

文章编号 1004-924X(2016)06-1233-09

基于应变传递理论的光纤传感器优化设计

王花平^{1,2}, 向平^{3*}

(1. 香港理工大学 土木与环境工程学院, 香港 999077; 2. 大连理工大学 土木工程学院, 辽宁 大连 116023;
3. 香港城市大学 建筑与土木工程学院, 香港 999077)

摘要: 联系传感器应用的作用机理, 根据变形传递方式的不同, 对工程中常用的光纤传感器进行了系统的归类分析。基于应变传递理论建立了应变传递系数与测量允许误差的关系, 并以此为优化控制方程得到了满足工程测试精度要求的传感器最佳取值, 给出了各类传感器具体的优化设计方法及优先设计指标。研究表明: 基于应变传递理论的优化设计方法较适用于依靠界面剪应力传递变形的光纤传感器, 其优先设计指标依次为粘贴(感知)长度、层间粘结强度、保护层弹性模量和半径、粘贴层厚度; 端部扩径型传感器的优化设计则因其应变传递系数能较准确和便利地通过标定试验获取而不依赖应变传递理论, 且无明显的优先设计指标。本文充分考虑了传感器工程应用的实际状态, 以测试准确性为核心, 从力学作用机理角度对传感器进行了较全面和系统的分析, 其研究结果可以用于指导工程化光纤传感器的应用设计和标定测试。

关键词: 光纤传感器; 应变传递理论; 优化设计; 优先设计指标

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162406.1233

Optimization design of optical fiber sensors based on strain transfer theory

WANG Hua-ping^{1,2}, XIANG Ping^{3*}

(1. Department of Civil and Environmental Engineering, the Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077; 2. School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

3. Department of Architecture and Civil Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

* Corresponding author, E-mail: wanghuaping1128@sina.cn

Abstract: In view of action mechanism of sensor applications, the fiber optic sensors commonly used in engineering were classified depending on the modes of transfer deformation. The relationship between strain transfer coefficient and measurement tolerance was established based on the strain transfer theory. Thereby, the optimal values of the sensor to meet accuracy requirements of engineering tests can be obtained for the optimization of control equations, and more specific optimization design methods and priority design specifications of various types of sensors were given. The research indicates that: optimal design method based on strain transfer theory is more applicable to the fiber optic sensors whose transfer deformation relies on interfacial shear stress, and its priority design specifications are sequentially as follows: bonded (sensing) length, interlayer adhesion strength, elastic modulus and

收稿日期: 2016-02-01; 修订日期: 2016-03-25.

基金项目: 国家 863 高技术研究发展计划资助项目 (No. 2014AA110401); 国家科技支撑计划资助项目 (No. 2011BAK02B01); 重点实验室科研专题 (No. DUT1LAB03)

radius of protective layer, adhesive layer thickness; optimization design of end-diameter expanding sensor is not dependent on the strain transfer theory because the strain transfer coefficient can be accurately and conveniently obtained through calibration tests without obvious priority design specifications. With full consideration given to the actual status of sensor application in engineering, by taking the test accuracy as the core, this article conducts a more comprehensive and systematic analysis on optical fiber sensor from the perspective of mechanical action mechanism was conducted. This research proves able to more scientifically guide the application design and calibration test of optical fiber sensors in engineering.

Key words: optical fiber sensor; strain transfer theory; optimization design; priority design specifications

1 引言

光纤传感器能够进行绝对测量,具有几何形状多方适应性、耐腐蚀、抗电磁干扰、体积小、质量轻、易集成传感网络等优点^[1],因而在土木工程领域得到了广泛应用。然而,很多自主研发的光纤传感器存在测试不准确、耐久性和稳定性差等问题^[2]。其原因除了光纤传感器的相关设计方法和规范的不完善外^[3],另一个重要因素是对传感器工程应用的力学作用机理的理解和认识的不足。例如,不了解被测基体变形传递到感知光纤的作用机理,传感器的研发者就没法在关键受力位置进行补强或其它精细设计^[4-7]。裸光纤因其弱抗剪和抗弯折性能难以抵抗土木工程结构的恶劣服役环境,因此在其使用过程中需要进行封装保护,以提升传感器的成活率和耐久性。由此在感知光纤和被测结构之间引入了中间介质层(如保护光纤的封装层和固定光纤的粘贴层),使得光纤感知应变不能完全代替基体应变。为提升传感器测量的准确性、较真实地诠释基体的实际变形,应变传递理论得以发展,以建立光纤感知应变和基体应变之间的定量关系^[8]。光纤传感器的应变传递理论分析除了能提供应变传递误差修正公式外,还能阐明其力学作用机理,指导传感器的设计。

