

## 二维同步插补算法及其在 S7-200 Smart PLC 上的应用

张益波<sup>1</sup>, 姚晓晓<sup>2</sup>

(1.浙江理工大学自动化系, 浙江 杭州 310018;

2.常山亚瑞轴承有限公司, 浙江 衢州 324207)

✉ zhangy41@163.com; 237459086@qq.com



**摘要:**针对插补运动系统中存在机械振动较大的问题,提出一类基于恒定加加速度的二维直线插补算法。在确定加加速度的前提下,将直线插补的运动过程分为7个不同的阶段。利用运动学定律分析每个阶段的加速度、速度和位移的表达式,获取各运动阶段的初始条件。在基于二维系统的位移要求确定二维同步关系的基础上,实现了各阶段算法的离散化,最终完成了基于PLC(可编程逻辑控制器)的算法设计。实测结果表明,该算法同步精度小于0.5%,运行时间误差小于1s,运行效果良好,满足应用场景的需求。

**关键词:**二维同步;插补;S7-200 Smart

**中图分类号:**TP273 **文献标志码:**A

## Two-axis Synchronous Interpolation Algorithm and Its Application in S7-200 Smart PLC

ZHANG Yibo<sup>1</sup>, YAO Xiaoxiao<sup>2</sup>

(1.Department of Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2.Changshan Yarui Bearing Co., Ltd., Quzhou 324207, China)

✉ zhangy41@163.com; 237459086@qq.com

**Abstract:** This paper proposes a two-axis linear synchronous interpolation algorithm based on constant jerk to reduce strong mechanical vibrations in interpolating motion systems. Under the premise of determining the jerk, the motion process of linear interpolation is divided into seven different stages. Kinematics laws are used to analyze the expressions of acceleration, velocity, and displacement in each stage, and the initial conditions of each motion stage are obtained. Based on the determination of the two-axis synchronization relationship according to the displacement requirements of the two-axis system, the discretization of the algorithms in each stage is achieved, and finally the algorithm design based on PLC (Programmable Logic Controller) is completed. The actual test results show that the synchronization accuracy of the proposed algorithm is less than 0.5%, the running time error is less than 1 second, and the running effect is good, meeting the needs of the application scenarios.

**Key words:** two-axis synchronous; interpolation; S7-200 Smart

### 0 引言(Introduction)

插补是指采用多项式对曲线进行拟合,使被控部件实现期

望运动轨迹的算法,常用于机床、机械手控制以及篆刻等场合。为便于数字化设备控制,通常将被拟合曲线进行分段切分,然

后对分段切分后的节点采用直线连接的方式实现曲线拟合。

根据运动轨迹类型,插补算法主要有直线插补和曲线插补两种类型。曲线插补主要通过对每一分段采用高阶多项式替代直线的方法改进拟合效果,例如利用逐点插补原理,对圆弧曲线进行算法设计<sup>[1-2]</sup>,或采用线性优化补偿插补轨迹的误差<sup>[3-5]</sup>。此类算法的优点在于精度较高,但计算相对复杂,通常应用于实时性要求较低的场合。直线插补则根据曲线的变化率自适应动态调整周期,从而提高拟合精度<sup>[6]</sup>,或者利用空间几何转换手段,采用逐点比较和角度逼近或高斯函数采用直线插补算法<sup>[7-8]</sup>,或采用在多项式轨迹中插入时间点的综合算法<sup>[9]</sup>。此类算法的实时性更高,但在运动中的加减速变化可能导致较强的机械振动。

本文针对二维同步插补系统,以减少机械加减速时产生的振动为目的,改变传统以固定加速度为前提条件的运动模式,获取了当加加速度为定值条件下的插补系统分阶段运动的加速度、速度和位移的表达式及边界条件;同时,根据设定位移确定同步系数,在算法离散化后,实现了二维系统直线插补算法在 S7-200 Smart 系列 PLC 上的应用,同步精度小于 0.5%,运行时间误差小于 1 s,数据效果表明算法效果良好,满足应用场景要求。

