



多传感信息融合的闸门状态监测系统研究

王贤龙^{1,2}, 吴 庞^{1,2}, 王 鹏¹, 杜利东¹, 陈贤祥¹, 方 震^{1,2}, 范晓峰³

(1. 中国科学院空天信息创新研究院传感技术国家重点实验室北方基地, 北京 100190;
 2. 中国科学院大学电子电气与通信工程学院, 北京 100049;
 3. 江苏省交通运输厅港航事业发展中心, 江苏 南京 210001)

摘要: 船闸是水运交通的重要枢纽, 而闸门是其重要组成部分, 一旦闸门发生故障会给航道运输带来巨大损失, 因此对于闸门的状态监测十分必要。现有方法以振动监测最为常见, 主要监测闸门运行时的振动情况, 但该方法监测量单一, 缺少振动引起的闸门形变、倾斜情况和开合状态监测。针对该问题, 以有限元分析为指导, 以振动监测为基础, 研制了一种多传感融合的闸门状态监测系统。该系统可实现闸门的实时振动频率、开合角度监测和长期倾斜监测, 为闸门状态监测提供一种多传感信息融合的监测方法。在江苏省谏壁船闸的测试应用, 证明该系统可以实时掌握了解闸门的运行状态, 为船闸的安全运行予以保障。

关键词: 结构健康监测; 有限元仿真; 闸门振动; 倾斜评估

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)01-0157-08

Gate status monitoring system of multi-sensing information fusion

WANG Xian-long^{1,2}, WU Pang^{1,2}, WANG Peng¹, DU Li-dong¹, CHEN Xian-xiang¹, FANG Zhen^{1,2}, FAN Xiao-feng³

(1. State Key Laboratory of Transducer Technology, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
 2. School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
 3. Port and Shipping Development Center of Jiangsu Provincial Department of Transportation, Nanjing 210001, China)

Abstract: The ship locks are critical parts of the waterway, and the gate is an indispensable part of the lock system, which brings great losses to the waterway transportation once it fails, so it is necessary to monitor the status of the lock gates. The vibration monitoring is common in existing methods and it mainly concentrates on the vibration when the gate works, however, it is single because of lacking tilt and working state of the gate caused by vibration. In view of the problems, a multi-sensor fusion status monitoring system of the lock gate is designed which based on the finite elements analysis and vibration monitoring. The system can conduct the real-time vibration frequency, angle monitoring and long-term tilt state monitoring, and provide a multi-sensing information fusion method for the gate status monitoring. The practical application in the Jianbi locks in Jiangsu Province proves that the system can acquire and master the working status of the lock gate in real time, and safely guarantee the routine work of the locks.

Keywords: structure health monitor; finite element analysis; gate vibration; tilt evaluation

船闸是水运交通的重要枢纽, 而闸门是船闸系统不可或缺的重要组成部分, 其工作可靠性直接影响内河航运整体安全运行。一旦闸门发生故

障轻则停航数天、重则断航数月进行维修, 给水上运输造成重大损失。例如, 刘家峡水电站闸门主轨与底板间焊缝断裂, 闸门因故大量漏水, 直

收稿日期: 2021-03-02

作者简介: 王贤龙(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为健康物联网。

通讯作者: 方震(1976—), 男, 博士, 研究员, 从事人工智能、医疗物联网等研究。E-mail: zfang@mail.ie.ac.cn

接经济损失 8 600 万元^[1]。因此对于闸门的实时状态监测就显得尤为重要。

目前对于闸门的状态监测方法一般包括人工检测、应力形变监测以及振动监测等^[2]。人工检测由人工用传统仪器定期到现场进行测量，主要包括巡视检查、外观检查等。应力形变监测主要使用应变传感器对结构承载能力以及形变情况进行实时监测^[3-4]，振动监测主要使用加速度传感器监测闸门的实时振动情况^[5]。人工检测存在一定的误差，而且不能实时监测；基于应力的方法需要布置足够多的传感器，代价较高，而且一旦有传感器损坏可能导致无法损伤定位^[6]。基于振动的方法是目前最常见的监测手段^[7-8]，当外界的激励频率与闸门固有频率接近时，闸门就会发生共振。长时间的共振会对闸门结构造成损伤，造成闸门支臂形变、倾斜等情况，严重时闸门整体遭到破坏^[9]。因此对于振动引起的闸门倾斜监测也是十分必要的，现有倾斜监测方法主要利用静力水准仪、倾斜传感器、光纤光栅传感器等仪器对输电塔、风力发电机等建筑结构进行倾斜角度监测^[10-11]，但在水工金属结构领域，闸门倾斜状态监测情况较少。此外，开合信息参与闸门的运行调度，而且不同开合状态下的振动情况也存在差异，因此对开合状态监测十分必要。

