



iCourse · 教材  
高等农林院校基础课程系列



自主创新  
方法先行

# 大学物理学



10111010110  
主编 汪建 刘书华

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

# 大学物理学

主 编 汪 建 刘书华

副主编 卢常芳 宋建民 王开明 杨景东 那木拉

参 编 王云明 孙希媛 李 鹏 康艳霜 谷延霞 张宪贵 杨 帆

刘东州 侯志青 哈 静 马恒心 王保柱 刘立芳

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书根据农林院校特点,精选了物理学的基础理论,包括流体的运动、液体表面现象、热物理学、静电场、恒定电流、恒定磁场、电磁感应、光的波动性和现代物理学等内容。书中注重对基本概念、基本规律的阐述,在物理学的知识系统结构方面,明晰了概念引入、概念形成、概念应用。在理论阐述方面,注意知识的系统性、科学性、严谨性,并注重物理理论在农林等学科中的应用,以提高学生的科学素质和创新能力。每章后还编写了物理知识窗口作为选读内容,以扩大学生视野,了解理论和应用的结合。

本书是为全国高等农林院校的大学物理学课程编写的,也可作为生物、医学和其他相关专业师生教学或自学的参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理学/汪建,刘书华主编.--北京:高等教育出版社,2015.8

iCourse·教材.高等农林院校基础课程系列

ISBN 978-7-04-042993-0

I. ①大… II. ①汪… ②刘… 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(2015)第140674号

Daxue Wulixue

项目策划 王瑜 李光跃 陈琪琳 李艳馥 吴雪梅

策划编辑 张海雁

责任编辑 张海雁

封面设计 张楠

版式设计 杜微言

插图绘制 郝林

责任校对 窦丽娜

责任印制 赵义民

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 北京天来印务有限公司  
开本 850mm×1168mm 1/16  
印张 19.25  
字数 410千字  
图书热线 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.landaco.com>  
<http://www.landaco.com.cn>  
版次 2015年8月第1版  
印次 2015年8月第1次印刷  
定价 33.60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 42993-00

iCourse · 数字课程 (基础版)

# 大学物理学

主 编 汪 建 刘书华

<http://abook.hep.com.cn/1246994>

## 登录方法:

1. 访问 <http://abook.hep.com.cn/1246994>, 点击“注册”。在注册页面输入用户名、密码及常用的邮箱进行注册。已注册的用户直接输入用户名和密码登录即可进入“我的课程”界面。
2. 课程充值: 登录后点击右上方“充值”图标, 正确输入教材封底标签上的明码和密码, 点击“确定”完成课程充值。
3. 在“我的课程”列表中选择已充值的数字课程, 点击“进入课程”即可开始课程学习。

账号自登录之日起一年内有效, 过期作废。

使用本账号如有任何问题, 请发邮件至:

[zhangshan@hep.com.cn](mailto:zhangshan@hep.com.cn)。



iCourse · 教材  
高等农林院校基础课程系列



自主创新  
方法先行

## 大学物理学

主编 汪建 刘书华

用户名

密码

验证码

6734

进入课程

注册

数字课程介绍

纸质教材

版权信息

联系方式

“大学物理学”数字课程与纸质教材一体化设计, 紧密配合。数字课程涵盖动画、视频、文本、图片等资源。充分运用多种形式媒体资源, 极大地丰富了知识的呈现形式, 拓展教材内容。在提升课程教学效果同时, 为学生学习提供思维与探索的空间。

重要通知

因系统升级, 所有用户都需要先注册 (不能用书后的明码暗码直接登录)。注册后的用户登录后, 请先点击页面右上方“充值”, 正确输入教材封底标签上的明码和密码完成课程选择。

注册 登录 充值

## 资源使用:

本书配套的数字资源包括 4 种类型: 动画、视频、文档和图片。



..... **动画:** 在部分章节中配套了动画资源, 您登录数字课程网站后, 可以通过点击按钮或者输入参数, 观看相应的物理现象演示。



..... **视频:** 在部分章节中配套了视频资源, 您可以通过扫描二维码或者登录数字课程网站观看, 直观了解物理现象。



..... **文档:** 在部分章节中配套了补充阅读材料, 您可以通过扫描二维码或者登录数字课程网站, 对书中未涉及的物理概念、物理学名人轶事进行查看。



..... **图片:** 在部分章节中配套了精美图片, 您可以通过扫描二维码或登录数字课程网站观看, 直观了解物理现象。

# 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际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,并获批准列入科技部“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“校际联合共建,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

