

# 中高水头大型三角闸门实时在线监测技术



周俊波，孙保虎，黄亚栋

(湖北省交通规划设计院股份有限公司，湖北 武汉 430051)

**摘要：**针对中高水头三角闸门在运行过程中受力和振动带来的安全性问题，依托引江济汉通航工程龙洲垸船闸的三角闸门，采用有限元分析软件 ANSYS 对其静力特性进行研究，在相应受力最大的位置布置实时在线监测点，利用实时在线监测技术对三角闸门设备性能、运行特性和健康状态实施全过程跟踪和研究。结果表明：对三角闸门主要构件的工作应力、动态特性等开展实时在线监测，是解决闸门结构变形、磨损、振动、缺陷扩展等问题的有效手段，对提高闸门运行安全、保证其功能的正常发挥十分重要。

**关键词：**ANSYS；三角闸门；实时在线监测系统；中高水头

中图分类号：U 641.2

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2021)02-0099-05

## Real-time online monitoring technology of large sector lock gate with medium and high water head

ZHOU Jun-bo, SUN Bao-hu, HUANG Ya-dong

(Hubei Provincial Communications Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China)

**Abstract:** Given the safety problems caused by the force and vibration during the operation of the medium and high water head sector lock gate, we combine with the sector gate in Longzhouyuan ship lock of the river diversion project from the Yangtze River to the Hanjiang River, study the static characteristics of the sector lock gate by using the finite element analysis software ANSYS, arrange the real-time online monitoring points at the corresponding maximum stress position, and apply real-time online monitoring technology to track and study the whole process of the performance, operation characteristics and health status of the triangular gate equipment. The results show that the real-time online monitoring of the working stress and dynamic characteristics of the main components of the sector gate is an effective means to solve the structural deformation, wear, vibration, defect expansion, and other problems of the gate, which is very important to improve the operation safety of the gate and ensure its normal function.

**Keywords:** ANSYS; sector lock gate; real-time online monitoring system; medium and high water head

船闸闸门及启闭机是保证工程永久运行的重要设备和设施。国家相关法规和行业管理规定，应定期进行安全检测和安全鉴定工作，确保工程永久设施的安全运行和及时维护、满足正常运行的管理措施、提供完整的安全评价数据。

闸门出现失事、故障的案例<sup>[1-2]</sup>表明，直接损失巨大，不仅影响工程运行的经济效益，同时也

会对社会安定造成严重影响。如金沙江某干流电站，闸门失事造成间接损失数亿元，影响工期1年；新疆某闸门失事，导致下游大量牲畜被淹死；东北某水电站闸门支铰轴断裂，更换全部支铰轴花费数千万元。上述工程在没有设置闸门智能监测系统的条件下运行，无法在事故早期发现问题，实现逐级报警和预警，从而导致质量缺陷

扩大、故障隐患恶化，最终形成运行事故。

引江济汉通航工程龙州垸船闸采用的三角闸门为国内乃至亚洲第一大三角闸门，同时将该种门型应用于中高水头挡水工况也属国内首创。由于存在跨度较大、整体刚度较弱等特点，在大多数条件下存在自激、边界条件和参数改变而引起振动的情况。如自然条件下的浪涌、启闭过程中的颤动、挠度、温差等引起的变形，都会产生内部应力、振动位移、疲劳破坏等缺陷隐患。

因此对三角闸门与机电设备全面实施智能安全监测，可以对工程的安全运行起到重要的保障

作用，是提高智能化管理水平的有效措施。同时，也是未来实现“无人值守、少人值班”管理模式的重要环节。

## 1 实时在线监测系统

### 1.1 系统组成

实时在线监测系统由应力传感器、加速度传感器和激光测距仪等测试单元，应变、振动、距离等数据采集单元，工控机及计算分析软件组成的工作站构成，并采用以太网与中控室实时通讯，系统结构见图 1。

