

# 高速公路隧道运行环境安全评价指标

戴忱华, 郭忠印, 马艳, 倪洪亮

(同济大学 交通运输工程学院, 上海 201804)

**摘要:** 根据高速公路隧道运行环境特性, 提出了隧道路段长度研究范围. 依据隧道运行环境风险影响因素和评价指标选取原则, 运用德尔菲法和聚类分析法提取隧道运行环境主因素, 从道路环境指标和气候环境指标两个方面建立了三层次六个子因素集的高速公路隧道运行环境安全评价指标, 并对各指标进行了分析和对比. 高速公路隧道运行环境安全评价指标的建立为隧道运行环境的分析和评价提供了理论基础.

**关键词:** 高速公路; 隧道; 隧道路段长度; 运行环境; 安全评价指标

中图分类号: U 491.13

文献标识码: A

## Safety Evaluation Index of Driving Environment of Expressway Tunnel

DAI Youhua, GUO Zhongyin, MA Yan, NI Hongliang

(College of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract:** According to the characteristic of the driving environment of the expressway tunnel, the length research scope of the tunnel section was established. Based on the risk ingredients of tunnels and the selecting principles of the evaluation index, the main factors of the tunnel driving environment were analyzed by using Delphi and clustering analysis method. A safety evaluation index system of tunnel driving environment was established, which contained three arrangements with six sub-factors in two aspects including road environment index and climate environment index. And the indices were analyzed and contrasted. The evaluation index system can be applied to the analysis and evaluation of the driving environment of expressway tunnel.

**Key words:** expressway; tunnel; length of the tunnel section; driving environment; safety evaluation index

行效率及保护环境的重要作用, 是高速公路穿越山岭丘区的比较经济的工程方案. 隧道特别是长大隧道是公路交通的咽喉, 这是因为隧道的行车环境具有封闭性的特点, 一旦发生事故, 对营救和交通组织都极为不利, 易引发重大事故和二次事故. 据统计, 欧洲每年隧道事故的直接经济损失达到 211 亿欧元, 间接经济损失更是高达 310~415 亿欧元<sup>[1]</sup>. 因此, 进行隧道运行安全研究, 预防隧道交通事故是世界各国普遍关注和研究的课题.

国内外对公路隧道运行环境的研究主要集中在通风、照明、消防三个方面. 例如美国联邦公路管理局(FHWA)、福特(FORD)公司、通用(GM)汽车公司等通过测试运行隧道中机动车污染物浓度来研究隧道空气污染状况<sup>[2]</sup>. FHWA、美国环境保护局(EPA)以及世界道路协会(PIARC)通过研究人在隧道污染环境中暴露时间, 限定相应的 CO 浓度限值. 中国学者邓顺熙等从大气扩散方程出发建立了一般公路隧道的空气质量方程, 在此基础上导出隧道内空气的解析模式, 从而计算出隧道内空气污染物浓度的分布<sup>[3]</sup>. 师利明等从声学理论出发研究了公路隧道内噪声的预测方法<sup>[4]</sup>, 潘晓东等通过隧道进出口视觉适应试验, 研究隧道进出口照明过渡<sup>[5]</sup>. 张生瑞等从交通影响因素指标、环境影响因素指标、动态影响因素指标等角度系统探索高速公路隧道交通运行环境评价指标<sup>[6]</sup>.

本文从道路环境及气候环境的隧道综合运行环境出发, 运用德尔菲法和聚类分析法提取隧道运行环境主因素, 研究隧道运行环境安全指标, 为隧道运行安全性评价以及运行安全管理提供基础依据.

## 1 隧道运行环境分析

隧道具有改善路线线形、缩短行车里程、提高运

隧道及隧道群, 一般位于大山、河流等特殊地理

收稿日期: 2009-05-18

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z235)

作者简介: 戴忱华(1983—), 女, 博士生, 主要研究方向为道路交通安全. E-mail: daiyouhua163@163.com

郭忠印(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为道路交通安全. E-mail: zhongyin@tongji.edu.cn

区段上,具有线形复杂多变、视距不良、洞内能见度低等特点.驾驶员在隧道路段行驶时,对其运行环境的安全感受与普通路段相比有较大差异,造成一定的生理心理压力.因此,应对隧道运行环境特性进行分析,以建立合理的隧道运行安全评价指标.

