

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.01.024

无刷同步电机的起动性能仿真

李岩, 张超, 刘陵顺

(海军航空工程学院控制工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对目前国内无刷同步电机较少应用于电动运行的现状, 设计一种无刷同步电机起动运行状态的仿真模型。该模型以电机起动系统为研究对象, 利用模块化思路, 分别建立励磁机、主发电机、旋转整流器以及控制单元等模块, 运用这些模块搭建一个完整的起动运行模型, 并对所建立的模型进行起动初期的仿真研究。仿真结果表明: 该模型有一定的可行性和有效性, 能为进一步研究无刷同步电机的起动性能奠定基础。

关键词: 无刷同步电机; 起动; 仿真

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Simulation of Brushless Synchronous Machine's Starting Performance

Li Yan, Zhang Chao, Liu Lingshun

(Dept. of Control Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: For the situation that the brushless synchronous machine used to run less in starting status, this paper designs a brushless synchronous motor's simulation model in start running state. The motor starting system as the study object of the model, the use of modular thinking, were established exciter, main generator, rotating rectifier and control units and other modules, the use of these modules and build a complete start-run model, and that the model simulation studies for the early start. Simulation results show that the model has some feasibility and validity, for further study the starting performance of brushless synchronous motor lay foundation.

Key words: brushless synchronous machine; starter; simulation

0 引言

采用无刷励磁方式的同步交流电机由于取消了滑动接触部分, 维护简单, 可靠性高, 可长期连续运行而不要保养, 特别适用于无人管理的自动化电站。在飞机上, 航空同步发电机作为飞机交流电源设备, 把发动机的机械能转换为电能^[1-2]。

由电机的可逆性原理可知, 无刷同步电机同样可以作电动运行。如果能够在其发电功能的基础上, 实现无刷同步电机的起动功能, 进而实现其起动发电双功能, 对飞机整体性能的提高帮助很大。目前, 美国的波音 B-787 和欧洲的空中列车 A380 2 种民航飞机的电源系统采用的电机就是无刷式同步电机的变频发电系统, 并且都成功实现了起动发动机的功能, 其功率达到了兆瓦级^[3-5]。由于目前国内关于无刷同步电机的研究仍主要集中于其发电运行状态, 有关其电动运行的研究还较少, 故笔者对此电机进行研究。

1 无刷同步电机简介

无刷同步电机静止时, 主发无法得到励磁, 传统的解决方案是在励磁机定子中增加一套三相辅助交流起动绕组: 向辅助绕组中通入三相交流电, 产

生旋转磁场, 使励磁机能够向主发提供足够的励磁电流。但是这一方案需重新设计电机本体, 增加了电机体积和重量, 使电机结构变得更为复杂^[6]。

为了解决三相交流励磁的弊端, 学者们提出了单相交流励磁的无刷同步电机起动方案, 如图 1。利用单相交流电可建立交变磁场, 进而可以在励磁机的电枢绕组中感应出交流电压的原理, 在起动时向原有的励磁机的直流励磁绕组中通入单相交流电, 起动完毕后接回调压器, 通以直流电。

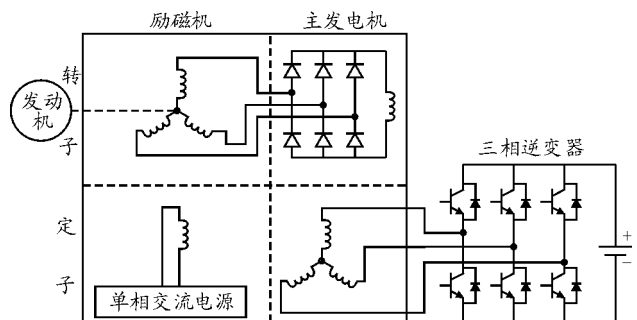


图 1 无刷同步电机单相交流励磁起动方案

图 1 中的励磁机和主发电机都是凸极同步电机。励磁机具有线性放大器特性, 需要大的换相电抗, 一般不考虑阻尼绕组; 主发电机需要考虑阻尼绕组, 这样的设计可以减小瞬态过程励磁电流的峰

