

## 环形轨道 RGV 非对称 S 型速度曲线的应用研究

何长江<sup>1</sup>, 周德强<sup>1,2</sup>, 盛卫锋<sup>1,2</sup>, 奚青<sup>3</sup>, 陈曲燕<sup>3</sup>(1. 江南大学 机械工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江苏省食品先进制造装备技术重点实验室, 江苏 无锡 214122;  
3. 无锡弘宜智能科技有限公司, 江苏 无锡 214174)

**摘要:**针对轨道式导引车(rail guide vehicle, RGV)复杂轨道的速度控制问题,以环形轨道 RGV 为研究对象,提出一种非对称 S 型速度曲线控制方法。首先介绍了 RGV 控制系统的硬件组成,主要由导航定位模块、动力模块、避障报警模块、电源模块、Wi-Fi 通信模块组成。然后介绍了非对称 S 型速度曲线的参数计算方法,建立了非对称 S 型速度曲线的数学模型。对非对称 S 型速度曲线和对称 S 型速度曲线对比仿真结果表明:在完成一次 RGV 搬运任务中,非对称 S 型速度曲线的运行时间能减少 3.13 s,效率提升约 11.81%;搭建基于 PLC 控制器的 RGV 速度控制试验平台,并进行速度控制实验。选择利用编码器实现“位移-速度”双闭环控制,实验结果表明:实际速度曲线的任务时间为 23.66 s,与理想速度曲线相比,各段边界条件的最大速度平均误差为 0.9%。仿真与实验结果证明该算法能有效解决环形轨道 RGV 的加减速控制问题。

**关键词:** RGV; PLC; 加减速控制; 非对称 S 型速度曲线

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)10-0017-06

## Research on RGV speed control system based on asymmetric S-shaped speed curve

HE Changjiang<sup>1</sup>, ZHOU Deqiang<sup>1,2</sup>, SHENG Weifeng<sup>1,2</sup>, XI Qing<sup>3</sup>, CHEN Quyan<sup>3</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Advanced Food Manufacturing Equipment &amp; Technology, Wuxi 214122, China;

3. Wuxi Hongyi Intelligent Technology Co., Ltd., Wuxi 214174, China)

**Abstract:** A non symmetric S-shaped velocity curve control method is proposed for the speed control problem of rail guide vehicle(RGV) complex orbits. This paper takes the circular-track RGV as the research object and proposes an asymmetric S-shaped speed curve control method. Firstly, the hardware composition of the RGV control system in this paper is introduced, which mainly consists of a navigation and positioning module, a power module, an obstacle avoidance and alarm module, a power supply module, and a Wi-Fi communication module. Then, the parameter calculation method of the asymmetric S-shaped speed curve is introduced, and establishes a mathematical model for asymmetric S-shaped velocity curve. The simulation compares the asymmetric S-shaped velocity curve with the symmetric S-shaped velocity curve. The simulation shows that in completing an RGV transportation task, the running time of the asymmetric S-shaped velocity curve can be reduced by 3.13 seconds, and the efficiency can be improved by about 11.81%; It builds an RGV speed control experimental platform based on a PLC controller and conducted speed control experiments. It chooses to utilize an encoder to implement dual closed-loop control for "displacement-velocity", the experiments show that the task time of the actual speed curve is 23.66 seconds, and compares with the ideal speed curve, the maximum average speed error of each boundary condition is 0.9%. Simulation and experiments show that this algorithm can effectively solve the acceleration and deceleration control problem of RGV in circular orbits.

