

中国现代科学全书·水利工程

水利水电工程

HYDRAULIC AND
HYDROPOWER ENGINEERING

李仲奎 马吉明 主编



科学出版社

www.sciencep.com

中国现代科学全书·水利工程

水 利 水 电 工 程
Hydraulic and Hydropower Engineering

李仲奎 马吉明 主编

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

《水利水电工程》为《中国现代科学全书》中《水利工程》卷第四分卷。内容主要包括水利水电工程概述,水电站与水泵站的工作原理、类型、枢纽布置、厂房结构、机电设备、高压管道、引水平水建筑物、水力系统中的不稳定流现象和调节保证问题等;还包括了内河航运工程中的码头、船闸和航道工程,以及地下洞室工程。

书中既回顾了本学科的历史,也前瞻了今后的发展,提出了一些新的思路 and 观点。

本书内容深入浅出,通俗易懂,既有相关基础理论的论述,又有大量工程实例、插图,使专业性问题也便于非专业读者的理解和接受。本书适合于相当大学文化程度的读者使用。

图书在版编目(CIP)数据

水利水电工程/李仲奎,马吉明主编. —北京:科学出版社,2004
(中国现代科学全书·水利工程)
ISBN 7-03-013305-6

I. 水… II. ①李…②马… III. ①水利工程②水力发电工程 IV. TV

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 041459 号

责任编辑:童安齐 沈 建 / 责任校对:宋玲玲
责任印制:吕春珉 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004年9月第一版 开本:850×1168 1/32
2004年9月第一次印刷 印张:18 1/4
印数:1-2 500 字数:464 000

定价:42.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

前 言

《中国现代科学全书》的编写和出版是规模宏大的跨世纪学术专著出版工程,水利水电事业又是我国方兴未艾的朝阳工业,发展前景远大,编者以有幸参与这套全书的工作并编写《水利水电工程》分卷为荣,同时感到责任的重大和担子的沉重。

《水利水电工程》分卷是工学类《水利工程》卷的第四分卷。按照学科划分,水利水电工程属于水利工程一级学科下的二级学科。其涵盖范围包括水力发电工程、农田水利工程及航运工程,内容相当广泛,这对于一本限制字数为 30 万字左右的分卷来说,无疑带来极大的困难。在《水利工程》卷主编董曾南教授的组织和支持下,根据《中国现代科学全书》编撰条例的精神和分卷规划,分卷参编者进行了多次讨论,明确了分卷的编写原则应该是突出重点、深入浅出,既保持学科的系统性、科学性、逻辑性、启发性和前瞻性,但又不能包罗万象、面面俱到,不求全而求新,不求细而求精。虽然编者们已经是尽力去这样做了,但编写后仍觉与上述要求有一定差距。

本书是以水力发电工程为主进行编写的。由于已经有《农业工程》卷存在,所以农田水利工程部分主要考虑了泵站工程,其他如渠系、灌溉工程仅在概论中提及,未做详述。又由于已经有《港口、海岸及近海工程》分卷存在,所以航运工程部分仅论及了内河航运。这些学科方向的其他详细内容,读者均可在相关分卷中找到。

本书的编写是集体努力的结果,参编者均为清华大学水利水电工程系从事水利水电工程教学、科研、工程实践数十年的教授。如谷兆祺教授、姜之琦教授虽已退休多年,但仍辛勤工作在水利水电事业的第一线,为学科的发展建设和青年教师的培养发挥着重要作用。书中的内容也反映出他们多年来的研究成果和心得。

本书分为十章,谷兆祺教授编写了第一、二、五章,姜之琦教授编写了第八章,聂孟喜教授编写了第十章,马吉明教授编写了第三、四章,李仲奎教授编写了第六、七、九章;最后由李仲奎教授进行全书统编和撰写前言。

参编者特别感谢国家电力水利规划总院、中国水利水电建设工程咨询公司原总工程师、教授级高工刘文雪先生,他在百忙之中校审了全书原稿,提出了许多宝贵、中肯的修改意见,并提供了最新水利水电工程资料,使本书的内容提高了品味,增加了新意。

