

# 一种多电机刚性连接系统转矩均衡控制方法

牛宗贤<sup>1</sup>, 范波<sup>1,2</sup>, 付雨林<sup>3</sup>, 王春光<sup>1</sup>, 吴晓丹<sup>1</sup>, 杨晨辉<sup>1</sup>

(1. 河南科技大学 信息工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 河南科技大学 河南省机器人与智能系统重点实验室, 河南 洛阳 471023;

3. 西安交通大学 钱学森学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 多电机刚性连接结构的同步控制系统, 在传统PI并行控制策略下, 会出现电机转矩输出不均衡的问题, 严重时会有断轴的风险; 以多电机齿轮传动刚性连接结构为研究对象, 建立齿轮—电机耦合模型, 根据模型的强耦合特性, 分析转矩误差的影响因素, 并针对这些问题提出一种基于偏差耦合思想的多电机转矩均衡控制策略, 通过综合所有电机输出转矩信息, 再选取合适的耦合增益系数, 对电机转矩进行补偿控制, 以实现电机转矩均衡输出。通过对比PI并行控制策略的仿真验证, 所提出方案可有效降低各电机之间的转矩误差, 并且由刚性齿轮传动结构引起的转矩输出波动也趋于平缓。

**关键词:** 多电机同步; 刚性连接; 偏差耦合; 转矩均衡

**中图分类号:** TM343 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd24298

## A Kind of Torque Balancing Control Method for Multi-motor Rigid Connection System

NIU Zongxian<sup>1</sup>, FAN Bo<sup>1,2</sup>, FU Yulin<sup>3</sup>, WANG Chunguang<sup>1</sup>, WU Xiaodan<sup>1</sup>, YANG Chenhui<sup>1</sup>

(1. School of Information Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003,

Henan, China; 2. Henan Key Laboratory of Robot and Intelligent Systems, Henan University of

Science and Technology, Luoyang 471023, Henan, China; 3. Qian Xuesen College,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

**Abstract:** Under traditional PI parallel control strategies, synchronous control systems of multi-motor rigid connection structure have the problem of unbalanced motor torque output, and there is even a serious risk of shaft breakage. Taking the rigid connection structure of multi-motor gear transmission as the research object, a gear-motor coupling model was established. According to the strong coupling characteristics of the model, the influencing factors of torque error were analyzed, and then a multi-motor torque balance control strategy based on the idea of deviation coupling was proposed. By synthesizing all motor output torque information and selecting an appropriate coupling gain coefficient, the control strategy compensates the motor torque to achieve a balanced output of motor torque. Compared with the simulation of a traditional PI parallel control strategy, the proposed scheme can effectively reduce the torque error among motors, and the torque output fluctuation caused by rigid gear transmission structure tends to be gentle.

**Key words:** multi-motor synchronization; rigid connection; deviation coupling; torque equalization

现代工业离不开电机技术的应用, 尤其是对于大功率、大惯量负载, 需要多台电机协同驱动。因此多电机系统控制性能直接影响整个施工作业效率和安全性。因此, 对多电机同步控制策略的研究具有十分重要的意义<sup>[1-2]</sup>。

依据电机耦合方式, 多电机系统大致可以分为3类: 1) 无耦合连接。在同一系统中各台电机

在物理意义上无连接, 相互独立运行; 2) 柔性连接。电机通过皮带轮耦合连接, 系统除了受电机控制影响, 还受传送带的张力等因素影响, 典型的应用有造纸机、带式传送机等; 3) 刚性连接。电机通过齿轮结构连接或是共轴连接, 此方式下各电机被强制同步, 但输出转矩相互耦合影响, 在大型工业作业中常用于大功率、低转速场合,

