

文章编号: 1000-8055(2023)10-2450-10

doi: 10.13224/j.cnki.jasp.20230176

航天捕获拖曳伺服机构系绳张力峰均比抑制技术

张得礼¹, 卜飞飞¹, 潘子昊¹, 杨志达¹, 王 俊², 王 苑², 张 宇²

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016;

2. 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 系绳张力的建立需要收绳与目标物拖曳之间存在速度差, 针对传统 PI 控制难以在张力建立或释放等动态过程中获得平稳快速的控制效果问题, 提出了一种将积分控制器分段组合的抗冲击策略, 在张力建立过程中采用纯积分控制, 当张力反馈接近参考值时, 加入比例控制使张力值快速收敛, 进而较为精确地建立张力, 并有效抑制张力冲击, 同时采用积分重置的方法使动态控制过程前后张力连续稳定。仿真和样机实验表明, 该控制策略精度较高, 张力突变过程响应平稳且迅速, 且不需要引入额外的物理量, 结构简单, 占用硬件资源少, 可靠性较高。

关 键 词: 柔性伺服; 永磁电动机; 张力控制; 抗冲击策略; 比列-积分-微分控制(PID)

中图分类号: V19; TP23

文献标志码: A

Peak-to-average ratio suppression technology of aerospace tension servo mechanism

ZHANG Deli¹, BU Feifei¹, PAN Zihao¹, YANG Zhida¹, WANG Jun²,
WANG Yuan², ZHANG Yu²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: Establishment of the tether tension requires a speed difference between the rope retraction and the target drag, making it difficult for the traditional PI control to obtain a stable and fast control effect in the dynamic process of tension establishment or release. To solve the problem, an anti-impact strategy was proposed, in which integral controllers were piecewise combined. Only integral control was used in the process of tension establishment. When the tension feedback was close to the reference value, the proportional control was added to make the tension value converge quickly, then the tension was established more accurately and the tension impact was effectively suppressed. Meanwhile, the integral reset method was used to make the tension continuous and stable before and after the dynamic control process. Simulation and prototype experiments showed that the anti-impact control strategy had high accuracy, and the response to tension sudden changes was smooth and rapid. At the same time, the control strategy did not need to introduce additional physical quantities, featuring simple structure and high reliability, and occupying less hardware resources.

Keywords: flexible servo; permanent magnet motor; tension control; anti-shock strategy; proportional integral derivative (PID)

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(NT2023007)

作者简介: 张得礼(1973—), 男, 副教授、硕士生导师, 博士, 主要从事伺服和机器人控制技术研究。E-mail: Nuaazdl@126.com

引用格式: 张得礼, 卜飞飞, 潘子昊, 等. 航天捕获拖曳伺服机构系绳张力峰均比抑制技术[J]. 航空动力学报, 2023, 38(10): 2450-2459. ZHANG Deli, BU Feifei, PAN Zihao, et al. Peak-to-average ratio suppression technology of aerospace tension servo mechanism[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(10): 2450-2459.

近年来,我国航天事业快速发展并取得一系列成果,航天器载荷越来越大,功能越来越丰富,需要一系列高可靠性和高性能的航天机载设备要求。柔性伺服机构是近年来提出的新型传动方式^[1-4],它是采用弹性模量较小的材料所制成的柔性系绳和绳网来连接或包覆目标物,完成对目标物的拖曳和姿态控制等任务^[5]。与传统刚性传动机构相比,柔性伺服机构具有以下显著优势^[6-7]: ①柔性传动采用复合材料制成的柔性系绳,质量较轻; ②柔性传动机构可在宇宙空间中延伸几十甚至上百米的距离,显著扩大航天器的工作范围; ③柔性系绳对径向和轴向的受力扰动均有较好的抑制作用,鲁棒性较好。欧洲宇航局和美国国家航天局等知名航天研究机构都提出基于柔性伺服机构的航天器概念样机^[8-11],浙江大学,哈尔滨工业大学和北京航空航天大学等国内相关高校也对航天柔性伺服机构的总体设计、动力学分析和控制技术进行了系统的理论设计与地面样机实验。

柔性拖曳系统一般采用长度大,刚度小的弹性系绳,其张力变化范围宽,且张力变化对外界扰动较为敏感,因此柔性材料的高性能张力控制是一个难题,有许多文献对此进行了研究。文献[12]研究了硅材料切片机中的张力平滑控制策略,针对一段目标材料两端张力传感器反馈系统提出了一种新型的前馈多条件比例控制器,获得了较好的张力稳态精度控制效果。文献[13]介绍了一种通过改变钢丝绳张力来进行运动控制的机器人牵引系统,针对所采用的双直驱电动机系统设计了一种应用于张力和机械臂应力的双扰动观测器,并给出一种提升机械响应带宽的变张力算法,实现了高带宽和低刚度的传输。文献[14]研究了工业用滚筒传动带运输过程中的张力控制问题,针对工业应用中通常使用的手动调节分散式 PI 控制器存在的不足,提出一种基于 H_∞ 控制的改进方案,实现了柔性材料大范围张力高稳态精度控制。

以上文献的研究对象多为对柔性材料的两端或多端控制,而外空间柔性拖曳系统为一段施力,另一端自由运动,或接近于固定状态。由于柔性系绳的材料特性,在张力动态控制过程中易产生张力冲击现象^[15-16],张力响应峰值与平均值的比值较大,而现有的研究没有涉及柔性绳在动态过程中的抗冲击控制。由多股复合材料纤维编织成的柔性系绳一般不表现出抗压能力,受压时基本

不表现出整体刚度^[17];而当受到电动机卷绕产生拉力作用时,由于各根纤维都具有一定的松弛余量,绳索整体的刚度依然非常小,其应力与应变关系还存在显著的迟滞特性,即单自由度纵向拉伸时,张力建立与释放过程的张力变化曲线不重合,且常会出现显著的震荡过程^[18]。柔性传动机构的动力学过程较为复杂,柔性张力的控制应考虑在响应速度和稳态精度之间保持良好的平衡^[19]。文献[20]和文献[21]都对张力变化范围较大、变化速度较快的柔性索张力变化进行了研究,并提出了对应的峰均比抑制策略。现有的优化控制方法缺乏对动态过程冲击的抑制和张力建立后稳态精度的提高综合考虑。同时,积分效应会累积调节过程中的误差,从而导致张力控制的快速性和准确性之间的矛盾^[22]。

