

组合秤下料机构自适应控制

朱鹏飞, 黄松和, 冷东

(西南交通大学, 成都 610031)

摘要: **目的** 研究组合秤下料机构参数缓慢时变导致的下料量偏差大的自适应控制方法。**方法** 采用模型参考自适应控制对下料速度的偏差进行补偿, 给出模型参考自适应控制器的设计方法, 并采用Matlab软件进行仿真。**结果** 当模拟下料机构在1 s之后发生机构参数变化时, 在2 s内无自适应控制系统下料量与参考模型下料量的偏差随时间增加而比例增大, 在2 s时相对误差达41.38%;采用自适应控制系统, 其下料量偏差稳定, 在2 s时相对误差为3.36%。**结论** 组合秤下料机构采用自适应控制系统, 能够有效减少由于参数缓慢时变引起的下料量偏差。

关键词: 组合秤; 下料机构; 参数; 自适应控制

中图分类号: TB486+.03 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2015)09-0090-05

Self-adaptive Control System for Feeding Mechanism of the Combination Weigher

ZHU Peng-fei, HUANG Song-he, LENG Dong

(Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

ABSTRACT: The aim of this work was to study the self-adaptive control system which could reduce the large deviations of the combination weigher's feeding amount that was caused by the slow change of feeding mechanism's parameters. This paper allowed the model reference adaptive control (MRAC) system to compensate for the deviations of the feeding speed, proposed the design method of the MRAC system for feeding mechanism, and performed simulation with the Matlab software. Assuming that the parameters of feeding mechanism changed at 1s, without the MRAC system, the deviations of feeding amount increased with the time within 2 s, and the relative error reached the maximum value of 41.38 % at 2 s. With the MRAC system, the deviations of feeding amount kept stable, and the relative error was 3.36 % at 2 s. When the MRAC system was adopted for the feeding mechanism of combination weigher, the feeding amount deviations caused by the slow change of the mechanism's parameters could be effectively reduced.

KEY WORDS: combination weigher; feeding mechanism; parameters; self-adaptive control

组合秤作为一种高速度、高精度的包装机械,已经广泛应用于食品、医药等行业,电磁振动给料机(以下简称电振机)作为组合秤的重要部件,其下料性能与组合秤运行速度和精度紧密相关^[1-4]。电振机将给料量设定为控制目标,通过调节振动幅度和时间达到对给料量的控制。电振机应用在组合秤上的主要问题是下料速度的精确控制问题。

目前,组合秤下料机构下料量的控制,主要有采用检测固体流量的PID控制系统^[5]和采用检测下料重量的比例模糊控制系统^[6]。检测固体流量的PID控制系统,具有对物料流量的连续检测、实时控制功能,然而由于组合秤下料机构有限的安装位置,使得固体流量检测实现难度大,控制效果差;检测下料量的比例模糊控制,由于组合秤下料的间断性,即本次下料完

收稿日期: 2014-11-11

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2014GZ0024)

作者简介: 朱鹏飞(1993—),男,四川成都人,西南交通大学硕士生,主攻机电一体化、机械设计。

通讯作者: 黄松和(1960—),男,福建人,西南交通大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为工程机械。

成后下次加料时存在不确定性,使得控制的实时性较差,稳定时间较长,下料量偏差大。在实际操作过程中,组合秤下料机构的下料量基本上还是通过手动调节。另外,电振机参数具有缓慢时变性^[7],如电振机长时间工作、弹簧紧固螺栓松动会导致弹簧刚度降低和料斗内物料重量偏差大等,都会导致系统参数变化,影响最终下料量,因此,需要一种定量给料稳定性好、准确度高、对不同物料和给料机构参数变化有自适应性的控制方式。在此,将模型参考自适应控制(MRAC)算法应用于电振机的控制,设计了控制器原理,并利用Matlab软件进行了仿真,验证了自适应控制算法的可行性。

