

多电机同步控制综述*

韩仁银^{1,2}, 郭阳宽^{1,2}, 祝连庆^{1,2}, 贺庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100101;
2. 生物医学检测技术及仪器北京实验室, 北京 100101)

摘要: 多电机同步协调系统在电机控制领域得到广泛运用, 控制策略对多电机同步系统的性能起着决定性作用。针对多电机同步问题, 国内外学者进行了深入研究, 并提出了多种同步控制策略。综述近年来国内外提出的控制策略, 对控制对象的跟踪精度、鲁棒性、抗负载能力等进行比较分析, 在此基础上对多电机同步控制提出新的展望。

关键词: 同步控制; 多电机; 控制策略

中图分类号: TM 301.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)06-0008-05

Review of Multi-Motor Synchronization Control*

HAN Renyin^{1,2}, GUO Yangkuan^{1,2}, ZHU Lianqing^{1,2}, HE Qing^{1,2}

(1. Beijing Key Laboratory for Optoelectronic Measurement Technology, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100101, China;
2. Beijing Laboratory for Biomedical Detection Technology and Instrument, Beijing 100101, China)

Abstract: Multi-motor synchronous and coordinate system was widely used in the field of motor control. The control strategy played a important role in the performance of multi-motor synchronization system. Domestic and foreign scholars had conducted deep research, who aimed at the problem of multi-motor synchronization. They put forward a variety of synchronization control strategies. The control strategies proposed at home and abroad were reviewed. The accuracy of tracking, robustness and capacity of anti-load of the control object were analyzed. The new prospect of multi-motor synchronization control was proposed.

Key words: synchronous control; multi-motor; control strategy

0 引言

随着工业化和自动化程度的不断提高, 多电机协调控制成为国内外学者讨论的热点。在工业领域, 多电机协调控制直接影响生产的可靠性及产品质量。多电机同步协调主要有两种方式: 存在物理连接和不存在物理连接。存在物理连接的如机械方式, 因其结构简单而被广泛运用。由于机械方式同步采用的是共轴方式, 机械结构磨损大、控制精度不高, 且传递范围和距离有限。除上述存在机械共轴方式外, 其余同步控制即使是存

在物理连接, 但是不存在机械共轴。目前研究的多电机同步控制多是不存在机械共轴情况, 主要有以下几种控制结构: 同等控制、主从控制、交叉耦合控制、虚拟主轴控制、偏差耦合控制等^[1]。

1 控制策略

(1) 同等控制亦称并行控制。由调速控制系统给定同一速度, 只有当系统中负载严格相同时才能实现同步。该控制策略着重的是理论速度与实际速度之间的误差而不是不同电机之间的误差。两电机同等控制系统结构图如图 1 所示。

* 基金项目: 教育部“长江学者和创新团队”发展计划 (IRT1212); 北京市属高等学校创新团队建设及教师职业发展计划 (IDHT20130518); 北京信息科技大学校科研基金项目 (1625003)

作者简介: 韩仁银 (1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为生物医学检测及仪器。

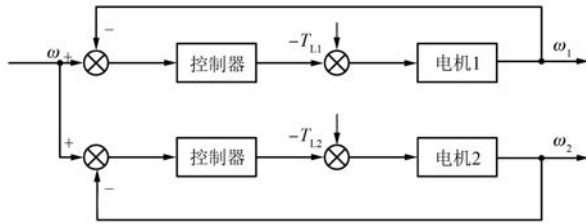


图1 两电机同等控制同步控制系统结构图

该控制策略优点在于启动、停止阶段的同步性能好,但是整个系统相当于开环控制,当受到外界扰动时,同步性能较差^[2]。

(2) 主从控制。以双电机为例,主从控制结构如图2所示。主电机输出作为从电机转速输入参考值,实现从电机对主电机速度跟踪。但是主从控制策略没有从机向主机的反馈环节,因而在实际应用场合,主机多为转动惯量大的电机,从机为转动惯量小的电机。

