

文章编号:1671-251X(2017)08-0055-06

DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.08.011

矿井提升机恒减速制动系统故障仿真分析

李娟娟¹, 胡亮¹, 孟国营¹, 谢广明², 汪爱明¹, 王帅¹, 贾一凡¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 北京大学工学院, 北京 100871)

摘要:以JKMD4.5×4型矿井提升机配套的E141A型恒减速制动系统为研究对象,分析了恒减速制动系统工作原理;搭建了恒减速制动系统仿真模型,并通过理论计算验证了仿真模型的可靠性;利用仿真模型模拟了弹簧刚度减小、闸瓦摩擦因数下降、制动器泄漏等制动系统典型故障。仿真结果表明:各主要部件性能下降时,并不能立即引起制动系统故障,而是系统性能退化,这些退化表现为制动系统压力降低、开闸间隙变小或变大等;系统性能退化到一定程度才出现制动减速度不符合要求、制动器不开闸、开闸间隙过大、空动时间过长等故障。

关键词:矿井提升机; 恒减速制动系统; 故障仿真; 弹簧刚度; 闸瓦摩擦因数; 制动器泄漏

中图分类号:TD534 文献标志码:A 网络出版时间:2017-07-27 10:06

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170727.1006.011.html>

Fault simulation analysis of constant deceleration braking system of mine hoist

LI Juanjuan¹, HU Liang¹, MENG Guoying¹, XIE Guangming²,
WANG Aiming¹, WANG Shuai¹, JIA Yifan¹

(1. School of Mechanical Electronic and Information Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. College of Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Taking E141A constant deceleration braking system in JKMD 4.5×4 mine hoist as research object, working principle of the constant deceleration braking system was analyzed. A simulation model of the constant deceleration braking system was built and reliability of the simulation model was verified by theoretical calculation. Typical faults such as spring stiffness decrease, friction factor of brake shoe decrease and brake leakage were simulated. The simulation results show that performance degradation of main components cannot immediately cause failure of the braking system, but can cause system performance degradation such as braking system pressure degradation, braker clearance smaller or bigger, etc. The braking system performance degradation with a certain degree will cause faults such as unsatisfactory braking deceleration, no braker clearance, too large braker clearance, too long idle motion time, etc.

Key words: mine hoist; constant deceleration braking system; fault simulation; spring stiffness; friction factor of brake shoe; brake leakage

收稿日期:2017-04-06;修回日期:2017-06-21;责任编辑:盛男。

基金项目:“十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFC0600900)。

作者简介:李娟娟(1976—),女,山西垣曲人,高级工程师,博士,研究方向为设备故障诊断,E-mail:673958678@qq.com。

引用格式:李娟娟,胡亮,孟国营,等. 矿井提升机恒减速制动系统故障仿真分析[J]. 工矿自动化,2017,43(8):55-60.

LI Juanjuan, HU Liang, MENG Guoying, et al. Fault simulation analysis of constant deceleration braking system of mine hoist[J]. Industry and Mine Automation, 2017, 43(8): 55-60.

0 引言

矿井提升机作为矿山生产流程中的关键设备,构建了地面和井下的联系,担负着提升煤炭或矿石、下放材料、升降人员和设备的重要任务^[1]。提升机制动系统是保障提升机安全运行的最后一道屏障,其制动性能的优劣直接影响提升机的安全、可靠运行^[2]。本文选用 JKMD4.5×4 型矿井提升机配套的 E141A 型恒减速制动系统为研究对象,分析了恒减速制动系统工作原理;针对高速、重载提升工况,采用 AMESim 仿真软件搭建了恒减速制动系统仿真模型;利用仿真模型模拟了恒减速制动系统典型故障,通过故障仿真可定量分析部件性能退化与制动性能之间的关系,为提升机制动系统健康评价与智能维护提供了依据。

