

# 基于模糊事故树的公路隧道火灾危险性分析

任平凡<sup>1,2</sup>, 伍爱友<sup>2,3</sup>, 施式亮<sup>3</sup>

(1. 湘潭市消防支队 岳塘大队, 湖南 湘潭 411000; 2. 河南理工大学 河南省煤矿瓦斯与火灾重点防治实验室, 河南 焦作 454003;  
3. 湖南科技大学 能源与安全工程学院, 湖南 湘潭 4112012)

**摘要:**根据隧道火灾事故的不确定性与传统火灾风险分析方法的主观性等特点,以火灾理论以及系统安全工程理论为基础,建立了公路隧道火灾模糊事故树分析(FFTA)模型;应用三角模糊理论,求出基于专家认知水平的基本事件模糊概率及顶上事件发生的模糊概率;最后把导致火灾的各影响因素的关联程度进行了模糊分级比较.通过以上分析得知,隧道中存在火源以及隧道中存在可燃物是导致火灾的最主要要素,其次为灭火措施失效.全面分析引发公路隧道火灾的各种因素及其逻辑关系,动态监测隧道火灾发生的可能性,制定主动、被动防火救灾策略,是降低隧道火灾风险的基本途径,它对保证公路的交通的安全运营与交通事业的可持续发展具有重要意义.

**关键词:**系统安全工程;隧道火灾;事故树;模糊概率;三角模糊数

**中图分类号:**U452 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9102(2013)03-0017-05

随着交通事业的迅猛发展和道路等级的提高,我国修建的高速公路隧道越来越多,规模也越来越大.据 2012 年交通运输部公布的《2012 年公路水路交通运输行业发展统计公报》显示,2012 年末全国公路隧道为 10 022 处、805.27 万 m,其中,特长隧道 441 处、198.48 万 m,长隧道 1 944 处、330.44 万 m.由于公路隧道具有封闭性强、纵深长、出入口数量少、行车环境复杂等构造与运营特征,隧道发生火灾的潜在威胁也在增大<sup>[1]</sup>.受隧道结构影响,火灾一旦发生,隧道内温升比地面火灾更快,烟雾更难排出,而且在长大公路隧道内极有可能导致交通中断,威胁到隧道内所有人、车的安全,造成难以估计的人员伤亡与财产损失.为此,深入研究隧道火灾的机理及行为特征,找出影响隧道火灾的关键要素,事前对隧道火灾灾变的可能性进行科学合理的分析预测,提出防火救灾策略,无疑成为公路隧道防灾减灾的重点<sup>[2]</sup>.

传统的隧道火灾风险分析方法<sup>[3-5]</sup>大多数都是

一种定性分析方法,由于对于隧道火灾事故系统来说,系统的结构、系统的作用原理、系统各因素之间的关系往往是很不明确的,这样就不利于人们对其分析和进行正确有效的决策<sup>[6]</sup>.事故树分析方法是安全系统工程中进行系统安全分析的核心,是安全评价的基础,但它对模糊性事件无法正确分析.模糊事故树是将事故树与模糊集合理论相结合,将所有的事件节点模糊化,即给每个模糊事件定义隶属函数来表示模糊事件的发生程度,来对事故树进行定性定量分析<sup>[7]</sup>.利用该方法既可分析出基本事件的模糊发生概率,又可以分析出制约火灾发生的主要原因,可将人们的主观判断做出客观描述,对分析火灾事故有着十分积极的意义.

## 1 模糊集理论基础

### 1.1 基本概念

模糊数  $\bar{A}$  是论域  $U$  中元素  $x$  隶属于模糊集  $A$  的

收稿日期:2013-06-14

基金项目:河南省煤矿瓦斯与火灾防治重点实验室开放课题项目(HKLG201102);国家自然科学基金项目(51274100);国家自然科学基金项目(511740890)

通信作者:伍爱友(1975-),男,湖南新化人,博士,副教授,主要从事火灾风险评估研究. E-mail: aywuhust@163.com

程度,其隶属函数为 $\mu_{\bar{A}}(x):U \rightarrow [0,1] \quad x \in U$ . 如果一个模糊数的隶属函数由线性函数组成,表示为

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \begin{cases} (x - m + l)/l & l \leq x \leq m; \\ (m + u - x)/u & m \leq x \leq u; \\ 0 & \text{其他.} \end{cases}$$

$m$ 称为 $\bar{A}$ 的核, $u + l$ 称为 $\bar{A}$ 盲度,参照三角模糊数如图1所示<sup>[8]</sup>.

