

混和输入整形控制策略快速抑制机器人振动

魏玉兰^{1,2}, 李兵^{1,3}, 张清珠¹, 欧鹏飞³

(1.湖州师范学院 工学院, 浙江 湖州 313000; 2.麦吉尔大学 机械工程系, 加拿大 蒙特利尔 H3A0C3; 3.麦吉尔大学 采矿与材料工程系, 加拿大 蒙特利尔 H3A0C5)

摘要:当多模态系统中各个模态的振动幅度和共振频带宽度差异明显时,正脉冲多模态输入整形器在有效减小残余振动的同时却增加了系统响应时间,而负脉冲混合多模态输入整形方法可解决该问题。介绍了其控制策略的基本原理和一个3-DOF 并联机器人,并构造6种减小该机器人前2个模态振动的负脉冲混合输入整形器。使用仿真获得了各种负脉冲混合两模态输入整形器(NHTIS)的振动响应曲线,分析了其响应时间和抑制振动的能力,并分别与正脉冲、负脉冲两模态输入整形器对比。结果表明 NHTIS 能在减小多模态残余振动的同时提高系统响应速度。

关键词:输入整形;多模态;负脉冲;混合振动控制;机器人

中图分类号:TH16; TP242; O328 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2019)03-0636-07

在制造领域中,机器人、多关节运动机构、机电系统等设备的移动速度和精度是极为重要的评价指标。并联机器人具有较好的系统刚度和运动稳定性,常被使用在运动精度较高的场合,但移动时会出现残余振动,随着运动速度的提升而残余振动越发明显,直接影响其运动精度^[1]。输入整形控制策略是一种能抑制残余振动的有效方法^[2-3],它是根据系统的固有频率和阻尼比计算出一些调节脉冲,并与系统的输入信号进行卷积操作,形成新的输入信号输出给执行元件,从而降低系统的残余振动。这种方法既可使用到单模态系统,也可使用到多模态系统中,即可减小单自由度简单机构的残余振动,也可减小多关节机器人或非线性系统的残余振动^[4-6]。普通多模态输入整形器是利用各阶振动参数建立一些相同类型的单模态输入整形器后合并而成^[7],其构造简单,可同时有效抑制多个模态的残余振动,但增加了系统响应的延迟,可使用负脉冲构建多模态输入整形器以提高系统响应时间^[8-9]。此外,当一个多模态系统各阶的振动幅度和所需要抑制振动的频带宽度差异明显时,一般控制策略的抑振能力明显降低,可应用正脉冲混合多模态输入整形控制策略,但会造成系统响应的时

延迟较大^[7]。针对这种缺陷,根据每阶模态的振动特性构建最适合该阶模态的单模态负脉冲输入整形器,然后构建一种基于负脉冲的混合型多模态输入整形器。

1 并联机器人

一种三自由度(3-DOF)并联机器人如图1所示。

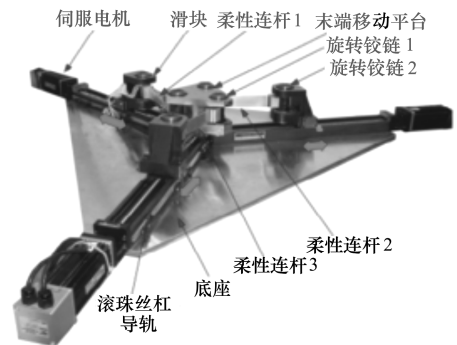


图1 3-DOF 并联机器人

并联机器人由3组直线移动机构在同一平面上

对称布置而成,每组直线移动机构包括伺服电机、柔性连杆、滚珠丝杠导轨、滑块和 2 个旋转关节,且每个柔性连杆均连接到一个等边三角形的末端移动平台,从而形成一个并联机器人,该机器人可实现沿 X、Y 轴的移动和绕着垂直于 XY 平面法线的转动,其主要零部件的尺寸和材料参数见表 1^[5]。

