

倾斜传感器在高墩桥墩顶位移监测中的应用

谭 靖, 符欲梅, 陈伟民

(重庆大学 重庆市 400044)

摘 要: 墩顶位移是表征高墩桥墩安全的重要参数之一。文中分析了倾斜传感器测量墩顶位移的原理, 并以重庆市向家坡立交桥监测系统为例, 应用倾斜传感器对该桥 N 匝道 10 号桥墩的墩顶位移进行了长期监测, 根据实际获得的监测数据, 分析了该桥墩墩顶在桥梁运营过程中的变化, 初步讨论了环境温度的变化对桥墩结构变形的影响。

关键词: 墩顶位移; 高墩桥; 倾斜传感器; 监测系统

我国西部地区, 地势起伏、沟壑交错, 在公路和铁路建设中, 以高墩为特点的桥梁逐年增多。由于高墩在这类桥梁结构中起着重要的支撑作用, 且工程造价昂贵, 因此对高墩的设计施工过程控制一直是人们关注的重点。但是, 高墩桥通常处于山区等地理环境复杂的区域, 这些地区同时也是洪水、山体滑坡、泥石流、地壳运动等自然灾害高发地带。建成通车后的高墩桥常常会受到这些异常外力作用的威胁。如果发生桥墩倾斜, 可能会导致墩梁错位, 甚至倒塌。因此, 在高墩桥营运过程中, 对桥墩的安全状况进行长期实时监测也是迫切需要解决的问题。同时, 通过分析监测获得的数据还可以了解桥墩在环境温度变化以及负载作用下的变形情况, 也可以为评价桥梁的设计和施工是否合理提供最直接、最原始的数据。

目前高墩桥普遍采用柔性墩设计, 因此人们最关心的是高墩的变形问题。在复杂地理环境条件下, 桥梁一般都是曲线、大纵坡、高墩、长桥等几种情况并存, 这就使得墩的变形原因变得复杂, 除了与直桥相同的纵桥向变形、竖向压缩变形外, 还有因曲线桥扭转产生的墩顶横向变形、大纵坡下的向下移动变形等。此外, 桥墩在长期负荷作用下的结构疲劳和受到自然灾害(如山体滑坡、地震等)的影响, 也会产生变形。但是, 不论什么原因造成的桥墩变形, 一般均会引起桥墩的墩顶发生位移, 即墩顶相对基准点在空间上发生位移, 包括水平和垂直位移。因此, 墩顶

位移的大小是反映高桥墩安全状况的重要参数之一。

在桥梁施工过程中, 现场测量墩顶的相对位移, 通常是在墩的附近设立一个相对稳定的基准点, 如激光挠度计、电子全站仪和利用 GPS 等方法。但是高墩桥所处的地理条件使得长期稳定的基准点很难找到, 因而上述方法均不能用于对高墩桥梁墩顶位移的长期监测, 只有不需要基准点的测量方法才能满足高墩桥墩顶位移的测量要求。在参考文献[4, 5]中介绍了一种使用倾斜传感器开发边坡监测系统的方法。由于倾斜传感器是以铅垂方向的重力矢量为基准的, 如果能将它用于对桥墩墩顶位移的测量, 就可以避免设立固定基准点的问题; 另外, 倾斜传感器还具有体积小、电气连接简单、安装方便等特点, 非常适合用于开发远程实时监测系统。本文正是在这种背景下, 讨论倾斜传感器在墩顶位移监测上的应用。

