

基于 MEMS 倾角仪的桥梁挠度监测动态及长期性能研究

刘龔, 王文剑, 李波, 章世祥

(中设设计集团股份有限公司 江苏省道桥管养技术与应用工程研究中心, 江苏 南京 210014)

摘要:为了分析基于 MEMS 倾角仪的桥梁挠度监测技术的可靠度及稳定性,该文从算法优化、长期温度影响、瞬时振动影响等多方面着手进行了研究。提出了一种多方案融合的修正样条插值方案,在典型工况下,算法引起的误差小于 0.1 mm;其次,通过对 MEMS 倾角仪的温度敏感性能研究,提出了倾角温漂修正方法;此外,通过对不同车速车辆过桥时的倾角时域、频域空间的研究,提出了采用带通滤波算法对倾角数据进行预处理,可以得到桥梁的准动态挠度;最终,经过实桥的应用及测试,验证了这一挠度监测方案在数据动态采集以及长期性能监测方面的可靠性。

关键词:桥梁;倾角仪;挠度监测;长期稳定性;带通滤波

桥梁的挠度变形是桥梁整体变形和承受荷载能力的直观反映。因此,可通过长期观测桥梁的竖向挠度变化情况来评估桥梁整体变形和承受荷载能力的变化情况。目前,国内外比较成熟的检测方法主要有:电子千分表、GPS、连通管液位式、基于光学的挠度测量。对于跨江大桥等特大型工程,大多采用基于 GPS 的挠度监测方案;而由于精度或可靠度的原因,这几种方法均难以应用在 50~200 m 跨径桥梁中。

由于航天科技中惯性姿态设备的迅猛发展,倾角测量方法得到了极速发展,在测量精度及可靠度上有了大量技术积累,大多为基于加速度传感器的倾角设备。其工作原理为采集重力加速度在传感器敏感轴上的分量大小,通过控制单元对芯片传输的信号进行处理,计算出倾角大小。理想情况下,当加速度传感器沿敏感轴方向倾斜角度为 θ ,则加速度 a 与倾斜角度 θ 的关系为:

$$a = g \sin \theta \quad (1)$$

因此,众多土木工程学者开发了基于转角的桥梁挠度测量法,其原理是通过倾角仪测量桥上多个控制点的竖向转角值,然后基于一定的数学模型由倾角值计算出挠度值。

但目前,这一挠度监测技术大多停留在验证性试验或静态试验过程,未对复杂工况下监测系统的可靠

度及稳定性进行深入研究。

1 基于不同算法的挠度测量精度分析

1.1 方法介绍

目前,基于倾角仪的挠度计算方法从其原理上主要分为 3 大类:最小二乘法、三次样条插值法、积分法。该文以传统的三次样条插值法为基础,将最小二乘法及积分法融合进来,提出一种无测点限制的改进样条函数拟合法。该方法在三次样条转角求解矩阵中增加了非采样点转角的限制,保证了拟合转角曲线的形状与理论转角曲线高度一致,使得三次样条计算法中的系数矩阵不再出现奇异,对测点布置无任何限制,有利于该方法的推广应用。

1.2 基于数值仿真的倾角挠度转化分析

以某(68+110+68) m 三跨连续梁桥为工程背景,选取代表性加载工况对其主跨进行挠度计算分析。通过有限元分析软件模拟该桥在各工况下桥面纵向上各测点的转角响应,然后利用 4 种算法求得桥梁纵轴线方向的计算挠度值。此次转角测点按 7 等分点布置,共布置 8 个转角测点。

