

高等学校教学参考书

液压传动学习导论

王裕清 王德胜 主编



高等学校教学参考书

液压传动学习导论

王裕清 王德胜 主编

十二所高校教材协编组

一九九〇年三月

内 容 简 介

本书是一本高等学校液压传动课程的教学参考书。内容包括:液压传动课程各章的学习方法,基本教学要求,课程内容的重点和难点,具有代表性的例题,补充习题和模拟试题等等。因此特别适合于辅导读者自学。

配套教材:现行的各种液压传动教材和书籍。

读者对像:大专院校的本、专科学生,函授学生,工程技术人员和工人技师。

前 言

液压传动是机械类专业学生的一门重要的技术基础课，课程内容的理论性和实践性都很强，学习时往往入门比较难。为了帮助学生更好地学习和掌握这门课程的内容和方法，根据我们多年的教学经验，编写了这本液压传动课程学习辅导教材。

本书的主要内容包括各章的学习方法、基本教学要求、课程内容的重点和难点、具有代表性的例题和补充习题，书末附有模拟试题。因此特别适合于讲课时数少的情况下辅导学生自学。同学们在学习有关章节之前，能在本书的指导下进行预习，即事先了解所学内容的学习要求、重点和难点。而在学完这些章节之后，对照本书提出的学习要求及例题进行复习、做习题，并进行小结，使学生比较牢固地掌握课程中应该掌握的内容，达到教学要求。

全书的名称术语、符号和单位均采用国家标准。全书约 30 万字。本书由十二所高校富有教学经验的教师参加编审。参加本书编写的有：焦作矿业学院王裕清（第一章、第六章、第七章、模拟试题），周爱萍（第二章），王德胜（第八章、第九章、第十章、第十一章），青海大学张玉虎（第三章），四川建材工业学院尹辉（第四章），天津理工大学周晓亨（第五章），焦作矿业学院邓乐和焦作大学胡丁桂负责绘制了全书的插图和部分校对。全书由王裕清、王德胜负责主编。

本书由中国矿业大学蒋志勤和阜新矿业学院王淑贞负责主审，参加审稿工作的有：山西矿业学院韩成石、成都科技大学赖启原、哈尔滨科技大学王启荣、焦作矿业学院王希斌、桂林电子工业学院田玲、周平、青岛职工大学孙钢。

本书在编写过程中，参考了国内同行作者的有关著作资料，曾得到许多兄弟院校的大力支持和帮助，在此一并致谢。本书编写时间仓促，难免有误，欢迎读者指正。

编 者

一九九〇年三月

目 录

前 言	
第一章 液压传动课程学习导论	(1)
第一节 液压传动课程的性质和内容	(1)
第二节 液压传动课程的基本教学要求	(1)
第三节 液压传动课程的学习方法	(2)
第二章 液压流体力学基础	(5)
第一节 学习指导	(5)
第二节 例 题	(7)
第三节 习 题	(32)
第三章 液压泵和液压马达	(50)
第一节 学习指导	(50)
第二节 例 题	(52)
第三节 习 题	(67)
第四章 液压缸	(76)
第一节 学习指导	(76)
第二节 例 题	(77)
第三节 习 题	(94)
第五章 方向控制阀和方向控制回路	(102)
第一节 学习指导	(102)
第二节 例 题	(103)
第三节 习 题	(108)
第六章 压力控制阀和压力控制回路	(111)
第一节 学习指导	(111)
第二节 例 题	(112)
第三节 习 题	(120)
第七章 流量控制阀和速度控制回路	(126)
第一节 学习指导	(126)
第二节 例 题	(127)
第三节 习 题	(143)
第八章 蓄能器及蓄能器回路	(156)
第一节 学习指导	(156)
第二节 例 题	(157)
第三节 习 题	(161)
第九章 典型液压系统分析	(163)
第一节 学习指导	(163)

	第二节 例 题	(164)
	第三节 习 题	(167)
第十章	液压系统设计	(171)
	第一节 学习指导	(171)
	第二节 例 题	(172)
	第三节 习 题	(185)
第十一章	液压元件和液压系统的动态特性分析	(187)
	第一节 学习指导	(187)
	第二节 例 题	(188)
	第三节 习 题	(192)
	液压传动模拟试题	(193)
	主要参考文献	(199)