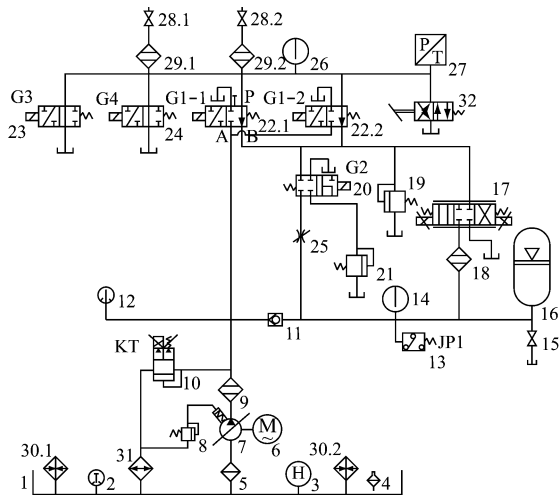
1 恒减速制动系统工作原理

E141A 型恒减速制动系统具有减速度恒值闭环自动控制功能。在安全制动时,可在各种载荷、速度、工况下,使提升机按照给定的恒定减速度进行制动。在检测装置检测到实际减速度偏离给定值的情况下,通过电液闭环制动控制系统的反馈调节和补偿作用,保持制动过程中减速度恒定不变,达到恒减速制动的效果^[3]。E141A 型恒减速制动系统同时具有恒力矩二级制动性能,在恒减速控制失效时自动转为恒力矩二级制动,增加了系统的可靠性。E141A 型恒减速制动系统原理如图 1 所示。

提升机开始工作前,先向空气蓄能器充油,电磁换向阀 G1—G4 断电,压力达到要求值后,压力继电器 JP1 动作,比例溢流阀给定的压力降为零,系统正常工作。当提升机发生故障需要安全制动时,电动机、比例溢流阀断电,液压泵停止供油,电磁阀 G1, G2 断电,电磁阀 G3 延时断电,电磁阀 G4 延时通电,制动油压迅速降到溢流阀 19 调定的压力,然后系统比较实际的减速度信号和给定的减速度信号后向电液伺服阀发出控制信号,使电液伺服阀阀芯右移或左移,即或向油箱排油,使系统压力下降,或由空气蓄能器供油,使系统压力上升。当控制电流为零时,电液伺服阀阀芯处于中间位置即全关闭状态,使系统压力保持恒定^[3]。依靠该控制方式使制动减速度保持恒定,直到提升机全部停车。

2 恒减速制动系统仿真模型

2.1 仿真模型搭建



- 1—油箱;2—电接点温度计;3—液位计;4—空气滤清器;
- 5,9,18,29—滤油器;6—电动机;7—液压泵;8—遥控溢流阀;
- 10—比例溢流阀;11—单向阀;12—电接点压力表;
- 13—压力继电器;14,26—压力表;15,28—截止阀;
- 16—空气蓄能器;17—电液伺服阀;19,21—溢流阀;
- 20,22,23,24—电磁换向阀;25—节流阀;27—压力传感器;
- 30—加热器;31—冷却器;32—手动换向阀

图 1 E141A 型恒减速制动系统原理

Fig. 1 Principle of E141A constant deceleration braking system

基于恒减速制动系统工作原理,在 AMESim 仿真环境下搭建恒减速制动系统仿真模型^[4-9],如图 2 所示。增益模块 K 代表闸瓦摩擦因数,函数 $F(X)$ 代表减速度计算模块,比较器将减速度的实时计算值与设定值进行比较,随机信号发生器产生高斯白噪声来模拟系统噪声^[10]。

