

步进电机控制系统建模及加减速曲线优化

王邦继， 刘庆想， 周磊， 卜朗， 李相强， 张健穹
(西南交通大学 物理科学与技术学院,四川 成都 610031)

摘 要:为了优化步进电机开环控制系统,对其加减速曲线的控制性能进行了研究。以步进电机运行原理为基础,建立了两相混合式步进电机开环控制系统仿真模型,设计了一种与电机矩频特性更为符合且可以用于实时在线计算的抛物线型加减速曲线算法,并与典型的匀加减速曲线算法、指数型加减速曲线算法进行了仿真比较分析,最后进行了实验验证。仿真和实验结果均表明,在相同的控制周期内,抛物线型加减速曲线的最大无失步转动角度有了显著提高,同时其中间过程的位置跟踪误差和平衡位置处的残余振荡误差也较小。抛物线型加减速曲线具有更快速的动态响应能力,已在某相控阵列天线的单元相位控制中得到了应用。

关键词:步进电机;开环控制;系统建模;加减速控制;抛物线型加减速

DOI:10. 15938/j. emc. 2018. 01. 006

中图分类号:TM 383. 6 文献标志码:A 文章编号:1007-449X(2018)01-0037-06

Modeling of stepper motor control system and optimization of acceleration and deceleration curve

WANG Bang-ji, LIU Qing-xiang, ZHOU Lei, BU Lang, LI Xiang-qiang, ZHANG Jian-qiong
(School of Physical Science and Technology , Southwest Jiaotong University , Chengdu 610031 , China)

Abstract:To optimize open-loop control system of stepper motor , influence of acceleration and deceleration curves to stepper motor control performance was studied . Based on running principles of stepper motor , the simulation model of the two-phase hybrid stepper motor open-loop control system was established . A parabolic acceleration and deceleration curve with real-time calculation was designed and compared to ordinary constant and exponential-type acceleration and deceleration curves by simulation . Finally , the experimental study of different running curves was carried out . The simulation and experiment results show that the parabolic curve has faster dynamic response rate and smaller position tracking error , and is suitable for the applications that response speed is highly required . The proposed control strategy has been successfully applied in phase control of the phased array antenna .

Keywords:stepper motor ; open-loop control ; system modeling ; acceleration and deceleration control ; parabolic-type curve

收稿日期: 2017-03-22

基金项目: 国家 863 计划资助项目课题

作者简介: 王邦继(1984—),男,博士,讲师,研究方向为电机驱动与控制技术;
刘庆想(1964—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为高功率微波理论及应用;
周 磊(1988—),男,博士研究生,研究方向为电机驱动与控制技术;
卜 朗(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电机驱动与控制技术;
李相强(1982—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为高功率微波技术;
张健穹(1983—),男,博士,副教授,研究方向为高功率微波技术。

通信作者: 王邦继

0 引言

步进电机是一种将数字脉冲转换为相应位移增量的电磁机械。在正常工作状态下,电机位移输出与数字脉冲输入严格同步,具有较高的控制精确度,且控制方法简单、启停迅速、性能稳定,广泛应用于数控机床、机器人等领域^[1]。

目前,步进电机控制方法有开环控制和闭环控制两种。步进电机闭环控制方法见文献[2-3]。在步进电机转轴上安装传感器来检测电机转子位置形成闭环,并采用自适应、变结构模糊等控制算法,整个系统的实现成本和控制复杂度都较高。随着细分驱动技术的发展,电机输出跟踪输入的同步能力不断提高,再通过合适的加减速曲线算法的优化,可以有效避免失步、振动等现象。由于其实现简单,控制精度和系统稳定性能满足大多数应用需求,开环控制是步进电机的主要控制方式,其研究主要集中在加减速曲线优化和具体实现上。

典型的加减速曲线有:梯形曲线、指数型曲线、S 型曲线等^[4-9],它们均在一定程度上反映了矩频特性对加速过程的限制,在适当条件下有其实用价值。周黎等人设计了一种正矢型加减速曲线^[8],能较好地抑制运动过程中的冲击及残余振动;但并不适合对动态响应有快速要求的场合。

本文以两相混合式步进电机位置旋转系统为对象,建立开环控制系统仿真模型,设计与电机矩频特性更为符合且可用于实时在线计算的抛物线型加减速曲线算法,并与典型的加减速曲线进行仿真比较分析,最后进行实验验证。

