



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学能源动力系列教材

流体机械基础

Fundamentals of Fluid Machinery

王正伟 主编

Wang Zhengwei

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学能源动力系列教材

流体机械基础

Fundamentals of Fluid Machinery

王正伟 主编

Wang Zhengwei

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍流体机械的基础理论知识,重点介绍了水轮机、水泵和风机方面的基础知识。全书分9章,分别简述了流体机械的分类、应用领域、基本结构、工作原理、流动特点、相似理论、空化空蚀与腐蚀腐蚀、特性曲线、安全运行、标准化与质检等方面的基础实用知识。

本书是按照32学时设计的,内容力求简练实用,并尽量体现最新的科研成果及标准化的要求,可作为能源、动力、水利、冶金、化工、环境等专业的本科生教材,也可供其他专业的师生及工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

流体机械基础/王正伟主编. —北京:清华大学出版社,2006.12

(清华大学能源动力系列教材)

ISBN 7-302-14040-5

I. 流… II. 王… III. 流体机械—高等学校—教材 IV. TH3

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第124377号

责任编辑:曾洁 赵从棉

责任校对:刘玉霞

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175 邮购热线:010-62786544

投稿咨询:010-62772015 客户服务:010-62776969

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:10.75 字 数:219千字

版 次:2006年12月第1版 印 次:2006年12月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-14040-5/TH·217

印 数:1~3000

定 价:18.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770177 转 3103 产品编号:020154-01

前言



流体机械是动力工程中应用最广泛的一类机械设备,本书根据近几年高校学科调整后的教学要求,设计了 32 学时的流体机械基础知识教学内容。

本书内容体现了三个特点:(1)教学内容基础简练。作为流体机械基础性知识的教材,在内容选取上侧重于基本概念和基本原理的阐述,在解释方式上侧重于平面和三维图形技术的大量应用,力求基础实用。譬如重点放在机组综合特性曲线和运转特性曲线的理解中,而未用大量篇幅介绍其详细获取过程。(2)专业术语规范标准。为了与行业的工程技术的最新发展紧密结合起来,书中引入了最新 IEC 和国家标准规范的专业术语和物理量符号定义,第 9 章专门介绍了相关标准与质检要求。(3)突出最新科研成果的介绍。书中简练介绍了流体机械流动分析和优化设计、运行稳定性测量与运行区域划分等技术,在许多内容中展现了大型设计和分析软件的应用成果。

本书的初稿作为讲义(电子版)已经在清华大学热能工程系动力工程专业经过了 4 年的教学实践,在此过程中师生互动一起更新提炼了许多内容。

全书共分 9 章,参加第 1~8 章的编写人员有周凌九(负责第 3、7 章)、肖若富、罗永要、彭光杰、秦亮、陈昌坤、孙光伟、阎宗国、黄星星、李军、程志慧、李凤超等,第 9 章由我国标准化与质检专家乐枚编写。全书由王正伟统稿。

本书在编写过程中得到了清华大学热能工程系和清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室的大力支持,在编辑、修改和出版过程中得到了清华大学出版社的大力支持与帮助,书中参考或局部引用了所列参考文献中的内容,在此一并表示敬意和感谢。

由于编者水平有限,书中错误和不当之处,恳请读者批评指正,联系地址: wzw@mail.tsinghua.edu.cn

编 者

2006 年 10 月

常用符号表

A 面积, m^2	Q_m 质量流量, kg/s
a_0 导叶开口, m	Q_{11} 单位流量, m^3/s
b 叶道宽度, 叶高, m	Re 雷诺数
D 公称直径, m	r 半径, m
e 机械能, J	Sr 斯特劳哈尔数
E 比能, J/kg	T 热力学温度, K
E_z 位置比能, J/kg	t 时间, 特征时间, s
E_p 压力比能, J/kg	u 牵连速度, m/s
E_v 速度比能, J/kg	v 速度, 绝对速度, m/s
Eu 欧拉数	v_a 声速, m/s
F 力, N	w 相对速度, m/s
Fr 弗劳德数	z 高度, m
G 重量, N	α 绝对流动角, $(^\circ)$
g 重力加速度, m/s^2	α_0 导叶出口角, 出流角, $(^\circ)$
H 水头, 扬程, m	β 相对流动角, $(^\circ)$
H_s 吸出高度, m	β_b 叶片安放角, $(^\circ)$
K 比值, 系数, 空化安全余量	ΔH 水头损失, m
L 长度, 特征长度, m	Δh_a 装置有效空化余量, m
M 力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$	Δh_r 必需空化余量, m
Ma 马赫数	Δp 压力损失, Pa
m 质量, kg	ΔP_m 机械损失功率, W
n 转速, r/min	ΔP_r 圆盘损失功率, W
n_s 比转速, $\text{m} \cdot \text{kW}$	ΔQ 泄漏体积流量, m^3/s
n_q 流量比转速, $\text{m} \cdot \text{m}^3/\text{s}$	Γ 环量, m^2/s
n_{QE} 无量纲比转速	η 效率, $\%$
n_{11} 单位转速, r/min	η_h 水力效率, $\%$
$NPSH_a$ 有效净正吸头, m	η_m 机械效率, $\%$
$NPSH_r$ 必需净正吸头, m	η_v 容积效率, $\%$
P 功率, kW	θ 角度, $(^\circ)$
P_{11} 单位功率, kW	κ 绝热指数
p 压力, 全压, Pa	λ 功率系数
Q 体积流量, m^3/s	μ 滑移系数, 动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$

