

基于 S 曲线的步进电机加减速的控制

杨 超, 张冬泉*

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

摘要: 针对不同约束条件下步进电机加减速的控制问题, 首先分析了 S 曲线算法原理, 寻找 S 曲线算法与其它常见的步进电机运动控制算法之间的联系。然后在分析 S 曲线传统的七段模型后, 提出了基于 S 曲线的步进电机加速度和速度控制方法, 并讨论了当约束参数发生变化时实际的 S 曲线规划方法。最后, 给出了不同约束条件下步进电机的加减速仿真曲线。研究结果表明, 这种方法可以满足不同约束条件下步进电机加减速的控制。

关键词: 步进电机; S 曲线; 加速度; 速度; 仿真

中图分类号: TP273; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)07-0813-05

Stepper motor's acceleration and speed control based on S-curve

YANG chao, ZHANG Dong-quan

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at studying on stepper-motor's acceleration and speed control under different constrains, the S-curve algorithm was firstly analyzed, the connections between S-curve algorithm and other algorithms used for motor control were given. After the analysis of the traditional 7-sections model of S-curve, the S-based control method for stepper-motor's acceleration and speed was presented, also the solutions on how to plan S-curve were discussed. Finally, the simulation results under different constraints were given. The research results show that this control method can be well used for stepper-motor's control under different constraints.

Key words: stepper-motor; S-curve; acceleration; speed; simulation

0 引 言

在现代的运动系统中, 为了追求更高的控制精度和更好的控制性能, 步进电机被广泛应用于机电一体化系统中的运动控制单元。步进电机是一种把脉冲信号转换成角位移的机电元件, 具有控制精度高、控制简单等特点, 即使在开环条件下也能获得较高的控制精度。但是步进电机在启动时, 会有启动慢、启动失步和启/停段冲击大等现象^[1], 因此对步进电机启动、停止阶段的加速度进行规划, 保证步进电机启/停时加速度和速度的连续性以减小冲击具有很强的实际意义。

目前, 常用的步进电机加减速控制算法有 3 种, 即梯形曲线、指数曲线、S 曲线, 这些算法各有特点。S

曲线算法由于其加速度和速度曲线的连续性, 能够保证步进电机在运动过程中速度和加速度没有突变, 减小冲击, 提高步进电机运动的平稳性, 常被应用于精确控制中, 如数控系统、医疗器械和机器人系统等。现有的关于 S 曲线算法的研究大多针对特定情况对算法做了简化处理, 本研究将依托 S 曲线的原始模型, 重点研究当被控对象的约束条件变化时步进电机在启/停阶段加速度和速度的控制方法。

1 常用的加速度控制算法分析

在实际应用中, 常用的加速度控制算法有梯形曲线、指数曲线和 S 曲线。对加速度的控制最终是用来控制被控对象的运动速度, 因而这里的梯形曲线、指数

曲线和 S 曲线实际反映的是被控对象的速度曲线。

1.1 梯形曲线和指数曲线算法分析

梯形曲线算法包括 3 个阶段:恒加速阶段、匀速阶段、恒减速阶段。梯形算法的速度和加速度曲线^[2]如图 1 所示。初始速度反应的是被控对象(如步进电机)的动力性能,在实际应用中,可以根据被控对象的性能确定初速度大小,从而在一定程度上可以改变被控对象加减速时间。

指数曲线算法使被控对象的速度曲线呈现指数函数特征,如图 2 所示。

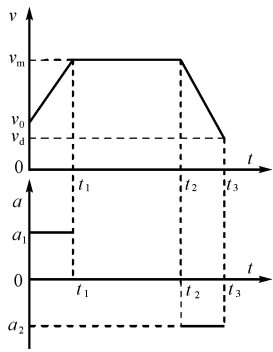


图 1 梯形曲线

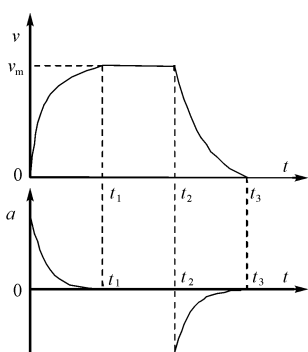


图 2 指数曲线

1.2 S 曲线算法

S 曲线是目前较新的运动控制算法^[3],它是由被控对象的加减速阶段的速度曲线呈 S 形而得来的,包含七段三次样条函数^[4]。S 曲线算法并不是一种固定的算法,常见的 S 曲线有抛物线型和三角函数型。S 曲线算法的核心思想是让加速度不产生突变,从而使被控对象的速度控制具有快速、平稳的特性。本研究将以抛物线为例来对 S 曲线进行分析。

