

文章编号:1671-251X(2024)S1-0151-05

基于 SSI 的煤矿车辆悬架系统在振动响应下的模态特征分析方法

贾瀚琪

(国能神东煤炭集团有限责任公司 设备维修中心, 内蒙古 鄂尔多斯 017299)

摘要:为了提高对矿车状态识别能力,提出了一种基于结构系统识别(SSI)的煤矿车辆悬架系统在振动响应下的模态特征分析方法。该方法考虑巷道道路不平度对车辆的影响,将车辆的动力学行为与路面不平度相结合,建立整车动力学模型和四轮激励输入模型,以更准确地反映实际运行条件。并通过 SSI 识别并分析车辆悬架系统在振动响应下的模态特征,将已生成的路面不平度时域信号输入到正常与故障的动力学模型中进行激励已得到对应状态下车身的振动响应信号,将这些振动信号进行 SSI 模态特征识别,提取振动信号的主要模态参数,从中获取有关系统动力特性的信息,以更准确地评估煤矿车辆悬架系统的状态和故障风险。研究结果表明基于 SSI 的煤矿车辆悬架系统在振动响应下的模态特征分析方法对整车悬架刚度、减震器阻尼及轮胎刚度能达到很好的故障识别程度,可实现对煤矿车辆悬架系统的状态监测和故障诊断,提高车辆的安全性和可靠性,具有很好的应用价值。

关键词:矿车; 双目视觉; 随机子空间; 模态识别

中图分类号:TD54 文献标志码:A

Momode analysis method of coal mine vehicle suspension system based on SSI

JIA Hanqi

(Equipment Maintenance Center, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd., Ordos 017299, China)

0 引言

煤矿井下的道路与一般公路相比有着截然不同的特点,其工作环境复杂,存在灰尘、湿滑、不平坦、狭窄等因素,给矿用防爆运输车辆的性能提出了更高的要求^[1-3]。随着矿车智能化的不断发展,虽在一定程度上为井下运输过程提供便捷的操纵环境,但与此同时,也面临着新的安全性和舒适性挑战^[4]。矿车悬架系统作为整车结构的重要组成部分,起着承载车辆重量、吸收道路不平整冲击、保证车辆行驶平稳的重要作用,其不仅是车辆在井下巷道行驶平顺性基础保证,同时直接影响车辆安全性能和舒适性^[5-7]。悬架失效、车身不稳、轮胎磨损等问题,给乘车人员和车辆带来严重的安全隐患。因此,有必要采取主动的措施来监测悬架系统的状态,通过传感器和监测设备,实时获取悬架系统的工作状态和参数(如悬架高度、减震效果、液压系统压力等),以便及时发现异常,并进行及时维修和保养。这不仅可

以减少煤矿井下复杂的道路环境下因悬架故障导致的交通事故,还可提高矿车的安全性能和乘坐舒适性^[8-9]。

徐达等^[10]采用加法集成法建立的自回归滑动(Autoregressive Moving Average, ARMA)-神经网络(Back Propagation, BP)组合模型,提高了装备故障率预测精度。颜诗旋等^[11]对轻量梯度提升机(Light Gradient Boosting Machine, LightGBM)模型进行改进,并运用贝叶斯优化对结果值进行优化,提高了矿车故障预测的速度和准确率。Geng Zhiqiang 等^[12]提出了一种基于解释结构(Interpretive Structural Modeling, ISM)模型及高介统计(Higher Order Statistics, HOS)模型相结合的故障诊断模型,实现了系统的故障诊断及预测。以上研究展示了在故障预测和诊断领域中的不同模型和方法的应用,为提高故障预测和诊断的准确性和效率做出了积极的贡献。

