

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2016.05.008



# 用于较大水平位移测量的电阻应变式位移传感器

牛庆芳, 师希望, 陈金永, 魏剑伟, 李铁英

(太原理工大学 建筑与土木工程学院, 太原 030024)

**摘要:**针对目前位移传感器很难直接测得木结构或木构件在转动中产生较大绝对水平位移的问题,研制了量程为 $\pm 500$  mm的电阻应变式位移传感器(WD位移传感器),应用正交试验法分析WD位移传感器的影响因素,并对其进行设计与制作,拟合了传感器在不同量程下应变-位移的分段函数关系,通过计算得出了WD位移传感器的6种静态参数指标。试验结果表明,WD位移传感器克服了传统电阻应变式位移传感器量程小的问题,解决了木结构或木构件发生非直线运动很难直接测得绝对水平位移的问题,且各静态参数指标良好。

**关键词:**位移传感器;正交试验;应变-位移函数;静态参数

**中图分类号:**TU317 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2016)05-0059-07

## A kind of new sensor used in the measurement of large horizontal displacement

Niu Qingfang, Shi Xiwang, Chen Jinyong, Wei Jianwei, Li Tieying

(College of Architecture and Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China)

**Abstract:** WD displacement sensor with a range of  $\pm 500$ mm is developed in order to measure large horizontal displacement. And the parameters analysis of WD displacement sensor are carried on using the orthogonal test method. The strain-displacement relationship of sensor is obtained. Six static parameters of WD displacement sensor are calculated. The experimental results showed that WD displacement sensor could measure the non-linear large displacement which is difficult to be measured directly by traditional electrical resistance sensor and all the static parameters are in good condition.

**Keywords:** displacement sensor; orthogonal test; strain-displacement relationship; static parameters

水平位移是反映结构力学性能的重要参数,木结构较钢结构、混凝土结构的水平位移大。薛建阳等<sup>[1]</sup>对使用碳纤维布加固的木结构输入地震波,在

8度罕遇地震( $0.41 \sim 0.61 \text{ m/s}^2$ )时,柱头最大水平位移达到100.28 mm;隋奕等<sup>[2]</sup>在殿堂式木结构模型振动台试验中输入EL-Centro波,柱头最大水平

收稿日期:2016-05-06

基金项目:国家自然科学基金(51338001,51278324)

作者简介:牛庆芳(1979-),女,博士生,主要从事古建木结构研究,(E-mail)niuqingfang@tyut.edu.cn。

李铁英(通信作者),教授,博士生导师,(E-mail)lty680412@163.com。

Received:2016-05-06

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51338001, 51278324)

Author brief: Niu Qingfang (1980-), PhD candidate, main research interest: ancient timber structure, (E-mail) niuqingfang@tyut.edu.cn.

Li Tieying (corresponding author), professor, doctoral supervisor, (E-mail) lty680412@163.com.

位移为 101.951 mm;Folz 等<sup>[3]</sup>在木结构模型的试验中测得结构的相对水平位移最大为 109.6 mm;周乾等<sup>[4-5]</sup>对故宫神武门进行了地震反应研究,在 8 度罕遇地震作用下,屋顶节点的位移在水平方向的响应峰值达 153 mm,对大雄宝殿采用三维激光扫描仪测得最大柱头侧移值为 220 mm;高大峰等<sup>[6]</sup>采用 EL-Centro 波对西安永宁门箭楼结构进行了抗震性能分析,得出了屋顶最大水平位移 253.33 mm;Maeno 等<sup>[7]</sup>对传统木结构的地震响应特征的研究中将柱的水平位移控制到 300 mm。很多研究人员研发了适合其领域的位移传感器<sup>[8-15]</sup>,应用效果良好,但木结构领域中所需大量程位移传感器的研制较少。目前,可测量位移的传感器类型较多,如电位器式、电阻应变式、电容式、电感式、磁敏式、光电式及超声波等位移传感器,每种类型的位移传感器均有其优缺点。昌学年等<sup>[16]</sup>和刘焱等<sup>[17]</sup>总结出了电阻应变式位移传感器量程为  $0.1 \mu\text{m} \sim 0.1 \text{ mm}$ ,现有的电阻应变式位移传感器的量程较小。虽然非线性绕式电位器式位移传感器、激光式、磁栅及感应同步器位移传感器可以测得  $\pm 500 \text{ mm}$  水平位移,但结构发生非直线运动时,需求得其运动方程并辅助倾角传感器才能计算出结构或构件的水平位移,不但过程复杂,还因间接求得而造成较大误差;结构发生不规则运动或运动方程无法求得时,现有的传感器将无法直接获得结构的水平位移;基于此,笔者研制了一种新型电阻应变式位移传感器——WD 位移传感器。

