郑茂全,侯媛彬,宋春峰,等. 双机驱动的煤矿带式输送机多级模糊均衡控制[J]. 煤炭学报,2015,40(S2):546-552. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0990

Zheng Maoquan,Hou Yuanbin,Song Chunfeng,et al. Equalization control with multistage fuzzy in coal belt conveyor by dual-motor drive[J]. Journal of China Coal Society,2015,40(S2):546-552. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2015.0990

双机驱动的煤矿带式输送机多级模糊均衡控制

郑茂全[1,2],侯媛彬[1],宋春峰[1],王　亮[1],薛　斐[1]

(1. 西安科技大学,陕西 西安　710054;2. 宁夏天地西北煤机有限公司,宁夏 石嘴山　753001)

摘　要: 从物理机理上推导并分析双机启动电机出力不均衡的原因,提出一种双机驱动的煤矿带式输送机多级模糊均衡控制(MFEC)算法,建立出该均衡控制器的数学模型,并给出了 MFEC 算法步骤和分级规则;最后以长距离大倾角的双机驱动的煤矿大巷带式输送机为例进行仿真,并与传统的 PI 控制比较。结果表明,该方法的平均线速度误差约减小 3%。

关键词: 煤料撒落;双机驱动;多级模糊规则;功率均衡

中图分类号: TD528.1　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253-9993(2015)S2-0546-07

Equalization control with multistage fuzzy in coal belt conveyor by dual-motor drive

ZHENG Mao-quan[1,2],HOU Yuan-bin[1],SONG Chun-feng[1],WANG Liang[1],XUE Fei[1]

(1. *Xi'an University of Science and Technology,Xi'an*　710054,*China*;2. *Ningxia Tiandi Northwest Coal Machine Limited Company,Shizuishan*　753001,*China*)

Abstract: The cause of power unbalance is analyzed and the relationship between the two motors is deduced in physical mechanism in the paper. Aim at the problem of coal belt conveyor,an algorithm of multistage fuzzy equalization control (MFEC) was proposed,equalization controller's mathematical model was created,the steps of MFEC algorithm and the ranking rules were deduced. At last,a belt conveyor of double-motor driven was made as a simulation example which was in long distance and large angle of coal-mine roadway. Then the simulation of MFEC was compared with traditional PI control. The result shows that the average error rate of this method is reduced by about 3%.

Key words: coal scattered; dual-motor drive; multistage fuzzy rules; power balance

针对多电机驱动的均衡问题,国内外专家进行了相应研究。董立红等提出一种灰色预测法对煤矿带式输送机张力进行 PID 控制[1]。陈举师、蒋仲安等针对胶带输送巷道粉尘分布及其影响因素进行了研究,并对巷道粉尘运动规律进行模拟[2-3]。朱立平等对适用于我国煤矿带式输送机典型机型作了研究[4]。罗亮、王腾、王建军、葛明臣、余发山等采用模糊控制器、小脑模型 CMAC 神经网络、专家系统等方法对带式输送机多机驱动进行功率平衡控制研究[5-9]。意大利 Mengoni Michele 提出一种基于五相连接的管状 PM 驱动器的多电机传动位置控制方式[10]。爱尔兰 Kaghazchi Hassan 提出一种多电机速度同步控制系统[11]。美国 Buben Shalom D 等对多电动机驱动时引起的热误差进行了实时优化设计[12]。英国 Lim Chee Shen 等针对基于 FCS-MPC 和 PI-PWM 的两电机驱动问题进行了同步电流控制比较研究[13]。保加利亚 Moni 等对一个露天矿长距离带式输送系统的驱动站的多电机复杂参数设计了综合测

收稿日期:2015-07-10　　责任编辑:毕永华
基金项目:中国煤炭科工集团科技创新基金资助项目(2011ZD007)
作者简介:郑茂全(1964—),男,甘肃兰州人,教授级高级工程师,博士研究生。E-mail:zhengmaoquan@sina.com

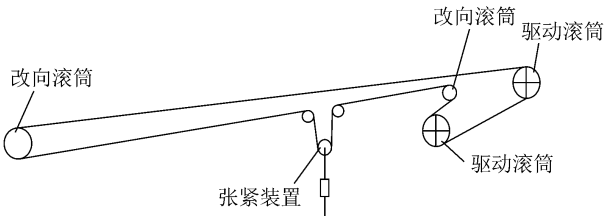
中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

