

板桥水库电站增效扩容改造及方案评价

张梦如¹, 万芳², 杨肖丽¹

(1. 河海大学, 江苏 南京 210098; 2. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450045)

摘要:以板桥水库为研究对象,采用模比系数差积曲线、状态转移概率等方法分析1974-2011年板桥水库的年内及年际径流特征。采用动态规划法,并以发电量最大为目标函数进行优化调度;采用基于层次分析的模糊综合评价法对拟定方案进行评价,确定板桥水库电站的增效扩容最优方案。结果表明:经增效扩容改造,板桥水库多年平均发电量增加为 $800.09 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h}$,经济效益为 $62.23 \times 10^4 \text{ 元/a}$,水资源利用率及发电效益均得到提升,为水电站增效扩容的改造设计提供理论依据。

关键词:增效扩容;径流规律分析;模比系数差积曲线;状态转移概率;动态规划;基于层次分析的模糊综合评价;板桥水电站

中图分类号:TV74

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)05-0174-06

Evaluating the efficiency-improving and capacity-expanding transformation solutions of Banqiao hydropower station

ZHANG Mengru¹, WAN Fang², YANG Xiaoli¹

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. North China University of Water Resources and Elec, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: The annual and inter-annual runoff characteristics of Banqiao Reservoir from 1974 to 2011 were analyzed by means of modulus ratio coefficient curve and state transition probability. The dynamic programming method is used to optimize the operation with the maximum power generation function as the objective function, and the fuzzy comprehensive evaluation based on analytical hierarchy process (AHP) is used to evaluate the proposed scheme and determine the best solution of efficiency-improving and capacity-expanding transformation of the Banqiao reservoir power station. The results show that the average annual generating capacity of Banqiao Reservoir increased to 8.009 million $\text{kW} \cdot \text{h}$ and the economic benefit reached 622,300 yuan per year, and both the water resources utilization efficiency and power generation efficiency improved. The scheme provides a theoretical basis for the design of hydropower expansion.

Key words: efficiency-improving and capacity-expanding transformation; runoff analysis; modulus coefficient residual mass diagram; state transition probability; dynamic programming; fuzzy comprehensive evaluation based on AHP; Banqiao hydropower station

1 研究背景

我国现有水库在防洪、发电、供水、灌溉、航运等方面发挥着巨大作用,合理利用水资源,同时使水库电站实现最大效益,成为实践工作中的重点问题^[1]。最早在20世纪60年代末期,我国对已建大中型水电站进行扩建及扩大装机容量改造^[2],水库

的调度管理工作也将越来越重要^[3]。水库调度模型包括调度图、调度规则等传统的经验模型,也包括动态规划、非线性规划等系统优化模型。目前,在调度模型应用中,调度图和调度规则主要用于制定调度计划,实时调度决策通常基于水文预报和系统优化模型^[4]。Castelletti等^[5]研究发现动态规划和随机动态规划能够用于求解非线性水库调度问题,但

收稿日期:2017-06-08; 修回日期:2017-06-27

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601504);国家自然科学基金项目(51579066)

作者简介:张梦如(1994-),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。

通讯作者:杨肖丽(1976-),女,河北邯郸人,博士,副教授,研究方向为气候变化与人类活动对水文循环影响的模拟与预测。

在水库群调度问题中面临“维数灾”,即求解时间和内存需求随水库数目增加而呈指数增加。除了数学优化算法,优化模型还可以采用启发式算法求解,包括遗传算法^[6]、粒子群算法^[7]、蚁群算法^[8]等。郭生练等^[9]、Szemis 等^[10]及 Zecchin 等^[11]相继采用启发式算法,此方法为调度图、调度规则设计和系统优化模型求解带来了革新和重大进步。目前,板桥水库电站面临发电效率低、能耗大以及电站综合能效偏低等问题,电站亟需进行改造。板桥水库电站为单一水库电站,因此可采用动态规划法对其进行增效扩容改造设计,缓解板桥水库电力系统负荷迅速增长的紧张趋势。

