光电技术及应用

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022060601

# 基于光纤传感技术的人字门结构健康监测研究与应用

姜永生*

（交通运输部水运科学研究所，北京 100000）

**摘　要：** 针对船闸人字门长期处于低速重载、超负荷运行的复杂水域环境下，现有检测手段存在自动化程度低、耗时耗力、易受电磁干扰等问题，提出了基于光纤光栅传感技术的人字门结构健康监测系统。基于光纤光栅传感原理构建了人字门结构健康监测系统，该系统可以感知人字门在运行过程中的应变变化情况，实现了实时数据显示、异常数据监测预警、历史数据回放等功能；针对传感器采集到的数据进行中值滤波处理，提高信号的信噪比。选取典型数据进行分析对比，验证了传感器的重复性及通航关联性，为船闸人字门的安全、稳定工作提供了数据支撑。

**关键词：** 光纤光栅；人字门；应力应变；结构健康；数据处理

**中图分类号：** TN253　**文章编号：** 1001－5868(2022)06－1179－05

## Research and Application of Health Monitoring of Miter Gate Structure Based on Optical Fiber Sensing Technology

JIANG Yongsheng

（China Waterborne Transport Research Institute，Beijing 100000，CHN）

**Abstract：** In view of the problems that the miter gate of ship lock is in the complex water environment of low-speed，heavy-duty and overload operation for a long time，and the existing detection methods are low in automation，time-consuming and labor-consuming，and vulnerable to electromagnetic interference，a miter gate structural health monitoring system based on fiber Bragg grating sensing technology is proposed. Firstly，the sensing principle of fiber Bragg grating was described. Then，based on this principle，the structural health monitoring system of miter gate was constructed. The system could sense the strain changes of miter gate during operation，and realize the functions of real-time data display，abnormal data monitoring and early warning，historical data playback and so on. Finally，the data collected by the sensor was processed by median filter to improve the signal-to-noise ratio of the signal. The data are analyzed and compared to verify the repeatability and navigation relevance of the sensor data，which provides data support for the safe and stable work of the miter gate of the ship lock.

**Key words：** FBG；miter gate；stress strain；structural health；data processing

## 0　引言

船闸人字门长期超负荷工作在复杂水域环境下，随着通航次数的增加，闸门的启闭次数也愈加频繁，这使得闸门门体在重载、水压差、水中微生物等多重因素的影响下产生结构损伤[1]。当门体结构损伤累计到一定程度时，就会引发诸如门体凹陷、闸门深水区出现裂纹等现象，不仅对航运的通航安全造成威胁，还会给社会带来巨大的经济损失[2]。

传统的监测技术主要以人工巡检为主，自动化程度低，不仅耗费时间和人力物力，还存在漏检的可能。电类传感器如电阻应变片[3]等可以实现对人字门结构应力应变的监测，但是该类型的传感器稳定

收稿日期：2022－06－06.

*通信作者：姜永生　　E-mail：jiangys@wti.ac.cn

性较差、寿命较短，不适合水下长期监测，且还会受到外界电磁干扰。因此，急需采用新的监测手段对门体结构及其健康状况进行在线监测[4]。

随着光纤传感技术的不断发展，越来越多的学者提出将光纤传感技术应用到工程领域的研究中。光纤传感技术通过光纤来感知待测物理量的变化并获取相关信息[5]，进而可以直接将数据信号传输至信号解调系统中。光纤光栅传感器因其具有重量轻、耐腐蚀、抗电磁干扰、稳定性好等优势被广泛应用于不同的工程领域，成为现阶段较为热门且具有较好发展前景的技术之一[6]。本文采用光纤光栅应变传感器实现对人字门门体结构应力应变的实时动态监测，及时发现结构损伤并提前预警，对保障通航安全、减少事故发生具有重大意义。

## 1 光纤光栅传感原理

光纤布拉格光栅(FBG)是利用光纤纤芯材料的光敏特性，通过紫外激光曝光的方法周期性地、永久地改变纤芯折射率的光学器件，简称为光纤光栅[7]。入射光在光纤中传播，经过光纤光栅，满足布拉格波长条件的光被反射回来，形成反射光谱，其余波长的光继续前进，形成透射光谱。

光纤光栅利用光的全反射原理来检测待测物理量。当外界温度和应变发生变化时，纤芯的有效折射率和光栅周期将会随之发生变化，这会引起光纤光栅反射光或透射光的波长改变，从而导致光栅的中心波长发生漂移。所以，通过检测漂移量便可得到被测物理量的变化。由于温度和应变是影响光栅纤芯折射率最主要的两个特性，当需要对其他参数(如振动、倾角、位移、压力等)进行测量时，可以通过与这两种特性之间建立联系，从而实现利用光纤光栅温度或应变特性来检测待测物理量的变化。