试系统,配合系统协调控制[14]。荷兰 Pang Yusonc 和 Lodewijks Gabriel[15] 提出了圆管带式输送机试验台和试验测试设计方法。采用有限元法进行建模,在建成的平台上模拟紧张的胶带的两端分别在六托辊和胶带的变形应力。测试结果和模拟输出验证了有限元模型。德国 Minikin A 等[16] 在改造 Maritza 以东的两个 300 MW 容量的火力电厂的废料分段运输系统中,设计了 8 km 多长的管式废料输送系统及其设施。马来西亚的 Mohd Shah Mohd Heidir 等[17] 设计了基于 PLCDE 自适应模糊 PID 控制的带式输送机系统,并进行了实验测试。德国的 Dilefeld,Mario[18] 探讨了无齿轮带式输送机驱动装置的大容量系统的新技术,驱动电机可设计为无轴承,与轴承或膜片联轴器,电机尺寸,立地条件和客户需求形成解决方案是实施的基础。Lim Chee Shen 等[19] 针对双机驱动系统,提出一种基于有限控制集模型预测控制的改进方法,对两个三相异步电动机采用 5 桥臂两级逆变器供电。Jennings Andrew 等[20] 介绍印度第一高速运输系统,三角画廊陆路输送机,采用 1 600 mm 的带式输送机,带速 7.5 m/s,运输 6 000 t/h,从 DAHEJ 港口煤炭到装车仓。系统中张力预测必须准确,需要阻力预测使用橡胶的流变方程和动态分析。

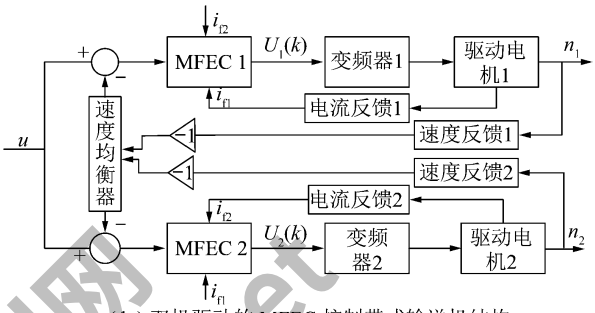
综上所述,国内外专家的研究集中在带式输送机的建模、参数预测、参数监控,也有采用模糊控制、神经网络、专家系统等理论对多机驱动的系统实行控制设法使功率均衡。双机驱动的均衡控制问题一直是长距离煤矿带式输送机的研究热点,是产生撒料故障的主要原因,也是没有彻底解决的难点。因此本文从物理机理上推导并分析双机启动电机出力不均衡的原因,提出一种双机驱动煤矿带式输送机多级模糊均衡控制(MFEC)算法,并验证之。

1　双机驱动 MFEC 控制系统总体方案

针对双机动驱动的长距离煤矿带式输送机系统,尽管两部驱动机在设计时功率和参数选择相同,并接受相同的控制信号,且目前双机驱动的变频器本身设置了均衡装置需要用户根据实际运行情况可编制双机均衡控制软件,但由于这两部电机机械特性不完全相同,且没有机械的联系,而且安装环境、托辊的位置及其布局不完全相同,因此两台驱动电动机在启动或运行中会出现出力不均衡的现象。在大倾角长距离煤矿带式输送机阻力规律分析和优化控制方面已作了一定研究[21-22]。一般的双机双滚筒驱动模型如图 1(a) 所示。针对煤矿双机驱动不均衡问题,本文提出一种双机驱动煤矿带式输送机的多级模糊均衡控制(Multistage Fuzzy Equalization Control,MFEC)算法,双机驱动 MFEC 控制的带式输送机系统的结构框如图 1(b) 所示。



(a) 双机双滚筒驱动模型



(b) 双机驱动的 MFEC 控制带式输送机结构

图 1　双机驱动 MFEC 控制系统结构框图

Fig. 1　Dual-motor drive MFEC control system structure

图 1(b) 中,驱动电机 1 指长距离大倾角的主电机,驱动电机 2 为该双机驱动子系统的从电机; 变频器 1 和变频器 2 分别为主、从执行器,电流反馈 1 和电流反馈 2 在带式输送机负载(动态阻力)变化时快速(电流采样设计为 3 ms 内)将电流变化信号反馈给主、从(各自)的 MFEC1 和 MFEC2,当动态阻力的变化反映在速度时,速度反馈 1 和速度反馈 2(速度采样为 10 ms)将信号反馈给速度均衡器,然后将速度均衡器运算得到的补偿信号送给主、从电机,与速度给定综合后送给各自的 MFEC 实现对主、从电机速度的均衡控制。

2　双机驱动不均衡分析

双机驱动可简化为功率分配控制,在系统功率均衡时满足:

$$\begin{cases} P = P_1 + P_2 \\ n_1 = n_2 = n \\ P_1 = \dfrac{T_1 n_1}{9.55} \\ P_2 = \dfrac{T_2 n_2}{9.55} \end{cases} \tag{1}$$

式中,P_1,P_2 为主、从电机的输出功率; P 为两部电动机的输出总功率; n_1,n_2 为主、从电机的输出转速; T_1,T_2 为主、从电机的电磁转矩。

据文献[23],在忽略磁饱和的理想情况下,从交

www.chinacaj.net 中国煤炭期刊网

流异步电动机稳态等效电路分析，电磁转矩 T_e 为

$$T_e = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{3I_r^2 R_r}{s}\frac{n_p}{\omega_1} \tag{2}$$

式中，P_m 为电磁功率；ω_m 为同步机械角速度；ω_1 为定子电压角频率；I_r 为折算到定子侧的转子相电流；R_r 为折算到定子侧的每相转子电阻；n_p 为极对数；s 为转差率。