**基金项目:** 国家自然科学基金 (U1704157)

**作者简介:** 牛宗贤 (1996—), 男, 硕士, Email: 15237972377@163.com

典型的有盾构机、桥式吊车等<sup>[3]</sup>。

多电机刚性结构连接,其特点在于各电机转速强制耦合为同一速度,依据功率平衡同步原理  $P=Fv$  ( $P$  为电机功率,  $F$  为电机转矩,  $v$  为电机转速) 可得,要达到各电机功率均衡输出,要求各电机转矩均衡控制<sup>[4]</sup>。若电机参数相同,各电机连接齿轮也完全相同,在系统正常运行时,各电机会被分配到相同的负载,并不存在输出转矩不平衡问题。但是,实际情况中,电机和齿轮都不可能完全相同,机械和电气部分材料、参数,任何一点偏差都会导致电机输出不均;如出现较大的扰动或负载突变,系统总负载分配给各电机的负载转矩会严重失衡,电机的输出转矩也不均衡,严重时会造成机械轴损坏或电机过载<sup>[5]</sup>。所以,对于多电机系统,选择合适的同步控制策略尤为重要,既要电机部分实现同步控制,又要考虑机械传动部分对电机和负载的影响因素,这对多电机同步控制领域有了更高的要求,对于现代工业发展具有十分现实的意义。

当今国内外学者在不同场合、不同方式、不同条件下对这一领域有了非常多的研究成果。文献[6-7]分别针对多电机偏差耦合控制策略提出了算法改进,前者在系统中增加了输出选择器并优化了系统结构以减少在线计算量,后者引入虚拟电机概念,有效降低系统启动时的同步误差;文献[8]针对双电机共轴刚性连接系统,提出一种基于双滑膜预测的主从控制结构来达到转速精确控制并有效抑制稳态转矩脉振和转矩同步误差;文献[9-10]以盾构机刀盘驱动系统为应用背景,建立多电机与齿轮传动结构的机电耦合模型,并分别提出鲁棒自适应控制和环形耦合控制策略来实现转矩均衡控制;文献[11]针对双电机系统因机械分化导致电机在同一负载下的功率输出不平衡问题,提出一种基于直接转矩控制的转速-转矩混合控制策略;文献[12]针对传统双电机齿轮传动结构因为齿轮磨损形变导致的两电机输出转矩误差增大的问题,提出一种基于交叉耦合控制的双电机转矩均衡控制策略,有效地抑制了因机械损耗导致的电机输出波动和同步误差,降低了系统过载风险,并搭建了小功率双电机试验台验证控制策略。本文依据现有的研究成果,针对多电机转矩均衡控制的不足之处,提出基于偏差耦合思想的转矩均衡控制策略,设计4台电机的系统模型进行验证,由于现有

的实验平台不具备4台及以上电机实验测试能力,于是在仿真平台上设计模型并验证所提方案。

本文以异步电机为参考对象,建立多电机驱动的刚性齿轮传动系统模型,分析影响多电机刚性连接结构误差的因素;针对多电机刚性连接系统在PI并行控制策略下由各种突发状况导致的电机转矩输出不平衡的问题,提出一种基于偏差耦合控制思想的转矩均衡控制策略,整合所有电机输出转矩的偏差信息,再通过耦合增益系数  $K_{Gi}$  对各电机进行转矩补偿,使各台电机均衡输出;针对提出的控制策略,先通过理论分析验证系统稳定性;其次设计了仿真验证,模拟设置电机组在不同突发状况下,对比PI并行控制和转矩均衡控制两种控制策略,验证控制策略的有效性。

## 1 系统模型分析

以多电机齿轮传动的刚性连接结构为研究对象,建立系统动力学模型,依据模型分析多电机刚性连接的系统转矩分配不均衡的原因。

图1所示为啮合齿轮系模型,每台感应电机通过传动轴与小齿轮分别连接,另一端由大齿轮通过输出轴连接负载。以小齿轮为例,其扭转运动方程为

$$J_i \ddot{\theta}_i = K(\theta_h - \theta_i) + B(\dot{\theta}_h - \dot{\theta}_i) \quad (1)$$

式中: $K, B$ 分别为齿轮的扭转刚度和扭转阻尼,可以通过齿轮半径进行推算; $\theta_i$ 为齿轮转动角度; $\theta_h$ 为上一级旋转刚体转动角度<sup>[13]</sup>。

