

高等学校教材

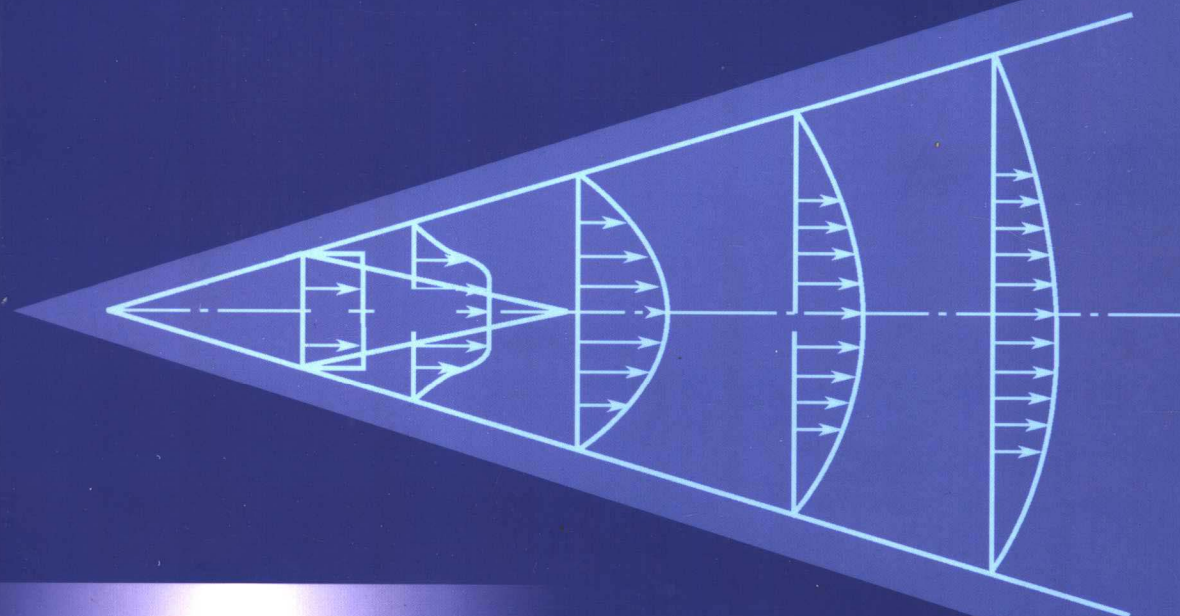
GONGCHENG LIUTI LIXUE

工程流体力学

泵与风机

BENG YU FENGJI

伍悦滨 朱蒙生 主编



化学工业出版社

教材出版中心

高等学校教材

工程流体力学泵与风机

伍悦滨 朱蒙生 主编



化学工业出版社
教材出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学泵与风机/伍悦滨, 朱蒙生主编. —北京: 化学工业出版社,
2005. 10

高等学校教材

ISBN 7-5025-7769-6

I. 工… II. ①伍…②朱… III. ①工程力学: 流体力学-高等学校-教材
②泵-高等学校-教材③鼓风机-高等学校-教材 IV. ①TB126②TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 125177 号

高等学校教材

工程流体力学泵与风机

伍悦滨 朱蒙生 主编

责任编辑: 满悦芝 陈 丽

文字编辑: 宋 薇

责任校对: 王素芹

封面设计: 潘 峰

*

化学工业出版社 出版发行
教 材 出 版 中 心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010)64982530

(010)64918013

购书传真: (010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

化学工业出版社印刷厂印装

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 19¼ 字数 531 千字

2006 年 1 月第 1 版 2006 年 1 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-7769-6

定 价: 39.80 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书是为高等学校建筑环境与设备工程专业流体力学课程编写的教材，也可作为工业与民用建筑、道路桥梁与交通、市政、环境等专业的流体力学教学参考用书。同时，由于本书内容覆盖了全国注册公用设备工程师（暖通空调）执业资格考试基础考试大纲中对流体力学部分的内容要求，所以还可作为注册公用设备工程师（暖通空调）流体力学复习考试的首选参考书。

