



# 异常工况下船闸阀门吊杆屈曲失效分析

熊先华, 冀温源, 沈秋任

(广西西江开发投资集团有限公司, 广西南宁 530022)

**摘要:** 某Ⅲ级船闸输水系统平板阀门闭门时发生卡阻, 导致吊杆折断, 采用动力学原理和有限单元法对阀门吊杆屈曲失效原因进行分析。在船闸输水阀门闭门卡阻工况下, 输水阀门-吊杆-启闭机形成平面四连杆机构, 在共线死点位置易使吊杆受压发生屈曲破坏。通过线性屈曲特征值计算和非线性后屈曲分析得出吊杆临界屈曲载荷为 80 kN, 低于液压启闭机超压报警值。屈曲模态显示, 吊杆受压失稳后发生大变形导致局部材料屈服后发生塑性变形直至断裂, 使得吊杆折断。吊杆临界屈曲载荷对铰接处单耳板的材料板厚敏感度较高, 增加板厚或采用双耳板结构可显著提高结构抵抗屈曲失稳的能力。研究成果可为同类结构的设计提供参考。

**关键词:** 船闸; 阀门; 吊杆; 屈曲

中图分类号: U641.3+32

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)06-0153-05

## Buckling failure analysis of ship lock valve boom under abnormal condition

XIONG Xianhua, JI Wenyuan, SHEN Qiuren

(Guangxi Xijiang Development & Investment Group Co., Ltd., Nanning 530022, China)

**Abstract:** When the plane valve of the water delivery system of a III-class ship lock is closed, the blockage occurs, resulting in the breakage of the boom. In this paper, dynamic principle and finite element method are used to analyze the causes of buckling failure of valve boom. Under the condition of water delivery valve blockage, the valve, boom and headstock gear form a planar four-link mechanism, which is easy to cause buckling failure of the boom under pressure at the collinear dead point. Through the calculation of linear buckling characteristic values and nonlinear post-buckling analysis, it is concluded that the critical buckling load of the boom is 80 kN, which is lower than the overpressure alarm value of the hydraulic headstock gear. The buckling mode shows that large deformation occurs after the boom is destabilized under pressure, resulting in plastic deformation and fracture of local materials after yielding, which makes the boom break. The critical buckling load of the boom is more sensitive to the material plate thickness of the hinged single lug plate. Increasing the plate thickness or using double lug plate structure can significantly improve the ability of the structure to resist buckling instability. The research results can provide reference for similar structural design.

**Keywords:** ship lock; valve; boom; buckling

输水阀门作为在船闸运行中实现充泄水环节的关键设备, 通常采用竖缸液压启闭机完成启闭动作, 通过吊杆结构与液压启闭机活塞杆进行连接。输水阀门吊杆整体通常由多节连杆通过销轴铰接而成。在正常启闭输水阀门时因承受门体自重及导轮、轨道的摩擦力等垂向力, 吊杆整体

始终处于承受拉力状态。输水阀门运转频繁, 工作条件复杂, 在长期运行过程中, 由于门体倾斜、门槽杂物、门槽掏空、滚轮和轨道磨损等, 会使阀门在启闭过程中出现卡阻<sup>[1-3]</sup>。当闭门过程中输水阀门出现卡阻而无法下落时, 启闭机活塞杆持续外伸的推力会使吊杆由受拉转变为受压状态,

收稿日期: 2024-08-29

作者简介: 熊先华 (1982—), 男, 高级工程师, 研究方向为船闸通航安全和过闸效率提升。

吊杆易出现稳定性问题，从而引起屈曲失效破坏。对于螺杆式闸门启闭机，闸门卡阻易导致螺杆产生弯曲变形甚至折断<sup>[4]</sup>。

2024 年 2 月，西江流域某 III 级船闸上右输水阀门闭门时卡阻，不能下落到位，导致吊杆发生折断，见图 1。但监测数据显示，液压启闭机在闭门过程中未达超压报警值，可见吊杆在低于压力设计值的情况下发生了破坏，其稳定性问题值得引起关注。JTJ 308—2003《船闸闸阀门设计规范》<sup>[5]</sup>中吊杆的设计要求应满足刚度和防振的要求。JTJ 309—2005《船闸启闭机设计规范》<sup>[6]</sup>对启闭机的推杆、活塞杆的稳定性计算、临界荷载、容许稳定安全系数作了相应要求。周吉<sup>[7]</sup>对船闸人字门启闭机液压缸屈曲稳定性进行了分析研究。可见，船闸输水阀门系统的相关设计规范和研究主要是针对启闭机结构的稳定性，对阀门吊杆的稳定性研究甚少。



