

# 基于事件触发的多电机系统一致性控制

王金锋\*, 于广亮, 任正某, 孙晓晨

(国网陕西省电力有限公司经济技术研究院, 陕西 西安 710065)

## Consensus Control of Multi-Motor System Based on Event-Triggered

WANG Jinfeng\*, YU Guangliang, REN Zhengmou, SUN Xiaochen

(State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the hysteresis of error transfer becomes more serious with the increase of the number of motors in the traditional ring coupling control strategy, a consensus control strategy of multi-motor system based on event-triggered is proposed. The speed compensation of each motor in the multi-motor system is obtained by consensus algorithm to ensure the consistency of each motor speed and improve the tracking performance of the system. When the system reaches the steady state, the event-triggered mechanism is used to reduce unnecessary communication times and save communication resources. In addition, the ring coupling structure can ensure the synchronization performance of the system within the event-triggered threshold, and the event-triggered threshold decreases with time. Simulation results show that compared with traditional ring coupling control strategy, the proposed strategy of motor system has better synchronization performance and tracking performance, and along with the increase of the number of motor, the error transfer delay problem is improved. At the same time, the event-triggered control effectively reduce steady-state process unnecessary communication.

**Key words:** ring coupling; consensus algorithm; multi-motor system; event-triggered control

**摘要:** 针对传统环形耦合控制策略中误差传递迟滞现象随着电机数量增加变严重的问题,提出一种基于事件触发的多电机系统一致性控制策略。通过一致性算法获取多电机系统中各电机的转速补偿项,以保证各电机转速一致性的同时,提升系统的跟踪性能。当系统达到稳态后,通过事件触发机制,减少非必要的通信次数,节约通信资源。另外,环形耦合结构可保证在事件触发阈值

内系统的同步性能,且触发阈值随时间增加而减小。仿真结果表明,相较于传统环形耦合控制策略,所提策略的多电机系统具有更好的同步性能及跟踪性能,且随着系统中电机数量的增加,误差传递迟滞问题得到明显的改善。同时,事件触发控制有效减少稳态过程中非必要的通信次数。

**关键词:** 环形耦合; 一致性算法; 多电机系统; 事件触发控制

## 0 引言

随着工业自动化水平不断提高,多电机系统被广泛应用于纺织、印刷及机器人控制等领域<sup>[1-2]</sup>。永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)具有高效、高精度及转矩输出能力强等优点<sup>[3-5]</sup>,在多电机系统中得到广泛应用,故对多永磁同步电机系统的高性能设计具有重要意义<sup>[6]</sup>。目前,为兼顾多电机系统同步性能及跟踪性能,研究的主要方向集中在控制结构和控制算法两方面<sup>[7]</sup>。

其中,控制结构分为非耦合结构和耦合结构。非耦合结构包括主令控制和主从控制,耦合结构包括交叉耦合控制、相邻耦合控制、环形耦合控制、偏差耦合控制和虚拟主轴控制。其中,环形耦合控制通过对各电机与其相邻一台电机的同步误差进行补偿,使得在保证系统同步性能的同时,控制结构不随电机数量的增加而变复杂,因此适用于多电机同步控制的场合。但随着电机数量增加,误差传递迟滞现象会变严重<sup>[8]</sup>。

另外,在保证系统同步性能的前提下,应用控制算法提升系统的跟踪性能。国内外学者通过滑模控制<sup>[9-12]</sup>、自抗扰控制<sup>[13-14]</sup>及神经网络<sup>[15-16]</sup>等控制算法,提升多电机系统在负载转矩变化、存在

**基金项目:** 国网陕西省电力有限公司科技项目(5226JY230008)

Technology Project of State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. (5226JY230008)

外部扰动等情况下的跟踪性能与鲁棒性。其中,文献[9]通过滑模控制对传统环形耦合控制进行改进,保留了环形耦合控制其复杂度不随电机数量增多而增大的特点,提升了多电机系统的动态性能和抗干扰能力,但会带来系统抖震的问题。文献[13]通过自抗扰控制对多电机系统进行双通道补偿,其对系统总扰动和速度张力间的耦合作用进行观测并补偿,提升多电机系统的动态性能与抗干扰性能。但存在参数整定困难,扩张状态观测器增益会影响系统稳定裕度的问题。文献[15]通过神经网络控制算法,并借助无模型自适应方法,有效提升了神经网络逆解耦控制下两电机调速系统的带载性能,增强了系统的抗扰性,但对于多电机系统会存在算法计算量庞大的问题。目前,多智能体一致性算法以其完全分布式控制的优点,只通过相邻智能体间通信即可达到全局控制的特点,广泛应用于群集运动<sup>[17-18]</sup>、机器人协作<sup>[19-20]</sup>以及微电网分布式控制<sup>[21-23]</sup>等领域。其中,文献[22]将微电网中每个储能单元定义为一个智能体,通过分布式一致性算法构造平均电压观测器,实现对各智能体端口电压一致性补偿。文献[23]在此基础上,进一步通过一致性算法对每个储能单元的荷电状态一致性进行补偿,并通过加入事件触发控制,减少系统稳态时的通信资源。因此,可通过一致性算法对传统环形耦合控制中各电机转速一致性进行补偿,实现多电机系统更优的动态性能。

基于上述分析,本文提出一种基于事件触发的多电机系统一致性控制策略,以控制结构简单且不受电机数量影响的环形耦合为基础,通过一致性算法对其误差传递的延迟问题进行改善,在保证多电机系统同步性能的情况下对跟踪性能进行提升,并通过事件触发控制减少系统稳态时非必要的通信次数,节约通信资源。