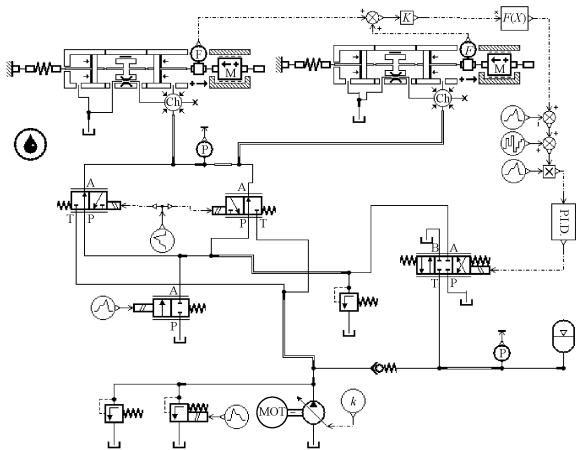


图 2 基于 AMESim 的恒减速制动系统仿真模型

Fig. 2 Simulation model of constant deceleration braking system based on AMESim

2.2 仿真参数设置

JKMD4.5×4 型矿井提升机主要参数见表 1,其配套使用的 E141A 型恒减速制动系统仿真模型

参数设置见表 2。

表 1 矿井提升机主要参数

Table 1 Main parameters of mine hoist	
参数	数值
额定负载质量/kg	28 000
卷筒直径/m	4.54
有效制动半径/m	2.45
旋转部分变位质量/kg	65 219.56
移动部分变位质量/kg	173 644
提升机总变位质量/kg	238 863.56
制动器对数	16
制动油缸面积/cm ²	84.2
制动弹簧组刚度/(N·mm ⁻¹)	10 368
制动弹簧预压长度/mm	8.38
闸瓦摩擦因数	0.3
设定减速度/(m·s ⁻²)	3.5

表 2 仿真模型参数

Table 2 Parameters of simulation model		
元件	子模型	参数设置
电动机	PM000	转速 1 430 r/min
液压泵	PU002	排量 10 mL/r
空气蓄能器	HA000	预充压力 4 MPa,容量 5 L
制动油缸	BAP11,BAP12	活塞直径 150 mm, 活塞杆直径 95 mm
制动器	BAF15RT	活塞直径 150 mm
质量块	MAS005	质量 30 kg,行程 1 mm
制动弹簧	SPR000A	刚度 3.3×10 ⁴ N/mm, 预压力 138 698 N
减速度计算模块	FX00	(1.08X+1.15×28 000)/23 886
增益模块	GA00	0.3
二位三通阀 控制信号	UD00	原始状态持续时间 2 s, 换位状态持续时间 3 s, 起始、终止时电流信号 40 mA, 恢复原始状态持续时间 5 s
二位二通阀 控制信号	UD00	原始状态持续时间 8 s, 换位状态持续时间 2 s, 起始、终止时电流信号 40 mA
总溢流阀	RV000	11.5 MPa
一级溢流阀	RV000	7 MPa
体积腔	BHC11	100 cm ³

注:X为制动力。

2.3 仿真结果及验证

根据达朗贝尔原理,提升机重载提升安全制动

时,作用在提升机卷筒上的力矩平衡方程为^[11]

$$M_Z + M_J = M_d \tag{1}$$

式中: M_Z 为制动力矩; M_J 为静阻力矩; M_d 为惯性力矩。

$$M_Z = 2(Kx - P_Z A) \eta \mu R_J \tag{2}$$

$$M_J = kmgR_J \tag{3}$$

$$M_d = m_t a R_J \tag{4}$$

式中: K 为弹簧组刚度,N/mm; x 为弹簧预压长度,mm; P_Z 为安全制动时制动系统压力,MPa; A 为制动油缸面积,m²; n 为制动器对数; μ 为闸瓦摩擦因数; R_Z 为制动半径,m; k 为矿井提升阻力系数,箕斗提升时 $k=1.15$,罐笼提升时 $k=1.20$; m 为提升负载质量,kg; g 为重力加速度,m/s²; R_J 为卷筒半径,m; m_t 为提升机总变位质量,kg; a 为重载提升减速度,m/s²。

将式(2)一式(4)代入式(1)得

$$P_Z = \frac{2nKx - \frac{(m_t a - kmg)R_J}{\mu R_Z}}{2nA} \tag{5}$$

取 $k=1.15$,将表 1 中各参数带入式(5),可得 $P_Z \approx 4.36$ MPa。

设置仿真时间为 10 s、步长为 0.01 s,其中 0~2 s 时空气蓄能器充压,2~5 s 时制动器开闸,提升机满载上提运行,5~8 s 时安全制动,8~10 s 时提升机停车。仿真得到安全制动时提升机减速度曲线和制动系统压力曲线分别如图 3 和图 4 所示。

