

基于重构系统的永磁交流伺服系统 在线转动惯量辨识^{*}

张 韬, 鲍海静, 张 静

(上海电气集团股份有限公司中央研究院, 上海 200070)

摘 要: 为了使伺服系统在负载变动下得到优良的动态响应, 提出了一种基于实际电机控制系统输入输出构建的非线性可调重构模型, 对实际系统进行重构, 并根据收敛之后的重构模型参数, 完成电机关键机械参数的准确辨识。其中, 全维观测器用来获得电机负载转矩状态观测量, 与输入电磁转矩一同作为所构建的自适应机构的输入参数; 当可调重构系统的输出与实际系统的输出为无差收敛时, 实现对实际系统的重构。仿真和试验验证了该方法的可行性和有效性, 能够对模型中预设的不同转动惯量进行准确的辨识。

关键词: 转动惯量; 自适应实时辨识; 重构系统; 全维观测器; 可调系统参数

中图分类号: TP 276 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)06-0027-07

On-Line Identification of the Moment of Inertia for PMSM Based on the Reconfigurable System^{*}

ZHANG Tao, BAO Haijing, ZHANG Jing

(Central Academy Institute of Shanghai Electric Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Based on self-adaptive identification theory, an easily realized reconfigurable method for the control system was presented, including a full state observer used to acquire the load torque state and a self-adaptive module used to lead the convergence of reconfigurable system. By taking the electromagnetic torque and the load torque observing state as input of reconfigurable system, the moment of inertia could be acquired when the system converges. The feasibility and efficiency of the proposed method had been verified by the simulation results, different inertia values set in the model can be identified accurately.

Key words: moment of inertia; self-adaptive real-time identification; reconfigurable system; full state observer; tunable parameters

0 引 言

伺服系统作为工业自动化设备中的重要执行部件,因其高精度、高功率密度和高可靠性,被广泛应用于数控机床、机器人等自动化生产线。在不同的应用中,系统机械参数会发生较大范围的变化,导致控制性能较难达到预期的效果,尤其是在重复起停工作状态下,会导致系统的动态性能发生严重恶化甚至不稳定状态。现有伺服控制系统通常选用比例积分(PI)控制方式,其控制参数

会受到系统转动惯量和粘滞摩擦因数影响,所以在提高系统动态跟踪性能和负载抗扰性能的过程中,若能对转动惯量和粘滞摩擦因数进行准确的辨识,可以时刻保证伺服系统处于最优控制效果^[1-2]。

针对转动惯量的辨识,目前主要分为离线辨识和在线辨识两种。常用的离线辨识方法有:直接计算法、加减速法等,其中加减速法为了使问题简化,仅计算伺服电机转子转动惯量且忽略摩擦力矩,并通过取其速度和加减速时间的平均值,来

^{*} 基金项目: 上海市科委企业合作专项项目(15dz1180400); 上海工程技术研究中心能力提升项目(17DZ2283300)

作者简介: 张 韬(1984—),男,博士,高级工程师,研究方向为永磁交流同步电机及其控制、高级功能算法等。

削弱摩擦力矩的影响。此类方法由于没有误差迭代收敛过程,导致不能够在线跟踪并且辨识结果存在一定范围的波动。在线辨识算法包括传统的最小二乘法、参考模型自适应等方法。最小二乘辨识由于对数据量的处理非常大,要求数字信号处理器(DSP)有较高的数据处理速度和存储能力,因此也提出了基于遗忘因子的最小二乘辨识方法,近似认为测得的电磁转矩为当前负载转矩;存在的缺点是当暂态过程负载扰动较大范围内变动,旧的负载转矩估计值仍参与递推过程,引起辨识失真^[3]。

近年来,模型参考自适应辨识方法,以其稳定的自适应律对辨识误差进行收敛,能够达到准确的辨识效果。通常的模型参考自适应辨识算法较为多见,能够采用自适应律梯度下降的方法同时实现对转动惯量和粘滞摩擦因数的辨识,缺点是由于辨识速度与辨识精度产生了矛盾,其处理速度只能用于离线辨识,并且辨识精度与自适应增益的手动选择有关,其应用受到严重的制约^[4-5]。

