

文章编号: 1006 - 2106( 2020) 05 - 0087 - 06

# 地铁盾构掘进安全影响因素及事故致因模型\*

陈辉华\*\* 李瑚均 户晓栋

(中南大学, 长沙 410075)

**摘要:** 研究目的: 近年来地铁盾构施工安全事故逐渐增多, 给国家、行业、企业和个人带来严重损失。为预防地铁盾构掘进施工安全事故, 本文基于“人-机-环境”系统工程方法构建地铁盾构掘进安全影响因素分析框架, 综合运用文献分析、案例分析和专家访谈等方法系统识别安全关键影响因素; 应用 DEMATEL - ISM 方法剖析因素间影响关系, 构建地铁盾构掘进安全事故致因模型; 选用 HF 盾构区间开展案例研究, 验证事故致因模型的适用性。

**研究结论:** (1) 地铁盾构掘进安全影响因素可系统识别为人员类、机械设备类和环境类等安全影响因素; (2) 地铁盾构掘进安全事故致因过程可用 5 级安全事故致因模型解释, 其中致险作业情境是安全事故发生的直接原因; (3) 安全预案、安全检查和安全技术作业是现场安全管理的重点; (4) 本文研究的安全事故致因模型可用于指导地铁盾构施工安全管理。

**关键词:** 盾构掘进; 安全事故; 安全影响因素; 事故致因模型; DEMATEL - ISM

中图分类号: TU71 文献标识码: A

## Safety Influential Factors and Accident Causation Model of Subway Shield Construction

CHEN Huihua, LI Hujun, HU Xiaodong

(Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

**Abstract: Research purposes:** Safety accidents in subway shield construction have increased in recent years and they caused huge losses to government, industry, enterprise, and individuals. To prevent the safety accident in subway shield construction, this paper investigated the safety impact factors and accident causation model. We proposed an analytical framework for safety impact factors using system engineering method of "human-machine-environment" and identified key safety impact factors based on literature review, case analysis and expert interview. The safety accident causation model was constructed based on DEMATEL - ISM method. And then, HF sub-project was chosen for case study to test the applicability of the safety accident causation model.

**Research conclusions:** (1) The safety impact factors in the subway shield construction can be systematically identified as personnel, mechanic-equipment and environmental impact factors. (2) Safety accident causation of subway shield construction can be interpreted by five-tier system model, of which accident-causing situations are the direct factors. (3) Safety plan, safety inspection and worker safety competencies are the pivot nodes. (4) The causation model

\* 收稿日期: 2019 - 12 - 16

基金项目: 国家自然科学基金项目(71841028); 湖南省自然科学基金项目(2019JJ40407)

\*\* 作者简介: 陈辉华, 1976 年出生, 男, 副教授, 博士生导师, 湖南省工程学会秘书长。

proposed in this research can guide the safety management during subway shield construction.

**Key words:** shield construction; safety accident; safety influential factors; accident causation model; DEMATEL – ISM

地铁交通系统具有安全、平稳、节能、环保等优点,是我国各大城市积极推进的基础设施工程。地铁隧道施工技术包括开挖式和盾构式,与开挖式施工技术相比,盾构掘进技术剪性强、技术剪成高、对地表影响小,已逐渐成为地铁隧道施工的首选。然因盾构掘进施工处于特殊作业情境,过程受到复杂安全因素的综合影响,加上我国地铁盾构掘进施工管理剪范度较低,施工安全事故时有发生,给国家、行业、企业和个人带来严重损失。特别是近年来盾构掘进施工安全事故导致的伤亡人数明显增多,地铁盾构掘进安全管理形势紧迫。因此,有必要深入探究地铁盾构掘进安全事故致因过程,为地铁盾构掘进安全管理提供建议。

学术界多整体上研究地铁盾构施工安全管理过程,未区分盾构掘进施工阶段和其他工程(洞口、风井等)施工阶段。识别的安全影响多聚焦在设计与施工管理<sup>[1]</sup>、自然环境<sup>[2]</sup>、邻近既有建筑<sup>[3]</sup>等方面,没有统一、清晰的系统分析框架。此外,也有学者提出“约束和响应”模型<sup>[4]</sup>、拉夫堡模型<sup>[5]</sup>、动态元网络模型<sup>[6]</sup>等建筑安全事故模型,其中以地铁施工为背景的模型多为开挖式施工情境<sup>[6]</sup>,而对盾构施工情境下的安全事故致因模型探讨较少。开挖式施工情境下的安全事故致因模型可适用于洞口或风井工程施工,但对盾构掘进施工情境的适用性较差。综上,有必要系统、深入地研究地铁盾构掘进安全影响因素和安全事故致因模型。

