

# 公路隧道运营期风险定量分析模型研究

赵峰<sup>1</sup>, 周勇狄<sup>2</sup>, 夏永旭<sup>1</sup>

(1. 长安大学 西安 710064, 2 广西交通科学研究院, 南宁, 530023)

**摘要:** 公路隧道在施工和运营过程中存在着巨大的风险, 将风险管理理论引入隧道工程势在必行。本文尝试建立一套适用于公路隧道运营期风险分析的定量风险分析模型, 该模型包括隧道事故场景设计、概率估计、后果估计等几部分内容。在隧道事故场景设计中, 考虑了 PIARC 和 OECD 推荐的设计事故场景, 同时建立了事故疏散模型和 FED 人员逃生条件模型。通过已建立的事故概率模型和事故后果模型可以估算出隧道风险事故发生的频率和后果, 绘制出公路隧道社会风险的 F-N 曲线。

**关键词:** 公路隧道 运营期风险 定量风险分析 事故场景设计 概率模型 后果模型 疏散模型

中图分类号: X951

文献标识码: A

## Research of Quantitative Analysis Model of Operating Risk in Road Tunnel

Zhao Feng Zhou Yong-Di Xia Yong Xu

(1. Chang'an University, Xi'an 710064, China)

(2. )

**Abstract:** The operating risk of highway tunnel can be reduced but not be avoided totally. This paper tries to establish a QRA model for highway tunnel operation period, which includes tunnel accident scene design, probability estimation, consequence estimation etc. The design accident scenes consider the recommendation of PIARC and OECD. On this basis, the tunnel accident evacuation model and the FED staff escape condition model have been established. Through probability model and consequence model, the probability and consequence of accidents has been estimated, and drawing out the social risks FN curve.

**Key words:** road tunnel; operating risk; QRA; accident scenario design; probability model; consequence model; evacuating model

CLC number: X951

Document code: A

近年来, 我国在公路隧道建设中取得了巨大的成就, 公路隧道的数量与长度不断增加, 尤其是特长隧道及隧道群数量迅速增加。据统计截止2008年5月30日, 我国在建、拟建和已完工的特长公路隧道( $\geq 3000\text{m}$ )达200余座。公路隧道作为地下工程具有不可预见性的特点, 在施工和运营过程中均存在巨大的风险, 由此引发的重大事故不胜枚举。2005年12月22日, 四川省都(江堰)汶(川)高速公路重安山隧道发生特大瓦斯爆炸事件, 造成44人死亡, 11人受伤, 直接经济损失2035万元。1999年2月25日, 连接法国和意大利之间的勃朗峰隧道发生火灾, 死亡39人, 烧伤数十人, 烧毁车辆43辆, 火灾燃烧53小时。这些重大事故造成了巨大的人员伤亡和经济损失, 产生了严重的社会不良影响, 并引发了公众对公路隧道运输的不安全感。如何识别这些风险, 并通过适当的手段来减少事故发生的频率或减小事故发生的后果, 均属于风险管理的范畴。因此, 将风险管理的相关理论引入到隧道工程中来已刻不容缓。国内对于隧道建设期风险的研究已经取得了一定的成果<sup>[8,9]</sup>, 但是对于运营期风险尤其是公路隧道运营期风险的研究则极少。本文尝试借鉴风险评估理论, 建立一套适用于公路隧道运营期风险分析的定量风险分析模型。

### 1. 运营期风险定量分析基本流程

风险分析是风险管理体系中非常重要的一个环节。公路隧道运营期风险定量分析的目的就是量化隧道运营期间发生事故的频率和后果，确定其是否符合隧道风险可接受的标准。因此，隧道运营期风险分析一般应包括以下内容：

- 风险可接受标准
- 事故场景设计
- 事故发生频率
- 事故后果
- 风险评价

图 1 为公路隧道运营期风险分析基本流程图。由于隧道事故尤其是那些具有严重后果的事故发生比例比较低，并且大量隧道内或隧道外的因素以及不确定性在影响事故的发生概率和后果，这使得对公路隧道运营风险进行定量分析成为一件比较困难的事情。

