

基于特征模型的电梯用永磁同步电机 抗扰动自适应控制*

沈宏丽, 郭健, 樊卫华, 吴益飞
(南京理工大学自动化学院, 江苏南京 210094)

摘要: 针对电梯用永磁同步电机(PMSM)建模的复杂性及高性能控制的需求,设计了基于特征模型的抗扰动自适应控制算法。在采用 $i_d=0$ 的矢量控制下建立系统的二阶特征模型,设计了速度环相应的积分黄金分割自适应控制。针对电梯运行时的负载扰动,设计了一种转矩观测器,将转矩观测测量补偿到电流环输出中。仿真结果表明,基于特征模型的抗扰动自适应控制具有良好的稳态精度及鲁棒性;进一步结合电梯速度曲线的仿真研究,验证了其用于电梯 PMSM 调速系统的可行性。

关键词: 电梯; 永磁同步电机; 特征模型; 黄金分割自适应控制; 转矩观测器

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)02-0001-06

Anti-Disturbance Adaptive Control of Elevator PMSM Based on Characteristic Model*

SHEN Hongli, GUO Jian, FAN Weihua, WU Yifei

(College of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Considering the model complexity of elevator permanent magnet synchronous motor (PMSM), a characteristic model-based anti-disturbance adaptive control was adopted to achieve high precision control needs. A characteristic model was established by used the $i_d=0$ vector control. Based on the characteristic model, a golden-section adaptive control was applied to the speed loop. A torque observer was designed to add torque quantity into the current loop for compensation. Simulation results showed that the characteristic model-based anti-disturbance adaptive control had good steady-state accuracy and robustness. Combined with the elevator speed curve, the simulation results verified that the control algorithm applied to the elevator with PMSM control system was feasible.

Key words: elevator; permanent magnet synchronous motor (PMSM); characteristic model; golden-section adaptive control; torque observer

0 引言

随着电梯行业的快速发展,人们对电梯的高速性、稳定性及节能性提出了更高的要求。永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)作为电梯中主要的驱动设备,其快速、平稳控制是研究的重点^[1-2]。

在电梯曳引调速系统中,制动和运行产生较大的摩擦力所造成的非线性,以及 PMSM 本身强

耦合、非线性的特性,传统的 PI 控制难以满足实际要求^[3]。目前,一些先进的非线性控制方法如模糊控制^[4]、神经网络^[5]、滑模变结构^[6-7]等自适应控制也逐渐被应用到电机的控制系统中,但这些控制算法由于其复杂性,还处在理论阶段。吴宏鑫院士提出的特征模型^[8],可以将复杂的高阶系统等价出低阶的时变差分方程,通过在线辨识特征量建立准确的控制模型,在此基础上进行控制,使控制设计简单、易于工程实现。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(61673219);江苏省科技成果转化专项资金项目(BA2015147)

作者简介: 沈宏丽(1992—),女,硕士研究生,研究方向为电机控制、自适应控制。

电梯在起动时,突加的负载会导致电梯溜车,同时在运行时,乘客数量的变化以及风阻等各种未知扰动会使负载转矩出现波动,影响电梯的稳定性^[9]。由于直接测量负载转矩成本较高,所以一些转矩观测的方法如降阶负载观测器^[10]、滑模控制^[11-12]等被应用到电机调速系统控制中。

本文以电梯用 PMSM 调速系统为研究对象,分析电梯特性建立系统动力学模型,在 $i_d=0$ 的矢量控制下,建立以速度为输出、控制电机转速的交轴电流 i_q 为输入的曳引机二阶特征模型。在此基础上采用加积分的黄金分割控制。电流环采用 PID 控制输出电压,同时针对电梯负载扰动及起动大惯量,采用一种改进的降阶负载观测,将观测到的控制量加入到输出电压中,提高转矩扰动的收敛速度。通过建模仿真验证基于特征模型的抗负载自适应控制应用于电梯用 PMSM 调速系统的有效性和可行性。

