

光纤布喇格光栅水流流速传感器的设计

张浩^{1,2},钟志鑫^{3*},胡军海⁴,赵雨佳⁵

(1.石家庄铁道大学 大型结构健康诊断与控制研究所,石家庄 050043;

2.河北省大型结构健康诊断与控制实验室,石家庄 050043;3.石家庄铁道大学 土木工程学院,石家庄 050043;

4.西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,成都 610031;5.西南交通大学 土木工程学院,成都 610031)

摘要:实时监测水中结构物所处水流环境参数,有助于精确分析水流冲刷作用及其对结构的影响。基于光纤布喇格光栅(FBG)传感原理,研发了一种水流流速实时监测的传感器,推导了该传感器的流速计算公式和传感器量程与灵敏度的计算方法,利用ANSYS和Fluent软件对传感器的结构性能进行了仿真分析,并进行了传感器标定实验。实验结果表明:所研发的传感器在0.05~5 m/s流速范围内,误差始终保持在7%以内,可满足水中结构的实际监测需求,为冲刷分析提供可靠的数据来源。

关键词:光纤布喇格光栅;流速传感器;仿真分析;标定实验

中图分类号:TB937;TH814;TN253 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)10-0005-06

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.10.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Design of fiber Bragg grating water flow velocity sensor

ZHANG Hao^{1,2}, ZHONG Zhixin^{3*}, HU Junhai⁴, ZHAO Yujia⁵

(1. Structural Health Monitor and Control Institute, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. The Key Laboratory for Health Monitoring and Control of Large Structures of Hebei Province, Shijiazhuang 050043, China;

3. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China; 4. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 5. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Real-time monitoring of water flow environmental parameters of structures in water is helpful to accurately analyze the effect of water flow scouring and its influence on structure. Based on the principle of fiber Bragg grating (FBG) sensor, a sensor for real-time monitoring of flow velocity is developed. The calculation formula of flow velocity and the calculation method of sensor range and sensitivity are deduced. The structure and performance of the sensor are simulated and analyzed by using ANSYS and Fluent software, and the sensor calibration experiment is carried out. The experimental results show that the error of the sensor is within 7% in the range of 0.05~5 m/s, which can meet the actual monitoring needs of underwater structures and provide reliable data sources for scouring analysis.

Key words: fiber Bragg grating; flow velocity sensor; simulation analysis; calibration experiment

0 引言

由于水中结构物在长期使用过程中不断受到水

流、波浪的冲刷和冲击等因素的影响,出现水上结构基础动力软化、材料侵蚀老化的现象,导致水上结构构件及整体抗力衰减,影响结构的安全度和耐久度^[1]。因此,长期监测水流的流速情况,对掌握水上结构物的性能演变、评价结构的工作状态、针对性合理的养护、各种安全事故的避免、确保水上结构物的安全以及提高其使用的年限具有重要意义。

目前,国内外大量的学者都将流速传感器的研发应用在固定的管道(油管、天然气管等)中,仅用来检测管中流体的流量变化,而对于大跨桥梁所处大江大河环境的水流流速监测的研究较少。这主要是由于管

收稿日期:2019-04-27。

基金项目:国家重点研发计划项目子课题(2016YFC0802202-3)资助;河北省教育厅重点项目(ZD2015060)资助。

作者简介:张浩(1976-),男,江西新余人,博士,副教授,师从东南大学吴智深教授(日本工程院外籍院士),在石家庄铁道大学大型结构健康诊断与控制研究所杜彦良院士团队工作,主要从事桥梁结构健康监测及光纤传感技术方面的研究。2017年获国家技术发明二等奖。

