

基于子结构模型修正的拱桥吊杆索力识别^{*}

朱劲松¹, 李国武¹, 张小海², 康亚男²

(1. 天津大学建筑工程学院 天津, 300072) (2. 珠海交通工程技术有限公司 珠海, 519000)

摘要 为了减小拱桥吊杆端部特征对索力测试误差的影响, 提出基于子结构模型修正的拱桥吊杆索力测试方法。首先, 通过现场实测获取吊杆一阶振动频率值; 其次, 根据吊杆边界条件及端部特征建立三段式吊杆有限元模型, 计算一阶振动频率数值解; 然后, 采用粒子群算法, 通过一阶频率实测值与数值解差值最小化得到吊杆索力, 并利用吊杆实测振动频率修正吊杆索力; 最后, 通过数值分析及工程实例对提出方法进行了验证。结果表明: 该方法可考虑吊杆端部的影响, 根据不同吊杆特征建立不同的有限元模型, 实现参数化建模; 数值分析及工程实例的最大误差分别为 0.20% 和 5.55%, 具有较高的测试精度。

关键词 桥梁工程; 索力测试; 粒子群算法; 端部效应
中图分类号 U443.38

0 引言

吊杆是中、下承式拱桥的重要组成部分和传力构件, 其索力大小直接决定着桥梁的工作状态^[1], 吊杆索力的准确测量对中、下承式拱桥的施工、运营和使用安全具有重要意义。目前, 常用的索力测量方法有压力表测定法、压力传感器测定法、磁通量法和振动频率法。其中, 振动频率法由于操作简单、方便经济得到了广泛应用。然而, 传统频率法将吊杆简化为均质, 忽略了两端锚头的影响, 这对于拱桥长度较短的吊杆会产生较大误差。对于边界为非两端铰接的吊杆, 频率法方程为超越方程, 无法得到索力与频率的显式解^[2-5]。

由于有限元建模误差、材料参数的不确定性、边界条件以及桥梁施工过程中的环境、施工工艺等因素影响, 使实际桥梁与有限元模型之间存在差异。为了获得桥梁的实际情况, 更好地进行健康监测、养护管理工作, 对有限元模型进行修正具有重要意义。近年来, 智能优化算法被广泛应用于土木工程的参数识别、结构优化等领域^[6-9]。李睿等^[10]推导了两端固结边界条件下的索力振动方程, 采用粒子群算法对该超越方程进行求解, 提出了通过实测频率识别吊杆索力和抗弯刚度的方法。谢旭等^[11]利用质量对短索自振频率的敏感性, 提出附加质量法, 运用遗传算法和神经网络对短吊杆索力进行识别。Bao 等^[12]利用自适应稀疏矩阵法对索力开展了实时识别。Xu 等^[13]利用有

限元方法通过特征值分析建立超越方程, 并利用遗传算法完成索力与抗弯刚度的识别。

本研究将模型修正的思路与优化算法结合起来, 提出了一种基于子结构模型修正的拱桥吊杆索力测试方法, 并采用粒子群算法, 利用吊杆实测振动频率修正吊杆索力。首先, 根据吊杆边界条件及端部特征建立三段式吊杆有限元模型; 其次, 通过现场实测获取吊杆一阶振动频率值; 最后, 采用粒子群算法根据实测一阶振动频率优化索力, 得到吊杆索力值。该方法考虑了吊杆端部的影响, 根据不同吊杆特征建立不同的有限元模型, 实现了参数化建模, 方便工程应用。

1 基于粒子群算法的索力识别

1.1 算法概述

粒子群算法 (particle swarm optimization, 简称 PSO) 是一种进化计算技术, 其源于对鸟群捕食的行为研究^[14], 通过共享最优粒子的位置引导搜索方向, 进而获得最优解。

对于优化问题求解, 生成若干随机解后开始进行迭代, 在迭代过程中通过设置目标函数判断解的优劣程度, 并向最优解的方向迭代, 直到最优解满足精度或达到最大迭代次数为止。

假设在一个 D 维的目标搜索空间中有 N 个粒子组成一个群体, 其中第 i 个粒子表示为一个 D 维

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (52078333)

收稿日期: 2024-06-17; 修回日期: 2024-09-19

向量,即

$$\mathbf{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (1)$$

第 i 个粒子的飞行速度为

$$\mathbf{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (2)$$

第 i 个粒子迄今为止搜索到的最优位置称为个体极值,记为

$$\mathbf{p}_{\text{best}} = (p_{i1}, p_{i2}, \dots, p_{iD}) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (3)$$

