



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

工程流体力学

侯 涛 陈明付 主 编
梁 倩 易祖耀 副主编

行动导向式



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

工程流体力学

主 编 侯 涛 陈明付
副主编 梁 倩 易祖耀
编 写 乔 凯
主 审 毛正孝 江文贱



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”职业教育国家规划教材。

全书分为四个学习项目，共十五个学习任务。通过对电力生产过程中流体设备和流动系统的分析，阐述了流体的物理性质、流体静压力的规律以及流体流动的基本规律等内容，着重介绍了流体稳定一元管流流动的基本规律，侧重工程实例和管道计算等方面的内容，同时对平面流动、气体动力学基础知识做了介绍。

本书可作为高职高专学校电厂热能力装置专业和火电厂集控运行专业的教材，也可作为电力职工大学、高等院校成人教育、函授等相应专业的教材，并可供有关专业技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

工程流体力学/侯涛，陈明付主编. —北京：中国电力出版社，2014.8

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978-7-5123-6134-8

I. ①工… II. ①侯…②陈… III. ①工程力学—流体力学—职业教育—教材 IV. ①TB126

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 144737 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 8 月第一版 2014 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 322 千字

定价 27.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前言

本书为贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020）》要求企业参与职业教育的文件精神，满足电力行业产业发展对高技术技能型人才的需求而编写。采用行动导向编写方式，为电力职业教育工程流体力学课程实现工学结合和理实一体教学模式起到支撑和载体的作用。同时，以编写规划教材为契机，总结、推广各校教学改革成果，进一步深化行动导向教学模式改革，促进“双师型”教师队伍和实训实习基地建设，实现“教、学、做”一体化，全面提升电力职业教育人才培养水平。

本书根据高等职业教育人才培养目标和电力行业人才需求，按照“项目导向、任务驱动、理实一体、突出特色”的原则，以岗位分析为基础，以课程标准为依据，充分体现高等职业教育教学规律。教材内容突出以能力培养为核心的教学理念，引入国家标准、行业标准和职业规范，科学合理设计学习项目和任务，充分考虑学生认知规律，充分体现任务驱动的特征，充分调动学生学习积极性。

本书对传统沿用多年的教材编写体系做出了重大调整，按照“项目导向、任务驱动”的原则，对内容重新进行了组织，设计了4个学习项目，共15个学习任务。学习项目中重点突出一元管道系统流动基本规律，以电力生产过程中典型流体设备和流动系统等的工作过程为学习任务，导入相关流体力学基础知识，弱化公式的理论分析与推导过程，强调知识在实践中的应用，通过任务的实施训练学生的基本技能。本书整体上降低了难度，与工程热力学课程协调，删去了气体一元管流基本方程和喷嘴流动等内容，增加了锅炉水动力计算、锅炉烟风系统通风计算以及水泵的扬程计算等工程问题的介绍，有助于学生理解和掌握工程中应用流体力学基本原理处理问题的方法。为了开阔学生视野，增加学习趣味性，培养科学素养，特别设计了“拓展知识”环节，介绍古今中外流体知识的智慧结晶和自然流体现象。

本书由郑州电力高等专科学校侯涛，福建电力职业技术学院陈明付担任主编，武汉电力职业技术学院梁倩，华电郑州机械设计研究院有限公司易祖耀担任副主编，郑州电力高等专科学校乔凯参加编写。项目一中任务一、项目三任务二、三、五及项目四由侯涛编写，项目二中任务一、三和项目三中任务一、六由陈明付编写，项目一中任务二、三由梁倩编写，项目三中任务四由易祖耀编写，项目二中任务二由乔凯编写，全书由侯涛统稿。

本书由国网技术学院泰山校区毛正孝老师和江西电力职业技术学院江文贱老师担任主审。两位审稿老师花费了大量时间精力从不同的侧面提出了很多宝贵的意见，毛正孝老师修订了本书的编写大纲，并提出了关于教材编写的指导意见，江文贱老师从篇幅剪裁、内容表述、文字校核等方面对全书做了细致严密的审核，编者感谢主审人对本书的仔细审阅及提出的宝贵意见。同时，本书在编写过程中参考了有关教材和文献资料，得到了其他院校老师和企业技术人员的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在缺点和不足之处，敬请读者不吝赐教。