ρ 密度, kg/m^3 σ 滑移系数, 空化系数 ϕ 扬程系数, 压力系数

下标

0 导叶出口

1 机器进口, 叶片进口

2 机器出口, 叶片出口

a 空气, 有效

cr 临界值

d 设计值

p 原型机, 真机

m 模型, 机械

 m 轴面 φ 流量系数; 叶片转角, $(^\circ)$ ω 角速度, rad/s

max 最大值

min 最小值

r 额定值, 圆盘, 必需

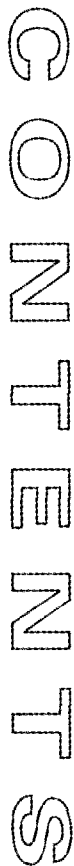
th 理论值

 u 周向 V 容积

va 空化

 ∞ 无穷叶片数

目 录



第1章 流体机械概述	1
1.1 流体机械的定义	1
1.2 流体机械的分类	1
1.2.1 按能量传递方向分类	1
1.2.2 按流体与机械相互作用分类	2
1.2.3 按工作介质分类	3
1.3 流体机械在国民经济中的应用	4
1.3.1 电力工业	4
1.3.2 水利工程	5
1.3.3 化学工业	6
1.3.4 石油工业	6
1.3.5 钢铁工业	6
1.3.6 其他领域	7
1.4 阅读材料——水轮机发展简史	7
1.4.1 我国历史上的水力原动机	7
1.4.2 近代水轮机的发展	10
1.4.3 现代水轮机的发展	12
1.5 复习思考题	13
第2章 流体机械典型结构简介	14
2.1 典型流体机械的工作过程简介	14
2.1.1 电风扇	14
2.1.2 离心泵	14
2.1.3 轴流式风力发电机组	14
2.1.4 混流式水轮机	15
2.1.5 冲击式水轮机	15
2.2 典型水轮机结构	16
2.2.1 混流式水轮机	17
2.2.2 轴流式水轮机	21
2.2.3 贯流式水轮机	22

2.2.4	斜流式水轮机	23
2.2.5	切击式水轮机	24
2.3	典型水泵结构	27
2.3.1	单级单吸悬臂式离心泵	27
2.3.2	单级双吸水平中开式离心泵	28
2.3.3	节段式多级泵	28
2.3.4	双壳泵	30
2.3.5	立式轴流泵	30
2.4	典型风机结构	31
2.5	容积式流体机械简介	32
2.5.1	往复式流体机械	33
2.5.2	回转式流体机械	33
2.6	复习思考题	34
第3章	流体机械性能参数与能量转换	35
3.1	流体机械内流体的能量	35
3.2	流体机械主要性能参数	36
3.2.1	水头(扬程)和压升	36
3.2.2	流量	38
3.2.3	转速	38
3.2.4	功率	38
3.2.5	效率	38
3.3	速度三角形	40
3.3.1	速度三角形的定义	40
3.3.2	反击式流体机械转轮进出口速度三角形分析	42
3.3.3	冲击式水轮机转轮速度三角形分析	44
3.3.4	绘制转轮内部流动速度三角形的说明	45
3.4	流体机械能量转换原理——欧拉方程	45
3.5	有限叶片数对水力性能的影响	48
3.5.1	有限叶片数对叶轮出口液流角的影响	48
3.5.2	滑移系数	49
3.6	其他过流部件工作原理	50
3.6.1	叶轮与其他过流部件的配合	50
3.6.2	水轮机引水室	51

