

振动频率法在风电机组混凝土塔筒索力监测中的研究进展

屈德斌*, 朱文凡, 赵万东, 武茂雄, 薛鹏鸣, 谢凯学

国华(陕西)新能源有限公司, 陕西 榆林

收稿日期: 2026年8月16日; 录用日期: 2026年9月8日; 发布日期: 2026年9月18日

摘要

振动频率法是当前风电混塔体外索力检测中综合性能最优的非损伤检测方法之一, 但其从桥梁斜拉索向混塔体外索迁移面临若干关键技术障碍。风电混塔体外索无约束套管、单根离散张拉及转向装置的存在, 使得经典频率-索力关系在该场景中面临离散钢绞线间耦合不足、有效长度不确定、边界条件复杂及抗弯刚度难以量化等多重挑战。本文系统梳理了振动频率法的理论基础及其在风电混塔中的适应性修正, 结合实际案例分析了离散钢绞线耦合机制、转向装置等效边界处理、有效索长识别及抗弯刚度修正等关键影响因素的研究进展, 介绍了基于深度学习与物理信息神经网络的索力智能化监测新方法, 并对未来研究方向进行了展望。

关键词

振动频率法, 风电混塔, 索力, 有效长度, 影响因素, 深度学习, 智能化监测

Research Progress of Vibration Frequency Method in Cable Force Monitoring of Hybrid Wind Towers for Wind Turbines

Debin Qu*, Wenfan Zhu, Wandong Zhao, Maoxiong Wu, Pengming Xue, Kaixue Xie

Guohua (Shaanxi) New Energy Co., Ltd., Yulin Shaanxi

Received: August 16, 2026; accepted: September 8, 2026; published: September 18, 2026

Abstract

The vibration frequency method ranks among the most optimal non-destructive testing techniques

*通讯作者。

文章引用: 屈德斌, 朱文凡, 赵万东, 武茂雄, 薛鹏鸣, 谢凯学. 振动频率法在风电机组混凝土塔筒索力监测中的研究进展[J]. 土木工程, 2026, 15(9): 77-89. DOI: 10.12677/hjce.2026.159225

with comprehensive performance for external cable force measurement of hybrid wind turbine towers at present. Nevertheless, several critical technical bottlenecks remain during the method's migration from stay cables of bridge structures to external tendons of hybrid wind towers. Characterized by unconstrained protective casings, discrete single-strand tensioning and steering fittings, external tendons for hybrid wind towers bring multiple obstacles to the classical frequency- cable force correlation formula, including insufficient discrete coupling effect, indeterminate effective tendon length, complicated boundary constraints and difficulty in quantifying flexural rigidity. This paper systematically reviews the theoretical fundamentals of the vibration frequency method as well as its adaptive modification strategies for hybrid wind tower applications. Combined with practical engineering cases, state-of-the-art research concerning dominant influential factors is elaborated, covering the coupling mechanism of discrete steel strands, equivalent boundary simplification for steering devices, identification of effective tendon length and flexural rigidity correction. Novel intelligent cable force monitoring approaches based on deep learning and physics-informed neural networks (PINNs) are summarized, and prospective research trends are outlined for future investigations.

Keywords

Vibration Frequency Method, Hybrid Wind Tower, Cable Force, Effective Length, Influential Factor, Deep Learning, Intelligent Monitoring

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在“双碳”目标的驱动下，风电机组持续向大功率、长叶片和高轮毂方向迭代，塔筒高度已从早期主流的 120 m 攀升至 160 m，甚至达到 190 m 以上[1]。传统纯钢塔筒因底部直径受运输条件限制，难以满足超高塔架的刚度与承载要求。钢-混凝土混合塔筒(简称混塔)以混凝土塔筒替代底部钢段，通过预应力拉索对塔筒施加环向压应力，抵消风载产生的拉应力，充分发挥了混凝土的抗压优势，成为超高塔架的主流结构形式[2]。据行业统计，2024 年混塔项目在中标总量中占比已达 33.86%，预计未来市场份额可能突破 60% [3]。

预应力拉索是混塔结构中最关键的承力构件，其索力状态直接决定了塔筒的整体刚度和抗疲劳性能。然而，施工误差、材料收缩徐变、锚具滑移及长期风载振动等多重因素易导致索力衰减[4]——当预应力损失超过设计阈值时，混凝土塔筒在外部荷载作用下可能出现接缝开裂，严重时甚至引发塔筒倾覆事故。因此，对拉索索力实施定期检测与实时监测是保障混塔全寿命周期安全的关键环节[5]。

振动频率法已在斜拉桥、悬索桥等缆索承重结构中获得了广泛而成熟的工程应用，并被认为是最适合风电机组混塔索力检测的方法[6]。然而，当振动频率法从桥梁斜拉索移植到风电混塔体外索时，面临一系列特有技术挑战。风电混塔体外索通常不配置高密度聚乙烯(High-Density Polyethylene, HDPE)约束套管，各钢绞线间无横向约束，呈离散状态；同束内各钢绞线受力不均匀；转向装置改变拉索的有效振动长度[7]。这些构造与工艺差异使得经典频率-索力关系在该场景中的适用性显著降低，亟需针对性修正。近年来，围绕离散钢绞线耦合机制、转向装置等效边界处理、预应力索力学有效长度(以下简称有效索长)识别及抗弯刚度修正等问题，学术界和工程界开展了大量研究，取得了一系列重要进展。

本文系统梳理振动频率法在风电混塔索力监测领域的研究现状，重点阐述理论基础与适应性修正、

关键影响因素分析及智能化识别方法三个层面的最新进展，并展望未来发展方向，以期为工程实践提供理论参考。

2. 振动频率法基本原理及混塔体外索特性

2.1. 振动频率法在索力监测领域的优势

当前工程中常用的索力检测方法包括压力传感器法、磁通量法、光纤传感法、反拉法(千斤顶拉脱法)和振动频率法等，表 1 简要对比了上述方法。前三种方法需在施工阶段预埋传感器，成本高、易出现器件故障风险，不适用于已投运机组的长期维护检测[8]；反拉法检测精度高，但设备笨重、操作不便且易对锚具造成损伤[9]。相比之下，振动频率法通过采集拉索的环境振动信号提取固有频率，依据频率 - 索力关系反算索力，兼具非侵入性、低成本、操作便捷及全生命周期适用性等综合优势[6]。

