

事故树分析法在中低速磁浮交通运营 事故分析中的应用*

魏庆朝¹ 潘姿华¹ 初智杰¹ 李敏²

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 100044, 北京;

2. 河北省农林科学院农业信息与经济研究所, 050051, 石家庄//第一作者, 教授)

摘要 中低速磁浮交通具有系统技术原理复杂、高架区间事故概率高、乘客疏散和列车救援难度大等特点。依据列车运行安全状态将运营事故分为列车火灾(爆炸)、列车冲突(碰撞)、列车运缓(途停)及其它事故类别。基于事故树分析原理,建立列车火灾(爆炸)、列车冲突(碰撞)及列车运缓(途停)等三类事故树,并进行最小割集、最小径集和基本事件结构重要度求解。结合集合思想,依据基本事件的致灾特性构建致灾集合,并根据致灾集合重要度进行排序,进而对中低速磁浮交通运营工作中的防范措施提出改进建议。

关键词 中低速磁浮交通; 事故树分析法; 运营安全; 运营管理

中图分类号 U298.5; U237

DOI:10.16037/j.1007-869x.2019.01.006

Fault Tree Analysis in Operation Accident of Medium and Low Speed Maglev

WEI Qingchao, PAN Zihua, CHU Zhijie, Li Min

Abstract Focusing on the complex technical principles of the medium and low speed maglev transit, the high probability of accidents on elevated structure, the difficulties in passenger evacuation and rescue, three fault trees for accidents like fire disaster (explosion), train collision and train running delay are established based on fault tree analytic principle. Then, the minimal cut set, the minimal path set and the structure importance coefficient of the basic events are calculated. Combined with the thought of mathematical set and the basic event characteristics, a disaster causing set is constructed, which is sorted by the importance degree of these sets, and preventive improvements for the operation of medium and low speed maglev are put forward.

Key words medium and low speed maglev transit; fault tree analysis; operation safety; operation management

First-author's address School of Civil Engineering, Bei-

jing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

中低速磁浮交通复杂的系统组成,使其具有转弯半径小、爬坡能力强、振动噪声小及节能环保等诸多优势,但也增加了运营安全影响因素的复杂性。目前,既有研究^[1-6]多从工程技术角度分析了磁浮交通单一线路或某一事故类型的致灾因素,但缺乏从系统角度对事故致因及救援措施的有效性等方面进行深入探讨。本文将在详细分析磁浮交通运营事故影响因素和类型特点的基础上,运用事故树分析法,对中低速磁浮交通运营事故致因及防范措施加以分析。

1 事故特点及分类

1.1 事故特点

中低速磁浮交通有复杂的技术原理,具有整体移动道岔等特殊轨道线路设施,其运营事故的致因比轮轨式地铁更为复杂。

在悬浮导向方面,中低速磁浮列车通过功率斩波器、悬浮控制器、间隙传感器、加速度传感器、电流传感器等元件间的电信号反馈和校正,可完成对2个悬浮电磁铁的控制和驱动,从而共同实现转向架上1点的悬浮^[7]。一旦供电系统及悬浮元件等发生故障,都可能使列车无法保持正常悬浮间隙,从而出现列车落轨或电磁铁吸死在轨道F轨的磁极面上的情况。

在牵引驱动方面,中低速磁浮列车一般1节车厢配置10台直线感应电机,并设有短接保护设施。在列车运行过程中,如出现直线电机短接保护盖损坏故障,则列车在推动牵引手柄瞬间会出现车辆主断路器跳开、且司机室显示屏显示“接地跳主断”的

* 北京市自然科学基金资助项目(8172040)

现象,使列车无法正常运行^[8]。此外,司机在驾驶时误碰磁浮列车司机控制器的方向手柄,则可能造成列车方向信号丢失,存在使列车在正常运行时触发紧急制动的风险^[9]。

在轨道设施方面,F 型轨道与钢轨枕共同组成的轨排结构是否正确安装也会影响磁浮列车的正常运行。例如,当站前道岔处的轨排未满足测速传感器安装板 300 mm 范围内除轨道外无其他金属物的要求时,车载传感器在感应线路轨枕位置时很可能输出异常速度信号,影响列车的驱动/制动系统。长沙磁浮快线在调试阶段就曾出现列车测速系统受道岔处与 F 轨平行的金属物影响,使已静止的列车再次启动电制动效应,使列车出现反向驱动^[10]。

