

三峡水库干流动防洪库容简化算法

黄伟^{1,2}, 童思陈^{1,2}, 王炎³

(1. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074; 2. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;
3. 浙江交科工程检测有限公司, 浙江 杭州 311200)

摘要:基于三峡水库实测水文、地形资料,采用一维水流数学模型对三峡水库干流动库容进行了计算,在综合分析的基础上对水库各特征段动库容进行了拟合。结果表明,三峡水库干流动库容可通过其与各代表水文站水位的关系来近似简单表达,且具有良好精度;在坝前水位一定的情况下,三峡水库干流的动防洪库容随流量的增大而减小,动、静防洪库容差随着流量的增大而增大。

关键词:三峡水库;动库容;动防洪库容;简化算法

中图分类号:TV697.1 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2018)06-0008-05

A simplified calculation method for dynamic flood control capacity in mainstream of Three Gorges Reservoir // HUANG Wei^{1,2}, TONG Sichen^{1,2}, WANG Yan³ (1. Department of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. National Inland Waterway Regulation Engineering Research Center, Chongqing 400074, China; 3. Zhejiang Traffic Detection Co., Ltd., Hangzhou 311200, China)

Abstract: Based on the measured hydrological and topographic data of the Three Gorges Reservoir, the dynamic reservoir capacity in the mainstream was calculated by a one dimensional numerical model, and the dynamic reservoir capacity of each characteristic reaches was fitted after comprehensive analysis. The study shows that the dynamic reservoir capacity in the mainstream of the Three Gorges Reservoir can be expressed approximately with good accuracy through the water level relationships from representative hydrological stations. In the case of a constant water level in the front of the dam, the dynamic flood control capacity decreases with the increase of discharge, and the difference between dynamic and static flood control capacities increases with the increase of discharge.

Key words: Three Gorges Reservoir; dynamic reservoir capacity; dynamic flood control capacity; simplified calculation method

三峡水库属于典型的超大型山区河道型水库,库区狭长,纵向流动明显,由于纵向水流的流动回水水面线存在明显坡降,具有显著的动库容特性。在河道型水库运行阶段,利用动、静库容的差异开展精细化防洪调度可以提高防洪效益。周建军等^[1]根据水库水动力特性分析和数值模拟研究表明,三峡水库水面线并不水平,坝前水位变化与库容变化不同步,按照静库容曲线计算出的水库蓄泄水量偏差可达 50% 以上,这表明在水库调蓄计算时不能按照静回水曲线进行计算,必须考虑反映水面线变化的动库容。张俊等^[2]从水面线、典型洪水过程的动库容计算及动库容曲线 3 个方面初步分析了三峡水

库的动库容特性,认为动库容对三峡水库洪水过程的库容与拦蓄量计算影响较大;仲志余等^[3]基于动库容调洪的基本原理,编制了基于瞬时水面线法、普来士曼隐式差分法和三级河网算法的 3 种不同的动库容调洪计算模型,采用三峡水库建成后的实测洪水对模型和三峡防洪能力进行了验证,但在求解的过程中需要考虑的因素及水力参数较多。由此可见,三峡库区的动库容对调洪影响很大,直接影响着防洪调度方案的制定。如何快速、准确计算库区的动库容成为难点。

针对水库动库容问题,很多学者进行了相关研究^[4-11],但大部分侧重于水库的调洪演算,对水库动

库容、动防洪库容的问题研究仍有待进一步深入。童思陈等^[12]从明渠恒定非均匀流方程出发,推导了河道型水库动、静防洪库容关系,以数学模型为手段计算并绘制了动、静防洪库容关系曲线,给出了防洪库容一般变化规律并提出了相应的近似算法,可用于中小型防洪水库缺少断面资料的情况下防洪库容的初步确定。本文基于实测水文资料与地形资料,采用一维水流数学模型模拟法,探讨三峡水库坝前至江津段干流动防洪库容特性,综合分析并拟合坝前水位与动库容的关系,得到三峡水库干流动库容简化算法,并对三峡水库干流动库容、动防洪库容变化规律进行探讨分析。