同时,电机拖动系统中的负载扰动是引起系统转动惯量和粘滞摩擦因数变化的主要因素,而两者皆为难以直接测量的非电物理量,其扰动变化又会直接影响整个系统动态响应性能。因此,对扰动转矩进行观测是实现转动惯量辨识的首要步骤,通常采用观测器或 Kalman 滤波器的方式对其状态进行监控。

本文基于模型参考自适应辨识机理和全维观测器,提出了一种实时重构系统,包括自适应机构和可调子系统,无差收敛之后的可调子系统能够近似模拟实际系统,并根据可调子系统的前馈修正参数和反馈修正参数完成对辨识参数的提取。

1 电机驱动模型和自适应重构控制系统

根据伺服电机机械系统建模,首先构建全维观测器,用来获取电机的负载转矩状态观测量^[6]。

永磁交流伺服系统一般采用转速、电流双闭环控制结构。在同步旋转坐标系下,采用 $i_d=0$ 控制时,对表贴式永磁同步电机来说,单位定子电流可获得最大转矩^[7]。电磁转矩方程为

$$T_{em} = p\psi_f i_q \quad (1)$$

伺服系统的运动方程为

$$J \frac{d\omega}{dt} + B_m \omega_m = T_{em} - T_L \quad (2)$$

式中: T_{em} ——电磁转矩;

p ——电机极对数;

ψ_f ——与定子相绕组交链的永磁体磁链;

i_q ——转矩电流;

J ——系统转动惯量;

ω ——转子的机械角速度;

T_L ——负载转矩。

以状态方程的形式对伺服系统的运动方程进行描述:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bu, y = Cx \quad (3)$$

$$\text{其中, } A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{B_m}{J_m} & -\frac{1}{J_m} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_m} \\ 0 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_d \end{bmatrix}, [1 \ 0 \ 0], x = \begin{bmatrix} \theta_m \\ \omega_m \\ T_d \end{bmatrix}, u = T_e, y = \theta_m。$$

输入转矩为转矩控制器输出的电磁转矩 T_e , 状态量分别取为机械角度、机械角速度和扰动转矩,输出变量为机械角位置。

设计过程分为两部分,如图 1 所示。首先建立全维观测器,对负载转矩状态量进行观测;之后基于观测的负载转矩 $\hat{T}_d(t)$,采用自适应辨识方法,以包括线前馈修正系数 $a_0(t)$ 、反馈修正系数 $b_0(t)$ 的可调重构系统对对象系统转速信号输出进行无差跟踪,实现重构建模。其中重构系统的输入由电磁转矩 T_e 和观测得到的负载扰动状态 $\hat{T}_d$,其中 $\hat{T}_d$ 包含电机所带负载转矩和由转动惯量和粘滞摩擦因数与真实值偏差带来的扰动转矩两项。

1.1 扰动负载转矩观测器

如图 2 所示,设负载转矩状态空间方程:

$$\frac{d\hat{x}}{dt} = A\hat{x} + Bu + K(y - C\hat{x}) \quad (4)$$

估计的状态为 $\hat{x} = [\hat{\theta}_m \ \hat{\omega}_m \ \hat{T}_d]^T$

取 3 个状态的比例增益为 $K = [k_1 \ k_2 \ k_3]^T$

整模块与待辨识变量之间的数学关系来确定待辨识参数,满足转动惯量辨识的实时性。

在速度控制模式下,开始电机伺服驱动控制,分别通过速度和转矩控制器,根据输入的转矩控制信号和转矩反馈信号计算获得 PWM 电压信号,驱动逆变器,带动负载旋转。全维观测器所观测到的负载转矩观测信号与电机给定电磁转矩信号叠加生成控制信号输入至前馈修正模块。参考模型输入包括可调重构系统的前馈修正模块和反馈修正模块的叠加控制信号。