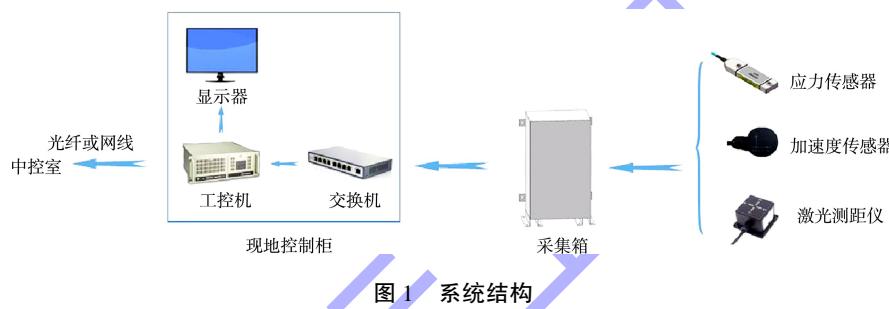


图 1 系统结构

### 1.2 监测内容

1) 应力监测。闸门的支臂、主梁、边梁、面板等部位都是应力较大的区域，通过实时监测这些部位的应力，以评估构件的应力情况和结构强度。

2) 振动监测。三角闸门的支臂等构件会受到水流的冲击，进而产生流激振动，若是超出一定范围，将影响闸门的安全。因此通过在线监测系统对时域和频域进行监测，以此评定闸门启闭过程的流激振动安全性。

3) 运行姿态监测。将激光测距仪安装于三角闸门左拉杆，通过监测左拉杆长度变化量来反映门枢中心的偏移量。由于该监测是一个长期的过程，只有当三角闸门拉杆结构出现松动时，监测数据才有变化，因此本文未研究该数据。

### 1.3 测点布置

罗家安等<sup>[3]</sup>对三角闸门进行了空间结构有限元分析，可知面板底部与主横梁相交的部位应力较大，网架结构中底片钢架、下斜片钢架靠近门

端柱附近的主钢管应力较大，为危险截面，起控制作用，监测时须重点监控。

根据三角闸门空间结构有限元分析，结合危险截面分布，合理布置三角闸门实时监测点。单扇闸门布置 10 个应变传感器用于监测闸门支臂各部位受力情况，2 个振动加速度传感器用于监测闸门支臂各部位振动情况，1 个激光测距传感器用于监测顶枢连杆支铰轴位移变化。测点布置见图 2。

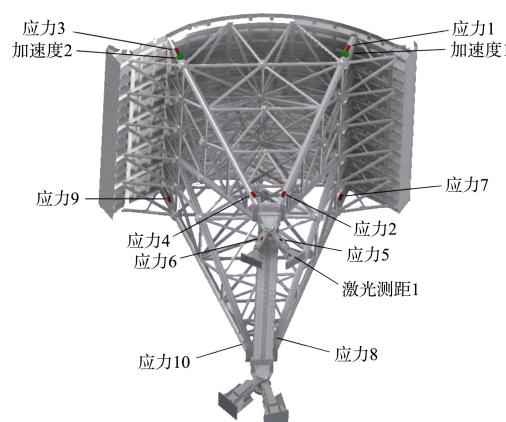


图 2 三角闸门在线监测测点布置

## 1.4 关键参数评价阈值

### 1.4.1 应力安全评价阈值

闸门在运行过程中所受应力分为静应力和动应力, 其中静应力为工作荷载状态下与工作荷载呈线性关系的结构应力, 动应力为与动荷载作用相关的结构应力。参照相关规范 SL 74—2019<sup>[4]</sup>和实际使用情况, 应力的安全判断应以材料的设计许用应力值 $[\sigma']$ 为基准。本工程三角闸门材料使用 Q345B 钢,  $[\sigma'] = 225 \text{ MPa}$ 。对于静应力, 预警的限值宜取设计许用应力值的 80%, 报警的限值宜取设计许用应力值的 90%。对于动应力, 预警的限值宜取设计许用应力值的 10%, 报警的限值宜取设计许用应力值的 20%。三角闸门在线监测系统闸门结构应力安全评价阈值见表 1。

表 1 应力安全评价阈值设定

评价等级	静应力/MPa	动应力/MPa
稳定	<180	<22.5
较稳定	$180 \leq \sim 202.5$	$22.5 \leq \sim 45$
不稳定	$\geq 202.5$	$\geq 45$

