



基于同步冗余策略的龙溪口船闸启闭机设计

冯学刚¹, 苏俊玮¹, 陈鹏², 徐才红³

(1. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017;

2. 四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000;

3. 常州瑞阳液压成套设备有限公司, 江苏 常州 213000)

摘要: 针对龙溪口 34 m 口门船闸人字门在启闭过程中要求运行平稳、快速、同步性好、关终位门体错位小等问题, 深入分析船闸人字门启闭过程中运行阻力矩的变化特性, 详细介绍船闸启闭机形式和布置方式。从设备和土建等方面对人字门全开位时启闭机活塞杆与门体垂直和倾斜连接两种布置方式进行对比, 得出口门宽度小于等于 16 m 的船闸宜采用倾斜连接, 口门宽度大于 16 m 的船闸宜采用垂直连接布置形式。梳理了龙溪口船闸启闭机及液压控制设计特点, 并基于同步冗余策略开展龙溪口船闸启闭机设计, 设置两套位移传感器互备互校, 实现人字门高效安全同步。通过龙溪口船闸试运行验证启闭机设计布置、选型和同步冗余策略合理可行。

关键词: 船闸; 启闭机形式; 启闭机布置; 液压控制

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0037-05

Hoist design for Longxikou ship lock based on synchronous redundancy strategy

FENG Xuegang¹, SU Junwei¹, CHEN Peng², XU Caihong³

(1. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China;

2. Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China;

3. Changzhou Ruiyang Hydraulic Equipment Co., Ltd., Changzhou 213000, China)

Abstract: Regarding the problems of stable operation, fast operation, good synchronization, and small dislocation of the closing door body of the 34 m gate of the Longxikou shiplock during the opening and closing process, this paper deeply analyzes the changing characteristics of the running resistance torque, and introduces the model and arrangement of hoist in detail. From the aspects of equipment and civil engineering, the two arrangement methods of inclined connection and vertical connection between the piston rod of hoist and the door body when the miter gate is fully open are compared, and the lock with a width of less than or equal to 16 m of the miter gate is suitable for oblique connection, and the vertical connection arrangement for the lock with the width of the miter gate greater than 16 m. The design characteristics of hoist and hydraulic control are introduced in detail. Based on the synchronous redundancy strategy, the design of hydraulic gate hoist is carried out. To realize the efficient and safe synchronization of the miter gate, two sets of displacement sensors are set up for mutual backup and mutual calibration. Through the trial operation of the Longxikou shiplock, the results are verified, and the design arrangement, selection and synchronous redundancy strategy of the hoist are reasonable and feasible.

Keywords: ship lock; hoist type; hoist arrangement; hydraulic control

收稿日期: 2022-06-07

作者简介: 冯学刚 (1986—), 男, 高级工程师, 从事船闸金属结构及启闭机械设计。

1 工程概况

岷江龙溪口枢纽是岷江下游河段(乐山—宜宾)航电规划老木孔、东风岩、犍为、龙溪口4个航电梯级中的最末一级,通航建筑物形式为船闸,近期为单线,远期预留二线船闸。船闸主要由上游引航道、进水口、上闸首、闸室、下闸首、出水口及下引航道等组成。船闸工作闸门形式为人字闸门,工作阀门形式为反向弧形阀门。闸、阀门启闭机分别布置于上、下闸首的内外边墩上。人字闸门启闭机采用卧式摆动液压启闭机,启闭机通过活塞杆推动门体绕顶、底枢平面转动实现启闭;反弧门启闭机采用立式双作用液压启闭机,通过拉杆带动反弧门绕支铰竖向旋转实现启闭。

人字闸门液压启闭机在启闭过程中运行负载阻力矩随人字闸门开度的变化而变化,若在整个运行过程中匀速运行,需要的启闭力更大^[1]。人字门在启闭过程中运行平稳、快速、同步性好、关终位门体错位小是保证船闸高效、安全运行的必要条件^[2]。