### 1 传统环形耦合控制策略

环形耦合控制是孙建忠等学者在相邻耦合控制的基础上提出的控制结构,其控制思想包括同一给定和误差补偿。图 1 为基于环形耦合控制的多电机系统结构框图,其中  $n$  台电机按照给定的转速同步转动,环形耦合控制同时考虑跟踪误差和同步误差,即每台电机实际转速与给定转速间

误差和该电机与相邻电机间的转速误差。因此,可保证多电机系统中各电机跟随给定转速,同时兼顾相邻电机的转速。

当任意一台电机转速发生变化时,该电机不仅产生跟踪误差,同时还会与相邻电机产生同步误差。跟踪误差将通过该电机自身的控制器进行调节,而同步误差将通过环形耦合结构,沿着相邻电机进行传递,从而使全部电机产生耦合。但随着电机数量的增加,同步误差传递的迟滞问题会加重,严重影响多电机系统的同步速度<sup>[7]</sup>。

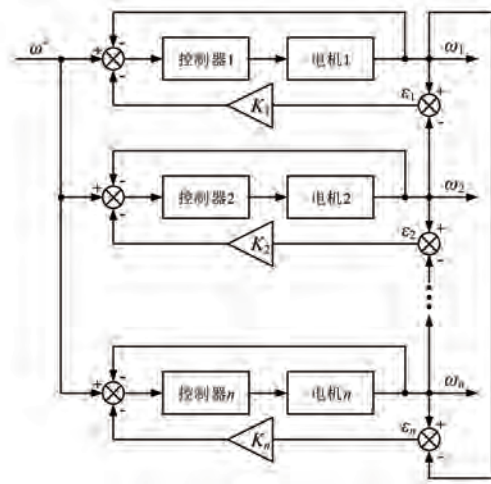


图 1 基于环形耦合控制的多电机系统结构框图  
Fig. 1 Structure block diagram of multi-motor system based on ring coupling control

### 2 改进环形耦合控制策略

针对环形耦合控制策略中各电机仅与相邻电机进行误差调节,导致多电机系统具有同步误差传递迟滞且随电机数量增多而变严重的问题,本文通过离散时间的分布式一致性算法对其进行改进,根据各电机转速获取对应的转速补偿项,以此提升多电机系统的同步速度及跟踪速度,进而获得更快速的动态性能。另外,当系统达到稳态时,通过事件触发机制,减少稳态过程中非必要的通信次数,节约通信资源。其中,环形耦合结构仍可调节事件触发阈值内各电机间的转速误差,以避免频繁地触发分布式通信过程。

#### 2.1 基于离散时间一致性算法的环形耦合控制

本文通过一阶积分器模型对电机电动力学方程进行描述,实现对电机的速度控制:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), \quad i = 1, \dots, N \quad (1)$$

并将文献[24]中的分布式一致性算法改写为离散形式:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + c\mathbf{K} \sum_{j=1}^N a_{ij} [x_i(t) - x_j(t)] \quad (2)$$

式中: $c$ 为耦合增益; $\mathbf{K}$ 为反馈增益矩阵; $a_{ij}$ 为邻接矩阵 $\mathbf{A}$ 的第 $(i,j)$ 项; $x_i(t)$ 、 $x_i(t+1)$ 分别为智能体 $i$ 在 $t$ 、 $t+1$ 时刻的状态变量信息; $x_j(t)$ 为智能体 $j$ 在 $t$ 时刻的状态变量信息。

本文定义每台电机为一个智能体,并将各电机转速信息设置为其状态变量,电机间的通信拓扑为强连接的无向图形式。而当智能体通信拓扑结构为无向图时,只要该无向图是连通的,则在式(1)的作用下,一阶积分器智能体网络能够实现一致性。即当 $t \rightarrow \infty$ 时,有 $x_i \rightarrow x_j$ 成立,即有限时间内实现各电机转速同步。

采用式(2)所示的离散时间一致性算法时,多电机系统分布式控制框图如图2所示。图中: $\omega_i$ 为第 $i$ 台电机的转速信息, $\omega_j$ 为第 $j$ 台电机的转速信息,其中 $j \neq i$ ; $\omega^*$ 为电机给定转速; $\Delta\omega_i$ 为第 $i$ 台电机的转速补偿项。

可以看到,各电机转速补偿调节模块通过与

分布式通信网络进行信息交流,使得相邻的电机进行转速信息交换,再通过离散时间一致性算法对各电机转速补偿的过程中不存在集中式控制器,因此该结构属于分布式控制结构。各电机仅通过与相邻电机进行信息交换,便可获得各电机转速补偿项,该转速补偿项实现对环形耦合控制下转速同步误差及跟踪误差的补偿。即使当通信网络失效时,亦不会影响环形耦合控制的正常运行。

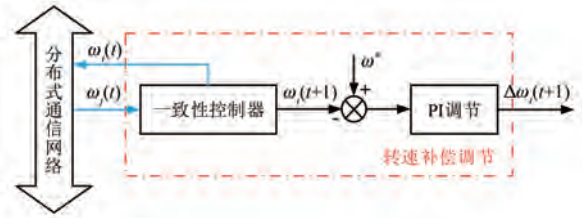


图2 多电机系统分布式控制框图

Fig. 2 Multi-motor system distributed control block diagram

图3为第 $i$ 台电机系统控制框图,多电机控制系统通过离散时间一致性算法所获得的各电机转速补偿项 $\Delta\omega_i$ 对环形耦合控制中各电机转速进行补偿,提升多电机系统的跟踪性能。

