

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

电力工程

DIANLI GONGCHENG

吴希再 熊信银 张国强

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

电力工程/吴希再 等

武汉:华中科技大学出版社, 1997年3月

ISBN 7-5609-1489-6

I. 电…

II. ①吴… ②熊… ③张…

III. 电力工程-基本知识

IV. TM7

电力工程

吴希再 熊信银 张国强

责任编辑:黄以铭

*

华中科技大学出版社出版发行

(武昌喻家山 邮编:430074)

安陆市鼎鑫印务有限责任公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:23.5 字数:570 000

1997年3月第1版 2003年6月第6次印刷

ISBN 7-5609-1489-6/TM·66

定价:26.80元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书着重阐述电能生产、传送、分配和使用全过程的基本内容和基本计算方法。全书共十章,内容包括电力系统的基本知识,发电厂、变电所的一次系统,电力系统的稳态分析计算、短路的计算方法、稳定性及电气设备选择,二次系统,继电保护,计算机计算方法和工厂企业供电等。

本书是高等学校电工类学科的专业基础课教材。除可以作为电力类各专业本、专科教材外,对工程技术人员也有参考价值。

前 言

本书是根据拓宽专业面的教学改革需要而编写的电工学科基础教材。它是在我校 1991 年编写的“电力工程”讲义的基础上,吸取多年教学实践的经验,重新编写而成的。在内容的取材上,本书除了可以作为电工学科本科、专科教学用书和电气工程技术人员的技术参考书外,还充分考虑了与专业实习、课程设计和毕业设计的衔接。书中带“*”号的部分为选授内容。

本书的全部文字符号、图形符号均采用国家标准 [GB4728]。其主要内容包括:电力系统的基本概念,电力系统的短路计算,稳态分析和稳定性分析,发电厂变电所的主接线,电气设备的选择,二次接线,继电保护的基本原理,电力系统计算机算法以及工业企业供电等。对现代科学技术新成果及发展动向,书中也作了适当介绍。书中例题丰富、极利于函授学生及自学者参考。

本书由华中理工大学电力系吴希再(一、八、十章),熊信银(二、六、七、九章)、张国强(三、四、五章)编写。吴希再担任主编,熊信银、张国强担任副主编。

本书在编写过程中得到电力系统及其自动化教研室诸多老师的关心和帮助。电力工程课程组的任课老师,根据教学实践中的体会提出了十分宝贵的意见。黄煜麒老师根据自己多年的教学经验,在编写“电力工程”讲义阶段做了很多工作,付出过辛勤劳动,陈忠老师为“电力工程”教材花了很多心血,提出过很多宝贵的有建设性的建议。张永立老师在仔细审阅本书的过程中提出了许多有益的具体的修改意见。在此,编者一并表示衷心的感谢。

由于编者水平所限,书中错误及不当之处敬请批评指正。

作者

1996.10

符号说明

一、下角标文字符号

符号名称	现用符号	旧符号
允许	al	yx
平均	av	pj
平衡, 分支	b	ph
计算	c	js
差动, 基准	d	B, j, cd
不平衡	dsq	bp, unb
熔体	FE	RT
电源, 发电机	G	F
短路	k	d, dl
继电器	K	j, J, R
负荷, 导线	L	fh, fz
测量	m	j
最大	max	zd, max
最小	min	zx, min
需要	ne	x
数量, 个数	<i>n</i>	<i>f</i>
额定	N	e
线圈, 绕组	N	w
非周期	np	fzq, fq
动作	op	dz, pu
过负荷	OL	gh
周期分量	p	zq
尖峰、峰值	pk	jf
返回	re	h
可靠	rel	K _k
灵敏	sen	lm
整定	set	zd
自启动	ss	zq
系统	s	x
同型	sam	tx
冲击	sh	ch, cj, jm
启动	st	qd, q

涌流	su	yl, y
变压器	T	.B
电流互感器	TA	LH, CT
电压互感器	TV	YH, PT
工作, 接线	w	g, jx
正、负、零序	1、2、0	
励磁	μ	L, LC
相	φ	φ