2 资料与方法

2.1 区域概况与资料

板桥水库位于河南省泌阳县淮河支流汝河上游,以防洪为主,兼顾灌溉、供水、发电、水产等功能,控制流域面积为 768 km²。板桥水库坝址处多年平均径流量 2.8×10^8 m³,年平均降雨量 1 000 mm,其中汛期占 65%,年平均径流深 300 mm,年径流系数在 0.3 左右,年水面蒸发量 1 300 mm,陆面蒸发量 640 mm,无霜期年平均 218 d。本区降雨量年际差异很大,年内分配不均匀。汛期雨量较为集中,常集中于 7—8 月份的两到三次暴雨之中,其强度大、范围广。板桥水库电站是国家“七·五”计划板桥水库复建工程的主要项目之一,位于板桥水库混凝土坝南端,原利用灌溉用水及城市供水通过输水洞的总管与支岔管引水发电,经 35 kV 板桥变电所入驻马店电网,电站装机容量为 4×800 kW,设计年发电量为 380×10^4 kW·h。

本文选取 1974—2011 年板桥水库历年的月来水量、水位以及特征水位与特征库容资料(1976 年停工缓建和 1990—1993 年检修年份除外)对其进行板桥水库电站增效扩容改造。

2.2 研究方法

2.2.1 建立数学模型 板桥水库的优化调度以水库发电量最大为目标函数,另一方面考虑水库调度的各种约束条件,建立单一水库优化调度动态规划模型。

针对板桥水库建立数学模型为:

(1)阶段变量。根据汛期和非汛期,按月进行划分,确定 12 个阶段变量;

(2)状态变量。本文将各阶段水位离散 200 份,离散后的水位即为状态变量;

(3)决策变量。对于板桥水库电站而言,各阶段内水位即决策变量;

(4)状态转移方程。采用动态规划法进行逆序求解时,板桥水库电站系统的状态转移方程为:

$$V_{i+1} = V_i + (Q_i - q_i)\Delta t \quad (1)$$

式中: V_i 、 V_{i+1} 为第 i 阶段初、末的水库蓄水量, m³; Q_i 为第 i 阶段的平均入库流量, m³/s; q_i 为第 i 阶段的发电引用流量, m³/s;

(5)目标函数。板桥水库的入库径流量为确定型,以计算期内总发电量最大为最优准则,目标函数为:

$$E = \max \sum_{i=1}^{12} (N(i) \times \Delta t) \quad (2)$$

式中: $N(i)$ 为第 i 阶段的出力值, kW。

(6)约束条件。约束条件主要有水库水位限制条件、出力条件、引用流量的限制条件以及水量平衡限制的条件。

2.2.2 基于层次分析的模糊综合评价 首先针对研究建立多目标层次指标体系,采用层析分析法确定指标权重。基本步骤如下:首先建立层次结构模型,构造判断矩阵 $A = [a_{ij}]$;其次采用列和求逆法计算权重向量。

单个判断矩阵的一致性检验^[12]。求矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$,计算一致性指标 CI 值。根据矩阵阶数 n ,查表 1 并计算 CR 值。由 $CR < 0.1$ 检验判断矩阵一致性。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

$$CR = CI/RI \quad (4)$$

表 1 平均随机一致性指标 RI

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

在层次分析确定权重的基础上进行模糊综合评价^[13],建立模糊关系矩阵 R 如下:

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nm} \end{pmatrix} \quad (0 < r_{ij} < 1) \quad (5)$$

式中: r_{ij} 为因素论域 U 中因素 u_i 对应评语等级论域 V 中等级 v_i 的隶属关系。其中确定隶属函数方法为:

$$\text{指标值越大越优时: } r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (6)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$
$$\text{指标值越小越优时: } r_{ij} = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} \quad (7)$$

$$(i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

式中： r_{ij} 为隶属度值； x_{ij} 为指标值； $\max x_{ij}$ 和 $\min x_{ij}$ 分别为该指标中的最大值和最小值。

选择合成算子，将权重向量 A 与模糊关系矩阵 R 合成得到各被评事物的模糊综合评价结果向量 B 。分析模糊综合评价结果向量，并采用最大隶属度原则做进一步处理。

$$B = A \cdot R = (b_1, b_2, \dots, b_m) \quad (8)$$

3 结果与分析

3.1 径流规律分析

板桥水库兴利库容为 $2.56 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，计算得多年平均年水量为 $2.946 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，库容系数 β 为 86.90%，因此板桥水库属于多年调节水库。在水文系统中，水文时间序列变化具有趋势特征^[14]，本文主要分析板桥水库上游来水量年内及年际的趋势变化。

3.1.1 年内径流规律分析 根据板桥水库 1974 – 2011 年的月来水量（1976 年停工缓建和 1990 – 1993 年检修年份除外），计算多年月均来水量，绘制板桥水库多年月均来水量变化趋势（见图 1）并统计多年月均入库径流量（见表 2）。

