

文章编号: 1001-0920(2011)06-0957-04

## 基于环形耦合策略的多电机同步控制研究

刘 然<sup>a</sup>, 孙建忠<sup>a</sup>, 罗亚琴<sup>a</sup>, 孙 伟<sup>b</sup>

(大连理工大学 a. 电气工程学院, b. 机械工程学院, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 针对目前广泛应用的交叉耦合控制策略在电机数量较多时, 其控制结构复杂且补偿规律难以确定的问题, 提出了基于耦合补偿原理与同一给定控制相结合的环形耦合控制策略, 降低了控制结构的复杂度. 建立了环形耦合策略的控制结构, 对其有效性进行了数学证明. 将环形耦合控制策略应用于多电机传动系统, 并与主从控制策略对比, 结果表明, 环形耦合控制策略具有更高的同步精度和更好的动态性能.

**关键词:** 环形耦合控制策略; 多电机传动; 同步控制; 同步误差

**中图分类号:** TP273

**文献标识码:** A

## Research on multi-drive synchronization control based on ring coupling strategy

LIU Ran<sup>a</sup>, SUN Jian-zhong<sup>a</sup>, LUO Ya-qin<sup>a</sup>, SUN Wei<sup>b</sup>

(a. School of Electrical Engineering, b. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China. Correspondent: LIU Ran, E-mail: psincos@163.com)

**Abstract:** Multi-motor synchronization control strategies are studied in this paper. To reduce the complexity of control structure and the difficulty in determining the compensation law of commonly used cross coupling control strategy when the number of motors is large, a ring coupling strategy based on the thought of the parallel control with error compensation is presented. The control method with the ring coupling strategy is proved. The proposed strategy is applied to the control of a four-motor system, and simulation results show that the proposed control strategy has higher synchronization accuracy and better dynamic performance compared with that of master-slave control strategy.

**Key words:** ring coupling control strategy; multi-motor system; synchronization control; synchronization error

### 1 引言

随着多电机传动的广泛应用, 多电机同步控制成为工业生产控制中备受关注的问题. 由于生产工艺的需要, 目前一般情况下控制驱动轴的各电机之间相互独立, 不存在物理连接, 如钢厂的连铸机、冷(热)轧机、纺织业的染整机、造纸机、拉丝机等. 这些生产工艺的效率和产品质量, 与驱动电机的同步性能密切相关, 有些甚至对同步精度提出了很高的要求. 目前利用多电机实现的传动系统已经发展出几种不同的同步控制策略, 主要包括同一给定控制、主从控制、虚拟总轴控制、交叉耦合控制和偏差耦合控制等<sup>[1]</sup>.

采用同一给定控制策略的系统中, 电机之间没有耦合, 任一台电机上发生的扰动不会影响到其他电机, 所有电机对参考信号实现一致跟随. 当系统运行过程

中某一台电机受到扰动时, 各电机之间将会产生转速偏差, 而且各传动轴的驱动特性不匹配等因素也会对同步性能造成影响, 因此这种策略的同步性能较差.

主从控制是将多电机设为一台主电机和若干从电机, 以主电机的输出转速作为从电机的转速参考值, 从电机转速实现对主电机的跟随. 采用主从控制策略的系统控制结构简单明了, 但系统中从电机受到的扰动不会反馈给其他电机, 电机之间的同步精度不能够得到保证, 抗干扰性不够理想.

虚拟总轴控制模拟机械总轴的物理特性, 系统输入信号要经过虚拟总轴的作用才能得出各电机的参考信号. 当电机载荷产生扰动时, 各电机转速均向减小该电机与其他电机之间速度差的方向变化. 采用虚拟总轴控制策略的系统中各电机的参考信号并不一

收稿日期: 2010-03-09; 修回日期: 2010-05-27.

基金项目: 国家973计划项目(2007CB714006).

作者简介: 刘然(1978-), 男, 博士生, 从事盾构机同步控制的工作; 孙建忠(1965-), 男, 教授, 从事特种电机及其控制、现代交流调速技术等工作.

定等于系统输入信号,因此在主参考值和每个电机实际转速之间可能存在偏差<sup>[2]</sup>.