## 1 二维插补算法(Two-axis interpolation algorithm)

### 1.1 二维插补的基本概念

二维插补系统是被控操作点在二维平面上运动,因此需要在垂直的两个方向分别进行运动轨迹拟合。在实际应用中通常采用两台伺服驱动器控制两台伺服电机,运动方向呈直角,分别为水平方向的  $x$  轴和垂直方向的  $y$  轴。以每个周期运动开始的位置为原点建立二维直角坐标系,并且每隔一段固定的时间,将曲线分解成若干个有纵横坐标的点,直线拟合矢量图如图 1 所示。

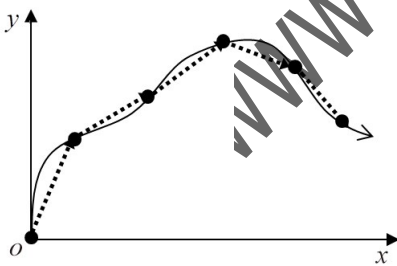


图 1 直线拟合矢量图

Fig. 1 Linear fitting vector graph

已知单个周期内二维位移值分别为  $\Delta x = x_i - x_{i-1}$  和  $\Delta y = y_i - y_{i-1}$ ,若结果为正,则表示电机正向运动,若结果为负,则表示电机反向运动,其绝对值代表运动的距离,用它除以伺服电机每接收一个脉冲带动设备移动的距离,就可以知道应该在该固定时间内分别向这两台伺服电机发送的总脉冲数。

### 1.2 直线插补算法

根据运动曲线,系统具有如下运动方式:刚启动时,以某固定的加加速度使加速度增加至最大值;以最大加速度运行一段

时间后,再以同样大小的加加速度使加速度减小至 0,此时速度刚好到达最大值。当接近目标时,加速度以同样的方式反向增大至最大值,维持一段时间后再减小至 0,此时速度也刚好减为 0,全程运动距离和设定距离相等,插补曲线示意图如图 2 所示,①~⑦分别代表运动中的 7 个加减速过程。

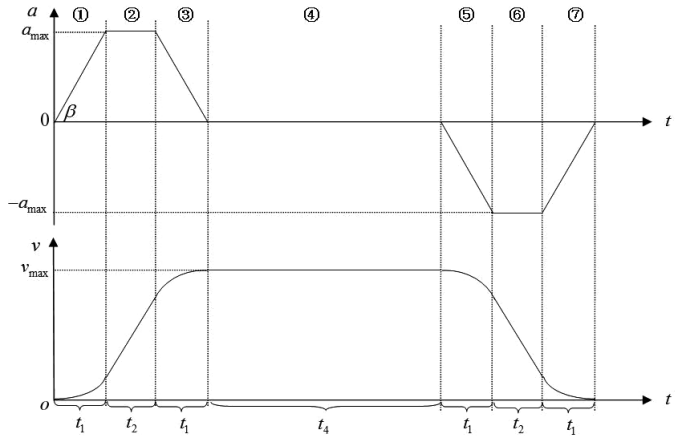


图 2 插补曲线示意图

Fig. 2 Diagram of interpolation curve

以下分析在每个阶段的时间内的速度和位移的运动方式,其中设实时加速度为  $a$ ,实时速度为  $v$ ,实时位移为  $s$ ,系统允许的最大加速度为  $a_{\max}$ ,最大速度为  $v_{\max}$ ,加加速度为  $\beta$ 。

第一阶段:该阶段为加速度增加阶段,该阶段内有  $a = \beta t$ ,对其进行积分,并已知  $v_0 = 0$ ,可得

$$v(t) = v_0 + \int_0^t \beta \tau d\tau = \frac{1}{2} \beta t^2 \quad (1)$$

对  $v(t)$  积分,并已知  $s_0 = 0$ ,可得该时段内相对位移为

$$s(t) = s_0 + \int_0^t \frac{1}{2} \beta \tau^2 d\tau = \frac{1}{6} \beta t^3 \quad (2)$$

该阶段结束时,加速度增大至最大值,即  $a(t_1) = \beta t_1 = a_{\max}$ ,可知  $t_1 = \frac{a_{\max}}{\beta}$ ;同时,可得当  $t = t_1$  时,速度和位移的边界条件为

$$\begin{cases} v(t_1) = \frac{1}{2} \beta t_1^2 \\ s_1 = s(t_1) = \frac{1}{6} \beta t_1^3 = \frac{1}{6} a_{\max} t_1^2 \end{cases} \quad (3)$$

