

基于 MACSF 的移动机械臂振动抑制轨迹规划方法*

邵继升¹, 李团结¹, 宁宇铭¹, 张琰^{1,2}, 李刚², 姚聪¹

(1. 西安电子科技大学机电工程学院 西安, 710071) (2. 北京镁伽机器人科技有限公司 北京, 100085)

摘要 为满足移动机械臂高精度、低抖动的作业需求,提出一种基于修正非对称组合正弦函数(modified asymmetry combined sine function, 简称 MACSF)的振动抑制轨迹规划方法。首先,针对传统非对称组合正弦函数(asymmetry combined sine function, 简称 ACSF)存在加速度突变、启停阶段不稳定等问题,以驱动函数加加速度连续平滑为目标,采用改进型组合正弦函数设计加加速度时间窗口中的加速阶段和减速阶段,以降低移动机械臂的关节力矩波动;其次,通过叠加组合方法求出满足约束条件的通用型驱动函数;最后,基于机器人操作系统(robot operating system, 简称 ROS)搭建移动机械臂抑振算法验证平台,并使用该平台在样机场景下进行了一系列实验验证。结果表明,MACSF 方法能够有效抑制移动机械臂的瞬态振动和残余振动(动态作业过程中振幅优于 1 mm),从而验证了该方法的有效性和实用性。

关键词 移动机械臂;非对称组合正弦函数;轨迹规划;振动抑制;机器人操作系统

中图分类号 TP242;TH113.1

1 问题的引出

随着现代化工业的快速发展,传统固定基座的桌面型机械臂已无法满足现代化工业的需求。移动机械臂在物料搬运、目标检测抓取等方面具有运动范围广、灵巧性高等优势^[1],但在点到点作业过程中存在运动轨迹不光滑、关节驱动不柔顺等缺陷,会产生不必要的振动现象。这些振动不仅降低了移动机械臂的作业精度与质量,还损害了机械结构的完整性。因此,研究一种抑振效果良好的通用型振动抑制方法成为工程应用的迫切需求。

国内外学者对振动抑制方法进行了深入研究^[2-3]。振动抑制方法可分为 2 类:①通过加入外界能量的主动抑振方法;②通过耗能或吸振材料的被动抑振方法。被动抑振在控制层面具有简单易用的优势,但其材料的选用和复杂性阻尼结构的设计在实际应用中面临较大挑战。主动抑振方法在某些特定条件下能表现出较好的抑振效果,但大多难以适应苛刻的实际应用场景。研究发现,高精度的轨迹规划也是一种有效抑制振动的主动抑振方法^[4]。Biagiotti 等^[5]提出了一种新的在线轨迹生成滤波器,通过滤波器零抵消装置的振荡动力学来抑制残余振动。Pajak^[6]针对控制移动机械臂整体振动的问题,

提出一种基于扩展雅可比矩阵的轨迹规划抑振方法,并通过仿真实验验证了其有效性。Cao 等^[7]建立了机械臂动力学模型,提出了一种以最小剩余弹性势能为目标函数的关节轨迹方案。虽然上述轨迹规划方法在一定程度上取得较好的抑振效果,但通用性不强,且很少能同时兼顾瞬态振动和残余振动两方面。在实际运动过程中,移动机械臂在启停阶段不柔顺会引起瞬态振动,减速阶段不平稳会引起残余振动。图 1 为样机实测移动机械臂在作业过程中的末端振动。

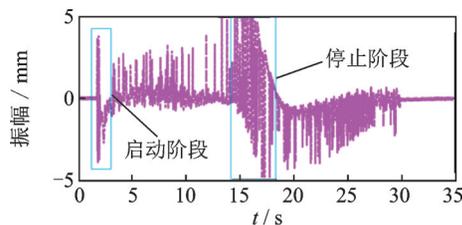


图 1 样机实测移动机械臂在作业过程中的末端振动

Fig.1 The prototype measured the vibration of the end-effector of mobile manipulators during operation

