

基于三维程式的海底通道地铁项目施工风险识别*

李顺平¹, 周红², 舒婷²

(1:中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518054; 2:厦门大学, 福建 厦门 361005)

摘要:以盾构法整个掘进过程为对象,根据盾构法施工阶段的工艺步骤,结合以往经验及研究成果,运用盾构法施工风险识别的三维程式方法确定风险识别的范围和对象。通过WBS工作分解结构树和RBS风险分解结构树耦合,梳理盾构法施工基本工序单元与风险因素的对应关系,构建盾构法施工风险因素识别WBS-RBS结构矩阵,并据此建立过海通道盾构法施工风险因素矩阵,识别出过海通道盾构法施工关键风险因素。以期对过海通道盾构法项目施工风险管理提供理论依据和风险识别工具,为其他类似工程施工风险识别提供参考。

关键词:施工风险识别;三维程式;工作分解结构;风险分解结构

中图分类号: TU71; U231.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-851X(2019)12-0036-05

DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.201912036

Construction Risk Identification of Cross-sea Channel Subway Project Based on 3D Program

LI Shunping¹, ZHOU Hong², SHU Ting²

(1:China Railway South Investment Group Co., Ltd, Shenzhen 518054, China; 2:Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: This paper takes the whole excavation process from the beginning of the shield method as the object. According to the process steps of the shield construction stage, combined with the previous experience and research results, the three-dimensional program method of shield construction risk identification is used to determine the scope and the objects of risk identification. Through the coupling of WBS work breakdown structure tree and RBS risk decomposition structure tree, the corresponding relationship between the basic process unit and risk factors of shield construction is combed, and the WBS-RBS structure matrix of shield construction risk factor identification is constructed. The risk factor matrix of the sea channel shield construction method identifies the key risk factors for the construction of the cross-sea channel shield method. In order to provides theoretical basis and risk identification tools for construction risk management of the cross-sea channel shield method project, and provides reference for other similar project construction risk identification.

Keywords: construction risk identification; three-dimensional program; work breakdown structure; risk breakdown structure

为解决城市用地矛盾与交通拥堵问题,地铁建设成为主要解决方法。当前我国地铁及海底隧道建设已进入高峰期。由于地铁工程建设难度大,风险性高,易引发隧道施工期间安全事故,带来经济损失,甚至人员伤亡。据统计,在我国地铁区间工程事故案例中,盾构法施工事故占有所有工法事故的一半以上(见图1),事故发

生率较高,累计死亡人数也较多。

相比陆域隧道,海底隧道承受高水压的作用,复杂的地质条件,基岩突起、风化岩层等,一旦发生风险事故,造成的环境破坏、经济损失和可能发生的人员伤亡更大。因此,在海底隧道的施工中,风险管理尤为重要。其中,风险识别是施工风险管理的首要工作。

1 盾构隧道施工风险源识别的三维程式

1.1 盾构隧道施工风险源识别的三维程式

为准确识别出特定的地质环境中起作用的有限风险源,竺维彬与鞠世健提出盾构法施工风险识别的三

*基金项目: 中铁建投2016年科技重大计划: 基于BIM的厦门地铁三号线过海通道施工风险集成控制与系统研发(201601-1)

作者简介: 李顺平,男,生于1979年,陕西富平人,高级工程师,主要从事工程项目管理方面的研究与工作。

收稿日期: 2019-03-18

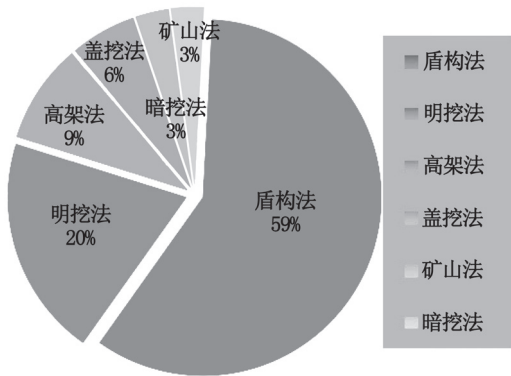


图1 地铁区间工程不同施工工法事故统计

维程式模型, 将盾构法施工风险体系分为广义自然风险、广义人为风险和盾构机适应性风险, 并结合三维程式识别法和集合论的思想进行风险识别。风险识别的三维程式可理解如图2: 分别用A、B、C三轴表示自然风险源、盾构机适应性风险源和人为风险源, 将每一风险源(A、B、C)细分为若干风险源因素(A_i、B_j、C_k), 最终发生事故的风险源为其中一个或几个因素的组合。