### 1.1 隧道路段长度

对隧道运行环境进行描述时,应首先对隧道路段的研究范围进行定义,《公路工程技术标准》规定隧道洞口外与之相连接的路段应设置距洞口不小于3 s设计速度行程长度且不小于50 m的过渡段,以保持横断面过渡的顺适.根据郭忠印课题组的有关研究成果<sup>[7]</sup>,隧道路段的过渡段长度应不小于5 s设计速度,如图1所示.

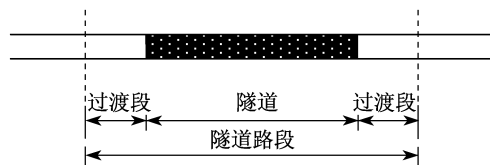


图1 隧道路段示意图

Fig.1 Schematic diagram of tunnel section

### 1.2 隧道路段安全特性

国内外的统计资料显示,隧道的事故率要比一般路段的事故率低,对于较长隧道尤其如此,原因主要为以下四点:①隧道空间封闭,不受雾、雨、冰雪、风等恶劣天气条件的影响且具有连续的照明;②驾驶员在隧道中一般心情紧张,注意力高度集中,发生错误驾驶行为的几率较小;③隧道进出口作为两种不同行车环境的过渡路段,在线形设计、抗滑性能、照明以及气候环境存在过渡和差异,因此存在较大的运行风险;④隧道群的间隙路段也存在较高的运行风险,这是因为驾驶员在隧道群行驶过程中须经历多次的线形过渡、抗滑性能过渡、照明过渡和气候环境变换等.

### 1.3 隧道路段运行环境特性

#### (1) 隧道线形特性

一般来说,隧道线形设计要点主要包括以下几点:①满足路线衔接的需要;②避开不良路段;③减少偏压及其他地质灾害的影响.

以往我国公路隧道多设计成直线隧道,因直线隧道在排水、衬砌结构及隧道的路面处理上均较为简单,同时直线隧道对隧道的通风也相对有利.北欧国家的公路隧道绝大多数都做成曲线形,这有利于光线的过渡,而且能有效地调节司机的心理,不至于受出口“白洞”影响加速出洞,同时通过曲线隧道避

开不良路段.

#### (2) 路面抗滑过渡特性

隧道进出口的路面抗滑性能存在突变,造成这种突变的原因主要有:①洞内外路面结构的不同;②使用过程中由于摩擦、烟尘积聚造成洞口处抗滑性能差异;③纵坡路段货车刹车产生的水滞留在隧道进出口,不易风干,导致抗滑性能下滑;④洞外雾、雨、雪等气候环境造成的洞口附近抗滑性能的差异.

#### (3) 照明过渡特性

隧道照明过渡是为了消除或减轻驾驶员进出洞口时的“黑洞效应”和“白洞效应”.在隧道照明设计方面,美国公路和运输官员协会 AASHTO、欧美一些国家以及我国在隧道照明设计上,都采用分段照明设计法,考虑隧道洞口环境亮度、设计速度、交通量三要素,将隧道按照照明设计分为入口段、过渡段、中间段和出口段,如图2所示.

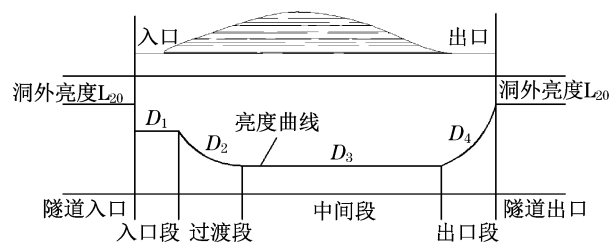


图2 隧道照明分段示意图

Fig.2 Tunnel lighting section of tunnel

### 1.4 隧道路段运行环境评价指标

隧道的运行安全受静态安全影响因素即道路条件、交通工程设施条件、环境条件,以及动态安全影响因素即交通条件、气候条件、事故条件及人文活动等多种因素的影响.为分析各类影响因素对隧道运行安全的影响,应先对隧道运行环境进行描述.本文根据实地交通调查数据及参考资料,将运行环境主要评价指标分为两类即:道路环境和气候环境.