1 电梯用 PMSM 数学模型

电梯用 PMSM 在 d, q 坐标系下的定子电流方程和运动方程如下:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R}{L}i_d + pwi_q + \frac{1}{L}u_d \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - pwi_d - \frac{p\psi_f}{J}w - \frac{1}{L}u_q \\ J\frac{dw}{dt} + Bw = T_e - \tau_L \\ T_e = \frac{3p\psi_f}{2}i_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_d, i_q, u_d, u_q ——曳引机 d, q 轴上的定子电流和电压;

- w ——曳引机转子机械角速度;
- R, L, ψ_f ——定子电阻、电感和永磁磁链;
- p ——极对数;
- B ——曳引机的粘滞摩擦因数;
- J ——调速系统等效在曳引轮上的转动惯量;
- τ_L ——等效在曳引轮上的负载转矩。

电梯曳引机承受的负载如式(2)所示。因此有必要对负载进行观测估计。

$$\tau_L = \begin{cases} 0 & T_f > T_1 \\ T_1 - T_f & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_f ——电梯制动曳引轮的摩擦力矩;

T_1 ——驱动曳引轮的摩擦力矩。

2 电梯用 PMSM 特征模型

电梯调速系统中曳引机的控制采用 $i_d=0$ 的矢量控制,实现 PMSM 定子电流的解耦,此时 PMSM 的数学模型近似为

$$\begin{cases} \frac{di_q}{dt} = -\frac{R}{L}i_q - pwi_d - \frac{p\psi_f}{J}w - \frac{1}{L}u_q \\ \frac{dw}{dt} = \frac{3p\psi_f}{2J}i_q - \frac{Bw}{J} - \frac{\tau_L}{J} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,PMSM 中的输出速度 w 和输入的 i_q 电流成线性关系。PMSM 在得到输入的 i_q 和 i_d 后,根据电流环控制器的调节输出电压,即可对电梯的转速进行控制。

根据特征模型的理论^[13],可以用一个时变的差分二阶方程描述电梯的调速系统,将系统的高阶信息压缩到几个特征变量,不断进行在线辨识,得到与实际系统相近的模型进行控制。PMSM 特征模型的表达式为

$$w(k) = f_1(k)w(k-1) + f_2(k)w(k-2) + g_0(k)i_q(k-1) \quad (4)$$

- 式中: $w(k)$ ——调速系统的输出转速;
- $i_q(k)$ ——控制转速的交轴电流;
- $w(k-n), i_q(k-n)$ ——前 n 时刻的转速和 q 轴电流;
- $f_1(k), f_2(k), g_0(k)$ ——未知的时变特征参数。

特征参数的范围为 $f_1(k) \in (1, 2], f_2(k) \in [-1, 0), g_0(k) = 1$ ^[14]。确定输入输出后,采用带遗忘因子的递推最小二乘法对参数进行在线辨识。

3 基于特征模型的抗扰动转速控制器

电梯调速系统控制器的设计在基于 $i_d=0$ 的矢量控制基础上,首先进行特征模型参数辨识,将得到的特征参数采用带积分的黄金分割控制进行速度环的控制,得到给定电流 i_q^* ,进入电流环采用 PI 控制得到电压的控制量。同时,采用一种改进的降阶负载观测器,将观测到的转矩控制量加入到输出电压中快速抑制负载扰动。

3.1 带积分的黄金分割速度环控制器设计

黄金分割控制器是吴宏鑫院士在特征模型的

基础上提出的^[15], 相对于其他的自适应控制算法, 其设计简单, 易于实现。该控制算法能够在参数未收敛的情况下, 有效实现速度的稳定过渡, 避免了现场人为试凑参数。设计的黄金分割控制律为

$$u_L(k) = - \frac{[l_1 \hat{f}_1(k)e(k) + l_2 \hat{f}_2(k)e(k-1)]}{\hat{g}_0(k) + k_L} \quad (5)$$

式中: l_1, l_2 ——黄金分割参数, 其值分别为0.382和0.618;

$e(k)$ ——电机转速差值(实际减去给定),
 $e(k) = w(k) - w^*(k)$;

