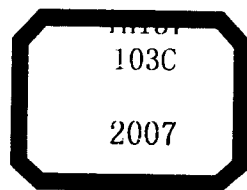


液压与气压传动 学习及实验指导

苏杭 刘延俊 主编
秦月霞 李海燕 副主编

新世纪高校机电工程规划教材



新世纪高校机电工程规划教材

液压与气压传动学习 及实验指导

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
主 审	李宏伟		

机 械 工 业 出 版 社

本教材是根据 2002 年全国高校教学与指导委员会审定的“液压与气压传动课程的教学基本要求”编写的,与刘延俊教授主编的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《液压与气压传动》教材配套使用的教学参考用书。它适合于一般工科院校机械类及近机类本科生学习《液压与气压传动》课程时使用,也可作为目前已经出版的各种版本的《液压与气压传动》教材的参考书。

本教材共分 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,每一章分为重点、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”十一个实验,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、实验报告共五方面内容。教材最后设置了涵盖全书内容的两套综合练习,据此作为对全书内容掌握程度的综合检验与练习。

本教材的特点是:内容范围广、实用性强、例题精练、习题恰当、实验全面、启发性强、通俗易懂,不但适合于本科生,也可作为广播电视大学、职工大学、业余大学、函授学院、高等职业学院以及各种中等技术学校的相关专业师生的教学参考用书和工程技术人员的参考用书。

本教材附有各章练习题及综合练习的参考答案,请在机工教材服务网 (<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/苏杭,刘延俊主编. —北京:
机械工业出版社, 2006.12
新世纪高校机电工程规划教材
ISBN 978-7-111-20198-4

I. 液… II. ①苏…②刘… 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. TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 125785 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:高文龙、邓海平
责任编辑:邓海平 版式设计:冉晓华 责任校对:程俊巧
封面设计:姚毅 责任印制:洪汉军
北京京丰印刷厂印刷
2007 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷
169mm×239mm·5.125 印张·196 千字
定价:12.00 元

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) 88379711
封面无防伪标均为盗版

前 言

本教材是根据 2002 年全国高校教学指导委员会审定的“液压与气压传动课程的教学基本要求”编写、与刘延俊教授主编的普通高等教育“十一五”国家级规划教材《液压与气压传动》配套使用的教学参考教材。它适合于一般工科院校机械类及近机类本科生在学习《液压与气压传动》课程时使用,也可作为目前已经出版的各种版本的《液压与气压传动》教材的参考书。

本教材共分 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,每一章分为重点、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”的十一个实验,每一个实验包括实验目的、实验设备、实验原理、实验参考步骤、实验报告共五方面内容。教材最后设置了涵盖全书内容的两套综合测试题,作为对全书内容掌握程度的综合检验与练习。

本教材的主要特点是:

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时常遇到的问题,精选了部分例题分析解答。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学习过程中练习,较为宽泛的编选了练习题。对于能够通过练习的方式能够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,目前所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,为便于教学选择,我们选择使用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,教材中只提供必要的参考步骤,具体的实际操作,由实验者根据自己所拥有的实验台和对实验原理的理解,根据目的自行设计。

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) 本教材在编写过程中注重理论性与实用性的结合、启发性与通俗性的结合，不但适合于本科生，也可作为广播电视大学、职工大学、业余大学、函授学院、高等职业学院以及各种中等技术学校的相关专业师生的教学参考用书和工程技术人员的参考用书。

本教材附有各章练习题及综合练习的参考答案，请在机工社教材服务网([http: \ \ www. cmpedu. com](http://www.cmpedu.com))上下载。

本教材由山东建筑大学苏杭和山东大学刘延俊主编，山东建筑大学秦月霞与李海燕为副主编。山东大学的孔祥臻、周军、刘维民与山东建筑大学的赵新、张坤以及山东交通学院的陈正洪参加了教材的编写工作。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评指正。

编者
于山东济南

信息反馈表

尊敬的老师:

您好!感谢您多年来对机械工业出版社的支持和厚爱!为了进一步提高我社教材的出版质量,更好地为我国高等教育发展服务,欢迎您对我社的教材多提宝贵意见和建议。另外,如果您在教学中选用了《液压与气压传动学习及实验指导》(苏杭、刘延俊主编),欢迎您提出修改建议和意见。

需要参考答案者,请到www.cmpedu.com去下载(请注册成教师用户)。

一、基本信息

姓名: _____ 性别: _____ 职称: _____ 职务: _____

邮编: _____ 地址: _____

任教课程: _____ 电话: _____ (H) _____ (O)

电子邮件: _____ 手机: _____

二、您对本书的意见和建议

(欢迎您指出本书的疏误之处)

三、对我们的其他意见和建议

请与我们联系:

100037 机械工业出版社·高教分社 邓编辑 收

Tel: 010—88379711, 68311394 (O), 68997455 (Fax)

