

# 步进电机加减速曲线的算法研究

崔洁, 杨凯, 肖雅静, 颜向乙

(中国电子科技集团公司第四十五研究所, 北京 100176)

**摘要:** 阐述了加减速算法在步进电机控制系统中发挥的重要作用, 分析了步进电机的梯形曲线、指数曲线和 S 形曲线等常用曲线加减速算法, 介绍了一种能满足更高精度和速度平滑性的三角曲线加减速算法, 最后总结了各算法的不同特性及具体应用场合。

**关键词:** 步进电机; 加减速算法; 三角曲线

中图分类号: TM 301.3

文献标识码: A

文章编号: 1004-4507 (2013)08-0045-05

## Algorithm Research in Acceleration and Deceleration of Stepper Motor

CUI Jie, YANG Kai, XIAO Yajing, YAN Xiangyi

(The 45th Research Institute of CETC, Beijing 100176, China)

**Abstract:** This paper describes that the acceleration and deceleration algorithm plays an important role in stepper motor control system. The commonly used acceleration and deceleration algorithms are comparatively analyzed, including trapezoidal curve, exponential curve and S-curve. It introduces a triangular curve acceleration and deceleration algorithm that can meet more precise and speed smoothness stepper. Finally, the different characteristics and specific applications of each method are summarized.

**Keywords:** stepper motor; acceleration and deceleration algorithm; trapezoidal curve

步进电机作为数字控制系统完成数模转化的执行元件, 功能是把电脉冲信号变换为相应角位移或直线位移。步进电机角位移量或线位移量与其接收电脉冲数成正比, 转速或线速度与脉冲频率成正比。在负载能力范围内这些正比关系不会因电压、环境条件等波动而变化, 因此应用步进电机的开环控制系统大大简化。所以在现代工业生

产中, 步进电机因具有无需反馈就能对位置和速度进行控制, 快速启停和低成本等优势, 在工业自动化控制系统中有极其广泛应用。

在步进电机实际应用过程中, 其良好动态运行性能是控制系统可靠稳定工作的重要前提。尤其是在实时性、快速响应要求高的自动化控制系统中, 如何保证步进电机在高速运动过程中频繁

收稿日期: 2013-07-15

启停、方向改变和频率突变时不发生丢步、堵转和过冲等现象成为关键。失步和过冲的发生与步进电机运行速度的变化规律,即步进电机的加减速控制曲线密切相关。因此,针对自动化控制系统步进电机的实际应用,研究步进电机曲线控制的加减速算法具有重要意义。

## 1 步进电机的控制系统

在步进电机的控制系统中,接收一个电脉冲信号,电机就前进一步或转动一定角度,电机转

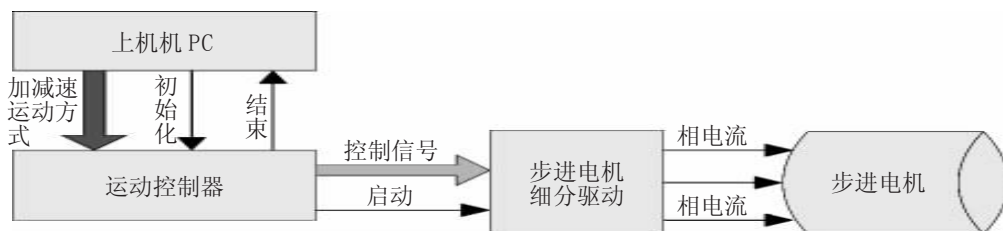


图1 步进电机控制系统

从步进电机的控制过程可以看出设计一个好的加减速控制曲线对规划电机实时快速、准确平稳运动,充分发挥步进电机优势起到了重要作用。下面对常用的曲线加减速算法进行分析。

## 2 常用曲线加减速算法

步进电机的加减速过程一般分加速、匀速和减速三个阶段,根据目标位移的长度 $S$ 不同,加减速规划过程也会不同。假设加速到最大目标速度 $V_{max}$ 的位移为 $S_{acc}$ ,从目标速度减速到停止的位移为 $S_{dec}$ ,会有以下三种具体情况:

(1)  $S_{acc} + S_{dec} < S$  时,加减速曲线包含加速、匀速和减速三段,并且匀速段时间为  $\frac{(S - S_{acc} - S_{dec})}{V_{max}}$ 。

(2)  $S_{acc} + S_{dec} > S$  时,加减速曲线仅有加速和减速两段,电机运行速度小于  $V_{max}$ 。

(3)  $S_{acc} + S_{dec} = S$  时,加减速曲线也只有加速和减速两段,但电机的运行速度能达到目标速度 $V_{max}$ ,即电机加速到目标速度后即刻进行减速运动,无匀速运动段。

根据步进电机的运动控制过程,目前常用的

动方向由接受的方向信号决定。此处以自动化控制系统如半导体设备控制系统为例说明步进电机运动的控制过程。首先,设计好电机加减速速度曲线,保证在启动和升速时,步进电机产生足够的转矩驱动负载,能达到规定的速度和加速度;减速时负载不产生过冲,能停止在规划的位置。然后,上位机PC机给定目标位置、目标速度和加速度等初始化信息,控制器通过设计好的加减速曲线产生相应频率脉冲,经细分功率放大后驱动电机运动。具体步进电机控制系统如图1所示。

步进电机的加减速曲线算法主要有梯形曲线、指数曲线和S形曲线算法。

### 2.1 梯形曲线

梯形曲线算法的加减速过程分匀加速、匀速和匀减速三个阶段。该算法的速度与时间曲线由于呈梯形状,属直线型,故名梯形曲线或直线曲线,如图2所示,同时,图中也给出了加速度时间关系。速度时间曲线的数学方程式为:

$$v(t) = V_s + At \quad (1)$$

其中, $v$ 为 $t$ 时刻的速度, $V_s$ 为起始速度, $A$ 为加速度。

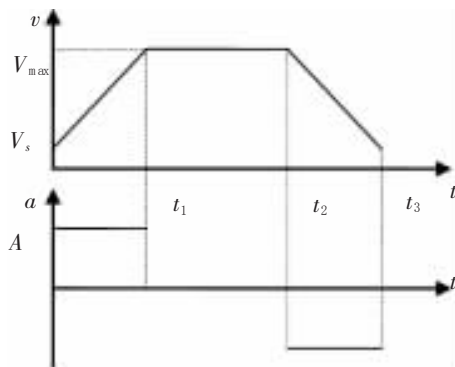


图2 梯形曲线关系图

由图 2 可知, 曲线的速度变化不够光滑, 存在突变。在电机运行过程中会发现该算法存在噪声较大, 稳定性不好等缺点, 因此该算法不适用短距离、高精度、高速启停的场合。但由于其算法控制简单, 易于计算实现, 节省资源等优点, 该曲线算法广泛应用于长距离升降速要求不高的场合。

## 2.2 指数曲线

与梯形曲线类似, 指数曲线是由于其加减速变化曲线按指数规律变化而得名, 速度时间、加速度时间变化曲线如图 3 所示。

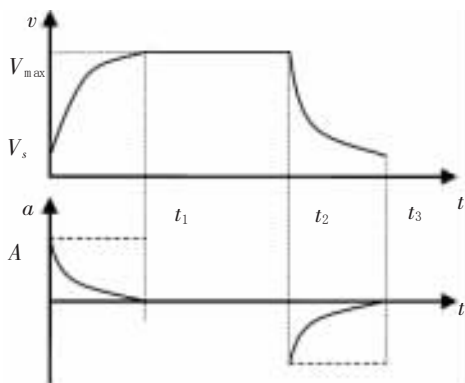


图 3 指数曲线关系图

与梯形曲线相比, 指数曲线算法光滑性好, 运行精度高, 但仍然存在速度突变, 因此对高速精准要求场合不能很好满足。另外, 由于其在加减速控制过程中有大量指数运算, 所以使得该算法计算实现复杂, 对硬件的运行能力有较高要求。

## 2.3 S 形曲线

从图 2、图 3 可以看出, 梯形和指数加速度曲线不连续, 均有不同程度的加减速突变。而 S 形曲线克服了这方面的缺点, 保证了加速度曲线的连续性。这样, S 曲线通过对加加速度的控制最大程度减少了速度的冲击和抖动现象, 实现了对电机的快速平稳控制。一般, S 曲线的加速度阶段分为加加速、匀加速和减加速控制三个阶段; 减速阶段分为减减速、匀减速和加减速三个阶段。这样, 加上匀速阶段, S 曲线通常分为七个阶段, 如图 4 所示。由图可以看出速度曲线在加减速阶段呈 S 形, 因此得名 S 形加减速算法。

