

# 南水北调解台站节制闸 液压启闭机改造技术探讨

于贤磊,鲁 健,倪 春,荐 威,张 苗,陈 齐

(南水北调东线江苏水源有限责任公司,江苏 南京 210019)

**摘要:**针对南水北调解台站节制闸液压启闭机启门力不足与纠偏困难的问题,从多个角度深入分析了原因。研究表明:解台站节制闸两侧水位差较大,闸门开启时流速较快,导致实际启闭时存在较大的下吸力,闸门实际启闭所需的力远大于原设计值,液压系统管路中存在较大背压,也降低了启闭机的工作效率。基于上述原因,提出了加大启闭力与优化管路设计的解决措施,针对闸门的纠偏困难,改进了阀组设计,确保闸门提升过程的同步要求。研究成果可为同类工程液压式叶调结构优化设计提供参考。

**关键词:**南水北调;节制闸;液压启闭机

中图分类号:TV664

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2023)07-0059-0004

## Discussion on reconstruction technology of hydraulic hoist for control gate at mediation station of South-to-North Water Diversion

YU Xianlei, LU Jian, NI Chun, JIAN Wei, ZHANG Miao, CHEN Qi

(The Eastern Route of South-to-North Water Diversion Project Jiangsu Water Source Co., Ltd.,  
Nanjing 210019, China)

**Abstract:** In view of the problems of insufficient opening force and difficulty in rectifying deviation of the hydraulic hoist of the control gate at the mediation station of south-to-north water diversion, the reasons are analyzed from various angles. The research results show that the water level difference on both sides of the control gate at Jietai Station is large, and the flow velocity is fast when the gate is opened, resulting in a large downward suction force when the gate is actually opened and closed. The force required for the actual opening and closing of the gate is far greater than the original design value, and there is a large back pressure in the hydraulic system pipeline, which also reduces the working efficiency of the hoist. Based on the above reasons, the solution measures of increasing the lifting force and optimizing the pipeline design are put forward. Aiming at the difficulty of gate deviation correction, the valve group design is improved to ensure the synchronous requirements of gate lifting process. The research results can provide a reference for the optimization design of hydraulic blade adjusters in similar projects.

**Key words:** South-to-North Water Diversion; control gate; hydraulic hoist

### 1 概 述

南水北调工程是构建我国水资源“四横三纵、南北调配、东西互济”的总体格局及国家水网建设

的重要组成部分<sup>[1]</sup>。南水北调解台站为南水北调东线一期第8梯级泵站,建成于2007年,地处京杭运河与老徐连公路交汇处,水陆交通方便,紧邻解台船闸,现由泵站、节制闸组成。新建的解台泵站设

收稿日期:2022-12-21

作者简介:于贤磊(1992—),男,工程师,硕士,主要从事南水北调泵站工程管理工作。E-mail:2521002697@qq.com

计流量  $125 \text{ m}^3/\text{s}$ , 泵站与节制闸合建一处, 布置在原解台节制闸闸下约  $100 \text{ m}$  处的引河上, 其主要作用是泵站向北送水, 节制闸向闸下排涝。解台节制闸地处徐州市泄洪主要通道, 承担着重要的防汛任务。解台站节制闸共 3 孔, 设计流量  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ , 采用平板直升式钢闸门, 节制闸孔口净宽  $10.0 \text{ m}$ , 闸门尺寸为  $10.12 \text{ m} \times 4.50 \text{ m}$  (宽 $\times$ 高), 启闭机采用 QPPY II- $2 \times 160 \text{ kN}$  液压快速启闭机。

在实际运行过程中, 解台泵站节制闸出现的 2 个主要问题分别为启门力不足以及闸门纠偏困难。本文针对解台泵站节制闸出现的问题, 从数值模拟计算、现场实测、经验公式计算 3 个方面出发, 深入剖析原因, 提出解决措施, 为同类工程液压启闭机结构优化设计提供参考。

## 2 运行过程中存在的问题

### 2.1 启门力不足

解台站节制闸曾在启门过程中发现闸门在额定压力下无法开启, 原设计闸门启闭过程中, 系统压力在  $11 \text{ MPa}$  的情况下只需运行 1 台小泵即可提升闸门。在实际启门过程中发现压力已远远超过系统设定值, 尤其是闸门在  $150 \sim 220 \text{ cm}$  上升过程中压力高达  $14.9 \text{ MPa}$ , 已接近管路临界值 ( $16 \text{ MPa}$ ), 且需要大泵和小泵同时运行才能提升闸门。