表 2 板桥水库多年月均入库径流统计表

月份	多年月均径流量/ 10^4 m^3	比例/%	月份	多年月均径流量/ 10^4 m^3	比例/%
1	283.5	0.96	7	8293	28.15
2	235.3	0.80	8	7700	26.14
3	473.7	1.61	9	4905	16.65
4	614.1	2.08	10	1972	6.69
5	1211	4.11	11	645.7	2.19
6	2913	9.89	12	212.0	0.72

结果表明：年内汛期主要在 7 – 9 月份，汛期径流总量所占比例相对较大，其多年月均径流总量占全年比例为 70.94%。7 月份的来水量达到全年峰值，8、9 月份来水量呈减小趋势；12、1 和 2 月份为年内较枯月份，3 个月入库径流之和仅占全年入库径流的 2.48%；最大多年月均径流量约占最小多年月均径流量的 39 倍，表明径流变化剧烈。综上分析：板桥水库的汛期为 7 – 9 月份，其余月份为非汛期，且年内各月来水分配极不均匀。

按照气象学及中国纬度的季度划分原则，分析板桥水库季度径流规律。板桥水库各季度径流变化趋势如图 2 所示。

由图 2 分析得出：夏、秋季降雨较多且较为集中，两季度总来水量占全年总量的 89.71%，其中夏季所占比例最大；冬季最枯，其来水量仅占全年总量的 2.48%，且夏季与冬季来水量比值约为 1: 26。春夏过渡期径流量呈大幅度上升趋势；夏秋过渡期径流量呈大幅度减小趋势；秋季到冬季的径流量呈相对缓慢减小趋势。以上分析表明：年内各季度降雨分配极不均匀。

3.1.2 年际径流规律分析 变差系数 C_v 通常可表示径流的年际变化^[15]，计算板桥水库多年变化特征值见表 3。

表 3 结果显示：其径流年际变化 C_v 值为 1.01，其值大于 1.0，且年极值比为 63.38，表明板桥水库径流年际变化幅度很大，且极不稳定。

由来水量资料计算模比系数差积，绘制模比系数差积曲线如图 3。

由图 3 分析可得：1974 – 1985 年呈现出向丰水年变化的趋势；1985 年以后的 23 a 间，虽有丰枯年交替，但整体呈现出向枯水年变化的趋势。这种不规则的径流长持续性变化，不仅与区域的径流长、中、短周期变化有关系，而且在一定程度上还受大尺度大气环流的影响。

表 3 板桥水库的年径流多年变化特征值

多年平均来水量/ 10^4 m^3	变差系数 C_v	最大年径流量			最小年径流量			最大与最小年径流量比
		年份	来水量/ 10^4 m^3	与多年平均比	年份	来水量/ 10^4 m^3	与多年平均比	
29458.09	1.01	1984	145903.38	4.95	2011	2302	0.08	63.38

板桥水库径流的 4、8、16 a 滑动平均结果分别见图 4 ~ 6。由图 4 ~ 6 可看出：20 世纪 70 年代末到 80 年代初径流量较大，80 年代初期以后，径流量总

体上呈减小趋势；70 年代后期、80 年代初期和 21 世纪初期的径流变化波动幅度较大，而整体径流呈减小趋势。

在实际的应用中,径流丰枯变化情况通常由模比系数^[16]确定。采用模比系数法对板桥水库 33a 来水量资料计算得相应模比系数值,根据表 4 可得各年丰、平、枯变化程度,见表 5。