第二阶段:加速度为  $a = a_{\max}$ ,类似可得速度和该阶段内的相对位移表达式为

$$\begin{cases} v(t) = \frac{1}{2} a_{\max} t_1 + a_{\max} t \\ s(t) = \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t + \frac{1}{2} a_{\max} t^2 \end{cases} \quad (4)$$

得到边界条件为

$$\begin{cases} v(t_2) = \frac{1}{2} a_{\max} t_1 + a_{\max} t_2 \\ s_2 = \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t_2 + \frac{1}{2} a_{\max} t_2^2 \end{cases} \quad (5)$$

第三阶段:加速度为  $a = a_{\max} - \beta t$ , 所以得到

$$\begin{cases} v(t) = \frac{1}{2} a_{\max} t_1 + a_{\max} t_2 + a_{\max} t - \frac{1}{2} \beta t^2 \\ s(t) = \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t + a_{\max} t_2 t + \frac{1}{2} a_{\max} t^2 - \frac{1}{6} \beta t^3 \end{cases} \quad (6)$$

边界条件为

$$\begin{cases} v(t_3) = a_{\max} (t_1 + t_2) \\ s_3 = \frac{5}{6} a_{\max} t_1^2 + a_{\max} t_1 t_2 \end{cases} \quad (7)$$

图 2 的加速度示意部分中,在第三阶段结束时加速度减为 0,前三阶段恰好形成等腰梯形,因此有  $t_3 = t_1$ ;同时,在图 2 的①②③阶段,加速度的面积之和即为速度,此时速度达到最大值,即  $v(t_3) = v_{\max}$ 。由于该梯形上边为  $t_2$ ,下边为  $2t_1 + t_2$ ,高为  $a_{\max}$ ,根据梯形面积公式可知  $v_{\max} = \frac{1}{2} [(t_2) + (2t_1 + t_2)] \times a_{\max} = a_{\max} (t_1 + t_2)$ ,所以  $t_2 = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} - t_1$ 。

第四阶段:此时以固定速度运行,与上文的分析过程类似,可得

$$\begin{cases} v(t) = v_{\max} \\ s(t) = v_{\max} t \end{cases} \quad (8)$$

边界条件为

$$\begin{cases} v(t_4) = v_{\max} \\ s_4 = v_{\max} t_4 \end{cases} \quad (9)$$

第五阶段:加速度  $a = -\beta t$ ,可得

$$\begin{cases} v(t) = v(t_4) + \int_0^t (-\beta \tau) d\tau \\ = v_{\max} - \frac{1}{2} \beta t^2 \\ s(t) = v_{\max} t - \frac{1}{6} \beta t^3 \end{cases} \quad (10)$$

边界条件为

$$\begin{cases} v(t_5) = v_{\max} - \frac{1}{2} \beta t_1^2 \\ = v_{\max} - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 \\ s_5 = v_{\max} t_1 - \frac{1}{6} a_{\max} t_1^2 \end{cases} \quad (11)$$

第六阶段:加速度  $a = -a_{\max}$ ,可得

$$\begin{cases} v(t) = v(t_5) + \int_0^t a d\tau = v_{\max} - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 - a_{\max} t \\ s(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau = v_{\max} t - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t - \frac{1}{2} a_{\max} t^2 \end{cases} \quad (12)$$

边界条件为

$$\begin{cases} v(t_6) = v_{\max} - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 - a_{\max} t_2 \\ s_6 = v_{\max} t_2 - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t_2 - \frac{1}{2} a_{\max} t_2^2 \\ = v_{\max} t_2 - \frac{1}{2} a_{\max} (t_1 + t_2) t_2 \\ = \frac{1}{2} v_{\max} t_2 \end{cases} \quad (13)$$

