

DOI: 10.7672/sgjs2026080001

索结构索力识别技术及关键影响因素分析*

赵一峰^{1,2}, 王泽强², 李心霞³, 杜可³, 胡洋², 尤德清², 卢立飞²

(1. 北京建工集团有限责任公司博士后科研工作站, 北京 100055;

2. 北京市建筑工程研究院有限责任公司, 北京 100039; 3. 北京建筑大学, 北京 100044)

[摘要] 面向索结构安全检测与长期运维的实际需求, 系统梳理6类索力识别技术的核心原理与适用场景, 重点聚焦三点弯曲法索力识别技术, 深入分析其技术发展现状及配套仪器的设计进展。在此基础上, 从初始误差、横向位移、剥离长度、物理抗弯刚度等关键维度, 系统剖析影响该方法识别精度的主要因素。研究表明, 各类索力识别技术均存在明确的适用边界, 针对既有索结构的专用索力测试技术仍较为匮乏; 三点弯曲法虽存在大直径拉索检测的技术瓶颈, 但凭借其独特优势, 在工程实践中应用广泛, 尤其适用于既有索结构的索力检测。此外, 提升三点弯曲法的索力测试精度与适用范围, 除需合理控制现场使用条件外, 还需进一步优化仪器结构设计、完善理论修正方法, 为索结构长期安全运维提供技术支撑。

[关键词] 索结构; 拉索; 索力; 三点弯曲法; 识别

[中图分类号] TU394

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)08-0001-08

Cable Force Identification Techniques and Analysis of Key Influencing Factors for Cable Structures

ZHAO Yifeng^{1,2}, WANG Zeqiang², LI Xinxia³, DU Ke³, HU Yang², YOU Deqing², LU Lifei²

(1. Post-doctoral Research Center, Beijing Construction Engineering Group, Beijing 100055, China;

2. Beijing Building Construction Research Institute Co., Ltd., Beijing 100039, China;

3. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: In response to the practical demands of safety inspection and long-term operation and maintenance of cable structures, the core principles and applicable scenarios of six types of cable force identification technologies are systematically analyzed, with a particular focus on the three-point bending method for cable force identification. The current technological development status and the design progress of the associated instruments are analyzed. On this basis, the key factors influencing the accuracy of this method from critical dimensions such as initial error, lateral displacement, stripping length, and physical flexural rigidity are analyzed. The research results indicate that each type of cable force identification technology has a clear applicable boundary, and currently, dedicated cable force testing technologies for existing cable structures are still relatively scarce. Although the three-point bending method has a technical bottleneck in the detection of large-diameter tension cables, it is widely applied in engineering practice due to its unique advantages, especially for the cable force detection of existing cable structures. Additionally, to enhance the accuracy and applicability of the three-point bending method in cable force testing, it is necessary to not only reasonably control the on-site usage conditions but also further optimize the instrument structure design and improve the theoretical correction methods, providing technical support for the long-term safe operation and maintenance of cable structures.

Keywords: cable structures; cables; cable force; three-point bending method; identification

* 国家自然科学基金(52208142, 52578156); 北京市教育委员会科学研究计划(KM202410016015); 北京市博士后工作经费资助项目(2025-ZZ-061); 北京市科技计划“揭榜挂帅”项目(Z251100004525015)

[作者简介] 赵一峰, 博士后, E-mail: afeng8603@tju.edu.cn

[收稿日期] 2025-09-27

0 引言

预应力拉索在大跨度建筑中应用广泛,是重要的承力构件,相比一般刚性受力构件,其需通过主动或被动张拉过程建立刚度,并保证位形达到设计状态。索力识别是预应力建立过程中最重要的观测指标。目前,行业主流索力识别技术有工装法、振动频率法、超声波法、磁通量法、光纤传感法、三点弯曲法等^[1]。明确这些索力识别技术的适用性和技术瓶颈,是保证工程建设质量和长期运维安全的重要前提,也是未来技术发展的重要内容。

随着我国早期索结构开始进入设计使用年限的中后期阶段(部分索结构使用>30年),索力退化导致的结构承载力不足及安全性问题开始显现。近年来,我国极端灾害天气频发,既有索结构面临的安全风险持续加大,对既有索结构安全性能检测及评价需求逐渐增长,亟待梳理适用于既有索结构的索力检测方法。

针对上述问题,首先梳理现有主要索力识别方法,简述各自的基本原理及适用特点;然后对比多种测试仪器在既有索结构索力识别上的适用性;最后着重阐述影响三点弯曲法索力识别精度的主要因素,聚焦其大索径测量精度不足的核心瓶颈,提出改进思路。

