



电力科技专著出版资金资助项目

严寒地区

混凝土大坝设计、施工与运行

俞介刚 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



严寒地区

混凝土大坝设计、施工与运行

俞介刚 编著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系电力科技专著出版基金书，全书系统总结了东北地区 70 年来混凝土坝的设计、施工和运行经验。在符合混凝土坝一般原理基础上，本书主要突出严寒地区的筑坝特点，既有符合混凝土坝一般规律的经验，也有严寒地区混凝土坝特有经验。内容包括东北地区混凝土坝的经验教训、混凝土在运行中的破坏情况及破坏机理、严冬季节混凝土坝开挖、浇筑、灌浆等施工作业方法及优缺点、RCD 工法浇筑碾压混凝土坝的方法、经验，以及有关的资料等。

本书内容权威、资料丰富，可作为国内外同类型地区混凝土坝建设的参考、大坝运行管理人员的参考资料，可为以后黑龙江干流水力资源开发参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

严寒地区混凝土大坝设计、施工与运行/俞介刚编著. 北京: 中国电力出版社, 2005.9
ISBN 7-5083-3439-6

I. 严... II. 俞... III. ①混凝土坝-设计②混凝土坝-严寒气候施工 IV. TV642.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 068165 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市铁成印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005 年 10 月第一版 2005 年 10 月北京第一次印刷

850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 9.75 印张 259 千字

印数 0001—1500 册 定价 24.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换)

前言

在 20 世纪 90 年代，笔者有机会参加了东北地区十余座水电站混凝土大坝的首次安全定检。这些被检的大坝运行时间大多在 20~60 年以上，有很长的运行经历，运行中反映出来很多有价值的设计和施工的经验教训。

每个被定检的大坝，有关单位都提供了很多资料和报告，例如每个工程都有设计和施工的复查报告，有运行检测和运行总结报告，还有很多专题研究报告等。这些资料是几十年来成千上万的水利水电科技人员和广大的施工人员智慧和心血的结晶，资料中所提供的经验和教训对以后严寒和寒冷地区水利水电工程建设具有借鉴作用。于是我产生了把它们系统整理归纳并出版以供将来广大科技人员使用和参考的想法，并形成了初稿。2002 年 11 月，这个想法得到了电力科技专著出版基金评审委员会的支持，他们同意提供资金资助本书出版。

在这里首先要感谢所有参与过这些大坝的勘测、设计、科研、施工、运行、管理人员所做的辛勤劳动和提供的这些丰富资料。

松辽水利委员会的王蔷、吴显伟、卞其栋、付宏明等同志帮助完成了文中大部分插图的复制工作，在此对他们的辛勤劳动表示谢意。

由于水平有限，本书难免存在疏漏和错误之处，望大家指正。

俞介刚

2003年4月21日

目 录

前言

1 大坝设计	1
1.1 混凝土重力坝设计	1
1.2 单支墩撑墙坝在东北地区的实践	46
1.3 白山拱坝设计	62
2 大坝施工	89
2.1 白山拱坝混凝土施工	89
2.2 混凝土冬季施工	105
2.3 观音阁大坝碾压混凝土施工和 RCD 工法	113
2.4 白山拱坝缝面灌浆和混凝土的微膨胀性	139
2.5 混凝土真空作业施工	150
2.6 桓仁大坝纵缝负温灌浆	155
2.7 观音阁水库大坝基础帷幕防渗高压灌浆	170
2.8 预应力锚索施工	193
2.9 坝上游面防渗墙施工	197
3 大坝运行	209
3.1 水工混凝土冻融破坏及补强加固处理	209
3.2 丰满大坝渗漏与防治	220
3.3 云峰大坝温度和应力应变观测	227
3.4 混凝土重力坝水平位移观测	238

