

大惯量负载多电机驱动系统协调控制方法综述^{*}

杨春雨¹, 孟凡仪¹, 许一鸣¹, 黄新利²

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008;

2. 酒泉卫星发射中心, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: 大惯量负载往往采用多个电机协同驱动, 整体系统的稳态和动态性能都与多电机驱动系统的协调控制密切相关。根据国内外多电机驱动系统协调控制的研究成果, 综述相关控制结构和控制算法。通过对比分析, 说明各种控制方法的优缺点和适用场合。最后, 根据目前的工业需求, 展望了多电机驱动系统协调控制的研究方向和发展趋势。

关键词: 多电机驱动系统; 协调控制; 大惯量负载; 控制结构; 控制算法

中图分类号: TM 301.2 文献标志码: B 文章编号: 1673-6540(2019)03-0001-07

Coordinated Control Methods for Multi-Motor Drive Systems of Large Inertia Load: A Survey^{*}

YANG Chunyu¹, MENG Fanyi¹, XU Yiming¹, HUANG Xinli²

(1. School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Jiuquan Satellite Launch Center, Jiuquan 735000, China)

Abstract: Large inertia load was often driven by multiple motors. The steady state and dynamic performance of the whole system was closely related to the coordinated control of the multi-motor drive systems. According to the existing coordinated control methods for multi-motor drive systems, the related control structures and control algorithms were surveyed. By comparison, the advantages and disadvantages of each existing coordinated control method were analyzed and the corresponding applicable engineering fields were provided. Finally, according to the current industry demands, the research directions and development trends of coordinated control of multi-motor drive systems were presented.

Key words: multi-motor drive system; coordinated control; large inertia load; control structure; control algorithm

0 引言

对于大惯量负载, 例如水泥窑^[1]、造纸^[2]、带式输送机^[3]等, 为了增加驱动系统结构的灵活性、减小电机体积、减少能耗, 常常采用 2 台或者多台电机协同驱动。多电机驱动系统能否安全可靠地运行, 直接影响到整个运动体的生产效率和产品

质量, 甚至还会导致生产安全问题。因此, 大惯量负载多电机驱动系统的协调控制研究具有重要的学术价值和广泛的应用前景。

多电机驱动系统根据其耦合方式^[4]可以分为无物理联接、刚性物理联接^[2,5]和柔性物理联接^[6]。无物理联接和柔性物理联接属于无轴传动系统, 刚性物理联接属于共轴传动系统^[7]。无轴

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(61873272)

作者简介: 杨春雨(1979—), 男, 教授, 研究方向为多电机控制系统设计。

孟凡仪(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为多电机协调控制。

许一鸣(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为柔性机器人的运动控制。

传动系统具有机械结构简单、各电机单元信号互不干扰等特点;但是其在降低硬件设计成本的同时增加了电气控制的成本,且对操作和维护人员的要求较高。共轴传动系统中各电机单元通过齿轮、链条等联接,便于实现多电机同步运动,具有连接牢固可靠、控制简单、各电机信号交互等特点;但是该联接方式又具有机械结构复杂、灵活性差、噪声大、传动距离短等缺点,并且随着运行时间变长,器件磨损和系统误差将进一步增大,限制了共轴传动系统在一些场合的推广和应用。

多电机驱动系统协调性能的好坏,主要取决于系统跟踪误差和同步误差的大小^[8]。跟踪误差是指系统中每个电机单元的输出值与期望值之间的差值,即负载或外部扰动发生变化时电机稳态和动态跟踪能力。跟踪误差的大小取决于单电机单元控制系统的设计,尤其是当负载变化或外界扰动发生时,如何保证电机系统对输入信号的跟踪控制、减小电机的跟踪误差,对保证多电机系统的同步性能显得尤为重要。同步误差是指各电机单元之间的输出值差值,一般包括速度同步和功率平衡。速度同步要求各电机之间在动静态过程中保持速度一致或者按照一定比例运行^[9]。在一些场合中(如多电机柔性联接),速度不同步会导致皮带张力波动过大,造成断带或打滑。功率平衡是指在动静态过程中各电机的输出功率保持一致或者按比例分配给各个电机单元^[3,10]。在一些大惯量负载运动过程中,功率不平衡易导致其中一台甚至多台电机过载或烧毁。因此,多电机驱动系统协调控制的目标是在保证单台电机性能的同时,保证速度同步和功率平衡。