Table 1. Comparison table of prestressed cable force detection methods
表 1. 预应力索索力检测方法对比表

检测方法	精度	成本	适用阶段	是否预埋	是否损伤结构	操作便捷性	长期监测能力
压力传感器法	高	高	施工阶段	是	否	差	差
光纤光栅传感法	高	高	施工阶段	是	否	优	优
磁通量法	中高	中高	施工阶段	是	否	优	优
反拉法	高	中	运维阶段	否	是	差	差
振动频率法	中	低	全生命周期	否	否	优	优

振动频率法测定索力的基本流程如图 1 所示，在待监测预应力索自由振动的截面(远离上下锚点或其他约束点)使用卡箍等工装布置一支高灵敏度加速度传感器，传感器采用有线或无线方式接入数据采集单元，最终接入风场环网，数据接入上位服务器。数据采集和处理软件对采集的加速度信号进行时频分析得到预应力索多阶自振频率，然后结合预应力索的相关参数利用弦振方程得到索力。

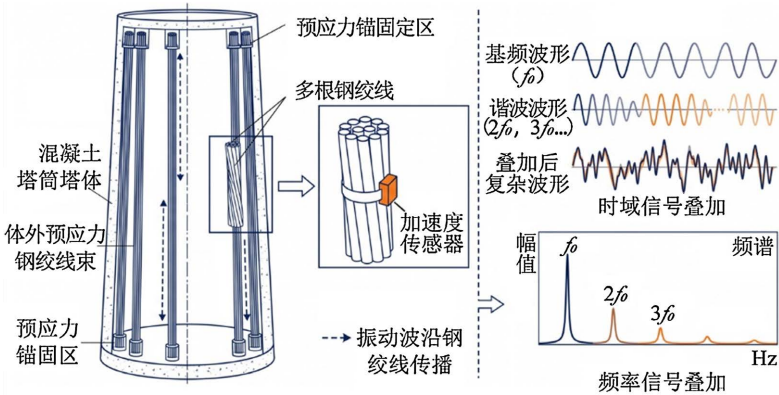


Figure 1. Vibration data acquisition and processing method for prestressed cables
图 1. 预应力索振动数据采集和处理方法

2.2. 经典频率 - 索力关系及其局限性

在小振幅线性振动假设下，对于均匀张力、两端简支的理想弦，索力 T 与第 n 阶自振频率 f_n 之间的关系由经典弦振方程给出[10]：

$$T = \frac{4mL^2}{n^2} f_n^2 \quad (1)$$

式中, m 为索的单位长度质量(线密度), L 为索长。该公式形式简洁, 仅需测得任意一阶自振频率及基本物理参数即可快速估算索力, 因此长期作为工程现场的实用计算公式。

然而, 式(1)建立在三个理想化假定之上: 拉索为均匀连续介质、两端理想简支约束、抗弯刚度和垂度效应可忽略, 这三个假定在实际结构中均难以严格成立。Irvine 最早考虑了索的垂度效应, 提出以无量纲参数 K 判别垂度影响程度[11]; Zui 等系统分析了抗弯刚度对拉索自振频率的影响, 给出了考虑抗弯刚度的实用修正公式[12]; 任伟新等利用能量法和曲线拟合方法, 建立了同时考虑垂度和抗弯刚度影响的索力推定公式[13]。这些工作构成了振动频率法索力识别的经典理论框架, 但上述研究均针对带 HDPE 套管、整体张拉成型的桥梁斜拉索或吊杆, 未考虑风电混塔体外索的特殊构造。

2.3. 风电混塔体外索的特性

风电混塔体外预应力索在构造和施工工艺上与桥梁斜拉索存在显著差异。主要体现为三个方面: 其一, 拉索仅在锚固端和张拉端附近紧密相连, 整束预应力索无约束套管, 中部区域各钢绞线间无可靠连接而处于离散状态; 其二, 施工时采用单根逐一张拉, 同束内各钢绞线受力不均匀[7]; 其三, 塔筒截面变化处设置转向装置, 改变了拉索边界条件与有效振动长度。

图 2 所示为风电混塔常见的体外预应力索状态, 图 2(a)中, 预应力索由于缺少套管或卡箍限制呈现明显的分散状态, 从锚点近似圆柱截面逐渐变为此处的长方形截面, 各钢绞线间的摩擦状态发生变化; 图 2(b)中, 预应力索在塔筒变径位置要与 PU 垫块接触(或转向架), 从而明显地改变了整条索的约束状态; 图 2(c)中, 预应力索在不同平台处出现了碰摩异常问题, 由此也明显改变了整条索的约束状态。风电混塔体外索的上述现象会直接导致振动频率法精度和适用性大幅下降[6]。

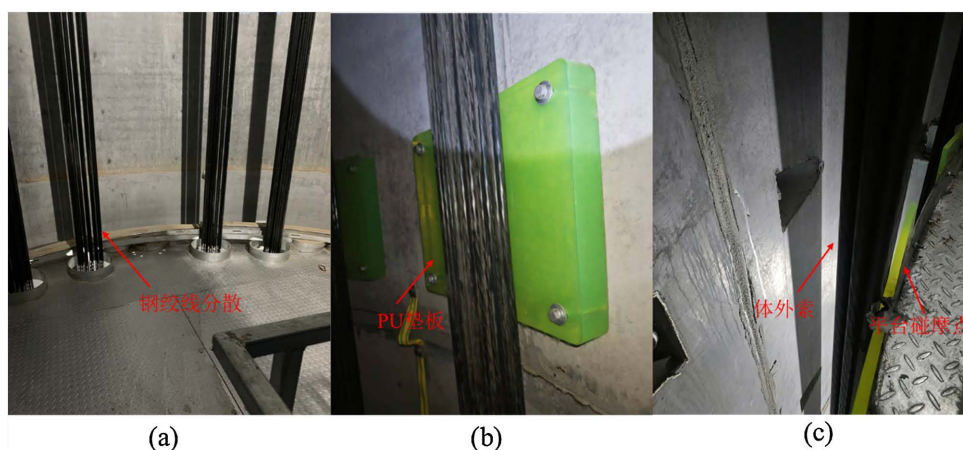


Figure 2. Special structural characteristics of external cables of wind power hybrid towers
图 2. 风电混塔体外索特殊结构现象

