

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2106756

# 步进电机速度控制技术研究

蔡娜 秦刚 张和铭 张河斌

(西安工业大学 电子信息工程学院 西安 710021)

**摘要:**为解决步进电机控制精度和速度曲线的实时实现问题,对其速度控制方法进行研究。以两相混合式步进电机工作原理和数学模型为基础,在 Simulink 中构建了其开环控制系统模型,设计了一种可实时实现的抛物线形速度给定曲线算法,并与典型的梯形、指数型速度给定曲线算法进行了仿真比较。仿真结果表明,在单位控制周期内,抛物线型加减速曲线的最大无失步转动角度为  $990^\circ$ ,较其余两种算法至少提高了 22%;驱动步进电机无失步转动  $360^\circ$  的最小控制周期达到了 42 ms,较指数型提高了 22.2%。论证了该加减速算法响应速度更快,控制精度更高,降低了失步、过冲现象的发生率,避免了机械柔性冲击,延长系统寿命。

**关键词:** 两相混合式步进电机;开环控制系统;抛物线型加减速

**中图分类号:** TM3 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

## Research on speed control technology of stepper motor

Cai Na Qin Gang Zhang Heming Zhang Hebin

(School of Electronic Information Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

**Abstract:** In order to realize the control precision and speed curve of stepper motor in real time, the speed control method was studied. Based on the working principle and mathematical model of two-phase hybrid stepper motor, the model of its open-loop control system was built in Simulink, and a real-time parabolic speed curve algorithm was designed and compared with the typical trapezoidal and exponential speed curve algorithm. The simulation results show that the maximum no-step rotation Angle of the parabolic acceleration and deceleration curve is  $990^\circ$  in unit control period, which is at least 22% higher than the other two algorithms. The minimum control period of driving stepper motor is 42 ms, which is 22.2% higher than that of exponential type. It is proved that the acceleration and deceleration algorithm has faster response speed and higher control precision, reduces the occurrence rate of out of step and overshoot, avoids mechanical flexible impact and prolongs the system life.

**Keywords:** two-phase hybrid stepper motor; open loop control system; parabolic acceleration and deceleration

## 0 引言

步进电机作为一种开环控制电机,其输入信号为电脉冲信号,输出为角位移,是自动化控制系统中的重要元件。具有控制简单、启停迅速、价格低廉、易于维护的特点,因而被广泛用于机电一体化控制系统中<sup>[1]</sup>。

理论上,步进电机的转角速度、运行步长仅取决于输入脉冲频率和脉冲数量。然而在实际工作中,电机的运行状况会受到电机转矩的影响<sup>[2]</sup>。当步进电机以较高频率启动时,电机无法提供驱动完成一个步进角所需的力矩,此时将会出现电机的失步与堵转情况,从而降低控制系统精度。同理,在电机减速阶段,将会引发电机的过冲情况,且突然停止的话,因机械惯性过大,容易造成电机损伤<sup>[3]</sup>。因此,

设计一种合理的加减速方法对提高步进电机控制系统精度具有决定性作用。

目前典型的加减速曲线有梯形曲线、指数型曲线、S型曲线等。周黎等<sup>[4]</sup>设计了一种正矢型加减速曲线,实现了对步进电机的精准控制,减少了失步过冲现象的发生率,但动态响应速度较慢。针对该情况,本文设计一种新的可实时实现的抛物线型速度给定算法。以两相混合式步进电机为主要研究对象,建立其开环控制系统仿真模型,对设计的加减速曲线进行仿真验证,并与典型的梯形、指数型速度给定算法进行仿真对比。结果显示该算法响应速度更快,控制精度更高,减少了失步、过冲现象的发生,避免了机械柔性冲击,延长系统寿命。