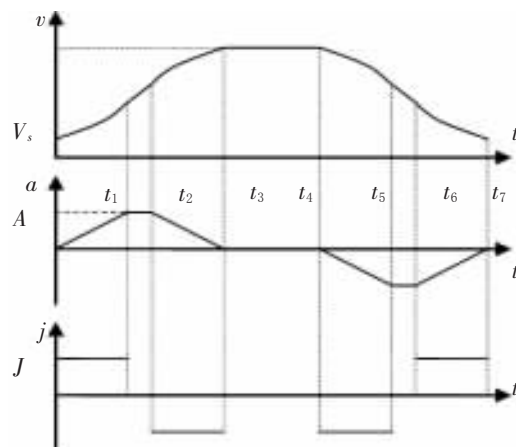


图 4 S 曲线关系图

虽然相比梯形和指数加减速, S 形加减速在减少速度冲击方面有了很大进步, 适用于较高要求的加减速过程。但由于其涉及阶段较多, 实现较复杂, 另外其加加速度的不连续性限制了柔性进一步控制。因此本文介绍一种三角曲线加减速算法, 该算法既有计算简单, 实现方便等优点, 又能提高系统加减速柔性, 满足更高设备系统的应用需求。

## 3 三角曲线加减速算法设计

### 3.1 数学函数的构造

由 S 曲线的缺点可知, 设计三角曲线加减速算法最重要的一点是变速过程中要满足加加速度曲线连续。综上可知, 构造的三角曲线必须满足以下几个基本条件:

- (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、匀速整段、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。

结合以上要求, 现构造三角曲线的加减速数学函数。设速度从  $V_s$  经时间  $T_m$  变化 (加速或减速) 到  $V_e$ , 则根据三角函数的移动变换关系, 可以构造变速阶段三角曲线数学函数如式 (2):

$$V(t) = \frac{1}{2} (V_e + V_s) + \frac{1}{2} (V_e - V_s) \cos\left(\frac{t}{T_m} \pi - \pi\right) \quad (2)$$

可简化为:

$$V(t) = \frac{1}{2}(V_e + V_s) + \frac{1}{2}(V_e - V_s)\cos\left(\frac{t}{T_m}\pi\right) \quad (3)$$

其中,  $t \in [0, T_m]$ 。当  $t = 0$  时,  $V(t) = V_s$ ; 当  $t = T_m$  时,  $V(t) = V_e$ , 满足速度边界条件。对公式(3)求导, 可得加速度数学函数为:

$$A(t) = \frac{1}{2T_m}\pi(V_e - V_s)\sin\left(\frac{t}{T_m}\pi\right) \quad (4)$$

显然  $A(0) = 0$ ,  $A(T_m) = 0$ , 满足加速度边界条件。对公式(4)求导, 易得加加速度数学函数为:

$$J(t) = \frac{1}{2T_m^2}\pi^2(V_e - V_s)\cos\left(\frac{t}{T_m}\pi\right) \quad (5)$$

另外, 正、余弦三角函数具有平滑连续可导特性。因此综上分析, 构造的数学函数满足三角曲线加减速算法设计的基本条件。

### 3.2 算法加减速过程分析

根据加减速运动控制过程可知, 加减速产生的位移对规划运动过程起决定性作用。对公式(3)积分可得算法位移时间关系式:

$$S(t) = \frac{1}{2}(V_e + V_s)t - \frac{T_m}{2\pi}(V_e - V_s)\sin\left(\frac{t}{T_m}\pi\right) \quad (6)$$