本文以地铁盾构掘进施工为研究情境,以“人-机-环境”安全系统工程方法为基础构建地铁盾构掘进安全影响因素分析框架,综合运用文献研究、案例研究和专家访谈等方法筛选安全关键影响因素,集成 DEMATEL – ISM 方法构建地铁盾构掘进安全事故致因模型,最后选用 CS 地铁 4 号线 HF 区间开展实证分析。研究成果将有助于地铁盾构掘进安全管理人员认知安全事故发生机理,提前设定安全干预措施,规避或减小盾构安全事故的发生。

## 1 地铁盾构掘进安全影响因素分析框架

地铁盾构掘进安全是一个复杂的社会技术系统,该类系统以“人-机-环境”为经典分析框架,认为通

过控制施工过程的人、机和环境等三维要素间的关系可以减少或规避安全事故<sup>[7]</sup>。本质安全理论也认为人、机、环境等系统要素是防范安全事故的根本。综合分析以往研究成果发现,已识别的安全影响因素也可从人、机和环境三个维度聚类。因此,本文应用“人-机-环境”三维系统观构建地铁盾构掘进安全影响因素分析框架,如图 1 所示。

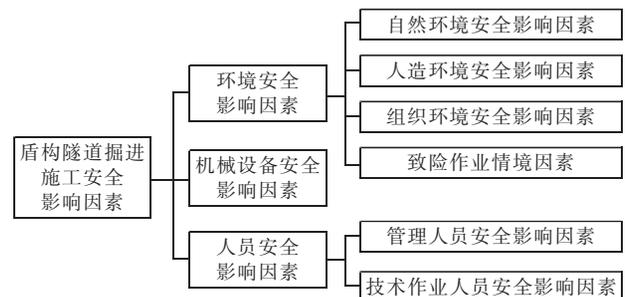


图 1 地铁盾构掘进安全影响因素分析框架

## 2 地铁盾构掘进安全影响因素识别

### 2.1 基于文献的初始安全影响因素收集

本文以“盾构掘进安全”“盾构掘进安全因素”“盾构掘进风险”和“盾构掘进安全风险”为关键字检索 EI、CSSCI 和 CSCD 源刊论文和博硕论文;分析检索到论文的摘要,确定 47 篇期刊论文和 13 篇博硕论文用于提炼初始安全影响因素,深入文献分析归总地铁盾构掘进安全影响因素初始清单。

### 2.2 基于事故案例的安全影响因素检验与扩充

查询国家及各地市住建部门和安全监管部门网站并运用“百度”“谷歌”等搜索引擎,收集到 43 份有效的盾构掘进安全事故报告。通过分析事故报告,检验和扩充初始清单,形成供专家访谈的安全影响因素访谈清单。

### 2.3 基于专家访谈的安全影响因素筛选

本文向 25 名有 5 年以上施工经验的盾构安全管理专家发放访谈问卷,邀请他们评定安全影响因素的重要性。收回有效问卷 19 份,然后统计重要度评分,以小于 20% 为下限,整理形成地铁盾构掘进安全关键影响因素清单,如表 1 所示。

表 1 地铁盾构掘进安全关键影响因素清单

类别		安全关键影响因素
地铁盾构掘进安全关键影响因素	环境安全影响因素	自然环境安全影响因素 NE <sub>1</sub> —复杂地层( 软弱地层、复合地层、富水地层、球状风化体、溶洞等); NE <sub>2</sub> —有害气体; NE <sub>3</sub> —地表水
	人造环境安全影响因素	ME <sub>1</sub> —建筑工程( 住宅、工业、教育等建筑群); ME <sub>2</sub> —基础设施工程( 公路、铁路、桥梁、隧道、地下管线等)
	组织环境安全影响因素	OE <sub>1</sub> —安全文化; OE <sub>2</sub> —安全制度; OE <sub>3</sub> —安全组织( 完善程度)
	致险作业情境因素	SC <sub>1</sub> —盾构姿态不稳; SC <sub>2</sub> —盾构参数突变; SC <sub>3</sub> —掌子面稳定性差; SC <sub>4</sub> —土仓压力不稳; SC <sub>5</sub> —出土量偏差; SC <sub>6</sub> —隧道沉降过大; SC <sub>7</sub> —管片破裂; SC <sub>8</sub> —隧道漏水; SC <sub>9</sub> —有害气体环境; SC <sub>10</sub> —漏电环境
人员安全影响因素	管理人员安全影响因素	M <sub>1</sub> —安全管理意识; M <sub>2</sub> —安全管理能力; M <sub>3</sub> —安全培训; M <sub>4</sub> —安全预案; M <sub>5</sub> —安全检查; M <sub>6</sub> —安全交底
	技术作业人员安全影响因素	W <sub>1</sub> —身体状况; W <sub>2</sub> —作业安全意识; W <sub>3</sub> —安全技术作业
机械设备安全影响因素		E <sub>1</sub> —刀盘系统障碍( 刀片磨损、刀盘变形、刀盘结泥饼等); E <sub>2</sub> —顶推系统障碍( 土仓积泥、液压系统漏油、盾构基座变形、反力架变形); E <sub>3</sub> —管片安装设备故障; E <sub>4</sub> —注浆设备故障; E <sub>5</sub> —通风设备故障; E <sub>6</sub> —电器设备故障; E <sub>7</sub> —监测设备故障; E <sub>8</sub> —电瓶车故障