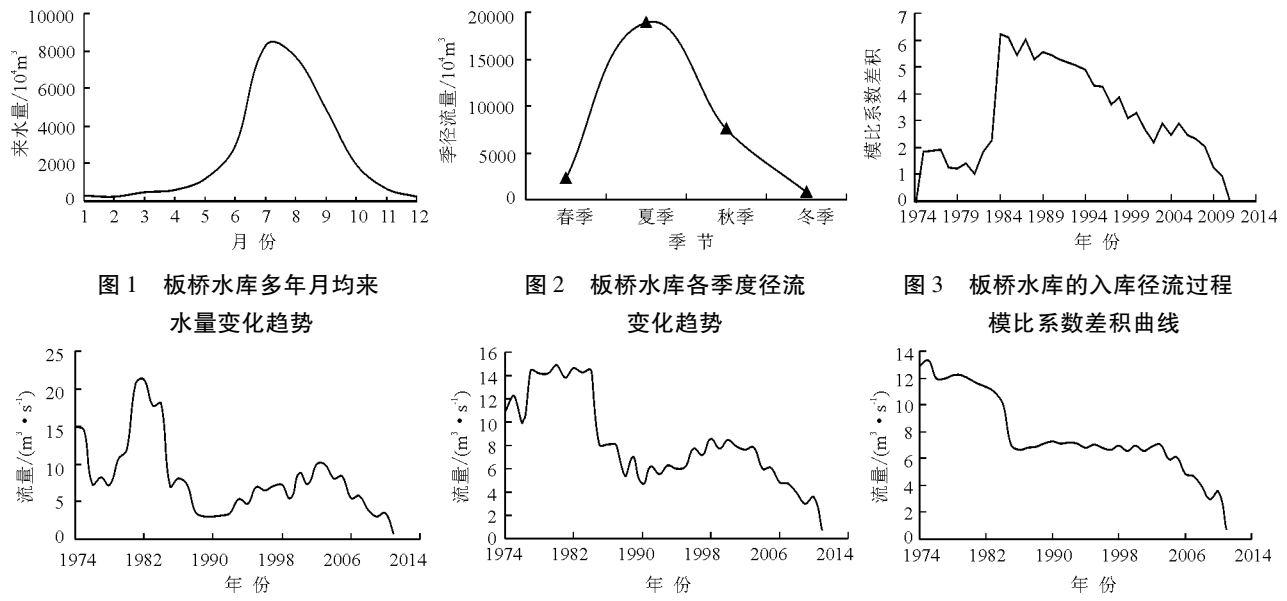


图 4 板桥水库径流的 4 a 滑动平均 图 5 板桥水库径流的 8 a 滑动平均 图 6 板桥水库径流的 16 a 滑动平均

丰水年		平水年	枯水年	
特丰	偏丰		偏枯	特枯
$K_p > 1.20$	$1.20 > K_p \geq 1.10$	$1.10 > K_p \geq 0.90$	$0.90 > K_p \geq 0.80$	$K_p < 0.8$

表 4 模比系数 K_p 的判别

表 5 1974 – 2011 年各年来水量的丰枯变化程度									
1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983
枯	丰		平	枯	平	偏丰	枯	丰	丰
1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
丰	偏枯	枯	丰	枯	丰				
1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
枯	枯	平	枯	丰	枯	偏丰	枯	枯	丰
2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011		
枯	丰	枯	偏枯	枯	枯	枯	枯		

用 Markov 过程表示径流丰枯状态转移过程^[17]。依据 Markov 链的理论,将板桥水库 33 a 的入库径流划为丰、偏丰、平、偏枯、枯 5 种状态,分别记为状态 1 ~ 状态 5,构成状态和时间均离散的随机序列,进行丰枯状态转移概率(见表 6)分析。统计结果表明:20 世纪 70 年代多为枯水年和平水年,80 年代多为丰水年,90 年代和 21 世纪初多为枯水年,由此得出 1974 – 2011 年间枯水年出现频率最大;各状态向枯水年的转移概率最大,丰水年次之。各状态向枯水年的平均转移概率约为丰水年的 5.5 倍,整体呈现出向枯水年的转移。

3.2 板桥水库优化调度

采用逆序寻优的动态规划方法,运用动态规划原理寻求最优的决策组合,即最优调度方案。

径流分析确定出汛期和非汛期,将汛期的最高水位设为汛限水位 110 m,最大库容设为 $2.022 \times 10^8 \text{ m}^3$;非汛期的最高水位设为正常蓄水位 111.5 m,最大库容设为 $2.195 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。离散水位,计算出所有决策的出力值 N ,并将出力计算结果与拟定的装机容量及相应最小出力(最小单机的 1/3)进行比较及判断,确定最终出力值 N ,求解给定装机容量所对应的多年平均发电量。

表6 板桥水库径流丰枯状态的一步转移概率矩阵

初始状态	转入状态				
	1 (丰)	2 (偏丰)	3 (平)	4 (偏枯)	5 (枯)
1(丰)	0.22	0.00	0.11	0.11	0.56
2(偏丰)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
3(平)	0.00	0.33	0.00	0.00	0.67
4(偏枯)	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00
5(枯)	0.41	0.06	0.12	0.06	0.35
平均转移概率	0.13	0.08	0.05	0.03	0.72

