

具有负载自适应功能的游梁式抽油机 矢量控制系统

徐向前^{1,2}, 李茂³, 焦生杰¹

1. 长安大学工程机械学院, 西安 710064
2. 西安石油大学材料科学与工程学院, 西安 710065
3. 中国石油天然气集团公司长庆油田分公司机械制造总厂, 西安 710201

摘要 为了减少抽油机的能耗,降低采油成本,提高系统效率,本文提出将电动机矢量控制技术应用于抽油机中,并使用模糊PID控制器使异步电动机的工作特性与游梁式抽油机载荷的变动特性相匹配。矢量控制方法实现了电动机的磁链和转矩解耦、抽油机的曲柄扭矩计算和等效力学模型确定的控制系统输入,而载荷传感器作为负载反馈,则可以根据负载控制电动机的电磁转矩电流。在抽油机运行过程中,矢量控制系统实时进行负载自适应控制,可提高电动机功率因数,降低无功功率。对具有负载自适应功能的游梁式抽油机矢量控制系统在长庆油田进行了现场试验,试验结果表明该控制系统能够实时、动态自动调整电机的转矩电流,使电机的输出转矩与抽油机的负载特性相匹配,提高了抽油机系统效率,达到节能降耗的目的。

关键词 游梁式抽油机; 矢量控制; 节能

中图分类号 TE933

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.33.003

Vector Control System of Beam Pumping Unit with Load-adaptive Function

XU Xiangqian^{1,2}, LI Mao³, JIAO Shengjie¹

1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China
2. College of Materials Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China
3. Machinery Manufacturing Plant, Changqing Oilfield Company, CNPC, Xi'an 710201, China

Abstract In order to reduce the energy consumption and the production cost of the pumping unit, and improve the system efficiency, the vector control technology and the fuzzy PID are applied to the oil pumping machine, for matching the asynchronous motor's operating characteristics with the pumping unit load's characteristics. With the vector control method, the control system of the asynchronous motor can be decoupled into torque and magnetic flux subsystems, to realize the decoupling control. The input of the control system is determined by the crank torque calculation of the pumping unit and an equivalent mechanical model. According to the feedback of the load sensor, the control system can control the torque current of the asynchronous motor. In the operating process of the oil pump, the control system is working in the real-time load adaptive control mode, so that the motor power factor is improved and the reactive power is reduced. The system was tested in the Changqing oil field, and the experimental results show that the control system can automatically adjust the real-time dynamic torque motor current, to match the output torque of the motor with the load characteristics of the pumping unit, improve the efficiency of the system beam pumping unit and achieve the energy conservation.

Keywords beam pumping unit; vector control; energy conservation

0 引言

游梁式抽油机是国内外油田广泛应用的采油设备,同时

也是石油生产的耗电大户。游梁式抽油机使用方便、可靠,同时也普遍存在运行效率低、能耗高、调节冲次费时费力等缺

收稿日期: 2012-07-19; 修回日期: 2012-10-14

作者简介: 徐向前, 讲师, 研究方向为机电设备及及其自动化, 电子信箱: xxqlsd@126.com; 焦生杰(通信作者), 教授, 研究方向为工程机械机电液一体化, 电子信箱: jsj@chd.edu.cn

点。游梁式抽油机转矩变化快且变化范围大^[1-2],平衡易受井况变化影响,容易出现发电态等特殊的运行工况。如何减少抽油机的能耗、提高系统效率、降低采油成本,已成为抽油机节能技术研究工作的重点^[3-8]。为了提高游梁式抽油机的工作效率,已经进行了大量的工作,如研发跟踪负荷调节输入电压技术(包括星三角转换^[9-10]、可控硅调压技术和变频调压技术^[11]等)、节能电机(包括超高转差率电动机、电磁滑差电动机^[12]等)。这些方法使工作载荷与动力特性相互匹配,而实践证明这些方法在不同程度上提高了抽油机的运行效率,但抽油机运行的工况特殊,在油田现场的长期运行过程中存在冲次调整不方便、有功节电不明显以及无法解决发电态的出现等缺陷,综合节电效果不佳。

