

ELUOSI SAYANGSHUSHENSIKE SHUIDIANZHAN
SHIGU YUANYIN FENXI

本书由南京水利科学研究院2010年度出版资金资助出版

俄罗斯萨扬舒申斯克水电站 事故原因分析

杨立信 李运辉 编译



黄河水利出版社



责任编辑 赵红菲
封面设计 何 颖
责任校对 田丽萍
责任监制 常红昕



ELUOSISAYANGSHUSHENSIKE SHUIDIANZHAN
SHIGU YUANYIN FENXI

ISBN 978-7-80734-803-0



9 787807 348030 >

定价：15.00元

本书由南京水利科学研究院 2010 年度出版资金资助出版

俄罗斯萨扬舒申斯克水电站 事故原因分析

杨立信 李运辉 编译

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书由萨扬舒申斯克水电站简介,萨扬舒申斯克水电站“八·一七”事故原因技术调查报告,联邦生态、技术和核能监督办公室主任库季因的新闻发布会和萨扬舒申斯克水电站“八·一七”事故原因思考共四章组成,重点介绍了“八·一七”事故的原因并进行了简要的分析,目的是让我国水电行业的专业学者、管理人员、电站运行人员也能从萨扬舒申斯克水电站事故中吸取相关经验教训,更进一步提高我国水电站的运行管理水平。

本书可供水电机组设计制造、运行管理和电网调度的相关人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

俄罗斯萨扬舒申斯克水电站事故原因分析/
杨立信,李运辉编译. —郑州:黄河水利出版社,
2010.4

本书由南京水利科学研究院 2010 年度出版资
金资助出版

ISBN 978 - 7 - 80734 - 803 - 0

I. ①俄… II. ①杨… ②李… III. ①水力发
电站 - 事故分析 - 俄罗斯 IV. ①TV737

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 037684 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话及传真:0371 - 66026940, 66020550, 66028024, 66022620(传真)

E-mail: hhsclbs@126.com

承印单位:黄河水利委员会印刷厂

开本:890 mm × 1 240 mm 1/32

印张:4.125

字数:120 千字

印数:1—1 000

版次:2010 年 4 月第 1 版

印次:2010 年 4 月第 1 次印刷

定价:15.00 元

前 言

2009年8月17日,俄罗斯水力发电开放式股份公司以聂泊罗日尼命名的萨扬舒申斯克水电站分公司由于水力机组有设计缺陷、设备使用和维护不当及调度管理不善等多方面因素,发生了世界水电史上罕见的重大事故,造成75人死亡,13人受伤,电站10台机组全部损坏或损毁,部分厂房结构被摧毁等重大损失。事发后,俄罗斯政府总理普京及政府相关部门负责人曾亲临现场视察救援工作。事故当天,俄罗斯政府决定成立以联邦生态、技术和核能监督办公室主任尼·格·库季因为首的事故原因技术调查委员会。调查委员会经过详细缜密的调查和技术检验,认定事故是由多种原因的总和造成的。俄罗斯政府于2009年10月3日在莫斯科举行了新闻发布会,联邦生态、技术和核能监督办公室主任库季因介绍了事故调查情况并回答了记者们的问题,与此同时,在联邦生态、技术和核能监督办公室网站上公布了调查报告。

随着社会经济的发展,水电站的安全运行举足轻重,不仅关系到人民生命财产安全,还涉及对社会经济和生态环境的影响。若水电站发生事故,其损失是巨大的,后果非常严重。萨扬舒申斯克水电站的事故就是明证。了解和分析萨扬舒申斯克水电站的事故原因无疑可以给人们提供一些重要的警示:首先是水力机组及其监测设备保持良好状态的重要性。应该说,萨扬舒申斯克水电站的水力机组技术性能并不怎么好,机组的振动和摆动等稳定性指标不够理想,水轮机叶片频频出现裂纹,空蚀破坏严重,推荐运行区的调节范围较小等,这些缺陷给机组的安全运行带来了隐患和不便。其次是严格按照操作规程运行的重要性。在水电站运行过程中,一定要规范操作,发现异常情况应该及时停机处理,查明情况,消除缺陷,不能带“病”坚持工作,确保机组安全正常运行。再次是大机组的负荷调节一定要谨慎从事,不可“大起大落”,忽上忽下,频繁穿越非推荐运行区,那样既影响机组的运行稳定

