



高水头省水船闸水工结构及输水系统研究*

张丽媛, 汤建宏

(中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 长江上游地区水头高、流速快、水位变幅大, 对通航建筑物提出了较高的要求, 采用升船机形式较难解决运量小、高地震烈度对塔柱的横向位移要求等问题; 多级船闸形式又面临耗水量巨大、下游引航道流态不佳等问题。省水船闸是解决上述问题的有效结构形式, 但在我国的应用经验较为有限。以三峡新通道工程为依托, 从省水船闸的工作原理出发, 分别对结构选型、省水池布置、结构高程及尺度确定、输水系统的计算流程和参数确定方法等关键问题进行研究, 并通过结构核算、输水效率、省水量3个方面说明省水船闸方案的可行性及其相对于梯级船闸的优越性。

关键词: 省水船闸; 水工结构; 输水系统; 高水头

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)10-0146-06

Research on structure and water-conveyance system in high water head water-saving ship lock

ZHANG Li-yuan, TANG Jian-hong

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Most of the rivers in the upper Yangtze River have high water head, rapid flow, large variation of water level. Serving as a navigation structure, ship lift cannot satisfy great traffic volume and lateral displacement limitation of tower column under earthquake, while traditional multistage ship lock has to deal with a series of problems: huge water consumption, poor flow regime in lower lock approach, etc. Water saving ship lock can effectively solve the problems above, however not enough experience has been gained domestically. Based on the water-saving ship lock scheme of the new channel of Three Gorges project, from the perspective of working principle of water-saving ship lock, this article studies structure selection, layout of water basins, structure elevation and scale are discussed in detail. Structure stability, conveyance efficiency of the scheme are analyzed, and superiority comparison to cascade ship lock scheme is expounded.

Keywords: water-saving ship lock; hydro structure; water-conveyance system; high water head

长江上游不仅是西部大开发的重要战略地区, 也是“一带一路”和长江经济带的关键路径, 宽阔的水道、优良的水深条件为高等级水运交通提供了天然的通航基础。由于该区域水头高、流速快、水位变幅大, 船闸的建设与运行受到下列不利条件的干扰: 1) 船舶单向运行耗水量巨大; 2) 高水头作用下, 阀门启闭时门后方流速过快,

极易引起结构的空蚀、空化; 3) 巨大的下泄流速造成下游引航道流态不佳, 不利船舶泊稳。当主体结构采用省水船闸结构时, 高水头在逐级省水结构中释放, 不仅能够缓解上述问题, 水资源也得以循环利用。

然而目前高水头省水船闸结构在国内外的研究均较为有限^[1], 国内外部分省水船闸概况见表1。

收稿日期: 2016-06-16

*基金项目: 国家自然科学基金(51109118); 浙江省自然科学基金(LY14E090001)

作者简介: 张丽媛(1988—), 女, 硕士, 工程师, 从事内河航运和海港码头研究。

表 1 国内外部分省水船闸

船闸名称	闸室尺度/(m×m)	水头/m
爱尔兰根	200×12	18.3
吕内堡	190×12	38.0
于尔岑	190×12	23.0
郑家岗	130×12	28.35(两级)
乌江银盘	120×12	36.50

在我国, 自 20 世纪 60 年代以来, 仅对郑家岗省水船闸^[2]、乌江银盘省水船闸^[3-4]、桂林春天湖省水船闸^[5]等开展了系列试验, 在水动力学、输水系统、运行方式等方面取得了有限的研究成果, 对于高水头省水船闸的设计与运行尚缺乏成熟的实践经验。

