

文章编号:1004-2474(2012)05-0680-04

光纤压力传感器在称重领域应用的研究进展

杨双收^{1,2}, 魏秀珍³, 闫平¹

(1. 清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084; 2. 北京一轻研究院, 北京 101111; 3. 北京玻璃研究院, 北京 101111)

摘要:从实际应用的角度出发阐述了光纤压力传感器在称重领域的发展概况,根据光波调制原理分别叙述了强度调制、波长调制、相位调制型光纤压力传感器在称重领域的研究状况,介绍了其原理、结构及优缺点等。通过对比各种光纤压力传感器的特点,波长调制型光纤压力传感器在称重领域的应用研究将成为重要发展方向。

关键词:光纤传感器;压力传感;称重;研究进展

中图分类号:TN2 **文献标识码:**A

Research Progress on Fiber-Optic Pressure Sensor for Weigh-in-Motion

YANG Shuangshou^{1,2}, WEI Xiuzhen³, YAN Ping¹

(1. Dept. of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Industrial Technology Research Institute, Beijing 101111, China; 3. Beijing Glass Research Institute, Beijing 101111, China;)

Abstract: The development of fiber-optic pressure sensor applied to the weigh-in-motion (WIM) field is discussed from a practical viewpoint in this paper. The research of fiber-optic pressure sensor based on intensity-modulation, wavelength-modulation, and phase-modulation is introduced respectively. The principles, structures, advantage and disadvantage are also described for these sensors. By comparing the characteristics of various fiber-optic pressure sensors, it has been found that the wavelength-modulated fiber-optic pressure sensor would become a mainstream of research for WIM.

Key words: fiber-optic sensor; pressure sensor; weigh-in-motion; research progress

0 引言

随着光导纤维的实用化和光通信技术的发展,光纤传感技术成为一个热门的研究方向且发展迅速。当光在光纤中传输时,由于外界压力的作用,光的强度、相位、频率、偏振态等参量发生变化,这就形成了光纤压力传感器。与传统的电量传感器相比,光纤压力传感器具有适应性强,抗电磁干扰,传输距离长,使用寿命长,结构小巧等优点,因此光纤压力传感器在各行业受到了高度重视。按照压力对传输光的调制方法进行分类,可分为强度调制型^[1-4]、频率调制型^[5]、相位调制型^[6-9]、波长调制型^[10-11]及偏振调制型^[12]。

称重领域是光纤压力传感器应用的一个方向,目前主要集中于动态称重方面的研究。动态称重指在汽车运动状态下称出其质量,利用光纤压力传感器进行称重已成为目前动态称重研究的重点。由于

称重领域的特殊性,在称重方面进行过实验研究的光纤压力传感器包括强度调制型、相位调制型及波长调制型。

1 光纤压力传感器在称重领域的研究

1.1 强度调制型光纤压力传感器在称重领域的研究

强度调制型光纤压力传感器的基本原理:当光纤弯曲时,在光纤中传输的导行模会在弯曲点变为辐射模,损耗掉部分光功率,光功率的损耗值与待测压力具有一定关系,通过测量光功率可得到待测压力。利用该原理的光纤压力传感器在称重领域得到了广泛研究。1998年, Pekka Suopajarvi, Riku Pennala 等人提出了一种基于光时域反射(OTDR)技术的微弯光纤称重结构^[13],如图1所示。在进行称重实验时,采用将光纤缠绕在一根细丝上制作成连续弯曲实验装置(见图1(b)),当有压力作用在细丝上

收稿日期:2011-08-26

作者简介:杨双收(1981-),男,河北沧州人,高级工程师,博士,主要从事光纤传感方面的研究。e-mail:shshyang@yahoo.com.cn。

时, 细丝弯曲使得光纤弯曲损耗增大, 通过 OTDR 技术测量光纤的损耗得到施加在光纤上的质量。

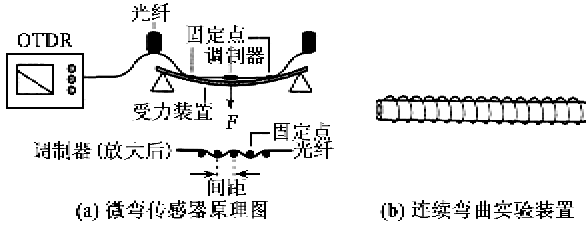


图 1 Pekka Suopajarvi 等人提出的一种 OTDR 技术的微弯光纤称重结构

陈晓竹等人提出了一种绞合式光纤称重传感器^[12], 采用传感光纤与一根横截面为圆形的均匀细线绞合的办法使光纤产生一个预弯曲, 在光纤受力时, 曲率会发生变化, 从而使光纤的损耗值也发生变化, 其结构如图 2 所示, 该方案可通过 OTDR 技术或正向光功率测量技术测量光纤弯曲损耗。

