阀门快速液压启闭机动态特性仿真与试验

王劼耘[1,2] 何俊辉[1,2*] 韦德鉴[1,2] 陈 云[3] 韩明兴[3] 胡楷雄[3] 钟林斌[1,2]
1.平陆运河集团有限公司,南宁,530004
2.广西现代运河实验室,南宁,530004
3.武汉理工大学交通与物流工程学院,武汉,430060

摘要:平陆运河工程采用多梯级省水船闸,具备省水、适应高水头等优点,同时灌泄水步骤较普通船闸显著增加,为保证过闸效率,须大幅提高阀门启闭速度(启门速度不低于8 m/min,闭门速度不低于16 m/min,达到常规速度的2~4倍)。基于该运河工程液压启闭机实际快速启闭需求,建立启闭机运动学数学模型,分析工作阀门的负载特性,建立启闭机液压系统仿真模型,综合对比分析蓄能器补油、高位油箱补油、启泵补油三种闭门快速补油方案,并进行样机试验验证。结果表明:综合考虑补油动态性能、技术成熟度、结构稳定可靠性等,采用高位油箱补油方案最为合理;样机试验测试与仿真结果趋势基本保持一致,其最大相对误差约4.1%,最大启门速度约8.2 m/min,最大闭门速度约16.1 m/min。所设计的快速液压启闭机具有良好的动态控制性能。

关键词:液压启闭机;液压系统设计;快速补油;快速启闭;液压仿真分析
中图分类号:TH137.52
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.08.003 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Simulation and Experimental Study on Dynamic Characteristics of Rapid Hydraulic Hoist

WANG Jieyun[1,2] HE Junhui[1,2*] WEI Dejian[1,2] CHEN Yun[3] HAN Mingxing[3]
HU Kaixiong[3] ZHONG Linbin[1,2]
1.Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning, 530004
2.Guangxi Modern Canal Experiment, Nanning, 530004
3.School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, 430060

Abstract: The Pinglu Canal project adopts a multi-tiered water-saving ship lock, which offers advantages in water conservation and adaptability to high water heads. However, the filling and emptying operations are substantially more frequent than those of conventional ship locks. To ensure lockage efficiency, the valve opening and closing speeds must be significantly increased—specifically, the opening speed should be no less than 8 m/min and the closing speed no less than 16 m/min, which are two to four times the conventional rates. This study focuses on the actual fast-acting requirements of the hydraulic hoist in the canal project. A kinematic mathematical model of the hoist is established, and the load characteristics of the working valve are analyzed. A simulation model of the hydraulic system is developed, and three rapid closing oil-filling schemes—accumulator oil filling, high-level tank oil filling, and pump-direct oil filling—are comprehensively compared and evaluated. Prototype tests are conducted to validate the simulation results. The results indicate that, considering dynamic refueling performance, technological maturity, structural stability, and reliability, the high-level tank scheme is the most reasonable. The prototype test results are generally consistent with the simulation predictions, with a maximum relative error of approximately 4.1%. The measured maximum opening speed is about 8.2 m/min, and the maximum closing speed is about 16.1 m/min. The designed fast hydraulic hoist exhibits good dynamic control performance.

Key words: hydraulic hoist; hydraulic system design; rapid oil replenishment; quick opening and closing; hydraulic simulation analysis

0 引言

近年来,液压启闭机广泛应用在大型水利水电工程上,国内相关学者也开展了大量研究[1-4]。刘伟林等[5]对三峡枢纽工程中液压启闭机的关键技术进行了全面的论述、分析和试验研究。詹磊[6]、李珺[7]设计了采用电液比例控制技术的液压启闭机控制系统,仿真分析了系统的稳定性和动态特性。李泽[8]研究了双吊点液压启闭机同步驱动技术,实现了双液压缸同步控制。段惠玲[9-10]研究了液压启闭机液压系统中平衡阀的设计方法及

收稿日期:2025-08-11
基金项目:广西科技计划项目"带土移植"人才引育计划(桂科AA24010006);广西科技重大专项(桂科AA23062035)

液压缸补油方式，以提高液压启闭机设备的运行平稳性及安全可靠性。毛武荣等[11]系统研究了长江三峡水利枢纽永久船闸液压启闭机液压系统的动态特性。王聪[12]研究了双吊点闸门液压启闭机的同步控制问题，采用模糊滑模控制实现了两液压缸及闸门的同步稳定运行。

当前启闭机的相关研究主要集中在启闭机系统的设计、制造、安装、检测及控制方法等方面[13-15]，涉及多级省水船闸快速液压启闭系统的相关研究较滞后。西部陆海新通道的平陆运河工程是构建国家综合立体交通网的重大战略工程，其船闸采用多级省水结构设计，具备省水率高（可达60%以上）、适应高水头（最大工作水头超过30 m）等突出优点[16-17]，能有效解决运河沿线水资源分布不均的难题。然而，省水船闸为实现节水，其灌注与泄水步骤较普通单级船闸显著增加[18-20]。为保证整个运河系统的通航效率，避免船舶长时间等待，必须大幅缩短单个闸门的运行周期，即对闸门的启闭速度提出了极高要求。目前，国内外大型船闸的启闭速度普遍不超过7 m/min，而平陆运河工程要求启门速度不低于8 m/min，闭门速度不低于16 m/min，达到常规速度的2～4倍，现有液压启闭机技术难以直接应用，亟需开展针对性的快速液压启闭系统研究。

