

金泰来等编著

高坝闸门 总体布置



科学出版社

高坝闸门总体布置

金泰来 等 编著

科学出版社

1994

(京) 新登字 092 号

内 容 简 介

本书收集了国内外工程 151 座、图 285 幅, 其中国内工程 30 座、图 71 幅; 国外工程 121 座、图 214 幅。它基本上反映了当代世界上高坝闸门总体布置的技术水平。本书还介绍了世界上主要高坝及闸门的一些参数, 论述了高坝闸门总体布置的指导思想及规划原则, 布置方法与优化程序; 并按不同的河谷形态、水文条件及坝型列举典型图例, 对每幅图例的特色、优点和新意进行了评述, 并附 32 幅世界著名高坝彩色照片。

读者对象: 水利水电工程技术人员及有关高等院校师生。

高坝闸门总体布置

金泰来 等 编著

责任编辑 林 鹏

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1994 年 4 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1994 年 4 月第一次印刷 印张: 17 3/8 插页: 8

印数: 1~2200 字数: 399 000

ISBN 7-03-003836-3/TV·8

定价: 40.00 元

序 一

进入 90 年代后, 中国的水利水电建设事业跨入了一个崭新的阶段, 同时也面临着巨大的挑战。形势的发展比我们过去设想的要急迫得多, 这是中国经济发展的大形势所决定的, 不以人们的意志为转移。

在今后的 10—20 年时间中。我们要解决大江大河的洪涝灾害问题、要实现南水北调的宏伟计划, 还要修建上亿千瓦的巨大水电站群, 举世瞩目的跨世纪工程—长江三峡工程已在进行施工准备。为此, 我们将在大江大河、高山陡谷中修建两三百米高的大坝, 数百亿立方米容量的水库, 十多公里长的隧洞和规模空前的地下工程。还必须解决泄洪消能、高速水流、岩土力学以及静动力学等一系列科技问题。为了攻克这些难关, 大量的规划、设计以及研究试验工作正在紧张地进行, 并发表了一系列设计科研成果和出版了大量书刊, 使水电建设在学术方面呈现出一片欣欣向荣的气象。

但是, 要使宏伟的水工建筑物能按设计要求运行, 起到严格控制水流, 保证结构安全的作用, 还必须配备相应的金属结构—首先是水工闸门。闸门不仅是水工建筑中必要的组成部分。而且在众多情况下, 对建筑物的功能乃至安全起着决定性的作用。不少的水工建筑物正是由于闸门故障而导致失事, 更多的建筑物由于闸门的布置、设计、制作欠妥而留下缺陷或隐患, 甚至不得不改建、重建。随着水利水电工程规模的不断扩大, 闸门的尺寸、水头、过闸流速、泄量也和大坝及地下洞室一样在不断加大, 达到前人难以想象的程度, 闸门的布置、设计、制作和安装运行同样面临着巨大的挑战。从材质、工艺到设计、分析, 技术问题日益尖锐, 传统的设计也将向规范化、优化和自动化方向发展。而在我国众多的水工论文和书籍中, 对闸门的专著显得很少, 这不能不说是一个缺憾。

现在, 我们高兴地知道金泰来同志主编的《高坝闸门总体布置》将出版问世, 无疑将为填补这方面的空白做出贡献。这本书集中研究总结了高坝闸门布置和设计的指导思想及原则, 并用大量实例进行解释。我有幸在本书付印以前得读全稿, 十分惊叹编者所化心力之巨和取材之广, 也非常赞赏全书的构思布局。这本书中没有长篇理论和说教, 在文字说明中只提纲挈领, 言简意赅地论述一下闸门布置的指导思想、主要参数的确定方法和目前达到的水平, 然后开门见山地分别就河谷形态、洪水大小和不同坝型, 用具体布置实例来阐述。全书搜集的国内外工程达 151 座、图纸 285 幅, 还有 32 幅世界著名高坝彩照, 让读者在大量实例中自己融会贯通。这本书集技术总结和手册的功能于一体。我深信本书的出版不仅可填补水工建筑出版物中的空白, 而且将对我国水工设计工作有很大帮助。读后你会感到编者的努力是有价值的。

金泰来同志问序于我, 我乐意写此短文以表钦佩和祝贺之意, 并希望今后有更多有关水电金属结构的专著问世。

潘家铮

1993 年 7 月于电力工业部

序 二

在有大量泄洪任务的高坝大型水电站工程建设中,控制洪水泄放和厂房引水的闸门,是保障工程安全和充分发挥枢纽效益的关键。近几十年来,高坝大水电站、大流量泄洪工程迅速发展,同时闸门技术的发展为工程建设提供了基础。

当前,最大坝高已超过 300m(Rogun 335m、Nurek 300m),水电站装机容量高达 12600MW(Itaipu 18×700 MW),泄洪建筑物的最大泄量大于 $100,000 \text{ m}^3/\text{s}$ (葛洲坝, Turecurui);高坝闸门技术方面,包括开敞式大型弧形门、高水头深孔闸门、大机组引水建筑物闸门等,也进入了新的高水平。

我国正在加速开发十分丰富的水电资源,许多江河的暴雨洪水峰高量大,高坝水电站工程建设对闸门金属结构技术的要求很高。已建著名工程如葛洲坝、丹江口、潘家口、白山、凤滩等实例外,最近开工修建的雅砻江二滩大流量高拱坝,以及准备施工的长江三峡和计划兴建的洪水河龙滩、澜沧江小湾等巨型高坝水电站工程,闸门金属结构都是一项重要的关键性技术。

《高坝闸门总体布置》收集了国内外工程 151 座,图 285 幅,并附有照片,既有总体布置图和具体数据,又有评述和分析,基本上反映了当代高坝闸门总体布置的技术水平。作者金泰来教授从事高坝闸门总体布置研究,已有四十多年经验,长期紧密联系工程建设实际,解决了许多实际技术问题。此书的出版,为我国水工技术人员和高等学校教学人员提供了有价值的参考资料,对水利水电工程建设和高坝闸门技术的发展有实用意义。

