

中国大坝

50年

潘家铮 何璟 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国大坝 50年

潘家铮 何璟 主编

内 容 提 要

本书总结了 50 年来特别是近 20 年来中国坝工建设的巨大成就和中国筑坝的成功经验。全书分 21 章,各章具有独立性,以坝工的专项技术为主题分别进行介绍。本书的编写原则是:以技术创新为主线,以介绍实用技术为主体;编写宗旨是:反映中国国情、创新特色和学术水平。

本书是第 20 届国际大坝会议的重要交流资料,并是坝工建设者们的一本极具参考价值、实用性很强的科技著作。

图书在版编目 (CIP) 数据

中国大坝 50 年/潘家铮,何璟主编. —北京:中国水利水电出版社, 2000.8

ISBN 7-5084-0360-6

I. 中… II. ①潘…, ②何… III. 水利建设-大坝-成就-中国
IV. TV64

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 60608 号

书 名	中国大坝 50 年
作 者	潘家铮 何璟 主编
出版、发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京人卫印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 64.75 印张 1513 千字
版 次	2000 年 9 月第一版 2000 年 9 月北京第一次印刷
定 价	285.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

《中国大坝 50 年》编辑委员会

主 任	汪恕诚				
副主任	陆佑楣	周大兵	潘家铮		
委 员	何 璟	高安泽	张学知	董哲仁	张晓鲁
	高季章	邴凤山	毛亚杰	陈厚群	朱伯芳
	梁瑞驹	贺 恭	陈东平	朱耀泉	李 新
	孔令兵				
主 编	潘家铮	何 璟			
副主编	高季章	邴凤山	陈东平		
撰稿人	郑连第	张进谦	芮孝芳	方子云	陈德基
	石瑞芳	朱伯芳	沈崇刚	林宝玉	蒋国澄
	张有天	陈祖煜	陈厚群	高季章	张瑞凯
	张超然	陈连青	林 椿	曹征齐	李学中
	朱耀泉	陈炳新	邴凤山	潘家铮	
编 辑	朱耀泉	张祁汉	卢 湘		

前 言

50 年来，中国水电建设日新月异，平均年投产 145.5 万 kW，更喜人的是 1993 年以后，连续 6 年投产超过 300 万 kW，1997 年投产 415 万 kW，1998 年投产 534 万 kW，1999 年投产 633 万 kW，这是世界水电史上仅有的。截至 1999 年底中国水电总装机容量达到 7297 万 kW，居世界第二位。

中国已经修建了 200 多座中型水电站，57 座大型水电站，其中 100 万 kW 以上大型电站 20 座。大规模的水电建设实践，使中国的水电工程技术达到了国际水平，有的技术达到世界先进水平。正在修建世界最大的水电站——三峡水电站，装机容量为 1820 万 kW；最大的抽水蓄能电站——广州抽水蓄能电站，装机容量为 240 万 kW。中国又是世界上筑坝最多的国家，筑坝技术也达到了世界水平。50 年来修建多座高达 100 m 以上的常规土石坝，如小浪底、碧口、鲁布革、石头河等；成功地建成了 240 m 高的二滩混凝土拱坝，还修建了 10 多座百米以上的混凝土面板堆石坝，其中天生桥一级坝高达 178 m，已建和在建碾压混凝土坝 50 多座，其中江垭坝高达 131 m，普定和沙牌碾压混凝土拱坝的高度也居世界前列。此外，在基础处理、高速水流及消能工建设等方面均有独特建树。

为了总结 50 年来中国筑坝的成功经验，介绍中国大坝建设中有特色的技术，向各国同仁提供有用的交流资料，中国国家电力公司组织编写了反映中国当代坝工新技术的学术专著——《中国大坝 50 年》。

《中国大坝 50 年》共分 21 章。编写的原则是：以技术创新为主线，以介绍实用技术为主体，各章有独立性；编写宗旨是：充分反映中国国情、创新特色和学科水平。以下简介各章核心内容。

