

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.054

考虑自振频率的吊杆式拱桥吊杆张拉力智能控制技术

韩大勇^{1,3}, 王亮^{1,3}, 刘德坤², 龙祖游²

(1. 中电建路桥集团有限公司, 北京 100089; 2. 湖南联智智能科技有限公司, 湖南 长沙 410203;

3. 中电建(广东)中开高速公路有限公司, 广东 中山 528455)

摘 要: 由于吊杆式拱桥的外部静定和内部超静定结构难以准确描述吊杆振动与张拉力之间的内在联系, 导致吊杆张拉力控制的相对误差较大。为此, 研究自振频率的吊杆式拱桥吊杆张拉力智能控制技术。结合希尔伯特变换识别吊杆式拱桥吊杆的自振频率。利用弦振动理论量化吊杆振动与张拉力之间的内在联系, 得到吊杆理论张拉力值。采用液压伺服控制技术实时监测吊杆实际张拉力值, 智能识别当前吊杆张拉力与理论张拉力之间的偏差, 控制张拉设备以确保吊杆张拉力维持在预设范围。实验结果表明: 采用所提方法后在面对负载突变时, 各液压缸输出的张拉力能够稳定地保持在预设值 7 200 N 附近, 实现了对吊杆张拉力的精确且稳定的控制。

关键词: 自振频率; 吊杆式拱桥; 吊杆张拉力; 张拉力控制; 吊杆; 桥梁工程

中图分类号: TU399 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0275-05

Intelligent Control Technology for Tie-Rod Tension in Tied-Arch Bridges Considering Natural Vibration Frequency

HAN Dayong^{1,3}, WANG Liang^{1,3}, LIU Dekun², LONG Zuyou²

(1. Power China Road Bridge Group Co., Ltd., Beijing 100089, China;

2. Hunan Lianzhi Intelligent Technology Co., Ltd., Changsha 410203, China;

3. Power China (Guangdong) Zhongkai Expressway Co., Ltd., Zhongshan 528455, China)

Abstract: Due to the difficulty in accurately characterizing the intrinsic relationship between tie-rod vibration and tensile force in the externally statically determinate yet internally statically indeterminate structure of tied-arch bridges, the relative error in tie-rod tension control tends to be significant. To address this issue, an intelligent control technology for tie-rod tension in tied-arch bridges, incorporating natural vibration frequency, is studied. The Hilbert transform is applied to identify the natural vibration frequency of the tie-rods. The intrinsic relationship between tie-rod vibration and tensile force is quantified using string vibration theory to obtain the theoretical tensile force value. Hydraulic servo control technology is employed to monitor the actual tensile force in real time, intelligently identify the deviation between the current tensile force and the theoretical value, and control the tensioning equipment to ensure the tensile force remains within the preset range. Experimental results show that with the proposed method, the tensile force output by each hydraulic cylinder can be stably maintained around the preset value of 7 200 N even under sudden load changes, achieving precise and stable control of the tie-rod tension.

Keywords: natural vibration frequency; tied-arch bridge; tie-rod tensile force; tensile force control; tie-rod; bridge engineering

0 引言

吊杆式拱桥的吊杆张拉力的大小和分布均匀性直接关系到拱桥的整体受力状态^[1-2]。若吊杆张拉力控制不当, 会导致桥面或横梁因受力过大而产生开裂现象, 直接威胁到行人和车辆的通行安全。因此, 如何对吊杆的张拉力实时监测与智

能调整, 成为目前的研究热点^[3]。

葛艺芃等^[4]通过引入概率模型与独立同分布假设, 结合稀疏混沌多项式展开技术, 实现对张拉力的分析与控制, 但该方法无法完全反映实际工程中的复杂情况, 导致控制结果与实际情况存在偏差。冯晓东等^[5]结合模糊规则自适应调节控制器参数, 提升张拉整体结构在动力荷载下的振动

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目 (DJ-ZDXM-2022-35)

第一作者简介: 韩大勇 (1982—), 男, 河北沧州人, 正高级工程师, 硕士, 研究方向为桥梁与隧道工程, handay3659@163.com。

通信作者简介: 刘德坤 (1984—), 男, 湖北恩施人, 高级工程师, 硕士, 研究方向为预应力桥梁施工、检测和质量控制等, handay3659@163.com。

控制效能,但该方法无法准确反映结构在不同频率荷载下的动态响应特性,减弱了控制器的自适应能力。唐茂林等^[6]结合有限元软件模拟优化张拉方案,实时监测关键节点并分析影响参数,完成对张拉力的控制,但该方法在极端天气或意外荷载作用下,结构存在失稳的风险。HABER 等^[7]基于大规模的概念验证实验与数值分析,深入探究了 5 个加固方案,实现对加固过程中张拉力的精确控制;但该方法面临结构尺寸、形状和跨度等方面的限制,导致设计灵活性降低。