本书的编写广泛吸收了国内各类优秀流体力学教材的精华，力求有所发展和提高。为适应建筑环境与设备工程专业发展和培养目标的需要，加强了必要的理论基础并做到与专业密切结合；根据注册公用设备工程师（暖通空调）执业资格基础考试大纲的要求，精心设计了全书的知识体系和内容；为培养学生科学思维、提高分析和解决工程问题的能力，各章均精心选编和设计了思考题和习题。

本书共 15 章，主编伍悦滨、朱蒙生。具体编写分工如下：第 1 章、第 7 章、第 9 章、第 10 章、第 13 章由伍悦滨编写，第 2 章、第 5 章、第 11 章、第 12 章由朱蒙生编写，第 3 章、第 4 章、第 6 章、第 8 章由曹慧哲编写，第 14 章、第 15 章由王芳编写。

鉴于编者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请专家、读者批评指正。

编 者

2005 年 7 月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 流体力学及其发展史	1
1.1.1 流体力学的研究对象	1
1.1.2 连续介质模型	1
1.1.3 流体力学的研究方法	1
1.1.4 流体力学的发展史	2
1.2 作用在流体上的力	4
1.2.1 表面力	4
1.2.2 质量力	4
1.3 流体的主要物理性质	5
1.3.1 惯性	5
1.3.2 黏滞性	5
1.3.3 压缩性和热胀性	8
1.3.4 表面张力特性	9
1.3.5 汽化压强	9
思考题	10
习题	10
第2章 流体静力学	12
2.1 静止流体中压强的特性	12
2.2 流体平衡微分方程	13
2.2.1 流体平衡微分方程	13
2.2.2 平衡微分方程的全微分式	14
2.2.3 等压面	14
2.3 重力场中流体静压强的分布规律	14
2.3.1 液体静力学基本方程	14
2.3.2 气体静压强的计算	15
2.3.3 压强的度量	15
2.3.4 水头、液柱高度和能量守恒	16
2.3.5 压强的计量单位	17
2.4 流体的相对平衡	18
2.4.1 等加速直线运动容器中流体的平衡	18
2.4.2 等角速度旋转容器中液体的平衡	19
2.5 液体作用在平面上的总压力	20
2.5.1 解析法	20
2.5.2 图算法	21
2.6 液体作用在曲面上的总压力	22

2.6.1	曲面上的总压力	22
2.6.2	压力体	23
2.6.3	液体作用在潜体和浮体上的总压力	24
	思考题	26
	习题	26
第3章	流体运动学	29
3.1	流体运动的描述方法	29
3.1.1	拉格朗日法	29
3.1.2	欧拉法	30
3.2	欧拉法的基本概念	31
3.2.1	流动的分类	31
3.2.2	流线	32
3.2.3	元流和总流	34
3.2.4	流量和断面平均流速	35
3.3	连续性方程	36
3.3.1	连续性微分方程	36
3.3.2	连续性微分方程对总流的积分	37
3.4	流体微团运动的分析	39
3.4.1	微团运动的分解	39
3.4.2	微团运动的组成分析	40
3.4.3	有旋运动(有涡流)和无旋运动(无涡流)	41
	思考题	43
	习题	43
第4章	流体动力学基础	46
4.1	理想流体运动微分方程	46
4.2	元流的伯努利方程	47
4.2.1	理想流体运动微分方程的伯努利积分	47
4.2.2	理想流体元流伯努利方程的物理意义和几何意义	48
4.2.3	实际流体元流的伯努利方程	49
4.3	实际流体总流的伯努利方程	49
4.3.1	总流的伯努利方程	49
4.3.2	总流伯努利方程的应用条件和应用方法	51
4.3.3	有能量输入或输出的伯努利方程	53
4.3.4	两断面间有合流或分流的伯努利方程	53
4.3.5	恒定气体总流的伯努利方程	54
4.4	总流的动量方程和动量矩方程	56
4.4.1	总流的动量方程	57
4.4.2	总流的动量矩方程	60
4.5	恒定平面势流	61
4.5.1	速度势(流速势)	61
4.5.2	流函数	62