2.1 前馈辨识参数和反馈辨识参数计算

根据电机和负载单元的动力学方程为

$$J_p \frac{d\omega_p}{dt} + B_p \omega_p + T_d = T_e \quad (10)$$

式中,参考模型期望输出转速 $\omega_m(t)$ 和电机传动轴输出实际转速 $\omega_p(t)$ 的差值 $e(t)$:

$$\dot{e}(t) = \dot{\omega}_m(t) - \dot{\omega}_p(t) \quad (11)$$

代入动力学方程计算得:

$$\dot{e}(t) = -\frac{B_m}{J_m}e(t) + \frac{1}{J_m} \left\{ \left[a_0(t) - \frac{J_m}{J_p} \right] \cdot (T_e - T_d) + \left[b_0(t) - J_m \left(\frac{B_m}{J_m} - \frac{B_p}{J_p} \right) \right] \omega_p(t) \right\} \quad (12)$$

$$\text{令 } r(t) = \begin{bmatrix} T_e(t) - T_d(t) \\ \omega_p(t) \end{bmatrix}, \eta = \begin{bmatrix} a_0(t) \\ b_0(t) \end{bmatrix},$$

$$\eta^* = \begin{bmatrix} \frac{J_m}{J_p} \\ J_m \left(\frac{B_m}{J_m} - \frac{B_p}{J_p} \right) \end{bmatrix}, \text{ 可得到:}$$

$$\dot{e}(t) = -\frac{B_m}{J_m}e(t) + \frac{1}{J_m}[\eta - \eta^*]^T r(t) \quad (13)$$

基于李雅普托夫稳定性理论,找出正定函数 $V(e, t)$,使 $e(t)$ 在有限时间内收敛到零,即数字计算机搭建的参考模型转速输出 $\omega_m(t)$ 完全跟踪电机传动系统转速输出 $\omega_p(t)$,同时保证了系统的全局渐进稳定性,其求解步骤如下:

(1) 求系统平衡点。 $\dot{e}(t) = 0, e(t) = 0, \eta - \eta^* = 0$ 时为唯一平衡点。

(2) 构造正定函数。

$$V(e, \phi) = \frac{1}{2}e^2(t) + \frac{h}{2}\phi^T(t)\phi(t) \quad (14)$$

其中, $\phi(t) = \eta(t) - \eta^*(t)$ 。

(3) 对正定函数求导。

$$\dot{V}(e, \phi) = -\frac{B_m}{J_m}e^2(t) + \frac{1}{J_m}\phi^T(t)r(t)e(t) + \frac{1}{J_m}\phi^T(t)\dot{\theta}(t) \quad (15)$$

$$\text{取 } \frac{1}{J_m}\phi^T(t)r(t)e(t) + \frac{1}{J_m}\phi^T(t)\dot{\theta}(t) = 0, \text{ 有}$$

$\dot{\theta}(t) = -r(t)e(t)$, 即

$$\dot{\theta}(t) = \begin{bmatrix} \dot{a}_0(t) \\ \dot{b}_0(t) \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} T_e(t) - T_d(t) \\ \omega_p(t) \end{bmatrix} e(t)$$

$$a_0(t) = -\lambda_1 \int [T_e(t) - \hat{T}_d(t)] e(t) dt \quad (16)$$

$$b_0(t) = -\lambda_2 \int \omega_p(t) e(t) dt$$

式中: λ_1, λ_2 ——前馈和反馈回路修正系数。

将其转换为计算机语言能够识别的离散化形式:

$$a_0(k+1) =$$

$$a_0(k) - \lambda_1 [T_e(k) - \hat{T}_d(k)] [\omega_m(k) - \omega_p(k)] T_s \quad (17)$$

$$b_0(k+1) =$$

$$b_0(k) - \lambda_2 \omega_p(k) [\omega_m(k) - \omega_p(k)] \cdot T_s \quad (18)$$

2.2 辨识参数计算

根据式(7)和式(8),期望 $a_0(t)$ 在辨识周期内最终收敛于 a_0^* ,因此取稳态 $a_0^* = a_0(t), b_0^* = b_0(t)$,由式(7)和式(8)计算得到转动惯量和粘滞摩擦因数辨识值的计算公式:

$$J_p = \frac{J_m}{-\lambda_1 \int [T_e(t) - \hat{T}_d(t)] \cdot [\omega_m(t) - \omega_p(t)] dt} \quad (19)$$

$$B_p = a_0(t) [B_m - \lambda_2 \int [\omega_p(t) - \omega_m(t)] \omega_p(t) dt] \quad (20)$$

式中: J_m, B_m ——所选取参考模型的转动惯量值和粘滞摩擦因数;

$\hat{T}_d(t)$ ——全维观测器的负载扰动转矩观测量;

