

文章编号:1001-2265(2007)10-0050-04

S 曲线加减速控制新方法的研究*

李晓辉, 邬义杰, 冷洪滨

(浙江大学 现代制造工程研究所, 杭州 310027)

摘要:直线加减速方法由于加速度不连续易造成冲击,传统的S曲线加减速实现方法可克服这一不足,但分段较多,程序实现较复杂。针对上述问题,提出了S曲线加减速控制的新方法,将加减速过程划分为五个阶段,并给出其加加速度、加速度、速度、位移的计算表达式,根据路径段长度进一步建立了S曲线加减速控制算法。仿真结果表明,该方法能保证速度、加速度的连续,有效提高了系统的柔性,同时简化了算法的实现。

关键词:S曲线加减速;控制方法;柔性

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A

Research on a New S-curve Acceleration and Deceleration Control Method

LI Xiao-hui, WU Yi-jie, LENG Hong-bin

(Institute of Modern Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Acceleration is discontinuous in linear acceleration and deceleration method, which caused impact in NC machining. The impact could be overcome by conventional S-curve acceleration and deceleration implementation method, but the algorithm is too complex. So a new method was proposed to implement S-curve acceleration and deceleration. The speed curve was constructed by five phases, the functions of jerk, acceleration, velocity and displacement were also given, the control algorithm was derived according to the length of path. The simulation results show that the method can make sure the acceleration is continuous, the speed changes smoothly, the flexibility is improved and the algorithm is easy to implement.

Key words: S-curve acceleration and deceleration; control method; flexibility

0 前言

加减速控制是数控系统的重要组成部分和关键技术之一。直线加减速中速度按线性规律变化,易于实现,但存在缺点,如图1所示,在 0 、 T_1 、 T_2 、 T_3 时刻,加速度均不连续,在加工过程中易造成冲击。S曲线加减速可以克服直线加减速方法的缺点,当前应用最多的实现方法是将加减速过程分为七个阶段^[1-7],保证了加速度和速度的连续,但是存在的问题是根据路径段长度所分情况较多,程序实现较复杂,如图2所示。为此,本文提出一种S曲线加减速实现的新方法,在保证系统柔性的前提下,简化了算法。

1 五阶段S曲线加减速模型和基本公式

如图2所示,在传统的S曲线加减速实现方法中,加减速的过程被分为加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速七个阶段,为了得到整段加减速曲线的模型,需要确定 T_1 到 T_7 各个阶段的时间,计算量较大,程序实现复杂。为此,本文提出将七阶段S曲线加减速简化为五个阶段,即加减速过程由加加速、减加速、匀速、加减速和减减速阶段组成,如图3所示。由图可看出,与七阶段S曲线加减速实现方法相比,虽然省略了匀加速段和匀减速段,但五阶段S曲线加减速同样能始终保证加速度连续、速度与时间关系一阶连续、位移与时间关系二阶连续,满足柔性加减速的要求。

收稿日期:2007-04-02

*基金项目:国家“863”高科技资助项目(2006AA04Z233);国家自然科学基金资助项目(50575205);浙江省自然科学基金资助项目(Y105686, Y104243)

作者简介:李晓辉(1982—),男,浙江大学硕士研究生,研究方向为数控,高速高精加工等,(E-mail)lihui351@sina.com。

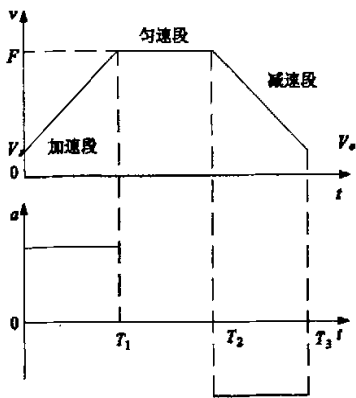


图 1 直线加减速的速度、加速度曲线

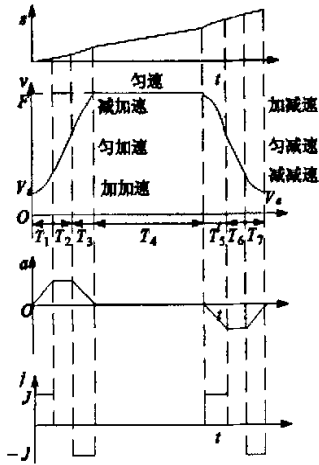


图 2 七阶段 S 曲线加减速过程

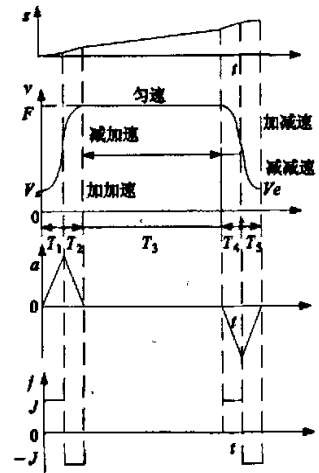


图 3 五阶段 S 曲线加减速过程

图 3 中, V_s 为起始速度, V_e 为终止速度, F 为代码段的指令速度, J 为加加速度, T_1 到 T_5 为各个阶段的运行时间。令加加速度 J 为恒定值, 为了使起始点和