3. 振动频率法适用性关键影响因素分析

前文中提到风电混塔体外索相比桥梁等拉索的特殊性, 风电混塔体外索无约束套管、中部钢绞线分散、同束体外索各钢绞线预紧力不同均可归为索体中部耦合状态(约束状态)不良; 体外索中部存在转向装置或碰摩现象可定性为有效索长改变。近年来, 学者针对上述问题以及预应力索边界条件、线密度、抗弯刚度及锚固角度等其他差异性均开展了广泛研究。上述研究表明, 振动频率法各影响因素按重要程度

排序为：有效索长 > 离散钢绞线耦合状态 > 线密度修正 > 抗弯刚度 > 边界条件 > 其他次要因素(锚固角度等)。其中，有效索长和离散钢绞线的耦合状态占据绝对主导。

3.1. 离散钢绞线的耦合状态

风电混塔体外索通常由多根钢绞线平行布置而成，由于缺乏 HDPE 套管的整体约束，各钢绞线之间的振动耦合程度成为决定振动频率法测试有效性的首要前提。若各钢绞线振动不一致，测得的整体频率将失去物理意义。

在桥梁工程领域，学者们已对平行钢绞线索的振动一致性问题开展了系统研究。通过建立考虑钢绞线接触的有限元模型，发现各钢绞线在一阶振动时具有相同振型，相互间无交叉振动，柔性套管对钢绞线振动影响很小[7]。韩州斌等对杭埠河大桥平行钢绞线索进行振动测试，结果表明振动法可用于平行钢绞线索索力测试，钢绞线间的离散性和索力不均匀性对拉索振动影响较小，面外振动频谱特征更为明显、低阶分量易识别，进而可以达到高精度索力[14]。张卓杰等将钢绞线斜拉索抽象为具有层间间隙的叠梁模型，通过接触分析证明在自重挤压和束箍作用下，发生接触的钢绞线之间振动具有良好的一致性[15]。基于有限元等效索长的方法亦被证明可将平行钢绞线斜拉索索力测试误差控制在 5% 以内[16]。

上述研究结论为振动频率法在平行钢绞线结构中的应用奠定了理论基础。由于风电混塔体外索缺乏横向约束，钢绞线离散性导致的振动不一致问题更为突出。某风场混塔体外索未安装索体耦合装置前同一拉索不同钢绞线测点的 1~5 阶频率最大差值达 0.537 Hz，这会带来明显的索力偏差。为解决这一难题，姚帅等提出了一种基于局部刚性耦合的索力检测技术[17]。其核心思路是在待测拉索上安装索箍作为模板，灌注环氧树脂填充钢绞线间隙并固化，实现局部区域钢绞线的刚性连接。理论分析表明，当耦合刚度 $k \geq 5 \times 10^6$ N/m 时，多根钢绞线的振动可等效为整体振动，索力与频率的对应关系可简化为经典弦振方程。通过环氧树脂填充高度 $h \geq 60$ mm 的设计，实测耦合刚度可达 8.53×10^8 N/m，可满足刚性耦合条件。现场试验结果显示，耦合装置安装后各测点频率偏差均降至零，实测索力与理论值误差控制在 1.03% 以内，验证了该方法的有效性。

针对离散钢绞线振动不一致问题，工程实践中更有效的做法是在需要安装加速度传感器的索体上安装一支定制卡箍，将传感器紧固在整个索体上，无需进行灌浆处理。笔者在榆林某风场 5.5 MW 混塔机组中开展了精度验证工作，其体外索钢绞线采用 1860 MPa 级 $1 \times 7-\phi 15.2$ mm 钢绞线，线密度为 1.01 kg/m，每束钢索包含 12 根钢绞线，全索长 133.02 m，初始拉力为 2600 kN。现场传感器的安装如图 3 所示，传感器被卡箍紧固在钢索束上，高度在塔筒一层平台上方 1 米。该体外索的加速度频谱如图 4 所示，从图中可知单束体外索基频和谐波成分，其实测基频为 1.753 Hz。将上述参数带入公式(1)可得此时刻被测拉索索力为 2636.1 kN，相比初始拉力偏差小于 1.4%，表明上述耦合方式的有效性。

3.2. 有效索长

风电混塔由于混凝土塔筒存在截面变化，拉索在变径节点处需设置转向装置，导致拉索有效振动长度不等于几何长度，成为影响索力识别精度的核心因素之一。张振利等通过有限元参数分析发现，当索长在 30~130 m 范围内变化时，索长 10% 的相对误差可导致索力计算误差达 20% 左右[7]，其敏感度是线密度误差的 2 倍，凸显了准确确定有效索长的重要性。

姚帅等将转向装置简化为具有一定刚度的弹性支座，建立了包含转向装置的拉索分段振动模型[17]。研究发现，转向装置支撑刚度与拉索频率之间呈“S 型曲线”关系：当支撑刚度 $k \leq 7 \times 10^3$ N/m 时，转向装置对拉索约束作用较弱，拉索可近似为全长简支模型；当支撑刚度 $k \geq 1.5 \times 10^7$ N/m 时，拉索振动表现为两段索频率的叠加效应消失，可简化为仅考虑测试段长度的简支模型；中间区域则需采用完整的



Figure 3. Acceleration sensor of external cable fastened by a custom clamp
图 3. 使用定制卡箍紧固的体外索加速度传感器

