

鸭绿江八道沟—云峰大坝段设计 最低通航水位研究

余文钧¹, 朱博渊²

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040; 2. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘要: 针对鸭绿江八道沟—云峰大坝段设计最低通航水位的取值问题, 进行区段内设计最低通航水位研究, 采用实测资料分析以及数学模型相结合的方法, 得出八道沟—云峰大坝段沿程 180 余公里的设计最低通航水位值。该值可直接应用于本河段后续航道设计研究。该研究方法对缺乏资料的枢纽上游以及天然河道最低通航水位研究具有借鉴意义。

关键词: 鸭绿江; 枢纽上游; 最低通航水位

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0134-05

Study on minimum navigable water level from Badaogou to Yunfeng dam of the Yalu River

YU Wen-jun¹, ZHU Bo-yuan²

(1. Changjiang Waterway Institute of Planning, Design & Research, Wuhan 430040, China;

2. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: To work out the value of the minimum navigable water level from Badaogou to Yunfeng dam, we analyze the lowest navigable water level of this section by a combination of the observation data analysis and mathematical model, and obtain the lowest navigable water level within the region of more than 180 km, which can be used for the following-up navigable route research of this river section. This research method may serve as a reference for the research on the minimum navigable water level in the hub's upstream and natural waterway which is lack of data.

Keywords: the Yalu River; upstream of the hub; minimum navigable water level

设计最低通航水位是通航水域船舶正常通航需要掌握的重要水位参数, 也是确定航道整治建筑物高程的重要依据。开展设计最低通航水位的研究是开展航道研究的前提。对于测量资料较为丰富的河段, 设计最低通航水位可直接采用实测资料分析得到^[1]。

鸭绿江河段为中朝界河, 河道实测数据及相关研究较为缺乏, 河道沿程设计最低通航水位难以通过实测资料分析直接获得。为得到鸭绿江八道沟—云峰大坝段设计通航水位, 为后续航道整治的实施提供基础参数, 笔者采取实测资料分析

与数学模型相结合的方法, 开展鸭绿江八道沟—云峰大坝段设计最低通航水位的研究, 研究成果可为后续航道整治工作提供基础参数。该方法可广泛用于实测资料不足河段设计通航水位的研究。

1 研究背景

1.1 河道概况

八道沟—云峰大坝河段位于中朝界河鸭绿江中游, 干流航道全长 187.1 km(图 1), 11 月至次年 4 月底为冰凌期。其中八道沟—大栗子段为天

然河段, 干流航道里程为 106.4 km, 河床以岩盘、孤石和卵石覆盖层为主, 枯水期河宽 60~200 m, 现状航道等级为 VI 级以下, 规划航道等级为 VI 级。大栗子—云峰大坝段位为库区河段, 其中大栗子—白马浪段为变动回水区, 干流航道里程为 29.8 km, 河床以岩盘和卵石、泥沙覆盖层为主, 河宽 100~200 m, 现状航道等级 VI 级以下, 规划航道等级为 VI 级; 白马浪—云峰大坝段为常年回水区, 干流航道里程为 50.9 km, 现状航道能够达到 VI 级航道标准, 规划航道等级为 VI 级^[2]。河段进口有八道沟水位站, 中段有临江水文站^[3](距八道沟约 80 km), 出口有云峰大坝库区水位观测点(距八道沟约 187.1 km)。