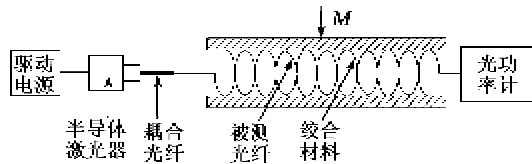


图 2 绞合式光纤压力传感器正向测量方案

使光纤产生弯曲损耗的方法很多, 如采用锯齿波纹板挤压光纤的方法^[15], 这些方法都在光纤称重领域得到了实验。除微弯法测量光纤损耗, 还可通过测量光纤耦合器输出功率比的方法测量光纤损耗, 其原理是当光纤耦合器受拉力或压力时, 耦合区的长度随之发生变化, 使耦合输出比发生变化。马宾等人利用耦合器的该特性制作了基于 2×2 耦合器的耦合型光纤应变传感器用于汽车动态称重^[16], 其实验安装方法如图 3 所示, 经过实验可得系统测量误差为 2.03%。

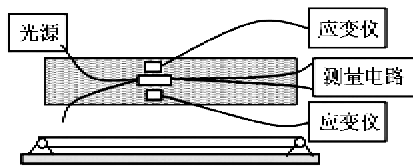


图 3 耦合型光纤应变传感器称重结构示意图

1.2 相位调制型光纤压力传感器在称重领域的研究

通过干涉测量技术, 相位调制型光纤压力传感器测量光纤内传播的光波相位在压力作用下发生的变化。该技术用在称重领域通过测量压力后转换为质量。

2005 年, Shenfang Yuan 等人设计了一套基于

Michelson 干涉仪的动态称重系统^[17], 如图 4 所示。将干涉仪的测量光纤铺设在一块 247.1 mm × 24 mm 的钢板上, 受压力作用的传感光纤长度为 247.1 mm, 当有压力作用在钢板上时, 干涉仪输出信号会发生变化, 通过测量输出信号的变化进行称重。该称重系统结构简单, 价格低, 可为许多实际应用提供更高精度需求。

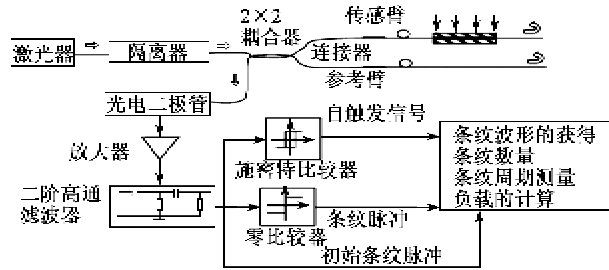


图 4 基于 Michelson 干涉仪的动态称重装置

吴奇峰设计了一套基于 Mach-Zehnder 干涉仪的频率输出型光纤动态称重传感器^[10], 如图 5 所示, 该系统光纤传感部分由光源、Mach-Zehnder 干涉仪及光电转换器等组成。本文作者对上述系统进行了实验, 且进行了一系列的软硬件处理。实验结果表明, 该系统的测量精度高, 抗干扰能力强, 响应速度快, 且便于组网等。

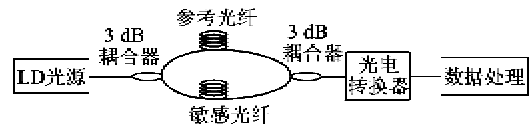


图 5 基于 Mach-Zehnder 干涉仪的频率输出型光纤动态称重传感器原理图

Jiulin Gan 等人在 2008 年提出了一种基于 Sagnac 干涉仪的光纤动态压力传感器用于称重研究^[19], 如图 6 所示, 该系统基于压力在单模光纤中引起的双折射效应, 通过 Sagnac 干涉仪来提取应力传感信号。压电陶瓷和反馈控制电路被用来设定该系统的最佳测量点。

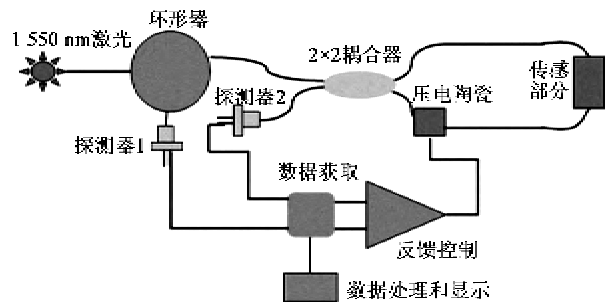


图 6 基于 Sagnac 干涉仪的光纤动态压力传感器称重系统框图

Pekka Suopajarvi, Riku Pennala 等人提出一种光斑传感器^[13],如图7所示,该传感器利用多模光纤中传导模干涉产生的光斑分布变化测量光纤所受扰动,作者指出,虽然该传感器的构成机理已知,但光纤扰动与光斑的准确关系还未解决,因此该传感器只在交通监测方面进行了实验研究。

