采煤机调高系统的机液协同仿真分析

曾庆良[1],张海忠[1],王成龙[1],李圣文[2],任 燕[2]
(1. 山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590;2. 山东能源机械集团有限公司,山东 新泰 271200)

摘 要: 为研究采煤机滚筒调高过程中调高系统的动态特性,以及实现对采煤机滚筒位置的控制,运用机械原理理论建立了调高机械系统摆动导杆机构运动模型,并用 Matlab 软件进行仿真,仿真结果表明,调高油缸匀速运动过程中,摇臂对连接销轴存在冲击作用力。针对调高液压系统中调高油缸行程较大的情况,建立了适用于活塞大位移的阀控非对称缸模型,分析结果表明,当考虑调高油缸有效容积的变化时,阀控非对称缸模型是非线性的。最后应用 AMESim 软件建立了采煤机调高系统的机液协同仿真模型,通过对比摇臂摆角实际值与给定值可知: 当考虑滚筒截割阻力、滚筒和摇臂重力综合作用时,采用摇臂角位移反馈、电液换向阀控制的调高控制模型能够实现对采煤机滚筒位置控制。

关键词: 采煤机; 滚筒调高; 机械系统; 液压系统; 协同仿真
中图分类号: TD421; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-2336(2015)01-0086-05

Analysis on mechanic and hydraulic collaborated simulation of height adjusting system in coal shearer

ZENG Qing-liang[1], ZHANG Hai-zhong[1], WANG Cheng-long[1], LI Sheng-wen[2], REN Yan[2]
(1. *School of Mechanic and Electric Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao* 266590, *China*;
2. *Shandong Energy Machinery Group Corporation Limited, Xintai* 271200, *China*)

Abstract: In order to study dynamic features of height adjusting system during the cutting drum height adjusting process of coal shearer and to realize control of the cutting drum position of coal shearer, a mechanical principle theory was applied to establish crank shaper mechanism movement model of height adjusting mechanic system. A Matlab software was applied to the simulation. The simulation results showed that during the uniform moving process of height adjustment hydraulic system, a ranging arm would have impact force to connecting pin shaft. According to a long stroke of height adjusting cylinder in height adjustment hydraulic system, a valve controlled asymmetric cylinder model suitable to large displacement piston was established. The analysis results showed that in consideration on effective volume variation of height adjustment cylinder, the valve controlled asymmetric cylinder model would be nonlinear. Finally, a AMESim software was applied to establish a mechanic and hydraulic collaborated simulation model of height adjusting system for coal shearer. A comparison was made on the swing angle actual value and ranging arm given value. The results showed that in consideration on the cutting resistance of cutting drum and gravity comprehensive role of cutting drum and ranging arm, an angle displacement feedback of the ranging arm and height adjustment control model controlled by electric and hydraulic directional valve could be applied to realize position control of coal shearer.

Key words: coal shearer; cutting drum height adjustment; mechanical system; hydraulic system; collaborated simulation

0 引 言

采煤机滚筒调高系统是典型的机电液一体化系统,机械系统与液压系统相互作用密不可分。调高油缸的液压力驱动机械部分运动,同时机械部分的运动引起调高液压力的变化。机液协同仿真将 2 个

收稿日期: 2014-08-22; **责任编辑:** 赵 瑞 **DOI:** 10.13199/j.cnki.cst.2015.01.021
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51375282); 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT1266); 山东省自主创新专项资助项目(2013CXB40203)
作者简介: 曾庆良(1965—),男,山东高密人,教授,博士生导师。Tel:0532-86057697,E-mail:qlzeng@163.com
引用格式: 曾庆良,张海忠,王成龙,等. 采煤机调高系统的机液协同仿真分析[J]. 煤炭科学技术,2015,43(1):86-90.
ZENG Qing-liang, ZHANG Hai-zhong, WANG Cheng-long, *et al*. Analysis on mechanic and hydraulic collaborated simulation of height adjusting system in coal shearer[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(1): 86-90.