3.5	太平哨大坝坝顶垂直位移观测	248
3.6	纵缝开度观测	250
3.7	丰满坝顶向上游水平时效变位	259
3.8	白山大坝变形观测	264
3.9	水力学观测	277
3.10	白山大坝溢流面减蚀设计和掺气减蚀原型试验	286
3.11	高坝泄流雾化和白山泄流雾化观测	290
3.12	回龙山水库库水温度观测	296
3.13	太平哨水库静冰压力观测	298
3.14	白山大坝渗漏量观测	300
3.15	扬压力观测	302
参考文献		306



大坝设计

1.1 混凝土重力坝设计

1.1.1 混凝土重力坝的特点和发展概况

(1) 重力坝靠自身重量维持稳定, 结构作用清楚, 设计方法比较简单。目前设计采用概率极限状态设计理论。一般用材料力学方法计算坝体内的应力。坝体的稳定情况用刚体极限平衡核算, 需要时也可用弹性或弹塑性理论及方法来进行应力应变计算。重力坝设计有近 80~90 年积累的设计、施工和运行实践经验, 安全度易于对比和判断。重力坝断面尺寸较大, 与地基接触面宽, 故坝内和坝基应力水平一般较低, 普通的混凝土及一般的基岩均可承受。坝内的渗透途径大, 渗透坡降较小, 一般混凝土材料均能长期承受冲刷而保持坝的较长寿命。重力坝即使发生事故, 不易出现连锁反应而出现全坝皆垮的局面, 而且一旦出现局部坝体冲毁后, 比较容易及时抢修恢复。目前在世界上正在运行的混凝土老坝有的寿命已达 90 年, 而且经过整修补强后还可以继续安全运行。

(2) 混凝土重力坝对地形、地质条件适应性好, 可以认为任何宽窄的地形都可以布置混凝土重力坝。对坝基地质条件要求也不太高, 具有一般强度的基岩都可以修建重力坝。对于中低高度的坝也可以建在软弱岩基或砂卵石覆盖层上。重力坝还能适应坝址中地质情况的变化及各种不均匀、复杂的地基。由于重力坝可

以当作平面问题来承受荷载，相邻坝段可以做成不同的坝高和坝宽，而相互间受力不致受到过多的影响。

(3) 混凝土重力坝便于大江大河的大洪水宣泄和布置数量众多的溢流建筑物，而且可以使建筑物集挡水和泄洪功能于一体，从而减少水工枢纽的工程量。由于下泄洪水流量基本也是一个平面问题，所以河床溢流坝的泄洪单宽流量一般较大，有的单宽流量已经达到 $300\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$ 。此外，重力坝还便于在坝内布置大直径的引水和泄水管道，有的工程引水管道直径达 12m ；也可以在同一坝段上布置表孔和深孔，而不致于造成坝内的应力过分复杂。

(4) 便于施工。重力坝易于解决施工导流，可以在不同时间、不同高程布置导流底孔、缺口等导流建筑物，使施工不受洪水影响而使坝体浇筑面不断升高。坝体施工可以采用高度机械化建筑高坝，也可以在必要的施工机械配合下更广泛地使用手工操作。1940年丰满大坝就是在部分施工机械化的情况下，使用了大量劳动力而建起来的。近年来碾压混凝土重力坝的出现，使用土石坝的施工机械用于混凝土的运输和碾压，而使施工速度大大加快、水泥用量减少并简化温控措施，为重力坝的建设开创了新路。

(5) 严寒地区重力坝易于温度控制和混凝土防裂。实体重力坝、重力拱坝是暴露面较少的坝型，可减少因内外温差产生裂缝的机会。运行期也可防止坝体温度有过大变化，从而避免和减少运行期温度应力和裂缝。并且由于坝体断面较厚，裂缝不易贯穿上下游，危害性也较小。虽然混凝土量较多，但模板量小，水泥用量也少，施工方便，经济上常常是可行的。

(6) 重力坝也有一定缺点，如断面较大，因而坝基开挖量和清基量大，坝体混凝土方量大，往往造成劳动力和工期的增加。与重力拱坝和薄拱坝比，其体积要大得多。与支墩坝或宽缝重力坝比，实体重力坝混凝土量也要大得多，因此在优良的地形和地质条件下，重力坝的经济指标就比不上上述坝型。另外，由于重力坝坝体应力较低，有一部分材料强度未被充分利用，这也是它体形上的一个缺点。