1 步进电机控制系统建模

假设步进电机的相数为 n ,其中第 m 相绕组电压平衡方程^[1,10]为

$$v_m(t) = R_m i_m(t) + \mathrm{d}(\sum_{j=1}^n L_{mj} i_j(t))/\mathrm{d}t。$$
$$(1)$$

式中: v_m 为第 m 相绕组电压; R_m 为第 m 相电阻; i_m 为第 m 相电流; L_{mj} 意义为:当 $m=j$ 时为第 m 相的自感,当 $m \neq j$ 时为两相间的互感。在不考虑相间互感的影响,同时省略下标 m 的情况下,相电压平衡方程为

$$v(t) = Ri(t) + \frac{\mathrm{d}(L_s(\theta)i(t))}{\mathrm{d}t} =$$
$$Ri(t) + L_s(\theta) \frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} + i(t) \frac{\partial L_s(\theta)}{\partial \theta} \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}。$$

万方数据

$$(2)$$

式中 L_s 为自感,与转子位置 θ 有关。相电压由 3 部分组成:第 1 项为绕组上的电阻压降;第 2 项为电流变化引起磁链变化而感应的电势;第 3 项为 θ 变化引起绕组中磁链变化而感应的电势。在不考虑高次谐波时,自感 L_s 可表示为

$$L_s(\theta) = L_0 + L_1 \cos(\frac{2\pi\theta}{\theta_z})。$$

$$(3)$$

式中: L_0 为自感的直流分量; L_1 为自感基波分量; θ_z 为齿距角。将式(3)代入式(2)中有

$$v(t) = Ri(t) + L_0 \frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} + L_1 \cos(\frac{2\pi\theta}{\theta_z}) \frac{\mathrm{d}i(t)}{\mathrm{d}t} -$$
$$i(t) L_1 \frac{2\pi}{\theta_z} \sin(\frac{2\pi\theta}{\theta_z}) \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}。$$

$$(4)$$

由能量转换原理,结合式(3),可得步进电机转矩表达式为

$$T_e = \frac{\partial W_f}{\partial \theta} = \mathrm{d}(\frac{1}{2} L_s(\theta) i^2(t))/\mathrm{d}\theta =$$
$$- \frac{\pi L_1}{\theta_z} \sin(\frac{2\pi\theta}{\theta_z}) i^2(t)。$$

$$(5)$$

式中 W_f 为磁场能量。令转子齿数 $p = 2\pi/\theta_z$,转矩常数 $K_t = pL_1/2$,则式(5)可以写成

$$T_e = - K_t \sin(p\theta) i^2(t)。$$

$$(6)$$

式(6)为步进电机的单相矩角特性。对于两相励磁微步细分驱动的混合式步进电机而言,其合成转矩可以看作是单相励磁转矩的矢量叠加,则两相混合式步进电机总的矩角特性为

$$T_e = T_A + T_B = - T_{sm} \sin(p\Delta\theta)。$$

$$(7)$$

式中: T_{sm} 为静转矩; $\Delta\theta$ 为偏离平衡位置的角度。

在某旋转运动的应用场合,设机械负载的转动惯量为 J_L ,电机转子的转动惯量为 J_M ,机械系统粘滞阻尼系数为 D ,电机负载转矩为 T_L ,可以得到以电机轴为对象的机械运动方程为

$$T_e = (J_L + J_M) \frac{\mathrm{d}^2\theta}{\mathrm{d}t^2} + D \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + T_L。$$

$$(8)$$

利用 SIMULINK 建立的步进电机开环控制系统仿真模型如图 1 所示。

图 1 中的仿真模型主要由 3 部分组成:Hybrid Stepper Motor 模块为两相混合式步进电机的简化模型,利用 Matlab 函数通过实现式(4)、式(7)及式(8)的关系得到;Subdivision Circuit 模块为采用电流滞环控制算法的微步细分驱动模块^[11];ACC/DEC Curve 模块为设计的加减速曲线,将在本文接下来的部分详细讨论。