在上述研究成果基础上,本文建立了永磁同步电动机柔性张力控制系统的数学模型,分析了张力建立和调整过程中张力与系绳形变等物理量的动态变化规律,研究引起张力冲击现象的因素。在此基础上,提出了一种基于单积分与积分重置优化组合的新型抗冲击张力控制策略,该方法在张力建立与释放过程中采用纯积分控制,实现张力平稳且平滑地建立与释放;在误差收敛过程中引入比例控制,逐步收敛控制误差,进行较为精确的张力控制。

1 柔性张力控制系统的动态特性

本文主要讨论单自由度柔性系绳的张力控制。为了进一步研究张力控制机构的动态响应,有必要建立张力控制系统的数学模型。

为便于分析,对图 1 所示的柔性传动张力控制物理系统进行简化,具体假设如下:

- 1) 系绳受拉力后伸长量不可忽略;
- 2) 只考虑系绳方向上的单自由度运动;
- 3) 拖曳电动机位置固定。

图 2 是基于永磁同步电动机的柔性系绳电动拖曳张力控制系统结构。在收卷系绳与负载之间

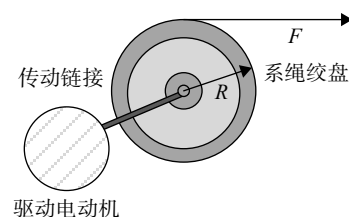


图 1 柔性传动机构中的张力控制

Fig. 1 Tension control in flexible drive

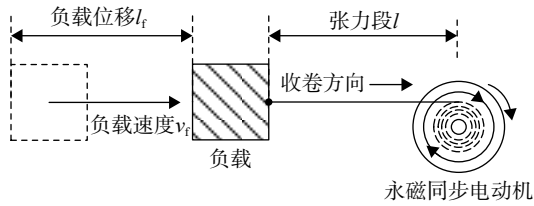


图 2 柔性系绳拖曳系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of flexible rope towing system

存在速度差的情况下,柔性系绳因拉伸过程而产生弹性变形。其中,系绳的伸长量及其所产生的张力大小满足如式(1)所示的弹性定律:

$$T = k_r (l_s - l_f) \quad (1)$$

其中 T 是系绳被拉伸产生的张力, k_r 是系绳的弹性系数,由系绳的材料与尺寸等因素决定, l_s 是系绳已被电动机卷绕收贮的长度, l_f 是系绳因负载移动而减少的长度。

系绳卷绕段长度 l_s 对时间的微分即为电动机转速,如式(2)所示:

$$\frac{d}{dt} l_s = v_s \quad (2)$$

其中 v_s 是电动机负载部分的外径线速度。

而负载的位移和张力之间则存在二阶微分关系,如式(3)所示:

$$\frac{d^2}{(dt)^2} l_f = \frac{T}{m} \quad (3)$$

其中 m 是负载质量。

将式(2)和式(3)带入式(1),可以得到张力控制系统的传递函数方程,如式(4)所示:

$$\frac{T(s)}{V(s)} = \frac{k_r s}{s^2 + k_r/m} \quad (4)$$

张力控制的传递函数框图如图 3 所示。

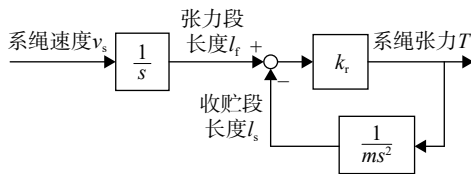


图 3 张力控制系统的传递函数模型

Fig. 3 Transfer function model of tension control

在系绳初始处于自然伸直状态下,系绳张力与目标物速度、系绳收放速度满足:

$$T = k_r (l_0 - l) = k_r \int (v_s - v_f) dt \quad (5)$$

即张力变化率满足:

$$\dot{T} = k_r (v_s - v_f) \quad (6)$$

因此,只有当系绳收放速度 v_s 与目标物速度 v_f 保持同向同速时,系绳张力才可以保持不变。且张力相对转速来说,存在微分关系,因此张力响应较为敏感,在动态过程中易产生冲击。

在张力控制策略中,张力控制回路的输入是张力反馈与张力给定之间的误差,张力控制回路的输出是电动机的给定速度。张力控制器的传递函数可以由式(7)表示。

$$v_{ref} = \left(k_p + k_i \frac{1}{s} \right) (T_{ref} - T) \quad (7)$$

其中 k_p 是控制器的比例系数, k_i 是控制器的积分系数。

柔性系绳在收绳过程中,伺服电动机转子转动惯量较小,定子绕组电感较小,电动机电流和转速响应在 10 ms 级,而张力的建立需要秒级的时间,因此,电动机的速度响应时间相对于张力的建立时间可以忽略不计,张力控制模型中可以对电动机速度响应部分进行简化。

式(8)是系绳张力控制系统的开环传递函数。

$$G(s) = \frac{T_{fed}(s)}{T_{ref}(s)} = \frac{(k_p s + k_i) k_r}{s^2 + k_r/m} \quad (8)$$

其中,在普通 PI 调节器控制下,单自由度柔性系绳的开环张力控制系统可以看作 0 型系统,而 0 型系统稳态响应存在固定误差,误差系数为

$$\frac{e}{E} = \frac{1}{1 + mk_i} \quad (9)$$

其中 e 和 E 分别是误差量和给定量的比值。

可见,在负载质量确定的情况下,张力控制精度与控制策略中的积分效应有直接的关系,积分效应越强,静态误差越小,控制精度越高。

图 4 是阶跃信号激励下不同积分参数的张力响应,其中弹性系数 k_r 为 140 N/m,目标质量为 3 000 kg。

随着积分系数的增大,张力达到给定值时的调节时间缩短,但超调量和震荡尖峰数量增加。这说明在采用 PI 张力控制策略的情况下难以同时达到缩短张力建立时间和减少张力超调的两个目的。PI 调节器中的积分项能够消除静差,提高稳态控制精度,但在张力建立或大幅度增/减给定时,张力在短时间内变化很大,这将导致积分项的积分初值累积过大,出现明显的峰值。这在电动机驱动的柔性系绳张力控制系统中是不允许的。