## 1 理论分析

WD 位移传感器由工具钢(M42 高速钢)、应变片、手柄、轴承、轨道(图 1)组成。WD 位移传感器系统中的手柄及工具钢通过喉箍固定在所测结构或构件的端部,轨道及轴承固定于绝对不动的合适位置处,工具钢置于轨道中,被测试件侧移时,因工具钢弯曲使贴于其表面的应变片发生变形,通过采集系统将应变片的变形转化为相应的微应变,同时建立应变和位移的函数关系以得到结构的位移值。

在 WD 位移传感器系统中,施加在工具钢上的荷载随着工具钢的变形而在工具钢上移动,但荷载作用点的运动轨迹与固定端的距离始终保持不变,荷载方向始终垂直于工具钢,这与传统悬臂梁中荷载始终作用于梁上某固定位置产生挠度的情况有所不同;当工具钢发生小弯曲变形时,其应变-位移关系呈现线性关系,非线性误差较小;当发生较大变形

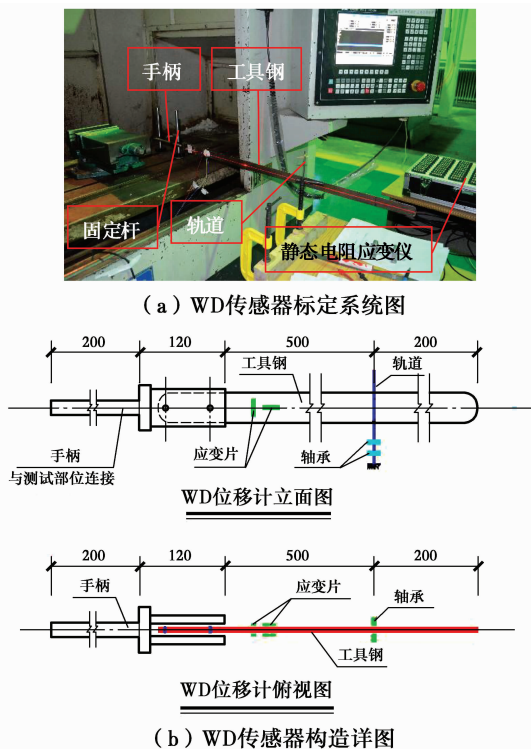


图 1 WD 位移传感器标定及构造图

Fig. 1 Calibration system and structure of WD displacement sensor

时,因工具钢的几何非线性,使应变-位移的关系不再保持直线。因此,WD 位移传感器的应变-位移关系应通过分段函数的方式表示。在往复加载试验中,由于工具钢置于竖直放置的轨道中,该轨道允许传感器沿竖向自由移动,而限制水平方向的位移,故测到的为试验对象的绝对水平位移。

## 2 正交试验设计

WD 位移传感器设计的优劣性取决于应变-位移关系对位移计的静态参数指标(精度、灵敏度、分辨力、线性度、回程误差)的影响程度,而影响这些静态参数指标的因素归咎于位移传感器自身的各种物理因素(轨道位于工具钢上的初始位置、轨道缝隙宽度及工具钢在轨道中的角度),因此,只要分析位移传感器各物理因素及其水平对设计目标的影响即可,而物理因素与设计目标的关系可通过正交试验设计完成。

### 2.1 正交试验设计及试验过程

正交试验设计是利用正交表在很多试验方案中挑选出代表性强的少数几个试验方案,并通过试验结果的分析推断出最优方案。正交试验设计首先确定试验目标、影响试验目标的因素及水平,选择合适