收稿日期:2021-05-23

### 1 步进电机控制系统模型建立

对于  $n$  相步进电机,其第  $m$  相绕组电压平衡式为:

$$u_m(t) = R_m i_m(t) + d(\sum_{j=1}^n L_{mj} i_j(t))/dt \quad (1)$$

式中:  $u_m$ 、 $i_m$ 、 $R_m$  为第  $m$  相绕组的相电压、相电流和电阻;当  $m$  与  $j$  相等时,  $L_{mj}$  可表示为  $L_{mm}$  是步进电机相间自感,  $m \neq j$  时,  $L_{mj}$  为步进电机  $m$  和  $j$  两相绕组的相间互感<sup>[5]</sup>。电机运行过程中相间互感过小可以忽略,则相电压平衡方程可表示为:

$$u_m(t) = R_m i_m(t) + \frac{d(L_s(\theta) i_m(t))}{dt} = R_m i_m(t) + L_s(\theta) \frac{di_m(t)}{dt} + i_m(t) \frac{\partial L_s(\theta)}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

式中:  $L_s$  为电机第  $m$  相的自感,与转子旋转角度  $\theta$  有关<sup>[6]</sup>。由式(2)可知,步进电机绕组相电压由3种变量组成,即步进绕组相电阻、相电流和转子位置  $\theta$ 。在忽略高次谐波时,自感  $L_s$  可简化为:

$$L_s(\theta) = L_0 + L_1 \cos\left(\frac{2\pi\theta}{\theta_z}\right) \quad (3)$$

式中:  $L_0$  为步进电机第  $m$  相自感的直流分量;  $L_1$  为基波分量<sup>[7]</sup>;  $\theta_z$  为电机转子的齿间距角。将式(3)代入式(2),则有:

$$u(t) = Ri(t) + L_0 \frac{di(t)}{dt} + L_1 \cos\left(\frac{2\pi\theta}{\theta_z}\right) \frac{di(t)}{dt} - i(t) L_1 \frac{2\pi\theta}{\theta_z} \sin\left(\frac{2\pi\theta}{\theta_z}\right) \frac{d\theta}{dt} \quad (4)$$

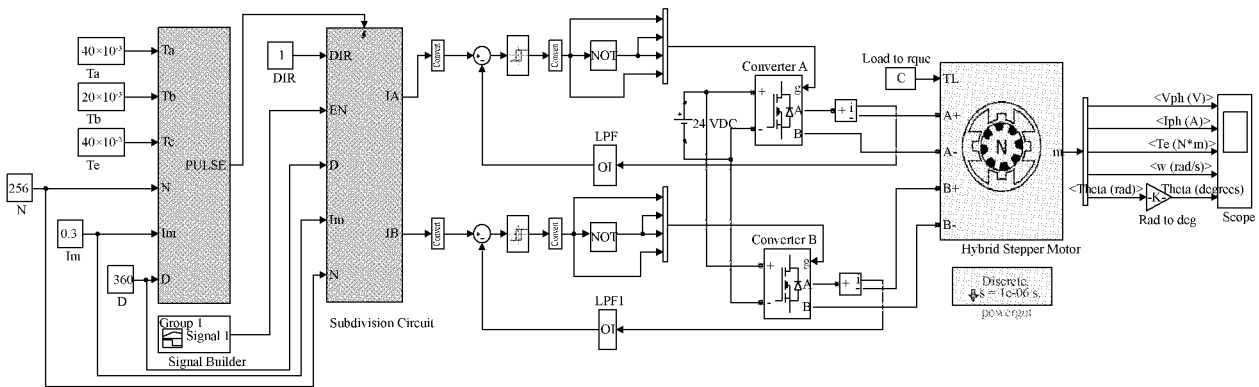


图1 两相混合式步进电机开环控制系统仿真模型

### 2 速度给定曲线设计

为防止步进电机发生堵转、过冲,一般通过加减速方式对速度给定曲线进行设计以避免上述情况发生<sup>[10]</sup>。启动后,电机将以变加速度运行  $n_a$  步到达最大转速  $\omega_m$ , 匀速运行  $n_b$  步后,再以相反的加速度做减速运动,运行  $n_c$  步后停止转动。此电机步距角为  $\alpha$ , 该过程总运行步数为  $n(n_a + n_b + n_c = n)$ , 总运行周期为  $T$ , 各阶段所需运行时

