深竖井大运量连续提升多点分段联驱系统同步控制研究*

余洪伟[1,2,3],周建[1,2,3],左英杰[1,2,3],程国栋[4]

(1.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
2.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
3.国家安全生产长沙矿山机电检测检验中心, 湖南 长沙 410012;
4.中国矿业大学徐海学院, 江苏 徐州市 221008)

摘要:针对深竖井大运量连续提升多点分段联驱系统存在的各分段电机同步控制问题,基于传统偏差耦合控制方法,采用转速转矩双闭环控制,提出了一种改进偏差耦合控制策略。搭建六电机分段联驱连续提升系统同步控制数值模型,对比分析传统偏差耦合控制和改进偏差耦合控制在连续提升分段联驱系统不同启动负载转矩和稳态负载扰动下的同步跟踪性能。结果表明:与传统偏差耦合控制的系统相比,改进偏差耦合控制策略可有效解决深竖井大运量连续提升多点分段联驱系统在启动过程中转速不同步的问题,同时提高了系统在启动阶段和稳态扰动下的同步跟踪性能和动态响应性能,验证了改进偏差耦合控制在连续提升系统多点分段联驱同步控制系统中应用的可行性。

关键词:连续提升系统;多点分段联驱;同步控制;转矩补偿;偏差耦合控制

中图分类号:TD534 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)08-0193-07

Research on Synchronous Control of Multi-Point Segmented Combined Drive System with Continuous Lifting of Large Capacity in Deep Shaft

YU Hongwei[1,2,3], *ZHOU Jian*[1,2,3], *ZUO Yingjie*[1,2,3], *CHENG Guodong*[4]

(1.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
2.State Key Laboratory of Metal Mine Safety Technology, Changsha, Hunan 410012, China;
3.Changsha Mine Mechanical and Electrical Testing Center for National Safety Production, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Xuhai College, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China)

Abstract: Aiming at the problem of synchronous control of each segmented motor in the multi-point segmented combined drive system with continuous lifting of large capacity in deep shaft, based on the traditional deviation coupling control method, an improved deviation coupling control strategy was proposed using the double closed-loop control of speed and torque. The numerical model of synchronous control of six-motor segmented combined drive continuous lifting system was built, and the synchronous tracking performance of traditional deviation coupling control and improved deviation coupling control under different starting load torque and steady-state load disturbance of segmented combined drive system with continuous lifting was compared and analyzed. The results show that compared with the traditional deviation coupling control system, the improved deviation coupling control strategy can effectively solve the problem of asynchronous speed in the start-up process of the multi-point segmented combined drive system with continuous lifting of large capacity in deep shaft. At the same time, the synchronous tracking performance and dynamic response performance of the system in the start-up stage and under steady-state disturbance are improved, and the feasibility of the application of the improved deviation coupling control in the multi-point segmented combined drive synchronous control system with continuous lifting is verified.

Key words: Continuous lifting system, Multi-point segmented combined drive, Synchronous control, Torque compensation, Deviation coupling control

---

* **收稿日期**:2024-11-23
基金项目:湖南省工业领域重点研发项目(2019GK2234);金属矿山安全技术国家重点实验室资助项目(2024GZKJ02)
作者简介:余洪伟(1985—),男,安徽安庆人,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为矿山机电装备安全与测试技术。E-mail:447918297@qq.com

0 引言

提升系统是矿井连接地面和井下的咽喉,是矿山深部开采必需的重大关键设备[1-3]。连续提升系统突破现有提升方式在提升运量及提升高度方面的限制,是研究深竖井大运量提升的新方向[4-6]。深竖井大运量连续提升系统采用多点分段联驱、多电机联合驱动方式,很大程度上降低了每个分段的机械部件和输送链的大小和强度,分段均分整个输送链系统张力。对于这种多电机驱动机电耦合系统,必须对所有电机进行同步控制,以保证连续提升系统的稳定性,提高整机运行的安全性和工作效率[7-9]。

