

文章编号: 1672-8785(2023)09-0028-10

基于光纤布拉格光栅的涡街 流量传感技术研究

贾振安^{1,2,3,4} 王恒超^{1,2,3,4*} 白 燕^{1,2,3,4} 樊 伟^{1,2,3,4}

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;

3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

4. CNPC 重点实验室——油藏光纤动态检测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 流量是科学研究及工业生产中的一重要参数。在众多流量测量仪表中, 涡街流量计是一种常用类型。由于光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)具有灵敏度高、体积小和抗电磁干扰强等特点, 基于 FBG 的涡街流量传感技术具有重要研究意义。概述了 FBG 涡街流量传感机理, 分析了涡街发生体下游的流体状态与升力变化。从已有研究成果入手, 分析提炼了基本型涡街发生体作用下的旋涡属性、涡街信号处理、消除管道振动和小流量测量四个关键性问题。最后, 总结并展望了该项技术利用光学方法抑制干扰信号、小口径管道涡街流量测量和 FBG 传感封装与增敏三个方面, 还提出了未来可能发展的研究方向, 以期发展新型涡街流量计。

关键词: 光纤布拉格光栅; 涡街流量计; 涡街发生体

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2023.09.005

Research on Vortex Flow Sensing Technology Based on Fiber Bragg Grating

JIA Zhen-an^{1,2,3,4}, WANG Heng-chao^{1,2,3,4*}, BAI Yan^{1,2,3,4}, FAN Wei^{1,2,3,4}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. Key Laboratory of CNPC-Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs, Xi'an 710065, China)

Abstract: Flow is an important parameter in scientific research and industrial production. Vortex flowmeter is a common type in many flow measuring instruments. As fiber Bragg grating (FBG) has the characteristics of high sensitivity, small size and strong electromagnetic interference resistance, vortex flow sensing technology

收稿日期: 2023-04-27

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS093)

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 主要从事纤维光学、光纤传感、光纤通信和光电子学等领域的教学与研究工作。

***通讯作者:** E-mail: 759105381@qq.com

based on FBG is of important research significance. The sensing mechanism of FBG vortex flow is summarized, and the changes of fluid state and lift force downstream of the vortex generator are analyzed. In addition, four key problems (the vortex properties, vortex signal processing, pipeline vibration elimination and small flow measurement) under the action of the basic vortex generator are analyzed and extracted based on the research achievement. Finally, the optical suppression of interference signal, vortex flow measurement of small diameter pipeline, FBG sensing package and sensitization are summarized and looked forward to. The possible research direction in the future is also put forward, in order to develop a new vortex flowmeter.

Key words: fiber Bragg grating; vortex street flow sensor; vortex generator

0 引言

流量是工业生产的一项重要参数, 基于卡门涡街原理设计制造的涡街流量计也是流量测量领域的重要部分^[1-2]。当流体流过涡街发生体时会产生周期性涡街信号。理论上, 通过检测涡街信号的频率就可以得到流量信息。刘明尧等人^[3]提出了一种用于液压管道流量测量的双 FBG 测量结构。他们通过建立两根光纤光栅中心波长漂移量与流量之间的传感关系, 得到两根光纤光栅的载荷灵敏度分别为 0.9907 nm/kg 和 0.8815 nm/kg, 测量范围为 0.0017 ~ 0.6 L/s。该方法具有较好的重复性且可消除温度敏感的影响。孙世政等人^[4]提出的一种基于 FBG 的小型探针式流量传感器, 可以实现对 2~30 m³/h 的流量测量, 具有压损更小、量程更宽的优点。Shoichi T 等人^[5]介绍了一种基于双光纤光栅的互相关流量计。在实验中, 该流量计可测量的下限流速为 0.05 m/s, 在 0 ~ 1.0 m/s 范围内有良好的线性关系。由于 FBG 会反射特定波长, 该中心反射波长的解调是 FBG 传感技术的关键, 而且 FBG 具有结构简单、灵敏度高、抗电磁干扰强等优势, 因此基于 FBG 的涡街流量传感技术具有很高的研究价值与应用前景。

国内外研究人员对 FBG 涡街流量传感技术的研究更加深入, 涵盖了气体和液体两类流体从低流速至中高流速的较为宽泛的范围。目前, 基于 FBG 传感的流量测量方式大多为靶式^[6]、压差式^[7]、热式^[8]等方法, 缺少对涡街流量传感技术的研究。本文重点研究 FBG 涡街流量传感技术, 分析并总结这项传感技术的

流量传感特性, 厘清该技术的核心问题, 为后续研究工作夯实基础。

1 FBG 涡街流量传感原理

由于 FBG 是一种纤芯折射率发生轴向周期性调制的无源光波导器件, 当它受到温度和应变影响时, 布拉格中心波长会发生变化。

如图 1 所示, FBG 中心反射波长 λ_B 取决于光纤栅距 Λ 和纤芯有效折射率 n_{eff} :