完整的 S 曲线包括以下几个阶段:加加速段、匀加速段、减加速段、匀减速段、加减速段、匀减速段和减减速段,如图 3 所示。在实际应用中,由于被控对象约束条件的不一样,运动的过程就会发生相应的变化,S 曲线会有不同情况,如图 4~图 6 所示。

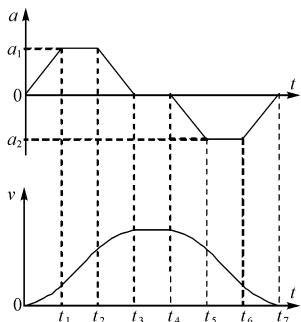


图 3 七段 S 形曲线

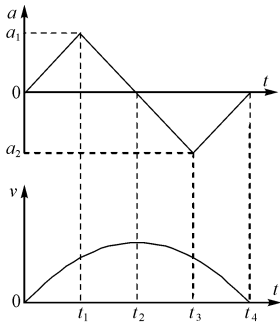


图 4 四段 S 形曲线

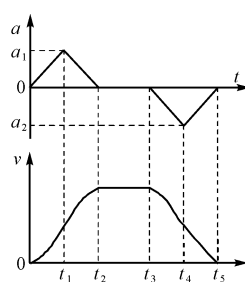


图 5 五段 S 形曲线

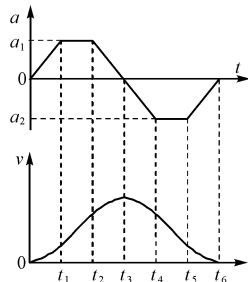


图 6 六段 S 形曲线

1.3 梯形、指数形和 S 形曲线之间的联系

梯形、指数形和 S 形曲线都是在被控对象的加减速阶段通过算法的设计和实现对被控对象的速度和加速度进行规划,从而使被控对象能够快速、平稳地达到运动系统的动作要求。

假设用 t_1 表示步进电机变加速阶段的时间,用 t_2 表示步进电机匀加速阶段的时间,则:

(1) 当 $t_1 \neq 0, t_2 = 0$ 时, S 形曲线就变成了三角形曲线(如图 4 所示),此时步进电机加减速时间最长;

(2) 当 $t_1 = 0, t_2 \neq 0$ 时, S 形曲线就变成了梯形曲线(如图 1 所示),此时步进电机加减速时间最短,但此时加速度有突变,步进电机在启/停阶段会有冲击;

(3) 当 $t_1 \neq 0, t_2 \neq 0$ 时, S 形曲线复杂(如图 3 所示),算法实现也较为复杂,但是步进电机具有良好的运动性能,步进电机在快速启动、失步和平稳性上均有较好的性能。此时 t_1 和 t_2 的选取就需要根据步进电机的性能进行灵活选取。

2 基于 S 曲线的步进电机加速度和速度的控制

2.1 抛物线形 S 曲线数学模型

以图 3 为例,本研究用变量 h 来表示变加速阶段变加速度:

$$h(t) = \begin{cases} h_{\max} & t \in [0, t_1) \\ 0 & t \in [t_1, t_2) \\ -h_{\max} & t \in [t_2, t_3) \\ 0 & t \in [t_3, t_4) \\ -h_{\max} & t \in [t_4, t_5) \\ 0 & t \in [t_5, t_6) \\ h_{\max} & t \in [t_6, t_7] \end{cases} \quad (1)$$

$$v(t) = \begin{cases} v_0 + \frac{1}{2}h_{\max}t^2 & t \in [0, t_1) \\ v_1 + a_{\max}t & t \in [t_1, t_2), v_1 = v_0 + \frac{1}{2}h_{\max}t_1^2 \\ v_2 + a_{\max}t - \frac{1}{2}h_{\max}t^2 & t \in [t_2, t_3), v_2 = v_1 + a_{\max}t_2 \\ v_3 & t \in [t_3, t_4), v_3 = v_2 + a_{\max}t_3 - \frac{1}{2}h_{\max}t_3^2 \\ v_4 - \frac{1}{2}h_{\max}t^2 & t \in [t_4, t_5), v_4 = v_3 \\ v_5 - a_{\max}t & t \in [t_5, t_6), v_5 = v_4 - \frac{1}{2}h_{\max}t_5^2 \\ v_6 - a_{\max}t + \frac{1}{2}h_{\max}t^2 & t \in [t_6, t_7], v_6 = v_5 - a_{\max}t_6 \end{cases} \quad (2)$$