第一类为道路环境.包括道路线形、路面状况、洞内环境、交通工程设施和安全设施五个方面.交通事故的发生与道路环境特征具有内在的、密切的联系,道路环境特征应满足运行安全的要求.通过对道路环境安全性进行描述,从道路环境特征的角度体现运行安全性.

第二类为气候环境.不良天气状况不仅改变了路表状况,破坏了轮胎与路面的正常接触状态,而且影响了驾驶员的视距,增加了驾驶员在隧道进出口路段识别安全设施和信息的困难性,而且还会影响驾驶员的生理和心理反应.通过对气候环境进行描

述,从管理的角度体现运行环境安全性.

## 2 隧道运行环境评价指标的构建

### 2.1 指标构建方法

对于隧道这样一个复杂的运行环境,通过分析道路设施和自然环境因素与运行安全的关系,确定隧道运行风险的基本因素及其不同组合形式,并进行聚类分析,辨识隧道运行安全显著性影响因素,合理选取运行风险评价指标,为隧道运行安全的科学评价提供基础.

隧道运行风险因素及组合众多,为使运行环境描述更加合理,本文引入多级综合评价指标.当因素集  $U$  的元素比较多时,每个因素的重要程度系数也

就相应较小,这时系统中因素之间难以分开,从而得不出有意义的评价结果.对于这种情形,可以把因素级  $U$  中的元素按照某些属性分成几类,先对每一类做综合评价,然后对评价结果进行“类”元素的高层次的综合评价.

因此,按照聚类分析法,建立三层次的隧道安全评价指标体系,如图3所示.第一层为目标层,即隧道运行环境安全性评价.第二层为对象层,包括六个要素,分别为道路线形安全性、路面状况安全性、洞内环境风险性、交通设施认知性、安全设施有效性、气候环境风险性,其因素集为  $U = \{U_1, U_2, U_3, U_4, U_5, U_6\}$ ,其中,  $U_i$  为第一层的第  $i$  个子因素集.第三层为指标层,包括  $n$  个元素,即  $U_i = \{U_{i1}, U_{i2}, U_{i3}, \dots, U_{in}\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, 6$ .

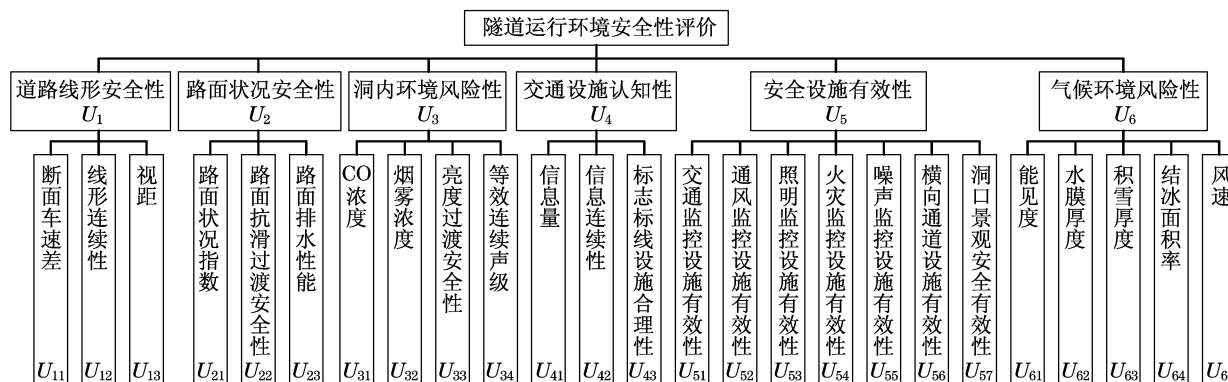


图3 隧道运行环境安全评价指标

Fig.3 Index for safety evaluation of the running environment of expressway tunnel

第一因素集  $U_1$ : 隧道路段线形安全性. 描述道路线形安全性的指标有平曲线半径、曲线长度、纵坡坡度及车道宽度等, 本文采用综合值断面车速差、线形连续性  $f$  和视距来描述隧道线形安全性.

