DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260835

基于振动法的斜拉桥拉索索力实时监测与频谱分析

曹东利[1],侯奔骋[2],路文发[1]
(1.北京市市政工程设计研究总院有限公司,北京市 100082; 2.北京中交华联科技发展有限公司,北京市 100029)

摘 要: 斜拉桥拉索作为关键受力构件,其索力状态直接关系到桥梁结构的安全性与耐久性。以某斜拉桥C01-001-01号拉索为研究对象,基于现场实测振动数据,采用频谱分析方法对拉索索力进行识别与评估。监测过程中,利用高灵敏度加速度传感器以50 Hz采样频率连续采集拉索振动信号,监测时长约625.95 s,共计获取31 298个有效数据点。对原始振动信号进行时域统计分析,得到振幅均值为0.000 112、标准差为0.001 294、峰峰值为0.012,峰值因子为4.62,表明拉索在环境激励下处于微弱振动状态。通过快速傅里叶变换(FFT)与功率谱密度(PSD)分析,识别出拉索基频约为1.596 Hz,并据此采用弦振动理论公式计算得到拉索索力。研究结果表明,该拉索索力处于设计允许范围内,结构工作状态正常。验证了振动法在斜拉桥拉索索力监测中的有效性,为同类桥梁的健康监测提供了参考。

关键词: 拉索索力;振动法;频谱分析;结构健康监测;功率谱密度
中图分类号: U441 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-7716(2026)11-0176-05

Monitoring and Spectrum Analysis of Stay Cable Force of Cable-Stayed Bridges Based on Vibration Method

CAO Dongli[1], HOU Bencheng[2], LU Wenfa[1]
(1. Beijing Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China; 2. Beijing Zhongjiao Hualian Technology Development Co., Ltd., Beijing 100029, China)

Abstract: Stay cables are the critical load-bearing components of cable-stayed bridges, and their cable force directly affects the safety and durability of the whole bridge structure. Taking stay cable C01-001-01 of a cable-stayed bridge as the research object, and based on field measured vibration data, the spectral analysis method is used to identify and evaluate the stay cable force. During the monitoring, the high-sensitivity accelerometers are adopted to continuously collect the vibration signals of stay cable at a sampling frequency of 50 Hz for a total monitoring duration of 625.95 s, yielding 31 298 valid data points. Time-domain statistical analysis on raw vibration signals gives a mean amplitude of 0.000 112, standard deviation of 0.001 294, peak-to-peak value of 0.012 and crest factor of 4.62, which indicates the cable vibrates slightly under ambient excitation. Fast Fourier Transform (FFT) and Power Spectral Density (PSD) are used to extract the fundamental frequency of the cable at 1.596 Hz, and the cable force is calculated according to the string vibration theory formula. The results reveal that the measured cable force is within the allowable design range, and the cable works normally. The effectiveness of the vibration method in monitoring the cable force of cable-stayed bridges is verified, providing a reference for the health monitoring of similar bridges.

Keywords: stay cable force; vibration method; spectral analysis; structural health monitoring; power spectral density (PSD)

0 引 言

斜拉桥跨越能力强、景观效果好,近年来得到了大力发展。而斜拉索作为斜拉桥的关键承重构件,负责将主梁荷载传递至索塔。在斜拉桥运营期间,拉索将长期承受自重拉应力、风荷载、交通荷载及温度效应等多重、交替的不利作用,其力学性能会逐渐劣化。索力过大可能导致斜拉索锚固端疲劳损伤,索力过小则会引起应力松弛,结构刚度下降,从而诱发斜拉索车振、风雨激振等有害振动[1]。因此,对斜拉桥拉索的索力进行实时、准确监测,对于评估斜拉桥安全运营、指导养护决策具有重要的工程意义。