4.5.3 流网及其特征·····	64
4.5.4 几种简单的平面势流·····	66
4.5.5 势流叠加·····	70
4.6 不可压缩黏性流体的运动微分方程·····	76
4.6.1 以应力表示的黏性流体运动微分方程·····	76
4.6.2 应力和变形速度的关系·····	78
4.6.3 不可压缩黏性流体运动微分方程·····	79
思考题·····	80
习题·····	80
第5章 量纲分析和相似原理 ·····	84
5.1 量纲分析的意义和量纲和谐原理·····	84
5.1.1 量纲的概念·····	84
5.1.2 无量纲量·····	85
5.1.3 量纲和谐原理·····	85
5.2 量纲分析法·····	86
5.2.1 瑞利法·····	86
5.2.2 π 定理·····	87
5.2.3 量纲分析方法的讨论·····	90
5.3 相似理论基础·····	90
5.3.1 相似概念·····	90
5.3.2 相似准则·····	92
5.4 相似定理·····	93
5.4.1 相似正定理·····	94
5.4.2 相似逆定理·····	94
5.4.3 相似第三定理·····	94
5.5 模型实验·····	95
5.5.1 模型律的选择·····	95
5.5.2 模型设计·····	96
思考题·····	98
习题·····	98
第6章 流动阻力和能量损失 ·····	100
6.1 流动阻力和能量损失的分类·····	100
6.1.1 能量损失的分类·····	100
6.1.2 能量损失的计算公式·····	101
6.2 实际流体的两种流动状态·····	101
6.2.1 两种流态·····	101
6.2.2 流态的判别准则——临界雷诺数·····	103
6.3 均匀流动方程式·····	104
6.3.1 均匀流动方程式·····	104
6.3.2 圆管过流断面上切应力分布·····	105
6.3.3 阻力速度·····	106

6.4	圆管中的层流运动	106
6.4.1	流动特征	106
6.4.2	流速分布	106
6.4.3	圆管层流沿程水头损失的计算	107
6.5	紊流理论基础	108
6.5.1	层流向紊流的转变	108
6.5.2	紊流运动的特征和时均法	109
6.5.3	紊流的半经验理论	111
6.5.4	黏性底层	113
6.6	圆管紊流中的沿程水头损失	113
6.6.1	尼古拉兹实验	113
6.6.2	流速分布	116
6.6.3	λ 的半经验公式	117
6.6.4	工业管道和柯列勃洛克 (Colebrook) 公式	117
6.6.5	沿程阻力系数 λ 的经验公式	118
6.7	非圆管的沿程水头损失	121
6.7.1	水力半径 R	121
6.7.2	当量直径 d_e	122
6.7.3	非圆通道雷诺数	122
6.7.4	非圆管的沿程水头损失	122
6.8	局部水头损失	123
6.8.1	局部损失的一般分析	123
6.8.2	几种典型的局部阻力系数	125
6.8.3	局部阻力之间的相互干扰	128
6.8.4	减少局部阻力的措施	129
6.9	恒定总流水头线的绘制	129
6.9.1	总水头线和测压管水头线	130
6.9.2	总压线和全压线	131
	思考题	135
	习题	136
第7章	边界层和绕流运动	140
7.1	边界层的基本概念	140
7.2	边界层动量方程	143
7.3	曲面边界层的分离现象与卡门涡街	144
7.3.1	曲面边界层的分离现象	144
7.3.2	卡门涡街	145
7.4	绕流阻力和升力	145
7.4.1	绕流阻力的一般分析	146
7.4.2	悬浮速度	147
7.4.3	绕流升力的一般概念	148
	思考题	149