本文针对该运河工程液压启闭机实际快速启闭需求（启门速度不小于8 m/min，闭门速度不小于16 m/min），开展船闸阀门快速液压启闭机液压系统仿真设计与试验研究，旨在为我国快速液压启闭机的进一步推广应用提供技术与理论支撑。

1　快速启闭机液压系统方案设计

基于前期充分的国内外调研，并结合运河工程对启闭机实际性能指标的需求，本文设计了船闸阀门快速液压启闭系统，该系统由大流量电比例泵组、比例插装阀集成控制阀组、液压缸及快速补油系统组成，如图1所示。对于快速补油系统，主要设计了三种方案：①启泵补油（阀门快速闭门时液压缸无杆腔所需流量完全由液压泵提供）；②高位油箱补油（在液压缸无杆腔上部安装补油油箱，通过油液自重对无杆腔进行高效主动补油）；③蓄能器组补油（阀门快速闭门时，液压缸无杆腔所需流量由液压系统里的蓄能器组提供），以便后续进行仿真对比分析。启闭机液压系统主要通过控制比例插装阀集成阀组来实现阀门的快速启门、闭门、事故闭门等功能。

1）快速启门。油泵启动，由于控制阀V5得电，油泵在卸荷状态下工作，随后控制阀V5失电；后控制阀V6和V9同时得电，系统在控制阀V5调定压力下工作，液压油经控制阀V9进入阀

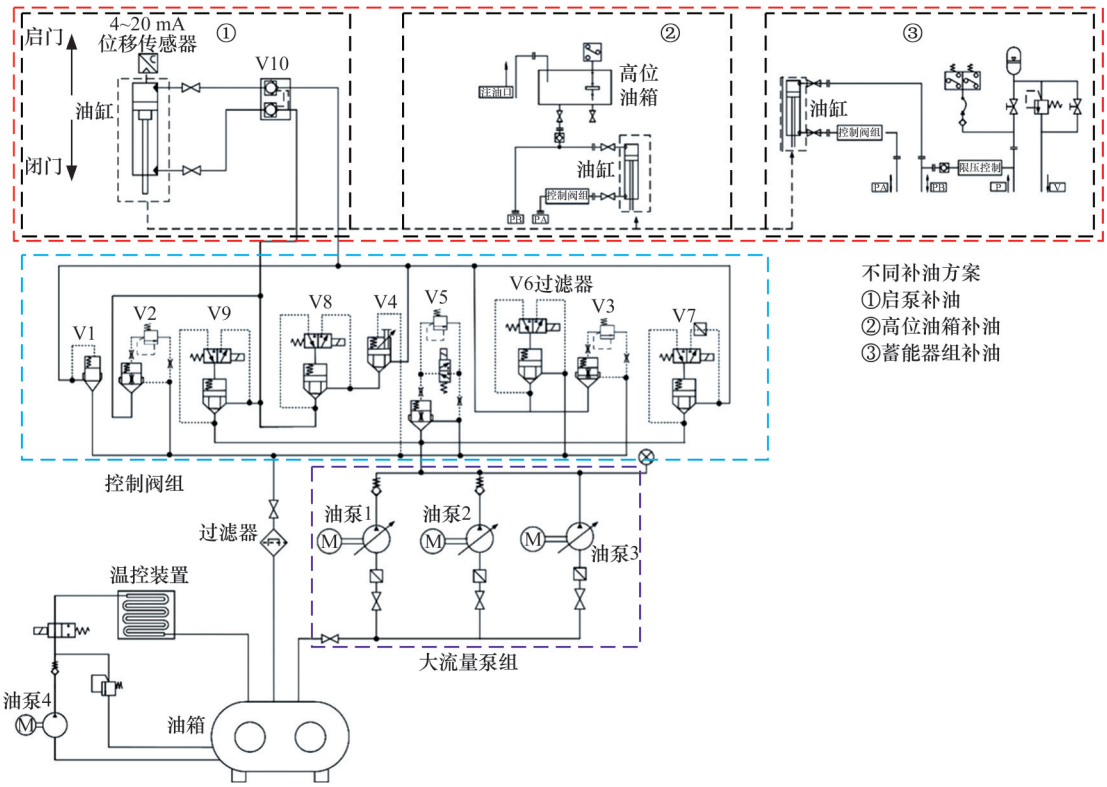


图1　快速启闭机液压系统原理

Fig.1　Schematic of hydraulic system for quick opening and closing machine

门液压缸有杆腔，推动活塞向上移动，开启阀门；同时无杆腔液压油进入油箱。

2）自重闭门。泵站不工作或处于低压卸荷状态，利用阀门自重下落。只需控制控制阀V8得电，阀门液压缸有杆腔液压油在阀门重力作用下，通过控制阀V8和V4进入液压缸无杆腔。由于无杆腔容积大于有杆腔容积，须通过快速补油系统补油。通过调节控制阀V4来控制系统流量，从而调节闭门速度。

3）下压事故闭门。进行事故闭门时，需要泵站动力源启动加压，进行强制快速关闸。控制阀V7和V9同时得电，系统在调定压力下工作，液压油经控制阀V7进入阀门液压缸无杆腔，有杆腔液压油通过控制阀V9、V7进入无杆腔，实现差动连接，推动活塞下行，实现下压事故闭门。