根据能量守恒定律,结合式(3),可得步进电机工作时转矩表达式为:

$$T_e = \frac{\partial W_f}{\partial \theta} = \frac{d\left(\frac{1}{2} L_s(\theta) i^2(t)\right)}{d\theta} = -\frac{\pi L_1}{\theta_z} \sin\left(\frac{2\pi\theta}{\theta_z}\right) i^2(t) \quad (5)$$

式中:  $W_f$  代表磁场能量。步进电机转子齿数  $p = 2\pi/\theta_z$ , 转矩常数  $k_t = pL_1/2$ , 代入式(5)可得步进电机单相转矩为:

$$T_e = -K_t \sin(p\theta) i^2(t) \quad (6)$$

将步进电机的单相励磁转矩进行矢量合成可得到该电机励磁时的总静力矩<sup>[8]</sup>, 此总力矩具有明显的正弦特性,则可表示为:

$$T_e = T_a + T_b = -T_{sm} \sin(p\Delta\theta) \quad (7)$$

式中:  $T_a$ 、 $T_b$  为 a 相、b 相绕组的静力矩;  $T_{sm}$  为步进电机的最大静转矩;  $\Delta\theta$  为转子偏离平衡位置的角度。

将电机本体和负载视为一个整体,设电机系统的总转动惯量为  $J$ , 系统粘滞阻尼系数为  $D$ , 电机负载与电机轴间的转矩是  $T_L$ , 则电机轴的机械动力学方程<sup>[9]</sup>可表示为:

$$T_e = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_L \quad (8)$$

通过式(4)~(8)得到两相混合式步进电机的基本简化模型,利用 Simulink 建立的开环控制系统仿真模型如图1所示。仿真模型主要由3部分组成:两相混合式步进电机的简化模型、微步细分驱动模块、加减速曲线模块,加减速曲线模块是本文的重点研究部分。

间为  $T_a$ 、 $T_b$ 、 $T_c$ 。

结合抛物线方程可知,加速过程的角速度方程<sup>[11]</sup>为:

$$\omega = \frac{\omega_m}{\sqrt{T_a}} \sqrt{t} \quad (9)$$

根据角速度与角度的关系可知,电机旋转角度为:

$$\theta = i\alpha = \int_0^t \omega(\tau) d\tau = \frac{2\omega_m}{3\sqrt{T_a}} t^{3/2} \quad (10)$$

步进电机在  $T_a$  加速时间段内运行  $n_a$  步,结合式(10),

则电机最高转速  $\omega_m$  为:

$$\omega_m = \frac{3n_a\alpha}{2T_a} \quad (11)$$

结合式(10)和(11)可得,第  $i$  个脉冲完成时刻  $t_i$  为:

$$t_i = T_a \left( \frac{i}{n_a} \right)^{2/3} \quad (12)$$

因此加速段  $T_i \in [0, T_a]$  中,第  $i$  个脉冲完成周期  $T_i$  为:

$$T_i = t_i - t_{i-1} = T_a n_a^{-\frac{2}{3}} \left[ i^{\frac{2}{3}} - (i-1)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (13)$$

式中:  $i$  的取值范围为  $[1, n_a]$ , 且  $i$  为整数。

匀速阶段  $T_i \in (T_a, T_b]$ , 电机转动时间  $T_b$ , 运行速度恒为  $\omega_m$ , 则第  $i$  个脉冲完成周期  $T_i$  为:

$$T_i = t_i - t_{i-1} = \frac{iT_b}{n_b} - \frac{(i-1)T_b}{n_b} = \frac{T_b}{n_b} \quad (14)$$

式中:  $i$  的取值范围为  $[1, n_b]$ , 且  $i$  为整数。

减速阶段  $T_i \in (T_b, T_c]$ , 整个减速过程中加速度等于反方向的加速阶段的加速度<sup>[12]</sup>, 则第  $i$  个脉冲完成周期  $T_i$  为:

$$T_i = t_i - t_{i-1} = T_a n_a^{-\frac{2}{3}} \left[ (n-i+1)^{\frac{2}{3}} - (n-i)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (15)$$

