

考虑龙羊峡水库回水影响的羊曲水电站 尾水疏挖研究

林劲松¹, 巨江², 张宽地¹, 吕宏兴¹

(1 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2 西北勘测设计研究院 科研工程试验分院, 陕西 西安 710043)

[摘要] **【目的】**在考虑下游龙羊峡水库回水影响条件下,研究河床疏挖前后拟建的羊曲水电站中坝址厂房尾水特征断面的水位-流量关系,寻求提高有效发电水头的方法。**【方法】**采用预测-校正求解方法,应用一维河床冲淤变形计算模型,在不考虑龙羊峡水库回水时,对尾水河道2个开挖方案进行数值分析,分别考虑疏挖比降为0.000 5, 0.001, 0.001 5,疏挖宽度为50, 80, 140 m时的疏挖效果。通过多方案比较,确定推荐方案后,在考虑下游龙羊峡水库不同回水影响时,采用推荐尾水疏挖方案,研究龙羊峡水库回水影响下的羊曲水电站尾水疏挖效果。**【结果】**从疏挖工程量和电站尾水断面所获得的水头综合考虑,推荐疏挖比降为0.000 5,疏挖宽度为50 m的开挖方案,该方案在平均流量625 m³/s时,电站厂房尾水位比河道开挖前降低了5.15 m。经多条水位-流量关系曲线套绘分析发现,龙羊峡水库坝前水位超过2 596 m时,河道疏挖后羊曲水电站尾水位没有降低;龙羊峡水位低于2 596 m时,平均流量625 m³/s下,河道开挖后仍能获得不同程度的发电水头。**【结论】**羊曲水电站尾水河段具备河道疏挖疏浚的客观条件,在考虑龙羊峡水库回水影响下,推荐疏挖方案当河道平均流量625 m³/s时,在不同的回水高程条件下,羊曲水电站尾水水位降幅为0.48~4.47 m,所得计算结果可供水能规划部门参考应用。

[关键词] 水电站;尾水疏挖;下游水库回水;水面线计算;水位-流量关系曲线

[中图分类号] TV135.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2010)10-0221-08

Study on tailrace dredging of hydropower station under considering backwater effects of Longyangxia reservoir

LIN Jin-song¹, JU Jiang², ZHANG Kuan-di¹, LÜ Hong-xing¹

(1 College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2 Research Branch of Engineering, Northwest Investigation Design and Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: **【Objective】** Considering the impact of downstream backwater Longyangxia reservoir conditions, a scientific and reliable basis which enhances effective water head was provided to water planning and design department by comparisons of the cross-section relationship between water level and water flow of hydropower station before and after the changing in tailrace dredging. **【Method】** By using Predictor-Corrector method, dredging effects were focused on the combination of 2 different types on dredging the length of the program by using application of one-dimensional deformation of riverbed erosion and deposition calculation model with different slope with 0.000 5, 0.001, 0.001 5 and different width with 50, 80, 140 m without considering the backwater effects of the Longyangxia reservoir. The recommended program was chosen by studying the effects of tailrace dredging of Yangqu hydropower station under considering the backwater effects of the Longyangxia reservoir. **【Result】** The recommended program was chosen by the amount of

* [收稿日期] 2010-03-22

[基金项目] 国家自然科学基金重点项目(40335050);2009年高等学校博士学科点专项科研基金项目(20090204110019);西北农林科技大学留学归国人员科研基金项目(01140507);西北农林科技大学科研专项基金项目(A213020503)

[作者简介] 林劲松(1968—),男,湖南长沙人,副教授,在读博士,主要从事水力学及河流动力学研究。

E-mail:linjinsong01369@nwsuaf.edu.cn

dredging works, power station tailrace section obtained after the head and dredging silt brought the issue into account, a slope dropped to 0.000 5, width of 50 m of the dredging program was recommended from dredging program II, powerplant tailrace water level was 5.15 m lower than the natural riverbed encountering the average flow of $625 \text{ m}^3/\text{s}$. A law of water level was found after several water level and flow rate curve drawn analysis, which suggested the river dredging tail water level wasn't reduced when the water level of Longyangxia dam was higher than 2 596 m, the river dredging tail water level began to decline when the water level of Longyangxia dam was lower than 2 596 m. 【Conclusion】 The riverbed of Yangqu hydropower station could be dredged because it has objective conditions of dredging. Considering the influence of Longyangxia reservoir backwater recommended dredging program, the tailrace water level drops to 0.48—4.47 m with an average flow of $625 \text{ m}^3/\text{s}$ when the water level in the Longyangxia reservoir dam is different. The conclusion could be used as a program comparison by water planning and design department.

