

全国高等院校**土木工程类**应用型系列规划教材

流体力学

张爱民 王长永 主编

 科学出版社
www.sciencep.com

全国高等院校土木工程类应用型系列规划教材



流体力学

张爱民 王长永 主 编
高 玮 王立军 副主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

我国高等教育从精英教育转为大众教育,必然会对教材建设提出新的要求。本教材在编写过程中,针对高等教育现状,着重体现了“拓宽专业面、加强基础、强化概念、实用与创新并重”的编写思想。

书中内容共计十章,附录中包含部分实验内容。具体章节为:第一章绪论,第二章流体静力学,第三章流体运动学,第四章流体动力学基础,第五章量纲分析和相似原理,第六章流动阻力与水头损失,第七章孔口、管嘴出流与有压管流,第八章明渠流动,第九章堰流,第十章渗流。

本书可作为高等院校土木工程类专业的教学用书,也可作为高等函授土木类专业的教材及参考书。

图书在版编目(CIP)数据

流体力学/张爱民,王长永主编. —北京:科学出版社,2010.3

(全国高等院校土木工程类应用型系列规划教材)

ISBN 978-7-03-026861-7

I. 流… II. ①张…②王… III. 流体力学-高等学校-教材 IV. ①035

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 032730 号

责任编辑:陈 迅 / 责任校对:赵 燕

责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

铭浩彩色印装有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年3月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2010年3月第一次印刷 印张:22 1/2

印数:1—3 000 字数:516 000

定价:33.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62132124(VA03)

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229 010-64034315; 13501151303

前 言

流体力学作为力学的一个重要分支,主要研究的是流体在静止或运动时所遵循的基本规律及其在工程上的应用。它是一门理论性和工程实践意义都较强的课程,具有理论不易掌握、概念和方程较多且易混淆、对学生高等数学知识及综合分析和处理问题能力要求较高等特点。

本书内容力求反映土木工程既要重视理论又要密切联系工程实践的特点,除了传统的内容外,增加了许多工程应用的内容,在编写上力求与时俱进,密切结合土木工程领域的新内容。书中内容紧密结合相关专业,内容完整,前后衔接较好,具有逻辑性和系统性,并且学时分配和篇幅的限定比较合理。为了采用启发式的教学和培养学生主动思考、积极创新的能力,书中加*号的章节为“发展动态”的内容,主要是对专门领域中目前正在研究的一些内容进行介绍,启发学生进行思考。本书与相关课程具有良好的衔接,恰当处理了本课程与高等数学、理论力学、材料力学、地基基础等课程的关系,避免重复,突出了工程应用中的本质内容。书中例题比较典型,在编写时,作者参考了国家注册结构师基础课考试中流体力学部分的知识点。

本教材由东北林业大学张爱民教授和南阳理工学院王长永副教授担任主编,大连水产学院高玮老师和东北林业大学王立军老师担任副主编,大连水产学院朱永英老师参编。全书编写分工为:第一章由张爱民编写,第二、六、七章由王长永编写,第三、四、五章由朱永英编写,第八、九、十章由王立军编写,实验部分由高玮编写。在编写过程中,滕达、侯旭鹏等同学进行了资料整理工作,全书由张爱民统稿。哈尔滨工业大学袁一星教授主审。

由于编者水平有限,本教材在内容选择与安排上难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 流体力学的研究对象、方法内容及应用	1
1.1.1 流体力学的研究对象	1
1.1.2 流体力学的发展简史	1
1.1.3 流体的连续介质假设	2
1.1.4 流体力学的研究方法	3
1.1.5 流体力学在土木工程中的应用	4
1.2 流体的主要物理性质	4
1.2.1 惯性	5
1.2.2 黏滞性	5
1.2.3 压缩性和热胀性	8
1.2.4 液体的毛细现象与表面张力	8
1.2.5 液体的汽化、空化及液化	10
1.3 作用在流体上的力	10
1.3.1 表面力	10
1.3.2 质量力	11
1.4* 非牛顿流体	12
1.4.1 流变性	12
1.4.2 非牛顿流体简介	13
小结	15
习题	15
第二章 流体静力学	18
2.1 静止流体中的应力特性	18
2.1.1 静水压强的定义	18
2.1.2 静水压强的特性	19
2.2 流体平衡微分方程	21
2.2.1 流体平衡方程式的建立	21
2.2.2 流体平衡方程的积分	22
2.2.3 等压面	23
2.3 重力场中的静水压强分布规律	24
2.3.1 水静力学的基本方程	24
2.3.2 基本方程的物理意义和几何意义	25