式中:  $i$  的取值范围为  $[1, n_c]$ , 且  $i$  为整数。

通过上面的计算,很容易获得步进电机的脉冲序列、速度和位置曲线。

### 3 仿真分析

根据上述设计,利用上文设计的两相混合式步进电机开环控制系统仿真模型,对速度给定曲线进行仿真研究。本文选用福誉科技公司生产的 FM5756SFD04 两相混合式步进电机作为研究对象,该电机拥有 50 个转子齿,对应步距角为  $1.8^\circ$ ,额定电压为 24 V。以转动角度实验和控制周期实验为例,将梯形、指数型、抛物线型速度给定曲线代入建立的系统模型中的加减速曲线模块中,进行仿真对比,分析 3 种速度给定曲线的控制性能的优劣性<sup>[13]</sup>。

#### 3.1 转动角度实验

分别采用这 3 种类型的速度给定曲线为仿真系统的输入,设置系统控制周期为 100 ms,其中加减速时间均为 40 ms,细分数为 256,在此基础上对其旋转角度逐步增加进行系统仿真,以获取 3 种速度给定曲线的最大不失步旋转角度<sup>[14]</sup>。3 种速度给定曲线的角位移与时间关系的仿真图如图 2 所示。其中,虚线为实际角位移输出曲线,实线为理论角位移输出曲线。

图 2 结果表明,在 100 ms 的控制周期内,采用梯形、指数型、抛物线型速度给定曲线,该步进电机最大不失步角分别为  $810^\circ$ 、 $630^\circ$  和  $990^\circ$ 。实际角位移输出曲线与理论目标输出曲线基本重合,说明这 3 种速度给定曲线都可以实现对步进电机的精准控制。

将实际输出角位移与理论角位移进行差值运算,得到

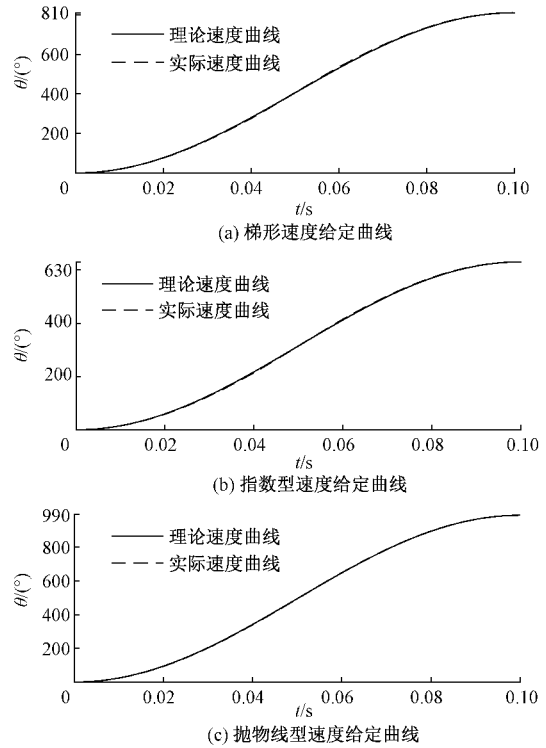


图 2 步进电机角位移与时间关系仿真图

步进电机工作时的位置跟踪误差仿真结果<sup>[15]</sup>,如图 3 所示,则这 3 种速度给定曲线在最大不失步角的位置跟踪误差值为  $-4.5^\circ \sim 3.7^\circ$ 、 $-2.5^\circ \sim 2.8^\circ$ 、 $-1.6^\circ \sim 0.8^\circ$ 。转动角度实验仿真结果如表 1 所示。

