

文章编号: 0559-9342(2005)09-0069-03

# 古田溪三级大坝老化病害及其治理

邢林生<sup>1</sup>, 徐世元<sup>2</sup>

(1. 国家电力监管委员会大坝安全监察中心, 浙江 杭州 310014;

2. 古田溪水力发电厂, 福建 古田 352258)

关键词: 坝基帷幕; 风化侵蚀; 渗漏溶蚀; 表层碳化; 坝体裂缝; 面板强度; 古田溪三级大坝

摘要: 古田溪三级钢筋混凝土平板支墩坝, 建成蓄水至今已 40 多年, 随着岁月的流逝, 坝基帷幕防渗能力逐渐衰减, 迎水面遭受到严重风化侵蚀, 面板渗漏溶蚀不断加剧, 表层碳化深度日益累进, 坝体裂缝增生或扩展, 面板强度大幅度降低。为了遏制大坝进一步遭受到老化病害的危害, 确保大坝安全运行, 采取了一系列针对性防护和加固措施。对该坝老化症状坚持定期检测分析, 并及时进行治理, 对于其他大坝具有一定的借鉴意义。

## Deterioration and its treatment of Gutianxi Cascade-III Dam

Xing Lin-sheng<sup>1</sup>, Xu Shi-yuan<sup>2</sup>

(1. Dam Safety Supervision Center of SERC, Hangzhou Zhejiang 310014;

2. Gutianxi Hydropower Plant, Gutian Fujian 352258)

**Key Words:** curtain grouting in dam foundation; weathering; seepage and solution; surface carbonation; crack in dam body; slab strength; Gutianxi III dam

**Abstract:** The Gutianxi cascade-III reinforced concrete facing buttress dam has been operated for more than 40 years. The anti-seepage capability of grouting curtain of dam foundation generally decreased as the time passed, so that the upstream dam surface was seriously weathered. The leakage solution of the face solution has worsened. The surface carbonation depth has increased, the cracks in the dam body have increased or extended and the strength of the face slab has intensively decreased. A series of protective and strengthening measures were taken to avoid the deterioration and to ensure dam safety and normal operation. The Gutianxi cascade-III hydropower plant performed periodic detection and analysis for the dam deterioration and timely took corresponding measures.

中图分类号: TV698.23; TV642.51(257)

文献标识码: B

## 1 工程概况

古田溪三级大坝坝型为钢筋混凝土平板支墩坝, 最大坝高 43 m, 坝顶长 225 m, 由 27 个平板坝段和两岸重力坝段组成, 其中 9~20 号坝段之间为开敞式自由溢流坝段, 挡水面板顶部厚度为 0.65 m, 底部厚度为 2.04 m, 按单向钢筋混凝土筒支板设计, 混凝土设计强度为 19.6 MPa, 钢筋保护层厚度迎水面为 10 cm, 背水面为 7.5 cm, 墩墙厚度为 1.2~1.7 m, 坝顶高程为 137.7 m, 溢流堰顶高程为 129.0 m。坝基岩石为中生代白垩系流纹斑岩, 岩性单一, 坝基范围内无大的构造断裂, 但节理发育, 7~17 号坝段间在 91.0 m 高程处有一条近水平向节理, 贯穿坝基上下游, 厚度 2~3 mm, 由灰白次生高岭土充填, 粘结力差, 渗透性强。该坝 1958 年 12 月开工兴建, 1961 年 6 月下闸蓄水, 至今已有 40 多年, 在运行中各种老化病害逐渐显现, 并随着时间的推移而不断加重。