*通信作者:钟志鑫(E-mail: zzxjgkjc@foxmail.com)。



道中流体方向相对固定,而水上结构所处水流环境相对复杂,流向时刻发生变化,导致水流流速测量困难^[2]。

近些年,超声波流速传感测量仪逐渐被用于测量实际跨海大桥等水上结构物所处环境的水流流速,此类传感器采用非接触式测量方式,无压损,但其因测量线路复杂,测量精度易受被测液体温度影响而广受诟病^[3]。之后,电磁波流速传感测量仪和声学多普勒流速传感测量仪逐渐兴起,这些设备的测量精度相对较高,但制造成本高,且因水下环境复杂,测量仪易受到电磁环境干扰,测量效果并不理想,导致应用场景有限^[4]。故研究一种成本低、精度高、抗外界电磁环境干扰能力强和能够实时在线监测不定向水流流速的传感器显得异常重要。近年来,光纤布喇格光栅(FBG)以其不易受外界电磁环境干扰、测量精度高、体积小、波长选择性好、不受非线性效应影响、带宽范围大、附加损耗小和耦合性好等优势,逐渐被用来当做各类传感器的测量元件^[5,6]。针对实际水流环境监测需求,本文基于 FBG 传感技术研发一种新型流速传感器。

1 传感器结构及传感原理

1.1 传感器结构

针对传感器需要实现的功能,本文设计的新型流速传感器的结构如图 1 所示。主要构成部件为:文丘里管、滑动连接件、偏心轮、垫圈、封闭推杆、位移传导轴、位移顶轴、螺母、调节钉、转向轴、简支梁、支撑架、机架底座、滚动轴承、轴套编码盘、水轮、杠杆和万向板。

1.2 传感器测量原理

新型流速传感器的测量原理主要分为 5 步:

①万向板流向自适应。要解决水流流向不定向的问题,传感器需要自适应流向变化。传感器设计万向

板结构来适应水流不定向流动,其特点是万向板一侧固定于转轴上,可随转轴转动,转动轴承固定在机架上。万向板工作时,转轴竖直,在水平面内随水流方向改变而旋转,带动与它固定的转轴一起旋转,待水流流向与万向板平面平行且由近轴端流向远轴端时,万向板处于平衡状态不再旋转,否则将继续旋转至平衡状态。万向板自适应水流示意图如图 2 所示。

②文丘里管流速增敏放大。待水流自我适应后,水流从文丘里管进水口流入,收缩口流出。根据流量相等原理,放大水流流速,增加测量灵敏度,实现对低流速水流的精确测量。

③水轮受力传导流速。水流从收缩口流出,与水轮接触,驱动水轮转动,杠杆将水轮的转动变化量传递到位移传导轴上,带动位移顶轴(仅上下移动,过滤掉位移传导轴的转向)上下往复移动,水流流速变化引起位移顶轴周期性往复运动的频率变化。流速测试原理如图 3 所示。

④流速转为光栅频率。位移传导轴穿过中空转向轴,跟其上部的转动轴承和位移顶轴相连接,位移顶轴上端和简支梁相连接,FBG 粘贴于简支梁的上端跨中间处,并采用特定的柔性材料(环氧树脂等)对其进行封装处理。为消除温度对测量的影响,串联一个温度补偿光栅,其示意图如图 4 所示。简支梁跨中受到位移顶轴往复推动力作用发生振动,导致光栅波长频率发生变化,通过感知频率变化,间接测量流速大小。上部结构整体装入圆形保护筒中,防止测量过程中水流渗入,影响测试效果。

⑤光栅频率识别方法。实验过程中,利用 FBG 解调仪设置采样频率,对测试用 FBG 和温补光栅进行波长数据采集。分别将采集到的波长减去初始中心波长,得到各自的波长变化量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 。将采集到的对