1 典型索力识别方法

1.1 工装法

工装法(或千斤顶法)是索力识别最基本的方法,可认为其为拉索锚固的逆过程(见图1),即通过安装定制的工装系统,通过千斤顶再次张拉拉索,使锚固端受力逐渐减小,当锚具达到松弛可调时,千斤顶的作用力与实际拉索张力一致,油压表读数即为该作用力。工装法是直接索力识别方法,对既有拉索、受力复杂和大直径拉索的适用性较好。但实际索结构工程中的拉索数量通常较多,工装法索力识别效率较低,人工耗费大;对被动张拉拉索(如无锚固端的定长索)的索力识别困难;工装索难以识别除锚固端外其他位置的索力。

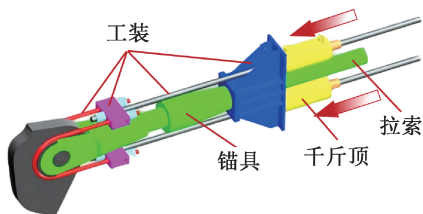


图1 工装法

Fig.1 Tooling method

1.2 振动频率法

振动频率法是索力识别应用最多的方法之一,该方法以弦振动理论为基础,建立拉索固有振动频率与轴向张力间的力学映射关系,当物理抗弯刚度可忽略两端铰接时(一般为细长索, $L/d > 100$, L 为索长, d 为索径),基本原理如式(1)所示^[2-4]。索力识别过程如下:①采用高精度振动测量设备采集拉索振动信号;②进行模态识别,以获得拉索振动频率;③基于弦振动理论实现索力的反向推算。从上述过程可知,该识别方法的核心硬件设备为采集拉索振动信号的拾振器(或加速度计)。在实际工程中,一般采用集成信号采集和弦振动理论分析的索力测试仪(见图2)。

$$T = \frac{4mLf_i^2}{\bar{\omega}_i^2} \quad (1)$$

式中: T 为拉索索力(拉索水平布置); f_i 为拉索基频; L 为拉索跨度; m 为单位面积; $\bar{\omega}_i$ 为无量纲化圆频率。



图2 索力动测仪(JMM-268)

Fig.2 Cable force dynamic testing instrument(JMM-268)

由上述分析可知,振动频率法的实用计算理论一般对拉索模型及其约束条件进行简化处理,振动频率法适用于具有独立约束、水平延伸和质量分布均匀的细长索。振动频率法依赖人工或环境激励作为振动输入,若振动通过约束在拉索间自由传播形成联合振动,即不具备约束的独立性,可能造成模态识别结果并非目标拉索固有频率,而是激励附近相互关联的一系列构件组成的耦合体系固有频率。因此,索体附加质量、索夹均影响模态识别的准确性。垂度较大、倾斜角度显著、存在附加质量等因素,均可能造成拉索索力在空间分布上的不均匀。拉索抗弯刚度差异及约束条件不同,也会引起其振动模态发生改变,因此在索力识别时需进行相应修正计算。在实际工程中,上述影响因素往往耦合存在,其应用难点在于如何准确判定适用条件,并选取合理的修正方法,以提高索力识别精度。

1.3 超声导波法

超声导波法检测材料应力主要依据声弹性理论,具有在有限介质中长距离传播衰减小、可选导波类型丰富、对结构应力变化敏感等特点,因此,广泛应用于结构损伤检测领域。典型应用场景包括拉索断丝检测、焊缝质量检测、混凝土梁探伤等^[5-7]。其检测原理为:通过分析超声导波在介质中传播时,遇到缺陷、界面及局部应力变化产生的反射、透射、延迟等特征,实现对结构缺陷或损伤的定性判断与精准定位。

超声导波法在索结构索力识别领域已有研究但工程应用相对较少(见图3)^[8-9]。超声导波在传播过程中,受外界环境、内部结构、应力状态等影响,表现出复杂的频散性、多模态性和随机性,而索力识别是精度要求较高的定量分析,因此,对识别信号的稳定性要求较严苛。因此,该技术对拉杆、撑杆等均质材料索体的适应性较好,仍需进一步研究具有复杂多样截面和捻角的钢绞线类拉索。随着人工智能、半解析有限元法等技术发展,复杂信号处理技术得到显著提升,有望推动超声导波法索力识别技术发展^[10-11]。

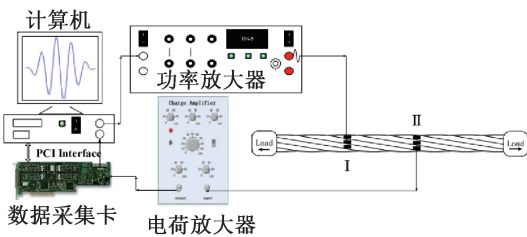


图3 超声导波法索力识别

Fig. 3 Cable force identification by ultrasonic guided wave method

1.4 磁通量法

磁通量法利用铁磁性材料拉索磁导率与应力间的相关性,通过检测磁通量变化反演索力(见图4)^[12-13]。因其具备抗干扰能力强、长期稳定性良好的优点,广泛应用于索结构健康监测中。

