

文章编号 1004-924X(2015)05-1254-11

受弯件上粘贴型光纤布拉格光栅的应变传递规律

李天梁, 谭跃刚*, 张翔, 魏来, 董艳方
(武汉理工大学机电工程学院, 湖北武汉 430070)

摘要: 考虑粘贴型光纤布拉格光栅(FBG)测量受弯件时测试效果易受到粘贴参数的影响, 研究了受弯件的粘贴型 FBG 的应变传递规律。首先, 通过理论分析建立了受弯件粘贴型 FBG 应变传递模型, 确定了相关影响参数; 然后, 利用仿真法分析了影响应变传递的各个参数; 最后, 通过实验分析验证了理论与仿真分析结论。实验与仿真对比分析表明: 黏胶长度与黏胶中间层厚度是影响受弯件粘贴型 FBG 应变传递率的主要因素; 黏胶的高度/宽度对应变传递率的影响较小, 测试的静态特性指标相近, 应变传递率分别在 96%/95% 上下小范围内波动。黏胶长度大于 FBG 名义长度 2 倍时, 静态特性明显优于黏胶长度较短者, 实验应变传递率约为 95%。FBG 的应变传递率随黏胶中间层厚度的增大而上升, 甚至超过 100%, 可用于对粘贴型 FBG 传感器的增敏。获得的结论对采用粘贴型 FBG 对受弯件进行高精度测试具有指导意义。

关键词: 粘贴型光纤布拉格光栅; 应变传递; 受弯件; 悬臂梁

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152305.1254

Strain transfer factors of pasted FBG on bending part surface

LI Tian-liang, TAN Yue-gang*, ZHANG Xiang, WEI Lai, DONG Yan-fang

(School of Mechanical and Electronic Engineering,
Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

* Corresponding author, E-mail: ygtan@whut.edu.cn

Abstract: When pasted Fiber Bragg Gratings (FBGs) are used to measure bending parts, the testing results are easily affected by paste parameters. This article researches the strain transfer factors of a pasted FBG under bending parts. Firstly, a pasted FBG strain transfer model was established by theoretical analysis, and the related parameters were determined. Then, the strain transfer parameters were qualitatively analyzed by a simulated analysis method. Finally, the results of theory and simulated analysis were verified by an experimental analysis. The experiment and simulation results show that the length and the middle layer thickness of glue have dominating effects on FBG strain transfer rate under bending parts. The thickness/width of glue are secondary factors, they have a similar result for static properties, and there are small fluctuations near by 96% / 95%, respectively. When the length of glue is more than 2 times of FBG length, its static properties are obviously better than that of shorter length, and the strain transfer rate is about 95%. Moreover, the strain transfer rate of the FBG rises with the augment of middle layer thickness, sometimes even more

收稿日期: 2014-12-29; 修订日期: 2015-02-12.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51375358)

than 100%, so it can be used to enhance the sensitization of a pasted FBG sensor. In the conclusion, the results offer a guidance for the high precision measurement of bending parts by the pasted FBGs.

Key words: pasted Fiber Bragg Grating(FBG); strain transfer; bending part; cantilever beam

1 引言

布拉格光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)的诞生至今已有30多年,它作为一种典型的光纤无源器件,具有体积小、抗电磁干扰、寿命长以及易于实现远距离分布式测量等优势,目前已广泛应用于工程结构、航天器件、大型旋转机械状态监测以及基于FBG的位移、振动等参量的传感器设计中^[1-5],具有巨大的应用前景。

在结构应变监测或者传感器设计中,通常需将FBG粘贴于被测对象或者弹性体表面或者埋入其中,进而实时感知被测体对应的应变值。为此粘贴层的效果直接决定了被测体应变测量的精度以及FBG传感器测试的重复性。国内外许多学者针对粘贴型FBG应变测量的精度影响进行了大量的研究。Ansari等人基于埋入式光纤粘贴长度中心的应变与基体应变相同的假设,获得了光纤的轴向应变和剪应力分布情况^[6]。文献^[7]无需假设基体材料是否受轴向力,建立了埋入式FBG传感器的应变传递模型,并通过有限元软件验证,最后定量分析了不同黏胶层参数对埋入式FBG的应变传递率的影响。梁磊等人定义了应变传递系数,建立了粘贴式FBG应变传感器5层有限元结构模型,通过仿真分析了不同黏接剂、材料的弹性模量以及它们的厚度对应变传递系数的影响,发现减小黏接层厚度可以使FBG测量更准确^[8]。王为等人推导了表面式FBG传感器感测应变与基体应变的关系,仿真分析了衬底厚度和黏结长度对应变传递效果的影响,采用等强度梁实验验证了表面式FBG传感器封装时粘贴长度和衬底厚度两个参数对FBG应变传感器灵敏度的影响^[9]。文献^[10]研究了FBG传感器黏接层材料特性对其应变传递性能的影响,仿真获得了应变传递效率随黏接层弹性模量变化的趋势曲线,并通过实验得到表面采用铅黏接层的应变传递系数维持在0.98左右,采用环氧树脂黏接层的应变传递系数维持在0.90。上海交通大学邱野

系统地研究了在受轴向力时粘贴式FBG的应变传递机制,建立了FBG4层基本结构,加入衬底层的6层结构,基体弹性模量引入应变,非轴向力作用下粘贴时FBG的应变传递模型,并对其进行了仿真分析^[11]。孙丽等人推导了基片式FBG传感器的应变传递公式,并给出了相应的应变传递系数,采用有限元分析验证了理论计算的正确性,最后对钢基片封装的FBG进行了拉伸试验,分析了未经修正的裸FBG应变与真实应变之间的误差,进一步验证了理论计算的正确性^[12]。文献^[13]研究了基于悬臂梁的FBG加速度传感器,根据粘贴型FBG原理研究了悬臂梁在受弯状态下,如何调整粘贴材料参数而获得传感器的最优灵敏度。