$$a(t) = \begin{cases} h_{\max}t & t \in [0, t_1) \\ a_{\max} & t \in [t_1, t_2) \\ a_{\max} - h_{\max}t & t \in [t_2, t_3) \\ 0 & t \in [t_3, t_4) \\ -h_{\max}t & t \in [t_4, t_5) \\ -a_{\max} & t \in [t_5, t_6) \\ -a_{\max} + h_{\max}t & t \in [t_6, t_7] \end{cases} \quad (3)$$

式(1)描述了整个过程中步进电机变加速度的变化情况;式(2)和式(3)则描述了步进电机速度和加速度情况。其中,变量 v_x ($x=0,1,2,3,4,5,6$) 表示每个阶段起始时刻步进电机的速度^[5]。

2.2 S 曲线加减速控制

传统的七段型 S 曲线是一个完整的数学模型,但在实际应用中 S 曲线是否存在匀速段取决于速度达到给定的指令速度时,加速段和减速段位移之和 s' 是否小于实际需要运行的位移 s ;加速及减速过程中是否存在匀加速段或匀减速段则由步进电机的初始速度 v_s 、最终速度 v_e 、加速度 $a_{\max}$ 和变加速度 $h_{\max}$ 共同决定^[6-7]。下面将对此做详细研究。

2.2.1 步进电机变加速阶段控制

由 S 曲线特性可知,加加速段和减加速段对称。且在加速过程中,应尽量满足使加速度 a 可达到 $a_{\max}$ 。所以,匀加速段存在的条件是给定速度 v 和初速度 v_s 之差不小于 $a_{\max}^2/h_{\max}$:

(1) 若 $v - v_s > a_{\max}^2/h_{\max}$,则加速过程中存在匀加

速段,最大加速度能够达到 $a_{\max}$,加速过程中加加速段时间、匀加速段时间、减加速段时间为:

$$\begin{cases} t_1 = \frac{a_{\max}}{h_{\max}} \\ t_2 = \frac{(v - v_s)}{a_{\max}} - t_1 \\ t_3 = t_1 \end{cases} \quad (4)$$

(2) 若 $v - v_s \leq a_{\max}^2/h_{\max}$,则加速过程中不存在匀加速段,最大加速度不能达到 $a_{\max}$,加速过程中 3 个阶段的时间和步进电机实际能够达到的最大加速度 $a_{\max}'$ 为:

$$\begin{cases} t_1 = \sqrt{\frac{(v - v_s)}{h_{\max}}} \\ t_2 = 0 \\ t_3 = t_1 \\ a_{\max}' = \sqrt{(v - v_s)h_{\max}} \end{cases} \quad (5)$$

由于 S 曲线的减速段跟加速段对称,按照同样的思路即可得出减速阶段加减速时间 t_5 、匀减速时间 t_6 和减减速时间 t_7 ,为:

$$\begin{cases} t_5 = \frac{a_{\max}}{h_{\max}} \\ t_6 = \frac{(v - v_e)}{a_{\max}} - t_5 \\ t_7 = t_5 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} t_5 = \sqrt{\frac{(v - v_e)}{h_{\max}}} \\ t_6 = 0 \\ t_7 = t_6 \\ a_{\max}' = \sqrt{(v - v_e)h_{\max}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: v —给定最大速度, v_e —终止速度。

其中,式(6)为 $v - v_e > a_{\max}^2/h_{\max}$ 情况下求出的各段时间,式(7)为 $v - v_e \leq a_{\max}^2/h_{\max}$ 情况下求出的各段时间。

2.2.2 步进电机匀速阶段控制

本研究用 s_{Acc} 表示步进电机在加速阶段的位移、 s_{Dec} 表示减速阶段的位移、 s 表示实际需要运行的位移,则:

(1) 当 $s_{\text{Acc}} + s_{\text{Dec}} < s$ 时, S 曲线中存在匀速运行的阶段,此时 $t_4 = (s - s_{\text{Acc}} - s_{\text{Dec}})/v_0$ 。