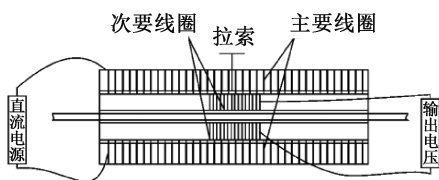


图4 磁通量法原理

Fig. 4 Principle of magnetic flux method

由于受限于识别原理,该方法仅适用于铁磁材料、新装索的健康监测中。因拉索类型、规格、材料

不同均影响磁导率-索力的相关性,因此在工程应用前,需在实验室标定目标拉索材料。对于既有拉索,尤其是服役时间>10年的索结构,通常缺乏完全相同的材料用于标定。另一方面,实验室标定难以完全准确模拟拉索初始状态、长期环境作用和材料自身性质的变化,因此采用该方法进行索力监测的稳定性仍有待持续研究。

1.5 光纤传感法

光纤传感法通过光纤光栅或布里渊散射测量应变分布,结合力学模型计算索力。该方法分辨率高、耐久性好,常见的有测力环式、智慧索式、卡箍式等(见图5)^[14-18]。其中,测力环式是将光纤光栅布置在锚具锚环处,较早应用于桥梁工程的大直径拉索中;智慧索式是将光纤替换拉索的若干索丝沿拉索长度方向灵活布置光栅,以测试多点应变,目前在索结构、屋面防风揭加固、边坡锚杆等领域应用逐渐增多;卡箍式将光纤构件布置于2个卡箍间,安装方便、布置灵活,是具有发展潜力的新型索力监测方法。

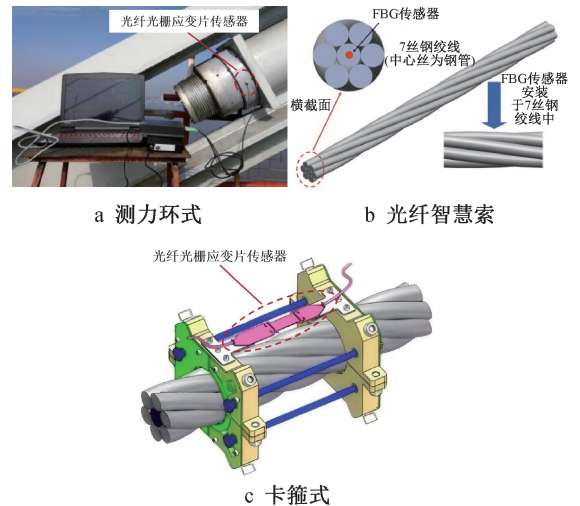


图5 光纤传感法索力识别装置

Fig. 5 Cable force identification device by optical fiber sensing

上述测力装置均需在施工时进行安装,更适用于新装索的健康监测。对于既有结构,需对拉索进行索力释放以识别绝对索力。

1.6 三点弯曲法

三点弯曲法的索力识别技术原理是通过测量拉索横向刚度,利用横向刚度与拉索张力间的关系反算拉索张力^[19-20]。横向刚度在部分文献中表述为抗弯刚度,主要由物理抗弯刚度和几何抗弯刚度构成,为避免混淆,下文仍表述为横向刚度。其中,几何抗弯刚度由拉索张力提供横向变形抵抗能力,

物理抗弯刚度主要由索体截面的物理特性提供。当符合拉索横向刚度由几何抗弯刚度主导、物理抗弯刚度可忽略不计的假设时,拉索可简化为张紧弦模型。索力识别过程即简化为对拉索施加横向力,使其产生横向变形,通过测量横向力与横向变形,利用几何线性变形理论计算拉索张力(见图 6)。

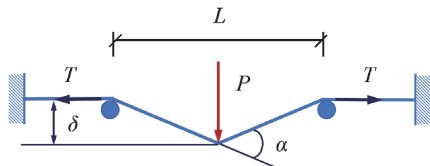


图 6 三点弯曲法原理

Fig. 6 Principle of three-point bending method

$$P = 2T\sin(\alpha/2) \quad (2)$$

$$\sin(\alpha/2) \approx \tan(\alpha/2) \approx \delta/(L/2) \quad (3)$$

$$T = \frac{PL}{4\delta} \quad (4)$$

式中: P 为横向力; T 为拉索张力; α 为索体相对转角; δ 为横向力 P 作用点处的横向位移; L 为两支点间距,即支撑长度。

2 识别方法对比

各类识别方法技术优势、改进方向和推荐应用场景如表 1 所示。由表 1 可知,多数索力识别技术适合新装拉索,适用于既有拉索的技术较少。对具有多种拉索类型或复杂环境的工程,索力识别方法间可进行互补与校核,如既有拉索在材料性能退化、局部损伤、约束条件变化、环境改变等因素影响下,使用工装法、三点弯曲法等,为振动频率法、超声波法等方法提供校核依据。对于新装拉索,工装法和三点弯曲法通常作为施工过程中的索力确定依据,可为运营期索力监测提供初始值。

