

文章编号: 1003-1421(2018)07-0116-06 中图分类号: U293.6 文献标识码: A
DOI: 10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.2018.07.23

基于DEMATEL和ISM融合的城市轨道交通车站运营安全评价方法研究

A Study on an Assessment System on Safe Operation of Urban Rail Stations based on DEMATEL and ISM

黎新华, 李俊辉

LI Xin-hua, LI Jun-hui

(广东交通职业技术学院 轨道交通学院, 广东 广州 501650)

(Rail Traffic Department, Guangdong Vocational Institute of Transportation Technology, Guangzhou 501650, Guangdong, China)

摘要: 为完善城市轨道交通运营安全预警及应急保障体系, 利用决策试验和评价实验室法(DEMATEL)及解释结构模型(ISM)各自的优势, 研究构建城市轨道交通车站运营安全评价方法。根据运营事故统计分析, 从员工素质、客流特征、设备设施、安全管理和外部环境5个方面建立了22个因素构成的初始影响因素集, 按照ISM划分层级结构步骤进行各因素的层级结构划分, 从而确定评价指标体系, 通过DEMATEL法对各影响因素的中心度进行分析确定各评价指标的权重, 最后以某地铁线路车站为例进行应用。结果表明, 该方法能够筛选出城市轨道交通车站运营安全评价关键指标, 具有较好的应用价值。

关键词: 城市轨道交通; 运营安全评价; DEMATEL方法; ISM方法; 影响因素

Abstract: This paper adopts Decision-Making and Trial Evaluation Laboratory (DEMATEL) and Interpretive Structure Modeling (ISM) to establish an assessment system on safe operation of urban rail stations, in order to improve the security warning system and contingency plans on safe operation of urban rail stations. Firstly, according to the statistical analysis of urban rail operation accidents, this paper identifies a collection of 22 initial influencing factors in 5 aspects, including staff quality, characteristics of passenger flow, equipment and facilities, safety management and external environment. Secondly, the paper proposes an assessment system by grading the 22 factors based on ISM and determining their weights with the analysis of their centrality in the proposed system based on DEMATEL. Finally, this paper applies the proposal into the case of a subway station and the results show that it is highly practical since it can be used to identify the key indicators in the assessment system on safe operation of urban rail stations.

Keywords: Urban Rail Transportation; Safe Operation Assessment; DEMATEL; ISM; Influencing Factors

0 引言

随着城市轨道交通的快速发展,伴随而来的各种安全问题也越发突出,城市轨道交通车站作为轨道交通系统中的重要组成部分,其环境封闭、客流密集和设备集中等特性所带来的安全隐患不断暴露。车站运营事故具有事件的连锁性、时间的紧迫性、环境的特殊性、救援的艰难性、事态的严重性、影响的深远性等特性。因此,研究城市轨道交通车站运营安全的评价方法,是开展城市轨道交通运营安全评价、预警、应急救援等技术的基础,有助于完善城市轨道交通车站应急管理,减少车站突发事件及人员伤亡。

在城市轨道交通系统及车站运营安全评价方法研究方面,国内外学者分别从可拓学、层次分析法、决策树、粗糙集等方面进行了分析^[1-6]。上述方法在将影响因素转化为评价或预警指标的过程多通过经验定性确定。在影响因素的系统分析方法上,决策试验和评价实验室(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)法,以及解释结构模型(Interpretive Structure Modeling, ISM)是常用于复杂系统结构分析的定性定量相结合的2种方法,目前已经得到广泛的应用。2种方法存在一定的共性,都需要通过专家确定各因素之间的关系,建立关系矩阵,不同之处在于DEMATEL侧重于影响因素之间的影响度计算,而ISM方法可以很好地用于影响因素的分层。近年来,部分学者将两者的优势进行整合,可以减少单独运用2种方法时的重复矩阵计算,大幅度减少计算工作量,并且能同时对影响因素进行分层和影响度计算^[11]。为此,在借鉴已有研究成果的基础上,通过DEMATEL和ISM融合计算,筛选出城市轨道交通运营安全评价指标并确定各指标的权重,从而应用于城市轨道交通车站运营安全评价。

1 城市轨道交通车站运营安全的影响因素

通过对历年国内外轨道交通车站运营安全事故的原因分析,结合专家头脑风暴会,确定城市轨道交通车站运营安全影响因素及相互联系。将提取出来的所有要素分为5类:员工素质、客流特征、设

备设施、安全管理、外部环境。综合分析相关资料^[7-11],将城市轨道交通车站系统中的5类子系统细化为22个影响因子,用 $a_i(i=1, 2, \dots, 22)$ 表示,各个因素之间相互关联并相互影响。城市轨道交通车站运营安全影响因素隶属关系如表1所示,城市轨道交通车站运营安全影响因素关系总图如图1所示。

