

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2021.03.043

低等级公路隧道提质升级原则及改善研究

文竞舟¹, 倪玉丹^{2*}, 武刚¹, 杜志刚²

(1. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051; 2. 武汉理工大学)

摘要:为了提升低等级公路隧道服务品质、保障隧道通行安全,对《公路隧道提质升级技术指南》进行了补充,提出隧道交通工程设施的布设应该满足人因理论、路侧宽容性设计以及最低全生命周期成本的原则。并对低等级公路隧道提质升级过程中存在的典型问题进行了分析,主要集中于标志系统、视线诱导设施、轮廓带以及养护管理等方面。提出采取标志竖向排列、按重要度排序改善标志系统设置混乱的问题;通过隧道入口诱导设计,解决隧道入口诱导性差的问题;采用轮廓带勾勒隧道轮廓,明确空间路权;并提出采取差异化管理,保障重要设施的可视性和完整性,弥补现有规范的不足。

关键词:低等级公路隧道;改善原则;交通工程设施;提质升级;视线诱导

1 引言

近10年来,中国公路隧道里程年均增长率高达15%,截止到2019年末,中国公路隧道已达19 067道/1 896.66万延米,隧道总量和建设规模持续增长,其中低等级公路(二级及以下公路)隧道数量庞大,如浙江省近2 000座公路隧道,其中低等级公路隧道占50%。隧道数量不断增加、规模不断扩大,隧道运营安全工作面临较大的压力和挑战。低等级公路隧道作为重要的公路运输通道,其交通组成复杂,对隧道路面、交通设施设置即行车环境的要求更高,同时该类隧道大多处于较低的养护管理水平,低照度甚至无照明运营现象普遍存在,交通安全与运营节能矛盾突出。

公路隧道受道路环境、构造特点、行车视觉等多种因素的影响,交通事故率相对较高,据统计,近5年来,中国隧道路段交通事故每年平均发生接近500起,隧道死亡率为0.48人/起,是同期全部事故死亡率的1.6倍。有研究指出,隧道事故主要是由于隧道出入口视觉参照系的剧烈过渡以及中部空间封闭、照度低、环境单调,从而引发驾驶人无意识超速造成的。马磊等研究指出隧道进出口段特殊的结构形式以及与外部环境的巨大差异是其成为事故黑点的重要原因;邓涛

等对隧道路段进行事故致因分析,发现隧道客观因素如道路线形、照明条件等是影响隧道行车安全性的最大因素,并提出应该完善隧道安全设施以减少隧道存在的安全隐患;樊兆董研究指出,隧道交通工程设施设置不合理是酿成各类型交通事故的重要因素;申燕指出应根据道路线形设置完善的视线诱导设施,在视距不良路段设置标志、线形诱导标等设施以保障行车安全。欧盟国家提出依据交通量和类型分为5个级别,要求每一级别的隧道分别配置相应的交通工程设置以满足通行安全需要。隧道交通工程设施是道路环境的主要组成因素,因此优化隧道交通工程设施是隧道提质升级的重要内容。国内外对于隧道交通工程设施设置的规范和研究已经取得不少成果,但是对低等级公路隧道交通工程设施规定还不够完善。

完善的交通安全设施对提升高速公路隧道安全、预防交通事故至关重要。为提升隧道路段服务品质、促进隧道高质量发展,交通运输部提出开展隧道提质升级行动,并于2019年3月发布了《公路隧道提质升级行动技术指南》(以下简称《指南》),对隧道交通工程设施的设置又提出了新的要求,但仍然存在一些不够全面的地方,缺乏对不同隧道类型的针对性规定。低等级公路隧道数量庞大,养护管理技术较低,通行环境质量良莠不齐,因此有必要提出低等级公路隧道提质

收稿日期:2020-05-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51578433);云南省交通运输厅科技创新示范项目(编号:云交科2018(A)01)

作者简介:文竞舟,男,博士,高级工程师。E-mail:905747538@qq.com

*通信作者:倪玉丹,女,硕士研究生。E-mail:nininiif@163.com

升级的原则,在此基础上,针对现状设施设置的典型问题提出改善对策。

2 低等级公路隧道提质升级原则

2.1 人因理论

美国印第安纳大学大众卫生研究所指出,交通事故致因中由于驾驶人观察与判断错误造成的事故占84.1%。驾驶人与隧道环境是否协调,主要看隧道交通环境是否适合驾驶人的信息需求。交通工程领域的人因分析旨在减少因“人”的失误造成交通事故,公路隧道改善应结合人因理论指导设施的提质升级。低等级公路隧道中照明环境恶劣,驾驶人受生理及驾驶能力限制,驾驶操作更易发生失误,容易导致超速行为及追尾、撞侧墙事故。同时低等级公路隧道交通组成复杂是增加事故发生可能性和严重性的重要原因。隧道路段驾驶人因设置原则如表1所示。

