



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 105320596 B

(45)授权公告日 2018. 11. 20

(21)申请号 201410379770.1

(51)Int. Cl.

(22)申请日 2014.08.04

G06F 11/36(2006.01)

(65)同一申请的已公布的文献号

申请公布号 CN 105320596 A

(56)对比文件

CN 102564323 A, 2012.07.11,

CN 102998081 A, 2013.03.27,

CN 103292774 A, 2013.09.11,

(43)申请公布日 2016.02.10

(73)专利权人 中国铁道科学研究院铁道建筑研究所

地址 100081 北京市海淀区大柳树路2号

叶贵如. 倾角仪在大跨度桥梁挠度检测中的应用.《公路交通科技》.2009,第26卷(第11期),

叶贵如. 倾角仪在大跨度桥梁挠度检测中的应用.《公路交通科技》.2009,第26卷(第11期),

(72)发明人 姚京川 杨宜谦 王巍 刘鹏辉
董振升 尹京 孟鑫

杨小森. 基于倾角仪的桥梁挠度测试方法研究.《土木工程学报》.2010,第43卷(第S2期),

(74)专利代理机构 北京慕达星云知识产权代理
事务所(特殊普通合伙)
11465

审查员 方源

代理人 李冉

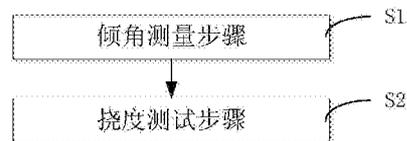
权利要求书4页 说明书6页 附图1页

(54)发明名称

一种基于倾角仪的桥梁挠度测试方法及其系统

(57)摘要

本发明公开了一种基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,包括:倾角测量步骤用于通过在测试桥梁的多个截面位置设置倾角仪,进行桥梁的截面转角的测量,获取倾角仪的转角数值;挠度测试步骤用于基于每个倾角仪在同一时刻采集到的转角数值与各个倾角仪的初始转角值的差值获取一n阶振型的组合系数,并基于该组合系数计算获取桥梁挠度。本发明还公开了一种基于倾角仪的桥梁挠度测试系统。



1. 一种基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,其特征在于,包括:

倾角测量步骤:通过在测试桥梁的多个截面位置设置倾角仪,进行桥梁的截面转角的测量,获取所述倾角仪的转角数值;

挠度测试步骤:基于每个所述倾角仪在同一时刻采集到的转角数值与各个所述倾角仪的初始转角值的差值获取一n阶振型的组合系数,并基于所述组合系数计算获取桥梁挠度;所述桥梁挠度通过下式计算获取:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n A_i \varphi_i(x) \quad (2)$$

其中, A_i 为所述组合系数,所述组合系数 A_i 通过下式计算获取:

$$A_i = \frac{P_i}{\omega_i^2 M_i} \quad (3)$$

其中,所述 P_i 和 M_i 分别为第i阶振型力和振型质量,所述 ω_i 为桥梁结构的第i阶自振频率;

$$\text{所述 } P_i \text{ 的计算公式为: } P_i = \int_0^L p(x) \varphi_i(x) dx \quad (4)$$

$$\text{所述 } M_i \text{ 的计算公式为: } M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx \quad (5)$$

其中,所述 $p(x)$ 为均布荷载,所述 $m(x)$ 为模态质量, $\varphi_i(x)$ 为第i阶振型;

所述第i阶振型 $\varphi_i(x)$ 可由三角级数表示为:

$$\varphi_i(x) = \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (6)$$

其中,所述 b_n 为常系数, L 为桥梁跨度,变量 n 为第i阶振型的最大阶数;

将式(6)中的代入式(4)中可得:

$$P_i = \int_0^L p(x) \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \sum_n b_n \cdot \int_0^L p(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (7)$$

在单位时间内, $p(x)$ 的表达式是固定的,不随时间和作用力的位置而改变,式(7)可简化为:

$$P_i = \sum_n b_n \cdot p(x) \int_0^L \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{\sum_n b_n \cdot \bar{p} \cdot L}{n\pi} \quad (8)$$

