DOI:10.16450/j.cnki.issn.1004-6801.2022.01.013

基于应变感知的桥梁梁端转角高精度测试*

王宁波[1]， 傅朝丰[1]， 赵雨森[1]， 李 新[2]
（1.中南大学土木工程学院 长沙，410075）（2.洛阳双瑞特种装备有限公司 洛阳，471000）

摘要 为推进转角响应数据在桥梁检测评估领域的应用，提出针对梁端转角的高精度动态测试方法，并设计制作相应的转角测试装置。该测试装置连接桥梁底板和桥墩，将未知转角信息依次转换为位移信息和应变信息，通过对应变信号的高精度动态感知来反算测点所在截面相对于桥墩的转角。针对转角测试装置具体参数，分析该装置的量程、灵敏度、工作荷载和理论分辨率，揭示其用于梁端小角度测试的明显优势。利用转角测试装置开展室内试验研究，多次试验的数据分析表明：应变测量值与实际转角值存在明显且稳定的线性关系；装置具有较高的灵敏度，且与理论值接近。试验研究进一步验证了基于应变感知进行梁端转角高精度动态测试的可行性。

关键词 梁端转角；高分辨率；动态测试；转角测试装置
中图分类号 TU997；U24；TH741.2

1 问题的引出

我国桥梁事业经历大举建设之后已进入漫长的运维管养阶段，随着服役时间增长，桥梁将进入老化养护期，由此带来的检测评估工作量巨大。结合桥梁结构在荷载作用下的变形量进行健康状态和承载能力量化评估是广泛采用的方法[1-2]，最典型的如基于桥梁挠度监测数据进行结构评估。挠度数据的获取方法包括：接触式方法（如位移传感器法[3]）和非接触式方法（如GPS传感[4]、机器视觉[5]等）。其中：非接触式远距离测试方法存在分辨率偏低的特点，主要适合于大变形测量；接触式方法具有较高测试精度，但需要辅助支撑安装设施实现近距离相对测试，存在经济和时效方面的不足，对于跨铁路线、河流及峡谷等桥梁更是难以实施。

桥梁转角与挠度同为结构变形量，均体现桥梁整体刚度及承载能力，作为一种替代，转角测试方法及应用研究逐渐受到关注，基于桥梁转角数据推演挠度响应是其中一个热点。Zhang等[6]基于偏最小二乘回归计算思路，提出结合转角数据进行桥梁变形评估的方法。研究表明，无论结构损伤与否，该方法都能精确估算桥梁挠度。侯兴民等[7]结合不同截面测点的转角数据，分别利用曲线拟合方法和最小二乘法获取挠度时程曲线，并通过简支梁模型试验进行验证。李勇等[8]通过数值积分、拟合等方式建立转角和挠度之间关系。邸昊[9]利用振型叠加原理提出桥梁转角与挠度间的转换算法。这类方法的主要思路是结合转角数据重建挠度曲线，利用桥梁转角测试不受限制、不需要静止参考点的特征，但其结果精度受转角测试仪精度、计算方法选取、测点数量和测点布置等因素影响。

近年来，更多学者将转角数据直接用于桥梁结构状态评估。文献[10]在桥梁支座处安装转角测试仪，研究桥梁边界条件。Zhai等[11]提出了使用转角测试仪获取桥梁模态特性的理论方法。李奇等[12]提出双侧梁端最大转角是影响车体最大加速度的主要控制变量之一，适合作为描述桥梁沉降的主要指标。Alamdari等[13]基于梁端转角影响线进行桥梁损伤诊断研究，用于识别斜拉桥吊索刚度损失。周宇等[14]从理论和数值分析角度证明了转角影响线可以有效定位、定量梁结构损伤。Huseynov等[15]提出了基于转角数据的桥梁损伤检测方法，将转角数据直接用于桥梁检测评估，可避免转角到挠度换算过程中的计算误差。

精确的转角测试是影响其应用的关键环节，目前大多数转角测试仪都是通过对重力摆锤行为引起的响应进行测量来获取转角信息。根据摆锤类型的不同，转角测试仪可分为固体摆、液体摆和气体摆3种[16]，其响应测试手段包括电阻、电容、磁、光纤或光学等[17-18]。部分商用转角测试仪的规格参数如表1

