

· 原型观测 ·



富春江船闸扩建改造工程闸室输水 水力特性及优化*

严秀俊, 安建峰, 郑飞东, 赵宇航

(南京水利科学研究所, 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室,
水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210029)

摘要: 随着我国内河航运的不断发展, 以保留老船闸使其兼作新船闸引航渠为方案的船闸扩建改造已成为突破内河通航“瓶颈”的创新性举措, 并已成功运用于富春江船闸扩建改造工程。研究成果表明, 输水阀门线性全开时, 由于老船闸上闸首口门处过水断面较小, 新闸室充水时老闸室内水位迅速下降, 并在其门槛处产生 7.15 m 的集中跌落。在满足闸室输水时间的前提下, 综合阀门启闭力、振动、空化及闸室惯性超高等特性, 提出改造方式下船闸充水阀门分段间歇性开启加动水关闭的优化运行方式, 使老闸室门槛处集中跌落降至 0.5 m, 有效地改善了引航渠内的水流条件。

关键词: 船闸改造; 引航渠; 输水阀门; 原型观测; 模型试验

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0188-06

Optimization of hydraulic characteristics of conveyance water lock in Fuchunjiang ship lock extension and reconstruction project

YAN Xiu-jun, AN Jian-feng, ZHENG Fei-dong, ZHAO Yu-hang

(Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China)

Abstract: It is an innovative measure for improving the inland shipping capacity by preserving the outdated ship lock as an approach channel in extension and reconstruction projects including Fuchunjiang ship lock. The results show that the water level of the outdated lock chamber will decrease rapidly during water filling for the new chamber due to the smaller wetted area at the entrance of the outdated navigation lock. Consequently, the concentrated hydraulic drop formed commonly at the doorsill of the outdated navigation lock is 7.15 m. Under the prerequisite of satisfying the requirement of the filling time and considering characteristics including the hoisting capacity, vibration, cavitation and over filling (emptying). We propose the optimized mode of the conveyance water locks, i. e., intermittent opening combined with closing in dynamic water, which makes the concentrated hydraulic drop at the doorsill of the outdated navigation lock reduced to 0.5 m. The flow regime in the approach channel is improved with the optimized mode.

Keywords: ship lock reconstruction; approach channel; conveyance water lock; prototype observation; physical model test

船闸扩建改造、新建航运通道以及增建升船机等方式是解决内河通航瓶颈问题的主要手

段^[1]。其中, 国内典型的船闸扩建改造工程——富春江船闸扩建改造工程创新性地采用了在原有

收稿日期: 2016-09-19

*基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402007); 国家自然科学基金青年基金(51509162); 江苏省自然科学基金青年项目(BK20150079); 中国博士后科学基金面上资助(2015M581831)

作者简介: 严秀俊(1971—), 男, 教授级高级工程师, 从事船闸及升船机水动力学研究。

船闸下游新建一座Ⅲ级标准船闸并保留原有船闸作为新船闸引航渠的设计方案,对碍航闸坝的改造具有示范性作用,对构建畅通、高效、安全、绿色的现代化内河水运体系具有重要的意义^[2]。但是,由于原有船闸上闸首口门处过水断面较小,新闸室充水时随充水流量增大,上引航渠道(原有船闸闸室)内水位将有所下降,导致船舶等待进出闸室时间较长,从而降低船闸通过能力^[3]。因此,需对船闸输水阀门运行方式进行优化,在满足闸室输水时间的前提下,综合阀门启闭力、振动、空化及闸室惯性超高等特性^[4-5],提出合理的工作阀门启闭方式,从而避免不良流态对闸室输水效率和船闸运行安全等方面的不利影响。