笔者以驱动函数加加速度连续平滑为出发点,提出轨迹光滑和加减速时间可调的 MACSF 的振动抑制轨迹规划方法。该方法在机械臂运行总时长不变的条件下,通过调节合理的加减速时间生成平滑的运动轨迹来抑制移动机械臂的瞬态振动和残余振动。

* 国家自然科学基金面上资助项目(51775403)

收稿日期:2021-12-30;修回日期:2022-03-08

2 轨迹规划算法设计

2.1 MACSF 振动抑制轨迹规划算法设计

由于关节振动的产生与关节加速度和加加速度密切相关^[8],因此从关节空间进行轨迹规划最为直接有效。同时,相比于笛卡尔空间轨迹规划,关节空间轨迹规划具有计算简单且无奇异位形的优点。为实现加减速度时间可调,在保证驱动速度平滑的基础上,文献[9-10]提出了一种加减速度时间可调的ACSF。该驱动函数主要由加速和减速2个阶段组成,虽然此方法能够满足加减速度时间可调的非对称特性,但在启停和拐点处的加速度不平稳、不平滑,从而导致机械臂运行不平稳。ACSF的加速度曲线如图2所示。

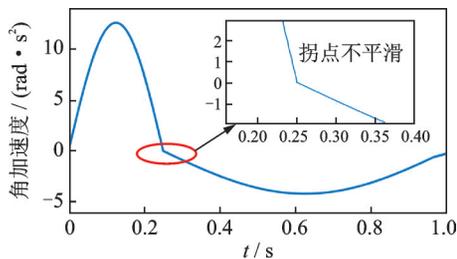


图2 ACSF的加速度曲线

Fig.2 Acceleration curves of ACSF

机械臂在实际应用场景中,所有的作业任务均可离散为点到点之间的作业集合。因此,以机械臂点到点作业为例,在实际运动作业过程中定义:设运行起始时间为 t_s ,终止时间为 t_f ,运行总时间为 $T=t_f-t_s$,关节角向量 $\theta=[\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_i]^T$,其中, i 为机械臂自由度数。机械臂起始关节向量 θ_{init} 与目标关节向量 θ_{obj} 之间的关系为

$$\begin{cases} \theta(t_s) = \theta_{init} \\ \dot{\theta}(t_s) = 0 \\ \ddot{\theta}(t_s) = 0 \\ \theta(t_f) = \theta_{obj} \\ \dot{\theta}(t_f) = 0 \\ \ddot{\theta}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

设由正弦函数组合而成的机械臂关节驱动函数为 $s(\tau)$,并满足

$$0 \leq s(\tau) \leq 1 \quad (0 \leq \tau \leq 1, \tau = t/T) \quad (2)$$

以 $s(\tau)$ 为自变量,则机械臂各关节变量 θ_i 可由 $s(\tau)$ 描述为

$$\begin{cases} \theta_i(t) = \theta_i^{init} + (\theta_i^{obj} - \theta_i^{init})s(\tau) \\ \dot{\theta}_i(t) = \frac{1}{T}(\theta_i^{obj} - \theta_i^{init})\dot{s}(\tau) \\ \ddot{\theta}_i(t) = \frac{1}{T^2}(\theta_i^{obj} - \theta_i^{init})\ddot{s}(\tau) \\ \overset{\cdot\cdot\cdot}{\theta}_i(t) = \frac{1}{T^3}(\theta_i^{obj} - \theta_i^{init})\overset{\cdot\cdot\cdot}{s}(\tau) \end{cases} \quad (3)$$

其中: θ_i^{init} 和 θ_i^{obj} 为第 i 个关节变量的起始和终止关节值。

将式(3)转化成运动矢量表达式

$$M = [\theta(t), \dot{\theta}(t), \ddot{\theta}(t), \overset{\cdot\cdot\cdot}{\theta}(t)]^T \quad (4)$$