* 国家自然科学基金资助项目（52078486）；湖南省自然科学基金资助项目（2021JJ30840）
收稿日期：2021-01-11；修回日期：2021-04-22

所示，可以看出：①从量程范围来看，多数转角仪量程远超出桥梁设计规范规定的转角限值，不适用于桥梁转角的专门测试，如中国、日本等国家规范规定的桥梁梁端转角限值为 $2\times10^{-3}\sim4\times10^{-3}$ rad[19-20]，即 0.115°～0.230°；②针对桥梁转角测试而言，转角测试仪分辨率普遍偏低，少数分辨率高的情况均以较低采样频率为前提，其动态测试精度难以保证。这类利用惯性原理进行桥梁转角测量的方法，需具有较强的抗振动或抗冲击能力来对抗在大冲击或高过载时产生的惯性力。

表 1　商用转角测试仪参数

Tab.1　Commercial inclinometers parameters

型号	原产国	量程/(°)	分辨率/(°)	最高采样频率/Hz
HI-INC	德国	±15	1×10^{-3}	100
DNS	德国	±85	3×10^{-3}	100
JDI 100	美国	±1	1×10^{-4}	125
JN2101	德国	±45	1×10^{-3}	20
ACA2200	日本	±0.5	1×10^{-4}	20
ZERO-TRONIC	瑞士	±0.5	1×10^{-4}	10
T935	英国	±1	6×10^{-5}	10
QY-3A型双轴倾角仪	中国	±15	1.3×10^{-3}	—
FS64倾角传感器	德国	±5	2×10^{-3}	—

以往多数研究对桥面多个不同测点转角测试的主要目的是间接获取桥梁挠度信息，以用于桥梁检测评估。近年来，直接结合桥梁转角信息进行检测评估是一种新的趋势。对于桥梁结构而言，梁端转角多数情况下均大于其他截面的转角，研究数据可以看出，同样荷载作用下梁端转角及损伤后的改变量均高于其他截面[14-15]。梁端转角是用于桥梁检测评估的理想特征参数，探索梁端转角的高精度测试方法，对于促进转角参数在桥梁工程领域的应用有着重大意义。

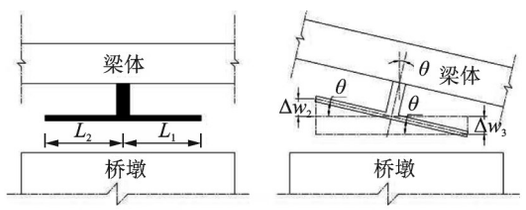
笔者提出一种高精度梁端转角测试方法，设计制作相应的转角测试装置，计算分析其量程、灵敏度、分辨率和工作荷载等特征参数。基于转角测试装置开展室内试验研究，探索装置应变输出与微小转角输入之间的对应关系。

2　桥梁梁端转角测试原理及方法

2.1　桥梁梁端转角的位移等效

在桥梁梁端选取合适转角测点，一般选定在支座中心线上方。图 1 为梁端转角转换示意图。倒 T 形结构与测点刚性连接，且随之发生角度变化。当角度变化 θ 时，倒 T 形结构底板两端相对于参考面（桥墩顶面）的位移分别为 Δw_1 和 Δw_2，如图 1(b)所示。梁端转角属于微小量，可近似得出 $\Delta w_1=\theta L_1$，$\Delta w_2=\theta L_2$，即实现梁端转角到相对位移的转换，梁端转角与两竖向位移满足

$$\Delta w_1+\Delta w_2=d\tan\theta=d\theta \tag{1}$$



(a) T形结构　　(b) 转角转换

(a) T-shaped structure　　(b) Rotating angle conversion

图 1　梁端转角转换示意图

Fig.1　Beam end rotating angle conversion

对于桥梁结构而言，我国《高铁设计规范》对梁端转角限值为 0.115°[19]，属于微小角度，竖向位移与转角呈线性关系。将倒 T 形块设置为刚性体，其底板长度 $d(d=L_1+L_2)$ 越大，转角 θ 导致的倒 T 形结构两端竖向位移越大，有利于放大测量值，有效减小测量误差。