第一章 液压传动课程学习导论

第一节 液压传动课程的性质和内容

液压传动是在本世纪三十年代以来发展起来的利用液体压力能传递动力做功的一种传动方式。相对机械传动、电气传动而言，液压传动是一门新兴的传动技术。由于液压传动具有体积小、重量轻，输出力和速度可方便地进行无级调节以及便于实现自动控制等突出的优点，因此液压传动技术被广泛用于冶金、矿山、航空、船舶、通用机械、农业机械、轻工机械、食品机械、机床工业等各种工程技术领域。液压元件已成为标准化的基本传动元件和控制元件。因此液压传动课程与机械原理、机械零件和电工学在教学计划中的地位是相同的，属于技术基础课性质，是机械工程类专业学生的必修课。

液压传动课程的主要内容包括液压传动的基本理论—流体力学基础；基本液压元件；常用的基本回路和机床典型液压传动系统；一般机床液压传动系统的设计计算；液压元件和系统的动态特性分析方法；以及比例控制、伺服控制内容的简介。

课程内容中，基本理论主要讲授与课程有关的流体力学基础。液压元件主要讲授工作原理、结构特点、性能分析及选用。基本回路主要讲授基本工作原理和性能特点。典型机床液压系统主要讲授阅读系统图的方法、系统工作原理和性能分析。液压系统的设计计算主要讲授设计步骤和方法。液压元件和系统的动态分析，以及比例控制、伺服控制的内容，在液压传动课内不要求重点掌握，只作一般介绍。然而这些内容代表了液压技术的水平和方向，必要时可开设这方面的专题讲座。

第二节 液压传动课程的基本教学要求

液压传动课程的教学要求是根据液压传动课程的性质由课程教学大纲确定的，它是机械类专业学生—未来的机械工程师应该掌握的基本的教学要求。达不到这个要求，就不能取得这门课程的学分。了解和掌握基本的教学要求，有助于本课程的学习。

液压传动课程的基本教学要求是：

- 1.学习和掌握液压传动的基本理论知识，包括与本课程有关的流体力学和液压油的知识。
- 2.学习和掌握各类液压元件的工作原理、性能特点及使用场合，要求在设计液压系统时能正确地选用。掌握液压缸的设计步骤和基本计算方法。
- 3.学习和掌握各类液压基本回路的组成、工作原理及性能特点，要求在设计液压系统时能合理地选择或拟定液压传动基本回路。
- 4.通过几个典型机床液压系统的学习，掌握阅读、分析一般液压系统的步骤和方法。能对一般液压系统进行原理、性能分析与故障维护。
- 5.学习和掌握一般机床液压系统设计计算的方法及步骤，较好地完成液压系统设计

计大作业。

6.学习和了解液压元件和系统的动态特性分析方法和步骤,了解伺服控制和比例控制的基本内容,了解液压传动技术的发展方向。

第三节 液压传动课程的学习方法

液压传动课程是机械类专业一门重要的技术基础课。要想学好这门课程,首先应该对这门课程的特点有所认识,然后针对课程的特点来选择适当的学习方法。

液压传动课程的具体内容大致可分为三大部分:第一部分是液压流体力学,是整个液压技术的基础。第二部分是液压元件,是组成液压系统必不可少的。第三部分则是系统原理及系统设计计算部分,是整个课程最终的目标。就内容而言,流体力学属基础课性质,内容比较抽象,学习时入门比较难。而液压元件和液压系统属于专业课性质,与具体的机械结构、生产条件、工艺过程等密切相关,由于同学的实践知识较少,学习起来往往也比较费劲。同学们在学习液压传动课程中,常常容易产生这样或那样的错觉,或者在学习方法上感到很不适应。比如,学习流体力学时对理论推导和工程计算的联系与区别不甚理解,容易钻牛角尖。有不少同学认为流体力学与液压元件和系统好象联系不多,特别是学习液压元件时似乎很孤零,学习兴趣不大,因而给液压基本回路和液压传动系统学习带来困难。

怎样才能学好液压传动课程呢?根据我们多年的教学经验,请读者注意以下几个方面:

1.明确学习目的,端正学习态度

大学期间每一门课程的学习都是与个人的健康成长和社会主义四化大业息息相关的。大学的学习有很强的专业性,只要你上了大学,一般来讲将来都要长期从事某种专业,大学期间打的基础不牢,对将来的事业是否有成就有很大关系。另外,大学期间的课程设置具有系统性和科学性,所安排的课程不是可学可不学的,而是必须学而且还要学好,前面的课学得不扎实,给后续课程的学习就会带来困难。因此,首先必须端正学习态度,明确学习目的,这样才有可能保持和激发学习的热情,增强学习的信心。

2.建立系统意识,把握规律性

同学们往往不大注意,实际上每门课程的绪论课(第一次课)是至关重要的,液压传动课程也不例外。什么是液压传动?怎样传动?课程要研究的主要内容是什么?学完之后要达到什么目的?首先要在头脑中形成一个整体(系统)的概念。然后站在整个课程的高度,来认识和了解本门课程和其它课程的联系和区别,课程内章节和章节之间的联系和区别。学习液压传动需要有高等数学、工程数学、物理、工程力学、控制工程基础、机械制图、机械原理与零件以及机床概论、金属工艺学等方面的知识。学习伊始,不妨复习复习,对理解课程内容会有好处的。从课程内容上讲,三大部分中,第一部分是理论基础,第二部分液压元件又是第三部分液压系统的基础,一环套一环。这三部分哪一部分不学好都不可能较顺利地完全地掌握液压传动的内容。液压流体力学与固体力学既有联系又有区别;液流连续性方程、动量方程、能量方程既有

联系又有区别：液压泵、马达、液压缸之间既同属能量转换元件又有各自的特点；只要把溢流阀的工作原理、性能特点掌握之后，那么其它压力控制阀就容易掌握；只要把液压元件的工作原理和性能特点牢牢掌握之后，回路分析和系统设计就容易理解。如此等等，说明建立整体的概念和系统的意识，把握住规律性，液压传动则不难学。

3. 掌握学习环节，学而时习之

在大学课堂教学中，存在着不可缺少的四个学习环节，即预习、听课、复习、作业。在这四个环节中，听课处于主导地位，是学生学习知识的最重要形式。液压传动课程可分为讲授课、习题课、讨论课、实验课。由于教学时数有限，在讲课上有如下特点：一般只讲基本理论、基本概念，能自学的就让同学自学；内容多，进度快，只讲重点、难点；讲的不一定都在教材上，教材上有的不一定都讲；注重学科思想方法的培养，不注重具体内容的阐述。因此，听课就显得特别重要。讲课需要艺术，听课也要艺术。一般来讲听课应注意四个方面：一是知识，听课时要掌握概念的内涵和外延，定理和定律反映的关系和适用范围；二是结构，听课时要注意掌握知识各部分之间的关系及结构；三是方法，听课时要特别注意掌握这门学科所特有的研究问题解决问题的思想方法；四是背景，听课时要注意掌握所学理论知识是怎样从实践中提炼出来的，代表什么实际问题，可以解决哪些实际问题。当然要掌握上述知识、结构、方法、背景四个方面，仅靠听课是不够的，还要和预习、复习、作业几个环节密切配合起来，才能更好地理解和掌握。

众所周知，学习一词包涵有“学”和“习”两层含义，“学”和“习”原是两种不同的获取知识（包括道德品质）的方法。“学”是从书本上、从教师口头上获取知识，“习”则是从经验中，从个体实践活动中获取知识。把这两种方式在时间上有节奏地加以配合，以学为主，辅之以习，这就是孔子“学而时习之”的教育思想。马克思主义认识论也认为，人的认识、思想、方法只能在“认识—实践—再认识—再实践”不断循环过程中得到锻炼和提高。有不少同学不愿意做作业，不愿意上实验课，则是学习之大忌。

4. 要善于自学，善于总结

自学历来是人们获得知识的重要途径，对大学生的未来来讲，自学更具有十分重要的意义。液压传动教学的时数少而内容多，自学显得格外重要。我们编写的这本《液压传动学习导论》无疑是一本辅助同学们自学的好教材。大家可以按照各章基本的教学要求、重点和难点精读手中的教材，同时也可以充分利用图书馆的藏书有计划、有目的、有重点的泛读有关液压传动的书籍，结合本书所提供的例题和习题，做适当的练习，这对理解和掌握课程的内容是很有帮助的。比较好的教学参考书或泛读教材排列如下，请读者任选2~3本即可。