1 下料机构数学模型

组合秤中电振机的运动特性,可以根据机械振动原理,简化成一个双自由度质量体系在周期激振力作用下的强迫振动^[8]。电振机的结构及其力学模型见图1。电磁振动给料器的数学模型可以描述为^[9]:

$$\ddot{\mathbf{M}}\mathbf{X} + \dot{\mathbf{C}}\mathbf{X} + \mathbf{K}\mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (1)$$

$$\ddot{\mathbf{X}} = -\frac{\mathbf{C}}{\mathbf{M}}\dot{\mathbf{X}} - \frac{\mathbf{K}}{\mathbf{M}}\mathbf{X} + \frac{1}{\mathbf{M}}\mathbf{F} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}, \dot{\mathbf{X}}, \ddot{\mathbf{X}}$ 分别为各质点的位移、速度和加速度矩阵,即 $\mathbf{X}=(x_1, x_2)^T, \dot{\mathbf{X}}=(\dot{x}_1, \dot{x}_2)^T, \ddot{\mathbf{X}}=(\ddot{x}_1, \ddot{x}_2)^T$; $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K} \in \mathbf{R}^{2 \times 2}$, 分别为质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵,其中: $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}; \mathbf{K} = \begin{bmatrix} (k_1 + k_2) & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$ 。

$\mathbf{F} \in \mathbf{R}^2$ 为系统激振力矩阵,即 $\mathbf{F}=(-F(t), F(t))^T$, $F(t)$ 为作用在 m_1, m_2 上、大小相等方向相反的瞬时电磁激振力。系统阻尼可简化为空气阻尼和材料内摩擦阻尼,即:

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{M} + \beta \mathbf{K} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{2\omega_i \omega_j (\omega_j \xi_i - \omega_i \xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (4)$$

$$\beta = \frac{2(\omega_j \xi_i - \omega_i \xi_j)}{\omega_j^2 - \omega_i^2} \quad (5)$$

式中: ω_i 和 ω_j 分别为结构的第 i 和第 j 阶固有频率; ξ_i 和 ξ_j 为相应的第 i 和第 j 阶振型的阻尼比,由实验确定,一般可取 $i=1, j=2$ ^[10]。

电振机的槽体是由激振器驱动而实现周期性振动的,其振动位移、速度和加速度可由公式(1)确定。槽体中物料在激振力作用下会出现抛掷运动^[11],其受力情况见图2。

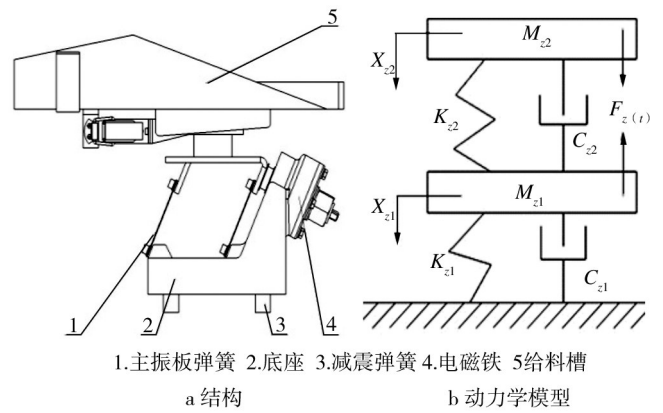


图1 电磁振动给料机结构及动力学模型

Fig.1 Structure and dynamics model of the electromagnetic vibrating feeder

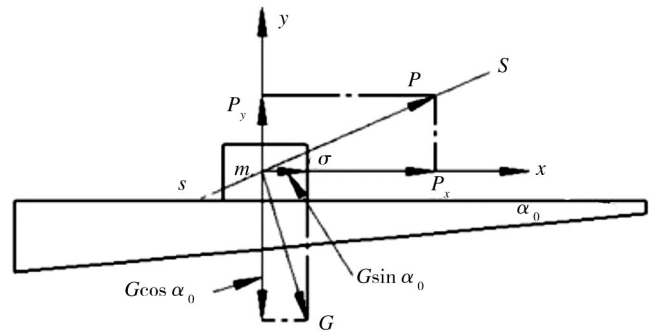


图2 槽体中物料的受力

Fig.2 The force diagrams of material in the trough

在选取适当的抛掷指数 D 与初始条件后,物料的实际输送速度 v_s ^[12]:

$$v_s = c_m c_a c_h k_v \omega A_2 \cos \delta (1 + \tan \alpha_0 \tan \delta) \quad (6)$$

式中: c_m 为物料物理性质影响系数; c_a 为倾角影响系数; c_h 为物料厚度影响因素; k_v 为速度降低系数, $k_v = \frac{\pi i_D^2}{D}$; ω 为振动角频率; A_2 为槽体的振幅; α, δ 为电振机料斗安装角度。