目前,斜拉索索力监测方法主要包括压力表法、压力传感器法、磁通量法和振动法等。其中,压力表法和压力传感器法需要在拉索张拉前预埋测力元

收稿日期:2026-07-29
作者简介:曹东利(1994—),男,硕士,工程师,从事桥梁智能化监测相关工作。

件，不适用于已投入运营期斜拉桥的监测。而磁通量法虽可实现无损检测，但受温度、磁场干扰等因素影响较大，且设备成本较高。振动法基于弦振动理论[2]，通过测量斜拉索在环境激励下的自振频率，通过傅里叶变换间接推算索力[3]，操作简便、设备便携、同时不损伤结构、可重复测试，可作为运营期斜拉桥索力监测的首推方法。

本文依托某斜拉桥结构健康监测系统，对 C01-001-01 号拉索开展连续振动监测。基于实测数据，运用一系列数据统计及分析方法，识别拉索自振频率并计算索力，评估拉索当前工作状态，为斜拉桥拉索索力的自动化监测提供技术参考。

1　工程概况

主桥为双索面全漂浮体系预应力混凝土斜拉桥，主桥长度为 850 m，跨径布置为 200 m+450 m+200 m。主梁为整体开口梁板式断面（π型梁），梁高（梁肋处）2.50 m，纵向每隔 4 m 设置 1 道横隔板；主塔呈 H 型，为塔、墩固结的钢筋混凝土和部分施加预应力结构。斜拉索采用扇形布置、平行钢丝体系，梁上标准间距为 8 m，塔上锚固间距为 1.60 m，全桥共 110 对斜拉索。斜拉索采用直径 7 mm 镀锌平行钢丝，外挤双层 PE 护套，钢丝标准强度 1 670 MPa，斜拉索锚具采用冷铸镦头锚。该桥于近年建成通车，目前处于正常运营阶段，其现场实拍图见图 1。

现场实拍图见图 1。



图 1　现场实拍图

C01-001-01 号拉索位于主跨上游侧，为短索区第 1 根拉索，靠近主梁边支点位置。该索自由长度约为 85.6 m，单位长度质量约为 42.5 kg/m，设计索力约为 3 200 kN。由于该拉索位置靠近跨中，交通荷载激励显著，且受风荷载影响较大，其动力特性对整个主梁的竖向刚度具有重要影响，因此将其作为重点监测对象。

为获取 C01-001-01 号拉索的基频并推算其索力，本次监测选用低频加速度型索力传感器（见图 2）。

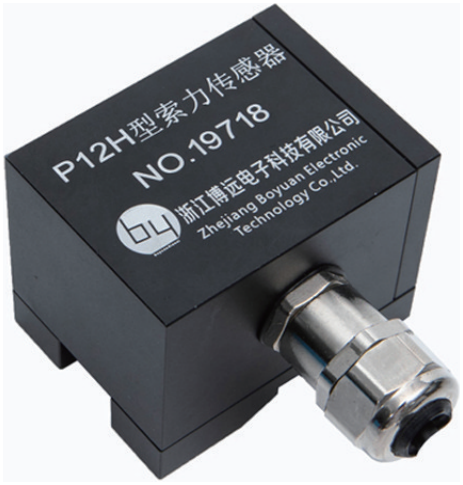


图 2　加速度传感器

该传感器灵敏度为 1 V/g，量程为±2 g，频率响应范围为 0.2 ~ 100 Hz，能够有效捕捉拉索的低阶振动信号，满足频率法测索力的要求。安装时，传感器通过抱箍牢固固定于拉索表面，测点布置在距拉索锚固端约 1/3 跨径处，兼顾低阶振型的有效激发与高阶振型节点的规避，保证频率识别的准确性。

