



iCourse · 教材
高等农林院校基础课程系列



自主创新
方法先行



面向21世纪课程教材
Textbook Series for 21st Century



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学基础物理学

(第四版)

陈建军 魏 薇 主 编
后德家 卢 军 副主编

高等教育出版社



iCourse · 教材
高等农林院校基础课程系列



自主创新
方法先行

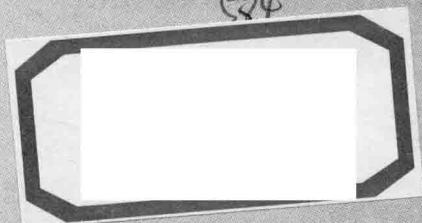


面向 21 世纪 课程 教材
Textbook Series for 21st Century



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

04
524



大学基础物理学

(第四版)

陈建军 魏 薇 主 编
后德家 卢 军 副主编

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是面向 21 世纪课程教材,也是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。本书对于经典物理的内容力求以高起点加以阐述,以便能与近代物理相衔接,并加强了为介绍现代观点,学习新理论、新知识所必需的近代物理的内容,介绍了与当今高科技相关的物理基础,突出了生命科学的特点以及与农、林等专业相联系的特点;在内容上也兼顾到目前高等农林院校的教学实际和大学基础教育的实用性。

本书可作为高等农林院校农林类专业的教科书,也可作为其他高校相近专业 40~50 学时大学物理课程的教材或参考书。

图书在版编目(CIP)数据

大学基础物理学/陈建军,魏薇主编.--4 版.--
北京:高等教育出版社,2017.9

iCourse·教材.高等农林院校基础课程系列

ISBN 978-7-04-048471-7

I. ①大… II. ①陈… ②魏… III. ①物理学-高等学校-教材 IV. ①O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 205260 号

Daxue Jichu Wulixue

项目策划 王 瑜 李光跃 陈琪琳 李艳馥 吴雪梅

策划编辑 程福平

责任编辑 高聚平

封面设计 张 楠

版式设计 童 丹

插图绘制 杜晓丹

责任校对 吕红颖

责任印制 尤 静

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
印 刷 北京新华印刷有限公司
开 本 850mm×1168mm 1/16
印 张 17.25
字 数 360 千字
购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>
<http://www.hepmall.com>
<http://www.hepmall.cn>
版 次 2000 年 9 月第 1 版
2017 年 9 月第 4 版
印 次 2017 年 9 月第 1 次印刷
定 价 39.20 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 48471-00

出版说明

“十二五”是继续深化高等教育教学改革、走以提高质量为核心的内涵式发展道路和农林教育综合改革深入推进的关键时期。教育教学改革的核心是课程建设,课程建设水平对教学质量和人才培养质量具有重要影响。2011年10月12日教育部发布了《教育部关于国家精品开放课程建设的实施意见》(教高[2011]8号),开启了信息技术和网络技术条件下校、省、国家三级精品开放课程建设的序幕。作为国家精品开放课程展示、运行和管理平台的“爱课程(iCourse)”网站也逐渐为高校师生和社会公众认知和使用。截至目前,已启动2911门精品资源共享课和696门精品视频公开课的立项建设,其中的1000多门精品资源共享课和600多门精品视频公开课已经在“爱课程(iCourse)”网站上线。

高等教育出版社承担着“‘十二五’本科教学工程”中国家精品开放课程建设的组织实施和平台建设运营的重要任务,在与广大高校,特别是高等农林院校的调研和协作中,我们了解到当前高校的教与学发生了深刻变化,也真切感受到课程和教材建设所面临的挑战和机遇。如何建设支撑学生自主学习和校企共建共享的课程和新形态教材成为现实课题,结合我社2009年以来在数字课程建设上的探索和实践,我们提出了“高等农林院校基础课程精品资源共享课及系列教材”建设项目,并获批列入科技部“科学思维、科学方法在高等学校教学创新中的应用与实践”项目(项目编号:2009IM010400)。项目建设理念得到了众多农林高校的积极响应,并于2012年12月—2013年6月,分别在北京、扬州、武汉、哈尔滨、福建等地陆续召开了项目启动会议、研讨会和编写会议。2014年,项目成果“iCourse·教材:高等农林院校基础课程系列”陆续出版。

本系列教材涵盖数学、物理、化学化工、计算机、生物学等系列基础课程,在出版形式、编写理念、内容选取和体系编排上有不少独到之处,具体体现在以下几个方面:

1. 采用“纸质教材+数字课程”的出版形式。纸质教材与丰富的数字教学资源一体化设计,纸质教材内容精炼适当,并以新颖的版式设计和内容编排,方便学生学习和使用;数字课程对纸质教材内容起到巩固、补充和拓展作用,形成以纸质教材为核心,数字教学资源配合的综合知识体系。

2. 创新教学理念,引导自主学习。通过适当的教学设计,鼓励学生拓展知识面和针对某些重要问题进行深入探讨,增强其独立获取知识的意识和能力,为满足学生自主学习和教师教学方法的创新提供支撑。

3. 强调基础课程内容与农林学科的紧密联系,始终抓住学生应用能力培养这一重要环节。教材和数字课程中精选了大量有实际应用背景的案例和习题,在概念引入和知识点讲授上也总是从实际问题出发,这不仅有助于提高学生学习基础课程的兴趣,也有助于加强他们的创新意识和创新能力。

4. 教材建设与资源共享课建设紧密结合。本系列教材是对各校精品资源共享课和教学改革成果的集成和升华,通过参与院校共建共享课程资源,更可支持各级精品资源共享课的持续建设。

建设切实满足高等农林教育教学需求、反映教改成果和学科发展、纸质出版与资源共享课紧密结合的新形态教材和优质教学资源,实现“校企联合共建,课程协同共享”是我们的宗旨和目标。将课程建设

及教材出版紧密结合,采用“纸质教材+数字课程”的出版形式,是一种行之有效的方法和创新,得到了高校师生的高度认可。尽管我们在出版本系列教材的工作中力求尽善尽美,但难免存在不足和遗憾,恳请广大专家、教师和学生提出宝贵意见与建议。

高等教育出版社

2014年7月

第四版前言

面向 21 世纪课程教材《大学基础物理学》(第三版)一书出版至今已有一段时间。近年来教学情况发生了较大的变化,为了适应新的教学需要,我们对第三版进行了修订。本书是专为高等农林院校农林类专业编写的。

《大学基础物理学》(第四版)增加了第 6 章(交变电磁场)、删除了原第 11 章(激光的原理与应用)。全书共 11 章,书中标有“*”号的内容可作为选讲内容,亦可供学生自学。

这次修订分工如下:华中农业大学陈建军修订前言、第 2 章(气体动理论)、第 3 章(热力学基础);魏薇修订第 1 章(流体力学基础)、第 5 章(恒定磁场)、增加第 6 章(交变电磁场);丁孺牛修订第 4 章(静电场 恒定电场);后德家修订第 7 章(光的波动性)、第 10 章(光谱分析原理及应用)、第 11 章(物质的放射性及其应用);卢军修订第 8 章(光的量子性)、第 9 章(量子力学初步)。陈建军负责全书的统稿和定稿。

由于华中农业大学王海婴教授、罗贤清教授先后退休,两位教授将本书的修订工作托付于编者。王海婴教授、罗贤清教授细致审阅了本书,并提出了许多建设性的意见,编者在此表示衷心的感谢。同时编者也对参加第一版、第二版和第三版编写工作的同志表示诚挚的谢意。

