

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



FADIANCHANG DONGLISHEBEI

发电厂动力设备

(第二版)

易大贤 主 编
陶 玲 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材 (高职高专教育)
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



FADIANCHANG DONGLISHEBEI
发电厂动力设备
(第二版)

主 编 易大贤
副主编 陶 玲
编 写 王 华
主 审 田金玉



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

内 容 提 要

本书以 300、600MW 机组及热力系统为主,以发电厂能量转换过程为中心,着重介绍国产设备及其系统,并结合超临界和超超临界参数机组的设备和系统介绍了国内当前的一些新技术和新设备。主要内容包括水力学基本原理、热工学理论基础、锅炉设备、汽轮机设备、核电厂及水力发电厂的基本知识等。在编写过程中基本贯彻少而精的原则,在内容上注重理论联系实际,力求深入浅出,通俗易懂。

本书可作为高职高专电力技术类专业学生学习发电厂生产过程的基本原理和设备的必修教材,也可作为电厂运行人员培训教材,并可供相关科技人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

发电厂动力设备/易大贤主编. —2 版. —北京:中国电力出版社,2008

普通高等教育“十一五”规划教材. 高职高专教育
ISBN 978-7-5083-6799-6

I. 发… II. 易… III. 发电厂-动力装置-高等学校:技术学校-教材 IV. TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 024960 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1995 年 5 月第一版

2008 年 5 月第二版 2008 年 5 月北京第十一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 17.5 印张 421 千字 1 插图

定价 28.00 元

敬 告 读 者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失

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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制定了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型学校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

根据高职高专院校对发电厂动力设备课程的要求,结合编者多年的教学实践并广泛吸取国内外教材的优点,联系近年来我国电力工业的迅猛发展、设备更新换代快的实际情况,对第一版的内容进行了精选、重组。考虑到电力工业今后的发展前景,本书以300、600MW火力发电机组及热力系统为主,增加了电力技术最新的成果,例如:介绍了超临界和超超临界压力机组热力系统和有关设备;介绍了引进的900MW和1000MW核电厂二回路原则性热力系统;简述了世界上目前单机容量最大的700MW水力发电机组及其辅助设备的特点;推荐了一些治理环境污染的措施,如脱硫装置、脱氮方法和脱硝技术;新增加了第七章发电厂中的泵与风机;根据火电厂实际运行情况新绘制了制粉系统图,使系统图耳目一新;还在编写工程流体力学、热力学、传热学经典理论时,紧密结合电厂现场实际,介绍了这些理论在发电厂中的实际应用等。虽然是修订,但在内容上以新编为主,并将书的结构和系统作了较大的变动,增加了先进性,提高了可读性,加强了知识的应用性。在文字表达上,力求深入浅出,通俗易懂。

本书紧紧围绕培养电力高等技术型、应用型、实用型人才的目标,注重以应用为目的,以够用为适度,做到基本理论准确,基本概念清楚,密切联系电力工程实际,培养学生分析问题、解决问题的能力,立足广大学生知识面的扩宽和应用能力的培养。为了便于读者分阶段巩固所学知识,每章后都附有一定量的思考题及习题。

本书主要作为电力高职高专院校的学历教育教学用书,还可以作为电力类大、中专职业教育教材,也可作为技术人员和技术工人参考用书。由于在本书篇章的划分上,各章具有一定的独立性,编排模块化,可以根据培训需要任意组合,增强了教材使用的灵活性,因此本书亦可适用于发电厂订单式培训教材。

本书由安徽电气工程职业技术学院易大贤主编,并编写绪论,第二、五~八章;安徽电气工程职业技术学院陶玲副主编,并编写第一、九、十章;安徽电气工程职业技术学院王华编写第三、四章。全书由西安电力高等专科学校田金玉主审,编者由衷地感激主审在仔细审阅中提出的宝贵意见和建议。