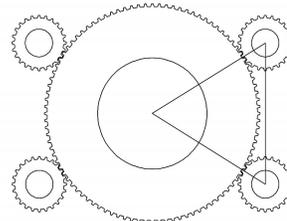


图1 啮合齿轮系示意图

Fig.1 Schematic diagram of meshing gear

将每台电机与该电机连接的齿轮看作整体,将大齿轮与负载看作整体,忽略啮合齿隙,此时,  $\theta_{mi} = \theta_{pi}, \theta_g = \theta_L$ , 其中,  $\theta_{mi}$  为电机的转子角度;  $\theta_{pi}$  为对应电机的小齿轮旋转角度;  $\theta_L$  为负载转子角度;  $\theta_g$  为大齿轮的旋转角度。则系统动力学方程如下:

$$\begin{cases} J_{mi} \ddot{\theta}_{mi} = T_{ei} - K_{gi} R_g (r_g \theta_{mi} - R_g \theta_g) - B_{gi} R_g (r_g \dot{\theta}_{mi} - R_g \dot{\theta}_g) \\ J_L \ddot{\theta}_g = \sum_{i=1}^n [K_{gi} R_g (r_g \theta_{mi} - R_g \theta_g) + B_{gi} R_g (r_g \dot{\theta}_{mi} - R_g \dot{\theta}_g)] - T_L \end{cases} \quad (2)$$

式中: $J_{mi}$ 为电机转动惯量; $J_L$ 为负载转动惯量; $r_g$ 为小齿轮半径; $R_g$ 为大齿轮半径; $B_{gi}$ 为齿轮阻尼系数; $K_{gi}$ 为齿轮刚度系数; $T_L$ 为负载转矩; $T_{ei}$ 为第*i*台电机电磁转矩<sup>[14]</sup>。

假设电机在恒转速下工作,忽略传输功率损耗和齿轮啮合误差,则各电机通过小齿轮传递到大齿轮的驱动转矩以及大齿轮所受转矩为

$$\begin{cases} T_{ei} = P_i/\omega_i \\ T_L = P_L/\omega_R \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\omega_i$ 为电机转子角速度,且 $\omega_1 = \omega_2 = \dots = \omega_i$ ; $\omega_R$ 为负载角速度; $P_i$ 为电机输出功率; $P_L$ 为大齿轮所受功率,即负载所需功率。

由功率平衡原理得 $P_L = P_1 + P_2 + \dots + P_i$ ,大小齿轮的传动比为

$$\frac{\omega_R}{\omega_1} = \frac{\omega_R}{\omega_2} = \dots = \frac{\omega_R}{\omega_i} = \frac{r_g}{R_g} \quad (4)$$

大齿轮及负载从各小齿轮接收的驱动转矩相对于驱动电机来说就是负载转矩,且总负载转矩在稳态时是一个恒值:

$$T_L r_g = R_g \sum_{i=1}^n T_{ei} \quad (5)$$

所以,依据转矩平衡原理有:

$$\sum_{i=1}^n T_{ei} - T_L = \left( \sum_{i=1}^n J_{mi} + J_L \right) \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

由Laplace变换可得时域下的转矩平衡方程如下:

$$\omega(s) = \frac{\sum_{i=1}^n T_{ei}(s) - T_L(s)}{\left( \sum_{i=1}^n J_{mi} + J_L \right) s} \quad (7)$$

由电机运动方程得

$$T_{ei} = T_{Li} + J_{mi} \dot{\omega}_i + B \omega_i \quad (8)$$

其中

$$T_{ei} = n_p \Psi i_{si} L_m / L_r \quad (9)$$

式中: $B$ 为电机摩擦阻力; $n_p$ 为电机极对数; $L_m$ 为励磁电感; $L_r$ 为励磁电感。

由式(2)、式(5)可得,从机械运动角度分析,齿轮的摩擦损耗、刚度系数和阻尼系数或电机转轴磨损都会引起传动结构的转矩输出误差,最终导致各电机负载分配不均衡。现实情况中,机械结构引起的误差会导致电机过载运行,齿轮摩擦损耗加剧,长时间运行下去,就会引发重大事故;由式(8)、式(9)可得,从电机运动角度分析,电机的型号、参数、材料也会影响系统的转矩输

