

径流贝叶斯概率预报在水库发电优化调度中的应用

韩义超¹,徐 炜^{2,3},张 弛³,彭 勇³,王本德³

(1. 辽宁省水利水电勘测设计研究院,辽宁 沈阳 110006;
2. 重庆交通大学河海学院,重庆 400074; 3. 大连理工大学建设工程学部,辽宁 大连 116024)

摘要:为了充分考虑降雨、径流预报的不确定性和降低水库发电调度模型的复杂性,采用贝叶斯概率水文预报系统(BFS)耦合降雨预报的不确定性和径流预报模型本身的不确定性来定量描述径流预报的不确定性,发布径流确定性预报、概率预报和概率预报期望值;结合随机动态规划(SDP)模型和贝叶斯随机动态规划(BSDP)模型来制定发电调度图;以浑江桓仁水库流域为背景,采用美国国家天气局的全球预报系统(GFS)发布的 10 d 降雨预报信息作为预报模型输入,模拟桓仁水库的发电调度过程。模拟结果表明基于径流贝叶斯概率预报的水库发电调度能有效提高水库的发电效益和保证率。

关键词:水力发电;数值降雨预报;径流概率预报;贝叶斯理论;随机动态规划;桓仁水库

中图分类号:TV697.1⁺1;TV214 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2014)04-0039-07

Building optimization model for reservoir hydropower generation using Bayesian forecasting system and stochastic dynamic programming//HAN Yichao¹, XU Wei^{2,3}, ZHANG Chi³, PENG Yong³, WANG Bende³(1. *Liaoning Hydro & Power Design Institute, Shenyang 110006, China*; 2. *College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China*; 3. *Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China*)

Abstract: In this paper, the Bayesian Forecasting System (BFS) is presented to address the uncertainties of inflow forecast and precipitation forecast as well as to reduce the complexity of the reservoir hydropower generation model. The BFS, based on Bayesian decision theory and total probability formula, is applied to quantitatively depict the uncertainties of inflow forecast by analyzing the uncertainties of hydrological model, inflow and precipitation forecast. Furthermore, the BFS is also used to develop a deterministic inflow forecast (DIF), the probabilistic quantitative inflow forecast (PQIF) and expectations forecast. Besides that, Stochastic Dynamic Programming (SDP) and Bayesian Stochastic Dynamic Programming (BSDP) are combined to formulate the hydroelectric operating policies. Finally, by using information of the 10 days lead time precipitation forecast of Global Forecast System (GFS) and taking Huanren Reservoir as a study case, the simulation of hydropower generation operating for this reservoir is provided. The simulation results show that the power generation dispatching based on the combination of BFS with SDP model can effectively improve the power generation efficiency and stability of the reservoir.

Key words: hydropower generation; precipitation forecast of GFS; probabilistic quantitative inflow forecast; Bayesian theory; stochastic dynamic programming; Huanren Reservoir

近年来,随着科学技术的不断发展,数值气象预报的精度不断提高,预见期也不断延长,其中美国的全球预报系统(global forecasting system, GFS)和中国气象局的 T213 系统均能够提供相对可信的中期环流形势以及 10~15 d 的降雨预报信息。将数值降雨预报信息应用于水库发电优化调度中,有利于提高水库径流预报的预见期和精度,从而有利于水库发电

调度决策。在降雨和径流预报信息的实际使用中,合理处理预报信息的不确定性是关键。

在水库实时发电调度中,预报的径流过程属于不确定性信息,局限了动态规划等确定性算法的应用,而随机动态规划(stochastic dynamic programming, SDP)模型能够在算法中耦合径流预报信息的不确定性,与水库多阶段决策的特点具有较高的契合性。

经典 SDP 模型将预报径流信息视为准确的或假定误差不变的,调度中直接用于决策^[1-3]。径流预报的不确定性主要受降雨预报精度的影响,且随着预见期的延长,降雨预报和径流预报的不确定性也逐渐增加,即试图精确地描述径流非常困难^[4-5],因此 Karamouz 等^[6-8]在水库运行中运用贝叶斯理论来灵活处理入流的概率信息,并在随后的研究中建立了贝叶斯随机动态规划(bayesian stochastic dynamic programming, BSDP)模型。通过对 BSDP 模型的改进,使其在电力系统需求分析、季节性入流不确定性对发电调度的影响评价等方面得到了应用^[9-15]。然而 BSDP 模型的人流概率信息只是对径流预报不确定性的某一或某几方面进行量化分析,没有充分考虑降雨预报的不确定性和径流预报模型本身的不确定性。当模型在融合多元信息描述径流预报信息的不确定性时,调度模型的复杂性和“维数灾”问题随信息量的增加而加剧。

鉴于目前在水库发电调度中耦合降雨和径流预报信息所存在的问题,本文参考 Krzysztofowicz 等^[16-20]提出的贝叶斯概率水文预报系统(bayesian forecasting system, BFS),将数值降雨预报不确定性与水文预报不确定性分别量化;然后通过全概率公式将二者耦合起来,得到水文预报不确定性的解析解,同时得到径流概率预报值、概率预报期望值和确定性径流预报值;最后,基于 SDP 模型和 BSDP 模型的发电优化调度图,依据径流预报信息分别模拟桓仁水库的发电调度决策,并对模拟发电调度的效益和稳定性进行比较与分析。