1 倾斜传感器测量墩顶位移的基本原理

用倾斜传感器测量墩顶位移的基本原理是以铅垂方向的重力矢量为基准, 测量桥墩由于外力或自身结构变化所发生的倾斜角度, 然后根据力学知识计算出墩顶发生的位移。

为了便于分析, 首先假设桥墩为一匀质、等截面、墩底不动的理想杆, 如图 1 所示。考虑到桥墩一般只在墩顶受到箱梁的外力作用, 因此先考虑桥墩

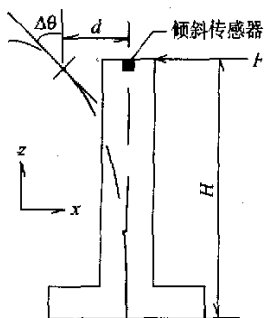


图1 顶端位移简化模型

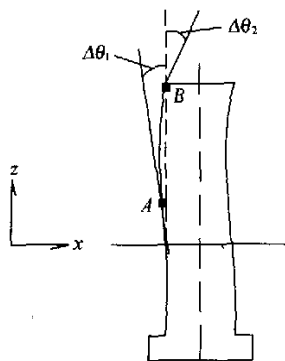


图2 桥墩的复杂变形模型

在墩顶受单一水平外力作用而发生倾斜的情况。假设外力 F 沿 x 轴负方向作用在墩顶上，墩顶平面的法向与墩初始位置的纵垂线方向的倾斜角为 $\Delta\theta$ ，墩顶沿 x 轴线方向发生的水平位移为 d 。此时，根据工程力学的知识有：

$$\text{顶端倾斜角 } \Delta\theta = -\frac{FH^2}{2EI} \quad (1)$$

桥墩的测点相对桥墩原中心线发生的水平位移为

$$d(l) = -\frac{Fx^2}{6EI}(3H-l) \quad (2)$$

在式(1)和式(2)中： F 为墩受到的外力； E 为弹性模量； I 为惯性矩； l 为测点到桥墩底部的距离； H 为桥墩高度。

当需要测量墩顶发生的位移时，令 $l=H$ ，由式(1)和式(2)可得由倾斜角度计算墩顶位移的公式：

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

因此，将倾斜传感器安装在墩顶，测得桥墩的倾斜角度后，由式(3)可计算出墩顶发生的位移。

在上面的推导过程中，是将桥墩假设为理想杆，只受单一外力作用的情况。但实际情况是，多数桥墩为柔性墩设计，而墩和箱梁之间有的是用固定铰支连接，因此桥墩受到的外力作用相当复杂，桥墩的变形也不再只是简单的倾斜，会发生类似如图2所示的复杂变形。此时，为了得到桥墩的变形情况，可以借助有限元分析软件，建立桥墩的变形模型，然后在变形斜率较大的地方，安装倾斜传感器，如图2中的A点和B点，分别测得各点的倾斜角度后，用式(3)分段计算，可获得桥墩变形的详细情况^[4]。

2 应用实例

重庆市向家坡立交桥是国道主干线重庆~湛江高速公路，重庆童家院子~雷神店段的一部分，是重庆南岸区的一项重要交通枢纽工程。向家坡立交桥

是一座多联的高架弯、坡连续梁桥，主要由4条匝道组成，是一座典型的高墩桥，多数桥墩都在30 m以上。由于立交桥四周属于高滑坡地段，而部分桥墩又建于沟壑中，上层土质较松，有滑坡的危险，因此需要对其进行长期监测。根据各匝道的跨径特征、平曲线半径、桥墩高度等因素，设计选定N匝道的10号桥墩作为结构分析和健康监测的对象，要求对该桥墩的墩顶位移进行长期实时监测。

N匝道10号墩为常规钢筋混凝土双圆弧墩，墩高36.25 m。由于梁与墩为固定铰支座连接，而桥墩四周又为滑坡地带，无法选取固定参考点，再加上重庆地区多雾的气候特点，用光电的方法受到限制，因此采用倾斜传感器的方法比较适合。

根据理论计算分析，10号墩墩顶位移监测需求如下：墩顶位移测量范围±300 mm；分辨率0.5 mm；精度1 mm；频响大于0.348 Hz；在全天候条件下进行监测。根据桥墩高度将位移参数变换为角度参数，可得对倾斜传感器的参数要求：角度量程>±0.8°；角分辨率<0.001 2°；角度精度<0.002 37°。监测系统选用4只液体摆式倾斜传感器，每只传感器的测量范围为±3°，角分辨率<0.000 6°，角度精度<0.001°，可以满足本项目的测量要求。由于液体摆式倾斜传感器易受到外界环境温度的影响，因此，需要对该种传感器输出的倾斜角度进行温度补偿，以减小温度对测量结果的影响。

对于每只倾斜传感器，通过数据拟合，得到其温度补偿算法：

$$\theta = S_{cal} [1 + K_s(T - T_{cal})] \cdot \frac{V}{2} - K_z(T - T_{cal}) \quad (4)$$