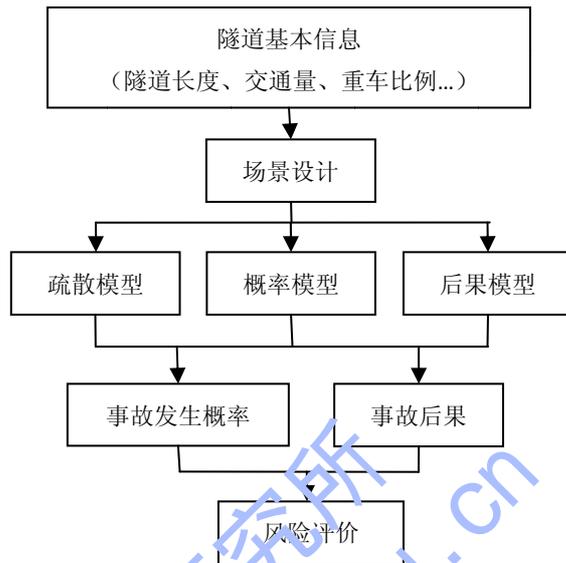


图 1 运营期风险分析基本流程图

## 2. 设计事故场景的选择

对于隧道事故，一般发生概率较大的交通事故后果包括追尾、侧翻、撞壁等，部分事故可发展成为火灾事故。而对公众影响较大的火灾事故中，包括有客车火灾、重型卡车火灾等，也包括危险品火灾。火灾的场景设计中，PIARC 推荐的火灾场景如表 1 所示<sup>[1]</sup>。而对于危险品运输的场景设计 OECD 推荐了 13 种场景<sup>[5]</sup>。危险品运输中最为常见的为汽油和液化天然气，其中汽油的运输大概占到了整个危险品运输的 68%。因此，针对不同的隧道，应结合具体隧道的交通流组织情况，选择适当的设计事故场景。

表 1 PIARC 推荐的火灾场景

火灾场景	热释放率 (MW)	隧道壁面的最大温度 (°C)
一辆小客车	2.5	400
一辆中型客车	5	500
2~3 辆小客车	8	
一辆货车	15	
一辆大客车	20	800
一辆重载货车	20~30	1000
重载车或危险货物车 (HGV 或 DGV)	100~120	1200~1400

## 3. 公路隧道运营风险定量分析模型

### 3.1 事故概率模型

对于隧道风险概率的估计需要综合考虑隧道风险出现的概率（风险基础概率）和隧道风险作用下发生损失的概率（损失发生概率），隧道风险概率模型用公式 1 表示。在某些评估中，不需要考虑基础概率和损失发生概率，可以直接通过专家经验获得风险概率  $P$ 。

$$P = p(h)p(C/h) \quad (1)$$

式中： $p(h)$ 为隧道风险事态出现的概率； $p(C/h)$ 为隧道风险事态出现并引起事故的概率。

### (1) 事故基础概率

一般交通事故率和交通量、单双向交通、隧道长度等有关，对于交通事故的发生概率，PIARC 文件显示隧道的交通事故率如表 2 所示<sup>[2]</sup>，火灾的统计数据如下<sup>[1]</sup>：

- 公路隧道火灾平均发生频率不超过 25 次 ( $10^8$  辆.km)；
- 城市隧道的火灾发生频率比其他隧道高；
- 所统计的隧道中只有 40% 的没有发生过火灾；
- 只有长隧道或交通量很大的隧道，或两者兼而有之的隧道中，事故发生频率会达到 1 次/月~1 次/年不等；
- 大多数隧道很少发生火灾。

表 2 隧道交通事故率 ( $10^8$  辆·公里)

隧道	事故率 (仅损失)	伤亡事故率	伤人率	死亡率
城市隧道	40-150	10-50	10-50	0-3
单向行驶高速公路隧道	30-80	0-15	0-15	0-1
双向行驶乡村隧道	20-100	0-40	0-20	0-2