表1 低等级公路隧道的驾驶人因原则

分类	含义
视距	可清晰明视前方的距离,包括识别视距、停车视距等
视区	可清晰明视前方的广度,避免视觉引导的断裂或突变
视错觉	速度错觉、距离错觉、方向错觉

从表1可知:现有隧道入口段交通信息及设施的设置需要考量驾驶人的能力及行车特性,实现视觉环境的平稳变化,增加隧道洞门及线形的可视性;隧道中部需要适当扩大视区,优化视距,将道路信息提前、尽可能清晰明了地传递给驾驶人,减小撞击障碍物的可能,保障驾驶任务顺利完成。

2.2 路侧宽容性设计

道路最右侧车道以外的区域为广义上的路侧区域。低等级公路隧道照明养护条件较差,隧道与外部道路不是完美衔接,进入隧道时,内外存在断面宽度、光照强度以及限速的突变,驾驶人存在一段视觉盲区,在此期间,车辆易失控撞击洞门、侧壁或偏离路面。隧道安全提升设计应该为偏离车道的车辆提供可以修正的空间,最大限度降低因人的无心之误造成的事故。主要采取设置路侧安全净区、主动引导和全时保障的方法,以对隧道进行路侧宽容性设计,保障路侧区域内障碍物及时发现,全时段保护驾驶人的行车安全,具体如下如表2所示。

表2 保障路侧交通安全原则

内容	含义
路侧净区	偏离车道的车辆在该区域内不会发生失控,车辆驶出路外后能够安全返回车道
主动引导	通过设置视线诱导设施,使驾驶人能够自主改变操作行为和行驶方向,降低其偏离道路的概率
全时保障	交通工程设施在不同时间、气候条件下均能发挥其良好性能

综合表2的内容,低等级公路隧道交通工程设施提质升级应该详细审查是否满足路侧宽容性设计原则。管理部门对低等级公路隧道重视程度不足将导致隧道交通工程设施系统不够完善,因此更应该为道路使用者提供宽容的空间与措施,具有较强的容错空间与修正能力,最终减少事故发生率及受伤程度。

2.3 最低全生命周期成本

全生命周期成本(Life Cycle Cost,简称LCC)涉及大型系统在其生命周期内所产生的全部成本,包括设计、采购以及施工、运营、维护、开发和处置各个阶段所产生的各种成本。目前低等级公路隧道的建设一般仅考虑建设期的直接投入,但公路隧道作为重要基础设施,主体结构设计使用寿命为100年,提质升级需实现工程全生命周期的经济性与合理性,考虑工程的使用寿命与长期经济效益,因此全生命周期成本最小为首要原则。各类交通工程设施的用途与寿命周期见表3。

表3 低等级公路隧道交通工程设施用途与寿命周期分析

交通工程设施	用途	寿命周期
彩色沥青路面	具有防滑、警示等综合作用	3~12月
标线	限定行车范围;部分标线可起到压缩车道宽度,限制行车速度作用	6~12月
警示柱	遮挡公路护栏,提前压缩视区,实现隧道出入口安全过渡	2~6年
突起路标	强化道路边界,在低照度条件下起到提醒作用	5年
轮廓带	主动改善隧道内光环境,强调隧道限界轮廓,提升速度感及距离感	10年
护栏	防护、诱导功能	20年

从表 3 可知:隧道各交通设施投入成本及使用寿命不一,建议依据各交通设施的使用频率、重要度、可维护性、耐用性等进行综合考察,以确定各设施的优先使用顺序与搭配及养护管理频率,力争通过不同设施的合理组合设计,使隧道的全生命周期成本最低。

3 低等级公路隧道提质升级典型问题及改善对策

3.1 进出口交通标志的设置

《指南》要求在隧道入口前设置隧道开车灯标志、警示标志等,但《指南》仅提供了标志前置距离的范围,在实际应用过程中仍然存在诸多问题:①标志设置层次性不足,重要信息无法凸显,驾驶人辨认难度大;②标志距隧道洞口过近,不满足视距要求,无法为驾驶人提供充足的视认—反应时间;③标志设置数量过多,造成信息过载;④隧道出口预告信息设置不合理。交通标志是管理交通、保障隧道通行安全及效率的重要措施,其设置应当遵循驾驶人的认知习惯,具有良好的可视性,同时应当清晰明确,给予驾驶人充足的可操作时间。

