

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201604004



高速高精度数控系统速度 平稳控制策略

李淑梅, 谢明红

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对加工段长度限制达不到指令进给速度的复杂情况,对传统的 S 型曲线加减速方法进行优化,得到半边 S 型加减速控制方法.对连续多段加工的不同情况,提出加速度连续衔接的方法,在保证加速度连续的同时,提高加工速度.通过仿真验证该方法对速度控制的效果.结果表明:该方法可以使速度曲线更加平滑,且能提高加工的整体效率,适合高速高精度数控加工的速度控制.

关键词: 数控系统; S 型曲线; 速度控制; 高速度; 高精度; 加速度

中图分类号: TG 659; TP 273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2016)04-0411-05

Strategy for Speed Smooth Control of High-Speed High-Precision Computer Numerical Control System

LI Shumei, XIE Minghong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: An optimization strategy was developed on the basis of the traditional S-curve of acceleration and deceleration. When the commanded feed rate cannot be reached due to length restrictions, a half S-curve acceleration and deceleration control method was devised through the proposed optimization strategy. For continuous multistage processing issue, a method for linking adjacent segments which can ensure a continuous acceleration as well as increase the processing speed was proposed. Simulation results demonstrated that this method can get a smoother speed curve and increase overall efficiency of the process, which suggested this proposed strategy is suited for computer numerical control system used for high-speed high-precision machining speed control.

Keywords: computer numerical control system; S-shaped curve; velocity control; high speed; high precision; acceleration

随着科技的不断进步,数控加工对加工效率和加工质量的要求不断提高,高速、高精度加工已经成为数控机床发展的总趋势.目前,主流控制速度已达到 $240 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$,精度达到 μm 级^[1],当主轴为电主轴时,加工时的最高转速可达 $200\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$.本文研究了高速加工时,加速度连续性对加工精度和加工效率的影响,提出一种速度平稳控制策略.

1 数控系统速度平稳控制方法

在数控机床加工的过程中,速度的提高势必会对加工精度产生影响.在满足高速度的前提下,为了

收稿日期: 2015-04-19

通信作者: 谢明红(1968-),男,研究员,博士,主要从事数控技术、CAD/CAM 及计算机视觉的研究. E-mail: xmh@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省科技重大专项(2013HZ0001)

实现高精度加工,需要选择合适的速度控制策略,实现速度的平稳控制.综合考虑数控系统实现难易程度和运动控制效果,找到一种合适的加减速控制方法是研究的重点.

1.1 加减速控制方法分析

传统的直线加减速^[2]和指数加减速^[3],计算简单、方便实现,但其平滑性较差,在加速开始和减速结束时,存在加速度突变;在高速运行时,会使数控设备产生较大的冲击,对加工对象的质量和机床寿命有很大的影响,只用于进给速度不高的切削过程. S 型加减速算法最初是由 Erkorkmaz 等^[4]提出的,被作为五次样条曲线的一种特殊情况(加加速度有限,加速度曲线呈梯形). 胡磊等^[5]通过对单段路径与多段路径中不同限制因素进行分析,提出了一种新型的 S 型曲线加减速算法,能有效缩短加工时间. 文献[6-7]提出了 S 型加减速 5 阶模型,确保了加速度的连续性,且算法更容易实现. 高阶多项式加减速方法^[8]能根据加工的最大速度、输出脉冲频率等,选择合适的多项式构造加减速特性曲线,具有比 S 型加减速更好的柔性,但是运算复杂性大大增加. 综上可知: S 型加减速在高速、高精度加工中具有突出的优点.

1.2 S 型加减速模型的建立

完整的 7 段 S 型加减速模型,如图 1 所示,包括加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速 7 个过程^[9]. 由图 1 可以得到加加速方程,表达为