为了在双机驱动中简化表达，将电磁转矩近似为实测瞬时电流 i 的函数 $T_e \approx C_m f(i)$，即 $T_1 \approx C_{m1} f(i_1)$，$T_2 \approx C_{m2} f(i_2)$。同时，在理想情况下，主、从电机分配的转矩比值和其额定转矩比值相等，用 r 表示为

$$r = \frac{T_1}{T_2} = \frac{T_{e1}}{T_{e2}} = 1 \tag{3}$$

设带式输送机的驱动滚筒的半径为 R，驱动电机和滚筒之间的减速比为 H，则输送带的线速度 $v = 2\pi Rn/H$，带式输送机的输送带上的任意 2 个点之间的理想速度比可以由式(4)来描述。

$$\frac{v_k}{v_{k+1}} = \frac{L_k}{L_{k+1}} = \frac{L_0(1+q_k)}{L_0(1+q_{k+1})} = \frac{(1+q_k)(1-q_{k+1})}{(1+q_{k+1})(1-q_{k+1})} = \frac{1+q_k-q_{k+1}-q_k q_{k+1}}{1-q_{k+1}^2} \tag{4}$$

式中，v_k 为输送带上任意一点 k 点的线速度，m/s；v_{k+1} 为沿着输送带运行方向 k 之后的 $k+1$ 点的线速度；L_k，L_{k+1} 为单位时间内通过 k 点和 $k+1$ 点输送带长度；L_0 为本段输送带的长度；q_k，q_{k+1} 分别为 k 点和 $k+1$ 点输送带运动时的拉长应变。

拉长应变很小，式(4)中的二次项可以忽略，并将输送带运动单位时间的应变 q 和张力 F_z 以及其刚度 E 的关系 $q = \frac{F_z}{E}$ 代入，则有

$$\frac{v_k}{v_{k+1}} \simeq 1 + q_k - q_{k+1} = 1 - \frac{F_{z(k+1)} - F_{zk}}{E} \tag{5}$$

从上分析可见，输送带任意点的张力稍不均衡时，使系统动态阻力发生变化，引起电流 i 变化，则会造成输送带对应点的线速度不完全相等。

但在实际中，若带式输送机的动、静态阻力不均衡，则双机驱动的转矩关系式(3)不成立。即

$$r = \frac{T_1}{T_2} = \frac{C_m f(i_1)}{C_m f(i_2)} \neq \frac{T_{e1}}{T_{e2}} \neq 1 \tag{6}$$

转矩不均衡时两台电机特性曲线如图 2 所示，在同一转速下，电动机 2 的转矩小于电动机 1 的转矩，即 $i_2 < i_1$，两台电动机的输出转矩之比 $\frac{T_1}{T_2} > 1$。

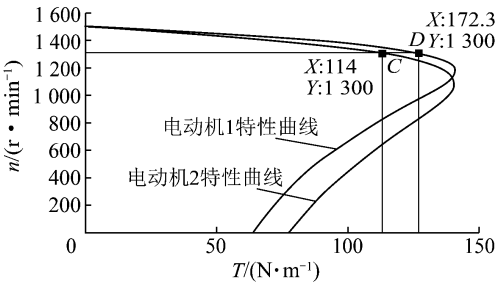


图 2 转矩不均衡时两台电机特性曲线

Fig. 2 Two motor characteristic curves when the torque is not balanced

图 1(b)中，双机驱动 MFEC 控制带式输送机结构中，MFEC 控制器根据获得反馈电流和反馈转速参数，计算两台驱动电机之间的差值，重新整定两个变频器的控制信号，来消除两台电机之间的不同步现象。

3 多级模糊功率均衡控制 MFEC 方法

3.1 双机驱动的 MFEC 算法描述

针对图 1 双机驱动的均衡控制带式输送机系统结构，MFEC 控制算法推导如下。MFEC 算法是按多级规则来调整的控制增量信号 $\Delta U_j(k)$，即

$$\Delta U_j(k) = a_j(c_j(k) + d_j(k))\,|i_{f1}(k) - i_{f2}(k)\,| + b_j(n_g(k) - n_j(k)) \quad (j = 1,2) \tag{7}$$

其中，k 为采样时刻；i_{f1}，i_{f2} 分别为双机驱动的两台电机的反馈电流；n_g，n_j 分别为电动机给定速度和第 j 台电机的转速；a_j，b_j 分别为反馈电流和反馈速度的 MFEC 算法的系数；其中角码 $j = 1,2$。假设 i_c 为

