

基于N-K模型的地铁施工安全风险耦合研究

吴贤国¹ 教授 吴克宝² 沈梅芳^{1*} 陈跃庆³ 张立茂¹

(1 华中科技大学 土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074)

2 华中科技大学 土木工程检测中心, 湖北 武汉 430074 3 武汉市建设委员会, 湖北 武汉 430074)

学科分类与代码:6203099(安全工程技术科学其他学科)

中图分类号:X913.4

文献标志码:A

基金项目:国家自然科学基金资助(51378235,71571078);湖北省自然科学基金重点项目资助(ZRZ2014000104);

教育部博士后基金资助(2015M570645);武汉市建委科技项目(201217, 201208, 201334)。

【摘要】 为研究地铁施工安全风险管理中的风险概率变化情况,对影响地铁施工安全的人为、设备、管理和环境等因素进行风险耦合分析,构建基于复杂网络的N-K模型,计算不同风险耦合情况发生的概率和风险值。结果表明,多因素风险耦合会增加事故发生的概率,主观因素(人为因素和管理因素)风险完全耦合比不完全耦合造成的风险大;主观因素与环境因素完全耦合最容易引起安全事故。

【关键词】 地铁施工; 复杂网络; 风险耦合; N-K模型; 安全管理

Research on coupling of safety risks in metro construction based on N-K model

WU Xianguo¹ WU Kebao² SHEN Meifang¹ CHEN Yueqing³ ZHANG Limao¹

(1 School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China 2 Civil Engineering Testing Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan

Hubei 430074, China 3 Wuhan Construction Committee, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: To study metro construction safety risk management and probability of accidents because of interaction between various risk factors, coupling was analyzed from the aspects of personnel factors, equipment factors, management factors and environmental factors. And an N-K model was built to calculate the number and frequency of risk coupling events. The result shows that multi-factor risk coupling increases the probability of accident, that safety risks increase when human factors and management factors involve in risk coupling. The conclusions can provide reference for improving metro construction safety management.

Keywords: metro construction; complex network; risk coupling; N-K model; safety management

0 引言

地铁施工处于一个复杂的风险系统中,安全事故的发生往往是多个风险因素共同作用的结果,这些风险因素间的耦合作用,使事故发生的概率更难确定。

国内对地铁施工安全事故的研究较多,例如:解东升等^[1]分析了几种典型事故,初步得出事

故发生的一些特点和规律;HU Qunfang等^[2]通过对比分析隧道施工事故的发生特征,提出了控制和降低事故率的对策与建议;范京玲^[3]通过地铁工程风险源分析,提出从整体工程的角度,多方参与管理和控制风险源。以往的研究一般从事故发生的时间、类型、死亡人数等因素入手,很少从成因角度进行分析;仅王梦恕等^[4]对地铁施工安全事故发生的主要原因进行了分析,但未考虑各因素

间的相互影响。

N-K模型^[5]起源于信息理论, 原本用于测度信息的传输量, 现发展为解决复杂系统的通用模型。它主要用于分析系统内部要素间相互作用对系统整体适应性的影响, 被广泛应用于经济金融等方面, 目前尚缺乏在地铁施工安全领域的研究。基于此, 笔者将结合N-K模型相关理论, 从风险耦合作用对地铁施工安全风险影响的角度展开研究, 通过构建该模型计算不同耦合方式下, 安全事件发生的概率和风险值, 根据风险值大小评估地铁施工过程的安全状态, 以期对地铁施工安全风险控制管理提供参考。

1 地铁施工安全风险机理分析

1.1 风险辨识与因子分析

结合文献[6]对风险的定义, 将地铁施工安全风险定义为在特定的条件下, 地铁施工安全风险系统内部及与其关系密切相关的各因素, 出现不安全事件的可能性及造成损失的程度。

通过对相关文献^[7-11]的研究, 将地铁施工安全风险主要影响因素划分为人为、设备、管理和环境4个方面。

1) 人为因素风险。在地铁施工中, 人是最活跃因素, 是事故产生的直接源头。人为因素风险包括生理缺陷风险, 缺乏安全知识、安全意识薄弱风险, 技术水平不足风险等。

2) 设备因素风险。设备因素风险指地铁施工过程中, 物质装备及施工机具等存在的缺陷引发的风险。设备因素风险主要包括设备质量不合格、设备老化性能降低、施工材料输送不当等。