### 2.2 闸门纠偏困难

由于解台站节制闸闸门较宽, 落门时纠偏不精准, 导致部分闸门止水压紧不足, 甚至卡在门槽之中未完全关闭, 日常开启关闭后存在漏水现象。此外, 因纠偏问题, 闸门止水存在不均匀磨损现象, 从而导致闸门漏水更加严重。

## 3 启门力不足原因分析

### 3.1 数值模拟计算

为探明启门力不足的原因, 开展节制闸启门力分析、CFD 预测与对策研究, 结果表明, 解台站节制闸启门力随着闸门开度呈先增大后减小的变化规律。当开度小于  $1.65 \text{ m}$  时, 启门力随闸门开度增大而增大, 并在开度达  $1.65 \text{ m}$  左右达到最大值, 在开度超过  $1.65 \text{ m}$  后, 启门力随开度呈下降趋势<sup>[2]</sup>。按上游水位  $32.39 \text{ m}$ 、下游水位  $26.45 \text{ m}$  (门后无水) 的水位组合, 对闸门进行 CFD 计算, 得出在闸门开度  $1.65 \text{ m}$  时最大启门力为  $437.8 \text{ kN}$  的结论<sup>[3]</sup>。

### 3.2 现场实测资料

2021 年解台站节制闸闸门实际启门过程中, 发

现压力已远远超过系统设定值。启门过程中, 现场管理人员对液压系统压力情况进行了记录 (表 1)。

表 1 2021 年闸门启门压力记录

闸门开度/m	系统压力/MPa
0~0.3	10
0.3~0.5	11
0.5~1.0	13~14
1.0~1.5	14.6

根据表 1 的记录数据, 可推算出液压启闭机在实际工作中, 液压系统存在背压约  $4.9 \text{ MPa}$ , 在开度达  $1.5 \text{ m}$  左右时, 启门力约  $554 \text{ kN}$ 。

### 3.3 经验公式计算

南水北调东线一期解台站节制闸闸门采用平面定轮钢闸门, 启闭机型号为 QPPY II- $2 \times 160 \text{ kN}$ , 其最大容量为  $320 \text{ kN}$ 。节制闸闸门底板高程  $26.45 \text{ m}$ , 节制闸孔口净宽  $10.0 \text{ m}$ , 闸门尺寸为  $10.12 \text{ m} \times 4.50 \text{ m}$  (宽 $\times$ 高), 门叶厚度  $1.1 \text{ m}$ , 滚轮直径  $0.7 \text{ m}$ , 轴径  $0.16 \text{ m}$ , 闸门吊点中心距  $6.2 \text{ m}$ , 闸门面板布置在下游侧, 侧、顶止水均采用 P 型橡皮, 底止水采用 H 平板橡皮。根据南水北调东线一期解台站节制闸工作门施工图, 计算可得闸门重量约  $170 \text{ kN}$ 。

#### 3.3.1 不计下吸力及水重时的闸门启门力

根据《水利水电钢闸门设计规范》(SL 74—2019)<sup>[4]</sup>, 不计下吸力及水重时的闸门启门力的计算公式为

$$F_Q = n_T (T_{zd} + T_{zs}) + n_G G + G_i \quad (1)$$

式中:  $F_Q$  为闸门启门力,  $\text{kN}$ ;  $n_T$  为摩擦阻力安全系数, 取  $1.2$ ;  $T_{zd}$  为滑动轴承的滚轮摩阻力, 取  $63.51 \text{ kN}$  (摩擦系数  $f=0.15$ );  $T_{zs}$  为止水摩阻力, 取  $12.43 \text{ kN}$ ;  $n_G$  为闸门自重修正系数, 取  $1.1$ ;  $G$  为闸门自重,  $\text{kN}$ ;  $G_i$  为配重块质量, 本闸门无配重块。

