

文章编号:1001-7372(2015)08-0031-09

具有减震器的吊杆施工期索力识别

单德山¹,董俊¹,刘昕玥²,周筱航¹,徐立枫¹

(1. 西南交通大学 桥梁工程系,四川 成都 610031; 2. 重庆交通大学 河海学院,重庆 400074)

摘要:为提高带减震器吊杆索力的识别精度,建立了一种新的吊杆索力识别方法。依据吊杆的力学行为,建立了带减震器吊杆的运动微分方程,明确了减震器刚度、吊杆索力及其振动频率间的复杂关系;建立并求解了带减震器吊杆的张拉有限元模型,获得不同减震器参数下吊杆频率、索力的计算结果,并绘制索力-频率-刚度的三维关系曲面,以实测索力和频率识别吊杆的减震器刚度,基于牛顿插值法得到该刚度下吊杆索力计算公式,据此建立带减震器吊杆索力识别的实用方法。以某180 m提篮式系杆拱桥吊杆索力识别为例,对所提方法进行验证。结果表明:该方法能有效地识别各施工阶段的吊杆索力,吊杆识别相对误差均小于10%,满足实际工程的需求,该方法可用于类似的实际工程中。

关键词:桥梁工程;提篮式系杆拱桥;索力识别;实用识别方法;减震器

中图分类号:U448.25 **文献标志码:**A

Tension Identification of Suspender with Damper Under Construction

SHAN De-shan¹, DONG Jun¹, LIU Xin-yue², ZHOU Xiao-hang¹, XU Li-feng¹

(1. Department of Bridge Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China;

2. School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To improve the accuracy of tension identification for suspender with damper, a novel method was proposed to identify the tension of suspender with damper. The motion differential equation of suspender with damper was established in light of the mechanical behavior of suspender, and the complex relations among the damper stiffness, suspender tension and its vibration frequency were determined. Tension finite element model of suspender with damper was established and calculated to obtain the corresponding analytical results of natural frequency and tension for the suspender with damper under different damper parameters. 3D relation surface of tension-frequency-stiffness for suspender was plotted out to measure tension and frequency of suspender to identify the damper stiffness. The calculated formula of suspender tension was achieved with the aid of Newton interpolation method, based on which practical tension identification method of suspender with damper was achieved. The suspender tension identification of a certain 180 m basket bowstring arch bridge was considered as a case study to verify the proposed method. The results show that the suspender tensions during each period of construction are identified effectively by the proposed method with good accuracy, and the relative error is less than 10%, which satisfies the need of actual project. The proposed method

收稿日期:2014-10-18

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)项目(2013CB036300-2);国家自然科学基金项目(51078316);

四川省科技计划项目(2011JY0032);铁路科技研究开发计划项目(2011G026-E,2012G013-C)

作者简介:单德山(1969-),男,四川大竹人,教授,博士研究生导师,工学博士,E-mail:dsshan@163.com。

can be adopted in real construction.

Key words: bridge engineering; basket bowstring arch bridge; tension identification; practical identification method; damper

0 引言

吊杆是中、下承式拱桥重要的传力构件,其索力大小是施工控制中的重要指标之一,索力测量的准确与否,直接关系到拱桥施工控制能否顺利进行、拱桥内力状态是否安全合理^[1]。目前国内外实际工程中常用的索力测定方法有:千斤顶液压法、压力传感器(简称压力环)以及频率法^[2-3]。第1种方法一般适用于张拉吊杆时的索力测定;第2种方法需在吊杆锚垫板下安装压力环,且一旦安装不能拆除,即该方法费用较高。在中、下承式拱桥施工过程中,如需对已安装的吊杆进行复测或进行各阶段吊杆索力测量,频率法几乎是唯一的选择。

目前频率法测量吊杆索力的研究中,多数未考虑减震器对吊杆的影响^[4]。在中、下承式拱桥中,相对于吊杆长度来说,拱肋与系杆截面高度一般较高,即拱肋与系杆内预留的吊杆管道较长,因此设置在吊杆管道口的减震器对吊杆的约束作用非常显著。已有的现场测试数据表明,减震器安装前后,吊杆实测频率偏差较大,并且减震器的存在对吊杆尤其是拱肋两端短吊杆的低阶频率影响较大^[5]。另外,实际工程中,施工误差客观存在,使得减震器对吊杆的作用非常复杂,即使同类型减震器对不同吊杆实测频率的影响也存在很大区别^[6],对有减震器的吊杆索力进行准确识别非常必要。

本文在对减震器作用下吊杆力学行为和构造进行深入理解和认识的基础上,建立考虑减震器作用的吊杆频率计算模型,推导吊杆索力与频率的解析表达式,提出一种考虑减震器作用的吊杆索力识别的工程实用方法,并对该方法进行实例验证。

1 减震器作用下吊杆张力与横向振动频率关系的计算理论

图1为一般钢管混凝土下承式拱桥吊杆构造示意图。由图1可知,在系梁和拱圈上索导管口安装了减震器及保护罩装置,且导管内填充有防腐油脂。减震器及防腐油脂填充物的存在,对吊杆的固有频率有较大影响^[6]。

在钢管混凝土拱桥施工过程中,防腐油脂的填充、吊杆拱端减震器及保护罩的安装一般是在吊杆

安装完成后进行;而对于吊杆梁端减震器,施工时为了便于吊杆安装对中及张拉工作,则会在吊杆张拉前安装。即在各施工阶段索力测量时,仅有梁端减震器对吊杆固有频率产生影响。

基于上述分析,本文考虑了吊杆两端有弹性支承,梁端减震器对吊杆的作用效应,以及吊杆自重的影响,建立了吊杆的计算模型如图2所示。图2中:

K_1, K_3 为吊杆两端横向支承刚度; K_2, K_4 为吊杆两端转动约束刚度; K_n 为减震器对吊杆的约束; C_n 为减震器阻尼系数; h 为梁端减震器到吊杆拱端的距离; h_0 为梁端减震器到吊杆梁端的距离。