式(8)中, \bar{p} 为单位时间内作用于梁体的集中力等效值, L 为桥梁跨度;

桥梁结构的各阶圆频率 ω_i 一般为常数,将式(6)中的 $\varphi_i(x)$ 代入式(5)中可得:

$$M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx = \int_0^L m(x) \cdot \left(\sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \right)^2 dx = \sum_n b_n^2 \int_0^L m(x) \sin^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx \quad (9)$$

将模态质量简化,因此,式(9)可简化为:

$$M_i = \sum_n b_n^2 \int_0^L m(x) \sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx = \frac{\sum_n b_n^2 \bar{m} L}{2} \quad (10)$$

上式中, \bar{m} 为梁体单位长度质量;

将式(6)、式(8)、式(10)和 ω_i 代入式(2)中, 可得:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\sum_n b_n \cdot \bar{p} \cdot L}{\sum_n b_n^2 \bar{m} L} \cdot \left(\sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}\right)}{\omega_i^2 \cdot \frac{1}{2}} \quad (11)$$

上式中, 除 $\sin \frac{n\pi x}{L}$ 为 x 函数外, 其余均为常数, 以 c_i 代替, 因此, 式(11)可简化为:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (12)$$

梁体截面的倾角方程可通过式(12)对 x 求导数得到:

$$u'(x) = \sum_{i=1}^n \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} \quad (13)$$

只考虑4阶模态, 取 $n=4$;

根据实测的倾角值与初读数的差值 θ_i , $i=1, 2, \dots, 4$, 建立4个方程组成的方程组:

$$\sum_{i=1}^4 \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} = \theta_i, \quad i=1, 2, \dots, 4; \quad (14)$$

基于所述组合系数 A_i 和所述第 i 阶振型 $\varphi_i(x)$, 距梁端 x 处的桥梁所述挠度的计算公式为:

$$u(x) = \sum_{i=1}^4 c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L}, \quad i=1, 2, \dots, 4; \quad (15)$$

所述 c_i 的计算公式为: $\sum_{i=1}^4 \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} = \theta_i$, $i=1, 2, \dots, 4$; 其中, 所述 θ_i , $i=1, 2, \dots, 4$ 为通过所述倾角仪实测的倾角值与初读数的差值。

2. 根据权利要求1所述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法, 其特征在于, 所述多个截面位置为: 梁端、1/4跨、跨中和3/4跨。

3. 一种基于倾角仪的桥梁挠度测试系统, 采用如权利要求1-2中任一项所述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法, 其特征在于, 包括:

倾角测量模块: 通过在测试桥梁的多个截面位置设置倾角仪, 进行桥梁的截面转角的测量, 获取所述倾角仪的转角数值;

挠度测试模块: 基于每个所述倾角仪在同一时刻采集到的转角数值与各个所述倾角仪

的初始转角值的差值获取一n阶振型的组合系数,并基于所述组合系数计算获取桥梁挠度;
所述桥梁挠度通过下式计算获取:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n A_i \varphi_i(x) \quad (2)$$

其中, A_i 为所述组合系数,所述组合系数 A_i 通过下式计算获取:

$$A_i = \frac{P_i}{\omega_i^2 M_i} \quad (3)$$

其中,所述 P_i 和 M_i 分别为第i阶振型力和振型质量,所述 ω_i 为桥梁结构的第i阶自振频率;

$$\text{所述 } P_i \text{ 的计算公式为: } P_i = \int_0^L p(x) \varphi_i(x) dx \quad (4)$$

$$\text{所述 } M_i \text{ 的计算公式为: } M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx \quad (5)$$

其中,所述 $p(x)$ 为均布荷载,所述 $m(x)$ 为模态质量, $\varphi_i(x)$ 为第i阶振型;

所述第i阶振型 $\varphi_i(x)$ 可由三角级数表示为:

$$\varphi_i(x) = \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (6)$$

其中,所述 b_n 为常系数, L 为桥梁跨度,变量 n 为第i阶振型的最大阶数;

