

文章编号: 1001-4888(2019)03-0443-08

柔索构形与张力的测试装置和试验研究^{*}

邓旭辉¹, 刘明龙¹, 宋晓东¹, 郭小刚^{1,2}

(1. 湘潭大学土木工程与力学学院, 湘潭 411105; 2. 长沙矿冶研究院、深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室, 长沙 410012)

摘要: 现代工程中, 柔索结构的应用日益广泛, 简单的理论分析难以满足复杂工程的需要, 柔索静动态空间构形与张力测试技术对柔索理论研究和工程应用具有重要的意义, 而目前尚没有一套完备的测试装置和技术标准。针对上述情况, 本文设计并制造了柔索空间构形与张力测试装置, 并通过不锈钢圆环链条的静态空间构形和张力测试试验, 与悬链线理论的计算结果进行对比, 验证测试装置的可靠性与稳定性。试验结果表明: 所建立的装置可以满足柔索的空间构形与张力测试的需要, 结果准确, 精度较好。证明该装置可以为柔索找形、空间构形、张力、运动轨迹和极限状态等柔索力学特性研究提供试验支持。

关键词: 柔索; 构形; 张力; 测试装置; 悬链线理论

中图分类号: TP23

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-218

0 引言

柔索结构在现实工程中应用广泛, 比如悬索屋盖、悬索桥和斜拉桥、工程索道、输电线、系泊等, 但随着现代工程的日益复杂和精细化, 原有的简化设计方法越来越不满足工程应用的需要, 如何精确控制柔索结构的构形和张力是成功应用的关键, 这就需要对柔索结构的理论和试验进行进一步深化研究。近年来, 关于柔索结构的研究日益活跃。周新年^[1]讨论并比较了四种悬索模型理论, 基于抛物线理论提出悬索初始构形、一个集中力下的悬索构形和张力等工程索道与柔性吊桥应用理论与设计。沈世钊等^[2]基于抛物线模型给出了单索的解析计算方法。唐茂林等^[3]用分段悬链线法计算悬索桥主缆线形, 认为主缆在吊索等集中力作用下, 不是全跨悬链线, 而是吊索之间的分段悬链线。周世良等^[4]基于弹性悬链线理论对趸船系留设施缆绳和锚链系缆处张力进行分析, 并且考虑了趸船运动对张力变化的影响; 同时指出, 针对柔索结构建立的模型适用性和正确性, 模型与真实状态的力学特性的差别有多大, 需要通过试验来验证。目前, 针对线缆构形和受力试验装置研究较多, 但装置尺寸小, 空间局限性大, 本文旨在建立一套结构简单、适应性广的柔索、系绳、线缆构形和张力测试装置。游斌弟等^[5]基于弹性细杆思想, 建立大变形柔性线缆动力学模型, 分析大变形线缆的力学特性, 以线缆线芯为研究对象, 基于电测法思想, 将电阻应变片对贴在弯曲线缆测量点的内外侧, 得到测量点的应变值与曲率值的关系, 从而通过测量应变得到一些离散点测量点的曲率, 然后得到拟合曲线, 验证所建模型的正确性。刘检华等^[6]基于弹性细杆力学模型, 建立活动线缆物性模型与运动仿真方法, 为了验证线缆物理特性模型与运动仿真, 研发了活动线缆位姿测量系统, 基于双目视觉和图像处理技术, 通过线缆外表面标记线的转角确定截面扭转变形, 进而对线缆变形和运动进行测量, 试验验证了线缆运动趋势与试验数据基本吻合。张永涛等^[7]为了验证基于悬链线理论建立的自然悬挂状态下线缆模型是否正确, 提出线缆在悬挂状态下形状

^{*} 收稿日期: 2017-10-21; 修回日期: 2017-11-24

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51434002)及大洋协会十二五重大项目(DY125-14-T-03)资助