交叉耦合控制策略最主要的特点是将两台电机的转速进行比较,将得到的转速差作为附加的反馈信号,对两台电机转速分别进行补偿,从而获得良好的同步控制精度.这种控制策略适用于两台电机的同步控制,随着电机数量的增加,其控制算法复杂程度将大大增加<sup>[3-4]</sup>.

偏差耦合控制策略基于交叉耦合控制策略,其基本思想是将某一台电机的转速同其他电机转速分别进行比较,然后将得到的转速偏差相加后作为该电机的转速补偿信号,用以补偿各个电机之间转动惯量的差异.该控制策略可用于2台以上电机的系统,但随着电机数目的增加,其控制结构的复杂程度逐渐增加,耦合补偿规律也愈加难以确定<sup>[5]</sup>.

此外,为了提高系统的同步控制精度、增强系统的鲁棒性,研究人员将现代控制方法与已有的控制策略相结合,提出了各种适用于多电机传动系统的同步控制方法.文献[6]提出了在系统反馈回路中引入单神经元自适应PID的补偿控制方法,进行速度前馈补偿,使系统的鲁棒性得到提高<sup>[6]</sup>.文献[7]提出了交叉耦合控制器和QFT鲁棒控制器相结合的控制方法,以解决扰动及其他不确定性因素对同步精度的影响问题<sup>[7]</sup>.

在目前已有的各种多电机同步控制策略中,比较受关注的是交叉耦合控制策略和偏差耦合控制策略.但在受控电机较多时,基于这两种策略的系统控制结构也越加复杂,而且补偿规律也难以确定.因此,本文提出一种适用于多电机同步控制的环形耦合控制策略,不但能够保证系统的同步性能,而且相对于上述两种耦合控制策略,能降低系统控制结构的复杂程度.

## 2 环形耦合控制策略

基于环形耦合策略的多电机同步控制系统结构如图1所示.环形耦合控制策略是基于耦合补偿原理与同一给定控制相结合的思想形成的.环形耦合控制策略在考虑每台电机转速与给定转速之间误差(跟踪误差)的同时,还考虑该电机转速与相邻一台电机转速之间的误差(同步误差).由图1可见,任何一台电机的转速变化都会对相邻一台电机形成反馈,所有电机之间两两耦合,最终形成耦合环.

采用环形耦合控制策略的系统中所有电机对参考信号实现一致跟随,保证了系统在启动或停机阶段具有良好的同步性能.如图1所示,同步误差补偿仅在相邻的两台电机之间进行.当系统运行过程中某一电机受到扰动而引起转速变化,会造成该电机与相

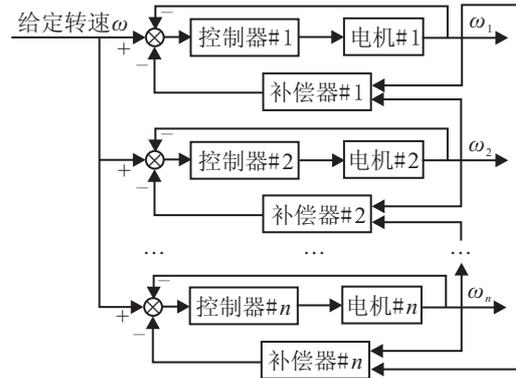


图1 环形耦合控制策略结构

邻的两台电机之间都存在同步误差.在环形耦合控制策略中,这两部分同步误差将通过补偿模块分别对相邻一台电机和受扰动电机本身形成反馈.基于转速参考信号同一给定的多电机同步驱动系统与转速耦合补偿模块相结合,使系统起动过程跟随性能和稳态性能都得到提高,系统抗扰性进一步加强.

系统中各电机给定转速参考值相同,避免了虚拟总轴控制策略中各电机的参考信号与主参考存在偏差的问题.系统中每个补偿模块都只根据相邻两台电机的同步误差确定一台电机的补偿量,补偿器的复杂程度不随电机数量的增加而改变,相对于交叉耦合控制策略和偏差耦合控制策略,环形耦合控制更适合受控电机较多的系统.