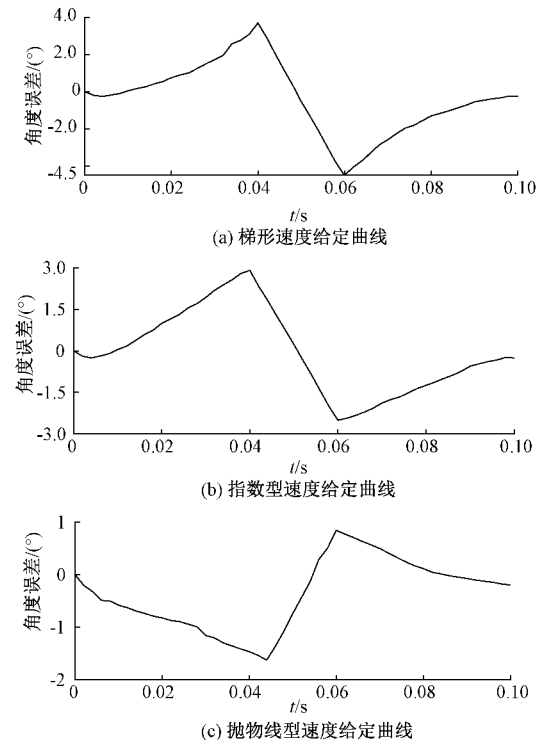


图 3 位置跟踪误差仿真图

表 1 转动角度实验仿真

运行曲线	100 ms 内最大转动角度	中间过程的角位置跟踪误差/(°)
梯形	810°	-4.5~3.7
指数型	630°	-2.5~2.8
抛物线型	990°	-1.6~0.8

综上所述,在 100 ms 的控制周期内,抛物线型速度给定曲线的最大转动无失步角为 990°,与梯形相比提高了 22.2%,与指数型相比提高了 57%。

### 3.2 控制周期实验

设定系统在 100 ms 的控制周期内电机的旋转角度为 360°,旋转角度不变,按比例减小系统控制周期,可得 3 种加减速运行方式下速度给定曲线的最小控制周期。3 种速度给定曲线的角位移与时间关系的仿真图如图 4 所示。

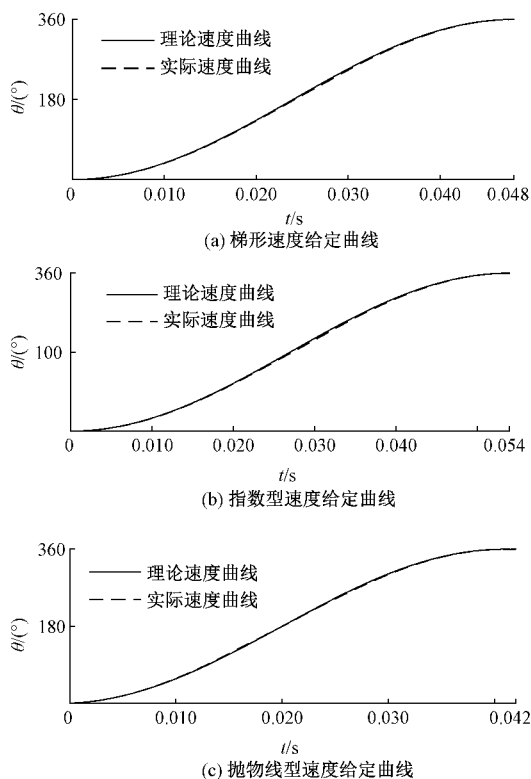


图 4 步进电机角位移与时间关系仿真图

仿真结果表明,在电机旋转角度给定的情况下,梯形、指数型、抛物线型速度给定曲线的最小控制周期分别为 48、54、42 ms,且实际角位移输出曲线与理论目标输出曲线基本重合。

步进电机工作时的位置跟踪误差仿真结果,如图 5 所示,则这 3 种速度给定曲线在最大无失步角的位置跟踪误差值为 -3.2°~0°、-3.7°~0°、-1.96°~2.15°。控制周期实验仿真结果如表 2 所示。