本文共进行 27 次计算,由于在后期多年平均发电量呈逐渐减小趋势,故后期不予考虑,取 14 次的运行结果,绘制出装机容量与多年平均发电量的关系曲线见图 7。板桥水库增效扩容模拟运行结果显示:(1)前期:随着装机容量的均匀增加,多年平均发电量基本呈稳定增加趋势;(2)中期:存在多年平均发电量随着装机容量的增加呈平稳不变的趋势;(3)后期:多年平均发电量出现减小趋势,说明装机容量过大,水库的出库流量不能满足其发电要求,造成资金投入的浪费,且可能造成水库无水的情况。

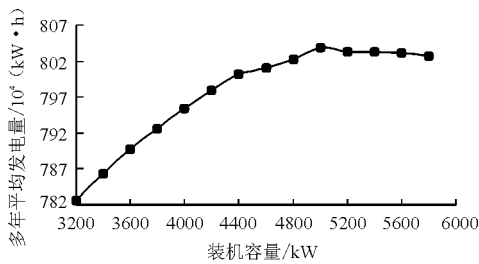


图7 装机容量与多年平均发电量关系图

在多年平均发电量达到平稳状态的阶段中选择 4 个电站扩容方案(见表 7),进一步对方案作分析与评价,寻求最优增效扩容方案。

表7 板桥水库拟定方案相关数据资料

方案	总装机容量/ kW	多年平均发电量/ 10 ⁴ (kW·h)	多年平均弃 水量/10 ⁴ m ³
方案1	4400(4×1100)	800.09	1757.96
方案2	4600(4×1150)	801.98	1772.04
方案3	4800(4×1200)	802.28	1758.55
方案4	5000(4×1250)	803.84	1746.61

3.3 板桥水库增效扩容最优方案

3.3.1 评价指标及其权重的确定 基于层次分析方法,建立板桥水库的层次结构模型(图 8)。综合考虑水电站的发电、经济、水资源利用以及用水和弃

水等因素,选取 5 个指标作为准则层。

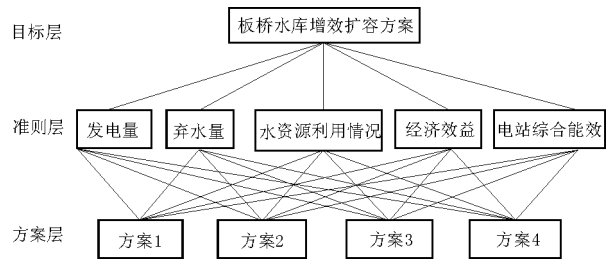


图8 板桥水库增效扩容方案评价层次结构

对 5 个评价指标进行重要等级分析,并构造判断矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 5 & 5 & 2 \\ 1/4 & 1 & 2 & 2 & 1/3 \\ 1/5 & 1/2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1/5 & 1/2 & 1 & 1 & 1/3 \\ 1/2 & 3 & 3 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

对判断矩阵采用列和求逆法,计算权重向量为 $W = (0.462, 0.112, 0.084, 0.084, 0.252)$,且判断矩阵通过一致性检验。

3.3.2 板桥水库增效扩容方案评价 确定对象的因素论域 U 及评语等级论域 V , 列出 4 种方案所对应的 5 个指标值如表 8 所示。

表8 板桥水库增效扩容方案的各指标多年平均值

方案	发电量/ 10 ⁴ (kW·h)	弃水量/ 10 ⁴ m ³	水资源利 用情况	经济效 益/10 ⁴ 元	电站综 合能效
方案1	800.09	1757.96	0.90	62.23	0.95
方案2	801.98	1772.04	0.88	53.67	0.70
方案3	802.28	1758.55	0.65	45.29	0.45
方案4	803.84	1746.61	0.40	36.67	0.30

其中,发电量和弃水量为拟定方案数据值;根据发电量并按照上网电价及不同装机发电机组的市场价进行计算得经济效益(计算期为 1 a,不考虑水电站其他固定投资及费用);水资源利用情况指标取值范围在 0~1 之间,综合考虑灌溉流量、多年平均出库流量、多年平均弃水量等进行定值;电站综合能效指标取值范围在 0~1 之间,需对改造方案的成本和长期效益等各方面进行主观的评判。

根据公式(6)和(7)计算 4 种方案的各项指标的隶属度,得到单因素隶属度如下:

$$R = \begin{bmatrix} 0.9965 & 0.9977 & 0.9993 & 1 \\ 0.9935 & 0.9856 & 0.9932 & 1 \\ 1 & 0.97 & 0.72 & 0.44 \\ 1 & 0.8624 & 0.7278 & 0.5893 \\ 1 & 0.74 & 0.47 & 0.32 \end{bmatrix}$$