2.2　基于应变测试的微小位移感知

利用应变计在变形测试方面的高精度优势，对上述微小位移进行准确测试。图 2 为弹性梁变形与内力。以图 1(b)右侧变形量 Δw_1 为例，其传递到固定约束弹性梁的一端，如图 2(a)所示，即给弹性梁施加一端支座位移，此时导致的弹性梁弯矩为

$$M(x)=\frac{6EI\Delta w_1}{l^3}(l-2x) \tag{2}$$

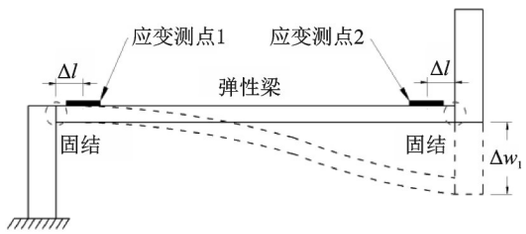
其中：EI 为弹性梁的抗弯刚度；l 为弹性梁长度；x 为应变测点与梁端的距离。

可以看出，梁端弯矩值最大，可在弹性梁端部附近对称设置 2 个应变测点，取二者平均值以减小不确定误差。假定应变测点中心离弹性梁端部距离均为 Δl，构建两应变测点的应变测量值 ε_1 和 ε_2 与微小位移量 Δw_1 之间关系为

$$\varepsilon_1=-\varepsilon_2=\frac{M(x)h}{2EI}=\frac{3h(l-2\Delta l)}{l^3}\Delta w_1 \tag{3}$$

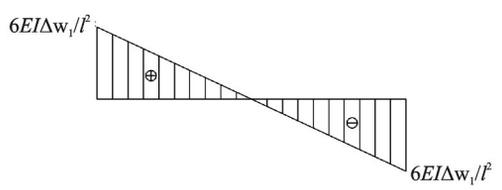
$$\varepsilon_1-\varepsilon_2=\frac{6h(l-2\Delta l)}{l^3}\Delta w_1 \tag{4}$$

其中：ε_1 为应变测点 1 的应变值；ε_2 为应变测点 2 的应



(a) 弹性梁

(a) Elastic beam



(b) 弯矩图

(b) Moment

图 2 弹性梁变形与内力

Fig.2 Elastic beam deformation and internal force

变值;h为弹性梁高度。

同理,对于图 1(b)左侧变形量Δw_2,亦可以传递至左侧弹性梁,通过应变传感器对其感知。假定两测点的应变测量值分别为ε_3和ε_4,在其他参数不变的情况下,二者满足

$$\varepsilon_3-\varepsilon_4=\frac{6h(l-2\Delta l)}{l^3}\Delta w_2 \tag{5}$$

基于应变感知的桥梁梁端转角高精度测试方法,利用桥梁端部存在桥墩结构作为固定参考的特点进行相对测试。将梁端测点的未知转角依次转换为微小位移和应变信号,结合式(1),(4)~(5),建立应变测试值与支座转角θ之间的关系

$$\varepsilon_1-\varepsilon_2+\varepsilon_3-\varepsilon_4=\frac{6h(l-2\Delta l)d}{l^3}\theta \tag{6}$$

其中:k为测试灵敏度,其公式为

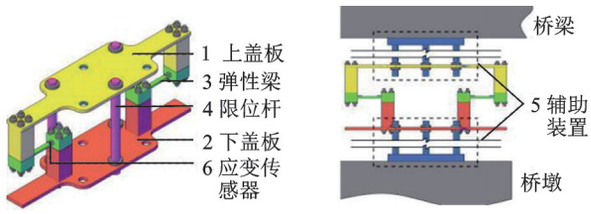
$$k=\frac{6h(l-2\Delta l)d}{l^3} \tag{7}$$

可以看出,应变测点的应变值与梁端转角呈线性关系,灵敏度k与弹性梁的抗弯刚度无关,主要与弹性梁长度、弹性梁高度、倒 T 形结构底板长度、应变片中心到梁端的距离等参数有关。通过合理设置参数取值,可改变单位转角对应的应变值,实现灵敏度调整。