为了提高对矿车状态识别能力,提出了一种基

收稿日期:2024-01-25;编辑:郑海霞。

作者简介:贾瀚琪(1999—),男,内蒙古鄂尔多斯人,主要从事煤矿设备维修工作, E-mail:jia1292140583@163.com。

于结构系统识别 (Structural System Identification, SSI) 的煤矿车辆悬架系统在振动响应下的模态特征分析方法。首先,考虑巷道道路不平度对车辆的影响,将车辆的动力学行为与路面不平度相结合,建立整车动力学模型和四轮激励输入模型,以更准确地反映实际运行条件。其次,利用已生成的路面不平度时域信号作为输入,分别输入到正常车辆和故障车辆的动力学模型中。通过观察对应状态下车身的振动响应信号,确定悬架系统的状态和故障情况。然后,使用随机子空间方法对这些振动信号进行模态特征识别,能够提取振动信号的主要模态参数,从中获取有关系统动力特性的信息。最后,分析模态参数与故障之间的关联,以更准确地评估煤矿车辆悬架系统的状态和故障风险。

1 矿用车辆的振动双目相机测量方法

1.1 双目视觉测量模型

在空间中,单个相机在不同角度位置下观察同一个物体得到的图像结果是不一致的,仅依靠一幅数字图像无法准确的描述物体的空间三维信息^[13-14]。双目相机的优势在于,只要在其基础参数(焦距、基线距离、视差等)一定时,就能够提供更准确和精细的空间信息,可通过相机之间的视角和位移差异,将这些信息应用于图像中的像素点上。这样,相机与物体之间的视差(即两个相机观察到的同一点在图像中的水平偏移量)可用来计算物体的深度或距离。此外,通过对两幅图像的视差进行分析,能够消除观察角度和位置变化带来的图像失真和信息缺失。双目视觉横向观测模型如图 1 所示,该相机由 2 个单目相机组成, Camera 1、Camera 2 分别代表左、右相机,它们以不同的角度和位置观察同一个物体 $P(X_w, Y_w, Z_w)$ 。在同一时刻分别获取两幅数字图像,即 P 点分在 Camera 1、Camera 2 相机的图像坐标系上获取的对应二维坐标,分别为 $P_{left} = (X_{left}, Y_{left})$; $P_{right} = (X_{right}, Y_{right})$ 。通过该成像平面间的投影和视差关系,可以获取物体的空间信息。

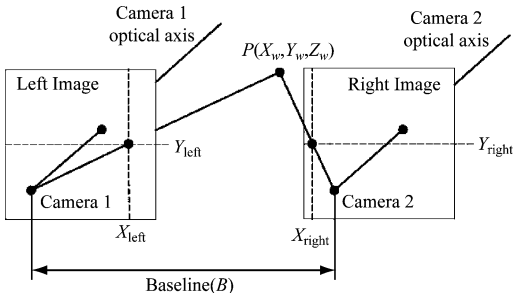


图 1 双目视觉横向观测模型

1.2 振动信息的提取与处理

在矿用车辆受到煤矿巷道路面的不平度的激励时,矿车会同时出现跳动和俯仰的响应^[15]。为解决

单纯依赖计算机视觉的图像分析技术无法有效提取车身振动信息这一问题,可利用惯性测量单元同步采集的相机姿态角信息,通过解算相机视野与距离的关系进行车身运动解耦,从而有效地提取车身振动信息。车身振动信息提取流程如图 2 所示。