## 2 主要老化病害

### 2.1 坝基帷幕防渗能力衰减

坝基帷幕布置在坝趾齿槽中心线处, 由一排灌浆孔组成,

共 50 孔, 大多数为铅直孔, 少数孔倾向上游, 倾角 8°, 基本孔距为 6 m, 地质条件差的部位孔距加密为 3 m, 孔深原则上达到  $\omega \leq 2 \sim 4 L_u$  以下 1~2 m, 采用 400 号普通水泥灌浆, 坝基接触段(即 91.0 m 高程附近)压水检查时透水量大, 平均水泥单耗量也明显高于其他孔段。帷幕形成后, 幕后 18 个扬压力测孔中, 只有 1 孔因所在部位节理未能封闭, 扬压力偏高, 其余 17 孔水位基本稳定, 扬压力系数  $\alpha < 0.25$ 。运行 20 多年后, 幕后有些部位扬压力水位上升, 12 号坝段右侧 9 号孔扬压力水位变化最为明显, 1987~1991 年, 在库水位无大变化的情况下, 最高孔水位上升 14.2 m, 平均年上升率达 3.55 m/a, 最大扬压力系数  $\alpha$  达 0.76, 以后孔内水位稍有回落,  $\alpha$  保持在 0.6 左右, 孔内有可燃性气体排出。通过水质分析发现, 库水对混凝土具有弱至中等溶出性腐蚀作用, 测压孔内水样  $C_a^{2+}$ 、 $Mg^{2+}$  比库水明显增大, 9 号孔内可燃性气体为甲烷。综合分析表明, 坝基帷幕经地下渗流长期腐蚀后防渗能力已经下降, 沉积

收稿日期: 2005-04-04

作者简介: 邢林生(1942—), 男, 江苏南京人, 教授级高工, 从事水工结构性能分析和大坝安全评价研究。

在库底的有机物质腐烂产生的甲烷从测压孔中排出,表明坝基附近帷幕前后连通性好。帷幕损坏首先是从地质条件较差的91.0 m高程附近开始的。

2.2 面板迎水面风化侵蚀损害严重

古田溪三级水电站水库为日调节性水库,正常水位为129.0 m(平溢流堰顶),坝址区昼夜温差较大,日照强,干湿冷热交替频繁,库水对混凝土具有弱至中等溶出性腐蚀作用,经过多年运行,面板迎水面混凝土已遭受到一定程度的风化侵蚀损害,水位变化区风化侵蚀损害最为严重。1990年10月,对11个平板坝段迎水面和左、右导流墙的库水位变化区(125.7~128.5 m高程)外观检测发现,表面明显凹凸不平,部分卵石裸露深度达20 mm,用手可以剥落;回弹检测结果表明,面板迎水面表层混凝土强度大幅度降低,最大仅为16.6 MPa,最小只有7.3 MPa,平均为10.5 MPa(见表1),都大大低于混凝土设计强度。

表1 面板迎水面库水位变化区回弹、碳化检测成果

项目	平均回弹值 N	碳化深度 L/mm	换算强度 R/MPa	测区高程/m
最大值	32.4	10	16.6	127.0
最小值	21.6	5	7.3	
平均值	25.5	8	10.5	

2.3 面板渗漏溶蚀加剧

1990年10月,对面板背水面做了一次全面检查,发现面板经过30年的挡水运行,渗水析钙现象相当严重,在27个平板坝段中,有3个平板坝段的面板渗水,5个平板坝段的面板与垛墙交接处渗水,7个平板坝段共计18处有白色物质析出,其中12~13号、14~15号两个平板坝段面板析出物覆盖率较高,分别为53%和22%<sup>[1]</sup>;12~13号平板坝段白色析出物由112.0 m高程挂至基础面。水质分析表明,这些析出物主要成分为Ca(OH)<sub>2</sub>和CaCO<sub>3</sub>。2000年3月,再次对面板背水面进行全面检查,有8个平板坝段渗水比较严重,其中6~7号平板坝段120.0 m高程处为经常性滴水,11~12号平板坝段125.0 m高程处渗水成流动状;有20个平板坝段共计36处析出物质较多,有的成散点状,有的成片状,有的已凝结成块,有的变为黄色,有的为新鲜白色,析出物覆盖率较高的平板坝段有8个;检查中还发现,面板上存在许多针孔般大小的孔洞。与1990年相比,2000年面板渗水析钙程度进一步加剧,标志着面板遭受的溶蚀病害日益加重<sup>[2]</sup>。这是一种本质性病害,面板混凝土中的CaO在渗水作用下溶解生成Ca(OH)<sub>2</sub>而被带出,一部分随渗水流走,一部分在出口处与CO<sub>2</sub>气体反应生成CaCO<sub>3</sub>白色结晶,随着CaO的不断溶解带走,混凝土孔隙率增加,渗透性增大,抗渗能力降低,结果恶性循环,溶蚀破坏进一步加重,混凝土因失去胶粘性,强度逐渐下降。

2.4 坝面碳化深度累进

1990年10月,对上下游坝面和垛墙表面进行了大范围碳化深度的检测。面板迎水面水位变化区和背水面的碳化深度相对较浅,最大深度分别为10 mm和15 mm,而垛墙表面碳化深度较深,最大达45 mm,平均为14 mm(见表2)。