此外,中低速磁浮交通采用三点定心结构式道岔,依靠驱动系统和锁定系统自动进行解锁、转辙、锁紧操作,由钢梁整体进行转辙。一旦曲柄摇杆、减速电机、滑槽、台车等驱动装置和锁销装置发生故障,轻则延迟道岔的转辙时间,降低线路运输能力,重则造成冲突碰撞等恶性事故。若道岔结构中的 F 轨角平分装置或移动梁体间的过渡装置等薄弱环节发生故障,则会降低列车悬浮系统通过道岔区时的稳定性和平顺性,为行车安全带来隐患^[12]。

中低速磁浮交通多采用高架线路。这使得突发事故发生时列车位于高架桥上的概率显著增大,同时也增加了乘客疏散和列车救援的难度。高架线路可能跨越城市繁忙交通干线或山坡、河道,其线下空间复杂,难以保证应急救援工作面沿线贯通。而站间距较大的高架线路(长沙磁浮快线已开通车站的平均站间距近 9 km^[13]),当大量乘客需要桥上进行长距离紧急疏散时,既有疏散设施的疏散效率尚有待检验。

1.2 事故分类

我国轨道交通事故按事故灾损程度分类,这难以体现中低速磁浮交通的事故特点,也难以提出系统的防范措施。因此,建议将磁浮列车运营事故按不同列车状态,以及列车同其它列车、人及物间的关系分为:列车运缓或途停、列车火灾或爆炸、列车冲突或碰撞、其它事故 4 类。具体内容如表 1 所示。

2 事故树致因分析

事故树分析(FTA)法是系统工程中逻辑性强、应用广泛的图形演绎法^[15]。

2.1 FTA 原理

采用 FTA 法进行定性分析时,首先,将事故作

为顶上事件;然后,由“果”到“因”逐层确定顶上事件、中间事件和基本事件间的逻辑关系;再后,运用布尔代数规则确定顶上事件与若干最小割集之间的关系;最后,计算各基本事件对顶上事件的影响力度,即结构重要度系数,并对各基本事件的结构重要度排序。FTA 步骤如图 1 所示。

表 1 中低速磁浮系统运营事故类型

事故类型	表现形式
列车运缓或途停	列车以低于运营计划中正常运行速度行驶,或失去动力停滞于线路上无法走行
列车火灾或爆炸	车体或车厢内发生火灾或爆炸
列车冲突或碰撞	运行过程中磁浮列车与共线车辆发生追尾或碰撞,或与其它(生)物体相撞,如轨道上落石、倒树、卧轨的人、侵入限界的异物等
其它事故	磁浮列车运行过程中发生的其它类事故,如危险化学品泄露、车内乘客打斗、或遇极高极低温、地震、强风等突发灾害性天气导致的事故以及其它不可预测事故

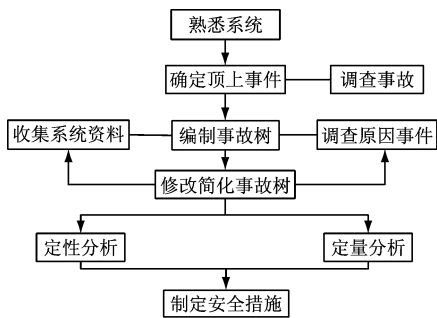


图 1 FTA 的一般步骤

2.2 事故树编制

以 T 表示顶上事件、以 M 表示中间事件、以 X 表示基本事件,编制列车火灾、列车冲突(碰撞)、列车运缓(途停)等 3 类事故的事故树,如图 2~4 所示。

2.3 基本事件结构重要度计算

采用 FTA 法定性分析时,需求解最小割集、最小径集和基本事件的结构重要度。最小割集是引起顶上事件发生的基本事件最低限度集合。最小径集是指使顶事件不发生的最低数量基本事件组合。最小割集越多,系统的危险性越大。最小径集越多,系统安全性越高。

当基本事件的发生概率难以准确获取时,可先假定各基本事件发生概率相等,通过计算各基本事件的结构重要度系数,分析基本事件的发生对顶层事件发生所产生的影响程度。基本事件 X_i 结构重要度为^[15]:

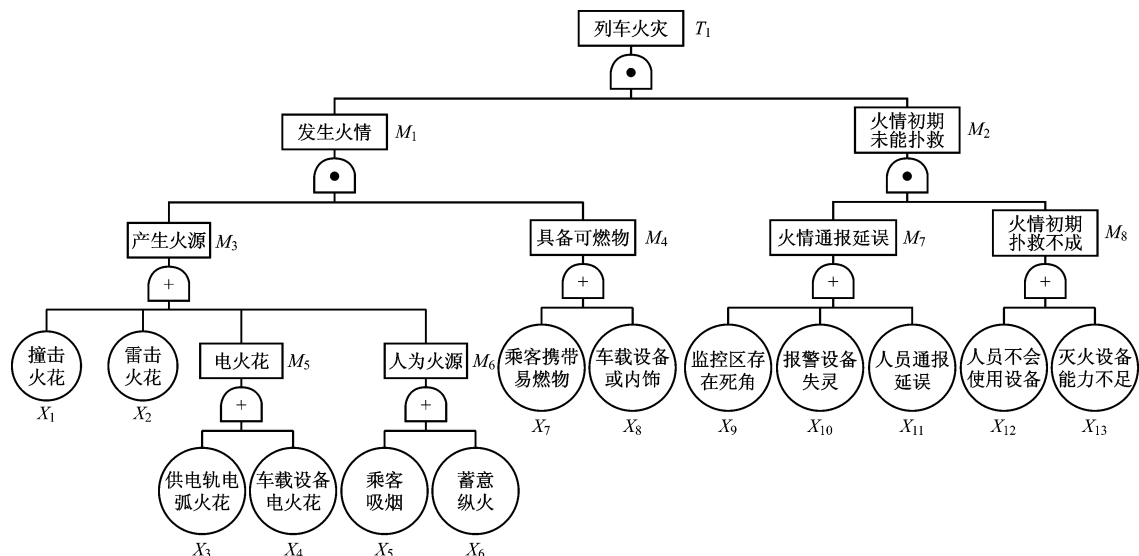


图 2 磁浮列车火灾事故树

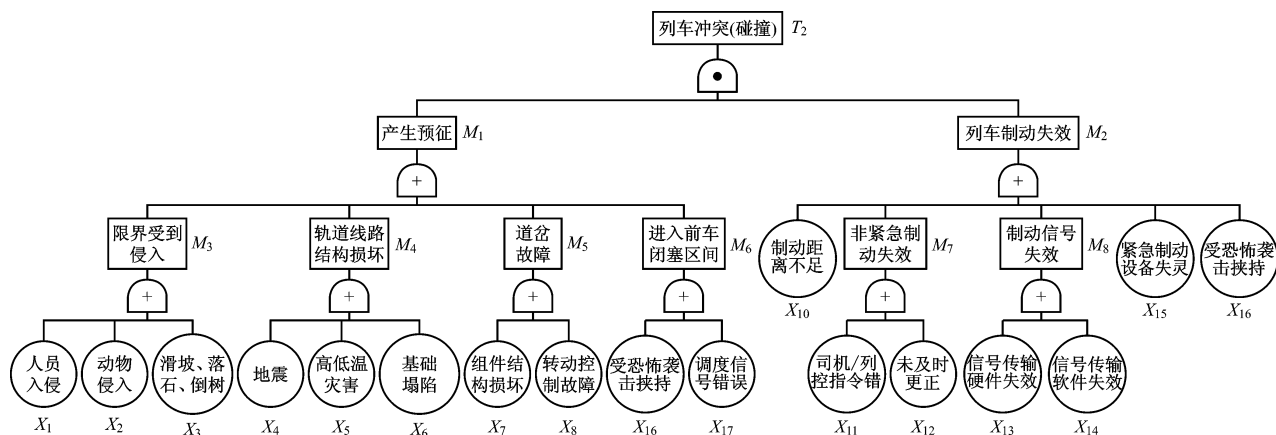


图 3 磁浮列车冲突(碰撞)事故树

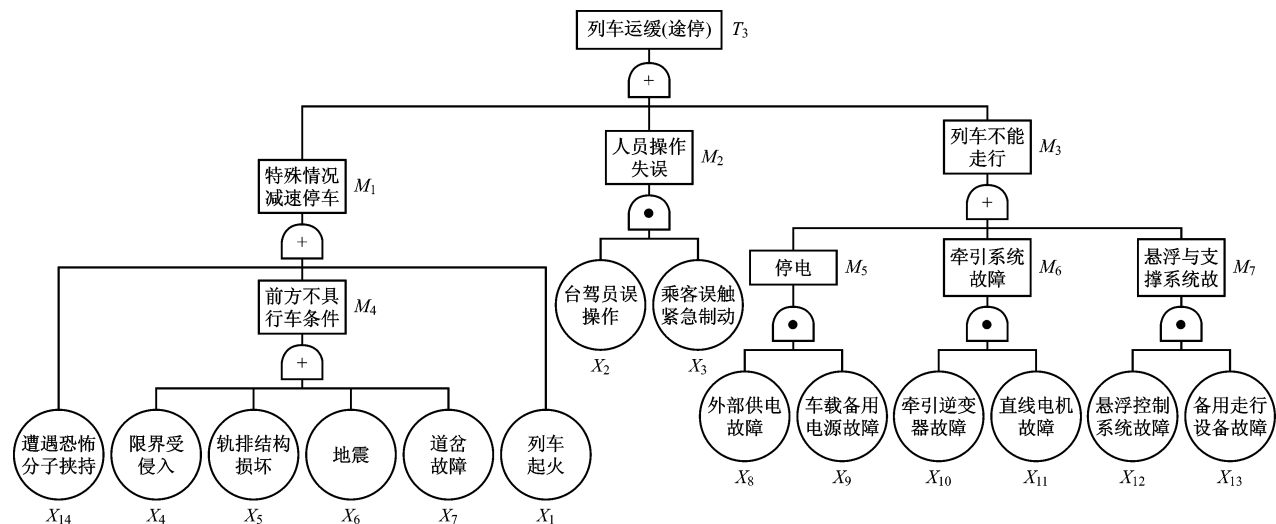


图 4 磁浮列车运缓(途停)事故树

$$I(i) = \sum_{X_i \in K_j} \frac{1}{2^{n_i} - 1} \tag{1}$$

式中:

$I(i)$ ——基本事件 X_i 结构重要度系数的判别值;

K_j ——基本事件 X_i 所在的最小割(径)集,其中 j 为最小割(径)集个数;

n ——基本事件 X_i 所在集合的基本事件个数。

3 运缓(途停)事故案例分析

中低速磁浮交通因系统原理独特,其运缓(途停)事故的致因和防范措施同地铁差别明显。

3.1 求解最小割集、最小径集和结构重要度系数

根据布尔代数计算原理,该事故树的结构函数表达式为

$$\begin{aligned} T_3 &= M_1 + M_2 + M_3 = \\ &(X_1 + X_{14} + M_4) + X_2 X_3 + (M_5 + M_6 + M_7) = \\ &X_1 + X_2 X_3 + X_4 + X_5 + X_6 + X_7 + \\ &X_8 X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} X_{13} + X_{14} \end{aligned} \tag{2}$$

从式(2)可见,该事故树最小割集共 11 个,分别是 $\{X_1\}$, $\{X_2 X_3\}$, $\{X_4\}$, $\{X_5\}$, $\{X_6\}$, $\{X_7\}$, $\{X_8 X_9\}$, $\{X_{10}\}$, $\{X_{11}\}$, $\{X_{12} X_{13}\}$, $\{X_{14}\}$

将上述事故树中的“与”门全部改换成“或”门,全部“或”门改换成“与”门,则可得原事故树的对偶树,即成功树。根据对偶原理,此成功树的最小割集则为原事故树的最小径集。转换后的成功树结构函数为:

$$\begin{aligned} T_3 &= M_1 M_2 M_3 = \\ &(X_1 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{14})(X_2 + X_3) \\ &\{(X_8 + X_9)(X_{10} X_{11})(X_{12} + X_{13})\} = \\ &X_1 X_2 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_8 X_{12} + \\ &X_1 X_2 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_8 X_{13} + \\ &X_1 X_2 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_9 X_{12} + \\ &X_1 X_2 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_9 X_{13} + \\ &X_1 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_8 X_{12} + \\ &X_1 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_8 X_{13} + \\ &X_1 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_9 X_{12} + \\ &X_1 X_3 X_4 X_5 X_6 X_7 X_{10} X_{11} X_{14} X_9 X_{13} \end{aligned} \tag{3}$$