2 工作阀门启闭负载特性研究

2.1 快速液压启闭机负载数学模型

船闸阀门为平板门，外形尺寸为5200 mm×900 mm×70 000 mm（长×宽×高），阀门运动过程中的阻力主要有阀门与导轨间的摩擦力、动静水压作用力、惯性力等，如图2所示。启闭机阀门的运动过程包含从静止（处于开启或者关闭状态）加速到最大速度，再从最大速度减速到静止状态（图3），根据快速启门、自重闭门及事故闭门三种典型工况的动力学分析，可建立以下阀门动力学方程：

$$\left.\begin{aligned} &F-Mg-f-F_w=Ma && \text{快速启门}\\ &Mg-f-F_w=Ma && \text{自重闭门}\\ &F_y+Mg-f-F_w=Ma && \text{事故闭门}\end{aligned}\right\} \tag{1}$$

其中，F为启门力，F_y为事故闭门下压力，M为运动负载总等效质量，f为摩擦力，F_w为水流作用力，a为阀门加速度，g为重力加速度。水流作用力及动静水压所造成的摩擦力可根据下式计算：

$$\left.\begin{aligned} &f=\mu(F_N+F_d)\\ &F_N=\int\rho ghA(h)\mathrm{d}h\\ &F_d=\rho Av_w^2\\ &F_w=\rho gV+(p_{h2}-p_{h1})A_1\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：μ为摩擦因数；F_N为水流作用在门上的静水压力；F_d为水流作用在门上的动水压力；ρ为水的密度；h为浸水深度；A为在水平方向上水流作用于阀门的面积；A_1为在垂直方向上水流作用于阀门的面积；V为阀门浸没在水中的体积；p_{h1}、p_{h2}分别为门顶与门底的静水压力；v_w为水的流速[21-22]。

2.2 快速启闭机液压系统关键参数设计

液压缸作为快速液压启闭机的关键核心执行部件，其设计必须满足快速运行时的强度要求，并具备一定的抗冲击能力。启闭机液压缸内径D和活塞缸直径d可按下式来确定：

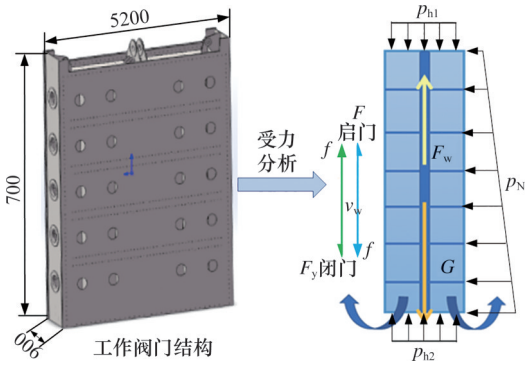


图2 阀门结构及其受力分析

Fig.2 Valve structure and force analysis

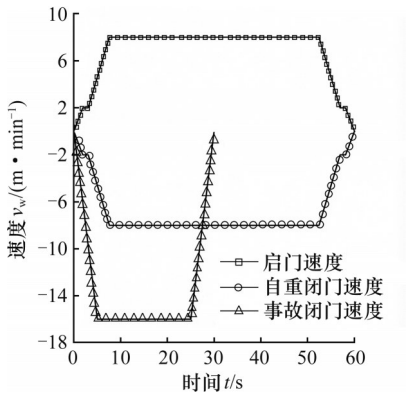


图3 阀门启闭过程速度曲线

Fig.3 Speed curve of valve opening and closing process

$$\frac{\pi}{4}(D^2-d^2)p_1=F+\frac{\pi}{4}D^2p_2+F_f \tag{3}$$

$$D^2=\frac{F+F_f}{\frac{\pi}{4}\left[\left(1-\frac{d^2}{D^2}\right)p_1-p_2\right]} \tag{4}$$

其中，p_1为液压缸工作压力；p_2为液压缸回油背压；d/D为活塞杆直径与液压缸内径之比，一般为0.5～0.58；F为工作循环中的最大负载；F_f为液压缸密封处摩擦力。启门过程中液压缸有杆腔流量、无杆腔流量可按下式计算：

$$q_1=v_1A_1 \tag{5}$$

$$q_2=v_1A_2 \tag{6}$$

其中，q_1、q_2分别为液压缸启门有杆腔、无杆腔流量；v_2为最大启门速度。结合初始设计要求，可获得液压启闭机关键设计参数，见表1。

3 快速启闭机液压系统仿真分析

3.1 仿真模型的建立及参数设置

快速启闭机液压系统仿真模型主要由大流量变量泵组、控制阀组和液压缸三部分组成。大流量变量泵组为系统供油，液压缸与阀门连接，控制阀门完成闭门、启门等运动。关键仿真参数如表2所示，将阀门及外负载等效为系统负载，建立快速启闭机系统仿真模型（图4）。

表 1　液压缸关键设计参数

Tab. 1　Key design parameters of hydraulic cylinder

参数	值
液压缸缸径/mm	480
液压缸杆径/mm	250
有杆腔的有效作用面积/m^2	0.132
无杆腔的有效作用面积/m^2	0.181
最大启门速度/(m·min^{-1})	8
最大闭门速度/(m·min^{-1})	16
工作行程/m	6.7
最大行程/m	6.9
启门力/kN	3000
启门压力/MPa	23
启门有杆腔流量/(L·min^{-1})	1070
启门无杆腔回油量/(L·min^{-1})	1466.1
闭门有杆腔回油量/(L·min^{-1})	2125.2
闭门无杆腔流量/(L·min^{-1})	2914.1
闭门补油量(差动)/(L·min^{-1})	942.3

