

虚拟 γ - δ 旋转坐标系下考虑定子电阻摄动的 永磁同步电机新型定子磁链观测器

魏海峰[†], 韦汉培, 张 懿, 戴 阳

(江苏科技大学 电子信息学院, 江苏 镇江 212003)

摘 要: 针对永磁同步电机定子磁链观测受定子电阻变化影响的问题, 提出一种 γ - δ 旋转坐标系下的永磁同步电机新型定子磁链观测器. 采用虚拟 γ - δ 旋转坐标系代替传统 α - β 静止坐标系, 通过 Lyapunov 稳定性判据进行定子电阻动态辨识, 在此基础上构建一种新型定子磁链观测器. 实验结果表明, 新型定子磁链观测器对定子电阻参数摄动和负载干扰具有较强的鲁棒性, 实现了定子磁链的在线准确观测.

关键词: 永磁同步电机; γ - δ 旋转坐标系; 定子磁链观测器; 定子电阻动态辨识

中图分类号: TP273

文献标志码: A

New stator flux observer of permanent magnet synchronous motor considering stator resistance perturbation under virtual γ - δ rotating coordinate system

WEI Hai-feng[†], WEI Han-pei, ZHANG Yi, DAI Yang

(College of Electronics Information, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China)

Abstract: Since stator flux observation of permanent magnet synchronous motor(PMSM) is affected by resistance variation, a new stator flux observer of PMSM under the γ - δ rotating coordinate system is proposed. The virtual γ - δ rotating coordinate system is adopted to replace the traditional α - β stationary coordinate system to do stator resistance dynamic identification by Lyapunov stability criterion. On the basis of this, a new stator flux observer is constructed. Experiment results show that the proposed stator flux observer is robust to resistance parameter perturbation and load disturbance, and the on-line accurate observation of stator flux is realized.

Keywords: PMSM; γ - δ rotating coordinate system; stator flux observer; stator resistance dynamic identification

0 引 言

定子磁链观测效果直接影响着永磁同步电机的控制性能. 传统电压型定子磁链观测器通过对反电势直接积分计算定子磁链, 这种算法计算简单、响应快, 仅依赖电机定子电阻唯一参数. 然而, 电机运行过程中定子电阻的摄动不可避免, 定子磁链实时准确观测必须对此充分考虑.

定子电阻在线辨识, 包括最小二乘法^[1]、卡尔曼滤波法^[2]以及人工智能方法^[3]等. 文献[4]提出一种内置式永磁同步电机自适应反步控制方法, 该方法能够根据自适应参数估计器实时估计出负载转矩和定子电阻. 文献[5]针对永磁同步电机多参数辨识问题, 提出一种基于免疫协同微粒群进化算法的电机多参

数辨识方法. 文献[6]针对3台异步电机和3台逆变器组成的三电机同步系统, 提出了局部模型网络磁链辨识方法. 文献[7]提出了一种双模态自适应小波粒子群的永磁同步电机多参数识别与温度检测方法. 文献[8]设计了一种基于非线性坐标变化后能观测规范型的高增益观测器, 利用微分几何理论分析了转子磁链定向系内非线性局部弱能观性及全局能观性. 文献[9]针对电机系统运行过程中电机参数变化问题, 采用粒子群优化算法在线调节子模型权值, 以改善逆模型失配造成解耦控制性能下降的问题. 文献[10-11]提出一种重置自适应转速观测器对转子磁链进行观测, 并可同时观测得到电机转速.

本文采用 γ - δ 虚拟旋转坐标系代替传统 α - β 静

收稿日期: 2016-08-26; 修回日期: 2016-12-01.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61503161); 江苏省产学研前瞻性联合研究项目(BY2016073-01).

作者简介: 魏海峰(1981-), 男, 副教授, 博士, 从事电机驱动控制、复杂控制系统等研究; 韦汉培(1992-), 男, 硕士生, 从事永磁同步电机控制技术的研究.

[†]通讯作者. E-mail: whf21@126.com

止坐标系,通过电流动态误差构造Lyapunov函数.采用Lyapunov稳定性判据获得定子电阻辨识误差方程,完成定子电阻动态辨识,构建新型定子磁链观测器.实验结果表明,新型定子磁链观测器系统对电机内部定子电阻参数摄动和外部负载干扰具有较强的鲁棒性.

本文采用 γ - δ 虚拟旋转坐标系代替传统 α - β 静止坐标系,通过电流动态误差构造Lyapunov函数.采用Lyapunov稳定性判据获得定子电阻辨识误差方程,完成定子电阻动态辨识,构建新型定子磁链观测器.实验结果表明,新型定子磁链观测器系统对电机内部定子电阻参数摄动和外部负载干扰具有较强的鲁棒性.