第七阶段:加速度  $a = -a_{\max} + \beta t$ ,可得

$$\begin{cases} v(t) = v(t_6) + \int_0^t a d\tau \\ = v_{\max} - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 - a_{\max} t_2 + \int_0^t (-a_{\max} + \beta \tau) d\tau \\ = v_{\max} - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 - a_{\max} t_2 - a_{\max} t + \frac{1}{2} \beta t^2 \\ s(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau \\ = v_{\max} t - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t - a_{\max} t_2 t - \frac{1}{2} a_{\max} t^2 + \frac{1}{6} \beta t^3 \end{cases} \quad (14)$$

边界条件为

$$\begin{cases} v(t_7) = v_{\max} - \frac{1}{2} a_{\max} t_1 - a_{\max} t_2 - a_{\max} t_1 + \frac{1}{2} \beta t_1^2 = 0 \\ s_7 = v_{\max} t_1 - \frac{1}{2} a_{\max} t_1^2 - a_{\max} t_2 t_1 - \frac{1}{2} a_{\max} t_1^2 + \frac{1}{6} \beta t_1^3 \\ = \frac{1}{6} a_{\max} t_1^2 \end{cases} \quad (15)$$

综上可得

$$\begin{aligned} s_l &= \frac{1}{6} a_{\max} t_1^2 + \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t_2 + \frac{1}{2} a_{\max} t_2^2 + \frac{5}{6} a_{\max} t_1^2 + a_{\max} t_1 t_2 + \\ & v_{\max} t_4 - v_{\max} t_1 - \frac{1}{6} a_{\max} t_1^2 + \frac{1}{2} v_{\max} t_2 + \frac{1}{6} a_{\max} t_1^2 \\ & = v_{\max} (2t_1 + t_2 + t_4) \end{aligned} \quad (16)$$

同时,在图 2 的速度示意部分可知,①②③与⑦⑥⑤左右对称,总距离即速度曲线与  $x$  轴所夹图形的面积,即(①+②+③)×2+④,因此总位移为

$$\begin{aligned} s_{\text{总}} &= \left( \frac{1}{6} a_{\max} t_1^2 + \frac{1}{2} a_{\max} t_1 t_2 + \frac{1}{2} a_{\max} t_2^2 + \right. \\ & \left. \frac{5}{6} a_{\max} t_1^2 + a_{\max} t_1 t_2 \right) \times 2 + v_{\max} t_4 \\ & = v_{\max} (2t_1 + t_2 + t_4) \end{aligned} \quad (17)$$

由此可得

$$t_4 = \frac{s_l}{v_{\max}} - 2t_1 - t_2 \quad (18)$$

### 1.3 离散化及增量式算法

为便于在计算机中进行运算,需将每个阶段速度和位移公式进行离散化,离散示意图如图 3 所示。

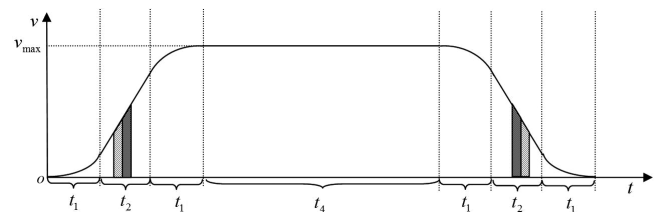


图 3 离散示意图

Fig. 3 Discretizing diagram

设采样周期为  $T$ ,以图 2 的速度示意部分中的阶段①为

例,其连续式为  $v(t) = \frac{1}{2}\beta t^2$  和  $s(t) = \frac{1}{6}\beta t^3$ , 因此在该阶段内第  $k$  个采样时刻, 速度和位移分别为  $v(k) = \frac{1}{2}\beta(kT)^2$  和  $s(k) = \frac{1}{6}\beta(kT)^3$ , 即从  $(k-1)T$  到  $kT$  时段内的脉冲频率为  $\frac{1}{2}\beta(kT)^2$ , 移动距离即总脉冲数, 即

$$\begin{aligned}\Delta s(k) &= s(k) - s(k-1) \\ &= \frac{1}{6}\beta(kT)^3 - \frac{1}{6}\beta[(k-1)T]^3 \quad (19) \\ &= \beta T^3 \left( \frac{1}{2}k^2 - \frac{1}{2}k + \frac{1}{6} \right)\end{aligned}$$

