

基于一种新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制

朱喜华, 李颖晖, 张敬

(空军工程大学工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 永磁同步电机无传感器控制中, 需要实现电机转速和位置的估计, 为了克服传统滑模观测器存在的不连续控制而导致的严重抖振问题, 在分析传统滑模观测器原理的基础上, 把 Sigmoid 函数引进了传统滑模观测器, 设计了一种新型的滑模观测器并证明了其稳定性。仿真试验结果表明: 基于 Sigmoid 函数新型的滑模观测器消除了传统滑模观测器存在的严重抖振, 减少了滤波环节和相位补偿环节, 能够实现对 PMSM 的速度和位置的精确估计; 同时基于该方法的永磁同步电机无传感器控制策略是有效的。

关键词: 永磁同步电机; 滑模变结构观测器; Sigmoid 函数; 无传感器控制

Sensorless control of PMSM based on a novel sliding mode observer

ZHU Xi-hua, LI Ying-hui, ZHANG Jing

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: For the sensorless control of permanent magnet synchronous motor (PMSM) drive system, it is necessary to estimate the information of speed and position online. In order to reduce the chattering problem commonly found in the conventional sliding mode observer, based on the analysis of the principle of the conventional sliding mode observer, this paper introduces the sigmoid function into the sliding mode observer and designs a novel sliding mode observer, then proves the stability of the system. The imitational and experimental results show that: the novel sliding observer can reduce the chattering and save the low pass filters and phases compensator, which can estimate exactly the speed and position of the rotor of permanent magnet synchronous motor; at the same time, the sensorless control scheme of PMSM based on the novel observer is valid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Shaanxi Province(No.2006E₁32).

Key words: permanent magnet synchronous motor; sliding mode observer; Sigmoid function; sensorless control

中图分类号: TM301.2 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)13-0006-05

0 引言

永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM) 具有效率高、体积小、响应快和运行可靠性高等优点。在很多驱动领域得到广泛的应用, 如机械工具、工业机器人等场合, 同时许多特殊的场合也得到越来越多的重视, 比如在航空、航天, 和特种机床等。由于永磁同步电机的精确控制需要转子的位置和速度信息, 而位置和速度传感器的安装增加了电机的体积和成本, 还增加了轴承的惯量, 影响了系统的静动态性能, 降低了系统的鲁棒性; 同时由于许多特殊场合的特殊限制, 比如安装空间、可靠性要求高等, 永磁同步电机的应用

受到了一定的限制。因此, 近年来, 永磁同步电机的无传感器控制技术和无速度和无位置传感器技术成为了国内外研究人员的研究的热点^[1,4,7]。其主要的方法包括: (1) 以滑差频率为基础的转速估计方法; (2) 以磁场定向为基础的转速估计方法; (3) 以自适应控制为基础的转速估计方法; (4) 以观测器为基础的转速估计方法。其中以观测器法最为热门, 传统的滑模观测器法就是其中的一种。但是由于传统滑模观测器是先估算电机的反电势, 然后通过反电势和电机转子位置关系来求得电机的位置和速度信息, 由于滑动模态的存在, 系统存在严重的抖振, 同时反电势是通过低通滤波器环节对高频信号进行滤波得到的, 这样就存在相位延迟, 所以需要相位补偿环节, 这样增加了系统的复杂性。本文设计一种新型的滑模观测器, 把 Sigmoid 函数引进

基金项目: 陕西省自然科学基金 (2006E₁32)

滑模观测器来消除滑模存在的抖振, 同时也减少了滤波环节和相位补偿环节。最后通过试验仿真对基于新型滑模观测器的 PMSM 的无传感器控制策略的可行性和有效性进行验证。

1 永磁同步电机数学模型

在不影响控制性能的前提下, 忽略磁路铁心的饱和, 不计磁滞和涡流损耗影响, 假设绕组中感应电势波形为正弦波, 则永磁同步电机在 $\alpha-\beta$ 静止坐标系中的电流方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s/L_d & \omega_e(L_d-L_q) \\ 0 & -R_s/L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L_d} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\text{其中 } \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \left[(L_d-L_q)(\omega_e i_d - i_q) + \omega_e \psi_f \right] \begin{bmatrix} -\sin\theta_e \\ \cos\theta_e \end{bmatrix}。$$

在 $d-q$ 旋转坐标系中的电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + DL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_d & R_s + DL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \psi_f \end{bmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} p \psi_f i_q \quad (3)$$

