

大坝安全 的监测数据

分析理论和评估方法

Dam Safety Monitoring Data
Analysis Theory & Assessment Methods

赵二峰 / 编著

非
外
借



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

大坝安全 的监测数据

分析理论和评估方法

Dam Safety Monitoring Data
Analysis Theory & Assessment Methods

赵二峰 / 编著



河海大学出版社
HOHAI UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书在总结分析国内外典型大坝失事案例的基础上,系统介绍了大坝安全的监测数据分析理论和评估方法。全书共分七章,包括绪论、大坝失事案例分析、大坝失事模式分析与评估、大坝安全监测原理和方法、监测数据的常规分析方法、监测数据的数学建模方法、大坝服役寿命的诊断与提升和退役评估方法。

本书可作为水工结构工程、水利水电工程、土木工程和工程力学等专业本科生和研究生教材和教学参考书,也可供从事大坝安全相关专业的设计、施工、运行管理的科研工作者、工程技术人员和高校教师参考。

图书在版编目(CIP)数据

大坝安全的监测数据分析理论和评估方法/赵二峰

编著. —南京:河海大学出版社,2018.4

ISBN 978-7-5630-5372-8

I. ①大… II. ①赵… III. ①大坝—安全监测—数据处理 IV. ①TV698.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 052644 号

书 名 大坝安全的监测数据分析理论和评估方法

DA BA AN QUAN DE JIAN CE SHU JU FEN XI LI LUN HE PING GU FANG FA

书 号 ISBN 978-7-5630-5372-8

责任编辑 金 怡

封面设计 黄 煜

出版发行 河海大学出版社

网 址 <http://www.hhup.com>

地 址 南京市西康路 1 号(邮编:210098)

电 话 (025)83737852(总编室) (025)83722833(营销部)

经 销 江苏省新华发行集团有限公司

排 版 南京新翰博图文制作有限公司

印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 23.75

字 数 475 千字

版 次 2018 年 4 月第 1 版

印 次 2018 年 4 月第 1 次印刷

定 价 58.00 元

前言

水库具有防洪、发电、灌溉、供水、航运、养殖、旅游、生态等多种功能,是调控水资源时空分布、优化水资源配置最重要的工程措施之一。然而,受地质、水文、设计、施工、运行管理等不确定因素的影响,大坝安全问题和溃坝风险一直无法回避,溃坝并导致重大人员伤亡在世界范围内都有过惨痛教训,水库大坝安全历来为各国政府和相关部门高度重视。

由于我国水库大多建于20世纪50—70年代,受当时经济技术限制,工程建设标准低、质量差,加上管理经费长期投入不足,工程老化失修。目前,我国病险水库数量大、安全隐患多,已成为大坝安全管理中的突出问题。进入21世纪以来,我国又建设了一大批高坝大库枢纽工程,工程难度和复杂性均超越了现有的工程认知水平。水库大坝在我国国民经济建设中发挥重大作用的同时,也因其自身安全性所导致的溃坝洪水风险问题,给相关地区带来潜在的安全隐患,对人们的生命财产形成威胁。随着国民经济的快速发展和人民生活水平的不断提高,社会固定资产不断增加,城市化进程不断加快,人口和资产日趋集中,这些都对涉及能源与公共安全的水库大坝安全保障提出了更高要求。

由于大坝承受着巨大的荷载,而且工作条件极为复杂,运行期间受到多重环境因素与荷载因素的长期作用,并经受各种突发性灾害(如汛期洪水、地震等)的侵袭,大坝失事往往是多个因素共同作用的结果,而且这其中存在许多无法预见的因素。理论上,完全避免大坝失事是不可能的。但是,已失事大坝的调查分析资料表明,在设计、施工或运行管理方面坚持认真负责的态度,采取切实可行和行之有效的措施,按现有的技术水平减小大坝失事概率是完全有可能的。因此,本书总结分析了大坝失事典型案例、失事规律和失事临灾决策方法,介绍了安全监测原理、监测数据常规分析和数学建模方法,并论述了有关大坝服役寿命方面的评估方法。

全书共分七章。第一章绪论,介绍了水资源与水利工程建设、我国建坝历程、我国水库大坝病险情况、我国大坝安全面临的挑战。第二章大坝失事案例分析,总结了国内外典型大坝失事发生过程、溃坝警示,分析了大坝失事的经验和教训。第三章大坝失事模式分析与评估,分析了国内外水库溃坝失事规律,论述了土石坝、拱坝、重力坝失事模式和失事路径,介绍了大坝失事后果评估方法,同时论述了大坝失事临灾决策方法。第四章大坝安全监测原理和方法,介绍了大坝安全监测方

法、监测设计、自动化监测系统和监测资料分析内容。第五章监测数据的常规分析方法,介绍了监测数据可靠性分析、特征值统计对比分析和监测数据时空分析方法。第六章监测数据的数学建模方法,系统介绍了利用统计回归理论进行监测数据处理的基本原理和方法,并论述了短序列小样本监测数据建模分析方法。第七章大坝服役寿命的诊断与提升和退役评估方法,论述了基于实测资料的大坝服役风险度分析方法和病变修复效果评价方法,介绍了大坝退役的评估方法。

在本书完稿之时,作者特别感谢河海大学吴中如院士、顾冲时教授,他们在大坝安全监控方面的教学经验和科研成果丰富了我的学识,在许多方面构成了本书的基础。作者还要感谢在研究过程中合作的同事们和研究生们,他们的大力协作与辛勤劳动使得研究成果更加充实。本书在编写过程中参考了有关书籍、文献,在此向这些专家学者表示衷心的感谢!