可见, 离散后公式的计算量较大, 为了提高计算的实时性, 同时考虑到高速脉冲串输出是采用匀加速方式, 因此每个采样周期均使用直角梯形的面积代替该面积, 即  $\Delta s(k) = \frac{T}{2}[v(k-1) + v(k)]$ , 每个采样周期仅需完成一次加法和一次乘法即可。

为提高计算实时性, 减少计算量, 本研究采用增量式算法。由于速度变化在每个采样周期是连续的, 因此在每个采样周期开始前, 可以在前一时刻的速度上增加一个增量, 以获取当前时刻的速度, 即  $\Delta v(k) = v(k) - v(k-1)$ 。观察前述插补算法的运动方式可知, 系统的运动状态主要有 4 类, 以下分别针对 4 类运动状态进行分析。

(1) 第一阶段和第五阶段: 加速度正向增大或反向减小。

已知该情况下有

$$v(k) = v(k-1) \pm \int_{(k-1)T}^{kT} \beta \tau d\tau \quad (20)$$

所以

$$\begin{aligned}\Delta v(k) &= v(k) - v(k-1) = \pm \int_{(k-1)T}^{kT} \beta \tau d\tau \quad (21) \\ &= \pm \frac{1}{2}\beta \tau^2 \Big|_{(k-1)T}^{kT} = \pm \frac{1}{2}\beta T^2 (2k-1)\end{aligned}$$

(2) 第二阶段和第六阶段: 匀加速度或匀减速。

$$\begin{aligned}\Delta v(k) &= v(k) - v(k-1) = \pm \int_{(k-1)T}^{kT} a_{\max} d\tau \quad (22) \\ &= \pm a_{\max} \tau \Big|_{(k-1)T}^{kT} = \pm a_{\max} T\end{aligned}$$

(3) 第三阶段和第七阶段: 加速度正向减小或反向减小。

$$\begin{aligned}\Delta v(k) &= v(k) - v(k-1) = \int_{(k-1)T}^{kT} (\pm a_{\max} \mp \beta \tau) d\tau \quad (23) \\ &= \pm a_{\max} \tau \Big|_{(k-1)T}^{kT} \mp \frac{1}{2}\beta \tau^2 \Big|_{(k-1)T}^{kT} \\ &= \pm a_{\max} T \mp \frac{1}{2}\beta T^2 (2k-1)\end{aligned}$$

(4) 第四阶段: 匀速。

$$\Delta v(k) = 0 \quad (24)$$

#### 1.4 两轴同步系数的计算

在一个采样周期内, 两台电机带动设备的期望运动轨迹应该是两台电机在各自方向运动距离的合成, 轨迹矢量图如图 4

所示。

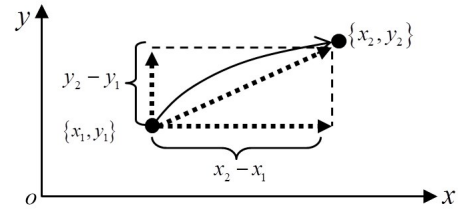


图 4 轨迹矢量图

Fig. 4 Trajectory vector graph

两个坐标值相减后可以得到该采样周期内两台电机的运动值分别为  $x_2 - x_1$  和  $y_2 - y_1$ , 若结果为正, 则表示电机正向运动, 若结果为负, 则表示电机反向运动, 其绝对值代表运动的距离, 用它除以伺服电机每接收一个脉冲带动设备移动的距离, 就可以知道 PLC 应该分别向这两台伺服电机发送的总脉冲数。

同时, 在每个采样周期, 两个轴向运动位移的比值  $\gamma = \frac{\Delta y}{\Delta x}$  亦等同于两个轴向速度、加速度和加加速度的比值, 因此可令  $x$  轴为主动轴, 采用公式推算下一采样周期速度与位移,  $y$  轴的速度和位移乘以  $\gamma$  即可获取。