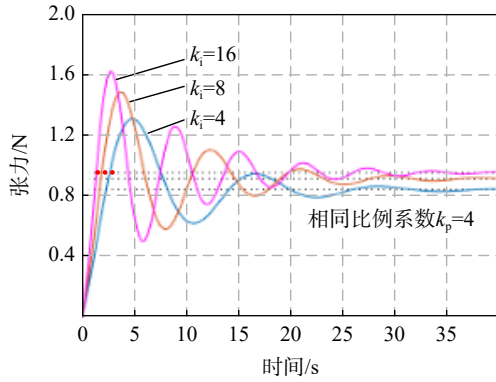


图 4 张力控制过程中的张力冲击现象

Fig. 4 Tension impact under tension control strategy

2 积分分段与积分重置的控制策略

以上分析可以看出, 普通 PI 控制器不能同时满足张力的建立和稳态时的高性能响应要求。因此, 需要在这两个过程分别进行控制。在 PI 张力控制策略中, 积分效应的滞后性使其难以同时达到两个目标: ①张力达到参考值; ②系绳收放速度与目标速度一致。在张力建立阶段, 比例调节器存在不可忽略的稳态误差, 很难成功地建立张力。从初始的控制状态开始, 在检测到张力的指令变化后, 电动机应以最大速度拉伸或释放系绳。这种情况会造成张力震荡冲击。

本文提出的积分分段和重置控制策略如图 5 所示。为了保证系统的稳定性, 采用一种单积分控制器来建立张力。在即将达到参考值时, 引入比例控制, 以获得较高的稳态控制精度。在控制方式切换过程中, 积分复位保证了切换前后的稳定性和连续性。

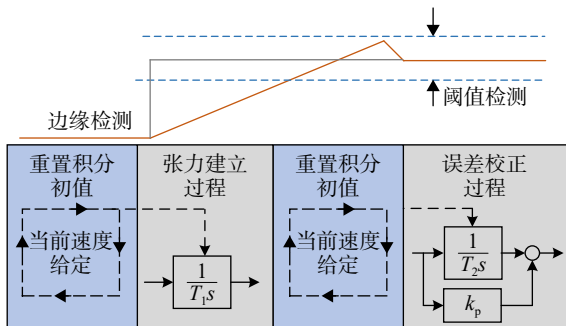


图 5 本文所提出分段控制策略示意图

Fig. 5 Piecewise control concept proposed in this paper

2.1 张力建立过程中的纯积分控制

对式(10)所示的普通 PI 控制闭环传递函数, 计算其特征频率 ω_n 和阻尼系数 ζ , 得到式(11)。

$$\Phi(s) = \frac{G(s)}{1+G(s)} = \frac{(k_p s + k_i) k_r}{s^2 + k_p k_r s + \left(k_i + \frac{1}{m}\right) k_r} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \omega_n = \sqrt{k_r (k_i + 1/m)} \\ \zeta = \frac{k_p k_r}{2\omega_n} \end{cases} \quad (11)$$

从特征频率 ω_n 的表达式可以看出, 在确定弹性系数 k_r 和载荷质量 m 的情况下, 系统建立时的稳定性仅由积分系数 k_i 决定。即积分系数 k_i 可以根据控制目标的客观条件来确定。

当阻尼比 ζ 为 0, 即 $k_p=0$ 时, 二阶系统的响应最快, 如图 6 所示, 无需考虑超调震荡的影响。因此, 张力的快速建立可以通过单个积分器来实现, 如式(12)所示。

$$V^*(s) = \frac{1}{T_i s} [T^*(s) - T_{fed}(s)] \quad (12)$$

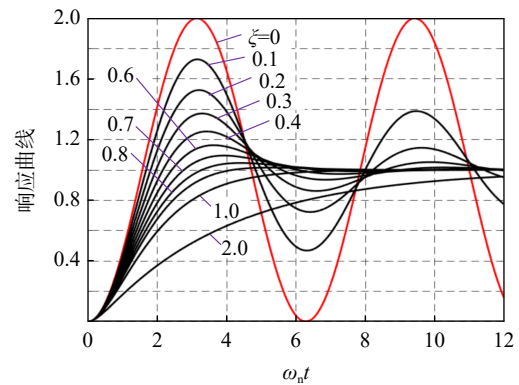


图 6 不同阻尼比下二阶系统的阶跃响应

Fig. 6 Step response of second order system with different damping coefficients

2.2 张力稳态过程中的 PI 控制

由式(11)可知, 当载荷质量一定时, 张力调整过程中的稳态误差只与积分系数有关。当张力反馈接近参考值时, 可以设置较大的积分系数来实现更精确的张力控制, 不会出现积分系数较大所引起的超调震荡。根据控制系统工况, 结合式(9)的静态误差系数可以得到合适的积分系数 k_i 。

由式(11)可以得到闭环系统的震荡衰减频率 ω_d , 如式(13)所示:

$$\omega_d = \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n = \sqrt{k_r k_i + \frac{k_r}{m} - \left(\frac{k_p k_r}{2}\right)^2} \quad (13)$$

结合柔性系绳工作环境中的扰动情况, 选取合适的震荡衰减系数对非理想因素造成的扰动进行抑制, 由此可以确定合适的比例系数 k_p 。传递

函数如式(14)所示:

$$V^*(s) = \left(\frac{1}{T_1 s} + k_p \right) [T^*(s) - T_{\text{fed}}(s)] \quad (14)$$

在此过程中,比例系数 k_p 和积分参数 T_1 的设计只需要满足小误差稳态平差的精度要求,不会受到张力冲击问题的限制,进而达到提高控制精度的目的。

2.3 控制模式切换过程中的积分重置

为了保持张力的连续性和稳定性,在张力达到目标值时,将积分项的输出值重置为当前的目标物体的速度,以便快速调整速度基准。

但由于柔性系绳长度较大,目标物同电动机控制系统在空间上的距离较远,难以检测目标物速度,因此,把张力指令变化点的收绳速度,作为达到积分输出的参考张力后的目标速度。采用积分分离 PI 张力控制策略的空间系绳张力控制模型如图 7 所示。