$\omega_m(t)$ ——数字计算机搭建的参考模型的转速输出值。

在实际系统中,根据前馈和反馈修正系数 $a_0(t)$ 和 $b_0(t)$,使 $e(t)$ 在一定时间内渐进收敛到

零,即 $a_0(t)$ 和 $b_0(t)$ 逐步收敛至 $\frac{J_m}{J_p}$ 和 $B_m - \frac{J_m}{J_p}B_p$, 进而获得转动惯量和粘滞摩擦因数的辨识公式, 进行反向推导, 通过前馈系数 a_0 与反馈系数 b_0 和转动惯量 J_p 与粘滞摩擦因数 B_m 之间的数学关系, 得到转动惯量和粘滞摩擦因数的离散化辨识公式, 直接采用 DSP 计算机语言应用于电机控制中。

$$J_p(t) =$$

$$\frac{J_m}{-\lambda_1 \int [T_e(t) - \hat{T}_d(t)] \cdot [\omega_m(t) - \omega_p(t)] dt} \quad (21)$$

$$B_p(t) = a_0(t) [B_m - \lambda_2 \int [\omega_p(t) - \omega_m(t)] \omega_p(t) dt] \quad (22)$$

离散化形式为

$$J_p(k+1) = \frac{J_m}{a_0(k) - \lambda_1 [T_e(k) - \hat{T}_d(k)] [\omega_m(k) - \omega_p(k)] \cdot T_s} \quad (23)$$

$$B_p(k+1) = a_0(k) \{B_m - [b_0(k) - \lambda_2 \omega_p(k) [\omega_m(k) - \omega_p(k)] \cdot T_s]\} \quad (24)$$

3 仿真分析

为了验证重构控制系统实施辨识的性能, 进行了仿真验证。运用 MATLAB/Simulink 搭建永磁同步伺服电机转子磁场定向矢量控制系统仿真平台, 伺服电机模型的额定功率选择为 1 kW, 额定电流为 6.7 A, 转矩常数 K_t 为 1.03 N·m/A, 参考模型的转动惯量值 J_m 为 0.014 5 kg·m², 摩擦因数 B_m 为 0.02 N·m/(rad·s⁻¹), 全维观测器的极点配置为 $a=b=c=-150$ rad/s。

图 3 显示了电机模型的速度响应曲线和重构控制系统的跟踪曲线。在开始之后即对前馈系数和反馈系数进行修正, 最后能够稳定跟踪目标速度曲线; 在对速度给定修改之后, 第二次跟踪波动较第一次要小, 跟踪速度较快, 并且速度基本无波动, 实现了自适应跟踪。

观察转动惯量辨识结果: 首先在额定负载下

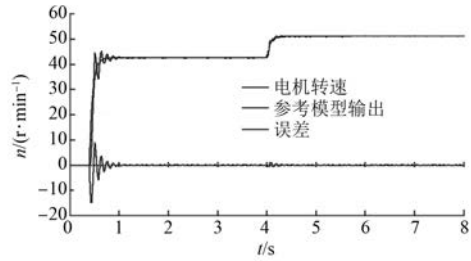


图 3 电机模型的速度响应曲线和重构控制系统的跟踪曲线

运行, 最终的转动惯量辨识结果收敛于 $J_p = 0.014 5$, 与给定转动惯量值基本吻合, 在 4 s 时刻改变负载变为 50% 额定负载, 测试结果为 $J_p = 0.014 33$, 如图 4 所示。仿真结果显示算法能够迅速准确地辨识出转动惯量结果, 并且基本不会受到负载端变化的影响, 仿真效果较好。

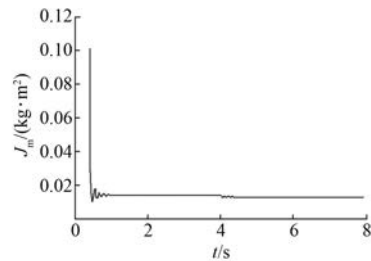


图 4 转动惯量辨识结果曲线

4 试验结果

本文试验平台采用刚性伺服传动平台, 如图 5 所示, 电机控制系统基于德州仪器公司的 TMS320F28335 数字处理器芯片。电流环采样频率 10 kHz, 速度环采样频率 1 kHz, 重构模型的采样频率等于速度环采样频率 1 kHz。被测电机采用额定输出功率为 750 W, 型号为 ACSM080 的永磁同步伺服电机, 单侧电机光轴转动惯量为 1.03×10^{-4} kg·m², 对拖加载电机为安川 750 W 伺服电机。电机技术参数如表 1 所示。



