

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.020

基于改进 Buck-Boost 斩波 电路的无功补偿器设计*

马立新, 马天顺

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院, 上海 200093)

摘要:针对电网中大量感性负载的投入使用造成电压降低和畸变的问题,以及现有无功补偿装置存在的不足,提出了一种新型的交流斩波无功补偿器。以改进后的 Buck-boost 交流斩波无功补偿器为研究对象,分析了交流斩波无功补偿的工作原理、补偿特性以及拓扑结构,通过状态空间方程建立了 Buck-boost 电路在不同工作状态下的数学模型,推导出补偿电流与占空比之间的关系。在此基础上,利用瞬时无功功率理论检测办法以及直接电流控制策略,搭建了 Matlab 仿真模型以进行实验验证。研究表明,基于直接电流控制的改进 Buck-boost 交流斩波无功补偿器可以实现对电网侧无功功率进行实时、动态补偿,具有潜在的实用价值。

关键词:改进 Buck-boost 电路;无功补偿;控制策略;Matlab 仿真;级联结构

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1191-05

Design for reactive power compensator based on improved Buck-Boost AC/AC chopper

MA Li-xin, MA Tian-shun

(Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering,
University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem of voltage reduction and voltage distortion due to the extensive use of inductive loads, and some shortcomings of existing reactive power compensation devices, a new AC—AC chopper based var compensator was proposed. The basic principles, compensation characteristics and topology of the improved Buck-Boost AC—AC chopper based var compensator were described, the mathematical model of improved Buck-Boost based on state-space equation was established, the relationship between duty ratio and compensation current was derived. The instantaneous reactive power theory and direct current control method were adopted to build a Matlab model. The results indicate that the real-time compensation of reactive power in grid side can be realized by this var compensator based on a direct controlled Buck-Boost AC—AC chopper, it has potential application value.

Key words: improved buck-boost circuit; reactive power compensation; control strategy; Matlab/Simulink; cascaded model

0 引 言

随着工业生产过程的迅速发展,电网中的功率需求发生急剧变化,特别是冲击性负载日益增多(如大型轧钢机、电气化机车、功率变流装置等)。这类用电

设备往往启动过程快,启动频率高,频繁地吸收大量动态无功功率,引起母线电压快速波动,给电网的稳定带来极为不利的影响^[1]。如何提高电力系统功率因数、稳定受电端及电网的电压、平衡三相有功和无功负载等成为亟待解决的问题。传统的固定补偿由电容器、

收稿日期:2014-04-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61205076);上海市研究生创新基金资助项目(JWCXSL1302)

作者简介:马立新(1960-),男,陕西安康人,博士,教授,主要研究方向为电力系统稳定性与优化运行、电力系统故障诊断与模式识别、群体智能与智能电网、电力能效测评系统。Email:malx_ii@sina.com

电抗器和隔离开关组成,有些甚至电抗器也不配,无功功率是根据负载情况在不断的变化,因此固定补偿技术也时刻处于过补偿或者欠补偿的状态^[2]。静止无功补偿器(SVC)的补偿容量受电力系统的电压影响较大,而且在投入使用的同时往往还要考虑其对电网的谐波污染^[3]。静止同步补偿器(STATCOM)以其容量大、响应快、输出电压谐波含量少、控制手段先进等优点而受到青睐^[4]。但是由于其造价高,逆变器的容量与电力系统对无功容量的需求相比还相差较远,这些因素导致其在工程上广泛使用还有一定的难度。

本研究提出一种基于改进 Buck-boost 型交流斩波器的无功补偿电路,详细分析其基本原理和补偿特性。通过仿真实验验证其可行性和先进性。

1 交流斩波无功补偿器的工作原理

无功补偿器结构框图如图 1 所示。交流斩波无功补偿器主要由网侧滤波器、AC/AC 斩波器及补偿电容器三部分组成。滤波器主要消除倍数频率及开关频率的边频谐波分量对电网造成的污染,AC/AC 斩波器由改进后的 Buck-boost 交-交斩波电路实现^[5]。

