

模态参数识别和输入整形相结合的抑振方法^{*}

李琳, 胡锡钦, 邹焱飏

(华南理工大学机械与汽车工程学院 广州, 510641)

摘要 针对输入整形技术对模态参数的高度依赖性以及整形器给系统带来延时的问题, 提出一种模态参数识别和无延时输入整形结合的复合方法。以单自由度机械臂为对象, 研究在 S 型曲线输入信号作用下系统的振动特性, 定量分析该方法对机械臂残余振动幅值的影响。搭建了机械臂残余振动抑制测试的实验平台, 并采用对系统模态参数最敏感的零振动(zero vibration, 简称 ZV)型整形器进行间歇-间歇(rest-to-rest)实验。结果显示, 使用该方法后机械臂残余振动的最大振幅仅为原最大振幅的 31%, 稳定时间由整形前的 0.118s 缩短到整形后的 0.043s, 机械臂运动控制的总时间由 1.738s 降为 1.643s, 表明该方法有效地抑制了机械臂的残余振动, 并保证了机械臂的工作效率。

关键词 残余振动; 输入整形; 模态参数; 延时; 稳定时间

中图分类号 TH113.1; TP242.2

引言

自动化技术的发展促使工业机器人被广泛应用在生产制造领域, 随着生产要求的提高, 实现机器人高速高精度的运动变得尤为重要。然而, 高速运动会使机械臂产生较大的残余振动, 实际生产中, 通常需要等到残余振动消失或者衰减到允许范围之后才能进行位置精度要求高的工序, 这就很难满足生产的要求。为了消除这种振动带来的副作用, 提高工作效率, 研究人员进行了大量的研究工作。近年来, 输入整形技术成为振动控制领域的研究热点。文献[1-3]对输入整形技术进行了深入的研究, 分析了整形器的鲁棒性以及模态参数的敏感性, 并在不同应用实例中验证了其有效性。董明晓等^[4-5]针对弹性机构中的单模态和多模态振动问题, 提出将输入整形引入到比例-微分(proportion derivative, 简称 PD)反馈控制中, 通过合理的设计控制器, 使其具有较强的参数鲁棒性和抗外界干扰能力。赵志刚等^[6]提出了改进型负输入整形和最优控制结合的方法, 引入线性二次型调节器反馈以应对模型参数不精确的问题。贾鹏霄等^[7]将 PD 自适应控制与输入整形技术相结合, 考虑系统模型存在参数不匹配的影响,

利用输出信息进行 PD 自适应控制器的设计, 保证跟踪参考模型的输出以获得满意的性能。然而, 这些方法都是以简化、理想化的动力学模型为基础, 这使得获取到的模态参数与实际系统的模态参数不匹配。

鉴于在设计输入整形器时, 整形器脉冲序列中各脉冲的幅值和作用时刻的求解要求精确的动力学模型, 且对模型参数的变化很敏感, 而采用鲁棒输入整形器虽然扩大了带宽, 但却要消耗大量的调节时间。为此, 既考虑到输入整形器对系统振动模态参数的敏感度很高, 也考虑到输入整形器会带来延时, 影响机器人的工作效率, 笔者提出一种基于模态参数识别和无延时整形相结合的复合方法来抑制机械臂的残余振动。

1 输入整形原理

输入整形是将初始指令与特定的脉冲序列进行卷积, 生成的整形指令作为控制系统运动的输入信号^[6]。其基本原理可以由图 1 来描述, 在 $t_1 = 0$ 时刻输入幅值为 A_1 的脉冲信号, 系统响应在图中用实线表示, 为了抑制由第 1 个脉冲激起的振动, 在 $t_2 = \Delta T$ 时刻输入幅值为 A_2 的脉冲信号, 其响应在

^{*} 国家科技重大专项资助项目(2015ZX04005006); 广东省科技重大专项资助项目(2014B090921004, 2014B090920002); 广州市科技重大专项资助项目(20160404009)
收稿日期: 2017-05-11; 修回日期: 2017-06-27

图中用虚线表示。由线性系统的叠加性可知,两个脉冲引起的系统响应如图中点画线所示,当 $t \geq \Delta T$ 时,两个脉冲激起的振动相互抵消,达到抑振的目的。