控制器的设计思想是使速度误差收敛并稳定在零附近.在两轴同步旋转 $\alpha - \beta$ 坐标系下,感应电机的机械转动方程为

$$\dot{\omega} = \frac{n_p M}{J L_r} \Psi_{\alpha r} i_{\beta s} - \left(\frac{B}{J}\right)\omega - \left(\frac{1}{J}\right)T_L. \quad (1)$$

其中: $\omega$ 为电机转速, $\Psi_{\alpha r}$ 为转子磁通, $i_{\beta s}$ 为 $\alpha - \beta$ 坐标系下 $\beta$ 轴的定子电流, $M$ 为定、转子之间的互感, $J$ 为转动惯量, $L_r$ 为转子电感, $n_p$ 为转子极对数, $B$ 为摩擦系数, $T_L$ 为负载转矩.

令

$$f = \frac{n_p M}{J L_r} \Psi_{\alpha r} i_{\beta s} - \left(\frac{1}{J}\right)T_L, \quad b = \frac{B}{J},$$

则式(1)可记为

$$\dot{\omega} = f - b\omega, \quad (2)$$

所以对于第*i*台电机,有

$$\dot{\omega}_i = f_i - b_i \omega_i. \quad (3)$$

设第*i*台电机转速跟踪误差为

$$e_i = \omega_d - \omega_i, \quad (4)$$

其中 $\omega_d$ 为系统各电机给定转速参考值.

设第*i*台电机与第*i+1*台电机的同步误差为

$$\varepsilon_i = \omega_i - \omega_{i+1}, \quad (5)$$

则第  $i$  台电机经过环形耦合补偿模块修正后的跟踪误差为

$$E_i = e_i - K_i \varepsilon_i. \quad (6)$$

根据李亚普诺夫直接法可知, 对于非线性微分方程, 可以构造一个李亚普诺夫函数, 通过研究该函数的正定性及其对时间的沿系统方程解的全导数的负定或半负定性, 即可判定系统的稳定性.

以系统中第 1 台电机为例, 若要使  $E_1 \rightarrow 0$ , 则可以构造李亚普诺夫函数

$$V_1 = E_1^2/2 > 0.$$

若  $\dot{E}_1 = -c_1 E_1 (c_1 > 0)$  存在, 则有

$$\dot{V}_1 = E_1 \dot{E}_1 = -c_1 E_1^2 < 0,$$

因此  $E_1 \rightarrow 0$  时系统是全局渐近稳定的.

将式 (4) 和 (5) 代入 (6), 可以得到

$$\dot{E}_1 = \dot{e}_1 - K_1 \dot{\varepsilon}_1 = \dot{\omega}_d - \dot{\omega}_1 - K_1 \dot{\omega}_1 - K_1 \dot{\omega}_2. \quad (7)$$

将式 (3) 代入 (7), 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 = & \dot{\omega}_d - (1 + K_1)(f_1 - b_1 \omega_1) - K_1(f_2 - b_2 \omega_2) = \\ & -b_1 K_1 \varepsilon_1 - (b_1 + b_1 K_1 + b_2 K_1) e_1 + u_1, \end{aligned} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} u_1 = & \dot{\omega}_d - (1 + K_1) f_1 - K_1 f_2 + \\ & (b_1 + b_1 K_1 + b_2 K_1) \omega_d. \end{aligned}$$

如果有  $\dot{E}_1 = -c_1 E_1$ , 则有

$$\begin{aligned} -b_1 K_1 \varepsilon_1 - (b_1 + b_1 K_1 + b_2 K_1) e_1 + u_1 = \\ -c_1 (e_1 - K_1 \varepsilon_1), \end{aligned} \quad (9)$$

因此, 可以构造

$$\begin{aligned} u_1 = & (c_1 + b_1) K_1 \varepsilon_1 + \\ & (b_1 - c_1 + b_1 K_1 + b_2 K_1) e_1. \end{aligned} \quad (10)$$

此时, 满足  $E_1 \rightarrow 0$ .

以此类推, 可以同样构造  $u_i$ , 使得  $E_i \rightarrow 0$ .

