



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材

高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

流体力学

(第三版)

刘鹤年 刘京 编

中国建筑工业出版社

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

流 体 力 学

(第 三 版)

刘鹤年 刘 京 编

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

流体力学/刘鹤年, 刘京编. —3 版. —北京: 中国建筑工业出版社, 2015. 12

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材, 普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材, 高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材 (经典精品系列教材)

ISBN 978-7-112-18872-7

I. ①流… II. ①刘… ②刘… III. ①流体力学-高等学校-教材 IV. ①O35

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 306681 号

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材
普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材
高校土木工程专业指导委员会规划推荐教材
(经典精品系列教材)

流 体 力 学

(第 三 版)

刘鹤年 刘 京 编

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京建筑工业出版社印刷

*

开本: 787×960 毫米 1/16 印张: 20 $\frac{3}{4}$ 字数: 429 千字

2016 年 1 月第三版 2016 年 1 月第三十四次印刷

定价: 39.00 元

ISBN 978-7-112-18872-7

(28115)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材、普通高等教育土建学科专业“十二五”规划教材，是土木工程专业流体力学课程（30~60学时）教材。

全书共12章，内容包括：绪论，流体静力学，流体运动学，流体动力学基础，平面无旋流动，量纲分析和相似原理，流动阻力和水头损失，孔口、管嘴出流和有压管流，明渠流动，堰流，渗流，一维气体动力学基础。本书针对土木工程专业的特点，注意加强理论基础，注重对学生能力的培养，论述简明严谨，便于教学。

本书也可作为市政、环境、水利各专业流体力学（水力学）教材，以及全国注册结构工程师流体力学考试的首选参考书。

为便于教学，作者特制作了与教材配套的电子课件，如有需要，可发邮件至 cabpbeijing@126 索取。

* * *

责任编辑：朱首明 王美玲

责任校对：张颖 党蕾

第三版前言

本书是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材，是高等学校土木工程专业指导委员会规划推荐教材。

第三版在保持前两版体系风格的基础上，参照教育部高等学校工科学课程教学指导委员会流体力学及水力学课程教学指导小组审定的《流体力学（水力学）课程教学基本要求（A类）》，吸收了哈尔滨工业大学教学改革的经验 and 各校教师的意见建议修订出版。

修订版在内容上增加流体力学的发展简史，扩展黏性流体运动微分方程、有势流动相关的内容，删去非恒定总流的伯努利方程，增加适用输配水管道摩阻计算的海曾-威廉公式，删去希弗林松公式，改写了部分例题和习题；逐一校订书中引用的实验资料数据，加注参考文献序号或注码注明出处；纠正文、图、符号中的差错，进行文字再加工。

国内高等学校土木工程专业流体力学（水力学）课程的理论教学时数多在30~60学时之间，本书基本内容为60学时，在内容编排上注意到兼顾少学时教学，不需改动章节顺序，删减黏性流体运动微分方程、平面无旋流动、一维气体动力学基础及加*号的各章节，达到基本要求，完成教学。

修订工作得到高等学校土木工程学科专业指导委员会和中国建筑工业出版社的大力支持，在此特致诚挚的谢忱，向选用本教材，提出许多宝贵意见的各校同仁致谢。

全书由哈尔滨工业大学刘鹤年、刘京共同讨论定稿，最后由刘京统稿，在完稿之际，我们以感激之情深深地怀念马祥瑞教授生前对本书的关怀。

由于编者学识所限，书中难免有疏漏差错之处，敬请读者批评指正。

第二版前言

本书是普通高等教育“十五”国家级规划教材，是面向 21 世纪课程教材和高校土木工程学科专业指导委员会规划推荐教材的修订版。

原书是依据土木工程学科专业指导委员会审订的流体力学课程教学大纲、工科水力学及流体力学课程教学指导组审订的水力学课程（少学时）教学基本要求编写的，土木工程专业用流体力学教材。第二版在保持第一版的体系和特点的基础上，力求有新意和提高，为此，改写了 §1.4 牛顿流体和非牛顿流体、§2.2 流体平衡微分方程、§6.5 紊流运动、§9.4 小桥孔径的水力计算及第 11 章一维气体动力学基础，新增 §4.4 非恒定总流的伯努利方程、§10.5 渗流对建筑物安全稳定的影响，同时删减部分经验性内容和计算方法，提高了教材的质量。

土木工程专业是宽口径专业，各校流体力学课的教学内容和教学时数有较大差别，本书适用于中、低学时（40~50 学时），书中带 * 号的章节可作为选学内容，以便于组织教学。