3.6.3 水轮机活动导叶	52
3.6.4 水轮机尾水管	53
3.6.5 水泵的吸入室	54
3.6.6 水泵的扩压元件	55
3.7 复习思考题	56
第4章 流体机械内部流动分析及优化设计	57
4.1 流体机械内部流动分析概述	57
4.1.1 一维流动理论	57
4.1.2 二维流动理论	58
4.1.3 准三维流动理论	58
4.1.4 全三维流动理论	59
4.2 流体机械全三维流动理论	60
4.2.1 N-S 方程	60
4.2.2 N-S 方程的求解和湍流模型	60
4.3 水轮机流道内部典型的三维流动特性	61
4.3.1 蜗壳及座环内的流动	61
4.3.2 活动导叶内的流动	62
4.3.3 转轮流道内的流动	63
4.3.4 尾水管内的流动	64
4.4 水泵流道内部典型的三维流动特性	65
4.4.1 潜水贯流泵正向运行水泵装置内部流动特性	65
4.4.2 潜水贯流泵反向运行水泵装置内部流动特性	66
4.5 风机内部流道典型的三维流动特性	67
4.5.1 叶轮内部流场特性	67
4.5.2 蜗壳内部流场特性	67
4.6 水轮机的水压力脉动分析	68
4.7 流体机械的多相流分析	69
4.8 流道优化设计方法	71
4.8.1 流道优化设计流程	71
4.8.2 流道优化设计工程实例	72
4.9 复习思考题	75
第5章 流体机械的相似理论	76
5.1 流体机械的相似准则	76

5.1.1	相似条件	76
5.1.2	相似准则与相似判别数	78
5.2	水轮机的相似准则	80
5.2.1	水轮机的单位参数	80
5.2.2	水轮机的相似换算	81
5.3	泵的相似准则	81
5.3.1	泵的单位参数	81
5.3.2	泵的相似换算	82
5.4	风机的相似准则	82
5.4.1	风机的单位参数	82
5.4.2	风机的相似换算	83
5.5	综合相似判别数——比转速	85
5.5.1	水轮机的比转速	85
5.5.2	泵的比转速	86
5.5.3	风机的比转速	86
5.5.4	比转速的应用	87
5.6	复习思考题	89
第6章	流体机械空蚀、磨蚀与腐蚀	90
6.1	空化与空蚀概述	90
6.1.1	空化与空蚀现象	90
6.1.2	空化现象及空蚀破坏实例	92
6.1.3	空化与空蚀机理简介	93
6.1.4	流体机械空蚀类型	94
6.2	水力机械的空化参数	96
6.2.1	转轮叶片上的最低压力	96
6.2.2	空化余量	97
6.2.3	空化系数	99
6.3	吸出(入)高度与安装高程	100
6.3.1	电站吸出高度与水轮机的安装高程	100
6.3.2	泵的吸入高度与安装高程	101
6.3.3	空化和空蚀的防护	103
6.4	泥沙磨蚀概述	103
6.4.1	磨损和磨蚀机理简介	103

6.4.2 防止磨损和磨蚀的措施	104
6.5 腐蚀概述	105
6.5.1 腐蚀的定义与分类	105
6.5.2 水轮机的常见腐蚀形式	105
6.5.3 某电站过流部件腐蚀案例分析	106
6.5.4 防腐措施	106
6.6 复习思考题	107
第7章 流体机械特性曲线	108
7.1 特性曲线概述	108
7.1.1 特性曲线的定义	108
7.1.2 特性曲线的分类	108
7.2 水轮机特性曲线	109
7.2.1 线性特性曲线	109
7.2.2 综合特性曲线	110
7.3 水泵特性曲线	117
7.3.1 离心式水泵特性曲线	117
7.3.2 轴流式水泵特性曲线	118
7.4 风机特性曲线	120
7.5 流体机械在管网系统中的工作	121
7.5.1 管网的性能曲线	121
7.5.2 流体机械与管网的联合工作	121
7.5.3 流体机械的串联与并联运行	122
7.6 复习思考题	123
第8章 流体机械安全运行	125
8.1 流体机械典型运行过程简介	125
8.1.1 开机过程	125
8.1.2 负荷调节过程	125
8.1.3 甩负荷过程	126
8.1.4 停机过程	126
8.1.5 调相过程	126
8.1.6 飞逸与脱离飞逸过程	127
8.2 影响稳定运行的因素及相应的改善措施	127
8.2.1 流体因素	127