Key words: hydropower station; tailrace dredging; backwater of downstream reservoir; water surface calculation; relationship between water level and water flow

现阶段,我国黄河干流的水库基本存在于规模不等的梯级水库群中。由于梯级水库水文情况的复杂性^[1],在拟建水电站的初期规划阶段,需要进行大量的水库水能计算,经防洪、发电、航运、供水、生态等多方面因素考虑论证,确定坝顶高程、各个水库特征水位和电站装机容量。在特征水位确定以后,当电站下游水位流量关系一定时,水电站出力就是定值^[2]。在相同的水资源总量下,不同的调度方式,即各级可调蓄水库的发电水位和用水量过程不同,将使梯级水利枢纽运行产生不同的发电效益^[3]。当前已建成的水库多采用各种水量平衡及优化流量调度的方法提高梯级水利枢纽的运行方式,从而实现合理利用水资源的目的^[4-10]。

由于梯级水库水能规划中有效水头的计算是连续的,不同坝址处水电站的水能指标及经济指标是不同的。但若下游水库长期低水位运行,使其回水末端与上游水电站尾水不能平顺衔接,即可通过疏挖尾水河道,降低厂房尾水位,从而达到多利用水头,充分开发河段的水能资源,以提高电站的水能及经济指标。但有关开挖长度、底坡比降等,需要通过综合经济技术比较才能确定。羊曲水电站天然河道的水文地质条件复杂,对其进行一般的水力学计算有一定误差,而此计算误差直接影响到电站装机、安装高程以及最终推荐方案的选择等。因此,本研究在不考虑龙羊峡水库回水时,对尾水河道各个开挖方案进行数值分析,通过多方案分析比较,确定推荐方案;然后在考虑下游龙羊峡水库不同回水影响时,以推荐尾水疏挖方案计算羊曲水电站尾水疏挖的有效水头,以期能为水能规划部门提供参考。

1 羊曲水电站的河道特点及水面线计算

拟建中的黄河羊曲水电站工程位于青海省海南州兴海与贵南交界处,距上游班多水电站约 75 km,距下游龙羊峡水电站大坝约 100 km。正常蓄水位 2 715 m,死水位 2 713 m,正常蓄水位下的库容为 14.724 亿 m^3 。工程规模为 I 等大(1)型工程,坝顶高程 2 721 m,最大坝高 150 m,电站装机容量 1 100 MW。本河段地形变化十分复杂,上有羊曲峡,下有野狐峡,两峡之间夹有吾托盆地。羊曲峡长约 3 km,两岸地形陡峻,河宽 100 m 左右;野狐峡横穿山梁,河谷狭窄,岸坡陡峻,近直立,河宽在 70~100 m;吾托盆地地形开阔,河流蜿蜒曲折,漫滩、心滩和 I、II 级阶地及两岸冲沟较发育,宽度为 300~500 m。从地形纵横剖面来看,河道平均比降 0.002 3,最大为 0.023,最小为 -0.03。羊曲河段平面地形及计算横断面布置见图 1,计算河段进口断面为上坝线,出口断面至下坝线厂房以下 946.4 m,总长 8 497 m,包括了羊曲峡、野狐峡和吾托盆地。

羊曲水电站河道为天然山区河道,地形复杂,因此其水面线计算在常规水流运动方程的基础上,采用预测-校正求解方法,在一维河床冲淤变形计算模型的基础上,增加了急流的均匀流水深与临界水深判断公式,同时为解决河道正坡、倒坡交替出现,突扩、突缩频繁发生的复杂地形条件下水面线计算的不连续性问题,建立了解决复杂地形条件下天然河道水面线计算模型,并将该方法在黄河羊曲水电站进行了实例验证,结果表明:用该模型计算的水面线与实测的水面线吻合较好,可满足工程设计精度要