1 水流数学模型及其验证

在计算动库容和动防洪库容过程中,需要计算回水曲线以及建立水位、流量和动库容之间的关系,这需要建立能反映这些关系的水动力数学模型。设1、2为相邻两断面编号,对于恒定非均匀流,其能量方程的差分形式为

$$Z_1 + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + h_f + h_j \tag{1}$$

其中

$$h_f = 0.5n^2 \left(\frac{U_1^2}{R_1^{4/3}} + \frac{U_2^2}{R_2^{4/3}} \right) L$$

$$h_j = \frac{c_p}{2g} |U_1^2 - U_2^2|$$

式中:下标1、2分别代表相邻的两个断面; Z 为断面水位; U 为断面平均流速; α 为动能修正系数; h_f 为沿程水头损失; h_j 为局部水头损失; n 为两断面间综合糙率; L 为两断面间距; R 为水力半径; c_p 为局部水头损失系数,与断面收缩和扩散程度有关; g 为重力加速度。在流量、坝前水位和水头损失确定后,即可根据式(1)计算河道断面的各水力要素。

为了确定上述恒定非均匀流一维水流数学模型能否满足本研究的要求,需要对模型进行验证,选取2011—2012年水位及6组流量(29 700 m³/s、17 100 m³/s、12 900 m³/s、20 100 m³/s、12 500 m³/s、9 540 m³/s)数据作为模型验证的基础数据,采用2011—2012年三峡库区坝前至江津河段的实际地形图,以及2011—2012年共424个1/5 000实测横断面作为计算断面。计算结果表明,糙率小范围变动对水库动库容影响较小,故沿程糙率取为0.03^[13]。计算6组流量条件下2011—2012年的水面线,并与实测水位进行比较(图1、图2),可见计算水位与实测水位基本一致,差值在10 cm之内,表明该模型可应用于动库容以及动防洪库容计算。

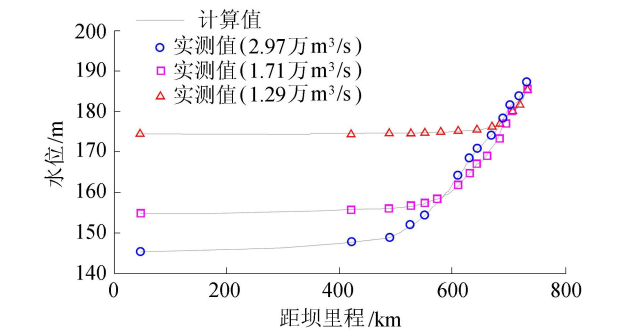


图1 2011年三峡水库水面线验证

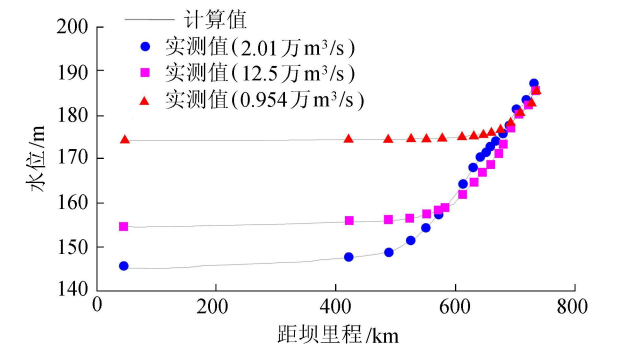


图2 2012年三峡水库水面线验证

2 三峡水库干流动库容简化计算

静库容的大小取决于库区的地形条件,与流量无关;而动库容则与坝前水位及入库流量、出库流量有关。相对于静库容,动库容能够更加真实地反映调洪过程中水面线、水库库容的变化情况,为汛期防洪调度提供更为切实的基础参考依据。