2 龙溪口船闸人字门运行阻力矩

船闸人字门运行阻力矩由顶枢和底枢的摩擦阻力矩 M_1 、风力阻力矩 M_2 、闸门运行惯性阻力矩 M_3 、水对闸门产生的阻力矩 M_4 组成^[3]。龙溪口船闸下人字门单扇门叶尺寸 20.2 m×24.0 m (宽×高),水级 17.94 m,计算结果见表 1。人字门在运行过程中阻力矩随时间变化曲线见图 1。

表 1 龙溪口船闸下闸首人字门运行阻力矩

启闭门	顶枢和底枢的摩擦阻力矩 $M_1/(kN\cdot m)$	风力阻力矩 $M_2/(kN\cdot m)$	闸门运行惯性阻力矩 $M_3/(kN\cdot m)$	动水对闸门产生的阻力矩 $M_4/(kN\cdot m)$	合计
启门数值	83.5	268.6	1.3	2 448.2	2 801.6
闭门数值	83.5	268.6	1.3	4 896.5	5 249.9
备注	摩擦系数取 $f=0.1$	按 $q=0.3\text{ kPa}$ 计	-	水位差形成的压强 Z 取值 1.5 kPa	-

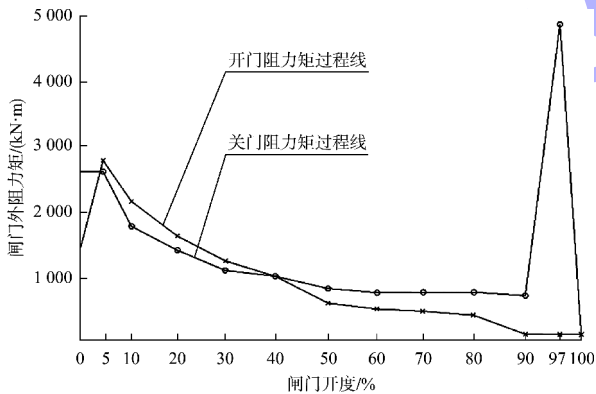


图 1 下闸首人字门运行阻力矩曲线

从表 1 和图 1 可知,人字门阻力矩曲线具有明显的规律性,其特点是两端大,中间小;人字门阻力矩峰值发生在闸门靠近全关位置和全开位置;阻力峰值一般发生在闸门启动后或停止运转前的几秒钟内,并很快消减;人字闸门启闭机在启闭过程中,运行负载阻力矩随门体开度的变化而变化。水对闸门产生的阻力矩占总阻力矩约 90%。

3 人字门启闭机布置

3.1 启闭机形式选择

人字闸门启闭机主要采用两种形式,即齿轮曲柄四连杆机构形式(简称四连杆启闭机)和液压卧式油缸直联形式(简称直联式启闭机)。两种形式的启闭机布置见图 2。四连杆启闭机主要优点是结构简单、使用安全、维护保养容易、寿命较长。而液压启闭机则体积小、结构紧凑、传动原理简单、运行平稳,元件标准化且有自润滑性能。



a) 齿轮曲柄四连杆



b) 液压卧式油缸直联式

图 2 启闭机

人字闸门运行时, 闸门淹没水深、闸门运转速度、残余水位差对动水阻力矩的影响较大^[4]。其中淹没水深越大, 则启闭力越大, 启闭力大约按淹没水深二次方关系变化; 启闭速度越快, 则启闭力越大, 启闭力大约按启闭速度一次方关系变化; 残余水位差越大, 则启闭力越大, 呈线性关系。而淹没水深和残余水位差以设计条件进行明确, 选择优化的无级调速运行方式对降低动水阻力矩尤为重要。

四连杆启闭机为平面四连杆机构, 当曲柄转角为 $0^\circ \sim 180^\circ$ 时, 在初始和终了时段从动杆的速度降低, 有利于降低启闭机初始和终了的峰值, 且四连杆机构力矩能力曲线大致与人字闸门阻力矩曲线适应, 因此早期大型船闸启闭机多应用四连杆机构。但由于其机械零件多, 常因润滑不足出现齿轮损伤的情况, 且占地较大, 后续应用逐渐减少。