感谢读者对本书的厚爱,虽然编者进行了艰苦的努力,但是书中仍难免有不妥之处。诚恳希望广大读者及时批评指正,或对其中某些内容进行探讨。

在此再版之际,对帮助过本书出版工作的老师和同志一并表示衷心感谢。

编者

2007年11月

目 录

前言

绪论 1

第一篇 理论基础知识

第一章 工程流体力学基本理论知识 5

第一节 流体的主要物理性质 5

第二节 流体静力学基本理论知识 6

第三节 流体动力学基本理论知识 14

第四节 流体的流动损失和有压流 23

思考题及习题 29

第二章 热力学基本定律 31

第一节 工质及其状态参数 31

第二节 理想气体及其状态方程式 34

第三节 热力学第一定律 35

第四节 稳定流动能量方程式及其应用 39

第五节 热力学第二定律 40

思考题及习题 42

第三章 热力学蒸汽动力循环 44

第一节 水蒸气的形成过程 44

第二节 水蒸气表及 t - s 图 48

第三节 水蒸气的流动 49

第四节 水蒸气的动力循环 55

思考题及习题 63

第四章 传热学基本理论知识 65

第一节 导热 65

第二节 对流换热 70

第三节 辐射换热 72

第四节 传热 77

第五节 换热器 78

第六节 发电厂电气设备中的传热现象 80

思考题及习题 82

第二篇 热力发电厂动力设备

第五章 电厂锅炉 84

第一节 概述	84
第二节 锅炉燃烧系统及其设备	87
第三节 锅炉汽水系统及其设备	109
第四节 锅炉热平衡	122
第五节 输煤系统、除尘及除灰系统	125
思考题及习题	131
第六章 汽轮机及其辅助设备	133
第一节 概述	133
第二节 汽轮机的基本原理及主要结构	134
第三节 汽轮机的调节	151
第四节 汽轮机的主要辅助设备	164
思考题及习题	171
第七章 发电厂中的泵与风机	172
第一节 概述	172
第二节 泵与风机的工作原理	173
第三节 离心式泵与风机的结构	175
第四节 水泵的汽蚀	179
第五节 发电厂常用的泵与风机	180
思考题及习题	189
第八章 发电厂热力系统及主要技术经济指标	190
第一节 发电厂热力系统	190
第二节 火力发电厂的主要技术经济指标	202
思考题及习题	205
第九章 核电厂的基本知识	206
第一节 概述	206
第二节 压水堆核电厂的基本原理	208
思考题及习题	214

第三篇 水电厂动力设备

第十章 水力发电厂	215
第一节 水力发电的基本原理	215
第二节 水电厂的类型	217
第三节 水电厂的水工建筑物	221
第四节 水轮机	227
第五节 水轮机的调速系统	246
第六节 水电厂的主要辅助设备及系统	248
思考题及习题	251
附录	253
附表1 压力单位换算	253
附表2 常用能量单位的互换常数	253

附表 3 饱和水与饱和蒸汽性质表（按温度排列） 253

附表 4 饱和水与饱和蒸汽性质表（按压力排列） 254

附表 5 未饱和水与过热蒸汽性质表 257

参考文献 269

绪 论

一、电力工业在国民经济中的地位与作用

电力工业是能源工业中的支柱产业,是国民经济的重要基础工业。电力工业的规模与发展水平是衡量国民经济发展和综合国力的一个重要标志。早在 20 世纪 50 年代初我国就确立了电力工业先行的地位。从新中国成立到现在已经五十多年了,凡是电力生产增长速度快的年代,国民经济发展速度就快。电力工业发展制约着工农业生产的发展。

我国 1949 年发电装机容量只有 184.9 万 kW,居世界第 21 位,年发电量 43.1 亿 kW·h,居世界第 25 位。经过几十年的迅速发展,特别是 1978 年以来,改革开放,使我国电力工业得到迅速发展,取得了辉煌的成就。到 2006 年末,全国发电设备装机容量已达到 6.22 亿 kW,是 1949 年的 336 倍;全国年发电量达 28344 亿 kW·h,是 1949 年的 658 倍。全国发电设备装机容量和年发电量都仅次于美国,跃居世界第二位。

二、火力发电厂的基本生产过程

图 0-1 为火力发电厂基本生产过程示意图。它的主要系统包括燃料系统、燃烧系统、汽水系统和电气系统。从能量转换的观点来看,在锅炉中燃料的化学能转变为蒸汽的热能;在汽轮机中蒸汽的热能转变为机械能;在发电机中机械能转变为电能。

燃料、燃烧系统包括输煤系统,煤粉制备系统,烟风系统和除尘、除灰系统等。由火车或轮船运到发电厂储煤场的煤,经过碎煤设备破碎后,再用皮带输送机送入锅炉房内的原煤仓。煤从原煤仓落入给煤机,由给煤机送入磨煤机,并将煤磨制成煤粉,同时送入热空气来干燥和输送煤粉。磨制好的煤粉经粗粉分离器将不合格的粗粉分离除去后再进入旋风分离器,在其中将空气和煤粉进行分离,旋风分离器中的空气由排粉机抽出。分离出来的细煤粉进入煤粉仓,再由给粉机送入输粉管,并在其中与空气混合,由燃烧器喷入炉膛内进行燃烧。由送风机送来的空气,先在空气预热器中进行预热,提高空气温度后再进入炉膛以改善燃烧过程。