1. **中国大坝建设历史**：介绍中国坝工发展概况，包括古代传统

坝工的发展，传统坝工与近代坝工技术的结合和创新。

2. **水电开发规划技术**：介绍中国丰富的水能资源、特点和研究程度及开发前景。

3. **大坝建设的水文水利计算**：介绍中国水电开发中水文水利计算技术进展和所采用的水能资源估价方法，为中国水电工程规划设计和生产运行管理现代化奠定可靠的基础。

4. **中国建坝环境技术**：介绍中国建坝各个不同阶段的环境技术。

5. **大坝建设的工程地质和勘测技术**：介绍中国大坝建设中所遇到的工程地质问题，针对大坝建设中四大勘测任务及研究内容（区域构造稳定性及地震危险性评价，水文工程地质与环境地质，坝址工程地质与水文地质和天然建筑材料），评述了近 20 年来，随着水电建设的重心向中西部转移后，中国大坝建设在地质勘测方面面临的新形势及所取得的巨大进展。

6. **中国大坝坝型和枢纽布置**：介绍新中国成立以来建设的大型水电工程所采用的坝型枢纽布置设计特色及各类坝型设计。

7. **拱坝体形优化**：介绍了拱坝体形优化的数学模型和求解方法及应用实例。

8. **中国碾压混凝土坝的发展**：介绍碾压混凝土坝在中国的新进展，诸如在坝的设计和施工中高掺粉煤灰、薄层、全断面、快速短间歇连续筑坝技术。

9. **高坝特种混凝土**：介绍中国在高坝混凝土方面的研究进展，高强、低弹模、低热、防裂及抗高速挟砂水流的耐磨蚀的混凝土、聚合物材料混凝土、硅粉混凝土、水下不分散混凝土的成分、配比性能及工程应用实例。

10. **混凝土面板堆石坝**：介绍中国混凝土面板堆石坝发展的特点：遍及全国，覆盖各种复杂的气候及地形条件，坝高达 200 m 量级，工程规模宏大，重视理论研究，以及所取得的技术成果。

11. **水工地下结构**：介绍中国高压大直径隧洞、地下厂房、埋藏

式高压钢管、喷锚衬砌和不衬隧洞支护技术的成功经验。

12. 岩质边坡工程:介绍中国境内工程建设中的高边坡失稳机理及加固处理技术。

13. 大坝抗震:介绍中国大坝抗震成就、水平和特点,重点论述了中国地震背景和水电工程抗震任务,近年几次大地震的震害分析,水库诱发地震概况,大坝抗震设防标准,抗震设计规范和工程抗震措施等内容。

14. 高坝泄洪消能及高速水流:介绍中国已建、在建和设计中的高坝枢纽工程中的泄洪消能设计原则,新型消能工研究的新成果,同时还介绍了典型工程的水力学原型观测成果与反馈分析及高坝泄洪消能中的高速水流问题。

15. 高坝通航建筑物:介绍中国已建和在建的高坝通航工程,诸如:葛洲坝、水口、岩滩及三峡等建筑物(船闸和升船机)的结构(闸室和闸首),水力学(船闸输水系统及阀门水力学),金属结构(闸门、阀门启闭机械及提升设备等)。

16、17、18. 高坝施工(I~Ⅲ):重点介绍二滩、小浪底、三峡三个特大水电工程的施工技术和施工工艺。

19. 水力发电设备:介绍中国各类水电机组研制的成就,总结了一些特殊问题,如机组稳定性、多泥沙河流水轮机抗磨蚀和气蚀措施的研究、弹性塑料金属轴瓦、电渣熔铸轮叶片、水轮发电机蒸发冷却技术研究等的新进展,特别介绍了三峡水轮发电机组特殊设计条件和水力性能优选。