从光纤光栅模式耦合理论和相位匹配条件可以推导出 FBG 的中心波长取决于光栅周期 $\Lambda$ 和有效折射率 $n_{\mathrm{eff}}$。它们之间的关系[8]如下：

$$\lambda_{\mathrm{B}}=2n_{\mathrm{eff}}\Lambda \tag{1}$$

当 FBG 受到外部应力或温度变化的影响时，纤芯的有效折射率和光栅周期也会相应地发生变化，从而导致光栅的中心波长发生漂移。因此，可以通过检测漂移量来得到被测物理量的变化。

当光纤光栅受到外界应变物理量变化的影响时，会出现轴向的应变。当温度场保持不变、压力场保持恒定的条件下，光纤光栅只考虑受到轴向应力的作用，此时应变参量会通过产生轴向应变使得光栅周期发生变化，并且产生的弹光效应和波导效应会影响 FBG 的有效折射率，从而使得 FBG 中心波长发生漂移。

轴向应力对 FBG 的周期变化可以表示为

$$\Delta\Lambda=\Lambda\times\Delta\varepsilon \tag{2}$$

式中，$\Delta\varepsilon$ 为光纤光栅受到的轴向应变，对光纤光栅有效折射率的影响为

$$\Delta n_{\mathrm{eff}}=-\frac{1}{2}n_{\mathrm{eff}}^{3}[p_{12}-(p_{11}+p_{12})\nu]\Delta\varepsilon \tag{3}$$

对上式进行变形，可以得到：

$$\frac{\Delta n_{\mathrm{eff}}}{n_{\mathrm{eff}}}=-\frac{1}{2}n_{\mathrm{eff}}^{2}[p_{12}-(p_{11}+p_{12})\nu]\Delta\varepsilon \tag{4}$$

式中，$p_{ij}(j=1,2)$ 为弹光系数，$\nu$ 为光纤光栅材料的泊松比。因此，有效弹光系数可以定义为

$$p_{\mathrm{e}}=\frac{1}{2}n_{\mathrm{eff}}^{2}[p_{12}-(p_{11}+p_{12})\nu] \tag{5}$$

综上所述，在改变光纤光栅轴向应变的条件下，FBG 的中心波长漂移为

$$\Delta\lambda_{\mathrm{B}}=\lambda_{\mathrm{B}}(1-p_{\mathrm{e}})\Delta\varepsilon \tag{6}$$

当外界环境施加的轴向应变是均匀变化的情况下，可以分析出 $\Delta\varepsilon$ 与光纤光栅中心波长变化量是呈线性变化的。因此，FBG 轴向应变灵敏度为[9]

$$K_{\varepsilon}=\frac{\Delta\lambda_{\mathrm{B}}}{\lambda_{\mathrm{B}}\times\Delta\varepsilon}=1-p_{\mathrm{e}} \tag{7}$$

## 2 船闸人字门结构健康监测系统设计

### 2.1 系统总体架构

船闸人字门结构健康监测系统由信号检测模块、数据采集和处理模块、数据呈现和远程监管模块三大部分组成，其系统架构如图 1 所示。

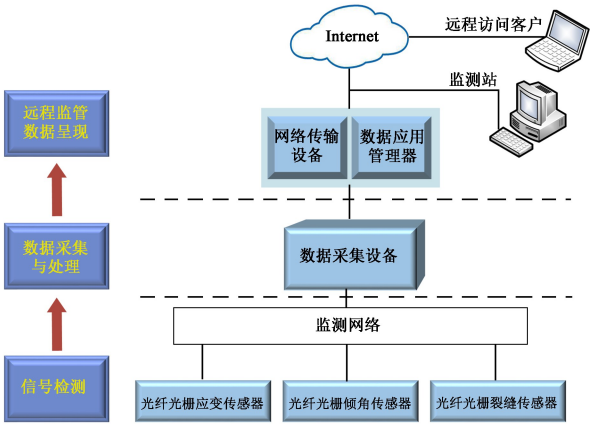



图 1 系统总体架构图

信号检测模块采用光纤光栅防水应力应变传感器，用于对人字门结构应力应变信号的检测，以此达到对人字门受力集中区域及门体关键部位形变情况监测的目的。

数据采集和处理模块包括光纤光栅解调仪、服务器和网络传输设备等。光纤光栅解调仪负责对人字门结构上安装的各种类型传感器的波长信息进行采集，将采集到的信息进行解调，便于系统分析处理；服务器主要用于将传感器的波长信号分别转换成应力、倾角、裂缝等物理量信息；网络传输设备用于将服务器处理后的物理量信息通过有线或无线的方式上传到数据中心，为后续损伤识别及安全评估提供数据支撑，进而完成对船闸人字门可靠性和安全性的综合评估。

