

计及蓄电池的高速磁浮辅助停车区位置研究

田毅,吴冬华,耿书恒,肖石,薛健康

(中车青岛四方机车车辆股份有限公司,山东 青岛 266111)

摘要:高速磁浮列车在辅助停车区进行故障排除后,必须保证其车载蓄电池电量能够满足到达下一个辅助停车区才能允许发车。对高速磁浮列车运行方式、列车运行过程中的车载蓄电池的能量消耗进行分析,建立计及蓄电池的高速磁浮辅助停车区设置方法;采用牵引加速度、滑行减速度、涡流减速度进行车速曲线计算,并计算出不同蓄电池电量下辅助停车区的设置位置。计算结果证明,该方法可使高速磁浮系统避免列车在维护运行时由于车载蓄电池电量不足导致的异常落车事故发生。

关键词:高速磁浮;车载蓄电池;辅助停车区;速度曲线

中图分类号:U237 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2021)03-0193-04

High Speed Maglev Assist Stop Area Position Research Considering of Battery

TIAN Yi, WU Donghua, GENG Shuheng, XIAO Shi, XUE Jiankang

(CRRC Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266111, China)

Abstract: In high-speed maglev system, after the system diagnostics process and before dispatching in the assist stop area, on-board battery of maglev trains must be ensured with sufficient charge to maintain operation to the adjacent assist stop area. The operation of the maglev system and the energy consumption of onboard battery during train operation were analyzed. The operational speed curve was calculated by means of traction acceleration, coasting speed reduction and eddy braking speed reduction, which derived the placement of the assist stop area with different onboard battery capacity. The result shows that maglev train levitation failure due to the low battery level during the maintenance operation can be avoided if battery capacity placement planning of the assist stop area is taken into account.

Keywords: high-speed maglev train; onboard battery; assist stop area; speed curve

0 引言

高速磁浮是未来轨道交通的发展方向,已经得到世界各国的高度重视。运行控制系统是高速磁浮系统的大脑,不仅需要保证列车运行安全,还需要满足系统维护等要求。为了列车在出现故障时能够得到可靠维护,高速磁浮系统建立了设置有动力轨等维护装置的辅助停车区^[1]。高速磁浮列车在出现故障时,仅允许在辅助停车区内停车。因此,辅助停车区的设置位置一直是高速磁浮系统研究的关键问题之一。

研究人员从列车运行控制方式方面对辅助停车区位置的设置方法进行了研究^[2-7]。卞建光建立了高速磁浮辅助停车区位置生成算法,该算法通过对列车牵引切断时的受力进行分析,包括风阻、坡道等不利环境情况,得到上海磁浮试验线辅助停车区设置的最大间距,并在此基础上讨论了列车运行速度对辅助停车区设置的影响^[2]。杨轲建立了基于速度防护曲线的辅助停车区位置生成算法,基于沪杭线进行了计算^[3]。虞翊等人提出了一种基于基准运行速度曲线的辅助停车区算法,并对

多目标速度曲线下辅助停车区的设置位置进行分析^[4]。实际上,随着高速磁浮列车商业运行速度的不断提高,根据列车运行方式计算得到的辅助停车区间距变得越来越大。当高速磁浮列车在辅助停车区停车后,如果列车采用维护运行方式运行,则必须保证车载蓄电池电量能够满足列车到达下一个辅助停车区。因此,在辅助停车区位置计算时,必须考虑车载蓄电池电量,目前未有该方面的相关文献发表^[8-10]。

本文建立了一个计及蓄电池的高速磁浮辅助停车区设置方法,并计算出不同蓄电池电量下辅助停车区的设置位置。

1 列车运行方式分析及车速曲线计算

1.1 停车点步进方法

高速磁浮线路上布置有多个辅助停车区,根据每个辅助停车区的起始点和终止点可以计算出安全制动曲线和安全悬浮曲线。为了使得列车不断从一个辅助停车区运行到下一个辅助停车区,高速磁浮运行控制系统采用了停