金泰来

1993 年 3 月于水利水电科学研究院

前 言

高坝闸门总体布置是水利水电工程规划设计中的重要环节,但影响总体布置的因素甚多,且因坝而异,目前尚无一定的规律可循,宜结合具体情况,因地制宜,力求创新。通常设计者凭长年积累的实践经验,触类旁通,举一反三。因此,撰写一本关于高坝闸门总体布置的书籍,对工程设计人员和科研人员将是有实际意义的。本书编著者积 20 余年的岁月,广泛搜集文献及散见于刊物中的素材,化繁为简,去芜存菁,突出重点,精心编辑加工,逐步形成初稿。近年来,国际交往频繁,资料来源畅通,以往匮乏欠缺部份,得以充实提高,方成此书。

在编著及出版过程中,承电力工业部科技司,中国长江三峡工程开发总公司以及水利水电科学研究院等单位大力支持,并蒙教授级高级工程师、水利水电科学研究院顾问陈桥庭、张泽祯等悉心指导、审阅、推荐;原国际大坝委员会副主席沈崇刚博士热情提供资料,电力工业部科技司邴凤山副司长大力支持鼓励,并审阅全稿。电力工业部潘家铮总工程师终审并作序。

参加本书编著工作的,先后有金泰来、陶芳轩、刘孝梅、潘水波及钱鸣森等同志,对多年合作者表示深切的谢意。

谨将此书献给广大水利水电工程技术同行及有关高等院校师生,希能对今后水利水电建设有所助益,则编著者的初衷可望实现,不胜企盼之至。

金泰来

1993 年 5 月

目 录

一、概述	1
二 高坝闸门布置的指导思想	1
(一) 正确处理发电引水建筑物与泄水建筑物布置中的矛盾	1
(二) 正确处理闸门布置中的若干矛盾	1
三、世界大坝和水电站的建设水平	2
四、目前闸门的建设水平	3
五、闸门孔口面积和设置高程的确定方法	3
六、不同河谷形态中的布置	4
(一) 狭窄河谷	4
(二) 宽阔河谷	4
七、不同水文条件下的布置	5
(一) 尖洪峰、大洪量	5
(二) 尖洪峰、小洪量	5
(三) 坦洪峰、大洪量	6
八、各类坝型中的闸门布置	6
(一) 重力坝	6
(二) 拱坝	13
(三) 土石坝	19
(四) 其他	21
九、结语和展望	22
参考文献	23
附 世界著名高坝彩色照片及布置图	25

一、概 述

我国水力资源丰富,在水电建设中常遇峡谷高坝泄水建筑物的规划布置问题,其中控制水流,调度库容往往涉及高坝闸门的总体布置问题。为此我们收集汇总国内外 151 座工程, 285 幅图纸,其中国内工程 30 座、图 71 幅,国外工程 121 座、图 205 幅,另有插图 9 幅。在一定程度上这些材料反映了当代高坝闸门总体布置的现有水平。本书的宗旨是试图总结高坝总体布置中存在的一些矛盾,针对我国拟建大型高水头水电工程中的特点,提出高坝闸门总体布置的指导思想、设计方法和处理途径,并以图集形式,分门别类介绍国内外一些较优的布置型式,剖析其思路,阐明其特色和巧妙之处,逐图予以简要评述,以供新建工程可行性研究和设计时参考借鉴。

二、高坝闸门布置的指导思想

(一)正确处理发电引水建筑物与泄水建筑物布置中的矛盾

在峡谷河道上修建水电站,泄水建筑物与发电引水建筑物的平面和立面布置中往往会出现一些矛盾,使总体布置遇到困难。例如,若将泄水建筑物布置在河道中央,则溢洪道或深孔出口水流射入河道深泓,流势顺畅,有助于消能防冲;但发电引水建筑物和厂房势必布置在岸边、地下,或在坝内,从而使施工、造价、工期或引水管道与尾水管布置等方面处于不利境况;若发电厂房布置在河道中央形成坝趾厂房,则引水钢管较短,尾水流出亦较为顺畅,但泄水建筑物的布置将要采取岸边溢洪道或泄洪隧洞,使泄水建筑物的施工、造价、工期及出流消能布置均处于不利地位;若发电厂房和泄水建筑物两者都布置在河道中央,则势必采取厂房顶溢流或坝内厂房等,前者的厂房顶要通过高速水流,其能量巨大,须充分论证后方敢采用,后者的坝体结构复杂,应力集中,而且施工干扰较大,势必影响工期。

综上所述,必须因地制宜,统筹安排,根据不同的地形和地质条件,正确处理泄水建筑物与发电引水建筑物之间的矛盾。若有通航建筑物则在总体布置上矛盾更多,须一并妥善处理,使各类水工建筑物各得其所,各尽所能,并发挥统一协调作用^[1]。

(二)正确处理高坝闸门布置中的若干矛盾

就闸门本身而言,对于高水头、大流量、多泥沙河流的高坝闸门,其孔口面积与设置高程之间也产生矛盾。一旦泄量既定,则低水头要大孔口,小孔口要高水头。这就涉及高水头大型闸门的技术可行性和安全可靠性问题。关于这方面的论述,可参阅文献[2]、

[3]。同时,洪水调度、临战人防又另有要求,必须首先优选孔口面积和设置高程。此外,闸门孔口面积的大小和设置部位(进口、中部或出口)等问题,又导致闸门金属结构与水工钢筋混凝土结构之间的矛盾,如缺乏全局观点,片面强调工程主次,偏护一方,将难点转移给金属结构,则一旦闸门布置失宜,闸门启闭不灵,将导致工程失事,造成重大损失,这方面的实例在历史上亦屡见不鲜。

此外,启闭机与闸门的布置也时有矛盾。当表孔与深孔重叠时,深孔的启闭机布置困难。最好错开,避免重叠,否则须将深孔启闭机设置在坝体内的廊道启闭机房内,这又带来了启闭机房处于高水头下的水封问题。若深孔闸门设于进口处,启闭机设于坝顶,则不但有拉杆承压失稳和门体加重问题,而且坝体应力分析也较为复杂。此时,深孔明流泄水,流速较高,压力较低,水流空化数较小,容易发生空蚀问题。若将闸门设于出口,则水流流态较好,泄水道压坡线较高,进口门槽处等不易出现空蚀破坏。但有压泄水道若不用钢板衬砌,则泄水道混凝土结构将承受内水压力,从而带来结构不稳定和渗漏等问题。