$$i_c = i_e + 0.01 i_e \tag{8}$$

式中，i_e 为驱动电动机的额定电流；i_c 为实测电流。

$$c_j(k) = -\operatorname{sgn}|i_{fj} - i_{cj}|, i_{fj} > i_{cj} \tag{9}$$

$$i_d = \frac{i_{f1} + i_{f2}}{2} - i_E \tag{10}$$

式中，i_E 为驱动电机的反馈电流的设计值与 k 时刻两台电机反馈电流的差值。

$$d_j(k) = \operatorname{sgn}|i_{dj} - i_{fj}|, i_{fj} < i_{dj} \tag{11}$$

式中，sgn 为符号函数。

$$U_j(k) = U_j(k-1) + \Delta U_j(k) \tag{12}$$

设双机的实时速度差 $n_E = n_g(k) - n_j(k)$。

从 MFEC 控制算法可见，式(7)为该算法的主要均衡控制构架，式(8)～(11)为式(7)的约束条件，当 k 时刻的反馈电流 i_{fj}，$j = 1$ 或 2，即 i_{f1} 或 i_{f2} 大于反馈电流的上限 i_c，$c_j(k)$ 取负号；当 i_{f1} 或 i_{f2} 小于反馈电流的下限 i_d，$d_j(k)$ 取正号；在 MFEC 算法中，协调 $c_j(k)$ 和 $d_j(k)$ 在任何时刻只可能出现其一。例如：i_{f2} 大于反

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

馈电流的上限，$\Delta U_2(k) = -a_2 \times |i_{f1}(k) - i_{f2}(k)| - b_2\Delta n(k)$，则 $U_2(k) = U_2(k-1) + \Delta U_2(k)$。

该 MFEC 算法根据双机驱动的带式输送机的实际特性分为三级: 第 1 级模糊细分段，在 $0.01 < i_E \leqslant 0.1$，a_j，$b_j(j=1,2)$ 的变化细微防止过冲引起胶带抖动; 第 2 级模糊中分段，在 $0.1 < i_E \leqslant 0.3$; 第 3 级模糊粗分段，在 $0.3 < i_E \leqslant 0.6$，a_j，$b_j(j=1,2)$ 变化较快，以提高均衡控制速度。

3.2　MFEC 算法步骤

Step 1: 初始化，设定 $i_{Emin} = 0.01$;

Step 2: 读取反馈电流 i_{f1}，i_{f2}，计算 i_E; 读取双机运行过程 k 时刻采样值 n_g，n_1，n_2;

Step 3: 调用 MFEC 子程序，求出两台电机的反馈电流和反馈速度 MFEC 算法系数 a_1，a_2，b_1，b_2 取值范围(0.01，0.6)，具体算法是在系统归一化处理后进行，该 MFEC 为:

第 1 级模糊细分段规则，i_E 的取值范围{0.01，0.1}、a_j 为{0.002，0.009}、b_j 为{0.02，0.09} 在该段中，可设计 5 ~ 20 条规则，例:

if　$0.01 < i_E < 0.02$，then $a_j = 0.002$ $b_j = 0.02$ else;

…

if　$0.08 < i_E < 0.1$，then $a_j = 0.009$ $b_j = 0.09$ else;

第 2 级模糊中分段规则，i_E 的取值范围{0.11，0.3}、a_j 为{0.01，0.026}、b_j 为{0.1，0.26}，中分段规则的设计方法同上;

第 3 级模糊粗分段规则，i_E 的取值范围{0.31，0.6}、a_j 为{0.032，0.2}、b_j 为{0.28，0.6}，粗分段规则的设计方法同细分段。

Step 4: 按照式(8) 计算 i_{cj}，按照式(9) 计算 c_1，c_2;

Step 5: 按照式(10) 计算 i_{dj}，按照式(11) 计算 d_1，d_2;

Step 6: 按照式(7)，分别计算:

$$\begin{cases} \Delta U_1(k) = a_1[c_1(k) + d_1(k)]\,|i_{f1}(k) - i_{f2}(k)| + b_1(n_g - n_1(k)) \\ \Delta U_2(k) = a_2[c_2(k) + d_2(k)]\,|i_{f1}(k) - i_{f2}(k)| + b_2(n_g - n_2(k)) \end{cases} \tag{13}$$

Step 7: 按照式(12) 计算，

$$\begin{cases} U_1(k) = U_1(k-1) + \Delta U_1(k) \\ U_2(k) = U_2(k-1) + \Delta U_2(k) \end{cases} \tag{14}$$

Step 8: 判断 $i_E < i_{Emin}$，或是否满足式(15)，若是，直接转 Step 9，若否，转 Step 2;

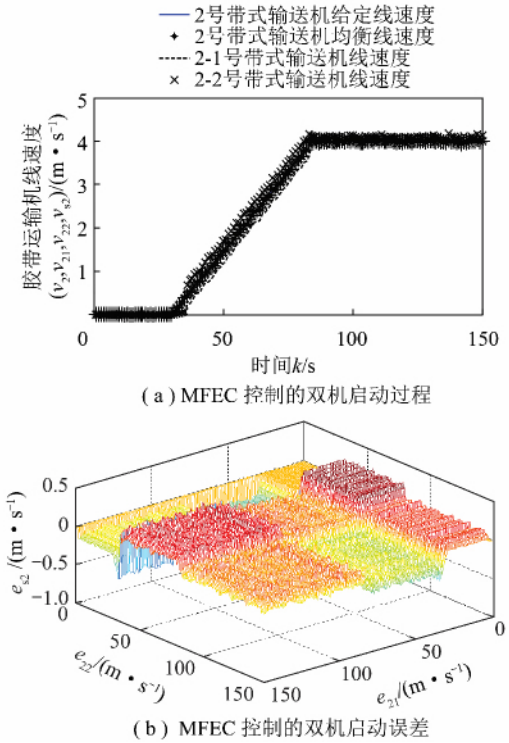
$$\begin{cases} i_d \leqslant i_{f1} \leqslant i_c, & U_1(k) = U_1(k-1) \\ i_d \leqslant i_{f2} \leqslant i_c, & U_2(k) = U_2(k-1) \end{cases} \tag{15}$$