表 1 主要零部件的尺寸和材料参数

参数	数值
末端移动平台各个旋转关节的中心距/mm	100
滚珠丝杠导轨的移动距离/mm	400
连杆长度/mm	200
连杆宽度/mm	30
连杆厚度/mm	2
连杆材料	铝合金
连杆弹性模量/(N·m ⁻²)	7.1×10 ¹⁰
连杆密度/(kg·m ⁻³)	2.77×10 ³
连杆集中转动惯量/(kg·m ²)	5.815×10 ⁻⁵

根据动力学方程可得柔性连杆之间相互作用的受力关系^[10]。通过实验可得 3-DOF 机器人柔性连杆前 2 个模态的固有频率和阻尼比,如表 2 所示^[5,10]。

表 2 固有频率和阻尼比

振动模态	固有频率/Hz	阻尼比
1	76.6	0.057
2	231.2	0.017

2 输入整形控制策略原理

2.1 单模态输入整形

输入整形控制策略是将一组脉冲与输入信号卷积而改变输入信号,使产生的驱动力抵消系统的残余振动^[5]。这些脉冲的作用时间和脉冲的幅值直接影响系统响应时间和减振效果。对于单模态系统,各脉冲的幅值及作用时间可利用固有频率和阻尼比的相关计算而得,根据约束方程(1),系统在这些脉冲依次作用下,其残余振动为零^[5]。

$$B_{AMP} = \sqrt{\left\{ \sum_{i=1}^n [B_i \cos(\varphi_i)] \right\}^2 + \left\{ \sum_{i=1}^n [B_i \sin(\varphi_i)] \right\}^2} \quad (1)$$

式中

$$B_i = A_i \frac{\omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega(t-t_i)} \quad \varphi_i = \omega \sqrt{1-\zeta^2} t_i \quad (2)$$

式中, ω, ζ 分别代表系统的角频率和阻尼比, A_i 和 t_i 代表第 i 个脉冲的幅值和作用时间。为了提高输入整形器的系统响应速度,并减小脉冲幅值对残余振动的影响,使第一个脉冲的作用时间为 0,并使全部脉冲的幅值之和为 1,当所有脉冲的幅值都为正值时,称为正脉冲输入整形器,其基本类型为 ZV,而 ZVD 可提高不灵敏度, EI 具有更高的不灵敏度^[5]。

当输入整形器的脉冲包含负值时,称为负脉冲输入整形器,负脉冲输入整形器的响应速度比正脉冲输入整形器更快,且输入整形器的不灵敏度也随之增加^[11]。负脉冲输入整形器同时包含正脉冲和负脉冲,其任意相连脉冲的幅值之和小于等于第一个脉冲幅值 Q ,在各个脉冲作用过程中,为减小系统振动的幅值,令 $Q=1$ 。负脉冲输入整形器的种类有 NZV、NZVD 和 NEI, NZV 的系统响应速度最快,而 NEI 具有最高的不灵敏度^[11]。

2.2 多模态输入整形

多模态输入整形控制策略是先根据各阶模态的固有频率和阻尼比建立对应模态的单模态输入整形器,然后将它们卷积,即获得多模态输入整形器。正脉冲多模态输入整形器是全部由单模态正脉冲输入整形器构建而成,其类型包括 ZV-ZV, ZVD-ZVD 和 EI-EI^[7]。它们能同时减小系统多阶的残余振动,然而响应速度慢。对于正脉冲多模态输入整形器, ZV-ZV 响应最快,但不灵敏度最低;而 EI-EI 响应最慢,但不灵敏度最好^[7]。

为提高正脉冲多模态输入整形器的响应速度,可使用负脉冲构建负脉冲多模态输入整形控制策略,该方法是将各个负脉冲单模态输入整形器进行卷积计算而构成的,例如前两个模态的负脉冲单模态输入整形器分别为

$$NZV_1 = \begin{bmatrix} A_{NZV1k} \\ t_{NZV1k} \end{bmatrix} \quad NZV_2 = \begin{bmatrix} A_{NZV2k} \\ t_{NZV2k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $A_{NZV1k}, t_{NZV1k}, A_{NZV2k}, t_{NZV2k}$ 分别为脉冲的幅值和作用时间, k 为脉冲数量,则负脉冲两模态输入整形器 NZV-NZV 为

$$NZV-NZV = \begin{bmatrix} A_{NZV1k} \\ t_{NZV1k} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_{NZV2k} \\ t_{NZV2k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

