

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.06.032

摩擦干扰下智能提升设备柔性随动技术研究

任鑫宇,梁滔,张连新

(中国工程物理研究院 机械制造工艺研究所,四川 绵阳 621900)

摘要:采用智能提升设备与滚动导轨相结合的装配装置对大部件进行重力平衡与装配过程的精确导向,提升了操作的方便性。由于导轨非线性摩擦力对智能提升设备称质量过程有干扰,控制系统输出的平衡力与所需的力之间有较大误差。针对上述问题,提出一种基于力反馈的柔性随动控制方法:基于S曲线设计力-速度转化关系以增强系统运动的平顺性;根据系统的特性提出在指定区间搜索谐振峰值的陷波滤波器方案;采用脉冲补偿的方式抑制系统中的摩擦干扰。采用仿真方法验证了所提方案的有效性。

关键词:大部件装配;智能提升设备;摩擦干扰;柔性随动控制

中图分类号:TP275 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2021)06-0123-06

Research on Flexible Follow-up Technology of Intelligent Lifting Equipment under Friction Interference

REN Xinyu, LIANG Tao, ZHANG Lianxin

(Institute of Mechanical Manufacturing Technology, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The assembly device combining intelligent lifting device and rolling guide is adopted to balance the gravity of the large parts and guide the assembly process with accuracy, which improves the convenience of operation. Under the interference of the non-linear friction force of the guide rail on the weighing process of the intelligent lifting device, there is a large deviation between the balance force output by the control system and the required force. To deal with the deviation, a flexible follow-up control method based on force feedback at the operating side is proposed. A force-speed conversion relationship is designed based on the S curve to enhance the smoothness of the system motion. According to the characteristics of the system, a notch filter is put forward to search the resonance peak in a specified interval. The friction interference in the system is suppressed by means of pulse compensation. And a simulation method is applied to verify the effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: assembly of large parts; intelligent lifting device; friction interference; flexible follow-up control

0 引言

智能提升设备具备了机电部分强大的拖拽和运动能力以及人的感知和灵活的特点,可以完成一些复杂的搬运和装配工作,具有很高的灵活性及可靠的运行机制。

国内外对智能提升设备的研究主要集中于以下两个方面:1)垂直方向(基于拉力传感器等)人机交互的控制方案,包括速度控制、导纳控制、阻抗控制;2)水平运动时的防摆控制(基于角度传感器),包括PID控制,模糊控制等^[1]。熊健等^[2]设计了高位和低位两种模式的微操作方式,操作人员根据位置的不同选用不同的方式对负载进行提升;许洪涛^[3]分别对PID控制和双模糊控制下的小车负载防摆系统进行了对比,得出基于操作者实际经验的模糊防摆策略,能较为有效地抑制负载摆幅的幅值,并且对于钢丝绳长度变化和负载变化具有更好的鲁棒性;CAMPEAU-LECOURS A等^[4]设计了一种高精度角度传感器,用于感知负载在水平面内的运动趋势,同时为了消除运行过程中加速度对负载质量计算的误

差,提出了一种复合的加速度估计方法,提高了竖直方向控制的精度。国外已经有大批智能提升设备涌现,包括多个国家的众多品牌,例如美国的Stanley Assembly Technologies、Ingersoll-Rand、德国的SMI等;国内哈尔滨工程大学研制了一种用于辅助物料搬运的合作机器人^[5],杭州某公司研制的IAD-H已经投入市场并有良好的使用体验。

目前智能提升设备产品基于精确称质量依靠电机驱动系统施加平衡力,对负载质量进行平衡进入“浮动模式”,依靠人的操作意图对负载运动方向进行控制。在大部件套装等装配应用场景中(例如图1所示的某大部件套装装置),为了提升操作方便性,采用智能提升设备平衡负载质量,同时采用导轨机构对套装配作进行精确导向,在使用过程中发现导向机构存在非线性摩擦力 f ,使得现有的设备在称质量环节出现了较大误差,进而导致对于操作力方向和大小的判断有误,限制了设备的使用性能。因此本文针对摩擦力干扰下智能提升系统的柔性随动控制方法进行研究。