通讯作者: 邓旭辉(1975—), 男, 副教授。主要研究领域: 工程结构设计与分析, 动力学与控制。Email: dengbh@xtu.edu.cn

和张力测试装置的初步模型,采用步进电机传动,自动实现线缆两端点水平面内两个自由度运动与手动垂直上下的运动,用数码相机拍摄线缆形状,力传感器测量线缆两端张力。

针对柔索结构的广泛工程运用价值,柔索结构理论研究的需要,以及目前相关试验装置研发的匮乏,本文开展了自然悬挂状态或受力状态下柔索构形和张力的测试装置研究,进行了基于悬链线理论试验验证、试验数据分析、装置合理性试验分析等方面的工作。本文研制的测试装置也可测量系绳、线缆、柔性管线的构形和端部约束力。

1 测试装置的构成和工作原理

本研究设计了柔索构形与张力测试装置,可满足柔索结构的足尺或小比例的试验要求。该装置可测试在自然悬挂状态,任意位置受集中力状态以及端点运动状态下柔索结构的构形和张力。图 1 是柔索结构构形与张力测试装置^[8],测试装置材质为挤压型铝材,除向上施力装置外,测试装置约长 2280mm、宽 1087mm、高 1500mm,向上施力装置约高 658mm、长 2200mm。该测试系统由装置平台、滑台、步进电机(57HS85,86HS85)^[9]、运动控制系统、向上施力装置、s 型拉压力传感器(CDK HF-2)、双目摄影测量仪、计算机构成。装置平台通过脚支座支撑于地面,还可以通过装置平台下方万向轮在地面移动;滑台和装置平台螺栓连接;滑台和滑台用连接件和螺栓连接;步进电机通过联轴器与滑台中的滚珠丝杠连接运动控制系统集成在控制箱内;向上施力装置通过固定在装置平台导轨支撑。



图 1 柔索结构构形与张力测试装置

Fig. 1 Flexible cable configuration
and tension testing device

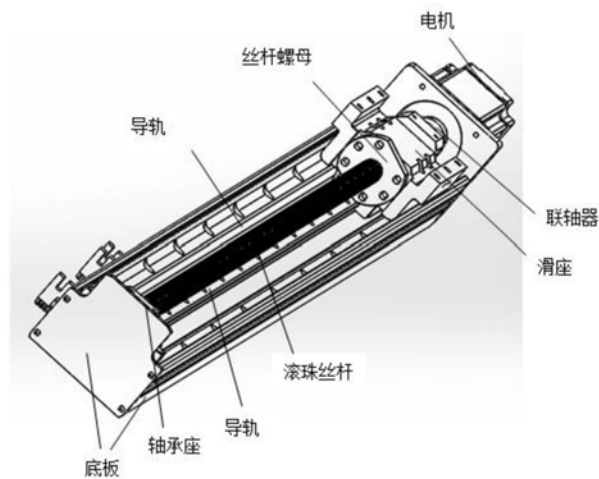


图 2 滑台

Fig. 2 Sliding table

柔索构形与张力测试装置中的滑台^[10]由滚珠丝杆、丝杆螺母副、导轨、滑座、轴承座、固定板等组成,如图 2 所示。试验装置包含 6 组位置对称的滑台,滑台一端通过联轴器连接相配套的 6 部步进电机,从而可实现竖向滑台上滑座上下、左右、前后的空间运动。运动控制系统(HD-V37, CARD-V37)包括 PLC(Programmable Logic Controller)、驱动器(DM542, DMA860H)、触摸屏、电源、继电器等。在触摸屏上设定移动距离、速度和方向,通过 PLC 运动控制器的运算产生脉冲、方向信号,控制步进电机的驱动电源,达到对距离、速度、方向控制的目的^[11]。步进电机驱动和滚珠丝杠传动的方式使步进电机的角位移转化为丝杠螺母副的直线位移,比如当竖向步进电机带动丝杠逆时针旋转,则竖向滑台上的丝杠螺母副会被拖动受到向下运动的力,从而带动滑座沿导轨实现往下的运动。反之,当步进电机运动方向相反,则滑座向上运动^[11]。6 组滑台有效行程都为 800mm,重复定位精度为 $\pm 0.02\text{mm}$ 。这样既实现了对柔索两端点进行精确定位调整柔索两端点的水平距离和垂直高度差,实现不同位置构形,又能实现柔索两个端点的三维空间运动,从而为进行柔索力学特性测量提供条件。