表 2　液压缸参数设置

Tab. 2　Simulation parameter settings

元件名称	参数	值
液压缸	活塞杆位移/m	6.9
	活塞直径/mm	480
	活塞杆直径/mm	250
	行程长度/m	6.9
	端口 1 死区体积/cm^3	50
	端口 2 死区体积/cm^3	50
	液压缸总质量/kg	59 063
插装阀	内孔直径/mm	60
	最大孔径/mm	30
	杆径/mm	0
	活塞直径/mm	70
	活塞杆直径/mm	60
	黏性摩擦因数/(N·m^{-1}·s)	10
	最小运动位移/m	0
	最大运动位移/m	0.015
	活塞直径/mm	70
	活塞杆直径/mm	0
	零压缩时弹簧力/N	100
	零压缩时弹簧长度/mm	10
	弹簧刚度/(N·mm^{-1})	10

3.2　启闭机闭门不同补油方案仿真分析

3.2.1　高位油箱补油

启闭机自重闭门采用高位油箱补油时，液压缸在整机质量的作用下关闭阀门，泵站不工作或处于低压卸荷状态，对液压启闭机完整启闭过程进行仿真，图 5 及图 6 分别为液压缸运动特性和有杆腔压力变化曲线。由仿真结果可知，启门过程中，0～10 s时，液压缸活塞速度逐渐增大，为匀加速运动阶段，运动到 0.9 m 后达到最大启门速度 0.15 m/s(9 m/min≥8 m/min)，运动到 6.1 m 后速度开始逐渐减小，在 56 s时速度减为 0。随后关闭液压泵，液压缸活塞在系统重力作用下快速下落，此时液压缸为差动连接，在 60～78 s时，液压缸达到平衡状态，流量不再增加，系统达到最大闭门速度 0.32 m/s。随后 78 s时控制阀组进行节流减速，由于阀门的闭门运动惯性，在液压缸有杆腔内产生了一个最大约 5 MPa的压力冲击。液压缸开始缓冲减速，流量急剧减小，活塞下降速度振荡，液压缸中的流量逐渐减小，直到约 86 s时完成闭门。

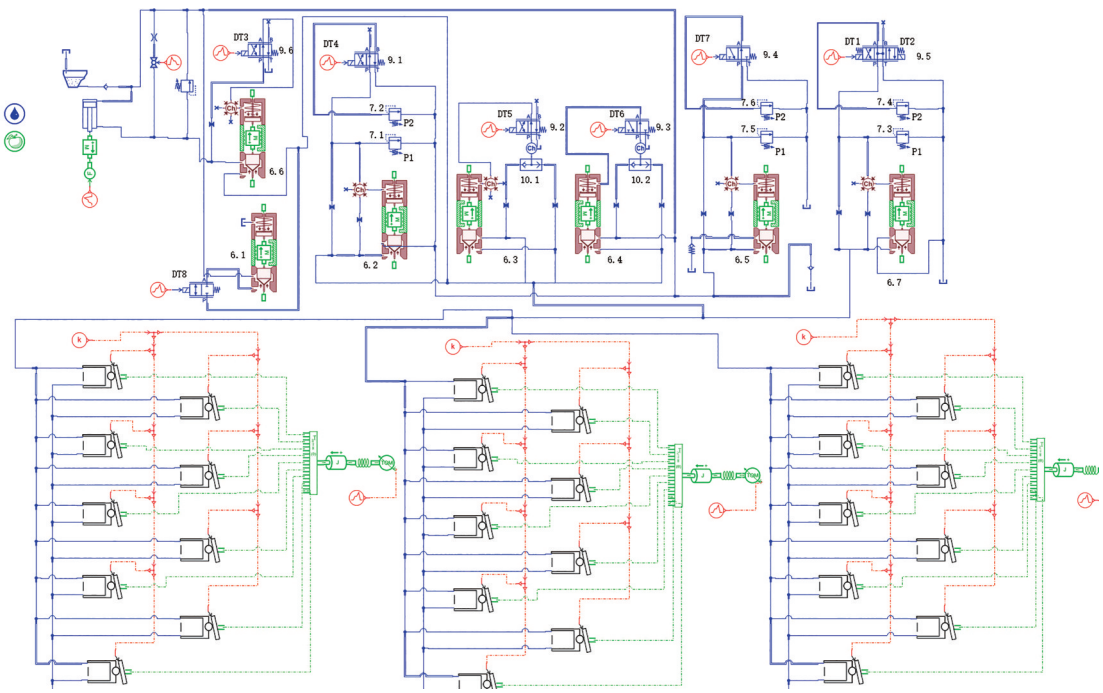
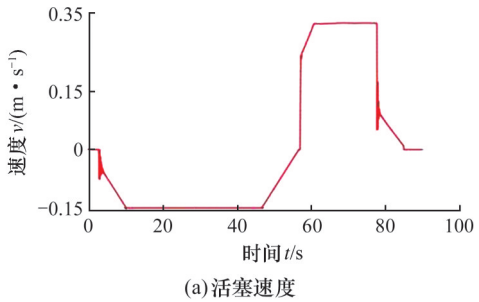
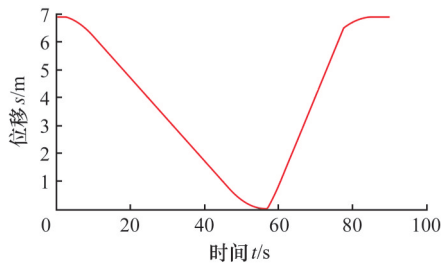


图 4　快速液压启闭机仿真模型

Fig.4　Simulation model of fast hydraulic opening and closing machine



(a)活塞速度



(b)活塞位移

图5 高位油箱补油时液压缸运动特性

Fig.5 The motion characteristics of the oil cylinder when refilling the high-level oil tank