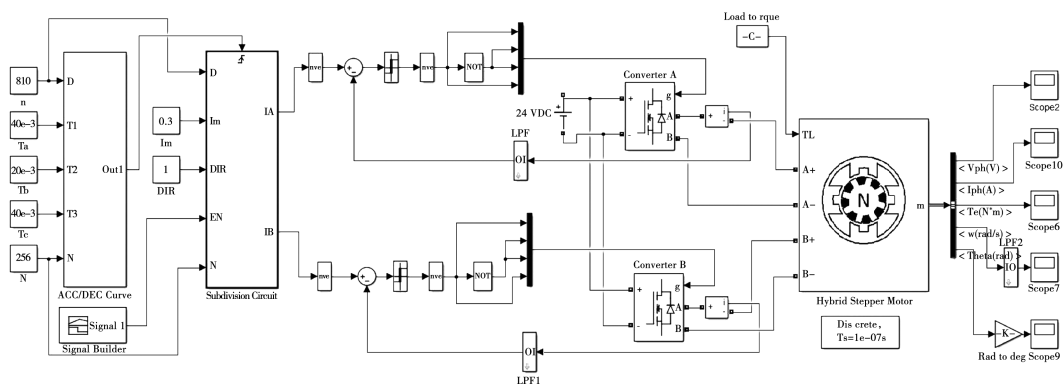


图 1 步进电机开环控制系统模型

Fig. 1 Model of stepper motor open-loop control system

2 加减速曲线设计

2.1 抛物线型加减速曲线

以抛物线作为加减速曲线,整个过程可分为加速、匀速和减速 3 个阶段,如图 2 所示。步进电机从静止开始启动,以变加速度加速,经过 T_a 时间运行 n_a 步后达到所需运行频率 f_{\max} ,匀速 T_b 时间运行 n_b 步后,再以与加速相反的过程减速,经过 T_c 时间运行 n_c 步后,刚好零速停止。

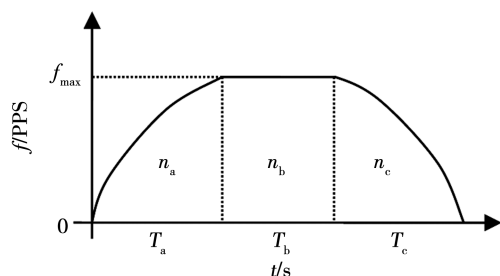


图 2 抛物线加减速曲线

Fig. 2 Parabolic acceleration and deceleration curve

在 $[0, T_a]$ 的加速阶段,电机运行频率 $f(t)$ 按抛物线规律变化,可表示为

$$f(t) = f_{\max} (t/T_a)^{1/2} \quad (9)$$

对运行频率 $f(t)$ 积分得到电机角位移 $\theta(t)$ 为

$$\theta(t) = \int_0^t f(\tau) d\tau = \frac{2f_{\max}}{3\sqrt{T_a}} t^{3/2} \quad (10)$$

由此可得,第 i 个脉冲发送完毕时刻 t_i 为

$$t_i = T_a (i/n_a)^{2/3} \quad (11)$$

第 i 步的步进周期 Δt_i 为

$$\Delta t_i = t_i - t_{i-1} = T_a n_a^{-2/3} [i^{2/3} - (i-1)^{2/3}] \quad (12)$$

式中 i 的取值范围为 $1, 2, \dots, n_a$ 。匀速阶段和减速

阶段每一步的步进周期,其推导方法与之类似,可得到匀速阶段和减速阶段的步进周期分别为:

$$\Delta t_j = T_b/n_b, j = n_a + 1, \dots, n_a + n_b \quad (13)$$

$$\Delta t_k = T_c n_c^{-2/3} [(n-k+1)^{2/3} - (n-k)^{2/3}],$$

$$k = n - n_c + 1, \dots, n(n = n_a + n_b + n_c) \quad (14)$$

通过以上的计算过程,步进电机的步进脉冲序列、速度和位置曲线等可以容易获得。

2.2 矩频特性分析

为了使步进电机既不发生失步或过冲,又能快速达到所需的运行速度,关键在于电机运行过程中,在各个运行频率下所需的转矩既能充分利用各个频率下的转矩,又没有超出其转矩。若加减速曲线在各个运行频率下所需的转矩完全符合矩频特性规律,那将是一种最优的理想加减速曲线。下面分析匀加减速、指数型加减速和抛物线型加减速 3 种方式的矩频特性利用情况:

1) 匀加减速也称为梯形加减速,在整个加速减速过程中所需的转矩 T_1 是恒定的。若矩频特性规律如图 3 所示,可知该方法没有充分利用电机低速时具有较大转矩的特点,所以加速时间与所能达到的运行频率之间 f_1 存在着矛盾关系。显然这不是一种较佳的加速方式。