的正交表、确定试验方案并组织实施,最后将试验结果进行极差和方差分析并确定最优方案<sup>[18]</sup>。

WD 位移传感器的设计目标为静态参数指标,影响因素为传感器的物理因素,每种影响因素下均设有两个水平,设计目标、影响因素及水平见 $L_4(2^3)$ 正交试验表(表 1)。

表 1 正交试验表  
Table 1 Orthogonal test

试验号	作用点位置 A	轨道宽度 B	转动 C	指标
1	1(500)	1(2.3)	1(正)	精度、灵敏度、分辨力、线性度、回程误差、重复性误差
2	1(500)	2(3)	2(斜 2.88)	
3	2(550)	1(2.3)	2(正)	
4	2(550)	2(3)	1(斜 2.88)	

由表 1 可知:为确定 WD 位移传感器物理因素与设计目标的关系,需要做 4 个试验(图 2)。将导线连接到静态电阻应变仪和位移传感器上,使用激光投线仪调整位移传感器各部件位置,确保手柄与工具钢同轴,并将位移传感器正置(或斜置 2.88°)固定在固定杆上;将钉子轨道固定在金属拉伸试验测距仪的轨道上,钉子轨道距工具钢固定端 500 mm(或 550 mm)处,保证两钉子始终保持竖直且缝隙为 2.3 mm(或 3 mm);设置静态电阻应变仪,采用半桥形式连接,电阻阻值为 120  $\Omega$ ;最后使用金属拉伸试验测距仪使其轨道与钉子轨道同步,以 50 mm 为单位进行移动,移动范围选用 0~350 mm。如此反复,每种试验做 4 次,试验数据取后 3 次。

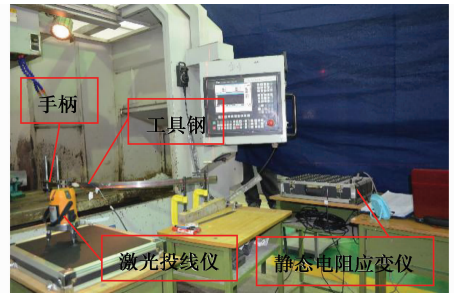


图 2 正交试验参数测试系统图

Fig. 2 Parameter test system of orthogonal test

## 2.2 试验结果分析

正交试验设计对试验数据采用极差分析和方差分析。通过极差分析可知 WD 位移传感器各物理因素对试验指标影响的主次顺序及各因素下选用的水平;而方差分析是分析各物理因素对试验指标的显著程度。

2.2.1 极差分析 通过对 WD 位移传感器进行的 4 组试验,并应用极差公式及 5 种静态参数指标公式分别对每组试验结果进行计算,得出了各因素的主次顺序、优水平(表 2)、3 个物理因素的 5 种静态参数指标极差图(图 3)。

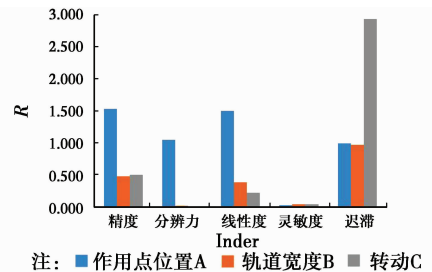


图 3 极差图

Fig. 3 Range figure

表 2 极差分析表  
Table 2 Range analysis

参数	精度		分辨力		线性度		灵敏度		迟滞	
	R	优水平	R	优水平	R	优水平	R	优水平	R	优水平
作用点位置 A	1.539	1	1.052	1	1.507	1	0.034	1	0.998	2
轨道宽度 B	0.480	2	0.020	1	0.387	2	0.048	2	0.973	1
转动 C	0.509	2	0.008	1	0.225	2	0.050	1	2.944	2
因素	A>C>B		A>B>C		A>B>C		C>B>A		C>A>B	

由以上结果可以看出:WD 位移传感器的 3 种物理因素在不同目标下的主次顺序及影响各不同,但作用点位置的选取对精度、分辨力、线性度及迟滞的影响较大,转动因素对回程误差的影响更大,而 3