根据被测基体的结构特征和待测变量需求,光纤传感器主要分为外贴式和埋入式两类。由于布设工艺的不同,其侧重点和设计方法亦有所区别:对于埋入式传感器,其基本要求是封装层能抵抗施工成型过程中的作用力以确保感知元件的成活,对被测基体内部应变场扰动影响较小以及应变传递效率高等;对于外贴式传感器,其封装层需要能抵抗湿度、日照、水侵蚀等外界环境因素的作用,尽可能地消除这些因素对基体结构整体性能的影响。本文以工程中常用的几种光纤传感器

为研究对象,基于应变传递理论分析,提出了不同布设工艺、不同传递变形方式下光纤传感器的优化设计方法及优先化封装的设计指标。考虑传感器在工程结构施工过程中通常同步安装到结构上,以实现施工及运营过程中结构性能的全程跟踪测试,以及基体结构所处的无损阶段较长,这里主要利用弹性阶段的应变传递理论指导传感器的优化设计。

2 基于应变传递理论的传感器优化设计

鉴于传感器优化设计的最终目标是较准确地测量基体变形,使测试精度符合工程需求,光纤传感器优化设计的实施步骤为:基于所推导的应变传递理论建立平均应变传递系数与相对误差的定量关系;以相对误差小于特定限制为目标函数,影响相对误差的几何和物理参数为约束变量,采用优化软件求得最优解。

2.1 外贴式光纤传感器

工程中常见的外贴式光纤传感器依据变形传递方式的不同可分为两种:一种通过接触界面剪应力的改变传递变形,另一种则通过夹持块之间距离的改变传递变形,分别如图 1 中的①号和②号传感器所示。

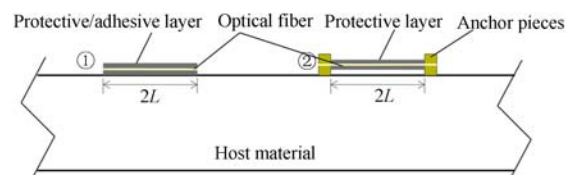


图 1 常见的外贴式光纤传感器

Fig. 1 Conventional surface-bonded optical fiber sensors

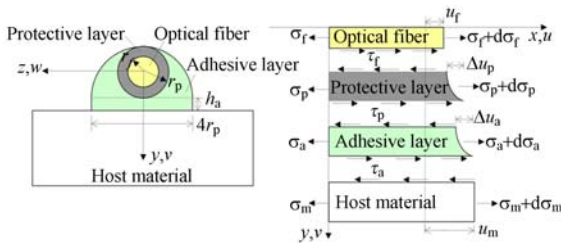
图 1 中,①号传感器通过层间界面剪应力传递变形,可实现结构的点式和分布式测试,在工程中有较广泛的应用。当传感测试模型包含如图 2 所示的四层结构时,通过理论推导可得到平均应变传递系数^[8]为:

$$\beta_{av} = \frac{\epsilon_{fav}}{\epsilon_m} = \frac{2 \int_0^L \epsilon_f dx / 2L}{\epsilon_m} = 1 - \frac{\sinh(\lambda L)}{\lambda L \cosh(\lambda L)}. \quad (1)$$

由此可得其相对误差 ω 为:

$$\omega = \frac{\epsilon_m - \beta_{av} \epsilon_m}{\epsilon_m} = 1 - \beta_{av} = \frac{\sinh(\lambda L)}{\lambda L \cosh(\lambda L)}, \quad (2)$$

其中: $\lambda^2 = \frac{2}{E_f} \left[\frac{r_p(r_p - r_f)}{G_p} + \frac{h_a(\pi r_p + h_a)}{G_a} \right]$ 。



(a) 四层结构模型 (b) 微元段受力状态

(a) Four-layered model (b) Stress states of micro sections

图 2 FBG 传感器粘结于结构表面

Fig. 2 Schematic diagram of FBG sensor attached on surface

土木结构的相对测量误差需控制在 5% 以内,利用式(2)可得:

$$\frac{\sinh(\lambda L)}{\lambda L \cosh(\lambda L)} \leq 5\%. \quad (3)$$

由于感知光纤的弹性模量和半径均为定值,故由式(3)可知影响测量误差的几何和材料参数主要有:粘贴长度、保护层的半径和剪切模量以及粘贴层的厚度和剪切模量。

外贴式传感器保护层的主要功能是使光纤能抵抗外界自然环境的作用,而粘贴层则将封装的光纤持续耐久地固定在被测结构上,因此,保护层和粘贴层的材料应具备较好的耐久性、稳定性、耐腐蚀及不易老化等特征,通常可选择高分子复合材料,如环氧树脂、FRP 等。关于几何参数(如粘贴长度、半径及厚度等)则可根据式(3)进行优化设计。