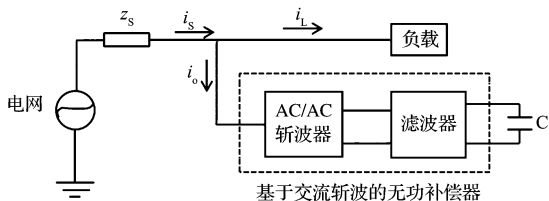


图 1 无功补偿器结构框图

改进后的 Buck-boost 型 AC/AC 交流斩波器同时具有升压、降压功能,输出电压与输入电压极性相同。传统的无功补偿电容器在投入运行以后,由于其容值已经确定,补偿容量不能随着系统中的无功功率变化而变化,经常处于欠补偿或者过补偿的状态,不能实现对系统中无功功率的跟踪、精确补偿^[6]。根据这一点,在传统并联无功补偿电容器的基础上,本研究在电网与电力电容器之间加一个改进的 Buck-boost 型 AC/AC 交流变换器,通过调节电路的工作模式和控制斩波电路开关的导通关断状态,就可以对电容器两端的电压进行动态调节,进而得到一超前电网电压 90°、幅值可调的容性电流,该电流可对交流感性无功功率进行连续动态的补偿,最终使得网侧的功率因数为 1。

改进后的 Buck-boost 型交流斩波无功补偿拓扑图如图 2 所示。

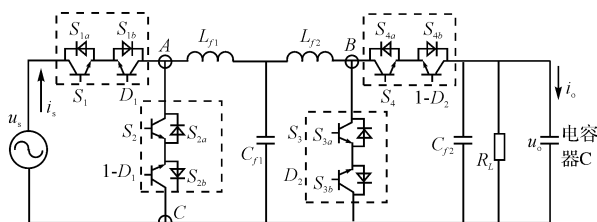


图 2 无功补偿器拓扑图

S_1, S_2 和 S_3, S_4 —由两个 IGBT 反向串联组成的双向开关,两者互补开通;电感 L_{r1}, L_{r2} —储能电感;电容 C_1, C_2 —用来滤除开关频率及其倍数的高次谐波分量

设无功功率最大允许波动率为 Δ ,将采样系统中的无功功率信号与基准值作比较,斩波电路存在 3 种工作模式:Buck 工作模式、Boost 工作模式和滤波工作模式。

(1) Buck 模式。

当 $Q < (1 - \Delta) Q_{ref}$ 时(Q —系统中检测到的无功信号, Q_{ref} —参考量),表明系统中所需要补偿的无功功率不大,且低于参考量,通过降低电容器两端电压可以实现系统的无静差补偿。电路前级 Buck 部分工作,后级 Boost 部分不工作,斩波电路工作于 Buck 模式。

当电路中所有元器件均为理想器件的情况下,假设输入电压为 u_s ,经斩波后得到的电压为 u_o ,开关频率为 f_s ,开关周期 $T_s = 1/f_s$, S_1 的占空比为 $D_1 (0 < D_1 < 1)$ 。定义开关函数 $D(t)$ 为:

$$D_1(t) = \begin{cases} 1 & (mT_s \leq t \leq DT_s + mT_s) \\ 0 & (0(mT_s + DT_s \leq t \leq (m + 1)T_s) \end{cases} \quad (1)$$

将式(1)用傅立叶级数展开得:

$$D_1(t) = D_1 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \text{sinn}D_1\pi \text{cosn}\omega_s t \quad (2)$$

式中: $\omega_s = 2\pi f_s$ 。

假设电网电压为理想正弦波,即:

$$u_s(t) = U_s \sin\omega_1 t \quad (3)$$

$$u_o(t) = u_s(t) D_1(t) = D_1 U_s \sin\omega_1 t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2U_s \sin\omega_1 t}{n\pi} \text{sinn}D_1\pi \text{cosn}\omega_s t \quad (4)$$

输出电流的基波分量是与输出电压 u_o 同频率的正弦波,其相位超前电压 90°,谐波频率分布在 ω_s 两侧,经过 LC 低通滤波后,可得:

$$i_o(t) = \frac{D_1 U_s \sin\omega_1 t}{-j \frac{1}{\omega_1 C}} = \omega_1 C D_1 U_s \cos\omega_1 t \quad (5)$$

(2) Boost 模式

当 $Q > (1 + \Delta) Q_{ref}$ 时(式中: Q —系统中检测到的无功信号, Q_{ref} —参考量),表明系统中所需要补偿的

无功功率较大,且高于参考量,通过升高电容器两端电压可以实现系统的无静差补偿,电路前级 Buck 部分不工作,后级 Boost 部分工作,斩波电路工作于 Boost 模式。

