

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.037

基于五次 S 型曲线的集装箱卸货机器人平滑启动研究

徐志祥, 杨傲, 卢保良, 熊浩杰

(大连理工大学 机械工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要:为解决集装箱卸货机器人启动过程中存在的加速度和加加速度突变的问题,提出一种基于五次 S 型曲线的控制系统算法。设计机器人的控制系统并设置适当的转动惯量比和 PI 参数;基于五次多项式插值原理对启动过程进行速度规划,推导出位移、速度、加速度、加加速度的表达式,利用 Matlab 软件进行仿真分析。结果表明:与传统 S 型曲线控制算法对比,该算法解决了启动过程中加速度和加加速度突变问题,速度波动峰值由 10 r/min 改善至 3 r/min,提高了系统稳定性和运行效率。

关键词:五次 S 型曲线;集装箱卸货机器人;平滑启动;转动惯量比

中图分类号:TP242.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2025)03-0192-04

Stable Start of Container Unloading Robot Based on Quintic S-shaped Curve

XU Zhixiang, YANG Ao, LU Baoliang, XIONG Haojie

(School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A control system algorithm based on five times S-curve is proposed to solve the problem of sudden changes of acceleration and plus acceleration in the starting process of the container unloading robot. The control system of the robot is designed and appropriate rotational inertia ratio and PI gain parameters are set. Based on the principle of quintic polynomial interpolation, the velocity planning of the start-up process is carried out, and the expressions of displacement, and velocity, acceleration and plus acceleration are given, on which simulation and analysis are conducted by Matlab software. The results show that the proposed algorithm, compared with the traditional S-curve control algorithm, solves the problem of abrupt changes in acceleration and plus acceleration during the start-up process, and improves the peak speed fluctuation from 10 r/min to 3 r/min, upgrading the system stability and operation efficiency.

Keywords: five S-curves; container unloading robot; smooth start; rotational inertia ratio

0 引言

随着我国经济的高速发展,冷链集装箱货物进口量大幅增长。由于目前集装箱货物到港后多由人工卸货,工人劳动强度大、效率低,故为此开发了冷链集装箱货物卸货机器人作业线^[1-3]。

集装箱卸货机器人具有多个自由度,能够实现在集装箱内按照规划的路径进行运动。在卸货机器人的启动过程中,机器人系统的加加速度突变会导致机器人产生振动和冲击,加速度变化越大,产生的振动和冲击越强,增加了能量损耗和运动时间,降低了系统的运行效率^[4]。为实现机器人良好的运动性能和运行效率,需要确保其控制系统加减速具有高度柔性、增益参数具有高度适合性^[5-6]。因此,必须通过专门设计的加减速控制规律来保证伺服系统的启动过程平稳、快速、准

确。目前,机器人运动系统中常用直线、指数加减速曲线方法,缺点是在加速度上有突变,容易产生振动冲击^[7-9]。S 型加减速曲线方法是一种常用的算法,能够实现加速度平滑过渡、减小振动冲击的程度。其中,三次 S 型加减速曲线对冲击改善能力较弱,而五次 S 型加减速曲线能够保证在频繁启动过程中加加速度和加速度没有突变,有效避免冲击^[10-13]。

1 集装箱卸货机器人控制系统

本文研究的是具有 6 个自由度的集装箱卸货机器人。该机器人是一个以 6 自由度的位置控制为目标的多轴同步运动控制系统^[14],可带动末端夹具在 3 维空间内沿 x 轴、 y 轴、 z 轴运动,并且可以绕 z 轴旋转运动,机器人结构如图 1 所示。

集装箱卸货机器人系统由上位机和下位机组

基金项目:大连市揭榜挂帅科技攻关项目(2022YJ11SN00103)

第一作者简介:徐志祥(1965—),男,辽宁大连人,教授,硕士,研究方向为测试与控制技术,zxxu@dlut.edu.cn。

成,上位机包括触摸屏、工控机;下位机包括汇川AM403PLC、汇川SV660P伺服驱动器、海康MV系列相机、限位开关传感器、激光位移传感器、绝对值编码器以及相应的执行机构组成,控制系统架构如图2所示。



图1 集装箱卸货机器人本体结构



图2 控制系统架构

该PLC主要实现网络通信功能,实现对上位机发送运动指令的接收、对伺服轴的运动控制和状态监测,包括控制伺服电机上电、下电、伺服电机启停、原点回归、定位控制、伺服轴手动/自动运行、速度控制等。上位机给PLC发出运动指令,PLC控制伺服驱动器给伺服电机发送运动指令,伺服电机带动齿轮齿条副,齿轮齿条副带动执行机构运动,编码器将速度等数据再反馈回伺服驱动器,从而实现半闭环控制。