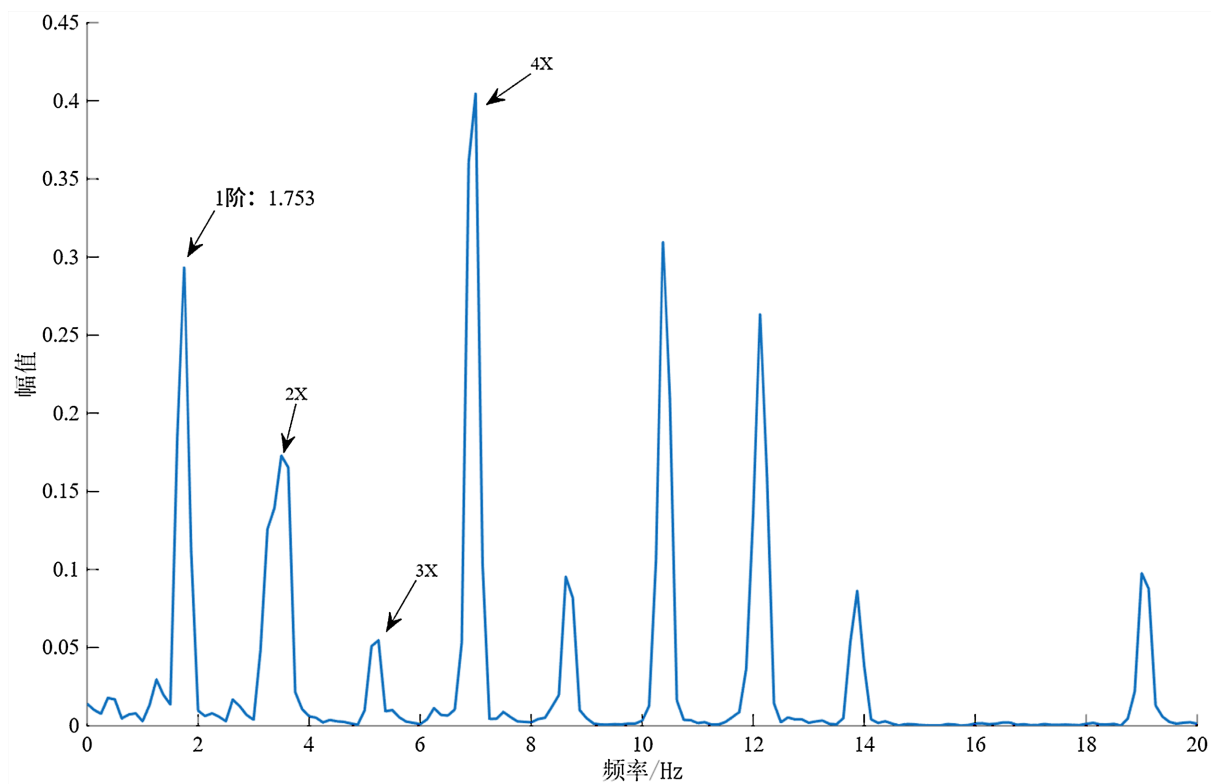


Figure 4. Frequency spectrum of external cables of hybrid wind turbine tower
图 4. 风电混塔体外索加速度频谱

分段模型计算。对于某实际混塔转向装置(聚氨酯垫板 + 钢支座), 经有限元计算其刚度值为 2.77×10^7 N/m, 大于简化阈值, 因此索力可按测试段长度计算。

贺冬冬等在同一实际工程中基于反拉法实测索力反推有效长度, 得到有效长度系数为 0.674, 即有效索长仅为几何索长的约 2/3 [9]。该结果与姚帅等关于转向装置可大幅缩短有效振动长度的理论分析高度吻合, 进一步证实了有效索长修正是振动频率法应用于风电混塔的关键环节。

除了转向装置, 体外索与塔筒平台的异常碰摩也会导致有效索长发生动态变化。仍以笔者所述榆林某风场为例, 该风场风机部分体外索与塔筒二层平台存在偶发碰摩, 而振动频率法的默认索长输入为全索长, 利用加速度数据频谱提取的基频及公式(1)得到的索力趋势如图 5 所示, 呈现偶发的大幅跳变问题, 最大超过 5900 kN。图 6 展示了出现碰摩和正常情况下的索力频谱图, 从图 6 中可以看出, 碰摩会直接导致基频上升(从 1.751 Hz 上升为 2.625 Hz), 此时有效索长已经不是全索长, 而是碰摩点与下锚点间的索长(87.6 m)。将正确的索长带入振动频率法, 得到的索力值 2562.7 kN 与理论值相差 1.5%, 符合测量要求。由此可见, 有效索长对索力的正确测量至关重要。

3.3. 抗弯刚度与边界条件的影响

抗弯刚度对振动频率法索力计算的影响与索长密切相关。李伟等通过对不同长度拉索的实测研究表明, 当索长大于 17 m 时, 抗弯刚度对索力值的影响基本低于 2%; 而短索受抗弯刚度影响较大, 索长为 8.21 m 时索力误差可达 5.6% [18]。对于平行钢绞线索, 由于受到钢绞线间接接触状态的影响, 其等效抗弯刚度的量化更为复杂, 且呈时变特性。

风电混塔体外索采用单端张拉工艺, 上部固定端与下部张拉端的实际约束状态介于铰接和固结之间, 更接近固定支撑。通过建立不同边界条件的有限元模型进行比较分析, 发现当索长超过 30 m 时, 基于弦理论公式和铰支梁公式的索力计算结果差异不超过 0.2% [7], 说明对于风电混塔中常见的 30~140 m 拉索