总之,闸门的孔口面积与设置高程之间、金属结构与水工结构之间、闸门与启闭机之间都存在着矛盾,必须正确处理,妥善运筹,否则万一顾此失彼,在总体布置上稍有失误,必将贻患全局。所以,在可行性研究阶段,从事金属结构的设计人员最好能尽早地参加总体布置的讨论,以求能充分论证闸门总体布置和选型的技术可能性,安全可靠性和经济合理性。

三、世界大坝和水电站的建设水平

闸门孔口面积和工作水头的确定,涉及闸门和启闭机的设计和制造水平。这与国家的工业基础及制造能力密切相关。一般面言,就称为技术可能性,亦即技术与工艺水平。

根据1991年的统计^[4],目前全世界凡满足下列任一指标者,即坝高超过150m,坝体总方量超过1500万 m^3 ,水库库容超过250亿 m^3 ,水电站装机容量超过100万kW的工程共有368座。其中坝高超过215m的25座,坝体总方量超过4430万 m^3 的26座,水库库容超过450亿 m^3 的25座,水电站装机容量超过270万kW的工程共27座。在337座大坝中,列入的中国已建工程有:白山、东江、葛洲坝、刘家峡、龙羊峡、三门峡、天生桥二级、乌江渡以及台湾省的翡翠、德基等10座;在建工程有:东风、二滩、隔河岩、李家峡、漫湾、水口、五强溪、岩滩及台湾省的明滩等9座;规划拟建工程有:构皮滩、锦屏、拉西瓦、龙滩、彭水、瀑布沟、潭坑、三峡、天荒坪、天生桥一级、小湾、小浪底等12座。目前,前苏联 Rogun 土石坝,坝高已达335m,已建成的前苏联 Nurek 土坝,坝高为300m。瑞士 Grand Dixence 重力坝,坝高285m。最大坝体总方量为在建中的加拿大 Syncrude Tailings 土坝,其总方量为5400万 m^3 。最大库容为乌干达的欧文瀑布(Owen Falls),库容为27000亿 m^3 (水库的主要部分为天然湖泊容量)。其次是津巴布韦与赞比亚共有的 Kariba,库容为1806亿 m^3 。这些都是当代坝工建设方面的最高水平。在水电站方面,目前世界上最大的水电站是设计中的前苏联 Turukhansk,计划装机容量2000万kW。其次是即将开工的中国三峡水电站,计划装机1768万kW(最近已增加为1820万

kW)。第三是巴西—巴拉圭的 Itaipu 水电站, 计划装机容量为 1260 万 kW, 现已全部投产。第四是美国的 Grand Coulee 水电站, 计划装机容量为 1083 万 kW, 现已投产 978 万 kW。第五是委内瑞拉的 Guri 水电站, 计划装机容量为 1030 万 kW, 现已全部投入运行。这些是当代水电站建设方面的世界水平。坝和水电站建设的水平意味着对闸门的需求。从属于上述高坝与大型水电站的闸门现有水平体现着技术的发展与可能性, 反映了高坝闸门总体布置的物质基础和指导思想。表 1 至表 7 列出了 1991 年统计的世界主要大坝技术指标。

四、目前闸门的建设水平

一般而言, 闸门工作水头愈高, 高速水流的水力学问题愈尖锐; 闸门的孔口面积愈大, 金属结构的结构力学问题及加工工艺问题愈尖锐; 闸门的总水压力愈大, 启闭机的容量包括油缸缸径、液压压强、液压阀件及活塞行程等铸造、锻造、加工等问题愈尖锐。工作水头、孔口面积与总水压力这三项是反映闸门水平的主要指标。关于各型闸门和启闭机的国际和国内水平及存在问题可参阅文献[2]、[3]。粗略的概念是闸门孔口面积的一般水平为 $40 \sim 50\text{m}^2$, 先进水平为 $80 \sim 90\text{m}^2$; 闸门的工作水头一般水平为 $60 \sim 80\text{m}$, 先进水平为 $120 \sim 140\text{m}$; 闸门启闭机的启门容量一般水平为 $500 \sim 600\text{t}$, 先进水平为 $800 \sim 1000\text{t}$; 液压启闭机行程一般水平为 $12 \sim 15\text{m}$, 先进水平为 $18 \sim 20\text{m}$ 。表 8 至表 11 列出了世界上具有较高水平的主要闸门和压力钢管的技术指标。

五、闸门孔口面积和设置高程的确定方法

泄水建筑物的总体布置要因地制宜, 全面考虑水文、地形、地质、河势、施工和运行管理等多方面的因素。高坝闸门的总体布置也应统筹兼顾, 妥善安排。在选择闸门孔口面积和设置高程时, 首先要进行调洪分析, 提出渡汛泄洪、水能利用、灌溉用水、临战人防和放空水库检修所需的水位和流量。一旦流量要求既定, 则应按水库的地形特性, 分别提出对泄量分配的时空关系。然后参阅图 1 所示的规划流程框图, 优选闸门孔口面积和设置高程。

确定孔口面积和设置高程的具体步骤如下: 首先根据水库的地形特点, 通过调洪分析提出库水位流量关系曲线 $Q = f(H)$ (见图 2)。图 3 为美国 Hoover 坝的库容与水位关系曲线; 然后试算与其相适应的孔口面积和设置高程。为方便起见, 制备了不同库水位下的表孔溢流单宽流量, 即 $q_1 = f(h)$ 和深孔泄流的单位面积流量, 即 $q_2 = f(h)$ (参阅图 4)。

显而易见, 表孔堰流的泄流能力远比深孔为大。在高水位下应尽可能采取表孔泄洪, 其超泄潜力较大。但堰顶高程较高, 在中、低水位下无能为力, 只好依靠深孔。在深孔泄流时, 其流量与水头的平方根成比例, 泄流能力较低。同时, 从水流空化数与水头的关系

