

# 基于 HFACS-MA 的地铁事故人为因素研究<sup>\*</sup>

张振华 朱琳 刘志钢 黄远春

(上海工程技术大学城市轨道交通学院, 201620, 上海 // 第一作者, 助理工程师)

**摘要** 我国地铁事故数据利用率不足, 难以对事故发生前的预防、事故发生时的现场决策、事故发生后的分析和定责提供理论支撑与帮助。基于 HFACS-MA(地铁事故的人为因素分析与分类系统), 将事故致因分析模型划分为事故致因层与事故反馈层, 并对 30 起地铁事故案例进行因素分析。采用 Apriori 算法对事故人为致因进行关联度分析, 并绘制事故致因链图。结果表明, 事故致因链中组织影响层涉及因素最多; 监督不力是主要连接因素, 需重点关注; 事故处理不及时是导致事故扩大蔓延的最直接原因。

**关键词** 地铁事故; 人为因素; 事故致因链

**中图分类号** X928; U231

**DOI:** 10.16037/j.1007-869x.2021.06.049

## Study on Human Factors of Metro Accidents Based on HFACS-MA

ZHANG Zhenhua, ZHU Lin, LIU Zhigang, HUANG Yuanchun

**Abstract** The utilization rate of metro accident data in China is insufficient, which makes it difficult to provide theoretical support and help for the prevention before accidents, site decision-making at the time of accidents, analysis and responsibility determination after accidents. Based on HFACS-MA, the accident cause analysis model is divided into accident-cause layer and accident-feedback layer, and factor analysis on 30 metro accident cases are carried out. Apriori algorithm is adopted to analyze the correlation degree of human causes to accidents, and accident cause chain diagram is drawn. Results show that the organization influence layer in the accident-cause chain involves the most factors; weak supervision is the main connecting factor that needs to be paid attention to; and untimely handling of accidents is the most direct cause leading to the expansion and spread of accidents.

**Key words** metro accidents; human factors; accident cause chain

**Author's address** School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai

hai, China

随着地铁运营规模的不断扩大, 运营行车组织作业日益困难, 各类人为因素所导致的地铁事故亦不容忽视。文献[1]发现, 1980—2009 年欧洲发生的轨道交通事故中, 因人为因素所导致的事故数占比高达 74%。目前, 我国依然缺乏系统性的事故人为因素调查、分类和分析方法<sup>[2]</sup>。因此, 设计一套系统性的地铁事故人为因素分析模型, 从事故中分析事故致因及其相关关系, 进而制定对策, 可以有效帮助管理人员进行事故预防处置, 在同类事故发生时为现场处置提供决策支持, 同时为事故的事后定责和整改提供系统科学的理论依据。

近年来, 关于事故中人为因素的研究理论众多。文献[3]总结提出了人为因素分析与分类系统(HFACS)模型, 该模型由于其评估框架的有效性、内容的完整性及强大的可实践性, 使其在煤矿、海运、铁路等不同领域中都有所应用<sup>[2-5]</sup>。部分学者在地铁运营安全领域也进行了研究。文献[6]通过 C-OWA 算子对指标赋值, 并结合 SPA(安全、潜力和期望)模型进行评价。文献[7]基于脆弱性理论和耗散结构理论, 分析地铁运营事故的演化机理和致因要素的影响机理。

HFACS 模型基于航空背景提出, 而地铁与其在组织架构、管理模式等方面具有相似性, 因此, 该模型具有良好的适应性基础。然而, 根据地铁事故的处理要求, HFACS 模型缺乏完整性, 且缺乏事故致因关系链, 对于已经发现的危害因素, 如何系统地排查其他相关因素存在困难。因此, 本文根据地铁运营系统特点、事故预防重点及处置流程, 提出适用于研究地铁事故的人为因素分析与分类系统(HFACS-MA)。运用关联度规则分析各层级因素间的关联度, 明确事故致因链, 为事故的前期预防、

