光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022110301

基于光纤传感技术的大型船闸人字门形变监测方法研究

张 勃*

（长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443002）

摘 要： 为实时了解船闸人字门长期满负荷工作可能带来的结构安全问题，提出了一种基于光纤光栅(FBG)传感技术的人字门结构形变在线监测方法。通过对人字门结构进行建模与仿真，弄清门体整体受力分布情况；根据受力分布情况，在人字门上布置若干光纤光栅倾角传感器，实时动态监测门体各部位倾斜角度；将动态倾角变化量转化为结构形变量，建立门体拱度与各点形变量之间的映射关系。结果表明，光纤光栅倾角传感器具有良好的重复性，能够准确反映闸门开、关运行过程；所监测门体最大受力区域为门底枢止水附近，最大拱度在0.1°以内，最大形变量在7 mm以内。

关键词： 船闸人字门；光纤光栅倾角传感器；门体结构拱度；形变量；动态监测

中图分类号： TN253 **文章编号：** 1001－5868(2023)03－0450－05

Research on Deformation Monitoring Method of Miter Gate of Large Ship Lock Based on Optical Fiber Sensing Technology

ZHANG Bo

（Three Gorges Navigation Authority，Yichang 443002，CHN）

Abstract： In order to solve the structural safety problem that may be brought by the long-term full load work of the miter gates of the ship lock in real time，an on-line deformation monitoring method of herringbone gate based on fiber Bragg grating (FBG) sensing technology is proposed. By modeling and simulating the structure of the miter gate，the stress distribution and the arch collapse of the gate body could be accurately understood. According to the force distribution，several fiber Bragg grating tilt sensors were arranged on the miter gate to dynamically monitor the tilt angle of every part of the gate body in real time. The dynamic change of inclination angle was transformed into structural deformation，and the mapping relationship between arch and deformation is established. The results show that the FBG tilt sensor has good repeatability and can accurately reflect the operation process of gate opening and closing. The maximum stress area of the monitored gate body is near the water seal of the bottom pivot of the gate. The maximum camber is less than 0.1° and the maximum deformation is less than 7 mm.

Key words： miter gate of ship lock；fiber Bragg grating tilt sensor；arch of gate body structure；deformation；dynamic monitoring

0 引言

三峡、葛洲坝船闸及三峡升船机作为长江中上游重要节点水利枢纽，在国民经济运行和长江黄金水道建设中的关键性作用日益突显[1]。近年来，随着长江航运事业的发展，过闸运量迅猛增加，使得船

收稿日期：2022－11－03.

* 通信作者：张 勃 E-mail：306051083@qq.com

闸处于满负荷甚至超负荷状态，导致船闸人字门结构安全问题日益突出[2]。

目前，葛洲坝船闸机械金属结构仍然以人工巡检为主，自动化程度较低。船闸运行时间已经超过 40 年，部分设备老化严重，急需新的监测技术和手段对人字门进行长期在线监测[3]。传统拱度测量方式多为机械装置测量，其体积较大，且容易损坏，在空间狭窄的环境下较难应用[4]。光纤传感器因其质量轻、体积小、抗腐蚀、灵敏度高等优点而被广泛应用于结构监测领域。光纤光栅(FBG)传感器除了具备以上优点外，还具有对光强波动不敏感、测量精度高、重复性好、易于大规模组网等特点，是目前光纤传感技术领域研究的热点之一[5]。

为了实时在线获取人字门结构整体形变信息[6]，本文采用了若干光纤光栅防水倾角传感器对人字门结构[7-8]关键部位拱度进行监测，为大型船闸人字门结构健康评估提供一种新的方法和思路。

1　门体形变检测理论分析

1.1　光纤光栅交叉敏感及解决方法

光纤光栅传感器依据光栅的中心波长变化来测量倾角的变化。在温度恒定的情况下，其倾角变化值与波长之间的对应关系为：

$$\theta=(\lambda_a-\lambda_{a0})-(\lambda_b-\lambda_{b0})/K \tag{1}$$

式中，λ_a 和 λ_b 分别为同一温度下的两个光栅的中心波长，λ_{a0} 和 λ_{b0} 分别为光栅的初始中心波长，K 为标定系数，θ 为测量倾角值。

正因为光纤光栅传感器在测量倾角时会感知温度，所以在对结构体的拱度进行测量时，必须屏蔽温度对测量的影响，这就是光纤光栅传感器的温度、倾角交叉敏感问题。由上述分析得知，一旦待测结构体倾角、外界环境温度发生变化，均会带来 FBG 的中心波长发生漂移。当不考虑两者耦合效果的情况下，它们与中心波长偏移量之间的关联表现为线性变化[9-10]。