以吊杆静力平衡位置为坐标原点,建立如图2所示坐标系 uOx (其中: u 为横向位移; x 为沿吊杆方向坐标位置; O 为坐标原点)。计入吊杆弯曲刚度的影响,吊杆张拉索力 T 受拉为正,且沿杆长大小、方向和时间均不变。在考虑吊索弯曲刚度影响的基础上,由结构动力学理论可知, Euler-Bernoulli 梁振动方程为^[7]

$$EI \frac{\partial^4 u(x, t)}{\partial x^4} + m \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial t^2} = T \frac{\partial^2 u(x, t)}{\partial x^2} \quad (1)$$

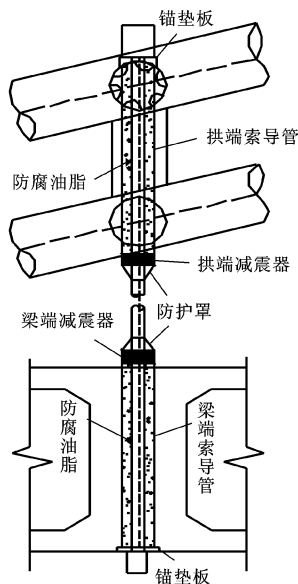


图1 下承式拱桥吊杆构造

Fig. 1 Configuration of Suspender for Through Arch Bridge

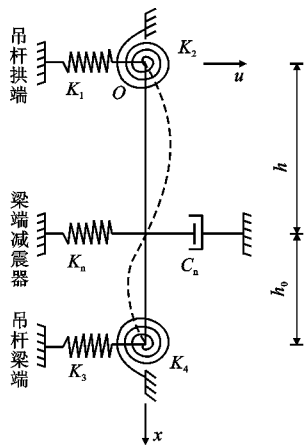


图2 具有减震器的吊杆计算模型
Fig. 2 Calculation Model for Suspender with Damper

式中: $u(x, t)$ 为吊杆各点 t 时刻横向位移; m 为吊杆单位长度质量; E 为吊杆的弹性模量; I 吊杆截面惯性矩。

由于吊杆自由振动方程为线性齐次偏微分方程, 且振动为简谐形式, 故采用分离变量法^[7], $u(x, t)$ 可通过广义坐标 $Z(t)$ 和形状函数 $\varphi(x)$ 表示, 则

$$u(x, t) = \varphi(x) Z(t)$$

形状函数可表示为^[8]

$$\varphi(x) = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 \cos(\alpha x) + C_3 \sinh(\beta x) + C_4 \cosh(\beta x) \quad (2)$$

式中: $\alpha = (\sqrt{\zeta^4 + \gamma^4} - \zeta^2)^{1/2}$, $\zeta^2 = \frac{T}{2EI}$, $\gamma^4 = \frac{m\omega^2}{EI}$, ω

为吊杆的自振频率; $\beta = (\sqrt{\zeta^4 + \gamma^4} + \zeta^2)^{1/2}$; $C_1 \sim C_4$ 为根据边界条件确定的待定系数。

由图 2 可知: 结构边界条件的数量大于形状函数 $\varphi(x)$ 中待定系数的个数, 因此很难进行方程求解。本文依据结构力学求解超静定的方法^[9], 在减震器所处位置释放结构约束, 即将原结构拆分为左、右两部分进行求解, 拆分点视为铰支, 并增加弯矩和剪力以代替释放的约束。且左、右结构在拆分点处力与变形相同, 结构计算模型如图 3 所示。图 3 中: Q_1 和 Q_2 分别为作用于减震器和阻尼器的剪力值; M 为左、右结构拆分点处的弯矩值。

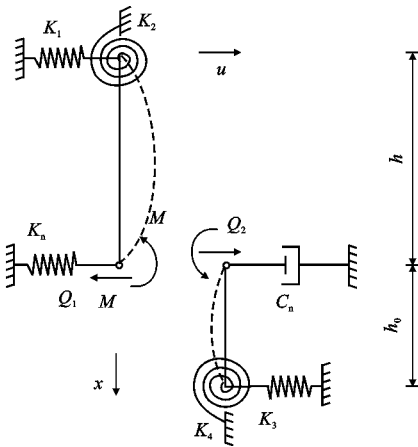


图 3 分离结构计算模型示意

Fig. 3 Analytical Model Schematic of Detached Suspender

左、右结构保持相同坐标系, 则左、右结构的形状函数 $\varphi_1(x)$ 和 $\varphi_2(x)$ 分别为

$$\varphi_1(x) = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 \cos(\alpha x) + C_3 \sinh(\beta x) + C_4 \cosh(\beta x) \quad 0 \leq x < h \quad (3)$$

$$\varphi_2(x) = D_1 \sin(\alpha x) + D_2 \cos(\alpha x) + D_3 \sinh(\beta x) + D_4 \cosh(\beta x) \quad h \leq x \leq l \quad (4)$$

式中: $D_1 \sim D_4$ 为根据边界条件确定的左、右结构的

待定系数; $l = h + h_0$ 。

根据作用在吊杆减震器处的力和位移的平衡条件, 以及吊杆梁端和拱端的边界条件, 吊杆应满足

$$\left. \begin{aligned} EI\varphi_1''(x)|_{x=0} &= -K_1\varphi_1(x)|_{x=0} \\ EI\varphi_1'(x)|_{x=0} &= K_2\varphi_1'(x)|_{x=0} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned} EI\varphi_2''(x)|_{x=l} &= K_3\varphi_2(x)|_{x=l} \\ EI\varphi_2'(x)|_{x=l} &= -K_4\varphi_2'(x)|_{x=l} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$Q_2 + C_n \frac{\partial u_2(h, t)}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$Q_1 - K_n u_1(h, t) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial u_1(h, t)}{\partial x} = \frac{\partial u_2(h, t)}{\partial x} \quad (9)$$

$$u_1(h, t) = u_2(h, t) \quad (10)$$

式中: $Q_1 = EIu_1''(h, t)$; $Q_2 = EIu_2''(h, t)$, $u_1(h, t)$ 和 $u_2(h, t)$ 分别为左、右结构在拆分点处 t 时刻的横向位移; 在自由振动情况下, $u''(h, t) = -\omega^2 u(h, t)$; $M = EIu''(h, t)$, $K_1 \sim K_4$ 的取值需要根据吊杆两端的实际边界条件确定。下文分别给出 2 种特殊边界条件下 $K_1 \sim K_4$ 取值:

(1) 两端简支。此时 $K_1 = K_3 = +\infty$, $K_2 = K_4 = 0$, 由式(5)、(6)可得

$$\varphi_1(x)|_{x=0} = 0, \varphi_1''(x)|_{x=0} = 0 \quad (11)$$

$$\varphi_2(x)|_{x=l} = 0, \varphi_2''(x)|_{x=l} = 0 \quad (12)$$

(2) 两端固结。此时 $K_1 = K_3 = +\infty$, $K_2 = K_4 = +\infty$, 由式(5)、(6)可得

$$\varphi_1(x)|_{x=0} = 0, \varphi_1'(x)|_{x=0} = 0 \quad (13)$$

$$\varphi_2(x)|_{x=l} = 0, \varphi_2'(x)|_{x=l} = 0 \quad (14)$$

实际工程中, 由于张拉吊杆两端的边界条件比较复杂, 很难准确得到边界参数, 因此需要对边界条件进行简化处理。对于实际工程中的系杆拱桥, 张拉吊杆的边界条件可认为两端固结, 但此时需要考虑索抗弯刚度对吊杆力计算的影响^[8,10]。基于此, 本文考虑吊杆两端为固结边界条件。

此时将形状函数 $\varphi(x)$ 及其导数代入式(7)~(10)和式(13)、(14), 可得

$$C_2 + C_4 = 0 \quad (15)$$

$$\alpha C_1 + \beta C_3 = 0 \quad (16)$$

$$D_1 \sin(\alpha l) + D_2 \cos(\alpha l) + D_3 \sinh(\beta l) + D_4 \cosh(\beta l) = 0 \quad (17)$$

$$\alpha D_1 \cos(\alpha l) - \alpha D_2 \sin(\alpha l) + \beta D_3 \cosh(\beta l) + \beta D_4 \sinh(\beta l) = 0 \quad (18)$$

$$EI[-\alpha^3 C_1 \cos(\alpha h) + \alpha^3 C_2 \sin(\alpha h) + \beta^3 C_3 \cosh(\beta h) + \beta^3 C_4 \sinh(\beta h)] \sin(\omega t) = \omega C_n \cos(\omega t) [C_1 \sin(\alpha h) + C_2 \cos(\alpha h) +$$

$$C_3 \sinh(\beta h) + C_4 \cosh(\beta h)] \quad (19)$$

$$EI[-\alpha^3 D_1 \cos(\alpha h) + \alpha^3 D_2 \sin(\alpha h) + \beta^3 D_3 \cosh(\beta h) + \beta^3 D_4 \sinh(\beta h)] = -K_n[D_1 \sin(\alpha h) + D_2 \cos(\alpha h) + D_3 \sinh(\beta h) + D_4 \cosh(\beta h)] \quad (20)$$

$$\alpha C_1 \cos(\alpha h) - \alpha C_2 \sin(\alpha h) + \beta C_3 \cosh(\beta h) + \beta C_4 \sinh(\beta h) = \alpha D_1 \cos(\alpha h) -$$

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \\ \alpha & 0 & \beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -EI\alpha^3\theta_2\psi - \omega C_n\theta_1 & EI\alpha^3\theta_1\psi - \omega C_n\theta_2 & EI\beta^3\theta_4\psi - \omega C_n\theta_3 & EI\beta^3\theta_3\psi - \omega C_n\theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha\theta_2 & -\alpha\theta_1 & \beta\theta_4 & \beta\theta_3 \\ \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (23)$$

式中: $\theta_1 = \sin(\alpha h)$; $\theta_2 = \cos(\alpha h)$; $\theta_3 = \sinh(\beta h)$; $\theta_4 = \cosh(\beta h)$; $\psi = \tan(\omega t)$ 。

式(23)即为考虑减震器作用下 T 与 ω 之间的解析表达式, 其为隐式形式, 图 4 给出了其求解算法。根据图 4 的求解算法便可得到减震器作用下的吊杆索力, 但在实际求解过程中会发现, 式(23)推导出的吊杆频率-索力方程极其复杂, 其迭代计算将耗费大量时间, 不宜在实际工程中直接应用。

此外, 在求解式(23)时需要输入相关参数, 虽然其中的吊杆参数及减震器阻尼系数可由相关制造商或试验获得, 但减震器对吊杆的约束刚度在实际工程中却很难确定。这是因为在桥梁施工、吊杆安装过程中存在一定的误差(如拱肋和系梁的吊杆导管口上下没有完全对中、拱肋安装误差使拱肋自身发生扭转等), 这些误差使得吊杆没有位于索导管的中心, 而向导管一边偏移并挤压减震器。上述原因使得减震器对吊杆的约束刚度 K_n 存在较大的不确定性, 这种不确定性与吊杆安装位置、安装状态等因素密切相关, 而 T, ω 等参数又与减震器约束刚度直接相关。

综上所述, 要准确识别吊杆索力, 就必须克服理论求解的复杂性以及减震器约束刚度的不确定性问题。下文基于图 4 所示的求解过程, 建立了式(23)的数值算法, 提出了一种简单实用的计算方法来识别具有减震器的吊杆索力。

2 吊杆索力识别的实用方法

为确定减震器对吊杆的作用效果, 简单而准确的识别吊杆索力, 本文中结合有限元法、频率法、牛

$$\alpha D_2 \sin(\alpha h) + \beta D_3 \cosh(\beta h) + \beta D_4 \sinh(\beta h) \quad (21)$$

$$C_1 \sin(\alpha h) + C_2 \cos(\alpha h) + C_3 \sinh(\beta h) + C_4 \cosh(\beta h) = D_1 \sin(\alpha h) + D_2 \cos(\alpha h) + D_3 \sinh(\beta h) + D_4 \cosh(\beta h) \quad (22)$$