以上关于粘贴型FBG应变传递率的研究都基于被测体受到轴向力作用的假设,而在实际测量中许多被测件还会受到弯矩作用而产生应变。本文针对应用于基于FBG的各类传感器,以机械状态健康监测等领域的受弯状态下的粘贴型FBG应变传感器为例,理论上推导了应变传递力学模型,通过ANSYS有限元对该模型中影响应变传递的黏胶长度、黏胶高度、黏胶中间层厚度以及黏胶宽度等参数进行了研究;最后通过对不同应变传递影响参数进行实验,验证了理论仿真模型,并提出了粘贴型FBG对受弯件高精度测量的参考粘贴方法。

2 粘贴式FBG应变传递率理论模型

粘贴式FBG对被测体表面进行应变测量时,通常去除其涂覆层再粘贴至被测体表面,其粘贴模型如图1所示。 M 为施加在被测体上的弯矩, $2l$ 为黏胶长度,略大于光纤光栅的长度,黏胶的其它各尺寸参数如图2所示。为便于后续分析,首先作以下几个假设:

(1)传感器各交界面在弯矩作用过程中始终紧密相连;

(2)各层材料为各向同性,且为线弹性体。

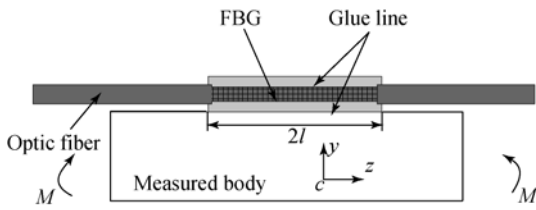
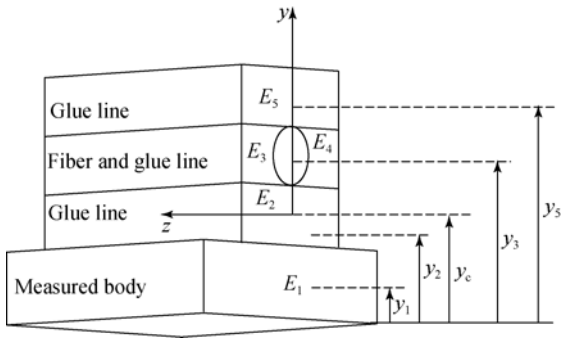


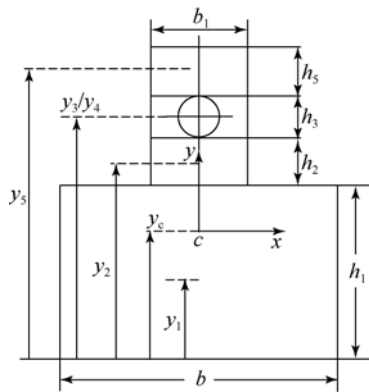
图 1 受弯件上粘贴式 FBG 的纵截面示意图

Fig. 1 Longitudinal section of pasted FBG on surface of bending parts



(a) 受弯件上粘贴型 FBG 模型的等轴视图

(a) Isometric view of pasted FBG on surface of bending part model



(b) 受弯件上粘贴型 FBG 模型的横截面图

(b) Cross-section view of pasted FBG on surface of bending part model

图 2 受弯件上粘贴型 FBG 模型

Fig. 2 Model of pasted FBG on surface of bending parts

图 2 为粘贴式 FBG 等轴视图和横截面图,其中选取该模型横截面对称轴与中性层的交点作为坐标原点,将 FBG、黏胶与被测体如图截取,将黏胶层分为 3 层,以与 FBG 的上下相切面为界进行分割。为便于分析,将被测体记为 1,依次往上编号胶层 2,FBG 为 3,胶层 4,以及胶层 5, y_1, y_2, y_3, y_4 和 y_5 分别为被测体,胶层 2,FBG,胶层 4 以及胶层 5 与被测体底部的距离。由此可知,胶层的弹性模量 $E_2 = E_4 = E_5$;FBG 的形心位置与

胶层 4 的形心相重合 $y_3 = y_4$ 。

根据材料力学中的物理关系可知:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{E_1 \cdot y}{\rho} \\ \sigma_2 = \frac{E_2 \cdot y}{\rho} \\ \sigma_3 = \frac{E_3 \cdot y}{\rho} \\ \sigma_4 = \frac{E_4 \cdot y}{\rho} \\ \sigma_5 = \frac{E_5 \cdot y}{\rho} \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 和 σ_5 分别为被测体,胶层 2,FBG,胶层 4 以及胶层 5 的应力; E_1, E_2, E_3, E_4 和 E_5 为被测体,胶层 2,FBG,胶层 4 以及胶层 5 的弹性模量; ρ 为粘贴型 FBG 的曲率半径; y 为任意层与中心层的距离。

对于粘贴型 FBG 的任意横截面,根据静力学平衡定理都存在以下关系:

$$\sum F_x = \int_{A_1} \sigma_1 dA + \int_{A_2} \sigma_2 dA + \int_{A_3} \sigma_3 dA + \int_{A_4} \sigma_4 dA + \int_{A_5} \sigma_5 dA = 0, \quad (2)$$

$$\sum M_z = \int_{A_1} y\sigma_1 dA + \int_{A_2} y\sigma_2 dA + \int_{A_3} y\sigma_3 dA + \int_{A_4} y\sigma_4 dA + \int_{A_5} y\sigma_5 dA, \quad (3)$$

其中: A_1, A_2, A_3, A_4 和 A_5 分别为被测体,胶层 2,FBG,胶层 4 以及胶层 5 的横截面面积。

结合静距的定义,将式(2)整理简化可得中性层距离被测体底部的距离 y_c 为:

$$y_c = \frac{E_1 A_1 y_1 + E_2 A_2 y_2 + E_3 A_3 y_3 + E_4 A_4 y_4 + E_5 A_5 y_5}{E_1 A_1 + E_2 A_2 + E_3 A_3 + E_4 A_4 + E_5 A_5} = \frac{\sum_{i=1}^5 E_i A_i y_i}{\sum_{i=1}^5 E_i A_i} \quad (4)$$

其中: S_1, S_2, S_3, S_4 和 S_5 分别为被测体,胶层 2,FBG,胶层 4 以及胶层 5 对 z 轴的静距。

根据材料力学理论,由式(3)可得:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M}{\sum_{i=1}^5 E_i I_i} \quad (5)$$