远程监管模块通过监测软件反映所有光纤光栅传感器所在的物理位置及对应的状态值、时域曲线、闸门三维动态画面，进而可以实现对人字门门体健康状况的实时监测。

### 2.2　光纤光栅应变传感器性能及安装

采用光纤光栅应变传感器实现对船闸人字门门体结构的应力应变的监测。通过在人字门门体上各区域安装光纤光栅防水应变传感器，感知门体应力的变化情况，从而分析人字门结构在运行过程中的形变状况、受力大小等信息，为门体结构的健康运行提供数据理论支撑。光纤光栅防水应变传感器的结构如图 2 所示，其性能参数如表 1 所示。

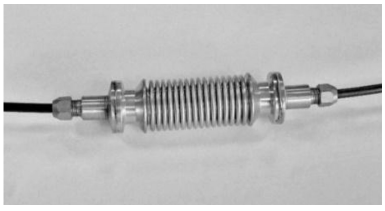


图 2　光纤光栅防水应变传感器

**表 1　光纤光栅防水应变传感器性能参数**

| 参数 | 数值 | 备注 |
|---|---|---|
| 中心波长/nm | 1 528～1 568 | |
| 测量范围/με | +/−2000 | |
| 精度 | 3‰FS | |
| 串接数量/只 | 20 | |
| 传感器间距/mm | 100～1 000 | |
| 尺寸/mm$^3$ | 140($L$)×110($W$)×12($H$) | |
| 安装方式 | / | 焊接/粘贴 |
| 尾纤 | / | 铠装光缆 |
| 防水等级 | IPX8 | 30 m 水深 |

依据人字门门体结构，结合船闸人字门历次检修报告确定门体关键受力区域及危险断面位置，设计光纤光栅传感器安装位置及相应的数量。船闸人字门结构由 2 扇门体构成，每扇门体共有 27 层横梁结构，共布设 320 个传感器监测点。考虑到船闸门体下半部分长期工作在水下的环境，在布设传感器时应适当增加传感器监测点的数量以保证对门体结构进行更全面的监测。在安装完传感器后，分 15 路光纤采用闭环的连接方式进行串接。这样可以避免由于局部单个传感器损坏，而影响绝大多数传感器数据的检测。如图 3 所示为光纤光栅传感器的部分安装分布图。

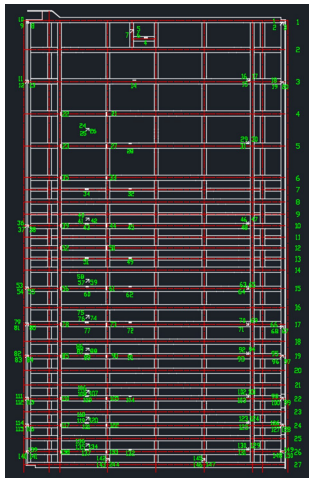


图 3　光纤光栅应变传感器分布

### 2.3　系统软件

根据实际项目监测软件的需求分析，结合系统长期可靠性、稳定性及安全性的原则，设计了船闸人字门结构健康监测系统软件，实现人字门门体应力应变结构在线监测、实时数据显示、用户管理、历史数据查询、统计报表等功能。软件系统界面如图 4 所示。

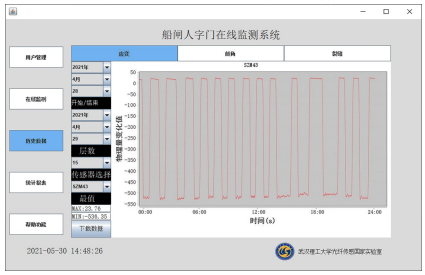



图 4　软件系统界面

## 3　数据分析与处理

### 3.1　数据滤波方法

在实际应用中，现场复杂环境和人为因素都会对传感器采集到的数据信号产生一定的影响，从而

降低数据的准确度。针对噪声干扰等问题，提出使用中值滤波方法对原始数据进行平滑滤波，以此降低噪声的影响，改善信号的信噪比。

中值滤波是一种基于排序理论的非线性信号处理方法，该方式对噪声信号具有较好的抑制作用。其原理是将待测信号进行连续采样，将 $n$ 个采样序列$(x_1,x_2,\cdots,x_n)$按大小进行排序，最终选取这组数据中的中间值作为采样值，其公式为

$$y=\mathrm{Med}(x_1,x_2,\cdots,x_n)=\begin{cases}X_{n/2}, & n\text{ 为奇数}\\ \dfrac{1}{2}(X_{n/2}+X_{(n+1)/2}), & n\text{ 为偶数}\end{cases} \tag{8}$$