式中： θ 为温度补偿后的倾斜角度，(°)； K_s 、 K_z 为温度补偿参数，均为0.000 2； V 、 T 为倾斜传感器

输出的倾斜角度和温度; S_{cal} 、 T_{cal} 为倾斜传感器标定的拟合曲线参数和标定温度,各传感器略有不同,具体见表1。

表 1 倾斜传感器温度补偿参数

型号	S_{cal}	$T_{cal}/^{\circ}\text{C}$
T_1	0.599 49	24.6
T_2	0.599 55	27.2
T_3	0.599 97	24.3
T_4	0.599 38	26.5

由于该立交为曲线、大纵坡桥梁,10号桥墩与箱梁之间为固支连结,所以该桥墩的变形也变得相当复杂。根据有限元分析的结果,要求监测系统在外圆弧桥墩顶端和距墩顶6 m的截面上分别安装2只倾斜传感器 T_1 、 T_2 和 T_3 、 T_4 ,用来测量2个截面切向(弯坡切向)和法向的倾角。同时,为了研究温度对桥墩变形的影响,在桥墩1/2处的截面上安装4只温度传感器,用来测量不同结构点的温度。10号桥墩上倾斜传感器和温度传感器的具体分布位置见图3,倾斜传感器的实际安装如图4所示。

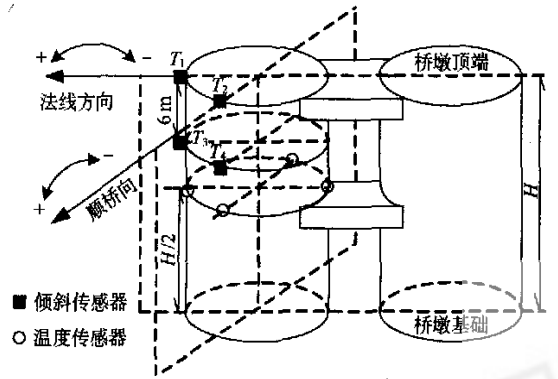


图 3 10号桥墩传感器布点示意



图 4 倾斜传感器安装示意

根据10号桥墩的监测需求,运用嵌入式系统和网络连接技术设计了一套测量墩顶位移和温度的远

程在线实时监测系统^[6]。实时监测系统由远程计算机和现场监测子系统组成,如图5所示。现场监测子系统主要由倾斜传感器、温度传感器、数据采集模块和微处理器组成。其中微处理器的主要功能是完成对传感器和采集模块的控制,并通过万维网与远程计算机之间进行通信和交换数据。由于采集模块与微处理器之间距离较远,所以它们之间采用RS485总线连接。现场监测子系统安装在被测桥墩上,通过设置采集时间间隔,可以自动定时采集各个传感器的输出信号,并按一定格式临时存储在子系统的FLASH存储器中。而位于监控中心的远程计算机,则可以通过万维网控制现场,监测子系统采集和存储数据,并将临时存储的历次数据上传到远程计算机中;此外,它还可通过网络设置现场采集子系统的各种参数,如设置日历时钟,设置采集时间间隔等。

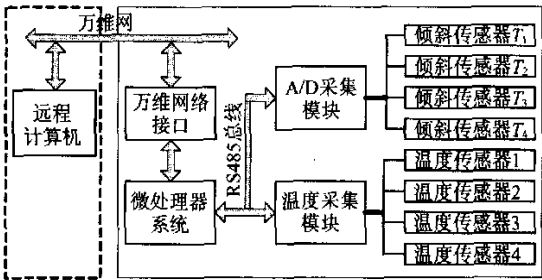


图 5 监测系统结构

3 测量数据分析

系统在现场安装调试完毕后,对10号桥墩的环境温度和倾斜角度进行了长期的监测。图6、图7和图8显示的是从2004年3月29日~4月4日自动采集到的倾斜角度和温度数据,其自动采集时间间隔为10 min。

从图6的环境温度曲线可以看出,环境温度在一天中呈有规律变化,在中午时分达最高,夜晚达到最低,这与一天中天气的变化情况一致。

图7为倾斜传感器内部的温度变化曲线,其变化规律和图6的温度变化规律相同,但比图6的温度曲线平滑,这是因为这几支温度传感器密封在倾斜传感器的金属机壳内,壳内的温度较环境温度变化缓慢。测量倾斜传感器内部温度的主要目的,是用来为输出的倾斜角度提供温度补偿。