典型加载工况示意图 1。各加载工况下 4 种算法挠度结果见表 1。

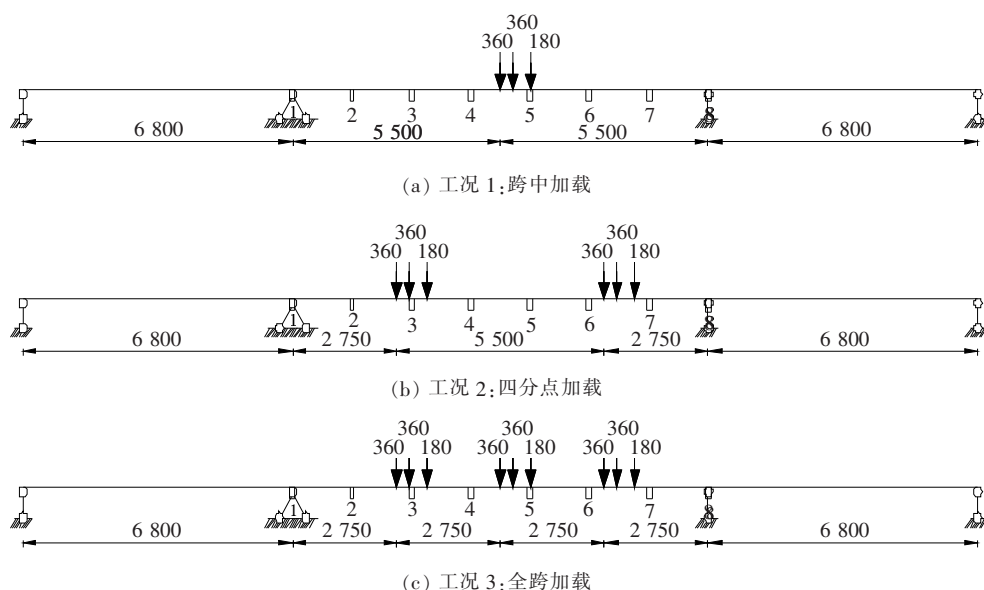


图 1 3 种工况加载示意图(长度单位:cm;荷载单位:kN)

表 1 不同算法挠度换算结果

加载 工况	理论 挠度	三次样条插值法		最小二乘法		积分法		改进样条函数拟合法	
		计算值	绝对误差	计算值	绝对误差	计算值	绝对误差	计算值	绝对误差
1	-14.0	-14.3	-0.3	-15.2	-1.2	-13.2	0.9	-13.9	0.1
2	-15.5	-15.5	0	-15.5	0.1	-15.4	0.1	-15.6	-0.1
3	-29.6	-29.8	-0.3	-30.6	-1.1	-28.6	1.0	-29.6	0

由表 1 可知:总体上,修正样条插值法计算精度最高,三次样条插值法及积分法次之,最小二乘法最差,修正样条插值算法的理论误差小于 0.1 mm。

2 MEMS 倾角仪测值与环境温度的相关性

对于长期监测而言,由于 MEMS 传感器自身的特性,其存在一个较为显著的温漂现象,即不同的温度其零点存在漂移现象。一般 MEMES 倾角厂商提供的温漂参数在 $0.0007^{\circ}/^{\circ}\text{C}$ 以内,以 1 年周期内大气温差 40°C 计算,误差达到了 0.028° ,这个误差将导致数据完全失真,因此必须采用有效的温度修正措施。

该文利用三轴高精度转台(图 2)对 20 个倾角传感器在不同温度下的温漂参数进行测量,测量中设置转台在所有温度下均保持统一角度。结果见图 3。

由图 3 可知:

(1) 基于 MEMS 加速度计原理的倾角传感器其温度漂移特性较为复杂,不同传感器间差异较大、趋势不一,难以采用统一的公式或参数进行修正。



图 2 三轴高精度转台

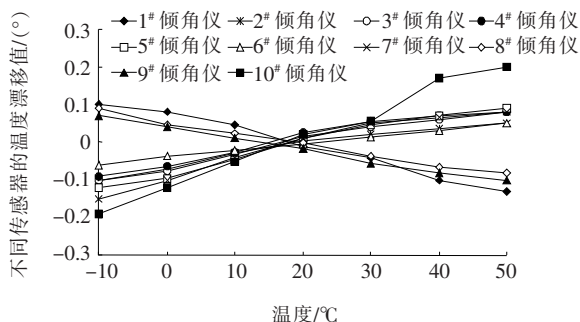


图3 实测传感器温漂数值

(2) 传感器品控难度较大,温漂系数全部大于标称的 $0.0007/^{\circ}\text{C}$,最大的温漂达到了 $0.0065/^{\circ}\text{C}$,最