减加速段末尾的加速度都为零, 必须满足加加速时间等于减加速时间, 即 $T_1 = T_2$, 同理可得 $T_4 = T_5$, 这样只要求出 T_1 和 T_4 , 加速度曲线就可以确定下来, 通过对加速度进行积分就能够得到加速和减速曲线, 在满足加减速边界条件的前提下简化了算法。

现以起始、终止速度相等的情况为例建立五阶段 S 曲线加减速控制方法的基本公式。由 $V_s = V_e$ 可知加速和减速曲线是对称的, 又由于 $T_1 = T_2$, $T_4 = T_5$, 所以加加速、减加速、加减速和减减速四个阶段的时间都是相等的, 即 $T_1 = T_2 = T_4 = T_5 = T_m$, 这里 T_m 的值由最高速度和起始速度之差以及加加速度 J 确定; T_3 为匀速段时间。

利用加速度、速度和位移对加加速度的积分关系, 可以依次推导出加加速度 a 、速度 v 、位移 s 的计算公式分别为:

$$a(t) = \begin{cases} Jt & t \in [0, T_m] \\ 2JT_m - Jt & t \in [T_m, 2T_m] \\ 0 & t \in [2T_m, 2T_m + T_3] \\ 2JT_m - J(t - T_3) & t \in [2T_m + T_3, 3T_m + T_3] \\ -4JT_m + J(t - T_3) & t \in [3T_m + T_3, 4T_m + T_3] \end{cases} \quad (1)$$

$$v(t) = \begin{cases} V_s + \frac{1}{2}Jt^2 & t \in [0, T_m] \\ V_s - JT_m^2 + 2JT_mt - \frac{1}{2}Jt^2 & t \in [T_m, 2T_m] \\ F & t \in [2T_m, 2T_m + T_3] \\ V_s - JT_m^2 + 2JT_m(t - T_3) - \frac{1}{2}J(t - T_3)^2 & t \in [2T_m + T_3, 3T_m + T_3] \\ V_s - 4JT_m^2 + 3JT_m(t - T_3) - \frac{1}{2}J(t - T_3)^2 & t \in [3T_m + T_3, 4T_m + T_3] \end{cases} \quad (2)$$

$$s(t) = \begin{cases} V_s t + \frac{1}{6}Jt^3 & t \in [0, T_m] \\ \frac{1}{3}JT_m^3 + V_s t - JT_m^2 t + JT_m^2 t^2 - \frac{1}{6}Jt^3 & t \in [T_m, 2T_m] \\ 2V_s T_m + JT_m^3 - 2FT_m + Ft & t \in [2T_m, 2T_m + T_3] \\ FT_c - V_s T_c + \frac{1}{3}JT_m^3 - JT_m^2 T_3 + \frac{1}{6}JT_3^3 \\ + (V_s - JT_m^2)t + JT_m^2 t^2 - \frac{1}{6}Jt^3 & t \in [2T_m + T_3, 3T_m + T_3] \\ \frac{4}{3}JT_m^3 + FT_3 - V_s T_3 + V_s t - \frac{1}{6}J(4T_m + T_3 - t)^3 & t \in [3T_m + T_3, 4T_m + T_3] \end{cases} \quad (3)$$

以上是五阶段 S 曲线加减速控制方法的基本公式, 可见只要确定了 T_m 和 T_3 两个变量, 就可构造出其整段的加减速控制曲线, 求得各个时刻的加速度、速度和位移值, 并能够判断所处加减速的阶段, 相比于七阶段实现方法, 算法较简单, 易于实现。

2 五阶段 S 曲线加减速控制算法

加减速分为前加减速和后加减速,后加减速对各个坐标轴分别进行速度控制,不需要专门预测减速点,计算量小,但会带来一定的轨迹轮廓位置误差;前加减速仅对合成速度进行控制,需要完成较多的计算来预测减速点,但是可以保证位置的精度^[8]。本文为了保证加工精度,采用前加减速的方式。实际加工中路径段的长度对于加减速控制是很重要的一个因素,当路径段足够长时就能达到指令速度 F ,而较短时只能达到低于 F 的某一值,所以对于长度不同的路径段,加减速曲线也有所不同。五阶段 S 曲线加减速控制的主要内容就是根据路径段的长度求出 T_m 和 T_3 ,然后利用上述公式进行加速度和速度控制。