因此,本文提出考虑自振频率的吊杆式拱桥吊杆张拉力智能控制技术,实现对吊杆张拉力的动态监测与智能调节。

1 吊杆式拱桥吊杆张拉力智能控制

1.1 拱桥吊杆自振频率识别

为了确保吊杆式拱桥的安全性和稳定性,需要对吊杆的自振频率进行持续的实时监测和准确识别^[8-9]。通过频率识别技术,可以实时捕捉到吊杆自振频率的细微变化^[10-11]。

用 $G(t)$ 表示吊杆式拱桥在环境激励下通过某关键位置的传感器所采集到的位移响应信号,利用快速傅里叶变换和带通滤波器技术^[12-13],从 $G(t)$ 中提取出与第 i 阶频率 w_i 相对应的时间序列 $G_i(t)$ 。对 $G_i(t)$ 进行经验模态分解,获得包含了与吊杆自振频率相关的如振幅、相位等关键信息的第 i 阶本征模态分量 $\varepsilon_i(t)$ 。则 $\varepsilon_i(t)$ 的平稳随机信号为

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_i(0)F(t) + \dot{\varepsilon}_i(0)V(t) + \int_0^t h(t-\lambda)f(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

式中: $F(t)$ 为吊杆在受到初始位移扰动后,以其自振频率进行自振的行为; $V(t)$ 为吊杆在受到初始速度扰动后,同样以其自振频率进行自振的特性; $h(t)$ 为吊杆式拱桥结构对瞬时张拉力变化的响应能力,包括其响应的幅度、速度和持续时间等; $f(\lambda)$ 为作用在吊杆上的包括风荷载、车辆荷载、温度变化等引起的均值为 0 的随机激励;振动响应 $\varepsilon_i(t)$ 、速度响应 $\dot{\varepsilon}_i(t)$ 均值均为 0。

在位于吊杆振动时的零位移和最大振幅之间选取固定位移值 Z 截取 $\varepsilon_i(t)$,以 Z 为起始位移,获得 N 个响应信号样本。用 $\varepsilon_{ij}(t)$ 表示第 j 个样本的响应信号,用 $\dot{\varepsilon}_{ij}(0)$ 表示其初速度,则有

$$\varepsilon_{ij}(t) = ZF(t) + \dot{\varepsilon}_{ij}(0)V(t) +$$

$$\int_0^t h(t-\lambda)f(\lambda)d\lambda \quad (2)$$

当样本数量 N 足够大时,统计各时刻的 $\varepsilon_{ij}(t)$ 取其均值,以获得稳定的平均响应信号,设 $g_i(t)$ 为 $G_i(t)$ 第 i 阶、初位移为 Z 的自由衰减信号,对 $g_i(t)$ 执行希尔伯特变换^[14-15]

$$H[g_i(t)] = \frac{P_v}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{g_i(\lambda)}{t-\lambda} dt \quad (3)$$

式中: $H[\cdot]$ 为希尔伯特变换; P_v 为柯西主值。

由此,得到能够对吊杆自振特性精确描述的解析信号

$$Z_i(t)e^{j\gamma_i(t)} = g_i(t) + jH[g_i(t)] \quad (4)$$

式中 $\gamma_i(t)$ 为相位函数,则吊杆瞬时频率为

$$w_i(t) = \frac{d\gamma_i(t)}{dt} \quad (5)$$

对其取平均值,则第 i 阶自振频率 w_i 的识别结果为

$$w_i = \overline{w_i(t)} \quad (6)$$

1.2 基于自振频率识别结果的吊杆张拉力值计算

利用弦振动理论^[16-17],建立吊杆的自由振动方程,描述吊杆在时间和空间上的位移变化。将 t 时刻吊杆上 x 点处的横向振动幅度表示为 p , $p = p(x, t)$,吊杆密度表示为 θ , $\theta = \theta(x)$,则方程为

$$E \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \theta \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0 \quad (7)$$