1 旋转坐标系下的新型观测器

转子磁场定向 d - q 坐标系中,永磁同步电机电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q, \\ u_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d. \end{cases} \quad (1)$$

其中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为定子电压矢量和电流矢量在 d - q 轴上的分量, R 为定子电阻, ω_e 为电角速度, ψ_d 、 ψ_q 为磁链在 d - q 轴上的分量.

根据式(1),改写永磁同步电机在 d - q 轴坐标系下的数学模型为

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & \omega_e L_q \\ -\omega_e L_d & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \omega_e \psi_f \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

d - q 轴到 γ - δ 轴的坐标变换为

$$\begin{bmatrix} \psi_\gamma \\ \psi_\delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_d \cos \bar{\theta} - \psi_q \sin \bar{\theta} \\ \psi_d \sin \bar{\theta} + \psi_q \cos \bar{\theta} \end{bmatrix} = T(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中 $\bar{\theta} = \theta - \hat{\theta}$.对式(3)求导得

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_\gamma \\ \dot{\psi}_\delta \end{bmatrix} = \dot{T}(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + T(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \end{bmatrix}, \quad (4)$$

即

$$T(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi}_\gamma \\ \dot{\psi}_\delta \end{bmatrix} - \dot{T}(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\dot{T}(\bar{\theta}) = \dot{\bar{\theta}} \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \bar{\theta} & -\sin \bar{\theta} \\ \sin \bar{\theta} & \cos \bar{\theta} \end{bmatrix} = \dot{\bar{\theta}} ET(\bar{\theta}). \quad (6)$$

其中: $T(\bar{\theta}) = \begin{bmatrix} \cos \bar{\theta} & -\sin \bar{\theta} \\ \sin \bar{\theta} & \cos \bar{\theta} \end{bmatrix}$ 为变换矩阵,用于矢量

从 d - q 坐标系向 γ - δ 坐标系变换; $E = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$; ψ_γ 和

ψ_δ 为定子磁链在 γ - δ 旋转轴上的分量.式(2)两端同乘 $T(\bar{\theta})$,得

$$T(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \dot{\psi}_d \\ \dot{\psi}_q \end{bmatrix} = -RT(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + T(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \omega_e ET(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}. \quad (7)$$

式(5)与(7)等式右边相等,求解得出

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}_\gamma \\ \dot{\psi}_\delta \end{bmatrix} = -RT(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \dot{\bar{\theta}} ET(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + T(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} - \omega_e ET(\bar{\theta}) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式(8)重写为

$$\begin{cases} \dot{\psi}_\gamma = -Ri_\gamma + u_\gamma + (\omega_e - \dot{\bar{\theta}})\psi_\delta, \\ \dot{\psi}_\delta = -Ri_\delta + u_\delta - (\omega_e - \dot{\bar{\theta}})\psi_\gamma. \end{cases} \quad (9)$$

式(9)为永磁同步电机在 γ - δ 虚拟旋转坐标系下的定子磁链模型.

γ - δ 旋转坐标系下的磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_\gamma = L_d i_\gamma + \psi_{f\gamma}, \\ \psi_\delta = L_q i_\delta + \psi_{f\delta}. \end{cases} \quad (10)$$

其中: $\psi_{f\gamma}$ 、 $\psi_{f\delta}$ 为 γ - δ 坐标系下的偏磁通量,用于获取转子位置误差

$$\begin{cases} \psi_{f\gamma} = [\psi_f + (L_d - L_q)i_d] \cos \bar{\theta}, \\ \psi_{f\delta} = [\psi_f + (L_d - L_q)i_d] \sin \bar{\theta}. \end{cases} \quad (11)$$

定义滑模相平面为 $S_\gamma = L_d(i_\gamma - \hat{i}_\gamma) = L_d \bar{i}_\gamma$,

$S_\delta = L_q(i_\delta - \hat{i}_\delta) = L_q \bar{i}_\delta$,定子磁链状态观测器为

$$\begin{cases} \dot{\hat{\psi}}_\gamma = -\hat{R}\hat{i}_\gamma + u_\gamma + (\omega_e - \dot{\bar{\theta}})\hat{\psi}_\delta + K_\gamma \text{sgn}(L_d \bar{i}_\gamma), \\ \dot{\hat{\psi}}_\delta = -\hat{R}\hat{i}_\delta + u_\delta - (\omega_e - \dot{\bar{\theta}})\hat{\psi}_\gamma + K_\delta \text{sgn}(L_q \bar{i}_\delta), \end{cases} \quad (12)$$

其中 K_γ 和 K_δ 为可变滑模增益.

