

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2014.04.004

# 基于加减速时间控制的S形速度规划新算法研究\*

郑仲谦, 王兴飞, 李松, 李迪\*

(华南理工大学机械与汽车工程学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对使用S形曲线加减速控制的7阶段模型时参数设定复杂以及使用困难的问题, 提出了基于加减速时间控制的5阶段S曲线柔性加减速控制方法。S形曲线加减速控制的7阶段模型可以解决直线加减速方法中加速度、速度不连续导致的冲击问题, 但是其规划参数的设定复杂, 使用过程中容易出错。通过对原有的S形曲线加减速控制的7阶段模型进行分析, 建立了加减速时间与加速度、加加速度的函数关系, 在保证速度控制平稳运行的前提下, 使参数设定大大简化, 使用更为方便; 同时, 解决了基于加减速时间控制的规划方法无法适用的问题。仿真结果表明, 利用基于加减速时间控制的5阶段模型控制方法可以在保证加速度、速度曲线连续, 提高系统柔性的前提下, 使参数设定更为简单直观, 具有较高的实际应用价值。

**关键词:** S曲线柔性加减速; 加减速时间; 规划算法

**中图分类号:** TH39; TP273.5 **文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-4551(2014)04-0425-06

## Algorithm of S-shape acceleration based on control of anticipation time

ZHENG Zhong-qian, WANG Xing-fei, LI Song, LI Di

(School of Mechanical & Automotive Engineering, South China University of Technology, Gangzhou 510640, China)

**Abstract:** Aiming at the difficulties of parameter-setting and using the 7-phase S-curve acceleration and deceleration control model, a new method was proposed to implement S-curve acceleration and deceleration based on the control of anticipation time. The problem that the impacts in NC machining caused by discontinuous acceleration and velocity in linear acceleration and deceleration method, was overcome by 7-phase S-curve acceleration and deceleration control model. However, the parameter configuration is so complex that they can be easily misused. After the analysis of 7-phase control model, the functional relationship of the anticipation time and acceleration was established. Except the strength of motion stability, the control model was based on the control of the anticipation time of acceleration and was constructed by five phases, which means the process of parameter-setting is not only simplified greatly but also more convenient to use. The simulation results indicate that the algorithm can make sure the acceleration is continuous, which mean the flexibility of control system is improved, and much easier to implement. The method has a high practical value.

**Key words:** flexible S-curve acceleration and deceleration; anticipation time of acceleration; plan algorithm

## 0 引 言

随着计算机技术和运动控制技术的飞速发展, 运动控制系统的功能越来越强大, 一些复杂的算法在控制中得到越来越多的应用, 从而使运动控制的速度和精度得到不断的提高<sup>[1-3]</sup>。加减速控制是开放式运动

控制系统的关键技术之一, 是实现高速、高精加工的重要保证, 一方面要求能够准确无误、快速地到达目标位置; 另一方面要求能够方便、简单地进行操作和运行。通常的S形曲线加减速规划的7阶段模型能够保证运动控制系统表现出较高的柔性, 加速度连续可以保证在控制过程中不出现冲击<sup>[4-6]</sup>。但是7阶段模型的计算量大, 而且在实际使用过程中, 通过直接指

收稿日期: 2013-12-02

基金项目: 广东省战略性新兴产业核心技术攻关资助项目(2012A010702004, 2012A09010012); 广东省教育部产学研项目(2011A090200054)

作者简介: 郑仲谦(1988-), 男, 广东汕头人, 主要从事高性能嵌入式系统设计方面的研究。E-mail: zzqleon@163.com

通信联系人: 李迪, 女, 教授, 博士生导师。E-mail: itdili@scut.edu.cn

定加减速时间来决定S形曲线的方式更为常见,所以本研究提出一种S曲线加减速控制的新方法—基于加减速时间控制的5阶段S曲线柔性加减速控制方法。通过采用这种方法可以在保证系统平稳运行的情况下,参数设定更为简单直观。