出平衡。

现实情况下,这些状况无可避免,仅仅依靠机械结构设计来消除误差,不仅成本高,实行起来也有一定难度。因此,可以借助安全可靠的控制算法来补偿消除这些误差。

## 2 传统控制策略

### 2.1 传统PI控制策略

经典的刚性连接多电机系统大多采用PI并行控制策略,在各电机系统内部各控制模块均采用PI闭环控制器<sup>[15]</sup>。由式(2)可得,若各电机参数完全相等,对应连接的齿轮也完全相同,系统在稳态时,各电机分配的负载也会相等,从而使输出转矩也相等。当负载较小时,如果某台电机发生故障,系统仍然可以正常运行。但是,在实际场合中,电机参数不可能完全相等,齿轮材料、轮齿磨损程度以及齿轮啮合误差也都无可避免。对于盾构机这类的大惯量且突发状况较多的控制结构,显然无法满足控制要求。

### 2.2 传统偏差耦合控制

传统偏差耦合控制器原理图如图2所示,为了将每台电机在过渡周期和转矩扰动时的相对速度归零,所以将电机输出转速与其他所有电机输出转速分别做差,各差值乘以速度反馈耦合增益系数 $K_{ij}$ 后再求和,得到转速误差补偿,使多电机系统转速同步,即

$$\omega_{ci} = \sum_{j=1, j \neq i}^n [(\omega_i - \omega_j) K_{ij}] \quad (10)$$

其中

$$K_{ij} = J_{mi} / J_{mj}$$

但是本文控制系统为齿轮传动的刚性耦合结构,相对速度总是等于零,研究意义在于控制转矩均衡输出,且本文为机电一体的混合系统,增大了控制器的运算量,所以需要对控制器结构加以改进。

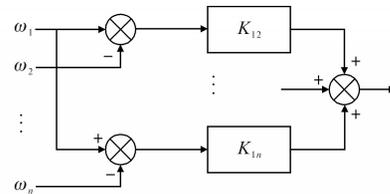


图2 传统偏差耦合控制原理图

Fig.2 Schematic diagram of traditional deviation coupling control

## 3 转矩均衡控制策略

### 3.1 转矩均衡控制结构与设计原理

PI并行控制系统虽然控制灵活,转速同步性



制原理可得  $G_s(s) = K_{p1} + 1/\tau_1 s$ ,  $G_c(s) = K_{p2} + 1/\tau_2 s$ , 其中,  $K_{p1}, K_{p2}$  为比例增益系数,  $\tau_1, \tau_2$  为积分时间常数;  $G_1(s)$  为电机转矩到转速的传递函数, 将电机运动方程转到时域内并忽略摩擦阻力, 可得  $G_1(s) = 1/J_{m1} s$ ;  $G_2(s)$  为电机电流到转矩的传递函数, 由系统原理图可得  $G_2(s) \approx 1$ ;  $F_1(s), F_2(s), F_3(s)$  为各闭环的反馈传递函数, 此处皆设为单位反馈。系统无补偿时的转矩闭环传递函数为