图8为4只倾斜传感器输出的未经温度补偿的倾斜角度。从图6、图7和图8中可以发现,4只倾斜传感器的角度输出与温度变化密切相关,当温度增

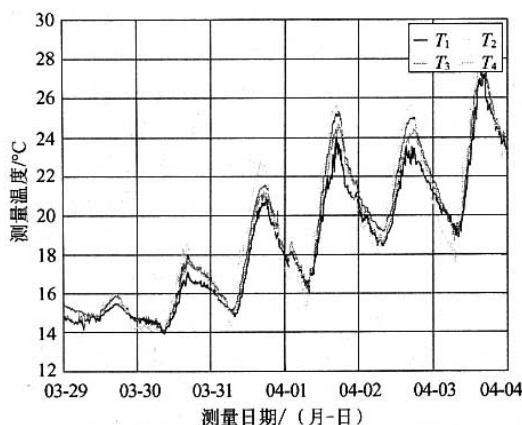


图 6 4 个测点处的环境温度曲线

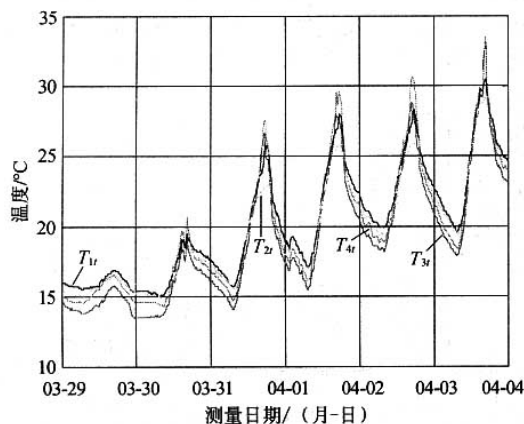


图 7 4 个倾斜传感器的温度输出

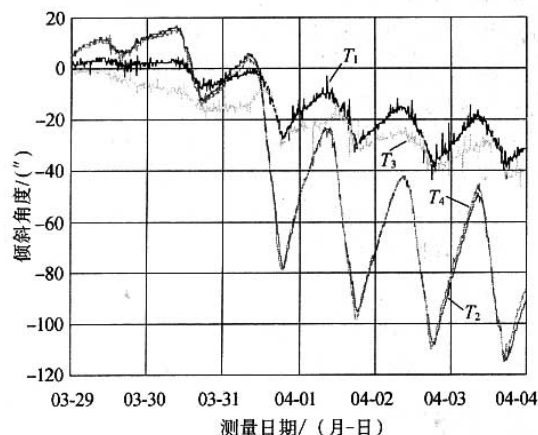


图 8 4 个测点的倾斜角度输出

高时,输出角度也增大,且变化规律与温度变化规律相同。究其原因,只可能有两种情况:一是桥墩、箱梁在温度变化时,出现热胀冷缩现象,导致桥墩发生变形倾斜;二是温度变化对倾斜传感器测量的影响。相

对箱梁和桥墩自身的热胀冷缩所引起的变形,温度变化对传感器测量的影响是非常小的。由此可见,由温度变化所引起的桥墩的结构变形是比较大的,为研究温度对桥梁结构变形的影响,有必要对其状态进行长期监测。

此外,从图 8 中还可以发现,切线方向上的 2 只倾斜传感器(T_2 和 T_4)输出角度的变化,比法线方向上 2 支传感器(T_1 和 T_3)的变化幅度大。这是由于 10 号桥墩为双圆弧结构,如图 3 所示,因此,和切线方向相比,在法线方向上发生的结构变形较小,传感器输出的倾斜角度也较小。

在得到图 8 所示的倾斜角度数据后,根据式(4),可以剔除温度对测量结果的影响,然后利用墩顶位移计算式,分别计算出 2 个截面的水平位移(T_1 和 T_2 的高度为 36.25 m, T_3 和 T_4 的高度为 30.25 m)。计算结果如图 9 所示。图中显示,切线方向上的位移 d_2 明显大于 d_4 ;此外,结合环境的温度变化曲线,可以发现,在桥梁的稳定运行阶段,桥墩在温度影响下发生的结构变形是桥墩变形的主要因素,在墩顶的切线方向可达 13 mm 以上。