S_3 和 S_4 为两对高频互补开通的交流开关管,开通时间分别为 $D_2 \cdot T_s$ 、 $(1 - D_2) \cdot s$ 。

在只考虑基波分量的情况下,参考前面 Buck 模式下的数据,可得:

$$u_o = u_s(t)/(1 - D_2) = U_s \sin \omega_1 t / (1 - D_2) \quad (6)$$

$$i_o(t) = \frac{U_s \sin \omega_1 t}{j \frac{1}{\omega_1 C}} = \frac{\omega_1 C U_s \cos \omega_1 t}{1 - D_2} \quad (7)$$

(3) 滤波模式。

当 $(1 - \Delta) Q_{ref} \leq Q \leq (1 + \Delta) Q_{ref}$ 时 (Q —系统中检测到的无功信号, Q_{ref} —参考量), 开关管 S_1 、 S_4 导通, S_2 、 S_3 关断, 补偿器发出的无功功率直接输送到系统当中, 斩波电路工作于滤波模式。

通过对斩波电路工作模式的分析, 可以看出, 不管输入状态怎么变化, 电路的输出只经过一级功率变换。

式(5,7)表明, 可以把改进的 Buck-boost 交流斩波无功补偿器看作成一个容值连续调节的电容器, 通过控制开关管的占空比, 就可以完成对电网无功功率的跟踪补偿。改进的 Buck-boost 型交流斩波无功补偿器所提供的无功功率大小与补偿电容 C 、电网电压以及占空比 D 有关。一般情况下, 电网电压是固定不变的, 补偿电容 C 也是固定的, 所以无功补偿功率的大小就直接由占空比 D 确定^[7]。

2 电路工作模式的选择

在改进的 Buck-Boost 斩波电路中, 由于滤波模式的存在, 除无功基准值 Q_{ref} 外还要设定另外两个基准值 $(1 - \Delta) Q_{ref}$ 和 $(1 + \Delta) Q_{ref}$ 。在 Buck、Boost 型交流斩波控制电路的基础上稍加变动, 就可以完成对 3 种模式的精确控制^[8], 改进后的 Buck-Boost 斩波电路控制框图如图 3 所示。

控制电路分为两部分: 前一部分是 Buck 和 Boost 斩波控制电路的组合, 分别产生与其相应的控制信号; 后一部分根据两个基准量 $(1 - \Delta) Q_{ref}$ 和 $(1 + \Delta) Q_{ref}$, 决定 Buck 和 Boost 型斩波电路的工作模式。

其具体过程是: 将采样得到的无功信号 Q 和基准值 Q_{ref} 进行比较, 差值经 PI 调节后得到放大, 再对其进行三角波调制, 得到的 PWM 信号 S_w 。将 S_w 反相可以得到与之互补的控制信号 S_y , S_w 、 S_y 与前后两级的 4