3 基于应变感知的转角测试装置

3.1 装置设计

基于笔者提出的梁端转角测试原理及方法,设计制作桥梁梁端转角测试装置。当梁端转角一定的情况下,测试的应变值越大则系统灵敏度越高。装置设计时采用两段相同的弹性梁固接于桥墩,分别接收梁端转角引起的倒 T 形构底板两端竖向位移。从式(6)可看出,在其他参数确定的情况下,当弹性梁高度h越大、长度l越小时,所测应变值越大。同时,弹性梁的应变值亦不能太大而超出其强度许可范围。综合以上因素,设计如图 3 所示的梁端转角测试装置。图 3(a)为主要测试元件,由上下刚性盖板、弹性梁、应变传感器和刚性限位杆组成。图 3(b)为转角测试装置安装图示,辅助装置一端与转角测点或桥墩粘接,另一端与测试装置上、下盖板螺栓连接,并具备高度调节功能,即实现上盖板连接梁体、下盖板连接桥墩。



(a) 测试元件 (b) 安装图示

(a) Tester component (b) Installation icon

图 3 梁端转角测试装置图

Fig.3 Beam end rotating angle tester

该转角测试装置各部分的具体参数及作用如表 2 所示。

表 2 测试装置具体参数及作用

Tab.2 Specific parameters and functions of the test device

元件名称	尺寸/mm	作用	特点
上盖板	530×150×8	将转角转换为位移	刚体
下盖板	530×150×8	固定参考	刚体
弹性梁	80×10×5	产生弹性变形	弹性体
限位杆	Φ20	测试前限位	刚体
辅助装置	100×100×8	连接梁底测点和上盖板	刚体
应变传感器	5×3	感知测点应变信息	—

本转角测试装置各组成部分均采用刚性连接,避免其他连接形式中微小间隙对测量结果的影响,刚体和弹性体组合使梁端转角测点的转动变形全部转换为弹性梁变形。这些优化设计保证了高精度转角测试的可能性,转角计算为

$$\theta=\frac{l^3}{6h(l-2\Delta l)d}(\varepsilon_1-\varepsilon_2+\varepsilon_3-\varepsilon_4) \tag{8}$$

令

$$\bar{\varepsilon}=\varepsilon_1-\varepsilon_2+\varepsilon_3-\varepsilon_4 \tag{9}$$

$$\lambda=\frac{l^3}{6h(l-2\Delta l)d} \tag{10}$$

则有

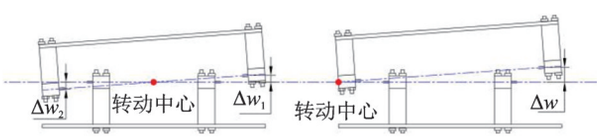
$$\theta=\lambda\bar{\varepsilon} \tag{11}$$

3.2　参数分析

3.2.1　量程及灵敏度分析

当装置尺寸和材料等参数设定时，转角的测试量程由最大应变值决定，如式(11)所示。该装置中弹性梁的材料采用许用应力 σ 与弹性模量 E 比值较大的黄铜，其中：σ = 369 MPa；E=110 GPa；Δl=12 mm；上盖板有效长度 d=420 mm。应变测点的应变容许值 ε_0 为

$$\varepsilon_0=\frac{\sigma(l-2\Delta l)}{El}=2\,348\mu\varepsilon \tag{12}$$



(a) 理想工况　　(b) 最不利工况

(a) Optimal condition　　(b) Worst condition

图 4　上盖板转动示意图

Fig.4　Top cover rotation diagram

图 4 为上盖板转动示意图。由于本转角测试装置中梁端转角产生的位移增量由两弹性梁共同承担，根据上盖板转动中心位置不同，考虑以下 2 种特殊情况。

1) 理想工况。如图 4(a)所示，上盖板中心与转动中心重合，此时两弹性梁均匀承担转角导致的位移改变，即 $\Delta w_1=\Delta w_2=1/2\ d\theta$。由式(6)可知，随着梁端转角的增加，4 个测点应变同时达到应变容许值 ε_0。此时式(11)中的 $\bar{\varepsilon}=4\varepsilon_0$，计算可得转角的测试量程为

$$\theta=\varepsilon_0/k=0.391^\circ \tag{13}$$

2) 最不利工况。如图 4(b)所示，上盖板边缘与转动中心重合，此时 $\Delta w_2=0$，$\Delta w_1=d\theta$，转角导致的位移改变量由其中一个弹性梁承担，而另一弹性梁基本不发生形变。图 4(b)中，随着转角变大，ε_1 和 ε_2 率先达到应变容许值 ε_0，而 ε_3 和 ε_4 值很小，可忽略不计。此时式(11)中的 $\bar{\varepsilon}=2\varepsilon_0$，转角的测试量程为