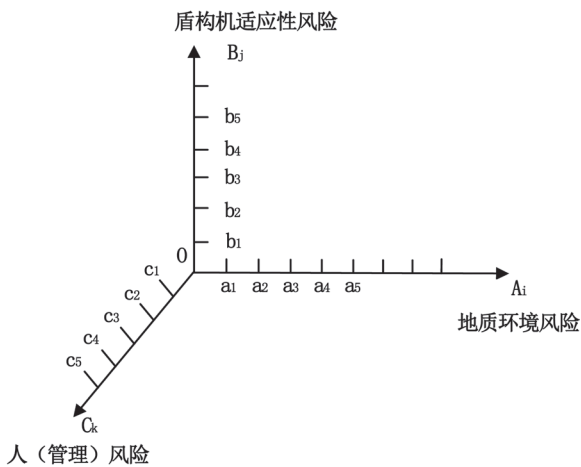


图2 风险识别的三维程式模型

由于在盾构推进过程中, 风险源动态变化, 无法精确客观地将其数量化表达, 因此结合集合论的思想, 将三维程式模型理解为: $A = \{\text{地质可能风险因素}\} = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_i\}$; $B = \{\text{盾构机可能风险因素}\} = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_j\}$; $C = \{\text{人(管理)可能风险因素}\} = \{c_1, c_2, c_3, \dots, c_k\}$; $T = \{\text{引发事故的风险源}\}$; $U = \{\text{风险源全集}\}$ 。风险因素的组合可能发生情况如图3: (1) 由于人(管理)可能风险因素造成事故; (2) 由于人(管理)以及地质环境可能风险因素造成事故; (3) 由于人(管理)风险及盾构机的适应性可能风险因素造成事故; (4) 由于地质情况、盾构机的适应性及人(管理)可能风险因素共同作用造

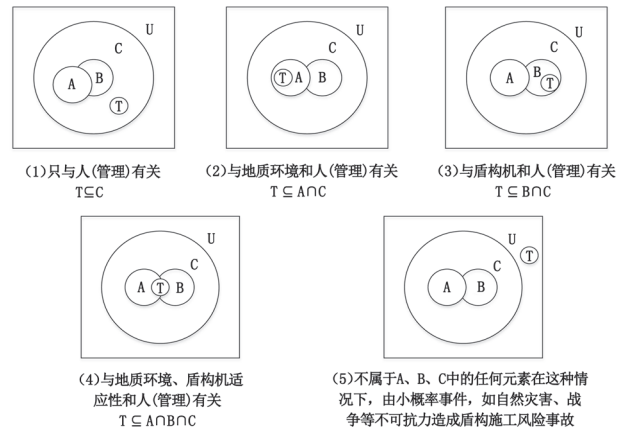


图3 风险因素组合的不同情况

成事故; (5) 由于自然灾害、战争等不可抗力等小概率风险事件造成事故。

1.2 基于三维程式的盾构法施工风险结构分解

盾构法施工的三维程式风险结构可以分解为地质环境风险、盾构机适应性风险、人员(管理)风险。

(1) 地质环境风险。地质环境是盾构法施工隧道的载体, 地质特征对盾构法施工具有决定性的影响主要从岩土形成的地史、地层的组合、岩石地层的岩性和地质构造、风化作用以及对盾构法施工而言的不良地质等方面进行识别。

(2) 盾构机适应性风险。盾构机适应性风险的识别主要考虑: 盾构机适应性在复合地层中的局限性; 盾构机选型的理论合理性与施工条件可能性的矛盾; 盾构机刀具配置的困难以及其他如盾构机螺旋输送机扭矩设计、泡沫管设置等的设计风险; 盾构机在钢材的选用、加工工艺水平及精度等的制造风险; 盾构机的运输、组装和解体风险等方面。

