

文章编号:1671-251X(2024)S1-0156-05

基于 NSGA-II 的矿车复合制动 多目标优化控制分析

于海龙

(国能神东煤炭集团有限责任公司 机电管理部, 陕西 榆林 719315)

摘要:矿车是煤矿、采石场和建筑工地等重型工业领域的主要运输工具之一,目前矿车制动系统大多采用约束控制的模式对制动转矩进行分配,虽然利用这种处理模式能够改善制动回收性能,但相对实际制动工况具有较大偏差以调节前后轴的制动力。针对上述问题,设计了一种基于非支配排序遗传算法 II(NSGA-II)的矿车复合制动多目标优化控制策略。该策略考虑矿车制动过程造成的干扰,按照多目标优化的方式获得不同状态下的决策最优参数,实现复合制动转矩分配并建立帕累托(Pareto)解集;利用优化后的理想解法实施决策,可确定最佳输出参数,获得与制动需求相符的转矩分配结果;同时,设计了模糊控制器,实现了矿车制动能量的高效回收。通过开展控制策略转矩分配仿真分析可知,进行决策分析时,利用基于 NSGA-II 的矿车复合制动多目标优化控制策略能够回收更高比例的制动能量,促进制动回收性能的明显提升,在较低强度制动下获得更优的制动能量回收效果,相对单独的模糊控制策略具备更优综合性能,完成预期制动力的分配。

关键词:NSGA-II 算法;矿车复合制动;多目标优化;模糊控制

中图分类号:TD524 文献标志码:A

Analysis of multi-objective optimization control of mine vehicle compound brake based on NSGA-II

YU Hailong

(Electromechanical Management Department, CHN Energy Shendong Coal Group Co., Ltd.,
Yulin 719315, China)

0 引言

矿车作为一种专门用于矿井内运输煤炭和矿石的交通工具,是煤矿安全生产的重要组成部分^[1-4]。为了保证能够顺利开展生产,矿车需具备稳定、安全、高效的运输能力,能够满足对于煤炭和矿石快速、稳定提运的需求。矿车的设计和制造及控制方法需经过严格的质量标准和安全检验^[5],以确保其可靠性和承载能力,为工人们提供一个安全、高效的工作环境。

矿车制动过程中会产生大量的动能,如果不能有效地回收和利用这些能量,将会导致能源的浪费和环境的污染,为了实现矿车节能、高效的控制目标,可通过设置适当的制动控制模式来回收制动过程中明显损耗的运动能量,从而显著提升矿车的续

航里程^[6-7]。因此,在制动控制方面需进行技术创新和改进,以提高制动能量的回收和利用效率。目前,针对矿车制动系统,大多采用约束控制的模式对制动转矩进行分配^[8],以调节前后轴的制动力,减少制动能量的损耗和浪费,提高能量回收效率,从而显著提升矿车的续航里程^[9-11],虽然利用这种处理模式能够改善制动回收性能,但会大幅降低系统稳定性。文献[12]针对电动汽车制动时车轮抱死的问题,利用电动机制动的优势,设计出电动机制动 ABS 控制系统。首先建立了无刷直流电动机制动模型和车辆纵向动力学模型,然后基于模糊 PID 控制策略,以理想滑移率为控制目标,设计了电动机制动 ABS 双闭环控制系统。仿真结果表明:控制系统能够实现控制滑移率的目标,系统响应迅速、精度高,且能够实现能量回收。搭建了模拟电动机制动的硬件在

收稿日期:2024-01-25;编辑:郑海霞。

作者简介:于海龙(1981—),男,满族,辽宁抚顺人,工程师,从事煤矿机电管理工作,E-mail:290278497@qq.com。

环试验系统,对控制系统和仿真结果进行了验证,结果表明虽然时间制动效果相对理想值存在波动,但波动幅值处于合理范围内。文献[13]提出一种模糊逻辑控制的再生制动控制策略,该控制策略能延长行驶里程 13%,并有效降低运动过程中的速度差。但利用上述方法进行处理时需结合之前的经验建立隶属度函数并确定合适的模糊规则,导致转矩分配性能减弱的结果。因此,多目标优化依旧是矿车控制的研究热点,通过多目标优化方式进行复合制动时,可根据矿车运行工况变化情况进行灵活调节^[14-16]。部分研究人员采用复合制动技术,将多种制动方式结合起来,使矿车制动系统达到更稳定的状态,并有效回收制动能量^[17-20]。文献[21]研究了制动能量回收的功率变化规律,引入神经网络方法对再生-液压混合制动过程进行系统控制,实现了制动能量回收率的提升。但是,按照以上决策的方式并不能达到最优结果,相对实际制动工况具有较大偏差。