在理想条件下,各电机间的速度、功率分配比应该相同或者成一定比例。但对于实际系统,有多种原因影响多电机驱动系统协调性能:(1)因生产厂家或者生产过程的不同,各电机参数、速度、功率等不可能完全匹配;(2)电机间信号传输延迟;(3)机械设备出现机械振荡甚至是机械共振;(4)跟踪曲线的非线性和不确定性;(5)跟踪曲线的进给速度;(6)负载的不确定性;(7)安装环境及其布局不完全相同;等等。通过选择合适的电机型号、调整安装电机等过程,可以降低这些因素的影响,但是并不能完全消除影响。因此,研究多电机驱动系统中各电机单元参数不同、存在

负载扰动或外部扰动等动态情形下的多电机协调控制方法是提高系统性能的关键,有助于进一步扩展多电机系统的应用范围。

多电机驱动系统协调控制方法的优劣取决于控制结构和控制算法两个方面。本文针对大惯量运动体多电机驱动系统协调控制方法进行综述,总结现有多电机驱动系统的协调控制结构和控制算法,对比分析现有方法的优缺点和适用领域,并对多电机驱动系统协调控制的发展方向进行了展望。

1 多电机驱动系统协调控制结构

多电机驱动系统协调控制结构按照耦合关系可以分为非耦合控制结构和耦合控制结构^[11-14]。

1.1 非耦合控制结构

非耦合控制结构指每个电机单元控制器的设计是相互独立的,没有信息交互。非耦合控制结构包括并行控制和主从控制结构。

并行控制指多台电机并联运行,系统中每个电机单元接收同一给定跟踪信号。并行控制结构框图如图1所示。

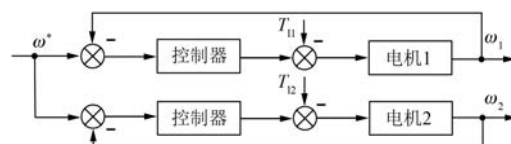


图1 并行控制结构框图

常见的并行控制有经转速环控制和经转矩环(或电流环)控制^[1,3,15]。经转速环控制结构,多电机驱动系统中的每个电机单元均有速度控制环和转矩控制环;经转矩环控制结构,多台电机共用一个速度环,每台电机均有转矩环。在刚性联接的双电机驱动系统^[16-17]中,各电机单元之间受到刚性联接轴的约束,适宜采用该种控制结构,一台电动机采用速度控制,使得转速跟随给定值,另一台电机跟随主机的转矩给定,实现两电机之间的负载平衡分配。

主从控制指多电机驱动系统中选取一台电机作为主电机,其余电机作为从电机,且主电机的输出信号(如转速信号)作为从电机的输入给定信号。以双电机系统为例,主从控制结构框图如图2所示。

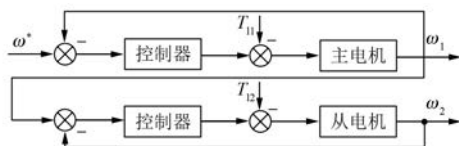


图2 主从控制结构框图

由图2可以看出,系统只有一个输入信号源(ω^*)作为主电机的输入给定,主电机的输出信号(ω_1)作为从电机的输入给定。若输入信号源发生变化,主电机接收信号后经过一定时间的延迟,从电机才能做出相应的跟随响应。

1.2 耦合控制结构

耦合控制结构,如交叉耦合控制^[8,12,18]、相邻交叉耦合控制^[19-20]和虚拟主轴控制^[14]等。其特点是各台电机之间互相影响,任意一台电机受到干扰或负载发生变化时都能引起整个系统的响应。