混凝土碳化,是空气中CO<sub>2</sub>气体沿着含不饱和和水的混凝土通道毛细孔渗入混凝土中,与孔隙液中的Ca(OH)<sub>2</sub>进行中

表2 坝面碳化深度检测成果

检测时间	部位	碳化深度/mm	
		最大	平均
1990年10月	面板迎水面库水位变化区	10	8
	面板背水面	15	7.8
	垛墙	45	14
2000年3月	面板背水面	37.5	11.8

和反应,生成低碱性CaCO<sub>3</sub>的现象。环境介质的相对湿度是影响碳化速度的一个关键因素,过高的空气湿度(如100%),将使混凝土孔隙充满着水,CO<sub>2</sub>气体不易扩散到水泥石中去,则碳化作用不易进行<sup>[3]</sup>。古田溪三级大坝1990年3月的检测结果就反映了这一规律:面板迎水面水位变化区和面板背水面环境空气湿度较大,故而混凝土碳化深度较浅,而处于干燥环境中的垛墙表面混凝土碳化比较严重。2000年3月,为了进一步了解碳化对面板的影响程度,又对面板背水面做了大范围的检测,结果发现,经过40年的运行,最大碳化深度已达37.5 mm。碳化对钢筋混凝土面板可能造成的主要危害有两个:一是当碳化深度超过保护层时,钢筋表面的钝化膜将因碱度下降而失钝,面板将遭受到钢筋锈蚀而产生的膨胀破坏;另一个是随着碳化深度的累进,混凝土中CaO的流失加重,面板强度和防渗性能降低。该坝面板背水面目前最大碳化深度约为保护层厚度的1/2,尚不致引起钢筋锈蚀膨胀破坏,而面板有效承载截面的逐年减小,对面板的承载能力和防渗能力的影响却是不可忽视的。

2.5 坝体裂缝增生或扩展

1992年12月17日现场检查发现,10、11、12号垛墙从基础面至106.0 m高程各有一条贯穿垛墙左右的竖直向裂缝,1994年元月18日现场检查又发现,3、4、5、7号垛墙各有一条程度不同的竖直向裂缝(见表3)。在这7个垛墙的裂缝中,除3号垛墙外,6个垛墙的裂缝都位于伸缩缝(纵缝)处,是二期混凝土干缩后形成的。3号垛墙施工时未留伸缩缝,这条位于浇筑块中间部位、长5.3 m、宽1.0 mm的竖直向裂缝,是新生裂缝。根据埋设的测缝计监测资料,多数测点开合度变化趋势平缓,主要与温度变化有关,但4号垛墙的裂缝缝宽1997年比1994年扩展了0.74 mm。1990年10月在对面板背水面的全面检查中未发现裂缝,2000年3月检查时发现22~23号平板坝段新产生一条明显裂缝,位于119.0 m高程处,平行于坝轴线方向,缝口有渗水和析钙现象。上述多次检查和监测结果表明,经过30~40年的运行,坝体裂缝不断增生,个别裂缝有所扩展,坝体结构整体性受到损害,尤其是位于22~23号平板坝段119.0 m高程处的裂缝,由于该部位面板厚度仅为1.25

表3 垛墙竖直向裂缝

垛墙号	缝长/m	缝宽/mm	裂缝位置
3	5.3	1.0	位于浇筑块中间,贯穿垛墙左右
4	7.0	0.5	位于伸缩缝(纵缝)处,贯穿垛墙左右
5	6.7	0.7	位于伸缩缝(纵缝)处,贯穿垛墙左右
7	6.0	0.2	位于伸缩缝(纵缝)处,贯穿垛墙左右

m 裂缝对单薄面板挡水能力的影响更为突出。

## 2.6 面板强度逐渐降低

1990 年 10 月,从面板背水面利用回弹法进行大范围强度检测,检测结果为总体平均强度达 49.5 MPa。2000 年 3 月,再次利用回弹法对面板背水面进行大范围强度检测,结果发现,与 10 年前相比,面板强度大幅度下降,平均强度为 37.91 MPa,比 1990 年降低 23.6%,其中 21~22 号平板坝段强度下降最为明显,平均仅为 31.8 MPa(见表 4),在 115.8 m 高程的 3 个测区中,第 1 区的强度已接近混凝土设计强度 19.8 MPa,第 2 区强度仅有 14.7 MPa,只相当于混凝土设计强度的 74%。2000 年的检测结果表明,该坝经过 40 年的挡水运行,承载能力大幅度下降,有的部位已处于极限临界状态。根据强度理论和以往的工程实例,一座坝的溃决失事,往往是由其最薄弱部位首先损坏而引发的。该坝 21~22 号平板坝段以及前述面板迎水面水位变化区,无疑是应该给予特别关注的薄弱部位。