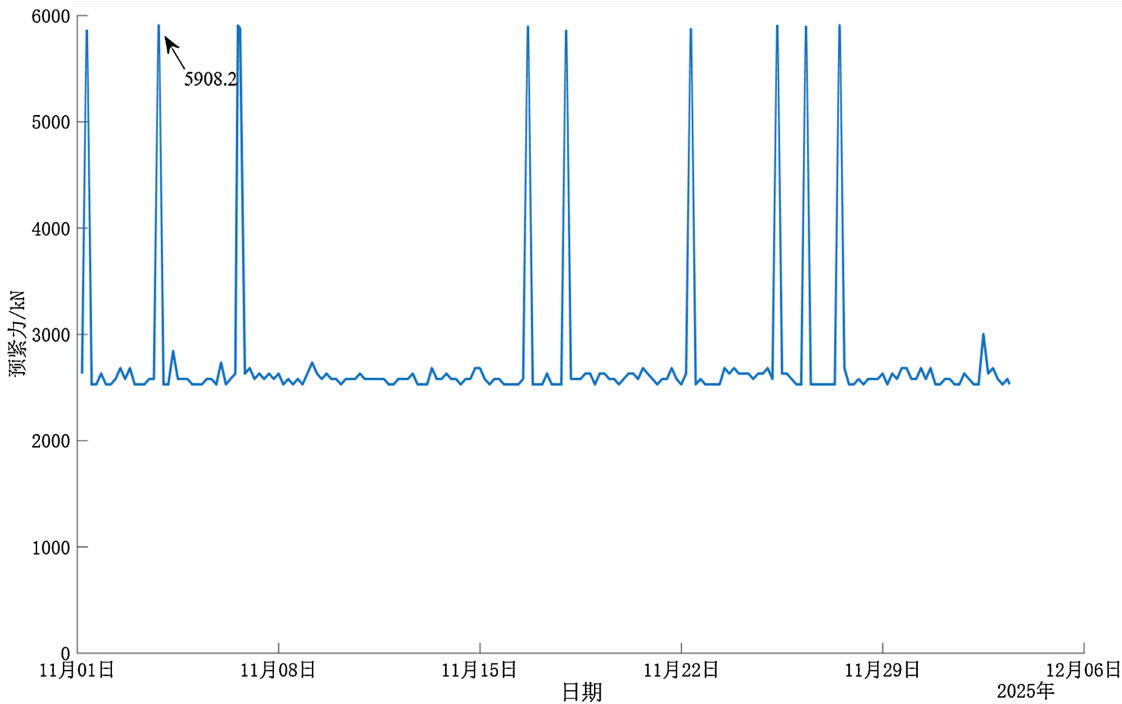


Figure 5. Cable force trend of external cables with occasional rub-impact faults

图 5. 存在偶发碰摩问题的体外索索力趋势

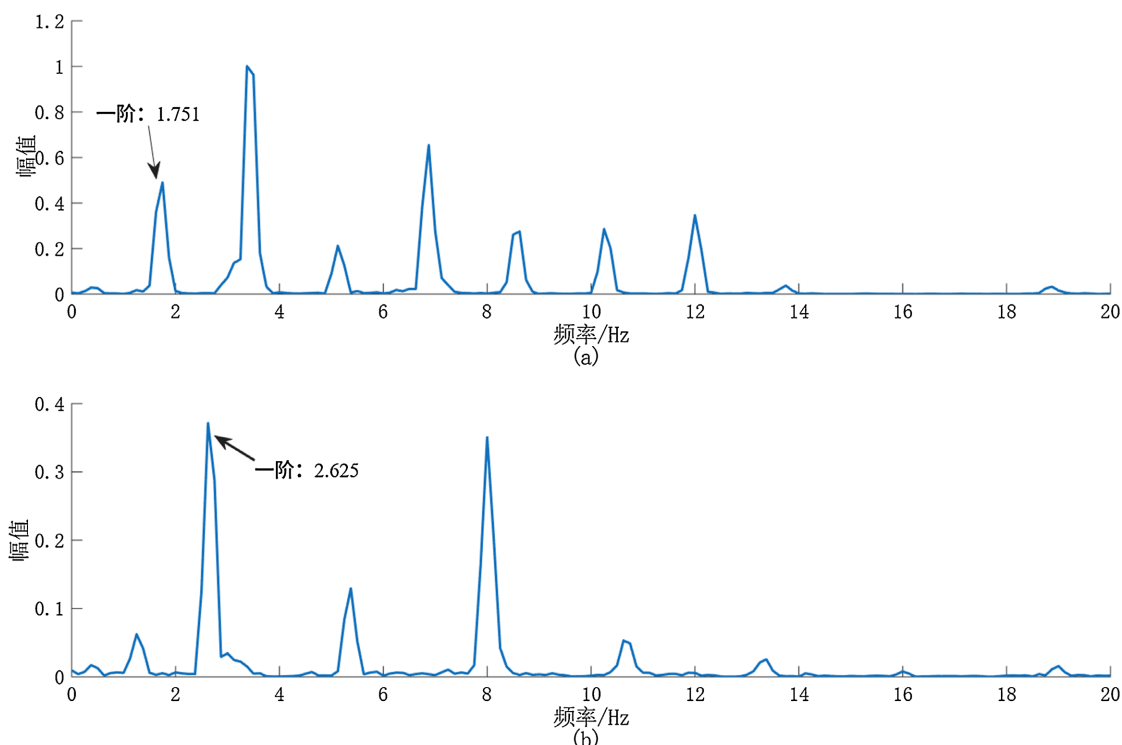


Figure 6. External cable spectrum under normal and rub-impact conditions, (a) normal; (b) rub-impact
图 6. 正常和碰摩状态下的体外索频谱, (a) 正常; (b) 碰摩

而言, 边界条件的影响相对有限。朱东等的有限元分析也验证了随着索长增加, 边界条件和抗弯刚度的影响逐渐减小的规律[6]。

抗弯刚度与边界条件在桥梁拉索或吊杆中的影响不可忽略, 但是结合风电机组体外索的细长、低垂跨比特性, 其影响可以忽略。

3.4. 斜度、垂度与环境因素

风电机组体外预应力索通常与地面呈约 89° 的夹角。当拉索倾角在 $20^\circ \sim 80^\circ$ 范围内变化时, 相同频率下得到的索力相差不超过 1% [7], 因此风电混塔中索体倾角的影响可忽略。垂度效应方面, 由于风电混塔体外索的垂跨比极小, 采用 Ernst 公式对弹性模量进行修正后的变化量也极为有限。此外, 预应力索位于塔筒内部, 受风和温度等外部环境因素的影响相对较小, 在实际工程中可以不予考虑。

4. 智能化索力识别方法

4.1. 深度学习技术在索力监测中的应用

传统振动频率法的核心挑战之一在于从环境激励下的振动信号中稳定提取拉索的自振频率。风电机组运行过程中, 叶片转动、机舱振动和风载波动等干扰源产生的宽带噪声易淹没拉索的低阶振动信号。近年来, 深度学习技术在自动化频率识别与索力预测方面展现出显著优势, 如图 7 所示。深度学习可通过一维数组向二维图像的变换强化固有频率特征, 从而提取到准确频率信息, 更进一步可对索力进行精准预测。

刘红波等则采用深度学习技术直接识别建筑用短粗拉索的索力, 通过构建多层神经网络模型从多源监测数据中学习索力与频率之间的复杂映射关系[19]。Wu 等开发了一种基于卷积神经网络(CNN)的全自

动索力监测系统,通过深度学习技术从长期振动信号中稳健筛选稳定模态频率,实现了拉索索力的实时连续监测,并在实际桥梁上完成了为期两年的在线验证[20]。Jeong 等则建立了基于深度学习的自动化无线监测系统,开发了针对拉索振动的全自动峰值拾取算法,与无线智能传感器相结合,实现了索力的自动化估计[21]。