针对这一问题,本研究将电动机矢量控制技术应用于抽油机中,通过坐标变换将异步电机定子电流分解成相互独立的励磁电流和转矩电流并加以控制,使异步电动机的工作特性与游梁式抽油机载荷的变动特性相匹配。

1 矢量控制原理

1971年德国学者 F. Blaschke 提出了感应电机磁场定向型矢量变换控制理论。矢量控制通过坐标变换将异步电机定子电流分解成相互独立的励磁电流和转矩电流^[13-15],这为改变电动机的机械特性奠定了理论基础^[16-17]。将交流异步电机在 A-B-C 坐标系下的数学模型通过 2 次坐标变换进行简化,可以得到在任意旋转坐标系 d-q 坐标系下交流异步电机的数学模型。

d-q 坐标系下电压方程为

$$\begin{pmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + L_s p & -\omega_e L_s & L_m p & -\omega_e L_m \\ \omega_e L_s & R_s + L_s p & \omega_e L_m & L_m p \\ L_m p & -\omega_s L_m & R_r + L_r p & -\omega_s L_r \\ \omega_s L_m & L_m p & \omega_s L_r & R_r + L_r p \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} \quad (1)$$

磁链方程为

$$\begin{pmatrix} \Psi_{sd} \\ \Psi_{sq} \\ \Psi_{rd} \\ \Psi_{rq} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{pmatrix} \quad (2)$$

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{2}{3} n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (3)$$

运动方程为

$$T_e - T_m = \frac{J \omega p}{n_p} + \frac{F \omega_r}{n_p} \quad (4)$$

当把转子旋转坐标系 d-q 坐标系磁链定向在同步旋转坐标系 M-T 坐标系的 M 轴时(此时 d-q 与 M-T 这 2 坐标系重合),有 $\Psi_{rd} = \Psi_{rd} = \Psi_r$, $\Psi_{rq} = \Psi_{rq} = 0$, 则

$$\Psi_r = L_m i_{sd} / (1 + T_r p) \quad (5)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p L_m i_{sq} \frac{\Psi_r}{L_r} \quad (6)$$

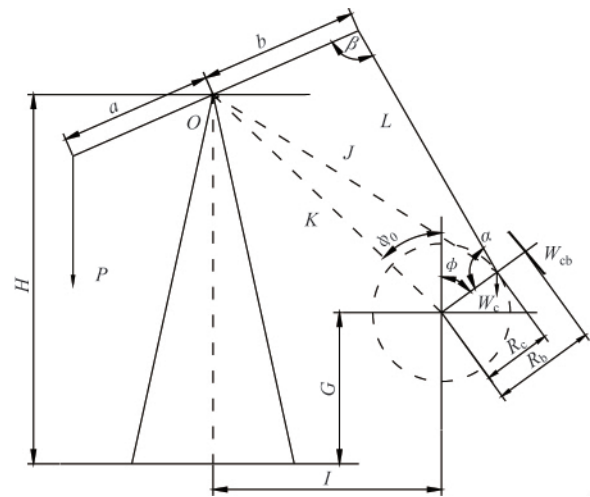
其中, $u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}$ 为定子和转子绕组在 d-q 坐标系中的相电压; $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ 为定子和转子绕组在 d-q 坐标系中的相电流; R_s 和 R_r 分别为定子和转子电阻; ω_e 和 ω_s 分别为电动机同步转速和转差; L_s, L_r, L_m 分别为定子自感、转子自感、互感; p 为微分算子; $\Psi_{sd}, \Psi_{sq}, \Psi_{rd}, \Psi_{rq}$ 为定子和转子绕组磁链; n_p 为电机极对数; T_e, T_m 为电磁转矩、负载转矩; T_r 为转子时间常数; J 为转动惯量; ω_r 为转子的角速度; F 为阻转矩摩擦系数。

