

工程流体力学、泵和风机



高等学校教学用书



工程流体力学、泵与风机

刘五秀 周士昌 李诗久 合编
李有章 林 慈 周亨达

中国工业出版社

本书是根据东北工学院及北京钢铁学院有关课程的讲义，并参考了一些苏联教材和书籍编写的。全书共十二章，分上下两篇，上篇为工程流体力学，讲述流体平衡与运动的基本规律，以及实际应用这些规律的方法；下篇为泵与风机，讲述泵与风机的类型、构造、工作原理、性能、运转和选择等。

本书在一些基本理论的应用、举例，以及泵与风机的类型、运转和使用方面，注意联系了冶金生产的实际。

本书可供高等工业学校冶金类型有关专业“工程流体力学、泵与风机”课程教材之用，其份量适合于85个学时讲授，学时较少的专业，可根据具体情况适当精简。

工程流体力学、泵与风机

刘五秀 周士昌 李诗久 合编
李有章 林 慈 周亨达

*

冶金工业部工业教育司编辑（北京猪市大街78号）

中国工业出版社出版（北京佟麟阁路丙10号）

（北京市书刊出版事业许可证出字第110号）

中国工业出版社第三印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ·印张19·插页1·字数427,000

1962年12月北京第一版·1963年6月北京第二次印刷

印数1,401—3,413·定价（10—5）2.30元

*

统一书号：K15165·1879（冶金-282）

序 言

本书是应高等工业院校冶金类型各专业对“工程流体力学、泵与风机”课程教材的急需，由东北工学院流体力学教研室与北京钢铁学院热工学及水力学教研组部份教师共同编写的。

“工程流体力学、泵与风机”作为一门基础技术课，必须在保证其基本内容和保持其科学系统性的基础上，密切联系我国实际、结合工程技术专业。我们依此原则，并根据几年来两院在教学、科学研究和生产劳动，以及教学改革中的经验和体会，以学时较多的冶金炉专业为准，经过研究讨论，首先拟定了本教材的内容、要点和编写提纲，然后采取个人执笔、集体讨论的方式进行编写。

本书共十二章，分为上下两篇。第一章阐明了本书中的一些基本概念；第二，第三，第四和第六章是本门课程的理论基础；第五章为一般性应用；第七至十二章是根据专业的要求，对泵与风机的工作原理、性能、选择、维护使用等方面作了较详尽的讲述。

本教材的编写，曾力图使其具有如下特点：

1. 力求定义确切、物理概念清晰，内容重点突出，以及文字简练便于阅读；
2. 在加强基本理论知识的同时，力求较多地联系实际，结合工程技术专业；
3. 各章节附有应用图表和必要的计算实例，以培养同学解决实际问题的能力；
4. 下篇泵与通风机部份，在叙述顺序上，先讲述了泵与通风机的类型、构造和性能术语（如总输水高度，风压等），然后，再集中分析泵与风机的工作原理、性能、运转和选择等问题。这样，一方面避免了泵与风机的一些共同性内容的重复；另一方面，在教学中，可以结合实物演示，使学生对泵与风机的构造有了一定的认识后，再来分析泵与风机的工作理论等问题。

但由于编者水平有限，实践基础不够，书中有不妥当和错误之处，希望各院校的师生和读者广泛提出批评和指正。

本书编写分工如下：第一、二、三章（东北工学院周士昌）；第四、五章（东北工学院刘五秀）；第六章（东北工学院李诗久）；第七，八章（北京钢铁学院林慈）；第九，十章（北京钢铁学院李有章）；第十一，十二章（北京钢铁学院周亨达）。刘五秀和李有章担任了总审工作。

在本书初稿的集体讨论中，东北工学院流体力学教研室和北京钢铁学院热工学及水力学教研组的老师们，以及东北工学院流体机械教研室唐兴华老师，提出了很多宝贵的意见，在此一併致以谢意。