[1] 盛敬超编：《液压流体力学》，机械工业出版社，1980年。

[2] 大连工学院机制教研室编：《金属切削机床液压传动》，第二版，科学出版社，1983年。

[3] 严金坤、张培生主编：《液压传动》，国防工业出版社，1981年。

[4] 贾培起编：《液压传动》，天津科学技术出版社，1984年。

[5] 上海业余工业大学、上海电视大学合编：《液压传动与控制》，上海科学技术出版社，1981年。

- [6].王懋瑶主编;《液压传动与控制》,天津大学出版社,1982年。
- [7].何存兴主编;《液压元件》,机械工业出版社,1982年。
- [8].关肇勋、黄奕振编;《实用液压回路》,上海科学技术文献出版社,1982年。
- [9].宫忠范主编;《液压传动系统》,机械工业出版社,1981年。
- [10].《机床与液压》杂志。
- [11].《液压与气动》杂志。
- [12].《液压工业》杂志。

总结也是一种基本的学习方法。列宁说过:“人的认识不是直线(也就是说不是沿直线进行的),而是无限地近似于一串圆圈、近似于螺旋的曲线。”学习不可能一次就深刻理解知识和掌握知识,因而到了一个阶段需要通过各种信息反馈,予以总结提高。如整理卡片、笔记,采取闭卷方式做一做本书附录的模拟试题进行自我检查。再经过一个阶段的学习,在提高的基础上再总结、再提高。学习活动既是连续的又是分阶段的,一个阶段的结束就意味着另一个阶段的开始。总结提高的学习方法使学习活动从一个圆圈过渡到更高的一个圆圈,直到圆满完成学习任务。

学习是一个由浅入深、由少到多、逐步积累、逐步深入、螺旋式提高的过程,这是学习的规律。学习方法也有一个选择、适应和完善的过程。不同年级、不同环境、不同的学生,所采取的学习方法也是各式各样的。以上所谈的学习方法仅供同学们在学习时参考。更多更好的适合于本门课程的学习方法,还有待于同学们去发现、去总结、去创造。

第二章 液压流体力学基础

第一节 学习指导

在机械类专业教学计划中一般不单列流体力学课程,所以液压传动课程就有三大部分组成,即液压流体力学、液压元件和液压系统。液压流体力学是后两部分的基础,即整个液压传动技术的基础。因此,液压流体力学在整个课程中的重要地位和作用就不言而喻了。

学习本章时,首先要注意分析问题的方法。比如在研究静压力的特性时,可以采取固体力学取隔离体的方法,即所谓“刚化原理”。在研究流体运动力学性质时也采取了类似隔离体的方法——控制体积法,给流体力学的研究带来了很大的方便。其次要注意各种问题的区别和联系。比如固体力学与流体力学研究方法的区别与联系。连续性方程、能量方程、动量方程之间的区别与联系。理论分析与工程计算之间的区别与联系等等。再其次就是牢记一些基本概念和公式的应用。特别要注意多做练习,学完本章以后一定要进行小结。

本章的基本教学要求及重点、难点如下:

教学要求:

- 1.了解液压油的一般特性,掌握液压油的选择原则和方法。
- 2.了解单位制的由来及各种单位制之间的换算关系。
- 3.较深入地学习和掌握静止液体力学和流动液体力学的一些基本概念、基本规律及运算方法。
- 4.了解和掌握液体在管道中流动的某些特性、压力损失的计算方法、孔口及缝隙流动特性。
- 5.了解和掌握公式、方程的推导与应用。

重点:

- 1.粘性的概念,粘度的三种表示单位,动力粘度的物理意义,粘温特性。
- 2.选择液压油应考虑哪些因素,为什么。
- 3.静压力的特性,重力作用下的压力分布规律,压力的度量基准及其表示方法,静力学方程的应用。
- 4.液压传动的基本原理——帕斯卡原理。
- 5.控制体的概念和控制体方程。
- 6.连续性原理及成立的条件。
- 7.压力决定于负载和速度决定于流量的概念。
- 8.理想液体、实际液体的伯努利方程式,伯努利方程的物理意义、几何意义及伯努利方程的应用。
- 9.动量方程的应用。
- 10.流态的概念及其判别。
- 11.沿程损失和局部损失的物理本质,降低压力损失的措施。