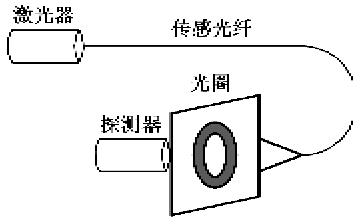


图7 光斑传感器原理图

1.3 波长调制型光纤压力传感器在称重领域的研究

波长调制型传感器最典型的是光纤光栅传感器,其传感原理是:光纤光栅的中心波长在外界物理量的作用下会发生变化,将具有一定谱宽的光输入光纤光栅后,根据接收到的反射或透射光谱的布喇格中心波长的变化即可得到外界物理量。光纤光栅传感器最显著的特点是测量结果具有良好的重复性,因此在压力测量方面得到了广泛的应用,也被广泛应用于称重研究。

光纤光栅主要可分为均匀光纤光栅和非均匀光纤光栅,各种光纤光栅都被研究人员在传感领域的应用进行了相应的研究。

由模耦合理论可知,光纤光栅的光栅方程^[20]为

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

式中: n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光纤光栅的周期; λ_B 为中心波长。

当外界轴向压力作用于光纤光栅引起中心波长变化^[21]为

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

式中: p_e 为光纤材料的弹光系数; ϵ 为作用在光栅上的外界压力。

根据光纤光栅的中心波长漂移特性,利用光纤光栅进行压力测量的实验基本方案如图8所示。透射型^[22]和反射型^[23]光纤光栅压力传感器都需进行波长解调而得到压力值,在进行称重实验时,多采用将光纤光栅贴在形变体上的方法。在进行称重研究过程中,研究人员一般采用承重梁模型或悬臂梁模型,光纤光栅被平行或垂直的贴在承重梁上,当车辆通过时,光纤光栅受到拉伸或压缩,通过解调波长得

到车辆的质量^[24-26]。

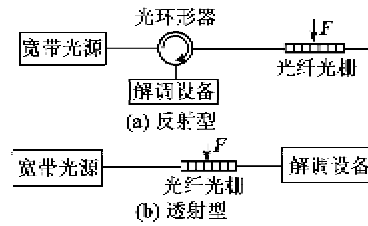


图8 光纤光栅压力测量原理图

除直接将光纤光栅贴在承重梁上的方法外,哈尔滨工业大学的赵琳和张博明还开发了一种复合材料结构用于动态称重系统研究^[27]。作者对汽车在50~70 km/h 行驶速度的情况下进行实验,其结果如表1所示。

表1 实验结果分析^[27]

速度/(km/h)	质量/kg	误差/%
50	2 810.293	0.56
60	2 548.643	8.81
70	3 191.629	14.19

2006年,高德文和赵勇等人对光纤光栅径向应力作用下的称重系统进行了研究^[28],如图9所示。光纤光栅在受到径向压力时会产生双折射效应,在光纤光栅轴向压力为0的情况下,布喇格波长的移动量仅是有效折射率的函数,在光纤参数一定的情况下,光纤光栅2个偏振态下的波长移动量差值与径向载荷间具有良好的线性关系。

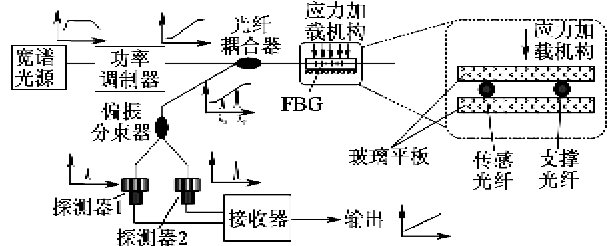


图9 基于双折射效应的光纤光栅称重系统

非均匀光纤光栅在称重领域也得到了应用。2010年,李永国和戴珩等人提出了一套基于啁啾光纤光栅的称重传感器^[29],如图10所示。将双啁啾光纤光栅粘贴在相同材料的等强度梁上下表面,在等强度梁受到压力时,双啁啾光纤光栅的总反射光强与其所受压力间具有良好的线性关系,且不受温度变化的影响。作者通过该方案在0~90 kN 的范围内进行了实验,线性度达到了0.999 93,重复误差为0.09%FS。