由于光纤光栅对倾角与温度两个参数都十分敏感，因此，在现场实施过程中不可避免地会产生交叉敏感现象。具体表现为：当倾角与温度一起对光纤光栅产生作用时，无法区分这两个物理量的影响大小。在进行温度测量时，必须让传感器不受任何外力影响，这样才能确保温度测量的准确性。然而，对倾角进行测量时，却无法屏蔽外界环境温度变化对测量的影响。

针对倾角和温度的交叉敏感问题，提出参考光栅法来解决上述问题。其具体原理如图 1 所示。

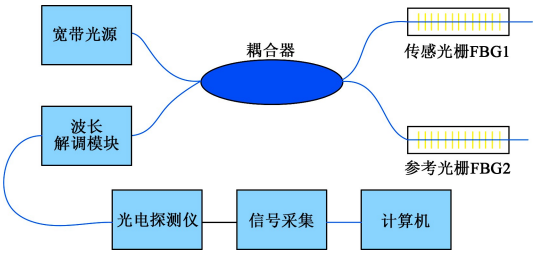


图 1　参考光栅法原理框图

根据理论可知，与传感光栅 FBG1 相比，参考光栅 FBG2 具有同样的温度膨胀系数，但不受任何外力影响。在待测结构倾角发生变化时，仅对传感光栅起作用，因此利用参考光栅来减少温度对传感光栅的影响是一个很有效的方式。参考光栅法结构简单，具有很多优势。

1.2　门体拱度计算方法

由于闸门始终处于开关运行状态，用位移直接测量法来反映人字门的拱度难度较大，测量精度也很难保证。本文采用倾角测量方法实时动态监测门体的拱度，即在门体上、下门格内对称、等距离安装多只光纤光栅倾角传感器。通过各测点的动态倾角值来反映门体待监测部位的拱度，具有简单易行、可操作性强等特点。

通过光纤光栅倾角传感器实时动态测量人字门门体沿迎水面方向的倾斜角度 θ，在进行门体拱度推演时，由于缺少参考基准点，故只能将人字门门轴顶部作为静态基准点。计算拱度时，将倾角传感器实际测量值与初始标定角度做差，即可获得相对拱度。如图 2 所示。

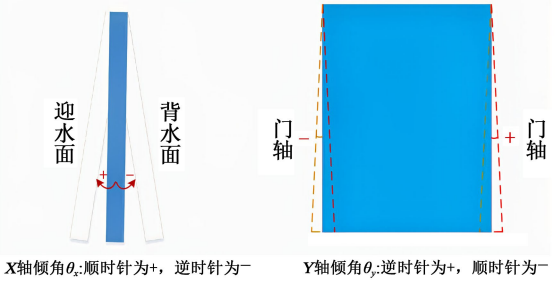


图 2　人字门门体沿迎水面拱度示意图

1.3　门体形变量计算方法

将人字门门轴顶部作为虚拟零点，每一列光纤光栅倾角传感器测量值与初始角度值进行差分，得到每一只传感器的倾角变化量，依次为 θ_1，θ_2，…，

θ_8，如图 3 所示。

由图 3 可知，人字门光纤光栅倾角传感器测点所在部位形变量可以通过以下关系式计算得到：

$$\tan\theta = h/L \tag{2}$$

$$h = L\tan\theta \tag{3}$$

其中，θ 为每只光纤光栅倾角传感器相对初始值的角度变化量，L 为人字门门格高度，即相邻两只传感器之间的垂直间距，h 为传感器测点所在部位的形变量。

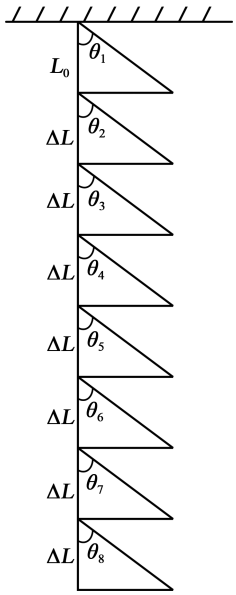


图 3　倾角传感器测量示意图

当门体结构出现拱度问题时，若相邻两个倾角传感器所测角度变化量一致，则该测点所在区域拱度朝同一方向；若所测角度变化量相反，此时拱度方向也相反，即反拱。

2　人字门结构建模与仿真

人字门由门叶、顶底枢、背拉杆、推拉杆、横向主梁、竖向主梁等部件组成。已知门体高度为 34.0 m，单扇门叶宽为 19.7 m，门体厚度为 2.7 m，人字门包含多根横梁、竖梁和背拉杆，门体均选用 Q345 钢结构材料。人字门结构简要模型如图 4 所示。