### 3 基于 DEMATEL - ISM 的盾构掘进安全事故致因模型

#### 3.1 DEMATEL - ISM 方法

DEMATEL - ISM 方法集成了 DEMATEL 和 ISM , 可有效降低可达矩阵的计算复杂度<sup>[8]</sup>。本研究运用该方法分析安全因素间相互关系进而构建安全事故致因模型, 具体步骤如下:

步骤 1: 设定安全关键影响因素集为  $F$ , 其中  $f_i \in F$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 表示单个因素。

步骤 2: 选取行业内  $m$  位专家评价因素  $f_i$  对因素  $f_j$  的影响  $e_{ij}^k$ 。若因素  $f_i$  对因素  $f_j$  存在影响, 则  $e_{ij}^k = 1$ ; 反之则  $e_{ij}^k = 0$ 。令  $e_{ij}^* = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m e_{ij}^k$ , 则可构成各因素之间的直接影响矩阵  $E$  如下:

$$E = \begin{bmatrix} 0 & e_{12}^* & \dots & e_{1n}^* \\ e_{21}^* & 0 & \dots & e_{2n}^* \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{n1}^* & e_{n2}^* & \dots & 0 \end{bmatrix} = (e_{ij}^*)_{n \times n} \quad (1)$$

式中  $e_{ij}^*$  ——因素  $f_i$  对因素  $f_j$  的直接影响。

步骤 3: 规范化直接影响矩阵, 可得到规范化矩阵  $S$  ( $S = (s_{ij})_{n \times n}$ ) 其中

$$S = \left( \frac{1}{\max_{j=1}^n \sum_{i=1}^n e_{ij}^*} \right) E \quad (2)$$

式中  $\max_{j=1}^n \sum_{i=1}^n e_{ij}^*$  ——每一行相加的最大值。

步骤 4: 计算因素系统间的综合影响矩阵  $T$  ( $T = (t_{ij})_{n \times n}$ ) 矩阵  $T$  的计算公式为

$$T = S(I - S)^{-1} \quad (3)$$

式中  $I$  ——单位矩阵。

步骤 5: 选择合适的  $\lambda$  对  $T$  进行删减得到关联矩阵  $R$  ( $R = (r_{ij})_{n \times n}$ ) 转换原则如下:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1 & t_{ij} > \lambda \\ 0 & t_{ij} < \lambda \end{cases} \quad (4)$$

步骤 6: 在关联矩阵  $R$  的基础上求解元素的可达集合  $Q_r$  和前项集合  $Q_a$ , 逐级除去可达集合与前项集合交集 ( $Q_r \cap Q_a$ ) 为空集的元素, 求解因素系统结构层次。

#### 3.2 盾构掘进安全事故致因模型

地铁盾构掘进安全事故是在各安全因素相互作用下逐渐发育和形成的, 是一个复杂的系统过程, 分析该系统中各因素间的关系可用于构建盾构掘进安全事故致因模型。基于本文 3.1 节, 选取 25 位盾构安全管理经验丰富的专家进行问卷访谈。收集和整理访谈数据, 获得直接影响矩阵  $E$ 。然后带入 MATLAB 按照式 (2)、式 (3) 进行矩阵运算, 可求得综合影响矩阵  $T$ 。基于式 (4), 选取  $\lambda = 0.2$  对综合影响矩阵  $T$  进行删减, 得到关键影响因素的关联矩阵  $R$ , 如图 2 所示。