式(15)~(22)构成以 $C_1 \sim C_4$ 和 $D_1 \sim D_4$ 为基本未知量的方程组, 要使方程有非零解, 则 8 个系数所构成的行列式值应为 0, 即

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \\ \alpha\theta_2 & -\alpha\theta_1 & \beta\theta_3 & \beta\theta_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -EI\alpha^3\theta_2 + K_n\theta_1 & EI\alpha^3\theta_1 + K_n\theta_2 & EI\alpha^3\theta_4 + K_n\theta_3 & EI\beta^3\theta_3 + K_n\theta_4 \\ \alpha\theta_2 & -\alpha\theta_1 & \beta\theta_4 & \beta\theta_3 \\ \theta_1 & \theta_2 & \theta_3 & \theta_4 \end{vmatrix} = 0 \quad (23)$$

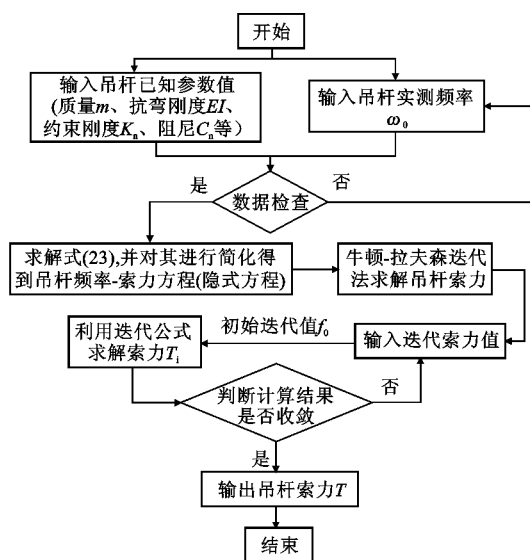


图 4 吊杆索力求解算法框图

Fig. 4 Flowchart of Algorithm for Suspender Tension

顿插值法, 建立了考虑减震器作用的吊杆索力识别的实用方法(图 5)。

该方法需首先确定吊杆索力计算参数(抗弯刚度、边界条件、计算长度、材料特性、减震器阻尼系数、减震器约束刚度等), 并采用 ANSYS 软件建立空间各吊杆有限元模型^[11], 用空间梁单元模拟吊杆, 弹簧单元模拟减震器。由于吊杆索力对吊杆刚度的影响属于非线性分析中的应力刚化问题, 吊杆索力越大其刚度亦越大^[12]。因此用初始应变模拟吊杆索力, 按非线性应力刚化问题计入索力对吊杆刚度的影响, 计算得到不同吊杆索力所对应的自振频率。

然后建立各吊杆索力-频率-刚度三维刚度识别

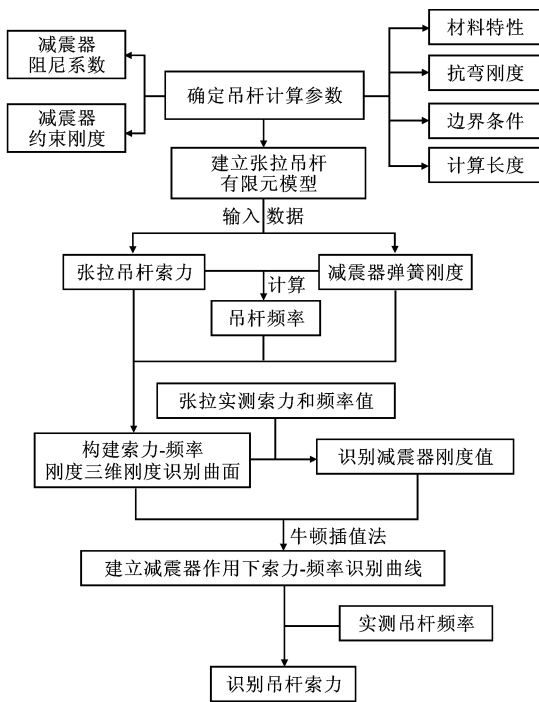


图 5 索力识别的具体步骤

Fig. 5 Specific Steps of Tension Identification

曲面,利用实测数据及刚度识别曲面对吊杆减震器刚度进行识别。具体方法是基于建立的有限元模型,将减震器刚度和张拉索力划分为若干等级,然后在各级减震器刚度作用下,计算出各级张拉索力对

应的频率值,得到索力-频率-刚度关系数据,以此绘制出三维刚度识别曲面。将吊杆张拉实测索力与频率值代入识别曲面,采用线性插值^[13]计算实测索力所对应的不同刚度等级下的理论频率值,然后确定实测频率位于哪段减震器刚度范围内,再利用线性插值识别出减震器刚度。

最后,根据识别的减震器刚度,采用线性插值计算此刚度下各级张拉索力对应的频率值,利用牛顿插值法^[13],建立考虑减震器作用的索力-频率对应关系的计算公式,利用该公式便可对吊杆各施工阶段的索力进行识别。

3 工程实例分析

3.1 工程背景

某跨渠公路桥为 180 m 的下承式钢管混凝土系杆拱桥,双幅桥设计,采用先梁后拱的方法施工。吊杆索体采用 PES(FD)7-121 镀锌钢丝,索体外层为高密度聚乙烯(HDPE)材料,系梁顶面吊杆管道口处设有减震器,减震器距离系梁底部为 3.66 m,吊杆张拉顺序是先张拉 11# 吊杆,然后由中间向两边张拉,且沿跨中对称的 4 根吊杆同时张拉。该桥立面布置如图 6 所示,图 6 中①~⑳为吊杆编号。