图 1 某 III 级船闸输水阀门折断的吊杆  
Fig. 1 Broken boom of filling and emptying valve of a III-class ship lock

本文对船闸输水阀门闭门卡阻工况下，输水阀门-吊杆-启闭机系统进行动力学分析，采用有限单元法对吊杆的稳定性屈曲失效进行分析研究，并就改善吊杆稳定性提出建议。

### 1 输水阀门启闭系统动力学

西江流域某 III 级船闸充泄水阀门总布置如图 2 所示，输水阀门为平面阀门，通过 6 节吊杆与岸上液压启闭机活塞杆连接。阀门-吊杆-启闭机活塞杆组成空间连杆机构，采用方向正交的 2 种销轴进行铰接，其中启闭机竖缸固定铰架轴、活塞杆连接吊杆轴销及阀门连接销轴均为平行闸室(水流)方向，中间吊杆铰连接销轴为垂直闸室方向。

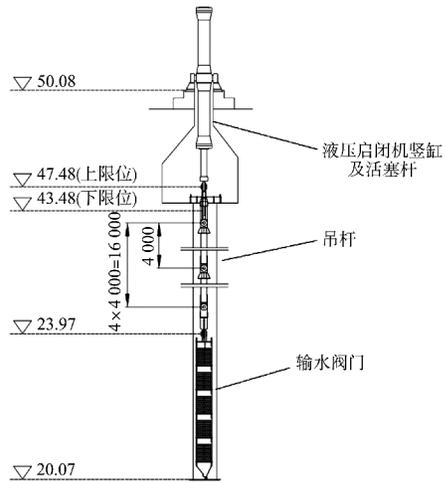
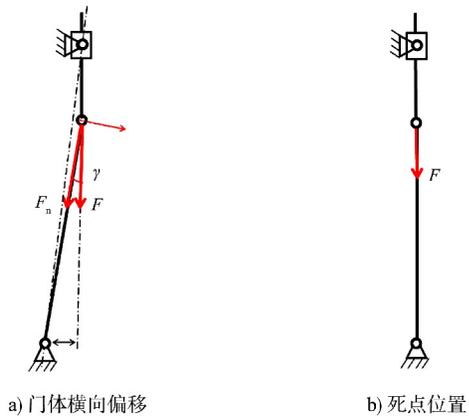


图 2 某 III 级船闸充泄水阀门总布置 (高程: m; 尺寸: mm)  
Fig. 2 General layout of filling and emptying valve of water delivery system of a III-class shiplock (elevation: m; dimension: mm)

根据图 2 所示平面分析，吊杆中间铰接处在非平面内的运动受到约束，整体可视为一根杆件。当输水阀门闭门发生卡阻时，竖缸支座-阀门-吊杆-竖缸活塞杆在与图 2 正交的平面内形成典型的平面四连杆机构，如图 3 所示，该机构亦被称为移动导杆机构。当无尺寸和位置误差时，在阀门发生卡阻前，活塞杆、吊杆整体、阀门在重力作用下呈垂直竖向共线状态，一旦卡阻发生，四连杆机构形成死点，使得机构均不能运动，见图 3b)。活塞杆作为主动件，继续施加推力荷载，吊杆承受压力荷载达到最大。吊杆整体在该平面方向为典型细长杆结构，在受压工况下，荷载达到临界值时极易发生失稳。



注:  $F$  为活塞杆对吊杆的推力;  $\gamma$  为吊杆与活塞杆延长线夹角;  $F_n$  为吊杆受到的法向分力。

图 3 吊杆转化为平面四连杆机构  
Fig. 3 Transformation of boom into planar four-link mechanism

由于门体倾斜、门槽掏空磨损等,阀门发生卡阻,此时门体在垂直闸室方向存在位移。该机构虽然未在连杆共线死点位置,活塞杆持续加载,吊杆具有侧向运动的趋势,且仍受到法向分力,见图3a)。该力虽然低于死点,但若大于吊杆稳定性临界载荷,仍可使吊杆整体在启闭机超压报警前发生屈曲失效。

