

基于动库容曲线的水库调洪高水位查算方法研究

张俊¹, 闵要武¹, 陈力¹, 鲍正风², 陈璐³

(1.长江水利委员会水文局, 湖北 武汉 430010; 2.三峡水利枢纽梯级调度通信中心, 湖北 宜昌 443133;
3.华中科技大学水电与数字化工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要:河道型水库因动库容特性显著,传统的静库容调洪方法难以适用,研究动库容调洪方法是亟待解决的问题。当坝前水位爬升到最高点时,库区内的洪水演进到达一种临界状态,库区内的水文、水力条件相对稳定,在出库流量和入库流量一定的情况下,可望获得最高坝前水位与同时刻库容之间良好的对应关系。依托三峡库区水文水动力耦合预报模型,建立了一组以出库流量、入库流量为参数的动库容曲线,以供调洪时快速查算最高坝前水位。采用2009年以来三峡水库16场场次洪水资料,检验所建动库容曲线的合理性。结果表明,各场洪水的最高库水位查算值与实况平均偏差仅0.20m,证明建立的基于动库容曲线的三峡水库最高库水位查算方法具有较好的实践价值。

关键词:动库容;库容曲线;最高库水位;调洪计算;三峡水库

中图分类号:TV697.11

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)05-0063-06

水库库容定义为最远回水断面至坝前的总蓄水量,是指库区内真实水面线与库区河床之间的蓄水容积,一般可分为坝前水位水平延长线以下的静库容和水库实际水面线与坝前水位水平延长线间的楔形库容(亦称动库容)两部分。对于河道型水库,楔形库容对库区水面线及洪水演进影响较大,传统的静库容调洪方法难以适用,动库容调洪计算方法因考虑静库容与楔形库容对洪水的共同调节作用,可为水库防洪调度提供更有力的技术支撑^[1]。

在进行水库动库容调洪计算时,常应用圣维南方程组来描述库区水流运动规律^[2],圣维南方程组属于拟线性变系数双曲型偏微分方程组,目前尚无法直接求其准确解。实际运用中主要采用两种途径近似求解:

(1)水文学方法。将圣维南方程组简化为水量平衡方程与河段槽蓄的关系后进行调洪计算,目前国内应用较多的虚拟入库点法。该法概念清晰,计算简便,但推求的入库点因来水和库水位等条件的不同而变动,难以准确定位,且在条件突变时容易出现水量不平衡现象。

(2)水动力学方法。用差分法直接求圣维南方程

组的近似数值解^[3-5],该法能较好地反映水库库区水流的非恒定流特性,亦能得出库区水面线变化过程,但其对基础资料要求较高。

三峡水库在175m蓄水水位下,回水长度约 60×10^4 m,平均库宽仅约1.6km,属于典型的河道型水库,动库容影响不容忽视,给水库防洪调度和水资源综合利用决策带来不利影响,研究动库容条件下的调洪方法是三峡水库实现科学化、精细化调度亟待解决的关键技术之一。为考虑三峡水库动库容影响显著的特性,长江委水文局建立了以水力学模型为主要手段的调洪工具^[6]。三峡水库蓄水运用以来的预报调度实践表明,该工具具有良好的调洪精度,但其在近坝区强降雨情况时精度有所欠缺,实时校正可能导致较大误差,另外对计算环境要求高、计算速度偏慢也是制约其应用的不利因素。鉴于最高调洪水位在调度决策中的重要性,本文尝试建立一种基于动库容曲线的水库调洪高水位快速查算方法,研究成果可作为水力学模型调洪的参考,两者配合使用,有望弥补水力学模型在实时计算中的速度瓶颈和近坝区强降雨情况实时校正计算可能带来的不确定性问题。

收稿日期:2015-09-12

基金项目:三峡科学调度关键技术研究项目(241202005)