#### 1.5 算法步骤

使用 S7-200 Smart 软件的 PTO 功能, 在程序开始前进行参数初始化。

(1) PTO 初始化, 置控制字 SMB67、77 为 16 # E0 (多段式)。

(2) 判断用户给出的最大加速度  $a_{\max}$ 、加加速度  $\beta$ 、最大速度  $v_{\max}$ 、采样时间  $T$  以及插补时间  $t_l$  等参数是否为 0, 若为 0 或存在负数, 则置位警告参数不合理; 计算临界时间  $t_1 = \frac{a_{\max}}{\beta}$

及  $k_1 = \frac{t_1}{T}$ ; 若  $t_l \leq 4t_1$ , 则置位警告插补时间可能偏短或用户参数不合理; 计算  $t_2 = \frac{v_{\max}}{a_{\max}} - t_1$  和  $k_2 = \frac{t_2}{T}$ 。

(3) 计算 3 种运动方式的临界值  $s_1 \sim s_3$ 。

(4) 为简化后期运算, 计算某些常用参数, 即  $a_{\max} T$ 、 $\frac{1}{2}\beta T^2$ 。

每个运动周期开始前根据设定的相对位移确定运动方式, 当前周期算法选择方法描述如下:

(1) 判断  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的符号, 若为负, 则置脉冲为负向, 否则置脉冲为正向。

(2) 取  $\Delta x$  和  $\Delta y$  的绝对值, 即  $|\Delta x|$  和  $|\Delta y|$ 。

(3) 分别判断  $|\Delta x|$  和  $|\Delta y|$  是否小于某一阈值 (如小于 1 000 个脉冲或 0.001 cm, 以实际系统为准), 若小于该阈值, 则认为其为 0, 置相应位确保其对应的运动子程序无效 (无位移)。

(4) 如果  $|\Delta x|$  和  $|\Delta y|$  不全为 0, 用其中的小值除以大值后计算  $\gamma$ 。

(5)进行相应的初始化过程,取  $\hat{k}_1 = k_1, \hat{k}_2 = k_2, \hat{\beta} = \beta, \hat{a}_{\max} = a_{\max}$ , 计算  $t_4 = \frac{s_t}{v_{\max}} - 2t_1 - t_2$  及  $k_4 = \frac{t_4}{T}$ ; 置当前速度  $v=0, s=0$ , 当前步数  $k=1$ ; 置当前阶段标志为 1。

运动控制采用中断方式, 每个采样周期完成如下工作:

(1)阶段置位程序如下。

阶段 1: 若  $k \leq \hat{k}_1$ , 则  $s = v, v = v + \left(\frac{1}{2}\hat{\beta}T^2\right)(2k - 1)$ ; 若  $k > \hat{k}_1$ , 则置  $k=1$ , 进阶段 2。

阶段 2: 若  $k \leq \hat{k}_2$ , 则  $s = v, v = v + (\hat{a}_{\max} T)$ ; 若  $k > \hat{k}_2$ , 则置  $k=1$ , 进阶段 3。

阶段 3: 若  $k \leq \hat{k}_1$ , 则  $s = v, v = v + (\hat{a}_{\max} T) - \left(\frac{1}{2}\hat{\beta}T^2\right)(2k - 1)$ ; 若  $k > \hat{k}_1$ , 则置  $k=1$ , 进阶段 4。

阶段 4: 若  $k \leq k_4$ , 则  $s = vT, v$  不变; 若  $k > k_4$ , 则置  $k=1$ , 进阶段 5。

阶段 5: 若  $k \leq \hat{k}_1$ , 则  $s = v, v = v - \left(\frac{1}{2}\hat{\beta}T^2\right)(2k - 1)$ ; 若  $k > \hat{k}_1$ , 则置  $k=1$ , 进阶段 6。

阶段 6: 若  $k \leq \hat{k}_2$ , 则  $s = v, v = v - (\hat{a}_{\max} T)$ ; 若  $k > \hat{k}_2$ , 则置  $k=1$ , 进阶段 7。

阶段 7: 若  $k \leq \hat{k}_1$ , 则  $s = v, v = v - (\hat{a}_{\max} T) + \left(\frac{1}{2}\hat{\beta}T^2\right)(2k - 1)$ ; 若  $k > \hat{k}_1$ , 则程序结束。