针对上述问题,本文采用多目标分析与模糊控制方案对制动转矩进行分配。首先,采用多目标优化的方式实现复合制动转矩的分配,从而建立帕累托(Pareto)解集。然后,在达到最优 Pareto 解集后,利用改造后的理想解法实施,以确定最佳输出参数。最后,将上述结果传输至电动机和制动部件,以获得符合制动需求的转矩分配结果。

1 复合制动多目标优化模型

复合制动由机械和电动机共同作用,开始形成制动力,当需要降低速度或停车时,可在不同的制动需求下降电极,使电动机切换成发电机模式,将制动动能转换为电能实现回收,这种回收制动能的方法大幅提高了矿车续航里程,同时也降低了机械部件在制动阶段发生的磨损程度,能够显著降低制动故障发生的几率。此外,该复合制动系统可根据不同的制动需要进行智能控制,包括机械制动和电动制动的转换,从而使制动效果更为准确和有效。考虑到不同车速下及制动效果发生变化时都会对电动机的控制性能产生较明显影响,仅使用制动力矩不能独立对制动部件发挥作用。而且,由于电动机产生制动力时,还会造成原先的机械摩擦制动效果发生变化,为获得更稳定的制动效果并保障安全性,需对复合制动过程的转矩进行合理控制,从而获得最优制动转矩^[22]。

在制动阶段回收能量时,应根据制动需求选择电动机制动模式。逐渐增大前轴制动力,有助于制动过程中回收更多的制动能量。然而,因无法同时实现制动能量回收和最佳制动效果的最优解,这种制动模式可能会降低系统的稳定性。

2 多目标优化问题

2.1 控制变量的选取

通过使用矿车运行控制过程动力学原理对控制变量进行分析,发现分配系数对矿车的制动稳定状态存在直接作用,当电动机的制动力矩发生改变后,实际回收的能量比例及系统控制稳定性都会出现较大差异。以实现矿车优化节能为目标,对机械制动效果与电动机制动力之间的相互影响程度开展深入研究,得到控制变量 X 的具体表达式。

$$X = [\beta_r, T_m]^T \quad (1)$$

式中: β_r 为轴制动力分配系数; T_m 为电动机电力矩。

2.2 目标函数

当附着系数不断接近制动强度要求时,能量的回收比例逐渐增加,同时提升了整体控制过程的稳定性。通过对矿车最优控制状态进行分析可知,要达到最理想的安全控制效果,应确保附着系数跟制动强度之间呈现相互平衡的状态。以该原则为基础,得到控制矿车达到稳定制动效果的最优函数表达式:

$$\min f_1 = \sqrt{(\varphi_f - z)^2 + (\varphi_r - z)^2} \quad (2)$$

式中: f_1 为制动效果目标函数; φ_f 为前轴附着系数; φ_r 为后轴的附着系数; z 为制动强度。

2.3 约束条件

通过分析矿车制动过程可知,调节电动机电力矩 T_m 达到电动机控制过程所需的约束参数,可满足最大输出转矩限制范围。

$$\begin{cases} T_m \leq T_{p\max} \\ T_{p\max} = \begin{cases} \frac{9\,549.3 \times P_{\max}}{n_0}, n \leq n_0 \\ \frac{9\,549.3 \times P_{\max}}{n}, n > n_0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中: n_0 为电动机基速; n 为电动机转速; $P_{\max}$ 为电动机最大充电功率。

最终,得到制动力分配系数 β 表达式:

$$\beta = \beta_r + \frac{T_m}{T_b} \quad (4)$$

式中 T_b 为约束条件下前轴最大转矩。

3 多目标优化 NSGA-II 算法

为了获得标准结构的非支配排序遗传算法 II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II),基于非支配排序遗传算法进行调整。首先,非支配排序是 NSGA-II 算法的核心,用于确定每个个体在种群中的非支配等级,可通过比较个体之间的目标函数值来进行排序,评估每个个体的优

劣程度,实现优胜劣汰。其次,修改交叉和变异操作以适应非支配排序的需求。在交叉操作中引入一些新的策略(使用模拟二进制交叉或分布式交叉算子),以确保生成的子代个体保持一定的多样性。在变异操作中引入如高斯变异或多项式变异,通过增加系统的随机性,来进一步增加种群的多样性。然后,对种群进行选择操作,从父代和子代中选择合适的个体形成下一代种群,该过程是基于非支配排序和拥挤度距离开展的,多方面衡量一个个体周围的个体密度,从而确保尽可能保留种群中的多样性。最后,以迭代次数或收敛程度为基础,定义停止准则决定何时终止算法的条件。