(3) 人员(管理)风险。人员(管理)风险指由于工程相关人员的行为活动偏差原因可能导致的潜在风险。对于盾构法施工而言, 主要是研究施工单位在盾构法施工过程中引发风险的人为因素偏差, 如: 由惯性思维和行为定式引发的风险; 施工现场人员在其对施工过程中各种状况的正确分析、判断和应对方面的能力及素质风险; 以及组织方式、管理制度、管理措施、道德行为和职业责任等的施工管理风险等方面。

2 基于三维程式的盾构法施工风险识别

施工风险首先是面向施工过程, 也就是从施工过程来进行风险识别、风险分析和风险控制与管理。盾构法施工风险识别的第一步需要进行施工过程的分解

(WBS, Work Breakdown Structure), 然后进行施工过程的风险结构分解 (RBS, Risk Breakdown Structure)。

2.1 盾构法施工WBS工序分解

将盾构法施工, 按照施工过程, 把各项工作分解到施工工序 (本文因后续风险评估方法的引入, 将工作分解统称为“分解树”)。根据过海通道盾构法施工阶段的工艺步骤, 将施工作业由上至下逐级分解, 主要工序过程为盾构始发、盾构掘进和盾构机到达解体吊出三个阶段。

(1) 盾构始发阶段 (W₁): 盾构始发是盾构法施工的首要步骤, 关系到盾构隧道能否顺利进入正常掘进阶段, 也是最易发生事故的部分。其主要内容包括: 始发端头加固、安装始发基座、盾构机组装及试运转、安装反力架及支撑、凿除洞门临时墙和围护结构、安装洞门密封装置、盾构姿态复核、拼装负环管片、盾构贯入作业面建立平衡压力和盾构试掘进等一系列作业过程。其中始发端头加固 (W₁₁)、安装始发基座 (W₁₂)、安装反力架及支撑 (W₁₃)、安装洞门密封装置 (W₁₄) 及盾构试掘进 (W₁₅) 等工序最易引发风险。

(2) 盾构掘进阶段 (W₂): 盾构掘进阶段是盾构法施工的主要工序, 根据始发试掘进阶段的情况设置掘进参数, 在掘进过程中, 必须按施工实施情况及时调整土仓压力、控制出渣量, 确保开挖面的稳定, 控制地面沉降在允许范围内, 严格按照规范进行掘进操作。重点控制内容有: 盾构机参数管理 (W₂₁)、开挖掘进 (W₂₂)、壁后注浆 (W₂₃)、管片拼装 (W₂₅)、开舱换刀 (W₂₆)、以及泥水系统控制 (W₂₄) 等。

(3) 盾构机到达解体吊出 (W₃): 在常压下进行盾构机的拆卸主要包括拆机检查及准备 (W₃₁)、加固及检验 (W₃₂)、拆机及吊装运输 (W₃₃) 等。

根据以上分析构建盾构法施工WBS施工工序分解树, 详见图4。

2.2 过海通道盾构法施工RBS风险分解

通过文献研究、盾构法施工事故多发部位统计和风险原因, 并以WBS分解的施工工序为基础, 基于盾构法施工风险识别的三维程式, 从地质环境因素、盾构机适应性相关因素以及人员 (管理) 因素对过海通道泥水盾构法施工进行风险分解。

(1) 地质环境因素 (D): 三维程式模型对地质风险的识别主要考虑岩土形成的地史、地层的组合、岩石地层的岩性和地质构造、风化作用和不良地质几个方面。首先把地质环境因素分解为地质条件风险 (D₁) 和环境条件风险 (D₂); 在此基础上进一步分解, 重点考虑上软下硬 (基岩凸起)、软土及强风化等特殊地层 (R₁)、海域地质断层及风化深槽 (R₂) 等特殊地质条件风险; 以及海底浅覆土 (R₄)、突遇地下障碍物 (R₅)、地层中含有有害气体 (R₆) 等环境条件风险。

(2) 盾构机适应性相关因素 (S): 三维程式模型中对盾构机适应性相关因素的识别主要集中在盾构机选型设计、制造加工以及装运等相关方面, 围绕盾构机设备本身。但根据以往研究及事故案例, 并与专业人员的交流发现, 与盾构机适应性相关的风险因素不仅限于盾构机设备本身, 还应包括与盾构机相关的施工技术、材料等因素。因此, 本文在三维程式模型的基础上进行适当改进, 将盾构机适应性相关因素分解为盾构机施工技术 (J)、材料因素 (C) 和机械设备 (X) 三个方面。