2.4 压强的表示方法和度量单位	26
2.4.1 压强的表示方法	26
2.4.2 压强常用的度量单位	29
2.4.3 流体静压强分布图	30
2.5 液柱式测压计	32
2.5.1 液柱式测压计	32
2.5.2 金属式测压计	35
2.6 作用于平面上的静水总压力	37
2.6.1 解析法	37
2.6.2 图解法	40
2.7 作用于曲面上的静水总压力	42
2.7.1 静水总压力的水平分力和垂直分力	42
2.7.2 静水总压力的方向	44
2.7.3 静水总压力的作用点	44
2.8 流体和潜体的平衡与稳定	45
2.8.1 浮力和物体的浮沉	46
2.8.2 潜体和浮体的稳定性	48
小结	48
习题	49
第三章 流体运动学	57
3.1 描述流体运动的方法	57
3.1.1 拉格朗日法	57
3.1.2 欧拉法	59
3.1.3 流体质点的加速度	59
3.2 欧拉法的基本概念	61
3.2.1 流动的分类	61
3.2.2 流线 & 迹线	65
3.2.3 流管、过流断面、元流和总流	69
3.2.4 流量和断面平均流速	70
3.2.5 系统与控制体	71
3.3 恒定流连续性方程	71
3.3.1 连续性基本微分方程	71
3.3.2 恒定不可压缩元流的连续性方程	73
3.3.3 恒定不可压缩总流的连续性方程	73
3.4 流体微团运动分析	75
3.4.1 微团运动的分解	76
3.4.2 微团运动的组成分析	77
3.4.3 有旋流动和无旋流动	80

小结	82
习题	82
第四章 流体动力学基础	85
4.1 流体运动微分方程	85
4.1.1 理想流体的运动微分方程	85
4.1.2 实际黏性流体的运动微分方程	87
4.2 恒定元流伯努利方程	89
4.2.1 理想流体运动微分方程的伯努利积分	89
4.2.2 元流伯努利方程的物理意义和几何意义	91
4.2.3 实际黏性流体元流的伯努利方程	92
4.2.4 毕托管测点流速的原理与应用	93
4.3 恒定总流伯努利方程	95
4.3.1 总流的伯努利方程	95
4.3.2 总流伯努利方程的物理意义和几何意义	98
4.3.3 水头线	98
4.3.4 文丘里流量计的原理与应用	101
4.3.5 不可压缩气流的伯努利方程	103
4.3.6 有能量或流量变化的伯努利方程	106
4.4* 非恒定总流伯努利方程	107
4.5 恒定总流动量方程	110
4.5.1 动量定理	110
4.5.2 总流的动量方程	111
4.5.3 总流动量方程的应用条件和使用方法	112
4.6 无黏性流体的无旋流动	117
4.6.1 理想流体无旋流动的伯努利方程	117
4.6.2 速度势函数	118
4.6.3 平面流动与流函数	119
4.6.4 基本平面势流	122
4.6.5 平面无旋流动的叠加原理	125
小结	128
习题	128
第五章 量纲分析及相似原理	131
5.1 量纲和谐原理	131
5.1.1 量纲的概念	131
5.1.2 无量纲量	132
5.1.3 量纲和谐原理	133
5.2 量纲分析法	134
5.2.1 瑞利法	134