3 三点弯曲法精度影响因素

3.1 初始误差

使用三点弯曲法识别索力前,受操作误差、仪器质量、支点处摩擦等因素影响,初始横向力和位移难以完全归零。可采用二级差测定法予以消除,主要方式如下^[21-23]。

1) 基于二次横张的级差测定法(方法 1)

该方法中,使用同一测点获取 2 次横向位移及其对应的横向力,此时式(4)可转换为:

$$T = \frac{(P_2 - P_1)L}{4(\delta_2 - \delta_1)} \quad (5)$$

式中: L 为两支点的支撑长度; δ_1, δ_2 分别为 2 次横向位移; P_1, P_2 分别为 2 次横向张力。

表 1 索力识别方法对比

Table 1 Comparison of cable force identification methods

识别方法	技术优势	限制因素	推荐应用场景
工装法	精度高、直接识别无需分析计算、抗干扰性强	施工技术要求高、人工耗费大、定长索受限	既有和新装拉索;索力检测
振动频率法	低成本、操作简便	边界条件敏感、易受噪声干扰	既有和新装拉索;索力检测和监测、细长索
超声导波法	复合缆,高温耐受性好	需声速标定、信号捕捉及分析难	新装拉索;索力检测和监测、复合材料索、特种环境(高温、水下)
磁通量法	长期稳定性好	需实验室标定、仅限铁磁材料应用、成本较高	新装拉索;索力监测
光纤传感法	抗干扰性强	成本较高、长期稳定性和耐久性有待检验	新装拉索;索力监测
三点弯曲法	抗干扰性强、识别技术简单	需接触加载,可能损伤 PE(聚乙烯)护套、索径受限	既有和新装拉索;索力检测、中小直径拉索

2) 基于变支撑长度的二级差测定法(方法 2)

该方法保持 2 次测量的横向力不变,但改变支撑长度并获得对应的 2 次横向位移,此时式(4)可转换为:

$$T = \frac{P(L_2 - L_1)}{4(\delta_2 - \delta_1)} \quad (6)$$

式中: P 为固定横向力; L_1, L_2 分别为 2 次识别的第 1, 2 支撑长度; δ_1, δ_2 分别为横向力 P 作用点的 2 次横向位移。

上述 2 种方法中,方法 2 需 2 台支撑长度不同的仪器,且 2 次识别的横向力很难完全一致,因此更推荐方法 1。

3.2 横向位移

横向位移为三点弯曲法测定索力的重要参数,其准确性对结果有较大影响。文献[20]表明:当横向位移为 5mm 时,横向力与纵向力呈二次曲线关系;而横向位移>5mm 时,横向力与纵向力呈显著线性关系,符合式(4)规律。

在索径均为 15.2mm、剥离长度均为 4 080mm 的条件下,文献[20]给出的横向位移分别为 5, 10, 15, 20mm 时的索力识别数据,本文据此进一步分析二级横向位移差值 $\Delta\delta = (\delta_2 - \delta_1)$ 的选择方法。

当 $\Delta\delta = 5\text{mm}$ 时,对比(10-5), (15-10), (20-15)mm 作差方案,可得(15-10)mm 时误差较小。当 $\Delta\delta = 10\text{mm}$ 时,对比(15-5), (20-10)mm 作差方案,可得(15-5)mm 时误差较小。当 $\Delta\delta = 15\text{mm}$ 时,

仅(20-5)mm作差方案。在3种 $\Delta\delta$ 中取误差最小的作差方案,对比拉索张力的影响(见图7)。当 $\Delta\delta=10\text{mm}$ (对应2次横向位移分别为5,15mm)时,误差总体较小;当拉索张力 $<60\text{kN}$ 时,识别误差急剧增大, $\Delta\delta=5\text{mm}$ 的误差整体较大;当索力 $>60\text{kN}$ 时, $\Delta\delta=15\text{mm}$ 的误差均 $<25\%$, $\Delta\delta=10\text{mm}$ 的误差均 $<20\%$ 。

