

## 数字伺服控制在 UPS 逆变系统中的应用

李桂梅<sup>1</sup>, 戴瑜兴<sup>2</sup>, 易龙强<sup>2</sup>

(1. 湖南商学院计算机与电子工程学院, 湖南长沙 410205;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)



**摘要:** 研究了数字化 UPS(Uninterruptible Power Supply) 逆变系统中应用数字伺服控制技术, 给出了数学建模的方法, 并采用 MATLAB/Simulink 进行了仿真研究。结果表明, 数字伺服系统的控制原理能有效地控制 UPS 正弦逆变器, 逆变器输出稳定、波形畸变小、抗负载干扰能力强。

**关键词:** UPS; 正弦逆变器; 数字伺服控制技术; 状态反馈

**中图分类号:** TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-731X (2008) 15-4146-03

## Application of Digital Servo Control Techniques for UPS Inverter System

LI Gui-mei<sup>1</sup>, DAI Yu-xing<sup>2</sup>, YI Long-qiang<sup>2</sup>

(1. College of Computer and Electronic Engineering, Hunan Business College, Changsha 410205, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** Digital servo control techniques was studied applying in inverter system of digital UPS--Uninterruptible Power Supply, and the approach of mathematic modelling was probed into, which was studied by simulation using MATLAB/simulink software. The results show that the control principle of digital servo system can effectively take control of the power of UPS sine inverter, which has stable output, low voltage distortion and strong load disturbing resistance.

**Key words:** UPS; sine inverter; digital servo control techniques; state feedback

## 引言

UPS(Uninterruptible Power Supply)作为一种向用户提供安全电能的电源装置随着科学技术手段的提高而朝着更高要求发展, 行业应用标准也越来越高。为使 UPS 具有低电压失真度和较快的动态响应, 各国学者开展了广泛的研究, 并对此提出了许多的控制方法和控制策略。其中有基于无差拍控制与重复控制的数字逆变控制技术、数字 PID 控制技术、变滑模控制技术<sup>[1-5]</sup>等等。本文研究数字化 UPS 逆变系统中运用数字伺服控制技术。

## 1 基于伺服控制原理的 UPS 逆变控制器设计

将数字伺服系统的控制原理运用于单相 UPS 正弦逆变器控制设计中, 其设计的基本思想是: 将 UPS 的逆变电源看作一个参考正弦波的随动系统, 即其输出始终跟随标准正弦波, 设计中将控制系统分为内、外两环。在被控对象数学模型分析中, 将输出负载电流视为对系统的扰动, 通过内环状态反馈来消除扰动, 实现输出的稳定, 减少输出电压的总谐波畸变率 (THD), 同时根据数字无差拍(deadbeat)控制的原理通过状态反馈将系统极点配置在零点, 以实现输出对参

考正弦波的快速跟随, 从而提高系统的动态响应性能、实现系统的无差拍响应<sup>[6-7]</sup>; 在外环路的控制中, 利用一个简单的积分器来消除系统输出的静态误差, 从而提高了系统的静态响应性能。综合上述, 单相 UPS 逆变控制器结构原理图如图 1 所示。

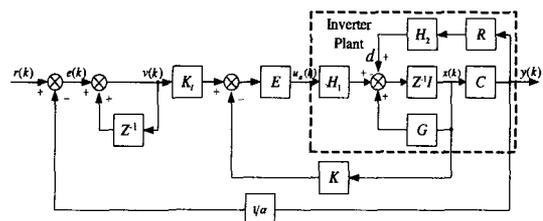


图 1 单相 UPS 逆变控制器原理图

图 1 中负载电流被视作扰动引回系统; E 为 PWM 功率放大增益(直流母线电压); 将反馈电压衰减  $\alpha$  倍是将输出电压反馈检测信号做归一化处理;  $r(k)$  为单位参考正弦波。C 为输出滤波电容, R 为负载电阻。