假设对一组序列 $x_i(i\in(-\infty,+\infty))$进行中值滤波操作。取其窗口长度为 $L=2k+1$，在采样过程中的某一时刻，样本值为 $x_{i-k},\cdots,x_i,\cdots,x_{i+k}$，在这个序列中 $x_i$ 为该样本的中心数据。将样本值按大小进行排序后处于中间位置的值则为信号滤波后的输出值，即

$$y=\mathrm{Med}\{x_{i-k},\cdots,x_i,\cdots,x_{i+k}\} \tag{9}$$

选取同一个应变传感器的数据进行中值滤波处理，如图 5 所示，为选取某一传感器测点的数据进行中值滤波处理前后的对比。

从图 5 可以看出，采用中值滤波处理可以有效地滤除噪声信号，并且消除噪声的同时有效地保留了原始数据中的有用信息，保证了滤波后的信号真实性。

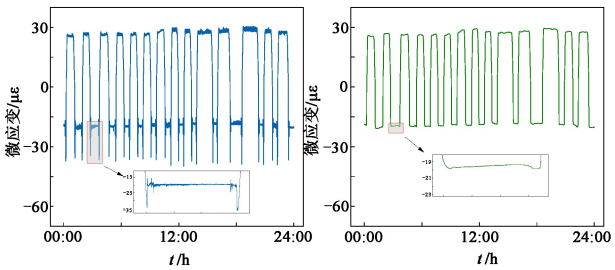



图 5 中值滤波方式处理前(左)和后(右)对比

### 3.2 传感器重复性分析

对同一个传感器在一天内，相同环境与工况下任意开启四次闸门过程中的数据进行分析。图 6 为四次开门过程中，传感器检测到的数据之间的对比。从图中可以看出，四条曲线分别代表着四次开启闸门的过程。随着时间的推移，闸门慢慢开启，四条曲线呈现出一致的变化趋势。且各曲线之间基本重合，重复性较好。

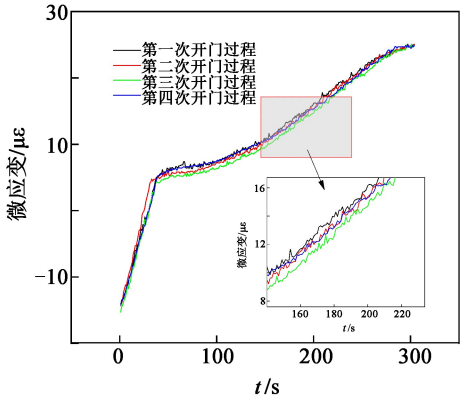



图 6 同一传感器四次开启闸门的重复性对比

### 3.3 通航关联性分析

如图 7 所示为闸门在通航期间一个完整的关门-充水-过船-泄水-开门过程。从图中可以看出，航船一个周期的通行时间约为 1.5 h。对光纤光栅应变传感器采集到的应变数据进行分析，可以看出船闸人字门在启闭的过程中，传感器的微应变值是几乎保持不变的，说明此时闸门的状态是较为平稳的。当闸室内进行充水操作时，微应变值随着水位的升高逐渐变为负值，说明传感器此时受到外界挤压应力。当闸室的水位与上游持平后，停止充水操作，航船开始通行。在这个阶段，闸门上传感器的微应变值也是几乎没有变化的。随着泄水操作导致的水位下降，应力值也逐渐回到原来的状态。

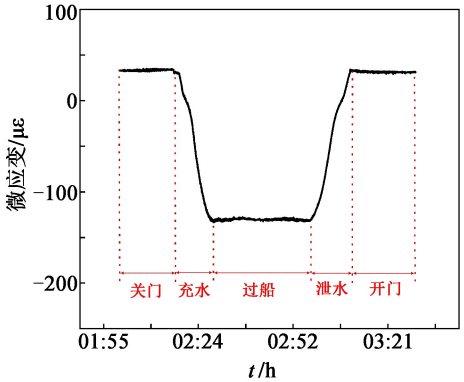



图 7 人字门通航过程

### 3.4 不同水位下闸门的应力变化规律

长江水位在不同时期会有不同的水位差，针对不同的季节，长江上下游的水位会做出相应的调整。一般在每年 4 月份的时候，船闸上下游会出现较大的水位差。在 6 月之后，伴随着夏季的到来，上下游水位差也会相应下降。在 8，9 月份的时候，长江的上下游的水位差会处于一个全年较小的状态。水位差的不同，闸门承受的静水压力也会不同，并且在通

