

煤矿双电机驱动带式输送机的能耗建模与参数辨识

杨春雨[†], 李 恒, 车志远

(中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 带式输送机运行过程中的能耗与原煤运量和带速关系密切, 根据运量优化带速, 对于输送机节能运行有重要意义. 本文面向煤矿双电机驱动带式输送机节能运行, 研究能耗建模和参数辨识方法. 首先, 根据双电机驱动模式, 建立基于电机动态模型的输送机能耗模型; 然后, 根据电机电流、转速和运量的测量数据, 建立基于磁链观测器和递推最小二乘的参数辨识方法; 最后, 通过仿真实验说明所提方法的有效性.

关键词: 煤矿带式输送机; 双电机驱动; 能耗模型; 参数辨识

引用格式: 杨春雨, 李恒, 车志远. 煤矿双电机驱动带式输送机的能耗建模与参数辨识. 控制理论与应用, 2018, 35(3): 335 – 341

中图分类号: TP271.4 文献标识码: A

Energy consumption modeling and parameter identification for double-motor driven coal mine belt conveyers

YANG Chun-yu[†], LI Heng, CHE Zhi-yuan

(School of Information and Control Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou Jiangsu 221116, China)

Abstract: Energy consumption during the operation of coal mine belt conveyors is closely related to the feed rate and belt speed. Thus it is significant for energy-saving operation of the belt conveyors to real-time optimize the belt speed according to the feed rate. This paper studies the problems of energy consumption modeling and parameter identification for dual-motor driven coal mine belt conveyors. Firstly, taking into account the structure characteristics of dual-motor driven systems, a new energy model is established. Then, based on the measurements of motor current, speed and feed rate, a parameter identification method is derived by using flux linkage observer and recursive least square. Finally, the proposed method is illustrated by simulations.

Key words: coal mine belt conveyors; dual-motor driven; energy consumption model; parameter identification

Citation: YANG Chunyu, LI Heng, CHE Zhiyuan. Energy consumption modeling and parameter identification for double-motor driven coal mine belt conveyers. *Control Theory & Applications*, 2018, 35(3): 335 – 341

1 引言(Introduction)

带式输送机是煤矿生产必不可少的设备, 主要由胶带、驱动电动机及滚筒、减速器、托辊、张紧装置、制动装置等部分组成^[1](如图1所示). 电机驱动滚筒转动, 进而牵引输送机胶带运动, 完成原煤的运输^[2]. 在当前煤炭行业产能过剩的情况下, 各个煤矿大幅度压缩煤炭产量, 煤矿生产不均衡, 输送机经常处于轻载或空载状态, 导致了严重的“大马拉小车”现象, 造成大量的电能浪费^[3]. 带式输送机是从电能到机械能的典型能量转换系统. 其能效通常可以在性能、运

行、设备和技术4个层面上提高^[4]. 目前, 主要在设备和运行方面提高带式输送机能源效率. 通过引进高效率的设备, 可以达到降低能源消耗的目的^[5]. 然而, 这种方法需要额外的投资来改造或替代设备. 在运行层面上, 提出了许多方法来提高带式输送机的能源效率. 文献[6]提出了变速驱动的带式输送机能耗优化方法, 以减少带式输送机的能源消耗; 文献[7]提出了一种带式输送机BP神经网络能耗模型, 使用遗传算法优化能耗模型并得到带速最优解, 保证带式输送机能耗最低; 文献[8]提出采用模糊控制提高变速运输能源效率的

收稿日期: 2017-05-19; 录用日期: 2017-11-08.

[†]通信作者. E-mail: chunyu yang@cumt.edu.cn; Tel.: +86 18852109885.

本文责任编辑: 詹宜巨.

中央高校基本科研业务费项目(2017XKQY055), 国家自然科学基金项目(61741318, 61603392)资助.

Supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2017XKQY055) and the National Natural Science Foundation of China (61741318, 61603392).

方法;文献[9]提出一种基于能耗模型辨识的优化方法,根据能耗指数控制带式输送机的效率.变速驱动控制理念已被行业采用,成功应用于实际生产.研究表明,根据原煤运量变化实时调整输送机运行带速能够产生显著的节能效果^[8, 10-11].因此,输送机节能优化运行一直是煤矿自动化的研究热点^[11-14],建立能够刻画输送机能耗与运量和带速关系、便于构建优化控制性能指标的能耗模型是实现煤矿带式输送机优化运行的关键问题^[15-18].