2.1 数模法计算的动库容

动库容是指在实际回水曲线下的库容,对三峡库区在不同坝前水位下、寸滩入库流量由3万 m³/s逐渐增大到9万 m³/s时的动库容进行推算,结果见表1。

表1 不同流量情况下的动库容

水位/ m	不同流量下的动库容/亿 m ³						
	3 万 m ³ /s	4 万 m ³ /s	5 万 m ³ /s	6 万 m ³ /s	7 万 m ³ /s	8 万 m ³ /s	9 万 m ³ /s
145	193.84	201.84	211.13	220.68	230.60	240.82	251.45
150	212.12	220.18	228.78	237.75	247.09	256.78	266.91
155	233.07	240.46	248.40	256.72	265.48	274.59	284.19
160	255.95	262.66	269.92	277.62	285.74	294.32	303.25
165	280.69	286.72	293.30	300.35	307.84	315.87	324.17
170	307.28	312.63	318.55	324.95	331.95	339.28	346.90
175	335.63	340.33	345.58	351.47	357.76	364.44	371.41

2.2 三峡水库干流动库容的简化算法

在三峡水库坝址至江津河段,全河段地形采用2008年三峡库区的实测断面,沿程共布设了424个断面。根据三峡水库实测地形、水文资料、水库回水的范围、河道地形的分布情况以及水文测站的分布,对三峡库区初步分为6段,即茅坪—奉节、奉节—白

沙沱、白沙沱—清溪场、清溪场—长寿、长寿—寸滩、寸滩—塔坪,分别标记Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ、Ⅵ。将茅坪、奉节、白沙沱、清溪场、长寿、寸滩、塔坪7个水文站分别标记为1、2、3、4、5、6、7,其对应的水位站水位为 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 、 Z_4 、 Z_5 、 Z_6 、 Z_7 ,如图3所示。

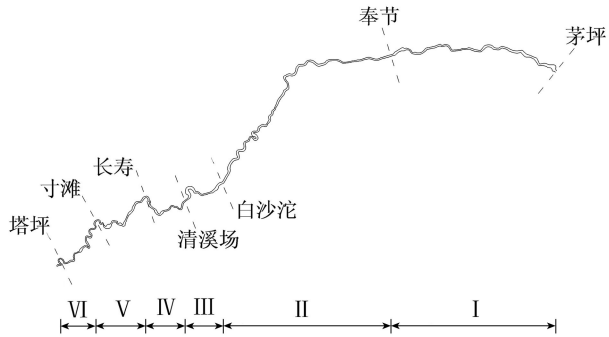


图3 三峡水库动库容计算分段示意图

三峡水库坝址至涪陵属于常年回水段,涪陵至江津属于变动回水段,越往上游河段越接近天然河道。在动库容计算分析时,分别选取流量3万~9万 m^3/s 作为各计算水位的计算流量,根据计算流量以及三峡水库的坝前水位计算出各段的动库容如图4所示。

茅坪—奉节段距坝前最近,水深最大,受动库容影响很小,库容值可认为只与坝前水位有关,与流量无关;奉节—白沙沱段属于常年回水区,奉节距坝址约160 km,受动库容现象影响,水面开始上抬并产生一定的坡降;再往上游的白沙沱—清溪场段动库容特性已十分明显,水面产生一定的坡度变化,水面线尾部向上翘起,整体略微下凹,且各流量下曲线走势较为一致,曲线分布比较均匀,说明库容与坝前水位及流量之间存在相关关系;长寿—寸滩段属于回水

区中段,曲线之间的间距逐渐缩小,楔蓄库容已经减弱;寸滩—塔坪段为距坝址最远的一段,属于三峡水库库尾段,接近于天然河道,相邻曲线间距基本保持定值,曲线随坝前水位变化并不明显,槽蓄库容占主导,楔蓄库容影响较小。