$$H_2(s) = \frac{G_c(s)G_2(s)}{1 + G_c(s)G_2(s)F_2(s)} \quad (14)$$

此时系统结构可简化为图6。

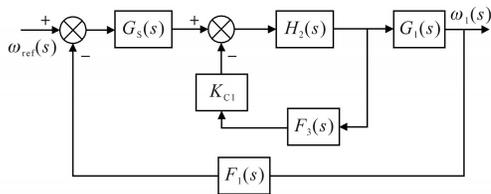


图6 无补偿简化结构图

Fig.6 Uncompensated simplified structure diagram

加入补偿后的转矩内环传递函数为

$$H_1(s) = \frac{H_2(s)}{1 + K_{c1}(s)H_2(s)F_3(s)} \quad (15)$$

则系统结构可简化为图7。

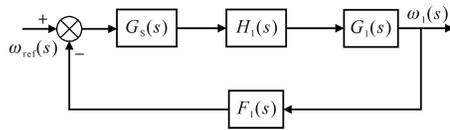


图7 有补偿简化结构图

Fig.7 Compensated simplified structure diagram

由梅森公式得系统传递函数为

$$H(s) = \frac{G_s(s)H_1(s)G_1(s)}{1 + G_s(s)H_1(s)G_1(s)F_1(s)} = \frac{G_s(s)H_2(s)G_1(s)}{1 + G_s(s)H_2(s)G_1(s)F_1(s) + K_{c1}(s)H_2(s)F_3(s)} \quad (16)$$

由赫尔维茨判据得系统稳定的充要条件为系

统特征方程顺序主子式全部大于0, 即  $\Delta_i > 0$ , 则

$$\begin{cases} (1 + K_{c1})\tau_1 J_{m1} + K_{p1}K_{p2}\tau_1\tau_2 > 0 \\ [(1 + K_{c1})\tau_1 J_{m1} + K_{p1}K_{p2}\tau_1\tau_2](K_{p1}\tau_1 + K_{p2}\tau_2) - [1 + K_{p2}(1 + K_{c1})]\tau_1\tau_2 J_{m1} > 0 \\ [(1 + K_{c1})\tau_1 J_{m1} + K_{p1}K_{p2}\tau_1\tau_2](K_{p1}\tau_1 + K_{p2}\tau_2) + [1 + K_{p2}(1 + K_{c1})]\tau_1\tau_2 J_{m1} \cdot [(1 + K_{c1})\tau_1 J_{m1} + K_{p1}K_{p2}\tau_1\tau_2] - [1 + K_{p2}(1 + K_{c1})]\tau_1\tau_2 J_{m1} > 0 \end{cases} \quad (17)$$

整理得:

$$\begin{cases} K_{c1} > -(1 + 1/K_{p2}) \\ K_{c1} > -(1 + K_{p1}K_{p2}\tau_1/J_{m1}) \\ K_{c1} > 1/K_{p2} - K_{p1}K_{p2}\tau_1/J_{m1} - K_{p2}^2\tau_1/J_{m1} - 1 \end{cases} \quad (18)$$

本文所用仿真电机转动惯量为  $10.18 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , PI 控制器参数经过整定, 设置为  $K_{p1} = 6, \tau_1 = 5, K_{p2} = 2, \tau_2 = 60$ , 将参数代入式 (14) 得  $K_{c1} > -1.5$ 。由此可得, 当耦合增益系数  $K_{c1}$  满足该条件即可使系统稳定性得到保证。

### 4 仿真实验

为了验证转矩均衡控制策略在各种突发事件环境下的有效性, 在 Matlab/Simulink 环境下搭建4台异步电机的齿轮传动仿真模型。对比PI并行控制策略下, 电机组出现扰动误差和总负载发生突变的情况, 观察各电机的转矩输出以及各电机之间的转矩同步误差。由于本文研究重点为多电机转矩均衡控制, 齿轮传动只搭建基本模型不作为重点分析对象, 所以齿轮传动比设为1。设计方案系统结构图如图8所示, 所选用异步电机实验参数为: 额定电压  $U_N = 690 \text{ V}$ , 额定转速  $\omega_N = 1150 \text{ r/min}$ , 额定功率  $P_N = 200 \text{ kW}$ , 转动惯量  $J_m = 10.18 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ , 极对数  $n_p = 3$ 。齿轮具体参数为: 分度圆直径  $D = 100 \text{ mm}$ , 阻尼系数  $B_g = 25 \text{ N}\cdot\text{S/m}$ , 刚度系数  $K_g = 500 \text{ N/m}$ 。

