

# 地铁运营系统安全综合评价指标体系研究\*

代宝乾<sup>1,2</sup>, 汪彤<sup>1</sup>, 蒋玉琨<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学, 北京 10083; 2. 北京市劳动保护科学研究所, 北京 100054;  
3. 北京市地下铁道设计研究所, 北京 100088)

**摘要:** 论文分析了地铁运营系统的特点、运营模式、系统故障模式, 并运用系统工程的理论原则, 从系统外部因素、系统指挥因素、设备设施因素、运营管理因素四个方面着手, 确立了地铁运营系统安全综合评价指标体系, 利用模糊数学综合评价法, 建立了地铁运营系统安全综合评价模型, 并通过具体实例进行了综合分析评价, 同时也证明了将模糊数学理论应用于地铁安全综合评价的可行性, 具有一定的工程意义。

**关键词:** 地铁运营系统; 综合评价指标体系

中图分类号: U231+.92 文献标识码: A 文章编号: 1673-0836(2008)01-0001-05

## Study on Index System of Comprehensive Safety Assessment in Subway Operation System

DAI Bao-qian<sup>1,2</sup>, WANG Tong<sup>1</sup>, JIANG Yu-kun<sup>3</sup>

(1. China University of Mining & Technology, Beijing 100083; 2. Beijing Institute of Labor Protection, Beijing 100054;  
3. Beijing Institute of Subway Design, Beijing 100088, China)

**Abstract:** The characteristic, operation pattern, system failure pattern of subway operation system are analyzed in this paper. The principle of system engineering is used to establish the target system for subway operational safety assessment. There are four factors mentioned in this assessment, i. e., systemic outer factor, systemic command factor, equipment and establishment factor and operational management factor. The basic principle of fuzzy mathematics is introduced for establishment of the comprehensive safety assessment model in subway operation system. This method is exemplified in a real case and the obtained calculated results show that the method is feasible. It is very important to improve safety level of subway operation system by studying and exploring the safety index and safety method.

**Keywords:** subway operation system; assessment index system

## 1 引言

地铁是城市快速轨道交通的一部分, 具有运量大、快速、正点、低能耗、少污染、乘坐舒适方便等优点, 常被称为“绿色交通”。世界范围内人口向城市集中, 城市化步伐加快, 大中型城市普遍出现人口密集、交通堵塞、环境污染严重以及能源匮乏等问题。地铁经过 150 年的发展机车车辆、自动控

制、通信信号等技术方面有了很大的进步。发达国家的经验表明, 地铁、轻轨是解决大中城市公共交通运输的根本途径, 对城市实现可持续发展有非常重要的意义。

运营安全是城市轨道交通系统实现顺畅、高效运营的前提和保证, 特别是对于地下铁道这样狭长的、近乎封闭的地下空间而言, 一旦发生较大的灾害事故, 将给各种运营设备和人员生命财产造成致

\* 收稿日期: 2007-04-17(修改稿)

作者简介: 代宝乾(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事风险评价和安全管理研究。E-mail: daibq15@163.com

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(8062012)

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

命性损害和巨大的社会影响,使系统功能难以在短时间内恢复,带来较大的经济损失。近年来,国内外城市轨道交通系统发生的运营灾害充分表明,运营安全是城市轨道交通系统的生命线,因此,任何一种城市轨道交通系统,都必须建立一个切实有效的运营安全保障系统<sup>[1]</sup>。

地铁运营系统的安全和评价,是目前一个重要的问题。论文从系统外部因素、指挥因素、设备设施因素、运营管理因素等方面进行分析,确立了地铁运营系统安全综合评价指标体系,建立了地铁运营系统安全综合评价模型,具有重要的工程意义和参考价值。

## 2 地铁运营系统特点

地铁运营系统是一个包含各种土建工程和车辆等各种机电设备系统,集车、机、工、电、检、运、营等多学科、多专业、多工种于一体的复杂巨系统。

地铁因其建设于地下,又具有封闭性强、运行高度速、起停频繁、客流量大且来源复杂、乘客自助乘车、应急疏散难度大、易于受到外界因素干扰等固有特点,因此地铁作为一类特殊的人员密集公共场所,对安全可靠性的要求更高<sup>[2-3]</sup>。