$\hat{f}_1(k), \hat{f}_2(k), \hat{g}_0(k)$ ——特征模型实时估计的特征参数;

k_L ——可控制参数。

带积分控制分量的公式如下:

$$u_i(k) = u_i(k-1) + k_i e(k) \quad (6)$$

式中: $e(k)$ ——转速误差;

k_i ——可控制参数, $k_i < 0$ 。

此时, 构建的带积分黄金分割控制器的自适应反馈控制量如下:

$$u_{iq}(k) = u_L(k) + u_i(k) \quad (7)$$

至此, 已经得到速度环输出的 i_q 控制量。该控制律简单, 可调参数少, 易于实现。

3.2 加入负载观测的电流环控制器设计

本文为了快速抑制电梯运行时的负载扰动, 在速度环采用积分黄金分割控制基础上, 电流环在PI控制下, 将采用一种改进型的降阶负载转矩观测器, 将负载扰动控制量加到电流环PI输出中, 提高转矩收敛速度。

由式(1)可知, PMSM的运动方程为

$$\frac{dw}{dt} = \frac{T_e}{J} - \frac{\tau_L}{J} - \frac{B}{J}w \quad (8)$$

其中, $T_e = \frac{3p\psi_f}{2}i_q$ 。

由于曳引机的控制周期短, 近似认为 $\frac{d\tau_L}{dt} = 0$ 。

将曳引机负载转矩和速度作为观测对象, 得到曳引机的调速系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (9)$$

其中, $x = [w \quad \tau_L]^T, A = \begin{bmatrix} -\frac{B}{J} & -\frac{1}{J} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \frac{1}{J} \\ 0 \end{bmatrix},$

$C = [1 \quad 0], u = T_e, y = w$ 。

基于式(9), 构造转矩 Luenberger 观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + G_1(y - \hat{y}) + G_2 \frac{d(y - \hat{y})}{dt} \\ \hat{y} = C\hat{x} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\hat{x} = [\hat{w} \quad \hat{\tau}_L]^T$ ——状态变量估计值;

$G_1 = [g_1 \quad g_2]^T, G_2 = [g_3 \quad g_4]^T$ ——反馈增益矩阵。

观测器的特征方程可表示为

$$\det \left[\lambda I - \frac{A - G_1 C}{SI + G_2 C} \right] = \lambda^2 - \left[\frac{1}{1 + g_3} \left(-\frac{B}{J} - g_1 + \frac{g_4}{J} \right) \right] \lambda - \frac{g_2}{1 + g_3} \frac{1}{J} = 0 \quad (11)$$

假设 $B=0$, 令 $g_1 = g_3 = 0$, 根据期望的极点 α, β 进而推导出反馈系数:

$$\begin{cases} \alpha + \beta = \frac{1}{1 + g_3} \left(-\frac{B}{J} - g_1 + \frac{g_4}{J} \right) \\ -\alpha\beta = \frac{g_2}{1 + g_3} \frac{1}{J} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} g_2 = -\alpha\beta J \\ g_4 = J(\alpha + \beta) \end{cases} \quad (12)$$

基于转矩负载观测的方程为

$$\begin{cases} \dot{\hat{w}} = -\frac{B}{J}w - \frac{1}{J}\hat{\tau}_L + \frac{1}{J}T_e \\ \dot{\hat{\tau}}_L = g_2(w - \hat{w}) + g_4 \frac{d(w - \hat{w})}{dt} \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13)中的负载转矩的观测值, 通过相应的比例控制量加入到电流环输出电压中, 使电梯调速系统在起动或者突加负载时能平稳跟踪转速, 加快了系统对扰动的响应。降阶负载转矩观测结构图如图1所示。

4 PMSM 调速系统仿真研究

4.1 仿真模型

基于特征模型的电梯用 PMSM 抗扰动的自适应控制框图如图2所示。在 $i_d = 0$ 矢量控制下建立系统的二阶特征模型, 以速度为输出, 控制电

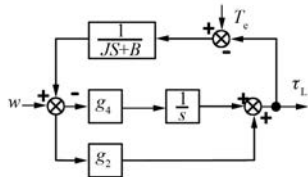


图 1 降阶负载转矩观测器结构图

机转速的交轴电流 i_q 为输入。在辨识得到的特征参数基础上,采用加积分的黄金分割控制设计速度环。电流环采用 PI 控制,同时将观测到的转矩控制量加入到输出电压中,提高转矩扰动的收敛速度。