8.2.2	机械因素	133
8.2.3	电气因素	134
8.3	加强流体机械运行稳定性的措施	134
8.3.1	加强监测	134
8.3.2	选择合适的运行区域	137
8.4	复习思考题	139
第9章 流体机械标准化和质量监督		140
9.1	五千年文明史就是中国标准化发展的历史	140
9.2	标准的定义	141
9.3	标准的分类	142
9.3.1	属性分类	142
9.3.2	层次分类	143
9.3.3	性质分类	143
9.3.4	对象分类	143
9.3.5	名称分类	143
9.4	标准的结构	144
9.5	编写标准的基本原则与要求	144
9.6	标准化的组织结构	145
9.6.1	全国专业标准化技术委员会	145
9.6.2	水轮机标准化工作的发展历程	145
9.6.3	规范和统一水轮机专业术语的重要性	147
9.6.4	全国水轮机标委会制定和修订的标准	148
9.6.5	主要国际标准化机构的情况	151
9.7	产品质量监督检验测试	152
9.7.1	概述	152
9.7.2	产品质量检验机构	153
9.7.3	常用质量管理术语	154
9.7.4	评审准则简介	154
9.7.5	我国水电站水力设备质检中心	155
9.8	复习思考题	155
参考文献		156

流体机械概述

1.1 流体机械的定义

流体机械是指以流体(液体或气体)为工作介质与能量载体的机械设备。流体机械的工作过程是流体的能量与机械的机械能相互转换或不同能量的流体之间能量传递的过程。在大多数的技术和生活领域中都需要输送流体介质或借助于流体进行能量转换,流体机械是一类应用极为广泛的机械设备。

对于流体机械的定义,许多教科书中这样表述:流体机械是指能够将流体能量和机械能量相互转换的机械设备。这种定义强调了流体作为工作介质和能量载体,但并未具体指明能量传递的形式。例如,内燃机利用了流体的化学能,并将其转换成机械能,但它不是流体机械。所以有的教科书这样定义:流体机械是指在流体具有的机械能和机械所做的功之间进行能量转化的机械。对于大多数流体机械,这样的定义是适用的,因此只需考虑流体的动能、位能和做功中体现出来的压力能。广义而言,水轮机、泵、风机、蒸汽轮机和燃气轮机等机械都属于流体机械。但通常将蒸汽轮机与燃气轮机作为动力机械进行深层次的研究。本书将重点介绍水轮机、泵与风机三大类流体机械,其特点是适用于流体不可压的假设条件,一般也不考虑流体的热作用。

1.2 流体机械的分类

流体机械可以按照能量传递方向、流体与机械的相互作用、工作介质等方式进行分类。

1.2.1 按能量传递方向分类

按照能量传递方向,流体机械可分为原动机与工作机。原动机是将流体的能量转换成机械能,用于驱动其他设备,如水轮机、风力机、蒸汽轮机和燃气轮机等。工作机是将机械能转换成流体的能量,将流体输送到位置更高或压力更高的空间,或克服阻力进行远距离输送,如泵、风机

和压缩机等。

此外,流体机械还包括液力传动装置和液力推进装置。液力传动装置装有两种叶轮,分别为泵叶轮和涡轮机(水轮机)叶轮,以压力油为介质传递动力,实现无级变速或传动功能,如液力变矩器(见图 1-1),用于汽车、工程机械和战车,也可用于大型机械的无级变速。液力推进装置利用流体产生的反作用力使物体前进,如船舶中所用的螺旋推进器等。

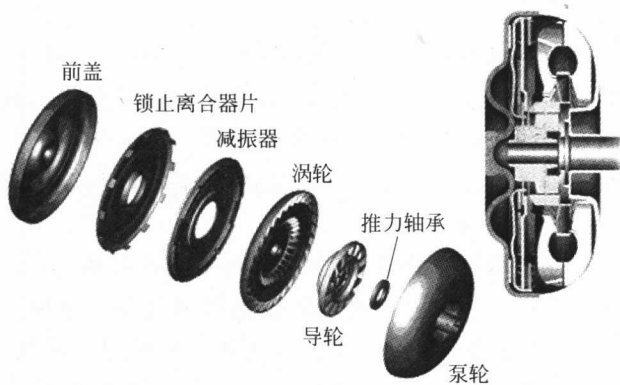


图 1-1 液力变矩器结构图

1.2.2 按流体与机械相互作用分类

按照流体与机械相互作用的特点,流体机械可分为叶片式、容积式及其他形式。

叶片式流体机械中,能量转换是在带有叶片的转子及连续绕流叶片的介质之间进行的。流体对叶片作连续绕流,叶片改变了流体的运动状态,运动的流体与转动的叶片之间产生作用力和反作用力,实现流体与机械的能量转换。