基于上述问题,提出推荐方案见表 4 和图 1。

表 4 低等级公路隧道接近段交通标志设置改善对策

满足需求	改善对策
满足视距需求	隧道入口前交通标志与隧道洞门的距离应根据限速值确定,并满足识别视距(约 10 s 行程);隧道开灯警示标志、限速标志、禁止变道超车标志推荐右侧低位设置,提升可视性和可读性
满足标志重要性排序	应根据标志的重要程度优先级别设置交通标志;重要顺序从高到低依次为:进隧道开灯警告标志>禁止变道标志>限速标志>指示标志
明确进隧道开灯	采用图形与文字组合形式单独设置于隧道入口,并采用 V 类黄绿色荧光反光膜,以增加阴雨天气标志显著性和可视距离
禁止变道	宜与双黄中心线与钢化玻璃猫眼道钉结合使用,以压缩车道、控制车速、降低车辆换道概率
隧道出口距离提前预告	应尽量避免设置在隧道紧急停车带,建议在隧道侧壁设置成竖向条形,增加对隧道侧壁的轮廓诱导,降低对紧急停车带障碍物及交通标志的视认任务

续表 4

满足需求	改善对策
进隧道开灯警示标志与禁止变道标志下设置标志设置顺序	进隧道开灯警示标志与禁止变道标志下设置标志设置顺序,体现“先开灯后进隧的逻辑顺序”,竖向条形设置可以增大文字字体,符合驾驶人对于路侧低位信息从上到下的认知习惯

(图 1)

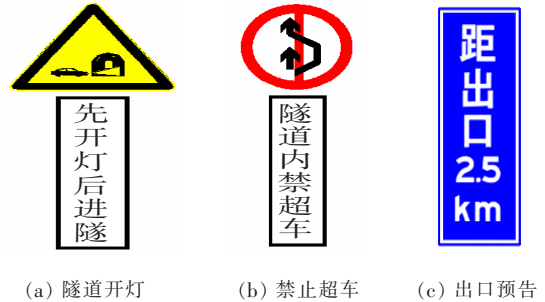


图 1 部分交通标志优化设计

3.2 入口诱导设施的设置

《指南》鼓励隧道出口波形梁护栏与隧道侧壁搭接,隧道入口护栏与隧道检修道内侧搭接,主张护栏除了防护作用外,还应该能够诱导驾驶人的视线。但现状护栏的设置往往存在与隧道结构的突然断裂,导致隧道洞口视线诱导过渡突然,往往造成车辆向隧道中心线显著偏移或者撞击护栏。隧道接近段为隧道与外部道路相连的路段,驾驶人有规避障碍、调整方向、保持车道等需求,视线诱导设施可以从功能性、安全性等方面全面优化入口的行车环境,实现隧道内外的连续与一致。

隧道出入口警示柱在很多隧道都有应用,能遮挡公路隧道护栏,降低护栏过渡对驾驶人视觉及行为的不利影响,实现隧道出入口视觉过渡的连续一致渐变;有利于在识别视距范围外就能发现,实现远距离诱导。防撞桶也是很重要的交通安全设施之一,能遮挡并辅助现有公路隧道护栏,部分实现吸能、缓冲、绊阻、导正功能,对现有隧道入口检修道及洞门端墙有一定的防护作用。但总体而言,防撞桶放在隧道入口接近段的主要目的不是防撞,而是为了多次绊阻,有效警醒驾驶人,缓解疲劳。因此采用警示柱与防撞桶及其他交通工程设施进行隧道接近段设计,可有效进行隧道入口视线诱导,改善对策与方法见表 5 及图 2。

