



大型船闸反弧门运行状态检测方案

郑 航¹, 陶 然¹, 陈明华¹, 乌 旭²

(1. 长江三峡通航管理局, 湖北 宜昌 443002; 2. 大连海事大学, 辽宁 大连 116026)

摘要: 目前船闸反弧门启闭位置控制主要依赖于开度检测装置和位移传感器, 由于船闸反弧门在高水头下启闭频繁, 当吊杆连接轴及轴套磨损后, 会造成反弧门启闭位置误差逐渐增大, 使得反弧门存在超关现象, 进而对反弧门门体、止水、底坎埋件造成破坏。针对此问题, 从提高启闭控制系统的精度方面对船闸反弧门运行状态检测方案进行研究。分析了反弧门位置控制系统存在的问题, 采用在反弧门门体内部安装倾角传感器的方式对启闭位置角度信息进行检测, 提高了启闭位置控制精度。2021 年在葛洲坝三号船闸右充反弧门实施了运行状态检测装置的安装施工与测试, 验证了反弧门运行状态在线检测系统的技术可行性以及检测水平的先进性。

关键词: 大型船闸; 反弧门; 状态检测; 倾角传感器; 启闭位置

中图分类号: U 643

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)06-0149-05

Operation state detection scheme of reversed tainter valve for large ship lock

ZHENG Hang¹, TAO Ran¹, CHEN Minghua¹, WU Xu²

(1. Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443002, China; 2. Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: At present, the opening and closing position control of reversed tainter valve of ship lock mainly depends on the chain drive opening detection device and proximity switch. Since the reversed tainter valve of ship lock is frequently opened and closed under high water head, when the connecting shaft and the shaft sleeve of the boom are worn, the opening and closing position error of the reversed tainter valve will gradually increase, causing the over-closing phenomenon of the reversed tainter valve, and then causing damage to the valve body, water stop and bottom sill embedded parts of the reversed tainter valve. Aiming at this problem, this paper studies the operation state detection scheme of the reversed tainter valve of the ship lock by improving the accuracy of the opening and closing control system. The problems existing in the position control system of the reversed tainter valve are analyzed, and the angle information of the opening and closing position is detected by installing the inclination sensor inside the valve body of the reversed tainter valve, which improves the control accuracy of the opening and closing position. In 2021, the installation, construction and testing of the operating state detection device were implemented at the right-charge reversed tainter valve of Gezhouba No. 3 ship lock, which verified the technical feasibility of the online detection system for the operating state of the reversed tainter valve and the advanced detection level.

Keywords: large ship lock; reversed tainter valve; state detection; tilt sensor; open and close position

船闸反弧门门体启闭主要由液压启闭机、吊杆、门体吊耳及联门轴组成^[1], 如图 1 所示, 船闸反弧门长期工作在高水头环境下, 反弧门门体通过液压启闭机推动吊杆, 使反弧门围绕支铰轴

沿竖直方向上下转动, 依靠其顶、底止水与设置在门楣及底坎的埋件形成密封^[2]。目前控制大型船闸(如葛洲坝)反弧门启闭的液压油缸上主要设置有链传动式开度检测装置和接近开关(行程限位

收稿日期: 2022-08-30

作者简介: 郑航 (1991—), 男, 工程师, 从事船闸及升船机机械设备检修、改造及技术研究工作。

开关)。链传动式开度检测装置的链轮与旋转编码器通过弹性联轴器连接，链条搭载于链轮上，链条两端垂直穿过链轮支座，链条一端连接配重块，链条另一端固定连接牵引支架。接近开关安装于链轮支座下方、位于链条一侧，感应极板安装于链条上。阀门垂直运动带动旋转编码器旋转，实现阀门开度的检测。反弧门底止水为橡胶止水，在检修期间设定的关终状态，要保证 3~5 mm 预压缩量。当反弧门液压油缸关门达到一定行程后触发接近开关，PLC 控制实现 500 ms 延时动作停止液压油缸运行。