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

FBG 轴向应变可表示为

$$\Delta\lambda/\lambda_B = (1 - p_e)\epsilon \quad (2)$$

如图 2 所示, 以圆柱型涡街发生体为例, 当流体有粘性且作圆柱绕流运动时, 若在流动方向上存在正的压力梯度 ($dp/dx > 0$), 就会产生流动分离。

涡街产生的频率 f 与流速 U_1 之间的关系可表示为

$$f = \frac{S_r}{d} U_1 \quad (3)$$

式中, S_r 为斯特劳哈尔数, 与雷诺数有关; d 为涡街发生体迎流面的宽度。

在发生体两侧, 由于压力变化趋势不同 (见图 3), 流体会对发生体产生一个与绕流趋势相垂直的横向作用力 (称作升力 F_L), 升力的方向为从旋涡正要分离的一侧指向已分离的一侧^[9]。

对升力 F_L 进行详细推导。设该环流速度为 u , 未被扰动的流体流速为 U_1 , 则邻近柱体两端的相邻两流线之间的流速为 U , 压力为 P , 水头 h 在断面 A-B 与 A'、B' 处是相同的。

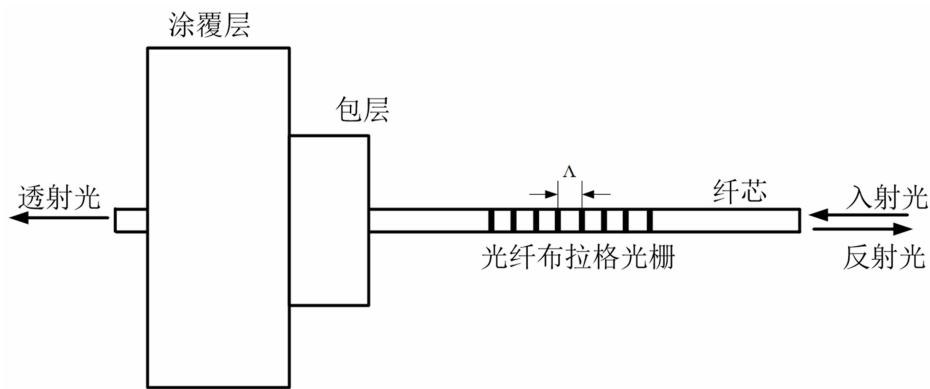
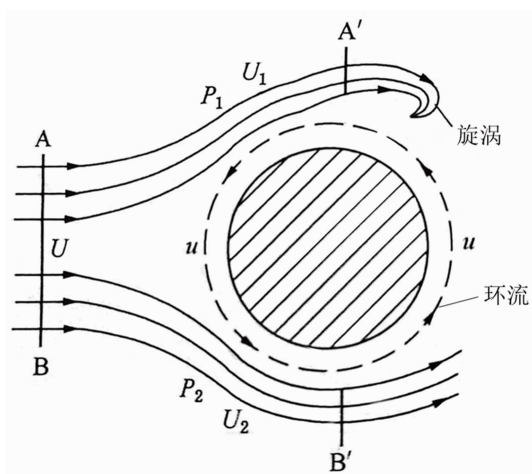


图 1 光纤光栅结构图



图 2 涡街产生原理图

图 3 旋涡分离与环流形成^[9]

根据伯努利方程，在 A、B、A'、B' 四处的总水头应相等，且 A、B 总水头相等，则可知 A'、B' 总水头也相等。

设 A'、B' 两处的压力分别为 P_1 、 P_2 ，两处的高度差可忽略不计，利用伯努利方程来比较柱体上、下侧的压力 P_1 、 P_2 ：

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{(U_1 - u)^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{(U_1 + u)^2}{2g} \quad (4)$$

由式(4)可得到压力差 $P_1 - P_2$ ：

$$P_1 - P_2 = 2\rho u U_1 \quad (5)$$

设柱体在流动方向上的长度为 d ，柱体的轴向长度为 h ，故柱体上下两侧的面积 S 相等，且 $S = dh$ 。又因为旋涡发生体的环量 $\Gamma = 2ud$ ，则有作用于柱体侧面的力 F_L (即升力)：

$$\begin{aligned} F_L &= (P_1 - P_2)S = 2\rho U_1 u S \\ &= 2\rho U_1 u dh = \rho U_1 h \Gamma \end{aligned} \quad (6)$$