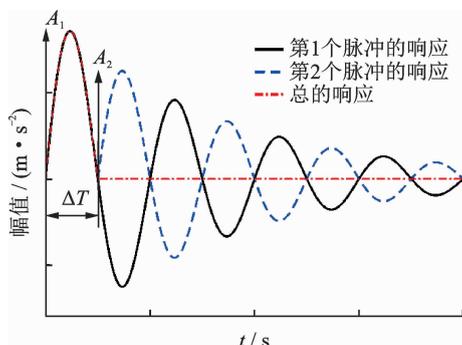


图1 输入整形法原理

Fig.1 Principle of input shaping

下面通过二阶线性系统来引出输入整形器的设计过程,假设二阶线性系统的传递函数为 G

$$G(s) = \frac{k\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

其中: ω_n 为自然频率; ζ 为阻尼比; k 为增益。

二阶线性系统的单位脉冲响应为

$$y(t) = \left[k \frac{\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} \exp(-\zeta\omega_n t) \right] \sin(\omega_d t) \quad (2)$$

其中: $\omega_d = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2}$ 为系统阻尼频率。

假设整形器由 n 个脉冲组成,那么整形器可表示为

$$f_{is}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \delta(t - t_i) \quad (3)$$

以包含 n 个脉冲的脉冲序列作为系统的输入信号,则系统响应为

$$y(t) = \sum_{i=1}^n A_i y(t - t_i) = \frac{k\omega_n}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n(t-t_i)} [V_1 \sin(\omega_d(t-t_i)) + V_2 \cos(\omega_d(t-t_i))] \quad (4)$$

$$V_1 = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\zeta\omega_n(t_n-t_i)} \cos(\omega_d t_i) \quad (5)$$

$$V_2 = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\zeta\omega_n(t_n-t_i)} \sin(\omega_d t_i) \quad (6)$$

其中: A_i, t_i 分别为第 i 个脉冲的幅值和作用时刻; t_n 为输入整形器的总长度。

实际上 A_i 和 t_i 也是整形器的两个设计参数。关于 A_i 和 t_i 的求解,需要设置一系列的约束条件: a. 为达到消除残余振动的目的,要求 $t \geq \Delta T$ 时,系统的输出响应 $y(t) = 0$, 即 $V_1 = V_2 = 0$; b. 为保证整

形后的信号与整形前的信号具有相同的增益,同时为避免系统响应出现超调,各脉冲幅值需满足 $A_i > 0$, $\sum_{i=1}^n A_i = 1$; c. t_n 越小,给系统带来的延时就会越短,通常,令 $t_1 = 0$ 。

对于某一确定的系统,其自然频率 ω_n 、阻尼系数 ζ 是确定的,根据上述约束条件可以解出 A_i 和 t_i

$$\begin{cases} A_i = \frac{C_{n-1}^{i-1} k^{i-1}}{\sum_{i=0}^{n-1} C_{n-1}^i k^i} \\ t_i = (i-1) \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}} \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$k = \exp\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)$$

最简单的输入整形器是包含两脉冲的整形器,称之为 ZV 整形器,由式(7)可得其数学表示形式为

$$\begin{cases} A_1 = \frac{1}{1+k} & (t_1 = 0) \\ A_2 = \frac{k}{1+k} & (t_2 = \frac{T_d}{2}) \end{cases} \quad (8)$$

其中: $T_d = \frac{2\pi}{\omega_n \sqrt{1-\zeta^2}}$ 。

2 模态参数的识别

整形器的设计需要预先获知系统的两个模态参数:自然频率 ω_n 和阻尼比 ζ 。传统的方法主要有 3 种: a. 建立系统的动力学模型,通过求解动力学方程来获得^[8-9]; b. 通过锤击法等进行模态实验获得^[10]; c. 有限元分析法^[11]。这 3 种方法都能得到系统的各阶模态,但不能直接确定在实际情况下起主要作用的模态,通常的做法是取第 1 阶模态或者前 2 阶模态来设计整形器。

笔者通过对机械臂末端的残余振动信号进行快速傅里叶变换(fast fourier transform,简称 FFT),分析其主要模态,来识别系统的模态参数^[12]。具体步骤如下:

1) 对采集到的残余振动信号进行 FFT 计算,绘制残余振动信号的功率谱;

2) 设定频谱幅度比较阈值 A_v 和频率变化阈值 ω_v , 筛选幅值大于 A_v 的峰值频率 ω_i , 再比较相邻的峰值频率 ω_i , 若 $\omega_{i+1} - \omega_i < \omega_v$, 则当成同一阶模态频率,如此确定在系统振动中起主要作用的模态;

3) 根据步骤 2 中识别到的主振频率 ω_i , 设置带通滤波器,对残余振动信号进行滤波,得到该模态

下的振动时域信号;

