

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.02.013

同轴双电机耦合系统功率平衡研究

薛晨旭¹, 韩峻峰², 林川¹, 潘盛辉¹, 李娜³

(1. 广西科技大学 电气与信息工程学院, 广西 柳州 545006;

2. 广西机电职业技术学院 机电工程系, 广西南宁 530007;

3. 河南大学 教育科学学院, 河南 开封 475001)

摘要:双电机同轴硬联运行时,2台电机速度被强制同步,由于2台相同电机参数略有差异,导致功率分配不平衡,针对这一问题提出了基于直接转矩控制的双电机主从模糊控制系统。基于功率平衡要求,通过MATLAB仿真分析双电机运行负载分配情况,提出双电机功率平衡运行条件。根据直接转矩控制,使用主从控制和传统PID设计的系统基本上解决了功率不平衡问题,但其动态性能不佳。为了改善动态性能,设计了“模糊参数自整定PID”控制器。仿真结果表明,该系统最终达到了功率平衡,有效防止双电机同轴运行时1台电机负载过大的问题,而模糊参数自整定PID与传统PID控制的系统相比,可以提高功率跟踪的动态性能。

关键词:双电机;功率平衡;模糊参数自整定;直接转矩控制

中图分类号:TP273.4 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2015)02-0052-05

Power Balance Studies of Coaxial Dual-Motor Coupling System

XUE Chenxu¹, HAN Junfeng², LIN Chuan¹, PAN Shenghui¹, LI Na³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou, Guangxi 545006, China;

2. Department of Electrical Engineering, Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, China;

3. College of Education and Science, Henan University, Kaifeng, Henan 475001, China)

Abstract: Two motor's speed is forced synchronization during the coaxial dual-motor running. Due to the slight difference in the two identical motor parameters, it will lead to uneven distribution of power and a fuzzy control system of two motor master-slave based on direct torque control is put forward. Based on the power balance requirements and load condition of dual-motor by MATLAB simulation analysis, the power balance condition of dual-motor was proposed. Based on direct torque control, the use of master-slave control and conventional PID system was basically designed to solve the problem of power imbalance. But its dynamic performance was poor. The "fuzzy parameter self-tuning PID" was designed to improve the dynamic performance. Simulation results show that the fuzzy parameters from the system compared with conventional PID tuning PID control can improve the dynamic performance of the power track.

Key words: dual motor; power balancer; fuzzy self-tuning parameters; direct torque control

伴随着工业化进程,人们对各种产品质量和机械性能要求逐渐提高,某些场合单一电机的控制已经不能满足需求,从而需要掌握控制多台电机,使其更协调运行的技术。多台电机同轴硬联运行主要作用是:出于机械设计方面的限制,减少机械磨损,保持驱动力平

衡;通过合理配置电机参数,减少功率冗余,由于电机的分级制造,大小电机进行匹配可提高电机的效率,从而提高机械特性硬度。只要是多电机同轴驱动就存在功率平衡或者说合理分配负载问题^[1]。

自从上世纪80年代Koren提出交叉耦合控制算

收稿日期:2014-09-13;修回日期:2014-10-16

基金项目:广西自然科学基金项目(2013GXNSFB019241);广西教育厅科研项目经费资助(YB2014214);广西重点实验室建设项目(13-051-38,课题编号13-A-03-02);广西重点实验室建设项目(14-045-44,课题编号14-A-02-02);广西汽车零部件与整车技术重点实验室开放基金资助(2012KFMS09)

作者简介:薛晨旭(1988),男,河南人,硕士研究生,主要研究方向为电机驱动。E-mail:xcx27@163.com

法之后^[2],许多专家针对“多电机协调控制”这一课题展开了一系列的研究。在国内,汤杰,李志勇针对刚性硬联的双电机同步传动系统的功率分配问题提出主从控制方案^[3],在同步运行中确保功率平衡。田瑞,赵艳提出了变频器的主/从功能在多电机传动系统中的应用^[4],解决了多台电机同时驱动同一负载的功率平衡问题。张超,裴延涛提出了基于矢量控制思想的同轴硬联双电机负载平衡系统^[5],并且将交叉耦合及主从控制的概念运用于其中,实现双电机承担相等负载的实验目的。

