

文章编号:1671-251X(2018)06-0064-05

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017120006

基于预见控制的带式输送机调速节能方法

韩东升¹, 杜永贵¹, 庞宇松^{1,2}, 乔铁柱³, 阎高伟¹

(1. 太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024;

2. 代尔夫特理工大学 机械海运与材料工程学院, 荷兰 代尔夫特 2628CD;

3. 太原理工大学 山西省测控技术与新型传感器工程技术研究中心, 山西 太原 030024)

摘要:针对目前的带式输送机变速节能控制方法均在短时间内对速度进行调节,速度突变易导致输送带撕裂、打滑的问题,提出了一种基于预见控制的带式输送机调速节能方法。该方法根据前一级带式输送机的物料运载量计算使下一级带式输送机以额定运载量运行所需的速度,通过预见控制调节下一级带式输送机运行速度;针对噪声对调速效果的不利影响,在预见控制中利用卡尔曼滤波对被控带式输送机状态进行最优估计,削弱噪声干扰,使调速过程平稳。仿真结果表明,该方法能充分利用带式输送机的运载能力,减少带式输送机功率消耗,在保证带式输送机安全运行的基础上达到了调速节能的目的。

关键词:带式输送机;预见控制;卡尔曼滤波;调速;节能

中图分类号:TD634 文献标志码:A

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20180525.1659.002.html>

Speed regulation energy saving method of belt conveyor based on preview control

HAN Dongsheng¹, DU Yonggui¹, PANG Yusong^{1,2}, QIAO Tiezhu³, YAN Gaowei¹

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. College of Mechanical, Maritime and Materials Engineering, Delft University of Technology, Delft 2628CD, Netherlands; 3. Engineering Research Center for Measuring and Controlling

Technology and Advanced Transducers of Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Current speed regulation energy saving methods all regulate speed of belt conveyor in short time, and speed mutation is easy to cause tear and slipping of belt conveyor. In view of above problem, a speed regulation energy saving method of belt conveyor based on preview control was proposed. According to material carrying capacity of preceding belt conveyor, speed which makes succeeding belt conveyor run at rated carrying capacity is calculated, and running speed of the succeeding belt conveyor is adjusted through preview control. Aiming at negative influence of noise on speed regulation effect, Kalman filter is used to estimate state of the controlled belt conveyor in the process of preview control, which can weaken noise interference and smooth speed regulation process. The simulation results show that the method can fully utilize carrying capacity of belt conveyor, reduce power consumption of belt conveyor, and achieve purpose of speed regulation and energy saving on the basis of ensuring safe operation of belt conveyor.

Key words: belt conveyor; preview control; Kalman filter; speed regulation; energy saving

收稿日期:2017-12-04;修回日期:2018-05-19;责任编辑:盛男。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61450011,61503271);山西省自然科学基金资助项目(2015011052)。

作者简介:韩东升(1991—),男,山西大同人,硕士研究生,研究方向为机器学习、智能信息处理,E-mail:1098275658@qq.com。

引用格式:韩东升,杜永贵,庞宇松,等.基于预见控制的带式输送机调速节能方法[J].工矿自动化,2018,44(6):64-68.

HAN Dongsheng, DU Yonggui, PANG Yusong, et al. Speed regulation energy saving method of belt conveyor based on preview control[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(6): 64-68.

0 引言

大多数多级串联带式输送机系统无论物料量多少均以恒速运行,导致运载效率低、能源成本高^[1]。利用速度控制使带式输送机保持额定运载量运行,可实现节能降耗^[2-4]。文献[5]提出了基于模糊规则的带式输送机调速模型,利用模糊控制算法优化输送带运行速度,实现带式输送机的变速节能控制,避免因短期负荷高峰引起的溢料和过载风险。文献[6]设计了一种带式输送机自适应调速系统,该系统依据电动机实时功率因数进行变压变频调速。但上述文献均在短时间内对速度进行调节,速度突变所产生的附加张力太大,易导致输送带撕裂、打滑。本文提出了一种基于预见控制的带式输送机调速节能方法。考虑到实际工业应用对带式输送机调速的安全性要求,将前一级带式输送机的物料运载量作为下一级带式输送机速度控制的依据,并利用物料在前一级带式输送机上的运载过程为下一级带式输送机调速提供足够的响应时间;另外考虑到带式输送机自身特性及噪声对调速效果的不利影响,在预见控制中利用卡尔曼滤波算法对被控带式输送机的状态进行最优估计^[7],削弱噪声干扰。该方法不仅能调节带式输送机按照与其运载能力相匹配的速度运行,而且能减少带式输送机的功率消耗。