- 4) 通过对数衰减法求解阻尼比^[13]。
对数衰减法的计算原理如图2所示。

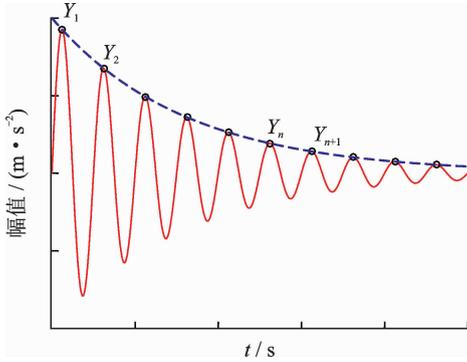


图2 对数衰减法原理

Fig. 2 Principle of logarithmic decrement method

由式(2)可知,第*i*阶模态下的振动信号为

$$y_i(t) = \left[\frac{A_i \omega_i}{\sqrt{1 - \zeta_i^2}} e^{(-\zeta_i \omega_i t)} \right] \sin(\omega_{di} t) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (9)$$

其中:*i*为主振模态序号;*N*为主振模态的数量。

由式(9)可知,振动信号为衰减的正弦信号,其包络线为

$$z_i(t) = A_i \frac{\omega_i}{\sqrt{1 - \zeta_i^2}} \exp(-\zeta_i \omega_i t) \quad (10)$$

设振动信号中两个连续的峰值为 Y_n 和 Y_{n+1} ,那么

$$\delta_i = \ln\left(\frac{Y_n}{Y_{n+1}}\right)$$

$$\zeta_i = \frac{\delta_i}{\sqrt{(2\pi)^2 + \delta_i^2}}$$

为提高计算的准确率,可以选择多个峰值计算出阻尼比 ζ 之后再取平均值。

3 无延时整形的设计方法

传统的输入整形器会引入延时,如果采用鲁棒性强的整形器,就不得不增加整形器中脉冲的数量,这将使延时更加严重。为了消除延时带来的副作用,笔者采用一种对输入轨迹进行加速设计实现无延时的方法,具体设计思路如下。

- 1) 典型的整形器可表示为

$$f_{IS}(t) = \sum_{i=1}^n A_i \delta(t - t_i)$$

其中:*n*为脉冲数; t_n 为整形器的长度,对输入轨迹整形后会使得轨迹时长增加 t_n 。

- 2) 对期望的输入轨迹 $S(t)$ ($t \in [0, T]$) 进行加速设计得到 $S_{acc}(\tau)$ ($\tau \in [0, T - t_{acc}]$),即按时间变量对轨迹均匀加速,使轨迹时长缩短 t_{acc} 。其中 $t_n \leq t_{acc} < T$,取系数

$$k = \frac{T - t_{acc}}{T}$$

则 $S_{acc}(\tau) = S_{acc}(kt) = S(t)$, $t \in [0, T]$ 。如此,确保加速设计后的轨迹与原轨迹保持形状不变,即轨迹曲线的各阶导数的连续性特性不变,而只改变运行速度。

- 3) 对加速后的轨迹 $S_{acc}(\tau)$ 进行整形,得到整形后的轨迹 $S_{IS} = f_{IS} * S_{acc}$ 。假设整形器包含*n*个脉冲,则整形后的轨迹为

$$S_{IS}(t) = \sum_{i=1}^n A_i S'_{acc}(t - t_i) u(t - t_i)$$

$$(t \in [0, T - t_{acc} + t_n])$$

$S_{acc}(t)$ 是对 $S_{acc}(t)$ 的扩展,即

$$S_{acc}(t) = \begin{cases} S_{acc}(t) & (t \in [0, T - t_{acc}]) \\ S_{acc}(T - t_{acc}) & (t \geq T - t_{acc}) \end{cases}$$

其中: $u(t)$ 为单位阶跃函数

$$u(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ 1 & (t \geq 0) \end{cases}$$

其目的是确保整形后机械臂能运行到与未整形时同样的位置,即机械臂运动的起止点相同。

比较原期望的轨迹 $s(t)$, $t \in [0, T]$ 与整形后的加速轨迹 $S_{IS}(t)$, $t \in [0, T - t_{acc} + t_n]$ 可知,由于 $t_n < t_{acc} < T$,所以 $T - t_{acc} + t_n < T$,即整形后的轨迹时长未延长,可以实现无延时。