小的也达到了 $0.002^{\circ}/^{\circ}\text{C}$ 。

(3) 同一温度下,传感器的重复性较好,数据基本稳定。

综上所述,采用基于倾角仪的挠度监测中,可在安装前,对传感器进行一一标定,在监测中将对应温度的温漂系数进行误差修正后使用。

3 MEMS 的动态性能研究

动挠度测试一直是桥梁安全监测中的难点。为了研究基于倾角仪的挠度测试系统在动挠度测试方面的性能,笔者组织了实桥试验,采用总重 50 t 的前四后八重车,对目标桥梁进行无障碍行车试验,车速分别为 10、40 及 80 km/h。跑车过程中,利用倾角仪采集系统对其进行数据采集,采集频率为 50 Hz,实测 1[#]测点的转角结果如图 4 所示。

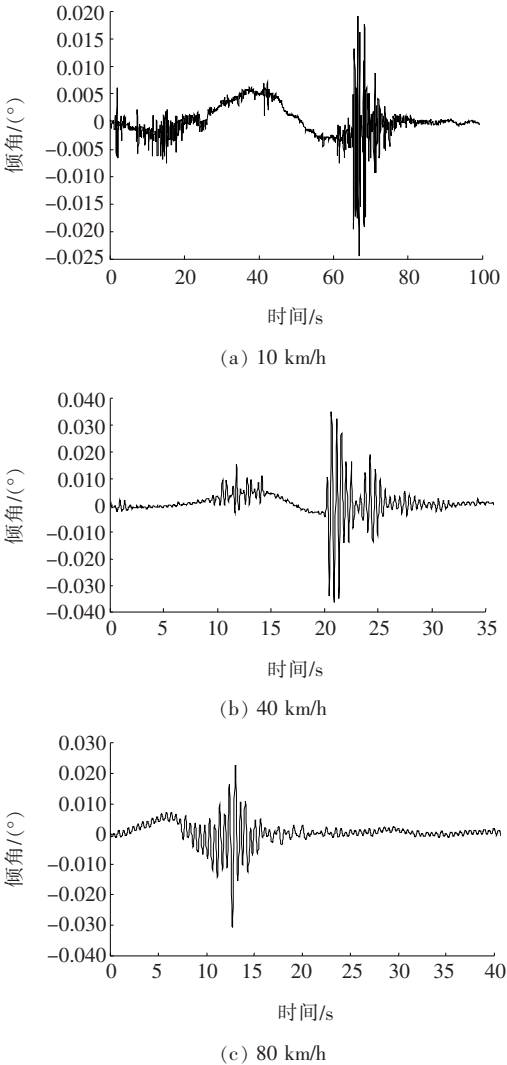


图 4 跑车作用下的倾角实测曲线

由图 4 可知:

(1) 动态采集过程中,存在大量的噪声数据。

(2) 测试噪声与车速存在一定的相关性,在 10 km/h 的车速下,噪声幅值为 0.02° ,在 80 km/h 下,噪声幅值达到 0.1° ,已完全淹没了真实信号。

根据对原始信号的分析,该文认为信号中的噪声源自设备的固有特性。基于 MEMS 的倾角仪本质是一种加速度传感器,当布设于结构中时,通过识别结构的加速度值,按式(1)方式转换为测试点位置发生的转角。因此,对于静止测试目标,通过采集原始数据即可识别测试目标的真实转角。而对于运动中的物体,应进行二次处理来过滤信号中的振动噪声,将由于振动产生的加速度值和由于角度变化产生的加速度变化值两者分开。

