基本回路	47
7.1 重点、难点分析	47
7.2 典型例题解析	51
7.3 练习题	55
第8章 典型液压系统	61
8.1 重点、难点分析	61
8.2 典型例题解析	64
8.3 练习题	67
第9章 液压系统的设计计算	75

9.1 重点、难点分析	75
9.2 典型例题解析	76
9.3 练习题	81
第10章 液压伺服系统	82
10.1 重点、难点分析	82
10.2 典型例题解析	82
10.3 练习题	83
第11章 气压传动	84
11.1 重点、难点分析	84
11.2 典型例题解析	86
11.3 练习题	87
第12章 液压气动系统的安装、调试、 使用与维护	88
12.1 重点、难点分析	88
12.2 练习题	89
第13章 液压与气压传动实验指导	90
13.1 液压系统中工作压力形成实验	90
13.2 液阻特性实验	94
13.3 液压泵性能测试实验	96
13.4 液压泵拆装实验	99
13.5 溢流阀静、动态性能实验	101
13.6 液压阀的拆装实验	106
13.7 节流调速回路性能实验	108
13.8 液压基本回路实验	112
13.9 液压回路的拼装实验	120
13.10 气动逻辑元件静态压力特性测试	123
13.11 气动线路设计	125
13.12 液压传动综合教学实验台实验	127
实验项目、内容及步骤	131
液压元件的性能测试	131
实验1 液压泵的性能测试	131
实验2 溢流阀的特性测试	132
实验3 节流阀的特性测试	134
实验4 调速阀的特性测试	136

实验 5 减压阀的特性测试	137
实验 6 液压缸的特性测试	139
典型液压回路实验	141
实验 1 采用节流阀的节流调速回路	141
实验 2 采用调速阀的定压节流调速回路	144
实验 3 简单的压力调定回路	147
实验 4 变量泵加旁路小孔节流的调压回路	148
实验 5 用多个溢流阀的压力调节回路 ..	149
实验 6 用减压阀的减压回路	150
实验 7 采用行程阀减速与流量控制阀组合的减速回路	151
实验 8 调速阀串联的速度换接回路	152
实验 9 调速阀并联的速度换接回路	153
实验 10 采用三位换向阀的卸荷回路	154
实验 11 采用先导式溢流阀的卸荷回路	155
实验 12 采用顺序阀的顺序动作回路	155
实验 13 采用电器行程开关的顺序动作回路	156
实验 14 采用压力继电器的顺序动作回路	157
实验 15 采用液控单向阀的闭锁（平衡）回路	158
实验 16 采用顺序阀的平衡回路	159

13.13 气动 PLC 控制综合教学实验台	
实验	160
实验项目、内容及实验步骤	163
气动回路功能演示实验	163
实验 1 单作用气缸的换向回路	163
实验 2 双作用气缸的换向回路	164
实验 3 单作用气缸的速度调节回路	165
实验 4 双作用气缸的速度调节回路	167
实验 5 速度换接回路	169
实验 6 缓冲回路	170
实验 7 互锁回路	171
实验 8 过载保护回路	172
实验 9 单缸单往复控制回路	173
实验 10 单缸连续往复控制回路	174
实验 11 双缸顺序动作回路	175
实验 12 三缸联动回路	176
实验 13 二次压力控制回路	177
实验 14 计数回路	178
实验 15 延时回路	179
实验 16 逻辑阀的应用回路	180
实验 17 双手操作回路	181
综合测试题 I	183
综合测试题 II	187
参考文献	191

绪 论

1.1 重点、难点分析

本章的重点内容是：液压传动的工作原理；液压传动系统的组成；液压传动的特点；液压传动技术的应用。在重点内容中，液压传动的工作原理是重中之重，其他是该内容的延伸和深化。通过对重点内容的分析，可以对液压传动有一个概括的认识，为进一步学习液压传动技术建立基础。当学习了全部课程后，再分析重点内容，会对其赋予新的内涵。

本章的难点是对液压传动工作原理的基本分析。对简单机床液压传动系统工作过程的分析，涉及工作载荷的控制和运动速度的调整两个问题，从而引申出压力与负载的关系、流量与速度关系这两个重要概念。这两个概念在此只能作为简单概念引出，在学习完第2章内容后才能得到基本的了解，当学习完本课程的全部内容后，才能对此概念得到比较深刻的理解。

1) 液压传动是以液体为工作介质，以液体的压力能传递运动和动力的传动方式。简单机床液压传动系统的工作过程，就是液压传动系统传动工作原理的真实写照。通过对此系统的分析可以引申出系统的过载控制和速度调节两个问题，从而为液压传动的特点分析打下感性基础。一个完整的液压传动系统是由能源装置、执行装置、控制调节装置、辅助装置组成，不同的液压系统，其四个组成部分元件的类型和数量不同。通过对各部分元件的分析，可以对整个液压系统的特点有深入的了解。液压传动的特点是该传动方式赖以生存和发展的基础，其大范围的无级调速、大功比、易自动控制、易过载保护、传动平稳、标准化程度高等优点是其他传动方式所不可比拟的。因此，液压传动在工程机械、矿山机械、压力机械、航空设备、金属加工设备、注塑设备中得到广泛的应用。