习题	149
第 8 章 不可压缩流体的管道流动	150
8.1 孔口出流	150
8.1.1 薄壁小孔口恒定自由出流	150
8.1.2 孔口淹没出流	152
8.1.3 孔口的变水头出流	153
8.2 管嘴出流	154
8.2.1 圆柱形外管嘴恒定出流	154
8.2.2 收缩断面的真空	155
8.2.3 圆柱形外管嘴的正常工作条件	155
8.2.4 其他类型的管嘴出流	156
8.3 简单管道	156
8.3.1 简单短管的水力计算	156
8.3.2 简单长管的水力计算	160
8.4 复杂管道	161
8.4.1 串联管道	161
8.4.2 并联管道	162
8.4.3 沿程均匀泄流管道	163
8.5 管网水力计算基础	165
8.5.1 枝状管网	165
8.5.2 环状管网	167
8.6 有压管道中的水击	169
8.6.1 水击现象	169
8.6.2 水击压强的计算	171
8.6.3 水击波的传播速度	172
8.6.4 防止水击危害的措施	173
思考题	173
习题	173
第 9 章 明渠均匀流	180
9.1 概述	180
9.1.1 明渠流动的特点	180
9.1.2 明渠的分类	181
9.2 明渠均匀流的特征及其形成条件	182
9.2.1 明渠均匀流的特征	182
9.2.2 明渠均匀流的形成条件	182
9.3 明渠均匀流的水力计算	183
9.3.1 明渠均匀流的水力计算公式	183
9.3.2 明渠过流断面的几何要素	184
9.3.3 明渠水力最优断面和允许流速	185
9.3.4 明渠均匀流水力计算的基本问题	186
9.4 无压圆管均匀流	188

9.4.1	无压圆管均匀流的特征	188
9.4.2	过流断面的几何要素	189
9.4.3	无压圆管的水力计算	189
9.4.4	输水性能最优充满度	190
9.4.5	最大设计充满度、允许流速	191
思考题		191
习题		192
第 10 章 渗流		193
10.1	渗流的基本概念	193
10.1.1	水在土壤中的状态	193
10.1.2	土壤的渗流特性与岩土分类	193
10.1.3	渗流模型	194
10.1.4	渗流的分类	194
10.1.5	流速水头的处理	194
10.2	渗流基本定律	194
10.2.1	达西定律	194
10.2.2	达西定律的适用范围	195
10.2.3	渗透系数的确定	195
10.2.4	无压恒定渐变渗流的基本公式	197
10.3	井和集水廊道的渗流计算	197
10.3.1	普通完整井	197
10.3.2	自流完整井	198
10.3.3	集水廊道	199
10.3.4	大口井	200
10.4	井群的渗流计算	200
10.4.1	普通完整井的井群	200
10.4.2	自流完全井的井群	201
思考题		202
习题		202
第 11 章 气体紊流射流		203
11.1	气体自由射流的结构与特征	203
11.1.1	射流的结构	203
11.1.2	射流的基本特征	203
11.2	圆断面射流的运动分析	205
11.2.1	主体段轴心速度 u_m	205
11.2.2	主体段断面流量 Q	205
11.2.3	主体段断面平均流速 v_1	206
11.2.4	主体段质量平均流速 v_2	206
11.2.5	起始段核心长度 s_n 及核心收缩角 θ	206
11.2.6	起始段流量 Q	206
11.2.7	起始段断面平均流速 v_1	207

11.2.8	起始段质量平均流速 v_2	207
11.2.9	公式小结	208
11.3	温差射流与浓差射流	208
11.3.1	温差射流的基本特征	208
11.3.2	圆断面温差射流运动分析	209
11.3.3	温差、浓差射流公式小结	210
11.4	旋转射流	212
11.4.1	旋转射流概述	212
11.4.2	旋转射流的流速分布	212
11.4.3	旋转射流的压强分布	212
11.4.4	旋转强度	213
11.4.5	无因次流量 $\frac{Q}{Q_0}$ 及 $\frac{Q_h}{Q_0}$	214
11.5	有限空间射流	214
11.5.1	射流结构	214
11.5.2	动力特征	215
11.5.3	半经验公式	215
11.5.4	末端涡流区	217
	思考题	217
	习题	217
第 12 章	一元气体动力学基础	219
12.1	理想气体一元恒定流动基本方程	219
12.1.1	连续性方程	219
12.1.2	状态方程	219
12.1.3	动量方程	219
12.1.4	能量方程	219
12.1.5	理想气体过程方程	220
12.2	声速和马赫数	221
12.2.1	声速	221
12.2.2	马赫数	222
12.2.3	滞止参数	223
12.2.4	气流按不可压缩处理的限度	224
12.3	变截面喷管中的等熵流动	225
12.3.1	流动参数与截面积的关系	225
12.3.2	通过收缩喷管的最大流量	227
12.4	可压缩气体管道流动	228
12.4.1	等温流动	229
12.4.2	绝热流动	232
	思考题	234
	习题	235
第 13 章	流动要素量测	236