根据计算水位选取的坝前水位值、库容计算值、计算水位之间的线性关系,对相应的数据进行拟合,拟合关系如图5所示。

拟合的相关关系 R^2 的范围在0.998~0.999之间,拟合成果与计算数据吻合较好。而根据前面计算值与库容实际值误差分析,误差远小于规范要求,因此各段的拟合公式可用于动库容计算。各库段动库容与各水位观测站水位之间的拟合公式如下:

$$V_{\text{I}} = 1.261Z_{\text{I}} - 107.00 \quad (2)$$

$$V_{\text{II}} = 2.759Z_{\text{II}} - 321.90 \quad (3)$$

$$V_{\text{III}} = 0.349Z_{\text{III}} - 45.80 \quad (4)$$

$$V_{\text{IV}} = 0.476Z_{\text{IV}} - 66.75 \quad (5)$$

$$V_{\text{V}} = 0.656Z_{\text{V}} - 100.40 \quad (6)$$

$$V_{\text{VI}} = 0.659Z_{\text{VI}} - 111.70 \quad (7)$$

其中 $Z_{\text{I}} = Z_1$ $Z_{\text{II}} = (Z_2 + Z_3)/2$
 $Z_{\text{III}} = (Z_3 + Z_4)/2$ $Z_{\text{IV}} = (Z_4 + Z_5)/2$
 $Z_{\text{V}} = (Z_5 + Z_6)/2$ $Z_{\text{VI}} = (Z_6 + Z_7)/2$

最后得到总动库容:

$$V_{\text{动}} = 1.261Z_{\text{I}} + 2.759Z_{\text{II}} + 0.349Z_{\text{III}} + 0.476Z_{\text{IV}} + 0.656Z_{\text{V}} + 0.659Z_{\text{VI}} - 753.55 \quad (8)$$