机器人在卸货过程中可能会产生振动,原因是机器人的伺服电机无法瞬间完成加速度和加加速度突变,因此需要采用平滑过渡的方法实现当前速度与目标速度之间的快速切换。通过采用高次S型加减速曲线代替低次S型加减速曲线,逐步增加电机的速度,进而实现电机的平滑启动,减轻瞬间冲击对电机和控制系统的影响,并提高电

机的运动精度和可控性^[15]。

2 传统S型曲线控制算法

传统三次S曲线加减速控制算法采用分段线性函数,其中包括了时间 t 分别与速度 v 、加速度 a 、加加速度 j 的关系,如图3所示。

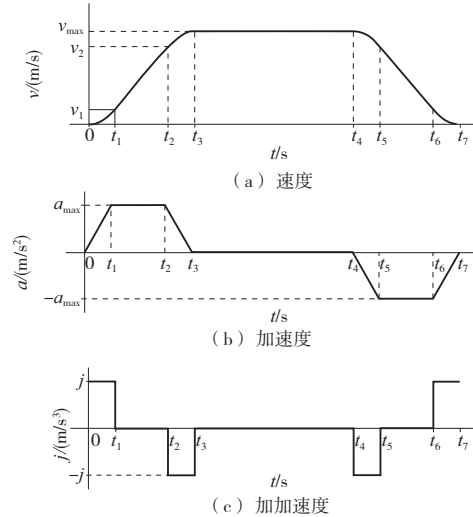


图3 传统三次S型加减速曲线

与T型加减速曲线相比,三次S型加减速曲线增加了一个阶数。其中,加速阶段分为3段:正加加速度段、匀加加速度段以及负加加速度段。减速阶段分为3段:负加加速度段、匀减速度段以及正加加速度段。整个运动过程共包含7段,加速阶段和减速阶段之间通过匀速运动段相连。在三次S型曲线加减速阶段,最大加加速度 J_m 会在达到最大加速度的时刻出现,然后加加速度变为0。一段时间后,加加速度变为最大减加速度 $-J_m$ 。减速阶段与加速阶段曲线型完全相反,匀加速和匀减速阶段的加加速度和减加速度为0,上述构成连续的7段S型曲线。式(1)—式(3)分别为加加速度、加速度和速度的分段函数。

$$J(t) = \begin{cases} J_m, & t \in (0, t_1] \\ 0, & t \in (t_1, t_2] \\ -J_m, & t \in (t_2, t_3] \\ 0, & t \in (t_3, t_4] \\ -J_m, & t \in (t_4, t_5] \\ 0, & t \in (t_5, t_6] \\ J_m, & t \in (t_6, t_7] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $t_i(i=0,1,2,\dots,7)$ 为各个时刻点; J_m 为最大加加速度。对式(1)每一段依次向上积分,可以得到该曲线的加速度和速度的分段函数:

$$a(t) = \begin{cases} Jt & t \in (0, t_1] \\ a_{\max} & t \in (t_1, t_2] \\ a_{\max} - Jt & t \in (t_2, t_3] \\ 0 & t \in (t_3, t_4] \\ -Jt & t \in (t_4, t_5] \\ -a_{\max} & t \in (t_5, t_6] \\ -a_{\max} + Jt & t \in (t_6, t_7] \end{cases} \quad (2)$$

式中: $a_{\max}$ 为最大加速度, $a_{\max} = Jt_1$; t_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 6$) 为局部时间区间。

$$v(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}Jt^2 & t \in (0, t_1] \\ \frac{1}{2}Jt_1^2 + Jt_1t & t \in (t_1, t_2] \\ \frac{1}{2}Jt_1^2 + Jt_1t_2 + Jt_1t - \frac{1}{2}Jt^2 & t \in (t_2, t_3] \\ v_{\max} & t \in (t_3, t_4] \\ v_{\max} - \frac{1}{2}Jt^2 & t \in (t_4, t_5] \\ v_{\max} - \frac{1}{2}Jt_5^2 - Jt & t \in (t_5, t_6] \\ v_{\max} - \frac{1}{2}Jt_5^2 - Jt_6 - Jt_1t + \frac{1}{2}Jt^2 & t \in (t_6, t_7] \end{cases} \quad (3)$$

式中: $v_{\max}$ 为最大速度; $v_{\max} = \frac{1}{2}Jt_1^2 + Jt_1t_2 + Jt_1t - \frac{1}{2}Jt_3^2$ 。

上述S型曲线的速度规划方法无法保证其速度和加速度在整个运动过程中始终是连续变化的。在集装箱卸货机器人末端夹具的运动过程中,这种加加速度不连续性可能导致柔性振动的发生,进而影响机器人系统的稳定性。因此,在机器人系统的速度规划中,需要采用更平滑和连续的速度曲线以确保系统的稳定性。

