

S 曲线加减速控制方法研究

朱晓春, 屈波, 孙来业, 汪木兰

(南京工程学院 自动化系, 江苏 南京 211167)

摘要:针对目前S曲线加减速控制的不足,研究了易实现控制的S曲线加减速算法。给出了控制策略和实时控制方法。基于该算法和控制方法进行了应用研究,并给出了应用实例,结果表明采用该算法和控制方法实现高速高精度是正确的和可行的。

关键词:S曲线;加减速;控制方法;数控系统

中图分类号:TP273

文献标识码:A

文章编号:1672-1616(2006)23-0038-03

随着先进制造业的发展,对数控加工的精度和速度要求越来越高。提高加工精度的途径很多,其中,从数控系统的控制角度看,要实现高速加工,必须采用加减速控制。传统数控系统一般采用指数曲线加减速或直线加减速。这两种加减速控制适合点位控制,但对于直线、圆弧高速切削,在加速启动和减速结束时易产生冲击^[1,2]。为解决这种冲击,在加减速启动阶段和结束阶段加减速,使速度变化柔和,从而适应电动机性能,减少冲击。这就诞生了S曲线加减速的思想。本文在其基础上,从可控性角度出发,研究了易实现控制的S曲线加减速算法,对S曲线加减速的实时控制方法进行了研究。

1 S 曲线加减速算法

S曲线加减速将传统的3段加减速过程变为7段加减速过程,形成S字形,如图1所示。加速段由加加速度段(T_1)、匀加速度段(T_2)、减加速度段(T_3)组成;减速段由加减速段(T_5)、匀减速度段(T_6)、减减速度段(T_7)组成。

T_1 段加速度从0变到最大值 A_{\max} ,速度从 V_S 升为 V_L 。设该段的加加速度(即:加速度的变化率)为 J ,则 $J = A_{\max}/T_1$ 。 A_{\max} 恒定, J 越大, T_1 则越小,升速快,冲击大;反之, J 越小, T_1 越大,升速慢,冲击小。