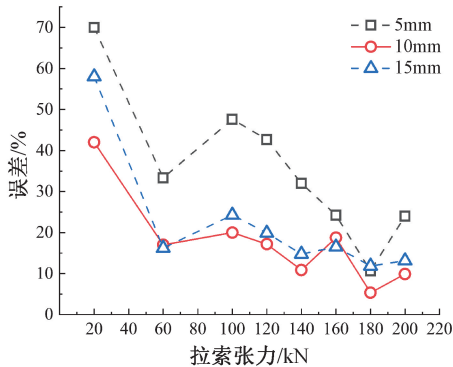


图7 不同横向位移差下测量误差随拉索张力的变化

Fig. 7 Measurement errors varying with changing the cable tension at different lateral displacement differences

综上所述,采用二极差测定法测定索力时,建议取 $\Delta\delta=10\text{mm}$ (对应2次横向位移分别为5,15mm)。

3.3 剥离长度

剥离长度指被测拉索两端的约束间距。当剥离长度较小时,对识别精度的主要影响在于测力仪两侧支点与拉索两侧锚固端的距离较小,进一步引起拉索张力和支点处弯矩的变化,从而引起式(4)计算结果失真。

文献[20,24]分别从剥离长度对拉索张力和支点处弯矩的影响角度推导修正公式,并进行试验验证。虽然角度不同,但2项研究均得到相似结论,即被测索剥离长度至少为测试仪器支点跨度的5倍。对于索结构中的拉索,剥离长度相比混凝土预应力筋更容易满足。除此之外,根据文献[24]的结论,还应满足仪器支点与最近锚固点的距离 >2 倍的仪器支点跨度,因为满足剥离长度后,由拉索伸长引起的拉索张力增量 ΔT 主要与索长增大率(拉索伸长量 ΔL 与拉索绝对长度 $L+\Delta L$ 之比, L 为初始索长)有关,受支点位置影响较小;而支点处弯矩主要与支点位置和物理抗弯刚度有关。

3.4 物理抗弯刚度

物理抗弯刚度为相对影响因素。文献[20]给出不同剥离长度、不同拉索张力下的识别精度对比(见图8)。由图8可知,随着拉索张力不断增大,不

同剥离长度条件下的识别精度均明显提高,因为拉索张力增大提高了几何抗弯刚度的相对占比,使物理抗弯刚度的影响相对降低。文献[20]在进行不同类型、直径和张力拉索的识别对比试验后,得到相似结论。综上可知,拉索直径增大、测试段(仪器两支点间)长细比减小、拉索张力降低等因素,均会相对增大物理抗弯刚度的影响,同时使支点处弯矩影响增大(支点处不可简化为铰接),导致张弦理论不再完全适用。因此,在考虑物理抗弯刚度的影响时,应综合分析上述因素。

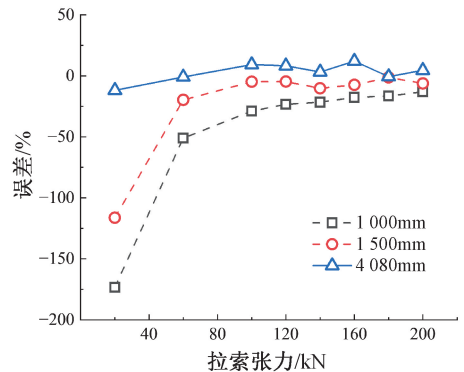


图8 不同剥离长度下测量误差随拉索张力的变化

Fig. 8 Measurement errors varying with changing the cable tension at different stripping lengths

以外包PE护套的钢丝束拉索为例,钢丝束在PE护套压力、两端约束、钢丝间摩擦力等组合作用下具有整体受力的能力。钢丝间摩擦力与钢丝材料类型(摩擦系数差异)、接触面积(受捻制方法、钢丝截面类型影响)、接触面压强(受索力、PE压力、捻制工艺、约束状态等影响)等因素有关^[25-26]。因此,一般难以给出具有明确物理意义的抗弯刚度理论公式。王立新等^[24]基于试验研究和理论分析,采用试凑算法对 $\phi 42.5-130-Z$ 型封闭式钢索物理抗弯刚度进行回归表达。Chen等^[27]、Yu等^[28]虽未区分几何抗弯刚度和物理抗弯刚度,但基于试验研究和数值分析揭示了拉索约束状态、捻制方法、拉索索力等因素对拉索横向刚度的影响机理,并给出精细化数值建模及合理的简化方法。

结合现有测力仪的结构设计、试验研究与工程应用实践,当前基于三点弯曲法研制的测力仪,适用范围为索体直径 $\leq 40\text{mm}$ (公差 $\pm 3\text{mm}$),折算抗弯刚度 $\leq 4.6\text{kN/m}^2$ (按与索体截面等面积的圆钢等效计算),且索力 $\geq 70\text{kN}$ ^[20]。若要进一步拓宽该仪器适用范围,需提升其承载力,并采用合理方法计入索体自身物理抗弯刚度影响。