3.3 隧道内轮廓带的设置

轮廓带指在隧道壁上设置的用于指示隧道整体轮廓的环状逆反射交通安全设施,主要分为条形轮廓带

表5 低等级公路隧道入口诱导设施设置改善对策

交通设施	设置方式	作用
警示型线形诱导标	以中等闪现率(0.5~1.0 Hz)设置在隧道入口护栏上	满足识别视距要求,实现线形诱导与轮廓诱导;提前压缩视区、优化视距,低照度下实现对前车车距的准确判断
突起路标	沿出入口车道道路中心线设置	给越线车辆以振动提醒,降低车辆变道概率
柔性警示柱	沿道路边线两侧布设,柱体采用荧光黄绿反光膜,60 cm以上	满足识别视距要求,提前警示,同时具有很强的抗撞击、抗碾压功能;对道路边线、突起路标有重要补充作用,满足路侧回复区安全要求
防撞桶	设置在柔性警示柱与护栏之间	可警醒驶出道路边线的分心或疲劳驾驶人;与警示柱组合遮挡护栏,保持隧道入口视线诱导的连续性、一致性,对车体、人体无伤害

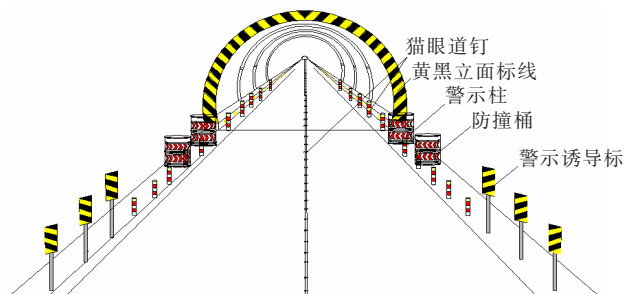


图2 隧道接近段视线诱导设施设置示意图

与环形轮廓带。轮廓带在勾勒隧道限界,明确空间路权方面具有重要作用,连续设置对于提升驾驶人整体方向感效果明显,尤其利于货车的安全行驶,已在全国的公路隧道广泛设置。《指南》中建议在二级以下公路隧道,隧道轮廓带以不小于100 m间距设置,但仍存在不少问题:① 轮廓带设置间距缺乏依据,间距过小则闪现率过高,会增加心理负荷,同时增加造价;间距过大则对车距保持帮助不显著;② 轮廓带宽度不统一,过宽会引发眩光,过窄其诱导效果减弱;③ 部分隧道过于追求美观,存在颜色变化频繁等问题,给驾驶人较强的视觉刺激,不利于安全行车。

针对以上问题,对低等级公路隧道轮廓带的设置提出改善建议见表6。

表6 低等级公路隧道轮廓带设置改善对策

位置	设置方式	作用
出入口	距洞口3 s行程内以15~20 m间距布设20 cm宽、V类反光膜的白色轮廓带	增加轮廓带与背景的对比度,强化隧道轮廓辨识度,增强方向感
中间段	布设15 cm宽度、IV类反光膜的轮廓带;直线路段布设间距为60~100 m,弯道路段布设间距依据转弯半径确定,并确保弯道路段内可看到至少3道轮廓带	避免驾驶人产生眩光;提升方向感,确保安全性

同时,长大隧道的直线路段可划分提醒区布设彩色轮廓带(推荐绿色),提醒驾驶人注意,解决驾驶疲劳问题,消除隧道边墙效应。轮廓带宜与其他诱导设施协同设置,构成视线诱导系统。

3.4 交通工程设施养护清洗

2016—2018年云南省公路隧道发生涂料剥落事件50起,引起多次交通事故。2015年JTG H12—2015《公路隧道养护技术规范》提出了严格的标准,二级及二级以下公路隧道多数采用二级及三级标准,对内装饰、检修道、横通道、标志、标线、轮廓标等采用相同的养护清洗频率。这导致部分设施(如内装饰、检修道、横通道)养护清洗频率过高,清洗养护任务过重,普遍达不到要求;交通标志标线及视线诱导系统养护清洗频率过低,各种标志标线及视线诱导设施长期运营,逆反射系数下降很快,积灰严重,难以辨识。建议优先保障交通标志标线及视线诱导设施的养护清洗,以加强隧道交通事故预防及安全管理,保障隧道主洞交通安全。其余内装饰、检修道、横通道、侧墙、洞门养护清洗频率适当降低。

