

长沙理工大学

硕士学位论文

高速公路螺旋型小半径曲线隧道线形与照明安全研究

姓名：张天乐

申请学位级别：硕士

专业：岩土工程

指导教师：吴从师;刘义虎

20090501

摘 要

山区特殊的自然地理环境决定了其公路建设标准应当因地制宜，为克服大高差，避开不良地质带等，螺旋曲线隧道方案将得到越来越广泛的应用。但由于国内外螺旋隧道罕见，相关规范也缺乏具体要求，因此，进行小半径螺旋隧道的风险预测与行车安全技术的研究，对我国交通隧道的运营安全有重大意义。

本文以干海子小半径螺旋隧道为工程依托，研究小半径曲线隧道的线形与照明对交通行车安全的影响。在线形安全方面，结合经典动力学与停车视距等相关规范要求，验证了加宽隧道横断面的小半径路线方案，并通过基于 Adams 的计算机仿真，得到了汽车系统动力学模型、道路模型与驾驶员模型。由此计算出各路线方案下汽车运行的实时数据，通过分析指出了存在安全隐患的路段与修正方法，为路线设计指标的优化提供了依据。

在安全照度方面，本文通过 DIALux 软件建立了基于日光分析的隧道入口段照明模型，对入口段的亮度折减出了参考意见，分析了不同时间下自然光对洞口照度的影响并提出人工照明调光意见。并针对弯坡段烟雾排放量采用规范方法无法计算的情况，建立烟雾排放量模型，并结合经验公式和 Adams 中得到的数据，对螺旋隧道内车辆的烟雾排放量和保证透过率的需风量进行了定量分析。

关键词：螺旋隧道；行车安全；停车视距；日光分析；烟雾排放量

Abstract

The special geographical environment in the mountainous area decide that the standard of highway construction should be adjusted to local conditions.Spiral tunnel will be more public due to the need of surmounting large height difference and avoiding unfavorable geology region.Because there are few spiral tunnels around the world, and few detailed articles according to the criterion.It is significative to do some research on risk prediction and vehicle driving safety for the tunnel operation safety.

According to the Ganhaizi Small Radius Spiral Tunnel,researches on the influence of traffic safety by alignment and lighting are processed.According to the classic dynamics and targets like stoping sight distance etc,researches on safe alignment are processed by bringing projects in which wider cross-section and smaller radius are considered.Combined with computer simulation technology,automobile system dynamics model、 road model and driver 's model are gained,and the real time data was obtained while the vehical was moving in each project.Analyse to the datas indicates where the insufficient safe road section is,and solutions are given in this thesis to optimize the design of safe alignment.

On the research of safe lighting,A illumination model of tunnel's entrance is builded base-on sunlight analysis by DIALux.Propositions are given to the decrement of illumination on the tunnel's entrance.This thesis takes the tunnel's entrance as study object to analyze its sunlight change during different time and season.and puts forward some suggestions on the light-adusting of artificial illumination.As the vehical is moving in a curve and also a slope, there is no method to calculate its smog emission amount according to the criterion. With the help of some empirical formula and data from Adams,a calculation model of smog emission and required airflow is formed to take quantitative analysis in this spiral tunnel.

Keywords : Spiral tunnel;Vehicle driving safety;Stoping sight distance;Sunlight analysis;Smog emission amount

长沙理工大学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：張天乐

日期：2009年5月24日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权长沙理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密口，在_____年解密后适用本授权书。

2、不保密口。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：張天乐

日期：2009年5月24日

导师签名：姜从军

日期：2009年5月25日

第一章 绪论

1.1 课题的提出及意义

随着我国西部地区大开发战略的实施，高等级公路的建设逐渐向西部山区推进。2004年12月国务院审议通过了由7条首都放射线、9条南北纵向线和18条东西横向线组成的国家高速公路网，简称“7918网”，总规模约8.5万公里。规划的8.5万公里中，已经建成2.9万公里、在建1.6万公里，而待建的4万公里中，东部地区有0.8万公里、中部地区1.1万公里，西部地区2.1万公里^[1]。所以，今后我国高速公路的建设任务将主要集中在中西部地区。

西部地区有其特殊的自然地理环境，山高谷深、戈壁沙漠、盐碱冻土、地形复杂、气候条件恶劣、地质灾害频繁，与东中部地区相比，工程地质特殊，增加了建设难度。其公路建设只能因地制宜，建设标准将受到社会、经济、地理环境等因素的制约，不能照搬发达国家和东部沿海地区公路建设的标准和指标。西部山区公路设计中，隧道和桥梁占总里程中较大的比例，其中隧道作为公路路线的基本组成部分，在山岭地区可用于克服地形与高程障碍、改善线性、缩短里程、减少对植被的破坏，可以提高车速、节约燃料、节省时间并保护生态环境，从而得到了广泛的应用。

本文的依托项目——干海子螺旋隧道位于“7918网”中7条首都放射线之一的北京—昆明高速，地处四川省西南部的雅安市、凉山州境，由于沿线地形地质条件十分复杂，线路在拖乌山设计为小半径双螺旋曲线隧道。采用螺旋隧道方案增加了线路长度，使整个线路的纵坡值由3.4%减小到2.9%，在一定程度上缓解了长大纵坡段车辆的安全隐患，也巧妙地避开了断裂带与季节性冰冻带。隧道设计时速80km/h，平面线型均为单一圆曲线，左转上坡，下坡圆曲线半径600米，上坡圆曲线半径618米，全隧道均为单向纵坡，坡度约为2.8%。螺旋曲线隧道的线形指标、通风照明、防灾难度等较一般直线型隧道均有较大区别。建立适合于山区曲线隧道的交通安全标准，是当前高速公路向西部推进面临的重要问题。

根据公安部和国家安全生产监督管理局公布的数据，近年来我国道路交通安全一直处于一个较高风险状况中，每年全国发生各类交通事故50~80万多起，造成约10万人死亡，50万人受伤，直接经济损失几十亿元^{[2][3]}。长期以来，我们对于交通安全的考虑往往强调驾驶员的安全意识，甚至将约90%以上事故责任归结到驾驶员身上，随着系统科学和安全科学的发展，人们逐渐意识到道路交通事故是交通运输系统内部多因素综合作用的结果，应达到人一车一路三者的协调。

这一理念在西部地区建设标准相对较低的公路上应得到更多的体现。

公路隧道是交通事故的高发区，隧道事故率一般为其他路段的 2~3 倍^[4]。隧道交通安全研究是多方面的，线形、照明、通风、火灾等都会造成影响，我国高速公路隧道建设起步较晚，正处于高速建设发展阶段，设计指标与一般公路隧道的设计指标基本无差别，某些条文的制定甚至套用或者照搬铁路隧道经验。隧道的安全设计还有很大的提升空间。

本文是《高速公路螺旋型小半径曲线隧道风险预测与行车安全技术研究》课题的研究内容之一，主要从交通安全角度对螺旋隧道项目进行线形、照明标准研究。希望能为改善公路生态环境，减少道路安全隐患，以及制定西部地区隧道建设相关技术规范提供参考依据。

1.2 线形安全国内外研究现状

1.2.1 国外研究现状

公路隧道的长管形状空间及其封闭性使其不同于一般路段，隧道安全检查与道路安全检查也有差别，但评价隧道线形的安全标准与一般道路是一致的，判断隧道线形是否安全，还是应从视距、超高、运行速度等方面入手，检查行驶路线对汽车行驶的安全、舒适、经济和车辆通行能力所起的作用。因此对隧道线形的安全研究是道路交通安全的一部分。

总结国外交通安全研究历程，大致经历了事故统计分析—交通安全评价—交通事故预测—交通事故预防等四个阶段，对交通安全检查体系的研究始发自英国，又传播到澳大利亚、新西兰，其后在美国兴起，并以较快的速度发展到德国、西班牙等国家，目前安全核查的理念与方法体系已经普及到全世界，并且根据各自情况形成了以美国、欧盟为代表的不同发展方向与体系的版本。

美国提出正式的安全核查的名词不算早，但目前成绩斐然，其中就包括计算机辅助道路安全设计程序的开发。美国联邦公路局(FHWA)于 2000 年推出了 Interactvie Highway Safety Design Model，其中文名称为“交互式公路安全设计模型”(简称 IHSDM)，该模型集成了美国迄今为止最核心的道路安全数学模型，实现了道路安全审计的目的，又方便了设计方案的修改，代表了道路安全评价未来的发展方向^[5]。

IHSDM 是一个集成化的应用软件包，在 CAD 环境中，帮助道路规划者与设计者评估道路几何设计方案的安全性能。

IHSDM 的目标是提供一个方法工具，可以对比不同道路设计方案的安全性能，使设计者在一条道路的设计阶段就能侦测到设计方案中的潜在安全隐患，进而制定措施，使道路几何设计要素的安全效益与设施成本比得到改善，达到优化

道路设计方案安全性能的目标。IHSDM 的结构如图所示：

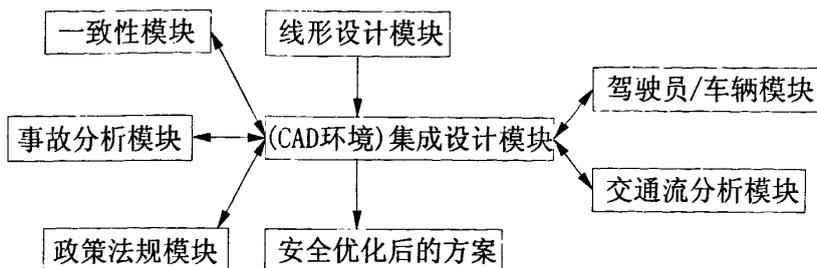


图 1-1 IHSDM 结构框图

该模型由五个分模块构成，每个模块完成不同的功能。

(1) 事故分析模块

该模块中共有三个模型：模型 1 统计路线区段上的事故数目与严重程度指标并加以分析处理。模型 2 针对道路方案的路侧设计，进行安全效益与消耗成本的对比分析。模型 3 是一个专家系统，进行交叉口的安全性能分析，勘定路线几何设计中的安全缺陷，并针对特定的安全缺陷提供改进措施。

(2) 人/车辆模块

它包括驾驶员行为模型以及与之相链接的车辆模型。通过这两个模型可以模拟特定的道路条件下，某种类型的驾车者，驾驶某类型车辆的行驶状态变化规律，通过对规律的分析对道路条件进行评估，判断是否存在可以导致车辆失控的设计缺陷。

(3) 交通流模块

以道路项目的预测交通量（道路改建工程则用统计交通量）为基准指标，利用现有的交通流微观仿真模型，模拟在道路设计方案所表征的交通环境下，交通流的运营状况，据此评估设计方案的安全性能。

(4) 政策法规模块

政策法规模块中集成了各级政府有关的交通政策、法规、通令，地方性行政措施等信息库，从而可以对道路设计方案中该方面的内容进行评估，帮助设计者找出方案中有悖于政策法规的内容，以便进行有针对性的改造使设计方案与政策法规相适应。

(5) 设计一致性模块

它是一个度量道路线形设计整体协调性的模型。道路设计方案应具有设计一致性，即道路实际特征与驾车者的期望特征应保持一致。当实际出现的道路特征与驾车者的期望特征有偏差时，驾车人就可能会犯错误。驾车者的期望是有惯性的，所以道路设计特征也应有可期望的惯性特征。

模块中线形设计的一致性，以车辆在某种交通环境下的“期望车速”(Speed Expectation)为衡量指标。在特定的设计时速下，由于道路环境的变化，车辆将以不同于设计车速的实际运营车速行驶，这种运营车速与车辆所在区段的设计要素相符。在 IHSDM 中，“期望车速”被解释为针对特定的道路设计要素，所对应的运营车速。在 IHSDM 的基本模型中，期望车速以设计车速为中心上下起伏，形成了车速分布曲线，因此这一曲线可映射出道路设计的特性变化。一致性模型通过速度指标确认设计方案中一致性有波动的区段，使设计规划者根据模型所提供的信息，有针对性进行方案改造，并根据改造后方案所体现出的速度曲线的平顺性，评估方案的安全改善效果。

由此可见，IHSDM 模型思路在于通过实地观测和实验建立汽车模型和驾驶员模型，并将其引入公路设计软件中，建立公路线形要素与速度、驾驶员负荷等指标的关系，从而对设计起检测与指导作用。IHSDM 道路安全审计与安全设计软件是目前国际上发布的唯一的、专门的、系统化的计算机道路安全设计应用系统，也是最早对安全相关的非定量指标的研究。

1.2.2 国内研究现状

北京工业大学在十多年来在十多项国家的交通安全项目中长期进行交通安全和事故发生的机理方面的研究，并取得了一系列科研成果，开发了基于 Windows 的路线形安全分析与评价系统，从机理层面上分析了各线形设计要素及各元素组合作用对事故的影响，运用统计分析手段建立了线形元素对事故的预测模型，借助计算机的辅助手段，实现了道路设计的安全水平量化的算法，并为整体的研究提供了数据维护、成果转换的集成的环境^[6]。该研究系统由三个子系统“基础数据库调用”、“辅助统计研究子系统”以及“辅助机理研究子系统”构成。三者的逻辑关系如图 1-2 所示。

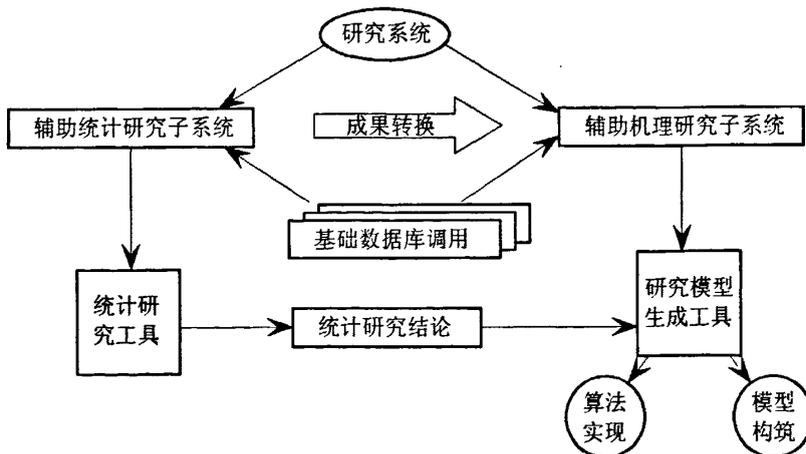


图 1-2 高速公路安全辅助决策系统示意图

同济大学郭忠印教授及其课题组多年来也一直致力于道路交通安全工程方面的研究。研究方向主要是道路线形与道路交通安全的关系。1995年该课题组在国内率先对道路安全进行系统的研究，首先开展的是道路安全评价和道路黑点鉴别与改善技术的研究。之后，课题组进一步揭示道路交通环境与道路安全关系，为了给道路安全设计提供依据，正在深入开展道路交通环境—道路运行车速—道路安全性三者之间关系的研究^[7]。同时同济大学的朱照宏、景天然等教授在道路线形评价方面也做了很有意义的工作，提出了将行车速度、耗油量、交通事故率作为公路线形使用的评价指标。

在对道路交通安全进行系统研究的同时，也有许多学者针对隧道交通安全进行研究，但目前还处于起步阶段，仍停留在事故统计分析和交通安全评价的基础上。但可以预见：随着研究的深入，隧道交通安全将慢慢独立出来，最终形成完善的体系。

目前的主要研究有：姚思国、刘清泉、和松等通过对8个隧道交通事故的统计分析，提出了高速公路隧道交通事故的特点^[10]。宋晓春、孙国华、鲍国平从交通工程学、交通管理学和交通心理学的角度对隧道交通事故的原因进行了系统分析^[11]；沈艾中从隧道交通事故着手分析，从隧道的设计、管理上提出有效地预防和减少隧道交通事故发生的措施^[12]；叶飞、苏臣宏分析了公路隧道营运特点及营运中的安全隐患并提出相应对策^[13]；胡锡岭、陈立道从驾驶员、车辆、道路和交通量方面分析了城市道路隧道交通事故的一般原因^[14]。

在隧道线形方面，由于在1988年之前，我国公路隧道基本上都是直线隧道，1988年《公路工程技术标准》规定隧道内可以设置平曲线之后，山区高速公路中曲线隧道不断出现，在隧道的安全线形方面，文献^{[15][16][17]}均有相关要求，但一些地方仍没有明确规定，容易使人产生理解上的差异，例如文献^{[15][16]}对洞口线形规定为“隧道洞口内外侧不小于3s设计速度行程长度范围内的平纵线形应一致”。文献^[15]条文说明强调这“是必要的，也是必须的”，但没有进一步说明“线形应一致”的含义。文献^[16]则要求隧道“平面线形不应有急骤的方向改变”，但又没有解释什么情况属于“有急骤的方向改变”。平面“线形一致”如何理解，有些人认为是指直线或圆曲线；有些人认为是指距曲线要素点距离要满足3s行程要求；有些人认为是指要避免出现反向曲线，直线或圆曲线是理想线形。因此行业内对技术标准中关于隧道洞口平面“线形应一致”规定的理解仍有分歧。但通过长期实践，对已建成隧道的交通安全情况进行统计分析并查证历年规范，一些学者对公路隧道的安全平纵线形做了更进一步的研究：如林宣财从运行速度与交通安全关系的角度，提出了公路隧道洞口平面线形设计的几点建议^[19]。长安大学赵永平、杨少伟等通过对汽车前灯散射角、隧道标准断面以及驾驶人在隧道中驾驶规律的研究，并考虑汽车左转与右转行驶的不同特点，计算出了不同设计速度下满足山

区高速公路隧道内螺旋展线停车视距的圆曲线最小半径^[20]。对文献^[16]的相关部份进行了补充。李玉文从公路隧道运营通风、行车安全、隧道施工的角度，论证并阐述了隧道设计纵坡与前三者的关系，从技术可行、经济合理、实施可能的角度，提出了公路隧道的最大设计纵坡可控制在4%以内^[21]，突破了文献^[17]中3%的限制。

由此可见，公路交通安全问题已在我国引起了重视，这一理念与国外发达国家设计理论是一致的，以上研究也在一定程度上推进了我国公路交通安全问题的研究进程。

1.3 隧道照明与安全的国内外研究现状

一般道路与隧道中间段的照明设计都采用亮度标准，两者都是为了提供一个合理的均匀的明亮的能够显现物体轮廓的路面。亮度设计的基础是路面的亮度分布，它取决于三个因素：路面的反射特性、灯具的光分布和灯具或灯杆的几何布局（即排列），在这三种因素的综合作用下，达到满意的照明效果。而评价这种照明效果优劣的方法就是采用路面平均亮度、亮度均匀度、眩光等照明质量评价指标。因此在这一点上隧道照明与道路照明的目标与研究对象是一致的，但隧道照明还有三个特点：

(1) 白天当车辆驶入隧道时，时间很短，但亮度变化却很快，驾驶员会感觉洞口很黑，以至于无法辨认洞口附近的状况，连障碍物也无法辨认，产生“黑洞”效应，而当车辆在接近隧道出口时，看到的是一个刺眼的眩亮白洞，此时形成“白洞”效应。因此如何从洞外自然光平顺过渡到洞内人工照明，与隧道照明的安全性与舒适性有着密切的关系。

(2) 隧道是半封闭的长条型交通系统，车辆在隧道内部产生的烟雾将使光线通过率降低，影响驾驶员视觉条件，同时长期以来烟雾微粒附着物将影响隧道侧壁材料的反射特性，降低隧道内亮度。因此隧道通风也与照明有着密切的关系。

(3) 隧道内的可见光主要来自人工照明，因此会引起斑马效应、眩光效应、频闪效应等一系列使驾驶员视觉产生不适感觉的刺激。

结合隧道照明的特点，本文的研究重点确定为洞口过段渡的照明安全及洞内烟雾废气对照明的影响。

国外公路隧道的照明技术研究开始早，经过多年的研究和实践，技术相对成熟。例如，早在20世纪60年代，意、法两国之间的MontBlanc隧道就已经按照交通量的变化进行照明调光。80年代后，世界各国相继出台了隧道照明规范，以规范隧道照明的设计和施工，减少交通事故。其中，当时被广泛接受的标准是CIE（国际照明委员会）1982年制定的(CIE No 30.2,1998)。随后，这个标准分别在1990年、1995年进行了修订^{[22][25]}。在此同时，各国也相继实施了各自的标准，如EUROSTD（欧洲隧道照明标准，1997），日本《隧道照明指针》(1990)等。这

些发达国家由于照明理论和技术相对比较完善，因此已经形成规范性的标准。

入口段亮度的确定直接关系到隧道洞口过渡段照明的安全性与舒适性，文献^[17]中使用 k 值法，即将洞外亮度值 L_{20} 乘上一个系数 k 来确定入口段亮度值。但在 k 值的确定上，隧道照明工学界至今仍有争议，两大学派，即欧洲的 D.A.Schreuder 学派和日本的成定康平学派，所主张的 k 值相差达 5 倍之多。两派的立说依据都是相同的模拟测试方法，但在基本参数的选用上差别较大。

从表 1.1 可以看出，Schreuder 在障碍物标准尺寸和亮度对比度上所采用的是照明工学上国际通用常规值，而成定康平所采用的是以“注视点”学说为依托的修正值，比较有利于障碍物的视认。可成定康平已于 1984 年宣布放弃自己的“注视点”，认为他主张的 k 值应提高 1 倍左右^[17]。

表 1.1 两大学派的基本参数差异

	障碍物标准尺寸	亮度对比度	模型显示时间
Schreuder	20cm×20cm	0.2	0.1s
成定康平	25cm×25cm	0.25	0.5s

隧道照明设计，首先就需要对一系列相关的照明指标进行计算，才能对照明设计方案的最终效果做出评估，使用人工进行直接计算，需要对大量的计算点分别计算照度亮度等指标，最后才能获得需要的照明指标，耗时耗力。利用计算机强大的计算功能，可以让计算机担负繁重的数据处理工作，实时计算获得所需要的各种指标，有利于设计者对于设计方案进行分析。

在照明设计软件方面，国外已有较长发展历史，既有各大灯具公司开发的相关软件，也有专门用于隧道和道路照明设计的专业软件。其中以 Dialux 与 AGI 软件最为常用，另还有 EUROPIC、3dsMAX、Lightscape 等较为出色^[26]。

德国 DIAL 公司邀集了世界著名厂商如 Philips、BEGA、THORN、雷士等公司，共同投资开发了 DIALux 软件。DIALux 可以统合各种照明灯具，做精准的照明计算，且还具有虚拟实境的功能，让整个空间设计以 3 维方式在电脑中显现，而所有的照明数据，以图表化的方式清楚地详列出来。

DIALux 的优点是：拥有丰富的灯具库、模型库和材质库，并能及时通过网络进行数据更新。2008 年发布的 DIALux4.4 还增加了自然光计算功能。可在设计方案中加入日光场景，这对隧道洞口段的设计有较大帮助。

AGI 软件是 Lighting Analysts 公司出品的优秀照明软件。它提供了基于电光源和日照分析的照明计算和渲染功能。无论绘图建模平台、光源设置、计算点设置还是日照分析功能都非常强大。

但是 AGI 软件需要手动设置计算点、眩光计算位置等信息。且没有携带灯具库。所有参与计算的灯具必须由用户提供灯具的 IES 文件才可以参与计算。

我国隧道照明技术起步较晚，经验和基础性的工作不足。我国在 2000 年以前使用的原则主要遵照文献^[17]来设计隧道的照明系统，由于该规范设计的标准不很完善，因此 90 年代后期，为了适应我国公路隧道照明的技术需求，我国有一部分学者在这方面进行了一系列的研究。这些研究主要从 2 个方面进行(1)确定布置灯光的方案，来消除“黑洞效应”和“白洞效应”等问题；(2)设计照明系统的控制系统，对隧道的照明进行动态控制。

随着公路隧道的迅猛发展，亟待制定一个系统的照明规范，我国在现有的经验基础上，借鉴国外公路隧道的成功经验和先进技术，于 2000 年 1 月颁布了《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1-1999)。该规范在照明系统构成、洞外亮度和减光、隧道各照明段的长度与亮度、照明总均匀度与纵向均匀度、调光分级、光源分级、灯具及布置、照度与亮度计算推荐方法等方面做出了详细的规范说明。在入口段照明设计中，该规范将入口段分为引入段、适应段和过渡段。并提出了各段长度与亮度要求的确定方法。

在隧道照明模拟计算方面，由浙江省丽水永通照明科技有限公司牵头，联合了国内科技人员着手展开道路与隧道照明分析软件的研究开发，于 1999 年 3 月完成了道路与隧道照明分析系统(R&TLAS)^[28]。它是国内首次开发的，功能齐全的，全开放的通用照明软件系统。该软件将任意布灯照明计算和任意形状的隧道墙面反射计算作为首要实现目标，并可考虑照明灯具设备与安装、道路几何与路面状况、观察点与计算域设置、隧道形状与墙壁反射特性等多方面因素。通过 R&TLAS 的快速分析，可以调整各种照明参数进行优化设计，使工程设计经济合理；也可判定照明发光器构造设计的优劣，进而改进发光器，改善灯具的技术性能。

