

温度自补偿光纤光栅应变传感器研制及其在索力测量中的应用

邓年春¹ 吴东明¹ 罗铮荣²

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545006 2 柳州欧维姆结构检测技术有限公司 柳州 545005)

摘要:光纤光栅应变传感器在测量过程中存在温度和应变交叉影响的问题,且温度对应力测量结果影响较大。为获得精确的应力测量结果,必须大幅度减少或消除温度的影响。目前参考光栅法或温度测量系数修正法,难获得理想的结果。文中提出以截面对称的悬臂梁结构作为敏感元件,利用其上下表面拉压异号等应变和温度变化同应变的原理,通过在悬臂梁上下表面对称粘贴两根光纤光栅,利用结果差来消除温度影响,并提高测量灵敏度。文中对此种温度自补偿新型光纤光栅应变传感器的传感性能进行了研究,并将此类传感器安装在拉索的锚具上进行索力测量。研究结果表明:研制的光纤光栅应变传感器,能大幅度降低温度的影响,达到温度自补偿的目的;将此类传感器用于索力测量,具有较高的精度及灵敏度,能满足工程应用的实际需要。

关键词:悬臂梁 索力测量 光纤光栅应变传感器 温度补偿

DOI: 10.13211/j.cnki.pstech.2015.02.001

1 引言

光纤光栅传感器是以光纤为载体,在光纤的局部区域采用紫外光曝光或其它写入方法,使光纤纤芯一小段范围内的折射率沿光纤轴线发生周期性变化而得到光纤光栅,它会将入射光中某一特定波长的光部分或全部反射。采集并分析栅格反射光,根据其波长的移动来感应外界物理量的微小变化。测量具有线性度高、重复性好、抗电磁干扰能力强、耐高温、体积小、接线简单、可实现数据远距离传输等优点^[1]。虽然光纤光栅传感器能够对结构的应变、温度等关键参数作长期稳定的绝对测量,但在实际应用中,进行应变测量时,由于光纤光栅波长对温度与应变交叉敏感,即温度与应变的变化能同时引起光纤光栅波长移动,使得通过测量光纤光栅耦合波长移动无法对温度与应变影响因素加以区分。通常的方法是单独布置一个受相同温度影响、不受应变影响的光纤光栅传感器进行温度补偿^[2]。由于光纤光栅传感器对温度敏感度较大,参考光纤光栅传感器法,难获得理想的结果。文中提出以悬臂梁结构作为敏感元件,通过在悬臂梁上下表面对称粘贴两根光纤光栅,利用结果差来消除温度影响,实现有效的温度补偿及高精度的应变监测,最后将新型传感器用于拉索的索力测量。

2 测量原理

2.1 光纤光栅传感器工作原理

光纤光栅可将入射光中某一特定波长的光部分或全部反射,反射或透射光的中心波长方程为^[3]

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

式中 λ_B 为光栅布喇格波长, n_{eff} 为纤芯的有效折射率, Λ 为光栅周期。由方程(1)可知,光纤光栅反射的布喇格波长主要取决于光栅周期 Λ 和反向耦合模的有效折射率 n_{eff} ,任何使这两个物理参量发生改变的物理过程都将引起光栅布喇格波长的漂移。引起 Λ 和 n_{eff} 变化的主要物理过程是应变和温度。布喇格波长的漂移与应变和温度的关系为

$$\frac{\Delta \lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e) \varepsilon_z + (\xi + \alpha) \Delta T \quad (2)$$

式中 ε_z 为轴向应变, ΔT 为温差, P_e 为有效光弹系数。当材料确定后,光纤光栅对应变和温度的灵敏度系数基本上是唯一与材料系数相关的常数,这就从理论上保证了采用光纤光栅作为应变和温度传感器可以得到很好的输出特性。如果忽略交叉灵敏度的影响,温度、应变共同作用引起的对光纤光栅的作用可以看作是相互独立的、线性叠加的。

2.2 光纤光栅应变传感器设计

以悬臂梁为敏感元件,其上下表面对称粘贴两根同型号裸光纤光栅传感器,将敏感元件弹片

安装在具有安装支座并可相对活动的框架内,外加保护罩后即形成光纤光栅应变传感器,见图1和图2。传感器通过夹持件及支座固定在被测件表面后,当安装支座之间产生变形时,带动传动件使弹片受力变形,敏感弹片为等强度梁,两根光纤光栅一个受拉一个受压产生值相同而符号相反的波长变化。温度引起悬臂梁上下表面光栅的波长同步同符号变化。将两根光纤光栅的波长测量值直接相减,可直接消除温度的影响,实现温度补偿的应力测量目的。与此同时,提高应力测量的灵敏度。