2) 指数型加减速,其加速度与运行频率之间满足的线性变化规律^[8]为

$$\frac{df}{dt} = A - Bt \quad (15)$$

通常的步进电机矩频规律为:在运行频率 f 较小时,电机转矩 T 基本恒定,而当 f 增大时 T 随 f 近似线性下降,所以,式(15)是对电机矩频特性的一

种较好的近似。

3) 抛物线型加减速。通常的步进电机矩频规律为:在 f_0 后的一段内, T 随 f 线性下降,但斜率不大;而当 f 较大时, T 随 f 的下降加快。对于这种矩频特性,抛物线型加减速曲线能更好地符合其矩频特性规律,这是因为抛物线型加减速曲线所需的转矩与运行频率的关系^[12]为

$$T = k \sqrt{b^2 - 4af_0 + 4af}$$

(16)

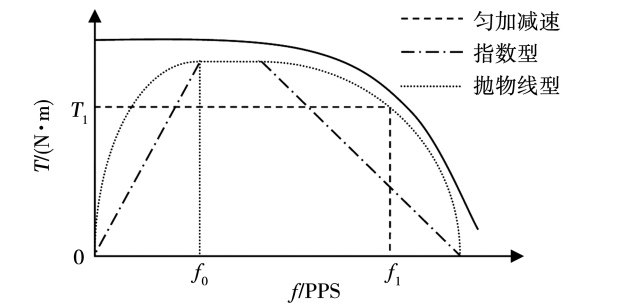


图 3 矩频特性曲线及其利用率

Fig. 3 Torque frequency characteristic and utilization rate

3 仿真分析

以某步进电机位置旋转系统为对象,利用前文的步进电机开环控制系统仿真模型,对上述 3 种加减速曲线分别进行仿真研究。采用 SanyoDenki 公司生产的边长为 14 mm 的两相混合式步进电机,转子齿数为 50 齿,最大输出转矩为 6.5 mN·m。采用 256 细分的微步细分驱动,理论上的步进角达到了 0.007°。负载转动惯量 J_L 取 3×10^{-7} kg·m²,电机轴转动惯量 J_M 为 0.58×10^{-7} kg·m²,粘滞阻尼 D 取 0.0001 N·m·s/rad。电机从静止启动到刚好停止的转动时间为 100 ms,其中加速、匀速和减速时间分别为 40 ms、20 ms 和 40 ms。这 3 种加减速方式下设计的速度曲线及其相应的步进脉冲序列的典型仿真结果如图 4 所示。

分别采用这 3 种速度曲线作为仿真系统输入,执行仿真系统,可以得到负载运动的速度、位置曲线等。仿真结果表明:在 100 ms 控制周期内,采用匀加减速曲线,步进电机的最大无失步转动角度为 630°;采用指数型加减速曲线,最大无失步转动角度为 450°,较匀加减速曲线降低了 180°;而采用抛物线型加减速曲线,最大无失步转动角度达到 810°,较匀加减速曲线提高了 180°,提高了约 30%。在最大无失步转动过程中,这 3 种速度曲线的负载端角

位移与时间关系仿真结果如图 5 所示,其中实线为输入的角位移曲线(设计的速度曲线的一次积分),虚线为负载端的角位移曲线。可以看出,这两种角位移曲线具有较好的吻合程度,说明设计的速度曲线能够实现对步进电机的精确控制。将它们作差值处理,将得到运行过程中的位置跟踪误差,以及输入停止后负载在平衡位置处的残余振荡过程,如图 6 所示。可以看出,抛物线型加减速曲线的中间过程位置跟踪误差最小,而在平衡位置处的残余振荡误差也较小,在 $-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$ 范围内。在上述电机转动过程中,这 3 种加减速方式下设计的速度曲线与仿真得到的负载端的速度曲线与时间关系如图 7 所示。这 3 种加减速的速度曲线均基本符合预期的设计要求,但在速度曲线不同阶段的转换处所需转矩不平滑,有一定的谐振振荡冲击,可能会诱发系统机械振动。