叶片式流体机械可按叶轮转换成流体能量的形式分为反击式和冲击式两类。反击式流体机械中流体的动能与势能均发生变化,流体介质充满流道,进口与出口处速度和压力变化明显。而在冲击式流体机械中,仅流体的动能发生变化,进出口处压力不变,一般为大气压。反击式水轮机可根据流体进出叶轮的方向不同进一步分为径流式、混流式、斜流式与轴流式等。冲击式又可细分为切击式、斜击式与双击式等形式。

容积式流体机械中,能量的交换是通过运动部件和静止部件或者两个运动部件之间的容积的周期性变化来实现的。流体与机械之间的相互作用力为静压力。根据运动方式不同,可分为往复式和回转式两类。

以上两种形式流体机械的原理和结构将在第 2 章中详细介绍。

还有一些不属于以上两类的流体机械,在这些流体机械中,能量主要是在两种具有不同能量的流体之间进行传递。例如在射流泵(见图 1-2)中,高压流体(液体或气体)与低

压流体(液体或气体)在喷射口处开始混合,通过动量交换使压力与速度趋于相同,以达到输送低压流体的目的,属于这一类的流体机械还有水锤泵、内燃泵等。在液环泵(见图 1-3)中,叶片将能量传递给液体工作介质,然后液体介质将能量传递给气体,达到压缩气体的目的。

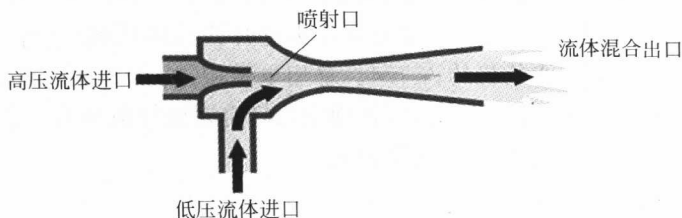


图 1-2 射流泵

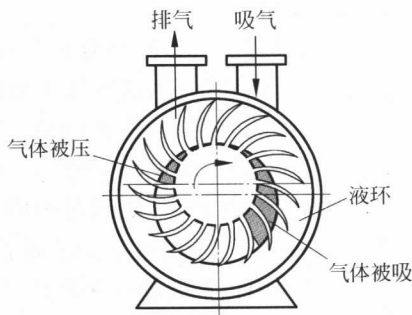


图 1-3 液环泵(液环圆周运动形成真空)

1.2.3 按工作介质分类

按照工作介质,流体机械可分为水力机械和热力机械两类。水力机械以液体为工作介质,热力机械以气体为工作介质。一般地,可认为液体不可压缩,气体可压缩。但要特别注意的是,可压缩性概念是相对的,流体是否可压缩,要视具体情况而定。例如当压力变化极大时(例如在水锤过程中),必须考虑液体的可压缩性;而当压力变化很小的时候(例如在通风机中),也可以不考虑空气的压缩性。

应该指出,还有许多其他的分类方法,例如根据流体机械的用途、结构特点等进行分类和命名,这些内容将在本书后面适当的地方予以介绍。由于流体机械的种类极其繁多,限于篇幅,本书将主要讨论水轮机、水泵这两种流体机械,同时也简单介绍风机的相关知识。

1.3 流体机械在国民经济中的应用

流体机械在国民经济的各部门和社会生活各领域都得到了极广泛的应用,而且技术越发展,流体机械的应用也就越广泛、作用越大。可以说,几乎没有哪一个生活领域没有流体机械。现代电力工业中,绝大部分发电量是由叶片式流体机械(汽轮机和水轮机)承担的,其中汽轮机约占 $3/4$,水轮机约占 $1/4$ 。总用电量中,约 $1/3$ 是用于驱动风机、压缩机和水泵的。而且,随着技术的不断发展,各种应用场合对流体机械的性能和可靠性的要求也越来越高。下面列举几个重要的应用领域。