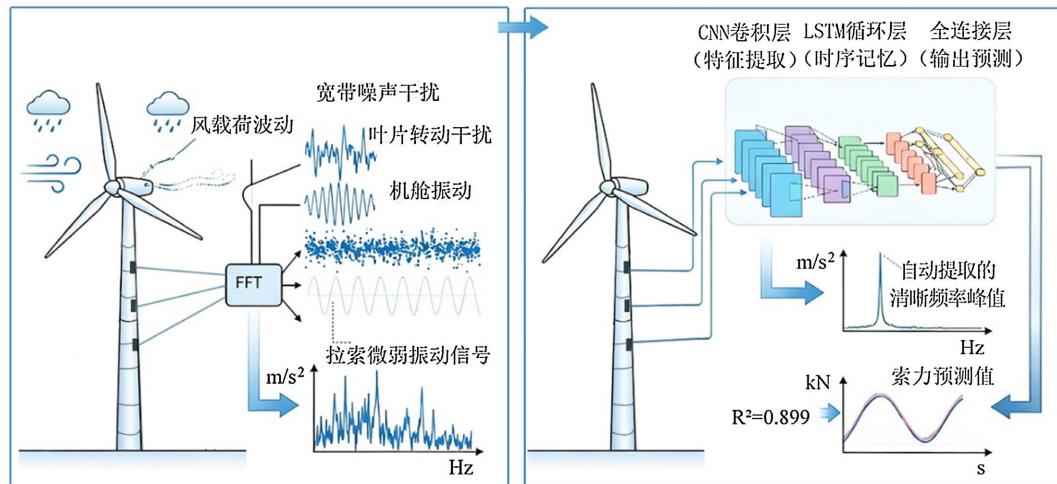


Figure 7. Application of deep learning methods in prestressed cable force detection

图 7. 深度学习技术在预应力索索力检测中的应用

在风电混塔领域,针对预应力索与平台碰摩问题,张凡采用预训练的 GoogLeNet 深度网络提前识别碰摩,剔除碰摩状态下的异常数据,将碰摩导致的索力值波动控制理论值 $\pm 10\%$ 以内,降低了大量的误报警问题[22]。相比原生训练的 CNN 网络,采用预训练深度网络+微调的方案可以大幅降低训练运算量。郭子臣等将长短期记忆(Long Short-term Memory, LSTM)网络引入钢混塔筒索力预测,利用风塔监测数据构建了能够有效捕捉索力变化趋势的预测模型。基于实际工程中连续 1000 个样本的验证结果表明,LSTM 模型预测值与实测真实值之间的平均误差仅为 0.133%,最大误差不超过 1.132%,训练集决定系数 R^2 达到 0.899,测试集 R^2 达到 0.855,表现出良好的泛化能力[23]。

目前在风电混塔领域,深度学习方法的专项研究尚处于初级阶段。深度学习技术在索力监测中的核心优势在于:无需人工干预即可从海量监测数据中自动提取频率特征,并通过端到端的训练捕捉索力变化的非线性映射关系。但纯数据驱动的深度学习方法局限性也比较明显:其一,该方法的泛化能力不足。现有模型大多基于特定风场的数据集训练,当迁移到其他塔型或工况时,精度会显著下降。其二,物理可解释性差。无法解释索力变化的物理机制,难以区分是索力真实变化还是传感器故障导致的信号异常。其三,数据需求量大。需要大量标注数据进行训练,而风电混塔索力的高精度标注数据获取难度及成本均非常高。

4.2. 物理信息神经网络与多方法融合

为解决纯数据驱动方法泛化能力弱及物理可解释性不足的问题,Raissi 等提出的物理信息神经网络(PINN)为索力识别开辟了新路径[24]。其核心思想是将描述物理规律的偏微分方程作为软约束嵌入神经网络的损失函数,使模型在数据驱动的同时受到物理机制的先验约束;在弦振动问题中两端位移为 0,神经网络的解自动满足边界条件,所以可不考虑边界条件项损失[25]。PINN 的损失函数可表示为:

$$L_{\text{total}} = \lambda_{\text{data}} L_{\text{data}} + \lambda_{\text{phy}} L_{\text{phy}} \quad (2)$$

式中： L_{total} 为总损失， L_{data} 为数据损失， L_{phy} 为物理约束损失， λ_{data} 和 λ_{phy} 分别是数据损失 L_{data} 、物理约束损失 L_{phy} 的权重系数。数据损失 L_{data} 取传感器测点处网络预测加速度与实测值的均方误差，承担“拟合观测”的作用；物理约束损失 L_{phy} 取控制方程残差在大量无标签配点上的均方误差。这些配点的各阶时空导数由自动微分计算，无需人工标注，承担“服从物理规律”的软约束；如图 8 所示，将因果关系和物理约束加入损失函数，该方法可加快网络收敛，在高噪声环境下显著提升网络鲁棒性，更适合小样本情况。

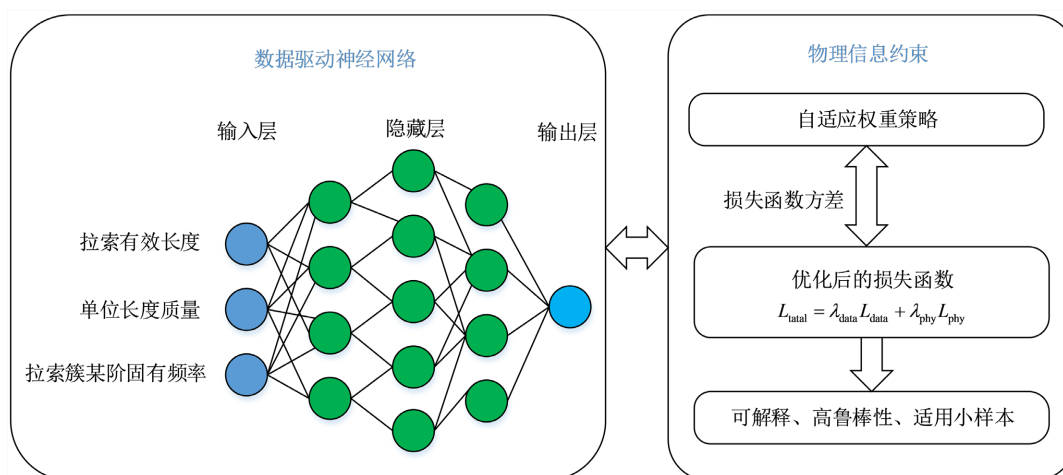


Figure 8. Fundamental principles and performance advantages of PINN
图 8. 物理信息神经网络的基本原理和性能优势