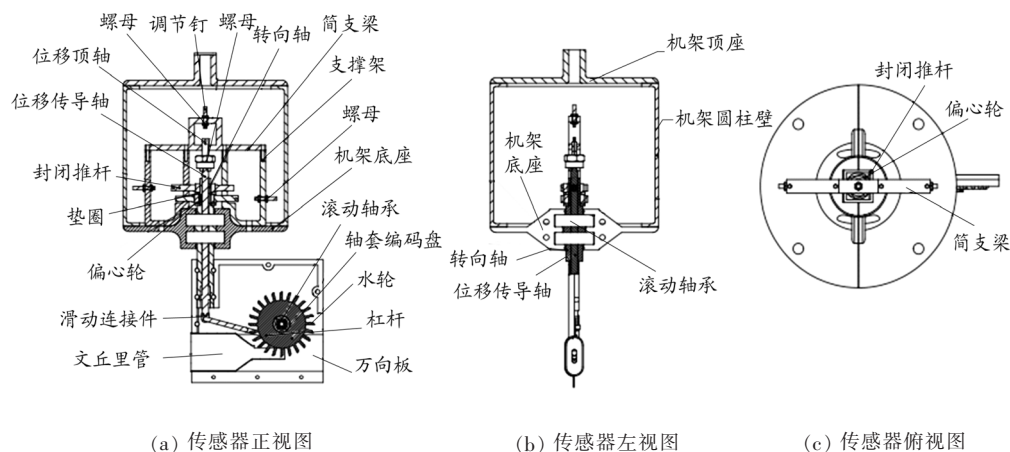


图 1 新型流速传感器结构示意图

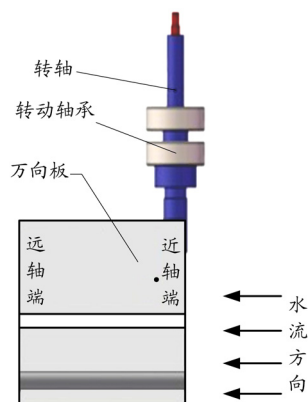


图 2 传感器万向板自适应水流示意图

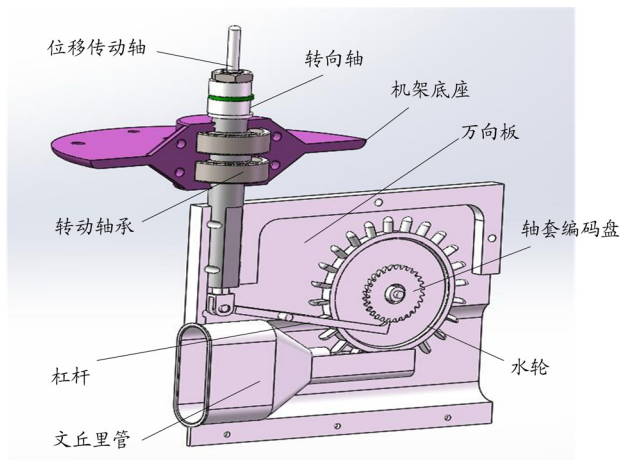


图3 流速测试原理

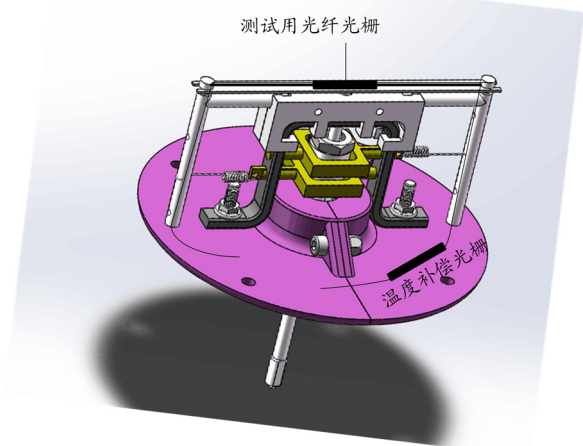


图4 光纤光栅粘贴位置示意图

应波长变化量 $\Delta\lambda_1$ 和 $\Delta\lambda_2$ 进行相减,提取两者相减量大于 0.1 nm 所对应的频率数据,即为流速对应频率值。