本文构建了 NSGA-II 遗传算法对矿车运行控制过程的复合制动转矩分配进行多目标匹配,同时设置了 Pareto 解集,对应算法处理的流程如图 1 所示。

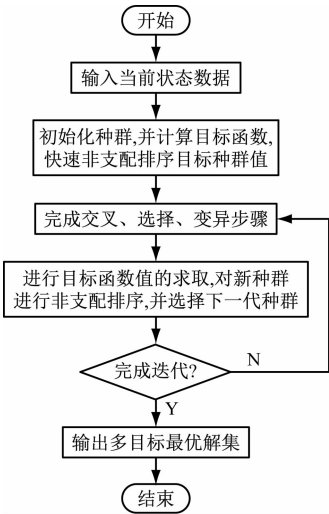


图 1 NSGA-II 多目标优化流程图

算法在实施优化的过程中,设置初始种群的数量为 100 个,以 100 次最大迭代次数座位算法的停止准则,并控制交叉因子和变异因子为 20 的情况下实施优化后的迭代计算。

车速 $V=60\text{ km/h}$ 并保持制动强度为 $z=0.3$ 时,利用多目标优化方法进行处理所得的结果如图 2 所示。

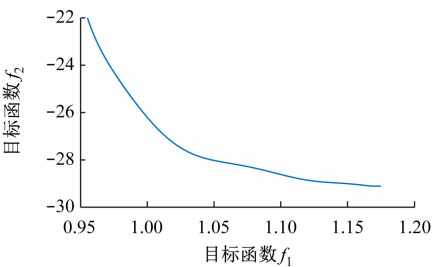


图 2 多目标优化结果

系统决策流程如图 3 所示,多目标优化处理后

得到了均匀最优解,各点依次对应 Pareto 解,每个 Pareto 解在优劣性方面基本接近,优化其中的 1 个目标时会引起其他目标发生了性能下降的结果,因此需利用合理的决策操作方法选择最优解。

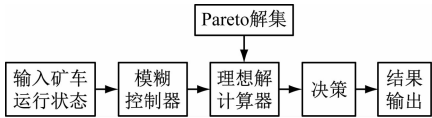


图 3 决策流程

4 仿真实验

4.1 实验模型

为了对本文多目标优化与模糊决策进行有效性验证,搭建以 Simulink 和 Cruise 共同建立仿真系统,如图 4 所示。先通过 Simulink 编写控制程序,接着利用 Cruise 软件设置矿车整车模型,同时设置了 API 接口开展联合仿真。在典型运行工况下设计了仿真测试方案,比较了各类控制模式下获得的分配效果。

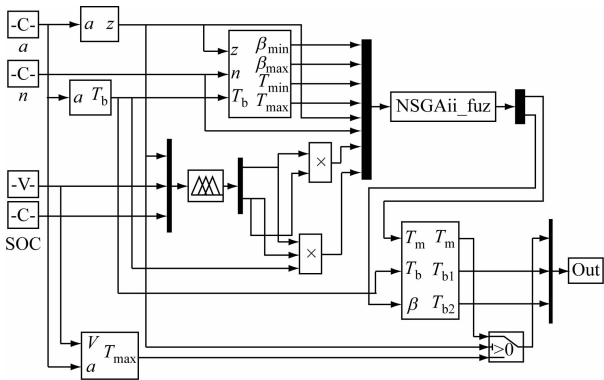


图 4 Simulink 控制模型

矿车的运行性能参数见表 1。

表 1 矿车参数

参数	值
整车质量/kg	1 020
轴距/mm	2 450
质心到前轴距/mm	1 220
质心高度/mm	480
迎风面积/m ²	1.80
电动机最大功率/kW	65
电池组容量/Ah	10
电池组最小和最大电压/V	220,420
电池个数	5
电池初始 SOC	0.5
车轮半径/mm	295

4.2 控制策略的转矩分配结果验证

针对矿车各制动强度对应的制动安全范围具有

较大差异这一情况,为了对不同制动强度下 Pareto 解集决策变化开展探讨,将制动强度控制在 $z=0.7$ 时,分析不同环境下出现紧急制动的结果,得到前后轴制动控制分配结果,如图 5 所示。其中,M 曲线模拟车辆在路面湿滑环境下的制动性能,反映在湿滑路面上发生紧急刹车的制动情况;I 曲线描述车辆在干燥、平坦的路面上制动时的情况;F 曲线反映的是车辆在典型道路状况(如干燥的钢铁铺装路面)上制动时的特点。