T_2 段加速速度 V 从 V_L 开始以 A_{\max} 加速度匀加速上升直到 V_M 为止。

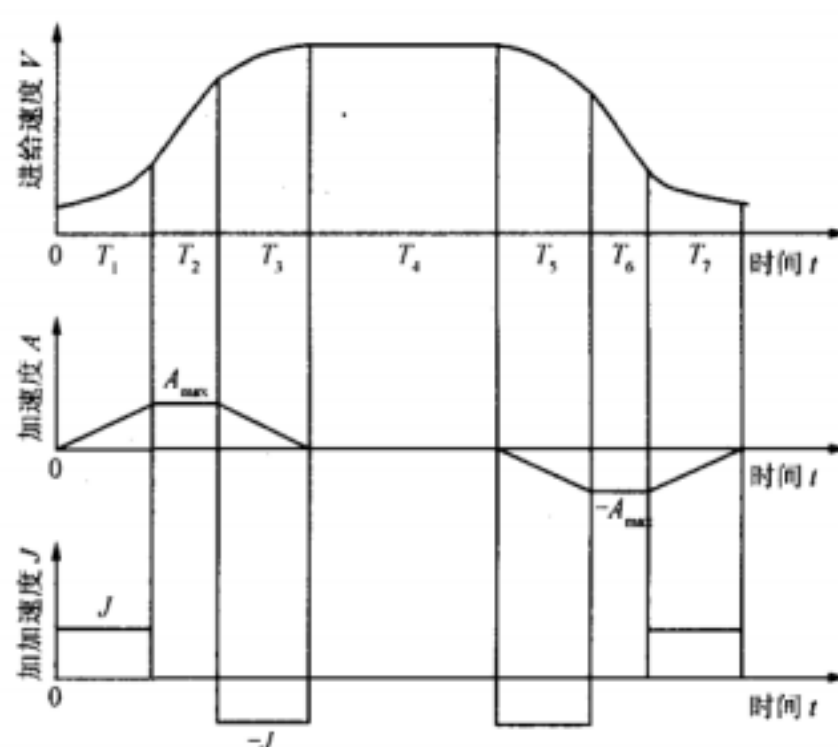


图1 S曲线加减速过程

T_3 段速度按减加速度上升,越接近 V_C ,升速越缓慢,保证高速时电机不丢步。

T_4 段以 V_C 匀速进给。

T_5 段速度从 V_C 开始,以加加速度 J 变加速度下降直到加速度为 A_{\max} ,速度到达 V'_M 。

T_6 段速度从 V'_M 开始以 A_{\max} 匀加速度直到 V'_L 。

T_7 段速度从 V'_L 开始减加速度下降,直到 V 等于 V_E 。

根据以上分析,要进行加减速时的速度计算,必须知道最大加速度 A_{\max} 、最高速 V_{\max} 和加加速度 J 。假设 $T_1 = T_3 = T_5 = T_7 = T$,则加减速时的加加速度、减加速度相等,且为 $J = \frac{A_{\max}}{T}$ 。在数控系统参数表中可由用户输入 A_{\max} , V_{\max} 和 J 。瞬

时速度等由数控系统自动计算。

S曲线加减速时的进给速度和位移计算公式推导如下。

a. 加加速度 (T_1 段)。

设加速度为 A , 初始速度为 V_S , 瞬时速度为 V_i 。

$$\text{因为 } A = dV/dt = Jt$$

$$\text{所以 } V = \int_0^t Jt dt = \frac{1}{2} Jt^2$$

$$V_i = V_S + \frac{1}{2} Jt^2$$

$$\text{因为 } dS = V_i \cdot dt$$

$$\text{所以 } S = \int_0^t V_i dt = V_S \cdot t + \frac{1}{6} Jt^3$$

$$\text{即: } V_i = V_S + \frac{1}{2} Jt^2$$

$$S = \int_0^t V_i dt = V_S \cdot t + \frac{1}{6} Jt^3$$

其中: $t \in (0, T_1)$; $V_i \in (V_S, V_L)$, $V_L = V_S + \frac{1}{2} JT_1^2$ 。

b. 匀加速度段 (T_2 段)。

$$V = V_L + JT_1 t$$

$$S = V_L t + \frac{1}{2} JT_1 t^2$$

其中: $t \in (0, T_2)$; $V \in (V_L, V_M)$, $V_M = V_L + A_{\max} T_2$ 。

c. 减加速度段 (T_3 段)。

$$V = V_C - \frac{1}{2} J(T_3 - t)^2$$

$$S = V_C t - (\frac{1}{2} JT_3^2 + \frac{1}{6} Jt^3 - \frac{1}{2} JT_3 t^2)$$

其中: $t \in (t_1, T_3)$, $t_1 = T_3 - \sqrt{\frac{2(V_C - V_M)}{J}}$; $V \in (V_M, V_C)$ 。

d. 匀速段 (T_4 段)。

$$V = V_C$$

$$S = V_C t$$

其中: $t \in (0, T_4)$ 。

e. 加减速段 (T_5 段)。

$$V = V_C - \frac{1}{2} Jt^2$$

$$S = V_{\max} t - \frac{1}{6} Jt^3$$

其中: $t \in (0, T_5)$; $V \in (V_C, V'_M)$, $V'_M = V_C - \frac{1}{2} JT_5^2$ 。

f. 匀减速度段 (T_6 段)。

$$V = V'_M - JT_6 t$$

$$S = V'_M t - \frac{1}{2} JT_6 t^2$$

其中: $t \in (0, T_6)$; $V \in (V'_M, V'_L)$, $V'_L = V'_M - JT_6^2$ 。

g. 减速度段 (T_7 段)。

$$V = \frac{1}{2} J(T_7 - t)$$

$$S = \frac{1}{2} J(T_7^2 t - T_7 t^2 + \frac{t^3}{3})$$

其中: $t \in (t_2, T_7)$, $t_2 = T_7 - \sqrt{\frac{2V'_L}{J}}$; $V \in (V'_L, V_E)$ 。

