

引用格式:陈昱鹏,苏宗琛,苏琦,等.基于哈夫式摩擦电传感器的拉索索力监测技术[J].大连海事大学学报,2025,51(3):131-137.

基于哈夫式摩擦电传感器的拉索索力监测技术

陈昱鹏¹,苏宗琛²,苏琦¹,金昊²,徐鹏³,王昊^{*2}

(1.柳州欧维姆机械股份有限公司,广西壮族自治区柳州 545005;

2.大连海事大学轮机工程学院,辽宁大连 116026;3.北京大学工学院,北京 100871)

摘要:拉索索力监测直接关系到桥梁运营期的结构安全。为此,提出一种基于摩擦纳米发电的哈夫式拉索索力传感器(HCTS),其内部感知单元主要由两对导电织物和一对环形硅胶片组成。在外部激励下,狭窄空间中的环形硅胶片产生径向振动,与两侧导电织物发生接触分离进而输出电信号。结合信号傅里叶变换方法和弦振动张拉理论,可准确估算拉索索力。对比标准电磁法,HCTS最大误差不超过9%,表明HCTS可实现拉索索力表征。

关键词:拉索;索力监测;哈夫式拉索索力传感器(HCTS)

中图分类号:U448.2

文献标志码:A

文章编号:1006-7736(2025)03-0131-07

doi:10.16411/j.cnki.issn1006-7736.2025.03.014

Cable tension monitoring technology based on HALF triboelectric nanogenerators

CHEN Yupeng¹, SU Zongchen², SU Qi¹,
JIN Hao², XU Peng³, WANG Hao^{*2}

(1. OVM Machinery Co., Ltd., Liuzhou 545005, China;

2. Marine Engineering College, Dalian Maritime University,

Dalian 116026, China 3. College of Engineering,

Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The monitoring of cable tension is directly related to the structural safety during the operation period of the bridge. A HALF-type cable tension sensor (HCTS) based on triboelectric nanogenerators was proposed, whose internal sensing unit mainly consists of two pairs of conductive fabrics and a pair of annular silicone films. Under external excitation, the annular silicone sheet in a narrow space generated radial vi-

bration, which lead to contact and separation between the conductive fabrics and silicone films, thereby outputting an electrical signal. By combining the signal Fourier transform method with chord vibration tension theory, the cable tension can be accurately estimated. Compared with the standard electromagnetic method, the maximum error of HCTS does not exceed 9%, indicating that HCTS can achieve cable tension characterization.

Key words: cable; cable tension monitoring; HALF-type cable tension sensor (HCTS)

0 引言

拉索作为钢结构稳定系统的重要组成部分,通过预应力张拉机制提高结构的承载能力与稳定性,增强结构的抗震、抗风等性能^[1-2]。该技术已在港珠澳大桥、苏通长江大桥等重大工程中形成标准化应用体系。然而,风致振动对拉索结构的稳定性影响很大^[3]。常见的风致振动包括涡激振动、风雨激振、尾流驰振^[4]。拉索在风的激励下产生振动,振动频率低、幅度大,易出现疲劳,造成安全隐患^[5]。因此,长期监测拉索索力对于保障桥梁的安全和稳定至关重要。

目前,索力监测方法有直接测量法和间接测量法^[6]。直接测量法包括千斤顶读表法、压力传感器法。其中,千斤顶读表法可直观读取索力,但动态响应差^[7]。压力传感器法通过识别传感器形

收稿日期:2024-12-19;修回日期:2025-06-30

基金项目:国家资助博士后研究人员计划(GZC20230062)

作者简介:陈昱鹏(1972-),男,高级工程师,E-mail:chenyp@ovm.cn;王昊*(1989-),男,博士,副教授,E-mail:hao8901@dlmu.edu.cn