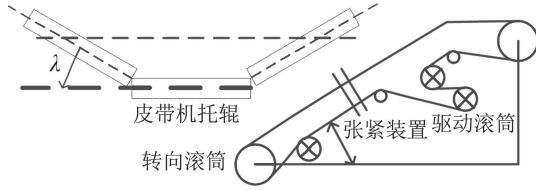


图1 煤矿带式输送机结构图

Fig. 1 Coal mine belt conveyor structure

输送机能耗与运量和带速的关系复杂,且随生产工况和驱动电机运行情况的变化而变化^[19],导致传统的建模和参数辨识方法不能直接应用,所以需要建立科学的能耗模型结构和参数辨识方法.现有输送机能耗模型主要分为两类:一类是纯粹的数据驱动能耗模型,例如文献[1]中所建立的基于BP神经网络的输送机能耗模型;另一类是基于解析表达式的能耗模型.数据驱动能耗模型精度受实验数据的影响大,且不具备外推性,不利于优化控制问题的描述和求解.因此,从能耗优化控制的角度考虑,基于解析表达式的输送机能耗模型更加合理.比较成熟的建模思路有两种:一种是依据国际标准ISO 5048、德国标准DIN 22101和美国标准CEMA,分析输送机运行过程中需要克服的阻力,进而利用输送机设计参数和运行参数计算输送机运行过程中所需的功率^[20-21];另一种是依据日本标准JIS B 8805和澳大利亚标准FDA,根据能量转换原理计算输送机所需要的功率^[22].基于阻力计算的能耗模型涉及较多的参数,实践中不容易执行.基于能量转换的能耗模型使用参数较少,但误差大.文献[23-24]结合上述两类方法的优势,建立了新的能耗模型

$$P_T = \theta_1 VT^2 + \theta_2 V + \theta_3 \frac{T^2}{V} + \theta_4 T + \frac{V^2 T}{3.6}, \quad (1)$$

其中: $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和 θ_4 是与输送机设计参数和运行参数有关的待定参数, P_T 是输送机所需功率, V 是带速, T 是运量.通过测量 P_T, V 和 T 可以辨识 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ 和 θ_4 等参数.文献[9]给出了基于最小二乘方法的离线参数辨识方法和基于递推最小二乘方法的在线参数辨识方法.文献[25]研究了单直流电机驱动输送机的能耗模型,考虑输送机所需驱动力矩与电机输出力矩的关系,建立了基于电机动态模型的能耗模型结构,并提出一种基于自适应观测器的参数辨识方法,该方法仅

需要采集输送机的运量和直流电机的转速,而不需要带速的测量数据.这项研究为煤矿带式输送机的能耗建模和参数辨识提供了新的思路,但局限于单电机驱动带式输送机.然而目前绝大多数煤矿都采用多异步电机驱动的带式输送机,相关能耗模型结构更加复杂,参数辨识涉及多时间尺度非线性电机动态模型,对现有参数辨识理论和方法提出了挑战.

本文研究煤矿双电机驱动带式输送机的能耗模型及其参数辨识方法.首先,根据双电机驱动模式,建立基于电机动态模型的带式输送机能耗模型;然后,提出基于磁链观测器和递推最小二乘的参数辨识方法;最后,通过仿真实验验证所给方法的有效性.

2 能耗模型(Energy consumption model)

考虑图2所示的由两个鼠笼型异步电机驱动的带式输送机为同轴刚性联接,假设该输送机两个电机和滚筒的规格相同(实际参数可能有差别).

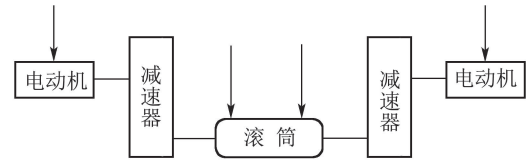


图2 双电机驱动带式输送机结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dual-motor driven belt conveyor

按转子磁链定向控制(flux orientation control, FOC)策略,假设在 mt 坐标系下, J 为机组的转动惯量; ω 为电机的转子角速度; L_m 为定子等效绕组与转子等效绕组间的互感系数; L_r 为转子等效绕组的自感系数; L_s 为定子等效绕组的自感系数; i_{st}, i_{sm} 为定子电流的 t 轴和 m 轴分量; R_r, R_s 为转子电阻和定子电阻; ψ_r 为转子磁链; T_e 为电机的电磁转矩; T_L 为电机所加负载转矩; u_{st}, u_{sm} 为定子电压的 t 轴和 m 轴分量; σ 为漏磁系数, $\sigma = 1 - L_m^2/(L_r L_s)$; ω_1 为 mt 坐标系的旋转角速度, $\omega_1 = \omega + (L_m i_{st})/(T_r \psi_r)$; T_r 为转子时间常数, $T_r = L_r/R_r$.于是,异步电机在 mt 坐标系上按转子磁链定向的状态方程如下:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = n_p (T_e - T_L), \\ \frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{1}{T_r} \psi_r + \frac{L_m}{T_r} i_{sm}, \\ \frac{di_{sm}}{dt} = \frac{L_m}{\sigma L_s L_r T_r} \psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{sm} + \omega_1 i_{st} + \frac{u_{sm}}{\sigma L_s}, \\ \frac{di_{st}}{dt} = -\frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \omega \psi_r - \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{\sigma L_s L_r^2} i_{st} - \omega_1 i_{sm} + \frac{u_{st}}{\sigma L_s}, \end{cases} \quad (2)$$

其中第1个方程为电机的运动方程.在此,认为负载是

恒转矩负载, 忽略阻尼转矩和扭转弹性转矩, 于是,

$$T_e = \frac{n_p L_m}{L_r} i_{st} \psi_r. \quad (3)$$

按转子磁链定向, 将定子电流分解为励磁分量 i_{sm} 和转矩分量 i_{st} , 转子磁链 ψ_r 仅由定子电流励磁分量 i_{sm} 产生, 而电磁转矩 T_e 正比于转子磁链和定子电流转矩分量的乘积 $i_{st} \psi_r$, 实现了定子电流两个分量的解耦.