式中: I_1, I_2, I_3, I_4 和 I_5 分别为被测体,胶层 2,FBG,胶层 4 以及胶层 5 对 z 轴的惯性矩。其中:

$$I_1 = \frac{bh_1^3}{12} + bh_1 (y_1 - y_c)^2, \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{b_1 h_2^3}{12} + b_1 h_2 (y_2 - y_c)^2, \quad (7)$$

$$I_3 = \frac{\pi h_3^4}{64} + \frac{\pi h_3^2}{4} (y_3 - y_c)^2, \quad (8)$$

$$I_4 = \frac{b_1 h_4^3}{12} + b_1 h_4 (y_4 - y_c)^2 - I_3, \quad (9)$$

$$I_5 = \frac{b_1 h_5^3}{12} + b_1 h_5 (y_5 - y_c)^2, \quad (10)$$

式中: h_1, h_2, h_3, h_4 和 h_5 分别为被测体, 胶层 2, FBG, 胶层 4 以及胶层 5 的厚度, b_1 为胶层的宽度。

根据材料力学可得模型任意层的应变为:

$$\epsilon = \frac{y}{\rho} = \frac{yM}{\sum_{i=1}^5 E_i I_i}. \quad (11)$$

为此, 结合式(4)和式(11)可知, FBG 感知应变为:

$$\epsilon_i = \frac{\left[\frac{2h_1 + 2h_2 + h_3}{2} - \frac{\sum_{i=1}^5 E_i A_i y_i}{\sum_{i=1}^5 E_i A_i} \right] M}{\sum_{i=1}^5 E_i I_i}. \quad (12)$$

由于 FBG 有一定的长度, 在粘贴式 FBG 传感器的实际应用中, 传感器所测得的应变是光纤整个粘贴长度范围内的平均应变:

$$\bar{\epsilon} = \int_{-l}^l \epsilon_i dx = \int_{-l}^l \frac{\left[\frac{2h_1 + 2h_2 + h_3}{2} - \frac{\sum_{i=1}^5 E_i A_i y_i}{\sum_{i=1}^5 E_i A_i} \right] M}{\sum_{i=1}^5 E_i I_i} dx, \quad (13)$$

其中: $2l$ 为黏胶的长度。由式(13)可知, FBG 所获得应变与粘贴模型的尺寸有关。其中黏胶长度(如图 1 中的 $2l$), 中间层厚度(图 2 中的胶层 2 的 h_2), 高度(图 2 中的 $h_2 + h_3 + h_5$)与宽度(图 2 中的 b_1)是影响受弯件中粘贴型 FBG 应变传递的主要因素, 为此后续主要针对这几个因素进行研究。

3 仿真分析

本文选用等强度悬臂梁作为研究对象来验证

理论模型, 其中该等强度梁的关键结构尺寸如图 3 所示。采用有限元软件 ANSYS 对它进行静力仿真分析, 仿真模型中各部分材料属性如表 1 所示。使用 Mesh 的扫略功能对胶层和光纤进行网格划分, 对等强度梁进行控制全局尺寸智能网格划分; 然后在等强度梁的末端施加全约束; 最后通过使用 Mass21 单元在等强度梁的末端孔内建立质量单元, 并与圆孔内面节点刚化耦合, 然后在 Mass21 单元节点上施加 10 N 的集中载荷。

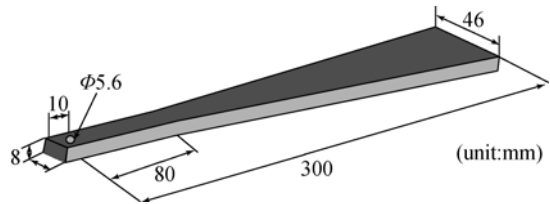


图 3 悬臂梁三维尺寸图
Fig. 3 Three dimensional chart of cantilever beam

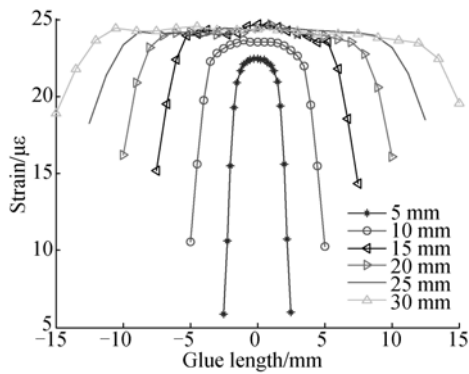
表 1 仿真模型各部分材料的属性

Tab. 1 Material properties of simulated model

材料	悬臂梁	黏胶	光纤
弹性模量/GPa	210	3.3	72
泊松比	0.3	0.35	0.17

3.1 黏胶长度影响

图 4 为不同黏胶长度下 FBG 纤芯应变沿黏胶长度方向的变化曲线。由图 4 可知, 光纤纤芯上感应的应变在胶层长度中间最大, 两侧最小; 光纤纤芯上感应的应变平稳区域随黏胶长度的增大而增大, 提取各黏胶长度下 FBG 的有效长度(图 4 中应变平稳段长度)如表 2 所示。从表中发现, 平稳区域长度即 FBG 的有效长度约为黏胶长度的 1.5~3 倍; 提取图 4 中各黏胶长度下平稳段的应变均值, 结合等强度梁表面的应变值, 得到 FBG 纤芯中心的平均应变传递率与黏胶长度的变化关系, 如图 5 所示。由图可知, 光纤纤芯的应变传递率随黏胶长度的变化趋于稳定, 约为 89%。综合表 2 和图 5 可知, 当黏胶长度大于 FBG 长度的 2 倍时, 应变传递率趋于平稳。



$b_1 = 5 \text{ mm}, h_2 + h_3 + h_5 = 1 \text{ mm}, h_2 + h_3 / 2 = 0.1 \text{ mm}$

图 4 不同黏胶长度下 FBG 纤芯应变沿黏胶长度方向的变化

Fig. 4 Variation of FBG core strain along glue length direction under different glue lengths

