

云南省交通运输厅科技项目（云交科教〔2018〕40号）成果

复杂地质地形条件下公路工程关键技术丛书

山区高速公路地下立交 建设与运营关键技术

王晓方 张 伟 杨 林 著
王安民 唐生炳 王少飞

西南交通大学出版社
• 成 都




前 言

近年来，随着我国交通建设的迅猛发展，越来越多的高速公路向西部高原山区延伸。受山区地形条件限制，一些地下环形隧道和地下互通立交开始出现，如已经通车的雅西高速公路双螺旋隧道、在建的云南香格里拉至丽江高速公路（以下简称“香丽高速公路”）虎跳峡地下互通立交等。

地下立交可以减小建设过程中对周边环境的影响和破坏，同时可以避免复杂的地质条件，但其存在结构复杂、隧道开挖断面大、结构形式多样、施工工艺要求高、交通组织困难以及运营养护难等难点。如何合理解决上述难题，是地下立交设计与建造的关键点。就目前国内外地下立交的建设现状来看，多以城市地下立交为主，公路地下立交相对较少，建设经验积累较少，相应的规范和标准相对欠缺，地下立交隧道工程关键节点安全无成套的保障体系和技术措施。

本书依托香丽高速虎跳峡地下互通立交工程，针对地下互通立交路线关键设计指标的问题，基于国内外文献综述和相关标准规范条文的分析，借助驾驶模拟实验、问卷调查、实车实验等研究手段，分别针对地下互通立交主线平纵面指标、线形组合方案、出入口连接部设计以及地下互通立交的交通组织开展了论证，在现有规范中隧道和互通立交相关设计指标规定的基础上进行探讨，初步提出了地下立交设计的关键指标要求。

针对虎跳峡互通独特的线形形式所存在的交通冲突分析和交通流引导所面临的问题，本书主要围绕虎跳峡地下互通立交路段（K48+415.78~K83+733）的线形指标、连续长下坡、隧道群以及行车安全性开展分析和研究，结合行车安全驾驶模拟仿真实验结果，提出对应的交通工程安全对策，指导工程交通安全设施设计，从而提高虎跳峡地下互通立交的整体运营安全水平；而后针对虎跳峡地下互通立交隧道关键节点施工安全保障技术难题，通过理论分析、数值计算和现场监测分析，明确平面分岔隧道的荷载变化模



式和交叠隧道的施工扰动规律,提出平面分岔隧道的设计计算方法和交叠隧道的设计施工控制准则,并分析比选不同施工工法的适用性,给出最佳化的施工组织建议,形成地下互通立交结构与施工关键技术体系。

此外,地下立交通风系统的合理设置,是保证地下立交安全、舒适、环保营运的重要技术。书中针对地下互通立交隧道运营通风与防灾关键技术问题,结合大型地下互通立交的设置形式、交通流特性等,通过研究其合理的通风方式、营运期间的气流组织及节能技术等问题,以适应公路建设的可持续发展战略 and 环境保护政策,并为地下立交隧道的建设提供理论依据。虎跳峡地下互通立交彪水岩隧道大断面、交叠、分岔等独特的结构形式,对其防火及一旦发生火灾后的安全疏散提出了不同于一般隧道的要求。

本书对山区高速公路地下立交建设与运营过程中的关键技术进行了分析总结,为类似工程积累了一定的经验,对山区高速地下立体交通的发展有一定的推动作用。

本书在写作过程中,得到了云南省交通运输厅、云南建设基础设施投资股份有限公司、云南丽香高速公路投资开发有限公司、云南省交通规划设计研究院有限公司、交通运输部公路科学研究院、同济大学、重庆交通科研设计院有限公司等单位的大力支持,得到了陈维、刘旭、张海太、李志厚、陈树汪、刘涛、王康云、刘凡、田英杰、马骏、狄胜德、谢东武、周栋、陈建忠、肖支飞、王昱博等同志的技术支持,在此一并表示衷心感谢。同时书中还引用了国内外已有的专著、文章、规范、研究报告等成果,在此对相关编者和作者表示感谢。由于时间仓促且作者水平有限,书中若有不妥之处,敬请读者批评指正。