3) 管理因素风险。管理因素风险指在施工管理过程中, 管理方案不科学, 施工组织设计不合理, 实际生产管理监督不到位引起的安全风险。管理因素风险包括对人员管理失误、安全检查不到位、规章制度存在漏洞、管理制度不落实等。

4) 环境因素风险。环境因素风险是指在施工过程中, 由于地质、水文等自然环境、施工场地周围建筑物、管线等社会环境和地铁施工内部工作环境造成的风险。环境因素风险包括工程地质条件不良、施工现场周边沿线交通情况复杂、地

下管线复杂, 狂风暴雨等。

1.2 风险耦合机理

耦合表示2个及以上系统或运动形式, 通过相互作用彼此影响趋于协同的现象^[8]。系统动力学认为^[9], 世界上的一切事物不是孤立的, 必须是作为系统中的某部分存在。耦合的过程就是各子系统间相互依赖、协调和促进的过程。在风险管理领域, 风险耦合定义为系统中某类风险的发生及其影响力依赖于其他风险的程度, 以及该风险影响其他风险形成及影响力程度。地铁施工过程中, 由于风险因子间相互依赖与影响, 最终会改变风险因子发生的概率, 形成风险演化过程中的风险耦合。

2 基于N-K模型的地铁施工安全风险耦合测度分析

N-K模型是用来研究复杂动态系统的一个通用模型, 包括2个参数: N 是系统构成要素的个数, K 是网络中相互依赖关系的个数。如果系统中有 N 种要素, 每种要素都有 n 种不同的状态, 则所有可能的组合方式共有 n^N 种^[9]。系统要素按照一定方式进行组合, 即形成了网络, K 的最小值为0, 最大值为 $N-1$ 。利用N-K模型测度地铁施工安全风险耦合步骤包括: 地铁施工耦合风险分类; 确定风险耦合信息交互公式; 构建双因素风险耦合类型计算公式; 构建多因素风险耦合类型计算公式。

2.1 地铁施工耦合风险分类

按风险因素耦合的数量将地铁施工安全风险耦合分为以下3类:

1) 单因素耦合风险。单因素耦合风险是指影响地铁施工安全的单个风险因素自身会包含多个风险因子, 各风险因子内部也会相互作用。单因素耦合风险包括人为因素耦合风险、设备因素耦合风险、环境因素耦合风险和管理因素耦合风险, 分别记为 $T_{11}(a)$, $T_{12}(b)$, $T_{13}(c)$, $T_{14}(d)$, 总耦合风险记为 T_1 。

2) 双因素耦合风险。双因素耦合风险是指影响地铁施工安全的2个风险因素间的相互影响。双因素耦合风险包括人-机因素耦合风险、人-环因素耦合风险、人-管因素耦合风险、机-环因素耦合风

险、机-管因素耦合风险及环-管因素耦合风险,分别记为 $T_{21}(a,b)$, $T_{22}(a,c)$, $T_{23}(a,d)$, $T_{24}(b,c)$, $T_{25}(b,d)$, $T_{26}(c,d)$, 耦合风险总值记为 T_2 。

3) 多因素耦合风险。多因素耦合风险是指影响地铁施工安全的3个及以上风险因素间的相互作用。多因素耦合风险包括人-机-环因素耦合风险、人-机-管因素耦合风险、人-环-管因素耦合风险、机-环-管因素耦合风险及人-机-环-管因素耦合风险,分别记为 $T_{31}(a,b,c)$, $T_{32}(a,b,d)$, $T_{33}(a,c,d)$ 和 $T_{34}(b,c,d)$, 耦合风险总值记为 T_3 。4因素耦合风险记为 $T_{41}(a,b,c,d)$, 耦合风险总值记为 T_4 。风险耦合模型如图1所示。