式中: E 为吊杆的抗弯刚度; T 为其张拉力。则方程的解为

$$T = \frac{4\theta D^2 w_n^2}{n^2} - \frac{n^2 \pi^2 E}{D^2} \quad (8)$$

式中: D 为吊杆的计算长度; w_n 为吊杆自振的第 n 阶频率,其中 n 为依次递增的正整数。

为简化计算和分析过程,忽略吊杆抗弯刚度的影响,则

$$T = \frac{4\theta D^2 w_n^2}{n^2} \quad (9)$$

在吊杆张拉力恒定的情况下,其各阶自振频率的频谱分布呈现等间距特性,且相邻 2 阶频率的间距恰好等于其主振频率 w_1 。假设吊杆在张紧状态下的主振频率 w_1 已知,则式(9)可简化为

$$T = K \times w^2 \quad (10)$$

式中 K 为通过现场标定测量的比例系数。在确定吊杆材料成分及其物理长度的情况下,吊杆理论上所承受的张拉力大小仅需测量其自由状态下振动的主振频率(即第 1 阶频率)即可推算^[18-19]。

1.3 基于主振频率的吊杆张拉力智能控制

在吊杆式拱桥吊杆张拉力的智能控制中,根据基于自振频率确定的吊杆理论张拉力值 T ,采用液压伺服控制技术,实现吊杆张拉力智能控制^[20-21]。计算控制装置内部会生成反映当前张拉力与基于自振频率确定的理论吊杆张拉力之间差异的偏差电压信号为

$$U_e = U_T - \sigma \times T_r \quad (11)$$

式中: U_T 为控制装置发出的基于自振频率确定的吊杆张拉力理论值所对应的电信号; σ 为力传感器增益系数; T_r 为力传感器检测到的吊杆张拉力。

经过控制装置处理的偏差电压信号,通过增益为 σ_a 的伺服放大器转换为控制电流^[22],驱动伺服阀产生阀芯位移 x_v 。将控制装置控制方法的传递函数用 $Y(q)$ 表示,基于阀控液压缸的动态特性,得到描述阀芯位移 x_v 与 T_r 之间关系的传递函数为

$$\frac{T_r}{x_v} = \frac{\sigma_b}{\sigma_c S} \times \frac{w_n^2}{q^2 + 2\eta_n w_n q + w_n^2} \quad (12)$$

式中: σ_b 为伺服阀的流量系数; σ_c 为综合无压泄漏和压力变化引起流量变化的数值; S 为吊杆有效作用面积; w_n 为吊杆自振频率; η_n 为吊杆结构阻尼比。

采用闭环传递函数详细描述其控制的动态关系,用 $Y_s(q)$ 表示伺服阀的传递函数,则对应的控制装置闭环传递函数为

$$\frac{T_r}{U_T} = \left[\frac{\frac{q+w_z}{w_z} \times \frac{q^2}{w_n^2} + \frac{2\eta_n q + w_n}{w_n}}{\frac{\sigma_a S \sigma_b}{\sigma_c} \times Y_s(q) \times Y(q) \times \frac{q^2 + w_n^2}{w_n^2} + \sigma} \right]^{-1} \quad (13)$$

式中 w_z 为吊杆结构并联耦合的固有频率。

由式(14)可得对应的控制装置偏差电压传递函数为

$$\frac{U_e}{U_T} = 1 - \left\{ \frac{\frac{q+w_z}{w_z} \times \frac{q^2}{w_n^2} + \frac{2\eta_n q + w_n}{w_n}}{\left[\frac{\sigma \times \sigma_a S \sigma_b}{\sigma_c} \times Y_s(q) \times Y(q) \times \frac{q^2 + w_n^2}{w_n^2} \right] + 1} \right\}^{-1} \quad (14)$$

由式(14)可以看出,通过合理配置控制装置中的传递函数^[23],能够有效对吊杆的张拉力偏差实施智能且精准的调控措施。

2 实验分析

本文实验对象为位于某地的一座总长 108 m

的吊杆式拱桥,该桥具有三跨结构,中跨长度为 60 m,两端各连接着 24 m 的预应力混凝土连续箱型加劲梁。全桥配备了 11 对(共 22 根)吊杆,每对吊杆间隔 6.5 m,采用 60 根直径为 7.5 mm 的高强镀锌钢丝制成,标准抗拉强度达到 1 670 MPa,并覆有双层 PE 保护层以增强耐久性。将顺桥向最外侧的 8 根吊杆(每侧 4 根)编为 1 号吊杆,位于桥梁跨中附近的 4 根吊杆编为 4 号吊杆,其余 10 根吊杆分别编为 2 号吊杆和 3 号吊杆。实验对象吊杆式拱桥实体如图 1 所示。