感谢教育部大学物理课程教学指导委员会农林水工作委员会、全国高等农林水院校物理教学委员会对本次修订工作的指导。

由于编者水平有限,书中难免有错误和疏漏之处,我们衷心期待得到广大读者、同行专家的批评、指正,感谢对编者的关爱和帮助。

编者

2017 年 1 月
于狮子山南湖畔

目 录

第1章 流体力学基础	001
1.1 理想流体的定常流动	002
1.1.1 理想流体	002
1.1.2 定常流动	003
1.1.3 流线与流管	003
1.1.4 理想流体的连续性方程	004
1.2 理想流体的伯努利方程	005
1.2.1 伯努利方程的推导	005
1.2.2 伯努利方程的应用	007
1.3 黏性流体的运动	009
1.3.1 流体的流动形态与雷诺数	009
1.3.2 层流与黏性力	010
1.3.3 泊肃叶定律	011
1.3.4 斯托克斯定律	012
习题	013
第2章 气体动理论	015
2.1 气体动理论的基本概念	016
2.1.1 宏观态与微观态	016
2.1.2 统计的规律性	017
2.1.3 统计规律的定量分析	017
2.1.4 等概率假设	018
2.2 分子平均平动动能统计分布规律	019
2.2.1 理想气体压强	019
2.2.2 温度的统计意义	021
2.3 分子能量的统计分布	023
2.3.1 玻耳兹曼能量分布律	023
2.3.2 能量按自由度均分原理	024
2.4 分子速率统计分布	027
2.4.1 麦克斯韦速率分布律	027
2.4.2 三种速率	028
2.5 分子碰撞的统计分布	030
2.5.1 分子的平均碰撞频率	031
2.5.2 分子的平均自由程	032
2.6 气体中的输运过程	032
2.6.1 黏滞现象	033
2.6.2 扩散现象	033
2.6.3 热传导现象	034
习题	034
第3章 热力学基础	037
3.1 热力学第一定律	038
3.1.1 热力学系统、热力学状态参量、内能	038
3.1.2 准静态过程的功	038
3.1.3 热量、热容	040
3.1.4 热力学第一定律	040
3.2 理想气体的热力学过程	041
3.2.1 等体过程	041
3.2.2 等压过程	042
3.2.3 等温过程	043
3.2.4 绝热过程	044
3.3 循环过程 卡诺循环	045
3.3.1 循环过程	045
3.3.2 循环效率	046
3.3.3 卡诺循环	049
3.4 热力学第二定律	053
3.4.1 热力学第二定律的两种表述	053
3.4.2 热力学第二定律的微观意义	054
3.4.3 热力学第二定律的统计意义	054
3.5 熵与熵增加原理	056
3.5.1 熵概念的引入	056
3.5.2 熵增加原理	058

3.5.3 熵变的计算	058	5.1.2 磁本质	094
3.6 熵的应用	058	5.2 磁场的描述	095
3.6.1 信息熵与遗传密码	058	5.2.1 磁感应强度	095
3.6.2 生命系统的负熵	060	5.2.2 毕奥-萨伐尔定律	096
习题	060	5.2.3 磁感线	097
第4章 静电场 恒定电场	063	5.3 磁场的基本规律	098
4.1 电荷与库仑定律	064	5.3.1 高斯定理	098
4.1.1 电荷	064	5.3.2 安培环路定理	099
4.1.2 库仑定律	064	5.4 磁场对运动电荷、电流及载流线圈的 作用	100
4.2 电场的提出	065	5.4.1 洛伦兹力	100
4.3 静电场的描述	066	5.4.2 安培力	102
4.3.1 描述电场的力的特性 ——电场强度	066	5.4.3 力矩	103
4.3.2 描述电场的能量特性——电势	069	5.5 磁场中的磁介质	104
4.4 静电场的规律	072	5.5.1 顺磁质与抗磁质	104
4.4.1 描述电场和场源电荷关系的定理 ——高斯定理	072	5.5.2 铁磁质	105
4.4.2 静电场的环路定理	074	5.5.3 磁介质中的高斯定理	105
4.5 对称性分析的应用	074	*5.6 生物组织的磁性	107
4.6 静电场与导体和电介质的相互作用	076	习题	108
4.6.1 静电场中的导体	077	第6章 交变电磁场	111
4.6.2 静电场中的电介质	078	6.1 电磁感应现象	112
4.7 静电场的能量	080	6.2 法拉第电磁感应定律 楞次定律	113
4.8 恒定电场与电源电动势	081	6.2.1 法拉第电磁感应定律	113
4.8.1 恒定电场	081	6.2.2 楞次定律	113
4.8.2 电源电动势	082	6.3 动生电动势	114
4.8.3 温差电动势	083	6.4 感生电动势 感生电场	116
4.9 生物膜内、外的电势差	085	6.4.1 感生电动势 感生电场	116
*4.10 电场在生物科学中的应用	087	6.4.2 涡电流	117
4.10.1 静电生物效应的应用	087	6.5 电磁波	117
4.10.2 细胞和生物胶粒的电泳	088	习题	119
4.10.3 细胞电场诱导融合	090	第7章 光的波动性	121
习题	091	7.1 光波及其相干条件	122
第5章 恒定磁场	093	7.1.1 光波	122
5.1 磁现象与磁场	094	7.1.2 光程	122
5.1.1 磁现象	094	7.2 分波阵面干涉	124
		7.2.1 杨氏实验	124