液压启闭机泵站早期多采用定量泵, 启闭机调速功能较差, 通过引入比例变量技术, 液压启闭机可更好地在不同工况的边界条件下通过任意变速方式来适应人字门运行。鉴于液压直联式启闭机在优化的无极变速运行方式下运行可以大大降低动水阻力矩, 适应人字闸门在大淹没水深条件下的运行和各种非正常工况下的运行和控制, 保证闸门运行安全、设备的合理布置及集中运行管理等, 因此工程采用卧式直联式液压启闭机。

3.2 启闭机布置方式选择

3.2.1 全开位时倾斜连接布置

采用倾斜连接布置(图 3)时, 一般选用的倾

斜角度可保证在全开位和关终位时启闭机油缸轴线与人字门横隔板角度 $\alpha_{\text{闭}}$ 和 $\alpha_{\text{启}}$ 大致相等, 即所需闭门力 $F_{\text{闭}}$ 和启门力 $F_{\text{启}}$ 大致相同, 这对所选启闭机的缸体及活塞杆的设计是最省最优的, 但缺点是启闭机布置对闸首顺水流方向需求长度增大。

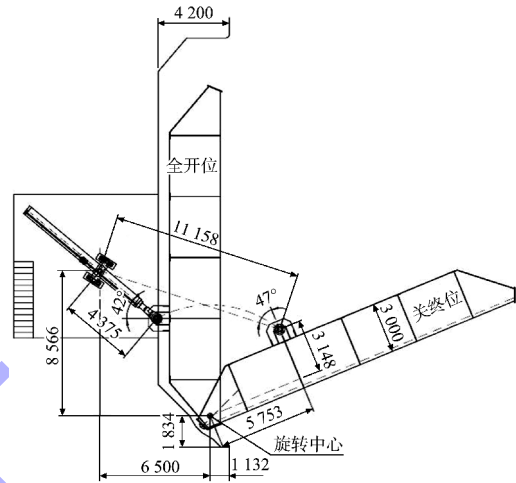


图 3 全开位时倾斜连接布置 (单位: mm)

3.2.2 全开位时垂直连接布置

采用垂直连接布置(图 4)时, 全开位启闭机轴线与人字门横隔板角度 $\alpha_{\text{闭}} = 0$, 而在关终位启闭机轴线与人字门横隔板角度 $\alpha_{\text{启}}$ 较大, 势必造成人字门所需启门力 $F'_{\text{启}}$ 大于闭门力 $F'_{\text{闭}}$, 且垂直连接 $F'_{\text{启}}$ 远大于倾斜连接 $F_{\text{启}}$ 。启门力和闭门力的不平衡将造成所选启闭机的缸体及活塞杆设计能力浪费, 存在启闭机布置对闸首边墩垂直水流方向需求宽度较大的缺点, 但这种布置形式工作行程较倾斜布置略小, 有利节约启闭机成本。

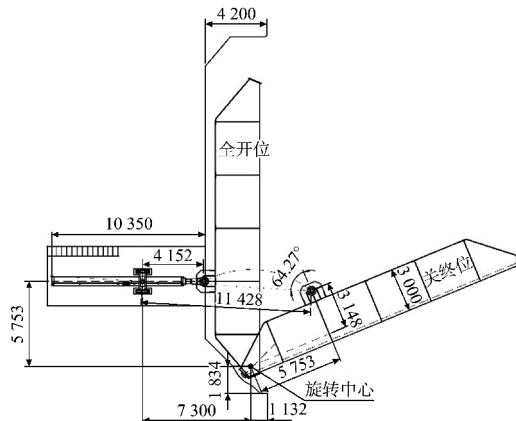


图 4 全开位时垂直连接布置 (单位: mm)

通过对比发现，当设计船闸口门宽度较小（12、16 m），门扇厚度不大时，采用倾斜连接可平衡启门力和闭门力，减小启闭机最大出力，有效利用启闭设备能力，节省设备投资。同时口门小的船闸闸首边墩尺度较小，倾斜连接布置可有效节约闸首边墩宽度，而为此增加的边墩长度有限，因此小口门船闸宜采用倾斜连接方式。

当设计船闸口门宽度尺寸（23、34 m）及门扇厚度较大时，采用垂直连接形式需要的闭门力较小，但需要的启门力却较大。通过在启闭机插销轴与旋转中心在横隔板方向上增加一段有效力臂 L ，可有效减小启门力。鉴于大口门宽度船闸所需的人字门门扇宽度和厚度较大，需要的液压启闭机尺寸也较大，采用垂直布置可缩小闸首边墩垂直水流方向布置范围，优化空间布局，因此大口门船闸宜采用垂直连接形式。