由式(5)和式(6)可以得出,转子磁链 Ψ_r 由定子电流励磁分量 i_{sd} 决定。当转子磁链 Ψ_r 达到稳态并保持不变时,电磁转矩 T_e 由定子电流转矩分量 i_{sq} 决定,此时磁链 Ψ_r 与转矩 T_e 分别由 i_{sd} 和 i_{sq} 独立控制,实现了磁链和转矩的解耦。

2 抽油机等效模型

2.1 曲柄扭矩计算

选择曲柄平衡的抽油机,对曲柄轴中心 O 取力矩平衡,可得减速箱输出轴的扭矩 M 与悬点载荷以及曲柄转角的关系(图 1)。



a—游梁前臂长度;b—游梁后臂长度;H—游梁支撑中心到底座底部的高度;P—悬点载荷;I—游梁支撑中心到减速器输出轴中心的水平距离;G—减速器输出轴中心到底座底部的高度;K—极距,即游梁支撑中心到减速器输出轴中心的距离;N—曲柄销中心到游梁支撑中心之间的距离;L—连杆的长度,m;Rc—曲柄重心半径;Rcb—曲柄平衡块半径;Wc—曲柄重量;Wcb—曲柄平衡块重量;alpha—L 与 Rc 的夹角;beta—L 与游梁后臂的夹角;phi—曲柄转角;phi_0—零度线与 K 的夹角

图 1 曲柄扭矩计算简图

Fig. 1 Calculation diagram of crank torque

$$M = \frac{a}{b} P \frac{r \sin \alpha}{\sin \beta} - (W_{cb} R_{cb} + W_c R_c) \sin \phi \quad (7)$$

$$\phi_0 = \arctan \left(\frac{I}{H-G} \right) \quad (8)$$

$$K = \sqrt{I^2 + (H-G)^2} \quad (9)$$

$$\beta = \arccos \left(\frac{b^2 + L^2 - K^2 - r^2 + 2K r \cos(\phi + \phi_0)}{2bL} \right) \quad (10)$$

$$N = \sqrt{L^2 + b^2 - 2bL \cos \beta} \quad (11)$$

$$\alpha = 2\pi - \left[\beta + \sin^{-1} \frac{L \sin \beta}{N} + \sin^{-1} \frac{r \sin(\phi + \phi_0)}{N} + \phi + \phi_0 \right] \quad (12)$$

其中, r 为曲柄旋转半径。

2.2 等效力学模型

为便于分析和计算,将复杂的抽油机系统简化为 1 个构件的等效力学模型。将电动机轴作为等效构件,将等效力矩和等效转动惯量作用其上,则可以将游梁式抽油机简化为 1 个构件的力学模型(图 2)。其中, M_e 为等效力矩; ω 为转速; J_e 为系统的等效转动惯量,由电动机、减速器、平衡重、四连杆机构、驴头以及抽油杆柱、油柱等向曲柄转化的等效转动惯量之和。

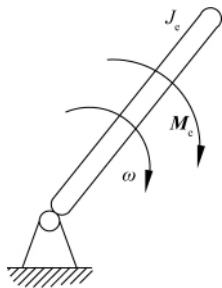


图 2 抽油机等效力学模型

Fig. 2 Equivalent mechanical model of beam pumping unit

根据动能定理,在 dt 时间内,等效模型的动能增量 dE 应等于瞬时等效力或等效力矩所做的功 dW ,且等效模型做定轴转动,有

$$d\left(\frac{1}{2}J_e\omega^2\right) = M_e d\theta \quad (13)$$

$$J_e \frac{\omega d\omega}{d\theta} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ_e}{d\theta} = M_e \quad (14)$$

由 $\omega = d\theta/dt$, 得

$$J_e \ddot{\theta} + \frac{1}{2} \dot{\theta} \frac{dJ_e}{d\theta} = M_e \quad (15)$$

等效力矩 M_e 等于等效驱动力矩 M_{ed} (电动机输出扭矩) 减去等效阻力矩 M_{er} , 即 $M_e = M_{ed} - M_{er}$ 。等效阻力矩 $M_{er} = \frac{M}{j\eta}$, 其中 j 为传动比, η 为传动效率。