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(71701124)

现场处置和后期定责提供依据。

### 1 HFACS-MA 模型的建立

本文通过对专业人员的访谈,查阅关键岗位作业规范和运营管理规定,以及对地铁事故报告的深入研究发现,由于地铁具有运输快速、高效、准时、安全的特性,使得乘客对其有着高度的依赖性。一旦出现事故,便会导致乘客积压,如未能做好事故应急处置就会进一步导致事故影响的扩大。然而,事故应急处置不是预防事故发生的屏障之一,而是事故发生后对于事故应急处置效果的实时反馈。如果事故应急处置不及时或处置方式不当,就会形成对于 4 层防护屏障的负反馈,可能进一步造成更大的次生事故的发生。因此,本文在原有模型的基础

上增加事故应急处置反馈层,构建 HFACS-MA 模型,如图 1 所示。各层级因素的分类及问题描述见表 1。

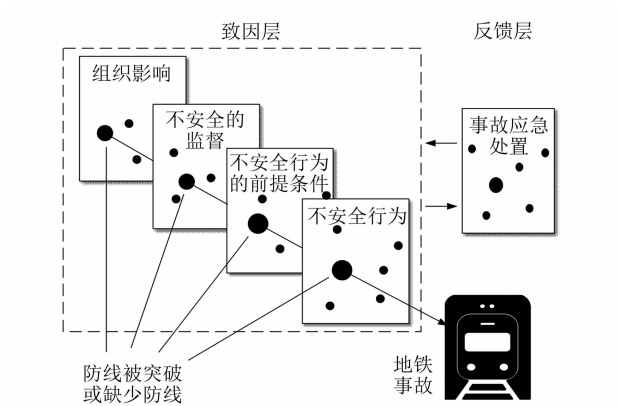


图 1 HFACS-MA 模型框架图

表 1 HFACS-MA 模型致因因素问题描述

层级	影响因素	问题描述
组织影响层	资源管理	人力资源 (A1) 职工知识、技能培训不足;部分岗位人员配备不齐;人员选拔制度不完善等 资金资源 (A2) 过度削减运营成本;缺少资金等 设备资源 (A3) 采购不合格的设备;地铁驾驶舱设计不合理等
	组织架构 (A4)	行政管理体系臃肿;部门沟通不畅等
	组织氛围	政策制定管理 (A5) 政策制定不完善;不同政策间互相冲突等 企业文化 (A6) 缺乏安全第一的企业文化;地铁职工安全生产积极性差;缺乏责任心等
	运行过程	运营操作 (A7) 任务过重,员工精神、体力压力过大;组织人员分配不合理,组织操作过程中易发生危险等 组织程序 (A8) 缺少安全检查/风险管理计划;缺少绩效标准;缺少程序指南等 组织监督 (A9) 缺少监督程序;缺少监督举报渠道等
	不安全的监督层	监督不力 (B1) 没有设置监督人员;监督人员任务过重;监督者没有受过培训;没有持续追踪效能等 运营计划不当 (B2) 列车运行图编制不当;车底交路图编制不当;任务/工作负荷过量,职工休息时间不足;班组人员配置不当等 未纠正问题 (B3) 没有纠正已发现的危险行为;没有纠正已知的危险事件;没有汇报不安全的趋势;已发现的设备设计不合理未及时纠正等 监管违规 (B4) 授权不合格的驾驶员驾驶地铁;未核查施工人员身份信息;允许无证人员操作特种设备等
	不安全行为的前提条件层	精神状态差 (C1) 司机心理或精神状态所产生的负面影响,如司机精神疲劳、精力不集中;司机过于自满、态度不端正;司机处理任务动机不良等 生理状态差 (C2) 不符合安全操作所需的医学状态,如生病、中毒、身体疲惫、极度兴奋、其他药理学或医学上的身体异常等 身体/智力局限 (C3) 未能满足安全生产对人體能与智商等的要求,如视力不佳或色盲、体力不足、常识欠缺、缺乏经验、信息过量等
	其他人员因素	乘客影响 (C4) 乘客强制开车门;乘客跳下轨道;乘客按下紧急停车按钮等 班组同事影响 (C5) 缺乏团队合作;班组内部沟通不畅;组内管理混乱;同事操作不规范等
	环境因素	技术环境 (C6) 操作系统显示界面过于复杂;驾驶面板按键布局不合理;面板控制灯亮度不足等 生产环境 (C7) 隧道内光线不足;隧道内不通风;驾驶室内噪声太大;高架上风力过大;驾驶室光照太足等
	不安全行为层	误操作误碰触 (D1) 由于操作者欠缺某种经验、知识、技能而导致的,且没有意识到的误操作或误触碰,如忘记操作流程导致操作错误、误触碰按钮等 精神或身体原因 知觉差错 (D2) 恶劣环境下导致操作者感知能力下降,进而出现知觉差错,如在地下、坏天气、机器噪声较大等降低人的感知能力的环境下工作时,易出现听错指令、看错信号等差错 决策差错 (D3) 关键决策执行有误,如司机作业流程不符合规范,调度疏散指令下达错误,行车值班员错误判断车站大客流情况等
事故反馈层	违章违纪	习惯性违规 (D4) 通常是习惯性的,通常是系统监管所容许的,被监督者忽略或默认的行为 偶然性违规 (D5) 孤立性的,不是典型的行为,也不为管理所容许
	事故处理不及时 (E1)	事故发生时未能及时发现;发现事故后未能及时采取应急措施;未及时向乘客通报事故处理进展等
	事故处理不当 (E2)	未在合适的时间处理事故;未采用合适的处理方法;未采取合适的救护手段等