将式(6)中的代入式(4)中可得:

$$P_i = \int_0^L p(x) \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \sum_n b_n \cdot \int_0^L p(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (7)$$

在单位时间内, $p(x)$ 的表达式是固定的,不随时间和作用力的位置而改变,式(7)可简化为:

$$P_i = \sum_n b_n \cdot p(x) \int_0^L \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{\sum_n b_n \cdot \bar{p} \cdot L}{n\pi} \quad (8)$$

式(8)中, \bar{p} 为单位时间内作用于梁体的集中力等效值, L 为桥梁跨度;

桥梁结构的各阶圆频率 ω_i 一般为常数,将式(6)中的 $\varphi_i(x)$ 代入式(5)中可得:

$$M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx = \int_0^L m(x) \cdot \left(\sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \right)^2 dx = \sum_n b_n^2 \int_0^L m(x) \sin^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx \quad (9)$$

将模态质量简化,因此,式(9)可简化为:

$$M_i = \sum_n b_n^2 \int_0^L m(x) \sin^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx = \frac{\sum_n b_n^2 \bar{m} L}{2} \quad (10)$$

上式中, \bar{m} 为梁体单位长度质量;

将式(6)、式(8)、式(10)和 ω_i 代入式(2)中,可得:

$$u(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\frac{\sum_{m=1}^n b_m \cdot \bar{p} \cdot L}{\omega_n^2} \cdot \frac{n\pi}{\sum_{m=1}^n b_m \cdot m L}}{2} \cdot \left(\sum_{m=1}^n b_m \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (11)$$

上式中,除 $\sin \frac{n\pi x}{L}$ 为x函数外,其余均为常数,以 c_i 代替,因此,式(11)可简化为:

$$u(x) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (12)$$

梁体截面的倾角方程可通过式(12)对x求导数得到:

$$u'(x) = \sum_{i=1}^n \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} \quad (13)$$

根据实测的倾角值与初读数的差值 θ_i , $i=1, 2, \dots, 4$, 建立4个方程组成的方程组:

$$\sum_{i=1}^4 \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} = \theta_i, \quad i = 1, 2, \dots, 4; \quad (14)$$

基于所述组合系数 A_i 和所述第 i 阶振型 $\varphi_i(x)$, 距梁端 x 处的桥梁所述挠度的计算公式为:

$$u(x) = \sum_{i=1}^4 c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L}, \quad i = 1, 2, \dots, 4; \quad (15)$$

所述 c_i 的计算公式为: $\sum_{i=1}^4 \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} = \theta_i$, $i = 1, 2, \dots, 4$; 其中,所述 θ_i , $i=1, 2, \dots, 4$ 为通过所述倾角仪实测的倾角值与初读数的差值。

4. 根据权利要求3所述基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,其特征在于,所述多个截面位置为:梁端、1/4跨、跨中和3/4跨。

一种基于倾角仪的桥梁挠度测试方法及其系统

技术领域

[0001] 本发明涉及一种桥梁挠度的测试方法,适用于任意桥跨长度任一位置的挠度测试,属于桥梁检测技术领域,具体地说是涉及桥梁检测过程中的一种高精度及高效率的桥梁挠度测试方法。