图 1 中可以看出, 此控制器由两部分组成。一是由状态反馈组成的内环, 它的作用在于对系统的镇定(无负载的情况下)和减少负载电流对输出电压的影响, 从而达到稳定输出电压、提高系统动态响应性能的目的; 系统的外环是由输出反馈与一个误差积分器组成。积分器的作用相当重复控制器的作用, 用以减少系统的静态误差同时稳定系统输出频率及相位。之所以没有使用重复控制器, 是因为积分器的结构简单却能得到令人满意的效果。

收稿日期: 2007-06-28

修回日期: 2007-08-20

基金项目: 湖南省教育厅资助项目(06c459); 湖南省自然科学基金资助项目(06JJ50110)。

**作者简介:** 李桂梅(1965-), 女, 湖南人, 硕士, 副教授, 系主任, 研究方向为信息处理及智能系统设计; 戴瑜兴(1956-), 男, 湖南人, 教授, 博导, 系主任, 研究方向为数字化与智能化系统设计理论及应用。

由图 1 可得, 系统的输入方程为:

$$u_o(k) = -KEx(k) + K_I Ev(k) \quad (1)$$

令  $\alpha = 220\sqrt{2}$ , 则积分器的方程为:

$$v(k) = v(k-1) + r(k) - \frac{1}{\alpha} y(k) \quad (2)$$

于是

$$v(k+1) = \frac{1}{\alpha}(CH_1KE - CG)x(k) + (I - \frac{1}{\alpha}CH_1K_1E)v(k) - \frac{1}{\alpha}CH_2i_o(k) + r(k+1) \quad (3)$$

式中  $G$ 、 $H_1$ 、 $H_2$  为离散化系数,  $i_o(k)$  系统输出电流, 同时可推得

$$x(k+1) = (G - H_1KE)x(k) + H_1K_1Ev(k) + H_2i_o(k) \quad (4)$$

对于整个闭环系统, 可以得到下列状态方程和输出方程:

$$\tilde{x}(k+1) = \tilde{G}\tilde{x}(k) + \tilde{H}_1r(k+1) + \tilde{H}_2i_o(k) \quad (5a)$$

$$y(k) = [C \ 0]\tilde{x}(k) \quad (5b)$$

式中

$$\tilde{G} = \begin{bmatrix} G - H_1KE & H_1K_1E \\ \frac{1}{\alpha}(CH_1KE - CG) & (I - \frac{1}{\alpha}CH_1K_1E) \end{bmatrix} \quad (6a)$$

$$\tilde{H}_1 = [0 \ 1]^T; \tilde{H}_2 = \begin{bmatrix} H_2 & -\frac{1}{\alpha}CH_2 \end{bmatrix}^T \quad (6b)$$

所以, 如何来确定参数  $K$  和  $K_I$  是控制系统设计的关键。

对于阶跃输入  $r(k)=r$  响应, 当  $k$  趋向无穷大时,  $x(k)$ 、 $v(k)$ 、 $i_o(k)$  趋向常数。将  $k = \infty$  代入上述状态方程, 可得:

$$\begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} = \tilde{G} \begin{bmatrix} x(\infty) \\ v(\infty) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ r \end{bmatrix} + \tilde{H}_2i_o(\infty) \quad (7)$$

定义

$$\begin{cases} x_e(k) = x(k) - x(\infty) \\ v_e(k) = v(k) - v(\infty) \\ i_e(k) = i_o(k) - i_o(\infty) \end{cases} \quad (8)$$

则由式(5)和式(7)可得

$$\begin{bmatrix} x_e(k+1) \\ v_e(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -\frac{1}{\alpha}CG & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} H_1E \\ -\frac{1}{\alpha}CH_1E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -K & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} + \tilde{H}_2i_e(k) \quad (9)$$

定义

$$W(k) = \begin{bmatrix} -K & K_I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \quad (10)$$

则(9)式可以改写为

$$\xi(k+1) = \hat{G}\xi(k) + \hat{H}W(k) + \tilde{H}_2i_e(k) \quad (11)$$

$$W(k) = -\hat{K}\xi(k) \quad (12)$$

式中

$$\xi(k) = \begin{bmatrix} x_e(k) \\ v_e(k) \end{bmatrix} \quad \hat{G} = \begin{bmatrix} G & 0 \\ -\frac{1}{\alpha}CG & I \end{bmatrix} \quad (13a)$$

$$\hat{H} = \begin{bmatrix} H_1E \\ -\frac{1}{\alpha}CH_1E \end{bmatrix} \quad \hat{K} = \begin{bmatrix} K & -K_I \end{bmatrix} \quad (13b)$$