运动方程为

$$T_e - T_L = \frac{J}{p} \cdot \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中: u_d 、 u_q 为 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴电流; L_d 、 L_q 为 d 、 q 轴电感; R_s 为定子电阻; ω_e 为转子的电角速度; D 为微分算子; ψ_f 为永磁体与定子交链磁链; T_e 为电磁转矩; T_L 为电机负载转矩; p 为电机的极对数; J 为电机的转动惯量。

2 新型滑模观测器的设计

2.1 观测器的设计

根据传统滑模观测器(如图1)设计可知, 传统滑模观测器的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{i}_\alpha &= -\frac{R}{L} i_\alpha - \frac{1}{L} Z_\alpha + \frac{1}{L} u_\alpha \\ \dot{i}_\beta &= -\frac{R}{L} i_\beta - \frac{1}{L} Z_\beta + \frac{1}{L} u_\beta \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} Z_\alpha &= k_{sw} \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ Z_\beta &= k_{sw} \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: k_{sw} 为滑模系数; $\text{sign}(\)$ 为砰-砰控制器。

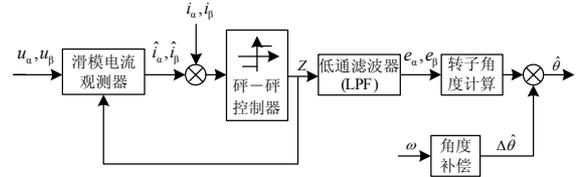


图1 传统滑模观测器结构图

Fig.1 Block diagram of conventional sliding mode observer

当在一些精度要求较高的场合下, 低通滤波器的输出值 e_α 、 e_β 不能满足要求, 不能直接采用, 因为反电动势估算值包含了较大的偏差量和高频抖振信号, 因此需要对观测器进行改型。为了获得更好的观测效果, 本文对 PMSM 系统的滑模观测器进行了改型, 引进了 Sigmoid 函数^[2], 设计一种新型的滑模观测器, 其原理框图如图2所示。其电流观测器模型的方程为

$$\begin{aligned} \dot{i}_\alpha &= -\frac{R}{L} \hat{i}_\alpha + \frac{1}{L} u_\alpha - \frac{1}{L} k_1 H(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \dot{i}_\beta &= -\frac{R}{L} \hat{i}_\beta + \frac{1}{L} u_\beta - \frac{1}{L} k_1 H(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{aligned} \quad (7)$$

式中: k_1 为观测器的增益; H 为 Sigmoid 函数^[5-6], 其作用是用连续控制代替原来的不连续控制, 其函数表达式为

$$\begin{bmatrix} H(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ H(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{1 + e^{-a(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)}} - 1 \\ \frac{2}{1 + e^{-a(\hat{i}_\beta - i_\beta)}} - 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中的 a 是大于零的实数, 可以根据实际情况调节。

定义滑模观测器的滑模面为

$$s_n = \begin{bmatrix} s_\alpha & s_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$s_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha \quad (10)$$

$$s_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$$

当系统到达滑模面时, $s_n = 0$, 即

$$\begin{aligned} \hat{i}_\alpha &= i_\alpha \\ \hat{i}_\beta &= i_\beta \end{aligned} \quad (11)$$

用式 (7) 减去永磁同步电机状态方程得到:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) &= -\frac{R}{L}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) + \frac{1}{L}e_\alpha - \frac{1}{L}k_1 H(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \frac{d}{dt}(\hat{i}_\beta - i_\beta) &= -\frac{R}{L}(\hat{i}_\beta - i_\beta) + \frac{1}{L}e_\beta - \frac{1}{L}k_1 H(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{aligned} \quad (12)$$

将滑模条件代入得:

$$\begin{aligned} e_\alpha &= k_1 H(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ e_\beta &= k_1 H(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{aligned} \quad (13)$$

得到反电势后, 就可以根据电机的反电势计算电机的转子转速和位置, 与传统滑模观测器一样, 电机转速和位置可以由式 (14)、(15) 得到。

$$\hat{\theta}_e = -\tan^{-1}\left(\frac{e_\alpha}{e_\beta}\right) \quad (14)$$

$$\hat{\omega}_e = \frac{d\hat{\theta}_e}{dt} \quad (15)$$

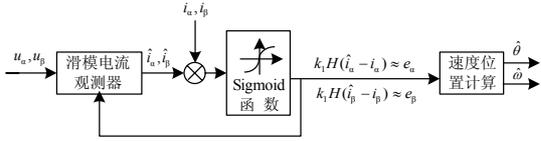


图 2 新型滑模观测器结构图

Fig.2 Block diagram of improved sliding mode observer

2.2 滑模存在和稳定性证明

要使滑模存在且稳定, 系统满足 Lyapunov 稳定性定理, 则要使得: ①当 $t \rightarrow \infty$ 时, $s_n \rightarrow 0$; ②系统满足 $\dot{s}_n s_n < 0$ 。根据 Lyapunov 稳定性定理^[3], 选择