本文以有限元分析为指导，以振动监测为基础，研究了一种多传感融合的闸门状态监测系统。该系统可以实时采集传输闸门的振动频率、倾斜角度以及开合角度，通过振动频率信息判断闸门振动状态，通过两点倾斜角度监测分析闸门的长期倾斜情况，通过开合角度信息判断闸门开合状态，为闸门状态监测提供一种多传感信息融合的监测方法。实际应用表明：该系统运行良好，可以在船闸现场以及远程移动端实时了解掌握闸门工作状态，为闸门的安全运行提供保障。

1 方法原理

1.1 振动分析原理

振动是闸门普遍存在的现象，闸门在运行过

程中会产生不同程度的振动，而振动频率和振型是最为重要的特征。在无水约束条件下，忽略闸门阻尼状态以及动力荷载，可得到闸门自由振动方程^[12]：

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = 0 \quad (1)$$

式中： \mathbf{M} 、 \mathbf{K} 分别为闸门质量矩阵和刚度矩阵； $\ddot{\boldsymbol{\delta}}$ 、 $\boldsymbol{\delta}$ 分别为节点加速度和位移。此时体系做简谐运动，表达式为 $\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\phi} \cos(\omega t + \theta)$ ，其中 $\boldsymbol{\phi}$ 为振幅，代入式(1)可得 $(\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}) \boldsymbol{\phi} = 0$ ，在自由振动时，结构各节点振幅 $\boldsymbol{\phi}$ 不全为 0，因此有：

$$|\mathbf{K} - \omega^2 \mathbf{M}| = 0 \quad (2)$$

式(2)即为闸门的自振频率方程，闸门自由度为 n 时，可求解得到 n 阶频率。将其从小到大排列，即为结构的第一、第二、……、第 n 阶固有频率， $\boldsymbol{\phi}$ 为与之对应的结构振型。

在实际情况中，水体的脉动压力会作用于闸门，引起闸门振动。在有水情况下，对式(1)进行修正，得到有水体作用下的流固耦合振动方程 $\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = -\mathbf{P}$ ，其中 \mathbf{P} 为流体与结构接触面的动水压力。在已知的边界条件下以及流固耦合接触面上，水节点法向速度等于门叶节点法向速度，同时远处水体的扰动速度和扰动压强均趋于零。基于以上条件可求得节点压力与加速度成正比，即 $\mathbf{P} = \mathbf{M}_p \ddot{\boldsymbol{\delta}}$ ，其中 \mathbf{M}_p 为附加质量矩阵，整理可得闸门流固耦合振动方程：

$$(\mathbf{M} + \mathbf{M}_p)\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \mathbf{K}\boldsymbol{\delta} = 0 \quad (3)$$

但在工程实际应用中，由于施加在门体的水动力荷载较为复杂，对于水体的脉动压力 \mathbf{P} 难以确定。本文参照《港口工程荷载规范》^[13]，确定作用工程结构的水流力标准值：

$$F_w = C_w \frac{\rho}{2} v^2 A \quad (4)$$

式中： F_w 为水流力标准值(kN)； C_w 为水流阻力系数； ρ 为水密度； v 为水流设计流速； A 为构件与流向垂直平面投影面积。本文以此水流力大小作为闸门激励源，探究闸门在水流作用下的振动响应特性。