1 概率预报及优化调度模型的建立

1.1 GFS 降雨预报系统

GFS 降雨预报系统由美国国家环境预报中心研制,是全球应用最广泛的数值预报业务系统之一。该数值天气预报系统按格林威治时间在每日的 0、6、12 和 18 时向公众发布未来 1~15 d 各地区降雨

情况,如图 1 所示。该降雨预报系统分为两个部分:一部分为精度较高的未来 1~8 d 降雨预报系统,以 6 h 为间隔发布数值预报,如图 1(a)所示;另一部分为精度较低的未来 9~15 d 降雨预报系统,以 12 h 为间隔发布数值预报,如图 1(b)所示。

1.2 径流预报模型

本文采用多元线性回归模型和新安江模型分别建立流域非汛期和汛期的旬径流预报模型^[13-14]。多元线性回归模型以上旬降雨和径流信息和本旬降雨信息作为影响因子,建立非汛期旬径流预报模型^[21-22];汛期建立以日降雨量作为输入的新安江模型,模拟汛期未来旬的径流过程,通过累加得到旬径流量^[23]。采用 1968—2000 年的实测降雨和径流资料对模型参数进行率定,将此阶段作为模型参数率定期;模型参数验证阶段采用 2001—2010 年实测降雨资料模拟径流,并与实测径流对比检验模型预报能力。模型参数率定期、验证期和预报期精度的详细内容可参见文献^[13]。

1.3 贝叶斯概率水文预报系统 BFS

流域径流预报不确定性可分为降雨预报不确定性和水文预报不确定性^[19-20]。通过统计分析实测降雨量与 GFS 预报降雨量获得降雨的不确定性。水文预报不确定性包括径流本身的不确定性以及径流预报模型结构和参数带来的不确定性,可通过实测降雨量模拟径流并与实测径流的对比来进行定量分析。BFS 采用全概率公式耦合水文预报不确定性与降雨预报不确定性,并提供了研究概率水文预报的框架,如图 2 所示。水文模型的预报径流所属区间为 H_t ,实测径流所属区间为 Q_t (在优化模型计算时,采用所属区间的中值作为区间代表值进行计算)。

1.3.1 水文预报不确定性分析

假定径流构成简单马尔科夫过程,概率 $P(Q_t | Q_{t-1})$ 称为径流的先验概率,反映径流本身的不确定性,它表示 $t-1$ 时段实测径流为 Q_{t-1} 区间条件下、 t 时段发生 Q_t 区间的概率。径流预报值与实测值之

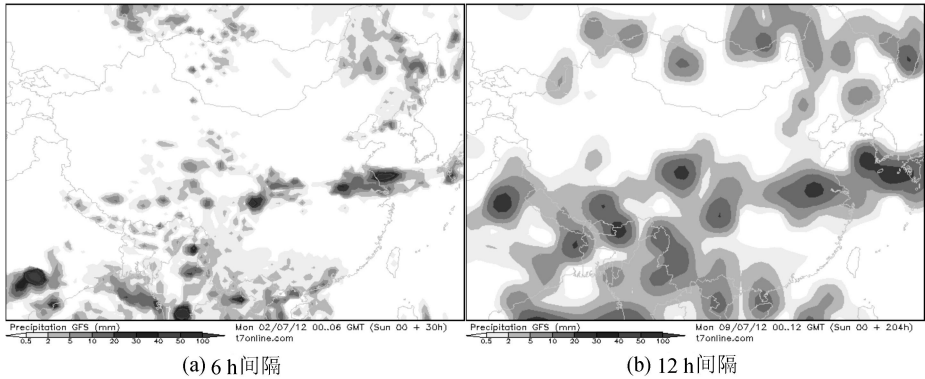


图 1 GFS 发布的降雨预报分布

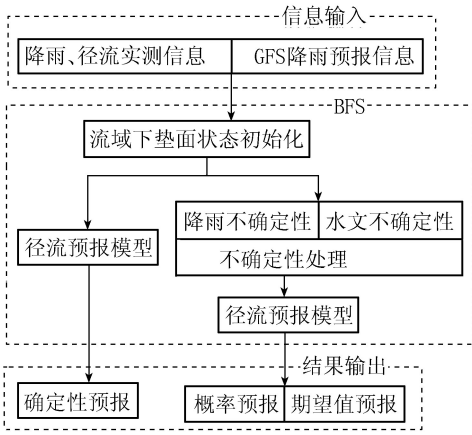


图2 旬径流概率预报模型结构

间的统计概率 $P(H_t | Q_t)$ 称为似然概率,反映了模型结构、参数等不确定性的分布情况。综合先验概率和似然概率,当 t 时段预报径流在 H_t 区间、 $t-1$ 时段实测径流在 Q_{t-1} 区间时, t 时段实际径流发生在 Q_t 区间的后验概率为

$$P(Q_t | H_t, Q_{t-1}) = \frac{P(H_t | Q_t)P(Q_t | Q_{t-1})}{\sum_{Q_t} [P(H_t | Q_t)P(Q_t | Q_{t-1})]} \quad (1)$$