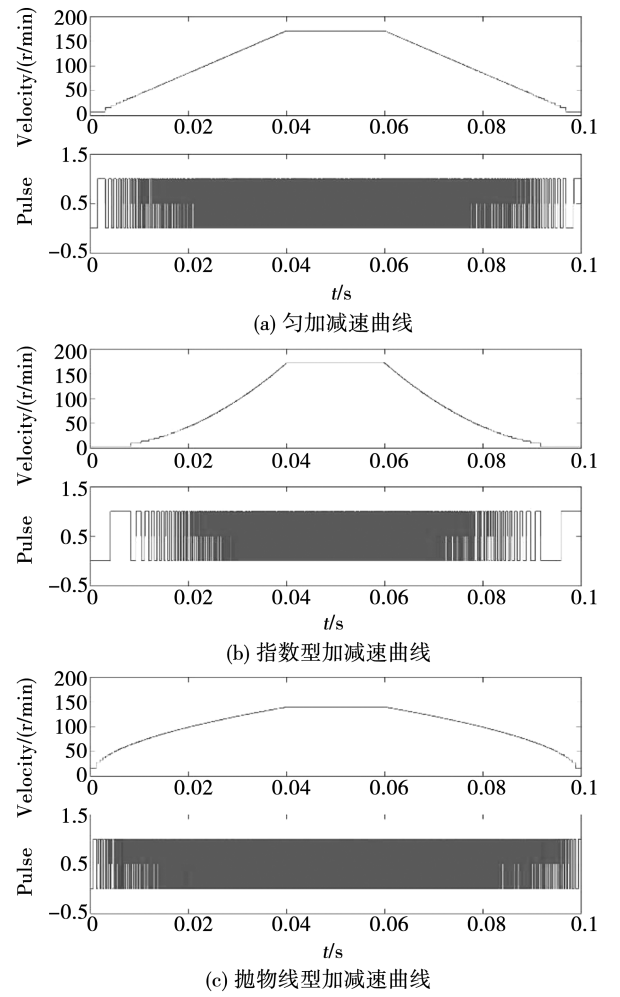


图 4 3 种类型速度曲线及其控制脉冲序列
Fig. 4 Three acceleration and deceleration curves and their control pulse signals