13.1 压强量测	236
13.1.1 连通器原理	236
13.1.2 压强量测仪器	236
13.2 流速量测	239
13.2.1 总压管	239
13.2.2 应用毕托 (Pitot) 管量测点流速	240
13.2.3 圆柱体测速管	241
13.2.4 其他流速度量测仪器	241
13.3 流量量测	243
13.3.1 体积流量计	243
13.3.2 文丘里流量计	243
13.3.3 孔板流量计与喷嘴流量计	244
13.3.4 非压差式流量量测仪器	245
13.4 流动显示与全流场测速法	246
13.4.1 流场显示的示踪法	246
13.4.2 现代图像处理技术	246
思考题	247
习题	247
第 14 章 泵与风机的理论基础	249
14.1 泵与风机的分类及应用	249
14.1.1 叶片式泵与风机	249
14.1.2 容积式泵与风机	250
14.1.3 其他类型的泵与风机	250
14.2 离心式泵与风机的构造特点及性能参数	251
14.2.1 离心式泵的基本构造	251
14.2.2 离心式风机的基本构造	253
14.2.3 离心式泵与风机的性能参数	255
14.3 离心式泵与风机的基本方程——欧拉方程	256
14.3.1 流体在叶轮中的运动	256
14.3.2 欧拉方程	257
14.3.3 叶片片数有限对欧拉方程的修正	257
14.3.4 理论扬程 H_T 的组成	258
14.4 叶型对离心式泵与风机性能的影响	259
14.4.1 叶型对理论扬程 H_T 大小的影响	259
14.4.2 叶型对理论扬程 H_T 组成的影响	260
14.5 离心式泵与风机的理论和实际特性曲线	260
14.5.1 泵与风机的理论特性曲线	261
14.5.2 泵与风机的损失与效率	262
14.5.3 泵与风机的实际特性曲线	263
14.5.4 泵与风机实际特性曲线的试验测定	265
14.6 相似律和比转数	265

14.6.1	相似条件	266
14.6.2	相似律	266
14.6.3	相似律的应用	267
14.6.4	比转数	269
14.6.5	比转数的意义	269
14.7	泵与风机的选择性能曲线图和性能参数表	271
14.7.1	泵或风机的通用性能曲线图	271
14.7.2	风机的选择性能曲线图和性能参数表	271
14.7.3	泵的综合性能曲线图和性能参数表	272
14.8	轴流式泵与风机	273
14.8.1	轴流式泵与风机构造及工作原理	273
14.8.2	轴流式泵与风机性能曲线的特点	274
	思考题	275
	习题	275
第 15 章	泵与风机的工作分析	277
15.1	管路特性曲线和工作点	277
15.1.1	管路特性方程和特性曲线	277
15.1.2	泵或风机的工作点	278
15.2	泵或风机的联合工作	279
15.2.1	并联工作	279
15.2.2	串联工作	280
15.3	泵与风机的工况调节	281
15.3.1	改变管路特性曲线的调节方法	281
15.3.2	改变泵或风机特性曲线的调节方法	282
15.3.3	轴流式泵与风机的调节	285
15.4	泵与风机的选择、安装和运行	287
15.4.1	泵的汽蚀与安装高度	287
15.4.2	泵与风机的选择	290
15.4.3	泵与风机和管路系统的连接	291
15.4.4	泵与风机的启动和运行	292
15.5	管道内的压力分布	293
15.5.1	液体管道内的压力分布	293
15.5.2	气体管道内的压力分布	295
	思考题	296
	习题	296
附录	本书各章主要专业术语中、英文对照	298
	主要参考文献	301

