

栅式电涡流传感器在桥梁挠度测量中的应用

吕春峰, 刘伟文, 姜盈盈, 赵辉

(上海交通大学 仪器科学工程系, 上海 200240)

摘要: 根据桥梁变形的特点提出了一种三点测量法的梁体挠度测量新方法, 在沿着桥梁轴线方向上等间隔选取测量点, 令每 3 个相邻的测点为一个测量单元, 通过安装在这些测量单元中的栅式电涡流位移传感器可测量得到该单元中间测点相对于两个端点连线的相对挠度, 而后可根据这些相对挠度计算出每个测点绝对挠度值; 为了验证该方法的有效性, 通过在简支梁模型上进行的一系列静态、动态挠度测量实验证明了该方法准确、稳定可靠。

关键词: 三点测量法; 挠度; 测量点; 栅式电涡流传感器

Estimation of Bridge Deflection Using Grating Eddy Current Sensors

Lv Chunfeng, Liu Weiwen, Jiang Yingying, Zhao Hui

(Department of Instrument Science and Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A three-point method for bridge deflection estimation is proposed. Measuring points are selected along the span axis, and every three adjacent measuring points are defined as a measuring unit. In each measuring unit, the displacement of the mid-measuring point relative to the reference line linking the other two measuring points measured by the grating eddy current sensor is defined as the relative deflection. Deflections of each measuring point can thus be calculated from the relative deflections of all the measuring units directly. Both static and dynamic experiments have been carried out on a simple beam bridge model. The experimental results demonstrate this method is precise and effective.

Key words: three-point method; deflection; measuring point; grating eddy current sensors

0 引言

桥梁是一种结构庞大且造价高昂的工程, 当它们投入使用后, 由于自然环境以及负载等外在因素的影响, 会造成梁体本身的累积损伤。为了确保这些与民生密切相关的大桥安全耐久, 因此必须对这些建筑进行长期的连续的健康监测。在诸多的监测对象中, 桥梁挠度变化值是一种最为直观且能有效反映桥梁健康状况的一种参数指标。因此, 有关桥梁挠度的测量也就自然成为了桥梁健康监测的核心内容之一, 很多学者对此进行了大量的研究工作, 提出了很多挠度测量的方法, 如自动全站仪法^[1]、连通管法^[2]、光电法^[3]、GPS 法^[4]、激光图像^[5]以及倾角仪法^[6]等。

尽管有关挠度的测量方法多种多样, 但是到目前为止, 没有任何一种方法能够满足不同类型桥梁的测量要求。随着测量仪器以及测量方法的不断进步, 未来的桥梁桥梁挠度测量方法势必将向着高度自动化且适合长期在线自动监测的方向不断发展。

为了进一步拓宽桥梁挠度的测量方法, 本文根据桥梁变形的特点提出了一种三点测量法的桥梁挠度测量新方法, 该方法直接以桥梁上各个测点作为相互参考, 从而舍去了传统方法中需要选取的额外测量基准点, 因此特别适合于那些不方便假架设测量设备的场合。同时, 从测量仪器的角度来说, 选用的传感器是具有栅式结构的电涡流位移传感器^[7-9], 该种类型的传感器兼具了传统电涡流传感器与栅式测量方法的一系列特点,

在保证测量精度的同时不仅扩大了测量范围还具有防水、防尘、防油污等功能, 因此特别适用于长期在线测量。

1 三点测量法

首先以简支梁模型作为研究对象来对测量原理进行说明。假设梁体长度为 L , 等间距分割为 n 段, 即选取了包含两个端点在内的 $n+1$ 个等间隔测点。由于桥梁的整体变形, 并不存在固定的基准可以参照, 只有各个测点的实际空间位置可以作为相对基准。因此, 可以选取 3 个连续的测点进行测量, 并定义这 3 个连续的测点为一个测量单元。此时, 利用一个直的连杆连接两端测点并安装在梁体上作为相对基准连线, 连杆的中部安装栅式电涡流位移传感器的线圈以及测量系统, 反射导体部分则安装在梁体的中间测点上。当梁体发生挠曲变形时, 中间测点相对于该基准的挠度变形可由位移传感器读出。图 1 为桥梁中某一段的变形示意图, 假设桥梁变形后测点 i 以及其前后两个相邻测点 $i-1$ 和 $i+1$ 的纵向挠度绝对值分别为 y_i 、 y_{i-1} 和 y_{i+1} , 通过位移传感器测量得到的位移 z_i 是中间测点相对于基准连线的相对位移, 称为测量单元的相对挠度。需要指出的是, 该相对位移与绝对挠度方向之间有一个转角, 在实际工程中, 该转角十分微小, 因此可近似认为 z_i 为竖直方向, 测点 i 的挠度 y_i 为:

$$y_i = (y_{i-1} + y_{i+1})/2 + z_i \quad (1)$$

这样, 经过测量除两端测点可得到 $n-2$ 个测量单元的相对挠度值, 加上两个边界条件 $y_0 = y_n = 0$, 就可以获得全部测点的纵向挠度值。

图 2 是以包含梁体两端点在内的 5 个测点为例的挠度测量示意图, 当梁体发生挠曲变形时, 此时每组测量单元的连杆中部与相应位置梁体上的中间测点发生位移变化, 测量得到的位移值为 z_i ($i = 1, 2, 3$), 待全部测量完成后, 绝对挠度值 y_i 与位移值

收稿日期: 2013-12-16; 修回日期: 2014-02-10。

作者简介: 吕春峰(1978-), 男, 山东人, 博士研究生, 主要从事电磁类传感器设计与应用方向的研究。

赵辉(1965-), 男, 辽宁人, 教授, 主要从事现代传感器技术与视觉检测技术方向的研究。

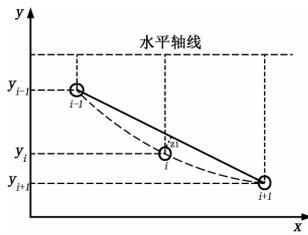


图 1 三点测量法示意图

z_i 之间关系可根据式 (1) 列出相应的矩阵表达式:

$$Z = KY \tag{2}$$

$$Y = K^{-1}Z \tag{3}$$

式中, $Z = [z_1, z_2, z_3]^T$, $Y = [y_1, y_2, y_3]^T$

$$K = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

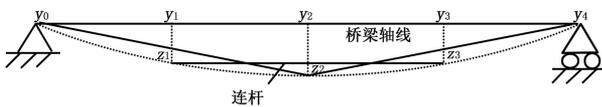


图 2 挠度测量示意图

通过这样的方式, 只要将全部测量单元中相对挠度测量完成, 就可以通过式 (3) 计算得到各个测量点的挠度值并可据此绘制出整个桥梁的挠度变形曲线。

2 传感器测量原理与安装方法

测量过程中选择的传感器是具有栅式结构的电涡流位移传感器 (涡流栅传感器), 该传感器由测量板与反射栅组成, 其中测量板由 4 个平面线圈和测量电路构成, 采用印制电路板工艺制作, 竖向固定在连杆中部。反射栅同样可采用印制电路板工艺制作, 是由一系列平均分布的导体组成, 也可称之为码道, 令码道上每个导体之间的距离为 $\lambda = 5 \text{ mm}$, 称之为测量波长或者测量周期, 固定在梁体的测量点上。

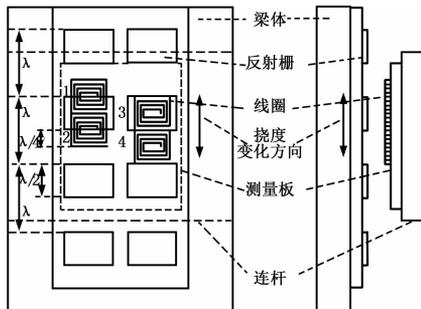


图 3 传感器基本结构及安装示意图

如图 3 所示, 4 个线圈分为两组, 并行布置, 每组中的线圈相距 $\lambda/2$ 形成差动输出形式, 用来增强灵敏度以及减小非线性误差。两组线圈相距 $\lambda/4$, 当线圈沿着反射导体布置方向移动时, 电涡流效应将会发生周期性变化, 使得线圈的电感值发生周期性变化, 可以通过将线圈接入测量电路测量电压、电流或频率得到, 本文采用的测量电路是调频式测量电路, 方法是