二、常用设备名称和文字符号

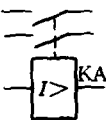
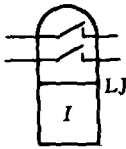
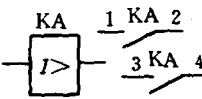
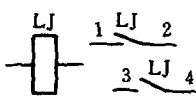
符号名称	现用符号	旧符号
自动重合闸装置	ARD	ZCH
熔断器	FU	RD
发电机、电源	G	F
绿灯	GN	LD
指示灯	HL	
电流继电器	KA	LJ
电压继电器	KV	YJ
中间继电器	KM	ZJ
加速继电器	KAC	JSJ
差动继电器	KD	CJ
气体继电器	KG	WJ, gas
出口中间继电器	KM ₀	BCJ
功率继电器	KP	GJ
信号继电器	KS	XJ
时间继电器	KT	SJ
阻抗继电器	KZ	ZKJ
合闸位置继电器	KOS	HWJ
跳闸位置继电器	KRS	TWJ
合闸接触器	KO	HC
继电器	K	R、j
同期继电器	KSY	TJJ
跳跃闭锁继电器	KLB	TBJ
电感, 电抗器, 线路	L	L, DKB
电动机	M	D
自动开关	QA	ZK
断路器	QF	DL
刀开关	QK	DK
电力开关	Q	K
负荷开关	QL	FK

隔离开关	QS	GL
红灯	RD	HD
控制开关	SA	KK, ZK
按钮开关	SB	AN
变压器	T	B
电流互感器	TA	LH
电压互感器	TV	YH
中间变流器	TAM	ZLH
零序电流互感器	TA ₀	LH ₀
电抗变压器	TAV	DKB
控制电路电源小母线	WC	KM
事故音响信号小母线	WAS	SYM
信号回路电源小母线	WS	
线路灯光信号小母线	WL	DM
跳闸线圈	YR	TQ
合闸线圈	YO	HC

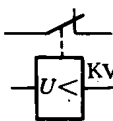
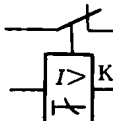
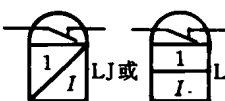
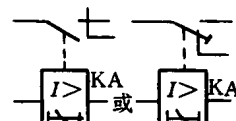
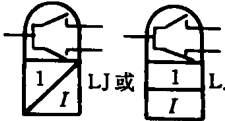
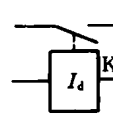
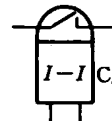
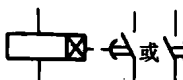
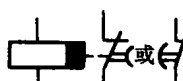
三、常用设备符号

符 号 名 称		图 形 符 号	
		新 国 标(GB4728) IEC	旧 国 标(GB312)
负荷开关(负荷隔离开关)			
断路器			
接触器触点的一般符号	动合(常开)触点		
	动断(常闭)触点		

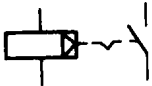
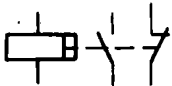
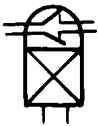
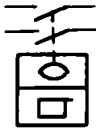
续表

符号名称		图形符号	
		新 国 标(GB4728) IEC	旧 国 标(GB312)
低压断路器(自动开关)			
隔离开关			
开关的一般符号	动合(常开)触点		
	动断(常闭)触点		
过电流继电器 (示出两瞬时动合触点)	集中表示法 (归总式)		
	分开表示法 (展开式)	 (采用“测量继电器”符号)	