3 五次S型曲线控制算法

本文提出了一种新的集装箱卸货机器人速度规划方法,旨在确保机器人的运动曲线更加平滑,并避免较大的刚性冲击。同时,该方法具有简单可靠的特点,采用五次多项式插值方法的S型曲线,使得机器人可以实现平滑的速度规划。首先,假设加速阶段位移随时间变化的方程为

$$s(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4 + a_5t^5 \quad (4)$$

式中: t 为加速时间; s 为位移; a_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 5$) 为参数。对式(4)进行求导可以获得速度方程:

$$v(t) = a_1 + 2a_2t + 3a_3t^2 + 4a_4t^3 + 5a_5t^4 \quad (5)$$

式中 v 为速度。对式(5)进行求导可以获得加速度方程:

$$a(t) = 2a_2 + 6a_3t + 12a_4t^2 + 20a_5t^3 \quad (6)$$

式中 a 为加速度。对式(6)进行求导可以获得加加速度方程:

$$j(t) = 6a_3 + 24a_4t + 60a_5t^2 \quad (7)$$

式中 j 为加加速度。

假设初始位移为0,起始速度为0,起始加速度为0,终止位移为 s_m ,终止速度为 v_m ,终止加速度为0,即

$$\begin{cases} s(0) = 0 \\ v(0) = 0 \\ v(1) = v_m \\ s(1) = s_m \\ a(0) = 0 \\ a(1) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)中的边界条件应用到式(4)一式(7)中,可以得到集装箱卸货机器人在五次多项式插值方法下的位移、速度、加速度、加加速度:

$$\begin{cases} s(t) = \frac{10s_m - 4v_mt_mt^3}{t_m^3} + \frac{7v_mt_m - 15s_m}{t_m^4}t^4 + \frac{6s_m - 3v_mt_m}{t_m^5}t^5 \\ v(t) = \frac{30s_m - 12v_mt_mt^2}{t_m^3} + \frac{42v_mt_m - 60s_m}{t_m^4}t^3 + \frac{30s_m - 15v_mt_m}{t_m^5}t^4 \\ a(t) = \frac{60s_m - 24v_mt_mt}{t_m^3} + \frac{168v_mt_m - 180s_m}{t_m^4}t^2 + \frac{120s_m - 60v_mt_m}{t_m^5}t^3 \\ j(t) = \frac{60s_m - 24v_mt_mt}{t_m^3} + \frac{336v_mt_m - 360s_m}{t_m^4} + \frac{360s_m - 180v_mt_m}{t_m^5}t^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中 t_m 为设置的最终时间。

4 仿真与实验分析

使用汇川 SV660P 伺服驱动器调试软件 InoDriverShop,分别采用转动惯量自识别和增益自整定方法,转动惯量自识别后再进行10次手动调节,以 x 轴电机为例,分别设置电机的速度环、位置环、负载惯量比的参数,如表1所示。

表1 伺服系统 x 轴电机参数表

编号	速度环	位置环	负载惯量比	备注
1	40.0	64.0	1.0	初始
2	158.0	240.0	1.0	
3	158.0	240.0	7.2	最佳
4	40.0	64.0	7.2	

