

文章编号 1004-924X(2018)10-2423-07

精密柔索传动张力的分析与测量

谢 馨, 祁 超, 江献良, 范大鹏*

(国防科技大学 智能科学学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:精密柔索传动是一种通过主、从动轮之间有适当预紧的传动介质实现的摩擦挠性传动方式, 具有轻质、高效、简洁等特点, 在轻量化光电侦察吊舱等系统中得到了广泛的应用。张力是精密柔索传动系统的一项关键设计参数, 可以有效调控传动特性。但是, 由于空间结构尺寸所限, 现有的张力测量方法难以进行精确测量。本文提出了一种改进型三点弯曲张力测量方法。建立了张力对传动特性的灵敏度关系, 推导了基于抗弯刚度的张力测量修正模型。为了验证修正模型的有效性, 将精密柔索传动单元下两种不同规格的传动柔索应用在三种不同跨距下, 进行张力测试。实验结果表明, 修正模型下的张力偏差均值大幅度减小, 张力偏差能够缩小到 5 N 以内, 满足柔索传动系统的张力测量精度要求。

关键词:精密柔索传动; 传动特性; 测量方法; 抗弯刚度

中图分类号: TH132.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182610.2423

Tension analysis and measurement of precision cable drive

XIE Xin, QI Chao, JIANG Xian-liang, FAN Da-peng*

(College of Artificial Intelligence, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

* Corresponding author, E-mail: fdp@nudt.edu.cn

Abstract: The precision cable drive is a flexible frictional transmission method in which power is transmitted from drive capstans to a driven pulley by a properly preloaded transmission medium. Owing to its many advantages, such as lightweight, high efficiency, and simplicity, it has been widely used in the field of lightweight electro-optical tracking. Cable tension is an important design parameter that can effectively regulate the transmission characteristics of the precision cable drive. However, accurate measurements of cable tension in highly confined spaces are difficult to make with the existing tension meter method. Therefore, a revised three-point-bending method was proposed in this paper. Parametric sensitivity was investigated to evaluate the relationship between the transmission characteristics of the drive and cable tension. Furthermore, a revised model for measuring cable tension that included bending rigidity was established. To validate the proposed theoretical models, a series of experiments were performed with two types of cables and three kinds of measuring spans. The test results reveal that the tension deviation could be reduced to 5 N by using the proposed method, which is considerably lower than that obtained with the tension meter method reported in the literature. The revised method can meet the requirements of cable tension measurement in a precision cable drive system.

收稿日期: 2018-02-01; 修订日期: 2018-04-03.

基金项目: 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2015CB057503)

Key words: precision cable drive; transmission characteristic; measurement methods; bending rigidity

1 引言

精密指向机构^[1-3]的发展对稳定平台结构及其传动机构提出了新的需求,小型化、轻量化、集成化是未来新型光电跟踪系统的发展方向。精密柔索传动^[4-8]是一种轻质、高效、简洁的传动方式,已广泛应用于轻量化光电侦察吊舱等系统中^[9-10]。张力是柔索传动的重要设计因素,对传动系统的传动空回、传动刚度、传动力矩以及动力学特性等具有重要的调控作用^[11]。但是,由于空间结构尺寸所限,现有的测量方法难以精确测量张力,而将测力传感器与传动介质串联的方法一般无法满足现场测量的要求。针对精密柔索传动张力测量的实际需求,以及传统三点弯曲法张力测量精度不高的现状,需要对传统模型进行改进,以有效地测量柔索传动的实时张力,从而达到调控柔索传动系统传动特性的目的。