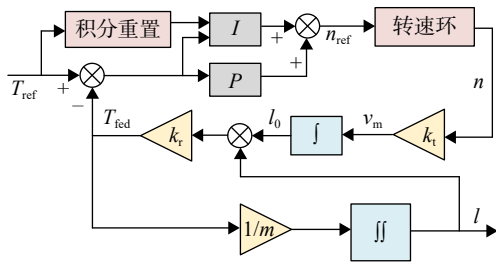


图 7 积分分离 PI 张力控制策略框图

Fig. 7 Integral separation PI tension control strategy diagram

由于建立张力所需的时间较短,且目标质量相对系绳张力来说较大,不会产生很大的加速度,因此当张力达到给定值时,可以近似地将张力指令变化点的收绳速度视为目标速度参考值。

以图 8 为例,红色曲线是反馈张力,蓝色曲线是参考张力,阈值取 0.1 N。如图 8(a)所示,当张力升高到差值大于 0.1 N 时,用单积分调节器确定卷绕系绳所用电动机的转速。当误差减小,通过 PI 调节器获得夹送电动机速度基准。当张力下降,调整过程也被分为两个部分,如图 8(b)所示。

张力控制策略的总体框图如图 9 所示。永磁同步电动机 A 通过收卷系绳产生张力,达到拉动负载的目的,永磁同步电动机 B 连接系绳卷筒,收卷后段不产生张力的部分。当出现较大的张力指令变化时,电动机进入积分控制状态,快速减小反馈与给定的误差;当张力反馈信号和张力指令值的误差进入设定的阈值后,引入比例控制来提高电动机的稳态张力控制性能。

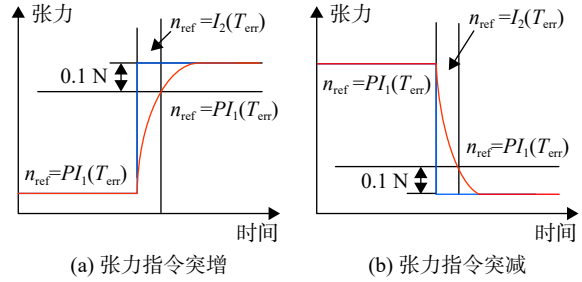


图 8 抗冲击张力控制策略模式切换示意图

Fig. 8 Example of switching strategy in anti-impact tension control

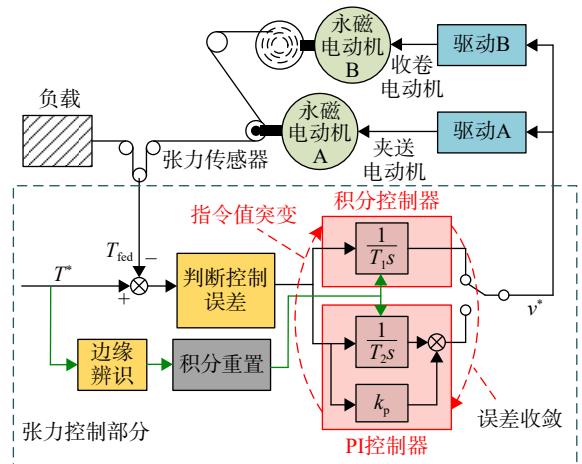


图 9 抗冲击张力控制策略

Fig. 9 Anti impact strategy of tension control

3 仿真结果

为验证所提张力控制策略,建立了如图 9 所示的由两台永磁同步电动机组成的仿真系统,并进行了对比仿真,主要参数见表 1。

表 1 永磁同步电动机柔性系绳张力控制系统主要参数

Table 1 Main parameters of flexible tether tension control system based on permanent magnet synchronous motor

参数	数值	
	夹送电动机(A)	收卷电动机(B)
系绳弹性系数/(N/m)	140	
系绳速度变化范围/(m/s)	0~0.5	
母线电压/V	28.0	28.0
额定转速/(r/min)	1 100	1 100
额定转矩/(mN·m)	50	200
额定电流/A	0.35	1.3
最大转矩/(mN·m)	150	400
最大转矩速度/(r/min)	400	400
相电阻/ Ω	11.5	3.6
相电感/mH	4.78	3.86
极对数	6	5

在张力控制建立后, 对系绳施加一段时间的恒定张力。在初始状态下, 系绳处于自然伸直状态。在 0 s 施加 5 N 的张力, 在 20 s 时施加 20 N 的张力, 在 40 s 施加 5 N 的张力。

3.1 静态负载仿真

图 10 是静态载荷条件下仿真结果。从图 10(a)

可以看出, 传统 PI 张力控制策略下, 系绳张力有超调。从图 10(b)可以看出, 采用改进的张力控制策略, 张力没有明显超调, 调整时间小于 1 s, 系绳的速度也迅速提高, 当张力达到参考值后出现阶跃指令时, 电动机速度参考值迅速下降到张力给定速度以保持稳定的张力。