表1 城市轨道交通车站运营安全影响因素隶属关系
Tab.1 Hierarchical relationship between the factors on safe operation of urban rail stations

子系统	包含的影响因素
员工素质	专业技能(a_1)、工作环境(a_2)、心理因素(a_3)、从业年限(a_4)、安全素质(a_5)
客流特征	乘客安全及自救宣传(a_6)、客流的身份构成(a_7)、进出站客流量(a_8)、客流的组织性(a_9)
设施设备	电扶梯系统可靠性(a_{10})、屏蔽门系统可靠性(a_{11})、供电系统可靠性(a_{12})、乘客信息系统可靠性(a_{13})、综合监控及火灾报警系统可靠性(a_{14})
安全管理	安全文化(a_{15})、规章制度(a_{16})、设备管理(a_{17})、劳动组织管理(a_{18})、应急预案(a_{19})、安全教育培训(a_{20})
外部环境	恶劣天气(a_{21})、地震(a_{22})

图1中的单向箭头表示因素之间的影响关系。在图1的基础上,建立影响因素之间的关系矩阵,用数字表示某因素对另一个因素是否有直接影响,其影响程度的大小通过专家打分进行确定,如无直接影响其对应矩阵数值为0,从而形成量化的关系矩阵。各因素自身的量化可以通过历史数据统计、问卷调查、专家打分等进行量化。例如,客流特征中的“客流身份构成”因素指的是将该车站客流的性别、职业、年龄构成比例进行综合,可以通过驻站观测调查统计得出,再将性别、职业和年龄进行折算形成评估指标,其他定性因素如“客流组织性”等则通过专家评估给出评分。

2 DEMATEL和ISM融合的城市轨道交通车站运营安全评价方法

2.1 DEMATEL和ISM融合的评价指标和权重确定方法

DEMAETL方法是运用图论与矩阵论原理进行系统因素分析的方法,通过系统中各因素之间的逻辑关系构建直接影响矩阵,计算各因素对其他因素的影响度及被影响度,从而计算各因素的中心度与

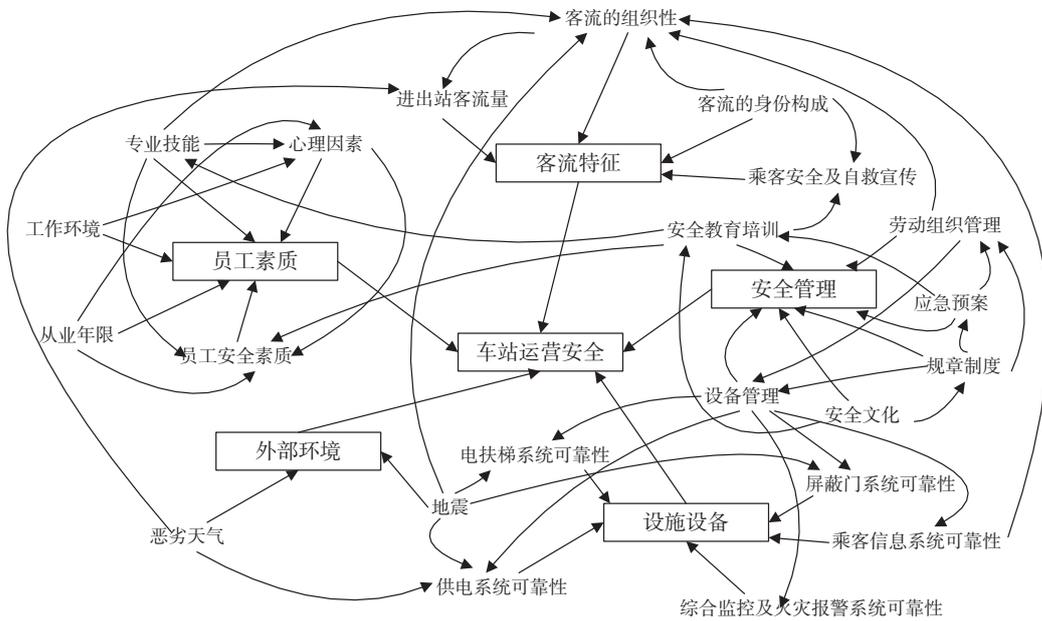


图1 城市轨道交通车站运营安全影响因素关系总图

Fig.1 General relationship between the factors on safe operation of urban rail stations