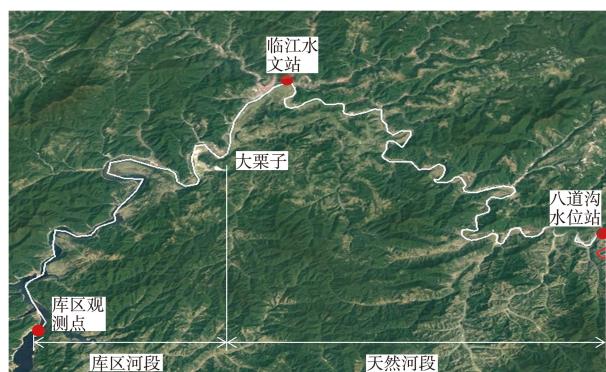


图 1 八道沟—云峰大坝河段河势

1.2 大坝枢纽运行方式

研究河段尾部的云峰大坝修建于伪满时期, 水库无防洪任务, 主要承担发电功能, 根据入库来流变化, 大坝一般采用以下运行方式^[4]。

1) 中枯水期: 当水库水位低于正常蓄水位(318.75 m)时, 按水库发电流量调度, 坝前水位在正常蓄水位和死水位(281.75 m)之间运行, 但 20 年实测资料表明, 除 2006 年因大坝维修运行, 坝前水位达到了死水位, 其他年份坝前水位值均高于死水位。

2) 丰水期: 当水库水位高于正常蓄水位时, 按水库最大出库流量不小于入库流量控制。

2 设计最低通航水位的确定

2.1 标准规定

天然河段以及枢纽上游最低通航水位是根据

GB 50139—2014《内河通航标准》的规定确定的:

- 1) 天然河段设计最低通航水位应采用综合历时曲线法计算确定;
- 2) 枢纽上游设计最低通航水位应采用多年历时保证率对应的入库流量与相应的坝前消落水位组合, 以及坝前死水位或最低运行水位与相应的各级入库流量组合, 得出多组回水曲线, 取其下包线作为沿程各点的设计最低通航水位。

2.2 研究方法

2.2.1 资料筛选

根据水文资料收集情况以及水位、流量变化特点, 设计最低通航水位计算采用的水文资料年限为 1993—2017 年, 重点反映近期水位的变化特点, 并确保各水文(位)站的资料年限一致; 考虑到研究河段现状航道等级在 VI 级以下, 规划航道等级为 VI 级, 而且目前通航需求不大, 设计最低通航水位的多年历时保证率取 90%。

2.2.2 研究步骤

- 1) 根据临江水文站 1993—2017 年实测流量资料, 采用综合历时曲线法, 计算多年历时保证率为 90% 的设计流量;
- 2) 采用最新 2019 年实测地形, 建立八道沟—云峰大坝段以及临江—云峰大坝段二维水流数学模型, 并采用 2019 年 4—5 月实测沿程水位数据对模型参数进行率定;
- 3) 将多年历时保证率为 90% 的设计流量与相应的库区最低水位计算工况带入八道沟—云峰大坝段二维水流数学模型计算, 得出天然河段的设计最低通航水位;
- 4) 将多年历时保证率为 90% 的设计流量与相应时期的坝前消落水位最低值工况、库区实际运行最低水位与相应入库流量工况带入临江—云峰大坝二维水流模型计算, 取其下包线作为库区河段的设计最低通航水位。
- 5) 根据临江水文站和八道沟水位站的实测水位资料, 采用实测资料分析得到水文(位)站设计最低通航水位, 分析其与模型计算成果的差异性, 确定其取值的合理性。

3 模型的建立

根据研究河段水文站分布情况,为了较准确地给模型提供水文边界条件,采用 Mike 21 软件首先建立八道沟—云峰大坝全长 187.1 km 的数学模型,重点研究大栗子以上天然河段设计通航水位;进一步建立临江—云峰大坝段全长约 105 km 的数

学模型,重点研究大栗子以下库区段设计通航水位。全河段模型共设置 40 万个三角网格,单个三角网格最大面积不超过 200 m²,其中天然河段网格较库区部分有所加密,见图 2。建模地形采用 2019 年实测地形,并采用同期沿程水位测量资料对模型进行验证。