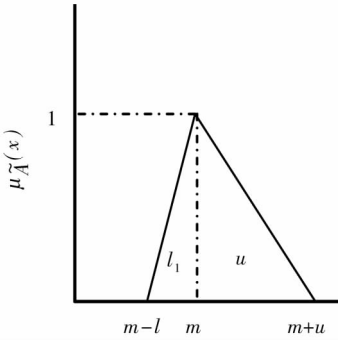


图1 三角模糊数

Fig.1 Triangle fuzzy numeral

对于图1,令 $A_1 = \int_{m-l}^m \mu_{\bar{A}}(x) dx, A_2 = \int_m^{m+u} \mu_{\bar{A}}(x) dx,$

$A = A_1 + A_2$ . 存在点 $Z$ ,使得经过该点的线为分界线,模糊数曲线下的左、右两部分面积相等,则 $Z$ 称为该模糊数的中位数.

### 1.2 模糊运算法则

令模糊数 $\bar{q}_1 = (l_1, m_1, u_1), \bar{q}_2 = (l_2, m_2, u_2)$ ,则模糊数的加法( $\oplus$ )、减法( $\ominus$ )、乘法( $\otimes$ )运算法则,可以分别定义如下:

1) “ $\oplus$ ”运算

$$\bar{q}_1 \oplus \bar{q}_2 = (l_1, m_1, u_1) \oplus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 + l_2, m_1 + m_2, u_1 + u_2). \quad (1)$$

2) “ $\ominus$ ”运算

$$\bar{q}_1 \ominus \bar{q}_2 = (l_1, m_1, u_1) \ominus (l_2, m_2, u_2) = (l_1 - l_2, m_1 - m_2, u_1 - u_2). \quad (2)$$

3) “ $\otimes$ ”运算

$$\left. \begin{aligned} \bar{q}_1 \otimes \bar{q}_2 &= (l_1, m_1, u_1) \otimes (l_2, m_2, u_2) \cong (l_1 l_2, m_1 m_2, u_1 u_2) \\ \bar{q}_1^2 &= (l_1^2, m_1^2, u_1^2) \\ C \otimes \bar{q}_1 &= (Cl_1, Cm_1, Cu_1) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

### 1.3 事故树分析中的模糊算子

传统的事故树的逻辑与门以及逻辑或门的算子

分别 $q_{\text{and}} = \prod_{i=1}^n q_i, q_{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i)$ ,式中 $q_i$ 为 $i$ 事件发生的精确概率值.则依此可以根据模糊数学的多元扩张原理,得出与门模糊算子与或门模糊算子为

$$\begin{aligned} \bar{q}_{s,l}^{\text{and}} &= (l_{\text{and}}, m_{\text{and}}, u_{\text{and}}) = \prod_{i=1}^n \bar{q}_i = q_1 \otimes q_2 \otimes \dots \otimes q_n \\ &= \left( \prod_{i=1}^n l_i, \prod_{i=1}^n m_i, \prod_{i=1}^n u_i \right). \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \bar{q}_{s,l}^{\text{or}} &= (l_{\text{or}}, m_{\text{or}}, u_{\text{or}}) = (1 \ominus \prod_{i=1}^n (1 \ominus \bar{l}_i), (1 \ominus \prod_{i=1}^n (1 \ominus \bar{m}_i)), (1 \ominus \prod_{i=1}^n (1 \ominus \bar{u}_i))). \end{aligned} \quad (5)$$

## 2 隧道火灾模糊事故树分析

### 2.1 基本分析流程

模糊事故树的基本分析流程为

第1步:把引发隧道火灾的全部原因事件通过演绎的方式用图形明确表示出来,以明确其结构与逻辑关系;

第2步:通过事故树的最小径集(割集)以及结构重要度的定性求解,掌握事故发生的每种可能性及导致这些可能性的各种关键要素.

第3步:通过各种途径获得各底事件的发生概率或语言值并将这些值转化为三角模糊数;

第4步:利用式(1)~式(5),求得顶事件发生的模糊概率;

第5步:分析结果,给出预防隧道火灾事故发生的合理性意见.