在柔索张力测量方面,三点弯曲测量方法简便实用,适用于工程实际测量。但是,由于抗弯刚度的存在,此方法在强迫柔索产生类似三点弯曲的局部变形时,会产生一个抵抗其变形的弯矩,进而改变柔索上的力学平衡。Lu 等^[5]分析了抗弯刚度对精密柔索传动特性的影响。Jung 等^[12-13]在分析传动系统紧边和松边张力关系时,考虑了柔索抗弯刚度的影响。Kong 等^[14]通过将带建模为欧拉-伯努利梁的方式,分析了抗弯刚度对柔索张力的影响。Gao 等^[15]则通过试验验证了抗弯刚度对传动张力影响的有效性。上述研究均是针对柔索与传动轮接触段,分析了抗弯刚度对传动过程力与运动的影响机制。然而,三点弯曲测量方法下产生的弯曲半径会随着横向变形量的变化而变化,且不再需要考虑柔索与传动轮之间的摩擦力。姚文斌等^[16-17]在三点弯曲测量过程中,建立了柔索张力与抗弯刚度之间的关系式。但是由于缺乏抗弯刚度的有效测量方式,需要利用不同标距的测力器对同一测力点进行二次测量,以消除在不同横向变形下的张力增量,这种测量方法难以适应于测量空间有限的精密柔索传动部件。

针对精密柔索传动张力测量的实际需求,本文首先分析了张力对于柔索传动特性的灵敏度,然后在传统三点弯曲测量方法的基础上,建立基于抗弯刚度的修正模型。最后构建实验系统,对理论推导的结论进行了验证。

2 张力对传动特性的灵敏度分析

典型精密柔索传动部件包括主、从动轮以及传动柔索和端部预紧装置等,如图 1 所示。传动柔索通常以 8 字形在主动轮上缠绕数圈后固定在从动轮上。在主动轮上缠绕数圈可以增大绳在主动轮上的包角,提高传动能力。从动轮上通常加工螺旋槽以消除绳与绳之间的摩擦和磨损,保证传动的平稳和有效。预紧装置的作用是在传动柔索上施加一个适当的预加张力。

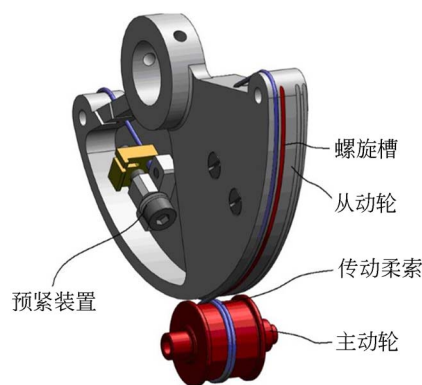


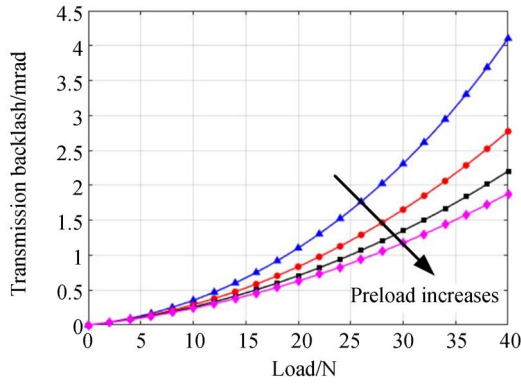
图 1 精密柔索传动部件典型形式

Fig. 1 Typical configuration of precision cable drive

在往复运动过程中,张力的变化会引起柔索变形量的变化,从而使传动系统引入空回,柔索传动空回 Θ 的理论计算公式为:

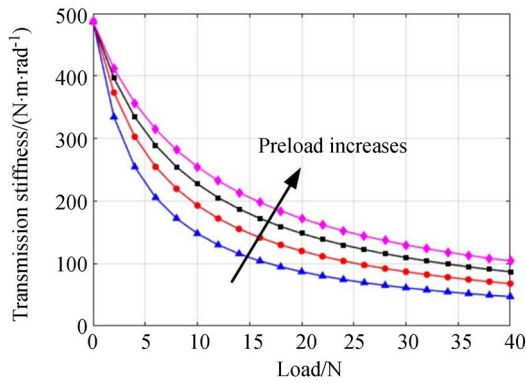
$$\Theta = \frac{1}{AEr_0} \left[\frac{T_d(r_i + r_o)}{\mu} \ln \left(\frac{T_{pl}^2}{T_d^2 - T_i^2} \right) + 2T_i \sqrt{L^2 - (r_i + r_o)^2} \right], \quad (1)$$

式中: E 为弹性模量, A 为等效截面积, L 为自由段长度, r_i 为输入轮半径, r_o 为输出轮半径, μ 为摩擦系数, T_i 为负载力, T_{pl} 为预紧力。可以发现,传动空回是可以通过柔索张力,包括负载力 T_i 和预紧力 T_{pl} 进行调控的。如图 2(a) 所示,传动空回随着负载力的增大而增大,随着预紧力的增加而减小。