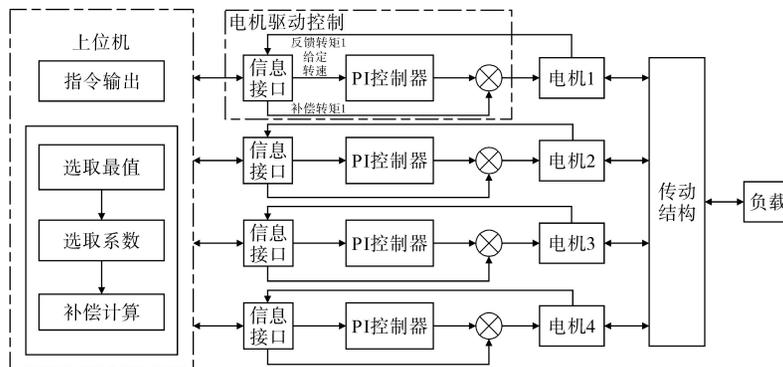


图8 转矩均衡控制方案结构图

Fig.8 Torque equalization control scheme structure drawing

将初始条件设置为4台电机同一给定转速  $\omega_{ref}=1\ 150\ \text{r/min}$ 。由于负载为旋转刚体,所以电机采用变负载启动方式,依据式(7)模拟负载信息,设置负载转动惯量为  $100\ \text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。对4台电机的输出转矩进行实时观测,设4台电机间的同步误差为

$$E(s) = T_{\text{emax}}(s) - T_{\text{emin}}(s) \quad (19)$$

$T_{\text{emax}}, T_{\text{emin}}$  分别为某时刻4台电机输出转矩中的最大值和最小值,用它们的差值来表征系统同步误差。

在第10 s给第一台电机施加一个脉冲信号模拟电机组外来扰动,图9~图12分别为PI控制策略下和转矩均衡控制策略下4台电机输出转矩和转矩同步误差。

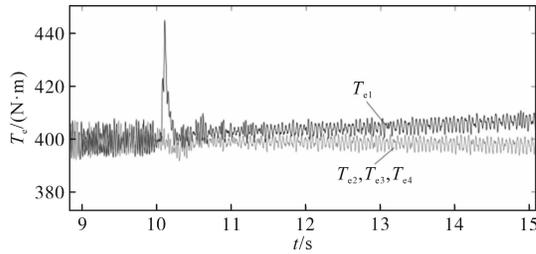


图9 PI控制下4台电机转矩

Fig.9 Torque of four motors under PI control

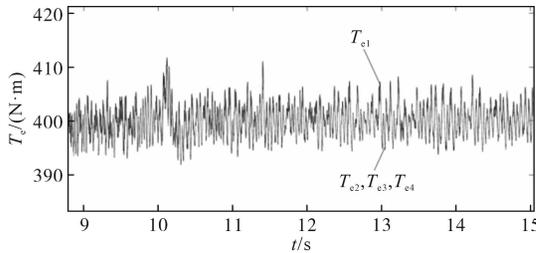


图10 转矩均衡控制下4台电机转矩

Fig.10 Torque of four motors under torque balance control

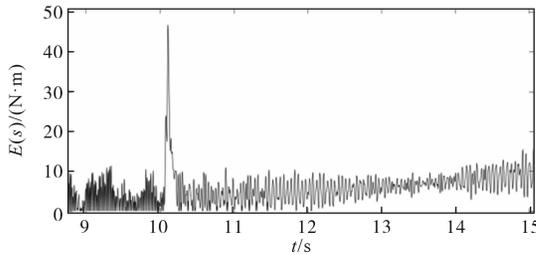


图11 PI控制下4台电机转矩误差

Fig.11 Torque error of four motors under PI control

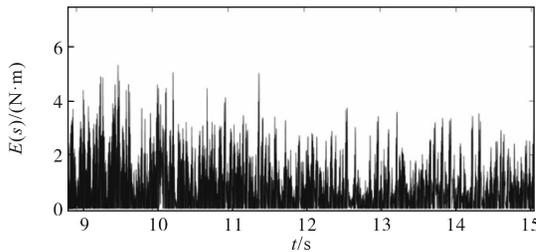


图12 转矩均衡控制下4台电机转矩误差

Fig.12 Torque error of four motors under torque balance control

将第一台电机控制参数在2.5%范围内调整,并在第10 s突然施加400 N总负载,图13~图16分别为PI控制策略下和转矩均衡控制策略下,第一台电机参数调整,第10 s系统总负载突变后,4台电机转矩和转矩同步误差。