将线圈通过一个多路开关依次接入到振荡电路中, 通过采集输出的振荡频率来计算位移变化。对应于 4 个线圈经测量得到的频率分别为 $f_{1,2,3,4}$ 。设第一组线圈的差动频率输出为 $f_{12} = f_1 - f_2$, 同理第二组的差动频率输出为 $f_{34} = f_3 - f_4$, 两组差动频率信号输出曲线接近正弦曲线的特性: $f_{12} = A\sin(2\pi x/\lambda)$, 其中 A 为输出信号的幅值, x 为位移值。由于两组线圈相差 $\lambda/4$ 波长, 因此两组差动频率的输出在相位上相差 $\pi/2$, 则 $f_{34} = A\cos(2\pi x/\lambda)$ 。设相位为 $\varphi = 2\pi x/\lambda$, 则相位可由下式计算得到:

$$\varphi = \arctan(f_{12}/f_{34}) \tag{4}$$

最终传感器位移输出值可由式 (4) 经变换计算得出:

$$x = \lambda\varphi/2\pi \tag{5}$$

该传感器的量程等于一个波长 λ , 精度可达 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 。如果需扩大量程, 可适当的增大测量波长或者另增一组测量波长不同的码道^[10]。

3 实验验证

为了验证三点测量法的可靠性, 在实验室环境下的简支梁模型上分别进行了静态以及模拟车行等动态测量实验。实验选取了合金材料来模拟简支梁, 梁体跨度为 1 280 mm, 沿梁体轴线方向从左至右每隔 320 mm 选取一个测量点。这样, 包含两个端点在内总共就选取了 5 个测量点, 然后根据图 2、图 3 介绍的方法进行测量传感器的安装。

3.1 静态挠度测量

在静态挠度测量实验中, 通过将不同重量的负载放置于梁体上不同位置上来测量并计算出各个测点的挠度值, 图 4 为不同重量的负载放置在测点 1 与 2 之间时的静态挠度测量示意图。在实验过程中, 通过传感器测量得到各个单元的相对挠度, 然后根据式 (3) 计算出各个测点的最终的挠度值。

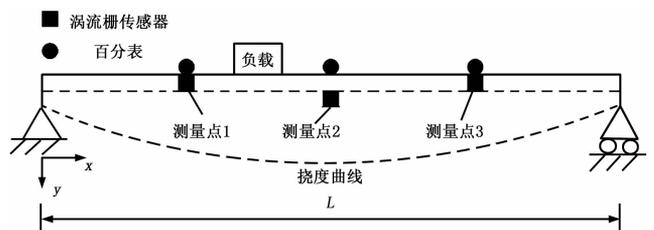


图 4 静态挠度测量

为了验证测量的准确性, 在各个测点上分别放置了百分表以便来和实验结果进行比对分析。表 1 为各个测点的静态挠度对比分析, 同时也给出了相对误差值。

表 1 静态挠度测量结果 (单位: mm)

负载重量 (kg)	2.6			3.6		
测点	1	2	3	1	2	3
相对挠度	0.14	0.30	0.10	0.21	0.38	0.11
挠度计算值	0.56	0.84	0.52	0.75	1.08	0.65
百分表	0.58	0.82	0.51	0.78	1.08	0.68
相对误差 (%)	3.4	2.4	1.9	3.8	0	4.4

由表中可以看出, 通过三点法测量并计算得到的静态挠度值与由百分表给出的测量结果具有较好的吻合度, 相对误差均小于 5%。

(下转第 1384 页)

微特电机, 2007, (12): 1-3.

[5] 李新春, 赵东斌, 易建强. 一种全方位移动机械手的可操作度分析 [J]. 中国机械工程, 2006, 17 (14): 1442-1447.

[6] Byun K S, Kim S J, Song J B. Design of a four-wheeled omnidirectional mobile robot with variable wheel arrangement mechanism [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation [C], 2002: 720-725.

[7] 吕文伟. 全方位轮移动机构的结构设计 [J]. 机械与电子, 2006, (12): 63-65.

[8] 王双双, 张豫南, 张健, 等. 基于观测器的全方位平台滑模轨迹跟踪控制 [J]. 计算机仿真, 2012, (29) 10: 204-208.

[9] 王宏文, 徐津娜, 李耀婷, 等. 基于阿克曼公式模糊切换增益调节的滑模控制 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (12): 2979-2981.