2) 涉及压力与负载的关系时，首先要搞清什么是负载。从广义上讲，一切阻碍液体流动的阻力都是负载。例如：液体在管路里流动时，液体与管壁间摩擦会产生负载；液体流经各种液压元件时，液压元件的阀芯通道产生阻力而造成负载；液体进入液压缸推动活塞克服外加阻力形成载荷负载等。前两种负载属于内负载，看不见，摸不着，并且所占比例不大，通常作为系统的能量损失和效率考虑；后者是系统对外界所做的功，直观性强，是实实在在需要克服的外负载，一般需单独计算。从某种角度上可以认为，液压系统的压力就是靠液压泵对液压油的推动与负载对液压油的阻尼作用产生出来的。因此“系统的压力取决于负载”

就是指上述负载（包括内、外负载）越大，系统的压力越大；反之亦然。

3) 流量与速度的关系，是指液压缸的活塞带动工作台运动时，活塞的运动速度与进入液压缸的液压油流量间的关系。事实上，活塞的速度就是液压缸内油面增长的平均速度，而液压油的流速与单位时间内进入液压缸的流量成正比，因此“执行装置（工作台）的运动速度取决于进入执行装置的液压油流量”。

1.2 典型例题解析

例 1-1 图 1-1 是液压千斤顶的传动系统图，试说明其工作原理。

解：当抬起手柄 5 时，活塞 6 向上运动，液压缸 7 容积增大形成真空，单向阀 3 关闭，液压缸 7 通过单向阀 8 从油箱吸油；当压下手柄 5 时，活塞 6 向下运动，单向阀 8 关闭，液压缸 7 中的油液通过单向阀 3 进入液压缸 2，推动活塞 1 向上运动，抬起重物。再抬起手柄 5，液压缸 7 从油箱吸油；压下手柄 5，油液进入液压缸 2……，这样，油液不断地被吸入液压缸 7，压入液压缸 2，就可以把重物抬起到所需的高度。由于单向阀 3 的作用，重物升高后不会落下来，当需要放下重物时，打开截止阀 4，液压缸 2 中的油液流回油箱，重物就被放下来。重物放下来后，关闭截止阀 4，待下次需要放油时打开。

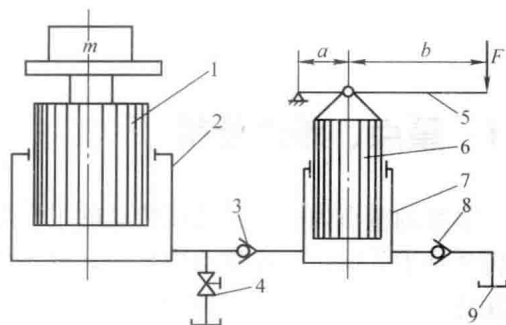


图 1-1 例 1-1 图

1、6—活塞 2、7—液压缸 3、8—单向阀
4—截止阀 5—手柄 9—油箱

1.3 练习题

- 1-1 液压传动与机械传动相比，有哪些优缺点？试列举液压传动应用实例。
- 1-2 液压系统由哪几部分组成？各部分的作用是什么？
- 1-3 目前液压传动技术正向着什么方向发展，请举出实例。
- 1-4 一个企业能否采用一个泵站集中供给压力油？说明理由。

液压油与液压流体力学基础

2.1 重点、难点分析

本章是液压与气压传动课程的理论基础。其主要内容包括：一种介质、两项参数、三个方程、三种现象。一种介质就是液压油的性质及其选用；两个参数就是压力和流量的相关概念；三个方程就是连续性方程、伯努利方程、动量方程；三种现象就是液体流态、液压冲击、空穴现象的形态及其判别。

在上述内容中重点内容为：液压油的黏性和黏度；液体压力的相关概念如压力的表达、压力的分布、压力的传递、压力的损失；流量的相关概念（如：流量的计算、小孔流量、缝隙流量）；三个方程的内涵与应用。其中，液压油的黏度与黏性、压力相关概念、伯努利方程的含义与应用、小孔流量的分析是本章重点中的重点也是本章的难点。

1) 液压油的黏性是液体流动时由于内摩擦阻力而阻碍液层间相对运动的性质，黏度是黏性的度量。液压油的黏度分为动力黏度、运动黏度和相对黏度。动力黏度描述了牛顿液体的内摩擦应力与速度梯度间的关系，物理意义明确但是难以实际测量；运动黏度是动力黏度与密度的比值，国产油的标号就是运动黏度的平均厘斯值的表达，实用性强，直接测量难；相对黏度就是实测黏度，其中恩氏黏度就是用恩氏黏度计测量油液与对比液体流经黏度计小孔时间参数的比值，直观性强，物理意义明确，操作简便。在一般情况下，动力黏度用作黏度的定义，运动黏度用作油品的标号，相对黏度用作黏度的测量。三者的换算关系可以用教材中所提供的公式解算，也可通过相关手册所提供的线图查取。影响黏度的因素主要有温度和压力，其中温度的影响较大。在选用液压油时，除考虑环境因素和设备载荷性质外，主要分析元件的运动速度、精度以及温度变化等因素的影响。