12.液体流经小孔及缝隙时压力损失与流量的关系。

13.引起缝隙泄漏的原因,最基本的缝隙泄漏形式,影响缝隙泄漏的因素。

难点:

1.各单位制之间的正确换算。

2.粘性的概念以及三种粘度之间的换算。

3.沿程损失(包括层、紊流)和局部损失的物理本质。

4.液体流动中的一些基本概念。

5.伯努利方程、动量方程的推导和应用。

6.系统中流量和压力之间在什么情况下有关和无关。(即是否有泄漏)

第二节 例题

例 2-1. 200cm³ 的液压油, 50℃ 时流过恩氏粘度计的时间 $T_1 = 162s$, 仪器的水值常数 $T_2 = 51s$, 若油液的密度 $\rho = 900kg/m^3$, 试求上述温度下该油的恩氏粘度 $^{\circ}E$, 重度 γ , 运动粘度 ν , 动力粘度 μ 各为多少? 在 30℃ 时的运动粘度 ν 是多少?

解: 由题意:

$$^{\circ}E_{50} = \frac{T_1}{T_2} = \frac{162}{51} = 3.18$$

$$\gamma = \rho g = 900 \times 9.81 = 8.829 \times 10^3 (N/m^3)$$

因为

$$\nu_{50} = (7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{E}) \times 10^{-6} (m^2/s) = 7.31 \times 3.18 - \frac{6.31}{3.18} \times 10^{-6} = 2.13 \times 10^{-5} (m^2/s)$$

所以

$$\mu_{50} = \nu_{50} \rho = 2.13 \times 10^{-5} \times 900 = 1.92 \times 10^{-2} (Pa \cdot s)$$

又 $\nu_{30} = 2.13 \times 10^{-5} m^2/s < 11 \times 10^{-5} m^2/s$ 且温度 $t = 30^{\circ}C$ 在 $30 \sim 150^{\circ}C$ 之间, 故可用经验公式 $\nu_t = \nu_{50} (\frac{50}{t})^n$ 计算 ν_{30} , 由表 2-2 (见参考文献[1]), 用内插法求出指数 n , 即

$$n = \frac{21.3 - 12}{25 - 12} \times (1.99 - 1.79) + 1.79 = 1.93$$

$$\nu_{30} = \nu_{50} (\frac{50}{t})^n = 2.13 \times 10^{-5} \times (\frac{50}{30})^{1.93} = 5.71 \times 10^{-5} (m^2/s)$$

例 2-2. 机床原用 10 号机械油, 油箱容量为 140 升。现需改用 20 号机械油, 但库存只有 40 号机械油。试问, 应将油箱中多少升的 10 号机械油换成 40 号机械油才能使混合油与 20 号机械油相当 (机械油标号仍以 50℃ 为基准)?

解: 1) 先求出各种机械油的恩氏粘度 ($^{\circ}E$):

由 $\nu = (7.31^{\circ}E - \frac{6.31}{E}) \times 10^{-6} (m^2/s)$ 得:

$$^{\circ}E = \frac{\nu \times 10^6 + \sqrt{(\nu \times 10^6)^2 + 4 \times 7.31 \times 6.31}}{2 \times 7.31}$$

故有

10 号机械油的恩氏粘度: $^{\circ}E_{50} = 2 = ^{\circ}E_2$

20 号机械油的恩氏粘度: $^{\circ}E_{50} = 2.9$

40 号机械油的恩氏粘度: $^{\circ}E_{50} = 5 = ^{\circ}E_1$

2) 试算 40 号机械油和 10 号机械油应占的百分比:

根据混合油粘度公式

$$^{\circ}E = \frac{a^{\circ}E_1 + b^{\circ}E_2 - c(^{\circ}E_1 - ^{\circ}E_2)}{100} \quad (^{\circ}E_1 > ^{\circ}E_2)$$