(2) 当 $s_{\text{Acc}} + s_{\text{Dec}} \geq s$ 时, S 曲线中不存在匀速运行的阶段即 $t_4 = 0$,此时步进电机实际所能达到的最大速度 $v_{\max}$ 显然发生了变化,需要重新计算 $v_{\max}$ 的大小。为了求出 $v_{\max}$,本研究可以按照四段型 S 曲线模型(如图 4 所示)求出 $s' = s_{\text{Acc}} + s_{\text{Dec}}$ 。

(3) 当 $s' < s$ 时,则步进电机运行过程包括加加速

段、减加速段、匀速段、加减速段、减减速段即 S 曲线为六段型(如图 6 所示)。此时步进电机各段运行的时间和实际能达到的最大速度为:

$$\begin{cases} t_1 = t_3 = \frac{a_{\max}}{h_{\max}} \\ t_2 = t_6 = \frac{-(v_s h_{\max} + 3a_{\max}) + \Delta}{2h_{\max} a_{\max}} \\ t_4 = t_5 = \frac{a_{\max}}{h_{\max}} \\ v_{\max} = v_0 + a_{\max}(t_2 + t_3) \\ \Delta^2 = (v_s h_{\max} + 3a_{\max})^2 - 4a_{\max}(2h_{\max} a_{\max} v_s + a_{\max}^2 - sh_{\max}^2 - a_{\max}^3) \end{cases} \quad (8)$$

其中,式中的 t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 同图 6 所示的标注。

(4) 当 $s' \geq s$ 时,则步进电机不能达到最大加速度 $a_{\max}$,也不能达到最大速度 $v_{\max}$,此时 S 曲线即为假设的四段型 S 曲线,但 S 曲线的参数需重新求解:

$$\begin{cases} a'_{\max} = \sqrt{\frac{3sh_{\max}^2}{2}} \\ t_1 = t_2 = t_3 = t_4 = \sqrt[3]{\frac{S}{2h_{\max}}} \\ v_{\max} = \sqrt{\frac{3s^2 h_{\max}}{4}} \end{cases} \quad (9)$$

其中,式中的 t_1, t_2, t_3, t_4 同图 4 所示的标注。

至此,全部参数已经全部确定,在应用时可以根据实际情况规划出需要的 S 曲线。

3 给定约束下 S 曲线算法仿真

本研究给定步进电机的参数信息:步距角 $\theta = 1.8^\circ$,步长 $\sigma = 0.487$ mm。下面将对 S 曲线在规划过程中的参数进行计算,并进行仿真。

由本研究第 2 节可知,在规划 S 曲线的过程中有两组共 4 个判断条件会决定 S 曲线的类型和加速度、速度的规划:

$$\text{组 1: } v - v_s > a_{\max}^2 / h_{\max} \quad (10)$$

$$v - v_s \leq a_{\max}^2 / h_{\max} \quad (11)$$

$$\text{组 2: } s_{\text{Acc}} + s_{\text{Dec}} < s \quad (12)$$

$$s_{\text{Acc}} + s_{\text{Dec}} \geq s \quad (13)$$

仿真结果如下:

(1) 当 $a_{\max} = 2 \text{ m/s}^2, h_{\max} = 10 \text{ m/s}^3, v = 1.2 \text{ m/s}, v_s = v_e = 0.2 \text{ m/s}, s = 1 \text{ 000 mm}$ 时, $v - v_s = 1 \text{ m/s}, a_{\max}^2 / h_{\max} = 0.4 \text{ m/s}, s_{\text{Acc}} + s_{\text{Dec}} = 900 \text{ mm}$,条件式 (10) 和式 (12) 满足, S 曲线为完整的七段型,此时步进电机的速度和加速度曲线如图 7 所示。

(2) 当 $a_{\max} = 3 \text{ m/s}^2, h_{\max} = 10 \text{ m/s}^3, v = 1 \text{ m/s}, v_s = v_e = 0.3 \text{ m/s}, s = 1 \text{ 000 mm}$ 时, $v - v_s = 0.7 \text{ m/s}, a_{\max}^2 / h_{\max} = 0.9 \text{ m/s}, s_{\text{Acc}} + s_{\text{Dec}} = 65 \text{ mm}$,条件式 (11) 和式 (12) 满足,步进电机在实际运行时无法达到最大加速度,实际最大加速度 $a'_{\max} = 2.65 \text{ m/s}^2$,加速过程和减速过程不存在匀加速段和匀减速段,此时 S 曲线呈现为五段型,此时步进电机的速度和加速度曲线如图 8 所示。