1.2 分析方法

1.2.1 闸门自振特性分析

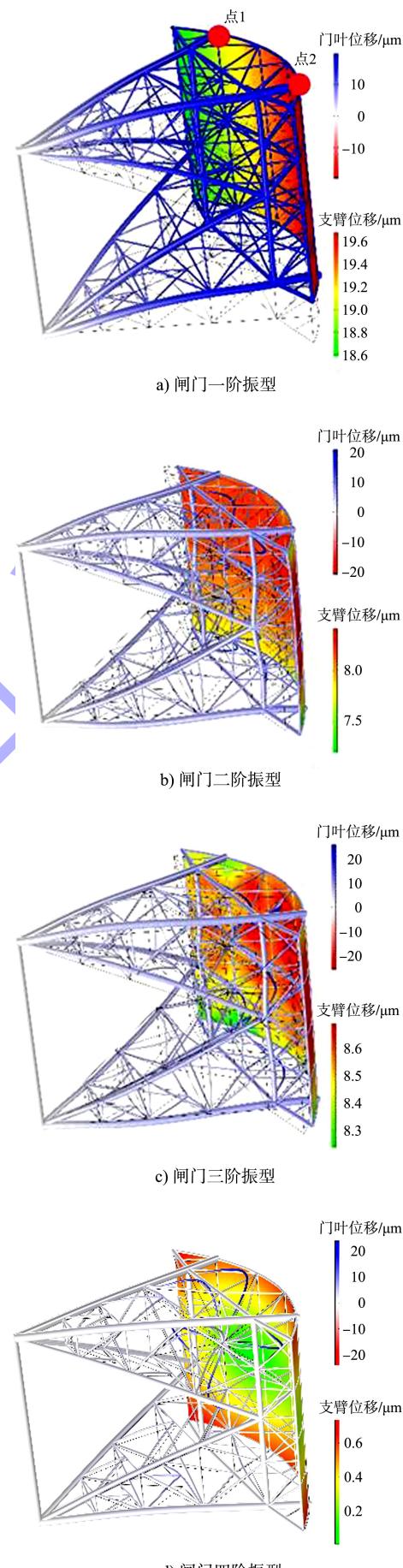
有限元分析技术可以节省研究时间和成本, 通过计算机仿真获得自振频率方程式(2)的数值解, 即闸门固有频率和振型, 为状态监测系统的前端传感器选型、布置以及闸门振动状态分析提供理论基础。

以江苏省谏壁船闸为原型, 该船闸为Ⅲ级通航建筑物, 上下游均为钢质三角闸门。利用COMSOL分析软件对闸门实际结构进行等比例建模, 由于闸门主要由桁架结构以及表面门叶构成, 在物理建模时选用梁模型构建桁架、壳模型构建门叶。分别对模型进行材料定义, 船闸门叶材料为CCSB、密度为7 870 kg/m³、杨氏模量200 GPa、泊松比0.29。主体型材采用Q335B、密度为7 870 kg/m³、杨氏模量211 GPa、泊松比0.33。门叶采用SHELL63单元, 桁架采用BEAM188单元。由于固有模态只与闸门自身特性及约束条件有关, 按照实际情况只对闸门门轴施加固定旋转约束。通过自适应网格划分对闸门进行有限元划分, 得到1 800个三角单元和1 856个边单元, 最后采用特征频率求解器对闸门固有模态求解并分析。

表1为该闸门的前六阶固有频率, 闸门一阶频率在6 Hz附近, 二阶到六阶频率在20~25 Hz。图1为闸门前六阶模态振型, 可以直观看到闸门位移情况。由图1a)可以看出闸门一阶模态中门叶、支臂振动最为强烈, 由于存在旋转约束, 点1、2处的振动情况不完全相同。第二、第三阶模态中门叶振动剧烈, 支臂轻微振动; 三阶之后模态门叶振动情况较弱, 支臂振动不明显, 主要为部分部件的振动。由模态分析可知: 低阶振型主要表现为闸门整体振动, 自振频率低, 与水流脉动频率接近, 更易引起共振^[14], 在实际中需对闸门低阶振型予以关注。

表1 闸门前六阶固有频率

阶数	一	二	三	四	五	六
固有频率/Hz	5.92	19.82	22.63	23.80	24.31	25.40



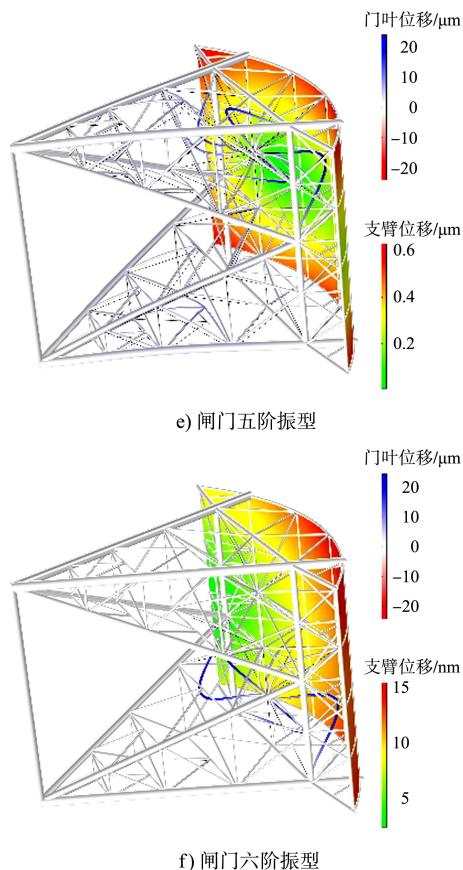


图1 闸门前六阶振型

模态分析可得到闸门固有特性,但其缺少结构动态变化信息^[15],闸门在运行工作中,会受到水体等载荷激励而产生反应变化。本文通过瞬态响应分析,得到系统节点在外界载荷作用下的响应曲线,为系统设计提供更进一步的理论支撑。根据闸门一阶振型振动强弱情况,在闸门支臂选取4个响应节点,见图2。