组合称重系统下料机构的下料速度 v :

$$v = 10^5 h B \gamma v_s \quad (7)$$

式中: h 为料层厚度; B 为料槽宽度; γ 为物料的堆积重度。

由式(2)可知,电振机在选取好合适抛掷指数 D 与模型参数后,其下料速度仅与振动角频率 ω 、槽体振幅 A_1 成比例关系。式(7)表明,在确定了槽体结构参数及物料堆积厚度后,组合称重系统下料机构的下料速度与槽体振幅成比例关系。为了使电振机的工作性能稳定,振动角频率 ω 通常设定在亚共振区,可调节范围较小,将其设定为固定值。由此可见,电振机的下料速度

的控制等同于对槽体振幅 A_1 的控制。由于组合称重系统的运行速度要求较高,下料时间受到限制,因此通过控制电振机振幅来提高下料量精度。

2 下料机构的模型参考自适应控制

组合称重系统下料机构的模型参考自适应控制系统结构见图3^[13-15]。

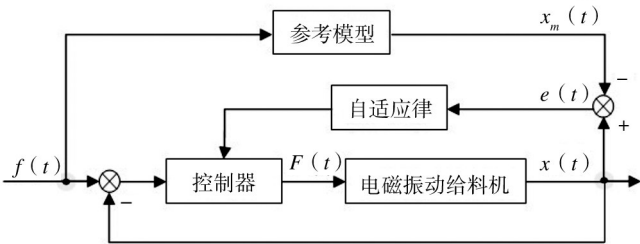


图3 模型参考自适应控制系统
Fig.3 The diagram of the MRAC system

确定电振机运行过程具有理想动态特性的参考模型,在控制过程中通过自适应律调节可调控制器,使得被控系统响应特性与参考模型的动态性能一致,达到期望的闭环性能。

整个系统采用速度反馈模式,其具体结构见图4。传递函数为 $as+b$,使用前馈滤波器(系数 f_α),则基本回路控制规律为: $F(t)=f_\alpha f(t)-a\dot{x}(t)-bx(t)$ 。基本回路的传递函数为: $G(s)=\frac{x}{f}=\frac{f_\alpha G_r(s)}{1+f_\alpha G_r(s)(as+b)}$,

其中,基本回路的可调增益分别为:

$$a = \lambda_2 \int_0^t e(t) \frac{\partial x}{\partial a} dt, \quad f = \lambda_1 \int_0^t e(t) \frac{\partial x}{\partial f} dt,$$

$$b = \lambda_3 \int_0^t e(t) \frac{\partial x}{\partial b} dt。$$

简化计算为:

$$f = \lambda_1 \int_0^t e(t) x_m dt, \quad a = -\lambda_2 \int_0^t e(t) S G_m(s) x dt,$$

$$b = -\lambda_3 \int_0^t e(t) S G_m(s) x dt。$$

3 Matlab 仿真

3.1 参考模型的选取

根据组合秤已知条件设定参考模型的参数,即质量矩阵 $\mathbf{M}$ 、阻尼矩阵 $\mathbf{C}$ 和刚度矩阵 $\mathbf{K}$,得到的Simulink仿真模型见图5。