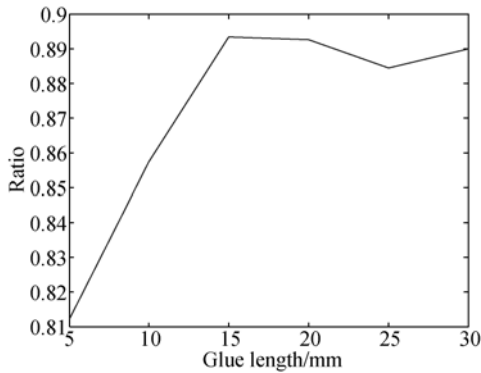


图 5 FBG 纤芯中心平均应变传递率与黏胶长度的变化趋势

Fig. 5 Average strain transfer rate of FBG core versus glue length

表 2 不同黏胶长度下的 FBG 有效长度

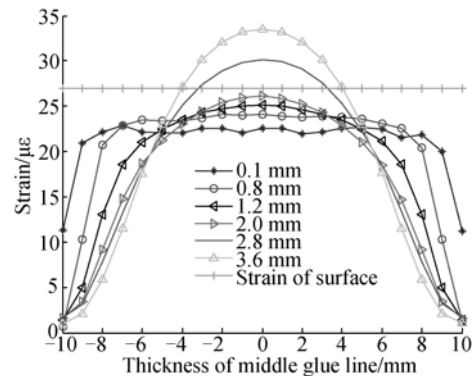
Tab. 2 FBG effective length under different glue lengths

黏胶长度/mm	5	10	15	20	25	30
FBG 有效长度/mm	1.5	5	7.5	11.25	17	20

3.2 黏胶中间层厚度的影响

图 6 为不同黏胶厚度 FBG 纤芯应变沿黏胶长度方向的变化图。由图 6 可知, 光纤纤芯上感应的应变平稳区域随黏胶中间层厚度的增大而减小; 提取各黏胶中间层厚度下 FBG 的有效长度如表 3 所示, FBG 有效长度随中间层厚度的增大而减小。根据图 6 中各中间层厚度下平稳段应变的均值, 绘制 FBG 纤芯中心平均应变传递率与黏胶

长度的变化关系, 如图 7 所示。由图可知, 光纤纤芯的应变传递率随黏胶中间层厚度的增大而增大, 为此可以适当控制中间层厚度实现粘贴式 FBG 应变测量的增敏。但由于 FBG 的有效长度减小, 长度在测量中容易出现啁啾现象, 为此需控制在适当范围内。



$b_1 = 5 \text{ mm}, 2l = 20 \text{ mm}, h_2 + h_3 + h_5 = 4 \text{ mm}$

图 6 不同黏胶厚度下 FBG 纤芯应变沿黏胶长度方向的变化

Fig. 6 Variation of FBG core strain along glue length direction under different glue middle layer thicknesses

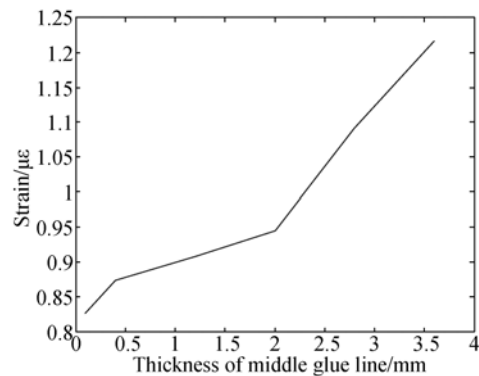


图 7 FBG 纤芯中心平均应变传递率与黏胶中间层厚度的变化趋势

Fig. 7 Average strain transfer rate of FBG core versus glue middle layer thickness

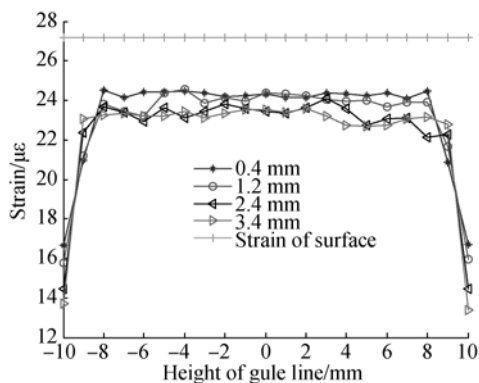
表 3 不同黏胶中间层厚度下的 FBG 有效长度

Tab. 3 FBG effective length with different glue middle layer thicknesses

中间层厚度/mm	0	0.8	1.2	2	2.8	3.6
FBG 有效长度/mm	18	14	8	4	2	2

3.3 黏胶高度/宽度的影响

图 8 为不同黏胶高度下 FBG 纤芯应变沿黏胶长度方向的变化图。由图 8 可知,光纤纤芯上感应的应变平稳区域随黏胶高度的增大而增大,但总体变化不大。根据表 4 不同黏胶高度下 FBG 测量的有效长度和图 9 FBG 纤芯中心平均应变传递率与黏胶高度的变化趋势可知:胶层高度对应变感应率以及 FBG 有效长度的影响较小。



$$b_1 = 5 \text{ mm}, 2l = 20 \text{ mm}, h_2 + h_3 / 2 = 0.1 \text{ mm}$$

图 8 不同黏胶高度下 FBG 纤芯应变沿黏胶长度方向的变化

Fig. 8 Variation of FBG core strain along glue length direction under different glue heights

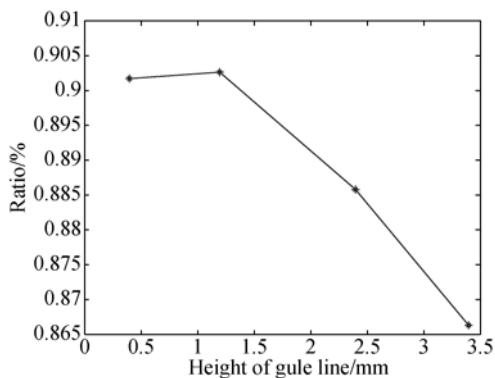


图 9 FBG 纤芯中心平均应变传递率与黏胶高度的变化
Fig. 9 Average strain transfer rate of FBG core versus glue height