结合事故树常规分析步骤,可得模糊事故树分析的基本流程如图2所示<sup>[8-9]</sup>.

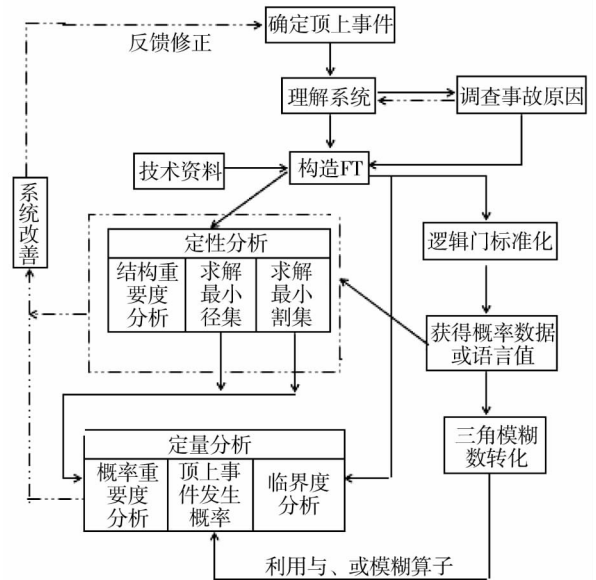


图2 模糊事故树分析流程

Fig.2 Procedure of fault tree analysis

### 2.2 模糊事故树的建立

从火灾学原理可知,火灾的发生是由于燃烧没有得到有效控制引起,因此,对于隧道火灾而言,可以从

起火的可能性及灾后的严重性两方面来分析其严重程度. 其中,隧道中的火源、可燃物是导致火灾发生的基础. 目前,我国的交通车辆大多以燃油当作动力驱动,且对于隧道这一长、窄的受限复杂空间,由车辆发动、车辆自燃、交通事故、电气设备导致的火源较路面交通更多,因此,其火灾的可能性也大为增加. 与此同时,由于隧道内的火灾通常发生在车辆的下部、车厢里或车辆的发动机部分,隧道火灾的安全防护(监测监控与主、被动灭火)相对其他火灾更加困难,一旦火灾发生,特别是受灾车辆烧毁无法前进后,瘫痪的交

通隧道极容易造成“火烧连车”现象甚至是导致车辆连环爆炸等二次事故,隧道火灾的危害性相对其他火灾更为突出. 参考文献[10]中的图2,笔者认为原事故树图仅从事故发生可能性考虑隧道火灾风险,未考虑防护措施对防灭火的影响,且部分中间事件与下一层事件的逻辑门有失严谨,对此进行补充、修改,按照模糊事故树分析流程第1步原则,将逻辑门标准化(即将不是与或门的逻辑门转为与或门),最终绘制隧道火灾模糊事故树图如图3所示.