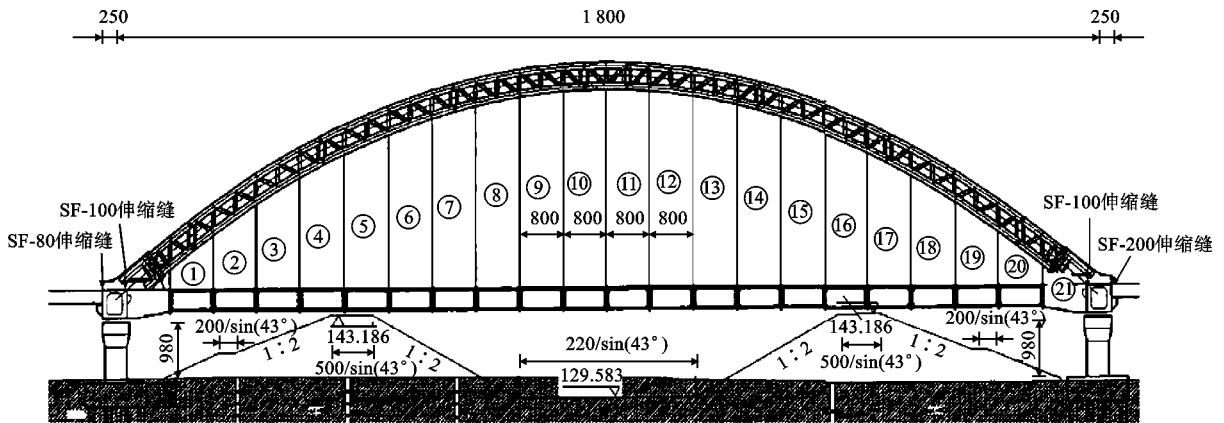


图 6 跨渠公路桥立面布置(单位:cm)

Fig. 6 Elevation Setup of Span Canal Highway Bridge (Unit:cm)

3.2 材料特性及实测数据

根据规范^[14]可查得 PES(FD)7-121 拉索的单位质量 $m=36.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$,索体外层 HDPE 材料的单位质量 $m=7.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$,钢丝束公称截面面积 $A=46.57 \text{ cm}^2$,完全粘结时的钢束截面惯性矩 $I=1\,997\,036.7 \text{ mm}^4$,弹性模量 $E=1.95 \times 10^5 \text{ MPa}$,则吊杆的抗弯刚度 $EI=379\,436.98 \text{ N} \cdot \text{m}^2$,拱桥主桥采用了 11 种不同长度吊杆,本文仅给出右

幅主桥中拱部分吊杆实测数据(表 1)。张拉实测值来源于现场第 1 次和第 2 次吊杆张拉施工记录。

第 1 次张拉吊杆分 2 步进行,第 1 步先张拉到 1 000 kN,待索力与频率测量完成后,再进行第 2 步张拉,直接张拉至目标索力。吊杆的张拉力通过油压表读取得到。第 1 次张拉吊杆前对应施工状态为拱肋混凝土灌注完成,主梁预应力完成第 2 次张拉,但主梁满堂支架未拆除,未吊装主桥桥道系 T 梁;

表 1 2 次张拉的实测拉力与频率

Tab. 1 Measured Tension Forces and Frequencies in Two Times Tensioning Process

吊杆编号	吊杆 长度/m	第 1 次张拉吊杆						第 2 次张拉吊杆			
		第 1 步		第 2 步		目标索力/ kN	张拉相对 误差/%	张拉力/ kN	频率/ Hz	目标索力/ kN	张拉相对 误差/%
		张拉力/kN	频率/Hz	张拉力/kN	频率/Hz						
2#	17.365	1 025.20	6.509	1 708.0	8.458	1 700	0.47	2 231.4	9.802	2 150	3.79
3#	22.146	1 017.40	4.743	1 730.6	5.828	1 700	1.80	2 208.8	6.891	2 250	-1.83
4#	26.360	979.90	3.292	1 700.4	4.183	1 700	0.02	2 233.3	4.686	2 250	-0.74
5#	30.011	1 009.30	3.139	1 730.8	3.979	1 700	1.81	2 330.9	4.626	2 400	-2.88
6#	33.097	986.30	2.840	1 725.4	3.750	1 700	1.49	2 376.0	4.302	2 400	-1.00
7#	35.618	994.90	2.531	1 760.5	3.352	1 700	3.56	2 541.1	3.881	2 500	1.64
8#	37.579	986.70	2.423	1 745.5	3.216	1 700	2.68	2 518.6	3.769	2 500	0.74
9#	38.983	989.30	2.322	1 737.9	3.044	1 700	2.23	2 616.1	3.648	2 700	-3.11
10#	39.837	979.90	2.182	1 730.4	2.820	1 700	1.79	2 751.2	3.481	2 750	0.04
11#	40.133	1 015.50	2.239	1 728.5	2.777	1 700	1.68	3 299.1	3.894	3 400	-2.97
12#	39.837	987.40	2.231	1 731.5	2.754	1 700	1.85	2 733.0	3.608	2 750	-0.62
13#	38.983	1 001.70	2.365	1 696.6	2.991	1 700	-0.20	2 616.0	3.667	2 700	-3.11
14#	37.579	1 044.60	2.526	1 721.5	3.144	1 700	1.27	2 518.6	3.823	2 500	0.74
15#	35.618	1 037.50	2.623	1 746.5	3.265	1 700	2.73	2 526.1	3.696	2 500	1.04
16#	33.097	1 014.00	2.874	1 732.4	3.767	1 700	1.91	2 376.0	4.222	2 400	-1.00
17#	30.011	1 029.00	3.065	1 681.5	3.958	1 700	-1.09	2 368.5	4.483	2 400	-1.31
18#	26.360	1 024.80	3.219	1 689.2	3.894	1 700	-0.64	2 248.4	4.705	2 250	-0.07
19#	22.146	1 026.80	4.837	1 726.2	5.932	1 700	1.54	2 267.2	6.782	2 250	0.76
20#	17.365	1 001.70	6.782	1 676.6	8.253	1 700	-1.38	2 190.9	9.622	2 150	1.90