选择一组 a, b, c 值, 计算出的 $^{\circ}E$ 值应为 2.9。

查表 2-1 (见文献[1]), 取 $a=60$, $b=40$, 相应的 $c=27.9$ 代入上式计算得出 $^{\circ}E=2.96$, 基本符合要求。

3) 计算所用油的体积

40 号机械油 $V_1 = 40 \times 0.6 = 84$ (升)

10 号机械油 $V_2 = 40 \times 0.4 = 56$ (升)

例 2-3. 在 20°C 时, 水的运动粘度为 $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 密度 $\rho_w = 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$; 空气的运动粘度为 $15 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$, 密度 $\rho_g = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$; 试说明哪种物质的粘性大。

解: 因为 $\mu_w = \rho_w \nu_w = 1 \times 10^{-6} \times 10^3 = 1 \times 10^{-3} (\text{Pa}\cdot\text{s})$
 $\mu_g = \rho_g \nu_g = 15 \times 10^{-6} \times 1.2 = 0.018 \times 10^{-3} (\text{Pa}\cdot\text{s})$
 $\mu_w > \mu_g$

所以, 在 20°C 时, 水比空气的粘性大。

[说明] 流体粘性是流体对于剪切力所表现的一种抵抗作用, 动力粘度 μ 是衡量流体粘性的指标, μ 表示流体在单位速度梯度下流动时, 单位面积上产生的内摩擦力。运动粘度 ν 无特殊物理意义, 它仅是 μ/ρ 的表示方法。就物理意义来说, ν 不是一个粘度的量, 因此对于不同介质的流体要比较粘性的大小, 只能用动力粘度 μ 来比较。

例 2-4. 有一钢管里充满液压油, 已知该油中混入空气的含量为 1%, 溶入空气的含量为 4%, 钢管的内径为 d , 壁厚为 δ , 纯油的体积模量为 K , 钢的弹性模量为 E , 空气的体积模量为 K_g , 求液压油的等效体积模量 K' 。

解: 由于溶入液压油的空气对其等效体积模量 K' 基本无影响, 故有

$$V_g / V_{\Sigma} = 1\%$$

在题设条件下, 容器即为钢管, 则容器的体积模量 K_c 可取为 $K_c = \frac{E\delta}{d}$ 。

所以, 由

$$\frac{1}{K'} = \frac{1}{K_c} + \frac{1}{K} + \frac{V_g}{V_{\Sigma} K_g}$$

得:

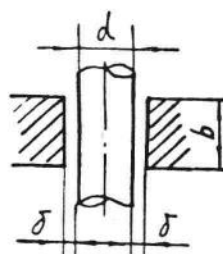
$$K' = \frac{100 E \delta K K_g}{100 d K K_g + 100 E \delta K + K E \delta}$$

例 2-5. 滑动轴承如图所示, 轴承和轴的间隙 $\delta = 1 \text{mm}$, 轴转速 $n = 180 \text{r}/\text{min}$, 轴径 $d = 150 \text{mm}$, 轴承宽 $b = 250 \text{mm}$, 试计算由润滑油的粘性摩擦所消耗的功率 (油的动力粘度 $\mu = 2.5 \times 10^{-2} \text{Pa}\cdot\text{s}$)。

解: 轴表面的线速度

$$u = r\omega = \frac{\pi d n}{60} = \frac{\pi \times 0.15 \times 180}{60} = 1.415 (\text{m}/\text{s})$$

因为油层很薄, 剪切速度 (速度梯度) 可近似为:



例 2-5 题图

$$\frac{du}{dr} = \frac{u}{\delta} = \frac{1.415}{0.001} = 1415(\text{m/s})/\text{m}^{-1}$$

根据牛顿内摩擦定律, 粘性摩擦力为

$$F = \mu A \frac{du}{dr} = \mu \pi db \frac{du}{dr} = 2.5 \times 10^{-2} \times \pi \times 0.15 \times 0.25 \times 1415 = 4.17(\text{N})$$

消耗的功率为

$$N_j = T_j \omega = \frac{2\pi F d n}{2 \times 60} = \frac{4.17 \times 0.15 \times 3.14 \times 180}{60} = 5.9(\text{W})$$