20. 科学研究及实验装备:介绍新中国成立以来,特别是近20年来高坝建设和水电开发科学研究新进展,以及中国水利水电科学研究重大科研设备,诸如:大型振动台、大型离心机、大型液压箱和高速水洞、土振动三轴仪、空化与空蚀试验装置和高坝通航水力学试验装置、水轮机及水泵试验装置等先进的大坝研究手段。

21. 21世纪初中国大坝建设的展望:本章展望水电建设新曙光,

介绍水电开发新任务和面对新建工程重大技术问题。

总结只是反映成就和经验，必定有局限，瞻望前景，任务艰巨繁重，新世纪来临后，中国水电发展迎来了春天，西部大开发战略的提出，为水电发展提供机遇。在新世纪中，中国的水电开发可以设想分阶段实施，分两步达到突破性目标。第一步：2001~2010年。这个期间三峡、龙滩、小湾、公伯峡、水布垭等一批大型水电站建成发电，全国水电总装机将达到1.4亿~1.5亿kW，可能居世界第一，中国实现从水能资源大国转变成成为水电生产大国的目标。那时，中国水电容量在全国电力中的比例将达到30%左右。随着三峡（最大的混凝土重力坝）、龙滩（碾压混凝土坝，最大坝高216m）、小湾（混凝土薄拱坝，最大坝高292m）和水布垭（钢筋混凝土面板堆石坝，最大坝高230m）的建成，中国的水电和坝工建设技术将全面达到国际水平。第二步：2011~2050年在西部大开发战略指导下基本完成中国技术可开发的水能资源的建设，那时，中国西部地区几十座超大型水电站，包括容量超过4000万kW的墨脱水电站，将全面建成，形成世界上最宏伟的水电基地，水电西电东送将超过1.5亿kW，配合东部抽水蓄能的大发展，形成强大的全国电网，充分发挥跨地区跨流域调节的效益。总之，中国的水能资源，为中国的水电建设者提供大展宏图的天地，高难度的水电工程技术为广大科学技术工作者提供了大显身手的舞台，我们期望着中国的水电建设者们，再接再厉，更上一层楼。我们尤其盼望国际的水电界能给我们以支援和友谊，共同为开发地球上的清洁能源做出贡献。

中国工程院副院长
中国科学院院士
中国工程院院士
中国国家电力公司顾问

潘家铮

2000年4月6日·北京·

《中国大坝 50 年》编辑出版工作人员

总 编 辑	王 国 仪
编辑室主任	吕爱华 黄会明
责 任 编 辑	陈琦英 方 苹
美 术 编 辑	曲大鹏 王 鹏
技 术 编 辑	王 国 华
微 机 排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
责 任 校 对	张 莉
责 任 描 图	樊启玲 蔡雅玲
出 版 印 制	黄勇忠 刘 萍

目 录

前 言

1 中国大坝建设历史	1
1.1 引言	1
1.2 古代堰坝发展概况	1
1.3 20 世纪上半叶坝工技术的进展	5
1.4 20 世纪下半叶坝工建设速度	6
1.5 坝高与坝型	9
1.6 最近采用和发展中的三种坝型	15
参考文献、参考资料	20
2 水电开发规划技术	21
2.1 中国水电开发的资源条件	21
2.2 水电开发的宏观决策规划	46
2.3 水电建设的微观经济分析	138
参考文献	170
3 大坝建设的水文水利计算	173
3.1 设计洪水	173
3.2 水文预报	184
3.3 径流调节与水能计算	194
3.4 水库调度	198
参考文献、参考资料	205
4 中国建坝环境技术	210
4.1 概述	210
4.2 环境影响评价	214
4.3 环境保护设计	223
4.4 大坝工程施工区与库区环境保护规划和管理	229
4.5 已建工程的回顾评价	241
4.6 环境监测站网的规划与实施	246
4.7 中国建坝成功的环境技术与进一步发展的问題	250
参考文献	256
5 大坝建设中的工程地质与勘测技术	257
5.1 大坝建设工程地质发展回顾	257
5.2 大坝建设工程地质勘察的主要内容及其研究进展	259