炉膛内的燃烧产物——高温烟气在引风机的抽风作用下,依次流过炉膛、过热器、省煤器和空气预热器,将热量逐步传递给水、蒸汽和空气。降温后的烟气再流入除尘器进行净化,分离出来的灰粒通过灰沟排走,净化除尘后的烟气被引风机抽走,经烟囱排入大气。

燃料燃烧时从炉膛内落下的灰渣、从尾部烟道落入空气预热器下面灰斗中的飞灰,还有从除尘器分离下来的飞灰,可以用水冲入灰渣沟中流到灰渣泵房,再用灰渣泵将其送到贮灰场。

火力发电厂的汽水系统是由锅炉、汽轮机、凝汽器、水泵、加热器及其管道组成。锅炉给水先在省煤器中接受烟气的预热,然后引入在锅炉顶部的汽包,经容水空间沿下降管流到下联箱,再进入布置在炉膛四周的水冷壁管,水在其中吸热并部分汽化,形成汽水混合物上升到汽包内。水不断在下降管、水冷壁管及汽包内循环,不断汽化。将聚集在汽包上部的饱和蒸汽引入过热器继续加热变为过热蒸汽,通过主蒸汽管道进入汽轮机,推动汽轮机转子转动,将热能转变为机械能。

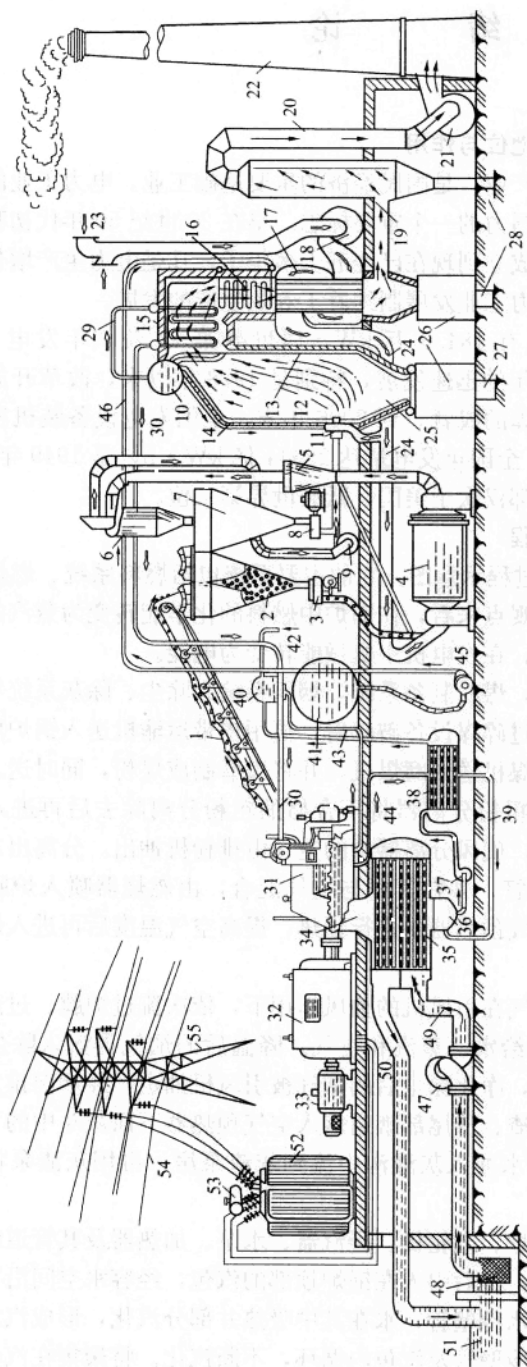


图 0-1 火力发电厂基本生产过程示意图

1—运煤皮带；2—原煤仓；3—圆盘给煤机；4—铜球磨煤机；5—粗粉分离器；6—旋风分离器；7—煤粉仓；8—给粉机；9—排粉机；10—汽包；11—燃烧器；12—炉膛；13—水冷壁；14—下降管；15—过热器；16—省煤器；17—空气预热器；18—送风机；19—除尘器；20—烟道；21—引风机；22—烟囱；23—送风机的吸风口；24—热风道；25—冷灰斗；26—除灰设备；27—冲渣沟；28—冲灰沟；29—空气预热器；30—主蒸汽管；31—汽轮机；32—发电机；33—励磁机；34—乏汽口；35—凝汽器；36—热井；37—凝结水泵；38—低压加热器；39—循环水泵；40—除氧器；41—给水箱；42—化学补充水入口；43—汽轮机第一级抽汽；44—汽轮机第二级抽汽；45—给水泵；46—给水管；47—循环水管；48—吸水滤网；49—冷却水进水管；50—冷却水出水管；51—江河或冷却设备；52—主变压器；53—油枕；54—高压输电线；55—铁塔