(7) 国内外混凝土重力坝的发展概况: 建国 50 年来, 我国兴建了很多混凝土重力坝。截至 1989 年, 我国共建混凝土重力坝 95 座, 按坝高统计见表 1-1。其中大部分为实体重力坝, 较高的坝为 20 世纪 60 年代建成的三门峡实体重力坝 (坝高 106m), 70 年代建成的刘家峡实体重力坝 (坝高 148m), 80 年代建成的乌江渡坝 (坝高 165m)。

表 1-1 我国已建的混凝土重力坝统计表 (截至 1989 年)

坝高 (m)	101 ~ 165	71 ~ 100	31 ~ 70	< 30	合 计
实体重力坝	9	6	37	18	70
宽缝重力坝	5	4	9	—	18
空腹重力坝	—	3	4	—	7

目前世界上最高的混凝土重力坝为瑞士大狄克逊坝, 高 284m, 于 1968 年建成; 其次为 1963 年建成的印度巴克拉坝, 高 226m; 第三为 1972 年建成的美国德沃歇克坝, 高 219m; 前苏联的托克托古尔坝, 高 215m, 高度列第四位。

我国东北地区目前已建的高于 15m 的混凝土重力坝有 18 座, 依建成先后次序为王家店、龙王塘、大西山、闹德海、水丰、二龙山、丰满、云峰、桓仁、太平湾、红石、渭源、观音阁等。坝龄最长的王家店已有 85 年 (1914 ~ 1917 年建, 坝高 29.09m), 建坝时间较早、规模较大的有水丰水电站重力坝 (坝高 106.4m, 坝体混凝土量 313 万 m^3 , 1936 ~ 1942 年建设), 云峰水电站宽缝重力坝 (坝高 113.75m, 坝体混凝土量 270 万 m^3 , 建设时间 1959 ~ 1967 年), 丰满水电站重力坝 (最大坝高 91.7m, 1937 ~ 1945 年完成 80% 坝体混凝土量, 1953 年建成, 坝体混凝土量 180 万 m^3)。

1.1.2 水工枢纽布置及泄洪消能

水工枢纽布置要求能满足国民经济各部门安全运用的需求, 并且技术经济指标合理。对水工枢纽一般要求具有发电、泄洪、航运、取水、过木及排沙等综合利用功能。但就某个水工枢纽而言, 它可能只有其中的部分要求。从水力发电厂在水工枢纽中的布置位置分类, 常见的布置型式有坝后式、河床式和引水式布置

等。在狭窄河床中的高坝也有坝内式布置和地下厂房布置，但地下厂房布置也可以归纳在引水式布置内。

一、坝后式水电站水工枢纽布置

坝后式厂房布置，一般是高坝在大江大河中常见的一种布置方式。因为大江大河泄洪流量大，发电机组台数多，一般在主河床上布置泄洪建筑物，以便洪水顺着主河道顺畅下泄。发电厂一般布置在主河床旁边，或在岸旁的滩地上。发电厂要求进、出口水平平顺，不增加水头损失，尾水渠能与主流很好衔接以及运行时电厂尾水不产生淤积，还要求汛期发电不受泄洪水流的影响。