由经验公式计算得出启门力  $F_Q=278.13 \text{ kN}$ 。

#### 3.3.2 考虑下吸力及水重时的闸门启门力

按照《水利水电工程钢闸门设计规范》(SL 74—2019)<sup>[4]</sup>, 考虑下吸力及水重时的闸门启门力的计算公式为

$$F_Q = n_T (T_{zd} + T_{zs}) + P_x + n_G G + G_i + W_s \quad (2)$$

式中:  $P_x$  为下吸力, 取  $222.64 \text{ kN}$ ;  $W_s$  为作用在闸门上的水柱压力, 取  $33.4 \text{ kN}$ 。

由经验公式计算得出启门力  $F_Q=534.16 \text{ kN}$ 。

通过对比上述分析及计算结果发现, 数值模拟

分析得出的启闭力变化规律与实测资料相符合,且现场实测资料推算得到的启门力与规范给出的考虑下吸力的公式计算结果接近。由此可知,解台站节制闸两侧水位差较大,闸门开启时流速较快,导致实际启门时存在较大的下吸力,所需的启门力远大于原设计值,启闭机不能满足工作要求,因此解台站节制闸闸门启门时,会出现启闭机系统压力远超设计值的情况。此外,通过对实测资料的分析看出,液压系统管路中存在较大背压,降低了启闭机的工作效率。因此,为解决解台站节制闸启门力不足的问题,可以从加大启闭力、优化管路设计两方面采取改造措施,确保节制闸正常启闭和工程运行安全。

## 4 解决措施

### 4.1 增大启门力措施

根据上述计算可知,实际启门力达534.16 kN,节制闸开启时水流造成的下吸力较大,原设计启门力不足,需按照2×320 kN配置启闭机,对现有杆径的活塞杆强度的复核结果显示不满足安全要求,需要同步更换。经计算,将目前液压启闭机油缸内径由180 mm增大至250 mm,活塞杆直径由90 mm增大至100 mm,在2×320 kN设计启门力情况下,液压系统压力为7.8 MPa。

#### 4.1.1 活塞杆规格选择

考虑2014年原节制闸启闭机油缸活塞杆表面由镀铬改为喷涂陶瓷,该活塞杆使用时间不长,需校核是否满足安全要求。

活塞杆强度计算式为

$$\sigma_1 = 4F / \pi d_0^2 \quad (3)$$

式中: $\sigma_1$ 为最大应力,MPa; $F$ 为液压缸的启门力,kN; $d_0$ 为活塞杆断面的最小直径,mm。

原活塞杆直径 $d=90$  mm,其危险截面在活塞杆与吊头的螺纹连接处,采用M68×3螺纹,其最小直径 $d_{\min}=64.7$  mm。按本次改造实际节制闸工作闸门启门力320 kN进行复核,最大应力 $\sigma_1=121.7$  MPa,大于112 MPa,不满足安全要求,需要更换活塞杆。

取活塞杆直径 $d=100$  mm,连接螺纹采用M80×4螺纹,其最小直径 $d_{\min}=76.75$  mm。按启门力320 kN进行计算,最大应力 $\sigma_1=86.5$  MPa,小于112 MPa,满足安全要求,因此更换活塞杆直径为 $d=100$  mm。

#### 4.1.2 油缸规格选择

为增大启门力,考虑对原启闭机进行改造,在更换油缸的同时,考虑到原启闭机液压系统压力设

计值为8.4 MPa,故通过增加油缸内径的方式提高启门力。

启门力计算式为

$$F_1 = P_1 A_1 - P_2 A_2 \quad (4)$$

式中: $F_1$ 为计算启门力,kN; $P_1$ 为无杆腔压强,MPa; $A_1$ 为无杆腔面积,mm<sup>2</sup>; $P_2$ 为有杆腔压强,MPa; $A_2$ 为有杆腔面积,mm<sup>2</sup>。

经计算,启闭力为2×320 kN时,为保证液压系统工作压力满足原管路设计要求,选用缸体内径 $D=250$  mm,液压系统工作压力设计值为7.8 MPa。

#### 4.1.3 油缸容积计算

节制闸工作闸门液压启闭机油缸改造后,因油缸缸径加大,油缸容积相应加大,需对原液压泵站油箱容积进行复核。原油箱容积为4 000 L,外形尺寸为2 500 mm×1 350 mm×1 200 mm。节制闸改造后,油箱容积仅考虑单孔油缸维修时无杆腔的液压油流回油箱,现场可进行二次加油。