原因度，该方法的不足为无法直观表示各因素的层级关系。而ISM模型是定性表示系统构成要素，以及要素之间的相互依赖、相互制约和关联情况的模型。通过建立系统要素相邻矩阵和可达性矩阵，对可达性矩阵进行分析，最终建立系统要素的多级递阶层次结构，该方法的不足为无法定量表示各要素之间的影响程度。综合运用上述方法可以从影响城市轨道交通车站运营安全的众多因素中找出主要影响因素，并以此确定评价指标和确定权重。为此提出DEMATEL和ISM融合的思想步骤，对计算的过程进行调整和改进，使其能完成评价指标的筛选和权重计算。计算步骤如下。

- (1) 初步确定所有可能的影响因素，设为 a_1, \dots, a_n 。
- (2) 通过专家打分方法确定系统因素之间的直接影响矩阵 $X (X=[x_{ij}]_{n \times n})$ 。其中， $x_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$ 表示 a_i 对 a_j 的影响程度，如果 $i=j$ ，则 $x_{ij}=0$ 。

(3) 将矩阵 X 进行规范化处理，得到新的矩阵 $G (G=[g_{ij}]_{n \times n})$ 为

$$G = \frac{X}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (1)$$

式中： $g_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$ 表示规

范化处理后新矩阵 G 中的元素。

- (4) 计算综合影响矩阵 $T (T=[t_{ij}]_{n \times n})$ 为

$$T = G(I - G)^{-1} \quad (I \text{ 为单位矩阵}) \quad (2)$$

式中： $t_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$ 表示综合影响矩阵 T 中的元素。

- (5) 计算可达矩阵 $R (R=[r_{ij}]_{n \times n})$ 为

$$R (R=[r_{ij}]_{n \times n}) = T + I \quad (3)$$

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

式中： $r_{ij} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n)$ 表示可达矩阵 R 中的元素。

(6) 各影响因素的结构分级。根据可达矩阵 R 统计每个因素的可达集 $P(s_i)$ 和先行集 $Q(s_i)$ ，将满足以下条件的因素： $P(s_i) \cap Q(s_i) = P(s_i)$ ，放入集合 L_1 ， L_1 中的因素处于有向图的第一级，并将其作为评价指标体系。

(7) 利用公式(2)计算各参数的计算公式为

$$f_i = \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$e_i = \sum_{i=1}^n t_{ij} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$m_i = f_i + e_i \quad i=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中： f 为各影响因素的影响度； e_i 为各影响因素的被影响度； m_i 为各影响因素的中心度。

(8) 将步骤6筛选出的第一级评价指标体系中各指标的中心度 m_i 进行处理得到各指标权重 a_i , 计算公式为

$$a_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad i=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: a_i 为各指标权重。

2.2 城市轨道交通车站运营安全评价指标确定和权重计算

(1) 确定城市轨道交通车站安全的初始影响因素集。将城市轨道交通车站安全影响因素体系中的各因素记为 $a_i (i=1, 2, \dots, n)$, 根据前面的分析, 共有22个影响因素, 即 $n=22$ 。

(2) 确定直接影响矩阵 X 。组织城市轨道交通系统安全技术部门专家、车站一线技术骨干对以上22个影响因素进行问卷调查, 对直接影响矩阵

$X (X=[x_{ij}]_{n \times n})$ 中的 x_{ij} 进行赋值, 2个因素之间的关系越密切, 则矩阵对应的数字就越大。直接影响矩阵如表2所示。

(3) 可达矩阵计算。按照公式(1)对直接影响矩阵 $X (X=[x_{ij}]_{n \times n})$ 进行规范化处理, 根据公式(2)和公式(3)计算出的可达矩阵如表3所示。

(4) 评价指标的确定。根据表3的可达矩阵 R , 按照ISM划分层级结构的步骤进行各因素的层级结构划分, 由于该过程需要反复进行集合的统计运算, 人工求解过程繁琐, 编写Matlab程序进行运算, 输入可达矩阵后可以直接输出划分的层数及各因素对应的层级。经计算, 城市轨道交通车站运营安全影响因素可分为5层, 各级影响因素集为: 第一层次 $L_1 = \{a_5, a_6, a_8, a_9, a_{10}, a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}\}$; $L_2 = \{a_3, a_7, a_{17}, a_{21}, a_{22}\}$; $L_3 = \{a_1, a_2, a_4, a_{18}\}$; $L_4 = \{a_{16}, a_{20}\}$; $L_5 = \{a_{15}, a_{19}\}$ 。第一层次

表2 直接影响矩阵

Tab.2 Matrix of the immediate factors

编号	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}	a_{22}
a_1	0	0	1	0	2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_4	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...
a_{20}	1	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_{21}	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_{22}	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