一般而言,地铁运营系统存在三种运营模式<sup>[4]</sup>:正常运营状态、非正常运营状态、紧急运营状态,如图1所示。

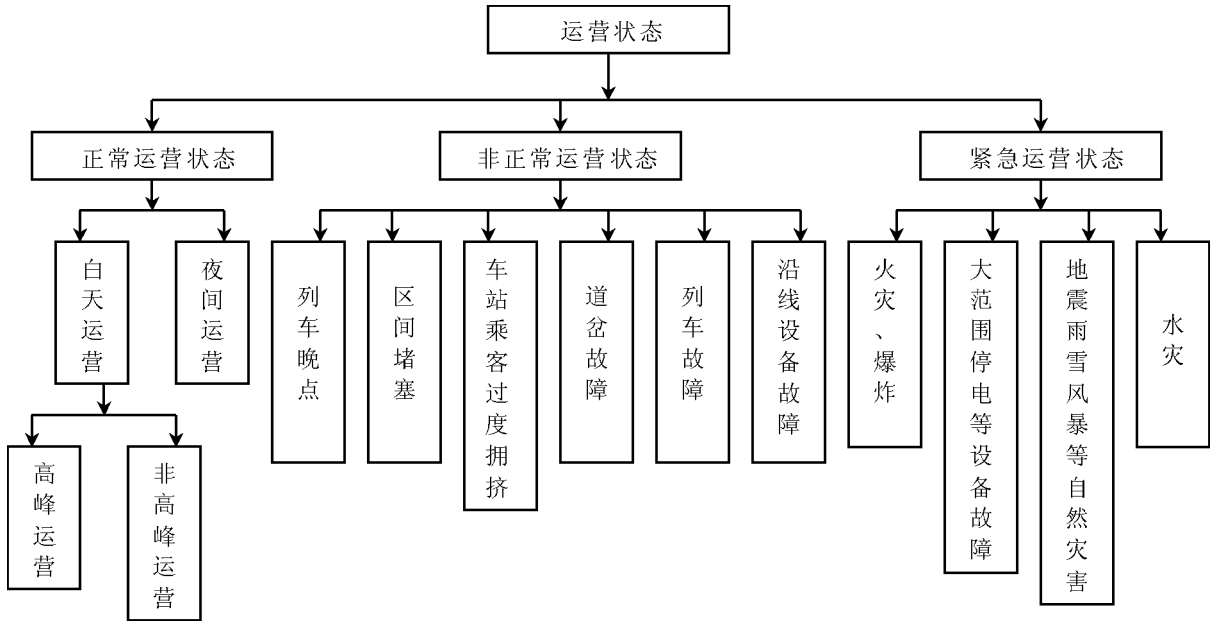


图1 地铁运营模式图

Fig. 1 The subway operation pattern

(1) 正常运营状态指列车白天和夜间的运营状态与计划运行图基本相符的状态。正常运营状态可分为高峰时段和非高峰时段。针对这两种运营状态,地铁又采取了不同的客运组织方案和运行管理模式。

(2) 非正常运营状态指因各种原因造成了列车晚点、区间堵塞、车站乘客过度拥挤、道岔故障、列车故障、沿线设备故障等影响到了正常的运营秩序的情况。经行车指挥系统按照应对方案及时进行调整,可在较短时间内使运营恢复正常,未对乘客的人身安全造成影响。

(3) 紧急运营状态指发生火灾爆炸、地震以及雨雪风暴等自然灾害、设备故障导致大范围停运等情况,部分区间或全线无法运营的情况。在这种状态下,有可能出现人员伤亡的严重后果,必须采取紧急事故抢险措施自救、减灾和抢险。

## 3 地铁运营系统故障模式分析

地铁系统一般有三种故障模式:点故障、局部故障、系统故障,不同故障存在于不同系统层次中,地铁系统 Bow Tie 安全分析模型<sup>[5][6]</sup>如图2所示。