表 4 不同黏胶高度下 FBG 的有效长度

Tab. 4 Effective length of FBG at different glue heights

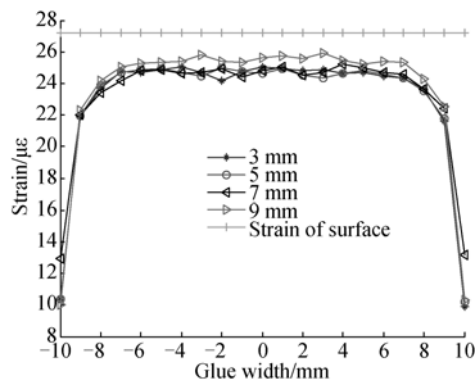
黏胶高度/mm	0.4	1.2	2.4	3.4
FBG 有效长度/mm	16	16	18	18

由图 10 和表 5 可知:光纤纤芯上感应的应变平稳区域随黏胶宽度的增大几乎不变,FBG 的有效长度也为定值。由图 11 可知,平均应变传递率随黏胶宽度的增大变化也不大。

表 5 不同黏胶宽度下 FBG 的有效长度

Tab. 5 Effective length of FBG at different glue widths

胶层宽度/mm	3	5	7	9
FBG 有效长度/mm	14	14	14	14



$$h_2 + h_3 + h_5 = 1 \text{ mm}, 2l = 20 \text{ mm}, h_2 + h_3 / 2 = 0.1 \text{ mm}$$

图 10 不同黏胶宽度下 FBG 纤芯应变沿黏胶长度方向的变化

Fig. 10 Variation of FBG core strain along glue length direction under different glue widths

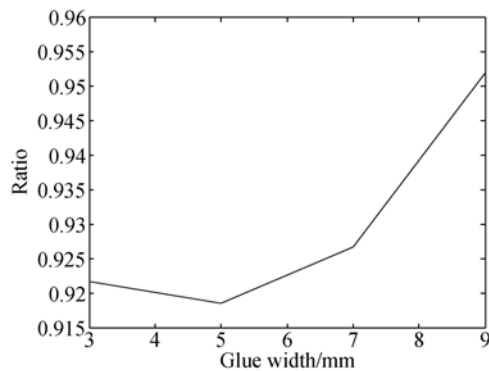


图 11 FBG 纤芯中心平均应变传递率与黏胶宽度的变化
Fig. 11 Average strain transfer rate of FBG core versus glue width

4 实验分析

将 FBGs 粘贴于等强度梁表面,分别控制与仿真相同的尺寸变量。实验中,在悬臂梁末端施加 1,2,3,4,5 以及 7 kg 的负载,采用 FBG 解调

仪记录各负载下 FBG 的中心波长。实验系统与原理如图 12 所示。

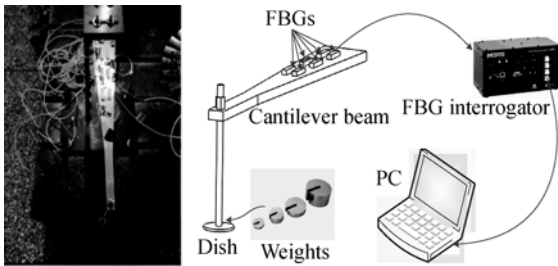


图 12 试验系统原理与实物图

Fig. 12 Principle and physical map of test system

4.1 黏胶长度实验

选用名义长度为 5 mm 的 FBG, 其中黏胶的宽度为 5 mm, 高度为 1 mm, 在悬臂梁表面粘贴 6 个 FBG, 黏胶长度分别控制为 5, 10, 15, 20, 25 以及 30 mm。图 13 为 FBG 应变测量与负载的关系曲线, 由图可知 FBG 应变传感器的静态曲线斜率随黏胶长度的增大而增大, 黏胶长度为 5 mm 的灵敏度最差。FBG 的应变传递率与黏胶长度的关系如图 14 所示。从图中发现, 当黏胶为 FBG 名义尺寸的 2~3 倍时, 应变传递率趋于稳定, 约为 95%, 其原因在于 FBG 的感知应变为一定测量长度的应变均值, 只有在一定黏胶长度下, FBG 的应变才能更接近于被测体的真实值。不同黏胶长度下 FBG 应变传感器的静态特性如表 6 所示, 黏胶长度较长者所获得的测试静态指标明显优于黏胶长度较短者。

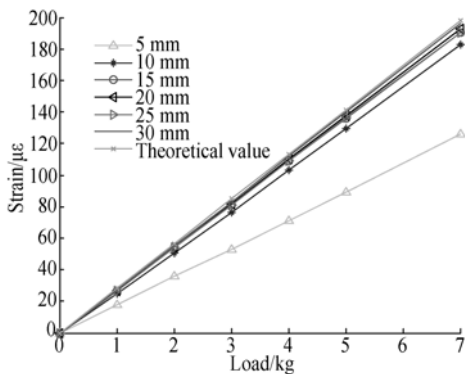


图 13 不同黏胶长度下 FBG 应变测量值与负载的关系曲线

Fig. 13 Strain of FBG core versus load under different glue lengths

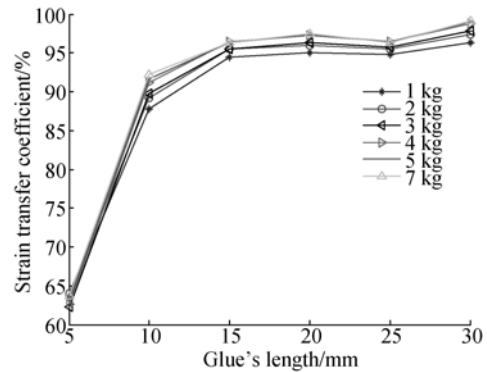


图 14 FBG 的应变传递率与黏胶长度的关系

Fig. 14 Strain transfer rate of FBG core versus glue length

表 6 5 mm-FBG 不同黏胶长度的静态特性

Tab. 6 Static properties of 5 mm-FBG under different glue lengths

黏胶长度/mm	灵敏度 / $\mu\epsilon$	线性度 /%	迟滞 误差/%	重复性 误差/%
5	17.94	0.64	6.50	9.75
10	26.15	0.68	3.70	6.24
15	27.29	0.23	2.87	5.45
20	27.63	0.33	3.19	5.44
25	27.29	0.18	2.96	5.44
30	28.09	0.36	3.20	5.45