由以上分析可得电动机等效驱动力矩与曲柄扭矩之间的关系为

$$M_{ed} = J_e \ddot{\theta} + \frac{1}{2} \dot{\theta} \frac{dJ_e}{d\theta} + \frac{M}{j\eta} \quad (16)$$

其中, $\ddot{\theta}$ 和 $\dot{\theta}$ 分别为 θ 的二阶导数和一阶导数。

3 抽油机矢量控制系统

3.1 抽油机矢量控制原理

由抽油机的工作原理可知,抽油机工作于上冲程和下冲程时其负载大小不同,同时矢量控制实现了异步电机定子电流分解成相互独立的励磁电流和转矩电流,因此可以根据式(6)、式(7)和式(16)实现抽油机的矢量控制。抽油机在正常工作时,由式(7)和式(16)可以计算出电动机等效驱动力矩随时间 t 或 ω ($\omega = d\theta/dt$) 的变化,再由式(6)即可推算出决定电动机的定子电流转矩分量 i_{sq} 的变化。以这个电流转矩分量 i_{sq} 作为输入量,载荷传感器测得抽油机的负载作为反馈量,就能够根据抽油机的负载特性来调节电机的输出转矩,控制原理见图 3。图 3 中变量上标带 * 的代表给定值,变量上标带有 ** 的为模糊控制输出给定值。在电动机轻载时减小电动机的转

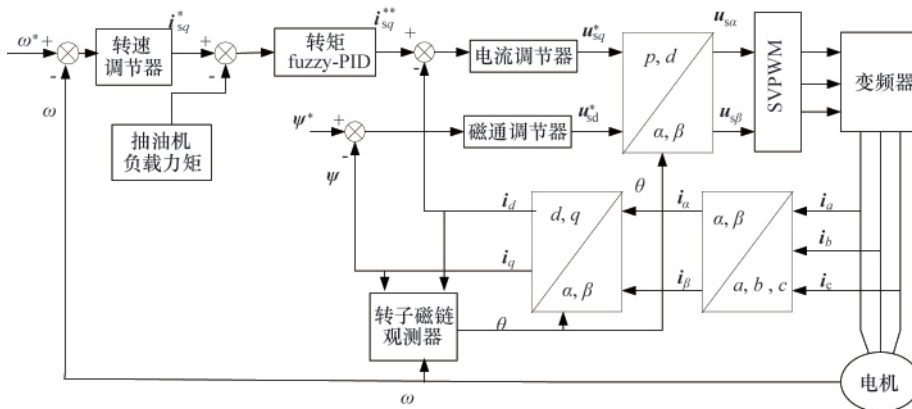


图 3 抽油机负载自适应矢量控制原理图

Fig. 3 The principle diagram of the pumping unit load adaptive vector control

矩电流 i_{sq} , 可减小轻载时的工作电流,从而能够减小平均工作电流,降低电机损耗。

游梁式抽油机用电动机承受的载荷是周期交变的,随着扭矩的改变电机电流波动较大且变化较为复杂。如果采用常

规的 PID, 控制规则建立后就固定不变,当受到某些干扰或其他环境的影响时,因控制器不适应,会出现难以避免的电流和转矩震荡,将影响控制性能。因此控制系统将自适应控制理论和模糊控制理论相结合,采用自适应模糊 PID 控制器使异步

电动机的工作特性与游梁式抽油机载荷的变动特性相匹配。

3.2 自适应模糊 PID 控制器的设计

自适应模糊 PID 控制器是在 PID 算法的基础上,以误差 e 和误差变化率 ec 作为输入,利用模糊规则进行模糊推理,并通过查询模糊矩阵表进行参数调整,以满足不同时刻的 e 和 ec 对 PID 参数自整定的要求。利用模糊规则在线对 PID 参数进行修改,便构成了自适应模糊 PID 控制器,其结构框图如图 4 所示。这里误差 e 为转矩电流 i_{sq} 的误差,误差变化率 ec 为转矩电流 i_{sq} 的变化率。