1 省水船闸的工作原理

1.1 省水船闸的工作原理

带省水池的船闸工作原理见图 1, 描述了灌水、泄水两个过程^[6]。

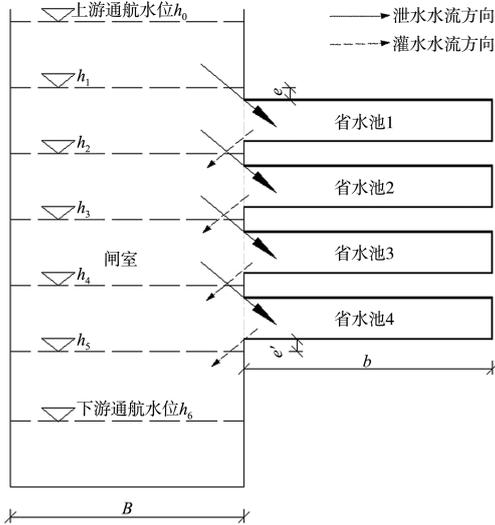


图 1 省水船闸灌泄水原理

灌水时, 闸室水位从下游通航水位 h_6 逐级升高至上游通航水位 h_0 。当水位依次由 h_6 上升至 h_5 , h_5 上升至 h_4 , \dots , h_3 上升至 h_2 时, 水流依次从省水池 4~省水池 1 排入闸室。每级灌水结束后, 闸室内水位低于相应省水池底部一定高度 e' 。最后 $h_0 \sim h_2$ 之间的水由上游引航道灌入闸室。从灌水的过程可以看出, 省水池节约了 $h_2 \sim h_6$ 的水量。

泄水时, 闸室水位从上游通航水位 h_0 逐级降

至下游通航水位 h_6 , 当水位依次由 h_0 下降至 h_1 , h_1 下降至 h_2 , \dots , h_3 下降至 h_4 时, 水流依次灌入省水池 1~省水池 4。每级灌水结束后, 水位高出相应省水池顶板一定高度 e 。最后 $h_4 \sim h_6$ 之间的水直接泄入下游引航道。从泄水的过程可以看出, 省水池节约了 $h_0 \sim h_4$ 的水量。

1.2 省水量的计算

当各级水位差相等、各级省水池储水量相同时, 省水量可由下式表示:

$$E = \frac{nm(H-2e)}{[1+m(1+n)]H} \quad (1)$$

式中: H 为灌泄水总水头差(m); e 为省水池顶预留的深度(m); $m = S_p/S_c$ 为省水池面积与闸室面积之比。实际工程中省水池的面积略大于闸室面积, $m = 1.5 \sim 2$; n 为省水池数量。当 $H \gg 2e$, 则有 $E = nm/[1+m(1+n)]$ 。

省水池到达一定数量后, 增加省水池的数量并不能明显提高省水率。一般地, 当 $H = 20$ m, $n = 2 \sim 3$; $H = 40 \sim 60$ m, $n = 6 \sim 8$ ^[7]。

2 三峡新通道省水船闸方案

与三峡大坝配套设计的双线五级船闸, 主体长 1.6 km, 船闸尺度 34 m×280 m, 最大水头差为 113 m, 单向通过能力 6 200 万~6 700 万 t/a, 是迄今为止世界第一大船闸, 也是长江上游最重要的通航枢纽。但近年来, 不断攀升的货运量与有限的船闸通过能力之间的矛盾日益凸显。经测算, 船闸单向通过能力需达到 1.8 亿 t/a 才能满足运量预测的要求, 远远超过现有船闸的能力。因此, 建设新的三峡水运通道势在必行。“十三五”规划明确将“推进三峡枢纽水运新通道建设, 完善三峡综合交通运输体系”作为现阶段国家的重点发展课题。这为高水头省水船闸的设计研究提供了良好的契机。

面对三峡高水头的工作状况, 提出采用两级双线省水船闸带中间渠道分散布置的形式, 这样不仅能够利用省水船闸的结构优势, 而且检修、调度更为灵活。过闸船舶还可以利用中间渠道双向运行。但三峡高水头工作条件对省水船闸结构

特性、输水特性提出的挑战是现有研究与工程经验难以解决的。因此,本文结合三峡新通道省水船闸方案,以上级船闸为例,对高水头船闸的水工结构与输水系统设计方法进行了详细研究。

3 船闸主体水工结构设计

省水船闸主体水工结构需要满足3方面的要求:1)主要建筑物高程满足行船、挡洪的要求;2)建筑物能够满足输水系统和工艺机械的布置要求;3)结构自身的稳定和强度符合要求。

3.1 结构选型

闸首闸室的结构形式分为重力式、衬砌式、混合式3种。重力式结构稳定性好、结构强度高,具有较强的地基适应性。但结构断面较大,易产生温度裂缝问题^[8],并且开挖量较大。衬砌式结构、混合式结构适用于岩面较高的情况,结构断面相对较小,开挖量较小。