3.5 PE护套

在服役期 >20 年的索结构中,PE拉索用量较

大,以安全检测和加固维护为目的的索力识别需求逐渐增多,有必要分析 PE 拉索受力特点。以热挤聚乙烯高强钢丝拉索为例,PE 护套对三点弯曲法索力测试精度的影响如下。

3.5.1 PE 护套对横向刚度的贡献

测试时,测试仪器各支撑点直接作用于 PE 护套外表面。因此,被测对象不单是内部钢丝束,而是钢丝束-PE 护套复合结构。该复合结构整体横向刚度实际大于内部钢丝束独自的横向刚度,故测试时施加同一横向张力产生的横向位移变小,所得索力测试值较真实值偏大。

在已知张拉力的情况下,对各种规格的带 PE 护套的短试件开展试验,建立横向张力-横向位移-索力间的关系曲线或修正公式,针对不同类型索建立数据库和索力计算修正项,从而提升索力识别精度。

3.5.2 PE 护套的局部压陷效应

基于三点弯曲法的索力测试仪器在测量索力时,仪器支撑点和横向张力加载点会对 PE 护套表面产生较大集中应力。PE 材料在压力下产生局部塑性变形或压陷,被计入横向位移中,但其并非由索体弯曲引起。以上现象会导致横向位移值偏大,从而使测试结果小于真实值。为减小 PE 护套局部压陷效应造成的测试误差,可使用具有足够曲率半

径和硬度的支撑垫块,减小局部压陷效应。

3.5.3 PE 护套与刚丝束的结合状态

对于服役期较长的 PE 拉索,因索体长期受力或 PE 护套老化、损伤等原因,导致 PE 护套松弛,对内部钢丝束的约束作用减弱,拉索在受到横向张力的初始阶段,PE 护套和钢索间可能存在相对滑移,导致横向刚度测量值比理想测试值偏小。需通过理论分析或试验进一步研究 PE 护套材料服役状态演化规律。在索力识别时,宜先评估 PE 护套与钢丝束的结合状态。

3.5.4 PE 护套温度敏感性

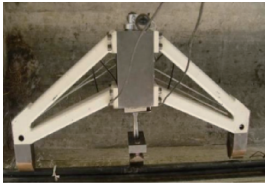


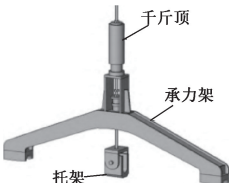
由于 PE 护套弹性模量对温度变化较为敏感,且其热膨胀系数远大于钢材,在炎热气候或阳光直射条件下,PE 护套(尤其是深色护套)弹性模量会显著降低、热变形增大,进而减弱对内部钢丝束的约束作用。有待通过理论分析或试验研究进一步深入探讨该温度效应。在进行索力识别时,宜选取温度变化平稳的时段,以减小温度效应带来的影响。

4 三点弯曲法识别仪器改进

常见三点弯曲法索力识别仪器特点如表 2 所示。针对大直径拉索索力识别仪器的改进需求,需提升仪器刚度、优化支点设计防止索体损伤、改进横向力加载方式、基于物理抗弯刚度和索体变形

表 2 识别仪器特点

Table 2 Characteristics of identification instrument

知识产权所属	型号	量程	成品样式	优点
长安大学和西安力创公司 ^[8,15]	LCZL-50	直径 4~20mm, 张力 ≤190kN(根据论文结论推测)		支点设计适用于混凝土预应力筋或钢绞线,已有基于剥离长度的修正理论,一侧空间占用小
瑞士 PROCEQ 公司	SM55C1/SM150C1	直径 ≤12.7mm, 张力 ≤140kN		读数方便,空间占用面积小
深圳市金象源科技有限公司	SL 系列	直径 10~34mm, 张力 50~300kN		读数方便,多型号适用性广,成品技术稳定
司波等 ^[1]	—	直径 ≤60mm, 张力 50~250kN (已测试范围)		适用于中大直径拉索,千斤顶辅助施加横向力

(长度、截面)对识别理论进行修正等。司波等^[1]使用穿心式千斤顶替代手动施力装置,研发了适用于直径 60mm 拉索识别仪,但仍需进一步优化仪器自重和承载力。部分新技术可为仪器设计提供新思路:①采用拓扑优化技术,引入高性能材料(如高强度钢、复合纤维增强材料、改性聚四氟乙烯等),创新设计仪器结构和构件,在提高强度、跨度的同时保证仪器自重可控,优化支点接触受力状态、防止索体损伤;②使用人工智能算法,实现基于索体类型、温度变化、边界条件、剥离长度、索体自重、空间位置等随机参数的快速修正;③增加无限传输模块,方便与被测结构的检测或监测平台进行数据交互,实现结构实时性能分析和安全预警。