拉索数据采集、信号传输示意图见图 3。

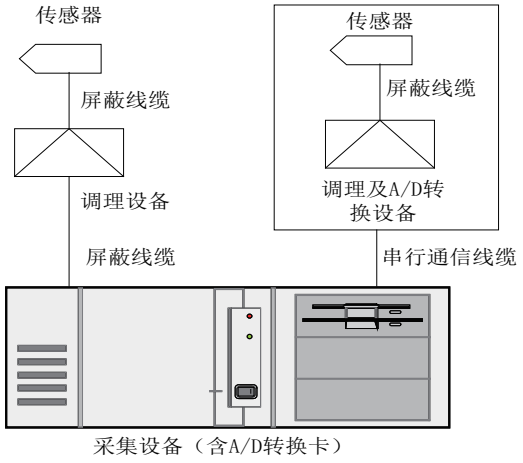


图 3　拉索数据采集、信号传输示意图

数据采集仪采用 24 位高精度 A/D 转换模块，其采样频率设置为 50 Hz。本次振动加速度监测采集时长约 625.95 s，最终获取了 31 298 个有效样本。

2　振动信号采集与预处理

2.1　整体计算原始信号特征

C01-001-01 号斜拉索振动信号的时域波形图见图 4。

从时域统计量看，该拉索振动信号均值接近零、标准差仅 0.001 3、峰峰值 0.012、峰值因子 4.62，整体呈现环境激励下的低幅随机振动特征，与同桥长索区拉索相比，振幅水平相当[4]。表明监测期间拉索

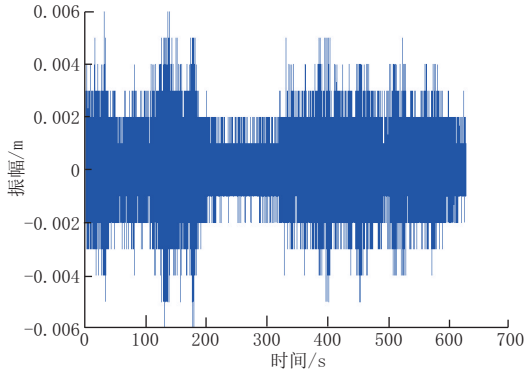


图 4　拉索时域波形图

工作平稳，未发生明显的风雨激振或参数振动现象。

拉索振动信号时域统计参数表见表 1。

表 1　拉索振动信号时域统计参数表

统计参数	数值	统计参数	数值
数据点数	31 298	监测时长/s	625.95
采样频率/Hz	50.00	采样间隔/ms	20.00
均值	0.000 112	标准差	0.001 294
最大值	0.006	最小值	−0.006
峰峰值	0.012	RMS 值	0.001 299
偏度	−0.011 5	峰度	0.676 6
峰值因子	4.62	变异系数	11.55

由表 1 可知：该拉索振动信号均值为 0.000 112，趋近于零，表明信号无单向偏置现象；标准差为 0.001 294、峰峰值为 0.012、最大正向振幅为 0.006、最大负向振幅为−0.006、有效值（RMS）为 0.001 299，几个幅值指标量级相当，表明拉索整体振幅水平较低。

峰值因子常用来区分随机振动和周期性强迫振动，本次实测峰值因子为 4.62，处于 2.5 ~ 5.0 区间内，说明该拉索振动由随机环境激励占主导。

偏度−0.011 5 和峰度 0.676 6 这 2 个高阶统计量都接近正态分布的理论值，尤其是峰度偏低，意味着信号尾部比标准正态稍微平坦一些，但整体对称性良好[5]。综合来看，C01−001−01 号拉索在监测时段内处于典型的低幅环境随机振动状态。

2.2　信号预处理

原始振动信号在采集和传输过程中可能受到电磁干扰、传感器温漂及基线漂移等因素影响，需要进行适当的预处理以提高信噪比。预处理阶段依次对原始监测数据进行多项式拟合去趋势、4 阶 Butterworth 带通滤波（通带 2~25 Hz）和奇异值剔除。后经检查，31 298 个数据点无异常跳变，全部有效。