本书得到国家重点研发计划(2016YFC0401601)、国家自然科学基金重点项目(51739003)、国家自然科学基金面上项目(51779086,51479054)、江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)(YS11001)的资助,在此表示感谢!

由于作者水平和经验所限,书中的错误或不足之处在所难免,敬请同行和读者批评指正。

赵二峰

2018年3月

目 录

第一章 绪论.....	1
第一节 水资源与水利工程建设.....	1
第二节 我国建坝历程.....	9
第三节 我国水库大坝病险情况	14
第四节 我国大坝安全面临的挑战	15
第二章 大坝失事案例分析	19
第一节 概述	19
第二节 国外大坝失事案例	21
第三节 我国大坝失事案例	35
第四节 大坝失事的经验和教训	43
第三章 大坝失事模式分析与评估	45
第一节 概述	45
第二节 水库溃坝失事规律分析	46
第三节 大坝失事模式和路径	55
第四节 大坝失事后果评估	62
第五节 大坝失事临灾决策	78
第四章 大坝安全监测原理和方法.....	103
第一节 概述.....	103
第二节 大坝安全监测内涵.....	104
第三节 大坝安全监测方法.....	107
第四节 大坝安全监测设计.....	112
第五节 大坝安全监测自动化系统.....	122

第六节 大坝安全监测资料分析.....	139
第五章 监测数据的常规分析方法.....	143
第一节 监测资料收集和整编.....	143
第二节 监测数据可靠性分析.....	145
第三节 特征值统计对比分析.....	157
第四节 监测数据时空分析.....	161
第六章 监测数据的数学建模方法.....	170
第一节 概述.....	170
第二节 一元线性回归建模分析.....	174
第三节 多元线性回归建模分析.....	214
第四节 最佳回归建模分析.....	249
第五节 逐步回归建模分析.....	253
第六节 短序列监测数据建模分析.....	261
第七章 大坝服役寿命的诊断与提升和退役评估方法.....	270
第一节 概述.....	270
第二节 大坝服役寿命的诊断方法.....	273
第三节 大坝服役寿命的提升评估方法.....	293
第四节 大坝退役的评估方法.....	325
参考文献.....	351
附录.....	356
附表1 世界大坝失事情况一览表	356
附表2 u 检验的 u_{α} 值表.....	365
附表3 小子样 t_{α} 分布数值表.....	365
附表4 χ^2 检验的 χ^2 分布表	366
附表5 F 检验的 F 分布表.....	368

第一章 绪 论

第一节 水资源与水利工程建设

存在于大自然中的水是一种重要的资源,是一种可利用的和可再生的重要能源。地球上的总水量很大,约为 $13.86 \times 10^8 \text{ km}^3$,但绝大部分是海洋中的咸水,其中通过大气循环,以降水、径流方式在陆地运行的淡水,相对就很少了,只占 2.5%。全球年径流总量为 4.7×10^5 亿 km^3 ,按全球人口计,人均约为 $9\,000 \text{ m}^3$,这是最重要的一部分水,但这部分水在时间和空间上的分布极不均匀。

一、世界水资源开发利用概况

由于水资源时空分布的不均衡性,全球可利用的水资源总量仅为 9 万亿 m^3 。按照国际大坝委员会对大坝的定义(坝高大于 15 m 或者坝高在 5~15 m 之间、水库库容大于 300 万 m^3),至 2007 年,全球水库大坝的总库容接近 7 万亿 m^3 ,其中 98% 为大坝库容;全球水库的有效库容约为 4 万亿 m^3 ,约相当于世界河流年径流量的 7.3%。水库总面积为 50 万 km^2 ,约相当于地球天然湖面的 1/3。可见,水库大坝建设对水资源综合利用和管理发挥着重要作用。