### 1 基本原理和公式

S形加减速规划由于加速度连续、柔性好,在数控系统中得到广泛的应用<sup>[7-8]</sup>。整个速度规划过程中加速度、速度和位移与时间的关系如下式所示:

$$a(t) = a(t_i) + \int_{t_i}^t j(\tau_i) d\tau_i \quad (1)$$

$$f(t) = f(t_i) + \int_{t_i}^t a(\tau_i) d\tau_i \quad (2)$$

$$s(t) = s(t_i) + \int_{t_i}^t f(\tau_i) d\tau_i \quad (3)$$

式中:  $a$ —加速度,  $f$ —速度,  $s$ —位移。

这3个参数变量都跟随时间变量  $t$  变化而改变,因此常常将S形曲线加减速规划分为7个阶段:①加加速段;②匀加速段;③减加速段;④匀速段;⑤加减速段;⑥匀减速段;⑦减减速段。7阶段模型是对S形加减速最完整的表征方式。

### 2 5阶段S曲线柔性加减速规划

7阶段模型能保证系统具有较高的柔性,但是其计算量大,规划过程中需划分多种情况,程序实现复杂<sup>[9-11]</sup>。另外,本研究采用7阶段模型需指定8个参数:  $L, F, f_s, f_e, A, D$  以及  $J_1(J_3), J_5(J_7)$ 。而在实际使用过程中,直接指定加减速时间代替最大加减速速度值以及各阶段的加加速度值更为常见,应用更为广泛。

假定加速时间为  $T_{acc}$ , 减速时间为  $T_{dec}$ , 可知:

$$T_1 + T_2 + T_3 = 2T_1 + T_2 = T_{acc} \quad (4)$$

$$T_5 + T_6 + T_7 = 2T_5 + T_6 = T_{dec} \quad (5)$$

对由①、②、③ 3段组成的加速过程,有:

$$F = f_s + J_1 T_1 T_2 + J_1 T_1^2 \quad (6)$$

仅由式(4)和式(6)组成的方程组无法全部解出  $T_1, T_2$  和  $J_1$ ; 因此7阶段模型无法适用。本研究提出将规划过程简化, 仅由加加速段、减加速段、匀速段、加减速段和减减速段组成, 示意图如图1所示。

由图1可知, 与7阶段模型相比, 5阶段模型虽然取消了匀加速段和匀减速段, 但同样能够确保规划过程中, 始、末点加速度都为零, 各个阶段之间平滑过渡, 加速度时间曲线连续, 满足柔性加减速控制要求。

