

2016—2017浙江省公路 学会学术论文集

浙江省公路学会 编

清华大学出版社
北 京

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

2016—2017浙江省公路学会学术论文集 / 浙江省公路学会编. — 北京：清华大学出版社，
2018

ISBN 978-7-302-50915-8

I. ①2… II. ①浙… III. ①道路工程—学术会议—文集 IV. ①U41-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 190094 号

责任编辑：王佳爽

封面设计：刘艳芝

版式设计：方加青

责任校对：王荣静

责任印制：董 瑾

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>，<http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编：100084

社 总 机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969，c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015，zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市铭诚印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185mm×260mm 印 张：20 字 数：431 千字

版 次：2018 年 7 月第 1 版 印 次：2018 年 7 月第 1 次印刷

定 价：118.00 元

产品编号：079957-01

《2016—2017 浙江省公路学会学术论文集》

编 委 会

主 任：洪秀敏

副主任：杨 健 吴德兴 寿 华 于群力 陈菊根

编 委：

邵 宏 张 起 李宏伟 戚春良 连真毅 方建义 郑其良

金晓平 徐晓和 郑文俊 苗成武 袁国清 陈晓敏 鲍江富

张征文 郭 健 金小平 单光炎 程 燕

目 录

美丽经济交通走廊的内涵与创建思路之浅见	陈菊根 黄 廷 (1)
基于视觉需求的公路隧道低碳节能发光诱导照明新技术	吕宁生 李海光 杜志刚 徐弯弯 (5)
打造生态环境下智能环保拌和楼新格局	刘燕燕 单 岗 (15)
高速“智慧服务区”规划探索	余 诚 卞 军 (23)
高速公路交通信息个性化定制初探	胡 晓 夏春晓 (30)
基于灰色马尔可夫模型的交通量反演预测方法研究	徐方圆 田 浩 (35)
AR 技术在道路交通标志和标线设置中的应用探讨	林斌峰 张凌辉 (43)
波形钢腹板 PC 组合箱梁桥内衬混凝土钢混组合段抗剪验算	江越胜 孙天明 作云飞 (46)
不考虑荷载变化的沉降预测方法	沈理斌 (53)
电力监控系统在高速公路长大隧道设备管理中的应用	傅志明 (66)
GIS 技术在宁波市县乡公路网调整规划中的应用研究	竺石磊 丁蓓妍 雷 电 黄 赛 (71)
高架桥双支花瓶墩模板支架受力性能分析	周 琪 池艳艳 郭志奇 (78)
硬质沥青在丽水 330 国道莲都段改建工程中的应用	张 瑜 季宋平 汤朝龙 张利忠 (85)
高速公路隧道行车火灾事故预防对策与应急救援	吕柱梁 (91)
高压空气喷砂机清理公路隧道墙身旧涂层的应用探讨	张 献 (95)
关于完善高速公路“绿通”政策的探讨	傅红阳 (103)
杭千高速区域监控系统建设与维护	朱 虹 (108)
花岗岩风化料作为路用材料的分类特征	陈帝江 陈善能 (119)
和谐、生态杭长路	叶建龙 麻辉东 姜正晖 (123)
建设大陈竹屿海上人行索桥之研究 [*]	陈伟康 (128)
交通行业视频资源整合平台建设与应用探索——以杭州市为例	陈学铸 陈英英 (134)

交通云平台——杭州智慧交通实践	郑凯 苟茂华	(140)
宽幅预应力空心板梁底纵向裂缝成因分析	李海光 陈勇 段浪	(145)
高速公路危货运输安全管理工作新模式的研究	范煜婷	(150)
“水泥就地冷再生”技术在 S219 磐缙线缙云段路面大中修工程中的应用	施育民	(155)
山区隧道大断面“零开挖”施工技术研究	陆飞勇 王东妹	(160)
浅谈高速公路服务区运营及服务功能拓展	蔡俊捷	(167)
浅谈工程造价管理和控制	唐林书	(171)
浅析高速公路养护档案管理	金伟雪	(179)
典型示范工程绍兴至诸暨高速公路路线方案研究	汪文滨	(187)
预制 T 梁施工上拱度的计算及控制措施	钱树波 李仲来	(193)
乳化沥青冷再生混合料劈裂强度影响因素分析	何伟南	(200)
社会稳定性评价中风险识别与估计实例应用	杨辉	(206)
道路旧砼再生集料在胜山至陆埠公路中的应用	潘晟贇 任超	(213)
数字化视频监控技术在甬台温高速公路温州段机电改造升级工程中的应用	周望蜀	(218)
多重黄金分割原理及其应用	池艳艳 周琪 周一勤	(226)
体外预应力加固技术在某连续箱梁桥的二次应用	王晓微	(235)
弯钩锚杆拉拔试验辅助装置研制与应用	郭志奇 柳淑波 周一勤	(245)
温州瓯江北口大桥主桥设计特点	史方华 戴显荣 王昌将	(252)
创建规划省道 S310 美丽公路的设计思路和技术方案	徐云涛 于祥生 毛斌 王雅茹	(258)
无损检测技术在结构工程中的应用	杨林妹	(267)
系杆拱桥横梁受力性能分析	王勇	(272)
橡胶沥青同步碎石封层技术在预防性养护工程中的应用	吕建伟 潘伟	(277)
预制盖梁吊装阶段桥台和立柱稳定性分析与监测	裘闻亮 张元光 徐炳 李云超	(282)
“营改增”对高速公路经营单位的税负影响	吴星强	(288)
某钢筋混凝土连续刚构板人行桥的加固维修	刘丰洲	(293)
甬台温高速公路吴岙枢纽立交杭州出口指路系统的优化	葛蔚敏	(297)
整车式动态称重系统在高速公路的实践与应用成效	傅志明 毛峰	(302)
钢管混凝土拱桥相贯节点焊缝的超声波检测缺陷漏检原因及控制措施	邱国阳 赵长军 徐聪 方良 李颖	(307)



美丽经济交通走廊的内涵与创建思路之浅见

陈菊根 黄 廷

(浙江公路水运工程咨询公司)

摘 要: 交通走廊对于消除流通和沟通障碍、促进地区间的联系、重构空间结构具有重要意义;对发挥地区经济优势、刺激落后地区经济、促进区域协调发展具有重要作用。“十三五”以来,浙江省提出了构建服务都市经济、海洋经济、开放经济、美丽经济发展四大交通走廊。本文针对建成自然风景线、科创产业线、生态富民线、历史人文线的万里美丽经济交通走廊布局,简要阐述了美丽经济交通走廊和“美丽公路+”的概念与内涵,并结合自身实践提出了创建美丽交通走廊的主要思路与原则,为浙江省建设“畅、安、舒、美”的万里美丽交通走廊、实现交通强省的战略目标做出了有益的探索。

关键词: 美丽经济; 交通走廊; 创建思路。

1 引言

“十三五”以来,浙江省提出了构建服务都市经济、海洋经济、开放经济、美丽经济发展四大交通走廊,实施万亿综合交通工程,努力打造省会到各区市高速铁路和全省空中一小时交通圈,率先基本建成现代综合交通运输体系,实现交通强省的战略目标。

围绕践行“八八”战略、建设四大交通走廊的目标,省交通系统提出了在“十三五”期间打造一万千米美丽经济交通走廊的重要部署,将建成“畅、安、舒、美”的自然风景线、科创产业线、生态富民线和历史人文线^[1],实现省内4A级以上景区、特色小镇、科创园区、省级产业集聚区基本通达二级及以上公路,各历史文化名村、农家乐示范村、美丽乡村精品村、旅游风情小镇通达等级公路,国省道优良路率达到95%以上,农村公路优良路率达到75%以上的主要目标。争创全国美丽经济交通

走廊示范区,充分发挥交通基础设施对浙江省经济的支撑和带动作用。

2 美丽经济交通走廊的内涵

交通走廊(Transport Corridor)也称交通运输走廊、运输通道,一般是指由多种交通基础设施所构成的交通设施带,是以高效率的综合运输通道为发展主轴,以轴上或被其紧密吸引的区域内产业、人口、资源、信息、城镇、客货流等经济要素集聚而成的带状空间地域经济综合体^[2]。

交通走廊是在交通运输业发展过程中逐渐形成的,它的研究一直是国内外交通运输规划、交通运输经济、经济地理和区域经济等多个领域研究的热点问题^[3]。交通走廊的合理规划与建设,不但对于消除流通和沟通障碍,促进地区间的联系,重构空间结构具有重要意义,同时对发挥地区经济优势、刺激落后地区经济、促进区域协调发展具有重要作用。



构建万里美丽经济交通走廊，就是把“修一条路、造一片景、富一方百姓”的理念贯穿公路规划、设计、建设、运营、管理全过程，宜弯则弯、宜窄则窄、依山傍水、顺势而为，科学建设和管理交通基础设施。依托广覆盖、深通达的交通基础设施网络，以4A级以上景区、国家公园、省级以上旅游度假区、特色小镇、健康养生基地、历史文化名村和农家乐示范村为节点，重点以“美丽公路+”特色经济、乡村旅游、历史人文、休闲体育、百姓健康创建模式，把散落在浙江大地的“山海林田湖、城镇乡村景”等一颗颗珍珠串联起来，构建自然生态、畅通舒适、美丽富饶的“江南风情走廊”。

3 基本思路

3.1 万里美丽经济交通走廊与美丽公路创建的有机结合

美丽公路是指安全可靠、畅通舒适、环境整洁、风景优美、自然和谐、节能环保、使用便捷、服务优质、助推经济，规划合理化、设计人性化、施工精细化、管理规范，宜行、宜游、宜业、宜居的资源节约型与环境友好型公路，美丽公路是建设万里美丽经济交通走廊的主要组成部分。

美丽公路建设机制是“政府主导、交通牵头、部门配合、齐抓共管”。地方党委政府应将美丽公路建设作为影响地方经济社会发展的重要工作，与美丽经济、美丽乡村、美丽城镇建设相结合，与“五水共治”“四边三化”“三改一拆”等省委重大行动相结合，建立有效工作机制。

美丽公路建设内容是以“五个一万”

工程为载体，开展设施美、环境美、秩序美、服务美、行风美建设^[4]，坚持典型引路，发挥示范作用，进一步完善路网体系、提升管养水平、强化安保能力、优化运行效能。

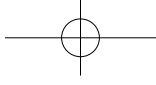
(1) 设施美。充分利用地形、地貌，合理运用各项技术指标，优化线形设计，使公路线形优美，视觉良好，行车安全。加强养护投入，对高速公路、国省干线公路实施大规模养护工程，确保路况完好。

(2) 环境美。扮靓路容路貌。深化路域环境整治，结合“三改一拆”“两路两侧”整治工作，抓好重点区域环境治理，消除公路沿线脏、乱、差现象。加大公路绿化力度，结合国土绿化、生态省创建、美丽乡村建设，实现公路绿化全路段立体化。

(3) 秩序美。结合平安浙江、法治浙江和美丽浙江的创建要求，狠抓超限治理，形成政府主导、部门联动、全境覆盖、全天候治理的良好格局。同时，推进公路信息化和智能化建设，优化公路运行效能，引导公众有序出行。

(4) 服务美。坚持“以人为本、服务至上”原则，完善公路服务设施，推进普通公路服务点（站）建设；完善ETC服务体系，推进“互联网+公路”智慧出行服务；提升运输服务水平，构建农村物流网络，促进农村物流与电商深度融合。

(5) 行风美。推动“人在路上，路在心中”的核心价值观内化于心、外化于行，使崇尚“最美”成为全省公路人的文化自觉，打造一支服务为民、爱岗敬业、奋发有为、勇于创新、敢于担当、作风顽强、清正廉洁、无私奉献的公路干部职工队伍。



3.2 以“美丽公路+”为主导， 构建浙江美丽经济增长的新引擎

(1) “美丽公路+特色经济”促进产业转型升级。打造科创产业线，以普通国道和省级产业集聚区配套公路建设为重点，服务国家自主创新示范区、国家级经济技术开发区和高新技术产业园区建设，服务云栖小镇、云制造小镇、梦想小镇等特色小镇和杭州大江东产业集聚区等省级产业集聚区及健康产业基地建设，增强产业创新平台的综合交通保障能力。

(2) “美丽公路+乡村旅游”助力百姓致富增收。打造生态富民线，实施农村公路“四个一万”工程，提升公路技术等级和安保设施水平，到“十三五”末，全面消除等外公路，形成连通度高、畅达性好的生态富民交通带，有效降低农村物流成本，加快农产品流通，推进农村产业结构调整，带动农民增收致富。

(3) “美丽公路+历史人文”弘扬特色文化。打造历史人文线，以国省道建设和养护为重点，完善河姆渡文化、良渚文化等人类文明发源地，杭州、绍兴、宁波等国家级历史名城及青田石雕、泰顺廊桥等人文古迹的国省道网络；以农村公路提升改造为重点，提高黄公望、碗窑、芹川等历史文化名村的路况水平。

(4) “美丽公路+休闲体育”树立公路旅游品牌。打造自然风景线，以发达的公路交通网络为基础，打造联通水乡平原、沟通山海协作、畅通青山秀水的公路精品工程，连接乌镇、普陀山、雁荡山、天目山、西湖等4A级以上景区及开化、仙居等国家公园。美丽公路和骑行相结合，让公路旅游成为一种健身时尚。

(5) “美丽公路+百姓健康”打造公路服务“升级版”。打造公路沿线的公园、游步道、服务站(点)等设施，为老百姓提供休闲之地。

4 创建原则

4.1 因地制宜

美丽公路应选择与实际环境相适应的特色类型，注重地域文化的保护和传承，将公路景观的历史、文化、地域、民俗等地方特色深层次融合，使公路建设与服务区域内的生态建设、文化建设、旅游业发展、主导产业的形成相结合。

4.2 崇尚自然

美丽公路的建设应使人工构造物与自然环境相互协调、融合，保证原有生态系统的完整运行。通过调查公路沿线区域生态环境特征，处理好绿化树种与交通、市政设施之间的关系，保证树木必需的立地条件与生长空间。

4.3 安全可靠

应坚持“以人为本、安全发展”的理念，提升公路交通安全保障水平。公路养护设施应充分利用现有场站设施，按照可达、可检、可维护和可更换的要求设置。加强公路养护作业的现场监管，科学、合理组织养护施工作业和车辆通行保障，现场安全防护措施规范、有效。

4.4 科学合理

应做好与城乡发展规划、国土规划、县域镇域村庄规划和旅游等专项规划的协

调衔接。通过梳理自然、人文、产业等资源，合理确定公路等级和路线走向，在分期建设时应处理好近期效果与远期效果的关系，远近结合。城镇段公路改造及通村路建设应充分征求公路两侧居民意见，公示规划平面图及施工期。

4.5 集约节约

公路建设具有投资大、占地多的特点，因此必须重视对废弃建筑材料及既有线位资源的充分利用，同时考虑建设及后期养护成本，尽量延长公路景观的生命周期。

4.6 生态环保

美丽公路建设环境保护应遵循预防为主、保护优先、防治结合、综合治理的原则。在规划、设计、施工、运营与养护全过程中贯彻保护公路沿线生态和社会环境的理念。通过制定合理的环境保护与治理措施，减少公路对该区域生态环境的影响。

4.7 服务提质

公路的服务设施建设应从最大限度发挥美丽公路高效、安全、经济、舒适的要求出发，兼顾建设者、经营者的利益和社会效益。应体现“以人为本、安全第一、服务至上、环保经济、便于管理”的原则，提升公路运营的综合服务水平。

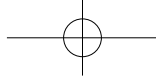
5 结束语

构建万里美丽经济交通走廊是践行“绿水青山就是金山银山”理论的重要实践，是精准对接浙江经济发展、补齐交通基础设施短板的重要举措。要着眼于全省自然资源、风景名胜、产业布局、特色经济等发展，带动乡村旅游、商贸物流、农业开发、产业发展、内河复兴，实现“绿水青山”的美丽资源转变为“金山银山”的经济效益。

创建万里美丽经济交通走廊，必须紧密结合产业集群、区域经济、乡村旅游、体育文化、休闲养生、历史人文等基础条件，创新“美丽交通+”的交通与经济融合的新发展模式。必须因地制宜、科学实施，努力构建和完善美丽经济交通走廊创建的标准体系。

参考文献

- [1] 浙江省交通运输厅. 万里美丽经济交通走廊创建指南（试行）[S]. 2017.
- [2] 毛敏，蒲云. 交通运输走廊研究综述[J]. 世界科技研究与发展，2006，28（5）：76-78.
- [3] 曹小曙，阎小培. 20世纪走廊及交通运输走廊研究进展[J]. 城市规划，2003，27（1）：50-56.
- [4] 楼晓寅. 浙江：“美丽公路+美丽经济”[J]. 中外公路，2016，24：44-47.