编 者

1962年3月

本书所用符号表

符 号	表 示 意 义	单 位	符 号	表 示 意 义	单 位
A	面积	米 ² , 厘米 ²	h_w	损失水头 (压头)	米
	功的热当量	$\frac{1}{427}$ 仟卡/公斤 米	h_f	沿程阻力; 沿程水头 损失	米
a	面积	厘米 ² , 毫米 ²	$\bar{h}_r$	局部阻力; 局部水头 损失	米
	加速度	米/秒 ²	i	沿程水力坡度	仟卡/公斤
B; b	宽度	米, 厘米	i_p	测压管水头线坡度	
C	谢才系数	米 ^{1/2} /秒	J	热的功当量	427 公斤 米/仟卡
	音速, 速度	米/秒		惯性矩	米 ⁴
C_p	定压比热	仟卡/公斤 度		惯性力	公斤
C_v	定容比热	仟卡/公斤 度	K	流量模数	米 ³ /秒; 升/秒
D; d	直径	米, 毫米	L; l	长度	米
E	弹性系数	公斤/厘米 ²	L	功	公斤-米
E; e	比能	公斤 米/公斤	l	比功	公斤 米/公斤
e	内能	公斤 米/公斤; 仟卡/公斤	M; m	质量	公斤 秒 ² /米
E_u	欧拉相似准数			质量流量	公斤 秒/米
F; f	力	公斤	M	马赫数	
F_r	富鲁德相似准数		N	功率	仟瓦; 马力
G	重量流量	公斤/秒; 公斤/分	N_o	牛顿相似准数	
	重量, 力	公斤, 吨	n	粗糙系数; 多变指数	
g	重力加速度	9.8米/秒 ²		转数	转/分
H	水头或压头	米	P	力; 总压力	公斤; 吨
	总输水高度	米	p	压力	公斤/米 ² , 公斤/厘米 ²
	高度, 水深	米; 厘米	p_a	大气压力	公斤/米 ²
	风压	公斤/米 ²	p_M	表压力	公斤/米 ²
h	水头或压头	米	p_B	真空或真空度	公斤/米 ²
	高度, 深度	米; 厘米			

續表

符 号	表 示 意 义	单 位	符 号	表 示 意 义	单 位
p/τ	压力水头	米	α	动能修正系数	
Δp	压力差, 压力降	公斤/米 ²	β	系数, 动量修正系数	
$Q; q$	体积流量	米 ³ /秒; 升/秒	Γ	速度环量	米 ² /秒
Q	热量	仟卡	γ	重度	公斤/米 ³
q	热量	仟卡/公斤	Δ	绝对粗糙度	毫米
R	力	公斤	δ	間隙, 高度, 厚度	毫米
	气体常数	公斤米/公斤度	ε	压力比, 收缩系数	
$R; r$	水力半径; 半径	米, 厘米	ζ	局部阻力系数	
R_e	雷诺数, 雷诺相似准数		η	效率	
S	熵	仟卡/公斤度	η_0	容积效率	
	距离	米, 厘米	η_r	水力效率	
T	内摩擦力	公斤	η_m	机械效率	
	绝对温度	°K	K	绝热指数	
	时间	秒; 分	λ	沿程阻力系数, 摩擦系数	
t	温度	°C	μ	动力粘性系数	公斤秒/米 ²
	时间	秒; 分		流量系数	
u	速度; 圆周速度	米/秒	ν	运动粘性系数	米 ² /秒
$u^2/2g$	速度水头 (压头)	米	ρ	密度	公斤秒 ² /米 ⁴
V	体积	米 ³	σ	系数	
v	速度, 平均流速	米/秒		应力	公斤/厘米 ²
	比容	米 ³ /公斤	τ	内摩擦切应力	公斤/厘米 ²
$v^2/2g$	速度水头 (压头)	米	φ	系数, 速度系数	
w	速度, 相对速度	米/秒	χ	湿周, 摩擦接触周长	米
X, Y, Z	单位质量力的分量	米/秒 ²	ω	角速度	1/秒
z	位置 (几何) 水头 (压头)	米			
	数目				

下角字	表示意义	下角字	表示意义
а _д	定熵	i	内部, 指示
в ; в _с	吸风管, 吸水管	K	临界
и _с	定温	m	平均
по _л	多变	T	理论的
max	最大	u	圆周向
min	最小	r	径向
H	压水管	z	轴向
ср	平均		