综上，龙溪口 34 m 口门船闸采用全开位时垂直连接布置。

4 启闭机液压控制设计

龙溪口船闸人字门液压启闭机采用 QRWY-1 600 kN/1 600 kN-7.5 m 规格的液压缸，输水廊道门采用 QPPYII-1 000 kN/100 kN-4.8 m 规格的液压缸。每个闸首边墩人字门液压缸与输水廊道门液压缸共用 1 套液压泵站。

4.1 人字门启闭机

人字门 QRWY-1 600 kN/1 600 kN-7.5 m 液压缸采用中间十字支铰座形式，液压缸与人字门连接部分采用自润滑关节轴承。两个结构的组合可以使液压缸上下、左右摆动，抵消一部分土建上的施工误差，降低人字门运行时震动对油缸产生的不良影响。并且在十字支铰座底部设置 1 套推力调心滚子轴承，使油缸与支铰座平面之间滚动摩擦，减少摩擦阻力，大大降低弯矩对活塞杆的影响，减少后期润滑不良导致异响以及磨损的概率。活塞杆采用陶瓷喷涂技术并设有防尘罩，与传统镀铬相比，具有硬度高、摩擦系数低、耐磨

性好、韧性高、耐腐蚀等优点。配合陶瓷活塞杆专用的非接触式传感器，精度更高。活塞杆密封选用防尘圈、V 组（两组对向安装）、导向带组合，可增加液压缸使用寿命，保压效果更好。缸盖、缸底与油缸间均采用两道 O 型圈密封，大大降低了油缸漏油的几率。除陶瓷杆配套非接触式传感器之外，液压缸还配备 1 套静磁栅传感器^[5]。静磁栅传感器设置行程开关，可在预设位置输出开关量信号。

4.2 工作阀门启闭机

工作阀门 QPPYII-1 000 kN/100 kN-4.8 m 液压缸采用的是端部法兰连接形式，液压缸端部采用了一种独特的分体式结构，使得陶瓷杆专用非接触式传感器位置提升到法兰上端，并且传感器有 1 套独立的可拆卸调整结构，大大降低了传感器的调整以及维修难度。活塞杆采用陶瓷喷涂技术，活塞杆密封选用防尘圈、V 组、导向带组合，活塞密封选用 V 组及格莱圈密封，也单独配备了 1 套静磁栅传感器。

4.3 液压控制设计

为保证闸、阀门平稳运行，避免在开关门运行至终点位置时产生撞击现象，在启闭机液压系统中，可采用电比例泵或变频器实现闸、阀门启闭的无级调速。电比例泵具有控制灵活、动作灵敏、稳定性好、调速范围广、结构紧凑等特点，可满足闸、阀门在开启、关闭以及运行过程中的稳定性要求。采用变频器进行调速，虽能实现闸、阀门变速运行的要求，但变频系统动态响应较慢、低速特性较差、调速精度不易保证，因此在闸、阀门启闭机液压系统中选用电比例泵，见图 5。