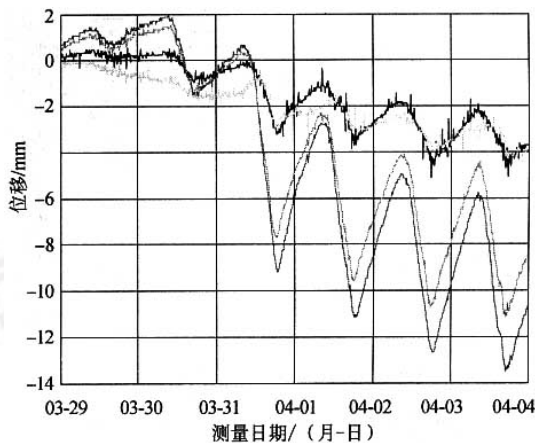


图 9 10 号桥墩各测点的位移变化

4 结语

对重庆向家坡立交 N 匝道 10 号桥墩进行长期状态监测所获得的数据表明,利用倾斜传感器的方法可以方便地实现高墩桥的墩顶位移监测。由于倾斜传感器不需要另设测量基准点,因此该方法对于滑坡等复杂地理条件的高墩墩顶位移的监测具有广泛的适用性。这种方法,为了解高墩桥在运营过程中的安全状况提供了一种比较有效的手段,同时也为高墩的设计和评价提供了最原始的依据。

文章编号: 0451-0712(2005)09-0027-06

中图分类号: U441.3

文献标识码: A

桥梁风工程研究的现状及展望

张新军

(浙江工业大学建筑工程学院 杭州市 310014)

摘 要: 桥梁结构因风的作用而遭到破坏的事故屡见不鲜。随着跨径的进一步增大, 桥梁结构对风的作用更加敏感, 风作用下桥梁结构的抗风性能已经成为影响其设计和施工的控制因素。本文回顾了 20 世纪国内外桥梁风致振动理论及其控制方面的研究情况, 并展望了 21 世纪桥梁风工程研究的重点问题。

关键词: 桥梁风工程; 风致振动; 控制

风灾是人类危害最大的自然灾害之一, 桥梁的风害事故屡见不鲜。至 1940 年, 相继有 11 座桥因风的作用而受到不同程度的破坏。此外, 还有一些桥梁

因风的作用产生了强烈的振动, 严重威胁到桥梁结构的疲劳寿命和行车安全。

随着桥梁设计和施工水平的不断提高, 现代大

收稿日期: 2005-04-07

参考文献:

- [1] 祝敏方. 山区高速公路桥梁设计探讨[J]. 公路, 2005, (5).
- [2] 尹如君, 花付南, 吕西方, 赖永星. 高墩大跨 T 构桥桥墩的有限元分析[J]. 郑州工业大学学报, 1999, 20 (3).
- [3] 王振阳, 赵煜, 徐兴. 高墩大跨径桥梁稳定性[J]. 长安大学学报, 2003, 23(4).
- [4] 方源敏, 聂卫东. 倾斜仪在变形观测中的应用分析[J]. 昆明理工大学学报, 1999, 24(1).
- [5] 徐法奎. 倾斜仪系统及测斜技术在煤矿的应用[J]. 煤矿开采, 2000, (3).
- [6] 符欲梅, 朱永, 陈伟民, 黄尚廉. 桥梁远程状态自动监测系统研究、开发及实际应用[J]. 土木工程学报, 2003, 36(2).
- [7] Holzhausen G R, H N Egan. Evaluating Structures Using Tilt (Rotation) Measurements. Proceedings, 1991 Sensors Expo West. San Jose, California.

Application of Tilt Sensor to Displacement Monitoring of High Piers

TAN Jing, FU Yu-mei, CHEN Wei-min

(Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The pier displacement is a key parameter for analyzing the security of the high pier bridges. A novel method which can indirectly measure the pier displacement with tilt sensor is presented and experimented in the monitoring system for the No. 10 pier of Xiangjiapo Over-Bridge in Chongqing City of China. Through a long-period monitoring, much data are gained and some analyses about the change of the pier displacement effected by the environment temperature have done.

Key words: pier displacement; high pier bridge; tilt sensor; monitoring system