该测试装置可通过向上施力装置(图1测试装置的上部结构)对被测物体施加任意位置多个垂直向上的集中力。向上施力装置采用方框架、直线镀铬不锈钢光轴、Gcr15 钢球轴承和滑轮的组合,方框架通过滑块连接到固定在装置平台的导轨上,可前后调节位置,方框架横梁上安装钢刻度尺(精度 1mm),作为轴承运动的标定;直线光轴用轴承座固定在横框架上;滑轮固定在 Gcr15 钢球轴承上,轴承可在直线光轴上左右运动。通过细绳绕过滑轮一端固结柔索,另一端悬挂增砝砝码,施加垂直向上的集中力。砝码为 M1 级不锈钢带挂盘增砝 c 形砝码,精度 0.1g。本测试装置选用的直线镀铬不锈钢光轴和轴承之间为滚动摩擦,在蓖麻油润滑下,摩擦系数可达到 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 量级。总之,通过滑轮轴承体系改变了力的方向,解除了直线光轴对轴承的水平约束,从而使被测物体始终受垂直向上的力。

根据传感器的最大过压能力、精度、价格与压力量程的关系以及测试装置特点^[12],本测试装置选择 s 型拉压力传感器,量程 5N,精度 0.001N。测试装置的两竖向滑台滑座上分别安装 s 型拉压力传感器,柔索安装在两 s 型拉压力传感器的吊钩、吊环或卡箍上。两部 s 型拉压力传感器可以测得柔索两端点垂向约束力,计算机负责绘出力的变化曲线图及计算其他力学参数。

测试装置通过双目摄影测量仪采集被测物体的构形(空间位置和姿态)。选用的双目摄影测量仪图形识别精度为 0.01 像素。双目摄影测量主要基于交汇计算^[13],利用计算机立体视觉和摄影测量学相关理论,结合图像处理与立体交汇来进行位姿求解。不需要直接接触被测物体,不用在被测物体上额外增加设备,使被测目标的运动更真实客观。由不同位置的两台相机拍摄被测物体,分析空间点在两幅图像中的对应点,利用线-线交汇等方法获得该点的三维坐标值,以获得被测物体的位置、姿态及形变。计算机负责控制图像采集对图像进行处理,测量软件可生成输出的测量结果为跟踪点坐标文本文件,因被测物体为由不锈钢圆环连接而成的柔索,选择圆环的连接结点为跟踪点,提取圆环结点坐标,绘制柔索的中心线。

2 悬链线理论(均布和集中载荷作用下的悬链线构形与张力分析)

柔索在自由悬挂状态(亦称初始构形状态)下,有如下假设^[2]:完全柔性,索仅承受张拉,任意截面不具备抗弯能力,即截面弯矩为零;不可拉伸性,悬链线受作用力时长度保持不变,不考虑泊松比效应。当柔索自重沿索轴方向均匀分布时,任意挠度的悬链线解为^[2]:

$$y = \frac{h}{q} [\cosh(\alpha + \frac{q}{h}x) - \cosh\alpha] \quad (1)$$

其中, h 是沿悬链线切线方向的水平张力,且恒定不变; α 是 a 左端点斜率的广义倾角,左端点 a 的斜率为 $\sinh\alpha$; q 为线重度。

令 $l = x_b - x_a$ 表示悬链线左右两端的相对水平距离,简称水平距离, $c = y_b - y_a$ 表示悬链线左右两端点的垂直距离。坐标原点建立在悬链线左端点 a ,右端点为 b , y 轴向上, x 轴向右。

方程(1)所代表的曲线是一族悬链线,需求解出水平张力 h 后,才能确定悬链线方程。为了验证试验结果,本文采用文献[16]给出的单参数悬链线方程的解与试验结果进行对比分析。 l, c, s 为悬链线的解。

广义倾角 α 的计算公式:

$$\alpha = \sinh^{-1} \frac{c}{\sqrt{s^2 - c^2}} - \frac{ql}{2h} \quad (2)$$

经简化得到隐含水平张力的非线性超越方程:

$$\sinh \frac{l}{2r} = \frac{\sqrt{s^2 - c^2}}{2r} \quad (3)$$

其中 $r = h/q$,通过上述非线性超越方程,二分法编程求解得 h ,代入方程(2)求解出广义倾角 α ,再代入方程(1)求得悬链线构形曲线。

两端点等高悬链线中点受集中力 $2W$ 时应满足下面的超越方程^[16]:

$$\sinh \frac{l}{\sqrt{s^2 - c^2}} \frac{c}{\sqrt{u^2 - c^2}} = \frac{c}{\sqrt{u^2 - c^2}} \quad (4)$$