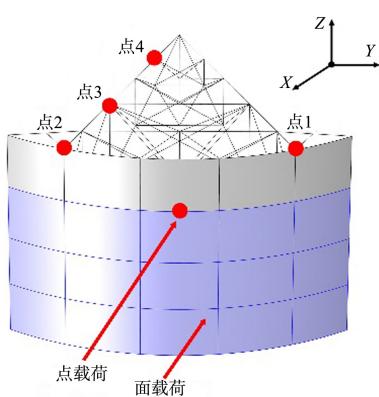


图2 瞬态分析响应节点及施加载荷

通过对门叶施加面载荷来模拟闸门受到水流压力时的情况、点载荷模拟面板受到船舶撞击时的情况,观察各点的振动响应,确定振动传感器

布置位置及选型。根据式(4),按照标准 C_w 取1.99; ρ 取1.0 t/m³,估算后水流力 F_w 大小为80 kN。取面载荷大小为80 kN,垂直于门叶方向。按照规范^[16],I、II级船闸船舶撞击力可取300 kN,谏壁船闸为III级船闸,取300 kN为最大撞击力,方向垂直于门叶方向。通过COMSOL瞬态响应求解器可得到闸门瞬态响应曲线。

图3a)为闸门在面载荷激励下瞬态响应曲线,4个响应节点波动变化情况基本一致。其中点1、2处振动加速度较大,点3、4加速度值依次减小。振动响应监测点应放置在结构形变、振动较大的区域,综合模态分析与瞬态响应分析,在点2处放置振动传感器。点2处的振动加速度变化范围在 $\pm 0.1 \text{ m/s}^2$ 左右,振动传感器分辨率为 0.01 m/s^2 。在点载荷激励作用下点2处振动响应如图3b)所示,振动加速度最大为 2.5 m/s^2 ,考虑到重力加速度 g ,振动传感器量程应选 $\pm 2g$ 。当加速度大小在 $1 \sim 3 \text{ m/s}^2$ 时,须关注闸门是否受到船舶撞击。此外闸门在不同运行状态下振动情况也有所差异,可通过角度传感器确定闸门工作运行状态,探究不同状态下的振动模态。

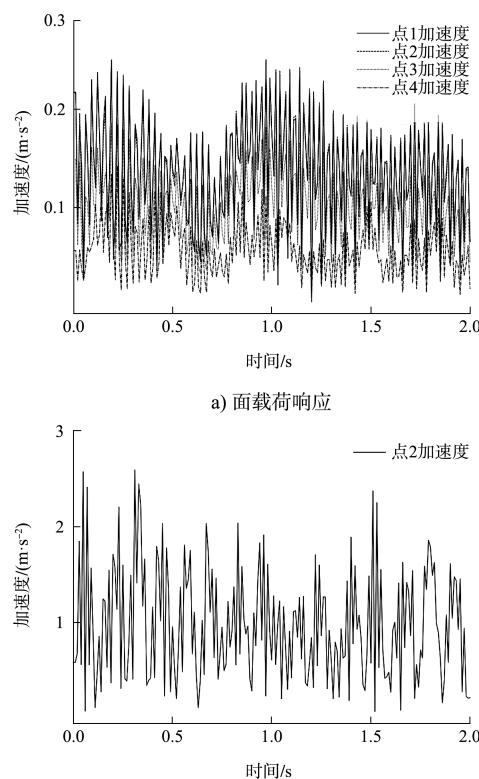


图3 瞬态响应曲线

1.2.2 闸门倾斜状态分析

由闸门模态分析可知, 支臂末端点1、2处振动情况不完全相同, 易产生形变。在长时间的启闭操作、动水作用、异常振动后, 支臂可能会上下弯曲产生塑性形变进而倾斜。通过应力传感器只能反映局部应力变化情况, 无法分析整体形变情况。针对该问题, 本文在应力最大处, 即点1、2处安装倾斜传感器, 间接分析闸门的形变倾斜情况。