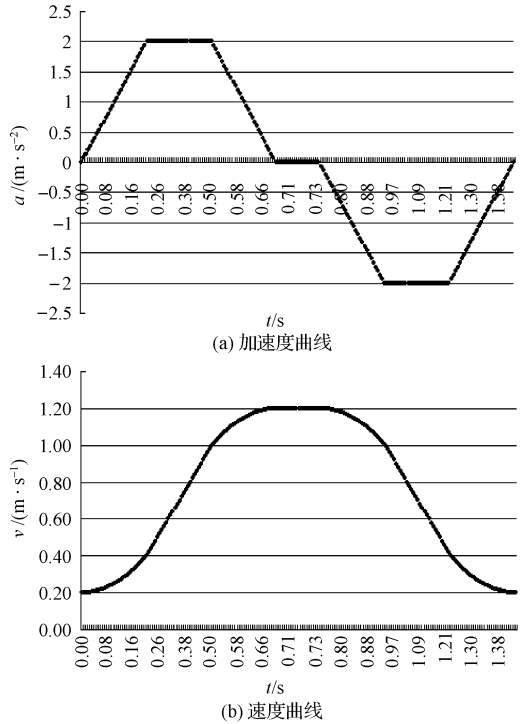


图 7 式(10)和式(12)满足时加速度和速度曲线

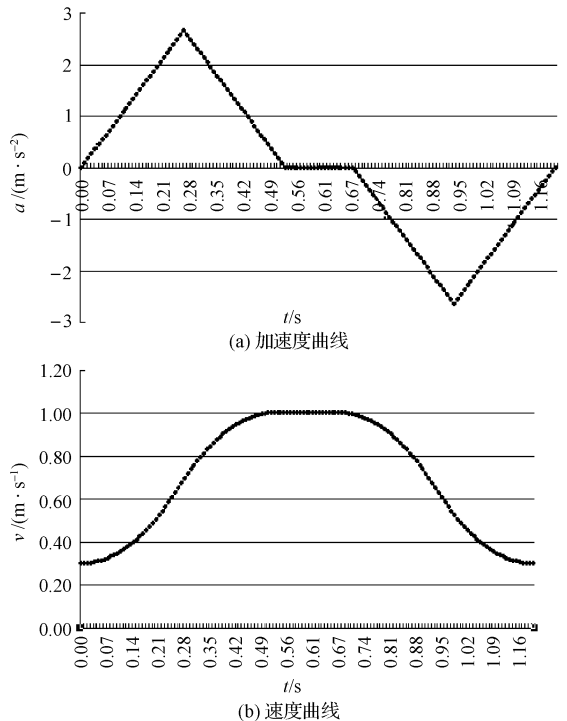


图 8 式(11)和式(12)满足时加速度和速度曲线

(3) 当 $a_{\max}=2\text{ m/s}^2, v=1.2\text{ m/s}, v_s=v_e=0.2\text{ m/s}, s=500\text{ mm}$ 时, $a_{\max}^2/h_{\max}=0.9\text{ m/s}, v-v_s=1\text{ m/s}, s_{\text{Acc}}+s_{\text{Dec}}=940\text{ mm}$, 条件式(10)和式(13)满足, 此时步进电机在实际运行时能达到最大加速度但无法加速到最大速度, 不存在匀速段, S 曲线呈现为五段型。重新计算 $v_{\max}=1.1\text{ m/s}$, 此时步进电机的速度和加速度曲线如图 9 所示。