性,又造成机组设备的较大磨损,严重者危及机组的安全。

萨扬舒申斯克水电站的事故是一个惨剧,令人非常痛心。为了从事故中吸取教训,俄罗斯电力部已把萨扬舒申斯克水电站“八·一七”事故的技术调查报告发放给所有电站(包括水电站、火电站和核电站)及其管理部门。同时,受俄罗斯政府总理的委托,联邦生态、技术和核能监督办公室对所有电站进行核查,其目的就是要利用这个不可多得的反面教材进行发电机组安全运行的教育。

萨扬舒申斯克水电站曾是苏联时期国家建设的骄傲,如今发生了机毁人亡的重大事故,由此引起国际社会广泛的关注,世界各大通讯社迅速对事故做出跟踪报道,从而引起世界各国水电专家的高度重视,纷纷猜测和分析事故原因,探讨保证水电站安全运行的方法和措施。世界各大水电站(如伊泰普水电站、大古力水电站等)立即进行了安全运行检查。萨扬舒申斯克水电站“八·一七”事故在我国水电行业同样也引起了不小的轰动。中国大坝协会在第一时间致函给俄罗斯大坝委员会主席和全俄水利科学研究院院长,希望从技术角度了解事故发生的真实原因。《中国三峡工程》报连续发表文章,在分析事故原因的同时,提出了我国水电机组安全运行的建议。我国水电部门的领导和专家高度重视这次事故,中国工程院院士、三峡总公司前总经理陆佑楣先生指出:“俄罗斯水电站事故无疑给我们敲响了一次警钟,加强管理和监督是保障发电站安全的重要举措”。南京水利科学研究院领导在获得了原文资料后,指示“组织尽快翻译,然后组织专家讨论”。根据领导指示,南京水利科学研究院信息中心立即组织相关专家队伍翻译了萨扬舒申斯克水电站事故原因技术调查报告和新闻发布会资料。同时,为了让读者对该水电站有个较全面的了解,译者编写了该水电站的简介和萨扬舒申斯克水电站“八·一七”事故原因思考。现在把这些资料合编成一本小册子出版,目的是让我国电力行业的专家学者、管理人员、电站运行人员也能从萨扬舒申斯克水电站事故中吸取相关经验教训,更进一步提高我国水电站的运行管理水平。

编译者

2010年1月

目 录

前 言

第 1 章 萨扬舒申斯克水电站简介	(1)
1.1 基本概况	(1)
1.2 经济意义	(4)
1.3 施工概要及大事记	(5)
1.4 萨扬舒申斯克水电站所发生过的事故	(8)
参考文献	(11)
第 2 章 萨扬舒申斯克水电站“八·一七”事故原因技术调查 报告	(12)
2.1 单位要素	(12)
2.2 事故原因技术调查委员会的组成	(13)
2.3 项目特点和事故位置	(15)
2.4 发生事故的重大事件(包括技术和组织原因)	(21)
2.5 事故发生及其发展的说明	(64)
2.6 预防类似技术成因的灾难(事故)的建议和措施	(77)
2.7 过去促使事故产生的事件(人物)	(83)
2.8 对萨扬舒申斯克水电站事件和事故承担责任的 人员清单	(84)
2.9 到 2009 年 9 月 25 日事故造成的经济损失	(104)
第 3 章 联邦生态、技术和核能监督办公室主任库季因的新闻 发布会	(106)
第 4 章 萨扬舒申斯克水电站“八·一七”事故原因思考	(122)

第 1 章 萨扬舒申斯克水电站简介

1.1 基本概况

萨扬舒申斯克水电站(见图 1-1)位于俄罗斯西伯利亚叶尼塞河上游,总装机容量 640 万 kW,保证出力 212 万 kW,平均年发电量 235 亿 kWh,是俄罗斯目前已建的最大水电站。