综上所述,当步进电机角位移为 360°时,抛物线型速

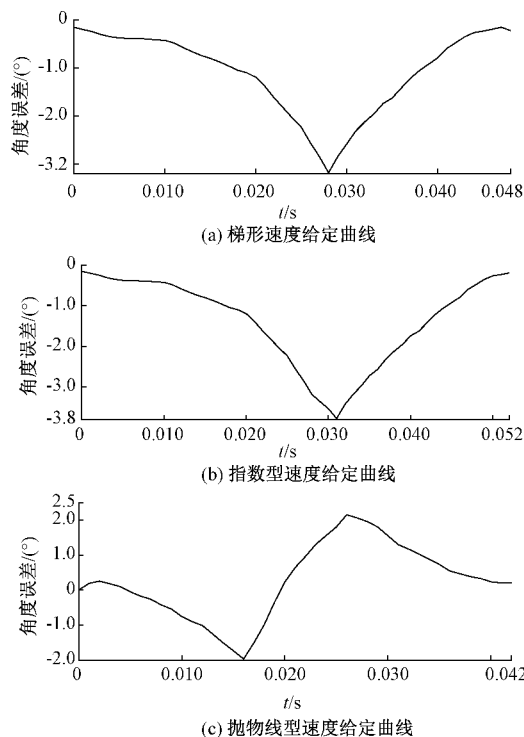


图 5 位置跟踪误差仿真图

表 2 控制周期实验仿真

运行曲线	转动 360°的最短时间/ms	中间过程的角位置跟踪误差/(°)
梯形	48	-3.2~0
指数型	54	-3.7~0
抛物线型	42	-1.96~2.15

度给定曲线的最小控制时间为 42 ms,与梯形相比减少了 12.5%,与指数型相比提高了 22.2%;同时最大无失步角的位置跟踪误差也相对减小。

## 4 结 论

本文以两相混合式步进电机工作原理和数学模型为依据,在 Simulink 仿真平台中搭建其开环控制系统模型,对典型的梯形、指数型速度给定曲线进行仿真分析,并根据步进电机力矩-频率特性和脉冲速度控制方法,设计了一种可实时实现的抛物线形速度给定曲线。仿真结果说明了与梯形和指数型加减速算法相比,抛物线型加减速算法响应速度更快,控制精度更高,减少了失步、过冲现象的发生率,避免了机械柔性冲击,延长系统寿命。

本文在对步进电机控制系统仿真建模中实现了对电机的电流控制,后期建模中还需增加位置控制功能继续优化控制效果。

### 参考文献

[1] 王晓峰. 步进电机的精准控制[D]. 包头: 内蒙古科技

- 大学,2020.
- [2] 江勇,刘宗凯,周本谋,等. 步进电机加减速控制优化设计[J]. 信息技术,2017(6):6-9.
- [3] 何昌俊,杨自栋,闫珍奇,等. 基于 STM32 的步进电机动态加减速控制[J]. 轻工机械,2020,38(2):45-50.
- [4] 周黎,杨世洪,高晓东. 步进电机控制系统建模及运行曲线仿真[J]. 电机与控制学报,2011,15(1):20-25.
- [5] 周一飞. 基于 Simulink 的步进电机控制系统仿真[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [6] 安世奇,阮俊林. 组合秤步进电机的智能调控方法应用[J]. 电子测量技术,2019,42(15):99-104.
- [7] 王邦继,刘庆想,周磊,等. 步进电机控制系统建模及加减速曲线优化[J]. 电机与控制学报,2018,22(1):37-42,52.
- [8] 余驰,李健仁,张刚峰. 两相混合式步进电机建模与仿真[J]. 兵工自动化,2016,35(2):48-51,55.
- [9] STOYCHITCH M Y. Generate stepper motor linear speed profile in real time[J]. Materials Science and Engineering,2018,294(1):13.
- [10] 侯俊杰,赵宇,李孟委. 基于 Zynq 的步进电机控制系统[J]. 国外电子测量技术,2021,40(3):108-112.
- [11] 王竞琪. 基于速度给定曲线的步进电机控制技术研究[D]. 武汉:湖北工业大学,2019.
- [12] 王磊,吕东瀚. 步进电机加减速曲线优化设计与仿真[J]. 自动化应用,2021(1):21-24.
- [13] 樊留强,惠延波,王莉. 步进电机加减速控制新方法的研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(3):36-39,45.
- [14] 陈祖霖,黄峰,吴靖,等. 步进电机 S 曲线调速控制研究[J]. 福州大学学报(自然科学版),2019,47(5):640-645.
- [15] 彭磷,张明敏,林飞龙,等. 基于 AT89S52 高精度步进电机伺服控制系统设计[J]. 电子测量技术,2011,34(3):49-53.

### 作者简介

蔡娜,硕士研究生,主要研究方向为计算机控制技术、传感器补偿技术。

E-mail:1787224726@qq.com