续表

符 号 名 称		图 形 符 号	
		新 国 标(GB4728) IEC	旧 国 标(GB312)
欠电压继电器 (示出一瞬时动断触点)	集中表示法	 (采用“测量继电器”符号)	
具有反时限特性的 过电流继电器 (示出一动断触点)	集中表示法	 (采用“测量继电器”符号)	
具有反时限特性的 过电流继电器 (示出一先合后断的 桥接式转换触点)	集中表示法	 (采用“测量继电器”符号)	
差动继电器 (示出一瞬时动合触点)	集中表示法		
时间继电器	集中表示法	缓慢吸合 	
		缓慢释放 	

续表

符 号 名 称		图 形 符 号	
		新 国 标(GB4728) IEC	旧 国 标(GB312)
信号继电器 (具有机械保持和 非自动复位结构)	集中表示法	 (采用“机械保持继电器”线圈和“非自动复位”触点符号)	
中间继电器 (快速动作)	集中表示法	 (采用“快速继电器”线圈符号)	
气体继电器 (瓦斯继电器)	集中表示法		
继电器、接触器、磁力启动器和操作机构的跳、合闸线圈			
双线圈继电器的电流线圈			
双线圈继电器的电压线圈			

目 录

符号说明	(1)
第一章 电力系统的基本概念	(1)
第一节 我国电力工业发展简况	(1)
第二节 发电厂的类型及电能生产过程	(2)
第三节 电力系统和动力系统的组成及其特点	(6)
第四节 电力系统的负荷	(10)
第五节 电能的质量指标	(12)
第六节 电力系统的电压等级及其选择	(14)
思考题	(16)
第二章 发电厂及变电所的一次系统	(17)
第一节 概述	(17)
第二节 高压电器	(19)
第三节 发电厂及变电所的电气主接线	(29)
第四节 配电装置	(39)
第五节 保护接地和接零	(48)
思考题	(54)
第三章 电力系统稳态分析	(55)
第一节 电力线路的结构	(55)
第二节 输电线路的参数计算及等值电路	(58)
第三节 变压器的参数计算及等值电路	(64)
第四节 开式电力网的电压和功率分布计算	(71)
第五节 简单闭式电力网电压和功率分布的计算方法	(80)
第六节 电力系统的无功功率和电压调整	(85)
第七节 电力系统运行的经济性	(98)
* 第八节 远距离输电	(108)
* 第九节 直流输电简介	(115)
思考题与习题	(119)
第四章 电力系统的短路计算	(121)
第一节 概述	(121)
第二节 标幺制	(123)

第三节	无限大功率电源供电网络的三相短路	(129)
第四节	网络简化与转移电抗的计算	(135)
第五节	有限容量系统供电网络的三相短路电流的实用计算	(140)
第六节	电力系统中各元件的序阻抗	(151)
第七节	电力系统各序网络的建立	(158)
第八节	电力系统不对称短路的计算	(163)
	思考题与习题	(173)
第五章	电力系统运行的稳定性	(175)
第一节	基本概念	(175)
第二节	发电机转子运动方程和功率特性	(176)
第三节	电力系统的静态稳定性	(181)
第四节	电力系统的暂态稳定性	(186)
	思考题与习题	(191)
第六章	电气设备的选择	(192)
* 第一节	电气设备的发热和电动力	(192)
第二节	选择电气设备遵循的一般条件	(203)
第三节	高压断路器及隔离开关的选择	(207)
第四节	限流电抗器的选择	(209)
* 第五节	互感器的选择	(212)
* 第六节	母线的选择	(219)
	思考题与习题	(225)
第七章	发电厂及变电所的二次系统	(227)
第一节	基本概念	(227)
第二节	断路器的控制回路和信号回路	(231)
第三节	中央信号及其信号装置	(238)
第四节	发电厂和变电所的计算机监控	(240)
	思考题	(245)
第八章	继电保护	(246)
第一节	概述	(246)
第二节	反应输电线路相间短路的电流保护	(248)
第三节	反应电网零序电量的接地保护	(260)
第四节	输电线路的自动重合闸	(269)
第五节	电力变压器的继电保护	(275)
第六节	发电机保护的配置	(288)
* 第七节	距离保护的概念	(291)
* 第八节	输电线全线速动保护的概念	(296)

