

文章编号:1672-3031(2015)06-0435-07

基于布拉格光纤光栅的静冰压力传感研究

叶秋红¹, 秦建敏^{1,2}, 张丽¹, 张俊¹, 邓霄¹

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 新型传感器与智能控制教育部重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要: 针对现有电传感器在高寒地区测量静冰压力存在的问题, 提出了一种基于布拉格光纤光栅的静冰压力传感测量系统, 可实现对静冰压力的定点在线测量。通过测得冰层内部静冰压力和温度同时变化过程中的光纤光栅布拉格波长, 经过温度补偿消除了静冰压力测量过程中温度的影响, 利用压力与布拉格光栅中心波长的关系得到静冰压力的测量值。同时, 利用混沌光源良好的互相关性, 通过相关峰的位置, 实现了对静冰压力的定点测量。本实验对-10℃~-5℃温度范围内, 实验室条件下的模拟静冰压力进行了测量, 对系统进行了温度补偿, 温度补偿曲线线性拟合度为99.56%, 有效地消除了交叉敏感, 可满足实际工程应用中静冰压力的测量要求。

关键词: 布拉格光纤光栅; 静冰压力; 温度补偿; 互相关; 混沌光源

中图分类号: TV875

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2015.06.006

1 研究背景

高纬度地区, 冰在消融过程中因膨胀产生巨大的静冰压力经常使河岸护坡和水工建筑物遭到破坏, 威胁着大坝及人们的财产安全。国内外许多学者对静冰压力进行了大量的试验和理论探索。Mayne等^[1]利用原型观测法对大量的冰进行了监测。Shi Qingzeng等^[2]进行了大量的冰力物理模型试验, 补充了原型观测的诸多不足。Wang S等^[3]运用数值分析方法对冰进行了结构与相互作用的研究。黄焱等^[4]采用有限元方法进行可数字模拟仿真计算, 建立计算模型并施加相应的边界条件及荷载, 使静冰压力测量在精度上达到较高的水平。受到低温及复杂恶劣野外环境的影响, 静冰压力测量方法受限、数据匮乏, 因此从理论上寻找新的并且能够应用于工程实际的静冰压力测量方法, 是一个有着重要意义的研究课题。

光纤光栅具有结构简单, 体积小, 抗电磁干扰, 耐腐蚀等诸多传统传感元件不具备的优点, 已经应用于石油, 化工, 桥梁, 大坝等领域。光纤光栅在传感领域应用中, 对压力和温度进行区分测量是研究的关键。目前, 针对这一问题, 主要有两种方法, 一种是采用复合传感方式传感, 即采用光纤光栅对, 或者直接与其他高精度温度传感器联用。另一种就是对光纤光栅进行特殊封装, 使光纤光栅对其中一个参量进行增敏。1996年, M.G.XU等^[5]将光纤光栅固定在中空玻璃球的结构中, 利用玻璃球的放大作用, 对压力进行增敏。2006年, H. Ahmad等^[6]将光纤光栅通过聚合物封装在铝板上进行封装, 研制出了高灵敏度的压力传感器。2010年, Frantisek Urban等^[7]采用金属平膜片作为增敏弹性元件, 膜片中心形变导致光纤光栅受到挤压, 实现压力的测量。2011年, Kort Bremer等人结合F-P和光纤光栅设计了用于对高温气流的动态压力和温度进行测量的传感器^[8-9]。近几年, 国内光纤光栅传感应用取得了突飞猛进的发展, 南开大学的刘云启等人对不同聚合物封装的光纤光栅压力传感器的灵敏度做了实验研究, 在10 MPa的范围内, 使光纤光栅的压力灵敏度相对于裸光纤 Bragg

收稿日期: 2015-05-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279122, 51205273); 国家自然科学基金中俄国际合作交流项目(51511130042); 水利部公益性行业专项经费项目(1261530110110); 山西省青年科技研究基金项目(2015021097)