由上述推导公式可以看出, S曲线加减速实际是抛物线-直线-抛物线的变化过程。

2 S曲线自动加减速的实时控制

由S曲线自动加减速算法可知, 加减速的控制要预先算出各段的边界点, 即 V_L, V_M, V'_M, V'_L , 以此边界点作为判断点, 从而决定计算公式的选取。控制策略: 用瞬时进给速度 V_i 与目标速度 V_C 的比较值、当前位移值剩余量与降速距离的比较值, 确定下一步进给。由于位移长短差异以及加减速过程中目标速度的变化(进给速度随 JOG 倍率变化), 需对加减速过程进行修正。

S曲线自动加减速实时控制的步骤如下。

步骤 1: 依据加加速度 J , 最大加速度 A_{\max} , 目标速度 V_C , 求降速区位移值 S_R 。

步骤 2: 进行加加速度段进给控制。若 $V_i < V_L$, 且位移值剩余量 $(\Delta S) > S_R$, 且 $V_i < V_C$, 继续步骤 2; 否则, 若 $V_i > V_C$, 或 $\Delta S < S_R$, 转到步骤 8, 进行减速度段进给控制, 若 $V_i \geq V_L$, 转到步骤 3。

步骤 3: 进行匀加速度段进给控制。若 $V_i < V_M$, $\Delta S < S_R$ 且 $V_i < V_C$, 继续步骤 3; 若 $V_i < V_M$, 且 $\Delta S < S_R$ 或 $V_i \geq V_C$, 转入步骤 7。若 $V_i > V_M$, 转入步骤 4。

步骤 4: 进行减加速度进给控制。若 $V_i < V_C$ 且 $\Delta S > S_R$, 继续步骤 4; 若 $V_i < V_C$, 且 $\Delta S < S_R$, 继续步骤 6; 若 $V_i \geq V_C$, 转入步骤 5。

步骤 5: 匀速控制。若 $\Delta S < S_R$ 或由于速度倍率变化 $V_i < V_C$, 转入步骤 6。若 $V_i > V_C$, 转入步骤 4。否则, 继续步骤 5。

步骤 6: 进行加减速段进给控制。若 $V_i >$

V'_M , 继续步骤6; 若 $V_i < V'_M$, 转入步骤7。

步骤7: 进行匀减速度段进给控制。若 $V_i > V'_L$, 继续步骤7; 若 $V_i < V'_L$, 转入步骤8。

步骤8: 进行减减速度段进给控制。若 $V_i > V_E$, 继续步骤8; 若 $\Delta S = 0$ 或 $V_i \leq V_E$, S曲线自动加减速结束。

3 应用实例

以数据采样插补的圆弧加工控制为例, 介绍实现S曲线加减速控制的过程。数据采样插补以弦代替弧, 会产生弓高误差, 为保证加工精度, 要根据圆弧半径和加工精度, 限制最大进给速度。

设加工精度 e_r 为 0.001mm, 插补采样周期 T_c 为 2ms, 圆弧半径 R 为 500mm, 进给速度 V_C 为 300mm/s, 最大进给加速度 A_{\max} 为 1 000mm/s², 进给加加速度 J 为 5 000mm/s³。

$$\text{最大允许加工速度}^{[1]} V_{\max} = \frac{\sqrt{8 \times e_r \times R}}{T_c} = \frac{\sqrt{8 \times 10^{-3} \times 500}}{2 \times 10^{-3}} = 1\,000(\text{mm/s}) > V_C$$

$$\text{由前面算法求得 } T_1 = \frac{A_{\max}}{J} = \frac{1\,000}{5\,000} = 0.2(\text{s}), \text{ 令 } T_1 = T_3 = T_5 = T_7 = T, \text{ 从而}$$

$$V_L = \frac{1}{2} J T^2 = \frac{1}{2} \times 5\,000 \times 0.2^2 = 100(\text{mm/s})$$