危险品货物道路运输事故率一般在  $10^{-6}$ ~ $10^{-7}$  (辆·公里)，但相关的数据信息比较缺乏，而且危险品种类繁多，针对某类危险品和具体运输路径特征的历史事故资料甚少，因此研究者多采用道路所有车辆的事故率数据信息作为参考。表 3 为美国 3 大州的重型车辆运输事故率和危险品运输泄露事故率，可作为危险货物风险事故的基础概率。

表 3 美国 3 大州重型车辆运输事故率和危险品运输泄露事故率<sup>[12]</sup>

道路类型		重型车辆事故率 (次/ $10^8$ 辆·公里)	危险品运输 条件泄露概率	危险品运输泄露事故率 (次/ $10^8$ 辆·公里)
乡村	双车道	1.55	0.086	0.12
	多车道 (未划分)	2.79	0.081	0.22
	多车道 (已划分)	1.54	0.082	0.11
	高速公路	0.40	0.090	0.04
城市	双车道	5.38	0.069	0.37
	多车道 (未划分)	8.65	0.055	0.48
	多车道 (已划分)	7.75	0.062	0.48
	单车道	6.03	0.056	0.34
	高速公路	1.35	0.062	0.09

### (2) 损失发生概率

对于损失发生概率难以采用统一的计算方法及模型，对于不同问题需要采取不同的求解策略和方法。在实际的应用中，常采用事件树分析方法 (Event Tree Analysis) 以及基于统计数据和专家经验的方法。图 2 为液化石油天然气泄露事故事件树。

## 3.2 事故后果模型

隧道运营期事故的后果包括人员伤亡、结构损伤和环境破坏三种<sup>[5]</sup>。但由于在隧道事故中对公众印象最为深刻的主要还是死亡人数，因此目前国外对隧道运营期风险后果分析中主要还是以人员伤亡 (主要是死亡人数) 作为评价结果<sup>[3]</sup>，本文的研究也主要侧重于对人员死亡数的估计。