建立完几何模型后，构造非结构化的自由四面体网格。为保证计算模型的准确性，选择了用户自定义的控制网格。对于受力较大的横梁、竖梁和背拉杆，使用更加细化的尺寸进行更密集的划分。整个模型的网格划分结果如图 5 所示。

人字门门体在启闭过程中，对门体起主要支承作用的是顶枢 AB 杆和底枢蘑菇头结构，同时需要启闭机带动推拉杆使门体绕门轴进行转动，从而实现门体的启闭工作。将模型导入并将参数初始化后，进行仿真计算，人字门门体在开关门状态下的受力分布如图 6 所示。

从图 6 可以看出，船闸人字门门体受力集中的区域为推拉杆附近、背拉杆焊接附近及底枢止水部位，其余部位的受力情况相对较小。针对此类受力集中、形变量较为明显的位置，将会是后期结构健康诊断关注的重点区域，底枢止水部位受力分布如图 7 所示。

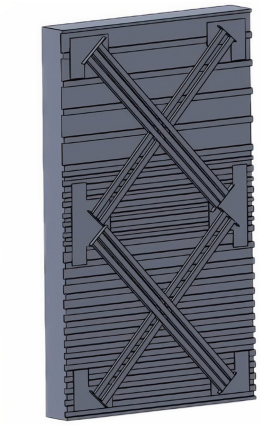


图 4　人字门结构简要模型

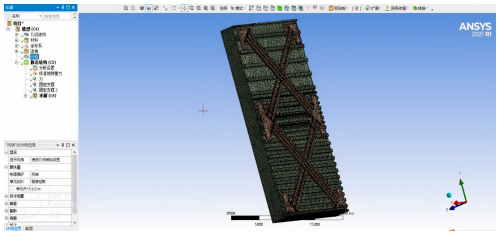


图 5　人字门模型网格划分

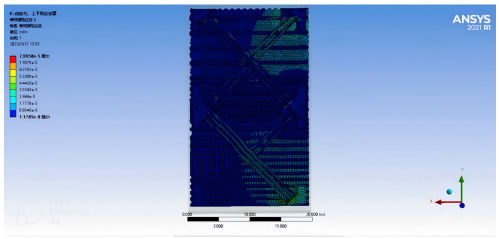


图 6　人字门受力分布图

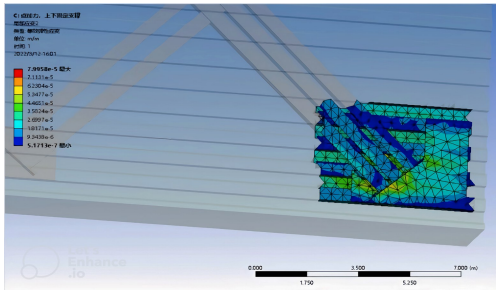


图 7　人字门底枢止水区域受力分布图

3　传感器的安装及布置

3.1　光纤光栅防水倾角计

光纤光栅倾角传感器具有广泛的倾斜监测应用，特别适合大型结构形变监测。双光栅封装结构可实现温度的自动补偿，计算方便；多个同类型的传感器之间可以串接，实现分布式测量。

3.2　光纤光栅倾角计安装及布置

在人字门门体上、下门格内共安装 40 只光纤光栅防水倾角计。40 只传感器呈 8 横、5 纵排列，如图 8，分别位于闸门的第 2，3，5，8，15，18，21 和 25 层，每层从门轴到门缝均匀分布 5 个测点，实现对人字门结构整体拱度的监测，对异常状态提出相关警示，并在虚拟门体上显示门体拱度状态。

人字门门体高度和宽度分别为 34.0 和 19.7 m，横向倾角传感器之间的间距分别为 3.6，3.2，4.0 和 3.2 m；纵向倾角传感器之间的间距分别为 3.6，3.6，3.6，3.6，7.2，3.6 和 3.6 m；其中第 2 层传感器距离人字门顶部（第 1 层）垂直距离为 2.2 m。