### 1.1 事故致因层

组织影响层处于 HFACS-MA 模型最底层,是事故分析中最难以挖掘分析的隐性层级。若基础出现问题,则在此之上建立的其他层级必定存在隐患,而且对隐患的纠正就异常困难。

充分的监督是避免事故发生的重要保护屏障,而不安全的监督所导致的监督缺位或监督不充分是事故致因中常见的一环。缺少监督,就会为违规现象的发生提供可乘之机。

不安全行为的发生一定存在先决条件,包括作业人员自身的状态,作业人员所处环境的影响,以及与作业人员接触的其他人员对作业人员的影响等。这些因素会直接或间接地影响作业人员对于当前发生情况的判断与处理,可能造成危险行为的发生。

操作者的不安全行为是导致人为因素事故发生的直接原因,包括违章违纪、误操作误碰触,以及精神或身体原因等3类。违章违纪指作业人员故意不遵守规章制度和操作规范,显然是操作者有意为之;误操作误碰触、精神或身体原因更多的是由于作业人员的精神和/或身体状态未达到预期结果,并非操作者主观上愿意发生的。

### 1.2 事故反馈层

地铁运营系统的特性使得事故后处置的及时性和合理性变得极其重要。事故处理不及时是指事故发生后未被发现或发现后未能第一时间进行处置,就会导致事故的进一步扩散;事故处理不当指在事故处理过程中所采用的方法、措施等不合理,未能有效遏制事故的蔓延,反而扩大事故影响或造成了新的事故发生。

综上所述, HFACS-MA 模型针对地铁运营系统特点,增加事故应急处置的反馈层,以更全面地分析影响地铁事故发生及蔓延的人为因素。

## 2 地铁事故致因链分析方法

预防地铁事故发生的屏障出现层层漏洞,就会产生一系列危险因素,形成事故致因链,最终导致事故的发生。本文运用关联规则,采用 Apriori 算法进行地铁事故人为致因链的分析。