作者
2021年7月



目 录

第 1 章 概 述	001
1.1 研究背景	002
1.2 研究意义	003
1.3 工程概况	004
1.4 研究内容	006
第 2 章 地下互通立交路线关键设计指标研究	007
2.1 地下互通立交主线平面指标研究	008
2.2 地下互通立交主线纵断面指标研究	020
2.3 地下互通立交主线线形组合研究	029
2.4 出入口连接部设计指标研究	038
2.5 地下互通立交交通组织技术研究	046
2.6 本章小结	061
第 3 章 虎跳峡地下互通立交行车安全分析及对策	063

3.1	线形设计指标分析	064
3.2	连续长下坡对虎跳峡互通的影响分析	066
3.3	隧道群对虎跳峡地下互通的影响分析	070
3.4	行车安全研究	075
3.5	安全保障措施建议	086
第 4 章	地下互通立交隧道关键节点施工安全保障技术研究	087
4.1	虎跳峡彪水岩工程情况分析	088
4.2	虎跳峡彪水岩大断面隧道荷载分布与计算方法研究	089
4.3	虎跳峡彪水岩交叠隧道荷载分布与计算方法研究	101
4.4	虎跳峡彪水岩大断面分岔隧道施工方法对比分析研究	119
4.5	虎跳峡彪水岩大断面分岔隧道科研监测分析与应用	134
4.6	本章小结	147

第 5 章 地下立交运营通风技术研究	149
5.1 地下立交隧道通风环境研究	150
5.2 地下立交隧道通风方式研究	151
5.3 地下立交隧道气流组织研究	156
5.4 分流匝道对气流组织的影响数值模拟研究	158
5.5 合流匝道对气流组织的影响数值模拟研究	164
5.6 本章小结	167
第 6 章 地下互通立交防火及安全疏散技术研究	169
6.1 地下互通立交火灾数值模拟及实体试验	170
6.2 地下互通立交防火安全设施	183
6.3 大型地下互通立交人员安全疏散研究	191
6.4 本章小结	210
结 论	213
参考文献	218



第 1 章 概 述

1.1 研究背景

近年来,随着我国山区高速公路不断发展,互通立交数量也在不断增多。山区高速公路在建设过程中,受限于地形、地质等复杂条件,桥隧比高,隧道群集中,互通立交设置艰难。但互通立交作为高速公路上车辆汇集、转向和疏散的必经之点,又是高速公路建设中不可或缺的。因此在地面条件受限的情况下,为满足交通发展和适应环境保护的要求,一些地下环形隧道和地下互通立交开始出现,如已经通车的雅西高速公路双螺旋隧道、在建的香丽高速公路虎跳峡地下互通立交等。

据不完全统计,目前世界各地已经建成多个地下互通立交工程(表 1.1-1、表 1.1-2)。机动车在地下通行,通行环境与地面不同,但近年来城市地下道路以及公路隧道工程已经越来越多,人们越来越适应这种形式,积累了更多的隧道建设和行驶经验,对一般隧道行驶条件下的预期趋于稳定。

表 1.1-1 国内部分地下立交工程实例

序号	立交名称	主路段属性	立交形式	施工方法	备注
1	厦门万石山地下立交	城市快速路	全互通	钻爆法	已通车
2	厦门东坪山地下立交	城市快速路	全互通	钻爆法	已通车
3	重庆嘉华匝道隧道地下立交	城市快速路	半互通	钻爆法	已通车
4	深圳横龙山匝道隧道地下立交	城市快速路	半互通	钻爆法	已通车
5	上海外滩通道匝道隧道地下立交	城市快速路	半互通	明挖法	已通车
6	长沙营盘路湘江隧道地下立交	城市快速路	全互通	钻爆法	已通车
7	胶州湾隧道匝道隧道地下立交	高速公路	半互通	钻爆法	已通车
8	南京青奥轴线地下立交	城市快速路	全互通	明挖法	已通车
9	深圳东部过境高速公路连接线工程地下立交	高速公路	全互通	钻爆法	施工中