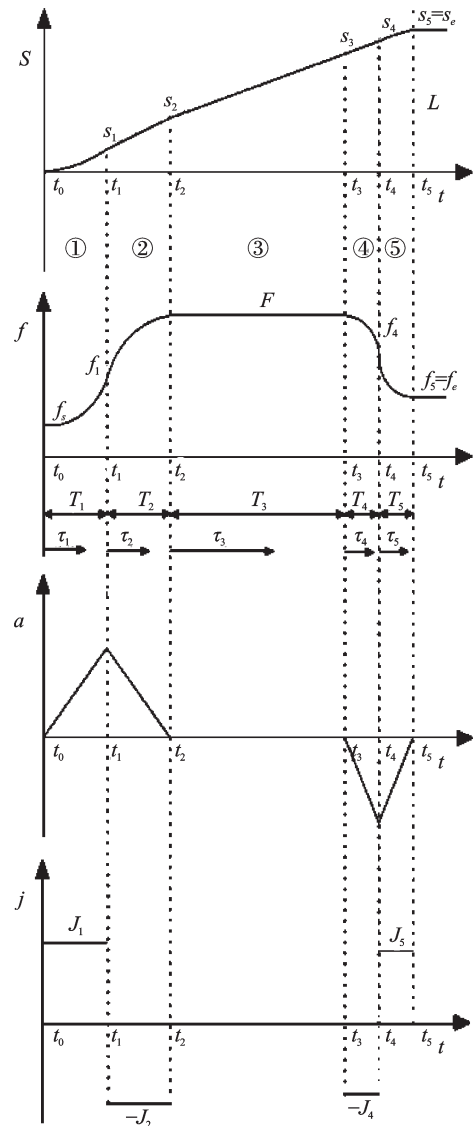


图1 5阶段S形速度规划示意图

$f_s$ —起始速度;  $f_e$ —终点速度;  $t_k(k=0,1,\dots,5)$ —各个阶段的过渡点时刻;  $\tau_k(k=1,2,\dots,5)$ —局部时间坐标, 表示以各个阶段的起始点作为零点的时间表示;  $\tau_k = t - t_{k-1}, T_k(k=1,2,\dots,5)$ —各个阶段的持续运行时间;  $L$ —整个运行长度;  $F$ —指令目标速度;  $A$ —最大加速度值;  $D$ —最大减速度值;  $J_1, J_2, J_4, J_5$ —第1,2,4,5阶段的加加速度

由式(1~3)可得5阶段相应的加加速度、加速度、速度和位移与时间的表达式为:

$$j(t) = \begin{cases} J_1, & 0 \leq t < t_1 \\ -J_2, & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_3 \\ -J_4, & t_3 \leq t < t_4 \\ J_5, & t_4 \leq t \leq t_5 \end{cases} \quad (7)$$

$$a(t) = \begin{cases} J_1 \tau_1, & 0 \leq t < t_1 \\ J_1 T_1 - J_2 \tau_2, & t_1 \leq t < t_2 \\ 0, & t_2 \leq t < t_3 \\ -J_4 \tau_4, & t_3 \leq t < t_4 \\ -J_4 T_4 + J_5 \tau_5, & t_4 \leq t \leq t_5 \end{cases} \quad (8)$$

$$f(t) = \begin{cases} f_s + \frac{1}{2}J_1\tau_1^2, & 0 \leq t < t_1 \\ f_1 + J_1T_1\tau_2 - \frac{1}{2}J_2\tau_2^2, & t_1 \leq t < t_2, f_1 = f_s + \frac{1}{2}J_1T_1^2 \\ f_2, & t_2 \leq t < t_3, f_2 = f_1 + J_1T_1T_2 - \frac{1}{2}J_2T_2^2 = F \\ f_3 - \frac{1}{2}J_4\tau_4^2, & t_3 \leq t < t_4, f_3 = f_2 \\ f_4 - J_4T_4\tau_5 + \frac{1}{2}J_5\tau_5^2, & t_4 \leq t \leq t_5, f_4 = f_3 - \frac{1}{2}J_4T_4^2 \end{cases} \quad (9)$$

$$s(t) = \begin{cases} f_s\tau_1 + \frac{1}{6}J_1\tau_1^3, & 0 \leq t < t_1 \\ s_1 + f_1\tau_2 + \frac{1}{2}J_1T_1\tau_2^2 - \frac{1}{6}J_2\tau_2^3, & t_1 \leq t < t_2 \\ s_1 = f_sT_1 + \frac{1}{6}J_1T_1^3 \\ s_2 + f_2\tau_3, & t_2 \leq t < t_3, s_2 = s_1 + f_1T_2 + \frac{1}{2}J_1T_1T_2^2 - \frac{1}{6}J_2T_2^3 \\ s_3 + f_3\tau_4 - \frac{1}{6}J_4\tau_4^3, & t_3 \leq t < t_4, s_3 = s_2 + f_2T_3 \\ s_4 + f_4\tau_5 - \frac{1}{2}J_4T_4\tau_5^2 + \frac{1}{6}J_5\tau_5^3, & t_4 \leq t \leq t_5 \\ s_4 = s_3 + f_3T_4 - \frac{1}{6}J_4T_4^3 \end{cases} \quad (10)$$

以上是5阶段S曲线柔性加减速控制方法的基本公式。由于没有匀加速段和匀减速段两个阶段,在加速过程中由“式(4)和式(6)组成的方程组有解”可见,只需  $L, F, f_s, f_e, T_{acc}, T_{dec}$  这6个变量,便可得到整段加减速曲线,求得每个时刻的加速度、速度和位移值。

### 3 基于加减速时间的S曲线控制方法

5阶段模型加减速规划的重点就是根据加减速时间求出加速度和加加速度,实现加速度和速度控制。

#### 3.1 加减速时间相等的情况

在这种特殊情况下,S曲线加减速规划只需要指定  $L, F, f_s$  和  $T_{acc}$  4个变量,便可构造出整段曲线。由于加减速时间相同,起始和终止的速度相等,即  $f_s = f_e$ 。同时,存在以下关系式:  $T_1 = T_2 = T_4 = T_5 = T_{acc}/2$ 。