作者简介:张俊(1982-),男(侗),湖南会同人,高级工程师,博士,主要从事长江流域预报调度分析工作。E-mail: zhangjun@cjh.com.cn

1 基本原理

水库动库容的大小,取决于库区水面线的形状^[7],主要受到坝前水位高低、入库流量和出库流量大小的影响。因此,将水库入流、出流作为参数,建立基于库容影响因子的动库容曲线,进而把单一静库容曲线改为一组动库容曲线,依照水量平衡原理,通过蓄泄关系的转换,即可实现考虑动库容条件下的调洪演算,若将计算时段拉长为预报时刻至最高库水位出现时刻的一个总时段,即可实现动库容影响条件下的最高库水位简化查算,避免了调洪过程中库容曲线跳线可能造成的水量平衡误差。

在水库的实际运行调度中,来水组成复杂,机组负荷和泄流建筑物工况改变频繁,导致出库流量亦不断变化,坝前水位多数时段处于不稳定状态,使得入库流量在库区内的演进条件千差万别,非恒定流特性显著,如果选取洪水演进过程中的所有样本建立动库容曲线,则无法量化坝前水位、入库流量、出库流量与总库容之间的一一对应关系,难以归纳出具有一定规律的动库容曲线。而在每场洪水中,当坝前水位达到最高时,库区内的洪水演进到达一种临界稳定状态,库区水面线在此刻也相对固定,库区内的水文、水力条件相对稳定。因此,在出库流量和入库流量一定的情况下,可望获得坝前调洪高水位与同时刻总库容之间良好的对应关系,进而得到较好的动库容曲线。

构建动库容曲线依赖有代表性的样本,视样本数据是否丰富可分两种方法进行:天然系列足够时,依据历史资料筛选出最高调洪水位的样本,直接建立动库容曲线;若资料系列不够,则可以依赖经过验证的水文水力学模型,通过模拟调洪计算增加样本,首先假定不同的入库来水过程,分别设定不同的出库流量过程方案,利用水力学模型进行调洪计算,计算需保证坝前最高水位出现在设定出库流量级 $Q_{出}$ 所属的时间范围内,否则重新调整出库方案进行试算直至达到要求。

通过上述方法得到调洪的坝前最高水位 Z_{max} 对应时刻的库区干流各站水位 z_i ,由分段库容曲线计算出分段蓄水量 Δv_i ,求和即得到总库容 $V_{总}$:

$$V_{总} = \sum_{i=1}^n \Delta v_i = \sum_{i=1}^n f_i(z_i) \left(\frac{z_i + z_{i+1}}{2} \right) \quad (1)$$

式中: n 为库区干流分段数。

根据流量叠加法,即入库站来水错时合成叠加区间来水计算得到入库流量 $Q_{入}$:

$$Q_{入,t} = Q_{入库站1,t-\tau_1} + Q_{入库站2,t-\tau_2} + q_{区间,t} \quad (2)$$

式中: τ_1 、 τ_2 分别为入库站1和入库站2到水库入库点的传播时间。

$V_{总}$ 、 $Q_{入}$ 、 $Q_{出}$ 和 Z_{max} 构成动库容曲线上的一个离散点据,对全部样本点进行相关图建模,可得到水库入、出库流量为参数的动库容曲线形式为:

$$V_{总} = f(Z_{max}, Q_{入}, Q_{出}) \quad (3)$$

在实际应用中,为考虑使用方便,将其制作成多簇动库容曲线组(共 m 组),即每一级出库流量 $Q_{出,m}$ 对应一组以入库流量为参数的动库容曲线,形式为:

$$V_{总,m} = f_m(Z_{max}, Q_{入}) \quad (4)$$

2 动库容曲线制作及结果分析

2.1 水文水动力耦合预报模型

本研究采用松散耦合方式构建三峡库区的水文水动力耦合预报模型,包括入库站来水校正、区间水文模拟和洪水演进模拟3个部分,各部分的计算过程相对独立,相互之间仅通过节点进行数据交换。其中,入库站来水校正通过建立合成流量法、水位流量关系转换模型和经验绳套法等实现将入库站的报讯流量系列进行实时校正,为三峡水库提供较准确的入库来水边界;区间水文模拟部分是应用合适的水文模型模拟三峡区间的产、汇流过程,研究将三峡区间划分为46个子分区,每个分区配置新安江、NAM、API等3种水文模型,以多模型综合后的人工交互结果作为每个分区的出口预报流量,以供洪水演进作为边界输入;洪水演进模拟部分是采用基于圣维南方程组的水动力学方法,进行三峡库区干流河道的洪水演进模拟,本研究中一维水动力学模型基于丹麦MIKE 11进行构建^[8],入库站来水和区间来水预报以点源、线源等方式分别输入给水动力学模型,通过边界条件、河道水流、支流水量交换和区域连接关系的模拟,实现水文模型与水动力学模型的耦合,形成三峡水库预报调度一体化模型,如图1所示。该模型可计算三峡库区任意时段各断面的水位及流量,并可根据水库不同工况和入库站来水等灵活设置边界条件,计算分析不同条件下库区的洪水演进情况。

收集2010~2013年汛期水雨情数据,应用建立的三峡水库预报调度模型逐日进行2d预见期来水的调洪演算,对坝前水位模拟的绝对误差进行保证率 $(1-P_{经验})$ 统计分析,结果见表1。由表1可知,各年汛期6h、12h、24h、36h、48h预见期的综合平均模拟误

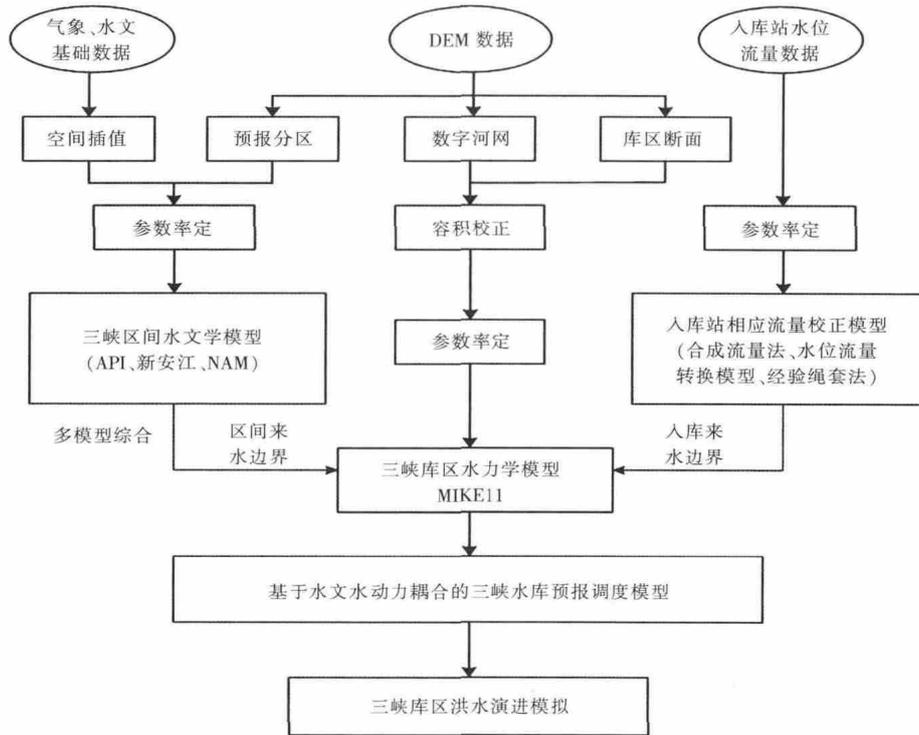


图1 基于水文水动力耦合的三峡水库预报调度模型

Fig.1 The hydrological model coupled with hydro-dynamic model for flood forecasting of TGR