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200602)

第一作者简介:田毅(1983—),男,山西孝义人,高工,博士,研究方向为高速磁浮运行控制。

车点步进的控制方式。在列车运行过程中,其速度始终保持在下一个辅助停车区的安全悬浮速度曲线以上,以及在当前辅助停车的安全制动速度曲线以下。高速磁浮停车点步进方式示意图如图1所示^[4,11]。

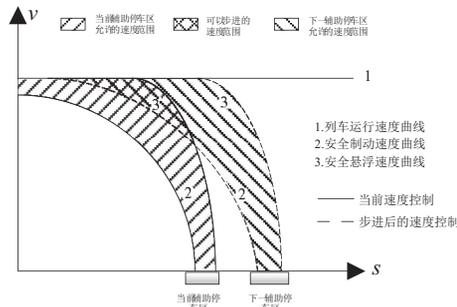


图1 高速磁浮停车点步进方式示意图

当安全制动速度曲线、安全悬浮速度曲线、列车运行速度曲线相交时,辅助停车区之间的间距最大,两个车站之间辅助停车区的数量最少^[2,12]。

1.2 车速曲线计算

为了保证高速磁浮列车的舒适性、安全性,高速磁浮列车的牵引和制动能力必须满足一定要求。列车运行速度、运行距离采用以下公式计算^[13-15]：

$$\begin{cases} v_{i+1} = v_i + a \cdot \Delta t \\ s_{i+1} = s_i + v_i \cdot \Delta t + 0.5 \cdot a \cdot \Delta t^2 \end{cases} \quad (1)$$

式中： a 为加速度， m/s^2 ； v_i 为第 i 秒的列车运行速度， km/h ； s_i 为第 i 秒的运行距离， km ； Δt 为时间步长， s 。

本文采用参考文献[3-4]中同样的牵引加速度、滑行制动减速度和涡流制动减速度进行车速曲线计算。牵引加速度如表1所示,滑行制动减速度如表2所示,涡流制动减速度如表3所示。

表1 牵引加速度表

运行速度/ (km/h)	[0,100]	(100,200]	(200,300]	(300,400]	(400,500]
牵引加速度/ (m/s^2)	0.9	0.9	0.7	0.5	0.2

表2 滑行制动减速度表

运行速度/ (km/h)	[0, 100]	(100, 200]	(200, 300]	(300, 400]	(400, 500]
滑行制动减速度/ (m/s^2)	-0.04	-0.09	-0.18	-0.30	-0.40

表3 涡流制动减速度表

运行速度/ (km/h)	[0, 10]	(10, 100]	(100, 200]	(200, 300]	(300, 400]	(400, 500]
涡流制动减速度/ (m/s^2)	-1.00	-0.11	-0.75	-1.08	-1.28	-1.44