刚性连接时, 电动机之间受到刚性联接轴的约束, 转速相同. 负载 T_L 可以描述为

$$T_L = F_U r, \quad (4)$$

其中: r 是转子半径 (不失一般性假设减速器比例是1); F_U 是输送机运行过程中需要克服的阻力. 于是, 两台异步电机 (电机1和2的相关参数和变量名字分别用下标1和2表示) 同时驱动的带式输送机模型为

$$\left\{ \begin{aligned} (J_1 + J_2) \frac{d\omega}{dt} &= n_p [(T_{e1} + T_{e2}) - T_L], \\ \frac{d\psi_{r1}}{dt} &= -\frac{1}{T_{r1}} \psi_{r1} + \frac{L_{m1}}{T_{r1}} i_{sm1}, \\ \frac{di_{sm1}}{dt} &= \frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}} \psi_{r1} - \frac{R_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}} i_{sm1} + \\ &\quad \omega_{1.1} i_{st1} + \frac{u_{sm1}}{\sigma_1 L_{s1}}, \\ \frac{di_{st1}}{dt} &= -\frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1}} \omega \psi_{r1} - \frac{R_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}} i_{st1} + \\ &\quad \omega_{1.1} i_{sm1} + \frac{u_{st1}}{\sigma_1 L_{s1}}, \\ \frac{d\psi_{r2}}{dt} &= -\frac{1}{T_{r2}} \psi_{r2} + \frac{L_{m2}}{T_{r2}} i_{sm2}, \\ \frac{di_{sm2}}{dt} &= \frac{L_{m2}}{\sigma_2 L_{s2} L_{r2} T_{r2}} \psi_{r2} - \frac{R_{t2}}{\sigma_2 L_{s2}} i_{sm2} + \\ &\quad \omega_{2.2} i_{st2} + \frac{u_{sm2}}{\sigma_2 L_{s2}}, \\ \frac{di_{st2}}{dt} &= -\frac{L_{m2}}{\sigma_2 L_{s2} L_{r2}} \omega \psi_{r2} - \frac{R_{t2}}{\sigma_2 L_{s2}} i_{st2} - \\ &\quad \omega_{2.2} i_{sm2} + \frac{u_{st2}}{\sigma_2 L_{s2}}, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

其中 R_t 是常数, 其大小为

$$R_t = \frac{R_s L_r^2 + R_r L_m^2}{L_r^2}. \quad (6)$$

根据文献[20], 输送机运行阻力为

$$\begin{aligned} F_U &= \frac{VT}{3.6} + \frac{T^2}{6.48 \rho b_1^2} + k_1 \frac{T^2}{V^2} + k_3 + C_{Ft} + \\ &\quad gfQ [L \cos \delta + (1 - \cos \delta) (1 - \frac{2Q_B}{Q})] + \\ &\quad (\frac{gL \sin \delta + gfL \cos \delta}{3.6} + k_2) \frac{T}{V}, \end{aligned} \quad (7)$$

其中: V 是传送带速度, $V = r\omega$; T 为原煤运量; ρ 为运料密度; b_1 为板间距离; f 为摩擦因数; L 为驱动滑

轮的中心距离; C_{Ft} 是常数; $Q = Q_{RO} + Q_{RU} + 2Q_B$, Q_{RO} 是承载托辊旋转部分的单位质量, Q_{RU} 是回程托辊旋转部分传动带的单位质量, Q_B 是传动带的单位质量; k_1 , k_2 和 k_3 是与皮带结构参数有关的常量.

根据式(4)和式(7), 可得

$$T_L = \frac{r^2 T \omega}{3.6} + \psi^T(T, \omega) \theta, \quad (8)$$

其中:

$$\psi(T, \omega) = [T^2 \quad 1 \quad \frac{T^2}{\omega^2} \quad \frac{T}{\omega}]^T, \quad (9)$$

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4]^T, \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \theta_1 &= \frac{1}{6.48 \rho b_1^2}, \\ \theta_2 &= gfQ [L \cos \delta + (1 - \cos \delta) (1 - \frac{2Q_B}{Q})] + \\ &\quad k_3 + C_{Ft}, \\ \theta_3 &= k_1, \\ \theta_4 &= \frac{gL \sin \delta + gfL \cos \delta}{3.6} + k_2, \end{aligned} \right.$$

θ 与输送机参数相关, 难以测量, 是待辨识的参数.