省水船闸方案不仅要建设船闸主体结构,还要为省水池结构留出空间。采用封闭式省水池能够节约建设用地^[9],若进一步将省水池设置在主体结构边墩内,省水池更接近闸室,灌、泄水的路径大大缩短。同时,省水池在边墩内部充当空箱功能,不仅节省建筑材料,还减少了大体积混凝土水化热问题。因此,三峡新通道工程上级船闸主体结构闸首采用钢筋混凝土实体底板和箱型边墩组成的整体式结构,闸室结构采用钢筋混凝土分离式结构,见图2。

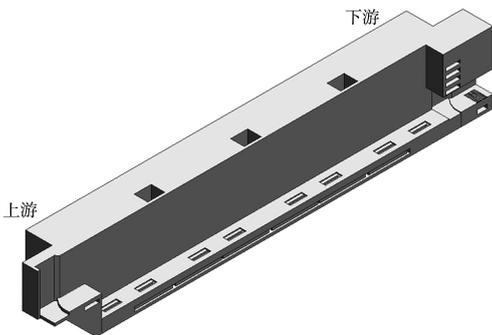


图2 三峡新通道省水船闸主体结构(半结构)

3.2 船闸规模及船闸尺度的确定

船闸规模主要包含3个参数^[10],即:

$$\text{闸室有效长度 } L_c = \sum l_c + \Delta L \quad (2)$$

$$\text{闸室有效宽度 } B_c = \sum b_c + \Delta B_c \quad (3)$$

$$\text{门槛水深 } H_c \geq 1.6T \quad (4)$$

式中: $\sum l_c$ 为一次过闸船队在闸室同一航线上停泊的总长度; ΔL 为闸室富裕长度; $\sum b_c$ 为一次过闸船队并列停泊的最大总宽度; ΔB_c 为富裕宽度; T 为最大船队满载吃水深度。计算得 $L_c = 400 \text{ m}$, $B_c = 40 \text{ m}$ 。

需要特别指出的是,已建三峡五级船闸门槛水深为5.5 m,实际运行时,并未按照5.5 m/1.6=3.4 m吃水控制过闸船舶,而是超设计能力通行吃水为4.3 m的大船,即实际 $H_c/T = 1.28$ 。多年来的实践经验显示,超能力运行并未出现搁浅碍航等问题。

三峡新通道的船型最大吃水为5.5 m,按照式(4)并借鉴三峡已建船闸的经验, $H_c = 8 \text{ m}$ 。

3.3 主要部位高程

船闸主体结构特征高程的限定条件及计算公式见表2。

表2 船闸结构主要高程

高程	限定条件	计算公式及结果
上闸首门槛顶高程	满足上游最低通航水位下的行船要求	$\nabla H = \nabla H_{ulwt} - H_c$ (137 = 145 - 8) m
闸首墙顶高程	满足挡洪闸门的安装、使用需求,且与枢纽挡水建筑物高程一致	$\nabla H = \nabla H_{dfl} + \Delta_1$ (183 = 180.6 + 2.4) m
闸室墙顶高程	满足上游最高通航水位的过闸要求	$\nabla H = \nabla H_{ubwt} + \Delta_2$ (178 = 175 + 3) m
闸室墙底高程、下闸首门槛顶高程	满足下游最低通航水位下的行船需求	$\nabla H = \nabla H_{lcwt} - H_c$ (111 = 119 - 8) m

注:表中 ∇H_{ulwt} 、 ∇H_{dfl} 、 ∇H_{lcwt} 、 H_c 、 Δ_1 、 Δ_2 分别为上游最低通航水位、设计洪水位、中间渠道水位、门槛水深、闸首安全超高、闸墙安全超高。

3.4 闸首平面尺寸

闸首长度可按式(5)计算:

$$l = l_1 + l_2 + l_3 \quad (5)$$

式中: l_1 为门前段长度,将检修门槽设置于闸首范围外可以减少闸首长度、节省投资, $l_1 = 1.0 \text{ m}$; l_2 为门龛段长度,因工作闸门的形式不同而异。根据国内外已建工程经验,超大型闸门主要门型为横拉门、人字门,但是横拉门需要开山建设门