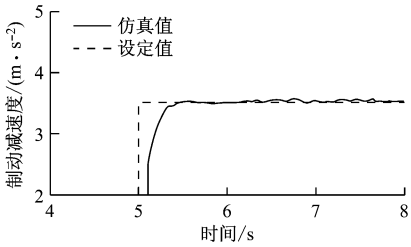


图 3 提升机减速度曲线

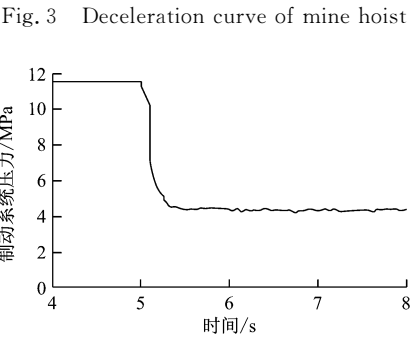


图 4 制动系统压力曲线

Fig. 4 Pressure curve of braking system

从图 3 可看出,该仿真模型能有效保证提升机达到恒定减速度。从图 4 可看出,仿真得到的制动系统压力在 4.36 MPa 附近波动,与理论计算结果相符,验证了仿真模型的可靠性。

3 故障仿真及性能分析

3.1 弹簧刚度减小

弹簧疲劳、制动闸瓦和制动盘之间间隙增大导致合闸时作用在制动盘上的正压力减小,都可以用弹簧刚度减小来仿真^[12-13]。仿真参数设置时,改变弹簧刚度的同时需要改变弹簧的预压力。开闸间隙、制动减速度、制动系统压力仿真结果分别如图 5—图 7 所示。

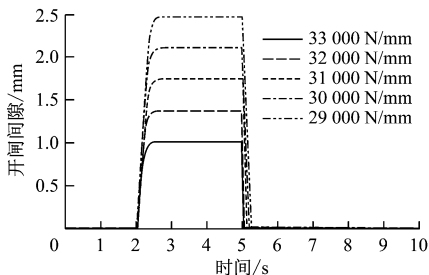


图 5 不同弹簧刚度时开闸间隙

Fig. 5 Braker clearance under different spring stiffness

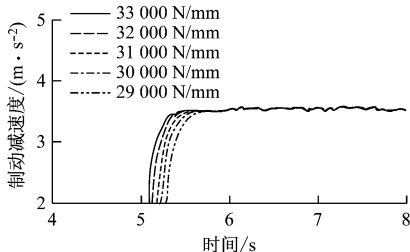


图 6 不同弹簧刚度时制动减速度

Fig. 6 Braking deceleration under different spring stiffness

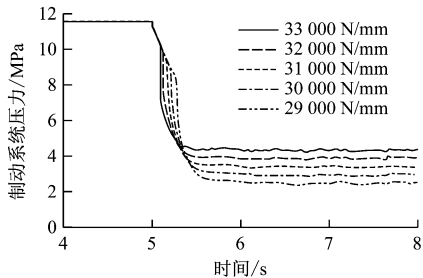


图 7 不同弹簧刚度时制动系统压力

Fig. 7 Braking system pressure under different spring stiffness

从图 5—图 7 可看出,弹簧刚度减小时,制动减速度满足设计要求,但开闸间隙慢慢变大,直至超出

《煤矿安全规程》规定的最大开闸间隙 2 mm,从开闸至合闸的时间(即空动时间)也逐步增大;开闸间隙小于 2 mm 且空动时间小于 0.3 s 时,制动系统压力逐渐减小,说明系统性能开始退化;开闸间隙大于 2 mm 或空动时间大于 0.3 s 时,说明系统已经出现故障。

3.2 闸瓦摩擦因数下降

正常工作时闸瓦摩擦因数为 0.3,摩擦因数从 0.3 减小至 0.18 时,制动减速度、制动系统压力仿真结果分别如图 8、图 9 所示。

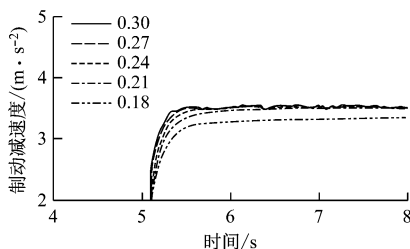


图 8 不同闸瓦摩擦因数时制动减速度

Fig. 8 Braking deceleration under different friction factors of brake shoe

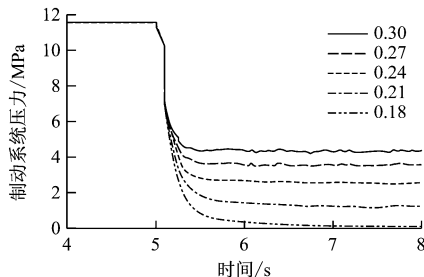


图 9 不同闸瓦摩擦因数时制动系统压力

Fig. 9 Braking system pressure under different friction factors of brake shoe

从图 8、图 9 可看出,闸瓦摩擦因数大于 0.21 时,制动减速度满足设计要求,但制动系统压力随着闸瓦摩擦因数的下降逐步减小,说明系统性能正逐渐退化;闸瓦摩擦因数小于 0.21 时,制动减速度逐步减小,达不到制动系统设计要求,说明系统已经出现故障。