求^[11]。在此计算模型的基础上,将该研究应用于羊曲水电站的尾水河道疏挖工程中,所得结果可供其

上下游水库梯级开发的水能规划部门参考应用。

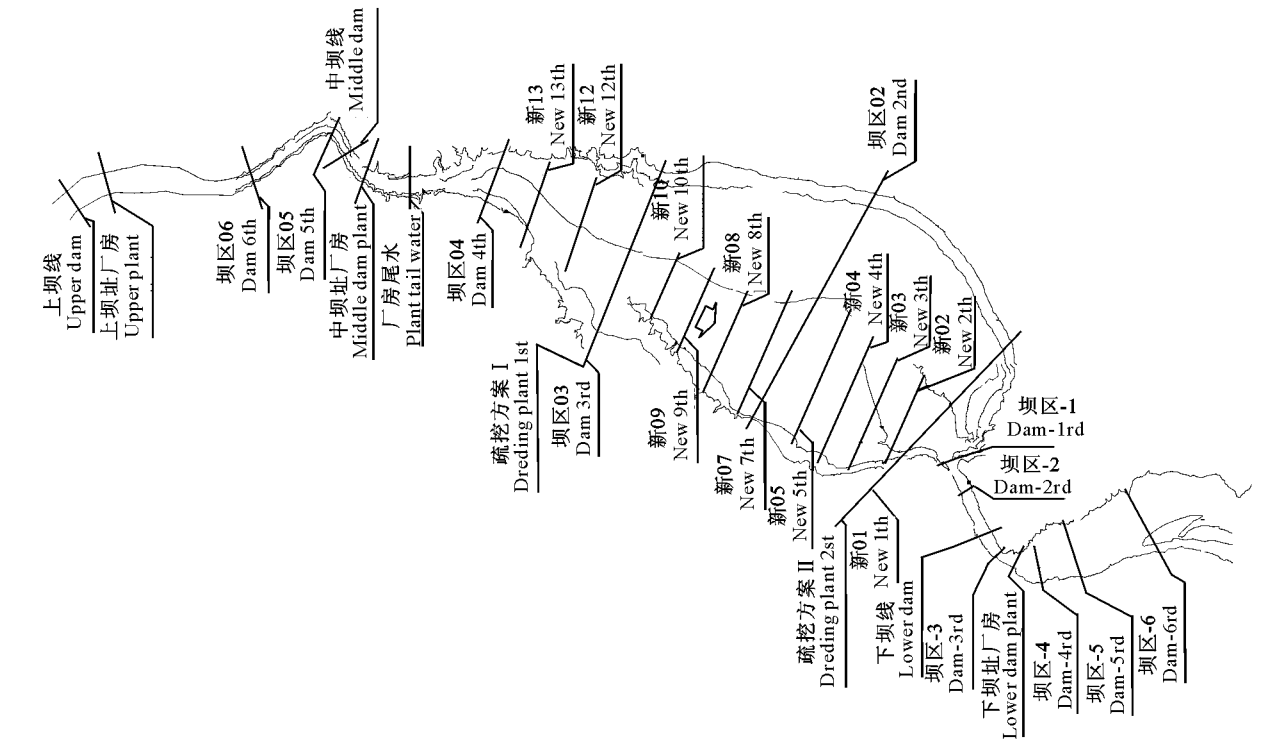


图 1 羊曲河段平面地形及计算横断面布置图

Fig. 1 Flat and calculating cross-section layout of Yangqu hydropower station

2 尾水河道疏挖方案的优化

2.1 河道疏挖方案的拟定

制定降低电站尾水位实施的下游河道疏挖方案,最经济合理的是减缓河道比降,即上游疏挖较深,下游疏挖较浅,形成上大下小的三角形纵剖面。从地形上看,羊曲河段疏挖工程应集中在吾托盆地以内,吾托盆地的纵比降为 0.002 1,宽度变幅达 300~500 m,且河床为砂卵石覆盖层,具备河道比降变缓的疏挖条件。

中、下坝址之间河道长约 5.0 km,根据地形条件尾水河段共拟定 2 种不同开挖长度,其首端均为厂房尾水断面,末端分别位于坝轴线以下 1.8 km

处的坝区 03 断面和坝轴线以下 4.2 km 坝区新 01 断面处(野狐峡进口)。开挖坡度(纵向底坡)初步拟定 3 种不同开挖底坡,分别为 0.000 5,0.001,0.001 5。根据河道地势顺挖,两岸边坡保持天然边坡,无需防护;或依据河道主槽宽度,拟定 2~3 种不同开挖宽度。

2.2 河道疏挖方案 I

河道疏挖方案 I 是指河道疏挖末端抵达坝区 03 断面,即维持 03 断面河床高程不变,按 0.001 比降向上游疏挖延伸至羊曲峡出口断面,疏挖宽度拟定为 140 m。电站厂房尾水断面位于羊曲峡峡谷,该地基岩裸露,无法疏挖。方案 I 各断面疏挖高程具体见表 1。

表 1 尾水河道疏挖方案 I 河道各断面疏挖特征

Table 1 Features of tail-water river dredging program I

断面序号 Section No.	断面名 Section name	距坝里程/m Distance	原深泓点高程/m Natural riverbed	疏挖方案 I Dredging program I	
				疏挖高程/m Altitude of dredging	疏挖面积/m ² Area
7	厂房尾水 Plant tail water	2 485.4	2 589.0		
8	坝区 04 Fourth of dam	3 037.1	2 589.6	2 588.68	201.71
9	新 13 New 13th	3 347.1	2 591.0	2 588.4	662.24
10	新 12 New 12th	3 667.1	2 588.0	2 588.0	463.20
11	坝区 03 Third of dam	4 115.7	2 587.6	2 587.6	556.12
疏挖工程量/万 m ³ Amount of dredging				62.59	

尾水河道疏挖方案Ⅰ各级流量下的水面线计算结果见表 2。由表 2 可以看出,与原天然河道相比,电站尾水断面疏挖后,300 m³/s 流量所对应的水位降低了 1.52 m;625 m³/s 流量所对应的水位仅降低了 1.35 m;1 000 m³/s 流量所对应的水位降低了 1.27 m。说明随着流量的增大,开挖前后电站尾水

位差别减小,即河道开挖并不增加大流量工况的发电水头,这是由于下游野狐峡壅水造成的。由于方案Ⅰ疏挖范围太短,疏挖量较少(只有 62.59 万 m³),对降低电站尾水位、增加发电水头的作用不显著,建议放弃。