整个群体迄今为止搜索到的最优位置称为全局极值,记为

$$\mathbf{g}_{\text{best}} = (g_1, g_2, \dots, g_D) \quad (4)$$

粒子速度和位置的更新公式为

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 z_1(t) [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + \\ c_2 z_2(t) [p_{gj}(t) - x_{ij}(t)] \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (5)$$

其中: ω 为惯性权重, ω 越大越不容易更改之前的运动路线; c_1, c_2 为学习因子; z_1, z_2 为 $[0, 1]$ 上的随机数, 表示粒子朝着个体最优粒子与全局最优粒子的方向随机飞行, 从而逐渐靠近最优解。

1.2 索力识别过程

索力识别方法流程图如图1所示。采用粒子群算法对索力进行识别, 通过 Matlab-Ansys 软件进行联合仿真, 以索力为优化变量, 建立有限元模型计算基频数值解, 通过基频实测值与数值解差值最小化实现索力识别。目标函数设为一阶频率实测值与数值解差的平方, 精度设为小于 0.000 1。

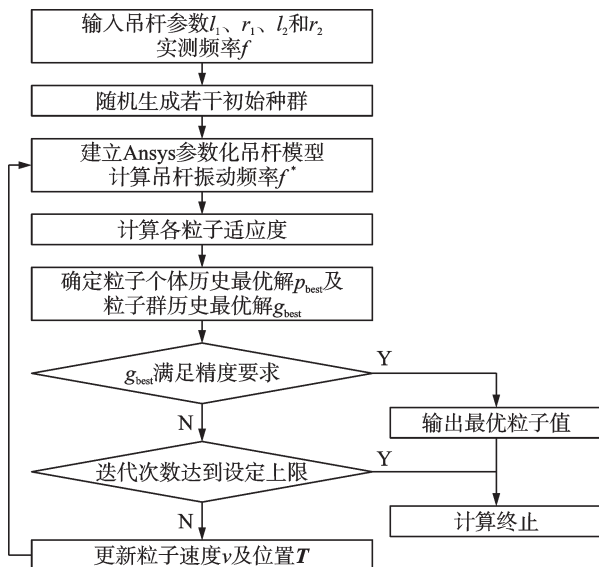


图1 索力识别方法流程图

Fig.1 Flow chart of identification method of cable force

1.2.1 种群粒子解空间

种群粒子解空间为索力 T , 可预先根据设计索力或频率法公式设定取值范围, $T \in (0.5 \sim 1.5) T_0$, T_0 为设计索力值或通过频率法计算得到的索力值。初始种群在以上范围内随机生成, 在迭代过程中, 当某粒子的位置超出取值范围时, 将超出的边界点位置作为当前粒子的更新位置。

1.2.2 粒子适应度

通过设定优化目标函数来评价每次迭代结果的好坏, 进而不断寻优得到最优解。目标函数值的大小体现粒子适应程度的优劣, 也称为适应度。本研究选取一阶频率实测值与数值解差异最小的粒子作为最优解, 将目标函数设为一阶频率实测值与数值解差的平方, 其精度小于 0.000 1, 即

$$R_i = (f - f^*)^2 < 0.000 1 \quad (6)$$

其中: f 为实测一阶频率; f^* 为一阶频率数值解。

1.2.3 粒子速度和位置的更新

在每次迭代中, 粒子通过跟踪两个“极值”进行自我更新, 一个是粒子本身找到的最优解, 另一个是整个粒子群目前找到的最优解。综合考虑全局与局部寻优能力, 粒子速度和位置的更新公式为

$$\begin{cases} v_i^d = \omega v_i^{d-1} + c_1 z_1 (p_{\text{best}}^{d-1} - x_i^{d-1}) + \\ c_2 z_2 (g_{\text{best}}^{d-1} - x_i^{d-1}) \\ x_i^d = x_i^{d-1} + v_i^d \end{cases} \quad (7)$$

其中: v_i^d 为粒子 i 的第 d 次迭代后速度; x_i^d 为粒子 i 的第 d 次迭代后位置; ω 取 0.8; p_{best} 为个体最优粒子; g_{best} 为全局最优粒子; c_1, c_2 取值为 2。

具体操作步骤如下:

1) 输入吊杆参数和实测频率值, 吊杆参数用于建立 Ansys 有限元模型, 实测频率值用于后续判断是否停止迭代;

2) 随机生成若干初始种群, 即根据索力范围生成若干随机初始索力值, 进行后续迭代计算;

3) 建立 Ansys 参数化模型, 计算得到吊杆一阶振动频率值, 并与步骤 1 实测值进行对比, 判断是否停止迭代;