倾斜变化属于长期形变过程, 短时倾斜数据受闸门运动状态影响, 存在波动及异常值, 无法反映真实倾斜情况。本文采用 3σ 法则筛选异常值, 采用最小二乘法^[17]拟合倾斜信号, 得到其倾斜趋势曲线。最小二乘拟合可为多项式拟合也可为线性拟合, 其中多项式拟合运算量较大, 且更多的是反映信号波动趋势而非整体趋势, 本文采用线性最小二乘法计算倾斜趋势。

闸门倾斜示意见图4, 根据分析结果在闸门末端选取两个倾斜监测点。监测点关于闸门中轴线对称, 其中 θ_{x1} 与 θ_{x2} 为传感器与水平面X方向夹角, θ_{y1} 与 θ_{y2} 为传感器与水平面Y方向夹角, θ_{x1} 与 θ_{y1} 垂直, 规定铅垂向下为正方向。对倾斜数据进行最小二乘趋势分析后, 根据两个监测点倾斜角度的比对, 可以确定闸门的倾斜状态: 1) 当 $\theta_{x1} = \theta_{x2} > 0^\circ$, $\theta_{y1} = \theta_{y2} = 0^\circ$, 闸门沿径向方向向下倾斜; 2) 当 $\theta_{x1} > \theta_{x2} > 0^\circ$, $\theta_{y1} = \theta_{y2} < 0^\circ$, 闸门沿径向中轴

线向左下倾斜; 3) 当 $\theta_{x2} > \theta_{x1} > 0^\circ$, $\theta_{y1} = \theta_{y2} > 0^\circ$, 闸门沿径向中轴线向右下倾斜; 4) 当 $\theta_{x2} \neq \theta_{x1}$, $\theta_{y1} \neq \theta_{y2}$, 同时倾斜角度变化较大, 则闸门支臂可能存在变形, 导致闸门左右倾斜异常。

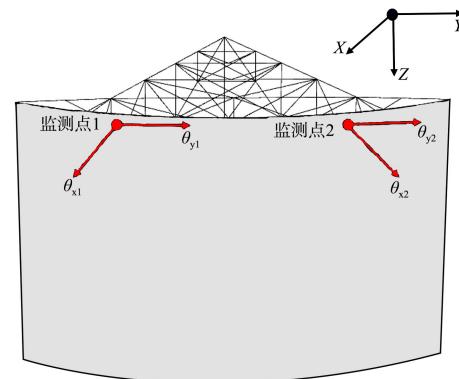


图4 闸门倾斜监测示意

2 系统设计与测试

2.1 系统结构

闸门状态监测系统见图5, 按照理论分析结果在支臂末端放置振动、倾斜传感器, 角度传感器放置在闸门门轴顶部。为实现振动状态的实时监测评估, 本文将原始振动信号转换成振动频率信号, 实时分析闸门振动状态。考虑到闸门工业现场环境以及传输距离, 振动频率、倾斜、角度信号都为RS485有线输出, 设计专门的闸门传感单元对传感信号进行采集、解析以及传输。通过振动采集单元以及闸门传感单元将前端信息传输至服务器云平台, 进行数据的实时显示、存储及分析。

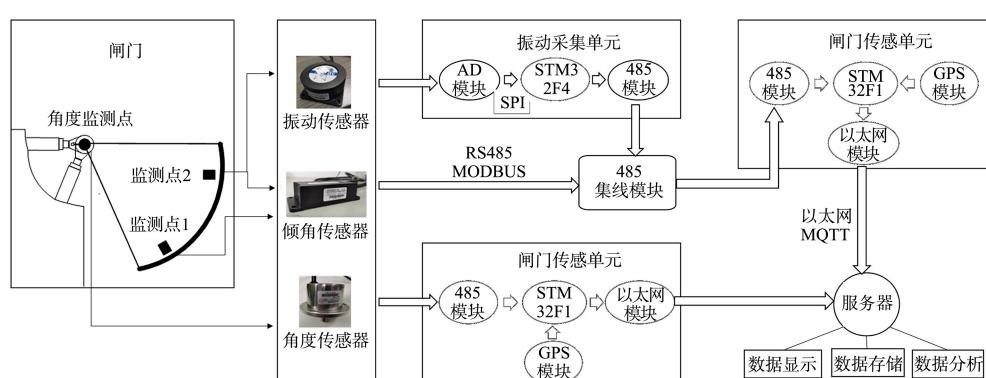


图5 状态监测系统

2.2 系统设计

2.2.1 振动采集单元

振动采集单元主要采集实时振动信号, 并进

行片上振动频率计算, 最后转换成RS485信号输出。闸门固有频率最大不超过50 Hz, 根据采样定理, 振动采集频率应大于100 Hz。根据瞬态响应

分析, 振动采集量程为 $\pm 2g$, 分辨率 0.01 m/s^2 。纵向和水平切向两路振动情况较为明显, 这里采用高实时性 AD 芯片 AD7606, 同步采集两路加速度信号。AD 和 MCU 采用 SPI 通信方式, 采集的振动信号传输至 MCU, 实现实时片上振动数据处理。