交叉耦合控制是目前多电机系统中应用最多的控制方式。以双电机系统为例,其控制结构如图3所示。该种结构由Koren^[21]最先提出。与非耦合控制结构相比,交叉耦合控制结构实现电机单元之间的信号交互,即每个电机单元的反馈信号除了自身的反馈信息还有电机单元之间的比较反馈信息。当系统中任一电机单元发生负载变化或者外部扰动时,其他电机单元都能及时接收变化信号,然后做出相应的响应,以实现多电机的同步协调控制。该种控制结构适用于柔性联接的多电机系统,例如带式输送机,可以同时实现速度同步和功率平衡。相邻交叉耦合结构是基于交叉耦合结构演化而来的。在该种结构中,各电机只考虑自身跟踪误差和与之相邻的2台电机的同步误差。

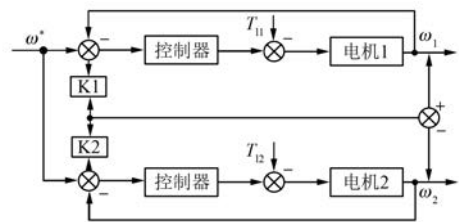


图3 交叉耦合控制结构框图

虚拟主轴控制模拟了一个虚拟主轴,将系统的给定信号通过主轴传递至各个电机单元,从而实现各个单元之间的同步,以对系统给定信号做

出快速响应。虚拟主轴控制结构如图4所示。

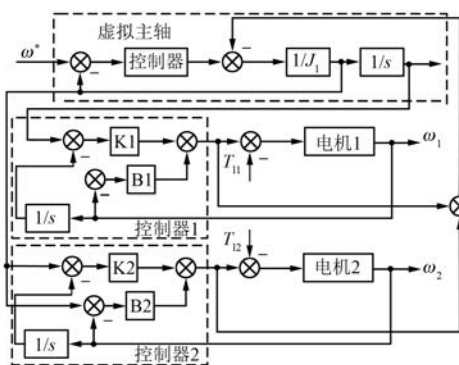


图4 虚拟主轴控制结构框图

文献[21]采用虚拟主轴同步控制研究高速铁路牵引同步系统,取得了优异的控制效果。

1.3 新型控制结构

针对传统控制结构的局限性,学者们提出新型控制结构^[22-23]。例如采用虚拟电机的改进偏差耦合结构^[24]。它是在传统偏差耦合结构的基础上改进而来,如图5所示。该种控制结构在原有的多电机驱动中加入了一台“虚拟机”,转速环控制器的输入误差中加入了自身电机和虚拟电机的转速差,每台电机在起动过程中跟随虚拟电机的运行轨迹,解决了传统偏差耦合控制结构在多电机转速控制中起动过程同步误差较大的问题。

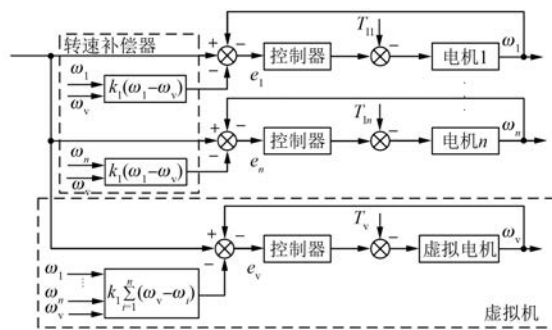


图5 改进偏差耦合结构框图

1.4 小结

根据实际系统的要求,合理选择协调控制结构,可以得到适当的协调控制性能。上述多电机驱动系统协调控制结构的优缺点总结如下。

(1) 非耦合控制结构不受电机单元数量限制、结构简单,其缺点是协调控制精度取决于各电机的参数,但是由于生产过程和现场工作环境的

不同,电机参数又很难保证严格相等,因此控制精度不高。非耦合控制结构适用于同步电机数量较多、各电机参数相等且控制精度要求不高、负载扰动不会发生剧烈变化的场合。该类控制结构一般很难同时实现速度同步和功率平衡。