基于视觉需求的公路隧道低碳节能发光诱导照明新技术

吕宁生¹ 李海光¹ 杜志刚² 徐弯弯²

(1. 浙江省金华市公路管理局; 2. 武汉理工大学交通学院)

摘要: 公路隧道路段视觉环境差, 进出口的黑白洞效应和隧道中部的昏暗单调环境极易引起驾驶员的视错觉, 从而导致交通事故的发生。为解决现有隧道照明能耗大、开灯率低以及事故多发的问题, 在基于隧道出行人员安全视觉需求分析的基础上提出隧道发光诱导系统设置新方法。利用逆反射和自发光技术, 从交通安全与视觉需求方面实现隧道照明节能减排。应用工程表明, 新方法既能满足隧道安全通行的视觉需求, 又能实现隧道节能减排。

关键词: 公路隧道; 发光诱导; 视觉需求; 照明节能。

引言

随着交通事业的不断发展, 我国隧道里程快速增长, 截至 2016 年末, 已运营的公路隧道达 15 181 座, 总长 1 403.97 千米。隧道是交通事故黑点, 国内学者曾对国内 23 座高速公路隧道的交通事故进行调查, 调查结果表明隧道路段事故的事率为全线的 1.3 ~ 9.67 倍, 平均为 5.17 倍, 隧道路段在造成经济损失及事故总数、受伤人数、死亡人数的比例方面均远高于正常路段^[1]。

隧道路段的不良光环境是隧道路段事故高发的主要原因, 隧道进出口的黑洞效应和白洞效应以及隧道中部的低照度单调环境极易导致驾驶员的视错觉, 如速度误估、距离误估, 从而引发超速、追尾、撞侧墙等驾驶行为或事故, 对十漫高速公路隧道群调研, 结果表明隧道事故 70% 发生在白天隧道入口, 且入口超速比例在 50% ~ 60%, 事故形态中 40% 以上为追

尾^[2]。传统的隧道光环境改善方法为加强隧道照明, 但照明耗电量大、成本高, 故隧道内普遍开灯率较低, “高配低用”现象明显, 尤其是西北部公路, 另外部分低等级公路隧道也存在没有安装照明设施的现象。即使现有的太阳能光电产品、智能照明控制设施、高效照明配光方法等仍存在施工费用和维护费用高的问题, 且难以符合驾驶员的视觉需求。

我国部分省市, 如浙江省、贵州省等, 提出了以逆反射和自发光技术为主的隧道低碳发光诱导方法。金华市公路管理局自 2011 年起在全市 10 个公路隧道组织实施“金华公路自发光节能安保工程”^[3], 利用反光环和自发光诱导标等设施改善隧道光环境, 实现安全与节能的统一。但现有的隧道低碳发光诱导系统存在设计方法不完善、设施设置不够合理的问题。故亟须提出符合通过视觉需求, 能有效改善其视错觉的隧道发光诱导系统设置新方法。

1 隧道视觉环境与驾驶员视觉需求分析

1.1 隧道视觉环境问题

公路视觉环境主要包括公路的线形组合、相关交通工程设施（如交通标志标线等）、绿化、车流及人流等。隧道外路段视觉空间广阔、照度高、交通设施和景观丰富；隧道内路段环境封闭、照度低、视觉信息缺乏。隧道内外的视觉环境差别和隧道内部的视觉环境问题会导致驾驶员的视知觉问题，使其对速度、距离、方向及位置发生较大误判，容易诱发不良视觉心理生理反应及驾驶行为。

杜志刚^{[4][5]}等实验表明驾驶员进出隧道由于照度和空间的剧烈过渡导致驾驶员瞳孔迅速扩大，难以准确在视网膜上聚焦从而产生瞬时盲期。黄发明^[6]等研究发现当驾驶员驶入隧道时，由于视觉参照物急剧减少，视敏度迅速降低，驾驶员无法看清隧道内信息，产生黑洞效应。肖尧^[7]等研究发现当驾驶员驶出隧道时，白天洞外照度高，产生白洞效应，造成驾驶员视觉功能降低。另外隧道中部视觉环境缺乏变化，A.B.Unal^[8]等研究发现驾驶员长时间驾驶在单调环境会产生被动疲劳现象，影响其操作方向盘的行为从而影响驾驶安全。

1.2 公路隧道驾驶员视觉需求分析

杜志刚^[9]等基于马斯洛需求层次理论，建立了驾驶员需求层次，包括功能性需求、安全性需求、舒适性需求和美观性需求。基于需求层次的道路环境视觉参照系框架包括基本型视觉参照系、安全型视觉参照系、舒适型视觉参照系、韵律型视觉参照

系，基于此对公路隧道驾驶员视觉需求进行分析。

公路隧道进出口路段空间和照明过渡剧烈，为典型的过渡剧烈的视觉参照系，不满足驾驶员安全性、舒适性、美观性需求。同时公路隧道内部空间狭小，视觉信息单一且缺少变化，轮廓标、突起路标、灯具主要为中频信息，为典型的弱视觉参照系，也不满足驾驶员安全性、舒适性、美观性需求。另外当驾驶员行驶在隧道内时需要获取充足的视觉线索以帮助其判断自身的驾驶状态，明确路权，看清车道边线和车道分界线，明确隧道线形、隧道轮廓边界和路侧障碍物、前车的位置。另外对于农村公路隧道，道路等级一般在二级及以下，一般会有驾驶员（机动车驾驶员、非机动车驾驶员）及行人，故需要同时考虑驾驶员和行人的视觉需求。对于行人，也需要明确路权，看清车道边线和车道分界线、明确隧道线形、隧道轮廓边界及前进方向障碍物。

由于隧道的昏暗单调环境难以满足驾驶员和行人的视觉需求，故提出利用逆反射和自发光材料组成的隧道发光诱导系统来改善隧道视觉环境，提供驾驶员必要的视觉线索并变剧烈过渡视觉参照系为缓和过渡视觉参照系、弱视觉参照系为强视觉参照系，以满足驾驶员的视觉需求。

2 基于视觉需求的公路隧道发光诱导系统设计思路

结合上述驾驶员视觉需求和视觉参照系分层，从安全感、舒适感、韵律感方面提出满足驾驶员视觉需求的改善对策，如表1所示。

表 1 公路隧道驾驶员视觉需求及对策

视觉需求分类	问题来源	信息需求特性	对策及实现方式
安全感	隧道进出口过渡剧烈，隧道内照度低、信息少，导致严重视错觉	安全型视觉信息，能降低速度错觉、距离错觉、方向错觉、位置错觉	多频率、多尺度、多形状、多色彩信息组合缓解剧烈过渡、增加视觉信息
舒适感	隧道内信息单调，长时运行，容易诱发疲劳	舒适型视觉信息，能有效缓解疲劳	单个隧道内构建韵律（连续重复、渐变、起伏、交错）信息缓解疲劳
韵律感	长大隧道中部单调景观，隧道群连续、频繁的明暗适应枯燥乏味，心情不良	韵律型视觉信息，能提升美感	长隧道内设置多个不同韵律信息，同时相邻隧道路段组合形成韵律型信息（多色彩、多形状的方式，构建连续重复、渐变、起伏、交错韵律）

考虑隧道内驾驶员事故致因多为速度感、距离感、方向感、位置感的缺失，故把安全性需求分为速度感、距离感、方向感和位置感的需求。针对隧道内驾驶员产生的不同驾驶问题，根据驾驶员的信息记忆要求确定不同驾驶行程所对应的安全需求，如图 1 和表 2 所示。



图 1 公路隧道驾驶员安全感示意图

表 2 公路隧道驾驶员安全感提升方法及对策

安全需求	常见问题	信息记忆要求	选取信息形式
速度感	不能判定本车车速	瞬时（短距离，0.2~0.5s 行程）需要，避免超速	高频信息，如立面标记线、路缘突起路标、路缘轮廓标
距离感	不能明确与前车和障碍物距离	短时（中等距离，1~2s 行程）需要，避免碰撞	中频信息，如侧墙轮廓标
方向感	不能明确前进线形方向	较长距离内需要（4~8s），避免高度、宽度错觉，对大货车驾驶员更为重要	低频信息，如反光环
位置感	不能明确具体哪个隧道、隧道内具体位置	超长距离内需要，避免位置错觉，有助于行程提醒，便于救援、疏散	超低频信息，间距约为单体隧道长度，隧道进出口与中部采用差异化的反光环、反光条，长隧道设置差异化韵律信息，不同隧道采用差异化颜色

速度感、距离感、方向感、位置感会有所区别，同时分别考虑隧道进出口和中部的视觉环境问题：隧道进出口主要为光照距离过渡和视觉参照系由强到弱的过渡

所引发的视觉不适和视错觉，隧道中部主要为单调的视觉环境所引发的视错觉，故同一隧道的不同区段安全需求问题也会在差别，因此，需要对不同长度和同一隧道不同区段提出具有针对性的改善对策，如表 3 所示。

表 3 不同长度农村公路隧道不同区段驾驶员安全需求分析

项 目	环境特点	驾驶员视觉需求				环境原因
		速度感	距离感	方向感	位置感	
短隧道 (<200m)	行程 <13s, 隧道进出口视觉环境剧烈过渡	缺失 (进出口)	缺失 (进出口)	较好	较好	白天夜间不开灯, 进口能看到出口, 提升了方向感
中短隧道 (200~500m)	行程 13~33s, 隧道进出口视觉环境剧烈过渡	缺失 (进出口及中部)	缺失 (进出口及中部)	缺失 (进口及中部)	较好	隧道内不开灯, 运行时间较短, 舒适感下降不显著
中长隧道 (500~1500m)	行程 33~100s, 隧道中部运行时间较长	缺失 (进出口及中部)	缺失 (进出口及中部)	缺失 (进出口及中部)	缺失 (中部)	隧道内运行时间较长, 舒适性差
长隧道 (>1500m)	行程 >100s, 隧道中部运行时间很长	缺失 (进出口及中部)	缺失 (进出口及中部)	缺失 (进出口及中部)	缺失 (中部)	隧道内运行时间长, 容易疲劳瞌睡

注：长度值对于农村公路，取值为高速公路取值的 50%。

3 公路隧道发光诱导系统设置方案

3.1 不同长度公路隧道

依据《公路隧道照明设计细则》(JTG/T D70/2-01-2014)^[10]，长度 > 200m 的高速公路隧道、一级公路隧道应设置照明，长度 > 1 000m 的二级公路隧道应设置照

明，三、四级公路根据实际情况确定。故高速公路隧道大都设置了照明设施，而对于低等级公路标准未给出明确规定。由于经济原因，< 1 000m 的农村公路隧道大部分未设置照明设施，特别是中西部地区。基于此，把隧道分为 < 1 000m 的农村公路隧道、> 1 000m 的农村公路隧道和高速公路隧道，如表 4 所示。

表 4 不同长度公路隧道分析

隧道类型	照明设施	交通流特点	视觉需求	与照明设施(灯具)关系
< 1 000m 农村公路隧道	绝大部分未设置	混合交通流(机动车和行人)，车速较慢	满足驾驶员和行人视觉需求，控制驾驶员视错觉	取代照明设施
> 1 000m 农村公路隧道	部分设置	混合交通流(机动车和行人)，车速较慢	满足驾驶员和行人视觉需求，控制驾驶员视错觉和长时驾驶疲劳	部分取代
高速公路隧道	设置	单一交通流，车速快	满足驾驶员的各项视觉需求	辅助

3.2 不同长度农村公路隧道设置方案

因发光诱导系统在农村公路隧道中起取代或部分取代照明设施的作用，故以农村公路隧道为例对发光诱导系统设计方案进行介绍。针对不同长度的隧道提出不同的优化设计方案，优化设计方案主要按短

隧道 (< 200m)、中短隧道 (200 ~ 500m)、中长隧道 (> 500m) 划分。其中长隧道设计又可由入口段、过渡段、中间段 (包含提醒区)、出口段分别展开，依据实际隧道的长度，可根据情况灵活设计。

(1) 短隧道设置方案 (< 200m) (图2和图3)