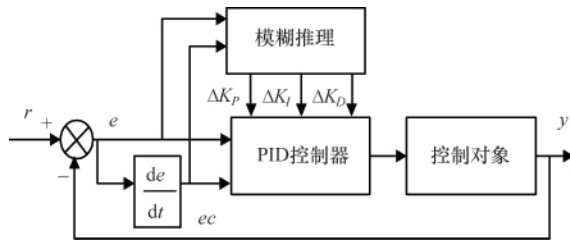


图 4 模糊自适应 PID 控制器结构

Fig. 4 Structure of fuzzy adaptive PID controller

PID 参数模糊自整定是找出比例系数 (K_p)、积分系数 (K_i)、微分系数 (K_d) 3 个参数与 e 和 ec 之间的模糊关系,在

表 1 K_p 的模糊规则表

Table 1 Fuzzy rule table of K_p

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PS	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PS	PS	Z	NS
PS	PM	PM	PM	PS	Z	NS	NS
Z	PM	PM	PS	Z	NS	NM	NM
PS	PS	PS	Z	NS	NS	NM	NM
PM	PS	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NM	NM	NM	NB	NB

表 3 K_d 的模糊规则表

Table 3 Fuzzy rule table of K_d

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PS
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	Z
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	Z
PS	Z	NS	NM	NM	NS	NS	Z
Z	Z	NS	NS	NS	NS	NS	Z
PS	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PM	PB	PS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

表 2 K_i 的模糊规则表

Table 2 Fuzzy rule table of K_i

e	ec						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	Z	Z
NM	NB	NB	NM	NS	NS	Z	Z
PS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	Z	Z	PS	PS	PM	PB	PB
PB	Z	Z	PS	PM	PM	PB	PB

4 抽油机矢量控制系统的应用

基于具有负载自适应的抽油机矢量控制系统,在长庆油田采油现场进行试验和测试对比。用弯梁变距式抽油机和矢量控制的抽油机在工频和 20Hz 频率 2 种状态下,对抽油机进行了冲程、冲次、电能、产量等参数的测试和对比(见表 4)。

5 结论

从测试结果来看,游梁式抽油机的系统效率过低,仅为 23.51%,油层压力很难恢复,抽油机系统在一定程度上受限。具有负载自适应功能的矢量控制抽油机系统效率为 32.08%,比游梁式抽油机提高了约 8%,这表明该控制系统能够实时、

表 4 抽油机测试结果

Table 4 Test results of pumping unit

测试项目	抽油机类型	
	游梁式抽油机	矢量控制抽油机
运行频率/Hz	50	20
电机额定功率/kW	11	7.5
电机输入平均电压/V	410.1	418.4
电机输入平均电流/A	9.56	2.18
电机输入有功功率/kW	2.28	1
电机输入无功功率/kvar	6.23	1.2
电机输入视在功率/kVA	6.73	1.56
电机功率因数	0.3358	0.6329
上冲程最大电流/A	10	5
下冲程最大电流/A	8	4
实测冲程/m	2.5	2.5
实测冲次/min	3.45	1.4
系统效率/%	23.51	32.08
百米吨液有功耗电量/(kW·h·10 ⁻² m ⁻¹ ·t ⁻¹)	1.98	1.27
百米吨液无功耗电量/(kvar·h·10 ⁻² m ⁻¹ ·t ⁻¹)	5.42	1.52

动态自动调整电机的转矩电流,使电机的输出转矩与抽油机的负载特性相匹配,提高了抽油机系统效率,达到节能降耗目的。

参考文献 (References)