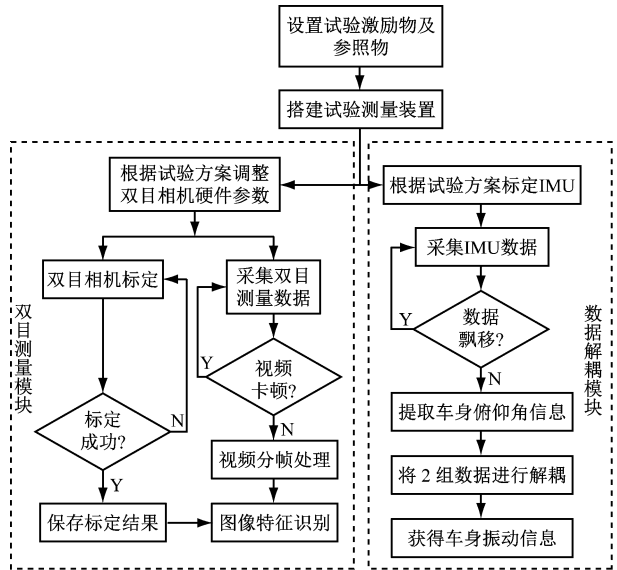


图 2 矿车垂直方法的振动信息提取流程

在煤矿巷道中,矿车的动态响应与相机视野变化由于路面不平度而产生耦合效应。为了分析这个问题,将矿车在巷道中的运动过程分为不同的刚体运动阶段。当矿车在巷道中遇到不平整路面时,若前轮(后轮)完全抬起,车身(包括相机)会发生一个耦合运动,这种运动是由车身的动态响应引起的,相机也必须跟随车身的运动进行相应的姿态调整。为了解车身运动和相机视野的变化,可通过采集惯性测量单元同步的相机姿态角信息进行分析。通过这种方式,可更加精确地提取出车身振动信息,从而对矿车动态响应和相机视野变化进行分析。

2 模态特征识别与分析

2.1 随机子空间识别法

SSI 通过观测系统的输出响应数据,就能够推断系统的动态特性,无需直接测量无法观测的输入激励,即利用输出响应数据中的信息来反推系统的动态特性,包括系统的频率、振型及阻尼比^[16-17]。

然而,在实际矿井巷道环境中,通常无法直接测量巷道路面环境状况产生的环境激励,因此,激励信号往往是随机的,且无法作为系统输入被直接观测。同时,激励信号的强度与噪声的影响非常相似,很难将其区分开。因此,在进行系统识别时需将它们合并,将输入项和噪声项一起考虑,得到系统的离散随机状态空间方程。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \boldsymbol{\omega}_t \\ \mathbf{y}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x}_{t+1}$ 为 $t+1$ 时刻系统的状态向量; $\mathbf{A}$ 为包含系统的特征信息的离散状态矩阵; $\mathbf{x}_t$ 为系统的状态向量; ω_t, v_t 分别为 t 时刻的输入噪声和测量噪声; $\mathbf{C}$ 为对应输出矩阵; $\mathbf{y}_t$ 为系统的输出向量。

在煤矿巷道的环境振动测试过程中,选取适当的参考点和灵活布置传感器,可最大限度地利用有限数量的传感器来获取全面的环境振动数据,进而得到系统的特征信息,现选取 k 个测点(信噪比较好)作为参考点,并在参考点位置上安装传感器,且保持它们在整个测量过程的位置固定,不受移动或变动的影响,进行连续的数据采集,以保证在整个测量过程中,参考点上的传感器所采集的数据是可靠和连续的。其他分布在不同位置的传感器,则在测量过程中进行移动和布置,以获取更全面的环境振动数据,帮助我们更好地采集煤矿巷道的振动特性。

$$\mathbf{y}_k = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_k^{\text{ref}} \\ \mathbf{y}_k^{-\text{ref}} \end{bmatrix} \tag{2}$$

式中: $\mathbf{y}_k^{\text{ref}}$ 为参考点输出向量; $\mathbf{y}_k^{-\text{ref}}$ 为非参考点的输出向量。

由输出的 N 个测点采样数据构成的 Hankel 矩阵,当传感器采集到的数据全部用到时,且当 j/i 足够大时,可认为 j 为无穷大。将 Hankel 进行奇异值分解,得到矩阵为

$$\begin{cases} \mathbf{P}_i^{\text{ref}} = \begin{bmatrix} R_{21} \\ R_{31} \\ R_{41} \end{bmatrix} \mathbf{Q}_i^T \in R^{li \times j} \\ \mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} = \begin{pmatrix} R_{41} & R_{42} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{Q}_i^T \\ \mathbf{Q}_2^T \end{pmatrix} \in R^{l(i-1) \times j} \end{cases} \tag{3}$$