参编者虽极尽努力,但时间和水平所限,本书内容、结构方面仍难免有疏漏、贻误和欠妥之处,乞望读者不吝赐教,多作指正。

目 录

前言

第一章 水利水电工程概论	1
1.1 水利水电工程涵盖范围	1
1.2 水利水电工程发展简史	3
1.3 新世纪的水利水电工程	9
第二章 水电站和水泵站的工作原理及类型	26
2.1 水力发电基本原理及水能计算	26
2.2 常规水电站类型	42
2.3 抽水蓄能电站	50
2.4 潮汐与波浪电站	64
2.5 水泵站	66
第三章 水电站及水泵站水力系统中的不稳定问题	72
3.1 电力系统及引水系统中的瞬变现象	72
3.2 水击基本方程组及波的传播速度	77
3.3 简单管中最大正、负水击压力的计算	82
3.4 复杂管道水击的简化计算	95
3.5 调节保证计算	98
3.6 调压室的功用、设置条件、类型及布置方式	106
3.7 调压室的涌浪计算及压力叠加	114
3.8 调压室的波动稳定问题	125
3.9 调压室构造与结构设计	127
第四章 引水建筑物	132
4.1 无压引水建筑物	132

4.2	有压引水建筑物	141
4.3	进水口的主要设备	149
第五章	压力管道	154
5.1	压力管道的种类、布置及尺寸的决定	154
5.2	地面式压力管道	157
5.3	坝内压力水管及坝后背管	163
5.4	地下埋藏式压力管道	168
5.5	分岔管	184
第六章	水电站、水泵站厂房建筑物的类型及组成	190
6.1	水电站地面厂房建筑物	190
6.2	水电站坝内式厂房建筑物	206
6.3	水电站地下式厂房建筑物	209
6.4	水电站厂房的结构和组成	213
6.5	水泵站厂房建筑物	216
第七章	水电站、水泵站厂房布置及结构设计	232
7.1	厂房布置设计资料及步骤	232
7.2	主厂房布置及特征尺寸的确定	242
7.3	副厂房的布置与设计	268
7.4	变电站或开关站的布置	277
7.5	厂区枢纽的布置和设计	282
7.6	厂房建筑物的结构设计	289
第八章	水电站和水泵站的主要机电设备	314
8.1	水轮机、水泵	314
8.2	发电机、发电电动机与电动机	360
8.3	电气一次设备	377
8.4	电气二次设备	384
8.5	水电站及水泵站的辅助机械设备	397
8.6	水电站的通讯系统	409
8.7	水电站的起重与运输	410

8.8 水电站及水泵站的发展远景	410
第九章 隧洞、地下厂房洞群设计及施工	414
9.1 水利水电工程隧洞	415
9.2 地下厂房洞群布置设计	419
9.3 地下厂房洞群围岩稳定问题	446
9.4 地下厂房洞群的施工	456
9.5 地下厂房洞群信息化设计及反馈分析	471
9.6 地下洞室工程的新进展	477
第十章 内河航运工程	481
10.1 内河码头工程	481
10.2 内河低水头船闸	505
10.3 内河航道工程	538
附录	552
表 1 世界上已建和在建的装机容量 400 万 kW 以上的水电站	552
表 2 中国已建和在建的装机容量 50 万 kW 以上的水电站	553
表 3 我国已建和在建的地下水电站	554
表 4 国外装机容量 25 万 kW 以上的地下水电站	558
表 5 国外装机容量 25 万 kW 以上抽水蓄能地下水电站	565
表 6 国外部分水电站地下厂房的开挖进度	568
参考文献	569

第一章 水利水电工程概论

1.1 水利水电工程涵盖范围

1.1.1 本学科主要涵盖范围

水利水电工程是水利工程学科下的二级学科(目前学科划分规定如此),它又可以再分为下列几个重要部分。

1. 防洪与治河工程

天然河流汛期常常会发生洪水,洪水会漫溢或冲毁农田或城市,防洪与治河工程就是研究如何防御洪水、控制洪水,避免或减少其造成灾害。

为了研究洪水的防御与控制,首先就要研究洪水发生的原因、洪水的规律、河道行洪的规律、影响洪水的因素等等,因此要首先研究水文气象、泥沙运动、河道变迁规律,要研究水力学、河流动力学以及水利规划、水利计算。