但 R&TLAS 中并没有自然光计算模块，在洞口段照明设计中无法考虑自然光与人工照明的过渡，而隧道洞口过渡段正是事故的高发区，所以这是其缺陷之一。另外该软件系统由于开发时间早（1999 年），采用 CIE 1982 的标准，不太符合文献^[27]的要求。

重庆交通科研设计院严格遵照文献^[27]的计算方法和照明系统设计方，开发了一套隧道照明计算软件。输入隧道的各基本参数（如隧道长度，高度，洞外亮度等参数）后，软件会自动按照规范要求计算出隧道中各照明区域长度及其相关的亮度水平。然后按照“系数曲线图计算方法”进行计算，得出隧道灯具的初步布置方案，这是粗略计算得出的结果。在此基础上，按照“光强表的数值算法”进行精确计算。

在洞外亮度的测量方面，针对传统的隧道洞外亮度 $L_{20}(S)$ 值确定方法耗时过长、工作量相对较大、结果误差较大、不适应工程应用等缺点。重庆交通科研设计院的屈志豪等根据隧道洞外亮度 $L_{20}(S)$ 的定义和环境简图计算隧道洞外亮度的原理，结合京珠高速公路粤境北段和南段隧道群的工程实际，在国内首次提出了

采用照度—亮度仪测试隧道洞口环境反光物的亮度，按照环境简图计算公式进行数据处理的一种洞外亮度测试的方法^[29]。同时，通过大量的测试和数据分析，为工程设计提供了具体的指导意见和基础数据。

涂耘、王小军等总结了由重庆交通科研设计院 2005 年承担的《福建公路隧道洞口段照明参数研究》课题中对洞外亮度 $L_{20}(S)$ 研究的部分成果，研究发展出用数码相机测试洞外亮度的新方法^[30]。根据摄影理论和照相光度学，照相机能通过镜头将目标物成像在感光材料上，图像上每一点的密度与目标物相应点的曝光量存在一定关系。利用这一方法，在取得了成像时曝光量大小和摄像过程中所采用的光圈值、曝光时间等指标后、利用课题组研究得出的数码相机 CCD 板感光特性曲线，可推得所拍物体某点的亮度。该方法提供了准确高效地测试隧道洞外亮度值的方法和手段，使大规模快速测试隧道洞外亮度成为可能，为建立适应不同地区隧道洞外亮度参数表提供了有效途径。

其他方面，同济大学的杜志刚对公路隧道进出口驾驶员的瞳孔变化进行了试验研究，在大量试验的基础上，建立了基于驾驶员瞳孔面积及面积变化速度的行车安全评价指标^[31]。北京交通大学的王梦恕等通过对人体视网膜适应机能的分析，认为降低文献^[27]所提供的隧道设计亮度，仍可满足识别隧道内危险障碍物的要求，建议降低亮度指标来节约照明费用^[32]。同济大学的马玉成等从隧道照明过渡的角度，结合视觉适应的理论，提出了隧道入口的安全运营车速控制标准及相应的车速控制措施^[33]。

1.4 本文的主要内容

本文以地处四川省西南部的雅安市、凉山州境的干海子螺旋隧道为研究对象，从安全角度对该隧道的平纵面线形、照明情况进行分析，主要内容如下：

(1)确立停车视距、路面超高、隧道加宽等为保证行车安全与舒适的定量指标，采用经典动力学进行车辆纵横向稳定分析，并结合相关规范，得出干海子螺旋隧道安全平纵线形指标。

(2)基于模拟仿真模型对隧道线形安全进行评价，主要有两方面工作：

① 结合仿真技术、汽车系统动力学理论以及公路工程的要求，建立适合人一车一路及环境仿真评价的汽车系统动力学模型。

②建立不同平纵面线形指标（如半径、纵坡度）的路线方案，在仿真实验中变换路线方案与车型，检验各方案下汽车运动规律、驾驶员操作难度等指标实现方案比选。

(3)对螺旋隧道的照明安全进行评价和建议，主要从三方面入手：

①建立隧道洞口段照明模型，确定隧道洞外亮度，考虑隧道入口处的亮度折减等因素提出入口段照明设计要点。

②通过照明模型提出随时间变化的入口段照明控制变化规律。

③确定保证螺旋行车安全所需的可见度及隧道内行车舒适度的隧道通风方面要求。

第二章 螺旋隧道安全线形参数研究

2.1 隧道线形设计概述

公路线形是公路的基本骨架，一旦建成就难以改动，甚至无法改动。一般情况下，隧道是公路线形主要控制点之一。因此，隧道线形设计的优良与否事关重大，它不仅对汽车行驶的安全、舒适、经济以及公路的通行能力和交通容量等都起着决定性的作用，而且对沿线影响区内的经济开发、土地利用、环境保护以及人们的生活都有较大的影响，所以隧道线形设计应结合地形、地质等诸多因素进行综合性设计。

我国目前的隧道线路设计主要是以设计速度为基本参数，根据预测交通量和公路等级，按照《公路隧道设计规范》(JTGD70-2004)和《公路路线设计规范》(JTGD20-2006)，在整条线路的设计速度确定之后，以设计速度为主要依据确定平、纵线形指标、超高、加宽、视距等公路几何设计参数。

平面线形设计中，主要考虑的是汽车的行驶轨迹，只有当平面线形与这个轨迹相符合或相接近的时候，才能说明这个线形设计是良好的、连续的，也才能保证行车的安全性和舒适性，这一点在高速行驶的条件下尤为重要。

而在纵断面设计中，线形是由直线和竖曲线组成的。在确定线形的组合和指标运用上同样是以满足汽车行驶的动力学需要出发，例如纵坡的长度和坡度都影响着汽车行驶速度和运输的经济性以及行车的安全和舒适，其临界值的确定是由通过的汽车类型及行驶性能决定的；在考虑竖曲线的指标时，主要从离心力、行车舒适和安全视距的角度出发确定限制因素，同时还要满足汽车运动学和驾驶人员的视觉心理和生理的需求。

此外，路线的平纵组合设计也是线形设计的一项重要内容。高速公路任何路段在设计时，对于所选用的线形单独而言，都是符合设计规范的，但将多种线形组合在一起，其综合效应是否满足道路交通安全，则需针对具体路段进行分析评价，一般来说应注意以下三个方面：

(1)应避免在凸形竖曲线与凹形竖曲线的顶部或底部插入小半径的平曲线。因为前种情况没有视线引导而必须急转方向盘；而后者在超出汽车设计速度的地方也要急转方向盘，这些都极易引起交通事故。

(2)要注意前后线形指标协调连续，保持驾驶员视觉上的均衡感，根据经验，平曲线半径如果不大于1000m，竖曲线的半径大约为平曲线的10~20倍，可达到视觉上的平衡。

(3)考虑行车安全的要求，对整体线形的连续性及衔接路段的级差进行控制。通过改善相邻路段线形指标的组合，降低容许速度差，从而消除安全隐患。

而在隧道线形设计中还应注意避免这两种情况：一是在进洞口洞外段设置较长、较大的下坡，在洞口设置小半径的平曲线进洞；二是在隧道出洞口洞内纵坡较大，而洞口设置小半径的平曲线出洞。这两种情况都容易引起车辆运动速度发生较大的变化，是事故高发点。

2.2 线形的主要形式与交通安全

2.2.1 平面线形的主要形式与交通安全

公路平面线形即公路中心线在水平面上的投影。平面线形的主要形式包括直线、圆曲线、缓和曲线，以下分别分析这三种线形对交通安全的影响。

(1) 直线

直线具有视野开阔、超车视距大等优点，但就直线与道路交通安全之间的关系而言，直线的最大长度小于 3min 行程对交通安全比较有利^[36]。事故统计数据表明：过长的直线段易使驾驶员产生疲劳，导致注意力分散，反应迟缓，一旦遇见紧急情况，常因措手不及而肇事；另外，驾驶员在长直线路段容易开快车，致使车辆在进入直线路段末端后的曲线部分的速度仍然较高，若遇到弯道超高不足或其它偶然干扰，往往导致车辆倾覆或其它交通事故。因此在隧道线形设计时，过长的直线并不利于安全。

(2) 圆曲线

圆曲线具有柔和的几何形态，能够较好地适应地形的变化，而且可以获得圆滑的线形，可以大范围灵活运用，但一般情况下，曲线段的事故风险高于直线段，其中曲线半径是影响行车安全的最主要因素。如果曲线半径太小，驾驶员的通视条件不足，视觉条件的限制将使其无法对突发情况做出及时反应，容易导致事故发生，而如果曲线半径过大，比如当圆曲线半径超过10000m时，驾驶员在驾车行驶时感到曲线地段与直线并无区别，多数驾驶员会加速超车，带来事故率的明显增加。对此研究人员也通过事故统计分析给出了结论，英国的McBean(1982)认为曲线半径小于500m会明显增加事故率；澳大利亚的Johnston(1982)则认为半径小于600m就会产生更高的事故率；但半径>3300m时，某些情况下曲线太长，导致曲线内超车，则会带来因超车的事故率明显增加^{[9][34]}。

隧道尽量采用曲线线形隧道，特别是对长大隧道更应予以考虑。曲线隧道有助于控制洞内车速，提高驾驶人员的注意力，而且比直线隧道能更好地解决光过渡和眼睛适应等问题。

(3) 缓和曲线

缓和曲线是指在直线和曲线或不同半径的大曲线和小曲线之间的渐变曲线，是一段曲率逐渐变化的曲线。其作用主要有：一是车辆从一曲线过渡到另一曲线的行驶过程中，缓和曲线使离心力加速度逐渐变化，从而缓和人体感受到的离心力加速度的急剧变化；二是缓和曲线通过其曲线的逐渐变化，可适应转向操作行驶轨迹及路线顺畅，达到视线平顺、视觉协调、驾驶员易于操作的目的；三是缓和曲线可以作为超高变化的过渡段。文献^[16]中规定缓和曲线采用回旋线，并规定了各级公路缓和曲线的最小长度。回旋线的基本方式为：

$$Rl=A^2 \quad (2-1)$$

式中： R —回旋线上某点的曲线半径

l —回旋线上某点至起点的曲线长

A —回旋线的参数

回旋线参数 A 表示缓和曲线曲率变化的缓急程度。当参数 A 较大时，缓和曲线曲率变化比较缓，驾驶员容易感到线形的连续，觉得道路间线形变化柔和，过渡自然，易于驾驶操作；反之， A 较小时，不易于驾驶员操作，甚至酿成事故。因此，设计时应尽可能使参数 A 取较大值。

驾驶员通过回旋线时需要不断地修正方向盘以适应路线曲线半径的变化。尽管方向盘的修正是均匀的，但在视觉条件较差的隧道内部，驾驶员需要高度集中注意力，修正方向盘会增加驾驶员的心理负担，加大事故发生的机率。因此隧道线形设计中更应严格控制回旋线参数 A ，但如果隧道平面线形采用圆曲线，通常难以避免在洞口段出现缓和曲线，此时则应保证缓和曲线有一定长度，使得洞口段线形没有突变，并以停车视距、超高渐变率等其他指标复核该路段的安全性。

2.2.2 纵面线形的主要形式与交通安全

纵面线形是指道路中心线在垂直平面上的投影，其主要形式是竖曲线与直线纵坡等。

(1) 直线纵坡

直线纵坡为均匀坡度线，它的坡度和坡长与交通安全紧密相关瑞典的Hoban(1988)认为坡度陡于6%时就会有较高的事故率；坡度在2.5%~4%间的坡道比一般水平路段事故率要高出10%~20%^{[9][34]}。表2.1是德国学者比兹鲁在德国高速公路上调查的坡度与事故率关系的统计资料，可以看出当坡度大于4%时，事故率剧增。

表2.1 坡度与交通事故率关系统计表

坡度/%	0~1.99	2~3.99	4~5.99	6~8.0
交通事故率/次(亿辆·km ⁻¹)	1.62	1.86	2.17	2.36

隧道纵坡以小为宜，文献^[17]中规定在 0.3%与 3%之间，控制隧道最大纵坡的因素有以下三点：

①隧道内的封闭环境下，隧道两壁及顶部对空气产生约束作用，使汽车在隧道中行驶所遇到的空气阻力比在露天所遇到的要大，

②隧道内空气比较潮湿，湿度大，凝集水多，加上洞内可能漏水，使得路面的附着系数降低。

③隧道内车辆的烟雾排放量与隧道纵坡的平方级数成正比。

(2) 竖曲线

纵断面上两个坡段的转折，为了行车安全、舒适以及视距和路容美观的需要用一段曲线缓和，称为竖曲线，我国一般采用二次抛物线作为竖曲线。文献^[16]对竖曲线的最小长度、最小半径等指标有相关要求。由于竖曲线变坡点对司机视距的影响，应避免设置在隧道洞口。

2.3 基于汽车动力学的线形安全考虑

目前路线设计的指标是通过分析汽车的行驶性能和汽车行驶的稳定性而确定的。公路设计部门对汽车动力学的应用是传统汽车动力学，把汽车作为质点或刚体，当汽车在道路上运行时，要有足够的驱动力来克服各种行驶阻力。因此了解汽车动力学的考虑因素，能更好地理解设计规范内容。

2.3.1 汽车行驶的动力特性

汽车在道路上行驶，必须同时具备两个条件，第一是汽车牵引力必须平衡于汽车的行驶阻力，第二是牵引力不能大于轮胎与路面之间的附着力，即汽车行驶必须同时满足以下两个关系式^[37]：

$$D=f+i+(\delta/g)a \quad (2-2)$$

$$P_t=\varphi \times z \quad (2-3)$$

式中： D 为动力因素，它表征某型汽车在海平面高程上，满载情况下，每单位车重克服道路阻力和惯性力的性能； f 为滚动阻力系数； i 为道路纵坡度； δ 为惯性力系数； g 为重力加速度； a 为汽车行驶加速度； P_t 为牵引力； φ 为轮胎与路面间附着系数； z 为驱动轮荷载。

2.3.2 汽车的纵向稳定性

在指导公路设计方面已有的对纵坡的研究中主要是纵向倾覆和纵向滑移。

(1) 纵向倾覆

产生纵向倾覆的临界状态是汽车前轮法向反作用力 Z_1 为零，此时，汽车可能绕 O_2 点发生倾覆现象（如图2-1所示）。对 O_2 点取矩并让 $Z_1=0$ 得

$$Gl_2 \cos \alpha_0 - Gh_g \sin \alpha_0 = 0$$

$$i_0 = \operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{l_2}{h_g} \quad (2-4)$$

式中： α_0 是 Z_1 为零时的坡道倾角； i_0 是 Z_1 为零时道路的纵坡度。 G 是汽车的总重力。

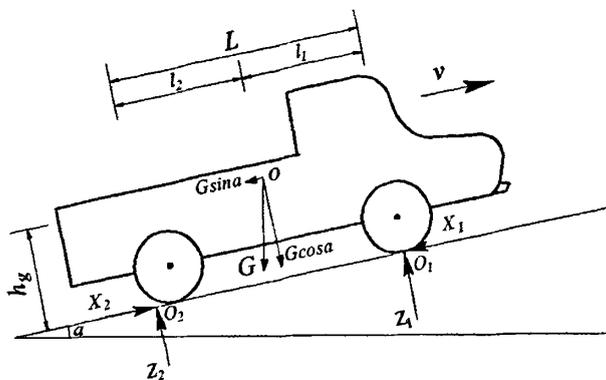


图2-1 汽车等速上坡受力示意图

当坡道倾角 $\alpha \geq \alpha_0$ （或道路纵坡 $\geq i_0$ ）时，汽车可能发生纵向倾覆。由式(2-4)可知，纵向倾覆的稳定性主要与汽车重心至后轴的距离 l_2 和重心高度 h_g 有关。 l_2 愈大， h_g 愈低，纵向稳定性愈好。

(2)纵向滑移

对后轮驱动的汽车，根据附着条件，驱动轮不产生滑移的临界状态是

$$G \sin \alpha_\varphi = \varphi G_k$$

因为 $\sin \alpha_\varphi = \operatorname{tg} \alpha_\varphi = i_\varphi$ ，则

$$i_\varphi = \operatorname{tg} \alpha_\varphi = \frac{G_k}{G} \varphi \quad (2-5)$$

式中： α_φ 为产生纵向滑移临界状态时坡道倾角； i_φ 为产生纵向滑移临界状态时道路纵坡度， G_k 为分配到汽车驱动轮上的荷载。

当坡道倾角 $\alpha \geq \alpha_\varphi$ （或道路纵坡 $\geq i_\varphi$ ）时，汽车可能产生纵向滑移， i_φ 的大小主要取决于驱动轮荷载 G_k 与汽车总重力 G 的比值以及附着系数 φ 值。

比较式(2-4)与式(2-5)，从汽车的技术规格来说，一般 i_φ 要小于 i_0 ，所以应以满足不产生纵向滑移为条件，即只要道路纵坡度 $i < i_\varphi$ ，汽车满载时都能满足纵向行驶稳定性，但在运载中装载过高时，由于重心高度 h_g 的增大会破坏稳定性条件，所以应对汽车装载高度有所限制。干海子隧道采用纵坡度为2.8%，符合文献^{[16][17]}纵向稳定性的要求。

2.3.3 汽车的横向稳定性

汽车在平曲线上行驶时，除受重力外，还受到离心力的影响。由于离心力的

产生，使汽车在平曲线上行驶时有向曲线外侧发生倾覆的可能（如2-2图所示）。离心力可以用下式表示：

$$F = \frac{Gv^2}{gR} \quad (2-6)$$

式中： F —离心力(N)；

R —平曲线半径(m)；

v —汽车行驶速度(m/s)。

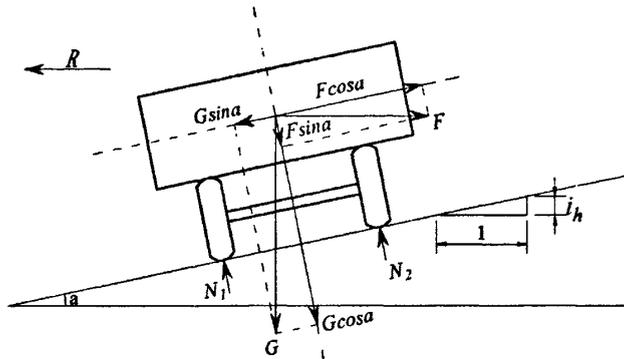


图2-2 曲线上汽车的受力分析

为平衡离心力的作用，为了保证汽车在平曲线上稳定行驶，在平曲线上设置了横向超高 α 。将离心力 F 与汽车重力 G 分解为平行于路面的横向力 X 与垂直于路面的竖向力 Y ：

$$X = F \cos \alpha - G \sin \alpha$$

$$Y = F \sin \alpha + G \cos \alpha \quad (2-7)$$

由于路面横向倾角 α 一般很小，则 $\sin \alpha \approx \tan \alpha = i_h$ ， $\cos \alpha \approx 1$ ，其中 i_h 称为横向超高坡度（简称超高率），所以：

$$X = F - G i_h = \frac{Gv^2}{gR} - G i_h = G \left(\frac{v^2}{gR} - i_h \right) \quad (2-8)$$

横向力 X 是汽车行驶的不稳定因素，竖向力是稳定因素。就横向力而言，只从其值的大小是无法反映不同重量汽车的稳定程度。例如5kN的横向力若作用在小汽车上，可能使其产生横向倾覆的危险，而作用在重型载重汽车上则可能是安全的。于是采用横向力系数来衡量稳定性程度，其意义为单位车重的横向力，即：

$$\mu = \frac{X}{G} = \frac{v^2}{gR} - i_h \quad (2-9)$$

用 V (km/h)表达上述公式，则

$$\mu = \frac{V^2}{127R} - i_h \quad (2-10)$$

式中： R —平曲线半径(m)；

μ —横向力系数;

V —行车速度(km/h);

i_h —横向超高坡度。

式中的 μ 由路面与轮胎之间的摩阻力提供,并与乘客感受到的横向力抗衡,因此 μ 过大对于驾驶操纵的稳定、行驶的舒适及燃料、轮胎的消耗都有不利影响。设计中认为 μ 小于某一值(0.1~0.15)则曲线是安全的。文献^[16]中对平曲线半径的规定也是来自式(2-9)的推导,例如其中规定高速公路最大超高值为8%-10%,与平面线形极限最小半径要求相对应,不设超高的最小半径则是取用了 $i_h=-0.015$,即一般路面横坡坡度值,然后根据各级公路的设计时速计算整理得出的结果。干海子隧道设计超高为单向坡2%,也是根据圆曲线半径、设计速度、公路条件等经计算确定的。

2.4 基于视距影响的线形安全考虑

2.4.1 停车视距的定义

为了行车安全,在道路的平面和纵面上均应保证必要的停车视距,在弯道有足够的横向间距,使驾驶员有良好的视距以正确判断道路的行车环境,决定正确的驾驶行为,从而决定驾驶行为的有效操作时间。

文献^[15]中对停车视距区分为小客车停车视距(SSD)和货车停车视距(TSSD)。通常将小客车停车视距简称为停车视距。

停车视距(SSD):小客车行驶时,当目高为1.2m,物高为0.1m时,驾驶人员自看到前方障碍物时起,至障碍物前能安全停车所需的最短行车距离。

货车停车视距(TSSD):载重货车行驶时,当目高为2.0m,物高为0.1m时,驾驶人员自看到前方障碍物时起,至障碍物前能安全停车所需的最短行车距离。

2.4.2 停车视距的组成

停车视距由两部分组成:

(1)反应距离:是驾驶员察觉障碍物,决定应采取的行动,踩刹车放慢车速整个过程所需的距离;

(2)刹车距离:汽车制动并停稳所需的距离;

通常按下式计算:

$$S_r = \frac{V}{3.6}t + \frac{(V/3.6)^2}{2gf_i} \quad (2-11)$$

式中: S_r —停车视距(m);

V —行驶速度(km/h);

t —反应时间(s);

f_l —纵向磨擦系数。

2.4.3 停车视距的假设条件及参数取值

反应时间：根据国际资料的统计，驾驶员的反应时间定 2.5s 为理想最低值，2.0s 可作为警觉状态下的最小值。在特殊情况下，也允许采用 1.5s 作为极限最小值。文献^[15]中规定反应时间值均采用 2.5s。

行驶速度：在特定路段长度上测定的第85个百分点上的车速。即在干净、潮湿条件下，85%的驾驶员行车不会超过的速度，行驶速度的确定，一般可由调查点绘制的运行速度累计分布曲线求得。而观测中还有15%的车速是出奇的高，公路设计的目的是创造条件满足绝大部分驾驶员，但不是全体驾驶员的速度要求，因此，设计若也考虑占总数15%的专爱高速飞车的驾驶员，从经济上来说是不可行的。

当前线路设计中选用的行驶速度比设计时速要低一些，并按如下原则：即当设计时速为 120km/h~80km/h 时，行驶速度选定为设计速度的 85%；当设计时速为 60km/h~40km/h 时，行驶速度选定为设计速度的 90%；当设计时速为 30km/h~20km/h 时，行驶速度选定为设计速度。

纵向磨擦系数：纵向磨擦系数是指轮胎与路面的纵向摩擦系数，它的取值与车速及路面的状况有极大的影响，若路面处于干燥状态，其摩擦系数为 0.45~0.75 之间。而我国现行标准中关于停车视距的计算中是以危险状态，假定由于雨水等原因，路面处于潮湿状态时所求得的，同时考虑到纵向磨擦系数随着车速的增大而减小的原因，摩擦系数的取值定为 0.29~0.44，其对应的车速为每小时 120km~20km。澳大利亚设计指南中，小客车的纵向摩擦系数定为 0.33~0.65，其对应的车速为每小时 130~50km，比我国的取值要大一些^[38]。

2.4.4 停车视距的确定

(1) 小客车停车视距(SSD)的确定

澳大利亚等国的停车视距(SSD)计算中考虑了路线纵坡的影响，其计算公式如下：

$$S_r = \frac{V}{3.6}t + \frac{(V/3.6)^2}{2g(f_l + i)} \quad (2-12)$$

式中 i 为路线纵坡度，其余符号意义同前。

我国规范中对停车视距(SSD)的确定是以平坡为计算模式的，即按式(2-11)计算，未而考虑下坡路段对制动距离的影响。在《公路路线设计规范》条文说明第 7.9.1 节中对此有如下说明：“制动停车距离随纵坡不同而变化，表列计算值是采用纵坡为零时的平坦路面而求得，理论上下坡路段是危险的，上坡则比较有保障。但因采用值尚较富裕，当属安全。”因此，我国的停车视距计算中主要是采用了较

长的反应时间、较小的纵向摩擦系数以及另外增加安全距离 5~10m 来抵消下坡对停车视距的增长作用。由此说明，在我国停车视距的计算中，上坡路段的停车视距应该有更大的富裕。

(2) 货车停车视距(TSSD)的确定

对于货车停车视距(TSSD)，根据澳大利亚的设计指南，货车各种车速下的纵向摩擦系数一律采用 0.17, 但该摩擦系数值(0.17)不代表轮胎与路面的实际摩擦系数，仅代表参考了货车视距不良影响而采用的正在刹车过程中货车的当量均匀减速率。计算中货车停车视距分两部分计算：第一部分：平坡条件下的基本货车停车视距；第二部分：由于上、下坡的坡度计算的校正值。根据式(2-11)、式(2-12)的计算方法，算出不同车速和纵坡条件下货车的停车视距和坡度校正值，分别列于表 2.2、表 2.3。