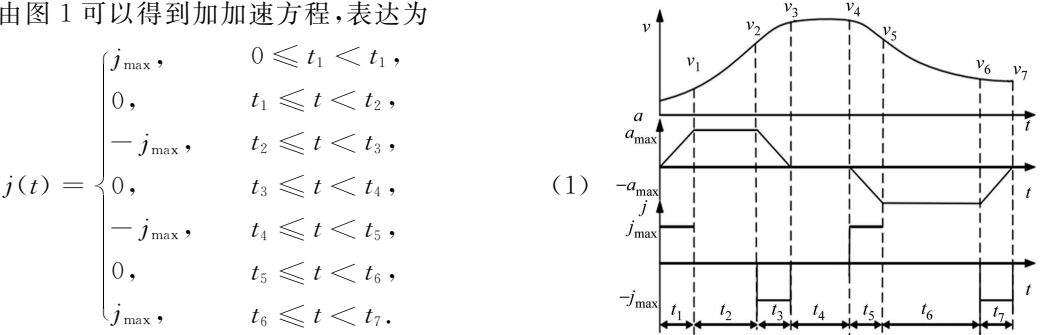


图 1 S 型加减速模型

Fig. 1 S-curve acceleration and deceleration model

加速度 $a(t)$, 进给速度 $v(t)$ 和位移 $s(t)$ 都可以经过积分获得, 且 $a(t_0)=0, v(t_0)=0, s(t_0)=0$, 即

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

$$v(t) = v(t_i) + \int_{t_i}^t a(\tau_i) d\tau_i, \quad (3)$$

$$s(t) = s(t_i) + \int_{t_i}^t v(\tau_i) d\tau_i. \quad (4)$$

在计算机数字控制机床 (computer numerical control, CNC) 加工中, 受加工段长度或形状的限制, 会不完全包含 7 段, 需要根据实际情况进行分析.

2 加减速曲线规划

根据加工程序段和机床限制因素可获得以下参数: 初速度 v_s ; 路径段长度 L ; 终点速度 $v_e \neq v_s$; 机床限制最大加加速度 j_{\max} ; 最大加速度 a_{\max} ; 指令进给速度 v_{\max} .

2.1 已知 v_s, v_e, L 加减速曲线规划

1) 判断是否存在匀加速段和匀减速段

由于加速过程与减速过程类似, 所以只对加速过程进行详细分析, 减速过程可利用同样方法得到. 由图 1 可知: 在加速过程中, 从 v_s 加速到 v_{\max} 的过程中是否存在匀加速过程, 取决于是否到达了最大加速度 a_{\max} , 即只有当加速度从 0 到达最大值后才会有匀加速的过程. 又因为加加速段与减加速段对称, 所以当满足式(5)时存在匀加速段, 即

$$v - v_s > a_{\max}^2 / j_{\max}, \quad (5)$$

且有 $t_1=t_3=a_{\max}/j_{\max}, t_2=(v_{\max}-v_s)/a_{\max}-t_1$. 否则, 不存在匀加速段, 需要根据实际加速段长度, 调整可达到的最大加速度值 a'_{\max} . 这时有

$$\left. \begin{aligned} t_1 - t_3 &= \sqrt{(v_{\max} - v_s) / j_{\max}}, & t_2 &= 0, \\ a'_{\max} &= \sqrt{(v_{\max} - v_s) / j_{\max}}. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据 t_1, t_2, t_3 和式(4), 可计算出加速段长度 S_a . 同理可得减速段时间 t_5, t_6, t_7 和减速段长度 S_d .

2) 判断是否存在匀速段

将加速段、减速段长度和 $S_a + S_d$ 与待加工长度 L 比较. 若 $S_a + S_d \leq L$, 则存在匀速段; 否则, 没有匀速段. 当存在匀速段时, 可直接得到该段所用加工时间. 即

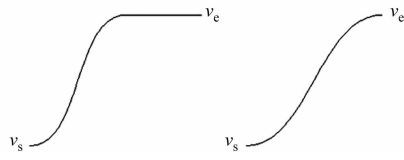
$$t_4 = (L - S_a - S_d) / v. \tag{7}$$

若 $S_a + S_d > L$, 速度达不到指令速度. 对于这种情况, 传统方法需要进行复杂的迭代运算, 难以确定可达到的最大速度. 下面提出一种针对达不到指令速度时的半边 S 型加减速算法.

2.2 半边 S 型加减速规划

以 $v_s < v_e$ 为例, 记 v_s 以 j_{\max} 加速到 v_e 时, 所走的距离为 S'_a . 这时可根据式(5)~(6), 计算出 v_s 加速到 v_e 的 t_1, t_2, t_3 , 从而得到 S'_a 的值.

