

# 公路隧道群智能联动控制技术的现状与展望

何 川<sup>1</sup> 王明年<sup>1</sup> 方 勇<sup>1</sup> 李祖伟<sup>2</sup> 李海鹰<sup>2</sup> 张太雄<sup>3</sup> 彭建康<sup>3</sup>

(1 西南交通大学,成都 610031;2 重庆高速公路发展有限公司,重庆 400042;

3 重庆市交通委员会,重庆 401147)

**摘 要** 随着西部高速公路的发展,隧道群及其特殊形式毗邻隧道大量出现,但由于隧道群中各隧道的通风、照明及防灾救援控制相互影响严重,现有的针对单体公路隧道的控制方法不再适用。文章在介绍当前公路隧道群智能联动控制技术研究现状的基础上,对公路隧道群智能通风控制方法、照明特性研究、防灾救援控制流程等急需解决的关键技术问题进行了探讨。此项研究可为公路隧道群联动控制技术的下一步研究提供参考。

**关键词** 高速公路 隧道群 联动控制

## 1 前 言

近年来,我国在高速公路建设中取得了巨大的成就,重庆、云南、四川、浙江等山区省市涌现出大量特长高速公路隧道。如以重庆市为例,目前在建隧道总数达 146 座,隧道总里程占高速公路总里程的 23.5%,个别路段,如渝湘线水江至武隆路段甚至高达 53%。这些路段上隧道间的距离较近,大都以隧道群的方式出现。以渝湘线水江至武隆路段为例,路段全长 54 km,隧道占 28.6 km,这些隧道的通风、照明及灾害救援控制相互影响,构成了路段上的隧道群及其特殊形式毗邻隧道。目前国内外的公路隧道的营运控制方法研究主要针对单体隧道而言,单体隧道特点是:隧道之间相距很远,各隧道之间的通风、照明及灾害救援没有相互影响,独立进行控制。随着高速公路隧道的增多,隧道群及其特殊形式毗邻隧道大量出现。隧道群的特点是:隧道间相距较近,隧道间通风、照明及灾害救援相互具有一定影响;毗邻隧道的特点是:隧道间相距很近,隧道间通风、照明及灾害救援的相互影响严重。故隧道群及毗邻隧道应考虑通风、照明及防灾救援上的联动控制。虽然单体公路隧道在通风、照明及防灾救援的控制方法上取得了长足的进步,一些已营运的单体公路隧道已采用了智能控制等先进的控制方法,而

且实现了营运期间单体隧道各子系统之间的联动控制,但是对于公路隧道群的联动控制技术目前尚处于发展阶段,本文在介绍公路隧道群智能联动控制技术研究现状的基础上,对急需解决的关键技术问题进行探讨。

## 2 公路隧道群智能联动控制技术研究现状

### 2.1 公路隧道群通风系统的智能联动控制

对于隧道群的通风系统而言,后方隧道的交通流及其特性将为前方隧道交通流预测创造条件,故对前方隧道的通风控制有较大影响性。而且当隧道相距很近时,除隧道间的交通流相互影响外,隧道出口、入口间的污染物扩散也相互影响。为保证隧道通风控制的准确性,还需探明隧道出口、入口间的污染物扩散的相互影响。

目前在隧道群中各隧道的通风设计与控制是相互独立的<sup>[1,2]</sup>,没有考虑到前后隧道在交通流上数据上的共享性。由于高速公路行驶的封闭性,隧道群中后面隧道的交通流数量及其特性在一段时间内同样会再现到前方隧道中,从而为前方隧道交通流预测创造条件,故对前方隧道通风控制有较大影响性。目前对已建成的隧道群进行通风设计与控制时,

修改稿返回日期:2008-07-29

作者简介:何 川,男,工学博士,教授,博士生导师。

没有考虑到隧道群的这种特点,如陕西省西安—汉中高速公路上秦岭Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ号特长公路隧道群、319国道长沙—刘阳段蕉溪岭隧道群、深圳坪西公路雷公山和迭福山隧道群等,在这些隧道群中各个隧道的通风设计与控制是相互对立的。