$$\theta=2\varepsilon_0/k=0.195^\circ \tag{14}$$

可以看出，灵敏度越大，量程越小，当上盖板有效长度 d=420 mm 保持不变时，不同尺寸转角测试装置灵敏度如表 3 所示。

表 3　转角测试装置灵敏度

Tab.3　Sensitivity of rotating angle tester

序号	弹性梁		灵敏度/($\mu\varepsilon\cdot(^\circ)^{-1}$)	量程/(°)	备注
	l/mm	h/mm			
1	80	5	24 041	0.195	本方案
2	80	8	38 465	0.122	—
3	100	5	16 705	0.305	—
4	100	8	26 728	0.191	—

取最不利工况下的计算结果作为本装置的测试量程，其值为 0.195°，超出中国桥梁规范对梁端转角的限值。针对梁端转角较大的特殊情况，参考表 3 及式(7)，(12)和(14)，可以通过增大弹性梁长度、减小弹性梁高度、减小上盖板有效长度等措施增大量程，但同时会减小灵敏度，同等情况下可通过调整转角测试装置的安装位置进行量程调整。

3.2.2　粘结力/工作荷载分析

本转角测试装置拟采用粘结形式将辅助装置粘结板固定在梁端测点和桥墩顶面相应位置，利用防松螺母将转角测试装置固定在辅助装置的螺杆上。现有黏合剂的抗拉性能较好，其拉伸强度大于大部分混凝土的拉伸强度，粘接层粘结强度的参考值选用 C20 混凝土的拉伸强度[21]，粘结力计算结果如表 4 所示。除上盖板重力外，辅助装置与梁端测点的粘结层还承受试验过程中因梁端测点转角变化导致弹性梁变形带来的附加力和附加弯矩，需要保证粘结层足够牢固。当转轴中心位于上盖板边缘，即图 1 中所示的 $\Delta w_2=0$，此时粘结层受到附加拉力与附加弯矩最大。附加荷载计算结果如表 5 所示。

从表 4，5 可以看出，附加力与梁端转角呈正比，当转角为 0.2°时，最大附加力(393.5 N)与上盖板重力(46.8 N)之和远小于粘结层的粘结力(8 800 N)。该转角测试装置与墩、梁之间粘结力较大，能承受试验过程中的最不利荷载，确保转角测试装置与桥梁结构固定连接。

表 4　粘结力计算结果

Tab.4　Calculation result of bonding force

粘结面积/m²	粘结强度/MPa	粘结力/N	上盖板重/N
0.02	0.44	8 800	46.8

表 5 附加荷载计算结果

Tab.5 Calculation results of additional load

序号	梁端转角/(°)	Δw/mm	附加弯矩/(N•m)	附加力/N
1	0.01	0.073	0.79	19.7
2	0.05	0.366	3.94	98.4
3	0.10	0.733	7.87	196.8
4	0.20	1.465	15.74	393.5

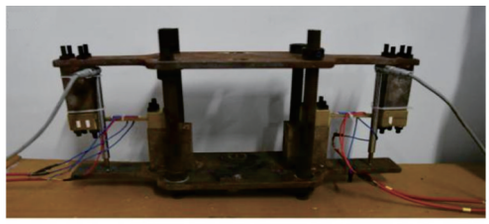
3.3 分辨率分析

针对梁端转角(尤其动态测试)的仪器和方法大多存在分辨率偏低的缺点,导致梁端转角的实际应用推进较为缓慢。本研究方法通过将未知梁端转角转化为对应的微小位移,并进一步转化为对应的应变信息,通过高分辨率应变测试仪器感知具体应变值,并合理设计转角测试装置的尺寸,进一步放大微小梁端转角,该方法在原理上具有高分辨率和高灵敏度特性。该转角测试装置分辨率与应变测试技术有关,采用分辨率为 1/2 000 的应变测试仪器,转角实测值越小,分辨率越高。参考文献[19],梁端转角限值为 0.115°,此时的分辨率约为 5.8×10^{-5}°,该值为最低分辨率。对比表 1 可以看出,该转角测试方法具备分辨率方面的明显优势,且高分辨率特性不受测试频率影响,有利于实现桥梁转角的高精度测试与应用。