上述文献均较少提及电机跟踪过程中的转速响应速度,因此功率转速响应速度是一个新的研究点。本文以双电机硬轴联接系统为对象,应用直接转矩控制对其进行研究,在主从控制和交叉耦合的基础上,设计了模糊参数自整定PID控制器,解决了功率平衡问题,提高了电机功率平衡精度,改善了动态性能。

1 双电机同轴运行功率分析

双电机硬轴联接驱动同一负载时,即使是同批次的相同型号电机也极难达到各项参数完全一致,因此它们所分担的负载就不可能完全相等,从而导致2个电机输出功率出现偏差,容易使其中一台电机工作在轻载状态,而另一电机工作在过载状态。为改善这种情况,将负载进行合理分配,双电机的功率平衡问题就必须得到解决。

1.1 双电机同轴运行功率不平衡的 Simulink 仿真

由双电机同轴运行功率平衡定义可知,在双电机同轴拖动同一负载时,2台电机额定功率相同,即使2台电机的其他参数不相同,其分配的负载力矩也必是相同的。在 MATLAB/Simulink 中创建双电机同轴模型,如图1所示。

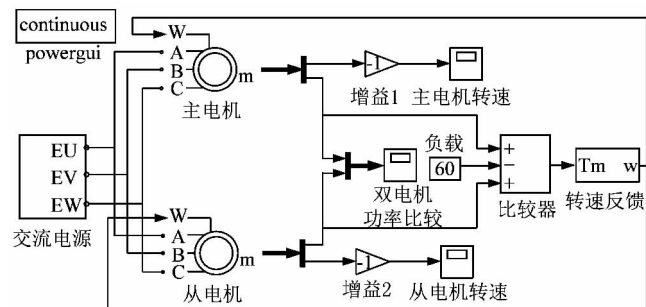


图1 双电机功率不平衡仿真实验

Figure 1 Power unbalance experiment of dual-motor

2台电机额定功率均为15 kW,其中电机1转子电阻为2.65 Ω,电机2转子电阻为3.65 Ω,2台电机

的输出转矩如图2所示。

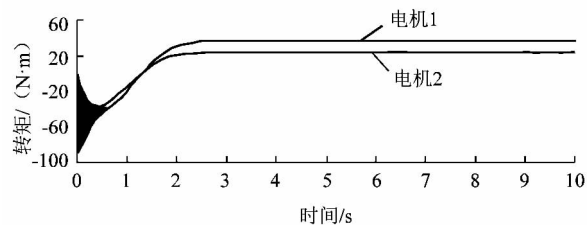


图2 功率不平衡输出转矩演示

Figure 2 Output torque of unbalanced power

如图2所示,当输入负载转矩为60 N·m,电机1输出转矩为38 N·m,电机2输出转矩为22 N·m,这说明2台电机在定子电阻相差1 Ω时,输出功率相差1.7倍以上,出现了严重的功率不平衡。

1.2 双电机同轴运行功率平衡条件

根据

$$M_1 = \frac{1}{k_1}(n_0 - n_g) = \frac{k_2}{k_1 + k_2} M_g = \frac{N_{1e}(n_0 - n_g)}{n_{1e}(n_0 - n_{1e})}, \quad (1)$$

$$M_2 = \frac{1}{k_2}(n_0 - n_g) = \frac{k_1}{k_1 + k_2} M_g = \frac{N_{2e}(n_0 - n_g)}{n_{2e}(n_0 - n_{2e})}. \quad (2)$$

式中: M_1 为主电机实际转矩, M_2 为从电机实际转矩, M_g 为负载转矩; k_1, k_2 为比例系数; N_{1e} 为主电机实际额定功率, N_{2e} 为从电机实际额定功率; n_0 为同步转速, n_g 为额定转速, n_{1e} 为主电机实际额定转速, n_{2e} 为从电机实际额定转速。

可得到双电机的额定力矩和输出力矩之比:

$$\frac{M_1}{M_{1e}} = \frac{N_{1e}(n_0 - n_g) n_{1e}}{n_{1e}(n_0 - n_{1e}) N_{1e}} = \frac{n_0 - n_g}{n_0 - n_{1e}}, \quad (3)$$

$$\frac{M_2}{M_{2e}} = \frac{N_{2e}(n_0 - n_g) n_{2e}}{n_{2e}(n_0 - n_{2e}) N_{2e}} = \frac{n_0 - n_g}{n_0 - n_{2e}}. \quad (4)$$