表 2 尾水河道疏挖方案Ⅰ各级流量下的水面线计算结果

Table 2 Calculation of water surface results in tail-water river dredging program I										
断面序号 Section No.	断面名 Section name	水位/m Water level								
		Q=300 m³/s	Q=500 m³/s	Q=625 m³/s	Q=750 m³/s	Q=1 000 m³/s	Q=1 500 m³/s	Q=2 000 m³/s	Q=2 500 m³/s	Q=3 000 m³/s
5	中坝线 Middle dam	2 594.12	2 595.65	2 596.48	2 597.24	2 598.62	2 600.9	2 602.54	2 604.15	2 605.7
6	中坝址厂房 Middle dam plant	2 594.08	2 595.58	2 596.4	2 597.15	2 598.52	2 600.78	2 602.4	2 603.99	2 605.54
7	厂房尾水 Plant tail water	2 592.76	2 593.7	2 594.14	2 594.55	2 595.23	2 596.64	2 598.5	2 600.38	2 602.21
8	坝区 04 Fourth of dam	2 591.85	2 592.63	2 592.95	2 593.28	2 593.78	2 595.14	2 597.36	2 599.48	2 601.47
10	新 12 New 12th	2 591.82	2 592.58	2 592.89	2 593.21	2 593.68	2 595.06	2 597.31	2 599.45	2 601.45
13	新 09 New 9th	2 591.38	2 592.09	2 592.27	2 592.44	2 592.61	2 594.63	2 597.17	2 599.37	2 601.39
17	新 05 New fifth	2 589.3	2 589.72	2 590.01	2 590.3	2 591.46	2 594.44	2 597.12	2 599.33	2 601.36
21	新 01 New first	2 586.6	2 587.23	2 587.88	2 588.82	2 590.94	2 594.33	2 597.05	2 599.27	2 601.3
24	下坝线 Lower dam	2 585	2 585.63	2 586.07	2 586.42	2 587.12	2 588.48	2 590.09	2 591.78	2 593.22
25	坝区-3 Third of dam	2 584.93	2 585.47	2 585.88	2 586.17	2 586.78	2 588	2 589.38	2 590.97	2 592.73
26	下坝址厂房 Lower dam plant	2 584.86	2 585.31	2 585.66	2 585.88	2 586.28	2 586.96	2 587.5	2 587.99	2 588.44
27	坝区-4 Dam-4rd	2 584.76	2 585.18	2 585.52	2 585.72	2 586.08	2 586.67	2 587.11	2 587.52	2 587.88

2.3 河道疏挖方案Ⅱ

考虑到方案Ⅰ疏挖范围太短,方案Ⅱ将河道疏挖末端延伸到新 01 断面。方案Ⅱ选择 3 种疏挖比降,分别是 0.001 5、0.001 和 0.000 5;3 个疏挖宽度依次为 50、80 和 140 m,共组合了 7 个疏挖子方案,其总疏挖量工程指标详见表 3。

各疏挖方案下中坝址厂房水位降幅见表 4。

表 3 尾水河道疏挖方案Ⅱ的总疏挖量工程指标

Table 3 Features of tail-water river dredging program Ⅱ

宽度/m Width	比降 Slope	疏挖工程量/万 m ³ The amount of dredging works	
50	0.000 5	123.19	
	0.001	94.20	
	0.001 5	79.51	
	0.000 5	192.76	
80	0.001	160.92	
	0.001 5	129.40	
140	0.001	308.97	

表 4 尾水河道疏挖方案Ⅱ中坝址厂房水位降幅

Table 4 The water level decline in dredging program Ⅱ

流量/(m ³ ·s ⁻¹) Discharge	原河道水位/m Natural water level	比降 0.001 Slope			比降 0.000 5 Slope		比降 0.001 5 Slope	
		50 m	80 m	140 m	50 m	80 m	50 m	80 m
100	2 593.20	—4.79	—4.79	—5.13	—6.57	—6.79	—2.39	—2.45
300	2 594.28	—4.35	—4.57	—4.91	—5.93	—6.31	—2.09	—2.3
500	2 595.13	—4.17	—4.52	—4.85	—5.53	—5.96	—2.03	—2.18
625	2 595.49	—3.91	—4.33	—4.66	—5.15	—5.56	—1.88	—2.02
750	2 595.83	—3.66	—4.09	—4.41	—4.74	—5.12	—1.77	—1.89
1 000	2 596.50	—3.1	—3.52	—3.8	—3.97	—4.25	—1.6	—1.7
1 250	2 596.96	—2.43	—2.72	—2.93	—3	—3.25	—1.18	—1.48
1 500	2 597.31	—1.63	—1.83	—1.95	—2.04	—2.22	—0.67	—0.87
1 750	2 597.94	—1.09	—1.22	—1.3	—1.4	—1.52	—0.36	—0.48
2 000	2 598.74	—0.79	—0.88	—0.94	—1.04	—1.12	—0.21	—0.29
2 250	2 599.60	—0.62	—0.67	—0.73	—0.82	—0.88	—0.13	—0.18
2 500	2 600.49	—0.49	—0.53	—0.58	—0.66	—0.7	—0.08	—0.12
3 000	2 602.27	—0.33	—0.36	—0.4	—0.47	—0.5	—0.03	—0.06

2.4 推荐方案的选择

由表 3 和表 4 可以看出,在同一疏挖比降下,疏挖宽度越大,即疏挖工程量越大,电站获得的水头越大,但不十分明显;在同一疏挖宽度下,比降越缓,电站获得的水头明显增加。综合分析推荐的疏挖方案为:疏挖末端到达野狐峡进口,疏挖比降为 0.000 5,疏挖宽度为 50 m,疏挖工程量为 123.19 万 m^3 。

图 2 为推荐方案的疏挖纵剖面,并给出了原河道与推荐疏挖方案在平均流量为 $625 \text{ m}^3/\text{s}$ 时水面

线的对比。由图 2 可以看出,推荐方案平均流量 $625 \text{ m}^3/\text{s}$ 下,厂房尾水位由疏挖前的 2 595.49 m 降低到 2 590.34 m,降低了 5.15 m;在 $300 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下,厂房尾水位降低了 5.93 m;在 $1\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 流量下,厂房尾水位降低了 3.97 m。随着流量的增大,电站尾水位降低的幅度越来越小,当流量超过 $2\,500 \text{ m}^3/\text{s}$ 以后,疏挖河道电站尾水位几乎不再降低。这是因为野狐峡的束水作用明显,导致吾托盆地水位急剧抬升,回水顶托淹没了中坝址厂房尾水位。