从平行于闸室(水流)的平面进行分析,该平面内吊杆中间存在5处铰接点,整体为多连杆机构,自由度较多,柔度较大,垂直受载时铰接处易发生横向位移;活塞杆达到最大行程后启闭机自行停机,不存在细长杆受压稳定性问题。

## 2 吊杆屈曲分析

屈曲是指结构元件由于压缩载荷作用而发生的失稳现象。当外部压缩载荷达到某个临界值时,结构件会突然从一个平衡状态向另一个平衡状态过渡,通常伴随着侧向偏移或变形。最基本的屈曲计算方法是基于欧拉屈曲公式<sup>[8]</sup>:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (1)$$

式中:  $P_{cr}$  为临界屈曲载荷;  $E$  为材料的弹性模量;  $I$  为截面的惯性矩;  $L$  为杆件的有效长度,须考虑端部约束条件;  $K$  为长度系数,反映边界条件对屈曲的影响。

如图2所示,各节吊杆上部为双耳板、下部为单耳板结构,在单耳板处存在明显的截面弱轴,使得吊杆结构在受压状态易向弱轴方向(水流方向)发生失稳,从而造成屈曲破坏。由于吊杆整体由6根吊杆铰接而成,不具有统一的截面,其惯

性矩为非常量,无法用式(1)直接计算临界屈曲载荷,通常需要通过有限元分析更精确地预测屈曲行为。

### 2.1 线性屈曲

结构线性屈曲分析即给结构施加单位载荷,求解刚度矩阵特征值。吊杆为钢板及钢管焊接结构,采用壳单元建立有限元模型。中间铰接在分析平面内无运动自由度,因此采用共节点简化连接,即双耳板结构与单耳板连接处的单元节点进行绑定位移约束。由式(1)可知,结构的约束条件对临界载荷影响较大。底部与阀门连接耳板,将其一圈节点耦合到中心参考点,约束该点除绕面内转动的自由度外的其他自由度。与活塞杆连接耳板耦合参考点后,保持面内转动和位移自由度,约束非铰接方向的转动自由度,并在上端参考点施加1 kN 载荷,模拟支座铰接的竖缸推力加载。

剔除刚体和正交面模态后,吊杆前5阶屈曲模态如图4所示。第1阶特征值为87,对应临界载荷  $P_{cr} = 87$  kN。当压力载荷达到该值时,中间发生横向位移,吊杆整体发生弯曲。随着载荷的增大,结构发生相反方向的多阶弯曲模态,使得结构呈“折叠”失稳形态,失去承载及传递载荷的能力,甚至发生折断失效。根据船闸现场记录,竖缸当时最大闭门压力约为3.5 MPa,未达超压报警值5 MPa,对应加载在吊杆顶部的压力为281 kN(超压报警值闭门力402 kN),超过吊杆屈曲临界载荷,可见屈曲失稳是导致吊杆折断的直接原因。由前5阶屈曲模态可见,弯曲振型的拐点均在吊杆的耳板连接处,此处局部形变较大,是结构的薄弱点。