曲线可见(参阅图 5),深孔设置高程过低,水流空化数也相应急剧下降,容易引起空蚀问题,得不偿失。有时,为了满足放空水库的要求,不同层次的深孔只好采用接力泄水的办法,控制孔口的工作水头。一般而言,水流空化数最好不低于 0.3,否则混凝土表面的不平整控制要求较高,导致施工困难,并且将增加工程造价和工期。按规划流程框图程序多次反馈验算,逐步修正直至满足设计要求。同时论证国内可能达到的水平、质量及合适的门型。这样就可优选闸门的孔口面积和设置高程。

水利枢纽总体布置和高坝闸门总体布置的制约因素较多。自然特点千变万化,犹如象棋、围棋的奕法不得不借助棋谱,中医处方亦不得不借助脉案,船舶螺旋桨设计采用图谱,以此类推推理,参考借鉴。今按不同河谷形态、不同水文条件和不同坝型分别列举闸门的总体布置 [5]至[24]。

六、不同河谷形态中的布置

不同河谷形态不仅适应不同的坝型,闸门的总体布置亦不同。大凡狭窄河谷适宜选择拱坝或重力坝,宽阔河谷则适宜选择土石坝、连拱坝或闸坝。

(一)狭窄河谷

图 6、图 7 为中国黄河上游狭谷中的龙羊峡水电站的平面布置及主坝上游展视图。

龙羊峡水电站的主坝采用重力拱坝,最大坝高为 178m,总库容 247 亿 m^3 ,装机容量 128 万 kW,最大水头 150m,闸门工作水头 120m,最大流量 $5900\text{m}^3/\text{s}$ 。它采用溢洪道表孔、坝体中孔、深孔和底孔,分层泄水,既满足泄量要求,也满足了消能防冲要求。图 7 显示了各孔口部位、孔口面积和设置高程。

图 8 为 La Barthe 双曲拱坝表孔及底孔闸门的布置方案。该坝地处狭窄河谷,流量不大。泄水建筑物均布置在河道中央,均采用弧形闸门。坝顶中部设 4 个 $10\text{m} \times 4.25\text{m}$ 表孔,最大流量为 $4 \times 450\text{m}^3/\text{s}$ 。底部设 2 个 $3.5\text{m} \times 3.3\text{m}$ 底孔,最大流量为 $2 \times 350\text{m}^3/\text{s}$ 。表孔闸门的启闭机设在坝顶,底孔闸门的启闭机设在坝趾,表孔采用坝顶跌流消能。这种布置在平面、立面、剖面的建筑造型都较紧凑、简练和美观,是窄河谷、较小流量的典型适例。

(二)宽阔河谷

中国汉江干流上的丹江口水利枢纽工程如图 9 所示。坝址处河谷宽阔,因而采用宽缝重力坝,其最大坝高为 97m,水库总库容为 208.9 亿 m^3 ,装机容量为 90 万 kW,泄洪建筑物有深孔泄洪闸门和堰顶溢洪道两部份。深孔段长 144m,位于河床右侧,设 12 个深孔,孔口宽 5m、高 6m,设计水头 46.8m,用弧形闸门控制,正常高水位时泄洪量为 $9200\text{m}^3/\text{s}$ 。溢流段长 240m,位于中部,设 20 个表孔,孔口宽 8.5m、高 22.5m,用平板

闸门控制，正常高水位时，其泄量为 $28200\text{m}^3/\text{s}$ ，校核洪水水位时可宣泄 $40000\text{m}^3/\text{s}$ 。溢洪道出口用鼻坎挑流。发电厂房位于河床左侧，厂房内安装 6 台 15 万 kW 水轮发电机组。过坝通航设施位于右岸，上段用垂直升船机，下段为斜面升船机。垂直升船机最大提升高度 50m，设计载重能力 150t。设计年过坝运输量为 83 万 t。

图 10 显示中国安徽省史河上的梅山水电站的总体布置，因坝址处河谷较宽，因而采用连拱坝方案，其最大坝高为 88.24m，总库容为 23.37 亿 m^3 ，调节库容为 9.12 亿 m^3 。设计洪水流量（千年一遇）为 $27000\text{m}^3/\text{s}$ ，校核洪水流量（万年一遇）为 $38000\text{m}^3/\text{s}$ 。主要泄洪建筑物为 7 孔 $12\text{m} \times 7.2\text{m}$ 溢洪道，置于右岸天然山凹上，用弧形闸门控制。右岸设有泄洪隧洞，内装 $4.5 \times 4.5\text{--}70\text{m}$ 弧形闸门。9 号拱底部拱台处设有泄水道，位于河床中央，出口为 $2.25\text{m} \times 2.25\text{m}$ 高压滑动闸门和油压启闭机。

一般而言，宽阔河谷的高坝工程，水头较低，流量较大，水库调节性能较差，所以应采用泄洪能力较大的溢洪道表孔。

七、不同水文条件下的布置

水文条件的不同反映在库区降雨强度、降雨历时、径流系数等水文因素的差异，从而影响设计洪水。我国大江大河的暴雨洪水峰高量大，有些河流还挟带大量的泥沙，使高坝建设中面临泄洪排沙的艰巨任务。工程的防洪标准确定后洪水过程线峰型与洪量的尖坦大小直接影响闸门的总体布置方案。就尖洪峰、大洪量，尖洪峰、小洪量，及坦洪峰、大洪量的工程实例分述如下：

（一）尖洪峰、大洪量

巴西 Tucurui 坝，坝高 93m，总库容 458 亿 m^3 ，溢流坝泄洪流量 $104400\text{m}^3/\text{s}$ 。巴西—巴拉圭的 Itaipu 坝，坝高 190m，总库容 290 亿 m^3 ，岸边溢洪道泄洪流量 $62200\text{m}^3/\text{s}$ 。中国丹江口大坝，坝高 97m，总库容 208.9 亿 m^3 ，溢流坝及中孔泄洪流量 $49590\text{m}^3/\text{s}$ ，其平面布置见图 8。潘家口大坝，坝高 107.5m，总库容 29.3 亿 m^3 ，溢流坝及深孔的泄洪流量为 $42600\text{m}^3/\text{s}$ 。