例 2-6. 在半径 $R_c = 100\text{mm}$ 的缸体内, 半径 $r_c = 99\text{mm}$, 宽度 $b = 150\text{mm}$ 的转子以 1500r/min 的转速转动, 克服润滑油粘性摩擦所需扭矩 $T_f = 35\text{N} \cdot \text{m}$, 试求缸内液压油的粘度。

解: 单位面积上的摩擦力即为剪应力

$$\tau = \frac{T_f}{Ar} = \frac{T_f}{2\pi r b r} = \frac{35}{2\pi \times 0.15 r^2} = \frac{37.14}{r^2}$$

根据牛顿内摩擦定律:

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} = -\mu \frac{du}{dr}$$

故有
$$du = -\frac{\tau}{\mu} dr$$

$$\therefore u = -\int \frac{37.14}{\mu r^2} dr = \frac{37.14}{\mu r} + c$$

根据边界条件, 当 $r = R_c = 100\text{mm}$ 时, $u = 0$ 代入上式, 可得

$$c = -\frac{37.14}{\mu}$$

$$\therefore u = \frac{1}{\mu} \left(\frac{37.14}{r} - 371.4 \right)$$

转子表面速度为

$$u = r_c \omega = 0.099 \times \frac{2\pi \times 1500}{60} = 15.55(\text{m/s})$$

$$\therefore \mu = \frac{1}{u} \times \left(\frac{37.14}{r} - 371.4 \right) = \frac{1}{15.55} \times \left(\frac{37.14}{0.099} - 371.4 \right) = 0.24(\text{Pa} \cdot \text{s})$$

例 2-7. 为了精确测定重度为 γ 的液体中 A、B 两点的微小压差, 设计如图所示的微压计。测定时的各液面差 H 、 a 、 b 分别如图所示。试求 γ 与 γ' 的关系及同一高度的容器 A、B 两点的压差。

解: 取等压面 1-1、3-3、4-4, 并设等压面 1-1 右侧到 g_1 的距离为 x_1 , 等压面 3-3 右侧到 g_2 的距离为 x_2 , 与空气接触的两个面 g_1 、 g_2 压力分别为:

$$P_{g_1} = p_1 - x_1 \gamma$$

$$P_{g_2} = p_2 - x_2 \gamma$$

因空气重度可以忽略不计, 空气段的压力均视为相同:

$$p_3 + x_2 \gamma = p_1 - x_1 \gamma$$

即 $p_3 = p_1 - (x_1 + x_2)\gamma = p_1 - (b-a)\gamma$

又由等压面 3-3 左侧, 可得 p_3 与 p_1 的另一关系式:

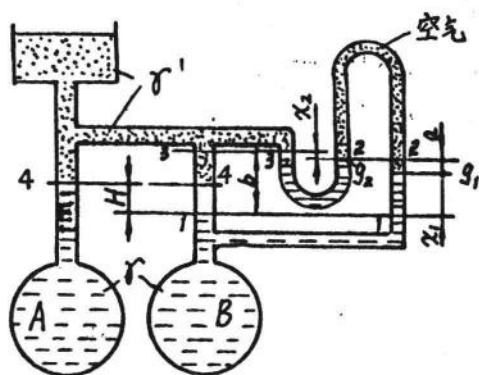
$$p_3 = p_1 - b\gamma'$$

故有 $b\gamma' = p_1 - p_3 = (b-a)\gamma$

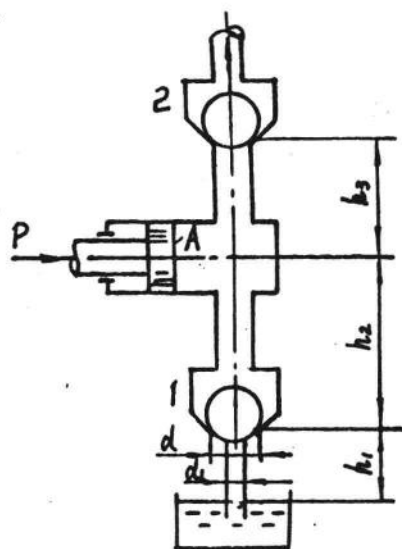
$$\gamma' = (1 - \frac{a}{b})\gamma$$

由等压面 4-4 可得两容器的压差

$$\Delta p = p_A - p_B = H(\gamma - \gamma') = \frac{a}{b}\gamma H$$



例 2-7 题图



例 2-8 题图

例 2-8. 如图所示, 泵在压油时, 作用在活塞上的力为 P , 活塞面积为 A , 单向阀 1 将吸油管封闭, 油顶开单向阀 2 进入系统, 单向阀座直径为 d , 油管直径均为 d_1 , 位置高度分别为 h_1 、 h_2 、 h_3 , 所有管路均充满重度为 γ 的油, 半径为 R 的钢球自重不计, 且 $R \ll h_1$ 、 h_2 , 试确定钢球压在 (单向阀 1) 阀座上的力。