负脉冲多模态输入整形器能明显提高系统响应

速度,其类型包括 NZV-NZV、NZVD-NZVD、NEI-NEI^[8]。当多模态系统中各阶的振动幅度和共振频带宽度差异明显时,一般控制策略抑制振动的能力明显降低,混合多模态输入整形控制策略能解决该问题,这种控制策略是针对各个模态的振动特性分别建立不同类型的正脉冲单模态输入整形器,然后将这些整形器卷积而成,其类型包括 ZV-ZVD、ZVD-ZV、EI-ZV、ZV-EI、ZVD-EI 和 EI-ZVD^[7]。

2.3 负脉冲混合多模态输入整形

当多模态系统振动的频率带宽度和振幅差异很大时,普通负脉冲多模态输入整形器的抑振能力下降;此外,正脉冲多模态混合输入整形器的系统响应较慢。因此,应建立一种新输入整形控制策略来克服这些缺陷。针对多模态系统各阶振动频带的宽度和振幅值,建立不同类型的负脉冲单模输入整形器抑制对应模态的振动,然后将它们卷积,从而构成负脉冲混合多模态输入整形器^[12]。例如,一个两模态系统,其前 2 阶的负脉冲单模态输入整形器 NZV₁,NZVD₂ 如下

$$NZV_1 = \begin{bmatrix} A_{NZV1m} \\ t_{NZV1m} \end{bmatrix} \quad NZVD_2 = \begin{bmatrix} A_{NZVD2n} \\ t_{NZVD2n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $A_{NZV1m}, t_{NZV1m}, A_{NZVD2n}, t_{NZVD2n}$ 分别代表前 2 阶负

脉冲单模态输入整形器脉冲的幅值和作用时间, m 和 n 分别代表 2 个输入整形器的脉冲数量,则这种负脉冲混合两模态输入整形器(NHTIS)为

$$NZV-NZVD = NZV_1 * NZVD_2 = \begin{bmatrix} A_{NZV1m} \\ t_{NZV1m} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} A_{NZVD2n} \\ t_{NZVD2n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据该方法可构建 6 个 NHTIS 输入整形器: NZV-NZVD、NZV-NEI、NZVD-NZV、NZVD-NEI、NEI-NZV、NEI-NZVD。请注意,在构建 NHTIS 过程中,忽略了连接杆之间的相互作用、非线性和外界激励等因素对抑制残余振动的影响。

3 仿真与分析

已知 3-DOF 并联机器人的振动参数, Q 值设定为 1,在系统中采用单位阶跃输入信号,限制所有包含 NEI 的多模态输入整形器的振动幅值不超过 5%。为提高系统响应速度使输入整形器的长度最小,则 NZV-NZVD, NZVD-NZV, NZV-NEI 和 NEI-NZV 最少脉冲序列为 15,而 NZVD-NEI 和 NEI-NZVD 最少脉冲序列为 25。3-DOF 并联机器人的 NHTIS 的参数如表 3 和表 4 所示。