将式(1),(2)代入式(3),得到 $s(\tau)$ 的约束条件: $s(0)=0, \dot{s}(0)=0, \ddot{s}(0)=0, \overset{\cdot\cdot\cdot}{s}(0)=0, s(1)=1, \dot{s}(1)=0, \ddot{s}(1)=0, \overset{\cdot\cdot\cdot}{s}(1)=0$ 。

为实现启停和拐点处加速度平滑,同时满足加减速度时间可调的非对称特性,以驱动函数加加速度连续平滑为出发点,得到加加速度曲线如图3所示。此方法不仅能够很好地约束速度、加速度以及加加速度,有效降低关节力矩波动,还避免了更高次函数积分带来的误差。

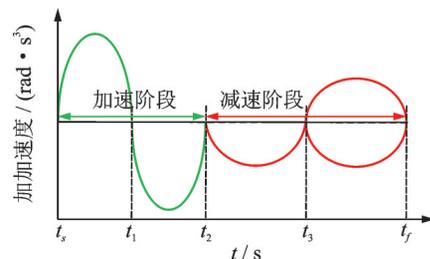


图3 加加速度曲线

Fig.3 The jerk curve

在约束条件下,求解各时间段的解析MACSF表达式。结合图3,令 $t_s \sim t_1$ 之间的时间为 T_1 , $t_1 \sim t_2$ 之间的时间为 T_2 , $t_2 \sim t_3$ 之间的时间为 T_3 , $t_3 \sim t_f$ 之间的时间为 T_4 ,且满足

$$\sum_{i=1}^4 T_i \frac{1}{T} = 1 \quad (5)$$

为确保驱动函数的加减速度时间可调,令驱动函数的加减速度比为

$$\gamma = (T_1 + T_2)/(T_3 + T_4) \quad (6)$$

构造的驱动函数由加速阶段和减速阶段2部分组成。加速阶段时间比减速时间短,较长时间的减速有利于减低残余振动,各时间段对应的驱动函数如下。

1) 当 $\tau \in [t_s, t_1]$ 时,此阶段移动机械臂各个关节处于启动加速阶段,加速度从0平稳加速至最大,对应的驱动函数为

$$\begin{cases} \ddot{s}(\tau) = k\sin\left(\frac{\pi}{T_1}\tau\right) \\ \dot{s}(\tau) = \frac{T_1 k}{\pi}\left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{T_1}\tau\right)\right) \\ \dot{s}(\tau) = \frac{T_1 k}{\pi}\left(\tau - \frac{T_1}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{T_1}\tau\right)\right) \\ s(\tau) = \frac{T_1 k}{2\pi}\tau^2 - \frac{T_1^3 k}{\pi^3} + \frac{T_1^3}{\pi^3}k\cos\left(\frac{\pi}{T_1}\tau\right) \end{cases} \quad (7)$$

2) 当 $\tau \in [t_1, t_2]$ 时,此阶段移动机械臂各个关节依旧处于加速阶段,加速度从最大平稳减速至0,对应的驱动函数为

$$\begin{cases} \ddot{s}(\tau) = -k\sin\left(\frac{\pi}{T_2}\tau\right) \\ \ddot{s}(\tau) = \frac{T_2 k}{\pi}\left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{T_2}(\tau - t_1)\right)\right) \\ \dot{s}(\tau) = \frac{T_1 k}{\pi}T_1 + \frac{T_2 k}{\pi}\left(\tau - t_1 + \frac{T_2}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{T_2}(\tau - t_1)\right)\right) \\ s(\tau) = d_1 + \frac{T_1^2 k}{\pi}(\tau - t_1) + \frac{T_2 k}{2\pi}(\tau - t_1)^2 + \frac{T_2^3 k}{\pi^3} - \frac{T_2^3}{\pi^3}k\cos\left(\frac{\pi}{T_2}(\tau - t_1)\right) \end{cases} \quad (8)$$

