

文章编号:1000-582X(2004)07-0028-04

倾斜传感器在桥梁变形监测中的应用*

何永琦, 陈伟民, 符欲梅

(重庆大学光电工程学院, 重庆 400030)

摘要:倾斜传感器是一种测量倾斜角度的仪器。比较其它的测量方法, 倾斜传感器以其安装方便、使用灵活、容易确立基准以及能适应恶劣环境下长期工作等优点和性能, 在桥梁变形监测中被国外桥梁工程师广泛应用。详尽介绍了目前世界上主要生产厂家倾斜传感器的工作原理, 如液体摆式、振弦式以及力平衡式。阐述利用倾斜传感器对桥梁的沉降、桥塔桥墩的位移以及梁体挠度等桥梁变形进行监测的原理, 提出相应的简化模型和算法, 并且列举各种变形监测的应用实例。

关键词:桥梁变形; 倾斜传感器; 桥梁监测

中图分类号:TH733

文献标识码:A

倾斜传感器是一种用于测量倾斜角度的仪器。由于任何空间结构, 都存在三个平动、三个转动共六个自由度。而一旦结构受到约束, 则平动与转动之间总是存在一定的对应关系, 如果能根据某个桥梁结构对象的具体条件、求出转动与平动的关系, 即可以用倾斜传感器实现桥梁变形监测。在桥梁变形监测中, 由于倾斜传感器是一种小型密封的微电子器件, 因此对比水准仪、全站仪、光电测量等其他的监测方法, 倾斜传感器具有安装方便、使用灵活、容易确立基准、能适应恶劣环境下长期自动工作等优点。在国外, 该仪器已被大量用于桥梁变形的监测, 特别在对建筑物进行非破坏性评估中。但是在中国国内, 由于桥梁监测的起步比较晚, 有关倾斜传感器在桥梁监测中应用的相关报道很少。为了让更多的桥梁工程师了解该监测技术, 本文将深入介绍该仪器的工作原理和在桥梁变形监测中的应用。

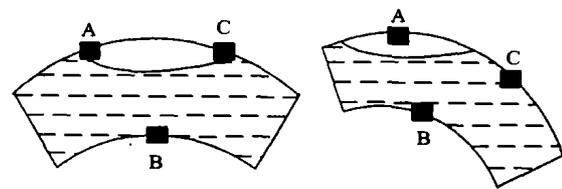
1 传感器的工作原理

倾斜传感器的种类很多, 在目前市场上的产品中, 按工作原理进行分类, 主要有液体摆式、振弦式和力平衡式。

1.1 液体摆式倾斜传感器

液体摆式倾斜传感器是利用液体摆的原理对倾斜

角度进行检测, 其内部有个电解气泡, 液体作为电导体, 两个电极 A、C 位于上方, 另一电极 B 位于下方。如图 1(a), 当气泡处于水平位置时, AB 与 CB 之间的电导相等, 从而流通它们之间的电流相等。当气泡随测量物发生倾斜时, 如图 1(b), 导致 AB 的电导增大, CB 减少。测量电极之间的电导变化, 将正比于倾斜角的变化^[1]。该工作原理的倾斜传感器结构简单, 犹如一个滑动变阻器。美国 AGI 和高级定位系统公司 (AOSI) 等公司的倾斜传感器就是该类原理的产品。



(a) 水平状态 (b) 倾斜状态

图1 液体摆倾斜传感器原理图

1.2 振弦式倾斜传感器

振弦式倾斜传感器是利用振弦技术对倾斜角度进行检测, 其内部有一个垂直重物, 用一振弦和弹性枢纽支撑着。如图 2, 当被测物倾斜角度发生变化, 导致倾斜传感器内部重物的重心产生转动, 从而使振弦的张力发生变化^[2]。利用“拨振”技术, 将电磁线圈放在弦的中间且距弦非常近, 该线圈兼作激励和信号感应线

* 收稿日期: 2004-03-06

基金项目: 国家科技攻关引导项目(2002BA105C)

作者简介: 何永琦(1975-), 男, 广东广州人, 重庆大学硕士研究生, 主要研究方向为高墩桥现场监测实时系统。

圈,电子脉冲信号通过两芯导线传入线圈引起磁场改变,使振弦以其谐振频率振动。由于振弦的张力不同,谐振频率也不同,线圈感受到振弦切割磁力线的频率并将信号通过两根电缆传到读数装置。这样,通过测定弦的振动频率,就可测量出被测物的倾斜角度^[3]。因为输出信号为频率,所以该原理的倾斜传感器抗干扰性强。美国基康公司就是该类倾斜传感器的著名生产厂家。