1.3.2 降雨预报不确定性分析

统计 GFS 发布的未来 10 d 降雨量和实测降雨量,并分别表示为 w 和 r 。将降雨量进行等级划分,各等级表示为 R_y (y 为等级数);可得到当预报降雨量 w 为 R_y 时,实际降雨量 r 的概率分布函数为 $f(R_y)$;根据 $f(R_y)$ 可得到不同概率条件 $\{P_h; h=1, 2, \dots, z\}$ 所对应的一组实测降雨量序列 $\{r_{p_1}, r_{p_2}, \dots, r_{p_z}\}$ 。根据 GFS 发布的 10 d 预报降雨量获得预报降雨量条件下,不同概率对应的实测降雨量序列;然后通过所建立的径流预报模型模拟计算获得对应的径流量序列 $\{s_{r_{p_1}}, s_{r_{p_2}}, \dots, s_{r_{p_z}}\}$ 。可通过上述关系计算出当预报径流发生在 H_t 区间的概率:

$$P(H_t | R_y) = p(s_{r_{p_h}}) - p(s_{r_{p_{h+1}}}) \quad (2)$$

$$H_t \in [s_{r_{p_h}}, s_{r_{p_{h+1}}}]$$

1.3.3 不确定性综合

当 $t-1$ 时段实测径流量在 Q_{t-1} 区间时,GFS 预报降雨发生等级为 R_y ,采用全概率公式, t 时段实测径流将发生在区间 Q_t 的概率为

$$P(Q_t | R_y, Q_{t-1}) = \sum_{k=1}^N [P(Q_t | H_t, Q_{t-1})P(H_t | R_y)] \quad (3)$$

式中: k 为 t 时段预报径流发生区间; N 为 t 时段预报径流划分区间数。

1.4 水电站调度优化模型

1.4.1 优化调度模型目标函数

优化调度模型以调度期 1 ~ T 时段内总发电量

期望值最大为目标函数:

$$\max \left\{ \sum_{t=1}^T E[B(K_t, Q_t, L_t)] \right\} \quad (4)$$

$$\text{其中 } B(K_t, Q_t, L_t) = \Delta t \{ b(K_t, Q_t, L_t) - \alpha [\max(e - b(K_t, Q_t, L_t), 0)]^\beta \} \quad (5)$$

式中: K_t 为 t 时段初的库水位; L_t 为 t 时段决策末水位; $E[B(K_t, Q_t, L_t)]$ 为 t 时段期望发电效益函数; $B(K_t, Q_t, L_t)$ 为 t 时段惩罚后的发电量效益函数; $b(K_t, Q_t, L_t)$ 为 t 时段水电站实际发电效益函数,由耗水率、总泄流量计算获得; α 和 β 为惩罚系数; e 为保证出力; Δt 为计算时段长度。

1.4.2 优化调度模型递归函数

建立经典 SDP 模型和 BSDP 模型,它们的径流描述过程分别如图 3(a)(b)所示。

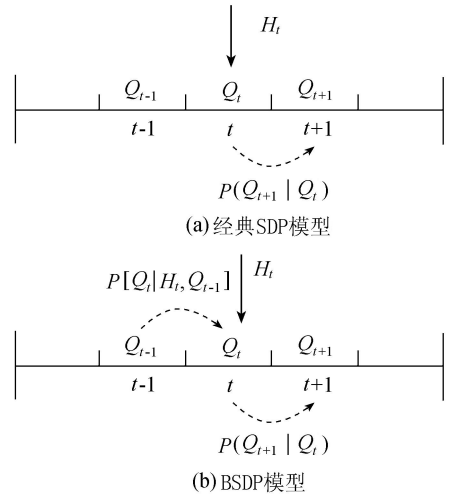


图3 优化调度模型径流描述过程

a. SDP 模型递推方程。SDP 模型的径流描述过程如图 3(a)所示,将预报径流 H_t 视为较准确的情况下水库发电调度优化模型递推方程为

$$f_{\text{opt}}(K_t, H_t) = \max \left\{ B(K_t, H_t, L_t) + \sum_{j=1}^m [P_{t-1,j}(Q_{t+1,j} | H_t) f_{\text{opt}}(L_t, Q_{t+1,j})] \right\} \quad (6)$$

式中: $f_{\text{opt}}(K_t, H_t)$ 为 t 时段初水位 K_t 和预报径流区间 H_t 条件下,优化模型递推方程效益函数; j 为 $t+1$ 时段实测径流发生区间; m 为 $t+1$ 时段实测径流划分区间数。

b. BSDP 模型递推方程。BSDP 模型采用贝叶斯理论描述径流状态转移过程及径流的不确定性,模型径流描述过程如图 3(b)所示,模型递推方程为

$$f_{\text{opt}}(K_t, Q_{t-1}, H_t) = \max \left\{ \sum_{i=1}^n P(Q_{t,i} | Q_{t-1}, H_t) \cdot [B(K_t, Q_{t,i}, L_t) + \sum_{j=1}^m P_{t+1,j}(Q_{t+1,j} | Q_{t,i}) \cdot f_{\text{opt}}(L_t, Q_{t,i}, Q_{t+1,j})] \right\} \quad (7)$$

式中: $f_{\text{opt}}(K_t, Q_{t-1}, H_t)$ 为 t 时段初水位 K_t 、预报径流区间 H_t 和 $t-1$ 时段实测径流区间 Q_{t-1} 条件下, 优化模型递推方程效益函数; i 为 t 时段实测径流发生区间; n 为 t 时段实测径流划分区间数。