差分别为 0.05m、0.08m、0.11m、0.15m、0.19m,90%保证率误差为 0.12m、0.17m、0.23m、0.33m、0.43m。可见,建立的三峡水库预报调度模型计算精度良好,可以反映三峡库区受动库容影响的洪水演进规律,能满足调洪演算要求。

应用该模型对较大流量级 30 000~70 000m³/s,假定不同入出库流量进行模拟调洪演算,提取演算结果中的最高库水位数据作为率定样本点,为制图定线提供依据。

2.2 入库来水方案设计

按静库容调洪原理,一次调洪过程中的最高库水位一般出现在退水段的入库流量与出库流量相等时刻,但考虑到动库容的影响,传统意义的入库流量与出库流量、坝前水位并不存在一一对应关系,调洪高水位一般出现在退水段的入库流量与出库流量相等时刻附近,即此刻的入库流量可能略大于、小于或等于出库流量。为便于分析这种关系,并丰富率定期样本数据,本研究设计了三种入库过程(均以“2012·7·24”三峡水库建库后最大入库洪峰过程为基础蓝本)用于调洪计算,入库流量涵盖 10 000~75 000m³/s 的中小洪水量级,涨水面相同,主要反映退水过程的差异,如图 2 所示。

2.3 成果分析

根据上述入库来水方案,设定不同出库流量级

表1 三峡水库预报调度模型模拟误差统计

Table1 The simulation errors of the flood forecasting and operation model for TGR

保证率	预见期内模拟误差/m				
	6h	12h	24h	36h	48h
平均	0.05	0.08	0.11	0.15	0.19
50%	0.04	0.05	0.07	0.10	0.12
80%	0.08	0.12	0.15	0.22	0.26
85%	0.10	0.13	0.18	0.26	0.33
90%	0.12	0.17	0.23	0.33	0.43
95%	0.17	0.23	0.34	0.50	0.62

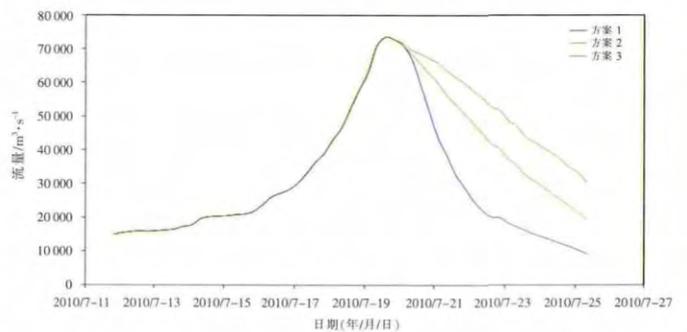


图2 入库流量方案设计

Fig.2 The design of the inflow scheme

别,采用预报调度模型按前述原理进行调洪计算,并收集样本点据,进行相关图建模^[9],得到三峡水库动库容曲线的成果,如图3~4所示,其中图3给出的是考虑以入库流量为参数的动库容曲线(作为调洪最高库水位的主要查算工具使用),图4绘制的是无入库流量区别的三峡水库动库容曲线(可用于忽略入库流量影响的

最高库水位查算,亦可尝试用于过程调洪计算)。

由图3分析可知:当出库流量一定时,入库流量增加,库容曲线右移,即同一水位下,入库流量增加,对应的总库容亦增大;若不考虑入库流量,当出库流量增加时,库容曲线呈右移趋势,即同一水位下,出库流量增加,对应的总库容亦增大,且当坝前水位越高