此处所得成功树的 8 个最小割集,即为原运缓(途停)事故树的最小径集。据式(1),计算中低速磁浮列车运缓(途停)事故树的基本事件结构重要度并排序。计算结果如表 2 所示。

由表 2,基本事件结构重要度排序为 $I(14) =$

$$I(11) = I(10) = I(7) = I(6) = I(5) = I(4) = I(1) > I(13) = I(12) = I(9) = I(8) = I(3) = I(2)。$$

3.2 构建致灾集合及防范措施分析

当事故树的基本事件个数较多时,防范措施难以按独立的基本事件进行归类与分析。因此,可在参照基本事件结构重要度排序时,将具有相同结构重要度和相同致灾事件性质的几个基本事件看作 1 个致灾事件集合,并根据致灾事件集合的排序来进一步分析防范措施。以运缓(途停)事故树为例,14 个基本事件可分为 6 个致灾事件集合:

表 2 中低速磁浮列车运缓(途停)事故树基本事件结构重要度系数

基本事件	结构重要度系数	基本事件	结构重要度系数
X_1	$I(1) = \frac{1}{2^1 - 1} = 1$	X_8	$I(8) = \frac{1}{2^2 - 1} = \frac{1}{3}$
X_2	$I(2) = \frac{1}{2^2 - 1} = \frac{1}{3}$	X_9	$I(9) = \frac{1}{2^2 - 1} = \frac{1}{3}$
X_3	$I(3) = \frac{1}{2^2 - 1} = \frac{1}{3}$	X_{10}	$I(10) = \frac{1}{2^1 - 1} = 1$
X_4	$I(4) = \frac{1}{2^1 - 1} = 1$	X_{11}	$I(11) = \frac{1}{2^1 - 1} = 1$
X_5	$I(5) = \frac{1}{2^1 - 1} = 1$	X_{12}	$I(12) = \frac{1}{2^2 - 1} = \frac{1}{3}$
X_6	$I(6) = \frac{1}{2^1 - 1} = 1$	X_{13}	$I(13) = \frac{1}{2^2 - 1} = \frac{1}{3}$
X_7	$I(7) = \frac{1}{2^1 - 1} = 1$	X_{14}	$I(14) = \frac{1}{2^2 - 1} = \frac{1}{3}$

$$A = \{X_1, X_{14} \mid \text{突发紧急事故}\}$$

$$B = \{X_2, X_3 \mid \text{人员不安全行为}\}$$

$$C = \{X_4, X_5, X_6, X_7 \mid \text{行车条件丧失}\}$$

$$D = \{X_8, X_9 \mid \text{供电系统失效}\}$$

$$E = \{X_{10}, X_{11} \mid \text{牵引驱动系统失效}\}$$

$$F = \{X_{12}, X_{13} \mid \text{列车悬浮与备用走行系统失效}\}$$

对应基本事件结构重要度排序,致灾集合的重要度排序为 $A = C = E > B = D = F$ 。可见,在正常运营条件下,若要避免运缓(途停)事故发生,应首先加强对“突发紧急事故、行车条件丧失和牵引驱动系统失效”三类致灾事件的防范与检查,提高中低速磁浮列车走行能力的稳定性和可靠性;通过视频监控、人工巡检等方式,可消除来自线路外部环境的不安全因素,确保良好的行车条件。此外,还应确保列车悬浮系统的稳定性、备用走行部件的可靠性及人员可靠性。从磁浮列车的救援角度分析,确保牵引驱动系统正常工作更为重要($E > D = F$)。这是因为当列车丧失悬浮能力时,仍可通过备用走