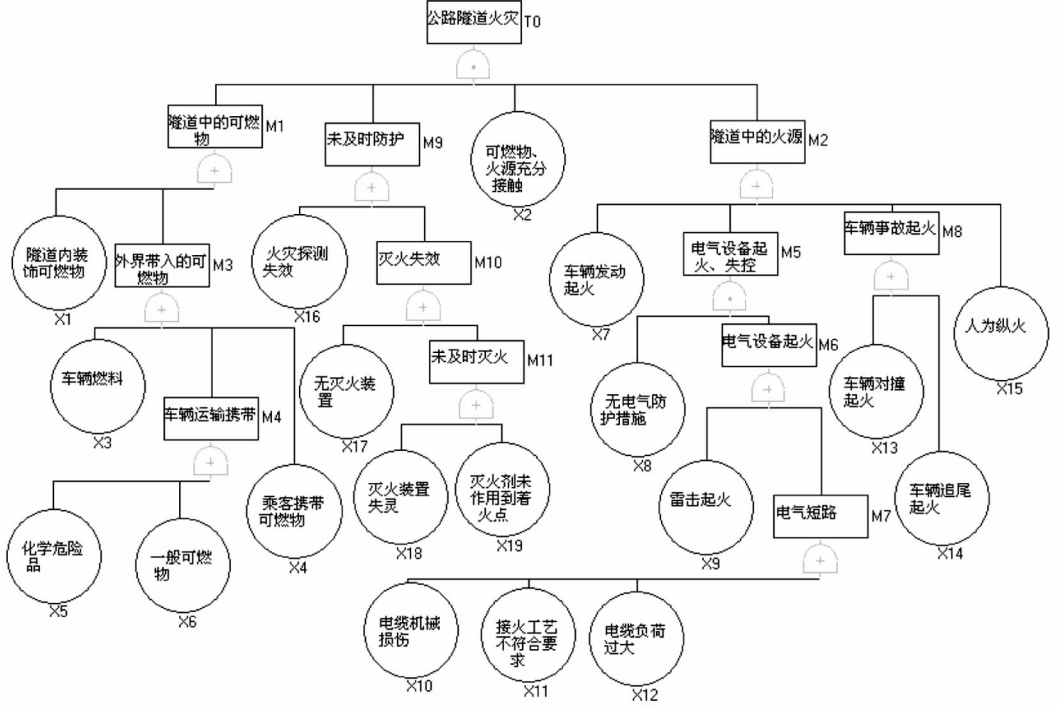


图3 隧道火灾模糊事故树  
Fig. 3 Fuzzy fault tree of tunnel fire

2.3 模糊概率数据及语言值的获取

图3中有19个基本事件、11个中间事件,常规的事故树分析中,由于基本事件发生是随机与不确定的,因此其概率也最难确定,在此情况之下,可采用专家打分结合模糊理论,通过 $3\sigma$ 法来表征基本事件模糊概率<sup>[10]</sup>. 设专家在判断基本事件发生可能性时所采用的自然语言设为:安全、较安全、较危险、危险、很危险等. 本研究用模糊集理论处理这些不确定信息,用梯形模糊数代替这些自然语言,其评语集及三角模糊数如表1、图4所示.

表1 专家认识水平程度  
Tab. 1 Experts cognition degree

模糊参数	安全	较安全	较危险	危险	很危险
$m$	0.000	0.400	0.600	0.800	1.000
$3\sigma$	0.200	0.100	0.050	0.025	0.010

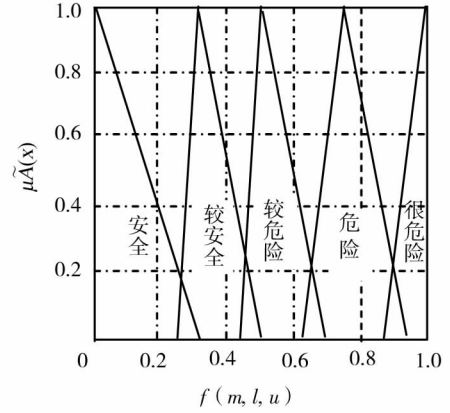


图4 专家认识水平程度三角模糊数图  
Fig. 4 Triangle fuzzy numeral of experts cognition degree

2.4 顶事件发生模糊概率计算

利用式(3)~式(5)的与、或模糊算子,求出顶上

事件(隧道火灾事故)发生的模糊概率. 求解方法参考本文作者施式亮教授研发出的计算机辅助事故树分析系统<sup>[11]</sup>,在此基础上对该系统的结构重要度、顶上事件概率重要度、危险重要度的原始计算程式进行改进,即按照本文方法将原基本事件发生概率所估计的确定值修改为基于资料统计及专家定性评判的三角模糊值<sup>[12]</sup>,得出基于专家认知水平的基本事件模糊概率如表2所示.通过改进后的计算机辅助设计,可求隧道火灾事件发生的模糊概率为 $q_T = (0.054, 0.093, 0.054)$ ,模糊概率均值为0.067,如图5.结合表1、图4,可知该隧道火灾风险处于较危险等级(即火灾风险事件概率落于较危险)区间.