### 2.1 关联规则

关联规则是形如  $X \rightarrow Y$  的蕴涵式,包括数据项、项集、频繁项集、支持度、置信度等属性,旨在寻找大量数据背后难以被发现的相互关系。其中,支持

度反映关联规则的有用性,置信度则是对规则确定性的描述。

### 2.2 Apriori 算法及实施步骤

Apriori 算法是基于两阶段频集核心思想的递推算法。计算步骤如下:

步骤1:扫描地铁事故数据库,生成候选1-项集和频繁1-项集。

步骤2:进入循环步骤,由频繁  $k-1$  项集生成频繁  $k$  项集,从  $k-2$  项集开始循环,步骤如下:①对项集中的所有项进行排序;②连接步,  $L(k-1)$  与其自身进行连接,产生候选项集  $C(k)$ ;③剪枝步,删除  $C(k)$  中不是频繁项集的元素;④再次扫描数据库,计算③中过滤后的  $k$ -项集的支持度,删除小于设定最小支持度的项集,生成频繁  $k$ -项集。

步骤3:当生成的频繁  $k$ -项集中只有1个项集时循环结束。

依据经验设置相应支持度及置信度值,对数据库进行处理即可得到隐含的事故致因链。

## 3 地铁事故致因链的建立

### 3.1 地铁事故来源及处理

由于地铁事故属于小样本事件,可采集的数据样本较贫瘠。本文通过查阅书籍、互联网以及地铁公司内部资料等方式,分析了30起地铁事故案例(T1—T30)。基于 HFACS-MA 模型,对地铁事故产生影响的5个层级、共27个影响因素进行编号,并对地铁事故报告逐层详细地分解分析,统计结果如图2所示。

### 3.2 基于 Apriori 算法的事故致因链分析

根据 HFACS-MA 模型可知,同一层级的事故致因会互相影响;不同层级之间的致因因素影响关系一定是上一层级因素的发生会导致下一层级因素的发生,也可跃层影响后面各层级因素的发生。本文通过相邻两个层级的多次迭代,最终选取的支持度  $M_{in,sup}$  与置信度阈值  $M_{in,conf}$  分别为0.3和0.7。本文分别计算了事故致因层间各因素以及事故反馈层与事故致因层间各因素的支持度与置信度,结果如表2和表3所示。由该结果表示的地铁事故致因链图如图3所示。

由图3可知,在地铁事故致因层中,影响因素最多的为组织影响层,可见深层级的组织影响是极易发生且影响深远的。其中,设备资源(A3)是最易受到影响的因素,主要是因为设备采购与配置处于组

