



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS
高等学校教材

工程流体力学

• 主 编 倪玲英 •



中国石油大学出版社

013031472

TB126-43

41



TEACHING MATERIALS
FOR COLLEGE STUDENTS

高等学校教材

工程流体力学

主编 | 倪玲英



TB126-43

41



北航

C1640012

中国石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程流体力学 / 倪玲英主编. — 东营: 中国石油
大学出版社, 2012. 9

ISBN 978-7-5636-3761-4

I. ①工… II. ①倪… III. ①工程力学—流体力学—
高等学校—教材 IV. ①TE126

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 123144 号

中国石油大学(华东)规划教材

书 名: 工程流体力学

作 者: 倪玲英

责任编辑: 穆丽娜 潘海源(电话 0532—86981531)

封面设计: 青岛友一广告传媒有限公司

出 版 者: 中国石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://www.uppbook.com.cn>

电子信箱: shiyoujiaoyu@163.com

印 刷 者: 青岛锦华信包装有限公司

发 行 者: 中国石油大学出版社(电话 0532—86981532, 0546—8392563)

开 本: 180 mm × 235 mm 印张: 23.5 字数: 471 千字

版 次: 2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

定 价: 37.00 元

目前,石油院校的石油相关专业多由原来的钻井专业、采油专业、油气储运等几个专业发展到十几个专业,针对这一情况,《工程流体力学》作为专业基础课教材列入了中国石油大学(华东)“十二五”规划教材。

本教材主要是在袁恩熙主编的《工程流体力学》教材基础上,参考石油高校流体力学学科教学指导委员会于1993年所制订的《工程流体力学》教学大纲和众多同行专家编写的教材,同时结合编者多年工程流体力学教学实践经验,根据石油工程、船舶与海洋工程、海洋油气工程、油气储运工程、力学、热能与动力工程、土木工程等专业现行的教学大纲以及当前学生的学习特点改编而成的。本教材与原来使用的教材相比,增补了适用于船舶与海洋工程、土木工程新专业的边界层理论基础、明渠流动、渗流方面的内容以及计算流体力学简介。本教材各章节内容既相互联系,又相对独立,适当取舍组合,可以满足石油院校相关专业对工程流体力学的教学需要。

全书共分十一部分,主要内容有绪论、流体及其主要物理性质、流体静力学、流体运动学与动力学基础、流体阻力和水头损失、压力管路的水力计算、边界层理论基础、明渠均匀流与堰流、渗流、非牛顿流体的流动和气体动力学基础。介绍了工程流体力学的基本概念、基本原理和基本方法,注意加强理论基础和能力的培养,力求物理概念明确,理论联系实际,深入浅出,内容深度、广度适宜,思路清晰。

本书绪论、第一章至第六章、第八章至第十章由中国石油大学(华东)倪玲英主编,第七章由刘成文编写,全书由倪玲英统稿审定。

在本书编写过程中,得到了中国石油大学(华东)流体力学课程组全体老师的帮助和支持,在此一并表示衷心感谢。

由于时间仓促、编者水平所限,书中错误、疏漏之处在所难免,恳请同行专家和读者批评指正。

倪玲英

2012年4月

绪论	1
第一章 流体及其主要物理性质	7
第一节 流体的概念	7
第二节 流体的主要物理性质	8
第三节 作用在流体上的力	18
思考题	20
习 题	21
第二章 流体静力学	23
第一节 流体静压强及其特性	23
第二节 流体平衡微分方程式	26
第三节 重力作用下的流体平衡	31
第四节 测压计	37
第五节 静止流体作用在平面上的总压力	42
第六节 静止流体作用在曲面上的总压力	46
第七节 物体在液体中的潜浮原理	51
第八节 几种质量力作用下的流体平衡	54
思考题	58
习 题	59
第三章 流体运动学与动力学基础	65
第一节 研究流体流动的两种方法	65

第二节	流体运动学的基本概念	69
第三节	连续性方程	75
第四节	理想流体运动微分方程及流线伯努利方程	80
第五节	实际流体总流的伯努利方程	84
第六节	泵对液流能量的增加	100
第七节	定常流的动量方程及其应用	103
思考题		111
习 题		111
第四章	流体阻力和水头损失	116
第一节	管路中流动阻力产生的原因及分类	116
第二节	两种流动状态及判别标准	119
第三节	实际流体运动微分方程式——纳维-斯托克斯方程式	123
第四节	因次分析和相似原理	131
第五节	圆管层流分析	148
第六节	圆管湍流分析	153
第七节	非圆管沿程水头损失	174
第八节	局部水头损失	176
思考题		183
习 题		184
第五章	压力管路的水力计算	188
第一节	简单长管的水力计算	189
第二节	复杂长管的水力计算	197
第三节	短管的水力计算	204
第四节	孔口和管嘴泄流	212
第五节	压力管路中的水击现象	222
思考题		229
习 题		230