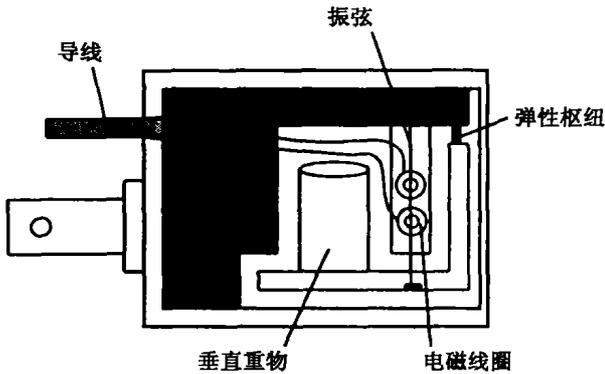


图 2 振弦式倾斜传感器原理图

1.3 力平衡式伺服倾斜传感器

力平衡式伺服倾斜传感器是利用力平衡的原理对倾斜角度进行检测,其由非接触位移传感器、力矩马达(MC)、悬臂质量块(Gs)、误差和放大电路、反馈电路五部分组成。悬臂质量块与力矩马达的电枢连接在一起。如图 3,非接触位移传感器为光电传感器(LED 和 PTR),非接触位移传感器用于检测质量块的位移量和方向。当整个倾斜传感器发生倾斜时,悬臂质量块就离开原来的平衡位置,非接触位移传感器检测出该变化后,将位置信号送入误差和放大电路,一方面倾斜传感器输出与倾角成一定比例的模拟信号。另一方面,该信号经反馈电路送入力矩马达的线圈,此时,力矩马达会产生一个与悬臂质量块运动方向相反、大小相等的力矩,力图使悬臂质量块回到原来的平衡位置。这样经过一定的时间后,悬臂质量块就停留在一个新的平衡位置上,这时,倾斜传感器输出的信号将获得真正有效的信号^[4-5]。该原理倾斜传感器的厂家有 Jewell Instrument 和 Schaevitz。

2 在桥梁变形监测中的应用

由于任何空间结构,都存在三个平动、三个转动共六个自由度。而一旦结构受到约束,则平动与转动之间总是存在一定的对应关系,如果能根据某个桥梁结构对象的具体条件、求出转动与平动的关系,即可以用倾斜传感器得出桥梁变形。因此利用倾斜传感器进行

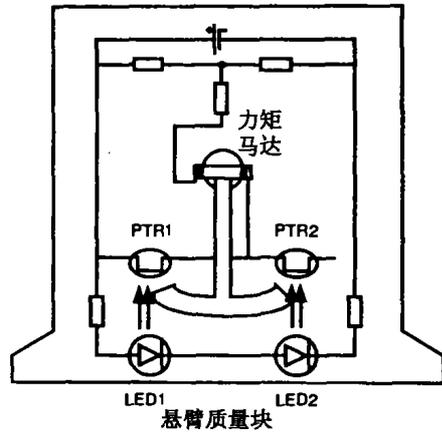


图 3 力平衡式倾斜传感器原理图

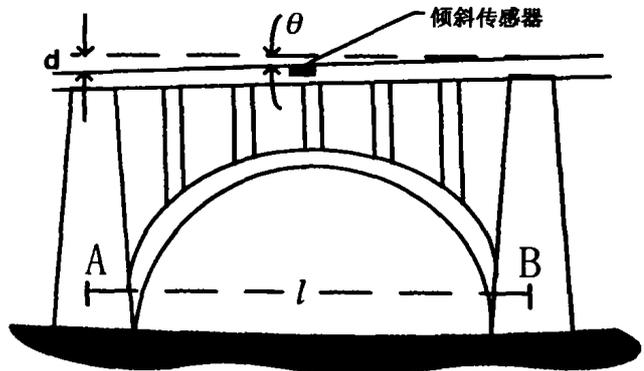
桥梁变形监测的核心问题是求出两者之间的对应关系,如果求不出对应变关系,则无法使用。因此用倾斜传感器监测桥梁变形受到诸多限制,但由于其突出的优点,仍然在桥墩沉降、桥墩侧移、主梁挠度等方面得到成功应用。

2.1 桥墩沉降监测应用

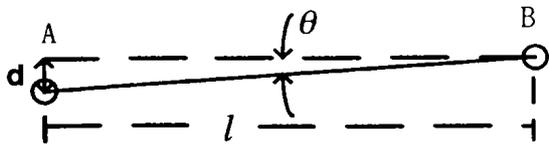
如果将一座桥的全桥看作一个绝对刚体(即自身没有变形),而该刚体的两个简支点分别位于 A、B 两点,如图 4(a),在此假设条件下,由于地基或河床的下沉,桥墩 A 产生下沉,即垂直方向上产生了位移 d 。在偏离原轴线 l (桥墩 B,作为基准点,和桥墩 A 之间的桥面直线),产生倾斜角 θ 。在桥墩发生沉降前,把倾斜传感器水平安装在适当的位置(一般在梁体上)并记录数据,当桥墩 A 发生沉降时,就可以及时获得倾斜角的变化,从而进一步算出桥墩 A 的沉降幅度 d 。经简化,如图 4(b),位移 d 与倾斜角 θ 的关系为:

$$d = l \tan \theta \approx l \cdot \theta \tag{1}$$

其中 l 为跨间的距离。韩国的 Kahwacheo 桥,为混凝土构造,由于建造的过失,中跨发生沉降。为监测是否需要对其结构退化进行修复,AGI 公司把其倾斜传感器装在桥的箱式梁上,并对桥墩的沉降进行监测^[6]。