国内外学者针对多电机联驱同步控制开展了大量的研究,在多电机联驱稳态运行控制和优化改进方面取得了重要成果[10-16]。但在多电机联驱系统启动过程中,由于载荷非线性、实时装载等载荷变化,导致各分段联驱电机转动惯量不同,从而造成各电机出现转速差并引起各驱动电机力矩不平衡,目前关于此方面的研究仍然不足。深竖井大运量连续提升系统作为大功率驱动的强耦合系统,在运行期间,各分段联驱部载荷呈非线性周期变化,且实际装载过程中还会产生随机负载扰动,造成各驱动电机力矩不平衡,给整个系统带来冲击[17-18]。

本文在传统偏差耦合控制理论的基础上,结合深竖井大运量连续提升系统运行工况特点,在转矩控制模块增加转矩补偿,并对转矩补偿器进行了稳定性分析。通过建立连续提升多点分段联驱系统数值仿真模型,分析其在启动阶段不同负载转矩和稳态负载扰动下的转速同步跟踪和动态响应性能,验证了改进偏差耦合控制策略的可行性。

1 连续提升多电机分段联驱系统

1.1 多电机驱动原理

本文研究对象为六电机(异步电机)分段联驱连续提升系统(见图 1),为了便于分析,多电机联驱系统略去了减速器、驱动轮、输送链等机械结构。考虑到深竖井大运量连续提升系统要求启动阶段加速平缓、稳态过程运行平稳,各分段驱动电机采用矢量控制变频控制技术[9]。

分段联驱连续提升系统中,每个分段的驱动配置均一致,电机和变频器的参数完全相同。假设启动阶段各分段驱动电机的启动力矩均相同,在稳定工况下,很容易实现各分段驱动电机的转速同步[19-21]。然而分段联驱连续提升系统的载荷随机分布于驱动圆环链料斗中,无法实现均匀分布,且实时装载过程中也会引起负载扰动,这些因素使各电机在启动过程中的转动惯量不一致,导致转速不同步,引起各驱动分段张力不平衡,对电机、驱动轮、减速器等机械部件造成冲击,圆环链出现张力不平衡、波动大等问题,降低连续提升系统的运行安全和使用寿命。

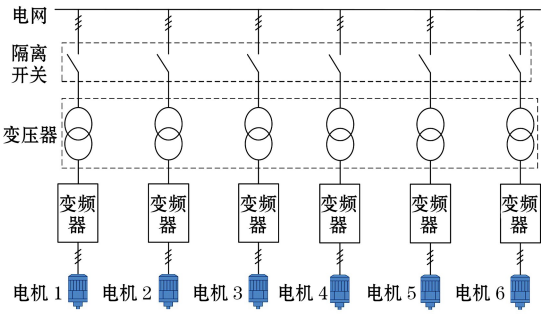


图 1 深竖井大运量连续提升多电机驱动系统

Fig.1 Multi-motor drive system of large capacity continuous lifting of deep shaft

1.2 多电机同步控制系统的电机模型

多电机同步控制系统被控对象是各驱动电机,为保证异步电机调速性能,采用基于转子磁链定向的矢量控制技术,其两相同步旋转坐标系下的数学模型见式(1)。

$$\begin{cases} u_{sd}=R_s i_{sd}+\sigma L_s p i_{sd}+u_{sdc} \\ u_{sq}=R_s i_{sq}+\sigma L_s p i_{sq}+u_{sqc} \\ \psi_r=\dfrac{L_m}{T_r p+1} i_{sd} \\ \omega_0-\omega=\omega_s=\dfrac{L_m i_{sq}}{T_r \psi_r} \\ T_e=n_p \dfrac{L_m}{L_r} i_{sq} \psi_r \end{cases} \tag{1}$$

式中:u_{sd}、u_{sq}分别为定子相电压的 d、q 轴分量;i_{sd}、i_{sq}分别为定子相电流的 d、q 轴分量;R_s、L_s分别为定子绕组的内阻和自感;σ 为电动机漏磁系数;ψ_r为转子磁链幅值;L_m为定转子之间的互感;T_r为转子励磁时间常数;ω_0、ω 和 ω_s分别为同步角速度、转子角速度和转差角速度;T_e为电磁转矩;n_p为极对数;L_r为转子绕组的自感;p 为微分算子;u_{sdc}、u_{sqc}为 u_{sd}和 u_{sq}之间的交叉耦合项,取值见式(2)。

$$\begin{cases} u_{sdc}=\dfrac{L_m}{L_r} p\psi_r-\sigma\omega_0 L_s i_{sq} \\ u_{sqc}=\omega_0(\sigma L_s i_{sd}+\dfrac{L_m}{L_r}\psi_r) \end{cases} \tag{2}$$