1.3 传感器流速计算公式与量程、精度表达式

1.3.1 流速计算公式

根据流体力学可知,流体以速度 V_1 流入文丘里管时,根据流量相等原则:

$$V_1 \times S_1 = V_2 \times S_2 \quad (1)$$

其中, S_1 为水流流入文丘里管时的初始截面积(mm^2), S_2 为水流流出文丘里管时的截面积(mm^2)。由式(1)可知经过文丘里管放大的速度 V_2 。流体以该速度流过水轮叶片,水流与水轮的接触点的速度也同为 V_2 。根据同轴转动角速度相等原理,可知小齿轮转动线速度 V_3 。假设小齿轮齿数为 N ,由于一个齿轮数对应位移顶轴的一次往复运动,位移顶轴运动导致简支梁振动,光纤光栅解调仪可读出因简支梁振动而导致光栅波长变化的频率 f ,根据 $f=1/T$ 计算出位移顶轴发生一次往复振动时间间隔 T ,则:

$$T \times N \times V_3 = 2\pi R_2 \quad (2)$$

其中, R_2 为小齿轮半径(mm)。

由式(2)可知,位移顶轴发生一次振动与小齿轮转动的弧长之间的关系,最终推导出水流初始流速 V_1 的计算公式为:

$$V_1 = \frac{2\pi R_1 S_2}{N S_1} \times f \quad (3)$$

其中, R_1 为水轮的半径(mm)。

根据已建立的数学模型,通过监测光栅波长变化频率,便能计算出对应流体流速 V_1 ,从而实现对流体流速的动态测量。

1.3.2 传感器量程和精度分析

根据流体力学知识可知,流体以速度 V 流过水轮叶片时,叶片在摩擦阻力 F_f 下将会产生转动,可得:

$$F_f = C_f \times \rho \times \frac{V^2}{2} \times B \times L \quad (4)$$

其中, C_f 为水流流体粘性的无因次阻力系数,根据经验公式可知为 1.3×10^{-6} ; ρ 为水流的密度,为 1000 kg/m^3 ; B 为水轮叶片的宽度(mm); L 为水轮单个叶片沿流体运动方向的长度(mm)。

再结合式(1),最终可以得出水流初始流速 V_1 对水轮叶片所产生的摩擦阻力 F_f ,可得:

$$F_f = C_f \times \rho \times \frac{V_1^2 S_1^2}{2 S_2^2} \times B \times L \quad (5)$$

由式(5)可知水轮转动的最小速度,即传感器所测水流流速最小量程。但因传感器加工工艺不同,只能用该公式进行理论最小流速计算,实际最小流速应以实际所做标定实验为准。

根据式(3)可求得传感器流速测量精度为:

$$S = \frac{\Delta f}{\Delta V} = \frac{N S_1}{2\pi R_1 S_2} \quad (6)$$

由式(6)可知,新型流速传感器测量精度取决于传感器设计时文丘里管流入端与流出端的截面积之比以及水轮的半径和小齿轮的齿数,其设计比值越小、传感器测量精度越高。但是,实际精度应以传感器性能标定实验为准。根据上述理论公式推导与实际监测需求,设计传感器中文丘里管与水轮结构尺寸如图5和图6所示(图6中 R 为半径, Φ 为直径)。