$$V = \frac{1}{2} s_n^T s_n = \frac{1}{2} (s_\alpha^2 + s_\beta^2) \quad (16)$$

因为

$$\dot{s}_\alpha = \dot{\hat{i}}_\alpha - \dot{i}_\alpha = -\frac{R}{L}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) + \frac{1}{L}e_\alpha - \frac{1}{L}k_1 H(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \quad (17)$$

$$\dot{s}_\beta = \dot{\hat{i}}_\beta - \dot{i}_\beta = -\frac{R}{L}(\hat{i}_\beta - i_\beta) + \frac{1}{L}e_\beta - \frac{1}{L}k_1 H(\hat{i}_\beta - i_\beta)$$

而要使得

$$\begin{aligned} s_n^T \dot{s}_n &= -\frac{R}{L} \left[(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)^2 + (\hat{i}_\beta - i_\beta)^2 \right] + \\ &\frac{1}{L} \left[e_\alpha (\hat{i}_\alpha - i_\alpha) - k_1 (\hat{i}_\alpha - i_\alpha) H(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \right] + \\ &\frac{1}{L} \left[e_\beta (\hat{i}_\beta - i_\beta) - k_1 (\hat{i}_\beta - i_\beta) H(\hat{i}_\beta - i_\beta) \right] < 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\text{故得出: } k_1 \geq \max(|e_\alpha|, |e_\beta|) \quad (19)$$

所以, 只要 k_1 足够大就可以保证滑模存在, 系统能够到达滑模面, 且系统能够渐进稳定。

3 仿真试验

为了验证所提出的基于新型滑模观测器的 PMSM 无传感器控制策略的可行性和有效性, 选用一台永磁同步电机, 电机参数如表 1 所示, 利用 Matlab/Simulink 设计仿真框图对其进行仿真试验, 仿真框图如图 3 所示。系统采用永磁同步电机矢量控制, 其中 $i_{dref} = 0$, 速度环和电流环均采用 PI 控制, 观测器分别采用传统滑模观测器和新型滑模观测器, 对其仿真结果进行比较分析。电机给定转速为 $200 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$ 。转子的初始位置为 $\theta_0 = 1.5 \text{ pi}$, 仿真结果如下所示, 从图 4 中可以看出两种观测器估计的电机的反电势, 其中图 4(a) 是传统滑模观测器的, 比较可以看出其存在的抖振比较严重, 存在的高频信号较多, 图中较前的曲线为 u_α 电压曲线, 较后的曲线为 u_β 电压曲线; 图 5 为观测器估计的电机转子位置曲线 (其中虚线代表转子的实际位置, 实线代表估计的转子位置), 可以看出, 两种观测器在电机的起动初期, 估计的转子位置都不精确, 这是这两种观测器的共同缺点, 需要加以研究改进。图 6 中的曲线为永磁同步电机在矢量控制下 PMSM 的转速曲线。图 7 为新型的滑模观测器估计的转子位置 and 实际转子位置的误差曲线, 可以看出, 误差比较小。从以上仿真结果可以判断基于新型滑模观测器的无传感控制策略是可行的, 也是有效的。

表 1 仿真试验用电机参数

Tab.1 Parameters of motor system	
PMSM 参数	参数值
定子绕组电阻 R_s	0.975 Ω
定子绕组互感 L	0.006 H
极对数 P	4
转动惯量 J	0.0015 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$
反电势常数 K_E	0.215 $\text{V} \cdot \text{s}$
粘滞摩擦系数 f	0.0037 $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$