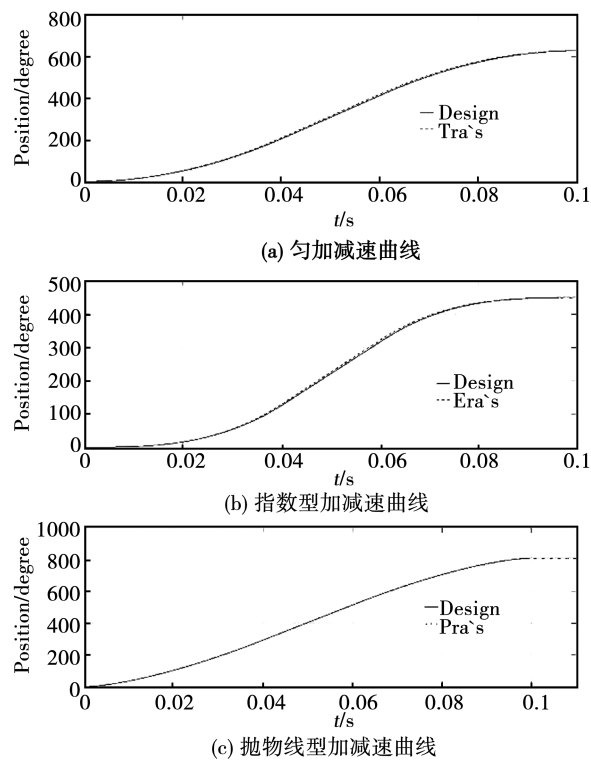


图 5 负载端角位移与时间关系仿真结果

Fig. 5 Relationship of load angle displacement and time

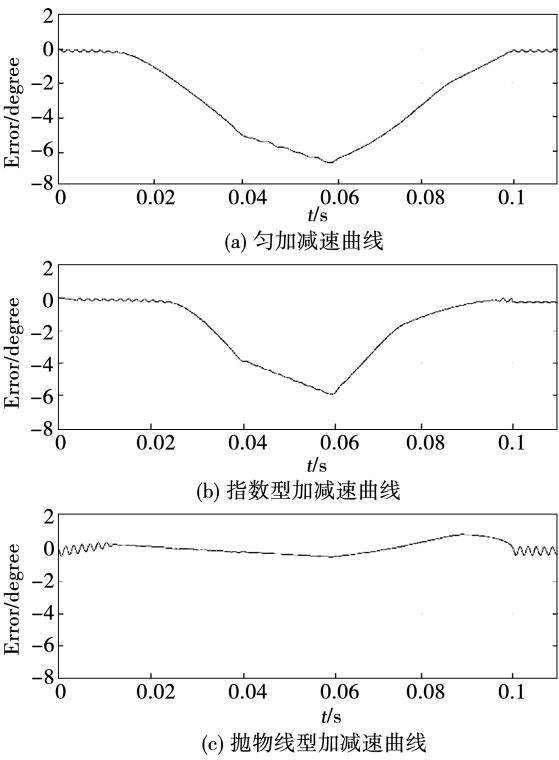


图 6 位置跟踪误差的仿真结果

Fig. 6 Simulation results of position tracking error

综上所述,抛物线型加减速曲线在相同控制周期内具有更大的转动角度,即具有更快的动态响应

速度,同时中间过程的位置跟踪误差也较小,这说明抛物线型加减速曲线具有更优的开环控制特性。

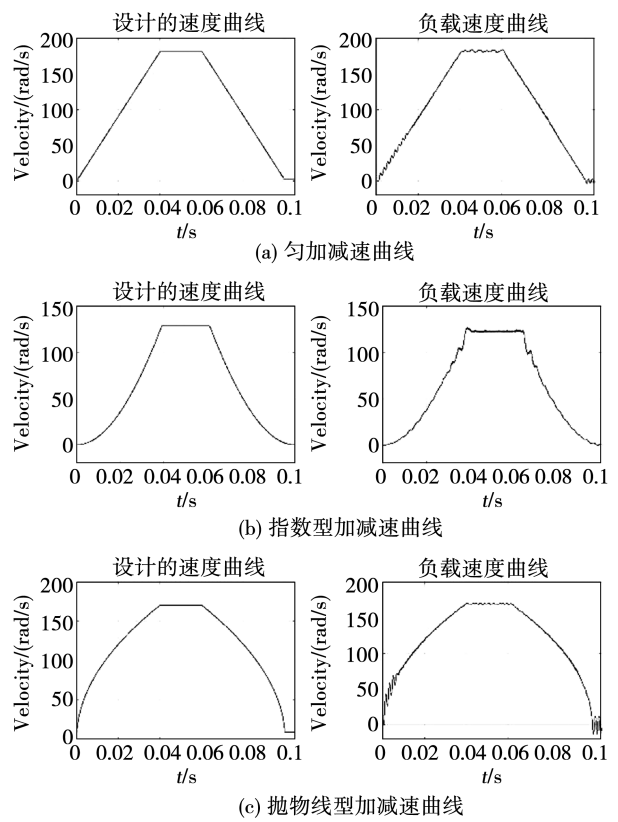


图 7 负载端角速度与时间关系仿真结果

Fig. 7 Relationship of load angle velocity and time

4 实验验证

前述的梯形速度曲线和抛物线型速度曲线已在 Altera 公司的 DE0 FPGA 开发板上得以实现。驱动对象的参数与仿真模型基本吻合,即采用静转矩为 $6.5\text{ mN}\cdot\text{m}$ 、额定电流为 0.3 A 、电机轴转动惯量为 $0.58\times10^{-7}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 、编码器线数为 1024 的两相混合式步进电机。旋转负载的转动惯量约为 $3\times10^{-7}\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,驱动电路的微步细分数为 16。加速、匀速和减速时间分别为 40 ms 、 20 ms 和 40 ms ,即单个控制周期的总运行时间精确为 100 ms 。

梯形和抛物线型速度曲线的最大无失步转动角位移及其相应的误差曲线如图 8 和 9 所示。可以看出,在 100 ms 的控制周期内,梯形加减速方式的最大无失步转动角度为 540° ;而抛物线型加减速方式的最大无失步转动角度为 810° ,较梯形加减速方式有了约 50% 的提高。同时,在系统停止输入后,负载在平衡位置处的残余振荡误差也均在 $-0.5^\circ\sim$

0.5°的范围内。

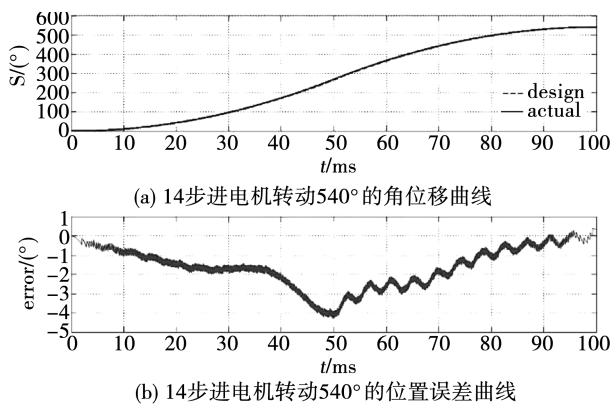


图 8 梯形曲线转动 540°的角位移及误差曲线

Fig. 8 Angle displacement and error curves of 540 degree based on trapezoidal velocity profile