为使方程简洁,原两端点等高悬链线中点作用的垂直向上集中力为 $2W$ 。取右边悬链线为研究对象。右边悬链线端点受 $1W$ 的集中力,相对水平距离为 l ,索长为 s 。整个悬链线的索长为 $2s$,水平距离为 $2l$ 。 c 是右边悬链线右端点与左端点的高差。悬链线受中点向上集中力时为 $u=2W/q-s$ 。

水平张力 h 为:

$$h = \frac{q}{2c} \sqrt{s^2 - c^2} \sqrt{u^2 - c^2} \quad (5)$$

通过方程(4)利用二分法编程求得右端点与左端点的高差 c ,代入方程(5)得悬链线受中点向上集中力时水平张力 h ,代入方程(2)得 α ,再代入方程(1)联立相应几何边界条件,得中点向上集中力作用下悬链线构形曲线。

3 试验方法及试验验证

本文通过分析对比一系列试验结果和悬链线理论解,验证测试装置的可用性和稳定性,来评估该装置能否满足力学模型研究的需要。

3.1 试验方法

试验前根据试验要求用电子天平(精度 0.01g)测量柔索的质量,用刻度尺(精度 1mm)测量柔索长度。检查开启并校核测试装置,根据研究需要对运动控制系统设置速度、位移等参数。