变反映拉索受力,但仅能测量安装位置的局部力,当拉索受力不均匀时,无法测量真实索力,且设备价格昂贵,安装困难,更换不便^[8]。直接测量法在便捷性、可靠性、准确性等方面仍存在问题,且需在桥梁施工阶段安装,不适合长期监测拉索索力^[9]。间接测量法有光纤传感器法、磁通量法和振动频率法。其中,光纤传感器法基于光纤内光信号的特性变化(如光强、相位、波长等)感知物理量的变化^[10],具有抗电磁干扰、体积小、耐腐蚀等优点,但需要将拉索局部应变转换为整体受力,而在该过程中会产生较大误差^[11]。磁通量法基于铁磁材料的磁弹性效应原理研发,动态响应好,但该方法存在标定困难的问题,无法实现实时索力监控^[12]。振动频率法为基于振动的识别法。该方法建立了频率与待测参数之间的函数关系,通过振动监测得到频率以识别待测参数^[13],具有动态响应好、识别精度高、成本低的特点,在拉索振动监测领域得到广泛应用^[14]。

在目前的索力识别领域,通常通过加速度信号获取索的振动频率,进而监测索力。工程领域中,加速度传感器主要分为两类:电子加速度传感器和光学加速度传感器^[15]。其中,光学加速度传感器具有高灵敏度和高分辨率,能够监测微小的振动变化,但其信号处理过程复杂,设备体积大、成本高,且易受光污染,不适用于拉索振动频率的长期监测^[16]。电子加速度传感器具有较高的动态响应和良好的频率响应,在极端温度、湿度和振动条件下均有良好表现,但存在设备复杂,需要电池供电等问题^[17]。因此,设计一种结构简单、能够实时反映索力的传感器是拉索索力监测的关键。

2012年,王中林团队首次提出一种基于有机材料^[18]的摩擦纳米发电机(TENG)的设计理念。TENG可以作为自供电传感器,利用摩擦起电效应和静电感应耦合效应,将微弱的机械运动转化为电信号,监测各种机械运动^[19-21]。Feng等^[22]研制了一种具有自发电功能的振动传感器,其利用振动工况诱导内部纳米材料相互摩擦发电,同时通过摩擦电信号与振动信号的对应关系实现对振动的测量,为井下发电及超高温传感器技术的研

究提供了借鉴。Wei等^[23]设计了一种基于摩擦纳米发电机的低频振动传感器(LV-TENG),结合TENG发电理论和电学仿真,阐明了该传感器电信号产生的基本原理,验证了LV-TENG可在无需外接电源情况下实现对二维振动的监测。Huang等^[24]设计了一种加速度TENG传感器,用于监测拉索振动,并将传感器产生的电信号与拉索振动加速度进行关联,实现了对拉索振动实时定量表征。随着材料工程、结构设计和理论建模的进步,TENG在机械运动监测应用中显示出自驱动传感潜力。对于振动频率法,准确识别拉索的振动频率是精准估算索力的关键。因此,提高对拉索振动频率识别的准确性,对于有效利用TENG传感器估算拉索索力至关重要。

本文提出一种基于摩擦纳米发电的哈夫式拉索索力传感器(HCTS),通过对传感信号的定量表征,提取拉索振动频率,实现对拉索索力的长期连续监测。该系统的内部感知单元由两对导电织物和一对环形硅胶片构成。在外部激励作用下,狭窄空间内的环形硅胶片发生径向振动,与两侧导电织物产生周期性接触和分离,从而输出电信号。利用信号傅里叶变换方法与弦振动张拉理论,HCTS能够较为准确地估算拉索索力。与标准电磁测量方法得到的索力结果相比,HCTS的最大误差不超过9%,从而验证了HCTS在拉索索力监测中的可行性,为索力监测技术提供了全新的研究思路。

1 索力传感器的设计及工作原理

1.1 拉索索力传感器的结构及工作原理

本文提出一种基于摩擦纳米发电的哈夫式索力传感器(HCTS),HCTS根据实际布置设计制造。拉索穿过HCTS的椭圆柱形空间,该椭圆柱形空间的切向圆与拉索的截面直径相适配,从而使HCTS能够固定在拉索上。这种布局能最大程度保留拉索的原始形态,并且可在一定范围内调节HCTS,以适应不同尺寸的拉索。其应用场景如图1所示。