于是, 鼠笼型异步电机同轴刚性联接驱动的带式输送机能耗模型为

$$\left\{ \begin{aligned} (J_1 + J_2) \frac{d\omega}{dt} &= n_p [\frac{n_p L_{m1}}{L_{r1}} i_{st1} \psi_{r1} - \psi^T(T, \omega) \theta + \\ &\quad \frac{n_p L_{m2}}{L_{r2}} i_{st2} \psi_{r2} - \frac{r^2 T \omega}{3.6}], \\ \frac{d\psi_{r1}}{dt} &= -\frac{1}{T_{r1}} \psi_{r1} + \frac{L_{m1}}{T_{r1}} i_{sm1}, \\ \frac{di_{sm1}}{dt} &= \frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}} \psi_{r1} - \frac{R_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}} i_{sm1} + \\ &\quad \omega_{1.1} i_{st1} + \frac{u_{sm1}}{\sigma_1 L_{s1}}, \\ \frac{di_{st1}}{dt} &= -\frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1}} \omega \psi_{r1} - \frac{R_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}} i_{st1} - \\ &\quad \omega_{1.1} i_{sm1} + \frac{u_{st1}}{\sigma_1 L_{s1}}, \\ \frac{d\psi_{r2}}{dt} &= -\frac{1}{T_{r2}} \psi_{r2} + \frac{L_{m2}}{T_{r2}} i_{sm2}, \\ \frac{di_{sm2}}{dt} &= \frac{L_{m2}}{\sigma_2 L_{s2} L_{r2} T_{r2}} \psi_{r2} - \frac{R_{t2}}{\sigma_2 L_{s2}} i_{sm2} + \\ &\quad \omega_{2.2} i_{st2} + \frac{u_{sm2}}{\sigma_2 L_{s2}}, \\ \frac{di_{st2}}{dt} &= -\frac{L_{m2}}{\sigma_2 L_{s2} L_{r2}} \omega \psi_{r2} - \frac{R_{t2}}{\sigma_2 L_{s2}} i_{st2} - \\ &\quad \omega_{2.2} i_{sm2} + \frac{u_{st2}}{\sigma_2 L_{s2}}. \end{aligned} \right. \quad (11)$$

当电机采用集中驱动模式驱动带式输送机时, 电机之间为刚性或短距离柔性联结, 电机转速和负载的波动对多个电机的影响都近似相同. 此时, 本文所提

模型可用于多电机驱动带式输送机的能耗建模。

3 参数辨识(Parameter identification)

本节假设电机电流和转速都可测, 双电机驱动带式输送机能耗模型参数辨识主要包括两部分: 两个驱动电机的磁链观测器设计; 能耗模型参数估计。

3.1 磁链观测器设计(Design of flux observer)

以电机1为例, 电流和磁链状态方程为

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{r1}}{dt} = -\frac{1}{T_{r1}}\psi_{r1} + \frac{L_{m1}}{T_{r1}}i_{sm1}, \\ \frac{di_{sm1}}{dt} = \frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}\psi_{r1} - \frac{R_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}}i_{sm1} + \omega_{1,1}i_{st1} + \frac{u_{sm1}}{\sigma_1 L_{s1}}. \end{cases} \quad (12)$$

令 $x_1 = i_{sm1}$, $x_2 = \psi_{r1}$, 则

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}x_2 - \frac{R_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}}x_1 + \omega_{1,1}i_{st1} + \frac{u_{sm1}}{\sigma_1 L_{s1}}, \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{T_{r1}}x_2 + \frac{L_{m1}}{T_{r1}}x_1, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (13)$$

由于电流可测量, 待观测的降阶子系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_2 = -\frac{1}{T_{r1}}x_2 + \frac{L_{m1}}{T_{r1}}y, \\ \hat{y} = \frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}x_2 + \dot{y} + \frac{R_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}}y - \omega_{1,1}i_{st1} - \frac{u_{sm1}}{\sigma_1 L_{s1}}. \end{cases} \quad (14)$$

建立如下磁链状态观测器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_2 = -\frac{1}{T_{r1}}\hat{x}_2 + \frac{L_{m1}}{T_{r1}}y + K(\hat{y} - \bar{y}), \\ \bar{y} = \frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}\hat{x}_2, \end{cases} \quad (15)$$

其中待定常数 K 是待定观测器增益。

令 $e = \bar{x}_2 - x_2$, 则观测误差动态为

$$\dot{e} = \left(-\frac{1}{T_{r1}} - K\frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}\right)e. \quad (16)$$

选择 K 满足 $-\frac{1}{T_{r1}} - K\frac{L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}} < 0$, 则误差系统渐近稳定, 观测误差趋于0。