第 2 次张拉吊杆前对应施工状态为主梁预应力完成第 4 次张拉且主梁满堂支架拆除,主桥桥道系 T 梁吊装完成。

3.3 索力-频率-刚度三维识别曲面的建立

对于含左、右两幅的跨渠公路桥,其单幅桥共有 42 根吊杆,包含 11 种长度类型,因此需要建立并求解这 11 种类型吊杆的有限元模型,本文以 5# 吊杆为例,根据第 2 节提出的方法,并结合吊杆的结构特点,拟定减震器约束刚度的变化范围为 0~10⁶ kN·m⁻¹(当约束刚度为 0 时,即吊杆无减震器约束),将该范围分为 12 个等级;张拉索力的变化范围为 0~3 000 kN(当索力为 0 时,即吊杆两端没有张力),将该范围划分为 15 级,依次计算出各刚度、张拉索力等级下对应的频率值。图 7 给出了减震器刚度为 500 kN·m⁻¹时,有限元模型计算出的索力与频率关系曲线,由图 7 可知,吊杆的自振频率随索力的增加而增大。

基于 5# 吊杆在各刚度、张拉索力等级下对应的频率值计算结果,绘制出索力-频率-刚度的三维刚度识别曲面见图 8。

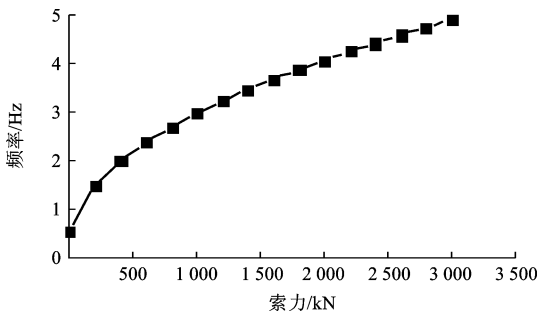


图 7 减震器刚度为 500 kN·m⁻¹时索力与频率关系

Fig. 7 Relation Between Cable Tensions and Frequencies with 500 kN·m⁻¹ Stiffness of Damper

3.4 刚度识别及对应索力计算公式的建立

在已有索力-频率-刚度的三维刚度识别曲面的基础上,利用吊杆第 1 次张拉过程中第 1 步张拉实测索力与频率值,对该吊杆减震器刚度进行识别。根据第 2 节提出的刚度识别方法,利用 MATLAB 软件^[15]编写了相关程序(算法框图见图 9),对各吊杆减震器刚度进行了识别,并利用牛顿差值法得到各吊杆对应的索力-频率计算公式。各吊杆减震器刚度识别结果见表 2,5# 吊杆的索力-频率曲线如图 10 所示。

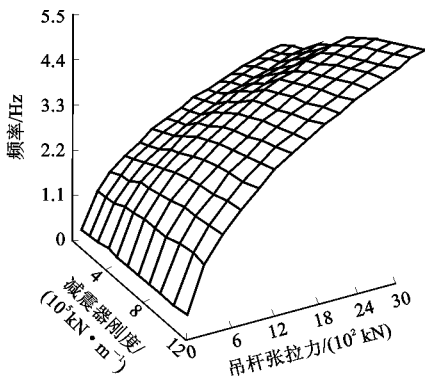


图 8 索力-频率-刚度三维刚度曲面

Fig. 8 3D Stiffness Surface of Tension-frequency-stiffness

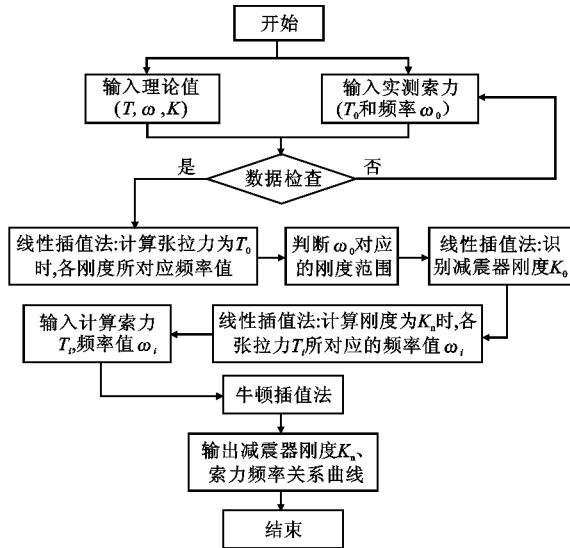


图 9 算法框图

Fig. 9 Flowchart of Algorithm

表 2 吊杆减震器约束刚度识别结果

Tab. 2 Identification Result of Suspender Damper Stiffness

吊杆编号	减震器的约束刚度/(kN·m ⁻¹)	吊杆编号	减震器的约束刚度/(kN·m ⁻¹)
2 [#]	1.0×10 ⁹	12 [#]	4 514.8
3 [#]	1.0×10 ⁹	13 [#]	2 759.4
4 [#]	9 202.2	14 [#]	1 294.6
5 [#]	4 637.1	15 [#]	5 760.2
6 [#]	593.6	16 [#]	2 391.5
7 [#]	3 345.2	17 [#]	836.3
8 [#]	2 258.1	18 [#]	569.5
9 [#]	1 391.3	19 [#]	1.0×10 ⁹
10 [#]	967.9	20 [#]	1.0×10 ⁹
11 [#]	4 043.1		

由图 10 可知,牛顿插值法得到的索力-频率关系曲线插值精度较高。由表 2 吊杆减震器约束刚度识别结果可知:减震器对 2[#]、3[#]、19[#] 和 20[#] 吊杆的约束刚度较大,而这 4 根吊杆为短吊杆,设计采用带

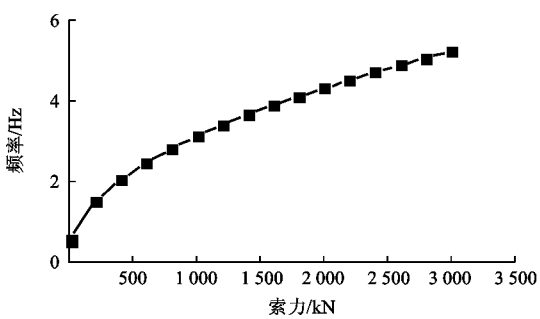


图 10 5[#] 吊杆索力-频率关系曲线

Fig. 10 Relation Between Tension and Frequency for 5[#] Suspender

球铰减震器装置的吊杆,因此可将减震器对吊杆的约束作用视为铰支约束;而其他吊杆仅在主梁顶面处设置环形橡胶减震器,其识别刚度远小于 2[#]、3[#]、19[#] 和 20[#] 吊杆,这说明本文方法识别的刚度情况与实际相符。