1.5 径流预报信息与发电调度的耦合

将 BFS 系统制定的确定性径流预报(确定性预报)、径流区间等级概率预报(概率预报)和径流概率预报期望值(概率预报期望值)分别作为 SDP 和 BSDP 模型径流预报信息输入指导水库发电调度决策。由于 BFS 以径流区间形式发布概率预报信息, 因此当采用概率预报信息作为径流输入信息时, 以发生概率最大的径流区间等级和当前控制水位查调度图得到决策出力。当采用确定性预报和概率预报期望值作为径流输入信息时, 通过预报径流结果和当前水库控制水位查调度图得到决策出力。

2 工程实例

2.1 流域概况

桓仁水库位于东经 $124^{\circ}43'$ ~ $126^{\circ}50'$ 、北纬 $40^{\circ}40'$ ~ $42^{\circ}15'$, 地处浑江中游我国东北暴雨中心北部边缘, 流域面积 10400 km^2 , 流域植被良好, 多年平均年雨量为 860 mm , 70% 的雨集中集中在 6—9 月, 大洪水发生在 7 月下旬至 8 月中旬。

桓仁水库径流过程可分封冻期、融雪期与丰水期 3 个阶段。①封冻期从 11 月至次年 3 月, 期间径流量小且相对稳定, 主要由地下径流补充, 封冻期采用多元线性回归模型进行径流预测。②融雪期从 3 月末至 4 月末(即春汛), 径流受封冻期流域降雪量、温度等因素影响, 往往致使该阶段径流深大于降雨量。在此期间, 采用多元线性回归模型和新安江模型进行径流预报, 处于由多元线性回归模型向新安江模型过渡的阶段。此阶段新安江模型对流域下垫面初值不断校正, 因此径流预报以多元线性回归模型为主。③丰水期从 5 月至 10 月, 径流量主要由降雨产生, 该阶段采用新安江模型进行径流预报。

2.2 径流概率预报

2.2.1 GFS 降雨预报不确定性分析

根据资料收集情况, 利用 2001—2010 年 5—10 月 GFS 每日 8:00 发布的未来 10 d 降雨预报, 并与实际降雨量进行统计分析。根据桓仁水库流域水文特点将 GFS 降雨预报信息分成 3 个阶段进行分析, 即汛前期 5—6 月; 主汛期 7—8 月; 汛后期 9—10 月。将各阶段 GFS 预报降雨量分为 4 级, 等级划分标准如表 1 所示。

对预见期内各预报等级的实际发生降雨量进行统计, 由于各阶段第 4 级的样本较少, 因此将 3 个阶

表 1 GFS 降雨预报等级划分标准

阶段	降雨量/mm			
	1 级	2 级	3 级	4 级
5—6 月	[0, 20)	[20, 50)	[50, 90)	≥ 90
7—8 月	[0, 25)	[25, 80)	[80, 140)	≥ 140
9—10 月	[0, 5)	[5, 25)	[25, 55)	≥ 55

段的第 4 级进行合并。通过 Kolmogorov 检验法以给定显著性水平 $\alpha=0.05$ 时对各阶段各预报等级条件下实际降雨量的分布进行非参数假设检验, 得出 5—6 月、7—8 月的第 3 级与合并后的第 4 级均满足 $0 \leq x$ 的正态分布; 其余等级均满足 P-III 型分布, 各等级实际降雨概率分布类型及参数见表 2。

表 2 各等级实际降雨概率分布类型及参数

阶段	等级	P-III 型分布			正态分布	
		期望值	变差系数	偏态系数	期望值	方差
5—6 月	1	21.2	0.90	1.90		
	2	36.7	0.72	1.44		
	3				59.4	32
7—8 月	1	29.6	1.2	2.40		
	2	60.2	0.8	1.60		
	3				94.8	39
9—10 月	1	8.6	1.16	2.50		
	2	17.4	1.00	2.10		
	3	25.9	0.81	1.80		
5—10 月	4				78.4	45

2.2.2 水文模型不确定性分析

采用马尔柯夫链过程来描述 $t-1$ 时段径流量与 t 时段径流量的关系, 采用径流先验概率 $P_{i,j}$ 来描述径流的不确定性, 表示 $t-1$ 时段实测径流量 Q_{t-1} 在区间 i , t 时段实测径流量 Q_t 发生在区间 j 的概率。由于只有 1968—2000 年历史实测径流资料, 计算得到的径流状态转移概率偶然性较大, 因此, 基于 1968—2000 年历史实测径流的统计规律, 采用季节性自回归模型得到 1 000 年模拟径流过程, 并将各旬径流划分为 4 个等级, 计算径流状态转移概率矩阵, 图 4 为 7 月下旬各实测径流等级条件下, 8 月上旬实测径流发生在各等级的转移概率矩阵。

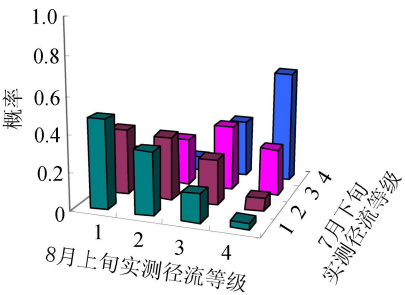


图 4 7 月下旬至 8 月上旬实测径流状态转移概率矩阵

利用实测降雨资料模拟径流与实测径流的差异反映了水文模型结构、参数和流域下垫面情况估计

等因素的不确定性,其概率矩阵即为似然概率矩阵,表示 t 时段径流预报 H_t 在区间 k 时,实测径流 Q_t 发生在区间 j 的概率。采用 1968—2000 年实测降雨模拟径流与实测径流建立似然概率矩阵,图 5 为 8 月上旬各径流预报等级条件下,实测径流发生的似然概率矩阵。