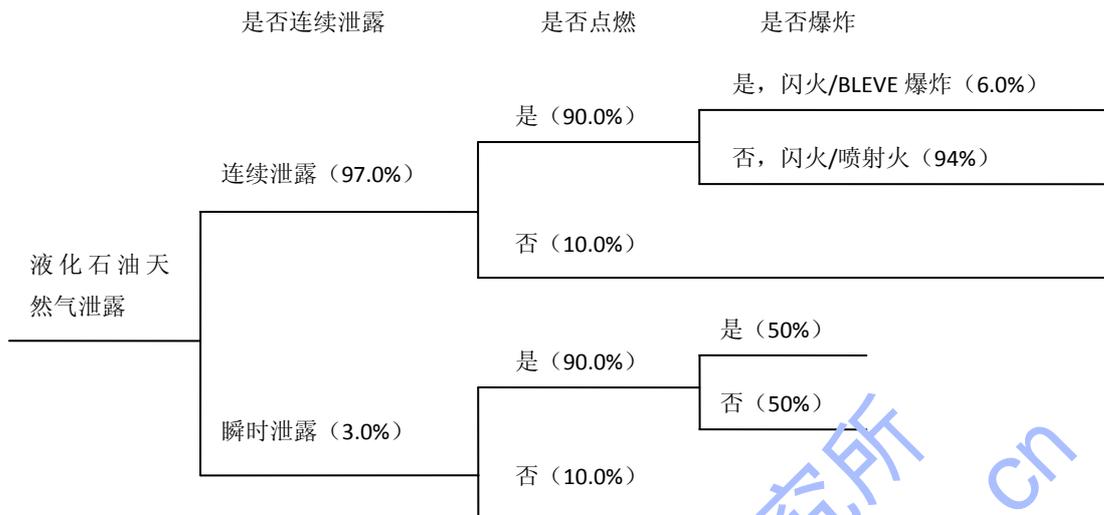


图 2 液化石油天然气泄露事故树

### (1) 一般事故后果模型

对于一般交通事故，不会引起隧道后续人员和车辆的损伤，因此一般交通事故引起的人员伤亡可以结合事故概率模型中的交通事故率等统计数据来估算。

### (2) 火灾事故后果模型

在隧道火灾事故中，除了由于车辆事故导致直接的人员死亡外，大部分死亡（约 85%）都是由于吸入烟尘及有毒气体昏迷后而致死的。估计在火灾中会产生大约 20 余种有毒物质<sup>[6]</sup>，这些气体中危害最大的是 CO。我国的火灾统计资料表明，在火灾死亡的人员中因 CO 气体窒息死亡的人员在半数以上，甚至高达 70%<sup>[10]</sup>。隧道火灾的物理后果主要有：温度、CO 的高浓度、CO<sub>2</sub> 的高浓度、缺氧、直接的热辐射等。

在隧道火灾中导致的人员死亡，主要是受到多种有害气体的共同作用的结果。因此，判断逃生人员死亡的标准主要是采用 FED 模型。但是能够产生严重后果的火灾事故，大多是与危险品有关的重载车运输。

### (3) 危险品运输后果模型

危险品在公路运输中发生泄漏事故后，通常会发生火灾、爆炸和毒物的泄漏扩散等事故后果，对人员、财产及环境具有不同程度的破坏作用。正确选择事故后果模型对事故后果评价的准确性具有重要的影响。危险品货物常见的后果模型如表 4 所示。

表4 危险货物的后果模型

后果模型	具体后果模型
爆炸伤害模型	蒸气云爆炸(VCE)伤害模型
火灾伤害模型	沸腾液体扩展蒸气爆炸(BLEVE)伤害模型
	闪火伤害模型
	喷射火伤害模型
毒物泄漏扩散模型	瞬间泄漏扩散模型
	连续泄漏扩散模型

### (4) 凝聚相爆炸模型 (CPE)

凝聚相爆炸指炸药等类型的含能材料的爆炸。CPE 模型用于模拟评价与分析凝聚相爆炸事故的后果严重度、危险等级和在和影响和破坏范围。凝聚相爆炸能产生多种破坏效应，最危险、破坏力最强、破坏区域最大的是冲击波的破坏效应。由于炸药爆炸时间很短，基本上

隧道内人员没有逃生时间，在其死伤范围内的人员全部死亡，危害性极大。因此将其从危险品运输中单独列出。

#### (5) 恐怖袭击

恐怖袭击的方式主要包括爆炸性袭击、纵火性袭击和生化袭击等几种方式，其后果已在上一节中体现。但由于案例较少，概率较难确定。

### 3.3 疏散模型

在构建疏散模型时，应该考虑到多个因素，比如事故发生地点，应急出口位置，事故两侧的车辆组织情况，烟雾扩散情况，人员的反应等。在这个疏散过程中，影响烟雾扩散和疏散时间的因素必须要考虑进去，如事故警报、人员反应、人员逃生速度、逃生距离、拥堵情况等。

#### (1) 疏散时间

疏散时间主要是指隧道人员从被置于一个危险的境地到其逃生到一个安全位置所经历的时间，一般这个过程被分为几个部分：察觉时间、反应时间和逃生时间。一般人员的察觉时间在 1~3 分钟之间，反应时间在 1~3 分钟之间，这与乘客和事故地点之间的距离、事故的严重程度以及隧道的警告标志有关。隧道内人员的逃生速度一般在 0.5m~1.5m/s 之间<sup>[1]</sup>。

#### (2) 疏散模型

疏散模型的建立与具体的隧道、交通量、事故场景以及通风方式等均有关系。在进行人员疏散时，首先需要通过建立车队模型来确定隧道内车辆数，以及受到事故影响需要逃生的人员数。其次需要计算隧道内人员的位置，需要逃生的距离以及逃生的时间。最后结合隧道内事故的发展根据逃生条件确定人员是否逃生成功，并以此确定死亡人数。