4.2 黏胶中间层厚度实验

选用名义长度为 8 mm 的 FBG, 其中黏胶的宽度为 5 mm, 高度为 4 mm, 在悬臂梁表面粘贴 6 个 FBG, 黏胶中间层厚度分别控制为 0, 0.4, 1.2, 2, 2.8 以及 3.6 mm。图 15 为 FBG 应变测量值与负载的关系曲线, 由图 15 可知, 黏胶中间层厚度为 3.6 mm 时 FBG 应变测量值曲线在理论计算曲线上侧, 而其它中间层厚度对应的 FBG 应变测量值都在理论曲线的下侧。FBG 的应变传递率与黏胶长度的关系如图 16 所示, 从图中发现, FBG 应变传递率随黏胶中间层厚度的增大先减小然后增大, 总体为上升趋势, 这是由于中间层厚度的变化引起了 FBG 纤芯中心与被测体的中性层距离的改变, 进而导致 FBG 的应变灵敏度随黏胶中间层厚度的增大而增大。不同黏胶中间层厚度的 FBG 应变测量的静态特性如表 7 所示, 除灵敏度差别较大之外,

所有静态指标差异不大。由此可知,黏胶中间层厚度的变化是影响 FBG 应变传感器灵敏度的主要因素。

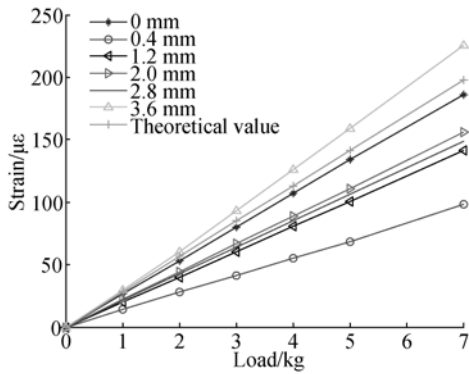


图 15 不同黏胶中间层厚度的 FBG 应变测量值与负载的关系曲线

Fig. 15 Strain of FBG core versus load under different glue middle layer thicknesses

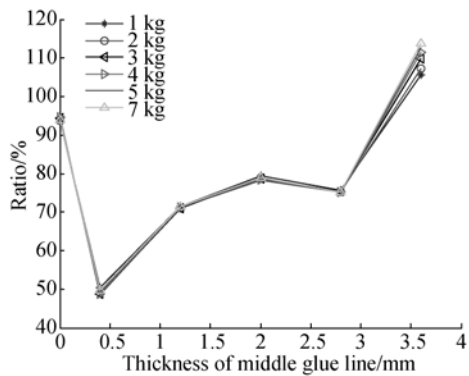


图 16 FBG 的应变传递率与黏胶中间层的关系

Fig. 16 Strain transfer rate of FBG core versus glue middle layer thickness

表 7 8 mm-FBG 不同黏胶中间层厚度的静态特性

Tab. 7 Static properties of 8 mm-FBG under different glue middle layer thicknesses

黏胶中间层厚度/mm	灵敏度/ $\mu\epsilon$	线性度/%	迟滞误差/%	重复性误差/%
0	26.66	0.30	0.48	0.87
0.4	13.95	1.11	12.87	3.53
1.2	20.19	0.23	5.05	1.69
2.0	22.24	0.37	6.37	2.04
2.8	21.24	0.07	3.26	1.46
3.6	32.33	1.07	1.85	1.08

4.3 黏胶高度实验

选用名义长度为 8 mm 的 FBG,其中黏胶的宽度为 5 mm,在悬臂梁表面粘贴 4 个 FBG,黏胶高度分别控制为 0.4,1.2,2.4 以及 3.4 mm。图 17 为 FBG 应变测量值与负载的关系曲线,由图可知不同黏胶高度的 FBG 应变测量曲线都处于理论计算曲线附近。FBG 的应变传递率与黏胶高度的关系如图 18 所示,从图中发现,FBG 的应变传递率在 96%上下波动,变化较小,其主要原因是:由式(13)可知黏胶高度主要对其惯性矩有一定的影响,但由于黏胶高度相对被测件较小,它的变化对整体的惯性矩影响不大,所以不同黏胶高度下 FBG 的应变静态特性曲线几乎重合。不同黏胶高度下 FBG 应变测量的静态特性如表 8 所示,所有静态指标的差异不大。

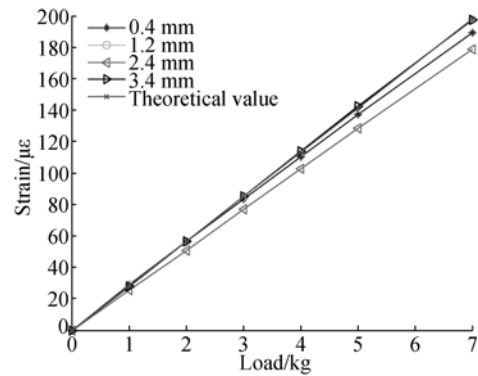


图 17 不同黏胶高度下 FBG 应变测量值与负载的关系曲线

Fig. 17 Strain of FBG core versus load under different glue heights

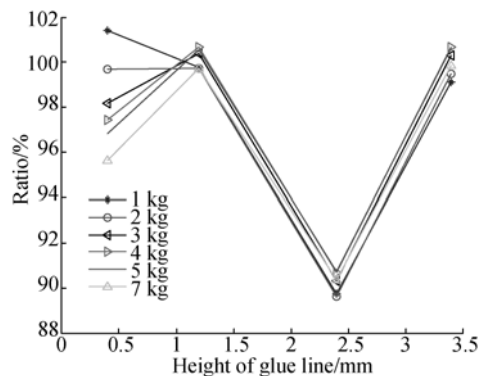


图 18 FBG 的应变传递率与黏胶层高度的关系

Fig. 18 Strain transfer rate of FBG core versus glue height

表 8 8 mm-FBG 不同黏胶高度的静态特性

Tab. 8 Static properties of 8 mm-FBG under different glue heights

黏胶高度/mm	灵敏度/ $\mu\epsilon$	线性度/%	迟滞误差/%	重复性误差/%
0.4	27.00	0.82	0.32	0.43
1.2	28.28	0.36	0.25	0.43
2.4	25.61	0.23	0.33	0.49
3.4	28.33	0.33	0.32	0.43