其次要研究用什么办法来控制、调节、改变河道的流态,防御洪水造成的破坏,因此要研究水工建筑物,研究坝、堤防、泄水建筑物、闸、金属结构、闸门及启闭机等等。

然后要研究如何建造实现这些建筑物,即研究施工技术、施工组织、施工管理等等。

防洪与治河工程在水利水电工程中占很重要的地位,一是因为洪水无情,处理不当往往会造成大范围的灾害,影响很大;二是因为大多数河道都会造成洪水灾害,这是一个带有普遍性的问题,没有洪水灾害的国家或河道是极少的。所以许多水利水电工程常把防洪放在首位。

2. 灌溉、给水及农田水利工程

农业为基础,每一个国家都重视农业。但是自然气候不会总是风调雨顺。相反,常常会有干旱缺水的情况,因此农田要有灌溉设施,城镇要有给水设施,提供生活用水、工业用水。与灌溉给水联系在一起的是排水工程,多余的水、废弃污水还得设法排走,否则会引起农田盐碱化、沼泽化,城镇如果没有污水处理及排污系统,就会引起大面积污染,破坏整个环境。我国是一个水资源比较缺乏的国家,农田灌溉、城市供水往往是仅次于防洪的第二位重要任务。

3. 水力发电工程

利用天然河、湖、海洋等水力资源发的电能是可持续、可再生的能源,是无污染的洁净绿色能源,和火电、核电相比,有其优越之处。要搞水力发电,通常要进行规划、勘测,要修建挡水建筑物、泄水建筑物、输水建筑物、发电建筑物及其他建筑物,还要制造、安装机电设备、金属结构。

我国水力资源的蕴藏量是十分丰富的,理论蕴藏量达 6.8 亿 kW,技术经济上宜于开发的在 3.8 亿 kW 以上,均占世界首位,因此许多水利工程中均有水电站这一部分。也有不少工程,其主要开发目标就是水力发电。

除了河道上建常规水力发电站之外,也有在沿海合适的地方利用潮汐、波浪来发电的,它和常规水力发电相比,既有许多共同点,但也有一些特殊的地方。

近年来抽水蓄能电站发展很快,它和常规水电站有相同和不同之处,一般也归入水力发电工程。

4. 航运工程

水运是各种运输工具中运费最低、运量最大的一种,利用江、湖、河、海发展水运是发展交通的一个重要方面。

航运工程又可以分为三大部分。一是码头仓储工程。沿海、

沿河建造码头及其配套设施。二是船闸或升船机工程。三是河道整治工程,如疏浚拓宽航道,调整流速,整治滩险等等。

5. 其他有关水利的工程

例如发展渔业、旅游业,改善环境等等都会与水利工程有关。

1.1.2 本卷主要涵盖范围

本卷名为水利水电工程,但由于学科的交插,灌溉工程部分包括在农业卷中,防洪治河工程包括在河流动力学卷中,因此本卷主要包括水力发电工程的电站建筑部分、引水调水及水利工程中的泵站建筑部分,此外还包括了内河航运工程部分。

1.2 水利水电工程发展简史

1.2.1 中国水利工程

我国是一个文明古国,在水利方面远在四五千年以前就有不少发展,无论是防洪、灌溉、航运、城市给排水各方面都有许多令人惊叹的成就。

1. 古代防洪史

公元前二千多年尧舜时期,为了防御江河洪水的袭击,人们就开始建堤防水,后来任命禹治水,他用疏导的办法疏浚黄河下游入海河段,开挖长江、淮河之间的水系,使汉水、淮河都通入长江。这是我国有文字记载的最古老的治河历史。