实验所得 x 轴速度反馈和速度指令曲线如图 4 所示。

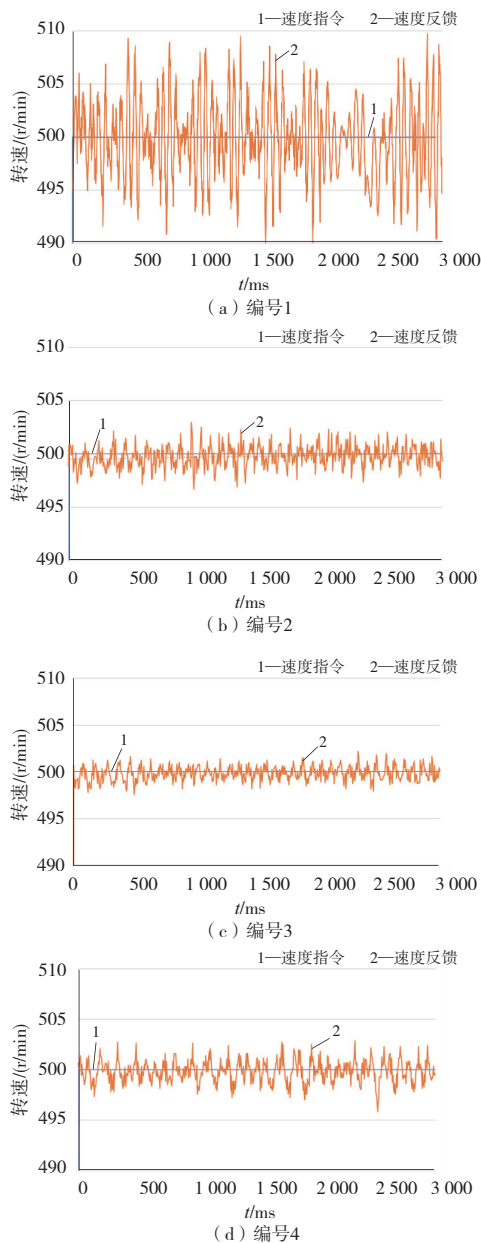


图 4 参数调节前后速度波动图

从图 4(a) 和图 4(c) 的对比可以看出,速度环设置为 158.0,位置环设置为 240.0,负载惯量比设置为 7.2,经过调节 PI 参数和转动惯量比参数后,在速度指令为 500 r/min 的情况下,速度波动峰值由 10 r/min 改善至 3 r/min,满足机器人在长期工作中的要求。

为了验证本文提出的五次多项式 S 型曲线在集装箱机器人速度规划中的可行性,以 x 轴为例,使用 Matlab 软件进行仿真分析,仿真结果如图 5 所示。

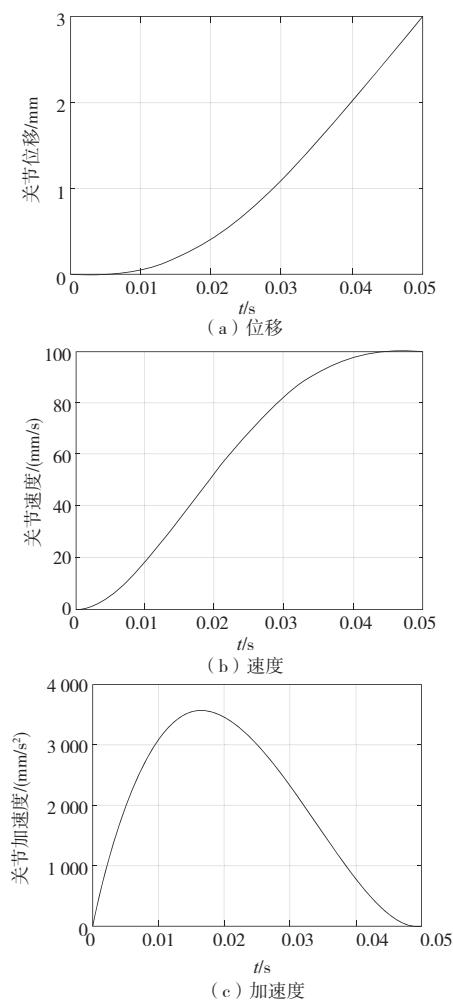


图 5 五次多项式位移、速度、加速度曲线

从图 5 与图 3 的对比中可以看出,应用传统 S 型加减速曲线的速度曲线和加速度曲线在启动时会有突变问题,导致机器人夹具末端振动剧烈,且达到最大速度的时间比较长。然而,在应用五次多项式拟合 S 型加速曲线后,机器人夹具末端的速度和加速度曲线均无突变,响应速度比传统的 S 型加减速曲线更快,能够满足机器人启动时的稳定性要求。

5 结语

为了解决集装箱卸货机器人启动过程中存在的加速度和加加速度突变问题,提出了一种具有五次多项式的 S 型加减速曲线控制算法,并推导出位移、速度、加速度以及加加速度的计算公式。仿真及实验结果表明,该算法解决了集装箱卸货机器人启动过程中加速度和加加速度的突变问题。该算法的位移和速度曲线光滑,加速度和加

(下转第 200 页)

- 收稿日期:2023-10-09

加速度曲线连续平滑,极大地减小了机器人启动时末端夹具受到的冲击,提高了机器人启动的稳定性和运行效率。

- [1] 何成刚,朱润智,黄挺博,等. 工业机器人轨迹规划与优化研究进展[J]. 现代制造工程,2023(7):150-159.
- [2] 龙樟,李显涛,帅涛,等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述[J]. 机械科学与技术,2021,40(6):853-862.
- [3] 董理,杨东,鹿建森. 工业机器人轨迹规划方法综述[J]. 控制工程,2022,29(12):2365-2374.
- [4] 乔心州,龚莉,刘鹏. 柔索驱动拣苡机器人抓取轨迹规划研究[J]. 机械科学与技术,2023,42(12):1986-1995.
- [5] 赵云,王泽飞,王晓光,等. 伺服驱动系统高增益速度环的振动抑制方法[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2021,42(4):433-440.
- [6] 张相胜,朱道坤,潘丰. 数控加工中S型曲线柔性加减速控制算法研究[J]. 制造业自动化,2020,42(12):68-73,124.
- [7] 韩婼. 基于S型加减速的六关节机器人速度平滑控制算法[J]. 电子设计工程,2021,29(20):6-9,14.

- 收稿日期:2023-08-23