4 试 验

4.1 模型与试验

图 5 为模型试验图。图 5(a)为转角测试装置,主要包括上下盖板、2 个弹性梁、4 个应变传感器和限位杆。为方便弹性梁与其他元件固接,在其两端各设置一个连接块,加工成如图 5(b)所示的哑铃状形式,通过螺栓实现与上、下盖板固接。工作过程中转角测试装置上盖板转动,下盖板固定不动,上盖板相对下盖板的角度变化值即为实际转角。该转角测试装置中除弹性梁外,其他部分均为刚体,各部件的连接均为刚性连接。限位杆主要在装置运输、安装过程中起保护作用,正式测试之前需去除限位杆使弹性梁自由变形。将装置固定后,通过人为扭转上盖板产生动态转角,在盖板两侧布置高精度位移传感器,如图 5(c)所示,监测其竖向位移 Δw_1 和 Δw_2,根据式(1)反算实际转角,并同步监测盖板转动过程中弹性梁上 4 个应变传感器的应变值。位移及应变



(a) 转角测试装置

(a) Rotating angle tester



(b) 弹性梁

(b) Elastic beam



(c) 位移传感器

(c) Displacement sensor



(d) 数据测试系统

(d) Data testing system

图 5 模型试验图

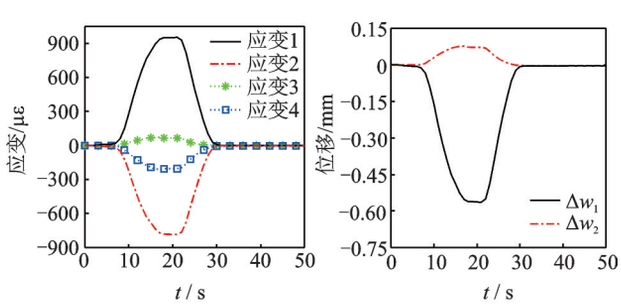
Fig.5 Model test

数据的测试均采用 HBM 的动态测试系统(MGC Plus),如图 5(d)所示,采样频率为 100 Hz。开展多次试验,获取单次加载、反复加载等不同扭转激励下的位移和应变数据时程曲线。

4.2 结果分析

单次加载和反复加载激励下的应变与位移曲线如图 6,7 所示。数据表明,轻微扭转激励导致上盖板两端产生微小位移,但对应弹性梁产生较大的应变值,转角测试装置具有明显的高灵敏度特性。