编者

2014年2月

目 录

前言

项目一 电力生产过程中的流体力学	1
任务一 工程流体力学及其在电力生产过程中的应用	1
任务二 电力生产过程中常用流体的物理性质和力学模型	9
任务三 电力生产过程中流体的运动要素、研究方法和流动模型	27
思考题	44
习题	45
项目二 电力生产过程中不可压缩流体静压力的变化规律及应用	47
任务一 分析低压给水系统备用状态, 阐明不可压缩流体静压力的变化规律	47
任务二 连通器水位计、液柱式压力计、低压加热器水封疏水器等仪器、设备原理的分析与使用	62
任务三 作用在固体壁面上的不可压缩流体总静压力	75
思考题	81
习题	82
项目三 电力生产过程中流体一元定常流动压力、流速的变化规律及应用	90
任务一 分析负荷不变时凝结水系统运行状态, 阐明不可压缩流体一元定常流动流速、压力的变化规律	90
任务二 文丘里流量计、毕托管测速仪、喷射泵等仪器设备工作原理的分析与使用	104
任务三 分析水泵运行时的吸水管系统, 阐明管内流动阻力损失的规律及减少措施	114
任务四 管道水力计算	134
任务五 超声速气流中的激波	154
任务六 分析不可压缩流体流动时对弯管的作用, 阐明流体流速与壁面所受作用力间的变化规律及应用	161
思考题	169
习题	171
项目四 电力生产过程中流体的平面流动规律及应用	181
任务一 分析锅炉细煤粉分离器、旋风除尘器的工作原理, 阐明有旋流动的基本规律	181

任务二 流体绕流叶型、圆柱体、球体的阻力与升力分析与计算·····	189
任务三 锅炉燃烧器的自由淹没射流·····	201
思考题·····	204
习题·····	205
参考文献·····	206

项目一

电力生产过程中的流体力学

【项目描述】

本项目了解工程流体力学的研究内容、基本概念,通过认识火力发电、水力发电、风力发电等各种电力生产方式,以及火力发电的生产过程来了解工程流体力学在流体工程、特别是电力生产过程中的重要作用,认识电力生产过程中常用流体的物理性质,熟悉工程流体力学的研究内容、研究方法、流体的力学模型与流动模型,以及流体的运动要素等基本概念。

【教学目标】

能表述工程流体力学的研究内容、研究方法,说出电力生产过程中工程流体力学的作用,举出工程应用实例,能分析电力生产过程中常用流体的物理性质,能解释工程流体力学中流体的各种力学模型和流动模型,能分析流体的运动要素并进行简单计算。

【教学环境】

多媒体教室、流体实验室、仿真机房、模型室或利用理实一体化教室实施课程教学,需要火力发电厂的生产设备模型、热力系统图、设备技术参数。

任务一 工程流体力学及其在电力生产过程中的应用

【教学目标】

知识目标:

- (1) 了解工程流体力学的研究内容、研究方法。
- (2) 了解工程流体力学在电力生产过程中的作用。
- (3) 了解流体力学的发展历史和现状。
- (4) 了解流体力学在自然界、流体工程中的普遍应用。

能力目标:

- (1) 能表述工程流体力学的研究内容、研究方法。
- (2) 知道工程流体力学在流体工程,特别是电力生产过程中的作用。
- (3) 知道流体力学的发展历史。
- (4) 能说出工程流体力学在自然界或流体工程中的应用实例。
- (5) 知道工程流体力学的学习方法。

态度目标:

- (1) 能积极主动学习、独立思考、发现问题、分析问题、解决问题。
- (2) 以团队协作的方式,与小组成员共同完成本学习任务。

🔊【任务描述】

通过相关内容的录像、模型、图片及网络资源等了解各种电力生产方式，特别是火力发电生产过程，认识工程流体力学的研究内容、研究方法，了解工程流体力学在流体工程、特别是电力生产过程中的作用，并举出工程应用实例。了解流体力学的发展历史和现状，知道如何学习本课程。

👤【任务准备】

(1) 了解各种电力生产方式和火力发电生产过程，独立思考并回答下列问题：

- 1) 电力生产过程中有哪些流体介质？流体起什么作用？流体介质的状态如何？
- 2) 工程流体力学能解决电力生产过程中的哪些工程问题？

(2) 了解工程流体力学与各种力学如固体力学等的区别，课前复习相关内容，独立思考并回答下列问题：

- 1) 力学主要研究哪些内容？解决哪些问题？
- 2) 中学物理中的力学研究对象是什么？有哪些主要的力学规律？
- 3) 流体有哪些？流体有什么特点？与固体有何区别？
- 4) 流体力学与固体力学有何区别？

(3) 了解流体力学的发展历史和现状及其在自然界和工程中的应用，独立思考并回答下列问题：

- 1) 工程流体力学与流体力学有什么不同？
- 2) 流体力学在自然界或流体工程中有哪些应用？

🔧【任务实施】

(1) 通过了解电力生产方式和电力生产过程了解工程流体力学的学习意义。

1) 通过观看电力生产的视频，参观电力设备模型，教师讲解热力系统图、演示仿真运行等方法，了解电力生产方式和电力生产过程的特点，认识各种流体在电力生产过程中的状态和作用。

2) 学生分组讨论工程流体力学在电力生产过程中的作用，举出工程应用实例，总结电力生产过程中的常用流体介质，电力生产过程中的流体力学工程问题，以及流体力学在自然界和其他流体工程中的应用。

(2) 了解流体力学的发展历史和现状。

- 1) 分组学习，搜索网络资源，了解流体力学的发展历史。
- 2) 了解对流体力学做出重要贡献的中外科学家。
- 3) 了解流体力学的发展现状和分支学科及应用。
- 4) 撰写学习报告：流体力学发展与未来。