收稿日期: 2011-09-06; 修回日期: 2011-09-30

作者简介: 李岩(1967—), 女, 山东人, 副教授, 从事电力电子与电力传动研究。

值,抑制电机振荡,进而提高同步电机带不对称负载的能力。分析同步电机的数学模型可知,其作为发电机和电动机的思路是一致的,仅某些参考方向不同。通过修正发电系统某些相关物理量电位方向,可以实现运行状态电机的互换。笔者采用电动机的惯例建立同步电机模型。

2 凸极同步电机的数学模型

根据凸极同步电机工作原理可知,其内部的电磁关系可用一组微分方程来描述。笔者忽略了磁滞损耗和磁饱和等影响,利用理想电机的派克方程如式(1)~(4)所示^[7]:

电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_f \\ u_D \\ u_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_D & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p\Psi_d \\ p\Psi_q \\ p\Psi_f \\ p\Psi_D \\ p\Psi_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\omega\Psi_q \\ \omega\Psi_d \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & M_{df} & M_{ad} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & M_{aQ} \\ 3/2M_{fa} & 0 & L_f & M_{fD} & 0 \\ 3/2M_{Da} & 0 & M_{Df} & L_D & 0 \\ 0 & 3/2M_{Qa} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

转矩方程: $T_e = 3/2p(\Psi_d i_q - \Psi_q i_d)$ (3)

运动方程: $T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt}$ (4)

其中: r, r_f, r_D, r_Q 分别为电枢绕组、励磁绕组、直轴阻尼绕组、交轴阻尼绕组的电阻值; ω 为电机的电角度; L_d 为电枢绕组直轴等效电感; L_q 为电枢绕组交轴等效电感; L_f 为励磁绕组电感; L_D, L_Q 分别为直轴、交轴阻尼绕组自感; $M_{df} = M_{fa}$ 为等效直轴电枢绕组与励磁绕组之间的互感; $M_{ad} = M_{Da}$ 为等效直轴电枢绕组与直轴阻尼绕组之间的互感; $M_{aQ} = M_{Qa}$ 为等效交轴电枢绕组与交轴阻尼绕组之间的互感; $M_{Df} = M_{fD}$ 为励磁绕组与直轴阻尼绕组之间的互感。

数学模型中利用互感可逆系统和 dq 参数,形式简洁而且便于工程应用;另外,建模过程中要考虑 abc 坐标与 dq 坐标之间的相互转换,转换关系从略。

3 无刷同步电机起动模型的建立

笔者利用模块化的设计方法,分别建立励磁机、主发电机、旋转整流器以及控制单元等模块。运用这些模块,搭建一个完整的起动运行模型,如图 2 所示。运用模块化的思路搭建模型,便于对系统的任一模块进行改动和仿真分析。建立基本系统以后,其它的仿真分析都可以在所建系统基础上进行改动得到,这就消除了重复建模的缺陷。

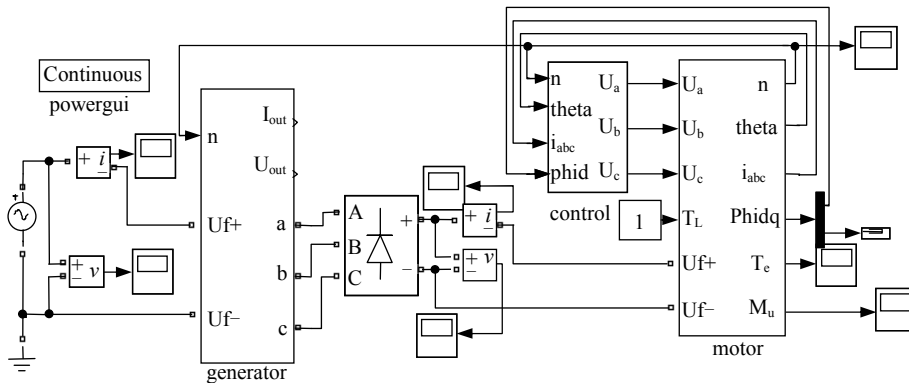


图 2 起动系统模型

3.1 主发电机的模型

运用凸极同步电机的数学模型和 Simulink 模块,搭建出了如图 2 中 motor 所示的主发电机。在主发电机搭建过程中,由于 PSB 模块和 Simulink 模块无法直接相连;因此为解决该问题,在 PSB 和 Simulink 模块之间连接电压(流)测量模块或受控电压(流)源。通过搭建的主发电机模块,可以对其内部进行相应的改动而得到其作为电动机的模型。运