织流程中较后的位置,很容易受到其他因素的影响。在不安全的监督层中,监督不力(B1)是受影响最多的因素。人力资源(A1)、设备资源(A3)、组织

程序(A8)和监督违规(B4)都会直接造成监督不力,进而导致班组同事作业不规范、违规作业,最终导致地铁事故的发生。

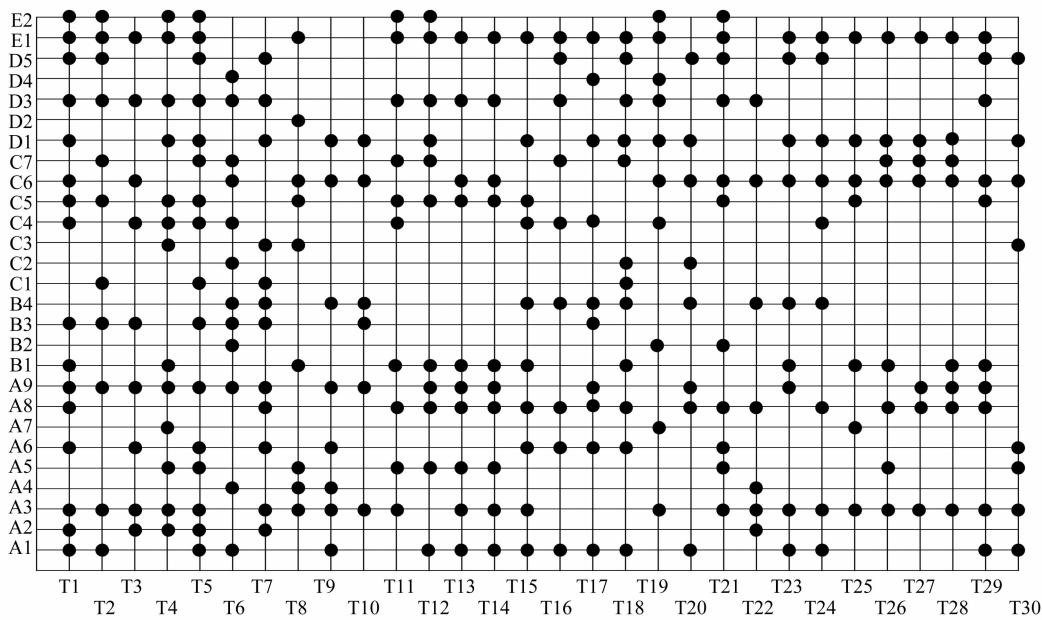


图2 地铁事故案例分析统计棋盘图

表2 地铁事故致因层间因素关联度分析表				
序号	前项	后项	支持度	置信度
1	A1	B1	0.43	0.764 7
2	A3	B1	0.60	0.750 0
3	A3	C6	0.60	0.750 0
4	A5	A3	0.30	0.900 0
5	A8	A3	0.43	0.722 2
6	A8	B1	0.50	0.833 3
7	A9	A1	0.37	0.733 3
8	A9	A3	0.37	0.733 3
9	B3	D3	0.20	0.750 0
10	B4	B1	0.30	0.750 0
11	B4	D1	0.30	0.750 0
12	B1	C5	0.33	0.714 3
13	C5	D3	0.33	0.769 2

表3 地铁事故致因层与反馈层间因素关联度分析表				
序号	前项	后项	支持度	置信度
1	A5	E1	0.30	0.900 0
2	A8	E1	0.43	0.722 2
3	B1	E1	0.43	0.928 6
4	C5	E1	0.40	0.923 1
5	C7	E1	0.30	0.900 0
6	D3	E1	0.40	0.800 0
7	E1	B1	0.53	0.761 9
8	E2	A3	0.30	0.900 0

事故致因层与反馈层间也存在关联关系。事故致因层中部分因素的发生会影响事故应急处置

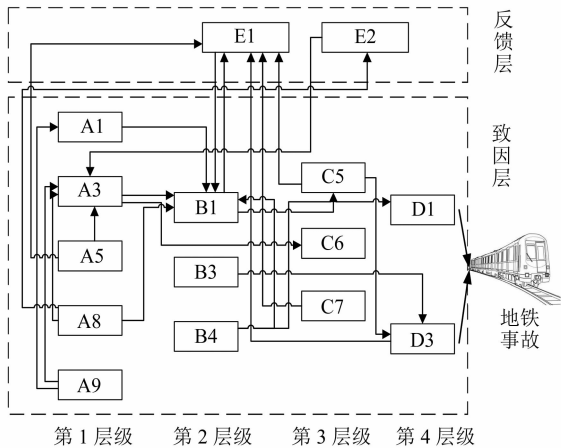


图3 地铁事故致因链图

的效果,事故应急处置的情况又实时反馈至事故致因层。由此可见,及时准确地做好事故应急处置会很好地遏制事故的进一步蔓延,减小事故损伤。

3.3 地铁事故管控措施建议

1) 做好前期的工作规划,保障工作的实施与推进。确保所有规章标准的制定、设备的采购与安装、人员的招聘与培训等严格按照前期规划进行,避免从根源埋下隐患。

2) 培养安全第一的公司文化,健全全面监督的监督体系。保障人人重视安全、人人都是监督者的

良好安全形势。

3) 建立健全应急演练机制。重视日常应急演练培训,确保工作人员技能熟练,有效减少事故反馈层与事故致因层之间的关联。

## 4 结论

1) 本文构建的 HFACS-MA 模型,更好地反映了地铁事故应急处置的特点。该模型提供了完整的事事故调查分析与决策工具,更加适应地铁事故的分析研究。

2) 采用 Apriori 算法,有效分析事故致因链,可以进行事故的预防,为同类事故发生时的处置提供现场支持,对事故的事后定责和整改亦可以提供系统科学的理论支持。