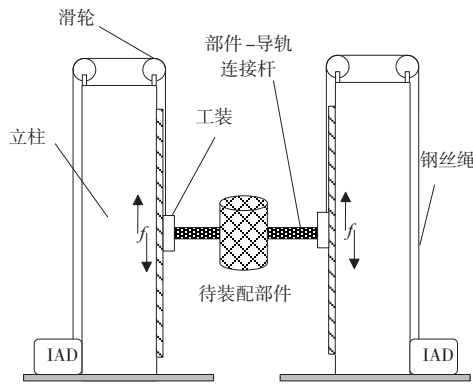


图1 某大部件套装装置示意图

1 基于操作端力反馈的柔性随动控制系统设计

直观上解决上述问题的一种方式是通过电机驱动系统补偿摩擦力。在这种方案下,需要分别对上升与下降方向摩擦力进行正向或者负向补偿,但是在操作意图不明确的情况下无法判断补偿方向。因此本文设计了一种利用操作端力反馈感知人操作意图的柔性随动控制方法。为了验证所提出方法的原理,本文对图1所示的双边平衡系统进行了简化,构建了如图2所示的实验系统(考虑到以原理验证为目的,实验系统对机械结构等进行了适当简化,相关参数见表1)。

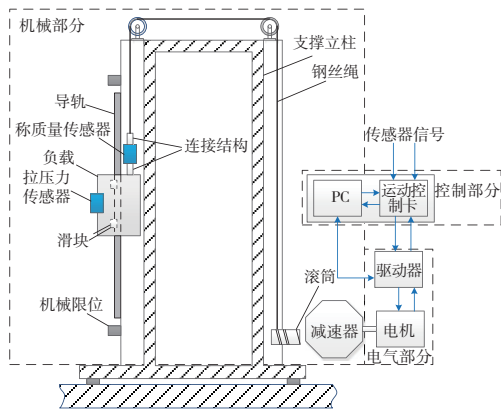


图2 提出方法的实验系统示意图

表1 模型各对象参数

对象	数值
负载质量 M/kg	[10 30]
钢丝绳长度 L/m	[1 2]
钢丝绳弹性系数 $K_g/(\text{N}/\text{m})$	[1.74×10^6 3.48×10^6]
滚筒转动惯量 $J_G/(\text{kg}/\text{m}^2)$	0.035 1
减速器刚度 $K_j/(\text{Nm}/\text{rad})$	48 128
等效转动惯量 $J_m/(\text{kg}/\text{m}^2)$	1.47×10^{-4}
滚筒半径 r/m	0.08
减速比 i	100 : 1

所提方法的控制原理如下:操作人员通过拉压力传感器输入力信号,上位控制系统对拉压力信号进行处理后给出速度指令,速度指令控制下位电机驱动系统速度环驱动钢丝绳牵引负载沿导轨运动。该控制原理下需要解决以下3个问题:1)人手施加力具有类似阶跃变化特点,需要输入力信号进行平滑处理;2)导轨非线性摩擦力引起的启动滞后问题;3)钢丝绳等传动系统柔性以及负载质量变化对系统刚度的影响导致运动过程的振动。为解决上述问题,本文提出如图3所示的柔性随动控制方法:在人机交互界面上,一方面通过力反馈-速度指令转换关系实现柔性力输入;另一方面,通过谐振抑制和摩擦来补偿提高速度环响应的平顺性。

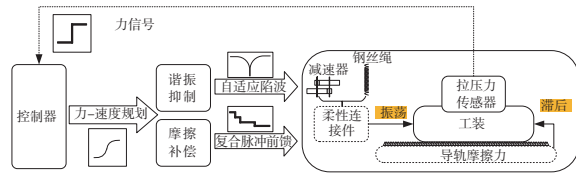


图3 柔性随动控制方法示意图

2 柔性随动控制方法

2.1 基于S曲线的力-速度规划

在操作人员与拉压力传感器的接触过程中,操作力对于传感器的输入相当于一个阶跃信号输入。为了使人手与系统接触的瞬间不发生跳变同时又能改善人手与传感器接触的作用力,对输入系统的信号进行平顺性处理。