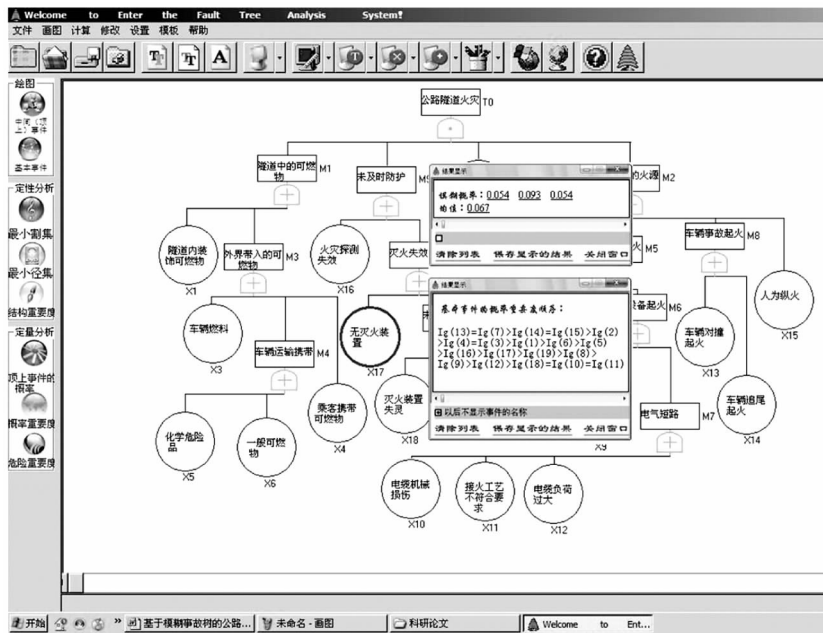


图5 计算机辅助隧道火灾模糊事故树分析

Fig. 5 Fuzzy fault tree analysis by computer assistant in tunnel fire

## 2.5 基本事件结构重要度分析

利用计算机辅助事故树分析系统,得出基本事件的结构重要度进行排序结果(图5).图5的分析结果表明:隧道中存在火源(交通事故导致火源、车辆发动火源)以及隧道中存在可燃物(车辆燃料、运输中的化学危险品)是导致火灾的最主要要素,其次为灭火措施失效,这与隧道火灾发生的机理是相吻合的.因此,限制可燃与易燃物品进入隧道空间,隧道内装饰采用阻燃耐火物品是减少火灾发生的有效措施.在降低火灾危险性、防止灾害范围扩大方面,必须加大对公路隧道火灾监测监控、主动与被动灭火的科研投入力度,涉及到隧道火灾的动态监测、有效灭火剂的选择、起火车辆的跟踪灭火、人员与车辆的安全疏散、交通管理等.

## 3 结论

1)将模糊事故树应用于公路隧道火灾事故的危險性分析过程中,全面阐述与演绎了影响隧道火灾影响因素的逻辑关系.分析结果表明,隧道中存在火源、可燃物品以及灭火措施失效,是制约火灾危險

性的关键要素.因此,预防公路火灾或降低火灾危险性的有效措施主要在于限制可燃与易燃物品进入隧道空间、采用阻燃耐火物品作为隧道内装饰材料;此外,还必须加大对公路隧道火灾的动态监测与交通安全管理等.

2)由于基本事件发生概率无法精确统计及相关事件的不确定性,将模糊数学理论融入事故树分析过程中,利用 $3\sigma$ 法来表征基本事件的三角模糊数,得到了理论上隧道火灾发生概率区间及火灾风险等级.这种方法更符合工程实际,为隧道火灾分析建立了较完善的评价模型,在交通安全运营与管理中具有较高的工程实际应用价值.

3)毋庸置疑,模糊分析方法在公路隧道火灾的事故树分析中具有重要的实际意义,它是求解事故树顶事件发生概率的合理补充.对研究公路隧道火灾风险而言,精确化描述各基本事件的概率当然是很理想的,但是当事故的发生具有随机性,以及限于统计资料和认识能力所不及时,模糊化描述反而更具有科学的理论依据.这正是笔者在研究公路隧道火灾危险性分析中将模糊理论引入事故树方法中的原因.