（二）尖洪峰、小洪量

山区峡谷河流，梯级开发时区间河槽纳蓄库容较小，山区暴雨洪水洪峰峰型尖瘦，但历时较短，洪量较小，图 11、12、13 为中国猫跳河三级修文水电站的平面布置、下游立视及溢流坝段剖视图等。此工程采用重力拱坝厂房顶溢流，最大坝高 49m，总库容 0.136 亿 m^3 ，调节库容仅 0.0705 亿 m^3 ，库水位骤涨骤落。设计洪水（五十年一遇）为 $1180\text{m}^3/\text{s}$ ，校核洪水（二百年一遇）为 $1510\text{m}^3/\text{s}$ ，坝顶设 3 孔宽 9.75m 高 5m 及 2 孔宽 5.8m 高 5m 的弧形闸门，溢流机会很多。

(三) 坦洪峰、大洪量

暴雨洪水来势不猛,但历时较长者属坦洪峰、大洪量类型。黄河上游龙羊峡水电站多年平均降雨量 271mm,集雨面积为 131420km²,设计洪水流量为 7060m³/s,洪量为 159 亿 m³;校核洪水流量为 10500m³/s,洪量为 235 亿 m³。刘家峡水电站多年平均降雨量为 250~750mm,集雨面积为 181766km²,设计洪水流量为 8720m³/s,洪量为 192 亿 m³;校核洪水流量为 10400m³/s,洪量为 229 亿 m³。这类工程所遇的多年平均降雨量较小,集雨面积也较小,并且上游龙头水库库容较大,洪水调节性能较好。洪量虽较大,但洪峰较为平坦,最大泄洪流量龙羊峡为 8570m³/s,刘家峡为 7950m³/s。泄洪建筑物的布置以中孔、深孔及中高程泄洪隧洞为主,表孔为辅,分层宣泄流量,各梯级流量较为平稳。

此外,埃及 Aswan 高坝,坝高 111m,水库库容 1680 亿 m³,调节径流系数为 2.02。中国新安江水电站,坝高 105m,水库库容 220 亿 m³,调节径流系数为 1.96,都属多年调节的大水库。它们可削减洪峰流量,减少泄洪时间,亦属于坦洪峰、大洪量的工程适例。

八、各类坝型的闸门布置

由于坝体结构、形式及建筑材料的不同,闸门的总体布置亦各不相同。今将重力坝(含宽缝重力坝、大头坝及拱形重力坝)、拱坝(含重力拱坝、薄拱坝、双曲拱坝及连拱坝)、土石坝(含土坝及堆石坝)以及其他(含厂房顶溢流、坝内厂房及支墩坝)分述如下。

(一) 重力坝

瑞士 Grand Dixence 坝位于狄克桑斯河,靠近 Heremence 城。坝型为混凝土重力坝,库容 4 亿 m³,最大坝高 284m,坝顶长 695m,装机容量现为 86.9 万 kW,计划装机容量为 170 万 kW。图 14 为 Grand Dixence 坝的平面布置,图 15 为该坝的立面及剖面图。这是一座高坝、小库、小流量工程,以发电为主,底孔泄量仅为 10m³/s,用两道滑动平板门控制,是欧洲高坝特点之一。

前苏联 Toktogul 坝位于 Naryn 河峡谷中,两岸边坡为 65~75°。坝型为混凝土重力坝,坝高 215m,坝顶长 292.5m,坝轴线略向下游弯曲。电厂进水口闸门和坝身溢洪道闸门均由设在坝顶的 140/12.5t 启闭机操作。其最大泄量为 4970m³/s,系万年一遇泄量,电站装机容量为 120 万 kW。四台机组分两列布置,图 16~19 为 Toktogul 坝的平面布置、厂房剖面、底孔坝段和溢洪道坝段。底孔在出口安装平板门与弧形门各一座,后者为工作门。两个底孔每个最大泄量为 1200m³/s,溢洪道泄量为 900m³/s。这一布置是峡谷地区水电站采用两列机组布置的著例之一,颇具特色。

前苏联 Katun 水电站位于 Katun 河上, 坝型为混凝土重力坝, 坝高 179m, 坝顶长 755m, 由 24 个坝段组成。图 20 为 Katun 重力坝的厂房坝段剖面, 在电厂进水口设有三道平板闸门。电站装机容量 160 万 kW。

图 21 为加拿大 Revelstoke 工程的平面布置, 工程位于哥伦比亚河上, 主坝为混凝土重力坝, 副坝为上坝, 最大坝高 175m, 装机容量 180 万 kW, 于 1984 年完工。图 22 表示溢流坝表孔布置, 它设有两孔弧形闸门, 其孔口为 13.7m 宽, 17.4m 高, 最大泄量为 $4405\text{m}^3/\text{s}$ 。图 23 为深孔布置, 设有两孔弧形闸门, 其孔口为 5.3m 宽, 7.6m 高, 最大泄量为 $2507\text{m}^3/\text{s}$ 。图 24 表示压力钢管及机组布置, 采用内径为 7.93m 的背管。图 25 表示预留机组的背管闷头, 这种布置既不干扰坝体混凝土施工, 又便于增建预留机组, 不失为一种可取的方案。

图 26 为乌江渡拱形重力坝的平面布置。图 27 表示其上游立视。图 28 为溢洪道闸门与启闭机的布置。图 29 表示中孔弧门与液压启闭机的布置。工程坝高 165m, 溢流坝段设 4 孔溢洪道, 泄量达 $10440\text{m}^3/\text{s}$, 单宽流量为 $201\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{m}$, 最大落差为 102.2m。工程泄水建筑物总体布置的特点是高坝峡谷大流量, 采用多层次, 全方位, 厂前挑流, 厂坝联合泄洪布置。它是当前这类布置中单宽流量最大的工程, 其闸门孔口面积及工作水头亦充分考虑了我国的技术水平, 所采用掺气减蚀措施, 经多年运行, 情况良好。6 个表孔溢洪道位于河床中泓部分, 水流挑越厂房泄向下游河床, 消能效果较好。电站进水口检修闸门与快速闸门设于溢洪道闸墩内, 避免了电站进水口闸门与泄洪闸门启闭机布置上的干扰, 拦污栅平台高程降至溢流堰顶 7m 以下, 避免了对表孔溢流的影响。孔口为 $13\times 18.5\text{m}^2$ 的大型表孔, 采用弧形闸门, 启闭机为 $2\times 150\text{t}$ 固定式卷扬机。坝顶设 400t 门式起重机, 并附设 80t 与 32t 副钩。左右两岸设泄洪隧洞, 及泄洪中孔, 右岸还设有放空水库的隧洞。