4) 计算各粒子适应度即目标函数值, 用来判断是否停止迭代, 本研究目标函数取吊杆一阶振动频率数值解与实测值差的平方, 精度设为小于 0.000 1;

5) 确定粒子个体历史最优解 p_{best} 及粒子群历史最优解 g_{best} , p_{best} 为若干随机初始索力值优化过程中各自适应度最小的索力值, g_{best} 为所有 p_{best} 中目标函

数值最小的索力值;

6) 判断 g_{best} 是否满足精度要求, 不满足则继续进行迭代计算;

7) 判断迭代次数是否达到上限, 不满足则继续进行迭代计算, 当精度要求过高而收敛速度过慢时, 可控制迭代次数结束计算;

8) 若不满足终止条件, 则更新粒子速度 v 和位置 T , 速度 v 控制粒子朝 p_{best} 和 g_{best} 移动, 位置 T 即为索力值, 当某粒子的位置(速度)超出取值范围时, 将超出的边界点位置(速度)作为当前粒子的更新位置(速度);

9) 更新后的索力值重复以上步骤, 直到 g_{best} 满足精度要求或迭代次数达到上限, 终止计算。

2 数值方法验证

通过 6 根不同长度、不同索力、不同边界条件的虚拟吊杆对所提方法进行可靠性验证。采用 Ansys 软件建立吊杆模型, 计算吊杆一阶振动频率, 并将此一阶频率值作为实测值输入程序, 对索力进行识别。吊杆参数示意图如图 2 所示。其中: l_i 为长度; r_i 为半径; 两端锚头参数取相同值。3 种边界条件下虚拟吊杆参数及振动基频分别见表 1 和表 2。

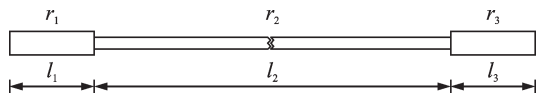


图 2 吊杆参数示意图

Fig.2 Schematic diagram of suspender parameter

表 1 虚拟吊杆参数

Tab.1 Parameter of virtual suspender					
吊杆编号	l_1/m	l_2/m	r_1/m	r_2/m	T/kN
1	0.5	5	0.04	0.02	500
2	0.5	5	0.04	0.02	1 000
3	0.5	10	0.04	0.02	500
4	0.5	10	0.04	0.02	1 000
5	0.5	15	0.04	0.02	500
6	0.5	15	0.04	0.02	1 000

采用所提方法进行索力识别, 虚拟吊杆索力识别结果见表 3。其中: T 为虚拟吊杆实际索力; T^* 为索力识别结果; 误差 $= (T^* - T) / T \times 100\%$ 。

由表 3 可知, 虚拟吊杆索力识别结果最大误差仅为 0.20%, 验证了所提方法的可靠性。

表 2 虚拟吊杆振动基频

Tab.2 Fundamental frequency of vibration of virtual suspender

吊杆编号	两端铰接	一固一铰	两端固接
1	18.79	20.96	23.77
2	26.49	28.96	32.01
3	10.30	10.90	11.56
4	14.56	15.24	15.99
5	7.09	7.35	7.64
6	10.02	10.33	10.65

表 3 虚拟吊杆索力识别结果

Tab.3 Cable force identification results of virtual suspender

吊杆编号	边界条件	T/kN	T^*/kN	适应度	误差/%
1	两端铰接	500	500	0.000 0	0.00
2		1 000	1 001	0.000 1	0.10
3		500	500	0.000 0	0.00
4		1 000	1 001	0.000 0	0.10
5		500	500	0.000 0	0.00
6		1 000	1 001	0.000 0	0.10
1	一固一铰	500	500	0.000 0	0.00
2		1 000	1 000	0.000 0	0.00
3		500	500	0.000 0	0.00
4		1 000	1 000	0.000 0	0.00
5		500	501	0.000 0	0.20
6		1 000	999	0.000 0	-0.10
1	两端固接	500	500	0.000 0	0.00
2		1 000	1 001	0.000 1	0.10
3		500	500	0.000 0	0.00
4		1 000	1 000	0.000 0	0.00
5		500	500	0.000 0	0.00
6		1 000	998	0.000 1	-0.20

3 工程应用

3.1 工程概况

某两跨连续无推力空间变箱型钢拱桥的主受力结构由两道边拱和两道中拱组成, 辅以风撑连接, 桥面系采用纵横梁体系。桥梁跨径布置为 18 m+152 m=170 m, 全长为 178.1 m, 桥梁平面线型为变截面曲线, 采用双向 6 车道, 全宽范围为 42.3~48.9 m。桥梁立面及横断面分别如图 3、4 所示。