5 结语

1) 本文涉及的 6 类索力识别技术中,仅 3 类可直接用于既有结构,且限制因素较多,仍需进行技术改进。

2) 推荐采用基于二次横张的二级差测定法降低三点弯曲法中因初始误差造成的精度降低,其中二级差可采用 $\Delta\delta = 10\text{mm}$ (对应 2 次横向位移分别为 5, 15mm)。

3) 采用三点弯曲法时,剥离长度宜至少为测试仪器支点跨度的 5 倍,否则需结合拉索张力、长度变形和物理抗弯刚度进行识别理论修正。

4) PE 护套在拉索横向刚度、局部压陷效应、与钢丝束结合状态及温度敏感性等方面,影响三点弯曲法的索力识别精度,可通过建立钢丝束-PE 护套整体受力标准数据库、优化仪器垫块、合理选择测试条件等方法提升识别精度。

5) 三点弯曲法索力识别仪的改进宜综合考虑结构刚度、支点接触、横向力加载、物理抗弯刚度、边界条件、截面类型等因素,积极引入新材料和智能算法,提升仪器识别精度和效率,拓展仪器适用性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 朱铁城. 拉索参数识别的多频率法研究与索力无线监测系统开发[D]. 杭州:浙江大学,2013.
ZHU T C. The research of multi-order frequency method of identification of cable parameters and development of wireless monitoring system of cable force [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013.
- [3] 李国强,魏金波,张开莹. 考虑边界弹性约束的索力动力检测

理论与试验研究[J]. 建筑结构学报,2009,30(5):220-226.

LI G Q, WEI J B, ZHANG K Y. Theoretical and experimental study on cable tension estimation by vibration method accounting for rotational end restraints [J]. Journal of building structures, 2009, 30(5): 220-226.

- [4] 中国建筑科学研究院. 索结构技术规程:JGJ 257—2012[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
China Academy of Building Research. Technical specification for cable structures: JGJ 257—2012 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2012.
- [5] 刘海波,张祥,刘彦坤,等. 电磁超声单向应力横纵波联合测量方法研究[J]. 机械设计与制造,2021(9):241-246.
LIU H B, ZHANG X, LIU Y K, et al. Study on combined measurement method of electromagnetic ultrasonic unidirectional stress transverse and longitudinal waves [J]. Machinery design & manufacture, 2021(9): 241-246.
- [6] CHAKI S, BOURSE G. Guided ultrasonic waves for non-destructive monitoring of the stress levels in prestressed steel strands [J]. Ultrasonics, 2009, 49(2): 162-171.
- [7] BARTOLI I, SALAMONE S, PHILLIPS R, et al. Use of interwire ultrasonic leakage to quantify loss of prestress in multiwire tendons [J]. Journal of engineering mechanics, 2011, 137(5): 324-333.
- [8] 刘增华,刘溯,吴斌,等. 预应力钢绞线中超声导波声弹性效应的试验研究[J]. 机械工程学报,2010,46(2):22-27.
LIU Z H, LIU S, WU B, et al. Experimental research on acoustoelastic effect of ultrasonic guided waves in prestressing steel strand [J]. Journal of mechanical engineering, 2010, 46(2): 22-27.
- [9] 赵华赞,裘进浩,顾娜,等. 弹性波在受拉钢绞线中传播的耦合与衰减[J]. 压电与声光,2014,36(5):828-832.
ZHAO H Y, QIU J H, GU N, et al. The coupling and attenuation of elastic waves propagating in pulled multi-wire strands [J]. Piezoelectrics & acoustooptics, 2014, 36(5): 828-832.
- [10] 黄琦,钱骥,张赋昱. 奇异值熵与支持向量机融合导波钢绞线张力识别[C]//第九届全国结构抗振控制与健康监测学术会议论文集,2023.
HUANG Q, QIAN J, ZHANG F Y. Identification of tension in guided wave steel strands by fusion of singular value entropy and support vector machine [C] // Proceedings of the 9th National Academic Conference on Structural Vibration Control and Health Monitoring, 2023.
- [11] 李浩华,陈华鹏,罗伟兵,等. 钢绞线导波传播特性研究[J]. 工程力学,2024,41(S1):98-103.
LI H H, CHEN H P, LUO W B, et al. Research on propagation characteristics of guided waves in steel strands [J]. Engineering mechanics, 2024, 41(S1): 98-103.
- [12] 余道华,李扬. 基于磁通量法的钢索拉力测量实验研究[J]. 电子质量,2008(11):25-27.
YU D H, LI Y. Electromagnetism method of stress measurement in steel [J]. Electronics quality, 2008(11): 25-27.
- [13] 宋杰,陈鲁,张其林,等. 磁通量法在预应力悬挂结构拉索施工中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2009,29(1):86-91.