库, 土建投资增大, 因此, 三峡新通道闸首结构选用人字门:

$$l_2 = (1.1 \sim 1.2) (B_c + d) / (2 \cos \theta) \quad (6)$$

式中: B_c 为闸首口门宽度, 由式(3)得 $B_c = 40$ m; d 为门龕深度(m), $d = 0.8$ m; θ 为闸门与船闸横轴线的夹角, 取 $\theta = 22.5^\circ$ 。因此最终求出 $l_2 = 26$ m。 l_3 为支持段长度(m), 由闸首稳定性计算和强度确定。国内已建船闸的统计资料表明, l_3 与水头、边墙的比值变化幅度较大, 国内外研究结果也缺乏一致的认知。参照葛洲坝 2 号、3 号船闸的建设经验, 取 $l_3 = 0.7h = 29$ m, h 为工作水头(m)。

闸首边墩宽度一般为 2~3 倍廊道宽度, 廊道宽度为 5.5 m×6.3 m (宽×高), 故闸首边墩宽度取 12 m。

3.5 闸室平面尺寸

常规船闸设计中, 闸室顶宽仅需满足行车等使用要求, 取值为 0.1~3 m, 边墩底宽及具体断面由稳定性确定。由于三峡新通道船闸在闸首、闸室边墩内设置省水池, 省水池的平面尺寸与闸室尺度的关系需满足式(1), 即 $S_p/S_c = 1.5 \sim 2.0$ 。若省水池布满双侧闸墙, 闸墙宽度 b 应为闸室有效宽度加上边墩壁厚, 即 $b = 46$ m。

3.6 省水池布置

三峡省水船闸上级船闸上游最高通航水位 175.0 m, 中间渠道水位 119.0 m, 共设置 5 级省水池, 每级省水池高度为 4 m, 各级省水池灌、泄水过程见表 3。

表 3 5 级省水池灌泄水过程

省水池 编号	省水池顶底 高程/m	省水池灌(泄)水 时闸室内水位/m
1	129~133	143~135(119~127)
2	137~141	151~143(127~135)
3	145~149	159~151(135~143)
4	153~158	167~159(143~151)
5	161~165	175~167(151~159)

4 输水系统设计

4.1 输水系统形式的选择

船闸输水形式一般采用下式确定^[11]:

$$m = T/\sqrt{H} \quad (7)$$

式中: T 为灌水时间(min); H 为水头(m)。本工

程中, 最大工作水头 $H \geq 28$ m, 规定灌水时间 $T = 12 \sim 15$ min, $2.5 < m = T/\sqrt{H} < 3.5$ 。通过对国内外大型船闸的实际建设资料进行统计分析^[12], 在工作水头 $H \geq 28$ m 时, 使用复杂式分散输水系统能够改善闸室内外的水流条件, 利于形成船舶泊稳条件。复杂式输水系统供水区段多且廊道水流惯性对各供水区段的影响基本相同, 在水流分配和消能上能够达到较为满意的效果。借鉴葛洲坝 1 号船闸的 8 根纵支廊道 4 区段出水输水系统的成功经验, 三峡新通道船闸采用垂直分流闸底纵支廊道 4 区段出水的输水形式。

4.2 廊道尺寸

闸墙廊道的廊道断面面积、省水池灌泄水廊道断面面积可由下式求出:

$$\omega = \frac{2C(\sqrt{H+d}-\sqrt{d})}{\mu T \sqrt{2g} [1-(1-\alpha)k_v]} \quad (8)$$

式中: ω 为输水廊道断面面积(m^2); C 为闸室水域面积(m^2); H 为设计水头(m), d 为惯性水头(m), μ 为阀门全开时输水系统的流量系数, 可取 0.6~0.8; T 为闸室输水时间(s); α 为系数, 查表得出; K_v 可取 0.6~0.8; g 为重力加速度(m/s^2)。表 3 中已经列出各级省水池与闸室之间灌(泄)水时对应的闸室水位情况。主廊道的灌(泄)水水头差为 $H = 135 \text{ m} - 119 \text{ m} = 165 \text{ m} - 159 \text{ m} = 16 \text{ m}$, 省水池与闸室之间灌(泄)水水头差 $H = 175 \text{ m} - 165 \text{ m} = 129 \text{ m} - 119 \text{ m} = 10 \text{ m}$ 。惯性水头 d 根据已有研究经验暂取 $0.40 \text{ m}^{[13]}$, $\mu = 0.73 \sim 0.75$, $\alpha = 0.545$, $T = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$, $K_v = 0.40$ 。