### 1.4.2 振动安全阈值

闸门振动通常是连续型平稳随机振动, 性质属于随机振动理论中的强迫随机振动, 其更加复杂且安全评价难度更大<sup>[5]</sup>。本文流激振动监测采用三向加速度传感器监测相应监测点的位移和振动频率, 通过评价指标对三角闸门振动进行安全评价。目前常用的评价方法有美国阿肯色河管理局的位移指标评价和德国 Patrikat 公式评价<sup>[6]</sup>。两种评价方法所需要的数据是加速度  $a$  和频率  $f$ , 然后对加速度进行整个时间域的两次积分得到振动幅值。

根据美国阿肯色河位移指标评价标准, 振动位移 0.25 和 0.50 mm 分别为预警和报警值, 为使得显示结果更直观, 引入振动位移  $A_a$  和振动频率  $A_f$  两个无量纲评价指标, 建立系统振动安全预警阈值体系公式:

$$A_a = A / 0.25 \quad (1)$$

$$A_f = \lg A / (3.14 - 1.16 \lg f) \quad (2)$$

式中:  $A$  为振幅 (mm);  $f$  为振动频率 (Hz)。则  $A_a$  的预警和报警值分别为 1 和 2。

德国的 Patrikat 在综合考虑振幅和频率效应基础上, 将振动安全度分为 6 个等级, 见图 3, 已知振动幅值与频率即可依图粗略判断振动对工程的危害程度。将振幅 0.25 和 0.50 mm 代入德国 Patrikat 曲线中, 查出各自对应的预警频率和报警频率, 将数值代入式(2)计算取上下限值, 得出  $A_f$  振动频率无量纲评价指标预警和报警值为 1 和 1.3。

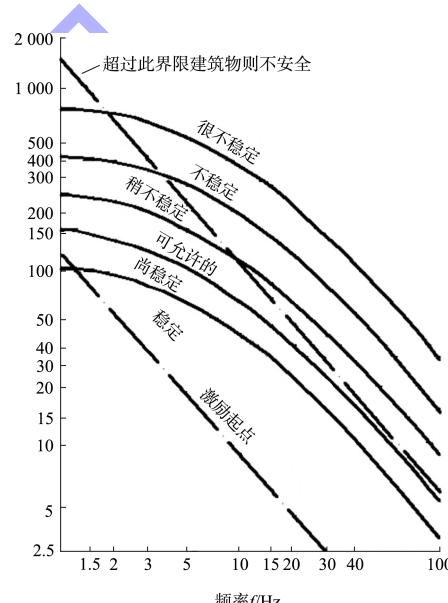


图 3 Patrikat 公式振动安全等级图

当  $A_a$  和  $A_f$  均小于 1 时为稳定状态;  $A_a$  值大于 2 且  $A_f$  值大于 1.3 时, 为不稳定状态; 其余为较稳定状态, 需要根据振幅值, 通过查 Patrikat 振动安全等级图进行人工分析。

## 1.5 安全稳定分析

### 1.5.1 监测状态

以上闸首左扇三角门实时监测为数据源, 其监测状态参数为: 门体尺寸为  $12.85 \text{ m} \times 19.50 \text{ m}$  (宽×高), 设计水头  $9.98 \text{ m}$ , 静水运行水头为  $4.3 \text{ m}$ (挡水工况)、动水运行水头为  $1.0 \text{ m}$ (启门工况), 监测时段为 2019-12-01—2019-12-05, 监测闸门开启的整个动作过程。

### 1.5.2 监测数据

上闸首左扇三角门应力振动监测数据见表 2、3。

表 2 上闸首左扇三角门应力监测数据

测点	静应力/MPa	动应力/MPa	
		最大值	最小值
应力测点 1	42.935	0.297	0.025
应力测点 2	48.945	0.063	0.038
应力测点 3	46.053	0.153	0.023
应力测点 4	64.139	5.538	0.025
应力测点 5	38.017	1.009	0.025
应力测点 6	45.969	0.185	0.023

表 3 上闸首左扇三角门振动监测数据

测点	方向	$A_a$	$A_f$		加速度最大值/(m·s <sup>-2</sup> )
			最大值	最小值	
加速度测点 1	x	0.757	2.456	-2.254	0.264
	y	0.094	-0.090	-2.322	0.166
	z	0.144	-2.176	-2.457	0.114
加速度测点 2	x	0.058	1.316	-2.250	0.189
	y	0.788	0.156	-2.334	0.275
	z	0.159	-1.095	-2.396	0.083