背景技术

[0002] 桥梁检测试验中,需对桥梁挠度进行测量,其挠度测量数据的准确度直接关系桥梁状态的评定,同时,桥梁检测的时效性要求高。因此,在桥梁检测过程中,高精度及高效率的桥梁挠度测试系统显得至关重要。现有技术中,桥梁挠度的现场测试一般采用如下方法:1、采用水准仪等光学测量仪器测量桥梁挠度,虽然操作简便,但测量精度低,测量结果受人影响干扰较大,无法适用于桥梁动态挠度的测试,误差较大。2、采用百分表、千分表等位移计测试桥梁挠度,需在梁体下方搭设脚手架,以便在脚手架上安装挠度测试仪器,但在桥下搭设脚手架时,存在工序复杂,费时费力,而且较高的脚手架存在较大的安全隐患,其本身的晃动和底部不均匀沉降还会影响桥梁挠度的测试结果。3、运用光电图像原理,通过采集的图像信号,采用数据处理方法,得出桥梁的挠度值,如申请号为200710103777.0、公开号为CN101055218、名称为“桥梁挠度和位移的监测装置及监测方法”的中国发明专利申请,其工作原理复杂,图像数据采集受天气、光线等特定条件的限制,数据处理复杂,而且成本较高,精度较低,实际可操作性差。4、基于连通管原理,根据开放式连通管内的液面的变化直接测量桥梁挠度,此方法原理简单,但由于液体与管壁之间的粘滞阻力及水与管壁之间的毛细作用,导致测试精度不高,且无法适用于桥梁动态挠度的测试。5、基于连通管原理,直接将挠度转化为管内液体的压力,采用压力变送器将压力变化换成挠度的改变,如专利号为200310108447.2、授权公告号为CN100385201C、名称为“大跨径桥梁挠度监测方法”的中国发明专利,其方法理论上具有可行性,但实际操作过程中尤其在桥梁跨度较大或测点较多时,由于管内液体与管壁之间的相对流动而产生粘滞阻力,液体的压力会有一定程度的损失,导致测量精度较低,同时无法适用于桥梁动态挠度的测试。

[0003] 因此,现有桥梁挠度测试装置存在如下缺陷:1、测试精度低,误差较大;2、测试装置安装复杂,数据采集较复杂,人工成本高,工作效率低;3、无法适用于桥梁动态挠度及跨越大河和大峡谷等桥梁挠度的检测。

发明内容

[0004] 本发明的目的在于提供一种基于倾角仪的桥梁挠度测试方法及其系统,以解决现有技术中桥梁挠度测试精度低,误差大,测试装置安装复杂,数据采集效率低的问题。

[0005] 为达上述目的,本发明提出了一种基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,包括:

[0006] 倾角测量步骤:通过在测试桥梁的多个截面位置设置倾角仪,进行桥梁的截面转角的测量,获取所述倾角仪的转角数值;

[0007] 挠度测试步骤:基于每个所述倾角仪在同一时刻采集到的转角数值与各个所述倾

角仪的初始转角值的差值获取一n阶振型的组合系数,并基于所述组合系数计算获取桥梁挠度。

[0008] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,所述多个截面位置为:梁端、1/4跨、跨中和3/4跨。

[0009] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,所述桥梁挠度通过下式计算获取:

$$[0010] \quad u(x) = \sum_{i=1}^n A_i \varphi_i(x)$$

[0011] 其中, A_i 为所述组合系数, $\varphi_i(x)$ 为第i阶振型。

[0012] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,所述组合系数 A_i 通过下式计算获取:

$$[0013] \quad A_i = \frac{P_i}{\omega_i^2 M_i}$$

[0014] 其中,所述 P_i 和 M_i 分别为第i阶振型力和振型质量,所述 ω_i 为桥梁结构的第i阶自振频率;

$$[0015] \quad \text{所述 } P_i \text{ 的计算公式为: } P_i = \int_0^L p(x) \varphi_i(x) dx$$

$$[0016] \quad \text{所述 } M_i \text{ 的计算公式为: } M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx$$

[0017] 其中,所述 $p(x)$ 为均布荷载,所述 $m(x)$ 为模态质量, $\varphi_i(x)$ 为第i阶振型。

[0018] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,所述第i阶振型 $\varphi_i(x)$ 可由三角级数表示为:

$$[0019] \quad \varphi_i(x) = \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}$$

[0020] 其中,所述 b_n 为常系数, L 为桥梁跨度,变量 n 为第i阶振型的最大阶数。

[0021] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,基于所述组合系数 A_i 和所述第i阶振型 $\varphi_i(x)$,距梁端 x 处的桥梁所述挠度的计算公式为:

$$[0022] \quad u(x) = \sum_{i=1}^4 c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (i=1,2,\dots,4)$$