双电机的额定功率和实际功率之比:

$$\frac{N_1}{N_{1e}} = \frac{M_1 n_g}{M_{1e} n_{1e}} = \frac{n_g(n_0 - n_g)}{n_{1e}(n_0 - n_{1e})}, \quad (5)$$

$$\frac{N_2}{N_{2e}} = \frac{M_2 n_g}{M_{2e} n_{2e}} = \frac{n_g(n_0 - n_g)}{n_{2e}(n_0 - n_{2e})}. \quad (6)$$

式中: N_1 为主电机额定功率, N_2 为从电机额定功率; M_{1e} 为主电机实际额定转矩, M_{2e} 为从电机实际额定转矩。

从而要求

$$n_{1e} n_0 - n_{2e} n_0 = n_{1e}^2 - n_{2e}^2. \quad (7)$$

要保证式(7)的成立,仅有2种情况:

- 1) $n_{1e} = n_{2e}$, 双电机的额定转速相等;
- 2) $n_0 = n_{1e} + n_{2e}$, 同步转速等于额定转速和。

一般情况下,电机额定转速与同步转速几乎相等,所以第2种情况是不符合实际的。于是,可得到双电机同轴硬联功率平衡的条件是:相同的电机种类,相同的极数。即2台电机的实际额定转速相同或者说2台电机的额定转差率相同。

2 基于直接转矩的双电机负载分配方案

双电机的硬轴控制系统可以采用主从控制。主从控制方案有转矩随动及转速随动2种形式,本文采用直接转矩控制中的转矩随动控制,从而使系统得到更好的动态性能^[7],其控制原理如图3所示。

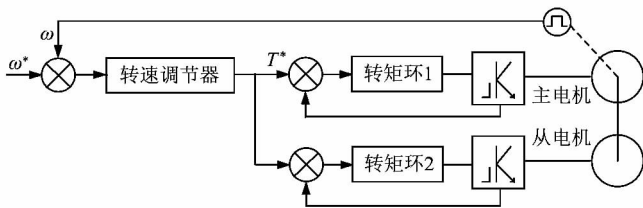


图3 基于直接转矩的主从控制原理图

Figure 3 Master-slave control basing on direct torque

M1 是主电机,有转矩环 ATL1 和速度调节器 ASR1,系统采用转速给定的工作方式,负责控制系统的启停控制和速度调节;M2 是从电机,仅有转矩环 ATL2,使用转矩随动工作方式,其转矩信号 T^* 由主变频器给定,由于给定值相同,通过转矩环调节,双电动机的转矩在稳态输出时必然达到平衡。

由于鼠笼型异步电机转子短路,电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \Psi_{s\alpha} \\ \Psi_{s\beta} \\ \Psi_{r\alpha} \\ \Psi_{r\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_r \Psi_{r\beta} \\ -\omega_r \Psi_{r\alpha} \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $u_{s\alpha}, u_{s\beta}$ 为定子侧相电压的 α 和 β 轴分量; $i_{r\alpha}, i_{r\beta}, i_{s\alpha}, i_{s\beta}$ 分别为转子侧和定子侧的相电流瞬时值 α 和 β 轴的分量; $\Psi_{r\alpha}, \Psi_{r\beta}, \Psi_{s\alpha}, \Psi_{s\beta}$ 分别为转子侧和定子侧磁链 α 和 β 轴的分量; R_r, R_s 分别为转子和定子绕组电阻; ω_r 是电动机角速度, P 是微分算子。电磁转矩 T 方程为:

$$T = \frac{3}{2}P(\Psi_{s\alpha}i_{s\beta} - \Psi_{s\beta}i_{s\alpha}) \quad (9)$$

直接转矩本质是:在异步电机的定子坐标系中,采用空间矢量法,直接进行计算及控制电动机电磁转矩^[8]。直接转矩控制结构图如图4所示。

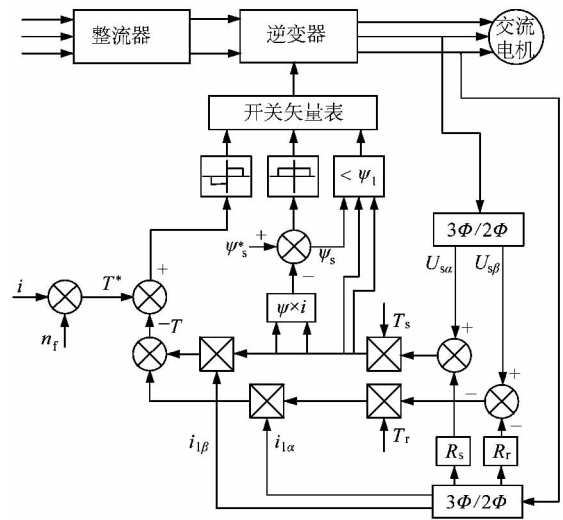


图4 直接转矩控制系统框图

Figure 4 Block diagram of direct torque control

对转矩进行直接控制是转矩调节的任务,转矩调节器是由施密特触发器构成。调节器的输入是转矩反馈值 T_e 和转矩给定值 T^* ,调节器的容差是 $\pm \Delta T$ 。