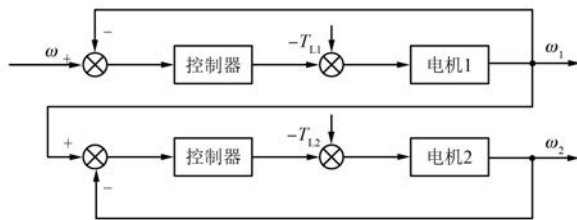


图2 主从控制同步控制系统结构图

(3) 交叉耦合控制。控制策略最早由 Koren 于 1980 年提出,其控制原理如图3所示。交叉耦合控制的特点是将速度或者位置进行比较作差,将差值作为系统反馈信号,并对该反馈信号进行跟踪。该系统能够反应任何一台电机负载变化。但是该控制策略不适用于两个以上的电机,因为计算两个以上电机的反馈近似值非常繁琐。

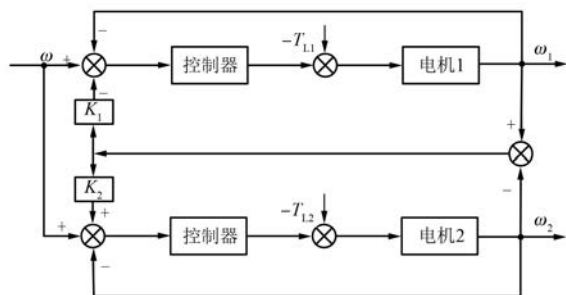


图3 交叉耦合控制系统结构图

(4) 虚拟主轴控制。最早由 Lorenz 和 Meyer 在相对刚度控制的基础上提出, Valenzula 和

Lorenz 对其进一步发展。两台电机的电子虚拟主轴控制结构图如图4所示。该方案模拟机械总轴同步的特性。系统的输入信号经过总轴作用后,得到单元驱动的参考信号,驱动单元跟踪的就是该参考信号。因为该信号是经过总轴作用,并经过滤波后得到的信号,可能存在主参考值和电机实际转速的偏差^[3]。

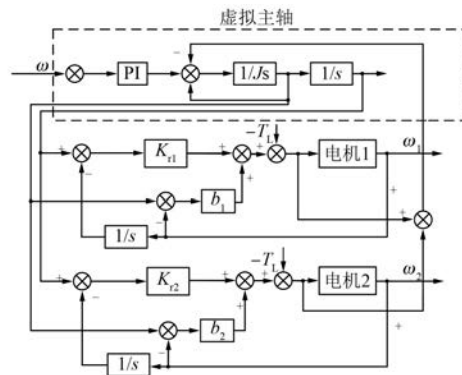


图4 虚拟主轴控制系统结构图

(5) 偏差耦合控制。控制策略是将某一台电机的速度反馈与其他电机的速度反馈分别作差,得到的偏差求和作为该电机的速度补偿信号,用增益来补偿各电机之间转动惯量的不同。

2 控制算法

随着研究深入,多电机同步控制相关算法除了传统PID控制外,还有许多先进的控制算法,如神经网络、模糊控制、滑模变结构、H[∞]控制等。

多电机同步控制的研究多是将控制策略与控制算法相结合。本文将介绍目前国内外学者在多电机同步方面已经取得的成就。

2.1 模糊神经网络相邻耦合同步控制

山东大学的张承慧教授等^[4]于2005年,针对造纸、印染等工业应用中存在非线性和参数辨识困难等限制了相邻耦合误差控制策略,提出了模糊神经网络同步控制,如图5所示。

模糊神经网络是将人工神经网络与模糊逻辑推理相结合的智能算法。其将人工神经网络的自学习和适应性与模糊逻辑推理的不确定性有机结合。模糊神经网络具有良好的自学习和非线性逼近的能力,可有效克服复杂系统中的参数时变、非线性等问题。