方程式(11)与(12)表现为标准的状态空间方程形式, 如图 2 所示。其有两个输入端, 一个是系统自身的状态反馈; 另一个是负载误差电流, 其相当于系统的干扰输入项。根据“状态反馈  $\hat{K}$  矩阵是基于由干扰引起的误差很快减小到零的原则建立的<sup>[4]</sup>”这一原理, 增益矩阵  $\hat{K}$  可以用极点配置方法求出。数字控制系统的无差控制原理指出, 当将系统的极点配置在原点时, 系统的响应是无差拍的<sup>[7]</sup>。这样, 期望的状态反馈增益矩阵  $\hat{K}$  可以由 Ackermann 公式得到:

$$\hat{K} = [0 \ 0 \ 1] [\hat{H} \ \hat{G}\hat{H} \ \hat{G}^2\hat{H}]^{-1} \hat{G}^3 \quad (14)$$

进而可以求得 UPS 正弦逆变控制系统的参数  $K$ 、 $K_I$ 。

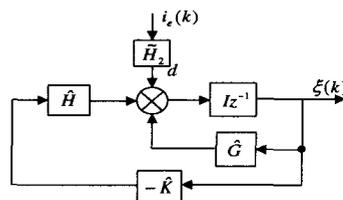


图 2 闭环状态反馈系统图

## 2 仿真研究

仿真研究<sup>[8-9]</sup>使用 MATLAB 的动态仿真工具 Simulink。根据控制算法理论可建立 MATLAB 仿真模型如图 3 所示。设计中的所使用的 UPS 正弦逆变器各参数如表 1 所示。

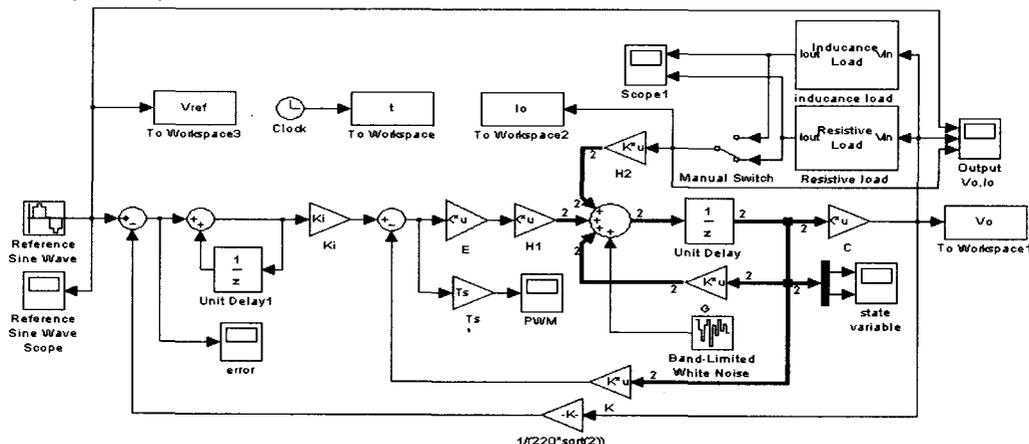


图 3 UPS 正弦逆变伺服控制器仿真模型图

表 1 UPS 正弦逆变器参数

对象	参数
输出滤波器	$L=1.8\text{mH}$ $C=120\mu\text{F}$
PWM 功率放大增益	$E=311\text{V}$
参考正弦波	$r=1\text{V}$ 、 $f=50\text{Hz}$
采样频率	$f_s=10\text{kHz}$
采样周期	$T_s=1/f_s=100\mu\text{s}$