5.2.2 π 定理	136
5.2.3 量纲分析方法的讨论	140
5.3 相似理论基础	140
5.3.1 相似概念	140
5.3.2 相似准则	142
5.4 模型实验	145
5.4.1 模型律的选择	146
5.4.2 模型设计	147
小结	149
习题	149
第六章 流动阻力与水头损失	151
6.1 流动阻力和水头损失的分类	151
6.1.1 沿程水头损失	151
6.1.2 局部水头损失	151
6.1.3 水头损失的计算公式	151
6.2 黏性流体的两种流态	152
6.2.1 层流和紊流	152
6.2.2 雷诺数	154
6.3 沿程水头损失与剪应力的关系	156
6.3.1 均匀流基本方程	156
6.3.2 圆管过流断面上的剪应力分布	157
6.3.3 明渠均匀流过流断面上的剪应力分布	157
6.3.4 壁剪切速度	158
6.4 圆管中的层流运动	159
6.4.1 流动特征	159
6.4.2 流速分布	159
6.4.3 层流的沿程水头损失计算	161
6.5 紊流运动	162
6.5.1 紊流的形成过程	162
6.5.2 紊流运动的特征与时均化	163
6.5.3 紊流剪应力	165
6.5.4 紊流中的黏性底层	168
6.6 紊流的沿程水头损失	170
6.6.1 紊流流速分布	170
6.6.2 紊流的沿程水头损失	171
6.6.3 尼古拉兹实验	172
6.6.4 人工粗糙管沿程阻力系数半经验公式	174
6.6.5 工业管道 λ 值的计算公式	175

6.6.6 计算沿程阻力系数的经验公式	176
6.7 局部水头损失	180
6.7.1 过水断面突然扩大的局部水头损失	181
6.7.2 各种管路配件及明渠的局部损失系数	182
6.8 边界层概念与绕流阻力	185
6.8.1 边界层的基本概念	185
6.8.2 边界层分离	186
6.8.3 绕流阻力	188
小结	190
习题	191
第七章 孔口、管嘴出流和有压管流	195
7.1 薄壁孔口的恒定出流	195
7.1.1 自由出流	195
7.1.2 淹没出流	196
7.1.3 孔口出流的系数	197
7.1.4 孔口的变水头出流	198
7.2 管嘴出流	200
7.2.1 圆柱形外管嘴恒定出流	200
7.2.2 收缩断面的真空	201
7.2.3 圆柱形外管嘴出流的正常工作条件	201
7.3 短管的水力计算	202
7.3.1 自由出流	202
7.3.2 淹没出流	203
7.3.3 短管的水力计算问题	204
7.4 长管的水力计算	208
7.4.1 简单管路	208
7.4.2 串联管路	214
7.4.3 并联管路	215
7.4.4 管网	217
7.4.5 沿程均匀泄流管路	222
7.5 有压管中的水击	224
7.5.1 水击现象	224
7.5.2 水击压强的计算	227
7.5.3 水击波的传播速度	229
7.5.4 停泵水击	229
7.5.5 防止水击危害的措施	230
7.6* 离心泵的工作原理与选用	230
7.6.1 离心泵的工作原理	230

7.6.2	离心泵的基本工作参数	231
7.6.3	水泵的工作性能曲线	232
7.6.4	管路特性曲线	233
7.6.5	水泵工作点的确定	234
小结		235
习题		237
第八章	明渠流动	244
8.1	明渠几何特征与允许流速	244
8.1.1	明渠流动的水力特点	244
8.1.2	渠道底坡	244
8.1.3	棱柱形渠道与非棱柱形渠道	245
8.1.4	明渠断面水力要素	245
8.2	明渠均匀流	247
8.2.1	明渠均匀流的水力特性	247
8.2.2	明渠均匀流的产生条件	248
8.2.3	明渠均匀流的基本公式	248
8.2.4	明渠均匀流的水力计算	249
8.2.5	水力最优断面和允许流速	251
8.2.6	无压圆管均匀流	253
8.3	明渠流动状态	256
8.3.1	明渠干扰微波波速及其判别	256
8.3.2	断面比能与临界水深	258
8.3.3	临界底坡	260
8.4	水跃和水跌	263
8.4.1	水跃	264
8.4.2	水跌	268
8.5	棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	268
8.5.1	棱柱形渠道非均匀渐变流微分方程	269
8.5.2	水面曲线分析	270
8.5.3	水面曲线分析的总结	274
8.6	明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	275
小结		277
习题		278
第九章	堰流	280
9.1	堰的类型及堰流特征	280
9.1.1	堰和堰流	280
9.1.2	堰的分类	280
9.1.3	堰流基本公式	282