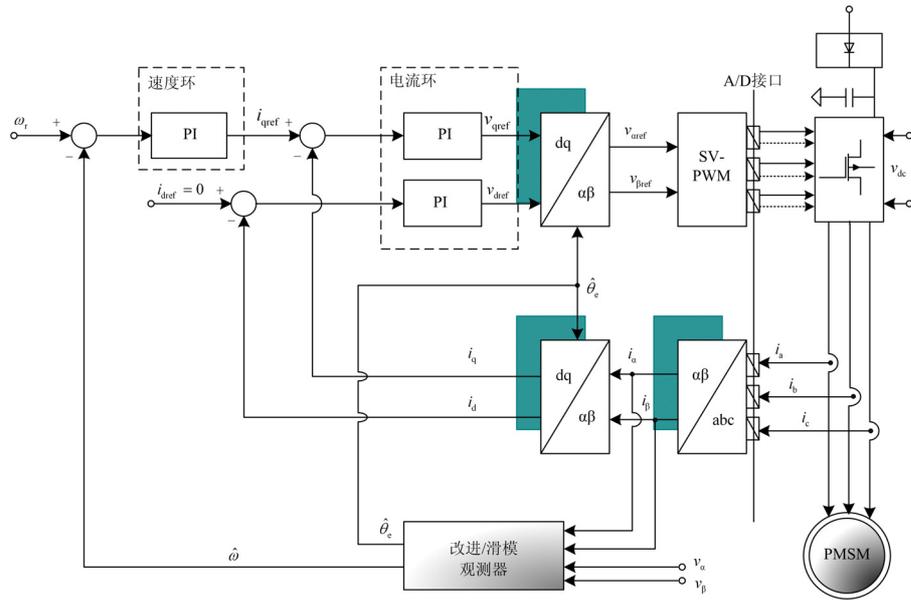


图 3 PMSM 无传感器控制仿真系统框图

Fig.3 Block diagram of imitation system of sensorless control PMSM

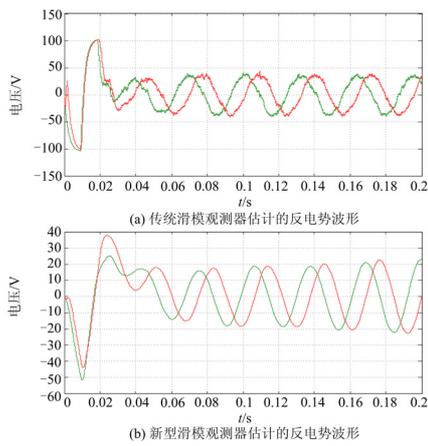


图 4 估计的反电势波形

Fig.4 Estimated EMF wave

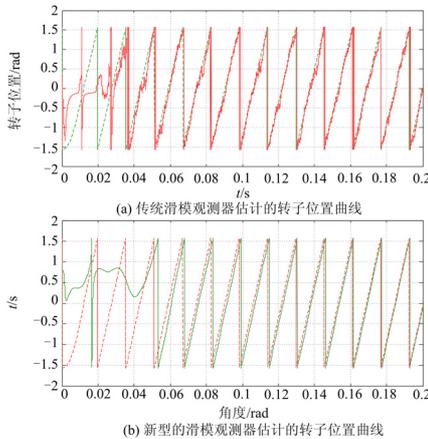


图 5 永磁同步电机转子位置曲线

Fig.5 Rotor position curve of PMSM

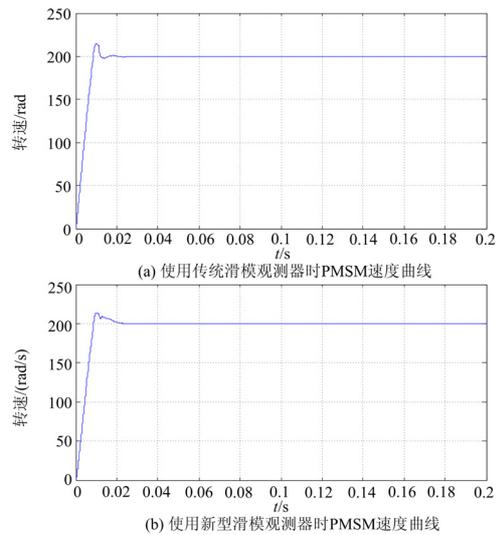


图 6 PMSM 速度曲线

Fig.6 Speed curve of PMSM

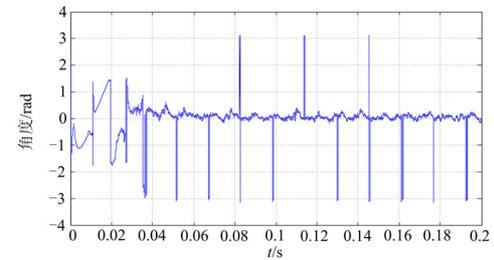


图 7 新型滑模观测器估计的转子位置误差曲线

Fig.7 Curve of estimated error of rotor position using improved sliding mode observer