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

系统联系在一起,实现两仿真系统之间状态参数的传递,解决了单领域仿真的局限性。采煤机自动割煤、滚筒自动调高,对滚筒调高控制策略[1-5]是当前的研究热点,其中调高系统的建模模型与采煤机实际工况接近程度是影响所采用控制策略是否有效的因素之一。在采煤机割煤过程中,作用在滚筒上的截割阻力是剧烈变化的,在滚筒调高过程中,滚筒和摇臂的重力对摇臂转动销轴的力矩也是变化的,这 2 种作用力将引起调高油缸压力的变化。因此对调高机械系统建模不能简单等效为只有惯性的质量块,对调高液压系统建模时应考虑负载变力作用,这样才能使所建模型更接近真实情况。在采煤机滚筒调高机械系统建模方面,文献[6]利用 ADAMS 软件建立了采煤机调高系统虚拟样机模型,考虑了截割阻力的影响,但是需要建立调高虚拟样机模型; 文献[7-8]应用 AMESim 软件建立了采煤机调高系统模型,但将调高机械系统简化为质量块过于粗糙; 文献[9]对采煤机调高液压系统的等效负载进行了分析计算,发现调高油缸活塞质量和滚筒、摇臂等效质量对调高液压系统的性能有影响。在滚筒调高液压系统建模方面,文献[10]将调高油缸有效容积的最大值与最小值的平均值等效为缸的有效容积,建立了阀控缸传递函数模型,这种建模方法将调高油缸有效容积假定为一常数,与实际不符; 文献[11]在液压缸活塞小位移的假设下,建立了阀控非对称缸的数学模型; 文献[12-13]建立了阀控缸的非线性模型,但仍忽略了液压缸有效容积的变化[14],该模型应用于活塞行程较大的情况存在误差。由于采煤机调高油缸活塞行程较大,活塞小位移假设下建立的阀控缸数学模型对此不适用。针对采煤机调高系统建模存在的问题,笔者对调高机械系统和液压系统详细建模,利用 AMESim 软件建立贴近实际工况的采煤机调高系统机液协同仿真模型,实现了 2 个系统机液耦合分析,仿真考虑了摇臂、滚筒自重以及滚筒截割载荷对采煤机调高系统的影响,同时实现了对采煤机滚筒位置的有效控制,对滚筒调高控制和机液协同仿真有一定参考价值。

1　采煤机调高系统工作原理

采煤机调高系统工作原理如图 1 所示。手液动换向阀中位机能为 H 型,当采煤机滚筒固定在某一高度割煤时,调高泵出口压力油经换向阀中位回油箱。调高手柄向左拉动时,手液动换向阀的 P、A 口接通,B、T 口接通,压力油经手液动换向阀打开液力锁进入调高油缸活塞腔,另一腔油液经液力锁回油箱,摇臂下降; 反之,将调高手柄向右推时摇臂上升。

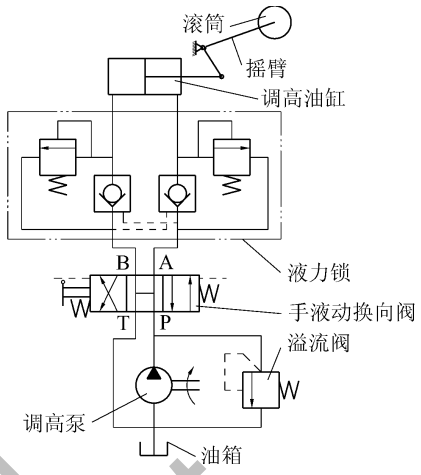


图 1 采煤机调高系统工作原理

2　调高系统数学建模

采煤机滚筒的位置是由调高油缸活塞的位置决定的。为研究采煤机调高系统的运动特性,分析活塞位移与滚筒的位置关系,需要建立调高系统的运动模型。采煤机调高机械部分由调高油缸和摇臂组成,该部分可以简化为如图 2 所示的摆动导杆机构。笔者采用解析法对调高机构进行数学建模。