9.2 宽顶堰溢流	283
9.2.1 基本公式	283
9.2.2 淹没的影响	285
9.2.3 侧收缩的影响	286
9.3 薄壁堰和实用堰溢流	288
9.3.1 薄壁堰溢流	288
9.3.2 实用堰溢流	290
9.4* 小桥孔径的水力计算	291
9.4.1 小桥孔过流的水力特性	291
9.4.2 小桥孔径的水力计算	292
9.4.3 泄水建筑物下游的衔接与消能	294
9.4.4 消力池水力计算	296
小结	299
习题	299
第十章 渗流	301
10.1 渗流现象与渗流模型	301
10.1.1 渗流模型	301
10.1.2 渗流的特点	302
10.2 渗流的达西定律	302
10.2.1 达西定律	302
10.2.2 达西定律的适用范围	303
10.2.3 渗透系数的确定	304
10.3 地下水的渐变渗流	304
10.3.1 裘皮幼公式	305
10.3.2 渐变渗流基本方程	305
10.3.3 渐变渗流浸润曲线的分析	306
10.4 井和井群	308
10.4.1 普通完整井	308
10.4.2 自流完整井	310
10.4.3 井群	311
10.5 渗流对建筑物安全稳定的影响	312
10.5.1 扬压力	312
10.5.2 地基渗透变形	313
小结	314
习题	314
附录 实验	316
实验 I 静水压强实验	316
实验 II 流线演示实验	319

实验Ⅲ	能量方程实验·····	321
实验Ⅳ	文丘里实验·····	325
实验Ⅴ	动量方程实验·····	329
实验Ⅵ	雷诺实验·····	333
实验Ⅶ	管流沿程阻力实验·····	336
实验Ⅷ	管流局部阻力实验·····	340
实验Ⅸ	孔口与管嘴出流实验·····	343
参考文献	·····	348

第一章 绪 论

学习要点 本章概述了有关流体力学研究对象和研究方法的一些基本知识,主要是流体的流动性、连续介质模型、作用在流体上的力,以及流体的主要物理性质。这些基本知识是学习流体力学理论的基础。

1.1 流体力学的研究对象、方法内容及应用

1.1.1 流体力学的研究对象

流体和固体是物质存在的主要形态。从力学分析的角度来看,流体与固体的主要差别是抵抗外力能力的不同。固体能够抵抗一定程度的压力、拉力和剪切力,流体一般不能抵抗拉力,在静止状态下也不能抵抗剪切力。如果对固体施加剪切力,那么只要剪切力不超过一定限度,固体在发生变形后其内部应力与外力相平衡,从而达到新的静止平衡状态。如果对流体施加剪切力,则无论力多小,它都将发生连续的变形,只要剪切力不停止作用,流体就永远不会达到静止平衡。这种在剪切力作用下所发生的连续变形通常称为流动。

大量与人类生活密切相关的物质,如水、空气、油等,都是流体力学研究流体的运动规律和力的相互作用规律;研究流动过程中动量、能量和质量的传输规律的对象。与物理学、数学等学科一样,流体力学所阐明的规律具有普遍性,因此流体力学是一门基础学科。另外,流体力学的一般原理和分析方法又被广泛地用来解决各种与流动相关的实际问题,它在许多工程技术领域中有广泛的应用性,因此流体力学又是一门应用学科。