在三角曲线加减速控制整个过程中, 假设能达到的最大速度为  $V_m$ , 加速起始速度  $V_s$ , 减速终止速度  $V_e$ , 总加速时间  $T_{ma}$ , 总减速时间  $T_{md}$ , 则加、减速的位移公式分别为:

$$S_a(t) = \frac{1}{2}(V_m + V_s)t - \frac{T_{ma}}{2\pi}(V_m - V_s)\sin\left(\frac{t}{T_{ma}}\pi\right) \quad (7)$$

$$S_d(t) = \frac{1}{2}(V_e + V_m)t - \frac{T_{md}}{2\pi}(V_e - V_m)\sin\left(\frac{t}{T_{md}}\pi\right) \quad (8)$$

目标位移  $S$  与  $S_a(T_{ma})$ 、 $S_d(T_{md})$  间的关系, 决定电机如何根据三角加减速算法规划运动。为了方便研究, 我们设加速初始速度与减速终止速度相等, 加速时间与减速时间相同, 即  $V_e = V_s$ ,  $T_{ma} = T_{md} = T_m$ 。这样, 由式(4)易得加速最大加速度  $A_{ma}$  与减速最大减速度  $A_{md}$  大小相等, 即  $A_{ma} = A_{md} = A_m$ 。同时, 加速与减速两个过程发生的总位移  $S_{AD} = S_a(T_{ma}) + S_d(T_{md})$  可简化为:

$$S_{AD} = (V_s + V_m)T_m \quad (9)$$

易知  $A(t) \leq A_m$ , 另外  $\sin\left(\frac{t}{T_m}\pi\right) \leq 1$ , 结合式(4)可得如下关系式:

$$A_m \leq \frac{\pi}{2T_m}(V_m - V_s) \quad (10)$$

$$\text{解(10)得 } T_m \geq \frac{\pi}{2A_m}(V_m - V_s)。$$

从系统运行时间最短考虑, 可用式(11)来保证运行时间最短。并且加速阶段加速度时间关系图关于时间轴  $t = \frac{T_m}{2}$  对称。

$$T_m = \frac{\pi}{2A_m}(V_m - V_s) \quad (11)$$

结合公式(11)、(3)和(6)可得速度变化关系式(12)和位移时间关系式(13), 根据式(9)和式(11)可以推得式(14)。

$$V(t) = \frac{1}{2}(V_m + V_s) + \frac{1}{2}(V_e - V_m)\cos\left(\frac{t}{2A_m}(V_m - V_s)\pi^2\right) \quad (12)$$

$$S(t) = \frac{1}{2}(V_m + V_s)t - \frac{T_m}{2\pi}(V_m - V_s)\sin\left(\frac{t}{2A_m}(V_m - V_s)\pi^2\right) \quad (13)$$

$$S_{AD} = \frac{\pi}{2A_m}(V_m^2 + V_s^2) \quad (14)$$

综上所述, 由于  $V_s$  为已知值, 所以只要给定最大加速度  $A_m$ 、目标速度  $V_m$  与目标位移  $S$  就可得到三角曲线加减速算法具体规划运动。

当  $S > S_{AD}$ , 即  $S > \frac{\pi}{2A_m}(V_m^2 + V_s^2)$  电机有加速、匀速和减速三阶段运动; 同理当  $S \leq \frac{\pi}{2A_m}(V_m^2 + V_s^2)$ , 电机仅有加速和减速两阶段运动。

## 4 结论

加减速控制算法在步进电机运动过程控制中起着不可替代作用, 在工业控制系统中有着广泛应用。不同的加减速控制算法有不同的控制要求和特点, 本文主要对梯形曲线、指数曲线和 S 形曲线等常用控制算法进行了分析研究, 并针对以上算法的不足介绍了一种速度柔性更强的三角曲线算法, 表 1 为上述几种加减速算法在速度、加速度、加加速度、计算量及实现复杂度上的具体情况。



表 1 步进电机加减速算法对比表

算法	$V(t)$	$A(t)$	$J(t)$	计算量	实现
梯形曲线	不平滑	不连续	—	小	简单
指数曲线	较平滑有突变	不连续	—	大	复杂
S 形曲线	很平滑有突变	连续	不连续	较大	较复杂
三角曲线	很平滑	连续	连续	大	复杂

根据表 1 所述加减速算法的不同特点,为了更好地发挥各算法的控制优势,不同的应用场合可以使用不同的算法。在半导体设备控制系统中,以物料系统的步进电机控制为例。

对运动精度与平稳性要求不高的场合,如长距离送料等辅助控制中,我们可以选用梯形曲线加减速算法控制;而对于精度、平滑性要求较高场合,如上下料步进定位,S 曲线加减速算法控制可以满足