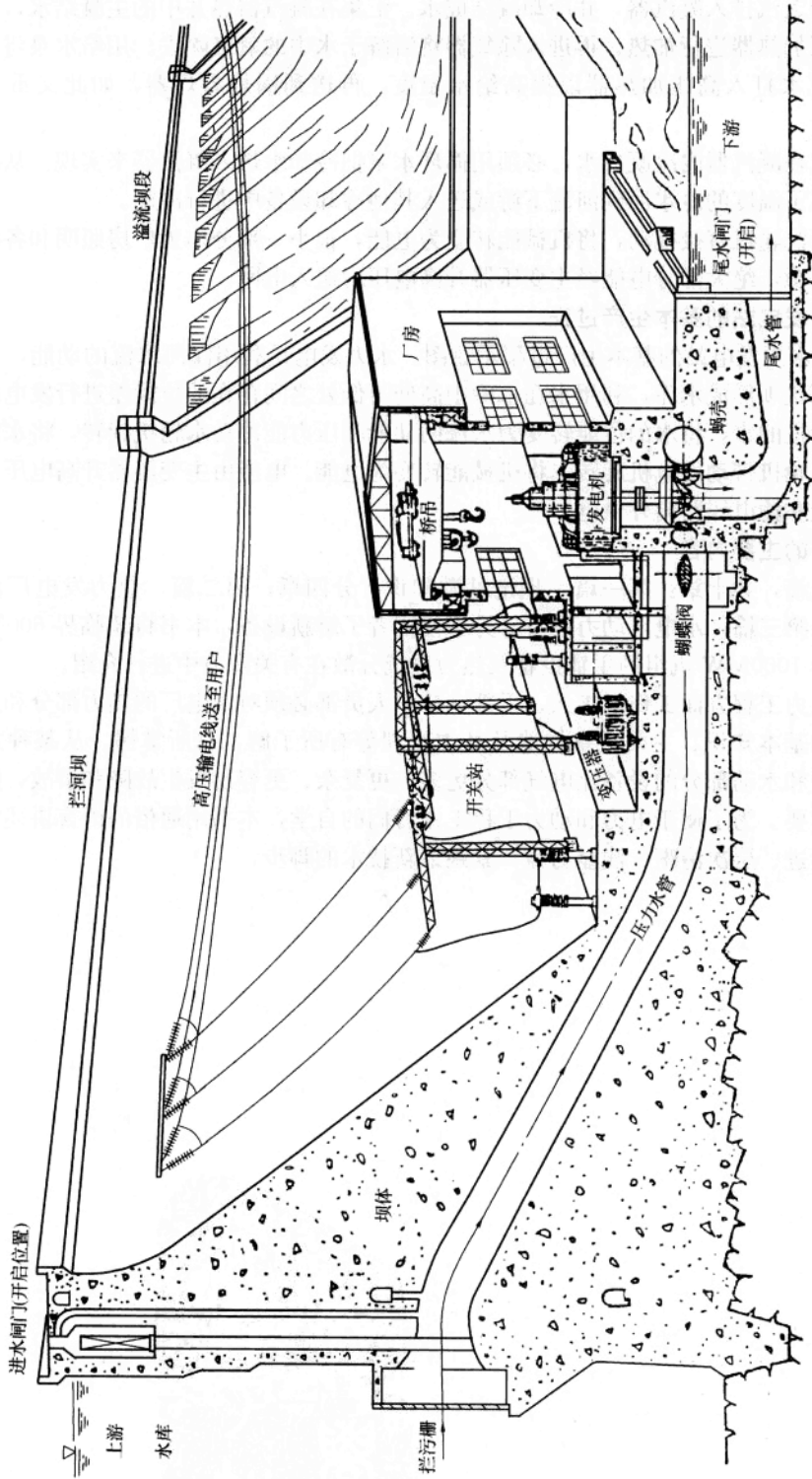


图 0-2 水力发电厂基本生产过程示意图

做功后的乏汽排入凝汽器，并冷却凝结成水。汇集在凝汽器热井中的主凝结水，用凝结水泵打入低压加热器进行加热，再进入除氧器将溶解于水中的氧气除去。用给水泵将主凝结水和化学补充水打入高压加热器以提高给水温度，再送到锅炉省煤器，如此又重复上述过程。