[0023] 所述 c_i 的计算公式为: $\sum_{i=1}^4 \frac{i\pi c_i}{L} \cos \frac{i\pi x}{L} = \theta_i \quad (i=1,2,\dots,4)$ 其中,所述 θ_i ($i=1,2,3,\dots$

5) 为通过所述倾角仪实测的倾角值与初读数的差值。

[0024] 本发明还提供一种基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,采用如所述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,包括:

[0025] 倾角测量模块:通过在测试桥梁的多个截面位置设置倾角仪,进行桥梁的截面转角的测量,获取所述倾角仪的转角数值;

[0026] 挠度测试模块:基于每个所述倾角仪在同一时刻采集到的转角数值与各个所述倾角仪的初始转角值的差值获取一n阶振型的组合系数,并基于所述组合系数计算获取桥梁挠度。

[0027] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,所述多个截面位置为:梁端、1/4跨、跨中和3/4跨。

[0028] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,所述桥梁挠度通过下式计算获取:

$$[0029] \quad u(x) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \varphi_i(x)$$

[0030] 其中, A_i 为所述组合系数, $\varphi_i(x)$ 为第 i 阶振型。

[0031] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,所述组合系数 A_i 通过下式计算获取:

$$[0032] \quad A_i = \frac{P_i}{\omega_i^2 M_i}$$

[0033] 其中,所述 P_i 和 M_i 分别为第 i 阶振型力和振型质量,所述 ω_i 为桥梁结构的第 i 阶自振频率;

$$[0034] \quad \text{所述 } P_i \text{ 的计算公式为: } P_i = \int_0^L p(x) \varphi_i(x) dx$$

$$[0035] \quad \text{所述 } M_i \text{ 的计算公式为: } M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx$$

[0036] 其中,所述 $p(x)$ 为均布荷载,所述 $m(x)$ 为模态质量, $\varphi_i(x)$ 为第 i 阶振型。

[0037] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,所述第 i 阶振型 $\varphi_i(x)$ 可由三角级数表示为:

$$[0038] \quad \varphi_i(x) = \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L}$$

[0039] 其中,所述 b_n 为常系数, L 为桥梁跨度,变量 n 为第 i 阶振型的最大阶数。

[0040] 上述基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,基于所述组合系数 A_i 和所述第 i 阶振型 $\varphi_i(x)$,距梁端 x 处的桥梁所述挠度的计算公式为:

$$[0041] \quad u(x) = \sum_{i=1}^4 c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (i=1, 2, \dots, 4)$$

$$[0042] \quad \text{所述 } c_i \text{ 的计算公式为: } \sum_{i=1}^4 \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} = \theta_i \quad (i=1, 2, \dots, 4)$$

其中,所述 θ_i ($i=1, 2, 3, \dots, 5$) 为通过所述倾角仪实测的倾角值与初读数的差值。

[0043] 相比于现有技术中的方法,本发明主要的有益效果在于:

[0044] 1、工作原理简单,理论基础可靠,不受桥梁结构形式和桥梁截面变化的影响,适用于任意跨度桥梁任一位置的挠度测试。

[0045] 2、使用操作简便,测试系统各部分组成现场安装方便,测试工作效率高,测试精度高,数据采集方便。

[0046] 3、测试系统不受跨度和现场工作条件的限制,能够适用于跨越大河和大峡谷等桥梁挠度的测试。

附图说明

[0047] 图1为本发明基于倾角仪的桥梁挠度测试方法步骤示意图;

[0048] 图2为本发明基于倾角仪的桥梁挠度测试系统结构框图;

[0049] 图3为本发明基于倾角仪的桥梁挠度测试系统应用示意图。

[0050] 其中,附图标记:

[0051] 1倾角测量模块2挠度测试模块

[0052] S1~S2:本发明各实施例的施行步骤

具体实施方式

[0053] 以下结合附图和具体实施例对本发明进行详细描述,但不作为对本发明的限定。

[0054] 本发明提供一种基于转角的桥梁挠度测试方法,将桥梁截面的转角变化转变为桥梁挠度的变化,即在桥梁的5个截面布置倾角仪测量截面转角,倾角变化的(电)信号通过信号电缆及时传送至采集系统,利用截面倾角值推算出桥梁挠度与转角的数学关系公式,进而推算出任一位置处的挠度。本发明易于操作且测试数据准确,测量效率高,且性能稳定可靠,不受桥梁结构形式和桥梁截面变化的影响,能解决跨越大河和大峡谷等桥梁挠度测试困难、测量数据精度差等问题。