异步电动机转矩的计算方程是:

$$T_e = n_p (\Psi_s \otimes i_s) \quad (10)$$

式中: T_e 为电动机转矩; n_p 为极对数; Ψ_s 为电动机定子磁链; i_s 为电动机定子电流。

两边微分再乘以 L_σ 得:

$$L_\sigma \frac{d}{dt} T_e = n_p L_\sigma \left(\frac{d}{dt} \Psi_s \otimes i_s + \Psi_s \otimes \frac{d}{dt} i_s \right) \quad (11)$$

式中: $L_\sigma = L_s L_r / L_m - L_m$; L_s 为定子漏感, L_r 为转子漏感, L_m 为互感; Ψ_r 为电动机转子磁链; i_r 为电动机转子电流。 R_s 为定子电阻, R_r 为转子电阻。

又

$$\frac{L_r}{L_m} \Psi_s = \Psi_r + L_\sigma i_s \quad (12)$$

将式(12)代入式(11)得

$$L_\sigma \frac{d}{dt} T_e = n_p \Psi_r \otimes u_s - n_p \omega_r \Psi_s \Psi_r - R_M T_e \quad (13)$$

式中: $R_M = L_r R_s / L_m + L_s R_r / L_r$; $T_e, \Psi_s, \Psi_r, \omega_r$ 在同一采样周期内,它们相对于外部激励电压 u_s 的变化可以忽略不计。也可以说,电压 u_s 是影响瞬时转矩变化的因素。由式(13)可知,异步电机可以通过定子磁链估算值和定子电流测量值得到转矩计算值。

3 基于模糊参数自整定PID控制器的设计及MATLAB仿真

选择主电机参数如表1所示。

表 1 主电机的相关参数
Table 1 Related parameters of main motor

额定功率/kW	额定电压/V	频率/Hz	定子电阻/ Ω	定子漏感/mH	互感/mH	转子电阻/ Ω	转子漏感/mH	转动惯量/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	摩擦因数	极对数/对	磁链/Wb
15	380	50	0.21	0.99	6.4	0.22	0.99	1.66	0.1	2	0.96

为使主从电机参数不同,设置从电机的转子电阻为 0.42Ω ,而其他参数与主电机一致。根据直接转矩控制模型和主从电机参数,设计模糊参数自整定 PID 控制器,根据控制系统中专家经验和响应的要求,对比例参数 K_p 和积分参数 K_i 的自整定设计如下:当误差 e 较大, K_p 应该设置为较小值,从而减小各个参数初始变化的冲击;为避免非线性影响产生的积分饱和及系统饱和, K_i 值应小一些;当误差 e 和 e_c 处于中等,为提高动态精度,适当增大 K_p 值;为避免对动态稳定造成影响, K_i 应保持适中;当误差 e 较小,应该减小 K_p ,从而保持较好的稳态性能;为提高控制精度,减小系统静态误差,应该减小 K_i 。