表 3 NZV-NZVD、NZVD-NZV、NZV-NEI 和 NEI-NZV 输入整形器的参数

NZV-NZVD		NZVD-NZV		NZV-NEI		NEI-NZV	
A_k	$t_k(s)$	A_k	$t_k(s)$	A_k	$t_k(s)$	A_k	$t_k(s)$
1	0	1	0	1	0	1	0
-2	0.000 68	-2	0.000 93	-2	0.000 70	-2	0.000 93
2	0.001 21	2	0.001 26	2	0.001 23	2	0.001 26
-2	0.002 76	-2	0.002 17	-2	0.002 77	-2	0.002 24
2	0.002 95	4	0.003 10	-2	0.002 90	4	0.003 16
-2	0.002 90	-4	0.003 43	2	0.002 97	-4	0.003 50
4	0.003 58	2	0.003 70	4	0.003 60	2	0.003 76
-4	0.004 11	-4	0.004 63	2	0.003 86	-4	0.004 69
4	0.005 66	4	0.004 96	-4	0.004 13	4	0.005 02
-4	0.005 85	-2	0.008 49	-4	0.004 56	-2	0.008 53
2	0.003 86	4	0.009 42	4	0.005 09	4	0.009 46
-4	0.004 54	-4	0.009 75	4	0.005 67	-4	0.009 79
4	0.005 07	2	0.009 00	-4	0.005 87	2	0.009 07
-4	0.006 62	-4	0.009 93	-4	0.006 63	-4	0.010 00
4	0.006 81	4	0.010 26	4	0.006 83	4	0.010 33

表 4 NZVD-NEI 和 NEI-NZVD 输入整形器参数

NZVD-NEI		NEI-NZVD	
A_k	$t_k(s)$	A_k	$t_k(s)$
1	0	1	0
-2	0.000 70	-2	0.000 68
2	0.001 23	2	0.001 21
-2	0.002 17	-2	0.002 24
-2	0.002 77	-2	0.002 76
4	0.002 87	4	0.002 92
2	0.002 97	2	0.002 95
-4	0.003 40	-4	0.003 45
2	0.003 70	2	0.003 76
-4	0.004 40	-4	0.004 44
4	0.004 93	4	0.004 97
4	0.004 94	4	0.005 00
-4	0.005 14	-4	0.005 19
-4	0.006 47	-4	0.006 52
4	0.006 67	4	0.006 71
-2	0.008 49	-2	0.008 53
2	0.009 00	2	0.009 07
4	0.009 19	4	0.009 21
-4	0.009 70	-4	0.009 74
-4	0.009 72	-4	0.009 75
4	0.010 23	4	0.010 28
4	0.011 26	4	0.011 29
-4	0.011 46	-4	0.011 48
-4	0.011 77	-4	0.011 83
4	0.011 97	4	0.012 02

根据仿真,图 2 给出了无输入整形和有 NZV-NZVD 作用时 3-DOF 机器人的振动响应曲线。

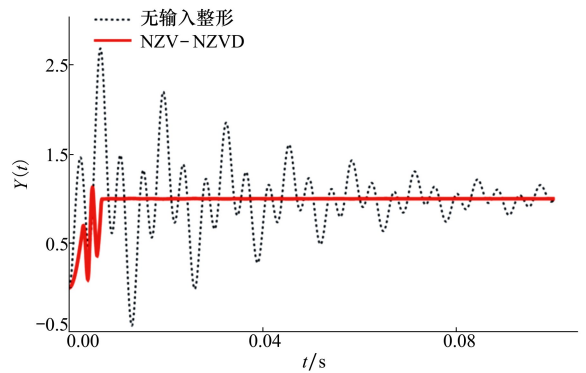


图 2 有 NZV-NZVD 和无输入整形时的振动响应

如图 2 所示,在没有输入整形器作用时,前 2 阶的残余振动较大,而当使用 NZV-NZVD 输入整形器后,前 2 阶的残余振动明显减小。其他负脉冲混合多模态输入整形器的振动响应曲线如图 3~8 所示,并与普通的负脉冲多模态输入整形器和正脉冲混合输入整形器的振动响应曲线对比。