4.4 黏胶宽度实验

采用名义长度为 8 mm 的光纤光栅实验,其中黏胶长度控制为 20 mm,厚度为 1 mm,在悬臂梁表面粘贴 4 个 FBG,黏胶宽度分别控制为 3, 5, 7 和 9 mm。图 19 为 FBG 应变测量值与负载的关系曲线,由图可知不同黏胶宽度的 FBG 应变测量值曲线也处于理论计算曲线附近。

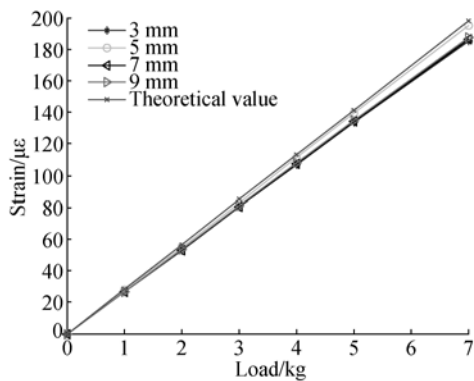


图 19 不同黏胶宽度的 FBG 应变测量值与负载的关系曲线

Fig. 19 Strain of FBG core versus load under different glue widths

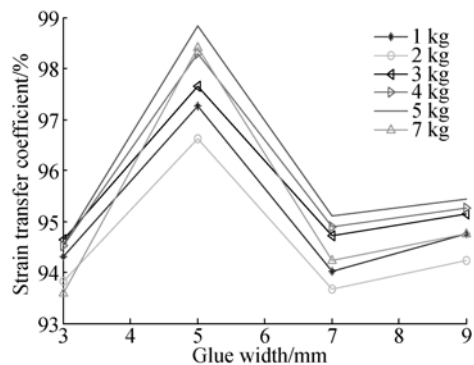


图 20 FBG 的应变传递率与黏胶层宽度的关系

Fig. 20 Strain transfer rate of FBG core versus glue width

FBG 的应变传递率与黏胶高度的关系如图 20 所示,从图中发现,FBG 的应变传递率在 95% 上下波动,黏胶宽度对 FBG 应变的影响与黏胶高度类似。不同黏胶宽度的 FBG 应变测量的静态特性如表 9 所示,由表可知黏胶宽度对不同测试静态指标的影响较小。

表 9 8 mm-FBG 不同黏胶宽度的静态特性

Tab. 9 Static properties of 8 mm-FBG under different glue widths

黏胶宽度/mm	灵敏度/ $\mu\epsilon$	线性度/%	迟滞误差/%	重复性误差/%
3	26.54	0.42	3.07	4.57
5	27.91	0.36	3.41	5.01
7	26.75	0.40	3.19	4.64
9	26.87	0.65	3.25	4.79

5 讨论分析

将实验中各负载下的应变传递率求取平均后与仿真应变传递率值对比可得图 21(仿真与实验下不同胶层参数的应变传递率)。

由图 21(a)可知,仿真所获得的胶层长度与应变传递率曲线和实验曲线趋势基本一致。由表 2 可知,当仿真中胶层长度 > 10 mm 时,FBG 的有效长度 > 5 mm,而实验中 FBG 的名义长度为 5 mm,由图可知,当黏胶长度大于 FBG 长度的 2 倍时,应变传递率趋于稳定。

由图 21(b)和 21(d)可知,仿真与实验的应变传递率随胶层高度或胶层宽度的增大,分别在 96%, 95% 上下小范围内波动。

由图 21(c)可知,仿真与实验的应变传递率曲线都随中间层厚度的增大而上升,趋势基本一致。图 21(a)与(c)中仿真与实验曲线一致性相较 21(b)与(d)好,4 种状态下实验与仿真结论基本一致,但实验与仿真总体上仍存在一定的误差。如图 21(a)中仿真的应变传递率稳定值约为 89%,而实验值为 95%,其主要原因:(1)仿真中假设的物理参数与实验中各材料的物理参数并不相等;(2)实验中黏胶参数的控制与理论值存在一定的误差;(3)仿真中假设胶层为线性单元,但在实际中胶层受力属于非线性。