第 1 章 绪 论

1.1 流体力学及其发展史

1.1.1 流体力学的研究对象

液体与气体统称为流体。

流体力学是研究流体机械运动规律及其应用的科学。

工程流体力学则包括流体力学的基本原理及其在工程中的应用。

流体区别于固体的最基本力学特征就是具有流动性。观察流动现象，诸如微风吹过平静的水面，水面因受气流的摩擦力（沿水面作用的切力）而流动；斜坡上的水因受重力沿坡面方向的切向分力而流动。这些现象表明，流体静止时不能承受切力，或者说任何微小切力的作用，都会使流体流动，直到切力消失，流动才会停止，这就是流动性的力学解释。此外，流体无论静止或运动都几乎不能承受拉力。

流体力学研究的内容是机械运动规律。流体运动遵循机械运动的普遍规律，如质量守恒定律、牛顿运动定律、能量转化和守恒定律等，并以这些普遍规律作为建立流体力学理论的基础。

1.1.2 连续介质模型

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。由于分子之间存在空隙，描述流体的诸物理量（如密度、压强和流速等）在空间的分布是不连续的。同时，由于分子随机运动，导致空间任一点上流体物理量在时间上的变化也是不连续的。显然，以分子为对象来研究流体的运动，将极为困难。现代物理研究表明，在标准状况下， 1cm^3 的水中约有 3.3×10^{22} 个水分子，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，分子间的距离约为 $3 \times 10^{-7}\text{cm}$ 。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。

流体力学的研究目的是流体的宏观机械运动规律，而这一规律恰恰是研究对象中所有分子微观运动的宏观表现。1755 年瑞士数学家和力学家欧拉（L. Euler, 1707—1783）首先提出把流体当做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。所谓质点，是指含有大量分子的、与一切流动空间相比体积可忽略不计的又具有一定质量的流体微团。建立连续介质模型，是为了避开分子运动的复杂性，对流体物质的结构进行简化。建立连续介质模型后，流体运动中的物理量都可视为空间坐标和时间变量的连续函数，这样就可利用数学分析方法来研究流体运动。

连续介质模型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，都是把受力构件当做连续介质，来研究应力和变形的规律。可以说连续介质模型是固体力学和流体力学等许多分支学科共同的理论基础。

1.1.3 流体力学的研究方法

流体力学的研究方法主要为理论分析、数值计算和实验研究三种。

理论分析是通过对流体性质及流动特性的科学抽象,提出合理的理论模型,应用已有的普遍规律,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。理论分析的研究方法由欧拉首先创立,并逐步完善,迄今已发展成流体力学的一个分支——理论流体力学,成为流体力学的主要组成部分。但由于数学上的困难,许多实际流动问题还难以精确求解。

数值计算是在应用计算机的基础上,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,通过计算机进行大规模数值计算和数值实验,得到在时间和空间上许多由数字组成的集合体,最终获得定量描述流场的数值解。近年来,这一方法得到很大发展,也已形成流体力学的一个分支——计算流体力学。

实验研究则是通过对具体流动的观测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,通常以模型实验为主。

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 流体力学的发展史

流体力学形成和发展的历史可分为四个阶段。

第一阶段 流体力学形成的萌芽阶段(16世纪以前的时期)。

最早的流体力学理论是公元前250年左右由希腊哲学家阿基米德(Archimedes, B. C. 287—212)提出的《论浮体》,它至今仍是流体静力学的一个重要的组成部分。但此后长达1700多年,流体力学未见有重大的进展。直到15世纪后期,在由意大利开始的文艺复兴时期,流体力学发展的停滞局面才被打破。公元1500年意大利物理学家和艺术家达·芬奇(Da Vinci, 1452—1519)提出了《论水的运动和水的测量》一文,并导出了不可压缩流体的质量守恒方程。但他的著作直到19~20世纪才被发现。

总的看来,在16世纪以前,近代的自然科学还未形成。人类对自然界的认识,还只是—些直观的轮廓以及和哲学混在一起的观点。流体力学还没有具备发展成—门独立科学的条件。但是人类在长期生产实践中积累的丰富经验,为流体力学的发展打下了感性认识的基础。