目 录

本书所用符号表

序 言

緒 論

上篇 工程流体力学

第一章 流体及其主要物理性质	5
§ 1-1 流体的定义, 連續介质的概念	5
§ 1-2 流体的主要物理性质	6
§ 1-3 流体內摩擦定律, 理想流体的概念	11
§ 1-4 作用在流体上的力	15
第二章 流体静力学	16
§ 2-1 流体静压力的特性	16
§ 2-2 压力的度量	18
§ 2-3 流体平衡的微分方程式	19
§ 2-4 等压面	21
§ 2-5 流体静力学的基本方程式	22
§ 2-6 流体静力学基本方程式的几何意义及能量意义	24
§ 2-7 重度小于大气的气体中压力的分布規律	26
§ 2-8 液体式测压計	29
§ 2-9 旋轉容器中液体的相对平衡	32
§ 2-10 平面上的液体总压力	34
§ 2-11 曲面上的液体总压力	37
§ 2-12 巴斯加定理, 简单水力机械	39
§ 2-13 阿基米德原理	41
第三章 工程流体动力学基础	43
§ 3-1 研究流体运动的方法	43
§ 3-2 稳定流与非稳定流	46
§ 3-3 跡綫与流綫	47
§ 3-4 流管、流束、有效断面、湿周、水力半径、流量和平均流速	50
§ 3-5 連續性方程式	51
§ 3-6 理想流体运动的微分方程式	55
§ 3-7 理想流体沿微小流束的伯努利方程式	57
§ 3-8 伯努利方程式的几何意义及能量意义	60
§ 3-9 皮托管及文德利流量計	64
§ 3-10 实际流体运动的微分方程式	67
§ 3-11 实际流体沿微小流束的伯努利方程式, 水力坡度及测压管水头綫坡度	69
§ 3-12 緩变流与均匀流	70
§ 3-13 实际流体总流的伯努利方程	72
§ 3-14 稳定流的动量方程式	77
第四章 流体运动的阻力和比能損失	80
§ 4-1 附面层的概念, 流綫型物体	81
§ 4-2 能量損失的种类	82

§4-3	均匀流的基本方程式	83
§4-4	流体运动的两种形态——层流、紊流	85
§4-5	层流运动的分析	89
§4-6	相似理論簡介	94
§4-7	量綱分析概述	103
§4-8	圆管紊流的特性	106
§4-9	圆管紊流有效断面上的速度分布	110
§4-10	紊流沿程损失的基本关系式	112
§4-11	尼古拉茨实验, 謝維列夫实验, 阻力系数 λ 的公式	113
§4-12	局部损失	124
§4-13	孔口和管嘴的出流	133
第五章	管路的水力计算	138
§5-1	管路水力计算的基本公式, 流量模数	138
§5-2	简单管路	139
§5-3	串联管路	142
§5-4	并联管路	143
§5-5	連續均匀洩流管路	145
§5-6	管网	146
§5-7	管中水錘	149
第六章	可压缩流体的一元流动	153
§6-1	一元稳定流动的伯努利方程式	153
§6-2	介质中的音速	158
§6-3	馬赫数对气流压缩性的影响	160
§6-4	管中气流速度与断面积的关系	161
§6-5	容器中高压气体經管嘴和拉伐尔管的流动	162
§6-6	气体管流	167
下篇 泵 与 风 机		
第七章	离心式泵	172
§7-1	离心式泵的工作原理及装置概要	172
§7-2	离心式泵的分类	173
§7-3	离心式泵的总輸水高度	176
§7-4	离心式泵的吸水高度及汽蝕現象	179
§7-5	离心式泵的輸水量、效率和功率	182
§7-6	軸向推力及其消除方法	184
§7-7	离心式泵的基本类型和构造	185
§7-8	离心式泵的安装、維護及使用	192
§7-9	冶金工厂水泵站的概况	194
第八章	离心式与軸流式通风机	195
§8-1	离心式通风机的工作原理	195
§8-2	軸流式通风机的工作原理	196
§8-3	通风机的总压、靜压和动压	197
§8-4	通风机的风量、功率与效率	199