1 船闸输水系统布置形式

富春江船闸输水系统的进水口由两部分组成,即通过老船闸现有输水系统进水和老船闸闸底廊道上方新增廊道顶板进水孔进水。上游进水口保

留原有船闸上闸首顶面格栅进水,并在原闸室底部廊道上方加设两支输水廊道,两支廊道中间采用间隔布置的椭圆形导流墩分隔。船闸上闸首输水廊道进水口与老船闸新增输水廊道衔接,通过水平及竖向弯曲输水廊道跌水至横向水平输水廊道,再分向左、右两侧闸墩,与两侧闸墩底部纵向水平输水廊道相连,其下游与闸室输水廊道相连。富春江船闸新闸室输水廊道断面为 40.5 m^2 。为了减小闸室底板厚度,采用侧支孔出水明沟消能,闸底廊道出水段每侧设 46 个出水孔,分为 3 组。出水段支孔采用分组、等间距布置,出水支孔间距为 4.5 m。富春江船闸下闸首输水廊道及泄水口由闸室底廊道通过两个水平转弯与下闸首闸室输水廊道相联接,廊道宽度由 4.5 m 渐变至 4.0 m。为了保证下游引航道具有较好的通航水流条件,下闸首右侧廊道通过消能室顶支孔出水泄入下游引航道;左侧廊道采用旁侧泄水,出水口断面面积取阀门断面面积的 2 倍,并设中间隔墩。船闸输水系统布置形式如图 1 所示。

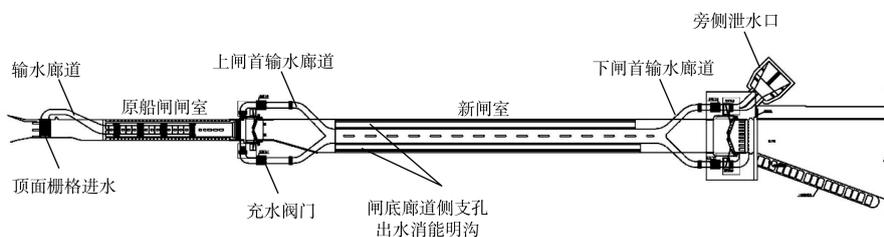


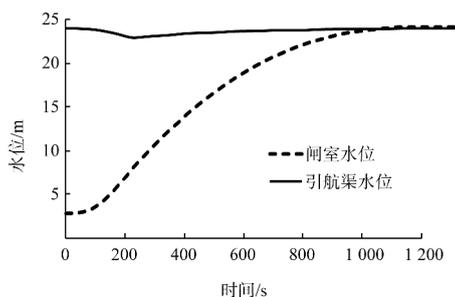
图 1 富春江船闸输水系统布置

2 阀门连续线性启闭时灌(泄)水水力特性

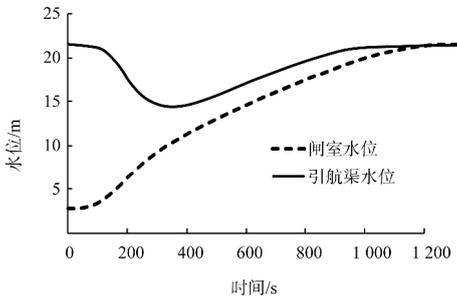
2.1 闸室灌水时引航渠水流流态

富春江船闸扩建改造工程采用了在原有船闸下游新建一座Ⅲ级标准船闸并保留原有船闸作为新船闸引航渠的设计方案。由于老船闸上闸首口门处过水断面较小(口门宽 12.4 m,底高程 18.5 m),加之阀门连续线性开启充水时充水流量较大,故闸室充水时上引航渠道(老船闸闸室)内水位迅速下降,老船闸上闸首门槛处形成堰流。

图 2 为不同上游水位下充水阀门 3 min 线性全开时引航渠及闸室水位变化过程。



a) 上游水位 24.0 m, 下游水位 2.78 m



b) 上游水位21.5 m, 下游水位2.78 m

图2 充水时闸室与引航渠水位变化过程

由图2可知, 充水初期, 阀门开度较小, 老闸室水位跌落幅度亦较小, 随着阀门开度增大, 系统流量逐渐增加, 闸室水位开始跌落, 且上游水位越低, 跌落幅度越大。上游水位 24.0 m, 下游水位 2.78 m 时, 阀门 3 min 线性全开方式下引航渠水位跌落 1.15 m, 上游水位为 21.5 m 时该值为 7.15 m。当闸室充水流量减小后上引航渠道水位逐渐回升, 在充水结束时, 引航渠道水位回升至与上游水位一致。实际上, 除上游水位之外, 影响引航渠水位跌落幅值的因素还包括阀门开启时间。表1给出了不同水位组合、不同阀门开启时间下的引航渠水位跌落幅值。