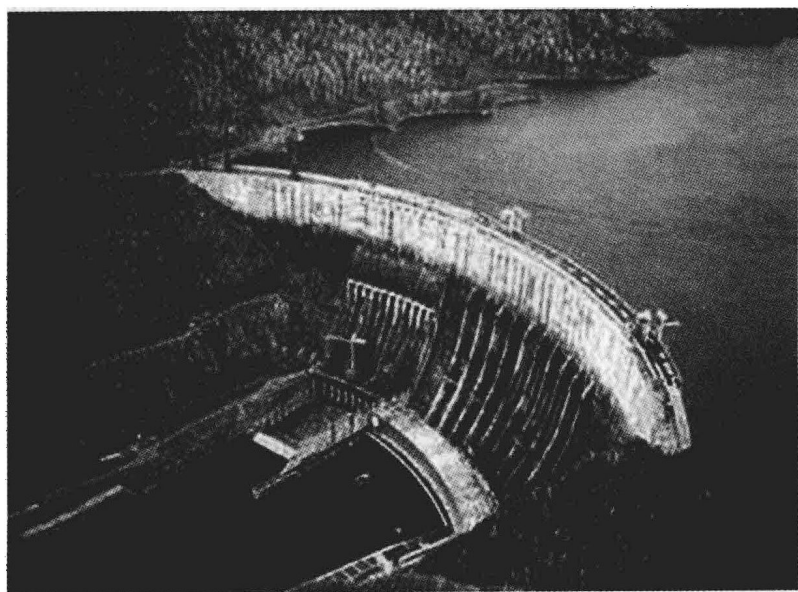


图 1-1 萨扬舒申斯克水电站

叶尼塞河萨扬舒申斯克坝址以上流域面积 179 900 km²,平均年径流量 467 亿 m³,平均年输沙量 441.5 万 t,平均含沙量 0.095 kg/m³。萨扬舒申斯克水库正常蓄水位 539 m,相应库容 313 亿 m³,水库回水长

290 km, 面积 583 km², 死水位 500 m, 调节库容 153 亿 m³, 相当于年径流量的 33%, 可进行多年调节, 为叶尼塞河的龙头水库。其下游为迈纳斯克反调节水电站, 装机 3 台, 每台装机容量 15 万 kW, 总装机容量 45 万 kW。迈纳斯克作为萨扬舒申斯克水电站调峰后的反调节水库, 其正常蓄水位 326 m, 水头 19 m, 于 1986 年建成。

萨扬舒申斯克坝址区地质为坚硬的变质石英岩, 抗压强度达 150 MPa。混凝土重力拱坝最大坝高 242 m, 为世界已建最高的重力拱坝。坝顶高程 547 m, 坝轴线半径 670 m, 坝顶弧长 1 074.4 m。坝体断面上游面垂直, 下游面坝坡从上部 1:0.05 渐变至下部 1:0.7。坝顶宽 25 m, 最大坝底宽 114 m。沿坝顶自右至左分 4 部分: 右岸非溢流坝段、溢流坝段、厂房坝段及左岸非溢流坝段。此外, 水电站验收时确定的新项目“岸边溢洪道”正在施工。坝体混凝土量达 850 万 m³, 是世界已建重力拱坝中最大的。萨扬舒申斯克水电站平面布置见图 1-2。

