

# 伺服压力机柔性加减速控制算法

沙心勇<sup>1</sup>, 殷文齐<sup>2</sup>, 李 建<sup>2</sup>, 刘春利<sup>3</sup>

**摘要:** 针对正弦函数加减速算法在运行过程中存在加加速度突变, 容易对传动系统产生柔性冲击的问题, 提出了一种伺服压力机改进型柔性加减速控制算法, 采用余弦函数作为伺服电动机加减速构造函数, 推导出伺服电动机位移、速度、加速度和加加速度数学表达式, 并详细分析其加减速模式。为该算法在伺服压力机加工工艺曲线设计中的应用奠定理论基础。

**关键词:** 伺服压力机; 伺服电动机; 新型加减速控制算法

**中图分类号:** TG302 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-3355 (2014) 02-0009-03

## An Improved Flexible Acceleration and Deceleration Control Algorithm for Servo Presses

Sha Xinyong, Yin Wenqi, Li Jian, Liu Chunli

**Abstract:** The accelerated acceleration's mutation that exists during the operation of sine function acceleration and deceleration control algorithm is prone to cause flexible impact to the drive system. For this reason, an improved flexible acceleration and deceleration control algorithm is brought forward, which uses cosine function as constructed the acceleration and deceleration function to obtain the mathematical expression of the displacement, velocity, acceleration and accelerated acceleration of the servo motor. The acceleration and deceleration mode is analysed in detail to provide the theoretical basis for the application of the algorithm in the design of the processing curve of servo presses.

**Key words:** servo press; servo motor; improved acceleration and deceleration control algorithm.

随着制造业的高速的发展, 传统的机械压力机由于工作模式固定、运动特性无法调节、工艺适应性差等缺陷, 已经不能满足不同材料和不同冲压工艺的成形要求; 另一方面, 随着伺服控制技术的高速发展, 伺服电机得到了广泛的应用。由此, 诞生出伺服压力机这种以伺服电机作为动力源的新型智能化机械压力机。与传统的机械压力机相比, 伺服压力机具有柔性化、智能化、制件精度高、噪声低和生产效率高等优点, 通过控制伺服电机的转速, 可以有效地控制滑块的运动特性, 从而可以满足不同材料以及不同成形工艺的要求。因此, 伺服压力机在冲压成形领域具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。

加减速控制是实现伺服压力机高速、平稳运行和高柔性的关键。为此, 国内外众多科研人员

提出了多种加减速控制算法。目前常用的有直线加减速、指数加减速、S形曲线加减速和三角函数加减速等。前两种加减速算法比较容易实现, 但在启动和结束中存在加速度突变, 不连续, 有冲击, 且只能按电机最高转速下输出的转矩来选取加速度, 电机的特性得不到充分发挥, 因而常用于经济型数控机床中。S型曲线加减速通过对启动阶段和高速阶段的加减速衰减, 来保证电动机性能的充分发挥和减少启动冲击。但S型曲线涉及的参数较多, 对程序实现来说比较复杂, 并且加加速度不连续, 柔性受到限制, 所以S型曲线加减速算法在高档数控机床中应用较为广泛。而本文所采用的三角函数加减速控制算法, 速度、加速度和加加速度均变化连续, 在起始和结束阶段加速度突变小, 减小了对系统的冲击, 使系统运行更加平稳<sup>[4-7]</sup>。

1. 一重集团大连设计研究院有限公司助理工程师, 辽宁大连 116600; 2. 一重集团大连设计研究院有限公司高级工程师, 辽宁大连 116600; 3. 安徽江淮汽车股份有限公司工程师, 安徽合肥 230601





## 1 加减速构造函数的建立

为避免伺服电机在加减速过程对机械本体的冲击,构造的加减速曲线须满足以下几项基本要求:

- (1) 速度变化曲线变化平稳,不存在速度突变冲击。
- (2) 加速度变化曲线连续。
- (3) 加加速度变化曲线连续。
- (4) 速度曲线加速变化段的起始和终止、匀速段、减速变化段的起始和终止加速度均为0,并满足边界速度要求<sup>[4]</sup>。

根据以上要求,先构造伺服电动机加速度函数为

$$a(t) = \frac{a_d}{2} \left[ 1 - \cos\left(\frac{2\pi}{t_e}t\right) \right] \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中,  $a_d$ —最大加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $t$ —时间变量 ( $\text{s}$ ),  
 $0 \leq t \leq t_e$ ;  $t_e$ —加减速时间。

当  $t=0$  时,  $a(0)=0$ , 当  $t=t_e$  时,  $a(t_e)=0$ , 满足加速度起始和终止加速度为0的边界条件。对式

(1) 求导, 得到加加速度

$$J(t) = a(t)' = \frac{\pi a_d}{t_e} \sin\left(\frac{2\pi}{t_e}t\right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