因素对灵敏度的影响不超过 5%,轨道宽度及转动因素对分辨力的影响不超过 2%,因此,在分析水平对静态参数指标的影响时可忽略;各因素下的水平在不同的指标下同样有所不同,WD 位移传感器作

用点位置在 500 mm 处的比例为 75%，轨道缝隙为 2.3 mm 的比例为 66.7%，转动角度为 2.88° 的比例为 100%。因此，WD 位移传感器系统轨道作用点的位置选取 500 mm 处，轨道缝隙宽选取 2.3 mm。虽转动因素影响很大，当位移传感器与木构件处于转动状态，工具钢在轨道中为几何可变体，因而测得的位移误差更大。因此，将位移传感器与木构件固定并使工具钢正置于轨道中。

2.2.2 方差分析 方差分析是将数据的总变异( $SS_{总}$ )分为因素引起的变异( $SS_{因}$ )和误差引起的变异( $SS_{误}$ )并构造 F 统计量，作 F 检验来判定因素作用是否显著。由方差分析计算公式可得 WD 位移传感器的 3 种物理因素对静态参数指标的影响显著程度(表 3)。

由表 3 可以看出：3 种物理因素对 WD 位移传感器的静态参数指标影响特别显著。

表 3 方差分析表

Table 3 Variance analysis

参数	精度		分辨力		线性度		灵敏度		迟滞	
	F 值	显著水平	F 值	显著水平	F 值	显著水平	F 值	显著水平	F 值	显著水平
作用点位置 A	$-4.2 \times 10^{13}$	**	$-9.7 \times 10^{12}$	**	$-4 \times 10^{13}$	**	$1.1 \times 10^{14}$	**	$-1.4 \times 10^{14}$	**
轨道宽度 B	$-4.1 \times 10^{12}$	**	$-3.3 \times 10^9$	**	$-2.7 \times 10^{12}$	**	$2.3 \times 10^{14}$	**	$-1.3 \times 10^{14}$	**
转动 C	$4.6 \times 10^{12}$	**	$-6.3 \times 10^8$	**	$-8.9 \times 10^{11}$	**	$2.4 \times 10^{14}$	**	$-1.2 \times 10^{15}$	**
Fa	F0.05(1.1)=161; F0.01(1.1)=405									

### 3 WD 位移传感器的标定

#### 3.1 标定内容

通过标定可得出 WD 位移传感器的应变-位移函数关系，在结构发生转动时将采集到的应变利用此函数关系计算出相应的位移值。

WD 位移传感器系统采用数控铣床、静态电阻应变仪 TS3890、TS3890 测量软件及激光投影仪等设备进行标定，将坐标系和轨道运行程序等输入数控铣床控制面板中，并设定位移范围为 0~500 mm，设定轨道运行速度为 500 mm/min，在位移传感器发生弯曲变形中将相应的位移通过静态应变仪转化为应变值。

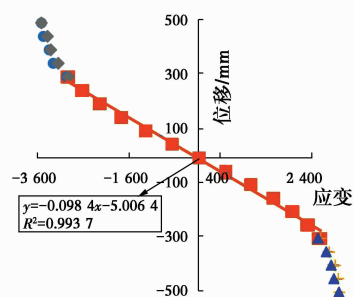
#### 3.2 试验结果分析

WD 位移传感器系统进行 4 次试验，取后 3 次的应变作为标定值，对试验数据采用基于 T 分布的格拉布斯法剔除异常数据，并通过计算数据的相对误差、标准偏差及变异系数来判定试验结果的准确

### 2.3 WD 位移传感器的制作

WD 位移传感器制作的关键在于应变片位置的确定。因工具钢固定端存在应力集中问题，所以应变片应贴至距固定端 50 mm 处；为提高位移传感器的灵敏度，应变片应在工具钢两侧对称位置处沿着工具钢轴线方向粘贴，相较于单侧粘贴，位移传感器的灵敏度将提高 1 倍；为避免温度变化对位移传感器的影响，同时解决因温度变化使工具钢受拉和受压面产生应变差，温度补偿应变片应在工具钢两侧对称位置处垂直于工具钢轴线方向粘贴。粘贴应变片时应严格按照文献[19]中的相关要求操作；由于应变片采用 AB 胶粘贴，鉴于胶水的时效性，传感器放置 3 个月后再使用时应复核或重新标定。结合试验数据，该传感器可用于测量较大水平位移( $\leq 500$  mm)的结构试验。