根据滑行制动减速度和公式(1),得到安全悬浮速度曲线的计算函数：

$$v_{hx} = f_{hx}(s) \quad (2)$$

式中 v_{hx} 为安全悬浮速度, km/h ; s 为运行距离, km 。

根据涡流制动减速度和公式(1),得到安全制动速度曲线的计算函数：

$$v_{wl} = f_{wl}(s) \quad (3)$$

式中 v_{wl} 为安全制动速度, km/h 。

根据牵引加速度和公式(1),得到牵引加速曲线的计算函数：

$$v_{qv} = f_{qv}(s) \quad (4)$$

式中 v_{qv} 为列车运行速度, km/h 。

2 辅助停车区设置方法研究

2.1 计及蓄电池的辅助停车区设置方法

计及蓄电池的辅助停车区设置方法流程如图2所示。

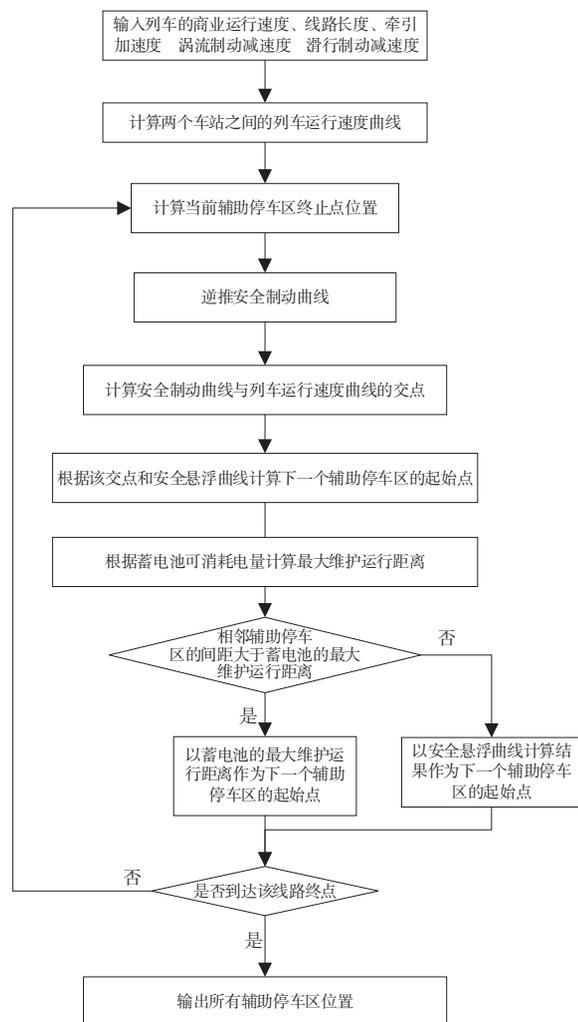


图2 计及蓄电池的辅助停车区设置方法流程图

从图2中可以得到,计及蓄电池的辅助停车区设置的计算步骤如下。

步骤1 根据两个车站之间的距离、两个车站的运行距离,可以采用如下公式计算出列车运行速度曲线：

$$\begin{cases} v=f_{qy}(s) & 0 \leq s < s_{js} \\ v=v_{sy} & s_{js} \leq s < s_{zd} \\ v=f_{wl}(s) & s_{zd} \leq s < s_{cz} \end{cases} \quad (5)$$

式中: v_{sy} 为高速磁浮商业运行速度,km/h; s_{js} 为运行速度曲线加速和匀速运行阶段的切换距离点,km; s_{zd} 为运行速度曲线匀速和制动运行阶段的切换距离点,km; s_{cz} 为运行速度曲线的运行距离。

最终得到列车运行速度曲线的计算函数:

$$v_{yx}=f_{yx}(s) \quad (6)$$

式中 v_{yx} 为列车运行速度,km/h。

步骤2 根据辅助停车区的终止点、安全制动曲线与列车运行速度曲线,采用如下公式计算出交点:

$$\begin{cases} v=f_{wl}(s) & 0 \leq s < s_{j dj} \\ v=f_{qy}(s) & s_{j dj} \leq s < s_{z j} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $s_{j dj}$ 为列车运行速度曲线、滑行制动减速度和涡流制动减速度的第 j 个交点对应的运行距离,km; $s_{z j}$ 为第 j 个辅助停车区的终止点,km。

步骤3 根据牵引加速度、滑行制动减速度和涡流制动减速度进行车速曲线的交点、安全悬浮曲线,采用如下公式计算出下一个辅助停车区的起始点:

$$v=f_{hx}(s) \quad s_{j d1} \leq s < s_{q2} \quad (8)$$

然后根据辅助停车区的长度,计算出下一个辅助停车区的终止点。

步骤4 根据2.2,计算蓄电池可消耗电量再计算出最大维护运行距离。

步骤5 如果相邻辅助停车区的间距大于蓄电池的最大维护运行距离,则以蓄电池的最大维护运行距离作为下一个辅助停车区的起始点;否则,以步骤3的计算结果作为下一个辅助停车区的起始点。