作者简介: 叶秋红(1990-), 女, 湖北广水人, 硕士生, 主要从事基于光纤布拉格光栅冰压力传感方面的研究。

E-mail: yeqiu hong725@163.com

通信作者: 秦建敏(1951-), 男, 山西静乐人, 博士, 教授, 主要从事冰情检测方面的研究。E-mail: qinjianmin@tyut.edu.cn

光栅最高提高了20倍^[10]。乔学光提出了一种薄壁圆柱壳体封装光纤光栅,使两个光纤光栅受到温度影响而引起的波长漂移相同,实现了对压力温度的区分测量^[11]。这些方法都能够对温度和压力实现区分测量,但是对工艺要求较高,成本大,同时对冰压这种特殊环境下的压力检测受限。

本实验对光纤光栅传感进行了理论和实验分析,实验结果表明光纤光栅波长与温度呈良好线性关系,通过对系统进行温度补偿,实现了应力和温度的交叉解敏。随着混沌互相关测距的提出^[12-13],用混沌光的可调谐性对波长进行解调,根据相关峰的位置对传感器进行准确定位,实现了静冰压力的定点检测,具有非常广阔的工程应用前景。

2 理论分析

2.1 光纤光栅传感原理 应力和温度变化均会引起光纤光栅传感器反射波长的改变,二者对反射中心波长的影响是相互独立的,可以进行线性叠加。在冰生消过程中,静冰压力的变化通常也伴随内部冰温的变化。对于压力变化过程中温度也随之变化的交叉敏感问题,通常采用两种方法解决,一种是利用光纤光栅与独立的温度传感器联用,另一种就是利用增敏材料对传感器进行封装,使传感器只对其中一个参量敏感,从而削弱另一参量的影响。本实验采用光纤光栅与独立高精度温度传感器联用,对温度进行补偿,从而将温度和应变对光纤光栅反射波长的影响分离。

光纤光栅传感本质上是通过对光纤波导条件的改变,使得光纤光栅反射光中心波长产生变化进行调制的。当入射宽带光进入FBG,经过Bragg光栅后,波长满足Bragg方程的光波会被耦合到反向传输的模式,形成反射波。反射波的中心波长 λ_B 和光纤光栅折射率 n_{eff} 及光栅周期 Λ 的关系表达式为:

$$\lambda_B = 2n_{eff} \Lambda \quad (1)$$

当应变恒定,仅改变温度时,由于热膨胀效应和热光效应分别会改变光栅周期和光纤光栅折射率,从而使得反射光的中心波长发生改变,温度发生变化时,因热膨胀效应引起的光栅周期 Λ 的改变:

$$\Delta\Lambda = \alpha\Lambda\Delta T \quad (2)$$

式中: α 为光纤的热膨胀系数。温度发生变化时,热光效应引起的光栅有效折射率 n_{eff} 的变化为:

$$n_{eff} = \zeta n_{eff} \Delta T \quad (3)$$

式中: ζ 为光纤的热光系数。

对式(1)求导可得

$$\Delta\lambda_{B1} = 2\Delta n_{eff} \Lambda + 2n_{eff} \alpha\Lambda\Delta T \quad (4)$$

将式(2)、式(3)代入可求得

$$\Delta\lambda_{B1} = 2n_{eff} (\alpha + \zeta)\Lambda\Delta T = \lambda_{B1} (\alpha + \zeta)\Delta T = K_T \Delta T \lambda_{B1} \quad (5)$$

当温度变化在一定范围内,一般认为光纤光栅的热膨胀系数和热光系数为常量。由此可知,在一定温度范围内,光纤光栅反射光中心波长与温度变化呈线性关系。

温度场恒定时,应变引起的光纤光栅周期的变化:

$$\Delta\Lambda = \varepsilon\Lambda \quad (6)$$

另外,弹光效应引起的光纤光栅有效折射率的变化:

$$\Delta n_{eff} = \frac{n_{eff}^3 [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})]}{2} \varepsilon \quad (7)$$