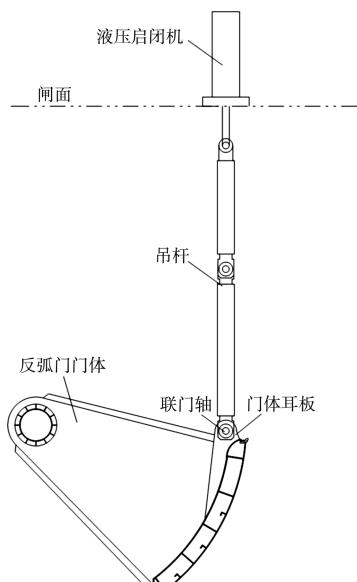


图 1 反弧门及液压启闭机布置

反弧门为自重力闭门，在操作反弧门启闭的过程中，可根据开度检测装置来监测液压油缸的行程，通过接近开关实现反弧门液压油缸的启闭限位，但最终还是由延时动作控制反弧门门体实现关终状态。开度检测装置和接近开关虽然能实现对液压油缸启闭的控制，一定程度上防止门体的超关，但由于船闸反弧门在高水头下动水启闭频繁，当吊杆联门轴及轴套磨损且耳板孔间隙变大或变形后，会造成反弧门启闭位置误差逐渐增大，使得延时开关不再准确，发生反弧门超关现象，进而对反弧门门体、止水、底坎埋件造成破坏。当反弧门顶止水过度挤压发生塑性形变、破损漏水时，在高水头水压持续作用下，会引起反

弧门振动^[3-4]，进而造成反弧门门体结构及联门轴损伤，对船闸正常运行造成安全风险。

针对反弧门启闭位置误差逐渐增大引起反弧门超关现象的问题，从提高启闭控制系统的精度方面对船闸反弧门运行状态检测方案^[5]进行研究，提出采用安装倾角传感器对启闭位置角度信息进行检测的方式，并在船闸检修中应用研究成果。通过布设船闸反弧门运行状态检测装置，实现准确检测启闭位置角度信息目标，解决反弧门启闭位置误差增大存在超关现象的问题，为葛洲坝船闸及国内其他船闸反弧门运行状态检测提供参考依据。

1 反弧门位置控制系统及存在的问题

现有的反弧门位置控制系统主要有 2 种方式：一是链传动式开度检测装置和接近开关组合控制反弧门启闭位置；二是由拉线式位移传感器直接控制反弧门启闭位置。拉线式位移传感器一般布置在反弧门液压油缸上，油缸活塞杆伸出时带动拉线式位移传感器伸出，通过检测其伸出长度实现反弧门启闭位置的控制。

以上 2 种方式均存在一定的问题：1) 反弧门上下吊杆的联门轴及轴套、吊杆与门体之间的联门轴及轴套由于长期高负荷运行，轴套及门体耳板产生磨损，反弧门启闭位置误差逐渐增大，延时动作不再准确，尤其是底止水为橡胶材质的反弧门存在超关现象，进而引起反弧门顶、底止水损坏，导致反弧门漏水。2) 链传动式开度检测装置与位移传感器主要检测的是液压油缸的行程状态，对反弧门门体的真实运行状态和位置检测存在偏差；且由于日常高频次运行，很难对反弧门阀门井进行停航排干检查，对门体早期发生的故障实施水下检查较为困难。

2 反弧门运行状态检测方案

针对反弧门启闭位置误差逐渐增大使得反弧门存在超关现象的问题，采用在门体上安装倾角传感器和振动传感器的方案进行现场运行测试。

倾角传感器是用来测量以水平面为参考面的

倾角变化量, 输出角度以水平面为参考, 且在 0° 附近测量精度最高。在本次测试中, 特别定制了测量范围在 $-30^\circ \sim 30^\circ$ 的水密倾角传感器, 测量精度为 5% 。在安装过程中, 为保证测量的可靠性, 将倾角传感器安装于如图 2 中 1~3 所示的反弧门位置。1) 位置 1、2 的倾角传感器主要是用来冗余测量反弧门全关位时的位置信息, 且保证反弧门全关位时倾角传感器与水平方位倾角读数在 $\pm 5^\circ$ 以内; 2) 位置 3 的倾角传感器主要是用来测量反弧门全开位时的位置信息, 且保证反弧门全关位时与水平方位倾角读数在 $\pm 5^\circ$ 以内; 3) 在每个倾角传感器旁边, 分别安装了一个水密振动传感器, 可实时监测门体振动发生状况。