3) 由于地铁事故案例的稀缺,导致 HFACS-MA 模型还未能作为普适性的地铁行业事故分析模型进行推广。还需进一步丰富数据库中事故案例样本,增强模型的行业普适性。

## 参考文献

- [1] ANDREW W E. Fatal train accidents on Europe's railways: 1980—2009 [J]. Accident Analysis and Prevention, 2011, 43 (1): 391.
- [2] 王黎静,莫兴智,曹琪琰. HFACS-MM 模型构建与应用[J]. 中国安全科学学报,2014(8): 73.
- [3] WIEGMANN D A, SHAPPELL S A. A human error approach to aviation accident analysis: The human factors analysis and classification system [M]. Aldershot: Ashgate Publishing Ltd, 2003: 157-162.
- [4] EMRE A. A marine accident analysing model to evaluate potential operational causes in cargo ships [J]. Safety Science, 2017, 92: 17.
- [5] 詹青见. 基于 HFACS-RA 的铁路事故致因建模及混合学习方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [6] 赵金先, 武丹丹, 李堃, 等. 基于改进 HFACS-SPA 的地铁运营人为因素风险评价——以青岛地铁 3 号线项目为例 [J]. 项目管理技术, 2018(11): 13.
- [7] 韩豫, 成虎. 基于脆弱性的地铁运营安全事故致因分析 [J]. 中国安全科学学报, 2013(8): 164.

(收稿日期: 2019-06-09)

(上接第 218 页)

## 3 感应电压吸收装置的安装

由于高铁与城际轨道交通并行区段属于宁和城际轨道交通的高架区间结构,土建结构施工时未考虑感应电压吸收装置安装空间,因此宁和城际铁路工程在该区间 1、2 变电所内的直流牵引母线上各设置 1 台感应电压吸收装置,共 2 套。感应电压吸收装置安装示意图如图 16 所示。



图 16 感应电压吸收装置安装示意图

## 4 结语

本文对高铁与城际轨道交通同桥并行情况下,高铁对城际轨道交通所产生的电磁影响进行了定量分析与计算,并在此基础上给出了感应电压吸

收装置的设计方案,详细阐述了该装置的功能及其部件选型。2017 年 12 月 6 日,该装置与宁和城际轨道交通一期工程同步投入使用,且首次在高铁、城际轨道交通并线运行的过江大桥上得到应用。项目的成功实施,填补了国内高铁、城际轨道交通并线跨江运行时电磁感应干扰消除难题的技术空白,保障了城际轨道交通列车的行车安全,具有强大的技术示范效应,同时也为后续类似项目的实施提供了有益的借鉴和参考。

## 参考文献

- [1] 罗利平. 南京大胜关桥交直流供电系统电磁感应影响分析 [J]. 城市轨道交通研究, 2011(6): 29.
- [2] 余南. 宁和城际大胜关大桥感应电压吸收仿真分析 [J]. 电子技术与软件工程, 2017(6): 91.
- [3] 宋奇吼, 李学武. 高速铁路接触网对地铁供电系统的电磁干扰研究 [J]. 城市轨道交通研究, 2013(12): 42.
- [4] 王长宁, 徐源, 江平, 等. 宁和城际轨道交通工程 DPP 项目管理与工程技术 [M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社, 2020: 264-267.

(收稿日期: 2020-09-04)