表 1.1-2 国外部分地下立交工程实例

序号	立交名称	主路段属性	立交形式	施工方法	所在国	备注
1	巴黎 A86 西线地下立交	绕城高速	全互通	盾构法	法国	已通车
2	N4.1 高速公路 Uetliberg 隧道地下立交	高速公路	半互通	明挖法	瑞士	已通车
3	N20.1.4 高速公路苏黎世西支路工程地下立交	高速公路	半互通	钻爆法	瑞士	已通车
4	A53 高速公路苏黎世地下立交	高速公路	全互通	明挖法	瑞士	已通车
5	波士顿地下立交	高速公路	全互通	明挖法 盖挖法	美国	已通车
6	东京都地下立交	城市快速路	全互通	盾构法	日本	已通车

地下隧道有其独特的空间环境特点，导致在地下修建立交有别于地面立交，其行车环境和交通流特性也存在较大的差异（表 1.1-3）。

表 1.1-3 地下立交与地面立交行车环境对比

序号	项 目	地下立交	地面立交
1	路 段	在地下，空间受限，交叉路较简单	空间开阔，交叉情况复杂
2	视 野	狭窄，视距受地下洞室遮挡	视野开阔，视距良好
3	光 线	较暗，存在眩光效应、黑洞效应	由气候决定
4	空 气	CO、废气等不易排出	由当地空气状况决定
5	噪 声	车辆噪声不易扩散，且产生反射叠加	外界正常噪声和车辆噪声
6	阻塞车流疏散方式	倒车、横通道、变线、车道反向	无横通道

车辆在进入立交范围前的行驶中，就存在观察信息、判断方向，从而导致驾驶员注意力分散。如果立交不熟悉、信息不完善或者立交的设置不合理，就无法使驾驶员一目了然，迅速作出判断。

地下立交是个半封闭、无自然光照的环境，视野差，其结果必然使部分驾驶员动作犹豫或者走错方向，因而存在一些安全隐患。特别是互通式立交还存在匝道多、线形复杂、上下坡、急弯、分叉以及立交层数多等特点。复杂的立交行驶环境难免使有的驾驶员心理紧张，在进入隧道立交段时，车速与地面立交相比要适当控制，以适应隧道这个密闭的环境。因此，在运营期间，必须对地下互通立交的交通安全与防灾救援等设施给予重点考虑。

由于交通的分、合流需要，主线与匝道须设置喇叭口分岔隧道。同时，由于地下互通立交层次穿越需要，通常会出现两条隧道上下层跨越和交叠的情况。因此，在建设期间，地下互通立交需要面对分岔隧道、交叉隧道等特殊结构形式隧道的设计与施工难题。

地下立交虽然可以减小建设过程中对周边环境的影响和对环境的破坏，同时可以避免复杂的地质条件，但其存在结构复杂、隧道开挖断面大、结构形式多样、施工工艺要求高、交通组织困难以及运营养护难等难点。合理解决上述难题，是地下立交设计与建造的关键点。就目前国内外地下立交的建设现状来看，多以城市地下立交为主，公路地下立交相对较少，建设经验积累较少，相应的规范和标准相对欠缺，地下立交隧道工程关键节点安全无成套的保障体系和技术措施。

1.2 研究意义

本书依托在建香丽高速公路虎跳峡地下互通立交工程，通过对国内外地下立交的

建设和运营的大数据进行挖掘和分析,分析地下立交全寿命周期关键安全节点技术瓶颈。在此基础上开展地下互通立交路线关键设计指标研究、地下互通立交交通安全评价方法与对策研究、高速公路地下互通立交隧道关键节点施工安全保障技术研究、高速公路地下立交运营通风与防灾关键技术研究等四个方面的系统研究;提出山区高速公路地下互通立交路线指标、地下互通立交交通安全及防灾对策与措施、山区高速公路地下互通立交平面分岔点和空间交叠段的结构计算方法,建立山区高速公路地下互通立交的通风技术标准。