全球几大洲的水电开发都有着各自的优势,也面临不同的挑战。水电资源颇有价值,它可以生产清洁能源,使丰富的自然资源得以开发利用,并吸引投资,促进该地区的经济发展。根据 2008 年的统计数据(表 1.1.1),世界上有 16 个国家依靠水电为其提供 90% 以上的能源,如挪威、阿尔巴尼亚等国;有 49 个国家依靠水电为其提供 50% 以上的能源,包括巴西、加拿大、瑞士、瑞典等国;有 57 个国家依靠水电为其提供 40% 以上的能源,包括南美的大部分国家。全世界水电的发电量占有所有发电量总和的 17%,水电总装机容量为 8.48 亿 kW。发达国家水电的平均开发度已在 60% 以上,其中美国在 80% 以上,日本在 84% 以上,加拿大在 65% 以上,德国在 73% 以上,法国、挪威、瑞士、意大利均达到或超过 90%。世界各大洲水电与大坝发展概况如下。

(1) 欧洲

欧洲大坝的主要用途首先是水电,其次是灌溉和供水。在欧洲国家,水库利用具有显著差异,尤其是表现在水电方面,这种差异反映了各国地形、降水和国家政策的差异。许多用作水电的水库,常常位于山区或北欧国家,明显不同于用作灌溉和供水的水库,后者规模一般较小,并且位于低地国家和欧洲南部。欧洲约有 1/4 的大坝是多用途大坝。有若干个国家的水电占本国电力供给的一半以上,例如阿尔巴尼亚为 97%,冰岛为 70.1%,拉脱维亚 70%,而挪威的水电比重达到了 99%。1960 年,欧洲许多地方的大坝建设和水电发展达到了高峰,现在的重点是按照新的法规要求维护和整修现有大坝。

(2) 亚洲

亚洲地区大多数大坝是为了灌溉而建造的,其次是为了水电、防洪和供水,其中印度和土耳其以灌溉为主,中国以防洪、灌溉、发电为主,日本偏重防洪和抽水蓄能,伊朗以灌溉和发电为主。亚洲有 9 个国家水电占全国电力的比重高于 50%。总的来说,中国、印度、土耳其、日本和伊朗是大坝建设最活跃的国家。亚洲大坝建设的高峰出现在 1970—1980 年,平均每年建坝数目超过 200 座。

(3) 北美和中美洲

根据国际大坝委员会 2006 年的统计,本区共有大坝 8 252 座,其中约 6 510 座在美国境内。本区 15 个国家中有 4 个国家水电占电力供应的比重超过了 50%,包括加拿大、哥斯达黎加、海地和巴拿马。加拿大的水电量是北美地区最高的,居世界第三,美国居世界第四。防洪、发电、灌溉、供水和娱乐是美国大坝的主要用途。第二次世界大战以后,该地区建成投入使用的大坝迅速增加。

(4) 南美洲

2006 年南美洲共有大坝 799 座,巴西(2006 年有 387 座)几乎占了一半。大坝建设的首要目的是水电和防洪。南美高坝建设比较多,主要集中在巴西、委内瑞拉、厄瓜多尔等国家。该地区水电开发最积极的是巴西,其水电发电量占总发电量的比重超过 76.6%,其他还有巴拉圭(99.99%)、哥伦比亚(78%)、秘鲁(65%)、委内瑞拉(73.3%)、法属圭亚那(60%)、智利(43.5%)和厄瓜多尔(43.5%) 7 个国家。

(5) 非洲

非洲国家水电开发度、水资源调控能力都比较低。根据国际大坝委员会 2007 年的统计资料,非洲已建成 1 815 座大坝,其中南非(1 166 座大坝)、津巴布韦(250 座大坝)和摩洛哥(120 座大坝)拥有的大坝数目之和占到了非洲大坝总数的 80% 以上。在干旱和半干旱的北部和南部地区,大坝以灌溉为主。在中部和其他较湿润地区,大坝以发电为主。在非洲,有 22 个国家的水电占全国电力的比重超过了 50%,赞比亚、莫桑比克、纳米比亚等 5 个国家的水电比重超过了 90%。

(6) 大洋洲

这一地区的大坝共 621 座,主要位于澳大利亚(541 座)和新西兰(67 座)。大坝以供水为主,其次是水电和灌溉。有 3 个国家的水电在全国电力中的比重超过了 50%,分别是斐济(50%)、新西兰(60%)、巴布亚新几内亚(65%)。在澳大利亚和新西兰,大坝建设的高峰出现在 1980 年(平均每年新建大坝约 10 座),到了 1990 年迅速减缓。当前,澳大利亚主要发展小水电和供水工程。

表 1.1.1 世界水电发展概况

地区	水电理论蕴藏量 (GWh/年)	技术可开发量 (GWh/年)	经济可开发量 (MW)	水电装机 (GWh/年)	水电发电量 (MW)	在建水电装机(MW)	规划水电装机(MW)
非洲	2 590 234	1 303 246	848 434	21 486	94 124	7 489	24 236~84 048
亚洲	19 701 583	7 654 565	4 487 377	329 737	1 107 622	130 479	224 368~241 699
大洋洲	633 384	195 987	88 644	13 470	40 259	160	416~2 489
欧洲	2 900 767	1 120 541	752 348	178 814	530 999	2 408	11 029~13 820
北美	7 574 535	1 763 478	1 014 910	167 042	664 244	5 940	18 435~43 645
南美	5 696 000	2 615 299	1 536 197	137 908	607 577	11 327	65 693~75 556
世界	39 096 503	14 653 116	8 727 910	848 457	3 044 825	157 803	344 176~461 257