### 3 基于环形耦合策略的同步控制

构建 4 台电机组成的多电机同步控制系统. 其中, 采用主从控制策略的系统中, 将电机 1 设为主电机, 电机 2~电机 4 设为从电机. 模型中电机类型采用笼式感应电动机, 额定功率为 37 kW, 额定电压为 380 V, 频率为 50 Hz, 定子电阻和电感分别为 0.087  $\Omega$  和 0.8 e-3 H, 转子电阻和电感分别为 0.228  $\Omega \pm 1\%$  和 0.8 e-3 H  $\pm 1\%$ , 互感为 34.7e-3 H  $\pm 1\%$ , 转动惯量为 2.98 kg·m<sup>2</sup>  $\pm 1\%$  (为考虑实际情况下各电机参数存在差异, 本文采用的电机模型对转子电阻和电感、互感及转动惯量取值各不相同), 摩擦系数为 0.1 N·m·s, 极对数为 2.

### 3.1 电机启动

4 台电机以恒转矩启动, 载荷大小为 700 N·m. 如图 2 所示, 系统采用两种控制策略时, 其同步误差都趋于零. 系统采用环形耦合控制策略时, 耦合补偿环节使得系统更加快速地达到稳定, 同步误差得到有效抑制, 并迅速收敛为 0. 根据曲线估算, 两种控制策略的相对动态速降<sup>[8]</sup> 分别为:

采用主从控制策略, 相对动态速降为

$$\sigma = \Delta\omega_{\max}/\omega_d \approx 57.5\%;$$

采用环形耦合控制策略, 相对动态速降为

$$\sigma = \Delta\omega_{\max}/\omega_d \approx 0.3\%.$$

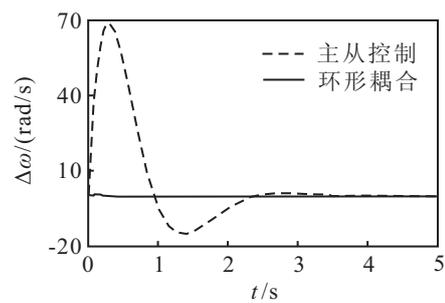


图 2 电机 1 和电机 2 之间同步误差曲线

由图 2 结果可知, 采用环形耦合控制策略的系统在启动阶段的同步性能明显优于主从控制策略.

### 3.2 电机载荷扰动

电机 2 在第 5 s 时载荷发生扰动 (如图 3 所示), 其他电机载荷保持为 700 N·m 不变. 对采用主从策略和环形耦合策略的控制系统进行对比分析, 结果如图 4 和图 5 所示.

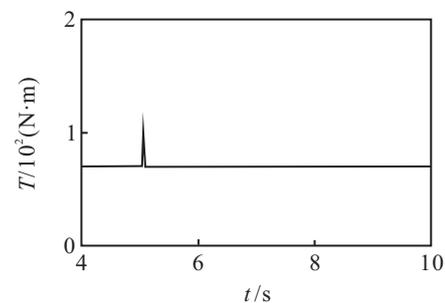


图 3 电机 2 载荷扰动曲线

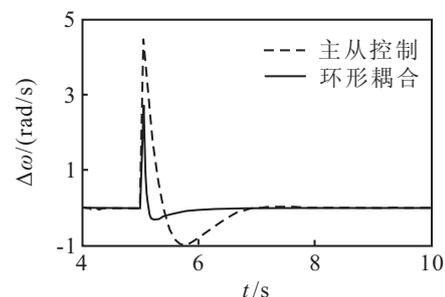


图 4 电机 1 和电机 2 之间同步误差曲线

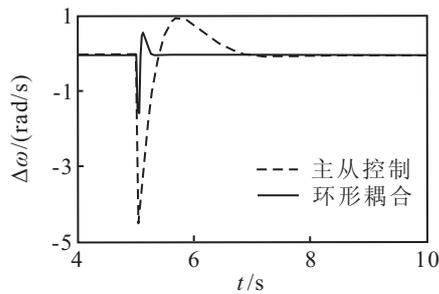


图5 电机2和电机3之间同步误差曲线

由图4和图5可知,电机载荷扰动对采用主从控制策略的系统中电机同步性能影响较大,扰动引起的同步误差在2s后逐渐收敛为0;而在采用环形耦合控制策略的系统中,出现扰动的电机与相邻两台电机的同步误差值均小于采用主从控制策略的系统,而且同步误差值在0.5~1s内收敛至0附近,并稳定运行.其中,采用主从控制策略时相对动态速降约为4%;采用环形耦合控制策略时相对动态速降约为2.3%.由此可见,耦合补偿环节不但使系统中电机扰动时产生的同步误差得到有效抑制,而且加快了其收敛速度.