(2) 耦合控制结构在动态和稳态响应过程中都具有较好的同步性能,但设计过程相对复杂。耦合控制结构适用于同步电机数量较多、干扰信号较多、负载多变且严格要求电机间协调控制的场合。该种控制结构各台电机信号相互耦合,可以实现同时要求速度同步和功率平衡的多电机驱动系统。对于交叉耦合结构而言,只适用于双电机系统,同步性能可调节;相比于交叉耦合同步结构,虚拟主轴控制和相邻交叉耦合控制同步精度和动态性能更好,且不局限于双电机驱动系统。该类控制结构的缺点是同步性能和动态性能相互影响,某一电机发生故障可能造成整个系统不能正常运行。

(3) 经传统控制结构改进后的新型控制结构,在一定程度上改进了原控制结构存在的问题,且不增加系统的复杂性,可有效提高系统的协调性能。加入虚拟电机的改进偏差耦合控制结构,在起动时通过增大虚拟电机的转动惯量来减少控制器的饱和状态时间,且减少了系统的复杂性。这种结构更适用于电机数目较多、起动速度较大的多电机驱动系统。

2 多电机驱动系统协调控制算法

多电机驱动系统协调控制算法主要用于单电机跟踪控制和多电机同步误差补偿。传统方法是大家熟知的 PID 控制^[25-26] 算法。现代先进控制算法包括模型预测控制(MPC)、自适应控制、神经网络控制和模糊 PID 控制。

2.1 MPC

MPC 是一种先产生于实践后发展成理论的非常实用的先进控制算法,其控制特点是在有限时域内进行滚动优化求解,包括动态矩阵算法、模型算法、广义预测算法等。MPC 三要素为:预测(内部)模型、滚动优化、反馈控制。MPC 经典控制原理框图如图 6 所示。

图 6 中, y_{sp} 表示系统的设定输出, y_r 表示参考轨迹, u 为输入, y 为实际输出值, y_m 为模型输出,

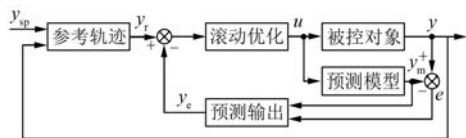


图 6 MPC 经典控制原理框图

y_e 为预测输出。

MPC 用于电机控制的研究越来越多^[25, 27-28], 且应用形式多样化,既可用于双闭环结构控制,也可用于设计单闭环控制结构。以用于单台电机的单闭环控制结构为例,其控制框图如图 7 所示。

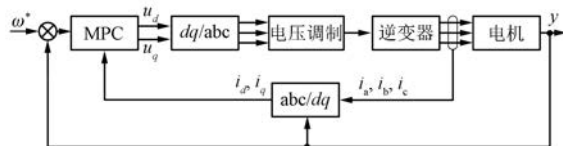


图 7 电机模型预测控制原理框图

2.2 自适应控制

自适应控制^[8] 属于现代控制方法,适用于具有不确定性的系统,应用广泛。自适应控制是一种基于数学模型的控制算法,不需要精确的模型和先验知识,只需要在系统运行过程中不断获取模型信息,使得模型逐渐趋于完善。在多电机驱动系统协调控制研究成果中,有增益自调整和模型参考自适应^[29] 两种方法,其中单输入自适应控制原理框图如图 8 所示。

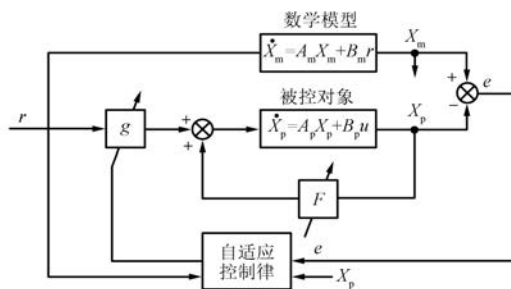


图 8 单输入自适应控制原理框图

图 8 中, g 为前馈增益, F 为反馈增益。由图 8 可知:

$$\begin{aligned} \dot{e} &= \dot{X}_m - \dot{X}_p = (A_m X_m + B_m r) - (A_p X_p + B_p u) = \\ &= A_m X_m + B_m r - (A_p + B_p F) X_p - B_p g r = \\ &= A_m e - (A_p - A_m + B_p F) X_p + (B_m - B_p g) r \end{aligned} \quad (1)$$