当采用硅橡胶材料作保护层(G_p 为 $6.65 \times 10^7 \text{ N/m}^2$)、硬质胶作粘贴层(G_a 为 $2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)时,根据式(3),利用 LINGO 优化计算软件,

可解得粘贴长度、保护层半径和粘贴层厚度的一组最佳取值为:

$$r_p = 0.15 \text{ mm}, h_a = 0.4 \text{ mm}, L = 0.06 \text{ m}. \quad (4)$$

与该组参数匹配的相对传递误差为 4.8%。此外,由优化分析可知:粘贴长度越长,保护层半径越小,粘贴层厚度越薄,相对传递误差越小。实际应用中,考虑封装层和粘贴层的可操作性,将式(4)提供的系数作为外贴式传感器的设计参考值。

在利用式(3)优化设计传感器的各项材料和几何参数,将其相对误差控制在 5% 以内后,不必要再对所测数据做应变传递误差修正,可认为传感器的测试值能较真实地反映基体的实际应变。此方法即为基于应变传递理论的传感器优化设计方法。由上述分析可知:此方法对传感器的各项参数要求较严格。此外,由于人为失误或机械制作精度等原因,传感器应用的测试模型参数与设计值有出入时,可提取现场各项相关参数的实际值,利用式(1)修正应变传递误差。即利用应变传递理论进行传感器的初步优化设计后,再次利用应变传递理论进行误差修正,以较准确地测量结构的真实应变。

界面剪应力传递变形的传感器可结合传感器和被测结构特征、测试要求等,合理地选择基于应变传递理论的传感器优化设计方法,或者通过应变传递理论初步设计传感器后,再利用应变传递理论进行修正的方法。

依靠两端部夹持块感知基体变形的传感器称为端部扩径式传感器,如图 1 中的②号传感器所示。其力学作用机理是:基体发生伸长变形后,粘贴在基体表面的两个端部夹持块之间的距离也发生改变,从而引起感知光纤在标距范围内的伸长。当基体在标距 $2L$ 区间内的伸长变形为 $2\Delta L$ 时,基体的应变等于:

$$\epsilon_m = \frac{\Delta L}{L}. \quad (5)$$

此时,传感器的伸长量亦为 $2\Delta L$ 。①号传感在标距范围内的伸长量与光纤感知应变的关系可通过室内拉伸实验来标定,设其标定系数为 k ,则有:

$$\epsilon_f = k \frac{\Delta L}{L}. \quad (6)$$

联立式(5)和式(6)可得光纤感知应变和基体应变的表达式为:

$$\epsilon_f = k \epsilon_m. \quad (7)$$

由式(7)可知,通过室内标定实验可以较准确地测定传感器的应变传递系数,且该系数在传感器制作完成后即为定值,不受被测基体材质或形变的影响。

因此,端部扩径型传感器的相关材料和尺寸参数的确定依据如下:(1)根据基体材料特征选定标距长度,即当基体为均质材料时,其标距可取较小值;当其为非均质材料时,标距可根据规范要求取值。(2)保护层的材质需能适应基体的服役环境,且具备较好的耐久性;其半径可根据所需要的量程范围进行调节,即当基体变形较大时,可考虑加厚保护层,以分担感知元件所受到的作用力,反之亦然。(3)选择夹持块的依据首先是能较好地夹住光纤感知元件,且具备高强耐久性特征,从而确保在传递基体变形的过程中,其自身不发生变形或变形极小;其次,选用轻质材料,且尺寸能保证夹住由保护层封装的感知元件即可,以免给基体增加质量。在前述步骤完成后,可通过规范要求标定和调控该传感器的线性度、灵敏度、信噪比、重复性、分辨率、迟滞及漂移等参数。此外,在将该传感器用于结构动力测试时,需校核其稳定性^[4]。即该类传感器的设计不依赖应变传递理论,根据使用要求及工程经验拟定,且光纤感知应变和基体真实应变的定量关系可方便且准确地通过标定实验获取。