通过对加速度时程曲线的分析,可知噪声发生在车辆通过桥梁之后,主要原因在于车辆在桥梁上时,桥体处于受迫变形中,自身振动不占主导作用,桥梁加速度变化主要由变形产生;而车辆通过桥梁后,主梁由于尚未进入稳定状态,开始自由振动。此时,桥梁自振占到主导因素,加速度变化由梁体竖向自由振动产生。

笔者对原始信号进行了频域处理,获取了 10 km/h 车速下倾角仪实测频域图,如图 5 所示。由图 5 可知:1 Hz 以上的高频信号数据较多,而车辆过桥的时间,至少在 5 s 以上,整个车辆过桥波形对应的频率为 0.2 Hz 左右,分析认为高频数据来源于车辆过桥后的桥梁自振。

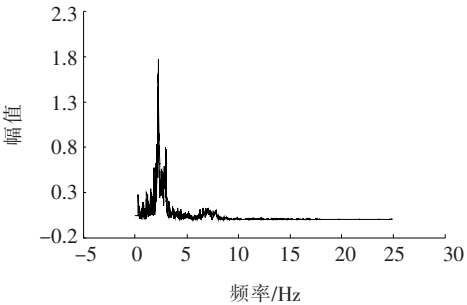


图 5 原始倾角数据频域图

因此,该文采用了带通滤波法对高频信号进行处理,滤波阈值分别设为 0.5、2 Hz,结果如图 6 所示。滤波结果表明:在 0.5 Hz 的低通信号时,较为符合真实的倾角变化。与此同时,这一方法存在的问题,将信号中属于自由振动信号完全过滤,消除了动态增量部分,最终得到的是准动态数据。