# 前 言

物理学是自然科学的基础,是工程技术和农业技术的重要支柱。大学物理是大学的一门十分重要的基础课,是培养学生科学素养和科学思维方法以及提高科学研究能力和创新能力的重要基础课。物理学的理论、研究方法、实验技术在化学、生物科学、农业科学中已得到广泛应用,取得了丰硕的成果,并产生了一系列的交叉学科,如生物物理学、农业物理学、土壤物理学等。而这些交叉学科涉及的内容十分广泛,它包括了生物系统热力学、生物电磁学、光生物物理学、量子生物学、辐射生物学等。实践表明,农业科技的发展、农业的现代化都迫切需要物理学,大学物理是农林院校的重要基础课。

考虑到许多农林院校物理学课时少的特点,本书在编写内容上进行了调整,精选和组织了农林院校学生所必须具备的物理基础知识,切实减轻学生负担,还学生以时间,又保证为后续课程提供必要的基础;去除了刚体的转动部分的内容,突出了流体的运动和液体表面现象的内容,合并了分子热运动和热力学,合并了振动和波的知识作为光的波动性的前序内容;同时对重要的物理概念、理论进行必要的阐述,对重要的定理、公式的推导思路进行了扼要的说明,以培养学生分析问题、解决问题的能力,提高学生的科学素质。在习题内容上进一步把握好习题的数量,使习题的内容与该章的重点内容更加紧密地结合。为了进一步体现物理学与农林科学、生物学的结合,在物理窗口再增加诸如生物电、生物磁学、生物与熵、辐射在农业中的应用、电磁生物效应技术应用、磁感应成像等内容,以扩大学生的科学视野,启迪学生的思维,激发学生学习物理学的兴趣。

本书由四川农业大学、河北农业大学和青岛农业大学的老师共同编写完成,汪建教授和刘书华教授担任主编,汪建教授完成了全书的统稿,刘书华教授完成了第三章、第八章、第九章的统稿。具体的编写分工是:孙希媛老师编写第一章,杨景东老师编写第二章,宋建民老师编写第三章,王开明老师编写第四章,李鹏老师编写第五章,卢常芳老师编写第六章,汪建老师编写第七章,王云明老师编写第八章,那木拉老师编写第九章。另外,康艳霜、谷延霞、张宪贵、刘东州、侯志青、哈静、马恒心、王保柱、刘立芳、杨帆老师对第三章、第八章和第九章的编写提出了宝贵建议,并在习题等方面做了部分工作。

限于编者水平,书中难免有不当和谬误之处,敬请读者批评指正。

编 者

2014年10月



# 目 录

<b>第一章 流体的运动</b> .....	001
第一节 理想流体的稳定流动 .....	002
第二节 伯努利方程及其应用 .....	006
第三节 黏性流体的流动 .....	012
第四节 泊肃叶定律、斯托克斯公式及其应用 .....	015
知识窗 .....	021
习题 .....	022
<b>第二章 液体的表面现象</b> .....	025
第一节 液体的表面现象 .....	026
第二节 弯曲液面的附加压强 .....	030
第三节 毛细现象 .....	031
知识窗 .....	035
思考题 .....	040
习题 .....	041
<b>第三章 热物理学</b> .....	043
第一节 气体动理论的基本概念 .....	044
第二节 能量均分定理和理想气体的内能 .....	047
第三节 气体分子热运动的速率分布规律 .....	050
第四节 热力学基本概念 .....	053
第五节 热力学第一定律及其对理想气体的应用 .....	054
第六节 循环过程 卡诺循环 .....	062
第七节 热力学第二定律 .....	065
第八节 熵 熵增加原理 .....	067
知识窗 .....	070
思考题 .....	072
习题 .....	074
<b>第四章 静电场</b> .....	075
第一节 电荷 库仑定律 .....	076
第二节 电场 电场强度 .....	079