1 带式输送机调速节能分析

物料运输常需要多级串联带式输送机协调运行来完成。根据文献[8]对第*i*级被控带式输送机运载过程中所受阻力及驱动功率的分析,确定第*i*级带式输送机功率消耗为

$$P = C_{\mu}Lg(m'_{\text{roll}} + 2m'_{\text{belt}}\cos\delta_i)v + C_{\mu}Lgm'_{\text{bulk}}v\cos\delta_i + gH_im'_{\text{bulk}}v \quad (1)$$

式中: C 为相关阻力系数; μ 为输送带与滚筒之间的摩擦因数; L 为输送带长度; g 为重力加速度; m'_{roll} 为每米托辊质量; m'_{belt} 为每米输送带质量; δ_i 为第*i*级带式输送机的倾斜角度; v 为带式输送机运行速度; m'_{bulk} 为每米输送带运载物料质量; H_i 为第*i*级带式输送机上物料提升高度。

当带式输送机安装方式固定时,其倾斜角度和物料提升高度随之确定,因此只有物料运载量和带式输送机运行速度的变化会对带式输送机功率消耗产生影响。式(1)中等号右边第1项与物料运载量无关,可理解为带式输送机自身固有功率消耗,

第2,3项与物料运载量有关,可理解为带式输送机运载物料所产生的功率消耗。

当物料运载量处于较低水平时,如果带式输送机运行速度保持高速不变,则运载效率低,而固有功率消耗保持不变,且带式输送机长期保持高速运行会增大机械磨损。此时若能适当降低带速,使物料运载量恢复到带式输送机额定运载量附近,不仅可高效利用带式输送机的运载能力,而且可减少机械磨损,大大降低带式输送机自身固有功率消耗,从而使带式输送机整体功率消耗降低。因此,当物料运载量远低于带式输送机额定运载量时,应尽可能降低被控带式输送机运行速度,使该带式输送机尽量达到额定运载能力并运行在理想节能状态。

2 基于预见控制的调速控制

2.1 预见控制理论

预见控制是利用已知期望目标和干扰信息来改善系统动态响应、提高系统跟踪精度的控制方法,适用于未来控制目标和干扰信息已知的系统^[9-10]。

设被控系统在*k*时刻的离散状态方程为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + \mathbf{E}\mathbf{d}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}(k)$ 为状态向量; $\mathbf{u}(k)$ 为输入向量; $\mathbf{d}(k)$ 为干扰向量; $\mathbf{y}(k)$ 为输出向量; $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{E}$ 为系数矩阵。

假设系统可控可观,目标值为 $\mathbf{r}(k)$,定义误差信号 $\mathbf{e}(k) = \mathbf{r}(k) - \mathbf{y}(k)$,结合式(2)可得被控系统的广义误差为

$$\mathbf{X}_0(k+1) = \Phi\mathbf{X}_0(k) + \mathbf{G}\Delta\mathbf{u}(k) + \mathbf{G}_R\Delta\mathbf{r}(k+1) + \mathbf{G}_d\Delta\mathbf{d}(k) \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}_0(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{e}(k) \\ \Delta\mathbf{x}(k) \end{bmatrix}$; $\Delta\mathbf{x}(k), \Delta\mathbf{u}(k), \Delta\mathbf{r}(k+1)$,

$\Delta\mathbf{d}(k)$ 为差分算子向量; $\Phi = \begin{bmatrix} \mathbf{I} & -\mathbf{CA} \\ 0 & \mathbf{A} \end{bmatrix}$, $\mathbf{I}$ 为单位