由式 (2) 知, 加加速度也是连续的。

对式 (1) 积分, 得到速度函数

$$v(t) = \frac{a_d}{2}t - \frac{a_d t_e}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{t_e}t\right) + v_1 \quad \dots\dots\dots (3)$$

当速度由  $v_1$  经过时间  $t_e$  后变化到  $v_2$  时, 则  $v(0)=v_1$ ,  $v(t_e)=v_2$ , 代入式 (3), 得到

$$t_e = \frac{2(v_2 - v_1)}{a_d} \quad \dots\dots\dots (4)$$

对式 (3) 积分可以得到位移函数

$$s(t) = \frac{a_d}{4}t^2 + \frac{a_d t_e^2}{8\pi} \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{t_e}t\right) - 1 \right] + v_1 t \quad \dots\dots\dots (5)$$

## 2 三角函数加减速控制算法

假定一个位移长度足够长, 初始速度和最终速度都确定, 速度运行方式满足3个运行阶段: 加速段、匀速段和减速段 (见图1)。在加速阶段首先从初始速度  $v_1$  加速到最大速度  $v_{\max}$ , 然后以最大速度  $v_{\max}$  运行一段距离, 当离终点一定距离时, 进入减速段, 减速至转速  $v_2$  时, 到达程序段终点。典型工况下,  $v_1$ 、 $v_2$  都为0。

### 2.1 加速段

根据本文的构造函数可知, 加速阶段的速度函

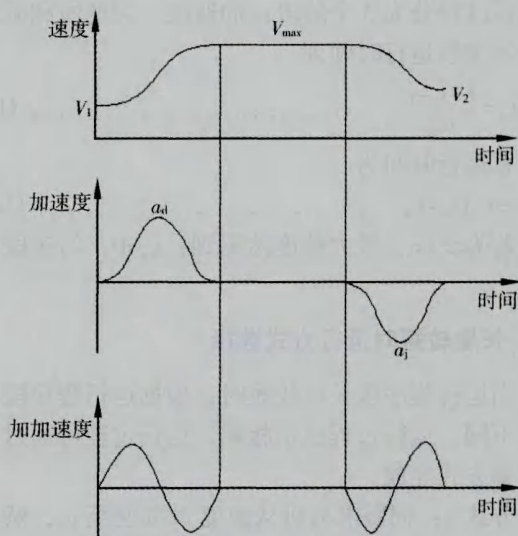


图1 伺服电机速度、加速度和加加速度曲线

数为

$$v_a(t) = \frac{a_d}{2}t - \frac{a_d t_{ae}}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{t_{ae}}t\right) + v_1 \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中,  $a_d$ —加速段最大加速度 ( $\text{m/s}^2$ );  $t_{ae}$ —加速段运行时间 ( $\text{s}$ )。

由式 (4) 可得

$$t_{ae} = \frac{2(v_{\max} - v_1)}{a_d} \quad \dots\dots\dots (7)$$

对式 (6) 积分, 得到加速阶段位移函数

$$s_a(t) = \frac{a_d}{4}t^2 + \frac{a_d t_{ae}^2}{8\pi^2} \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{t_{ae}}t\right) - 1 \right] + v_1 t \quad \dots\dots\dots (8)$$

将  $t=t_{ae}$  代入式 (8), 可得加速阶段伺服电动机的位移为

$$s_a = \frac{v_{\max}^2 - v_1^2}{a_d} \quad \dots\dots\dots (9)$$

### 2.2 减速段

当伺服电动机速度从  $v_{\max}$  减速至  $v_2$  时, 采用上述推导过程, 可得减速阶段伺服电动机的速度和位移函数, 分别为

$$v_b(t) = \frac{a_j}{2}t - \frac{a_j t_{be}}{4\pi} \sin\left(\frac{2\pi}{t_{be}}t\right) + v_2 \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$s_b(t) = \frac{a_j}{2}t^2 + \frac{a_j t_{be}^2}{8\pi^2} \left[ \cos\left(\frac{2\pi}{t_{be}}t\right) - 1 \right] + v_2 t \quad \dots\dots\dots (11)$$