根据操作力 F 的大小,将输入力转化为不同大小的速度信号 v 输入系统。当人手施加到传感器的力 $< 0.05 \text{ N}$ 时,系统处于“死区”,该区的存在主要防止误触等造成的系统不必要的运动;当施加的力处于 $[0.05 \ 0.2] \text{ N}$ 时,随着输入力 F 的增大,对应的速度信号 v 也增大,两者呈现线性关系;当输入力进一步增大,则限制对应输入速度的大小,本系统将其限制在 0.1 m/s 。力-速度对应关系如图4所示。

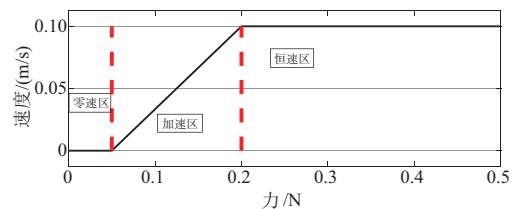


图4 系统输入力-速度对应关系

当力信号转化为对应的速度信号后,对于输入的速度信号进一步处理,目标是使得该阶跃速度信号随时间缓慢变化至终值而不是瞬间完成这一过程。为此,以输入的速度信号 v_{input} 为目标终值,以0为初始值设计了一个基于S曲线的加速过程,在这个关系中速度是时间的函数,时间-速度曲线如图5所示(本刊为黑白印刷,如有疑问请咨询作者)。

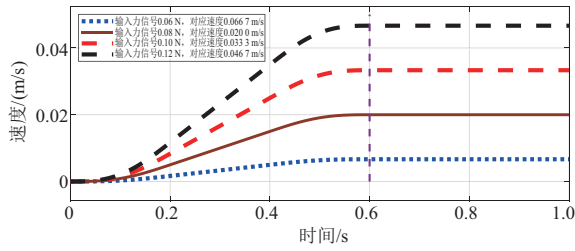


图5 基于S曲线的加速规划

加速过程中的S曲线表达式为

$$v = v_{\text{input}} \begin{cases} 1.25(t - \sin(5\pi t)) / (5\pi) & 0 \leq t < 0.2 \\ 2.5t - 0.25 & 0.2 \leq t < 0.4 \\ 1.25t + \sin[5\pi(t-4)] / (4\pi) + 0.25 & 0.4 \leq t < 0.6 \\ 1 & t \geq 0.6 \end{cases} \quad (1)$$

通过对力-速度变换关系以及S曲线速度规划后,系统的输入变为一个缓慢加速的信号并在0.6s达到终值,在一定程度上可以避免系统在启动阶段有过大的跳动,对系统运行的平顺性有积极的作用。

2.2 基于自适应滤波器的多惯量系统谐振抑制

对于系统的机械部分(如图2虚线框图部分所示),考虑减速器和钢丝绳的柔性,其中减速器作为转动部件,将其转动惯量折算到电机输出端,并单独将扭转刚度取出建模,使得滚筒与电机连接作为双惯量系统,因此第一个柔性环节为减速器,而钢丝绳作为线性运动部件需要用弹性系数来替代扭转刚度,使得滚筒和导向机构之间形成第二个柔性连接^[6]。据此可将图2机械部分等效为一个多惯量模型,如图6所示。

模型中各符号定义: J_m 为电机转子与减速器折算到

电机转子的转动惯量之和; b_m 为电机转子机械阻尼系数; T_m 、 θ_m 分别为电机电磁转矩、电机转子转角; K_j 、 C_j 、 T_j 分别为减速器扭转刚度、阻尼系数、减速器转矩; J_G 、 b_G 分别为滚筒转动惯量、机械阻尼系数; K_g 、 C_g 、 F_g 分别为钢丝绳弹性系数、机械阻尼系数、钢丝绳拉力; L 为钢丝绳长度; M 为负载质量; v 为负载运行速度。