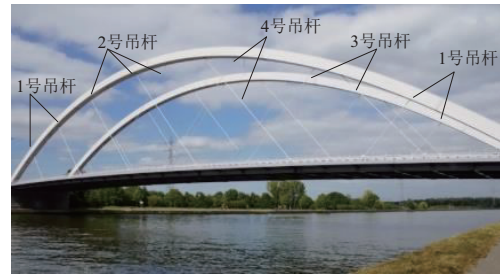


图 1 吊杆式拱桥

该吊杆式拱桥吊杆张拉力的液压伺服控制装置参数如表 1 所示。

表 1 液压伺服控制装置参数

项目	参数	数值
液压缸	缸筒内径/mm	100
	活塞杆直径/mm	63
	行程/mm	800
	工作压力/MPa	16
	运动速度/(mm/s)	100
	效率	0.85
伺服阀	最大流量/(L/min)	50
	最大工作压力/MPa	21
	控制电压/V(DC)	24
	控制电流/A	1.6
	质量/kg	3
	线性度/%	<3
	滞环/%	<1
	分辨率/%	0.5
	量程/N	10 000
力传感器	灵敏度/(mV/V)	2
	精度等级/%	±0.5

实验对该拱桥 4 种吊杆自振频率进行识别。在 Gaussian 白噪声激励下获取固支吊杆拱桥的位移时程响应信号,依据本文方法,得到 4 种吊杆的第 1 阶自振频率,识别结果如图 2 所示。

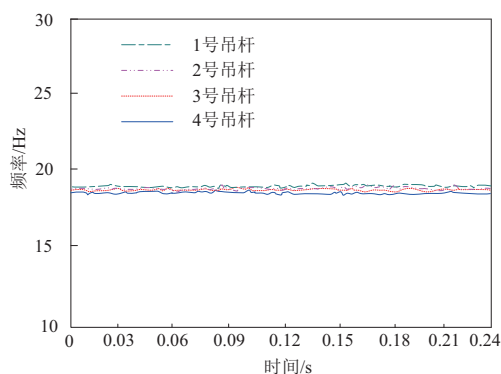


图 2 4 种吊杆第 1 阶自振频率识别结果

从图 2 可以看出:本文方法能够在短时间内精准识别不同吊杆在不同时间点的自振频率,4 种吊杆的频率均稳定维持在 18.3~18.8 Hz 之间,验证了本文方法在吊杆自振频率识别中不仅具有较高的计算效率和实时处理能力,还具有出色的稳定性和一致性。

依据本文方法,测试计算实验吊杆式拱桥 10 根吊杆的理论张拉力值。测试结果如表 2 所示。

表 2 吊杆张拉力测试结果

吊杆 编号	吊杆 分类/号	理论张 拉力/N	控制后的 张拉力/N	相对 误差/%
1	1	7 200	7 218.4	0.26
2	1	7 200	7 221.3	0.30
3	1	7 200	7 184.6	0.21
4	1	7 200	7 179.3	0.29
5	1	7 200	7 223.5	0.33
6	1	7 200	7 231.8	0.44
7	1	7 200	7 168.4	0.44
8	1	7 200	7 224.3	0.34
9	2	7 300	7 262.7	0.51
10	2	7 300	7 274.6	0.35

从表 2 可以看出,10 根吊杆的理论张拉力与本文方法控制下的张拉力值之间的相对误差均低于 1% 的水平,表明本文方法能够控制吊杆张拉力始终稳定维持在预设值附近,具有很高的准确性。

在 4 种吊杆中,每种选择 1 根吊杆及其配套的液压伺服控制装置进行详尽分析。统一设定所有输入指令为 7 200 N 的张拉力,将液压缸编号为 1—4。为更真实地检验控制算法在应对干扰时的稳定性和准确性,考虑在实际中可能遇到的负载变化情况,在第 8 s 时,对液压缸施加了额外的负载干扰输入,其幅值为指令力信号的一半。4 个液压缸对吊杆张拉力的控制结果如图 3 所示。

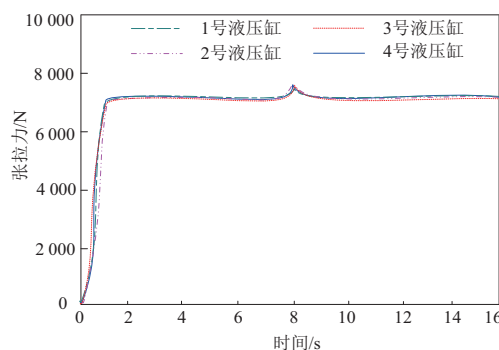


图 3 4 个液压缸对张拉力控制结果

从图 3 可以看出,在 $t=2$ s 时,出现了负载干扰,但是本文方法控制下的所有液压缸的张拉力迅速上升并试图达到指令值 7 200 N,与预设的指令输入相比,上下波动误差被严格控制在 1% 以内;在 $t=8$ s 时,系统施加了额外的负载干扰输入,张拉力虽出现了小幅度波动,但迅速又回到设定的张拉力数值附近,充分验证本文方法在面对突发负载干扰时的鲁棒性和稳定性。