3　频谱分析与索力识别

3.1　FFT 频谱分析

C01−001−01 号拉索预处理信号的 FFT 频谱分布图见图 5。

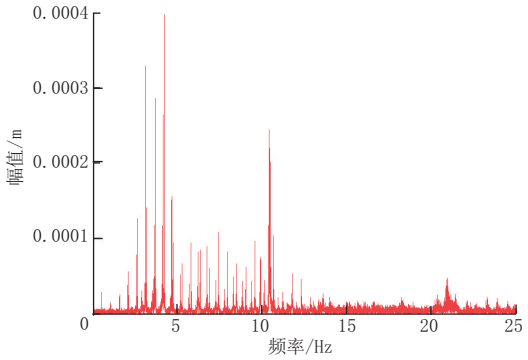


图 5　拉索预处理信号的 FFT 频谱分布图

由图 5 可知，在 0 ~ 25 Hz 范围内，1.596 Hz 处出现该拉索基频对应的谱峰，此外 10.40 Hz（约第 6 阶）等高阶模态峰也较为显著。需要留意的是，2.5 ~ 3.1 Hz 区间还有 1 组低幅密集峰，这组成分从能量上看远不及基频，频率位置也偏离拉索理论模态的预期值，推测来自桥面振动经支座向该拉索的传递，属于耦合分量，索力计算时不需要纳入[6]。

拉索的 STFT 时频分析热力图见图 6。显然，该图从另一个角度印证了上述判断。1.596 Hz 对应的能量带横贯整个监测时段，频率位置没有出现漂移，能量强度随时间有小幅起伏。这种起伏模式与风荷载和交通荷载的随机性是吻合的。更重要的是，整个时频面上没有出现频率成分的突然消失或新增，如果拉索发生松弛或刚度退化，基频会向低频方向移动，但这种迹象在本次监测中并未观察到。

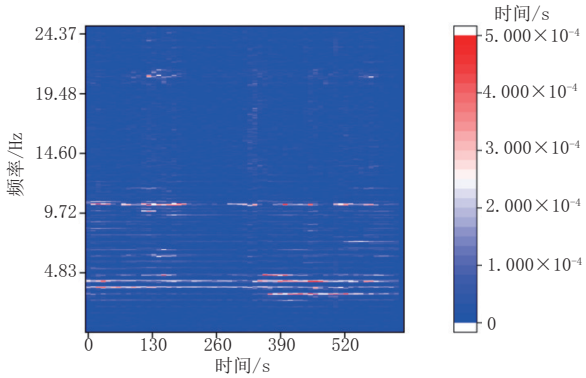


图 6　拉索 STFT 时频分析热力图

3.2　功率谱密度分析

为了进一步确认基频并提高识别的鲁棒性，又用 Welch 法做了 PSD 分析。结果与 FFT 一致：1.596 Hz 处功率谱峰对应基频信噪比相当好。从工程实践角度看，PSD 曲线比原始 FFT 更平滑，有利于排除随机噪声对基频判读的干扰。

1.596 Hz 处功率谱峰值的显著性，从另一个侧面说明该频率分量的能量高度集中，不太可能是噪声

伪峰。表 2 汇总了该拉索频谱分析识别的主要频率成分。

表 2　频谱分析识别的主要频率分布表

频率/Hz	幅值/功率	判定
1.596	较低	拉索 1 阶自振频率
2.5~3.1	较低	环境低频扰动
10.400	最高	第 6 阶模态

3.3　索力计算

根据弦振动理论，当拉索两端铰接、忽略抗弯刚度影响时，拉索索力 T 与拉索自振频率 f 之间的关系可表示为：

$$T = 4mL^2 f^2 \tag{1}$$

式中：m 为拉索单位长度质量，kg/m；L 为拉索自由长度，m。

对于长细比较大的斜拉索，抗弯刚度的影响不可忽略[7]，需采用考虑抗弯刚度修正的索力计算公式：

$$T = 4mL^2 f^2 - EI(\pi/L)^2 \tag{2}$$

式中：E 为拉索弹性模量，Pa；I 为拉索截面惯性矩，m^4。

将 m=42.5 kg/m、L=85.6 m、E=1.95×10^{11} Pa、I≈1.85×10^{-5} m^4、f=1.596 Hz 代入式(2)，得索力 T≈3 168 kN。该值与设计索力 3 200 kN 相差 32 kN，偏差−1.0%，在工程上通常接受的±5% 允许范围之内。作为对比，若不考虑抗弯刚度项，弦理论公式给出 3 173 kN，仅差 5 kN。对这个长细比的拉索来说，抗弯修正的影响确实很小，不过从严谨角度出发仍建议保留修正项。