第三节	静电场中的高斯定理 .....	086
第四节	静电场的环路定理 电势 .....	094
第五节	静电场中的导体 电容 .....	104
第六节	静电场中的介质 .....	112
第七节	静电场的能量 .....	121
知识窗	.....	127
习题	.....	129
<b>第五章</b>	<b>恒定电流</b> .....	<b>133</b>
第一节	电流和电动势 .....	134
第二节	基尔霍夫定律 .....	144
知识窗	.....	149
思考题	.....	152
习题	.....	152
<b>第六章</b>	<b>恒定磁场</b> .....	<b>155</b>
第一节	毕奥-萨伐尔定律 .....	156
第二节	磁场的高斯定理 .....	166
第三节	安培环路定理 .....	168
第四节	磁场对运动电荷的作用 .....	176
第五节	磁场对载流导线的作用 .....	178
知识窗	.....	182
习题	.....	185
<b>第七章</b>	<b>电磁感应</b> .....	<b>191</b>
第一节	电磁感应定律 .....	192
第二节	动生电动势 .....	195
第三节	感生电动势 .....	197
第四节	自感和互感 .....	199
第五节	磁场的能量 .....	202
第六节	麦克斯韦方程 .....	205
知识窗	.....	210
习题	.....	211
<b>第八章</b>	<b>光的波动性</b> .....	<b>215</b>
第一节	振动与波动 .....	217
第二节	波的叠加原理、波的干涉和驻波 .....	229
第三节	光的干涉 .....	233
第四节	光的衍射 .....	243

第五节 光的偏振态 .....	252
知识窗 .....	259
习题 .....	261
<b>第九章 近代物理学</b> .....	<b>263</b>
<hr/>	
第一节 经典物理学遇到的困难 .....	264
第二节 能量子概念的引入及量子物理的诞生 .....	268
第三节 光电效应 光的波粒二象性 物质波 .....	272
第四节 量子力学概述 薛定谔方程 .....	277
第五节 现代物理技术在生物学中的应用 .....	282
知识窗 .....	290
习题 .....	291
<b>习题参考答案</b> .....	<b>293</b>
<hr/>	
<b>参考文献</b> .....	<b>294</b>
<hr/>	

## >>> 第一章

# … 流体的运动

### 【本章要求】

1. 正确理解理想流体、流线、流管、稳定流动的概念；
2. 掌握体积流量、质量流量的概念；
3. 掌握和理解连续性原理和伯努利方程；
4. 了解流体的黏性、层流和湍流的概念，了解泊肃叶定律和斯托克斯公式。

众所周知，在通常情况下，物质存在着三种基本状态：固态（固体）、液态（液体）和气态（气体）。与固体相比，液体和气体没有一定的形状，从而在运动过程中各部分之间很容易发生相对运动，这种相对运动的特性称为流动性，我们将具有流动性的物体统称为流体（fluid）。

流体力学（mechanics of fluid）是研究流体的宏观运动规律与平衡的学科，它以流体宏观模型作为基本假说。流体宏观模型认为流体是由无数流体质元（或称流体微团）连续地组成的。所谓流体质元指的是，大小比分子的平均自由程大得多，但是与放置在流体中的实物相比是微不足道的小块流体。流体质元包含足够多的分子，可以通过统计平均求出其宏观参量，少数分子的出入不会影响稳定的平均值。另外，对于统计平均的时间要选的足够大，这可以保证诸如分子间的碰撞等微观性质在这段时间内进行统计平均能够得到稳定的数值。于是，从统计物理的知识可知，微观上描述分子运动的物理量（质量、速度、动量和能量）经过统计平均后变成了流体元的质量、速度、压力和温度等宏观物理量；分子质量、动量和能量的输送过程经统计平均后表现为宏观上的扩散、黏性、热传导等性质。总之，流体可以视为由无数流体质元组成的连续介质，其最基本特征是具有一定的流动性。

流体力学是许多科学技术部门的理论基础，它在水利工程学、生物体液和养分的输送，动物体内血液的循环，土壤中水分的运动，以及农田排灌、昆虫迁飞等领域有着广泛的应用。本章从牛顿运动定律和相应的力学规律出发，介绍流体力学中的一些基本概念和规律。

## 》》》 第一节 理想流体的稳定流动

### 一、理想流体

自然界中存在的实际流体除了流动性以外还在不同程度上具有另外两种性质：可压缩性（compressibility）和黏性（viscosity），因此实际流体的运动规律很复杂。为了使研究问题简化，正如像在质点力学中引入质点、刚体力学中引入刚体、静电场中引入点电荷这样一些理想模型一样，我们可以用一个理想化的模型来代替实际流体进行讨论，此理想化模型即为理想流体。所谓理想流体（ideal fluid）指的是绝对不可压缩的、完全没有黏性的流体。

如果温度不变，流体的体积会随压强的增加而缩小，这种特性称为流体的压缩

性.通常情况下,如果压强不变,流体的体积随温度的升高而增大,这种特性称为流体的膨胀性.通常情况下液体的压缩性和膨胀性都非常小,可以不予考虑.例如水在 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,每增加 $1\ 000$ 大气压强,水的体积改变不足 $5\%$ ,因此,一般情况下液体可以看作是\*\*不可压缩的流体\*\*.但在个别情况中,例如当流速较大的水管上的闸门突然半闭时,会产生一种水击现象,此时就必须考虑液体的压缩性,否则会得出荒谬的结果.