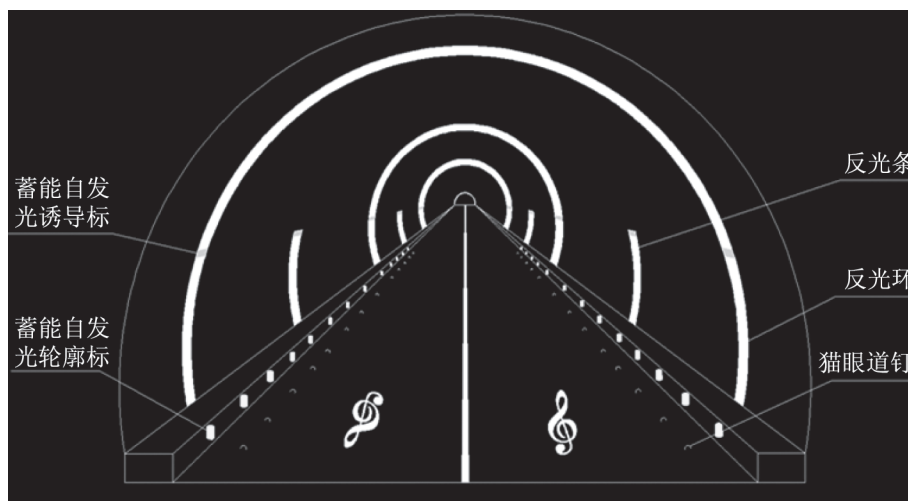


图2 短隧道方案透视图

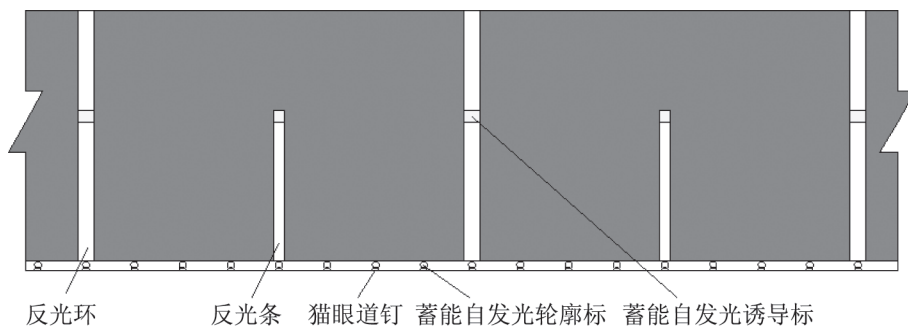


图3 短隧道内侧视图

该方案由反光环、反光条、猫眼道钉、蓄能自发光轮廓标和蓄能自发光诱导标组成，反光条与反光环间隔设置 (都为 20 ~ 32m/道)，蓄能自发光诱导标设置在反光环和反光条上 (10 ~ 16m/个)，同时高密度设置猫眼道钉和蓄能自发光轮廓标 (2.5 ~ 4m/个)，另外路面设置

音符标志 (20 ~ 32m/个)。

(2) 中短隧道设置方案 (200 ~ 500m) (见图4 ~ 图7)

该方案由反光环、反光条、猫眼道钉、蓄能自发光轮廓标和蓄能自发光诱导标组成。但隧道设计方案分为入口段、中间段与出口段三部分。

入口段 / 出口段设置高密度反光环 (10 ~ 16m/ 道), 共 3 ~ 5 道, 不设反光条, 反光环上设置蓄能自发光诱导标 (10 ~ 16m/ 个), 路缘设置猫眼道钉和蓄能自发光轮廓标 (2.5 ~ 4m/ 个)。

该方案由反光环、反光条、猫眼道钉、蓄能自发光轮廓标和蓄能自发光诱导标组

成, 反光环 (40 ~ 64m/ 道) 间设置 3 条反光条 (10 ~ 16m/ 道), 蓄能自发光诱导标设置在反光环和反光条上 (10 ~ 16m/ 个), 同时高密度设置猫眼道钉和蓄能自发光轮廓标 (2.5 ~ 4m/ 个), 另外路面设置音符标志 (40 ~ 64m/ 个)。

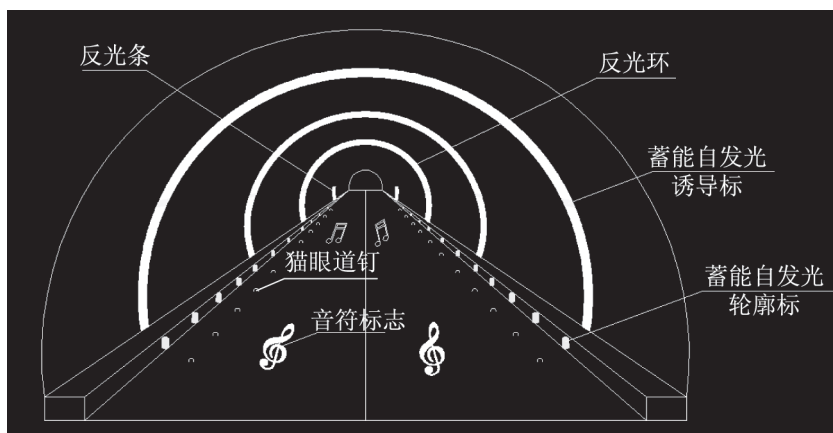


图 4 中短隧道入口段 / 出口段方案透视图

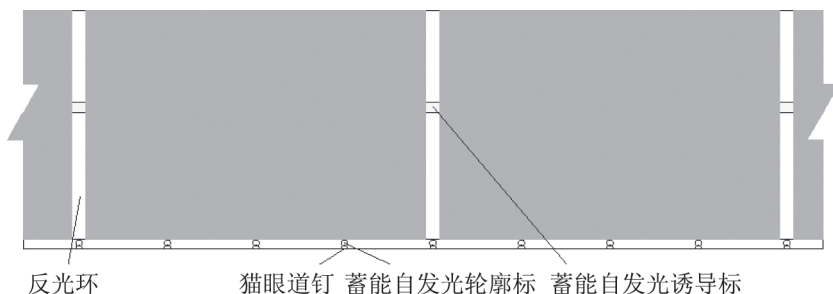


图 5 中短隧道入口段 / 出口段侧视图

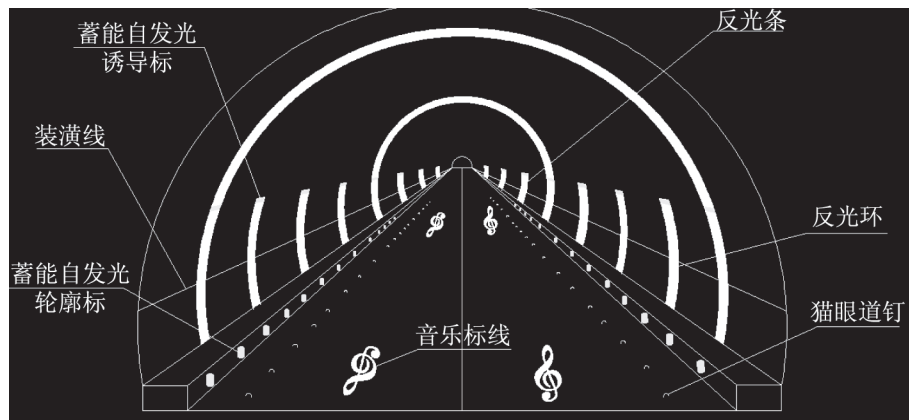


图 6 中短隧道中间段方案透视图

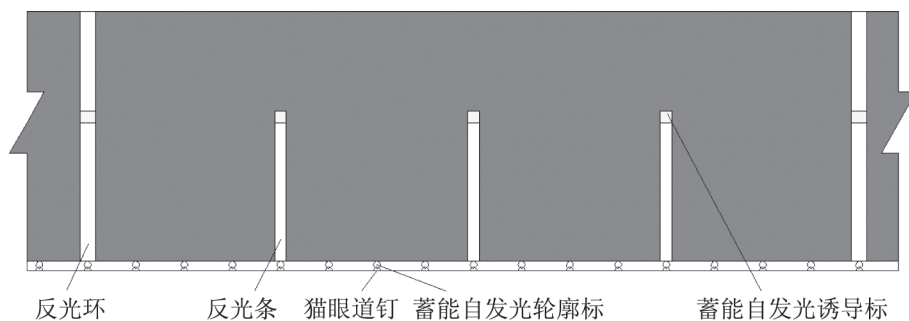


图7 中短隧道中间段侧视图

(3) 中长隧道设置方案 (> 500m) (见图8~图13)

该方案由反光环、反光条、猫眼道钉、蓄能自发光轮廓标和蓄能自发光诱导标组成。但长隧道设计方案分为入口段、出口段、过渡段与中间段四部分，另外中间段设置提醒区。

与中短隧道入口段/出口段设置方法类似，中长隧道入口段/出口段设高密度

反光环 (10~16m/道) 3~5道，不设反光条，反光环上设置蓄能自发光诱导标 (10~16m/个)，路缘设置猫眼道钉和蓄能自发光轮廓标 (2.5~4m/个)。

过渡段反光环与反光条间隔设置 (各20~32m/道)，反光环和反光条上设置蓄能自发光诱导标 (10~16m/个)，路缘设置猫眼道钉和蓄能自发光轮廓标 (2~4m/个)。

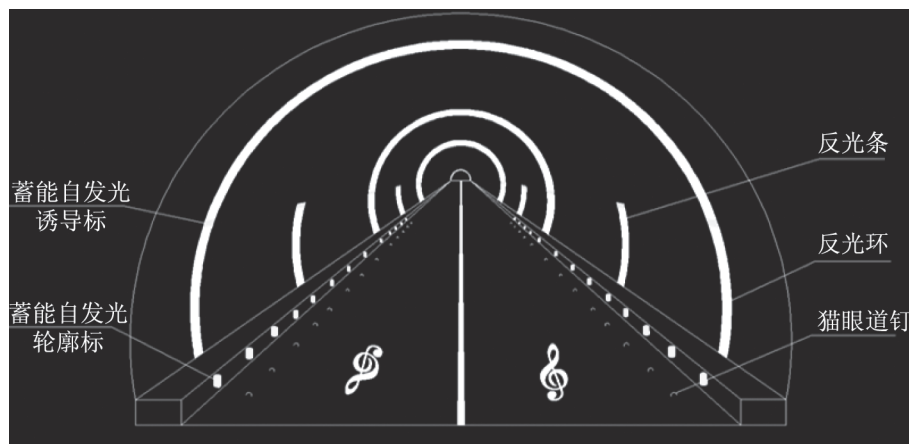


图8 中长隧道过渡段方案透视图

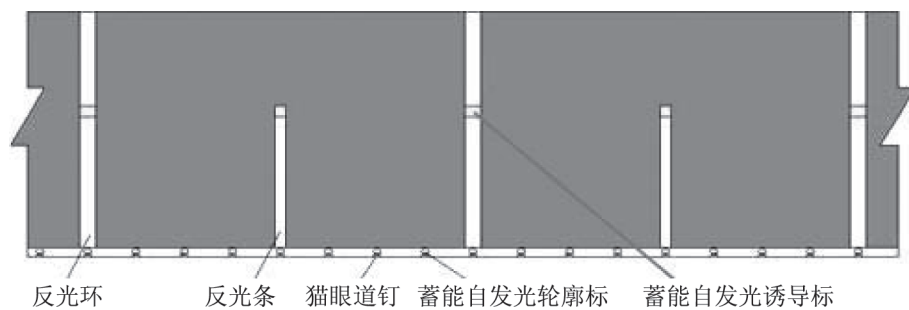


图9 中长隧道过渡段侧视图

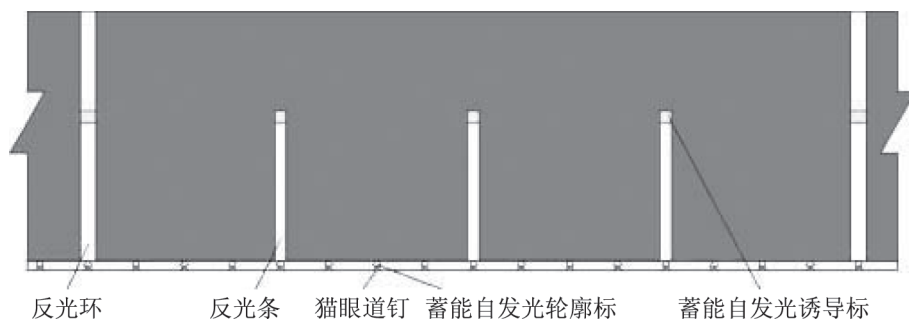


图 10 长隧道中间段基本区侧视图

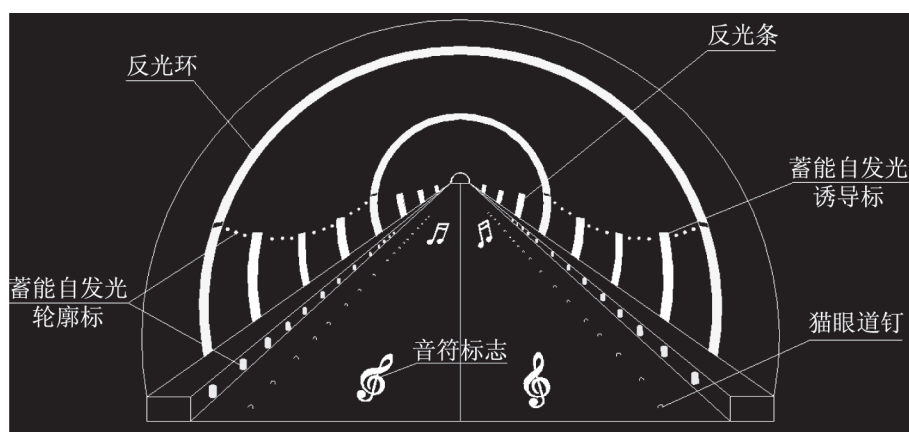


图 11 长隧道中间段提醒区方案透视图

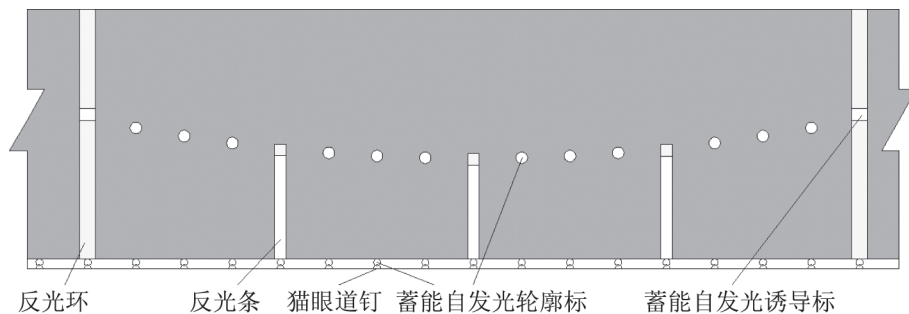


图 12 长隧道中间段提醒区侧视图

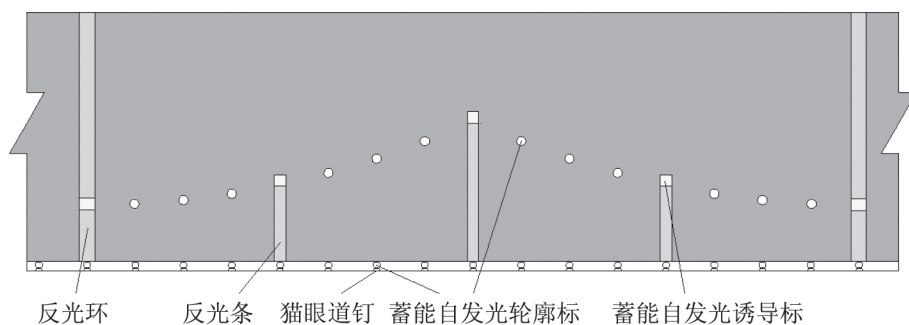


图 13 长隧道中间段疲劳唤醒区侧视图

中间段基本区两条反光环（40 ~ 64m/道）间设置3条反光条（10 ~ 16m/道），中间段提醒区设置彩色反光环（每500m设置一处），两条黄色彩色反光环（40 ~ 64m/道）间设置高度呈韵律曲线变化白色反光条（10 ~ 16m/道），反光环和反光条上设置蓄能自发光诱导标（10 ~ 16m/个），同时应急诱导灯和蓄能自发光轮廓标（2.5 ~ 4m/个）组成韵律曲线增加韵律感，路缘设置猫眼道钉和蓄能自发光轮廓标（2.5 ~ 4m/个）。