因此主廊道 $\omega = 70 \text{ m}^2$, 进水口尺寸设定为 5.5 m×6.3 m (宽×高), 闸首双侧对称布置; 闸室与省水池相连的输水廊道 $\omega' = 142 \text{ m}^2$ 。每侧闸墙上设 3 个直立的输水阀门井, 单个阀门井尺寸为 20 m×16 m, 阀门井内放置输水廊道, 廊道尺寸为 5 m×5 m, 下端与闸室底的输水廊道相连, 阀门井身沿高程设树状阀门廊道依次与 5 个省水池相连。闸室底部设 16 个出水口, 每个出水口尺寸为 20 m×6 m (长×宽), 通过出水口完成闸室内的灌、泄水。输水系统与省水池布置见图 3。

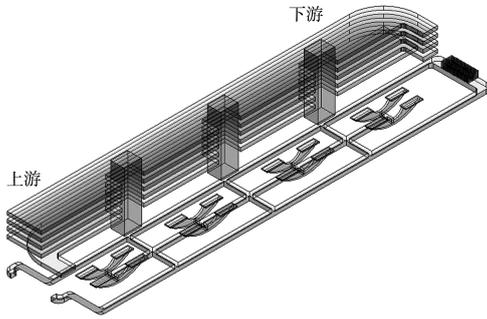


图3 三峡新通道省水船闸输水系统及省水结构
(输水系统+单侧省水池)

5 省水船闸技术评价

5.1 结构核算

针对省水船闸结构进行了各种工况^[14]下的有限元计算, 计算结果见表4。

表4 省水船闸结构核算结果

计算工况	闸顶横向位移/cm	混凝土最大拉应力/MPa	最大地基应力/MPa
完建工况	2.5	2.6	1.40
灌水工况	2.3	3.3	1.48
泄水工况	0.1	2.3	1.54
检修工况	2.3	2.9	1.35
地震工况(灌水)	3.3	4.0	1.54
地震工况(泄水)	0.9	2.1	1.59

从计算结果可以看到, 闸墙向内的最大变形量为 3.3 cm, 相对变形比为 0.04%; 结构最大拉应力为 4.0 MPa(局部), 通过配筋能满足混凝土的抗裂需求; 地基最大压应力为 1.59 MPa, 不超过一般中风化、弱风化岩基的承载能力。综合来看, 各项力学参数基本满足设计要求。

需要特别指出的是, 由于闸首、闸室均为直墙重力式结构, 墙高最大高达 84 m。在后方填土至闸墙顶的情况下, 闸室边墙中部的横河向位移及混凝土拉应力为结构核算的重点。当横河向位移或混凝土拉应力较大时, 可采取的措施有: 在保证通航净空的要求下, 在结构顶部增加肋梁、加大边墩宽度或者考虑衡重式结构方案。

5.2 输水效率

船闸输水时间由闸门开启时船闸灌、泄水输水时间和闸门全开船闸灌、泄水时间组成, 即:

$$T = \frac{2C(\sqrt{H+d} - \sqrt{d})}{\mu\omega\sqrt{2g}} + (1-\alpha)t \quad (9)$$

各参数含义同式(8)。省水船闸与连续 5 级船闸的输水效率计算结果见表 5、6。

表5 省水船闸方案输水效率计算结果

位置	水头差/m	输水时间/min	阀门开启时间/min	廊道尺寸(宽×高×个数)/(m×m×个)	廊道最大瞬时流量/(m ³ /s)	廊道最大瞬时流速/(m/s)	闸室水位平均下降速度/(cm/s)	闸室水位瞬时下降速度/(cm/s)
省水池灌水	10	4	1	5×5×6	862.1	8.13	3.33	4.84
下游引航道泄水	16	10	4	5.5×6.3×2	711.3	10.26	2.67	3.83

表6 5级船闸输水方案输水效率

指标	每级船闸水头差/m	输水时间/min	闸门开启时间/min	廊道尺寸(宽×高×个数)/(m×m×个)	廊道最大瞬时流量/(m ³ /s)	廊道最大瞬时流速/(m/s)	闸室水位平均下降速度/(cm/s)	最大瞬时下降速度/(cm/s)
参数	22~23	14	3.5	5.0×6.7×2	748.3	11.2	2.74	4.07

省水船闸单次输水时间为 30 min。上下两级船闸的总输水时间为 60 min。连续 5 级船闸的总输水时间为 70 min。可以看出省水船闸方案能够较大提升输水效率、减少船舶的过闸时间。