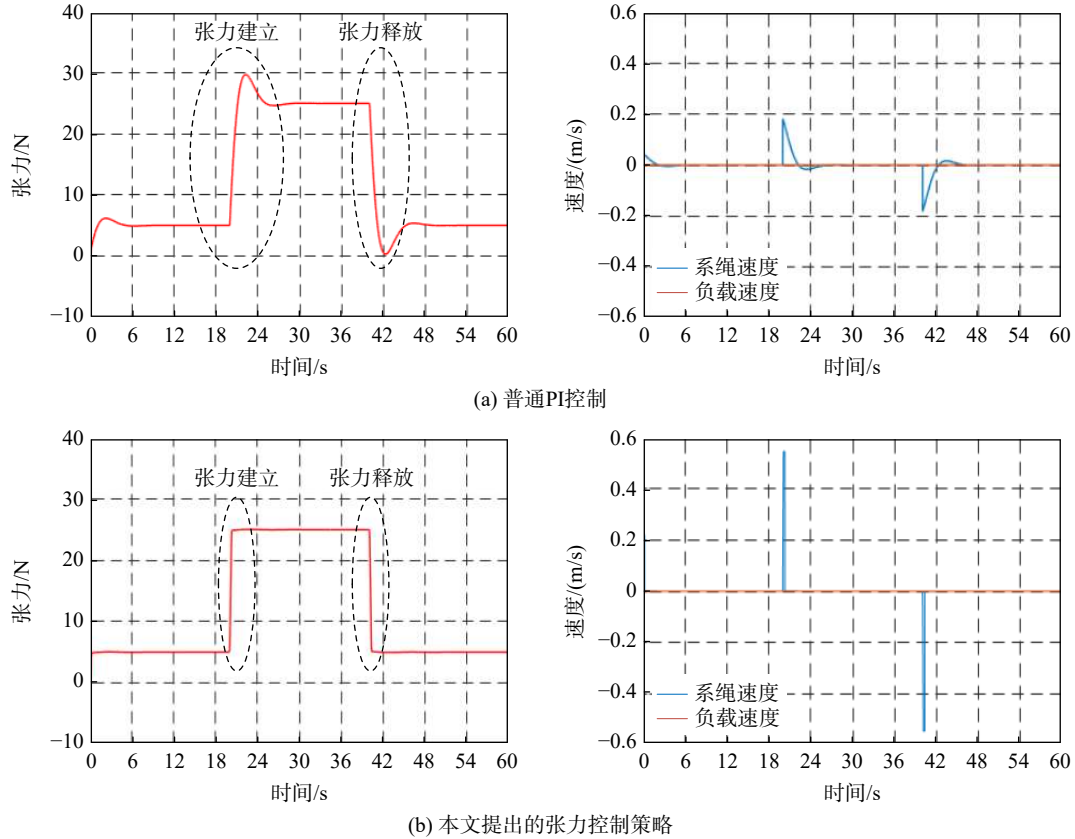


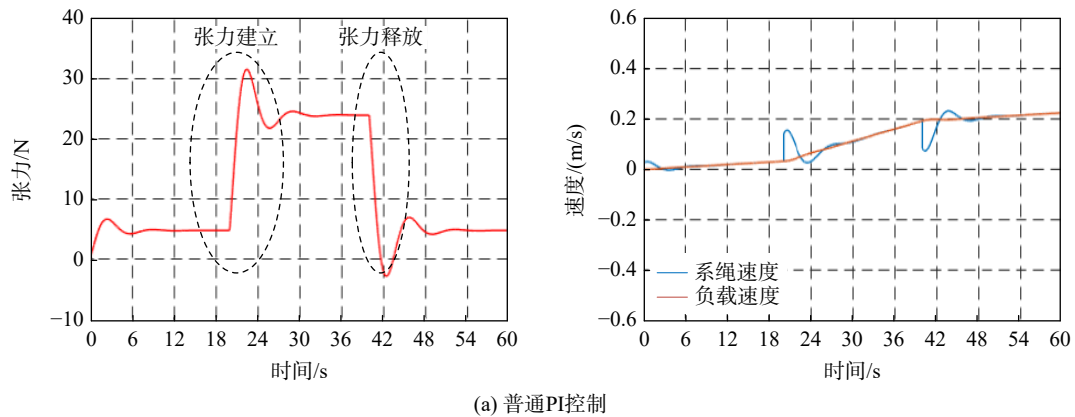
图 10 不同控制策略下的静态负载仿真结果

Fig. 10 Simulation results of different control strategy at the condition of static load

3.2 自由负载仿真

在自由载荷条件下的仿真如图 11 所示, 目标初始速度为 0 m/s。从图 11(a)可以看出, 使用普通 PI 张力控制策略, 系绳张力超调量较大。从

图 11(b)可以看出, 在使用抗冲击张力控制策略, 系绳张力超调量较小。在 5~25 N 阶跃时, 超调量约为 4%, 调节时间为 3.5 s。



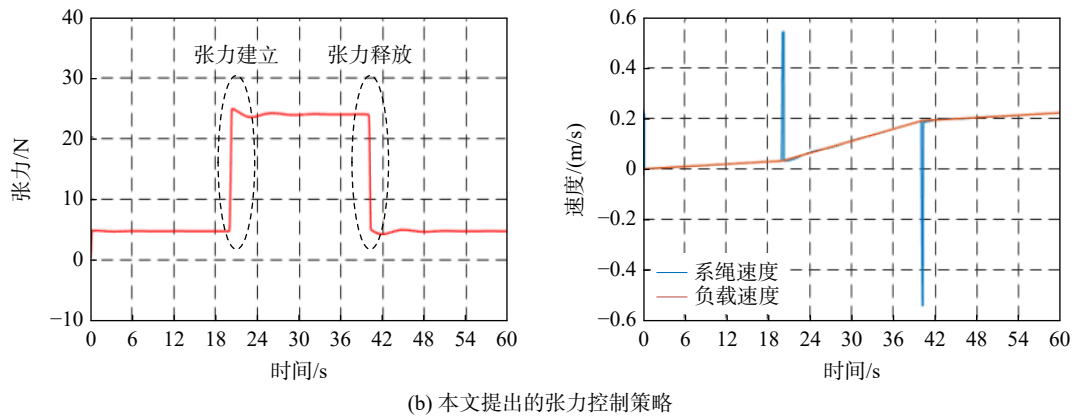


图 11 不同控制策略下的自由负载仿真结果

Fig. 11 Simulation results of different control strategy at the condition of free load

4 实验验证

构建的永磁同步电动机柔性系绳张力控制实验平台,如图 12 所示。该平台由张力伺服机构和控制器组成,控制负载和永磁同步电动机传动机构之间的系绳张力,测试系统通过通信发送控制命令和接收实验数据。