### 3.3 结果分析

由电机启动仿真结果可知,当系统采用环形耦合控制策略时,在电机启动过程中,电机同步误差始终趋近于0并迅速收敛,因此具有良好的启动同步性能.为考察环形耦合控制策略的鲁棒性能,对电机加图3所示的扰动载荷,结果显示,当系统采用环形耦合控制策略时,电机载荷发生扰动引起的同步误差相对较小并快速收敛,其抗干扰性明显优于主从控制策略.基于上述分析可知,环形耦合控制策略明显地改善了系统动态和稳态特性,其扰动恢复时间缩短,振荡现象减弱,耦合补偿控制器不仅对系统的外部扰动具有很好的抑制能力,同时也对电机系统的参数差异具有很好的适应性和鲁棒性.

## 4 结论

基于耦合补偿原理与同一给定控制相结合的思想,提出了一种新的环形耦合控制策略,使得电机数量增多时,其控制结构的复杂程度能够保持不变.首先简述了现有的各种多电机同步控制策略,指出这些方法的特点和适用性,在此基础上提出了环形耦合控制策略,并对所提出策略的控制结构进行了介绍,利用李亚普诺夫函数证明了控制算法的收敛性.将所提出的控制策略应用于4台电机的同步控制系统,并与采用主从控制策略的系统进行比较,结果表明本文提

出的控制策略使系统具有良好的启动性能、动态性能和抗干扰性,保证了系统的同步精度,具有较快的响应速度,适用于对多台电机的同步控制,以及对同步精度要求较高的情况.

### 参考文献(References)

- [1] Francisco J Pkrez-Pinal', Ciro NGez', Ricardo Alvarez. Comparison of multi-motor synchronization techniques[C]. The 30th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society. Busan, 2004: 1670-1675.
- [2] Perez-Pinal F J. Improvement of the electronic line-shafting[C]. IEEE 35th Annual of Power Electronics Specialists Conf. 2004: 3260-3265.
- [3] Deng W, Low K S. Cross-coupled contouring control of a rotary based biaxial motion system[C]. IEEE/ICARCV/Intl 9th Int Conf on Control, Automation, Robotics and Vision. Singapore, 2006: 1-6.
- [4] Xiao Y, Zhu K Y. Optimal synchronization control of high-precision motion systems[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1160-1169.
- [5] Dogruel Cao, Li L Z, Chen C W, et al. Backstepping control of position synchronization system in crane lifter[C]. IEEE/ICAL/Intl Conf on Automation and Logistics. Qingdao, 2008: 2282-2285.
- [6] 祝淑萍, 刘德君. 单神经元PID双直线电机同步控制[J]. 微计算机信息, 2007, 23(6-1): 84-85.  
(Zhu S P, Liu D J. Control for synchronous drive of dual linear motors based on single neural PID[J]. Control & Automation, 2007, 23(6-1): 84-85.)
- [7] 孙宜标, 李萌萌, 郭庆鼎. 基于QFT的双直线电机鲁棒同步控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(3): 249-252.  
(Sun Y B, Li M M, Guo Q D. Robust synchronization control for dual linear motors based on QFT[J]. J of Shenyang University of Technology, 2008, 30(3): 249-252.)
- [8] 彭思远, 李旭宁, 马宏绪. 舞台现场四电机同步控制系统设计与方法研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 2008: 51-53.  
(Peng S Y, Li X N, Ma H X. System design and method research for four motors synchronous control system on the stage[D]. Changsha: College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, 2008: 51-53.)