本书出版适逢我国实施“2003~2007 年教育振兴行动计划”，高等教育将实现更新更高跨越的年代。修订工作承蒙高校土木工程专业指导委员会、高校工科水力学及流体力学课程教学指导组专家的鼓励和指导，一些兄弟院校在原书使用过程中提出许多宝贵的意见和建议，哈尔滨工业大学、中国建筑工业出版社给予了大力支持，在此表示衷心的感谢。

本书由刘鹤年（哈尔滨工业大学）、张维佳（苏州科技学院）编，刘鹤年主编并定稿。

由于编者水平所限，书中难免疏漏和不妥之处，恳请读者批评指正。

第一版前言

本书是面向 21 世纪土建类人才培养方案和教学内容改革与实践项目研究成果的一部分，是普通高等学校土木工程专业流体力学课程教材，也可作为市政、环境、水利等专业流体力学（水力学）课程教学用书，以及全国注册结构工程师流体力学考试的首选参考书。

本书从流体力学课程的基础地位出发，加深加宽理论基础，在不削弱一元流动理论的同时，加强对质点运动的分析，注意运用基本方程分析流动问题，引导学以致用，重在培养学生分析问题的能力。

根据土木工程专业的专业特点，学生的基础情况和减少课内教学时数的需要，本书适当提高了知识起点，并精简传统的经验性内容和计算方法，尽量减小篇幅。部分带 * 号的章节，作为选学内容，以便于组织教学。

在本书之前，曾编写出版了高等学校建筑工程专业系列教材《水力学》（中国建筑工业出版社，1998 年 12 月），受到有关学校的欢迎。本书吸收了编写《水力学》的经验和各校教师的建议，进一步提高了书的质量，当此《流体力学》出版之际，再次向各校同仁深致谢意。

本书的编写得到建设部高校土木工程专业指导委员会、教育部工科力学课程教学指导委员会水力学和流体力学组专家的鼓励和指导，也得到中国建筑工业出版社、哈尔滨工业大学土木工程学院的大力支持，在此致以衷心的感谢。

由于编者学识所限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 流体力学及其任务	1
1.2 作用在流体上的力	6
1.3 流体的主要物理性质	7
1.4* 牛顿流体和非牛顿流体	14
习题	17
第 2 章 流体静力学	20
2.1 静止流体中应力的特性	20
2.2 流体平衡微分方程	21
2.3 重力场中流体静压强的分布规律	24
2.4* 流体的相对平衡	30
2.5 液体作用在平面上的总压力	33
2.6 液体作用在曲面上的总压力	38
习题	43
第 3 章 流体运动学	49
3.1 流体运动的描述	49
3.2 欧拉法的基本概念	52
3.3 连续性方程	59
3.4 流体微团运动分析	63
习题	68
第 4 章 流体动力学基础	71
4.1 无黏性流体的运动微分方程	71
4.2 元流的伯努利方程	73
4.3 恒定总流的伯努利方程	77
4.4 恒定总流的动量方程	87
4.5 黏性流体运动微分方程	91
习题	97
第 5 章 平面无旋流动	101
5.1 无黏性流体无旋流动的伯努利方程	101
5.2 速度势函数和流函数	103
5.3 流网法解平面势流	109

5.4 势流叠加法解平面势流	111
习题	122
第6章 量纲分析和相似原理	124
6.1 量纲分析的意义和量纲和谐原理	124
6.2 量纲分析法	127
6.3 相似理论基础	132
6.4 模型实验	137
习题	140
第7章 流动阻力和水头损失	144
7.1 流动阻力和水头损失的分类	144
7.2 黏性流体的两种流态	146
7.3 沿程水头损失与切应力的关系	149
7.4 圆管中的层流运动	150
7.5 紊流运动	155
7.6 紊流的沿程水头损失	162
7.7 局部水头损失	175
7.8 边界层概念与绕流阻力	182
习题	190
第8章 孔口、管嘴出流和有压管流	194
8.1 孔口出流	194
8.2 管嘴出流	198
8.3 短管的水力计算	199
8.4 长管的水力计算	204
8.5 有压管道中的水击	210
8.6* 离心泵的原理和选用	215
习题	219
第9章 明渠流动	225
9.1 概述	225
9.2 明渠均匀流	227
9.3 无压圆管均匀流	234
9.4 明渠流动状态	238
9.5 水跃和水跌	247
9.6 棱柱形渠道非均匀渐变流水面曲线的分析	252
9.7 明渠非均匀渐变流水面曲线的计算	261
习题	263
第10章 堰流	267