##### 3.3.1 能够达到指令速度的情况

对称5阶段S形速度规划示意图如图2所示。

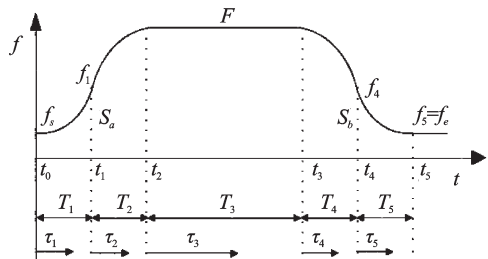


图2 对称5阶段S形速度规划示意图

当  $L$  足够长时,存在匀速阶段,即可以到达  $F$ 。

加速的过程为:在加加速段内,速度从  $f_s$  增加到  $f_1$ ,在减加速段内,速度从  $f_1$  增加到  $F$ ,消耗时间分别为  $T_1, T_2$ ,由式(9)可知:

$$f_1 = f_s + \frac{1}{2}J_1T_1^2, F = f_2 = f_1 + J_1T_1T_2 - \frac{1}{2}J_2T_2^2 = f_s + J_1T_1^2 \quad (11)$$

由以上两式可得速度增量为  $F - f_s = J_1T_1^2$ 。因此,可得到:

$$J_1 = J_2 = \frac{F - f_s}{T_1^2} = \frac{4(F - f_s)}{T_{acc}^2} \quad (12)$$

$$A = J_1T_1 = \frac{2(F - f_s)}{T_{acc}} \quad (13)$$

减速过程与加速过程相似,同样可得:

$$J_4 = J_5 = \frac{F - f_s}{T_3^2} = \frac{4(F - f_s)}{T_{acc}^2} \quad (14)$$

$$D = J_3T_3 = \frac{2(F - f_s)}{T_{acc}} \quad (15)$$

由式(10)可以求得由加/减速区的长度  $S_a$  和  $S_b$  为:

$$S_a = S_b = \frac{(F + f_s) \times T_{acc}}{2} \quad (16)$$

此时若  $L \geq S_a + S_b$ ,则可得到规划所需的全部参数。

#### 3.1.2 达不到指令速度的情况

对称4阶段S形速度规划示意图如图3所示。

当  $L < S_a + S_b$  时,加工中无法达到  $F$ ,此时加减速过程中没有匀速段,其速度和加速度曲线如图3所示。

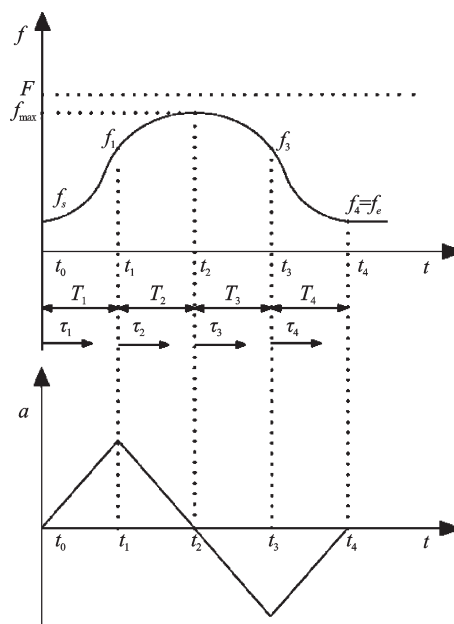


图3 对称4阶段S形速度规划示意图

此时,由式(9,10)可得:

$$f_{max} = f_s + JT_1^2 = f_s + \frac{1}{4}JT_{acc}^2 \quad (17)$$

$$(f_{max} + f_s) \times T_1 = \frac{(f_{max} + f_s) \times T_{acc}}{2} = \frac{L}{2} \quad (18)$$