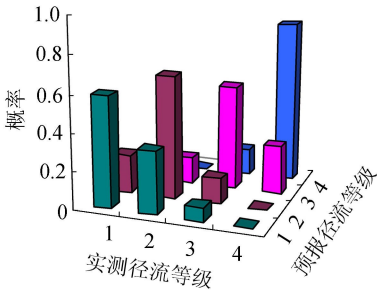


图5 8月上旬预报径流区间的似然概率矩阵

在径流预报的不同时期,根据 $t-1$ 时段实测径流等级和 t 时段预报径流等级,使用公式(1)可更新该时段后验概率,图 6 为 8 月上旬的后验概率矩阵。

2.2.3 旬径流概率预报

利用 BFS 综合考虑 GFS 降雨预报和径流预报模型的不确定性,发布旬确定性径流预报和考虑不确定性的概率预报和径流期望值,表 3 为 2010 年发布的丰水期各旬概率预报的解析解。

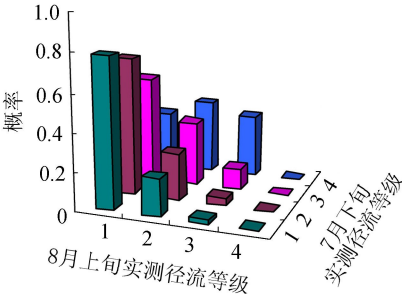
根据 SL250—2000《水文情报预报规范》规定径流中长期预报误差以多年变幅的 20% 作为评定标准。2001—2010 年丰水期 5—10 月旬径流预报期望值与确定性预报的合格率统计结果见表 4。

表 3 2010 年丰水期径流预报等级发生概率分布

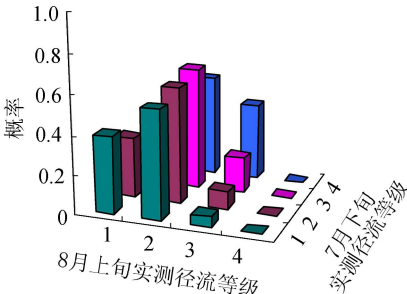
时间	预报等级发生概率/%				实测等级
	1 级	2 级	3 级	4 级	
5 月上旬	0	6	35	59	4 级
5 月中旬	5	5	39	51	4 级
5 月下旬	0	4	37	59	3 级
6 月上旬	0	5	57	38	3 级
6 月中旬	6	22	25	47	3 级
6 月下旬	40	41	15	4	2 级
7 月上旬	80	18	2	0	1 级
7 月中旬	69	19	2	10	2 级
7 月下旬	4	35	56	5	3 级
8 月上旬	5	25	39	31	4 级
8 月中旬	0	0	18	82	4 级
8 月下旬	0	0	31	69	4 级
9 月上旬	0	3	10	87	4 级
9 月中旬	0	3	5	92	4 级
9 月下旬	0	0	15	85	4 级
10 月上旬	13	31	33	23	2 级
10 月中旬	0	0	13	87	4 级
10 月下旬	0	0	19	81	4 级

表 4 径流概率预报期望值和确定性预报合格率

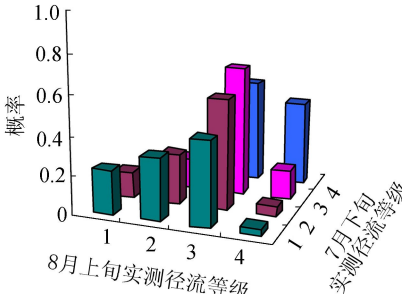
时间	合格率/%		时间	合格率/%	
	预报期望值	确定性预报		预报期望值	确定性预报
5 月上旬	70	70	8 月上旬	90	100
5 月中旬	70	70	8 月中旬	80	70
5 月下旬	60	80	8 月下旬	90	90
6 月上旬	80	70	9 月上旬	80	90
6 月中旬	80	70	9 月中旬	90	90
6 月下旬	80	80	9 月下旬	70	80
7 月上旬	60	50	10 月上旬	90	90
7 月中旬	70	50	10 月中旬	100	90
7 月下旬	80	80	10 月下旬	90	100



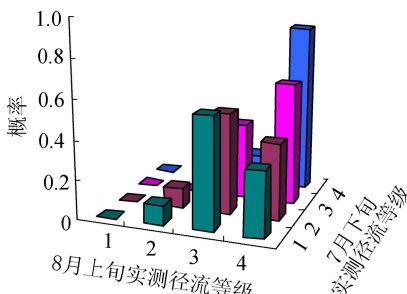
(a) 预报径流1级



(b) 预报径流2级



(c) 预报径流3级



(d) 预报径流4级

图 6 8 月上旬的后验概率矩阵

2.3 水电站发电调度模拟

2.3.1 优化调度决策图

分别采用 SDP 和 BSDP 模型制定水库发电调度图。图 7 为 8 月上旬基于 SDP 模型优化制定的桓仁水库发电优化出力图,其中 a 表示 8 月上旬预报径流量等级。图 8 为 8 月上旬基于 BSDP 模型优化制定的发电优化出力图,其中 b 表示 7 月下旬实测径流量发生等级。根据上月实测径流量等级、本旬预报径流量等级和当前水库控制水位查图 8 可获得水库 8 月上旬决策出力。