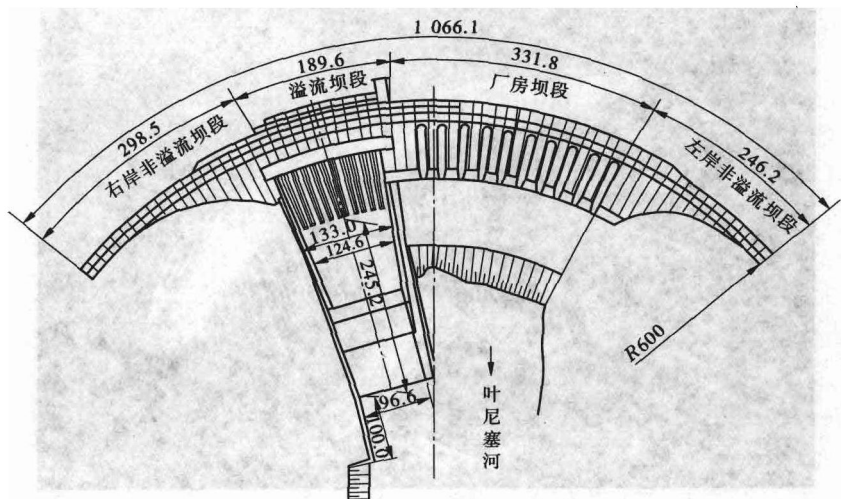


图 1-2 萨扬舒申斯克水电站平面布置 (单位: m)

溢流坝段长 189.6 m, 设 11 个中孔, 设计断面尺寸 8.2 m × 5.4 m, 进口高程 479 m, 溢流面出口设弧形闸门, 闸门用 2 台龙门吊操作, 每台起重量为 500 t, 最大水头 116.7 m, 泄洪能力 13 600 m³/s, 下设消力

池消能。

厂房坝段长 331.8 m, 设 10 个进水口, 各进水口宽 7.5 m, 高 11.5 m, 进口高程 479 m。大坝下游面设外包混凝土背管, 内径 7.5 m。坝后厂房长 288 m、宽 36 m。下游侧与之相连的是工艺厂房及行政办公楼 A 和 B。萨扬舒申斯克水电站厂房见图 1-3。

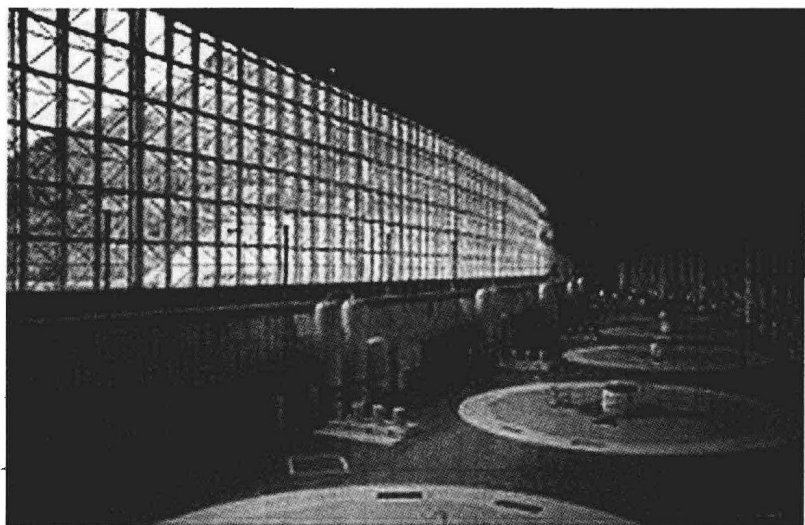


图 1-3 萨扬舒申斯克水电站厂房

厂房内安装 10 台伞形同步水力发电机组(列宁格勒电力制造厂制造), 发电机型号为 CBΦ 1285/275 - 42VXL4, 额定出力 640 MW, 定子水冷, 转子风冷; 辐向轴流式水轮机(列宁格勒金属厂生产联合公司制造), 型号为 PO - 230/833 - B - 677, 转轮直径 6.77 m, 水轮机使用期限为 30 年。

水轮机总过水能力 $3\,400 \sim 3\,600 \text{ m}^3/\text{s}$, 水轮机设计水头 194 m, 最小水头 176 m。额定流量 $360 \text{ m}^3/\text{s}$, 额定转速 142.8 r/min, 额定容量 65 万 kW, 最大水头 220 m 时最大出力为 73.5 万 kW。发电机电压 - 15.75 kV, 额定容量 71.5 万 kV · A, 最大容量 73.6 万 kV · A。主接线采用扩大单元接线, 每 2 台 64 万 kW 机组与 1 组 160 万 kV · A 的单相升压变压器相联, 每台单相变压器的容量为 53.3 万 kV · A, 升压至