步骤6 如果下一个辅助停车区的起始点超出两个车站的距离,则输出所有辅助停车区的位置;否则,继续执行步骤2。

2.2 蓄电池的最大维护运行距离计算方法

列车的最大维护运行距离是计及蓄电池的辅助停车区设置方法的核心,是保证车载蓄电池能够满足列车到达下一个辅助停车区的关键。最大维护运行距离的计算流程图如图3所示。

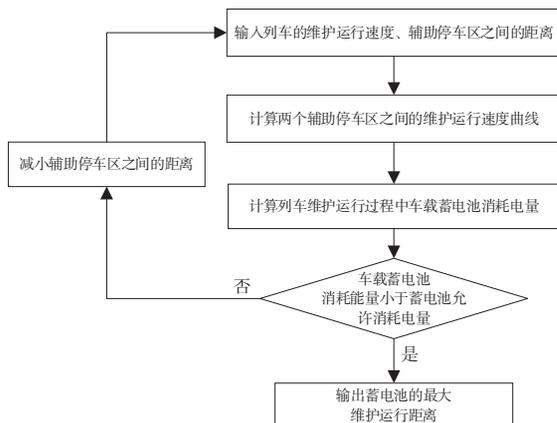


图3 最大维护运行距离的计算流程图

从图3中可以得到,最大维护运行距离的计算步骤为:

1) 根据两个辅助停车区之间的距离初始设置值、维护运行速度,参考公式(5)计算出列车维护运行速度曲线。

2) 车载蓄电池的消耗能量计算方式为

$$W_{bat}=W_{xf}+W_{dx}+W_{sb}-W_{lig} \quad (9)$$

式中: W_{bat} 为车载蓄电池的消耗能量,kWh; W_{xf} 为悬浮设备的消耗能量,kWh; W_{dx} 为导向设备的消耗能量,kWh; W_{sb} 为车载电气设备的消耗能量,kWh; W_{lig} 为车载直线发电机的输出能量,kWh。

车载直线发电机的输出功率与列车运行速度相关,其输出能量计算简化公式为

$$W_{lig}=\int_0^{t_{wh}}(av^2+bv+c)dt \quad (10)$$

式中: a 、 b 、 c 为系数; t_{wh} 为列车维护运行时间,h。

车载蓄电池耗电量的计算公式为

$$Q_{bat}=\frac{(P_{xf}+P_{dx}+P_{sb}) \cdot t_{wh}-W_{lig}}{U_{bat}}$$

式中: Q_{bat} 为车载蓄电池的消耗电量,Ah; P_{xf} 为悬浮设备的消耗功率,kW; P_{dx} 为导向设备的消耗功率,kW; P_{sb} 为车载电气设备的消耗功率,kW; U_{bat} 为车载蓄电池的电压,V。 P_{xf} 、 P_{dx} 、 P_{sb} 可通过实车试验得到数值。

3) 如果车载蓄电池消耗电量小于蓄电池允许消耗电量,则输出蓄电池的最大维护运行距离;否则,减小两个辅助停车区之间的距离,继续执行步骤1)。

另外,蓄电池充放电过程中电流对蓄电池电量也会产生影响,众多国内外研究人员对此进行了研究。本文重点研究车载蓄电池对辅助停车区间距的限制,故忽略上述影响。如果需要考虑该影响,可以增加列车充放电模型,对本文中车载蓄电池的消耗电量计算公式进行修正即可。

3 计算结果及分析

本文采用一条50km的高速磁浮平直线路进行计算,维护运行速度采用100km/h,蓄电池允许使用电量为10Ah。

高速磁浮列车的商业运行速度为200km/h时,采用基于车速防护的辅助停车区设置方法后,计算结果如图4所示;采用基于车速防护的辅助停车区设置方法后,计算结果如图5所示。高速磁浮列车的商业运行速度为400km/h时,采用计及蓄电池的辅助停车区的设置方法后,计算结果如图6所示;采用计及蓄电池的辅助停车区的设置方法后,计算结果如图7所示。