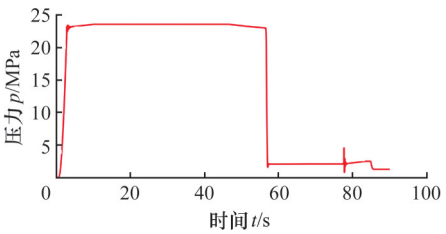
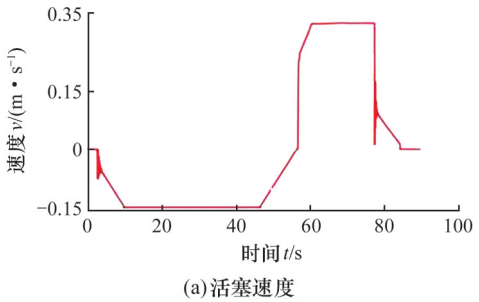
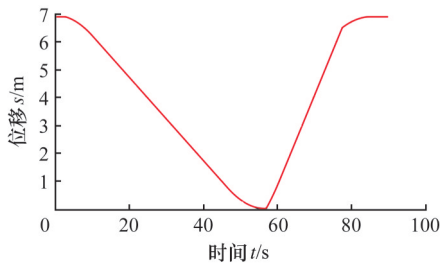


图6 高位油箱补油时液压缸有杆腔压力变化

Fig.6 Changes in pressure in the rod chamber of the oil cylinder when refilling the high-level oil tank



(a)活塞速度



(b)活塞位移

图7 液压泵主动补油时液压缸运动特性

Fig.7 Motion characteristics of hydraulic cylinder during active oil replenishment of hydraulic pump

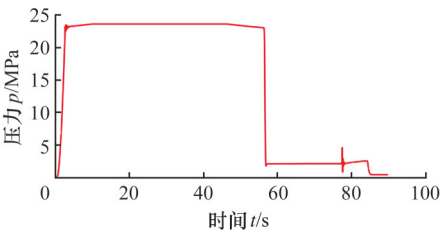


图8 液压泵主动补油时液压缸有杆腔压力变化

Fig. 8 A pressure change in the rod chamber of the oil cylinder when the pressure pump actively replenishes oil

3.2.2 液压泵主动补油

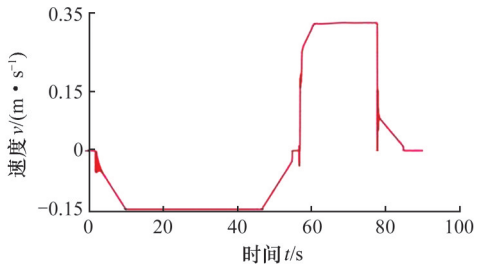
启闭机自重闭门采用液压泵主动补油时，泵站启动处于工作状态，系统在调定压力下工作，液压缸采用差动连接，液压油经液压缸无杆腔推动活塞向下运动闭门，对系统进行仿真，图7、图8分别为液压缸运动特性和有杆腔压力变化曲线。由仿真结果可知，启门过程与高位油箱补油方案中保持一致。在闭门时，大流量油泵主动给液压缸无杆腔补油，达到最大速度0.33 m/s，液压缸达到平衡状态，流量不再增加，阀门保持最大速度匀速下降。随后78 s时控制阀组进行节流减速，在液压缸有杆腔内产生了一个最大约6 MPa的压力冲击。液压缸开始缓冲减速，液压缸中的流量逐渐减小，直到约86 s时完成闭门。对比发现，液压泵主动补油时进入缓冲瞬间产生的速度振荡明显强于高位油箱补油方案。

3.2.3 蓄能器补油

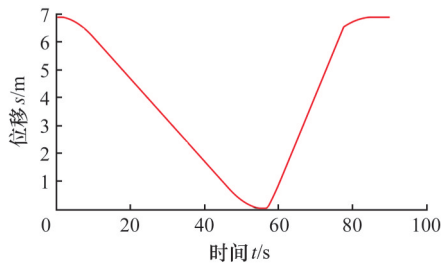
对于蓄能器补油方案，启闭机整机启门过程与上述两种方案保持一致。在闭门阶段，泵站不工作或处于低压卸荷状态，液压缸采用差动连接，通过开启预先充能的蓄能器对液压缸无杆腔进行主动补油，图9、图10所示分别为液压缸运动特性和有杆腔压力变化仿真结果。在闭门阶段，蓄能器主动给液压缸无杆腔补油，系统达到最大速度0.32 m/s，液压缸达到平衡状态，流量不再增加，阀门保持最大速度匀速下降。随后78 s时控制阀组进行节流减速，在液压缸有杆腔内产生了一个最大约6 MPa的压力冲击。液压缸开始缓冲减速，液压缸中的流量逐渐减小，直到约86 s时完成闭门。对比发现，进入缓冲瞬间，蓄能器补油方案产生的速度与压力冲击与液压泵主动补油方案相当，均强于高位油箱补油方案。

3.3 不同补油方案对比分析

如表3所示，蓄能器补油、高位油箱补油、液压泵补油等方案的最大闭门速度相当，均满足启闭机对于最大启闭速度的要求。高位油箱补油方案在闭门减速阶段产生的压力冲击峰值最低(5 MPa)，较另外两种方案(6 MPa)降低了约16.7%，这表明其系统运行更为平稳，有助于提高液压元件及管路的使用寿命与可靠性。液压泵主