根据流体力学可得，环流速度 u 与流体速度 U_1 成正比。定义与发生体形状相关的升力系数 C_L ：

$$C_L = 4u/U_1 \quad (7)$$

则升力 F_L 为

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U_1^2 dh \quad (8)$$

由式(2)、式(3)与式(8)可知，涡街发生体周围的流速变化的脉动性导致压力存在一定规律的变化，而压力脉动的频率就是涡街信号产生的频率 f 。这种压力脉动以升力 F_L 的方式作用在发生体上，通过置于涡街发生体内部

或下游并粘贴在悬臂梁上的 FBG 的波长移位置来得到流体流量。

2 FBG 涡街流量传感技术分析

2.1 不同的涡街发生体对涡街信号检测的分析

涡街发生体是流量测量的关键部件, 其主要作用是在流量管道内作为阻流体, 并使阻流体下游产生沿管道轴向分布的周期性涡街信号。根据结构的不同, 涡街发生体可以分为单发生体和双(多)发生体; 柱体形状主要为圆柱、矩形柱和三角柱, 其余形状均可视为三者的变形或叠加^[9-10]。Razsa M R 等人^[11]为研究几种涡街发生体周围流体流动状态与卡门涡街的关系, 开发了一种卡门涡街可视化的方法。他们可以更直观地观测到发生体周围的流动状态, 从而进一步研究更优良的发生体和更准确的流量计量装置。

2.1.1 圆柱型涡街发生体

圆柱型涡街发生体形状简单, 容易加工, 并可达到较高的加工精度, 且有较高的 S_r 。其可控因素仅仅是轴向截面圆形的直径, 同时它也是最早研究的柱体。但旋涡分离点不固定, 产生的旋涡强度与稳定性不能满足进一步研究的要求, 因此现在较少选用圆柱型发生体。经研究发现, 圆柱型发生体的 S_r 在 0.20 左右。

2.1.2 三角柱型涡街发生体

三角柱型涡街发生体同样也是比较早出现的发生体, 1969 年被美国 Eastech 公司首次应用在热敏式涡街流量计中。如图 4 所示, 三角柱型发生体的截面形状可视为一个等腰梯形与一个矩形拼接而成, 也称“楔形多面体”。矩形长边 d 正对着迎流方向; 矩形短边棱 c 有强迫旋涡在此处产生并同步分离的作用^[12]。在设计该发生体时通常需要关注矩形长边 d 与管道内径的比值、矩形长边 d 与发生体轴向长度 b 的比值。研究发现, 三角柱型发生体的斯特劳哈尔数为 0.16。

在日本 Tokico 公司的电容式涡街流量计中, 采用图 5(a)所示的向流体运动方向内凹的

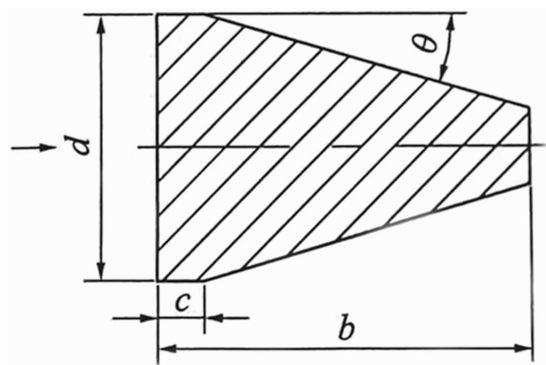


图 4 三角柱型发生体的轴向截面^[9]

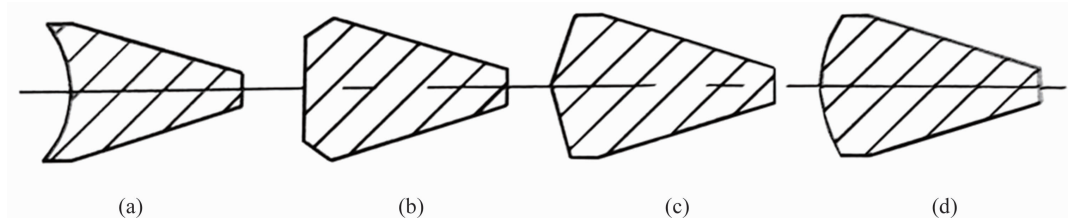
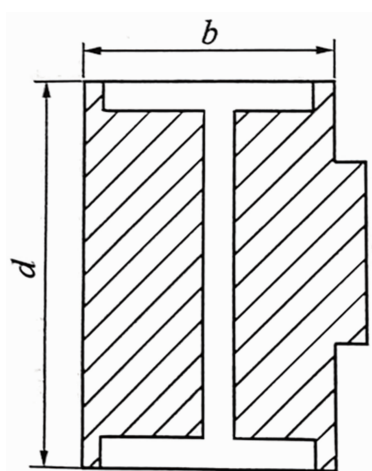
圆弧面。内凹的曲面可以提高旋涡的强度, 但在脏污介质测量时无法使用。随后将内凹结构进行调整, 引入图 5(b)、图 5(c)与图 5(d)所示的外凸形态。这样不仅可以减少旋涡发生体的阻力系数、降低压力损失, 而且还可防止脏污介质的附着与滞留。