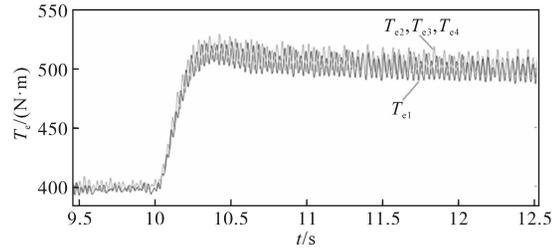


图13 总负载突变时PI控制下4台电机转矩

Fig.13 Four motor torque under PI control during total load mutation

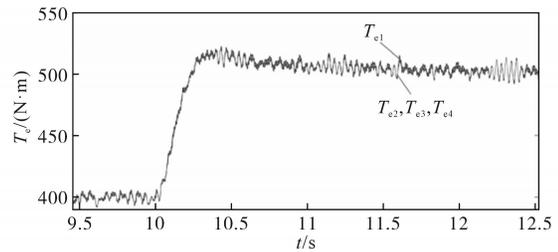


图14 总负载突变时转矩均衡控制下4台电机转矩

Fig.14 Four motors under torque balance control during total load mutation

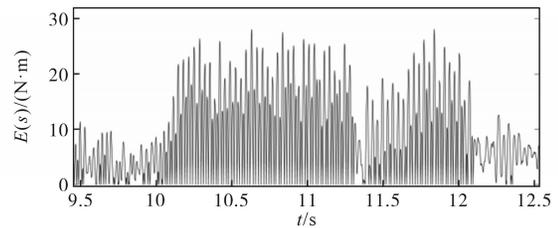


图15 总负载突变时PI控制下4台电机转矩误差

Fig.15 Torque error of four motors under PI control during total load mutation

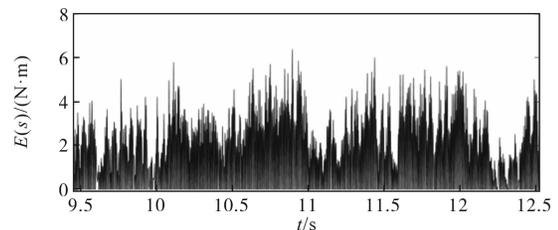


图16 总负载突变时转矩均衡控制下4台电机转矩误差

Fig.16 Torque error of four motors under torque balance control during total load mutation

由实验结果可得,转矩均衡控制策略效果明显,系统施加扰动后,对比PI控制策略,转矩误差明显收敛,系统同步率达到98%以上;当系统总负载突变后,对比PI控制策略,系统在0.5 s内迅速恢复到稳定状态,且同步误差也明显缩小,转

矩输出波动明显平缓,系统同步率达到98%以上。

## 5 结论

本文对多电机的刚性连接系统进行了分析,以典型齿轮传动刚性连接系统为例,对机电耦合模型和同步控制方案进行了分析和设计,由于现有实验设备的局限性,针对齿啮耦合多轴刚性连接的多电机同步控制系统进行了仿真测试,对系统的补偿控制方案得到了有效验证。对于实验中出现的输出波动情况表明,在刚性连接条件下,当电机数量较多、负载较大时,电机的同步误差也会随之增大,电机本身输出也会受到干扰,仿真结果证明,转矩均衡策略有效地抑制了输出波动,使曲线趋于平滑。此外,可以选择智能算法对电机控制进行优化,或者利用变频器特性软化电机的机械特性,从而使电机控制效果更加良好。