当 $S'_a < L$ 时, 存在匀速区, 且匀速段速度为 v_e , 即先由 v_s 加速到 v_e , 然后保持匀速直到加工完该段为止, 如图 2(a) 所示. 当 $S'_a \geq L$ 时, 不存在匀速区, 则由 v_s 直接加速到 v_e , 如图 2(b) 所示. 其加加速度由 v_s, v_e, L 三者共同确定.



(a) $S'_a < L$ (b) $S'_a \geq L$

图 2 半边 S 型加减速示意图

Fig. 2 Diagram of acceleration and deceleration of half S-curve

同理, 在 $v_s > v_e$ 的情况下, 当加速距离 $S'_a < L$ 时, 先匀速再减速; 否则, 直接减速到 v_e .

显然, 利用这种方法加工速度被限制在开始速度和终点速度之间. 所以这种半边 S 型加减速规划方法会在一定程度上降低加工过程的速度, 但很大程度提高了系统的可操作性, 且大大地简化了达不到指令速度时的运算量. 因此, 整体上还是提高了数控系统的效率.

2.3 已知当前速度 v 和 v_e 速度规划

在实际应用中, 速度规划过程都是与前瞻技术(Look-Ahead)^[10] 结合在一起的. 前瞻技术是在插补前预先分析后续路径, 获取路径长度和速度约束条件等信息, 从而适当地进行进给速度调整, 在提高效率的同时避免进给速度突变的一种技术. 在加工的同时, 系统要根据程序段不断地计算该加工点到该段结束的距离, 并判断是否达到减速点.

实时计算是否到达减速点是高速加工中速度控制的关键. 设 v_e 反向加速到 v 的距离为 l , 由程序段计算得到的从当前点到该段终点的长度为 L' . 其中: l 可由 $v_e, v, j_{\max}, a_{\max}$ 及 V 计算得到. 若 $l > L'$, 继续以当前速度加工; 否则, 设置减速点, 立即减速.

3 加速度连续规划

3.1 单段加减速分析

以上分析了在一段加工路径内的 S 型加减速规划, 在每段的开始和结束部分加速度都为 0. 多段连接示意图, 如图 3 所示. 加速段 4 种情况, 如图 4 所示. 在 P_i 点由段长 l_i 和夹角 θ 限制的速度 v_i , 指令进给速度 v_{\max} , 若 $v_i \geq v_{\max}$, 则以 V 继续度过点 P_i 继续加工下一段; 否则, 以 $v_{i-1} < v_i$ 为例, 会出现以下两种情况.

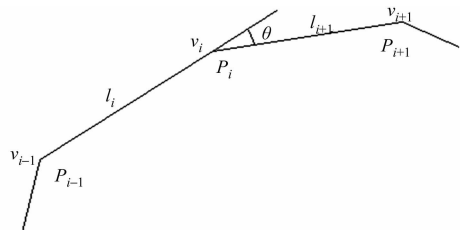
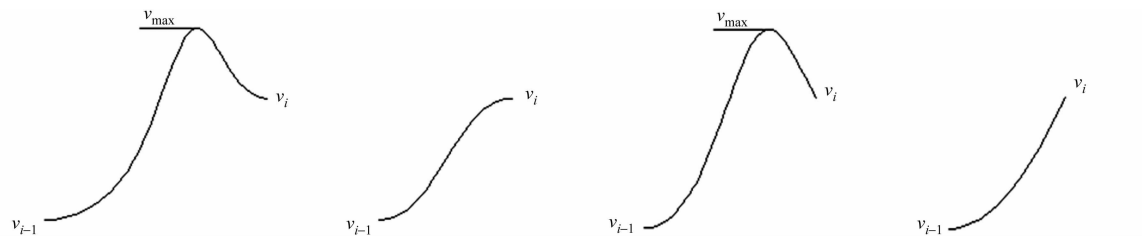


图 3 多段连接示意图

Fig. 3 Multi-connection diagram



(a) $l_i > s_1 + s_3$ 且 $a_i = 0$ (b) $l_i \leq s_1 + s_3$ 且 $a_i = 0$ (c) $l_i > s_1 + s_3$ 且 $a_i \neq 0$ (d) $l_i \leq s_1 + s_3$ 且 $a_i \neq 0$