4 实验

为了验证上述方法的有效性,搭建了单自由度机械臂的实验平台,并进行了间歇-间歇实验来测试抑振效果。

实验平台如图3所示,机械臂实体采用广州数控设备有限公司生产的六自由度工业机器人的J4和J5轴,其中J4轴固定在基座上,J5轴由交流伺服电机通过同步带驱动。驱动模块采用台达公司的ASD-A2 Ether-CAT通讯型交流伺服驱动器和EC-MA-CA0604SS型交流伺服电机,电机额定功率为400W,额定转速为3kr/min。传感器采用的是德国KISTLER公司的三维加速度传感器,测量范围为 $-300 \sim +300 \text{m/s}^2$ 。信号处理模块为华研IPC-510嵌入式工控机,配置主频3.4GHz的Intel i7-3770四核处理器。实验中输入控制信号为机械臂

的位移轨迹,输入指令间隔为 1ms,模态参数识别的计算过程在 Matlab 中完成。

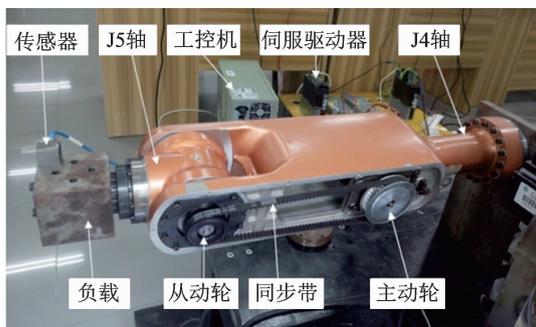


图 3 抑振测试实验平台

Fig. 3 Experiment platform for vibration suppression control

4.1 模态参数识别

本实验中输入轨迹为典型的 S 型曲线,机械臂按照规划的轨迹运行,通过加速度传感器采集机械臂末端残余振动的电压信号,将原始振动信号进行低通滤波,滤除高频噪声,再进行快速傅里叶变换得到的功率谱如图 4 所示。

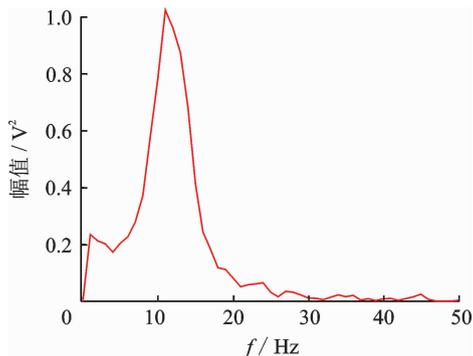


图 4 振动信号功率谱

Fig. 4 Power spectrum of residual vibration

根据前述参数识别法,本实验中系统的主振频率为 11Hz,此处分别用波峰值和波谷值进行对数衰减法求解阻尼比,再取平均值以提高准确性,结果为 $\zeta=0.11$ 。

4.2 整形器设计

根据 4.1 节中所得模态参数设计输入整形器,由式(8)可知 ZV 整形器的数学表达式为

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.586 & 1 \\ 0.413 & 9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.045 \end{bmatrix}$$

根据前述无延时设计的方法,对原始期望轨迹进行整形,结果如图 5 所示。由图 5(a)可知,加速设计后的轨迹与原期望轨迹形状相同而时长缩短,整形轨迹较贴合期望轨迹。由图 5(b)可知,整形后实际的运行时间为 1.6s,而预先期望轨迹的运行时间为 1.62s,这说明通过对轨迹加速设计可以实现无延时的目的。