表 2.2 平坡的货车停车视距

行驶速度(km/h)	一般值(m)	最小值(m)	极限最小值(m)
30	38	34	34
40	59	54	54
50	87	80	79
60	120	111	108
70	158	148	142
80	202	190	181
90	251	234	226
100	301	288	—
110	356	341	—

注：表 2.2 中视距的一般值、最小值、极限最小值是根据反应时间的理想值、最小值、极限最小值推算。

表 2.3 货车上、下坡坡度修正值(m)

行驶速度 (km/h)	上坡				下坡			
	+2%	+4%	+6%	+8%	-2%	-4%	-6%	-8%
50	-6	-11	-15	-19	+12	+18	+32	+51
60	-9	-16	-22	-27	+17	+26	+45	+74
70	-12	-22	-30	-52	+23	+35	+62	+101
80	-16	-28	-39	-47	+30	+46	+81	+132
90	-20	-36	-49	-60	+38	+58	+102	+167
100	-24	-44	-60	-74	+46	+71	+126	+206
110	-29	-53	-73	-90	+56	+86	+153	+249

我国现行《公路工程技术标准》在条文说明第 3.0.12.列出高速公路、一级公路停车视距及货车停车视距及下坡段货车停车视距，如表 2.4、表 2.5。

表 2.4 高速公路、一级公路停车视距及货车停车视距

设计速度(Km/h)	120	100	<u>80</u>	60
停车视距(m)	210	160	<u>110</u>	75
货车停车视距(m)	245	180	<u>125</u>	85

表 2.5 平坡段与下坡段货车停车视距

设计速度(Km/h)	120	100	<u>80</u>	60	40	30	20	
纵坡坡度 (%)	0	245	180	125	85	50	35	20
	3	265	190	<u>130</u>	89	50	35	20
	4	273	195	132	91	50	35	20
	5	--	200	136	93	50	35	20
	6	--	--	139	95	50	35	20
	7	--	--	--	97	50	35	20
	8	--	--	--	--	--	35	20
	9	--	--	--	--	--	--	20

(3) 停车视距的比取与确定

按澳大利亚的设计指南方法计算，以设计时速为 80km/h 的雅泸高速为例，干海子隧道纵坡坡率为 2.8%，则上坡幅 SSD 为 82.2m，TSSD 为 140.6m，下坡幅 SSD 为 86.8m，TSSD 为 172.8m，可见货车停车视距(TSSD)确实比小客车停车视距(SSD)长很多，尽管载重汽车驾驶员由于视点高能看得见相当远处障碍物的垂直面，但这一优势不足以补偿货车不良的制动性能。特别在侧向视距受限制的地点，视点高也会丧失优势，而需提供较长的停车视距和其它补救措施，如设置标志和铺筑磨擦阻力大的路面等。

按我国《公路路线设计规范》要求，干海子隧道的小客车停车视距为 110m，比澳大利亚规范值要大；而对于 TSSD，由表 2.4、表 2.5 与上文计算值的对比情况可以看出，我国《公路工程技术标准》中的货车停车视距比澳大利亚规范值要小。对比国外一些技术规范的取定值来看，我国货车停车视距的取值也是合适的。因为公路的设计既要考虑货车特征，又要权衡成本效益，公路一般应按适应小客车特性的思路设计，货车停车视距和减速距离可用来对货车具有潜在危险的区段进行验算。我国规范的思路就是对小客车停车视距做偏于安全的规定，再对存在视距和潜在威胁的区段按货车停车视距进行视距检验。因此本文选取 125m 作为上坡停车视距，选取 130m 作为下坡停车视距。

2.4.5 隧道横断面加宽

在一般公路中横断面几何要素的宽度也直接影响驾驶员的驾驶行为以及判断与其它车辆或其它道路使用者横向安全距离的能力，在隧道半封闭的环境中这种判断能力对安全的影响尤为重要，大多数的研究表明^[2]，对双车道公路，随着车道宽度的增加，事故率随之下降，然而，这种增加是有一定限度的，具体表现为：当车行道宽度由 4m 增加到 7m 时，事故率下降明显，而当车行道宽度大于 7m 时，再增加车道宽度对事故率影响不大。

美国的研究表明，当车道宽度在 3.35m 到 3.65m 之间变化时，对事故率影响不大，而交通量不大，车道宽度大于 3.65m 时，事故率会减少，但减少幅度不大。进一步的研究表明：以车道宽度在 3.3m 至 3.8m 为标准宽度，当车道宽度减少 1m 时，车速大约会减少 5.7km/h。^[39]因此，如何选择合适的车道宽度，对车辆能否安全、迅速、舒适的行驶关系重大。

干海子隧道采用文献^[15]中规定的高速公路车行道宽度 3.75m，可满足我国目前车辆安全行驶的要求。另设计方考虑隧道横断面宽度对行车视距的影响明显，对隧道原设计内轮廓断面在原基础上内侧加宽 40cm，外侧加宽 20cm，应是偏于安全的。

2.5 本章小结

本章对线形的几种主要形式做了介绍，逐一分析各种线形形式对交通安全方面的影响，并结合经典动力学，对汽车稳定行驶所需要的纵向稳定性和横向稳定性如何达到给出了相应的定量指标，另外，介绍了停车视距的概念，通过深入分析其取值依据并参照国内外规范，确定了干海子隧道的安全停车视距。

第三章 线形方案的安全性比较

3.1 路线方案的提出

3.1.1 保证视距的临界圆曲线半径计算

根据下图 3.1 可知，视点与对象物在同一圆曲线内时，从行车轨迹线到铅垂状障碍物的横净距按下式(3-1)计算：

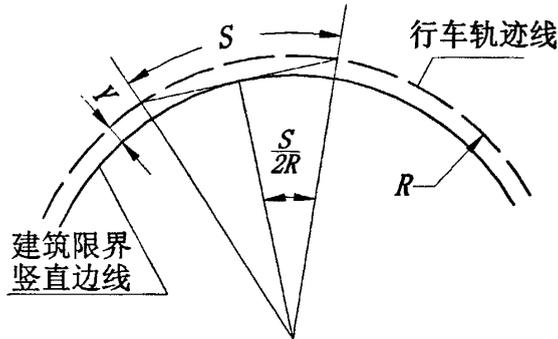


图 3.1 保证视距宽度的临界圆曲线

$$Y = R(1 - \cos \frac{S}{2R}) = \frac{S^2}{8R} (1 - \frac{48R^2}{S^2} + \dots) \approx \frac{S^2}{8R} \quad (3-1)$$

式中：Y—横净距(m)

S—视距(m)

R—曲线内侧行驶轨迹的半径(m)。

而确定横净距时涉及到视点位置的确定，视点位置即驾驶员视线发出的位置，它是停车视距的重要参数，隧道中取视点位置到隧道建筑限界之间的距离为 Y，国内外技术规范大多将视点位置定为内侧车道的中心，仅文献^[16]将视点位置定为距内侧车道边缘 1.5m。

鉴于本项目的螺旋隧道建造经验少，可能存在较大的安全隐患，故本文采用距内侧车道边缘 1.5m 做为最不利视点位置。

隧道中上下坡有不同的视点位置，可列出如图 3.2 的四种工况，干海子隧道为左转上坡隧道，因此在上坡幅隧道中，最不利视点位置为左侧行车道距路缘带 1.5m 处（即工况 1），应满足的货车停车视距为 125m；在下坡幅隧道中，最不利视点位置为右侧行车道距路缘带 1.5m 处（即工况 4），应满足的货车停车视距为 130m。工况 2 和工况 3 分别为视点位置定在内侧车道中心的上、下坡幅情况。

隧道横断面采用文献^[17]推荐的标准内轮廓断面，以距路边缘 1.5m 处为视点

位置，视点高 1.2m，可得上下坡幅最不利视点距隧道建筑限界竖直边界分别为 2.75m 与 3.0m，以此作为横净距 Y ，再根据式(3-1)初步算得临界圆曲线半径，由于线路设计中讲的圆曲线一般是指行车道中线所在的圆，式(3-1)计算得出的 R 是视点位置所在圆，故还应加上差值 2.25m (工况 1、4) 或 1.875m (工况 2、3)，得到行车道中线的临界圆曲线半径。为利于对比，特将工况 1 至工况 4 行车道中线的临界圆曲线半径列如下表 3.1:

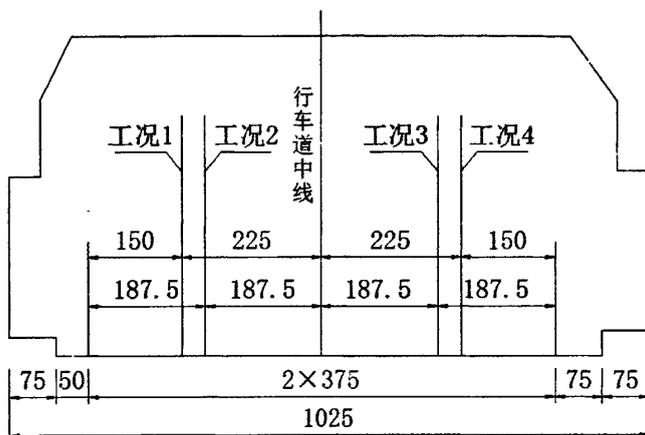


图 3.2 最不利视点位置工况示意图

表 3.1 不加宽时保证安全视距的临界圆曲线半径(m)

工 况	上坡幅 (货车停车视距 125m)		下坡幅 (货车停车视距 130m)	
	距路缘带 1.5m (工况 1)	车道中心 (工况 2)	距路缘带 1.5m (工况 4)	车道中心 (工况 3)
视点所在圆 临界半径值(m)	710.23	625.0	704.17	625.93
行车道中心线所在 圆临界半径值(m)	712.48	626.88	706.42	627.81

设计院拟定的干海子隧道上坡线圆曲线设计半径 618m 与下坡线圆曲线设计半径 600m 都不能满足停车视距要求。

3.1.2 各路线方案的平、纵、横断面设计

隧道平面曲线半径越大就越能保证停车视距与安全，但同时也会加大隧道的长度，从经济费用上来说是不利的。为此隧道设计方湖南省交通规划勘察设计院考虑采用半径小于上文计算结果的圆曲线，同时加宽隧道内轮廓，以期加大横净距 Y 来满足视距安全要求。

上文已得按标准二车道断面(不加宽)上下坡幅保证视距的临界圆曲线半径，

比其更大的半径已无意义，现在取低于上述临界半径的平面圆曲线，得到四种路线方案，列如下表 3.2 所示。

表 3.2 干海子隧道各方案平面线形参数

方案一		方案二(原方案)		方案三		方案四	
下坡线 半径	上坡线 半径	下坡线 半径	上坡线 半径	下坡线半径	上坡线 半径	下坡线 半径	上坡线 半径
560m	580m	600m	618m	660	680m	720m	740m

平面线形设计采用导线设计法，采用前缓和曲线-圆曲线-后缓和曲线的形式。各线形产生的转角一致，横向偏移值不同。

纵断面仍采用单一纵坡，需要注意的是：因隧道两端应设置的高差较大，半径为 600m 的曲线就应设置纵坡坡度 2.8%，接近文献^[17]中规定的最大纵坡 3%，而半径小于 600m 的方案则需要在后缓和曲线后面接直线来延长路线，以避免大纵坡的出现。结合地形图上的等高线可得到隧道进出口位置，再根据文献^[17]中对隧道洞口段线形一致的相关规定进行调整，例如 $R=580\text{m}$ 时，隧道出口段洞内直线仅为 40m，小于 3s 行程 66m，则应适当减小纵坡度，以延长该直线长度。最后得到平面路线方案如下图 3.3 所示：

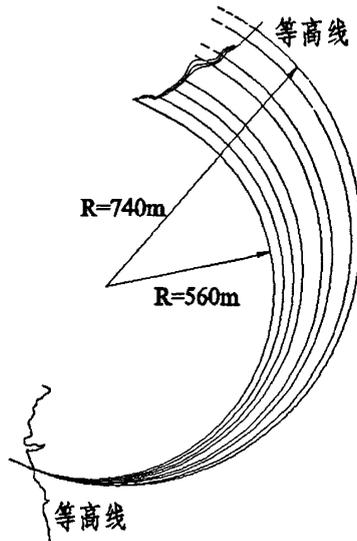


图 3.3 干海子隧道各方案平面线形图

隧道横断面不加宽时采用标准断面，加宽时则参照停车带断面处理，通过加宽两侧侧向宽度来保证视距宽度。隧道内路面宽度由标准值与加宽值构成，标准值依照文献^[17]中条文 4.4.4 所列，设计时速 80km 的双车道高速公路，车道宽加左右侧向宽度总共为 8.75m（见图 3.2）。

超高取设计值 2%，另外在公路横断面设计中，为了行车的舒适、路容的美观和排水的通畅，一般应设置一定长度的超高过渡段，使超高的过渡在超高过渡

段全长范围内进行，双车道公路中用超高渐变率 p 来控制超高变化的缓急：

$$p = \frac{B\Delta_i}{L_c} \quad (3-2)$$

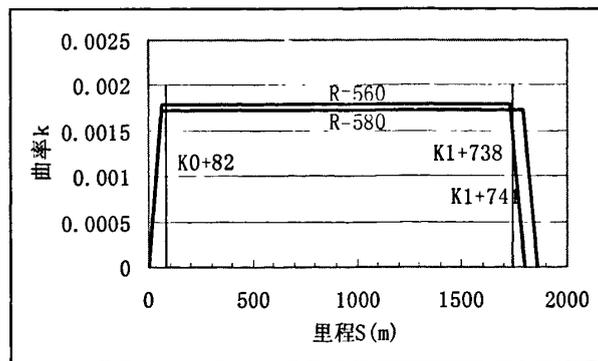
L_c 为最小超高过渡段长度，通常取缓和曲线的长度； B 为旋转轴到路边缘的宽度，以路面边线为旋转轴，则取为道路宽度； Δ_i 为超高变化值。经计算各方案超高渐变率均满足文献^[16]中 1/330~1/150 的要求。

现将各路线方案的平纵面线形要素及隧道横断面参数列如下表 3.3：

表 3.3 各路线方案线形参数表

		方案一		方案二		方案三		方案四	
		下坡	上坡	下坡	上坡	下坡	上坡	下坡	上坡
缓和曲线	A(m)	187.1	193.0	200.0	206.0	220	226.7	240	246.7
	长度(m)	62.5	64.2	66.7	69.1	73.3	75.8	80	82.2
圆曲线	R(m)	560	580	600	618	660	680	720	740
	长度(m)	1665.8	1725.8	1785.1	1844.3	1963.6	2022.9	2142.1	2201.6
纵坡坡度%		-2.9	+2.8	-2.8	+2.7	-2.6	+2.5	-2.4	+2.3
隧道长度		1656	1659	1715	1802	1949	2012	2199	2293
超高渐变率		1/187	1/196	1/205	1/216	1/233	1/244	1/261	1/268
保证视距宽度 Y(m)		3.77	3.37	3.52	3.15	3.20	2.87	2.93	2.64
应加宽(m)		0.80	0.61	0.55	0.39	0.23	0.11	0	0
道路宽度(m)		9.55	9.36	9.3	9.14	8.98	8.86	8.75	8.75

下图所示为各路线方案的平面线形指标变化情况，函数线上的标志与里程表示隧道两端洞口的位置：



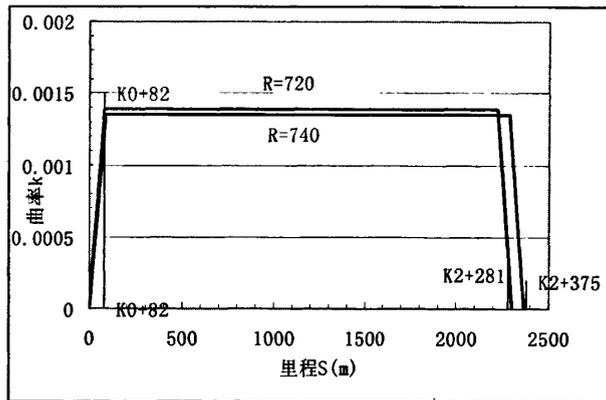
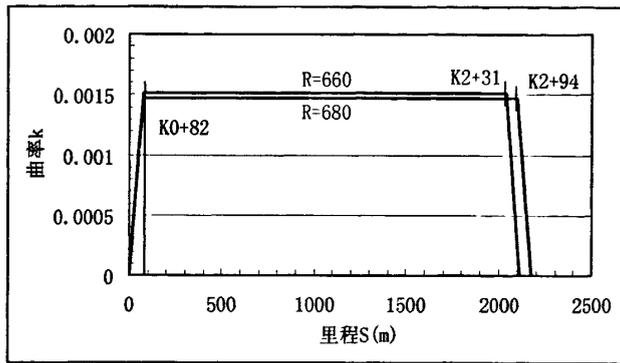
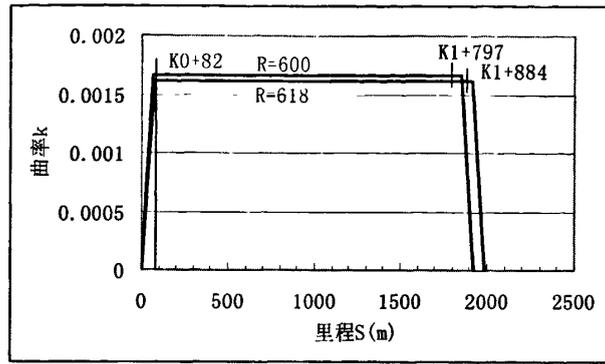


图 3.4 各路线方案平面线形指标变化图

3.2 人车路系统仿真模型的建立

3.2.1 汽车动力学仿真简介^[52]

汽车的动力学采用“驾驶员—汽车—道路”的闭环系统，将汽车作为该闭环系统中的被控部分。并将汽车的各个大的部件加入考虑。如：汽车的轮胎、汽车的悬架、汽车的制动性能、汽车的动力性能等。通过理论分析确定汽车评价指标

与汽车结构的函数关系，即根据已知的物理定律来描述相关的力学特性并建立分析模型。模型由力与运动的代数或微分方程式表示，通过这些方程式来评价汽车的性能。因此模型提供了改变汽车结构及结构参数以提高汽车性能的手段，但是汽车动力学是一门相当复杂的学科，要想通过理论分析得到符合实际的结果，必须考虑很多因素。于是人们开始考虑设计各种新型软件来代替这一过程，这就出现了多种版本的汽车动力学仿真分析方面的软件。其中 Adams/Car 是最具代表性的一种软件。

Adams 软件是美国 MDI 公司开发的机械系统动力学仿真分析软件，它使用交互式图形环境和零件库、约束库、力库，创建完全参数化的机械系统几何模型，其求解器采用多刚体系统动力学理论中的拉格朗日方程方法，建立系统动力学方程，对虚拟机械系统进行静力学、运动学和动力学分析。输出位移、速度、加速度和反作用力曲线。

Adams 软件包括核心模块 Adams/View 和 Adams/Solver 以及其它扩展模块。

Adams/Solver（求解器）是 ADAMS 软件的仿真“发动机”，它自动形成机械系统模型的动力学方程，提供静力学、运动学和动力学的解算结果。Adams/Solver 有各种建模和求解选项，以便精确有效地解决各种工程问题。

Adams/Car（轿车模块）是 MDI 公司与 Audi、BMW、Renault 和 Volvo 等公司合作开发的整车设计模块，它能够快速建造高精度的整车虚拟样机，其中包括车身、悬架、传动系统、发动机、转向机构、制动系统等，可以通过高速动画直观的再现各种行驶状况下（例如：道路状况、驾驶员经验）整车的动力学响应，并输出标志操纵稳定性、制动性、乘坐舒适性和安全性的等特征参数。

Adams/Driver（驾驶员模块）是在德国的 IPG-Driver 基础上，经过二次开发形成的成熟产品，它可以确定驾驶员的行为特征，确定各种操纵情况，同时确定转向盘转角或转矩、加速踏板位置、作用在制动踏板上的力、离合器的位置、变速器档位等，提高车辆动力学仿真的真实感。Adams/Driver 还可以调整驾驶员行为适应各种汽车特定的动力学特性，并具有记忆功能。最后，在 Adams/Driver 中建立的驾驶员行为模型也可以被 Adams/Car 所调用，作为整车模型的一种控制模式。

另外，Adams 中没有专门的道路模块，道路特征文件的输入被整合在 Car 模块中，该文件中的数据包含了道路的线形特征、物理特征等内容。

基于 Adams 的上述功能，则在 ADAMS/Car 中得到下述三个模型：汽车模型、道路模型和驾驶员模型以后，就能实现对干海子隧道各线路方案下车辆行驶情况的模拟，并对行车舒适性、安全性的相关参数进行分析与评价。

3.2.2 仿真建模

3.2.2.1 车辆模型的建立

车辆系统与其他机械系统一样，一般可用由若干刚体和可变形物体（柔性体）组成的系统模型予以有效的描述。这些系统和模型称为多体系统。车辆建模的过程，就是通过对组件、约束、柔性连接（力）及轮胎（力）等的定义，来确定车辆各部分的组件特性及其连接关系，从而形成一系列车辆多体系统动力学控制方程；而车辆仿真的过程，则是采用一定的仿真算法，求解车辆多体系统动力控制方程。像车辆系统这样复杂的系统，其控制方程一般为大规模微分-代数方程组。其求解过程较为复杂。这个问题已成为多体系统动力学的重点问题之一。Adams 采用了吉尔(Gear)的刚性积分算法和稀疏矩阵技术，对车辆多体系统动力学模型具有良好的收敛性。

车辆系统中各组件间存在相互作用力，车辆也受到的其他外力作用，一般来说，力元增加的约束都增加在动力学方程的右边，不影响系统的自由度数，Adams/Car 中，力元作为输入或扰动，详细情况视进行何种分析、采用何种工况而定。

Adams/Car 的车辆模型中最小的部份是组件(part)，组件内部的组成元件间没有相对运动，是实际物理系统中无相对运动或相对运动不太重要的若干零件固化组合而成的。各个组件通过软件内部定义的相互约束关系来加以连接，从而形成一个具有不同功能的子系统，主要包括发动机、传动系、转向系、制动系、车轮系统、悬挂系统、车身及底盘。

(1)发动机是汽车动力产生部分，它主要接受油门的控制输入，也受到离合器状态的影响。

(2)传动系是动力的传动部分，它主要包括：离合器、变速器、传动轴、主减速器、驱动轴。传动系的具体细部对于公路仿真意义不是很大，所以在 Adams/Car 中改用文件控制，这样既满足仿真的需要，也简化了汽车模型的建立。

(3)转向系主要是指方向盘到转向车轮之间(一般为前轮转向)部分，在仿真模型中它包括方向盘、转向机及具有横拉杆的转向部分

(4)制动系主要作用是当踩下制动踏板时，产生使车辆停止运动的制动力矩。

(5)轮胎在汽车模型中占有非常重要的地位，轮胎是汽车接触路面的媒介，它的特性与汽车的垂向密切相关，不论是转弯时加速或制动，所有汽车与路面间的水平方向的力都得靠轮胎接触地印迹面上的摩擦力来传递，橡胶是一种粘弹性材料，是一种非线性体，所以轮胎与地面的相互作用十分复杂。

轮胎模型中比较成熟和被人们认同的有 Fiala 模型、Delet 模型、Frank 模型和 UA 模型。Adams 根据这些轮胎模型的理论基础建立了相应的轮胎仿真模型，为建立整车仿真模型带来了方便。本文采用 Fiala 轮胎模型。Fiala 轮胎模型是 Fiala

在 1954 年由简化的轮胎理论模型导出的无量纲解析式。这种模型比较简单，不把内倾角作为主要因素，并且把纵向滑移和横向滑移分开对待，对于简单的操纵性分析可以得到合理的结果。

(6)悬架主要由减振器组成，它是传递车辆垂直、俯仰、侧倾等运动的主要部分。悬架接受来自车轮和车身的输入，在其自身的刚度、固有频率和阻尼比等的影响下，向车身输送车辆所需要的纵向力、侧向力以及振动、俯仰、侧倾力矩等，对车轮的输入主要是传递车身的垂直荷载，使车轮产生驱动或制动的附着力。

减振器模型表示为一个刚度阻尼力，其中的阻尼系数由实车减振器的实验数据：相对作用力与相对加速度的样条插值得到

(7)车身及底盘集中了汽车质量的主要部分。因此，车身对整车的运动状态有很大的影响，同时，也是汽车运动过程中各种阻力集中作用的部分。

在进行线形方案和路线上运行车辆情况的研究时，通常选用小客车和货车作为有代表性的研究对象，在本文中，鉴于条件所限，小客车选用了软件自带的小客车模型，货车选用了国产中型货车东风 EQ151，两车型的主要技术参数如下：

表 3.4 小客车与货车的技术参数表

	Adams 自带小客车	东风 EQ151
输出功率(kw/rpm)	79kw/5800	100kw/2600
发动机排量(L)	1.799	6.494
总备质量(kg)	1208	5800
乘客人数或载质量	5 人	4100kg
长×宽×高(mm)	7350×2470×2800	4400×1695×1470
轴距(mm)	2550	3950