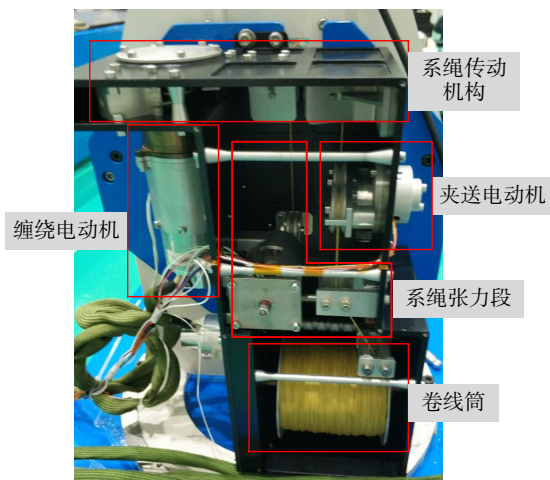


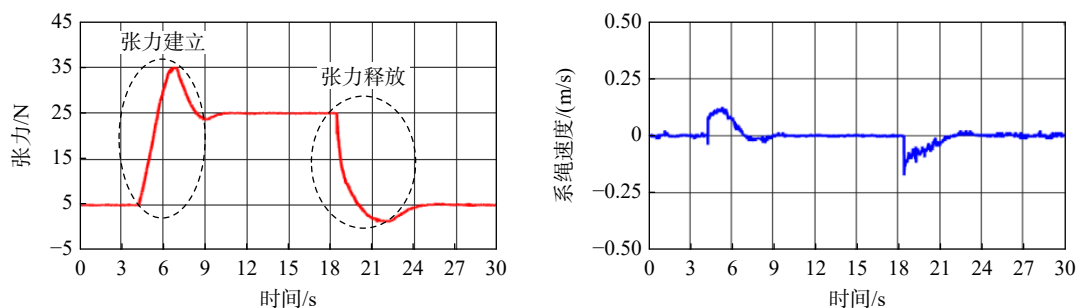
图 12 实验平台

Fig. 12 Experiment platform

4.1 静态负载实验

为了模拟静态负载下的张力控制,将惯量盘锁死。如图 13 所示,在建立了 5 N 张力的基础上,发送从 5 N 到 25 N 的阶跃指令,观察是否存在张力冲击现象。稳定一段时间后,再发送从 25 N 降到 5 N 的阶跃指令。

从图 13(a)可以看出,使用 PI 张力控制策略,系绳张力可以跟踪阶跃指令,但其震荡和调整时间相对较大。当电动机减速时,系绳速度开始下降,但由于 PI 调节器中积分输出不能突变,绳速下降较慢,在下降过程中,系绳速度仍大于负载速度,导致张力仍在增加,产生超调。张力指令下降段超调产生原因与上升段类似。从图 13(b)可以看出,采用提出的张力控制策略,系绳张力可以跟踪阶跃指令,并且超调和调整时间显著减少。阶跃指令发出后,电动机开始收绳,收绳速度较快,大大缩短了张力的建立时间。当张力达到参考值 25 N 时,由于积分复位,系绳速度迅速下降到 0 m/s,从而保持张力稳定。



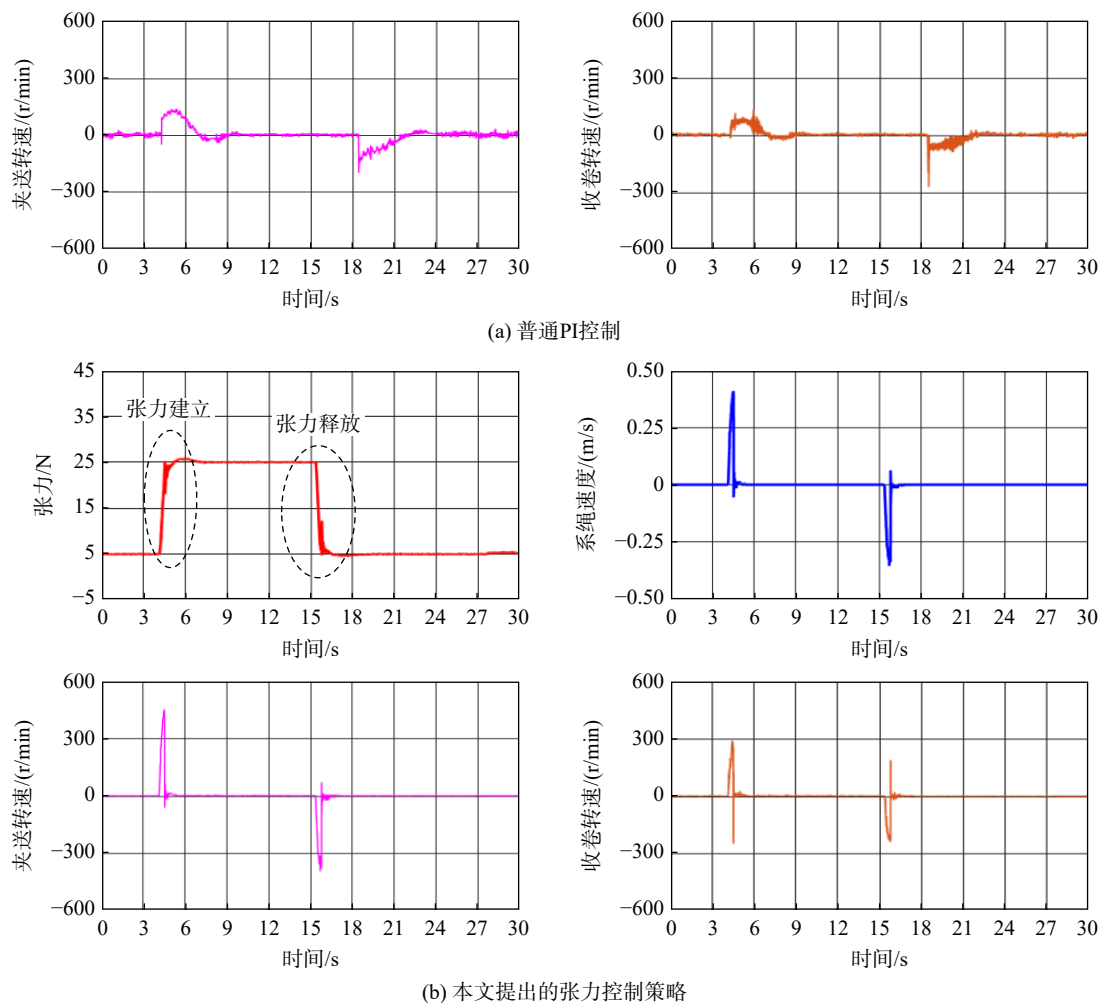


图 13 不同控制策略下的静态负载阶跃实验结果

Fig. 13 Experimental results of step setting for different tension control strategies under static load

4.2 自由负载实验

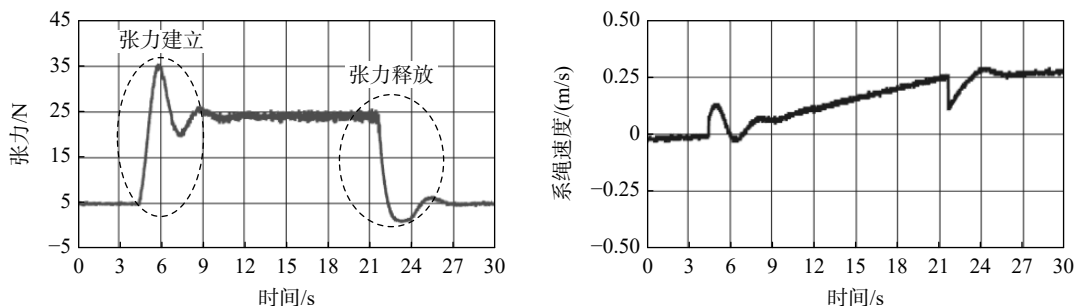
图 14 验证了在自由负载下的结果, 打开惯量盘抱闸, 用 3 000 kg 的惯量盘模拟负载。在建立 5 N 张力的基础上, 当张力作用使负载加速到 0.1 m/s 时, 再发送从 5 N 到 25 N 的张力阶跃指令, 观察是否存在张力冲击现象。然后再发送张力给定 25 N 阶跃至 5 N 的指令, 降低张力。