度及精密度，同时应用 F 检验和 T 检验来判定误差的显著程度，根据最小二乘法原理得出 WD 位移传感器的应变与位移的函数关系(图 4~图 6)，并利用拟合优度检验及标准残差来判定曲线拟合的程度(表 4)，表 4 中相对误差最大值为  $\pm 0.679\%$ ，变异系数最大值为  $\pm 0.612$ 。



注：■  $y: (-300, 300)$  ●  $y: (300, 500)$  ◆  $y: (500, 300)$  +  $y: (-300, -500)$

图 4 应变-位移曲线图

Fig. 4 Strain-displacement curve

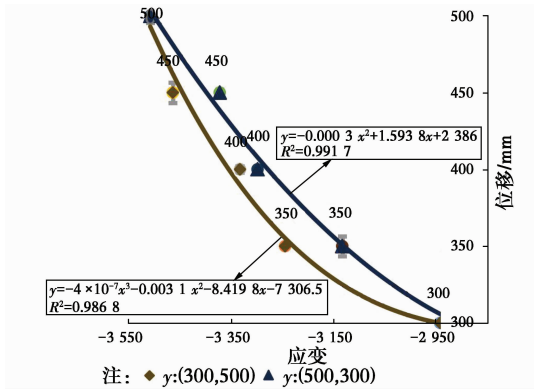


图 5 量程为 300~500 mm 应变-位移曲线图

Fig. 5 Strain-displacement curve from 300 mm to 500 mm

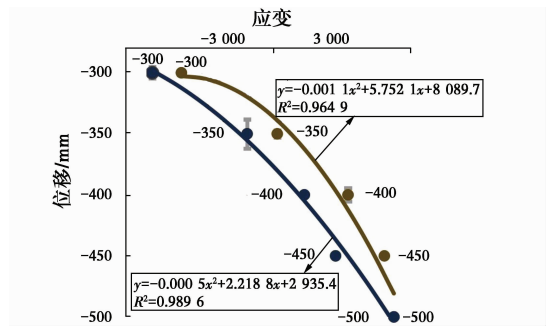


图 6 量程-300~-500 mm 应变-位移曲线图

Fig. 6 Strain-displacement curve from -300 mm to -500 mm

表 4 回归分析表

Table 4 Regression analysis

位移区间/mm	特征应变区间	回归方程	相关系数 $R^2$	标准残值
300→500	-2 943~-3 508	$y = -4 \times 10^{-7} x^3 - 0.003 1 x^2 - 8.419 8 x - 7 306.5$	0.987	28.584
500→300	-3 508~-2 905	$y = 0.000 3 x^2 + 1.593 8 x + 2 386$	0.992	17.073
300→-300	-2 905~2 707	$y = -0.098 4 x - 5.006 4$	0.994	14.867
-300→300	2 652~-2 943	$y = -0.098 4 x - 5.006 4$	0.994	14.867
-300→-500	2 707~3 117	$y = -0.001 1 x^2 + 5.752 1 x - 8 089.7$	0.965	28.547
-500→-300	3 117~2 652	$y = -0.000 5 x^2 + 2.218 8 x - 2 935.4$	0.990	16.785

由图 4~图 6 可知:量程在(-300 mm, 300 mm)拟合为线性关系,其余部分拟合为多项式(见式(1)),相比全量程拟合为线性则更为精确;由判定系

数及标准残值可知 WD 位移传感器应变-位移公式拟合度较高;由相对误差及变异系数可知试验结果的准确度及精密度较高。

$$y = \begin{cases} 0.003x^2 + 1.5938x + 2386 & (300 \leq x \leq 500 \text{ 返}) \\ -4 \times 10^{-7}x^3 - 0.0031x^2 - 8.4198x - 7306.5 & (300 \leq x \leq 500 \text{ 往}) \\ -0.0984x - 5.0064 & (-300 \leq x \leq 300) \\ -0.0011x^2 + 5.7521x - 8089.7 & (-500 \leq x \leq -300 \text{ 往}) \\ -0.0005x^2 + 2.2188x - 2935.4 & (-500 \leq x \leq -300 \text{ 返}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x$  为微应变; $y$  为位移,mm。