矩阵; $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} -\mathbf{CB} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix}$; $\mathbf{G}_R = \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix}$; $\mathbf{G}_d = \begin{bmatrix} -\mathbf{CE} \\ \mathbf{E} \end{bmatrix}$ 。

对于式(3),其二次型性能指标为

$$\mathbf{J} = \sum_{k=-M_R+1}^{\infty} [\mathbf{X}_0^T(k)\mathbf{Q}\mathbf{X}_0(k) + \Delta\mathbf{u}^T(k)\mathbf{H}\Delta\mathbf{u}(k)] \quad (4)$$

式中: M_R 为期望目标预见步长; $\mathbf{Q}$ 为半正定权值矩阵; $\mathbf{H}$ 为正定权值矩阵。

使 $\mathbf{J}$ 最小的 $\Delta\mathbf{u}(k)$ 即为最优解。设 $\Delta\mathbf{u}(k)$ 为

$$\Delta u(k) = F_0 X_0(k) + \sum_{j=0}^{M_R} F_R(j) \Delta r(k+j) + \sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) \Delta d(k+j) \quad (5)$$

式中: F_0 为被控系统反馈系数矩阵; $F_R(j)$ 为被控系统在第 j 步的前馈目标补偿系数矩阵; M_d 为干扰信号预见步长; $F_d(j)$ 为被控系统在第 j 步的前馈干扰补偿系数矩阵。

将式(5)代入式(4),并令 $\frac{\partial J}{\partial \Delta u(k)} = 0$, 可得

$$F_0 = -[H + G^T P G]^{-1} G^T P \Phi \quad (6)$$

$$\begin{cases} F_R(0) = 0 \\ F_R(j) = -[H + G^T P G]^{-1} G^T (\xi^T)^{j-1} P G_R \quad j \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

$$F_d(j) = -[H + G^T P G]^{-1} G^T (\xi^T)^j P G_d \quad j \geq 0 \quad (8)$$

式中: P 为 Riccati 方程正定解; $\xi = \Phi + G F_0$ 。

假定 $F_0 = [F_e \quad F_x]$, 其中 F_e , F_x 分别为被控系统的误差矩阵、状态反馈系数矩阵, 且初始值均为零, 得到被控系统的预见控制律为

$$u(k) = F_e e(k) + F_x x(k) + \sum_{j=1}^{M_R} F_R(j) r(k+j) + \sum_{j=0}^{M_d} F_d(j) d(k+j) \quad (9)$$

2.2 预见信息确定

在前一级带式输送机进料端(位置 p)安装检测装置, 假设 t 时刻在位置 p 处检测的瞬时物料流量为 $q(p, t)$ 。当带式输送机运行速度恒定时, $q(p, t)$ 随时间不确定变化, 若直接利用 $q(p, t)$ 求预见信

息, 会因其频繁变化对调速过程造成不利影响, 因此将时间段 $[0, t_0]$ (t_0 为物料在前一级带式输送机上的运输时间)内的物料质量总和作为计算下一级带式输送机预见信息的依据。

在时间段 $[0, t_0]$ 内的物料质量总和为

$$m = \int_0^{t_0} q(p, t) dt \quad (10)$$

设运输过程中物料密度保持不变, 将根据式(10)得到的前一级带式输送机上物料质量转换为物料所占体积。利用上下两级运输物料质量守恒的条件, 将前一级带式输送机上的物料所占体积转换为下一级带式输送机的期望速度:

$$\bar{v} = \frac{m}{\rho S t_0} \quad (11)$$

式中: ρ 为物料密度; S 为下一级带式输送机额定运载条件下的物料截面面积。

前一级带式输送机的物料在一段时间后抵达下一级带式输送机, 在该时间段内根据前一级带式输送机运载物料质量来计算使下一级带式输送机以额定运载量运行时的期望速度, 并将该期望速度作为预见信息, 通过预见控制调节下一级带式输送机运行速度, 使其物料运载量尽可能达到最大。