E-mail: happyDHP@sohu.com

<http://www.CmpBook.com>

<http://www.CmpEdu.com>

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	10
第 3 章 液压泵与液压马达	16
3.1 重点、难点分析	16
3.2 典型例题解析	20
3.3 练习题	24
第 4 章 液压缸	27
4.1 重点、难点分析	27
4.2 典型例题解析	32
4.3 练习题	35
第 5 章 液压控制阀	38
5.1 重点、难点分析	38
5.2 典型例题解析	42
5.3 练习题	46
第 6 章 液压辅助元件	50
6.1 重点、难点分析	50
6.2 典型例题解析	52
6.3 练习题	53
第 7 章 液压基本回路	55
7.1 重点、难点分析	55
7.2 典型例题解析	60
7.3 练习题	65
第 8 章 典型液压系统	71

8.1 重点、难点分析	71
8.2 典型例题解析	73
8.3 练习题	77
第 9 章 液压系统的设计计算	84
9.1 重点、难点分析	84
9.2 典型例题解析	86
9.3 练习题	91
第 10 章 液压伺服系统	92
10.1 重点、难点分析	92
10.2 典型例题解析	93
10.3 练习题	93
第 11 章 气压传动	94
11.1 重点、难点分析	94
11.2 典型例题解析	97
11.3 练习题	98
第 12 章 液压气动系统的安装、调试、使用与维护	99
12.1 重点与难点分析	99
12.2 练习与思考题	100
第 13 章 液压与气压传动实验指导	102
13.1 液压系统中工作压力形成实验	102
13.2 液阻特性试验	106
13.3 液压泵性能测试实验	108
13.4 液压泵拆装实验	112
13.5 溢流阀静、动态性能实验	115
13.6 液压阀的拆装实验	120
13.7 节流调速回路性能实验	122
13.8 液压基本回路实验	127
13.9 液压回路的拼装实验	138
13.10 气动逻辑元件静态压力特性测试	142
13.11 气动线路设计	144
综合测试题 I	146
综合测试题 II	151
参考文献	156

第1章 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，其它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。通过对简单机床液压传动系统工作过程的分析，可以提及到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) 液压传动就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它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、金切设备、注塑设备中得到广泛的应用。

2) 涉及到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：液体在油管里流动时，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作的功，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

的推动与负载对油的阻尼所憋出来的。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），负载越大，系统的压力越大；反之亦然。

3) 流量与速度的关系，就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。

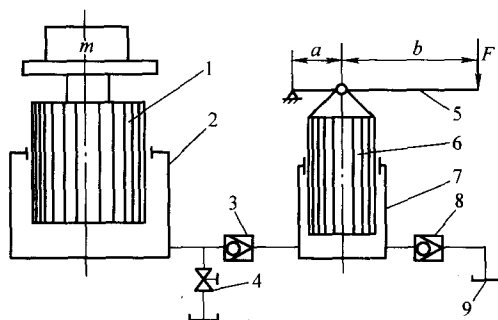


图 1-1 例 1-1 图

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

解：当抬起手柄 5 时，活塞 6 向上运动，缸 7 容积增大形成真空，单向阀 3 关闭，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，缸 7 中的油液通过单向阀 3 进入缸 2，推动活塞 1 向上运动，抬起重物。再抬起手柄 5，缸 7 从油箱吸油；压下手柄 5，油液进入缸 2……，这样，油液不断地被吸入缸 7，压入缸 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，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。

1.3 练习题

- 1-1 液压传动与机械传动相比，有哪些优缺点？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，请您举出实例。
- 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。

第2章 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：液压油的粘性和粘度；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，液压油的粘度与粘性、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的重点，也是本章的难点。

1) 液压油的粘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，粘度是粘性的度量。液压油的粘度分为动力粘度、运动粘度和相对粘度。动力粘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；运动粘度是动力粘度与密度的比值，国产油的标号就是用运动粘度的平均厘斯值的表达，实用性强，直接测量难；相对粘度就是实测粘度，其中恩氏粘度就是用恩氏粘度计测量油液与对比液体流经粘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，动力粘度用作粘度的定义，运动粘度用作油品的标号，相对粘度用作粘度的测量。三者的换算关系可以用教材中所提供的公式解算，也可通过手册所提供的线图查取。影响粘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（压力差）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、油液的粘度有关。

4) 连续方程、伯努利方程、动量方程三个方程是质量守恒定律、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、位置的有关问题。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到如显热、潜热、汽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;若计算的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粘滞力参数的比值。

液压冲击是流体与运动部件的冲击力与惯性力突变而引起的系统内液体的压力突然升高的现象,液压冲击会引起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 为多大时,钢球才能处于平衡状态?