结合式(1)和式(2),采用双闭环结构对磁链 ψ_r、转子角速度 ω 和定子电流 i_{sd}、i_{sq}进行 PI 控制,可得异步电机矢量控制系统的结构示意,如图 2 所示。

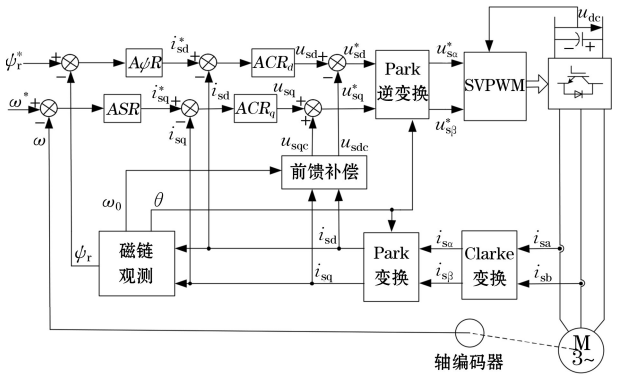


图 2　异步电机矢量控制系统

Fig.2　Asynchronous motor vector control system

图 2 中,带"*"的变量均为给定值,如 $u_{s\alpha}^*$、$u_{s\beta}^*$ 分别为 α、β 两相静止坐标系下的定子电压给定指令;i_{sa}、i_{sb} 分别为定子 a 相和 b 相电流,$i_{s\alpha}$、$i_{s\beta}$ 分别为定子电流的 α、β 轴的分量;u_{dc} 为逆变器直流母线电压;ASR、$A\psi R$、ACR_d、ACR_q 分别为转速、磁链、定子电流励磁分量、定子电流转矩分量对应的 PI 控制器;前馈补偿环节用于消除交叉耦合项,对应式(2);θ 为进行 Park 变换所需的转子磁链空间角,可采用不同类型的磁链观测器得到。

2　基于偏差耦合控制的多电机同步控制

2.1　传统偏差耦合控制

图 3 为传统偏差耦合控制的结构示意,其中 w^* 为给定目标转速,w_n 为第 n 台电机的转速;T_{Ln} 为第 n 台电机的负载转矩。各分段驱动电机均采用矢量变频控制(见图 2),采用转速转矩双闭环控制,所有电机给定同一个转速信号,除了本电机的速度闭环反馈以外,增加本电机与其他电机之间的实际转速差,作为每台电机的进一步补偿。

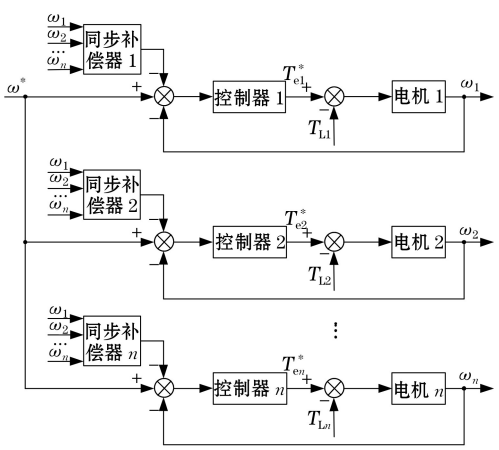


图 3　传统偏差耦合控制示意

Fig.3　Schematic of traditional deviation coupling control

图 4 为同步补偿结构,将本电机与其他电机的实际转速分别作差,然后乘以同步补偿器的系数 K_{ij} 后作为本电机的输入补偿信号,K_{ij} 一般为各电机转动惯量 J 之比。