①首先, 针对施工过程中的关键环节, 从施工工艺的角度分解为端头技术风险 (J₁) 和掘进技术风险 (J₂)。端头技术风险进一步划分为端头加固密封问题

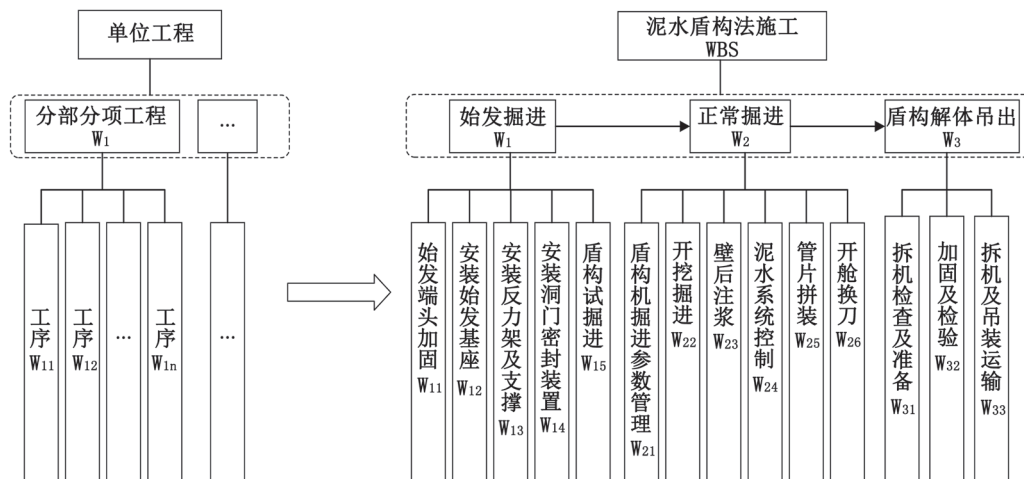


图4 盾构法施工WBS施工工序分解树

(F) 和盾构机拆除阶段盾体与围岩固定不到位 (R_9)；再将端头加固密封问题分解为端头加固方案、效果不佳 (R_6)、始发支架和反力架支撑效果不佳 (R_7)、洞门密封不严 (R_8)。同时，将掘进技术风险进一步分解为系统参数设置问题 (J_{21})、系统控制问题 (J_{22}) 和拼拆装问题 (J_{23})，再进一步将系统参数设置问题分解为盾构机掘进参数控制不当 (R_{10})、盾构机掘进姿态控制不当 (R_{11})、舱体压力控制不当 (R_{12}) 等系统参数设置问题方面的风险因素；将系统控制问题分解为注浆系统控制不当 (R_{13})、泥水系统管理不当 (R_{14}) 等风险因素；在拼拆装问题中重点考虑管片拼装不到位 (R_{15})、开舱换刀 (R_{16}) 等风险因素。

②管片和注浆是过海通道盾构法施工中的结构基础，泥水改良材料是泥水系统正常运转的关键。材料风险因素主要分解为管片质量控制不当 (R_{17})、注浆质量控制不当 (R_{18})、泥水改良材料质量控制不当 (R_{19})。

③相对于运输、组装和解体风险，盾构机在施工过程中更容易在刀盘刀具、防水系统和配套设备上出现问题，从而引发风险事故。因此，在机械设备 (X) 基础上，进一步分解为设备选型问题与故障风险 (X_1) 以及设备防水体系风险 (X_2)，并分别将二者分解为盾构机设备选型、设计不当 (R_{20})；设备系统故障 (R_{21})；刀盘刀具磨损、更换不及时 (R_{22})；防水体系的风险主要考虑盾尾密封出问题 (R_{23})；铰接密封出问题 (R_{24}) 以及主轴承密封出问题 (R_{25})。

(3) 人员 (管理) 因素 (R_3)：三维程式模型中人员 (管理) 的风险主要是由人对经验的过分依赖而导致的思维固化和疏忽大意引起的。但经验同时又是指导施工必不可少的参考，这就需要通过个人能力对其进行权衡。此外，施工人员的违规操作以及组织管理不当往往是引发风险事故的重要因素。因此，将人员 (管理) 因素分解为施工经验及能力不足 (R_{26})、施工人员违规操作 (R_{27}) 和施工组织管理不到位 (R_{28})。