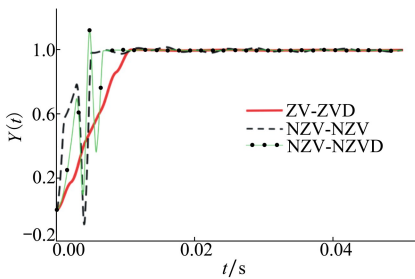


图 3 ZV-ZVD、NZV-NZV 和 NZVD-NZVD 整形的振动响应

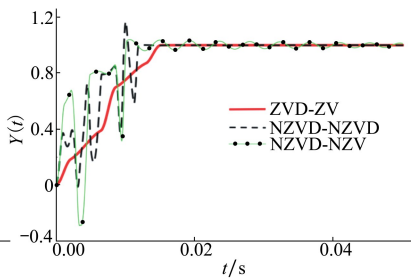


图 4 ZVD-ZV、NZVD-NZVD 和 NZVD-NZVD 整形的振动响应

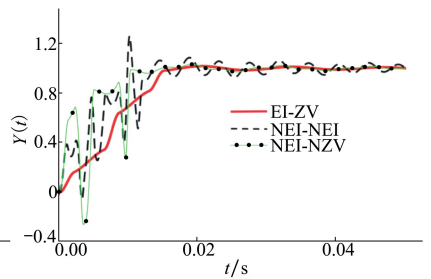


图 5 EI-ZV、NEI-NEI 和 NEI-NZVD 整形的振动响应

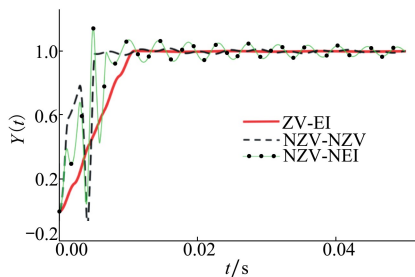


图 6 ZV-EI、NZV-NZV 和 NZV-NEI 整形的振动响应

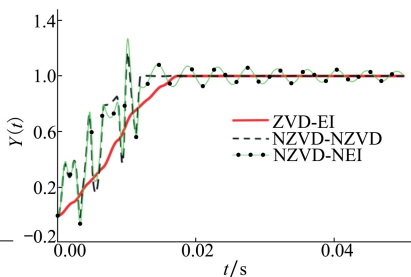


图 7 ZVD-EI、NZVD-NZVD 和 NZVD-NEI 整形的振动响应

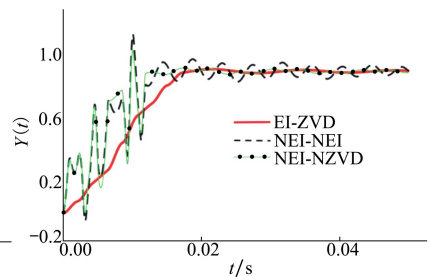


图 8 EI-ZVD、NEI-NEI 和 NEI-NZVD 整形的振动响应

由图 3~8 可得, NHTIS 能明显减小 3-DOF 并联机器人前 2 个模态的残余振动, 且通过与正脉冲混合两模态输入整形器 (PHTIS) 对比, NHTIS 的响应

速度更快。各种类型输入整形器的响应时间及节省时间的百分比如表 5 所示。

表 5 输入整形器的响应时间

输入整形器	正脉冲混合输入整形/s	负脉冲混合输入整形/s	节省时间比例/%
ZV-ZVD	0.010 5	0.006 4	39.04
ZV-EI	0.010 8	0.006 9	36.11
ZVD-ZV	0.015 1	0.010 0	33.77
ZVD-EI	0.017 7	0.013 4	24.29
EI-ZV	0.015 4	0.010 2	33.77
EI-ZVD	0.017 4	0.012 7	27.01

从表 5 可得, NHTIS 能明显提高系统响应时间。NZV-NZVD、NZV-NEI、NZVD-NZV、NZVD-NEI、NEI-NZV、NEI-NZVD 比 ZV-ZVD、ZV-EI、ZVD-ZV、ZVD-EI、EI-ZV、EI-ZVD 分别节省了 0.004 1, 0.003 9, 0.005 1, 0.004 3, 0.005 2, 0.004 7 s。在这些 NHTIS 中, NZV-NZVD 系统响应时间最快, 节省时间比例最高, 达到了 39.04%, 而 NZVD-NEI 的响应时间最慢, 节省时间比例最低, 但仍比 ZVD-EI 的响应快, 节省时间比例为 24.29%。