500 kV。

变电站位于左岸下游 1 km 处,用 500 kV 输电线联入西伯利亚电网。该电网内水电、火电容量约各占 1/2。根据现有输电线路极限通电能力,萨扬舒申斯克水电站交付时有峰值功率小于 4 000 MW 的限制。

1.2 经济意义

到 2008 年 12 月 18 日,萨扬舒申斯克水电站自第一台机组投入运行已 30 周年。30 年来,萨扬舒申斯克水电站共发电 5 800 多亿 kWh,其售电收入早已超过电站建设费用的许多倍。萨扬舒申斯克水电站多年平均发电量按照设计为 234 亿 kWh,最近几年实际年发电量见表 1-1,在 2001 年,萨扬舒申斯克和迈纳斯克水电站 1 kWh 电的成本为 1.62 戈比。萨扬舒申斯克水电站盈利能力是火电厂的 2.5 倍以上。在俄罗斯和西伯利亚统一电力系统中覆盖峰值电功率下降是最强大的能量源。

表 1-1 年发电量 (单位:亿 kWh)

电站	2000 年	2005 年	2006 年	2007 年	2008 年	2009 年
萨扬舒申斯克水电站	227.9				186	158.7 (8 月)
萨扬舒申斯克水电站和 迈纳斯克水电站		236.477	268.177	207.645	199.839	

萨扬舒申斯克水电站 75% 的电力消耗于萨扬诺戈尔斯克铝厂(俄罗斯铝业公司)。2006 年,为了利用因输电线路容量有限而没有利用的电站电能,还投产运营了年产量 30 万 t 的哈卡斯铝厂(该厂属于俄罗斯铝业公司)。

2003 年上半年,收入为 6.497 亿卢布,净利润 9 470 万卢布。

2007 年上半年,收入为 28.6 亿卢布,净利润 8.23 亿卢布。

2007 年,由于春汛期来水量少,发电量减少。为了履行联邦水电股份公司的义务,在批发市场购买了必要数量的电再按照调节价格卖

出,使公司蒙受 10 亿卢布的损失。

1.3 施工概要及大事记

1.3.1 施工概要

萨扬舒申斯克水电站处于西伯利亚偏僻地区,交通不便。年平均气温 1.5°C ,最低达 -42°C ,冬季长且气温低,施工条件较差。工程于 1963 年起进行施工准备,修建进场道路,进行场地建设。1968 年 9 月开始建第一期围堰,1972 年 10 月起浇筑大坝溢流坝段混凝土。1975 年建第二期围堰,当年 10 月截流,1976 年起浇筑厂房坝段混凝土。截至 1977 年底共浇筑混凝土 202万 m^3 ,5 年内平均每年浇筑混凝土仅 40万 m^3 左右,施工进度缓慢。

为了提前发挥效益,采取低水头先发电的措施,在坝体内另设较低的临时进水口引水发电。1 号、2 号临时进水口底坎高程设在 369.5 m (比设计进水口底坎高程 479 m 低 109.5 m)。首批 2 台机组采用临时转轮,直径 6.05 m ,水头 60 m 时出力 15.5 万 kW , 140 m 时出力 40 万 kW ,带动发电机降低出力运行。同时,1978 年加快混凝土浇筑速度,所设拌和楼年生产能力达到 120 万 m^3 ,使大坝混凝土浇筑量共达 322 万 m^3 ,为大坝总混凝土量的 38% ,大坝前缘达到 386 m 高程。蓄水至 383 m 时,通过临时进水口及所接临时压力钢管,使 2 台安装临时转轮的水力发电机组分别于 1978 年和 1979 年提前发电。3 号临时进水口底坎高程设在 400 m ,4 号、5 号、6 号临时进水口底坎高程设在 426.5 m ,随着大坝浇筑高程抬高而逐步引水发电。第三台至第六台机组用正常转轮的水轮机,对结构采取了适当措施,在 120 m 水头(相当于设计水头 194 m 的 62%)时开始发电。1~6 号临时进水口以后用混凝土封堵,改用原设计进水口。1 号和 2 号临时转轮也更换为正常转轮。