思考题与习题·····	(301)
* 第九章 电力系统的计算机算法·····	(304)
第一节 概述·····	(304)
第二节 电力网络的数学模型·····	(304)
第三节 电力系统三相短路电流的计算机算法·····	(309)
第四节 电力系统潮流的计算机算法·····	(313)
思考题·····	(329)
第十章 工厂企业供电·····	(330)
第一节 概述·····	(330)
第二节 工厂供电系统的主接线·····	(330)
第三节 工厂电力负荷的计算·····	(332)
第四节 工厂供电系统的短路电流计算·····	(341)
第五节 工厂供电系统的保护·····	(344)
思考题·····	(351)
附录Ⅰ 各种常用架空线路导线的规格·····	(352)
附录Ⅱ 架空线路导线的电抗和电纳·····	(354)
附录Ⅲ 短路电流周期分量计算曲线数字表·····	(355)
参考文献·····	(359)

第一章 电力系统的基本概念

第一节 我国电力工业发展简况

电力工业是国民经济的一项基础工业，其发展速度必须超前于国民经济发展的速度，否则其他各项工业将要受到制约。

我国自 1882 年建立第一个电厂到 1949 年新中国诞生的 68 年间，电力工业发展非常缓慢。截止解放前夕，发电设备装机容量为 $185 \times 10^4 \text{ kW}$ ，发电量 $43 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，分别居世界的第 21 位和第 25 位。

解放后，经过 40 多年的建设，我国电力工业的面貌发生了巨大的变化。到 1995 年，我国电力装机容量已超过 $2.1 \times 10^8 \text{ kW}$ ，完成发电量 $10000 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，为 1949 年的 230 倍以上。整个“八五”期间，发电设备装机容量以年均 $1500 \times 10^4 \text{ kW}$ 的速度增长，电网建设和运行相应地取得了很大的发展和进步，220kV 及以上输电线路达到 $11.4 \times 10^4 \text{ km}$ ，变电容量大于 $3 \times 10^8 \text{ kVA}$ 。大电网已覆盖我国全部城市和大部分农村。华东、华中、华北、东北电网及南方联营电网装机容量都已超过或接近 $3000 \times 10^4 \text{ kW}$ ，广东、山东、四川、河南、江苏等省电网已超过 $1000 \times 10^4 \text{ kW}$ ，其中广东已超过 $2260 \times 10^4 \text{ kW}$ 。全国已有九个跨省电网和省电网建成了 330kV 和 500kV 超高压主网架。华中、华东两个跨省电网实现了 $\pm 500 \text{ kV}$ 直流联网运行。全国 29 个网、省调度自动化系统，160 个地调调度自动化系统已经通过实用化验收，国调中心调度自动化系统经过电力部组织专家考核，也通过了实用化验收，这标志着我国电网调度自动化系统以及以微波通信为主的全国电力专用通信网装备技术水平、运行管理水平取得了很大进步。我国电力工业正以大电网、超高压、大机组、较高自动化的特征向现代化的目标前进。

我国的水能资源极其丰富，可开发的储量为 $3.7 \times 10^8 \text{ kW}$ ，平均每年发电量为 $1.9 \times 10^{12} \text{ kW} \cdot \text{h}$ ，占世界总量的 25%，居世界首位，但目前开发利用率仅及 10%，发展潜力很大。正在兴建中的三峡工程，总装机容量为 $1820 \times 10^4 \text{ kW}$ ，是世界上最大的水电站。它建成后，对建立全国统一电力系统将起着中枢纽站的作用。

第二次世界大战以来，利用核能发电，已成为人类开拓新能源以满足经济发展需求的不可阻挡的趋势。我国的核电站建设也已经起步，两个核电站——大亚湾和秦山核电站已相继建成并网发电，新的核电站发展计划也正在审议之中，今后将实行火电、水电并举，适当发展核电的方针，以加速我国电力工业的发展。