相比于液体,气体的压缩性和膨胀性十分明显.例如用很小的力推动活塞即可很容易的压缩汽缸中的气体.虽说气体有较明显的压缩性但它的流动性极好,很小的压强改变就可导致气体迅速流动起来,因而压强差不引起密度的显著改变,所以在研究气体流动的问题时,按不可压缩流体来处理也不会产生很大的误差.总之,认为流体绝对不可压缩就是假设了流体中各处的密度不随时间发生变化,并且不必考虑由于流体压缩而引起的热力学过程,这可以大大简化问题的分析.

至于黏性,指的是流体流动时各层之间有阻碍相对运动的内摩擦力(黏性力),黏性在静止的流体中是表现不出来的.例如,河水流动时河中心处水流快,由于黏性,愈靠近岸边的水流速度愈慢,到了岸边水流速度几乎为零.但是,当流体各层之间的相对运动速度比较小时可以忽略流体的黏性.水和酒精等液体的内摩擦力很小,气体的内摩擦力更小,由于流体良好的流动性,这些黏性小的流体在小范围内流动时常常可以忽略黏性的影响.对于黏性不能忽略的流体的运动规律将在后面(第三节)讨论.

## 二、稳定流动

自然界与工程实际中,流体大多处于流动状态,流体的流动性是流体在存在状态上与固体的最基本区别,因此,研究流体的运动规律具有相当重要的意义.描述流体的运动形态和方式有两种不同的基本方法:拉格朗日(Lagrange)法和欧拉(Euler)法.拉格朗日法着眼于研究流体中各流体质元的流动情况,跟踪每一个流体质元,并观察与分析该流体质元的运动历程,然后综合足够多的流体质元的运动情况以得到整个流体运动的规律.这种方法本质上就是一般力学中研究质点系运动的方法,因此这种方法也称为质点系法;欧拉法着眼于流体经过空间各固定点时的运动情况,它不关心这些流体运动情况是哪些流体质元表现出来的,也不关心那些流体质元的运动历程.综合流场中足够多的空间点上所观测到的运动要素值及其变化规律,可以获得整个流场的运动特性,所以欧拉法又称为空间点法或流场法.拉格朗日法在概念上清晰易懂,但各流体质元的运动历程一般来讲是非常复杂的,并且在数学处理中也会遇到很多困难.因此,我们书中采用的是得到广泛应用的较为简便的欧拉法.

欧拉法是用场的观点研究流体运动,不考虑个别流体质元如何运动.它只关心空间各个地点的流速分布,对于流体质元来自于哪里,如何到达这一点以及经过这一点后的运动情况怎样,这一切问题从欧拉法的观点看来并不是基本的.因此,在欧拉描写方式下流速分布可表示为空间位置与时间的函数,即 $\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r},t)$ ,这里 $\boldsymbol{r}=\boldsymbol{r}(x,y,z)$ 是空间各点的位置矢量.如果流体内各流体质元的速度不随时间发生变化,也就是流体内各流体质元的速度只是空间坐标的函数 $\boldsymbol{v}=\boldsymbol{v}(\boldsymbol{r})$ ,与时间无关,我们称这种流动方式为稳定流动(steady flow),又称为定常流动.流体稳定流动时,不

仅各流体质元的速度与时间无关,而且流体的密度和压强等都与时间无关.例如,管道中水的运动,在一段不长的时间内,可认为是一种稳定流动.

### 三、流线和流管

物理学中常把某个物理量的时空分布叫做场,所以流体内各点流速分布就可以看成速度场.为了形象、直观地描述场的分布情况,正如在静电场中引入电场线,磁场中引入磁感线一样,我们在流速场中引入流线(图 1-1)的概念.流线(streamline)指的是流体空间内一系列连续的有向曲线,曲线上每一点的切线方向代表流体内流体质元流经该点的速度方向,同时曲线的疏密程度可以反映流速的大小.