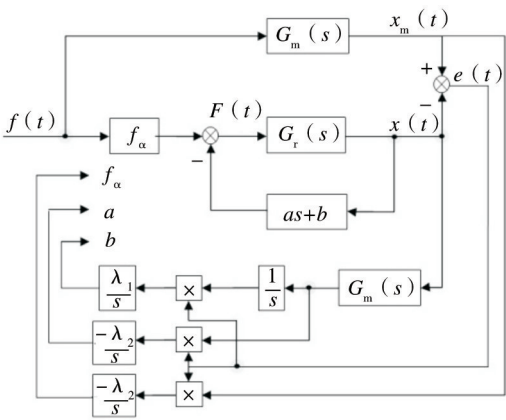


图4 模型参考自适应控制系统框图
Fig.4 The block diagram of the MRAC system

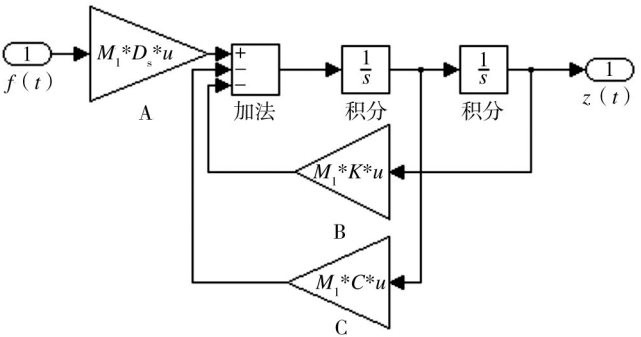


图5 参考模型的Simulink仿真模型
Fig.5 Simulink model of the reference model

3.2 仿真模型

组合秤下料机构自适应控制的Simulink框图见图6。期望输出的振幅和频率与参考模型一致。

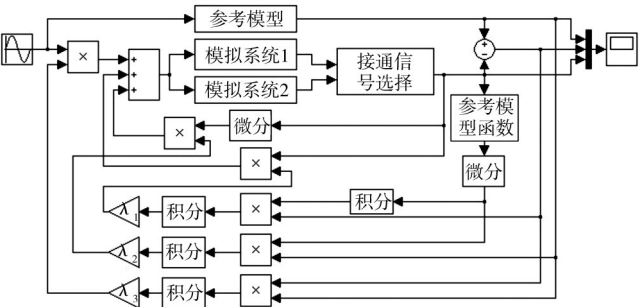


图6 模型参考自适应控制系统仿真
Fig.6 The simulation block diagram of the MRAC system

以称量散装小米为例进行仿真,其参数通过查表得出^[12]: $c_m=0.8, c_\alpha=1, c_h=0.85, k_r=0.86, \gamma=12 \text{ kN/m}^3$;电

振机结构参数为: $\alpha=0^\circ$, $\delta=25^\circ$, $h=30$ mm, $B=120$ mm。组合秤下料机构模型仿真参数设置为:

$$M = \begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 2.7 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} 295\,000 & -255\,000 \\ -255\,000 & 255\,000 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 116.8905 & -62.177 \\ -62.177 & 75.6651 \end{bmatrix}。$$

为了研究组合秤下料机构自适应控制系统适应环境突变的能力,如槽体内物料超重、弹簧长期工作刚度变化等。假设在1 s时系统模型变为system2,其simulink仿真模型结构与model一致,模型仿真参数发生改变,其中:

$$M = \begin{bmatrix} 9 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix}; K = \begin{bmatrix} 270\,000 & -240\,000 \\ -240\,000 & 240\,000 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 110.3960 & -63.5419 \\ -63.5419 & 76.5124 \end{bmatrix}。$$

当输入振动角频率 $\omega=50$ Hz的正弦信号时,取自适应参数 $\lambda_1=3 \times 10^{18}$, $\lambda_2=2 \times 10^{10}$, $\lambda_3=5 \times 10^7$ 进行仿真。槽体振动波形见图7;组合秤下料机构的下料速度见图8。

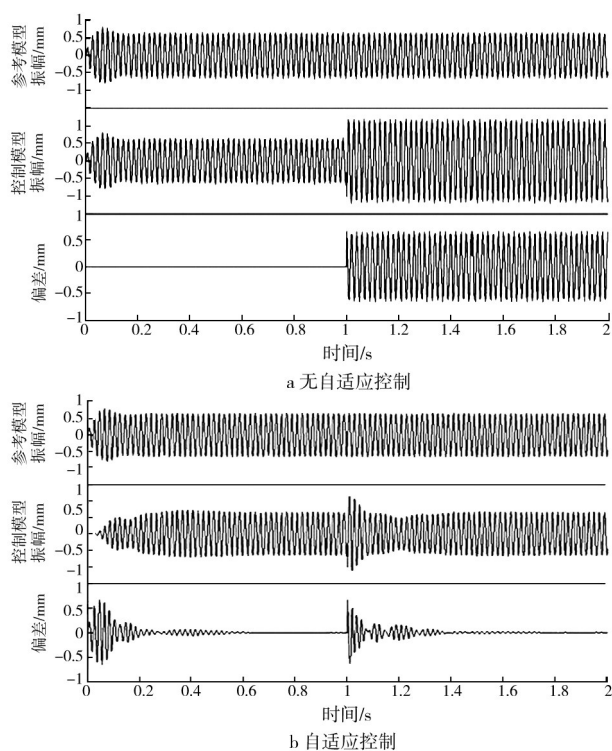


图7 槽体振动波形

Fig.7 The chute's vibrations without the MRAC system

无自适应控制时组合秤下料机构的输出见图7a,初始时刻输出振幅与模型输出振幅一致,但当给料机模型发生变化后,输出振幅大于模型输出振幅。采用自适应控制时组合秤下料机构的输出见图