对于隧道群的特殊形式毗邻隧道,隧道出口、入口间的污染物扩散对通风控制的影响也没有被深入研究。虽然对公路隧道洞口处污染物扩散的研究较多,研究手法多以数值模拟和现场实测为主,如长安大学课题组采用有限元法对秦岭终南山特长公路隧道(18 020 m)洞口外污染物浓度的分布及两洞口之间污染物的回流进行了数值分析研究,为该特长公路隧道通风和洞口的环保设计提供了参考依据;西南交通大学课题组对重庆市渝合高速公路北碚隧道在单向行车、双向行车等情况下洞口处的污染物扩散形态进行了现场实测,获得了很有意义的结论。但这些研究一方面仅局限于单体隧道洞口处的污染物扩散研究,并没有涉及到毗邻隧道洞口处的污染物扩散研究,实际上后者由于有两个出口和两个进口,因而变得更为复杂;另一方面,隧道洞口处污染物扩散的影响并没有体现到通风的控制中去。

## 2.2 公路隧道群照明系统的联动控制

目前国内外对隧道群及毗邻隧道的照明控制技术研究较少<sup>[4]</sup>。当隧道群中两隧道间的距离很近时,后方隧道的出口照明与前方隧道的入口照明之间有明显的相关关系。驾驶人员在驶出后方隧道的时候经历了“明适应(light adaptation)”过程,不到30 s的时间内又要经历前方隧道接近入口处的“暗适应(dark adaptation)过程,给驾驶人员带来很大的心理压力,是引发交通事故的主要因素。

当隧道群中各隧道间相距较远时,前后隧道出入口照明几乎没有影响,因而其照明控制方法就是单座隧道照明的控制方法,如广东汕梅高速公路丰顺至梅县路段隧道群,就是分别针对每座隧道独立设计控制方法,各隧道的照明控制互不影响。对于毗邻隧道的照明控制而言,由于没有对前后隧道出入口照明的相互影响进行深入而系统地研究,缺乏控制的理论依据,目前国内外并没有提出专门针对毗邻隧道的照明控制方法。从已建隧道的实际的营运状况来看,出入口相距较近的两座隧道的照明控制仍然是独立进行的,并没有考虑到两座隧道照明控制的联动性。

关于毗邻隧道之间照明相关关系的研究,国内

外进行得相对较少,研究资料与成果也很匮乏,仅日本有关研究人员对此进行了研究,他们根据两隧道间的行车时间长短对前方隧道入口段的照明亮度进行折减;我国现行的《公路隧道隧道通风照明设计规范》中也是采用该方法对毗邻隧道中前方隧道的照明设计进行规定,如表1所示。

表1 前方隧道入口段亮度折减率

两隧道之间行驶时间/s	<2	<5	<10	<15	<30
前方隧道入口段亮度折减率/(%)	50	30	25	20	15

从表1可以看出,前方隧道入口段亮度的折减率是根据人眼的适应性来确定的,且认为只有当隧道间行车时间小于30s时才考虑亮度的折减。两隧道间行车时间越短,前方隧道入口段的亮度折减就越大。实际上仅仅由隧道间行车时间这单一因素来决定前方隧道入口段照明亮度折减率是不全面的,往往会产生很大的误差,甚至影响行车安全。前方隧道入口的亮度折减有必要综合考虑行车间隔、天气情况、周围植被、出入口建筑形式、道路路面铺装以及人眼对明暗环境交替的适应等因素的影响。但从调研的资料来看,目前国内还没有系统地开展对毗邻隧道照明的研究。

## 2.3 公路隧道群防灾救援的联动控制

目前公路隧道群的防灾救援控制仍然是针对各个隧道独立进行的<sup>[6]</sup>,没有考虑到隧道间的相互影响。单个公路隧道的救援控制预案在不同的营运工况下是不同的,故制定控制预案时需尽可能地考虑到公路隧道营运过程中所能遇到的所有工况,而且控制预案包含了隧道机电与监控系统中的通风、照明、交通、火灾报警、闭路电视和有线广播系统等子系统的控制。针对单个公路隧道防灾救援的控制流程及方案,目前已取得了一些成果,这些控制流程及方案综合考虑了隧道营运的正常情况、火灾情况、隧道堵塞、隧道事故、隧道维修以及污染物浓度严重超标等情况,对各种情况的控制预案制定原则、基本功能、控制原理、控制基准和控制顺序进行了研究,编制分别适应不同营运工况下的控制预案,并将预案以动态数据库的形式与智能监控软件系统结合起来,应用于隧道的实际营运中,如渝合高速公路北碚隧道和西山坪隧道,这些隧道在灾害情况下实现了隧道内各子系统的联动,从而保证了防灾救援的及时性。