萨扬舒申斯克水电站从修筑围堰工程起,至首台临时转轮机组发电用时 10 年。至 1985 年 12 月 1 日,10 台机组全部投产,大坝工程于 1987 年竣工,完成土石方开挖量 $1\,690\text{ 万 m}^3$,混凝土浇筑量 960 万 m^3 ,

总工期达 19 年。

叶尼塞河上萨扬舒申斯克水利枢纽水工建筑物技术合格证书由列宁格勒水工设计院于 1985 年制定,萨扬舒申斯克水电站建筑物等级为 1 级。

1.3.2 大事记

- 1962 年 7 月 21 日,国家委员会从萨扬舒申斯克水电站 3 个坝址方案中选定卡尔洛夫斯基坝址;

- 1968 年 9 月 12 日,在卡尔洛夫斯基坝址开始填筑第一期基坑围堰;

- 1970 年 10 月 17 日,在萨扬舒申斯克水电站基础建筑物浇筑第一罐混凝土;

- 1972 年 12 月 26 日,在大坝溢洪段浇筑第一罐混凝土;

- 1975 年 10 月 11 日,在水电站坝址处截断叶尼塞河;

- 1978 年,开始建设反调节迈纳斯克水电站(萨扬舒申斯克水电站的机组安装见图 1-4);

- 1978 年 12 月 18 日,萨扬舒申斯克水电站第一台机组投产带工业负荷;

- 1979 年 5 月 23 日,在泄洪过程中水进入了施工中的萨扬舒申斯克厂房,并淹没了第一台投产机组;

- 1979 年 7 月 4 日,被淹没过的机组,经过全面的技术检查,重新投入西伯利亚电网;

- 1979 年 11 月 5 日,萨扬舒申斯克水电站第二台机组投产,像第一台机组一样,使用临时转轮;

- 1979 年 12 月 21 日,萨扬舒申斯克水电站第三台机组投产,使用正常转轮;

- 1980 年 10 月 29 日,第四台机组“共青团号”投产;

- 1980 年 12 月 21 日第五台机组投产;

- 1981 年 11 月 6 日,第六台机组提前投产带工业负荷;

- 1984 年 9 月 5 日,第七台机组投产;

- 1984 年 10 月 11 日第八台机组投产;



图 1-4 萨扬舒申斯克水电站的机组安装

- 1985 年 12 月 21 日,第九台机组投产;
- 1985 年 12 月 25 日第十台机组投产,水电站达到了设计容量;
- 1987 年 6 月 12 日,萨扬舒申斯克水电站前两台机组的临时转轮被更换成正常转轮;
- 1988 年,水电站建设基本完成;
- 1990 年 9 月 25 日,萨扬舒申斯克水电站水库首次蓄水到正常高水位 540 m;
- 1993 年,建立萨扬舒申斯克水电站开放式股份公司;
- 2000 年 12 月 13 日,水电站通过了国家正常运行委员会的验收 (俄罗斯统一电力股份公司于 2000 年 12 月 13 日发出命令 No. 690);

●2005年,开始建设电厂的岸边溢洪道,计划2011年建成,该溢洪道投入使用后将提高水电站的可靠性和安全功能(现有的溢洪道设计不好,不止一次消力池被破坏)。同年,萨扬舒申斯克水电站开放式股份公司并入联邦水电股份公司。

1.3.3 运行

在2006年的检查过程中,发现萨扬舒申斯克水电站存在严重缺陷。2007年的例行检查表明,萨扬舒申斯克水电站的挡水设备经过近20年的运行,需要大修,浮栅的某些部件磨损了85%。根据2009年1月的数据,财务部门已将资料报送给总检察处。

水电站更新改造计划涉及大量的机械和电气设备计划。从2011年起,开始逐渐更换水力机组的转轮,现有转轮的结构不是很成功,出现高几率的裂缝,在特定的工况下不允许水力机组运行。2009年8月17日事故后,这些计划将会有所调整。