(1) 路径段较长的情况

设路径段长度为 L ,当 L 较大时可以达到指令速度 F ,这时加减速曲线如图 3 所示。由加速过程中的速度增量 $JT_m^2 = F - V_i$,可得

$$T_m = \sqrt{\frac{F - V_i}{J}} \quad (4)$$

由式(3)可求得由加速区长度 $S_a = S(2T_m) = JT_m^3 + 2V_i T_m$,将式(4)代入可得

$$S_a = (F + V_i) \sqrt{\frac{F - V_i}{J}}$$

由于 $V_i = V_e$,所以加速和减速曲线是对称性的,于是有减速区长度 $S_d = S_a$,可得匀速段时间

$$T_3 = \frac{L - 2S_a}{F}$$

(2) 路径段较短的情况

当 $L < 2S_a$ 时,将达不到指令速度 F ,速度和加速度曲线为:

图中 V_{\max} 为能够达到的最大速度,这时没有匀速段, $T_3 = 0$,加速区和减速区长度各为线段总长的一半,即 $S_a = JT_m^3 + 2V_i T_m = \frac{L}{2}$,解关于 T_m 的方程得

$$T_m = \frac{\sqrt[3]{\frac{L\sqrt{J}}{4} + \sqrt{\frac{L^2 J}{16} + \frac{8V_i^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{L\sqrt{J}}{4} - \sqrt{\frac{L^2 J}{16} + \frac{8V_i^3}{27}}}{\sqrt{J}}$$

能够达到的最大速度为

$$V_{\max} = JT_m^2 + V_i =$$

$$\left(\sqrt[3]{\frac{L\sqrt{J}}{4} + \sqrt{\frac{L^2 J}{16} + \frac{8V_i^3}{27}}} + \sqrt[3]{\frac{L\sqrt{J}}{4} - \sqrt{\frac{L^2 J}{16} + \frac{8V_i^3}{27}}} \right)^2 + V_i$$

根据路径段的长度求得 T_m 和 T_3 后,就可以由公式(1)、(2)、(3)构造出完整的加速度、速度、位移曲

线,该控制算法保证了加速度连续、速度平滑的变化,实现起来比七阶段方法简单。

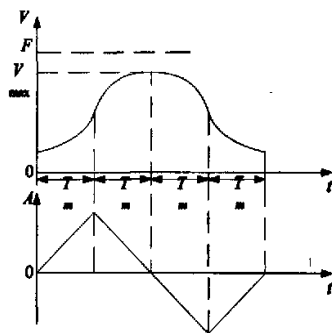


图4 短线段 S 加减速速度、加速度曲线

3 仿真及结果分析

为了检验该方法能否保证速度和加速段的连续,验证其是否满足柔性加减速的要求,现采用两段不同长度的数控加工路径段代码进行实验。

代码 1: G91 G01 x13.45 y18.67 z32.72 F1200 M30

代码 2: G91 G01 x6.37 y4.15 z12.93 F1200 M30

系统加工控制参数如下:起始速度和末速度 $V_i = V_e = 2.7 \text{ mm/s}$,加加速度 $J = 100 \text{ mm/s}^3$,插补周期为 $T = 0.008 \text{ s}$,对上述两段代码进行计算获得的数据如表 1 所示。

表 1 代码段计算结果

参数	代码 1	代码 2
线段长度	40mm	15mm
指令速度	20mm/s	20mm/s
T_m	0.416s	0.408s
T_3	1.088s	0
最大速度	20mm/s	17.8mm/s
最大加速度	41.6mm/s ²	40.8mm/s ²

由表 1 可见,代码 1 可达到指令速度,速度曲线由五个阶段组成;代码 2 能达到的最大速度为 17.8 mm/s,没有匀速段。在加加速度 J 确定的情况下,当由于路径段的长短不同造成加加速时间 T_m 不等时,能够达到的最大加速度也是不相等的。现将每个插补周期内的实际速度和加速度保存下来,把获得的数据仿真可得速度曲线、加速度曲线如图 5、图 6 所示。