(一) 丰满水电站的水工枢纽布置和泄洪消能

丰满水电站水工枢纽平面布置及剖面图见图 1-1 ~ 图 1-4。

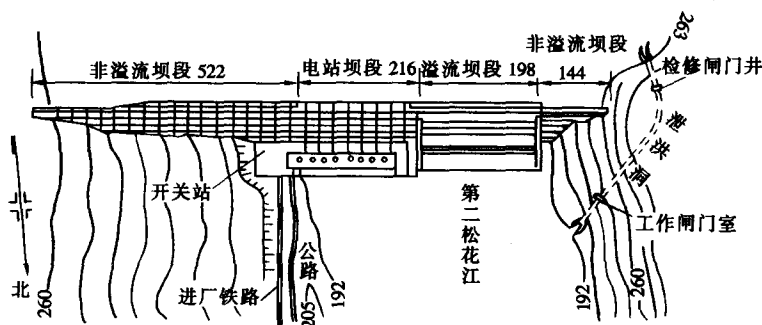


图 1-1 丰满水电站枢纽平面布置示意图

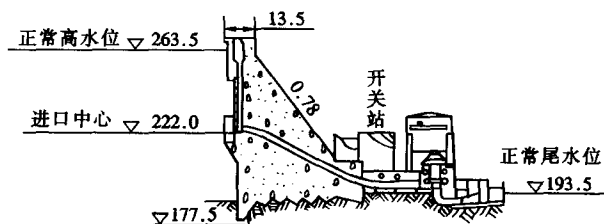


图 1-2 丰满水电站坝段剖面图 (单位: m)

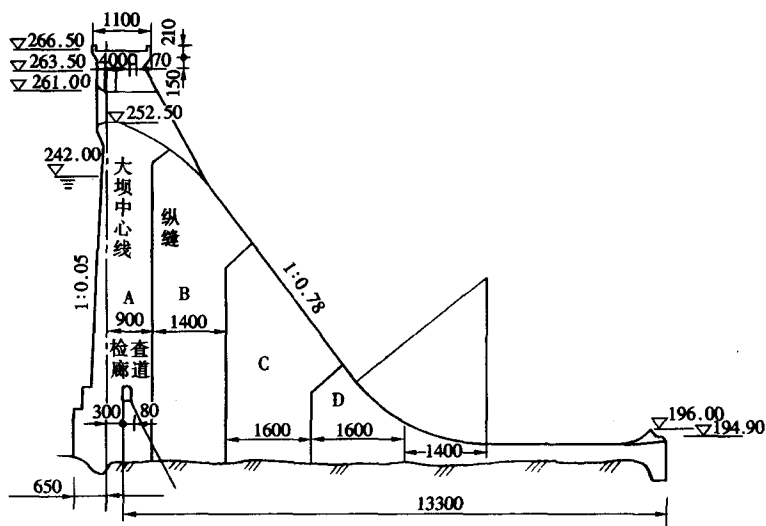


图 1-3 溢流坝段剖面图 (尺寸单位: cm, 高程单位: m)

水利枢纽由拦河坝、坝后式厂房、泄洪洞兼发电引水洞和左岸发电厂房组成。

拦河大坝长 1080m, 分为 60 个坝段, 每个坝段长 18m。其中 9~19 号坝段为溢流坝段, 布置于主河床, 21~31 号坝段为发电引水坝段, 中间 20 号坝段及左、右两岸为挡水坝段。坝后式厂房中装有 10 台水轮发电机组, 装机容量 850MW。其中第一期装 8 台机组, 另 2 台机组钢管预留, 第 2 期 2 台机组为 20 世纪 80 年代安装。左岸 70 年代建有泄水洞 1 条, 长 682.9m, 直径 9.2m, 后在 90 年代在泄水洞上接发电引水支洞, 并建成第三期发电厂房。泄水洞平时作为发电引水洞, 遇稀有洪水时可以泄洪, 泄洪流量 $1234\text{m}^3/\text{s}$, 当需要放空水库时, 可以作为放空泄水洞使用。加上三期电站后, 丰满水电站总装机容量 1004MW。大坝的最大坝高为 91.7m。