### 3 公路隧道群智能联动控制急需解决的关键问题

#### 3.1 公路隧道群智能通风控制方法

具体内容主要包括以下几个方面:

##### (1) 高速公路隧道群交通流特征与预测模型研究

在隧道群及其特殊形式毗邻隧道中,由于高速公路的封闭性,后方隧道测得的交通流可为前方隧道的交通流预测创造条件。隧道群中各隧道间距离相对较远,车辆在隧道间的路段上行驶一段时间才达到下一座隧道,交通流形态已发生显著改变,研究交通流在隧道内和隧道间的特征,并根据隧道间距建立相应的交通流预测模型。毗邻隧道中,各隧道间距离非常近,车辆在后方隧道内的行驶状态来不及改变就驶入下一座隧道,交通流形态没有发生显著改变,研究车辆在毗邻隧道内的行驶特征,建立毗邻隧道的交通流预测模型。

##### (2) 高速公路隧道群污染物扩散形态研究

建立高速公路隧道群和毗邻隧道通风系统的空气动力学模型和污染物扩散模型,进行隧道内和洞口间的污染物扩散形态研究,具体内容包括:

###### ① 隧道内空气污染物扩散形态研究

对隧道内典型的局部污染物扩散形态进行研究,包括射流风机处、横断面突然变化处等,探明局部污染物扩散对纵向污染物浓度分布的影响;结合交通流仿真技术,采用数值计算方法研究隧道内空气污染物在纵向上的动态分布情况和变化规律。

###### ② 左右隧道洞口处空气污染物扩散形态研究

研究隧道洞口处污染物在横向上的扩散形态和扩散规律,探明地形条件、洞口间距、隧道风速、外界风速风向等因素对左右洞口污染物扩散形态的影响。

###### ③ 毗邻隧道中前后洞口间污染物扩散研究

在毗邻型隧道中,前后隧道的洞口相距较近,此时后方隧道出口处的污染物在纵向上的扩散会对前方隧道入口处的空气质量造成影响。研究后方隧道出口处污染物在纵向上的扩散形态和扩散规律,探明地形条件、前后隧道洞口间距、隧道出口风速、外界风速和风向等因素对隧道间污染物扩散形态的影响。

##### (3) 高速公路隧道群前馈式智能通风控制器研

究<sup>[7]</sup>

针对高速公路隧道群及毗邻隧道的具体特点,进行以前馈式智能控制为核心的通风控制器研究,研究内容包括:

###### ① 单体隧道的前馈式智能通风控制器研究

在隧道群和毗邻隧道中,最先驶入的隧道交通流和污染物不受其它隧道的影响,故按单体隧道的通风控制方法进行控制。研究建立单体公路隧道的神经网络控制器、模糊-神经网络控制器等,并采用仿真测试等手段对其修正和完善。

###### ② 隧道群前馈式智能通风控制器研究

进行隧道群前馈式智能通风控制器研究时,需考虑到:后方隧道的当前交通流就是前方隧道将来某一时段的交通流,但根据隧道间的距离的大小,通过隧道的交通流形态改变程度也不一样。

###### ③ 毗邻隧道前馈式智能通风控制器研究

毗邻隧道的最重要特点在于:后方隧道的当前交通流就是前方隧道将来某一时段的交通流,而且交通流形态的改变也较小;其次由于两隧道间洞口较近,后方隧道出口污染物扩散还会对前方隧道入口的空气造成污染。进行毗邻隧道前馈智能通风控制器研究时需综合考虑这两方面的影响。

##### (4) 高速公路隧道群通风系统控制策略研究

实际应用表明,单纯地依靠智能控制器的设计还不能达到智能控制的最优效果。为了更进一步节约能源消耗、延长风机使用寿命和降低对环境检测仪器的依赖性,需进行控制策略研究,主要包括风量分担、风机保护以及降低设备依赖性等策略。