流体做稳定流动时,由于流体质元在空间每一点都有确定的流速方向,因此流线的形状不随时间发生变化.图 1-1 中同一流线上  $A$ 、 $B$  两点虽有不同的速度,但其不随时间发生变化.由于流线上每点的切线方向和流体质元的速度方向一致,所以对于稳定流动来说流线实际上是流体质元的运动轨迹,且流线的疏密程度可以反映流体流速大小.另外,由于流线的切线方向表示流体质元流经该点的速度方向,因此流线永远不会相交,否则流经流线交点处时流体质元会同时具有两个或两个以上不同的速度,这是不可能的.由此还可以推断出,流体在不可穿透的固体边界上沿边界法向的流速分量必等于零,流线将于该边界的位置重合.

在运动的流体中标出一个横截面,流经横截面周界的流线会围成一个管状区域,这个由流线所围成的管状区域称为流管(stream tube),如图 1-2 所示.由于流线不相交且流体质元速度方向与流线相切,所以流管内、外的流体质元不具有穿过流管的速度,也就是说流管内部的流体不能流到流管外面,流管外的流体也不能进入流管内,在这一点上流管和真实的管道相似.在研究流体运动时,我们可以把整个流体看成是由许多细流管组成的,所谓细流管指的是垂直于流管的同一截面上各点流速近似相同,因此,只要掌握了每一个细流管中流体的运动规律,就可以了解整个流体的运动规律.

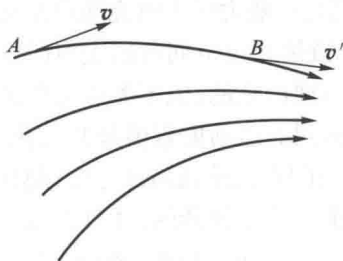


图 1-1 流线示意图

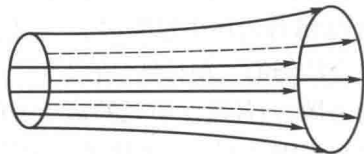


图 1-2 流管示意图

### 四、连续性原理

流体运动是一种连续介质的连续运动,它和其他物质运动一样也要遵循质量守恒定律.如图 1-3 所示,在稳定流动的流体中任取一段截面很小的细流管,近似认为垂直于流管的同一截面上各点流速相同.设与流管垂直的任意两个截面的面积为  $S_1$  和  $S_2$ ,流体在两个截面处的流速分别为  $v_1$ 、 $v_2$ ,对应的密度为  $\rho_1$ 、 $\rho_2$ .流体做稳定



动画: 流线

流动时流体质元不能穿入或穿出流管,因此在一个较短的时间  $\Delta t$  内,流进流管的流体质量应该等于流出流管的流体质量(质量守恒),即

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 \quad (1-1)$$

上式叫做连续性方程(continuity equation),确切地说应叫做稳定流动流管中的连续性方程.对于不可压缩的流体,由于密度不变,即  $\rho_1 = \rho_2$ ,则有

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \quad (1-2)$$

由于上述两个截面是任意选取的,所以式(1-2)对流管内任意两个与流管垂直的截面都是正确的,又可以表示为

$$Sv = C \quad (1-3)$$

式(1-2)、(1-3)是不可压缩流体的连续性方程.其中  $Sv$  表示单位时间通过流管内某一截面的流体的体积,称为体积流量(或流量),单位为立方米每秒( $\text{m}^3/\text{s}$ ).由体积流量的概念可以定义平均流速,通过流管内横截面积为  $S$  处的体积流量为  $Q$ ,则该横截面处的平均流速为  $v = Q/S$ .

以上各方程所表述的统称为流体的连续性原理,其物理本质是稳定流动的流体流管中流体质量守恒.

从上式可以看出,对于做稳定流动的不可压缩的流体,在同一根流管中流体的流速和流管横截面积的乘积是一常量.如果同一截面上流量相同,则不可压缩的流体在流管中做稳定流动时流体流动速度  $v$  与流管横截面积  $S$  成反比关系.同时,由于流线疏密程度可以反映流速大小,因此横截面较大处流线疏,横截面较小处流线密.对于可压缩流体上述结果并不一定成立,例如超音速流动的气体不能看作不可压缩的,流线较密处流速较小,而流线较疏处流速反而大.

理想流体在如图 1-4 所示的分支管道中做稳定流动时,理想流体的连续性方程可以表示为  $S_1 v_1 = S_2 v_2 + S_3 v_3$ ,即单位时间内所有流入流管的流体体积应该等于所有流出流管的流体体积(体积流量保持守恒).