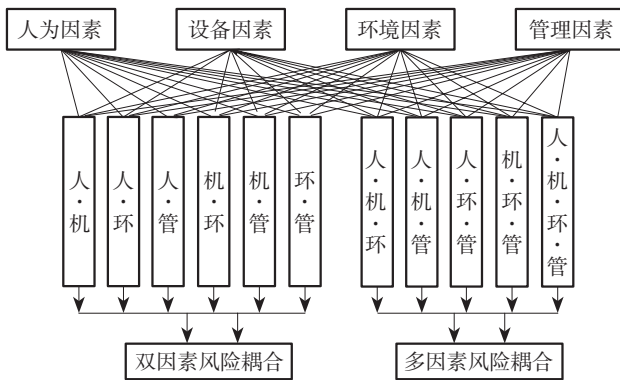


图1 风险耦合图示模型

Fig.1 Risk coupling graphic model

2.2 确定风险耦合信息交互公式

通过计算地铁施工过程中4类风险因素之间的交互信息,评价耦合作用形成新的风险状态。根据某种方式耦合次数衡量该耦合方式发生的概率,即耦合次数愈多,该耦合方式出现的概率愈大;根据耦合值大小衡量耦合风险大小和事故发生概率,即以某种形式耦合所得值愈大,那么表明了该耦合风险愈大,导致事故发生的概率愈大。交互信息的计算公式如下:

$$T(a,b,c,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{hijk} \cdot \log_2 \left(p_{hijk} / (p_{h...} \cdot p_{i..} \cdot p_{.j.} \cdot p_{...k}) \right) \quad (1)$$

$h=1,2,\dots,H; i=1,2,\dots,I; j=1,2,\dots,J; k=1,2,\dots,K$

式中 p_{hijk} 为人在第 h 种状态、设备在第 i 种状态、环境在第 j 种状态、管理在第 k 种状态下,4种因素风险耦合发生的概率。 T 值越大,说明地铁施工安

全风险越大, T 是对地铁施工安全风险耦合的量化评估。

2.3 构建双因素风险耦合类型计算公式

地铁施工安全风险大部分在局部进行耦合,局部风险耦合包括单因素风险耦合、双因素风险耦合以及多因素风险耦合。局部耦合可以是某因素内部不同风险因子间的耦合,该种耦合情况可以看做多因素风险耦合的特例。2个风险因素间的耦合会产生6种不同情况,例如:设备因素和环境因素发生耦合,但与人为因素风险关系不大时导致事故发生,就发生了局部风险耦合的情况。因此,通过计算发生在两者之间的信息交互可以探究局部风险耦合情况。双因素风险耦合的计算公式如下:

$$T_{21}(a,b) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I p_{hi} \log_2 \left(p_{hi} / (p_{h...} \cdot p_{i..}) \right) \quad (2)$$

$$T_{22}(a,c) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J p_{hj} \log_2 \left(p_{hj} / (p_{h...} \cdot p_{.j.}) \right) \quad (3)$$

$$T_{23}(a,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{k=1}^K p_{hk} \log_2 \left(p_{hk} / (p_{h...} \cdot p_{...k}) \right) \quad (4)$$

$$T_{24}(b,c) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{ij} \log_2 \left(p_{ij} / (p_{i..} \cdot p_{.j.}) \right) \quad (5)$$

$$T_{25}(b,d) = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p_{ik} \log_2 \left(p_{ik} / (p_{i..} \cdot p_{...k}) \right) \quad (6)$$

$$T_{26}(c,d) = \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{jk} \log_2 \left(p_{jk} / (p_{.j.} \cdot p_{...k}) \right) \quad (7)$$

2.4 构建多因素风险耦合类型计算公式

同理,3种因素导致局部风险耦合的耦合方式有4种,如人为因素、环境因素和管理因素风险耦合后引发安全事故,如果事故的发生与设备因素风险关系不大,即是局部风险耦合的情况。3种因素风险耦合的计算公式如下:

$$T_{31}(a,b,c) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J p_{hij} \cdot \log_2 \left(p_{hij} / (p_{h...} \cdot p_{i..} \cdot p_{.j.}) \right) \quad (8)$$

$$T_{32}(a,b,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K p_{hik} \cdot \log_2 \left(p_{hik} / (p_{h...} \cdot p_{i..} \cdot p_{...k}) \right) \quad (9)$$

$$T_{33}(a,c,d) = \sum_{h=1}^H \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{hjk} \cdot \log_2 \left(p_{hjk} / (p_{h...} \cdot p_{.j.} \cdot p_{...k}) \right) \quad (10)$$

$$T_{34}(b,c,d) = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K p_{ijk} \cdot \log_2 \left(p_{ijk} / (p_{i..} \cdot p_{.j.} \cdot p_{...k}) \right) \quad (11)$$