## 参考文献:

- [1] 刘辉,张智超,王林娟. 2004—2008年我国隧道施工事故统计分析[J]. 中国安全科学学报,2010,20(1):96-101.  
Liu H,Zhang Z C,Wang L J. Statistical analysis on safety accidents of tunnel construction from 2004 to 2008 in China[J]. China Safety Science Journal,2010,20(1):96-101.
- [2] 林志,王少飞. 基于风险分析的公路隧道防火安全等级划分[J]. 消防科学与技术,2010,29(5):394-398.  
Lin Z,Wang S F. Safety grades of fire prevention in highway tunnel based on risk analysis[J]. Fire Science and Technology,2010,29(5):394-398.
- [3] 贺志勇,张娟,王存宝,等. 高速公路隧道安全性的综合评价[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2008,36(2):58-63.  
He Z Y,Zhang J,Wang C B, et al. Comprehensive evaluation of expressway tunnel safety[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition),2008,36(2):58-63.
- [4] 周勇狄,夏永旭. 公路隧道火灾消防救援安全研究[J]. 中国公路学报,2008,21(6):83-89.  
Zhou Y D,Xia Y X. Research on safety of fire rescue in highway tunnel[J]. China Journal of Highway and Transport,2008,21(6):83-89.
- [5] 王景春,侯卫红,莫勋涛. 海底隧道施工安全评价的初步研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(12):3756-3762.  
Wang J C,Hou W H,Mo X T. Preliminary research on safety evaluation for subsea tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2007,26(12):3756-3762.
- [6] 李树忱,李术才,张京伟,等. 数值方法确定海底隧道最小岩石覆盖厚度研究[J]. 岩土工程学报,2006,28(10):1304-1308.  
Li S C,Li S C,Zhang J W, et al. Study on numerical method for the minimum rock cover of subsea tunnels[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2006,28(10):1304-1308.
- [7] 马谦杰,胡乃联. 基于风险度量理论的煤矿安全的系统评价[J]. 中国安全科学学报,2004,14(4):20-23.  
Ma Q J,Hu N L. Systematic evaluation of coalmine safety based on the theory of risk measurement[J]. China Safety Science Journal,2004,14(4):20-23.
- [8] 陈鹏宇,陈强. 基于模糊事故树的公路隧道火灾事故概率分析[J]. 公路与汽运,2012(7):74-78.  
Chen P Y,Chen Q. Probabilistic analysis of a highway tunnel fire based on fuzzy fault tree[J]. Highways & Automotive Applications,2012(7):74-78.
- [9] 侯福均,肖贵平,杨世平. 模糊事故树分析及其应用研究[J]. 河北师范大学学报(自然科学版),2010,25(4):464-468.  
Hou F J,Xiao G P,Yang S P. Study on fuzzy fault tree analysis and its application[J]. Journal of Hebei Normal University,2010,25(4):464-468.
- [10] 俞文生,王少飞,陈建忠,等. 事故树分析法在公路隧道防火安全中的应用[J]. 公路交通技术,2009,6(3):129-133.  
Yu W S,Wang S F,Chen J Z, et al. Application of event tree analysis method in firefighting safety of highway tunnel[J]. Technology of Highway and Transport,2009,6(3):129-133.
- [11] 施式亮,卢本陶. 基于可视化的事故树分析系统研究与开发[J]. 中国工程科学,2004,6(11):66-72.  
Shi S L,Lu B T. Development and application of fault tree analysis system based on visualization[J]. Engineering Science,2004,6(11):66-72.
- [12] 祁景新,陈全,孙旭红. 模糊事故树在氯乙烯聚合釜风险评价中的应用[J]. 天津理工大学学报,2010,26(4):79-82.  
Qi J X,Chen Q,Sun X H. Application of fuzzy fault tree assessment on chloroethylene polymerization reactor[J]. Journal of Tianjin University of Technology,2010,26(4):79-82.

## Analyzing the risk of road tunnel fire based on fuzzy fault tree method

REN Ping-fan<sup>1,2</sup>, WU Ai-you<sup>2,3</sup>, SHI Shi-liang<sup>3</sup>

(1. Xiangtan City Fire Brigade, Xiangtan 411201, China;

2. Henan Key Laboratory of Coal Mine Methane and Fire Prevention, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

3. School of Energy and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract:** On the basis of system safety engineering theory and fire theory, combining the characteristic of the uncertainty and subjectivity of tunnel fire and its traditional fire risk analysis method, a model of tunnel fire named Fuzzy Fault Tree Analysis (FFTA) was built. Using triangle fuzzy theory, the fuzzy probability of basis accidents and roof accidents based on experts scognition degree was achieved, then the fuzzy grade of each factors' relevance giving rise to gas explosion was obtained also. The result show that fire and fuel is the main elements leading to tunnel fire, following by fire-fighting measures ineffective. In order to reducing the risk of tunnel fire, ensuring the safe operation and sustainable development of road transport, we analysis the various factors and its logical relationship of road tunnel fire comprehensive, monitor the possibility of tunnel fire dynamically, and work out the strategy of active and passive fire protection.

**Key words:** system safety engineering; tunnel fire; fault tree; fuzzy probability; triangle fuzzy numeral