2) 液压系统中的压力就是物理学中的压强，压力分静止液体的压力和流动液体的压力两种；按参照基准不同，压力表达为绝对压力、表压力和真空度；在液压系统中，压力的大小取决于负载（广义负载）；压力的传递遵循帕斯卡原理，对于静止液体压力的变化量等值传递，对于流动液体压力传递时要考虑到压力损失的因素；压力分布的规律就是伯努利方程在静止液体内的一种表述形式。

压力的表达方法主要指绝对压力和相对压力，相对压力又分为表压力和真空度。上述压力间的关系的要点在于选择的测量基准不同：若以绝对零压为基准所测得的是绝对压力；以

大气压为基准所测得的是相对压力。当所测压力高于大气压时,其高出的部分为表压力(即压力表所指示的压力值);当所测压力低于大气压时,其低于大气压的部分为真空度。对于真空度的概念,有人错误地认为就是零压。实际上,绝对真空才是零压,而真空度只表示绝对压力不足大气压的那部分数值,也就是以大气压为基准所测量到的负表压力值(取绝对值),真空度的最大值为一个大气压。在解决上述压力间的问题时,首先要选择好压力的测量基准与等压面,否则容易引起概念的混乱。

3) 液压系统所指的流量就是单位时间流经某截面流体的体积,用流体的平均流速与其流管截面面积之积计算。对于进出油口没有安装节流装置、不考虑泄漏的执行元件,其运动速度取决于输入执行元件的流量,而与负载无关;对于进出油口设有节流装置、且需考虑泄漏的执行元件,其运动速度不但与流量有关而且受负载变化的影响。

小孔流量公式主要建立起了流体的流量与压力(压差)间的关系;缝隙流量公式主要建立起了泄漏量与压差间的关系。对于各类阀孔、节流孔、管道的变径孔,都可以用小孔流量公式分析其流量与压力间的特性关系。最小稳定流量就是通过流量阀口连续流动液体流量的最小值,其大小不但与小孔性质有关,也与小孔两端的压差有关,还与小孔的形状、油液的黏度有关。

4) 连续性方程、伯努利方程式、动量方程分别是质量守恒定律、能量守恒定律、动量定律在流体力学中的表达形式。连续性方程主要分析在同一管道内不同截面,流体的流速与面积间的变化关系;伯努利方程式主要解决流体与压力、速度、位置有关量的变化问题;动量方程主要研究流体速度变化与作用力间的问题。

伯努利方程也就是能量方程,它表明了液体内压能、动能、势能间的关系。其物理意义在于:在流管内流动的液体存在压能、动能、势能三种形式的能量;液体在流动过程中,这三种能量之间可以相互转换;在同一流管内不同截面上,这三种能量连同流体流经截面间所产生的能量损失之和保持不变。该方程最适合解决流体涉及压力、速度、位置有关的问题。事实上静止液体的压力分布、小孔流量、缝隙流量、压力损失等问题都可以看作伯努利方程在不同问题上的具体应用。但是该方程不适合用于相变流体(液态变气态)的流体,也不适合用于流管与外界有能量交换的流体。因为相变流体要涉及如显热、潜热、气化热等能量的转化问题,与外界有能量交换的流体有能量的损失问题,对于上述流体仅用伯努利方程无法解释其能量守恒问题。在使用该方程解决问题时要注意选择好流管的计算截面,应选择参数明显且易于确定的面作为计算截面,这样会达到事半功倍的效果。

动量方程适合于液动力的计算。在使用动量方程时,要注意其中的速度与力均为矢量,在进行量值计算时一定要将矢量向坐标方向投影分解,分别考虑各向动量。

5) 液体的流态分为层流与湍流,其判定方法是计算流体的雷诺数与临界雷诺数比较;若计算雷诺数大于临界雷诺数为湍流,小于临界雷诺数为层流;雷诺数的物理意义是流体的液动力参数与黏滞力参数的比值。

液压冲击是流体与运动部件的冲击力与惯性力突变所引起的系统内液体的压力突然升高的现象,液压冲击会产生噪声甚至于损坏液压元件,防止的措施是延长压力变化的时间或设置缓冲装置吸收冲击。

空穴现象是由于液压系统内某点的压力过低而造成局部产生气泡的现象,空穴破坏液体流动的连续性、使系统产生噪声、在元件内表面产生疲劳点蚀等。防止空穴产生的主要措施

就是避免液体内出现的局部低压点，防止液压油内气体的析出。

2.2 典型例题解析

例 2-1 如图 2-1 所示，容器内盛满液体，已知活塞面积 $A = 10 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ，负载重量 $G = 10 \text{ kN}$ ，问压力表的读数 p_1, p_2, p_3, p_4, p_5 各为多少？