表 4 21~22 号坝段面板背水面混凝土碳化、强度检测结果

测区高程/m	测区序号	碳化深度 L/mm	回弹平均值 N	声波 V/(km/s)	换算强度 R/MPa
126.6	1	21.0	49.6	3.70	34.5
	2	27.0	45.2	4.03	35.6
	3	37.5	44.4	4.33	37.6
115.8	1	23.0	38.2	3.48	21.4
	2	26.5	35.9	2.82	14.7
	3	35.5	37.6	4.23	26.4
101.2	1	10.0	44.2	4.44	38.4
	2	3.5	44.5	4.50	39.5
	3	7.0	41.4	4.93	38.5
平均值		21.2	42.3	4.05	31.8

## 3 治理措施

### 3.1 坝基帷幕补强灌浆

根据坝基帷幕防渗能力衰减情况,在 20 世纪 90 年代,对坝基帷幕实施补强灌浆处理。确定 6~7、8~10、12~15 号坝段为重点补强灌浆坝段,坝基接触面及 91.0 m 高程水平节理附近为重点灌浆部位。为避免水下施工,补强灌浆孔布置在坝块之间面板背水面的空间内,一律向上游倾斜,与水平成 45°角。针对普通水泥灌浆难以使坝基裂隙充填密实,而磨细水泥可灌性好、凝固时间短的特点,采用 525 号普通硅酸盐水泥和改性磨细水泥为灌浆材料,压水试验流量 >5 L/min 时,采用普通硅酸盐水泥灌浆,当流量 <5 L/min 时,采用改性磨细水泥灌浆。因大坝结构单薄,为防止灌浆过程中坝基产生抬动,设置了相应的监测设施。共完成 23 个补强孔和 3 个检查孔的灌浆,灌入 525 号普通硅酸盐水泥 483 kg,改性磨细水泥 5 638 kg,平均单位耗灰量约为 15 kg/m。2001 年结合坝体加固,又在坝块间增设总长为 480 m 的排水孔。坝基帷幕补强灌浆完成后,帷幕后的扬压力水位明显下降,原来扬压力水位最高的 12 号坝块右侧 9 号孔,扬压力系数由加固前的 0.6 左右,降至 0.04 左右,其他各测压孔的扬压力系数均小于设计采用值(0.25)。

### 3.2 面板防渗和防碳化处理

2001 年采用防渗和防碳化性能良好的材料,对面板迎水面、背水面作了全面防护处理,对集中渗漏部位进行灌浆封堵处理,以遏制面板进一步遭受到风化、侵蚀、溶蚀和碳化的危

害。因该坝无水库放空设施,利用发电将库水位降至最低水位 120.0 m 左右,对面板迎水面 119.0~129.0 m 高程范围,采用 903 聚合物乳液和水泥砂浆进行护面处理。其施工程序为:首先清除混凝土表面的浮尘、泥土和油污,冲洗擦干后,在基面上喷涂 2 mm 厚的 903 净浆,在其初凝前喷抹 8 mm 厚的 903 聚合物乳液和水泥砂浆,在自然条件下终凝后,洒水养护 3~5 d。在面板背水面,采用 LW/HW 聚氨酯混合浆液,对面板上的渗漏孔洞、面板与垛墙交接处渗漏部位以及原导流底孔面板堵头集中漏水处,进行灌浆封堵;对 120.0 m 高程以下面板,采用 961 环氧增厚型涂料进行护面处理,使其厚度达到 1.5~2 mm;对 120.0 m 高程以上面板,采用 903 聚合物乳液和水泥砂浆进行护面处理,使其厚度达到 10 mm。总共完成面板防渗和防碳化处理工程量为:迎水面 903 聚合物乳液和水泥砂浆护面处理 2 107 m<sup>2</sup>,背水面 120.0 m 高程以下 961 环氧增厚型涂料护面处理 2 164 m<sup>2</sup>,120.0 m 高程以上 903 聚合物乳液和水泥砂浆护面处理 2 083 m<sup>2</sup>,LW/HW 聚氨酯混合浆液灌浆 489 m。