徐浩等将 PINN 引入斜拉索索力识别领域，在神经网络损失函数中引入表征索力的弦振动方程损失项，利用拉索动位移响应进行网络训练，通过最小化损失函数实现索力识别[25]。张卓杰等进一步将 PINN 应用于刚性耦合索股系统的索力识别，通过将耦合索股系统的显式频率方程嵌入神经网络损失函数，实现了物理机制的先验知识指导网络训练。该研究还构建了基于损失方差的自适应权重分配策略，使数据损失与物理约束损失之间的权重关系达到动态平衡，无需人工调参[26]。算例验证表明，自适应权重 PINN 模型在小样本条件下仍可保持较高识别精度——测试集中索力识别的 RMSE 为 14.14 kN, MAPE 为 0.99%, R^2 达到 0.9984。与传统 DNN 方法相比，PINN 在训练范围外样本上的误差增幅显著减小，验证了物理信息约束对泛化性能的提升作用。

4.3. 智能化方法在工程应用中的共性挑战

为更清晰地展示不同传统索力识别方法和智能化方法的优劣，本文从适用场景、物理可解释性、数据需求量、是否依赖专家知识、泛化能力和工程适用性五个维度进行了对比，结果如表 2 所示。总体而言，深度学习实现了频率特征的自动提取与复杂非线性关系的端到端建模，PINN 进一步引入物理约束以缓解纯数据驱动模型的泛化瓶颈，二者结合构成了下一代索力智能监测体系的发展方向。然而，当智能化方法从实验室走向风电场实际工程时，仍面临数据、模型与信任三个层面的共性挑战，以下逐一分析。

4.3.1. 数据困境：获取、标注与清洗

高质量训练数据的稀缺是制约智能化索力监测方法落地的首要瓶颈。一方面，风电混塔索力的高精度标注数据获取成本极高：可靠的标签通常需依赖反拉法逐根标定或光纤光栅等预埋手段交叉验证，难以在已投运机群中大规模开展；另一方面，风电机组运行环境复杂，叶片转动、机舱振动与风载波动

Table 2. Comparison of various prestressed cable force identification via vibration frequency method
表 2. 振动频率法不同预索力识别方法对比表

识别方法	适用场景	可解释性	数据 需求量	依赖专家 知识	泛化能力	工程适用性
经典弦振方程	索长 > 30, 有 HDPE 套管	好	小	高	高	不适用于风电 体外索
刚性耦合 + 弦 振方程	离散钢绞线、无套管	好	小	高	高	高
分段弦振模型	有转向装置	好	小	高	高	高
CNN/LSTM	长期在线监测, 有大量历史数据	差	大	低	低	中
PINN	长期在线监测, 小样本, 高噪声	中	中	中	高	低

产生的宽带噪声极易淹没拉索低阶振动信号, 加之体外索与塔筒平台偶发的碰摩、传感器松动等异常, 使原始信号中混杂大量“脏数据”。数据清洗本身亦高度依赖专家经验——需识别并剔除碰摩、断索、传感器故障等异常工况样本, 否则模型将学到错误的频率-索力映射。上述因素共同导致可用于训练的“干净、标注、足量”样本严重不足, 形成典型的超小样本困境, 即使 PINN 也很难达到预期效果。

4.3.2. 模型鲁棒性与泛化能力

现有深度学习模型多基于特定风场、特定塔型的数据集训练, 而风电混塔在塔高、索长、转向装置刚度、钢绞线根数等参数上差异显著。当模型迁移至训练分布之外的塔型或工况时, 识别精度往往显著下降, 即存在明显的泛化鸿沟。虽然 PINN 泛化能力相比深度学习有了显著提升, 但因其存在多个经验调参, 工程场景中调参难度高, 且理论严谨程度不足[27], 不良参数会导致泛化能力极差。此外, 现场环境噪声水平、采样频率与传感器布置方式均与实验室条件不同, 进一步削弱了已训练模型的鲁棒性。如何使模型在跨风场、跨塔型、低信噪比的真实工程中保持稳定的识别性能, 是智能化方法工程化必须解决的关键问题。

4.3.3. 安全攸关结构中的可解释性问题

混塔预应力索是保障机组全寿命周期安全的核心承力构件, 属于典型的安全攸关结构。在此类场景中, 仅给出索力预测数值而缺乏物理解释的“黑箱”模型难以被工程界采信并用于决策——当监测结果出现异常时, 运维人员无法分辨这是索力真实的衰减, 还是传感器故障、信号干扰所致。纯数据驱动方法难以建立输入(振动信号)与输出(索力)之间的因果关联, 缺乏物理机制支撑, 限制了其在安全攸关结构健康诊断中的可信应用。因此, 提升模型的可解释性以及异常归因能力, 是智能化监测从“报警”走向“诊断”的前提。

5. 结论与展望

振动频率法作为一种兼具非侵入性、经济性和便捷性的索力检测手段, 在风电混塔体外索力监测领域展现出广阔的应用前景。本文系统梳理了该方法从桥梁工程向风电混塔场景迁移过程中面临的离散钢绞线耦合、有效索长不确定性及转向装置边界复杂化等关键问题及其研究进展。目前, 刚性耦合装置与分段振动模型已将现场检测精度控制在工程可接受范围内(误差 $\leq 1.03\%$); 深度学习与物理信息神经网络的引入则为自动化、智能化监测开辟了新路径。然而, 面向大规模商业化与全寿命周期安全运维, 以下方向仍需重点突破:

- (1) 多物理场耦合下的频率修正模型研究。现有研究多集中于单一力学因素, 而真实服役环境中温度、

湿度、混凝土收缩徐变及钢绞线腐蚀等多物理场因素将长期改变索体的耦合状态与刚度(抗弯刚度、弹性模量)等物理参数,进而引起索-频率关系的系统性偏移。未来应建立耦合温度-湿度-徐变-腐蚀的多物理场频率修正模型,通过长期现场监测数据标定各因素的贡献权重,量化环境-时间耦合效应下的索力偏差,为高精度长期监测提供修正依据。

(2) 数字孪生与多源数据融合。单一监测手段均存在局限:振动频率法擅长获取高频索力动态信息,而光纤光栅(FBG)等技术可提供高精度的准静态应变/温度数据,塔筒整体有限元模型则刻画了结构承载的全貌。未来应研究将振动频率法监测到的高频索力动态数据、FBG 准静态数据以及塔筒有限元模型相融合的数据同化方法,构建索力健康的数字孪生体,实现索力状态的实时重构、演化预测与剩余寿命评估,推动监测体系从“监测”向“预测”和“决策”跨越。