用这种方法搭建电机模型使得模块内部全部可见,便于进行改动^[8]。

3.2 励磁机的模型

励磁机与主发电机的模型建立类似,但与主发电机相比,励磁机的建立只需要考虑式(1)和式(2),无需考虑电机的转矩方程和运动方程;采用发电机惯例进行建立;励磁机忽略了阻尼绕组绕组,不考虑阻尼绕组的影响;极对数大于主发电机等。

励磁机的模块如图 2 中的 generator 所示。

3.3 旋转整流器

笔者直接运用 Simulink 中的通用桥模型, 对其进行参数设置, 使其作整流器用。与此同时也可以运用二极管自行搭建整流器模块。分别运用 2 种模块, 得到 Simulink 中的固有模块能够很好地实现整流器功能, 故笔者使用其固有模块。

3.4 坐标变换

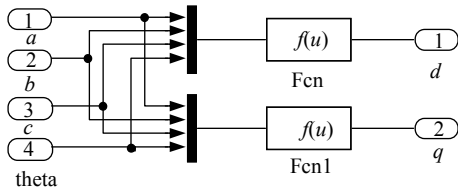


图 3 abc-dq 转换

同步电机的建立是运用 dq 坐标的方程, 而同步电机的真正三相输出为 abc 三相, 因此需要进行 abc 坐标和 dq 坐标的转换。依据 abc 到 dq 坐标的转换矩阵, 可以得到 abc 到 dq 的转换模型, 其内部结构如图 3 所示。其中 theta 表示转子位置角。同理

可得 dq 到 abc 的变换, 此处从略。

3.5 控制模块

对于交流电机来说, 目前其起动的控制方式主要有直接转矩控制、频率他控式控制、频率自控式控制。在同步电机控制方面, 直接转矩控制的控制方式还不太成熟; 频率他控式控制存在着转子振荡及失步等问题; 频率自控式则不然, 变频器的输出频率不是随意由外部给定的, 而是由电动机本身转速决定的, 这样就解决了失步的问题^[9]。

笔者采用自控式电流矢量控制方式, 其控制示意图如图 4。图 4 中, 电机的转速和三相电流反馈给控制单元, 通过控制单元中的速度调节器、电流调节器。其中采用 $i_d = 0$ 的磁场矢量控制。电机实际的三相电流和通过检测转速和转子位置而通过计算得到的三相电流进行差值比较, 其差值控制门极驱动电路, 从而控制三相逆变器的各个管子的导通与关断。由此可知控制单元主要包括速度控制单元、 i_{dq} 到 i_{abc} 转换单元、电流滞环控制单元和逆变器单元等。利用以上单元, 对其进行封装, 建立子系统控制模块, 如图 2 中的 Control 模块所示。