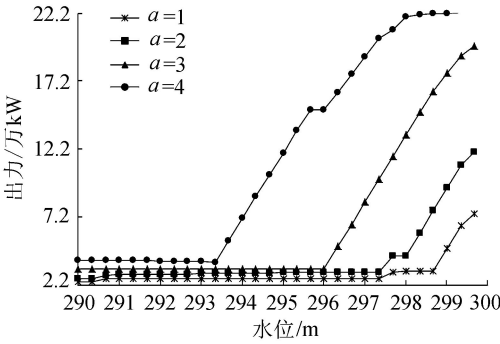


图 7 基于 SDP 模型的 8 月上旬桓仁水库发电优化出力

2.3.2 水电站发电调度模拟

以确定性动态规划 (dynamic programming, DP) 模型推求的 2001—2010 年发电调度过程作为理想决策过程,以 SDP 和 BSDP 模型制定的发电优化调

度图为基础,采用 BFS 发布的确定性预报、概率预报和概率预报期望值作为径流信息输入,模拟决策水库 2001—2010 年发电调度过程。采用年平均发电量、纳什系数以及决策出力满足系统出力的可能性作为评价指标^[24-25],纳什系数用于评价各方案模拟的决策过程与理想决策的贴近程度,各方案模拟调度评价指标统计结果见表 5。

表 5 不同模型方案发电调度模拟计算结果

方案	模型	径流信息	年平均发电量/ (10 ⁶ kW · h)	发电保 证率/%	纳什 系数/%
1	DP	实测	450.15	87	100
2	SDP	实测	443.60	87	93
3	BSDP	实测	444.53	87	94
4	SDP	确定性预报	411.78	75	72
5	SDP	概率预报	423.40	84	89
6	SDP	概率预报期望值	426.35	85	89
7	BSDP	确定性预报	418.20	82	86
8	BSDP	概率预报	422.03	84	89
9	BSDP	概率预报期望值	424.03	84	89

方案 2、3 的发电量都低于方案 1,结果是合理的,这是因为方案 2、3 只利用了下一个时段的实测径流信息,而方案 1 利用了当前时段以后所有的实测径流信息。比较方案 4 和 7 可知,在确定性预报信息条件下,BSDP 模型优于 SDP 模型,这是由于 SDP 模型只采用马尔科夫链描述径流状态转移,而 BSDP 模型采用贝叶斯理论同时描述了径流状态转

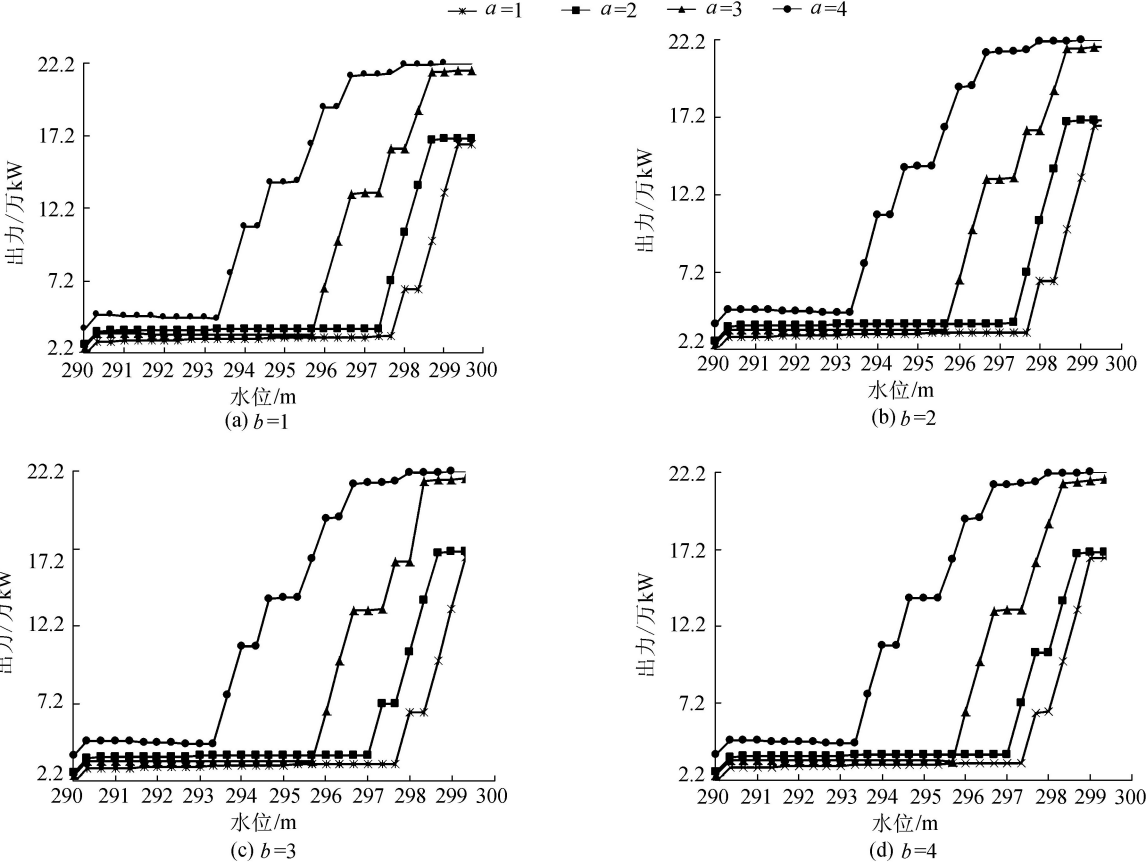


图 8 基于 BSDP 模型的 8 月上旬桓仁水库发电优化出力

移和径流预报不确定性,因此在决策中直接使用确定性预报信息时,BSDP 模型比 SDP 模型具有更强的抗不确定性。

比较方案 5、6、8、9 可知,SDP 模型和 BSDP 模型中利用概率预报信息(概率预报值或概率预报期望值)来决策发电调度,模拟调度评价指标接近,这是由于这 4 个方案都充分考虑了径流的不确定信息,也说明将径流不确定性描述与优化调度模型相分离是可行的。