**Keywords:** rail guide vehicle; PLC; acceleration and deceleration control; asymmetrical S-curve

## 0 引言

近年来,自动化立体仓库搬运效率的提升成为生产制造系统快速运作的关键。RGV 在现代自动化物流系统领域中得到了越来越广泛的应用。根据不同需求, RGV 使得工作人员不受时间和空间等特殊因素的影响,提高了安全性,有效地提高了工业加工的效率<sup>[1]</sup>。在实际应用过程中,速度控制直接决定 RGV 的整体性能,良好的 RGV 速度规划可以在保证计算效率的同时提高节能效果<sup>[2]</sup>。

S 型速度曲线作为一种平滑的速度控制技术,其加速度变化连续的控制策略可以有效削弱对系统的冲击和振动<sup>[3]</sup>。Xiao 等<sup>[4]</sup>将 S 型速度曲线应用于样条轨迹的插补中并提出快速规划速度算法。吴继春等<sup>[5]</sup>基于双重反馈控制模型,提出利用 CNC 多维约束 S 型速度曲线,实现了非时间速度规划,提高了 S 型速度曲线的抗干扰能力。上述工作都是基于加速段和减速段对称的 S 型速度曲线,但由于环形轨道 RGV 受弯道速度的限制,传统对称的 S 型速度曲线在实际使用中使得系统不够灵活。

Ren 等<sup>[6-8]</sup>引入比例系数,通过调节比例系数得到不对称 S 型速度曲线。王斌锐等<sup>[9]</sup>根据路径段的长度变化,

\* 基金项目:江苏省无锡市科技局项目(G20222014)

收稿日期:2023-11-10

采用非对称 S 曲线加减速控制,自适应前瞻规划出路径段间最优衔接速度,并在相邻路径段间采用圆弧进行平滑过渡。肖金壮等<sup>[10]</sup>提出了一种基于卷积原理的非对称 S 速度曲线规划算法,该算法的原理是通过计算出两个不同的对称 S 型速度曲线进行拼接,从而得到非对称 S 型速度曲线,浪费处理器的算力。Li 等<sup>[11-12]</sup>在减少残余振动的同时,利用 WOA 算法优化非对称 S 型速度曲线,并用机械手进行实验,但这是假设路径长度可以达到最大速度的基础上进行的相关参数优化。而在 RGV 任务中存在路径不能达到最大速度的情况。

针对上述问题,本文以环形轨道 RGV 为研究对象,搭建了基于 PLC 控制器的 RGV 速度控制试验平台,提出了一种非对称 S 型速度曲线速度控制策略。

## 1 RGV 控制系统

### 1.1 RGV 控制系统组成

本文的 RGV 控制系统主要由导航定位模块、动力模块、避障报警模块、电源模块、Wi-Fi 通信模块组成,总体系统框图如图 1 所示。

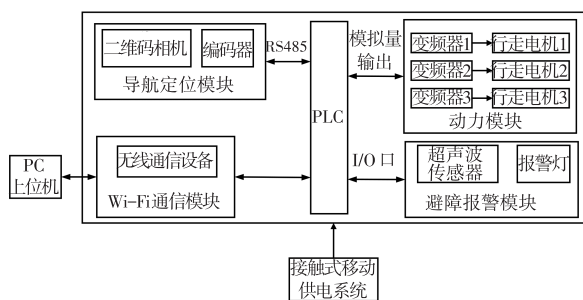


图 1 控制系统框

导航定位模块包含二维码相机和编码器,本文设计的 RGV 为双轨环形轨道式,轨道上间隔 1 m 贴上二维码,选择使用相机识别二维码进行全局定位。由于二维码定位有一定的局限性,两个二维码之间的位置信息无法获得<sup>[13]</sup>,因此选择使用编码器进行两个二维码之间的局部定位。

动力模块主要包含 3 个变频器和 3 台电机,其中两台变频器控制两台行走电机,一台变频器控制一台移栽电机。PLC 与变频器采用模拟量控制,变频器对电机采用无速度传感器矢量控制。

避障报警模块包含一个超声波传感器和报警灯,当超声波传感器检测到前方有障碍物时,会亮起报警灯并紧急停车,以实现无碰撞运行<sup>[14]</sup>。

Wi-Fi 通信模块包含无线 Wi-Fi 通信设备,使得 PC 端能够对系统进行操作和监控。

### 1.2 硬件选型

控制器选用西门子 S7-200 SMART PLC,型号 CPUS7-40(6ES7 288-1 ST40-0AA0)和扩展模块 SBCM1(6ES7 288-5CM01-0AA0),采用模拟量控制变频器。