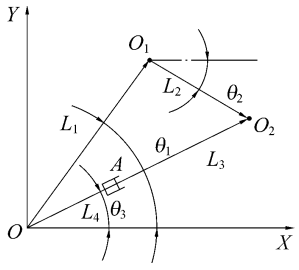


图 2　采煤机调高摆动导杆机构原理

由机械原理知识可得到机构封闭矢量方程在水平和竖直方向的分解方程为

$$\begin{cases} L_1\cos\theta_1 + L_2\cos\theta_2 = (L_3 + L_4)\cos\theta_3 \\ L_1\sin\theta_1 + L_2\sin\theta_2 = (L_3 + L_4)\sin\theta_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: L_1 为摇臂销轴与油缸销轴的距离; L_2 为摇臂销轴与油缸活塞杆销轴的距离; L_3 为调高油缸活塞杆长度; L_4 为油缸活塞与缸筒转动销轴的距离; θ_1 为摇臂销轴与油缸缸筒销轴的连线与水平方向的夹角; θ_2 为摇臂与水平方向的角度; θ_3 为调高油缸与水平方向的角度。

式(1)两边对时间求导得

$$\begin{pmatrix} -L_2\sin\theta_2 & (L_3+L_4)\sin\theta_3 \\ L_2\cos\theta_2 & -(L_3+L_4)\cos\theta_3 \end{pmatrix}\begin{bmatrix}\omega_1\\ \omega_2\end{bmatrix}=\begin{pmatrix} v\cos\theta_3 \\ v\sin\theta_3\end{pmatrix} \tag{2}$$

式中: ω_1 为调高油缸转动角速度; ω_2 为摇臂转动角速度; v 为调高油缸活塞运动速度。

由式(2)两边对时间求导,可得

$$\begin{pmatrix} -L_2\sin\theta_2 & (L_3+L_4)\sin\theta_3 \\ L_2\cos\theta_2 & -(L_3+L_4)\cos\theta_3 \end{pmatrix}\begin{bmatrix}\varepsilon_1\\ \varepsilon_2\end{bmatrix}=$$

$$\begin{pmatrix} a\cos\theta_3-2v\omega_2\sin\theta_3+\omega_1^2L_2\cos\theta_2-\omega_3^2(L_3+L_4)\cos\theta_3 \\ a\sin\theta_3+2v\omega_2\cos\theta_3+\omega_1^2L_2\sin\theta_2-\omega_3^2(L_3+L_4)\sin\theta_3\end{pmatrix} \tag{3}$$

式中: ε_1 为调高油缸转动角加速度; ε_2 为摇臂转动角加速度; a 为调高油缸活塞移动加速度。

式(1)—式(3)分别描述了缸筒、活塞与摇臂三者之间的位置与速度和加速度关系。通过对式(1)—式(3)的求解,可以得到采煤机调高机械部分各部件的运动特性。由式(2)得出 MG400/930-WD 型采煤机摇臂 Matlab 软件仿真方框图,如图 3 所示,其中, L_2=755 mm。仿真初始条件为采煤机摇臂及调高油缸水平位置,此时 $L_3=L_4$=979 mm, θ_2=-96.77°, θ_3=0。设调高油缸活塞运动速度为 100 mm/s,仿真时间为 5 s,摇臂及油缸摆动角速度仿真结果如图 4 所示。

由图 4 分析可知,油缸摆动角速度近似一条斜线,则其对系统的作用力较恒定;摇臂在开始的 2 s 内角速度变化较平缓,但在 2 s 之后角速度变化逐渐增加,这说明在滚筒调高过程中,摇臂对整个调高系统存在冲击作用力。