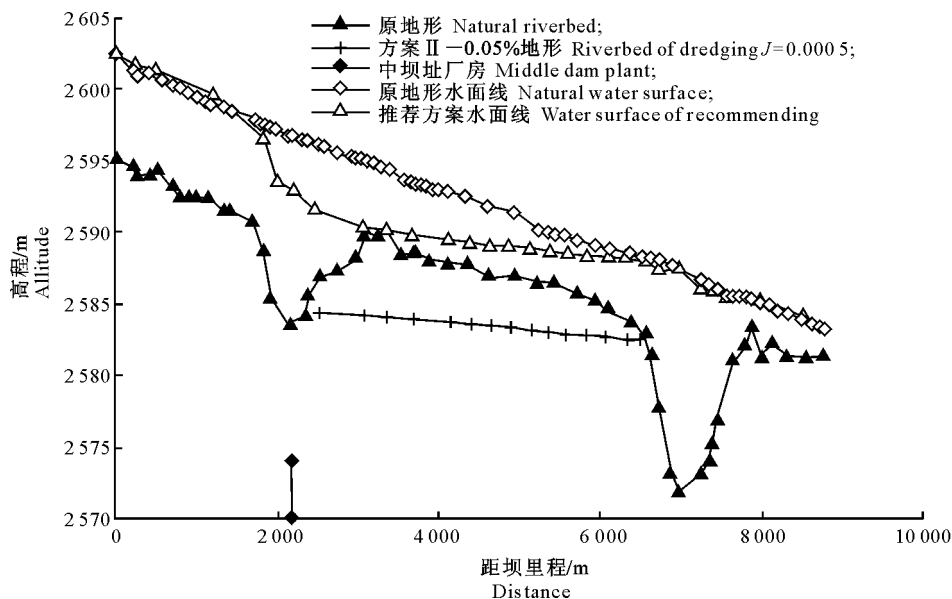


图 2 推荐疏挖方案地形剖面及平均流量 $625 \text{ m}^3/\text{s}$ 水面线

Fig. 2 Natural terrain profiles and water line under average flow $625 \text{ m}^3/\text{s}$ in recommended dredging program

3 考虑龙羊峡水库回水影响的羊曲水电站尾水疏挖计算

野狐峡处在下游龙羊峡水库的回水末端,龙羊峡水库低水位运行时,野狐峡及吾托盆地河段没有龙羊峡水库回水的顶托,通过开挖吾托盆地获得中坝线发电水头是可行的。当龙羊峡高水位运行时,野狐峡及吾托盆地受到不同程度的淹没,抬高了羊曲峡(中坝线电站)的水位,此时疏挖河道能否再获得发电水头需要进一步计算论证。

3.1 龙羊峡水电站简介

在拟建的羊曲水电站下游有已建的龙羊峡水利枢纽^[12]。龙羊峡水电站位于青海省海南藏族自治州黄河龙羊峡峡谷进口,以发电为主,兼有防洪、灌溉等综合利用效益。电站正常蓄水位 2 600 m,相应总库容为 247 亿 m^3 ,调节库容为 193.5 亿 m^3 ,库容调节系数为 0.94,为黄河唯一可以全年蓄水进行多年调节的水库。电站装机容量 1 280 MW,保证出力 589.8 MW,多年平均发电量 50.4 亿 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

陈飞等^[13]研究认为,由于龙羊峡水库实际运行受到上游来水、下游用水和电网限电等诸多因素的限制,致使其库水位长期处于低水位运行状态,耗水率高,经济效益低。钟炜等^[14]以龙羊峡水电站为背景,采用遗传算法建立了水电站调度模型,并在此基础上评估了龙羊峡水电站低水位运行所带来的发电损失,结果表明,龙羊峡水电站在实际调度中,低水位情况下超发电量现象十分严重,致使耗水率平均偏高达 34.36%,严重影响了水电站的长期运行效益。如果能恢复到正常水位下运行,每年可平均提高发电量 63.7%,并使耗水率降低 29.2%。以上研究表明,龙羊峡水库不可能一直处于低水位运行状态,当其坝前处于不同水位时,其回水对拟建的羊曲水电站的尾水影响是不同的。

3.2 龙羊峡不同坝前水位下野狐峡的水位-流量关系

设计方在考虑了龙羊峡水库变动回水区的泥沙淤积影响后,分析计算得到了龙羊峡不同坝前水位下野狐峡的水位-流量关系,结果见图 3。

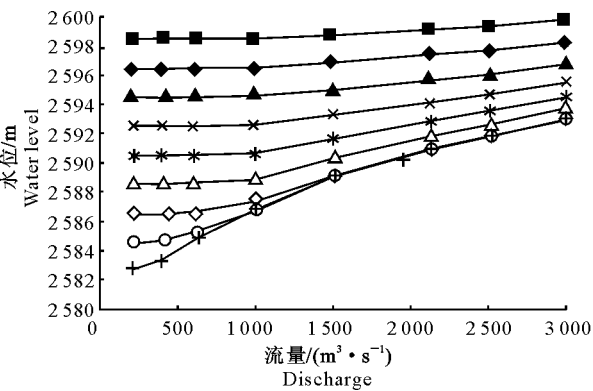


图 3 龙羊峡不同坝前水位下野狐峡断面的水位-流量关系

—■—, 坝前水位 2 600 m; —◆—, 坝前水位 2 598 m; —▲—, 坝前水位 2 596 m; —×—, 坝前水位 2 594 m; —*—, 坝前水位 2 592 m; —△—, 坝前水位 2 590 m; —◇—, 坝前水位 2 588 m; —○—, 坝前水位 2 586 m; —+—, 坝前水位 2 584 m