图 5 刚性伺服试验平台

表 1 电机技术参数

参数名称	参数值
额定输出功率/W	750
额定负载转矩/(N·m)	2.39
瞬间最大转矩/(N·m)	7.16
额定转速/(r·min ⁻¹)	3 000
电机转子惯量 J_m /(kg·m ²)	1.03×10^{-4}
重量/(N·m·A ⁻¹)	2.9
编码器/P/R	2 500
电机极对数	4

电机光轴转动惯量为 1.03×10^{-4} kg·m², 额定负载转矩为 2.39 N·m, 伺服传动系统总折合惯量为 $14.56\times1.03\times10^{-4}$ kg·m²。因此取重构系统参考模型的转动惯量值 J_m 为 1.5×10^{-3} kg·m², 是被测电机光轴惯量的 14.56 倍, 摩擦因数 B_m 为 0.01 N·m/(rad·s⁻¹), 全维观测器的极点配置仍然为 $a=b=c=-150$ rad/s。转动惯量辨识的结果对速度环和位置环的参数自整定性能有较大影响, 因此主要观测和分析转动惯量辨识的结果。考察伺服系统在不同工况下, 用重构系统完成惯量辨识算法的效果。

采集的电流 i_q 、速度 n_f 反馈信号以及所计算的速度微分信号, 皆需要进行 50 Hz 截止频率的低通滤波。观察滤波和辨识结果, 将采集的数组用 MATLAB 绘图。图 6 和图 7 分别显示了反馈电流和速度微分值的滤波前后的曲线, 反馈电流和速度微分值为标么值。

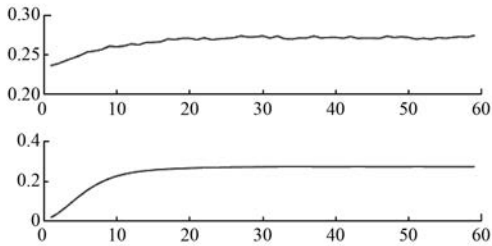


图 6 反馈电流 i_q 滤波效果图

试验在 3 种工况下进行, 验证算法的辨识效果。

(1) 空载工况下, 速度周期阶跃 0 ~ 300 r/min, 负载转矩为 0 N·m, CCS 在线辨识结果如图 8 所示。转动惯量为 1.63×10^{-3} kg·m², 与伺服平台标定转动惯量基本一致。

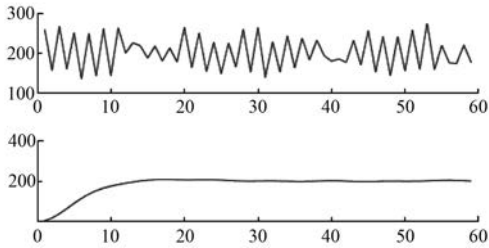


图 7 速度微分 dn_f 反馈信号滤波效果图

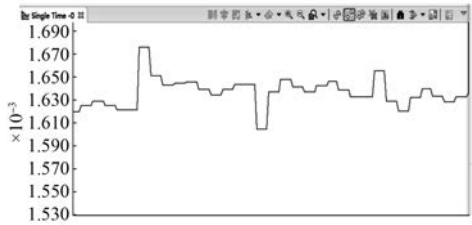


图 8 空载工况下转动惯量辨识结果

(2) 50% 负载工况下, 速度周期阶跃 0 ~ 300 r/min, 负载转矩为 50% 额定转矩, CCS 在线辨识收敛结果为 1.73×10^{-3} kg·m², 如图 9 所示。

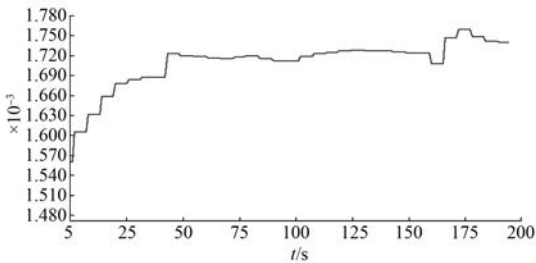


图 9 50% 负载工况下惯量辨识结果

(3) 100% 负载情况下, 速度周期阶跃 0 ~ 300 r/min, 负载转矩为 100% 额定转矩, CCS 在线辨识收敛结果为 1.979×10^{-3} kg·m², 将 DSP 电流、速度微分和惯量辨识结果数组用 MATLAB 绘图如图 10 所示。