全桥共计 4 道索面, 分别位于两个中拱和两侧的边拱下方。每道索面设置 14 根吊杆, 0 号墩侧为

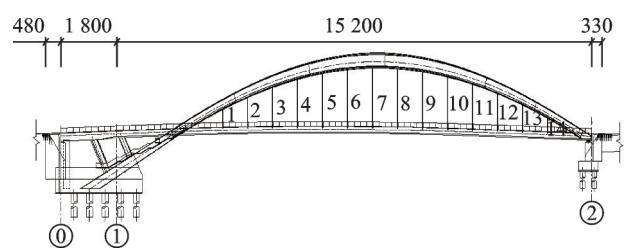


图3 桥梁立面(单位:mm)
Fig.3 Elevation of bridge (unit:mm)

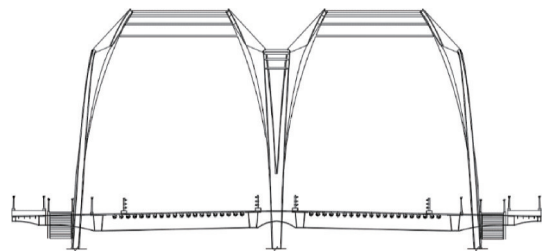


图4 桥梁横断面
Fig.4 Cross section of bridge

1号,2号墩侧为14号,如图3所示。吊杆采用平行钢丝,顺桥向标准间距为8m。中拱14号为公用吊杆,上下吊点均采用锚箱结构与主拱、主梁连接,其他吊杆上吊点采用叉耳构造与主拱连接,下吊点采用锚箱结构与梁体横梁对应位置连接。根据吊杆张拉力,吊杆采用直径为7mm和5mm高强镀锌平行钢丝,其标准强度为1670MPa。

3.2 索力测试方法验证

为了获得该桥运营阶段的准确索力,在其上游侧1~7号吊杆中安装了锚索计。吊杆上吊点采用叉耳构造与主拱连接,下吊点采用锚箱结构与梁体横梁对应位置连接,边界为一固一铰,通过对成桥索力调整后工况的锚索计实测数据进行计算,验证所提索力测试方法的可靠性。吊杆参数及索力数据见表4。其中: T_0 为锚索计实测索力值; f_0 为对应一阶频率。

表4 吊杆参数及索力数据

Tab.4 Suspender parameters and cable force data						
吊杆 编号	l_2/m	$(l_1, l_3)/\text{m}$	r_2/m	$(r_1, r_3)/\text{m}$	T_0/kN	f_0/Hz
1	4.557	0.45	0.023	0.04	677	24.14
2	7.606	0.45	0.021	0.04	400	12.41
3	10.140	0.45	0.021	0.04	442	9.71
4	12.285	0.45	0.021	0.04	480	8.26
5	13.868	0.45	0.021	0.04	447	7.19
6	14.903	0.45	0.021	0.04	522	7.12
7	15.363	0.45	0.021	0.04	458	6.50

采用所提方法对以上7根吊杆的索力识别结果见表5。其中: T_0 为锚索计实测索力值; T^* 为索力识别结果;误差= $\frac{T^*-T_0}{T_0} \times 100\%$ 。

表5 索力识别结果

Tab.5 Cable force identification results of suspender			
吊杆编号	T_0/kN	T^*/kN	误差/%
1	677	715	5.55
2	400	408	2.00
3	442	440	-0.45
4	480	464	-3.33
5	447	444	-0.67
6	522	505	-3.26
7	458	444	-3.06

由表5可知,采用所提方法测试索力的最大误差为5.55%。误差产生的原因为吊杆模型的端部简化、边界条件与实际吊杆之间的差异以及测试时的环境影响等。测试结果表明,该方法精度满足工程要求,可以考虑到吊杆端部特征,且计算方便快捷。

4 结 论

- 1) 通过模型修正的方法,将吊杆索力作为修正参数用于索力测试,所得结果精度较高。
- 2) 通过 Matlab-Ansys 软件进行联合仿真,可简化索力测试流程,测试时只需输入相应参数即可获得索力,方便工程应用。
- 3) 所提方法对虚拟吊杆和实际工程案例的误差分别为0.20%和5.55%,且能够考虑不同吊杆的端部特征,可应用于实际工程。

参 考 文 献

[1] 顾安邦,徐君兰.中、下承式拱桥短吊杆结构行为分析[J].公路,2002(5):8-10.
GU Anbang, XU Junlan. Structural analysis of short suspenders of half through or through arch bridge[J]. Highway, 2002(5): 8-10. (in Chinese)

[2] 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. (in Chinese)