图中两负载模块为自建模块，用于模拟线性负载和整流性负载。

### 2.1 控制器校正后的系统阶跃响应与脉宽响应

UPS 正弦逆变系统经控制器校正后，系统极点被配置在零点处。系统的对参考输入的跟随性变得十分的优秀。其仿真情况如图 4 所示。

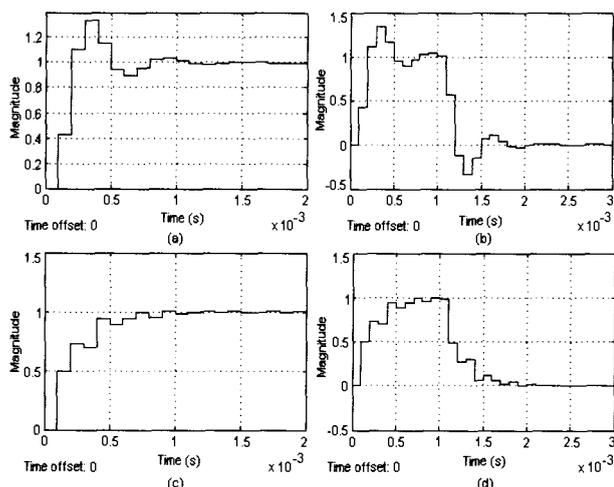


图 4 控制器校正前后系统阶跃响应(左)与脉宽响应(右)

图 4 中(a)、(b)为原系统响应波形，可知原系统对各输入量响应速度较慢，阶跃响应须 10 几个采样周期才进入稳态，而脉宽响应则需要近 20 个采样周期；且信号响应过程伴随振荡，响应超调分别达到了近 30%与 50%。下半部分为控制器校正后的系统阶跃响应(c)与脉宽响应(d)，与原系统响应相比：控制器校正后的系统对各信号输入的响应速度得到了明显改善，各响应都由原响应减少近 5 个采样周期就进入了稳态；且信号响应过程不再伴随振荡。可见 UPS 逆变系统经数字控制器校正后，系统的动态响应性能大大的提高了。

### 2.2 逆变系统带线性负载仿真

图 5 是单相 UPS 逆变器带阻性负载时的输出电压电流的情况。负载阻值为 50Ω，大约相当于 1KW 的负载。

图 5 中，从上到下分别为参考正弦波、输出电压、输出电流的波形图。仿真中为了提高仿真的真实性，人为的在系统中加入了一定带宽与幅度的随机白带噪声。从图上可以看出，在线性负载的情况下输出波形仍然十分光滑。

### 2.3 逆变系统带单相全波可控整流线性负载仿真

图 6 为带全波可控整流负载的系统输出图。其中负载为

50Ω 电阻，晶闸管的触发角约为 60° 和 240°。正如控制器设计中所述，在负载电流引起输出电压畸变时，由于无差拍控制的作用，通过状态反馈，使得输出电压在几个采样周期里得到校正。

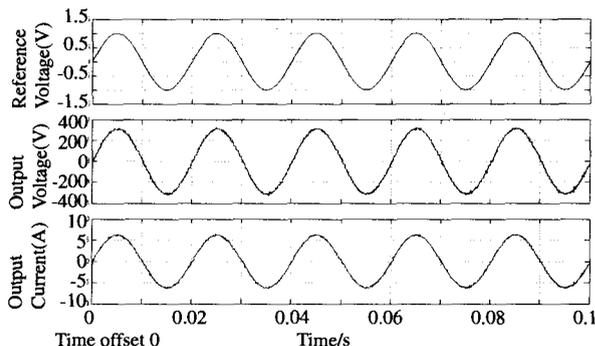


图 5 带阻性负载

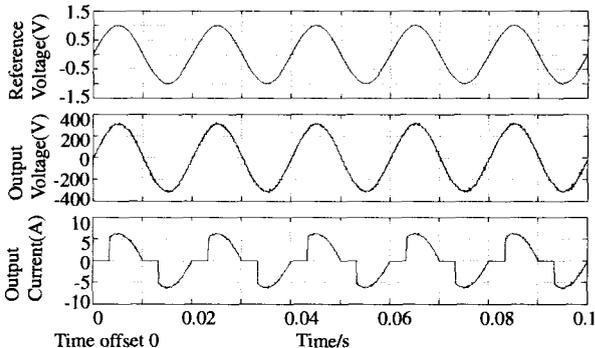


图 6 带全波可控整流线性负载

### 2.4 逆变系统带感性负载仿真

图 7 显示了 UPS 逆变系统在数字控制器的控制下直接带感性负载时的系统输出电压、电流。仿真中，感性负载中电感值 10mH、电阻值为 16Ω，感性负载为电感与电阻的串联。可以看出，系统的输出十分理想。