解：容器内的液体是静止的，忽略由于其自重产生的压力，则液体内部各点的压力相等，即

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = p_5 = \frac{G}{A} = \frac{10000}{10 \times 10^{-3}} \text{ Pa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa} = 1 \text{ MPa}$$

例 2-2 如图 2-2 所示，半径为 $R = 100 \text{ mm}$ 的钢球堵塞着垂直壁面上直径为 $d = 1.5R$ 的圆孔，若已知钢球密度 $\rho_1 = 8000 \text{ kg/m}^3$ ，液体密度 $\rho_2 = 900 \text{ kg/m}^3$ ，问钢球中心距容器液面的深度 H 为多少时，钢球才能处于平衡状态？

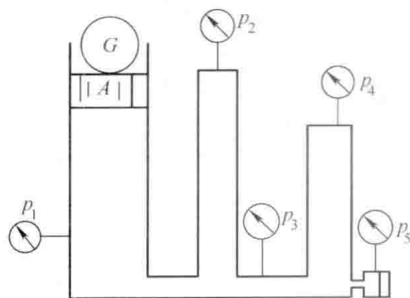


图 2-1 例 2-1 图

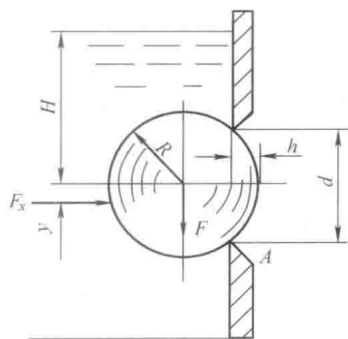


图 2-2 例 2-2 图

解：当钢球重量减去球浸没部分所受浮力对 A 点的力矩与水深 H 对钢球产生的水平方向作用力对 A 点的力矩相平衡时，才能使钢球处于平衡状态。假设浮力作用在钢球中心上。则

$$F = \frac{4\pi R^3}{3} \rho_1 g - \left[\frac{4}{3} \pi R^3 - \pi h^2 \left(R - \frac{h}{3} \right) \right] \rho_2 g$$

根据几何关系

$$h = R - \sqrt{R^2 - (d/2)^2} = 0.1 \text{ m} - \sqrt{0.1^2 - (1.5 \times 0.05)^2} \text{ m} = 0.034 \text{ m}$$

故

$$\begin{aligned} F &= \frac{4\pi}{3} \times 0.1^3 \times 8000 \times 9.8 \text{ N} - \left[\frac{4}{3} \pi \times 0.1^3 - \pi \times 0.034^2 \left(0.1 - \frac{0.034}{3} \right) \right] 900 \times 9.8 \text{ N} \\ &= 294.30 \text{ N} \end{aligned}$$

该力对 A 点的力矩为

$$T_F = F(R - h) = 294.30 \text{ N} \times (0.1 - 0.034) \text{ m} = 19.43 \text{ N} \cdot \text{m}$$

水平力

$$F_x = \rho_2 g H \cdot \frac{\pi}{4} d^2 = 900 \times 9.8 \times \frac{\pi}{4} \times (1.5 \times 0.1)^2 H = 155.86 H$$

作用点到钢球中心线的距离

$$y = \frac{d^2}{16H} = \frac{(1.5 \times 0.1)^2}{16H} = \frac{0.001406}{H}$$

水平力对 A 点的力矩为

$$\begin{aligned} T_x &= F_x \cdot \left(\frac{d}{2} - y \right) = 155.86 H \times \left(\frac{1.5 \times 0.1}{2} - \frac{0.001406}{H} \right) \\ &= 11.6895 H - 0.2191 = T_F = 19.43 \end{aligned}$$

$$H = \frac{19.43 + 0.2191}{11.6895} \text{ m} = 1.681 \text{ m}$$

例 2-3 用图 2-3 所示仪器测量油液黏度, 已知 $D = 100 \text{ mm}$, $d = 99 \text{ mm}$, $l = 200 \text{ mm}$, 当外筒转速 $n = 6 \text{ r/s}$ 时, 测得转矩 $T = 30 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$, 求油液的动力黏度。

解: 测得的转矩包括筒部和底部产生的转矩, 即 $T = T_1 + T_2$

$$T_1 = \tau A \cdot D/2$$

$$\tau = \mu \frac{du}{dr} = \mu \frac{\pi D n}{(D/2) - (d/2)} = \frac{2\mu \pi D n}{D - d}$$

$$\text{故 } T_1 = \frac{2\mu \pi D n}{D - d} \pi D L D/2 = \frac{\mu \pi^2 D^3 L n}{D - d}$$