### 3.3 面板和垛墙加固

由于面板和垛墙经过 40 年的运行,遭受到风化、侵蚀、溶蚀、碳化和裂缝的严重危害,承载能力、防渗能力和整体性已大幅度下降,必须进行补强加固处理。2001 年,结合坝基缓倾角裂隙抗滑稳定加固处理,在垛墙之间面板背水面设置了混凝土加重支撑块,针对面板检查和检测中发现的薄弱部位,根据面板原结构情况,加重块设计为三角形,顶面高程为 120.0 m,顺水流方向顶宽 1 m,最大底宽约 20 m,最大高度约 25 m,沿高度方向设两个平台,加重块底部设有观测和排水廊道,将基础观测设施引入廊道内,钻设了排水孔和扬压力观测孔,加重块沿坝轴线方向每隔 3 个坝段设一道伸缩缝,回填混凝土与垛墙之间做凿毛处理并布置了插筋,预埋接触灌浆管,后期进行低压接触灌浆,回填混凝土与面板之间不做凿毛处理,加重块与面板间设有排水设施,将面板的少许渗水通过排水管引入廊道。设置加重块后,既对面板进行了支撑加固,又满足了基础沿缓倾角裂隙面的抗滑稳定要求。另外,结合大坝侧向抗震加固的需要,在垛墙之间偏下游侧浇筑 1 m 厚防震隔墙,将垛墙相互连接起来,墙顶高程 122.0~130.0 m,部分坝段在隔墙顶部设置了钢筋混凝土加劲梁,既对垛墙进行支撑加固,也满足了大坝侧向稳定的要求。整个加固工程共完成加重块混凝土浇筑 30 780 m<sup>3</sup>,防震隔墙混凝土浇筑 2 480 m<sup>3</sup>,垛墙插筋 3 650 根,加劲梁钢筋混凝土浇筑 12 m<sup>3</sup>。

## 4 结 语

古田溪三级大坝,是我国第一座主要因老化病害严重而进行全面防护和加固的水电站大坝,对于其他运行多年的老坝,该坝的检测分析和治理,具有一定的借鉴意义。坝基渗流对于轻型坝的安全稳定,与其他坝型一样,是一个关键问题,1962 年梅山连拱坝右岸坝基因渗压过大而上抬失稳就是一个典型事例。古田溪三级大坝发现坝基渗流异常后,及时对坝基帷幕进行灌浆,又增设了排水孔,采用堵排结合的措施,使坝基渗流恢复正常,这无疑是非常必要的。就坝体混凝土风化、侵蚀、溶蚀、裂缝等老化病害对大坝的危 (下转第 74 页)

表1 南桠河梯级各水电站的主要参数

电站名称	基准合同电价/(kW·h)	平段合同出力/MW	日初水位/m	日末水位/m	正常蓄水位/m	死水位/m	装机容量/MW
冶勒	0.35	40	2 640	—	2 650	2 600	240
姚河坝	0.28	32	1 676	1 676	1 678	1 666	132
南瓜桥	0.15	28	1 366	1 366	1 369.5	1 363.5	120

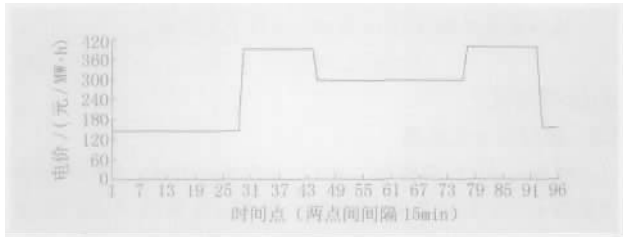


图1 某典型日96点边际电价过程

2.2 计算结果

在上述给定的参数和边界条件下,利用前述优化模型和方法,进行梯级联合优化计算,计算出梯级各电站出力日内96点的最优分配过程,并给出了梯级总出力、总合同出力和竞价出力过程线,结果见表2和图2。从图1、2和表2可以看出,电价高时梯级总出力大,反之亦然。从表2还可看出,各电站谷段的竞价出力比平段高。这是由于冶勒水电站主要在谷段提前下泄,让姚河坝水电站蓄到较高水位,其他两水电站主要是因为水库的起始水位较高,空库容较小,所以各水电站在达到日最高限制水位后被强迫放水发电,而经过早高峰段(07:00~11:00)加大出力后,各水电站在平段起始时水库水位较低,空库容较大,为了让晚高峰(19:00~23:00)多发,将水库蓄到较高水位,所以平段相对谷段来讲总竞价电量较小,但整个梯级在调度期内的总收入是最大的。综上所述,计算结果是合理的。