2.1.3 矩形柱型涡街发生体

矩形柱型涡街发生体最早应用在英国 Kent 公司研制的电容式涡街流量计上, 十分巧妙地利用了矩形的形状特点。如图 6 所示, 将矩形的长边 d 对着流体流动方向(作为迎流面), 并将两个差动电容检测元件置于矩形两短边 b 处, 用于感应发生体两侧的压力波动, 从而测量流量。

由于矩形柱型发生体的特殊结构设计, 这类发生体会产生很强烈的旋涡, 但旋涡分离后会迅速增压, 无法充分利用管壁反射回来的能量。所以通常会在下游设置一个小的凸起平台, 改善高流速区域的流量特性。

对以上三种基本型涡街发生体产生的涡街信号进行分析后可知, 优良的涡街发生体应当是具备旋涡强度高、稳定性强、信噪比高、抗压抗振性强等特点的均匀柱体。圆柱型涡街发生体的旋涡分离点会随着雷诺数 Re 的增大而后移, 对观测旋涡和测量涡街信号有较大影响。矩形柱型涡街发生体虽然结构简单、产生的旋涡强度足够强烈, 但旋涡的稳定性较差, 并且减速增压较快, 能量利用率较低。这使得三角柱型涡街发生体的综合性能比较优良。后续可从涡街发生体的阻力特性与流量测量原理

图 5 三角柱型发生体轴向截面的四种优化^[9]图 6 矩形柱型发生体的轴向截面^[9]

出发,提高流量测量精度并设计性能优良的涡街发生体。

2.2 涡街信号的处理分析

涡街信号是管道内流体冲击涡街发生体时所产生的正弦信号。大多数研究都是采用在涡街发生体上开设导压腔的方式,将 FBG 粘贴于悬臂梁上,并将悬臂梁放置在导压腔内来检测压力脉动,然后经分析得到旋涡产生频率,进而计算流量信息。

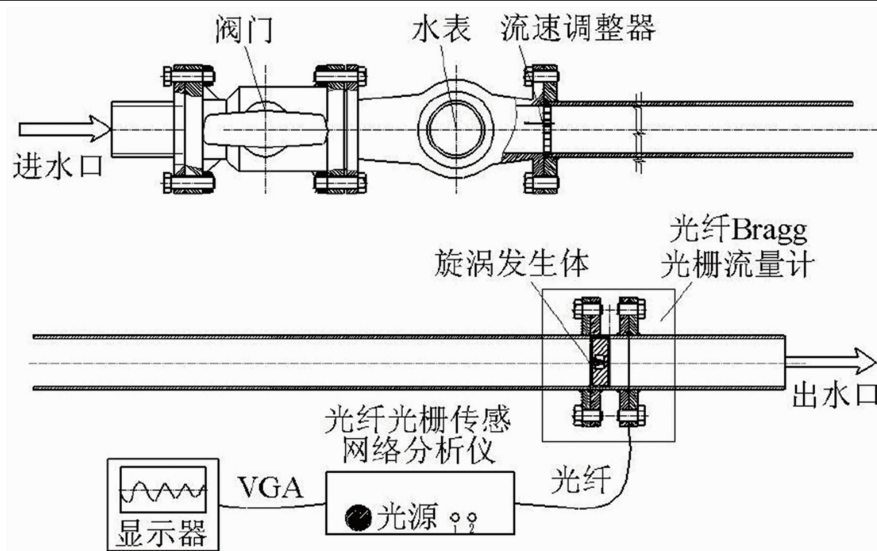
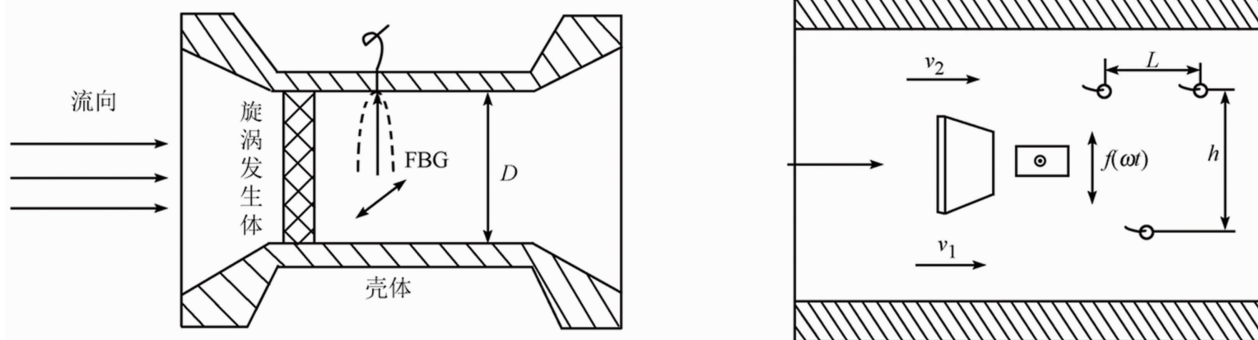
赵学芳^[13]通过重整化群(Renormalization Group, RNG) $k-\epsilon$ 模型,利用有限元分析软件仿真设计出一种类三角柱发生体的光纤光栅空气流量测量的传感系统。他对空气流速按照 5.1~18.8 m/s 进行测量,并利用快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法获得涡街信号的功率谱,最终得到涡街产生频率为 49.96~183.72 Hz。该项设计通过计算流体力学仿真证实了 FBG 对空气流的流量测量。但 FFT 算法相对复杂,采集信号较为庞大,操作难度较大,但它对干扰噪声有较好的抑制作用。