2 仿真分析

2.1 传感器水轮结构的 ANSYS 受力分析

为合理选取水轮材料,需要进行水轮 ANSYS 受力分析^[7]。本文将水轮中心固定,在其底部齿轮处构造

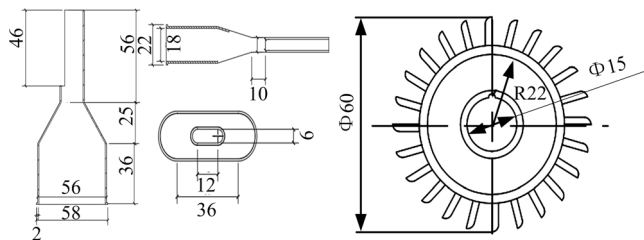
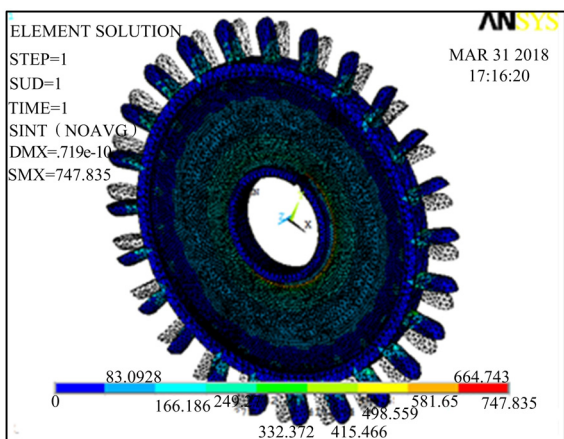
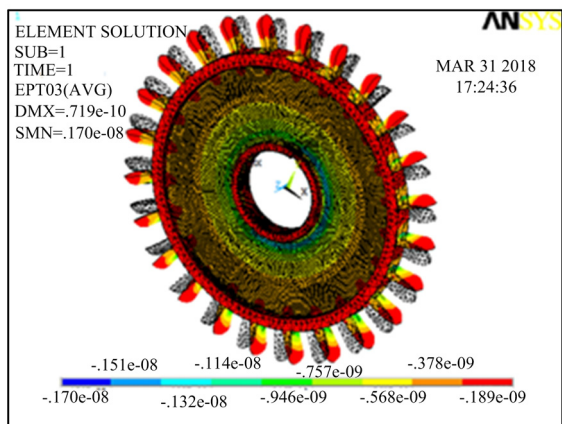


图5 文丘里管三视图 (单位:mm) 图6 水轮尺寸图 (单位:mm)

10 N(根据式(6)计算可知其值为 8.65 N,但考虑到实际建模简化需求改为 10 N)的流体荷载界面,水轮上的齿轮开始转动后逐渐发生应变变化,图7为提取水轮应力/应变图。



(a) 水轮应力图 (单位:Pa)



(b) 水轮应变图

图7 水轮应力/应变图

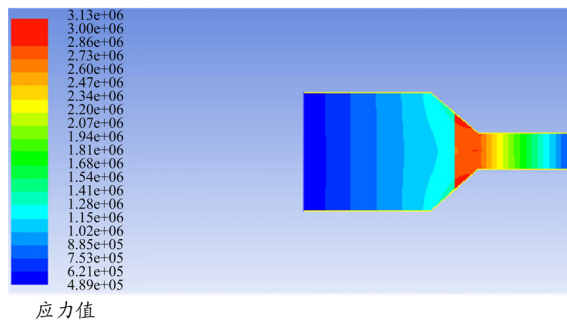
从图7可知,齿轮与水轮连接处受力明显,应变较大,水轮其它部分几乎不受力。考虑到加工难度,水轮整体结构应尽量选择相同材料,故水轮应选择强度较高、反应比较灵敏的材料;且因水轮长时间在水中浸泡,还需应选择抗腐蚀性、不易生锈的材料。

2.2 传感器文丘里管流固耦合分析

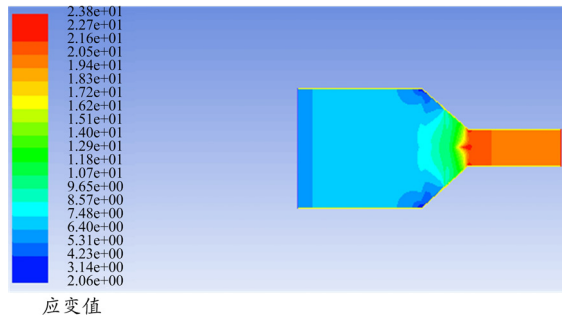
水流经过文丘里管的过程中,会对文丘里管产生冲击作用,若水流冲击力过大,将会导致文丘里管颈缩、截面发生变形,故需对文丘里管内应力/应变情况进行分析。由于文丘里管对水流具有一定的摩阻力,导致其流速减小,因此需对文丘里管摩阻力大小以及水流流速减小量进行分析。