式中: p_{11} 和 p_{12} 为光纤光栅应变张量的分量, v 为泊松比, ε 为施加在光纤光栅上的应变。将上式代入式(4)可知,应力导致光纤光栅的波长变化:

$$\Delta\lambda_{B2} = 2n_{eff} \Lambda \left\{ -\frac{1}{2} n_{eff}^2 [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})] \right\} \varepsilon + 2n_{eff} \Lambda \varepsilon \quad (8)$$

定义光纤光栅的有效弹光系数 p_e :

$$p_e = \frac{n_{eff}^2 [p_{12} - v(p_{11} + p_{12})]}{2} \quad (9)$$

则变化波长:

$$\Delta\lambda_{B2} = (1 - p_e)\lambda_B \varepsilon - (1 - p_e)\lambda_B \sigma / E = K_\varepsilon \varepsilon \lambda_B \quad (10)$$

σ 为轴向应力, E 为光纤光栅的弹性模量。对于熔融石英光纤光栅, 线性热膨胀系数 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}$, 热光系数 $\xi = 0.7 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, $p_{11} = 0.121$, $p_{12} = 0.270$, $n_{eff} = 1.456$, $v = 0.17$, $E = 7.0 \times 10^{10}$ Pa。所以温度灵敏度系数为 $K_T = 0.755 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$, 实际测量中, 二者共同导致光纤光栅反射中心波长发生变化, 其改变量为:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \varepsilon \lambda_B + K_T \Delta T \lambda_B = (K_\varepsilon \varepsilon + K_T \Delta T) \lambda_B \quad (11)$$

在实际测量中, 通常先测量二者共同导致的光纤光栅中心波长的变化, 然后测量温度单独引起的光纤光栅中心波长的漂移, 通过补偿进而得到施加在光纤光栅上的应变引起的中心波长的变化。

2.2 混沌激光互相关压力定点测量原理 混沌激光信号有非周期、宽频谱、类噪声等特性, 做互相关时, 由于其频谱宽, 相关曲线呈现更加尖锐的 δ 函数线性形状, 具有良好的相关特性。利用光纤光栅反射信号与参考信号做互相关, 通过延迟时间得到主相关峰偏离原点的位置确定对应传感器的位置, 从而实现对静冰压力定点测量。

利用互相关对静冰压力实现定点测量原理如图 1。混沌源发出的宽带光源经过可调谐滤波器后产生窄带光, 再经过耦合器将光源分成两部分, 一部分作为参考光, 参考光直接进入光电探测器; 另

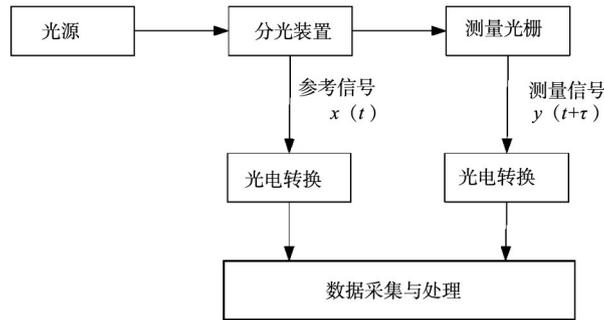


图1 互相关定点测量原理

一部分经过检测光纤光栅产生反射, 反射光进入光电探测器与参考信号同时被示波器采集。

设参考信号为 $x(t)$, 测量信号为 $y(t + \tau)$, 其中 τ 为测量信号经过光纤光栅反射后的测量信号相对参考信号的延迟时间。互相关函数:

$$R_{xy}(t) = x(t)y \otimes (t + \tau) \approx k\delta(t) \quad (12)$$

其中 \otimes 为对两路采集信号做相关运算。由式(12)可知, 测量信号与参考信号有 δ 函数线性。分光装置将光源发出的光分为两部分, 测量信号经过光纤传输进入测量光栅经过反射最终进入数据采集装置, 参考信号直接进入数据采集装置。通过互相关的峰值可以得到对应的延迟时间 τ , 时间延迟是光通过测量光栅往返后相对参考信号经过的光程差产生的。经过下式计算可以得到测试点距参考点的距离:

$$L = c \cdot \tau / 2n \quad (13)$$

式中: c 为光速; n 为传输光纤相对于空气的折射率。

3 实验室静冰压力模拟实验

3.1 实验室静冰压力模拟实验 本实验包括混沌激光产生, 光纤光栅传感测量以及互相关数据处理

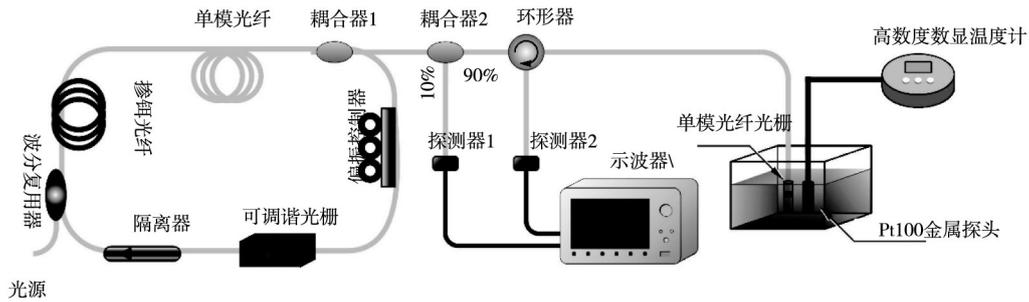


图2 实验室静冰压力测量系统

3个部分。

如图2所示的环形腔为混沌激光产生装置。半导体激光器(LD)发出980 nm的激光，通过耦合器(WDM)耦合到掺铒光纤(EDF)进行放激光大，经过3 km的单模光纤(SMF)进行传输，可调谐光纤光栅将混沌光源的波长控制在1 540.26到1 571.86 nm之间。隔离器限制了光的单向传输。从环形腔出来的窄带混沌激光经过耦合器输出10%的光进行检测，90%的光信号在环形腔里循环传输。输出的检测信号经过第二个耦合器将10%的光作为参考信号，90%的光进入检测光纤光栅，反射光经过环形器输出。两路光经过光电转换进入示波器进行采集。

压力测量过程中，将光纤光栅和高精度温度传感器探头一起放入盛水玻璃容器，对整个容器降温，使其结冰。经过长时间冻结后取出容器，对装置进行一定的隔热处理，在室温条件下，使其以极其缓慢的速度升温，实时测量冰内部温度升高过程中中心波长的变化，从而实现了消融过程中静冰压力的测量。

调节可调谐光纤光栅，当可调谐光纤光栅与被测光纤光栅中心波长匹配时，互相关系数大，产生尖锐的相关峰，当波长与测试光纤光栅产生微小的漂移，相关系数迅速减小，相关峰淹没在基地噪声中，如图3所示。在室温下，不对测试光纤光栅施加应力，调节可调谐光纤光栅，当波长为1 549.96 nm时，相关系数为0.679，调谐光栅发生漂移，相关峰即消失。相关峰与原点的距离即为测试点相对参考点的位置，利用相关测距测得测试光纤光栅的位置为距参考点563.8 cm处，与实际测量光纤光栅位置相符。通过相关峰确定测量点的几何位置这一特性，对于进一步实现多点静冰压力的定点测量是非常重要的。