由图 14(a) 可以看出, 张力控制策略采用 PI 来调节, 在自由载荷下, 虽然系绳张力能够跟踪

阶跃指令, 但其调节时间和超调量较大。

在张力给定前, 伺服系统以大约 0.1 m/s 的速度收绳, 并还在慢慢逐渐加速。在张力上升指令发出后, 电动机开始加速来增加收绳张力。

约在 10 s 时, 当张力第一次达到给定值 25 N 后, 电动机逐渐减速, 收绳速度逐渐下降。由于 PI 调节器中存在积分项, 收绳速度下降较慢。在绳速下降过程中, 系绳速度仍比负载速度大, 导致张力仍在不断地增加, 进而产生较大超调。



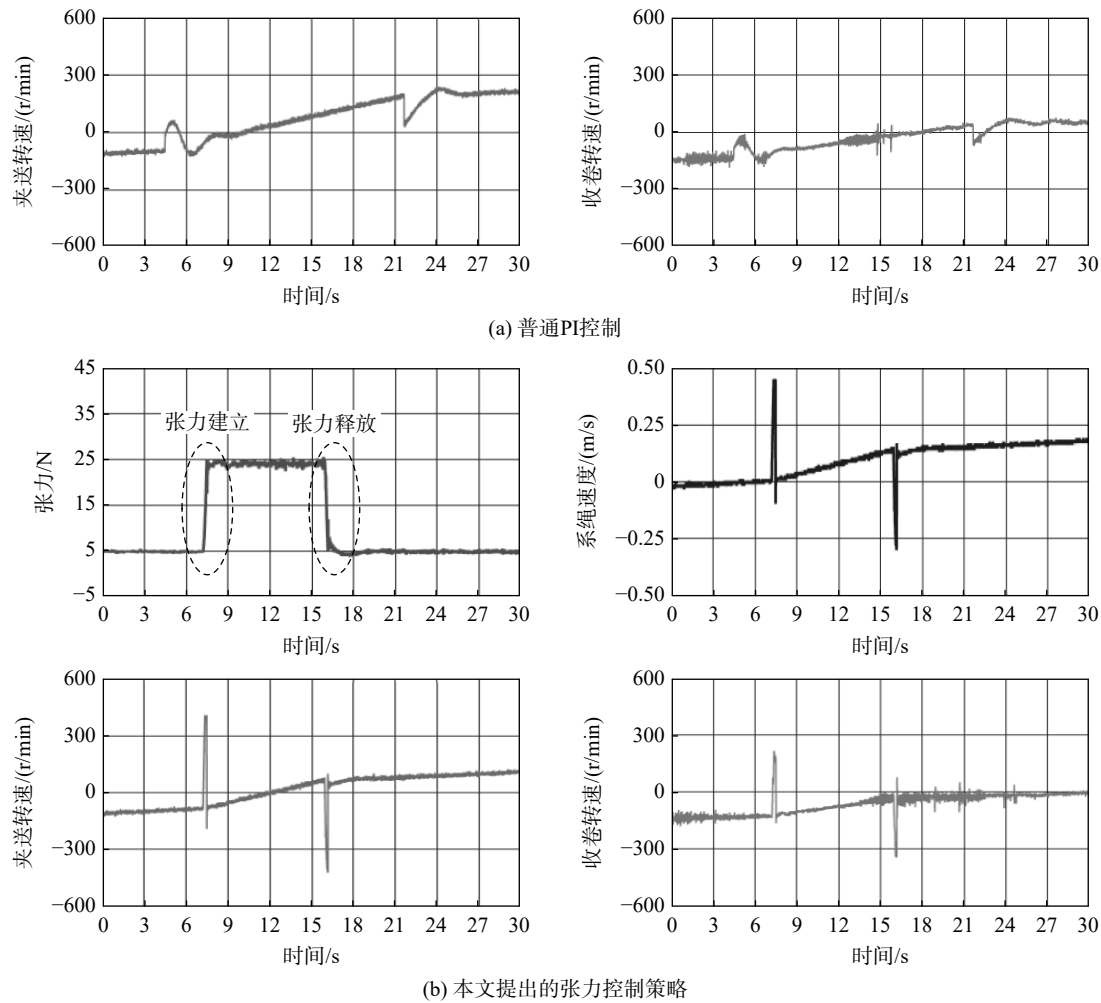


图 14 不同控制策略下的自由负载阶跃实验结果

Fig. 14 Experimental results of step setting for different tension control strategies under free load

从图 14(b)可以看出,在自由负载下,系绳张力能够跟踪阶跃张力指令,调整时间和超调量明显减少。在发出阶跃指令之前,张力控制系统以 0.1 m/s 的速度收回绳索,并缓慢加速。张力指令发出后,收绳速度加快,张力建立时间大大缩短。当张力达到给定值 25 N 时,由于积分复位,系绳速度迅速下降到 0.1 m/s 左右,接近负载速度,从而保持张力稳定。

以上实验结果表明,提出的张力控制策略可以显著减少超调量和调节时间,并具有抑制张力冲击的效果。

5 结 论

本文构建了永磁同步电动机拖动柔性系绳张力控制机构数学模型,指出柔性系绳张力控制过程中张力响应与电动机转速存在微分关系,张力变化敏感,动态过程易产生冲击。普通 PI 控制仅将控制系统校正为 0 型,系统响应跟踪指令能力

不强,且难以兼顾动态响应稳定性与稳态控制精度。提出的一种适用于柔性系绳的永磁同步电动机抗冲击张力控制策略。该方法在张力建立过程中采用纯积分控制,以获得快速平滑的动态响应速度,在张力反馈接近参考值时,加入比例控制使张力值快速收敛。为保证分段控制过程的连续性,将张力环的输出,即电动机的速度基准作为积分初值进行重置,实现控制模式平滑切换。