从而:

$$J_1 = J_2 = J_3 = J_4 = \frac{4(L - 2T_{acc} f_s)}{T_{acc}^3} \quad (19)$$

$$A = D = J_1 T_1 = \frac{2(L - 2T_{acc} f_s)}{T_{acc}^2} \quad (20)$$

由此得到了S曲线加减速规划所需的全部参数。

### 3.2 加减速时间不相等的情况

通常情况下,起始速度与终止速度、加速时间与减速时间并不相等,即  $f_s \neq f_e$ 、 $T_{acc} \neq T_{dec}$ ,此时上文中建立在对称性基础上的控制算法已经无法在适用于当前对加加速度和加速度的计算,需要在原有基本模型的基础上对具体算法进行扩展。

加减速控制中只需分别通过  $T_{acc}$ 、 $T_{dec}$  确定加速过程中的  $J_1$ 、 $J_2$ 、 $A$  以及减速过程中  $J_4$ 、 $J_5$ 、 $D$  等6个变量,就能够确定整个加减速的过程。

#### 3.2.1 能够达到指令速度的情况

不对称5阶段S形速度规划示意图如图4所示。

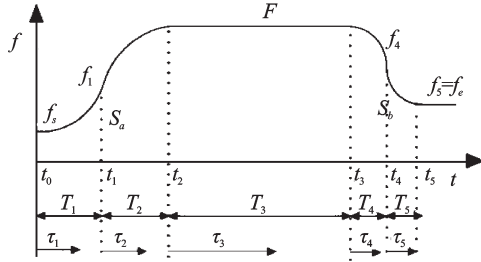


图4 不对称5阶段S形速度规划示意图

与加减速时间相等的条件下,能够达到指令速度的情况的情况类似,同理可得:

$$J_1 = J_2 = \frac{F - f_s}{T_1^2} = \frac{4(F - f_s)}{T_{acc}^2} \quad (21)$$

$$A = J_1 T_1 = \frac{2(F - f_s)}{T_{acc}} \quad (22)$$

$$S_a = \frac{(F + f_s) \times T_{acc}}{2} \quad (23)$$

减速过程与加速过程相似,同样可得:

$$J_4 = J_5 = \frac{F - f_e}{T_3^2} = \frac{4(F - f_e)}{T_{dec}^2} \quad (24)$$

$$D = J_3 T_3 = \frac{2(F - f_e)}{T_{dec}} \quad (25)$$

$$S_b = \frac{(F + f_e) \times T_{dec}}{2} \quad (26)$$

此时,如果  $L \geq S_a + S_b$ ,则得到规划所需的全部参数。

#### 3.2.2 达不到指令速度的情况

不对称4阶段S形速度规划示意图如图5所示。

当  $L < S_a + S_b$  时,加工中无法达到  $F$ ,此时加减速过程中没有匀速段,即由  $f_s$  先加速到某一速度  $f_{max}$ ,然后再由  $f_{max}$  减速到  $f_e$ 。实际运行能够达到的最高速度  $f_{max}$  需要先被计算出来,但由于速度曲线的非对

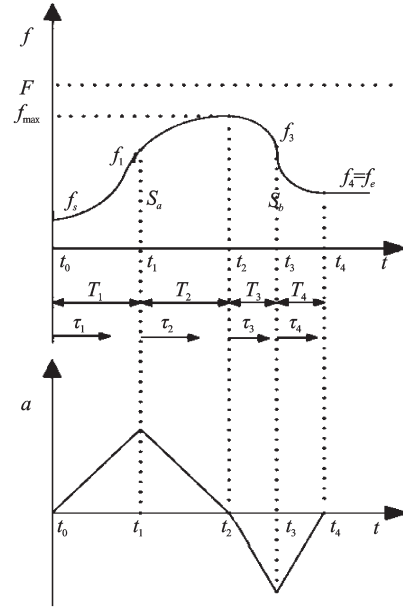


图5 不对称4阶段S形速度规划示意图

称性,通过原有方法无法获得最高速度值。

由式(10)可得,  $L = S_a + S_b$ , 其中:

$$\begin{cases} S_a = \frac{(f_{max} + f_s) \times T_{acc}}{2} \\ S_b = \frac{(f_{max} + f_e) \times T_{dec}}{2} \end{cases} \quad (27)$$