(2)将  $v$  和  $s = (s + v)T/2$  赋值给  $|\Delta x|$  和  $|\Delta y|$  中值较大的运动轴子程序的速度与位移变量, 同时将  $v\gamma$  和  $s\gamma$  赋值给值较小的运动轴子程序的速度与位移变量。

(3)重复上述过程直至程序结束。

## 2 实验验证 (Experiment results)

为验证算法效果, 将上述算法编制为 S7-200 Smart PLC 程序后, 应用于两轴运动系统。同时, 设定参数如下: 最大加速度为 1, 加加速度为 1, 最大速度为 1.5, 采样周期为 0.05。通过设定不同的位移, 得到的实验结果如表 1 所示。

表 1 实验对照数据

Tab.1 Experiment comparison data

次数	位移	理论	实际	相对误	理论时	实际时		
序号	增量	轴	/cm	脉冲数	脉冲数	差/%	长/s	长/s
1	4.0	X	1.5	90 000	89 967	0.037	4.0	4.930
		Y	1.0	60 000	59 960			
2	5.5	X	3.0	180 000	179 359	0.350	4.6	5.530
		Y	2.5	150 000	149 453			
3	10	X	7.5	450 000	449 959	0.009	7.5	8.449
		Y	2.5	150 000	149 960			
4	10	X	6.0	360 000	359 959	0.014	6.5	7.443
		Y	2.5	150 000	149 950			

对上述数据进行分析可知, 最大相对误差小于 0.5%, 误差主要由浮点数四舍五入为双整型脉冲值时的舍入误差(正误差)导致; 实际时长均大于理想时长, 主要由中断调用和运行时占用时间所致, 上述数据均达到了应用场景的工艺要求。

## 3 结论 (Conclusion)

本文研究了一类基于固定加加速度的二维插补算法及其在 S7-200 Smart 上的应用。首先在加加速度恒定的前提条件下, 设计了二维直线插补方法, 其次在对不同阶段运动方式进行分析的基础上, 获取了运动公式及相应的边界条件, 并通过离散化和增量化得到了可应用于 S7-200 Smart PLC 的算法。实测效果表明, 真实位移与理想位移的相对误差均小于 0.5%, 运行时间误差均小于 1 s, 满足应用场景的运行要求。该算法目前仅适用于直线运动系统, 后续将进一步研究可实现快速的曲线插补算法。

## 参考文献 (References)

- [1] 官哲, 雷志伟, 张新. 经济型可编程控制器插补算法的研究与应用[J]. 机械工程与自动化, 2019(3):191-192.
- [2] WANG Y Q, LU W K, LI Y S. A self-adaptive antialiasing framework for seismic data interpolation[J]. IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2023, 61: 233-237.
- [3] 桂昊, 张立强, 杨青平, 等. 非可展直纹面侧铣刀具插补轨迹优化方法[J]. 制造业自动化, 2023, 45(9):148-152.
- [4] RAZVAN D. Generalised graded interpolation[J]. International journal of approximate reasoning, 2023, 152:236-261.
- [5] ZHANG N, CANINI K, SILVA S, et al. Fast linear interpolation[J]. ACM journal on emerging technologies in computing systems, 2021, 17(2):1-15.
- [6] 李进文, 何素梅, 吴海彬. 一种直线插补算法及其在机器人中的应用研究[J]. 机电工程, 2015, 32(7):966-970.
- [7] 李文江, 郝晓琳, 孙宏. 基于 PLC 的马鞍型焊接机自动控制系统[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(10):31-35.
- [8] DEGIRMENCI A H, PERRIN R D, DOUGLAS P. Gaussian process regression for ultrasound scanline interpolation[J]. Journal of medical imaging, 2022, 9(3):37-39.
- [9] 冯建超, 鲁文其, 林军华, 等. 基于 3-5-3 多项式插补的六轴机器人轨迹优化[J]. 机械与电子, 2023, 41(10):75-80.

## 作者简介:

张益波(1978-), 男, 博士, 副教授。研究领域: 工业控制算法研究, 软件开发。

姚晓晓(1987-), 男, 本科, 工程师。研究领域: 机械设计与制造, 机电一体化。