Fig. 3 The relationship between water level and water flow of Yehu gap considering the backwater effects of the Longyangxia reservoir in different water levels

—■—, Water leavel 2 600 m; —◆—, Water leavel 2 598 m; —▲—, Water leavel 2 596 m; —×—, Water leavel 2 594 m; —*—, Water leavel 2 592 m; —△—, Water leavel 2 590 m; —◇—, Water leavel 2 588 m; —○—, Water leavel 2 586 m; —+—, Water leavel 2 584 m

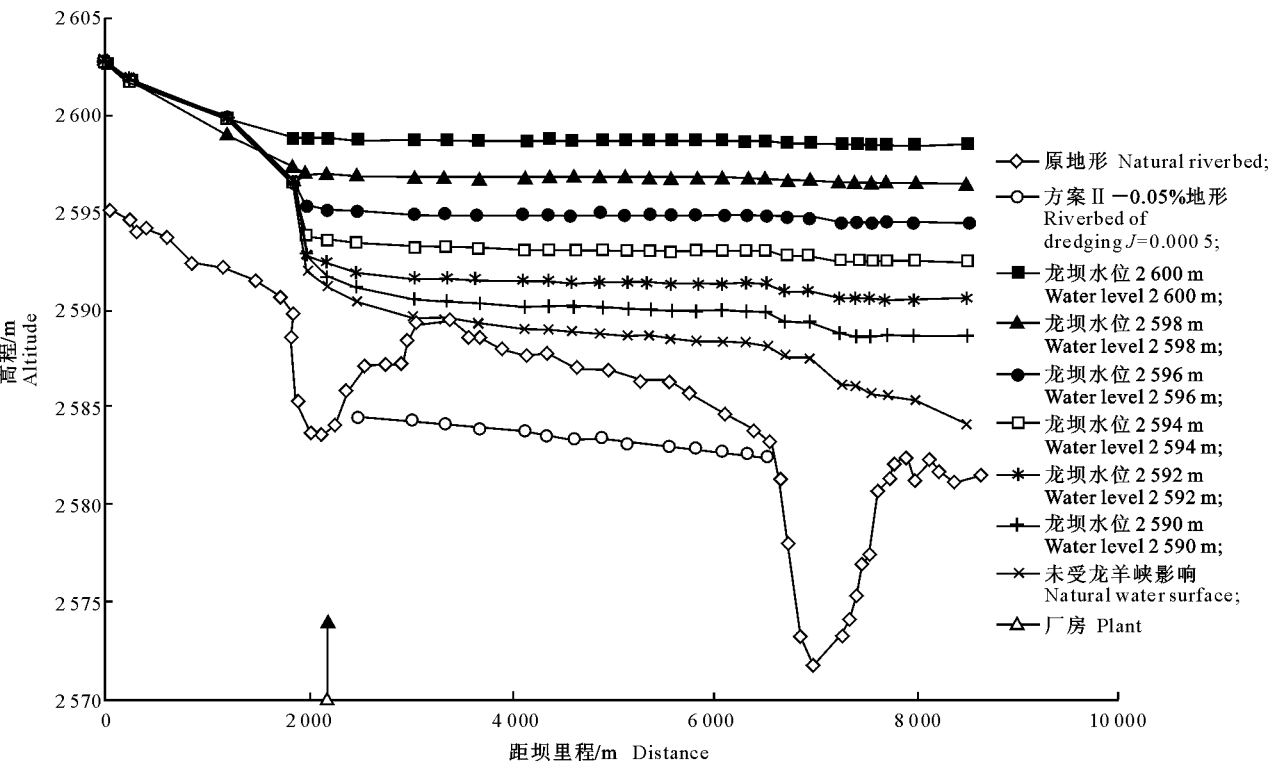


图 4 推荐方案平均流量 625 m³/s 下龙羊峡不同坝前水位时的羊曲河段水面线

Fig. 4 The water surface line of under considering the backwater effects of the Longyangxia reservoir in recommend dredging plan average discharge 625 m³/s

由图 3 可见,龙羊峡水位越高,野狐峡受回水淹没越严重,如坝前水位达到 2 600 m 时,野狐峡水位随流量上涨不大,几乎被完全淹没在龙羊峡库区。龙羊峡水位逐渐降低时,野狐峡水位随流量变化趋于明显,即对野狐峡影响逐渐减小;当龙羊峡水位低于 2 584 m 以后,野狐峡接近天然河道的水位-流量关系,也就是说野狐峡水位不再受龙羊峡回水的影响。