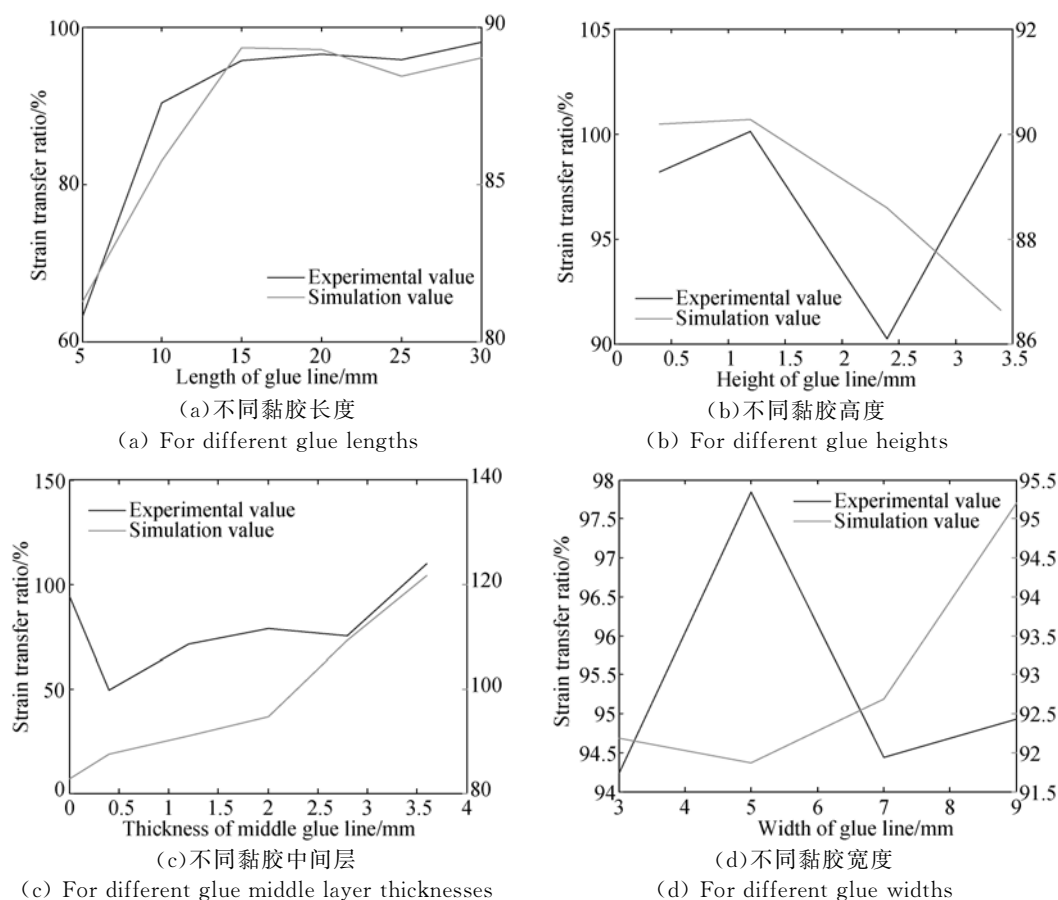


图 21 不同胶层参数下 FBG 纤芯的应变传递率

Fig. 21 Average strain transfer rates of FBG core under different glue parameters

6 结 论

本文建立了受弯件上粘贴型 FBG 的应变传递模型,通过仿真和实验对黏胶长度,黏胶高度,黏胶中间层厚度以及黏胶宽度等参数对应变传递率的影响进行了研究。实验与仿真对比分析表明:黏胶长度与黏胶中间层厚度是影响受弯件 FBG 应变传递率的主要因素;黏胶的高度和宽度对应变传递率的影响较小,静态特性指标相近,应变传递率分别在 96% 和 95% 上下的小范围内波

动;黏胶长度大于 FBG 名义长度的 2 倍时,静态特性明显优于黏胶长度较短者,实验应变传递率约为 95%;FBG 的应变传递率随黏胶中间层厚度的增大而上升,甚至超过 100%,可作为粘贴型 FBG 传感器的增敏方法使用。

在使用粘贴型 FBG 测量受弯件应变时,为保证测试结果更接近真实值以及具有更好的重复性,黏胶的长度应大于 FBG 有效长度的 2 倍,将 FBG 紧贴被测件表面。此外,对黏胶中间层厚度的调整也可改变粘贴型 FBG 传感器的灵敏度。

参考文献:

- [1] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [2] 姜德生,何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光

电子·激光,2002(4):420-430.

JIANG D SH, HE W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2002(4):420-430. (in Chinese)

- [3] 唐炜,史仪凯. Bragg 光纤传感技术应用研究[J]. *光学精密工程*,2002(1):79-83.

TANG W, SHI Y K. Optical fiber Bragg grating

- sensing technology [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2002 (1):79-83. (in Chinese)
- [4] 徐国权, 熊代余. 光纤光栅传感技术在工程中的应用[J]. *中国光学*, 2013,6(3): 306-317
XU G Q, XIONG D Y. Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering [J]. *Chinese Optics*, 2013,6(3): 306-317. (in Chinese)
- [5] 李爱群, 周广东. 光纤 Bragg 光栅传感器测试技术研究进展与展望(II): 位移, 加速度, 索力, 钢筋锈蚀, 裂缝测试[J]. *东南大学学报: 自然科学版*, 2009, 39(6): 1307-1314.
LI A Q, ZHOU G D. Progress and prospect of fiber Bragg grating sensors measurement technology (II): displacement, acceleration, cable force, corrosion, and crack measurement[J]. *Journal of Southeast University: Natural Science Edition*, 2009, 39(6): 1307-1314. (in Chinese)
- [6] ANSARI F, LIBO Y. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. *Journal of Engineering Mechanics*, 1998, 124(4): 385-394.
- [7] WU R, ZHENG B, FU K, *et al.*. Study on strain transfer of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(8): 085105.
- [8] 梁磊, 王艳妮, 刘德力. 粘贴式光纤光栅应变传感器的应变传递分析[J]. *武汉理工大学学报*, 2008,10: 144-146.
LIANG L, WANG Y N, LIU D L. Strain transferring analysis of pasted strain fiber Bragg grating sensor [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2008,10:144-146. (in Chinese)
- [9] 王为, 林玉池, 黄银国. 表面式光纤光栅传感器应变传递研究[J]. *激光与红外*, 2008,12:1218-1220.
WANG W, LIN Y CH, HUANG Y G. Research on strain transferring of surface FBG sensor [J]. *Laser & Infrared*, 2008,12:1218-1220. (in Chinese)
- [10] 吴俊, 陈伟民, 章鹏, 等. 粘接层弹性模量对光纤 Bragg 光栅传感器应变传递性能的影响[J]. *光学精密工程*, 2011,12:2941-2946.
WU J, CHEN W M, ZHANG P, *et al.*. Influence of bond layer characteristics on strain sensing properties of FBG sensors [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011,12:2941-2946. (in Chinese)
- [11] 邱野. 表面粘贴式 FBG 传感器应变传递机制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
QIU Y. *Strain transferring mechanism analysis of surface-bonded FBG sensor* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012. (in Chinese)
- [12] 孙丽, 岳川云, 宋岩升. 基片式光纤布拉格光栅传感器应变传递分析[J]. *光电子·激光*, 2013(5): 849-854.
SUN L, YUE CH Y, SONG Y SH. Strain transfer analysis of substrate fiber Bragg grating sensor [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2013(5): 849-854. (in Chinese)
- [13] BASIMALICK N, BISWAS P, DASGUPTA K, *et al.*. Design optimization of fiber Bragg grating accelerometer for maximum sensitivity[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, 194: 31-39.

作者简介:



李天梁(1990—),男,江西吉安人,博士研究生,2014年于武汉理工大学获得硕士学位,主要从事光纤光栅传感技术,振动仪器仪表设计以及机械状态监测与故障诊断的研究。E-mail: tianliang.liwhut@sina.com

导师简介:



谭跃刚(1959—),男,教授,博士生导师,1983年,1989年于重庆大学分别获得学士、硕士学位,2005年于武汉理工大学获得博士学位,主要从事机器人及其控制,机械装备动态监测技术与应用等方面的研究。E-mail: ygtan@whut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)