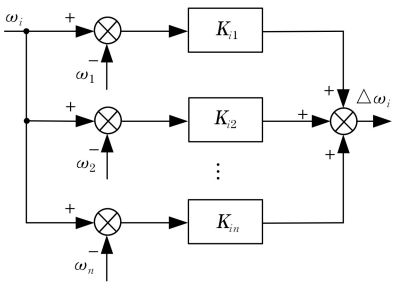


图 4　同步补偿器结构

Fig.4　Synchronous compensator structure

第 i 个同步补偿器的数学模型为:

$$\Delta\omega_i = \sum_n K_{ij}(\omega_i - \omega_j) \tag{3}$$

2.2　带转矩补偿器的改进偏差耦合控制

在负载稳定的多电机驱动系统,传统偏差耦合控制对各分段驱动电机的同步跟踪性能较好,稳态过程中转速动态响应迅速。但在启动过程中存在缺陷:转速同步补偿器易发生饱和失效,各电机输出转矩相同。针对本文研究的大运量连续提升系统,在启动阶段,各电机的初始负载均可能不一样,会引起各分段驱动电机加速度出现差异,导致启动阶段各电机的转速无法同步。

在传统偏差耦合控制的基础上,对转矩控制环节进行进一步补偿,即增加一个转矩补偿器,得到改进偏差耦合控制结构,如图 5 所示。转矩补偿器的设计依据为各电机实际转速与各电机平均转速 ω_{av} 的转速差。ω_{av} 表示为:

$$\omega_{av} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\omega_i \tag{4}$$

通过 P 控制器调节补偿效果,其转矩补偿器的系数 K 与对应各驱动电机的转动惯量 J 成正比,即:

$$K_i/K_j = J_i/J_j \tag{5}$$

转矩补偿器的优点为:包含所有电机的平均转速,同样可以补偿任意电机转速波动带来的不同步问题;启动时,可以解决由于转速控制器饱和及各电机转动惯量差异导致的不同步问题;任意电机受到负载扰动时,可配合同步补偿器进一步补偿不同步问题;补偿结构比较简单,且采用 P 控制器,不会影响系统的快速性。

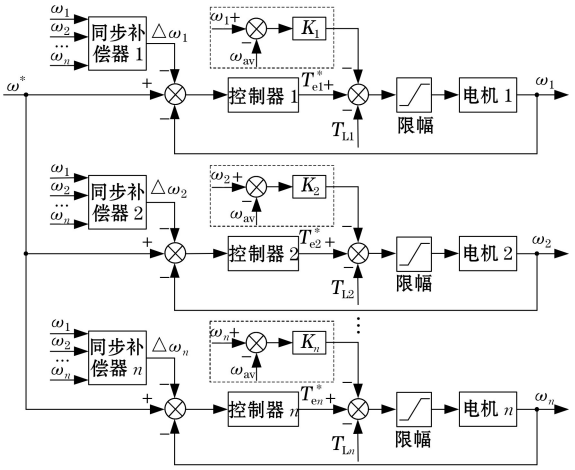


图 5 改进偏差耦合控制结构

Fig.5 Improved deviation coupling control structure

图 5 中,控制器 1 ~ n 均为 PI 型,其传递函数 $G_{ci}(s)$ 为:

$$G_{ci}(s)=K_{Pi}+\frac{K_{Ii}}{s} \tag{6}$$

式中:K_{Pi}、K_{Ii} 分别为控制器 i 的比例增益和积分增益系数;s 为变换参数。

等效传递函数 $G_i(s)$ 为:

$$G_i(s)=\frac{1}{J_i s} \tag{7}$$

基于以上理论可知,每台电机的实际转速是由给定转速信号、实际转矩信号以及各电机转速信号共同调节。

单独考虑给定目标转速,各分段驱动电机实际转速传递函数 $\Phi_{1i}(s)$ 为:

$$\Phi_{1i}(s)=\frac{\omega_i(s)}{\omega^*(s)}=\frac{G_{ci}(s)G_i(s)}{1+\left(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}\right)G_{ci}(s)G_i(s)+\frac{n-1}{n}K_iG_i(s)} \tag{8}$$

式中:$\omega_i(s)$ 为第 i 台电机实际转速传递函数;$\omega^*(s)$ 为给定目标转速传递函数。

单独考虑实际负载转矩,各分段驱动电机实际转速传递函数为:

$$\Phi_{2i}(s)=\frac{\omega_i(s)}{T_{Li}(s)}=\frac{-G_i(s)}{1+\left(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}\right)G_{ci}(s)G_i(s)+\frac{n-1}{n}K_iG_i(s)} \tag{9}$$