将  $t=t_{be}$  代入式 (11), 可得减速阶段伺服电动机的位移为

$$s_b = \frac{v_{\max}^2 - v_2^2}{a_j} \quad \dots\dots\dots (12)$$

### 2.3 匀速段

设定运行程序段的总长度为  $L$ , 若  $L \geq s_a + s_b$ ,

则运行过程分为3个阶段:加速段、匀速段和减速段,匀速段运行时间为

$$t_{ce} = \frac{L - s_a - s_b}{v_{max}} \quad (13)$$

总运行时间为

$$t = t_{ae} + t_{be} + t_{ce} \quad (14)$$

若  $L < s_a + s_b$ , 最大速度达不到,  $t_{ce} = 0$ , 匀速段消失。

## 2.4 长度较短时运行方式选择

当运行程序段长度较短时, 根据运行程序段长度的不同, 运行过程也不相同, 运行过程可通过以下2种方式完成。

方式1: 伺服电动机从速度  $v_1$  加速至  $v_m$ , 然后减速至  $v_2$ , 且刚好到达程序段终点, 这种运行方式时间最短。

方式2: 若  $v_1 > v_2$ , 伺服电动机先以速度  $v_1$  匀速运行, 然后减速至  $v_2$ , 到达程序段终点; 若  $v_1 < v_2$ , 伺服电动机从  $v_1$  加速至  $v_2$ , 然后以  $v_2$  匀速运行至程序段终点。这种方式虽然运行方式简单, 但是运行时间比较长。

### (1) 方式1

加速段 伺服电动机从  $v_1$  加速至  $v_m$ , 用  $v_m$  代替  $v_{max}$ , 则加速度、速度和位移分别按式(1)、(6)和(8)计算。加速阶段位移为

$$s_a = \frac{v_m^2 - v_1^2}{a_{max}} \quad (15)$$

减速段 伺服电动机从  $v_m$  减速至  $v_2$ , 用  $v_m$  代替  $v_{max}$ , 则加速度、速度和位移分别按式(1)、(10)和(11)计算。减速阶段位移为

$$s_b = \frac{v_m^2 - v_2^2}{a_{max}} \quad (16)$$

则运行总长度

$$L = s_a + s_b = \frac{2v_m^2 - (v_1^2 + v_2^2)}{a_{max}} \quad (17)$$

可以得出

$$v_m = \sqrt{\frac{La_{max} + v_1^2 + v_2^2}{2}} \quad (18)$$

### (2) 方式2

当  $v_1 > v_2$  时, 伺服电动机先做匀速运动, 再做减速运动。减速运行阶段, 加速度、速度和位移分别按照式(1)、(10)、(11)计算。由  $v_1$  代替  $v_{max}$ , 减速阶段的位移为

$$s_b = \frac{v_1^2 - v_2^2}{a_j} \quad (19)$$

匀速运行时间为

$$t_{ce} = \frac{L - s_b}{v_1} \quad (20)$$

当  $v_1 < v_2$  时, 伺服电动机先做加速运动, 然后再匀速运行。加速运行阶段, 加速度、速度和位移分别按照式(1)、(6)、(8)计算。由  $v_2$  代替  $v_{max}$ , 加速阶段的位移为

$$s_a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{a_d} \quad (21)$$

匀速运行时间为

$$t_{ce} = \frac{L - s_a}{v_2} \quad (22)$$

由于  $v_m > v_1$ ,  $v_m > v_2$ , 由式(17)可得

$$L > \frac{|v_2^2 - v_1^2|}{a_{max}} \quad (23)$$

当运行位移长度满足式(23)时, 才能够运行两个阶段, 否则, 只能运行一个阶段。若  $L \leq s_b$  或  $L \leq s_a$ , 则无匀速运行阶段。为了提高生产效率, 应尽量提高伺服压力机的冲压生产节拍, 减少非工作区间段的运行时间, 用较少的时间完成伺服电动机的加减速过程, 因此方式1更加适合于伺服压力机加工工艺曲线的规划设计。

## 3 结语

根据本文提出的以余弦函数作为伺服压力机加减速构造函数的改进型伺服压力机柔性加减速控制算法, 消除了正弦函数加减速算法存在的加加速度的突变问题, 减少了对伺服压力机传动系统的柔性冲击, 可作为下一步在伺服压力机加工工艺曲线设计中应用该算法的理论指导。

### 参考文献

- [1] 宋清玉, 郭宝峰, 李建, 等. 伺服压力机柔性加减速控制算法[J]. 农业机械学报, 2013, (6): 270~273.
- [2] 张德礼, 胡育文. 伺服压力机加工运动的控制[J]. 锻压装备与制造技术, 2010, (6): 44~47.
- [3] Ando H. Application of servo system in recent press machines [J]. Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity, 2004, 45 (526): 877~882. (in Japanese).
- [4] 崔洁, 杨凯, 肖雅静, 等. 步进电机加减速曲线的算法[J]. 电子工业专用设备, 2013, (8): 45~49.
- [5] 李丹. 多项式拟合柔性加减速算法的研究[J]. 制造自动化, 2011, 3 (上): 158~160.
- [6] 李智国, 李萍萍, 刘继展, 等. 不同加减速控制算法的能耗分析与比较[J]. 农业机械学报, 2009, 40 (8): 193~197.
- [7] 郭新贵, 李从心. 一种新型柔性加减速算法[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37 (2): 205~207.

收稿日期: 2014-03-13