战国时期,黄河下游就有了系统的堤防工程。两汉时期,各种护堤的措施都已发展了,到王景治河时,已经知道要做好统一规划、统一施工,视具体条件不同,采用分疏、改道、防堵、开浚等各种办法来治水,修建了汉水下游的堤防。

明朝的水利专家潘季驯,在治黄时还着眼于治沙,提出筑堤束水、以水攻沙,他还把黄河、淮河、运河统一规划,实行蓄清排浑,刷

深河道。另外他也根据当地条件,修建分洪区,实行放淤固堤。这些办法直至今日也是非常有效的。

到了清朝,长江荆江段大堤、江西赣江段大堤、广东珠江北、东、西各支流的大堤均已形成,有效地保护了广大的地区和城镇。明、清两代对永定河的治理更是花费了大量的人力、物力,保证了国都北京的安全。

2. 古代灌溉史

我国和世界上其他古国一样,很早就发展了灌溉事业,有较详细文字记载的始于两千多年前的战国时期,秦在关中地区修建了郑国渠、白渠,灌溉面积达60余万亩,延续至今,就是今日的泾惠渠。

在公元前100多年的西汉时期,宁夏地区屯兵开垦,修建了许多引黄灌区,从甘肃永登县一直延伸到内蒙乌拉特前旗一带。修建了长230km的唐徕渠及长200多公里的汉延渠;长100多公里的大渠有10条,大小支渠68条,灌溉农田100多万亩,不少灌区至今还在使用。

公元前200多年蜀郡太守李冰,在成都灌县修建都江堰,科学地布置了凹岸进水,鱼嘴分流,飞沙堰溢洪退水,宝瓶口引水。他提出水位控制及岁修要求,既保证合适的引水量,防止灌区内发生洪水,又科学地排沙,减少渠系淤积。他提出的“深淘滩,低作堰”、“迂弯截角,逢正抽心”等等许多法则,无一不完全符合现代水利科学的原理。两千多年来都江堰灌溉面积不断发展,由一二百万亩,直到今日上千万亩,使得成都平原成为举世公认的“天府之国”。

古代淮河流域最有名的蓄水灌溉工程为安徽的芍陂,始建于公元前598年至591年间,引淝河之水,灌溉淮河南岸的农田,最多时可灌到400多万亩,从春秋战国一直延续至今,解放后进行了综合治理,开挖淝东干渠,沟通了淝河总干渠,芍陂成为淝史杭灌区较大的反调节水库,灌溉效益有很大的提高。

古代北方最大的灌区还有引漳十二渠,为战国前期西门豹所

开创。在今临漳县西南 20km 的邺镇引漳河水灌溉农田,在渠首以下 6km 河段内建拦河低溢流堰十二道,在漳河南岸各开引水口,建成十二条干渠,灌地 10 万亩,一直沿用下来,解放后,1959 年建成岳城水库,自水库引水,北岸开民有渠,南岸开幸福渠,总共灌田数百万亩,代替了古灌区。

新疆地区的坎儿井也是历史悠久的古灌溉工程,是公元前从中亚传来的灌溉方式。在地下开凿暗渠,引来雪山之水。开凿的办法是先开一系列竖井,井距 100~200m,然后在地下连通形成暗渠,渠高 2m,宽约 1m,长度最大的可达 30km,水在地下流动,减少了蒸发与渗漏,暗渠直到农田附近方流出地面,成为明渠,明渠末端还常建有小蓄水池,供蓄水灌溉。坎儿井流传了几千年,直至解放后,大量发展,在 20 世纪 50 年代新疆共有坎儿井灌渠 5000 余条。

其他古代灌溉工程还有很多很多,黄河后套灌区,民生渠、广济渠、它山堰,台湾古灌区等等都是很有名的。

3. 古代航运史

公元前 486 年,春秋战国时吴王修建长江淮河之间的邗沟,从长江扬州一直挖到淮安以北,沟通了江淮之间的水运。此后四年又开挖荷水,沟通了济水和泗水,使黄河与淮河之间相通。