NHTIS 能明显减小残余振动, 而 PHTIS 的响应曲线比 NHTIS 的响应曲线更平滑, 这代表 PHTIS 可以抑制更多的残余振动, 但 PHTIS 响应时间较慢。随着时间增加, NHTIS 和 PHTIS 在系统响应时间之后所剩残余振动的幅值差将越来越小。对于 3-DOF 机器人, NHTIS 已能显著抑制机器人的残余振动, 但如何减少系统响应时间是更为重要的指标, 而 NHTIS 能有效节省响应时间。而 NHTIS 与普通两模态负脉冲输入整形器相比, 在系统响应时间之后, 有些类型的 NHTIS 抑制残余振动幅值的能力要强于普通两模态负脉冲输入整形器, 例如 NZVD-NZV 好于 NZVD-NZVD (见图 4), NEI-NZV 好于 NEI-NEI (见图 5), NEI-NZVD 好于 NEI-NEI (见图 8), 而其他类型 NHTIS 抑制振动幅度的能力要低于普通两模态负脉冲输入整形器, 但对于所有类型的 NHTIS, 其响应时间都快于普通两模态负脉冲输入整形器。

此外, 负脉冲两模态输入整形器和 NHTIS 在抑振过程中会产生一些比较明显的振荡, 但这些振荡远小于无输入整形器作用时系统的残余振动, 这是由输入整形器中的脉冲影响的, 振荡的数量与脉冲的数量有关, 脉冲的数量越多, 振荡的次数就越多。

对于 NHTIS, 在减振过程中, NZVD-NZV 产生的振荡幅度最大, 而 NZV-NZVD 产生的振荡幅度最小; 当所有脉冲作用结束后, NZV-NZVD 可抑制最多的残余振动, 且在最短的时间能内消除所有的残余振动, 而 NZVD-NEI 抑制残余振动最少, 且消除全部残余振动所需的时间最长。

另外, 负脉冲两模态输入整形器的响应时间与 NHTIS 几乎相同, 但抑制振动幅值的能力却不相同。多模态的输入整形器抑制振动幅值的能力是由每个振动模态对应的频带宽度和振幅决定的。例如, 3-DOF 并联机器人前 2 个模态的负脉冲单模态输入整形器 NZV1、NZV2、NEI1、NEI2, 可构成两模态的输入整形器 NZV-NZV、NEI-NEI、NZV-NEI 和 NEI-NZV, 这些整形器的响应时间比较接近, 但抑制振动幅值的能力是不同的, 减少振动幅值从高到低依次为 NZV-NZV、NEI-NZV、NZV-NEI、NEI-NEI。同样的结果也适用于其他类型的多模态输入整形器和混合多模态输入整形器。

4 结 论

介绍了一种新型混和控制策略的减振原理, 并结合一种 3-DOF 并联机器人构建了 6 个 NHTIS 输入整形器: NZV-NZVD、NZV-NEI、NZVD-NZV、NZVD-NEI、NEI-NZV 和 NEI-NZVD。使用仿真的方法分析了这些输入整形器的抑振性能, 并与正脉冲混合两模态、负脉冲两模态输入整形器的抑振性能对比。根据仿真结果可得, NHTIS 能明显减少 3-DOF 并联机器人前 2 阶模态的残余振动, 但在抑制

振动过程中产生了一些比较明显的振荡,这是由输入整形器的脉冲影响的,脉冲越多振荡次数越多。此外,根据各种 NHTIS 的振动响应曲线获得了响应时间和抑制振动幅值的能力,NHTIS 的响应时间明显快于 PHTIS。负脉冲混合输入整形器 NZV-NZVD 比正脉冲混合输入整形器 ZV-ZVD 节省了 39.04%

的响应时间。且 NZV-NZVD 在 NHTIS 中响应时间最快,达到了 0.006 4 s;而 NZVD-NEI 的响应速度最慢,为 0.013 4 s,但仍比 ZVD-EI 快了 0.004 3 s,节省了 24.29%的响应时间。因此可得,NHTIS 能在更快的响应速度下有效减少多模态系统的残余振动。