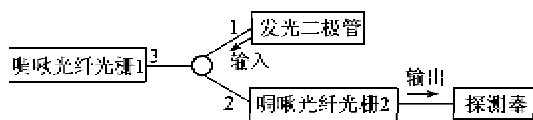


图 10 基于啁啾光纤光栅称重传感器原理图

2 各种压力传感器在称重领域应用比较

强度调制型光纤压力传感器应用于称重的优点是测量仅从光纤本身出发,利用光纤本身损耗特性,受外界温度等参量的影响小,且解调简单,解调速度较快,能满足高速运动车辆称重的要求;但在称重应用中,该类型传感器因其灵敏度较低(光纤只有弯曲到一定程度损耗才较明显),且测量用光纤的长度也对测量结果影响较大,测量恢复时间长,不满足连续测量的需要。相位调制型光纤压力传感器用于称重中其相应速度快,精度高,但各种干涉仪普遍具有稳定性差,易受外界干扰等问题,因此将该类型传感器用于称重还是具有一定的实际困难。因波长调制型光纤压力传感器在其他领域的成功应用,故在称重领域的研究中也备受关注,主要集中于光纤光栅压力传感器,其测量精度高,重复性能好,便于安装,能多点同时测量。与其他类型的光纤压力传感器相比,波长调制型光纤压力传感器的系统成本高,但随着研究人员的普遍关注和光器件技术的发展,将波长调制型光纤压力传感器用于称重领域将成为研究的热点。

为实现对车辆载重情况的实时监测,在车辆上安装称重传感器也是信息技术发展的一个需求,但目前除电子传感器还没有光纤传感器用于车载称重,比较3种用于称重的光纤压力传感器可知,由于车载称重的特殊性,只有基于波长调制的光纤光栅压力传感器能满足车载的要求,因此波长调制型的光纤光栅压力传感器可用于称重研究。该类型传感器的解调速度制约其称重领域应用,因此,须寻找一种能满足光纤光栅快速解调的方法。

3 结束语

光纤压力传感器用于车辆称重能实现对车辆的动态监测。本文对在称重领域应用的3种光纤压力传感器进行了概述,并对比了各自的优缺点。强度调制型、相位调制型和波长调制型都能用于称重,但波长调制型光纤压力传感器由于其自身具有稳定性高,重复性好等优点,已成为称重领域研究的热点,且随着车载称重的需要,波长调制型光纤压力传感器用于称重是将来称重传感器发展的一个重要方向。

参考文献:

- [1] 宋磊, 刘海滨, 任新. 反射式光强调制型光纤压力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 1994(3): 11-12.
- [2] THOMAS G G, JOSEPH A B. Optical fiber sensor technology[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1982, 18(4): 626-665.
- [3] 王学伟, 王琳. 第三讲: 强度调制式传感器[J]. 电测与仪表, 1996, 33(5): 40-45.
- [4] 徐亚军, 刘长华. 基于光纤微弯的分布式光纤应力传感器[J]. 半导体光电, 2003, 24(6): 436-438.
- [5] 高金山, 王家楨, 童诗白. 微谐振型光纤传感器研究[J]. 测试技术学报, 1998, 12(2): 8-12.
- [6] 毕卫红, 李一良, 张睿. 新型光纤压力传感器[J]. 仪表技术与传感器, 2008(8): 8-9.
- [7] 张旨遥, 周晓军. 白光干涉分布式光纤压力传感器实验研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2006, 1(4): 364-368.
- [8] 邸岳森, 肖悦娣, 何赛灵. 新颖的微弯结构 Mach-Zehnder 干涉仪型传感器及其优化设计[J]. 光子学报, 2005, 34(1): 69-72.
- [9] 祖鹏, 向望华, 白扬博, 等. 超低温度系数的光子晶体光纤 Sagnac 压力传感器[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(7): 1955-1958.
- [10] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, et al. Fiber grating sensor[J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [11] MARCELO A S, GABRIELE B, FABRIZIO D P. Enhanced simultaneous distributed strain and temperature fiber sensor employing spontaneous Brillouin scattering and optical pulse coding [J]. IEEE Photon Technol Lett, 2009, 21(7): 450-452.
- [12] 梁大开, 陶宝祺. 智能复合材料结构中偏振式光纤传感器系统的研究[J]. 航空学报, 1998, 19(3): 335-337.
- [13] PEKKA S, RIKU P, MIKKO H, et al. Fiber optic sensors for traffic monitoring applications[J]. Proc SPIE, 1998, 325(3): 222-229.
- [14] 陈晓竹, 陈宏. 绞合式光纤称重传感器的研究[J]. 黑龙江自动化技术与应用, 1999, 18(6): 47-48.
- [15] 马宾, 隋青美. 基于光纤微弯传感器的汽车动态称重系统设计[J]. 传感技术学报, 2010, 23(8): 1195-1200.
- [16] 马宾, 徐健, 隋青美. 耦合型光纤应变传感器用于汽车动态称重研究[J]. 压电与声光, 2009, 31(4): 482-485.

MA Bin, XU Jian, SUI Qingmei. Study on coupling fiber-optic strain sensor in vehicle dynamic weighting [J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2009, 31(4): 482-485.

(下转第 687 页)