油箱总容积计算式为

$$V_{\text{总}} = 1.2V_{\text{有}} + V_{\text{无}} + V_1 \quad (5)$$

式中: $V_{\text{总}}$ 为启闭机油缸总容积,L; $V_{\text{有}}$ 为所有泵站油缸活塞杆容积和5支节制闸油缸活塞杆容积,取770 L; $V_{\text{无}}$ 为1支节制闸油缸的无杆腔容积,取230 L; $V_1$ 为油箱中吸不到的油的容积,取1 250 L。

由计算可知 $V_{\text{总}}=2 404$  L,小于4 000 L,现有油箱容积满足加大启闭机油缸缸径的要求,无须改造。

#### 4.1.4 基座改造

因启闭机油缸缸径增大,原基座(钢筋混凝土预制)埋设的基础因螺栓孔不对应无法继续使用,考虑到日常管理发现混凝土基座表面粉刷层在户外容易开裂剥蚀,需要经常性粉刷处理,故更换为钢结构基座,外形美观且方便维护。

## 4.2 管路改造

根据分析可知,原液压管路存在较大背压,为了减少压力损失,提高启闭机运行效率,需对部分管路进行优化改造。将原泵站部分回油管路的\*\*锈钢油管延伸至最后一孔节制闸的闸孔末端,并将原节制闸回油管路即无杆腔油管的管径增大,以减少背压。此改造加大了油管直径,需要增加液压油约520 L。

## 4.3 纠偏措施

因目前齿轮式液压同步分流马达输出的流量精度达不到同步要求,后加的比例节流阀是在原液压同步分流马达基础上进行微量调整,不能满足同步要求。因此,需要拆除原液压系统现场控制的同

步回路,重新制作安装现场控制阀块,改用2只普通调速阀+叠加式双单向节流阀+电磁换向阀旁路泄油的纠偏方式。与此同时,阀组上带有紧急手动闭门阀,改造后液压油缸采用内置式开度(行程)检测装置。

#### 4.4 电气柜改造

根据液压系统改造的要求,对电气控制柜进行改造。为PLC增加3块SSI信号模块用于接收开度(行程)检测装置的信号,原PLC的底板槽数不够,需要更换,因现场阀块增加了3个电磁换向阀,需要增加6个输出继电器控制回路用于控制电磁阀。按照更新后的液压控制回路和开度信号重新编制PLC控制程序,以满足闸门运行的要求。

#### 4.5 闸门止水漏水措施

对闸门门槽、底槛及止水橡皮进行更换处理,解决闸门漏水问题,并对闸门底坎、门槽进行检查,发现问题并处理。安装新水封时,用原水封压板在新橡胶水封上划出螺孔,然后冲孔,孔径比螺栓小1~2 mm。止水橡皮在制造厂进行严格的验收,表面应光滑平直,其厚度允许偏差为0.1 mm,其余外形尺寸允许偏差为设计尺寸的2%。止水压板螺栓孔与止水座的螺孔同心,位置度不大于0.5 mm,螺栓端头低于止水橡皮自由表面8 mm以上。两侧水封

中心距、顶止水与底止水底缘的中心距控制在3 mm以内,水封顶部所构成的平面不平度不得超过2 mm,水封压缩量保持2~4 mm,底水封与水封座配合压缩保持6~10 mm。

## 5 结 语

本文针对南水北调解台站节制闸液压启闭机启门力不足与纠偏困难的问题,分析出原因为闸门开启时流速较快,导致实际启闭时存在较大的下吸力,闸门实际启闭所需的力远大于原设计值。采取加大启闭力、优化管路等措施,上述问题得到了较好的解决,可为解决类似工程问题提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 杜选震,储训,杨淮,等.南水北调东线工程大型泵站设计研究[J].水利水电科技进展,2003(5):38-40.
- [2] 孙涛,仇宝云,黄先北,等.双向钢闸门反向挡水启门力CFD分析与减载对策[J].排灌机械工程学报,2021(3):6-9.
- [3] 黄先北,仇宝云,孙涛,等.平面钢闸门反向挡水启门力数值分析[J].工程科学与技术,2021,53(1):4-8.
- [4] 中华人民共和国水利部.水利水电工程钢闸门设计规范:SL 74—2019[S].北京:中国水利水电出版社,2019.