仿真与实验结果表明,该方法可以在不牺牲稳态精度的前提下,有效减小动态响应中的张力冲击,同时保持电动机速度变化的平滑稳定。该方法不需要引入额外的物理量,结构简单,占用硬件资源少,可靠性较高,在永磁同步电动机柔性系绳高性能张力控制系统中具有较好的应用前景。

参考文献:

- [1] 黄玉平,崔佩娟,安林雪,等.高品质航天伺服产品及其实

- 现途径探索[J]. 导弹与航天运载技术(中英文), 2022(6): 38-42.
- HUANG Yuping, CUI Peijuan, AN Linxue, et al. High-quality aerospace servo products and its realization way to explore[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2022(6): 38-42. (in Chinese)
- [2] 杨雷, 张柏楠, 郭斌, 等. 新一代多用途载人飞船概念研究[J]. 航空学报, 2015, 36(3): 703-713.
- YANG Lei, ZHANG Bainan, GUO Bin, et al. Concept definition of new-generation multi-purpose manned spacecraft[J]. *Acta Astronautica et Astronautica Sinica*, 2015, 36(3): 703-713. (in Chinese)
- [3] 喻思琪, 张小红, 郭斐, 等. 卫星导航近技术进展[J]. 航空学报, 2019, 40(3): 022200.
- YU Siqi, ZHANG Xiaohong, GUO Fei, et al. Recent advances in precision approach based on GNSS[J]. *Acta Astronautica et Astronautica Sinica*, 2019, 40(3): 022200. (in Chinese)
- [4] 李小彭, 尚东阳, 陈仁桢, 等. 基于机械臂位姿变换的柔性负载伺服驱动系统控制策略[J]. 机械工程学报, 2020, 56(21): 56-69.
- LI Xiaopeng, SHANG Dongyang, CHEN Renzhen, et al. Control strategy of flexible load servo drive system based on manipulator position and position transformation[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(21): 56-69. (in Chinese)
- [5] 钟靖龙, 宋宝, 刘永兴, 等. 基于DDPG的柔性伺服系统级联陷波器设计[J]. 微电机, 2022, 55(5): 40-44, 61.
- ZHONG Jinglong, SONG Bao, LIU Yongxing, et al. Deep deterministic policy gradient-based design of cascade notch filters for suppressing mechanical resonance in flexible servo system[J]. *Micro-motors*, 2022, 55(5): 40-44, 61. (in Chinese)
- [6] 刘凯宁. 机器人柔性臂伺服系统振动抑制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- LIU Kaining. Research on vibration suppression of flexible manipulator servo system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [7] 王云周. 基于CMAC控制策略柔性联接电液位置伺服系统特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2020.
- WANG Yunzhou. Research on characteristics of flexible linked electro-hydraulic position servo system based on CMAC control strategy[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2020. (in Chinese)
- [8] BISCHOF B, KERSTEIN L. ROGER-robotic geostationary orbit restorer[J]. *Science and Technology Series*, 2004, 109: 183-193.
- [9] BROPHY J R, FRIEDMAN L, CULICK F. Asteroid retrieval feasibility[C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Piscataway, US: IEEE, 2012: 1-16.
- [10] BRPPHY J R, MUIRHEAD B. Near-earth asteroid retrieval mission (ARM) study[R]. Washington DC: The 33rd International Electric Propulsion Conference, 2013.
- [11] NAKASUKA S, FUNASE R, NAKADA K, et al. Large membrane "Furoshiki Satellite" applied to phased array antenna and its sounding rocket experiment[J]. *Acta Astronautica*, 2006, 58(8): 395-400.
- [12] FANG Z J, ZHANG H J, SHAO C Y, et al. Control strategy for smooth wire sending and constant tension in multiwire slicer[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(3): 1668-1677.
- [13] MITSANTISUK C, OHISHI K, KATSURA S. Control of interaction force of twin direct-drive motor system using variable wire rope tension with multisensor integration[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(1): 498-510.
- [14] GASSMANN V, KNITTEL D, PAGILLA P R, et al. Fixed-order H_∞ tension control in the unwinding section of a web handling system using a pendulum dancer[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2012, 20(1): 173-180.
- [15] 李鹏威. 先进控制理论在冷轧平整机控制系统中的应用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
- LI Pengwei. Application research of advanced control theory in control system of cold rolling temper mill[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2019. (in Chinese)
- [16] LEE J, LEE C. Model-based winding tension profile to minimize radial stress in a flexible substrate in a roll-to-roll web transporting system[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2018, 23(6): 2928-2939.
- [17] 郭吉丰, 王班, 谭春林, 等. 空间非合作目标物柔性捕获技术进展[J]. 宇航学报, 2020, 41(2): 125-135.
- GUO Jifeng, WANG Ban, TAN Chunlin, et al. Development of flexible capture technology for space non-cooperative target[J]. *Journal of Astronautics*, 2020, 41(2): 125-135. (in Chinese)
- [18] 郭吉丰, 易琳, 王班, 等. 空间绳网多收口质量块收口过程动力学分析[J]. 宇航学报, 2017, 38(7): 669-677.
- GUO Jifeng, YI Lin, WANG Ban, et al. Dynamic analysis of take-up process for space tethered-net[J]. *Journal of Astronautics*, 2017, 38(7): 669-677. (in Chinese)
- [19] MAZUMDAR A, SPENCER S J, HOBART C, et al. Synthetic fiber capstan drives for highly efficient, torque controlled, robotic applications[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 554-561.
- [20] 蒋辉虎. 舰载机着舰阻拦规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- JIANG Huihu. Research on the arresting law of carrier-based aircraft landing[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019. (in Chinese)
- [21] 张晓谓, 张育兴, 刘勇, 等. 阻拦索张力控制方法[J]. 国防科技大学学报, 2016, 38(6): 49-53.
- ZHANG Xiaoxu, ZHANG Yuxing, LIU Yong, et al. Method of arresting cable tension control[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2016, 38(6): 49-53. (in Chinese)
- [22] 杨志达. 空间系绳用永磁电机张力伺服系统控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
- YANG Zhida. Research on control technology of permanent magnet motor tension servo system for space tether[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020. (in Chinese)

(编辑: 张 雪)