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}}_2 = & \left(-\frac{1}{T_{r1}} - \frac{KL_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}\right)\bar{x}_2 + \frac{KR_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}}y + \\ & \frac{L_{m1}}{T_{r1}} + K(\dot{y} - \omega_{1,1}i_{st1} - \frac{u_{sm1}}{\sigma_1 L_{s1}}). \end{aligned} \quad (17)$$

令 $z = \bar{x}_2 - Ky$, 则有

$$\dot{z} = \left(\frac{L_{m1}}{T_{r1}} + \frac{KR_{t1}}{\sigma_1 L_{s1}} - \frac{K}{T_{r1}} - \frac{K^2 L_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}\right)y +$$

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{1}{T_{r1}} - \frac{KL_{m1}}{\sigma_1 L_{s1} L_{r1} T_{r1}}\right)z - \\ & K\left(\omega_{1,1}i_{st1} + \frac{u_{sm1}}{\sigma_1 L_{s1}}\right). \end{aligned} \quad (18)$$

因此, 磁链的估计值是 $\bar{x}_2 = z + Ky$ 。

3.2 递推最小二乘法参数辨识(Recursive least squares parameter identification)

由于待辨识参数与测量数据呈线性关系, 本文选择递推最小二乘法辨识^[26-27]。

根据能耗模型中的运动方程可得

$$\psi^T(T, \omega)\theta = T_{e1} + T_{e2} - \frac{(J_1 + J_2)\frac{d\omega}{dt}}{n_p} - \frac{r^2 T \omega}{3.6},$$

即

$$\begin{aligned} \psi^T(T, \omega)\theta = & \frac{n_p L_{m1}}{L_{r1}}i_{st1}\psi_{r1} + \frac{n_p L_{m2}}{L_{r2}}i_{st2}\psi_{r2} - \\ & \frac{r^2 T \omega}{3.6} - \frac{(J_1 + J_2)\frac{d\omega}{dt}}{n_p}. \end{aligned} \quad (19)$$

由于电机电流和转速可测, 磁链可以通过观测器估计, 令 $x = \psi(T, \omega)$ 和

$$\begin{aligned} y = & \frac{n_p L_{m1}}{L_{r1}}i_{st1}\psi_{r1} + \frac{n_p L_{m2}}{L_{r2}}i_{st2}\psi_{r2} - \\ & \frac{r^2 T \omega}{3.6} - \frac{(J_1 + J_2)\frac{d\omega}{dt}}{n_p}, \end{aligned}$$

于是, 可以建立最小二乘法基本形式

$$y(k) = \psi^T(T, \omega)\theta. \quad (20)$$

为了尽量减少辨识过程中的大矩阵求逆及大量运算, 本文采用递推最小二乘法, 其算法具体实现为

$$\begin{cases} \hat{\theta}(m+1) = \hat{\theta}(m) + \lambda(m+1)[y(m+1) - x^T(m+1)\hat{\theta}(m)], \\ \lambda(m+1) = \frac{P(m)x(m+1)}{1 + x^T(m+1)P(m)x(m+1)}, \\ P(m+1) = P(m) - \lambda(m+1)x^T(m+1)P(m). \end{cases} \quad (21)$$

4 仿真(Simulation)

利用Simulink搭建了仿真平台(如图3所示), 其中包括电机模块、平衡控制模块、观测器模块、输送机负载模块。电机的参数分别为

$$\begin{aligned} n_p = & 2, L_{m1} = 0.2838 \text{ H}, L_{r1} = 0.289 \text{ H}, \\ L_{s1} = & 0.2941 \text{ H}, R_{t1} = 4.4 \Omega, T_{r1} = 0.11 \text{ H}/\Omega, \\ C_{gm1} = & 0.055, L_{m2} = 0.284 \text{ H}, L_{r2} = 0.29 \text{ H}, \\ L_{s2} = & 0.295 \text{ H}, C_{gm2} = 0.057, \\ R_{t2} = & 4.49 \Omega, T_{r2} = 0.107 \text{ H}/\Omega, \end{aligned}$$