为使乏汽在凝汽器内冷凝成水，必须用循环水泵把冷却水送入凝汽器来实现。从凝汽器中出来的升高了温度的冷水回到河流下游或送入其他冷却设备中进行冷却。

发电机由汽轮机直接拖动，将机械能转变为电能，很小一部分作为厂房照明和各种辅助机械的厂用电源，绝大部分电能经主变压器升高电压后送入电网。

三、水力发电站的基本生产过程

图 0-2 为水力发电站的基本生产过程示意图。水力发电是利用江河水流的动能，一般是在河流中拦河筑坝形成水库，利用水在水库中高处与低处之间存在的位能差进行发电的。从水库引入水轮机的水，将水的位能转变为水流的动能和压力能冲动水轮机旋转，将水能转变为机械能。水轮机带动发电机旋转，将机械能转变为电能。电能由主变压器升高电压后，经高压配电装置和输电线路向外供电。

四、本书的主要内容

本书分三篇，共十章：第一篇 理论基础知识，分四章；第二篇 热力发电厂动力设备，分五章；第三篇 水电厂动力设备。为了使读者了解新设备，本书将超临界 600MW 机组和超超临界 1000MW 机组的主辅设备及热力系统分散在有关章节中进行介绍。

凡从事电力工程方面工作的工人、干部、技术人员都必须对火电厂的热力部分和水电厂的水动部分的基本知识、主要设备构造及基本原理等有所了解，有所掌握。从某种意义上说，热力部分和水动部分的设备比电气部分更多、更复杂、更容易发生故障和事故，因此阅读本书甚为重要。为了便于电力和动力工程工作者们的自学，本书用通俗的语言讲述深奥的技术，循序渐进、层次清晰、浅显易懂，紧跟最新技术的脚步。

第一篇 理论基础知识

第一章 工程流体力学基本理论知识

第一节 流体的主要物理性质

一、惯性、质量和密度

惯性是物体保持原有运动状态的特性。

液体的惯性只有运动状态改变时才显示出来。惯性的大小与液体的质量成正比。质量越大的液体,改变其运动状态所需的外力越大,说明液体的惯性力越大。

惯性力是指改变物体运动状态时所遇到的反作用力,它与作用力的大小相等,但方向相反,即

$$F = -ma \quad (1-1)$$

式中 F ——惯性力, N;

m ——质量, kg;

a ——加速度, m/s^2 。

力的单位与质量和加速度的单位之间的关系是,力的单位为 N,以 1N 的力作用于质量为 1kg 的物质时,能获得 1m/s^2 的加速度,即

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$$

液体的密度是单位体积的液体所具有的质量,即

$$\rho = m/V \quad (1-2)$$

式中 ρ ——液体的密度, kg/m^3 ;

V ——液体的体积, m^3 。

在标准大气压下,温度为 4°C 时水的密度为 $\rho_{\text{水}} = 1000\text{kg/m}^3$,水银的密度为 $\rho_{\text{汞}} = 13600\text{kg/m}^3$ 。

在实际工程中常采用工程单位,液体的主要物理参数单位换算见表 1-1。

表 1-1 液体参数单位换算表

参数名称	国际单位	工程单位	国际单位	工程单位
力	1N	0.102kgf	9.8N	1kgf
质量	1kg	$0.102\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$	9.8kg	$1\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
密度	1kg/m^3	$0.102\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$	9.8kg/m^3	$1\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$

二、万有引力特性、重量

万有引力是指任何物体之间具有的吸引力。万有引力特性是指任何物体对其他物体都具有吸引力的性质。

重力是地球对物体的吸引力,即

$$G=mg \quad (1-3)$$

式中 G ——液体的重力, N;

g ——重力加速度, m/s^2 。它与附近的纬度和海拔有关。

通常取 $g=9.8\text{m/s}^2$ 。

三、流体的流动性、黏滞性和黏度

物质的三种形态是固体、液体和气体,而液体和气体又统称为流体。流体和固体的主要区别是流体分子之间的内聚力很小。当流体受到很微小的切向力作用时,就会产生流动,流体具有的这个特性叫做流体的流动性。

当流体流动时,流体质点之间发生相对运动,在质点之间会产生内摩擦力阻滞相对运动,这种阻滞相对运动的特性叫做流体的黏滞性,它是流体的一个重要物理性质。

当流体运动时就表现出黏滞性,它所产生的阻滞力对运动的流体产生阻力,要维持运动必须克服阻滞力,就会发生能量损失。

黏度是表示流体黏滞性的大小,流体力学中通常用动力黏度 μ 表示。 μ 与流体的种类、压力、温度等因素有关,如液体的黏度随温度的升高而减小;而气体的黏度随温度的升高而增加。