3.5 低等级公路隧道交通工程设施设置现状及改善方法

低等级公路隧道提质升级范围广、任务重、专业性强、技术难度大,为了保障隧道运营安全、提升隧道服务品质,对现状问题进行分析总结,提出改善对策见表7。

4 结论

低等级公路隧道运营环境不佳,养护管理水平低,是隧道提质升级行动的重点对象。该文在分析隧道提

表 7 低等级公路隧道提质升级现状问题与改善对策

现状问题	后果	改善方法
标志设置视认性不足,设置缺乏层次性,重要性排序不合理	驾驶人反应时间不足,易造成不良驾驶操作,撞击洞门、侧壁或者突然减速等	按重要性进行排序;标志版面竖向排列,符合认知习惯;考虑视距要求,降低视认难度
隧道入口横断面及视觉环境突变,诱导性差	诱导突然断裂,车辆易偏离车道或撞击洞门或护栏	利用柔性警示柱、防撞桶及其他交通工程设施共同构建隧道接近段视线诱导系统,提升整体方向感与诱导性
轮廓带设置缺乏标准,设置间距凭经验设置	色彩过于绚丽,间距设置不合理,易造成驾驶人视觉负荷过大,驾驶疲劳	对隧道进行分段设计,满足不同段视觉需求,同时在长大隧道内部设置彩色轮廓带缓解驾驶疲劳
交通工程设施管理水平低、养护难度大,管理泛化	视线诱导设施逆反射系数很低,难以辨识	保障交通标志、标线及视线诱导设施(含突起路标、警示柱、防撞桶)清洗频率,降低内装饰、横通道、检修道清洗频率

质升级原则的基础上提出了低等级公路隧道交通工程设施改善对策,对现有《公路隧道提质升级技术指南》进行重要补充,主要结论有:

(1) 低等级公路隧道应当充分考虑驾驶人的生理与心理特性,给予其一定的容错空间,遵循人因理论及宽容设计的原则。同时综合考虑隧道整个工程期限内的全生命周期成本,利用交通工程设施合理设置进行提质升级,提升工程质量与服务水平。

(2) 低等级公路隧道交通工程设施的设置存在诸多问题,可以采取标志竖向排列、按重要度排序并考虑识别视距以改善标志设置缺乏层次、视认性不足的问题;采用警示柱、突起路标、防撞桶等进行隧道口诱导设计,解决隧道入口诱导性差的问题;采用轮廓带勾勒隧道轮廓,明确空间路权,同时采取分段设计弥补现状不足。

(3) 对于养护管理水平低、照度环境差的低等级公路隧道,应采取差异化管理,重点保障交通标志、标线及视线诱导设施养护清洗频率,降低内装饰、横通道、检修道清洗频率,在降低养护成本的同时,保障隧道交通安全性。

参考文献:

- [1] 交通运输部. 2018年交通运输行业发展统计公报[J]. 人民交通, 2019(8).
- [2] 王首硕, 杜志刚, 赵爽, 等. 低等级公路隧道入口光环境优化新思路[J]. 公路交通技术, 2018(S1).
- [3] 王晓燕, 马兆有, 董宪元. 我国隧道交通事故分析及管理对策研究[J]. 交通工程, 2017(6).
- [4] 杜志刚, 孟爽, 郑展曦, 等. 基于视觉参照系重构的高速公路长隧道照明设置新方法[J]. 公路, 2017(2).
- [5] 杜志刚, 徐弯弯, 向一鸣. 基于视线诱导的公路隧道光环境优化研究框架[J]. 中国公路学报, 2018(4).
- [6] 马焜, 王航, 刘江, 等. 隧道进出口过渡段及其长度[J]. 中外公路, 2013(4).
- [7] 邓涛, 王武. 基于物元分析的隧道路段行车安全性评价[J]. 公路工程, 2015(3).
- [8] 申燕. 国省道山区公路行车安全性主要措施[J]. 中外公路, 2014(3).
- [9] 樊兆董. 特长隧道特殊交通安全设施评估及优化方法研究[D]. 北京工业大学硕士学位论文, 2018.
- [10] Haack A. Fire Safety Conception in Vehicle Tunnel[C]. Proceedings of Highway Tunnel Technical Communion of 2001 China—Switzerland, 2001.
- [11] 交通运输部公路局. 公路隧道提质升级行动技术指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2019.
- [12] 李良, 何江华, 张恬, 等. 高速公路景观对驾驶人操作表现和心理健康的影响[J]. 南方建筑, 2018(3).
- [13] 交通部公路司. 新理念公路设计指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
- [14] Al-Chalabi, H. Life Cycle Cost Analysis of the Ventilation System in Stockholm's Road Tunnels[J]. Journal of Quality in Maintenance Engineering, 2018, 24(3): 358—375.
- [15] 杨理波, 杜志刚, 马兆有, 等. 高速公路隧道小半径圆曲线路段反光环有效性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018(8).
- [16] JTG H12—2015 公路隧道养护技术规范[S].