首先,在 gambit 中建立文丘里管模型;然后,导入 Fluent 软件中进行流固耦合计算,得出文丘里管应力应变和水流流速变化情况,再根据变化情况,找出两者相互作用关系^[8-10]。Fluent 软件中流固耦合计算结果如图8所示,水流流速变化如图9所示。

由图8可知,文丘里管的颈缩截面处应力最大,应变变化明显,几乎囊括了应变变化的最大与最小



(a) 文丘里管应力图(单位:Pa)



(b) 文丘里管应变图

图8 文丘里管应力/应变图

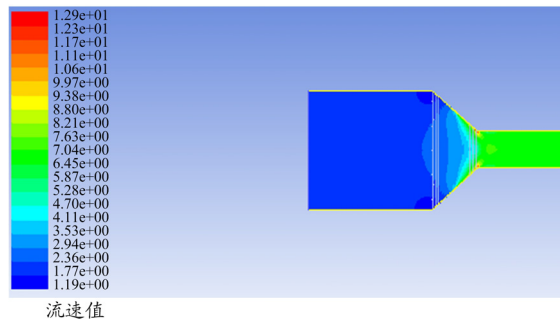


图9 水流速度变化图(单位:m/s)

值,根据文丘里管的设计尺寸和放大原理可知,水流经文丘里管放大倍数为 13.3 倍。图 9 中水流速度的变化表明,水流从初始速度到最终速度放大了 11.71 倍。

根据上述分析可知,在颈缩截面处的水流因截面颈缩导致其受力发生改变,水流速度增大的同时使文丘里管的内壁颈缩处发生了较大的应变变化,水流速度放大的同时也受到了来自文丘里管内壁的摩擦阻力作用,导致水流流速减少了 1.59 倍。在对文丘里管的材料选取上,应选择强度大、摩擦阻力小,且耐腐蚀性的材料。在后期改进设计中,对于文丘里管颈缩截面的设计,在保证摩擦阻力小的前提下,应尽量平缓,避免截面发生突变。

3 传感器标定实验

3.1 实验内容

新型流速传感器利用 3D 打印技术进行加工,实物如图 10 所示。标定实验方案示意图如图 11 所示^[11]。

根据现有文献和以往工程实际经验发现,不同的 FBG 种类将会在一定程度上影响测试的效果和精度。通过比对国内外光栅产品,均匀 FBG 适用于温度、应变传感器的制作,符合新型流速传感器对 FBG 的基本要求。



图 10 传感器实物图

故本实验采用 2 个均匀 FBG,其参数如表 1 所示。

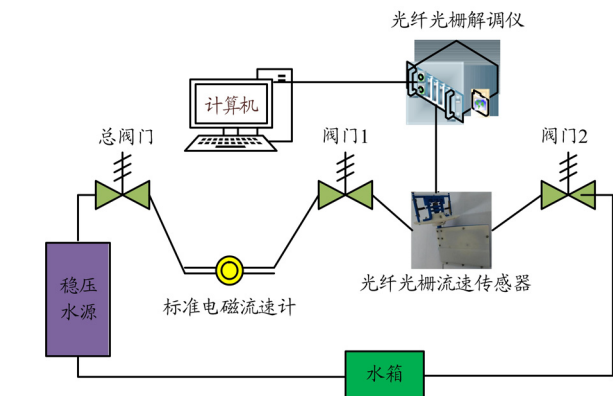


图 11 传感器标定实验方案示意图

本文通过参考国内外常见水流流速传感器监测量程^[12, 13],并结合我国跨海大桥等所处水流环境流速监测需求后,采用一维连续小波变换(swt)对振动信号进行降噪处理后,按照 1.2 节中步骤⑤所示方法提取实验数据如表 2 所示。

我们将表 2 中流速监测数据进行拟合分析,并与

表 1 FBG 参数

光栅编号	用途	中心波长	3dB 带宽 (nm)	边模抑制比 (dB)	反射率	光栅长度
1	测试	1550.008	0.180	18.50	92.92%	10 mm
2	温度补偿	1567.033	0.186	19.75	92.06%	10 mm