从图4-图7中可以得到,当高速磁浮列车的商业运行速度为200km/h时,将采用基于车速防护的辅助停车区设置方法和采用计及蓄电池的辅助停车区的设置方法进行对比,发现二者计算结果基本相同;而当高速磁浮列车的商业运行速度为400km/h时,与采用基于车速防护的辅助停车区设置方法得计算结果相比,采用计及蓄电池的辅助停车区设置方法得到的辅助停车区数量增加了1个,辅助停车区的最大间距也从19.616km减小到

14.230 km。

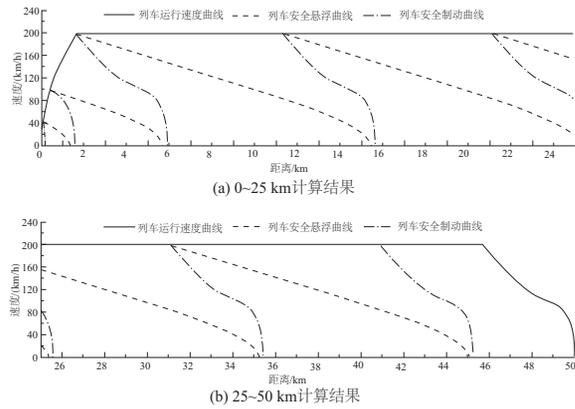


图4 200 km/h时,基于车速防护的辅助停车区计算结果

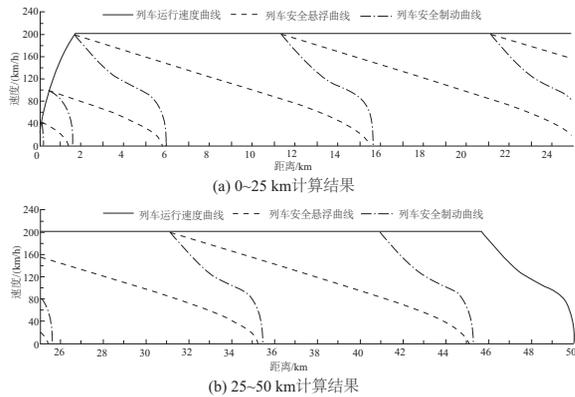


图5 200 km/h时,采用计及蓄电池的辅助停车区计算结果

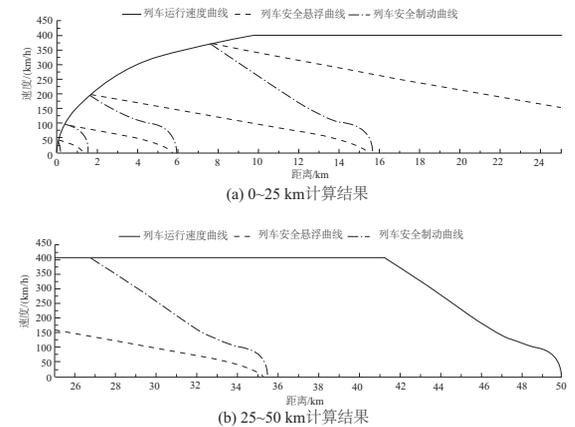


图6 400 km/h时,基于车速防护的辅助停车区计算结果

列车发生故障在辅助停车区停车后,继续运行时如果采用维护运行速度,车载直线发电机的输出功率和蓄电池的输出功率无法满足车载设备、悬浮导向设备和涡流制动设备的输出功率需要,很可能导致列车在高速条件下落车的事故发生。根据2.2计算蓄电池的最大维护运行距离为14.230 km。如果高速磁浮的商业运行速度为400 km/h时,采用基于车速防护的辅助停车区设置方法计算出的辅助停车区的最大间距为19.616 km,大于蓄电池的最大维护运行距离,很可能导致列车在高速条件下