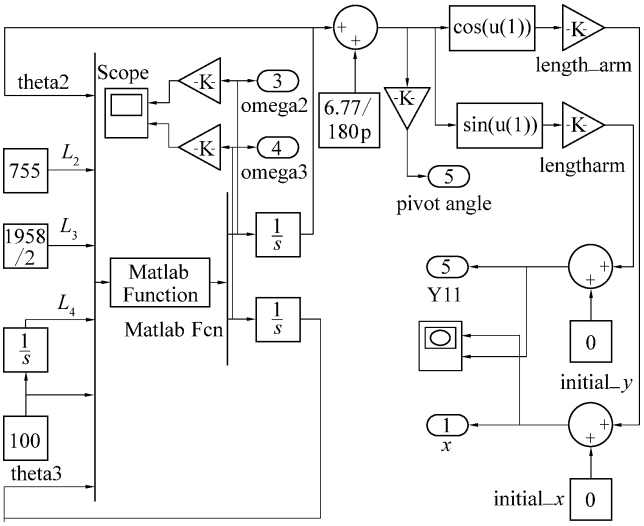


图 3　采煤机摇臂 Matlab 软件仿真方框图

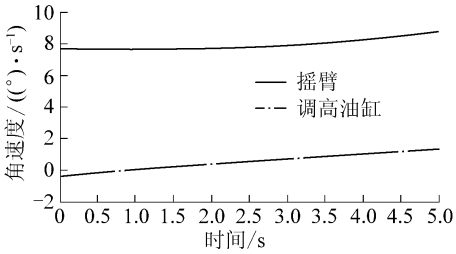


图 4　摇臂及油缸摆动角速度曲线

3　调高系统非对称阀控缸数学建模

对采煤机调高系统建模,主要是对关键液压元件换向阀和调高油缸建模,即建立阀控缸模型。采煤机调高油缸为非对称缸,换向阀采用零开口四通滑阀,则需要建立阀控非对称缸的数学模型。阀控非对称缸原理如图 5 所示,假设阀为理想零开口四通滑阀,4 个截流窗口匹配对称,供油压力 p_s 恒定,回油压力 p_o 为零。

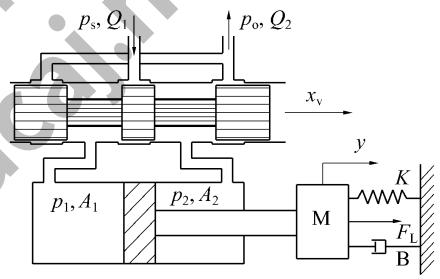


图 5　阀控非对称缸原理

1) 油缸的流量连续性方程。油缸无杆腔和有杆腔流量连续性方程分别为

$$Q_1-C_{ic}(p_1-p_2)-C_{ec}p_1=A_1\frac{dy}{dt}+\frac{V_1}{\beta_e}\frac{dp_1}{dt}$$

$$C_{ic}(p_1-p_2)-C_{ec}p_2-Q_2=-A_2\frac{dy}{dt}+\frac{V_2}{\beta_e}\frac{dp_2}{dt}$$

式中: Q_1、Q_2 为油缸进油腔和回油腔流量; C_{ic}、C_{ec} 为油缸内、外泄漏系数; p_1、p_2 为油缸无杆腔和有杆腔压力; A_1、A_2 为油缸无杆腔和有杆腔有效面积; y 为油缸活塞位移; t 为时间; V_1、V_2 为油缸无杆腔和有杆腔有效容积; β_e 为有效体积的弹性模量。

定义负载压力[11] $p_L=p_1-mp_2$,负载流量 $Q_L=(Q_1+mQ_2)/(1+m)$,其中 $m=A_2/A_1<1$,则

$$Q_L=A_1\frac{dy}{dt}+\frac{1}{(1+m^2)\beta_e}\left(\frac{V_1dp_1}{dt}-m\frac{V_2dp_2}{dt}\right)+\frac{(1+m)(p_1-p_2)C_{ic}}{(1+m^2)}+\frac{(p_1-mp_2)C_{ec}}{(1+m^2)}$$