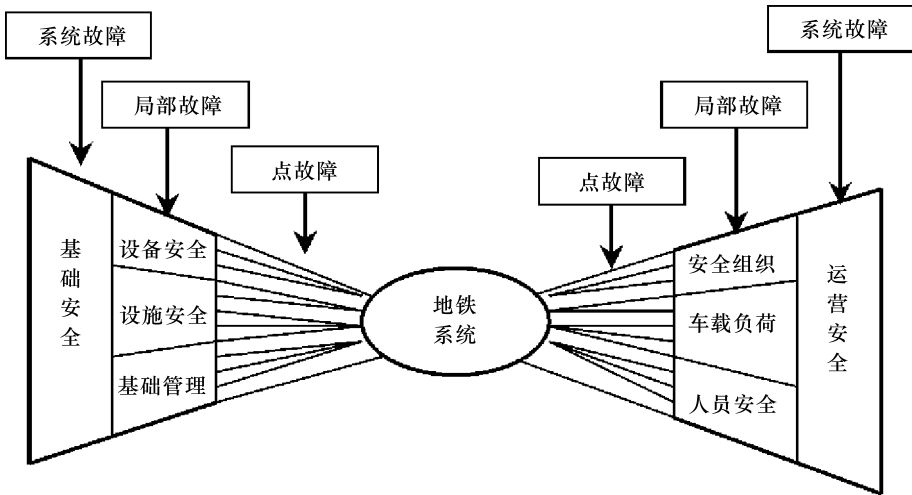


图 2 地铁系统 Bow Tie 安全分析模型图

Fig. 2 Safety analysis Bow Tie model of the subway system

#### 4 地铁运营系统安全综合评价指标体系框架的构建

地铁是一个复杂的巨型系统,影响其安全总体状况的因素和环节很多,要想科学地解决安全评价多因素的权重问题,必须构造一个合理的、科学的安全综合评价指标体系<sup>[7]</sup>。从总体上讲,地铁安全综合评价体系由“基础设备设施体系”和“运营系统安全体系”两部分组成。所谓基础设备设施体系,主要是指对各种土建工程和设备系统的设计、施工的可靠性、安全性等方面构建完善的防护体系,这是安全的物质基础、物质保证。所谓运营系统安全体系,主要是指对运营管理和正确使用物质基础的体系。随着时间的推移和设备的使用,“基础设备设施体系”可能出现一些欠缺,通过高效的运营管理和指挥,使其始终保持良好的安全状态<sup>[8]</sup>,使各种运营设备的功能得到充分的发挥,从而实现体系的有效平衡。结合前三节的分析论述,并与实际情况相结合,构造了地铁安全综合评价指标体系如图 3 所示。

对地铁运营系统的具体情况全面了解后,经地铁和安全方面的专家分析和打分,得到因素类权重集  $A = (a_1, a_2, a_3, a_4) = (0.1968, 0.2536, 0.3376, 0.2254)$ 。在权值的分配上虽然存在人为主观因素的影响,同样的评判因素若取不同的权重集则所得的结论不同,然而多级评判可把人为的主观因素限制在单一的很小范围内,可使主、客观因素的差异大为减小,趋于一致,从而保证了评判结果的准确性与可靠性。

#### 5 地铁运营安全系统模糊综合评价模型<sup>[9]</sup>

对于地铁运营安全系统而言,各因素对系统的影响重要程度存在一定的差异,其权重值大小也不同,这就要求在模糊矩阵符合运算中,必须对所有因素依权重大小均衡兼顾,全盘考虑其对系统的贡献。根据调查结果,建立第二层次的单因素评判矩阵,用  $R_i$  表示:

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & \cdots & r_{i1x} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & \cdots & r_{i2x} \\ r_{i31} & r_{i32} & r_{i33} & \cdots & r_{i3x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & r_{in3} & \cdots & r_{inx} \end{bmatrix} \quad (1)$$

矩阵中,决定  $U_i$  的因素有多少个,  $R_i$  阵就有多少行;评判集  $V$  中有多少个结果  $V_x$ ,  $R_i$  阵就有多少列。所以,第二层次的模糊评判集为:  $B_i = A_i \cdot R_i$  即

$$B_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \cdots, a_{in}) \times \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & r_{i13} & \cdots & r_{i1x} \\ r_{i21} & r_{i22} & r_{i23} & \cdots & r_{i2x} \\ r_{i31} & r_{i32} & r_{i33} & \cdots & r_{i3x} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{in1} & r_{in2} & r_{in3} & \cdots & r_{inx} \end{bmatrix} \\ = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, \cdots, b_{ix})$$