注:数据来源 World Atlas Industry Guide 2008。

水电增长的驱动因素不仅仅是因为电力需求的普遍增长,还因为各国力求实现“巴黎协定”规定的碳减排目标所需要的可靠、清洁和价廉的电力能源。水电产生的二氧化碳极少,甚至少于风能、核能和太阳能等。与此同时,水电是重要的可再生能源,虽然开发水电的初期投资比较高,但从长期来看,总成本往往很低。另外,与其他可再生能源相比,水电仍独具优势,比如在可再生能源总储量中(表 1.1.2),水电占 86.3%;可转化成固态、液态和气态燃料的生物质能,以及可用于

表 1.1.2 各种可再生能源的发电量及所占比重(2008 年)

能源	发电量(10^9 kW·h)	占比(%)
水电	3 247.30	86.31
生物质能	223.50	5.94
风能	215.70	5.73
地热能	63.40	1.69
太阳能(包括光伏发电)	12.10	0.32
海洋能	0.54	0.01
总计	3 762.54	100.00

发电的生活垃圾为二次能源,占 5.9%;风能占 5.7%;地热能占 1.7%;太阳能和海洋能占 0.01%。

2016 年,全世界水电稳步发展,如图 1.1.1—1.1.3 所示,全世界总水电装机容量达到 1 246 GW(包含 150 GW 抽水蓄能),新增装机容量 31.5 GW,其中抽水蓄能新增 6.2 GW,接近 2015 年的 2 倍。抽水蓄能的发展意味着水电在支持能源系统中的作用越来越受到认可,特别是其平衡风能和太阳能等不稳定可再生能源的作用。

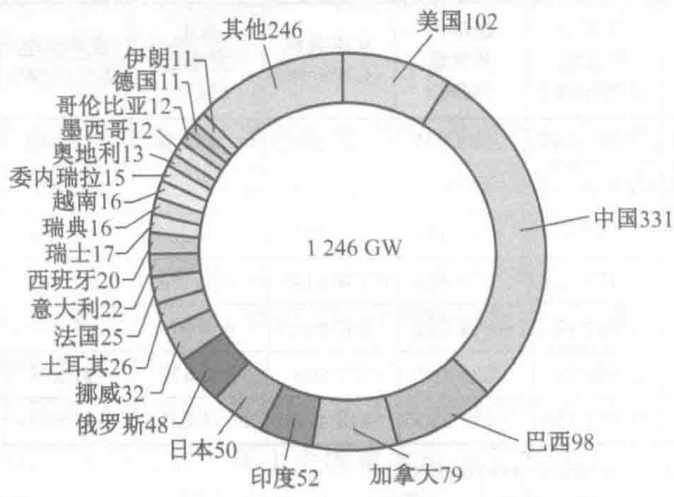


图 1.1.1 截至 2016 年底全球水电总装机容量(包含抽蓄)(GW)

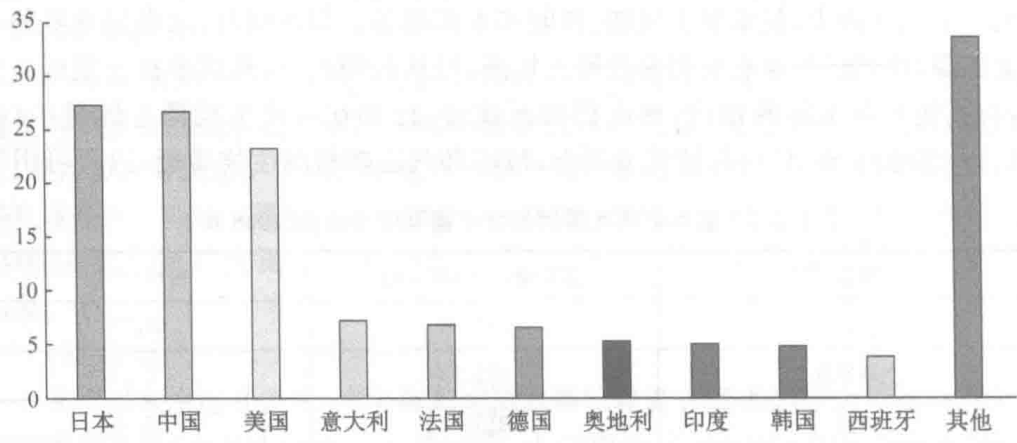


图 1.1.2 截至 2016 年底全球在运抽水蓄能装机容量(GW)

2016 年水电总发电量约为 4 102 TWh,是可再生能源中贡献最大的。中国再次成为 2016 年新增水电装机容量最多的国家,共 11.7 GW 投入运营,其中 3.7 GW 为抽蓄电站,但其增速也在放缓,2015 年中国新增水电装机 19.4 GW,而