虽然，我国的电力工业目前已跃居世界前列，但与发达国家相比仍有一定的差距，今后还有待奋力追赶。就国民经济建设的情况来看，电力工业仍未能满足工农业生产和人民生活对用电的需求，有些地区缺电还比较严重，还将会阻碍国民经济的稳步发展。因此，我国电力工作者还面临着光荣而又艰巨的任务，必须加速电力工业的发展，使其成为名符其实的先行工业，以推动整个国民经济持续、稳步地发展，为在本世纪末使我国初步实现四个现代化作出积极的贡献。

第二节 发电厂的类型及电能生产过程

一、发电厂的类型

在人类社会进步的漫长过程中，太阳能、风能、水能、生物质燃烧产生的能源等等一直是推动人类社会发展的动力。上世纪末开始出现的电力工业，是能源工业中的一场革命。它使得一些不能直接和方便地加以利用的一次能源变成了可以方便而有效地输送、分配和使用的二次能源，而且为本世纪的技术突飞猛进和所有新兴产业（如电子工业、电化学工业、核工业）的发展提供了物质基础。

发电厂是直接生产电能的部门。由于所用“燃料”的不同，发电厂的种类也不同，例如：利用矿物燃料，如煤、石油等为能源转换为电能的，称为火力发电厂；利用水能转换为电能的，称为水力发电厂；利用原子能转换为电能的称为核电厂；利用风力转换成电能的称为风力发电厂。除此以外，还有地热发电厂、太阳能发电厂、磁流体发电厂等等，目前，世界各国前三类发电厂居多，下面将分别介绍这三类发电厂的生产过程。

二、电能的生产过程

1. 火力发电厂

火力发电厂简称火电厂，是利用煤、石油、天然气或其他燃料的化学能生产电能的工厂，其能量的转换过程是：燃料的化学能→热能→机械能→电能。

火电厂分两类：一是单一生产电能的火电厂，称凝汽式火电厂；二是既生产电能，又生产热能的热电厂，称热电厂。由于热电厂供热距离不能很远，通常建在靠近热负荷的地区。凝汽式火电厂则可建在燃料产地。

下面以燃煤电厂为例，说明火电厂的主要生产过程。图 1-1 为凝汽式火电厂生产过程示意图。

原煤从产地运进电厂后，先储入原煤仓，然后经输煤皮带送进原煤斗并落进磨煤机中，煤被磨成煤粉后，由排粉机抽出，随同热空气经喷燃器送入锅炉的燃烧室内燃烧。燃烧时放出的热量，一部分被燃烧室四周的水冷壁所吸收，一部分加热燃烧室顶部和烟道入口处的过热器中的蒸汽，其余的热量则被烟气携带穿过省煤器、空气预热器，继续把热量传给蒸汽、水和空气。烟气经除尘器净化处理后，由引风机从烟囱排入大气。燃烧时生成的灰渣和由除尘器收集下来的细灰，用水冲进冲灰沟排出厂外。

燃烧用的助燃空气，由送风机送入空气预热器加热，加热后的热空气一部分进入磨煤机用于干燥和输送煤粉，大部分热空气则进入燃烧室助燃。

水和蒸汽是将热能转换成机械能的主要工质。经净化后的给水，先送入省煤器内预热，然后进入锅炉顶部的汽包内再降入水冷壁管中，待吸收了燃烧室的热能后蒸发成蒸汽，此蒸汽流经过热器时，进一步吸收烟气的热量而变为高温高压的过热蒸汽，然后经过主蒸汽管道进入汽轮机，进入汽轮机的蒸汽在喷管里膨胀而高速冲动汽轮机的转子转动，将热能转换成机械能。汽轮机带动发电机旋转，将机械能转换成电能。汽轮机内作功后的蒸汽，在冷凝器中被冷却凝结成水。凝结水经除氧器除氧，再经加热器加热后，用给水泵重新送进省煤器预热。上述过程循环往复，周而复始，发电厂便连续不断地生产出电能。