通过定子电流动态误差,构造李雅普诺夫函数

$$V = \frac{1}{2} [(L_d \bar{i}_\gamma)^2 + (L_q \bar{i}_\delta)^2 + \frac{1}{\gamma} \bar{R}^2]. \quad (13)$$

对其求导,得到

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \frac{1}{\gamma} \bar{R} [\dot{\bar{R}} - \gamma_\gamma (i_\gamma L_d \bar{i}_\gamma + i_\delta L_q \bar{i}_\delta)] - \dot{\hat{\psi}}_{f\gamma} L_d \bar{i}_\gamma + \\ & (\omega_e - \dot{\bar{\theta}}) \bar{\psi}_{f\delta} L_d \bar{i}_\gamma - K_\gamma |L_d \bar{i}_\gamma| - \dot{\hat{\psi}}_{f\delta} L_q \bar{i}_\delta - \\ & (\omega_e - \dot{\bar{\theta}}) \bar{\psi}_{f\gamma} L_q \bar{i}_\delta - K_\delta |L_q \bar{i}_\delta|. \end{aligned} \quad (14)$$

根据李雅普诺夫稳定性理论,设置参数满足

$$\begin{cases} K_\gamma > |-\dot{\hat{\psi}}_{f\gamma} + (\omega_e - \dot{\bar{\theta}}) \bar{\psi}_{f\delta}|, \\ K_\delta > |-\dot{\hat{\psi}}_{f\delta} + (\omega_e - \dot{\bar{\theta}}) \bar{\psi}_{f\gamma}|. \end{cases} \quad (15)$$

滑模系统稳定时,状态变量将在滑模面上进行滑

模运动. 此时利用两相电流动态调节过程求解电阻观测误差变化速率为

$$\dot{\bar{R}} = \gamma_\gamma (i_\gamma L_d \bar{i}_\gamma + i_\delta L_q \bar{i}_\delta). \quad (16)$$

其中: $\bar{R} = \hat{R} - R$, \hat{R} 为定子电阻辨识值, R 为定子电阻实际值, \bar{R} 为定子电阻辨识误差.

$$\bar{\dot{R}} = K_{\bar{R}} \int (\gamma_\gamma (i_\gamma L_d \bar{i}_\gamma + i_\delta L_q \bar{i}_\delta)) dt, \quad (17)$$

相应地, 定子电阻辨识值为

$$\begin{aligned} \hat{R} &= \hat{R}_{\text{initial}} + K_{\bar{R}} \int \bar{R} dt = \\ &\hat{R}_{\text{initial}} + K_{\bar{R}} \int \left(K_{\bar{R}} \int (\gamma_\gamma (i_\gamma L_d \bar{i}_\gamma + i_\delta L_q \bar{i}_\delta)) dt \right) dt. \end{aligned} \quad (18)$$

其中: $K_{\bar{R}}$ 为定子电阻辨识误差比例系数, $K_{\hat{R}}$ 为定子电阻辨识比例系数, \hat{R}_{initial} 为定子电阻辨识初始给定值.

2 实验结果及分析

在永磁同步电机交流调速平台上, 对本文提出的观测器进行实验研究. 实验电机参数为: 额定功率 $P_N = 1.5 \text{ kW}$, 额定电压 $U_N = 310 \text{ V}$, 极对数 $P = 4$, 定子电阻 $R = 1.2 \Omega$, 输出额定转矩 $T_N = 7.2 \text{ N}\cdot\text{m}$. 实验过程中, 选择不同负载运行与负载转矩突变2种典型工况进行实验研究, 2.5 s时刻投入使用观测器.