表 2 FBG 流速传感器测试实验数据

第一次实验		第二次实验		理论频率 计算值 (Hz)
光栅波长变化 频率(Hz)	标准流速 (m/s)	光栅波长变化 频率(Hz)	标准流速 (m/s)	
79.589701	0.05	78.754191	0.05	84.817642
159.024973	0.1	163.897541	0.1	169.635284
240.057984	0.15	242.577101	0.15	254.452926
410.213452	0.25	399.702654	0.25	424.088210
480.297557	0.3	500.012867	0.3	508.905852
789.057891	0.5	800.052795	0.5	848.176421
1105.279865	0.7	1110.687095	0.7	1187.446989
1579.443567	1	1679.587092	1	1696.352841
3390.157658	2	3378.025678	2	3392.705683
4968.712461	3	5000.257103	3	5089.058524
6513.887526	4	6659.729417	4	6785.411366
8189.229901	5	8310.889573	5	8481.764207

理论值频率进行对比,得出的采集频率与理论值对比分析图如图 12 所示。可以看出,2 次实验采集频率曲线均主要分布在理论值上方,实验数据拟合趋势线均为一条线性直线,即 $y=0.0006x$,故该传感器监测数据与实际测量流速之间存在 $V=0.0006f$ 的线性关系,由式(3)可知流速与频率的理论曲线为 $V=0.0005895f$ 。两者相比存在一定的误差。

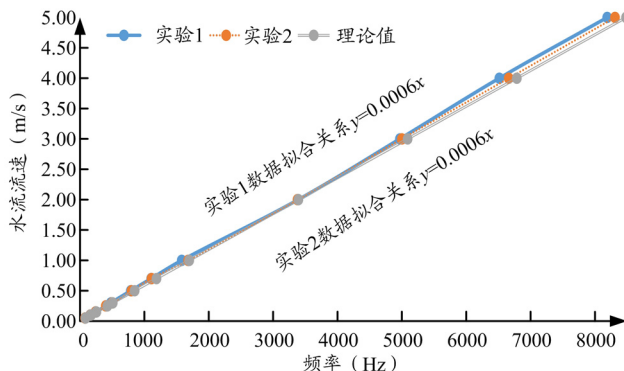


图 12 实验采集频率与理论值对比分析图

本文将实验频率值与理论频率值进行误差百分比分析, 对比分析图如图 13 所示。可以看出, 理论计算频率与实际监测频率存在一定的误差, 但误差较小, 始终保持在 7% 以内, 表明新型流速传感器在 0.05~5 m/s 流速范围内具有较高的测试精度。

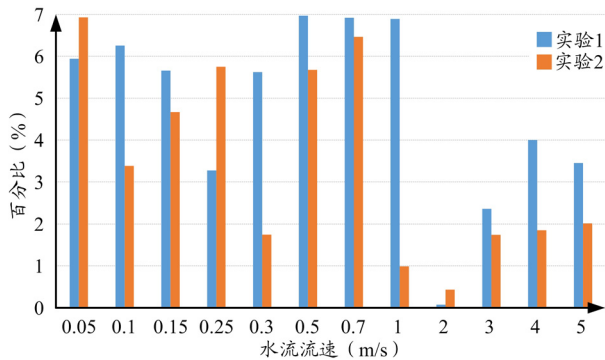


图 13 误差范围对比分析图

3.2 实验误差分析

流速实验误差主要来源于 3 个方面:

①水轮的灵敏度: 新型流速传感器主要利用水轮转动进行受力传感, 但其传递效率并非理想状态下的 100%, 而是存在一定的消耗^[14,15], 水轮受力越灵敏、传感器测量数据越准确。本次实验用传感器水轮结构采用 3D 打印技术加工, 灵敏度不够高, 导致后期测量较大水流流速时测试精度偏低。