3 三峡水库干流动防洪库容特性

3.1 三峡水库干流动防洪库容计算方法

动防洪库容指防洪起调水位和终调水位之间相

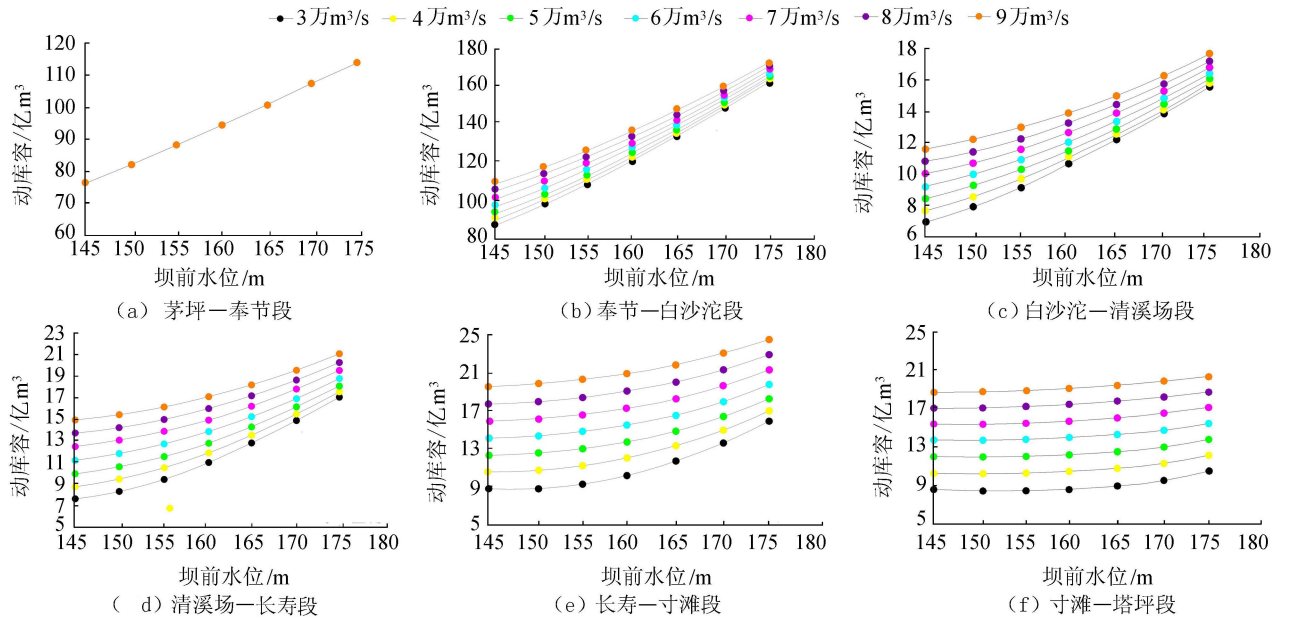


图4 不同流量下坝前水位与动库容计算值的关系

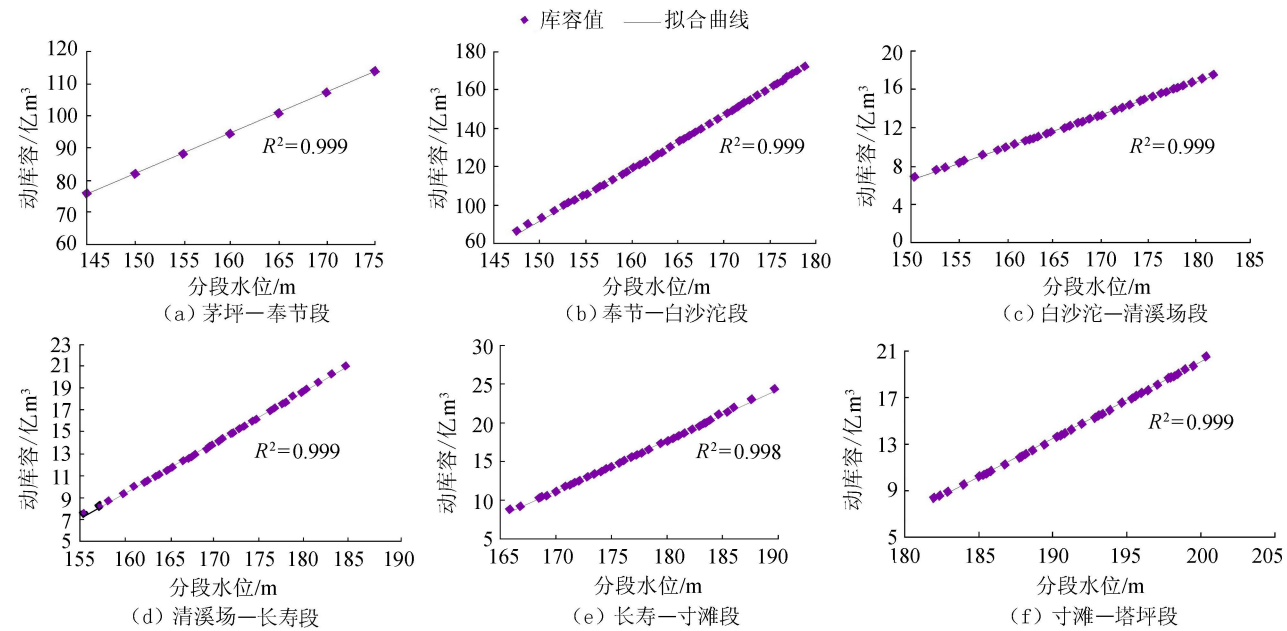


图5 各段水位与该段动库容拟合关系

对应的库容大小,即 $V_{\text{终}} - V_{\text{起}}$,其中 $V_{\text{终}}$ 、 $V_{\text{起}}$ 可以采用式(8)计算。下面从三峡水库干流动防洪库容整体规律及变化趋势,以及三峡水库干流动静防洪库容之间的关系等方面,初步分析三峡水库干流动防洪库容特性。

3.2 三峡水库干流动防洪库容特性分析

三峡库区不同坝前水位下,寸滩入库流量由 3 万 m^3/s 逐渐增大到 9 万 m^3/s 时三峡库区动防洪库容计算结果见表 2。防洪动库容取决于起调水位和终调水位,计算时选取同一流量下每 5 m 水位差的相邻水位作为起调水位和终调水位。