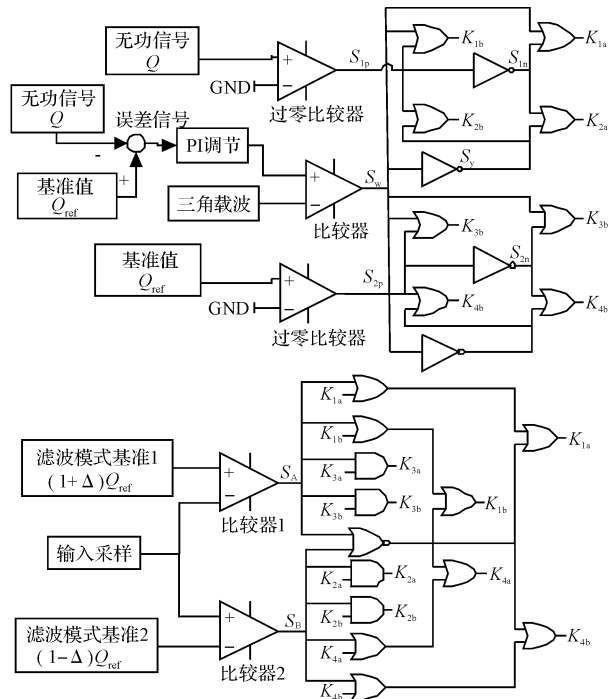


图 3 斩波电路控制框图

个信号 S_{1p} 、 S_{1n} 、 S_{2p} 、 S_{2n} 分别进行组合, 就可以得到 8 个 IGBT 开关管的控制信号; 设定合适的滤波模式基准值 $(1 - \Delta) Q_{ref}$ 和 $(1 + \Delta) Q_{ref}$, 将无功信号分别与这两个基准值进行比较, 得到两路调制信号 S_A 、 S_B , 用来调制原始开关信号。当 $Q < (1 - \Delta) Q_{ref}$ 时, S_A 为低电平, 通过与门电路使 S_{3a} 、 S_{3b} 断开, S_B 为高电平, 通过或门电路使 S_{4a} 、 S_{4b} 导通, 其它开关信号调制后仍保持原来状态, 斩波电路开启 Buck 工作模式; 当 $(1 - \Delta) Q_{ref} \leq Q \leq (1 + \Delta) Q_{ref}$, 控制信号 S_A 、 S_B 均为低电平, 通过与非门电路和与门电路使 S_{1a} 、 S_{2b} 、 S_{4a} 、 S_{4b} 导通, 通过与门电路使 S_{2a} 、 S_{2b} 、 S_{3a} 、 S_{3b} 断开, 斩波电路进入到滤波模式; 当 $Q > (1 + \Delta) Q_{ref}$ 时, S_A 为高电平, 通过或门电路使开关管 S_{1a} 、 S_{1b} 恒通, S_B 为低电平, 通过与门电路使 S_{2a} 、 S_{2b} 恒断, 其它开关信号调制后保持原态, 变换器转入 Boost 工作模式。

3 控制策略

与 STATCOM 由网侧电流和直流侧电压来产生无功功率补偿的指令所不同, 改进的 Buck-boost 型交流斩波无功补偿器对有功功率不可调控。传统的开环控制策略不能实现 Buck-boost 型交流斩波无功补偿器对电网系统的无静差补偿, 因此, 需要研究适当的补偿电流产生方式及控制策略^[9]。