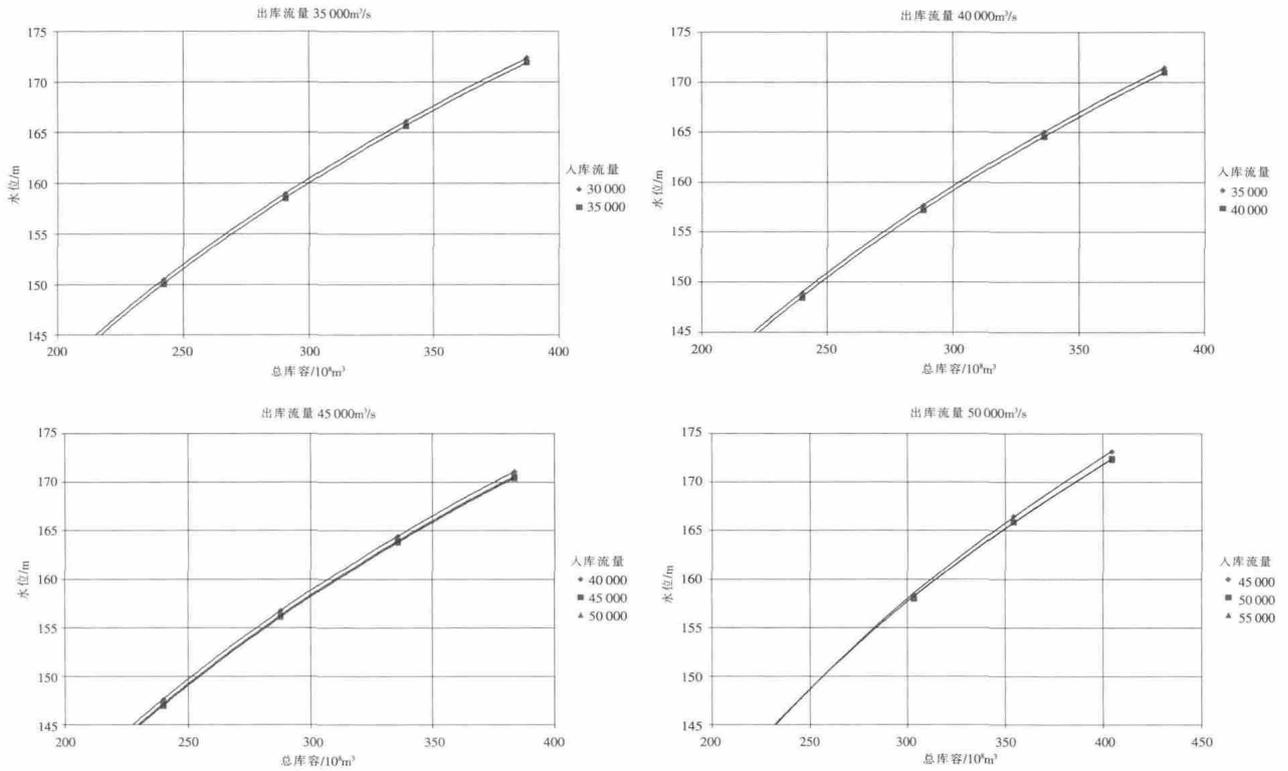


图3 以入库流量为参数的三峡水库动库容曲线

Fig.3 The dynamic reservoir capacity curves with inflow as parameters

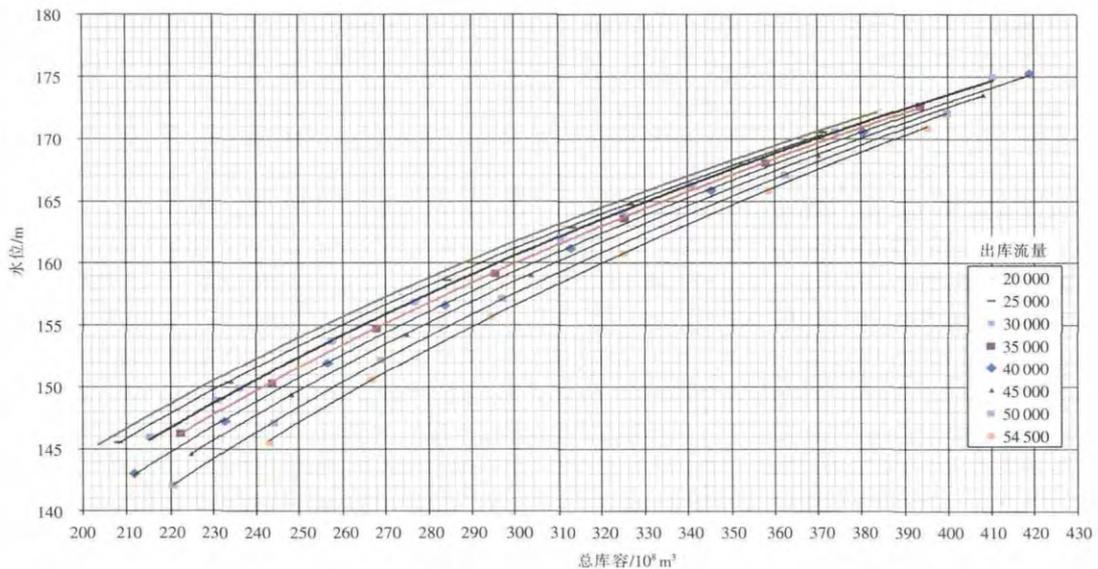


图4 无入库流量参数的三峡水库动库容曲线

Fig.4 The dynamic reservoir capacity curves without the discharge as the parameters

时,总库容量随出库流量增加的增幅越小。

2.4 动库容曲线使用方法

本研究制作的三峡水库动库容曲线,主要用于次洪过程最高库水位的查算,具体使用步骤如下:

(1)将一次洪水过程总体考虑,在已知未来预报入库流量过程和预见期内三峡水库出库计划的前提下,预判出现最高库水位的时间 t_{max} ,由此得到 $Q_{出,max}$;

(2)由分段库容曲线求得预报时刻 $t_{预}$ 的总库容 V_1 ($V_1 = \sum_{i=1}^n \Delta V_i$),并由水量平衡原理计算得到 t_{max} 至 $t_{预}$ 的库容变化量 ΔV ,进而得到 t_{max} 时刻总库容 $V_2(V_2 = V_1 + \Delta V)$;