(a) 桥墩沉降示意图



(b) 桥墩沉降简化模型

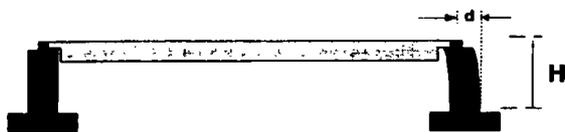
图 4 桥墩沉降监测原理

2.2 桥塔或桥墩的顶部位移监测应用

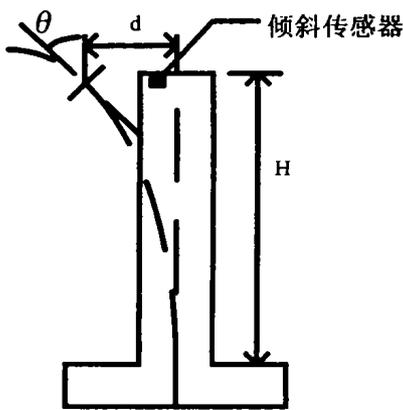
桥塔或桥墩的顶部位移指桥墩或桥塔的顶端相对于垂直轴线产生的水平位移,水平位移又分为纵向位移和切向位移。假设该桥塔或桥墩为一匀质,等截面、底端不动的理想杆,如图 5(a),当桥塔的塔顶发生位移 d 时,在偏离垂直直线上产生倾斜角 θ 。如图 5(b),把倾斜传感器安装在顶部,监测倾斜角的变化,经一定的数学换算,就可及时获得塔顶位移 d 。根据工程力学中相关理论进行推导,该位移 d 与倾斜角 θ 的关系可简化为:

$$d = \frac{2}{3}H\theta \quad (2)$$

其中 H 为桥墩的墩高。



(a) 桥墩墩顶位移示意图



(b) 桥墩墩顶位移简化模型

图 5 桥墩墩顶位移监测原理

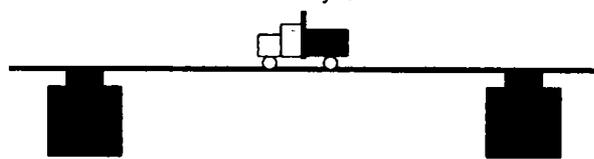
在 1990 年,AGI 在美国金门桥的两个塔上安装了两个双轴倾斜传感器,测量冲蚀或地震造成的永久性位移。结果数据表明,塔架每天移动约 25 个微弧度,相当于它们的热弹性循环,潮汐荷载的影响很少,没有观测到永久性位移。2001 年,唐山高等专科学校和北京科技大学合作,利用倾斜传感器成功对铁道部 16 工程局承建的塞浦路斯高速公路罗密欧高架桥桥墩位移测量^[7]。2003 年,重庆大学光电工程学院利用倾斜传感

器对重庆向家坡立交桥墩进行长期远程监测。该系统通过 RS-485 总线对现场传感器(倾斜传感器等)进行数据采集,并利用局域网与远程上位机进行通信。

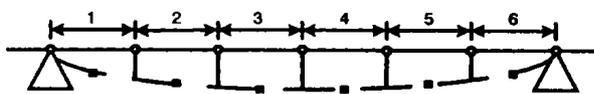
2.3 挠度监测应用

桥梁的挠度是梁轴线上的某一点在垂直于梁变形前轴线方向的垂线位移,通常的挠度监测是对梁体在静荷载和动荷载的作用下产生的挠曲和振动进行监测。假设挠度变形发生在单跨的简支梁上,如图 6(b),把多个倾斜传感器安装在梁体上,当梁体在荷载下产生挠曲时,选择适当的挠度方程^[8]:

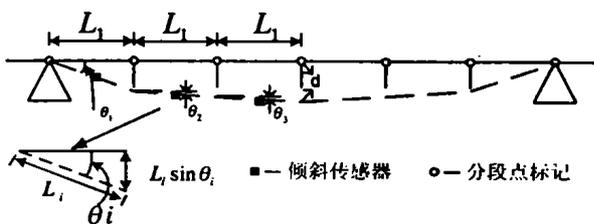
$$d(x) = A(x) \sum_{j=1}^{k-1} X_j g_j(x) \quad (3)$$