* 7.2.2	光强分布	126
7.2.3	劳埃德镜实验	127
7.3	分振幅干涉	127
7.3.1	薄膜的等倾干涉	127
7.3.2	薄膜的等厚干涉	130
7.4	迈克耳孙干涉仪	133
* 7.5	人工膜 BLM 厚度的测量	134
7.6	光的衍射	135
7.6.1	光的衍射现象	135
7.6.2	惠更斯-菲涅耳原理	136
7.6.3	单缝的夫琅禾费衍射	136
7.6.4	光栅的衍射	139
7.7	光学仪器的分辨率	143
7.7.1	圆孔衍射	143
7.7.2	光学仪器的分辨率	144
7.7.3	显微镜的分辨率	146
7.8	光的偏振	147
7.8.1	自然光与偏振光	148
7.8.2	反射和折射时光的偏振	149
7.8.3	偏振片的起偏和检偏 马吕斯定律	152
* 7.9	椭圆偏振光和圆偏振光 波片	154
7.9.1	椭圆偏振光和圆偏振光	154
7.9.2	波片	155
* 7.10	偏光显微镜、相衬显微镜	155
7.10.1	偏光显微镜	155
7.10.2	相衬显微镜	156
* 7.11	物质的旋光性及其应用	158
* 7.12	圆二色性、旋光色散	159
	习题	162

第 8 章 光的量子性 163

8.1	热辐射与普朗克量子假说	164
8.1.1	热辐射	164
8.1.2	黑体辐射的规律	164
8.1.3	黑体辐射定律	165
8.1.4	普朗克量子假说	166
8.2	光电效应与爱因斯坦光子说	168

8.2.1	光电效应实验规律	168
8.2.2	爱因斯坦光子理论	169
8.2.3	爱因斯坦光电效应方程	170
8.2.4	光电效应的应用	171
8.3	康普顿-吴有训效应	172
8.4	光的波粒二象性	175
8.5	人类对光的本质认识的发展	177
	习题	178

第 9 章 量子力学初步 179

9.1	德布罗意波与电子衍射实验	180
9.1.1	德布罗意波	180
9.1.2	电子显微镜	182
9.2	不确定关系	183
9.3	薛定谔方程	186
9.3.1	波函数	186
9.3.2	波函数的统计解释	186
9.3.3	薛定谔方程	187
9.4	薛定谔方程的应用——势阱和势垒	188
9.4.1	一维势阱中的粒子	188
9.4.2	方势垒的穿透 隧道效应	190
9.5	扫描隧穿显微镜	192
9.5.1	扫描隧穿显微镜的原理	192
9.5.2	扫描隧穿显微镜系统	193
9.5.3	扫描隧穿显微镜与电子显微镜的 比较	194
9.5.4	扫描隧穿显微镜在生命科学中的 应用	194
9.6	原子结构的量子理论	195
9.6.1	氢原子光谱的规律性	195
9.6.2	用薛定谔方程处理氢原子	196
9.6.3	电子自旋	200
9.7	原子壳层结构	201
9.8	核磁共振	202
9.8.1	核磁共振基本原理	202
9.8.2	核磁共振谱测量	204
* 9.9	量子生物学简介	205
	习题	207

第 10 章 光谱分析基础及应用	209	11.1 原子核的一般性质	234
10.1 光谱分析的种类	210	11.1.1 原子核的组成	234
10.2 光的吸收与散射	212	11.1.2 原子核的大小与核力	235
10.2.1 光的吸收	212	11.1.3 原子核的结合能	235
10.2.2 吸收定律	212	11.2 核的放射性衰变	237
10.2.3 光的散射	214	11.2.1 放射性的发现	237
10.2.4 拉曼散射	215	11.2.2 放射性衰变规律	237
10.2.5 光合作用	217	11.2.3 生物衰变常量与 ¹⁴ C 鉴年法	239
10.3 原子光谱	217	11.3 放射性衰变的类型与核反应	241
10.3.1 原子的发射光谱	217	11.3.1 放射性衰变的类型	241
10.3.2 原子吸收光谱	219	11.3.2 原子核反应	242
10.4 分子光谱	220	11.4 射线与物质的相互作用	243
10.4.1 转动能级与转动光谱	221	11.4.1 带电粒子与物质的相互作用	243
10.4.2 振动能级与振动光谱	221	11.4.2 光子与物质的相互作用	245
10.4.3 振转能级与振转光谱	222	11.4.3 中子与物质的相互作用	246
10.4.4 分子的电子光谱	223	11.5 放射性探测器	246
10.5 遥感技术及其在农业、林业中的应用	225	11.6 辐射剂量	250
10.5.1 遥感技术概述	225	11.7 放射性核素的应用	252
10.5.2 红外遥感	225	11.7.1 放射性核素在工业方面的应用	252
10.5.3 遥感技术在农业、林业中的应用	225	11.7.2 放射性核素在科学研究中的应用	253
10.6 荧光和磷光	227	11.7.3 放射性核素在生物学和医学中的 应用	255
10.7 X 射线谱及其应用	229	习题	257
10.7.1 X 射线的产生及其谱线	229	附录	259
10.7.2 X 射线晶体衍射	231	附表 1 常用物理常量表	260
10.7.3 X 射线在生物学中的应用	232	附表 2 国际单位制的词头	261
习题	232	参考文献	263
第 11 章 物质的放射性及其应用	233		