为了实现对负载无功功率的实时、跟踪补偿, 本研究针对改进后的 Buck-boost 型交流无功补偿器的工作

特性,提出了的模拟电网、检测和补偿系统如图 4 所示。

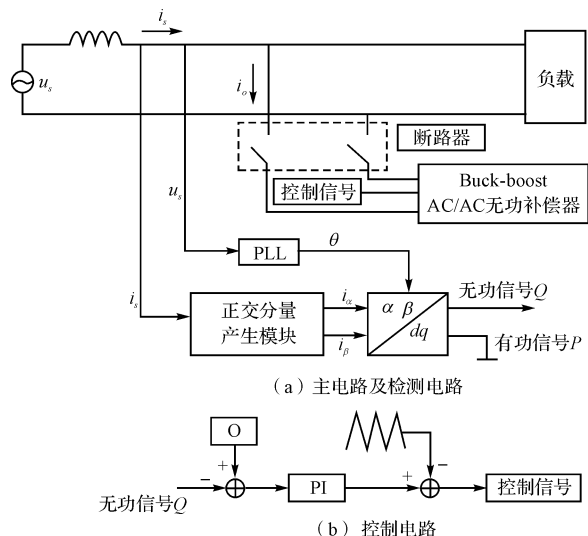


图 4 无功补偿器工作流程图

如图 4 所示,本研究首先采样电网侧电流并对其

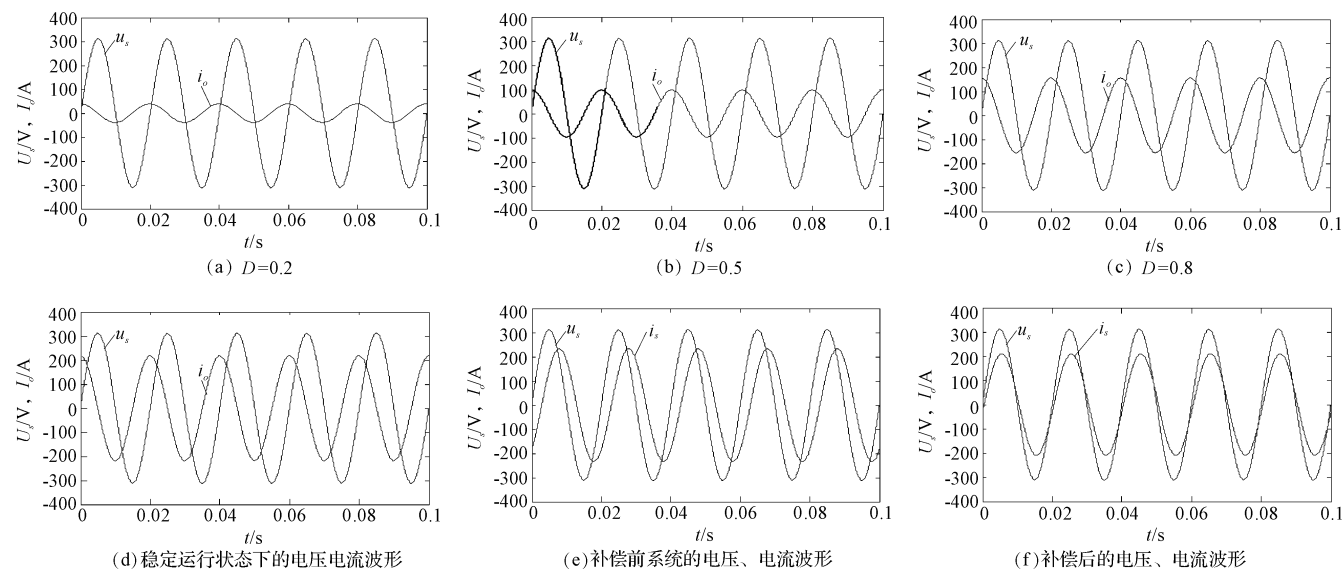


图 5 仿真结果波形图

当无功负载 $Q = 20 \text{ kvar}$ 时,斩波电路在 Buck 工作模式下运行。当占空比分别为 0.2、0.5、0.8 时,电网电压和补偿电流的波形如图 5(a~c) 所示。从仿真结果可以看出,补偿电流是与电网电压同频率并且在相位上超前输出电压的容性电流,当占空比从 0.2 变化到 0.8 时,补偿电流由 27.5 A 增加到 110 A;通过对占空比的控制,可以连续对补偿电流进行调节,最终实现对电网无功功率的实时跟踪补偿。

当无功负载 $Q = 40 \text{ kvar}$ 时,斩波电路在 Boost 工作模式下运行。补偿器稳定运行状态下电网电压和补

进行正交分解,得到 2 个正交的电流分量,再经 dq 变换得到网侧电流的无功分量 Q 和有功分量 P ,将无功分量 Q 与 0 作差,差值经比例-积分(PI)环节后得到输出电流误差放大信号,再经三角波调制后得到交流斩波开关管的高频 PWM 控制信号,最终实现对网侧无功电流的实时控制^[10]。

4 电路仿真和实验结果

为了验证文中理论分析的无功补偿特性以及提出的策略的正确性和有效性,本研究利用 Matlab 的 Simulink 元件库搭建线电压为 220 V/50 Hz 的改进 Buck-boost 型交流斩波无功补偿器仿真模型,该模型主要包括主电路模块、检测模块和控制模块 3 个部分。设无功功率最大允许波动率 $\Delta = 5\%$;无功功率的基准值 $Q_{\text{ref}} = 30.25 \text{ kvar}$;开关频率为 $f_s = 10 \text{ kHz}$;储能电感 $L_f = 10 \text{ H}$;滤波电容 $C_f = 20 \text{ }\mu\text{F}$;补偿电容 $C = 2\,000 \text{ }\mu\text{F}$;无功负载连续可调。

偿电流的波形图如图 5(d) 所示。从仿真结果可以看出,补偿电流是与电网电压同频率并且在相位上超前输出电压的容性电流,可以对电网实现无功功率的补偿。投入无功补偿器前后电网电压和电流的波形图如图 5(e~f) 所示。从仿真结果可以看出,在投入无功补偿器之前,系统的功率因数角 $\alpha = 52^\circ$,功率因数 $\lambda = 0.62$;投入无功补偿器稳定运行以后,系统的功率因数角 $\alpha = 9^\circ$,电网电压和电流在频率和相位上基本同步,功率因数近似为 1,从而验证了控制策略的准确性和可行性以及改进的 Buck-boost 型交流斩波无功补偿器的有效性。

5 结束语

本研究对基于改进的 Buck-boost 型交流斩波无功补偿器的工作原理和拓扑结构的分析,得出了无功补偿电流与占空比之间的关系;采用跟踪 PWM 技术对该补偿器进行控制并利用 Matlab 仿真软件在不同工作模式下进行验证。研究结果表明,基于改进的 Buck-boost 型交流斩波无功补偿器可以完成对电网无功功率的实时跟踪补偿。

改进的 Buck-boost 斩波电路采用了不同的工作模式,克服了其他斩波电路调节范围窄、控制方法繁琐、变化效率低等缺陷,具有潜在的应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 粟时平,刘桂英. 静止无功功率补偿技术[M]. 北京:中国电力出版社,2006.
- [2] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [3] 孙聪,王异凡,陈国柱,等. 基于 Steinmetz 原理与瞬时

无功理论的 SVC 装置防过补偿控制策略[J]. 机电工程, 2013,30(10):1246-1249.