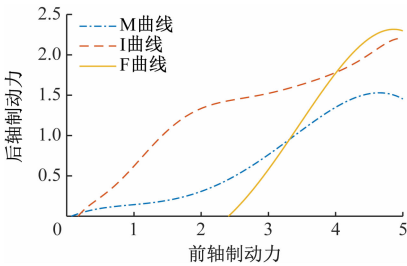


图 5 前后轴制动力控制分配

为了验证对多目标优化方法计算得到的 Pareto 解对不同决策模式实施转矩分配的加效果。在车速 $V=60\text{ km/h}$ 的状态下,将制动强度 z 逐渐增大到 0.60,设定步长为 0.01,作为对比,设置了平均赋权、客观赋权、模糊决策 3 个决策方案,其中,方案 1 平均赋权基于等权值赋权的模式建立,方案 2 客观赋权是经过客观赋权的目标函数集确定的理想值,其中采用了标准差权数确定客观权数,方案 3 模糊决策为本文控制策略,采用模糊控制的方法完成理想值的决策优化。

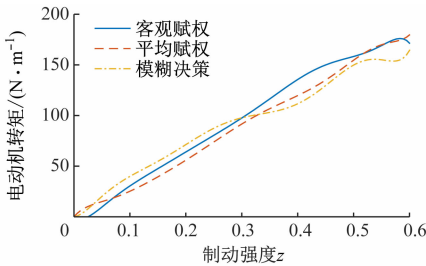


图 6 电动机转矩输出值

由图 6 可看出,方案 1 平均赋权符合稳定性和回收性的控制条件,总制动转矩较小,无法实现对不同矿车工况的转矩调节;方案 2 客观赋权更重视能量的回收效果,整体输出曲线接近线性,而将稳定性置于较弱的地位;方案 3 模糊决策在较低的制动强度下具有较高的制动转矩,而在高制动强度下达到更低制动转矩,满足很高制动稳定性,提高制动回收效率。

4.3 联合仿真验证

进行决策分析时,考虑矿车制动过程造成的干扰,决策获得最优参数,从而完成对转矩进行分配的

过程。根据欧洲新行驶循环工况进行联合仿真,对各类决策方法和采用单独模糊控制方式回收制动能量,结果见表 2。可看出方案 3 模糊决策策略在较低强度制动情况下能够获得更好的制动能量回收效果,可回收更高比例的制动能量,明显提升制动回收性能,具备更优综合性能。该策略能够完成预期制动力的合理分配,使矿车更加平稳地刹车,同时回收更多的制动能量,提高能效,降低油耗。

表 2 制动能量回收情况

控制方案	制动能量/kJ	提高率/%
方案 1	785.2	—
方案 2	948.1	29.1
方案 3	1 196.7	42.5
单独模糊控制	1 056.4	33.4

5 结论

1) 在矿车决策分析阶段,考虑到车辆制动因素对车辆稳定性的影响,确定了矿车制动过程的优化目标函数及约束条件。

2) 进行决策分析时,考虑矿车制动过程造成的干扰,以 NSGA-II 遗传算法对矿车运行控制过程的复合制动转矩分配进行多目标匹配决策,获得最优参数,从而完成转矩的分配过程。

3) 相比于单独模糊控制策略,模糊决策控制策略制动能量回收性能得到明显的提升,在低强度制动时能够获得更好的制动能量回收效果,制动能量回收率提高了 42.5%,具备更好的综合性能。

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] 靳舒凯,魏冠楠,王春明,等. 煤矿副井矿车装载物智能识别方法[J]. 工矿自动化,2022,48(4):14-19,30.

[3] 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.

[4] 汪学松. 纯电动矿车驱动与充电一体式主电路设计[J]. 工程机械,2023,54(10):83-88,10.

[5] MA Mianmin, WU Xiaorui, ZHANG Yongqiang. Research on maintenance strategy of coal mining vehicle based on RCM[J]. Applied Mechanics and Materials,2014,3082(543/547):126-129.

[6] 张明军,李睿鑫,段维. 重载矿车用锂离子电池包随机振动可靠性研究[J]. 矿冶工程,2023,43(4):178-181.

[7] 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.

[8] 宋强,万海桐,米玉轩,等. 纯电动汽车加速过程中的驱动转矩优化控制策略[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2017,38(1):1-6.