采用模糊合成算子计算得评判结果向量 $B = W \cdot R = (0.9976, 0.9177, 0.8190, 0.7471)$, 进行归一化处理得: $B = (0.2866, 0.2636, 0.2352, 0.2146)$ 。按最大值原则, 确定最优调度方案为方案1, 即电站装机容量为4 400 kW(单机容量1 100 kW), 下游供水为 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$, 起调水位和期末水位均为106.27 m, 多年平均弃水量为 $1\,757.96 \times 10^4 \text{ m}^3$, 多年平均发电量为 $800.09 \times 10^4 (\text{kW} \cdot \text{h})$, 经济效益为 $62.23 \times 10^4 \text{ 元/a}$ 。

4 结 论

(1) 板桥水库汛期集中在7-9月份, 年内降雨分布极不均匀, 年内径流变化剧烈, 易出现汛情和旱情, 年际径流变化也极不稳定, 整体呈现出向枯水年变化的趋势。因此, 板桥水库需要通过水库调节对下游进行有计划的供水, 提高水资源的利用率。

(2) 本研究基于动态规划最优化原理, 简化了解各阶段状态和决策的计算过程, 有效提高了板桥水库电站若干优化调度方案的拟定效率。

(3) 板桥水库通过适当扩容, 增加水电站发电机组的装机容量为4 400 kW($4 \times 1\,100 \text{ kW}$), 该方案的板桥水库电站多年平均发电量为 $800.09 \times 10^4 (\text{kW} \cdot \text{h})$, 增加了经济效益及用水效率。

(4) 建议采用技术先进、质量可靠、节能环保的电气设备和部分辅助设备, 减少发电损耗, 引入先进的微机监控系统, 提高电站安全性能和综合自动化管理水平。

参考文献:

- [1] 宋松柏, 冯国章, 王双银, 等. 综合利用水库优化调度决策支持系统[J]. 水科学进展, 2002, 13(3): 358-362.
- [2] 胡代清. 国内外已建水电站扩机增容情况综述[J]. 水电站设计, 2004, 20(2): 11-14.
- [3] 周建平, 钱钢粮. 十三大水电基地的规划及其开发现状[J]. 水利水电施工, 2011, 36(1): 1-7.
- [4] Li Xiang, Guo Shengliang, Liu Pan, et al. Dynamic control of flood limited water level for reservoir operation by considering inflow uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2010, 391(1-2): 124-132.
- [5] Castelletti A, Galelli S, Restelli M, et al. Tree-based reinforcement learning for optimal water reservoir operation[J]. Water Resources Research, 2010, 46(9): 1-19.
- [6] 涂启玉, 梅亚东. 遗传算法在水库(群)优化调度研究中的应用综述[J]. 水电自动化与大坝监测, 2008, 32(1): 16-18+29.
- [7] 陈立华, 梅亚东, 杨娜. 自适应多策略粒子群算法在水库群优化调度中的应用[J]. 水力发电学报, 2010, 29(2): 139-144.
- [8] 郭旭宁, 胡铁松, 黄兵, 等. 基于模拟-优化模式的供水水库群联合调度规则研究[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 705-712.
- [9] 郭生练, 陈炯宏, 刘攀, 等. 水库群联合优化调度研究进展与展望[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 496-503.
- [10] Szemis J M, Maier H R, Dandy G C. A framework for using ant colony optimization to schedule environmental flow management alternatives for rivers, wetlands, and floodplains[J]. Water Resources Research, 2012, 48(8): 1-21.
- [11] Zecchin A C, Simpson A R, Maier H R, et al. Improved understanding of the searching behavior of ant colony optimization algorithms applied to the water distribution design problem[J]. Water Resources Research, 2012, 48(9): 1-16.
- [12] 谢季坚, 刘承平. 模糊数学方法及其应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.
- [13] 乔亮, 钱会, 高盼盼. 黑河金盆水库入库径流水文特征分析[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(5): 190-191.
- [14] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [15] 万思成, 张建云, 王国庆, 等. 漳河上游径流变化特性分析[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(6): 7-11+18.
- [16] 姜艳君, 贾纯刚. 辽源水文站年径流长短系列代表性分析[J]. 吉林水利, 2011, 29(5): 52-53.
- [17] 张少文, 张学成, 王玲, 等. 黄河天然年径流长期丰枯状态变化特性研究[J]. 人民黄河, 2005, 27(5): 9-10+46.