4　监测结果分析与讨论

4.1　时域特征分析

如 2.1 节所述，监测期间各项时域指标均处于正常区间，此处不再重复。图 7 为 C01−001−01 号拉索的振幅分布直方图。

由图 7 可知，数据高度集中在±0.002 区间，以零为中心呈对称形态，形态上接近正态。这一结果与前面的时域统计量相互呼应：振动来源以随机环境荷载为主，不存在显著的周期性强迫分量。从实际工程经验来看，这种"干净"的振动信号恰恰说明该拉索工作状态良好。如果索力发生突变或锚固系统出现松动，振动响应的统计特征会明显偏离这一模式。

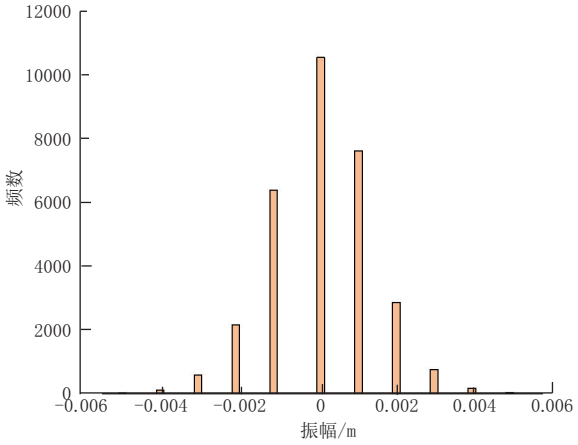


图 7　拉索振幅分布直方图

4.2　频域特征分析

如 3.1 节所述，监测全程基频稳定保持在 1.596 Hz，STFT 时频图也未观察到频率漂移或突变，此处重点讨论温度因素。拉索频率受温度影响较为显著[8]：钢材弹性模量随温度升高而降低，导致频率下降，温度效应引起的频率变化率约为 −0.01%/℃ ~ −0.03%/℃。本次监测在上午时段进行，气温变化相对平稳，温度效应对索力计算结果的影响有限。但对于长期监测而言，温度日变化和季节变化幅度远大于单次监测时段，建议同步采集环境温度数据，对频率进行温度修正，以消除温度引起的索力计算偏差[9-10]。

4.3　索力评估与对比

由前述可知，该拉索实测索力 3 168 kN 与设计值偏差−1.0%，处于±5% 允许范围内。为进一步验证振动法的可靠性，将其与最近一次千斤顶张拉法标定结果（3 185 kN）进行对比，两者相差 17 kN，相对偏差约 0.5%。2 种方法原理不同，振动法基于频率反推，千斤顶法基于液压压力直接测量，但结果高度一致，说明振动法在该桥拉索索力检测中是可靠的，也表明该拉索自上次标定以来索力未发生明显变化，当前无需调索。

5　结　语

（1）在约 625.95 s 的连续监测时段内，拉索在环境激励下呈现稳定的微弱随机振动特征，振幅均值为 0.000 112，标准差为 0.001 294，峰值因子为 4.62，信号分布近似正态，表明拉索处于正常工作状态。

（2）由 FFT 和 PSD 2 条分析路径得出了相同的拉索基频 1.596 Hz。STFT 时频图进一步确认，该频率在 625.95 s 监测时段内位置恒定，未出现漂移或突

变，从频率稳定性角度排除了索力发生明显变化的可能性。

（3）将实测基频代入考虑抗弯刚度修正的弦振动公式，算得索力为3 168 kN。与设计值3 200 kN相比，偏差为-1.0%；与千斤顶张拉法标定值3 185 kN相比，偏差为0.5%，3种来源的数据互相咬合，说明该拉索当前索力处于安全区间，无需调索。