对于 > 1 500m 的长隧道中间段添加设置疲劳唤醒区，每 1 500m 设置一处，采用绿色反光环和反光条，并组成韵律图形。

4 结语

本文对隧道驾驶环境和隧道驾驶员视觉需求进行分析，基于驾驶员的视觉需求提出隧道发光诱导系统，该系统主要优点如下。

(1) 主要利用逆反射与自发光技术，采用点、线组合提升隧道局部亮度与对比度，在不大幅度提升隧道整体亮度的情况下给予驾驶员隧道亮度提升的感觉，与传统照明方式相比在安全与经济方面都有较大提升。

(2) 从驾驶员的视觉需求出发，采用多频、多尺寸、多形状、多色彩信息组合设置，合理控制各设施设置数量与间距，与现有隧道低碳发光诱导系统相比有效减缓发光系统对驾驶员的刺激，并合理控制驾驶员的视错觉，高密度诱导信息（猫眼道钉与蓄能自发光轮廓标）提升了速度感，反光条和蓄能自发光诱导标提升了距离感与局部方向感，反光环提升了方

向感。

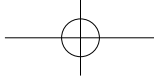
(3) 利用彩色反光环、反光条，并与其他设施组成韵律图形，丰富隧道景观，增加隧道环境美观性，提高驾驶员的舒适感并减缓驾驶疲劳。

本文对不同类型的隧道和不同长度的隧道进行分析，提出具有针对性的设计方案，该系统适用于农村公路隧道和高速公路隧道，对于高速公路隧道或长隧道需要与照明系统配合使用，起到辅助照明的作用，有效降低需要开灯率。但该发光诱导系统需要进一步的实验验证，同时对于弯道、坡道等特殊线形隧道路段尚未给出设计方案，需要进一步展开研究。

参考文献

- [1] 戴忱华, 安超杰, 廖志高, 等. 高速公路隧道路段交通安全特性研究 [J]. 交通信息与安全, 2010, 28 (2): 101-106.
- [2] 张文斌. 知觉理论模型在中长隧道入口安全改善中的应用 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
- [3] 吕宁生. 公路自发光安保工程应用研究 [J]. 交通安全与环保, 2015 (12): 67-70.
- [4] 杜志刚, 潘晓东, 杨轶, 等. 高速公路隧道进出口视觉震荡与行车安全研究 [J]. 中国公路学报, 2007, 20 (5): 101-105.
- [5] Zhigang Du, Zhanji Zheng, Miao Zheng etc, Drivers' visual comfort at highway tunnel portals: A quantitative analysis based on visual oscillation, Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2014. Vol.31(8), pp. 37-47.
- [6] 黄发明. 基于“黑洞效应”的公路驾驶员视错觉改善方法实验研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [7] 肖尧, 杜志刚, 陶鹏鹏, 等. 公路隧道出口

- “白洞”效应改善方法研究 [J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2015, 39 (3): 573-576.
- [8] UNAL A B, STEG L, EPSTUDE K. The influence of music on mental effort and driving performance[J]. Accident Analysis & Prevention, 2012, 48(5): 271-278.
- [9] 杜志刚, 孟爽, 郑展骥, 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 (2): 230-237.
- [10] 中华人民共和国行业推荐性标准. 公路隧道照明设计细则 [S]. JTG/T D70/2-01-2014.



打造生态环境下智能环保拌和楼新格局

刘燕燕 单 岗

(浙江顺畅高等级公路养护有限公司)

摘 要:以浙江顺畅养护公司智能环保型沥青拌合站为案例,从加热系统油改气,到楼体环保系统、成品仓放料处理系统、沥青烟气处理系统、冷配料粉尘处理系统、新型再生滚筒和温拌技术装备等方面,阐述了在国家环保新政要求下的智能环保沥青拌和楼新格局。

关键词:智能;环保;拌和楼。

截至 2016 年底,我国公路通车总里程达 469 万千米,其中高速公路总里程达 13.1 万千米。公路建设的快速发展驱动了经济快速增长的同时,也消耗了大量有限的国家资源和破坏了生态环境。如果说路用材料的生产、加工和使用,是人类给予自然生态的创伤,那么噪声、粉尘、有害气体和公路维护过程中的废料,则是人类给予自然生态的负担。

随着经济水平的不断发展和物质水平的不断提高,“绿色生态”的生存环境逐步回归人们的意识行为中来。如何减少混合料拌和过程中粉尘、废气排放,如何破解矿产资源日益匮乏的局面以及如何提高路面维修过程中旧料的回收率和利用率,一直是公路建设者近年来直面的症结。随着高速公路建设步伐减缓,高速公路养护市场角色逐渐彰显。作为一个有着担当和使命的施工企业,应积极响应国家环保政策要求,创业创新谋发展,打造出集拌和工厂化、操作智能化、生产环保化、资源集约化、耗能最小化为一体的绿色养护基地新格局。

1 实现混合料拌和工厂化的智能环保拌和站

智能环保拌和站(见图 1)采用现代工厂化全封闭结构,双面采光和内部照明,保证了楼内采光。拌和站采用先进的成套环保设备对污染源头全覆盖,有效地解决了常规沥青拌和楼在生产过程中对环境造成影响三种重大污染源:粉尘、烟气和噪声。拌和楼各楼层内均设有粉尘和烟气吸收装置,并且采用强制分层对流冷却设计,降低主楼内温度,保证空气清洁,改善作业环境。



图 1 智能环保拌和站外景

SG4000 型沥青拌和楼除配置常规的

烘干滚筒二级除尘设备外,还采用了全封闭智能烟尘控制处理系统(见图2)。成品仓卸料区车辆通道配备廊式封闭房子,防止粉尘和烟气无组织飘逸,并在车辆进出口使用快速卷帘门封闭,房内配备独立的引风机提供负压,并使用水雾降温风扇,将粉尘控制在中间区域,粉尘通过吸尘管路进入主布袋进行处理,烟气视排烟成分的不同可以分别进入烘干筒二次燃烧或等离子光催化机进行净化处理,粉尘和沥青烟气回收系统可在控制室内自由切换。当沥青烟气从底部进入喷淋旋流塔,经过旋流离心水喷淋的除尘,沥青烟气得到部分去除,进入离心分离工艺。离心工艺采用机械式除烟气技术,沥青烟雾颗粒分子在叶轮盘、片上撞击聚集去除,再进入静电工艺段,剩余未被处理的烟尘被吸附到蜂窝静电场内得到去除。最后进入光催化等离子工艺段,废气经过设备时被紫外光、等离子电场分解,同时光催化及等离子产生的多种活性自由基和生态氧同烟气中的分子碰撞时会发生一系列基元物化反应把有害分子去除,最终使烟气变成二氧化碳和水,烟气处理效率达95%以上。为防止

冷配料装卸过程中产生扬尘,拌和楼具有冷配环保处理系统,除冷料仓除上料口部分敞开外,其余部分均采用钢结构防尘罩封闭处理,罩盖料顶部配备自动感应吸附装置(每个料仓配置单独感应装置,独立作业,提高效能,节约电能消耗),当装载机上车时自动感应装置自动开启吸尘口吸收扬尘,将扬尘有组织地送往专门配置的布袋除尘装置,同时对集料皮带输送过程的扬尘源头也加装了扬尘引风管,有效避免了扬尘无组织地蔓延。拌和站巡检平台与小车行走轨道之间采用透明钢化材料进行全封闭,并在该封闭空间内部配备独立的引风机,形成超强负压吸收粉尘。拌和站的粉罐顶部配有独立的脉冲除尘、满仓声光报警系统,防止打粉出现冒粉、胀罐等事故。废弃的回收粉通过湿式处理装置加湿处理,通过螺旋外排至粉罐车。

智能环保拌和楼特殊的烟尘处理系统和灵活的调控技术,突显绿色环保、高效智能理念,可实现综合能耗降低20%以上。

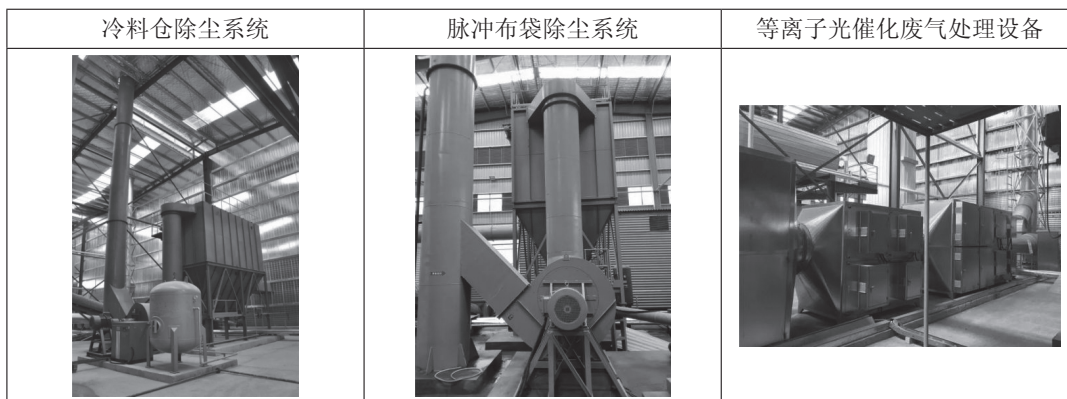


图2 全封闭智能烟尘控制处理系统

附：经环保局环评竣工验收的智能环保拌和站各项监测指标数据结果如下。

污染源废气监测结果	
<p>(1) 烘干废气布袋除尘器排放口颗粒物最大排放浓度为 33.4mg/m³，平均浓度为 31.5mg/m³，最大排放速率为 2.62kg/h，平均速率 2.43kg/h；二氧化硫最大排放折算浓度为 424mg/m³，平均折算浓度为 342mg/m³，最大排放速率为 6.80kg/h，平均速率为 6.34kg/h；氮氧化物最大排放浓度为 95mg/m³，平均浓度为 87mg/m³</p> <p>烘干废气布袋除尘器排放口的颗粒物、二氧化硫、氮氧化物排放浓度均符合《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)新污染源二级标准要求和《工业炉窑大气污染物排放标准》(GB 9078—1996)表 4 二级标准。即颗粒物浓度≤ 120mg/m³、颗粒物排放速率≤ 3.5kg/h；二氧化硫浓度≤ 850mg/m³；氮氧化物浓度≤ 240mg/m³</p>	<p>(2) 导热油炉废气排放口颗粒物最大排放折算浓度为 24.1mg/m³，平均折算浓度为 20.8mg/m³，最大排放速率为 1.15×10²kg/h，平均速率 1.08×10²kg/h；二氧化硫最大排放折算浓度为 低于检出限，最大排放速率为 7.16×10⁻³kg/h，平均速率 6.74×10⁻³kg/h；氮氧化物最大排放折算浓度为 140mg/m³，平均折算浓度为 124mg/m³，最大排放速率为 7.17×10²kg/h，平均速率 6.35×10²kg/h；林格曼悬度小于 1；均符合《锅炉大气污染物排放标准》(GB 13271—2014)表 2 燃油锅炉标准要求。即颗粒物浓度< 30mg/m³、二氧化硫≤ 200mg/m³，氮氧化物≤ 250mg/m³</p>
<p>(3) 拌和楼粉尘废气布袋除尘器排放口颗粒物最大排放浓度为 28.8mg/m³，平均浓度为 26.4mg/m³，最大排放速率为 0.508kg/h，平均速率 0.466kg/h，符合《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)新污染源二级标准要求。即浓度≤ 120mg/m³、排放速率≤ 3.5kg/h</p>	<p>(4) 进料粉尘废气布袋除尘器排放口颗粒物最大排放浓度为 56.6mg/m³，平均浓度为 52.6mg/m³，最大排放速率为 2.19kg/h，平均速率 2.02kg/h，符合《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)新污染源二级标准要求。即浓度≤ 120mg/m³、排放速率≤ 3.5kg/h</p>
<p>(5) 高温沥青罐焚烧炉废气排放口沥青烟最大排放浓度为 31.4mg/m³，平均浓度为 30.0mg/m³，最大排放速率为 1.48×10²kg/h，平均速率 1.42×10²kg/h，苯并[a]芘最大排放浓度为 2.0×10⁻⁵mg/m³，平均浓度为 1.52×10⁻⁵mg/m³，最大排放速率为 9.36×10⁻⁹kg/h，平均速率 7.29×10⁻⁹kg/h，符合《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)新污染源二级标准要求。即沥青烟浓度≤ 75mg/m³、排放速率≤ 0.18kg/h；苯并[a]芘浓度≤ 0.30×10⁻³mg/m³、排放速率≤ 0.05×10⁻³kg/h</p>	<p>(6) 成品仓出料口水喷淋+光催化氧化+低温等离子设施出口废气排放口沥青烟最大排放浓度为 5.12mg/m³，平均浓度为 4.93mg/m³，最大排放速率为 6.04×10⁻²kg/h，平均速率 5.71×10⁻²kg/h，苯并[a]芘最大排放浓度为 7×10⁻⁶mg/m³，平均浓度为 6×10⁻⁶mg/m³，最大排放速率为 8.18×10⁻⁸kg/h，平均速率 7.14×10⁻⁸kg/h。符合《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)新污染源二级标准要求。即沥青烟浓度≤ 75mg/m³，排放速率≤ 0.18kg/h；苯并[a]芘浓度≤ 0.30×10⁻³mg/m³、排放速率≤ 0.05×10⁻³kg/h</p>
<p>(7) 柴油储罐呼吸废气排放口非甲烷总烃的最大排放浓度为 60.1mg/m³，平均浓度为 54.4mg/m³，符合《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)新污染源二级标准要求。即非甲烷总烃浓度≤ 120mg/m³</p>	
无组织排放废气监测结果	
<p>根据监测结果，下风向监控点厂界无组织废气中总悬浮颗粒物的最高浓度为 0.269mg/m³ 苯并[a]芘的最高浓度为 低于检出限，符合《大气污染物综合排放标准》(GB 16297—1996)中表 2 无组织排放监控浓度限制要求。下风向监控点厂界无组织废气中臭气浓度的最高浓度值为 12 (无量纲)，符合《恶臭污染物排放标准》(GB 14554—1993)厂界标准值中的二级标准</p>	