3.3 龙羊峡不同坝前水位下的羊曲河段水面线

对龙羊峡每一级坝前水位,羊曲峡河段都有与之对应的水位-流量关系曲线。数学模型在疏挖比降为 0.000 5,疏挖宽度为 50 m 的推荐方案下的疏挖地形上,针对每一级龙羊峡水位,以野狐峡水位-流量关系为下边界条件,推算了每一级坝前水位下,流量从 100 m³/s 变化到 3 000 m³/s 计算河段的若干条水面线。图 4 为推荐方案平均流量 625 m³/s 下龙羊峡不同坝前水位时的羊曲河段水面线。由图 4 可以看出,龙羊峡水位很低时,羊曲河道水面线较陡,几乎不受回水顶托;当龙羊峡水位较高时,河道水面线变缓,接近水平,说明此时已完全被淹没在龙羊峡库区。

3.4 龙羊峡不同坝前水位下羊曲水电站中坝址尾水断面水位-流量关系

用计算结果点绘了龙羊峡不同坝前水位下,羊

曲水电站中坝址厂房尾水断面水位-流量关系曲线如图 5 所示。

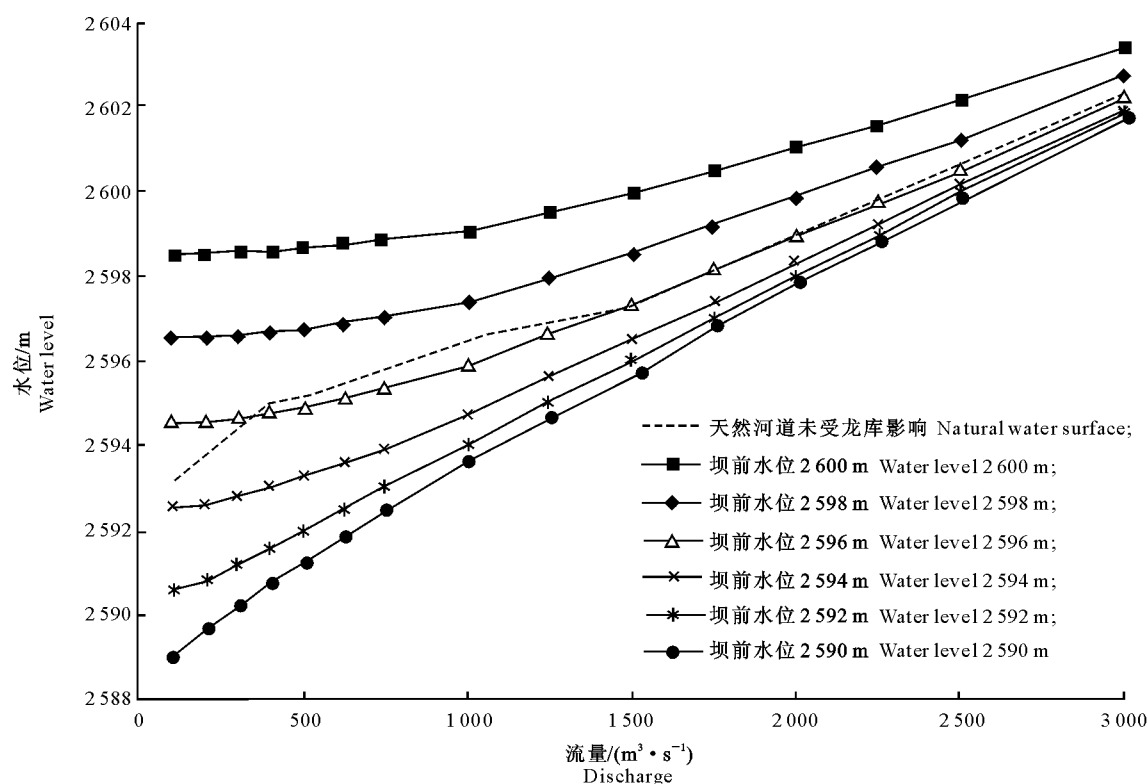


图 5 推荐疏挖方案下受龙羊峡回水影响的羊曲水电站中坝址厂房尾水水位-流量关系曲线

Fig. 5 The relationship between water level and water flow of Yangqu hydropower station middle plant under considering the backwater effects of the Longyangxia reservoir in recommended dredging plan

由图 5 可见,在龙羊峡水库 2 600,2 598,2 596 m 级水位条件下,羊曲水电站中坝址厂房的水位均超过了河道疏挖前的水位,即疏挖河道不增加发电水头;龙羊峡水位在 2 596 m 及其以下时,疏挖羊曲水电站尾水河道获得的发电水头对野狐峡影响较大,对羊曲峡影响较小。龙羊峡水位越低,羊曲水电站尾水位-流量关系曲线越陡,表明回水影响越小;龙羊峡水位越高,羊曲水电站尾水位-流量关系曲线变缓,表明回水顶托逐渐加大。以平均流量 625 m³/s 为例,龙羊峡水库坝前水位为 2 590 m 时,与开挖前相比电站仍能增加 4.47 m 水头;龙羊峡水库坝前水位为 2 596~2 590 m 时,羊曲水电站厂房尾水水位降幅为 0.48~4.47 m,当龙羊峡水位抬高到 2 598,2 600 m 时,电站却分别损失水头 1.33 和 3.23 m。

4 结 论

本研究在复杂地形条件下天然河道水面线计算研究^[11]的基础上,采用一维恒定非均匀流数学模型

进行分析,较好地解决了天然河道复式断面、突扩、突缩、水跃、水跌等复杂问题。将其应用于黄河羊曲水电站尾水疏挖研究,在考虑下游龙羊峡水库回水影响条件下,得出如下结论。