PI 参数整定需考虑到 3 个参数在不同时刻的互相作用^[9-10],依照此参数整定原则,建立模糊控制器规则如图 5 和图 6 所示。

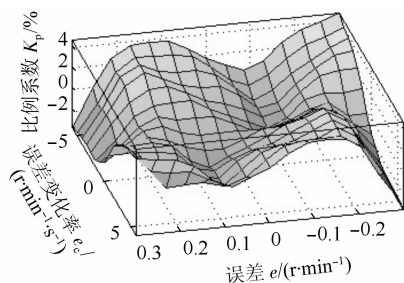


图 5 K_p 的模糊整定规则

Figure 5 Fuzzy PI parameter tuning rules of K_p

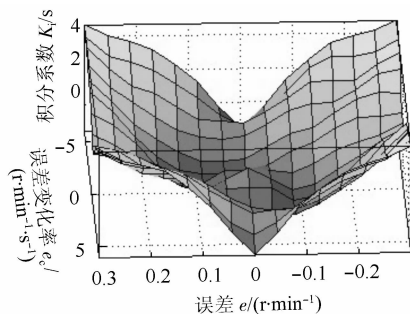


图 6 K_i 的模糊整定规则

Figure 6 Fuzzy PI parameter tuning rules of K_i

对上述系统进行 MATLAB 仿真,如图 7 所示。

仿真时间为 2.0 s,在 0 s 时,双电机同轴系统启动,经过 0.65 s,转速达到 1 420 r/min,通常双电机同

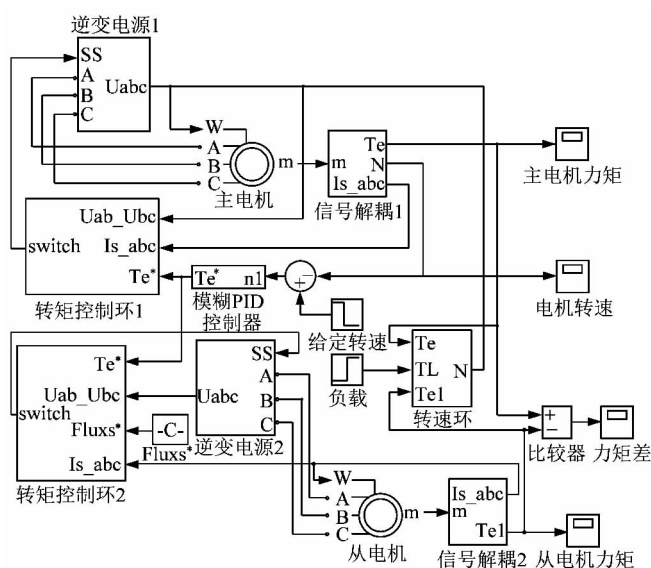


图 7 基于直接转矩控制的同轴双电机系统仿真实验图

Figure 7 Coaxial dual motor system basing on direct torque control

轴是为获得比较大的输出转矩,故此假设负载转矩为 $100 \text{ N} \cdot \text{m}$,并在 0.8 s 时加入负载,观察力矩是否平衡,在 1.2 s 时将电机的转速降为 1 200 r/min,观察力矩是否平衡,并将模糊参数自整定 PID 与传统 PID 相比较,仿真结果如图 8 ~ 12 所示。