自适应控制的任务是设计合适的 g 、 F 和自

适应律,使得闭环系统稳定。

2.3 神经网络控制

神经网络是根据生物神经网络的工作原理形成的一种数学模型。经典的神经网络控制结构框图如图9所示。

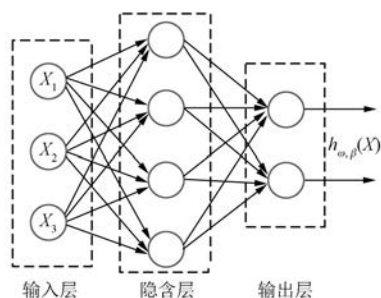


图9 神经网络控制原理框图

图9是一个包含三个层次的神经网络:输入层、隐含层、输出层,其中输入层有3个输入单元,隐含层有4个单元,输出层有2个单元,圆圈代表神经元。每条连接线对应一个不同的权重(其值称为权值),其中输入层到隐含层之间的权值 ω 在一定范围内随机生成,隐含层到输出层之间的权值 β 需要训练得到。

文献[30]将神经网络控制应用于多电机驱动系统协调控制,其高度非线性映射的特点保证了系统模型的精度,还使得系统具有预测性和自学习能力。

2.4 模糊PID控制

模糊PID控制是模糊控制与PID控制的结合,是智能控制与传统控制策略相结合形成的一种混合控制策略。模糊控制在电机领域应用日益广泛^[20,31-32]。模糊控制与其他控制算法的结合,更能凸显出其优势。模糊PID控制原理框图如图10所示。

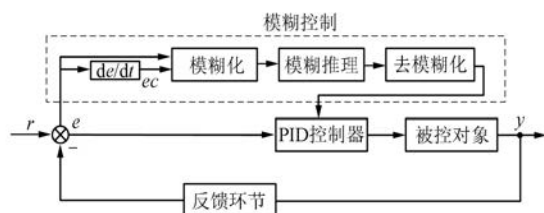


图10 模糊PID控制原理框图

模糊PID控制原理是根据系统输入和输出的差值得到 e 和 ec ,经过模糊化、模糊推理、去模糊

化几个步骤后,得到的3个输出量分别乘以相对的比例系数,得到3个精准的输出量 ΔK_P 、 ΔK_I 、 ΔK_D ,即PID控制器系数的变化量,再分别与原始PID控制器的3个参数值相加,得到调整后的控制参数。经典PID控制的控制规律可以用式(2)表示:

$$u(n) = K_P e(n) + K_I \sum_{i=0}^n r(i) + K_D [e(n) - e(n-1)] \quad (2)$$

式中: u_n ——第 n 个采样控制输入量;

$e(n)$ ——第 n 个采样时刻系统输入和输出的差值。

调整后的控制律变为

$$u(n) = (K_P + \Delta K_P) e(n) + (K_I + \Delta K_I) \sum_{i=0}^n r(i) + (K_D + \Delta K_D) [e(n) - e(n-1)] \quad (3)$$

2.5 小结

适当选择控制算法,可以实现不同环境下的多电机驱动系统协调控制。上述控制算法的优缺点总结如下。

(1) 传统控制策略,例如PID控制,方法简单,易于实现,适用于多电机协调性能要求不高的场合。但是对于具有非线性、强耦合等特性的多电机系统,传统控制算法达不到理想的控制效果,在负载变化较大时,抗干扰能力差、超调量大等缺点尤显突出。

(2) 自适应控制和MPC均属于现代控制策略。自适应控制适用于对象特性或扰动特性变化范围较大,同时又要求经常保持高性能指标的系统。自适应控制能够有效克服被控对象参数变化的干扰,在电动机控制中,有增益自调整系统和模型参考自适应控制系统两种形式的自适应方法。其不足之处在于,数学模型、算法较为复杂,辨识、校正计算量较大。MPC具有建模方便、动态控制效果好、鲁棒性强等特点,是一种计算机优化控制算法。其不足之处在于,在线计算量过大,还需要依靠经验和专用技巧设计。MPC适用于慢动态过程和具有高性能计算机的环境^[33]。