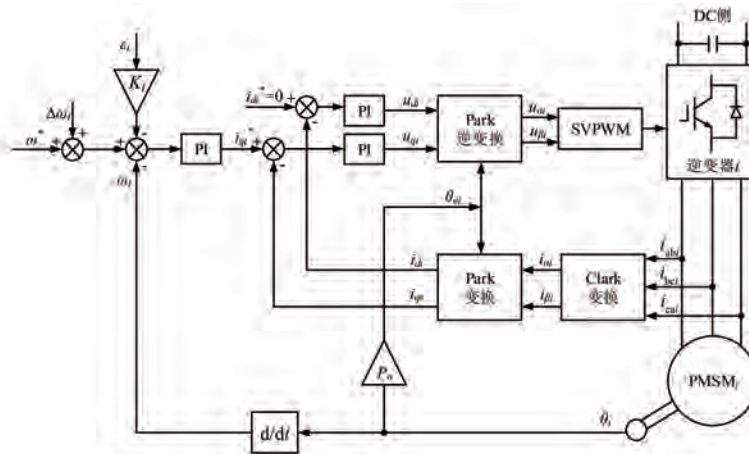


图3 第 $i$ 台电机系统控制框图

Fig. 3 Control block diagram of  $i$ th motor system

## 2.2 基于事件触发的多电机一致性控制策略

事件触发控制不同于传统的时间触发控制,其信号采样和传递过程不是基于固定时间,而是在某些特定时刻进行。为避免Zeno现象,即在有限时间内发生无数次事件触发,在传统定周期采样的前提下,对事件触发间隔的下界进行限制。将

采样周期记做 $T_s$ ,则事件触发时刻 $t$ 为采样时刻 $\{0, T_s, 2T_s, \dots\}$ 的真子集。当多电机系统满足事件触发条件时,则对其控制器的信号进行更新。

由式(2)可知,分布式控制需通过相邻电机的转速信息,来计算每台电机对应的转速平均值信息,故多电机系统内部需进行连续通信。为减

小系统的通信量,提高系统通信效率,提出一种基于事件触发通信的离散时间一致性控制器,其表达式为

$$\omega_i(t+1) = \omega_i(t) + cK \sum_{j=1}^N a_{ij} [\omega_i(t_{ki}^i) - \omega_j(t_{kj}^j)] \quad (3)$$

式中: $\omega_i(t_{ki}^i)$ 为电机  $i$  在触发时刻  $t_{ki}^i$  的转速状态; $\omega_j(t_{kj}^j)$ 为电机  $j$  在触发时刻  $t_{kj}^j$  的转速状态。

为实现事件触发控制,定义电机  $i$  的转速状态测量误差为

$$e_i(t) = \omega_i(t_{ki}^i) - \omega_i(t) \quad (4)$$

因此设计每台电机  $i$  的事件触发函数为

$$f_i(t, e_i(t)) = |e_i(t)| - (c_0 + c_1 e^{-\alpha t}) \quad (5)$$

式中:常数  $c_0 \geq 0$ 、常数  $c_1 \geq 0$ ,且  $c_0 + c_1 > 0$ ;常数  $\alpha$  满足  $0 < \alpha < \lambda_2(\mathbf{G})$ ,  $\lambda_2(\mathbf{G})$  为无向图  $\mathbf{G}$  的第二个特征值。

当满足以上参数条件时,对于任意初始条件  $\omega_0 \in \mathbb{R}^N$ ,系统不会出现 Zeno 现象<sup>[25]</sup>。当各电机转速平均值信息趋向于给定转速时,转速补偿项  $\Delta\omega_i$  将趋向于 0。另外,当  $c_0$  和  $c_1$  设置过小时,系统触发频率过高将导致通信变频繁,常数  $\alpha$  的大小会决定触发函数误差的收敛速度。

### 2.3 多电机系统控制策略

在多电机系统中,每台电机的控制器由直接控制层和分布式控制层组成,图 4 为本文提出的基于事件触发的多电机系统一致性控制流程图。

(1) 直接控制层。各电机以  $\omega^*$  为同步转速,并补偿分布式控制层得到的转速补偿项  $\Delta\omega_i$ ,采用基于环形耦合结构的磁场定向控制,将输出空间矢量脉宽调制信号控制各逆变器,进而控制各电机的转速。其控制目标为电机转速跟随  $\omega^*$  和  $\Delta\omega_i$  的变化,保证多电机系统跟随控制目标的功能。

(2) 分布式控制层。该层利用低带宽通信线进行信息交换,各电机仅与相邻电机交换上一触发时刻转速平均值信息,同时结合本地转速信息,当满足事件触发条件时,对各电机转速平均值信息进行更新,进而对转速补偿项进行更新。其控制目标为分布式通信网络输出的  $\omega_i$  趋于一致,保证多电机系统的同步性能。另外,转速补偿项  $\Delta\omega_i$  的设置,保证多电机系统转速同步下的跟踪性能。

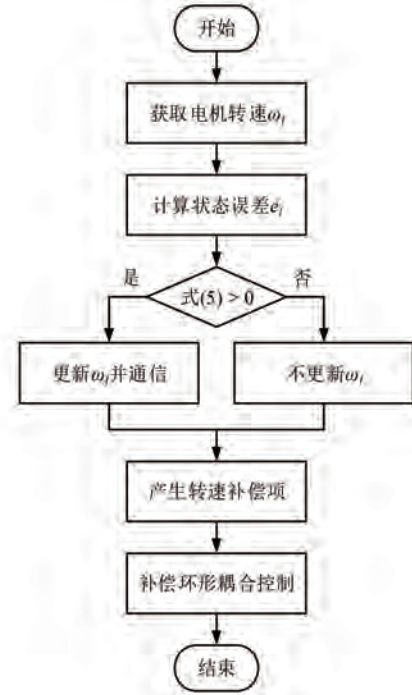


图 4 基于事件触发多电机系统一致性控制流程  
 Fig. 4 Consensus control of multi-motor system based on event-triggered flow