$$V_M = V_C - \frac{1}{2} J T^2 =$$

$$300 - \frac{1}{2} \times 5\,000 \times 0.2^2 = 200(\text{mm/s})$$

减速区曲线与加速区曲线类似, 不同之处在于数据采样插补用小线段拟合圆弧时的剩余量要均匀处理, 否则, 会影响加工速度。该圆弧的S加减速曲线如图2所示。

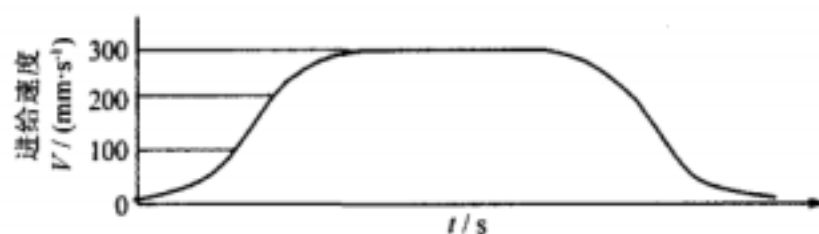


图2 S加减速曲线应用实例

4 结论

本文对S曲线加减速控制方法的研究, 为高速高精度数控系统的研制提供了理论支撑, 解决了电动机加速和减速时的冲击问题。从该研究可以看出, S曲线加减速过程除受加速度 A 、加加速度 J 和加工速度 V_C 影响外, 还与加工轮廓的长短有关。对于短距离轮廓显然不能实现完整的S曲线加减速过程, 本文用设置降速区距离来控制加减速过程, 是一种有效和实用的方法。在加工过程中, 切削速度若不断变化, 对于非直线轮廓实现实时的S曲线加减速控制, 降速区的距离计算是复杂的, 需研究新的控制方法。

参考文献:

- [1] 朱晓春, 吴祥, 任浩, 等. 数控技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [2] 赵巍, 王太勇, 万淑敏. 基于NURBS曲线的加减速控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(1): 1-3.

Study on the Acceleration/Deceleration Control Method for S-curve

ZHU Xiao-chun, QU Bo, SUN Lai-ye, WANG Mu-lan

(Nanjing Institute of Technology, Jiangsu Nanjing, 211167, China)

Abstract: Due to deficiency of S curve acceleration/deceleration control at present, it researches a new control strategy, the control arithmetic and method of real time control. With the application example, it gives the detail on the arithmetic and control method. The results show that the arithmetic and control method for realizing high-speed and high-precision is right and useful.

Key words: S-curve; Acceleration/Deceleration; Control Method; CNC System

(上接第37页)

Abstract: It introduces the motor-driven system of the electrical bicycle. Based on the AVR single chip, through modulating the duty-ratio of PWM wave, the speed of the electrical bicycle can be well controlled. The research is focused on the phenomenon of overcurrent, overload and abnormal operation of the motor during beginning. It puts forward the method of overcurrent detecting and protecting. The experimental results show that the method has good ability.

Key words: Electric Bicycle; Brushless Direct Current Motor; PWM Control

作者：[朱晓春](#)，[屈波](#)，[孙来业](#)，[汪木兰](#)，[ZHU Xiao-chun](#)，[QU Bo](#)，[SUN Lai-ye](#)，[WANG Mu-lan](#)
作者单位：[南京工程学院 自动化系, 江苏, 南京, 211167](#)
刊名：[中国制造业信息化](#) 
英文刊名：[MANUFACTURING INFORMATION ENGINEERING OF CHINA](#)
年，卷(期)：[2006, 35\(23\)](#)
被引用次数：[8次](#)

参考文献(2条)

1. [赵巍](#); [王太勇](#); [万淑敏](#) 基于NURBS线的加减速控制方法研究 [期刊论文] -中国机械工程 2006(01)
2. [朱晓春](#); [吴祥](#); [任浩](#) 数控技术 2006

本文读者也读过(10条)