式中 $\mathbf{P}_i^{\text{ref}}$ 为投影矩阵。

根据随机子空间理论可知,将投影矩阵 $\mathbf{P}_i^{\text{ref}}$ 进行分解:

$$\begin{cases} \mathbf{O}_i = \mathbf{U}_i \mathbf{S}_i^{1/2} \\ \mathbf{O}_{i-1} = \mathbf{O}_i (1:1(i-1), :) \\ \hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{O}_i^+ \mathbf{P}_i^{\text{ref}} \\ \hat{\mathbf{X}}_{i+1} = \mathbf{O}_{i-1}^+ \mathbf{P}_{i-1}^{\text{ref}} \end{cases} \tag{4}$$

式中: $\mathbf{O}_i$ 为观测矩阵; $\mathbf{O}_{i-1}$ 为拓展的广义观测矩阵, $\mathbf{X}_i, \mathbf{X}_{i+1}$ 为卡尔曼滤波状态序列。

对上式离散随机状态空间进行求解可得到:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{ii} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i^+ \tag{5}$$

噪声系列可表示为

$$\begin{pmatrix} \omega_i \\ v_i \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{ii} \end{bmatrix} - \begin{pmatrix} \mathbf{A} \\ \mathbf{C} \end{pmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i \tag{6}$$

2.2 振动模态分析

建立模态特征识别算法,得到的整车动力学模

型系统的特征信息见表 1。模态振型如图 3 所示。

表 1 整车动力学模型特征信息

特征	固有频率/Hz	阻尼比/%	特征	固有频率/Hz	阻尼比/%
跳动	1.16	23.97	右前	14.97	16.19
俯仰	3.10	64.05	左后	14.98	16.34
侧倾	1.29	26.67	右后	15.09	16.07
左前	14.39	16.92			

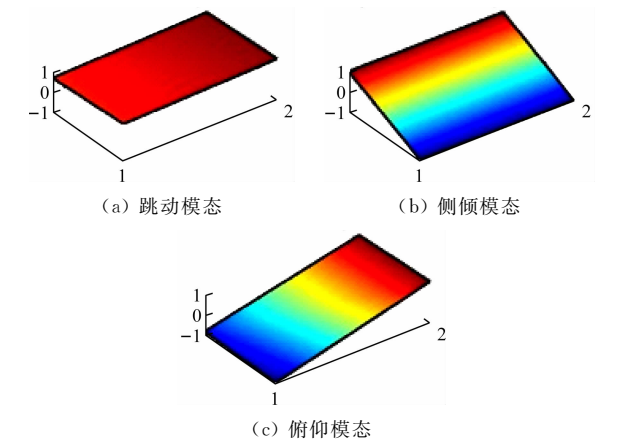


图 3 车身模态振型

状态矩阵 $\mathbf{A}$ 分解后得到特征向量矩阵 Ψ 决定了系统状态向量中各参数的振型,可反映车身振动在各个固有频率下的姿态。

$$\begin{cases} \phi_a = \psi_1 - l_1 \psi_2 + l_3 \psi_3 \\ \phi_b = \psi_1 - l_1 \psi_2 - l_3 \psi_3 \\ \phi_c = \psi_1 + l_2 \psi_2 + l_3 \psi_3 \\ \phi_d = \psi_1 + l_2 \psi_2 - l_3 \psi_3 \end{cases} \tag{7}$$

式中: $\phi_a, \phi_b, \phi_c, \phi_d$ 分别为车身质心处的振型投影到车身的 4 个角时振动姿态; ψ_1 为车身质心处的跳动; ψ_2 为车身质心处的侧倾; ψ_3 为车身质心处的俯仰的振型。

由图 3 可看出,在矿车的正常行驶过程中,其左、右两侧的模态振型总是相同的,侧倾运动表征并不明显,因此可通过分析矿车悬架在跳动、俯仰 2 类模态中振型变化来进一步实现故障诊断。