📖【相关知识】

知识一：电力生产过程中的流体力学

流体包括液体和气体，最具代表性的流体是水和空气，也是流体力学研究的主要对象。流体力学是研究流体运动规律及工程应用的科学。力学研究物体在受外力作用下的运动规律，如果物体不变形，属于理论力学研究范畴；若物体有轻微有限变形，是固体力学的研究对象；流体特别容易变形，由力学的分支学科——流体力学加以专门的研究。

流体力学研究宏观现象中的流体平衡、运动及流体与固体相互作用等的力学规律。流体

力学按研究对象的特点,通常有两个分支:一个是水力学,以水为代表的不可压缩流体(通常是液体)的运动规律;另一个是空气动力学,以极易被压缩的空气为代表的可压缩流体(一般指气体)的运动规律。工程流体力学侧重于工程技术中的流体力学问题及应用。

随着科学技术的发展和环保意识的增强,电力生产方式日益多元化,特别是新能源技术发展迅猛。电力生产过程各有其特点,但在绝大多数的电力生产方式中,都利用水、蒸汽、空气等流体作为工作介质,因为流体廉价、环保、流动性好,且气体易膨胀压缩,便于实现连续生产,所以被广泛应用于各种形式的动力循环中,通过流体的流动传输能量,转换能量,生产出电能,满足工业生产和生活的需要。

一、电力生产方式

按照利用能源的种类来分,电力生产方式主要有以下几种:

1. 火力发电

以煤、油、天然气等为燃料,加热水产生蒸汽,推动汽轮机旋转,带动发电机发电。

2. 水力发电

通常利用江河、水库中的水推动水轮机旋转,带动发电机发电。

3. 风力发电

以自然界的风驱动风车发电。

4. 核能发电

核燃料在反应堆中发生原子核裂变产生能量,加热水产生蒸汽,推动汽轮发电机组发电。

5. 太阳能发电

有两种方式,一是直接用光伏电池发电;另一种为太阳能热发电技术,即用太阳能加热水等介质,带动汽轮发电机组发电。

6. 地热发电

利用地下的热水或蒸汽等热源生产蒸汽,带动汽轮发电机组发电。

7. 潮汐发电

潮汐发电是一种水力发电的形式,利用潮汐水流的移动或潮汐海面的升降,推动水轮机旋转,带动发电机发电。

8. 生物质发电

利用农业、林业和工业废弃料,如秸秆、沼气等,直接燃烧或气化的方式发电。

9. 磁流体发电

将燃料(石油、天然气、燃煤等)直接加热成易于电离的气体,极高温并高度电离的气体高速流经强磁场直接发电。

可以看出,各种电力生产方式中,利用最多的流体介质是水、蒸汽、空气等,不同的流体介质通过参与燃烧吸收热量,在原动机中转换为机械能,或者流体直接推动原动机旋转,最后在发电机中产生电能。流体的性质及运动规律对电能的生产方式和生产过程有着重要的作用和意义,许多电力生产方式,典型的如风力发电、水力发电都是直接利用流体的力学性质完成电能的生产。

二、火力发电生产过程

在最常见的火力发电生产过程中,发电过程以蒸汽的动力循环为基础完成电能的持续生

成。动力循环中以水为工作介质，水在锅炉中吸热变成高温高压的蒸汽，蒸汽进入汽轮机内膨胀做功，推动汽轮机旋转，汽轮机旋转带动发电机发电，做功后的乏汽排入凝汽器中放热凝结成水，水经给水泵升压，高压水重新回到锅炉吸热。这样的过程周而复始就称为动力循环（也叫热力循环），简称循环。当循环完成后，工质回复到了原来的初始状态，再按相同的过程重复进行循环，就可以连续不断地对外输出电能。