变频器选择汇川 MD500 系列变频器,电机选择杰牌

传动平行轴齿轮减速电机,选择欧姆龙的 E6B2-C 编码器,具体型号见表 1。

表 1 硬件型号和主要参数

硬件名称	型号	规格参数
变频器	MD500T2.2GB	2.2 kW
电机	JRTFAZ39DN100S4-TF-270°	2.2 kW, 1 450 r/min
编码器	E6B2-CWZ6C	1 000 P/R

PLC 通过模拟量控制变频器,变频器对电机采用无速度传感器矢量控制模式。实验环形轨道和 RGV 平台如图 2 所示,其主要由双轨环形轨道、RGV 小车和出站口组成。



1—双轨环形轨道; 2—RGV 小车; 3—出站口

图 2 环形轨道和 RGV 样机

### 1.3 RGV 的任务流程

RGV 进行作业时,主要由上位机提供任务信息。通常任务信息包括目标位置和作业内容,其中作业内容主要包括出库任务、入库任务以及出入库任务<sup>[15]</sup>。RGV 初始化完成后获得任务信息开始以 S 型速度曲线运行,再以 S 型速度曲线减速,并通过编码器和相机定位到目标位置,之后通过光电传感器确定货物已经搬运到安全位置。RGV 的任务流程图如图 3 所示。

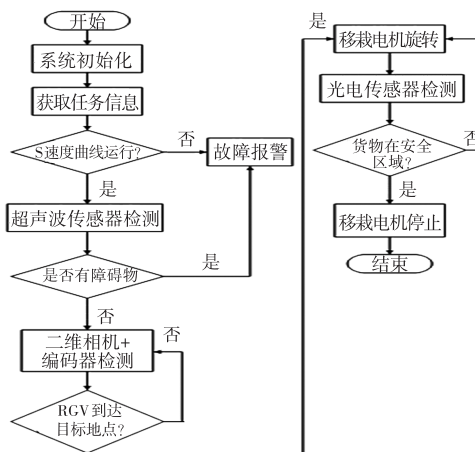


图 3 RGV 任务流程图

## 2 非对称 S 型速度曲线设计

### 2.1 非对称 S 型速度曲线简介

如图 4 所示,本文的非对称 S 型速度曲线的加速段和减速段非对称,该算法将加速段与减速段的参数分别进行计算,可以实现自动生成起始速度和终止速度不相同的速度曲线。其中: $q$  为位移, $V$  为运行速度, $a$  为加速度, $J$  为加加速度, $T_a$  为加速时间, $T_v$  为匀速时间, $T_d$  为减速时间, $T_{j1}$  为加速段的加速度变化时间, $T_{j2}$  为减速段的加速度变化时间。

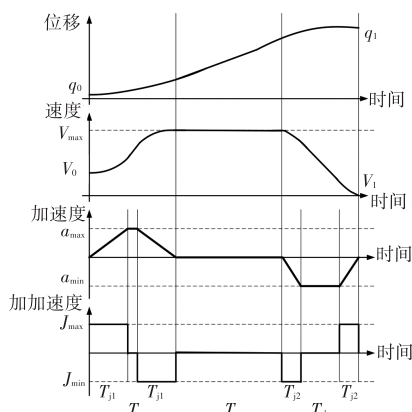


图4 理想的非对称S型速度曲线

一个完整的S型速度曲线分为3个阶段:

- 1) 加速段  $0 \leq t < T_a$ , 以  $J_{\max}$  使加速度从0变化到  $a_{\max}$ , 再以  $a_{\max}$  加速, 最后以  $J_{\min}$  使加速度从  $a_{\max}$  变化到0。
- 2) 匀速段  $T_a \leq t < T_a + T_v$ , 以恒定的速度运行。
- 3) 减速段  $T_a + T_v \leq t < T_a + T_v + T_d$ , 以  $J_{\min}$  使加速度由0变化到  $a_{\min}$ , 再以  $a_{\min}$  减速, 最后以  $J_{\max}$  使加速度从  $a_{\min}$  变化到0。