采用快速傅里叶变换(FFT)计算振动频率, 傅里叶变换频率分辨率公式为: $f_s = F_s/N$ 。其中 f_s 为频率分辨率, F_s 为采样频率, N 为采样点数。有限元分析中, 阀门第四、五阶固有频率相差 0.5 Hz , 为实现频率可分辨, 采样频率设定为 256 Hz , 采样点数为 1 024 个, 频率分辨率为 0.25 Hz , 满足频率可分辨。本文采用滑动窗口来实现振动频率的实时转换, 计算流程如下: 1) 先采集 1 024 个振动数据; 2) 去工频干扰、去直流分量; 3) 对 1 024 采样点进行快速傅里叶变换; 4) 在频谱图中找寻最大值点即为当前振动频率; 5) 滑动窗口采集 1 s 数据(256 个数据点), 构成新的 1 024 个数据窗口, 返回步骤 2 进行下次计算。其中低通滤波采用四阶巴特沃斯低通滤波器, 滤掉 50 Hz 工频干扰, 通过均值滤波减少直流分量对傅里叶变换结果的影响。

2.2.2 阀门传感单元

阀门传感单元主要解析传感器输出的 RS485 信号, 并与 GPS 时间信息按照对应格式主题打包发送至以太网转 MQTT 模块进行数据传输。为保证数据的实时性和各传感器节点的时间同步, 采用 GPS 模块获取卫星校准时间, 与解析数据一起打包传输。现有的船闸监测手段只能实现阀门现场端的数据监测, 无法实现远程移动端的监控。本文采用一种基于 TCP/IP 的轻量级协议—MQTT 协议, 实现数据的远程监控, 该协议可以通过发布和订阅主题(Topic)进行数据的传输和获取。将打包数据按照对应主题进行发布, 利用串口转以太网 MQTT 模块直连控制中心的网络接口, 实现船闸现场向控制中心及物联网服务器的实时信号传输。

2.2.3 系统实现

为了验证阀门状态监测系统的可行性, 按照

上述方法原理制作了硬件系统实物, 振动采集单元、阀门传感单元见图 6。振动传感器通过传感接口接入采集单元并进行实时频率转换, 通过 RS485 模块进行输出。振动频率、倾斜的 RS485 信号通过集线器接入传感单元, 与 GPS 时间信息打包, 按照对应主题通过以太网转 MQTT 模块进行传输。角度传感器由于距离问题, 需要单独的传感单元进行采集解析。

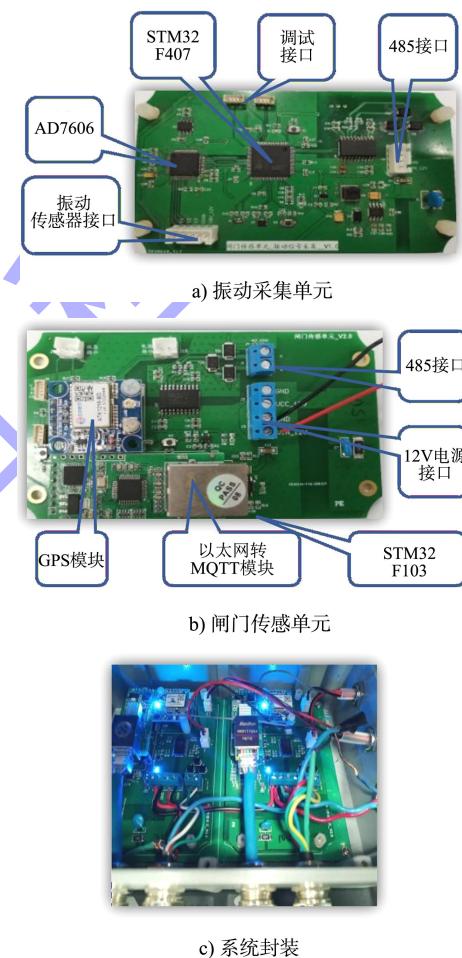


图 6 监测系统硬件实物

2.3 测试结果

在江苏省谏壁二号船闸进行了系统部署。通过该监测系统可以将现场传感数据传输到阀门监控室, 参与阀门的实时调度。当阀门振动情况严重时, 会对异常情况进行预警。移动端远程监控阀门现场数据的变化曲线, 通过实时数据、历史数据了解阀门的运行状况。保存阀门历史数据, 可进行长期健康监测及溯源。