溢流坝采用潜孔溢流, 每孔宽 12m、高 6m, 当库水位为

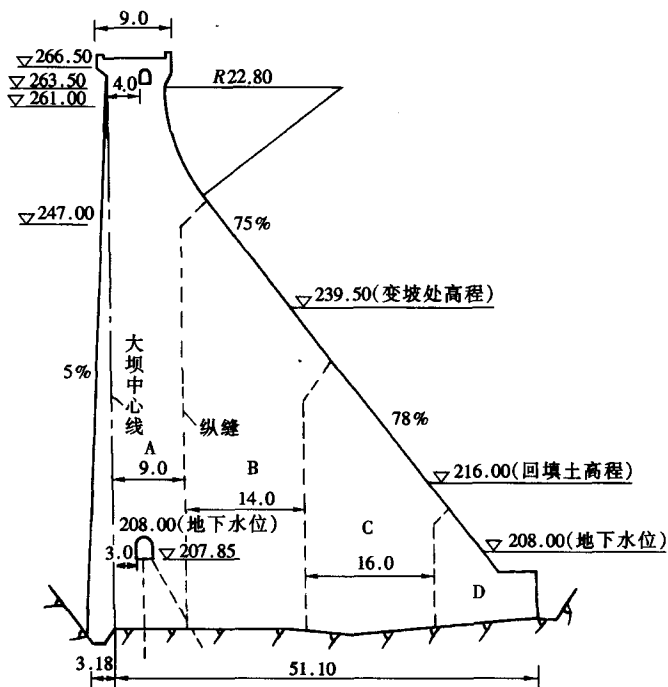


图 1-4 挡水坝段剖面图 (单位: m)

267.7m 时, 11 个溢流孔全开可下泄流量 $9724\text{m}^3/\text{s}$, 单宽流量 $q = 49\text{m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$, 加上泄洪洞泄量 $1234\text{m}^3/\text{s}$, 坝后厂房 10 台机组过流量 $1300\text{m}^3/\text{s}$, 合计可以下泄流量 $12258\text{m}^3/\text{s}$ 。调洪计算考虑起调水位 261.0m, 与白山水库联合调度; 根据洪水预报, 提前 12 小时泄流。据此计算得 500 年、5000 年和 10000 年一遇洪水的水库洪水位分别为 266.40m、267.12m 和 267.65m。可见, 校核洪水位略低于坝顶 267.70m, 10000 年一遇洪峰流量可以安全下泄。

1937年设计丰满大坝时,设计入库洪峰流量为 $15000\text{m}^3/\text{s}$ (按调查洪水扩大1.5倍而得)。以后,洪水流量按频率法计算,设计入库洪水逐年增加,到1996年时1000年和10000年一遇的

设计洪水分别增加到 $26900\text{m}^3/\text{s}$ 和 $35100\text{m}^3/\text{s}$ 。后来采取了将泄洪水位提高 1m, 因而坝顶高程抬高 1m (坝顶高程由 266.7m 抬高到 267.7m), 增设的泄水洞兼作泄洪洞, 以及电站扩大装机容量 (由 650MW 增加为 1004MW, 机组由原来的 8 台增加为 12 台) 使水轮机增大过流量等多种有效措施, 终于满足了大坝泄洪标准要求。

溢流坝顶不能发生真空, 以免混凝土剥落, 其堰顶曲线设计是参考克利格 (Creager) 公式, 并经多次水工模型实验确定。溢流方式采用潜孔溢流, 溢流顶高程 252.5m, 溢流面曲线方程式为 $Y = 0.0342X^2$ 。

溢流流量系数 C 系由实验之流量、水位求得。各种不同水位的溢流系数及溢流量见表 1-2。

表 1-2 不同库水位溢流系数与溢流量

水位标高 (m)	溢流堰顶 水深 (m)	溢流系数 C	单孔 泄量 (m^3/s)	11孔总 泄量 (m^3/s)
253.5	1	0.862	10.34	113.7
255.5	3	1.464	91.28	1004.1
257.5	5	1.613	216.5	2381.6
259.5	7	1.836	386	4246.1
261.5	9	2.001	523.7	5761.5
263.5	11	2.093	635.5	6991.2
265.5	13	2.123	722.3	7945.2
266.5	14	2.130	760.5	8366.1