### 1.5.3 数据分析

三角闸门不同测点的动、静应力最大值见图 4。该监测工况下测点 4 位置处的动、静应力响应较大，最大动应力为 5.538 MPa，最大静应力为 64.139 MPa，该测点位于右上支臂前端（靠近顶枢侧），顶枢处的连杆起支撑闸门的作用，受力较大，应作为重点数据监测点。根据表 1 评价阈值，测点的最大动、静应力均处于稳定范围内。

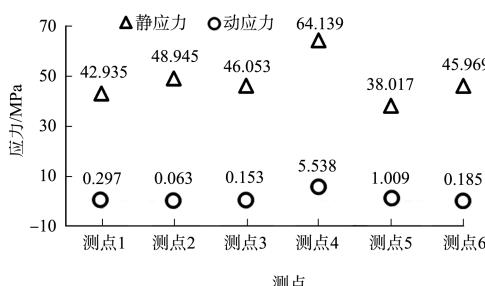


图 4 不同测点的动、静应力最大值

三角闸门不同测点不同方向的  $A_a$  指标最大值

见图 5。测点 1 的振幅以  $x$  向为主， $y$ 、 $z$  向的振幅可忽略不计，测点 1 的  $A_a$  合成值最大为 0.776。测点 2 的振幅以  $y$  向为主， $x$ 、 $z$  方向的振幅可忽略不计，测点 2 的  $A_a$  合成值最大为 0.806。两测点分别位于左、右上支臂前端（靠近门叶侧），测点 1 与 2 的  $A_a$  合成值相差不大。两个测点的振幅均小于 1，根据 1.4.2 节可知，该监测参数处于稳定范围内。

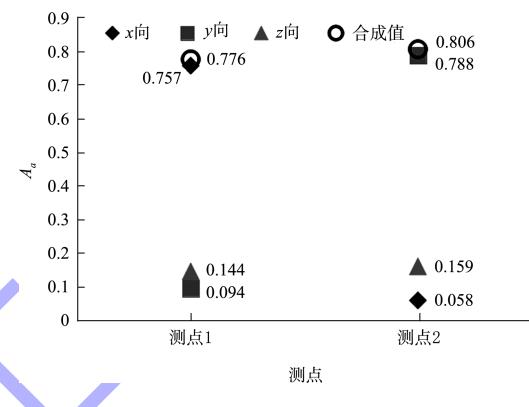


图 5 不同测点不同方向的  $A_a$  最大值

三角闸门不同测点不同方向的  $A_f$  指标最大值见图 6，两测点  $y$  向的  $A_f$  指标可忽略不计，以  $x$ 、 $z$  向为主。测点 1、2 的  $A_f$  合成值最大分别为 3.283、1.719，加速度测点 1 的  $A_f$  指标较高，需要综合分析其指标稳定性。

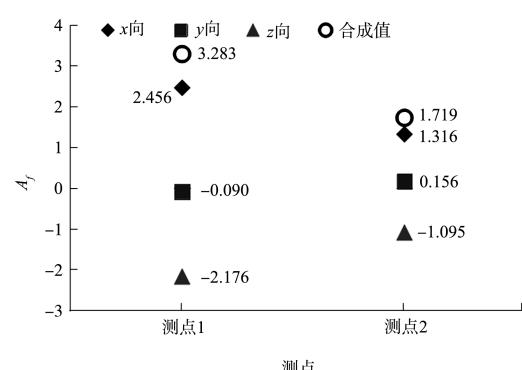


图 6 不同测点不同方向的  $A_f$  最大值

三角闸门不同测点不同方向的加速度指标最大值见图 7。测点的振动加速度主要以  $x$ 、 $y$  向为主， $z$  方向的振动加速度相对较小，测点 1、2 的振动加速度合成值最大分别为 0.332、0.343 m/s<sup>2</sup>。