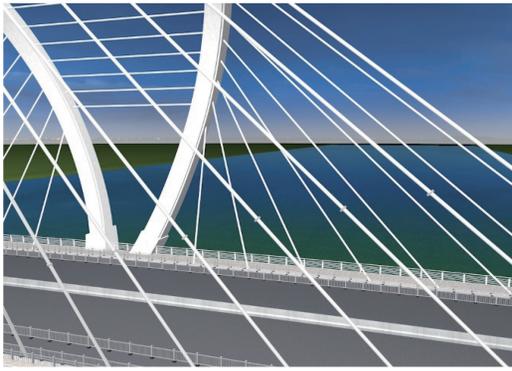


图 1 HCTS 的应用场景

Fig.1 Application scenario of HCTS

图 2(a) 为拉索嵌入 HCTS 的设计方案。HCTS 采用对称结构设计,由内外套筒和基于接触式独立层模式的内部摩擦结构组成。内外套筒长度均为 60 mm。外套筒壁厚为 2 mm,内直径为 65 mm;内套筒壁厚为 3 mm,外直径为 60 mm。将导电织物裁剪为 102 mm×60 mm 和 94 mm×60 mm 两种规格,分别作为摩擦材料和电极,对应粘贴在外套筒内壁和内套筒外壁上,如图 2(b) 所示。然后,将内外套筒同轴心装配,环形空间间隙为 2.5 mm。图 2(c) 为 HCTS 的实体结构。

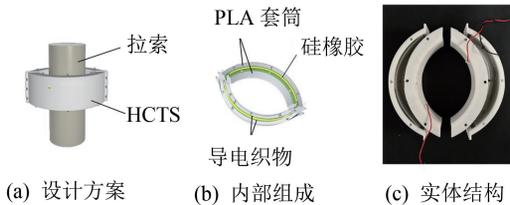


图 2 HCTS 的设计

Fig.2 Design of HCTS

HCTS 的工作原理如图 3 所示。初始状态下,硅橡胶环与一个电极相接触。当硅橡胶环与导电织物多次接触后,由于硅橡胶环相较于导电织物具有更强的电负性,其表面会积累负电荷;与此同时,导电织物上会产生等量的正电荷,二者形成电位平衡。随着拉索振动,硅橡胶环与初始导电织物一侧分离,向另一侧导电织物移动,从而打破了电势平衡。当硅橡胶环远离初始导电织物一侧时,电子在两个电极之间流动,因此,在外电路中产生电流以平衡电位差。当硅橡胶环与另一侧的导电织物接触时,便会形成新的电位平衡,两个电极之间的电子转移随之停止。随着拉索不断振动,硅橡胶环向相反方向运动,同时,电势的不平

衡导致电子在两个电极之间向相反方向运动,导致外部电路有逆流。因此,在两个导电织物电极与硅橡胶环的持续接触和分离过程中会产生交流电,从而将振动转换为电信号。

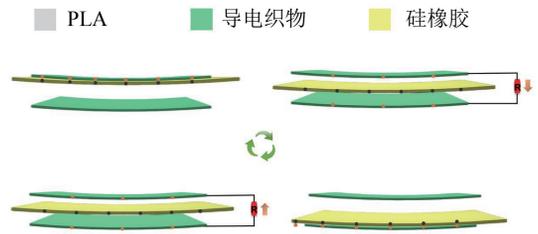


图 3 HCTS 的工作原理

Fig.3 Working principle of HCTS

1.2 拉索索力传感器的实验平台

拉索索力传感器的实验平台由伺服驱动器、线性电机、数据采集单元、Keithley 6514 静电计、线性电机控制器及基于 LabView 的数据记录仪等组成,具体如图 4 所示。其中,线性电机控制器控制伺服驱动器及调节线性电机的运动频率和幅度,驱动线性电机做往复运动。将 0.4~2.0 Hz 的正弦加载波形施加于拉索索力传感器,并将振幅从 20 mm 调节至 40 mm。数据采集卡和 Keithley 6514 静电计负责采集电信号输出的原始数据,并将输出波形反馈至 Labview 程序面板上。