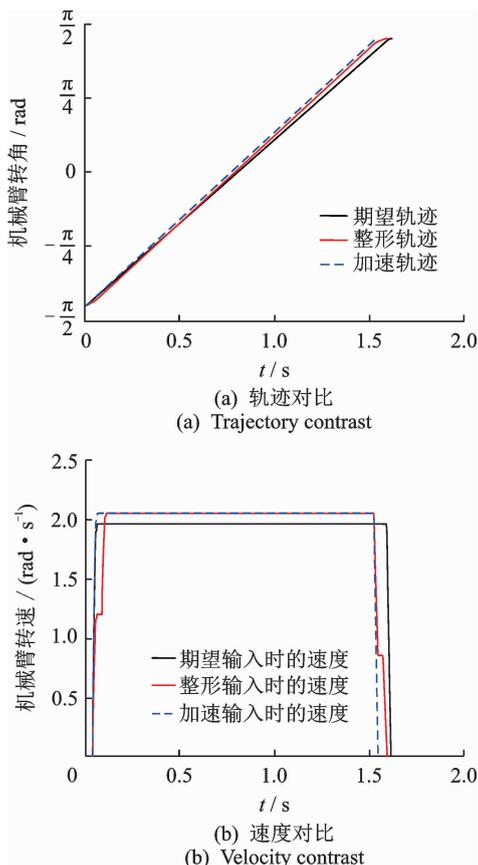


图 5 无延时设计

Fig. 5 Zero time delay method

4.3 抑振效果

首先令机械臂按照期望的轨迹运行,通过加速度传感器采集末端的残余振动信号,如图 6(a)所示。起始时间为期望轨迹运行完的时刻,总时长为 1s。

设整形前后残余振动信号分别为 $y_1(t)$ 和 $y_2(t)$ 。为方便讨论,此处将振动数据按整形前残余振动的最大幅值 $\max(|y_1(t)|)$ 做归一化处理(量纲为 1)

$$y_1^*(t) = \frac{y_1(t)}{\max(|y_1(t)|)}$$

其中: $\max(|y_1(t)|) = 12.7 \text{ m/s}^2$ 。

考虑到噪音以及加速度传感器可能存在的信号

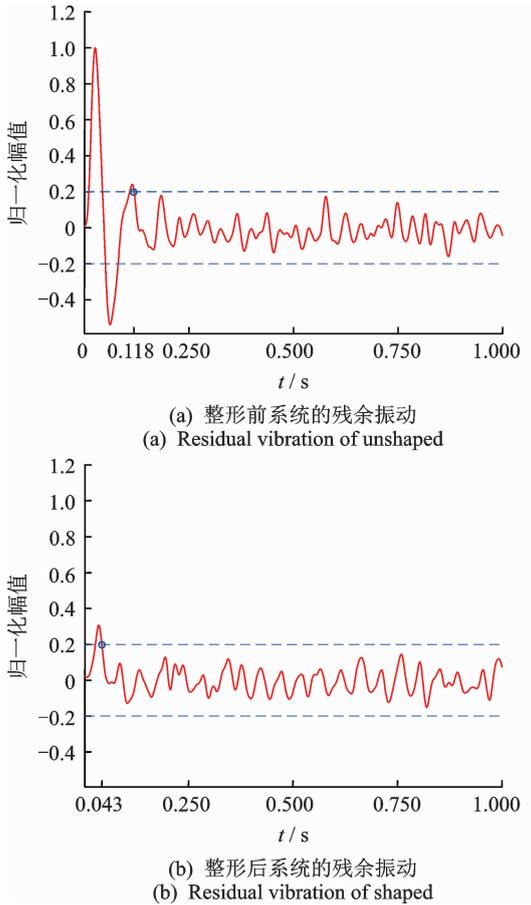


图 6 抑振效果

Fig. 6 Effect of vibration suppression

波动的影响,设定 $|y_1^*(t)| \leq 0.2$ 时(图中用虚线标出),认为振动已经稳定下来,则整形前系统的稳定时间为 0.118s。

图 6(b)所示为机械臂按无延时整形轨迹运行时,从加速度传感器采集到的振动信号 $y_2^*(t)$ 。起始时间为机械臂运动停止时刻,总时长为 1s。此处仍按整形前振动的最大幅值 $\max(|y_1(t)|)$ 做归一化处理(量纲为 1)

$$y_2^*(t) = \frac{y_2(t)}{\max(|y_1(t)|)}$$

整形后系统残余振动的最大幅值仅为整形前的 31%,稳定时间为 0.043 s。

对比整形前后机械臂的运行时间和稳定时间,如表 1 所示。其中总时间为运行时间(即轨迹时长)与稳定时间之和,残余振动的稳定时间由整形前的

表 1 实验结果对比

Tab. 1 Summary result of experiments

输入信号	运行时间/s	稳定时间/s	总时间/s
期望轨迹	1.62	0.118	1.738
整形轨迹	1.60	0.043	1.643

0.118 s 缩短到整形后的 0.043 s,稳定时间大大缩短,说明输入整形器设计合理,抑振效果非常理想。

5 结束语

利用输入整形技术抑制机械系统的残余振动时,通常难以获取系统的模态参数,致使参数不匹配,从而影响抑振效果。同时,输入整形器不可避免地给系统带来延时,影响工作效率。笔者提出了一种基于模态参数识别和无延时输入整形相结合的复合方法来抑制机械臂的残余振动,并且在单自由度机械臂系统上进行实验以验证其有效性。实验结果显示,整形后机械臂末端残余振动的最大振幅降低到整形前的 31%,稳定时间由整形前的 0.118 s 缩短到整形后的 0.043 s,表明通过该方法识别到的振动模态参数准确性较高,设计的输入整形器合理。同时,机械臂的运行时间由 1.62 s 降低为 1.6 s,说明无延时设计方法有效地补偿了输入整形器所带来的延时,运动控制的总时间由整形前的 1.738 s 降低到 1.643 s,保证了机器人的工作效率。

参 考 文 献

[1] Singer N, Seering W. Preshaping command inputs to reduce system vibration [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement & Control, 1990, 112 (1) : 76-82.