第六章 边界层理论基础 235

第一节 边界层概念	235
第二节 边界层微分方程式	238
第三节 边界层动量积分方程及应用	242
第四节 平板边界层近似计算	244
第五节 边界层分离现象	252
第六节 绕流物体的阻力	254
思考题	258
习 题	258

第七章 明渠均匀流与堰流 261

第一节 明渠及明渠流的分类	261
第二节 明渠均匀流的水力特征及其发生条件	263
第三节 明渠均匀流的水力计算	264
第四节 水跃与跌水	270
第五节 堰流的概念及其类型	271
第六节 堰流的基本公式	273
第七节 堰流的水力计算	274
思考题	279
习 题	279

第八章 渗流 281

第一节 渗流模型	281
第二节 达西定律	283
第三节 无压均匀渗流和缓变渗流	287
第四节 缓变渗流浸润曲线分析	289
第五节 井和井群	293
第六节 流土和管涌	297

思考题	299
习 题	299

第九章 非牛顿流体的流动 302

第一节 非牛顿流体的分类及其流变方程	302
第二节 非牛顿流体的结构流	307
第三节 塑性流体的流动规律	310
第四节 钻井循环系统压力损失的计算	317
第五节 幂律流体的流动规律	324
第六节 非牛顿流体流变性参数的测定	327
思考题	332
习 题	333

第十章 气体动力学基础 335

第一节 气体动力学诸方程	335
第二节 微弱扰动在可压缩流动中的传播	342
第三节 气体运动的三种参考状态	347
第四节 变断面管道内流动分析	354
第五节 有摩擦的绝热管流	358
思考题	363
习 题	363
参考文献	365

绪 论

一、流体力学的研究内容

流体力学是研究流体平衡和运动规律的一门科学,是力学的一个重要分支。流体力学的基本任务是研究流体在静止和运动时所遵循的基本规律,确定流体流经各种通道及绕流不同物体时速度、压强的分布规律,探求能量转换和损失计算方法,解决流体与固体之间的相互作用问题。

流体力学按其研究内容侧重方法的不同,分为理论流体力学(通称流体力学)、应用流体力学(通称工程流体力学)和水力学三个分支。理论流体力学主要采用严密的数学推理方法,力求准确性和严密性;水力学侧重于运用物理和实验方法进行实用研究;工程流体力学不追求数学上的严密性,而是趋向于解决工程实际中出现的问题,是前面两种方法的结合。

流体力学研究对象包括液体和气体,它们统称为流体。空气、水、油等都属于流体。流体是人类生活和生产中经常遇到的物质形式,许多科学技术部门都和流体力学有关,如石油、海洋、土建、造船、航空、机械、冶金、化工、生物等学科。事实上,目前很难找到与流体力学无关的专业和学科。

流体力学也和理论力学一样可以分为流体运动学、流体动力学和流体静力学。流体运动学用几何观点来研究流体的运动,不涉及力的问题;流体动力学用力学的观点来研究流体的运动,研究力和运动之间的关系,特别是研究压强和速度之间的关系;流体静力学是流体动力学的特例,研究流体平衡时的压强分布规律。

二、流体力学发展简史

流体力学是物理学中最古老的分支之一。流体力学的发展与数学和普通力学的发展密切相关,它是人类长期与自然界进行斗争的结果,是人类集体创造的财富。

从古代起人们就开始注意到固体与其周围介质(空气或水)之间存在相互作用力的问题。要特别指出的是阿基米德(Archimedes)的功绩,他是液体平衡理论,特别是物体浮力理论的创立者,阿基米德定律直到现在还是液体静力学的基础。在此之后的千余年间,流体力学没有重大发展。直到15世纪,意大利达·芬奇在其著作中才谈到水波、管流、水