图 30 为刘家峡水电站的平面布置, 主坝为混凝土重力坝, 最大坝高 147m, 长 204m, 装机容量 122.5 万 kW, 总库容为 57 亿 m^3 , 有效库容 41.5 亿 m^3 , 系一座蓄洪补枯的不完全年调节水库。泄洪建筑物有堰口溢洪道, 堰顶有 3 扇 $10\times 8.5\text{m}^2$, 水头 21m 的定轮平面闸门, 由 $2\times 100\text{t}$ 固定式卷扬机启闭, 溢洪道泄量为 $4220\text{m}^3/\text{s}$ 。图 31 为上游立视。图 32 显示溢洪道闸门及启闭机布置。右岸泄洪隧洞进口设有 $8\times 9.5\text{m}^2-60\text{m}$ 弧形工作闸门, 洞身部分与导流洞结合, 形成“龙抬头”式泄洪隧洞, 此洞长 529m, 泄量为 $2140\text{m}^3/\text{s}$, 最高流速达 $45\text{m}^3/\text{s}$ 。图 33 为隧洞进口闸门及启闭机布置。左岸设两孔坝内泄水道, 用于泄洪、排沙和放空。每孔设 $3\times 8\text{m}^2-70\text{m}$ 平面定轮工作闸门, 由 600t 油压启闭机控制, 泄水道总泄量为 $1530\text{m}^3/\text{s}$ 。图 34 为泄水道闸门及启闭机布置。图 35 显示电站机组进水口闸门及启闭机布置。5 台机组进水口前采用直线形连通式拦污栅, 以免水草等杂物进入机组。泄洪建筑物全部选用挑流消能, 投资省, 消能效果好。但存在坝下游含泥沙水流雾化问题, 对上坝交通及变电站电气部件绝缘有影响。泄洪隧洞龙抬头反弧段有空蚀问题, 对反弧曲线及不平整控制应予重视, 并应考虑掺气减蚀措施。

日本 Kusaki 坝位于 Watarase 河, 为一防洪、发电和供水多目标工程, 于 1976 年建成。坝型为混凝土重力坝, 坝高 140m, 坝顶长 405m。泄洪建筑物有 4 个表孔和 2 个底孔, 均设弧形工作门, 总泄量为 $4320\text{m}^3/\text{s}$ 。总库容 6050 万 m^3 , 有效库容 5050 万 m^3 。图 36 和 37 分别为其平面布置和上游立视及溢流坝段。

前苏联 Bureya 水电站位于 Talakan 的 Bureya 河上, 工程包括混凝土重力坝、厂房和输水系统, 最大坝高 140m, 坝顶长 765m, 上游面垂直, 下游坝坡 1:0.7。大坝左非溢流段长 197m, 溢流坝段长 180m, 设 8 个 12m 宽的溢流孔, 厂房段长 144m, 有 6 个取水口, 电站装机容量 200 万 kW, 右岸非溢流段长 244m, 坝顶设 320/ 20/ 5t 的启闭机, 操作溢洪道的平面闸门与厂房进水口闸门。坝内底孔进口设弧形闸门, 由油压启闭机操作。其布置较为简洁。图 38 为前苏联 Bureya 水电站的溢流坝段剖面。

湖南镇水电站位于浙江省乌溪江上, 坝型为梯形支墩坝, 最大坝高 129m, 设计流量 $11300\text{m}^3/\text{s}$, 校核流量 $16600\text{m}^3/\text{s}$, 坝顶设 5 孔 $14.5 \times 15\text{m}^2$ 弧形闸门。图 39 为该坝泄水底孔闸门及启闭机布置。

图 40 和 41 为前苏联 Bratsk 水电站的溢流坝段和厂房坝段剖面。坝址在寒冷地区, 最低气温可达 -58°C , 无霜期仅 84 天, 但夏季气温又可达 35°C 。工程包括混凝土重力坝、厂房和土坝, 混凝土坝长 1430m, 最大坝高 125m。厂房坝段长 440m, 设有 20 个机组进水口, 装机容量 450 万 kW, 10 孔溢洪道装有 $18 \times 6\text{m}^2$ 的弧形闸门。最大泄量 $11930\text{m}^3/\text{s}$ 。坝顶设有起重量为 150/ 15t 的启闭机。混凝土坝体及金属结构的温度应力和防冰冻问题都需经心考虑。

图 42 是前苏联 Bureisk 水电站厂房剖面图, 电站位于 Bureya 河上, 装有 6 台 33.5 万 kW 水轮机组。每台机组引用流量为 $347\text{m}^3/\text{s}$, 大坝最大泄量为 $13800\text{m}^3/\text{s}$ 。

前苏联 Krasnoyarsk 水电站位于 Yenisei 河的峡谷河段, 坝址河宽 750m, 枢纽包括混凝土重力坝、厂房、斜面升船机。混凝土坝长 1065m, 最大坝高 124m, 左侧非溢流段长 187.5m, 溢流段长 225m, 厂房坝段长 360m, 右侧非溢流段长 232.5m。电站装机 24 台, 总容量 600 万 kW。溢流坝段有 7 个 25m 宽溢流孔, 装有 $25 \times 12.5\text{m}$ 的平面闸门, 坝址最大流量为 $29800\text{m}^3/\text{s}$, 泄流水舌通过挑坎送入下游 100m 以外, 以防冲刷坝基。设在坝顶的 250/ 30t 起重机操作溢洪闸门及机组进水口闸门。图 43 为该坝溢流坝剖面, 图 44 则为该坝厂房坝段剖面。