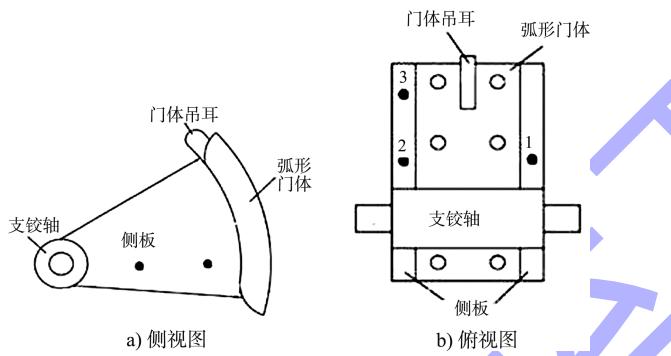


图 2 倾角传感器安装位置

反弧门作为一个刚性整体, 通过液压启闭机推动吊杆使其围绕支铰轴沿竖直方向做顺时针/逆时针转动, 实现反弧门的启闭。采用以上方案对反弧门位置控制系统进行现场测试, 实现了以下目的: 1) 如果在反弧门门体内部安装一个倾角传感器, 在反弧门检修后良好运行工况下, 标定好反弧门全关位的位置角度信息, 通过测量其沿竖直方向的旋转角度即可判定反弧门的相对全关位时的位置信息; 2) 将传感器刚性安装于反弧门门

体内部, 可实时准确感知反弧门的运行位置, 相对于传统的通过液压吊杆定标来控制液压系统的启闭, 在长期工作稳定性、测量精度可靠性等方面, 具有明显优势。

各倾角传感器及振动传感器的安装如图 3 所示。

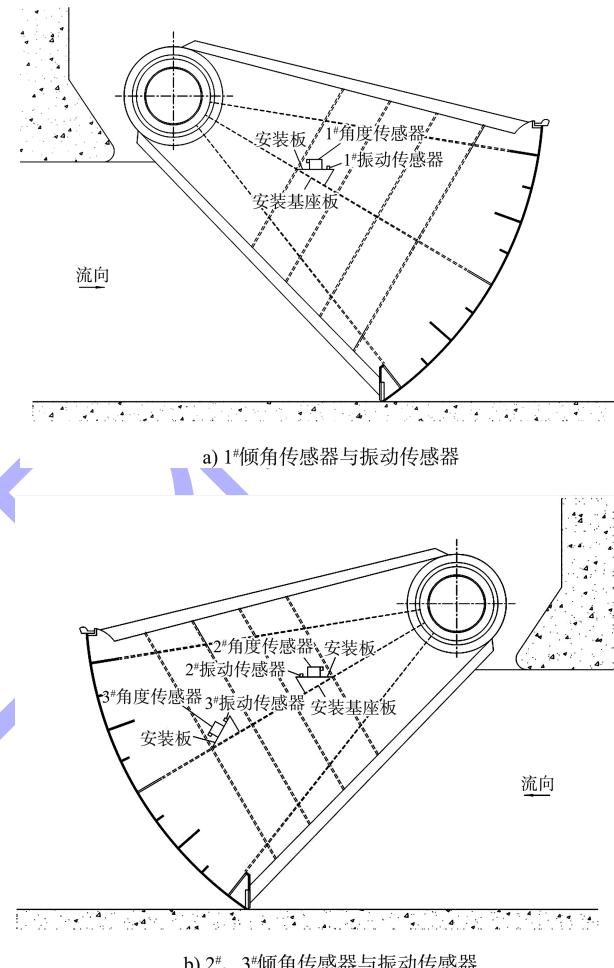


图 3 传感器安装与走线

门体内传感器线缆经固定、保护后送至工作机房, 系统工作流程见图 4, 其中水位传感器用来记录反弧门工作时的实时水位信息, 为下一步分析提供依据。

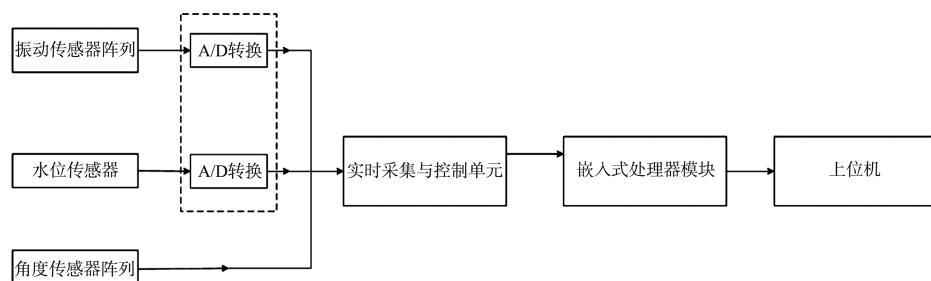


图 4 反弧门动态监测系统工作流程

3 反弧门运行状态检测装置测试及应用

3.1 反弧门无水运行测试

传感器安装、走线及软硬件调试完成后，在葛洲坝3#船闸现场进行了反弧门无水状态下的运行测试。1)试验过程中，反弧门的启闭由井下工作人员采用原有控制系统进行实时控制，反弧门相应的高度变化也由井下现场实时测量。2)在反弧门液压系统井上部分，通过一组滑轮系统对液压吊杆升降变化进行标定和测量，并以此作为反弧门门体的升降信息。