表 2 不同流量情况下动防洪库容

水位/ m	不同流量下的动防洪库容/亿 m^3						
	3 万 m^3/s	4 万 m^3/s	5 万 m^3/s	6 万 m^3/s	7 万 m^3/s	8 万 m^3/s	9 万 m^3/s
145 ~ 150	17.76	17.74	17.22	16.80	16.32	15.97	15.69
150 ~ 155	20.78	20.10	19.40	18.78	18.30	17.85	17.44
155 ~ 160	22.94	22.13	21.45	20.79	20.23	19.76	19.17
160 ~ 165	24.84	24.09	23.42	22.77	22.15	21.62	21.07
165 ~ 170	26.73	26.04	25.33	24.70	24.17	23.48	22.86
170 ~ 175	28.49	27.80	27.13	26.60	25.89	25.25	24.63

对选取流量、相邻水位间动防洪库容进行比较分析,结果见图 6。由图 6 可知,在高水位小流量下动防洪库容达到最大,为 28.494 亿 m^3 ;在低水位高流量下动防洪库容最小,为 15.687 亿 m^3 。同一流量下,动防洪库容随着起调水位和终调水位的增大,均呈现增大的趋势;在相同流量变化条件下,动防洪库容与水位呈正相关;在起调、终调水位均相同的情况下,动防洪库容随着流量的增大而减小;水位变化相同的情况下,动防洪库容随着流量的增大而减小。

上述对于动防洪库容所呈现出的变化规律也与

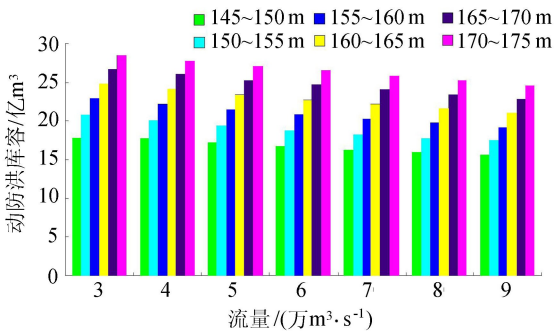


图6 不同起调和终调水位下的动防洪库容

河道型水库动库容特性相吻合。在流量变化相同时,随着水位的升高动库容的影响减弱,库尾水面线上翘减缓,动防洪库容逐渐接近静库容并呈梯形分布,因此动防洪库容值逐渐增大;在水位变化相同时,随着流量的增大动库容的影响增强,库尾水面线上翘越明显,动防洪库容大致呈楔形分布,而非按静库容的梯形分布,因此动防洪库容值逐渐减小。

起调水位 145 m,终调水位 175 m 的条件下动防洪库容随流量的变化如图 7 所示,随着流量的增大,

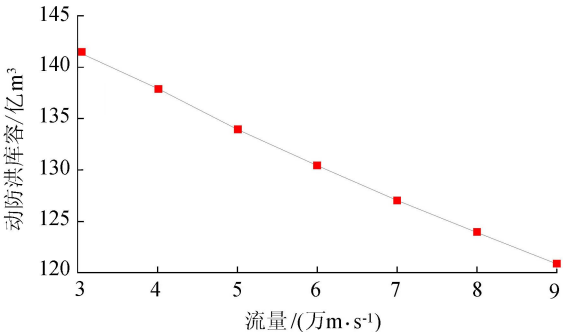


图7 起调水位 145 m、终调水位 175 m 条件下动防洪库容随流量的变化

总防洪动库容逐渐变小;流量增大的过程中,动防洪库容的变化率稳定。

3.3 三峡水库干流动、静防洪库容关系分析

利用动库容简化公式可以快速准确地计算某种水位流量下的动库容值,两条不同水面线下的动库容值相减即为两者之间包含的动防洪库容大小。下面以汛限水位 145 m 为起调水位,设定 155 m、165 m、175 m 为终调水位,分别计算在频率为 20%、10%、5%、2%、1% 的洪水流量条件下的动防洪库容,并与对应工况下的静防洪库容进行比较,分析两者之间的关系。经查询资料可知以上 5 个频率对应的寸滩流量分别为 6.14 万 m³/s、6.91 万 m³/s、7.53 万 m³/s、8.31 万 m³/s、8.87 万 m³/s。终调水位为 175 m 时计算得到的静防洪库容与动防洪库容比较情况见表 3。