§8-5 离心式和轴流式通风机的构造	200
第九章 透平式泵与通风机的性能、运转及选择	205
§9-1 叶栅的基本概念	205
§9-2 透平式泵及通风机的理论压头	207
§9-3 离心式叶轮叶片型式对理论压头的影响	212
§9-4 透平式泵及通风机的理论性能曲线	215
§9-5 透平式泵及通风机的实际性能曲线	216
§9-6 性能曲线的换算方法	222
§9-7 管网性能曲线及透平式泵与通风机在管网中的工况	225
§9-8 透平式泵及通风机的不稳定工作	226
§9-9 透平式泵及通风机工况的调节	227
§9-10 透平式泵与通风机的并联及串联工作	230
§9-11 比转数	232
§9-12 一般化、无因次和百分比性能曲线	233
§9-13 透平式泵及通风机的选择	237
第十章 透平式鼓风机及压气机	240
§10-1 离心式鼓风机及压气机的概述	240
§10-2 轴流式压气机的概述	241
§10-3 透平式鼓风机及压气机的总压头	242
§10-4 透平式鼓风机及压气机的功率和效率	244
§10-5 透平式鼓风机及压气机的实际性能曲线	249
§10-6 吸气状态改变对透平式鼓风机及压气机性能的影响	251
§10-7 离心式鼓风机在管网上运转的工况, 飞动现象的防止方法	255
§10-8 透平式风机的调节方法	257
§10-9 透平式鼓风机及压气机的并联及串联工作	260
§10-10 透平式鼓风机及压气机的构造	261
§10-11 冶金厂的鼓风站	265
§10-12 透平式鼓风机及压气机的选择、维护和使用	268
第十一章 往复式泵	269
§11-1 往复式泵的结构概要、工作原理及分类	269
§11-2 往复式泵的输水量	270
§11-3 吸水过程及压水过程	273
§11-4 空气室	276
§11-5 指示图、指示功率及有效功率	277
§11-6 往复式泵的构造实例及主要部件	278
§11-7 往复式泵的选择、维护及使用	281
§11-8 往复式泵和离心式泵的比较	283
第十二章 迴转式泵及压气机械, 真空泵	284
§12-1 齿轮泵及螺杆泵	284
§12-2 罗茨泵及罗茨鼓风机	286
§12-3 旋板式泵及压气机	287
§12-4 叶氏鼓风机	289
§12-5 迴转式泵和压气机械的性能曲线与调节	290
§12-6 机械式真空泵	291

緒 論

工程流体力学属于应用力学的一个分科，它研究流体平衡与宏观机械运动的规律及其在工程中的应用。泵与风机是用来输送流体的机械设备，在本书中将论述泵与风机的类型、构造、性能、运转和选择等问题。

工程流体力学、泵与风机在许多工程部门都有着极其广泛的应用。泵与风机是冶金厂中重要设备之一。冶金工程中随着冶金理论和技术的发展，工程流体力学愈益显示出它的重要作用。

目前的金属冶炼绝大部分都需要通过燃烧来进行，因此在冶炼过程中必须供应大量的空气，例如高炉炼一吨生铁就需要供应 $2200-2500\text{米}^3$ 空气，转炉炼一吨钢需要 $450-500\text{米}^3$ 空气。由于金属冶炼是高温作业，因此为了保证高温设备的正常工作，对高温设备的冷却也是一个重大问题。一般冶金工厂中都用水来冷却设备，故需消耗大量的水，例如平炉炼一吨钢需要消耗十几吨水，一个年产150万吨钢的钢铁企业每昼夜需消耗水100万吨之多。所以，送风供水是冶金生产中极为重要的问题。要正确设计供水和送风系统，选择合适的水泵和风机等等，都需掌握工程流体力学、泵与风机的知识。

供水和送风只是冶金炉外部的流体力学问题，而要掌握冶金炉内部炉气的流动规律，也需要流体力学方面的知识。此外，如废气的排除和利用，液体或气体燃料的供应及炉子漏气等问题，都必须应用工程流体力学的知识才能解决。因此，工程流体力学对冶金炉的设计操作和安全技术等方面，都有着十分重要的意义。

在金属压力加工中应用的水压机、水力蓄能机等水力机械，以及保证这些机械工作所需的高压水供应系统的设计及运转，也是以工程流体力学、泵与风机的知识作指导的。

在铸造技术及其理论研究，要解决离心铸造、水力清砂、化铁炉的鼓风和铸造车间的通风、冷却等问题，工程流体力学、泵与风机的知识也是不可缺少的。而要提高铸造技术，又必须对熔融金属的性质、运动规律以及它们与铸模的相互作用问题进行深入的研究。这些问题则是熔融金属流体力学的研究对象。它是在流体力学的理论基础之上发展起来的一个分支。