王国武等人^[14]改进了涡街信号的源头,提出了一种具有较好的抗振动与抗电磁干扰性能的涡街流量传感器。该传感器的流量测量范围最大可达 4100 m³/h,最小流速为 2 m/s,可以抵抗 1.5g 以下的机械振动,同时也具有超过 20:1 的宽量程比,提升了此领域的智能化发展。

全克帅等人^[15]设计了一种基于旋涡发生体的 FBG 流量计,在涡街发生体轴向中部开设导压腔(内部放置粘贴在悬臂梁上的 FBG),分析了光栅波长漂移与悬臂梁自由端挠度的关系,实现了对流体脉动式冲击的光学测量。图 7 为所设计的 FBG 流量计的原理图。实验采用的流体为液态水,流量以 0.189~0.346 m³ 进行测量,分别对应涡街产生的频率为 11~22 Hz。最终能够得到的仪表系数为 3.659,非线性误差可达 4.38%FS,FBG 对流量的响应灵敏度可达 1.182 Hz(m³/h)。实验结果表明,涡街流量计可以比较理想地测量液体流量。

李红民等人^[16]设计了一种不受温度影响的光纤光栅涡街流量传感器。图 8 所示为该传感器发生体与 FBG 的位置关系。在发生体下游放置 FBG,根据测量发生体得到的振动与 FBG 的波长漂移来检测流量。使用 PIN 光电探测器接收涡街流量传感器的光信号,并利用带通滤波器消除低频波动,从而解决光纤光栅温度交叉敏感问题。该传感器线性度误差可达 0.42%,精度可达 $\pm 0.5\%$ FS。这种方法不仅解决了传统机电类流量计的安全问题,也在光纤流量传感领域作出了巨大的贡献。

Dong H J 等人^[17]将 FBG 封装在圆柱发生体内,采用有限元分析软件对传输管道内部的流场进行数值模拟,并利用质量-弹簧-阻尼模

图 7 实验测量原理图^[15]图 8 旋涡发生体与 FBG 的位置关系^[16]

型对光栅轴向应变进行分析,使得涡街信号对发生体的谐振冲击转换为 FBG 的轴向应变,从而实现流量探测。利用亚克力玻璃材料对发生体进行加工,提高了发生体的寿命。流量计的测试范围可达 1200~5000 L/h。当流量约为 3700 L/h 且圆柱直径为 2 mm 时,会发生剧烈的共振。该流量计检测油井流量时具有较好的测量范围。

Jin W 等人^[18]较早地利用 FBG 来探测流致振动的涡街信号。在实验过程中,噪声主要由光电检测后的电子噪声和管道振动组成,并且是光子散粒噪声的三至四倍。Cheng L K 等人^[19]设计了一种可在 300℃ 下工作的 FBG 涡街流量计,通过分析 FBG 传感信号的频谱来计量流量,且该涡街流量计具有较宽的流速测量范围。Arumuru V 等人^[20]利用光子晶体光

纤(Photonic Crystal Fibers, PCF)的模态干涉检测低流速下的涡街信号。实验最小 Re 值为 5000,并且在涡街发生体的上下游均设置阻尼器来消除泵带来的机械振动,灵敏度较高。Chen J L^[21]对涡街流量计的入口流场进行模拟仿真,对涡街信号的产出给出了稳定的入口条件,也为涡街信号的后续处理奠定了基础。Herzog J P^[22]较早地提出了一种光纤涡街流量计,将多模光纤置于涡街发生体的导压腔内,利用多模光纤受到涡街影响后引起的光强变化来探测涡街频率,最终计算出流量信息。