考虑到 $V_1=V_{10}+A_1y$, $V_2=V_{20}-A_2y$,并令 V_{10}

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

$=V_{20}=V_0$。式中，V_{10}、V_{20} 分别为油缸无杆腔、有杆腔初始容积。由文献[11]易得，当阀芯右移，即阀芯位移 $x_v>0$ 时，有供油压力 $p_s=p_1+p_2/m^2$；当阀芯左移，即 $x_v<0$ 时，有 $p_s=m^2p_1+p_2$。若忽略油缸内泄漏，则

$$Q_L=A_1\frac{dy}{dt}+\frac{V_0}{(1+m^2)\beta_e}\frac{dp_L}{dt}+\frac{(1-m^2)A_1}{(1+m^3)\beta_e}y\frac{dp_L}{dt}+\frac{C_{ec}}{1+m^2}p_L \tag{4}$$

2) 油缸和负载的力平衡方程。

$$F_g=A_1p_1-A_2p_2=A_1p_L=M\frac{d^2y}{dt}+B\frac{dy}{dt}+Ky+F_L \tag{5}$$

式中：F_g 为油缸产生的驱动力；M 为活塞和负载的总质量；B 为活塞和负载的黏性阻尼系数；K 为负载的弹簧刚度；F_L 为作用在活塞上的负载力。

3) 阀的压力-流量线性化方程为[14]

$$Q_L=K_qx_v-K_cp_L \tag{6}$$

其中：K_q 为阀的流量增益；K_c 为阀的流量-压力系数。

由式(4)—式(6)可得出阀控非对称缸的方框图，如图 6 所示。其更具一般性，不再局限于活塞小位移的假设。从式(4)和图 6 都可看出，模型中多出 dp_L/dt 一项，这使得模型不再是线性的，同时增加了分析的复杂性；当忽略此项时，模型是线性的，但此时只适用于活塞小位移的情况。

4　调高系统机液协同仿真

第 3 节建立的采煤机调高系统模型没有考虑外负载的影响，且建立的调高系统阀控非对称缸模型是非线性，这为调高系统的分析带来了难度。因此利用 AMESim 软件建立采煤机调高系统模型，将机械系统与液压系统耦合，进行机液协同仿真。

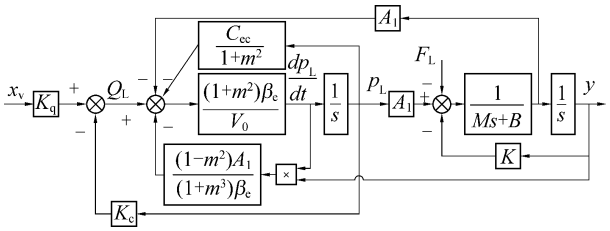


图 6　阀控非对称缸方框图

机液协同仿真的实现形式主要有 2 种：①在多体动力仿真软件中建立机械系统模型，在液压仿真软件中建立液压系统模型，然后利用 2 种软件之间的接口进行数据传递，完成机液协同仿真[6,16]；②利用多领域建模与仿真软件[17]，在同一软件内建立机械系统模型和液压系统模型。

笔者建立的采煤机调高系统机液协同仿真模型如图 7 所示，左部分是由 AMESim 软件中的液压库及液压元件库搭建的液压系统模型，右部分是由平面机构库搭建的调高系统模型，两者通过作动器实现了模型数据的传递。所建模型考虑了采煤机摇臂、滚筒自重以及滚筒截割阻力对整个系统的影响，更接近采煤机实际调高工况。角位移传感器实时采集摇臂摆角，并与给定控制目标进行比较，比较误差经 PID 调节器后控制先导阀阀芯位移，最终实现对采煤机滚筒位置的控制。

以摇臂摆角为控制目标，对所建模型进行仿真，结果如图 8 所示。由图 8 分析知，在仿真开始时刻摇臂突然摆动到给定值以下 2°的位置，此时调高油缸内没有油液，即调高力为零，摇臂在重力作用下向下摆动，随着油泵对油缸不断供油，摇臂停止向下摆动。仿真 2 s 时间内，由于摇臂平衡位置在初始位置以下，摇臂实际摆角始终小于给定值，同时曲线不断波动，这是机械负载惯性力与液压力相互作用的