在关联矩阵的基础上按照步骤 6 进行求解, 可得到安全影响因素的系统结构(图 3), 然后分析最顶层与安全事故直接关系, 构建安全事故致因模型(图 3)。

如图 3 所示, 整个地铁盾构掘进安全事故致因模型包括 5 层: 安全基础层、安全传递层、因素交互层、致险情境层和事故层。安全文化、安全制度和安全组织为整个系统模型的基础, 指出各参建单位的安全管理规范程度是引起工程安全事故的根本原因。具有较高安全意识和安全能力的安全管理人员可以通过安全培



安全管理是环境安全影响因素、人员安全影响因素和机械设备安全影响因素的交互过程。地铁隧道处于复杂的地质环境,前期探测无法全面获得详细地层信息,环境因素不确定带来极大安全风险;盾构机械属于复杂技术机械,掘进过程中因各种因素影响易发生设备故障;因此,安全管理人员和施工作业人员同环境因素与机械设备因素的交互极为重要,可及时发现事故和排除安全隐患,从而降低安全事故的发生。致险情境是安全事故发生的直接原因,因下层因素交互不充分,致使致险情境不断加剧,超过临界点,则发生安全事故,其中安全预案、安全检查和安全技术作业是现场安全管理的关键点。

### 3.3 地铁掘进安全事故致因模型的特点

本文研究构建的地铁掘进安全事故致因模型具有以下特点:

一是模型中引入致险作业情境因素。以往模型忽略导致安全事故的直接因素(致险作业情境因素),比如“约束和响应”模型认为各相关方的约束与响应引起了不合理的施工控制、作业约束和施工规划,进而导致不合适的施工作业、作业行为和现场条件,致使安全事故发生<sup>[4]</sup>。然在实际施工过程中,不合适的施工作业、作业行为和现场条件广泛存在,并不一定导致安全事故,该类未指明安全事故发生的直接原因。盾构掘进安全事故的形成是一个动态、不断加剧的系统过程,管理人员与作业人员同致险施工环境的交互极为

重要。本文构建的系统致因模型引入致险情境层,更能体现出安全事故形成过程中人员、机械、环境和致险情境的动态交互过程。

二是模型沿用“链式致因”思路,工程特点明显。拉夫堡模型基于“传染病”事故致因模型建立,考虑导致安全事故直接影响因素的交互关系<sup>[5]</sup>,但该模型仅模糊表达各直接影响因素相互交互导致安全事故,并未给出明确的“事故因素链”,导致工程应用性差。本研究构建的模型有明确的“事故因素链”,工程实用性强,可直接指导安全管理人员制定明确的截断措施。同时,此模型针对地铁盾构掘进施工开展研究,少有学者提出该施工情境下的安全事故致因模型。

## 4 案例分析

### 4.1 案例概况

CS 地铁 4 号线 HF 盾构区间设计采用盾构法施工,区间地质总体分为泥灰岩区段、砂岩区段和复合地层区段三个区段。工程位于湘江西侧约 900 m 处,基岩裂隙水稳定水位埋深为 0.00 ~ 9.60 m。区间通过地表建筑物 7 座。

### 4.2 盾构区间的安全因素识别

区间段施工前,应用上文构建的安全影响因素分析框架和安全关键影响因素清单识别了各类安全影响因素,经过分析和筛选,最终确定的 HF 区间安全关键影响因素清单如表 2 所示。

表 2 HF 区间安全关键影响因素清单

类别		安全关键影响因素	
HF 盾构区间施工安全关键影响因素	环境安全影响因素	自然环境安全影响因素	岩溶富水地层,邻近湘江
		人造环境安全影响因素	HN 大学工程馆,HN 大学碰撞实验室,HN 大学教学南楼,HN 大学风洞实验室,HN 大学工程实验楼,HN 大学软件学院
		致险作业情境因素	盾尾姿态不稳,盾构参数突变,土仓压力不稳,隧道漏水
	人员安全影响因素	管理人员安全影响因素	安全管理意识低,安全管理能力稍差
		技术作业人员安全影响因素	作业人员有隐疾,作业安全意识低,安全作业水平稍不足
	机械设备安全影响因素	刀盘结泥饼,土仓积泥,管片安装设备故障,通风设备故障,电器设备故障,监控设备故障	

### 4.3 安全措施及应用效果

人员采取对应安全管理措施,如表 3 所示。

基于前文安全事故致因模型分析,项目安全管理

表 3 安全管理人员采取的主要防护措施

HF 区间施工安全关键影响因素		安全措施
环境安全影响因素	自然环境安全影响因素	超前注浆;增加地下水位观测
	人造环境安全影响因素	加强建筑物地表沉降监测
	致险作业情境因素	按照技术规范决策和作业;积极编制安全预案;加强作业过程安全信息沟通和人员交互;特殊安全致险作业情境开展专家会