冶金炉内部的气体流动，严格说来不是单纯的机械运动，而是在气体流动的过程中同时伴随着热交换和化学反应，要真正了解冶金炉中气体运动的规律，必须把流体的机械运动和热交换与化学反应同时考虑，这就是化学流体力学的研究对象，它也是流体力学的一个分支。

上面只是提到了冶金生产中与工程流体力学、泵和风机密切有关的某些主要方面，事实上冶金生产中还有很多附属设备，如气体压力和风量的测量仪器及各种液压设备的设计、选择和使用，都需要工程流体力学、泵与风机的知识。

由此可见，工程流体力学、泵与风机的知识在冶金工程上有着重要的、广泛的应用。

本課程对冶金类各专业來說是一門基础技术課。它以物理学、理論力学和数学等課程为基础。本課程为专业課（如冶金炉、炼鋼、炼鉄及鑄工等課程）建立流体力学、泵与风机的基础理論，同时也为学生提供了有关流体力学、泵与风机方面的一般知識。

下面簡要介紹工程流体力学、泵与风机的发展历史。首先是我国古代工程流体力学、泵与风机的发展概况。不少历史記載都說明我們祖先很早以前就掌握了流体运动的一些規律，并利用它来为自己服务。

在提水工具方面，早在公元前 2000 多年我們的祖先就已經应用了戽斗作为提水工具。后来又应用杠杆原理发明了桔槔来提取井水。东汉的毕嵐和三国的馬鈞发明了脚踏水車。唐宋以前又提出了水力水車，利用水本身的动力来带动戽水工具吸水，这实际上是自动化水泵的雛形。

鼓风机的应用最初也是从冶炼事业中开始的。我国是世界上第一个生产鑄鉄的国家。在公元前 600 多年就已經在炼鉄中应用了鼓风工具——囊（囊是一个大皮囊，利用人力拉压进行鼓风）。到战国时代囊的应用已經很普遍了。后来又出現了木扇（即利用启閉木箱盖板进行鼓风）。后汉杜詩在公元 37 年发明了用水力带动木扇进行鼓风，称为“水排”。欧洲发明水力鼓风机是在 11—12 世紀，比我国晚 1000 年左右。后来我国又更进一步发明手拉木制风箱，在公元 1637 年宋星著的“天工开物”上，詳細記載了在当时已經普遍应用的手拉木风箱的构造（其作用原理与往复式水泵相同）。

在其他流体机械方面，如計时用的“銅壶滴漏”（一种利用流水作为計时的工具），利用水力带动天象仪旋轉的渾天仪，水輪大紡車等等，早已发明和应用。

我們祖先在水利工程上的成就（如連續数千年的治理黄河工程，春秋时代的都江堰，隋朝的南北大运河，航运中风帆的利用等）也說明了我們祖先已經对水的运动規律有了一定的了解，并积累了不少經驗。

綜上所述，可見我們祖先在有关工程流体力学、泵与风机的理論和实践方面都有着不少重要的貢獻。但是由于封建統治的束縛和帝国主义的侵略压迫，生产力得不到发展，因此我們祖先在有关工程流体力学、泵与风机方面的理論和实践知識，也只是停留在局部的和零星的阶段上，沒能形成完整的系統理論。

其次，就工程流体力学、泵与风机在国外的发展情况來說，也与我国一样，人們很早就开始利用有关知識来为人类服务了，如公元前数百年，在希腊出現了木质往复泵、消防唧筒、水压机等簡單水力机械。在这些技术发展的基础上，阿基米德于公元前 250 年，提出了著名的論文“論浮体”，这是最早的一篇有历史記載的流体力学論文。但在漫长的中世紀，由于黑暗的封建統治，流体力学和其它科学一样，没有什么进展，直到公元 16 世紀，由于生产上的需要，流体力学才又有了发展。托里拆里（1643 年）提出了孔口洩水定律；巴斯加（1650 年）提出了液体中压力传递定律；牛頓（1686 年）提出了流体內摩擦假說等。但这一阶段工程流体力学发展的特点是没有找出作用力与流体运动的普遍規律，而只限于个别問題的解决，因此沒有形成系統的理論。

18 世紀开始，由于資本主义的兴起，生产力飞跃上升，流体力学也得到了巨大的发展。D. 伯努利提出了能量方程，L. 欧拉提出了理想流体的平衡与运动微分方程，从而建立了流体运动及其中作用力的普遍規律。使流体力学有了比較完整的理論基础，而形成了一門独立的科学。在泵和风机方面，18 世紀也有不少进展，在理論上 L. 欧拉建