以上研究结果表明,这项流量传感技术的关键在于检测涡街信号的频率。

2.3 消除管道振动

在实际环境中,管道内部也会存在管道振动、湍流脉动以及测量现场的干扰信号。通常

采用半导体、电子器件构成模拟滤波器对这些干扰信号进行滤波来消除无用成分,或者利用优良的软件算法对其进行优化和修正。

Meng L 等人^[23]在涡街发生体下游固定了一个带有两片压电元件的菱形信号探头,通过特殊位置结构设计有效地解决了振动噪声问题,较好地提高了涡街信号的信噪比。Bera S C 等人^[24]采用了一种利用微处理器对涡街流量计进行电感式测量的技术。该技术具有结构简单、成本较低且重复性好的特点。Xu K J 等人^[25]将单片机 MSP430 作为控制器,采用频率方差算法研究了双传感器涡街流量计的抗强干扰的解决策略。在水流实验中,口径为 200 mm 的流量计具有 0.630% 的线性度,重复性误差小于 0.303%。在强扰动下,该解决策略能够保证涡街流量计正常工作。Akresh M 等人^[26]采用微处理器实现了将有源过零技术和卡尔曼滤波器二者组合的数字算法,在湍流范围内滤除噪声的同时也提供了可靠的涡街频率估计。另外,他们还对商用涡街流量计进行了性能优化,使其测量范围扩大了约 55%。

Chen J 等人^[27]设计了一种具有一 40dB/dec 特性的非线性滤波器,在低流速下滤除高频噪声的同时还能探测到较优良的涡街信号。在高流速下使用简单的电子器件,系统也具有较好的快速性。Chen J 等人^[28]还提出了一种涡街信号的数学模型,为研究涡街信号建模提供了参考。他们利用改进的卡尔曼滤波算法对涡街信号进行了实验验证。结果表明,与传统的卡尔曼滤波算法和经验模态法(Empirical Mode Decomposition, EMD)相比,改进的算法具有更好的滤波速度和测量精度,同时也提升了抗振性能和抗瞬态性能。

Zheng D D 等人^[29]提出了一种基于希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)的信号处理方法。他们对弱涡街信号进行了消除噪声处理,同时分别利用该方法与经典 FFT 方法分析了低流量下的涡街信号。与经典 FFT 方法 0.3~0.5 m/s 的涡街测量下限相比,该

方法具有较好的线性度以及 0.1 m/s 的测量下限。此外,Zheng D D 等人^[30]还提出了一种双窗口弛豫陷波周期图方法来解决低流速下涡街流量计的噪声问题,并分别利用该方法中的三角窗与 hanning 窗来估计振幅与频率。测试 DN25 的最低流量为 0.317 m³/h, DN50 的最低流量为 1.009 m³/h。它们都有较低的不确定性,也有效地将流量测量范围变宽了。

Li B 等人^[31]将滤波器组与广义模式相结合的方法可以更好地获取精准的涡街信号,以更小的采样样本、更好的实效性验证了所设计的涡街流量计算法。该算法不仅提升了抗振性能,而且保证各类噪声相对误差绝对值均小于 1%。

刘月圆等人^[32]利用小波变换(Empirical Wavelet Transform, EWT)处理差压式涡街流量计的涡街信号(水流实验误差小于 0.5%),并为湿蒸汽计量提供了新思路。Zhang T 等人^[33]通过用 EWT 对涡街信号进行降噪的算法,在三至五个尺度分解上可以使有用的涡街信号起主导作用。此外,该算法能使涡街流量计在低流速测量时检测到较规则的涡街信号。

符潇天等人^[34]利用特殊的硬件级联结构,同时实现了对涡街信号的有效识别、对振动干扰的抑制和对信号的整合计数功能。实验中,流量测量管径为 50 mm,可在 20~700 Hz 的宽范围内使得误差为 0.2%。该方法具有很高的抗振性能和较好的使用推广性。

2.4 小流量测量

近年来,在小流量或小口径测量时,涡街流量计的涡街信号会受较大的影响,甚至会出现探测失效的情况。Miao J J 等人^[35]较早地设计了一种“T”字形的涡街发生体,将压力传感器内嵌在发生体内,并利用压差原理来测量流量。经分析发现,在 $2 \times 10^3 \sim 3.3 \times 10^4$ 的雷诺数范围内有较好的流量特性。后续研究可将压力传感器替换为 FBG,利用 FBG 物理尺寸小的特性,以期将其用于小口径的涡街流量计。

Koncar B 等人^[36]对 $8.3 \times 10^3 \sim 5 \times 10^4$ 雷诺数范围内的涡街流量计进行了数值模拟并验证了涡街频率与体积流速直接存在的线性依赖性。为了更精确地识别强涡街信号的压力损失, Venugopal A 等人^[37]对各种发生体在管道内的湍流尾迹进行可视化, 详细分析了不同发生体的压力损失和恢复, 并得出了以下结论: 梯形柱型发生体的线性度为 1.14%, 是最希望的结果; 三角柱型发生体也是较好的类型, 其线性度为 1.5%。在受限边界条件和湍流条件下, 涡街信号的形成机理得到了深层次的理解。