完成这个电力生产的循环需要许多设备和系统的共同工作。下面以燃煤电厂为例介绍火力发电生产过程（见图 1-1）。

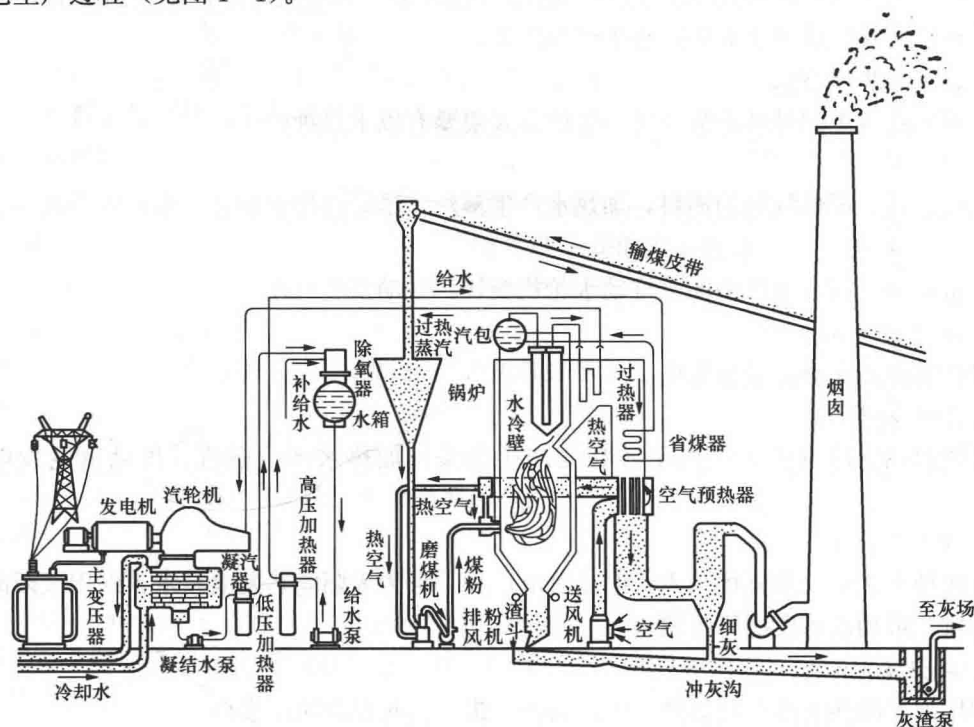


图 1-1 火力发电生产过程

1. 运煤系统

利用各种运输工具（火车、汽车、轮船等）将电煤从产区运往发电厂的储煤场，再根据燃烧需要用输煤皮带送至锅炉的原煤仓。

2. 制粉系统

为了尽快燃烧，提高燃烧效率，将煤磨制成煤粉后再送入锅炉燃烧。首先送风机将冷空气送入空气预热器加热，经热风道输送到制粉系统中，一部分热空气先干燥原煤，再把磨煤机内磨制的煤粉送往燃烧设备燃烧，另一部分热空气直接进入燃烧设备提供燃烧所需的空气。

3. 燃烧系统

制粉系统送到燃烧设备的风粉混合物和热空气在锅炉的炉膛内燃烧，生成高温烟气，在引风机的作用下，沿锅炉本体烟道依次流经炉膛、过热器、再热器、省煤器和空气预热器，同时将热量传递给水、蒸汽和空气。然后经除尘器、脱硫装置净化后，经引风机送入烟囱排出。锅炉的炉渣和除尘器下部的细灰用水由灰浆泵排到灰场。

4. 汽水系统

给水由给水泵加压后经给水管道进入省煤器,利用烟气余热吸收热量后进入汽包,经下降管进入水冷壁,吸收炉内燃烧生成的热量后,部分变成水蒸气。水冷壁内的汽水混合物再次进入汽包,经汽水分离器分离,蒸汽引出后进入过热器继续加热,水重新进入下降管,进行循环流动。

从过热器出来的合格蒸汽经蒸汽管道引入汽轮机内进行膨胀做功。通常过热蒸汽先在高压缸膨胀做功,排汽经管道送回锅炉,在再热器中重新加热后,引入汽轮机的中、低压缸继续膨胀做功,蒸汽推动汽轮机旋转,带动与汽轮机同轴相连的发电机一起旋转,发出交流电。

汽轮机排出的乏汽进入凝汽器,经循环水泵打入的循环冷却水将其冷凝成凝结水,凝结水经凝结水泵加压后,送入低压加热器加热,再经除氧器除氧后,经给水泵加压送入高压加热器加热,重新进入省煤器,自此完成一次热力循环,并且开始下一次循环。如此连续不断地循环往复,持续生产电能。汽轮机、发电机及泵与风机等转动设备的润滑油来自油系统。

5. 电气系统

发电机生产的交流电经主变压器升压后,经高压配电装置由输电线路向用户供电。其中,一部分由厂用变压器降压后,供电厂泵与风机等辅助设备用电,即厂用电。

电力生产的实质是能量的转换,由燃料的化学能经燃烧变为热能,热能依次传递给烟气、水、蒸汽、空气,蒸汽在汽轮机内将热能转换为动能并传递给汽轮机转子,汽轮机转子将动能传递给发电机转子,进而切割磁力线产生电能。一系列能量的转换中流体作为能量的载体在各种设备和系统中循环流动,例如,磨制的煤粉由热空气输送进入炉膛燃烧,燃烧生成的高温烟气沿烟道流动,将热量传递给过热器、再热器、省煤器和空气预热器,送入锅炉的给水经省煤器吸收热量后,在水冷壁内继续吸热变为水蒸气,蒸汽在过热器、再热器内吸热变为过热蒸汽,过热蒸汽进入汽轮机,先膨胀加速,再推动汽轮机旋转,这样通过流体进行传热、功能转换最终实现电能的生产。

三、工程流体力学在电力生产工程中的应用

在电力生产过程中,各种热力设备和管道系统内的主要工作介质是水、蒸汽、空气、烟气、油等流体。维持流体的正常流动是能量转换的基本前提。流体的物理性质、流动特点和能量转换都直接影响电力生产的各个环节。锅炉、汽轮机及附属系统中流体设备的结构、热力系统的建立及管道的连接,均建立在对工程流体力学规律的深入理解和运用上。