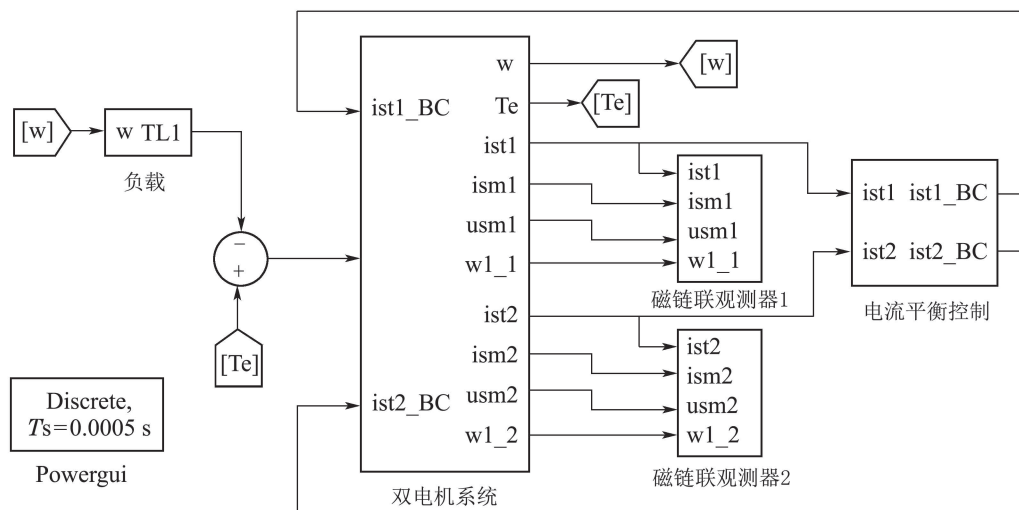


图3 双电机驱动带式输送机仿真平台

Fig. 3 Dual-motor drive belt conveyor simulation platform

转动惯量

$$J_1 = 0.1284 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2, J_2 = 0.13 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2.$$

将负载中待辨识参数设置为 $\theta_1 = 1.2$, $\theta_2 = 0.3$, $\theta_3 = 3.5$, $\theta_4 = 2.3$. PI控制器参数为 $K_p = 5$, $K_i = 100$. 观测器增益取为 $K = 5$. 选择运量(激励信号)为

$$T = 0.09[8 + \sin(10t+1) + 2\cos(-5t+2) + \sin(20t)] + 0.3[8.6 + 2\cos(-5t+2) + \sin(15t+0.4) + \sin(20t) + 4\sin t] \times |\sin(4t+0.5)| \text{ kg/s}, 0 \leq t \leq 60.$$

电机控制模块采用双闭环控制结构, 电流环和转速环采用PI调节器. 考虑双电机运行时需要功率平衡, 采用差电流负反馈法实现平衡控制^[28-29].

图4-5分别是电机1、电机2定子磁链的观测器波形和实际磁链波形的比较. 图4-5中横坐标表示时间 t , 纵坐标表示磁链值.

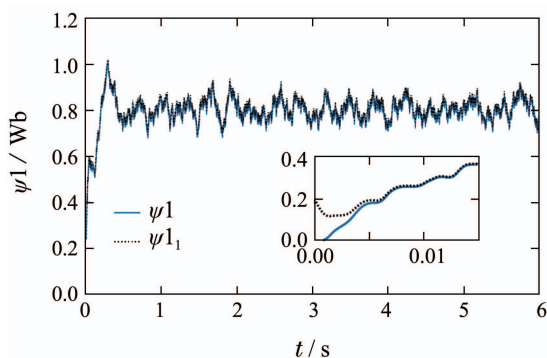


图4 异步电机1磁链观测值与实际值对比

Fig. 4 Comparison of flux observed value and actual value of asynchronous motor 1

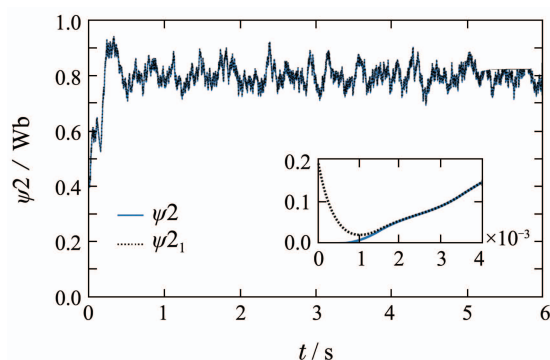


图5 异步电机2磁链观测值与实际值对比

Fig. 5 Comparison of flux observed value and actual value of asynchronous motor 2

如图6所示, 0.5 s后辨识算法收敛, 得到参数的准确估计值.

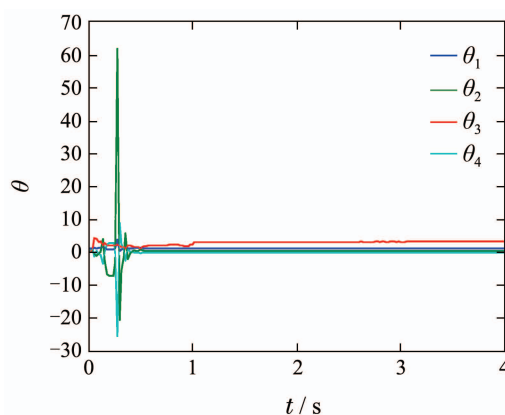


图6 参数辨识结果

Fig. 6 Parameter identification result

由表1可知估计误差小于5%, 可用于输送机能耗估计. 为验证双电机驱动带式输送机能耗模型的有效性, 设计如图7所示的给料速度. 基于辨识参数

所得的机械功率与电机实际功率如图8所示. 可见本文提出的双电机驱动带式输送机能耗模型具有较高的准确性, 能反应输送机实际运行情况.