式中,$T_{Li}(s)$ 为第 i 台电机的负载转矩传递函数。

单独考虑任一台电机实际转速,各分段驱动电机实际转速传递函数为:

$$\Phi_{3i}(s)=\frac{\omega_i(s)}{\omega_m(s)}=\frac{K_{im}G_{ci}(s)G_i(s)+\frac{1}{n}K_iG_i(s)}{1+\left(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}\right)G_{ci}(s)G_i(s)+\frac{n-1}{n}K_iG_i(s)} \tag{10}$$

式中:$\omega_m(s)$ 为第 m 台电机实际转速传递函数;K_{im} 为常数。

由式(8)至式(10)可得,第 i 台电机实际转速传递函数 $\omega_i(s)$ 为:

$$\omega_i(s)=\Phi_{1i}(s)\omega^*(s)+\Phi_{2i}(s)T_{Li}(s)+\sum_{\substack{m=1\\m\neq i}}^{n}\Phi_{3i}(s)\omega_m(s) \tag{11}$$

同时可得传递函数的特征方程为:

$$D(s)=1+(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij})G_{ci}(s)G_i(s)+\frac{n-1}{n}K_iG_i(s)=0 \tag{12}$$

将式(6)和式(7)代入式(12),可得:

$$D(s)=J_is^2+\left[\frac{n-1}{n}K_i+\left(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}\right)K_{Pi}\right]s+\left(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}\right)K_{Ii}=0 \tag{13}$$

此外,电机实际转速的稳态误差 e_{ssi} 可表示为:

$$\begin{aligned}e_{ssi}&=\lim_{s\to0}sE(s)=\lim_{s\to0}s[\omega^*(s)-\omega_i(s)]=\\&\lim_{s\to0}s\{[1-\Phi_1(s)]\omega^*(s)-\Phi_2(s)T_{Li}(s)-\sum_{\substack{m=1\\m\neq i}}^{n}\Phi_3(s)\omega_m(s)\}=\\&\lim_{s\to0}\frac{sT_{Li}(s)+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}K_{Ii}\omega^*(s)-\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{im}K_{Ii}\omega_m(s)}{\left(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}\right)K_{Ii}}\end{aligned} \tag{14}$$

考虑负载扰动引起的转矩变化为阶跃信号,第 i 台电机的负载转矩对转速产生的稳态误差为 0,式(14)可简化为:

$$e_{ssi}=\frac{1}{1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}}\lim_{s\to0}s\{\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}[\omega^*(s)-\omega_j(s)]\}=$$

$$\frac{1}{1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}}\lim_{t\to\infty}\{\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}[\omega^{*}(t)-\omega_{j}(t)]\}=$$

$$\frac{1}{1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}}\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}(K_{ij}e_{ssj}) \tag{15}$$

由式(15)可得:

$$\left(1+\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}K_{ij}\right)e_{ssi}=\sum_{\substack{j=1\\j\neq i}}^{n}(K_{ij}e_{ssj}) \tag{16}$$

式(16)方程组的系数矩阵为可逆矩阵,存在唯一解,即:

$$e_{ssi}=e_{ssj}=0,\{i=1\sim n,j=1\sim n,i\neq j\} \tag{17}$$

由式(13)和式(17)可知,改进偏差耦合控制系统具有稳定性,各分段联驱电机均可无静差地跟踪给定转速,实现转速同步。

3 仿真分析

为了验证带转矩补偿器的改进偏差耦合控制策略在深竖井大运量连续提升分段联驱系统应用中的合理性和稳定性,本文建立了提升量为750万t/a、提升高度为1 500 m、单台电机驱动功率为2 000 kW的六电机分段联驱连续提升系统数值模型,并进行了仿真分析。在重载启动、稳态受扰和重载紧急制动等工况条件下,对传统偏差耦合控制和改进偏差耦合控制分别进行了仿真。仿真用异步电机的参数见表1。

表1 三相异步电机参数

Table 1 Parameters of three-phase asynchronous motor

电机	额定功率/kW	额定电压/kV	额定转速/(r/min)	额定转矩/(N·m)	转动惯量/(kg·m²)
M1	2 000	6	740	20 000	151.0
M2	2 000	6	740	20 000	135.9
M3	2 000	6	740	20 000	120.8
M4	2 000	6	740	20 000	151.0
M5	2 000	6	740	20 000	166.1
M6	2 000	6	740	20 000	181.2