## 2.2 非对称S型速度曲线参数计算

### 1) 给定边界条件和约束条件

一般地,需要给定边界条件:始末时刻的位置和速度  $q_0, q_1, V_0, V_1$ ; 约束条件:最大速度  $V_{\max}$ , 最大加速度  $a_{\max}$  和最小加速度  $a_{\min}$ , 最大加加速度  $J_{\max}$  和最小加加速度  $J_{\min}$ , 其中,  $a_{\min} = -a_{\max}$ ,  $J_{\min} = -J_{\max}$ 。

设加速段的实际最大加速度为  $a_{\lim a}$ , 减速段的实际最大加速度为  $a_{\lim d}$ , 匀速段的实际最大速度为  $V_{\lim}$ , 则根据给定的边界条件和约束条件,需要计算的参数为:时间参数  $T_{j1}, T_{j2}, T_a, T_d, T_v$ , 实际加速度参数  $a_{\lim a}, a_{\lim d}$ , 和实际最大速度  $V_{\lim}$ 。非对称S型速度曲线的参数计算流程图如图5所示。

### 2) 判断是否能达到最大速度

#### a) 加速阶段

若加速阶段刚好能达到最大加速度  $a_{\max}$ , 有,  $V_{\max} - V_0 = \int_0^{T_a} a dt$ , 此时  $T_a = 2T_{j1}, T_{j1} = \frac{a_{\max}}{J_{\max}}$ , 化简得到  $(V_{\max} - V_0)J_{\max} = a_{\max}^2$ 。

根据给定条件和上述推导,若加速阶段满足  $(V_{\max} - V_0)J_{\max} < a_{\max}^2$ , 说明加速阶段达不到最大加速度  $a_{\max}$ , 则有:  $T_{j1} = \sqrt{\frac{V_{\max} - V_0}{J_{\max}}}, T_a = 2T_{j1}, a_{\lim a} = J_{\max} T_{j1}$ 。

若加速阶段满足  $(V_{\max} - V_0)J_{\max} \geq a_{\max}^2$ , 说明加速阶段能达到最大加速度  $a_{\max}$ , 则有:  $T_{j1} = \frac{a_{\max}}{J_{\max}}, T_a = T_{j1} + \frac{V_{\max} - V_0}{a_{\max}}, a_{\lim a} = a_{\max}$ 。

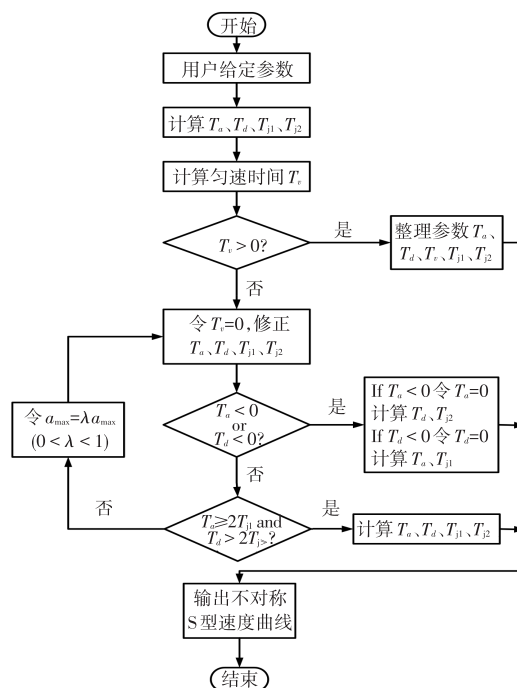


图5 非对称S型速度曲线参数计算流程图

#### b) 减速阶段

同理加速阶段的推导,减速阶段根据给定条件,若满足  $(V_{\max} - V_1)J_{\max} < a_{\max}^2$ , 说明减速阶段达不到  $a_{\min}$ , 则有:  $T_{j2} = \sqrt{\frac{V_{\max} - V_1}{J_{\max}}}, T_d = 2T_{j2}, a_{\lim d} = J_{\min} T_{j2}$ 。