WD 位移传感器的精度、分辨力、灵敏度、线性度、回程误差及重复性误差进行计算(表 5)。

### 4 WD 位移传感器的静态参数指标

传感器系统的性能取决于其静态参数指标,对

表 5 静态参数表

Table 5 Static parameter

区间	线性度/%	正行程重复性误差/%	反行程重复性误差/%	精度/%	灵敏度	分辨力/ ( $\mu\text{m} \cdot \text{mm}^{-1}$ )	迟滞/%
300→500	±15.457	±0.226		±15.593	$dy/dx$	6.234	±1.674
500→300	±15.457	±0.362		±15.593	$dy/dx$	6.234	±1.674
300→-300	±6.189	±0.162	±0.265	±6.336	-0.098	8.827	±1.097
-300→300	±6.189	±0.162	±0.265	±6.336	-0.098	8.827	±1.097
-300→-500	±15.457	±0.226		±15.593	$dy/dx$	6.234	±1.674
-500→-300	±15.457	±0.362		±15.593	$dy/dx$	6.234	±1.674

由表5可以看出:WD位移传感器的静态参数指标体现了较好的性能,尤其在量程(-300 mm, 300 mm)区间;相比全量程拟合为线性关系,分段函数的拟合曲线极大的降低了非线性误差、重复性误差及回程误差,提高了WD位移传感器的精度、灵敏度及分辨力。

## 5 结论

结合古建木构试验研制了WD位移传感器,其线性度、重复性误差、精度、分辨力、回程误差等参数响应良好;拟合了传感器应变-位移函数,实现了电阻应变式位移传感器大量程的精确测量,量程为±500 mm;WD位移传感器系统解决了木结构或木构件在往复加载过程中很难直接测得绝对水平位移的问题,能为结构或构件在水平荷载作用下滞回性能及耗能分布等方面研究提供测量数据。

## 参考文献:

- [1] 薛建阳,张风亮,赵鸿铁,等. 碳纤维布加固古建筑木结构模型振动台试验研究[J]. 土木工程学报,2012,45(11):95-104.
- XUE J Y, ZHANG F L, ZHAO H T, et al. Shaking table test of an ancient timber structure strengthened with CFRP [J]. China Civil Engineering Journal, 2012,45(11):95-104. (in Chinese)
- [2] 隋隼,赵鸿铁,薛建阳,等. 古代殿堂式木结构建筑模型振动台试验研究[J]. 建筑结构学报,2010,31(2):35-40.
- SUI Y, ZHAO H T, XUE J Y, et al. A study on Chinese ancient timber structures by shaking table test [J]. Journal of Building Structures, 2010, 31(2): 35-40. (in Chinese)
- [3] FOLZ B, FILIATRAULT A. Seismic analysis of woodframe structures II: Model implementation and verification [J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130: 1361-1370.
- [4] 周乾,闫维明,周锡元,等. 古建筑榫卯节点抗震性能试验[J]. 振动、测试与诊断,2011,31(6):679-684.
- ZHOU Q, YAN W M, ZHOU X Y, et al. Aseismic behavior of Chinese ancient tenon-mortise joint [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(6): 679-684. (in Chinese)
- [5] 周乾,闫维明,周锡元,等. 故宫神武门动力特性及地震反应研究[J]. 工程抗震与加固,2009,31(2): 90-95.
- ZHOU Q, YAN W M, ZHOU X Y, et al. Study on dynamical character and seismic response of Shen-Wu Gate in the Forbidden City [J]. Earthquake Resistant Engineering and Retrofitting, 2009,31(2):90-95. (in Chinese)
- [6] 高大峰,祝松涛,丁新建. 西安永宁门箭楼结构及抗震性能分析[J]. 山东大学学报(工学版),2013,43(2):62-69.
- GAO D F, ZHU S T, DING X J. Analysis of structural and seismic performance of Yongning Gate embrasured watchtower of Xi'an City Wall [J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2013,43(2):62-69. (in Chinese)
- [7] MAENO M, SUZUKI Y, OHSHITA T, et al. Seismic response characteristics of traditional wooden frame by full-scale dynamic and static tests [C]// 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B. C., Canada, August 1-6, 2004, Paper No. 1184.
- [8] 赵辉,马东丽,刘伟文,等. 用于防水数显卡尺的新型感栅式位移传感器设计[J]. 上海交通大学学报,2004,38(8):1382-1384.
- ZHAO H, MA D L, LIU W W, et al. Design of a new inductive grating displacement sensor and application in liquid resistant caliper [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2004, 38(8): 1382-1384. (in Chinese)
- [9] 段抗,张强勇,朱鸿鹄,等. 光纤位移传感器在盐岩地下储气库群模型试验中的应用[J]. 岩土力学,2013,34(2):471-477.
- DUAN K, ZHANG Q Y, ZHU H H, et al. Application of fiber bragg grating displacement sensors to geotechnical model test of underground salt rock gas storages [J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(2): 471-477. (in Chinese)
- [10] 蒋善超,王静,隋青美,等. 微型FBG位移传感器研制及其在模型试验中的应用[J]. 防灾减灾工程学报,2013,33(3):348-353.
- JIANG S C, WANG J, SUI Q M, et al. Developing of Micro FBG Displacement sensor and its application to model experiment [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013,33(3):348-353. (in Chinese)
- [11] 雷瑞波,程言峰,李志军,等. 磁致位移传感器冰雪厚度测量仪原理及其应用[J]. 大连理工大学学报,2010,50(3):416-420.
- LEI R B, CHENG Y F, LI Z J, Principle and application of apparatus for monitoring ice/snow