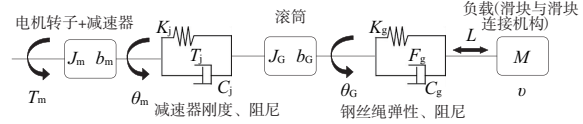


图6 多惯量模型示意图

根据图6的模型,可以推导出多惯量系统的动力学方程(系统建模过程中忽略了机械阻尼的影响)。选取系统状态变量 $x(t) = [\omega_m \ \omega_G \ v \ T_j \ F_g \ M_g]^T$,系统输入 $u(t) = T_m$,系统输出 $y(t) = \omega_m$,得到如下的状态空间方程:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & -1/(J_m i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/J_G & -r/J_G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/M & -1/M \\ K_j/i & -K_j & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_g r & -K_g & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = [1/J_m \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

分别在不同负载以及不同绳长的条件下作出系统的bode图以分析系统的幅频特性(图7)。系统中各参数数据如表1所示。

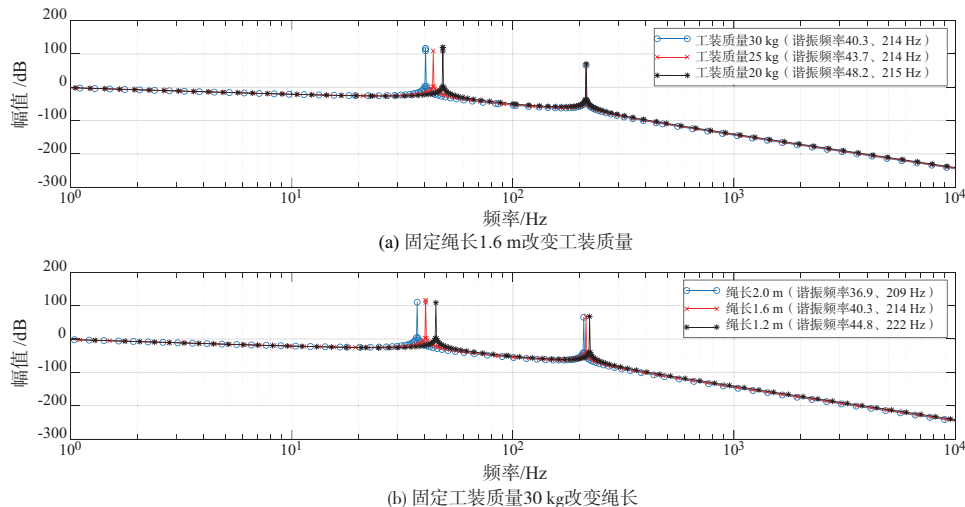


图7 绳长与负载变化对系统谐振点的影响

从图7中可以看到,系统谐振点频率随着负载质量的变大而减小,随着绳长的变短而增大。在实际运行过程中,负载会不定期更换而绳长会在每个时刻都发生改变,故系统的谐振点时刻处于变化的状态中。本文利用基于FFT的自适应陷波滤波器对系统变谐振点的现象进行抑

制。该方法利用一段时间内的速度误差数据进行快速傅里叶变换获取当前的谐振频率并实时更新滤波器的参数以抑制变化频率的谐振^[7]。在提取谐振频率的过程中发现,由于系统中存在低频信号,在开始运行的一段时间内低频信号的幅值要远大于谐振频率的幅值,无法直接提取

峰值对应的频率为谐振频率,因此采用在指定区间内搜索的方式来提高获得谐振频率的快速性和准确性。根据系统谐振的特性选取 [10 100] Hz 为频率搜索区间,对速度误差做 1 024 点 FFT 得到谐振点频率,算法原理如图 8 所示,控制方式实现如图 9 所示。