根据以上分析构建盾构法施工风险的RBS分解树，详见图5。

3 过海通道盾构法地铁施工风险WBS-RBS结构矩阵

WBS-RBS风险结构矩阵由WBS分解树和RBS分解树的最底层元素相互交叉耦合而成，即把WBS分解树的最底层工序元素作为列，RBS分解树的最底层风险元素作为行，构建形成矩阵结构，从而反映基本工作单位与基本风险因素的对应关系。

本文以厦门地铁3号线本岛至翔安过海通道工程为例，建立过海通道盾构法地铁施工风险WBS-RBS结构矩阵，以期识别其施工过程中的显著风险源。该项目是连接厦门本岛与翔安东部副中心的西南—东北向骨干线，其中，五缘湾站至刘五店站区间盾构段采用泥水盾构法施工，长约1.4km，见图6；采用针对项目特点设计的德国海瑞克牌双舱式泥水平衡盾构机，盾构机自刘五店

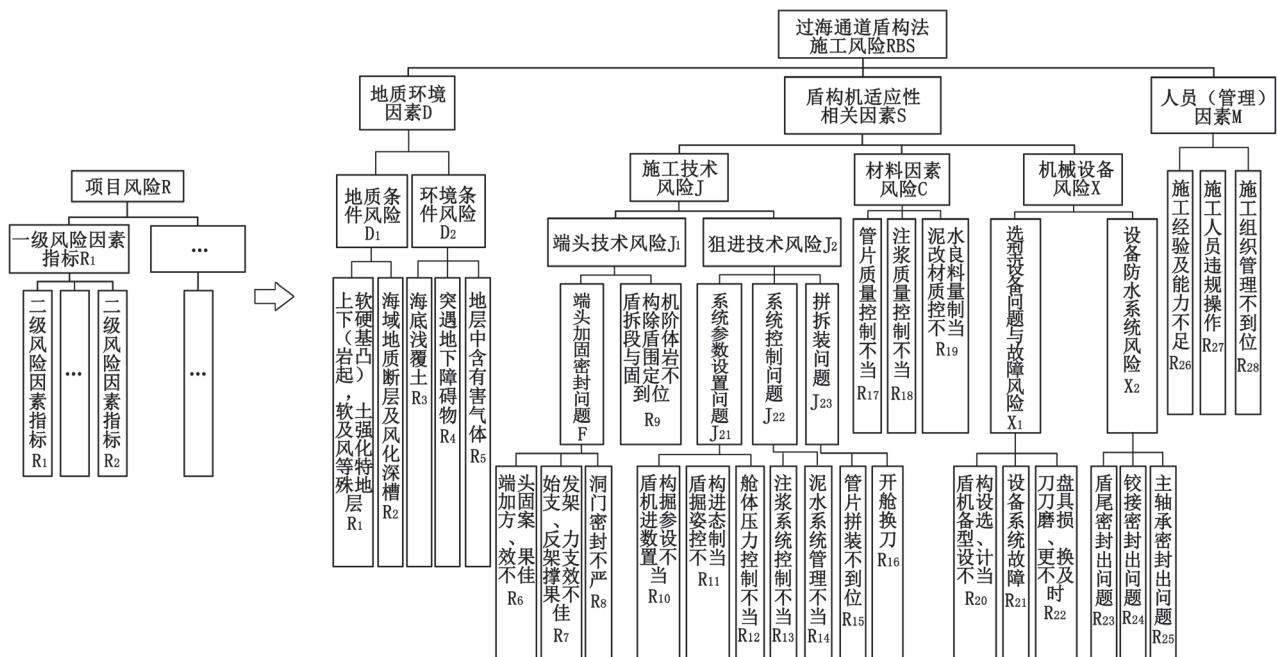


图5 盾构法施工风险的RBS分解树

表1 厦门地铁3号线盾构法施工风险因素识别WBS-RBS矩阵

		D					S																		M			
		D ₁		D ₂			J									C			X									
							J ₁			J ₂									X ₁			X ₂						
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	F			J ₂₁			J ₂₂			J ₂₃			R ₂₀	R ₂₁	R ₂₂	R ₂₃	R ₂₄	R ₂₅				
W ₁₁	W ₁₂	W ₁₃	W ₁₄	W ₁₅	W ₂₁	W ₂₂	W ₂₃	W ₂₄	W ₂₅	W ₂₆	W ₃₁	W ₃₂	W ₃₃	R ₁₇	R ₁₈	R ₁₉	R ₂₀	R ₂₁	R ₂₂	R ₂₃	R ₂₄	R ₂₅	R ₂₆	R ₂₇	R ₂₈			
W ₁	W ₁₁	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	
	W ₁₂	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	W ₁₃	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	W ₁₄	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	W ₁₅	0	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
W ₂	W ₂₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
	W ₂₂	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	W ₂₃	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
	W ₂₄	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	W ₂₅	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	1	0	1	1