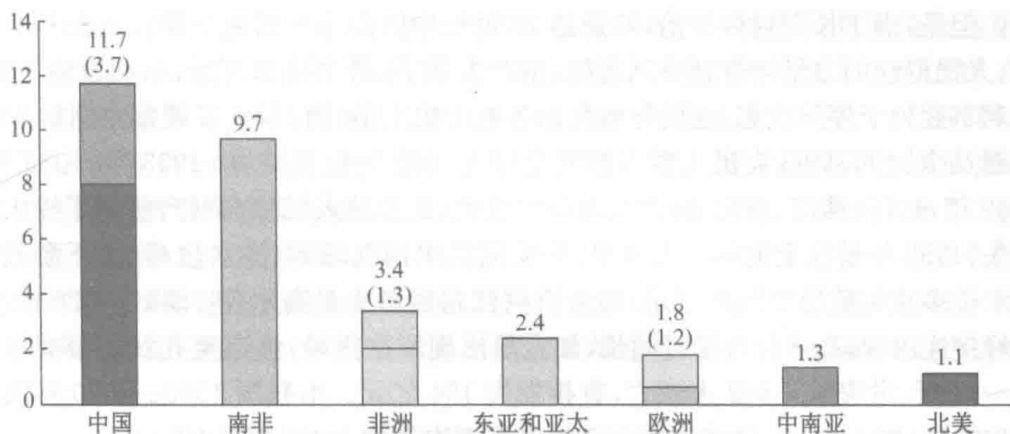


图 1.1.3 2016 年各地区新增水电装机容量(括号为抽蓄)(GW)

2014 年则为 21.9 GW。巴西取得重大进展,其中诸如 Jirau 等重大项目建成使 2016 年共有 6.4 GW 水电装机投入运营。其他水电装机新增容量较大的国家包括:厄瓜多尔(2 GW)、埃塞俄比亚(1.5 GW)、南非(1.3 GW)、越南(1.1 GW)、秘鲁(1 GW)、瑞士(1 GW)、老挝(0.7 GW)、马来西亚(0.6 GW)。

二、我国水利工程建设概况

我国幅员辽阔,河流也不少,流域面积超过 1 000 km² 的大河有 1 598 条,年径流总量约 2.8×10^4 亿 m³, 占世界的 5%。我国河川径流总量低于巴西(8×10^4 亿 m³)、俄罗斯(4.3×10^4 亿 m³)、美国(3×10^4 亿 m³)、加拿大(2.9×10^4 亿 m³)、印度尼西亚(2.84×10^4 亿 m³),居世界第六位,但人均占有量不足 2 200 m³,仅相当于全球平均数的 1/4,从人均意义上说,我国水资源并不丰富。我国多年平均降雨量 649 mm,但由于我国夏季盛行西南(印度洋)气流和东南(太平洋)气流,受季风气候的影响,降水量年内分配极不均匀,各地降雨主要发生在夏季,大部分地区每年汛期连续 4 个月降水量占全年的 60%~80%。河川径流与降水量变化相对应,水资源约 70% 是洪水径流量,形成河流的汛期洪水和非汛期的枯水,易致春旱夏涝。降水量年际剧烈变化,造成河流特大洪水和严重枯水,出现连续大洪水年和连续枯水年,特大洪水对河流两岸平原地区的严重威胁是两岸人民的心腹之患,制约着经济社会可持续发展。

自古以来,我国人民曾为治理水患、开发水利进行过长期的英勇奋斗,取得了辉煌的业绩,至今还有一些纪元前修建的水利工程仍在运行。如建于公元前 598 年—公元前 591 年间的安徽省寿县的安丰塘,坝高 6.5 m,库容达 9 070 万 m³,水面面积达 34 km²,经历史上多次修复和更新改建,至今已运行 2 600 多年。又如秦代李冰主持修建的岷江都江堰分洪灌溉工程,一直是成都平原农业稳产高产的保

证。但是,由于长期封建统治,特别是 19 世纪中叶以来半封建半殖民地的社会形态,人民群众的力量与智慧受到压抑,生产力低下,科学技术落后,水利设施失修,水利事业处于停滞状态,这就导致我国各地历史上洪、涝、旱灾害频发。例如 1928 年遍及全国的旱灾,灾民人数占当时全国人口的 $1/4$;1931 年、1933 年、1935 年、1939 年,长江、淮河、黄河、汉水及海河的洪灾,也都使人民生命财产蒙受了极大的损失;1998 年长江全流域特大洪水,干支流洪水情况恶劣、洪水位高,中下游及两湖水位多次突破历史最高记录,如干流荆江超过历史最高水位 $0.55\sim 1.25\text{ m}$,且洪峰接连出现,高水位持续时间长,如宜昌出现 8 次洪峰,沙市至九江超警戒水位 $54\sim 97$ 天,洪灾致 1 562 人死亡,直接损失 194 亿元。由我国 1990—2010 年洪灾损失统计(图 1.1.4),洪涝灾害致直接经济损失平均 1 200 多亿/年。