Step 9: 暂停调整，延迟 20 ms 后转 Step 2。

综上所述，MFEC 算法在所推导的式(7) ~ (15) 的基础上，实时检测到 k 时刻该系统的双机转矩不均衡时的电流 i_{f1}，i_{f2} 和转速 n_1，n_2，根据算法的 9 个步骤，即分级模糊规则求出 k 时刻的式系数 a_j，b_j，$c_j(k)$ 和 $d_j(k)$，计算出图 1 中双机的变频器的控制电压 $U_j(k)$，$(j=1,2)$，从而动态实现双机速度均衡控制。

4　MFEC 算法仿真验证及分析

针对黄陵煤业集团某矿的带式输送机系统的斜井段输送机，下称 2 号带式输送机，带长 1 200 m、传动滚筒直径均为 1 250 mm、额定带速为 4 m/s、最大倾角为 15°; 双机 2 × 400 kW 交流电机驱动，电机的平均转动惯量为 2 598 N·m、额定电压 6 000 V、额定电流 $i_e = 67$ A、额定转速 $n_e = 1\,480$ r/min，两台驱动电机分别称 2 - 1 驱动电机和 2 - 2 驱动电机，两部电机参数一致，但具体性能有差异，对该系统的静态、动态分析建模(见文献[21 - 22])，现场测得 2 - 1 驱动电机与驱动滚筒和输送带之间的静、动态阻力比 2 - 2 的阻力大，使得其线速度比给定线速度低 3%。



(a) MFEC 控制的双机启动过程

(b) MFEC 控制的双机启动误差

图 3　MFEC 控制的 2 号带式输送机双机启动过程曲线

Fig. 3　Dual-motor starting process curve of the 2 belt conveyor by MFEC control

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

采用 MFEC 算法对 2 号煤矿带式输送机启动过程进行功率均衡优化控制，控制仿真结果如图 3(a) 所示。由于该长距离的煤矿带式输送机系统运输距离 3 400 m，分 1 号、2 号、3 号和 4 号带式输送机子系统，逆煤流启动，先启动 4 号输送机，每隔 15 s 启动下一台输送机，2 号带式输送机从 30 s 开始启动，1 200 m长的 2 号带式输送机的双机启动线速度误差如图 3(b) 和表 1 所示。图 3(a) 中 v_2 为给定线速度 m/s，v_{21} 为 2 - 1 电机驱动的输送带的线速度，v_{22} 为 2 - 2 电机驱动的输送带的线速度，v_{s2} 为 2 号双机驱动的输送带的均衡线速度; 图 3(b) 中，e_{21} 为 2 - 1 电机驱动的输送带启动误差，e_{22} 为 2 - 2 电机驱动的输送带启动误差，e_{s2} 为 MFEC 均衡算法控制的 2 号双机驱动的输送带线速度误差。

为了比较，这里对 PI 控制 2 号输送机双机系统的启动过程进行了仿真，采用 PI 控制 2 号输送机双机启动线速度如图 4(a) 所示，采用 PI 控制 2 号输送机双机启动的线速度误差如图 4(b) 和表 2 所示。

表 1 MFEC 控制的 2 号带式输送机的双机启动过程线速度误差

Table 1 Line-speed error of the dual-motor starting process of the 2 belt conveyor by MFEC control

k/s	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
e_{21}	0	0	0	0.030 0	0.066 1	0.010 6	0.021 5	0.023 8	0.065 4	0.074 6
e_{22}	0	0	0	-0.135 3	-0.106 8	-0.194 9	-0.094 0	-0.138 3	-0.034 9	-0.032 5
es_2	-0.042 3	0.015 2	0.022 0	0.035 3	0.001 5	0.044 1	0.003 2	-0.032 1	0.004 6	0.008 5