图 8 指定区间搜索峰值流程

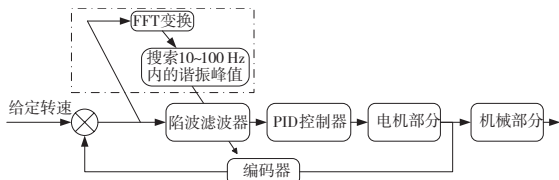


图 9 变频率谐振抑制控制原理

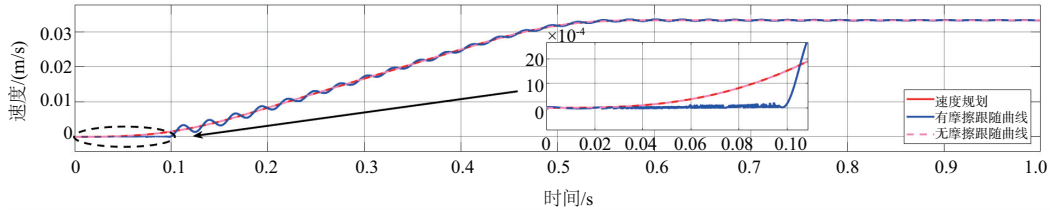


图 10 系统有、无摩擦速度跟随曲线

从图 10 中可以看到,相较于无摩擦的系统,有摩擦的系统在系统开始运行的较短时间内出现了速度“死区”,持续时间在 0.1 s 左右,这使得系统的启动性能变差。因此需要对这一时间段内的摩擦力进行补偿,以降低摩擦作用的时间,提高系统启动性能。

本文利用一种不基于摩擦模型的方式——复合脉冲法来改善系统中的摩擦问题。将滚筒的转动惯量折算到电机端,忽略减速器的刚度影响,简化模型如图 11 所示。

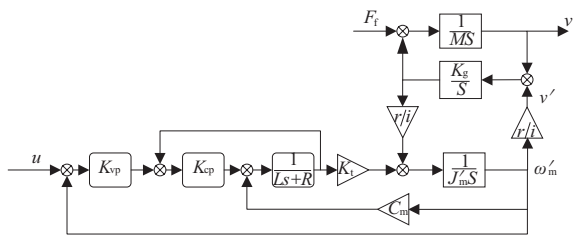


图 11 简化后的系统示意图

图 11 中: u 为给定信号; K_{vp} 为速度环放大倍数; K_{cp} 为电流环放大倍数; K_t 为转矩常数; C_m 为反电动势系数; J' 为电机转动惯量与减速器、滚筒折算到电机输出轴的转动惯量之和; ω'_m 为滚筒转速; L 为电枢电感; R 为电枢电阻。当操作信号经过转化输入到系统中后,电机在较短时间内发生转动从而引发减速器以及滚筒的运动,但是负载端由于受到非线性摩擦力的影响在宏观上不会出现运动,只有当钢丝绳上的力达到一定的值后才开始运动。为了简化模型,将电流环视为一个线性放大环节。定义 $K_r = r/i$, 有以下微分方程:

$$(u - \omega'_m) K_{vp} K_{cp} K_t / R - K_g / s K_r^2 \omega'_m = J' \dot{\omega}'_m \quad (3)$$

2.3 基于复合脉冲前馈的导轨非线性摩擦力补偿

在图 2 所示的系统结构图中,可以看到钢丝绳末端与负载等结构为偏置连接,这会使得负载围绕连接点产生一个逆时针方向的力矩,导轨为了限制这个力矩,必然会在导轨和滑块之间产生一个方向相反的力矩,进而使得与钢丝绳偏置连接的负载和导轨之间产生一定的摩擦力。为了提高系统的启动性能,需要对起始时刻的摩擦力进行补偿。本文基于 Stribeck 模型将摩擦力引入系统,作为一种静态摩擦模型^[8],它能以 90% 的精度近似拟合真实的摩擦力^[9],因此已经具有较高的可靠性。通过对比有摩擦和无摩擦系统在给定速度信号下的跟随情况来模拟系统在启动阶段的不同,采用负载质量 30 kg,绳长 1.6 m 得到速度跟随如图 10 所示。

定义滚筒在一个较短时间内输出 $v' = K_r \omega'_m$, 得到传递函数 G_i 为

$$G_i = \frac{v'}{u} = \frac{K_{vp} K_{cp} K_t K_r s}{R J' s^2 + K_{vp} K_{cp} K_t s + R K_g K_r^2} \quad (4)$$