力机械、鸟的飞翔原理等。17世纪,帕斯卡阐述了静止流体中压力的概念。流体力学的主要发展是从牛顿(Newton)时代开始的。1687年,牛顿在其名著《自然哲学的数学原理》(现常简称为《原理》)中讨论了流体的阻力、波浪运动等内容,已经有了与近代概念很接近的论述,使流体力学开始变成力学中一个独立分支。流体力学尤其是流体动力学的名字是伯努利(Bernoulli)于1738年在其名著《流体动力学》一书中首先引用的,他在该书中提出了著名的伯努利方程,即在流体的压力、密度和运动速度之间建立了普遍关系,直到现在仍是流体力学中一个重要定律。欧拉(Euler)于1755年在其著作《流体运动的一般原理》中提出了理想流体概念,并建立了欧拉方程和连续方程,同时提出了速度势的概念。伯努利方程和欧拉方程的建立是流体动力学作为分支学科建立的标志,从此开始了用微分方程和实验测量进行运动定量研究的新阶段。

从18世纪起,势流理论有了很大进展。法国拉格朗日(Lagrange)总结了前人的工作,进一步发展了流体力学的解析方法,他对速度势的存在性做了较严格的证明,并于1781年首先引进了流函数的概念。至此,对于平面问题,如果满足拉普拉斯方程的速度势和流函数分别存在,就可以把流体力学的问题转化为寻求一个解析的复变函数,即复式的纯数学问题。达朗贝尔于1744年提出了著名的达朗贝尔疑题,即在无界、理想不可压缩流体假定下,物体在水中匀速运动时不受阻力作用,说明了理想流体假定的局限性;达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了许多实验工作,证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系。与此同时,理想流体运动力学中的重要分支——波浪理论——也得到了发展。牛顿、拉格朗日、柯西(Cauchy)、拉普拉斯(Laplace)、泊松(Poisson)、艾瑞(Airy)、斯托克斯(Stokes)、米切尔等人对波浪理论都做出了贡献。

在19世纪,工程师们为了解决许多工程问题,尤其为了解决带有粘性影响的问题,部分地运用流体力学,部分地采用归纳实验结果的半经验公式进行研究,这就形成了水力学,水力学至今仍然与理论流体力学并行发展。1822年,纳维(Navier)建立了粘性流体的基本运动方程;1845年,斯托克斯又在更合理的基础上完善了这个方程,这就是沿用至今的纳维-斯托克斯方程(简称N-S方程),它是流体动力学的理论基础。关于粘性流体在小直径管中流动的详细试验工作是由泊肃叶(Poiseuille)在1840年和雷诺(Reynolds)在1876年先后完成的,并发现了流动中两种不同的流态——层流和湍流。

19世纪后半期出现了流体的旋涡运动理论,应该把亥姆霍兹(Helmholtz)看作是这一理论的创始人。他于1858年指出了理想流体中旋涡的许多基本性质以及旋涡运动理论,并于1878年提出了绕流脱体理论。柯西早在1811年、斯托克斯在1847年分别提出了旋涡概念的解释,汤姆孙(Thomson)也对旋涡理论做了许多工作。

普朗特(Prandtl)在1904年提出了边界层理论。他假定流体在接近固体边界很薄的一层(边界层)内存在粘性影响,在边界层之外是理想流体流动。这一理论很好地解释了阻力的产生,并把势流理论和粘性流体理论两者之间建立了联系。随着边界层理论的完

善和近代实验技术的发展,它已成为独立的流体力学分支。

现代机翼理论的发展与航空科学的发展密切相关。1878年雷利(Rayleigh)研究了圆柱体绕流问题,并且解释了弹道学中的马格纽斯(Magnus)效应。兰切斯特(Lanchester)、库塔(Kutta)和儒可夫斯基分别独立地建立了机翼升力和空气围绕机翼的环行流动之间的关系。普兰特于1918年首先提出了升力线理论,使机翼产生的升力可以用数学的方法来处理。20世纪40年代后,随着航空事业的发展,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞机的飞行速度超过了声速,使气体高速流动的研究进展迅速,空气动力学也得到了飞速发展,形成了气体动力学和稀薄空气动力学。

随着各种科学技术的迅速发展,流体力学的相关学者除了对湍流、涡流、流动稳定性等理论问题继续进行研究外,更主要的是转而研究石油、化工、冶金、能源、环保、生物等领域中的流体力学问题,上述这些研究都取得了丰硕的成果,既促进了生产技术的发展,又大大丰富了流体力学的学科内容,使流体力学这一古老学科更加富有活力。从流体力学的发展简史可以看出,流体力学的发展始终与社会生产实践紧密相联。