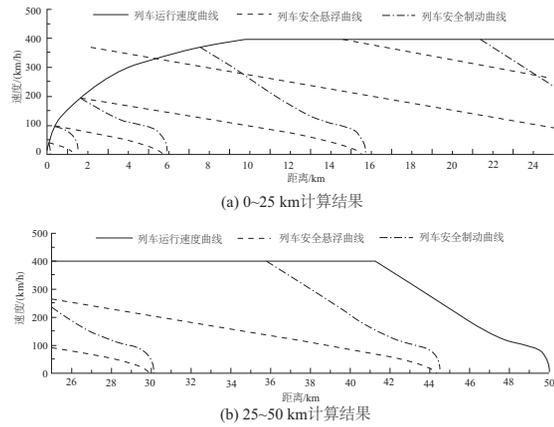


图7 400 km/h时,采用计及蓄电池的辅助停车区计算结果

落车的事故发生。而采用计及蓄电池的辅助停车区设置方法计算出的辅助停车区的最大间距设置为14.230 km,计算过程通过充分考虑了车载蓄电池允许使用的电量,减小了两个辅助停车区之间的间距,保证了高速磁浮列车运行的安全。

4 结语

通过分析及计算得到:高速磁浮系统辅助停车区的设置位置与数量与列车商业运行速度相关,还与车载蓄电池电量相关。本文建立的蓄电池高速磁浮辅助停车区设置方法实现了在列车商业运行速度和车载蓄电池电量的共同限制下进行辅助停车区设置位置的计算,解决了随着高速磁浮列车商业运行速度的不断提高,辅助停车区设置距离不断提高和维护运行时车载蓄电池无法满足列车长距离运行的矛盾,使得高速磁浮系统避免了列车在维护运行时由于车载蓄电池容量有限、辅助停车区设置距离过长导致的异常落车故障的发生,为高速磁浮实际应用建立了基础。

参考文献:

- [1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [2] 卞建光. 磁浮列车运行控制系统相关性性质及辅助停车区特性研究[D]. 杭州:浙江大学,2006.
- [3] 杨轲. 磁浮列车仿真平台设计及运控算法研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.
- [4] 虞翊,姜西,林辉,等. 基于防护速度的高速磁浮辅助停车区设置[J]. 同济大学学报(自然科学版),2019,47(9):1310-1316.
- [5] 刘进,吴汶麒. 高速磁悬浮交通二维速度防护曲线及其算法研究[J]. 中国铁道科学,2002,23(4):106-110.
- [6] 江亚,吴汶麒,刘进. 磁浮列车运行控制系统二维速度防护曲线仿真[J]. 同济大学学报(自然科学版),2004,32(3):397-400.
- [7] 姚媛. 高速磁浮列车速度曲线监控功能安全分析[D]. 北京:北京交通大学,2016.
- [8] 陈飞,徐洪泽. 德国高速磁浮列车安全防护速度曲线研究[J]. 中国科技信息,2006(17):248-251.

(下转第206页)

通过图4中对比结果可以看出,相对比文献[2]、文献[3]方法,本文方法提供的启动参数所得到的排矿粒度更细,这是因为该方法可以将输入能量有效转为有用功,通过智能启动多个粉碎机,粉碎中压料层,使破碎矿层变薄,并维持破碎间隙,增加排矿粒度的细度与均匀程度。

3) 多机启动参数对功耗的影响

启动参数除了对粉碎机的生产能力具有影响力,而且与运行功耗也存在一定的相关性,粉碎矿石过程中各方法的启动参数与功耗之间的关系如图5所示。

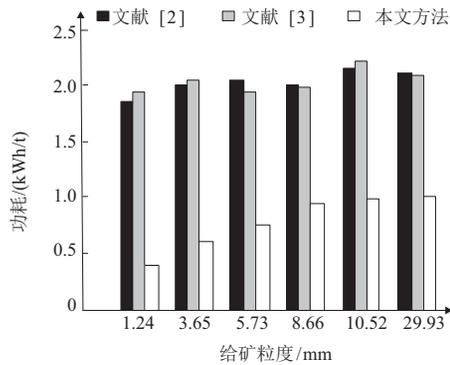


图5 各方法功耗对比图

从图5中的曲线走势可以看出,由于本文方法可依据运行条件与情况,智能启动各粉碎机,电源频率控制阶段是多机启动参数控制方法的核心部分,通过对不同粉碎机电源频率的傅里叶级数形式进行变换,得到每个粉碎机的最佳启动参数,因此,比文献[2]、文献[3]方法节省了更多的粉碎能量,大幅度降低了相同给矿量的工作能耗。