因此有:

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0.27, 0.48, 0.25)$$

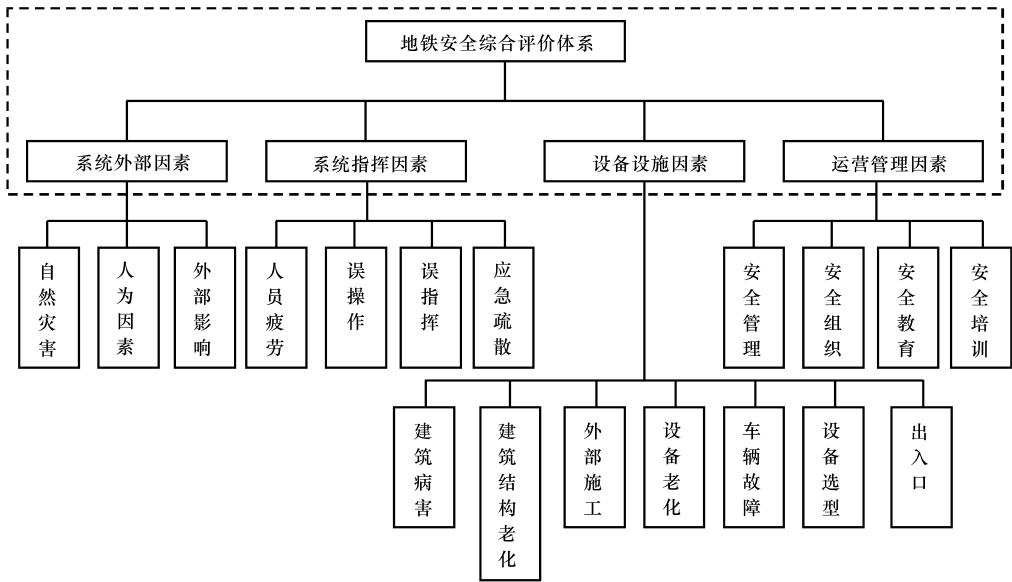


图3 地铁运营系统安全综合评价指标体系框架图

Fig.3 Index system of comprehensive safety assessment in subway operation system

$$\begin{aligned} & \times \begin{bmatrix} 0.33 & 0.39 & 0.22 & 0.06 \\ 0.29 & 0.31 & 0.30 & 0.10 \\ 0.36 & 0.40 & 0.23 & 0.01 \end{bmatrix} \\ & = (0.318, 0.354, 0.260, 0.0667) \end{aligned}$$

对 B1 进行归一化处理得:

$$B'_1 = (0.318, 0.354, 0.261, 0.067)$$

同理可以求出影响系统安全的其它因素的 B<sub>i</sub>

与 v<sub>i</sub>:

$$B'_2 = (0.2858, 0.3854, 0.2002, 0.131)$$

$$B'_3 = (0.296, 0.3276, 0.2856, 0.091)$$

$$B'_4 = (0.3606, 0.378, 0.2006, 0.0604)$$

$$V = B' \cdot S =$$

$$\begin{bmatrix} 0.3180 & 0.3540 & 0.2610 & 0.1310 \\ 0.2858 & 0.3854 & 0.2002 & 0.1310 \\ 0.2960 & 0.3276 & 0.2856 & 0.0910 \\ 0.3606 & 0.3780 & 0.2006 & 0.0604 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 85 \\ 70 \\ 60 \\ 50 \end{bmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 70.82 \\ 69.833 \\ 69.778 \\ 72.167 \end{pmatrix}$$

对第二层次单因素进行了一级模糊综合评判后,再综合第一层次所有因素的影响,进行二级模糊综合评判,即对第一层次各因素的影响进行综合的评判。则第一层次单因素评判矩阵为:

$$R = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \\ B_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \cdot R_1 \\ A_2 \cdot R_2 \\ A_3 \cdot R_3 \\ \vdots \\ A_m \cdot R_m \end{bmatrix}$$