转角-应变曲线如图 8 所示,图中直线的斜率值

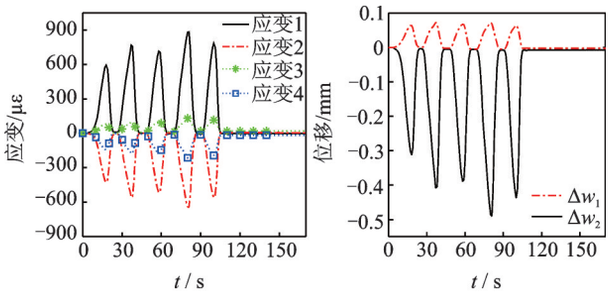


(a) 应变曲线 (b) 位移曲线

(a) Strain curve (b) Displacement curve

图 6 单次加载激励下的应变与位移曲线

Fig.6 Strain and displacement curves under a single load



(a) 应变曲线　　(b) 位移曲线

(a) Strain curve　　(b) Displacement curve

图 7　反复加载激励下的应变与位移曲线

Fig.7　Strain and displacement curves under repeated load

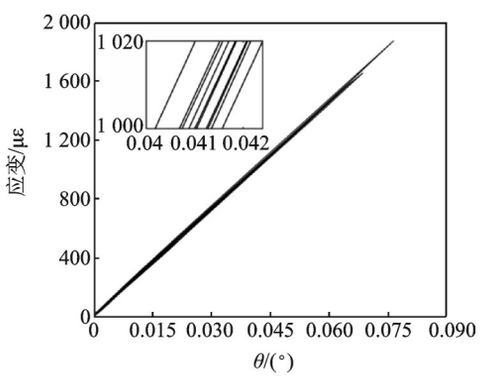


图 8　转角-应变曲线

Fig.8　Rotating angle-strain curve

即为实际灵敏度。转角与应变二者具备较好线性，且加、卸载过程线条重复性较好，验证了该转角测试方法和测试装置的可行性。

表 6 为不同工况下转角测试装置的实测灵敏度。可以看出，不同工况下的实际灵敏度基本接近，均值为 23 190 με/(°)，最大相对误差为－1.26%。分析结果表明，该转角测试装置具有较高的灵敏度和较好的稳定性，实测灵敏度与理论值 24 041 με/(°)较为接近。转角测试装置制作过程中元件的加工精度和应变传感器粘贴位置的准确度等是引起实际与理论偏差的主要因素。可见，该转角测试装置适用于梁端转角动态测试领域，其测试分辨率具有明显优势，稳定性良好，适合于梁端小角度的高精度动态测量。

可见，转角输入为 0.073°时，装置上盖板两端约产生 0.6 mm 竖向位移差，导致弹性梁桥路应变约为 1 850 με。利用转角测试装置将梁端微小转角量等效为较大应变值，再由应变测量值反算梁端转角，该测试方法和装置具备高精度特性。

表 6　实测灵敏度

Tab.6　Measured sensitivity

工况	实测灵敏度 /(με•(°)$^{-1}$)	灵敏度均值 /(με•(°)$^{-1}$)	相对误差/%
单次加载	23 118	23 190	－0.31
单次加载	23 481	23 190	－1.26
单次加载	23 181	23 190	0.04
单次加载	23 152	23 190	0.28
反复加载	23 043	23 190	0.63

5　结　论

1）提出一种梁端转角高精度测试方法，通过连接梁端转角测点与桥墩，将测点截面转角信息依次转换为位移信息和应变信息，并实现信号放大，借助应变测试技术实现对转角的测量。应变信号与转角信号具有明显线性关系，基于此设计制作梁端转角测试装置，采用全刚性连接避免各部件间微小间隙导致的测量误差。选取刚体和弹性体结合的方式，使转角引起的变形集中于弹性梁上。

2）理论分析与试验研究结果表明：本转角测试装置的灵敏度高且稳定，平均灵敏度为 23 190 με/(°)，相对误差不大于 1.26%；其测试分辨率最低为 5.8×10^{-5}°，高于现有梁端转角测试水平。该装置能实现对梁端转角或类似结构的高精度动态测试，适合进行桥梁转角等微小角度的专门测试。本研究成果可促进梁端转角响应数据在桥梁检测评估领域的应用。

参　考　文　献

[1] 杨红，刘夏平，崔海霞，等．大跨径桥梁实时动态挠度信号的分离[J]．振动、测试与诊断，2015，35(1)：42-49.
YANG Hong，LIU Xiaping，CUI Haixia，et al.Separation of real-time dynamic deflection signals for long span bridges[J]. Journal of Vibration，Measurement & Diagnosis，2015，35(1)：42-49.(in Chinese)

[2] 李东平，唐新葵，王宁波．基于实际影响线的桥梁快速检测方法[J]．桥梁建设，2019，49(1)：42-46.
LI Dongping，TANG Xinkui，WANG Ningbo. Bridge rapid detection method based on actual influence lines[J]. Bridge Construction，2019，49(1)：42-46.(in Chinese)

[3] 刘寒水，罗万宝，吴春利．简支桥梁预应力损失计算方法[J]．哈尔滨工程大学学报，2016，37(11)：1510-1513.
LIU Hanshui，LUO Wanbao，WU Chunli. Calculation method for the prestress loss of a simply-supported bridge[J]. Journal of Harbin Engineering University，

2016, 37(11): 1510-1513.(in Chinese)

[4] LIAO C Q, WANG M, TIAN H J, et al. Damage alarming of long-span suspension bridge based on GPS-RTK monitoring [J]. Journal of Central South University, 2015, 22(7): 2800-2808.