3.1 传统偏差耦合控制仿真结果

仿真条件设定:0 s时,系统各分段联驱电机同时启动,各电机给定负载转矩均为20 kN·m,给定转速为740 r/min;2.5 s时,6台电机负载均同时减小至10 kN·m;3 s时,6台电机负载同时恢复至20 kN·m;4 s时,系统各分段联驱电机同时紧急制动停车。

传统偏差耦合控制时重载仿真结果如图6所示。由图6可知,在初始负载不同的多电机分段驱动系统启动阶段,传统偏差耦合控制下转速同步控制精度不高,其原因是启动阶段转速控制同步补偿失效,各分段驱动电机在启动阶段最大电磁转矩基本相同,转矩控制没有起到控制作用,但能保证稳态负载扰动工况下转速同步跟踪。

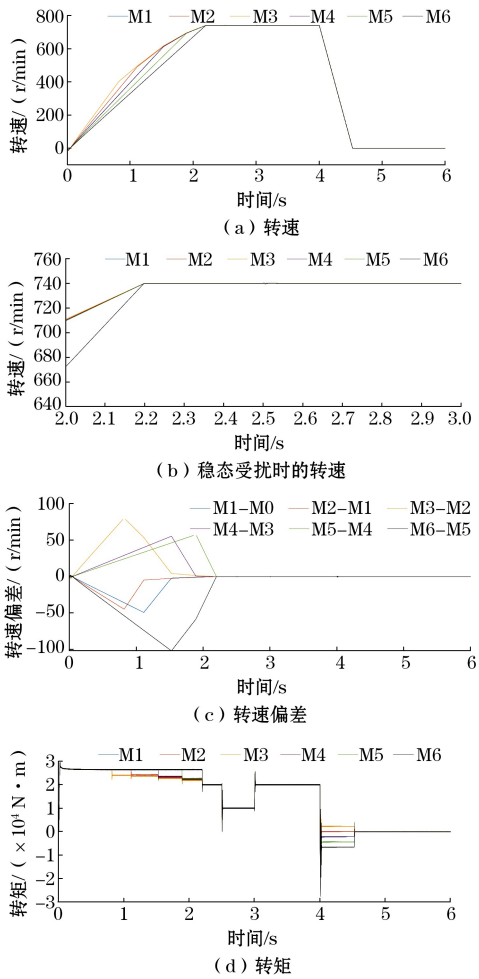


图6 传统偏差耦合控制时重载仿真结果

Fig.6 Overloading simulation results of traditional deviation coupling control

3.2 改进偏差耦合控制仿真结果

仿真参数和条件设定与3.1节相同。改进偏差耦合控制时重载仿真结果如图7所示。

对比图6和图7可知,采用改进偏差耦合控制时,不但可以保证各分段驱动电机稳态运行过程中的抗扰性能,在负载阶跃扰动信号的作用下,各电机的转速同步跟踪性能和响应性能也都较好。此外,在转矩控制模块中增加的转矩补偿器,对各分段驱动电机的电磁转矩进行补偿,很大程度上提高了各

分段驱动电机在启动阶段的转速同步跟踪性能。结合表 1 和图 7(d)可知,M4(M3)、M5(M2)和 M6(M1)的转动惯量依次增大,加入转矩补偿器和转矩输出限幅后,M6(M1)仍保持最大电磁转矩启动,M4(M3)、M5(M2)的启动转矩则依次下降,进而保证所有电机在启动阶段的转速同步。