行轮实现列车移动,从而避免列车对线路的占用。

按照相同的计算分析思路,可分别求出列车火灾及列车冲突事故树的最小割集、最小径集和基本事件的结构重要度。具体计算结果见表 3。由计算

结果可知,中低速磁浮列车火灾和冲突(碰撞)两类事故的最小割集数量远大于最小径集数,事故防范难度较大。列车运缓(途停)事故的最小割集和最小径集的数量则相对接近。

表 3 事故树结构重要计算分析表

事故类型	最小割集数	最小径集数	结构重要度排序 致灾事件集合重要度排序	防范措施重要程度
列车火灾	72	4	$\{I(13)=I(12)\}=\{I(8)=I(7)\}>$ $\{I(11)=I(10)=I(9)\}>$ $\{I(6)=I(5)=I(4)=I(3)=I(2)=I(1)\}$	初期火情及时扑救=防控列车内可燃物燃烧> 及时监控火情>消除火源
列车冲突(碰撞)	46	3	$\{I(16)\}>$ $\{I(15)=I(14)=I(13)=I(10)\}>$ $\{I(12)=I(11)\}>$ $\{I(17)=I(8)=I(7)=I(6)=I(5)=I(4)=I(3)=I(2)=I(1)\}$	防范恐怖分子劫持>确保紧急制动设备可靠= 确保制动信号传递可靠>制动指令可靠>消除 线路上的碰撞冲突预征
列车运缓(途停)	11	8	$\{I(14)=I(11)=I(10)=I(7)=I(6)=I(5)=I(4)=I(1)\}>$ $\{I(13)=I(12)=I(9)=I(8)=I(3)=I(2)\}$	(1)消除磁浮列车行车中外部环境的不安全 因素>提高列车走行设备可靠性和人员安全 操作可靠性 (2)保证列车牵引走行功能正常>保证外部 供电和悬浮支撑系统可靠性

4 结语

中低速磁浮交通的牵引、悬浮、导向等技术原理与其他轨道交通不同,有独特的线路轨道及道岔结构。本文采用 FTA 法分析了中低速磁浮交通 3 类典型事故的致因及防范措施。提出一系列建议:未来应构建磁浮交通致灾事件及故障率统计数据库,进一步探明磁浮交通运营事故的特点及规律;采用加强线路巡检、增设视频监控设备等方式,消除外部线路环境和人员因素造成的致灾条件,加强车辆、人员的安保工作和设备设施检测,提高中低速磁浮列车各子系统间的综合协调能力,为提供有针对性的防范措施提供基础,为磁浮交通的安全运营提供重要保障。

参考文献

[1] 魏庆朝,孔永健,时瑾,等. 磁浮铁路系统与技术[M]. 北京:中国科学技术出版社, 2010.

[2] 徐银光,蔡文锋. 中低速磁浮交通工程建设核心技术研究[J]. 铁道工程学报, 2015(7):82.

[3] 丁信华. 对磁浮工程技术的一些思考[J]. 城市轨道交通研究, 2015(5):10.

[4] 曹刚,曾科,李艳. 城市磁悬浮轨道交通系统安全问题研究

[J]. 中国安全科学学报, 2006, 16(11):10.

[5] 简炼. 中低速磁浮交通运行的安全性及可靠性分析[J]. 都市快轨交通, 2013, 26(6):24.

[6] 陈永胜. 磁浮列车灾害事故处置对策[J]. 防灾科技学院学报, 2010, 12(3):6.

[7] 叶俊,龙志强. 磁浮列车系统故障模型的建立与分析[J]. 城市轨道交通研究, 2007(3):24.

[8] 曹芬,程维. 中低速磁浮列车直线感应电机短接保护盖故障分析及优化[J]. 山东工业技术,2015(3):44.

[9] 肖越群. 长沙磁浮列车司控器方向手柄异常归零位故障分析及解决方案[J]. 技术与市场,2017(7):102.

[10] 王新宇,党宁. 长沙磁浮列车测速系统故障原因分析及改善措施[J]. 技术与市场,2017(3):15.

[11] 袁青平,王俊杰,王财华,等. 中低速磁浮交通道岔系统工程设计[J]. 都市快轨交通,2009(1):67.

[12] 曾国锋,袁亦竑,吉文,等. 长沙中低速磁浮工程的道岔设计与调试[J]. 城市轨道交通研究,2016(5):44.

[13] 李经纬. 某中低速磁浮线路救援方案研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2014,34(12):2791.

[14] 国务院公布国家城市轨道交通运营突发事件应急预案[J]. 中国应急管理, 2015(5):7.

[15] 彭金栓. 交通运输安全系统工程[M]. 长沙:中南大学出版社,2014.

(收稿日期:2018-05-04)