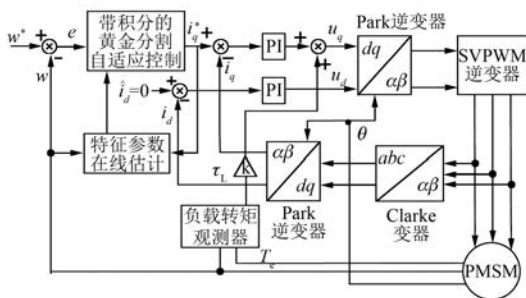


图 2 基于特征模型的 PMSM 抗扰动的自适应控制框图

电梯用 PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数说明

参数名称	数值	参数名称	数值
额定功率/kW	26.1	定子相电阻/ Ω	0.23
额定转矩/($N \cdot m$)	600	d, q 轴电感/mH	8.5
额定电流/A	50	极对数	16
额定电压/V	340	额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	200

4.2 特征模型验证

为了验证建立的特征模型的正确性,将实际曳引机模型的输出与特征模型的输出进行比较,搭建 PMSM 仿真模型。通过在线辨识得到的特征模型参数如图 3 所示。

在确定特征参数后,进行模型验证,特征模型验证图如图 4 所示。图 4(a)、图 4(b)分别是在给定为阶跃信号和斜坡信号下的实际模型转速输出与特征模型输出的对比图。从图 4 中可以看出,特征模型能够较好地复现电机模型,其收敛速度也较快。

4.3 抗负载扰动的自适应控制验证

电梯在起动时,其负载转矩很大。图 5 是在

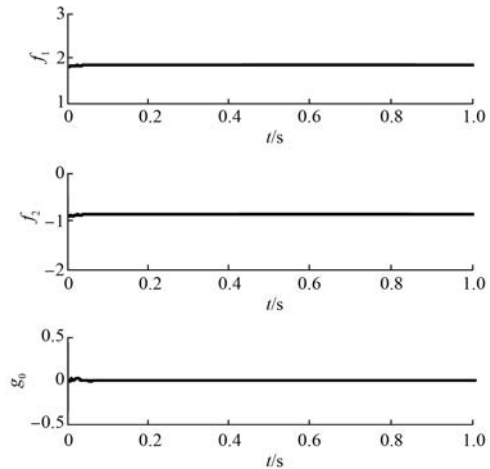


图 3 特征参数辨识曲线图

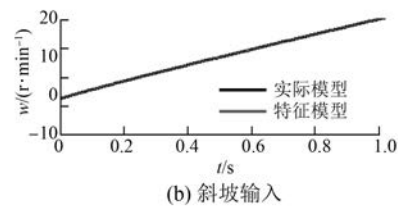
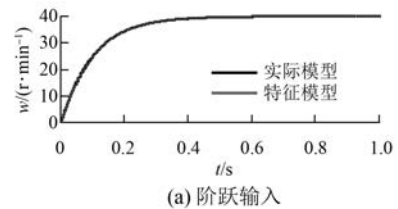


图 4 特征模型验证图

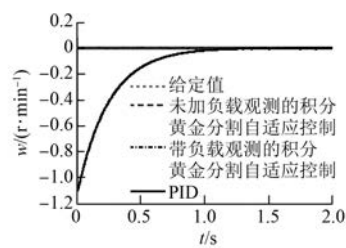


图 5 电梯起动 0 r/min 下的转速波形图

给定速度为 0 r/min 下,加入 200 N 负载力矩的转速波形图。从图 5 中可以看出,本文基于特征模型下的积分黄金自适应控制和加入负载观测的积分黄金分割自适应控制,相比于传统的 PID 控制,在电梯起动时可以快速地克服大惯量负载。