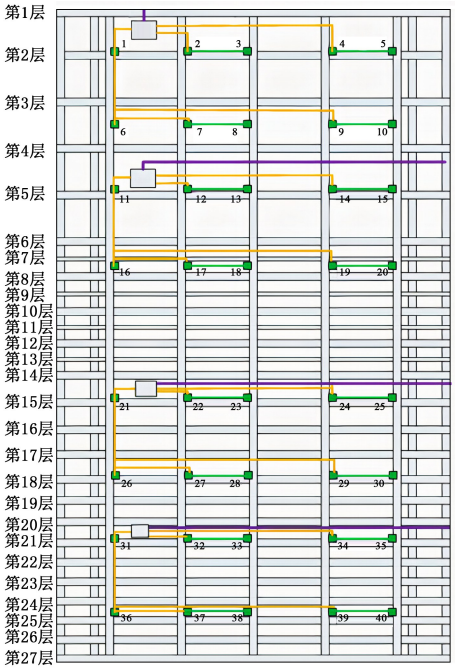
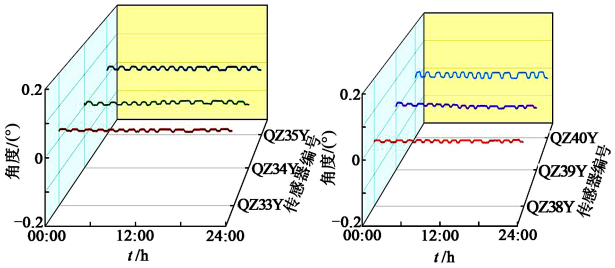


图 8　光纤光栅倾角计布置图

4　门体形变分析

4.1　倾角传感器数据分析

由人字门结构有限元仿真结果可知，门体受力集中且最大的区域为推拉杆附近、背拉杆焊接附近及底枢止水部位，其余部位受力相对较小。通过对人字门所有测点的倾角变化进行分析对比，同样呈现出门体底部受力较大的情况。因此，根据光纤光栅倾角传感器的布设位置，选取第 21，25 层的多个倾角传感器测点进行分析，了解受力较大区域传感器测点沿迎水面方向倾角变化情况，如图 9 所示。



（a）第 21 层测点角度　　（b）第 25 层测点角度

图 9　所选测点 24 h 角度变化曲线

由图 9 可以看出，重点区域传感器在 24 h 内的倾角数据均具有良好的周期性，重复性良好，且能够准确反映闸门运行状态。

在通航过程中，闸门处于开、关状态时的倾角在 0°附近，闸门在运行过程中倾角相对较大，但总体变化量较小，均保持在 0.1°以内范围。

4.2　人字门形变量分析

由于闸门在运行过程中均保持良好的周期性和平稳性，故可以选择 40 只光纤光栅倾角传感器在闸门运行过程中的任意时刻的动态倾角值进行分析，所有传感器所测量的角度值如表 1 所示。

表 1　光纤光栅倾角传感器测量值（单位：°）

位置/层	纵 1	纵 2	纵 3	纵 4	纵 5
2	−0.035	−0.034	−0.059	−0.026	−0.012
3	−0.025	−0.026	−0.035	−0.025	−0.015
5	−0.025	0.032	0.016	0.041	0.045
8	−0.022	0.027	−0.009	−0.004	0.016
15	0.051	0.064	0.051	0.104	0.08
18	−0.006	0.043	0.041	0.106	0.079
21	−0.029	0.019	0.029	0.088	0.047
25	−0.059	−0.083	−0.079	−0.028	0.011

将人字门顶部（第 1 层）设为虚拟零点，由倾角与形变推演公式（2）和（3）可知各光纤光栅倾角传感器测点所在部位最大形变量，如表 2 所示。

表 2　传感器测点所在区域拱度值（单位：mm）

位置/层	形变量				
	纵 1	纵 2	纵 3	纵 4	纵 5
2	−1.34	−1.31	−2.27	−1.00	−0.46
3	−1.57	−1.63	−2.20	−1.57	−0.94
5	−1.57	2.01	1.01	2.58	2.83
8	−1.38	1.70	−0.57	−0.25	1.01
15	3.20	4.02	3.20	6.53	5.03
18	−0.38	2.70	2.58	6.66	4.96
21	−1.82	1.19	1.82	5.53	2.95
25	−3.71	−5.22	−4.96	−1.76	0.69