立了渦輪機的基本方程式，而俄羅斯工程師A.薩勃路柯夫在1832及1835年分別設計了離心式泵和離心式通風機。

19世紀在流體力學理論方面得到了進一步發展，如L.納維、G.斯托克斯、A.柯西和S.泊松等人建立了粘性流体运动的理論，海姆霍茲建立了旋渦运动的理論基礎等。但這些理論還不能滿足迅速發展着的生產所提出的大量實際問題的要求。因此在18世紀末和19世紀，工程流體力學在實驗方面有了進展，這主要是從實驗中得出了一些數據和經驗公式以解決迫切的工程問題。如O.雷諾通過實驗發現了流体运动的兩種類型——層流與紊流，而A.謝才、H.巴生、H.哈根和達西等在實踐和實驗的基礎上，對渠道和管路中的阻力計算等問題也有不少研究，這些研究都是以直接解決工程問題為目的的。此外在19世紀末葉，有些國家已經設置了風洞，這為流體力學提供了一個新的重要的實驗研究方法。這一階段工程流體力學發展的特點是理論和實際兩方面還沒有很好地結合起來；流體力學理論在一定程度上還是追求嚴格地系統地數學推导，不能解決太多的工程問題；另一方面，實驗研究又沒有緊密地與理論結合，不能以理論來指導實驗。

泵與鼓風機方面，在19世紀出現了性能很好的蒸汽作用往復式泵。

20世紀以來，由於生產的進一步發展，對工程流體力學的要求更高了，尤其是航空工業的發展，促使空氣動力學獲得飛速的進步。而20世紀中，工程流體力學理論發展最快的是蘇聯。蘇聯在二戰以後，在水利、航空和冶金等工業生產方面得到了飛速的發展，特別是1957年蘇聯發射的第一顆人造地球衛星，以及1961年第一個載人宇宙飛船，更說明了蘇聯在工程流體力學方面的巨大成就，在這一段時期內蘇聯又為很多流體力學的新分支奠定了基礎。如機翼理論方面除儒珂夫斯基及查普雷金外，M.凱爾迪什和Φ.富蘭凱爾等人進一步發展了它。在流體力學的重要問題——紊流理論方面，蘇聯學者也是走在世界前列的，這方面如A.柯爾莫格洛夫和И.洛強斯基等人都有不少貢獻。

在其他國家中，也有一些科學家對20世紀中工程流體力學的發展有一定的貢獻。如L.普朗特，V.卡門和布拉德斯等人發展了附面层理論，在紊流理論方面，泰勒、普朗特、卡門等人也有一定貢獻。

由於機翼理論的發展也為渦輪機械奠定了理論基礎，因此離心式及軸流式泵與風機的性能大大改善了。由於工業生產發展的需要，泵與風機的種類也愈來愈多。

這一階段工程流體力學發展的特點，是流體力學理論正與實驗逐漸密切地結合起來，另一方面是工程流體力學的分科愈來愈細，邊緣科學得到了迅速發展並正在形成系統的理論。

新中國成立以後，由於黨對科學研究事業的重視，解放後在北京和全國很多地區相繼成立了科學院及科學分院，其中有不少力學研究機構。同時在高等學校中也成立了一些流體力學專業，培養這方面的專門人才。

圍繞著全國各地進行的許多大型水利工程的建設，全國不少科研機構及高等院校進行了不少理論和實驗研究。58年以來，水力采煤的發展也促進了射流與兩相流的 research。在科研成果上如附面层、紊流、泥砂問題等都取得了一定的成績。

在泵與鼓風機方面，由於解放後冶金、采礦及農業生產的巨大發展，大大促進了水

泵、通风机、鼓风机和压气机的生产。解放前对水泵只能小量仿造，而解放后早已能大量生产数十种规格的水泵了。在通风机、鼓风机及压气机方面也完全可以自己进行大规模生产，而且实现了系列化，进一步简化了生产。在涡轮机理论、叶片及涡壳的强度等方面的問題，有关科学研究单位也进行了研究。