启动运动控制系统,进行试验,最后对测量数据进行分析 and 对比。

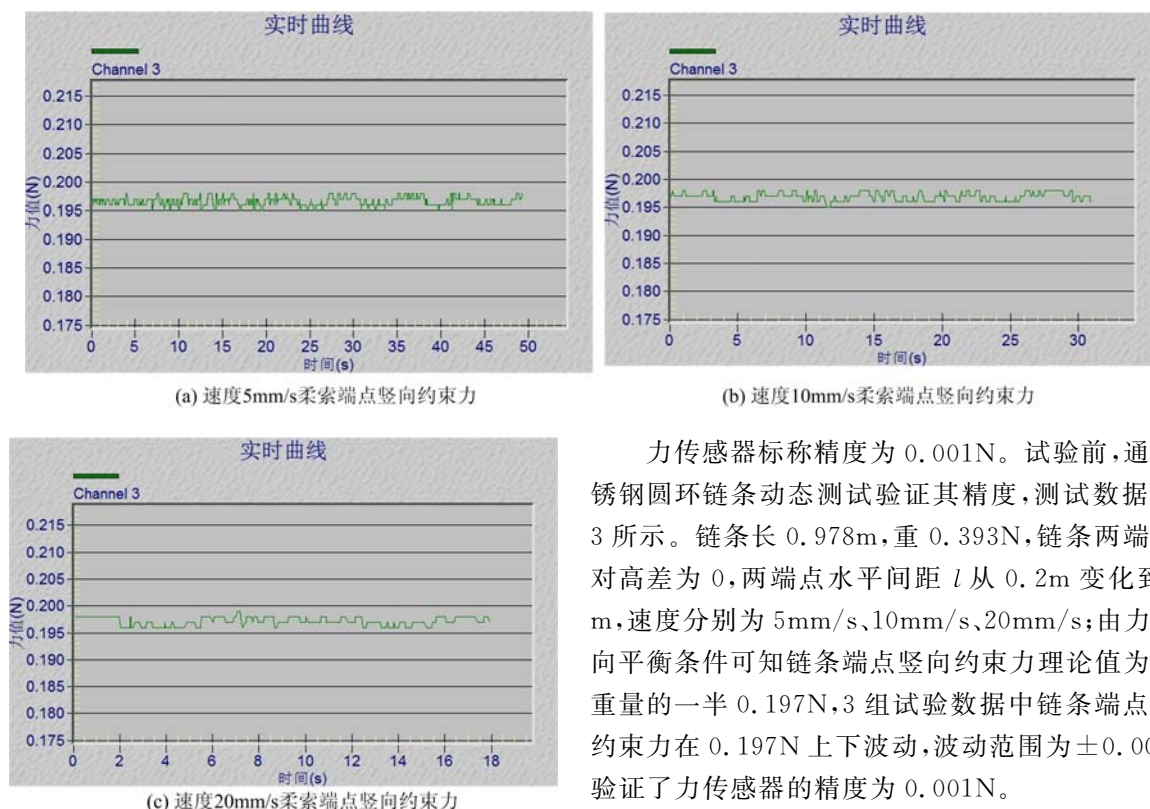


图 3 力传感器动态测试数据

Fig. 3 Dynamic test data of force sensor

力传感器标称精度为 0.001N 。试验前,通过不锈钢圆环链条动态测试验证其精度,测试数据如图 3 所示。链条长 0.978m ,重 0.393N ,链条两端点相对高差为 0 ,两端点水平间距 l 从 0.2m 变化到 0.4m ,速度分别为 5mm/s 、 10mm/s 、 20mm/s ;由力的竖向平衡条件可知链条端点竖向约束力理论值为链条重量的一半 0.197N ,3 组试验数据中链条端点竖向约束力在 0.197N 上下波动,波动范围为 $\pm 0.001\text{N}$,验证了力传感器的精度为 0.001N 。

自然悬挂下柔索构形与张力的测量过程如下:用触摸屏设置 x 轴向两步进电机运动参数,调节柔索两端点水平距离(l);设置 z 轴向步进电机运动参

数,调节垂直高度差(c);设置 y 轴向步进电机运动参数,调节柔索所在平面,使柔索构形处于图像测量采集区内。计算机中提取 s 型拉压力传感器测得的柔索两端点的竖向约束力和图像数据采集得到的两端点的倾角,计算得柔索的张力;由计算机处理采集的柔索构形图片,导出空间坐标值,绘制出构型曲线;分别把张力值和构形曲线试验值与仿真模型计算值或理论值进行比较分析。集中力作用下柔索构形与张力的测量,除应按照上述方法操作外,还应通过向上施力装置,利用刻度尺和轴承上的指针,在指

定位置施加垂直向上的集中力。垂直向下集中力的施加可直接在相应位置通过悬挂砝码,也可以在柔索上多点悬挂砝码模拟均布力。

本文的测试装置及试验方法可以通过选用不同材料的被测物体,不同长度、横截面的被测物体,调整两端点的水平距离、垂直高度差和前后距离,调整砝码重量,设置不同的牵引速度,规划两端点的运动轨迹,来测量柔索的位置、姿态和两端约束力。

3.2 基于悬链线理论静力试验结果验证

为了测试试验装置的精度和可靠性,柔索特选用轻质的细不锈钢圆环链条,链条长 s 为 1.005m,线重度 q 为 0.401N,圆环宽 5.5mm,圆环长 7mm,线粗 1.4mm。在工程应用和试验研究的范围内选择做 6 组静态试验,测量其构形和张力,并用悬链线理论值进行验证。1~3 号试验测量两端点自然悬挂状态下柔索构形和张力,柔索两端点相对高差为零,即 $c=0$,改变两端点水平距离 l ,分别为 0.201m、0.5025m、0.804m。

按照上述试验方法,1~3 号试验测得的柔索构形和柔索悬链线理论解如图 4 所示。1 号试验测得的柔索水平张力试验值和理论值相对偏差为 4.20%;2 号试验测得的柔索水平张力试验值和理论值相对偏差为 1.70%;3 号试验测得的柔索水平张力试验值和理论值相对偏差为 1.59%。具体水平张力计算结果见表 1。

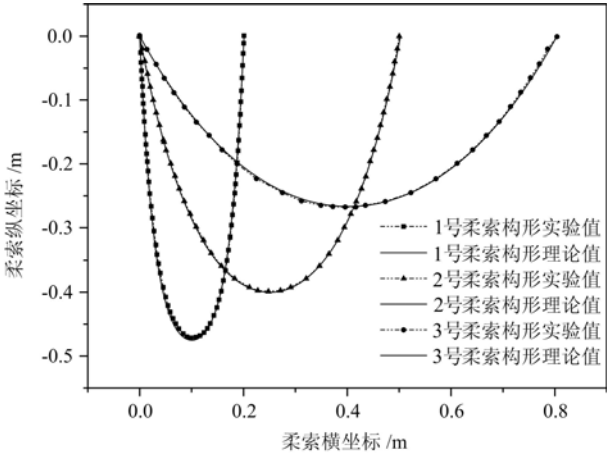


图 4 1~3 号柔索构形试验值和理论值的比较

Fig. 4 The comparison of theoretical and experimental values of flexible cable configuration in No. 1~3 experiment