表1 闸室充水时引航渠水位跌落幅值

水位组合/m	水头/m	t_v /min	引航渠水位跌落幅值/m
24.0~2.78	21.22	2	1.23
		3	1.15
		4	1.06
21.5~2.78	18.72	2	7.34
		3	7.15
		4	6.91

注: t_v 为阀门开启时间。

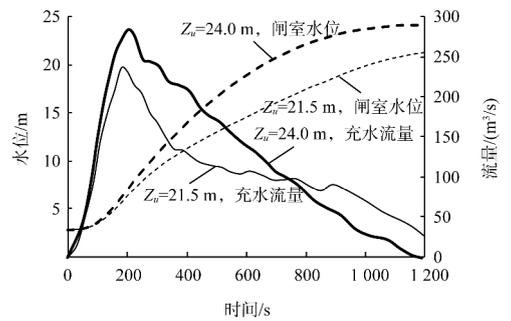
图2及表1中的研究成果表明, 上游水位是引航渠水位跌落幅值的主要影响因素, 上游水位相差 2.5 m 时, 引航渠水位跌落幅值相差约 6 m。阀门开启速度越慢, 引航渠水位跌落幅值越小, 但是相比于上游水位, 阀门开启速度对跌落幅值的影响较小。

上游水位 21.5 m 下游水位 2.78 m 时, 阀门 3 min 线性全开时引航渠水位跌落 7.15 m。在此情况下, 上闸首进水口水流条件良好, 无表面旋转

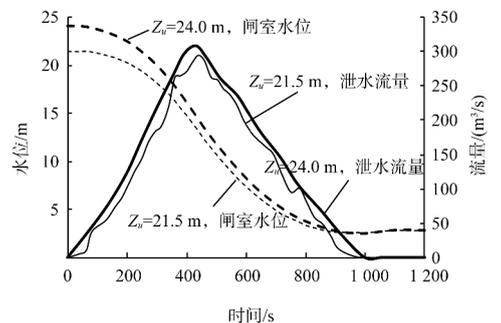
水流, 但闸室充水时间需附加 5 min 的引航渠内水流波动时间。由于大幅度的水面跌落可能造成引航渠内出现较大幅度的水位振荡和贯穿性吸气漩涡, 从而对船闸水工建筑物及船舶进闸造成不利影响, 故需对输水阀门运行方式进行进一步优化, 以改善引航渠内的通航水流条件。

2.2 闸室输水水力特性

闸室充、泄水时, 水位及流量变化过程如图3所示。由图3a)可知, 对于分散输水系统而言, 闸室充水初期, 由于输水有效水头较大, 水体惯性对闸室水位上升速率影响较小; 充水末期, 输水水头减小, 水体惯性对闸室水位上升速率影响较大。由图3a)还可看出, 水头越大, 输水最大流量越大, 输水末期水体惯性影响越显著, 所以上游水位越大, 输水时间越短。



a) 充水($t_v=3$ min)



b) 泄水($t_v=7$ min)

图3 闸室水力特性曲线

由图3b)可知, 闸室泄水时, 由于阀门开启时间较长, 且开阀过程中水头越高, 流量越大, 则闸室水位下降速度越快。因此, 图中不同上游水位条件下泄水末期输水水头基本相同, 输水时间也基本一致。表2为闸室充、泄水过程中的水力特征值。

表 2 输水系统水力特征值

工况	水位组合/m	t_v/min	T/min	$Q_{\max}/(\text{m}^3/\text{s})$	$U/(\text{m}/\text{min})$
充水	24.0~2.78	2	18.37	315.76	2.64
		3	18.70	290.17	2.43
		4	19.23	282.81	2.37
	21.5~2.78	2	20.87	269.93	2.26
		3	21.25	250.51	2.10
		4	21.74	235.77	1.97
泄水	24.0~2.78	6	14.58	340.06	2.84
		7	15.14	335.06	2.80
		8	15.75	328.17	2.75
	21.5~2.78	6	13.88	315.23	2.64
		7	14.44	306.73	2.57