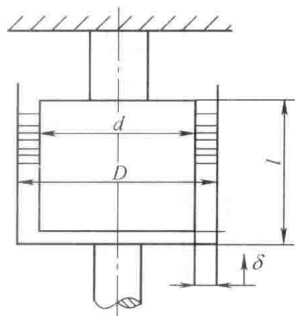


图 2-3 例 2-3 图

假设内外筒之间的间隙为 δ , 则 $\delta = \frac{D - d}{2} = \frac{100 - 99}{2} \text{ mm} = 0.5 \text{ mm}$

$$T_2 = \int_0^{\frac{d}{2}} \left(\mu \frac{2\pi r n}{\delta} 2\pi r dr \right) r = \mu \frac{4\pi^2 n}{\delta} \int_0^{\frac{d}{2}} r^2 dr = \frac{1}{16\delta} \mu \pi^2 n d^4$$

$$T = \frac{\mu \pi^2 D^3 L n}{D - d} + \frac{1}{16\delta} \mu \pi^2 n d^4$$

故

$$\begin{aligned} \mu &= \frac{T}{\frac{\pi^2 D^3 L n}{D - d} + \frac{\pi^2 n d^4}{16\delta}} \\ &= \frac{30 \times 10^{-2}}{\frac{\pi^2 \times 0.1^3 \times 0.2 \times 6}{0.1 - 0.099} + \frac{\pi^2 \times 6 \times 0.099^4}{16 \times 0.5 \times 10^{-3}}} \text{ Pa} \cdot \text{s} = 0.024 \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

例 2-4 如图 2-4 所示一倾斜管道, 其长度 $L = 20\text{m}$, 直径 $d = 10\text{mm}$, 两端高度差 $h = 15\text{m}$, 管中液体密度 $\rho = 900\text{kg/m}^3$, 运动黏度 $\nu = 45 \times 10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$, 当测得两端压力如下时, (1) $p_1 = 0.45\text{MPa}$, $p_2 = 0.4\text{MPa}$; (2) $p_1 = 0.45\text{MPa}$, $p_2 = 0.25\text{MPa}$, 求管中油液的流动方向和流速。

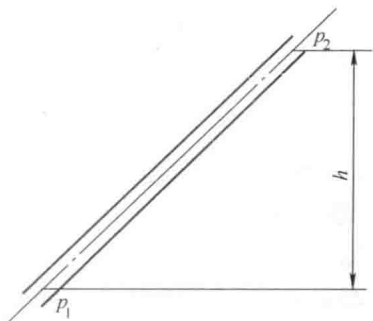


图 2-4 例 2-4 图

解: 假如管中油液静止, 则管道下端油液压力应等于上端压力与油液重量产生的压力之和。

$$(1) \quad p_2 + \rho gh = 0.4 \times 10^6 + 900 \times 9.8 \times 15 = 5.323 \times 10^5 \text{ Pa} = 0.5323 \text{ MPa} > p_1$$

故油液从上向下流动, 压力损失为

$$\begin{aligned} \Delta p &= p_2 + \rho gh - p_1 = (0.5323 - 0.45) \times 10^6 \text{ Pa} \\ &= 8.23 \times 10^4 \text{ Pa} = \frac{32\mu lv}{d^2} \end{aligned}$$

$$\text{故} \quad v = \frac{\Delta p d^2}{32\mu l} = \frac{8.23 \times 10^4 \times 10^2 \times 10^{-6}}{32 \times 900 \times 45 \times 10^{-6} \times 20} \text{ m/s} = 0.3175 \text{ m/s}$$

(2) $p_2 + \rho gh = 0.25 \times 10^6 \text{ Pa} + 900 \times 9.8 \times 15 \text{ Pa} = 3.823 \times 10^5 \text{ Pa} = 0.3823 \text{ MPa} < p_1$
故油液从下向上流动, 压力损失为

$$\Delta p = p_1 - p_2 - \rho gh = (0.45 - 0.3823) \times 10^6 \text{ Pa} = 6.77 \times 10^4 \text{ Pa} = \frac{32\mu lv}{d^2}$$

$$\text{故} \quad v = \frac{\Delta p d^2}{32\mu l} = \frac{6.77 \times 10^4 \times 10^2 \times 10^{-6}}{32 \times 900 \times 45 \times 10^{-6} \times 20} \text{ m/s} = 0.2612 \text{ m/s}$$

例 2-5 如图 2-5 所示, 水从固定水位的水箱中沿其下部的竖直管道流出, 已知管道直径为 d , 出口流量系数为 C_q , 水位高度为 h , 试求管道出口流量与管长 L 的关系, 并指出水位 h 为多少时, 出口流量将不随管长 L 而变化。

解: 对截面 1-1 和截面 2-2 列伯努利方程

$$\frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_2 + h_w$$

其中, $h_1 = h + L$, $h_2 = 0$, $p_1 = p_2 = 0$, $v_2 = v$ 。由于水箱直径远大于管道直径, 所以可认为水箱液面的流速为 0, 即 $v_1 = 0$; 管道出口液流状态为湍流, 故 $\alpha_2 = 1$ 。

$$h + L = \left(1 + \lambda \frac{L}{d}\right) \frac{v^2}{2g}, \quad v = \sqrt{\frac{2g(h + L)}{1 + \lambda \frac{L}{d}}}$$