3.5 索力识别及结果分析

根据已建立的各吊杆索力-频率的计算公式,将表 1 中实测吊杆频率数据代入公式进行计算,得到各吊杆张拉索力值,并将其与实测索力值进行对比,计算结果见表 3。

通过表 3 可知,本文方法的索力识别的结果与实测数据较为吻合,相对误差最大为 7.32%,即 2[#] 吊杆在第 2 次张拉时的相对误差,其他吊杆的相对误差均在 6% 范围内,3[#] 杆的误差波动范围(−5.24%~5.71%)最大。考虑到材料的离散性和现场测量误差,并结合规范《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2004)^[16] 中第 8.8.7 条可知,不超过 10% 的相对误差是可以接受的,这说明本文方法可用于识别带减震器的吊杆索力,且识别精度较高。

为了进一步验证本文方法的正确性和适用性,将跨渠公路桥道桥系纵梁架设完成后(该施工阶段是第 1 次和第 2 次吊杆张拉之间的施工阶段)各吊杆的实测频率,代入本文建立的索力-频率计算公式中计算各吊杆索力值,并与有限元模型(全桥模型由桥梁专业分析软件 BSAS 建立而成)计算出的索力值(简称理论值)进行误差分析。本文中仅给出了钢管拱桥右幅桥中拱各吊杆索力的识别结果与理论结果,见表 4。

由表 4 可知,本文方法的识别结果与有限元模型理论计算结果较为吻合,18[#] 吊杆相对误差最大,识别值为 2 165.9 kN,理论值为 2 003.2 kN,相对误差为 8.1%,其他吊杆误差均在 6% 范围内。

表 3 2 次张拉过程中索力识别结果

Tab. 3 Identification Results of Cable Tension in Two Times Tensioning Process

吊杆 编号	第 1 次张拉索力						第 2 次张拉索力		
	第 1 步			第 2 步			识别 结果/kN	实测 结果/kN	相对 误差/%
	识别 结果/kN	实测 结果/kN	相对 误差/%	识别 结果/kN	实测 结果/kN	相对 误差/%			
2 [#]	1 022.8	1 025.2	0.53	1 823.0	1 708.0	6.73	2 394.8	2 231.4	7.32
3 [#]	1 054.7	1 017.4	3.66	1 639.9	1 730.6	−5.24	2 334.8	2 208.8	5.71
4 [#]	978.9	979.9	−0.10	1 664.9	1 700.4	−2.09	2 132.3	2 233.3	−4.52
5 [#]	1 009.5	1 009.9	−0.04	1 676.0	1 730.5	−3.15	2 310.0	2 330.9	−0.90
6 [#]	1 020.6	986.3	3.48	1 818.9	1 775.5	2.44	2 413.5	2 376.0	1.58
7 [#]	994.6	994.9	−0.03	1 809.1	1 760.5	2.76	2 469.8	2 541.1	−2.81
8 [#]	998.4	986.7	1.19	1 792.4	1 745.5	2.69	2 481.1	2 518.6	−1.49
9 [#]	998.2	989.3	1.87	1 746.4	1 738.0	0.48	2 529.6	2 616.1	−3.31
10 [#]	978.8	979.9	−0.11	1 696.7	1 730.4	−1.95	2 663.0	2 751.2	−3.21
11 [#]	1 014.9	1 015.5	−0.07	1 718.6	1 728.5	−0.58	3 243.1	3 299.2	−1.70
12 [#]	986.8	987.4	−0.07	1 685.5	1 731.5	−2.66	2 702.0	2 733.0	−1.14
13 [#]	1 036.9	1 001.7	3.51	1 683.6	1 696.6	−0.77	2 555.9	2 616.0	−2.30
14 [#]	1 088.8	1 044.6	4.23	1 710.4	1 721.5	−0.64	2 554.3	2 518.6	1.42
15 [#]	1 036.3	1 037.5	−0.12	1 711.9	1 746.5	−1.98	2 407.2	2 526.1	−4.71
16 [#]	1 046.6	1 014.0	3.22	1 836.2	1 732.4	5.99	2 322.5	2 376.0	−2.25
17 [#]	1 027.8	1 029.0	−0.12	1 709.9	1 681.5	1.69	2 379.9	2 368.5	0.48
18 [#]	1 018.0	1 024.8	−0.66	1 593.6	1 689.2	−5.66	2 278.4	2 248.4	1.34
19 [#]	1 100.5	1 026.8	7.18	1 702.8	1 726.2	−1.35	2 258.0	2 267.2	−0.40
20 [#]	1 051.5	1 001.7	4.97	1 728.4	1 676.6	3.09	2 329.4	2 190.9	6.32

基于上述分析可知,利用本文方法对具有减震器的吊杆索力进行识别,其相对误差不超过 10%,考虑到材料特性的变异性、现场施工、安装、测量过程中存在误差,并结合相应规范^[16]可知,吊杆张拉索力识别结果不超过 10%的相对误差是可以接受的。因此,本文方法可用于识别带减震器的钢管混凝土拱桥吊杆索力。

4 结 语

(1)在中、下承式拱桥施工过程中,对带有减震器的吊杆索力进行识别时,需要考虑减震器对吊杆频率的影响。

(2)利用本文方法对带有减震器的吊杆索力进行识别,其索力识别相对误差均小于 10%,满足实际工程的精度要求,能很好地识别吊杆索力。

(3)采用本文方法对带减震器的吊杆索力进行识别时,可以得到较好的识别结果,但对于更复杂的情况,例如梁端减震器和拱端减震器同时安装时,若采用刚度识别的方法进行索力识别会遇到困难,这是因为此时需要识别的刚度变为 2 个,而同时识别 2 个刚度难度会增加。为了找到一种适合多个减震

器作用下的吊杆索力的计算方法,需要开展进一步的研究。

参考文献: References:

[1] 朱劲松, 邑 强. 拱桥新型吊杆安全性及其静动力影响研究[J]. 桥梁建设, 2011, 40(1): 39-42, 51.
ZHU Jin-song, YI Qiang. Study of Safety of New Type Suspenders and Their Impact on Static and Dynamic Performance of Arch Bridge[J]. Bridge Construction, 2011, 40(1): 39-42, 51.