1.1.2 流体力学的发展简史

流体力学的历史非常悠久,人类早在公元前就开始研究、探索流体的运动和受力规律。我国在公元前 256~前 210 年,便修建了都江堰、郑国渠、灵渠三大水利工程。特别是李冰父子带领修建的都江堰,既有利于岷江洪水的疏排,又能常年用于灌溉农田,并总结出“深淘滩,低作堰”、“遇弯截角,逢正抽心”的治水原则。古代的铜壶滴漏就是利用孔口出流使铜壶的水位变化而计算时间的。这表明,我国那时已对孔口出流有了相当的认识。北宋时期,在汤河上修建的真州船闸与 14 世纪末荷兰的同类船闸相比,约早 300 多年。明朝的水利学家潘季顺提出了“筑堤防溢,建坝减水,以堤束水,以水攻沙”和“借清刷黄”的治黄原则。以上都说明了我国劳动人民的聪明智慧,当时对流体流动规律的认识已达到相当高的水平。

对流体力学学科的形成做出第一个贡献的是古希腊的数学家及力学家阿基米德(Archimedes),公元前 250 年,他发表了一篇“论浮体”的论文,提出了浮体定律,这是流体

力学的第一部著作。他建立了包括物理浮力定律和浮体稳定性在内的液体平衡理论,奠定了流体静力学的基础。他第一个阐明了相对密度的概念,发现了各种不同的物体有不同的密度,并证明了任何一种液体的液面,在静止时与地球表面呈同一曲面,此曲面的中心即地心。他的这些著名论断至今还是流体静力学的重要基础,但由于奴隶制、神权和宗教观念的束缚,直到15世纪文艺复兴时期,流体力学仍未形成系统的理论。

16世纪以后,欧洲工业革命的开始,生产力有了较快发展。在城市建设、航海和机械工业发展需要的推动下,逐步形成近代的自然科学,流体力学也随之得到发展。意大利的L.达·芬奇(L. da Vinci)倡导用实验的方法了解水流形态,在米兰附近设计建造了一个小水渠,系统地研究了沉浮、孔口出流、物体的运动阻力等问题,促进了这一时期水力学和流体力学的发展。1612年G.伽利略(G. Galilei)提出了潜体的沉浮原理;1643年E.托里拆利(E. Torricelli)给出了孔口泄流的公式;1650年B.帕斯卡(B. Pascal)提出液体中压力传递的定理;1686年牛顿(Newton)发表了《自然哲学的数学原理》,对普通流体的黏性做了描述,即黏性切应力与速度梯度成正比(牛顿内摩擦定律)。为了纪念牛顿,将黏性切应力与速度梯度成正比的流体称为牛顿流体。18~19世纪,流体力学得到较大的发展,成为独立的一门学科。

19世纪末到20世纪初,众多学者对流体力学也做出了重要的贡献。1883年,雷诺(Reynolds)用不同直径的圆管进行实验,研究了黏性流体的流动,提出了黏性流体存在层流和紊流两种流态,并给出了流态的判别准则——雷诺数。12年后,他又引进紊流(或雷诺)应力的概念,并用时均方法,建立了不可压缩流体做紊流运动时所应满足的方程组,雷诺的研究为紊流的理论研究奠定了基础。1904年,L.普朗特(L. Prandtl)提出了边界层理论,解释了阻力产生的机制,并将势流理论和黏性流体理论建立了联系,随着边界层理论的完善和近代实验技术的进步,已经形成一个独立的流体力学分支。我国近代科学家钱学森在空气动力学方面的新理论、周培源的紊流理论、吴仲华的三元流理论也被世人所瞩目。

20世纪中叶以后,流体力学所研究的问题更加广泛深入,和其他学科相互渗透,派生出许多分支,形成许多边缘学科,如电磁流体力学、化学流体力学、生物流体力学、地球流体力学、高温气体动力学、非牛顿流体力学、爆炸力学、流变学、计算流体力学等。这些新兴学科的出现和发展,使流体力学这一古老的学科焕发出新的生机和活力。

1.1.3 流体的连续介质假设

流体力学研究的对象是流体,从物质结构的角度来看,流体是由大量的分子构成的,这些分子都在做无规则的热运动。由于分子之间存在空隙,流体的物理量(如各点的密度、压强和速度等)在空间的分布是不连续的。同时,分子的随机运动,使得空间任一点上流体物理量在时间上的变化也是不连续的。可以想见,以分子为对象来研究流体的运动,是极为困难的。