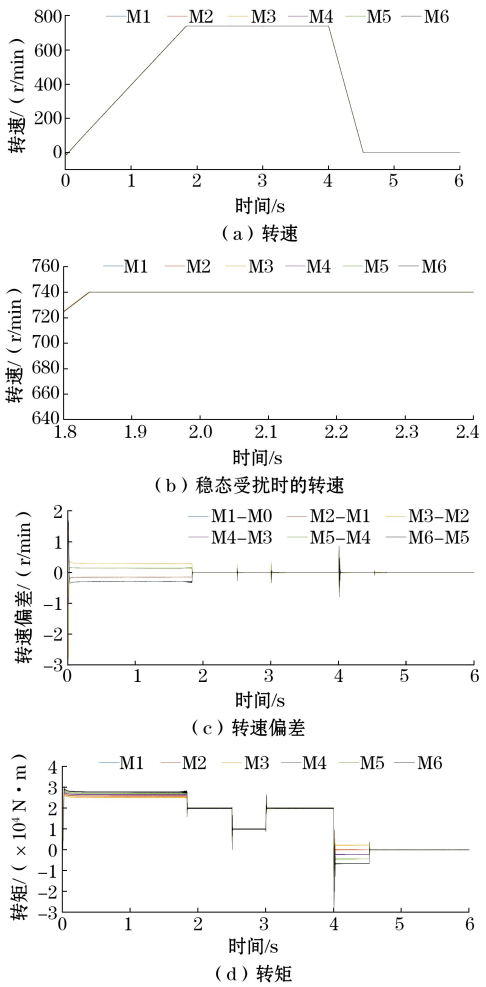


图 7 改进偏差耦合控制时重载仿真结果

Fig.7 Overloading simulation results of improved deviation coupling control

3.3 仿真结果讨论

传统偏差耦合控制在多电机分段联驱系统中可以保证稳态运行过程中各分段联驱电机的同步跟踪性能,抗干扰性能也有所提升,负载转矩的阶跃突变对系统稳定性影响较小。但无法保证启动过程中各分段驱动电机的转速同步,这个问题出现的原因是:在系统启动的初始阶段,所有的电机转速控制环节无法起到调节作用,转速同步补偿失效,启动阶段各分段电机的同步跟踪效果差。

改进偏差耦合控制可以保证多电机分段联驱系统在全过程(启动、稳态运行以及停车)中的转速同步精度,同时,系统的稳态抗扰性能较好,负载转矩的阶跃突变对转速影响非常小。与传统偏差耦合控制相比,改进偏差耦合控制成功克服了该系统在启动阶段因电动机转动惯量差异而导致的转速同步性问题。归结于在改进偏差耦合控制策略中引入了转矩补偿器,该补偿器通过比较各电机的实际转速与整体电机的平均转速,自动调节各电机的启动力矩,从而实现了转速的同步。因此,启动过程中,即使各电机转动惯量存在差异,仍可保持较高的转速同步精度。

4 结论

(1) 本文在传统偏差耦合控制方法的基础上,结合深竖井大运量连续提升系统运行工况特点,提出了一种转速转矩双补偿的改进偏差耦合控制策略。理论分析结果表明,改进偏差耦合控制策略具有稳定性,且在该策略控制下,系统各分段联驱电机均可无静差地跟踪给定转速,实现转速同步。

(2) 采用数值仿真建模方法,对比分析了传统偏差耦合控制和改进偏差耦合控制的仿真结果。结果表明,改进偏差耦合控制策略能有效解决系统在启动过程中转速不同步的问题,同时提高了连续提升分段驱动系统在启动阶段和稳态扰动下的同步跟踪性能和动态响应性能。

(3) 后期将搭建多电机分段联驱系统试验平台,得到改进偏差耦合控制策略在系统启动阶段和稳态扰动下的试验结果,验证该控制策略的可行性。

参考文献(References):

[1] 余洪伟,李广,左英杰,等.深竖井大运量多点驱动连续提升系统设计与分析[J].煤矿机械,2019,40(11):23-25.
YU Hongwei, LI Guang, ZUO Yingjie, et al. Design and analysis of deep shaft large-capacity multi-point drive continuous lifting system[J].Coal Mining Machinery,2019,40(11):23-25.

[2] 殷健翔.基于 TMS320F28379D 的多电机同步控制策略研究[D].杭州:浙江大学,2021.
YIN Jianxiang. Research on multi-motor synchronization control strategy based on TMS320F28379D[D]. Hangzhou: Zhejiang University,2021.

[3] 阮毅,陈伯时.电力拖动自动控制系统[M].北京:机械工业出版社,2009.
RUAN Yi, CHEN Boshi. Control system of electric drive [M]. Beijing: Machinery Industry Press,2009.

[4] 程国栋,吴玮.矿井带式输送机多电动机同步控制技术[J].工矿自动化,2021,47(12):81-86.
CHENG Guodong, WU Wei. Multi-motor synchronous control technology of mine belt conveyor[J].Journal of Mine Automation,2021,47(12):81-86.