三、工程流体力学在石油工业中的作用

石油工业中钻井液和水泥浆的循环,油田生产作业用的压裂液和驱替液的注入,石油与天然气计量,采油工艺、炼油设备,油气分离、油气储存和运输,都离不开管、罐、泵的设计与使用,这都要涉及流体力学的相关内容。譬如钻井液循环压力和流速的设计,套管强度的校核,注水管网和油气集输管网的优化设计,流体在管道内的压力、阻力、压差和输送量的关系确定,管线管材强度的校核,布置管线位置以及选择泵的大小和类型,设计泵的安装位置,油罐或其他储液容器的结构强度校核,估计油槽车、油罐的装卸油时间,气蚀、水击等现象预防等等,都用到流体力学的知识。学习工程流体力学,不仅仅为了掌握油、气、水运动规律,更重要的是将这些规律运用到石油工程的设计与管理中,开展科学研究和技术革新,为我国石油赶超世界先进水平做出自己应有的贡献。

四、流体力学研究方法

流体力学作为一门学科,在其历史发展过程中产生并不断完善了一些解决问题的方法,如实验研究、理论分析和数值计算。

1. 实验研究方法

实验研究包括现场观测和实验室模型实验两个方面。

(1) 现场观测。对自然界固有的流动现象或实际工程中的流动现象,利用各种仪器进行系统观测,从而总结出流体运动的规律,并借以预测流动现象的演变。

不过,现场流动现象的发生往往不能控制,发生条件几乎不易完全重复出现,影响到

对流动现象和规律的研究;现场观测还要花费大量物力、财力和人力。因此,人们建立了实验室,使这些现象能在可以控制的条件下出现,以便于观察和研究。

(2) 实验室模型实验。在实验室内,以相似理论为指导,把实际工程(原型)缩小(或放大)为模型,在模型上预演相应的流体运动,得出在模型中的流体运动规律,将其按照相似关系换算为实际工程所需要的结论。实验能显示运动特点及其主要趋势,有助于形成概念,检验理论的正确性。

流体力学发展中每一项重大进展都离不开实验。现场观测常常是对已有事物、已有工程的观测,而实验室模型实验却可以对还没有出现的事物、没有发生的现象(如有待设计的工程、机械等)进行观察,使之得到改进。因此,实验室模型实验是研究流体力学的重要方法。

2. 理论分析方法

理论分析是根据流体运动的普遍规律,如质量守恒、动量守恒、能量守恒等,利用数学分析的手段,研究流体的运动,解释已知的现象,预测可能发生的结果。

理论分析的步骤大致如下:

(1) 建立力学模型,即针对实际流体的力学问题,分析其中的各种矛盾并抓住主要方面,对问题进行简化,建立反映问题本质的力学模型。

(2) 针对流体运动的特点,用数学语言将质量守恒、动量守恒、能量守恒等定律表达出来,从而得到连续性方程、动量方程和能量方程。此外,还要加上某些联系流动参量的关系式,例如本构方程和状态方程等,构建流体力学方程组。

(3) 求解方程组,利用各种数学工具解出方程并对它的解进行分析。

从基本概念到基本方程的一系列定量研究,都涉及很深的数学问题,所以流体力学的发展是以数学的发展为前提的。反过来,那些经过实验和工程实践考验的流体力学理论,又检验和丰富了数学理论,它所提出的一些未解决的难题,也是进行数学研究、发展数学理论的好课题。从目前数学发展的水平来看,有不少题目将是今后几十年内难以从纯数学角度完善解决的。

在流体力学理论中,用简化流体物理性质的方法建立特定的流体的理论模型,用减少自变量和减少未知函数等方法来简化数学问题,在一定的范围内是成功的,并解决了许多实际问题。对于一个特定领域,考虑具体的物理性质和运动的具体环境后,抓住主要因素,忽略次要因素,进行抽象化,也同时给予简化,建立特定的力学理论模型,便可以克服数学上的困难,进一步深入地研究流体的平衡和运动性质。

在建立模型时,常用以下两种方法:

(1) 无限微元法。设在运动流体占据的空间中,取一固定的微元控制体。譬如,在直角坐标系中,边长分别为 dx , dy , dz 的微元体,其极限即可表示点 (x, y, z) 。无限微元法

是将机械运动的普遍定律应用于微元控制体内的流体,建立流体的运动微分方程。由于目前还没有关于流体的运动微分方程组的普遍解析解,所以,常采用某些假定条件,使方程简化后才能求解。