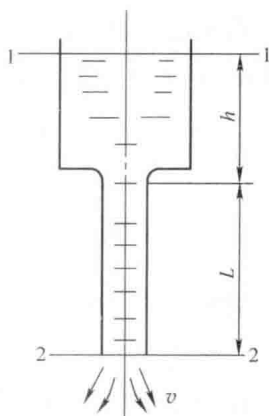


图 2-5 例 2-5 图

$$\text{管道出口流量为} \quad q = C_q \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2g(h + L)}{1 + \lambda \frac{L}{d}}} = C_q \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2g} \sqrt{\frac{h + L}{1 + \lambda \frac{L}{d}}}$$

若想使流量 q 与管长 L 无关, 则上式中第二个根号下是常数即可, 即

$$h + L = k \left(1 + \lambda \frac{L}{d} \right) \quad (\text{其中 } k \text{ 为一常数})$$

$$h = \left(k \frac{\lambda}{d} - 1 \right) L + k$$

所以, 当 h 与 L 的关系满足上式的线性关系时, 管道出口的流量将不随管长 L 而变化。

例 2-6 液压泵从一个大容积的油池中吸油, 流量 $q = 144 \text{ L/min}$, 油液黏度为 $\nu = 45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, 密度 $\rho = 900 \text{ kg/m}^3$, 油液的空气分离压为 $2 \times 10^4 \text{ Pa}$, 吸油管长度 $l = 10 \text{ m}$, 直径 $d = 40 \text{ mm}$ 。如果只考虑管中的摩擦损失, 求: (1) 泵在油箱液面以上的最大允许安装高度 H 。(2) 当泵的流量增大一倍时, 最大允许安装高度将如何变化?

解: (1) 管中液流速度 $v = \frac{4q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 144 \times 10^{-3}}{60 \times \pi \times 40^2 \times 10^{-6}} \text{ m/s} = 1.91 \text{ m/s}$

液流雷诺数 $Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{1.91 \times 40 \times 10^{-3}}{45 \times 10^{-6}} = 1698.5 < 2320$ 故 $\alpha = 2$

沿程压力损失

$$\begin{aligned} \Delta p_\lambda &= \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} = \frac{75}{Re} \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \\ &= \frac{75}{1698.5} \times \frac{10}{40 \times 10^{-3}} \times \frac{900 \times 1.91^2}{2} \text{ Pa} = 18122 \text{ Pa} \end{aligned}$$

对油箱液面和泵吸油腔截面列伯努利方程

$$p_1 + \rho g h_1 + \frac{1}{2} \rho \alpha_1 v_1^2 = p_2 + \rho g h_2 + \frac{1}{2} \rho \alpha_2 v_2^2 + \Delta p_\lambda$$

由于油箱容积很大, 且是敞开的, 所以 $p_1 = p_a$, $v_1 = 0$, $h_1 = 0$, $p_2 = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$, $h_2 = H$, $\alpha_2 = \alpha$, $v_2 = v$, $p_a = p_2 + \rho g H + \rho v^2 + \Delta p_\lambda$, 则泵的最大安装高度为

$$H = \frac{p_a - p_2 - \rho v^2 - \Delta p_\lambda}{\rho g} = \frac{100000 - 20000 - 900 \times 1.91^2 - 18122}{900 \times 9.8} \text{ m} = 6.64 \text{ m}$$

(2) 如果泵的流量增加一倍, 即 $q = 288 \text{ L/min}$

管中液流速度 $v = \frac{4q}{\pi d^2} = \frac{4 \times 288 \times 10^{-3}}{60 \times \pi \times 40^2 \times 10^{-6}} \text{ m/s} = 3.82 \text{ m/s}$

液流雷诺数 $Re = \frac{vd}{\nu} = \frac{3.82 \times 40 \times 10^{-3}}{45 \times 10^{-6}} = 3395.6 > 2320$ 故 $\alpha = 1$

沿程压力损失

$$\begin{aligned} \Delta p_\lambda &= \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} = 0.3164 Re^{-0.25} \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} \\ &= 0.3164 \times 3395.6^{-0.25} \times \frac{10}{40 \times 10^{-3}} \times \frac{900 \times 3.82^2}{2} \text{ Pa} = 68043 \text{ Pa} \end{aligned}$$

泵的最大安装高度为

$$H = \frac{p_a - p_2 - 0.5\rho v^2 - \Delta p_\lambda}{\rho g} = \frac{100000 - 20000 - 0.5 \times 900 \times 3.82^2 - 68043}{900 \times 9.8} \text{m}$$

$$= 0.62 \text{m}$$

例 2-7 如图 2-6 所示, 油在喷管中的流动速度 $v_1 = 6 \text{m/s}$, 喷管直径 $d_1 = 5 \text{mm}$, 油的密度 $\rho = 900 \text{kg/m}^3$, 喷管前端置一挡板, 问在下列情况下管口射流对挡板壁面的作用力 F 是多少? (1) 当壁面与射流垂直时 (图 2-6a)。(2) 当壁面与射流成 60° 角时 (图 2-6b)。