■ 2 清洁无污染的油改气加热方式

传统的沥青拌和楼加热燃料采用的是燃烧油，其性状黏稠，主要成分为碳水化合物及硫、灰分杂质等，热值在 9 500 ~ 10 000 卡 / 千克左右。重油是近几年沥青拌和站在加温系统中替代柴油燃料的主要产品。在生产实践中发现燃烧油存在着污染严重、易损坏设备、操作复杂、高耗能等诸多的缺点，并且燃烧不完全导致排放的烟尘中含有大量的二氧化硫及其他有毒物质，对大气环境污染严重。因利益驱使供货商向燃烧油中添加成本较低的其他化工原料造成燃烧油的质量不稳定，热值达不到要求，从而造成油耗增加，加大了工程成本；化工原料具有强烈的刺激性气味，对操作人员身体损害较大；由于燃烧油的质量问题，在生产过程中经常出现无法点火或在燃烧过程中熄火，造成生产中断；因雾化不好、燃烧不完全产生油烟糊住除尘布袋，影响除尘效果，缩短了除尘布袋的使用寿命；燃烧不好导致在燃烧室处形成积碳，致使燃烧室变形烧坏，增加维修成本，影响正常生产；由于燃烧油中掺有杂质造成燃烧油泵磨损加重、更换频繁等后果。燃烧器低压气动雾化需要大量的压缩空气，致使空压机始终处于满负荷运行状态，加剧了磨损，缩短了使用寿命，从而增加了拌和站使用成本。在诸多不利因素的驱动下，天然气加热方式备受青睐，被国家大力提倡和推广。天然气主要成分为甲烷，热值为 9 000 大卡 / m³，被公认为世界上最清洁的能源，它无色、无味、无毒，燃烧后对空气污染非常小，对人体无害。

(1) 环保方面比较

燃烧油污染严重，有刺激性易挥发气

体产生，维修过程中会造成少量泄漏，燃烧后会产生一部分有害气体。天然气是一种洁净环保的优质能源，几乎不含硫、粉尘和其他有害物质，燃烧后产生的二氧化碳少于其他化石燃料，温室效应低，因而能从根本上改善环境质量。天然气易散发，比重轻于空气，避免了像液体燃料那样因泄漏造成的对大地的污染。

(2) 生产成本比较

直接成本：每生产 1 000 吨沥青拌合料用天然气比燃烧油节省 3 000 元左右（每生产一吨沥青混合料耗天然气 8m³；每生产一吨沥青混合料耗重油 7.3kg，耗柴油 1.2kg/ 吨沥青混合料）。

间接成本：①由于燃烧油质量不稳定，燃烧不完全，对除尘布袋有极大损害，产生油烟会糊住布袋，影响除尘效果。使用燃烧油做燃料，每生产 10 万吨除尘布袋须清洗一次，清洗三次后须全部更换，每次清洗需 1.8 万元，全部更换需 16 万元。使用天然气做燃料对布袋影响很小，能延长除尘布袋使用寿命，至少在 100 万吨以上。②使用燃烧油每生产 5 万吨需更换 1 个燃烧油泵，燃烧油泵每个价格 1.5 万元左右。使用天然气维护费用低，基本很少有机械零部件损坏。③燃烧油火焰不稳定、燃烧不好，极易在燃烧室处形成积碳，烧坏燃烧室；天然气火焰稳定、燃烧效果好，不会发生这种情况。④燃烧油需导热油加热保持在 60℃ ~ 80℃，每天需要一定费用。⑤燃烧油点火需用液化气辅助，增加了一定费用；天然气自行点火，无须辅助。

(3) 碳减排 (CO₂) : 35.8%

计算过程：每吨沥青混合料耗重油 7.3kg，CO₂ 排放为 7.3×3.170 5=23.144 6kg；每吨沥青混合料耗柴油 1.2kg，CO₂ 排放

为 $1.2 \times 3.0959 = 3.7151 \text{ kg}$ ；每吨沥青混合料耗天然气 8 m^3 ， CO_2 排放为： $8 \times 2.1622 = 17.2976 \text{ kg}$ 。 CO_2 减排量为： $(23.1446 + 3.7151 - 17.2976) \div (23.1446 + 3.7151) = 35.6\%$

计算依据：

各种能源碳排放参考系数

中国合同能源管理网 - 2012-03-19

CO_2 排放系数表

数据来源：中国能源合同网 2012-03

2013 年始，顺畅公司在省内率先改造了拌和楼油改气燃烧系统，采用天然气为主要燃料进行沥青混合料生产，获得交通部“交通运输行业绿色循环低碳示范项目”称号（见图 3），在成功应用的基础上进行了推广并应用在智能环保型拌和站中（见图 4）。

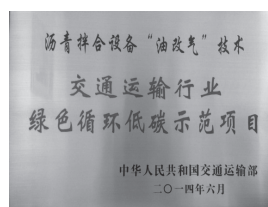


图 3 荣誉证书

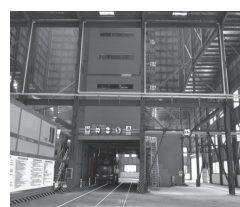


图 4 油改气后的拌和楼

3 博纳帝新型再生滚筒实现 RAP 旧料换新颜

智能环保沥青拌和站采用了意大利博纳帝 RED 新型再生滚筒（见图 5），该滚筒具备传统滚筒的一切功能，可以在生产沥青混合料的过程中直接向烘干筒中添加 RAP 料，解决了传统烘干筒不能直接进行 RAP 料厂拌再生的难题。



图 5 RED 新型再生滚筒

与传统拌和楼生产再生沥青混合料相比，RED 再生滚筒只使用一台燃烧器，新集料和 RAP 的烘干加热效果高于普通双滚筒，并且通过燃烧室特殊设计，将 RAP 加热产生的沥青废气进行燃烧，无论是否添加 RAP 料，燃料消耗都比普通滚筒低 20% 左右。RED 再生滚筒由于其内部的特殊设计，采用逆流加热方式，集料在加热过程中没有

直接接触火焰，使得 RAP 料中的水分得到充分释放，也避免了集料产生老化的现象。RAP 料经过振动筛筛分，生产出的沥青混合料级配更准确，并且，随着 RAP 中沥青被加热软化和水分蒸发，能使新添加的沥青和 RAP 料紧紧地裹附一起，保证了再生混合料的质量。

将回收的 RAP 料经过破碎、筛分，按

事先设定的比例放到两个配料斗中,与新骨料一起经由皮带机送入滚筒共同加热,经振动筛网筛分后进入各挡热料仓,再经计量配料,加入新沥青、矿料充分拌和均匀,即成再生沥青混合料并用于路面铺筑。

目前我国公路发展由大规模建设阶段进入了建养并重的发展阶段,旧路面材料再生循环利用问题已引起公路管养部门的重视与关注。路面材料的再生利用即保护了生态环境,又保持了公路交通可持续发展,因此,沥青路面热再生技术成为近些年来研究热点之一。经过多年研究和应用,

厂拌热再生技术日趋成熟,除国省道、地方道路外,厂拌热再生沥青混合料已广泛用于高速公路的中、下面层,并在高速公路上面层也逐步推广。采用博纳帝 RED 新型再生滚筒生产厂拌热再生混合料,RAP 料最高掺配量可达 40% 以上,实现 RAP 循环利用,降低资源消耗,真正实现了路用材料 100% 循环利用。下面以金丽温高速公路 2017 年路面专项工程为例,在 RAP 料掺配量为 20% 时,沥青路面中、上面层新沥青混合料与厂拌热再生沥青混合料对比数据如表 1~表 3 所示:

表 1 新沥青混合料与再生沥青混合料配合比设计阶段性能参数对比

混合料类型 / 参数	油石比 / %	毛体积密度 / (g/cm ³)	空隙率 / %	最大理论密度 / (g/cm ³)	马歇尔稳定度 / kN	残留稳定度 / %	流值 / mm	冻融劈裂强度比 / %	动稳定度 / (次/mm)
AC-13C 目标	5.00	2.435	4.4	2.546	15.18	89.0	3.1	83.0	3 245
AC-13C 再生目标	4.98	2.443	4.3	2.553	15.05	86.9	3.	82.0	3 537
AC-20C 目标	4.30	2.432	4.2	2.538	14.36	88.0	3.3	83.0	5 118
AC-20C 再生目标	4.38	2.427	4.4	2.54	15.9	87.3	3	83.3	4 297
AC-13C 生产	5.00	2.439	4.4	2.552	14.98	86.4	3.3	83.0	> 6 000
AC-13C 再生生产	5.00	2.448	4.6	2.565	15.45	91.7	3.2	85.8	4 913
AC-20C 生产	4.30	2.432	4.2	2.538	14.36	88.0	3.3	83.0	5 118
AC-20C 再生生产	4.40	2.426	4.4	2.537	15.7	87.0	2.5	90.2	3 806
技术要求	/	/	4~6	/	≥ 8	≥ 85	2~4	≥ 8	≥ 3 000

表 2 新沥青混合料与再生沥青混合料生产阶段抽测性能参数对比

混合料类型 / 参数	油石比 / %	毛体积密度 / (g/cm ³)	空隙率 / %	最大理论密度 / (g/cm ³)	马歇尔稳定度 / kN	流值 / mm
AC-13C	4.98	2.439	4.4	2.552	17.11	3.6
AC-13C 再生	4.93	2.446	4.8	2.568	17.33	3.5
AC-20C	4.32	2.429	4.3	2.537	12.23	3.3
AC-20C 再生	4.38	2.427	4.3	2.538	12.43	3.1
技术要求	/	/	4~6	/	≥ 8	2~4

表 3 新沥青混合料与再生沥青混合料现场实测数据对比

混合料类型 / 参数	现场密度平均值 / (g/cm ²)	渗水平均值 / (ml/min)	构造深度平均值 / (mm)	摩擦系数平均值 /BPN
AC-13C	2.422	93	0.69	53
AC-13C 再生	2.419	105	0.72	56
AC-20C	2.428	/	/	/
AC-20C 再生	2.418	/	/	/
技术要求	/	≤ 150ml/min	≥ 0.55	≥ 45

数据表明, 掺配一定比例 RAP 料的厂拌热再生沥青混合料路用性能指标完全达到新集料沥青混合料路用指标。由于 RAP 掺量大小对热再生混合料高温稳定性、低温抗裂性、水稳定性以及疲劳性能等指标影响程度不同, 为此, 在使用过程中应综合考虑工程的实际特点、RAP 料的性能和热再生混合料所处的结构部位来确定 RAP 的掺量。

4 有效节能的发泡水温拌技术

引用美国 ASTEC 发泡水温拌装置 (见图 6), 其工作原理为将少量的水加入热沥青中, 热沥青与冷水表面发生能量交换, 将水滴加热至 100℃ 蒸发, 水蒸气进而包裹在沥青中。此时沥青膨胀发泡, 沥青体积暂时增大, 使得沥青黏度下降, 增加了混合料拌和的和易性。发泡水温拌技术, 在不改变沥青混合料各项技术指标的条件下, 通过降低沥青混合料拌和温度、碾压温度, 以缓解和改善公路建设过程中高温作业环境。发泡水温拌技术比传统的混合料拌和温度低 30℃ 左右, 避免了蓝烟和有害气体的产生。除此之外, 发泡水温拌生产方便, 无须额外添加剂, 温拌沥青混合料路用性能 (如水稳定性、高温稳定性、低温抗裂性) 均满足热拌沥青混合料技术

要求。

温拌沥青混合料与传统沥青拌和相比, 可使室内气体排放量减少 50%, 沥青“蓝烟”等有害气体减少 80%, 减少了空气污染, 改善了作业环境; 温拌沥青混合料可减少拌和能源 (燃料) 消耗 15% 左右, 不需要添加剂, 仅需沥青质量 1%~2% 的水, 节约了施工成本; 发泡水温拌技术降低了拌和温度, 减少了沥青的瞬时老化, 提高了路面耐久性, 同时, 路面施工和易性增强, 路面更易压实, 在缓解了高温作业环境同时, 也降低了施工的季节影响。

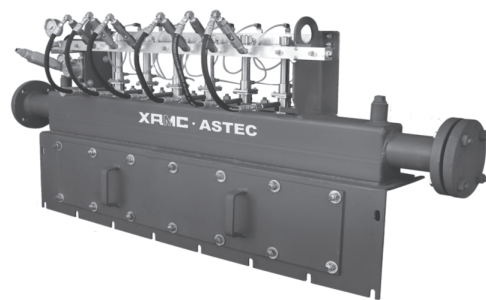


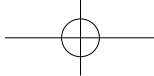
图 6 ASTEC 发泡水温拌装置

节能环保技术永无止境, 作为绿色养护的践行者, 打造节能、环保和智能型拌和站, 不仅符合节约资源和保护环境的时代主题, 也是符合“创新、协调、绿色、开放、共享”的发展理念, 更是符合公路养护人对习近平总书记“两山”理论践行。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国交通部 . JTG F40—2004 公路
沥青路面施工技术规范 [M]. 北京: 人民交通
出版社, 2004.11
- [2] 中华人民共和国交通部 . JTG F41—2008 公路

- 沥青路面再生技术规范 [M]. 北京: 人民交通
出版社, 2008.4.
- [3] 国家环境保护局 . GB 16297—1996 大气污染
物综合排放标准 [M]. 北京: 人民交通出版社,
1997.