本研究有效解决了虎跳峡地下互通立交建设和运营过程中的各种问题,推动了滇北重要的旅游干线(香丽高速公路)的建设,完善了云南高速公路建设体系,同时填补了我国高速公路地下立交建设的空白,为类似工程建设积累了丰富的经验,尽可能避免了地面立体交通所带来环境破坏和噪声污染;很好地解决了地下立体交通建设难、通风难、管养难、灾害防治救援难等问题,进一步推动了地下立体交通事业大发展。

1.3 工程概况

在建的云南香格里拉至丽江高速公路,作为滇北重要的旅游干线,不仅是国家高速公路网北京至西藏高速的西宁—丽江联络线(G0613)中的一段,也是云南省干线公路“9210”骨架网中昆明至德钦公路的重要组成部分。该项目的建设,对于完善国家、区域和云南省高速公路网,改善区域交通出行条件,加强滇西北旅游资源的联动开发和构筑滇川藏“大香格里拉”旅游圈,促进区域经济社会发展,加强民族团结,增强国防交通保障能力,推动云南省少数民族聚居区域实现跨越式发展和同步建成小康社会目标等均有重要意义。香丽高速公路地理位置如图 1.3-1 所示。

香丽高速公路采用四车道高速公路标准建设,设计速度 80 km/h,路基宽度 24.5 m,全线共设置 6 处互通式立交,其中枢纽互通 1 处、一般互通立交 5 处。其中,虎跳峡地下互通立交,设在迪庆州香格里拉市虎跳峡镇,主要为解决虎跳峡镇交通流入入而设。立交区域位于云南省西北部。根据地形地物分布条件,该立交施工图设计中采用了“半互通+C 形调头”的立体形式,共设 A、B、C 三条匝道及一条连接线;由于受地形、地质条件限制,该互通立交进出口匝道位于隧道洞口附近,且 B 匝道入口位于隧道内。虎跳峡地下互通立交及其匝道效果图如图 1.3-2~图 1.3-4 所示。

除结构形式特殊外,虎跳峡地下互通还处于连续长下坡且桥隧相接路段,该连续下坡路段起于 6 标起点 K48+415.78,至金沙江大桥后的开达古隧道出口左右(桩号 K83+205),均为分离式路基结构。



图 1.3-2 虎跳峡地下互通立交效果图



图 1.3-3 C 匝道效果图



图 1.3-4 A、B 匝道效果图

1.4 研究内容

本书依托在建工程主要进行以下几个方面的工作：

(1) 地下立交路线关键设计指标研究：围绕地下互通立交在隧道环境下驾驶行为特性的变化规律，面临的主要安全问题，以及互通立交变速车道长度、出口形式、匝道断面布置方式和圆曲线最小半径等方面开展研究。

(2) 地下立交行车安全分析与对策研究：运用传统安全评价方法对虎跳峡立交整体设计方案进行系统性安全评价，分析可能存在的安全隐患，提出改善对策和建议，并基于驾驶模拟仿真探讨对策方案的效果，为立交方案设计提供建议。

(3) 高速公路地下立交隧道关键节点施工安全保障技术研究：通过理论分析、数值计算和现场监测分析，明确平面分岔隧道的荷载变化模式和交叠隧道的施工扰动规律，提出平面分岔隧道的设计计算方法和交叠隧道的设计施工控制准则，并分析比选不同施工工法的适用性，给出最佳化的施工组织建议，形成地下互通立交结构设计及施工关键技术体系，解决虎跳峡地下互通立交建设过程中遇到的平面分岔隧道和立体交叠隧道的设计与施工难题。

(4) 高速公路地下立交运营通风与防灾关键技术研究：包括地下立交隧道通风环境、通风方式及气流组织、防灾技术等研究。