黄玉杨等人^[38]将遗传算法的双调制随机共振方法用于涡街信号的探测, 尤其在小流量测量中可以较好地得到精准的涡街信号, 从而获取涡街频率用于流量测量。Jiang Z 等人^[39]通过计算多个峰值频率的方差和振幅特性来得到涡街信号, 并利用所设置的方差阈值消除振动干扰以提高小流量测量精度。该方法可保证气体流量测量量程比为 1:10, 重复性误差小于 0.19%。

Sun Z 等人^[40]利用 EMD 分解原始传感器上的涡街信号, 提出了涡街能量比这一专用名词来感知流量信息。涡流能量比对流体流动条件十分敏感。他们还总结了一组涡街信号是否正确的可行性诊断步骤。同样也可利用该诊断步骤来反向推断涡街信号是否受微小振动扰动而导致流量信息检测不准确。在小流量测量中, 该研究有较高的参考性。

3 总结与展望

本文主要研究了 FBG 涡街流量传感技术。该技术重点在于检测涡街信号产生的频率, 本质是检测发生体周围的流体静压或流速的脉动变化, 利用 FBG 探测这种脉动变化所引起的布拉格波长漂移, 从而检测流量信息。

综上所述, 针对 FBG 涡街流量传感技术研究的重点问题, 可以从以下几个方面来展开研究:

(1) 检测管道的振动、湍流脉动这类外界

干扰因素对实际涡街信号产生的影响是否可以不借助半导体滤波器, 而是利用光学方法来抑制, 并且在抑制干扰的同时提高传感器的灵敏度;

(2) 对于小流量或小口径的管道来说, 涡街发生体能否在下游产生准确的、强度高且便于检测的涡街信号, 因此还需开发新型优良涡街发生体或非测压型的 FBG 流量传感检测技术;

(3) 涡街流量测量领域中, 在涡街发生体上开设导压腔与 FBG 组合的方式是否是最优的测量方法, 还需开发新方法来实现, 并需要引进新材料、新技术来提高测量灵敏度。

FBG 涡街流量传感技术的现有研究成果较少, 仍具有较大的研究价值。未来更应重点关注涡街信号的解调, FBG 的灵敏度提升以及 FBG 传感器的小型化、智能化、产业化发展。

参考文献

- [1] 武玉涛, 任华堂, 夏建新. 圆柱绕流研究进展及展望 [J]. 水运工程, 2017, 42(2): 19-26.
- [2] 郑河清, 闫博. 涡街流量计的技术改进研究进展 [J]. 广州化工, 2018, 46(14): 11-14.
- [3] 刘明尧, 邹瑶, 宋涵, 等. 基于光纤布拉格光栅的流量测量方法 [J]. 武汉理工大学学报, 2020, 42(9): 75-82.
- [4] 孙世政, 张辉, 刘照伟, 等. 小型探针式 FBG 流量温度复合传感器 [J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2023, 37(1): 85-91.
- [5] Shoichi T, Hiroshi A, Hiroaki N. A water flowmeter using dual Fiber Bragg Grating sensors and cross-correlation technique [J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 2004, 116(1): 66-74.
- [6] 刘强, 张晓雨, 刘懿莹, 等. 弯曲光纤布拉格光栅靶式流量传感器的研究 [J]. 应用光学, 2017, 38(2): 336-340.
- [7] 李洪才, 刘春桐, 冯永保, 等. 一种内嵌喷嘴差压式 FBG 流量传感器 [J]. 光电子·激光, 2014, 25(10): 1886-1891.
- [8] 贾振安, 任杰, 党硕, 等. 光纤布拉格光栅热式流量传感技术研究 [J]. 红外, 2022, 43(8):