若减速阶段满足  $(V_{\max} - V_1)J_{\max} \geq a_{\max}^2$ , 说明减速阶段可以达到  $a_{\min}$ , 则有,  $T_{j2} = \frac{a_{\max}}{J_{\max}}, T_d = T_{j2} + \frac{V_{\max} - V_1}{a_{\max}}, a_{\lim d} = a_{\min}$ 。

### 3) 计算匀速时间

根据速度-位移公式,一般地,有

$$\int_0^{T_a} V dt + \int_{T_a}^{T_a+T_v} V dt + \int_{T_a+T_v}^{T_a+T_v+T_d} V dt = q_1 - q_0$$

将上述推导的加、减速阶段的时间参数代入并化简,计算得到匀速时间:

$$T_v = \frac{q_1 - q_0}{V_{\max}} - \frac{T_a}{2} \left(1 + \frac{V_0}{V_{\max}}\right) - \frac{T_d}{2} \left(1 + \frac{V_1}{V_{\max}}\right) \quad (1)$$

若满足  $T_v > 0$ , 说明系统能够达到的最大速度  $V_{\lim}$  与设定的最大速度  $V_{\max}$  相等,即  $V_{\lim} = V_{\max}$ , 此时不需要修正  $T_{j1}, T_{j2}, T_a, T_d, a_{\lim a}, a_{\lim d}$ 。

若满足  $T_v \leq 0$ , 说明系统能够达到的最大速度  $V_{\lim}$  小于设定的最大速度  $V_{\max}$ , 即  $V_{\lim} < V_{\max}$ , 系统不存在匀速段,令  $T_v = 0$ , 修正其他参数。

### 4) $T_v \leq 0$ 时,修正参数

首先,假设能到达最大加速度  $a_{\max}$  和最小加速度  $a_{\min}$ , 有  $T_{j1} = T_{j2} = \frac{a_{\max}}{J_{\max}}$ , 根据速度-加速度方程,位移-速度方

程,列出

$$\begin{cases} \int_0^{T_a} a dt = V_{lim} - V_0 \\ \int_{T_a}^{T_a+T_d} a dt = V_1 - V_{lim} \\ \int_0^{T_a+T_d} V dt = q_1 - q_0 \end{cases} \quad (2)$$

根据已知条件,解得方程的解为

$$T_a = \frac{\frac{a_{max}^2}{J_{max}} - 2V_0 + \sqrt{\Delta}}{2a_{max}}, T_d = \frac{\frac{a_{max}^2}{J_{max}} - 2V_1 + \sqrt{\Delta}}{2a_{max}}$$

其中,

$$\Delta = \frac{a_{max}^4}{J_{max}^2} + 2(V_0^2 + V_1^2) + a_{max} \left( 4(q_1 - q_0) - 2 \frac{a_{max}}{J_{max}} (V_0 + V_1) \right),$$

次,对  $T_a$ 、 $T_d$  进行讨论:

1)  $T_a < 0$  或  $T_d < 0$ , 即判断是否存在加速段或减速段。

若  $T_a < 0$ , 令  $T_a = 0$ , 此时系统没有加速段,只有减速段,各个参数修正如下。

$$\begin{cases} T_a = T_{j1} = 0 \\ T_d = 2 \frac{q_1 - q_0}{V_0 + V_1} \\ T_{j2} = \frac{J_{max}(q_1 - q_0) - \sqrt{J_{max}^2(q_1 - q_0)^2 + (V_0 + V_1)^2(V_1 - V_0)}}{J_{max}(V_0 + V_1)} \\ a_{lima} = 0 \\ a_{limd} = J_{min} T_{j2} \\ V_{lim} = V_0 \end{cases} \quad (3)$$