>>> 第1章

●●● 流体力学基础

流体(fluid)是具有流动性的连续介质,其是对气态和液态物体的统称. 在日常生活中流体起着极为重要的作用,诸如流动的空气、流动的江河湖海,生命系统内循环的流体,高速离心分离技术等. 流体力学在生命科学、环境保护、科学技术及工程中具有重要的应用价值.

与质点(可以忽略形状和大小)、刚体(有形状和大小,但不可形变)、弹性体(有形状和大小,可形变,但外力撤销后恢复原状)相比,流体有着自己的特征. 流体具有流动性、可压缩性和黏性. 对于理想流体,我们往往忽略流体的可压缩性和黏性,而突出流动性这一重要特征.

流体力学(fluid mechanics)是力学的一个分支,它研究流体的静止和运动,以及流体和固体界壁间有相对运动时的相互作用的力学规律,常常分为流体静力学和流体动力学. 流体静力学的主要结论有:第一,流体静压力的方向永远沿着作用面的内法线方向;第二,静止流体中任一点压强 p 的大小,在各个方向上都是相等的;第三,流体静力学的基本公式为 $p=p_0+\rho gh$,其中 p_0 为作用在流体表面上的外界压强, ρ 为流体的密度, h 是压强为 p 处的深度;第四,在静止平衡的流体中,当流体表面压强增大时,它能够大小不变地传递到流体内部各点.

本章主要讨论流体动力学的基本研究方法以及理想流体做定常流动时的基本规律,最后对黏性流体的流动规律作一些简单介绍.

1.1 理想流体的定常流动

实际流体的运动是十分复杂的,至今尚未完全了解. 然而,我们将流体理想化(理想流体)、流体运动理想化(定常流动)后,在数学上可以非常容易地描述其运动,甚至还可以得出许多有用的结论.

讨论理想流体的定常流动,首先要明确什么是理想流体,它与实际流体之间的区别是什么.

1.1.1 理想流体

流体的一个重要特征是物体的各部分间很容易发生相对运动,这种特征称为流动性. 研究流体的运动规律时,我们都是从宏观上去探讨,一般不考虑其微观结构. 虽然气体和液体都由分子组成,但是我们观察到的物体的运动和各部分之间的相互作用,在任何情况下都是大量分子的集体行为,故流体可看作连续体.

实际流体具有可压缩性. 不同流体的可压缩性不同. 液体的可压缩量很小,通常可以不考虑液体的可压缩性. 与之相反,气体的可压缩性非常明显. 气体的可压缩性能否忽略呢? 由于气体的密度小,即使压强差不太大,流速不很高,也能够迅速驱使密度大处的气体流向密度较小的地方,使密度趋于均匀. 因此一定条件下,流动的气体也可以看作是**不可压缩的**. 综上所述,如果压强变化非常微小和缓慢,相应的密度变化不大时,可压缩性是可以忽略的.

实际流体的另一性质是黏性(viscosity). 实际流体流动时,相邻流层之间存在

着沿分界面切向的内摩擦力,阻碍流层间的相对运动,如河流中心的水流动较快,由于黏性,靠近岸边的水几乎不动.这种性质就称为流体的黏性.不同流体的黏性不同,如果研究黏性较小的流体在小范围内运动时,可忽略其黏性.

因此,为了解决流体力学问题,我们把完全不可压缩的无黏性的流体称为理想流体(ideal fluid),并找出理想流体的运动规律,以此为基础来讨论实际流体的流动规律.

1.1.2 定常流动

在一般情况下,即使是理想流体,运动也是相当复杂的.引起这种复杂性的原因是流体各部分之间非常容易发生相对运动,在同一时刻,流体各处的流速可能不同,在不同时刻,流体流经空间某给定点的流速也可能在变化.但在有些场合,流体的运动会出这样的情形:在所考察的范围内,如果流动随时间变化不明显,即流体质元流经空间任一给定点的速度是确定的,并且不随时间变化,这种流动称为定常流动(steady flow).当流速较低时定常流动的条件是能够得到满足的.例如,流速不大的管道中水的流动、流速不大且不涨不落的河水的运动,在一段不太长的时间内都可以看成定常流动.