4 结论

本文在分析了传统滑模观测器的基础上,把 Sigmoid 函数引进滑模观测器,设计了一种新型的滑模观测器及基于该观测器的 PMSM 无传感器控制策略。仿真试验结果表明:新型的滑模观测器克服了传统滑模观测器存在的抖振问题,且减少了滤波环节和相位补偿环节,简化了传统滑模观测器,实现了对 PMSM 的位置和速度的较高精度的估计;结果表明基于该方法的 PMSM 无传感器控制策略是可行有效的。

参考文献

- [1] 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 基于变结构模型参考自适应系统永磁同步电机转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2008, 29(9): 71-75.
WANG Qing-long, ZHANG Chong-wei, ZHANG Xing. Variable-structure MRAS speed identification for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 29(9): 71-75.
- [2] Kittitthuch Paponpen, Mongkol Konghirun. Speed sensorless control of PMSM using an improved sliding mode observer with sigmoid function[J]. ECTI transactions on electrical ENG, 2007, 5(1): 51-55.
- [3] Elbuluk M, Li Chang-sheng. Sliding mode observer for wide-speed sensorless control of PMSM drive[C].//IAS Annual Meeting Conf. 2003: 480-485.
- [4] 李君, 刘毓洲. 无速度传感器永磁同步电机的 SVM-DTC 控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(3): 28-34.
LI Jun, LIU Yu-zhou. Speed sensorless SVM-DTC for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 28-34.
- [5] 李曦. 神经网络信息传输函数 Sigmoid 与 tanh 比较论证[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2004, 28(4): 312-315.
LI Xi. A comparison between information transfer function Sigmoid and tanh on neural[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2004, 28(4): 312-315.
- [6] 武妍, 王守觉. 一种新的快速收敛的反向传播算法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2004, 32(8): 1092-1095.
WU Yan, WANG Shou-jue. Novel quick convergence back-propagation algorithm[J]. Journal of Tongji university: Natural Science, 2004, 32(8): 1092-1095.
- [7] Fatumlasc C, Andkllscl G D, et al. Voltage sags ride-through of motion sensorless controlled PMSG for wind turbines[C].// Record of the 42nd IEEE, Industry Applications Conference. New Orleans(LA, USA): 2007: 171-178.
-
- 收稿日期: 2009-08-26; 修回日期: 2009-12-18
- 作者简介:
朱喜华(1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为现代控制理论及应用; E-mail: zhuxihua929@sina.com
李颖晖(1966-), 女, 博士生导师, 教授, 主要研究方向为先进控制理论及其航空电气系统的应用;
张敬(1982-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电能处理与监控。
-
- (上接第 5 页 continued from page 5)
- [13] 王海欢, 邹斌. 合同和电力拍卖市场购电量分配问题的研究[J]. 继电器, 2008, 36(5): 40-44.
WANG Hai-huan, ZOU Bin. Electricity purchasing allocation research between the contract and power auction markets[J]. Relay, 2008, 36(5): 40-44.
- [14] 发改价格[2005]2254号文件: 国家发展改革委关于继续实行差别电价政策有关问题的通知[EB/OL]. [2005-11-01].
http://www.ndrc.gov.cn/jggl/zcfg/t20051107_48470.htm.
- [15] 国办发[2006]77号文件: 国务院办公厅转发发展改革委关于完善差别电价政策意见的通知[EB/OL]. [2006-09-01].
http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/20060911_132460.Htm.
- [16] 发改价格[2007]2655号文件: 关于进一步贯彻落实差别电价政策有关问题的通知[EB/OL]. [2007-09-30].
http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/2007tongzhi/t20071010_163967.htm.
- [17] 曼昆. 经济学原理: 微观经济学分册[M]. 北京: 北京大学出版社, 2006.
MAN Kun. Economics: microeconomics volumes[M]. Beijing: Beijing University Press, 2006.
- [18] 蒋殿春. 高级微观经济学[M]. 北京: 经济管理出版社, 2000.
JIANG Dian-chun. Senior microeconomics[M]. Beijing: Economic Management Press, 2000.
-
- 收稿日期: 2009-08-27
- 作者简介:
王雁凌(1970-), 女, 副教授, 主要从事电力经济分析、电力市场运营理论与技术的研究; E-mail: wangyanling@ncepu.edu.cn
孙健(1982-), 男, 硕士, 主要从事电力安全可靠性的管理与理论研究;
李艳君(1986-), 女, 硕士研究生, 主要研究课题为电力系统经济管理。