## 3 仿真验证

针对本文所设计的基于事件触发的多电机一致性控制策略,在 Matlab/Simulink 平台上对传统环形耦合与本文策略在启动过程、加载过程和改给定过程进行对比研究,以验证系统的控制性能。以 3 台和 5 台 PMSM 分别构成多电机系统,除转动惯量外,各电机参数一致,如表 1 所示。仿真总时长设置为 0.4 s,在 0.15 s 时将第 1 台电机的负载转矩由 0 N·m 变为 4 N·m,在 0.3 s 时将电机系统转速设定值改变至 350 r/min。其中,三电机系统中电机序号分别为 1、2、3,五电机系统额外增加的电机序号为 4、5。

### 3.1 启动过程

图 5 和图 6 分别为传统环形耦合策略和本文所提策略下多电机系统启动过程的波形,其中 a 图为三电机系统,b 图为五电机系统。通过对比图 5 和图 6 可知,三电机系统中,在启动阶段,由于 1 号和 3 号电机参数完全一致,而 2 号电机转动惯量偏大,因此无论是传统环形耦合还是本文所提策略下的三电机系统中,2 号电机(图中蓝色线)跟随给定的速度较缓于其他两台电机。在传

统环形耦合控制下的三电机系统中,当2号电机与另外两台电机出现转速偏差时,环形耦合结构会对2号电机转速进行补偿,同时对1号电机转速进行约束,并通过环形耦合结构进而对3号电机转速进行约束。而离散时间一致性算法则是通过对三台电机的转速进行一致性补偿计算,得到能使三台电机转速趋于一致的补偿量,并利用各自补偿量对给定转速进行补偿,实现多电机系统保持同步的同时跟踪给定控制目标的效果。因此,可以看到图6(a)中三台电机的同步效果明显优于图5(a)中的三台电机。

表1 电机参数

Tab. 1 Parameters of the motor

参数名称	参数值	参数名称	参数值
转动惯量 $J_1, J_3, J_5 /$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	$6.3\times 10^{-4}$	转动惯量 $J_2, J_4 /$ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )	$8.4\times 10^{-4}$
$d$ 轴电感 $L_d / \text{mH}$	5.25	$q$ 轴电感 $L_q / \text{mH}$	5.25
定子电阻 $R_s / \Omega$	0.96	永磁体磁链 $\psi_f / \text{Wb}$	0.182 7
极对数 $p_n$	4	额定转矩 $T_N / (\text{N}\cdot\text{m})$	4
额定转速 $n /$ ( $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ )	300	直流母线电压 $U_{dc} / \text{V}$	200
采样频率 $f / \text{kHz}$	10	环形耦合参数 $K_{pr}$	1
一致性算法参数 $c$	-0.1	事件触发 参数 $c_1$	0.1
事件触发 参数 $c_0$	0.1	事件触发 参数 $\alpha$	0.015
$K_{pc}$	0.2	$K_{ic}$	0.05

另外,从图5(a)、图6(a)的局部放大图可以看到在0.004 s时,与传统环形耦合相比,本文策略下三电机转速有明显的下降趋势,响应速度得到提升,可见本文策略对转速一致性具有补偿效果。同时,五电机系统也可得到上述结论,在电机转动惯量不一致情况下,相较于传统环形耦合策略,本文所提策略对五电机系统同步性能提升更加明显。因此,基于事件触发的多电机系统在启动过程的各电机转速差值逐渐减小,能更快速达到均衡,直至相等。

图7是多电机系统启动过程中本文所提策略下事件触发时刻的波形图,可以看到初始阶段,触发频率较高。在0.04 s之前,多电机系统转速未达到给定转速,且多电机之间存在同步误差,因此本阶段各电机之间进行频繁的事件触发;而在0.04 s之后,系统趋于稳定时,触发频率较小,系统达到稳态后,即各电机速度保持同步时,在事件

触发控制下不会触发事件。因此,通过加入事件触发控制减少了多电机系统稳态过程中非必要通信次数。

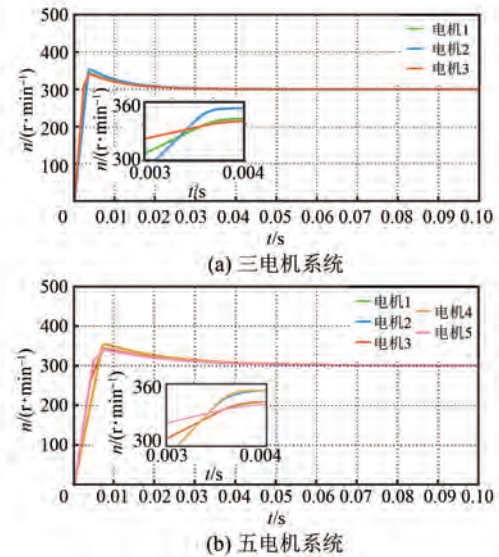


图5 传统环形耦合策略多电机系统启动波形

Fig. 5 Starting waveforms of multi-motor system under traditional ring coupling strategy

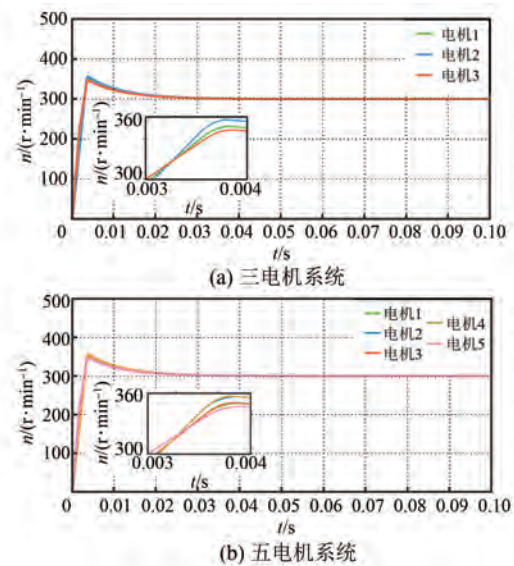


图6 本文所提策略下多电机系统启动波形

Fig. 6 Starting waveforms of multi-motor system under the proposed strategy in this paper