2.3 基于卡尔曼滤波的预见控制

根据文献[11-12]将带式输送机分割成 n 个 Voigt 单元, 将带式输送机看作一个多自由度的黏弹性阻尼系统, 通过状态空间法对被控带式输送机的动态过程进行描述, 根据牛顿第二定律建立每个单元的表达式, 最后可推导出式(2)的系数矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ -\frac{\mu_n - \mu_1}{m_1} & -\frac{c_n - c_1}{m_1} & \frac{\mu_1}{m_1} & \frac{c_1}{m_1} & \cdots & \frac{\mu_n}{m_1} & \frac{c_n}{m_1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 & 0 \\ \frac{\mu_1}{m_2} & \frac{c_2}{m_2} & -\frac{\mu_1 - \mu_2}{m_2} & -\frac{c_1 - c_2}{m_2} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 \\ \frac{\mu_n}{m_n} & \frac{\mu_n}{m_n} & 0 & 0 & \cdots & -\frac{\mu_{n-1} - \mu_n}{m_n} & -\frac{c_{n-1} - c_n}{m_n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$[c_1 \quad c_2 \quad \cdots \quad c_n]$ 分别为 n 个 Voigt 单元的摩擦因数、质量、阻尼系数。

考虑到输送带自身黏滞特性及噪声对被控系统状态信息获取造成的影响, 将不确定的噪声视为观测噪声和量测噪声, 采用经典卡尔曼滤波算法对状

$$B = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{m_1} & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}^T \quad (13)$$

$$C = [0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad \cdots \quad 0] \quad (14)$$

式中 $[\mu_1 \quad \mu_2 \quad \cdots \quad \mu_n]$, $[m_1 \quad m_2 \quad \cdots \quad m_n]$,

态方程进行滤波处理。

假设观测噪声和量测噪声的协方差矩阵分别为 $\mathbf{W}, \mathbf{R}$, 二者均不随被控系统状态的变化而变化, 系统状态估计下的误差协方差矩阵为 $\mathbf{L}(k)$, 增益为 $\mathbf{K}(k)$, 针对式(2)表示的被控系统, 卡尔曼滤波算法的递推公式^[13-14]为

$$\mathbf{K}(k)=\frac{\mathbf{L}(k)\mathbf{C}^T}{\mathbf{CL}(k)\mathbf{C}^T+\mathbf{R}}\tag{15}$$

$$\mathbf{L}(k)=\mathbf{AL}(k-1)\mathbf{A}^T+\mathbf{BWB}^T\tag{16}$$

$$\mathbf{L}(k+1)=(\mathbf{I}-\mathbf{K}(k)\mathbf{C})\mathbf{L}(k)\tag{17}$$

$$\mathbf{x}(k)=\mathbf{Ax}(k-1)+\mathbf{K}(k)(\mathbf{y}(k)-\mathbf{CAx}(k-1))\tag{18}$$

卡尔曼滤波算法的状态向量更新更多地考虑输出向量和上一时刻状态的影响, 可有效抑制噪声干扰。因此, 将卡尔曼滤波算法与预见控制相结合, 利用卡尔曼滤波对状态向量最优估计的方式代替式(2)中对状态向量的更新, 最终得到预见控制律为

$$\mathbf{u}(k)=\mathbf{F_e}e(k)+\mathbf{F_x}\mathbf{x}(k)+\mathbf{r}(k)\sum_{j=1}^{M_R}\mathbf{F_R}(j)\tag{19}$$

3 仿真实验

利用 Matlab R2014a 搭建两级串联带式输送机系统模型, 模型参数见表 1。随机设定系统的噪声协方差矩阵 $\mathbf{W}, \mathbf{R}$, 随机初始化系统状态估计下的误差协方差矩阵 $\mathbf{L}(k)$ 。为验证基于卡尔曼滤波的预见控制对带式输送机调速节能的有效性, 将本文方法与基于模糊控制的调速方法和基于单一预见控制的调速方法进行对比。

表 1 带式输送机系统模型参数

Table 1 Model parameters of belt conveyor system

输送带长度/m	1 000	每米托辊质量/kg	22.58
输送带宽度/m	1.2	每米输送带质量/kg	28.56
带式输送机额定速度/ (m·s ⁻¹)	6	每米输送带额定运载 物料质量/kg	133.54
输送带滑轮摩擦因数	0.35	最大纵向撕裂力/N	5×10 ⁵
附加阻力系数	1.09	滚筒围包角/(°)	180
瞬时安全系数	5.4		