图 4 加速段 4 种情况

Fig. 4 Four cases of acceleration

1) 经过先加速后减速两阶段(图 4(a));2) 只有加速段(图 4(b)). 反之同理. 对单段或结束段加工时, 必然是图 4(a), (b)这两种曲线中的一种, 具体情况受 l_i 的限制, 存在一种临界状态: 当最大加速度 j_{\max} 只经历加加速和减加速过程, 刚好能达到最大加速度 a_{\max} 的状态. 这时可以计算得到

$$t_1 = t_3 = a_{\max}/j_{\max}, \quad t_2 = 0. \tag{8}$$

将 t_1, t_3 代入式(4)可得 s_1 和 s_3 . 当 $l_i > s_1 + s_3$ 时, 经历先加速后减速过程(图 4(a)); 否则, 只有加速过程(图 4(b)).

3.2 多段加工的加速度连续衔接

多段高速加工会导致加减速频繁, 且效率降低. 提出一种加速度连续衔接的算法, 如图 4(c), (d)所示. 在 P_i 处加速度不为零. 根据 $P_{i-1}P_i$ 与 P_iP_{i+1} 的速度衔接状态, 选择是否需要将加速度降为零, 具体有以下 4 种情况.

- 1) $P_{i-1}P_i$ 需要加速和减速过程、 P_iP_{i+1} 为加速段时, $P_{i-1}P_i$ 选择图 4(a)加速度降为 0 进行衔接.
- 2) $P_{i-1}P_i$ 只含加速过程、 P_iP_{i+1} 为减速段时, $P_{i-1}P_i$ 选择图 4(b)加速度降为 0 进行衔接.
- 3) $P_{i-1}P_i$ 需要加速和减速过程、 P_iP_{i+1} 为减速段时, $P_{i-1}P_i$ 选择图 4(c)加速度不需降为 0.
- 4) $P_{i-1}P_i$ 只含加速过程、 P_iP_{i+1} 为加速段时, $P_{i-1}P_i$ 选择图 4(d)

加速度不需要降为 0.

4 仿真及结果分析

板料数控铣削加工轨迹, 如图 5 所示. 利用传统方法和文中方法对图 5 加工段进行仿真, 加工轨迹段参数为: $v_0 = 600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_1 = 200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_2 = 600 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; $v_3 = 100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; $l_0 = 125 \text{ mm}$; $l_1 = 168 \text{ mm}$; $l_2 = 95 \text{ mm}$. 机床参数: $v_{\max} = 800 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$; $a_{\max} = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$; $j_{\max} = 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-3}$. P_0P_1 段受加工长度限制达不到最大速度, 可以采用文中提出的半边 S 型加减速控制方法; P_1P_2 和 P_2P_3 两段符合加速度连续衔接条件, 可以重新进行规划. 通过 MATLAB 仿真, 得到传统方法和文中方法的速度与加速度曲线, 如图 6 所示.