续表3 安全管理人员采取的主要防护措施

HF 区间施工安全关键影响因素		安全措施
人员安全 影响因素	管理人员安全影响因素	加强对管理人员、安全人员教育
	技术作业人员安全影响因素	土仓作业前健康筛查; 招聘技术娴熟的工人; 加强作业前安全教育
机械设备安全影响因素		施工过程中增大各施工机械设备的检查频次; 选择合适时间开展土仓作业

通过采取对应的安全防护措施, HF 区间盾构掘进过程中未发生涌水和坍塌安全事故, 未出现触电、中毒等安全事件; 并且地表建筑物监测竖向位移最大值为  $-3.38 \text{ mm}$  ( $< 30 \text{ mm}$ ), 最大变率为  $0.08 \text{ mm/d}$  ( $< 3 \text{ mm/d}$ )。整个施工区间安全通过, 获得 CS 市安全质量标准化示范工地。

## 5 结论

(1) 运用“人-机-环境”的系统工程方法构建了盾构掘进安全影响因素分析框架, 并基于此结合文献分析、案例分析和专家访谈, 系统识别地铁盾构掘进过程中的安全关键影响因素, 提炼出 34 个安全关键影响因素, 分为 7 类, 即自然环境安全影响因素、人造环境安全影响因素、组织环境安全影响因素、致险作业情境因素、管理人员安全影响因素、技术作业人员安全影响因素和机械设备安全影响因素。

(2) 应用 DEMATEL-ISM 模型分析了安全关键影响因素的相互影响, 基于此构建了地铁盾构掘进安全事故致因模型, 并对比了“约束和响应”模型和拉夫堡模型, 说明该模型具有动态性和实用性特点。该模型指出致险作用情境是安全事故的直接原因, 安全组织因素是根本原因, 而管理人员通过优化自身、作业人员、机械设备与环境的复杂交互过程可有效地降低安全事故的发生, 安全预案、安全检查与安全技术作业是现场管理的重点。

## 参考文献:

- [1] 邓小鹏, 袁竞峰, 陆莹, 等. 地铁项目安全绩效关键影响因素分析研究[J]. 中国安全科学学报, 2010(2): 110-115.  
Deng Xiaopeng, Yuan Jingfeng, Lu Ying, etc. Analysis of Key Influencing Factors of Subway Project Safety Performance [J]. China Safety Science Journal, 2010(2): 110-115.
- [2] 任建喜, 杨锋, 朱元伟. 邻近建筑物条件下西安地铁盾构掘进风险评估[J]. 铁道工程学报, 2016(7): 88-93.  
Ren Jianxi, Yang Feng, Zhu Yuanwei. The Risk Assessment of Shield Construction under the Condition of Adjacent Buildings in Xi'an Metro [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2016(7): 88-93.
- [3] 张明书, 龚伦, 陈海勇, 等. 地铁 TBM 区间上跨高铁隧道施工关键技术研究[J]. 铁道工程学报, 2019(7): 76-80.  
Zhang Mingshu, Gong Lun, Chen Haiyong, etc. Research on the Key Technologies of Construction of TBM Interval Tunnel across High-speed Railway [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2019(7): 76-80.
- [4] Suraji A, Duff A R, Peckitt S J. Development of Causal Model of Construction Accident Causation [J]. Journal of Construction Engineering and Management, 2001(4): 337-344.
- [5] Behm M, Schneller A. Application of the Loughborough Construction Accident Causation Model: a Framework for Organizational Learning [J]. Construction Management and Economics, 2013(6): 580-595.
- [6] 吴贤国, 冯宗宝, 王洪涛, 等. 基于动态元网络的地铁施工安全事故致因分析[J]. 中国安全生产科学技术, 2019(3): 141-147.  
Wu Xianguo, Feng Zongbao, Wang Hongtao, etc. Analysis on Causes of Safety Accidents in Subway Construction Based on Dynamic Meta-network [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019(3): 141-147.
- [7] Loosemore M, Cheung E. Implementing Systems Thinking to Manage Risk in Public Private Partnership Projects [J]. International Journal of Project Management, 2015(6): 1325-1334.
- [8] 补利军, 于振江, 邵泽开. 集成 DEMATEL/ISM 的高校消防安全管理影响因素研究[J]. 中国安全科学学报, 2018(11): 129-134.  
Bu Lijun, Yu Zhenjiang, Shao Zekai. Study on Factors Influencing Fire Safety Management in Universities Based on DEMATEL/ISM [J]. China Safety Science Journal, 2018(11): 129-134.