所以,第一层次的二级模糊综合评判集为:

$$B = A \cdot R = (b_1, b_2, b_3, \dots, b_i)$$

$$B = A \cdot R = (0.1968, 0.2536, 0.3376, 0.2254)$$

$$\begin{bmatrix} 0.3180 & 0.3540 & 0.2610 & 0.0670 \\ 0.2858 & 0.3854 & 0.2002 & 0.1310 \\ 0.2960 & 0.3276 & 0.2856 & 0.0910 \\ 0.3606 & 0.3780 & 0.2006 & 0.0604 \end{bmatrix}$$

$$= (0.3163, 0.3632, 0.2438, 0.0907)$$

系统安全综合评价的总得分:

$$f = B \cdot S_x = 0.3163 \times 85 + 0.3632 \times 70 + 0.2438 \times 60 + 0.0907 \times 50 = 71.471$$

S<sub>x</sub> 为各级别的分值,具体取值详见表1。地铁运营系统安全模糊综合评价汇总情况如表2所示。

表1 量化指标分级表

Table 1 Quantity index ranking

安全评价得分	85(S <sub>1</sub> )	70(S <sub>2</sub> )	60(S <sub>3</sub> )	50(S <sub>4</sub> )
安全级别	好	中等	合格	不合格

表 2 地铁运营系统安全模糊综合评价汇总表

Table 2 Fuzzy comprehensive safety assessment in subway operation system

2 级综合评价结果		1 级综合评价结果		初级综合评价结果	
指标名称	评价结果	指标名称	评价结果	指标名称	评价结果
地铁安全综合评价	71.471	系统外部因素	70.82	自然灾害	71.55
				人为因素	69.35
				外部影响(停电)	72.9
		系统指挥因素	69.833	人员疲劳	71.9
				误操作	70.75
				误指挥	73.35
				应急疏散能力	70.85
				建筑病害	70.25
		设备设施系统因素	69.778	建筑结构老化	70.1
				外部施工	72.35
				设备老化	69
				车辆故障	68.35
				设备选型与品质保证	69.05
				出入口狭小	69.7
				安全管理	78.8
		运营管理因素	72.167	安全组织	73.5
				安全教育	71.75
				安全培训	72.75

根据上述综合评价结果可知,该地铁系统安全水平的综合评价分值为 71.471。说明了其系统总体安全水平属于“中等”等级,应进一步加以改进。其中系统指挥因素和设备设施系统因素的评价分值比较低,在宏观上应加以防护和改进。在初级综合评价中车辆故障、设备老化、设备选型与品质保证的分值较低,应重点加以保护和改进<sup>[10~11]</sup>,如改进后,系统的整体安全性将会有较大的提高。

## 6 结论

对评价中的许多指标,不可能非常准确的描述,具有一定的模糊性,模糊数学综合评价法克服了传统评价方法的缺陷,可以准确地对复杂大系统做出综合评价,提高安全评价的可靠度和可信度。在地铁运营系统安全综合评价过程中,安全信息的完善程度如何直接影响着安全综合评价结果的准确程度,因此,建立完善的安全信息数据库是非常必要的。

参考文献:

[1] 城市轨道交通展望[EB/OL]. <http://www.engineersky.com/Article/ShowArticle.asp?ArticleID=344>, 2005. (The Prospect of Urban Rail Transportation [EB/OL]. [cle.asp?ArticleID=344,2005. \(in Chinese\)\)](http://www.engineersky.com/Article/ShowArti-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

- [2] 孙章. 城市轨道交通的世纪回眸与展望[EB/OL]. <http://www.china-frm.com302121101.htm>, 2005. (SUN Zhang. The Review and Prospect of Urban Rail Transportation [EB/OL]. <http://www.china-frm.com302121101.htm>, 2005. (in Chinese))
- [3] F. Fiedrich. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. *Safety Science*, 2000, 35: 41-47.
- [4] U. S. Department of Transportation Emergency Response Guidebook. 1990.
- [5] V. M. Trbojevic. Active Bow Tie Manual[M]. *Risk Management Strategies*, 2004: 1-7.
- [6] Clarke C J, Varma S. Strategic risk management: the new competitive edge. *Long Range Planning*, 1999, 32(4): 41-42.
- [7] 安永林,彭立敏,杨高尚. 隧道火灾后衬砌损伤的灰色综合评判[J]. *地下空间与工程学报*, 2006, 2(2): 284-287. (AN Yonglin, PENG Limin, YANG Gaoshang. Grey Comprehensive Evaluation of the Damage of Lining Caused by Fire in Tunnels[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2006, 2(2): 284-287. (in Chinese))
- [8] Frcwer L. The public and effective risk communication. *Toxicology Letters*, 2004, 149: 39139