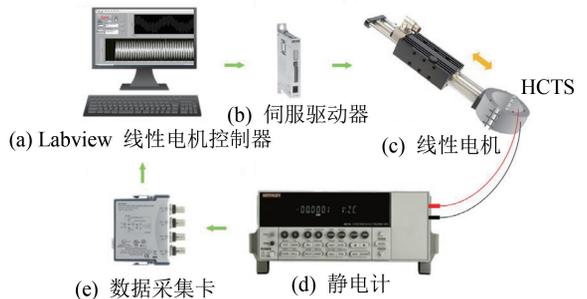


图 4 HCTS 实验平台

Fig.4 The experimental platform of HCTS

2 实验结果与讨论

2.1 不同结构参数的器件输出性能

HCTS 嵌套在拉索外,其运动主要由拉索的振动驱动,电极材料、硅橡胶环厚度及硅橡胶环的不同面积也会在一定程度上影响 HCTS 的性能。为确保 HCTS 的潜能得到最大程度发挥,本文通过选用不同的电极材料、不同厚度及面积的硅橡胶环对其进行测试。选用导电织物、尼龙和铜箔三

种不同的材料作为电极进行对比,结果如图 5(a)所示,导电织物作为电极时的电压输出优于尼龙和铜箔。在硅橡胶环厚度对比实验中,本文选用厚度为 0.50、0.75、1.00、1.25、1.50 mm 的五组硅橡胶环进行测试,结果如图 5(b)所示。当硅橡胶环厚度为 0.75 mm 时,HCTS 的输出最高。在硅橡胶环薄膜完整度对比实验中,本文分别选用完

整的间隙长度及 3/4、1/2、1/4 间隙长度的硅橡胶薄膜进行测试,结果如图 5(c)所示,完整间隙长度的硅橡胶环对应的 HCTS 输出最高。经过以上分析,确定以导电织物为电极、硅橡胶环厚度为 0.75 mm 且具有完整间隙长度的 HCTS 为本文研究对象。

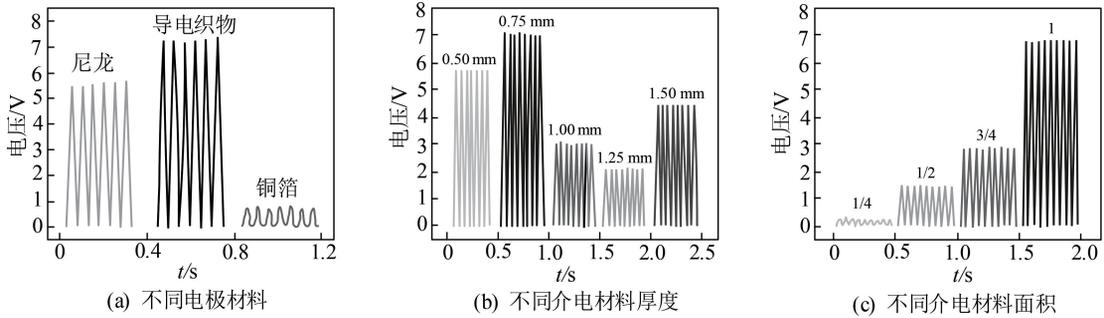


图 5 不同结构参数的器件输出性能

Fig.5 Output performance of devices with different structural parameters

2.2 低频高振幅工况下的器件输出性能

本文采用线性电机对 HCTS 的开路电压进行测试。如图 6(a)所示,振动幅度不变时,随着振动频率从 0.4 Hz 增加至 2.0 Hz,HCTS 的开路电压输出明显增加。由图 6(b)可以看出,振动频率

不变时,随着振幅从 20 mm 增加至 40 mm,HCTS 的开路电压输出明显增加。另外,对不同频率输出信号的主频分析表明(图 6(c)),信号主频率与输入频率吻合良好。