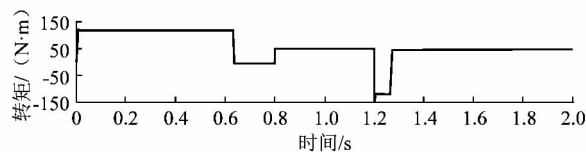


图 8 主电机转矩输出

Figure 8 Main motor output torque

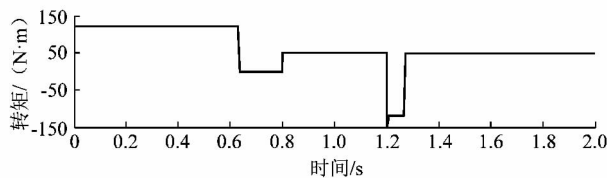


图 9 从电机转矩输出

Figure 9 Auxiliary motor output torque

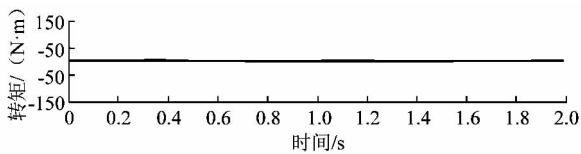


图 10 双电机输出力矩差

Figure 10 Output torque difference of dual-motor

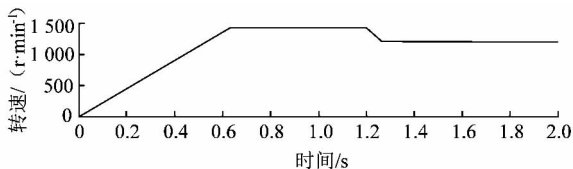


图 11 基于模糊参数自整定 PID 的电机速度仿真

Figure 11 Speed simulation basing on fuzzy parameter self-tuning PID

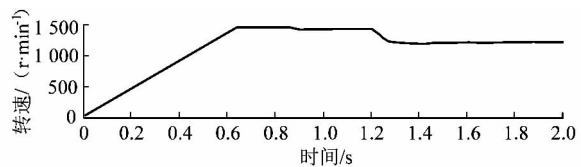


图 12 基于传统 PID 的电机速度仿真

Figure 12 Speed simulation of motors basing on traditional PID

由图 8 和图 9 可知,在 0.65 s 以前主从电机均以最大力矩启动,转速达到 1 420 r/min 后 2 台电机启动完毕;在 0.8 s 时同轴双电机系统加入 100 N·m 的负载,此时 2 台电机的力矩均为 50 N·m 左右,功率达到平衡;在 1.2 s 时,电机转速由 1 420 r/min 下降到 1 200 r/min,2 台电机经过 0.1 s 的抖动,力矩再次达到平衡。由图 10 可知,2 台电机的转矩差一直在 0 N·m 上下波动,由此可见在中速和高速时,该系统均能够使负载平均分配,从而使功率达到平衡。由图 11 和图 12 可知,相对于传统 PID,基于模糊参数自整定的 PID 转速曲线更硬,说明转速动态性能更好,转矩跟踪更精确。

4 结语

由 $\Delta P = \Delta Tn$, 电机功率 ΔP 为电机转矩 ΔT 与转速 n 之积可知,2 台电机同轴运行时,速度被强制同步,这时转矩的细微差距将导致较大的功率差,因此使 2 台电机的转矩相等是有效的功率平衡方法。本文将直接转矩控制应用于同轴双电机的功率平衡系统,通过定子磁链的估算,并使用模糊参数自整定 PID 进行控制,通过 MATLAB 仿真证明了其可行性。通过仿真证明,2 台电机输出功率基本上达到了一致,且精度较高,动态性能好,而普通 PID 控制的系统其速度的响应动态性能较差。本文研究的电机为功率相等的 2 台电机在参数不一致时的功率平衡,而没有涉及电机功率不一致时 2 台电机力矩按功率大小等比例输出的功率平衡研究,这是本课题以后研究的难点。

参考文献:

- [1] 李秀芬,雷跃峰. 电动汽车关键技术发展综述[J]. 上海汽车,2006(1):8-10.
- [2] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer controls for manufacturing systems [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1980, 102(4): 265-272.
- [3] 汤杰,李志勇. 变频调速在双电机同步传动中的应用[J]. 电气传动, 2008, 38(11): 8-11.
- [4] 田瑞,赵艳. 变频器在多电机传动中的应用[J]. 电气传动, 2006, 36(4): 61-64.
- [5] 张超,裴延涛. 基于矢量控制的同轴串联双电机负载平衡系统[J]. 电工电气, 2010(2): 33-34.
- [6] GUO L, SCHONE A, DING Xiachun. Control of hydraulic rotary multi-motor systems based on bilinearization[J]. Automatica, 1994, 30(9): 1445-1453.
- [7] 李夙. 异步电机直接转矩控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2011.
- [8] 张宇林,蒋鼎国,焦竹青. 异步电动机低转矩脉动直接转矩控制研究[J]. 电气传动, 2008, 38(9): 27-30.
- [9] 葛薇,朱张青. 模糊 PID 控制及其进展[J]. 安徽职业技术学院学报, 2012, 6(4): 9-19.
- [10] 吴俊,邱建琪,史涔激,等. 基于 FPGA 的异步电动机变频调速系统[J]. 机电工程, 2012, 29(8): 941-944.

[信息·简讯]

· 行业简讯 ·

西门子以数字化助力企业

数字化现已成为几乎所有工业领域实现增长的决定性因素。数字化是提高生产力、效率与灵活性的关键,因此,西门子在 2015 年汉诺威工业博览会(Hannover Messe)上将“通向工业 4.0 之路——引领数字化企业进程”为主题,全面展示电气化、自动化和数字化这三大增长领域的各种解决方案与产品。除了将可再生能源并入能源系统进行展示外,西门子还将展示包括全集成自动化(TIA)、全集成驱动系统(IDS)、工业软件和工厂数据服务等工业解决方案。西门子展位还将设立“数字化展厅”,展示数字化技术在制造业、过程工业以及机械行业的具体应用实例。

在“数字化企业”主题下,西门子提供基于高性能软件技术的面向未来的平台,特别瞄准制造业客户,能够在未来几年内使工业 4.0 的广泛要求得以满足。

(西门子(中国)有限公司 传播部)