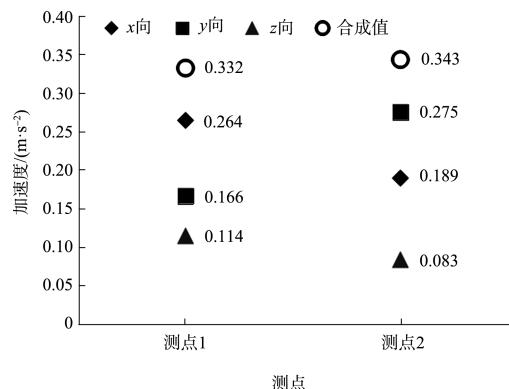


图7 不同测点不同方向的加速度最大值

综上所述, 三角闸门关键监测部位的应力处于稳定范围内, 且还有较大富余。振动评价指标  $A_a$  也处于安全阈值内, 虽然  $A_f$  指标超过安全警报阈值, 但因  $A_f$  为振幅频率的综合比值指标, 其指标建立在振幅指标  $A_a$  的基础上, 根据振幅值, 通过查 Patrikat 振动安全等级图进行人工分析, 处于安全曲线范围内, 因此闸门整体处于良好的运行状态。

## 2 三角闸门有限元计算

### 2.1 有限元计算分析

针对获取本次监测数据时闸门挡水工况, 建立该三角闸门的有限元分析模型, 施加如下约束: 顶枢施加  $x$ 、 $y$  向位移约束; 底枢施加  $x$ 、 $y$ 、 $z$  向位移约束; 闸门中缝纵轴线处的约束为中缝羊角接触面施加法向约束。三角闸门顶片钢架有限元计算结果见图 8。

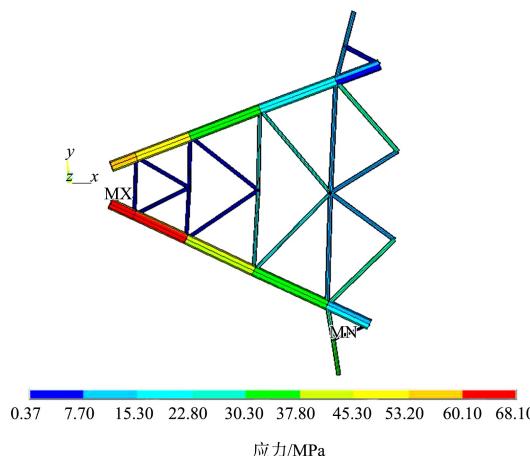


图8 三角闸门顶片钢架应力计算结果

### 2.2 监测数据和有限元计算结果对比分析

将监测得到的挡水状态下的应力值与有限元

计算结果进行对比, 结果见表 4。

表4 监测数据和有限元计算结果对比

测点	监测静应力/MPa	有限元计算应力/MPa	相差比例/%
应力测点 1	42.935	23.8	44.57
应力测点 2	48.945	53.1	8.50
应力测点 3	46.053	16.3	64.61
应力测点 4	64.139	68.1	6.18
应力测点 5	38.017	43.2	13.63
应力测点 6	45.969	50.2	9.20

通过将监测数据与有限元计算结果进行比较, 除了应力测点 1 和 3 的监测数据与有限元计算结果的偏差比较大, 其余测点均比较接近, 两者相互印证对照, 可以判断出监测数据合理可取, 有限元分析模型的建立和约束的施加也科学合理。

### 3 结论

1) 本文结合引江济汉通航工程龙州垸船闸三角闸门, 利用有限元分析软件 ANSYS 分析闸门体在正常挡水工况下的静力状态, 确定该闸门危险截面分布, 合理布置三角闸门实时监测点。

2) 运用三角闸门关键部位的应力、振动监测数据及其安全预警阈值系统的相关数据分析, 对闸门的运行状态进行判断和安全评价分析, 分析结果表明该闸门整体处于良好的运行状态。

3) 将监测数据与有限元计算结果进行比较分析, 结果表明监测数据合理可取, 有限元分析模型的建立和约束的施加也科学合理。

### 参考文献:

- [1] 夏念凌.水工闸门事故实例分析[M].北京:水利电力出版社, 1994.
- [2] 章继光, 刘恭忍.轻型弧形钢闸门事故分析研究[J].水力发电学报, 1992(3): 49-57.
- [3] 罗家安, 孙保虎, 黄亚栋, 等.中高水头大型三角闸门静力数值分析[J].水运工程, 2011(12): 127-130.
- [4] 中水东北勘测设计研究院有限公司.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, 2020.
- [5] 焦修明.弧形闸门动力特性及流激振动研究[D].武汉:武汉大学, 2005.
- [6] 张雯雯.水工泄水建筑物振动安全评价方法研究[D].南昌:南昌大学, 2014.

(本文编辑 王璁)