- [1] 张学鲁, 季祥云, 罗仁全, 等. 游梁式抽油机技术与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2001.
Zhang Xuelu, Ji Xiangyun, Luo Renquan, et al. Technology and application of beam pumping unit[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [2] 赵云峰, 刘牧洲, 张建成, 等. 常规游梁式抽油机节能改造技术探讨[J]. 新疆石油科技, 2011, 21(3): 11-13.
Zhao Yunfeng, Liu Muzhou, Zhang Jiancheng, et al. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2011, 21(3): 11-13.
- [3] 杨芳丽, 侯红武, 谢丽君, 等. 常规抽油机节能潜力分析及对策[J]. 资源节约与环保, 2011, 29(3): 31-39.
Yang Fangli, Hou Hongwu, Xie Lijun, et al. Resource Conservation and Environmental Protection, 2011, 29(3): 31-39.
- [4] 陈宪侃, 叶利平, 谷玉洪. 抽油机采油技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
Cheng Xiankan, Ye Liping, Gu Yuhong. Pumping unit production technology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [5] 崔振华, 余国安, 安锦高, 等. 有杆抽油系统[M]. 北京: 石油工业出版社, 1994.
Cui Zhenghua, Yu Guoan, An Jinguo, et al. Rod pumping system[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1994.
- [6] 梁宏宝, 伊莲娜, 孙旭东, 等. 游梁式抽油机节能技术改造综述 (II)[J]. 应用能源技术, 2011, 28(3): 6-9.
Liang Hongbao, Yi Lianna, Sun Xudong, et al. Applied Energy Technology, 2011, 28(3): 6-9.
- [7] 张彬. 抽油机倒发电与节能自动控制系统的研究[J]. 中国石油和化工

标准与质量, 2012, 32(3): 174-175.

Zhang Bin. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2012, 32(3): 174-175.

- [8] 许士真, 白连平, 隋娜, 等. 关于游梁抽油机合理驱动和电机节能的讨论[J]. 石油矿场机械, 2005, 34(2): 85-87.
Xu Shizhen, Bai Lianping, Sui Na, et al. Oil Field Equipment, 2005, 34(2): 85-87.
- [9] 蔡甫权, 周挺巧, 蔡甫寒, 等. 电动机星三角转换节能保护器在抽油机上的应用[J]. 机床电器, 2002, 29(6): 50-51.
Cai Fuquan, Zhou Tingqiao, Cai Fuhuan, et al. Machine Tool Electric Appliance, 2002, 29(6): 50-51.
- [10] 孙其宏, 任新华, 孙志刚, 等. 基于 ATT7022A 的 Y/Δ 切换抽油机节能控制器的研制[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(17): 4288-4291.
Sun Qihong, Ren Xinhua, Sun Zhigang, et al. Science Technology and Engineering, 2012, 12(17): 4288-4291.
- [11] 周封, 胡洋, 孙志刚, 等. 抽油机节能方法与变频技术合理应用研究[J]. 节能技术, 2010, 28(3): 218-221.
Zhou Feng, Hu Yang, Sun Zhigang, et al. Energy Saving Technology, 2010, 28(3): 218-221.
- [12] 杜红勇, 安蓉, 齐光峰, 等. 抽油机用节能电动机综合对比测试[J]. 节能, 2011, 29(5): 56-58.
Du Hongyong, An Rong, Qi Guangfeng, et al. Energy Conservation, 2011, 29(5): 56-58.
- [13] 冯焱生, 曾岳南. 无速度传感器矢量控制原理与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
Feng Duosheng, Zeng Yuenan. Principles and practice of speed sensorless vector control[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1997.
- [14] 马小亮. 大功率交变频调速及矢量控制技术[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2004.
Ma Xiaoliang. High-power AC-AC frequency control and vector control technology[M]. 3rd ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2004.
- [15] 李凤. 直接转矩控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
Li Su. Direct torque control technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1994.
- [16] 夏超英. 直接转矩控制系统的稳定性问题和鲁棒控制器设计 [J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 54-58.
Xia Chaoying. Control Theory and Applications, 2004, 21(1): 54-58.
- [17] 洪乃刚. 电力电子和电力拖动控制系统的 Matlab 仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
Hong Naigang. Matlab simulation of power electronics and electric drive control system[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006.

(责任编辑 孙秀云, 马骁骁)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。