选取闸门某一天的开合、水平切向振动频率进行对比(图7)。可以看出闸门每次开合基本稳定到位, 无明显异常情况。闸门在长期闭合和开启期间, 受充泄水影响, 振动响应频率主要集中在6、20 Hz, 该频率与有限元仿真结果接近, 存在共振危险的可能。开合关闭瞬间振动频率为20 Hz, 该振动由液压油缸启动推力较大以及闭合到位时的惯性冲击所造成。下面利用振动频率、倾斜信号对闸门进行状态评估。

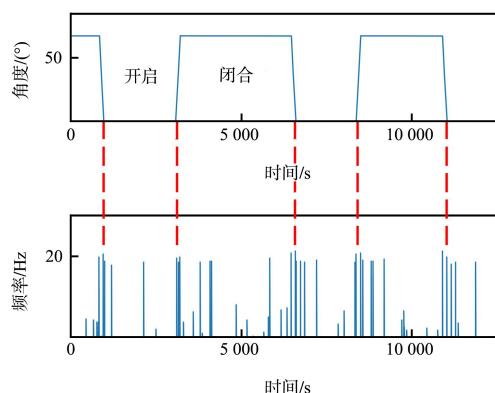
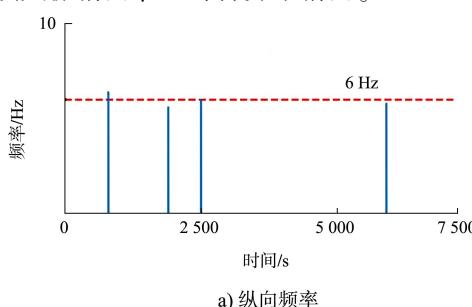
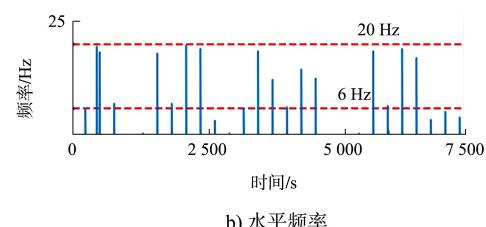


图7 状态监测信号对比

振动频率信号见图8, 振动时域分辨率0.01 m/s², 频域分辨率0.25 Hz, 振动加速度较小或无法识别时振动频率为0。闸门水平切向的振动频率变化较多, 其主要集中在20 Hz左右, 6 Hz附近也存在一些振动情况。振动频率与闸门固有频率接近, 闸门存在共振可能, 但持续时间较短。闸门纵向的振动频率变化情况较少, 当纵向频率变化较多时说明闸门纵向跳动情况频繁, 属于异常情况。当出现其他阶振动频率时, 由有限元分析可知, 其引起的振动位移较小, 而且主要是部件的振动。但出现情况频繁时, 则需要及时检修, 避免闸门部件出现问题。该闸门无异常跳动情况、无持续共振情况、无部件异常情况。



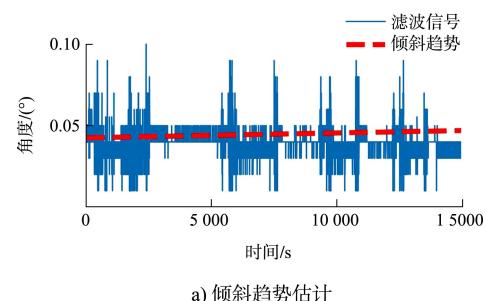
a) 纵向频率



b) 水平频率

图8 振动信号分析

倾斜变化是长期过程, 获得倾斜数据后, 对其进行历史倾斜变化分析。倾斜原始信号都存在异常值, 进行异常值处理后, 采用最小二乘法拟合倾斜信号, 得到其倾斜趋势曲线。如图9a)所示, 虚线即为信号的趋势曲线, 对趋势曲线求取均值即可得到当日倾斜角度。选取闸门2020年6—11月两个监测点的倾斜数据, 得到其倾斜角度历史变化曲线。可以看到 θ_{x1} 与 θ_{x2} 变化接近, 有一定倾斜趋势, 最大倾斜角度为0.06°。 θ_{y1} 与 θ_{y2} 变化稳定, 基本在0°附近波动, 无明显倾斜趋势。根据倾斜状态分析, 闸门径向存在向下倾斜情况, 呈线性增长趋势, 考虑为长期启闭及自身重力因素造成, 倾斜角度不大, 属于正常情况。