(下转第 37 页)

- Kaushal, Yuji Tomita, R. R. Dighade, Concentration at the pipe bottom at deposition velocity for transportation of commercial slurries through pipeline[J]. *Power Technology*, 125 (2002): 89 - 101.
- [2] Gogus, M., Kokpinar, M. A. (1993), Gogus, M. and Kokpinar, M. A. (1993). Determination of critical flow velocity in slurry transporting pipeline systems. [D]. Proc., 12th Int. Conf. on Slurry Handling and Pipeline Transport, British Hydraulic Research Group, Bedfordshire, England; 743 - 757.
- [3] Mehmet Ali Kokpinar, Mustafa Gogus, Mehmet Ali Kokpinar and Mustafa Gogus, Critical flow velocity in slurry transporting horizontal pipelines[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, September 2001: 763 - 771.
- [4] 白晓宁, 胡寿根. 浆体管道的阻力特性及其影响因素分析[J]. *流体机械*, 2000, 28(11): 26 - 32. (BAI Xiaoning, HU Shougen. Study on Resistance Characteristic of Slurry Transport Pipes and Effects Analysis[J]. *Fluid Machinery*, 2000, 28(11): 26 - 32. (in Chinese))
- [5] 付毅, 谢源, 刘道昆, 等. 膏体浆料管道自流充填新技术试验[J]. *有色金属*, 2003, 55(5). (FU Yi, XIE Yuan, LIU Daokun. Test of New Technique for Paste Self-flowing in Pipes[J]. *Nonferrous Metals*, 2003, 55(5). (in Chinese))
- [6] 甘正旺. 沉降性浆体水平管道堆积速度的研究[J]. 辽宁工程技术大学, 2004年12月. (GAN Zhenwang. Study on Deposit Velocity of Setting Slurry in Pipes[J]. Liaoning Technical University, December 2004. (in Chinese))
- [7] 汪东. 沉降性浆体水平管道临界流速的研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2004年12月. (WANG Dong. Study on Critical Velocity of Setting Slurry in Pipes[J]. Liaoning Technical University, December 2004. (in Chinese))
- [8] 张士林. 沉降性浆体速度与浓度分布耦合模型及迁移速度研究[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2005年1月. (ZHANG Shilin. Studies on Slurry Velocity and Volumetric Percent Distribution Model and Transfer Velocity[J]. Liaoning Technical University, Jan 2005. (in Chinese))
- [9] 邓祥吉. 管道输沙阻力特性研究[J]. 河海大学, 2005年5月. (DENG Xiangji. Flowing Resistance Characters of Sand Transport in Pipes[J]. Hohai University, May 2005. (in Chinese))
- [10] 孙东坡, 王二平, 许继钢, 李国庆. 管道泥浆输送能力的试验研究[J]. 武汉大学学报, 2004, 37(1): 19 - 23. (SUN Dongpo, WANG Erping, XU Jigang, LI Guoqing. Experimental Research on Carrying Capacity of Slurry Pipe Flow[J]. Wuhan University Journal of Natural Science, 2004, 37(1): 19 - 23. (in Chinese))
- [11] Smith K. *Environmental hazards: assessing risk and reducing disaster* (2nd edition). New York: Routledge, 1996
- [12] 汪彤等. 北京地铁运营系统安全现状评价报告[R]. 北京: 北京市劳动保护科学研究所, 2004. (WANG Tong. Report of Safety Assessment About Beijing Subway [R]. Beijing: Beijing Municipal Institute of Labour Protection, 2004. (in Chinese))

(上接第5页)

- [9] 王彩华 宋连天. 模糊论方法学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. (WANG Caihua, SONG Liantian. Methodology of Fuzzy Theory [M]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1998. (in Chinese))
- [10] Luise Vassie. Health and Safety Management in UK and Spanish SMEs; A Comparative Study. *Journal of Safety Research*, 2000, 31(1): 35 - 4