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

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

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

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

水平力

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

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

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

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

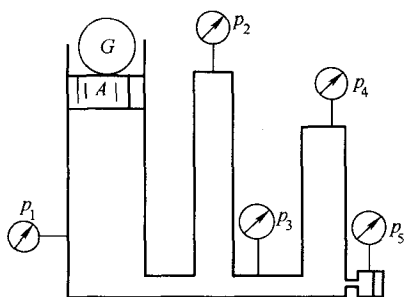


图 2-1 例 2-1 图

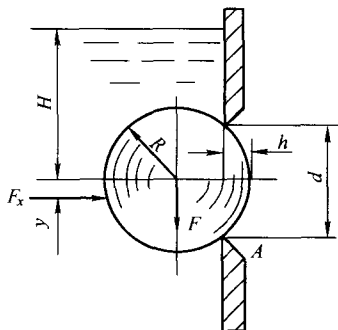


图 2-2 例 2-2 图

例 2-3 用图 2-3 所示仪器测量油液粘度, 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 $T = 30 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}$, 求油液的动力粘度。

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

$$T_1 = \tau AD/2$$

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

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

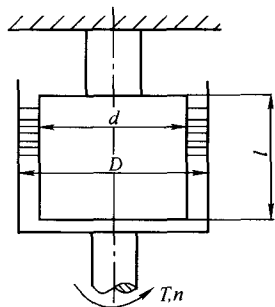


图 2-3 例 2-3 图

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

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

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

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

$$= \frac{30 \times 10^{-2}}{\frac{\pi^2 \times 0.1^3 \times 0.2 \times 6}{0.1 - 0.099} + \frac{\pi^2 \times 6 \times 0.099^4}{16 \times 0.5 \times 10^{-3}}} \text{Pa} \cdot \text{s} = 0.024 \text{Pa} \cdot \text{s}$$

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 $\rho = 900\text{kg/m}^3$, 运动粘度 $\nu = 45 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 当测得两端压力为:

(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。

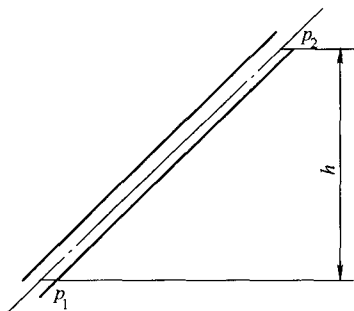


图 2-4 例 2-4 图

解: 假若管中油液静止, 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。

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

故油液从上向下流动, 压力损失为

$$\Delta p = p_2 + \rho gh - p_1 = (0.5323 - 0.45) \times 10^6 = 8.23 \times 10^4 = \frac{32\mu b\nu}{d^2}$$

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

$$(2) p_2 + \rho gh = (0.25 \times 10^6 + 900 \times 9.8 \times 15) \text{Pa} = 3.823 \times 10^5 \text{Pa} = 0.3823 \text{MPa} < p_1$$

故油液从下向上流动, 压力损失为

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

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

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

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

式中， $h_1 = h + L$ ， $h_2 = 0$ ， $p_1 = p_2 = 0$ ， $v_2 = v$ ；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紊流，故 $\alpha_2 = 1$ 。

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

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

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 $q = 144 \text{ L/min}$ ，油液粘度为 $\nu = 45 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ，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？

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

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

沿程压力损失

$$\Delta p_\lambda = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho v^2}{2} = \frac{75 l}{Re d} \frac{\rho v^2}{2}$$

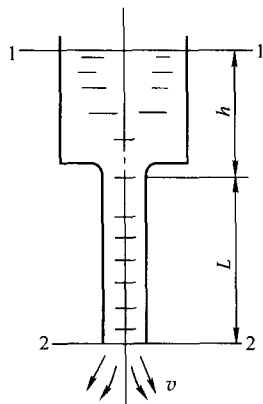


图 2-5 例 2-5 图

$$= \frac{75}{1698.5} \times \frac{10}{40 \times 10^{-3}} \times \frac{900 \times 1.91^2}{2} \text{Pa} = 18122 \text{Pa}$$

对油箱液面和泵吸油腔截面列伯努利方程

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2} \rho \alpha_1 v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2} \rho \alpha_2 v_2^2 + \Delta p_\lambda$$

由于油箱容积很大，且是敞开的，所以 $p_1 = p_a$ ， $v_1 = 0$ ， $h_1 = 0$ ， $p_2 = 2 \times 10^4 \text{Pa}$ ， $h_2 = H$ ， $\alpha_2 = \alpha$ ， $v_2 = v$ ， $p_a = p_2 + \rho gH + \rho v^2 + \Delta p_\lambda$

则泵的最大安装高度

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} H &= \frac{p_a - p_2 - 0.5 \rho v^2 - \Delta p_\lambda}{\rho g} = \frac{100000 - 20000 - 0.5 \times 900 \times 3.82^2 - 68043}{900 \times 9.8} \text{m} \\ &= 0.62 \text{m} \end{aligned}$$

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）。

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

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

(2) 在平板法线方向对射流列动量方程