10.1	堰流及其特征	267
10.2	宽顶堰溢流	268
10.3	薄壁堰和实用堰溢流	272
10.4*	小桥孔径的水力计算	275
	习题	278
第 11 章	渗流	280
11.1	概述	280
11.2	渗流的达西定律	281
11.3	地下水的渐变渗流	283
11.4	井和井群	287
11.5	渗流对建筑物安全稳定的影响	291
	习题	292
第 12 章*	一维气体动力学基础	294
12.1	可压缩气流的一些基本概念	294
12.2	无黏性完全气体一维恒定流动的基本方程	298
12.3	喷管的等熵出流	304
12.4	可压缩气体管道流动	308
	习题	313
	习题答案	316
	参考文献	322

第1章 绪 论

1.1 流体力学及其任务

1.1.1 流体力学的研究对象

流体力学是研究流体的机械运动规律及其应用的科学，是力学的分支学科。

在常温常压下，自然界物质有三种形态：固体、液体和气体。宏观地看，固体有一定的体积和形状，不易变形；液体有一定的体积，不易压缩，形状随容器形状而变，可有自由表面；气体容易压缩，充满整个容器，没有自由表面。

液体和气体合称为流体，流体的基本特征是具有流动性。什么是流动性呢？观察流动现象，诸如微风吹过平静的池水，水面因受气流的摩擦力（沿水面作用的剪切力）作用而波动；斜坡上的水，因受重力沿坡面方向的切向分力而往低处流淌……。这些现象表明，流体在静止时不能承受切力，或者说任何微小的切力作用，流体都将产生连续不断的变形，这就是流动，只要切力存在，流动就持续进行。流体的这种在微小切力作用下，连续变形的特性，称为流动性。此外，流体无论静止或运动，都几乎不能承受拉力。

固体没有流动性，在剪切力的作用下可以维持平衡。所以，流动性是区别流体和固体的力学特征。

1.1.2 流体力学的发展简史

1. 发展历程

人类治水的历史可追溯到上古时期。在中国，早在新石器时代晚期，已出现引水、排水沟渠和汲水井^①，在漫长的历史进程中，积累了丰富的治水经验和建造技术，留下众多历史文化遗产，如先秦时期（公元前 256～前 251 年）在四川岷江中游建都江堰^②（图 1-1），从此川西平原“水旱从人，不知饥馑，时无荒年，天下谓之天府也。”（《华阳国志·蜀志》）；隋朝自文帝始，历二世（公元 584～610 年）修浚并贯通南北大运河^③“自是天下利于转输”，“运漕商旅往来不

① 周光桐编著《史前与当今的流体力学问题》北京大学出版社，2002.

② 联合国教科文组织列入世界文化遗产名录 2000. 11.

③ 联合国教科文组织列入世界文化遗产名录 2014. 6.

绝”；又如隋大业年间（公元 605 年～617 年）在河北洹河上建安济桥（赵州桥），如图 1-2 所示，这座石拱桥跨径 37.4m，主券两端各伏有两小券，既减轻了桥身自重，又可泄洪，迄今 1390 余年依然完好。历史上这些伟大的工程，皆因“顺应水性”，才能跨江河逾千年而不毁。



图 1-1 都江堰渠首



图 1-2 赵州桥

流体力学成为一门现代科学，发轫于 17 世纪欧洲文艺复兴以后，大致可分为：流体力学的建立（17 世纪中叶至 18 世纪末叶）、古典流体力学（古典水动力学）发展成熟（19 世纪至 20 世纪初）、近代流体力学（20 世纪初至中叶）和现代流体力学（20 世纪中叶以后）四个时期。

欧洲文艺复兴时期（1300 年～1600 年）以后，意大利数学家、物理学家托里拆利（Torricelli, E., 1608 年～1647 年）据实验推断开放空间存在大气压力，其后，法国数学家、物理学家、哲学家帕斯卡（Pascal, B., 1623 年～1662 年）在不同高程继续托里拆利的实验，于 1648 年提出大气压概念，1653 年发表静止流体中压强传递原理—帕斯卡原理。1687 年英国数学家、物理学家、天文学家