(1)羊曲水电站河段由羊曲峡、野狐峡及吾托盆地 3 部分组成,河道平均比降为 0.002 3,河宽变幅为 70~500 m,河床覆盖层以卵石为主,具备河道开挖疏浚的客观条件。

(2)拟定河道开挖比降为 0.000 5,0.001 和 0.001 5,开挖宽度为 50,80 和 140 m,改变开挖范围共组合了 7 个疏挖子方案,并分别预报了各级流量下的水面线、特征断面的水位-流量关系。

(3)从开挖工程量、电站尾水断面所获得的水头综合考虑,推荐疏挖比降为 0.000 5,疏挖宽度为 50 m 的开挖方案,该方案在平均流量 625 m³/s 时,电站厂房尾水位比河道开挖前降低了 5.15 m。

(4)在推荐的河道开挖地形上,对每一级龙羊峡坝前水位又分别计算了各级流量下的河道水面线和特征断面上的水位-流量关系。经多条曲线套绘分

析发现,龙羊峡水库坝前水位超过 2 596 m 时,河道开挖后羊曲水电站尾水位没有降低;龙羊峡水位低于 2 596 m 时,河道开挖后羊曲水电站尾水位才有所下降。在平均流量 $625 \text{ m}^3/\text{s}$ 下,龙羊峡水库坝前水位为 2 596~2 590 m 时,羊曲电站厂房尾水水位降幅为 0.48~4.47 m。

参考文献

- [1] 谢小平. 水库防洪关键问题的理论与方法研究 [D]. 西安:西安理工大学,2007.
Xie X P. Study on theory and method of some key problems in reservoir flood control [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [2] 贾东旭. 水电站水库提高水能利用率的方法研究 [D]. 辽宁大连:大连理工大学,2001.
Jia D X. Study on the improving method of water utilization in hydropower reservoirs [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2001. (in Chinese)
- [3] 马超. 梯级水利枢纽多尺度多目标联合优化调度研究 [D]. 天津:天津大学,2008.
Ma C. Research on multi-scale and multi-objective combined optimal dispatching of cascaded hydropower junctions [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)
- [4] 吴爱华,周建中,陶东兵,等. 水库优化调度中随机动态规划方法的研究与应用 [J]. 计算机仿真,2003,20(10):39-42.
Wu A H, Zhou J Z, Tao D B, et al. Research and application of stochastic dynamic programming method for hydroelectric station optimal operation [J]. Computer Simulation, 2003, 20(10):39-42. (in Chinese)
- [5] 刘涵. 水库优化调度新方法研究 [D]. 西安:西安理工大学,2006.
Liu H. New methods study of reservoir optimal operation [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [6] 原文林,黄强,王义民,等. 最小弃水模型在梯级水库优化调度中的应用 [J]. 水力发电学报,2008,27(3):16-21.
Yuan W L, Huang Q, Wang Y M, et al. Application of minimal abandoned water model in optimal operation of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2008, 27(3):16-21. (in Chinese)
- [7] 黄强,张建生,曹辉,等. 梯级水库调节库容合理规模研究 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):44-49.
Huang Q, Zhang J S, Cao H, et al. Research on reasonable size of the regulated storage of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):44-49. (in Chinese)
- [8] 黄炜斌,马光文,王和康,等. 混沌粒子群算法在水库中长期优化调度中的应用 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):102-105.
Huang W B, Ma G W, Wang H K, et al. Application of chaos particle swarm optimization algorithm to mid-long term optimal operation of hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):102-105. (in Chinese)
- [9] 万芳,原文林,黄强,等. 基于免疫进化算法的粒子群算法在梯级水库优化调度中的应用 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):202-206.
Wan F, Yuan W L, Huang Q, et al. Application of particle swarm optimization and immune evolutionary algorithm to optimal operation of cascade reservoirs [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):202-206. (in Chinese)
- [10] 杨道辉,马光文,杨梅. 育种粒子群算法在梯级水电站优化调度中的应用 [J]. 水力发电学报,2010,29(1):207-212.
Yang D H, Ma G W, Yang M. Application of BBPSO to optimal operation of cascade hydropower stations [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1):207-212. (in Chinese)
- [11] 林劲松,巨江,张宽地,等. 复杂地形条件下天然河道水面线计算研究 [J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2010,38(9):187-191.
Lin J S, Ju J, Zhang K D, et al. Study on natural river water surface calculation of complex terrain conditions [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2010, 38(9):187-191. (in Chinese)
- [12] 陈飞,李瓚. 再谈龙羊峡水电站初期运行 [J]. 西北水电,1997(4):1-7.
Chen F, Li Z. Repeat study on the early-stage operation of Longyangxia hydropower station [J]. Northwest Hydropower, 1997(4):1-7. (in Chinese)
- [13] 陈飞,李瓚. 黄河龙羊峡水电站的初期运行 [J]. 水力发电学报,1998(1):33-46.
Chen F, Li Z. The early-stage operation of Longyangxia hydropower station [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1998(1):33-46. (in Chinese).
- [14] 钟炜,韩松,冯平,等. 龙羊峡水电站运行调度问题的分析研究 [J]. 水电能源科学,2004,22(2):36-39.
Zhong W, Han S, Feng P, et al. Study on operating scheduling problem of Longyangxia hydroelectric station [J]. Water Resources and Power, 2004, 22(2):36-39. (in Chinese)