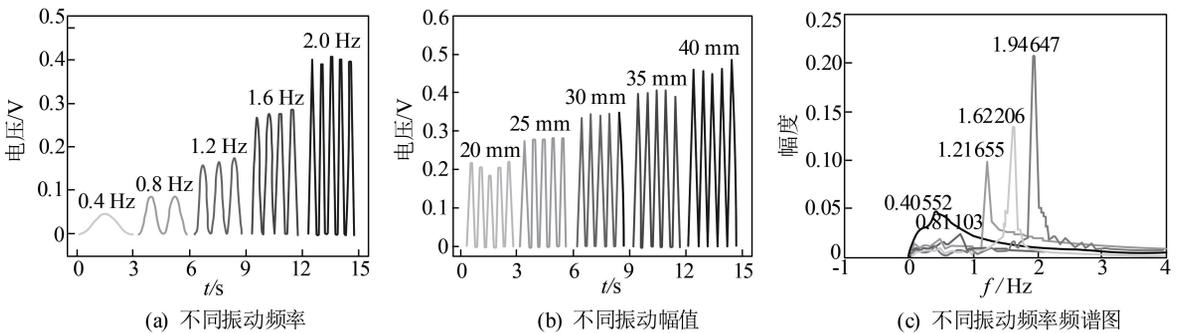


图 6 不同工况下的器件输出性能

Fig.6 Output performance of devices under different operating conditions

3 HCTS 的功能实现

如图 7 所示,将 HCTS 安装在实际拉索上,测试其输出频率。利用张拉设备对拉索分别进行 20%、30%、40% 三个载荷等级的张拉试验。设定拉索长度为 L ,将 HCTS 和 AX-3D-XRANGE 商用加速度传感器安装在拉索的 $L/2$ 处,并在该位置施加激励,使拉索产生振动;拉索振动时带动 HCTS 传感器和商用加速度传感器同步振动,进

而分别产生电信号和加速度信号。接下来,将 HCTS 与 AX-3D-XRANGE 商用加速度传感器安装在拉索的 $L/4$ 处,重复上述操作。分别对 HCTS 输出的电信号和商用加速度传感器输出的加速度信号进行傅里叶变换,得到拉索的振动频率。与商用加速度传感器的频率测量结果相比,HCTS 的误差不超过 1%,且 HCTS 还具有结构简单、制作及安装成本低、无需电池供电的优势。

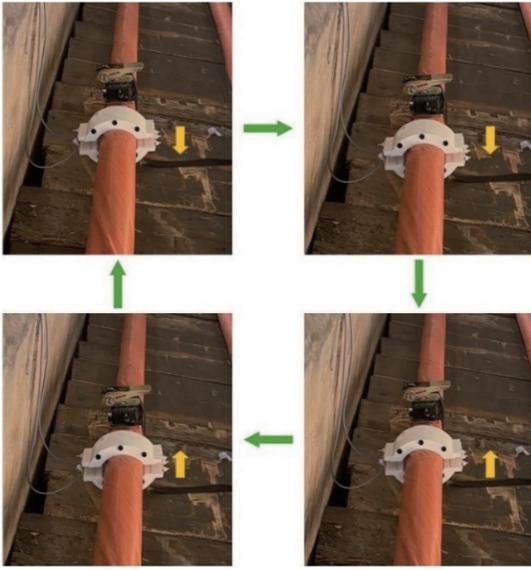


图7 HCTS的实际应用场景

Fig.7 Practical application scenarios of HCTS

张拉方程被用来描述索力和振动频率之间的关系。忽略拉索抗弯刚度时,单根钢丝绳的张拉方程可以表示为^[25]:

$$T_1 = 4mL^2 f^2 \quad (1)$$

式中: T_1 为忽略拉索抗弯刚度的单根钢丝绳索力; m 为拉索的单位质量; L 为拉索有效振动长度; f 为拉索振动频率(Hz)。拉索参数如表1所示。

表1 拉索参数

Tab.1 Parameters of the cable

拉索型号	有效振动长度/m	单位质量/(kg·m ⁻¹)	直径/mm
PEGJ15B-7D/SLXZ	20	9.46	64±1

考虑拉索的抗弯刚度时,单根钢丝绳的张拉方程可以表示为^[25]:

$$T_2 = 4mL^2 f^2 - EI_1(\pi/L)^2 \quad (2)$$

式中: T_2 为考虑抗弯刚度的单根钢丝绳索力; EI_1 为单根钢丝绳的抗弯刚度。

在实际应用中,拉索大多采用钢绞线。钢绞线的受力部分主要由内部的芯线和外侧的股线构

成,芯线与股线之间存在空隙。空隙率(A)为芯线和股线的总面积与包含空隙区域在内的钢绞线总横截面积之比,计算公式为:

$$A = \frac{B_1}{B_t} = s \left(\frac{d_s}{d} \right)^2 \quad (3)$$

式中: B_1 为芯线和股线的实际占有面积; B_t 为拉索截面总面积; s 为钢丝绳数量; d_s 为每股钢丝绳的直径; d 为钢绞线的总直径。

钢绞线的抗弯刚度(EI_2)为单根钢丝绳的抗弯刚度乘以空隙率,表示为:

$$EI_2 = A \cdot EI_1 \quad (4)$$

考虑抗弯刚度的钢绞线的张拉方程表示为^[25]:

$$T_3 = 4mL^2 f^2 - EI_2(\pi/L)^2 \quad (5)$$

将HCTS测量的振动频率分别代入式(1)、式(2)和式(5),即可得到索力 T_1 、 T_2 及 T_3 。将其与电磁法测得的标准索力进行对比,并根据下式计算误差(ε)。

$$\varepsilon = \frac{|T - T_k|}{T} \times 100\% \quad (6)$$

式中: T 为标准索力; T_k 为估算索力。

表2为弦振动下自供能HCTS的索力估算。由表2可知,当拉索处于低张力状态(载荷等级为20%)时,拉索弯曲效应显著,忽略抗弯刚度导致 T_1 的误差 ε_1 较大;因钢绞线中存在空隙,致使钢绞线的实际抗弯刚度低于理论抗弯刚度,导致 T_2 的误差 ε_2 小于 T_3 的误差 ε_3 。当拉索处于中高张力状态(载荷等级为30%、40%)时,拉索的弯曲效应减弱,忽略抗弯刚度后的简化模型与拉索的真实力学行为接近,故 ε_1 最小;在中高张力下,理论抗弯刚度高于实际抗弯刚度,导致估算的索力误差增大。在上述三种模型中,利用HCTS估算的索力误差均不超过9%。因此,HCTS具备索力监测能力。

表 2 弦振动下自供能 HCTS 的索力估算

Tab.2 Estimation of cable tension for self-powered HCTS under string vibration

载荷等级	激振位置	标准索力 T/kN	估算索力 T_1/kN	误差 $\varepsilon_1/\%$	估算索力 T_2/kN	误差 $\varepsilon_2/\%$	估算索力 T_3/kN	误差 $\varepsilon_3/\%$
20%	$L/2$	616.9	634.4	4.294	630.3	2.175	632.1	2.457
	$L/4$	615.8	670.4	8.870	666.3	8.208	668.1	8.491
30%	$L/2$	924.9	922.3	0.279	918.2	0.720	920.0	0.531
	$L/4$	923.8	918.2	0.608	914.1	1.049	915.9	0.860
40%	$L/2$	1229.6	1192.7	3.000	1188.6	3.332	1190.4	3.190
	$L/4$	1228.3	1192.8	2.893	1188.7	3.225	1190.4	3.083

4 结 论

本文设计一种基于摩擦纳米发电的哈夫式拉索索力传感器,其核心感知单元由两对导电织物和一对环形硅胶片构成。首先,通过选材测试确定 HCTS 的关键材料,并最终选用导电织物作为电极,采用厚度为 0.75 mm 且具有完整间隙长度的硅胶薄片作为介电材料,以优化电信号输出性能。随后,在低频高振幅条件下对 HCTS 进行测试,结果显示,HCTS 识别的振动频率与输入频率吻合良好。基于弦振动张拉理论,将测得的频率代入三种理论模型估算索力 T_k ,并与标准值 T 对比,结果显示,误差均在 9% 以内,表明基于 HCTS 的索力监测系统能够提供较为准确的监测数据,验证了 HCTS 在拉索索力监测中的可行性,为索力监测技术开辟了新的研究思路。