若  $T_d < 0$ , 令  $T_d = 0$ , 此时系统没有减速段,只有加速段,各个参数修正如下。

$$\begin{cases} T_d = T_{j2} = 0 \\ T_a = 2 \frac{q_1 - q_0}{V_0 + V_1} \\ T_{j1} = \frac{J_{max}(q_1 - q_0) - \sqrt{J_{max}^2(q_1 - q_0)^2 - (V_0 + V_1)^2(V_1 - V_0)}}{J_{max}(V_0 + V_1)} \\ a_{lima} = J_{max} T_{j1} \\ a_{limd} = 0 \\ V_{lim} = V_0 + a_{lima}(T_a - T_{j1}) \end{cases} \quad (4)$$

2) 是否满足  $T_a \geq 2T_{j1}$  且  $T_d \geq 2T_{j2}$ , 即加速段和减速段是否都能达到最大加速度。

若满足  $T_a \geq 2T_{j1}$  且  $T_d \geq 2T_{j2}$ , 此时加速段和减速段都能达到最大加速度,假设成立。有

$$a_{lima} = a_{max}, a_{limd} = a_{min}, V_{lim} = V_0 + a_{lima}(T_a - T_{j1}).$$

若不满足,说明至少有一个阶段不能达到最大加速度。令:  $a_{max} = \lambda a_{max}$  ( $0 < \lambda < 1$ ), 即逐步减小  $a_{max}$ , 然后循环修正参数的过程,循环结束的条件为满足  $T_a \geq 2T_{j1}$  且  $T_d \geq 2T_{j2}$ 。

### 2.3 非对称 S 型速度曲线数学模型

根据 2.2 中的参数计算,通过微积分计算,非对称 S 型速度曲线各段速度、加速度的表达式分别如式(5)、(6)所示。

$$V = \begin{cases} V_0 + J_{max} \frac{t^2}{2}, & 0 \leq t < T_{j1} \\ V_0 + a_{limd} \left( t - \frac{T_{j1}}{2} \right), & T_{j1} \leq t < T_a - T_{j1} \\ V_{lim} + J_{min} \frac{(T_a - t)^2}{2}, & T_a - T_{j1} \leq t < T_a \\ V_{lim}, & T_a \leq t < T_a + T_v \\ V_{lim} - J_{max} \frac{(t - T_a - T_v)^2}{2}, & T_a + T_v \leq t < T_a + T_v + T_{j2} \\ V_{lim} + a_{limd} \left( t - T_a - T_v - \frac{T_{j2}}{2} \right), & T_a + T_v + T_{j2} \leq t < T_a + T_v + T_d - T_{j2} \\ V_1 + J_{max} \frac{(T_a + T_v + T_d - t)^2}{2}, & T_a + T_v + T_d - T_{j2} \leq t < T_a + T_v + T_d \end{cases} \quad (5)$$

$$a = \begin{cases} J_{max} t, & 0 \leq t < T_{j1} \\ J_{max} T_{j1}, & T_{j1} \leq t < T_a - T_{j1} \\ J_{max}(T_a - t), & T_a - T_{j1} \leq t < T_a \\ 0, & T_a \leq t < T_a + T_v \\ J_{min}(t - T_a - T_v), & T_a + T_v \leq t < T_a + T_v + T_{j2} \\ J_{min} T_{j2}, & T_a + T_v + T_{j2} \leq t < T_a + T_v + T_d - T_{j2} \\ J_{min}(T_a + T_v + T_d - t), & T_a + T_v + T_d - T_{j2} \leq t < T_a + T_v + T_d \end{cases} \quad (6)$$

$$J = \begin{cases} J_{max}, & 0 \leq t < T_{j1} \\ 0, & T_{j1} \leq t < T_a - T_{j1} \\ J_{min}, & T_a - T_{j1} \leq t < T_a \\ 0, & T_a \leq t < T_a + T_v \\ J_{min}, & T_a + T_v \leq t < T_a + T_v + T_{j2} \\ 0, & T_a + T_v + T_{j2} \leq t < T_a + T_v + T_d - T_{j2} \\ J_{max}, & T_a + T_v + T_d - T_{j2} \leq t < T_a + T_v + T_d \end{cases} \quad (7)$$