2.2 埋入式光纤传感器

为了测试混凝土、复合材料及路面等结构的内部应变,需要采用埋入的方式安置光纤传感器。根据变形传递方式的不同,埋入式传感器可主要分为以下三类:(1)依靠接触界面传递作用的粘贴式传感器,可实现准分布式和分布式测量,如图 3 中的①号传感器;(2)通过对感知元件端部进行扩径处理、依靠两个端部扩径块之间距离的改变传递变形的传感器,通常用来测量局部小范围内的平均应变,如图 3 中的②号传感器;(3)同时依靠接触界面和两端部扩径块传递作用的传感器,如

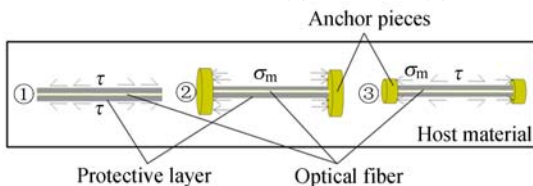


图 3 三种埋入式光纤传感器

Fig. 3 Three types of embedded optical fiber sensors

图 3 中的③号传感器。其中,第①类传感器受应变传递效果的影响最大。

如图 3 所示,①号传感器的基体变形依次通过基体和保护层、保护层和光纤之间的界面剪应力传递到感知光纤。基体应变和光纤感知应变之间的传递关系如下:

$$\beta_{av} = \frac{\epsilon_f}{\epsilon_m}, \quad (8)$$

其中 β_{av} 为应变传递系数。即①号传感器测试的准确性与应变传递效果联系紧密。因此,可通过控制相关的几何和物理参数获取最佳的平均应变传递效率,从而实现传感器参数的优化设计。与①号传感器相对应的平均应变传递系数参考文献^[9],可得其相对误差 ω 为:

$$\omega = (1+C) \sqrt{B_1} \sinh \frac{L}{\sqrt{B_1}} / (L \cosh \frac{L}{\sqrt{B_1}}), \quad (9)$$

其中: $C = \left\{ \frac{(A_1 - B_1)}{[A_1 + (\frac{l}{n\pi})^2](-1)^n} \cosh \frac{l}{\sqrt{B_1}} - 1 \right\}^{-1}$, $A_1 = \frac{E_m(r_m^2 - r_f^2)}{2r_p k_p}$, $B_1 = \frac{E_f r_f}{2k_f}$ 。

埋入式传感器的保护层要求能抵抗土木工程结构施工过程中的振捣力(混凝土结构)、碾压成型作用(沥青混凝土结构)、挤压力(复合材料结构)等^[10],确保光纤在施工和服役过程中成活,同时对基体结构局部应变场的扰动较小。因此,保护层的半径可通过有限元仿真初步拟定(判定标准是对基体局部应变场的扰动小,不影响基体结构的整体性能);然后通过基础实验检验其成活率,从而确定相对较合理的尺寸。保护层的材质需具备中间过渡层特征,即对于刚性结构(如混凝土),可采用物理参数相近的材料(如 FRP)做封装层;对于柔性结构(如沥青混凝土),可采用兼顾柔性和一定强度特征的材料。对于给定的被测基体,保护层半径和材质的选择可通过工程经验、有限元试算和基础实验论证确定。

粘贴长度根据基体待测区域及测试精度要求来确定:当需要进行局部高精度监测时,可采用光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Sensor, FBG)传感器^[11],其测试值通常为传感器标距范围内的平均应变值,且标距通常小于 20 cm;当需要提取结构分布式变形特征时,通常采用串联的 FBG 或分布式光纤传感器^[12-14],测数为空间分辨率范围内的平均应变。即对于给定的被测基体,传感器的粘

贴长度通常由外界因素初步确定,然后根据应变传递效率在特定区间内进行微调。

此外,式(9)中还含有层间粘结系数,即表征基体和保护层、保护层和光纤之间接触界面粘结强度的参量。以文献[9]中的相关几何参数为例,以测量误差小于5%为控制指标,利用式(9)对被测区域确定的基体结构进行优化计算,可解出满足条件的一组层间粘结系数取值为:

$$k_p = 1 \times 10^{10} \text{ N/m}^3, k_f = 2 \times 10^{11} \text{ N/m}^3. \quad (10)$$

其中: k_p 和 k_f 分别代表基体和保护层之间、保护层和光纤之间的层间粘结系数。

应用式(10)参数可得测试模型的相对传递误差为1%。此外,由灵敏度计算分析可知:光纤和保护层之间的层间粘结系数对应变传递效果的影响更加显著。因此,对于通过界面剪应力传递变形的传感器,设计中光纤和保护层之间的层间粘结强度需尽可能大,从而能获得较高的应变传递效率以确保测试的准确性。