护坦长度及消力设施型式按水工模型试验结果确定, 模型比例尺为 1:50, 在吉林市自来水厂进行试验。在比较了楔形槛、齿形槛、阻柱、梯形槛、楔形与齿结合槛及各项特殊组合共 180 种之后, 根据下游冲刷深度、冲刷距离及长度, 才确定护坦及消能设施。护坦长 50m, 厚 2m, 末端为消力槛, 设有钢筋混凝土消力齿。

1951年由前苏联莫斯科设计院提出改建和加固设计,将护坦增厚 $0.8\sim 1\text{m}$,在每 1.95m^2 内设插筋1根,直径 50mm ,深入岩盘 2m ,同时在每 1.95m^2 内插3对直径 25mm 的斜向钢筋,以保证新旧混凝土连接。在护坦面层下 20cm 处配置焊接的钢筋网,以防止护坦在水流冲击时发生裂纹。

每坝段护坦内设2行排水孔,每行3个,以降低扬压力。

护坦和消力齿的混凝土,要求有足够的强度、抗冻性与耐磨性能,表面应光滑,要求浇筑混凝土时进行真空作业。

护坦末端消力齿,原设计为角棱台形的钢筋混凝土结构,通过模型试验,改为采用差动式消力齿。新设计的消力齿的倾斜导水齿面与水平面成 30° 角,各齿间表面差为 20° 角。

消力齿每 1.95m^2 插一直径 50mm 的钢筋,深入岩盘 2m ,并配有纵向钢筋与护坦连接。为保护消力齿不受下游水流冲刷,下游齿槽要求做到原设计标高 186m ,并再向下游伸出 3.5m ,以包住原有的混凝土。

对溢洪道表面破损的处理,采取在现场浇筑厚 30cm 以上的整体钢筋混凝土护面的全面改建方案。由于溢流面流速大,为防止空蚀,使用混凝土标号为 $R_{28}200S4M100$ 的抗冻混凝土进行真空作业。新溢流坝表面比原溢流坝表面高出 30cm 。表面曲线公式 $Y = X^2/0.78 - 12.51$ 。为与原溢流坝曲线公式 $Y = 0.0342X^2$ 连接,两者之间采用 $Y = 0.202X^2 + 0.39X - 2.75$ 的曲线公式加以连接。

上述溢流面改建措施,在以后30年的运行中除了具有抗冻性好,混凝土表面耐久性好、消能结构选择合适等优点外,也暴露出以下问题:对冻深估计不足,锚筋深度不够,混凝土为整体浇筑不分横缝,坝内渗漏水排不出去,造成冬季坝内混凝土饱和,结冻时表面混凝土膨胀鼓包。坝内约 2m 深处形成一条经多次冻融破坏的约 20cm 厚的疏松裂缝,最后1986年导致溢流时一次冲毁溢流面面积 1000m^2 ,冲走约 2000m^3 混凝土,冲深 $2\sim 3\text{m}$ 。

(二) 水丰水电站的水工枢纽布置和泄洪消能

水丰水电站水工枢纽布置由拦河大坝、副坝（备用溢洪道）、大坝坝后式厂房、变电站、左右岸引水发电隧洞及扩建电站厂房等组成。早期还建有右岸流筏道，后来堵死，图 1-5 为枢纽布置示意图。