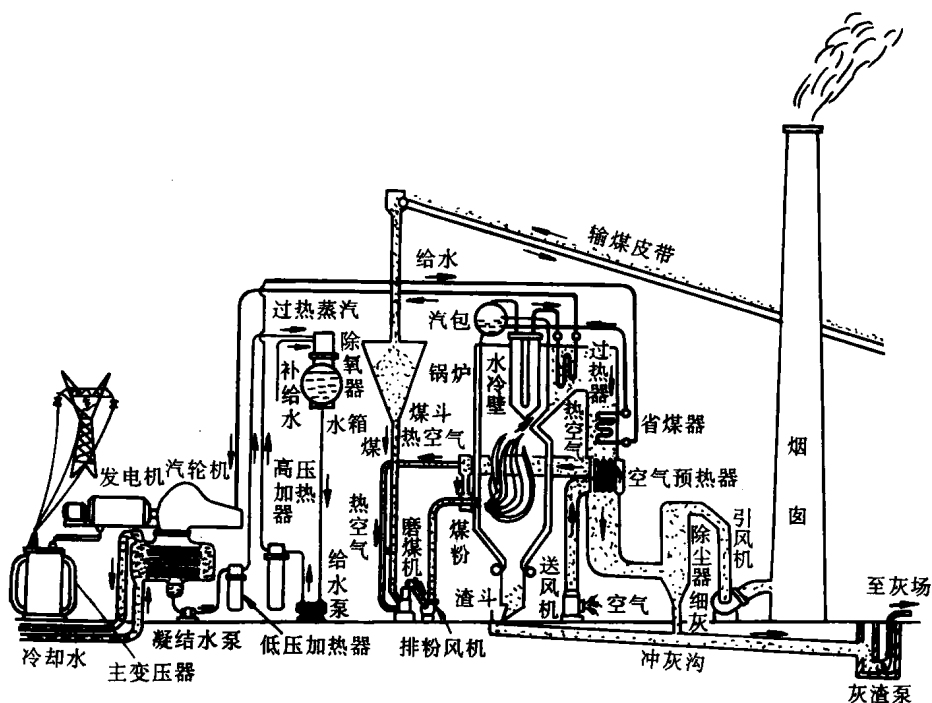


图 1-1 凝汽式火力发电厂生产过程示意图

冷凝器所需的冷却水,由循环水泵从江河上游(或冷水池)打入,冷却水在冷凝器中吸热之后,流进江河下游(或冷却塔)散热,然后不断循环。

在凝汽式火电厂中,由于循环水带走很大一部分热能,因而这类电厂的效率不高,通常为 30%~32%,也就是说,只有 30%~32%的燃料热量用来生产电能,其余 68%~70%的燃料热量,在发电过程中未加利用而被损耗掉。提高凝汽式火电厂效率的有效措施是尽量采用高温、高压的蒸汽参数和大容量的汽轮发电机组。例如:蒸汽为 170~225MPa, 550~600℃ 的凝汽式火电厂,其效率可达 34%~40%。

热电厂与凝汽式电厂主要区别在于前者不仅生产电能,而且生产热能。热电厂装设有给水加热器,与热用户构成热力网。利用汽轮机的抽汽将水加热后,其所带热负荷可能是水或蒸汽,视用户性质而定。从汽轮机抽出的蒸汽量,取决于热能用户对热或蒸汽的需求量。当抽出蒸汽量占汽轮机总输入蒸汽量较大比重时,进入冷凝器的蒸汽量就减少。因此,循环水的热量损耗便相应降低,从而使热电厂的效率远高于凝汽式电厂。现代化大型热电厂的效率可达 60%~70%。由于受热负荷等条件的限制,热电厂不可能大量兴建。

2. 水力发电厂

水力发电厂是利用江河水流在高处与低处之间存在的位能差进行发电的。它的基本生产过程是:从河流较高处或水库内引水,利用水的压力或流速冲动水轮机旋转,将水能转变成机械能,然后水轮机带动发电机旋转,将机械能转变为电能。