参考文献:

- [1] KAPUCU S, NIHAT Y, YAVUZ H. Suppression of Residual Vibration of a Translating-Swinging Load by a Flexible Manipulator [J]. *Mechatronics*, 2008(18): 121-128
- [2] 郁春丽, 牛王强. 基于输入整形法的码头装卸起重机防摇研究[J]. *计算机仿真*, 2016, 33(11): 233-238
YU Chunli, NIU Wangqiang. Research on Anti Sway of Wharf Handling Crane Based on Input Shaping Method[J]. *Computer Simulation*, 2016, 33(11): 233-238 (in Chinese)
- [3] JIA P X, LI E, LIANG Z Z, 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
- [4] MOHAMMED F D, ZIYAD N M. Nonlinear Input-Shaping Controller for Quay-Side Container Cranes[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2006(45): 149-170
- [5] LI B, ZHANG X P, MILLS J K, et al. Vibration Suppression of a 3-PRR Flexible Parallel Manipulator Using Input Shaping[C] //IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Changchun, China, 2009: 3539-3544
- [6] MASOUD Z, ALHAZZA K. Frequency-Modulation Input Shaping for Multimode Systems[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2016, 22(15): 3439-3451
- [7] LI B, WEI Y L, ZHU S X, et al. Hybrid Multi-Mode Input Shaping Suppresses the Vibration of a 3-DOF Parallel Manipulator [C] //International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology, Sanya, China, 2011: 2115-2118
- [8] HUANG Q, ZHANG D, LI B, et al. Vibration Suppression of Manipulator with Multiple-Mode Negative[C] //2012 2nd International Symposium on Chemical Engineering and Material Properties, Taiyuan, China, 2012: 816-820
- [9] BAUMGART M D, PAO L Y. Discrete Time-Optimal Command Shaping[J]. *Journal of Automatica*, 2007, 43: 1403-1409
- [10] ZHANG X P, MILLS J K, CLEGHORN W L. Dynamic Modelling and Experimental Validation of a 3-PRR Parallel Manipulator with Flexible Intermediate Links[J]. *Journal of Intelligent and Robotic System*, 2007, 50(4): 323-340
- [11] SINGHOSE W E, SEERING W P, SINGER N C. Time-Optimal Negative Input Shapers[J]. *Journal of Dynamic, Measurement, and Control*, 1997, 119(2): 198-205
- [12] HAN Y Y, LI B, WEI Y L, et al. Vibration Suppression of a 3-DOF Parallel Manipulator Based on Hybrid Negative Impulses Multi-Mode Input Shaping[C] //2011 International Conference on Mechatronics and Information Technology, Shenyang, China, 2012: 372-377

Quick Suppression of Vibration of Robot via Hybrid Input Shaping Control Strategy

WEI Yulan^{1,2}, LI Bing^{1,3}, ZHANG Qingzhu¹, OU Pengfei³

(1.School of Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China;
2.Department of Mechanical Engineering, McGill University, Montreal H3A0C3, Canada;
3.Department of mining and Materials Engineering, McGill University, Montreal H3A0C5, Canada)

Abstract: When the vibration amplitude and resonant frequency bandwidth of each mode are different in the multiple-modal system, the response time of a system is increased but the residual vibration is effectively reduced by the positive impulses multiple-modal input shapers. However, a negative impulses hybrid multiple-modal input shaping method can solve those problems. The basic principle of this control strategy and a 3-DOF parallel robot were introduced. Six negative impulses hybrid input shapers to reduce vibration of the first two modes were constructed based on the robot. Using simulation methods, the response time and vibration suppression abilities of various negative impulses hybrid two-modal input shapers (NHTIS) were obtained by analyzing the vibration response curves of these input shapers, and comparing with positive and negative impulses two-modal input shapers, respectively. The results show that the NHTIS can improve the response speed of the system while significantly reducing the multiple-modal residual vibration.

Keywords: input shaping; multiple-modal; negative impulse; hybrid vibration control; robot