模拟料仓随机将物料释放给第一级带式输送机, 第一级输送机上的随机物料质量如图 1 所示。

在第一级带式输送机带速恒定且运载量随机变化的情况下, 第二级带式输送机运载物料质量如图 2 所示。可看出不同调速方法下第二级带式输送

机均以高运载量运行, 但本文方法在预见控制的基础上利用卡尔曼滤波算法对被控系统的状态进行最优估计, 抑制了噪声对调速的干扰, 使带式输送机上的物料分布更加均匀。

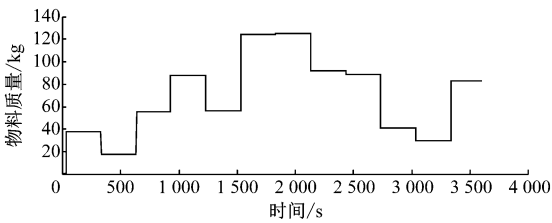


图 1 第一级带式输送机随机运载物料质量

Fig. 1 Random material quality of the first belt conveyor

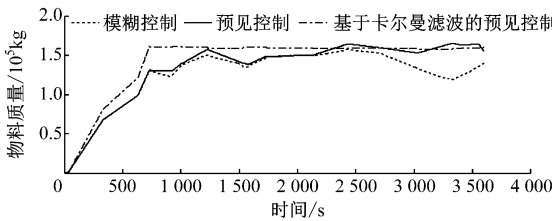


图 2 不同调速方法下第二级带式输送机运载物料质量

Fig. 2 Material quality of the second belt conveyor under different speed regulation method

带式输送机调速过程及对应的加速度变化分别如图 3、图 4 所示。可看出基于模糊控制的调速过程迅速, 相应的加速度增大; 基于单一预见控制的调速过程有较明显波动, 且加速度变化频繁; 基于卡尔曼滤波的预见控制调速过程相对稳定、平滑, 加速度变化幅度较小, 满足带式输送机调速过程的安全性要求。

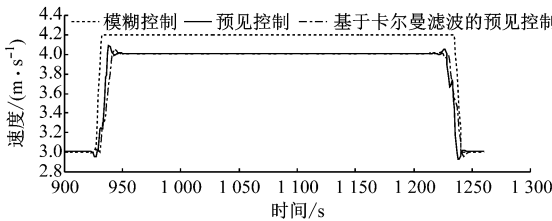


图 3 不同调速方法下带式输送机速度

Fig. 3 Speed of belt conveyor under different speed regulation method

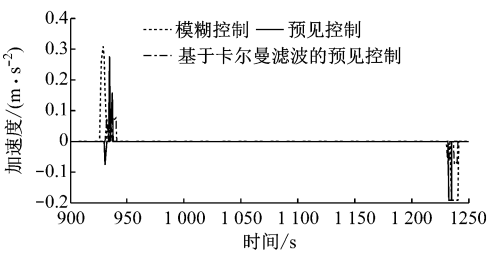


图 4 不同调速方法下带式输送机加速度

Fig. 4 Acceleration of belt conveyor under different speed regulation method

带式输送机功率消耗如图5所示。可看出采用基于卡尔曼滤波的预见控制进行调速时带式输送机功率消耗低于基于模糊控制的调速方法,而与基于单一预见控制的调速方法相差不大。

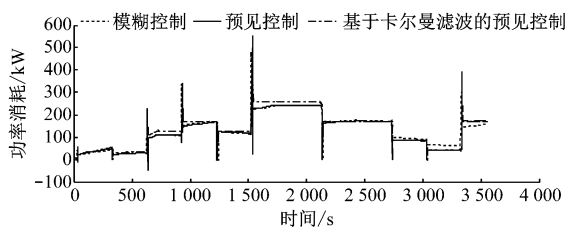


图5 不同调速方法下带式输送机功率消耗

Fig. 5 Power consumption of belt conveyor under different speed regulation method