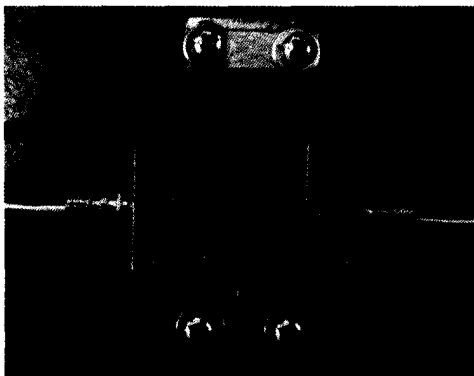
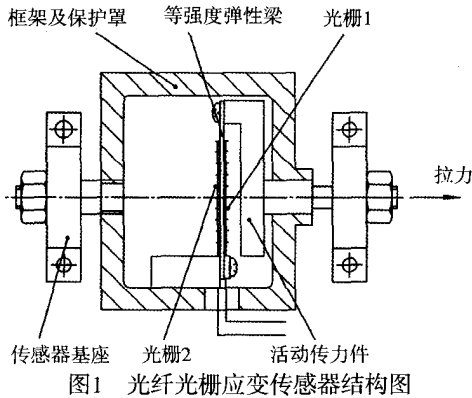


图2 光纤光栅应变传感器实物图

2.3 悬臂梁变形测量原理

敏感弹片做成悬臂梁或等强度悬臂梁的结构,见图3。在悬臂端部受力作用下,等强度悬臂梁各个截面的应变值是相同的,有利于做理论计算,但也可做等截面梁或其它结构形式的悬臂梁。

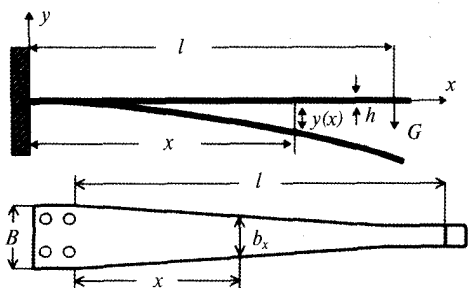


图3 等强度悬臂梁

敏感弹片为等强度梁时,距离为 x 的断面上的弯矩为 $M_x=G(l-x)$,而断面抗弯模量 $W_{(x)}=b_x/6h^2$,相应的断面应力为

$$\sigma = \frac{6G(l-x)}{b_x h^2} \quad (3)$$

其中 $b_x=B^{(l-x)/l}$ 为距固定零点距离为 x 的宽度。 G 为作用在加载点的荷载,当 $x=l$ 时,得到加载点处的挠度为

$$f=y(l)=\frac{6Gl}{EBh^3}l^2 \quad (4)$$

式中 E 为材料的杨氏模量。由于等强度梁上各个断面的正应力相等,所以梁的表面上各点沿 x 轴方向的应变相等。与梁的固定端($x=0$)的应力相等,由虎克定律可得

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{6Gl}{BEh^2} \quad (5)$$

由式(4)和(5)可得

$$\varepsilon = h/l^2 f \quad (6)$$

假定弹片梁上下表面对称,同位置分别粘贴同质同型号的光栅1和光栅2,则

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = (1-P_e)\varepsilon_1 + (\xi + \alpha)\Delta T \quad (7)$$

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = (1-P_e)\varepsilon_2 + (\xi + \alpha)\Delta T \quad (8)$$

由于光栅粘贴位置的应变相等符号相反,则 $\varepsilon = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2$,将式(7)与(8)相减,可得

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} - \frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = 2(1-P_e)\varepsilon \quad (9)$$

选定光纤光栅后,光栅初始波长 λ_1 与 λ_2 为确定值,则两光栅波长差变化与应变成正比,并消除了温度的影响。如光栅初始波长 λ_1 与 λ_2 偏差不大,例如1510nm至1550nm波段范围内,波长相差5nm以内,则 λ_1 与 λ_2 可看成相等,简化成同一值,则式(9)可简化成

$$\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2 = 2\lambda(1-P_e)\varepsilon \quad (10)$$

式(10)可直接用于温度自补偿光纤光栅应变传感器的应力测量。

3 传感器性能试验

温度自补偿光纤光栅应变传感器的性能试验主要包括等力值增量加载试验和不同温度下的等力值增量试验。等力值增量加载采取将传感器的一端垂直悬挂,另一端逐级增加等重砝码的形式