5.3 省水量

对于省水船闸方案, 式(1)中, $m=2$, $e=2$, $H=56$ m, $n=5$, $E=71.4\%$, 即一次过闸的省水量为 640 km³, 耗水量为 256 km³。而三峡连续 5 级的耗水量为 423 776 m³^[7], 是省水船闸的 1.66 倍。

由此可见, 省水船闸在水头节约利用上有明显的优势。节约的水能资源有利于创造更多通航、发电等经济社会效益。

6 结语

本文针对三峡新通道分散布置省水船闸方案, 以上级船闸为例进行了高水头省水船闸水工结构及输水系统研究, 并得到了如下研究成果: 1) 研究了高水头工作条件下封闭式省水船闸设计流程

及结构构造、主要参数选取方法, 尤其是省水池布置和尺度确定方法; 2) 明确了高水头船闸输水系统形式的选取和主要尺度的确定方法, 特别是省水池与闸室连接的廊道尺度的确定方法; 3) 说明了高水头省水船闸输水时间、耗水量的计算方法。

通过结构稳定性、输水效率和省水量的计算论证了省水船闸高效输水、水头利用等方面的优越性。

需要指出的是, 本文仅从技术角度分析了省水船闸的优越性。实际上, 评价省水船闸方案还应综合考虑新通道线路的平面布置、建材使用量、土地开挖与征用量等经济及社会效益指标。

参考文献:

- [1] 王晓青, 刘畅. 省水船闸发展及研究现状[J]. 重庆建筑, 2013(10): 52-54.
- [2] 杨裔轩, 黄秀章. 郑家岗省水船闸输水系统水力学试验[J]. 水利水运工程学报, 1980(1): 83-86.
- [3] 杨忠超, 陈明栋, 杨斌. 乌江银盘省水船闸整体水力学模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2010(2): 61-66.

- [4] 杨忠超, 陈明栋, 杨斌, 等. 乌江银盘水利枢纽省水船闸运行方式研究[J]. 水运工程, 2009(6): 111-116.
- [5] 黎运菜, 石桂萍. 桂林市春天湖双线省水船闸及其输水系统特性分析[J]. 中国水运, 2011(9): 76-78.
- [6] PIANC. Service Waterway & Harbour Information. Final report of the International Commission for the study of locks [R]. Belgium: PIANC, 1992.
- [7] 周华兴. 水运工程中省水建筑物形式及对有关问题的探讨[J]. 水运工程, 1994(7): 1-5.
- [8] 左正, 胡昱, 李庆斌, 等. 大体积混凝土温度应力耦合直观化仿真计算系统[J]. 计算力学学报, 2013, 30(S1): 1-6.
- [9] 周华兴, 王永成. 省水船闸输水系统设计若干问题综述[J]. 河海科技进展, 1994(1): 56-63.
- [10] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].
- [11] TJ 306—2001 船闸输水系统设计规范[S].
- [12] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水利水电出版社, 1992.
- [13] 张瑞凯, 须清华. 船闸输水初始流量增率和惯性水头计算[J]. 水利水运工程学报, 1994(4): 297-306.
- [14] JTJ 307—2001 船闸水工建筑物设计规范[S].

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 135 页)

5 结语

1) 在传统北方煤炭七港中, 日照港到港港铁路车型最为复杂, 既有现状的 C6X、C70 及通用 C80E 车型, 又有新建的瓦日铁路 C96 重载车型, 且此多种车型将会在较长时间中同时存在, 因此给日照港的煤炭翻车机设计选型带来很大困难, 这就要求翻车机能适应不同车型, 并尽量减少后续再改造的可能性。

2) 近期对已有翻车机搬迁并做较小改造, 以适应近期到港车辆复杂的情况, 中期、远期根据运量和铁路车型发展情况选用万能型翻车机是合理的。

3) 新建的瓦日铁路 C96 火车车型目前处于试验阶段, 尚未批量生产, 中期、远期翻车机须结

合批量生产的 C96 实际车型再做优化调整。

参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 日照港总体规划[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2009.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司. 日照港石臼港区南作业区规划方案调整报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2013.
- [3] 中交水运规划设计院有限公司. 日照港石臼港区南作业区翻车机系统建设方案报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2015.
- [4] 尹锡泽. 国投曹妃甸煤码头工程翻车机卸车系统的选型[C]//中国交通建设股份有限公司. 中国交通建设股份有限公司现场技术交流会文集, 2010.

(本文编辑 郭雪珍)