四、流体的压缩性

当温度不变时,作用在流体上的压力增加,使流体体积减小的特性,称为流体的压缩性。流体的压缩程度用体积压缩率 K 来表示。

液体的压缩率 K 很小,若压力增加 1 个大气压时,液体只缩小原有体积的两万分之一,一般情况下认为水是不可压缩的。只有在压力变化非常迅速的情况下,譬如说在研究压力管道中水击问题时就要考虑水的压缩性。

气体的压缩率 K 值很大,故而气体是可压缩的。

五、流体的膨胀性

当压力不变时,流体的温度增加使流体体积增加的特性,称为流体的膨胀性。流体受热膨胀程度用体积膨胀系数 α_v 来表示。

液体的 α_v 值很小。在温度变化较大的热水循环系统中一定要考虑水的膨胀性。值得指出的是,当水结冰时不能忽略膨胀性。

第二节 流体静力学基本理论知识

流体静力学的研究对象是处于静止状态下的流体的力学规律及其在工程实践中的应用。

一、流体静力学基本方程式

流体处于静止状态时,对与流体接触的壁面以及流体内部的质点之间都有压力作用,这种静止状态时的压力,称为流体静压力。

流体静压力就是作用在单位面积上的流体静压力,单位为 N/m^2 或 Pa 。

流体静压力有两个特性:一是流体静压力的大小与作用面的方位无关;二是流体静压力的方向总是垂直并指向作用面。

1. 流体静力学基本方程的推导

以水作为不可压缩流体的例子来推导流体静力学基本方程。

如图 1-1 所示, 在静水中任取一底为 dA 、高为 h 的垂直水柱作为隔离体。分析这个隔离体的受力情况, 列出平衡方程式。

作用在水柱上的力有四个。

(1) 重力。水柱的自重 $G = mg = \rho gh dA$, 方向垂直向下。

(2) 自由表面压力。 $P_0 = p_{amb} dA$, 方向垂直向下, 其中 p_{amb} 为自由表面压力。

(3) 底面总压力。 $P = p dA$, 方向垂直向上, 其中 p 为作用在底面上的压力。

(4) 水柱四周表面上的静水压力。四周侧面上的水压力为水平力, 由于水柱四周是对称的并且水柱平衡不动, 故水平力相互平衡抵消。

水柱体垂直线上的平衡方程为

$$p_{amb} dA + \rho gh dA = p dA \quad (1-4)$$

故静水压力基本方程式为

$$p = p_{amb} + \rho gh \quad (1-5)$$

式中 p ——静水压力;

p_{amb} ——静水表面压力, 是一个定值;

ρgh ——单位面积上的水柱重量。

从静水压力基本方程式可知, 静水压力产生的根本原因是水体所受到的重力作用, 是上层水的重量压在下层水上面形成的, 所以静水压力与水柱高度 h 成正比, 即与水的深度成正比。

当式 (1-5) 中水的深度 h 用位置高度 Z 表示时, 则 $h = Z_0 - Z$, 将 $h = Z_0 - Z$ 代入式 (1-5) 中得

$$p = p_{amb} + \rho g (Z_0 - Z)$$

故

$$Z + \frac{p}{\rho g} = Z_0 + \frac{p_{amb}}{\rho g} \quad (1-6)$$

式 (1-6) 为静水压力分布规律的另一种表达式。说明了在静止的水体中位置高度 Z 越大, 静水压力越小; Z 越小, 静水压力越大。当 Z 值相等时, 静水压力相等, 此面就是等压面。

2. 流体静力学基本方程的意义

为分析流体静压强的几何意义和物理意义, 取一装有静止水体的容器, 如图 1-2 所示。

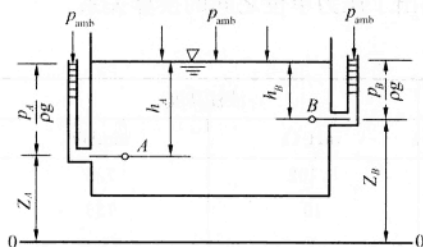


图 1-2 装有静止液体的容器

(1) 几何意义。从图 1-2 可知, A、B 两点位置高分别为 Z_A 和 Z_B , 水深为 h_A 和 h_B , 水体表面压力为 p_{amb} 。

根据静水压力基本方程可以得出 A、B 两点的压力分别为

$$p_A = p_{amb} + \rho gh_A$$

$$p_B = p_{amb} + \rho gh_B$$

若在 A、B 两点处安装测压管后, 在静水压力

作用下，管中液柱升高，升高的高度叫做压力水头 $\frac{p}{\rho g}$ ，位置高度叫做位置水头 Z 。两者之和成为测压管水头 H_p ，即

$$H_p = Z + \frac{p}{\rho g} \tag{1-7}$$

A、B 两点的压差为

$$\frac{p_A}{\rho g} - \frac{p_B}{\rho g} = \frac{p_{amb} + \rho g h_A}{\rho g} - \frac{p_{amb} + \rho g h_B}{\rho g} = h_A - h_B = Z_B - Z_A$$