5.3	几个典型工程的地质研究简介	263
5.4	勘察技术的发展与进步	285
	参考文献.....	301
6	中国大坝坝型和枢纽布置	302
6.1	中国大坝枢纽建设特点概述	302
6.2	高混凝土重力坝枢纽布置	317
6.3	通航河流上大坝枢纽布置	356
6.4	高拱坝枢纽布置	370
6.5	高土石坝枢纽布置	413
	参考文献、参考资料.....	442
7	拱坝体形优化	444
7.1	拱坝优化的几点经验	444
7.2	拱坝的最优中心角	445
7.3	拱坝的几何模型	448
7.4	拱坝的满应力设计	456
7.5	拱坝的优化设计	458
7.6	拱坝优化中的静态应力分析	462
7.7	拱坝优化中的动态应力分析	465
7.8	优化方法	468
7.9	拱坝的智能优化辅助设计	469
7.10	拱坝优化的应用实例.....	472
7.11	结束语.....	474
	参考文献.....	475
8	中国碾压混凝土坝的发展与成就	477
8.1	发展概况	477
8.2	发展规模	477
8.3	碾压混凝土重力坝设计	483
8.4	碾压混凝土拱坝的设计	496
8.5	碾压混凝土的配合比	505
8.6	碾压混凝土坝的施工	509
8.7	碾压混凝土坝的运行	520
8.8	效益	521
8.9	展望	522
	参考文献、参考资料.....	522
9	大坝特种混凝土	524
9.1	概述	524
9.2	粉煤灰混凝土	525
9.3	抗磨蚀混凝土	536

9.4	水下不分散混凝土	548
9.5	聚合物水泥砂浆及混凝土	557
9.6	MgO 混凝土	563
	参考文献、参考资料	566
10	混凝土面板堆石坝	569
10.1	概述	569
10.2	坝址选择及枢纽布置	579
10.3	坝体分区和筑坝材料	584
10.4	防渗体系	591
10.5	施工	604
10.6	结语及展望	614
11	水工地下结构	615
11.1	引言	615
11.2	中国水工地下工程发展概况	615
11.3	中国水工隧洞建设新进展	622
11.4	中国水电站地下厂房建设新进展	640
	参考文献、参考资料	652
12	岩质边坡工程	654
12.1	引言	654
12.2	边坡工程地质	658
12.3	岩体的抗剪强度	660
12.4	边坡稳定分析方法和计算机程序	665
	参考文献	673
13	大坝抗震	675
13.1	大坝地震背景	675
13.2	大坝抗震设计	682
13.3	大坝地震工程研究	693
13.4	大坝地震监测	725
	参考文献	731
14	高坝泄洪消能及高速水流	734
14.1	高水头大流量泄洪消能技术发展概况	734
14.2	高水头大流量泄洪消能技术和设施	737
14.3	高坝新型消能技术	752
14.4	高速水流问题	770
	参考文献、参考资料	784
15	高坝通航建筑物	786
15.1	前言	786
15.2	输水系统	790