(3) 神经网络控制属于智能控制。随着计算机技术的不断发展,神经网络控制的研究也愈来愈多。该算法具有非线性映射能力,可近似描述非线性系统,还具有学习能力、计算能力以及智能

处理能力。但这类方法一般需要凭借经验设计,计算量较大。

(4) 现在越来越多的场合采用多种控制策略相结合的复合控制方法。例如模糊 PID 控制,综合了模糊控制动态响应性能好、PID 控制精度高等特点,使得系统具有响应速度加快、调整时间缩短、超调较小等优点,同时保证了系统的鲁棒性。多种策略相结合可以突出各种算法的优点,提高系统性能。但是,复合控制方法不能完全避免各种算法的缺点,比如模糊 PID 控制模糊规则的制订有一定的主观性,设计过程缺乏系统性。

3 展 望

综上所述,多电机驱动系统的协调控制旨在实现对各台电机的速度同步或/和功率平衡。多电机驱动系统高性能协调控制设计面临如下挑战:(1) 电机动态的非线性和参数不确定性;(2) 电机输出转矩的有界性;(3) 负载动态的不确定性(负载发生突变及运行过程中随机干扰和噪声等)。

虽然多电机驱动系统协调控制的研究已经得到很大的发展,但仍存在许多问题需要进一步的研究和探索。

(1) 降低控制器设计的复杂性。目前绝大多数的控制算法,随着电机数量的增加,控制器的设计也变得愈来愈复杂,且系统的瞬态性能也受到影响^[34]。需要设计合适的控制算法,既可以提高系统的协调性能,又不增加系统控制器设计的复杂性。

(2) 进一步改善多电机驱动系统的控制结构。对于一些高阶次、强耦合的大惯量负载多电机驱动系统,很难设计出合适的控制结构来同时实现多电机速度同步和功率平衡。针对传统控制结构存在的不足,设计新型控制结构,是目前需要解决的重要问题。

(3) 设计最优控制算法。控制算法和控制结构的设计,只能保证系统在特定条件下能够得到较好的协调控制效果,但无法实现最优协调性能,容易导致系统负载发生变化后恢复转矩同步的时间过长,存在电机过载的安全隐患。因此,急需设计最优协调控制算法,以实现系统协调性能的最大化^[35]。

4 结 语

本文综述了多电机驱动系统的研究成果,包括常见的控制结构和典型的控制算法,分析了现有方法的原理和特点,并对其优缺点做了比较。针对多电机驱动系统研究的难点,结合新的控制理论和技术,对多电机系统协调控制的发展进行了展望。

【参考文献】

- [1] BOGIATZIDIS I X, SAFACAS A N, MITRONIKAS E D, et al. A novel control strategy applicable for a dual AC drive with common mechanical load [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(6): 2022.
- [2] VALENZUELA M A, LORENZ R D. Electronic line-shafting control for paper machine drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37(1): 158.
- [3] XIAO D M, LI X J, HE K F. Power balance of starting process for pipe belt conveyor based on master-slave control [J]. IEEE Access, 2018, 6: 16924.
- [4] 李慧, 刘星桥, 李景, 等. 多电机同步协调系统控制策略 [J]. 电机与控制应用, 2014, 41(4): 6.
- [5] 李志勇. 硬轴联结多电机功率平衡控制方法 [J]. 电机与控制学报, 2009, 13(3): 398.
- [6] NIAN X, DENG Z. Robust synchronization controller design of a two coupling permanent magnet synchronous motors system [J]. Transactions of the Institute of Measurement & Control, 2014, 37(8): 17.
- [7] 韩仁银, 郭阳宽, 祝连庆, 等. 多电机同步控制综述 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(6): 8.
- [8] CHENG M H, LI Y J, BAKHOUM E G. Controller synthesis of tracking and synchronization for multiaxis motion system [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 22(1): 378.
- [9] LIU X, IWASAKI T. Design of coupled harmonic oscillators for synchronization and coordination [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(8): 3877.
- [10] MO L, CHEN S, WANG Y. Power balance control of multi-motor driving belt system using fuzzy neural network [C] // International Conference on Intelligent Control and Information Processing, 2010: 719.