(a)活塞速度



(b)活塞位移

图 9　蓄能器补油时液压缸运动特性

Fig.9　Movement characteristics of oil cylinder during accumulator refueling

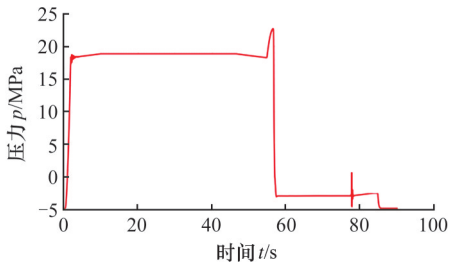


图 10　蓄能器补油时液压缸有杆腔压力变化

Fig.10　When the accumulator is refilled, there is a pressure change in the rod chamber of the oil cylinder

动补油时，由于系统存在一定的流量溢流损失，其补油流量最大为 1130.1 L/min。对比系统单次闭门时的补油能效，高位油箱补油方案仅消耗 26.9 kJ，其能量利用效率远超另外两种方案。液压泵主动补油与蓄能器补油方案的能耗分别高达 489.7 kJ 与 510.4 kJ，约为高位油箱方案的 18 倍与 19 倍。高位油箱利用重力势能进行自动补油，而另外两种方案均需液压泵克服系统压力做功，能量损耗巨大。

表 3　不同补油方案性能与能耗对比

Tab. 3　Comparison of performance and energy consumption of different oil replenishment schemes

补油方案	最大闭门速度/(m·s⁻¹)	补油流量/(L·min⁻¹)	压力冲击峰值/MPa	单次补油消耗能量/kJ
高位油箱补油	0.32	942.3	5	26.9
液压泵补油	0.33	1130.1	6	489.7
蓄能器补油	0.32	942.3	6	510.4

液压泵补油响应速度快，无需增加额外设备，控制较为方便，但需要液压系统长时间处于强压工作状态，能耗高、效率较低；蓄能器补油需要动力源提前给蓄能器充能，花费时间较长，同时蓄能器现场安装占用空间较大，存在长期工作稳定性、使用维护成本、能耗高等问题。

综上，高位油箱补油技术成熟，稳定可靠，结构简单，成本较低，启闭机正常闭门时采用高位油箱补油方案最为合理。

4　样机试验

为验证船闸阀门快速液压启闭机整机设计方案与仿真结果的准确性，研制了快速液压启闭机，并搭建了启闭机原位立式试验装置，如图 11 所示。装置主要由电控系统、液压泵站系统、工作阀门、立式台架、工作液压缸、高位补油箱、加载缸等组成，图 12 所示为实际试验现场。

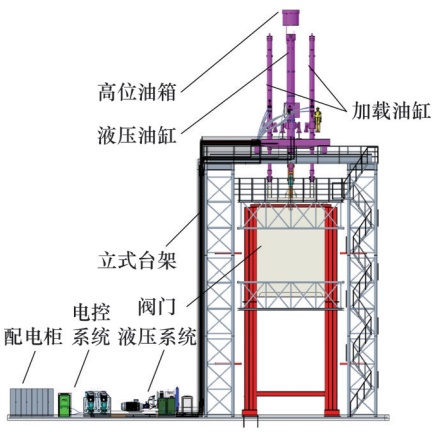


图 11　启闭机原位立式试验装置

Fig.11　In situ vertical testing device for hoist machine

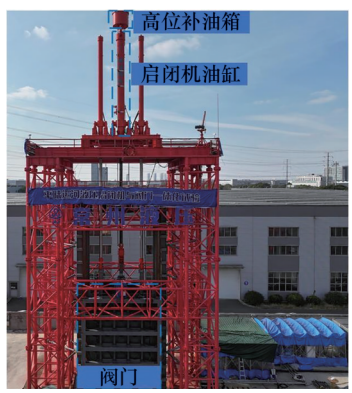


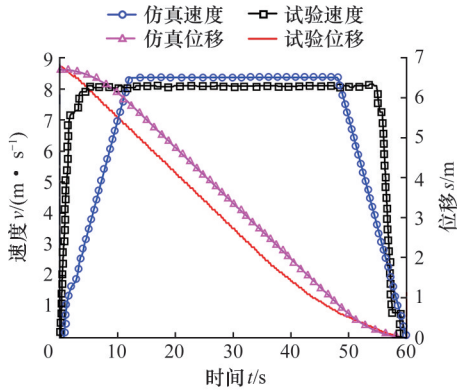
图 12　试验测试现场

Fig.12　Experimental testing site

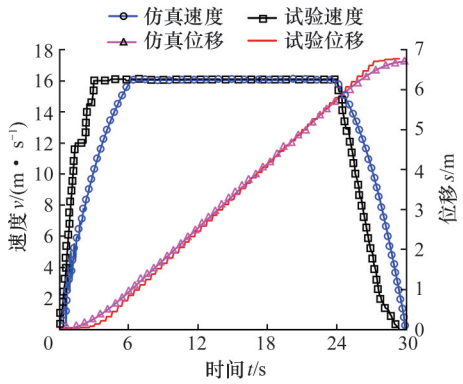
图 13 所示为启闭机启门＋事故闭门性能测试，阀门往复运行用时 127.7 s，其中启门用时 59 s，闭门用时 58.7 s，液压系统响应时间为 10 s。启门工况下，实验液压系统建压时间为 5 s，工作压力稳定在 9 MPa，峰值压力为 12 MPa，泵站响应 10 s，液压缸无杆腔进油，进行事故闭门工况，系统整体运行良好，启闭过程中液压缸活塞杆伸缩正常。