在本系统中,输入信号在时间上可以分为 3 段,而非线性摩擦力主要作用于系统起始的阶段。通过仿真实验(图 10)可以看到在前 0.1 s 内非线性摩擦的作用较强,由式(2)中 0 s~0.2 s 表达式可知,此时对应的系统速度环输入信号为

$$u = v_{input} \times 1.25 [t - \sin(5\pi t)] / (5\pi) \quad 0 \leq t < 0.2 \quad (5)$$

定义输入的脉冲信号为 α , 叠加的信号经过 t_0 时刻的作用后,输入系统的信号可表示为

$$\lambda = u + \alpha = v_{input} \times 1.25 [t_0 - \sin(5\pi t_0)] / (5\pi) + \alpha \quad 0 \leq t_0 < 0.2 \quad (6)$$

当电机开始转动而负载不动时,对系统传递函数做 Laplace 逆变换,有

$$v'(t_0) = \lambda L^{-1} [G_i / s] \quad (7)$$

上式表达了滚筒在有输入信号时的单位阶跃响应,需要定义一个滚筒运行的最小速度 v'_{min} 来表示负载已经脱离摩擦区域开始运动,若 v'_{min} 已确定,令 $v'_{min} = v'(t_0)$ 即可求出叠加信号 α 的值。据以上分析,带入仿真数据,其中 $J' = 1.38 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^2$, $K_{vp} = 6 \text{ A/(rad/s)}$, $K_{cp} = 1.6 \text{ A/V}$, $K_t = 0.12 \text{ Nm/A}$, $M = 30 \text{ kg}$, $K_g = 2.174 \times 10^6 \text{ N/m}$, $K_r = 48 \text{ 128 Nm/rad}$, $R = 0.365 \text{ } \Omega$, $L = 1.61 \times 10^{-4} \text{ H}$, 取 $v_{min} = 0.002 \text{ m/s}$ 及 $t_0 = 0.01 \text{ s}$ 可得

$$G_i = \frac{9.8e^{-5}s}{4.891e^{-5}s^2 + 1.225s + 0.508} \quad (8)$$

得到第一个时刻 0.01 s 内叠加信号的值为 2.5 rad/s。为了使得脉冲信号能符合摩擦力逐渐减小的趋势,通过仿真实验确定 0.01 s~0.1 s 内的脉冲信号幅值及作用时间,

使其峰值呈阶梯下降的形式,在满足摩擦补偿的同时降低对系统输入信号的影响,叠加信号的幅值及作用时间曲线如图 12 所示(0.1 s 后脉冲信号为 0)。

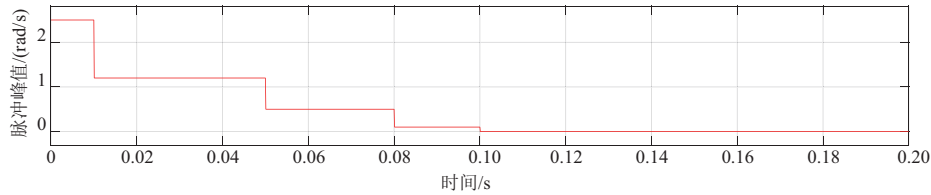
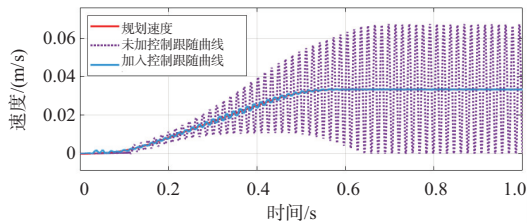


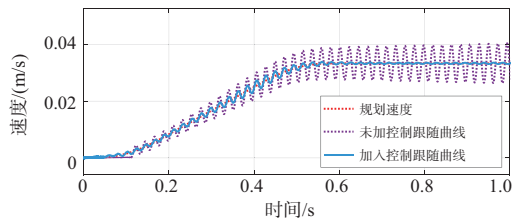
图 12 脉冲信号随时间变化曲线

3 仿真分析

本节采用数值仿真方式对第 2 节提出的方法进行验证^[10]。系统输入信号为阶跃力信号,通过 2.1 节的方式规划为 S 型速度曲线,对相同绳长(1.6 m)下不同负载运行情况进行仿真,控制最大速度在 0.033 m/s,仿真时间 2 s。因为绳长变化相较于总长较小,可忽略绳长引起的谐振点变化,选取负载质量分别为 10 kg、20 kg,对照组为未进行控制的速度跟随曲线,结果如图 13、图 14 所示。