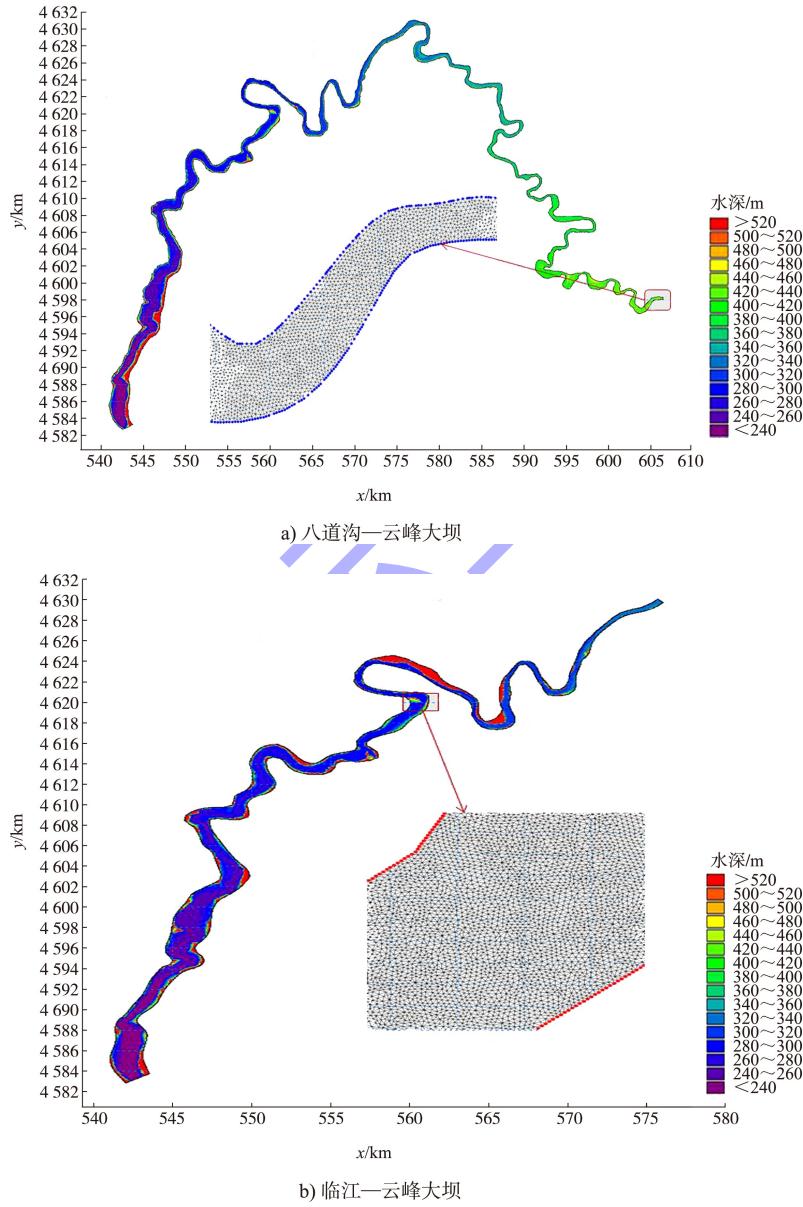


图 2 二维数学模型

4 最低通航水位取值及合理性分析

4.1 最低通航水位

4.1.1 多年历时保证率设计流量

综合历时曲线法是将统计年份内的所有日平均值放在一起,从大到小排列,计算并点绘出各

级流量与大于此流量的天数占总天数的百分比关系曲线,再由设计保证率查得相应保证率的流量^[5]。根据临江站 1993—2017 年冰凌期以外时段(4 月 25 日—10 月 31 日)日均实测流量资料,计算多年历时保证率(表 1)。多年综合历时保证率

为 90% 对应的流量为 $80 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

表 1 临江站 1993—2017 年实测流量历时保证率

保证率/%	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	保证率/%	流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
1	2 950.0	60	156.0
5	729.0	70	130.0
10	506.0	80	106.0
20	340.0	85	95.3
30	270.0	90	80.0
40	224.0	95	70.9
50	187.0	98	64.1