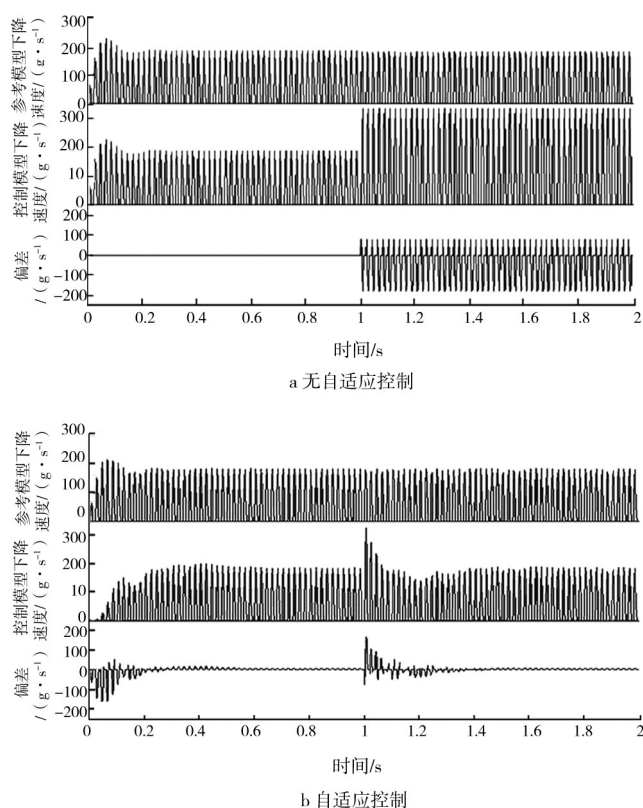


图8 下料速度随时间的变化

Fig.8 Variation of feeding speed without the MRAC system

7b,由于采用了振幅自适应控制,给料机输出的振幅稳定在0.65 mm,即使系统在1 s时发生突变,也能迅速恢复平衡状态。电振机无自适应控制的下料速度见图8a,在开始1 s内,system1下料速度与model速度相同;1 s后系统参数变化,系统下料速度提高,与model相比下料速度增大,下料速度偏差没有回0;电振机自适应控制的下料速度在1 s后系统发生变化,下料速度突然增大,但很快恢复平衡,下料速度偏差很快归于零点平衡位置见图8b。

在2 s内电振机的下料量随时间的变化见图9。由图9a可见,无自适应控制的下料量随时间递增,1 s后当系统变化后的系统下料量与model相比,偏差量随时间的增加而增加。由图9b可见,自适应控制下料量随时间的变化情况,下料量由于调整过程系统与model的波形差异导致偏差。当系统发生变化时,下料量偏差维持在稳定偏差附近,系统下料量曲线与model的下料量曲线保持良好的线性关系。当模拟下料机在1 s之后发生机构参数变化时,在时间2 s内,无自适应控制系统的下料量与参考模型下料量的偏差随时间增加而比例增大,在2 s时相对误差达41.38%;而采用自适应控制系统,其下料量偏差渐进稳定,在2 s时相对误差为3.36%。

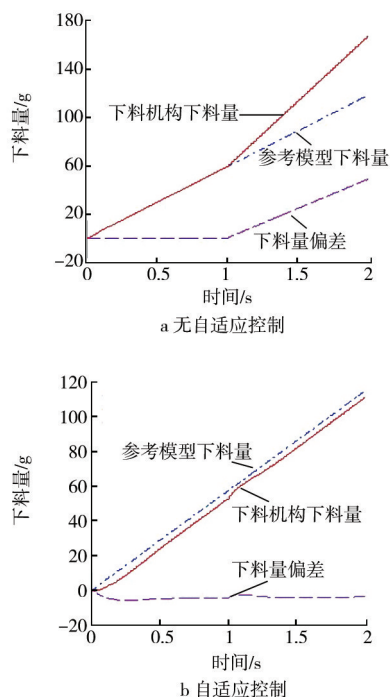


图9 下料量随时间的变化

Fig.9 Variation of feeding amount without the MRAC system

4 结语

采用模型参考自适应控制的组合秤下料机构,能够有效减少由于电磁振动、给料机结构参数变化所引起的下料量偏差,提高了组合秤的下料精度。

参考文献:

- [1] 陈羽锋,吕浩杰,胡国清,等.组合秤组合计算的研究与仿真[J].包装工程,2009,30(12):74—76.
CHEN Yu-feng, LU Hao-jie, HU Guo-qing, et al. Research and Simulation of Combinatorial Calculation of Combined Balance[J].Packaging Engineering, 2009, 30(12): 74—76.
- [2] 袁梦,刘萍,余勃,等.组合秤包装生产线分布式监控系统的软件设计[J].包装工程,2009,30(11):10—12.
YUAN Meng, LIU Ping, YU Bo, et al. Software Design of Distributed Monitoring and Control System in Combination Balance Package Production Line[J]. Packaging Engineering, 2009, 30(11): 10—12.
- [3] 蒋焕新,赵琳.组合称量技术的研究[J].包装工程,2005,26(2):66—67.
JIANG Huan-xin, ZHAO Lin. Research on the Combinatorial Weighing Technology[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(2): 66—67.
- [4] 余勃,宋迎法.组合秤包装机分布式控制系统的总体设计[J].包装工程,2008,25(6):39—41.
YU Bo, SONG Ying-fa. Combination Weigher Packing Machine Overall Design of Distributed Control System[J]. Packaging Engineering, 2008, 25(6): 39—41.
- [5] 万文,熊震江.电磁振动给料机的PID控制[J].矿山机械,2006,34(5):55—56.
WAN Wen, XION Zhen-jiang. The PID Control System of the Electromagnetic Vibrating Feeder[J]. Mining Machinery, 2006, 34(5): 55—56.
- [6] 张西良,李萍萍.电磁振动给料器数字控制及应用研究[J].农业机械学报,2004,35(1):100—103.
ZHANG Xi-liang, LI Ping-ping. Study on Numerical Control of a Electromagnetic Vibration Feeder and Its Application[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2004, 35(1): 100—103.
- [7] 黄凤,汤炳新.振动给料机的模型参考自适应控制[J].河海大学常州分校学报,2007,21(1):33—36.
HUANG Feng, TANG Bing-xin. The Model Reference Adaptive Control System for Vibration Feeder[J]. Journal of Hohai University Changzhou, 2007, 21(1): 33—36.
- [8] 赵仕奇,黄银花,何晓佑.卫生香包装振动上料装置研究[J].包装工程,2013,34(23):84—87.
ZHAO Shi-qi, HUANG Yin-hua, HE Xiao-you. Development on Vibration Feeding Device of Incense Stick Packaging[J]. Packaging Engineering, 2013, 34(23): 84—87.
- [9] 黄松和,朱建梅,谢大帅.电磁振动给料系统的动态仿真分析[J].矿山机械,2013,41(12):100—104.
HUANG Song-he, ZHU Jian-mei, XIE Da-shuai. Dynamic Simulation and Analysis on Electromagnetically Vibrative Feeding System[J]. Mining Machinery, 2013, 41(12): 100—104.
- [10] ALIPOUR A, ZAREIAN F. Study Rayleigh Damping in Structures[C]// The 14th World Conference on Earthquake Engineering .Beijing: 2008.
- [11] RIBIC A I, DESPOTOVIC Z. High-performance Feedback Control of Electromagnetic Vibratory Feeder[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2010, 57(9): 3087—3094.
- [12] 洪致育,林良明.连续运输机械[M].北京:机械工业出版社,1982.
HONG Zhi-yu, LIN Liang-ming. Continuous Conveying Machinery[M].Beijing: China Machine Press, 1982.
- [13] GAETA A, MONTANARO U. Application of a Robust Model Reference Adaptive Control Algorithm to a Nonlinear Automotive Actuator[J]. International Journal of Automation and Computing, 2014, 11(4): 377—391.
- [14] ITO K, YAMADA T, IKEO S, et al. Application of Simple Adaptive Control to Water Hydraulic Servo Cylinder System [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(5): 882—888.
- [15] TAIFOUR A A, EISA BASHIER M T, BUSATI M O. Adaptive PID Controller for Dc Motor Speed Control[J]. International Journal of Engineering Inventions, 2012, 1(5): 26—30.