3 故障与模态特征之间的仿真验证

3.1 刚度变化仿真情况分析

悬架弹簧是连接车身与车桥的重要组成部分,其具有承受和传递车身动载荷的功能,且能够有效减缓路面不平带来的颠簸感。当悬架弹簧的刚度发生变化时,系统如频率、振型和阻尼比等方面的各个模态参数也会发生不同的变化,例如,当悬架弹簧的刚度减小时,导致系统的自然频率下降,振型形状可能发生变化,阻尼比可能增加或减小。因此,通过分析模态参数的变化规律,可实现对悬架系统状态的监测和故障的诊断^[18-19]。

以矿车右后悬架为例,通过逐步降低模型刚度矩阵中对应的悬架弹簧刚度来模拟故障,并分析模态参数变化。当对应弹簧刚度从正常状态降低至 50%时,模拟悬架弹簧故障时模态参数结果如图 4 所示。可看出一阶跳动模态的频率下降且阻尼比增加,表明矿车的垂直振动变得更缓慢且受到的阻尼效果增强。二阶侧倾模态的频率也随着右后悬架弹簧刚度的降低而下降,同时振型的形状可能发生变化。这表示矿车的侧倾运动受到右后悬架弹簧故障的影响,并可能存在稳定性问题。三阶俯仰模态的频率和振幅都会随着右后悬架弹簧刚度的降低而增加。这可能引起矿车加速和制动时的前后倾斜运动增加,影响驾驶员的操控性。从图 4(a)可看出,随着弹簧刚度的下降,三阶模态的固有频率都有不同

程度的下降,对俯仰模态的影响最明显,其频率下降了 0.25 Hz。该现象可能导致矿车在车速变化、加速和制动等情况下产生过大的前后倾斜运动,从而影响矿车的行驶安全性和驾驶员的驾驶舒适性。从图 4(b)图可看出,系统三阶模态的阻尼比随着故障弹簧的刚度下降均有所上升,其中俯仰模态的阻尼比变化率最大,说明俯仰模态的振动在受到故障弹簧影响时更容易被耗散,这可能会导致矿车在行驶过程中的前后倾斜运动受到的控制降低。从图 4(c)可看出,与其他两种模态参数相比,模态振型变化更为明显,其中跳动模态变化率达到了 3%,这意味着在故障弹簧刚度下降的情况下,矿车的垂直振动模式发生了显著变化,可能导致矿车在行驶过程中出现更加剧烈的垂直振动。

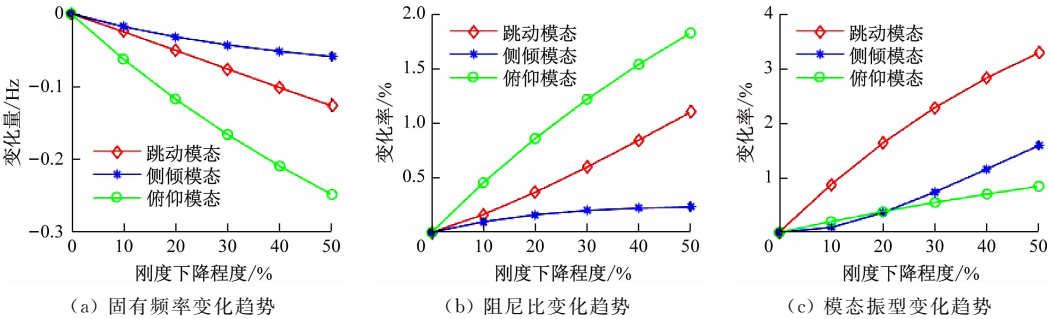


图 4 模拟悬架弹簧故障时模态参数结果

3.2 阻尼变化仿真情况分析

悬挂系统中的减震器通过其套筒内的阻尼液变化,可吸收路面不平度引起的振动冲击,其性能好坏直接影响矿车整体的舒适性^[20-21]。因此,对悬挂减震器的阻尼故障进行仿真,将阻尼矩阵中的右后悬

架阻尼值逐次降低至 50%,模拟阻尼故障时模态参数结果如图 5 所示。可看出随着减震器阻尼值不断下降,俯仰模态中的固有频率及阻尼比均有较为明显的下降;但阻尼值的变化对跳动和侧倾模态的影响相对较小,固有频率和阻尼比的变化不明显。