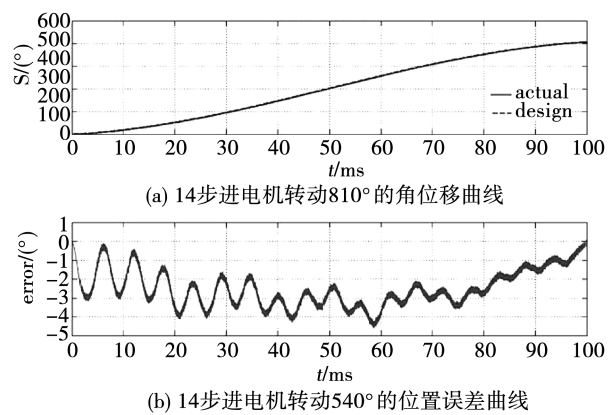


图 9 抛物线型曲线转动 810°的角位移及误差曲线

Fig. 9 Angle displacement and error curves of 810 degree based on parabolic velocity profile

在其他转动角度下也进行了实验测试,这两种速度曲线在不同转动角度下的中间过程角位移误差最大值总结于表 1 中。在相同的控制周期内,较梯形曲线来说,抛物线型曲线具有更大的无失步转动角度,同时中间过程角位移误差也有所降低。实验与仿真结果及其规律基本吻合,证明了前述矩频特性理论分析的正确性。抛物线型加减速方式的运用,使步进电机的开环控制性能有了显著提高。

表 1 不同转动角度下中间过程角位移误差

Table 1 Angle displacement errors at different degrees

角度	450°	540°	630°	720°	810°
梯形	-4.0 ~ 0.5	-4.3 ~ 0.5	-	-	-
抛物线	-3.3 ~ 0.5	-3.7 ~ 0.5	-4.0 ~ 0.5	-4.3 ~ 0.5	-4.6 ~ 0.5

5 结 论

- 1)建立了两相混合式步进电机开环控制系统仿真模型,设计了一种与步进电机矩频特性更为符合且可以用于实时在线计算的抛物线型加减速曲线算法。
- 2)仿真分析了匀加减速、指数型加减速、抛物线型加减速 3 种类型速度曲线的控制性能。结果表明,在 100 ms 的控制周期内,抛物线型加减速曲线的最大无失步转动角度达到 810°,较另外两种加减速曲线分别提高了 29% 和 80%;同时其中间过程的位置跟踪误差和平衡位置处的残余震荡误差均较小。
- 3)实验研究了梯形、抛物线型速度曲线的控制性能。结果表明,在相同控制周期下,抛物线型速度曲线的最大无失步转动角度为 810°,较梯形速度曲线有了约 50% 的提高;同时其角位移误差也相对减小。仿真和实验都说明了抛物线型加减速曲线具有更快速的动态响应能力。
- 4)基于抛物线型加减速曲线的步进电机开环控制方式已成功应用到某相控阵列天线的单元相位控制中,实现了天线波束更快速的动态扫描性能。该控制方式也适用于对响应速度有较高要求的其他应用场合。

参 考 文 献:

[1] ACARNLEY P. Stepping Motors: A guide to theory and practice [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2002.

[2] 史敬灼,徐殿国,王宗培. 模糊控制步进电动机位置伺服系统[J]. 电工技术学报, 2001, 16(3):20.

SHI Jingzhuo, XU Dianguo, WANG Zongpei. Stepping motor position servo system with fuzzy control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(3):20.

[3] 刘景林,王帅夫. 数控机床用多步进电机伺服系统控制[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(5):80.

LIU Jinglin, WANG Shuaifu. Multi-stepping motor servo system control for numerical control machine [J]. Electric Machines and Control, 2013, 17(5):80.

[4] 刘颖,王志刚,王红,等. 步进电机升降频的优化算法[J]. 微电机, 2010, 43(8):93.

LIU Ying, WANG Zhigang, WANG Hong, et al. An optimization algorithm to accelerate or decelerate speed of step motor [J]. Micromotors, 2010, 43(8):93.