1. [林晓新](#) . [吴小洪](#) . [曹占伦](#) . [姜永军](#) S曲线加减速控制在LED贴片中的应用 [期刊论文]- 机械制造 2008, 46(5)
2. [胡磊](#) . [林示麟](#) . [徐建明](#) . [董辉](#) . [HU Lei](#) . [LIN Shi-lin](#) . [XU Jian-ming](#) . [DONG Hui](#) S曲线加减速速度控制新方法 [期刊论文]- 组合机床与自动化加工技术 2010(1)
3. [张碧陶](#) . [高伟强](#) . [沈列](#) . [阎秋生](#) . [ZHANG Bitao](#) . [GAO Weiqiang](#) . [SHEN Lie](#) . [YAN Qiusheng](#) S曲线加减速控制新算法的研究 [期刊论文]- 机床与液压 2009, 37(10)
4. [李晓辉](#) . [邬义杰](#) . [冷洪滨](#) . [LI Xiao-hui](#) . [WU Yi-jie](#) . [LENG Hong-bin](#) S曲线加减速控制新方法的研究 [期刊论文]- 组合机床与自动化加工技术 2007(10)
5. [吴小洪](#) . [林晓新](#) . [曹占伦](#) . [姜永军](#) . [袁喜林](#) . [Wu Xiaohong](#) . [Lin Xiaoxin](#) . [Cao Zhanlun](#) . [Jiang Yongjun](#) . [Yuan XiLing](#) 三极管粘片机S曲线加减速控制 [期刊论文]- 半导体技术 2008, 33(3)
6. [郝双晖](#) . [宋芳](#) . [郝明晖](#) . [宋宝玉](#) . [HAO Shuanghui](#) . [SONG Fang](#) . [HAO Minghui](#) . [SONG Baoyu](#) 参数限制快速求解S曲线加减速控制算法研究 [期刊论文]- 制造技术与机床 2008(7)
7. [黄艳](#) . [李家霖](#) . [于东](#) . [彭健钧](#) . [HUANG Ya](#) . [LI Jiaji](#) . [YU Dong](#) . [PENG Jianjun](#) CN系统S型曲线加减速算法的设计与实现 [期刊论文]- 制造技术与机床 2005(3)
8. [郭新贵](#) . [李从心](#) S曲线加减速算法研究 [期刊论文]- 机床与液压 2002(5)
9. [史旭光](#) . [胥布工](#) . [李伯忍](#) . [SHI Xuguang](#) . [XU Bugong](#) . [LI Boren](#) 基于圆整误差补偿策略的S曲线加减速控制研究与实现 [期刊论文]- 机床与液压 2008, 36(11)
10. [关于数控系统加减速控制的研究](#) [期刊论文]- 科学技术与工程 2009, 9(22)

引证文献(8条)

1. [魏月](#) . [权建洲](#) . [张海涛](#) RFID标签封装设备的桁架轨迹规划 [期刊论文] -组合机床与自动化加工技术 2011(1)
2. [李建伟](#) . [林浒](#) . [孙玉娥](#) 基于S曲线加减速的NURBS时插补前瞻控制方法 [期刊论文] -组合机床与自动化加工技术 2009(11)
3. [关于数控系统加减速控制的研究](#) [期刊论文] -科学技术与工程 2009(22)
4. [谢剑云](#) 数控系统加减速控制方法研究现状 [期刊论文] -机械管理开发 2009(5)
5. [张碧陶](#) . [高伟强](#) . [沈列](#) . [阎秋生](#) S曲线加减速控制新算法的研究 [期刊论文] -机床与液压 2009(10)
6. [于金刚](#) . [林浒](#) . [张晓辉](#) . [黄艳](#) . [盖荣丽](#) 一种新型的Jerk连续加减速控制方法研究 [期刊论文] -组合机床与自动化加工技术 2009(8)
7. [郑寿庆](#) . [刘婷婷](#) . [侯书林](#) . [周惠兴](#) 基于RTLinux的数控系统螺纹加工关键技术研究 [期刊论文] -组合机床与自动化加工技术 2009(4)

8. 李晓辉. 邬义杰. 冷洪滨 S曲线加减速控制新方法的研究 [期刊论文] - 组合机床与自动化加工技术 2007(10)

本文链接：http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jxsjyzzgc200623011.aspx