[0055] 本发明方法通过求解同一时刻由不同位置倾角仪读数与初读数的差值组成的方程组来得到4阶振型的组合系数,再计算出桥梁挠度方程,最终确定桥跨任一位置的挠度值。

[0056] 为了消除桥梁结构形式和桥梁截面变化的影响,采用结构动力学中的桥梁振型方程,简化了利用桥梁截面转角变化来求解挠度方程的公式。

[0057] 如图1所示,本发明提供了一种基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,包括:

[0058] 倾角测量步骤S1:通过在测试桥梁的多个截面位置设置倾角仪,进行桥梁的截面转角的测量,获取倾角仪的转角数值;挠度测试步骤S2:基于每个倾角仪在同一时刻采集到的转角数值与各个倾角仪的初始转角值的差值获取一n阶振型的组合系数,并基于组合系数计算获取桥梁挠度。

[0059] 下面结合附图和具体实施方式,对本发明具体实施例做进一步的详细说明:

[0060] 具体实施例中倾角仪传感器的量程为 $-3.00 \times 10^4 \text{rad} \sim 3.00 \times 10^4 \text{rad}$,倾角仪的测试精度选取 10^6rad 即可满足实际测试要求,其对应的位移测试精度为0.01mm。

[0061] 倾角仪桥梁挠度测试方法中,在测试桥梁梁端、1/4跨、跨中和3/4跨截面位置安装倾角仪,并连接至桥梁挠度测试系统。

[0062] 倾角仪桥梁挠度测试方法中,测试桥梁截面转角变化转变为桥梁挠度变化的机理为: $\theta^0 (i=1,2,3,\dots,5)$ 为梁端、1/4跨、跨中和3/4跨的倾角仪初读数, $u(x)$ 为距梁端x处的桥梁挠度, $\theta^1 (i=1,2,3,\dots,5)$ 为桥梁受外荷载作用发生挠度变形后,梁端、1/4跨、跨中和3/4跨的倾角仪读数。当桥梁受外荷载发生挠度变形时,得:

$$[0063] \quad \theta_i = \theta_i^1 - \theta_i^0 \quad (i=1,2,3,\dots,5) \quad (1)$$

[0064] 上式中, $\theta_i (i=1,2,3,\dots,5)$ 为变形前后梁端、1/4跨、跨中和3/4跨的倾角仪读数的差值。

[0065] 由结构动力学可知,均布荷载 $p(x)$ 作用下,桥梁挠度曲线可表示为多阶振型的叠加,即:

$$[0066] \quad u(x) = \sum_{i=1}^{\infty} A_i \varphi_i(x) \quad (2)$$

[0067] 上式中, $\varphi_i(x)$ 和 A_i 分别为第 i 阶振型和其组合系数。 A_i 可表示为:

$$[0068] \quad A_i = \frac{P_i}{\omega_i^2 M_i} \quad (3)$$

$$[0069] \quad P_i = \int_0^L p(x) \varphi_i(x) dx \quad (4)$$

$$[0070] \quad M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx \quad (5)$$

[0071] 上式中, L 为桥梁跨度, $m(x)$ 为模态质量, ω_i 为结构的第 i 阶自振频率; P_i 和 M_i 分别为第 i 阶振型力和振型质量。

[0072] 梁体的固有振型可写成如下的三角级数形式:

$$[0073] \quad \varphi_i(x) = \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (6)$$

[0074] 上式中, b_n 为常系数, L 为桥梁跨度, 变量 n 为第 i 阶振型的最大阶数。

[0075] 将式 (6) 中的 $\varphi_i(x)$ 代入式 (4) 中可得:

$$[0076] \quad P_i = \int_0^L p(x) \sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \sum_n b_n \cdot \int_0^L p(x) \sin \frac{n\pi x}{L} dx \quad (7)$$