4 结语

基于预见控制的带式输送机调速节能方法利用物料在前一级带式输送机上的运行时间,在该时间段内根据前一级带式输送机运载物料质量获得使下一级带式输送机以额定运载量运行时的期望速度,通过预见控制对下一级带式输送机运行速度进行调节,并在预见控制中增加卡尔曼滤波对被控带式输送机状态进行最优估计,使带式输送机调速过程更平稳。该方法不仅充分利用了带式输送机的运载能力,而且减少了带式输送机功率消耗,达到了调速节能的目的。

参考文献(References):

[1] 程成,符如康,张豪,等.采煤工作面刮板输送机变频改造[J].中州煤炭,2016(11):105-108.
CHENG Cheng, FU Rukang, ZHANG Hao, et al. Frequency conversion of scraper conveyor on coal mining face[J]. Zhongzhou Coal, 2016(11): 105-108.

[2] MATHABA T, XIA X. Optimal and energy efficient operation of conveyor belt systems with downhill conveyors[J]. Energy Efficiency, 2016, 10(2): 1-13.

[3] 徐国强,陈鹏飞.基于变频器应用的井下带式输送机优化研究[J].中州煤炭,2016(12):114-116.
XU Guoqiang, CHEN Pengfei. Improvement study on belt conveyor in underground mine based on usage of frequency converter[J]. Zhongzhou Coal, 2016(12): 114-116.

[4] HILTERMANN J, LODEWIJKS G, SCHOTT D L, et al. A methodology to predict power savings of troughed belt conveyors by speed control [J]. Particulate Science & Technology, 2011, 29(1): 14-27.

[5] PANG Yusong, LODEWIJKS G, SCHOTT D L. Fuzzy controlled energy saving solution for large-scale

belt conveying systems [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 261: 59-64.

[6] 李治亮,陆阳.带式输送机自适应调速系统节能研究[J].煤矿机械,2014,35(4):170-172.
LI Zhiliang, LU Yang. Research on saving energy for adaptive speed system of belt conveyor[J]. Coal Mine Machinery, 2014, 35(4): 170-172.

[7] 李明干,孙健利,刘沛.基于卡尔曼滤波的电力系统短期负荷预测[J].继电器,2004,32(4):9-12.
LI Minggan, SUN Jianli, LIU Pei. Short-term load forecast of power system based on Kalman filter[J]. Relay, 2004, 32(4): 9-12.

[8] 程军,李愈清,陆文涛.基于变频调速的煤矿带式输送机节能控制方法[J].电气传动,2013,43(11):61-64.
CHENG Jun, LI Yuqing, LU Wentao. Energy-saving control method based on frequency control of coal mine belt conveyor[J]. Electric Drive, 2013, 43(11): 61-64.

[9] 沈炯,金林,陈来九.火电单元机组负荷最优预见控制系统仿真研究[J].中国电机工程学报,1999,17(3):14-17.
SHEN Jiong, JIN Lin, CHEN Laijiu. Simulating study on load preview control system of a thermal power unit [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 1999, 17(3): 14-17.

[10] 甄子洋.预见控制理论及应用研究进展[J].自动化学报,2016,42(2):172-188.
ZHEN Ziyang. Research development in preview control theory and applications[J]. Acta Automatica Sinica, 2016, 42(2): 172-188.

[11] ZHANG Wenqiang, BIN Guangfu, LI Xuejun, et al. The dynamic analysis of belt conveyor driving drum based on finite element model [C]//International Conference on Energy and Mechanical Engineering, Wuhan, 2016: 1046-1053.

[12] CAO Ning, GAO Guofu, ZHAO Chongyang, et al. Finite element analysis of large-belt width conveyor driving roller [C]//IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, 2015: 2029-2034.

[13] WANG Yanwei, ZHENG Ying. Kalman filter based fault diagnosis of networked control system with white noise [J]. Journal of Control Theory and Applications, 2005, 3(1): 55-59.

[14] 吴垣甫,孙跃.基于递推更新卡尔曼滤波的磁偶极子目标跟踪[J].北京航空航天大学学报,2017,43(9):1805-1812.
WU Yuanfu, SUN Yue. Magnetic dipole target tracking based on recursive update Kalman filter[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 43(9): 1805-1812.