- [11] LEE Y, HA J I. Control method of monoinverter dual parallel drive system with interior permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 7077.
- [12] SENCER B, ISHIZAKI K, SHAMOTO E. Cross coupling controller for accurate motion synchronization of dual servo systems [J]. International Journal of Automation Technology, 2013, 7(5): 514.
- [13] 刘成, 吕延军, 张永芳, 等. 无轴传动凹版印刷机的相邻偏差耦合同步控制[J]. 振动、测试与诊断, 2017, 37(6): 1242.
- [14] PAYETTE K. The virtual shaft control algorithm for synchronized motion control [C] // American Control Conference, 1998: 3008.
- [15] 马小亮, 魏学森. 有机联系的多电机传动系统的负荷均衡控制和扭振抑制[J]. 电气传动, 2007, 37(3): 3.
- [16] 刘希喆, 吴捷, 皮佑国, 等. 硬联接双电机的变频同步驱动方案研究[J]. 中国农村水利水电, 2003(7): 57.
- [17] 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.
- [18] 夏长亮, 李莉, 谷鑫, 等. 双永磁电机系统转速同步控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 1.
- [19] 姜晓平, 朱奕, 伞冶. 大功率随动试验台多永磁同步电机同步控制[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(4): 88.
- [20] 李鹏飞, 王伟涛, 万亚斌. 基于相邻偏差耦合的多电机模糊 PID 同步控制[J]. 机械设计与研究, 2013, 29(5): 45.
- [21] KOREN Y. Cross-coupled biaxial computer controls for manufacturing systems [J]. Journal of Dynamic Systems Measurement & Control, 1980, 102(4): 265.
- [22] SHI T, LIU H, GENG Q, et al. Improved relative coupling control structure for multi-motor speed synchronous driving system [J]. IET Electric Power Applications, 2016, 10(6): 451.
- [23] 高川, 黄叙辉, 芮伟, 等. 改进型环形耦合结构的多缸比例同步控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(6): 701.
- [24] 史婷娜, 辛雄, 夏长亮. 采用虚拟电机的改进偏差耦合多电机同步控制[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 7004.
- [25] CIMINI G, FOSSI V, IPPOLITI G, et al. Model predictive control solution for permanent magnet synchronous motors [C] // 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2013: 5824.
- [26] 董泳, 闫国军, 李小斌. 调速型液力偶合器双机驱动同步调速与功率平衡控制方法探讨[J]. 煤矿机械, 2007, 28(2): 57.
- [27] 王永宾, 林辉, 计宏, 等. 多约束永磁同步电机稳定模型预测控制策略[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(12): 7.
- [28] STUMPER J, DÖTLINGER A, KENNEL R. Classical model predictive control of a permanent magnet synchronous motor [J]. EPE Journal, 2012, 22(3): 24.
- [29] 李传翹. 多电机协调的参考模型自适应控制[J]. 工业工程, 1994(1): 69.
- [30] 樊卫华, 赵国峰, 陈庆伟, 等. 双电机驱动伺服系统神经网络控制器的设计[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(3): 260.
- [31] GAO C, WANG F, FU Z. Fuzzy self-tuning PID control algorithm for belt conveyor driven by multi-motor [J]. Journal of Robotics, Networking and Artificial Life, 2017, 4(2): 175.
- [32] 牛景丽, 刘晓超. 基于模糊 PID 带式输送机双机驱动的功率平衡控制[J]. 机电技术, 2015(6): 25.
- [33] 席裕庚, 李德伟, 林姝. 模型预测控制——现状与挑战[J]. 自动化学报, 2013, 39(3): 222.
- [34] WANG M, REN X, CHEN Q. Cascade optimal control for tracking and synchronization of a multimotor driving system [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology (Early Access). doi: 10.1109/TCST.2018.2810273.
- [35] LEWIS F L, VRABIE D L, SYRMOS V L. Optimal Control of Continuous-Time Systems [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2012: 110-176.

收稿日期: 2018-10-11