1.3.4 大坝状态的评估

专家们早就警告萨扬舒申斯克水电站大坝状况不佳。特别是,《生意人》报1998年4月11日发表了一篇题为《萨扬舒申斯克水电站危险》的文章,其中引用俄罗斯紧急情况部的预报说,萨扬舒申斯克水电站是“潜在的危险项目”：“这座电站的结构发生了危险的变化。大坝溃坝的后果可能是灾难性的,尤其是对克拉斯诺亚尔斯克来说。大家都承认,大坝明显处于不利地位,分歧只是危险程度的评估和水电站的当前状态。俄罗斯统一电力股份公司说,状态在完全控制之中,并认为只需要维修。相反,独立专家说大坝发生了不可逆转的危及破坏的变化。”

1.4 萨扬舒申斯克水电站所发生过的事故

1.4.1 1979年5月23日事故

在施工过程中,为了排泄水流,设计规定了几种临时泄水方案。

1979年,按照原计划应首次使用第二层临时溢洪孔。然而,由于种种原因,它们未能在预定的期限内建成。1979年5月23日,就通过尚未建成的大坝泄洪孔排泄无法控制的水流。水流摧毁了一些大坝建筑物,淹没了水电站厂房,冲洗了起重机和其他设备。尽管对当时已投产的第一台机组采取了修筑围堤的紧急措施,但它还是被水淹没了。

在修复工作中,围绕水力机组设置了混凝土围栅,密封围护结构。5月31日用泵抽干了水力发电机组中的水,6月10日开始抽水电站厂房的水,同时进行电站设备的修复工作。6月20日水电站厂房和水轮机设备已经完全风干。7月4日开始进行水轮发电机绝缘的干燥和损坏部件的修理。水力发电机组经过112天的脱水处理,1979年9月20日被接入电网。

1.4.2 1985年事故

1985年,在排泄大洪水(下泄流量大约等于 $4\,500\text{ m}^3/\text{s}$)时消力池的底板被摧毁了80%。被完全摧毁的有加固板(厚2 m多)、混凝土垫层,底板下的岩石深达7 m。直径50 mm锚杆被扯断,且带有攻击金属屈服点的特征痕迹。1991年开始重建消力池。

1.4.3 1988年事故

1988年,洪水导致修复了的消力池再次被破坏。溢洪道修复时共浇筑混凝土 9.3万 m^3 ,钢筋314 t,预应力锚索300根。为了增加消力池底板的牢固性及可靠性,后来决定将水电站运行的最大高水头标高调低,由不高于240 m取代设计值245 m。这样,使消力池恢复到原来的状况。

萨扬舒申斯克水电站现有的溢洪道运用经验和其维修工作的复杂性表明,从水工建筑物安全运用条件出发,如此大型高水头水工建筑物,在其组成中应当有多个泄水建筑物。这些泄水建筑物要独立运用,在选择下泄洪水计划时应有灵活性,并能够进行预防性检修工作。考虑到这些,决定设计和修建补充的河岸式溢洪道。

坝体渗流事故情况如下:

坝体渗流越来越大是施工的主要问题之一。为了避免冲掉混凝土,当时所有的工艺就是往坝体中补充灌浆,重新向分段之间的接缝灌注水泥浆,通过日益上升的钻孔进行裂缝灌浆。但是,所有的努力都不太有效,渗流量继续增大。1993年,为了消除缺陷,萨扬舒申斯克水电站与法国公司(Soletansh Bachy)达成协议,利用该公司的工艺技术(基于法国树脂)向渗水孔填压混凝土。先进行了试验性修理作业,结果是成功的,渗流实际上被消除了。后来确定了法国树脂的成分,此后消除大坝渗流的工作由俄罗斯专家进行。

1.4.4 2009年8月17日事故

萨扬舒申斯克水电站2009年8月17日的事故见图1-5。



图1-5 萨扬舒申斯克水电站2009年8月17日的事故

2009年8月17日,萨扬舒申斯克水电站2号水轮机组因固定螺