参考文献 (References):

- [1] 刘扬,袁和平,鲁乃唯.基于概率盒理论的斜拉索腐蚀失效概率分析[J].交通科学与工程,2022,40(6):59-65.
LIU Y, YUAN H P, LU N W. Analysis of failure probability of corroded stay cable based on probability box theory[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022,40(6):59-65. (in Chinese)
- [2] 刘扬,段吉珠,鲁乃唯,等.随机车载激励下的斜拉桥拉索损伤识别研究[J/OL].交通科学与工程,2024.https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20221212003.
LIU Y, DUAN J Z, LU N W, et al. Research on cable damage identification of cable-stayed bridge under random traffic load[J/OL]. Journal of Transport Science and Engineering, 2024. https://doi.org/10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20221212003. (in Chinese)
- [3] 刘鹏飞,蒋振雄,黄健,等.常泰长江大桥超长斜拉索风致振动控制方法研究[J/OL].铁道标准设计,2023.https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202311290001.
LIU P F, JIANG Z X, HUANG J, et al. Study on wind-induced vibration control method of super-long stay cable of Changtai Yangtze River Bridge [J/OL]. Railway Standard Design, 2023. https://doi.org/10.13238/j.issn.1004-2954.202311290001 (in Chinese)
- [4] 刘庆宽,韩鹏,孙一飞,等.安装肋条斜拉索的涡激振动和气动力特性研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2024,51(7):95-110.
LIU Q K, HAN P, SUN Y F, et al. Study on vortex-induced vibration and aerodynamic force characteristic of stay cables with ribs installed[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2024,51(7):95-110. (in Chinese)
- [5] 李良才.基于健康监测数据的平行钢绞线斜拉索风致振动分析[J].科技创新与应用,2023,13(24):117-120.
LI L C. Wind-induced vibration analysis of parallel stranded cable inclined cable based on health monitoring data [J]. Technology Innovation and Application, 2023,13(24):117-120. (in Chinese)
- [6] 司波,陈志华,陈硕晖,等.钢拉索索力监测技术研究和应用[J].建筑技术,2024,55(21):2593-2596.
SI B, CHEN Z H, CHEN S H, et al. Research and application of steel cable force monitoring technology [J]. Architecture Technology, 2024,55(21):2593-2596. (in Chinese)
- [7] 赵成贵.商合杭铁路芜湖长江公铁大桥斜拉索安装控制技术[J].桥梁建设,2020,50(4):107-111.
ZHAO C G. Installation control techniques for stay cables of Wuhu Changjiang River Rail-cum-Road Bridge on