(a) 梁体荷载示意图



(b) 梁体挠度简化模型 1



(c) 梁体挠度简化模型 2

图 6 梁体挠度监测原理

上式中, $A(x)$ 为边界条件, $g_j(x)$ 为适当的函数组, X_j 为各函数组的常数矩阵。为建立挠度和倾斜角度的函数关系,对式子(3)中的 x 求导,得:

$$[A'(x) \sum_{j=1}^{k-1} X_j g_j(x) + A(x) \sum_{j=1}^{k-1} X_j g'_j(x)] \Big|_{x=x_j} = d'(x_j) = \theta(x_j) \quad (4)$$

利用最小二乘算法,把各测量点的倾斜角度 θ_j 代入方程:

$$\sum_{j=1}^{k-1} (\theta(x_j) - \theta_j) \frac{\partial \theta(x_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

求解常数矩阵 X_j 的最优解 X_j^* ,从而求出挠度方程:

$$d(x) = A(x) \sum_{j=1}^{k-1} X_j^* g_j(x) \quad (6)$$

如果变形微小,可以把挠度曲线看作折线组合,则挠度计算可简化为各段挠度的累加,如图 6(c),其挠度和

各倾斜角的函数关系为:

$$d = L_1 \sin \theta_1 + L_2 \sin \theta_2 + L_3 \sin \theta_3 \quad (7)$$

上式(7)中, L_i 和 θ_i 分别为各段的长度和倾斜角度。

1989年, 工程师 T. Y. Lin 带领一个小组, 利用倾斜传感器对美国 Parrotts Ferry 大桥进行了挠度的监测, 同时用经纬仪作比较。从工程师对测量的效果反映, 倾斜传感器比经纬仪有更好的准确度^[9]。而在国内, 中国地震局工程力学研究所最近也开展了利用倾斜传感器测量桥梁挠度的研究。对于挠度的计算利用分跨的最小二乘算法, 并在实验室用 6 m 的简支梁作了动静态试验, 而且应用到松花江铁路桥和九江公路铁路两用桥的静载挠度测量中^[10]。

3 结 语

倾斜传感器是一种高性能的倾斜角度测量仪器, 以垂重为基准, 安装容易, 能够在恶劣环境下长期地工作, 是桥梁界变形监测的一种重要手段。在变形监测的应用中, 工程师必须根据实际的情况, 建立适当的倾斜角度和形变位移的关系函数, 这将是应用中的关键所在。在国外, 该技术已经被大量使用, 对在建和已建桥梁的运行状况进行监测。在国内, 随着桥梁安全被日益重视, 作为一种重要的监测手段, 倾斜传感器也必将被大量使用。

参考文献:

- [1] WILLIAM F KANE, TIMOTHY J BECK. Advances in Highway Slope Stability Instrumentation [A]. Proceedings 50th Highway Geology Symposium [C]. Roaholce: V A, 1999. 328 - 337.
- [2] Installation Manual Model 6300 - 1H Vibrating Wire Inclimeter Horizontal Type [EB/OL]. <http://www.geokon.com/datasheets/6300.pdf>, 2002 - 02 - 01.
- [3] 蒋小钢, 辛松林. 振弦式仪器及其长期稳定性 [EB/OL]. http://www.geokon.com.cn/tech/tech_support_02_01_30_2.htm, 2002 - 02 - 01.
- [4] 张福学. 传感器应用及其电路精选 (上册) [M]. 北京: 电子工业出版社, 1993.
- [5] LCI - 360 系列双轴力平衡式伺服倾角传感器 [EB/OL]. <http://www.vigortech.com/>, 2002.
- [6] TILTMETER. Applications on Bridges [EB/OL]. <http://www.geomechanics.com/pdf/bridges.pdf>, 2004.
- [7] 徐化轩, 史丰收. 基于虚拟仪器技术的桥墩顶部位移自动监控系统 [J]. 铁道工程学报, 2002, (1): 30 - 33.
- [8] 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.
- [9] Load Testing on Parrotts Ferry Bridge [EB/OL]. http://www.geomechanics.com/pdf/cases/ParrottsFerryBridge_L00221B.pdf, 2004.
- [10] 侯兴民, 杨学山, 廖振鹏, 等. 实时测量桥梁挠度 [J]. 地震工程与工程振动, 2002, 22 (1): 67 - 72.

Bridge Deformation Monitoring With Tiltmeter

HE Yong-qi, CHEN Wei-min, FU Yu-mei

(College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Tiltmeter is a kind of sensor for tilt measurement. Comparing to other technologies, tiltmeter has so great unique performance that it is proposed for bridge deformation testing or monitoring widely abroad. We introduce some kinds of tiltmeters and the way how they work. In addition, some examples application to bridge deformation are presented.

Key words: bridge deformation, tiltmeter, bridge monitoring

(编辑 张小强)