现代物理学的研究得出,在常温下 1cm^3 的水中有 3.3×10^{22} 个水分子,分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$,可见分子间距离之微小。即使在很小的体积中,也含有大量的分子,足以得到与分子数目无关的各项统计平均特性。

流体力学是研究流体宏观机械运动规律的,也就是大量分子统计平均的规律性。1755年,瑞士数学家和力学家L.欧拉(L. Euler)首先提出把流体当作是由密集质点构成的、内部无空隙的连续体来研究,这就是连续介质模型。这里所说的质点,是指大小同所有流动空间相比微不足道,又含有大量分子,具有一定质量的流体微元。提出连续介质假设,是为摆脱分子运动的复杂性,对流体物质结构的简化。按连续介质假设,流体运动中的物理量都可以视为空间坐标和时间变量的连续函数,这样就可以用连续函数的分析方法来研究流体运动。

1.1.4 流体力学的研究方法

流体力学作为一门学科,在它的发展过程中产生了一些特殊的研究和解决问题的方法,掌握这些方法,对于获得流体力学方面的知识和能力等方面,都是很重要的。研究流体力学问题有实验测量、理论分析和数值计算三种方法。

1. 实验测量方法

流体力学的研究,离不开科学实验。流体力学理论的发展,在相当程度上取决于实验测量水平,流体力学的实验方法主要有以下四个方面。

(1) 原型观测。对工程中的实际流体运动直接进行观测,收集、整理数据,为检验理论分析或总结基本规律提供依据。

(2) 模型实验。在实验室内,以相似理论为指导,把实际工程中原型物体缩小或放大为模型,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,并按照相似理论换算为原型的结果。

(3) 系统实验。如果原型观测受到某些条件的局限或因流体运动的相似规律在理论上没有建立,则可在实验室内小规模地造成某种流体运动,以此进行系统的实验观测,从中找出规律性。

(4) 模拟实验。根据水流或电流的相似或水流与气流的相似等性质,进行电模拟或水、气比拟实验等。

以上几个方面各有特点,在实验研究中起着不同的作用,在一定范围内,可以相互配合、补充与验证。

2. 理论分析方法

理论分析方法是在连续介质假设的基础上,对流动现象进行物理观点的描述,将实际流体流动抽象为工程流体力学模型——物理模型,根据机械运动的普遍规律和物体的物性,结合流体流动的特点,通过数理分析建立流体运动的基本方程——数学模型,利用各种数学工具解出方程并对它的解进行分析。但是,由于流体流动的复杂性,单纯依靠由数学分析得到的分析解很难解决工程实际问题,因此,需要采用理论分析与实验研究相结合的方法。流体力学中用理论解决实际问题有以下几种情况:①先推导理论公式再用经验系数加以修正;②根据实验现象与理论推理提出半经验公式;③先进行定性分析,然后直接给出经验公式。

3. 数值计算方法

还有相当多的流动问题,若仅仅依靠理论分析与各类实验还是不能满足生产实践的要求,可以通过数值计算的方法实现。随着计算机技术及其应用的飞速发展,这一方面已形成流体力学的一个重要分支——计算流体力学。

数值模拟的计算步骤如下。

(1) 对需要模拟计算的工程实际问题,运用描述流体流动的基本方程和具体的初始条件和边界条件建立数学模型,组成这些数学模型的方程是偏微分方程。

(2) 采用不同的方法,如有限差分、有限元、有限容积、有限分析以及谱方法等,对数学模型进行离散。

(3) 利用计算机和相应的数值计算方法对流动进行模拟显示,重复或再现复杂的流动现象,从而得到问题的解。

实验测量、理论分析和数值计算这三种方法各有利弊,实验可检测理论分析和数值计算结果的正确性与可靠性,并为简化理论模型和建立运动规律提供依据,这是其他方法无法替代的。理论分析则能指导实验和数值计算,并可把部分实验结果推广到一整类没有做过实验的现象中。数值计算可对一系列复杂流动进行重复性的模拟,节约时间。这三种方法互相补充,对于一些重要工程流体力学问题的研究,还要采用三种方法相结合的途径。