### 3.2 加载过程

图8和图9分别为传统环形耦合策略和本文所提策略下多电机系统加载过程的波形,其中a图为三电机系统,b图为五电机系统。通过对比图8和图9可知,三电机系统中,在0.15 s时,1号

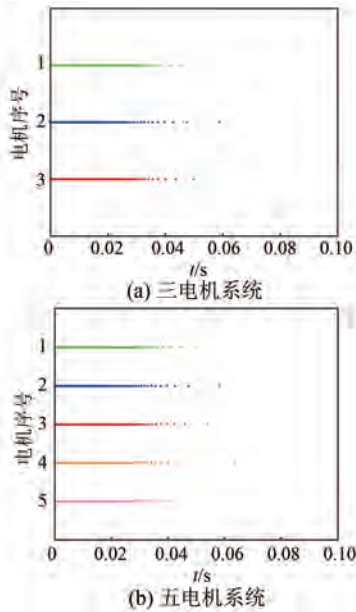


图 7 多电机系统启动阶段事件触发波形

Fig. 7 Triggering waveforms of multi-motor system under start phase event

电机负载转矩增大,其转速瞬间出现跌落。传统环形耦合结构会使得 3 号电机产生转速跌落的效果,进而 2 号电机转速也出现跌落。而基于离散时间多智能体一致性算法的环形耦合结构,在传统环形耦合导致三台电机转速下降的基础上,对三台电机转速的一致性进行补偿,使得在转速跌落的过程中,三台电机转速趋于一致。另外,三台电机的转速补偿量施加在电机转速给定上,因此,在补偿多电机一致性的同时,对给定转速进行调整,实现更快速的一致性补偿效果。另外,相较于图 8(a) 中传统环形耦合策略下多电机系统,图 9(a) 中本文所提策略下多电机系统转速跌落幅度得到了明显的补偿,各电机转速之间的差值更加均衡,直至相等,且转速恢复过程的动态性能得到了明显的提升。五电机系统也可得到上述结论,且对比图 8(a) 和图 8(b) 可以发现,随着电机数量的增加,传统环形耦合结构下多电机系统误差传递速度出现明显的下降。而图 9(b) 中利用离散时间一致性算法对环形耦合结构的转速一致性进行补偿,提升了多电机系统的同步速度,同时提升了系统的动态性能。

图 10 为多电机系统加载过程中本文所提策略下事件触发时刻的波形图,从中可以看到,在 0.15 s 时系统突加负载,触发频率较高,这是由于

各电机转速出现偏差,且偏差量达到事件触发阈值,使得本阶段各电机之间进行频繁的事件触发。而在 0.18 s 之后,系统趋于稳定时,触发频率较小,各电机速度几乎保持同步,且同步转速误差达不到系统的事件触发阈值。此时,无需通过分布式通信进行事件触发调节。另外,多电机系统同步转速在事件触发阈值内存在的转速偏差仍可通过环形耦合结构进行调节,故该策略能减小系统稳态误差,并节约系统通信资源的消耗。

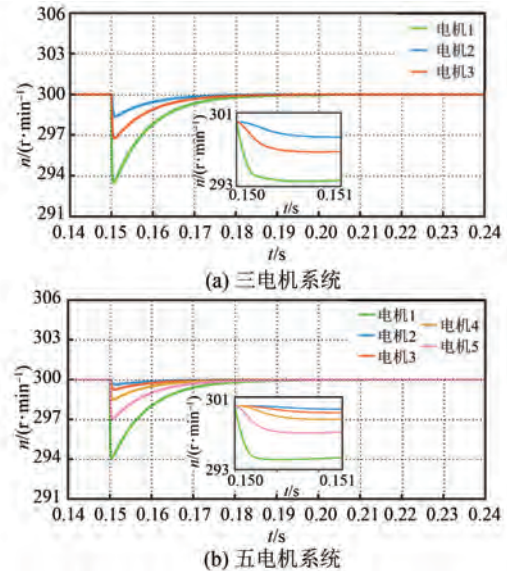


图 8 传统环形耦合策略下多电机系统加载波形  
 Fig. 8 Loading waveforms of multi-motor system under traditional ring coupling strategy

### 3.3 改给定过程

图 11 和图 12 分别为传统环形耦合策略和本文所提策略下多电机系统改给定过程的波形,其中 a 图为三电机系统, b 图为五电机系统。通过对比图 11 和图 12 可知,在三电机系统中,对于改变转速给定过程的电机转速变化趋势,与启动过程十分相似,大惯量电机(2 号)转速变换过程相对缓慢,传统环形耦合策略会使得 1 号电机转速给定值受到影响,影响 2 号电机的运行转速,进而影响到 3 号电机的运行转速。而基于本文离散时间多智能体一致性控制策略下的多电机系统,会在传统环形耦合的基础上,对三台电机转速的一致性进行补偿。即在多电机系统中各电机运行转速均未达到给定转速的过程中,对三台电机的转速补偿量均为正补偿量;而当存在电机超过给定转速时,该电机的转速补偿量会变为负补偿量。