埋入式①号传感器的优化设计首先需保证其成活率;然后,传感器的埋入不影响被测基体的结构性能;最后,在前述拟定参数的基础上,以平均应变传递系数尽可能大为目标,对相关的材料参数和几何参数进行局部区间内的设计,确定最佳值。即在满足特定的前提条件下,基于所推导的应变传递理论对①号传感器进行上述优化设计。

图3中,②号传感器的基体应变主要通过两端部夹持块之间相对距离的变化传递到感知光纤,反映其测试机理的公式如下:

$$\epsilon_{\text{mav}} = \frac{2\Delta L}{2L} = \frac{\sigma_m \cdot (A_{\text{anchor}} - A_{\text{sensor}}) 2L}{E_{\text{sensor}} A_{\text{sensor}}} / 2L = k\epsilon_f, \quad (11)$$

其中: ϵ_{mav} 为标距范围内基体的平均应变; $2\Delta L$ 为标距范围内的相对位移变量; k 为传感器的应变灵敏度系数,由实验标定; A_{anchor} 为夹持块的横截面积; A_{sensor} 为传感器的横截面积; E_{sensor} 为传感器的弹性模量,如图4所示。

由式(11)可知:通过精确的标定实验可获取传感器在标距范围内的平均应变,应变传递系数等于该传感器的标定系数,即不论该类传感器的应变传递效率高或低,总可以利用该系数精确地修正应变传递误差,确保较准确地还原基体真实应变。因此,在满足成活率高、埋入后对基体局部

应变场扰动较小的条件后,可从其它角度如高耐久性、稳健性等方面进行此类传感器的优化设计,而不依赖于应变传递理论。例如,夹持块选择需符合下列条件:(1)具备特定的强度,从而在传递变形过程中可忽略自身的变形;(2)具备特定的粘度,从而在变形过程中能较好地夹住光纤,避免滑移引起的测试失效。

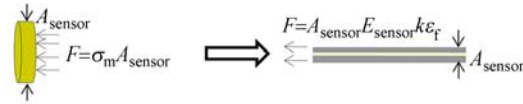


图4 夹持块和封装光纤的作用力传递机理

Fig. 4 Force transfer mechanism between anchors and packaged optical fiber

图3中的③号传感器兼顾了①号和②号传感器所具备的变形传递方式,在工程中有较广泛的应用,如FRP智能防滑筋和锚杆等^[12, 15-16]。根据变形传递机理,利用式(11)可建立基体应变和光纤感知应变的关系:

$$\epsilon_{\text{mav}} = \frac{\Delta L}{L} = \left[\frac{\sigma_m \cdot (A_{\text{anchor}} - A_{\text{sensor}}) L}{E_{\text{sensor}} A_{\text{sensor}}} + \frac{\tau \cdot 2\pi r_p L}{E_{\text{sensor}} A_{\text{sensor}}} \right] / L = k\epsilon_f + \frac{2\pi r_p \tau}{A_{\text{sensor}} E_{\text{sensor}}}. \quad (12)$$

与式(11)相比,式(12)计入了传感器和被测基体接触界面之间的剪应力对应变测试的影响,即常规标定实验获取的系数不能较准确地表征应变传递关系。当近似认为基体和传感器接触面光滑、忽略界面粘结力影响时,②号和③号传感器有相同的应变传递系数,均可通过实验准确地获取。同理,该类传感器的优化设计也不依赖应变传递效率。

综合可知:基于应变传递理论的优化设计较适用于依靠层间界面剪应力传递变形的光纤传感器,即图1和图3中的①号传感器;而端部扩径型光纤传感器的应变传递系数,总可以通过实验标定方式较准确地获取,且端部扩径处理使得基体应变能较高比例地传递到感知光纤,所以其优化设计不依赖应变传递理论。

3 工程化光纤传感器的优先设计指标

根据应变传递理论在光纤传感器优化设计中的应用可知:对于通过界面传递基体变形的传感

器和端部扩径型传感器,影响其应变传递效果的灵敏参数各有不同。

图 1 和图 3 中,①号传感器的测试准确性受应变传递效率的影响较明显,因此,设计参数应尽可能使传感测试模型的平均应变传递系数取最大值。根据参数灵敏度分析和优化设计结果可知,当保护层能较好地保证感知元件的高成活率、且不影响基体结构性能时,该类传感器的优先化设计指标依次为:粘贴长度(感知长度)、各界面的层间粘结强度、保护层弹性模量和半径、粘贴层厚度。