1.1.5 流体力学在土木工程中的应用

流体力学广泛用于土木工程的各个领域。例如,在建筑工程和路桥工程中,基坑排水、地基抗渗稳定处理、围堰修建、桥渡设计等都有赖于通过水力计算方能确定。风是影响建筑物设计的主要气象因素之一,兴建一座有足够抗风强度的高层建筑需要考虑到风对结构体的动态载重效应、建筑外墙的风压、建筑物在强风作用下的摆动等结构安全性问题。对于大楼周边风场变化情形研究主要采用风洞物理模拟试验,随着计算机硬件水平的飞速发展和计算应用软件技术的不断完善,出现了与试验相对应的数值模拟方法。桥梁设计中,风荷载是不可忽略的,而气体的压力和运动规律也正是流体力学所研究的问题。近几年来,我国大跨度桥梁的建设进入了一个辉煌时期。特别是大跨度拱桥的建设业绩更是雄踞国际领先地位,在大跨度钢拱桥、钢管混凝土拱桥、钢筋混凝土拱桥和石拱桥等全部四种型式拱桥中,世界最大跨度的记录均由中国保持。拱桥由于其优美的造型,在桥梁建设中越来越受到欢迎,随着拱桥跨径的增大以及钢结构材料的广泛使用,大跨度拱桥越来越柔,因此,对风的敏感程度也逐渐增大。相对于大跨度的斜拉桥和大跨度的悬索桥,大跨度拱桥的抗风研究水平还有待进一步提高。

1.2 流体的主要物理性质

在研究流体的平衡及运动时,必须掌握流体的力学性质。流体最主要的力学性质是惯性、黏滞性以及压缩性和热胀性。

1.2.1 惯性

所谓惯性是指物体维持原有运动状态的性质,要改变物体的运动状态,则必须克服惯性的作用。一般用物体的质量来表征物体惯性的量度。在地球引力场里,由于物体的重量与质量成正比,因此重量也是惯性的量度。但是在多数情况下,流体的总质量或者总重量是没有意义的。因此往往用密度和容重来表征流体的惯性。

1. 密度

流体的密度是流体的重要属性之一,它表征流体在空间某点质量的密集程度,流体的密度定义为:单位体积流体所具有的质量,用符号 ρ 来表示,即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

式中: ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

2. 容重

容重或称重度。流体的容重定义为:单位体积流体所具有的重量,以符号 γ 来表示,即

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1.2)$$

式中: γ ——流体的容重, N/m^3 ;

G ——流体的重量, N ;

V ——流体的体积, m^3 。

由牛顿第二定律可知 $G = mg$ 。因此

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g \quad (1.3)$$

式中: g ——重力加速度, $g \approx 9.807 \text{m}/\text{s}^2$ 。

流体的密度和容重随外界压力和温度的不同而变化,例如,水在标准大气压和 4°C 时其 $\rho = 1000 \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $\gamma = 9.807 \text{kN}/\text{m}^3$ 。水银在标准大气压和 0°C 时,密度和容重是水的 13.6 倍。干空气在温度为 20°C 、压强为 $760 \text{mmHg}^\text{①}$ 时的密度和容重分别为 $\rho = 1.2 \text{kg}/\text{m}^3$ 、 $\gamma = 11.80 \text{N}/\text{m}^3$ 。

1.2.2 黏滞性

流体的黏滞性可由实验和分析了解到,用流速仪测出管道中某一端面的流速分布。流体沿管道直径方向分成很多流层,各层的流速不同,并按某种曲线规律连续变化,管中心的流速最大,向着管道壁的方向递减,直至管壁处的流速为零。如图 1.1 所示,取流速方向的坐标为 u ,垂流速方向的坐标为 y ,若令水流中某一流层的速度为 u ,则与其相邻

① $1 \text{mmHg} = 0.133 \text{kPa}$ 。