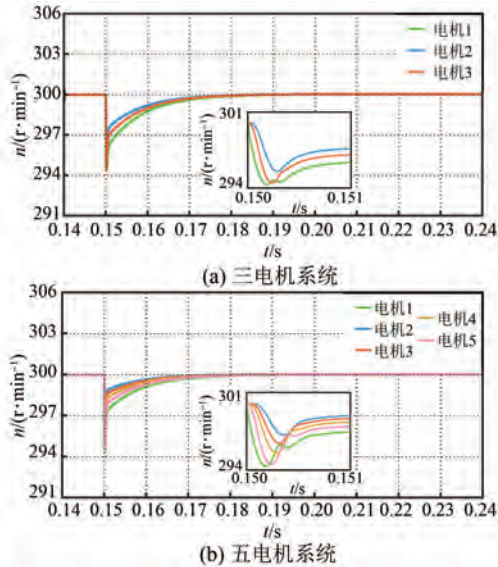


图9 本文所提策略下多电机系统加载波形  
Fig. 9 Loading waveforms of multi-motor system under the proposed strategy in this paper

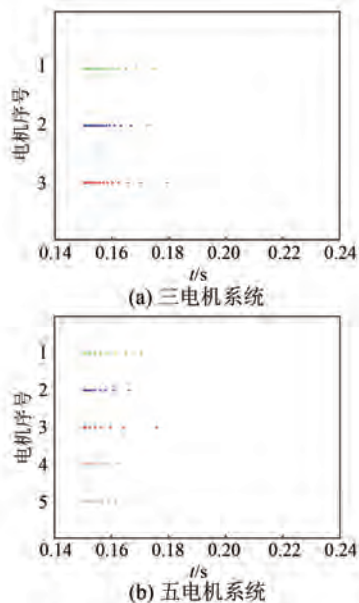


图10 多电机系统加载阶段事件触发波形  
Fig. 10 Triggering waveforms of multi-motor system under load phase events

即在保持多电机系统同步性能的同时,提升系统的跟踪性能,而非传统环形耦合策略中仅对三台电机同步性能进行补偿。因此对比图 11(a)和图 12(a)中局部放大图可知,在相同的环形耦合控制参数情况下,采用本文离散时间一致性策略的多电机系统各电机转速可达到一致性效果,并且转速一致性速度优于传统的环形耦合控制策略,

故离散时间一致性控制策略下多电机系统的同步性能优于传统环形耦合策略。另外,0.301 s 时传统耦合过程转速仍处于上升阶段,而本文策略的转速已经呈现出平缓态势,可见本文策略在给定转速跟踪过程中对系统跟踪性能具有明显的补偿效果,使得系统动态性能得以提升。五电机系统也具备上述结论,与三电机系统效果基本相同。

图 13 为本文策略在改变转速给定阶段的事件触发时刻图,可以看到,多电机系统在 0.3 s 时改变转速给定,系统触发频率较高。这是由于各电机转速距离给定值的偏差量达到事件触发阈值,使得本阶段各电机之间进行频繁的事件触发。而在 0.31 s 之后,系统趋于稳定时,触发频率较小,多电机系统基本达到稳定状态,且事件触发阈值内的同步误差仍可靠环形耦合结构调节,避免产生不必要的事件触发次数,节约了系统通信资源。

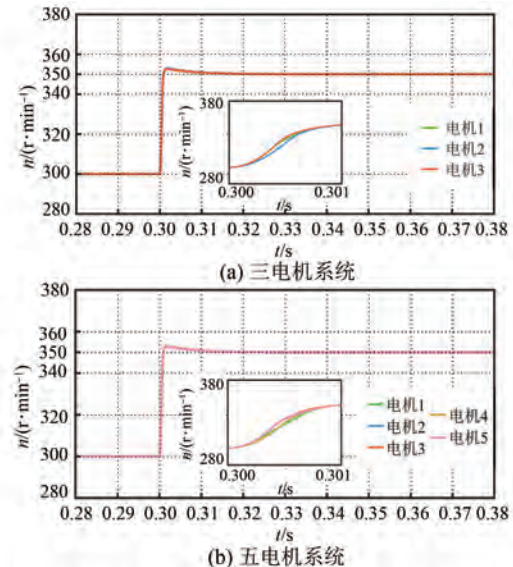


图11 传统环形耦合策略下改给定波形  
Fig. 11 Given waveforms are changed of multi-motor system under the traditional ring coupling strategy

## 4 结语

本文提出了一种基于事件触发的多电机系统一致性控制策略,分别以 3 台和 5 台 PMSM 构成多电机系统,并在启动过程、加载过程和改给定过程进行仿真验证,得出以下结论:

(1) 启动过程中与传统环形耦合相比,本文策略下三电机系统的响应速度得到提升,对转速

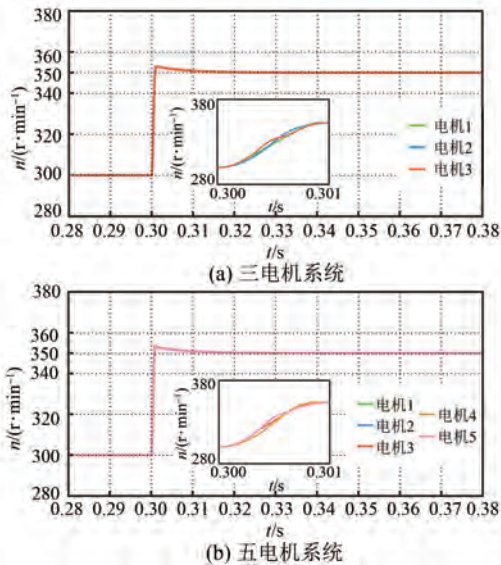


图 12 本文所提策略下多电机系统改给定波形  
Fig. 12 Given waveforms are changed of multi-motor system under the proposed strategy in this paper

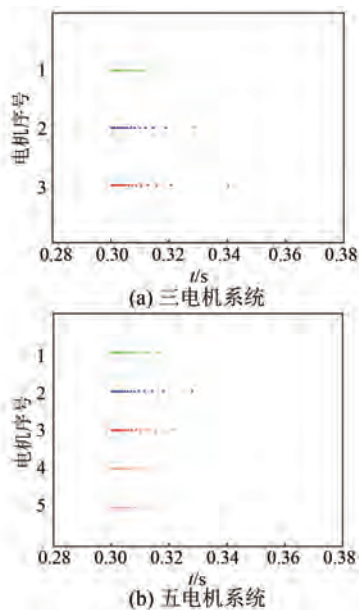


图 13 多电机系统改给定阶段事件触发波形  
Fig. 13 Triggering waveforms of multi-motor system under a given stage