第二阶段 流体力学奠定了作为—门独立科学的基础阶段(16世纪中叶~18世纪中叶)。

由16世纪末到17世纪中叶是—阶段的前期。此时由于人们还未找到力和运动之间的普遍联系,尚未发现数学分析的方法,所以当时的一些成就都偏重于流体静力学方面。

由17世纪中叶到18世纪中叶是—阶段的后期。1687年牛顿(I. Newton, 1642—1727)提出了著名的力学定律,奠定了物质机械运动的理论基础。大致同时创立的微积分原理,也为流体力学的发展提供了必要的条件,1738年瑞士物理学家伯努利(D. Bernoulli, 1700—1782)在他写的《水动力学》—书中首次系统地阐明了水动力学的一些基本概念,并用能量原理解决了—些流动问题。1755年瑞士数学家欧拉在他的著作《流体运动的—般原理》中建立了理想流体运动微分方程式。他首先应用数学分析方法研究流体力学问题,为理论流体力学的发展开辟了新的道路。这些成就为流体动力学奠定了基础。

第三阶段 流体力学沿着古典流体力学和水力学两条道路发展的阶段(18世纪中叶~19世纪末)。

欧拉提出的不考虑流体内部摩擦阻力的理想流体,是—种经过简化的抽象的流体。只有在摩擦阻力很小的流动中,由这个方程得到的解答才能较好地符合实际。否则,理论得到的

结果甚至可能是荒谬的。到 19 世纪, 急剧发展的工程技术又向流体力学提出了许多用理想流体无法解决的问题。在这种情况下, 1826 年法国工程师纳维 (L. M. H. Navier, 1785—1836) 首先提出了考虑流体内部摩擦阻力的黏性流体运动微分方程。此后, 很多人致力于研究该微分方程的数学解答。这些研究大大丰富了流体力学的内容, 逐渐形成了现在的所谓古典流体力学。

黏性流体运动微分方程虽然考虑了摩擦阻力, 但它的形式比较复杂, 只有在极简单的情况下才能求解。但是, 当时迅速发展的生产又向流体力学提出了一系列问题, 要求解决。于是人们不得不求助于实验, 以便根据工程总结与模型试验来解决工程技术问题。水力学就是这样逐渐形成的。水力学是在伯努利成就的基础上, 利用大量的实验资料来解决那些在古典流体力学中无法解决的问题。

第四阶段 发展成为近代流体力学的阶段 (由 19 世纪末至今)。

从 19 世纪后期开始, 流体力学以空前的速度蓬勃发展起来。流体力学在这一阶段的发展有以下两个特点。

(1) 理论与实验密切结合, 大大促进了流体力学的发展速度。英国人雷诺 (O. Reynolds, 1842—1912) 于 1882 年首先阐明的相似原理大大提高了对实测资料进行理论概括的能力, 从而加速了理论与实验的结合。雷诺以后, 实验技术有了很大提高, 实验作用也有所扩大。研究流体运动的实验室 (水力学实验室和空气动力学实验室) 陆续建立。水力学实验由以现场进行的实物观测为主, 逐渐发展为实物观测与模型试验并重。试验的目的也不像先前那样局限于解决工程具体问题, 同时还加强了对基本理论的验证和基本规律的寻求。理论与实验的密切结合, 是近代流体力学迅速发展的重要因素。

(2) 理论与生产实践的密切联系, 使流体力学的研究领域不断扩大, 出现了很多新的分支。这一阶段的最重要特点还在于理论与生产实践的紧密联系。流体力学逐渐广泛地应用于生产实践。在生产实践的推动下, 大大丰富了流体力学的内容。流体力学的研究领域不断扩大, 出现了许多新的分支。

近代流体力学的发展, 首先是和 20 世纪航空事业的蓬勃兴起分不开的。例如平面势流理论、机翼理论、螺旋桨理论和边界层理论等, 都是在航空事业的推动下发展起来的。其中德国人普朗特 (L. Prandtl, 1875—1953) 于 1904 年首先提出边界层理论, 对进一步推动流体力学与生产实践的联系起了重大作用。其他如与多方面问题有关的紊流理论, 与高速飞行和涡轮机制造有关的气体动力学理论等, 20 世纪以来都获得了巨大的成就。20 世纪 40 年代以来, 由于超高速飞行、火箭技术、原子能利用、电子计算机等尖端技术以及其他新兴工业的发展, 给流体力学提供了许多新的课题, 大大开拓了流体力学的研究领域, 促使一些流体力学新分支的诞生, 如电磁流体力学、化学流体力学、计算流体力学、非牛顿流体力学、多相流体力学等, 这些新分支一般都具有边缘科学的性质。流体力学正越来越多地和其他有关的科学结合, 这正是人们的认识由简单到复杂, 逐渐认识到物质的不同运动形式之间的相互联系和转化关系的结果。