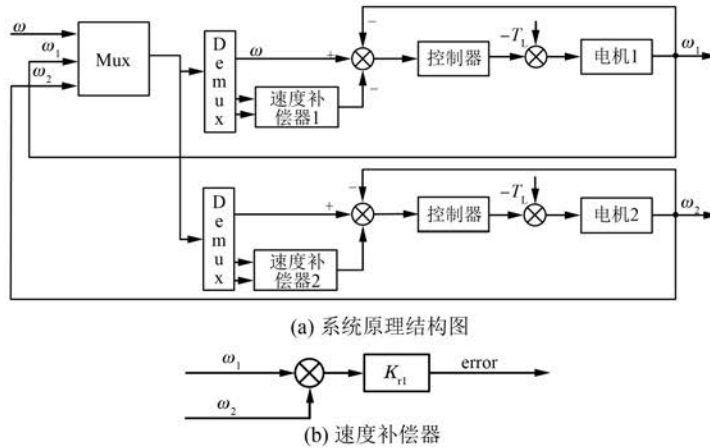


图5 偏差耦合控制系统结构图

在相邻耦合误差同步控制策略中,每轴的控制需要耦合相邻两轴的状态,方程式表示如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_1 = \dot{y}_1(t) + \beta[\varepsilon_1(t) - \varepsilon_n(t)] + \Lambda e_1^*(t), \\ u_2 = \dot{y}_2(t) + \beta[\varepsilon_2(t) - \varepsilon_1(t)] + \Lambda e_2^*(t), \\ \vdots \\ u_n = \dot{y}_n(t) + \beta[\varepsilon_n(t) - \varepsilon_{n-1}(t)] + \Lambda e_n^*(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_i(t)$ ($i=1,2,\dots,n$)——第 i 轴的控制函数;

$\varepsilon_i(t)$ ($i=1,2,\dots,n$)——第 i 轴同步误差;

β, Λ ——正耦合系数,以平衡系统的跟踪性能和同步性能。

定义转速误差函数:

$$E(t) = \frac{1}{2} \{ \Lambda e_i^2(t) + \beta [\varepsilon_i(t) - \varepsilon_{i-1}(t)]^2 \} \quad (2)$$

根据 BP 算法,定义网络权值学习规则:

$$w(k+1) = w(k) + \eta \left(-\frac{\partial E}{\partial w} \right) + \alpha [w(k) - w(k-1)] \quad (3)$$

式中: η ——学习速率, $\eta > 0$;

α ——平滑因子。

求得误差函数对权值的偏导数 $\partial E / \partial w$, 从输出层向前层方向进行,求得各层次的权值调整公式并按此调整。

仿真和试验证明,模糊神经网络相邻耦合控制器具有十分理想的性能和同步性能。

在此基础上,马正友^[5]设计了基于 ARM 的多电机同步控制系统。该系统以 Cortex-M0 为 MCU,结合相邻交叉耦合控制方法。由于 MCU 是进行离散采样计算,需将时间离散化,用微分项代替连续时间。试验结果表明,其设计的系统可以消除跟踪误差和同步误差。

2.2 环形耦合控制

大连理工大学的刘然等^[6]于 2010 年提出了环形耦合控制。环形耦合控制策略不仅需要考虑电机自身的跟踪误差,还要考虑相邻一台电机的同步误差。该控制策略采用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,可以实现电机的转速差在两两电机间实现补偿,对提高电机的同步性能具有明显的效果^[7]。环形耦合控制结构如图 6 所示。

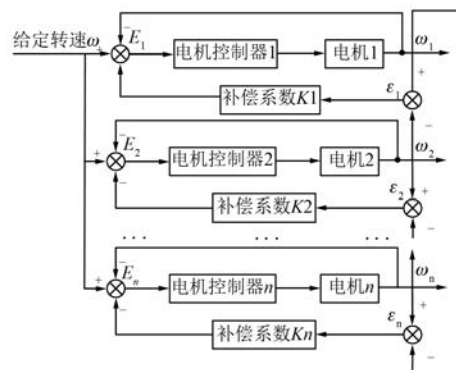


图6 环形耦合控制结构图

根据电机机械传动方程得到第 i 台电机的转速 ω_i 以及跟踪误差 e_i , 则

$$e_i = \omega - \omega_i \quad (4)$$

第 i 台电机两两间的同步误差 ε_i 为

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

补偿修正后的第 i 台电机的跟踪误差 E_i 为

$$E_i = e_i - k_i \varepsilon_i \quad (6)$$

将式 (6) 代入电机的传动方程, 根据 Lyapunov 大范围稳定性定理, 构造 Lyapunov 函数 $V_1 = E_i^2/2$ 。使 V_1 正定, \dot{V}_1 负定, 综合误差 E_i 稳定收敛到 0。该方法在一定程度上补偿了同一给定控制同步协调差。