表 3 终调水位 175 m 下三峡库区不同频率洪水防洪库容						
方法	洪水流量/ (万 m ³ ·s ⁻¹)	库容/亿 m ³		防洪 库容/ 亿 m ³	动、静防 洪库容 差/亿 m ³	动、静 防洪库 容比/%
		坝前水位 145 m	坝前水位 175 m			
静库容法		169.79	326.51	156.73		
动库容法	6.14	222.05	352.32	130.27	26.46	83.1
	6.91	229.70	357.17	127.48	29.25	81.3
	7.53	235.98	361.26	125.28	31.45	79.9
	8.31	244.05	366.56	122.52	34.21	78.2
	8.87	250.06	370.49	120.43	36.3	76.8

由表 3 可见,三峡库区动防洪库容均要小于对应水位下的静防洪库容,且在起调水位与终调水位固定时,动防洪库容随着流量增大而减小;动、静防洪库容差值变化范围较大,并随着终调水位的增大而增大;结合终调水位为 155 m 和 165 m 的动、静库容计算结果,整体动静库容差值为 9.20 亿~36.30 亿 m³,动防洪库容占静防洪库容的比例为 73%~83.1%。由于终调水位为 155 m、165 m、175 m 的动静库容之间关系变化趋势一致,分析终调水位 175 m 动静防洪库容比值可知,在起调水位和终调水位固定时,流量越大水库库容呈楔形越明显,因此动防洪库容占静防洪库容比例随流量增大而逐渐减小;而当同一流流量下,终调水位升高时,由于水位对动库容产生的负面影响,减缓了库尾水面线上翘的程度,因此动防洪库容占静防洪库容比例增大。

4 结 语

通过一维水流数学模型计算,对三峡水库干流动库容、动防洪库容进行了探讨,提出了仅通过库区典型水文站水位确定动库容的简化算法,研究表明简化算法具有良好的精度。基于简化法探讨了三峡

水库干流动库容、动防洪库容的基本特性和变化关系,结果表明,在坝前水位一定情况下,三峡水库干流的动防洪库容随流量的增大而减小,动、静防洪库容差随着流量的增大而增大。

参考文献:

[1] 周建军,程根伟,袁杰等.三峡水库动库容特征及其在防洪调度上的应用;2. 动态汛限水位调度方法[J]. 水力发电学报, 2013,32(1):168-173. (ZHOU Jianjun, CHENG Genwei, YUAN Jie, et al. Dynamic storage of Three Gorge reservoir and its application to flood regulations;2. flood regulations with dynamic flood control levels [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2013,32(1):168-173. (in Chinese))

[2] 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))

[3] 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))

[4] 许海军,陈守煜. 水库动库容调洪计算的数值-解析解法[J]. 水利学报, 2002,33(3):69-73. (XU Haijun, CHEN Shouyu. Numerical-analytic method for reservoir backwater storage flood routing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002,33(3):69-73. (in Chinese))

[5] 徐玲玲,张瀚文. 基于数值解析法的水库动库容调洪计算[J]. 水电能源科学, 2017,34(4):67-68. (XU Lingling, ZHANG Hanwen. Calculation of reservoir dynamic storage capacity based on numerical analytical method [J]. Water Resources and Power, 2017,34(4):67-68. (in Chinese))

[6] 闵要武,王俊,陈力. 三峡水库入库流量计算及调洪演算方法探讨[J]. 人民长江, 2011,42(6):49-52. (MIN Yaowu, WANG Jun, CHEN Li. Discussion on calculation method of flood routing and inflow of Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River, 2011,42(6):49-52. (in Chinese))

[7] 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. Backwaterstorage analytic method for river type reservoirs [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources. 2005,25(5):9-11. (in Chinese))

(下转第 85 页)