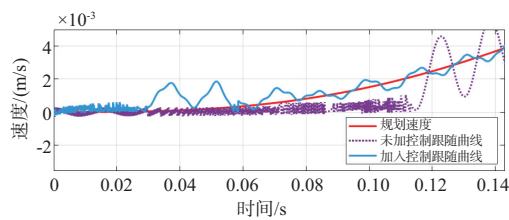


(a) 10 kg

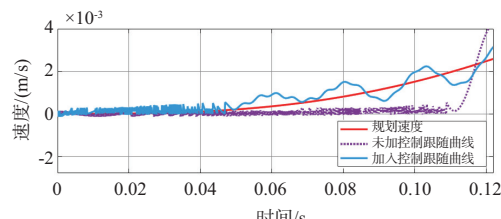


(b) 20 kg

图 13 10 kg/20 kg 运行过程加入控制与未加入控制效果对比



(a) 10 kg



(b) 20 kg

图 14 10 kg/20 kg 启动阶段加入控制与未加入控制效果对比

从图 13、图 14 中可以看到谐振现象得到了明显的抑制,在启动过程中的摩擦得到了有效的补偿,“死区”持续时间大幅减小,系统启动性能得到了提高。

在负载质量为 10 kg 条件下,初始绳长 1.6 m,操作力给定 0.1 N,目标速度 0.033 m/s 运行 15 s,即终止绳长在 1.15 m 左右。在整个过程中, K_g 随着绳长的变短而变大,系统的刚度也随之变大,所提出的滤波器仍能准确识别谐振频率变化,系统仅在几个时刻有小幅的振动,相对于运行速度来说可以忽略不计,负载跟随速度曲线如图 15 所示。

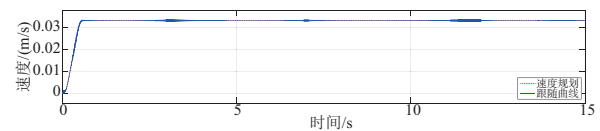


图 15 变刚度系统速度跟随曲线

综上,无论是在系统启动时的摩擦干扰还是在运行过程中的谐振影响,在复合控制策略下都能得到有效的抑制,验证了第 1 节中提出控制方法的有效性,保证了系统运行的平顺性及稳定性。

4 结语

针对现有智能提升设备在摩擦力干扰下称质量不准确进而影响装配操作性能的问题,本文提出一种基于负载端力反馈的柔性随动控制新方法。该方法利用力反馈表达人的操作意图,将力信号转化为速度指令信号驱动速度环控制系统实现柔性随动功能。为了实现良好的人机交互性能,一方面,基于 S 曲线设计了力信号与速度指令转换关系,实现柔性力输入;另一方面,基于自适应滤波器抑制了变刚度柔性系统的谐振,基于复合脉冲前馈对系统的摩擦力进行了补偿,实现速度环响应的平顺性。仿真分析结果显示,所提的方法能有效减小摩擦力的和谐振引起的运动滞后与抖动问题。该研究对于扩展智能提升设备的应用场景具有一定意义。

参考文献:

[1] 王岚, 张立勋, 赵红菊. 基于 Fuzzy 控制的零重力操作系统[J]. 自动化技术与应用, 2005, 24(12): 48-50.
 [2] 熊健. 双控微操作助力机械手控制系统研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.
 [3] 许洪涛. 大型零件搬运装配的智能辅助设备设计及控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学.