最后在 Adams 中得到的模型如下图 3.5 所示：

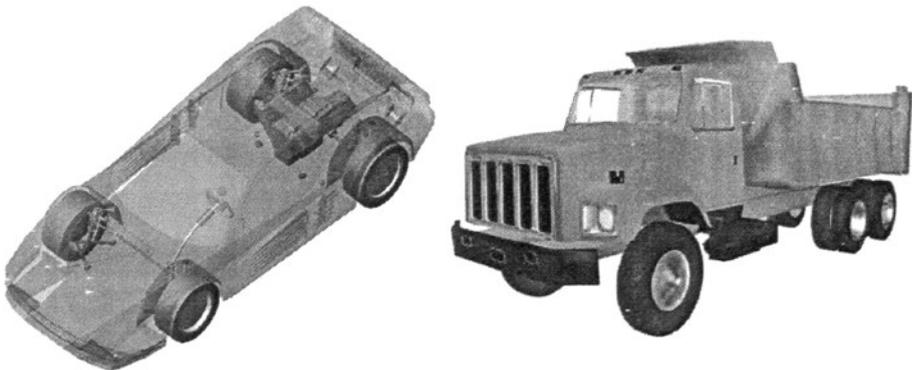


图 3.5 整车模型

3.2.2.2 道路模型

在 Adams 中，通过定义道路中线上的各点的坐标，可得到任意平纵面线形的三维道路。道路的各种属性储存在软件所定义的道路特征文件（rdf 文件）中，在该文件中，用户取道路中线上的若干点（各点之间间隔应小于模拟步长内汽车行驶距离），给出各点的坐标，对应的道路宽度、超高及两侧路面的路面—轮胎摩擦系数，可得到与真实道路情况一致的虚拟道路模型。本文中根据已定路线方案每隔 5m 输入一个点的数据得到道路模型。

按照上节确立的 4 种线形方案，可得到对应的 8 条道路模型：用前缓和曲线的起点作为原点，按前缓和曲线-圆曲线-后缓和曲线的顺序，每 5m（符合间隔要求）取一个点，输入各线路的 X、Y、Z 坐标及路宽值、超高值与摩擦系数；道路与轮胎间摩擦力是纵向与横向摩擦力的合力，主要取决于路面的粗糙程度和潮湿泥泞程度，轮胎的花纹和气压以及车速等因素，一般情况下，小汽车取总重的 0.5~0.65 倍，载重车取总重的 0.65~0.8 倍作为道路与轮胎间摩擦力^[37]，因此本文中取摩擦系数为 0.65。下图 3.6 所示为 $R=618\text{m}$ 的道路模型。另将方案二（原方案）的 rdf 文件列于附表，因数据太多，数据点沿线路方向每 20m 取一个。

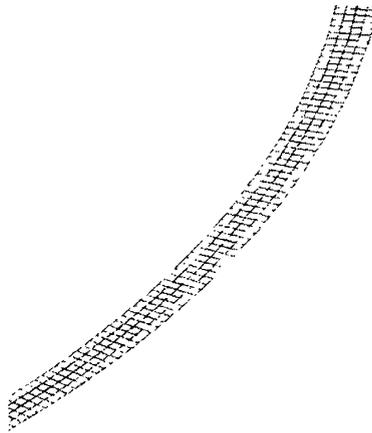


图 3.6 道路模型（局部）

3.2.2.3 驾驶员模型

在 Adams/Car 中，调用 Driver 模块是实现车辆控制的方式之一，它运行时数据文件框架如下图 3.7 所示：

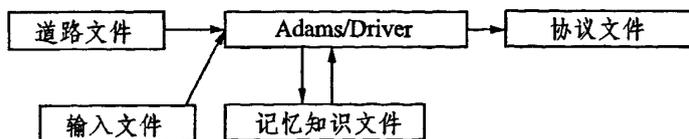


图 3.7 Driver 模块数据文件框架

道路文件如上节所述，输入文件包括以下信息：

- (1) 驾驶员控制车辆的行驶路径，取前文中所考虑的最不利位置，即上坡左侧和下坡右侧行车道距路缘带 1.5m 沿道路方向的连线。
- (2) 驾驶员的驾驶特征，包括进行各种操作，如换档、刹车、转换油门与刹车的反应时间，转向的预瞄时间、对车辆动力性能与路面情况的学习适应能力等；本文在建模时选用软件内置的普通驾驶员驾驶特征输入文件，其中各类指标均为参考各国规范的规定值，具有一定代表性。
- (3) 调入的汽车模型。

记忆知识文件负责储存驾驶员操作过程中所学习到的车辆特性。协议文件是模拟过程的输出文件，存储各类结果。

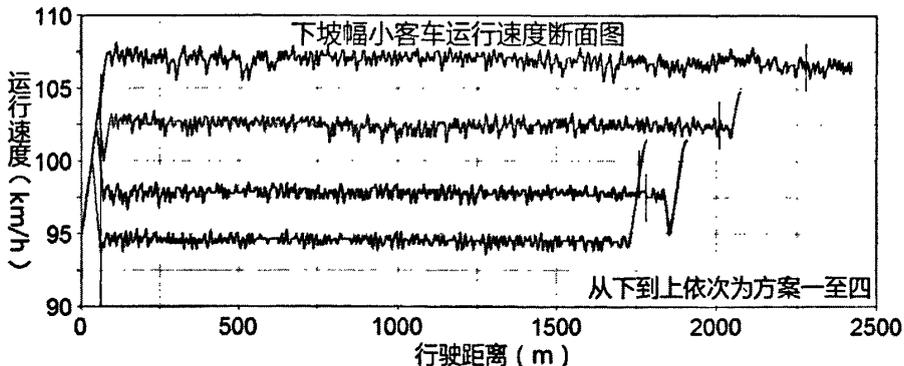
基于这样的文件框架，Adams/Driver 可以根据路面，路线及汽车的动力特性确定驾驶员的行为特征，确定各种操纵情况，同时确定转向盘转角、加速踏板位置、作用在制动踏板上的力、离合器的位置、变速器档位等，还可以调整驾驶员行为适应各种汽车特定的动力学特征。

Adams 中还内置了普通、熟练、新手等程度的驾驶员模型，分别对应不同的操作模式，即代表着驾驶特征与记忆知识文件等的不同，本文中直接选取普通驾驶员作为车辆的控制模式。

3.3 基于仿真的各路线方案行车安全研究

3.3.1 车辆运行速度分析

令小客车初速度为 95km/h，中型货车初速度为 65km/h^[18]，进行模拟后，可得出各方案下汽车运行速度随行驶距离的变化情况，下图中速度曲线上的黑色短线表示隧道两端洞口的位置：



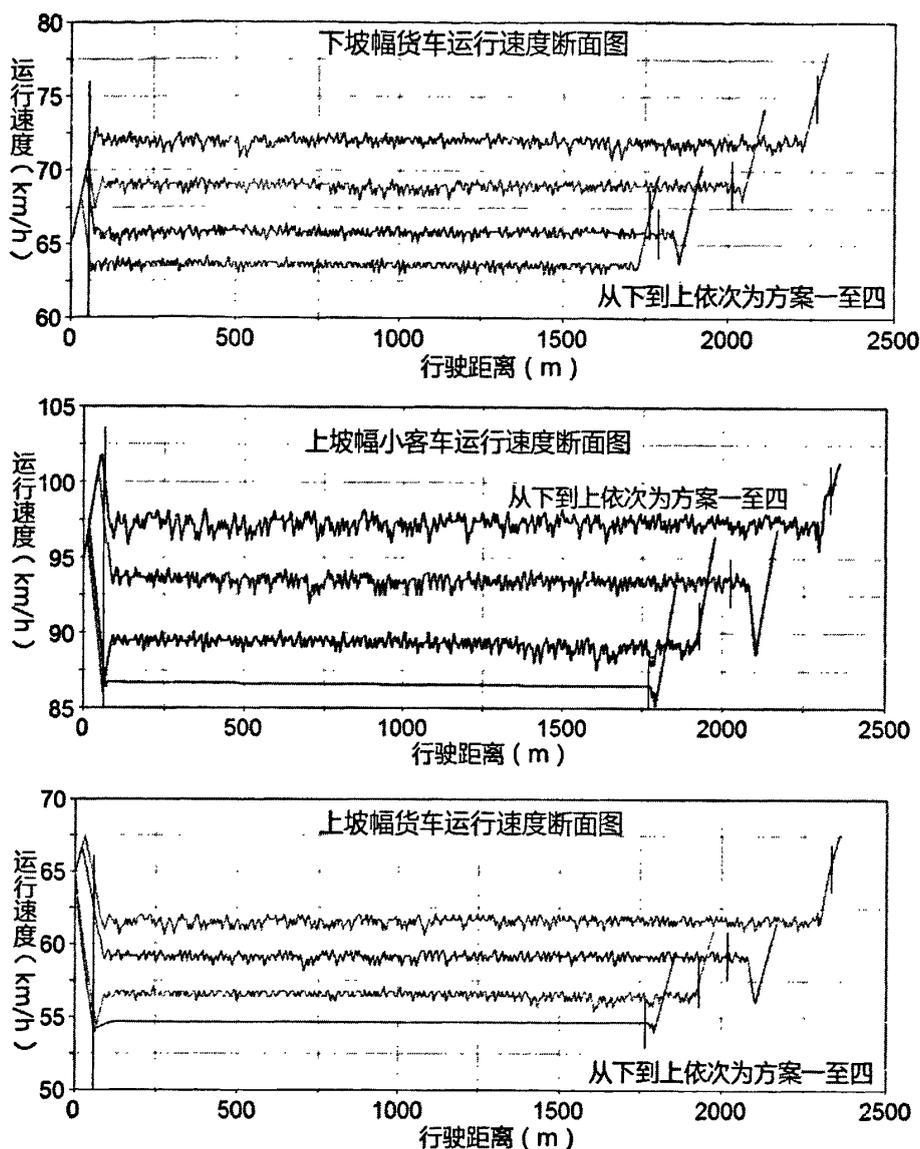


图 3.8 各路线方案下的车辆运行速度断面图

分析上图的一般规律：模拟开始后，除了方案四下坡幅中的驾驶员会有一个短暂的加速过程再减速以外，其他方案下的车辆都会立即放慢车速，在隧道中车速一般稳定于某个值，出隧道口时驾驶员期望尽快出洞，则有一个明显的加速过程。可见：驾驶员会根据线形的优劣来选择运行速度，在将要行驶到小半径路线上时会提前减速，而前方路线条件较好时会选择加速，实际上，在线形较好的路段上，小客车和大货车都有一个期望行驶速度，当初始运行速度 v_0 小于期望运行速度时则会加速，直到达到期望运行速度后再匀速行驶，文献^[18]中认为平直路段上的期望运行车速，小客车为 120km/h，货车为 75km/h。

加减速行为所导致的运行车速差与安全性具有密切的相关关系。一般认为，加速行为是较安全的，而减速行为则对行车安全不利^[43]。在 5s（约行驶 100m）

内,如果运行车速差不超过 10km/h 时,事故率较低;当运行车速差在 10~20 km/h 之间时,事故率一般;当运行车速差超过 20km/h 时,事故率较高^[43]。由上图可知:圆曲线半径越小,进洞前的减速过程越急促,各方案中最快的减速过程是方案一上坡幅中的小客车与货车,百米减速分别达到了 16.5km/h 和 18km/h,还在允许范围内,而方案四上坡幅中的小客车与货车百米减速分别为 9km/h 与 12km/h,说明加大平曲线半径起到了一定作用。

还可看到:小客车运行速度一直高于设计时速,货车的运行速度则一直低于设计时速,而各方案下两种车型的运行速度差在数值上的变化并不大,例如上坡幅中,方案一中两种车型的运行速度差为 30.5km/h,方案四中则为 35km/h,大半径路线方案上的运行速度差还要更大。这是因为路线对这两种车型都是有影响的,线形平缓时,车速都会加快,而小轿车自重小惯性小,随着平曲线半径的增大,小客车速度的增幅要比货车大,因此大半径路线方案中小客车与货车的运行速度差更大,这也增加了车辆在运行中发生追尾事故的概率,有可能使小客车驾驶员无法忍受前车的速度而超车,增加事故发生的概率。

3.3.2 停车视距安全分析

选取仿真中车辆在隧道内达到的稳定速度作为运行速度,代入式(2-11)计算各路线方案下的停车视距,结果列如下表 3.5:

表 3.5 各路线方案下的停车视距

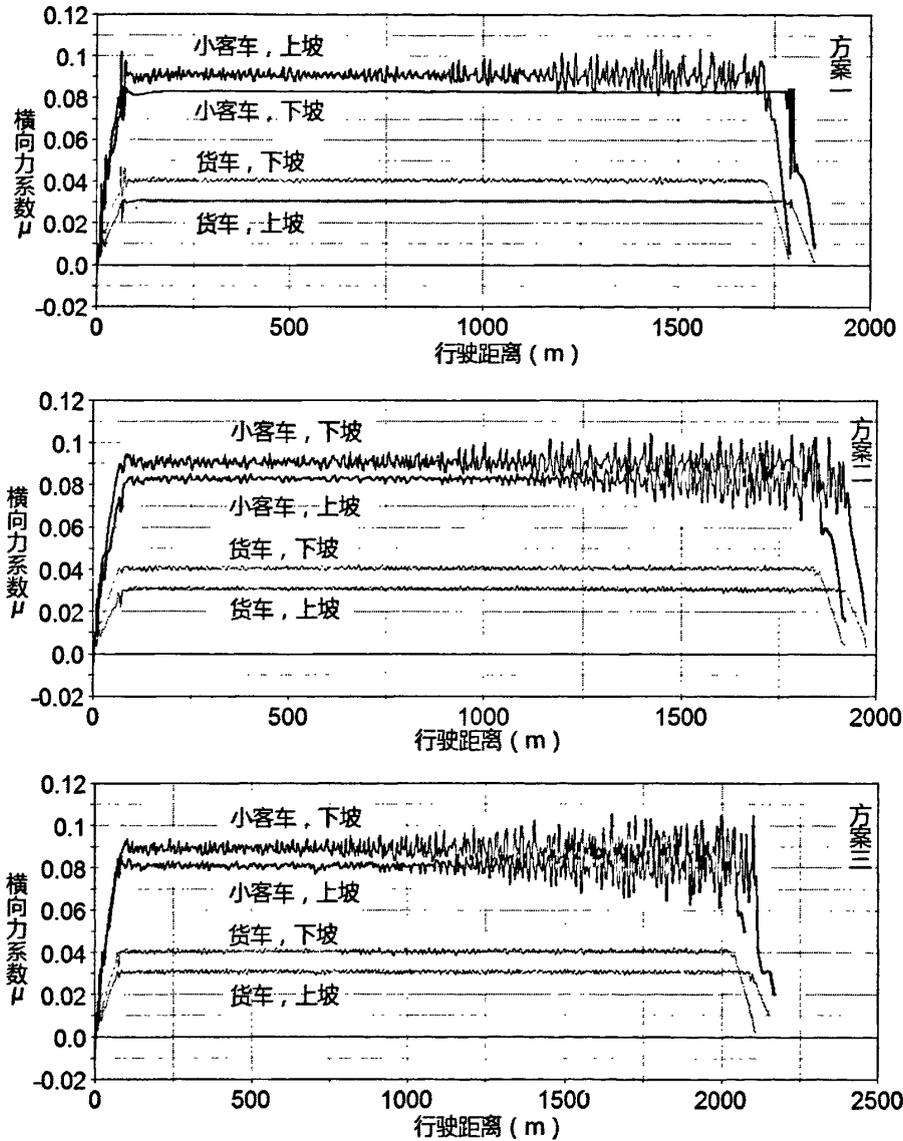
车型	方案	上坡幅		下坡幅	
		运行速度(km/h)	停车视距(m)	运行速度(km/h)	停车视距(m)
小客车	一	76	116.7	80	127.5
	二	80.5	129.0	83	136.2
	三	83	136.2	87	148.2
	四	87.5	149.8	91	161.0
货车	一	47.5	85.3	53	101.9
	二	50	92.7	55	108.3
	三	52	98.8	58	118.2
	四	54	105.1	61	128.6

可见,货车的视距要求基本能够满足,但由于小客车运行速度过快,有几个方案中小客车所需要的停车视距超过了本文 2.4.4 节中选取的标准 125m(上坡幅)与 130m(下坡幅),且有一些方案超过标准较多,如果按这种视距标准来修建隧

道显然是不经济的，还应当从降低车速方面来入手解决。根据式(2-11)，限制小客车速度在 80km/h 以下，货车速度在 60km/h 以下时，可以保证安全的停车视距。

3.3.3 车辆横向稳定性分析

Adams可得出行驶过程中车辆的侧向加速度，为考察行驶过程中的横向稳定性，结合公式(2-9)可得到横向力系数的变化曲线，列如下图：



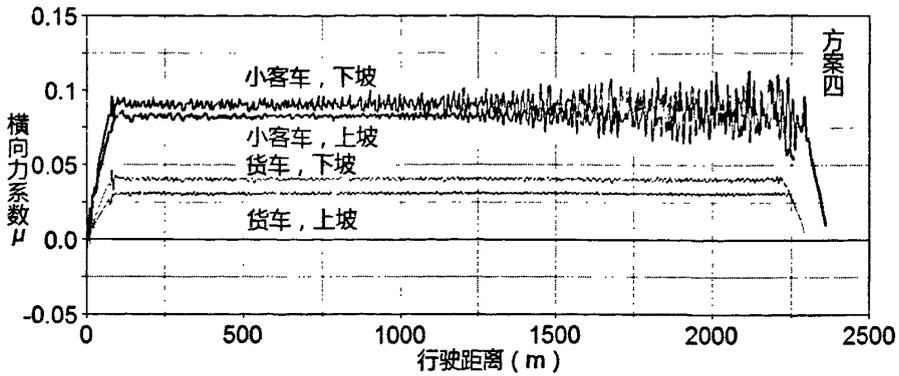


图3.9 各路线方案下的车辆横向力系数 μ 变化图

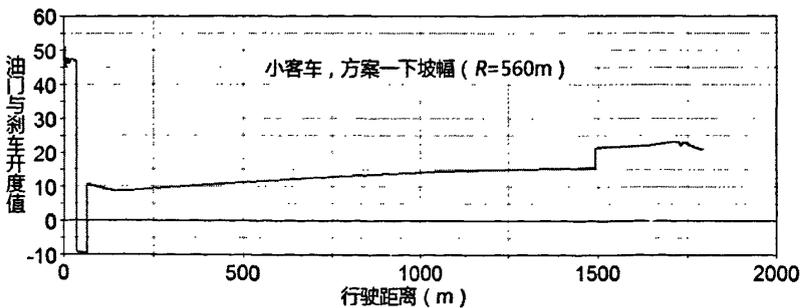
由公式(2-9)知，横向力系数 μ 与运行速度、平曲线半径及超高坡度有关，在直线段和缓和曲线段，平曲线半径较大，使 μ 值很小；进入圆曲线后，车辆速度始终保持在某个值附近，使该段的横向力系数也较稳定。

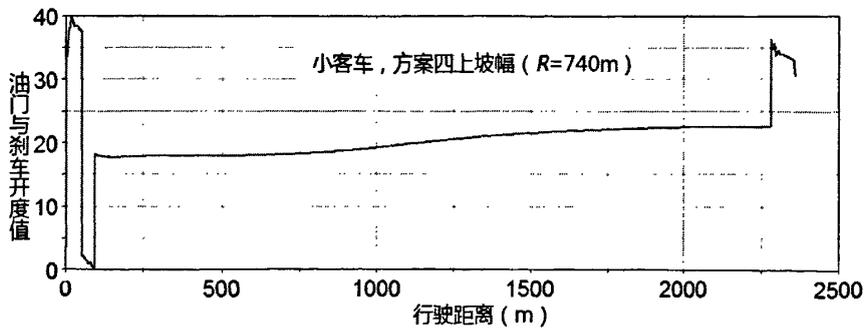
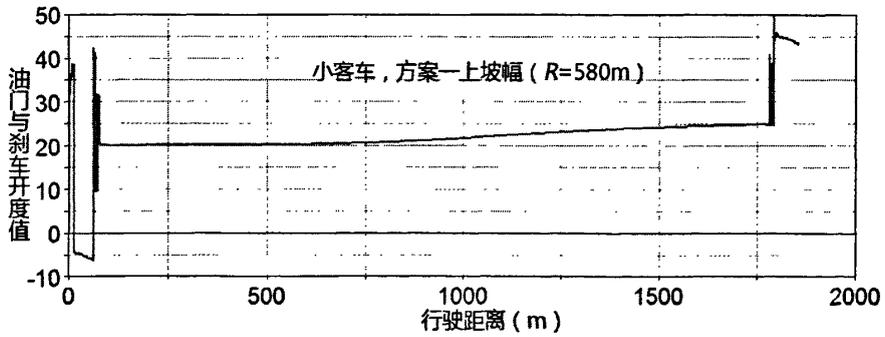
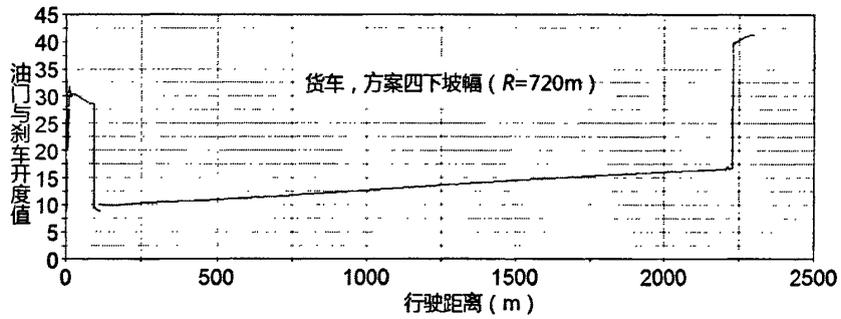
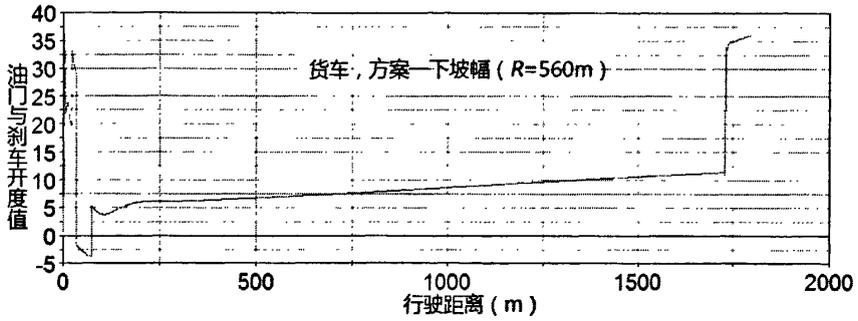
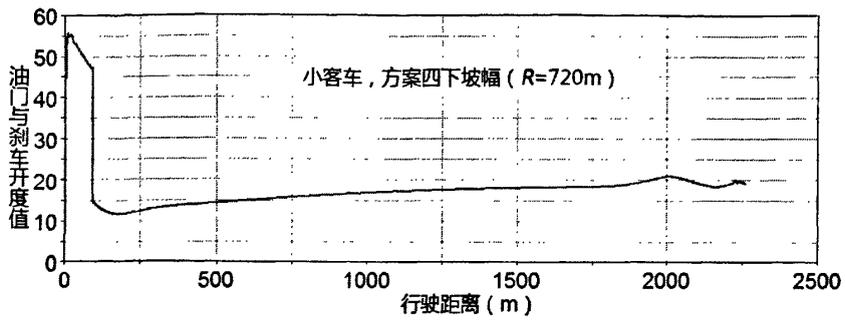
上图中，各方案下对应车型在行驶过程中的横向力系数基本一致，说明大半径路线方案下较快的运行速度也使得路线平缓对横向稳定性的优势有所丧失。而同一方案不同车型在行驶过程中的横向力系数差别较大，由于小客车与货车运行速度不一样，而 μ 与运行速度的平方成正比，说明其变化主要受运行速度的影响，上图曲线中 μ 值振荡的路段，也与运行速度有振荡的路段相吻合。

小客车 μ 的振幅比货车大，从式(2-9)分析可知，如果小客车车速 v 在运行过程中加大 Δv ，尽管 Δv 不大，但 μ 将增大 $(2v\Delta v + \Delta v^2)/gR$ ，因此运行速度较快的小客车 μ 值的振荡也较大，一般认为 μ 小于0.1~0.15之间的某一值，曲线是安全的，但图中小客车 μ 值振荡的波峰有时 would 超过0.1，因此在这些路线方案中，限制运行车速并控制车速的平顺，是保证车辆行驶横向稳定的重要前提。