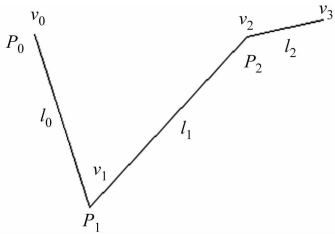


图 5 加工轨迹图
Fig. 5 Processing trajectories

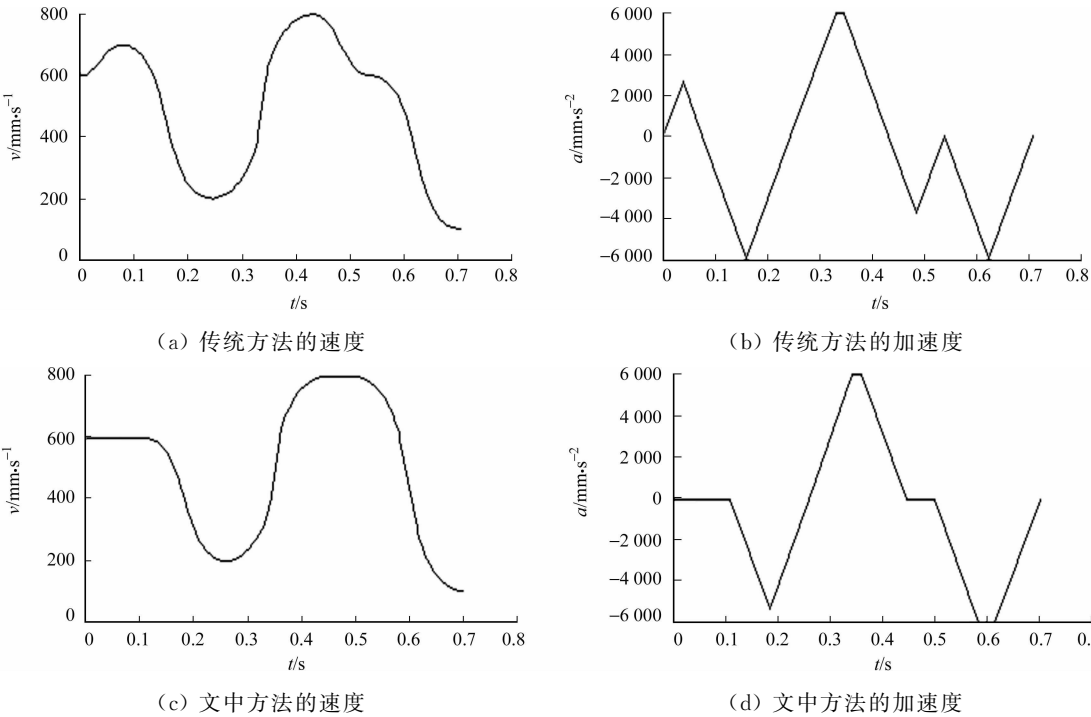


图 6 仿真结果对比图

Fig. 6 Simulation results comparison

从图 6 中提取速度各个变化阶段的时间坐标, 组成时间对比表, 并对 3 段加工路径所用时间进行

总计,结果如表 1 所示.

表 1 各个变化阶段采用两种方法所用时间对比
Tab.1 Time comparison of two methods in various stages

方法	时间	P_0P_1				P_1P_2					P_2P_3		总计
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	
传统方法	t/ms	37.8	37.8	84.5	84.5	85.7	14.3	85.7	53.4	53.4	84.5	84.5	706.1

方法	时间	P_0P_1				P_1P_2					总计	
		t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9		t_{10}
文中方法	t/ms	107.8	75.6	75.6	85.7	14.3	85.7	53.5	85.7	31.0	85.7	700.6

由图 6 和表 1 可知: P_0P_1 线段所用时间较传统方法有所增加,但是其速度曲线和加速度曲线更加简单; P_1P_2 和 P_2P_3 所用时间较传统方法有所减少,该段加工效率提高了 4.3%,且其速度曲线和加速度曲线更加平滑、简单.

5 结束语

提出一种数控系统速度控制策略,从两方面改善了高速高精度数控加工的速度控制.对于受加工段限制无法达到指令进给速度的情况,半边 S 型加减速规划方法在很大程度上降低了运算复杂性,提高了系统的可操作性;对于段与段间加速度可以衔接的情况,提高了加工效率,且避免了速度频繁变化引起的机床振动.该方法适合于高速高精度数控加工.

参考文献:

[1] 何均. 高平稳数控运动控制算法与系统软件开发方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010:6-10.

[2] LEE C S. Generation of velocity profiles with speedlimit of each axis for high-speed machining using look-ahead-buffer[J]. Int J Precis Eng Manuf,2010,11(2):201-208.

[3] 姜平. CNC 系统中指数升降速控制曲线的算法[J]. 微特电机,2003(5):16-17.

[4] ERKORKMAZ K,ALTINTAS Y. High speed CNC system design (Part I): Jerk limited trajectory generation and quintic spline interpolation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2001,41(2):1323-1345.

[5] 胡磊,林示麟,徐建明,等. S 曲线加减速速度控制新方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2010(1):22-26.

[6] ZHANG Zhanli, GUO Shijun. A new acceleration and deceleration algorithm and applications[C]// International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. Sanya:IEEE Press,2012:121-124.

[7] 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.

[8] OSORNIO-RIOS R A. FPGA implementation of higher degree polynomial acceleration profiles for peak jerk reduction in servomotors[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,2009,15(2):379-392.

[9] CHEN Yudong,JI Xudong,TAO Yong,et al. Look-ahead algorithm with whole S-curve acceleration and deceleration [J]. Advances in Mechanical Engineering,2013,2013(10):1-12.

[10] 王海涛. 数控系统速度前瞻控制算法及其实现[D]. 南京:南京航空航天大学,2011:23-26.

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:崔长彩)