注: T 为闸室输水时间, Q_{\max} 为最大流量, U 为闸室水面最大上升(下降)速度。

由表 2 可知, 同一水头下, 闸室充、泄水时间随着阀门启闭时间增大而增大, 输水最大流量则随着阀门启闭时间增大而减小, 闸室水面最大升降速度亦然; 阀门同一启闭速度下, 水头越小, 则充水时间越长, 泄水时间越短, 输水过程中最大流量越小, 闸室水面最大升降速度也越小。

综上所述, 富春江船闸充水阀门以 3 min 线性全开、泄水阀门以 7 min 线性全开的方式进行充、泄水时, 最低水头下充水时间为 21.25 min(含充水末期 5 min 的引航渠水流波动时间), 泄水时间 14.44 min, 闸室充泄水时间满足不超过 36 min 的设计要求, 但是充水时上游引航渠水位跌落幅值 7.15 m, 输水结束时船舶需等待引航渠内波动稳定后方能进出闸室, 降低了过闸效率, 同时大幅度的水面跌落可能造成引航渠内出现较强的水位振荡和贯穿性吸气漩涡, 不利于船闸安全稳定运行。

因此, 需针对闸室充水过程中引航渠内水位跌落这一特殊水力现象, 在富春江船闸扩建改造工程原型调试中进行重点研究。通过多组次充、泄水过程有水联合调试, 在满足闸室输水时间的前提下, 综合阀门启闭力、振动、空化及闸室惯性超高等特性, 对输水阀门启闭运行方式进行优化。

3 闸室充、泄水水力特性优化

3.1 输水阀门运行方式优化

针对富春江船闸扩建改造工程中闸室输水时

引航渠水位跌落幅度较大的问题, 结合国内外船闸调试运行经验及现场多组次调试结果, 提出输水阀门分段间歇性开启加动水关闭的运行方式。充、泄水过程中输水阀门开度过程线如图 4。

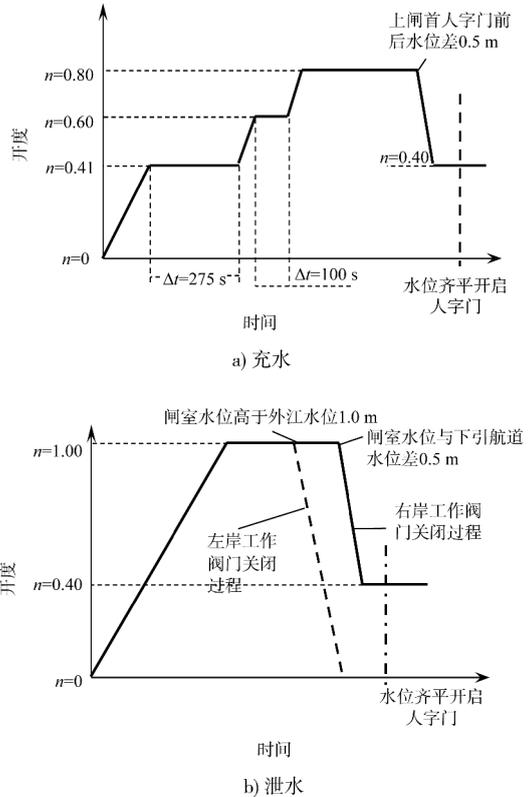


图 4 阀门运行方式优化方案

在图 4a) 所示充水方案下, 充水初期输水阀门在小开度下运行, 输水流量较小, 可有效地控制引航渠内的水位跌落; 输水中后期阀门开度分段间歇性增加, 以使输水流量缓慢变化, 从而抑制了引航渠内的水位波动; 充水阀门在人字门水头为 0.5 m 时动水关闭至 0.4 开度, 能有效地减小超灌, 避免上闸首人字门承受过大反向水头。

在图 4b) 所示泄水方案下, 泄水阀门 5 min 内线性全开, 并在闸室水位高于外江水位 1 m 时关闭左岸工作阀门, 解决了江侧水位高于下游引航道水位所引起的泄水时闸室内外水位难以齐平的问题; 闸室水位与下游引航道水位差 0.5 m 时动水关闭右岸泄水阀门至 0.4 开度, 有利于控制超泄, 从而避免下闸首人字门承受过大反向水推力。