	W ₂₆	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1
W ₃	W ₃₁	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
	W ₃₂	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1
	W ₃₃	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1

站始发，掘进至矿山法段与泥水盾构段工法交接处停机，拆除盾构机弃置盾壳运输至始发站吊出。该区段周边无既有道路，仅铺设了施工临时便道；地表为海域、空地，周边无建筑物及管线。区间段穿越的地层主要为中粗砂、残积土、圆砾、粉质粘土、强风化花岗闪长岩、中等风化花岗闪长岩、微风化花岗闪长岩，其中隧道范围内存在基岩凸起、孤石及硬岩段。

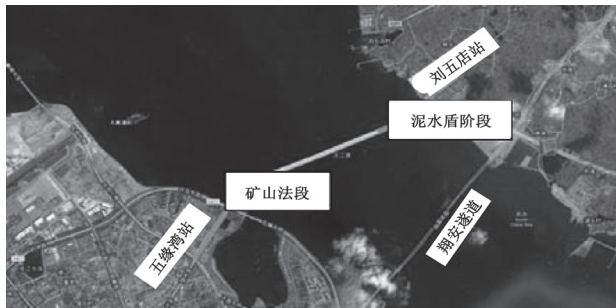


图6 五缘湾站-刘五店站区间平面示意图

根据项目特点，结合以往学者研究以及现场盾构专家、管理人员、技术人员、施工经验丰富的工人等对过海通道盾构法施工风险的意见，逐一判断矩阵中每个元素的值，若基本工序单元对应的风险因素存在，则在表格中填入“1”，以深色标示；若不存在，则将该元素定义为“0”，以浅色标示，见表1。由此可以看出盾构法不同施工阶段的显著风险源，从而采取对应的防范措施。

4 结 语

盾构法是目前地铁隧道施工使用较为普遍的方法，主要以自动化见长，但同时也是最容易发生风险的施工方

法之一。厦门地铁3号线过海通道工程地质复杂，风险管理尤为重要，为识别该工程的风险，本文采用三维程式识别法，构建盾构法施工风险识别的三维程式，结合WBS-RBS方法，构建了盾构法地铁施工风险WBS-RBS结构矩阵；在此基础上，建立了过海通道盾构法施工风险因素结构矩阵，并识别出施工过程中的关键风险因素。实践表明，该方法简单易行，并能够与贝叶斯网络分析法相结合，进行下一步的定量评估。因此，本文建立的地铁施工风险结构矩阵可以应用于类似地铁项目的风险识别。▲

参考文献

- [1] 洪开荣.我国隧道及地下工程发展现状与展望[J].隧道建设, 2015 (2) : 95-107.
- [2] 李浩然, 李启明, 等.2002~2016年我国地铁施工安全事故规律性的统计分析[J].都市轨道交通, 2017 (1) : 12-19.
- [3] 候寒冰.地铁建设项目施工风险评价方法与准则研究[D].大连: 大连理工大学, 2011.
- [4] 竺维彬, 鞠世健.地铁盾构施工风险源及典型事故的研究[M].广州: 广州暨南大学出版社, 2011.
- [5] 陈馈, 洪开荣, 焦胜军.盾构施工技术[M].北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.
- [6] 丁敏.基于事故统计的盾构法施工风险识别[J].建筑机械化, 2017 (11) : 44-47.
- [7] 丁敏.基于贝叶斯网络法的厦门地铁3号线过海通道盾构法施工风险评价[D].厦门: 厦门大学, 2018.