我国在防治水害和运用水利方面有着悠久的历史。在中国古代的典籍中, 就有相传 4000 多年前大禹治水“疏壅导滞”, 使滔滔洪水各归于河的记载。先秦时期 (B. C. 256—251) 在岷江中游建都江堰, 从此成都平原“水旱从人, 食无饥谨, 无凶年”。东汉初杜诗制造了水排, 就是利用山溪水流驱动鼓风机用于炼铁, 这可以说是近代水力机械的先驱。古时计时工具——铜壶滴漏的出现, 说明当时对孔口出流的规律已有了定量的认识。只是近代中国长期处在封建统治之下, 科学技术严重滞后, 致使我国在流体力学发展成为一门严密学科

的关键时期，未能做出应有的贡献。

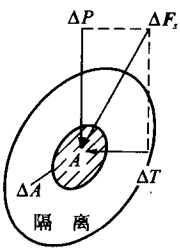
中华人民共和国成立以来，随着工农业发展的需要，人们对流体力学进行了大量的理论和实验研究，获得了很多重要的成果。我国著名科学家钱学森、周培源、郭永怀等在流体力学方面都有卓越的成就和巨大的贡献。特别是改革开放以来，我国在与流体力学有关的工农业生产、工程以及国防建设工程等方面都取得了很大的进步和成就。1992年开始兴建的长江三峡工程已经如期实现水库初期蓄水、永久船闸通航和首批机组并网发电三大目标。南水北调世纪工程分西、东、中三条调水方案，也已开始分步实施。同时在建筑环境与设备专业，流体力学应用得非常广泛。热的供应、空气的调节、燃气的输配、排湿排毒和除尘降温等，都是以流体作为工作介质，通过流体的各种物理作用，对流体的流动有效地加以组织来实现的。学好流体力学才能对专业范围内的流体力学现象做出合乎实际的定性判断，进行足够精确的定量估计，正确地解决专业范围内的与流体力学相关的设计和计算问题。

1.2 作用在流体上的力

力是造成机械运动的原因，因此研究流体机械运动的规律，就要从分析作用于流体上的力入手。作用在流体上的力，按作用方式可分为两类。

1.2.1 表面力

表面力是通过直接接触，施加在接触表面上的力。



在流体中取隔离体为研究对象，如图 1.1 所示，周围流体对隔离体的作用以分布的表面力代替。表面力的大小用应力来表示。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 $\bar{p} = \frac{\Delta P}{\Delta A}$ 为 ΔA

上的平均压应力，取极限 $p_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} = \frac{dP}{dA}$ 为 A 点的压应力，又称为 A

图 1.1 表面力 点的压强； $\tau_A = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta A} = \frac{dT}{dA}$ 为 A 点的切应力。

应力的单位是帕斯卡（Pascal），简称帕，以符号 Pa 表示， $1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$ 。

1.2.2 质量力

质量力是指施加在隔离体每个质点上的力，重力是最常见的质量力。此外，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（Coriolis）力也归为质量力。

质量力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 F_B ，则单位质量力为

$$f_B = \frac{F_B}{m}$$

单位质量力在各坐标轴上分量为

$$X = \frac{F_{BX}}{m}, Y = \frac{F_{BY}}{m}, Z = \frac{F_{BZ}}{m}$$

$$f_B = Xi + Yj + Zk$$

若作用在流体上的质量力只有重力（见图 1.2），则

$$F_{BX} = 0, F_{BY} = 0, F_{BZ} = -mg$$

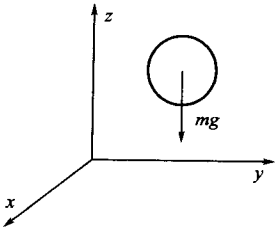


图 1.2 重力