### 参考文献

- [1] CHEN S P, ZHANG K, ZHANG W, et al. Design of multi-motor synchronous control system[C]// IEEE Proceedings of the 29th Chinese Control Conference, Beijing, China, 2010:3367-3371.
- [2] 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 Yuhao, PENG Fei, HUANG Yunkai. Overview of multi-motor synchronous motion control technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(14): 2922-2935.
- [3] 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):398-401,407.  
LI Zhiyong. Power balance control in fixed joint multi-motor system[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(3): 398-401, 407.
- [4] 唐红雨,陈飞,王翠军.多电机同步控制系统设计与实现[J].电气传动,2017,47(6):45-49.  
TANG Hongyu, CHEN Fei, WANG Cuijun. Design and implementation of the multi-motor synchronous control system[J]. Electric Drive, 2017, 47(6): 45-49.
- [5] NICOLA M, SACERDOTIANU D, HUREZEANU A. Sensorless control in multi-motors electric drives with high dynamic and rigid coupling[C]//2017 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & 2017 Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), IEEE, 2017:495-500.
- [6] 耿强,王少炜,周湛清,等.改进型偏差耦合多电机转速同步控制[J].电工技术学报,2019,34(3):474-482.  
GENG Qiang, WANG Shaowei, ZHOU Zhanqing, et al. Multi-motor speed synchronous control based on improved relative coupling structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 474-482.
- [7] 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):7004-7013,7092.  
SHI Tingna, XIN Xiong, XIA Changliang. Multi-motor speed synchronous control based on improved relative coupling structure with a virtual motor[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2017, 37(23): 7004-7013, 7092.
- [8] 肖雄,王浩丞,武玉娟,等.基于双滑模估计的主从结构共轴双电机模型预测直接转矩控制无速度传感器控制策略[J].电工技术学报,2021,36(5):1014-1026.  
XIAO Xiong, WANG Haocheng, WU Yujuan, et al. Coaxial dual motor with master-slave structure model-predictive direct torque control speed sensorless control strategy based on double sliding mode estimation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(5): 1014-1026.
- [9] LIAO J, YAO B, ZHU X. Adaptive robust coordinated control for over-actuated cutter-head driving systems of hard rock tunnel boring machines[J]. IFAC Papers OnLine, 2016, 49(21): 611-616.
- [10] SUN J, LIU R, LUO Y, et al. Electromechanical coupling model for cutterhead driving system of shield machines[C]//International Conference on Intelligent Robotics and Applications, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010:310-317.
- [11] 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): 2022-2036.
- [12] 耿强,单长帅,刘涛,等.双电机刚性齿轮传动系统转矩均衡控制[J].电工技术学报,2017,32(15):17-26.  
GENG Qiang, SHAN Changshuai, LIU Tao, et al. Torque balance control of dual-motor rigid gear drive system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 17-26.
- [13] 易园园,秦大同,刘长钊.冲击载荷下电机-多级齿轮系统动态特性研究[J].振动与冲击,2019,38(19):253-260.  
YI Yuanyuan, QIN Datong, LIU Changzhao. Dynamic characteristics of a motor-driven multistage gear system under impact load [J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(19): 253-260.
- [14] 刘利,舒锐志,黄金,等.多电机并联驱动-传动系统动力学建模及其固有振动特性分析[J].机械传动,2020,44(10):29-37.  
LIU Li, SHU Ruizhi, HUANG Jin, et al. Dynamics modeling and inherent vibration characteristic analysis of multi-motor parallel drive-transmission system[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2020, 44(10): 29-37.
- [15] 谷雨,马钺.基于加权交叉耦合的多电机同步控制研究[J].电气传动,2015,45(9):58-61,65.  
GU Yu, MA Yue. Research on multi-motor synchronization control based on weighted cross-coupling control[J]. Electric Drive, 2015, 45(9): 58-61, 65.
- [16] 林远,卢子广,卢泉,等.基于模糊PI矢量控制的异步电机调速系统[J].电气传动,2017,47(8):15-18.  
LIN Yuan, LU Ziguang, LU Quan, et al. Induction motor speed control system based on fuzzy PI vector control[J]. Electric Drive, 2017, 47(8): 15-18.

收稿日期:2022-04-08

修改稿日期:2022-05-30