1) 设置电机分别在10%、50%、100%额定负载转矩3种工况下稳定运行. 图1、图2分别为电机在3

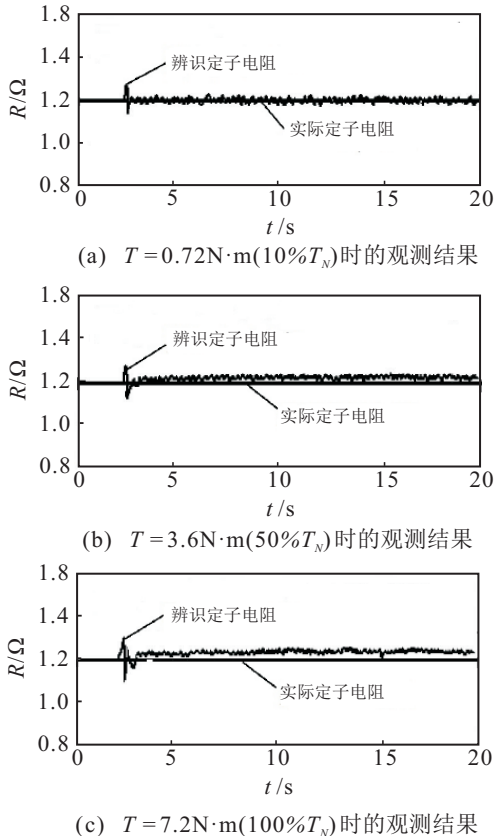


图1 不同负载工况下定子电阻辨识

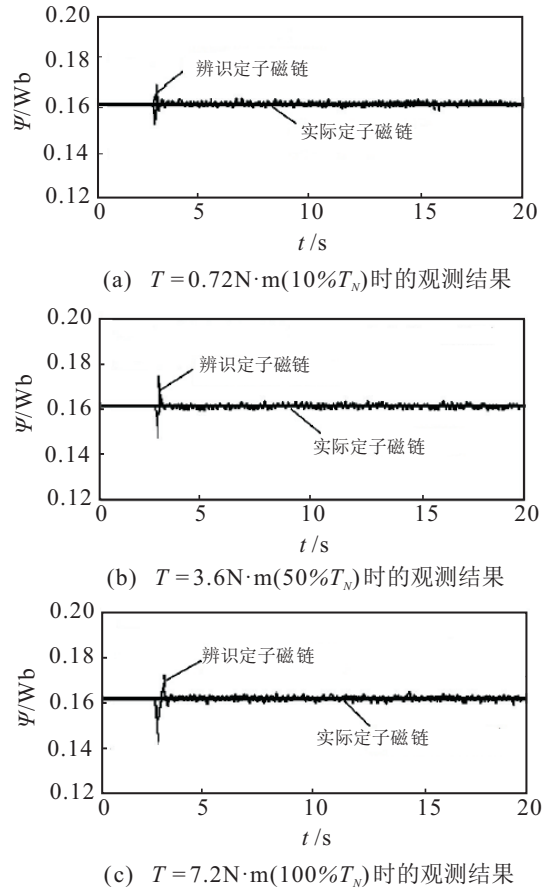


图2 不同负载工况下定子磁链观测

种不同负载工况下的定子电阻动态辨识和定子磁链观测结果. 实验结果显示, 不同负载工况下, 定子电阻辨识和磁链观测数值均可由初始的短暂震荡快速收敛至实际值.

2) 电机运行中考虑负载转矩的突变. 电机初始负载转矩为 $3.6 \text{ N}\cdot\text{m}$, 10 s时刻阶跃突变为 $7.2 \text{ N}\cdot\text{m}$. 如图3所示, 电机变负载运行对定子电阻和磁链观测值影响较小, 可快速收敛至实际值.

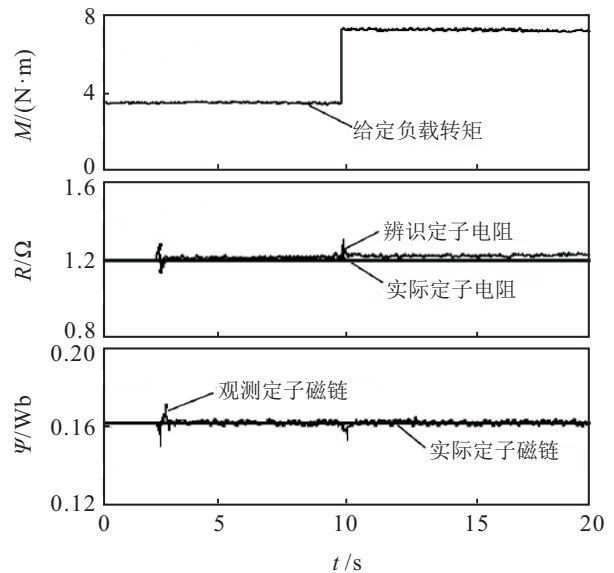


图3 负载突变工况下的定子电阻、磁链观测

3) 为考察辨识算法的动态特性,使电机运行于从轻载到满载之间的10组负载工况,将每组工况下的定子电阻参数辨识结果绘成曲线,如图4所示.为使定子电阻有明显温升,电阻值有明显变化,电机在每组负载工况下运行10 min后记录.可以看出,定子电阻辨识值随负载不断增大缓慢上升,实验结果符合实际特征.