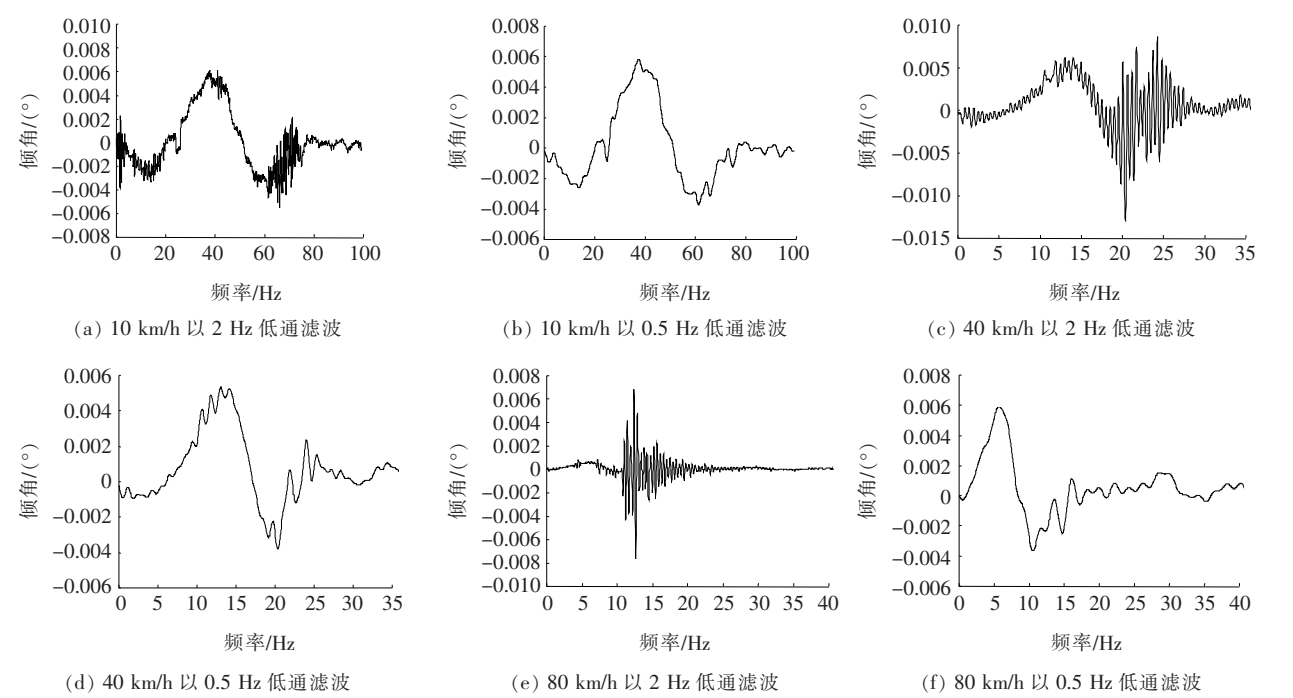


图6 基于带通滤波的倾角实测曲线

4 实桥验证

基于以上研究,该文开发了基于保形的样条函数拟合法的倾角仪挠度监测系统,并通过带通滤波、温漂系数修正等对测试结果进行预处理。整个测试系统由倾角仪、数据传输系统、数据分析处理系统组成,其网络传输拓扑图如图7所示。

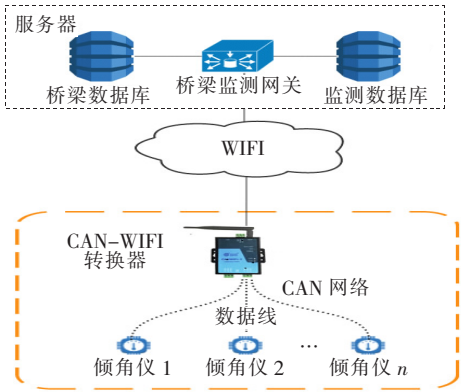


图7 基于倾角仪的挠度检测系统网络拓扑图

4.1 准动挠度测量验证

利用非接触多点位移检测系统与倾角换算挠度进行了比较分析,典型结果如图8及表2所示。

由图8可以看出:该文提出的挠度监测时程曲线与(非接触)多点位移检测系统测试结果基本一致,但

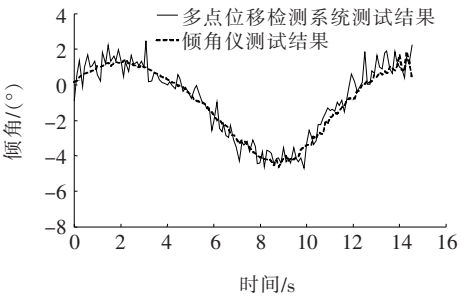


图8 某时刻现场挠度试验测试结果

表2 现场挠度试验测试结果

序号	挠度/mm		绝对 误差/ mm	相对 误差/ %
	多点位移 检测系统	倾角仪		
1	-7.71	-6.95	0.75	-9.78
2	-7.73	-7.06	0.57	-7.43
3	-6.98	-6.51	0.47	-6.77
4	-4.33	-4.00	0.33	-7.54
5	-4.10	-4.31	-0.21	5.10
6	-4.38	-4.14	0.24	-5.58

(非接触)多点位移检测系统所测得的挠度曲线抖动更加显著,噪声较大。由表2可知:两种测量方法所计算的中跨跨中最大挠度值绝对误差不超过1mm,相对误差不超过10%。

4.2 长期稳定性验证

为了验证这一监测系统在实际桥上的应用成效,该文选取了 3 跨连续梁及 5 跨连续梁主跨进行为期 1 个月的测试。根据有限元计算结果,3 跨连续梁主跨对温度效应较为敏感,而 5 跨连续梁的第 3 跨在温度作用下基本无挠度变化。

图 9~11 为两座桥梁主跨 2 月份的实测数据。

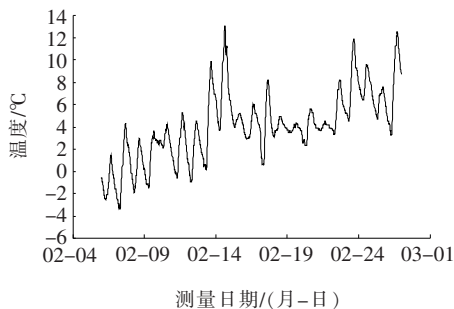


图 9 2 月份温度变化情况(2018 年)