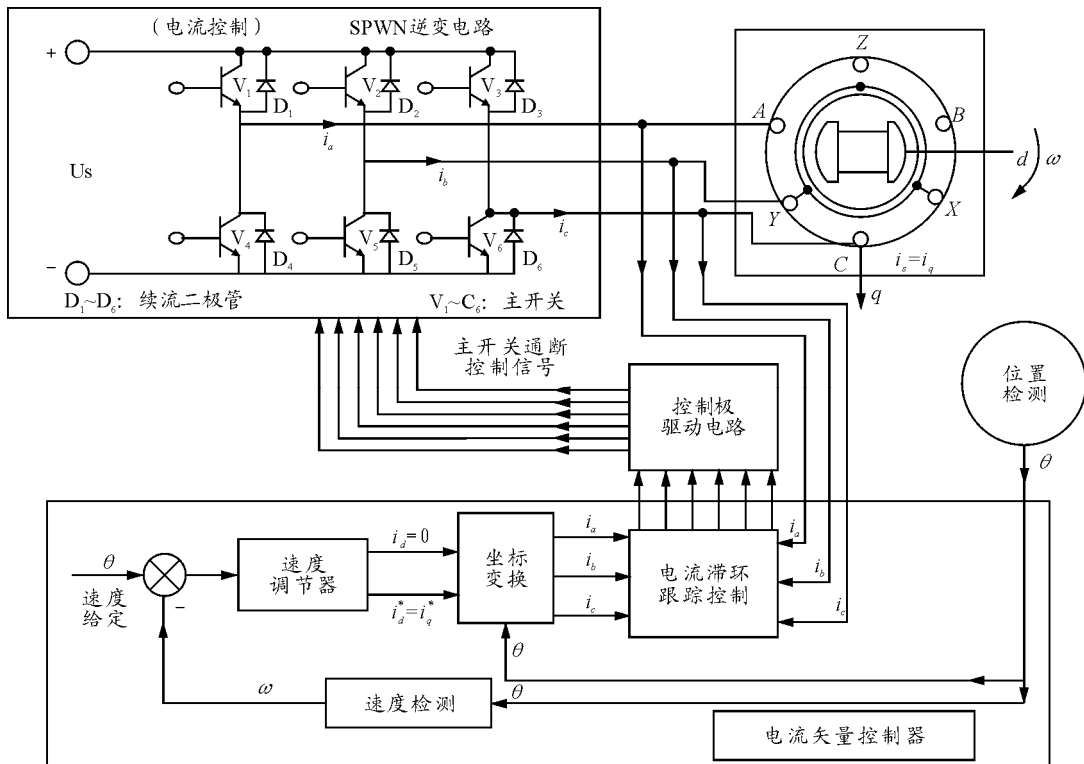


图 4 频率自控式电流矢量控制调速示意图

3.6 仿真模型的建立

运用以上建立各个模块和 Simulink 固有元件, 搭建出如图 4 所示的仿真模型。

4 无刷同步电机起动仿真研究

4.1 仿真参数的设定

针对图 2 中所示的无刷同步电机起动系统模

型, 选择算法 ode23tb 可以提高仿真的速度; 另外, 在仿真时选择变步长的方法, 并对最大步长由固有参数 auto 更改为 1e-4, 这样仿真的精度更高。

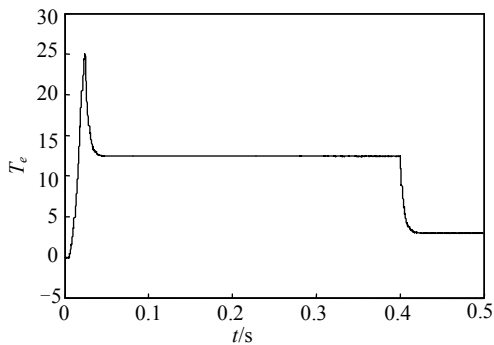
4.2 模型参数的给定

Control 中的 speed 模块里转速给定设定为 1 200, 逆变器的直流母线电压设定为 150 V。为了缩短仿真时间, 负载转矩取的较小 (1 N·m), 机械惯量也取的较小 (0.03)。对于 motor 的输出转速 n 来说, n 是由运动方程式 (4) 得到的; 由于电磁转矩 T_e 需要一段时间才能达到稳定, 在 T_e 上升到稳定的这段时间内, T_e 小于给定的负载转矩 T_L , 由式 (4) 可知此时 n 为负值; 作为实际的物理量, 转速 n 不可能为负值, 故在 motor 的模块中加入速度限制模块, 限定转速最小值为 0, 从而确保在转矩建立的前期不会出现转速 n 为负值的情况。