(2) 有限控制体法(平均值法)。在流体力学中,常不需知道流体所占有的每一空间点上的流体质点运动的情况,而只需知道运动参数在某一体积或面积上的平均值。有限控制体法是在运动流体占据的空间中取一固定的有限控制体,建立以平均值表示的流体运动方程。

每种合理的简化都有其力学成果,但也有其局限性。例如,忽略了密度的变化就不能讨论声音的传播,忽略了粘性就不能讨论与它有关的阻力和某些其他效应。掌握合理的简化方法,正确解释简化后得出的规律或结论,全面并充分认识简化模型的适用范围,正确估计它带来的同实际的偏离,正是流体力学理论工作和实验工作的精华。

3. 数值计算方法

流体力学的基本方程组非常复杂,在考虑粘性作用时更是如此,如果不靠计算机,就只能对比较简单的情形或简化后的欧拉方程或N-S方程进行计算。20世纪30—40年代,对于复杂而又特别重要的流体力学问题,曾组织过人力用几个月甚至几年的时间做数值计算,比如圆锥做超声速飞行时周围的无粘流场就从1943年一直算到1947年。随着数学的发展、计算机技术的不断进步以及流体力学各种计算方法的发明,许多原来无法用理论分析求解的复杂流体力学问题有了求得数值解的可能性,这又促进了流体力学计算方法的发展,并形成了“计算流体力学”。

从20世纪60年代起,在飞行器和其他涉及流体运动的课题中,经常采用电子计算机做数值模拟,这可以和物理实验相辅相成。数值模拟和实验模拟相互配合,使科学技术的研究和工程设计的速度加快,并节省开支。数值计算方法最近发展很快,其重要性与日俱增。

解决流体力学问题时,实验室研究和数值计算几个方面是相辅相成的。实验需要理论指导,才能从分散的、表面上无联系的现象和实验数据中得出规律性的结论。反之,理论分析和数值计算也要依靠现场观测和实验室模拟给出物理图案或数据,以建立流动的力学模型和数学模式。最后,还需依靠实验来检验这些模型和模式的完善程度。此外,实际流动往往异常复杂(如紊流),理论分析和数值计算会遇到巨大的数学和计算方面的困难,得不到具体结果,只能通过现场观测和实验室模拟进行研究。

理论分析能指导实验和计算,使它进行得更有效,并可把部分实验结果推广到一整套没有做过实验的现象中去;实验不仅可用来检验理论和计算结果的正确性和可靠性,而且可提供建立运动规律和理论模型的根据;计算可以弥补理论及实验的不足,对复杂问题进行又快又省的研究。

研究流体还有一条途径,就是应用统计物理的方法,从分子、原子的运动出发,采用统计平均的方法建立宏观物理量满足的方程,并确定流体的性质。目前可以对分子碰撞作某些简化假设,可以导出正确的宏观方程,但对某些分子输运系数的值不能准确求得。液体输运过程理论还不完善,统计物理办法虽然直接,但还不能为流体力学中很多基本性质和概念提供十分有用的阐述。因它力图从微观导出宏观,所以可以深刻揭示微观与宏观的关系。

第一章

流体及其主要 物理性质

流体平衡和运动规律取决于流体的内因和外因,内因是流体的主要物理性质,外因为作用在流体上的力。因此在讨论流体力学规律之前,应首先掌握流体的概念、其主要物理性质及作用在流体上的力。

第一节 流体的概念

一、流体的概念

凡是沒有一定形状、容易流动的物质都称为流体。流体包括液体和气体。自然界中的物质有三态——气态、液态和固态,流体就占了两态。由此可见,流体力学涉及范围很广,其在相关的自然科学和工程技术领域中具有重要作用。

从外观上看,液体和气体很不相同,但是从某些性能方面来看,液体和气体是相似的。液体与固体相比,分子排列松散,分子引力较小,这就决定了液体和气体具有相同的特性。由于分子运动较强烈,流体无一定形状,易流动,只能抗压力,不能抗拉力和切力。而固体具有抵抗压力、拉力和切力三种能力,因而在外力作用下,固体通常只发生较小的变形,而且到一定程度后变形就停止。

液体和气体相比较也有各自特点。液体的分子距和分子有效直径差不多是相等的。当液体加压时,由于分子距稍有缩小而出现强大的分子斥力来抵抗外力。这就是说,液体分子距很难缩小,可以认为液体具有一定的体积,因此通常称为不可压缩流体。又由于分子引力作用,液体有力求自身表面面积收缩到最小的特性,所以在大气容器里只能占据一定的体积,而在上部形成自由表面。