牛顿 (Newton, I., 1642~1727 年) 所著《自然哲学的数学原理》(Philosophia Naturalis Principia Mathematica) 问世, 阐述了牛顿运动定律和万有引力定律, 《自然哲学的数学原理》第二篇第九章提出关于流体内摩擦阻力的假设—牛顿内摩擦定律。1732 年法国工程师皮托 (Pitot, de. H., 1695 年~1771 年) 发明测量流速的仪器—皮托管, 使有可能测量点流速和流速分布。1738 年瑞士数学家、物理学家伯努利 (Bernoulli, D., 1700 年~1782 年) 所著《水动力学》出版, 书中应用能量原理结合实验, 得出水流运动的流量关系式—伯努利方程。1752 年法国数学家、力学家达朗贝尔 (d' Alembert, J. le. R., 1717 年~1783 年) 发表在理想流体 (无黏性流体) 中, 物体作匀速直线运动阻力为零的理论解, 即达朗贝尔佯谬。1755 年瑞士数学家、力学家欧拉 (Euler, L., 1707 年~1783 年) 在所著《流体运动的基本原理》中建立无黏性液体运动方程—欧拉运动方程, 该方程与连续性微分方程组成无黏性流体运动微分方程组, 奠定了无黏性流体动力学的理论基础, 标志着流体力学从建立走向古典流体力学发展成熟时期。

19 世纪至 20 世纪初是古典流体力学发展成熟时期, 1839 年德国工程师哈根 (Hagen, G. H. L., 1797 年~1884 年), 同一时期法国医生、物理学家泊肃叶 (Poiseuille, J. L. M., 1799 年~1869 年) 相继完成圆管水流的实验研究, 后者于 1841 年发表圆管层流计算公式—哈根—泊肃叶公式。1822 年法国土木工程师、力学家纳维 (Navier, L. M. H., 1785 年~1836 年) 提出考虑黏性的流体运动方程式, 至 1845 年英国数学家、物理学家斯托克斯 (Stokes, G. G., 1819 年~1903 年) 以更为严格的推证最终建立现在形式的黏性流体运动方程—纳维—斯托克斯方程。1856 年法国工程师达西 (Darcy, H. P. G., 1803 年~1859 年) 提出多孔介质渗流的基本规律—达西定律。1883 年英国物理学家雷诺 (Reynolds, O., 1842 年~1912 年) 用可视化方法实验验证水流运动存在两种型态—层流和紊流 (湍流), 判别准数—雷诺数, 后于 1895 年提出紊动应力 (雷诺应力) 和紊流运动方程 (雷诺方程), 开紊流研究之先河。

自 18 世纪以来, 流体力学沿着两个相互独立的途径发展, 其一是古典流体力学, 对理想流体以牛顿力学定律为基础, 用数学演绎的方法进行理论研究, 至 19 世纪末在数学上已臻完美, 但所得理论解往往同实验结果相差甚远; 另一途径是水力学, 主要根据实验结果归纳成经验公式或半经验公式, 应用于工程实际, 此类公式因缺乏理论基础带有局限性。直到 1904 年德国力学家普朗特 (Prandtl, L., 1875 年~1953 年) 在观察、实验的基础上提出边界层理论, 从理论上解决了古典流体力学和水力学各自用于实际流动存在的困难, 使两者得以统一起来, 自此, 进入近代流体力学时期。

20 世纪初开始近代流体力学时期, 代表人物之一普朗特继边界层理论之后, 1913 年提出三维机翼理论, 1925 年提出紊流的混合长度理论。1906 年俄罗斯数学家、力学家儒考夫斯基 (Joukowski, N. E., 1847 年~1921 年) 发表绕流体升

力理论——儒考夫斯基升力理论。1911年美国应用数学家、力学家卡门(Karman, Th. v., 匈牙利, 美, 1881年~1963年)发现卡门涡, 建立涡街理论, 1921年根据动量原理导出边界层动量方程。1921年英国数学家、力学家泰勒(Taylor, G. I., 1886年~1975年)提出紊流扩散理论, 1933和1935年先后发表涡旋传递理论和紊流统计理论。1927年美国工程师德莱顿(Dryden, H.)和基西(Kuethe, A.)发明热线风速仪, 为紊流的实验研究提供了有效的手段, 首次测得紊流脉动速度。1933年德国工程师尼古拉兹(Nikuradsa, J.)完成人工粗糙管流摩阻变化规律及速度分布的实验研究。在这一时期, 1939年我国力学家钱学森(1911年~2009年)发表可压流绕流问题的解法(卡门—钱学森法), 提出跨声速流动相似律, 并与卡门一起, 最早提出高超声速流的概念。1945年物理学家、力学家周培源(1902年~1993年)建立紊流相关动力学方程及其近似解法, 是建立紊流模式的奠基石。1952年力学家、机械工程学家吴仲华(1917年~1992年)建立叶轮机械的三元流理论, 建立流动的基本方程。他们都为近代流体力学的发展作出了贡献。