航工作时，传感器检测的闸门在启闭过程中门体的受力大小也会相应发生变化。表 2 为船闸人字门在不同月份的上下游水位及水位差。

**表 2　不同月份下的水位差**

| 时间 | 上游水位 | 下游水位 | 水位差 |
|---|---|---|---|
| 4 月 25 日 | 64.42 | 42.3 | 22.12 |
| 6 月 25 日 | 64.11 | 43.54 | 20.57 |
| 8 月 25 日 | 66.21 | 48.88 | 17.33 |

选取人字门上常年处于水下环境的光纤光栅应变传感器进行分析，分析其在不同月份下处于一个闸门启闭周期内的受力情况，如图 8 所示。由于该传感器处于水下背拉杆焊接位置附近，是一个受力集中的区域，因此在闸门启闭的过程中其受到的挤压或是拉伸力会稍大，从而测得的微应变也会较大。从 4 月份到 8 月份，随着夏季汛期的到来，长江上下游的水位差会随之变小。从图中可以看出，随着水位差的减小，该传感器测得的应变变化量也会相应较小，说明船闸在启闭过程中其承受的荷载大小会随着水位差的变化而变化。

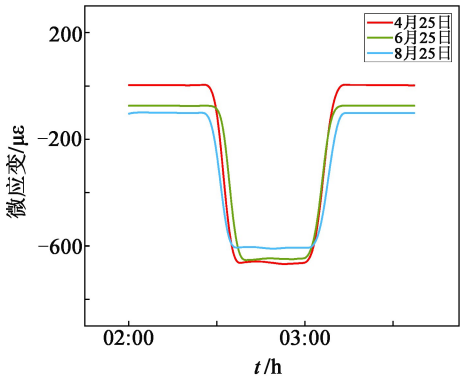



图 8　水下传感器不同月份的变化值

## 4　总结

针对船闸人字门常年超负荷运转而产生结构疲劳损伤，传统监测方式自动化程度低、易受电磁干扰、存在漏检的情况，提出了基于光纤光栅传感技术的人字门结构健康监测系统，该系统由信号检测模块、数据采集和处理模块、数据呈现和远程监管模块三大部分组成。通过人字门结构健康监测系统，实现了对人字门门体结构应力应变的实时在线监测，及时了解门体在工作过程中的运行状态，对异常情况进行预警；通过对传感器的动态应变信息进行分析，可以准确获取船闸的通航信息，如通航过程、通航闸次等；通过对传感器在不同季节时的峰峰值进行比较，可以了解闸门上下游水位分布情况。总之，基于光纤光栅传感技术的人字门结构健康监测系统可为船闸的安全、稳定运行提供有力保障。

## 参考文献：

[1]　陈明华. 基于光纤布拉格光栅的船闸人字门健康状态远程监测系统[J]. 水运工程，2020(2)：143-147.
Chen Minghua. A remote monitoring system for the health status of the gable door of a ship lock based on fiber Bragg grating[J]. Water Transportation Engineering，2020(2)：143-147.

[2]　王崇宇，刘虎英，周杰源. 船闸工程安全监测技术与设计[J]. 水电自动化与大坝监测，2014，38(5)：21-24.
Wang Chongyu，Liu Huying，Zhou Jieyuan. Safety monitoring technology and design of ship lock engineering[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring，2014，38(5)：21-24.

[3]　Gdoutos E E. Electrical Resistance Strain Gages [M]. Experimental Mechanics，Springer，2022：1-18.

[4]　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 ship lock herringbone gate based on fiber Bragg grating[D]. Dalian：Dalian Maritime University，2017.

[5]　廖延彪，苑立波，田　芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报，2018，38(3)：10-28.
Liao Yanbiao，Yuan Libo，Tiao Qian. 40 years of optical fiber sensing in China[J]. J. of Optics，2018，38(3)：10-28.

[6]　Campanella C E，Cuccovillo A，Campanella C，et al. Fibre Bragg grating based strain sensors：Review of technology and applications[J]. Sensors，2018，18(9)：3115.

[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]　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.

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

## 作者简介：

**姜永生**(1970—)，男，北京市人，大学学历，副研究员，主要从事港口装卸工艺、港口机械检测方面的研究工作。