- 17-25.
- [9] 姜仲霞, 姜川涛, 刘桂芳. 涡街流量计 [M]. 北京: 中国石化出版社, 2006.
- [10] 王笑然. 浅析涡街流量计发生体 [J]. 中国新技术新产品, 2015, **21**(8): 38.
- [11] Rzasa M R, Czapla-Nielacna B. Analysis of the influence of the Vortex Shedder shape on the metrological properties of the vortex flow meter [J]. *Sensors*, 2021, **21**(14): 4697.
- [12] 王鹏. 不同流体条件下涡街流量计的测量特性研究 [J]. 计量与测试技术, 2020, **47**(5): 34-38.
- [13] 赵学芳. 基于光纤光栅的流量传感技术研究 [D]. 杭州: 中国计量大学, 2014.
- [14] 王国武, 丁必要, 赵静. 基于涡街流量传感器的高精度液体旋涡流量计 [J]. 化工自动化及仪表, 2015, **42**(8): 873-876.
- [15] 仝克帅, 薛俊华, 杨洪磊, 等. 基于旋涡发生体的光纤 Bragg 光栅流量计的研究 [J]. 光学技术, 2014, **40**(1): 79-83.
- [16] 李红民, 高宏伟, 刘波, 等. 一种新型的光纤光栅涡街流量传感器 [J]. 传感技术学报, 2006, **19**(4): 1195-1197.
- [17] Dong H J, Cai Y, He J, et al. The vibration analysis of a novel vortex flowmeter based on Fiber Bragg Grating [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, **1675**: 526-531.
- [18] Jin W, Zhou Y, Chan P K C, et al. A fiber-optic grating sensor for the study of flow-induced vibrations [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 2000, **79**(1): 36-45.
- [19] Cheng L K, Schiferli W, Nieuwland R A, et al. Development of a FBG vortex flow sensor for high-temperature applications [C]. *SPIE*, 2011, **7753**: 77536V.
- [20] Arumuru V, Dash J N, Dora D, et al. Vortex shedding optical flowmeter based on photonic crystal fiber [J]. *Scientific Reports*, 2019, **9**(1): 1-9.
- [21] Chen J L. Frequency characteristics of a vortex flowmeter in various inlet velocity profiles [J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2017, **9**(3): 1-12.
- [22] Herzog J P. An optical fibre vortex sensor for flowrate measurements [J]. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 1992, **32**(1-3): 696-700.
- [23] Meng L, Huang H. The design of a vortex flowmeter with anti-vibration structure [C]. Kuala Lumpur: 2012 IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering (EESYM), 2012.
- [24] Bera S C, Ray J K, Chattopadhyay S. A modified inductive pick-up type technique of measurement in a vortex flowmeter [J]. *Measurement*, 2004, **35**(1): 19-24.
- [25] Xu K J, Luo Q L, Fang M, et al. Note: Anti-strong-disturbance signal processing method of vortex flowmeter with two sensors [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2011, **82**(9): 096105.
- [26] Akresh M, Walker W D, Reindl L. Flow measurement using Kalman filter for smoothing vortex shedding frequency [C]. Austin: 2010 IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference, 2010.
- [27] Chen J, Li B, Dai G. Vortex signal processing method based on flow momentum [C]. Beijing: 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments, 2009.
- [28] Chen J, Hou Z Y, Li B, et al. Vortex signal model based Kalman filter of vortex signal processing method [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2022, **93**(4): 045004.
- [29] Zheng D D, Zhang T, Xing J, et al. Improvement of the HHT method and application in weak vortex signal detection [J]. *Measurement science and technology*, 2007, **18**(9): 2769.
- [30] Zheng D D, Zhang T. Research on vortex signal processing based on double-window relaxing notch periodogram [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2008, **19**(2): 85-91.
- [31] Li B, Wang C, Chen J. A frequency-correcting method for a vortex flow sensor signal based on a central tendency [J]. *Sensors*, 2020, **20**(18): 5379.
- [32] 刘月圆, 梁玉娇, 郑盟, 等. 新型均速管涡街流量传感器的测量特性研究 [J]. 电子测量与仪器学报, 2022, **36**(12): 10-18.

- [33] Zhang T, Sun H, Wu P. Wavelet denoising applied to vortex flowmeters [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2004, **15**(5-6): 325-329.
- [34] 符潇天, 黄明, 马斌, 等. 一种有效的涡街流量计数字抗强干扰计量算法设计 [J]. *工业技术创新*, 2021, **8**(5): 94-99.
- [35] Miao J J, Yang C C, Chou J H, et al. A T-shaped vortex shedder for a vortex flow-meter [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1993, **4**(4): 259-267.
- [36] Koncar B, Sotošek J, Bajsić I. Experimental verification and numerical simulation of a vortex flowmeter at low Reynolds numbers [J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2022, **88**: 102278.
- [37] Venugopal A, Agrawal A, Prabhu S V. Investigations on bluff bodies as improved vortex shedders placed inside a circular pipe [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2017, **139**(4): 041204.
- [38] 黄玉杨, 黄咏梅. 基于遗传算法的涡街信号随机共振检测方法 [J]. *中国测试*, 2021, **47**(4): 101-106.
- [39] Jiang Z, Li A, Xu K J, et al. Anti-strong pipeline vibration method combining frequency variance and amplitude feature for vortex flowmeter [J]. *Measurement*, 2020, **166**: 108193.
- [40] Sun Z, Zhang H. Application of empirical mode decomposition based energy ratio to vortex flowmeter state diagnosis [J]. *Journal of Central South University of Technology*, 2009, **16**(1): 154-159.