- SONG J, CHEN L, ZHANG Q L, et al. Application of magneto-elastic method to tension measurement of prestressed cables in suspended structure [J]. *Journal of vibration measurement & diagnosis*, 2009, 29(1): 86-91.
- [14] 南秋明. 光纤光栅测力环在悬索桥索力监测中的应用[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(3): 64-68.
- NAN Q M. Application of FBG force-testing ring in monitoring cable force of suspension bridge [J]. *Journal of highway and transportation research and development*, 2010, 27(3): 64-68.
- [15] 王天鹏, 周果子. 基于光纤光栅测力环的桥梁拉索索力监测及温度补偿研究[J]. *中外公路*, 2017, 37(3): 112-117.
- WANG T P, ZHOU G Z. Research on cable force monitoring and temperature compensation of bridge cable based on fiber Bragg grating force measuring ring [J]. *Journal of China & foreign highway*, 2017, 37(3): 112-117.
- [16] 贾俊峰, 侯智献, 王蕾, 等. 光纤光栅传感器研发及其在土木工程中的应用进展[J]. *防灾科技学院学报*, 2024, 26(3): 9-21.
- JIA J F, HOU Z X, WANG L, et al. Progress of fiber grating sensor development and its application in bridge engineering[J]. *Journal of Institute of Disaster Prevention*, 2024, 26(3): 9-21.
- [17] 张子颀, 李向红, 淡丹辉. 交通基础设施智能监测传感器发展与展望[J]. *施工技术(中英文)*, 2025, 54(20): 12-21, 59.
- ZHANG Z Y, LI X H, DAN D H. Development and prospect of intelligent monitoring sensors for transportation infrastructure[J]. *Construction technology*, 2025, 54(20): 12-21, 59.
- [18] 王旭泽, 李国东, 王心刚, 等. 新型工程化光纤光栅索力监测传感器的研制[J]. *河南科学*, 2023, 41(6): 793-800.
- WANG X Z, LI G D, WANG X G, et al. Development of engineering clamp cable force meter of FBG sensor[J]. *Henan science*, 2023, 41(6): 793-800.
- [19] 姚文斌, 程赫明. 用“三点弯曲法”原理测定钢丝绳张力[J]. *实验力学*, 1998, 13(1): 79-84.
- YAO W B, CHENG H M. Determination of wire rope tension by means of three points loading flexure[J]. *Journal of experimental mechanics*, 1998, 13(1): 79-84.
- [20] 郭明渊. 在役张弦结构索力测试的理论分析与试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.
- GUO M Y. Theoretical analysis and experimental study on cable tension test of cable-supported string structure [D]. Tianjin: Tianjin University, 2017.
- [21] 郭琦. 复杂预应力体系梁式结构有效预应力预测理论与方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
- GUO Q. Theory and methodology of predication on effective prestress for beam structures with complicated prestressing systems [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [22] 郑周练, 刘长江, 龚文川, 等. “三点弯曲法”在线检测缆索张力力学模型[J]. *土木建筑与环境工程*, 2009, 31(2): 29-32.
- ZHENG Z L, LIU C J, GONG W C, et al. Mechanical model with on-line measuring the cable tension with three-point bending method [J]. *Journal of civil, architectural & environmental engineering*, 2009, 31(2): 29-32.
- [23] 李战利. 钢线绳张力在线检测原理及应用研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- LI Z L. Theory of steel cable tension on real-time detection and application [D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [24] 王立新, 杨桂生. 钢索张力测定的研究[J]. *力学与实践*, 1998, 20(6): 42-44.
- WANG L X, YANG G S. The measurement of the tension in wireropes [J]. *Mechanics in engineering*, 1998, 20(6): 42-44.
- [25] 武晓凤. 拉索弯曲性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2014.
- WU X F. Research on bending performance of cable [D]. Tianjin: Tianjin University, 2014.
- [26] 郭明渊, 陈志华, 刘红波, 等. 拉索索力测试技术与抗弯刚度研究进展[J]. *空间结构*, 2016, 22(3): 34-43.
- GUO M Y, CHEN Z H, LIU H B, et al. Research progress of cable force test technology and cable flexural rigidity [J]. *Spatial structures*, 2016, 22(3): 34-43.
- [27] CHEN Z H, YU Y J, WANG X D, et al. Experimental research on bending performance of structural cable [J]. *Construction and building materials*, 2015, 96: 279-288.
- [28] YU Y J, CHEN Z H, LIU H B. Advanced approaches to calculate recovery length and force redistribution in semi-parallel wire cables with broken wires [J]. *Engineering structures*, 2017, 131: 44-56.