故

$$H_p = Z_A + \frac{p_A}{\rho g} = Z_B + \frac{p_B}{\rho g} = \text{常数} \tag{1-8}$$

从式（1-8）可知，静水压力基本方程的几何意义是：在静止状态的水中，各点的位置水头与压力水头之和为一常数。也就是说测压管水头为一常数。

（2）能量意义。若在 A、B 两处各取一微水质量 m 时，两处各具有的位置势能与压力势能之和，即

$$mg \left(Z_A + \frac{p_A}{\rho g} \right) = mg \left(Z_B + \frac{p_B}{\rho g} \right)$$

故单位重量水所具有的势能为

$$e = Z_A + \frac{p_A}{\rho g} = Z_B + \frac{p_B}{\rho g} = \text{常数} \tag{1-9}$$

从式（1-9）可知，静水压力基本方程的能量意义是：静止水体中各点的位置势能与压力势能之和为一常数。

二、流体静压力的单位、表示方法及测量

（一）流体静压力的单位

流体静压力的单位常用以下三种表示。

（1）用压力单位表示。用单位面积上的力来表示。国际单位制是 $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ （帕）， $\text{kPa} = \text{kN}/\text{m}^2$ ，工程单位制是 kgf/cm^2 。

（2）用液柱高度表示。一定的液柱高度对应一定的液体的压力。在工程中常用米水柱（ mH_2O ）和毫米汞（ mmHg ）表示。

（3）用大气压来表示。这种单位有两种，一种是工程大气压，用 at 表示， $1\text{at} = 98.0\text{kPa} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2$ ；另一种是标准大气压，用 atm 表示， $1\text{atm} = 101325\text{Pa}$ 。

考虑到老的设备和阅读科技图书的方便，表 1-2 列出了压力单位之间的换算关系。

表 1-2 压力单位换算

法定单位	工程单位		液柱高度	
kPa	kgf/cm ²	工程大气压 (at)	mH ₂ O	mmHg
1	0.0102	0.0102	0.102	7.5
98	1	1	10	736
9.8	0.1	0.1	1	73.6
0.133	0.00136	0.00136	0.0136	1

(二) 流体静压力的表示方法

静止流体中任意一点静压力的大小, 根据度量的基准点不同, 会有不同的压力数值。通常用绝对压力、相对压力和真空表示。

(1) 绝对压力。以没有空气存在的绝对真空作为基准点计算的压力值, 称为绝对压力, 用 p' 表示。若自由表面压力 p_0 为大气压力 p_{amb} , 则任一点的绝对压力为

$$p' = p_{amb} + \rho gh \quad (1-10)$$

(2) 相对压力。以大气压力为基准点计算的压力值, 称为相对压力、计示压力或表压力。通常用仪表测得的压力值为表压力, 用 p 表示。若不加说明, 流体静压力均指相对压力, 即

$$p = \rho gh \quad (1-11)$$

相对压力与绝对压力的关系为

$$p = p' - p_{amb} \quad (1-12)$$

(3) 真空。被测试流体的绝对压力低于大气压力部分, 称为真空, 也称负压。真空的大小用 p_v 表示, 即

$$p_v = p_{amb} - p' \quad (1-13)$$

对于同一处的真空可以用该点的负压值 p 来表示, 两者大小相等, 符号相反, 即

$$p_v = -p \quad (1-14)$$

三种计量表示法的关系如下:

当所测量的压力大于大气压力时, 绝对压力 = 大气压力 + 相对压力;

当所测量的压力小于大气压力时, 绝对压力 = 大气压力 - 真空;