15.3	阀门水力学	799
15.4	大型人字闸门运行阻力及启闭机型式	815
15.5	升船机	822
	参考文献、参考资料	836
16	高坝施工 (I) —— 三峡工程	837
16.1	工程概况	837
16.2	大坝工程进度及分年度工程量	843
16.3	施工导流及施工期通航	843
16.4	坝基开挖	853
16.5	大坝混凝土施工	854
16.6	金属结构安装	862
16.7	对外交通	865
17	高坝施工 (II) —— 二滩工程	866
17.1	工程概况	866
17.2	二滩拱坝施工进度及施工布置	872
17.3	二滩拱坝导流工程及高压旋喷灌浆施工	877
17.4	坝基开挖	882
17.5	拱坝混凝土施工	889
17.6	环形预应力锚索在拱坝中孔结构上的应用	898
17.7	二滩拱坝基础灌浆	902
17.8	二滩水电站混凝土拱坝接缝灌浆	908
17.9	工程施工对外交通运输	910
	参考文献、参考资料	911
18	高坝施工 (III) —— 小浪底工程	912
18.1	小浪底水利枢纽工程概况	912
18.2	大坝施工布置及场内外交通	918
18.3	施工导流与大坝施工进度	921
18.4	基础开挖	924
18.5	料场开采加工	924
18.6	坝体填筑	928
18.7	基础防渗工程	935
18.8	施工期安全监测和外部变形观测	952
19	水力发电设备	955
19.1	水力发电设备发展概况	955
19.2	水轮机运行关键技术	964
19.3	长江三峡工程水轮机	978
20	科学研究	982
20.1	科学研究工作成果	982

20.2	科研机构	995
20.3	重要科学试验设备	1000
20.4	水利水电科学技术领域的中国科学院院士和中国工程院院士	1006
	参考文献、参考资料	1007
21	21 世纪初中国水电建设将再创新辉煌	1008
21.1	加快水能资源的开发是中国经济可持续发展的要求	1008
21.2	为 21 世纪初大力开发水电的工程技术储备	1010
21.3	预计在 21 世纪初建设的大坝工程	1012

1 中国大坝建设历史

沈崇刚* 郑连第**

1.1 引言

修建大坝、利用水库调节天然水量,是人类防止水旱灾害和合理开发水资源的需要,对农业灌溉、城市供水、防洪、开发水电以及改善航运等,都起了积极的作用。特别在中国,由于水资源总量少,而且时空、地区分布又十分不均匀,依靠自然来水 28124 亿 m^3 /年,无法满足缺水地区或缺水季节的需要;任凭洪水泛滥,也将无法保证社会生活的正常运转和社会的进步。所以,中国自古就重视水利,重视对水资源的控制和调节,因而必须兴修水库,建设足够的大坝。

修建任何一个工程,总有相对性,不可能只有利益,没有不足。大坝工程也是这样,工程技术人员主要任务除了使工程自身安全经济外,还要做到尽量发挥效益,把反面的影响缩减到最小,转弊为利。

现在国际上有一种潮流,某些环境工作者认为建坝破坏了河流的自然流淌,影响生态平衡,反对修建大坝和水库。这显然是一种偏见,片面夸大了建坝带来的影响而低估了人类通过自身的努力达到自然和谐发展的能力。

在综合开发水资源的前题下,防洪、灌溉、供水、航运、养殖和发电都要兼顾,同时为了改善人类的生存环境,天然的和人工的水体是多么重要。不可设想,任何风景名胜如果没有水面,会有多大的遗憾。因此国家经济建设的发展,大坝建设是不可缺少的。

1.2 古代堰坝发展概况

约在五千多年前,农耕已成为中国人民的主要生产方式。当时人们集体居住在河流或湖泊岸边的阶地上,这里环境湿润,土地肥沃,取水方便,为生产和生活提供了便利。但这里也是洪水容易泛滥的地方,人们为了保护自己,受“自然堤”的启示,做土堤挡水,于是出现了初期的防洪工程,现已为大量的考古发掘所证实。随着生产的发展,工程的挡水功能被用来蓄水灌溉田地,早期的堤和坝常常是难以分开的。