3.3 制动器泄漏

制动器缸筒、活塞或活塞上的密封圈磨损都会引起制动器内部泄漏,可改变制动器缸筒与活塞之间的间隙、活塞直径和活塞长度来模拟泄漏^[14-16],本仿真仅通过改变缸筒与活塞之间的间隙来模拟泄漏。开闸间隙、制动减速度、制动系统压力仿真结果

分别如图 10—图 12 所示。

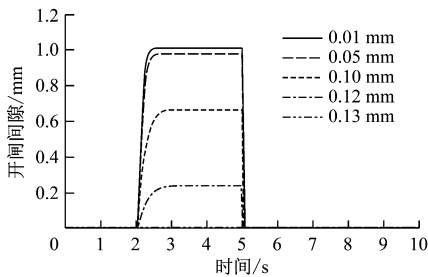


图 10 不同泄漏量时开闸间隙

Fig. 10 Braker clearance under different leakage

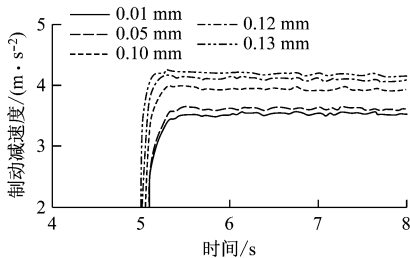


图 11 不同泄漏量时制动减速度

Fig. 11 Braking deceleration under different leakage

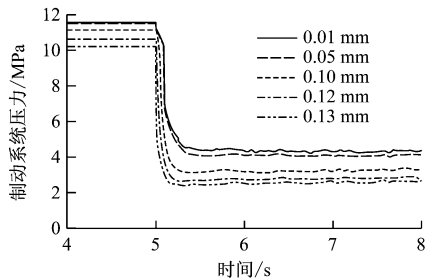


图 12 不同泄漏量时制动系统压力

Fig. 12 Braking system pressure under different leakage

从图 10—图 12 可看出,随着泄漏量的增大,制动器开闸间隙逐渐缩小,直至出现不开闸故障;制动器泄漏量增大时,制动系统压力逐渐减小,制动减速度逐步增大,不满足恒减速制动系统性能要求。

制动器开始泄漏后,为调节制动系统性能,需要调节 PID 参数。调节 PID 参数后制动减速度、制动系统压力仿真结果分别如图 13、图 14 所示。

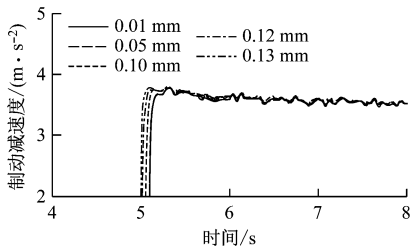


图 13 调节 PID 参数后不同泄漏量时制动减速度

Fig. 13 Braking deceleration under different leakage after adjusting PID parameters

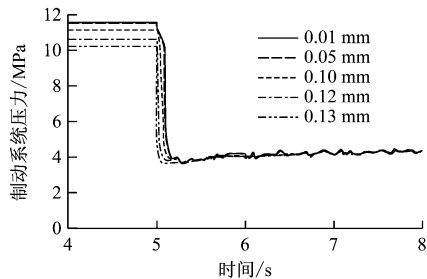


图 14 调节 PID 参数后不同泄漏量时制动系统压力

Fig. 14 Braking system pressure under different leakage after adjusting PID parameters

从图 13、图 14 可看出,调节 PID 参数后,制动减速度和制动系统压力均可以满足恒减速制动系统性能要求。

4 结语

在 AMESim 仿真环境下对矿井提升机恒减速制动系统弹簧刚度减小、闸瓦摩擦因数下降、制动器泄漏等典型故障进行了仿真分析,结果表明:各主要部件性能下降时,并不能立即引起制动系统故障,而是系统性能退化,这些退化表现为制动系统压力降低、开闸间隙变小或变大等;当系统性能退化到一定程度才会出现制动减速度不符合要求、制动器不开闸、开闸间隙过大、空动时间过长等故障。

参考文献 (References):

[1] 葛世荣. 矿井提升机可靠性技术[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,1994.