图 6 是电梯在给定速度为 0 r/min 下的转速局部放大图。加入负载观测的积分黄金自适应控

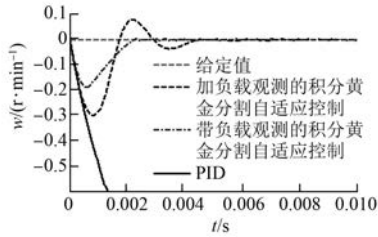


图6 电梯起动 0 r/min 下的转速局部放大图

制相比未加入负载观测的积分黄金自适应控制具有更好的优势,可以更快地跟踪,且超调量小。

图7是在给定速度 100 r/min 下加负载扰动的转速波形图。图7中负载为 200 N,在 0.9~1.0 s 时负载突变为 250 N 情况下,加入负载观测的积分黄金自适应控制与未加入负载观测控制的仿真结果进行对比。图8为图7中转速局部放大图。

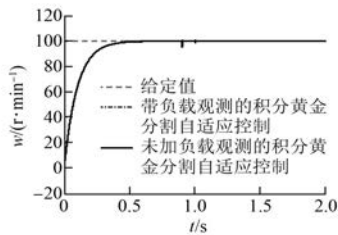


图7 电梯 100 r/min 下加负载扰动的转速波形图

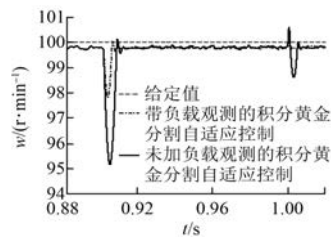


图8 电梯 100 r/min 下加负载扰动的局部放大图

本文中采用的基于特征模型的积分黄金分割自适应控制可以很好抑制负载扰动,且速度响应快;而加入负载转矩补偿的积分黄金分割自适应控制算法能够更快地抑制电梯运行中的负载扰动,控制效果更佳。

综上所述,本文基于特征模型下带负载观测的积分黄金分割自适应控制,不仅速度响应快,稳态跟踪误差小,对运行中出现的扰动有很强的鲁棒性,且可调参数少,在电梯调速系统中相比传统的 PID 控制具有明显优势。

5 基于电梯速度曲线的仿真研究

电梯在用 PMSM 调速控制过程中,其快速性和舒适性在相关规范中是有规定的,要求电梯的加减速速度 $\leq 1.5 \text{ m/s}^2$,加加速度 $\leq 1.3 \text{ m/s}^3$ ^[16]。

为了验证本文基于特征模型的抗扰动自适应控制在电梯速度曲线下的控制效果,设计电梯速度曲线,控制其额定梯速为 2.5 m/s,对应曳引机额定转速为 100 r/min,设计的速度曲线如式(14)所示:

$$\begin{cases} 0.625t^2 & 0 \leq t < 1 \\ 0.625 + 1.25(t - 1) & 1 \leq t < 2 \\ 2.5 - 0.625(3 - t)^2 & 2 \leq t < 3 \\ 2.5 & 3 \leq t < 6 \\ 2.5 - 0.625(t - 6)^2 & 6 \leq t < 7 \\ 0.625 - 1.25(t - 8) & 7 \leq t < 8 \\ 0.625(t - 9)^2 & 8 \leq t < 9 \end{cases} \quad (14)$$

为了验证电梯调速系统的抗扰动性能,在初始转矩为 200 N 的基础上,在加速段、匀速段和减速段内以方波的形式各施加一次负载突变,幅值为 50 N,持续 0.5 s。由图9中可以看出,该观测器能够较好地估计负载值。将观测的转矩值作为一个电压控制量,可以快速地抑制转矩扰动。

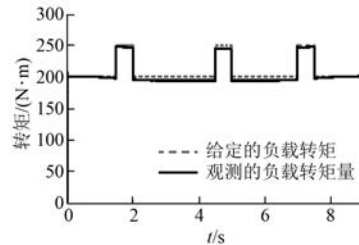


图9 电梯负载观测波形图

将设计的电梯速度曲线及给定的负载值对 PMSM 进行仿真验证,得到基于特征模型下的抗扰动自适应算法电梯上行和下行速度曲线,并将其与传统 PID 对比。电梯给定速度曲线与实际速度运行曲线对比图如图 10 所示。电梯曲线速度跟踪误差如图 11 所示。从图 11 中看出,基于特征模型下的抗扰动自适应控制在起动时可以平稳快速地跟踪速度曲线,同时针对负载扰动与 PID 控制相比有较好的鲁棒性,说明此控制算法用于电梯调速系统的可行性。