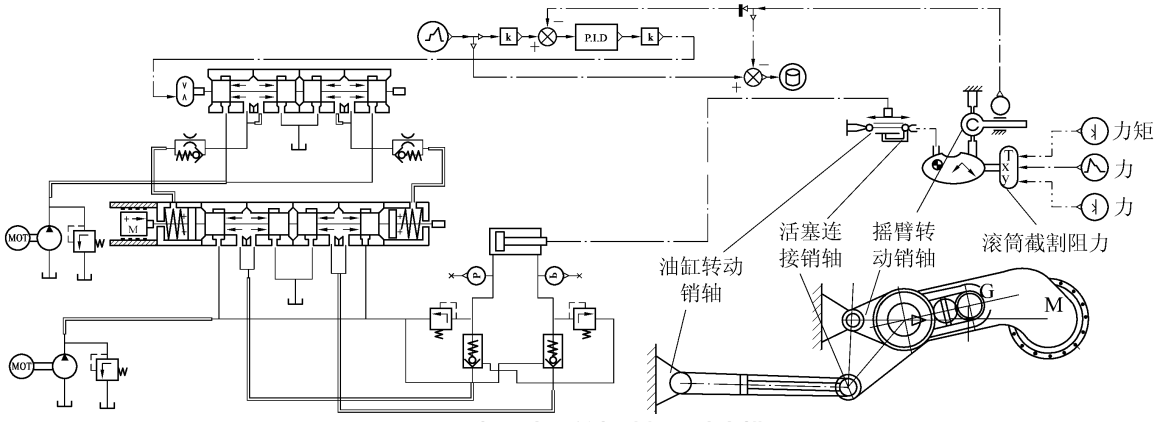


图 7　采煤机调高系统机液协同仿真模型

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net

结果。由于系统阻尼较小，摇臂长时间振动。2 ~ 10 s 时间段内控制摇臂向上摆动 5°，摇臂响应滞后于控制目标，这是因为采煤机摇臂和滚筒惯性大，难以改变其运动状态。随着仿真时间的增加，控制误差逐渐减小。10 ~ 30 s 时间段属于采煤机正常割顶煤阶段，由于滚筒受到变化的截割阻力作用，摇臂不断振动，同时滚筒重心处于给定位置下方。30 ~ 45 s 为滚筒下放阶段，调高油缸活塞杆不仅受到滚筒截割阻力变载荷的作用，而且受到滚筒和摇臂重力产生的变力作用。45 ~ 60 s 采煤机割底煤，摇臂摆角在控制曲线以上波动。从整个仿真过程来看，摇臂摆角实际曲线始终在给定曲线附近上下波动，说明滚筒能够跟踪预设轨迹，实现滚筒的自动调高；另外采煤机摇臂始终受到动载荷的作用，引起采煤机整机的振动。

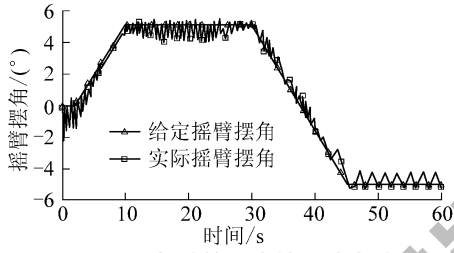


图 8　采煤机滚筒调高控制仿真结果

5　结　　论

1) 建立了采煤机滚筒调高系统运动模型，通过设置初始条件，利用 Matlab 软件对模型进行了测试仿真，得到机构运动过程中的角速度、角加速度，可用来分析滚筒调高过程中机构的运动学性能，为采煤机调高系统的设计、优化提供借鉴。