一致性具有补偿效果;同时,在电机转动惯量不一致情况下,所提策略对五电机系统同步性能的提升更加明显。

(2) 加载过程中多电机系统在补偿多电机一致性的同时,也对给定转速进行调整,实现更快速的一致性补偿效果;多电机系统同步转速在事件触发阈值内存在的转速偏差仍可通过环形耦合结

构进行调节,减小系统稳态误差,节约通信资源。

(3) 改给定过程中本文策略在保持多电机系统同步性能的同时提升系统的跟踪性能,而非传统环形耦合策略中仅对三台电机同步性能进行补偿,与此同时,也提升了系统的动态性能。

因此,基于事件触发的多电机系统一致性控制策略解决了传统环形耦合中误差传递迟滞现象随电机增加而变严重的问题,实现多电机系统具有更好的同步性能和跟踪性能。同时利用事件触发控制使系统达到稳态时减少了非必要的通信次数,并且环形耦合结构仍可保证触发阈值内的系统的同步性能。

### 参考文献

- [ 1 ] WANG M L, REN X M, CHEN Q. Cascade optimal control for tracking and synchronization of a multi-motor driving system [ J ]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2019, 27 ( 3 ): 1376-1384.
- [ 2 ] 李东亮, 缪仲翠, 王志浩, 等. 基于模型预测的多电机弱磁同步控制策略研究 [ J ]. 电机与控制应用, 2019, 46 ( 11 ): 7-12.  
LI D L, MIU Z C, WANG Z H, et al. Synchronous flux weakening control strategy of multi-motor system based on model prediction [ J ]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46 ( 11 ): 7-12.
- [ 3 ] WANG X Q, WANG Z, HE M Z, et al. Fault-tolerant control of dual three-phase PMSM drives with minimized copper loss [ J ]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36 ( 11 ): 12938-12953.
- [ 4 ] 王宇, 张成糕, 郝雯娟. 永磁电机及其驱动系统容错技术综述 [ J ]. 中国电机工程学报, 2022, 42 ( 1 ): 351-371.  
WANG Y, ZHANG C G, HAO W J. Overview of fault-tolerant technologies of permanent magnet brushless machine and its control system [ J ]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42 ( 1 ): 351-371.
- [ 5 ] 石鹏川, 王学庆, 贺明智, 等. 双三相永磁同步电机驱动系统简易容错控制方法研究 [ J ]. 电机与控制学报, 2023, 27 ( 12 ): 117-126.  
SHI P C, WANG X Q, HE M Z, et al. Simple fault-tolerant control of dual three-phase PMSM drives [ J ]. Electric Machines and Control, 2023, 27 ( 12 ): 117-126.
- [ 6 ] 毛海杰, 李炜, 蒋栋年. 基于复杂网络的多电机



- 同步控制系统故障诊断与切换容错研究[J]. 控制与决策, 2020, 35(4): 843-851.
- MAO H J, LI W, JIANG D N. Fault diagnosis and switching tolerance for multi-motor synchronous control based on complex dynamical network [J]. *Control and Decision*, 2020, 35(4): 843-851.
- [ 7 ] 叶宇豪, 彭飞, 黄允凯. 多电机同步运动控制技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(14): 2922-2935.
- YE Y H, PENG F, HUANG Y K. Overview of multi-motor synchronous motion control technology [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(14): 2922-2935.
- [ 8 ] 赵坤, 王栋. 基于环形耦合与模糊控制策略的多电机同步控制[J]. 计算机与数字工程, 2018, 46(7): 1367-1370+1477.
- ZHAO K, WANG D. Multi motor synchronous control based on ring coupling and fuzzy control strategy [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2018, 46(7): 1367-1370+1477.
- [ 9 ] 刘建宇. 网络化多电机系统同步控制策略研究[D]. 济南: 济南大学, 2023.
- LIU J Y. Research on synchronous control strategy of networked multi-motor systems [D]. Ji'nan: Ji'nan University, 2023.
- [ 10 ] 丁威, 杜钦君, 宋传明, 等. 均值耦合多电机滑模速度同步控制[J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(2): 159-170.
- DING W, DU Q J, SONG C M, et al. A synchronous control method for mean-coupled sliding mode speed of multi-motor [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2022, 56(2): 159-170.
- [ 11 ] DERAKHSHANNIA M, MOOSAPOUR M M. Sliding mode based consensus for networked multi-agent systems consisting of chaotic PMSMs [C] // 2019 International Power System Conference, Tehran, 2019.
- [ 12 ] ASADI A R, ERFANIAN A. Adaptive neuro-fuzzy sliding mode control of multi-joint movement using intraspinal microstimulation [J]. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 2012, 20(4): 499-509.
- [ 13 ] 方圣龙, 樊继东. 一种基于自抗扰的永磁同步电机复合控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(10): 62-69.
- FANG S L, FAN J D. A composite control strategy of permanent magnet synchronous motor based on active disturbance rejection [J]. *Electric Machines & Control Application*, 2023, 50(10): 62-69.
- [ 14 ] 王兴亮, 李德, 杜超, 等. 基于改进自抗扰控制的三电机同步系统研究[J]. 电气传动自动化, 2020, 42(2): 1-7.
- WANG X L, LI D, DU C, et al. Research on three-motor synchronous system based on improved active disturbance rejection control [J]. *Electric Drive Automation*. 2020, 42(2): 1-7.
- [ 15 ] 刘国海, 陈仁杰, 张多, 等. 两电机调速系统的神经网络逆无模型自适应鲁棒解耦控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 868-874.
- LIU G H, CHEN R J, ZHANG D, et al. Model-free adaptive robust control for two motor drive system based on neural network inversion [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(3): 868-874.
- [ 16 ] HU S Y, REN X M. Observer-based adaptive integral control for multi-motor drive systems [C] // 2020 39th Chinese Control Conference, Shenyang, 2020.
- [ 17 ] ZHANG W L, TANG Y, KOCAREV L, et al. Cluster tracking performance analysis of linear heterogeneous multi-agent networks: A complex frequency domain approach [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2020, 67(1): 259-270.
- [ 18 ] GE X H, HAN Q L, ZHANG X M. Achieving cluster formation of multi-agent systems under aperiodic sampling and communication delays [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, 65(4): 3417-3426.
- [ 19 ] SU S Z, LIN Z L. Distributed consensus control of multi-agent systems with higher order agent dynamics and dynamically changing directed interaction topologies [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2016, 61(2): 515-519.
- [ 20 ] SHENG W D, GUO H L, YAU W Y, et al. PD-FAC: Probability density factorized multi-agent distributional reinforcement learning for multi-robot reliable search [J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2022, 7(4): 8869-8876.
- [ 21 ] 林嘉伟, 王志新, 张永. 独立直流微电网中考虑不同容量的分布式储能系统能量控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 139-146.
- LIN J W, WANG Z X, ZHANG Y. Energy control