(3)根据预见期内出库流量过程以及入库来水的组成,凭人工经验得到 $Q_{入,max}$,若为无入库区别的动库容曲线,该步骤可省略;

(4)根据 V_2 、 $Q_{入,max}$ (或无)、 $Q_{出,max}$ 直接查算动库容曲线即得到此次洪水过程的最高库水位值。

3 成果检验

分析 2009 年以来三峡水库发生的 16 场较大场次洪水资料,收集每场洪水最高库水位时的相关数据,为建立的动库容曲线查算最高坝前水位法提供检验样本,其中入库流量、出库流量、最高库水位均为三峡梯调通信中心报讯数据,实况总库容为根据最高库水位出现时刻的库区干流水位站监测水位数据,查算分段库容曲线累加所得。由各场洪水的最高库水位时刻总

库容及同时的入库流量、出库流量,分别查算上述建立的动库容曲线,得到相应的最高库水位查算值,其与实况最高库水位的误差统计结果列于表 2。

由表 2 可知:各场洪水的最高库水位查算值大多高于实况值,偏差幅度在 -0.40~0.61m 之间,平均偏差 0.20m 左右,说明本研究基于动库容曲线的三峡水库最高库水位查算方法具有较好的实践价值,可为 MIKE11 水力学模型实时计算校正提供良好的参考作用。