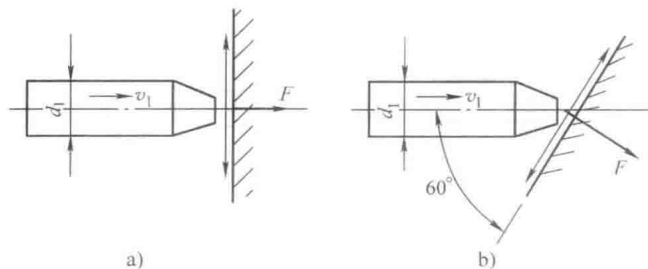


图 2-6 例 2-7 图

解: (1) 在水平方向对射流列动量方程

$$F_x = \rho q (v_{2x} - v_{1x}), \text{ 其中, } v_{1x} = v_1, v_{2x} = 0$$

所以射流对挡板壁面的作用力为

$$F = -F_x = \rho q v_1 = \rho v_1 \frac{\pi d_1^2}{4} v_1 = 9000 \times 6^2 \times \frac{\pi \times 5^2 \times 10^{-6}}{4} \text{N} = 6.36 \text{N}$$

(2) 在平板法线方向对射流列动量方程为

$$F_n = \rho q (v_{2n} - v_{1n})$$

其中, $v_{1n} = v_1 \sin 60^\circ$, $v_{2n} = 0$ 。所以射流对挡板壁面的作用力为

$$F = -F_n = \rho q v_1 \sin 60^\circ = \rho v_1 \frac{\pi d_1^2}{4} v_1 \sin 60^\circ$$

$$= 9000 \times 6^2 \times \frac{\pi \times 5^2 \times 10^{-6}}{4} \times \sin 60^\circ \text{N} = 5.51 \text{N}$$

2.3 练习题

2-1 液压油有哪几种类型? 液压油的牌号与黏度有什么关系? 如何选用液压油?

2-2 已知某液压油的运动黏度为 $32 \text{mm}^2/\text{s}$, 密度为 900kg/m^3 , 问: 其动力黏度和恩氏黏度各为多少?

2-3 已知某液压油在 20°C 时的恩氏黏度为 $^\circ E_{20} = 10$, 在 80°C 时为 $^\circ E_{80} = 3.5$, 试求温度为 60°C 时的运动黏度。

2-4 什么是压力? 压力有哪几种表示方法? 液压系统的工作压力与外界负载有什么关系?

2-5 解释如下概念：恒定流动，非恒定流动，通流截面，流量，平均流速。

2-6 伯努利方程的物理意义是什么？该方程的理论式和实际式有什么区别？

2-7 管路中的压力损失有哪几种？其值与哪些因素有关？

2-8 如图 2-7 所示，已知 $D = 250\text{mm}$ ， $d = 100\text{mm}$ ， $F = 80\text{kN}$ ，不计油液自重产生的压力，求下面两种情况下液压缸中液体的压力。

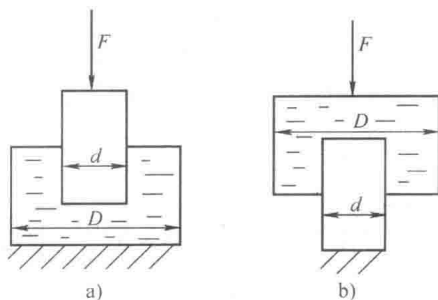


图 2-7 题 2-8 图

2-9 图 2-8 所示各容器内盛满水，已知 $F = 5\text{kN}$ ， $d = 1\text{m}$ ， $h = 1\text{m}$ ， $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ，求：

(1) 各容器底面所受到的压力及总作用力。

(2) 若 $F = 0$ ，各容器底面所受的压力及总作用力。

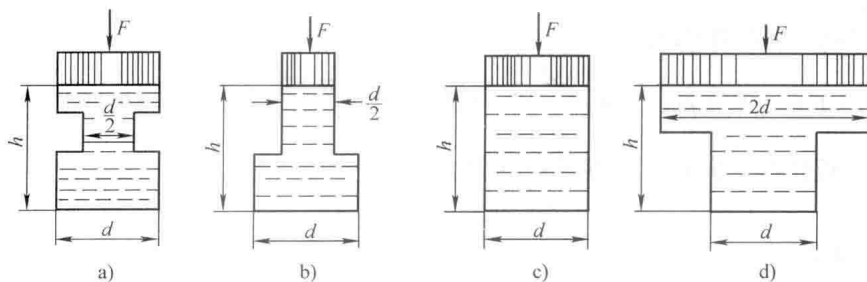


图 2-8 题 2-9 图

2-10 如图 2-9 所示，球形容器内装有水，U 形管测压计内装有水银，U 形管一端与球形容器相连，一端开口。已知： $h_1 = 200\text{mm}$ ， $h_2 = 250\text{mm}$ ，水的密度 $\rho_1 = 1 \times 10^3\text{kg/m}^3$ ，水银密度 $\rho_2 = 13.6 \times 10^3\text{kg/m}^3$ 。求容器中 A 点的相对压力和绝对压力。