[9] 刘刚,陈树新. 电传动矿车动力系统非电量在线测量技术[J]. 仪表技术与传感器,2014(2):108-110.

[10] 方桂花,王鹤川,曾标,等. 电机发电特性优化再生制动控制策略的方法[J]. 机械设计与制造,2021(1):134-137.

[11] 赵向阳,吴启斌. 基于 CLTC 工况的纯电动汽车单踏板再生制动系统经济性研究[J]. 机械传动,2021,45(5):26-31.

[12] 陈综合,高鉴,陈庆樟. 基于模糊 PID 的电动汽车电机制动 ABS 控制研究[J]. 机械设计与研究,2018,34(1):145-149.

[13] 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.

[14] 陈茂林,曹家伟. 基于 Ansoft 的电机机械制动用电机仿真方法[J]. 中国工程机械学报,2021,19(5):390-395.

[15] INOSTROZA F,TSUNEKAWA I P,SOLAR J R D. Robust localization for underground mining vehicles: an application in a room and pillar mine[J]. Sensors, 2023,23(19). DOI:10. 3390/S23198059.

[16] 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):150-1588.

[17] 刘汉武,雷雨龙,付尧,等. 基于多目标优化的增程式电动汽车自适应制动回馈控制策略[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2021,49(7):42-50,65.

[18] 刘士士,谷正气,伍文广,等. 基于响应面方法的车辆多目标协同优化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2012,43(7):2586-2592.

[19] 王程玉,林慕义,吴柯桐,等. 负载变化对纯电动货车驱动控制策略的影响[J]. 机械设计与制造,2022(2):148-151.

[20] 张民安,储江伟,李春雷. 结合遗传算法的四轮毂电机电动汽车制动能量回收控制策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2021,35(10):77-84.

[21] 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.

[22] 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.

(上接第 133 页)

[5] WANG Guimei, LI Xuehui, YANG Lijie. Dynamic coal quantity detection and classification of permanent magnet direct drive belt conveyor based on machine vision and deep learning[J]. International Journal of Pattern Recognition & Artificial Intelligence,2021,35(11):1-17.

[6] 李文兵,李丽宏,范正兵. 脉冲式激光测距传感器温度补偿研究[J]. 现代电子技术,2021,44(20):69-73.

[7] 朱涛. 基于机器视觉的变速发电动机轴承故障自动检修系统设计[J]. 自动化与仪器仪表,2020(12):153-156.

[8] 刘仓,童靳于,包家汉,等. 基于多传感器两级特征融合的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击,2022,41(8):199-207,259.

[9] 郭俊锋,樊怡明. 一种滚动轴承振动信号自适应数据级融合方法[J]. 机械设计与制造工程,2022,51(12):98-103.

[10] 种磊. 带式输送机在线监测与故障诊断系统的研究与应用[J]. 煤矿机械,2022,43(7):152-155.

[11] 徐丽娜. 带式输送机纵撕断带断丝监测系统应用[J]. 机械研究与应用,2022,35(6):190-192,196.

[12] 宋钦一. 基于故障树和贝叶斯网络的带式输送机故障诊断[J]. 矿山机械,2022,50(9):55-58.

[13] 刘永辉. 胶带输送机自动化优化设计应用[J]. 机械研究与应用,2022,35(3):148-150.

[14] LIU Qi,HUO Baiqi,LIU Yunsheng,et al. A study on diesel engine crankshaft bearing failure analysis with consideration of bearing lubrication [J]. Industrial Lubrication and Tribology,2022,74(1):118-126.

[15] 丁秀荣,薛正福,王芝兰. 矿用带式输送机滚筒故障检测系统应用研究[J]. 能源与环保,2022,44(4):205-210.

[16] 张承森. 带式输送机噪声来源分析及降噪方法研究[J]. 煤炭科学技术,2017,45(增刊2):101-103.

[17] 贾志鹏. 带式输送机低噪声托辊性能特性研究[D]. 太原:太原科技大学,2021.

[18] 李席岳. 主斜井煤矿带式输送机动态特性研究[J]. 机械研究与应用,2023,36(3):140-142.

[19] 刘尧青. 带式输送机降噪优化设计研究[J]. 机械管理开发,2021,36(9):325-326.

[20] 刘乐姗. 卷积神经网络模型压缩的算法优化研究[D]. 石家庄:河北经贸大学,2020.

[21] 谭紫龙. 基于混合神经网络模型的故障预测技术的研究[D]. 南京:南京邮电大学,2020.