早期的蓄水工程,是兴建堤坝提高低洼地带蓄水能力以形成淹没很大的平原水库。这

* 沈崇刚——中国大坝委员会副主席,中国水利水电科学研究院咨询委员,中国水力发电工程学会常务理事,北京水利学会副理事长,教授级高级工程师,博士。

** 郑连第——原中国水利学会秘书长,教授级高级工程师。

种堤坝,长度很大,形状不规则,宽度、特别是高度尺寸都很小,但这确实是挡水建筑物,即堰坝。现保留最完整最典型的是安徽省寿县的安丰塘,也称芍陂,建于公元前 598~前 591 年间,至今已有 2600 年历史。这类水库在宋代以前的历史上,黄河、淮河、海河以及长江中下游广泛存在,相应的堰坝很多,著名的如:汉代的鸿隙陂(今河南省信阳地区淮河与支流汝河之间)、六门陂(今河南省南阳地区,唐白河流域)、鉴湖(今浙江省绍兴市境内)、练湖(今江苏省丹阳市境内)等,在古代地理名著《水经注》中有大量的关于平原水库的记载。有的成群存在。

平原水库淹没土地面积大,工程量大,管理和维护很不方便,特别是库区,低水位时,滩涂易被围垦和挤占,从宋代开始,随人口增加,平原水库的消失就是必然的了。利用山丘间的沟谷洼地蓄水,堰坝的工程量大将大为减少,维护与使用十分方便,也相对节省工程量。当然,早期山丘水库堰坝的长度仍较宽度和高度大得多。汉代建造的马仁陂(今河南省泌阳县境内)、陈公塘(今江苏省仪征市境内)和唐代扩建的东钱湖(今浙江省鄞县境内)等,都是历史上很有影响的工程。其中,东钱湖至今犹存,马仁陂经改造仍在发挥作用。

中国历史建造最多的坝是引水工程中的壅水坝,它不形成水库,在古文献中称堰、埭或遏等,都是这一类。在现有文献中可查到的最早的这类坝是智伯渠坝(今山西省太原市境内),建于公元前 453 年。接着,引漳十二渠(今河北省邯郸地区)、灵渠(今广西壮族自治区兴安县境内)、戾陵堰(今北京市西郊)等工程相继出现。2000 年来,这类工程越来越多,随处可见,广泛利用在农田水利、城市供水和航运水源等方面。其中有许多长时间利用,保留至今的也有一些,灵渠是最为著名的(图 1.1)。

中国古代堰坝数量众多,规模不一,最大的工程是在南北朝时建造的浮山堰和明代开始形成的高家堰,今称洪泽湖大堤。有大量的古代文献包括历史著作、地理著作、工程专著、个人文集、地方志,对古代堰坝的建设、使用和效益做了多方面的记述,是发掘和研究古代堰坝发生、发展和效益的珍贵资料依据。

一些蓄水工程中的堰坝举例如下。

1.2.1 芍陂

今称安丰塘,在安徽省寿县境内,创始人为孙叔敖,至今已有 2600 年的历史。它位于淮水支流淠水和肥水之间的一大片洼地上,在北、西两面筑堤,即挡水长坝以蓄水,以南面诸水为源,并与淠、淝二水相通。史料表明,历史上它的规模很大且有多次变化,周长为 60 km、100 km、162 km 不等;灌溉面积从数千顷到四万顷不等,1959 年 5 月,安徽省文化局文物工作队在芍陂曾发掘出一座汉代草土堰坝遗址,系在生土层上铺一层砂礓石,上面是层土层草,逐层叠筑,并打进一排整齐有序的栗木桩,深入生土层内。根据伴随出土的文物断定,这是汉代建筑无疑,给我们认识汉代平原水库的堰坝提供了一个难得的实物例证。

安丰塘现在是一个四面筑堤的平原水库,塘堤周长 24.3 km,是淠史杭灌区东干渠的主要反调节水库,水面 34 km²,合 53 万亩(3.53 万 hm²),可蓄水近 1 亿 m³,对近 64 万亩(4.27 万 hm²)农田进行自流灌溉。