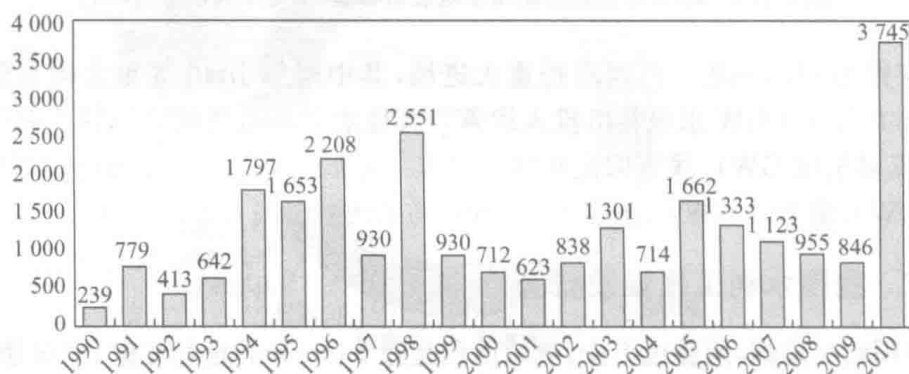


图 1.1.4 我国 1990—2010 年洪灾损失统计(亿元)

水库大坝是调控水资源时空分布、优化水资源配置、防洪减灾的重要工程措施,是江河防洪工程体系的重要组成部分,是国民经济的重要基础设施。中华人民共和国成立后,我国的水利建设有了较大的发展,现有水库基本上是建国后逐步修建的。据 1950 年国际大坝委员会统计,1949 年以前世界上建成的坝高 15 m 以上的 5 286 座大坝中,中国仅有 22 座(包括丰满水库等),数量极其有限,水库总库容和水电总发电量与国际比较,都处于非常落后的阶段。据《第一次全国水利普查公报》(2013 年),全国共有水库 98 002 座(不含港澳台地区),其中大型水库 756 座[大(1)型 127 座,大(2)型 629 座],中型水库 3 938 座,小型水库 93 308 座[小(1)型 17 949 座,小(2)型 75 359 座],总库容 $9\,323.12\text{ 亿 m}^3$,面积 $10\,000$ 亩以上的灌区 2 500 多处;水电站装机容量从 1949 年的 16.3 万 kW 发展到目前的超过 2 亿 kW ;灌溉面积从 2.4 亿亩增至 7 亿亩以上,3.4 亿亩的易涝耕地中有 $2/3$ 得到了初步治理,1.1 亿亩盐碱地已改良 $1/2$ 以上;为城市、工业供水及农牧区人、畜饮水

① $1\text{ 亩}=666.67\text{ m}^2$,文中出现非国标单位均为原文引用。

提供了相当数量的水源;为工农业生产和人民生活提供了电能及其他综合利用效益。可见,水库大坝在防洪、供水、灌溉、发电、航运以及改善环境等方面发挥了巨大的综合效益。与此同时,我国水库的省际分布很不均匀,湖南、江西、广东、四川、湖北、云南 6 省的水库数量占全国水库总数的 55%,其中湖南省水库最多,为 13 300 多座,占全国水库总数的 15.6%。从大坝坝型看,土石坝占绝大多数,土石坝因就地取材、施工便利等优势而得到广泛采用,我国在 20 世纪技术经济条件相对较差情况下修建的大量水库更多地利用了这种优势,形成了我国土石坝比例高于世界平均水平的现象(世界范围土石坝占大坝总数约 83%,我国土石坝占大坝总数的 93%)。

虽然我国水资源人均拥有量不算多、水资源时空分布不均(南多北少、东多西少),但由于从青藏高原到海平面之间落差巨大,可用于发电的水能资源却十分丰富,水能理论蕴藏量达 6.94×10^8 kW,其中技术上可开发的有 5.42×10^8 kW,经济可开发的是 4.02×10^8 kW,年发电量可达 $19\,100 \times 10^8$ kW·h 以上,这些数字均居世界首位。按照国际惯例,水电的开发程度是按技术上可开发的总容量计算,截至 2014 年底,我国常规水电装机容量达 3 亿 kW,约占我国水电技术可开发量的 55%(图 1.1.5),占全球的 27%(全球水电装机容量约 10 亿 kW)。



图 1.1.5 我国水电新增装机容量发展趋势(单位: 万 kW)

尽管如此,水利建设的差距还很大。首先,我国大江大河的防洪问题还没有真正解决,许多中小河流防洪隐患也未根治,随着河流两岸经济建设的发展,一旦发生洪灾,造成的损失将越来越大。第二,我国农业目前仍在很大程度上受制于自然地理和气候条件,如不进一步大修水利以提高抗御自然灾害的能力,很难实现逐年增产。第三,工业和城市用水增长速度比农业更快,有些沿海城市已出现淡水供应困难,水利建设不加快,水源紧缺将日益成为限制我国生产和生活水平提高的重大