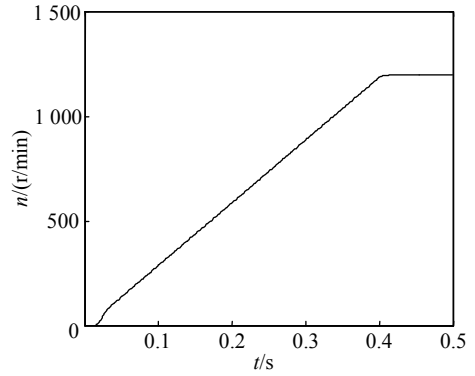
4.3 仿真波形与分析

通过仿真, 得到如图 5 所示的仿真波形。

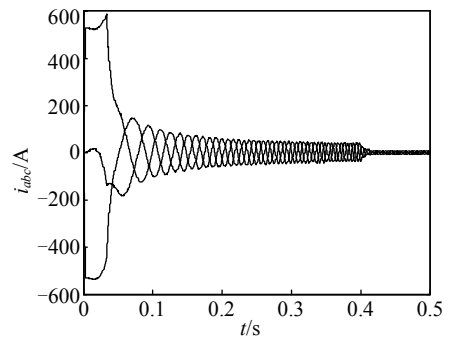
在图 5(a)中, 电磁转矩在建立的初期会有一个峰值出现, 但时间很短, 随即下降到稳定阶段, 直至 0.4 s 左右, 当图(b)中的转速上升到给定转速值 1 200 r/min 左右时, 电磁转矩 T_e 迅速下降到负载转矩值, 随后保持转矩平衡, 转速保持 1 200 r/min; 由 T_e 脉动值和转速很快达到给定转速来看, 说明自控式电流矢量控制调速系统适用于笔者所建的模型。图(c)中, 在起动时电流初值较大, 但其作用的时间很短; 随着转速的上升, 电流的幅值缓慢减小, 最终趋向稳定。这是由于随着转速的上升, 定子绕组的反电势逐渐加大造成; 如图(c)和图(d), 随着电机转速的末端三相电流放大波形上升, 三相电流的频率不断上升。图(d)为图(c)中转速达到 1 200 r/min 以后的三相电流的放大图。由图(d)可知, 三相电流频率已经稳定, 频率为 80 Hz, 符合同步电机的转速-频率关系。



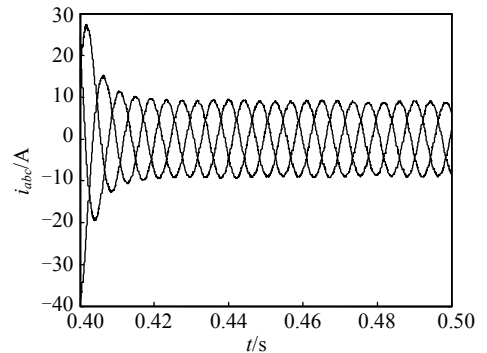
(a) 电磁转矩



(b) 转速上升曲线



(c) 三相电流



(d) 三相电流放大图

图 5 仿真波形

5 结论

笔者利用模块化的方式建立了同步电机、控制单元等模型, 搭建了无刷同步电机起动系统的仿真模型。通过仿真验证了所建模型的可行性, 为以后进一步分析无刷同步电机起动系统以及无刷同步电机的起动/发电系统奠定了一定的基础。

参考文献:

- [1] 何友观. 现代中小型同步发电机励磁系统的分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 45.
- [2] 刘迪吉. 航空电机学[M]. 北京: 航空工业出版社, 1991: 152-154.
- [3] Michael D Otto, Donald V Otto. Computer simulation of electric motor drive systems including the power electronic network, IEEE, Trans.on IA, 1992, 28(5):

1072-1079.

[4] 龚春英. 旋转整流器式无刷发电机仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1993.

[5] 胡育文. 航空电源系统的新发展[C]. 电力电子与运动控制学术年会, 2004: 8-9.

[6] 谢少军. 飞机交直交变速恒频电源系统的数字仿真[D]. 南京: 南京航空航天大学, 1995.

[7] 高景德, 王祥衍, 李发海. 交流电机及其系统的分析

[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 72-75.

[8] 陈艳峰, 丘水生, 伍言真, 等. Matlab 与 PSPICE 相结合用于开关功率变换器仿真的方法[J]. 电机与控制学报, 1999(2).

[9] Byoung-Kuk Lee, Mehrdad Ehsani. A Simplified Functional Simulation Model for Three-Phase Voltage-Source Inverter Using Switching Function Concept[J]. IEEE Trans.on IE, 2001, 48(2): 309-321.