公元前 361 年魏惠王开始开挖鸿沟,在淮河以北形成水网。

公元前 216 年秦始皇为了出兵南方,在今广西桂林附近修建灵渠,沟通湘江与漓江,灵渠全长 33km,有拦河堰、渠道、船闸等设施,至今还在运作。

隋朝开通京杭大运河,从北京直到杭州,全长 1700km,在沿线修建水库,拦蓄溪水、泉水作为运河水源,仅山东一段就有 300 余处。在运河上修建通航船闸 30~40 多处,调节水位。直到清朝黄河在铜官厢向北改道后,运河分成了几段,北段可通行 300t 的船队,南段可通行 900t 的船队。解放后,扩建了大运河,从徐州到长江,底宽展宽至 45~120m,建造了 7 个船闸,江北段可通 500t 船

队,年货运量 2000 万 t,江南段可通 1000t 船队,年货运量超过 8000 万 t 以上。黄河以北至天津段也可通行小型船只。

历史上开凿的著名的运河还有许多条,从黄河通淮河的汴渠,从长安到潼关黄河边的漕渠等等。这些运河在船闸建造、防御洪水、清淤减淤、引水取水等方面都有非常科学的创造与实践经验,是十分了不起的成就。

4. 古代城市供水排水工程

远在春秋战国时代,古人在选择筑城地址时,就已经注意到城市要求供水、排水的问题,要求城市建在有供水保障、有排水通道的地方,各个城市一般都有护城河,既可作为防御设施,又是引水、供水的设施,护城河往往有排水去处,可以防洪又能排除污水。

唐代的长安城,规模很大,城周长 36km,城区面积 84km^2 ,有龙首渠、永安渠、清明渠三条渠道分别将城东泸水、城西南交水、城南的滹水引入城内,城内南北向有 11 条大街,东西向有 14 条大街,各街两侧者有水渠,主干街道上水渠上口宽 3.3m,深 1.7~2.1m。这些沟渠既有输水作用,又使全城各处环境优美。另外长安还有漕渠,与渭河并行,直通潼关黄河,是重要的水运通道。

隋唐时洛阳也是一个重要都市,城跨洛河两岸,周长近 30km,洛河上游开了五条渠道向洛阳供水,并且与漕渠相通,成为水运交通的中心。

其余像北京、开封、杭州、南京等许多大城市都有很完整、科学的供水系统及排污系统。

1.2.2 世界水利工程

1. 世界防洪史

许多文明古国早在公元前 3000~前 2000 年前就开始有水利建设。

古埃及在公元前 3400 年就修建了尼罗河左岸大堤,以保护西岸的农田和城市,大堤全长约 1100km,后来右岸大堤也逐渐建造

起来。

公元前 2000 多年前中亚美索不达米亚地区也已有了完善的堤防系统。

公元前 2650 年前,埃及在杰赖维干河上就修建了调蓄天然来水的水库,同期在中亚幼发拉底河沿岸,也利用湖泊洼地作为滞洪调节的水库。

河道整治工程始于 1000 年前,德国人在施特拉斯堡一带做过裁弯取直的工程。

20 世纪,由于科学与经济的发展,世界上许多国家有了现代化的系统的防洪工程。

2. 灌溉发展

公元前 4000 年在中亚幼发拉底河、底格里斯河一带以及古埃及尼罗河一带就开始利用河水灌溉农田,干渠用砖砌,养育了上千万的人口。最初是利用洪水漫灌,到公元前 2900 年前就开始有灌溉系统。巴比伦时代,更发展到修建水库,向两岸渠道内供水。公元前 600~560 年前,更采用了像现代喷灌这样的技术。

印度河流域在公元前 2500 年左右已有引洪淤灌。在中世纪,印度建造了数万座水库用于灌溉。其中在博帕尔东南的一座水库库区面积大到 650km^2 。公元前 300 年,印度河流域已藉灌溉做到一年两熟。