3.3.3 驾驶员操作过程分析

Adams 可得出司机在驾驶过程中对刹车和油门的控制，令油门值为正，刹车为负，如下图 3.10 所示：





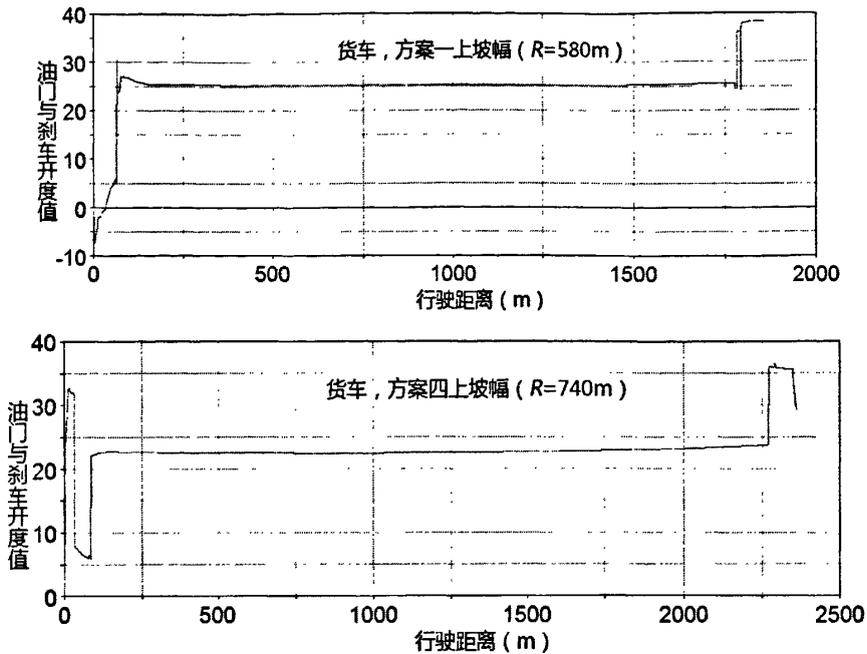


图 3.10 各路线方案下的驾驶员操作变化情况图

由经典动力学分析,在某一路线中,若纵坡坡度为 i (上坡为“+”,下坡为“-”),汽车下坡加速度为 a , 由式(2-2)变换可得:

$$a=(D-(f+i)(g/\delta)) \quad (3-3)$$

式(3-3)中, i, f 取决于道路的设计, D, δ 取决于汽车性能和司机的驾驶操作;踩油门使 D 增加大, 而踩刹车则使 D 减小。

由于各方案下刹车油门开度值变化的规律一致, 所以只列出了方案一与方案四的函数图像, 其余两方案的函数图像应位于这两个方案之间, 不再累述。

可以从图中分析出的一般规律为: 进入缓和曲线段后, 司机会开始踩刹车踏板或松开油门进行减速, 经过一段时间刹车的调整后, 速度已降至安全, 开始进入隧道的圆曲线路段, 司机松开刹车踏板, 继续轻踩下油门速度控制车速, 在接近隧道出口时, 司机会加大油门开度, 提速离开隧道。

对比以上各图, 路线变化平缓方案下的油门和刹车开度变化都要小于路线变化急促的方案。如在上坡幅中, 方案一的货车在一开始就有刹车的要求, 这说明前方的上坡与弯道对自重大的货车爬坡有一定难度, 必须提前减速以提高牵引力。而方案四中只需要减小油门开度, 不需要完全松开而换踩刹车, 操作较简单。

汽车下坡时, 由下坡产生的下滑力来克服其它阻力驱动汽车行驶。但模拟中车辆在隧道中运行需要油门, 因此在干海子隧道中 $f+i$ 大于 0, “下滑力”不足以克服行驶阻力,

下坡幅中, 两个方案中的油门和刹车开度值差别不大, 方案四油门开度值还略大于方案一, 这应是由于线形更好使驾驶员有加速的欲望, 但就操作而言还是

方案四更安全，方案四下不用变换油门和刹车。但方案一(R=560m)中的小车进隧道之前有较急促而幅度较大的一次踩踏刹车过程，如果进隧道前有较长的直线段，而小车在直线段下坡达到较高的车速后，突然进入弯道，司机触不及防，需要较快的反应才能调整好车速以进入隧道，所以该路段有一定的危险性。

3.4 路线方案的选择

综上所述，采用螺旋曲线隧道方案存在以下问题：(1)各方案中均存在小客车运行速度过快导致停车视距不足的现象。(2)小客车在圆曲线路线上运行时，横向力系数 μ 有较大的振荡， μ 值在波峰时处于不安全的状态。这些问题在大半径曲线方案中也不能得到很好的解决。而应从限制车辆运行速度方面来考虑，例如可通过在进洞前设置固定限速标志、警示牌等降低小客车速度来解决。

而采用小半径曲线方案的理由有：(1)尽管车辆在小半径隧道方案的入口段减速更快，但这种减速仍属于安全的范围。(2)改变圆曲线半径对小客车与货车的速度差影响并不大。

但如果采用的圆曲线半径过小也会存在以下问题：(1)驾驶员在进洞前减速还需要进行刹车和油门的转换，难度要大于大半径方案。(2)由于要保证加宽部分的安全视距，加宽部分路面不得让车辆停靠和行驶，造成资源浪费。(3)加宽横断面势必对隧道支护提出更高的要求。

路线设计是一个反复修改、不断优化完善的过程，需要从安全、经济、周边环境等多方面综合考虑。在经济方面，小半径方案也具有较大优势，根据设计方前期所做研究，如采用方案三，仅土建费用就要比方案二多出4125万元。相对而言，小半径加宽方案既能满足安全视距要求，又能节约资金。最终设计方采用了曲线半径为600m与618m的方案，并加宽隧道内轮廓，具体加宽措施为：在考虑到施工误差的情况下，在隧道原设计内轮廓断面的基础上内侧加宽40cm，外侧加宽20cm。

3.5 本章小结

本章提出：在螺旋隧道平面线形的确定过程中，可以通过加宽隧道横断面的方法，结合小半径曲线，使得安全停车视距得到保证，通过汽车动力学仿真软件Adams模拟人车路系统，对加宽和不加宽的四套路线方案进行运行安全评价。分别从隧道内车辆的运行速度、停车视距、横向力系数、驾驶操作等方面评价了各路线方案的安全程度，验证了有代表性的小半径螺旋曲线隧道安全线形方案。

第四章 螺旋隧道安全照明设计

4.1 隧道照明设计所考虑的因素

由于隧道与其他道路相比运行环境和司机行车心理比较特殊，照明设计初期要考虑的因素很多，充分的考虑这些影响照明设计和质量的因素才能给驾驶员保证一个好的照明环境，促进公路隧道安全、高效的运营，现在逐一分析这些因素：

4.1.1 隧道状况

不同的隧道对应的照明设计要求有所不同。设计时要注意隧道本身以下几方面的状况：隧道的长度、宽度、线形、交通状况及隧道附近的环境。

根据以上指标：干海子隧道长度大于1000m，为汽车专用双车道高速公路，双车道单向设计交通量为2600辆/h，这些条件使其对照明的要求较为严格，另外隧道附近山高坡陡，沿线地表植被发育，左右地形起伏大，对洞外亮度有一定的减弱作用，有利于驾驶员在隧道进出口段的照明过渡。

另外，虽然隧道平面线形为单一圆曲线，但隧道洞壁对洞内照明光源的遮挡作用不大，主要是转弯加纵坡的螺旋路线使车辆烟雾排放量增加而影响照明。

4.1.2 隧道进出口段的照明过渡

车辆在驶进隧道时，会遇到各种视觉问题。车辆以80km/h的设计车速行驶时，通过洞门附近（例如内外各10m）时，时间很短，但是亮度变化的却很快，会产生“黑洞”效应与“白洞”效应。

“黑洞”效应与“白洞”效应与人眼的生理适应机制有关，人的眼睛能够自动适应环境光强的变化，但亮度变化的速率越高，所需要的适应时间越长。当环境光强由暗变亮时，人眼的响应（瞳孔直径变小）称为亮适应，一般1~3s即可。反之，称为暗适应，暗适应过程较长，一般约需10s左右。不论明适应还是暗适应都会使驾驶员暂时失去获得视觉信息的能力，使视觉信息暂时终断。

因此隧道入口段与出口段照明设计要充分考虑人眼的适应过程使亮度变化速率与适应时间相协调，为司机提供不间断的照明条件。尤其是入口段，在隧道各段中发生事故的概率最高，应重点考虑。入口段事故的普遍特征是：驾驶员在车辆高速行驶的情况下因“黑洞效应”而产生心理紧张感，在隧道入口处会采取制动措施，由于经常性的刹车，造成隧道入口处的路面附着系数降低，极易造成车辆侧滑、方向失控而发生交通事故。隧道入口处的事故形成过程分为以下几种类

型：

(1)直接发生事故：车辆高速驶入→车辆侧滑→事故；

(2)在减速过程发生事故：车辆高速驶入→隧道照明不佳→暗反应恐惧→采取急减速措施→车辆侧滑→事故；

(3)发生追尾碰撞：车辆高速驶入→隧道照明不佳→因暗反应难以看清前方情况→前方低速行驶或停放→驾驶员急制动→车辆失去稳定性→发生追尾碰撞。

从事故的形成过程可以看出：入口段的照明条件不佳是驾驶员在隧道入口前紧急制动的主要原因。由于高速公路路面较好、线型顺畅、视野开阔，绝大多数驾驶员超速行驶，速度快使车辆的操控性减弱，同时车辆的制动距离增长。如果隧道入口处照明过渡不佳，驾驶员在入口处采取强制减速时，就不能在有效的距离内达到理想的速度，因此容易发生追尾或撞固定物等事故。

4.1.3 车辆尾气

司机行车驶入隧道时，通常都会降低速度。在隧道内部行驶一般也达不到设计车速，尤其是螺旋隧道中车辆需要在转弯的同时上坡，而在交通量比较大时，尾气更多，对能见度造成了不良影响。如果此隧道内通风设施不完善，就会造成隧道内烟雾很大，严重影响隧道照明质量。所以在设计照明时要注意到最大交通量时隧道内的尾气对能见度的影响（选用气体穿透力强的光源）及隧道内通风设施的配置。

4.2 隧道入口段照明安全设计

4.2.1 入口段照明设计方法

隧道照明系统可分为中间段、入口段、过渡段、出口段、接近段等。照明系统如下图所示：

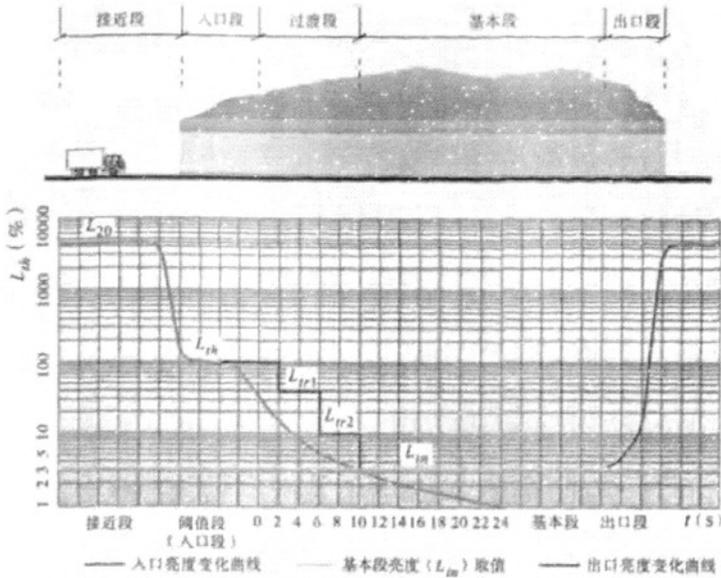


图4.1 隧道照明系统示意图

其中入口段照明由于要考虑与洞外亮度过渡，一直是照明设计中的重点。我国《公路隧道通风照明设计规范》采用 k 值法，其中亮度折减率 k 是入口段亮度 L_{th} 与洞外亮度 $L_{20}(S)$ 的比值，反映进入隧道后亮度折减的程度，因此入口段亮度按下式取值：

$$L_{th} = k \times L_{20}(S) \quad (4.1)$$

如本文1.3节所述，关于 k 值的选取，国际上还没有达成有效的共识，《公路隧道通风照明设计规范》采用的 k 值（表4.1）是两大学派荐用值的中间值。

表4.1 入口段亮度折减系数 k 表

设计交通量 N (辆/h)		k			
		设计速度 v_i (km/h)			
双车道双向交通	双车道单向交通	100	80	60	40
≥ 2400	≥ 700	0.045	<u>0.035</u>	0.022	0.012
≥ 1300	≥ 360	0.035	0.025	0.015	0.01

而入口段长度按下式计算：

$$D_{th} = 1.154D_s - \frac{h-1.5}{\tan 10^\circ} \quad (4.2)$$

式4.2中： D_{th} 为入口段长度(m)， h 为洞口内净空高度，干海子隧道净空高度按初设取值均为7.2m， D_s 为照明停车视距(m)。为保证驾驶员对路面上（标准高20cm）障碍物的视认能力，在障碍物背后应有一段明亮路面来衬托障碍物。驾驶员自看到前方障碍物无法辨认时起，至障碍物前能安全停车所需的最短行车距离就称为照明停车视距，可按表4.2取值：

表4.2 照明停车视距 D_s (m)表

纵坡 V_t	-4%	-3%	-2%	-1%	0%	1%	2%	3%	4%
100 km/h	179	173	168	163	158	154	149	145	142
80 km/h	112	<u>110</u>	106	103	100	98	95	<u>93</u>	90
60 km/h	62	60	58	57	56	55	54	<u>53</u>	52
40 km/h	29	28	27	27	26	26	25	25	25

现雅泸高速计算行驶时速为80km/h，两隧道纵坡坡度均在 $\pm 2.5\% \sim 3\%$ 之间，则偏于安全考虑取3%，代入可得下坡时入口段长度 $D_{th}=94.6\text{m}$ ；上坡时入口段长度 $D_{th}=75.0\text{m}$ ；

4.2.2 隧道入口段照明建模

本文在1.3节介绍了DIALux的发展与应用，在实际建模操作中，需要考虑的具体内容与步骤如下：

1、编辑空间：即在DIALux中输入实际隧道空间的规格，建立对应的虚拟模型。隧道平面设计是通过在平面图中输入边界点坐标得到的，其中隧道宽度为8.75m，长度则参照上文入口段长度值，取为100m。其他参数如纵坡度、平面线形、横断面均与原设计方案保持一致。

2、置入材质：即给模型各部件的表面赋予相应的材质属性，这包括材料的种类和颜色，以决定该表面的反射率、透明度与粗糙度等性质。根据隧道内装图，内轮廓边墙面层采用蓝白相间的专用防火涂料，路面采用沥青砼。

3、设定地理位置与周围障碍物：地理位置可通过指定该地点的经纬度及指北方向来决定，干海子隧道上坡线入口段路线方向为北偏西 65° ，下坡线则为北偏西 54° ，而周围的障碍物可根据实际情况在DIALux中内置的室外对象库中选取，室外对象库中有编辑好的树木、指示牌、山丘等，可满足一般设计方案的需要。

4、设定时间与天空状况：DIALux以德国标准DIN 5034（室内日光照明）与CIE110为依据，把天穹分成若干个参数化的照射面，这些照射面因天空模式、地理位置、日期与时间的不同而设置一个亮度。DIALux的天空类型取自于CIE110-1994，分阴天、晴天、一般天气。阴天使用的亮度一般用于自然光指数的计算，无直接的太阳光照射。

最终得到的隧道入口段照明模型如下图4.2：

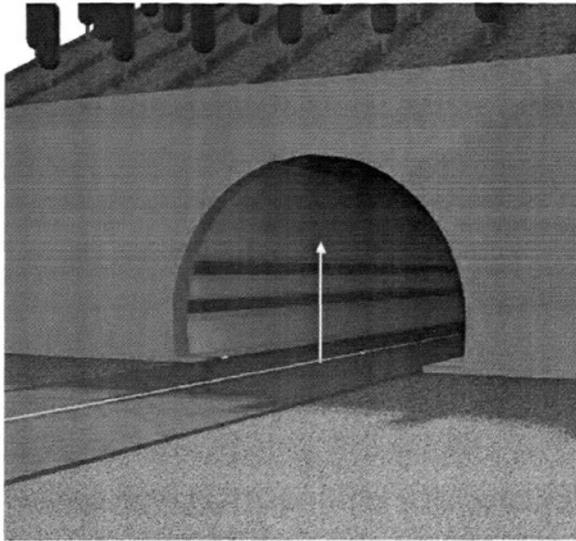


图4.2 干海子隧道入口段照明模型示意图

4.2.3 隧道入口处的亮度折减与人眼适应

在隧道入口前，驾驶员一般很早就注意到了黑暗的隧道入口的存在，并且在接近隧道入口的过程中，黑暗的隧道入口在其视野范围内所占的比例越来越大，在隧道入口前某一点，黑暗的隧道入口完全占据了驾驶员的视野，可以认为此时驾驶员视觉已完全进入暗适应状态，称此点为适应点。按隧道照明理论，适应点距隧道入口的距离称为适应距离 d ， $d=(h-1.5)/\tan 10^\circ$ ，算得 $d \approx 32.3 \text{ m}$ 。

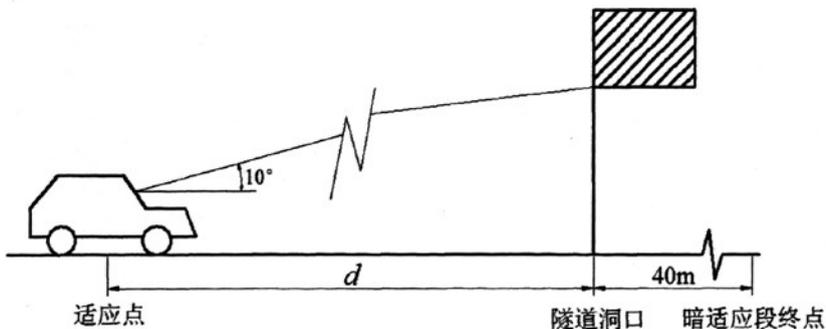


图 4.3 暗适应距离

暗适应终点的确定可参照DIALux中进行的自然光指数计算。某点的自然光指数是指：在同样无阳光直射的天空（即阴天）下，室内或半封闭空间内某点的自然光照度与室外无遮挡情况下的该点自然光照度之比。自然光对隧道内亮度的影响情况如下图所示：

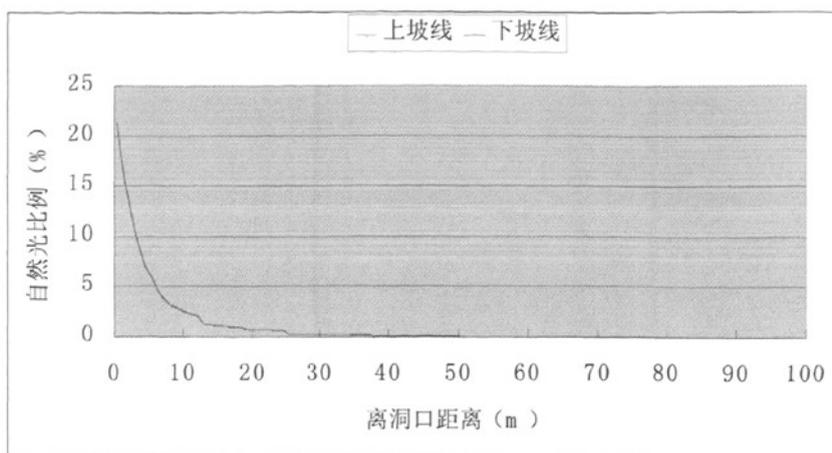


图 4.4 自然光对隧道内部路面照度的影响

由上图，因为洞门朝向相差不大，上下坡线之间自然光影响比率的差别很小，两条函数线几乎重合，隧道内距离入口5~10m处，自然光对隧道照明亮度的影响占5%左右，相对人工照明亮度还是不能忽略的，而在40m以外，自然光对隧道照明亮度的影响小于0.01%，已经可以忽略不计，可以做为暗适应距离的终点。

参考PIARC（国际公路协会）给出的亮度折减率—暗适应时间曲线^[33]，如下图4.5所示。可以看出，亮度折减率越小，保持一定视力时所需要的暗适应时间越长。

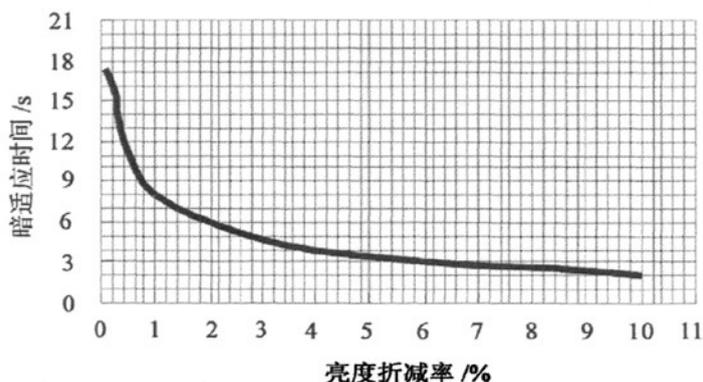


图4.5 PIARC给出的亮度折减率—暗适应时间曲线

驾驶员从适应点运行至隧道内40m的位置，其暗适应距离 $s=72.3\text{m}$ ，再参照表4.1取 $k=0.035$ ，对照上图4.5知暗适应时长约4.3s，可计算得出该条件下的限制车速值为60km/h。雅泸高速设计时速为80km/h，应该在洞口接近段设置固定限速标志、警示牌等以实现降速。

实际上车速在公路隧道照明中也是个极为敏感的参数，对整个照明系统的投资与营运电费影响很大，日本东京湾海底隧道曾做过详细比较^[17]，如其他参数相同，仅是设计时速由80km/h提高到100km/h，其结果照明设备费提高60%~61%，

营运电耗提高 63%~66%。日本许多隧道实测结果也证明，通过隧道时，车速普遍下降 30%左右。这一现象对隧道照明影响很大，故 PIARC1995 报告建议，凡通行货车的公路隧道，计算行车速度不超过 80km/h。

但隧道进出口处的车速控制有别于一般路段，主要原因是隧道出入口处路面附着系数低，车辆制动距离增长，尤其是下坡路段，车辆在入口处制动容易产生车辆跑偏或“甩尾”。入口内的路面宽度一般都较连接路面宽度窄，并且两侧都是墙壁，若车辆跑偏或“甩尾”，更容易发生撞固定物的事故。所以上坡可以考虑用限速，但必须在车辆到达入口前一定距离内将车速降至理想水平，而下坡车辆惯性大，从上一章中也可看出车速比上坡段快，因此不应过分限速，还应主要从另一方面考虑，即提高洞内照明亮度与亮度折减率。

因此本文对于海子隧道入口段照明设计的意见是：对上坡段照明设计仍取 k 为 0.035，但入口段应限速 60km/h。下坡段则取主要措施为提高亮度折减率，如以 80km/h 的速度跑完暗适应距离 72.3m，则需时 3.3s，由图 4.5 可知应取 k 为 0.044，比规范所给值略大。

4.3 隧道安全照明曲线

按式(4.1)计算入口段亮度，对于洞外亮度，目前无实测值，仍按经验取 4000cd/m^2 ，可得上坡幅 $L_{th}=k \times L_{20}(S)=0.035 \times 4000=140\text{cd/m}^2$ ，。下坡幅 $L_{th}=k \times L_{20}(S)=0.044 \times 4000=176\text{cd/m}^2$ 。隧道中间段、过渡段及出口段的照明要求，文献^[27]的出发点多从设计路段的交通量与计算行车速度出发，下面逐一介绍：

4.3.1 中间段照明

根据文献^[27]，中间段照明亮度按表 4.3 取值：

表4.3 中间段照明亮度 L_{in}

计算行车速度 (km/h)	$L_{in}(\text{cd/m}^2)$	
	双车道单向交通 $N > 2400/\text{h}$	双车道单向交通 $N < 700/\text{h}$
100	9.0	4
80	4.5	2
60	2.5	1.5
40	1.5	1.5

4.3.2 过渡段照明

过渡段照明由 TR_1 、 TR_2 、 TR_3 三段组成，与之对应的亮度按下表4.4取值：

表4.4 过渡段照明亮度

照明段	TR ₁	TR ₂	TR ₃
亮度	$L_{TR1}=0.3L_{th}$	$L_{TR2}=0.1L_{th}$	$L_{TR1}=0.035L_{th}$

可知上坡段 $L_{TR1}=42\text{cd/m}^2$, $L_{TR2}=14\text{cd/m}^2$, $L_{TR3}=4.9\text{cd/m}^2$, 下坡段 $L_{TR1}=53\text{cd/m}^2$, $L_{TR2}=18\text{cd/m}^2$, $L_{TR3}=6.2\text{cd/m}^2$ 。

而过渡段各照明段的长度应按下表4.5计算

表4.5 过渡段长度 $D_{tr}(\text{m})$

计算行车速度 $V_t(\text{km/h})$	D_{tr1}	D_{tr2}	D_{tr3}	计算行车速度 $V_t(\text{km/h})$	D_{tr1}	D_{tr2}	D_{tr3}
100	106	111	167	60	44	67	100
80	72	89	133	40	26	44	67