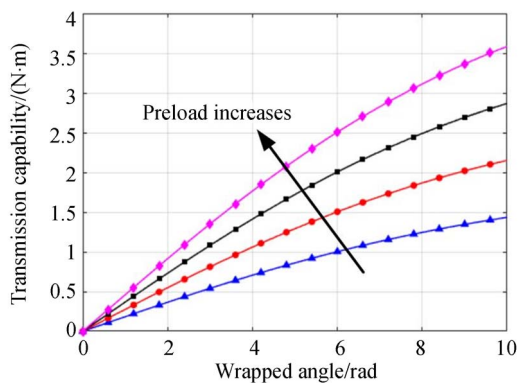
(a) 传动空回与预紧力、负载力之间的关系

(a) Relationship of transmission backlash with pre-load and load tension



(b) 传动刚度与预紧力、负载力之间的关系

(b) Relationship of transmission stiffness with pre-load and load tension



(c) 传动力矩与预紧力之间的关系

(c) Relationship between transmission torque and pre-load tension

图 2 柔索张力与传动特性之间的关系

Fig. 2 Relationship between tension and transmission characteristics

传动刚度是指在输入轮保持不动,而输出轮上施加一定外载荷的情况下,输出轮由于传动柔索的弹性变形而产生一定的回转角度。根据柔索的等效刚度与其弹性伸长变化量的关系,可以导出传动系统的扭转刚度为:

$$K_{\theta} = \frac{AEr_1^2}{r_i + r_o \frac{T_1}{\mu T_{pl} + T_1} + \sqrt{L^2 - (r_o - r_i)^2}} + \frac{AEr_1^2}{r_i + r_o \frac{T_1}{\mu T_{pl} - T_1} + \sqrt{L^2 - (r_o - r_i)^2}} \quad (2)$$

由式(2)可知,柔索传动刚度可以通过负载力 T_1 和预紧力 T_{pl} 进行调控。如图 2(b)所示,传动刚度随着负载力的增大而减小,且随着预紧力的增大而显著提高。

传动力矩是指当传动柔索在主动轮上发生全滑移时的负载力矩,是体现其传动能力的重要指标。当不考虑柔索的抗弯刚度、弹性伸长等因素时,基于 Amonton 线性摩擦假设式的传动力矩为:

$$\Gamma = 2 T_{pl} r_1 \frac{e^{\mu\theta} - 1}{e^{\mu\theta} + 1} \quad (3)$$

由式(3)可知,在传动包角 θ ,输入轮半径 r_1 ,摩擦系数 μ 确定的情况下,传动力矩仅与预紧力 T_{pl} 相关。如图 2(c)所示,传动力矩随着包角的增大而增大,且预紧力的增加可以明显地提高传动能力。

以上研究表明,预紧力和负载力对传动空回、刚度、力矩均具有重要影响。在负载力确定的情况下,精密柔索传动系统可以通过保持合理的预紧力,达到调控传动特性的目的。因此,在有限空间内精确测量柔索张力是非常必要的。

3 张力测量修正模型的建立

传统三点弯曲法测量柔索张力的原理如图 3 所示。测量时,C 处测针相对 A、B 轮向下压紧,强迫测试段柔索产生局部变形。其中, T 为柔索的实际张力值, P 为横向压力测量值, l 为张力测量跨距, δ 为柔索测点处的横向偏置。被测柔索在测力器滚轮施加的横向载荷作用下产生弯曲变形,于是在柔索截面 A、B、C 处产生弯曲力矩及相对应的弯曲应力。