20世纪中叶(1960年)以后, 计算机广泛应用, 流体力学研究领域空前扩展, 非牛顿流体力学、多相流体力学、环境流体力学、物理化学流体力学、计算流体力学等新的分支和交叉学科迅速兴起, 流体力学进入现代流体力学时期。

自17世纪中叶至今三百余年的发展史, 记下了先驱者和大师们凭借科学思想的突破, 理论创新和实验技术创新, 引领流体力学从初起走向成熟、走向辉煌的历史进程。回顾历史, 展望未来, 面对当今世界面临的重大全球性问题, 其中气候变化、水资源短缺、环境保护、防灾减灾、空天利用, 海洋开发等无不与流体力学有着密切的关系, 流体力学将在解决这些事关人类未来的问题中继续不断地创新发展!

2. 流体力学与土木工程

流体力学广泛应用于土木工程的各个领域。例如, 在建筑工程和桥梁工程中, 研究解决风对高耸建筑物的荷载作用和风振问题, 要以流体力学为理论基础; 进行基坑排水、地基抗渗稳定处理、桥渡设计都有赖于水力分析和计算; 从事给水排水系统的设计和运行控制, 以及供热、通风与空调设计和设备选用, 更是离不开流体力学。可以说, 流体力学已成为土木工程各领域共同的专业理论基础。

流体力学不仅用于解决单项土木工程的水和气的的问题, 更能帮助工程技术人员进一步认识土木工程与大气和水环境的关系。大气和水环境对建筑物和构筑物的作用是长期的、多方面的, 其中台风、洪水通过直接摧毁房屋、桥梁、堤坝, 造成巨大的自然灾害; 另一方面, 兴建大型厂矿、公路、铁路、桥梁、隧道、江海堤防和水坝等, 都会对大气和水环境造成不利影响, 导致生态环境恶化, 甚至加重自然灾害, 这方面国内外已有惨痛的教训。只有处理好土木工程与大气和水

环境的关系，作到保护环境，减轻灾害，才能实现国民经济可持续发展。

1.1.3 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法大体上分为理论方法、数值方法和实验方法三种。

理论方法是通过对流体物理性质和流动特征的科学抽象，提出合理的理论模型。对这样的理论模型，根据物质机械运动的普遍规律，建立控制流体运动的闭合方程组，将实际的流动问题，转化为数学问题，在相应的边界条件和初始条件下求解。理论研究方法的关键在于提出理论模型，并能运用数学方法求出理论结果，达到揭示运动规律的目的。但由于数学上的困难，许多实际流动问题还难以精确求解。

数值方法是在计算机应用的基础上，采用各种离散化方法（有限差分法、有限元法等），建立各种数值模型，通过计算机进行数值计算和数值实验，得到在时间和空间上，许多数字组成的集合体，最终获得定量描述流场的数值解。近 50 年来，这一方法得到很大发展，已形成一个专门学科——计算流体力学。

实验方法是通过对具体流动的观察与测量，来认识流动的规律。理论上的分析结果需要经过实验验证，实验又需用理论来指导。流体力学的实验研究，包括原型观测和模型实验，而以模型实验为主。

上述三种方法互相结合，为发展流体力学理论，解决复杂的工程技术问题，奠定了基础。

1.1.4 连续介质假设

流体力学研究的对象是流体，从微观角度来看，流体是由大量的分子构成的，这些分子都在作无规则的热运动。由于分子间是离散的，流体的物理量（如密度、压强和速度等）在空间的分布是不连续的，又由于分子的随机运动，在空间任一点上，流体的物理量随时间的变化也是不连续的，因此以分子作为流动的基本单元来研究流体的运动将极为困难。

现代物理学的研究得出，在标准状态（ 0°C ， 1.0 大气压）下， 1cm^3 的水中约有 3.3×10^{22} 个水分子，相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-8}\text{cm}$ ； 1cm^3 气体约有 2.7×10^{19} 个分子，相邻分子间的距离约为 $3 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。分子间距离如此微小，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。