进行加载测试。不同温度下的等力值增量试验，是在等力值增量加载时，选取早晨、中午温差较大的两个不同的时间段进行。增量加载试验装置见图4，传感器直接悬挂在竖直支架上，分6级加载每级加载0.4kg，直到加载4.8kg重为止，每级停顿3分钟。砝码的重量采用上海速展机电有限公司5公斤电子秤准确称量，光纤光栅的读数采用MOI 光纤光栅解调仪 Sm125进行测量。2014年7月8日早晨 18° C时，测试得出的光栅波长变化与加载总重量的拟合曲线，见图5。两光栅波长变化和的最大值为0.427nm，三次加载拟合方程的相关系数为0.999。中午28° C时，重复加载测试波长变化最大偏差0.003nm，相对最大量程0.427nm而言，偏差为0.7%，每摄氏度的影响为0.07%。由此可知，研制的光纤光栅应变传感器具有较好的线性度，温度影响较小，达到了温度自补偿的目的。

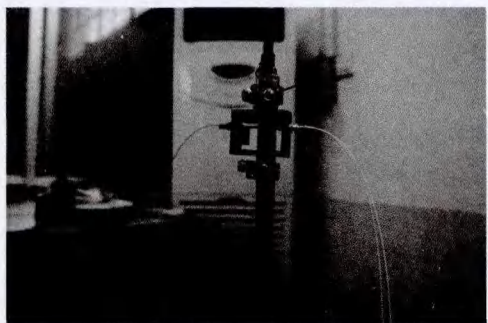


图4 光纤光栅传感器增量加载试验图

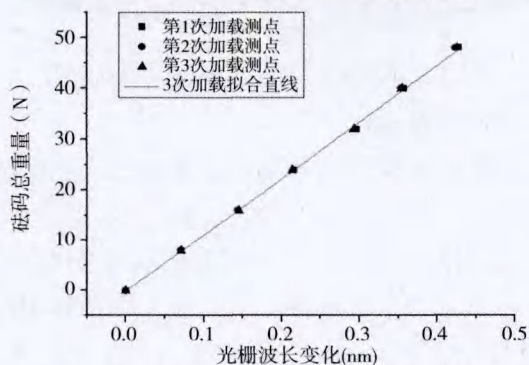


图5 光纤光栅传感器波长与加载重量拟合曲线

4 传感器在拉索索力测量中应用

拉索在张拉受力过程中，拉索锚具表面的应变与索力存在线性关系，将温度自补偿光纤光栅应变传感器直接安装在拉索锚具的表面，通过测量拉索锚具表面的应变变化就得出拉索索力，

由此实现拉索的索力测量。拉索的索力测试试验在柳州欧维姆机械股份有限公司天文台恒温室内的试验台座上进行，一个高精度标准测力传感器作为测力标准，纤光栅读数采用MOI 光纤光栅解调仪 Sm125。试验装置见图6，传感器布置见图7。拉索分10级进行张拉，每级张拉过程中，记录力值和光栅波长值。拉索预先超张拉后，进行了2次重复加载测试。2次加载两光栅波长的差值和荷载关系拟合曲线，见图8。由图8中可知传感器的线性度比较好，拟合方程的相关系数为0.997，2次加载的测点基本重合。

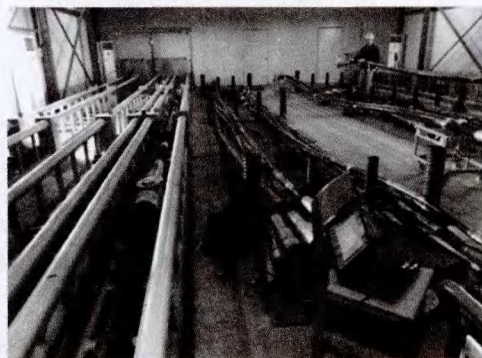


图6 索力测试试验装置图

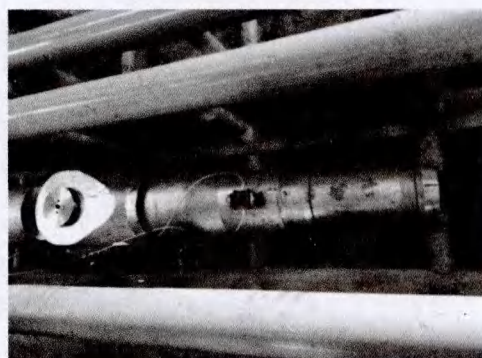


图7 索力测试传感器布置图

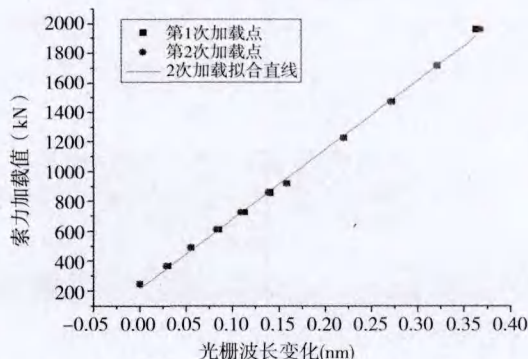


图8 索力测试光栅波长变化与索力拟合曲线

(下转第22页)