[0077] 在单位时间内, $p(x)$ 的表达式是固定的, 不随时间和作用力的位置而改变, 因此, 式 (7) 可简化为:

$$[0078] \quad P_i = \sum_n b_n \cdot p(x) \int_0^L \sin \frac{n\pi x}{L} dx = \frac{\sum_n b_n \cdot \bar{p} \cdot L}{n\pi} \quad (8)$$

[0079] 上式中, \bar{p} 为单位时间内作用于梁体的集中力等效值, L 为桥梁跨度。

[0080] 桥梁结构的各阶圆频率 ω_i 一般为常数, 将式 (6) 中的 $\varphi_i(x)$ 代入式 (5) 中可得:

$$[0081] \quad M_i = \int_0^L m(x) \varphi_i^2(x) dx = \int_0^L m(x) \cdot \left(\sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \right)^2 dx = \sum_n b_n^2 \int_0^L m(x) \sin^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx \quad (9)$$

[0082] 将模态质量简化, 因此, 式 (9) 可简化为:

$$[0083] \quad M_i = \sum_n b_n^2 \int_0^L m(x) \sin^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx = \frac{\sum_n b_n^2 \bar{m} L}{2} \quad (10)$$

[0084] 上式中, \bar{m} 为梁体单位长度质量。

[0085] 将式 (6)、式 (8)、式 (10) 和 ω_i 代入式 (2) 中, 可得:

$$[0086] \quad u(x) = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{\sum_n b_n \cdot \bar{p} \cdot L}{n\pi}}{\omega_i^2 \cdot \frac{\sum_n b_n^2 \bar{m} L}{2}} \cdot \left(\sum_n b_n \cdot \sin \frac{n\pi x}{L} \right) \quad (11)$$

[0087] 上式中, 除 $\sin \frac{n\pi x}{L}$ 为 x 函数外, 其余均为常数, 以 c_i 代替, 因此, 式 (11) 可简化为:

$$[0088] \quad u(x) = \sum_{i=1}^n c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (12)$$

[0089] 梁体截面的倾角方程可通过式(12)对x求导数得到:

$$[0090] \quad u'(x) = \sum_{i=1}^n \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} \quad (13)$$

[0091] 本发明的具体实施例只考虑4阶模态,即取 $n=4$,本发明不以此为限。根据实测的倾角值与初读数的差值 θ_i ($i=1,2,3,\dots,4$),可以建立4个方程组成的方程组:

$$[0092] \quad \sum_{i=1}^4 \frac{i\pi c_i}{L} \cdot \cos \frac{i\pi x}{L} = \theta_i \quad (i=1,2,\dots,4) \quad (14)$$

[0093] 求解方程组,可得 c_i ($i=1,2,\dots,4$),将 c_i ($i=1,2,\dots,4$)代入式(12)中,可得距梁端x处的桥梁挠度方程。

$$[0094] \quad u(x) = \sum_{i=1}^4 c_i \cdot \sin \frac{i\pi x}{L} \quad (i=1,2,\dots,4) \quad (15)$$

[0095] 上述过程表明,在测试过程中,利用挠度测试系统记录不同时刻的截面转角,即可通过求解方程组求出距梁端x处的桥梁挠度方程。

[0096] 本测试方法可用于桥梁检测中的挠度测试及桥梁健康监测过程中桥梁长期的挠度及线形监测测试。本发明还可以有其它实施方式,凡采用同等替换或等效变换形成的技术方案,均落在本发明要求保护的范围之内。

[0097] 本发明还提供一种基于倾角仪的桥梁挠度测试系统,采用如所述基于倾角仪的桥梁挠度测试方法,如图2所示,包括:

[0098] 倾角测量模块10:在测试桥梁的多个截面位置设置倾角仪,进行桥梁的截面转角的测量,获取倾角仪的转角数值;