表 2 多年综合历时保证率为 90% 流量对应坝前水位

时间	坝前水位/m	时间	坝前水位/m	时间	坝前水位/m	时间	坝前水位/m
1993-10-01	302.8	1998-10-16	313.3	2002-10-20	308.3	2014-09-19	300.0
1996-10-14	315.9	1998-10-24	313.3	2002-10-21	308.2	2014-09-20	299.8
1997-07-30	298.5	1999-10-04	303.8	2002-10-26	308.2	2014-09-21	299.7
1997-08-06	297.4	1999-10-13	303.3	2003-10-27	311.9	2014-09-22	299.6
1997-08-17	295.4	1999-10-17	302.8	2009-09-19	310.1	2014-09-24	299.4
1997-08-23	294.5	2000-07-09	292.7	2009-10-21	307.9	2014-10-04	298.1
1998-06-09	299.5	2000-07-15	291.8	2009-10-28	307.6	2014-10-05	298.0
1998-06-13	299.1	2001-10-13	305.8	2009-10-29	307.5	2015-05-29	288.7
1998-10-13	313.3	2002-06-21	289.9	2014-09-17	300.2	2015-06-08	287.8
1998-10-14	313.3	2002-06-29	290.3	2014-09-18	300.1	2015-06-09	287.7

因此, 根据《内河通航标准》, 天然河段的最低通航水位计算工况为: 90% 保证率的流量(八道沟 $80 \text{ m}^3/\text{s}$)与对应时期的库区水位(287.7 m)组合。

2) 库区河段计算工况。库区河段应采用设计最低通航流量与相应时期的坝前消落水位最低值、库区实际运行最低水位与相应入库流量进行组合的下包线综合确定^[6], 根据云峰大坝运行特点, 云峰大坝坝前水位消落时期一般出现在 10 月至次

4.1.2 计算工况

考虑到鸭绿江八道沟—云峰大坝段地处山区, 区段支流入汇多由降雨引起, 而枯水期支流基本断流, 因此研究过程中不考虑支流入汇。

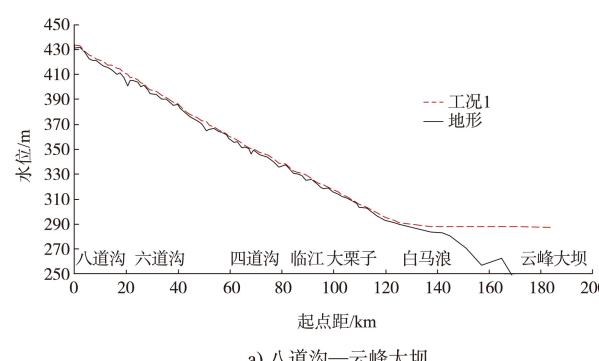
1) 天然河段计算工况。通过统计多年综合历时保证率为 90% 流量下对应坝前水位情况, 得到该流量下对应的坝前最低水位为 287.7 m , 该最低水位值出现在 2015 年 6 月, 见表 2。

年 4 月, 考虑到 11 月以后为冰凌期, 因此对出现在 10 月且与设计最低通航流量接近时期的坝前水位进行核查, 得到 10 月份最低值为 298.1 m , 出现在 2014 年 10 月 5 月。统计库区 1993—2017 年最低水位(除去 2006 年大坝维修特殊年份)出现在 1996 年 4 月 26 日, 水位值为 285.2 m , 该时期对应的入库流量为 $307 \text{ m}^3/\text{s}$ 。因此, 确定得到天然河段与库区河段设计最低通航水位计算工况, 见表 3。

表 3 设计最低通航水位计算工况

计算类别	工况说明	进口流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	坝前水位/m
天然河段	工况 1: 90% 保证率的流量与对应时期的库区水位组合	80	287.7
库区河段	工况 2: 90% 保证率的流量与相应坝前最低消落水位组合	80	298.1
	工况 3: 实际出现最低运行水位与相应入库流量组合	307	285.2

3) 最低通航水位的取值。将工况 1 带入八道沟—云峰大坝段数学模型, 工况 2 与工况 3 带入临江—云峰大八段数学模型进行计算, 得到沿程水位计算成果(图 3), 其中八道沟与临江站最低通航水位计算值分别为 433.76 、 326.29 m , 见表 4。