例如,锅炉自然水循环以流体静力学为工作原理,要保证自然水循环的正常流动需要进行正确的水(动)力计算,锅炉烟风系统的设计需要进行通风计算。而汽轮机是以蒸汽绕流叶栅产生升力的基本原理来工作的。热力循环中所有管道系统的循环流动都建立在应用连续方程、伯努利方程等的管道水力计算基础之上。热力系统中维持流体流动的主要是各系统中的泵与风机,泵与风机是为流体流动提供动力的,其设置合理与否,关键在于对所在流体系统进行正确的管道水力计算。如果应用工程流体力学的流动规律来设计或改造流体管道系统,可以有效控制流动中的能量损失,提高流动效率,降低泵与风机电耗,节约生产成本。这也是电力生产“节能降耗”的主要途径之一。

热力设备和管道系统中流体的压力、流量等参数直接反映了系统运行状态,是运行监控和事故处理的重要依据,要及时准确地进行自动控制和调节。表1-1是我国常用机组锅炉

的部分技术参数，这些重要的运行参数由热工测量仪表进行测量与计算。而许多热工测量仪表如文丘里流量计、毕托管测速仪、液柱式测压计、水位计等也是按照流体力学原理设计制造的，仪表的布置安装和控制系统的逻辑均需建立在流体力学知识的基础之上。因此，只有掌握了流体的基本运动规律，才能真正了解流体设备和热力系统的性能和运行规律，继而进行正确的设计和运行管理，从而保障电力生产过程安全、经济、节能、环保。

表 1-1 我国常用机组锅炉部分技术参数

机组功率 (MW)	300	600	1000
过热蒸汽流量 (t/h)	1025	1900	2953
过热蒸汽压力 (MPa)	18.2	25.4	27.56
再热蒸汽流量 (t/h)	860	1607.6	2457
再热蒸汽压力 (MPa)	4.00/3.79	4.71/4.52	6.0/5.8

应该特别指出的是，虽然本教材以电力生产过程为主要对象研究工程流体力学的基本概念和规律，但是，流体力学的基本概念和规律是普遍适用的，各种流体工程及自然界的流体现象都遵循同样的力学规律。

知识二：流体力学发展历史

流体力学是随着人类追求文明和科学进步而不断发展成熟起来的。

在人类早期，文明的孕育与河流密不可分。古人在傍水而生的过程中，观察总结了河流的四季变化，形成了最早的人类智慧。距今五千年前古埃及人就掌握了尼罗河定期泛滥的规律，他们修建河坝，用水位测量标尺测量季节性洪水，依据洪水的水位预测出当年庄稼的收成，以此来确定相应的征税金额。可以说正是通过对尼罗河的认识和利用，古埃及人建立了灿烂辉煌的古埃及文明。两河流域的古巴比伦（今伊拉克）颁布的著名《汉谟拉比法典》（约公元前 18 世纪）中有许多关于灌溉、水权的明确规定。古代中国大禹治水的故事流传至今，春秋战国和秦朝时修建了都江堰、郑国渠和灵渠三大著名水利工程。

最早对流体力学做出研究的是古希腊的数学家、物理学家阿基米德，他在公元前 250 年撰写的《论浮体》中，通过严密的数学推理建立了包括浮力定律和浮体定常性在内的液体平衡理论，奠定了流体静力学的基础。此后千余年间，流体力学没有重大发展。

14 世纪伟大的文艺复兴运动兴起，开启了科学与艺术的革命时期，近代科学孕育而生。意大利著名画家、物理学家达·芬奇（15 世纪）比较系统地研究了沉浮、孔口出流、物体运动阻力、流体在管道和水渠中的流动问题，在他的著作中还谈到水力机械、鸟的飞翔原理等问题。此后，流体力学开始了快速发展。17 世纪，帕斯卡阐明了静止流体中关于压力的帕斯卡原理。伽利略建立了沉浮的基本理论。力学奠基人牛顿研究了在流体中运动的物体所受到的阻力，得到阻力与流体密度、物体迎风截面积以及运动速度的平方成正比的关系。他通过实验验证了黏性流体运动时的内摩擦力，提出了牛顿内摩擦定律。

从 17 世纪到 20 世纪流体力学不断进步，逐步形成了流体力学的理论分析和实验研究两大发展方向。理论分析的基本方法是忽略实际流体运动时的次要影响因素，将流体视为理想流体，建立抽象的数学模型，应用数学推导的方法得出结论。瑞士的数学家、物理学家欧拉是理论流体力学的奠基者，他在数学上著述颇丰，并将数学方法引入力学研究，用欧拉法研究了运动流体，建立了欧拉方程，并用微分方程组描述了无黏流体（理想流体）的运动，奠