3 结 语

本文采用 BFS 分别与 SDP 模型和 BSDP 模型相耦合的方法来提高水库的发电效益。由于 BFS 考虑了降雨信息、模型及径流本身的不确定性,其预报结果与确定性预报径流相比有校正效果,所以在概率预报信息条件下 SDP 模型和 BSDP 模型效率相近,说明所建模型和耦合方法是可行的,且此时 SDP 模型比 BSDP 模型计算量更少,更简洁易懂,独立的 SDP 模型和 BFS 系统具有更强的模块化。

参考文献:

[1] DUTTA B, Houck M H. A stochastic optimization model for real-time operation of reservoirs using uncertain forecasts[J]. Water Resource Research 1984, 20(8): 1039-1046.

[2] DUTTA B, BURGESS J. Short-term, single, multiple purpose reservoir operation: importance of loss function and forecast errors[J]. Water Resource Research, 1984, 20(9): 1167-1176.

[3] STEDINGER J R, SULE B F, LOUCKS D P. Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization[J]. Water Resources Research, 1984, 20(11): 1499-1505.

[4] ROULIN E, VANNITSEM S. Skill of medium-range hydrological ensemble predictions [J]. Journal of Hydrometeorology, 2005, 6(5): 729-744.

[5] MASCARO G, VIVONI E, DEIDDA R. Implications of ensemble quantitative precipitation forecast errors on distributed streamflow forecasting [J]. Journal of Hydrometeorology, 2010, 11(1): 69-86.

[6] KARAMOZ M. Forecast uncertainty in reservoir operation[C]//Proceedings of the 15th Annual Water Resources Conference, Critical Water Issues and Computer Applications. New York: ASCE, 1988.

[7] KARAMOZ M. Bayesian decision theory and fuzzy sets theory in systems operation[C]//Proceedings of the 17th Annual Water Resources Conference, Optimizing the Resources for Water Management. New York: ASCE, 1990.

[8] KARAMOZ M, VASILADIS H V. Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts[J]. Water Resource Research, 1992, 28(5): 1221-1232.

[9] KIM Y O, PALMER R N. Value of seasonal flow forecasts in bayesian stochastic programming[J]. Water Resources Planning and Management, 1997, 123(6): 327-335.

[10] MUJUMDAR P P, NIRMALA B. A bayesian stochastic optimization model for a multi-reservoir hydropower system [J] Water Resour Manage, 2007, 21: 1465-1485.

[11] 周惠成, 王峰, 唐国磊, 等. 二滩水电站水库径流描述与优化调度模型研究[J]. 水力发电学报, 2009, 28(1): 18-23. (ZHOU Huicheng, WANG Feng, TANG Guolei, et al. Study on the runoff description and optimal operation models for Ertan hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28(1): 18-23. (in Chinese))

[12] 唐国磊, 周惠成, 李宁宁, 等. 一种考虑径流预报及其不确定性的水库优化调度模型[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 641-647. (TANG Guolei, ZHOU Huicheng, LI N, et al. Optimal operation model for hydropower station considering the inflow forecast and uncertainty[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 641-647. (in Chinese))

[13] 徐炜, 张弛, 彭勇, 等. 基于降雨预报信息的梯级水电站不确定优化调度研究 I: 聚合分解降维[J]. 水利学报, 2013, 44(8): 42-51. (XU Wei, ZHANG Chi, PENG Yong, et al. Stochastic optimization operation for cascade hydropower reservoirs by using precipitation forecasts I. Using aggregation-decomposition methodology to reduce high computational costs [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 42-51. (in Chinese))

[14] 徐炜, 彭勇, 张弛, 等. 基于降雨预报信息的梯级水电站不确定优化调度研究 II: 耦合短、中期预报信息[J]. 水利学报, 2013, 44(10): 1189-1196. (XU Wei, PENG Yong, ZHANG Chi, et al. Stochastic optimization operation for cascade hydropower reservoirs by using precipitation forecasts ii-coupling short and medium-term information [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(8): 42-51. (in Chinese))

[15] TANG G L, ZHOU H C, LI N, et al. Value of medium-range precipitation forecasts in inflow prediction and hydropower optimization[J]. Water Resour Manage, 2010, 24: 2721-2742.

[16] KRZYSZTOFOWICZ R. Bayesian model of forecasted time series[J]. Water Resource Research, 1985, 21(5): 805-814.

[17] KRZYSZTOFOWICZ R, KELLY K S. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic river stage forecasting[J]. Water Resource Research, 2000, 36(11): 3265-3277.

(下转第 56 页)

参考文献:

[1] KAHL T, RUELL S. Flashboard alternatives including rubber dams [C]//Proceedings of Waterpower, Niagara Falls. New York: [s. n.], 1989: 447-456.