图 14 所示为启闭机在快速启门、自重闭门、

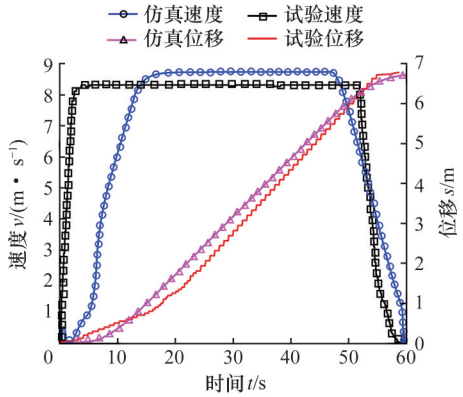
事故闭门三种工况下的仿真与试验测试结果。如图14a所示，启门工况测试结果与仿真结果趋势基本保持一致，在加速段、匀速段和减速段出现一定误差，启门总用时的相对误差为1.7 %，匀速段最大速度的相对误差为3 %；如图14b所示，自重闭门工况测试结果与仿真结果具有较好的一致性，仅在加速段出现差异，自重闭门总用时的相对误差为1.7 %，匀速段最大速度相对误差为0.5 %。在减速段，均实现了阀门从最大速度16 m/min平缓地减小到0；如图14c所示，事故闭门工况测试结果与仿真结果有着相同趋势，事故闭门工况总用时相对误差为2.2 %，匀速段最大速度相对误差为4.1 %。在减速段，均实现了阀门从最大启门速度8 m/min平缓减小到0。



(a)启门工况



(b)自重闭门工况



(c)事故闭门工况

图14 启闭机启闭过程仿真与试验结果对比

Fig.14 Comparison between simulation and experiment result of the opening and closing process of the hoist

通过分析启闭机三种工况下仿真与试验结果的对比，验证了液压系统仿真模型的正确性以及启闭机液压系统与补油方案的可行性，结果表明，所设计的快速液压系统可满足启闭机使用需求。

5 结论

1)针对快速液压启闭机8 m/min启门速度和16 m/min自重闭门速度的需要，本文设计了由大流量电比例泵组、比例插装阀集成控制阀组、液压缸及快速补油系统组成的快速启闭机液压系统，进行了启闭机外负载特性的分析，建立了启闭机负载数学模型，完成了快速启闭机液压系统关键参数的设计。

2)本文建立了启闭机液压系统仿真模型，分别对启闭机液压系统中蓄能器补油、高位油箱补油、启泵补油三种方案进行了仿真对比分析，结果表明高位油箱补油方案在动态性能和能量效率上展现出显著优势，闭门过程中的压力冲击峰值最低(5 MPa)，系统运行更为平稳；同时，单次补油能耗(26.9 kJ)远低于液压泵主动补油(489.7 kJ)与蓄能器补油(510.4 kJ)方案。综合考虑技术性能、能耗与经济性，高位油箱补油被确定为最优方案。

3)完成了快速液压启闭试验方案设计与原位立式试验台架的搭建，试验结果表明，仿真与试验的最大速度相对误差为4.1 %，测试结果与仿真结果具有较好的一致性。本文设计的液压快速启闭机满足阀门快速启闭的技术要求，验证了仿真模型的准确性，且启闭机液压系统具有良好的动态性能。

参考文献：

[1] 杨海超. 双吊点启闭机液压系统动态特性研究[D]. 兰州：兰州理工大学，2017.
YANG Haichao. Study on Dynamic Characteristics of Hydraulic System of Double Hoist[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.

[2] 苑清敏. 内河船闸控制系统的设计与实现[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2018.
YUAN Qingmin. Design and Implementation of Control System for the Inland River Lock[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[3] 王希强，丁海港，景军清，等. 变速泵控型船闸启闭机系统设计与试验研究[J]. 机床与液压，2025，53(5)：204-209.
WANG Xiqiang, DING Haigang, JING Junqing, et al. Design and Experimental Research of Variable Speed Pump-controlled Ship Lock Hoist Systems[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2025, 53(5): 204-209.

[4] 范庆，赵勇，何延，等. 一种水电站快速门液压启闭机回油箱智能净化装置[J]. 机床与液压，2025，53(12)：217-223.
FAN Qing，ZHAO Yong，HE Yan，et al. A Hydropower Station Rapid Gate Hydraulic Hoist Return Oil Tank Intelligent Purification Device[J]. Machine Tool & Hydraulics，2025，53(12)：217-223.

[5] 刘伟林. 三峡枢纽工程中的液压启闭机关键技术研究[D]. 太原：太原理工大学，2003.
LIU Weilin. Research on Key Technologies of Hydraulic Hoisting Machine in Three Gorges Project[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology，2003.

[6] 詹磊. 新型双吊点液压启闭机的设计与研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2011.
ZHAN Lei. Design and Research of a New Hydraulic Hoist with Double Lifting Points[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2011.

[7] 李珺. 液压启闭机电液比例控制系统的设计研究[D]. 昆明：昆明理工大学，2008.
LI Jun. Design and Research of Electro Hydraulic Proportional Control System for Hydraulic Hoist[D]. Kunming：Kunming University of Science and Technology，2008.

[8] 李泽. 基于同步驱动技术的双吊点液压启闭机控制系统研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2019.
LI Ze. Research on Control System of Double Hanging Point Hydraulic Hoist Based on Synchronous Drive Technology[D]. Harbin：Harbin Institute of Technology，2019.