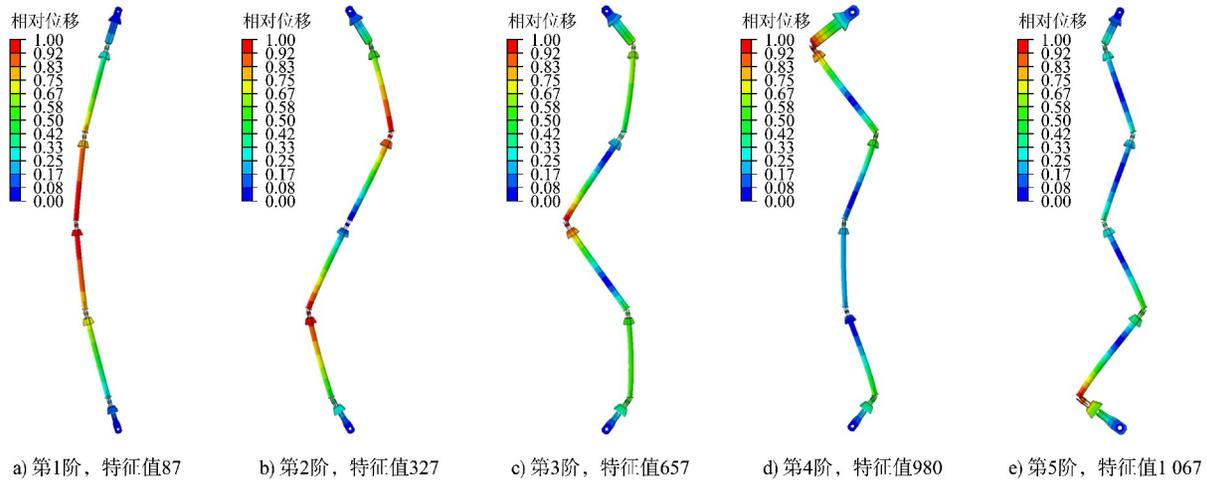


图 4 吊杆振型数值归一化的低阶屈曲模态及其特征值

Fig. 4 Low-order normalization buckling modes of boom and their eigenvalues

### 2.2 非线性屈曲

线性屈曲载荷的计算属于结构小位移、材料线弹性的屈曲范畴，可以确定临界载荷和屈曲振型，但无法提供屈曲后发生的情况<sup>[9]</sup>。本文所分析的折断吊杆材料已明显发生塑性变形，同时，结构在加工制造中可能存在尺寸公差，如吊杆要求上吊耳板的对称中心线与下吊耳板的对称中心线间的最大偏离不得超过 3 mm，使得模型可能存在初始缺陷。为了更精确地对吊杆屈曲失效过程进行分析，并确定屈曲后形状，需考虑材料塑性行为、初始缺陷以及大变形效应等因素，对吊杆进行非线性屈曲分析，即后屈曲分析。

在此分析过程中，非线性屈曲分析中的初始缺陷采用几何缺陷，通常将结构的一阶模态乘以比例系数作为初始缺陷加入到结构系统中，同时将材料设定为弹塑性材料。非线性屈曲分析方法多采用 Newton-Raphson 迭代的弧长法<sup>[10]</sup>进行分步迭代计算，沿着平衡路径迭代位移增量的大小（弧长）和方向确定载荷增量的自动加载方案。通过追踪整个失稳过程中实际的载荷-位移关系，获得结构失稳前后的全部信息。

由图 5 可知，阀门卡阻后活塞杆继续对吊杆

施加推力，吊杆受压变形，初始为线性弹性形态，到达临界载荷点后，吊杆开始发生屈曲，并伴随大变形。弹性材料模拟时，吊杆变形位移持续增加，但承载力不再明显增加，吊杆各耳板处均产生大变形，吊杆整体成抛物线形态，如图 6a) 所示。弹塑性材料吊杆承载达到临界载荷后，吊杆变形位移持续增加，而承载力下降。这是因为在加载过程中中间位置的耳板应力率先达到屈服值，随后发生塑性形变，耳板呈塑性铰接状态，而其他处耳板仍保持弹性变形状态，吊杆整体从中间“折断”，如图 6b) 所示。对比之下，弹塑性材料后屈曲分析更能真实反应吊杆发生屈服失效的过程。后屈曲分析得到吊杆的临界屈曲载荷为 80 kN，修正后略低于线性屈曲值，同时低于液压系统超压报警时的推力，超压报警保护机制失效。

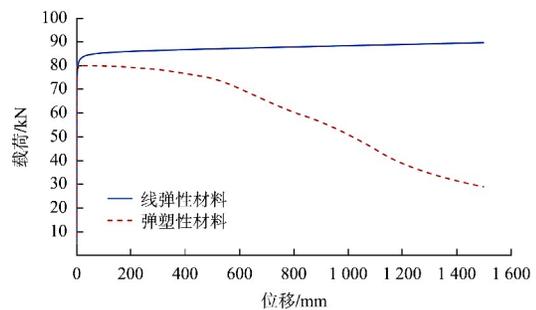


图 5 吊杆后屈曲载荷-位移曲线

Fig. 5 Post-buckling load-displacement curves of booms

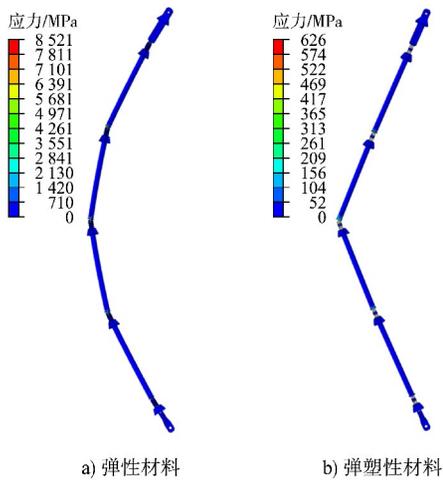


图 6 不同材料吊杆后屈曲形态及应力云图

Fig. 6 Post-buckling mode and stress nephogram of booms made of different materials