#### (3) 火灾烟气控制

隧道内一旦发生火灾，对于纵向通风的隧道应尽量避免火灾烟气出现“回流”现象，以使火灾对上游阻滞车辆人员危害最小化。隧道通风系统提供足够的纵向风流使得火灾“回流”为零时所需的风速被称之为“临界速度”。临界速度可采用式 2 计算<sup>[1]</sup>：

$$V_c = K_1 K_2 \left[ \frac{\sigma g H Q}{\rho_\infty C_p A \left( \frac{Q}{\rho_\infty C_p A V_c} + T_\infty \right)} \right]^{1/3} \quad (2)$$

式中， $V_c$ 为临界速度； $K_1, K_2$ 为常数； $\sigma$ 为重力加速度； $H$ 为隧道高度； $Q$ 为火场火灾热释放率； $A$ 为隧道横断面积； $C_p$ 为空气比热； $\rho_\infty$ 、 $T_\infty$ 分别为周围空气的密度与温度。

#### (4) 逃生条件

隧道内逃生人员生存是否与其在逃生过程中是否达到死亡标准有关，如果达到死亡标准，则其逃生过程将终止。对于爆炸事故，主要是判断隧道人员受到冲击波压力大小。而对于火灾事故，需要判断其受到温度、有害气体和热辐射的综合效应，逃生标准可以采用 FED 模型（式 3），当 FED 值达到 1 时，表示达到了死亡标准<sup>[10]</sup>。

$$FED = \sum_i \int_{t_0}^{t_i} \frac{C_i dt}{(Ct)_i} \quad (3)$$

式中， $C_i$ 为第  $i$  种气体的浓度， $(Ct)_i$ 为第  $i$  中气体伤亡标准与时间的乘积。

对 FED 模型进行扩展，可以得到 ISO13571<sup>[7]</sup>推荐的窒息气体的 FED 失能模型式 4 以及温度的 FED 失能模型式 5：

$$FED_{GASES} = \sum_{t_1}^{t_2} \frac{CO}{35000} \Delta t + \sum_{t_1}^{t_2} \frac{\exp(HCN/43) - 1}{220} \Delta t \quad (4)$$

式中，CO 和 HCN 为时间增量 $\Delta t$  内的气体平均浓度。本式适用于氧气含量不低于 13%，CO<sub>2</sub> 含量不高于 2%的情况。

$$FED_{HEAT} = \sum_{i=1}^{i_2} \frac{T^{3.4}}{5 \times 10^7} \Delta t \quad (5)$$

式中，T 为空气温度，℃。

当 FED=0.3，表明受影响人群失能，失去逃生能力。这个条件可适用于温度和有毒气体；当 FED=0.01 时，表明失能开始，但远低于导致死亡的极限。这个条件仅适用于有毒气体。

### 3.4 定量分析结果

结合事故概率估计、后果估计以及疏散模型，对于每种事故场景设计可以计算出其发生概率以及死亡人数，并绘制出隧道的社会风险 F-N 曲线，图 3 为 F-N 曲线示例<sup>[4]</sup>。

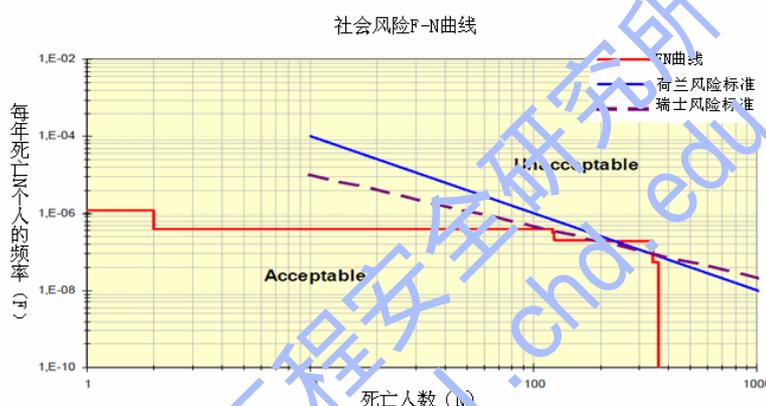


图 3 社会风险 F-N 曲线示例

### 4. 风险评价

隧道风险评价是隧道风险管理体系中在完成风险分析后的下一个环节，主要是判定风险分析结果是否可以接受。如果不能接受需要采取适当的措施来降低风险，并达到可接受的目标。因此，判断风险分析结果是否可以接受的前提是确定风险接受标准，目前风险接受准则一般采取的是最低合理可行 ALARP (As Low As Reasonably Possible) 风险接受准则<sup>[11]</sup>。