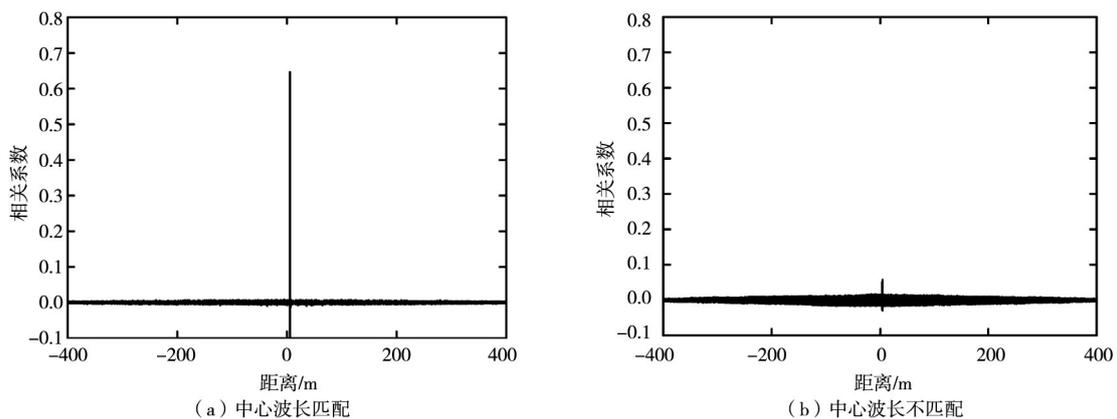


图3 波长匹配与不匹配对相关系数的影响

实验中，温度变化为-10℃~-5℃，测量光纤光栅的受温度和应力变化共同作用下，在冰内部温度升高时，实测得中心波长变化如表1。

3.2 温度补偿实验 在压力测量试验中，若是采用两个光纤光栅在等温度条件下，对其中一个光纤光栅施加应变进行对比试验来实现温度补偿，在理论上可行，但在试验中难以实现。本实验用单个

表1 不同时刻光栅中心波长及变化

实验时刻	实时温度 $t/^\circ\text{C}$	光栅波长 λ/nm	温度补偿前 $\Delta\lambda_1/\text{nm}$
1	-10.0	1549.442	0.518
2	-9.5	1549.494	0.466
3	-9.1	1549.514	0.446
4	-8.5	1549.558	0.402
5	-8.0	1549.586	0.374
6	-7.5	1549.606	0.354
7	-7.0	1549.638	0.322
8	-6.6	1549.650	0.310
9	-6.2	1549.674	0.286

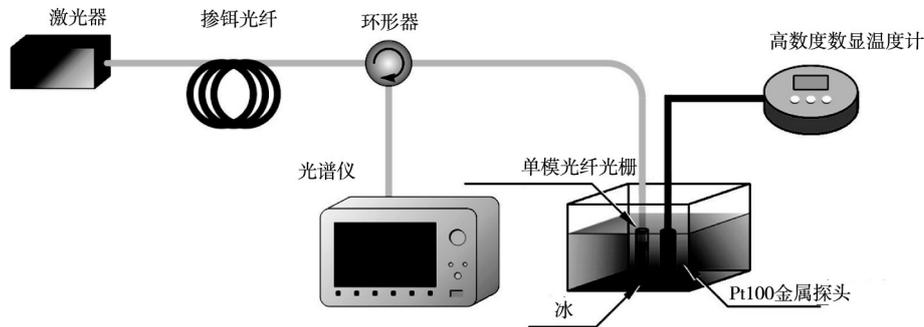


图4 温度补偿实验装置

光栅利用光谱解调法进行温度实验，得到相应温度下的反射中心波长。

如图4，将光纤光栅悬空置于箱内，测量中采用PT100高精度数显温度计进行温度精确测量，用高精度光谱仪对光纤光栅反射光中心波长进行解调。实验中，将被测光栅和高精度温度计探头一并放置于低温保温箱，分别记录不同温度点对应光纤光栅反射波的中心波长，中心波长随温度变化曲线如图5，得到的拟合直线为