第二因素集  $U_2$ : 路面状况安全性. 隧道洞口的抗滑性能的突变是影响隧道行车安全的重要因素. 故选取的路面状况安全性评价指标为路面状况指数、路面抗滑过渡安全性、路面排水性能.

第三因素集  $U_3$ : 洞内环境风险性. 隧道区别于其他重大交通基础设施运行环境的一个重要特征就是隧道洞内是圬工所围裹管状环境, 而其他重大交通基础设施如桥梁、立交等是开放的运行环境. 选取的洞内环境风险性的指标为 CO 浓度、烟雾浓度、亮度过渡安全性和等效连续声级.

第四因素集  $U_4$ : 交通设施认知性. 隧道路段的交通设施包括静态诱导设施和动态诱导设施. 静态诱导设施包括标志标线、紧急电话标志、消防设备指示标志、行人横洞指示标志、行车横洞指示标志、紧

急停车带标志、疏散指示标志等. 动态诱导设施包括可变(限速)信息板和交通广播. 这些交通设施诱导驾驶员顺利通过隧道, 在发生隧道事故时帮助隧道内人员进行自救或逃生.

第五因素集  $U_5$ : 安全设施有效性. 安全保障设施有三个作用: ① 尽早发现隧道内的事故或火灾; ② 尽早发出警告, 并对隧道洞内外的车流实施控制; ③ 尽早扑灭火势并采取相关的安全对策. 基于隧道运行环境特性, 选取的安全设施为有效性评价的指标为交通监控设施有效性、通风监控设施有效性、照明监控设施有效性、火灾监控设施有效性、噪声监控设施有效性、横向通道设施有效性和洞口景观安全有效性.

第六因素集  $U_6$ : 气候环境风险性. 由于隧道洞内是一个封闭环境, 因此雾、雨、冰雪、风等气候环境对隧道运行安全的影响集中在隧道过渡段及洞口附近. 选用五个指标(能见度、水膜厚度、积雪厚度、结冰面积率和风速)来表征一定气候环境下隧道运行

环境安全性.

## 2.2 评价指标的说明

### 2.2.1 线形安全性

#### (1) 断面车速差

从车速累积分布曲线上可以看出,运行速度  $V_{85}$  是一个特征速度值,反映了公路上绝大多数驾驶员的交通心理需求,以  $V_{85}$  作为评价道路线形的方法,有效地保证了路线所有相关要素如视距、超高、纵坡、竖曲线半径等指标与设计速度的合理搭配,故可保证线形连续、一致性和均衡性.对隧道路段线形安全性采用断面车速差  $\Delta V_{85}$  来描述隧道不同路段车速的变化,主要方法是将一般路段的稳定车速与隧道路段的特征点,比如隧道进出口的车速相减或相比,得到断面车速差  $\Delta V_{85}$ .断面车速差  $\Delta V_{85}$  的意义在于研究车辆在出入口的加减速过程与隧道路段各项参数以及隧道路段事故率之间的关系.断面车速差  $\Delta V_{85}$  定义为:驶入隧道方向为过渡段起点与隧道入口处车速差,驶出隧道方向为出口处与出口过渡段终点车速差.

驶入隧道方向:

$$\Delta V_{85\text{驶入}} = V_{85\text{入口}} - V_{85\text{过渡段起点}} \quad (1)$$

式中: $\Delta V_{85\text{驶入}}$  为驶入隧道方向断面车速差,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $V_{85\text{过渡段起点}}$  为进口方向过渡段起点运行车速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $V_{85\text{入口}}$  为隧道入口运行车速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

驶出隧道方向:

$$\Delta V_{85\text{驶出}} = V_{85\text{过渡段终点}} - V_{85\text{出口}} \quad (2)$$

式中: $\Delta V_{85\text{驶出}}$  为驶出隧道方向断面车速差,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $V_{85\text{过渡段终点}}$  为出口方向过渡段终点运行车速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $V_{85\text{出口}}$  为隧道出口运行车速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ .

#### (2) 线形连续性

在线形评价中不仅要考虑各路段的线形状况,更要注重隧道相邻路段线形的过渡和连续性.综合的线形技术指标  $f$  能够反映线形的设计质量,  $f$  值越大,线形越差,线形技术指标  $f$  公式如下:

$$f = \left\{ \xi + \lambda \cdot \left( \exp \left( mV \cdot \sqrt{\int_a^b \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_0} \right)^2 dl / L} + nV \cdot \sqrt{\frac{1}{R_0}} - 1 \right) \right) \right\} \cdot g(i) \quad (3)$$

式中: $R_0$  为计算点的曲线半径,  $\text{m}$ ;  $R$  为计算范围内各点的曲线半径,  $\text{m}$ ;  $V$  为设计车速,  $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $L$  为计算范围长度,  $\text{m}$ ;  $i$  为计算范围内的平均坡度;  $g(i)$  为纵坡修正系数;  $\xi, \lambda, m, n$  为量纲一参数.

从隧道路段的出入口线形差异的角度出发,考

虑过渡段衔接点,即出入口前后各 5 s 的设计车速行程范围,构建隧道出入口路段过渡技术指标  $\Delta f^{[8]}$ .线形过渡技术指标  $\Delta f$  采用线形过渡点前后 5 s 行程的线形技术指标差值来表示,即  $\Delta f = f_{5s}^{(2)} - f_{5s}^{(1)}$ ,反映了进出口路段线形的连续性.

#### (3) 视距

车辆在隧道路段行驶过程中,从开放环境到裹管状环境,或者从裹管状环境到开放环境的转换,运行环境的转变伴随着驾驶行为的调整,因此隧道路段平曲线视距成为事故发生的重要隐患,应根据运行速度所需的停车视距,对平曲线段视距进行终点验算.

### 2.2.2 路面状况安全性

#### (1) 路面状况指数

路面状况指数是一个综合指标,用来评价路面病害和路面杂物等对路面抗滑性和平整度的影响.隧道洞内外路面状态对运行安全的影响表现在对驾驶员驾驶行为以及由于路面平整度所引起的车辆震动对驾乘人员舒适性的影响.同时,路面不平整或车辙还容易形成路面积水,造成车辆滑水,是雨天事故的主要原因.路面状况的评价采用路面状况指数 PCI 这一综合指标.

#### (2) 路面抗滑过渡安全性

隧道路面抗滑过渡安全性是分析车辆在不同摩擦系数路面上的行驶特性和行驶风险.车辆在不同摩擦系数路面上的行驶风险分为两部分:第一,突发风险包括制动和转向风险;第二,运行风险包括侧向滑移率和横向力系数.

定义隧道路面抗滑过渡技术指标为

$$F = F_1 + (F_1 - F_0) = 2F_1 - F_0 \quad (4)$$

式中: $F_1$  为隧道内路面的总行车风险;  $F_0$  为隧道外路面的总行车风险.

#### (3) 路面排水性能

路面排水性能保持路面附着系数在正常范围,保证行车安全及隧道结构和设备的正常使用.

### 2.2.3 洞内环境风险性

#### (1) CO 浓度

隧道内空气污染物主要来自过往机动车的排放和车辆携带的尘土及卷起的尘埃,隧道内的污染物主要有 CO,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ , TSP(总悬浮颗粒物)和 PM10(可吸入颗粒物)等,其中 CO 是对人、卫生和安全影响最大的污染物.

#### (2) 烟雾浓度

在公路隧道的设计过程中,汽车尾气中有害成

分特别是CO和烟雾浓度是决定隧道通风设计的关键因素。

### (3) 亮度过渡安全性

隧道运行环境对驾驶员视觉心理影响具有区别于其他运行环境的特殊性,当车辆通过时,光强的变化会对驾驶员视觉生理以及心理产生影响。白天,在车辆高速驶入隧道时容易产生“黑洞”效应,快速驶出时又容易产生“白洞”效应,夜晚则相反,驶入隧道时产生白洞效应,驶出时又产生黑洞效应。试验证明,这种视觉生理心理影响与行车速度、照明设计、洞口设计、路面结构、隧道洞壁等因素有关。

### (4) 等效连续声级

由于隧道内多采用刚性路面,车辆在洞内行驶时,将产生较大的噪声污染,以等效连续声级评价,为在规定时间内A声级的能量平均值,又称等效连续A声级,用 $L_{eq}$ 表示,单位为dB。