表 1 辨识结果与真实值比较

Table 1 Comparison of identification results with real values

参数	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
辨识结果	1.2052	0.3078	3.4549	2.2613
真实值	1.2	0.3	3.5	2.3
误差/%	0.43	2.60	1.29	1.68

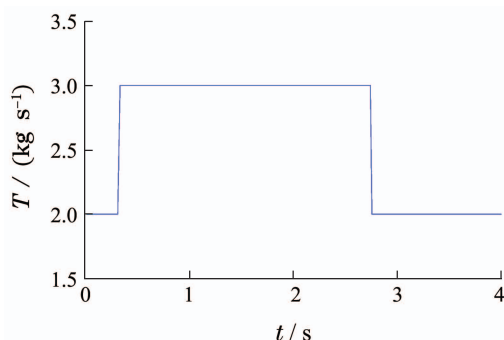


图 7 带式输送机给料速度

Fig. 7 Belt conveyor feed rate

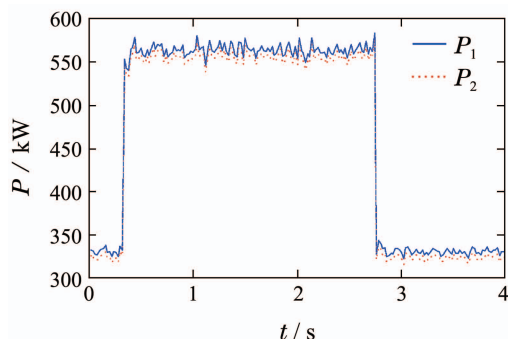


图 8 带式输送机能耗实际值与估计值对比

Fig. 8 Comparison of actual value and estimation of energy consumption of belt conveyor

表 2 各参数在10%误差情况下辨识结果

Table 2 The parameters are identified by an error of 10%

参数	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
L_m	1.13	0.20	3.92	2.74
L_r	1.10	0.15	8.63	3.12
L_s	1.20	0.29	3.48	2.27
R_t	1.21	0.31	3.45	2.18
ψ	1.20	0.29	3.53	2.31

为验证在电机参数不确定情况下, 带式输送机能耗参数辨识结果精度受参数摄动的影响, 对辨识

所需的各电机参数分别设置10%的变化, 辨识结果如表2所示. 辨识精度受参数 L_m , L_s , R_t , ψ 的误差影响较小, 受参数 L_r 的误差影响较大. 因此, 本文所提双电机驱动带式输送机能耗模型参数辨识方法具有一定的鲁棒性, 但在参数 L_r 摄动时, 其鲁棒性较差.

5 结语(Conclusions)

面向煤矿双电机驱动带式输送机, 把电机动态和输送机运行过程能耗联系起来, 建立了能耗模型. 该模型刻画了输送机运行能耗与运量和带速的关系, 可用于实现输送机节能优化控制. 由于能耗模型待定参数与测量数据呈线性关系, 提出了基于磁链观测器和递推最小二乘的参数辨识方法. 仿真表明所提方法是有效的, 且具有一定的鲁棒性. 未来工作将考虑电机参数未知情况下的能耗模型参数辨识方法, 并进一步提高能耗模型辨识方法的鲁棒性.

参考文献(References):

- [1] SONG Weigang. *Design of Universal Belt Conveyor* [M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
(宋伟刚. 通用带式输送机设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.)
- [2] PANG Y. *Intelligent Belt Conveyor Monitoring and Control* [M]. TU Delft: Delft University of Technology, 2010.
- [3] ZHANG Shizhen. *Research on energy-saving optimization method of the belt conveyor* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
(张世珍. 带式输送机节能优化方法的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2012.)
- [4] XIA X, ZHANG J. Energy efficiency and control systems—from a POET perspective [C] // *Proceedings of the IFAC Conference on Control Methodologies and Technology for Energy Efficiency*. Vilamoura, Portugal: IFAC, 2010: 255 – 260.
- [5] REICKS A V. Belt conveyor idler roll behaviors [J]. *Bulk Material Handling by Conveyor Belt*, 2008, 7(11): 35 – 40.
- [6] DE ALMEIDA A T, FONSECA P, BERTOLDI P. Energy-efficient motor systems in the industrial and in the services sectors in the European Union: characterisation, potentials, barriers and policies [J]. *Energy*, 2003, 28(7): 673 – 690.
- [7] ZHANG Yanjiang. *Belt conveyor energy-saving control system technology research* [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2014
(张沿江. 带式输送机节能控制系统技术研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2014.)
- [8] RISTIC L B, JEFTENIC B I. Implementation of fuzzy control to improve energy efficiency of variable speed bulk material transportation [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, 59(7): 2959 – 2969.
- [9] ZHANG S, XIA X. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors [J]. *Applied Energy*, 2011, 88(9): 3061 – 3071.
- [10] HEUVEL B. Investigations dealing with variable-speed drives of belt conveyor systems [J]. *World of Mining—Surface & Underground*, 2006, 58(2): 111 – 119.
- [11] HE D, PANG Y, LODEWIJKS G. Determination of acceleration for belt conveyor speed control in transient operation [J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2016, 8(3): 206 – 211.
- [12] HE D, PANG Y, LODEWIJKS G. Speed control of belt conveyors during transient operation [J]. *Powder Technology*, 2016, 301(7): 622 – 631.