高速“智慧服务区”规划探索

余 诚 卞 军

(浙江高速信息工程技术有限公司)

摘 要: 随着智慧高速、智能交通建设的迅猛发展,作为高速公路承担出行、休闲、消费和服务的重要节点,服务区信息化建设发展势在必行。本文以浙江省高速服务区智慧化建设规划为例,为服务区信息化建设探索设计一条可行发展道路。

关键词: 智慧服务区; 信息化; 大数据分析; 云计算。

1 概述

1.1 研究背景

1. 服务区定义

^[1] 高速公路为了保证能够高速连续行驶,采用全封闭、全立交的管理原则,严格控制车辆出入,车辆驶入高速公路后,除在互通式立交处允许上下外,基本上是与外界隔离的。高速公路的“封闭性”阻隔了车辆和旅客与外界的联系,服务对象在运输过程中产生的需求得不到满足。比如司乘人员及旅客在途中食宿、购物、通信和生理等方面的需求,车的加油、检测、维修需求,部分货物在运输过程中需要特殊处理措施等。这些需求要借助于高速公路内部的服务设施来满足,即高速公路沿线服务区,^[2] 目前全世界已有 80 多个国家和地区拥有高速公路,通车里程超过 23 万千米。

因此,所谓高速公路服务区,是指在全封闭、控制出入的高速公路上,为了缓解并消除长时间的高速行驶对驾乘人员带来的心理上、生理上的疲劳以及汽车机械

疲劳而提供的就餐、采购、休息、加油、修理等全方位服务的设施。

2. 浙江建设现状

2012 年 5 月,浙江省政府发布《关于务实推进智慧城市建设示范试点工作的指导意见》(浙政发〔2012〕41 号)文件,开启了“智慧高速”建设,并于 2015 年初步建设完成。服务区作为高速公路的重要组成部分,具有较为明显的商业独特性和行业禀赋性,在信息化、智能化、数据化等方面均需有所突破。随着智慧高速建设的迅猛发展,作为高速公路承担出行、休闲、消费和服务的重要节点,智慧服务区建设发展势在必行。

2014 年以来,浙江省交通投资集团在信息型服务区的基础上,以“全国领先”为目标,进一步提出了打造“智慧服务区”理念,结合“云物移大智”等新技术,突破实体服务区原有的时空限制,着力打造线上虚拟服务区,综合利用大数据、云平台,力争为出行人员和各品牌加盟商户提供全方位、立体式的专业化商业服务和出行体验。

1.2 建设需求

1. 存在问题

浙江省“智慧服务区”经过多年的建设和业态布局，已经由传统服务区逐步实现了信息化服务区，初步实现了从总部到各服务区节点的统一收银、监控平台，但仍存极大完善空间，以浙江及外省考察调研分析，服务区信息化建设普遍存在如下问题。

(1) 信息化基础薄弱。大部分服务区网络存在接入条件较差、带宽不足、形式单一、稳定性差等问题。

(2) 内部监管手段单一。服务区分布零散，巡检力度较低，人为主观因素大，容易滋生慵懒和侥幸心理，监管部门得不到真实的数据和信息，不能够合理做出应有的服务调整与规划，降低服务质量。

(3)^[3] 安全管理基础薄弱。车流、客流量大的服务区，安全管理难度大，没有形成全范围和重点突出的安防监控。监控系统未形成联网，易出现偷盗行为，事后举证较难，易滋生治安事件，影响服务水平和窗口形象。

(4) 服务功能单一。尽管在服务区信息化建设过程中已引入了信息查询功能，但服务内容较少，需要综合考虑与交通、旅游、物流等外部平台的对接。

2. 需求分类

(1)^[4] 内控管理需求包括对服务区的人事、财务、资产和协同办公的需求。

(2) 经营管理需求包括对服务区的超市、餐饮、加油、客房等经营管理信息化的需求。

(3) 公共管理需求包括对服务区停车场、服务区公共安全、公众信息的查

询及公布等。

(4) 决策分析需求包括实现现场情况、经营状况、公众服务、安全运营等方面的协同及汇聚，对服务区内各业态实时运转情况与运营效果的数据化反馈。

2 总体规划设计

2.1 总体设计架构（见图1）

1. 五大基础

(1) 一张传输网络

坚持有线网与无线网相结合，建设高质量、大容量、高速率的数据传输网络，规划、整合现有的网络资源（含自建专用、运营商租用），实现公司本级以及所属单位办公网络的覆盖，实现服务区公众无线网络的覆盖，实现公司本级与各服务区之间的互联互通，实现为数据互联互通、开放共享、实时互动提供可靠通道。

(2) 一套信息采集体系

数据信息采集是信息化形成的基本要素，坚持全面感知，根据日常管理、经营运营、监控、公众服务等应用的需要，合理规划建设各子公司各类系统的数据接口、各子公司的视频监控摄像头等，从而达到信息整合融合、信息分析处理、信息交互共享，为公司日常管理、经营分析和公共服务提供可靠的基础数据来源。

(3) 一套精确的地理信息系统地图

将现有的高速公路地图转化为多图层、高比例、统一使用的地理信息地图，作为应用支撑体系和信息展示基础平台。根据公司部门以及所属单位的不同需求，将全省高速公路的各类属性数据、空间数据实行共享，按照具体需求分别展示在地

提供其相对应的运营业务提供信息化管理系统,包括服务区收银管理、餐饮管理、物业管理、仓储管理、商品采购配送管理等。

(3) 新媒体平台

新媒体平台建立公共出行系统是体现“转型升级,服务于民”的重大举措。利用现代移动通信媒体建立微信、微博、手机 App、服务区触摸综合信息屏及广播媒体,将高速公路相关路况、服务区停车位、气象、事件以及服务区商品信息、周边旅游信息等进行实时宣传、销售、支付、评价、互动,为公众出行提供多方式的服务。

(4) 分析决策平台

分析决策平台汇总各部门、各服务区的资金信息、工作管理信息、商品信息、车人流信息等经营数据以及与交通相关的信息,通过数据挖掘、业务建模生成决策分析报告,支持公司管理层进行决策分析,包括资产经营决策分析、服务区经营决策分析、财务决策分析和车流人流分析等。

3. 三层架构

从云平台技术架构角度,智慧服务区云服务应用平台技术架构主要分为 IaaS、PaaS、SaaS 三方面。

基础设施即服务(IaaS)是指云资源池管理层,它采用分布式部署方式,利用虚拟化技术,把分散各服务区的硬件资源“聚集”起来,形成一个资源池,进行统一管理和调度。同时又与公有云对接,搭建成一个混合云,通过公有云来支持对外公众服务。

平台即服务(PaaS)主要指运行服务体系平台,主要由大数据管理平台和商业智能分析平台组成。大数据管理平台是智慧服务区云平台的内核,而商业智能分析

将独立形成各类应用均需要的中间层服务组件。

软件即服务(SaaS)主要是智慧服务区云平台的具体应用,包括内部管理、经营管理、新媒体及分析决策下的各类应用。

4. 一个平台

对服务区信息化建设方案进行“统一规划、迭代设计、分期实施”,逐步完善“五大基础”“四大平台”和“三层架构”,运行功能、业务功能日益强大,力求通过统一的服务区管理平台解决服务区运营和公众服务问题,如图 2 所示。



图 2 服务区管理平台

2.2 核心重点应用

1. 内部管理平台之任务管理

当前服务区对日常管理工作中保洁、巡查、抄表等工作较多采用劳务外包方式,而对于外包人员的工作绩效、任务执行情况一直较难有有效的监管手段,当接到公众投诉时难以取证、突发事件事故时缺乏对一线工作人员的调度。任务管理应用基于 App 方式,如图 3 所示,实现人员的定时定位上报、任务下达、工作情况反馈。该功能与服务区内部管理中的人员管理、设备管理进行整合。



图3 任务管理 App

巡查、保洁人员通过 App 端可接收上级管理人员下达任务，通过 App 记录执行过程文字、图片信息，并实时反馈至管理系统；上级管理人员可通过 PC、App 查看执行进行，并进行督办、关闭、再次下发等操作。平台可实现设备巡查、水电抄表、安全巡检、卫生检查等业务需求，具体权限的管理人员可实时发起人员定位抽查、临时任务下达指令，对应员工在接受指令后需在 App 中接受检查指令，并通过手机 GPS、定向二维码扫描等方式上传其位置、执行情况信息。

2. 经营管理平台之客流量分析

服务区客流分析（见图 4）是经营指标的重要因素，针对总体客流量与经营数据的科学比对，可评估各个服务区出行人员的消费偏好、购买比重、引导路线，而对服务区重点的餐厅、超市、商铺、卫生间的客流分析统计，可实现精细化管理，针对单店考核 KPI、客单转化率、经营利润等，从而形成利润分成、店铺租赁、员工招聘等众多经营决策的价值数据。

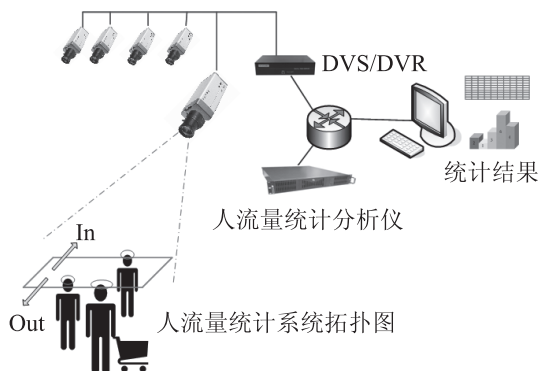


图 4

客流量分析的实现，采用融合视频处理、图像处理、模式识别以及人工智能等多个领域技术，通过大量样本形成统计模型；通过对视频中人头的监测和跟踪判断通过区域的人数、方向，实现客流量的统计。

3. 新媒体平台之互联网应用

新媒体平台（见图 5）的建立是服务区公共出行服务“转型升级”的重大举措。利用现代移动通信媒体建立微信公众号、小程序、手机 App、服务区触摸综合信息屏、广播媒体，将高速公路相关路况、气象、事件以及服务区商品信息等进行实时宣传，



图 5 多媒体平台

为公众出行提供多方式的服务,针对不同类型的出行者提供相适应的应用载体,如:智慧服务区 App,主要面向高速路网出行频率较为频繁的固定用户,已实时路况、便民服务为核心功能;微信小程序,主要面向临时出行、频率较低的用户,用完里面的功能退出即可,不占据微信聊天界面,也不占用手机存储空间。微信公众号,提供消息类推送服务,包括高速公路、服务区热点、信息的推送、关键词自动回复、热门文章自动抓取等。

4. 分析决策平台之大数据(见图6)

服务区管理平台形成服务区数据资源的汇聚,改变服务区经营及相关业务的数

据信息通过各自系统单独进行采集,缺乏统一的数据汇集、数据清洗、数据剪裁和加载的现状,形成对经营数据、消费数据、地理数据等的统一管理,为新数据源、新采集方式的互联提供标准,形成数据的深度挖掘与大数据分析的基础。大数据分析依托 SaaS 层应用所采集的数据源,可分析出行者在服务区停留时间与消费金额之间的联系;基于服务区内免费 Wi-Fi 定位、视频人流量监控数据,分析区域人流与区域服务内容间相关关系;通过 App、客流量监控、触摸屏等终端,分析服务区广告成功引导收益模型。

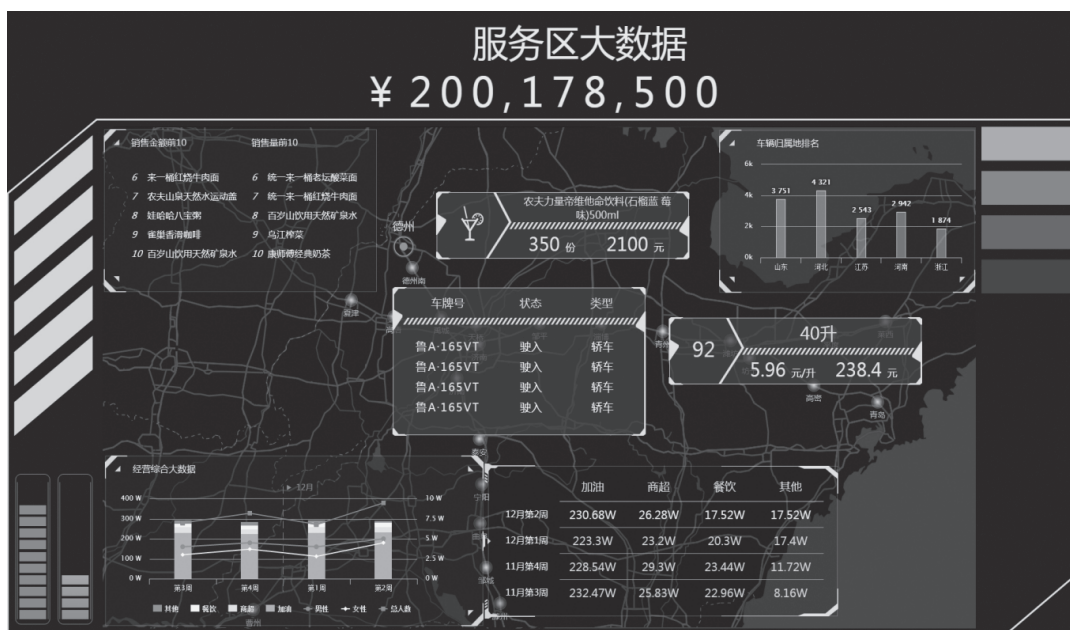


图6 大数据展示平台

2.3 实施策略

智慧服务区建设应本着“大胆假设、小心求证、源于实际、适度超前”的宗旨,结合服务区功能要求、服务水平以及建设资金,把握服务区中长期发展趋势。服务

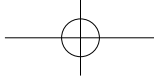
区可以根据技术规模、地理环境、需求程度实行总体设计、分步实施,分阶段扩容和版本升级换代,在充分利用原有的计算机系统资源基础上,确保投资的项目经济适用、注重实效。

3 结论

智慧服务区的建设将改进现有服务区的信息系统建设思维、数据应用方式和商业运营模式，以一种全新的信息系统架构、数据化的商业智能分析和系统化的运营盈利模式为高速公路全过程经营管理所涉及的公众、服务区经营管理者和行业管理部门三方用户，提供智慧化的、恰到好处的服务，真正体现了“以人为本”的服务宗旨和“社会服务与经营效益双丰收”的服务运营理念。

参考文献

- [1] 汪晓露. 沪宁高速公路服务区建设与实践之分析 [J]. 交通纵横, 2000 (3): 24-25.
- [2] 汤毅. 高速公路服务区规划的关键技术研究 [D]. 西安: 长安大学 2008 F253 10710-20051164: 3.
- [3] 陆由. 高速公路服务区信息化架构与研究 [J]. 中国交通信息化, 2014 (1): 45.
- [4] 虞安军, 刘麒麟. 集团型高速公路服务区信息化建设的设计和实现 [J]. 中国交通信息化, 2016 (1): 81-83.