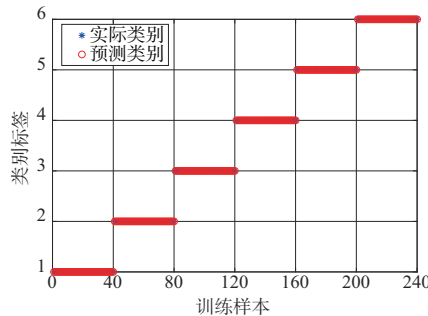
- [4] CAMPEAU - LECOURS A, FOUCAULT S, LALIBERTÉ T, et al. A cable-suspended intelligent crane assist device for the intuitive manipulation of large payloads [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2016,21(4):2073-2084.
- [5] 高建秀. 助力机械手控制系统实验研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2012.
- [6] 丁有爽,肖曦. 伺服系统柔性负载建模方法研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):818-827.
- [7] 王璨,杨明,徐殿国. 基于PI控制的双惯量弹性系统机械谐

振的抑制[J]. 电气传动,2015,45(1):49-53.

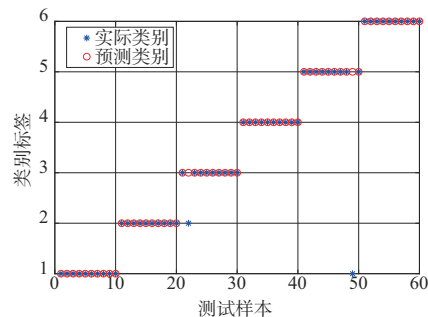
- [8] 刘强,尔联洁,刘金琨. 摩擦非线性环节的特性、建模与控制补偿综述[J]. 系统工程与电子技术,2002,24(11):45-52.
- [9] 丁千,翟红梅. 机械系统摩擦动力学研究进展[J]. 力学进展,2013,43(1):112-131.
- [10] 刘金琨. 先进PID控制MATLAB仿真[M]. 2版. 北京:电子工业出版社,2004.

收稿日期:2020-10-09

(上接第117页)



(a) ELM诊断准确率=100%



(b) ELM诊断准确率=96.6667%

图6 ELM故障识别

图6中,横坐标分别代表训练样本和测试样本,纵坐标代表6种故障类别的标签。测试样本中的空心点代表预测类别。实心点代表实际类别。当测试的数据符合同类故障的标准时,空心点和实心点会重合,代表识别正确。本文测试集总的准确率达到96.7%,对于绝大多数的故障情况,都能达到很好的识别效果。

5 结语

针对齿轮故障特征在单一尺度难以全面提取的问题,提出一种基于参数优化的VMD和多尺度排列熵的齿轮故障诊断方法。相比较手动寻优,该方法可以搜寻更优的

VMD参数组合,更有效地提取出不同故障状态下的信号特征参数。分析结果表明,通过参数优化VMD和多尺度排列熵的齿轮故障诊断方法,极大地提高了齿轮故障诊断的准确性。

参考文献:

- [1] 丁康,李巍华,朱小勇. 齿轮及齿轮箱故障诊断实用技术[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 卓仁雄,肖金凤. 基于改进的集合经验模态分解的电动机滚动轴承故障诊断研究[J]. 机械制造与自动化,2019,48(1):36-39.
- [3] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition [J]. IEEE Transactions on Signal Processing,2014,62(3):531-544.
- [4] 刘长良,武英杰,甄成刚. 基于变分模态分解和模糊C均值聚类的滚动轴承故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2015,35(13):3358-3365.
- [5] 瞿红春,许旺山,郭龙飞,等. 基于参数优化变分模态分解的滚动轴承微弱故障诊断研究[J]. 机床与液压,2020,48(9):162-167,180.
- [6] 张莹,殷红,彭珍瑞. 基于改进SVD及参数优化VMD的轴承故障诊断[J]. 噪声与振动控制,2020,40(1):51-58.
- [7] 潘震,黄国勇,吴漫. 基于参数优化VMD和增强多尺度排列熵的单向阀故障诊断[J]. 振动与冲击,2020,39(15):118-125.
- [8] YANG X S. A new metaheuristic bat-inspired algorithm [M]// Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2010). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 65-74.
- [9] 史峰,王辉,郁磊. MATLAB智能算法30个案例分析[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2011.
- [10] BANDT C, POMPE B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series [J]. Physical Review Letters, 2002, 88(17):174102.
- [11] COSTA M, GOLDBERGER A L, PENG C K. Multiscale entropy analysis of complex physiologic time series [J]. Physical Review Letters, 2002, 89(6):068102.

收稿日期:2020-11-02