图 1 和图 3 中,②号传感器的基体变形主要通过端部扩径块之间距离的变化传递到感知光纤,由于反映应变传递效果优劣的传递系数可以由实验较精确地标定,通过该标定系数修正误差,能较准确地反映基体在测试标距范围内的平均应变。该类传感器设计时需要优先考虑的因素是夹持块的材料和几何参数。

对于图 3 中的③号传感器,为较准确地获取基体与感知光纤的应变传递关系,由式(12)可知还需要测定封装光纤和基体之间的层间剪应力。与②号传感器相比,设计中需要优先考虑的指标除了夹持块外,还需要考虑传感器和基体之间的层间粘结系数。

为了对比分析②号传感器和③号传感器设计和标定中的差异,这里以端部扩径型传感器在沥青混凝土材料中的应用^[17-18]为例进行说明。当将 FRP 为夹持块、铠装线为光纤保护套管的 FBG 传感器粘贴于基体表面时(见图 5),在标距长度内基体在外部荷载 $\sigma_m A_m$ 作用下产生平均应变 ϵ_m ,传感器对应的伸长量为 $2\Delta L$,则根据线应变理论有:

$$2\Delta L = \epsilon_m \cdot 2L, \quad (13)$$

由此得到传感器的变形 ϵ_s 为:

$$\epsilon_s = \frac{2\Delta L}{2L} = \frac{\epsilon_m \cdot 2L}{2L} = \epsilon_m, \quad (14)$$

即传感器变形即为基体的真实变形。

FBG 传感器的应变 ϵ_s 由 FBG 中心波长变化量 $\Delta\lambda$ 反映。而 $\Delta\lambda$ 与伸长量 $2\Delta L$ 的关系则可方便地由实验标定,如图 6 所示。进行 3 次加、卸载循环后,得到:

$$\Delta\lambda = 1.619\ 89 \times 2\Delta L - 0.125\ 52. \quad (15)$$

联立式(14)和式(15)可得基体应变和 FBG

中心波长变量的关系为:

$$\epsilon_m = \frac{\Delta\lambda + 0.125\ 52}{1.619\ 89 \times 2L} = \frac{\Delta\lambda + 0.125\ 52}{3.239\ 78L}, \quad (16)$$

即由标定实验可精确获得外贴式端部扩径类传感器的基体应变和传感器感知参数之间的关系。传感器可依据抗压强度、稳定性、耐久性等指标进行设计,而不依赖于精度控制设计。

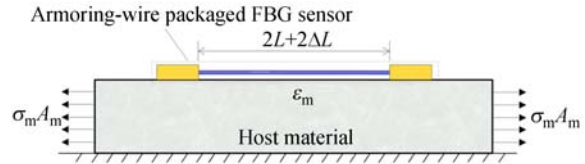
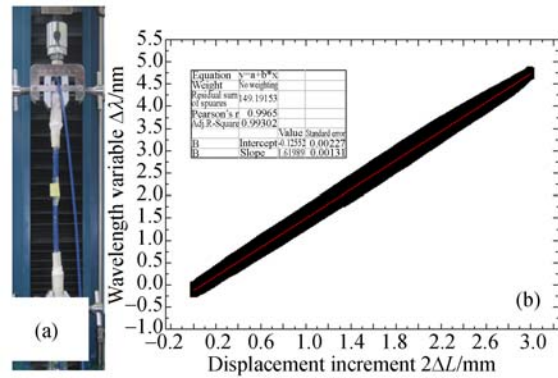


图 5 FBG 传感器外贴于基体的力学模型

Fig. 5 Mechanical model of surface-bonded FBG sensor



(a) 装置 (b) 实验数据

(a) Set-up (b) Experimental data

图 6 常规拉伸标定实验

Fig. 6 Common tensile calibration test

当将该传感器埋入基体测试其内部变形时(如图 7 所示),传感器除受到基体应力 σ_m 作用外,还受保护套管和基体接触界面之间的剪应力 τ_m 作用。根据其力学作用机理,可建立如下方程:

$$\sigma_m \cdot \pi(r_{ep}^2 - r_p^2) + \tau_m \cdot 2\pi r_p L = E_p \epsilon_p \cdot A_p, \quad (17)$$

其中: E_p , ϵ_p , A_p 和 r_p 分别为保护层的弹性模量、应变、横截面积和半径, r_{ep} 为夹持块的半径。横截面积 $A_p = \pi[r_p^2 - (r_p - t_p)^2]$, t_p 为保护层厚度。