3 实证分析

3.1 工程背景

近年来，国内地铁建设发展取得了一定成绩，由于地铁建设具有比其他工程建设更加复

杂、地理位置特殊、施工环境复杂等特点，导致不同类型和层次的施工安全事故不断出现，造成了重大经济损失和不良社会影响。根据相关资料^[2]统计，2002—2014年间共发生183起地铁施工过程中

表1 部分安全事故信息
Tab. 1 Data on safety accidents

时间	事故地点	事故后果	人为因素	设备因素	环境因素	管理因素
2003年1月	北京5号线	人员伤亡	违章操作	设备故障	其他	施工组织不合理
2004年8月	广州4号线	高处坠落	安全措施不足	其他	其他	安全教育不到位
2006年6月	北京10号线	机械伤害	违规操作	设备故障	其他	其他
2010年7月	上海15号线	坍塌	其他	其他	地质复杂	施工方案不备

3.2 风险耦合计算

在N-K模型中，未发生的情况和发生的情况分别用0和1表示，则会出现16种可能的风险耦合情

况，通过分析地铁施工安全事故的统计数据，得出风险耦合发生的次数及每种耦合发生的频率，结果见表2。

表2 2002—2014年地铁施工安全事故风险耦合次数及频率
Tab.2 Number and frequency of risk coupling events for construction safety accidents from 2002 to 2014

单因素风险耦合	次数	0 000=0	1 000=5	0 100=1	0 010=2	0 001=2	—
	频率	$P_{0000}=0.000\ 0$	$P_{1000}=0.027\ 3$	$P_{0100}=0.005\ 5$	$P_{0010}=0.010\ 9$	$P_{0001}=0.010\ 9$	—
双因素风险耦合	次数	1 100=14	1 010=12	1 001=15	0 110=6	0 101=9	0011=6
	频率	$P_{1100}=0.076\ 5$	$P_{1010}=0.065\ 6$	$P_{1001}=0.082\ 0$	$P_{0110}=0.032\ 8$	$P_{0101}=0.049\ 2$	$P_{0011}=0.043\ 7$
多因素风险耦合	次数	1 110=23	1 101=30	1 011=26	0 111=18	1 111=12	—
	频率	$P_{1110}=0.125\ 7$	$P_{1101}=0.163\ 9$	$P_{1011}=0.142\ 1$	$P_{0111}=0.098\ 4$	$P_{1111}=0.065\ 6$	—

1) 单因素风险耦合分析。为了计算 T 值，首先计算以下不同方式风险耦合发生的概率。

根据式(1)，需计算 P_h, P_i, P_j, P_k 值。人为因素不参与风险耦合时事故发生概率为： $P_{0...}=P_{0000}+$

$P_{0100}+P_{0010}+P_{0001}+P_{0110}+P_{0101}+P_{0011}+P_{0111}=0.251\ 4$ ，同理可以计算： $P_{1...}, P_{0..}, P_{.1.}, P_{.0.}, P_{.1.}, P_{.0.}$ 和 $P_{...1}$ ，计算结果见表3。

表3 单因素变化风险概率
Tab.3 Probabilities of risk coupling events for single factors

$P_{0...}$	$P_{1...}$	$P_{0..}$	$P_{.1.}$	$P_{..0.}$	$P_{.1.}$	$P_{...0}$	$P_{...1}$
0.251 4	0.748 6	0.382 5	0.617 5	0.415 3	0.584 7	0.344 3	0.655 7

2) 双因素风险耦合分析。根据式(2)一式(7)，需计算 $P_{hi}, P_{hj}, P_{hk}, P_{ij}, P_{ik}$ 和 P_{jk} 值。人为因素与设备因素不参与风险耦合时事故发生概率为： $P_{00..}=$

$P_{0000}+P_{0010}+P_{0001}+P_{0011}=0.065\ 6, P_{01..}=0.185\ 8$ ，同理可以计算其他 P 值，见表4。