高速公路交通信息个性化定制初探

胡晓¹ 夏春晓²

(1. 浙江智慧高速公路服务有限公司; 2. 浙江高速信息工程技术有限公司)

摘要: 在移动互联网环境下, 社会公众对高速公路出行信息需求越来越多样化、及时性全面性要求越来越高; 当前社会公众首要上网方式是使用手机等智能终端上网, 在有信息需求的时候能随时随地查询交通出行信息。本文在这些背景的基础上提出高速公路交通信息化个性化定制的观点, 主要是总结现有服务方式的不足, 分析实行个性化定制的可行性、必要性, 提出个性化服务的模式, 最后为保障该服务的顺利开展, 提出了四点对策。

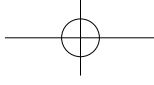
关键词: 高速公路; 交通信息; 个性化服务。

截至 2016 年底, 浙江省公路总里程已达 11.9 万千米, 其中高速公路通车里程超 4 000 千米, 公路密度 116.95 千米/百平方千米。从路网密度来看, 浙江是全国平均水平的 2.5 倍, 高速公路密度位居全国第二, 仅次于江苏。这样的路网密度, 已趋于发达国家水平。据数据统计, 2016 年中国内地机动车人均保有量为 29 469 万辆, 平均 4.66 人拥有一辆车。从人均水平来看, 浙江省平均 3.3 人拥有一辆车, 人均保有量最高^[1]。2010—2014 年浙江省高速公路新增通车里程 501 千米, 但路网车流量却日均新增 40 万辆, 路网里程增长速度远不及车流量增长速度, 巨大的车流量造成浙江省部分路段超负荷运行, 拥堵成为了常态, 交通供需矛盾日益突出。

从 2004 年以来, 浙江省以及部分省市陆续开始了基于传统互联网的高速公路出行服务系统的建设, 并面向公众提供查询服务, 服务内容涵盖道路路况、气象信息、路径路费、交通地图、旅游景点等, 公众可通过交通门户网站、可变情报板、客服电话和广播等方式获取。上述由交通运输

行业主管部门提供的基于传统互联网的高速公路交通信息服务在使用中存在以下问题: 一是可供查询信息以施工等静态信息为主, 交通事故等动态信息在及时性方面相对不足; 二是服务信息以“你问我答”式单向传播为主, 双向互动手段不足; 三是信息采集系统不完备, 信息内容不全面, 信息量较小; 四是信息发布效率低; 五是不便于随时随地查看; 六是用户被动接收, 不能实现个性化定制。

近年来, 以智能终端为载体的移动互联网迎来了爆发式增长, 据中国互联网信息中心(CNNIC)发布第 40 次《中国互联网络发展状况统计报告》显示, 截至 2017 年 6 月, 中国网民规模达到 7.51 亿, 占全球总网民数的 1/5, 手机网民数达到 7.24 亿, 手机网民占比达 96.3%^[2]。这就为高速公路交通信息服务提供了新的应用手段和发展机遇。基于移动互联网的高速公路交通信息服务系统能够弥补传统交通信息服务系统的不足, 丰富高速公路交通信息服务的服务方式和服务手段, 拓展出行服务信息的获取和发布渠道, 缓解高速公路出行服



务信息的供需矛盾和信息不对称,满足出行者多元化、个性化的服务需求。如何满足公众这种特殊需求,个性化信息服务定制提供了一条可行的解决途径。个性化服务是信息服务发展的必然趋势,彻底改变以往“我提供什么,用户查询什么”的服务机制,变为“用户需要什么,我就提供什么”,实现对用户的主动信息推送服务,服务有针对性、网络化、人性化、交互性的特点。

1 高速公路交通信息个性化定制的必要性和可行性

1.1 高速公路交通信息个性化定制的必要性

1. 个性化服务可以缓解高速公路交通供需矛盾

截至目前浙江省已建成高速公路4000多千米,高速公路网络体系已基本建成,“十三五”期间浙江将在“加密、提标、扩容”上下功夫,高速公路重心已从先前的建设为主向联网运营转移。当前公众出行需求已从“走得了”向“走得快、走得好、走得安全”上转变,对高速公路各管理方提出了更高的要求,在现有基础上提质增效,从量变到质变,浙江省高速公路管理已到了转型升级的关口期。从交通行业自身来讲,2016年国家部委层面正式启动“智能交通”战略,相继出台了《关于推进“互联网+便捷交通”促进智能交通发展的实施方案》《推进智慧交通发展行动计划(2017—2020年)》等多个顶层设计方面的文件,围绕以智能化带动交通运输现代化的政策推动,倒逼着高速公路各

管理方要重新审视高速公路传统的运营管理,借助“互联网+便捷交通”、大数据开发应用等开展智慧交通建设,运用先进的高速公路交通信息服务系统缓解道路供需矛盾是其中的有效途径之一。

2. 个性化服务可以有效满足用户日益多元化的信息需求

以往社会公众通常希望获取道路路况、路径路费等出行基础信息,但是随着社会公众对高速公路服务要求的提升,还要获取交通事件信息、通行时间预测等影响快速出行的关键信息。基于移动互联网的高速公路交通信息服务系统能够丰富信息服务的供给手段和服务内容,公众可根据自身需要选择获取相应信息,满足公众对出行服务信息的多元个性化需求。

3. 个性化服务可以有效提升高速公路服务质量

通过提供个性化服务,公众可以随时随地地获取自己最关注的拥堵信息、交通事故、通行时间预测以及服务区、收费站等高速公路沿线服务信息,个性化服务给公众的出行提供充分的信息支撑,提高高速公路服务质量。

4. 个性化服务可以有效提升信息资源的利用效率

个性化服务可以根据公众的不同需求对信息资源进行深度糅合、匹配、整合,实现信息资源的高效利用,根据公众的个性化多样化的需求,可以对部分有这类信息获取需求的公众进行推送,避免信息资源的浪费。

5. 个性化服务可以实现节能减排和畅通出行

针对公众提供的个性化服务,可以有效减少交通阻断事件的发生,减少交通延

误,降低燃油消耗,为出行者和管理者节约成本,从而在一定程度上实现节能减排和畅通出行。

1.2 高速公路交通信息个性化定制的可能性

1. 移动互联网及其应用软件的快速发展

移动互联网具备便捷性、即时性、交互性等特点,依托于移动互联网技术的快速发展和应用软件开发不断深化迭代,高速公路交通信息服务将助推出行便利化,推送、订阅、双向交互的方式将成为主流,以便于出行者随时随地获取可靠的交通信息。基于移动互联网的高速公路交通信息服务系统将在高速公路管理和服务过程中发挥越来越重要的作用。

2. 高速公路拥有信息资源优势

高速公路管理方掌握第一手的高速公路交通拥堵、养护施工、交通事故等实时路况信息,事件类型、事发位置、事发原因、人员伤亡、现场救援情况等突发事件信息,以及通过高速公路上的物联网感知设备(车检器、摄像机、高清卡口、气象站等设备),可以提供精确的路况信息;对高速公路的收费站、服务区、隧道等基础设施的管理,也是其他单位所不具备的,通过对自身资源与互联网信息的融合可以更好地为公众出行提供服务。

3. 掌握不同客户出行需求信息

高速公路管理方综合公众查询的客服电话、短信、应用软件浏览记录等数据,通过后台数据分析公众不同的出行信息需求,跟踪用户的需求,归纳出公众日常使用频率较高的功能需求。同时通过推送信息调研,针对每个公众提交的结果对信息进行筛选采集需求信息。

2 高速公路交通信息个性化定制服务模式

现阶段高速公路交通信息用户的主体主要可分为高速公路出行者、高速公路运营单位、高速公路公安交通管理部门、高速公路交通管理部门、应急服务团体、新闻媒体、科研院所等。本文以高速公路出行者为讨论对象,分析出行者的信息服务需求;然后根据出行者的服务需求,设计系统的服务功能模块,并逐一一对每个服务功能模块进行二次细分,直到所有服务功能模块能被细分出来的子功能完全表达;最后按照“家族谱系图”的形式对系统的服务功能模块和各子功能进行排列,绘制一张详细的服务功能图谱。

2.1 网络为依托建服务平台

服务以网络为依托来建设,具体平台可以为手机短信、客户端程序等,通过平台来对信息进行接收、筛选、融合、转发、发布。

(1) 手机短信。手机短信信息服务可以由高速公路管理方交通信息化系统自动生成,也可以是用户自主定制,用以向用户推送所需的道路通行情况等基本功能。手机短信在推送字数和资源格式上有较多限制,只能推送简短的文字信息,属于比较初级的信息推送服务。

(2) 客户端程序。客户端程序是安装在智能手机等移动端上的一个软件,它与电脑上的软件程序一样,点击后即能通过其进入网络,用户不仅能接收手机短信或WAP网页服务能推送的所有信息和服务,还能实时浏览查询自己需要的视频、图片、文字等相关信息,同时用户还可以根据自

己的需要, 订阅该客户端的信息。客户端服务就是将高速公路提供的所有服务封装于一个应用中, 用户使用时仅需将该应用下载并安装到移动设备中, 方便出行者随时随地浏览。随着智能手机的崛起, 移动互联网被广大手机用户的接受, 我国移动互联网客户端的开发及应用也将呈井喷状态。

除上述两种信息服务外, 还有传统 WAP 网页展示方式的信息服务, 相较于移动客户端, 更多出行者偏好后者。

2.2 搭建专题导航服务内容

针对高速公路出行者, 还要搭建专题导航服务系统, 提供公路基础信息、路网运行信息、突发事件信息、沿线服务信息、个性化服务信息五大类信息(见表 1), 涵盖旅行时间预测、地理位置定位、实时交通信息推送与播报、气象信息、周边服务设施、高速公路收费支付方式的选择、应急服务、其他拓展信息推送等服务, 具体服务内容结合用户需求进行细化。

表 1 高速公路出行者交通信息服务需求

分 类	需求信息	详细信息
公路基础信息	公路概况	名称、编号、车道数、限速、途经城市、平行公路等
	收费站	名称、位置、收费标准、支付方式、衔接道路及城市等
	服务区	名称、位置、提供服务内容
路网运行信息	交通拥堵	交通管制、管制位置、预计时间、绕行方案
	施工信息	施工位置、时间、是否占道、是否管制、是否堵车
突发事件信息	自然灾害	位置、时间、是否交通管制、预计时间、绕行方案
	事故信息	位置、时间、是否拥堵、是否通管制、预计时间、绕行方案
沿线服务信息	气象信息	是否交通影响
	加油站信息	是否营业、油品种类
	维修信息	维修等级
个性化服务信息	路径规划	综合里程、时间、收费、路况条件及行程时间预测
	沿线信息	酒店、景点等

2.3 开展定题、专题服务

定期开展定题、专题服务, 更好地与用户进行沟通, 了解用户所需要的服务内容、收集用户在使用过程中遇到的问题以及建议, 完善系统的功能以及提供用户的满意度。

制定相应的技术与服务标准, 主要从高速公路出行者出发, 针对不同高速公路出行者制定对应的信息推送和处理的规范, 保障信息的高效、精确、实用。

3.1 完善基础设施

基础设施作为高速公路出行和管理的主要载体, 完善基础设施有利于提高高速公路出行的安全性、便捷性、舒适性, 提高高速公路出行者出行满意度; 有利于高

3 高速公路交通信息个性化定制措施与对策

高速公路交通信息个性化的实施, 要

速公路营运管理部门对高速公路实时交通信息的采集与分析。基础设施的完善包括：道路质量的完善，例如定期对路面进行保养；根据流量情况适当增加车道，减少因车道少产生的交通拥堵情况；收费站设施完善，例如增加 ETC 车道，减少车辆因排队缴费产生的收费站拥堵；提供多种支付方式，增加除了现金以外的移动支付、无感支付等手段，给司机提供灵活、多变的支付方式，收费站提供周边旅游或者出行信息咨询服务等。服务区的完善，例如增加小车停车位，安装停车位空位显示屏提醒司机可用车位数，以免造成服务区拥堵；提供多样的消费设施，针对各地区的饮食习惯提供不同的餐饮服务。

3.2 注重用户体验

目前所有行业对用户的体验都放在第一位，只有用户体验好了，才会继续使用服务。针对提高用户体验的方式，可以定期开展专题服务，给用户提供一些日常所需的额外服务，例如服务区加油优惠，ETC 收费优惠等活动。还可以不定期地组织用户回访，了解用户对服务的满意度，收集用户的意见和建议并完善服务方式和内容。

3.3 加强技术创新

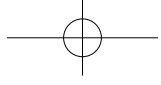
现阶段是互联网高速发展的时期，作为一个为公众服务的平台，服务的方式与方法需要与时俱进，一旦技术水平无法跟上，公众势必会选择更好的平台，从而会减少用户的黏性与新鲜感。

3.4 加大营销宣传

平台的完善与可持续性发展离不开广大用户的使用，只有用户数量增加了，通过用户采集的信息才会更加准确，进而更精准、更及时的信息会使用户黏性持续增长。为了保证用户的数量与用户的多元化，需要加大营销宣传。借助于高速公路自有的可变情报板、收费站、服务区等手段，发布宣传信息；新闻媒体作为用户主体之一，可以联动新闻媒体进行宣传。

参考文献

- [1] 中商情报网. 2016 年各省市汽车保有量排行榜 [Z]. <http://www.askci.com/news/dxf/20170222/1125539-1315.shtml>, 2017-02-22.
- [2] 中国互联网络信息中心. 第 40 次《中国互联网络发展状况统计报告》[R]. http://www.cnnic.net.cn/hlwfzyj/hlwxzbg/hlwtjbg/201708/t20170803_69444.htm, 2017-08-03.



基于灰色马尔可夫模型的交通量反演预测方法研究

徐方圆¹ 田浩²

(1. 浙江大学宁波理工学院; 2. 浙江省交通科学研究院)

摘要:目前的交通量预测模型多是连续时间段的单向输入—输出,针对动态称重系统可能出现的连续时间段内的交通量信息缺失情况,建立以灰色GM(1,1)模型的参数值最优作为目标函数的反演方法,重构连续时间段的交通量信息。针对灰色模型建立的初始预测值波动性较大,采用马尔可夫模型通过迭代确定优化的状态转移模型修正,并应用于某国道公路桥梁多个缺失数据的预测。结果表明,灰色模型的反演结果较实测值波动较大,灰色马尔可夫模型的反演结果能充分利用已有交通量信息,得到较好的交通量预测结果,可用于对缺失交通量数据的预测。

关键词:交通量预测;缺失数据;灰色模型;马尔可夫模型;反演。

1 概述

随着国省道公路逐步取消收费,大量货运车辆转走国省道及地方公路,为了解运营中公路桥梁上车流量,目前主要采用的方法包括:①通过交通调查粗略确定的方法;②基于神经网络计算的智能方法;③采用车辆动态称重传感器系统WIM(weight in motion)监测^[1]。其中,动态称重系统由于具有检测速度快、能实时获取车流量情况等优点而被广泛应用。然而,不可避免地,动态称重系统在运营过程中会出现采集数据的缺失或纰漏,导致数据信息的不完整,从而无法完整反映公路桥梁上的交通量状况。因此,为了实现交通量数据的长期完备性,需要通过预测方法进行缺失数据及未来交通量分析。

目前,交通量预测方法主要有历史平均法、指数平滑法、时间序列法、灰色预测模型法、神经网络法和支持向量机模型法等^[2~4]。其中,灰色马尔可夫预测模型

已被较多研究。刘宗明^[5]采用GM(1,1)模型拟合交通系统,并在此基础上对随机波动性大的残差序列进行马尔可夫预测,并将其运用至太原某街道每15min的连续时间段交通量预测中。任明仑等^[6]建立了灰色马尔可夫模型,基于数量较小的连续时间段内的超载量数据进行超载车辆的预测分析。蒋丽忠等^[7]建立交通量灰色马尔可夫模型预测,提出模型的精度检验标准,并对贵州连续7年的年交通量进行预测分析。杨志勇^[8]将灰色模型和神经网络模型结合,应用于高速公路某路段连续时间段的交通量预测。Zhang等^[9]采用灰色马尔可夫模型对运营阶段的桥梁上的车辆荷载进行预测分析。Qi等^[10]、Lu等^[11]利用马尔可夫模型预测短时交通量变化。可以看到,这些方法是在连续时间段内对交通量数据的发展过程和趋势进行单向输入—输出预测(如图1所示),即①需要原始数据在时间序列上是连续的;②只能进行后续时间的数据预测。但是,目前针对连续