从最高库水位的查算值和实况值的比较分析可知,在使用动库容曲线成果时存在查算值略偏大的系统误差,分析可能由以下两个方面的因素导致:(1)三峡水库预报调度模型在建立之初,就存在对三峡库区复杂水文水力条件的概化,使得模型结构本身存在不确定性,且在参数率定时,考虑的是多场洪水的综合检验效果,确定的“最优”参数在面临不同条件洪水时,难免出现模拟计算误差;(2)在计算各场洪水最高库水位对应总库容时,库区各水位站水位监测数据均采用三峡梯调报讯站数据,因其数据维护工作欠缺原因可能导致部分水位实况数据失真,从而导致计算的实况总库容值本身存在误差。

4 结论

本研究基于河道型水库次洪过程中坝前水位最高时库区内的洪水演进到达一种临界稳定状态的假定,以基于水文水动力学耦合的三峡水库预报调度模

表 2 三峡水库动库容曲线检验成果

Table 2 The test results of dynamic reservoir capacity curves for TGR

时间	出库流量 /m ³ ·s ⁻¹	入库流量 /m ³ ·s ⁻¹	实况总库容 /10 ⁸ m ³	最高库水位 /m	查算最高库水位 /m	误差 /m
2009/8/8 14:00	37 600	35 500	262.17	152.89	153.3	0.41
2010/6/27 8:00	18 000	18 700	225.77	149.83	149.9	0.07
2010/7/15 14:00	27 100	27 000	231.32	149.63	149.4	-0.23
2010/7/23 10:00	34 100	35 500	293.28	158.86	158.9	0.04
2010/7/30 0:00	40 000	37 000	308.42	160.22	160.5	0.28
2010/7/31 14:00	25 400	25 000	300.44	161.01	161	-0.01
2010/9/10 20:00	25 200	32 000	306.77	161.72	161.9	0.18
2010/9/16 2:00	20 900	20 000	311.54	162.94	162.9	-0.04
2011/6/26 8:00	27 700	25 500	232.09	149.8	149.4	-0.4
2011/8/8 20:00	26 800	24 000	254.65	153.84	153.6	-0.24
2011/9/23 8:00	20 000	20 000	348.33	167.98	167.9	-0.08
2012/7/8 14:00	42 000	38 000	263.83	152.61	152.8	0.19
2012/7/16 2:00	27 500	28 800	288.21	158.88	158.9	0.02
2012/7/27 8:00	42 600	43 000	332.76	163.09	163.7	0.61
2012/9/6 8:00	25 500	26 500	295.36	160.12	160.2	0.08
2013/7/27 14:00	24 600	27 500	269.35	155.94	156.3	0.36
平均						0.20

型为工具,建立不同出库流量条件下,以入库流量为参数的动库容曲线组(总库容与最高坝前水位相关关系),以供调洪时根据初始条件和入出库流量的预知信息查算坝前调洪高水位。利用2009年以来三峡水库16场场次洪水资料对建立的动库容曲线法进行应用检验,各场洪水的最高库水位查算值与实测值相比,平均偏高仅0.20m,证明建立的基于动库容曲线的三峡水库最高库水位查算方法具有较好的实践价值,可作为河道型水库动库容调洪计算的参考工具使用。

考虑到建立的动库容曲线组查算值在统计时存在的系统误差,可采取扣除平均偏大误差值的方法,对最高库水位查算值进行修正,在该法实时使用中,系统误差修正值需要依据最新样本结果进行实时更新,才能在最高库水位预报时取得良好效果。

参考文献:

- [1] 许海军, 陈守煜. 水库动库容调洪计算的数值解析法[J]. 水利学报, 2002,(3):69-73. (XU Haijun, CHEN Shouyi. Numerical-analytic method for reservoir backwater storage flood routing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,(3):69-73. (in Chinese))
- [2] 陈森林, 游中琼, 纪昌明. 水库动库容调洪方法研究[J]. 水电能源科学, 1999,17(4):27-30. (CHEN Senlin, YOU Zhongqiong, JI Changmin. Research on the flood-regulation method of reservoir backwater storage [J]. Water Resources and Power, 1999,17(4):27-30. (in Chinese))
- [3] 李光炽, 周晶晏. 河道型水库动库容分析方法[J]. 水利水电科技进展, 2005,25(5):9-11. (LI Guangchi, ZHOU Jingyan. Backwater storage analytic method for river type reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005,25(5):9-11. (in Chinese))
- [4] 仲志余, 李文俊, 安有贵. 三峡水库动库容研究及防洪能力分析[J]. 水电能源科学, 2010,28(3):36-38. (ZHONG Zhiyu, LI Wenjun, AN Yougui. Study on dynamic reservoir capacity and flood control capacity of Three Gorge reservoir [J]. Water Resources and Power, 2010,28(3):36-38. (in Chinese))
- [5] 艾学山, 陈森林, 安有贵, 等. 水库动库容调洪计算方法研究[J]. 人民长江, 2002,33(7):43-44. (AI Xueshan, CHEN Senlin, AN Yougui, et al. Study on flood regulation computation method in consideration of dynamic reservoir capacity [J]. Yangtze River, 2002,33(7):43-44. (in Chinese))
- [6] 闵要武, 王俊, 陈力. 三峡水库入库计算及调洪演算方法的探讨[J]. 人民长江, 2011,6(3):49-52. (MIN Yaowu, WANG Jun, CHEN Li. Discussion on calculation method of flood routing and inflow of Three Gorges reservoir [J]. Yangtze River, 2011,6(3):49-52. (in Chinese))
- [7] 张俊, 闵要武, 陈新国. 三峡水库动库容特性分析[J]. 人民长江, 2011,42(6):90-93. (ZHANG Jun, MIN Yaowu, CHEN Xinguo. Analysis of characteristics of dynamic reservoir capacity of Three Gorges reservoir [J]. Yangtze River, 2011,42(6):90-93. (in Chinese))
- [8] 陈力, 段唯鑫. 三峡蓄水后库区洪水波传播规律初步分析[J]. 水文, 2014,34(1):30-34. (CHEN Li, DUAN Weixin. Preliminary analysis of flood wave routing in Three Gorges reservoir area [J]. Journal of China Hydrology, 2014,34(1):30-34. (in Chinese))
- [9] 程海云, 葛守西, 邹冰玉. 相关图实时预报技术研究[J]. 水利水电快报, 2008,29(3):16-18. (CHENG Haiyun, GE Shouxi, ZOU Bingyu. Research on real time forecast technology correlation diagram [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2008,29(3):16-18. (in Chinese))

Determination of Highest Water Level for Flood Routing Based on Dynamic Reservoir Capacity Curves

ZHANG Jun¹, MIN Yaowu¹, CHEN Li¹, BAO Zhengfeng², CHEN Lu³

(1. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China;

2. Three Gorges Cascade Dispatch & Communication Center, China Three Gorges Corporation, Yichang 443133, China;

3. School of Hydropower & Information Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Due to the dynamic storage characteristics, traditional flood routing method of static reservoir capacity is no longer applicable for determination of the highest water level of the Three Gorges Reservoir (TGR) during the flood routing model. Therefore, research on the new method is needed for deriving accurate water level forecasted value. When the water level of the reservoir rises to the highest point in a flood event, flood routing in the TGR region reaches a critical state. At that time, a reasonable correlation between storage capacity and water level is expected to be established under the constant inflow and discharge condition. In order to quickly calculate the highest water level in flood routing for TGR, based on the hydrological model coupled with hydro-dynamic model, a dynamic reservoir capacity curve which uses the inflow and discharge as parameters was built and 16 flood hydrographs were employed to test its effects. The results show that the mean deviation between the measured values and calculated values is only 0.20 m, which proves the established highest water level calculation method has a good practical value.

Key words: dynamic reservoir capacity; reservoir capacity curve; highest water level for flood routing; flood routing; Three Gorges Reservoir