相对压力 = 绝对压力 - 大气压力, 真空 = 大气压力 - 绝对压力。

三种计量表示法的关系也可用图 1-3 表示。

图中 0—0 表示绝对压力基准; 图中 0'—0' 表示相对压力基准。

图中 1、2、3 三点的绝对压力均为正值。相对压力有三种情况, 1 点为正值, 2 点为零, 3 点为真空或负压, 用真空表示时为正值。

(三) 流体静压力的测量

两个以上的容器在装有液体的自由表面以下连通, 称为连通器。任一点的压力值根据连通器的原理, 选定等压面后进行计算。

流体静压力的测量方法较多, 简单介绍如下。

1. 测压管

如图 1-4 所示是一种最简单的液体测压计。

【例 1-1】 如图 1-4 所示, 已知 A 点测压管高度 $h_p = 0.5\text{m}$, 试求 A 点的绝对压力和相对压力。(已知 $\rho g = 9.8\text{kN/m}^3$, $p_{amb} = 98\text{kPa}$)

解 连接 A、A' 两点, 取等压面 N—N。

绝对压力 $p'_A = p_{amb} + \rho gh_p = 98 + 9.8 \times 0.5 = 102.9\text{ kN/m}^2$

相对压力 $p_A = \rho gh_p = 9.8 \times 0.5 = 4.9\text{ kN/m}^2$

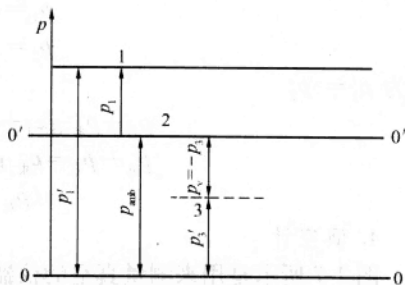


图 1-3 静水压力表示方法

2. U 形水银压力计

图 1-5 所示为在 U 形管内装有水银对流体压力进行测量的测压计。

根据水银压力计可求出表面压力 p_0 和容器出口压力 p ，首先取等压面 $N-N$ ，分别求出 1、2 两点的压力。

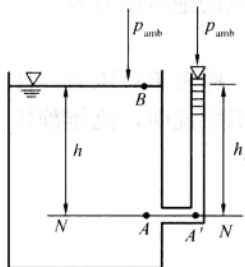


图 1-4 测压管

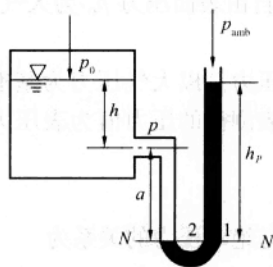


图 1-5 U 形测压计

$$p_1 = \rho_{\text{汞}} g h_p$$

$$p_2 = p_0 + \rho_{\text{水}} g(h+a)$$

因为 $p_1 = p_2$

$$\rho_{\text{汞}} g h_p = p_0 + \rho_{\text{水}} g(h+a)$$

故

$$p_0 = \rho_{\text{汞}} g h_p - \rho_{\text{水}} g(h+a) \quad (1-15)$$

容器出口压力

$$p = \rho_{\text{汞}} g h_p - \rho_{\text{水}} g a \quad (1-16)$$

3. 压差计

如图 1-6 所示压差计用于测量两个容器或两点的压差。

为了求 A、B 两点的压差，取 $N-N$ 为等压面，求出 1、2 两点的静水压力。

$$p_1 = p_B + \rho_{\text{水}} g z_2 + \rho_{\text{汞}} g h_p$$

$$p_2 = p_A + \rho_{\text{水}} g z_1 + \rho_{\text{水}} g h_p$$

因为 $p_1 = p_2$

$$p_B + \rho_{\text{水}} g z_2 + \rho_{\text{汞}} g h_p = p_A + \rho_{\text{水}} g z_1 + \rho_{\text{水}} g h_p$$

故

$$\begin{aligned} p_A - p_B &= \rho_{\text{汞}} g h_p - \rho_{\text{水}} g h_p + \rho_{\text{水}} g z_2 - \rho_{\text{水}} g z_1 \\ &= (\rho_{\text{汞}} - \rho_{\text{水}}) g h_p + (z_2 - z_1) \rho_{\text{水}} g \end{aligned} \quad (1-17)$$

4. 真空计

图 1-7 所示是用来测量真空的仪器，叫做真空计。

水泵安装高度为 h_s ，在水泵吸水管 k 点安装真空计，这样就可以测出吸水管的真空 p_v 。

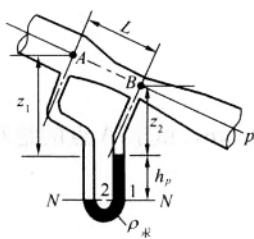


图 1-6 压差计

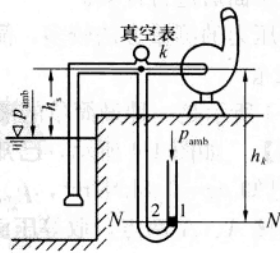


图 1-7 真空计