- thickness based on a magnetostrictive displacement sensor [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2010, 50(3):416-420. (in Chinese)
- [12] 何俊,董惠娟,周智,等.一种适合工程应用的新型光纤光栅位移传感器[J].哈尔滨理工大学学报,2010,15(5):61-64.
- HE J, DONG H J, ZHOU Z, et al. A kind of new displacement sensor based on FBG for engineering [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2010, 15(5):61-64. (in Chinese)
- [13] 王峥,常晓明,脇若弘之.长线磁致伸缩位移传感器激励波的研究[J].太原理工大学学报,2010,41(3):241-244.
- WANG Z, CHANG X M, HIROYUKI W. Study on impulse wave of magnetostrictive position line sensor [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2010, 41(3):241-244. (in Chinese)
- [14] 刘荣先,李凡,崔守鸷.霍尔式直线小位移传感器的设计[J].扬州大学学报(自然科学版),2013,16(4):47-50.
- LIU R X, LI F, CUI S Z. Design of Hall Linear small displacement sensor [J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2013, 16(4):47-50. (in Chinese)
- [15] 王先全,吴敏,彭东林,等.两相非等节距时栅位移传感器[J].西南大学学报(自然科学版),2009,31(5):162-167.
- WANG X Q, WU M, PENG D L, et al. A two-phase unequal-pitch time grating displacement sensor [J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2009, 31(5):162-167. (in Chinese)
- [16] 昌学年,姚毅,闫玲.位移传感器的发展及研究[J].计量与测试技术,2009,36(9):42-44.
- YAN X N, YAO Y, YAN L. The development and investigation of displacement sensor [J]. Metrology & Measurement Technique, 2009, 36(9):42-44. (in Chinese)
- [17] 刘焱,王焯.位移传感器的技术发展现状与发展趋势[J].自动化技术与应用,2013,32(6):76-80.
- LIU Y, WANG Y. Present status and thrend of technical development of displacement sensor [J]. Techniques of Automation and Application, 2013, 32(6):76-80. (in Chinese)
- [18] ANGELOPOULOS P, KOUKOUVINOS C S. Some robust parameter designs from orthogonal arrays [J]. Journal of Applied Statistics, 2008, 35(11/12):1399-1408
- [19] 林圣华.结构试验[M].南京:南京工学院出版社,1986.

(编辑 胡英奎)