2) 考虑活塞大位移对调高油缸有效容积的影响，建立了采煤机调高液压系统阀控非对称缸非线性模型，使阀控非对称缸模型的适用范围更为广泛。

3) 利用 AMESim 软件建立了采煤机调高系统机液协同仿真模型，实现液压系统与机械系统的耦合。仿真考虑了采煤机摇臂、滚筒重力以及滚筒截割阻力对采煤机调高系统的影响，更接近采煤机实际工作工况。该仿真研究对采煤机调高系统的控制、设计及优化有一定指导作用，对同类型的机液协同仿真也有借鉴意义。笔者所建模型仅利用反馈控制实现滚筒调高，如何根据煤岩性质的不同实现滚筒自动调高以及仿真试验将有待继续研究。

参考文献:

[1] 刘春生，荆　凯，万　丰. 采煤机滚筒记忆程控液压调高系统的仿真[J]. 中国工程机械学报，2007，5(2)：142-146.

[2] 张福建. 电牵引采煤机记忆截割控制策略的研究[D]. 上海：煤炭科学研究总院上海分院，2007：19-32.

[3] 王忠宾，徐志鹏，董晓军. 基于人工免疫和记忆切割的采煤机滚筒自适应调高[J]. 煤炭学报，2009，34(10)：1405-1409.

[4] 苏秀平，李　威，樊启高. 采煤机滚筒调高滑模变结构控制策略[J]. 煤炭学报，2012，37(12)：2107-2111.

[5] 张修荣. 采煤机滚筒自适应液压调高系统研究[D]. 西安：西安科技大学，2009：13-15.

[6] 赵丽娟，王　丽. 滚筒式采煤机调高机构机液协同仿真研究[J]. 计算机测量与控制，2014，22(3)：823-825.

[7] 徐二宝. 基于 AMESim 的采煤机电液比例自动调高系统研究[D]. 淮南：安徽理工大学，2013：34-42.

[8] 张寅锋. 滚筒式采煤机运动轨迹跟踪及控制策略研究[D]. 杭州：浙江大学，2014：69-83.

[9] 苏秀平，李　威. 采煤机调高液压系统等效负载分析[J]. 液压与气动，2013(2)：69-70.

[10] 刘长年. 关于液压施力系统非对称油缸的建模问题[J]. 机床与液压，1985(3)：2-9.

[11] 王栋梁，李洪人，张景春. 非对称阀控制非对称缸的分析研究[J]. 机床与液压，2003(1)：198-200.

[12] 郭洪波，李洪人. 基于 Backstepping 的阀控非对称缸电液伺服系统非线性控制[J]. 液压与气动，2004(10)：38-40.

[13] 方一鸣，许衍泽，李建雄. 具有输入饱和的电液伺服位置系统自适应动态面控制[J]. 控制理论与应用，2014，31(4)：511-518.

[14] 杨军宏，尹自强，李圣怡. 阀控非对称缸的非线性建模及其反馈线性化[J]. 机械工程学报，2006，42(5)：203-207.

[15] 梁利华. 液压传动与电液伺服系统[M]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学出版社，2005：105-109.

[16] 陈晓强，彭天好，徐二宝，等. 基于 AMESim 和 ADAMS 的采煤机调高系统的协同仿真[J]. 煤矿机械，2012，33(11)：40-42.

[17] 崔大文. 基于 ADAMS/Hydraulics 与 Matlab/Simulink 的采煤机自动调高系统建模与仿真[J]. 辽宁工程技术大学学报：自然科学版，2011，30(2)：254-257.

征　订　启　事

2015 年《煤炭科学技术》杂志定价：25 元/册，全年 12 期共 300 元(含邮费)。本刊可邮局订阅，邮发代号：80-337，也可直接向本编辑部索取订单并办理订购业务，欢迎随时订阅。

汇款地址：北京市和平里青年沟路东口 5 号煤炭科学研究总院《煤炭科学技术》编辑部(100013)

联系电话：(010) 84262114(解老师)

传　　真：(010) 84262114

电子信箱：cst410@ china. com

网　　址：www. mtkxjs. com. cn

中国煤炭期刊网 www.chinacaj.net