引入 Goodman 假设^[19],并采用线应变理论可得到剪应力为:

$$\tau_m = k_m \cdot (\epsilon_m - \epsilon_p) L, \quad (18)$$

其中: k_m 为保护套管和基体接触界面上的层间粘结系数。将式(18)代入式(17)可得:

$$\epsilon_p = \frac{E_m(r_{ep}^2 - r_p^2) + 2kr_p L^2}{2kr_p L^2 + E_p[r_p^2 - (r_p - t_p)^2]} \epsilon_m \quad (19)$$

将式(15)代入式(19)可得中心波长变量和基体应变的关系为:

$$\epsilon_m = \frac{\Delta\lambda + 0.12552}{3.23978L} \cdot \frac{2kr_p L^2 + E_p[r_p^2 - (r_p - t_p)^2]}{E_m(r_{ep}^2 - r_p^2) + 2kr_p L^2} \quad (20)$$

对比式(16)和式(20)可知:端部扩径型传感器外贴或埋入基体的传递系数不同,相比外贴式工艺,埋入式传感器的变形作用机理较复杂,引入了界面剪应力影响,且应变传递系数不能单纯通过标定实验获取。如果忽略剪应力 τ_m 对传感测试的影响,则可统一采用式(16)获取结构的真实变形。

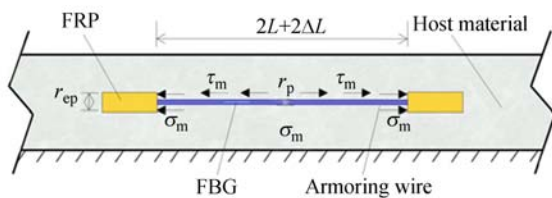


图7 FBG传感器埋入基体的力学模型

Fig. 7 Mechanical model of embedded FBG sensor

此外,图7所示的埋入式FBG传感器基体和中心波长变量之间的定量关系,除了基于常规标定实验,利用式(17)至式(20)步骤进行理论推导换算的方式获取(这里的应变传递分析等效于Habel^[20-22]教授提出的传感器在工程应用时需要

进行二次标定)外,还可以通过改进标定实验的方式获取。即取基体的标准试件,将FBG传感器埋入该试件中,在标定实验中引入被测基体,通过拉伸实验直接获取基体应变和中心波长变量之间的关系。

4 结 论

本文根据变形传递方式的不同,将工程中常用的光纤传感器进行了较系统的归类,发展了基于应变传递理论的传感器优化设计方法。基于所推导的应变传递理论,建立了应变传递系数与工程测量允许误差的函数关系,以此为控制方程对传感器相关的材料参数和几何参数进行了优化设计,获取满足测试精度要求的传感器最佳取值,并得出基于应变传递理论的优化设计方法,较适用于依靠层间界面剪应力传递变形的光纤传感器,而端部扩径型传感器(由于其端部扩径处理较好地保证了基体应变能高效率地传递到感知光纤)的优化设计则不依赖应变传递理论。在优化设计分析的基础上,给出了依靠接触界面剪应力传递变形的传感器的优先化设计指标,而端部扩径型光纤传感器(虽然保护层和夹持块的材料、几何参数等会影响其应变传递系数,然而通过标定实验能够较精确地获取其传递系数值)没有较明显的优先设计指标,并据此进一步给出了此类传感器应用的标定测试建议。

参考文献:

- [1] 周智. 系列光纤传感制品研制与开发及其工程应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
ZHOU ZH. R&D of Series OF-based Products and Their Application in Infrastructures: Report for Doctoral Fellow[D]. Harbin: Harbin Institute University, 2006. (in Chinese)
- [2] 李宏男, 李爱群, 滕军, 等. 结构健康监测系统设计标准[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2012.
LI H N, LI A Q, TENG J, et al.. Design Standard of Structural Health Monitoring System[S]. Beijing: China Building Industry Press, 2012. (In

Chinese)

- [3] 罗军, 吴永红, 许蔚. 埋入式FBG传感器护套参数设计[J]. 传感器与微系统, 2013, 32(8):71-75.
LUO J, WU Y H, XU W. Design on sheath parameters of embedded FBG sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013, 32(8): 71-75. (in Chinese)
- [4] 吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 传感光纤光栅标准化埋入式封装的理论及试验研究[J]. 中国激光, 2010, 37(5): 1290-1293.
WU Y H, SHAO CH J, QU W J, et al.. Basic theoretical model and its experimental investigation for standard embedded sensing fiber Bragg grating