由式(9)可得最高速度  $f_{max}$  值为:

$$f_{max} = f_s + \frac{1}{4} J_1 T_{acc}^2 = f_e + \frac{1}{4} J_3 T_{dec}^2 \quad (28)$$

由此可得:

$$\begin{cases} J_1 = J_2 = \frac{4(2L - 2f_s T_{acc} - (f_s + f_e) \times T_{dec})}{T_{acc}^3 + T_{acc}^2 T_{dec}} \\ J_3 = J_4 = \frac{4(2L - 2f_e T_{dec} - (f_s + f_e) \times T_{acc})}{T_{dec}^3 + T_{dec}^2 T_{acc}} \end{cases} \quad (29)$$

$$\begin{cases} A = \frac{2(2L - 2f_s T_{acc} - (f_s + f_e) \times T_{dec})}{T_{acc}^2 + T_{acc} T_{dec}} \\ D = \frac{2(2L - 2f_e T_{dec} - (f_s + f_e) \times T_{acc})}{T_{dec}^2 + T_{dec} T_{acc}} \end{cases} \quad (30)$$

由此得到了S曲线规划所需的全部参数。

## 4 仿真及结果分析

为了验证该方法是否满足柔性要求以及准确的加减速周期要求,现进行软件仿真,以加减速时间不等这一适用性最广的情况为例,算法流程图如图6所示。

笔者采用两段加减速时间不同但目标距离相同的路径段进行实验,时间以周期为单位,距离以脉冲为单位。速度规划参数如表1所示。

将以上参数输入到仿真程序中,得到数据如表2所示。

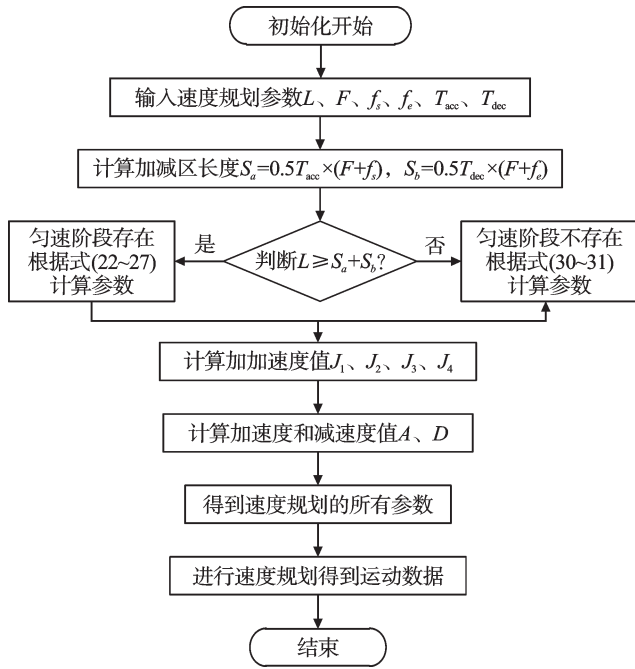


图6 算法流程图

表1 速度规划参数

参数(单位)	路径段1	路径段2
$L$ (脉冲)	4 000	4 000
$F$ (脉冲/周期)	100	100
$f_s$ (脉冲/周期)	10	10
$f_e$ (脉冲/周期)	20	20
$T_{acc}$ (周期)	35	45
$T_{dec}$ (周期)	20	30