- strategy of distributed energy storage system considering different capacities in isolated DC microgrid [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2020, 40(10): 139-146.
- [22] NASIRIAN V, MOAYEDI S, DAVOUDI A, et al. Distributed cooperative control of DC microgrids [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015, 30(4): 2288-2303.
- [23] 郭伟, 赵洪山. 基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J]. *电工技术学报*, 2020, 35(5): 1140-1151.
- GUO W, ZHAO H S. Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2020, 35(5): 1140-1151.
- [24] 杨大鹏. 多智能体系统的事件驱动一致性控制与多 Lagrangian 系统的分布式协同[D]. 北京: 北京理工大学, 2015.
- YANG D P. Event-triggered consensus control of multi-agent systems and distributed collaboration of multiple Lagrangian systems [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015.
- [25] SEYBOTH G S, DIMAROGONAS D V, JOHANSSON K H. Event-based broadcasting for multi-agent average consensus [J]. *Automatica*, 2013, 49(1): 245-252.

---

收稿日期:2024-01-12

收到修改稿日期:2024-03-16

作者简介:

王金锋(1984-),男,博士,高级工程师,研究方向为电机控制和综合能源服务等, [stategrid2025@163.com](mailto:stategrid2025@163.com);

\* 通信作者:王金锋(1984-),男,博士,高级工程师,研究方向为电机控制和综合能源服务等, [stategrid2025@163.com](mailto:stategrid2025@163.com)。

## Consensus Control of Multi-Motor System Based on Event-Triggered

WANG Jinfeng<sup>\*</sup>, YU Guangliang, REN Zhengmou, SUN Xiaochen

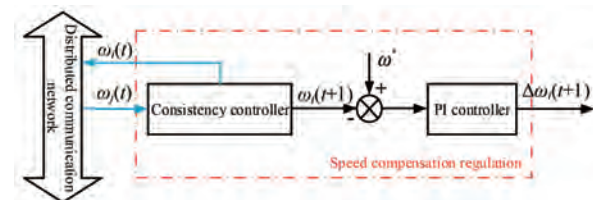
(State Grid Shaanxi Electric Power Company Limited Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Key words:** ring coupling; consensus algorithm; multi-motor system; event-triggered control

With the continuous improvement of industrial automation, multi-motor systems are widely used in textile, printing, robot control and other fields. Permanent magnet synchronous motor (PMSM) has the advantages of high efficiency, high precision and strong torque output ability, and has been widely used in multi-motor systems. So it is of great significance for the high-performance design of multi-magnet synchronous motor systems.

In order to take into account the synchronization performance and tracking performance of multi-motor system, annular coupling control compensates the synchronization errors of each motor and its adjacent motor, so as to ensure the synchronization performance of the system. At the same time, the control structure does not become complicated with the increase of the number of motors. Therefore, it is suitable for the occasions of multi-motor synchronous control.

Aiming at the problem that error transfer hysteresis becomes more and more serious as the number of motors increases in traditional ring coupling control strategies, a consensus control strategy of multi-motor system based on event-triggered is proposed. The distributed control block diagram of multi-motor system is shown in Fig.1.



**Fig. 1 Multi-motor system distributed control block diagram**

In this paper, the consensus algorithm is used to obtain the speed compensation items of each motor in the multi-motor system, so as to ensure the speed consistency of each motor and improve the tracking performance of the system. When the system reaches steady state, the event triggering mechanism reduces unnecessary communication times and saves communication resources. In addition, the ring coupling structure can ensure the synchronization performance of the system within the event-triggered threshold, and the event-triggered threshold decreases with the increase of time.

To verify the effectiveness of the proposed strategy in this paper, Matlab/Simulink platform is used to compare the traditional ring coupling control strategy with the proposed strategy in the starting process, loading process and setting process, so as to verify the control performance of the system. The multi-motor system is composed of 3 PMSMs and 5 PMSMs respectively, and the parameters of each motor are the same except for the moment of inertia.

Simulation results show that compared with the traditional ring coupling control strategy, the multi-motor system with the proposed strategy has better synchronization and tracking performance, and the error transfer hysteresis problem is obviously improved with the increase of the number of motors in the system. Meanwhile, the event-triggered control can effectively reduce the unnecessary communication times in the steady-state process.