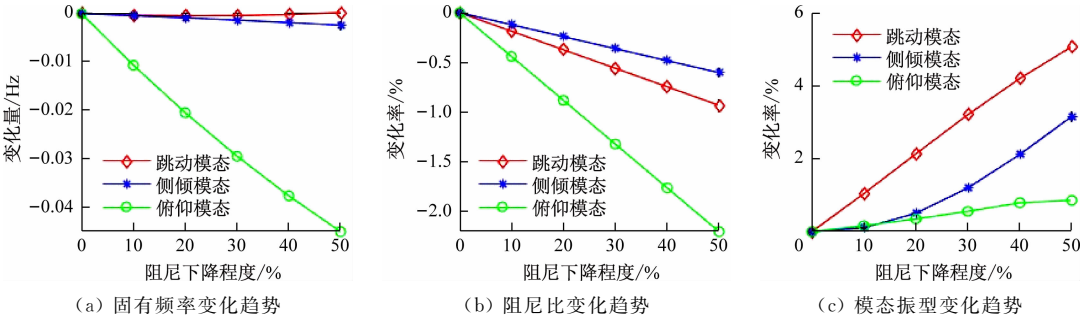


图 5 模拟阻尼故障时模态参数结果

3.3 胎压变化仿真情况分析

为了对轮胎胎压故障进行仿真,模拟当轮胎胎压降低时对轮胎的侧偏特性影响,进行胎压变化与模态参数之间关系的仿真实验。仿真过程中不考虑轮胎的实际胎压参数,而是将轮胎刚度作为替代变量,并采用降低轮胎刚度来间接模拟轮胎胎压下降的效果。通过将轮胎刚度矩阵中右后轮的刚度依次从 0 降低至 50%来模拟胎压故障,间接地反映轮胎胎压故障对矿车行驶特性的影响,模拟车轮胎压降低时模态参数结果如图 6 所示。可看出随着胎压的

持续下降,系统的三阶模态中的固有频率和阻尼比均有所降低。其中俯仰模态的变化最为显著,固有频率从胎压正常时的数值下降到了 0.3 Hz,阻尼比下降了 2%,意味着在胎压故障的影响下,矿车前后倾斜方向上的振动频率降低了,同时振动的能量耗散效果也减弱。在跳动模态中,虽然固有频率和阻尼比也有下降,但相对于俯仰模态的变化来说,变化程度较小。固有频率的下降幅度为 2.5%,说明胎压故障对矿车的垂直振动特性的影响不如俯仰模态明显。

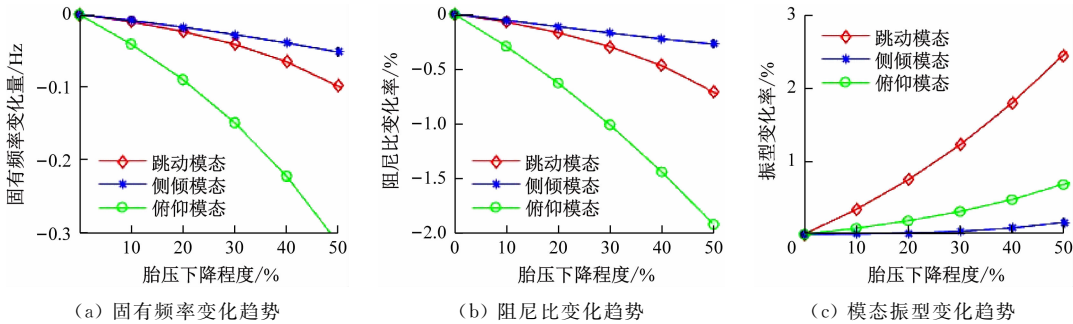


图 6 模拟车轮胎压降低时模态参数结果

4 结论

1) 通过双目摄像机采集惯性测量单元同步的相机姿态角信息,解耦车身运动和相机视野的变化,从而更加精确地提取出车身振动信息。

2) 提出了适用于煤矿井下矿车的 SSI 模态识别方法,可在没有外部激励数据的情况下,仅通过响应信号来识别模态特征。该方法不仅能够在实际应用中提高井下矿车车辆状态监测与故障诊断的精度和效率,而且能够降低数据采集难度和成本。

3) 模拟矿车悬架刚度、减震器阻尼及轮胎刚度的不同程度故障,并分析不同故障与矿车跳动、侧倾以及俯仰三阶模态的关系。

参考文献:

[1] 李军鸿. 矿井电机车安全防护系统设计[J]. 工矿自动化,2016,42(6):77-79.