[0099] 挠度测试模块20:基于每个倾角仪在同一时刻采集到的转角数值与各个倾角仪的初始转角值的差值获取一n阶振型的组合系数,基于组合系数获取桥梁挠度。

[0100] 本发明具体实施例系统的应用如图3所示,包括多个倾角仪1、连接导线2和桥梁挠度测试3。其中多个倾角仪1设置于桥梁的梁端a1、1/4跨b、跨中c和3/4跨位置d、梁端a2,当桥梁发生挠度变形时,桥梁截面转角的变化反映在倾角仪1读数变化,并通过导线2输入到桥梁挠度测试系统3中。通过求解同一时刻由不同位置倾角仪读数与初读数的差值组成的方程组来得到4阶振型的组合系数,进而计算出桥梁挠度方程。

[0101] 综上所述,本发明的目的是提供一种高精度、高效率且适用性强的桥梁挠度测试方法及其系统,该方法克服了现有挠度测试方法无法适用于跨越大河和大峡谷等桥梁挠度检测的不足,通过在桥梁的5个截面布置倾角仪测量截面转角,将倾角仪采集的电信号通过信号电缆及时传送至挠度测试系统,利用截面倾角值变化推算出桥梁挠度与转角的数学关系公式,进而推算出不同位置处的挠度。本方法不但测试精度高,而且适用性强,操作方便,不受桥梁结构形式和桥梁截面变化的影响,具有较高的实用价值。

[0102] 当然,本发明还可有其它多种实施例,在不背离本发明精神及其实质的情况下,熟悉本领域的技术人员当可根据本发明做出各种相应的改变和变形,但这些相应的改变和变形都应属于本发明所附的权利要求的保护范围。

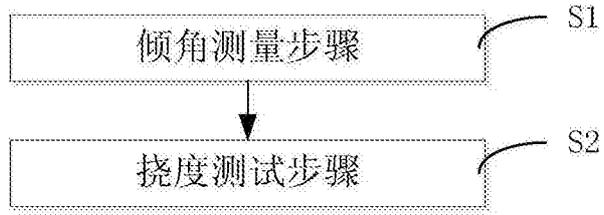


图1

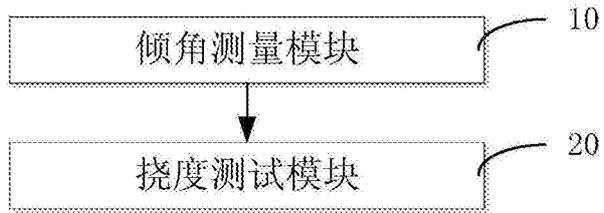


图2

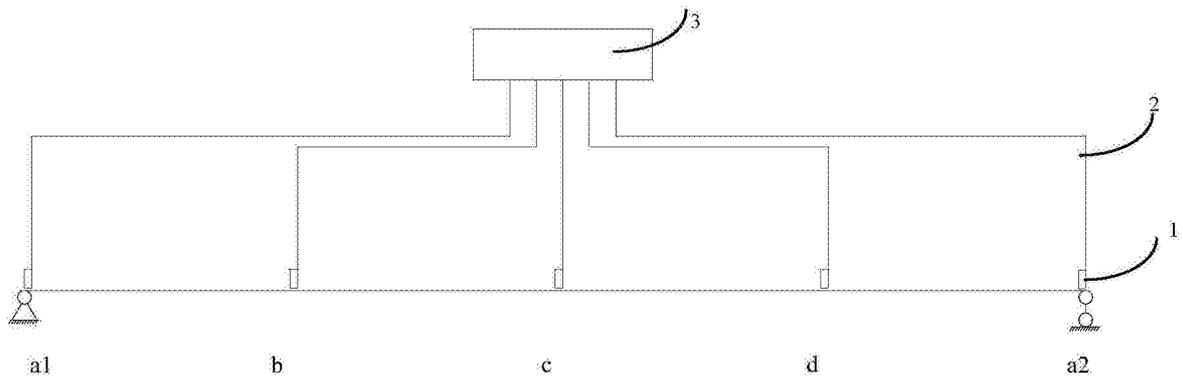


图3