[3] 孙永明,李惠.端部性质对频率法测量竖直拉索索力影响分析[J].工程力学,2013,30(8):10-17.
SUN Yongming, LI Hui. Effect of extreme properties

- of vertical cable on the cable force measurement by frequency-based method[J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(8): 10-17. (in Chinese)
- [4] 马天颖. 复杂边界条件下拉索索力频率法测量方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2018.
- [5] 袁警. 考虑端部性质影响的频率法索力测量研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [6] 王兴宇, 刘俊, 杨燕, 等. 智能优化算法在土木工程领域的应用综述[J]. 建筑施工, 2024, 46(3): 372-376.
WANG Xingyu, LIU Jun, YANG Yan, et al. Review on application of intelligent optimization algorithms in civil engineering[J]. Building Construction, 2024, 46(3): 372-376. (in Chinese)
- [7] 周宏元, 张广才, 王小娟, 等. 基于改进蝴蝶优化算法的结构损伤识别[J]. 振动、测试与诊断, 2023, 43(1): 164-171.
ZHOU Hongyuan, ZHANG Guangcai, WANG Xiaojuan, et al. Structural damage identification based on improved butterfly optimization algorithm[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2023, 43(1): 164-171. (in Chinese)
- [8] 张超, 邓扬, 李爱群, 等. 基于智能算法的稳定点自动分析方法研究[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(1): 65-72.
ZHANG Chao, DENG Yang, LI Aiqun, et al. Automatic analysis method of stable poles based on intelligent algorithm[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(1): 65-72. (in Chinese)
- [9] 秦远田, 唐甜, 张炉平. 基于改进遗传算法的动载荷识别研究[J]. 振动、测试与诊断, 2025, 45(1): 146-153.
QIN Yuan Tian, TANG Tian, ZHANG Luping, et al. Dynamic load identification based on Improved genetic algorithm[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2025, 45(1): 146-153. (in Chinese)
- [10] 李睿, 李晓章, 郑祥隆, 等. 粒子群算法在基于频率的两端固结吊杆索力识别中的应用[J]. 振动与冲击, 2018, 37(9): 196-201.
LI Rui, LI Xiaozhang, ZHENG Xianglong, et al. Application of PSO in frequency-based tension identification of hanger rods with two fixed ends[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(9): 196-201. (in Chinese)
- [11] 谢旭, 孙良凤, 王渊, 等. 基于神经网络算法和附加质量法的短吊杆张力识别[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(4): 33-39.
XIE Xu, SUN Liangfeng, WANG Yuan, et al. The tension identification of short hangers based on neural network algorithm and additional mass method[J]. China Railway Science, 2010, 31(4): 33-39. (in Chinese)
- [12] BAO Y Q, SHI Z Q, BECK J L, et al. Identification of time-varying cable tension forces based on adaptive sparse time-frequency analysis of cable vibrations[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2017, 24(3): e1889.
- [13] XU X, LI X Z. Genetic algorithm-based tension identification of hanger by solving inverse eigenvalue problem[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2014, 22(6): 966-987.
- [14] EBERHART R, KENNEDY J. A new optimizer using particle swarm theory[C]//MHS'95. Proceedings of the Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science. Nagoya, Japan: IEEE, 1995: 39-43.



第一作者简介:朱劲松,男,1975年10月生,博士、教授、博士生导师。主要研究方向为桥梁健康监测与损伤识别。曾发表《基于小波包能量的桥梁损伤识别指标》(《振动、测试与诊断》2015年第35卷第4期)等论文。
E-mail: jszhu@tju.edu.cn

欢迎订阅《振动、测试与诊断》

《振动、测试与诊断》由工业和信息化部主管,南京航空航天大学 and 全国高校机械工程测试技术研究会联合主办,是反映振动、动态测试及故障诊断学科领域的科研成果及其应用情况的技术性刊物。主要刊登国内外以振动测试与故障诊断为中心的动态测试理论、方法和手段的研究及应用方面的技术文献,包括实验测试技术、测试仪器的研制、方法和系统组成、信号分析、数据处理、参数识别与故障诊断以及有关装置的设计、使用、控制、标定和校准等,不拘泥于行业和测试项目。

本刊为EI Compendex数据库收录期刊和中文核心期刊,双月刊,每逢双月末出版,每本定价30元,全年180元。欢迎订阅和投稿,欢迎在本刊刊登各类广告和科技信息。

编辑部地址:南京市御道街29号 邮政编码:210016 电话:(025)84893332

邮发代号:28-239 E-mail:qchen@nuaa.edu.cn 网址:http://zdc.nuaa.edu.cn