2.3 自抗扰控制

20 世纪 90 年代, 韩京清等^[8-9] 从传统 PID 控制原理出发, 提出自抗扰控制理论。自抗扰控制技术发扬了 PID 技术的精髓, 并吸取现代控制理论的成就, 其集成了经典控制理论与现代控制理论的优点, 提出“观测+补偿”的方法^[10]。自抗扰控制结构图如图 7 所示。江苏大学刘星桥教授等^[11] 于 2012 年提出基于二阶自抗扰技术的多电机同步控制策略。刘星桥教授以三电机同步控制为例, 采用“分离性原理”, 独立设计跟踪微分器、误差反馈、扩张状态跟踪器, 然后对各部分进行组合, 最终进行相关试验。其控制结构图如图 8 所示。控制器一定程度上能够克服超调量小与相应速度快之间的矛盾, 使从电机的速度跟随主电机速度变化。

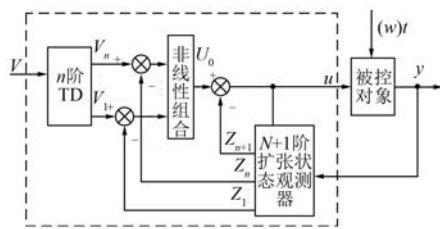


图 7 自抗扰控制结构图

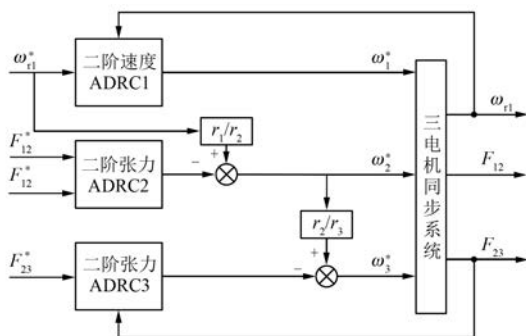


图 8 三电机同步控制系统

2.4 虚拟主轴

虚拟主轴同步方式至今已有 20 年, 其中 Robert D.Lorenz 教授^[12] 在虚拟主轴同步控制方面做了大量工作。该控制方式最早就是由 Robert D.Lorenz 教授提出, 并于 2001 年将此方法运用于实际的造纸机同步系统中^[13]。试验证明该方案对于局部负载过大或者存在负载扰动情况能够有效地保持系统同步性能。相比于传统的局部负载系统, 该方案可以避免局部系统崩溃的情况发生。

鉴于虚拟主轴在多电机同步方面的优良性能, 浙江大学方攸同教授等^[14-15] 在此方面也进行了相关研究, 并将其运用于高速列车牵引系统中。文献[15]通过对同等控制、主从控制、交叉耦合控制、虚拟主轴控制在同等条件下进行仿真试验, 仿真结构表明虚拟主轴控制同步跟踪性能优于其他三种控制方式。文献[14]对于在虚拟主轴控制策略下会出现较大的超调现象, 提出了对起动过程和运行过程进行分别控制的方案, 并在运行过程中对起动过程产生的误差给予补偿, 从而消除误差。仿真试验表明其同步性能较好, 抗扰动效果较好。

3 控制策略比较

比较上述控制策略, 其各有优劣。经典 PID 控制算法简单, 操作容易, 控制参数相对固定, 但是对非线性控制对象的控制效果不理想, 抗干扰能力差。

相对于经典 PID, 模糊神经网络相邻耦合控制结合了模糊控制和神经网络控制的优点。模糊控制不依赖于控制对象的模型, 模糊控制系统的鲁棒性强, 动态响应、调节效果都明显优于经典 PID 控制, 适合于非线性、时变、纯滞后系统控制。神经网络控制具有良好的学习和非线性逼近能力, 可有效克服复杂系统中的参数时变、非线性等问题。