在加速阶段结束后,可求得驱动函数加速阶段结束后的极大速度,表达式为

$$v = \frac{k}{\pi}(T_1^2 + T_2^2) \quad (9)$$

3) 当 $\tau \in [t_2, t_3]$ 时,该阶段为移动机械臂减速阶段,减速度从0平稳增加至最大,对应的驱动函数为

$$\begin{cases} \ddot{s}(\tau) = -\gamma^2 k\sin\left(\frac{\pi}{T_3}\tau\right) \\ \ddot{s}(\tau) = -\frac{\gamma^2 T_3 k}{\pi}\left(1 - \cos\left(\frac{\pi}{T_3}(\tau - t_2)\right)\right) \\ \dot{s}(\tau) = v - \frac{\gamma^2 T_3 k}{\pi}\left(\tau - t_2 - \frac{T_3}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{T_3}(\tau - t_2)\right)\right) \\ s(\tau) = d_2 + v(\tau - t_2) - \frac{\gamma^2 T_3 k}{2\pi}(\tau - t_2)^2 + \frac{\gamma^2 T_3^3 k}{\pi^3} - \frac{\gamma^2 T_3^3}{\pi^3}k\cos\left(\frac{\pi}{T_3}(\tau - t_2)\right) \end{cases} \quad (10)$$

4) 当 $\tau \in [t_3, t_f]$ 时,该阶段为移动机械臂减速阶段,减速度从最大平稳降低至0,减速完成后,各关节到达目标关节角度,对应的驱动函数为

$$\begin{cases} \ddot{s}(\tau) = \gamma^2 k\sin\left(\frac{\pi}{T_4}\tau\right) \\ \ddot{s}(\tau) = -\frac{\gamma^2 T_4 k}{\pi}\left(1 + \cos\left(\frac{\pi}{T_4}(\tau - t_3)\right)\right) \\ \dot{s}(\tau) = v - \frac{\gamma^2 T_3^2 k}{\pi} - \frac{\gamma^2 T_4 k}{\pi}\left(\tau - t_3 + \frac{T_4}{\pi}\sin\left(\frac{\pi}{T_4}(\tau - t_3)\right)\right) \\ s(\tau) = d_3 + v(\tau - t_3) - \frac{\gamma^2 T_3^2 k}{\pi}(\tau - t_3) - \frac{\gamma^2 T_4 k}{2\pi}(\tau - t_3)^2 - \frac{\gamma^2 T_4^3 k}{\pi^3} + \frac{\gamma^2 T_4^3}{\pi^3}k\cos\left(\frac{\pi}{T_4}(\tau - t_3)\right) \end{cases} \quad (11)$$

d_1, d_2, d_3 和 d_4 分别为各时间段的位移量,则各时间段的位移为

$$\begin{cases} d_1 = \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2}\right)\frac{T_1^3 k}{\pi} \\ d_2 = d_1 + \frac{T_1^2 k T_2}{\pi} + \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi^2}\right)\frac{T_2^3 k}{\pi} \\ d_3 = d_2 + vT_4 - \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{\pi^2}\right)\frac{\gamma^2 T_3^3 k}{\pi} \\ d_4 = d_3 + vT_4 - \frac{\gamma^2 T_3^2 k T_4}{\pi} - \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi^2}\right)\frac{\gamma^2 T_4^3 k}{\pi} \end{cases} \quad (12)$$

将 $s(1) = 1$ 代入式(11),则 k 为

$$k = \frac{\pi}{2T_1^3 - 2\gamma^2 T_3^3 + 4T_1^2 T_3} \quad (13)$$

2.2 数值验证

对于MACSF,有多种非对称性时间比例(加减速时间比 γ),其中较为经典的非对称性时间比例是2:3^[9]。为了验证修正后驱动函数的通用性和有效性,取含有2:3非对称性时间比例进行数值仿真,分别得到传统ACSF和MACSF下,加减速时间比 γ 取值不同时生成的运动曲线,如图4,5所示。

对比分析图4与图5,MACSF具有以下特点:

1) 满足加减速时间可调的非对称特性。通过调节 m 可以表征不同的速度曲线,当 $\gamma = 1:1$ 时,可近似表示为五次多项式轨迹规划。

2) 在拐点处加速度更平滑,且不同加减速时间比所对应的运动曲线均满足轨迹平滑连续的设计目标,同时驱动函数加速度曲线在启停阶段更加平稳。

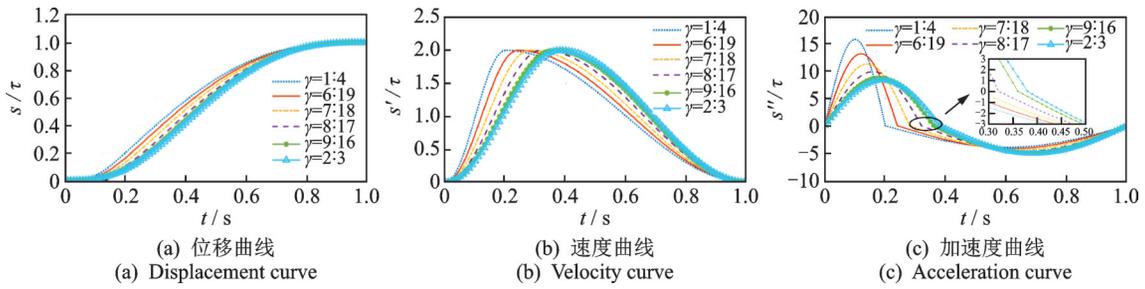


图 4 加减速时间比 γ 取值不同时生成的运动曲线(ACSF)

Fig.4 Motion curves generated with different ratios of acceleration /deceleration time to γ (ACSF)

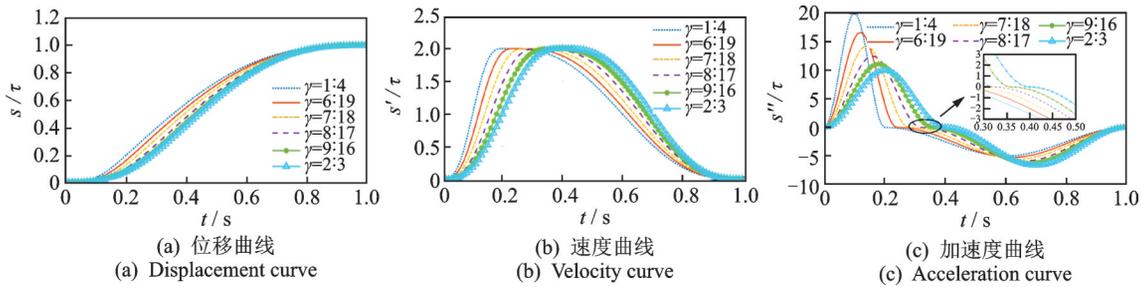


图 5 加减速时间比 γ 取值不同时生成的运动曲线(MACSF)

Fig.5 Motion curves generated with different ratios of acceleration /deceleration time to γ (MACSF)

3 搭建移动机械臂算法验证平台

笔者以自主集成的移动机械臂为实验对象,移动机械臂由安装在平台顶部的机械手和移动平台组成。该机械臂具有 7 个自由度,并配置含有 2 个自由度移动副的末端夹爪。表 1 为设备型号与技术参数。移动机械臂如图 6 所示。表 2 为移动机械臂主要力学参数。

表 1 设备型号与技术参数

Tab.1 Device model and technical parameters

样机设备	型号	关键性能参数
移动平台	Bulldog	4 轮驱动,电源为 48V 锂电池,最大负载为 100 kg,最大速度为 2.0 m/s,工作频率为 60 Hz
机械臂	Franka-panda	9 个自由度,有效负载为 3 kg,工作半径为 85 cm,工作频率为 1 kHz
激光雷达	RS-LiDAR	探测距离为 100 m,测量频率为 10 Hz