气体分子距很大,在 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、1 个标准大气压下,气体的平均分子距约为 $3.3 \times 10^{-9}\text{ m}$,其分子平均直径约为 $2.5 \times 10^{-10}\text{ m}$,平均分子距比分子平均直径约大 10 倍,因此分子间的吸引力很小,气体分子可以自由运动。这就使气体既没有一定形状,也没有一定体积,可以压缩,不能形成自由表面。

二、连续介质假设

流体的真实结构是由分子组成的。显然,分子间是有空隙的,但是流体力学研究的并不是个别流体分子微观运动,而是研究由大量分子组成的宏观流体在外力的作用下所引起的运动。因此在流体力学中引入连续介质的假设,即把流体看成是由无限多彼此之间无间隙的流体质点组成的,稠密而无间隙的连续介质,而流体质点是微观上充分大、宏观上充分小的分子团,由彼此之间有间隙的分子组成。

流体连续介质假设是流体力学中第一个带根本性的假设。将真实流体看成连续介质,意味着流体的各种宏观物理量,如密度、压力、速度等,都可作为时间和空间位置的连续函数,使人们有可能用数学分析方法来讨论和解决流体力学中的问题。这一假设对大多数流体是适用的,但对稀薄的气体,连续假设便不能适用,必须考虑为不连续流体。

第二节 流体的主要物理性质

一、密度和重度

1. 密度

惯性是指物体要维持原有运动状态的物理性质,任何运动状态的改变都必须克服惯性。表征惯性的物理量是质量,质量愈大,惯性也愈大,运动状态愈难改变。流体的质量常用密度来反映。

流体在单位体积内所具有的质量称为密度,以 ρ 表示,国际单位为 kg/m^3 。

对于均质流体,设其体积为 V ,质量为 M ,则密度可以表示为

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

对于非均质流体,根据连续介质的假设,则有

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta M}{\Delta V} = \frac{dM}{dV} \quad (1-2)$$

2. 重度

物体相互之间具有吸引力,这个吸引力称为万有引力。表征地球对流体的引力大小的物理量就是重力。流体在重力作用下便显示出重量。

流体在单位体积内所具有的重量称为重度,以 γ 表示,国际单位为 N/m^3 。

对于均质流体,设其体积为 V ,重量为 G ,则重度可以表示为

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-3)$$

对于非均质流体,根据连续介质的假设,则有

$$\gamma = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta G}{\Delta V} = \frac{dG}{dV} \quad (1-4)$$

3. 密度与重度的关系

在地球引力场中,根据牛顿第二定律可知,质量和重量的关系为

$$G = Mg$$

则密度与重度有以下关系

$$\gamma = \rho g \quad (1-5)$$

式中 g ——重力加速度,计算中一般采用 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ 。

密度和重度的关系对于均质和非均质流体都适用。

由此可见,流体的密度仅仅与流体的质量有关,而流体的重度不仅与流体的质量有关,还与流体所处的地理位置有关。换言之,对确定的流体来说,密度是不变的,其重度则随地球引力的改变而改变。

4. 相对密度

相对密度俗称比重。需要说明的是,液体的相对密度与气体的相对密度的定义是有所不同的。

液体的相对密度是指液体的质量与相同体积、温度为 4°C 的纯水的质量之比。为什么选择 4°C 呢?这是由于纯水在 4°C 时密度最大,此时它的密度是 1000 kg/m^3 。

相对密度一般用 δ 表示。就液体来说,它与密度或重度有以下关系

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{水}}} \quad (1-6)$$

某些常见液体的相对密度如表 1-1 所示。

表 1-1 某些常见液体的相对密度

液 体	相对密度	温度 / $^\circ\text{C}$	液 体	相对密度	温度 / $^\circ\text{C}$
蒸 馏 水	1.00	4	航空汽油	0.65	15
海 水	1.02 ~ 1.03	4	轻 柴 油	0.83	15
重质原油	0.92 ~ 0.93	15	润 滑 油	0.89 ~ 0.92	15
中质原油	0.88 ~ 0.90	15	重 油	0.89 ~ 0.94	15
轻质原油	0.86 ~ 0.88	15	沥 青	0.93 ~ 0.95	15
煤 油	0.79 ~ 0.82	15	丙 三 醇	1.26	0