(上接第 8 页)

取 Fabless 模式或 Semi Fabless 模式,利用代工来完成产品的制造。目前知识产权的保护,大多还是依靠代工厂的声誉来保证的。一旦代工厂有意进入 MEMS 产业以填充产能、提高利润,知识产权就很难得到实质性的保护。因此,知识产权的保护成为 MEMS 行业亟待解决的问题。

尽管 MEMS 行业存在着种种亟待解决的问题,然而其市场潜力巨大,前景非常看好。随着中国在政策支持、工艺研发、融资渠道、生产管理、投入产出等方面的不断努力,国内 MEMS 产业化新的春天很快就会到来。

#### 参考文献:

- [1] Yole Development. Status of the MEMS Industry 2012[J]. Research and Markets, 2012(7): 1-4.
- [2] Yole Development. Top 30 MEMS companies of 2012[J]. Solid State Technology, 2012, 56(4): 35-36
- [3] Yole Development. MEMS Front-End Manufacturing Trends[J]. Research and Markets, 2013(3): 96-114.
- [4] Peter Clarke. MEMS market to show 13% CAGR to 2017[EB/OL]. [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1262056](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1262056) 2012-04-07.
- [5] Peter Clarke. ST closes in on TI at top MEMS top 30 ranking[EB/OL]. [http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1261430](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1261430) 2012-03-26.
- [6] 张乐平,陈晓萍. MEMS 产业化面临的机遇与挑战[J].

要求;而对于速度平稳性,精度要求更高场合,如搜索料过程,则三角曲线算法控制为最好选择。

#### 参考文献:

- [1] 陈隆昌,阎治安. 控制电机[M]. 西安,西安电子科技大学出版社,2003.
- [2] 从爽,李泽湘. 实用运动控制技术[M]. 北京,电子工业出版社,2006.
- [3] 李锡文,姜德美,谢守勇. 步进电动机加速运行控制研究[J]. 微电机, 2007, 40(10): 45-47.

#### 作者简介:

崔洁(1984-),女,河北献县人,硕士研究生,主要从事软件研发工作。

中国集成电路, 2007(8): 34-36.

- [7] 王莹. MEMS 将迎来第三次发展浪潮[J]. 电子产品世界, 2010(7): 9-11.
- [8] Yole. 2012 年前 20 大 MEMS 晶圆代工厂排名[EB/OL]. [http://www.eeworld.com.cn/xfdz/2013/0506/article\\_21744.html](http://www.eeworld.com.cn/xfdz/2013/0506/article_21744.html) 2013-05-06.
- [9] 袁永举,王静. MEMS 器件封装技术[J]. 电子工业专用设备, 2012(7): 6-8.
- [10] 杨宇,蔡坚,刘泽文,等. RF-MEMS 的系统级封装[J]. 半导体技术, 2004, 29(5): 45-48.
- [11] 童志义. MEMS 封装技术及设备[J]. 电子工业专用设备, 2010(9): 1-8.
- [12] 方震华,黄慧锋. 微电子机械系统(MEMS)技术在军用设备中的应用现状[J]. 2010, 26(4): 1-4.
- [13] 赵正平. 移动互联网时代 MEMS 技术的创新发展[J]. 微纳电子技术, 2013, 50(6): 337-341.
- [14] 张运鸿,张善杰. 物联网核心技术专利态势分析[J]. 物流科技, 2012(5): 48-53.
- [15] 意法半导体 MEMS 芯片出货量突破 30 亿大关[EB/OL]. <http://www.eepw.com.cn/article/141731.html> 2013-02-05.

#### 作者简介:

谷雨(1992-),男,辽宁大连人,现为美国加州大学洛杉矶分校本科三年级在读学生。专业:机械工程。主修:金属及非金属材料的应力分析,现代制造业工艺及流程,流体力学及热力学应用。特长:机电一体设计及制造,计算机辅助设计。加州大学洛杉矶分校 2013 年全自动机器人年度毕业设计竞赛获第四名(共 17 个队)。