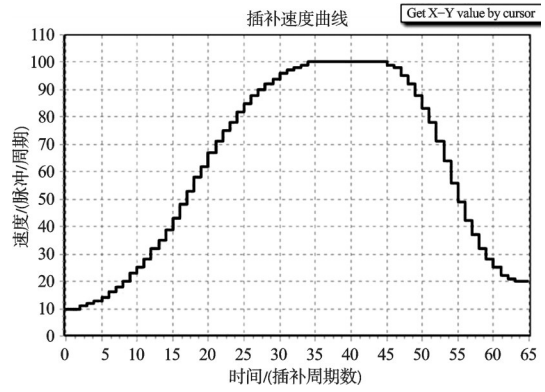
表2 程序计算结果

计算结果(单位)	路径段1	路径段2
$S_a$ (脉冲)	1 925	2 475
$S_b$ (脉冲)	1 200	1 800
$L \geq S_a + S_b$ ?	Y	N
$J_1, J_2$ (脉冲/周期 <sup>3</sup> )	0.293 9	0.1633
$J_3, J_4$ (脉冲/周期 <sup>3</sup> )	0.800 0	0.323 0
$A$ (脉冲/周期 <sup>2</sup> )	5.142 9	3.674 1
$D$ (脉冲/周期 <sup>2</sup> )	8.000 0	4.844 4
$f_{max}$ (脉冲/周期)	100	91.189 3

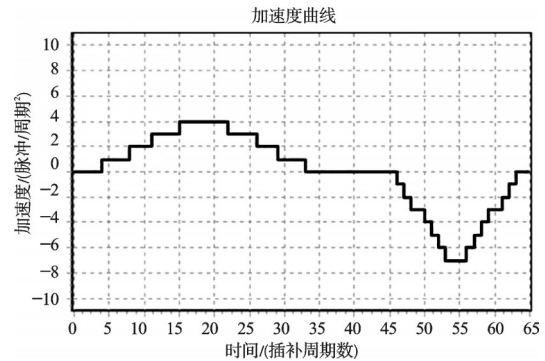
由表2可知,路径段1存在匀速阶段,可以达到 $F$ ,曲线有5个阶段共同组成,路径段2不存在匀速阶段,可以达到的最大速度为91.189 3脉冲/周期。

由表1、表2得到S曲线加减速规划所需的全部参数,通过速度规划算法得到的速度、加速度曲线如图7、图8所示。

从图7、图8中可以看出,不仅实际的加速度曲线连续、速度曲线光滑连续,而且加减时间满足指定要求,证明这一5阶段S曲线加减速规划算法可以满足柔性加减速的要求,同时使用方便、简单。

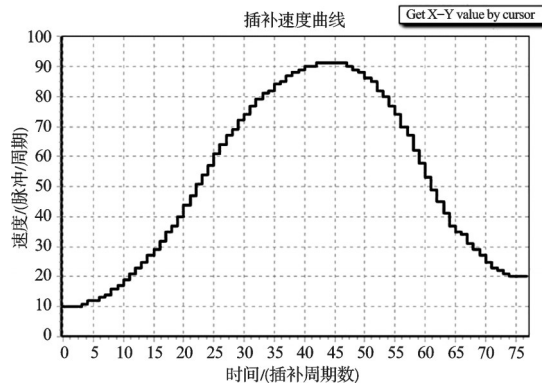


(a) 插补速度曲线

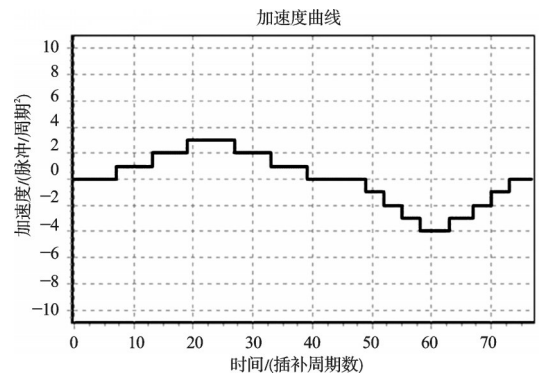


(b) 加速度曲线

图7 路径段1的S速度规划速度、加速度仿真图



(a) 插补速度曲线



(b) 加速度曲线

图8 路径段2的S速度规划速度、加速度仿真图

### 5 结束语

本研究提出了一种实现S曲线加减速控制的新方法,简化了参数的指定方式—通过直接指定加减速时间代替加加速、减加速以及加速度、减速度来决定S形曲线的方式,将常用S形曲线7阶段模型简化为5阶段模型,解决了基于加减速时间控制的规划方法无法适用的情况,并根据运动长度的不同,进一步推导出了该规划算法的基本公式,保证了速度、加速度均能够实现连续变化,满足了柔性加工要求,减少了实际加工过程中的冲击,提高了加工质量。与原有的7阶段模型相比,参数的指定大为简化,使用更加方便直观。该方法已在16轴运动控制卡中得到了实际应用,并取得了较好的使用效果。