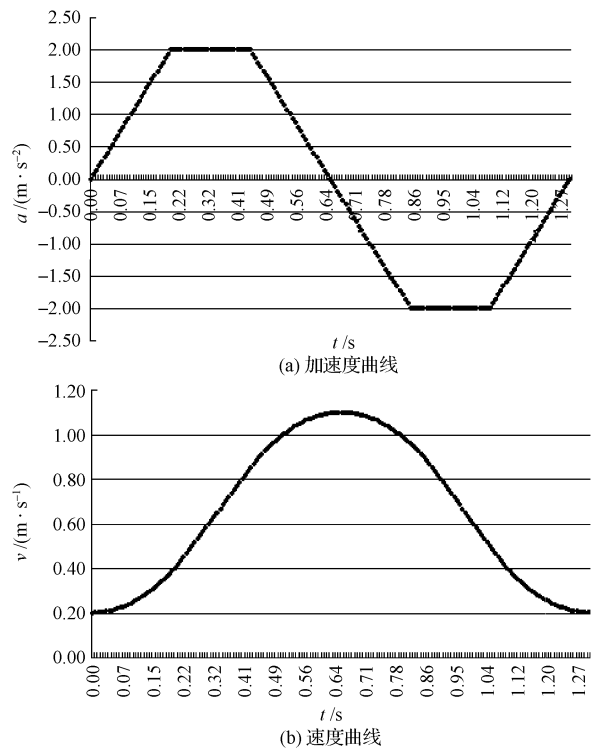


图9 式(10)和式(13)满足时加速度和速度曲线

(4) 当 $a_{\max}=4\text{ m/s}^2, v=1\text{ m/s}, v_s=v_e=0\text{ m/s}, s=500\text{ mm}$ 时, $v-v_s=1\text{ m/s}, a_{\max}^2/h_{\max}=1.6\text{ m/s}, s_{\text{Acc}}+s_{\text{Dec}}=545\text{ mm}$, 条件式(11)和式(13)满足, 此时步进电机在实际运行时给定的最大加速度和最大速度均无法达到, 需要重新求解, $a_{\max}=2.92\text{ m/s}^2, v=0.85\text{ m/s}$ 。S 曲线不存在匀加速、匀减速段和匀速段, 呈现为四段型, 此时步进电机的速度和加速度曲线如图 10 所示。

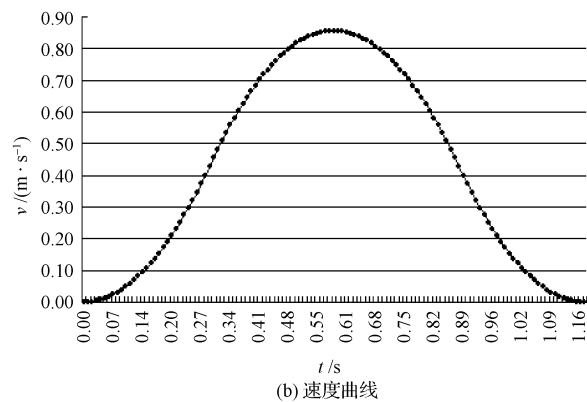
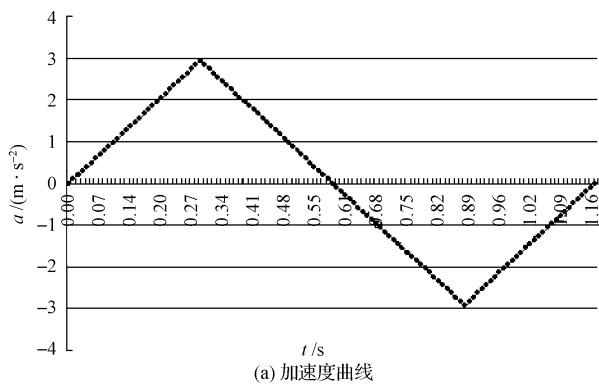


图10 式(11)和式(13)满足时加速度和速度曲线

4 结束语

本研究在 S 曲线传统的七段模型的基础上, 提出了对步进电机的加速度和速度进行控制的方法。在考虑被控对象的约束条件不同时, 对 S 曲线的规划方法做了重点的阐述并给出了不同情况下 S 曲线参数求解方法。最后给出了在不同约束条件下步进电机加减速仿真曲线。仿真结果表明, 仿真曲线跟理论分析吻合, 可以较好地用于不同约束条件下步进电机加速度和速度的规划。

参考文献 (References):

[1] [日]坂本正文. 步进电机应用技术[M]. 王自强, 译. 北京: 科学出版社, 2010.

[2] 姜德美, 谢守勇, 甘露萍. 步进电机启动控制算法设计[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2007, 29(5): 128-132.

[3] ERKORKMAZ K, AHINTAS 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(9): 1323-1345.

[4] ROU Chi-wei, SHIH C L, LEE W Y. Planning S-curves in the coordinated PTP motion of multiple-axis machines under velocity acceler action and jerk constrains[J]. **Journal of the Chinese Institute of Electrical Engineering**, 2003, 10(3): 221-234.

[5] 张碧陶, 高伟强, 沈列, 等. S 曲线加减速控制新方法的研究[J]. 控制与液压, 2009, 37(10): 27-29.

[6] 李亚, 杨亮, 任鹏, 等. 步进电机短位移高响应加减速控制方法研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2010(8): 30-32.

[7] PIDCOE P E, ROGERS M W. A closed-loop stepper motor waist-pull system for inducing protective stepping in humans [J]. **Journal of Biomechanics**, 1998(31): 377-381.

[编辑: 张翔]