3.2 闸室充水时引航渠流态改善

上述输水阀门优化启闭方式下, 充水时上游

引航渠水位和闸室水位变化过程如图5所示。由图5可知,上游水位23.18 m、闸室初始水位5.3 m、水头17.88 m时,优化方案下引航渠水位跌落幅值仅为0.5 m,远小于阀门线性全开情况下的跌落幅值,充水末期引航渠水位上升平稳,无明显的波流运动及振荡,引航渠内的通航水流条件得以显著改善。因此充水时间中无需考虑充水末期5 min的引航渠水流波动时间。

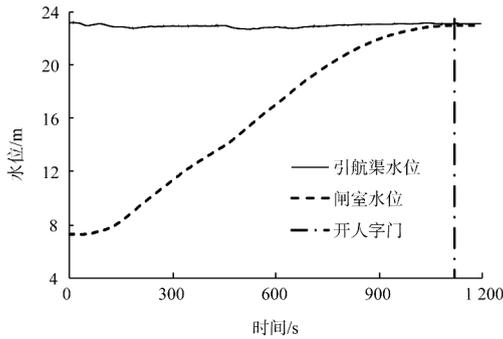
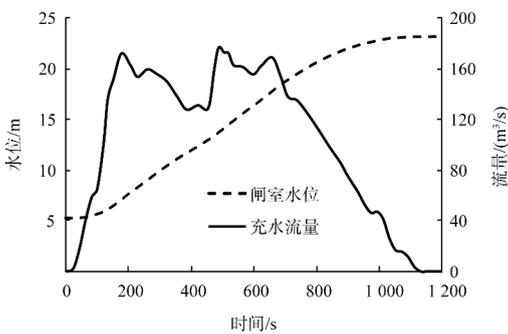


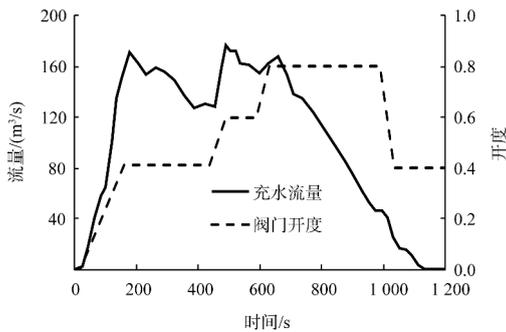
图5 优化方案充水时引航渠及闸室水位

3.3 优化方案下闸室输水特性

输水阀门优化运行方式下闸室充、泄水水力特性曲线分别如图6、7所示。

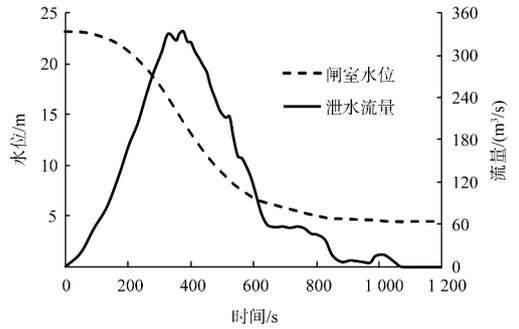


a) 闸室水位与充水流量

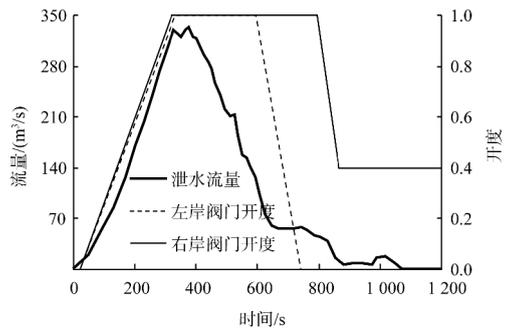


b) 阀门开度与充水流量

图6 闸室充水水力特性曲线(优化方案)



a) 闸室水位与泄水流量



b) 阀门开度与泄水流量

图7 闸室泄水水力特性曲线(优化方案)

由图6可知,采用输水阀门优化运行方式进行闸室充水时,输水流量随阀门开度调节过程出现对应于0.4、0.6和0.8开度的3个峰值,分别为171.55、176.05和168.30 m³/s。充水时间为18.33 min,大于阀门线性全开且不计引航渠水位波动时的充水时间(16.25 min),但小于该情况下计入水位波动的充水时间。闸室充水时水面最大上升速度1.53 m/min,较阀门线性全开方案更小。