如图 4 所示,取柔索 AC 段进行分析。忽略

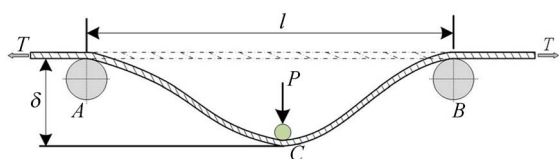


图 3 三点弯曲法张力测量原理

Fig. 3 Principle for tension measurement by three-point bending method

柔索轴线由于柔索自重所造成的变形,假设弯曲的抛物线坐标原点为 AC 段中点。基于线性弯曲假设,弯曲转矩 M 只取决于抗弯刚度 B 和曲率半径 ρ , 即有:

$$M = \frac{B}{\rho}, \quad (4)$$

其中曲率半径 ρ 为:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}}. \quad (5)$$

同时,根据力作用平衡定理可知,弯曲转矩 M 是在张力 T 作用下的结果。

$$M = T y \cos \Delta \alpha, \quad (6)$$

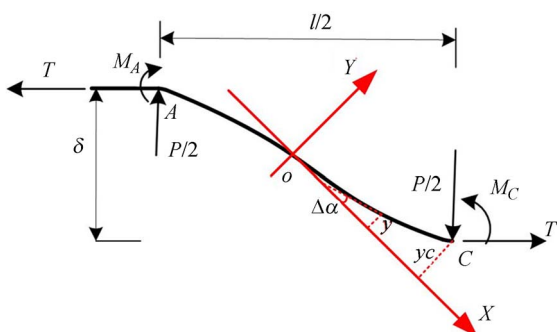


图 4 AC 段柔索受力分析

Fig. 4 Force analysis of segment AC

结合式(4),式(5)和式(6)可得微分方程:

$$\frac{|y''|}{(1+y'^2)^{3/2}} = \frac{T y \cos \Delta \alpha}{B}, \quad (7)$$

$$T = \left[\left[\frac{3\sqrt{B}}{8\delta} + \sqrt{\left(\frac{-Pl}{12\delta}\right)^3 + \left(\frac{3\sqrt{B}}{8\delta}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} + \left[\frac{3\sqrt{B}}{8\delta} - \sqrt{\left(\frac{-Pl}{12\delta}\right)^3 + \left(\frac{3\sqrt{B}}{8\delta}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \right]^2. \quad (18)$$

4 测试方法设计

根据张力修正模型,可以将柔索传动单元的柔索实时张力测定分为三步,具体过程如下:

其中 $\Delta \alpha$ 为绳与水平方向的夹角。由于 $\Delta \alpha$ 非常小,故 $\cos \Delta \alpha \rightarrow 1, y'^2 \rightarrow 0$ 。式(7)可以简化为:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{T}{B} y. \quad (8)$$

式(8)特解为:

$$y = e^{x\sqrt{T/B}} = y' \sqrt{B/T}. \quad (9)$$

作用点 C 的坐标 y_c 为:

$$y_c = y'_c \sqrt{B/T} = \frac{P/2}{T} \sqrt{B/T}. \quad (10)$$

作用点 C 的曲率半径 ρ_c 为:

$$\rho_c = \frac{B}{T y'_c} = \frac{2}{P} \sqrt{BT}. \quad (11)$$

因此, A, C 截面因测力器滚轮作用而产生的弯曲力矩 M_A, M_C 为:

$$M_C = \frac{B}{\rho_c} = \frac{P}{2} \sqrt{\frac{B}{T}}, \quad (12)$$

$$M_A = \frac{P}{4} \sqrt{\frac{B}{T}}. \quad (13)$$

考察 AC 段绳的平衡,由 $\sum M_A(F) = 0$ 得:

$$T \cdot \delta + M_A + M_C - \frac{P}{4} \cdot l = 0. \quad (14)$$

将式(12),式(13)代入式(14)得:

$$B = \frac{(Pl - 4T\delta)^2}{9P^2} T. \quad (15)$$

式(15)即为柔索抗弯刚度的计算公式。如果不计柔索的抗弯刚度,即 $B=0$,则由式(15)可得传统三点弯曲法的张力模型为:

$$T = \frac{Pl}{4\delta}. \quad (16)$$

但是,精密柔索传动系统中柔索的截面抗弯刚度对测量信号的影响不容忽视,由式(15)可得:

$$(\sqrt{T})^3 - \frac{Pl}{4\delta} \sqrt{T} + \frac{3\sqrt{B}}{4\delta} P = 0. \quad (17)$$

根据卡丹公式,即可解得基于抗弯刚度的张力修正模型为:

(1) 横向张力计横向变形的标定

张力测量过程中,柔索对测力滚轮的反作用力会引起横向张力计自身产生一定横向变形。为确定柔索张力测量过程中的实际横向偏置,需要先标定横向张力计的横向变形。标定方法为:将

横向张力计固定到微位移平台上,同时将针头接触不变形刚体,通过改变微位移平台的横向距离来调节张力计的测力值。具体标定过程为:首先调节手动位移平台至张力计 F_1 的位置,再调节至张力计 F_2 的位置,同时记录张力计读数在 F_1 和 F_2 时对应的微位移平台读数 x_1 和 x_2 。以此反复循环调节位移平台,直到连续三次测量到的位移读数 x_1 和 x_2 的变化范围在所测值的 1% 内。以此来标定横向张力计的横向变形,即:

$$\Delta d = \frac{F_1' - F_2'}{x_1' - x_2'} \quad (19)$$

(2) 柔索抗弯刚度的测定

根据式(18)可知,传动柔索的抗弯刚度 B 是张力测量修正模型的关键因素。由式(15)可知,可以采用三点弯曲法来测量抗弯刚度。具体测定过程为:将柔索张力调至柔索传动单元在实际应用中的稳定预紧状态(60~200 N)下,记录与柔索串联的拉压力传感器测量得到的实际张力值和测量跨距。再将横向张力计固定到位移平台上,同时将针头接触待测柔索,通过改变微位移平台的横向距离来调节张力计的测力值。首先调节手动位移平台至张力计 F_1 的位置,再调节至张力计零点位置 F_0 ,同时记录张力计读数在 F_1 和 F_0 时对应的位移平台读数 x_1 和 x_0 。以此反复循环调节位移平台,直到连续三次测量到的位移读数 x_1 和 x_0 的变化范围在所测值的 1% 内,此时记录该张力值下的抗弯刚度。改变柔索张力值,重复上述操作,当连续三次测量结果在所测值的 5% 内变化时,即可认定最后三次测量结果的平均值为该规格柔索的抗弯刚度,其表达式为:

$$\bar{B} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \left[\frac{((F_1 - F_0)l - 4\bar{T}_i(x_1 - x_0 - \Delta d))^2}{9(F_1 - F_0)^2} \bar{T}_i \right] \quad (20)$$

(3) 柔索实时张力测定

根据前文建立的基于抗弯刚度的修正模型测量柔索的实时张力。在传动柔索的稳定预紧状态(60~200 N)下进行,使用与测量抗弯刚度同样的方法。在相同规格柔索和相同测量跨距的情况下,改变柔索的实际张力值 \hat{T} ,记录不同张力值下张力计的轴向进给力 \hat{P} ,横向偏置 $\hat{\delta}$ 和测量跨距 \hat{l} ,即可根据式(18)计算出该柔索传动单元的柔索张力测量值 \tilde{T} 。

5 实验结果

为验证本文所建立的柔索张力修正模型的有效性,构建了一个柔索张力测试平台,如图 5 所示。传动柔索一端固定在 X 向位移平台上,一端与拉力传感器(Veste-VL13,量程:500 N)串联,从而可以通过改变 X 向位移平台的位移来调节传动柔索的实际张力,并通过拉压力传感器及张力显示器(型号:VXT550)来测量实际张力。将横向张力计(Correx-2000CNP,量程:±20 N)固定在 Z 向位移平台上,通过改变 Z 向位移平台的位移,使得横向张力计针头相对两组导向轮向下压紧,从而测量轴向进给力 and 横向偏置。

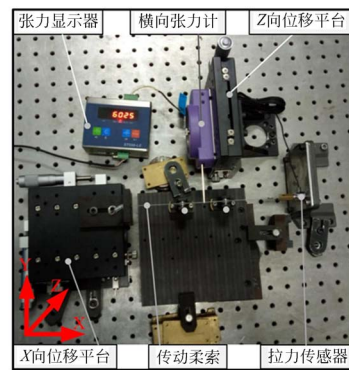


图 5 改进型三点弯曲法柔索张力测量装置

Fig. 5 Tension measurement platform for revised three-point bending method

为了验证测试方法的有效性,本文采用柔索传动单元下两种不同规格的柔索进行测试,其相关信息如表 1 所示。并在相同规格的传动柔索下分别选用 3 种不同的测量跨距进行实时张力测量。