3 结语

本文针对吊杆式拱桥吊杆张拉力智能控制问题,采用考虑自振频率的控制方法,利用实时监测到的吊杆自振频率变化,对吊杆自振频率数据进行深入的处理与分析,推算出吊杆张拉力的理论数值,结合先进的信号处理技术和智能控制技术,实现对吊杆张拉力的实时、精准监测与智能调节。

参考文献:

- [1] 高婧,陈龙云,王俊文. 基于影响矩阵法的多跨系杆拱桥吊杆张拉力计算与优化[J]. 公路,2022,67(9): 165-170.
- [2] 贺果蒙,朱世峰,刘昂,等. 悬吊式桥面系吊杆拱桥的梁桥体系改造技术[J]. 桥梁建设,2022,52(6): 147-154.
- [3] 于孟生,姚鑫玉,郑皆连,等. 大跨度钢管混凝土拱桥吊杆索力优化实用方法[J]. 桂林理工大学学报,2023,43(1): 78-82.

- [4] 葛艺芃,姜超,张亮,等. 考虑预应力松弛的张拉整体机械臂可靠性分析[J]. 工程力学,2024,41(10):237-246.
- [5] 冯晓东,王晓煜,郑亦汶,等. 基于动态滑模的张拉整体结构振动控制研究[J]. 振动与冲击,2024,43(14):293-300.
- [6] 唐茂林,江建秋,张兴标,等. 三塔自锚式空间缆索悬索桥吊索张拉控制方法及影响参数分析[J]. 公路交通科技,2021,38(增刊1):125-132.
- [7] HABER Z B, GRAYBEAL B A. Strengthening of steel through - girder bridges using UHPC and post - tensioning[J]. Journal of Bridge Engineering, 2024, 29(3):04024004.
- [8] 薛浩,彭珍瑞,殷红. 基于边缘线追踪的斜拉桥拉索振动频率识别[J]. 振动与冲击,2024,43(19):153-162.
- [9] 钟国强,柳尚,徐润,等. 考虑异常监测数据影响的桥梁拉索振动频率识别方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2023,54(12):4870-4881.
- [10] 祝秀琴,张玲,李文莉. 基于小波重构的建筑自振周期计算仿真[J]. 计算机仿真,2022,39(4):473-476,510.
- [11] 项长生,李祖栋,袁华智. 基于车辆振动放大响应的连续梁桥频率识别研究[J]. 公路工程,2023,48(3):1-8,17.
- [12] 闫慧欣,杨录,李少聪,等. 基于FPGA的数字带通滤波器设计与仿真[J]. 现代电子技术,2024,47(2):7-10.
- [13] 张婉玉,杨倩,弋航,等. 基于硅基 MEMS 微同轴技术的滤波器设计[J]. 微波学报,2024,40(增刊1):171-174.
- [14] 康会刚,余波. 利用四阶样条小波快速计算信号的希尔伯特变换[J]. 广西师范大学学报(自然科学版),2024,42(4):124-136.
- [15] 夏继隆,范华,王晓飞,等. 希尔伯特变换结合格雷码的相位展开方法[J]. 激光杂志,2024,45(2):23-28.
- [16] 蔡为睿,李智超,沈韩,等. 共振激励和重力作用下一维水平弦垂直振动驻波理论与实验研究[J]. 大学物理,2024,43(1):31-36.
- [17] 方奕忠,崔新图,沈韩,等. 弦、杆、环的横振动理论与实验研究[J]. 大学物理,2023,42(6):32-39.
- [18] 张玉斌,樊守乾,王艳,等. 异型单肋双索面人行钢拱桥吊杆张拉方案研究[J]. 水利与建筑工程学报,2024,22(4):165-174.
- [19] 李青. 钢管混凝土拱桥吊杆张拉顺序对结构受力的影响[J]. 黑龙江交通科技,2024,47(4):105-108.
- [20] 吴杰. H 型钢万能轧机液压伺服辊缝控制技术的应用[J]. 山西冶金,2023,46(4):182-184.
- [21] 戴永彬. 一种改进的液压伺服预测控制系统[J]. 机床与液压,2023,51(1):101-106.
- [22] 刘佳,夏天垠. 一种机载伺服放大器的电源设计方案[J]. 移动电源与车辆,2024,56(2):53-56,29.
- [23] 姜昌录,袁良,汪建刚,等. 光电成像系统动态调制传递函数测量装置[J]. 应用光学,2021,42(4):592.

收稿日期:2024-12-30