相邻交叉耦合控制与环形耦合控制具有相同的核心理念, 相邻两台电机进行两两耦合, 并形成耦合环, 系统复杂程度不受电机数量影响。模糊神经网络相邻耦合通过获得权值调整式的值, 并通过学习进行权值调整。环形耦合控制是采取两两补偿的方式进行同步控制。上述两种控

制策略对于外部扰动能够较快收敛,动态性能和同步性能好,抗干扰能力强,鲁棒性好。

自抗扰控制技术的控制算法相对简单,不依赖于控制对象模型,且跟踪效果明显,响应速度快,解耦效果明显。

虚拟主轴控制具有机械轴同步控制的优点,同时具有极强的负载能力和负载抗干扰能力,且同步跟踪性能好,动态响应速度快。

4 展 望

多电机同步协调技术在国内外的工业领域有着广泛的运用,同步协调控制技术主要围绕以下几点研究:

(1) 高跟踪精度。跟踪精度直接反映多电机同步协调系统的控制性能,要求多电机系统不但能够同步,还需要对不同类型的输入信号进行高精度跟踪。

(2) 强抗干扰能力和鲁棒性能。在实际场合,抗干扰能力是控制系统稳定性的最直接反映。随着工作时间和环境的变化,系统的控制参数存在变化的可能,就对系统的鲁棒性提出了较高的要求。

(3) 优良的负载特性。多电机同步系统不仅要求在低载荷情况下具有好的同步特性,还需具备在大负载条件下保持优良的同步特性。如高速列车牵引系统。

(4) 较快的动态响应特性。较快的动态响应特性使系统能够快速跟随输入信号。

(5) 高可靠性和稳定性。系统的可靠和稳定是系统功能实现的前提。

5 结 语

本文根据目前研究较多的多电机同步控制系统作简单的介绍,分析了4种控制的原理和特点,并对多电机协调控制系统技术的发展进行了展望。

【参考文献】

[1] PKREZ-PINAL F J, NGEZ C, AIVAREZ R. Comparison of multi-motor synchronization techniques

[C]// The 30th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society, Busan, 2004: 1670-1675.

[2] 王国亮.基于模糊 PID 补偿器的多电机同步控制策略研究[D].沈阳:东北大学,2006.

[3] PEREZ-PINAL F J. Improvement of the electronic line-shafting [C] // IEEE 35th Annual of Power Electronics Specialists Conf, 2004: 3260-3265.

[4] 张承慧,石庆升,程金.一种多电机同步传动模糊神经网络控制器的设计[J].控制与决策,2007,22(1): 30-34.

[5] 马正友.基于 ARM 的多电机同步控制系统的设计[J].微特电机,2015,43(3): 66-68.

[6] 刘然,孙建忠,罗亚琴,等.多电机滑模环形耦合同步控制策略研究[J].中国机械工程,2010,21(22): 2662-2665.

[7] 刘然,孙建忠,罗亚琴,等.基于环形耦合策略的多电机同步控制研究[J].控制与决策,2011,26(6): 957-960.

[8] 韩京清.自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.

[9] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control[J]. Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.

[10] HAN J Q. From PID to active disturbance rejection control [J]. Industrial Electronics, 2009, 56(3): 900-906.

[11] 刘星桥,唐琳,周丽.二阶自抗扰控制器在三电机同步系统中的应用[J].电工技术学报,2012,27(2): 179-184.

[12] LORENZ R D, SCHMIDT P B. Synchronized motion control for process automation[C]// Conf Rec IEEE- IAS Annu Meeting, 1989: 1693-1699.

[13] VALENZUELA M A, LORENZ R D. Electronic line-shafting control for paper machine drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 37(1): 158-164.

[14] 丁立,方攸同,蒋毅.高速列车牵引电机的同步虚拟主轴控制[J].机电工程,2014,31(10): 1311-1315.

[15] LI J, FANG Y T, HUANG X Y, et al. Comparison of synchronization control techniques for traction motors of high-speed trains [C] // Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2014 17th International Conference on, 2014: 2114-2119.

收稿日期: 2016 -11 -09