障碍。第四,我国丰富的水能资源已开发量占可开发量的比例还相当低,比如四川、云南、西藏三省(区)是我国水资源最丰富的地区,理论蕴藏量占全国总量的 $\frac{2}{3}$,技术可开发量 4.25×10^8 kW,占全国总量的78.4%,截至2016年底,三省(区)水电装机容量 1.35×10^8 kW,开发程度仅为37%(按装机计算),相比发达国家较高的水电开发度,我国西南水电开发潜力巨大。此外,预计到2030年我国人口增至16亿时,人均水资源量将由现在的 $2\,220\text{ m}^3$ 降到 $1\,760\text{ m}^3$,接近国际公认的警戒线,按国际上现行的标准,人均水资源量小于 $1\,700\text{ m}^3$ 的为用水紧张的国家,可见我国未来水资源的形势是十分严峻的。由于水能资源是一种清洁的可再生能源,且未开发前又是不可蓄积的能源,故世界各工业化国家都优先开发水电,我国也理当如此。

三、水资源开发利用的可持续发展

近年来,国际上召开了一系列重要会议,如2002年世界首脑峰会、波恩能源会议、2004年联合国水电与可持续发展会议等。在联合国水电与可持续发展会议上,通过了《水电与可持续发展北京宣言》,这是国际上对多年来水电开发中热点问题讨论的总结,是世界水电发展历史上的第一次,对世界水电发展具有重要的指导意义。2015年5月19日,世界水电大会首次在中国召开,大会的主题为“水电可持续发展”,鉴于当前水电开发主要受制于环境、移民等因素,要求水电开发实现社会、环境和经济共赢,并呼吁水电领域运用《水电可持续性评估规范》。“目前,全球水电装机开发程度约为25%,其中欧洲、北美洲、南美洲、亚洲和非洲水电开发程度分别为47%,38%,24%,22%和8%,亚洲、非洲、南美是今后水电建设的重点地区。”国际水电协会主席肯·亚当斯表示,优先发展水电已成为国际共识。基于对水电发展的新认识,为应对经济危机,尤其是全球气候变化,各国在加大对病险水库除险加固、提高大坝安全能力的同时,进一步加大了对水电的投入力度。能源是实现可持续发展的必要条件,水电是清洁的、可再生能源,以环境友好的、社会和谐的各种方式开发水电,符合新千年的发展目标。呼吁大力开发水电,是科学认识水电的必然结果。

目前,发达国家大部分技术及经济可行的水电资源都得到了开发,发展中国家水电开发率还很低,尤其非洲,水电技术潜能已得到开发的还不到10%(截至2016年),且一多半都集中在中部非洲和东部非洲地区。作为利用效率高、开发经济、调度灵活的新能源,水力发电未来还有较大发展空间。据国际行业预测,到2050年,全球水电装机容量将由现在的10亿kW“翻一番”至20亿kW,大部分待开发的水电资源集中在非洲、南美、南亚、东南亚等地。

我国水电近30年来得到了很好的发展,成了世界水电大国,为国民经济发展提供了清洁、安全、可靠的能源保障。我国对于水电能源的发展也有更多政策扶

持。2015年1月初,国家能源局曾下发《关于鼓励社会资本投资水电站的指导意见》,鼓励和引导社会投资,规范和完善水电投资环境。在2014年11月国务院发布的《能源发展战略行动计划(2014—2020年)》中,到2020年,我国力争常规水电装机达到3.5亿kW左右;而最新发布的《水电发展“十三五”规划》上调了装机目标,2020年水电总装机容量将达到3.8亿kW,其中常规水电3.4亿kW,抽水蓄能0.4亿kW,年发电量1.25万亿kW·h。不仅如此,能源转型时期的中国在大力开发水电的同时,也在加快风电、太阳能等新能源的建设,这对水电的开发提出了更高的要求,比如说水电的灵活性和波动能源的补偿。同时,水电开发中应充分重视对社会、环境的负面影响,特别关注受水电影响的弱势群体。总之,水电的发展,对中国来讲是到了一个非常重要的时期,它肩负的使命将越来越多。

第二节 我国建坝历程

中华人民共和国成立之初,全国仅有大型水库6座、中型水库17座,坝高15 m以上的大坝仅22座。历经近70年艰苦创业,我国坝工建设实现了从小到大、从低坝到高坝、从单一坝型到多种坝型、从单目标开发到多目标开发的巨大转变。