[9] 段惠玲，常庆玉. 平衡阀在液压启闭机液压系统中的设计研究[J]. 液压气动与密封，2021，41(5)：57-60.
DUAN Huiling，CHANG Qingyu. Design and Research of Balance Valve for Hydraulic Hoist Hydraulic System[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals，2021，41(5)：57-60.

[10] 段惠玲. 水利水电工程中液压缸补油方式设计研究[J]. 液压气动与密封，2021，41(6)：10-13.
DUAN Huiling. Design and Research on Oil Replenishment Mode of Hydraulic Cylinder for Water Conservancy and Hydropower Engineering[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals，2021，41(6)：10-13.

[11] 毛武荣，张国贤，黄人豪，等. 启闭机液压系统的动态特性研究[J]. 机电设备，2004，21(3)：15-19.
MAO Wurong，ZHANG Guoxian，HUANG Renhao，et al. Study on the Dynamic Characteristics of the Hydraulic System for Headstock Gear[J]. Mechanical and Electrical Equipment，2004，21(3)：15-19.

[12] 王聪. 双吊点闸门启闭机液压系统仿真及同步控制策略研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2022.
WANG Cong. Research on Hydraulic System Simulation and Synchronous Control Strategy of Double Lifting Point Gate Hoist[D]. Qinhuangdao：Yanshan University，2022.

[13] 侯庆宏，周伟. 液压启闭机带多拉杆启闭平面闸门的设计[J]. 水科学与工程技术，2018(4)：59-61.
HOU Qinghong，ZHOU Wei. Design and Research of Operation Plane Gate for Hydraulic Hoist with Multi Pull Rod[J]. Water Sciences and Engineering Technology，2018(4)：59-61.

[14] 杜超，李聪，谭勇. 闸阀门启闭机液压系统多通道运行状态检测装置研发应用[J]. 中国水运，2025(19)：105-107.
DU Chao，LI Cong，TAN Yong. Development and Application of Multi-channel Running State Detection Device for Hydraulic System of Gate Valve Hoist[J]. China Water Transport，2025(19)：105-107.

[15] 周兵. 船闸人字闸门液压启闭机设计研究[J]. 水电与抽水蓄能，2022，8(5)：112-115.
ZHOU Bing. Design and Research of Hydraulic Hoist for Miter Gate of Ship Lock[J]. Hydropower and Pumped Storage，2022，8(5)：112-115.

[16] 夏小迪，汤建宏. 省水船闸的布置方案与结构设计[J]. 水运工程，2022(增刊1)：124-129.
XIA Xiaodi，TANG Jianhong. Layout Scheme and Structure Design of Water-saving Ship Lock[J]. Port & Waterway Engineering，2022(S1)：124-129.

[17] 陈明，吕森鹏，刘原，等. 省水船闸输水系统水力学研究综述[J]. 水运工程，2021(9)：106-112.
CHEN Ming，LÜ Senpeng，LIU Yuan，et al. Review of Hydraulics Investigations of Filling and Emptying System in Ship Locks with Water-saving Basins[J]. Port & Waterway Engineering，2021(9)：106-112.

[18] 潘海涛，吴澎，袁和平，等. 西部陆海新通道(平陆)运河工程规划设计方案综述[J]. 水运工程，2024(11)：1-7.
PAN Haitao，WU Peng，YUAN Heping，et al. Overview of Planning and Design Scheme for Western Land-sea New Corridor(Pinglu) Canal Project[J]. Port & Waterway Engineering，2024(11)：1-7.

[19] 刘宁. 平陆运河工程建设关键问题研究与思考[J]. 水运工程，2024(6)：1-11.
LIU Ning. Research and Contemplation on Key Issues in Construction of Pinglu Canal Project[J]. Port & Waterway Engineering，2024(6)：1-11.

[20] 穆森，吕小龙. 平陆运河船闸通过能力研究[J]. 水运工程，2021(3)：145-150.
MU Sen，LÜ Xiaolong. Lock Capacity of the Pinglu Canal[J]. Port & Waterway Engineering，2021(3)：145-150.

[21] 陈云，苏华，胡楷雄，等. 平面阀门启门初期与闭门末期数值水动力及负载特性模拟研究[J]. 起重运输机械，2024(22)：49-56.
CHEN Yun，SU Hua，HU Kaixiong，et al. Simulation Study on Numerical Hydrodynamic and Load Characteristics of Plane Valve at the Initial Stage of Door Opening and the Final Stage of Door Closing[J]. Hoisting and Conveying Machinery，2024(22)：49-56.

[22] 刘昉，谷欣玉，李文胜，等. 动水关闭的平面事故闸门体型优化试验研究[J]. 农业工程学报，2019，35(12)：142-149.
LIU Fang，GU Xinyu，LI Wensheng，et al. Structural Optimization of Emergency Plate Gate for Closure in Moving Water[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering，2019，35(12)：142-149.

（编辑　陈　勇）

作者简介：王劼耘，男，1966年生，教授级高级工程师。研究方向为大型水运工程建设管理。E-mail：437107227@qq.com。
何俊辉*（通信作者），男，1981年生，正高级工程师。研究方向为水运工程建设技术。E-mail：hejunhui925@163.com。

本文引用格式：
王劼耘，何俊辉，韦德鉴，等. 阀门快速液压启闭机动态特性仿真与试验[J]. 中国机械工程，2026，37(8)：1832-1839.
WANG Jieyun，HE Junhui，WEI Dejian，et al. Simulation and Experimental Study on Dynamic Characteristics of Rapid Hydraulic Hoist[J]. China Mechanical Engineering，2026，37(8)：1832-1839.