[2] 姜建山, 唐德东, 周建庭. 桥梁索力测量方法与发展趋势[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2008, 27(3): 379-382, 466.
JIANG Jian-shan, TANG De-dong, ZHOU Jian-ting. Progress and Developing Trend of Cable Stress Measuring Methods of Bridge[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science, 2008, 27(3): 379-382, 466.

[3] KRONEBERGER-STANTON K J, HARTSOUGH B R. A Monitor for Indirect Measurement of Cable Vibration Frequency and Tension[J]. Transaction of the ASCE, 1991, 35(1): 341-346.

表 4 右幅桥道桥系纵梁架设完成后中拱
各吊杆索力对比

Tab. 4 Comparison of Tension of Suspenders on Middle
Arch when Longitudinal Beam Have Been Completely
Installed for Right Range Bridge

吊杆编号	频率/Hz	计算值/kN	理论值/kN	相对误差/%
1 [#]		1 702.0	1 612.3	5.6
2 [#]	9.190	2 180.2	2 083.7	4.6
3 [#]	6.707	2 155.9	2 054.6	4.9
4 [#]	4.552	2 002.1	2 002.9	0.1
5 [#]	4.277	1 954.2	1 996.7	-2.1
6 [#]	3.995	2 072.5	2 024.7	2.4
7 [#]	3.697	2 127.7	2 088.3	1.9
8 [#]	3.549	2 193.8	2 168.8	1.2
9 [#]	3.362	2 140.6	2 193.2	-2.4
10 [#]	3.096	2 072.4	2 057.3	0.7
11 [#]	2.776	1 594.4	1 572.5	1.4
12 [#]	3.123	2 111.2	2 057.8	2.6
13 [#]	3.480	2 297.2	2 193.5	4.7
14 [#]	3.498	2 129.7	2 168.5	-1.8
15 [#]	3.449	1 992.1	2 087.7	-4.6
16 [#]	3.810	1 979.5	2 023.9	-2.2
17 [#]	4.292	1 968.8	1 996.1	-1.4
18 [#]	4.720	2 165.9	2 003.2	8.1
19 [#]	6.665	2 177.0	2 055.7	5.9
20 [#]	9.202	2 186.3	2 085.0	4.9
21 [#]		1 668.0	1 612.3	3.5

注:1[#]和 21[#]吊杆安装了压力传感器,可直接测量其索力,其他吊杆通过实测频率计算其吊杆索力。

[4] 吴晓亮. 频率法在钢管混凝土吊杆拱桥索力测试中的研究与应用[D]. 合肥:合肥工业大学,2010.
WU Xiao-liang. The Research and Application of Frequency Method in Concrete Filled Steel Arch Bridge Suspender Cable Tension Test [D]. Hefei:Hefei University of Technology,2010.

[5] 李新生,项贻强. 基于挠度曲线振型函数的系杆拱桥柔性吊杆索力测量公式[J]. 工程力学,2010,27(8):174-178,198.
LI Xin-sheng, XIANG Yi-qiang. Tension Measurement Formula of Flexible Hanger Rods in Tied-rods Arch Bridges Based on Vibration Shape Function of Deflection Curve[J]. Engineering Mechanics,2010,27(8):174-178,198.

[6] 何伟,陈淮,王博,等. 复杂边界条件下基于频率法的吊杆张力测定研究[J]. 土木工程学报,2012,45(3):93-98.
HE Wei,CHEN Huai,WANG Bo,et al. Study of Suspender Tension Measurement Based on Frequency

Method with Complex Boundary Conditions[J]. China Civil Engineering Journal,2012,45(3):93-98.

[7] ZUI H,SHINKE T,NAMITA Y,et al. Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method[J]. Journal of Structural Engineering,1996,122(6):651-656.

[8] 凌知民,杨沈红,沈炯伟. 吊杆索力的计算方法与应用研究[J]. 石家庄铁道大学学报:自然科学版,2011,24(3):16-19.
LING Zhi-min,YANG Shen-hong,SHEN Jiong-wei. Computing Method and Analytic Study of Suspender Forces[J]. Journal of Shijiazhuang Tiedao University: Natural Science Edition,2011,24(3):16-19.

[9] 李廉锟. 结构力学[M]. 4 版. 北京:高等教育出版社,2004.
LI Lian-kun. Structural Mechanics[M]. 4th ed. Beijing:Higher Education Press,2004.

[10] 甘泉,王荣辉,饶瑞. 基于振动理论的索力求解的一个实用计算公式[J]. 力学学报,2010,42(5):983-988.
GAN Quan,WANG Rong-hui,RAO Rui. Practical Formula for Estimation on the Tensional Force of Cable by Its Measured Natural Frequencies[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2010,42(5):983-988.

[11] STOLARSKI T,NAKASONE Y,YOSHIMOTO S,et al. Engineering Analysis with ANSYS Software[M]. Oxford:Elsevier,2011.

[12] 曾甲华. 大跨度悬索桥非线性抖振响应时域分析[D]. 成都:西南交通大学,2009.
ZENG Jia-hua. Nonlinear Time Domain Buffeting Response Analysis of Long-span Suspension Bridge[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2009.

[13] 徐跃良. 数值分析[M]. 成都:西南交通大学出版社,2005.
XU Yue-liang. Numerical Analysis[M]. Chengdu:Southwest Jiaotong University Press,2005.

[14] GB/T 18365—2001,斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件[S].
GB/T 18365—2001,Technical Conditions for Hot-extruding PE Protection High Strength Wire Cable of Cable-stayed Bridge[S].

[15] MATHEWS J,FINK K D. Numerical Methods Using MATLAB[M]. 4th ed. Englewood Cliffs:Pearson Education Ltd.,2004.

[16] JTJ 071—98,公路工程质量检验评定标准[S].
JTJ 071—98,Quality Inspection and Evaluation Standards for Highway Engineering[S].