3 结语

本文提出的发电侧电力市场不同阶段下梯级水电站日优化运行模型和方法,考虑了系统边际电价、各电站的合同电价和合同电量、系统对各电站的出力约束,适应发电侧电力市场竞争上网的要求,计算出的结果可作为梯级水电站的日前交易市场申报电量的基础。

本模型及其求解方法不仅可以应用于梯级水电站短期优化运行,同样适用于单个水电站的短期优化运行。

(上接第71页) 害性来说,平板坝、连拱坝和大头坝由于结构比较单薄,往往在不太长的时间内即已威胁到大坝的安全运行。古田溪三级大坝的检查和检测结果,就明显地证实了这一点。因而,对于轻型坝遭受到的风化、侵蚀、溶蚀和裂缝等老化病害问题,需要给予特殊的关注。随着岁月的流逝,大坝渐趋老化是客观自然规律,我国20世纪70年代末以前建成的约90座大、中型水电站大坝,至今已运行30多年,有的已超过60年,各种老化现象逐渐显露,需要象古田溪三级大坝那样,坚持定期对大坝老化症状进行检查和检测,深入分析老化危害程度,并及时采取针对性防护和加固措施,遏制老化病害

表2 各水电站日优化合同电量和竞价电量分配结果

电站名称	项目	峰段	平段	谷段	合计
冶勒	合同电量/万 kW·h	50.40	32.00	24.00	106.40
	竞价电量/万 kW·h	15.50	4.12	7.59	27.21
姚河坝	竞价电量/总竞价电量/%	57.0	15.1	27.9	100
	合同电量/万 kW·h	38.40	25.60	19.20	83.20
姚河坝	竞价电量/万 kW·h	24.95	0.14	0.40	25.48
	竞价电量/总竞价电量/%	97.9	0.5	1.6	100
南瓜桥	合同电量/万 kW·h	33.60	22.40	16.80	72.80
	竞价电量/万 kW·h	45.65	8.00	8.14	61.79
	竞价电量/总竞价电量/%	73.9	13.0	13.1	100

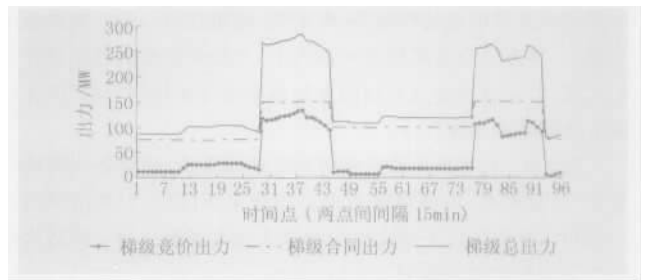


图2 南桠河梯级水电站群日优化总出力过程

需要指出的是,本文暂时没有对系统边际电价进行预测,基于边际电价预测的梯级水电站优化运行有待下一步研究。

参考文献:

- 任丽,等. 电力市场模式评述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004,6:17-22.
- 金尚成,黄永皓,夏清,等. 电力市场理论与应用[M]. 北京:中国电力出版社, 2002,36-39.
- 赵振华,周建中,李承军. 清江梯级水电站短期优化调度模型研究[J]. 计算机仿真, 2003 (10):43-45
- 宗航,李承军,周建中,张勇传. POA 算法在梯级水电站短期优化调度中的应用[J]. 水电能源科学, 2003 (3): 46-48.
- 董子敖. 水库群调度与规划的优化理论和应用[M]. 济南:山东科学技术出版社, 1989.12-21.
- Turgeon A. Optimal short-term hydro scheduling from the principle of progressive optimality [J]. Water Resource. Res, 1981,17(3):481-486.
- 方红远,王浩,程吉林. 初始轨迹对逐步优化算法收敛性的影响[J]. 水利学报, 2002,11: 27-30.

的进一步发展,增强大坝的稳定性和承载能力,确保大坝安全运行。

参考文献:

- 徐庆钦. 古田溪三级大坝混凝土面板、垛墙钢筋混凝土检测[J]. 大坝与安全, 1995 (2): 30-35.
- 邢林生,聂广明. 混凝土坝坝体溶蚀病害及治理[J]. 水力发电, 2003 (11): 60-63.
- 邢林生. 混凝土坝表层碳化及其危害性分析[J]. 水力发电学报, 2003 (4): 67-73.