表3 可达矩阵

Tab.3 Reachable matrix

编号	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	a_9	a_{10}	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	a_{17}	a_{18}	a_{19}	a_{20}	a_{21}	a_{22}
a_1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_2	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_3	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
a_4	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
...
a_{16}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0
a_{17}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0
a_{18}	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
a_{19}	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	0	0
a_{20}	1	0	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
a_{21}	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
a_{22}	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

包含的因素有员工安全素质、乘客安全及自救意识、进出站客流量、客流的组织性、电扶梯系统可靠性、屏蔽门系统可靠性、供电系统可靠性、乘客信息系统可靠性、综合监控及火灾报警系统可靠性是影响车站运营安全的直接因素，这些因素从根本上对城市轨道交通车站运营事故的发生产生影响，可以作为评价城市轨道交通车站运营安全状态的指标。城市轨道交通车站运营安全评价指标体系如图2所示。

(5) 评价指标权重的计算。根据公式(5)至公式(7)计算出各影响因素的中心度 m_i 。根据图2所示的评价指标体系，对选定的各评价指标对应的中心度，按照公式(8)进行计算，最终得到各指标的权重集合为 $a_5=0.18$, $a_6=0.13$, $a_8=0.07$, $a_9=0.33$, $a_{10}=0.11$, $a_{11}=0.08$, $a_{12}=0.09$, $a_{13}=0.01$, $a_{14}=0.01$ 。各影响因素的中心度计算结果如表4所示。

2.3 案例分析

由于确定的城市轨道交通车站运营安全评价属性不同，为便于综合评价，采取专家根据评价对

象各单项指标的资料、数据等信息单独打分评价的方法进行量化，将评价指标标准划分为安全、较安全、危险、非常危险4个等级，分别对应区间(100, 80], (80, 60], (60, 40], (40, 0]。专家针对9个指标进行独立打分，取单项指标的平均值作为该单项指标的评价结果，最后结合指标权重进行加权求和，最终确定该车站的评价等级。以某地铁公司为例，选择6个车站进行评价。某地铁6个车站指标专家打分和最终评价结果如表5所示。

由表5可以看出，各评价车站的安全性排名为：车站3>车站2>车站4>车站1>车站6>车站5，其中车站3和车站2都处于安全水平，其余车站处于较安全水平。

3 结束语

利用DEMATEL法与ISM法融合的方法，并进行适当改进后，运用于城市轨道交通车站运营安全评价的指标筛选和权重确定。DEMATEL方法计算出的中心度反映了城市轨道交通车站运营安全影响

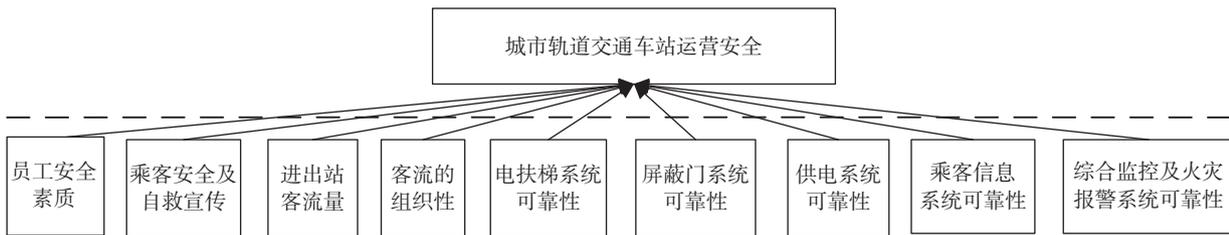


图2 城市轨道交通车站运营安全评价指标体系

Fig.2 An indicator system for operational safety assessment of urban rail transit

表4 各影响因素的中心度计算结果

Tab.4 Calculation results of the centrality of the influencing factors

影响因素	f_i	e_i	m_i	影响因素	f_i	e_i	m_i
a_1	1.777 7	0	1.777 7	a_{12}	0	0.888 8	0.888 8
a_2	0.666 6	0	0.666 6	a_{13}	0	0.111 1	0.111 1
a_3	0.111 1	1.444 3	1.555 4	a_{14}	0	0.111 1	0.111 1
a_4	0.777 7	0	0.777 7	a_{15}	1.666 6	0	1.666 6
a_5	0	1.888 8	1.888 8	a_{16}	1.666 6	0.666 6	2.333 2
a_6	0	1.333 2	1.333 2	a_{17}	1.999 9	1.111 1	3.111 0
a_7	1.666 6	0	1.666 6	a_{18}	0.777 7	1.666 6	2.444 3
a_8	0	0.666 6	0.666 6	a_{19}	1.666 6	0	1.666 6
a_9	0	3.333 2	3.333 2	a_{20}	1.666 6	1.666 6	3.333 2
a_{10}	0	1.111 1	1.111 1	a_{21}	0.777 7	0	0.777 7
a_{11}	0	0.777 7	0.777 7	a_{22}	1.555 4	0	1.555 4