- [4] CHEN Dong, TU Chun-ming, LUO An, et al. Coordinated control design and simulation of joint operation for SVC with STATCOM[J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2008,32(19):76-80.
- [5] 王杰. 临界导电模式下 BOOST 变换器功率因数校正电路设计[J]. 机电工程,2011,28(5):616-619.
- [6] 王晓坤,李玉玲. 基于交错并联 boost 电路的集中式光伏发电系统[J]. 机电工程,2013,30(8):1005-1009.
- [7] KULKARNI D B, UDUPI G R. ANN-based SVC switching at distribution level for minimal-injected Harmonics [J]. **IEEE Trans on Power Delivery**,2010,25(3):1978-1985.
- [8] 丁明昌,张友军,任永保,等. 级联式 Buck-Boost AC/AC 交流变换器的研究[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):46-50.
- [9] 武伟,谢少军,汤鱼,等. 基于 Buck 交-交斩波器的无功补偿器拓扑与控制方法设计[J]. 电力系统自动化, 2013,37(5):124-129.
- [10] 杨君东,李磊. Buck-boost 式三电平单级 AC/AC 变换 [J]. 电工技术学报,2010,25(2):107-113.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

马立新,马天顺. 基于改进 Buck-Boost 斩波电路的无功补偿器设计[J]. 机电工程,2014,31(9):1191-1195.

MA Li-xin, MA Tian-shun. Design for reactive power compensator based on improved Buck-Boost AC/AC chopper[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2014,31(9):1191-1195.

《机电工程》杂志;<http://www.meem.com.cn>

(上接第 1176 页)

问题,提出的在辨识对象中使用加入滤波器的最小二乘算法,用于实现在噪声环境下的正确辨识,该方法得到了实验验证。实验结果表明,此算法可以让高速高精运动控制系统中的控制器实现稳定辨识的效果,并为以后的研究提供了重要参考依据。

参考文献 (References):

- [1] 王高中,王石刚,崔海徽. 运动控制系统中被控对象的模型辨识研究[J]. 计算机仿真,2005,22(4):194-197.
- [2] MEULEN S D, TOUSAIN R, BOSGRA O. Fixed structure feedforward controller tuning exploiting iterative trials, applied to a high-precision electromechanical servo system[C] //American Control Conference. New York, JUL, 2007: 4033-4039.
- [3] DING F, LIU G, LIU XP. Partially coupled stochastic gradient identification methods for nonuniformly sampled systems [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control**, 2010,55(8):1976-1981.
- [4] YAO B, XU L. Adaptive robust motion control of motion for precision manufacturing [J]. **Mechatronics**,2002,12(4): 595-616.

- [5] 李力千,王占林,周福章,等. 闭环运动控制系统中被控对象的模型辨识研究[J]. 制造业自动化,2000,22(1):17-20.
- [6] 故瑞云,周良德,林碧. 粉末颗粒物料高速、高精度自动称料系统的研究[J]. 包装与食品机械,2012(4):29-32.
- [7] 强明辉,张京鹅. 基于 Matlab 的递推最小二乘辨识与仿真[J]. 自动化与仪器仪表,2008,140(6):4-39.
- [8] ZHAO S, TAN K K. Adaptive feedforward compensation of force ripples in linear motors [J]. **Control Engineering Practice**,2005,13(2005):1081-1092.
- [9] TORFS D E, VUERINCKX R, SWEVERS J, et al. Comparison of two feedforward design methods aiming at accurate trajectory tracking of the end point of a flexible robot arm [J]. **IEEE Transactions on Automatic Control Systems Technology**,1998,6(1):2-14.
- [10] 毛文杰,范坚坚,吴建华,等. 交流伺服 PMSM 系统模糊 PI 矢量控制设计[J]. 轻工机械,2013,31(3):43-46.
- [11] 郭庆鼎. 直线交流伺服系统的精密控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- [12] 姜军鹏. 两轴高速直驱伺服进给系统控制策略与实验平台[D]. 天津:天津大学机械工程学院,2012.

[编辑:洪炜娜]