流体力学研究流体宏观机械运动的规律，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欧拉（Euler, L. 1707 年~1783 年）提出，把流体当作是由密集质点构成的、内部无间隙的连续体来研究，这就是连续介质假设。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,流体运动的物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数,这样就能用数学分析方法来研究流体运动。

连续介质假设用于一般的流动是合理和有效的,但是对某些特殊的问题,如研究在高空稀薄气体中的物体运动,气体分子平均自由程很大,与物体特征长度尺度相比为同量阶,则不能视稀薄气体为连续介质。

连续介质假设对于学过固体力学的读者并不陌生,在材料力学和弹塑性力学中,都把受力构件当作连续介质来研究应力和变形的规律。可以说连续介质假设是固体和流体力学许多分支学科共同的理论基础。

1.2 作用在流体上的力

力是造成物体机械运动的原因,因此研究流体机械运动的规律,要从分析作用在流体上的力入手。作用在流体上的力,按作用方式的不同,分为两类。

1.2.1 表面力

表面力是通过直接接触,作用在所取流体表面上的力,简称面力。

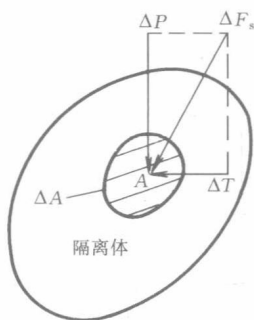


图 1-3 表面力

在运动流体中,取隔离体为研究对象(图 1-3),周围流体对隔离体的作用,以分布的表面力代替。表面力在隔离体表面某一点的大小(集度)用应力来表示。

设 A 为隔离体表面上的一点,包含 A 点取微小面积 ΔA ,若作用在 ΔA 上的总表面力为 ΔF_s ,将其分解为法向分力(压力) ΔP 和切向分力 ΔT ,则

$$\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad \text{为 } \Delta A \text{ 上的平均压应力}$$

$$\bar{\tau} = \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad \text{为 } \Delta A \text{ 上的平均切应力}$$

取极限 $p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 为 A 点的压应力,习惯上称为 A 点的压强

$$\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} \quad \text{为 } A \text{ 点的切应力}$$

应力的单位是帕斯卡(Pascal, B. 法国数学家,物理学家,1623年~1662年),简称帕,以符号 Pa 表示, $1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2$ 。

1.2.2 质量力

质量力是作用在所取流体体积内每个质点上的力,因力的大小与流体的质量

成比例，故称质量力。在均质流体中，质量与体积成正比，质量力简称体力。重力是最常见的质量力，除此之外，若所取坐标系为非惯性系，建立力的平衡方程时，其中的惯性力如离心力、科里奥利力（Coriolis force）也属于质量力。

质量力的大小用单位质量力表示。设均质流体的质量为 m ，所受质量力为 \vec{F}_B ，则单位质量力为

$$\vec{f}_B = \frac{\vec{F}_B}{m}$$

在各坐标轴上的分量

$$X = \frac{F_{Bx}}{m}, Y = \frac{F_{By}}{m}, Z = \frac{F_{Bz}}{m}$$

$$\vec{f}_B = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

若作用在流体上的质量力，只有重力（图 1-4），则

$$F_{Bx} = 0 \quad F_{By} = 0 \quad F_{Bz} = -mg$$

单位质量力 $X=0, Y=0, Z = \frac{-mg}{m} = -g$

负号表示重力方向与 z 轴的方向相反。

单位质量力的单位为 “ m/s^2 ”，与加速度单位相同。

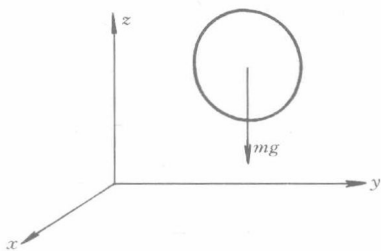


图 1-4 重力

1.3 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流动状态的内在因素，同流体运动有关的主要物理性质是惯性、黏性和压缩性。

1.3.1 惯性

惯性是物体保持原有运动状态的性质，凡改变物体的运动状态，都必须克服惯性的作用。

质量是惯性大小的度量，单位体积的质量称为密度，以符号 ρ 表示。如均质流体的体积为 V ，质量为 m ，则

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

密度的常用单位是 “ kg/m^3 ”。

液体的密度随压强和温度的变化很小，一般可视为常数，如采用水的密度为 1000kg/m^3 ，水银的密度为 13600kg/m^3 。

气体的密度随压强和温度而变化，一个标准大气压下 0°C 空气的密度为 1.29kg/m^3 。