[2] 李娟莉,杨兆建. 基于本体的矿井提升机故障诊断方法[J]. 振动、测试与诊断,2013,33(6):993-997.

LI Juanli, YANG Zhaojian. Fault diagnosis method for mine hoist based on ontology [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(6): 993-997.

[3] 《矿井提升机故障处理和技术改造》编委会. 矿井提升机故障处理和技术改造[M]. 2 版. 北京:机械工业出版社,2013.

[4] 梁全,谢晨晨,聂利卫. 液压系统 Amesim 计算机仿真进阶教程[M]. 北京:机械工业出版社,2016.

[5] 梁全,苏齐莹. 液压系统 AMESim 计算机仿真指南[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[6] 郭占正,苑士华,荆崇波,等. 基于 AMESim 的液压机械无级传动换挡过程建模与仿真[J]. 农业工程学报,2009,25(10):86-90.

GUO Zhanzheng, YUAN Shihua, JING Chongbo, et al. Modeling and simulation of shifting process in hydraulic machinery stepless transmission based on

- AMESim[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(10): 86-90.
- [7] 温良,倪佳. 基于 AMESim 的某升船机制动系统仿真分析[J]. 机床与液压, 2016, 44(8): 66-68.
- WEN Liang, NI Jia. Simulation on braking system of a shiplift based on AMESim [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2016, 44(8): 66-68.
- [8] 林桂林,杨寅威,许磊,等. 基于 AMESim 的提升机制动系统仿真分析[J]. 煤矿机械 2010, 31(4): 41-42.
- LIN Guilin, YANG Yinwei, XU Lei, et al. Simulation and analysis of braking system of mine hoist based on AMESim[J]. Coal Mine Machinery, 2010, 31(4): 41-42.
- [9] 赵强. 提升机制动系统动态特性仿真及试验研究[D]. 太原:太原理工大学, 2016.
- [10] RAMAKRISHNAN R, HIREMATH S S, SINGAPERUMAL M. Theoretical investigations on the effect of system parameters in series hydraulic hybrid system with hydrostatic regenerative braking [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(5): 1321-1331.
- [11] 李玉瑾,寇子明. 矿井提升系统基础理论[M]. 北京:煤炭工业出版社, 2013.
- [12] 段雷,杨兆建,薛军亮,等. 矿井提升机制动系统动力学的研究[J]. 矿山机械, 2010, 38(19): 55-59.
- DUAN Lei, YANG Zhaojian, XUE Junliang, et al. Dynamics study on braking system of mine hoist [J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(19): 55-59.
- [13] LIN Tianliang, WANG Qingfeng, HU Baozan, et al. Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators [J]. Automation in Construction, 2010, 19(8): 1016-1026.
- [14] 练睿,徐正国,卢建刚. 矿井提升机盘式制动器故障监测方法[J]. 煤矿安全, 2013, 44(9): 131-133.
- LIAN Rui, XU Zhengguo, LU Jiangang. Fault monitoring methods for disc brake system of mine hoist[J]. Safety in Coal Mines, 2013, 44(9): 131-133.
- [15] 张强,胡南,李宏峰. 矿井提升机制动器的 GA-BP 故障诊断[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2016, 35(2): 155-159.
- ZHANG Qiang, HU Nan, LI Hongfeng. Fault diagnosis of the mine hoist brake based on GA-BP neural network [J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2016, 35(2): 155-159.
- [16] 王正友,刘济林. 提升机制动系统故障的信息融合诊断[J]. 煤炭学报, 2003, 28(6): 650-654.
- WANG Zhengyou, LIU Jilin. Information-fusion-based fault diagnosis of hoist braking system [J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(6): 650-654.