根据上文提到的横向张力计横向变形的标定方法,对 Correx-2000CNP 型张力计进行标定。根据式(19)可知,横向张力计的横向变形 Δd 为 1.3 N/mm。

表 1 传动柔索相关信息

Tab. 1 Relevant information for cables

铭牌号	结构形式	材料	公称直径/mm	单根钢丝公称直径/mm	待测长度/mm
FF-081	7×7	SUS-304	0.81	0.09	250
FF-120	7×7	SUS-304	1.20	0.13	350

再对两种不同规格的传动柔索(FF-081/FF-120)进行抗弯刚度测定。根据式(20)可测定柔索试样 FF-081 和 FF-120 的抗弯刚度 \bar{B} 值分别为 $450 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 和 $500 \text{ N} \cdot \text{mm}^2$ 。

在测定抗弯刚度的基础上,对柔索实时张力进行测量。在上述不同柔索规格和测量跨距下的 6 组试验中,每组试验是通过调节 X 向位移平台改变实时张力,从而在不同张力情况下测量 12 组相应数据进行分析。图 6 所示为所测得数据在采用传统模型和修正模型计算张力后的偏差值对比,采用本文提出的修正模型能够将张力偏差缩小到约 5 N 以内,满足精密柔索传动单元张力测量要求,由此证实了本文所提供的张力计算修正模型是有效实用的。

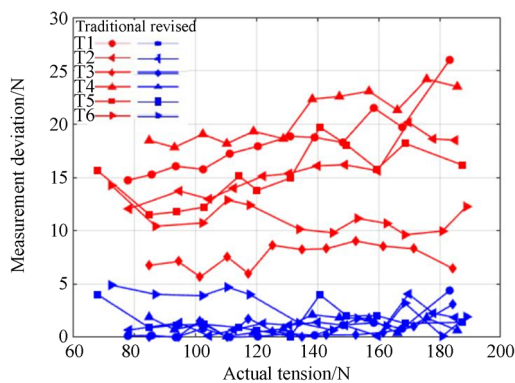


图 6 两种模型下张力测量偏差的对比

Fig. 6 Comparison of measured deviation between traditional and revised models

针对每组数据,采用传统模型和修正模型计算到的张力偏差值进行平均值和标准差分析,结果如表 2 所示。修正模型下张力值偏差的平均值及标准差均大幅度减小。

参考文献:

- [1] ULICH B. Overview of acquisition and tracking and pointing system technologies [J]. *SPIE*, 1988, 887:40-63.
- [2] HO T H. *Pointing Acquisition and Tracking systems for Free-Space Optical Communication Links* [D]. America: University of Maryland, 2007.
- [3] REN Z, STEPHENS L. Laser pointing and tracking using a completely electromagnetically suspended precision actuator [J]. *Journal of Guidance Control and Dynamics*, 2006, 29(5): 1235-1239.

表 2 两种模型下张力测量偏差的统计分析

Tab. 2 Statistic analysis of tension measurement deviation between traditional and revised models

试验号	条件		平均值/N		标准差/N	
	柔索规格	跨距/mm	传统	修正	传统	修正
T1	FF-081	45	18.33	0.80	9.73	1.50
T2	FF-081	57	15.69	1.35	5.87	1.12
T3	FF-081	94.5	7.54	0.77	1.28	0.90
T4	FF-120	45	20.70	1.16	2.36	0.71
T5	FF-120	57	15.23	1.64	2.62	1.22
T6	FF-120	94.5	15.23	3.23	2.41	3.05

6 结 论

本文从理论上推导了基于抗弯刚度的张力测量修正模型,分析了张力与系统主要传动特性的关系,并构建了实验系统对理论推导结果进行部分验证。张力对传动特性参数化分析的结果表明:随着预紧力的增大,传动空回逐渐减小,传动刚度、传动力矩显著提高;随着负载力的增大,传动空回增大,传动刚度不断减小。这说明张力是调控柔索传动特性至预期目标的关键因素。