斯里兰卡在公元 2~14 世纪就建造了大小 1.5 万余座的蓄水池。柬埔寨早在 1050 年就在吴哥附近修建了暹粒河灌区,并且一直使用到现在。

在南北美洲,灌溉事业也早就发展了,公元前 1000 年秘鲁在皮斯科河谷就有灌溉工程,印加帝国统治的一千多年间,灌溉又得到了很大的发展。

近 200 年来,灌溉事业发展很快,1800 年左右,全世界灌溉面积约有 800万 hm^2 。20 世纪初全世界灌溉面积达到 4800万 hm^2 ,60 年代末则超过 32亿 hm^2 。

和灌溉同时发展的有排水工程,公元前5世纪尼罗河流域就有排水工程。10世纪左右,欧洲北海附近的低湿地区修建了排水工程。

截至20世纪60年代,全世界有人工排水设施的土地约有1亿 hm^2 ,美国、俄罗斯等国的排水面积都很大。

3. 世界城市供水史

公元前2900年埃及孟菲斯城就有了城市供水工程。大约在公元前2500年至公元前1700年间,印度河流域两座大城市就已有完整的供排水系统。

公元前800年,乌拉尔图王国(今土耳其东部)修建了向首都图什拉供水的渠道,全长56km。以后首都到托普拉卡莱,又扩建了输水工程,建造两座主坝,若干副坝,形成一座水库,由两条主干渠向下游输水。

公元前700年,为了向耶路撒冷城供水,修建了一条长530m,高2m的输水隧洞。

古罗马人在城市供水排水工程方面有杰出的创造,在公元前312年至公元226年间先后建成11条向罗马供水的渠道,总长400多公里,先将水贮存在城市周围的200多个水库中,然后输送至城内,当时已采用渡槽这种结构型式,最高的渡槽离地面达108英尺,下部为石拱干砌基础,上部为砖砌渠道,宽0.6~2.0m,高1.6~2.6m,至今还有一些遗迹。

公元9世纪,在埃及开罗也建造过一条输水渠道,后来在巴黎、墨西哥、伦敦、日本水户都建造过颇具规模的供水工程。

由于城市规模越来越大,城市供排水工程日趋完善,规模也日益扩大,已有上千公里长的供排水渠道。

4. 世界运河史

古罗马人在欧洲早就修建了许多运河。

公元67年在科林斯地峡开了一条长23km的运河,连接莱茵河和默兹河。

16~18 世纪是欧洲运河大发展的时期,法国在 1642 年建成布里亚尔运河,把卢瓦尔河与塞纳河连在一起,沿线建有 40 座船闸。1681 年建成朗格多克运河,长 250km,把比斯开湾和地中海连在一起,沿线建有 108 座船闸。同期在英国、德国、希腊、俄罗斯、美国、加拿大等地都建造了不少规模巨大的运河系统。

19~20 世纪,世界上建成了三大现代化的运河,即德国的基尔运河、埃及的苏伊士运河以及巴拿马的巴拿马运河。基尔运河全长 95km,沟通了英吉利海峡及波罗的海,缩短航程 685km,至今已扩展至宽 40m、吃水深 9m 的航道,沿线有 6 座船闸。苏伊士运河沟通地中海及红海,沿线无船闸,全长 160km,河面宽 160~200m,吃水深达 20m 以上,可通行 20~30 万吨的油轮。巴拿马运河沟通大西洋及太平洋,全长 85km,河宽 150~304m,航道水深 13.5m,有二座船闸,为双线,可通过 6.5 万吨级船只,每年可通过 1.5~2 亿吨的总吨位。

1.2.3 水力发电

世界上最早在 19 世纪末、20 世纪初开始建造一些小型水电站。我国建造的第一个水电站是云南昆明石龙坝的小水电站,建在滇池入金沙江的螳螂川上,1912 年第一期工程完工,装二台各 240kW 的机组。1950 年以前扩建了五次达 2368kW,1950 年以后又扩建两次,目前该电站总装机为 8368kW。

1949 年以前我国水电装机总容量仅 36 万 kW,建国 50 多年来,水电装机总容量已近 9000 万 kW,为世界第二。

1.3 新世纪的水利水电工程

1.3.1 我们面临的水资源状况

全世界所拥有的水资源约为 $1.386 \times 10^{19} \text{ m}^3$,但是其中绝大部