Iznajar 坝位于西班牙, 坝型为混凝土重力坝, 坝高 120m, 库容 9.8 亿 m^3 , 坝顶设溢洪道表孔, 泄洪流量为 $6550\text{m}^3/\text{s}$, 由弧形闸门控制, 坝内设有 7 个底孔, 泄量为 $950\text{m}^3/\text{s}$, 底孔出口用锥形阀, 出口流速 30m/ s。图 45 显示该坝表孔及底孔闸门与启闭机的布置。

西班牙 San Esteban 水电站, 建于 1955 年, 坝型为混凝土拱形重力坝, 最大坝高 115m, 电站装机容量 26.548 万 kW。溢流段有 6 个溢流孔, 装有 $15\text{m} \times 6.2\text{m}$ 弧形闸门, 泄流量 $4500\text{m}^3/\text{s}$, 为改善坝面水流流态和提高消能效果, 在坝面反弧段附近设有导水墙。图 46 为该电站平面布置, 图 47 为其溢流坝段剖面。

云峰水电站拦河大坝为宽缝重力坝, 坝高 113.75m, 溢流坝段设 21 个带有胸墙的表孔, 孔口尺寸 $11\text{m} \times 7.8\text{m}$, 由平面闸门控制, 最大泄流量为 $21900\text{m}^3/\text{s}$ 。图 48 为该坝深孔闸门及启闭机布置, 深孔出口设 $4.25\text{m} \times 4.25\text{m}$ 弧形闸门, 设计水头为 70m, 由螺杆式启闭机操作, 起重量为 75/ 40t。进口事故门采用 $5.3\text{m} \times 7\text{m}$ 平面闸门, 由坝顶门式启闭机操作, 容量为 350/ 150t。进口门槽及门槽下游 2m 范围内全部用带肋性骨架的 20mm 钢板衬护, 压力管道全部用 12-16mm 钢板衬护, 直至出口与弧门埋件连接, 弧门面板采用机加工, 平度与弧度的允差较小, 水封性能良好。

前苏联 Kurpsai 水电站是 Nizhne-Naryn 梯级的二级电站, 夏季承担基荷, 冬季担负峰荷。工程包括混凝土重力坝、厂房、进水口、引水管和泄水建筑物。图 49 为 Kurpsai 水电站的平面布置。重力坝顶长 360m, 最大坝高 113m。图 50 显示电站厂房坝段, 由 4 条钢板衬护的引水管连接水轮机, 单机容量 20 万 kW, 设计水头 91.5m, 引用流量 $243\text{m}^3/\text{s}$, 总装机容量为 80 万 kW。图 51 为泄洪隧洞和坝内底孔剖面, 泄洪隧洞进口设有弧形闸门, 泄流量为 $1680\text{m}^3/\text{s}$, 底孔出口装有弧形门, 泄量为 $1074\text{m}^3/\text{s}$, 连同机组过水, 整个建筑物泄量为 $3680\text{m}^3/\text{s}$ 。

黄龙滩水电站位于湖北省郧县的堵河, 主坝为混凝土重力坝, 坝高 107m。坝顶有 6 个溢流孔, 装有平面闸门, 另有一非常溢洪道, 设计洪水流量为 $13300\text{m}^3/\text{s}$ 。还设有泄水孔和升船机。图 52 为黄龙滩水电站的上游立视和溢流坝剖面。

图 53 所示为日本加治川坝, 系混凝土重力坝, 坝高 106.5m, 最大泄量为 $350\text{m}^3/\text{s}$, 采用 1 个表孔 2 个中孔, 由弧形闸门控制, 中孔弧门启闭机设在出口, 与表孔错开, 同在两个坝段, 共用一个消力塘, 这种布置适用于高坝小流量工程。

三门峡水利枢纽位于黄河中游, 控制流域面积为黄河流域的 92%(黄河年平均输沙量 15.7 亿 t)。该坝为重力坝, 高 106m, 于 1960 年建成蓄水, 后发现泥沙淤积严重, 为此经两次改建, 使泄流能力由 $3080\text{m}^3/\text{s}$ 增加至 $10000\text{m}^3/\text{s}$ 。电站装机容量 25 万 kW。泄水建筑物有两条 $8\text{m} \times 8\text{m}$ 泄洪排沙隧洞, 4 个由发电引水管改建的泄流排沙管, 8 个导流底孔和 7 个深孔, 均由平面闸门控制。图 54 为三门峡大坝上游立视和底孔及厂房坝段剖面。

前苏联 Ust-Ilim 水电站位于 Angara 河, 坝址的最低气温可低至 -59°C 。主坝为重力坝, 副坝为土坝和堆石坝, 坝顶总长 3840m, 重力坝长 1475m, 坝高 105m, 厂房坝段长 396m, 装机容量 384 万 kW。溢流坝长 242m, 有 11 个溢流孔, 每个宽 15m, 装有弧形闸门, 由设在坝顶的门机操作, 起重量为 180/20/5t。电厂进水口的平面闸门亦由该机操作。图 55 和 56 分别为该坝的溢流坝和厂房坝段剖面。

图 57 为日本大渡坝, 它是混凝土重力坝, 坝高 100m, 最大泄量 $7700\text{m}^3/\text{s}$ 。溢流坝段在同一剖面上设表孔及中孔, 均由弧形闸门控制, 中孔弧门由廊道内启闭机操作, 上下启闭机布置互不干扰, 两者共用一个消力塘, 利用水跃消能。

图 58 为西班牙 La Concepcion 坝底孔闸门布置。坝高 98m, 设两个底孔, 工作门为弧形闸门, 由油压启闭机操作, 事故检修门为平面闸门, 亦由油压启闭机操作, 并设有平压系统。启闭机房都布置在坝内, 设有廊道与外界相连, 布置比较紧凑, 妥善解决了闸门启闭机房的止水问题。

丹江口水利枢纽主坝为混凝土重力坝, 坝高 97m, 泄洪流量为 $49590\text{m}^3/\text{s}$, 20 个溢流孔, 由 $8.5\text{m} \times 22.5\text{m}$ 平面闸门控制, 单宽流量达 $235\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$, 闸门承受总水压力 2180t, 采用 400t 门式启闭机, 布置见图 59。深孔采用 $5\text{m} \times 6\text{m}$ 弧形闸门, 由 200t 台车式启闭机操作, 如图 60 所示。图 61 为该坝溢流坝段和厂房坝段剖面。丹江口枢纽的闸门布置是宽河谷, 大流量高坝闸门典型布置的范例之一。