反弧门在线监测系统是由工作机房相应的硬件解调设备及软件读取相应角度信息后，利用式(1)计算得到反弧门高度变化值 Δh_3 ：

$$\Delta h_3 = R(\sin\theta_2 - \sin\theta_1) \quad (1)$$

式中： θ_1 为无水试验初始位倾角传感器读数； θ_2 为无水试验中倾角传感器的读数； R 为反弧门面板到支铰的半径， $R=4500\text{ mm}$ 。

在反弧门无水条件测试下，标定反弧门全关位时的角度位置信息，同时通过观察反弧门实测高度变化值检验倾角传感器工作的稳定性和监测反弧门运行位置信息的正确性。记录比较反弧门每次关停时的井下反弧门实测高度变化值 Δh_1 和反弧门液压拉杆地上测量的相对高度变化值 Δh_2 ；工作机房读取相应倾角传感器数据，计算得到反弧门高度变化值 Δh_3 。计算原理见图5。

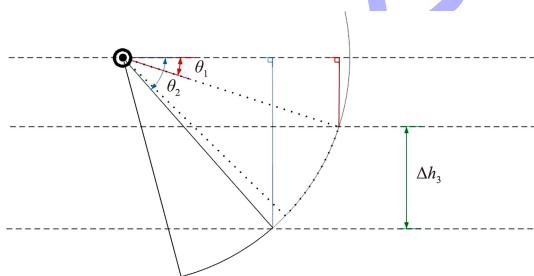


图 5 基于倾角传感器读数的 Δh_3 计算

反弧门无水运行测试记录如表1所示，测试次数为0表示测量初始位信息，此时反弧门井下所在位置高度记为0，反弧门液压吊杆井上标定记录值为73 mm， θ_1 为 0.273 1°。

表 1 反弧门无水运行测试记录

测试次数	$\Delta h_1/\text{mm}$	反弧门井上标定记录/mm	$\Delta h_2/\text{mm}$	$\theta/(\text{°})$	$\Delta h_3/\text{mm}$
0	0	73	0	0.273 1	0
1	4	77	4	0.329 9	4.46
2	7	79	6	0.364 5	7.18
3	11	83	10	0.415 3	11.17
4	13	85	12	0.448 8	13.80
5	16	87	14	0.485 3	16.67
6	19	89	16	0.511 4	18.72
7	21	91	18	0.539 3	20.91
8	24	93	20	0.568 0	23.16
9	26	95	22	0.599 6	25.64
10	29	98	25	0.644 7	29.18
11	31	100	27	0.678 4	31.83

3 种方式的测试记录对比见图6，由图可知， Δh_3 与 Δh_1 吻合度好，测量的线性变化率与井下实测一致，且精度与反弧门井下实测数据相比，可靠性更高，满足系统设计要求。

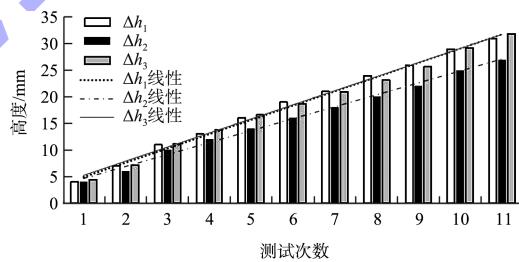


图 6 反弧门无水状态下运行测试记录

3.2 反弧门运行状态测试

葛洲坝三号船闸右充阀门井充水恢复运行后，在闸室高水位状态下，在线记录 23 组反弧门从全开位至全关位的位置角度 θ 变化信息。为便于观察和比较，以反弧门在无水状态下的全关位角度值 $\theta_{\text{无}} = 1.427 2^\circ$ 为零基准，换算得到每次反弧门全关位距离零基准的高度差 Δh ：