张力是精密柔索传动系统的一个重要设计参数,可以有效地调控传动特性。但是,由于空间结构尺寸所限,现有的张力测量方法难以进行精确测量。因此,本文提出了一种改进型三点弯曲张力测量修正方法,可以大幅度减小张力测量偏差,满足精密柔索传动系统张力测量的精度要求,进而构建柔索张力-传动特性-伺服性能三者之间的映射关系,为工程人员测试柔索传动实时张力、预估传动特性提供了理论依据。这也是进一步开展精密柔索传动系统设计研究的一项重要工作。

- [4] LU Y F, FAN D P. Transmission backlash of precise cable drive system[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2013, 227(10): 2256-2267.
- [5] LU Y F, FAN D P, LIU H, et al. Transmission capability of precise cable drive including bending rigidity[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 94: 132-140.
- [6] 罗护. 基于精密绳传动的导引头机构若干问题研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2008.

- LUO H. *Research on Cable-drive Seeker Mechanism* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)
- [7] 鲁亚飞. 精密柔索传动机理与设计方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2013.
- LU Y F. *Study on the Principle and Design Method of the Precise Cable Drive*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2013. (in Chinese)
- [8] 张连超, 鲁亚飞, 范大鹏, 等. 精密绳传动空回特性分析与验证[J]. 航空兵器, 2014(1): 14-20.
- ZHANG L C, LU Y F, FAN D P, *et al.*. Verification and analysis of cable drive transmission's backlash characteristics [J]. *Aero Weaponry*, 2014(1): 14-20. (in Chinese)
- [9] LU Y, LIAO H, MO H, *et al.*. Development of a differential cable drive mechanism for acquiring tracking and pointing application[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 229(17): 3191-3200.
- [10] 张洪文, 曹国华, 李延伟, 等. 钢丝绳传动在航空光学遥感器上的应用[J]. 激光与红外, 2013, 43(4): 418-422.
- ZHANG H W, CAO G H, LI Y W, *et al.*. Application of wire rope gearing in aerial optical remote sensor[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(4): 418-422. (in Chinese)
- [11] 李凯, 叶佩青, 周晓尧, 等. 精密行星滚柱丝杠的传动特性[J]. 光学精密工程, 2016, 24(8): 1908-1916.
- LI K, YE P Q, ZHOU X Y, *et al.*. Transmission characteristics of precise planetary roller screw[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(8): 1908-1916. (in Chinese)
- [12] JUNG J H, PAN N, KANG T J. Generalized capstan problem: Bending rigidity, nonlinear friction, and extensibility effect[J]. *Tribology International*, 2008, 41(6): 524-534.
- [13] JUNG J H, PAN N, KANG T J. Capstan equation including bending rigidity and non-linear frictional behavior[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2008, 43(6): 661-675.
- [14] KONG L, PARKER R G. Steady mechanics of Belt-Pulley systems[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, 72(1): 25-34.
- [15] GAO X P, WANG L P, HAO X F. An improved Capstan equation including power-law friction and bending rigidity for high performance yarn [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 90: 84-94.
- [16] 姚文斌, 何天淳, 文宏光. 一种高精度接触式钢索张力测定传感器的研制[J]. 仪表技术与传感器, 2001(2): 9-10.
- YAO W B, HE T C, WEN H G. Development of a high precision contact wire-rope tension sensor [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2001(2): 9-10. (in Chinese)
- [17] 姚文斌, 程赫明. 用“三点弯曲法”原则测定钢丝绳张力[J]. 实验力学, 1998(1): 79-84.
- YAO W B, CHEN H M. Determination of wire-rope tension by means of three points loading flexure[J]. *Journal of experimental at mechanics*, 1998(1): 79-84. (in Chinese)

作者简介:



谢馨(1991—),男,湖南长沙人,博士研究生,2012年于中南大学获得学士学位,2015年于国防科技大学获得硕士学位,主要从事精密机械设计、动力学分析建模及仿真方面的研究。E-mail: gfkdxixin@163.com

导师简介:



范大鹏(1964—),男,河南周口人,教授,博士生导师,1991年于华中科技大学获得博士学位,主要从事数控技术,嵌入式系统以及精密光电跟踪平台的测控技术研究。E-mail: fdp@nudt.edu.cn