1.3.1 电力工业

目前的电力生产有三种主要方式:热力发电(火电)、水力发电和核能发电,在这三种发电方式中,流体机械都起着重要的作用。

在火电站和核电站中,除用作主机的汽轮机外,还有许多泵和风机。在火电站的蒸汽动力装置中包括锅炉给水泵、凝结水泵、循环水泵、送风机和引风机等,在燃气动力装置中则要用到空气压缩机等。随着发电机组的大型化,电站用泵也在向大型和高参数方向发展。目前最大的锅炉给水泵的功率已达 49.3MW ,扬程达 3000m 。在核电站中,除了二次蒸汽回路中需要与火电站基本相同的泵以外,一次回路中的主循环泵是一次系统中惟一的回转机械,它工作在高温高压的环境下,是核电站的关键设备之一。此外,核电站的安全系统、容积控制系统、废料处理系统中也都要使用多种类型的泵。

火电站与核电站的厂用电的绝大部分用于驱动水泵、风机等辅机,目前我国热电站的厂用电约占发电量的 12% ,而发达国家的厂用电只占 $4\%\sim 4.5\%$,可见提高辅机的效率对于节能有非常重要的意义。同时,泵与风机的可靠性更为重要,特别是当今,汽轮发电机组不断向大容量、单元制发展,泵和风机等辅机的可靠性与主机有同样的要求。

水轮机作为水力发电的主要设备,在电力工业中占有特殊的地位。由于煤、石油、天然气等燃料的资源有限,又由于大量使用石化燃料对环境有巨大的破坏作用,所以开发清洁可再生能源(水能、太阳能、风能、海洋能等)是实现可持续发展战略的重要条件。目前,水力资源是惟一可以大规模开发的清洁可再生能源,而且开发水力资源还能收到防洪、灌溉、航运、水产养殖和旅游等综合利用的效益。据统计,全世界水力资源的总蕴藏量为 $38\times 10^5\text{MW}$,已开发的仅约 10% 。我国可开发的水力资源蕴藏量为 $3.78\times 10^5\text{MW}$,约占世界总量的 10% ,目前已开发和正在开发的约 25% ,见图 1-4。今后,国家将更加优先开发水力资源。正在建设的长江三峡工程,是世界上最大的水电站,也是我国迄今所进行的最大的工程项目。

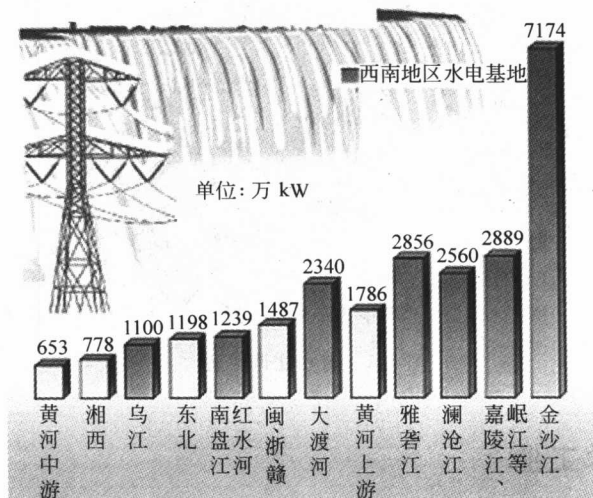


图 1-4 我国十二大水电基地装机容量

水轮发电机组具有功率调节简单快速的特性,因此水电站在电力系统的调节过程中有着特别重要的地位。由于核电站的负荷不便于调节,太阳能、风能、海洋能等新能源具有不稳定的特点,在开发这些能源时,都需要兴建抽水蓄能电站以保证系统的正常运行,蓄能机组研发和生产越来越受到重视。

1.3.2 水利工程

我国的人均水资源占有量只有世界平均水平的 $1/4$,而且时空分布极不均匀,因此水利工程对我国来说尤为重要。水利工程不管是灌溉、排涝还是供水,都需要相应容量的泵。据统计,我国排灌机械的配套功率,在 20 世纪 80 年代已达 57 000 MW。这虽然是一个很大的数字,但距解决我国灌溉和排涝问题的要求差距还很大。

为解决我国的水资源问题,开源和节流同样重要。在节流方面,国家大力发展了节水灌溉技术,如喷灌、滴灌等,其中需要大量的泵。在开源方面,国家已经并将继续建设许多大型水利工程,如引黄灌溉工程、南水北调工程等。其中南水北调工程已进行了长期的规划,工程总体规划推荐西线、中线和东线三条调水线路,如图 1-5 所示,即分别从长江流域上、中、下游调水,以适应西北、华北各地的经济发展需要。预计到 2050 年,三条线路调水总规模为 448 亿 m^3 ,其中东线 148 亿 m^3 ,中线 130 亿 m^3 ,西线 170 亿 m^3 ,必将在很大程度上解决北方水资源短缺的问题,改善水资源南多北少的局面。