- Shangqiu-Hefei-Hangzhou Railway[J]. Bridge Construction, 2020, 50(4): 107-111. (in Chinese)
- [8] JOHNSON SINGH M, CHOUDHARY S, CHEN W B, et al. Applications of fibre Bragg grating sensors for monitoring geotechnical structures: a comprehensive review[J]. Measurement, 2023, 218: 113171.
- [9] XU B, DAN D H, YU X W. Real-time online intelligent perception of time-varying cable force based on vibration monitoring [J]. Engineering Structures, 2022, 270: 114925.
- [10] 刘建铭.桥梁拉索索力传感器的研制[J].湖南交通科技, 2024, 50(1): 101-105.
LIU J M. Development of cable force sensor for bridge cable[J]. Hunan Communication Science and Technology, 2024, 50(1): 101-105. (in Chinese)
- [11] 张瑞友, 黄海波, 刘芳. 基于光纤光栅压力传感器的桥梁斜拉索索力自校准监测技术[J]. 西部交通科技, 2024(9): 94-97.
ZHANG R Y, HUANG H B, LIU F. Self-calibration monitoring technology of cable force of bridge diagonal cable based on optical fibre grating pressure sensor[J]. Western China Communications Science & Technology, 2024(9): 94-97. (in Chinese)
- [12] 胡孝阳, 段元锋, 魏巍, 等. 高钒索索力监测电磁传感器的研发与应用[J]. 结构工程师, 2021, 37(2): 78-83.
HU X Y, DUAN Y F, WEI W, et al. Development and application of Elasto-Magneto-Electric (EME) sensor for force monitoring of Galfan cables[J]. Structural Engineers, 2021, 37(2): 78-83. (in Chinese)
- [13] 陈岱杰, 徐文城, 王凯. 基于振动的斜拉索索力异常自动检测与处理[J]. 公路, 2024, 69(10): 102-106.
CHEN D J, XU W C, WANG K. Automatic anomaly detection and processing for tension monitoring of stay cables based on vibration[J]. Highway, 2024, 69(10): 102-106. (in Chinese)
- [14] 李沛洪, 曾凡锐, 朱育才. 振动频率法监测斜拉桥拉索施工阶段索力研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(7): 30-34.
LI P H, ZENG F R, ZHU Y C. Study on monitoring cable force of cable-stayed bridge during construction by vibration frequency method [J]. Guangzhou Architecture, 2024, 52(7): 30-34. (in Chinese)
- [15] WANG Y, YOU R Z, REN L. A fibre Bragg grating accelerometer with temperature insensitivity for cable force monitoring of FAST [J]. Measurement, 2024, 225: 114031.
- [16] 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.
- XUE H, PENG Z R, YIN H. Identification of cable vibration frequency for cable-stayed bridge based on edge line tracking [J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43(19): 153-162. (in Chinese)
- [17] 杨建宇, 段宇星, 童晓玲, 等. 一种基于新型双轴圆弧铰链的二维 FBG 加速度传感器[J]. 光电子·激光, 2023, 34(4): 364-370.
YANG J Y, DUAN Y X, TONG X L, et al. A 2D fiber Bragg grating accelerometer based on a novel biaxial arc hinge[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2023, 34(4): 364-370. (in Chinese)
- [18] WANG S H, LIN L, WANG Z L. Nanoscale triboelectric-effect-enabled energy conversion for sustainably powering portable electronics[J]. Nano Letters, 2012, 12(12): 6339-6346.
- [19] RADHAKRISHNAN S, JOSEPH S, JELMY E J, et al. Triboelectric nanogenerators for marine energy harvesting and sensing applications[J]. Results in Engineering, 2022, 15: 100487.
- [20] HE C L, YANG T T, FANG J H, et al. Tensegrity-inspired triboelectric nanogenerator for broadband and impact-resistive vibration sensing [J]. Nano Energy, 2023, 109: 108279.
- [21] 李原正, 王天润, 关堂镇, 等. 基于液态金属型摩擦纳米发电的水下仿生触须传感器[J]. 水下无人系统学报, 2024, 32(5): 794-800.
LI Y Z, WANG T R, GUAN T Z, et al. Underwater biomimetic whisker sensor based on liquid metal and triboelectric nanogenerator[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2024, 32(5): 794-800. (in Chinese)
- [22] 冯彦军, 吴川, 杨朔. 用于井下振动测量的自发电振动传感器的研制[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(4): 63-67.
FENG Y J, WU C, YANG S. Development of self-powered vibration sensor for downhole vibration measurement[J]. Mining Safety and Environmental Protection, 2023, 50(4): 63-67. (in Chinese)
- [23] 魏斌, 庞洪臣, 杨芳, 等. 基于摩擦纳米发电机的自供能低频振动传感器研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(20): 158-165.
WEI B, PANG H C, YANG F, et al. Research on self-powered low frequency vibration sensor based on triboelectric nanogenerator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(20): 158-165. (in Chinese)
- [24] HUANG K X, ZHOU Y H, ZHANG Z C, et al. A real-time quantitative acceleration monitoring method based on triboelectric nanogenerator for bridge cable vibration [J]. Nano Energy, 2023, 118(Part A): 108960.
- [25] DO H D, PARK K S. Vibration-based tension estimation of short helically multi-stranded wires under low axial tension[J]. Engineering Structures, 2023, 275(Part A): 115207.