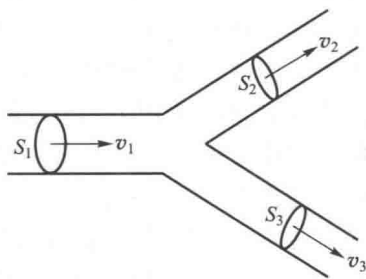


图 1-4 分支管中的流体

**例 1-1** 如图所示的分支管道,已知  $Q_3 = 2.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_2 = 1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ,管道截面 1-1 的面积  $S_1 = 0.2 \text{ m}^2$ ,求流经横截面 1-1 的平均流速.

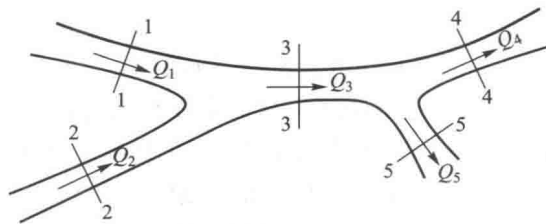


图 1-5 例 1-1 图



解:根据分支管道的连续性方程,有

$$S_1 v_1 + S_2 v_2 = S_3 v_3$$

则横截面 1-1 处的平均流速为

$$v_1 = \frac{S_3 v_3 - S_2 v_2}{S_1} = \frac{Q_3 - Q_2}{S_1} = 5.5 \text{ m/s}$$

## »» 第二节 伯努利方程及其应用



文档: 伯努利

伯努利方程是瑞士数学家伯努利在 1738 年提出来的,是理想流体做稳定流动时的基本动力学方程,它实际上是把功能原理应用于流体,从而得到适合于流体力学应用的形式.伯努利方程对于确定流体内部各处的压力和流速有很大的实际意义,在水利、造船、航空等领域有着广泛的应用.

### 一、伯努利方程

设理想流体在重力场中做稳定流动,在流体中任取一细流管,如图 1-6 所示.取细流管中的任意一段流体  $a_1 b_1$  为研究对象,考虑经过很短的时间  $\Delta t$  后该段流体由  $a_1 b_1$  位置移到了  $a_2 b_2$  处.设  $a_1$ 、 $a_2$  处对应流管的截面积为  $S_1$ 、 $S_2$ ,流体的速度分别为  $v_1$ 、 $v_2$ ,相应的压强为  $p_1$ 、 $p_2$ ,  $S_1$  和  $S_2$  面中心到参考平面的高度为  $h_1$ 、 $h_2$ .由于理想流体的不可压缩性,流管中各处的流体密度均为  $\rho$ .将流体和地球作为一个体系来考虑,流体所受的重力可视为体系的内力,流体所受的外力只有四周流体对它的作用力,其中流管外面流体对该段流体的作用力和其运动方向垂直不做功,对这段流体做功的外力只有段外流体对它的压力.流体微元后面的流体对它做的功是正功,前面的流体对它做的功是负功,外力所做的功就等于这两部分功的代数和.由于考虑流体做稳定流动,流体内各点压强不变,流体微元从  $a_1 b_1$  到  $a_2 b_2$  过程中,在  $b_1$  到  $a_2$  这一段路程中上述两力大小相等、方向相反,正好抵消掉.因此,只需要考虑  $a_1$  到  $b_1$  这一段后面流体对流体微元的推力所做的功和  $a_2$  到  $b_2$  这一段前面流体对流体微元阻力所做的功,则外力所做的净功应为

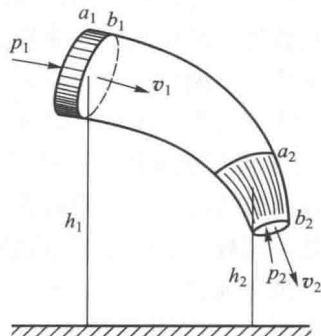


图 1-6 理想流体的伯努利方程

$$W = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t$$

因为理想流体不可压缩,由理想流体的连续性原理有  $S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t = V$ ,则外力所做净功可以表示为  $W = (p_1 - p_2) V$ .根据功能原理,外力对这段流体系统所做的净功应等于这段流体机械能的增量,即  $W = \Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p$ .

分析流动过程中所发生的变化可知,过程前后  $b_1 a_2$  之间这段流体的状态并未出现任何变化,变化表现在  $a_1 b_1$  之间流体的消失和  $a_2 b_2$  之间流体的出现,因此只需