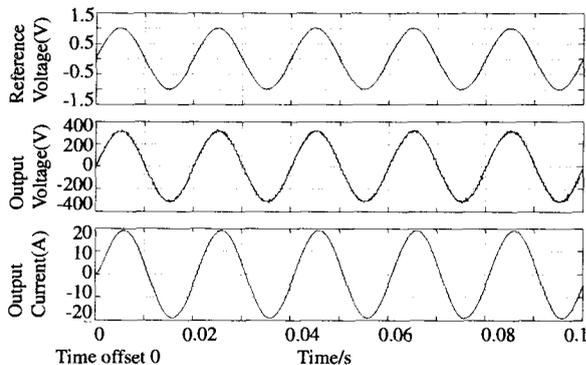


图 7 带感性负载

图 8 为系统带晶闸管可控全波整流感性负载的非线性负载的输出电压、电流图，晶闸管的触发角约为 60° 和 240°。感性负载为电感 10mH、电阻 16Ω 的串联感性负载。图 8 中显示，即使在这种整流感性非线性负载的恶劣环境下，控制器仍然能够保证系统输出电压幅值与相位的稳定。

- 1234-1236.)
- [11] 李伏京, 方卫宁, 胡清梅, 邓野. 地铁车辆安全疏散性能的仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(4): 852-855. (LI Fu-jing, FANG Wei-ning, HU Qing-mei, DENG ye. Simulation and analysis of passengers' evacuation ability in subway under urgent conditions [J]. JOURNAL OF SYSTEM SIMULATION, 2006, 18(4): 852-855.)
- [12] 杨立中. 基于元胞自动机的火灾中人员逃生的模型[J]. 科学通报, 2002, 12(4): 7-12.
- [13] Xie H M. The complexity of limit languages of cellular automata: an example [J]. Journal of Systems Sciences and Complexity (S1009-6124), 2001, 14(12): 17-30.
- [14] Veronique T. Two-dimensional cellular automata and their neighborhoods. [J]. Theoretical Computer Science (S0304-3975), 2004, 312(1): 203-222.
- [15] John E H, Denise E C. Learning using an artificial immune system [J]. Journal of Network and Computer Applications (S1084-8045), 1996, 19(4): 189-212.
- [16] Kirchner A. Simulation of evacuation processes using a bionics inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics [J]. Physics A (S0378-4371), 2002, 312(2): 260-276.
- [17] Z Fang. On the Relationship between Crowd Density and Movement Velocity [J]. Fire Safety Journal (S0379-7112), 2003, 38(2): 271-283.
- [18] 廖守亿, 陆宏伟. 基于Agent的建模与仿真概念化框架[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(8): 616-620. (Liao Shouyi, Lu Hongwei, Research on Conceptual Framework for Agent-based Modeling and Simulation [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(8): 616-620.)
- [19] 于泉, 石建军. 基于Agent的交通流微观仿真系统框架研究[J]. 计算机仿真, 2006, 23(1): 210-214.
- [20] 缪海青, 汤淑明, 王飞跃. 基于对等计算的人工交通系统设计[J]. 交通运输工程与信息, 2006, 6(6): 83-85.
- [21] 李德伟, 韩宝明. 基于多智能体的交通枢纽微观仿真研究[J]. 都市快轨交通, 2006, 19(5): 48-51.
- [22] 李昊, 戴金海. 基于Agent的建模与仿真和离散事件仿真的集成应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(S2): 116-120. (Li Hao, Dai Jinhai, Study on Integrated of Agent-based Modeling and Simulation and Discrete Event Simulation [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(S2): 116-120.)
- [23] 郝成民, 刘湘伟, 胡波. 基于Agent的电子战CGF建模研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(9): 2321-2323, 2326. (HAO Cheng-min, LIU Xiang-wei, HU Bo. Study on Modeling of CGF in EW Based on Agent [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(9): 2321-2323, 2326.)
- [24] 商蕾, 陆化普. 城市微观交通仿真系统及其应用研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 221-224. (SHANG Lei, LU Hua-pu Urban Microscopic Traffic Simulation System and Its Application [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 21-224.)
- [25] 何宇强, 毛保华, 丁勇, 张好智, 杨静. 铁路客运站最高聚集人数模拟计算研究[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(1): 213-216, 224 (HE Yu-qiang, MAO Bao-hua, DING Yong, ZHANG Hao-zhi, Research on Simulative Calculation of Maximum Assembling of Railway Passenger Station [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(1): 213-216, 224.)
- [26] 杜霄, 唐涛. 地铁列车运行仿真系统中三维视景建模和简化[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(6): 1724-1728. (DU Xiao, TANG Tao. Analysis and Modeling of Three-Dimension Visual of Subway Trains Operation Simulation System [J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(6): 1724-1728.)