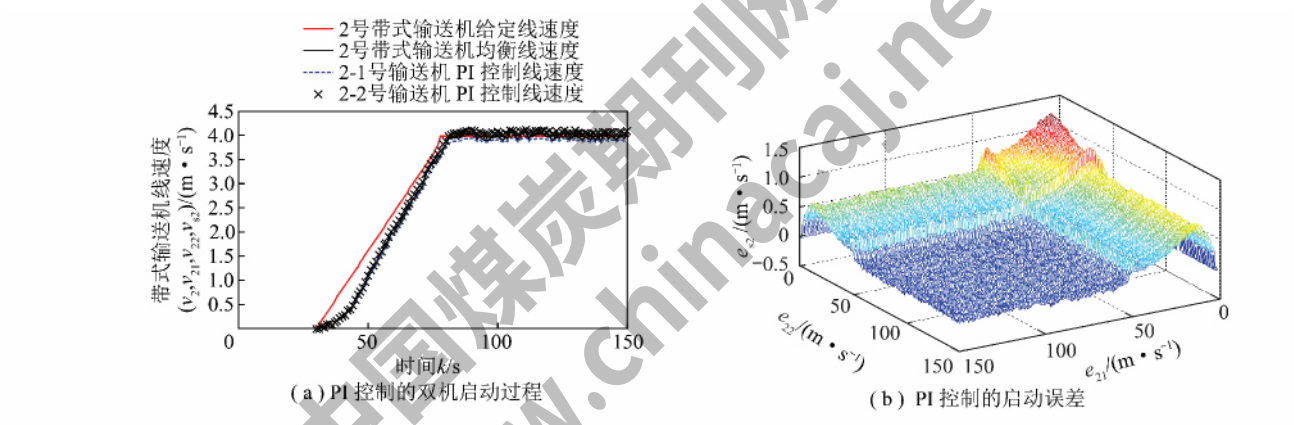


图 4 PI 控制的 2 号带式输送机双机启动过程曲线

Fig. 4 Dual - motor starting process curve of the 2 belt conveyor by PI control

表 2 PI 控制的 2 号带式输送机的双机启动过程线速度误差

Table 2 Line-speed error of the dual-motor starting process of the 2 belt conveyor by PI

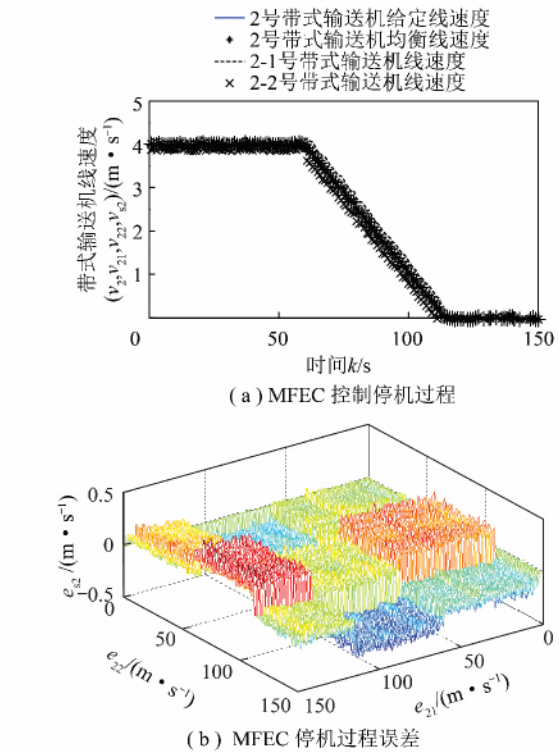
k/s	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
e_{21}	0	0	0	0.397 4	0.226 3	0.073 4	0.046 9	0.041 5	0.047 1	0.132 8
e_{22}	0	0	0	0.264 8	0.085 6	-0.081 5	-0.108 9	-0.115 1	-0.108 5	-0.022 4
es_2	0	0	0	0.246 4	0.136 5	0.106 8	0.041 0	-0.042 5	-0.005 5	0.036 5

在表 1 中，k 为带式输送机启动过程的时间，s。从图 3 和图 4 仿真图及表 1 和表 2 误差比较可见，MFEC 均衡算法控制和常规 PI 控制相比，在 40 s 时，动态最大线速度误差从 0.397 m/s 下降到 0.04 m/s，平均线速度误差降低了约 3%。

下面采用 MFEC 算法对 2 号输送机停机过程进行功率均衡优化控制，控制仿真结果如图 5(a) 所示。对应的停机过程的线速度误差如图 5(b) 和表 3 所示。采用 PI 控制 2 号输送机停机过程仿真如图 6 和表 4 所示。实测的 PI 控制数据与仿真基本吻合。

从 MFEC 均衡算法和 PI 控制方法对 2 号带式输送机的停机过程仿真比较可见，在控制 2 号输送机停机的 110 s 时，动态误差从 -0.461 m/s 减小到 -0.032 1 m/s，平均线速度误差约下降 3%。可见，在 2 号输送机启动和停止的动态过程中，MFEC 均衡算法均优于 PI 控制方法的控制效果。