[5] 鲍晓明,林涛,郑晓翔,等.双电机同步控制技术综述[J].微特电机,2024,52(8):68-73.
BAO Xiaoming, LIN Tao, ZHENG Xiaoxiang, et al. Review of dual-motor synchronous control technology[J]. Small & Special Electrical Machines,2024,52(8):68-73.

[6] 冯晗,杜钦君,徐东祥,等.基于均值偏差耦合的多电机同步预测控制[J].仪表技术与传感器,2024(8):84-92.
FENG Han, DU Qinjun, XU Dongxiang, et al. Multi-motor synchronized predictive control based on mean deviation coupling [J]. Instrument Technique and Sensor,2024(8):84-92.

[7] 殷俊,陈华,李祥,等.内力加载机构基于模型前馈的多电机同步控制方法[J].制造技术与机床,2024(8):127-131.
YIN Jun, CHEN Hua, LI Xiang, et al. Multi motor synchronous control method based on model feedforward for internal force loading mechanism [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool,2024(8):127-131.

[8] 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.

[9] 王毅波,曹宽.多电机同步控制技术发展简介[J].微特电机,2019,47(8):69-73.
WANG Yibo, CAO Kuan. Brief introduction of multi-motor synchronous control technology [J]. Small & Special Electrical Machines,2019,47(8):69-73.

[10] 耿强,徐婷婷.关于多电机转速同步控制系统仿真研究[J].计算机仿真,2018,35(11):319-323.
GENG Qiang, XU Tingting. Simulation study on synchronous control system of multi-motor speed [J]. Computer Simulation,2018,35(11):319-323.

[11] 金鸿雁,赵希梅.基于 Sugeno 型模糊神经网络和互补滑模控制器的双直线电机伺服系统同步控制[J].电工技术学报,2019,34(13):2726-2733.
JIN Hongyan, ZHAO Ximei. Dual linear motors servo system synchronization control based on Sugeno type fuzzy neural network and complementary sliding mode controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(13):2726-2733.

[12] 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.

[13] 王增科.基于嵌入式技术的施工升降机多电机同步控制方法[J].微电机,2024,57(4):40-45.
WANG Zengke. Multi-motor synchronous control method of construction elevator based on embedded technology [J]. Micromotors,2024,57(4):40-45.

[14] 谢斌,雷力,王在相,等.基于一般性动力学建模的多电机复合同步控制[J/OL].中国电机工程学报:1-15[2024-11-05]. https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231862.
XIE Bin, LEI Li, WANG Zaixiang, et al. Multi-motor composite synchronous control based on generalized dynamic modeling[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-15[2024-11-05]. https://link.cnki.net/doi/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231862.

[15] 苏石磊,岳云涛,刘东.基于改进偏差耦合的多电机同步控制[J].组合机床与自动化加工技术,2023(9):102-105+111.
SU Shilei, YUE Yuntao, LIU Dong. Multi-motor synchronous control based on improved deviation coupling [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique,2023(9):102-105+111.

[16] 周奇才,董日腾,熊肖磊,等.混凝土振动台多电机同步控制技术研究[J].机械设计与制造,2023(9):141-144+149.
ZHOU Qicai, DONG Riteng, XIONG Xiaolei, et al. Research on synchronous control technology for multi-motor of concrete vibrator[J]. Machinery Design & Manufacture,2023(9):141-144+149.

[17] 何晋,曹鲁成,李珂,等.改进型偏差耦合结构的多电机同步控制系统[J].兵工自动化,2020,39(3):41-44+52.
HE Jin, CAO Lucheng, LI Ke, et al. Multi-motor synchronization control system with improved deviation coupling structure [J]. Ordnance Industry Automation,2020,39(3):41-44+52.

[18] MU Y, QI L Q, SUN M Y, et al. An improved deviation coupling control method for speed synchronization of multi-motor systems[J]. Applied Sciences,2024,14(12):5300.

[19] NIU F, SUN K J, HUANG S P, et al. A Review on multimotor synchronous control methods [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification,2023,9(1):22-33.

[20] MAO H J, LI W, FENG X L, et al. Active fault tolerance control based on consistent matrix for multimotor synchronous system[J]. Complexity,2020:1426193.

[21] ZHANG F G, YIN H B, ZHANG H. Design and analysis of novel synchronous motion technique for a multi-module permanent magnet linear synchronous motor[J]. Energies,2022,15(10):3617.