3 结语

智能控制技术通过拓宽理论与应用领域,将自动控制观点引申至人机结合、智能互补的方向上,推动智能控制技术的飞速升级。因为智能控制技术相对复杂,不存在统一、规整的定理、规则以及定律。所以,研究智能控制方法具有重要的现实性与必要性。离心流动超细粉碎机是一种可以实现细碎粗磨的预碎设备,该设备的研发制造为矿业应用发展提供了有力的支撑,故本文将智能控制技术融入矿用离心流动超细粉碎机的研究中,提出一种矿用离心流动超细粉碎机的多机启动参数控制方法。根据控制方法的开放性与形式非唯一性,采用创新型神经网络算法、遗传算法等,促进该领域的研究发展,争取实现自动控制的高度智能化,并为离心流动超细粉碎机的进一步开发奠定了良好的理论基础。

参考文献:

- [1] 杨新民. 智能控制技术在火电厂应用研究现状与展望[J]. 热力发电, 2018, 47(7): 1-9.
- [2] 甄岩, 郝明瑞. 基于深度强化学习的智能PID控制方法研究[J]. 战术导弹技术, 2019(5): 37-43.
- [3] 王亮, 荆澜涛. 高压断路器电机机构智能控制系统研制[J]. 高压电器, 2018, 54(3): 59-69.
- [4] 刘波, 刘邱祖, 陆洋. 圆盘旋转冲击粉碎机转子参数优化 EDEM 仿真[J]. 机械设计与制造, 2018(4): 119-121.
- [5] 钱义, 王迪, 张珏, 等. 粉碎机异形筛片气流场数值模拟及试验研究[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(3): 79-87.
- [6] 张纪利, 韦建玉, 曹阳, 等. 拔秆粉碎机液压系统流量分配特性仿真分析[J]. 机床与液压, 2018, 46(19): 110-112, 180.

收稿日期: 2020-10-26

(上接第196页)

- [9] 杨光. 高速磁浮列车最优速度曲线及其跟踪控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [10] 陈峙. 高速磁悬浮列车的停车区域数学模型及原理研究[M]. 上海: 同济大学, 2009.
- [11] 赖纳·沙赫, 彼得·耶勒, 勒内·瑞曼, 莫凡. 高速磁浮与高速轮轨交通系统比较[M]. 许晶, 翁秀玲, 译. 北京: 中国科学技术出版社, 2008.
- [12] ONO M, KOGA S, OHTSUKI H. Japan's superconducting Maglev train [J]. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, 2002, 5(1): 9-15.
- [13] ZHAO H H, CHEN Y J, LIAO Z M, et al. Fault injection technique applications in vehicle operation control system simulation tests for high-speed maglev transportation[C]//17th COTA International Conference of Transportation Professionals,

Shanghai, China, Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2017: 2820-2829.

- [14] CHEN Y J, ZHAO H H, LIAO Z M, et al. Information flow analysis and software architecture design for the vehicle control system in a high-speed maglev transportation system[C]//16th COTA International Conference of Transportation Professionals, Shanghai, China, Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2016: 1018-1032.
- [15] ZHAO H H, CHEN Y J, LIAO Z M. Safety location function and its realization mechanism for high-speed maglev transportation systems [C]// 15th COTA International Conference of Transportation Professionals, Beijing, China, Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers, 2015: 207-214.

收稿日期: 2020-05-06