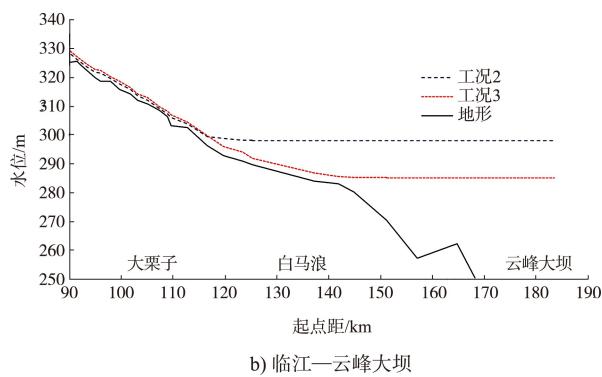


图 3 数学模型计算成果

表 4 特征点水位计算成果

特征点	起点距/km	水位/m			设计最低水位取值/m
		工况 1	工况 2	工况 3	
八道沟	0	433.76	-	-	433.76
六道沟	35.5	391.84	-	-	391.84
四道沟	62.8	357.32	-	-	357.32
临江	91.4	326.29	326.29	327.12	326.29
大栗子	107.2	309.13	309.13	309.94	309.13
白马浪	137.0	287.86	298.10	286.74	286.74
云峰大坝	183.0	287.70	298.03	285.15	285.15

4.2 合理性分析

根据临江水文站 2005—2017 年、八道沟水位站 1993—2017 年日均水位实测资料分析得出临江站与八道沟站 90% 保证率的设计最低通航水位分别为 326.32、433.80 m。将上述值与最低水位计算成果进行对比，差异在 0.1 m 以内，模型计算结果符合实际情况（表 5）。

(上接第 121 页)

- [7] 赖东亮, 李中华. 升船机卧倒门启闭船舶停泊条件三维数值模拟[J]. 水运工程, 2017(10): 32-37.
- [8] HAYASE T, HUMPHREY J A C, GREIF R A. Consistently formulated QUICK scheme for fast and stable convergence using finite-volume iterative calculation procedures [J]. Journal of computational physics, 1992, 98(1): 108-118.
- [9] RHIE C M, CHOW W L. A numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation[J]. AIAA journal, 1983, 21(11): 1525-1552.

表 5 最低通航水位合理性分析

水位(文)站	实测资料统计值/m	计算推荐值/m	差值/m
八道沟	433.80	433.76	-0.04
临江	326.32	326.29	-0.03

5 结语

1) 天然河段采用综合保证率流量推求沿程最低通航水位，库区河段采用设计最低通航流量与相应坝前最低消落水位组合，以及近期最枯水位与相应流量组合的下包线的方式综合确定最低通航水位的方法，符合《内河通航标准》的要求。

2) 八道沟与临江站计算的设计最低通航水位值与实测资料统计值符合性较好，计算推求的设计最低通航水位是可信的，最低通航水位成果可为后续本河段航道整治工程提供设计依据。

参考文献：

- [1] 闵朝斌. 关于最低通航设计水位计算方法的研究[J]. 水运工程, 2002(1): 29-33.
- [2] 高科, 李波. 中朝船舶航行规则与鸭绿江中下游通航现状[J]. 中国海事, 2008(12): 51-54.
- [3] 王子臣, 冯天琼. 鸭绿江流域的水文概况[J]. 水文, 1983(1): 47-51.
- [4] 金灿镐. 云峰大坝运行状态[J]. 大坝与安全, 1996(3): 44-51.
- [5] 丁平, 刘圣保. 天然河流设计最低通航水位两种计算方法的对照分析及选用[J]. 中国水运(下半月), 2010, 10(1): 157-159.
- [6] 徐军辉, 邓伟. 梯级电站变动回水区设计最低通航水位确定方法[J]. 水运工程, 2020(4): 109-114.

(本文编辑 郭雪珍)

- [10] CHANG Y C. Lateral mixing in meandering channels[D]. Iowa: The University of Iowa, 1971.
- [11] RIJN L C. Mathematical modeling of morphological processes in the case of suspended sediment transport[D]. Delft: Delft University, 1987.
- [12] ALFRINK B, RIJN L C. Two-equation turbulent model for flow in trench[J]. Journal of hydraulic engineering, 1983, 109(3): 941-958.

(本文编辑 王璁)