由图可以看出锚具有锥度的钢丝拉脱力和握裹力优于无锥度的。且有锥度的拉脱力和握裹力数据分布的离散程度也优于无锥度的。由此可见,在相同的握裹长度、钢丝强度下,锚具有锥度有利于增强钢丝的拉脱力和握裹力及提高稳定性。

4.3 不同强度钢丝的拉脱力及握裹力的分析比较:

试样的握裹长度均为200mm,均选用有锥度的锚具,制锚后进行顶压处理。通过试验数据及计算得到:不同强度钢丝拉脱力及握裹力对比图(见图10、图11)

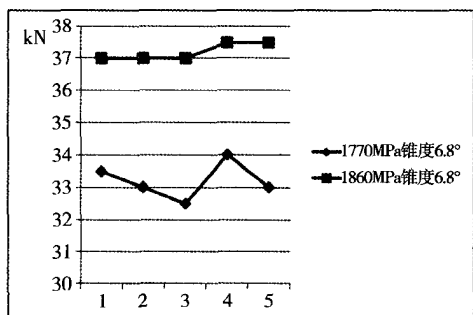


图10 不同强度钢丝的拉脱力对比图

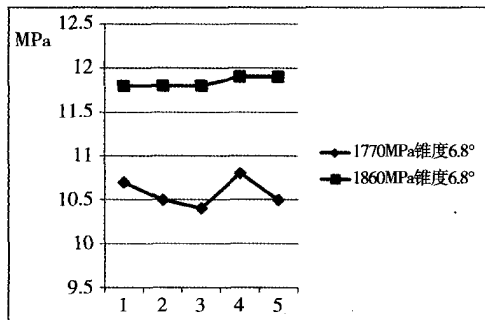


图11 不同强度钢丝的握裹力对比图

(上接第5页)

5 结论

文中基于悬臂梁上下表面拉压异号等应变而温度影响同应变的原理,在其上下两面分别粘贴光纤光栅作为敏感元件,构制传感器。该种新型传感器,利用测量结果差值,直接消除温度的影响而实现应力应变测量。文中对悬臂梁传感器的测试理论进行了公式推导,并对研制的传感器进行了等力值增量加载试验和不同温度下的等力值增量试验,试验结果表明,传感器可有效地消除温度影响实现应力测量。在传感器试验的基础上,将传感器安装于拉索的锚具表面进行拉索索力测量,测试结果表明,研制的温度自补偿光纤

由图可以看出,1860MPa钢丝的拉脱力、握裹力均要优于1770MPa的钢丝。

4.4 顶压工艺对握裹力的影响

对试验数据进行分析比较:制锚后,进一步进行顶压处理,对钢丝的握裹力影响不大;

5 结论

综合各项试验数据及结果分析,可得到以下的结论:

(1) 钢丝的拉脱力随着握裹长度的增大而增大,握裹力在较低握裹长度时,基本稳定;

(2) 锚具有锥度,可以对钢丝起到挤压的作用,有利于增大钢丝的握裹力,同时对握裹力的离散程度(工艺稳定性)是有利的;

(3) 提高钢丝的强度,握裹力也会相应小幅度的增大;

(4) 顶压工艺对握裹力的影响不大;

(5) 本试验研究的一些影响热铸锚单根钢丝握裹力的因素,虽实际应用中热铸锚杯为多根钢丝,但也为今后热铸锚杯的设计提供了一点参考。

参考文献

- [1] 王福敏,邓志刚. 虎门大桥悬索桥主缆索股热铸锚工艺试验的研究[J]. 重庆交通学院学报, 1997(3) 75-79
- [2] 叶觉明,陈婉霞. 缆索用热铸锚锚具和灌铸[J]. 桥梁建设, 2004(1) 75-77
- [3] 特大跨径钢箱梁悬索桥设计指南(报批稿)中交公路规划设计院有限公司

光栅应变传感器能对拉索进行有效的索力测量,具有较高的精度和灵敏度,能满足工程的实际需要。

参考文献

- [1] 邓年春. 桥梁缆索索力测量传感器及测量系统研究[D]. 上海: 同济大学博士后研究报告, 2010
- [2] 金秀梅. 光纤光栅应变、温度交叉敏感问题研究现状分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2011, 10(2)
- [3] M D Todd, G A Johnson, S T Vohra. Deployment of a fiber Bragg grating-based measurement system in a structural health monitoring application[J]. Smart Materials and Structures. 2001, 10
- [4] 刘鸿文. 材料力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004
- [5] 肖德宝,王帆,吴波. 光纤光栅传感器在索力测量中的应用[A]. 第七届全国现代结构工程学术研讨会论文集[C], 杭州, 2007