表4 双因素变化风险概率
Tab.4 Probabilities of risk coupling events for double factors

$P_{00..}$	$P_{01..}$	$P_{10..}$	$P_{11..}$	$P_{0..0.}$	$P_{.1..}$	$P_{0..1.}$	$P_{1..1.}$
0.065 6	0.185 8	0.316 9	0.431 7	0.065 6	0.349 7	0.185 8	0.398 9
$P_{0..0}$	$P_{1..0}$	$P_{0..1}$	$P_{1..1}$	$P_{..00}$	$P_{.10.}$	$P_{.01.}$	$P_{.11.}$
0.049 2	0.295 1	0.202 2	0.453 6	0.120 2	0.295 1	0.262 3	0.322 4
$P_{.0..0}$	$P_{.1..0}$	$P_{.0..1}$	$P_{.1..1}$	$P_{..00}$	$P_{..10}$	$P_{..01}$	$P_{..11}$
0.103 8	0.240 4	0.278 7	0.377 0	0.109 3	0.235 0	0.306 0	0.349 7

3) 多因素风险耦合分析。根据式(8)一式(11), 需计算 P_{hij} , P_{hik} , P_{hjk} , P_{ijk} 值。计算人为因素、设备因素和环境因素不参与风险耦合时事故发生概

率为: $P_{000} = P_{0000} + P_{0001} = 0 + 0.0109 = 0.0109$, 同理可以计算其他 P 值, 见表5。

表5 多因素变化风险概率
Tab.5 Probabilities of risk coupling events for multiple factors

P_{000}	P_{100}	P_{010}	P_{001}	P_{110}	P_{101}	P_{011}	P_{111}
0.010 9	0.109 3	0.054 6	0.054 6	0.240 4	0.207 7	0.131 1	0.191 3
$P_{.000}$	$P_{.100}$	$P_{.010}$	$P_{.001}$	$P_{.110}$	$P_{.101}$	$P_{.011}$	$P_{.111}$
0.027 3	0.082 0	0.076 5	0.092 9	0.158 5	0.213 1	0.185 8	0.163 9
$P_{0.00}$	$P_{1.00}$	$P_{0.10}$	$P_{0.01}$	$P_{1.10}$	$P_{1.01}$	$P_{0.11}$	$P_{1.11}$
0.005 5	0.103 8	0.043 7	0.060 1	0.191 3	0.245 9	0.142 1	0.207 7
$P_{00.0}$	$P_{10.0}$	$P_{01.0}$	$P_{00.1}$	$P_{11.0}$	$P_{10.1}$	$P_{01.1}$	$P_{11.1}$
0.010 9	0.092 9	0.038 3	0.054 6	0.202 2	0.224 0	0.147 5	0.229 5

根据式(1)一式(11), 可分别计算出下列各项风险耦合的 T 值:

$$T_4=0.143\ 1; T_{21}=0.015\ 8; T_{22}=0.024\ 8; T_{23}=0.025\ 3; \\ T_{24}=0.019\ 1; T_{25}=0.010\ 7; T_{26}=0.015\ 2; T_{31}=0.067\ 8; \\ T_{32}=0.058\ 6; T_{33}=0.074\ 9; T_{34}=0.052\ 7。$$

计算结果可以得知: $T_4 > T_{33} > T_{31} > T_{32} > T_{34} > T_{23} > T_{22} > T_{24} > T_{21} > T_{26} > T_{25}$ 。

3.3 综合分析

1) 随着风险耦合因素的增加, 总风险也随之增大。从计算结果可知, 4因素耦合的风险大于3因素耦合的风险, 3因素耦合风险大于双因素耦合风险, 这与实际施工安全事故发生情况相符。

2) 在3因素风险耦合中, 人-环-管因素耦合值最大; 同时, 人-机-管因素和人-环-管因素耦合风险比人-机-环因素和机-环-管因素耦合风险大。这表明主观因素(人为因素和管理因素)风险完全耦合比不完全耦合形成的风险大, 当主观因素与环境因素完全耦合时风险最大。

3) 在双因素耦合风险中, 人-管因素耦合风险最大, 人-环因素耦合风险相对较大, 机-环因素耦合风险和人-机因素耦合风险较低, 机-管耦合因素

风险最小。这说明人为因素与管理因素存在较大耦合性, 即当现场施工人员操作失误而管理人员管理不到位, 容易导致安全事故发生。

4 结 论

1) 结合最近十几年来我国地铁施工的典型事故案例数据, 利用N-K模型计算地铁施工过程中不同风险耦合的风险值, 得出一些地铁施工安全风险耦合规律, 计算结果可为地铁施工安全管理工作提供理论依据。