- (31): 19.
- WEI Kexin, CHEN Qiaoyan. Electric vehicle battery SOC estimation based on multiple-model adaptive Kalman Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31): 19.
- [12] LESLIEK, DEMIRKIRAN I, RASK E, et al. An investigation into the PNGV battery model with the addition of a dynamic temperature range[C]//Norfolk: Southeastcon, 2013. Proceedings of IEEE, 2013: 1-6.
- [13] HUSSEINA A. Experimental modeling and analysis of lithium-ion battery temperature dependence[C]//Charlotte: Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2015: 1084-1088.
- [14] 毕军, 康燕琼, 邵赛. 纯电动汽车动力锂电池 Nernst 模型参数辨识[J]. 汽车工程, 2015, 37(6): 725-730.
- BI Jun, KANG Yanqiong, SHAO Sai. Parameters identification of nernst model for power Li-ion battery of pure electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2015, 37(6): 725-730.
- [15] 刘记. 全钒液流电池双极板流道的优化及流量控制研究[D]. 吉林: 吉林大学, 2011.
- [16] ZHENG Xinxin, XIAO Lan, MENG Xin, et al. Optimization of LCL filter based on THD estimation model[C]. Denver, Colorado: Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013.
- [17] 杨铭. Minitab 用于中心复合设计与数据处理[J]. 药学服务与研究, 2007, 7(3): 231.
- YANG Ming. Minitab for central composite design and data processing[J]. Pharmaceutical Care and Research, 2007, 7(3): 231.
- [18] GIJO E V, SCARIA J, ANTONY J. Application of six sigma methodology to reduce defects of a grinding process[J]. Quality and Reliability Engineering International, 2011, 27(8): 1221.
- [19] 梁志国, 朱振宇. 非均匀采样正弦波形的最小二乘拟合算法[J]. 计量学报, 2014, 35(5): 494.
- LIANG Zhiguo, ZHU Zhenyu. The sinewave fit algorithm based on total least-square method with non-uniform sampling[J]. Acta Metrologica Sinica, 2014, 35(5): 494.
- [20] 刘新天, 刘兴涛. 基于 Vmin-EKF 的动力锂电池组 SOC 估计[J]. 控制与决策, 2010, 3(25): 445.
- LIU Xintian, LIU Xingtao. Based-Vmin-EKF SOC estimation for power Li-ion battery pack[J]. Control and Decision, 2010, 3(25): 445.
- [21] CHARKHGARDM, FARROKHI M. State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks and EKF[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(12): 4178.

(编辑: 张楠)

(上接第 42 页)

- [5] 王邦继, 刘庆想, 周磊, 等. FPGA 在多轴步进电机控制器中的应用[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(3): 78.
- WANG Bangji, LIU Qingxiang, ZHOU Lei, et al. FPGA-based multiple-axis stepper motor controller[J]. Electric Machines and Control, 2012, 16(3): 78.
- [6] CARRICA D O, GONZALEZ S A, BENEDETTI M. A high speed velocity control algorithm of multiple stepper motors[J]. Mechatronics, 2004, 14: 675.
- [7] JI Shuai, HU Tianliang, ZHANG Chengrui, et al. A parametric hardware fine acceleration/deceleration algorithm and its implementation[J]. Int J Adv Manuf Technol, 2012, 63: 1109.
- [8] 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.
- ZHOU Li, YANG Shihong, GAO Xiaodong. Modeling of stepper motor control system and running curve simulation[J]. Electric Machines and Control, 2011, 15(1): 20.
- [9] 巫佩军, 杨文韬, 余驰, 等. 一种用于高精度随动控制系统的轨迹预测方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(7): 1.
- WU Peijun, YANG Wentao, YU Chi, et al. Trajectory prediction method for high precision servo control system[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(7): 1.
- [10] 刘卫国, 宋受俊. 三相反应式步进电动机建模及常用控制方法仿真[J]. 微电机, 2007, 40(8): 22.
- LIU Weiguo, SONG Shoujun. Modeling and simulation of conventional control methods for 3-phase reluctance stepper[J]. Micro-motors, 2007, 40(8): 22.
- [11] LYSHEVSKI S E. Microstepping and high performance control of permanent-magnet stepper motors[J]. Energy Conversion and Management, 85(2014): 254.
- [12] 陈爱民. 步进电机抛物线型升降频曲线介绍[J]. 微特电机, 1991, 6: 42.

(编辑: 张楠)