②传感器整体结构加工精度: 传感器所用加工技术的加工方法严重影响传感器测试性能, 传感器加工越精密、测量性能越好, 这是影响新型流速传感器实验误差的原因之一。

③简支梁灵敏度: 新型流速传感器所用监测光栅粘贴于简支梁上, 若加工的简支梁灵敏度不够好, 强度不够均匀, 容易导致 FBG 感知振动频率变化能力减弱, 产生实验误差。

4 结束语

本文研究内容主要是基于 FBG 传感技术, 围绕水流流速监测需求, 对设计的新型流速传感器进行了仿真分析和标定实验, 取得了一些有益的研究成果, 并得出了如下结论:

①本文提出的基于 FBG 传感技术的水流流速监测传感器, 可实现水流流向自适应监测功能和正向流速测量功能。传感器对水流流速进行增敏放大, 可实现低流速水流的精确测量。通过性能实验分析可知, 传感器在 0.05~5 m/s 流速监测范围内具有较高的测

试精度, 误差范围始终保持在 7% 以内, 满足实际跨海大桥等水中结构物所处水流环境水流流速监测需求。

②采用 ANSYS 对传感器水轮结构受力分析, 为水轮结构选择强度大、受力灵敏和耐腐蚀性强的加工材料提供依据; 根据 Fluent 对文丘里管流固耦合分析结果可知, 文丘里管内壁会对水流产生摩阻力影响, 导致文丘里管出水口水流流速与理论值相比减少约 1.59 倍, 因此, 在后期传感器加工时应提高颈缩截面的光滑程度。

③根据实验误差来源分析, 流速传递机构数量越多带来的误差源越多, 后续传感器应进一步简化设计, 主要传感构件应采用精密度更高的加工方式。对于不同光栅种类可能带来的测试精度影响, 后续将考虑采用不同类型的光栅进行实验验证, 以达到提高测试精度的效果。

参考文献:

- [1] 钟诚. 光纤光栅流速传感及新型器件研究 [D]. 天津: 南开大学, 2011.
- [2] 李康宁. 光纤光栅流速传感器 [D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
- [3] 李进军, 常新龙, 宋晓东, 等. 光纤光栅传感技术及其应用 [J]. 光机电信息, 2003(10): 9-13.
- [4] 王冬生. 基于光纤光栅系统的流量测量研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013.
- [5] HILL K O, MALO B, BILODESU F, et al. Bragg Grating Fabricated in Monomode Photosensitive Optical Fiber by UV Exposure Through a Phase Mask [J]. Applied Physics Letters, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [6] MELTZ G, MOREY W W, GLENN H. Formation of Bragg Gratings in Optical Fibers by a Transverse Holographic Method [J]. Optics Letters, 1989, 14(15): 823-825.
- [7] 杨帆. ANSYS 流固耦合离心风扇的强度计算 [J]. 西安科技大学学报, 2015, 35(1): 100-104.
- [8] 蒋勇其. 冲击式水轮机流固耦合数值模拟研究 [D]. 武汉: 武汉大学, 2017.
- [9] 郭海军, 郭鹏程, 廖伟丽, 等. ANSYS 在水轮机部件流固耦合振动分析中的应用 [J]. 水电能源科学, 2004, 22(4): 64-66.
- [10] 张小栋, 吴冰, 谢思莹. 涡轮叶片三维叶尖间隙光纤检测系统 [J]. 光学精密工程, 2018, 26(7): 1578-1587.
- [11] 尚盈, 刘小会, 王昌, 等. 光纤流量非侵入式测试系统 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2001-2006.
- [12] 声学多普勒流速剖面仪产品说明书 [Z]. 上海: 上海精导科学仪器有限公司, 2018.
- [13] 陈建军, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器 [J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1136-1139.
- [14] 曹海东. 基于光纤传感器的冲击 / 流量及温度监测技术研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
- [15] 蒋善超, 隋青美, 王静, 等. 流速 / 温度共采的光纤布拉格光栅涡轮流速传感器 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(10): 6-6.