水电厂发出的功率 P 与河流上、下游的水位差(落差) H 和流量 Q 成正比,可表示为

$$P = 9.87QH \quad (1-1)$$

式中, Q ——通过水轮机的流量(m^3/s);

H ——水位差(m);

η ——水轮机组的效率($\eta=0.8\sim0.9$)。

水电厂的生产过程远比火电厂简单,图 1-2 示出堤坝式水电厂示意图,由水坝 1 将水维持在高水位 H_a ,在水的势能作用下,水由高水位 H_a 流向低水位 H_b ,途中经过压力水管 2 进入螺旋形机壳 3,推动水轮机转子 4 旋转,水轮机转子再带动发电机 5 的转子旋转,将机械能转换成电能。水流对水轮机做功之后,经尾水管 6 排往下游(低水位 H_b 处)。

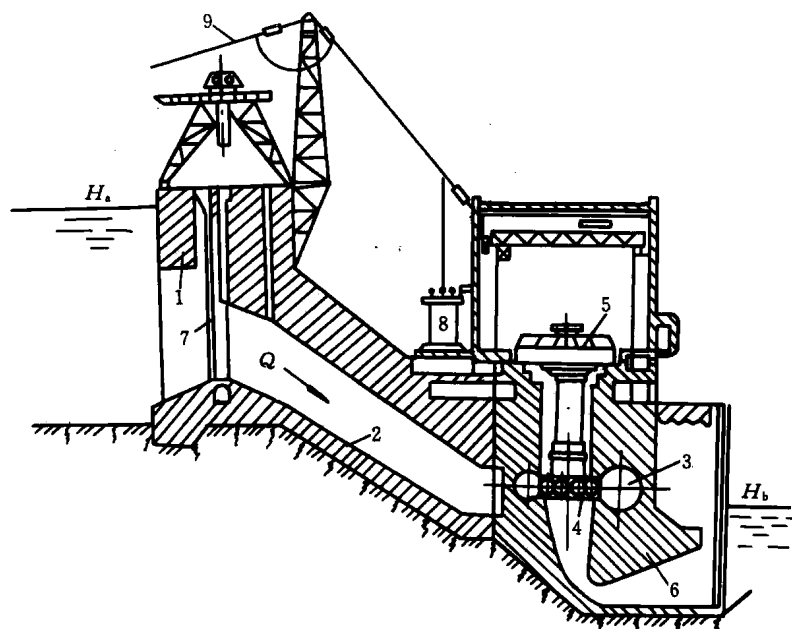


图 1-2 堤坝式水电厂示意图

由式(1-1)可见,在水位差一定的条件下,调节阀门 7,加大水流量 Q ,即可增加水电厂发出的功率 P ,以满足负荷增长的需要。

与火电厂相比,水电厂具有一系列特点:

(1)利用循环不息的水能发电,可节省大量燃料,而且没有环境污染;

(2)生产过程较简单,所需的运行维护人员较少,容易实现电能生产自动化;

(3)生产效率较高,发电成本低,大中型水电厂的发电效率约为 $80\%\sim90\%$,成本约为火电厂的 $1/3\sim1/4$;

(4)水电机组从静止状态启动到满负荷运行,正常时只需 $4\sim5$ 分钟,事故时还可缩短到 1 分钟左右,而火电厂则需数小时,故水电厂能适应负荷的急剧变化,宜于承担系统的峰荷及作为备用。

必须指出,水电厂仍存在下面一些缺点:

(1)投资较大,工期较长;

(2)受气象、水文等自然条件的影响,有丰水期和枯水期之别,因而发电不均衡;

(3)由于水库的兴建,将淹没一部分土地,给农业生产带来一些不利影响。

此外,还可能在一定程度上破坏自然界的生态平衡。

3. 核电厂

核电厂也是热力发电厂的一种形式。它与其他热力发电厂的区别在于所使用的燃料不同。核电厂的燃料称核燃料。核能发电主要是利用重核裂变使核能转变为热能,这一过程是在核反