由此可見，解放后短短的十二年間，在党的领导下，我国在工程流体力学、泵与风机的理论和实践方面都获得了巨大的发展，今后，工程流体力学、泵与风机一定能获得更大的发展。

上篇 工程流体力学

第一章 流体及其主要物理性质

§ 1-1 流体的定义, 連續介质的概念

1. 流体的定义 流体是一种受任何微小的拉力和剪力都能产生巨大变形的物体。

固体在拉力或剪力的作用下, 其变形較小, 而且到一定程度后就停止变形, 但流体却能繼續不断地运动(流动)。这是固体与流体的区别。

流体可分为液体和气体两种: 液体的分子間距离較气体小, 在压力作用下体积改变很小, 一般可以忽略不計, 工程上也称为不可压缩流体。气体的分子間距离較大, 在压力作用下体积改变也較大, 一般不能忽略, 因此称为可压缩流体。

2. 連續介质的概念 从微观的角度来看, 流体是由无数分子組成的, 分子与分子間有空隙(分子距), 并且即使在一般所謂靜止流体中, 分子也是永恒不息地运动着的。但流体力学不去研究微观的分子运动, 而是从宏观的角度来研究流体的机械运动。因此, 在流体力学中, 把流体看成是由质点組成的連續介质: 质点与质点間沒有空隙, 质点本身的几何尺寸相对于流动空間或流体中的固体而言可以忽略不計, 也就是說, 把质点看作是流体的最小单位。但是每一个质点又包含有大量分子, 不过分子間的距離相对于质点的尺寸來說是可以忽略不計的。这些假設在工程上是可行的, 因为在一般情况下, 即使放在流体中的固体(或限制流体运动的固体边界)尺寸极微小, 但其綫尺寸也远比流体分子間的距離为大。例如 1 毫米^3 在工程上已是很小的尺寸了, 但是 1 毫米^3 的气体中仍有 2.7×10^6 个分子。因此, 分子距离在工程上是完全可以忽略不計的。分子距离既可忽略, 分子运动也可忽略了, 因此流体力学中假定在靜止流体中质点是完全靜止的, 沒有运动。

流体既被看作是連續介质, 反映流体质点运动特性的各种物理量(如速度、密度、压力等), 也應該是空間坐标的連續函数。这样就可以用数学解析方法来分析流体平衡和运动的規律, 因为数学解析方法是建立在連續函数的基础上的。

虽然在絕大多数工程問題中, 把流体看作連續介质是可行的, 但是在很稀薄的气体中, 分子自由行程相对于流体中的固体(或限制流体运动的固体)几何尺寸來說已不能忽略了。此时流体是連續介质的假定就不能成立了。例如在冶金工程中的真空冶炼, 要求炉內的真空度很高, 这时炉內气体的分子自由行程就較大, 因此不能把这种气体看成是連續介质。但在一般冶金炉中的气体还是可以看成連續介质的。本課程只研究連續介质的平衡和运动的規律。

最后应当說明, 在研究流体平衡和运动的規律时, 我們是从宏观的角度来研究的, 但是由于流体的一些宏观特性(如后面要談到的粘性, 表面张力等)是由其微观分子运动所决定的, 因此在研究流体的物理性质时, 往往还从微观的角度來說明, 但这只是

用来说明宏观特性产生的原因，而不用来分析流体机械运动的规律。

§ 1-2 流体的主要物理性质

流体的物理性质是决定流体平衡和运动规律的内部原因。因此必须首先对它进行研究。在这里只谈几种主要的、与流体平衡和运动规律直接有关的物理性质。

1. **重度和密度** 任何物体都有质量，而在受地心引力作用后就显示出重力（即重量）。单位体积流体所具有的重量称为重度，即：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-1)$$

式中 γ —— 重度；

V —— 流体的体积；

G —— 流体的重量。

若为非均匀流体，流体每点的实际重度为：

$$\gamma = \frac{dG}{dV} \quad (1-2)$$

G 是重力，量纲以 F 表示； V 的量纲以长度的立方 L^3 表示。故 γ 的量纲是 $\frac{F}{L^3}$ 。在物理学中力以达因表示，故 γ 的物理单位为达因/厘米³；而一般工程中力以公斤表示，长度以米表示，故 γ 的工程单位是公斤/米³。