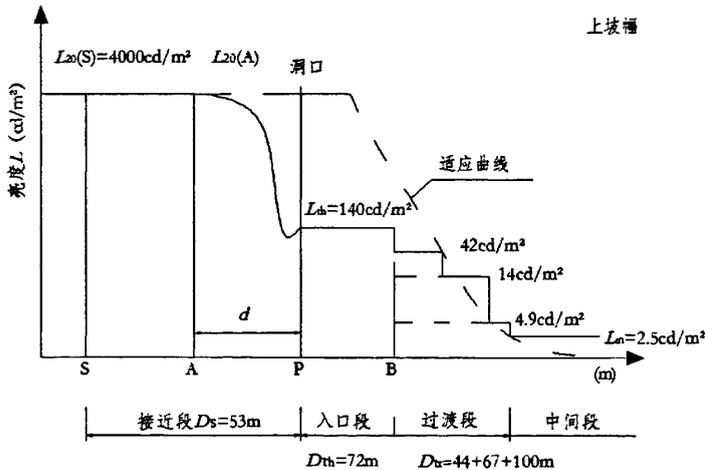
可得到上坡幅 D_{th1} 、 D_{th2} 、 D_{th3} 分别为44m、67m、100m，下坡幅 D_{th1} 、 D_{th2} 、 D_{th3} 分别为72m、89m、133m。

4.3.3 出口段照明

文献^[27]规定单向交通隧道中，出口段长度可取60m，照明亮度宜为中间段的5倍。根据上文计算结果可知为 22.5cd/m^2 。

4.3.4 安全照明亮度曲线

由以上计算可得设计要求的照明亮度曲线图如下：



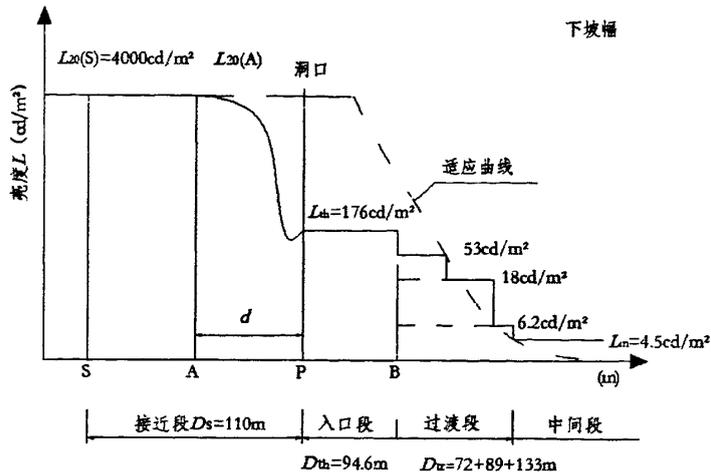


图 4.6 干海子隧道洞口段亮度要求示意图

4.4 不同时间下洞口的照度仿真

洞外照度是照明系统的设计基准之一，它的确定对工程投资和营运电费都有极大的影响，不容忽视。日本东京湾海底隧道曾于设计中做过详细比较：在其他条件（包括速度）相同的情况下，如洞外亮度分别设定为 4000cd/m^2 与 6000cd/m^2 ，则设备费用相差 34%，年电耗量相差达 30%^[17]。由于洞外的照度随季节和时间的变化而变化，下文将在 DIALux 下改变时间，进行照明模拟。

仍取上节中建立的隧道模型，日期的确定则按夏季、冬季的太阳位置取特征天，如 6 月 22 日（夏至）、12 月 22 日（冬至）等，对每天分别设置晴天、阴天。首先计算这两天早晚与正午的照度情况。得到适应段路面的水平照度如图 4.7 所示：图中横坐标为距洞口距离，+为洞内，-为洞外，下同。

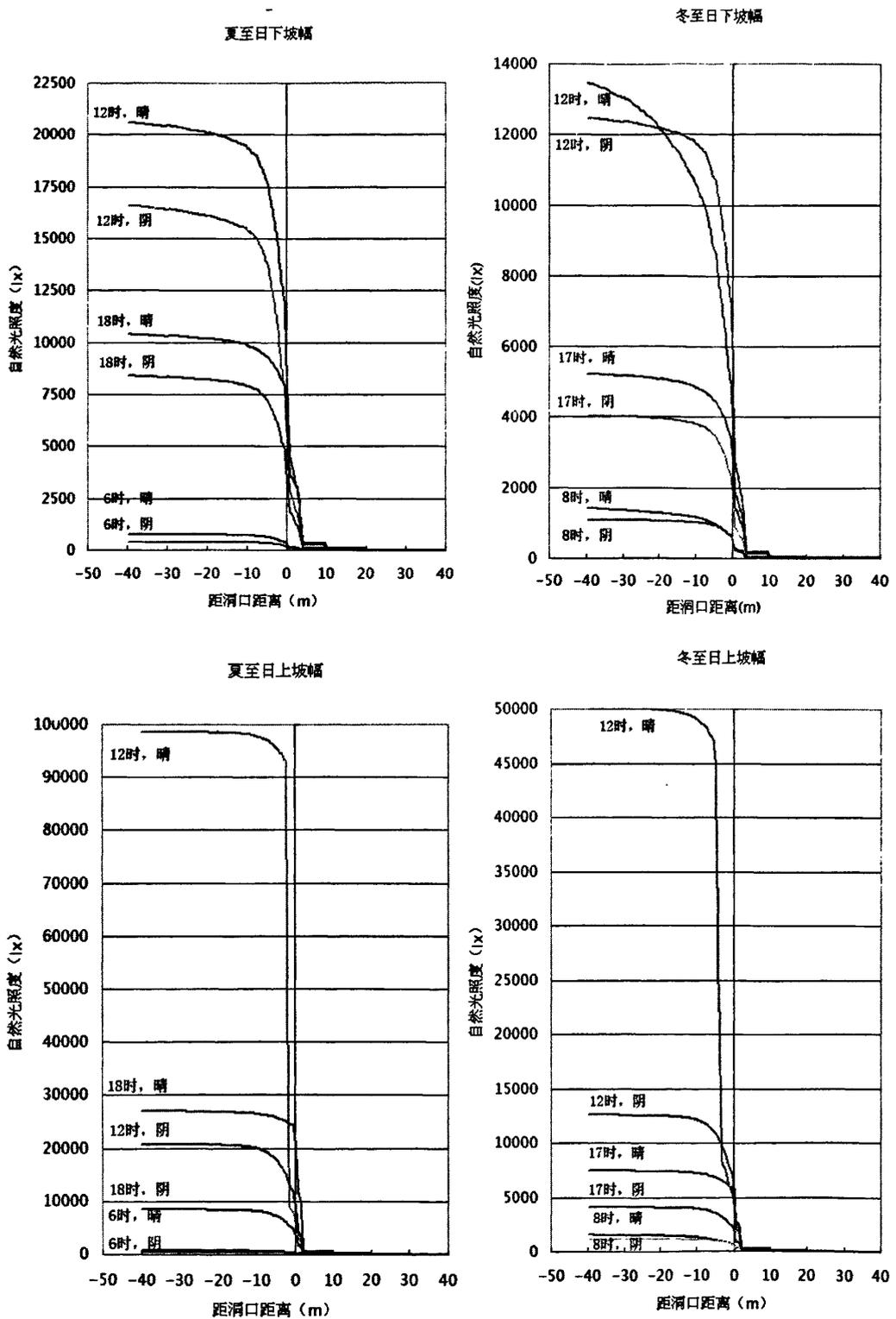


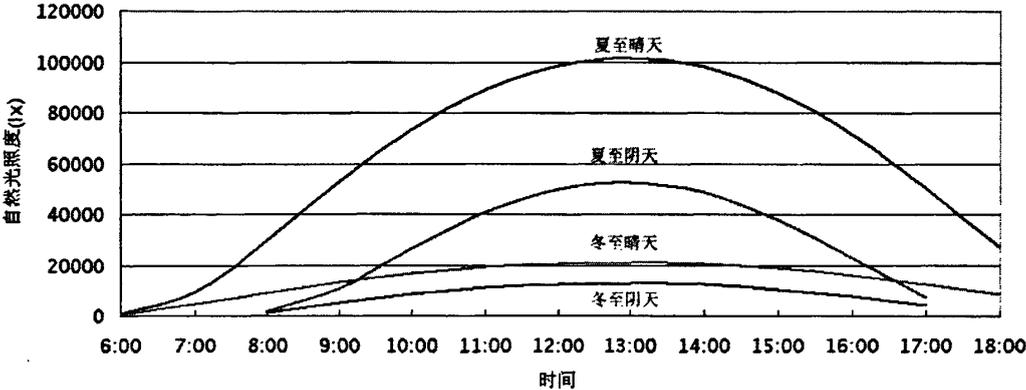
图4.7 洞口段照度变化图

从以上各图中可以看出：(1)在洞口附近自然光照度变化非常迅速，变化最快的地段是离洞口-5~5m处，以晴天时夏至日正午的上坡幅隧道为例，照度从近

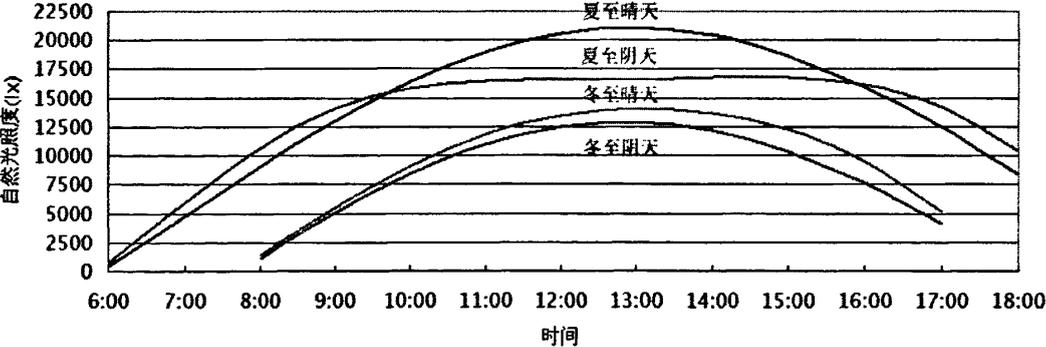
95800lx下降到425lx，在10m距离内照度就下降了近225倍。(2)隧道内距离洞口超过10m时，自然光照度受洞外亮度的影响已不大。(3)由于方位及周围环境的关系，上坡幅隧道洞口的照度要高于下坡幅。(4)洞外亮度随季节时间的变化很明显，另由于干海子隧道洞口朝向为北偏西，早晨接受自然光照射的时间较晚，以至于冬至日7:00时还没有自然光照射，因此本文中选取了8:00的灯光场景，而冬季昼短夜短，18:00时也无自然光，晚上则选取了17:00灯光场景。

为比较一天之内自然光照度随时间变化的情况，特选取距洞口-40m、0m 两点为研究对象，代表洞外与洞口的自然光照度，然后按照夏至 6:00~18:00，冬至 8:00~17:00，每隔 1h 建立 1 个灯光场景，得到照度变化如下图。

上坡幅洞外



下坡幅洞外



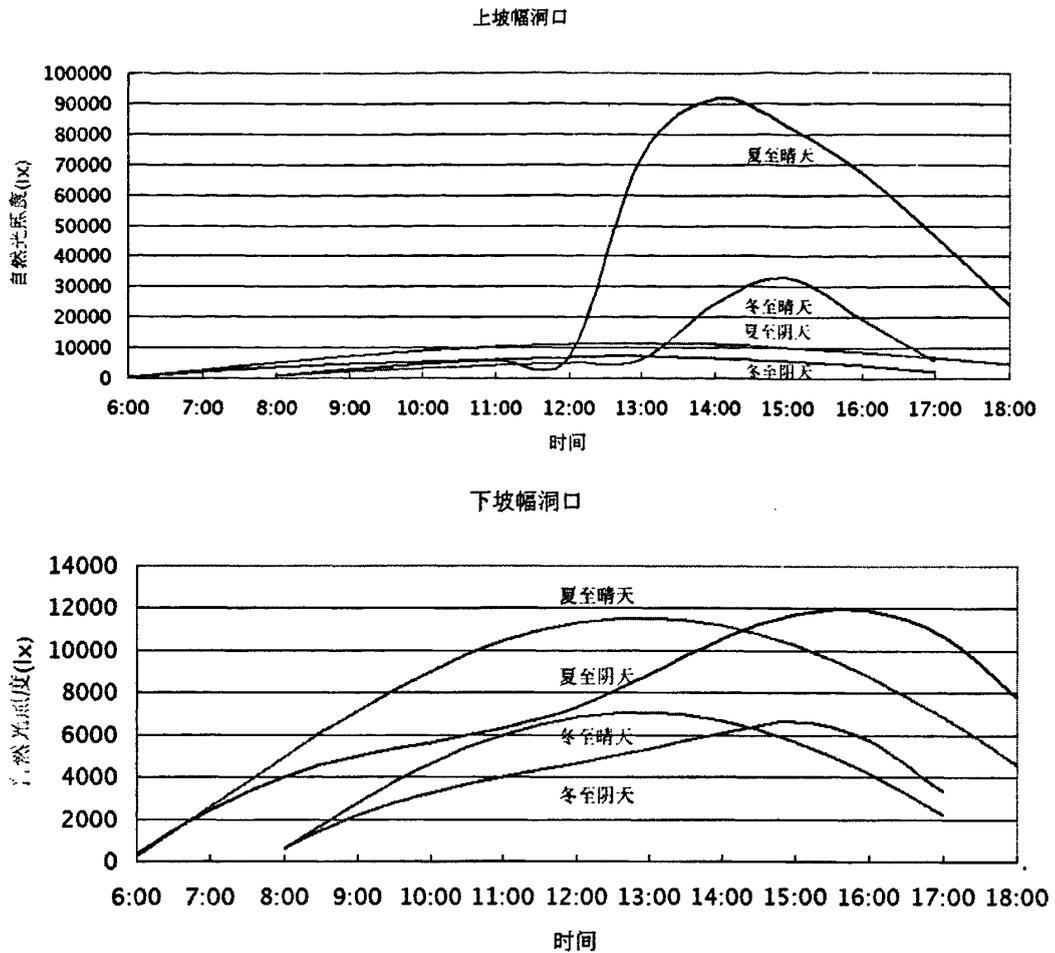


图 4.8 照度随时间的变化示意图

由上图可知：(1)晴天中午的照度要明显大于早晚，而阴光照度变化较小较平缓。(2)由于隧道朝向偏西，下午的照度要明显大于上午。(3)上坡幅洞口晴天时只在短时间能达到 10^5 的高照度，其他时间照度并不高。

针对以上分析结果，可提出以下建议：(1)应在隧道接近段应用减光设施，如：洞外植被、洞口棚洞、削竹或者喇叭口洞门等以消除进入隧道前后自然光照度变化过大的缺点(2)洞外亮度随时间与季节变化明显，应根据实际情况进行人工照明调节，而不是一味采用设计规定 $4000\sim 6000\text{cd/m}^2$ 作为洞外亮度。(3)晴天时上坡幅隧道洞口在 12:00~15:00 时段照度明显高于其他时段，此时应当加强入口段照明。

4.5 烟雾浓度与照明安全

4.5.1 烟雾浓度对透过率的影响

隧道内的烟雾主要来自于汽车尾气，而烟雾的存在也势必会对隧道内能见度产生不利的影响，这是因为烟雾中的悬浮物会对光线起到散射的作用：即把原来

向一个方向传播的光变成各个方向传播，使原来光线减弱的现象。不同的组成成份对不同波长光线的散射作用不同，比如雾粒子半径通常大于3~5 μm ，所以它对可见光的散射无选择性。雾越大，散射性越强，雾的颜色也就越白，也越不透明。由于雾粒子的影响，一部分光向司机方向散射，结果可以看到雾中出现的光幕。要通过光幕看到观察对象，司机要经过相当的努力才能做到，如果司机在雾中打开前大灯，会出现“白壁现象”。

因此烟雾对隧道照明的影响大部分是光线透过率的问题，在道路隧道中的空气里，或多或少的存在着污染物质。如汽车卷起的尘埃；柴油车引擎产生的油烟，氮氧货物所构成的烟雾，水蒸气及其凝结而成的雾等，其中最主要的是尘埃和烟。光通过污染空气时，入射光线中的一部分被吸收，一部分被散射，其余部分得以通过。这三部分之和等于入射光通，分别把这三部分光通量和入射光通量之比称为吸收系数 α 、反光系数 ρ 和透光系数 τ 。显然 $\alpha+\beta+\tau=1$ ，所以 τ 是小于1的系数。在道路隧道中，为了描述光透过空气的能力，用 E 、 E_0 分别表示同一光源所发出的光线、通过100m的污浊空气和清洁空气后的照度，用 τ_{100} 表示光通过100m的透过率，则：

$$\tau_{100} = \frac{E}{E_0} \quad (4.3)$$

行驶速度不同时，对 τ_{100} 有不同的要求，PIARC提出^[44]：

$$V=80\text{km/h 时， } \tau_{100} = 0.6$$

$$V=60\text{km/h 时， } \tau_{100} = 0.48$$

$$V=40\text{km/h 时， } \tau_{100} = 0.4$$

并指出 $\tau_{100} < 0.3$ 是不允许的。而烟雾浓度作为烟雾对空气污染程度的一种度量。也往往是通过测定光线在烟雾中的透过率来确定的。透过率 τ 、烟雾的厚度 L (m)和烟雾浓度 $k(\text{m}^{-1})$ 之间的关系为：

$$\tau = \exp(-kL) \quad (4.4)$$

$$k = -\frac{\ln \tau}{L} \quad (4.5)$$

取 $L=100\text{m}$ ，确定 τ_{100} 后确定 k ，并用 K 代替 k ，则：

$$K = -\frac{\ln \tau_{100}}{100} \quad (4.6)$$

式(4.6)中： K 为烟雾浓度， m^{-1} ； τ_{100} 为100m厚烟雾的光线透过率。由式(4.6)可见，雾浓度是通过测定100m厚烟雾的光线透过率来确定的，所以，有人也将烟雾浓度叫100m透过率。但应注意烟雾浓度和100m透过率在物理概念上和数值上都不相同。本文4.2.3节提出对上坡限速60km/h，下坡幅限速80km/h，将对应的 τ_{100} 代入式(4.6)，可得上下坡幅保证光线透过率的烟雾浓度分别为 0.0073m^{-1}

与 0.0051m^{-1} 。

文献^[27]中 3.3.3 条规定：采用钠灯光源时，烟雾设计浓度应按下表 4.6 取值：

表 4.6 烟雾设计浓度 K

计算行车速度 (km/h)	100	80	60	40
$K(\text{m}^{-1})$	0.0065	0.0070	0.0075	0.0090

可见规范用值仍不能保证 PIARC 的光线透过率要求，因此下文分析中将控制上坡幅 K 值低于 0.0073m^{-1} ，下坡幅 K 值低于 0.0051m^{-1} 。

4.5.2 烟雾排放量计算模型的建立

文献^[27]中 3.4.4 条规定：烟雾排放量与需风量应按下式计算：

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_D} (N_m \times f_{m(VI)})$$

$$Q_{req(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} \quad (4.7)$$

式中： Q_{VI} 为隧道全长烟雾排放量， m^2/s ； $Q_{req(VI)}$ 为需风量 m^3/s ； q_{VI} 为烟雾基准排放量， $\text{m}^2/(\text{辆} \cdot \text{km})$ ，规范推荐取值为 2.5。 L 为行驶距离， n_D 为柴油车车型类别数， N_m 为相应车型的设计交通量，辆/h。

其他系数分别为： $f_{a(VI)}$ 为考虑烟雾的车况系数； f_d 为车密度系数， $f_{h(VI)}$ 为考虑烟雾的海拔高度系数， $f_{iv(VI)}$ 为考虑烟雾的纵坡—车速系数， $f_{m(VI)}$ 为考虑烟雾的车型系数。对于以上各系数，规范都给出了明确的取值方法，但对于 $f_{iv(VI)}$ ：考虑烟雾的纵坡—车速系数，规范指出按下表 4.7 取值：

表 4.7 考虑烟雾的纵坡—车速系数 $f_{iv(VI)}$

$i(\%)$ $V_I(\text{km/h})$	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
80	0.3	0.4	0.55	0.8	1.3	2.6	—	—	—
70	0.3	0.4	0.55	0.8	1.1	1.8	3.1	—	—
60	0.3	0.4	0.55	0.75	1.0	1.45	2.2	—	—
50	0.3	0.4	0.55	0.75	1.0	1.45	2.2	—	—
40	0.3	0.4	0.55	0.7	0.85	1.1	1.45	2.2	—
30	0.3	0.4	0.5	0.6	0.72	0.9	1.1	1.45	2.0
10~20	0.3	0.36	0.4	0.5	0.6	0.72	0.85	1.03	1.25

可以看到：车速为 80km/h 、纵坡为 1% 以上及车速为 $50\sim 80\text{km/h}$ 、纵坡为 2% 以上等工况对应的考虑烟雾的纵坡—车速系数 $f_{iv(VI)}$ 缺值。而实际上这些工况是大量存在的。通风计算中如果遇到这些工况，普遍的做法是采用外推法来取 $f_{iv(VI)}$ 值，具体推导也因人而异，有的按线性推导，有的按多项式推导，有的按抛物线

推导等等，其结果有的相差数倍之多。在一些上坡隧道通风计算中，这些工况求得的需风量往往是控制需风量，那么 $f_{iv(VI)}$ 不同的取值必然影响最终的通风计算结果。本文中两隧道上坡幅纵坡度 3%，设计速度 60km/h，无法得到该值。因此考虑直接通过对发动机的燃烧过程进行分析，计算车辆的烟雾排放基准量。

显然规范推荐 $q_{V1}=2.5$ 是当其所考虑的因素均为理想状况时，即各系数均取 1 时的 q_{V1} 值。若将 q_{V1} 与 $f_{iv(VI)}$ 的乘积定义为 q_V ，则 q_V 表示除 $f_{iv(VI)}$ 外其它系数都取 1 时的烟雾排放量。其物理意义是：当工况为在高速公路上，车速 60km/h，车型为中型货车时，单位车辆行走 1km 所排放的烟雾浓度 k 为 1m^{-1} 的烟雾体积。因为 q_V 中考虑了纵坡的因素，所以如果能够通过某种方法求得干海子隧道上坡幅路线的 q_V 值，则可通过 q_V/q_{V1} 求得纵坡度 3% 下的 $f_{iv(VI)}$ 值，又因为干海子隧道平面线形为圆曲线，车辆上坡的同时还有转弯，因此 q_V 中也包含了平面线形的影响因素。

柴油车烟雾排放量远远大于汽油车（一般超过 30~80 倍），所以研究烟雾基准排放量时，应选择柴油车为研究对象。柴油燃烧后向大气排放的物质既有完全燃烧产物 CO_2 和 H_2O ，又有不完全燃烧产物 CO 、 HC 、自由 C 以及残余 O_2 、 N_2 等，且自由 C 含量较高。根据燃烧化学反应平衡原理^[46]，1kg 燃料燃烧后气态产物的总量为：

$$M = M_{\text{CO}} + M_{\text{CO}_2} + M_{\text{H}_2\text{O}} + M_{\text{C}} = M_{\text{O}_2} + M_{\text{N}_2} = \frac{g_{\text{C}}}{12} + \frac{g_{\text{H}}}{2} + \phi_2 \frac{g_{\text{C}}}{24} + \alpha L_0 - 0.21 L_0 \quad (4.8)$$

式中 M_{CO} 、 M_{CO_2} 、 $M_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 M_{C} 、 M_{O_2} 、 M_{N_2} 为 1kg 燃料燃烧后生成 CO 、 CO_2 、 H_2O 、 C 、 O_2 、 N_2 的千克摩尔数，单位为 mol/kg。

令： $M_{\text{CO}} = \phi_2 g_{\text{C}} / 12$ ； $M_{\text{CO}_2} = (1 - \phi_1 - \phi_2) g_{\text{C}} / 12$ ； $M_{\text{C}} = \phi_1 g_{\text{C}} / 12$ ； $M_{\text{H}_2\text{O}} = g_{\text{H}} / 2$ ；

$M_{\text{N}_2} = 0.79 \alpha L_0$ ； $M_{\text{O}_2} = 0.21(\alpha - 1)L_0 + \frac{1}{2} \phi_2 \frac{g_{\text{C}}}{12} + \phi_1 \frac{g_{\text{C}}}{12}$ 。其中， g_{C} 为 1kg 燃料中碳的含量，kg； g_{H} 为 1kg 燃料中氢的含量，kg； ϕ_1 为碳元素中以自由碳状态排出的百分比； ϕ_2 为碳元素中燃烧转化成 CO 的百分比；

另外， α 为过量空气系数，指燃烧 1kg 燃料所实际供给的空气质量与完全燃烧 1kg 燃料所需的理论空气质量之比； L_0 为理论空燃比，指燃料进行完全燃烧时所需的空气量和燃料的质量之比，一般取 14.7。

将 $L_0 = \frac{1}{0.21} (\frac{g_{\text{C}}}{12} + \frac{g_{\text{H}}}{4})$ 代入式 4.8 中最后一项，可得：

$$M = \frac{g_{\text{H}}}{4} + \phi_2 \frac{g_{\text{C}}}{24} + \alpha L_0 \quad (4.9)$$