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

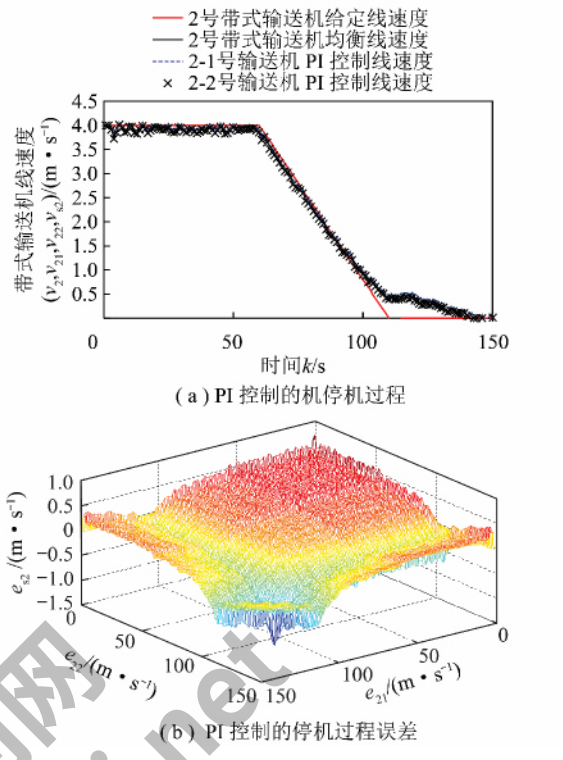


(a) MFEC 控制停机过程

(b) MFEC 停机过程误差

图 5　MFEC 控制的 2 号带式输送机停机过程曲线

Fig. 5　Dual-motor shutdown process curve of the 2 belt conveyor by MFEC control



(a) PI 控制的机停机过程

(b) PI 控制的停机过程误差

图 6　PI 控制的 2 号带式输送机停机过程曲线

Fig. 6　Dual-motor shutdown process curve of the 2 belt conveyor by PI control

表 3　MFEC 控制的 2 号带式输送机的双机停机过程线速度误差

Table 3　Line-speed error of the dual-motor shutdown process of the 2 belt conveyor by MFEC control

k/s	10	20	30	40	50	…	90	100	110	120
e_{21}	−0.058 1	−0.030 8	−0.134 7	−0.065 2	−0.012 6	…	−0.065 4	−0.109 9	−0.032 1	−0.001 0
e_{22}	0.065 4	0.109 9	0.036 6	0.064 6	0.080 5	…	0.010 7	0.042 8	0.012 2	0.000 1
e_{s2}	−0.015 6	0.018 5	0.037 6	0.008 1	0.031 4	…	−0.003 3	0.020 9	0.001 2	0.000 1

表 4　PI 控制的 2 号带式输送机的双机停机过程线速度误差

Table 4　Line-speed error of the dual-motor shutdown process of the 2 belt conveyor by PI contorl

k/s	10	20	30	40	50	…	90	100	110	120
e_{21}	0.118 0	0.183 5	0.156 6	0.187 3	0.171 2	…	−0.040 1	−0.065 9	−0.461 0	−0.321 1
e_{22}	0.175 4	0.245 3	0.218 8	0.249 3	0.233 1	…	0.018 7	−0.009 3	−0.406 8	−0.223 0
e_{s2}	−0.009 2	0.019 0	0.075 5	0.080 5	0.071 9	…	−0.066 6	−0.003 5	−0.422 1	0. . 2 608

5　结　　语

针对大功率的煤矿带式输送机双机驱动过程中带式输送机功率不均衡问题,分析了长距离大倾角的双机启动电机出力不均衡的原因,从运动学的物理机理入手,推导双机不均衡的力学关系,为了抑制在工程实际中双机不均衡造成胶带抖动、物料撒落等故障,提出一种双机启动煤矿带式输送机多级模糊均衡控制(MFEC)方法,深入讨论了 MFEC 的数学模型建立的方法,建立了不均衡状态下,双机的反馈电流、反馈速度、调整控制量输入及各个均衡系数之间的数学模型,并详细给出了 MFEC 算法步骤和模糊分级控制的规则; 最后针对黄陵矿业集团某矿带式输送机系统的斜井 2 号输送机: 对长距离大倾角的双机驱动的 2×400 kW 的煤矿斜井带式输送机的参数所建立的模型进行仿真验证,仿真结果与传统的 PI 控制比较,该方法的均衡误差明显减小,其平均线速度误差约减小 3%,该 MFEC 算法可以推广到多级驱动的大功率带

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

式式输送机均衡控制。

参考文献:

[1] 董立红,赵鹏兵. 带式输送机拉紧装置张力的灰色预测 PID 控制[J]. 煤炭学报,2013,38(2):342 - 346.
Dong Lihong,Zhao Pengbing. Grey predictive PID control of the tensioning device system in belt conveyor [J]. Journal of China Coal Society,2013,38(2):342 - 346.

[2] 陈举师,蒋仲安,姜 兰. 胶带输送巷道粉尘分布及其影响因素的实验研究[J]. 煤炭学报,2014,39(1):135 - 140.
Chen Jushi,Jiang Zhongan,Jiang Lan. Experimental research on dust distribution and its influencing factors in belt conveyer roadway [J]. Journal of China Coal Society,2014,39(1):135 - 140.

[3] 蒋仲安,陈举师,王晶晶,等. 胶带输送巷道粉尘运动规律的数值模拟[J]. 煤炭学报,2012,37(4):659 - 663.
Jiang Zhongan,Chen Jushi,Wang Jingjing,et al. Numerical simulation of dust movement regularities in belt conveyer roadway [J]. Journal of China Coal Society,2012,37(4):659 - 663.