在定常流动中,流体质元在不同地点的速度可以各不相同,如图 1-1 中 A、B、C 三点的流速分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 ,并且 $v_1 \neq v_2 \neq v_3$,由于流体的流动是定常流动,这三个速度都不随时间改变,即 $v_i(t) = v_i(t + \Delta t)$.需要注意的是,流体做定常流动时,流体在空间各点的流速分布可以不同.如果空间 A、B、C 三点的流速相同,即 $v_1 = v_2 = v_3$,而 $v_i(t) \neq v_i(t + \Delta t)$,这时我们说流体做匀速流动.换句话说,定常流动指的是流体流动各点流速不随时间变化,而匀速流动指的是各点流速不随空间变化.

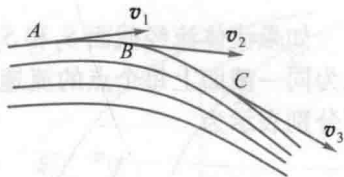


图 1-1 定常流动的流线

1.1.3 流线与流管

为了形象地描述流体每一特定瞬时的流动情况,我们在流体中画出一系列曲线,使曲线上每一点的切线方向与流经该点的流体质点的速度方向相同,这种曲线就称为流线(stream line).流线是一种假想的曲线.因为流线上每一点都具有确定的流速方向,故任意两条流线永不相交.流线的疏密还反映了流速的大小,流线较密处流速大,流线稀疏处流速较小.

在定常流动中,空间各点的流速虽然不同,但流线是不随时间变化的.流线上每一点的切线方向都与流体质点的流速方向相同,所以流体质点将沿着流线流动,流线就是流体质点的流动轨迹.

由一束流线围成的管状区域称为流管(stream tube),如图 1-2 所示.流管中的流体不能流出管外.管外的流体也不能流入管内.在定常流动中,流管不随时间变化.流管是研究流体问题时最主要的研究对象,对于复杂的流体,整个流体可以看成由一个或多个流管组成的,研究流体的运动规律,需要首先掌握流体在流管内的

运动情况。

理想流体在流管中流动的时候都具有哪些规律呢？是否还满足前面讨论的质量守恒和能量守恒呢？如果满足，其具体形式又是怎样的呢？接下来我们讨论理想流体定常流动的连续性方程（即质量守恒）和伯努利方程（即能量守恒）。

1.1.4 理想流体的连续性方程

连续性原理描述理想流体做定常流动时，任一细流管内流体微元在不同截面处的流速与截面积的关系。

在流体中任取一细流管，并任意作两个与流管垂直的截面，截面面积分别为 S_1 和 S_2 ，如图 1-3 所示。

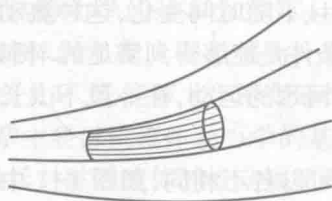


图 1-2 定常流动的流管

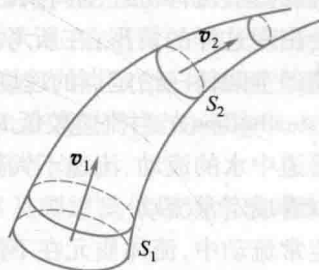


图 1-3 连续性原理

如果流体流经截面 S_1 和 S_2 时的速率分别为 v_1 和 v_2 （细流管的截面积小，可近似认为同一截面上每个点的流速相等），则在 Δt 时间内流过这两个截面的流体体积可分别表示为

$$\Delta V_1 = S_1 v_1 \Delta t$$

$$\Delta V_2 = S_2 v_2 \Delta t$$

定义：单位时间内流过某一截面的流体体积，称为流体流过该截面的体积流量，或流量。则流过截面 S_1 和 S_2 的流量可分别表示为

$$\frac{\Delta V_1}{\Delta t} = S_1 v_1$$

$$\frac{\Delta V_2}{\Delta t} = S_2 v_2$$

对于不可压缩流体（理想流体具有这种性质）来说，单位时间内由截面 S_1 进入流管的流体体积，应该等于同一时间内从截面 S_2 流出流管的流体体积，所以必定有

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (1.1)$$

因为 S_1 和 S_2 为流管内任意截面，所以

$$Sv = \text{常量}$$

上式就是理想流体的连续性方程。它表示，理想流体做定常流动时，流体的速率与流管截面积的乘积是一个常量，或者说，流体的速率与流管的截面积成反比。

如果在连续性方程等号两边同乘以流体的密度 ρ ，则连续性方程变为



视频：血液流动

$$\rho Sv = \text{常量} \quad (1.2)$$

上式是一般流体的连续性方程,它表示,单位时间内流进流管的流体质量等于同一时间内从该流管流出的流体质量.可见,理想流体连续性方程是质量守恒在不可压缩条件下的具体体现.