由于液体燃料体积与参加燃烧的空气体积相比极小，可以略去不计，则燃烧前的工质数量为空气的千克摩尔数值 $L = \alpha L_0$ 。在柴油机的排气中 CO 的含量很低，可以忽略不计，则 $\phi_2 \approx 0$ 。于是，燃烧前后工质的分子量变更系数 β 为：

$$\beta = \frac{M}{L} = 1 + \frac{g_H}{4\alpha L_0} \quad (4.10)$$

依据H与C个数比可推出1kg柴油中氢含量为 $g_H=0.125\sim 0.135\text{kg}$ ，这里取 $g_H=0.130\text{kg}$ 。

这样只要测得单位里程的燃油消耗量 m_f 和过量空气系数 α ，就可以得到排气的流量：

$$G_{\text{reth}} = m_f \alpha L_0 \left(1 + \frac{g_H}{4\alpha L_0} \right) / 1.29 \quad (4.11)$$

式中， G_{reth} 为柴油机的排气流量， m^3/km ； m_f 为单位里程的燃油消耗量， L/km ；另外，按照文献^[17]规定，隧道内空气中CO浓度为200ppm。发动机台架模拟试验证明，在该CO浓度环境下污染进气时，与自然环境进气相比，在低速、低负荷时，影响不太明显，高负荷时影响显著；高速时，各种负荷状态下都有较显著的影响。隧道内污染环境进气与自然环境进气相比，柴油机烟雾排放量平均增长约15%~20%^[46]。鉴于本文中货车的载荷与速度并不高，因此仅假设其增加了15%。最终得到的隧道环境中，单位里程的烟雾排放量计算公式为：

$$q_v = 1.15 m_f \alpha L_0 \left(1 + \frac{0.134}{4\alpha L_0} \right) k / 1.29 = 0.891 m_f \alpha L_0 \left(1 + \frac{0.134}{4\alpha L_0} \right) k \quad (4.12)$$

4.5.3 烟雾排放量的计算

结合前文中汽车动力学模型，选取干海子隧道上坡幅($R=620\text{m}$, $i=2.7\%$)进行 q_v 计算。为比较平面线形的影响，考虑加入上文的线形方案四($R=740\text{m}$, $i=2.3\%$)；又为与规范指定的烟雾基准排放量相比较，再加入 $R=620\text{m}$ 的平坡路线方案，一共三个方案做同等条件的分析。各方案下均选取车型为东风EQ151，以60km/h的速度等速通过隧道。

对于 α 与 k 的取值，应由烟度计直接采样连续检测尾气的烟雾浓度 k ，五气分析仪连续测定过量空气系数 α ，文献^[46]中作者随机挑选了正常运营的东风EQ151车型进行了实车道路运行实验，使车辆以60km/h的速度等速运行500m，连续检测其排放烟雾的过量空气系数 α 与烟雾浓度 k 。实测得出了东风EQ151在平坡下 $\alpha=3.503$ ， $k=0.33$ ，纵坡为2.4%时 $\alpha=4.904$ ， $k=0.462$ 。

文献^[48]通过大规模野外油耗实验对理论油耗模型进行标定，建立了东风EQ151的理论油耗模型，通过回归分析，建立该车型的油耗计算公式如下：

$$m_f' = 2.857 + 3.113 \times 10^{-5} \text{RPM} + 3.674 \times 10^{-2} P + 1.25 \times 10^{-5} \text{RPM} \cdot P \quad (4.13)$$

m_f' 为单位时间油耗，单位为 ml/s ，因三个方案车速均为60km/h，可得转换式 $m_f=0.06m_f'$ 。

RPM 为发动机转速，单位为转/min； P 为发动机输出功率，单位为

HP(1HP=0.746KW)。

按照上述条件在Adams中进行模拟仿真，可得RPM及P的变化情况如下图所示：

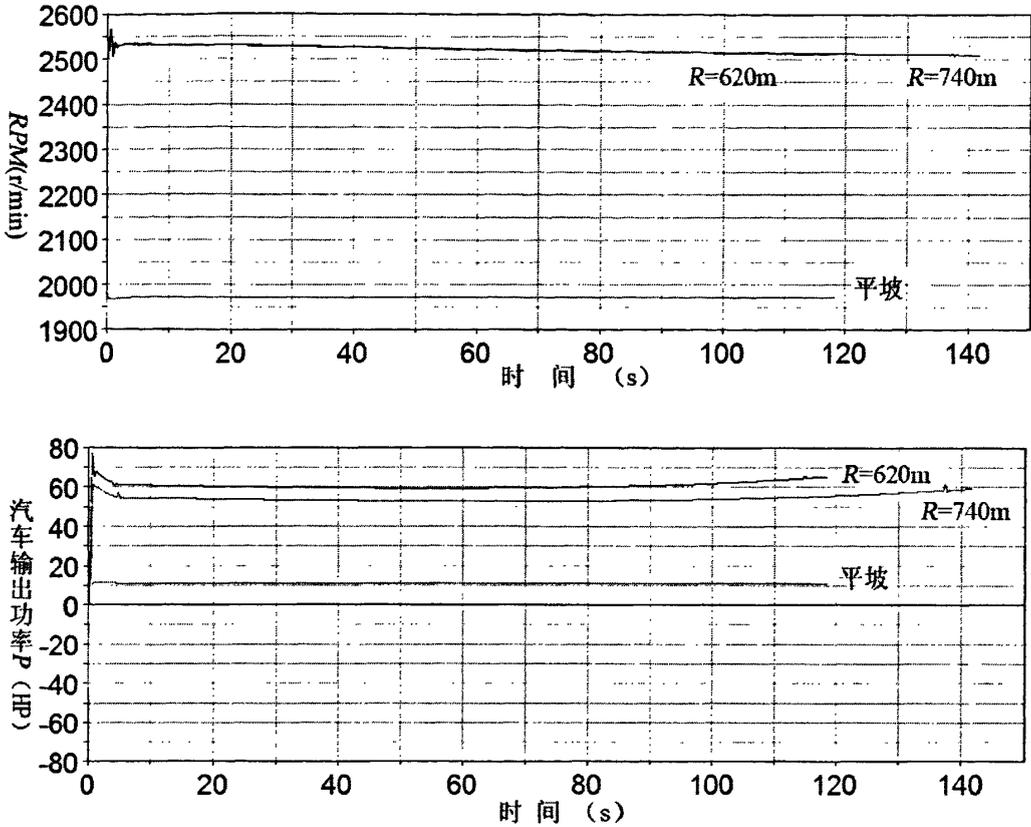


图 4.9 车辆运行时的转速与功率

从仿真输出结果看，虽然汽车在稳定工况下运行，但发动机参数仍有一定波动，鉴于波动幅度不大，故取其连续积分平均值以方便计算。现取发动机参数的平均值并通过式(4.12)、(4.13)计算得出的 m_f 、 q_v 列于下表

表 4.8 各方案下车辆烟雾排放量计算表

平均值	原方案(R=620m)	方案四(R=740m)	平坡方案(R=620m)
RPM(r/min)	2522.4	2520.9	1971.4
P(HP)	60.6	54.1	10.8
m_f (L/km)	0.424	0.398	0.215
q_v (m ² /km.veh)	11.03	10.70	2.83

由上表可知，当考虑平面线形因素时，同为平坡的R=620m方案与直线线路的规范推荐值相比较，曲线方案下的烟雾排放量增长了13.2%，而同为上坡的原

方案与方案四相比较，原方案下的烟雾排放量增长了3%。可见烟雾排放量也受平面线型的影响，曲线路段耗油量与烟雾排放量均比直线段要大，分析其原因，应该是有一部分动力损耗于转向机构的内部摩擦。同时，汽车曲线行驶时，转向轮（一般为前轮）会产生一个至少与行驶速度的4次方成比例增长的曲线行驶阻力。由于不断地转向，驱动轮还要产生转动速度差，这就要通过差速器的调节，才能保证车辆整体平稳前进，而在调节车轮转速差的过程中，又要消耗一部分动力。因此，与直线行驶相比，曲线行驶使车辆的动力消耗增加，引起烟雾排放量的增加。但对原方案加大半径对烟雾排放量的影响不大，这应该是由于半径增量不大和平面线形因素本身的敏感度不高造成的

当考虑纵断面因素时，原方案与方案四分别是平坡方案烟雾排放量的3.90与3.78倍，可以此值代替表4.7中缺失的 $f_{iv(VI)}$ 系数。

另根据文献^[49]中发动机台架实验和汽车道路实验得出的结论：如果纵坡度不变，则车速每升高10km/h，烟雾排放量增加20%~25%。则根据表4.7，原方案下的 $f_{iv(VI)}$ 应为3.4，可见文献^[49]的结论与前面计算结果差距不大，考虑到还有转弯的因素，本文中仍取3.90作为原方案计算用 $f_{iv(VI)}$ 。

最后通过式(4.7)计算干海子隧道全长的烟雾排放量与需风量，（交通量数据来自项目前期工可研究报告）对于下坡幅，全长烟雾排放量（ m^2/s ）为：

$$\begin{aligned} Q_{VI} &= \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_D} (N_m \times f_{m(VI)}) \\ &= \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times 2.5 \times 1 \times 0.75 \times 1.42 \times 0.4 \times 1889 \times 544 \\ &= 0.304 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

需风量(m^3/s)为：

$$Q_{req(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} = \frac{0.304}{0.0051} = 59.61 \text{ m}^3/\text{s}$$

上坡幅全长烟雾排放量（ m^2/s ）为：

$$\begin{aligned} Q_{VI} &= \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{iv(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_D} (N_m \times f_{m(VI)}) \\ &= \frac{1}{3.6 \times 10^6} \times 2.5 \times 1 \times 1 \times 1.42 \times 3.9 \times 1889 \times 544 \\ &= 3.953 \text{ m}^2/\text{s} \end{aligned}$$

需风量(m^3/s)为：

$$Q_{req(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} = \frac{3.953}{0.0073} = 541.51 m^3/s$$

只要保证了上式算得的需风量，使得隧道内烟雾浓度得到控制，就能保证光线在烟雾中的透过率，进而保证行车安全所需的可见度和隧道内行车的舒适度。

4.6 对洞内人工照明的要求

4.6.1 亮度均匀度

良好的视功能不仅要求有一个较好的平均亮度，还要求路面上的平均亮度与最小亮度之间不能相差太大。如果视场中亮度差太大的话，亮的部分会形成一个眩光源，而且亮暗的变化会带来一定的频闪效应，从而影响视觉，人眼的视觉效果和视觉疲劳会明显变差和加重。

总体亮度均匀度 U_0 是指隧道内部段路面上最小亮度和平均亮度的比值，纵向均匀度 U_1 是指在车道轴线上最小路面亮度和最大路面亮度的比值。如果路面上连续、反复出现亮带和暗带，即“斑马效应”，会使得行驶者感到烦躁。这个问题涉及到人的心理，会危及到道路安全。

文献^[27]对隧道内部段照明的亮度均匀度的推荐最小值如表 4.9 所示：

表 4.9 内部段照明的总体亮度均匀度 U_0 和纵向均匀度 U_1

路面亮度总均匀度 U_0			路面纵向均匀度 U_1		
设计交通量 N (辆/h)		U_0	设计交通量 N (辆/h)		U_1
双车道单向交通	双车道双向交通		双车道单向交通	双车道双向交通	
≥ 2400	≥ 1300	0.4	≥ 2400	≥ 1300	0.6~0.7
≤ 700	≤ 360	0.3	≤ 700	≤ 360	0.5

4.6.2 眩光控制

眩光的形成是由于视场中有极高的亮度或亮度对比存在，而使视功能下降或眼睛感到不舒适。眩光会使人对障碍物的辨认能力下降，危及行车安全。因此隧道照明灯具应采用截光型，采取消去直射和反射眩光的技术措施，形成漫反射，使光线十分柔和地进入人的视野。

在干海子隧道中，隧道照明灯具、隧道出口时外面的高亮度都可能产生眩光，所以应尽量避免用高亮度大光源进行照明。国际上一般采用国际照明委员会提出的相对阈值来衡量因眩光而造成的视功能下降，欧盟标准委员会的隧道照明标准中规定：在白天时隧道阈值段和内部段以及夜间的整个隧道，其相对阈值增量(TI)必须小于 15%。

当背景亮度范围为 $0.05\text{cd/m}^2 < L_b < 5\text{cd/m}^2$ 时, TI 的计算公式近似为:

$$TI = \frac{65L_v}{(L_{av})^{0.8}} \quad (4.14)$$

其中, L_{av} 为路面平均亮度。 L_v 为等效光幕亮度, 即由眩光源产生的。

4.6.3 频闪效应的防止

频闪是指在较长的隧道中, 由于照明器排列的不连续, 使司机不断受到明暗刺激而产生烦乱, 它与明暗的亮度变化、明暗变化的频率、频闪的总时间有关。这三者与所使用灯具的光学特性、车辆的行进速度、照明器安装间距、隧道长度有关。一般而言, 应避免频闪的频率在 2.5Hz 到 15Hz 之间。

对于设计时速 80km/h 的隧道, 则应控制照明器间距大于 8.9m 或小于 1.5m, 以防止频闪对驾驶者带来的不适。

4.6.4 应急照明

隧道照明设计中还应包括应急照明。尤其长大隧道, 更应考虑因事故停电后紧急疏散。应急照明应使用独立于主照明的电源供电, 在停电后自动接入, 启动应急照明。应急照明的照度一般为正常照明的 1/5, 如果是长时间停电, 还应提供入口处的信号照明, 以警告驾驶员放慢车速。同时应设置诱导照明, 在隧道内壁上等间距布灯, 指明隧道内壁位置和隧道走向。

4.7 本章小结

本章对隧道入口段亮度的折减与人眼适应情况进行了研究, 提出了适合干海子隧道入口段的亮度折减率(上坡幅 k 为 0.035, 下坡幅 k 为 0.044)与其他注意措施; 通过 DIALux 软件建立了隧道洞口段照度模型, 并分析了不同季节与时刻下洞口照度的变化情况; 分析了弯坡路段下的车辆排烟量, 结合规范相应公式给出了干海子隧道中保证安全可见度的通风要求。并对洞内人工照明提出了相应要求。

第五章 结论与展望

5.1 主要研究结论

本文在小半径螺旋隧道安全线形与照明方面取得的研究结论主要是以下五个方面：

1. 分析了在路线设计方面有关安全的各类定量指标，提出了一个不加宽的平曲线半径方案和三个加宽小半径曲线方案，并验证了在螺旋隧道中，可通过加宽隧道横断面以弥补平曲线半径太小而造成停车视距不足的问题。

2. 结合基于 Adams 的计算机仿真，建立汽车系统动力学模型、道路模型与驾驶员模型。通过模拟汽车在各路线方案上的运行，获得了车辆运动规律数据。

模拟中发现各方案均存在小客车运行速度过快导致停车视距不足，横向力系数过大的现象。对于小半径曲线方案，尽管车辆在其入口段减速更快，但这种减速仍属于安全的范围。且平面线形的曲线半径对小客车与货车的速度差影响并不大。但小半径方案对驾驶员的操作与反应要求更高，对安全不利。最后，为路线方案的优化选择提供了安全方面的依据。

为保证安全停车视距，除加宽隧道内轮廓横断面外，还应限制隧道内小客车速度在 80km/h 以下，货车速度在 60km/h 以下。

3. 对隧道入口段亮度的折减和人眼适应情况进行了研究，提出了干海子隧道入口段的安全亮度折减率 k 和车速要求，隧道上坡幅 k 为 0.035，隧道下坡幅 k 应采用高于规范要求的亮度折减率 0.044

隧道上坡幅应限制车速为 60km/h，考虑洞口限速对安全有一定影响，应在车辆到达洞口前一定距离内采取分段分级降速，逐步将车速降至理想水平外，具体可在洞口接近段设置固定限速标志、警示牌等以实现。

4. 通过 DIALux 对洞口周围环境及洞口段进行模拟仿真，分析了不同时间下自然光对洞口照度的影响并提出人工照明调光意见。

提出应在隧道接近段应用减光设施，如：洞外植被、洞口棚洞、削竹或者喇叭口洞门等以消除进入隧道前后自然光照度变化过大的缺点。指出洞外亮度随时间与季节变化明显，应根据实际情况进行人工照明调节，另晴天时上坡幅隧道洞口在 12:00~15:00 时段照度明显高于其他时段，此时应当加强入口段照明。

5. 针对弯坡段烟雾排放量采用规范方法无法计算的情况，根据柴油燃烧化学反应平衡原理，建立了烟雾排放量模型，并结合经验公式和 Adams 中得到的数据计算烟雾排放量，推导出弯坡路段车辆的烟雾排放量与保证透过率的需风量

5.2 有待进一步研究的问题

1. 在人车路系统的动力学模拟中，道路模型还只能在线形上进行模拟仿真，还不能建立道路的视景模型，模拟隧道内的虚拟环境。现在已经有软件可以实现道路模型纹理和材质的赋值，但相应的驾驶员模型还没有研究，一般采用抽调驾驶员在虚拟环境中进行操作的方法。但本文限于设备的缺乏及作者水平，还无法考虑虚拟隧道环境对线形及车辆运行的影响。

2. 汽车模型可以进一步细化，然后建立车辆的模型库，使模型库中的车辆具有各种车型，不仅有设计用的代表性车型，还应该有拖挂车、汽车列车等等现在经常出现在道路上的车辆。所以原来有代表性车型也应该随之变化，线形设计指标也应该变化以适应车辆的变化。

参考文献

- [1] 交通部规划研究院. 国家高速公路网规划. 北京: 人民交通出版社, 2004-09.
- [2] 史小丽. 基于交通安全的西部公路线形设计标准研究. [长安大学硕士学位论文]. 2005-05.
- [3] 游宏, 罗俊, 高建平. 公路交通安全系统化管理模式研究. 重庆交通大学学报, 第 26 卷第 5 期, 2007-10.
- [4] 杨华仕, 许有俊. 公路隧道线形设计. 公路, 2007 年 4 月第 4 期.
- [5] Federal Highway Administration, Interactive Highway Safety Design Model(IHSDM). www.tfhrc.gov/safety/ihsdm/ihsdm.htm, 2005-07.
- [6] 陈永胜, 刘小明. 道路安全设计理论体系回顾与展望, 北京工业大学学报, 2001, 27(1), 1-3.
- [7] 梁夏, 郭忠印, 方守恩. 道路线形与道路安全性关系的统计分析, 同济大学学报, 2002, 30(2), 203~206.
- [8] 郭忠印, 方守恩等编著. 道路安全工程. 人民交通出版社, 2004.
- [9] Safety Standards of Road Design and Redesign. The European Commission Under the Transport RTD Program of the Fourth Framework Programme. 2002-11.
- [10] 姚思国, 刘清泉, 和松等. 几个高速公路隧道交通事故分析和对策. 2000 年道路工程学会学术交流会论文集. 北京: 人民交通出版社, 2000. 26-31.
- [11] 宋晓春, 孙国华, 鲍国平. 浙江省高速公路隧道交通安全情况调查及对策探讨. “国际隧道研讨会暨公路建设技术交流大会”论文集. 北京: 人民交通出版社, 2002. 763-769.
- [12] 沈艾中. 隧道交通事故多发的成因及预防措施. “国际隧道研讨会暨公路建设技术交流大会”论文集. 北京: 人民交通出版社, 2002. 770-774.
- [13] 叶飞, 苏臣宏. 公路隧道营运安全分析及对策. 现代隧道技术, 2003, 40(1): 31-33.
- [14] 胡锡岭, 陈立道. 城市道路隧道交通事故的分析. 中国市政工程, 2003(6)
- [15] 中华人民共和国交通部. 公路工程技术标准(JTG B01-2003)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [16] 中华人民共和国交通部. 公路路线设计规范(JTG D20-2006)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2006.
- [17] 中华人民共和国交通部. 公路隧道设计规范(JTG D70-2004)[S]. 北京: 人民

- 交通出版社，2004.
- [18] 中华人民共和国交通部. 公路项目安全性评价指南(JTG/T B05-2004)[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [19] 林宣财. 公路隧道洞口平面线形设计有关问题的探讨. 公路. 2007年3月第3期.
- [20] 赵永平, 杨少伟, 吴华金等. 山区高速公路螺旋展线隧道内平曲线最小半径. 长安大学学报. 第27卷第6期, 2007-11.
- [21] 李玉文. 公路隧道设计纵坡探讨. 公路. 2002年11月第11期.
- [22] Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute. Reducing Barriers to Use of High Efficiency Lighting Systems . US Department of Energy. 2003-01-22.
- [23] H. Mashimo. State of the Road Tunnel Safety Technology in Japan. Public Works Research Institute, Independent Administrative Institution, Tsukuba, Japan.
- [24] CIE. Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic[R], 1995, 115.
- [25] Lighting Applications-Tunnel Lighting. CEN report, No CR14380:2003.
- [26] 刘宾, 王爱英, 秦鑫. 常用照明设计软件简介及比较. 灯与照明, 第29卷第3期, 2005-09.
- [27] 中华人民共和国交通部. 公路隧道通风照明设计规范(JTJ026. 1-1999)[S]. 北京: 人民交通出版社, 1999.
- [28] 项小强, 吴德兴, 李玉文. 道路与隧道照明分析(R&TLAS)系统的研制. 公路, 1999年10月第10期.
- [29] 屈志豪, 赵清碧, 刘相华. 用环境简图法测试隧道洞外亮度 $L_{20}(S)$, 公路交通技术, 2004年10月第5期.
- [30] 涂耘, 王小军, 周健. 福建公路隧道洞外亮度 $L_{20}(S)$ 研究. 公路交通技术, 2007年9月增刊.
- [31] 杜志刚, 潘晓东, 郭雪斌. 公路隧道进出口行车安全的视觉适应指标. 华南理工大学学报, 第35卷第7期, 2007-07.
- [32] 郑桓, 王梦恕. 公路隧道照明新思路分析与探讨. 公路: 2007年11月第11期.
- [33] 马玉成, 孔令旗, 郭忠印. 隧道入口基于照明过渡的安全运营车速及控制对策. 山东交通学院学报, 第15卷第1期, 2007-03.
- [34] Jerry A Reagan. The Interactive Highway Safety Design Model: Designing for Safety by Analyzing Road Geometrics[M]. Washington: Federal Highway Administration. 1995.

- [35] Jaenam Chang, Effects of Traffic Condition(V/C) on Safety at Freeway Facility Sections[J]. Journal of Korean Society of Transportation, 1997, 17.
- [36] 张锐, 程建川编译. 直线长度对平曲线安全性的影响. 中外公路, 2004-04.
- [37] 杨少伟, 朱照宏. 道路勘测设计. 北京: 人民交通出版社, 2004-05.
- [38] Australian Transport Council (ATC). Australian Road Rules. The Federal Register of Legislative Instruments. 2008-01.
- [39] 关昌余. 美国公路设计理念和典型案例介绍. www.chinahighway.com.
- [40] 杨宏志, 许金良, 李建士. 基于计算机仿真的公路线形设计评价, 中国公路学报, 2005年1月第1期.
- [41] 李军, 邢俊文, 覃文洁等. Adams 实例教程: 北京理工大学出版社, 2002.
- [42] 余景顺, 林国涛, 苏永和. 基于运行安全的山区高速公路路线设计及实例. 公路, 2005年1月第1期.
- [43] 王琰, 孔令旗等. 基于运行安全的公路隧道进出口线形设计: 公路交通科技, 2008年3月第3期.
- [44] 王毅才. 隧道工程. 北京: 人民交通出版社, 2000-08.
- [45] 邹吉平, 庄振华. 基于日光分析的隧道照明研究与设计. 照明设计, 2007年第9期.
- [46] 王生昌, 刘浩学, 王贺武. 公路隧道柴油车烟雾基准排放量研究. 人类工效学 2004年12月第10卷第4期.
- [47] 刘浩学. 动态环境下汽车污染物排放及环境因素影响的研究. [长安大学博士学位论文]. 2002-10.
- [48] 章后忠, 潘玉丽, 程珊珊. 建立四类代表车型的理论油耗模型. 华东公路, 2002年12月第6期.
- [49] 王贺武, 刘浩学, 王生昌. 隧道内路面坡度和车速对车辆烟雾排放量影响的研究. 公路交通科技, Vol. 20 No. 5, 2003-10.
- [50] Staehelin J. Emission factors from road traffic from a tunnel study[J]. Atmos. Environ, 1998, 32(6): 999-1009.
- [51] Steven NR, Ute P, Tom D, et al. Gaseous emission from vehicles in a tunnel in vancouver. [J]. Air&Waste Manage. Assoc, 1998, 84(4): 604-615.
- [52] 李建士. 路线安全设计方法的研究和应用. [长安大学硕士学位论文]. 2004-02.