从图 5 和图 6 可看出实际的加速度曲线连续、速度曲线平滑,该五阶段 S 曲线加减速控制方法可使系统具有较高的柔性,减小了实际加工过程中的冲击。

4 结论

提出一种 S 曲线加减速控制的新方法,将加减速的过程分为五个阶段,给出了加加速度、加速度、速度、位移的计算式,并针对路径段长度的不同,进一步给出

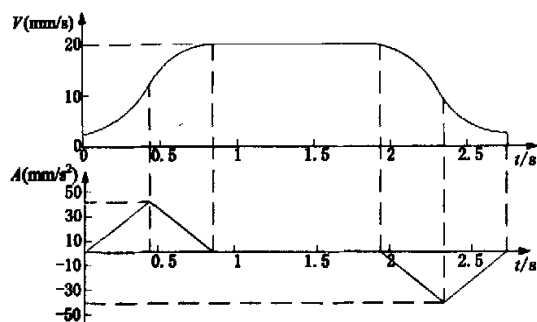


图5 代码1 S曲线加减速速度、加速度仿真图

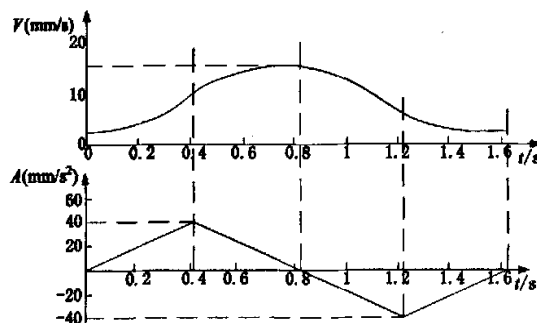


图6 代码2 S曲线加减速速度、加速度仿真图

了该加减速的控制算法,保证了速度和加速度均连续变化,减小了冲击,改善了加工质量,与传统的七阶段

S曲线加减速控制方法相比,程序实现上大为简化。该方法已在三维计算机微细雕刻系统中得到了实际应用,并取得了较好的加工效果。

[参考文献]

- [1] 郭新贵,李从心. S曲线加减速算法研究[J]. 机床与液压, 2002(5), 60-62.
- [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] 付云忠,王永章,富宏亚,等. 多轴联动线性插补及其“S加减速”规划算法[J]. 设计与研究, 2001(9), 9-11.
- [4] 杨存祥,曹玲芝,高永田,等. CNC系统中“S曲线加减速”规划算法的研究与实现[J]. 铸造技术, 2006, 27(9), 988-991.
- [5] 胡建华,廖文和,周儒荣. CNC系统中几种升降速控制曲线的研究与比较[J]. 南京航空航天大学学报, 1999, 31(6), 706-711.
- [6] 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.
- [7] Kaan Erkorkmaz, Yusuf Altintas. High speed CNC system design. Part I: jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation [J]. Int. J. Mach. Tools Manufact., 2001, 41:1323-1345.
- [8] 毕承恩,丁乃建,等. 现代数控机床[M]. 北京:机械工业出版社, 1991. (编辑 赵善)

(上接第49页)

[参考文献]

- [1] Yoshio Yamamoto, Hiroshi Eda, Jun Shimizu. Application of Giant Magnetostrictive Materials to Positioning Actuators. Proceeding of the 1999 IEEE/ASME. International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics; 215-220.
- [2] 夏春林,丁凡,陶国良. 超磁致伸缩电—机械转换器热变形补偿试验研究[J]. 中国机械工程, 1999, 10(5): 563-565.
- [3] 贾振元,杨兴,郭东明,等. 超磁致伸缩材料微位移执行器的设计理论及方法[J]. 机械工程学报, 2001, 37(11): 46-49.
- [4] 邹义杰,徐杰. 超磁致伸缩执行器热误差补偿及抑制方法研究[J]. 工程设计学报, 2005, 12(4): 213-218.
- [5] A. E. Clark, D. N. Crowder. High Temperature Magnetostriction of $TbFe_2$ and $Tb_{0.77}Dy_{0.23}Fe_2$ [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1985, (5): 1945-1947.
- [6] 徐德胜. 半导体制冷与应用技术[M]. 上海:上海交通大学出版社, 1992.
- [7] 王爱华,任建勋,梁新刚. 热泵-相变材料热控系统的实验研究[J]. 清华大学学报(自然科学版). 2005, 45(11): 1502-1505.
- [8] 张彤,陈小文,刘银年,等. 星载红外探测器温度控制系统的设计和应用[J]. 红外技术, 2005, 27(2): 167-170.
- [9] R. E. Simons and R. C. Chu. Application of Thermoelectric Cooling to Electronic Equipment; A Review and Analysis. 16th IEEE SEMI-THERMTM Symposium. (2000): 1-9.
- [10] Enchao Yu, DeMing Wang, Sura Kim, and Andrzej Przekwas. Active Cooling of Integrated Circuits and Optoelectronic Devices Using a Micro Configured Thermoelectric and Fluidic System. Inter Society Conference on Thermal Phenomena (2000): 134-139.
- [11] A. A. Aivazov Y. I. Stern K. B. Makhrtchev A. V. Morgal. The Design Problems of Thermoelectric Heat Pumps for Transportation Facilities. 15th International Conference on Thermoelectrics. (1996): 247-251.
- [12] 杜英滨,李西章,朱勇奇. 电子冷冻铣削装夹系统[J]. 机械工程师, 2006, (10): 108-109.
- [13] L. P. Bulat and E. M. Sher. Some Aspects of Phase Transitions Control by Thermoelectric Method. 21st International Conference on Thermoelectrics. (2002): 500-503. (编辑 赵善)