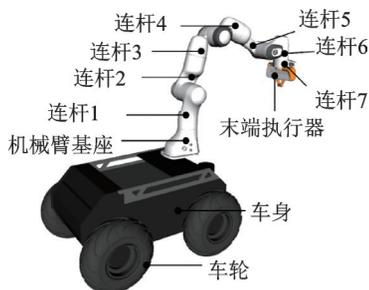


图 6 移动机械臂

Fig.6 The mobile manipulator

表 2 移动机械臂主要力学参数

Tab.2 The dynamics parameters of the mobile manipulator

名称	m/kg	惯量/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^2)$		
		I_x	I_y	I_z
车身	40	0.700	2.000	4.000
车轮	3	0.025	0.025	0.045
机械臂基座	2.92	0.007	0.010	0.010
连杆 1	2.74	0.703	0.706	0.009
连杆 2	2.74	0.007	0.028	0.025
连杆 3	2.38	0.037	0.036	0.010
连杆 4	2.38	0.025	0.019	0.028
连杆 5	2.74	0.035	0.290	0.008
连杆 6	1.55	0.002	0.004	0.005
连杆 7	0.54	0.012	0.010	0.004
末端执行器	0.73	0.002	0.004	0.002

4 实验

为验证 MACSF 方法的有效性,笔者依托 ROS 平台进行样机实验。由于激光测振仪仅具备单维测振功能,不具备跟踪测量功能,因此兼顾实际仪器固定方便以及测量结果的准确性,设置样机实验场景如图 7 所示。使用激光测振仪测量实际振动,该测振仪具有极高的速度分辨率 ($0.05 \mu\text{m/s}$),测量频率范围为 $0\sim 22 \text{ kHz}$,工作距离为 $0.2\sim 30 \text{ m}$,能够准确测出移动机械臂在作业时的振动。

实验步骤如下:

1) 调整激光测振仪对准移动机械臂末端的测量点,采样频率为5 120 Hz,测量距离为1 m;

2) 给定机械臂始末点对应的关节角向量 $\theta_{init} = [-0.004, 0.860, 0.025, -0.681, -0.026, 1.550, 0.711]$, $\theta_{obj} = [-0.004, -0.08, 0.02, -2.08, -0.007, 2.02, 0.67]$ (单位均为弧度),采用2:3经典非对称时间比例;

3) 使机械臂末端沿 x 方向从初始点到目标点做直线往返运动,同时测量在 x 方向上的振动变化情况。

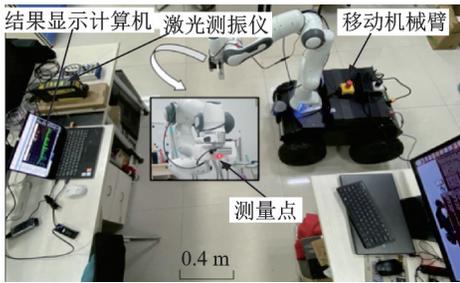


图7 样机实验场景
Fig.7 The prototype scene

图8为移动机械臂原始振动时域与频域图。可以看出,机械臂振动明显,振动幅值可达1.82 mm,振动频率主要分布在20~30 Hz之间。

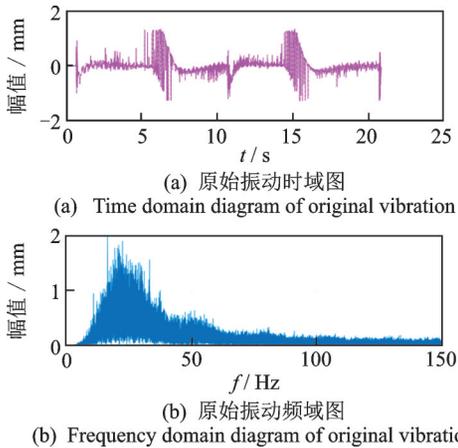


图8 移动机械臂原始振动时域与频域图
Fig.8 Time domain and frequency domain diagrams of original vibration of the mobile manipulator