$$y = 0.01158x + 1549.77374 \quad (14)$$

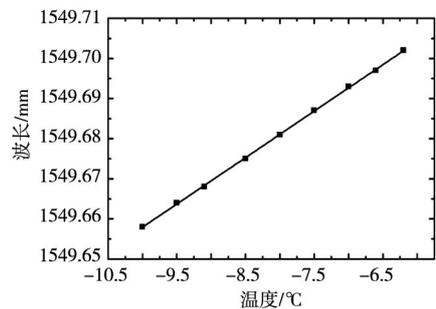


图5 温度与波长的关系曲线

经过温度补偿后，静冰压力作用下光纤光栅中心波长发生的漂移量为 $\Delta\lambda_2$ 。代入式(9)一式(10)可得实验记录点静冰压力数值，见表2。

表2 补偿后的光栅中心波长及变化

实验点	温度补偿实验中光栅波长 λ/nm	温度补偿后 $\Delta\lambda_2/\text{nm}$	静冰压力计算值/MPa
1	1549.658	-0.216	12.442
2	1549.664	-0.17	9.792
3	1549.668	-0.154	8.870
4	1549.675	-0.117	6.739
5	1549.681	-0.095	5.472
6	1549.687	-0.081	4.666
7	1549.693	-0.055	3.168
8	1549.697	-0.047	2.707
9	1549.702	-0.028	1.613

4 结论

本文设计了基于光纤光栅的静冰压力传感系统,通过实验室进行了单点冰压力以及温度补偿实验,对温度及应变引起的中心波长漂移进行了理论和实验验证。在温度实验中,光纤光栅的中心波长和峰值波长呈线性变化,较好地对系统进行了补偿;混沌互相关定位测量结果与实际光纤光栅位置相符,证明了通过相关峰确定测量点的几何位置是可行的,这对于进一步实现多点静冰压力的定点测量是非常重要的。实验表明,通过光纤光栅进行更进一步的封装,同时对系统进行优化,该系统即能够实际应用于静冰压力定点准确测量。

参 考 文 献:

- [1] Mayne D C, Brown T G . Rubble pile observations[C]//Proc . of the 10th International Offshore and Polar Engineering Conference . Seattle, USA. 2002, 1: 596-599 .
- [2] Shi Qingzeng, Song An, Huang Yan . An experimental Study of several issues regarding the ice force on conical structures[J] . China Ocean Engineering, 2002, 16(4): 561-568 .
- [3] Wang S . A dynamic model for breaking pattern of level ice by conical structures[J] . Mechanical Engineering Series, 2001, 156 .
- [4] 黄焱,史庆增,宋安 . 冰温度膨胀力的有限元分析[J] . 水利学报, 2005(3): 314-320 .
- [5] Xu M G, Geiger H, Dakin J P . Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing[J] . Electronics Letters, 1996, 32(2): 128-129 .
- [6] Ahmad H, et al . High sensitivity fiber Bragg grating pressure sensor using thin metal diaphragm[J] . DEEE Sensors Journal, 9(12): 1654-1659 .
- [7] Urban F, Jaroslav Kadlec, Radek Vlach . Design of a pressure sensor based on optical fiber Bragg grating lateral deformation[J] . Sensors, 2010, 10: 11212-11225 .
- [8] Bremer K, et al . Fiber optic pressure sensor system for high temperature exhaust gas flows[C]//21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Ireland, 2011 .
- [9] Bremer K, et al . Feedback stabilized interrogation technique for EFPI/FBG hybrid fiber-optic pressure and temperature sensors[J] . IEEE Sensors Journal, 2012, 12(1): 133-138 .
- [10] 乔学光,陈懿,贾振安 . 基于双光纤光栅温度压力同时区分测量的研究[J] . 光电子·激光, 2010(1): 12-14 .
- [11] 刘云启,郭转运,刘志国,等 . 光纤光栅的压力传感特性研究[J] . 光子学报, 1999(5): 60-62 .
- [12] WANG An-bang, WANG Yun-cai . Chaotic correlation optical time domain reflectometry[J] . Science China: Information Sciences, 2010, 53(2): 398-404 .
- [13] WANG Y C, WANG B J, WANG A B . Chaotic correlation optical time domain reflect meter utilizing laser diode [J] . IEEE Photonics Technology Letters, 2008, 20(19): 1636-1638 .
- [14] 王云才,马建议,韩晓红,等 . 混沌激光相关法测距系统的信号采集与处理[J] . 应用光学, 2011(3): 568-573 .
- [15] 王斐斐,张丽,杨玲珍,等 . 基于混沌光纤激光的准分布式布拉格传感网络[J] . 光学学报, 2014(8): 96-100 .
- [16] 张敬花,乔学光,冯忠耀,等 . 基于弯曲伸张结构的光纤光栅传感研究[J] . 物理学报, 2012(5): 242-248 .
- [17] 王宏亮,宋娟,冯德全,等 . 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J] . 光学精密工程, 2011(3): 545-551 .
- [18] 杨秀峰,张春雨,童峥嵘,等 . 一种新型光纤光栅温度传感特性的实验研究[J] . 中国激光, 2011(4): 147-150 .
- [19] 孙伟民,姜福强,刘志海,等 . 利用掺铒光纤光栅实现应变测试中的温度补偿[J] . 哈尔滨工程大学学报, 2007, 6: 719-722 .