定了理想流体的运动理论基础。在欧拉、拉格朗日等科学家的共同努力下，建立起以数学推理为基础的理论流体力学，理论分析的研究方法日趋成熟。但是，由于流体运动的复杂性，理论分析得出的结论并不与实际情况完全相符，无法指导实践活动。用以弥补不足的实验研究的方法逐渐兴起，人们经过大量的实验研究和实践，总结出了许多经验和半经验公式，用来解决生产实践中的各种问题，这样建立起了以实验研究为基础的实用水力学。其中最著名的是伯努利方程，这是瑞士著名科学家伯努利将牛顿力学引入流体力学的研究，从经典力学的能量守恒观点出发，通过实验研究分析得到的。1738年伯努利出版了《流体动力学》。欧拉方程和伯努利方程的建立，是流体动力学作为一个分支学科建立的标志。19世纪末又出现了对空气动力学的研究，德国物理学家普朗特通过实验观察发现了边界层的存在，提出边界层理论，他还分别在风洞实验技术、机翼理论、紊流理论等方面做出突出贡献，被誉为空气动力学之父，是现代流体力学的创始人之一。20世纪50年代，水力学与空气动力学并入统一的流体力学。当代，随着科学技术的进步，流体理论的发展和实验技术的完善，理论流体力学与实用水力学不断结合，使工程流体力学发展成为一门应用科学。

20世纪以来，随着计算机技术的突飞猛进，各科学和技术领域获得了前所未有的发展，以前很多人力无法计算和处理的复杂方程得以顺利解决，复杂多变的流体运动可以实现计算机模拟和研究，以计算机计算为基础的数值计算技术得到飞速发展。流体力学中的数值计算已成为继理论分析和实验研究之后的第三种重要的研究方法，在求解流体力学的问题中得到了越来越广泛的应用。由此出现一个新的分支学科——计算流体力学，大到星际爆炸、飓风肆虐、大洋环流、火山爆发、油轮和客机航行，小到浮游生物游动、心血管流态都可以通过计算机模拟出来。

纵观流体力学的发展历史，流体力学的研究方法随着科学技术生产力的发展不断演进。现场观测、理论分析、实验研究、数值计算仍然是当今流体力学的重要研究方法。科学与技术总是相辅相成、互为促进，流体力学作为各种流体工程中最重要基础学科，在科学技术高速发展的现代，出现了许多新兴分支学科，如电磁流体力学、环境流体力学、生物流体力学、多相流体力学、物理—化学流体力学、非牛顿流体力学、高速气体动力学、稀薄气体动力学，等等，在航空航天、宇宙探索、现代医学、环境保护、海洋、气象、化工、能源等领域发挥日益重要的作用。

【拓展知识】

都江堰水利工程

都江堰水利工程[见图1-2(a)]位于长江支流岷江的上游，是公元前256年战国时期秦国蜀郡太守李冰主持修建的一座大型水利工程，是世界上修建最早、至今仍发挥着巨大效益的水利工程。

李冰总结蜀人治水的经验，精心选址都江堰，因为都江堰位于成都平原的顶部，是整个都江堰灌溉区的制高点。岷江流至此处，地势由高山峡谷变为平原，河床变宽，水势趋缓，是设置渠首枢纽的最佳位置。都江堰既可扼制住刚出峡谷的岷江水势，使其不能直泻成都平原，又可因地势高而控灌整个都江堰灌溉区。这项工程主体由鱼嘴分水堤、飞沙堰溢洪道、宝瓶口进水口三大部分构成，如图1-2(b)所示，它们的位置、结构、尺寸、方向等的设计，与岷江的河势、周围的地理条件、上游的来水来沙条件等巧妙结合，彼此之间互为依存、互相关联、互相协作，形成浑然天成的系统工程，科学地解决了江水自动分流、自动排



图 1-2 都江堰水利工程

(a) 全景图; (b) 示意图

沙、控制进水流量等问题。

鱼嘴分水堤的设置极为巧妙，它利用地形、地势，巧妙地完成分流引水的任务，鱼嘴将岷江水流一分为二，外江是原河道，内江水经人工造渠引入成都平原，既可以分洪减灾，又达到了引水灌溉、变害为利的目的。在洪、枯水季节不同水位条件下，起着自动调节水量的作用。

鱼嘴前方的岷江江面狭窄，江水流向因而受到控制。枯水季节时，天然江心洲露出水面，主流被挑向右岸，沿百丈堤下泄直趋内江，形成枯水季节内江分六成、外江分四成的天然倒四、六分流，可以保证灌溉用水。为了不让外江 40% 的流量白白浪费，聪明的先人采用杓搓截流的办法，拦截外江水入内江，使内江灌区用水更加可靠。洪水季节时，水位没过天然江心洲，岷江主流取直，趋向外江，形成洪水季节内江分四成、外江分六成的天然四、六分流，使灌区不受水灾影响。现在，在鱼嘴的外江河道已建成一座钢筋混凝土结构的大坝，代替过去临时杓搓工程，截流排洪更加灵活可靠。