## 2.2.4 交通设施认知性

### (1) 信息量

驾驶员在隧道的行驶过程中,道路交通信息进入视野,并存储于短时记忆中,但驾驶员的短时记忆信息容量有限,当信息量过多以致信息过载将大大增加驾驶员认知时间,造成认知困难。

### (2) 信息连续性

驾驶员在隧道的行车过程中,需要接受较多的道路交通信息,而各种不同的信息也会互相造成信息干扰;同时,驾驶员记忆认知能力有限,不可避免地产生信息遗忘,因此需要对重要交通信息等按一定规律重复出现,以符合驾驶员的认知能力和认知过程,减少视觉干扰和视觉遗忘,确保驾驶员及时、准确地认知各类交通信息,保证行车安全性。

### (3) 标志标线设置合理性

标志标线的设施位置、设置密度、标志的尺寸、字高、颜色、反光性能及标线的抗滑性能等均影响其认知性。

## 2.2.5 安全设施有效性

基于隧道的运行环境特性,包括交通、通风、照明、火灾以及噪声五方面的监控设施,另外还包括其他隧道安全设施即横向通道和洞口景观的有效性。这七类安全设施的有效评估涉及多方面的具体要求,难以用某个指标进行客观准确的量化,因此,对隧道安全设施有效性的评估通常采用德尔菲法给出评分值。

## 2.2.6 气候环境风险性

### (1) 能见度

通常采用能见度来表征雾、雨、冰雪、风环境的等级强度。雾、雨、冰雪、风等恶劣环境使得隧道洞口附近能见度大幅度降低,影响标志标线视认性以及隧道线形和出入口的辨认。

### (2) 水膜厚度

降雨对行车安全的影响除了降水在视野中形成了干扰和影响了驾驶员的心理和生理反应外,主要是路表水膜的润滑作用造成了“水膜溜滑现象”,且车速越高,润滑作用越明显,路面抗滑能力越差。John Anderson对公路路面降雨水深进行了试验研究,总结出了降雨形成水膜厚度的经验公式如下<sup>[9]</sup>:

$$d = 0.15(LI)^{0.5} N^{0.5} \quad (5)$$

式中: $d$ 为水膜厚度,mm; $L$ 为排水长度,m; $I$ 为降雨强度, $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ ;  $1/N$ 为路表坡度。

### (3) 积雪厚度

雪对隧道路段的行车安全影响集中在洞口附近,包括影响驾驶员进洞的视线,积雪对阳光的强烈反射作用造成的雪盲现象,路面积雪使行车变得困难,被积雪覆盖的道路交通设施的安全性被弱化等。积雪厚度与降雪量可按照15:1的比例换算,如15cm厚的积雪约为10mm降雪量。

### (4) 结冰面积率

对隧道的运营安全而言,隧道洞口路面结冰是运行安全的影响因素之一。结冰面积率为结冰面积占不结冰路面的比例,%。

### (5) 风速

风对隧道运行安全的影响主要来源于侧风的突然出现或消失。进入隧道时表现为侧风的突然消失,出隧道时表现为侧风的突然出现。不同的风速大小影响车辆的行驶阻力及行驶视距增加、侧向滑移甚至倾覆。因此,选用风速作为参数对风环境进行描述,表示风速的单位有 $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ , $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

## 2.3 评价指标的检验

依据隧道运行环境的安全特性初选的评价指标体系未必是满意的,还必须对初选的指标体系进行进一步检验。分析第一层指标 $U_1 \sim U_6$ 以及第二层指标的确定依据以及计算方法的正确性,并对各指标进行检验。

(1) 代表性是指各指标从隧道运行环境特性考虑是否是必不可少的,指标间是否存在重复现象。可采用相关性分析法对指标进行相关性检验,若存在高度相关的两个或多个指标,则应重新拟定指标。

(2) 重要性是指各评价指标的重要程度,即隧道运行环境特性对运行安全影响的程度。可采用德

尔菲法对拟出的隧道运行安全评价指标进行研究. 若某指标体系中某层次有  $n$  个指标, 请  $k$  位专家对其进行评议. 设  $E_i$  表示专家对第  $i$  个指标的综合评价结果,  $w_{ij}$  表示第  $j$  个专家在评价第  $i$  个指标时的权重系数;  $E_{ij}$  ( $E_{ij} = 1, 2, 3, 4; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k$ ) 表示第  $j$  个专家在评价第  $i$  个指标时的评价结果, 公式如下:

$$E_i = \left( \frac{1}{\sum_{j=1}^k w_{ij}} \right) \cdot [w_{i1}E_{i1} + \dots + w_{ik}E_{ik}] \quad (6)$$

式中:  $E_i$  的大小确定了指标  $i$  重要程度的大小, 反映了  $k$  个专家的综合评价期望值.