#### 参考文献(References):

[1] 张得礼,周来水. 数控运动加工的平滑处理[J]. 航空学报,2006,27(1):125-130.  
 [2] 朱晓春,屈波,孙来业,等. S曲线加减速控制方法研究

[J]. 中国制造业信息化,2006,35(23):38-40.  
 [3] 张得礼,周来水. 数控运动加工的平滑处理[J]. 航空学报,2006,27(1):125-130.  
 [4] 杨超,张冬泉. 基于S曲线的步进电机加减速的控制[J]. 机电工程,2011,28(7):813-817.  
 [5] ERKORKMAZ K, ALTINTAS Y. High speed CNC system design: part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation [J]. **International Journal Machine Tools & Manufacture**. 2001,41(9):1323-1345.  
 [6] 郭新贵,李从心,阮雪榆. 采用线性加减速伺服系统的快速准确定位方法[J]. 机械工程学报,2003,39(7):74-78.  
 [7] 张振华,赵福令. 数控系统终点控制算法研究[J]. 机械设计与制造,2008(8):163-165.  
 [8] 胡鸿豪,吴勇种,肖 绚. CNC系统直线加减速优化算法[J]. 机床与液压,2008,36(5):287-289.  
 [9] 邵现京,董金才,赵龙章,等. 基于新型加减速曲线的多步进电机控制的研究[J]. 自动化与仪表,2013,28(4):53-56.  
 [10] 陈寿坤. 基于微机原理的步进电机控制[J]. 机电技术,2012(5):28-30.  
 [11] 李晓辉,郭义杰,冷洪滨. S曲线加减速控制新方法的研究[J]. 控制与检测,2007(10):50-53.

[编辑:张 翔]

#### 本文引用格式:

郑仲谦,王兴飞,李 松,等. 基于加减速时间控制的S形速度规划新算法研究[J]. 机电工程,2014,31(4):425-430.  
 ZHENG Zhong-qian, WANG Xing-fei, LI Song, et al. Algorithm of S-shape acceleration based on control of anticipation time[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*,2014,31(4):425-430.  
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第413页)

#### 参考文献(References):

[1] 计时鸣,张利,金明生,等. 气囊抛光技术及其研究现状[J]. 机电工程,2010,27(5):1-12.  
 [2] 计时鸣,金明生,张 宪,等. 应用于模具自由曲面的气囊抛光新技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.  
 [3] 李全胜,成 晔,蔡复之,等. 计算机控制光学表面成形驻留时间算法研究[J]. 光学技术,1999,5(3):56-62.  
 [4] 俞 敏,杨 力,万勇建. 驻留时间参数优化分析[J]. 光学与光电技术,2006,4(1):5-7.  
 [5] 万勇建,施春燕,袁家虎,等. 基于驻留时间补偿的抛光误差控制方法[J]. 强激光与粒子束,2011(1):97-100.  
 [6] 汉语,伍 凡,万勇建. CCOS技术驻留时间的计算方法[C]//2009年先进光学技术及其应用研讨会论文集,红外与激光工程,2009:69-72.  
 [7] SCHINHAERL M, RASCHER R, STAMP R, et al. Utilisa-

tion of time-variant influence functions in the computer controlled polishing[J]. **Precision Engineering**,2008(32):47-54.  
 [8] SCHINHAERL M, SMITH G, STAMP R, et al. Mathematical modelling of influence functions in the computer controlled polishing: Part I[J]. **Applied Mathematical Modelling**,2008(32):2888-2906.  
 [9] SCHINHAERL M, SMITH G, STAMP R, et al. Mathematical modelling of influence functions in the computer controlled polishing: Part II[J]. **Applied Mathematical Modelling**,2008(32):2907-2924.  
 [10] 陈伟强,计时鸣,金明生,等. 气囊连续进动抛光的转换模块设计[J]. 轻工机械,2013,31(1):24-28.  
 [11] 金明生. 模具自由曲面抛光机理及工艺研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.

[编辑:罗向阳]