[2] Singhose W. Command shaping for flexible systems : a review of the first 50 years [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing , 2009, 10(4): 153-168.

[3] Shome S, Mukherjee A, Datta U. Input shapers against system parametric uncertainty [C]//2013 International Conference on Machine Intelligence Research and Advancement. Jammu, India: IEEE Computer Society, 2013: 299-304.

[4] 董明晓,张明勤,张瑞军,等.单模态振动机构输入整形振动主动控制研究[J]. 振动与冲击,2009,29(8):40-42.
Dong Mingxiao, Zhang Mingqin, Zhang Ruijun, et al. Research on active vibration control for single mode vibration mechanisms [J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 29 (8): 40-42. (in Chinese)

[5] 董明晓,孙杰,郑康平,等.闭环输入整形器消除多模态柔性系统残留振荡[J]. 机械工程学报,2006,42(5): 110-114.

- Dong Mingxiao, Sun Jie, Zheng Kangping, et al. Closed-loop input shape eliminating residual vibration of multi-mode flexible systems [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42 (5): 110-114. (in Chinese)
- [6] 赵志刚,游斌弟,赵阳.改进型负输入整形与最优控制结合的振动抑制方法[J].振动与冲击,2014,33(8):202-208.
- Zhao Zhigang, You Bindi, Zhao Yang. Combination of modified negative input shaping and optimal control for vibration suppression [J]. Journal of Vibration and Shock, 2014,33 (8) : 202-208. (in Chinese)
- [7] 贾鹏霄,李恩,梁自泽,等.PD自适应控制结合输入整形抑制单模态弹性机构振动研究[J].振动与冲击,2013,32(17):189-193.
- Jia Pengxiao, Li En, Liang Zize, et al. Adaptive PD control combined with input-shaping for suppressing vibration of a single-mode flexible mechanism [J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32 (17):189-193. (in Chinese)
- [8] Li Weipeng, Luo Bo, Huang Hai. Active vibration control of flexible joint manipulator using input shaping and adaptive parameter auto disturbance rejection controller [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 363:97-125.
- [9] Pereira E, Trapero J, Diaz I , et al. Adaptive input shaping for single-link flexible manipulators using an algebraic identification [J]. Control Engineering Practice, 2012, 20 : 138-147.
- [10] 韩清凯,于涛,杜戊,等.六杆并联机器人模态实验与动力学特性分析[J].振动工程学报,2003,16 (3): 349-353.
- Han Qingkai, Yu Tao, Du Wu, et al. Experimental modal measurement and dynamical analysis for 6 link parallel robot [J]. Journal of Vibration Engineering, 2003,16 (3) :349-353. (in Chinese)
- [11] 程丽,刘玉旺,骆海涛,等.165kg焊接机器人有限元模态分析[J].机械设计与制造,2012,1(1):147 - 149.
- Cheng Li, Liu Yuwang, Luo Haitao, et al. Finite element modal analysis of 165kg welding robot [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012,1(1):147-149. (in Chinese)
- [12] Aribowo W, Yamashita T, Terashima K. Vibration control of semiconductor wafer transfer robot by building an integrated tool of parameter identification and input shaping [C] // Proceedings of the 18th World Congress the International Federation of Automatic Control. Milano, Italy: Elsevier Science Direct, 2011: 14367-14373.
- [13] 卢晓东,费庆国,韩晓林.基于时间响应函数的结构阻尼识别方法比较[J].力学与实践,2011,33(2):58-61.
- Lu Xiaodong, Fei Qingguo, Han Xiaolin. Evaluation and application of damping identification methods based on time response functions [J]. Mechanics in Engineering, 2011, 33(2):58-61. (in Chinese)



第一作者简介:李琳,女,1962年12月生,博士、教授。主要研究方向为工业机器人技术及应用。曾发表《基于条纹式激光传感器的机器人焊缝跟踪系统研究》(《中国激光》2015年第42卷第5期)等论文。

E-mail: linli@scut.edu.cn