[2] PLAUT R H, LIAPIS S I, TELIONIS D P. When the levee inflates [J]. Civil Engineering, 1998, 68 (1): 62-64.

[3] CONRAD D A, MULDOON D P. Design and application of a PC/PLC utility rubber dam control system [J]. Instrument Society of America. 1995, 6: 351-362.

[4] 田忠禄. 具有决策支持系统的枢纽橡胶坝安全运行管理自动化系统研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2008, 6 (1): 56-59. (TIAN Zhonglu. Study on the automation system for safe operation and management of rubber dams with decision supporting system [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2008, 6 (1): 56-59. (in Chinese))

[5] ZHANG X Q, TAM P W M, ZHENG W. Construction, operation, and maintenance of rubber dams [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2002, 29 (3): 409-420.

[6] TAM P W M, ZHANG X Q. Management of rubber dams in Hong Kong [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 1999, 26 (2): 123-134.

[7] 徐智廷, 孙廷玺, 张世功, 等. 沂河梯级橡胶坝汛期调度运用原则探讨 [J]. 中国水利, 2008 (19): 61-62. (XU Zhiting, SUN Tingxi, ZHANG Shigong, et al. Regulation of cascade rubber dams in Yihe River Basin [J]. China Water Resources, 2008 (19): 61-62. (in Chinese))

[8] 李风增. 胶南市风河梯级橡胶坝综合管理与运用 [J]. 中国水利, 2007 (16): 17. (LI Fengzeng. Integrated management and application of cascade rubber dams on Feng River of Jiaonan [J]. China Water Resources, 2007 (16): 17. (in Chinese))

[9] 吴军华, 孟红军. 安阳市洹河梯级橡胶坝联合运行探讨 [J]. 河南水利与南水北调, 2010 (4): 31-32. (WU Junhua, MENG Hongjun. Integrated operation of step rubber dams on Huanhe River in Anyang City [J]. Henan Water Resources & South to North Water Diversion, 2010 (4): 31-32. (in Chinese))

[10] 张世功, 孙廷玺, 段伟华, 等. 沂河梯级橡胶坝调度运用实况对洪水影响分析 [J]. 治淮, 2010 (5): 15-17. (ZHANG Shigong, SUN Tingxi, DUAN Weihua, et al. Analysis of Yihe cascade rubber dams operation and control impact on flood [J]. Huaihe Management, 2010 (5): 15-17. (in Chinese))

[11] 温会军. 辽河干流橡胶坝联合调度方案编制方法 [J]. 现代农业科技, 2012 (9): 274-276. (WEN Huijun. Rubber dam joint operation scheme established method of Liaohe River [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2012 (9): 274-276. (in Chinese))

[12] 陈瑞. 对橡胶坝流量系数的探索 [J]. 水利学报, 1987 (6): 36-39. (CHEN Rui. Research on flow coefficient of rubber dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1987 (6): 36-39. (in Chinese))

[13] 苑希民, 林继镰. 溢流橡胶坝泄流特性试验 [J]. 天津大学学报, 1996, 29 (3): 342-348. (YUAN Ximin, LIN Jilian. Rubber dam fall discharge characteristic test [J]. Journal of Tianjin University, 1996, 29 (3): 342-348. (in Chinese))

[14] ZHANG Qinghua, DIAO Yanfang. Cascade rubber dams fall discharge calculation and analysis [J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2011, 38 (8): 957-962. (收稿日期: 2013-07-01 编辑: 周红梅)

+++++

(上接第 45 页)

[18] KRZYSZTOFOWICZ R, HERR H D. Hydrologic uncertainty for probabilistic river stage forecasting: precipitation-dependent model [J]. Journal of Hydrology, 2001, 249 (1/2/3/4): 46-68.

[19] KRZYSZTOFOWICZ R, MARANZANO C J. Hydrologic uncertainty processor for probabilistic stage transition forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2004, 293 (1/2/3/4), : 57-73.

[20] KRZYSZTOFOWICZ R, MARANZANO C J. Bayesian system for probabilistic stage transition forecasting [J]. Journal of Hydrology, 2004, 299 (1/2): 15-44.

[21] 梁国华, 王国利, 王本德, 等. 大伙房跨流域引水工程预报调度方式研究 [J]. 水力发电学报, 2009, 28 (3): 32-36. (LIANG Guohua, WANG Guoli, WANG Bende, et al. Study on forecast based operation mode for Dahuofang inter-basin water transfer project [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 28 (3): 32-36. (in Chinese))

[22] 梁国华, 习树峰, 王本德, 等. 基于 BP 神经网络的旬降雨径流相关预报模型 [J]. 水力发电, 2009, 35 (8): 10-12. (LIANG Guohua, XI Shufeng, WANG Bende, et al. Ten-day correlation forecast model of rainfall and runoff based on BP neural network [J]. Water Power, 2009. 35 (8): 10-12. (in Chinese))

[23] 詹道江, 叶守泽. 工程水文学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.

[24] HASHIMOTO T, STEDINGER J R, LOUCKS D P. Reliability, resiliency and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation [J]. Water Resource Research, 1982, 18 (1): 14-20.

[25] SURESH K R. Modeling for irrigation reservoir operation [D]. Bangalore, India: Indian Institute of Science, 2002. (收稿日期: 2013-12-31 编辑: 周红梅)