(3) 完整性是指该指标体系是否全面地描述和测度了高速公路隧道运行环境的主要特性. 在初选的隧道运行安全评价指标中, 先通过德尔菲法确定重要指标, 剔除一些对隧道运行安全无关紧要的指标, 再通过指标之间的相关性进行筛选, 为了找出主要影响因子, 可以通过德尔菲法或主成分分析法筛选出主要影响指标.

### 3 结语

(1) 隧道路段应包括两部分, 即隧道部分和两端不小于 5 s 设计速度的过渡段. 并对隧道以及隧道群运行环境安全性进行描述, 将其主要评价指标分为道路环境和气候环境两个部分.

(2) 公路隧道路段的裹管状运行环境不同于普通路段的开放式运行环境, 根据隧道运行环境特性, 建立三层次六个子因素集的隧道安全评价指标.

(3) 隧道路段运行环境是一个复杂的多因素, 因素之间又互相影响的复杂系统, 隧道路段的评价指标还有待进一步研究和完善.

#### 参考文献:

[1] Ad hoc Multidisciplinary Group of Experts on Safety in Tunnels.

- Recommendations of the multidisciplinary group of experts on safety in tunnels [R/OL]. [2003 - 01 - 21]. <http://www.unece.org/trans/dox/2003/ac7/TRANS2AC7213e.pdf>.
- [2] Steven N R, Tom D. Gaseous emission from vehicles in a tunnel in vancouver [J]. Air and Waste Manage Assoc, 1998, 34: 604.
- [3] 邓顺熙, 刘人通. 公路隧道空气质量模式及应用 [J]. 西安公路交通大学学报, 2000, 20(2): 27.  
DENG Shunxi, LIU Rentong. Roadway tunnel air quality models and their applications [J]. Journal of Xi'an Highway University, 2000, 20(2): 27.
- [4] 师利明, 罗德春, 邓顺熙. 公路隧道内噪声预测和降噪措施的理论研究 [J]. 中国公路学报, 1999, 12(增刊): 101.  
SHI Liming, LUO Dechun, DENG Shunxi. Theoretical research on noise prediction and measures of reducing noise in highway tunnel [J]. China Journal of Highway and Transport, 1999, 12 (Supplement): 101.
- [5] 潘晓东, 杜志刚, 杨轶. 动视点指标与隧道进口平曲线半径 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2008, 36(12): 1661.  
PAN Xiaodong, DU Zhigang, YANG Zhen. Relationship between eye movement index and horizontal alignment at entrance of highway tunnel [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2008, 36(12): 1661.
- [6] 张生瑞, 马壮林. 高速公路隧道交通环境评价指标体系 [J]. 长安大学学报, 2006, 26(2): 86.  
ZHANG Shengrui, MA Zhuanglin. Evaluation indices for traffic environment of expressway tunnel [J]. Journal of Chang'an University, 2006, 26(2): 86.
- [7] 郭忠印, 孔令旗, 王琰, 等. 隧道进出口运行安全研究报告 [R]. 上海: 同济大学交通运输工程学院, 2007.  
GUO Zhongyin, KONG Lingqi, WANG Yan, et al. Research on operating safety of the tunnel entrance and exit zone [R]. Shanghai: Tongji University. College of Transportation Engineering, 2007.
- [8] 王琰, 孔令旗, 郭忠印, 等. 基于运行安全的公路隧道进出口线形设计 [J]. 公路交通科技, 2008, 25(3): 134.  
WANG Yan, KONG Lingqi, GUO Zhongyin, et al. Alignment design at tunnel entrance and exit zone based on operating safety [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(3): 134.
- [9] Anderson J. Depth of rain water on road surface [J]. Highway & Transportation, 1995(5): 112.