致 谢

本文是在吴从师教授、刘义虎教授级高工的悉心指导下完成的。我首先对恩师致以最衷心的感谢。两位恩师渊博的知识、严谨的治学态度、开阔的视野、为人师表的品学、孜孜不倦的教诲使我终身受益。正是在他们的悉心教导之下，我才得以进入螺旋隧道线形与照明安全的研究领域，为以后进一步学习打下了坚实的理论和实践基础，还要特别感谢两位恩师在生活上给予我的帮助和勉励。

恩师的教诲将永记于心中！

在平时的学习生活之中，我也得到了教研室黄生文教授、柳厚祥教授、刘辉教授以及徐泽沛老师、张庆彬老师等给予我的关心和指导，在此也向他们表示真挚的谢意！

感谢一起朝夕相处的好友们：李波、黎高辉、余志江、潘旭东、匡波、罗军、葛峰、张扬、李志雄、郭文、王有昌等，还有我的师弟：王智、鉴学升、潘隆武、李海宝。与你们真诚的友谊将是我一生最大的精神财富。

最后，感谢父母亲的理解和支持，是你们的支持和鼓励，激励着我不断前进。

感谢所有关心、爱护我的亲人和朋友！

附录 A（攻读硕士学位期间发表学术论文情况）

刘义虎，张天乐，张进华，吴从师. 基于安全停车视距的螺旋隧道圆曲线方案比选. [J]中外公路. (已录用，待刊 2009 年第 5 期)

附录 B（攻读学位期间参与课题目录）

四川省交通厅交通建设科技项目：高速公路螺旋型小半径曲线隧道风险预测与行车安全技术研究（编号 2006A24-56）

附表：

干海子隧道路线方案二道路特征文件数据表(R=600m)

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 <i>f</i>	右侧 <i>f</i>
0.000	0.000	0	8.75	0	0.65	0.65
20.000	0.033	-0.56	8.91	-0.00573	0.65	0.65
39.998	0.267	-1.12	9.07	-0.01147	0.65	0.65
59.988	0.900	-1.68	9.23	-0.0172	0.65	0.65
64.982	1.144	-1.82	9.24	-0.01864	0.65	0.65
84.749	2.516	-1.96	9.27	-0.02007	0.65	0.65
104.564	4.552	-2.52	9.27	-0.02007	0.65	0.65
124.300	7.245	-3.08	9.27	-0.02007	0.65	0.65
143.936	10.591	-3.64	9.27	-0.02007	0.65	0.65
163.450	14.588	-4.2	9.27	-0.02007	0.65	0.65
182.821	19.230	-4.76	9.27	-0.02007	0.65	0.65
202.026	24.512	-5.32	9.27	-0.02007	0.65	0.65
221.046	30.429	-5.88	9.27	-0.02007	0.65	0.65
239.860	36.974	-6.44	9.27	-0.02007	0.65	0.65
258.445	44.140	-7	9.27	-0.02007	0.65	0.65
276.782	51.919	-7.56	9.27	-0.02007	0.65	0.65
294.851	60.303	-8.12	9.27	-0.02007	0.65	0.65
312.632	69.281	-8.68	9.27	-0.02007	0.65	0.65
330.105	78.845	-9.24	9.27	-0.02007	0.65	0.65
347.251	88.983	-9.8	9.27	-0.02007	0.65	0.65
364.051	99.685	-10.36	9.27	-0.02007	0.65	0.65
380.486	110.939	-10.92	9.27	-0.02007	0.65	0.65
396.539	122.732	-11.48	9.27	-0.02007	0.65	0.65
412.191	135.052	-12.04	9.27	-0.02007	0.65	0.65
427.426	147.884	-12.6	9.27	-0.02007	0.65	0.65
442.227	161.215	-13.16	9.27	-0.02007	0.65	0.65
456.577	175.030	-13.72	9.27	-0.02007	0.65	0.65
470.460	189.313	-14.28	9.27	-0.02007	0.65	0.65
483.862	204.050	-14.84	9.27	-0.02007	0.65	0.65
496.767	219.223	-15.4	9.27	-0.02007	0.65	0.65

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 <i>f</i>	右侧 <i>f</i>
509.161	234.817	-15.96	9.27	-0.02007	0.65	0.65
521.031	250.813	-16.52	9.27	-0.02007	0.65	0.65
532.364	267.194	-17.08	9.27	-0.02007	0.65	0.65
543.146	283.942	-17.64	9.27	-0.02007	0.65	0.65
553.366	301.040	-18.2	9.27	-0.02007	0.65	0.65
563.014	318.466	-18.76	9.27	-0.02007	0.65	0.65
572.077	336.204	-19.32	9.27	-0.02007	0.65	0.65
580.547	354.233	-19.88	9.27	-0.02007	0.65	0.65
588.414	372.533	-20.44	9.27	-0.02007	0.65	0.65
595.669	391.084	-21	9.27	-0.02007	0.65	0.65
602.304	409.865	-21.56	9.27	-0.02007	0.65	0.65
608.312	428.856	-22.12	9.27	-0.02007	0.65	0.65
613.686	448.037	-22.68	9.27	-0.02007	0.65	0.65
618.421	467.385	-23.24	9.27	-0.02007	0.65	0.65
622.511	486.880	-23.8	9.27	-0.02007	0.65	0.65
625.951	506.499	-24.36	9.27	-0.02007	0.65	0.65
628.738	526.223	-24.92	9.27	-0.02007	0.65	0.65
630.869	546.027	-25.48	9.27	-0.02007	0.65	0.65
632.342	565.892	-26.04	9.27	-0.02007	0.65	0.65
633.154	585.794	-26.6	9.27	-0.02007	0.65	0.65
633.306	605.713	-27.16	9.27	-0.02007	0.65	0.65
632.796	625.625	-27.72	9.27	-0.02007	0.65	0.65
631.625	645.510	-28.28	9.27	-0.02007	0.65	0.65
629.795	665.345	-28.84	9.27	-0.02007	0.65	0.65
627.307	685.108	-29.4	9.27	-0.02007	0.65	0.65
624.165	704.778	-29.96	9.27	-0.02007	0.65	0.65
620.372	724.332	-30.52	9.27	-0.02007	0.65	0.65
615.931	743.750	-31.08	9.27	-0.02007	0.65	0.65
610.849	763.010	-31.64	9.27	-0.02007	0.65	0.65
605.130	782.090	-32.2	9.27	-0.02007	0.65	0.65
598.781	800.971	-32.76	9.27	-0.02007	0.65	0.65
591.808	819.630	-33.32	9.27	-0.02007	0.65	0.65
584.221	838.047	-33.88	9.27	-0.02007	0.65	0.65

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 f	右侧 f
576.026	856.202	-34.44	9.27	-0.02007	0.65	0.65
567.232	874.075	-35	9.27	-0.02007	0.65	0.65
557.851	891.647	-35.56	9.27	-0.02007	0.65	0.65
547.891	908.897	-36.12	9.27	-0.02007	0.65	0.65
537.364	925.807	-36.68	9.27	-0.02007	0.65	0.65
526.282	942.359	-37.24	9.27	-0.02007	0.65	0.65
514.656	958.533	-37.8	9.27	-0.02007	0.65	0.65
502.500	974.313	-38.36	9.27	-0.02007	0.65	0.65
489.827	989.680	-38.92	9.27	-0.02007	0.65	0.65
476.651	1004.619	-39.48	9.27	-0.02007	0.65	0.65
462.986	1019.111	-40.04	9.27	-0.02007	0.65	0.65
448.847	1033.143	-40.6	9.27	-0.02007	0.65	0.65
434.251	1046.697	-41.16	9.27	-0.02007	0.65	0.65
419.213	1059.759	-41.72	9.27	-0.02007	0.65	0.65
403.749	1072.315	-42.28	9.27	-0.02007	0.65	0.65
387.877	1084.350	-42.84	9.27	-0.02007	0.65	0.65
371.615	1095.852	-43.4	9.27	-0.02007	0.65	0.65
354.979	1106.808	-43.96	9.27	-0.02007	0.65	0.65
337.989	1117.206	-44.52	9.27	-0.02007	0.65	0.65
320.663	1127.034	-45.08	9.27	-0.02007	0.65	0.65
303.021	1136.281	-45.64	9.27	-0.02007	0.65	0.65
285.081	1144.938	-46.2	9.27	-0.02007	0.65	0.65
266.864	1152.994	-46.76	9.27	-0.02007	0.65	0.65
248.390	1160.442	-47.32	9.27	-0.02007	0.65	0.65
229.678	1167.272	-47.88	9.27	-0.02007	0.65	0.65
210.750	1173.477	-48.44	9.27	-0.02007	0.65	0.65
191.627	1179.050	-49	9.27	-0.02007	0.65	0.65
172.329	1183.986	-49.56	9.27	-0.02007	0.65	0.65
152.878	1188.278	-50.12	9.27	-0.02007	0.65	0.65
133.295	1191.922	-50.68	9.27	-0.02007	0.65	0.65
113.602	1194.915	-51.24	9.27	-0.02007	0.65	0.65
101.472	1196.427	-52	9.27	-0.01864	0.65	0.65
81.569	1198.392	-52.56	9.23	-0.0129	0.65	0.65

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 f	右侧 f
61.624	1199.875	-53.12	9.07	-0.00717	0.65	0.65
41.660	1201.074	-53.68	8.91	-0.00143	0.65	0.65
21.691	1202.177	-54.24	8.75	0	0.65	0.65

干海子隧道路线方案二道路特征文件数据表($R=620m$)

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 f	右侧 f
0.000	0.000	0	8.75	0	0.65	0.65
19.754	0.030	0.39	8.87	-0.00573	0.65	0.65
39.753	0.244	0.91	8.99	-0.01147	0.65	0.65
59.744	0.830	1.43	9.11	-0.0172	0.65	0.65
67.151	1.179	1.62	9.16	-0.02007	0.65	0.65
87.191	2.560	2.14	9.16	-0.02007	0.65	0.65
107.175	4.589	2.66	9.16	-0.02007	0.65	0.65
127.083	7.265	3.18	9.16	-0.02007	0.65	0.65
146.894	10.584	3.7	9.16	-0.02007	0.65	0.65
166.587	14.543	4.22	9.16	-0.02007	0.65	0.65
186.142	19.138	4.74	9.16	-0.02007	0.65	0.65
205.537	24.365	5.26	9.16	-0.02007	0.65	0.65
224.753	30.216	5.78	9.16	-0.02007	0.65	0.65
243.769	36.687	6.3	9.16	-0.02007	0.65	0.65
262.566	43.771	6.82	9.16	-0.02007	0.65	0.65
281.123	51.460	7.34	9.16	-0.02007	0.65	0.65
299.422	59.746	7.86	9.16	-0.02007	0.65	0.65
317.442	68.621	8.38	9.16	-0.02007	0.65	0.65
335.166	78.074	8.9	9.16	-0.02007	0.65	0.65
352.574	88.097	9.42	9.16	-0.02007	0.65	0.65
369.648	98.678	9.94	9.16	-0.02007	0.65	0.65
386.370	109.807	10.46	9.16	-0.02007	0.65	0.65
402.723	121.472	10.98	9.16	-0.02007	0.65	0.65
418.690	133.661	11.5	9.16	-0.02007	0.65	0.65
434.253	146.360	12.02	9.16	-0.02007	0.65	0.65
449.397	159.557	12.54	9.16	-0.02007	0.65	0.65
464.106	173.237	13.06	9.16	-0.02007	0.65	0.65
478.363	187.387	13.58	9.16	-0.02007	0.65	0.65

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 <i>f</i>	右侧 <i>f</i>
492.155	201.991	14.1	9.16	-0.02007	0.65	0.65
505.466	217.035	14.62	9.16	-0.02007	0.65	0.65
518.283	232.501	15.14	9.16	-0.02007	0.65	0.65
530.592	248.375	15.66	9.16	-0.02007	0.65	0.65
542.381	264.639	16.18	9.16	-0.02007	0.65	0.65
553.637	281.276	16.7	9.16	-0.02007	0.65	0.65
564.347	298.270	17.22	9.16	-0.02007	0.65	0.65
574.502	315.601	17.74	9.16	-0.02007	0.65	0.65
584.090	333.252	18.26	9.16	-0.02007	0.65	0.65
593.101	351.205	18.78	9.16	-0.02007	0.65	0.65
601.525	369.440	19.3	9.16	-0.02007	0.65	0.65
609.355	387.938	19.82	9.16	-0.02007	0.65	0.65
616.581	406.681	20.34	9.16	-0.02007	0.65	0.65
623.196	425.647	20.86	9.16	-0.02007	0.65	0.65
629.194	444.818	21.38	9.16	-0.02007	0.65	0.65
634.567	464.173	21.9	9.16	-0.02007	0.65	0.65
639.310	483.692	22.42	9.16	-0.02007	0.65	0.65
643.419	503.355	22.94	9.16	-0.02007	0.65	0.65
646.888	523.140	23.46	9.16	-0.02007	0.65	0.65
649.715	543.027	23.98	9.16	-0.02007	0.65	0.65
651.896	562.996	24.5	9.16	-0.02007	0.65	0.65
653.429	583.024	25.02	9.16	-0.02007	0.65	0.65
654.313	603.092	25.54	9.16	-0.02007	0.65	0.65
654.546	623.178	26.06	9.16	-0.02007	0.65	0.65
654.128	643.260	26.58	9.16	-0.02007	0.65	0.65
653.059	663.319	27.1	9.16	-0.02007	0.65	0.65
651.342	683.333	27.62	9.16	-0.02007	0.65	0.65
648.977	703.280	28.14	9.16	-0.02007	0.65	0.65
645.967	723.140	28.66	9.16	-0.02007	0.65	0.65
642.315	742.893	29.18	9.16	-0.02007	0.65	0.65
638.026	762.517	29.7	9.16	-0.02007	0.65	0.65
633.103	781.991	30.22	9.16	-0.02007	0.65	0.65
627.551	801.296	30.74	9.16	-0.02007	0.65	0.65

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 f	右侧 f
621.378	820.411	31.26	9.16	-0.02007	0.65	0.65
614.588	839.315	31.78	9.16	-0.02007	0.65	0.65
607.189	857.990	32.3	9.16	-0.02007	0.65	0.65
599.190	876.416	32.82	9.16	-0.02007	0.65	0.65
590.597	894.572	33.34	9.16	-0.02007	0.65	0.65
581.421	912.441	33.86	9.16	-0.02007	0.65	0.65
571.671	930.003	34.38	9.16	-0.02007	0.65	0.65
561.357	947.240	34.9	9.16	-0.02007	0.65	0.65
550.490	964.134	35.42	9.16	-0.02007	0.65	0.65
539.082	980.667	35.94	9.16	-0.02007	0.65	0.65
527.144	996.822	36.46	9.16	-0.02007	0.65	0.65
514.689	1012.582	36.98	9.16	-0.02007	0.65	0.65
501.730	1027.930	37.5	9.16	-0.02007	0.65	0.65
488.281	1042.850	38.02	9.16	-0.02007	0.65	0.65
474.355	1057.326	38.54	9.16	-0.02007	0.65	0.65
459.968	1071.344	39.06	9.16	-0.02007	0.65	0.65
445.134	1084.888	39.58	9.16	-0.02007	0.65	0.65
429.869	1097.945	40.1	9.16	-0.02007	0.65	0.65
414.189	1110.500	40.62	9.16	-0.02007	0.65	0.65
398.111	1122.541	41.14	9.16	-0.02007	0.65	0.65
381.651	1134.055	41.66	9.16	-0.02007	0.65	0.65
364.827	1145.029	42.18	9.16	-0.02007	0.65	0.65
347.656	1155.453	42.7	9.16	-0.02007	0.65	0.65
330.156	1165.315	43.22	9.16	-0.02007	0.65	0.65
312.346	1174.605	43.74	9.16	-0.02007	0.65	0.65
294.245	1183.313	44.26	9.16	-0.02007	0.65	0.65
275.871	1191.430	44.78	9.16	-0.02007	0.65	0.65
257.244	1198.947	45.3	9.16	-0.02007	0.65	0.65
238.383	1205.858	45.82	9.16	-0.02007	0.65	0.65
219.307	1212.153	46.34	9.16	-0.02007	0.65	0.65
200.039	1217.828	46.86	9.16	-0.02007	0.65	0.65
180.596	1222.875	47.38	9.16	-0.02007	0.65	0.65
161.000	1227.290	47.9	9.16	-0.02007	0.65	0.65

X	Y	Z	路面宽度	超高值	左侧 f	右侧 f
141.271	1231.067	48.42	9.16	-0.02007	0.65	0.65
121.430	1234.204	48.94	9.16	-0.02007	0.65	0.65
102.008	1236.640	49.45	9.04	-0.01864	0.65	0.65
82.098	1238.533	49.97	8.92	-0.0129	0.65	0.65
62.151	1239.980	50.49	8.8	-0.00717	0.65	0.65
42.186	1241.169	51.01	8.76	-0.00143	0.65	0.65

作者: [张天乐](#)
学位授予单位: [长沙理工大学](#)

相似文献(10条)

1. 会议论文 [刘先明, 戴晓虹, 成渝高速公路隧道运营与管理](#) 2002

在高速公路上,隧道是整条高速公路的咽喉地段和重点控制工程,它的安全性、可靠性对整个高速公路的快速畅通起着重要的作用,因此如何有效保障隧道的安全畅通是山区高速公路管理者面临的紧迫问题之一。成渝高速公路经过几年的运营,在隧道运营管理方面积累了一定的经验。本文以成渝高速公路在隧道管理体系构成,机电系统安全运行,设备维护检修和隧道突发事件响应等有关隧道运营和管理方面的情况为例,总结了高速公路隧道运营管理方面的经验与教训,并就高速公路隧道在运营管理上存在的问题和发展方向向国内外同行学习与交流。

2. 会议论文 [张生瑞, 马壮林, 高速公路隧道群交通运行环境评价指标及方法研究](#) 2005

根据高速公路隧道群交通变化规律及交通运行环境特性,在评价指标选取原则的基础上,按照影响高速公路隧道群交通运行环境的各因素对评价指标影响的显著程度,从交通功能、环境影响和动态影响三个方面,建立了高速公路隧道群交通运行环境评价指标体系,对高速公路隧道群交通运行环境状况进行综合分析评价。以京珠高速公路粤境韶关隧道群为例,说明了评价过程以及评价结果对高速公路隧道管理部门的指导作用,旨在为高速公路隧道群交通运行环境评价的实施提供理论基础。

3. 会议论文 [何川, 王明年, 方勇, 李祖伟, 李海鹰, 张太雄, 彭建康, 公路隧道群智能联动控制技术的现状与展望](#) 2008

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,现有的针对单条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。

4. 学位论文 [帆航军, 高速公路隧道运营安全综合评价研究](#) 2009

我国高速公路隧道建设和管理起步较晚,对于高速公路隧道运营安全综合评价还停留在定性判断阶段,尚没有量化的诊断方法和系统。为此,本文通过研究建立了一套高速公路隧道运营安全综合评价的定量化管理方法,并开发了相应的综合评价管理系统,为高速公路隧道运营安全综合评价和科学管理提供了手段和依据。

从高速公路隧道运营现状出发,应用系统工程理论与方法,分析了高速公路隧道运营安全管理体系、隧道结构健康度、机电系统、火灾救援系统、交通安全系统,以及运营效果等准则层和指标层的意义,提出了高速公路隧道运营安全影响因素构成体系。

在此基础上,运用AHP法建立了高速公路隧道运营安全层次结构分析模型,初步构建了高速公路隧道运营安全综合评价指标体系,结合Delphi法及优选法,通过定量筛选和定性修改等方法,建立了正式的高速公路隧道运营安全综合评价指标体系。通过比较分析,采用结合基于“功能驱动”的主观赋值法和“差异驱动”的客观赋值法的综合集成法,确定了各指标的权重。广泛参考现有国家有关高速公路隧道运营技术规范 and 养护等标准,设计了高速公路隧道运营安全综合评价指标体系各指标层定性和量化的评分标准及安全综合评价量表。

运用FS法建立了高速公路隧道运营安全综合评价数学模型,采用二次加权增加负荷的方法对评价主体指标进行量化处理。在此基础上,以Visual studio.net2003作为开发平台,以关系型数据库服务器SQL Server2000作为后台数据库之城,开发了高速公路隧道运营安全综合评价管理系统。

以西柞高速公路终南山隧道、西汉高速公路秦岭1号隧道、黄延高速公路罗圈梁等隧道为实例,分别运用FS法和开发的管理系统进行了实践分析验证,结果表明,该评价指标体系和评价方法具有较好的实用性。在基于人工神经网络的BP算法学习和训练收敛后,运用训练后的网络对其它隧道进行了计算,其结果与FS法具有较高的一致性。选用Kendall和和谐系数和Cronbach α 系数分别对评价主体信度和指标体系内部一致性进行了考察。经实践检验,Kendall和和谐系数具有显著性,表明安全综合评价具有意义;Cronbach α 系数符合要求,表明综合评价指标体系具有良好的内部一致性。

5. 会议论文 [侯小鹏, 李峰, 陈善超, 基于平钟高速公路隧道照明控制技术的研究](#) 2007

讨论隧道作为高速公路上的封闭构造体,司乘人员在通过隧道时会产生种种效应,最明显的就是“黑洞效应”和“眩光效应”。隧道照明系统的设置就是为了减轻驾驶员通过隧道时所产生的这一系列妨碍行车安全的不良效应,创造洞内良好的工作视觉环境质量。然而,大量的高功率照明灯具的应用,使得照明电费开支成为是隧道运营费用甚至是高速公路运营费用中最大的日常开支项目之一。做好隧道照明节能工作对降低高速公路运行成本,构建节约型社会有着重大的意义。

6. 会议论文 [徐从常, 李天华, 高速公路隧道照明节能的效益分析](#) 2007

介绍隧道照明节能的必要性,隧道作为高速公路的特殊路段,当车辆在驶入、通过和驶出隧道的过程中,会出现一系列的视觉问题。为适应视觉的变化,需设置附加电光照明,这就是高速公路隧道照明系统。

7. 会议论文 [倪军, 高速公路隧道机电系统的建设与管理](#) 2007

介绍雁门关隧道和外场设备的距离大于5公里,采用光纤传输各种监控信息。通讯网络选择冗余光纤环网,冗余光纤环网上的交通监控信号灯子系统、通风控制子系统、照明控制子系统、消防安全子系统和供电检测子系统,五个子系统的监控信息是汇聚在一起传输的。火灾报警、闭路电视、紧急电话、可变情报板系统是相对独立的子系统,其传输线路也相对独立。

8. 期刊论文 [朱昭海, 高速公路隧道渗漏水病害与防排水措施探讨 - 中国新技术新产品2010, \(4\)](#)

公路隧道是公路的咽喉部分,若隧道局部产生破坏就会造成整段高速公路不能使用,导致巨大的经济损失和不良影响。文章分析了公路隧道渗漏水的原因,并综合考虑公路隧道各方面因素,探讨了各施工阶段的预防措施。

9. 学位论文 [吴云飞, 黄塔\(桃\)高速公路隧道洞口景观设计研究](#) 2008

随着改革开放,高速公路的建设促进了沿线地区生活、经济和文化交流,推动了区域物质文明和精神文明的发展。虽然景观设计学开始渗透到高速公路中,并且高速公路景观设计取得一定的成果,但是隧道洞口景观设计还处于比较薄弱的阶段。

由于国内高速公路隧道洞口景观设计尚处于发展阶段,而隧道洞口文化意境设计更处于萌芽阶段。所以,本论文主要是针对黄塔(桃)高速公路隧道洞口景观设计的研究;根据黄塔(桃)高速公路区域环境,提出了该高速公路隧道洞口景观设计的生态和文化意境设计的意义。根据景观设计理论,以黄塔(桃)高速公路沿线的自然景观和人文景观(如徽派建筑、徽砚、徽雕、黄山等徽州文化)作为设计背景,深入的研究了隧道洞口景观设计的思想、原则和洞口设计形式;再结合洞口生态与文化意境设计思想,进一步把黄塔(桃)高速公路隧道洞口景观设计分为生态恢复型、环境融合型、文化特色型、景观特色型、技术保障型和意象概念型六种类型;同时,详细分析了单个洞口设计现状、主题以及表现形式,以徽州马头墙、黄山景观、牌坊等设计素材为主,深入挖掘和研究各类洞口景观的文化内涵,突出了黄塔(桃)高速公路隧道洞口景观的徽州文化特色。

其次,根据生命周期评价理论,介绍了黄塔(桃)高速公路隧道洞口景观设计评价内容应从实施前、实施中和实施后三个部分来探讨。

最后,结合已有高速公路思想框架研究的相关成果,对高速公路隧道洞口城市和平原景观模式进行叙述,以瞬时性、粗犷性、自然性和原始性作为山区高速公路隧道洞口景观设计原则的表现形式,在洞口设计范畴为300米的基础上,对山区高速公路隧道洞口景观设计思想框架进行探讨;同时,分析了思想框架的洞口景观划分,强调了洞口、路基、护栏、分隔带、边坡等设计单元。

10. 会议论文 [张家铭, 邹启贤, 李建国, 路为, 岩溶地区高速公路隧道溶洞处理](#) 2006

本文结合湖北沪蓉西高速公路岩溶隧道的设计与施工经验,对部分隧道岩溶的处置方法进行了总结,可供类似隧道设计和施工参考。

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Thesis_Y1504731.aspx

授权使用: 上海海事大学(wf1shyxy), 授权号: d4705a15-7cf3-4014-9370-9dd900836ae0

下载时间: 2010年8月21日