Static ice pressure sensing based on fiber Bragg grating

YE QiuHong¹, QIN Jianmin^{1,2}, ZHANG Li¹, ZHANG Jun¹, DENG Xiao¹

(1. Physics and Optoelectronic Engineering College, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Aiming at the existing problems of electric sensors in measuring the static pressure in the alpine region, a static ice pressure sensing system based on the fiber Bragg grating sensor is proposed. Accurate online measurement of the fixed-point static ice pressure can be realized. The Bragg wavelengths of the fiber Bragg grating sensor in the ice are measured under different temperatures and strains. Through temperature compensation to eliminate the effect of temperature, strain response of fiber Bragg grating wavelength was obtained. Meanwhile, based on the good cross-correlation of chaotic light, the correlation peaks can locate the position of the sensor. Within $-10 \sim -5^\circ\text{C}$, static ice pressure under laboratory conditions was measured. Temperature compensation was made, and the fitting linearity is 0.9956. So the cross-sensitivity can be eliminated effectively. The requirements of practical engineering applications to measure the static ice pressure can be satisfied.

Key words: fiber Bragg grating; static ice pressure; temperature compensation; cross-correlation; chaotic light

(责任编辑: 李福田)

(上接第 434 页)

Advances in research on sub-division and characteristic scales of open channel flows with vegetation

YAN Jing^{1, 2}, CHEN Yang², TANG Hongwu^{1, 2}, DAI Kun², ZHANG Ming²

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;

2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Vegetation is an essential element in most natural ecological rivers. Its biological characteristics change turbulent structures of the river significantly. Due to the strong inhomogeneity of flow in the vertical direction, there still are no universal expressions of the turbulent statistical properties along water depth in vegetated open-channel flows. Therefore, flow sub-division and corresponding characteristic scales of these regions have gained more focuses. In this paper, the research achievements of sub-division and characteristic scales are reviewed in terms of traditional and vegetated open-channel flows. The results based on the velocity distribution and turbulent structures are analyzed and summarized respectively. The paper proposes that to partition the flow into different sub-regions by combining the vortex structure with the distribution of flow characteristic parameters, determine the appropriate characteristic scales of each sub-regions and investigate the influence factors of sub-division and characteristic scales are the main research contents and tendencies.

Key words: open channel flow with vegetation; turbulence structure; flow sub-division; flow regime; characteristic scales of flow

(责任编辑: 韩 昆)