#### 3.2 公路隧道群照明特性及控制方法

以往的隧道照明系统的控制有人工控制、时序自动控制、光强自动控制、时序光强结合自动控制等几类,这些控制仅仅考虑洞外光强的变化,而没有考虑洞外环境、天气状况、路面情况等客体因素,也没有考虑交通量大小、交通组成情况及司乘人员等主体因素,因而控制效果通常达不到节约电力消耗和交通环境优好等目标。

将虚拟现实技术应用于高速公路隧道群照明的研究中<sup>[5]</sup>,可以更好地了解高速公路隧道群的照明特性。虚拟现实技术综合了人机工程学、计算机、图形图像学、隧道工程学等多领域的知识,针对在现实中对洞外亮度、洞口建筑形式、路面类型与照明质量之间的关系难以考察的问题,构建复杂的虚拟现实平台。基于该虚拟现实平台,对行车速度、交通流

量、交通组成、天气情况、周围环境、洞口建筑形式、路面铺装等客观因素对隧道照明效果的影响进行了主观评价研究。基于照明评价研究结果,根据交通流和洞外光强的实时检测值对隧道照明进行控制,高速公路隧道群照明控制的基本流程如图1所示。这种照明控制方法既考虑了隧道所处的各种外部环境因素,也考虑了司乘人员的主观因素,同时又充分利用了现场实测的洞外光强和交通流数据,因而无论从安全性、舒适性还是节能上都能达到较好效果。

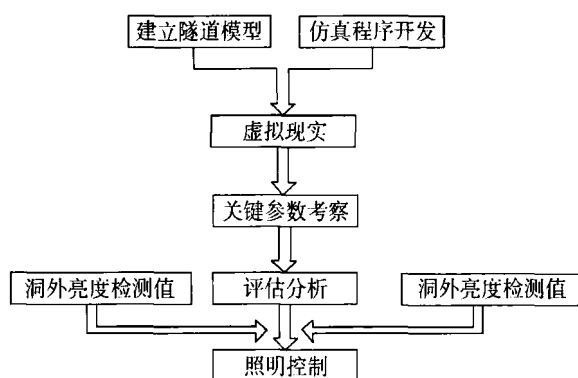


图1 隧道照明控制开发流程

### 3.3 公路隧道群防灾救援控制流程

具体内容主要包括下面几个方面:

#### (1) 灾害情况下各隧道的相互影响研究

一方面隧道发生火灾后,由于火灾点上游横通道被打开,两隧道通风系统不再单一,而变为一个相互影响、相互作用的连通的复杂多变的通风网络系统,此时,隧道内失去交通风力,但火风压、火焰节流效应对隧道通风影响巨大。在这种情况下,常规通风计算理论已不能解决实际问题,必须采用网络通风理论进行设计。

另一方面对于隧道群而言,灾害隧道引起的交通流间断必然会对另一座隧道的交通流产生影响。因而隧道群发生灾害时,不仅包括对产生灾害的隧道进行救援和控制,还包括对隧道群中的其它隧道进行控制,防止灾害的蔓延及次生灾害的产生。在隧道群中某座隧道发生灾害时,控制系统及时地做出反映,对其它隧道的相关子系统进行控制,即在灾害情况下对隧道群进行联动控制。对于灾害情况下隧道群中非灾害隧道的控制是以交通的诱导和控制为主。对于毗邻隧道而言,由于后方隧道的出口与前方隧道的进口相距较近,灾害情况下隧道间的相

互影响更为巨大。当前方隧道发生灾害时,控制系统必需迅速地做出反应,一是保障灾害隧道中人员的逃生和防止烟流的反窜,同时还需及时地对后方隧道进行控制,防止后方隧道的车辆驶入前方隧道。当后方隧道发生灾害时,一是保障后方隧道中人员的逃生和防止烟流的反窜,同时还需对前方隧道的通风系统进行控制,防止后方隧道的烟雾扩散至前方隧道。

#### (2) 隧道群灾害影响范围及控制区段划分

由于纵向通风隧道阻止火灾蔓延和烟雾扩散非常困难,故只能根据火灾时人员疏散组织进行隧道火灾区段划分。当隧道发生火灾时,火灾点下游人员自行驾车由隧道出口快速撤离隧道,火灾点上游人员弃车通过横通道进入非火灾隧道撤离。由于隧道火灾点是随机的,因此火灾区段的划分应根据人员疏散和人员救助的可能性进行划分。在单体公路隧道中,通常将两条横通道之间的隧道长度作为一个火灾控制区段。