西班牙 Ricobayo 水电站位于 Esla 河。建于 1935 年, 电站装机 13.32 万 kW, 共 4 台机组。主坝为混凝土重力坝, 坝高 95m。溢洪道在大坝左侧, 共 4 孔, 由 $20.8\text{m} \times 10.6\text{m}$ 弧形闸门控制, 泄量 $4640\text{m}^3/\text{s}$, 泄洪隧洞进口设 2 扇 $10.3\text{m} \times 7.5\text{m}$ 弧形闸门, 泄量 $874\text{m}^3/\text{s}$, 出口挑流消能。另有 2 个直径 1.5m 的底孔, 进出口各由直径为 1.5m 的平板

阀门控制,泄水流量 $74.9\text{m}^3/\text{s}$ 。图 62 为该电站的平面布置,图 63 显示厂房坝段,在引水管中部设有扇形闸门,控制进入水轮机的流量,这种布置较为罕见。

图 64 为 Vadiello 坝表孔与深孔闸门的布置,该坝为宽缝重力坝,坝高 85m。底孔闸门段上游为有压段,廊道内设启闭机房。闸门下游为无压明流,出口流速 $51\text{m}/\text{s}$,表孔挑流消能,底孔跌流消能。

图 65 显示龚嘴水电站溢洪道闸门和冲沙底孔闸门及启闭机布置。溢洪道为平面闸门,孔口尺寸 $12\text{m} \times 18\text{m}$,工作水头 23.5m,用 2 台固定式卷扬机操作。冲沙底孔工作门为 $5 \times 8\text{m}$ 弧形闸门,总水压力 5600t,用 $2\text{m} \times 150\text{t}$ 卷扬机操作。

图 66 所示为日本松川坝,系混凝土重力坝,最大坝高 84.3m,最大流量 $900\text{m}^3/\text{s}$,坝顶设 2 孔溢洪道,由弧形闸门控制,中孔亦由弧形闸门控制,闸门位于出口,沿切向布置,与溢流表孔共用溢流坝面及消力塘,采用水跃消能。

西班牙 Saucelle 水电站,1956 年建于 Duero 河上,电站装机 4 台,总装机容量 24 万 kW,厂房为半地下式,大坝系混凝土重力坝,坝高 83m,坝顶溢洪道 4 孔,设 $24\text{m} \times 8\text{m}$ 弧形闸门,总泄洪流量 $11200\text{m}^3/\text{s}$,消力塘消能。泄洪隧洞设 $14\text{m} \times 13.8\text{m}$ 弧形闸门控制,泄量 $1300\text{m}^3/\text{s}$,挑流消能。4 个 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 坝内底孔,设两道 $1.5\text{m} \times 1.5\text{m}$ 平板阀,最大泄量 $165\text{m}^3/\text{s}$ 。其布置较为紧凑。图 67 和 68 为其平面布置和大坝溢流剖面,这一工程充分利用溢洪道表孔宣泄大流量,有可取的优点。

大化水电站主要建筑物有河床式厂房、溢流坝、通航建筑及两岸挡水坝等。溢流坝布置在深槽,坝型为混凝土重力坝和空腹重力坝,最大坝高 78.5m,面流消能。图 69 和 70 分别为大化溢流坝及电站机组进水口闸门与启闭机布置。溢流坝用平面闸门以适应下游较大的水位变幅。闸门门叶两侧设有平衡锤及斜撑式锁定装置,以满足部分开启要求。

图 71 为西班牙 Mequinenza 混凝土重力坝的闸门布置,坝高 79m 设 2 个底孔,泄量 $160\text{m}^3/\text{s}$,底孔出口流速 $15\text{m}/\text{s}$,消力塘内设消力齿坎,采用水跃消能。

图 72 显示陈村水电站平面布置,坝型为拱形重力坝,坝高 76.3m,库容 247.4 亿 m^3 ,装机容量 15 万 kW,坝趾厂房,两侧布置左右表孔滑雪式溢洪道。4 孔尺寸各为 $12\text{m} \times 6\text{m}$ 。中孔直径 7m,底孔 1 座,尺寸为 $2.8\text{m} \times 2.86\text{m}$ 。总泄量 $4890\text{m}^3/\text{s}$ 。图 73 显示其下游立视。图 74 显示其厂房坝段机组进水口闸门及启闭机布置。整个工程布置较为匀称,造型亦较美观,运用情况良好。

前苏联 Tashkumyr 水电站位于河宽仅为 50—80m 狭窄河谷,主坝为混凝土重力坝,坝高 75m,坝顶长 341m,坝顶溢洪道 2 孔,由 $9\text{m} \times 12\text{m}$ 弧形闸门控制,泄量为 $958\text{m}^3/\text{s}$ 。由导流隧洞改建的泄洪隧洞,泄量为 $1735\text{m}^3/\text{s}$,孔口尺寸 $10\text{m} \times 12\text{m}$,出口有 76m 长明槽,接挑坎,图 75 为该电站平面布置,图 76 为其厂房段、溢流段和泄洪隧洞剖面。

图 77 为 Gabriel Y Galan 坝剖面,该坝为重力坝,坝高 72m,底孔泄量为 $228\text{m}^3/\text{s}$,出口流速为 $25\text{m}/\text{s}$,用调节阀控制。

葡萄牙 Torrao 水电站建于 1988 年,装有 2 台容量为 7.3 万 kW 的抽水蓄能水轮机组,电站总装机容量 14.6 万 kW。大坝为空腹重力坝,坝高 70m,大坝中部布置 5 孔溢洪道,由弧形闸门控制,最大泄洪流量为 $4150\text{m}^3/\text{s}$,采用消力塘消能。厂房布置在左岸为地下式。图 78 为其平面布置,各建筑物布置紧凑,亦较美观。图 79 显示溢流坝段及消