- packaging[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(5): 1290-1293. (in Chinese)
- [5] BASUMALLICK N, BISWAS P, DASGUPTA K, *et al.*. Design in optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 194:31-39.
- [6] LI L T, ZHANG D S, LIU H, *et al.*. Design of enhanced sensitivity FBG strain sensor and application in highway bridge engineering [J]. *Photonic Sensors*, 2014, 4(2):162-167.
- [7] LEUNG C K Y. Fiber optic sensors in concrete: the future [J]. *NDT & E International*, 2001, 34(2): 85-94.
- [8] 王花平. 损伤状态下光纤应变传递及其在多层路面的应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2015.
WANG H P. *Strain Transfer of Optical Fiber Under Damage Conditions and Its Application in Multi-layered Pavements* [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [9] 王花平, 周智, 王倩, 等. 光纤传感器埋入沥青路面基体的应变传递误差[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(6):1499-1507.
WANG H P, ZHOU ZH, WANG Q, *et al.*. Strain transfer error of optical fiber sensors embedded in asphalt pavement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(6):1499-1507. (in Chinese)
- [10] XIONG W, CAI C S, KONG X. Instrumentation design for bridge scour monitoring using fiber Bragg grating sensors [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(5):547-557.
- [11] HAQ M, KHOMENKO A, UDPA L, *et al.*. *Fiber Bragg Grating Sensor Array for Health Monitoring of Bonded Composite Lap-joints* [M]. *Experiment Mechanics of Composite, Hybrid and Multifunctional Materials*, 2014: 189-203.
- [12] ZHOU Z, HE J P, YAN K, *et al.*. Fiber-reinforced polymer packaged optical fiber sensors based on Brillouin optical time domain analysis [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(1): 1-10.
- [13] 梁浩, 张旭革, 路元刚. 基于自发布里渊散射的双路分布式光纤传感器设计与实现[J]. *中国光学*, 2009, 2(1): 60-64.
LIANG H, ZHANG X P, LU Y G. Design and implementation of spontaneous Brillouin scattering based double-trace distributed optical fiber sensor [J]. *Chinese Journal of Optics*, 2009, 2(1):60-64. (in Chinese)
- [14] 徐宁, 戴明. 分布式光纤温度压力传感器设计[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 629-635.
XU N, DAI M. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 629-635. (in Chinese)
- [15] HUANG M H, ZHOU Z, HUANG Y, *et al.*. A distributed self-sensing FRP anchor with built-in optical fiber sensor [J]. *Measurement*, 2013, 46(4):1363-1370.
- [16] HUANG M H, ZHOU Z, YUE S, *et al.*. A novel durable intelligent fiber reinforced polymer anchor with embedded optical fiber Bragg grating sensors [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(5): 1455-1462.
- [17] WANG H P, LIU Q W, HE J P, *et al.*. Functionality enhancement of industrialized optical fiber sensors and system developed for full-scale pavement monitoring [J]. *Sensors*, 2014, 14(5): 8829-8850.
- [18] LIU Q W, WANG H P, ZHOU Z, *et al.*. Optical fiber based sensors with flexible encapsulation for pavement behavior monitoring[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2015, 22(2): 301-313.
- [19] UZAN J, LIVNEH M, ESHED Y. Investigation of adhesion properties between asphaltic-concrete layers [C]. *Association of Asphalt Paving Technologies*, 1978:495-521.
- [20] HABEL W R, SCHUKAR V G, KUSCHE N. How do application-related issues influence the reliability of fiber optic strain measurements [C]. *Sensors IEEE*, 2011: 947-950.
- [21] SCHUKAR V G, KUSCHE N, HABEL W R.

How reliably do fiber Bragg grating patches perform as strain sensors [J]. *IEEE Sensor Journal*, 2012, 12(1): 128-132.

[22] HABEL W R, SCHUKAR V G, KUSCHE N.

Fibre-optic strain sensors are making the leap from lab to industrial use—reliability and validation as a precondition for standards [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24: 1-13.

作者简介:



王花平(1985—),女,湖北武汉人,博士,2007年、2010年于武汉理工大学分别获得学士、硕士学位,2015年于大连理工大学智能结构健康监测研究所获得博士学位,主要从事智能结构健康监测中的力学分析、应变传递误差修正、道路岩土工程结构监测及性能评定。
E-mail: wanghuaping1128@sina.cn



向平(1982—),男,湖南湘西人,博士,高级研究员,2012年于香港城市大学结构工程专业获得博士学位,主要从事结构力学响应分析、纳米材料的多尺度仿真模拟及结构设计理论的研究。
E-mail: pxiangp@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)