将所有光纤光栅传感器测点的拱度值进行曲线

拟合，即可得到人字门各纵向结构形变情况，如图10所示。

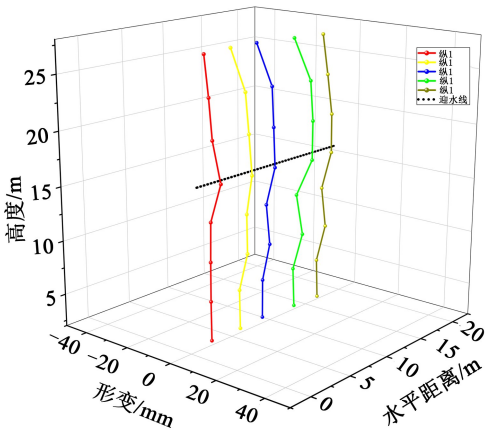


图10 人字门各纵向结构形变曲线

由图10可知，人字门5条纵向形变曲线变化趋势基本一致，很好地说明了传感器测量倾角值与推演得到的形变值具有较高的可信性；迎水线上方外拱，迎水线下方内拱，与闸室内的水位对人字门的压力吻合度较高。

5 总结

所研制的光纤光栅倾角传感器具有良好的防水和耐压性能，长期水下工作时具有很好的重复性和可靠性；通过对人字门结构进行建模、仿真与数据分析，可以准确了解其整体受力分布情况，受力集中区主要位于推拉杆附近、背拉杆焊接附近及底枢止水部位；通过对光纤光栅倾角传感器动态周期信号进行分析，可以准确获取每天通航的闸次、各种工况持续的时间以及不同季节水位对闸门受力的影响；将动态倾角变化量转化为结构形变量，建立门体拱度与各点形变量之间的映射关系，为人字门结构健康评估提供理论基础。总之，基于光纤传感技术的大型人字门拱度监测方法可为门体结构安全评估提供新的思路，为船闸安全、高效、稳定、可靠的运行，提供技术支撑。

参考文献：

[1] 尹 东. 基于光纤光栅的船闸人字门应变监测系统设计[D]. 大连：大连海事大学，2017.
Yin Dong. Design of strain monitoring system for miter gate based on fiber grating[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

[2] Wang C Y, Liu H Y, Zhou J Y. Safety monitoring technology and design of ship lock engineering [J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2014, 38(5): 21-24.

[3] 姜晓彤. 泄洪闸门在线状态监测系统的研究[D]. 武汉：湖北工业大学，2019.
Jiang Xiaotong. Research on online condition monitoring system of Sluice gate [D]. Wuhan: Hubei University of Technology, 2019.

[4] Li P, Liu Y J, Leng J S. A new deformation monitoring method for a flexible variable camber wing based on fiber Bragg grating sensors(Article)[J]. J. of Intelligent Material Systems and Structures, 2014, 25(13): 1644-1653.

[5] Chen M H. A remote monitoring system for the health status of the gable door of a ship lock based on fiber Bragg grating [J]. Water Transportation Engin., 2020(2): 143-147.

[6] 杨志泽，胡木生，李小勇，等. 现役水工钢闸门安全度评估方法研究[J]. 水电能源科学，2016，34(2)：169-172.
Yang Zhize, Hu Musheng, et al. Safety evaluation method research of existing hydraulic steel gate[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(2): 169-172.

[7] 姜劭栋，张发祥，李淑娟，等. 光纤光栅应变传感系统在船舶结构监测中的应用[J]. 半导体光电，2017，38(2)：268-270.
Jiang Shaodong, Zhang Faxiang, Li Shujuan, et al. Application of fiber Bragg grating strain sensing system in ship structure monitoring[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(2): 268-270.

[8] 柳博仁. 葛洲坝三号船闸人字门振动状态监测系统设计[D]. 大连：大连海事大学，2017.
Liu Boren. Design of Gezhouba 3# shiplock miter gate vibration status monitoring system [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.

[9] 朱超杰，魏 鹏，李成贵. 基于光纤光栅的结构应变模态测试及参数识别[J]. 半导体光电，2019，40(1)：123-128.
Zhu Chaojie, Wei Peng, Li Chenggui. Structural strain modal test and parameter identification based on fiber grating[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(1): 123-128.

[10] Zhu H H, Shi B, Zhang C C. FBG-based monitoring of geohazards: current status and trends[J]. Sensors (Basel), 2017, 17(3): 452.

作者简介：

张 勃(1989—)，男，湖北省宜昌市人，大学本科，工程师，主要从事船闸机械检测方面的研究。