2) 从计算结果可知, 人为因素、管理因素以及环境因素在风险耦合过程中表现活跃。在人-机-环-管系统中, 人是主要因素。因此, 要充分发挥人的主观能动性, 提高现场管理水平, 加强对环境因素的控制和设备的管理, 这样才能降低地铁施工安全事故发生的频率; 而且工程中应尽可能避免多因素风险耦合, 尤其是4因素风险耦合。

3) 该模型对数据的完整性与样本数量有一定要求, 因此, 在运用中还需要提高数据完整性、扩大样本量, 进而提高计算精度, 使计算结果更加符合实际情况。

参考文献

- [1] 解东升,王明洋,卢浩. 地铁工程安全事故统计分析[C]. 第2届全国工程安全与防护学术会议论文集(上册), 2010:205-209.
XIE Dongheng, WANG Mingyang, LU Hao. Accidents statistics and analysis of subway engineering[C]. Proceedings of The Second Session of the National Security and Protection Engineering Conference (Volume One), 2010:205-209.
- [2] 胡群芳,秦家宝. 2003—2011年地铁隧道施工事故统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2013,9(3): 705-710.
HU Qunfang, QIN Jiabao. Statistics analysis of accidents of subway tunnel construction from 2003 to 2011 in China[J] Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2013, 9(3): 705-710.
- [3] 范京玲. 北京地铁10号线施工安全风险控制[J]. 风险管理, 2008, 12(4):25-28.
FAN Jingling. Construction safety risk control of the Beijing subway line 10[J]. Risk Management, 2008,12(4):25-28.
- [4] 王梦恕,张成平. 城市地下工程建设的事故分析及控制对策[J]. 建筑科学与工程学报, 2008, 25(2): 1-6.
WANG Mengshu, ZHANG Chengping. Analysis of accident induced by urban underground project construction and its control measures[J], Journal of Architecture and Civil Engineering, 2008, 25(2): 1-6.
- [5] CHU F, CHU C. Single item dynamic lot-sizing models with bounded inventory and outsourcing[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2008, 38(1):70-77.
- [6] 易花. 南昌地铁施工安全风险研究及应对措施[D]. 南昌:南昌大学, 2010.
YI Hua. Security risk and counter measures studies of Nanchang metro construction[D]. Nanchang, Nanchang University, 2010.
- [7] 侯艳娟,张顶立,李鹏飞. 北京地铁施工安全事故分析及防治对策[J]. 北京交通大学学报, 2009,33(3): 52-59.
HOU Yanjuan, ZHANG Dingli, LI Pengfei. Analysis and control measures of safety accidents in Beijing subway construction[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009,33(3): 52-59.
- [8] 刘堂卿,罗帆. 空中交通安全风险构成及耦合关系分析[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2012,34(1):93-97.
LIU Tangqing, LUO Fan. Analysis of constitution and coupling of air traffic security risks[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2012,34(1):93-97.
- [9] 罗帆,刘堂卿. 基于N-K模型的空中交通安全耦合风险分析[J]. 武汉理工大学学报:信息与管理工程版, 2011, 33(2): 267-270.
LUO Fan, LIU Tangqing. Analysis of coupled risk of air traffic safety based on N-K model[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2011,33(2): 267-270.
- [10] 周荣义,黎忠文. 地铁工程建设施工危险辨识与施工坍塌事故应急预案的探讨[J]. 中国安全科学学报, 2005, 15(12): 93-96.
ZHOU Rongyi, LI Zhongwen. Risk identification and discussion on emergency preparedness for collapse accident during metro construction by way of TBM[J]. China Safety Science Journal, 2005,15(12): 93-96.
- [11] 郭圣煜,骆汉宾,蒋晓燕,等. 地铁施工工人不安全行为知识可视化研究[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(3):140-145.
GUO Shengyu, LUO Hanbin, JIANG Xiaoyan, et al. Research on metro worker's unsafe behavior knowledge visualization[J]. China Safety Science Journal, 2015,25(3):140-145.



作者简介: 吴贤国(1964—), 女, 湖北武汉人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事工程项目管理、工程安全管理等方面的研究。E-mail: wxg0220@126.com。