(上接第 1341 页)

3.2 模拟车行实验

在对桥梁进行动态测量时, 测量的对象是各个测点的时间历程值, 也称为时程曲线, 通过将这些记录值在时域或频域下进行统计分析, 为后续的相关设计工作提供计算依据。由于桥梁本身固有频率较低, 因此在对它进行动态测量时, 应当以位移为主要测量对象, 即各个测点的动态挠度值。

在模拟车行实验中, 将一个运动的物体以不同速度通过桥梁模型, 然后记录下梁体上各个测点的动态挠度变化值。在实验过程中, 为了便于实验结果的对比分析, 选择了挠度值变化最为明显的测点 2 为主要观测点, 并在该测点下方放置一个激光位移传感器来记录该测点的动态挠度变化值。

图 5 为运动物体在不同运动速度下的三点法与激光位移传感器测量得到的测点 2 的动态挠度时程曲线对比图, 由图中可以看出, 用这两种方法得到的测量结果同样具有较好的吻合度。

4 结束语

采用三点测量法来测量桥梁挠度可直接以各个测点为相互参考点而无需额外选取静态参考点, 特别适合于无法架设测量设备的场合。通过大量的静态、动态试验结果表明, 该方法均具有很高的精度。在今后的工作中, 还可以引入无线传输技术至传感器中, 组成无线传感网络, 进一步扩大该方法的应用范围。

参考文献:

[1] 姜晨光, 刘华, 刘桂芳, 等. 自动电子全站仪桥梁三维动态变形实时监测系统 [J]. 铁路航测, 2003, (2): 38-40.

[2] 杨建春, 陈伟民. 连通管式光电挠度测量系统及其大桥监测应用 [J]. 光电子. 激光, 2006, 17 (3): 343-346.

[3] Whiteman T, Lichti D D, Chandler I. Measurement of deflections in concrete beams by close-range digital photogrammetry [A]. Proceedings of the Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications [C], Ottawa, ON, Canada: ISPRS Commission IV, 2002: 9-12.

[4] Celebi M. GPS in dynamic monitoring of long-period structures [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2000, 20 (5): 477-483.

[5] Nassif H H, Gindy M, Davis J. Comparison of laser Doppler vibrometer with contact sensors for monitoring bridge deflection and vibration [J]. NDT & E International, 2005, 38 (3): 213-218.

[6] 杨学山, 侯兴民, 廖振鹏, 等. 桥梁挠度测量的一种新方法 [J]. 土木工程学报, 2002, 35 (2): 92-96.

[7] 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.

[8] Lu C, Liu W, Zhang Y, et al. Experimental Estimating Deflection of a Simple Beam Bridge Model Using Grating Eddy Current Sensors [J]. Sensors, 2012, 12 (8): 9987-10000.

[9] 马东丽, 赵辉. 用于调频式电涡流传感器的高稳定性 LC 振荡电路 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (3): 298-300.

[10] Weiwen L, Hui Z, Hongli Q. Research on novel grating eddy-current absolute-position sensor [J]. Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on, 2009, 58 (10): 3678-3683.

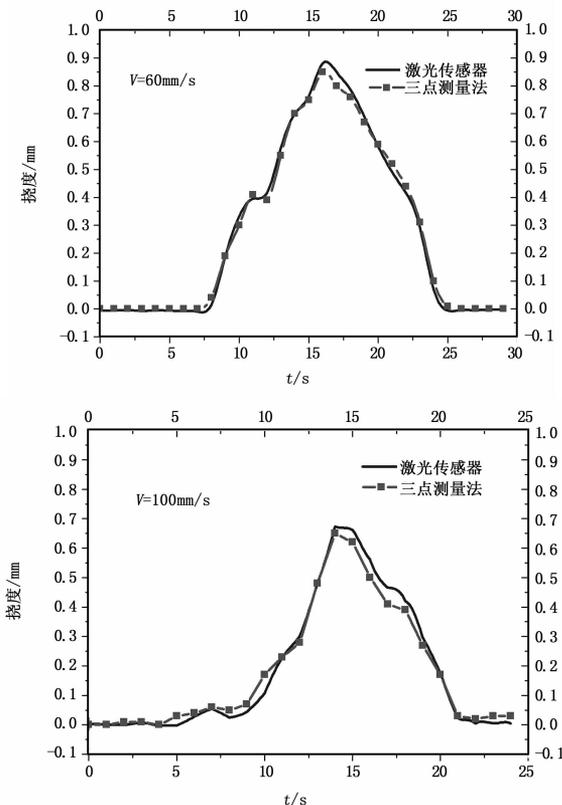


图 5 测点 2 挠度时程曲线