由图7可知,上游水位23.09 m,下游引航道水位4.38 m,输水有效水头18.71 m条件下,采用输水阀门优化运行方式进行闸室泄水时,输水流量最大值为333.74 m³/s,泄水时间为15.23 min,大于泄水阀门线性全开时对应的泄水时间(约13 min),这主要是因为优化方案中考虑了江侧水位高于引航道水位的情况,左岸阀门提前关闭后,闸室水位与引航道水位仍有一定差距,此时只通过右岸阀门泄水,泄流流量较小(图7中输水末期流量拐点),导致输水时间加长。优化方案下闸室泄水时水面最大下降速度为2.90 m/min,该速度

发生于阀门全开时, 且略大于阀门 6 min 线性全开方案下的水面最大降速。

综上所述, 富春江船闸输水阀门以分段间歇性开启加动水关闭的优化方案运行时, 输水总时间闸室充泄水时间 33.56 min, 满足不超过 36 min 的设计要求, 上游引航渠水位跌落 0.5 m, 且输水末期无明显波动和振荡, 人字门开启结束后, 船舶无需等待波动稳定即可直接进出闸室, 有助于提高船闸运行效率和安全性。

研究成果还表明: 输水阀门在优化方式下运行时充水阀门启闭力峰值为 397.60 kN, 泄水阀门启闭力峰值为 384.65 kN, 均小于相应的启闭力设计值。

由于富春江船闸充泄水阀门吊杆采用分段铰接形式与油缸活塞杆连接, 故阀门以优化方案启闭过程中吊杆振动很小, 运行平稳。

通过布置于阀门井的水听器、空气声级计以及风速仪等观测设备对阀门段廊道空化噪声强度、声振的强弱和门楣通气量进行了监测, 结果表明分段间歇性开启加动水关闭的输水阀门运行方式下, 输水系统阀门段无明显空化, 门楣通气效果良好。

4 结语

1) 在船闸扩建改造工程中, 采用保留原有闸

室并使其作为新船闸引航渠道方案时需重视闸室充水时引航渠内的水位跌落, 尤其是上游水位较低时, 跌落更为显著。

2) 输水阀门采用分段间歇性开启加动水关闭的方式运行, 可有效地降低充水过程中引航渠内的水位跌落, 保证船闸运行安全, 提高输水效率。

3) 通常, 采用上述运行方式时输水阀门将在一定时间内维持较小开度运行, 因此, 需进行全面观测, 重点关注阀门振动、空化特性, 以确保运行安全。

参考文献:

- [1] 金国强, 董志军. 富春江航电枢纽通航瓶颈改造方案探讨[J]. 水运工程, 2008(11): 136-138.
- [2] 曹一中, 张公略. 富春江船闸扩建改造工程总体布置方案[J]. 水运工程, 2009(9): 136-141.
- [3] 胡亚安, 王晓刚. 富春江船闸扩建改造工程船闸输水阀门水力学模型试验技术开发研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [4] 宣国祥, 刘本芹, 黄岳, 等. 富春江船闸改扩建工程输水系统布置、水力特性分析及水力学模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [5] 宣国祥, 李君. 长洲水利枢纽三线四线船闸工程初步设计阶段输水系统布置及水力分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2010.

(本文编辑 郭雪珍)

(上接第 187 页)

一个卷筒上的 4 根钢丝绳全部穿过相应 4 个动滑轮底部后, 使用桥机逐一将钢丝绳绳头锥套吊起与均衡油缸吊耳连接, 完成全部安装工作。

3 结论

1) 在大直径卷筒上同时安装多根大直径钢丝绳具有精度要求高、技术难度大等特点, 安装前期需进行重点难点分析, 有针对性地制定措施, 配置必要的专用工装, 在卷筒动力未形成前, 采

用辅助驱动装置进行钢丝绳安装, 顺利完成 16 个卷筒共 64 根钢丝绳的安装, 满足了工程需要。

2) 通过计算分析, 解决了钢丝绳中部缠绕在卷筒上时两端与工作部件连接的定位精度问题, 安装精度达到设计要求。

3) 提升钢丝绳安装完成后, 经过 6 年调试、运行, 相关技术指标均满足设计及规范要求, 证明该安装工艺与方法正确可靠。

(本文编辑 郭雪珍)