(3) 面向全生命周期的低成本监测系统开发。当前研究多停留在算法层面,而大规模商业化应用对成本、功耗与可靠性提出了刚性约束。未来研究除算法创新外,更应关注集成化、低功耗、支持无线传输的低成本智能传感器(如内置边缘计算能力的加速度传感单元)及整套监测系统的研制,实现“传感器-采集-边缘诊断-云端管理”的一体化,使智能化索力监测具备在成百上千台机组上规模部署的经济性。

(4) 异常诊断能力增强。结合第 4.3 节所指出的可解释性挑战,发展具备异常归因能力的智能诊断模型,使系统不仅能报警,更能区分索力真实衰减与传感器故障、碰摩等干扰,提升运维决策的可信度。

上述问题的逐步突破,将推动振动频率法从“人工操作、单次检测”向无人值守、实时连续、智能预警的在线监测体系升级,为风电混塔的全寿命周期安全运维提供更为可靠的技术支撑。

基金项目

国家能源集团科技创新项目(GHTZ-25-15),“基于多维度融合的风电机组混塔结构安全监测系统研究”。

参考文献

- [1] 朱少辉. 风力发电机组钢混结构塔架研究[J]. 重型机械, 2022(5): 74-78.
- [2] 王丹, 徐军, 贺广零, 等. 风电机组混凝土-钢混合塔筒技术现状与发展趋势[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025, 47(6): 151-167.
- [3] 曹胜平, 林恒峰, 张廷发. 陆上风电机组钢混塔架智能监测技术研究与应用[J]. 节能, 2026, 45(2): 88-91.
- [4] 李艳, 丁通, 季长征, 等. 浅谈体外预应力加固技术预应力损失的计算方法[J]. 建设机械技术与管理, 2023, 36(4): 105-107.
- [5] 喻文超, 罗国甘, 黄声富, 等. 基于光纤传感的混塔结构风机安全监测系统的应用[J]. 中国设备工程, 2024(S1): 60-67.
- [6] 朱东, 吕伟荣, 徐伟. 频率法在风电机组混塔预应力索索力检测中的可行性分析[J]. 四川水泥, 2024(12): 43-45.
- [7] 张振利, 贾克勤, 刘庆阳, 等. 基于频率法的风电机组混塔索力识别影响因素分析[J]. 风能, 2024(9): 68-72.
- [8] 张后禅. 风电混塔行业技术发展现状及标准体系分析[J]. 能源, 2023(7): 61-67.
- [9] 贺冬冬, 唐现梓. 振动频率法在风电混塔索力检测中的应用[J]. 金属制品, 2025, 51(4): 41-44.
- [10] Weaver, J.W., Timoshenko, S.P. and Young, D.H. (1991) *Vibration Problems in Engineering*. John Wiley & Sons.
- [11] Irvine, H.M. (1981) *Cable Structures*. The MIT Press.
- [12] Zui, H., Shinke, T. and Namita, Y. (1996) Practical Formulas for Estimation of Cable Tension by Vibration Method. *Journal of Structural Engineering*, 122, 651-656. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1996\)122:6\(651\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1996)122:6(651))
- [13] 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(11): 26-31.
- [14] 韩州斌, 李东升, 杨洋. 等值张拉时基于振动法的平行钢绞线索索力测试分析[J]. 公路交通科技, 2018, 35(2): 55-61.

-
- [15] 张卓杰, 谷利雄, 王东强, 等. 刚性耦合对多索股结构自振特性的影响[J]. 铁道学报, 2021, 43(7): 153-160.
- [16] 何雄君, 杨永超, 肖祥, 等. 基于有限元等效索长的振动频率法[J]. 桥梁建设, 2016, 46(6): 40-44.
- [17] 姚帅, 戴巨川, 吕伟荣. 基于频率法的风电机组混合塔筒拉索索力检测技术研究[J]. 机械工程学报, 2026, 62(2): 385-396.
- [18] 李伟, 郭跃, 赵万. 考虑抗弯刚度与垂度效应的频率法拉索索力测定方法研究[J]. 四川水泥, 2026(3): 135-138.
- [19] 刘红波, 王龙轩, 郭刘璐, 等. 基于深度学习的建筑用短粗拉索索力智能识别[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(9): 204-213.
- [20] Wu, W., Chen, C., Lin, S. and Lai, G. (2023) Fully Automatic Cable Tension Monitoring Based on Vibration Measurements with Deep Learning Techniques. In: Limongelli, M.P., Giordano, P.F., Quqa, S., Gentile, C. and Cigada, A. Eds., *Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, 339-348. https://doi.org/10.1007/978-3-031-39109-5_35
- [21] Jeong, S., Kim, H., Lee, J. and Sim, S. (2020) Automated Wireless Monitoring System for Cable Tension Forces Using Deep Learning. *Structural Health Monitoring*, **20**, 1805-1821. <https://doi.org/10.1177/1475921720935837>
- [22] 张凡, 张峰武, 孟立, 等. 基于小波变换与微调 GoogleNet 的风电机组混凝土塔筒预应力索碰摩智能识别方法[J]. 新能源科技, 2026, 7(2): 50-54.
- [23] 郭子臣, 郑家榕, 包丽莉, 等. 基于 LSTM 的钢混风塔索力预测方法[J]. 建筑结构, 2025, 55(15): 119-123.
- [24] Raissi, M., Perdikaris, P. and Karniadakis, G.E. (2019) Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations. *Journal of Computational Physics*, **378**, 686-707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
- [25] 徐皓, 单德山, 吴康, 等. 基于物理信息神经网络的斜拉索索力识别[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-10. <https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20241216.0912.002>, 2026-06-29.
- [26] 张卓杰, 韩义泽, 徐建新, 等. 基于改进物理信息神经网络的耦合索股系统索力识别研究[J]. 振动与冲击, 2026, 45(5): 27-39.
- [27] Zhang, W., Suo, W., Song, J. and Cao, W. (2026) Physics-Informed Neural Networks (PINNs) as Intelligent Computing Technique for Solving Partial Differential Equations: Limitation and Future Prospects. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, **69**, Article 214602. <https://doi.org/10.1007/s11433-024-2665-5>