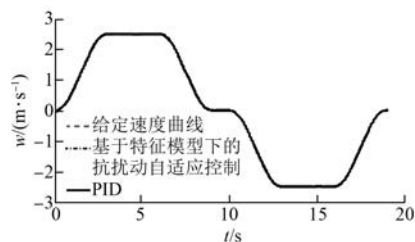


图 10 电梯给定速度曲线与实际速度运行曲线对比图

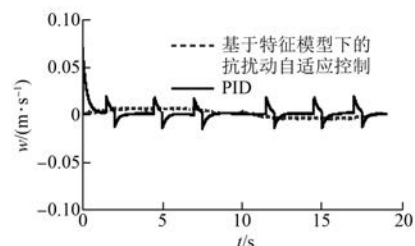


图 11 电梯曲线速度跟踪误差图

6 结 语

本文对电梯用 PMSM 调速系统,提出了一种基于特征模型的抗扰动自适应控制算法。通过特征模型得到电梯调速系统的模型,在特征模型的基础上应用积分黄金分割自适应。同时,针对电梯负载扰动,在电流环输出中加入了负载扰动补偿量,并验证该算法用于电梯的可行性。所研究的基于特征模型的抗扰动自适应控制算法,不仅满足电梯高精度的控制要求,而且可以减小运行中的各种扰动,具有很强的鲁棒性能。

【参考文献】

[1] 王同旭,马鸿雁,聂沐晗.电梯用永磁同步电机 BP 神经网络 PID 调速控制方法的研究[J].电工技术学报,2015,30(增刊1): 43-47.

[2] JIANG J, ZHANG X. Variable frequency speed-regulation system of elevator using PLC technology [C] // International Conference on Advanced Computer Control IEEE, 2011: 328-332.

[3] 袁雷,胡冰新,魏克银.现代永磁同步电机控制原理及 MATLAB 仿真[M].北京:北京航空航天大学出版社,2016.

[4] 薛薇,路雅立.永磁同步电机调速系统的模糊自抗扰控制[J].电机与控制应用,2013,40(8): 57-60.

[5] 谷鑫,胡升,史婷娜.基于神经网络的永磁同步电机多参数解耦在线辨识[J].电工技术学报,2015,30(6): 114-121.

[6] 朱晓虹,张广明,梅磊.基于滑模速度控制器的 PMSM 无速度传感器控制研究[J].电机与控制应用,2016,43(1): 1-6.

[7] CHEN H, XU H, LIU B, et al. The compensated active disturbance rejection controller based on sliding mode control for PMSM [C] // IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems, IEEE, 2015: 240-245.

[8] 吴宏鑫,胡军,解永春.基于特征模型的智能自适应控制[M].北京:中国科学技术出版社,2009.

[9] HONG X, DENG Z, WANG S, et al. A novel elevator load torque identification method based on friction mode [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, IEEE, 2010: 2021-2024.

[10] 荀倩,王培良,蔡志端.基于负载转矩观测器的 PMSM 抗负载扰动控制策略[J].电工电能新技术,2016,35(5): 36-41.

[11] 张虎,朱晓虹,孙明山.带有负载转矩观测器的 PMSM 自适应反步控制[J].电机与控制应用,2016,43(4): 17-21.

[12] ZHANG C, JIA L, HE J. Load torque observer based sliding mode control method for permanent magnet synchronous motor [C] // 25th Chinese Control and Decision Conference, Guiyang, China, 2013: 550-555.

[13] 窦晓华.基于特征模型的永磁同步电机转速自适应控制方法及应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2015.

[14] 吴宏鑫.全系数自适应控制理论及其应用[M].北京:国防工业出版社,1990.

[15] 王永,窦晓华.永磁同步电机的黄金分割自适应控制研究[J].电子技术,2015(9): 18-22.

[16] 段晨东.电梯控制技术[M].北京:清华大学出版社,2015.

收稿日期: 2017 -05 -10

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告