在相同实验条件和场景下,分别测试了工程实际中最具代表性的五次多项式轨迹规划方法、抑振效果和运行精度较高的S曲线方法、传统ACSF轨迹规划方法以及笔者提出的MACSF轨迹规划方法的抑振效果。实验过程中,对机械臂末端 x 方向上的振动实时监测,将监测到的数据实时输出并显示。图9为在时域中各方法的抑振效果。可以看出,振动主要发生在启动阶段和停止阶段。由于实验过程中移动平台一直保持静止状态,因此这些高

频振动是由机械臂各关节运动特性产生,在移动机械臂运行始末阶段振动最为突出,机械臂运行平稳后的振动幅度相比启停阶段小。

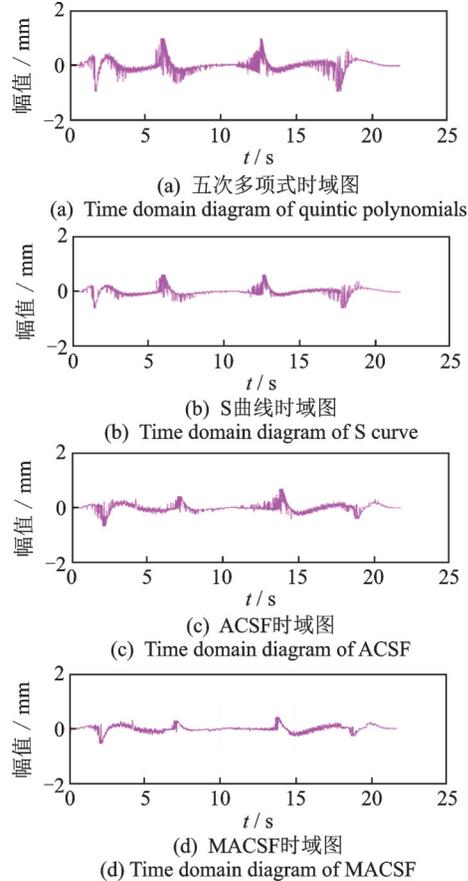


图9 在时域中各方法抑振效果
Fig.9 Vibration suppression effects of various methods in time domain

为了进一步分析振动与移动机械臂频率之间的关系,对获得的实验数据进行傅里叶变换,获得在频域中各方法的抑振效果如图10所示。可见,移动机械臂振动的差异尤为明显,振动峰值频率仍在20~30 Hz之间,通过轨迹规划能够有效降低振动幅值,但不会改变移动机械臂本身频域特性。

样机实验在 x 轴向上的振动幅值如表3所示。在相同运动时间下,以原始的实验结果为基准,定义幅值相对百分比为 $[(\text{初始最大振幅} - \text{抑振后最大振幅}) \div \text{初始最大振幅}] \times 100\%$ 。从表3可以看出:五次多项式方法抑振效果不明显;ACSF方法的幅值相对百分比为30.1%,与S曲线方法抑振效果相近;MACSF方法在满足非对称特性的基础上,不仅保证了加速度曲线连续平滑,而且在拐点无突变,能够有效提升机械臂的运动性能,从而证明了MACSF方法抑制振动效果显著。