表 1 1~3 号柔索试验数据分析

Tab. 1 The analysis of experimental data of No. 1~3 cable

	柔索左端点 垂向约束力 F_a/N	柔索右端点 垂向约束力 F_b/N	柔索水平 张力试验值 h_1/N	柔索水平 张力理论值 h_2/N	水平张力 绝对偏差 $\Delta h/\text{N}$	水平张力 相对偏差 dh
1 号	0.202	0.202	0.0118	0.0113	0.0005	4.20%
2 号	0.202	0.202	0.0471	0.0463	0.0008	1.70%
3 号	0.202	0.202	0.1385	0.1363	0.0022	1.59%

注:水平张力绝对误差 $\Delta h=h_1-h_2$,水平张力相对误差 $dh=(h_1-h_2)/h_1$ 。

4~6 号试验:不锈钢圆环链条长(s)为 1.005m,线重度(q)为 0.4011N,半径为 1.4mm。柔索两端点相对垂直高差为 0m,柔索两端点水平距离为 0.5025m,柔索中点作用向上的集中力分别为 0.1N、0.2N、0.3N。该组试验测试不同集中力水平下的柔索构形与水平张力。

按照上述试验方法,4~6 号试验测得的柔索构形和悬链线理论解如图 5 所示。4 号试验测得的柔索水平张力试验值和理论值相对偏差为 1.15%;5 号试验测得的柔索水平张力试验值和理论值相对偏

差为 2.53%;6 号试验测得的柔索水平张力试验值和理论值相对偏差为 4.82%;通过分析 6 组试验结果,本文的测试装置具有较高精度和可靠性,水平张力测试误差在 5%以内。误差主要有以下几个原因引起:(1)圆环链条长度测量误差,用刻度尺测量的链条长度为链条的原始长度,取三次测量的平均值,误差 $\pm 1\text{mm}$ 。圆环链条是不锈钢材质,重量很轻,在自然悬挂下其伸长可忽略不计,即不可伸长假设成立。(2)测试装置在调节柔索两端点水平距离、两端点垂直高差时,存在定位误差 $\pm 0.02\text{mm}$;另外两部测力计固定在竖向滑台滑座上,存在安装误差,不能保证完全对称。(3)两部测力计的精度为 0.001N,水平张力理论值和试验值存在一定偏差。(4)用系绳固定在圆环上,利用砝码施加向上的力,在力的施加过程中,力的作用点位置会稍有偏移,带来水平张力计算和构形测量上的误差。当柔索两端点水平距离 l 越小,柔索端点水平约束力越小,使得水平张力测量误差变大;当柔索所受中点向上集中力变大,柔索两端点约束力越小,水平张力测量误差越大。通过试验得出,除了曲线曲率最小处和尖点处测量误差较大外,曲线其他部分和理论值基本吻合,最大误差控制在 3%内。具体水平张力计算结果见表 2。

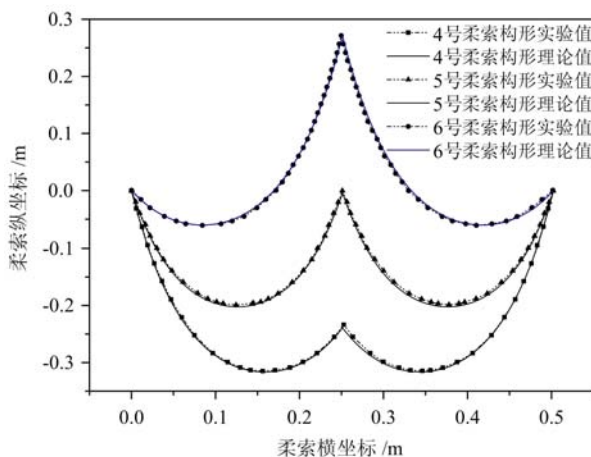


图 5 4~6 号柔索构形试验值和理论值的比较

Fig. 5 The comparison of theoretical and experimental values of flexible cable configuration in No. 4~6 experiment