1.2 理想流体的伯努利方程

根据连续性原理,流体在流管中流动时,截面积大的地方流速小,截面积小的地方流速大.1733年,瑞士科学家、数学家丹尼尔·伯努利(Daniel Bernouli,1700—1782)首先提出了伯努利方程,解释了理想流体流动速度变化的动力学原因.他根据连续性原理和功能原理,推得了描述流体定常流动的基本方程,揭示了流体在流管中做定常流动时,各处压强、流速和高度之间的关系.伯努利方程是流体力学的基本方程式.下面我们从功能原理出发推证这一方程.

1.2.1 伯努利方程的推导

在重力场中做定常流动的理想流体内取一细流管,并在此流管中考察一段流体的流动情况,如图1-4所示.

在图1-4中, S_1 和 S_2 分别表示在细流管中所截取的两个横截面的面积,相对同一个水平参考面,它们的高度分别为 h_1 和 h_2 .处于 S_1 到 S_2 之间的流体块在 Δt 时间内流到 S'_1 到 S'_2 之间的位置上.流体流经截面 S_1 的流速为 v_1 ,流经 S_2 的流速为 v_2 .由于理想流体是不可压缩的,我们所讨论的流体块在运动过程中体积保持不变,所以从 S_1 到 S'_1 之间的流体质量必定等于从 S_2 到 S'_2 之间的流体质量,并用 Δm 表示之.由于理想流体不可压缩且密度均匀,设流体的密度为 ρ ,体积为 ΔV ,则 $\Delta m = \rho \Delta V$.

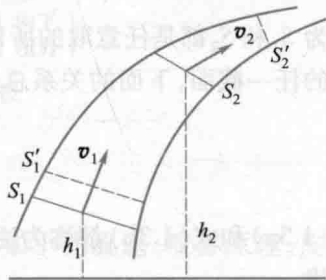


图1-4 伯努利方程的推导

功能原理表示,系统从一个状态变到另一个状态的过程中,机械能的增量等于外力和非保守内力做功的代数和.因为理想流体没有黏性,故在我们的问题中,不存在非保守内力,只需要考虑外力做功就够了.

机械能的增量包括动能的增量和势能的增量两部分.由图1-4可以看出,因为流体做定常流动,流管的形状不会发生变化,流体块在两个位置上的交叠部分(即从 S'_1 到 S'_2 的部分)的机械能没有变化.所以,整个流体块从位置 S_1 - S_2 流到位置 S'_1 - S'_2 的过程中,机械能的增量 ΔE 等于从 S_2 到 S'_2 之间流体的机械能($E_{k2}+E_{p2}$)与从 S_1 到 S'_1 之间流体的机械能($E_{k1}+E_{p1}$)之差,即

$$\begin{aligned} \Delta E &= (E_{k2}+E_{p2}) - (E_{k1}+E_{p1}) \\ &= \left[\frac{1}{2}(\Delta m)v_2^2 + (\Delta m)gh_2 \right] - \left[\frac{1}{2}(\Delta m)v_1^2 + (\Delta m)gh_1 \right] \end{aligned}$$



伯努利简介

$$= \left(\frac{1}{2}v_2^2 + gh_2 - \frac{1}{2}v_1^2 - gh_1 \right) \Delta m = \left(\frac{1}{2}v_2^2 + gh_2 - \frac{1}{2}v_1^2 - gh_1 \right) \rho \Delta V.$$

接下来考虑外力对流体块做功. 由于没有黏性, 流管外流体对这段流体的压力必垂直于流管侧壁表面, 因而这种压力不做功. 只有垂直于截面 S_1 和 S_2 的压力对流体块做功, 设 S_1 处压强为 p_1 , S_2 处压强为 p_2 , 则合外力所做的功为

$$\begin{aligned} W &= F_1 v_1 \Delta t - F_2 v_2 \Delta t \\ &= (p_1 S_1 v_1 - p_2 S_2 v_2) \Delta t \end{aligned}$$