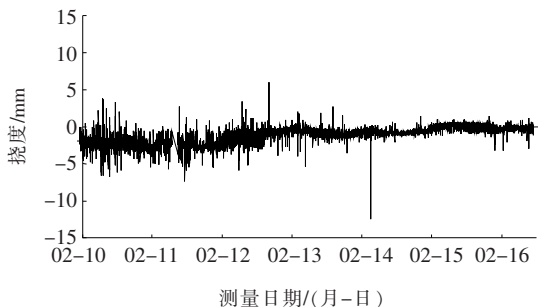


图 10 5 跨连续梁的 2 月份挠度时程曲线(2018 年)

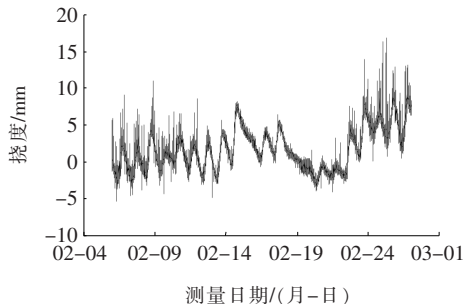


图 11 3 跨连续梁的 2 月份挠度时程曲线(2018 年)

由图 9~11 可知:

(1) 温漂效应修正后,挠度监测设备能够较好地反映出两座桥梁随着温度变化的挠度响应特征,说明长期稳定性较好。

(2) 2018 年 2 月 13 日至 2 月 20 日间,数据均较

为平滑,主要由于春节期间无重车过桥所致。

5 结论

为了分析复杂环境下基于 MEMS 倾角仪的桥梁挠度监测技术的可靠度及稳定性,该文从算法优化、温度影响、瞬时振动影响等多方面着手进行了研究。得到以下主要结论:

(1) 该文所提出的修正样条函数,其算法精度达到了 0.1 mm。

(2) 对不同车速车辆过桥时的倾角动态采集性能进行了研究,并分析了信号的时域、频域特点,采用了带通滤波算法对倾角数据进行预处理,取得了较好的效果。

(3) 通过对 MEMS 倾角仪的温度敏感性能研究,提出了倾角温漂修正方法。

(4) 经过实桥应用及对比测试,验证了这一挠度监测方案在动态采集以及长期性能方面的可靠性。

参考文献:

- [1] 王艳,陈淮,李杰.大跨径 PC 连续刚构桥长期下挠影响因素分析[J].中外公路,2014(4).
- [2] 叶华文,王力武,曲浩博,等.帕劳国预应力连续箱梁长期下挠分析[J].中外公路,2017(5).
- [3] 魏斌,王强.大跨度桥梁挠度监测方法评述[J].中外公路,2015(6).
- [4] 蔡长林.振动环境对基于压力变送器的桥梁主梁变形监测影响研究[D].哈尔滨工业大学硕士学位论文,2014.
- [5] 过静珺,戴连君,卢云川.虎门大桥 GPS(RTK)实时位移监测方法研究[J].测绘通报,2000(12).
- [6] 叶贵如,周玉龙.倾角仪在大跨度桥梁挠度检测中的应用[J].公路交通科技,2009(11).
- [7] 何先龙.基于伺服式倾角仪的桥梁挠度和转角监测技术的研究[J].国际地震动态,2013(5).
- [8] 赵雪峰,孔祥龙.一种光纤光栅倾角传感器的试验研究[J].防灾减灾工程学报,2010(S1).
- [9] 葛李强.基于转角的桥梁结构健康监测与状态评估[D].东南大学硕士学位论文,2016.
- [10] 文香稳,潘明华,朱国力.倾角仪特性研究及其测量误差补偿[J].传感器与微系统,2011(3).
- [11] 朱国力,文香稳,潘明华.曲线拟合在倾角仪测量误差补偿中的应用[J].华中科技大学学报(自然科学版),2010(5).