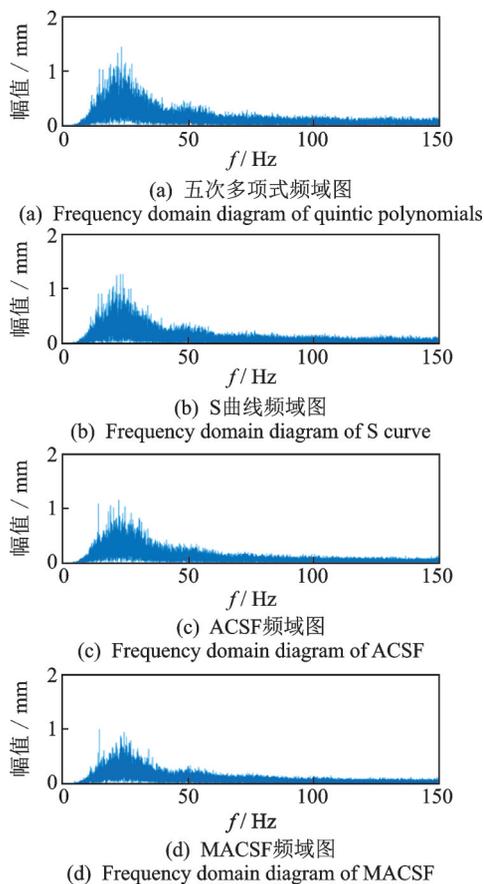


图10 在频域中各方法抑振效果

Fig.10 Vibration suppression effects of various methods in the frequency domain

表3 样机实验在x轴向的振动幅值

Tab.3 The vibration amplitude of the prototype in the x-axis direction

方法	最大振动幅值/mm	相对百分比/%
原始方法	1.820	—
五次多项式方法	1.520	16.1
S曲线方法	1.340	25.8
ACSF方法	1.260	30.1
MACSF方法	0.965	46.9

5 结论

1) 机械臂运行时的振动由启停阶段的瞬态振动和运行结束后的残余振动组成,运行过程中的振动并不明显。瞬态振动与残余振动可以通过提高轨迹平滑度、延长减速时间来抑制。

2) 笔者所提出的方法在减速段内可以加速系统自由衰减,同时使振幅降低在1 mm内,提高了移动机械臂的作业精度与作业质量。

3) 实验结果表明,MACSF方法具有良好的抑振效果和较好的适应性,但针对狭小受约束空间以及移动平台的整体振动抑制仍存在不足。

参 考 文 献

- [1] 孙立宁,许辉,王振华,等.工业机器人智能化应用关键共性技术综述[J].振动、测试与诊断,2021,41(2):211-219.
SUN Lining, XU Hui, WANG Zhenhua, et al. Review of key generic technologies for intelligent application of industrial robots[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(2): 211-219.(in Chinese)
- [2] SINGHOSE W, SEERING W, SINGER N. Residual vibration reduction using vector diagrams to generate shaped inputs[J]. Journal of Mechanical Design, 1994, 116(2): 654-659.
- [3] PÁSZTORI Z, RUGGIERO F, LIPPIELLO V, et al. Bayesian optimization approach to input shaper design for flexible beam vibration suppression [J]. IFAC-Papers on Line, 2020, 53(2): 9150-9156.
- [4] PARK K J, PARK Y S. Fourier-based optimal design of a flexible manipulator path to reduce residual vibration of the endpoint [J]. Robotica, 1993, 11(3): 263-272.
- [5] BIAGIOTTI L, MELCHIORRI C, MORIELLO L. Damped harmonic smoother for trajectory planning and vibration suppression [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2020, 28(2): 626-634.
- [6] PAJAK G. Trajectory planning for mobile manipulators with vibration reduction[J]. Journal of Vibroengineering, 2021, 23(4): 877-890.
- [7] CAO B, LI T, SUN K, et al. Trajectory modified in joint space for vibration suppression of manipulator[J]. IEEE Access, 2018, 6: 57969-57980.
- [8] BOSCARIOL P, RICHIEDEI D, TAMELLIN I. Residual vibration suppression in uncertain systems: a robust structural modification approach to trajectory planning[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 74: 102282.
- [9] LIU X P, TIAN X Y, ZHUANG W. A robot trajectory planning method based on asymmetric combination of sine function[J]. Electronic Mechanical Engineering, 2008, 24(1): 56-58.
- [10] MA S, YANG L, LIU Z, et al. Trajectory planning of 6-DOF manipulator based on combination function method [C] //The 26th Chinese Control and Decision Conference. Changsha, China: IEEE, 2014: 3407-3411.



第一作者简介:邵继升,男,1995年11月生,硕士。主要研究方向为移动机械臂运动规划与振动抑制。

E-mail:s1391048465@163.com

通信作者简介:李团结,男,1972年2月生,教授、博士生导师。主要研究方向为空间可展结构与天线、智能机器人。

E-mail:tjli@mail.xidian.edu.cn