### 5. 结论

本文尝试建立了一套适用于公路隧道运营期风险分析的定量风险分析模型，通过设计事故场景、事故概率模型、事故后果模型以及疏散模型可以计算出风险分析的结果。但由于我国隧道运营期定量风险分析的基础资料缺乏，仍存在问题：

- (1) 我国关于隧道事故概率研究的数据较少，需要大量的统计工作来继续完善，这不是一两个科研课题或一两个部门所能解决的；
- (2) 危险品事故采用的灾害模型多为在开放空间的模型，是否适用于隧道还有待继续深入研究，国外对于此类危害的研究也不多；
- (3) 目前我国还没有相关的隧道风险接受准则，风险分析结果是否可接受仍无依据。

### 参考文献：

1. PIARC. Fire and Smoke Control in Road Tunnel[M]. 1999
2. PIARC. Road Safety in Tunnels[M].1995
3. PIARC. Risk Analysis for Road Tunnels[M]. 2008
4. Mattias Persson. Quantitative Risk Analysis Procedure for the Fire Evacuation of a Road Tunnel[R]. LUND University, 2002

5. OECD. Safety in tunnels, Transport of Dangerous Good through Road Tunnels[M]. 2001
6. Niels Peter Høj, COWI. Technical report Part2: Fire Safe Design-Road tunnel[R]. Fit, 2001
7. Richard G.G, Jason D.A, Kathryn M.B, et al. International study of the sublethal effects of fire smoke on survivability and health (SEFS): Phase I final report [ R ]. NIST Technical note, 1439, 2001
8. 地铁及地下工程建设风险管理指南[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2007
9. 铁路隧道风险评估暂行规定(报批稿) [S].北京: 中国铁道出版社, 2007
10. 卫巍, 夏永旭. 公路隧道逃生条件研究[J]. 现代隧道技术, 2008 增刊: 302-306
11. 胡群芳, 黄宏伟. 隧道及地下工程风险接受准则计算模型研究[J]. 地下空间与工程学报, 2006.2: 60-65
12. 沈小燕. 道路危险货物运输风险分析及路线优化研究[D].长安大学, 2009.6: 41-44

### 作者简介:

1) 赵峰, 男, 身份证号: 132331197609113675。2002 年 7 月毕业于长安大学桥梁与隧道工程专业, 获工学硕士学位。毕业后就职于中交远洲交通科技集团有限公司, 从事公路隧道设计工作, 发表科研论文 10 余篇。现攻读长安大学桥梁与隧道工程专业博士学位, 主要从事公路隧道风险评估与安全评价研究。

通信地址: 河北省石家庄市红旗大街 25 号 C 座 15 层, 050051

联系方式: 15081877598, 13933058549。电子邮箱: [zhaof2000@163.com](mailto:zhaof2000@163.com)

2) 周勇狄

3) 夏永旭, 男, 身份证号: 610103195312180453。1982年3月毕业于西安公路学院工程力学专业, 现任长安大学公路学院桥梁与隧道专业教授, 博士生导师。多年来一直从事教学与科研工作, 发表科研论文80余篇, 出版专著5本, 近年来主要从事公路隧道的结构理论及长大公路隧道的通风和防火救灾研究。

通信地址: 西安市南二环中段长安大学 444 信箱, 710064

联系方式: 13709258640。电子邮箱: [yongxuxia@126.com](mailto:yongxuxia@126.com)

长安大学隧道工程安全研究所  
<http://roadtunnel.chd.edu.cn>  
源自 西部交通科技