a) 倾斜趋势估计

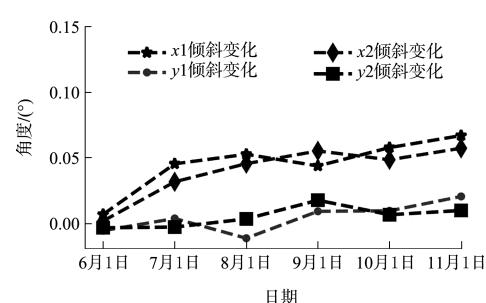


图9 倾斜信号分析

3 结语

1) 对谏壁船闸进行模态分析, 提取其前六阶

模态,发现该闸门低阶振型为整体振动,低阶频率与水流脉动频率接近,因此实际中监测应对闸门低阶振动频率予以重点关注。

2)通过监测数据分析,该闸门角度开合良好、无异常振动情况;通过闸门倾斜变化曲线分析,闸门径向存在向下倾斜情况,倾斜角度不大。综合上述分析,闸门整体运行状态良好,无异常情况。

3)多传感监测系统稳定可靠,具有良好的扩展性和普适性,可根据不同闸门监测要求对监测内容进行扩充。在水工金属闸门的状态监测及分析领域具有一定的参考意义和广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 杨光明.水工金属结构安全评估系统设计与研究[D].南京:河海大学,2005.
- [2] 郑圣义,原玉琴.水工金属结构安全检测与评估方法综述[J].水利水电科技进展,1997,17(2):26-29.
- [3] EICK B A, TREECE Z R, SPENCER JR B F, et al. Automated damage detection in miter gates of navigation locks[J]. Structural control and health monitoring, 2018, 25: 1-18.
- [4] YANG Y, MADARSHAHIAN R, TODD M D . Dynamics of civil structures, Volume 2: Bayesian damage identification using strain data from lock gates [M]. Cham: Springer, 2020: 47-54.
- [5] 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.
- [6] NOEL A B, ABDAOUI A, ELFOLY T, et al. Structural health monitoring using wireless sensor networks: A comprehensive survey[J]. IEEE communications surveys & tutorials, 2017, 19(3): 1403-1423.
- [7] ZHAO M Y, WANG J, QIN X X, et al. Study on the miter gate fault diagnosis methods based on vibration signals[C]. Advanced materials research. Trans Tech publications, 2014, 875: 2087-2091.
- [8] VEGA M, MADARSHAHIAN R, TODD M D. Model Validation and Uncertainty Quantification, Volume 3: A neural network surrogate model for structural health monitoring of miter gates in navigation locks[M]. Cham: Springer, 2020: 93-98.
- [9] 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):51-59.
- [10] JIANG S, WANG J, SUI Q . Distinguishable circumferential inclined direction tilt sensor based on fiber bragg grating with wide measuring range and high accuracy[J]. Optics communications, 2015, 355: 58-63.
- [11] LIU C, PARK J W, SPENCER B F, et al. Sensor fusion for structural tilt estimation using an acceleration-based tilt sensor and a gyroscope[J]. Smart material structures, 2017, 26(10): 1-25.
- [12] SINGH D K, PAL P, DUGGAL S K. Free vibration analysis of lock gate structure[J]. Journal of mechanics, 2020, 36(4): 507-520.
- [13] 中交第一航务工程勘测设计院有限公司.港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S].北京:人民交通出版社,2010.
- [14] 王均星,焦修明,陈炜.龙滩工程底孔弧形闸门的自振特性[J].武汉大学学报:工学版,2008,41(5):31-34.
- [15] LI J H, SHI Z Y, LIU L, et al. An efficient scaled boundary finite element method for transient vibro-acoustic analysis of plates and shells[J]. Computers & structures, 2020, 231: 1-28.
- [16] 四川省交通厅内河勘察规划设计院.船闸闸阀门设计规范: JTJ 308—2003[S].北京:人民交通出版社,2003.
- [17] ZHENG W, DAN D, CHENG W, et al. Real-time dynamic displacement monitoring with double integration of acceleration based on recursive least squares method[J]. Measurement, 2019, 141: 460-471.

(本文编辑 武亚庆)