(上接第 77 页)

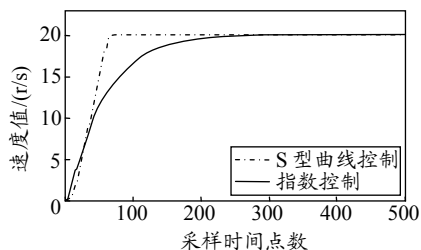


图 5 指数和 S 形曲线加速控制器输出响应比较

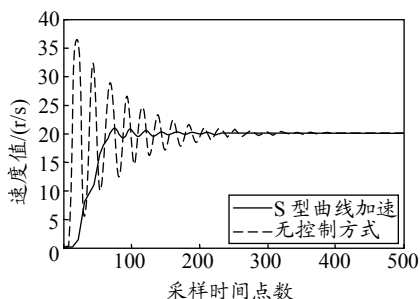


图 6 S 型曲线和无控制方法时速度响应比较

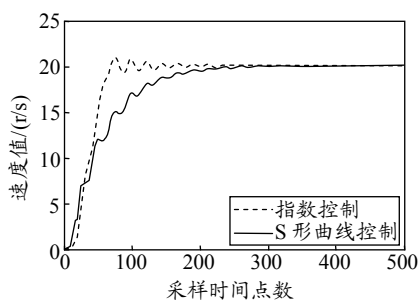


图 7 S 型曲线和指数控制速度响应比较

由仿真曲线的比较可见:

- 1) 指数加速控制时间短;
- 2) 在给定转速下, 不加任何加速控制器时系统调节时间为 26.35 s, 超调为 84.55%;
- 3) 指数加速控制调节时间为 17.74 s, 超调为 13.60%; S 形曲线加速控制下, 调节时间 11 s, 超调为 4.43%, 且转速波动小。

通过对比分析, 系统在加减速控制下的动态性能明显提高, 同时相较于指数加减速算法, S 形曲线加减速控制系统响应速度慢, 但是其调节时间短,

超调小, 且能够稳定于期望速度值处。

4 结束语

步进电动机为开环控制, 在保证系统运行平稳的前提下, 为有效地解决电动机加速启动时出现的失步、堵转和减速停止时出现的超程、冲击、振荡等现象, 笔者提出了指数加减速算法和 S 形曲线加减速算法。通过仿真分析可见, 算法动态响应快、超调小、冲击小, 具有很好的动态性能, 达到了期望速度值波动小, 控制精度高的要求^[8]。S 形曲线加速控制克服了无控制和指数控制算法中的缺点, 能获得平滑的速度, 有很好的控制效果。同时, 根据不同的电动机参数, S 形曲线加减速控制器模型易于调整、改进, 大大地缩短了开发周期, 具有很好的推广应用价值。

参考文献:

[1] 王宗培. 步进电动机及其控制系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1986.

[2] 卢志刚, 吴杰, 吴潮. 数字伺服控制系统与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007.

[3] 何平, 李岳, 徐小军. 基于 DSP 的步进电机高精度变速控制研究[J]. 兵工自动化, 2007, 26(11): 86-89.

[4] Hao Shuanghui, Song Fang, Liu Jie. An Applied CNC Acceleration and Deceleration Control Algorithm Research[C]. Japan: International Conference on Mechatronics and Automation, 2008.

[5] 谢建云. 数控系统加减速控制方法研究现状[J]. 机械管理开发, 2009, 24(5): 38-39.

[6] 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.

[7] 张振华. 数控系统加减速算法及定位技术研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2007.

[8] 王玉琳, 王强. 步进电机速度调节方法[J]. 电机与控制应用, 2006, 33(1): 53-64.

[9] Li H. Motion Profile Design to Reduce Residual Vibration of High-Speed Positioning Stages[C]. ASME transactions on mechatronics: IEEE, 2009, 80.

[10] 张华宇, 王孚懋, 徐方全. S 形曲线加减速算法的研究[J]. 现代制造技术与装备, 2006(2): 21-22.