[4] 朱立平,蒋卫良. 适用于我国煤矿带式输送机典型机型的研究[J]. 煤炭学报,2010,35(11):1916 - 1920.
Zhu Liping,Jiang Weiliang. Study on typical conveyor in coal mine of China [J]. Journal of China Coal Society,2010,35(11):1916 - 1920.

[5] 罗 亮. 带式输送机多体动力学仿真及动态特性研究[D]. 北京:华北电力大学,2014.
Luo Liang. Study on dynamic simulation and dynamic characteristics of belt conveyor [D]. Beijing: North China Electric Power University,2014.

[6] 王 腾,夏护国. 重型刮板输送机驱动方式比较分析[J]. 煤炭科学技术,2013,41(9):154 - 158,162.
Wang Teng,Xia Huguo. Comparison and analysis of drive modes used to heavy duty scraper conveyor [J]. Coal Science and Technology,2013,41(9):154 - 158,162.

[7] 王建军,樊重建,陈善本. 长链传动系统双电机驱动控制研究[J]. 机械设计与研究,2008,24(2):54 - 57.
Wang Jianjun,Fan Zhongjian,Chen Shanben. Study on the control method for the long chain drive [J]. Mechine Design and Research,2008,24(2):54 - 57.

[8] 葛明臣. 多电机驱动下输送机平衡研究[J]. 煤矿机械,2011,32(6):65 - 67.
Ge Mingchen. Research on dynamic balance of multi-motor drive of conveying [J]. Coal Mine Machinery,2011,32(6):65 - 67.

[9] 余发山,韩超超,田西方,等. 带式输送机多机变频驱动功率平衡控制研究[J]. 工矿自动化,2013,39(3):69 - 73.
Yu Fashan,Han Chaochao,Tian Xifang,et al. Research of power balance control for multi-motor frequency-conversion drive of belt conveyor [J]. Industry and Mine Automation,2013,39(3):69 - 73.

[10] Mengoni Michele,Tani Angelo,Zarri Luca,et al. Position control of a multi-motor drive based on series-connected five-phase tubular PM actuators [J]. Transactions on Industry Applications,2012,48(6):2048 - 2058.

[11] Kaghazchi Hassan,Mannion James. Synchronisation of a multi-motor speed control system [J]. Assembly Automation,2013,33(4):374 - 385.

[12] Buben Shalom D,Tsao Tsu-Chin. Real-time optimal commutation for minimizing thermally induced inaccuracy in multi-motor driven stages [J]. Automatica,2012,48(8):1566 - 1574.

[13] Lim Chee Shen,Levi Emil,Jones Martin,et al. A comparative study of synchronous current control schemes based on FCS-MPC and PI-PWM for a two-motor three-phase drive [J]. Transactions on Industrial Electronics,2013,61(8):3867 - 3878.

[14] Moni,Klouda,Skraban. Complex measurement of drive stations of belt conveyors [A]. 12th Int. Multidisciplinary Sci. GeoConf. EXPO-Mod. Manage. Mine Producing,Geology Environ. Protection [C]. Varna,Bulgaria,2012:487 - 494.

[15] Pang Yusonc,Lodewijks Gabriel. Pipe belt conveyor statics comparison of simulation results and measurements [J]. Bulk Solids Handling,2013,33(2):52 - 56.

[16] Minikin A,Dilffeld M,Fischer W. Residuals removal at Maritza E1: Design installation and commissioning of a tube belt conveyor [J]. Bulk Solids Handling,2014,34(1):18 - 24.

[17] Mohd Shah Mohd Heidir,Rahmat Mohd Fua'ad,Danapalasingam Kumeresan A,et al. PLC based adaptive FUZZY pid speed control of DC belt conveyor system [J]. International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems,2013,6(3):1133 - 1152.

[18] Dilefeld,Mario. Gearless belt conveyor drives: New technology for high capacity systems [J]. Bulk Solids Handling,2014,34(1):26 - 29.

[19] Lim Chee Shen,Levi Emil,Jones,Martin,et al. An improved two-motor three-phase drive using FCS-MPC based flux and torque control with voltage constraint consideration [A]. Proc. IEEE Int. Electric Mach. Drives Conf. [C]. Chicago,IL,United States,2013:188 - 195.

[20] Jennings Andrew,Bhansari Jimmy,Shah Ketan. High speed conveying: India's first elevated,triangulated gallery overland conveyor [J]. Bulk Solids Handling,2013,33(6):24 - 27.

[21] Hou Yuanbin,Zheng Maoquan,Wang Xinzhao. The belt conveyor control of large dip angle by FMBTES [J]. Journal of Advanced in Applied Materials and Electronacs Engineering,2014,905(3):448 - 451.

[22] 郑茂全,侯媛彬. 大倾角长距离带式输送机阻力规律分析[J]. 工矿自动化,2013,39(10):27 - 32.
Zheng Maoquan,Hou Yuanbin. Resistance rule of large dip angle and long distance for belt conveyor [J]. Industry and Mine Automation,2013,39(10):27 - 32.

[23] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net