- [13] CHEN W, LI X. Model predictive control based on reduced order models applied to belt conveyor system [J]. *ISA Transactions*, 2016, 65(11): 350 – 360.
- [14] HAO Xijun. Study on control method of energy saving and reducing consumption of belt conveyor [J]. *Shanxi Coking Coal Science & Technology*, 2015, 4(4): 19 – 21.
(郝喜军. 带式输送机节能降耗控制方法研究 [J]. 山西焦煤科技, 2015, 4(4): 19 – 21.)
- [15] CHAI T Y, QIN S J, WANG H. Optimal operational control for complex industrial processes [J]. *Annual Reviews in Control*, 2014, 38(1): 81 – 92.
- [16] HE Defeng, DING Baocang, YU Shuyou. Review of fundamental properties and topics of model predictive control for nonlinear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2013, 30(3): 273 – 287.
(何德峰, 丁宝苍, 于树友. 非线性系统模型预测控制若干基本特点与主题回顾 [J]. 控制理论与应用, 2013, 30(3): 273 – 287.)
- [17] LUO J, HUANG W, ZHANG S. Energy cost optimal operation of belt conveyors using model predictive control methodology [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 105(10): 196 – 205.
- [18] MATHABA T, XIA X. A parametric energy model for energy management of long belt conveyors [J]. *Energies*, 2015, 8(12): 13590 – 13608.
- [19] ZHANG S, XIA X. A new energy calculation model of belt conveyor [C] // *Proceedings of the IEEE 2009 Green Innovation for African Renaissance*. Nairobi, Kenya: IEEE, 2009: 1 – 6.
- [20] GENEVA, ISO. *Continuous mechanical handling equipment—belt conveyors with carrying idlers—calculation of operating power and tensile forces* [S]. ISO 5048, 1989.
- [21] BERLIN, DIN. *Continuous conveyors—belt conveyors for loose bulk materials—basis for calculation and dimensioning* [S]. DIN 22101, 2002.
- [22] TOKYO, JIS. *Rubber belt conveyors with carrying idlers—calculation of operating power and tensile forces* [S]. JIS B 8805, 1992.
- [23] LUO J, SHEN Y. Energy efficiency optimization of belt conveyor for material scheduling problem [C] // *Proceedings of the IEEE International Conference on Information and Automation*. Lijiang, China: IEEE, 2015: 122 – 127.
- [24] ZHANG S, XIA X. Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems [J]. *Applied Energy*, 2010, 87(6): 1929 – 1937.
- [25] SHEN Y, XIA X. Adaptive parameter estimation for an energy model of belt conveyor with DC motor [J]. *Asian Journal of Control*, 2014, 16(4): 1122 – 1132.
- [26] HU Shuang, ZHU Jihong. Multiple partitioning of flight data for manoeuvrable aircraft aerodynamic modeling and parameter estimation [J]. *Control Theory & Applications*, 2016, 33(10): 1289 – 1295.
(胡爽, 朱纪洪. 基于飞行数据多重分区的高机动飞机气动建模及参数辨识 [J]. 控制理论与应用, 2016, 33(10): 1289 – 1295.)
- [27] YANG Hua, LI Shaoyuan. A novel recursive MOESP subspace identification algorithm based on forgetting factor [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(1): 69 – 72.
(杨华, 李少远. 一种新的基于遗忘因子的递推子空间辨识算法 [J]. 控制理论与应用, 2009, 26(1): 69 – 72.)
- [28] TANG Jie. *Variable frequency speed regulation and power balance control of double motor hard shaft drive* [D]. Changsha: Central South University, 2009.
(汤杰. 双电机硬轴传动变频调速及其功率平衡控制 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.)
- [29] LI Weiming, LIU Mingshan, HE Xiuhong. Many D.C. Motor pull system by hard shaft linking [J]. *Journal of Qiqihar University*, 1999, 15(4): 80 – 83.
(李伟明, 刘明山, 何秀红. 硬轴联接的多台直流电动机拖动系统 [J]. 齐齐哈尔大学学报, 1999, 15(4): 80 – 83.)

作者简介:

杨春雨 (1979–), 男, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为控制系统建模、分析与设计, E-mail: chunyu yang@cumt.edu.cn;

李恒 (1992–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为带式输送机建模与设计, E-mail: ts15060261p3@cumt.edu.cn;

车志远 (1993–), 男, 硕士研究生, 目前研究方向为电机控制方法, E-mail: czy@cumt.edu.cn.