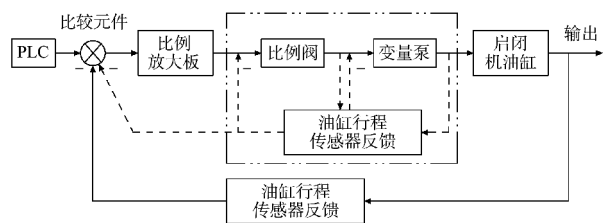


图 5 电比例泵控制系统

由于人字闸门启闭力及启闭速度较大, 使液压系统的电机以及油泵选型较大, 因此设计选用 3 套 55 KW+140 ml/r 的电机泵组单元, 2 用 1 备。选用的比例泵可以根据传感器反馈的信号实时调节双缸同步, 也可实现启闭过程中加速-匀速-减速的功能, 使启闭过程更稳定, 液压缸运行同步性更佳。由于系统流量较大, 系统的主要阀件均采用 DN32 通径的二通插装阀。其结构简单, 易于维修更换, 并具有通流能力大、阀芯动作灵敏、抗堵塞能力强、密封性好、泄漏少, 油液流经阀口压力损失小等优点, 适用于频繁启闭的船闸工况。整套液压系统具有完善的监测及报警功能(超压/失压报警、液位报警、油温报警、滤芯堵塞报警等); 配备吸、回油过滤器, 保证了比例泵运行所需要的油液清洁度; 设置电加热系统, 确保系统在低温环境下稳定运行; 配置油水分离系统, 降低了水汽混入油液引起油液乳化的风险。

液压泵站采用分体式结构, 即电机泵组单元+油箱单元。两者通过蝶阀和避震喉软连接, 大大降低了电机泵组震动对系统的影响, 降低了噪声, 且使运输和安装更为方便。由于液压站在安装中为镜像布置, 因此将每 2 套液压泵站设计为镜像对称, 使现场安装更便捷。

5 启闭机及液压控制设计关键技术

5.1 人字门启闭机的无级变速

1) 船闸控制系统采用电液比例阀控系统, 具有控制灵活、动作灵敏、稳定性好、调速范围广、结构紧凑的优点。

2) 人字门启闭采用比例泵根据传感器反馈的信号实时调节双缸同步, 系统的主要阀件采用二通插装阀, 通流能力大; 阀芯动作灵敏、抗堵塞能力强; 结构简单, 易于维修更换。

5.2 人字门启闭机同步冗余控制策略

1) 人字门开度仪配套全开位、等待位、关终位和合拢位 4 处限位开关。关闭运行时, 在关终位前设置等待位, 要求启闭机等待位同步误差小于 10 mm。当满足等待位误差值后, 左右启闭机启动, 人字门导轮顺利进入导卡, 启闭机活塞杆

运行至关终位后停机, 使得关终位处两扇人字门门叶斜接柱间隙小于 15 mm, 人字门在闸室充泄水过程中形成的水头差作用下自然顺势合拢。等待位、关终位和合拢位可在现场根据船闸原型调试进行最终整定。

2) 除了陶瓷杆配套非接触式传感器之外, 液压缸还配备 1 套静磁栅传感器。静磁栅传感器为刚性结构直线绝对编码型开度传感器, 由刚性结构的动尺和静尺两部分构成, 综合测量精度 ± 1.0 mm, 防护等级 \geq IP68, 耐水压能力 ≥ 10.0 m 工作水深, 抗击 5 kg 及以下漂浮物撞击、水草缠绕。2 套位移传感器相互独立, 使用中互相配合、互备互校, 使液压缸位移信号输出更准确, 系统更稳定。

6 结语

1) 人字门阻力矩曲线具有明显的规律性, 其特点是两头大, 中间小。水对闸门产生的阻力矩占总阻力矩约 90%。

2) 人字门全开位时, 小口门船闸启闭机宜采用倾斜布置形式, 大口门船闸启闭机宜采用垂直连接布置形式。

3) 液压启闭机采用比例泵控制, 稳定性好、调速范围广, 并可实现启闭机无级变速。闭门时设置等待位、关终位和合拢位, 有效控制闸门同步误差, 保证关终位门体错位小。同时配置 2 套位移传感器互备互校, 做到同步冗余, 在船闸试运行阶段取得良好效果。

参考文献:

- [1] 刘永胜, 叶雅思, 田红伟, 等. 大源渡二线船闸启闭机液压控制系统设计[J]. 水运工程, 2019(3): 43-46.
- [2] 陈坤, 高术, 陈学文. 三峡船闸双边人字闸门随动控制仿真研究[J]. 人民长江, 2021, 52(8): 235-238.
- [3] 四川省交通厅内河勘察规划设计院, 船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社. 2003.
- [4] 魏文炜. 三峡永久船闸重点启闭设备设计研究[J]. 机械工程学报, 2001, 37(12): 79-82.
- [5] 纪九军, 王可, 徐传仁. 静磁栅行程检测装置在兴隆航电枢纽中的应用[J]. 人民长江, 2014, 45(12): 97-99.

(本文编辑 赵娟)