由理想流体的连续性原理可以得到 $S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t = \Delta V$, 因此

$$W = (p_1 - p_2) \Delta V$$

根据功能原理, 应有

$$\Delta E = W$$

即

$$\left(\frac{1}{2}v_2^2 + gh_2 - \frac{1}{2}v_1^2 - gh_1 \right) \rho \Delta V = (p_2 - p_1) \Delta V$$

将上式整理可以写成

$$p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 = p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 \quad (1.3a)$$

因为 S_1 和 S_2 都是任意取的所以可以将式(1.3a)中的角标去掉, 对于同一条细流管中的任一截面, 下面的关系总是成立的:

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{常量} \quad (1.3b)$$

式(1.3a)和式(1.3b)都称为伯努利方程, 它们描述了理想流体做定常流动时的基本规律.

如果理想流体沿水平流管做定常流动, 伯努利方程可写为

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{常量} \quad (1.4)$$

上式表明, 在同一条水平流管中, 流速大的地方压强必定小, 流速小的地方压强必定大. 前面所讲的连续性方程向我们表明, 流速大的地方流管狭窄, 流速小的地方流管粗大. 从这两个结果中, 我们可以得到这样的结论: 当理想流体沿水平管道流动时, 管道截面积小的地方流速大、压强小, 管道截面积大的地方流速小、压强大. 喷雾器(图1-5)、水流抽气机等都是利用这个原理制成的.

除此之外, 飞机机翼、跑车车尾的导流板则都是利用了机翼与导流板的结构形状使得空气流过其表面时, 分别使得机翼上部、导流板下部的流管压缩, 流速增大, 压强变小, 从而产生了上下压力差, 而起到了抬升力和下压力的效果, 如图1-6所示.



视频: 飞机升力

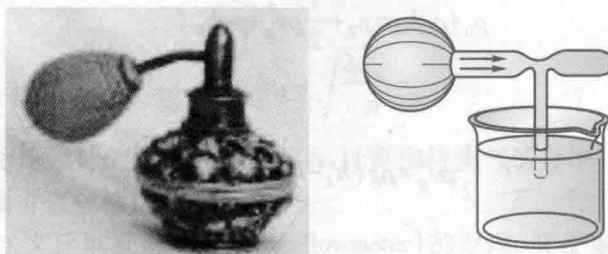


图 1-5 喷雾器

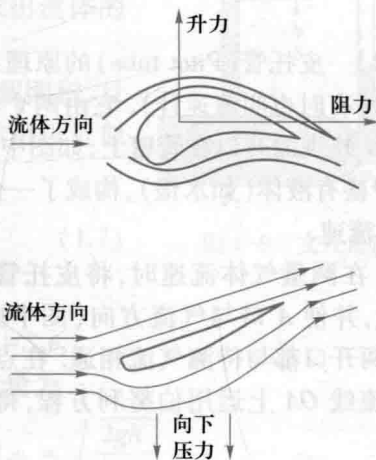
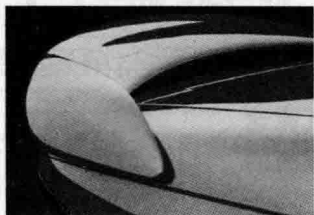


图 1-6 飞机机翼和汽车导流板

1.2.2 伯努利方程的应用

在生活应用中有很多实例运用了伯努利方程,例如小孔流速、喷雾原理、皮托管、文丘里流量计、马格努斯效应和机翼的升力等。

【例 1.1】小孔流速:求水从容器壁小孔中流出时的速率。

【解】水从小孔中流出时的流速可以根据伯努利方程求解。设水面距离小孔的高度为 h , ABC 为一条流线,如图 1-7 所示。

A 和 B 分别是这条流线在水面和小孔出的两点,在这条流线上运用伯努利方程,得

$$p_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 + \rho gh_A = p_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 + \rho gh_B$$

其中水面上点 A 和孔口出点 B 都与大气接触,所以其压强均等于大气压 p_0 。由于容器的横截面比小孔的截面大得多,根据连续性方程, $v_A \ll v_B$,故可以认为 $v_A \approx 0$ 。于是,上式写为

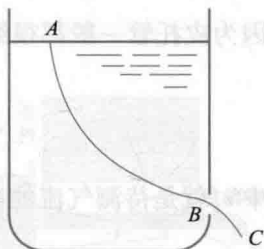


图 1-7 小孔流速