[2] 刘猛,刘辉荣. 电动轮矿车牵引电机的应用现状与发展趋势[J]. 工程机械,2022,53(2):91-94,11.

[3] 蒋荣超,刘大维,王登峰. 基于熵权 TOPSIS 方法的整车动力学性能多目标优化[J]. 机械工程学报,2018,54(2):150-158.

[4] 刘晋霞,王莉,刘宗锋. 四驱电动轮汽车模糊逻辑控制的再生制动系统[J]. 机械设计与制造,2021(12):164-168.

[5] 何仁,朱思宇. 考虑最大制动能量回收功率的再生制动模糊控制[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(1):1-11.

[6] 邢志伟,毕凤荣,马小强,等. 纯电动汽车的复合制动系统多目标控制研究[J]. 机械科学与技术,2020,39(12):1805-1812.

[7] 王俊. 煤矿井下煤流运输智能视频调速系统[J]. 工矿自动化,2023,49(增刊 2):33-35.

[8] 马季,聂文武,郝玲琴. 基于有限元分析的矿车后油气悬架系统优化[J]. 煤矿机械,2016,37(7):129-131.

[9] 熊志远,赵娜,赵阳,等. 六参数对矿车振动影响规律的理论探讨[J]. 机械研究与应用,2023,36(2):115-120,124.

[10] 徐达,周诚,关鑫,等. 基于 ARMA-BP 组合模型的装

备故障率预测方法[J]. 火力与指挥控制,2021,46(1):83-87.

[11] 颜诗旋,朱平,刘钊. 基于改进 LightGBM 模型的汽车故障预测方法研究[J]. 汽车工程,2020,42(6):815-819,825.

[12] GENG Zhiqiang, YANG Ke, HAN Yongming, et al. Fault detection of large-scale process control system with higher-order statistical and interpretative structural model[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering,2015(1):146-153.

[13] 李郁峰,韩肖清,李琴,等. 基于双目立体视觉的地面军用机器人障碍物检测[J]. 中北大学学报(自然科学版),2022,43(6):481-487.

[14] 闫小宇,陆凡凡,葛芦生,等. 基于双目立体视觉系统的测量研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2023,40(3):48-55.

[15] 边泽英,赵鸿铎,彭科迪,等. 基于分布式振动传感的车辆轴载感知方法[J]. 同济大学学报(自然科学版),2023,51(8):1157-1167.

[16] 章国稳,汤宝平,孟利波. 基于特征值分解的随机子空间算法研究[J]. 振动与冲击,2012,31(7):74-78.

[17] JAIN S K, JAIN P, SINGH S N. A fast harmonic phasor measurement method for smart grid applications[J]. IEEE Trans Smart Grid,2017,8(1):493-502.

[18] REYNDERS E, MAES K, LOMBAERT G, et al. Uncertainty quantification in operational modal analysis with stochastic subspace identification: validation and applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2016(66/67):13-30.

[19] 王愿望,乔美英. 基于负载变化的纯电动矿车驱动转矩优化控制策略研究[J]. 汽车实用技术,2023,48(21):36-42.

[20] 毕凤荣,石纯放,梁永勤. 悬架系统非线性减振器阻尼值变化系数对整车振动影响的研究[J]. 机械科学与技术,2017,36(9):1421-1427.

[21] 肖望强,邵堃. 基于粒子阻尼的高速动车组侧墙蒙皮减振研究[J]. 铁道科学与工程学报,2023,20(9):3251-3261.