$$\Delta h = R(\sin\theta - \sin\theta_{\text{无}}) \quad (2)$$

测试结果见表 2。

表2 反弧门正常工作时全关位位置信息

测试序号	$\theta/(^\circ)$	$\Delta h/mm$	测试序号	$\theta/(^\circ)$	$\Delta h/mm$
1	1.419 0	0.64	25	1.414 7	0.98
2	1.417 1	0.79	26	1.420 1	0.56
3	1.421 2	0.47	27	1.423 6	0.28
4	1.418 1	0.71	28	1.419 4	0.61
5	1.417 2	0.79	29	1.418 9	0.65
6	1.420 1	0.56	30	1.417 1	0.79
7	1.418 0	0.72	31	1.418 3	0.70
8	1.421 2	0.47	32	1.418 6	0.68
9	1.421 2	0.47	33	1.419 5	0.60
10	1.419 2	0.62	34	1.415 9	0.89
11	1.417 8	0.74	35	1.418 5	0.68
12	1.419 8	0.58	36	1.420 7	0.51
13	1.415 9	0.89	37	1.420 5	0.53
14	1.420 3	0.54	38	1.417 9	0.73
15	1.420 4	0.53	39	1.419 7	0.59
16	1.420 2	0.55	40	1.421 3	0.46
17	1.420 5	0.53	41	1.422 6	0.36
18	1.420 4	0.53	42	1.417 7	0.75
19	1.417 4	0.77	43	1.418 5	0.68
20	1.417 0	0.80	44	1.423 1	0.32
21	1.417 4	0.77	45	1.421 9	0.42
22	1.417 6	0.75	46	1.425 9	0.10
23	1.417 1	0.79	47	1.421 5	0.45

葛洲坝三号船闸右充反弧门运行状态检测试验结果表明: 1) 在闸室泄水前, 闸室上游反弧门关闭过程中的全关位, 即液压启闭系统发出关指令的位置信息精度在1 mm范围内随机变化。2) 由于试验在反弧门检修后实施, 反弧门全关位在液压吊杆的定位刻度已调整到最佳工作位置, 此时

反弧门底止水密封状况基本良好, 测试中最大距离无水全关位基准点位置高度差为0.98 mm。

4 结论

1) 本文提出一种大型船闸反弧门运行状态检测方案, 通过研究反弧门位置控制方式, 设计了采用倾角传感器的反弧门位置控制系统。通过现场测试以及工程应用, 验证了方案的可靠性和实用性。

2) 根据反弧门运行状态检测装置的工程应用情况, 该检测方案可高精度准确获取反弧门工作过程中的位置信息, 配合相应信号处理与技术手段, 可用来在线监测反弧门门体的工作状态, 能够在故障早期发现门体异常状态, 防止故障进一步恶化, 作为反弧门检修周期的有效判据。

参考文献:

- [1] 卞兆盛. 葛洲坝船闸输水反弧门运行实践[J]. 水运工程, 2001(5): 24-27, 31.
- [2] 陶然, 陈明华, 曾维, 等. 大型船闸反弧门顶止水固定方案改进研究[J]. 中国水运(上半月), 2022(5): 128-130.
- [3] 吴杰芳. 高水头船闸输水廊道反弧门水弹性振动试验研究[J]. 振动工程学报, 1994(4): 352-356.
- [4] 王新, 胡亚安, 严秀俊, 等. 高水头船闸阀门顶缝空化切片试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(4): 14-19.
- [5] 陈明华. 基于光纤布拉格光栅的船闸人字门健康状态远程监测系统[J]. 水运工程, 2020(2): 143-147.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第136页)

参考文献:

- [1] 吴澎, 于忠涛, 罗业辉, 等. 通海港区—通州湾港区疏港航道整治工程双桥枢纽工程初步设计报告[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2021.
- [2] 翟高勇, 李燕, 蔡敏, 等. 新江海河航道整治工程取消双桥梯级影响分析报告[R]. 南京: 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 2019.
- [3] 翟高勇, 李燕, 蔡敏, 等. 新江海河、东灶新河航道整治

工程特征水位分析报告[R]. 南京: 江苏省水利工程科技咨询股份有限公司, 2019.

- [4] 国家发展改革委, 建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 3版. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [5] 陆飞, 张跃东, 杨一奇, 等. 通海港区—通州湾港区疏港航道整治工程可行性研究报告[R]. 南京: 中设设计集团股份有限公司, 2020.

(本文编辑 王璁)