### 3 改造设计

由式(1)可知,吊杆的截面惯性矩直接影响着临界屈曲载荷,可通过优化吊杆薄弱处,即增加吊杆单耳板处的钢板厚度提高截面惯性矩,从而提高结构抵抗屈曲失稳的能力。表 1 为吊杆单耳板不同厚度的临界载荷特征值,由表可知,随着板厚的增加,吊杆的临界载荷也提高,临界载荷对单耳板的板厚敏感度较高。在耳板总板厚相同的情况下,采用双耳板铰连接也能提高吊杆的临界载荷。

表 1 不同截面结构下吊杆屈曲特征值  
Tab. 1 Buckling eigenvalues of booms of different section structures

耳板结构	板厚/mm	吊杆屈曲特征值				
		1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶
单耳板	30	87	327	657	980	1 067
	40	136	523	1 088	1 703	1 862
	50	176	686	1 463	2 382	2 639
	60	206	811	1 757	2 948	3 326
双耳板	30	252	906	1 838	3 015	3 517

### 4 结论

1) 船闸输水阀门闭门卡阻时,在同一平面内,阀门-吊杆-竖缸活塞杆可形成平面四连杆机构,并当吊杆与活塞杆在共线死点位置时,继续加载易使吊杆往截面弱轴方向发生屈曲破坏。

2) 屈曲分析得到吊杆临界屈曲载荷  $P_{cr} = 80$  kN, 低于液压启闭机超压报警值。吊杆的低阶屈曲模

态为波形(阶次)逐个增加的弯曲振型,弯曲的拐点为吊杆的单耳板,形变较大,是结构的薄弱点。屈曲失稳导致单耳板材料屈服后发生塑性形变直至断裂,使得吊杆折断。

3) 吊杆临界屈曲载荷对铰接处单耳板的材料板厚敏感度较高,增加板厚或采用双耳板结构可显著提高结构抵抗屈曲失稳的能力。

4) 设计同类输水阀门吊杆时,应对吊杆结构的稳定性进行校核。设置液压启闭机超压报警阈值,应与吊杆的临界屈曲载荷相适应。在对闭门速度要求不高的情况下,可采用自重闭门(不启泵)设计,避免阀门关闭遇到卡阻时吊杆在铰接方向弯曲发生屈曲破坏。

### 参考文献:

[1] 贺柏武,尹斌勇,赵娜. 船闸输水阀门工作异常原因分析及对策[J]. 水运工程, 2009(10): 135-137.  
HE B W, YIN B Y, ZHAO N. Analysis of and countermeasures for work abnormalities of lock's valve[J]. Port & waterway engineering, 2009(10): 135-137.

[2] 冉晓俊,曹栋梁,谭勇. 葛洲坝船闸输水廊道平板检修门漏水原因及对策[J]. 水运工程, 2020(2): 134-138.  
RAN X J, CAO D L, TAN Y. Causes and countermeasures for water leakage of flat inspection door of Gezhouba ship lock water delivery corridor [J]. Port & waterway engineering, 2020(2): 134-138.

[3] 覃承贵. 溢流坝工作闸门关闭卡阻应急处理及预防措施[J]. 红水河, 2016, 35(3): 93-94, 97.  
QIN C G. Emergency handling and preventive measures against closing failure of service gate of overflow dam[J]. Hongshui river, 2016, 35(3): 93-94, 97.

[4] 王东升. 螺杆式闸门启闭机在实际应用中的注意事项[J]. 南方农业, 2019, 13(6): 146, 150.  
WANG D S. Matters needing attention in practical application of screw gate hoist [J]. South China agriculture, 2019, 13(6): 146, 150.

[5] 船闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.  
Code for design of lock gates and valves of shiplocks: JTJ 308-2003[S]. Beijing: China Communications Press, 2003.