(上接第4148页)

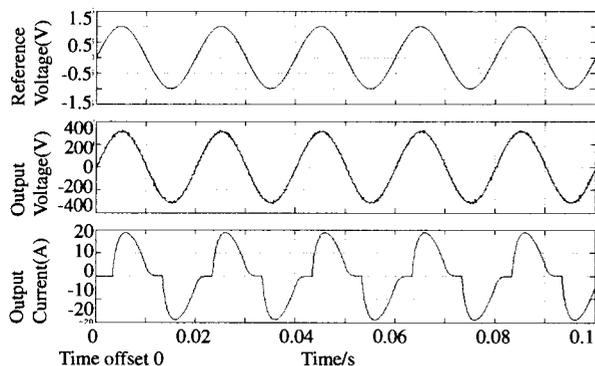


图8 带全波可控整流感性负载

### 3 结论

经过理论分析和仿真实验,表明运用数字伺服系统的控制原理能有效地控制正弦UPS逆变电源,并能有效地抑制负载电流对UPS逆变器的输出影响,从而提高了系统的动态性能和稳态精度。该控制算法思路清晰、设计出的控制系统结构简单且易于实现。通过对UPS正弦逆变系统带各种线性、非线性负载的仿真,其结果表明该方案有效可行。

### 参考文献:

- [1] 周洁. 逆变电源的数字控制技术的应用[J]. 广东电力, 2005, (1): 22-25.
- [2] C Rech, H Pinheiro, H A Grundling, H L Hey, et al. Analysis and design of a repetitive predictive-PID controller for PWM inverters [C]// IEEE Power Electr. Spec. Conf. Rec. 2001. USA: IEEE, 2001: 2531-2537.
- [3] T Kawabata, T Miyashita, Y Yamamoto. Dead beat control of three phase PWM inverter [J]. IEEE Trans. Power Electron (S0885-8993), 1990, 5(1): 21-28.
- [4] L Malesani, P Mattavelli, S Buso. Robust dead-beat current control for PWM rectifiers and active filters [J]. IEEE Trans. Ind. Applicat (S0278-0046), 1999, 35(3): 613-620.
- [5] P A Ioannou, J Sun Robust. Adaptive Control [M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1996.
- [6] Montagner V F, Carati E G, Grundling H A. Univ. Federal de Santa Maria. An Adaptive Linear Quadratic Regulator with Repetitive Controller Applied to Uninterruptible Power Supplies [C]// Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference (ISBN: 0-7803-6401-5). USA: IEEE, 2000, 4: 2231-2236.
- [7] 冯国楠. 现代伺服系统的分析与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 63-68.
- [8] 魏克新, 王云亮, 陈志敏. MATLAB语言与自动控制系统设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 254-271.
- [9] 薛定宇, 陈阳泉. 基于MATLAB/Simulink的系统仿真技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 350-362.