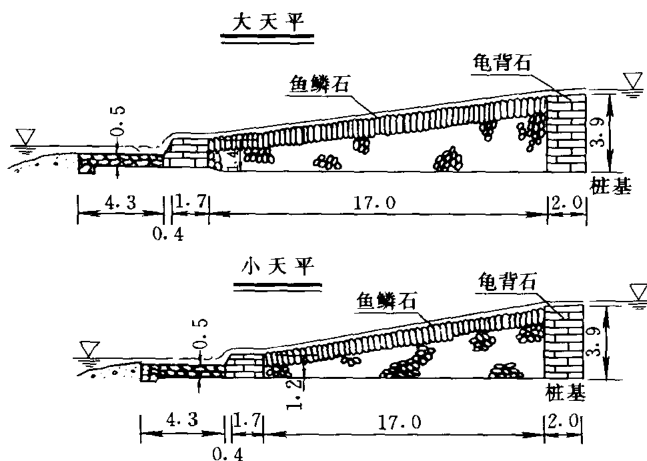
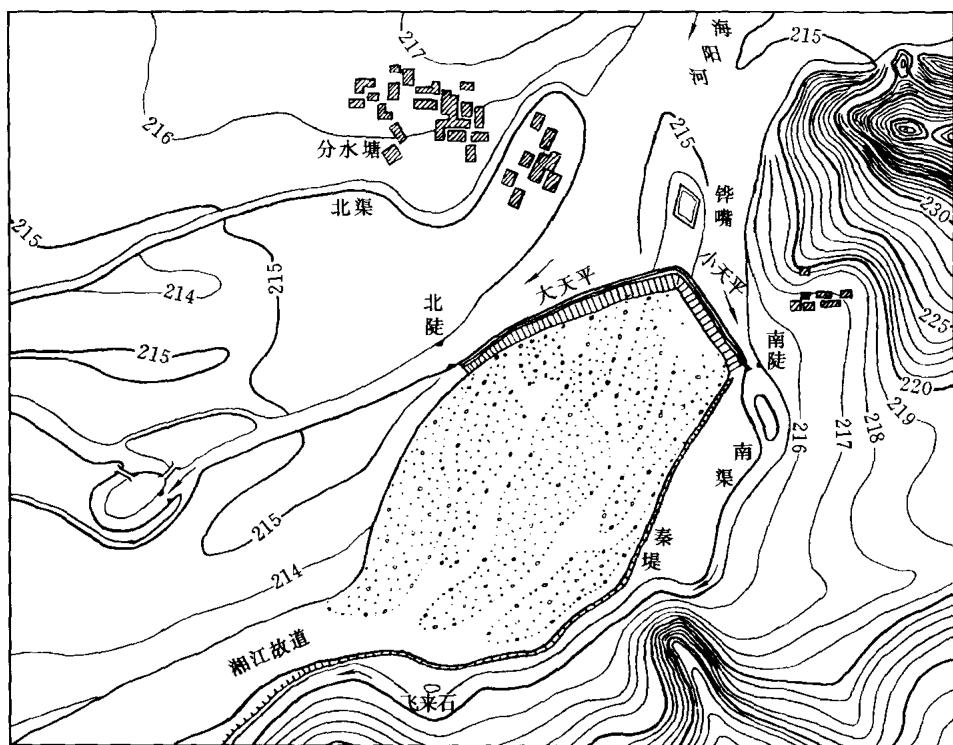


图 1.1 灵渠大小天平平面、断面图
(高程单位: m, 本书以下同; 尺寸单位: m)

1.2.2 鸿隙陂

比芍陂规模还大的平原水库是汉代所建的鸿隙陂, 它位于今河南省淮河干流与汝河间的正阳、息县一带。据《水经, 淮水注》载: 该工程堰坝长 200km, 可见规模之大。受益地区因为有了鸿隙陂的灌溉而富足。可惜, 这项工程早已荡然无存了。在南北朝以前, 淮河两岸, 还有很多这样的平原水库, 类似现在“长藤结瓜”的灌溉系统, 当时的堰坝工程应十分浩大。