## 3 仿真与实验

### 3.1 基于 MATLAB 的仿真

在 RGV 环形轨道中, RGV 沿同一固定方向运行,将货物从一侧的入/出库站搬运至另一侧的入库输送机,然后由堆垛机将入库货物存储于指定货位并返回输送机,进而完成货物的入库搬运任务。

RGV 小车出入站的复合任务,需要从在两个货架分别停车进行出货,然后由静止开始加速到最大速度,直道限速 1.5 m/s,再减速进入弯道,弯道限速 0.8 m/s,出弯后在下一个直道上的出站口停车。

根据经验所得,为防止货物倾倒<sup>[16]</sup>,最大的加速度应为  $a_{max} = 1.5 \text{ m/s}^2$ ,最大加加速度应为  $J_{max} = 2.0 \text{ m/s}^3$ 。因此选择最大加速度应为  $a_m = 0.8 \text{ m/s}^2$ ,最大加加速度应为  $J_m = 1.6 \text{ m/s}^3$ 。

根据任务规划, RGV 小车的一次出入站复合任务包括四段边界条件,在 MATLAB 中添加 4 段边界条件,见表 2。

表 2 仿真边界条件参数

$q_0$	$q_1$	$V_0$	$V_1$	$V_{max}$	$a_{max}$	$J_{max}$
0	2	0	0	1	0.8	1.6
2	7	0	0.8	1.5	0.8	1.6
7	16	0.8	0.8	0.8	0.8	1.6
16	19	0.8	0	1.5	0.8	1.6

输入边界条件后,通过 MATLAB 仿真得到非对称的 S 型速度曲线和传统对称 S 型速度曲线的  $q-t$ 、 $V-t$ 、 $a-t$  曲线图,如图 6 所示。

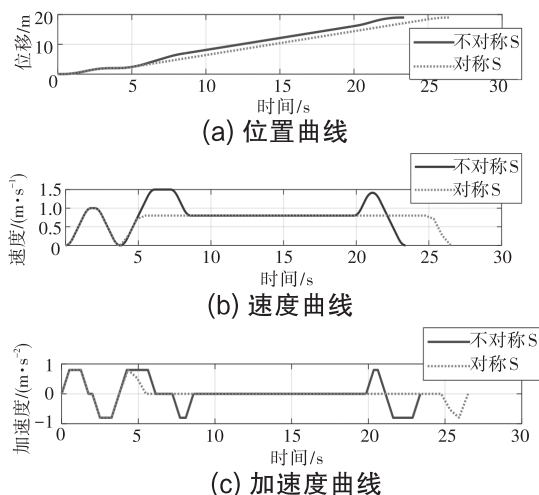


图6 非对称S型和对称S型速度曲线仿真对比

两种速度控制方法总位移均为16 m,非对称S型速度曲线能够加速到规定的最大速度1.5 m/s,并在入弯前减速至弯道限速0.8 m/s,同时自行计算出弯后能达到的最大速度为1.41 m/s。通过对比发现,在环形轨道中受到弯道限速的影响,传统的对称S型速度曲线在一次任务过程中,难以加速到最大速度。在相同的约束条件下,非对称的S型速度曲线大约用时23.37 s,比传统对称S型速度曲线的26.5 s节省约3.13 s,效率提升约11.81%。

### 3.2 实验

本文选择利用编码器实现“位移-速度”双闭环控制,控制框图如图7所示。

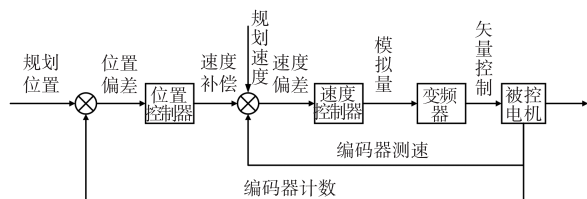


图7 双闭环控制系统

PLC以速度给定算法为核心,以S型速度曲线为控制目标。由于西门子S7-200 SMART PLC为离散型控制器,因此在主函数中调用参数计算的子函数,并采用5 ms的定时中断,在中断时输出实时速度,然后将模拟量传递给变频器,使得RGV按给定曲线运行<sup>[17]</sup>。