表 2 4~6 号柔索试验数据分析

Tab. 2 The analysis of experimental data of No. 4~6 cable

	柔索左端点 垂向约束力 F_a/N	柔索右端点 垂向约束力 F_b/N	柔索中点 所受集中力 W/N	柔索水平 张力试验值 h_1/N	柔索水平 张力理论值 h_2/N	水平张力 绝对偏差 $\Delta h/\text{N}$	水平张力 相对偏差 dh
4 号	0.153	0.153	0.1	0.0262	0.0259	0.0003	1.15%
5 号	0.102	0.102	0.2	0.0237	0.0231	0.0006	2.53%
6 号	0.051	0.051	0.3	0.0290	0.0276	0.0014	4.82%

注:水平张力绝对误差 $\Delta h = h_1 - h_2$, 水平张力相对误差 $dh = (h_1 - h_2)/h_1$ 。

4 结 论

经过试验值与悬链线理论值的对比验证,本文的测试装置精度高,可靠性好。试验构形曲线和理论构形曲线能高度重合,水平张力试验值和水平张力理论值相对误差在 5%以内,精度较好。测试装置的运动系统,力传感器和图像采集装置满足试验需求,测试装置和试验方法能满足柔索构形和端部约束力测试的需要。

本文测试装置的可调参数包括:不同材料和尺度的柔索、系绳、线缆、柔性管线等,柔索两端点的水平距离、高差、速度、运动轨迹,任意位置施加垂向力。该测试装置可为柔索等空间构形、运动轨迹规划和张力或者端部约束力等特性研究提供试验支持。

参考文献:

- [1] 周新年. 工程索道与柔性吊桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008 (ZHOU Xinnian. Engineering ropeway and flexible suspension bridge[M]. Beijing: China Communication Press, 2008 (in Chinese))
- [2] 沈世钊, 徐崇宝, 赵臣, 等. 悬索结构设计(第2版)[M]. 北京: 建筑工业出版社, 2006 (SHEN Shizhao, XU Chongbao, ZHAO Chen, et al. Design of cable structures(2nd Edition)[M]. Beijing: Construction Industry Press, 2006 (in Chinese))
- [3] 唐茂林, 强士中, 沈锐利. 悬索桥成桥主缆线形计算的分段悬链线法[J]. 铁道学报, 2003, 25(1):87-91 (TANG Maolin, QIANG Shizhong, SHEN Ruili. Segmental catenary method of calculating the cable curve of suspension bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2003, 25(1):87-91 (in Chinese))
- [4] 周世良, 李泳龙, 李怡, 等. 基于弹性悬链线理论的斜坡式码头趸船系留设施受力计算方法[J]. 水运工程, 2014, 43(1):70-75 (ZHOU Shiliang, LI Yonglong, LI Yi, et al. Calculation method of force on mooring facilities attached to pontoon for sloping wharf based on elastic catenary theory[J]. Port & Waterway Engineering, 2014, 43(1):70-75 (in Chinese))
- [5] 游斌弟, 郑天骄, 陈军, 等. 拖拽下大变形柔性缆绳力学特性分析与测试[J]. 机械工程学报, 2015, 51(23):36-45 (YOU Bindi, ZHENG Tianjiao, Chen Jun, et al. Analyses and tests on mechanical properties of dragging flexible cables with large deformation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(23):36-45 (in Chinese))
- [6] 刘检华, 赵涛, 王春生, 等. 虚拟环境下的活动线缆物理特性建模与运动仿真技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9):117-124 (LIU Jianhua, ZHAO Tao, WANG Chunsheng, et al. Motional cable harness physical characteristic oriented modeling and kinetic simulation technology in virtual environment. [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(9):117-124 (in Chinese))
- [7] 张永涛. 基于悬链线理论的线缆建模和仿真研究[D]. 南京航空航天大学, 2013 (ZHANG Yongtao. Research on modeling and simulation of cable based on the theory of catenary[D]. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013 (in Chinese))
- [8] 邓旭辉, 刘明龙, 郭小刚, 等. 一种静动态柔索张力与空间构形测试装置:中国专利[P]. 201721185261.0, 2017 (DENG Xuhui, LIU Minglong, GUO Xiaogang, et al. A device of test for flexible cable tension and space configuration in static or dynamic condition; Chinese patent[P]. 201721185261.0, 2017 (in Chinese))
- [9] 牛雪娇. 精密运动滑台结构及运动控制研究[D]. 北方工业大学, 2016 (NIU Xuejiao. The research of precision motion sliding table structure and motion control[D]. North China University of Technology, 2016 (in Chinese))
- [10] 廖伟强, 何佳兵, 李丽秀, 等. 步进电机驱动滚珠丝杠传动分析与应用[J]. 机械传动, 2014, 38(12):171-173 (LIAO Weiqiang, HE Jiabing, LI Lixiu, et al. Analysis and application of stepper motor driven ball screw[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2014, 38(12):171-173 (in Chinese))
- [11] 王彦军, 李增生. 基于 PLC 的步进电机控制[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(5):1077-1079, 1087 (WANG Yanjun, LI Zengsheng. The control of the stepping motor basing on PLC [J]. Science Technology and Engineering, 2011, 11(5):1077-1079, 1087 (in Chinese))
- [12] 凌永发, 王杰. 压力传感器的选择与应用[J]. 云南民族学院学报(自然科学版), 2003, 12(3):192-194 (LING Yongfa, WANG Jie. The selection and appliance of the force transducer[J]. Journal of Yunnan University for Nationalities(Natural Sciences Edition), 2003, 12(3):192-194 (in Chinese))
- [13] 杨阳. 基于模型的双目位姿测量方法研究与实现[D]. 西安电子科技大学, 2015 (YANG Yang. Research and implementation on pose measurement using double camera based on object model[D]. Xidian University, 2015 (in Chinese))
- [14] 王朝阳. 数字图像相关方法的准确度与速度增强[J]. 实验力学, 2011, 26(5):632-638 (WANG Chaoyang. On the accuracy and speed enhancement of digital image correlation technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(5):632-638 (in Chinese))
- [15] 牛永强, 胡秋实, 闫德莹, 等. 基于数字图像体相关的物体内部三维位移场分析[J]. 实验力学, 2011, 26(3):247-253 (NIU Yongqiang, HU Qiushi, YAN Deying, et al. Internal 3D displacement analysis using digital image volumetric correlation method[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2011, 26(3):247-253 (in Chinese))
- [16] 郭小刚, 周涛, 金星, 等. 水平悬链线中点集中力作用下的非线性分析及计算[J]. 计算力学学报, 2018, 35(4):

514—520 (GUO Xiaogang, ZHOU Tao, JIN Xing, et al. The nonlinear analysis and computation on horizontal catenary midpoint under concentrating force[J]. Journal of Computational Mechanics, 2018, 35(4):514—520 (in Chinese))

On the configuration and tension testing device of flexible cable and its experimental study

DENG Xu-hui¹, LIU Ming-long¹, SONG Xiao-dong¹, GUO Xiao-gang^{1,2}

(1. College of Civil Engineering and Mechanics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2. Changsha Research Institute of Mining & Metallurgy, State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep-Sea Mineral Resources, Changsha 410012, China)

Abstract: In modern engineering, the application of flexible cable structure is becoming more and more extensive and complex, and simple theoretical analysis is difficult to meet the needs of complex engineering. The static and dynamic spatial configuration and tension measurement techniques of flexible cables are very significant to study of flexible cable theory and engineering application, but nowadays there is not a complete set of testing devices and technical standards. In order to solve this problem, space configuration and tension testing device of flexible cable was developed in authors' laboratory. The static spatial configuration and tension test of stainless steel ring chain are compared with the calculation results of catenary theory to verify the reliability and stability of the testing device. Experimental results show that the device is able to meet the requirement of space configuration and tension test of cable. The results are accurate and the accuracy is very well. It can be proved that the device can provide experimental support for cable shape-finding, space configuration, tension, trajectory planning, limit state and the other cable mechanical characteristics.

Keywords: flexible cable; configuration; tension; testing device; catenary theory