表5 车站指标专家打分和最终评价结果

Tab.5 Experts' grades and final assessment results of the factors

指标权重	员工安全素质(0.18)	乘客安全及自救宣传(0.13)	进出站客流量(0.07)	客流的组织性(0.33)	电扶梯系统可靠性(0.11)	屏蔽门系统可靠性(0.08)	供电系统可靠性(0.09)	乘客信息系统可靠性(0.01)	综合监控及火灾报警系统可靠性(0.01)	评价结果
车站1	78	70	60	76	76	75	86	90	86	76
车站2	80	76	76	80	80	72	90	92	90	80
车站3	86	82	80	85	85	85	85	90	92	85
车站4	80	86	68	68	82	68	90	95	90	77
车站5	64	66	62	65	78	70	86	96	96	70
车站6	50	65	80	85	72	86	84	92	86	75

注：括号中数字为评价指标权重。

因素在所有因素中的重要程度，根据其数值计算出的指标权重能够反映指标之间的权重关系。ISM法能够深入挖掘影响车站运营安全的关键因素，以及这些因素之间的相互影响和层次关系。案例分析表明，提出的城市轨道交通运营安全评价方法能够确定评价指标并能够计算得到各指标的权重，结合专家打分确定各指标的具体数据后，可以用于城市轨道交通车站运营安全评价等级划分和安全性排序比较，具有较高的应用价值。

参考文献：

- [1] DANIEL J, DIXON K. Analysis of Fatal Crashes in Georgia Work Zone[J]. Journal of the Transportation Research Board, 2000, 17(15): 18-23.
- [2] LEVE S, NANCY G. A New Accident Model for Engineering Safer Systems[J]. Safety Science, 2004, 42(4): 237-270.
- [3] Korea Railroad Research Institute. Development and Application of Hazard Analysis Risk Assessment Models for the Korea Railway[R]. Seoul: Korea Railroad Research Institute, 2008.
- [4] Metropolitan Transportation Authority. Department of Subways System Safety Program Plan[R]. New York: Metropolitan Transportation Authority (MTA), 2005.
- [5] 肖雪梅, 王艳辉, 贾利民. 基于复杂网络和熵的城轨路网运营安全评价模型[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(11): 41-48.
XIAO Xue-mei, WANG Yan-hui, JIA Li-min. Safety Assessment Model for Urban Rail Transit Network Operations based on Complex Network and Entropy Theory[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(11): 41-48.
- [6] 蔡国强, 贾利民, 吕晓艳, 等. 基于决策树的轨道交通安全评估方法及其应用[J]. 自然科学进展, 2007(11): 1538-1543.
- [7] 李曼. 城市轨道交通运营安全综合评估模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [8] 刘光武. 城市轨道交通应急平台建设研究[J]. 都市轨道交通, 2009(1): 12-15.
LIU Guang-wu. Establishing Urban Rail Transit Emergency Platform System[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2009(1): 12-15.
- [9] 姜林林, 左忠义. 基于ISM方法的城市轨道交通系统运营安全分析[J]. 中国安全科学学报, 2013(6): 172-176.
JIANG Lin-lin, ZUO Zhong-yi. Analysis of City Rail Transit System Operation Safety based on ISM[J]. China Safety Science Journal, 2013(6): 172-176.
- [10] 张志科, 刘敬辉. 铁路客运安全风险研究[J]. 铁路运输与经济, 2017, 39(3): 56-60, 84.
ZHANG Zhi-ke, LIU Jing-hui. Study on Safety Risk Management of Railway Passenger Transportation[J]. Railway Transport and Economy, 2017, 39(3): 56-60, 84.
- [11] 张勇, 魏高乐, 郑龙生. 基于DEMATEL的雷达装备保障指挥效能评估指标权重分析[J]. 装甲兵工程学院学报, 2014(1): 16-20, 33.
ZHANG Yong, WEI Gao-le, ZHENG Long-sheng. Analysis of Index Weight of Radar Equipment Support Command Efficiency Evaluation based on DEMATEL[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2014(1): 16-20, 33.

收稿日期：2017-07-19

基金项目：广东省交通运输厅科技项目(科技-2014-02-037)

责任编辑：李梦娜