在PLC程序中输入与MATLAB仿真相同的边界条件,并在任务栏中监视输出速度的波形,利用PLC-Recorder软件,将编码器信号输出到电脑端并在MATLAB中生成波形,结果如图8所示。该软件直接访问PLC中的变量地址,不需要PLC端编写程序,同时输出优先级较低,不会对速度输出产生影响。图8显示,实际速度曲线下总耗时23.66 s,与理想速度曲线相比,各段边界条件的最大速度平均误差为0.9%,同时变加速度曲线存在公切线且在每个过渡点的加加速度均为0,保证任务过程中的平稳性充分证明了RGV非对称S型速度曲线调速方法的正确性,可应用于复杂轨道的RGV的任务运行。

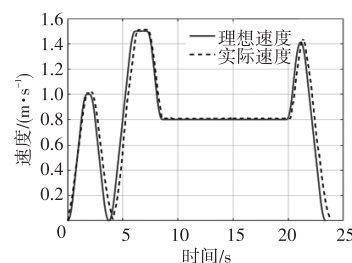


图8 RGW实际速度与仿真曲线对比

## 4 结束语

本文针对RGV复杂轨道的速度控制问题,提出了一种非对称S型速度曲线,得到以下结论:首先,仿真表明,非对称S型速度曲线比传统对称的S型速度曲线单次任务时间减少3.13 s,效率提升约11.81%;其次,实验表明,实际速度曲线的任务时间为23.66 s,与理想速度曲线相比,各段边界条件的最大速度平均误差为0.9%,非对称S型速度曲线能更好地适应复杂的RGV轨道。

## 参考文献

- [1] LIU Wenbin, LIU Dongbing. Dynamic adjustment strategy of rail guide vehicle[J]. Mobile Information Systems, 2021, 2021(5): 1-9.
- [2] WANG Jinxiang, HAN Dongming, YAN Yongjun, et al. Energy-saving and punctuality combined velocity planning for the autonomous-rail rapid tram with enhanced pseudospectral method[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2023, 36(1): 1-13.
- [3] ZHANG Yuzhe, LI Minghui, FANG Yanchao. Research and design of speed profiles for stacker cranes[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2562(1): 012062.
- [4] XIAO Jianxin, FANG Jun, LI Bingran, et al. Dynamic velocity planning method for parametric toolpath with mode-based tracking error control[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2023, 128(11/12): 4805-4817.
- [5] 吴继春, 许可, 周会成, 等. 利用CNC多维约束的S型速度规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2023, 35(9): 1439-1449.
- [6] REW K H, KIM K S. Using asymmetric S-curve profile for fast and vibrationless motion[C]//2007 International Conference on Control, Automation and System. Seoul, Korea: IEEE, 2007: 500-504.
- [7] REW K H, HA C W, KIM K S. A practically efficient method for motion control based on asymmetric velocity profile[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(7/8): 678-682.
- [8] REW K H, KIM K S. A closed-form solution to asymmetric motion profile allowing acceleration manipulation[J]. Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(7): 2499-2506.
- [9] 王斌锐, 王涛, 李正刚, 等. 多路段平滑过渡的自适应前瞻位姿插补算法[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1211-1218.
- [10] 肖金壮, 王震, 郭漠凡, 等. 基于卷积的高效非对称S速度曲线规划算法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2020(11): 42-44.
- [11] LIU Tianyu, CUI Jingkai, LI Yanhui, et al. Time-optimal asymmetric S-curve trajectory planning of redundant manipulators under kinematic constraints[J]. Sensors, 2023, 23(6): 3074.
- [12] LI Xingchen, GAO Xifeng, XIAO Jichun, et al. Time-optimal general asymmetric S-curve profile with low residual vibration[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2023(188): 109978.

(下转第109页)