[5] 徐超, 张一凡, 韩晓明, 等. 基于机器视觉的大柔性结构振动位移测量[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(4): 781-786.
XU Chao, ZHANG Yifan, HAN Xiaoming, et al. Vibration displacement measurement of large flexible structures based on machine vision [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(4): 781-786.(in Chinese)

[6] ZHANG W, SUN L M, SUN S W. Bridge-deflection estimation through inclinometer data considering structural damages[J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 22(2): 04016117.

[7] 侯兴民, 杨学山, 黄侨. 利用倾角仪测量桥梁的挠度[J]. 桥梁建设, 2004, 34(2): 69-72.
HOU Xingmin, YANG Xueshan, HUANG Qiao. Using inclinometers to measure birdge deflections [J]. Bridge Construction, 2004, 34(2): 69-72. (in Chinese)

[8] 李勇, 闫维明, 陈彦江. 基于倾角测试的桥梁变形实时监测研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(5): 65-69.
LI Yong, YAN Weiming, CHEN Yanjiang. Bridge deflection real-time monitoring based on inclined angle measurement [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(5): 65-69. (in Chinese)

[9] 邸昊. 基于转角及振型参量的桥梁挠度监测方法[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(10): 72-76.
DI Hao. Bridge deflection monitoring method based on angle and mode parameters[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019,36(10): 72-76. (in Chinese)

[10] HOULT N A, FIDLER P R A, HILL P G, et al. Long-term wireless structural health monitoring of the Ferriby road bridge[J]. Journal of Bridge Engineering, 2010, 15(2): 153-159.

[11] ZHAI H, QU S Y, WANG G L. Research on the method of simply supported beam modal parameters recognition by QY inclinometer[J]. Journal of Applied Sciences, 2014, 14(16): 1844-1850.

[12] 李奇, 吴阅, 吴琪. 考虑轨道静态变位的简支梁竖向刚度限值研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(3): 34-39.
LI Qi, WU Yue, WU Qi. Research on the threshold of vertical stiffness of simply supported girders considering static deformation of track[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(3): 34-39. (in Chinese)

[13] ALAMDARI M M, KILDASHTI K, SAMALI B, et al. Damage diagnosis in bridge structures using rotation influence line: validation on a cable-stayed bridge[J]. Engineering Structures, 2019, 185: 1-14.

[14] 周宇, 狄生奎, 项长生, 等. 基于弹性约束支承梁转角影响线的梁结构损伤诊断[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(5): 879-888.
ZHOU Yu, DI Shengkui, XIANG Changsheng, et al. Beam structure damage detection based on rotational-angle-influence lines of elastic-constrained-support beam [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2020, 54(5): 879-888. (in Chinese)

[15] HUSEYNOV F, KIM C, OBRIENE E J, et al. Bridge damage detection using rotation measurements-experimental validation [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 135: 106380.1.-106380.22.

[16] ZOU X D, THIRUVENKATANATHAN P, SESHIA A A. A high-resolution micro-electro-mechanical resonant tilt sensor [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 220:168-177.

[17] 蔡少川, 王坤东. 磁性液体用于倾角测量的传感特性[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(8): 1183-1188.
CAI Shaochuan, WANG Kundong. Inclination sensing characteristic using magnetic fluids [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(8): 1183-1188. (in Chinese)

[18] 谢涛, 王行, 李川, 等. 水银柱活塞差动式光纤布拉格光栅倾角传感器[J]. 光学学报, 2017,37(3): 170-176.
XIE Tao, WANG Xing, LI Chuan, et al. Fiber bragg grating differential tilt sensor based on mercury column piston structure[J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(3): 170-176. (in Chinese)

[19] 中华人民共和国铁道部高速. TB 10621—2014 高速铁路设计规范(正式)[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.

[20] 铁道公合技术研究所. 铁道构造物等设计标准•同解说-变位制限[S]. 东京: 丸善(株)出版事业部,2004.

[23] 孙训方, 方孝淑, 关来泰, 等. 材料力学[M]. 5版. 北京: 高等教育出版社, 2009: 39-40.



第一作者简介: 王宁波, 男, 1982年9月生, 博士、副教授。主要研究方向为桥梁健康监测及检测评估、桥梁测试技术等。曾发表《Extraction of influence line through a fitting method from bridge dynamic response induced by a passing vehicle》(《Engineering Structures》2017, Vol.151, No.15)等论文。
E-mail: wangnb@csu.edu.cn