解: 由题意, 在泵轴线处压力为 $\frac{P}{A}$, 它包含了泵轴线以上的油重度引起的压力 γh_3 及外负载。因此作用在钢球阀座上半部的向下合力为:

$$F_1 = (\frac{P}{A} + h_2\gamma + p_a) \times \frac{\pi}{4} d^2$$

作用在钢球阀座下半部的向上合力为:

$$F_2 = (p_a - h_1\gamma) \frac{\pi}{4} d^2$$

而作用在阀座上总的向下合力为:

$$F = F_1 - F_2 = (\frac{P}{A} + h_1\gamma + h_2\gamma) \frac{\pi}{4} d^2$$

例 2-9 如图所示, 有一固定液位 h 的水箱, 水通过一直径 d 、长为 l 的垂直管自

由出流，水的重度为 γ ，求 1). c 点的压力 p_c 和流速 v_c ；2) 管口垂直下方 H 处的流速 v_o 及水柱直径 d_o 。

解: 1) 取液面 A 与管内通过 C 的截面列出伯努利方程:

$$h + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} = \frac{p_c}{\gamma} + \frac{\alpha_c v_c^2}{2g} + h_w$$

$$\because p_A = 0 \quad v_A \ll v_c \quad \text{取 } h_w = 0 \quad \alpha_A = \alpha_c = 1$$

$$\therefore p_c = h - \frac{v_c^2 - v_A^2}{2g} \gamma \approx (h - \frac{v_c^2}{2g}) \gamma \quad (1)$$

再对管内通过 E 的截面与液面 A 列出伯努利方程:

$$(h+l) + \frac{p_A}{\gamma} + \frac{\alpha_A v_A^2}{2g} = \frac{p_E}{\gamma} + \frac{\alpha_E v_E^2}{2g} + h_w$$

$$\because p_A = p_E = 0 \quad v_A \ll v_E \quad \text{取 } \alpha_A = \alpha_E = 1 \quad h_w = 0$$

$$\therefore v_E = \sqrt{2g(h+l)}$$

由连续性方程，得

$$\frac{\pi}{4} d_c^2 v_c = \frac{\pi}{4} d_E^2 v_E \quad \therefore v_c = v_E = \sqrt{2g(h+l)} \quad (2)$$

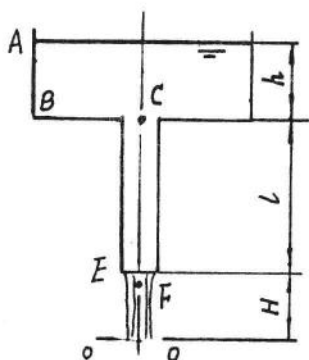
将(2)式代入(1)式得 $p_c = -l\gamma$

2) 对 E 截面和 O 截面列出伯努利方程:

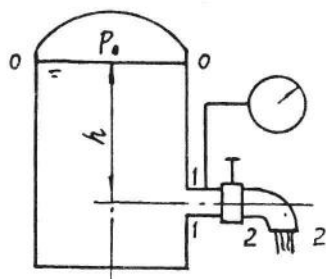
$$H + \frac{p_E}{\gamma} + \frac{\alpha_E v_E^2}{2g} = \frac{p_o}{\gamma} + \frac{\alpha_o v_o^2}{2g} + h_w$$

$$\because p_E = p_o = 0 \quad \text{取 } \alpha_E = \alpha_o = 1 \quad h_w = 0$$

$$\therefore v_o = \sqrt{2gH + v_E^2} = \sqrt{2g(H+h+l)}$$



例 2-9 题图



例 2-10 题图