建国初期,我国修建的绝大多数大坝都是低坝和土坝,而且大多数是均质土坝。20世纪50年代中、后期,从治理淮河、海河开始,建成了第一批中坝和高坝,包括梅山和磨子潭等几座轻型混凝土高坝。新安江水电站是我国第一座100 m级高坝的水电枢纽。20世纪60年代,为及时满足全国各地经济发展的需要,兴建了大批中小型水电工程,因而低坝、中坝数量猛增,同时一些高坝水电工程相继开工,比如三门峡重力坝、刘家峡重力坝、鸭绿江云峰宽缝重力坝和流溪河拱坝等。20世纪70年代至80年代初,受文革影响,建坝速度明显降低,但开发层次有所提升,大江大河梯级综合开发已经启动,新坝型不断涌现,水电工程向着更大规模发展,混凝土重力坝和拱坝成为高坝枢纽的主导坝型,比如凤滩空腹重力拱坝、碧口心墙堆石坝、乌江渡重力拱坝、龙羊峡重力拱坝和葛洲坝等。20世纪80年代中期到20世纪末是我国坝工技术发展的新时期,高坝建设的数量和速度明显上升,通过国家重点科技攻关,研究解决了一些复杂条件下的高坝建设技术难题;这一时期坝工建设的特点是,以混凝土坝和堆石坝为基本坝型,借助计算机数值模拟技术和物理模型试验手段,研究和开发了一些适应复杂条件的枢纽布置方案、地基处理和泄洪消能等新型结构;同时,学习和引进国外坝工技术,重点推广应用混凝土面板堆石坝和碾压混凝土坝两种新坝型。改革开放20年内,已经建成的100 m以上的高坝有26座,在建的7座,高坝坝型以重力坝和面板堆石坝占大多数,比如三峡重力坝、小浪底斜心墙堆石坝、二滩双曲拱坝、天生桥一级面板堆石坝、江垭碾压混凝土

土重力坝、李家峡双曲拱坝、沙牌碾压混凝土拱坝等。

进入 21 世纪以来,龙滩、水布垭、构皮滩、三板溪、公伯峡、瀑布沟、小湾、溪洛渡、向家坝、糯扎渡、锦屏一级、拉西瓦、积石峡、官地、黄登等一批高坝枢纽工程已经建设完成,白鹤滩、双江口、两河口、大藤峡、乌东德、如美、大石峡等正在建设。未来还将有一大批高坝大库枢纽工程投入建设,如黄河上游的茨哈峡(254 m)、玛尔挡(210 m),澜沧江的古水(305 m)、班达(222 m),金沙江的其宗(310 m)、龙盘(276 m)、岗托(229 m)、叶巴滩(240 m)、拉哇(227 m),怒江的马吉(270 m)、松塔(315 m)、同卡(205 m)、怒江桥(240 m)、罗拉(243 m),大渡河的长河坝(240 m)。这些以及未来水电工程建设的特点,一是高坝占有相当的比重,不仅有 200 m 级的高坝,而且还有 300 m 级特高坝,二是高坝坝型以混凝土坝和堆石坝为主要坝型,三是江河梯级深度开发形成规模,水电综合技术发展快速。这些高坝工程,几乎都处于大江大河、高山峡谷,面临着复杂地基条件、高水头大流量泄洪消能、高边坡稳定加固、强震区工程抗震设防等技术,有些是国内外尚未遇到的难题。以上各具特色的高坝枢纽工程,使我国大江大河和一大批中、小河流的径流、洪水基本得到控制的同时,建立了从规划、勘测、试验、设计、施工到安全监测和运行管理的一整套标准化技术体系,随着这些高难技术的攻克和高坝建设,逐渐形成了具有中国特色的坝工建设技术。

目前,我国大坝建设在世界各国中不仅数量上居首位,而且大坝高度也明显增高,见表 1.2.1—表 1.2.2。

表 1.2.1 我国坝高 200 m 以上的超高大坝

序号	坝名	河流	省县	坝型	坝高 (m)	总库容 (亿 m ³)	装机容量(MW)
1	如美	澜沧江	西藏芒康	粘土心墙堆石坝	315	36.02	2 100
2	双江口	大渡河	四川马尔康	砾石土心墙堆石坝	314	31.15	2 000
3	锦屏一级	雅砻江	四川盐源	双曲拱坝	305	77.6	3 600
4	两河口	雅砻江	四川雅江	心墙堆石坝	295	120.31	2 700
5	小湾	澜沧江	云南凤庆	双曲拱坝	294.5	150.43	4 200
6	白鹤滩	金沙江	云南巧家 四川宁南	双曲拱坝	289	206	16 000
7	溪洛渡	金沙江	云南永善 四川雷波	双曲拱坝	285.5	126.7	12 600
8	乌东德	金沙江	云南禄劝 四川会东	双曲拱坝	270	74.08	10 200
9	糯扎渡	澜沧江	云南思茅	心墙堆石坝	261.5	237.03	5 850
10	拉西瓦	黄河	青海贵南	双曲拱坝	250	10.79	4 200
11	二滩	雅砻江	四川攀枝花	双曲拱坝	240	61.8	3 300