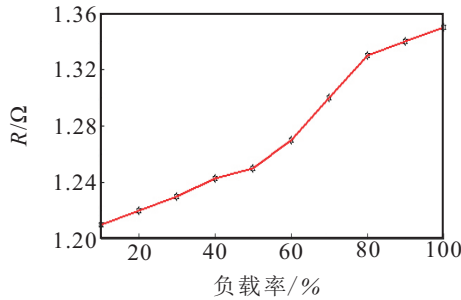


图4 变负载工况下的定子电阻辨识

3 结论

1) 本文提出了一种旋转坐标系下的永磁同步电机新型定子磁链观测器.采用Lyapunov稳定性判据获得定子电阻辨识误差方程,完成定子电阻动态辨识,构建了一种新型定子磁链观测器.

2) 以一台1.5 kW永磁同步电机为实验对象,实验结果表明,新型定子磁链观测器可准确、快速地辨识定子电阻,补偿定子电阻摄动对磁链观测的影响,对电机定子电阻参数摄动和外部负载干扰具有较强的鲁棒性,实现了定子磁链的在线准确观测.

参考文献(References)

- [1] Wang Kaiyu, Chiasson J, Boddon M, et al. A nonlinear least-squares approach for identification of the induction motor parameters[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2013, 50(10): 1622-1628.
- [2] Barut M, Bogosyan S, Gokasan M. Experimental evaluation of braided EKF for sensorless control of induction motors[J]. IEEE Trans on Industry Electronics, 2013, 55(2): 620-632.
- [3] Abdelhadi B, Benoudjit A, Nait-Said N. Application of genetic algorithm with a novel adaptive scheme for the identification of induction machine parameters[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2012, 20(2): 284-291.
- [4] 张兴华, 唐其太. 考虑参数和负载不确定性的内置式永磁同步电机自适应反步控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1509-1512.
(Zhang X H, Tang Q T. Adaptive backstepping control of interior permanent magnet synchronous motors considering parameter and load uncertainties[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1509-1512.)
- [5] 刘朝华, 张兢, 李小花, 等. 免疫协同微粒群进化算法的永磁同步电机多参数辨识模型方法[J]. 自动化学报, 2012, 38(10): 1698-1708.
(Liu Z H, Zhang J, Li X H, et al. Immune co-evolution particle swarm optimization for permanent magnet synchronous motor parameter identification[J]. Acta Automatica Sinica, 2012, 38(10): 1698-1708.)
- [6] 张令朝, 刘国海, 潘天红, 等. 基于新型转子磁链辨识方法的多电机系统同步控制[J]. 控制与决策, 2010, 25(12): 1804-1809.
(Zhang L Z, Liu G H, Pan T H, et al. Decoupling control of multi-motor synchronous based on new rotor flux observer[J]. Control and Decision, 2010, 25(12): 1804-1809.)
- [7] 刘朝华, 周少武, 刘侃, 等. 基于双模态自适应小波粒子群的永磁同步电机多参数识别与温度检测方法[J]. 自动化学报, 2013, 39(12): 2121-2130.
(Liu Z H, Zhou S W, Liu K, et al. Permanent magnet synchronous motor multiple parameter identification and temperature monitoring based on binary-model adaptive wavelet particle swarm optimization[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(12): 2121-2130.)
- [8] 祝晓辉, 李颖晖, 孙国强. 永磁同步电机非线性观测器设计及内核验证[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(12): 1594-1602.
(Zhu X H, Li Y H, Sun G Q. Nonlinear observer design for permanent magnet synchronous motor and verification of the algorithm kernel[J]. Control Theory & Applications, 2012, 29(12): 1594-1602.)
- [9] 梅从立, 殷开婷, 黄文涛, 等. 基于数据驱动的感应电机多模型逆自适应解耦控制[J]. 控制与决策, 2016, 31(6): 1037-1041.
(Mei C L, Yin K T, Huang W T, et al. Data-driven adaptive decoupling control of induction motors using multi-model inversion[J]. Control and Decision, 2016, 31(6): 1037-1041.)
- [10] 潘月斗, 郭映维, 贺靓. 基于重置算法的感应电机转速自适应观测器[J]. 控制与决策, 2015, 30(9): 1723-1728.
(Pan Y D, Guo Y W, He J. Rotor flux and speed adaptive observer for induction motor based on a reset law[J]. Control and Decision, 2015, 30(9): 1723-1728.)
- [11] 潘月斗, 陈虎. 基于高增益观测技术的高精度感应电机磁链观测研究[J]. 控制与决策, 2014, 29(8): 1495-1500.
(Pan Y D, Chen H. Research on high gain technique based on-line fluxes estimation for IMs[J]. Control and Decision, 2014, 29(8): 1495-1500.)

(责任编辑: 孙艺红)