飞沙堰溢洪道因具有泄洪排砂的显著功能而得名。一方面，飞沙堰的作用是当内江水量过大时，多余的水便从飞沙堰（飞沙堰的高度只超过内江河床 2.15m）自行溢出；如果遇到特大洪水，它还会自行溃堤，让大量江水回归岷江正流。另一方面的作用就是“飞沙”，内江进口处于微弯河段的凹岸，飞沙堰位于内江弯道的下段。水流进入内江以后，在弯道环流离心力作用下，底部水流的流向指向飞沙堰，底流横向越过堰顶，将泥沙、石块带到外江，表层水流与堰顶平行而流向内江下游，形成堰顶溢流时底部流量大、上部流量小的特殊流态，在中等流量的需水季节，用较少的水量排走进入内江的大部分卵石和泥沙。飞沙堰的排沙作用随泄流量的增加而增强。洪水越大，飞沙堰的分流比越高，排沙效果越显著。

宝瓶口进水口是人工开凿用来控制内江的进水流量的，因形似瓶口且功能奇特而得名。宝瓶口的宽度和底高都有极严格的控制，古人在岩壁上刻了几十条分划，取名“水则”，这是中国最早的水位标尺。内江水流进宝瓶口后，通过干渠经节制闸，把江水一分为二。再经下一道闸二分为四，依西北高、东南低的地势，一分再分，形成自流灌溉渠系，灌溉成都平原。

两千年来,都江堰水利工程历经多次修复,始终发挥作用,以“历史跨度大、工程规模大、科技含量大、灌区范围大、社会经济效益大”的特点享誉中外、名播遐方,其中蕴含的系统工程学、流体力学等知识,在今天仍处在当代科技的前沿,普遍受到推崇,然而这些科学原理,早在两千多年前的都江堰水利工程中就被勤劳的中国人民运用于实践了。这是中华古代文明的象征,是我们智慧的先人留给世界的财富。

任务二 电力生产过程中常用流体的物理性质和力学模型

🔊【教学目标】

知识目标:

- (1) 掌握电力生产过程中常用流体介质的基本物理性质,包括密度、压缩性与膨胀性、黏性。
- (2) 理解表面张力的含义。
- (3) 掌握流体受力分析的方法。
- (4) 理解流体的基本力学模型,包括流场连续性假定、理想流体与实际流体、不可压缩流体与可压缩流体、牛顿流体与非牛顿流体。

能力目标:

- (1) 能进行流体密度的计算。
- (2) 说出压缩系数、膨胀系数的概念和特点,能进行液体与气体压缩性、膨胀性的定量分析。
- (3) 能解释黏性的概念,应用牛顿内摩擦定律计算黏性系数与黏性力,分析黏度系数的物理意义、特点和影响因素并应用于工程问题。
- (4) 能对作用在流体上的力进行分析和推导。
- (5) 阐述流体基本力学模型引入的目的及其含义。

态度目标:

- (1) 能积极主动学习、独立思考、发现问题、分析问题、解决问题。
- (2) 以团队协作的方式,与小组成员共同完成本学习任务。

🗣️【任务描述】

通过对电力生产过程中常用流体介质基本物理性质、作用在流体上的力和流体基本力学模型的学习,能掌握和区别水、空气、油等电厂典型流体介质的物理性质,能对流体受力情况进行分析,能对锅炉、汽轮机等热力设备中流体介质的力学模型进行分析。

👤【任务准备】

- (1) 了解电力生产过程中常用到的流体介质。
- (2) 复习中学物理中有关的力学知识,课前预习流体物理性质等相关内容,独立思考并回答下列问题:
 - 1) 如何从力学角度区别固体与流体?
 - 2) 电力生产过程中常用到的流体介质有哪些?
 - 3) 中学物理中研究过哪些与力学相关的固体的物理性质?
 - 4) 流体的基本物理性质包含哪些内容?其中哪些物理性质与力学相关?

5) 黏性对流体的影响是什么?

6) 固体受力分析方法是什么? 作用在流体上的力分为哪几类? 各自有什么特点?

7) 常用的流体基本力学模型有哪些?

【任务实施】

(1) 观看电力生产过程的录像, 了解各种流体力工质在热力循环中所起到的作用及其性质, 并分组讨论学习。

(2) 学习电力生产过程中常用流体介质的基本物理性质, 了解作用在流体上的力, 认识流体基本力学模型。

(3) 以学生自荐或教师指定的方式选择 1~2 组, 对本次任务进行总结汇报。

【相关知识】

知识一: 电力生产过程中常用的流体介质

我们知道固体有固定的形状, 受到切向力作用时, 只有力足够大, 才会产生某种程度的变形, 固体变形的大小与作用力大小有关, 作用力越大, 变形越大。流体没有一定的形状, 而且不能抵抗切向力的作用, 也就是说, 任何微小的切向力都会使流体发生连续变形, 外力停止作用, 变形才会消失。这种持续的变形就是我们看到的流动。流体这种极易变形的性质叫作流动性。从力学的角度看, 流体是一种受任何微小切向力作用都会产生连续变形的物质。由于液体与气体内部的微观结构不同, 二者的流动性也有差别, 通常液体在流动时体积不变, 气体则总是充满流动的空间。