（4）本次监测没有借助任何人工激振手段，完全依赖风荷载和交通荷载等环境激励完成索力识别，这一点对运营期桥梁尤其有意义。监测过程不影响交通，也无需封闭车道。后续若能在系统中加入温度补偿模块，并将监测对象从单根拉索扩展到全桥拉索群，实用价值将会更高。

参考文献：

[1] 陈水生，孙炳楠. 斜拉索参数振动及其控制[J]. 工程力学，2003，20(1)：126-131.
[2] Fang Z, Wang J Q. Practical formula for cable tension estimation by vibration method[J]. Journal of Bridge Engineering, 2012, 17(1): 161-164.
[3] 吴康雄，刘克明，杨金喜. 基于频率法的索力测量系统[J]. 中国公路学报，2006，19(2)：62-66.
[4] 王朝华，李国蔚，何祖发，等. 斜拉桥索力测量的影响因素分析[J]. 世界桥梁，2004，32(3)：64-67.
[5] 朱继梅. 机械振动[M]. 北京：科学出版社，2018.
[6] Kim B H, Park T. Estimation of cable tension force using the frequency-based system identification method[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 304(3-5): 660-676.
[7] 任伟新，陈刚. 由基频计算拉索拉力的实用公式[J]. 土木工程学报，2005，38(11)：26-31.
[8] 赵珧冰，孙测世，彭剑，等. 温度变化对拉索频率与索力的影响[J]. 应用力学学报，2013，30(6)：904-908.
[9] 闫维明，许晓建，李勇，等. 基于振动频率法和优化功能的斜拉索索力测试研究[J]. 公路交通科技，2015，32(11)：61-67.
[10] 黄勇，蔡键，蔡敏. 斜拉桥斜索频率检测的温度修正[J]. 华东公路，1999(6)：13-15.

（上接第123页）

析[J]. 工程建设与设计，2024(3)：89-92.
[4] 陈鑫炜，过洪赟，曹翔鹏. 轨道交通隧道与公路隧道共建设计方案研究[J]. 广东建材，2025(2)：95-100.
[5] 张春光. 路轨共建的城市地下快速路系统方案研究—以济南市黄河大道快速路为例[J]. 城市道桥与防洪，2022(3)：1-5.
[6] 沈伊楠. 市域铁路与市政道路共建方案研究[J]. 城市轨道交通研究，2023(增刊2)：23-31.
[7] 赵晓娟，程京伟. 城市道路与铁路立交的节点设计实例及方案比选研究[J]. 城市道桥与防，2016(4)：1-5.
[8] 张骁. 涉铁道路改建工程节点方案研究[J]. 中国市政工程，2025(1)：61-65.
[9] 刘皓，王仲林. 苏州轨道交通6号线与金鸡湖公路隧道共建方案分析[J]. 城市轨道交通研究，2019，22(5)：95-99.
[10] 周华. 宁波市北环快速路与轨道交通一体化工程[J]. 交通与运输，2016(6)：47-48.
[11] 高扬. 桥梁与隧道共建模式及工程设计技术特点分析[J]. 工程技术研究，2024(8)：167-169.
[12] 熊正元，杨春山. 隧道与桥梁共建桩基布置及方案优化[J]. 公路，2019(2)：137-141.
[13] 孙秉毅. EPS路基在地铁上方道路的设计应用[J]. 城市道桥与防洪，2022(1)：44-46.
[14] 贾嫆. EPS在地铁隧道上方零荷载换填施工技术[J]. 工程质量，2025(增刊1)：51-56.
[15] 孙海明，赵兵，孟猛. 地铁下穿既有运营线技术措施研究[J]. 建筑技术开发，2023(1)：58-60.
[16] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司. 外青松公路提升改造工程施工图设计[Z]. 上海：上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司，2023.