表 2 辨识精度对比

工况	$J_{est}/(10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{m}^2)$	J_{est}/J_M	相对误差 $\delta/\%$
空载	1.63	15.825	8.6
50% 额定负载	1.73	16.79	15.3
100% 额定负载	1.979	19.21	31.9

试验验证的 3 个工况下辨识结果都较为平稳, 不会出现尖峰。负载情况下, 辨识结果受到的影响较大, 相对误差也较空载情况下增大, 空载时

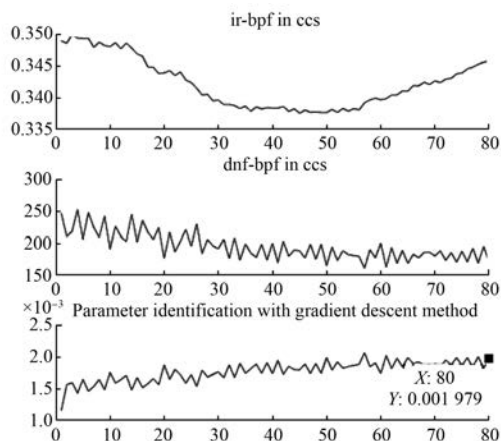


图 10 100% 负载工况下惯量辨识结果

较为理想,50% 稳定负载加载之后相对误差绝对值超过 15%;100% 额定负载加载之后,相对误差绝对值超过 30%。转动惯量辨识的结果,直接用于配置速度环控制器 PI 参数,实现控制器的参数自整定。以上辨识结果的识别误差虽各不相同,但皆在一个数量级之间,并且针对参数自整定而言,误差在可接受范围之内,对控制器的调节不会产生影响。

5 结 语

模型参考自适应辨识的主要思想就是以数字化搭建的包含前馈系数和反馈系数的可调参考模型针对实时系统实现在线重构,以两者输出的无差收敛作为辨识条件,达到对转动惯量的在线辨识。

针对电机控制中负载转矩会对转矩观测产生扰动的特殊性,加入全维观测器对扰动负载转矩进行观测,并基于重构系统,准确完成了在线对转动惯量和粘滞摩擦因数的辨识过程,基本消除了负载对辨识结果的影响,实现了速度环控制器的比例和积分系数参数自整定。这也为对粘滞摩擦力实现补偿控制提供了基础。

【参考文献】

- [1] 杨明,张扬,曹何金生,等.交流伺服系统控制器参数自整定及优化[J].电机与控制学报,2010,14(12): 29-34.
- [2] 李杰.伺服系统惯量识别及谐振抑制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2008.
- [3] 刘辉.交流伺服系统及参数辨识算法研究[D].南京:南京航空航天大学,2005.
- [4] 杜帅,陈阳生.永磁同步电动机伺服系统转动惯量辨识[J].微特电机,2012,40(8): 7-10.
- [5] TUNGPATARATANAWONG S, OHISHI K, MIYAZAKI T. High performance robust motion control of industrial robot parameter identification based on resonant frequency [C] // Industrial Electronics Society,2004: 111-116.
- [6] 郑泽东,李永东,肖曦,等.永磁同步电机负载转矩观测器[J].电工技术学报,2010,25(2): 30-36.
- [7] SKOCZOWSKI S, DOMEK S, PIETRUSEWICZ K, et al. A method for improving the robustness of PID control[J].Industrial Electronics, IEEE Transactions on,2005,52(6): 1669-1676.

收稿日期: 2018 -01 -03

(上接第 20 页)

- [10] OOSHIMA M, TAKEUCHI C. Magnetic suspension performance of a bearingless brushless DC motor for small liquid pumps[J].IEEE Transactions on Industry

Applications,2011,47(1): 72-78.

收稿日期: 2017 -12 -04

中文核心期刊 中国科技核心期刊 中国学术期刊(光盘版)
 全国优秀科技期刊 华东优秀科技期刊
 中国科学引文数据库来源期刊 中国学术期刊综合评价数据库来源期刊