在隧道群中不仅包含了隧道本身,也包含了隧道间的普通路段,而且为了便于行驶车辆的分流,还根据需要在隧道外路段上设置了互通。故在隧道群联动控制系统中,除了在隧道内划分控制区段外,还需从路段的角度将高速公路划分为控制区、影响区和无影响区,并在一个控制区内将隧道、隧道间路段划分若干个控制单元,如图2所示。

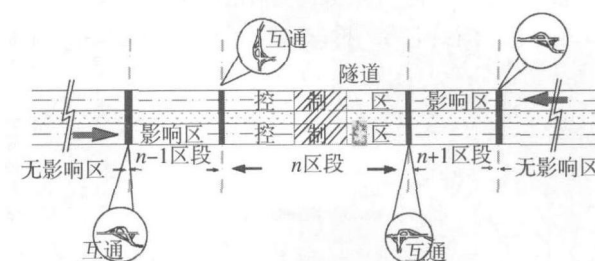


图2 交通事件影响范围划分

#### (3) 隧道群交通事件执行策略

一旦发生交通事件,应首先对控制区内的监控设施进行控制,然后进行影响区内的安全交通提醒。其中控制区和影响区有若干个单元(路段单元和隧道单元),单元的执行顺序为:

首先,执行交通事件发生单元及对面线路单元的交通控制设施;

其次,执行交通事件发生地点控制区内上游单

元的交通控制设施;

再次,执行交通事件发生地、非交通事件线路控制区内上游单元的交通控制设施。

最后,执行影响区。

根据图 3,当隧道内(单元 3)发生交通事件时,路段及隧道的交通控制设施执行顺序为:

- ① 控制区 单元③→单元④→单元⑤→单元⑥;
- ② 影响区 影响 1 区→影响 2 区。

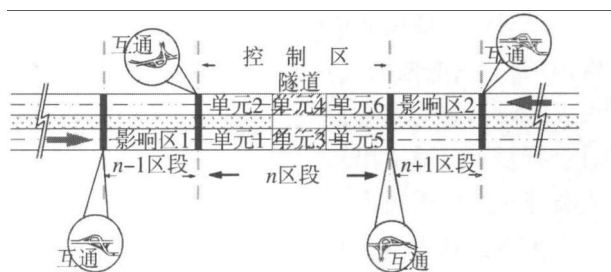


图3 控制单元执行顺序示意

## 4 结 论

本文在介绍公路隧道群智能联动控制技术研究现状的基础上,对急需解决的关键技术问题进行了探讨,这些问题包括:高速公路隧道群交通流特征与预测模型、污染物扩散形态及对通风控制的影响、前馈式智能通风控制器设计、通风系统控制策略研究、毗邻隧道照明特性及控制方法、灾害情况下隧道群各隧道的相互影响、灾害影响范围及控制区段划分、交通事件执行策略等,从而为公路隧道群联动控制技术的下一步研究提供了参考依据。公路隧道群联动控制技术的发展将进一步提高我国在高速公路隧道通风、照明及防灾救援控制方面的技术水平,在实际工程中应用将产生显著经济效益和社会效益。

## 参考文献

- [1] 杨彦民,曹 振.秦岭特长公路隧道群通风设计[J].公路,2005,(4)
- [2] 丁丽娟,邵俊涛.焦溪岭隧道群运营通风自动控制子系统的设计[J].隧道建设,2000,(S1):186~190
- [3] 谭 华,尉自斌.贵州省隧道群机电工程监控模式的研究[J].公路交通科技(应用技术版),2006,(6):84~90
- [4] 叶培群.汕梅高速公路隧道群节能型智能照明控制系统研究[J].公路交通技术,2005,(4):53
- [5] 马 非,何 川.虚拟现实技术在土木工程中的应用与探索[C].四川省公路隧道会议论文集,2007:173
- [6] 郭 春,王明年,高 旭,韩 均,敬世红.渝合高速公路北碚隧道防灾救援控制预案研究[C].交通资源节约和环境保护新技术研讨会论文集,人民交通出版社,2007:285~289
- [7] 何 川,李祖伟,方 勇,王明年.公路隧道通风系统的前馈式智能模糊控制[J].西南交通大学学报,2005,(5):575~579