通过前一个学习任务, 我们了解到电力生产方式多种多样, 在绝大多数的电力生产方式中, 都利用水、蒸汽、空气等常见流体作为工作介质, 利用流体的流动性传输能量、转换能量, 实现连续生产电能。

在电力生产过程中, 流体全面参与了各生产环节的工作。以前面介绍的火力发电生产过程为例, 蒸汽动力循环以水和水蒸气为工作介质, 空气主要参与燃烧和煤粉的输送, 燃烧生成的烟气将热量依次传递给各受热面。在运转设备中还离不开油这种介质, 油主要在锅炉点火、轴承润滑、液压控制等方面使用。由于循环系统的复杂性和热力设备各有其技术规范, 流体在其中处于各种物理状态, 水从未饱和状态到饱和状态, 再蒸发为水蒸气, 由饱和蒸汽加热到过热蒸汽。电厂用油根据不同的用途, 可以有燃料油、绝缘油、润滑油等多种油类。不同种类的流体物理性质有所不同, 即使是同种流体, 在不同环境条件下, 物理性质也会发生变化, 其中, 如密度、黏度、膨胀系数、弹性系数等物理性质与力学和运动有密切的关系。以油为例, 入厂的新油和使用一定时期的油均需对其多种物理指标进行检验, 以确保油在使用中符合各自用途的要求, 特别是油的黏度对其工作状态有重要影响。黏度也是流体力学中流体运动的主要影响因素之一。电力生产过程中除了水、蒸汽、空气、烟气、油等大量使用的流体介质外, 还会有氢气、氮气、二氧化碳等多种流体。

流体与固体一样, 均是在外力作用下保持平衡或产生运动。从牛顿定律等基本力学规律可知, 固体的密度、质量等物理性质深刻影响着固体受力与运动的关系。流体也是如此, 而且由于流体形状不固定、很容易变形流动, 其运动规律更加复杂, 至今仍有许多流动现象与流动问题有待解释, 但是有一点, 不管固体还是流体, 在本质上都遵循共同的力学规律, 只不过流体运动的表现形式比较复杂, 研究起来更加困难。在研究流体的力学规律前, 首先要了解流体的基本物理性质, 在研究流体平衡或机械运动的内部因素之后, 再来分析作用在流

体上的力,因为力是使流体运动状态发生变化的外因。鉴于实际流动现象的复杂性,流体力学在研究每一个具体物理过程中,往往不是一开始就把所有的内在因素全部考虑进去,而是抓住影响问题本质的最基本因素,忽略一些次要因素,先建立理想的物理模型,进行理论上的分析及数学推理,然后再考虑次要因素,通过实验等手段对结果进行逐步修正。

知识二:流体的基本物理性质

这里只介绍与力和运动相关的流体物理性质,主要有:密度、压缩性和膨胀性、黏性及表面张力。

一、密度

(一) 密度的定义

惯性是物体维持原有运动状态的能力的性质,表征某一流体惯性的大小除了可用质量外,习惯上常用流体的密度来比较不同流体的惯性。单位体积流体的质量称为流体的密度,以 ρ 表示,其单位为 kg/m^3 。

如果流体是均质的,即流体各点密度相同,其密度 ρ 表示为

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——该质量流体的体积, m^3 。

对于非均质流体,流体各点的密度不完全相同。如图 1-3 所示,在流体中取一个流体微团 A,其微元体积为 ΔV ,微元质量为 Δm 。当微元体无限小而趋近 $P(x, y, z)$ 点成为一个流体质点时,流体中该质点的密度为

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——某点流体的密度;

Δm ——微小体积 ΔV 内的流体质量;

ΔV ——包含该点在内的流体体积。

密度 ρ 的倒数即是流体的比容,又称比体积,也就是单位质量流体所占据的空间体积,以 v 表示,单位为 m^3/kg ,可表示为

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

(二) 影响流体密度的因素

1. 流体的种类

密度是流体的物性参数。不同流体的密度是不相同的,表 1-2 给出了几种常见流体的密度。

从表 1-2 可以看到,不同流体的密度差别很大。液体的密度比气体的密度大得多,因此克服液体的惯性改变流体状态所需的力要比气体大很多,所以输送液体比输送气体更耗能。在气液共存的同一容器或管路之中,气体的质量往往可以忽略不计。

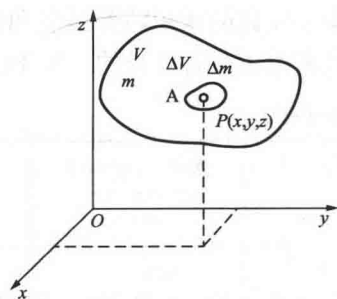


图 1-3 流体密度示意图