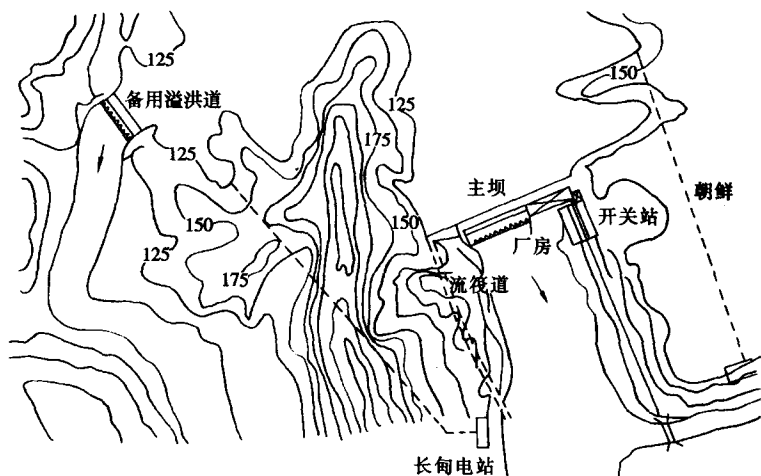


图 1-5 水丰水电站枢纽布置示意图

主坝建在鸭绿江干流的下游，全坝坝顶长度 899.5m，共分 60 个坝段，其中 24~49 号坝段为溢流坝段，共长 390m，布置在主河床；16~22 号坝段为取水发电坝段，共长 152m，布置于朝方侧。1~15 号及 50~60 号坝段分别为左、右岸挡水非溢流坝段。其中的 55~59 号坝段为流筏过坝坝段。大坝坝高 106.4m。挡水坝段坝顶高程为 126.4m，并在上游设挡水及挡浪墙，墙顶高程 131.0m，挡浪墙的顶、底宽度为 0.6m 和 1.50m。溢流坝的坝顶高程为 127.56m（工作桥），溢流堰堰顶高程 116m，溢流孔为潜孔式，每个孔口设 12m × 7.3m 闸门一扇。电站厂房内设 7 台水轮发电机组，总装机容量 630MW。另在坝头两侧各修建发电引水隧洞 1 条，各建 1 个扩建电站，中方侧叫长甸电站，装机

容量 150MW，朝方侧叫 101 电站，装机容量 150MW，故水丰水电站总装机容量为 930MW，多年平均发电量 40 亿 kW·h。

副坝（备用溢洪道）布置在中国境内的涧谷中，为混凝土实体重力坝，坝顶长度 249m，其中溢流坝段长 213m，坝高 41m。溢流段共有 18 个溢流孔，溢流堰堰顶高程 116m，每个溢流孔净宽 9m。装有 9m×10m 平板闸门 18 扇。

主坝和副坝的平面和剖面布置图见图 1-6～图 1-9。

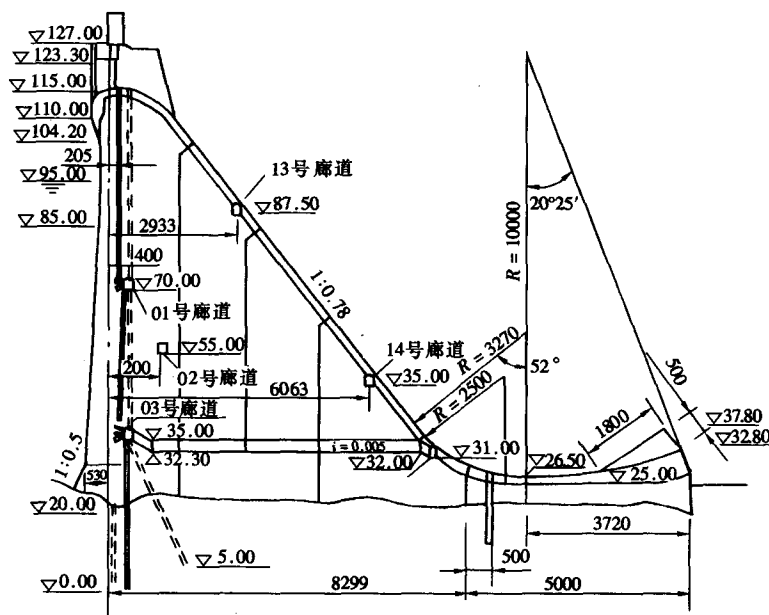


图 1-6 水丰大坝剖面图（尺寸单位：cm，高程单位：m）

1937 年大坝设计采用的设计洪水流量为 $41000\text{m}^3/\text{s}$ ，是根据 1926～1938 年实测最大流量乘以 1.5 倍而得。

1955 年列宁格勒设计院所做的加固设计采用频率法计算洪水，采用千年一遇洪水 $41000\text{m}^3/\text{s}$ 设计，万年一遇洪水 $59000\text{m}^3/\text{s}$ 校核。