2-11 如图 2-10 所示，充满液体的倒置 U 形管，一端位于一液面与大气相通的容器中，另一端位于一密封容器中。容器与管中液体相同，密度 $\rho = 900\text{kg/m}^3$ 。若 $h_1 = h_2 = 1\text{m}$ ，试求 A、B 两处的真空度。

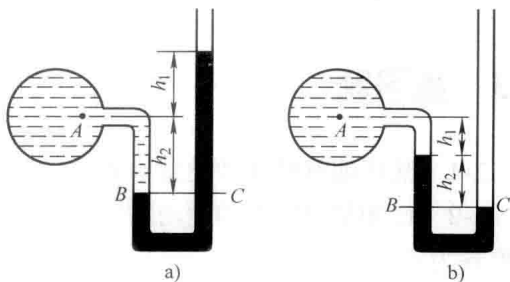


图 2-9 题 2-10 图

2-12 图 2-11 所示容器上部充满压力为 p 的气体，容器内液面高度 $h = 400\text{mm}$ ，液柱高度 $H = 1\text{m}$ ，液体密度 $\rho = 900\text{kg/m}^3$ ，其上端与大气连通，问容器内气体的绝对压力和表压力各为多少？

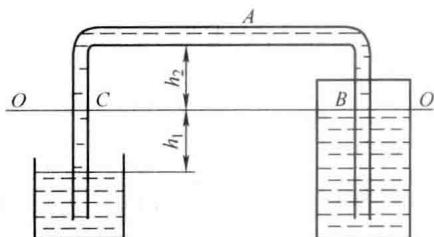


图 2-10 题 2-11 图

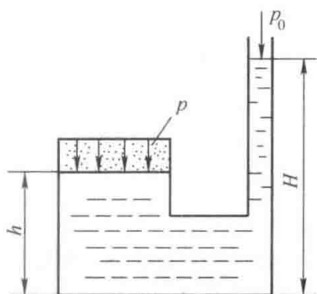


图 2-11 题 2-12 图

2-13 如图 2-12 所示， $d_1 = 20\text{mm}$ ， $d_2 = 40\text{mm}$ ， $D_1 = 75\text{mm}$ ， $D_2 = 125\text{mm}$ ， $q = 25\text{L/min}$ ，求 v_1 ， v_2 ， q_1 ， q_2 各为多少？

2-14 如图 2-13 所示，油管水平放置，截面 1—1、2—2 处的内径分别为 $d_1 = 5\text{mm}$ ， $d_2 = 2\text{mm}$ ，在管内流动的油液密度 $\rho = 900\text{kg/m}^3$ ，运动黏度 $\nu = 20\text{mm}^2/\text{s}$ 。若不计油液流动的能量损失，试问：

- (1) 截面 1—1 和 2—2 哪一处压力较高？为什么？
- (2) 若管内通过的流量 $q = 30\text{L/min}$ ，求两截面间的压差 Δp 。

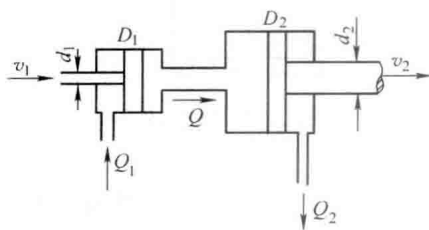


图 2-12 题 2-13 图

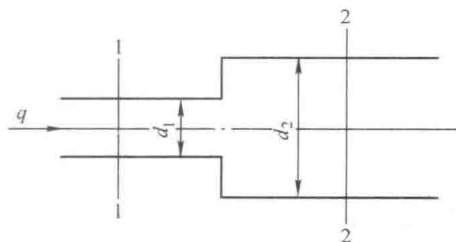


图 2-13 题 2-14 图

2-15 已知管道直径为 50mm ，油的运动黏度为 20cSt ，如果液体处于层流状态，那么可以通过的最大流量不超过多少？

2-16 图 2-14 所示的水箱，已知：水箱底部立管直径 $d = 20\text{mm}$ ，水的密度 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ 。假设动能修正系数为 1，不考虑压力损失，求：

- (1) 立管出口处的流速。(2) 高立管出口 1m 处的水压力。

2-17 如图 2-15 所示，已知液面高度 $H = 5\text{m}$ ，截面 1—1 面积 $A_1 = 2000\text{mm}^2$ ，截面 2—2 面积 $A_2 = 5000\text{mm}^2$ ，液体密度 $\rho = 1000\text{kg/m}^3$ ，不计能量损失，求孔口的流量以及截面 2—2 处的压力（取 $\alpha = 1$ ，不计损失）。