单位体积流体所具有的质量称为密度，即：

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (1-3)$$

式中 ρ —— 密度；

M —— 流体的质量。

若为非均匀流体，则流体每点的密度为：

$$\rho = \frac{dM}{dV} \quad (1-4)$$

由于

$$G = M \cdot g$$

两边以 V 除之，则得：

$$\gamma = \rho g \text{ 或 } \rho = \frac{\gamma}{g} \quad (1-5)$$

g 的量纲为 $\frac{L}{T^2}$ ，其中 T 代表时间，故 ρ 的量纲为 $\frac{F/L^3}{L/T^2} = \frac{F \cdot T^2}{L^4}$ 。显然 ρ 的物理单位应当是达因·秒²/厘米⁴ = 克/厘米³（ $\because 1 \text{ 达因} = 1 \text{ 克} \cdot \text{厘米/秒}^2$ ），而 ρ 的工程单位则为公斤·秒²/米⁴。

表 1-1 列出了重度与密度的工程单位与物理单位，以及通过 1 克重 = 980 达因建立的换算关系。

冶金工程中常见的气体如空气、煤气等，都是各种气体的混合物。几种彼此不起化

表 1-1 重度与密度的工程单位、物理单位及其换算关系

工 程 单 位 物 理 单 位 换 算 关 系	重度 (F/L^3)	密度 ($F \cdot T^2/L^4$)
	公斤/米 ³	公斤·秒 ² /米 ⁴
	达因/厘米 ³	克/厘米 ³
	1公斤/米 ³ =0.98达因/厘米 ³	1公斤·秒 ² /米 ⁴ =9.81×10 ⁻³ 克/厘米 ³

学作用的液体也可以构成混合液体。混合流体的重度，可按其混合的百分比计算：

$$\gamma = 0.01(\gamma_1\alpha_1 + \gamma_2\alpha_2 + \dots + \gamma_n\alpha_n) \quad (1-6)$$

式中 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——混合流体各成份的重度；

$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ ——混合流体各成份之百分组成。

应当注意区别比重与重度两个概念：比重是物体重量与同体积水（4℃）的重量之比，故没有量纲。而重度是有量纲的。两者的工程单位在数值上也不同，如水的比重为1，而重度则为1000公斤/米³。

例 1-1 已知以工程单位计的流体密度 ρ 为100公斤·秒²/米⁴，求以工程单位计的重度及以物理单位计的重度和密度。

解： 由式1-5得工程单位计的重度：

$$\gamma = 100 \times 9.81 = 981 \text{ 公斤/米}^3.$$

又由表1-1知 1公斤·秒²/米⁴=9.81×10⁻³克/厘米³

流体的密度以物理单位计为：

$$100 \times 9.81 \times 10^{-3} = 0.981 \text{ 克/厘米}^3.$$

流体的重度以物理单位计为：

$$0.981 \times 981 = 962 \text{ 达因/厘米}^3.$$

2. 粘性 流体在其质点间作相对运动时产生阻力的性质，称为粘性。以圆管中流体运动为例，紧贴管壁的流体质点由于其与管壁的附着力大于其分子的内聚力，故其速度为零。离管壁愈远则管壁影响愈小，故速度愈大，形成如图1-1所示的速度分布。这说明流体层之间有相对运动存在。

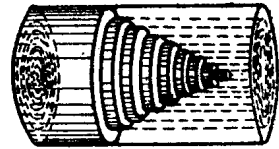


图 1-1 圆管中流体速度的分布

在这里需要从微观的角度来解释流体粘性产生的原因。由于流体有分子运动，因此两层流体在相对运动的过程中又有分子的相互掺混。速度慢的分子进入速度快的层中以后，其向前的动量要发生变化，这就需要快的一层给它一个向前的力，反过来就是它给快的一层一个向后的作用力；而速度快的分子进入慢的层中以后，又必然给慢的一层一个向前的作用力。这种快慢层间的相互作用力，结果表现为阻止两流体层作相对滑动的阻力。此外，两层流体间的分子引力也阻止其作相对滑动。故分子运动（不是质点运动）和分子引力是两层流体间产生切应力（摩擦力）的根源。同理，当流体质点间有分离运动时，分子运动和分子引力也必阻止质点间的相互分离，这就引起流体内部的拉应力。

这种切应力和拉应力都表现为粘性阻力（阻止流体相对运动），其产生的原因则是分子运动时产生的力和分子引力的作用，这就是粘性产生的物理本质。

粘性是流体运动时产生的阻力，因此维持流体运动必须消耗能量来克服粘性阻力，