时间段内出现数据缺失的交通量预测方法的研究较少。

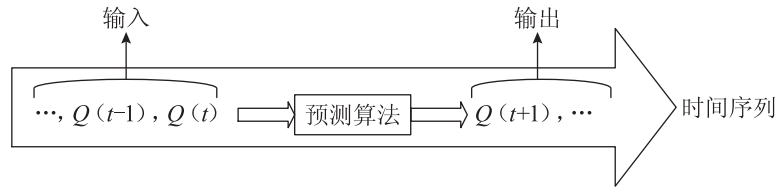


图1 传统交通量预测方法

本文在传统灰色马尔可夫模型的基础上，提出了一种针对连续时间段内原始数据缺失的交通量反演预测方法。首先，根据已采集的不连续时间序列的交通量，以灰色预测模型的参数值最优作为目标函数，重构车辆在实际运营环境下的交通量分布。其次，针对灰色 GM(1, 1) 模型建立的初始预测数据波动性较大，采用马尔可夫过程通过迭代方法确定最优目标状态，建立状态转移模型进行缺失交通量的预测。最后，以绍兴地区国道 104 上的钟家湾公路桥梁 2013—2014 年的已测交通量统计数据为例进行分析，检验结果的有效性。本文方法流程如图 2 所示。

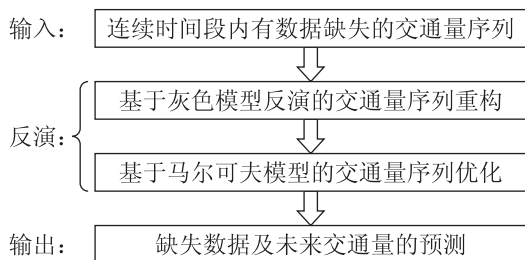


图2 反演方法流程图

2 灰色马尔可夫模型反演方法的建立

2.1 灰色马尔可夫模型

在预测研究中，灰色 GM(1, 1) 模

型可用于时间序列问题的预测，具有操作简单、数据要求较少、抗噪声能力强等优点。同时，马尔可夫模型可弥补灰色模型原始数据波动性较大的缺陷。因此，结合这两种模型的优点，以下对灰色马尔可夫模型作简单介绍^[5, 6]。

首先，公路桥梁上的交通量可描述为一定时间序列下的交通量数据。假设在连续的时间序列 t_1, t_2, \dots, t_n 下，检测得到的交通量数据向量为 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ 。累加数据序列为 $X^{(1)} = \{x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)\}$ ，其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ 。定义均值序列向量 $Z^{(1)} = \{z^{(1)}(1), z^{(1)}(2), \dots, z^{(1)}(n)\}$ ，其中 $z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]$ 。由此，根据 GM(1, 1) 模型的基本方程 $x^{(0)}(k) + a \cdot z^{(1)}(k) = b$ 可将 $X^{(1)}$ 拟合为一阶线性微分方程：

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + a \cdot X^{(1)} = b \quad (1)$$

其中， a 为发展系数； b 为灰色作用量。建立参数向量 $\hat{\alpha} = [a, b]^T$ ，则上式可改写为矩阵方程：

$$B \cdot \hat{\alpha} = Y \quad (2)$$

$$\text{其中 } B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}.$$

根据最小二乘法估计参数向量的解为

$$\hat{\alpha} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (3)$$

由此，可还原得到该时间序列下的交通量数据变化趋势函数：

$$\begin{aligned} y^{(1)}(k) &= \tilde{x}^{(0)}(k) = \tilde{x}^{(1)}(k) - \tilde{x}^{(1)}(k-1) \\ &= (1-e^{-a}) \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right] e^{-ak} \quad (4) \end{aligned}$$

其次，根据原始数据序列与灰色模型初始预测值的相对变化率建立状态划分标准，对非平稳随机序列 $Y^{(1)} = \{y^{(1)}(1), y^{(1)}(2), \dots, y^{(1)}(n)\}$ 可划分为 S 个互补相交的状态，任一状态表示为： $H_s = [\Phi_{1s} \ \Phi_{2s}]$ ($s=1, \dots, S$)，其中 Φ_{1s}, Φ_{2s} 分别为该状态空间的上下限值。将数据序列进行状态空间划分后，定义 $p_{ij}(r) = n_{ij}(r) / N_i(r)$ 表示数据由状态 i 经过 r 步转换为状态 j 的概率，其中 $n_{ij}(r)$ 表示状态 i 经过 r 步转换为状态 j 的次数， $N_i(r)$ 表示为状态 i 出现的总次数。由此可以得到 r 步状态转移概率矩阵为

$$P(r) = \begin{bmatrix} p_{11}(r) & p_{12}(r) & \dots & p_{1s}(r) \\ p_{21}(r) & p_{22}(r) & \dots & p_{2s}(r) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{s1}(r) & p_{s2}(r) & \dots & p_{ss}(r) \end{bmatrix} \quad (5)$$

当确定交通量状态转移概率矩阵后，可确定下一步交通量的变动区域，最可能的预测值可认为是该变动区域的中点。由此，得到最可能的预测值 $g(k)_s$ 为

$$g(k)_s = \frac{\Phi_{1s}(k) + \Phi_{2s}(k)}{2} \quad (6)$$

2.2 基于灰色模型的交通量反演

传统的灰色模型要求数据按时间序列进行累加生成具有指数性质的序列，然而实际公路桥梁动态称重系统采集的交通量

数据可能出现在某一时段内的数据信息缺失或纰漏，因此无法直接利用灰色模型进行缺失数据及未来状况的预测。

本文在灰色 GM(1, 1) 模型的基础上，利用反演方法进行连续时间段内缺失数据的预测，具体计算流程如图 3 所示。输入数据包括连续时间段内有缺失的交通量原始实测数据 $X^{(0)}$ 和初始假定的灰色模型参数向量 $\hat{a}_0 = [a_0, b_0]^T$ (以得到缺失点处的交通量预测初始值)。根据交通量原始数据和缺失点处交通量预测值形成的连续时间段内的交通量数据序列建立灰色 GM(1, 1) 模型方程，按公式 (3) 可计算得到灰色模型参数向量 \hat{a}_1 。为得到优化的灰色模型，建立反演目标函数 $\varphi = (\hat{a}_1 - \hat{a}_0)^T (\hat{a}_1 - \hat{a}_0) = (a_1 - a_0)^2 + (b_1 - b_0)^2$ ，通过迭代方式将目标函数控制在 eps 以内。最终反演得到的参数向量 \hat{a}_1 可预测缺失点处的交通量数据与连续时间内的灰色模型交通量数据序列 $Y^{(1)}$ 。

2.3 基于灰色马尔可夫模型的交通量反演

由于灰色模型建立的初始预测数据波动性较大，数据拟合精度较低，所以可利用马尔可夫过程对预测结果进行修正。对于连续时间段内存在数据缺失的情况，采用马尔可夫过程对灰色预测值进行修正时，由于无法确定缺失数据的状态空间，也就无法确定交通量状态转移概率矩阵，进而无法得到预测值。为了实现对缺失数据的状态空间预测，这里采用对缺失点所有可能状态的枚举法，通过选取原始数据与预测值的残差平方和最小的缺失点状态作为最优状态，得到该状态下的数据序列预测值，具体计算流程如图 4 所示。

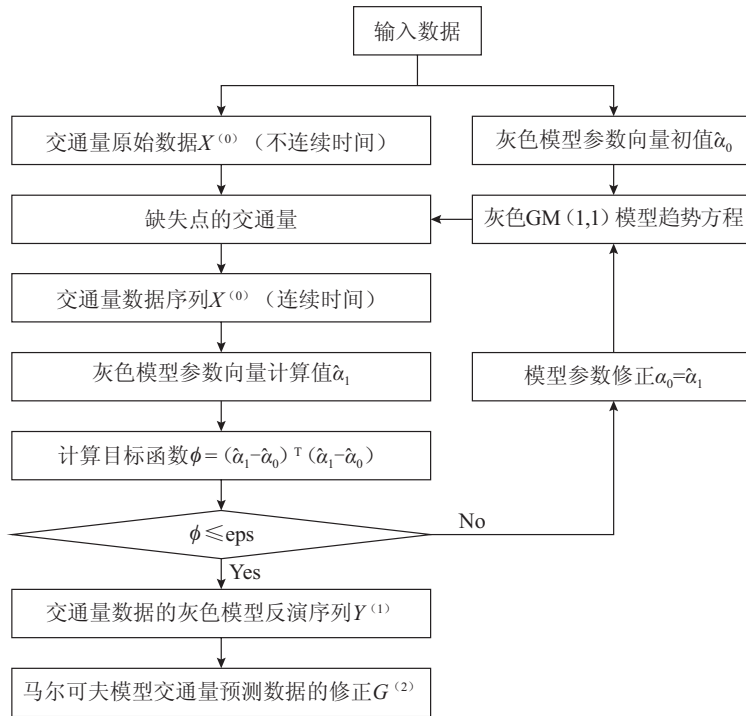


图3 灰色 GM (1 , 1) 模型的反演计算流程图

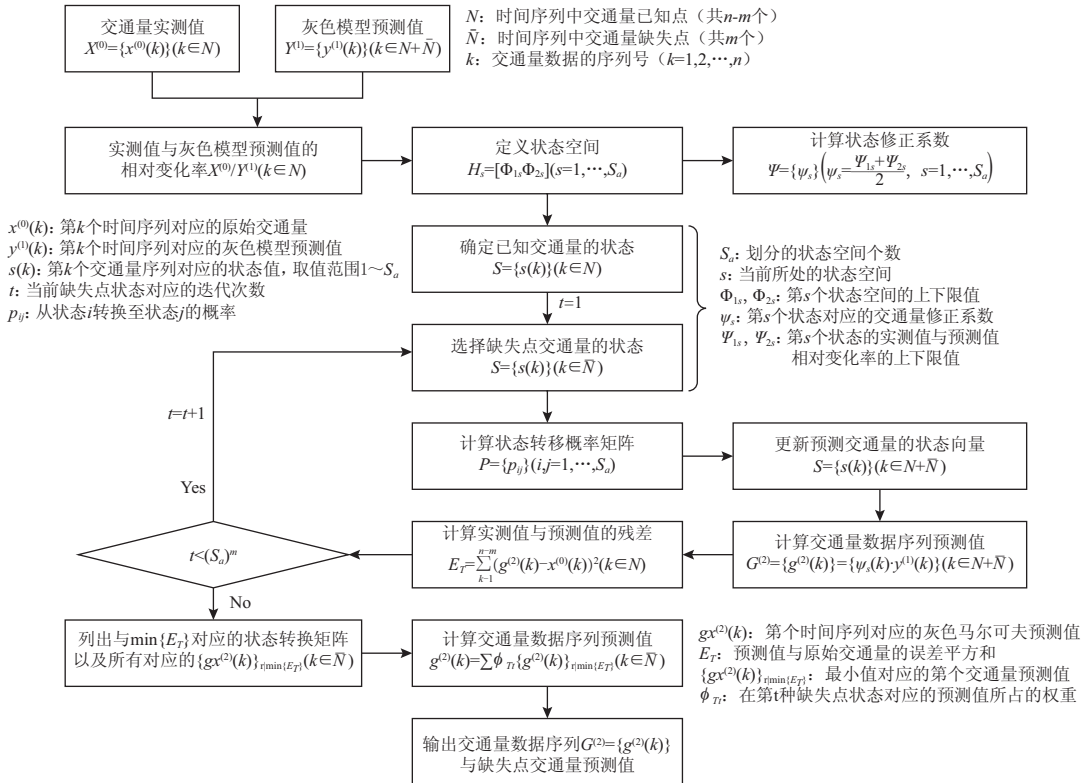


图4 马尔可夫过程对灰色模型预测值修正的计算流程图

根据已知点处的实测值（原始数据）与灰色模型预测值的相对变化率 $X^{(0)}/Y^{(1)} = \{x_k^{(0)}/y_k^{(1)}\}$ 进行状态空间的划分；所划分的 S_a 个状态空间是互补相交的，且每一状态具有上下界限值，可记为 $[\Phi_{1s}, \Phi_{2s}]$ （下标：s 表示当前所在的状态空间，1s、2s 分别为该状态的上下限）。这里，为了简化计算引入系数 ψ_s ，表示预测值 $g(k)_s$ 与原始数据 $y^{(1)}(k)$ 的比值。当预测值落入某状态时，取该状态空间区域的中点为最优预测值，这样任意 s 状态的预测修正系数可表示为

$$\psi_s = \frac{\psi_{1s} + \psi_{2s}}{2} \quad (7)$$

其中， ψ_{1s}, ψ_{2s} 分别表示于状态 s 对应的修正系数上下限值。根据定义的状态空间，可确定已知点的状态；缺失点的状态空间采用枚举法逐一考虑，因此共需要迭代 $(S_a)^m$ 次（m 为缺失数据的个数）。每次迭代计算中，由连续时间段内交通量数据序列的当前状态，考察状态转移概率矩阵并更新状态空间向量 S，对应状态下的最可能预测值 $g(k)_s$ 可按下式计算：

$$g(k)_s = \psi_k \cdot y^{(1)}(k) \quad (8)$$

为了获得最佳的预测结果，以原始数据与预测值的残差平方和 $E_T = \sum_{k=1}^{n-m} (g^{(2)}(k) - x^{(0)}(k))^2$ 为判定条件，比选最小残差平方和对应的最终更新交通量状态向量 S。由此，可以得到对应最终更新状态空间的灰色马尔可夫模型交通量数据预测序列；针对缺失点的交通量预测值，采用加权平均法确定缺失交通量预测值。

3 实例分析

浙江省绍兴市钟家湾立交桥位于 104 国道绍兴“南连北建”工程的北线段，是绍兴外环线上交通繁忙的路段。位于该桥上的动态称重系统采集的交通量如表 1 所示，其中，2013 年 6 月、2014 年 1—3 月由于某些原因未能采集得到相应的月交通量。为预测缺失月份的交通量，采用基于灰色马尔可夫模型的交通量反演预测方法进行预测。

表 1 某国道公路桥梁的月交通量

月份	2013 年						
	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
交通量 / 辆	93 618	152 892	缺失	40 483	29 980	109 616	100 438
月份	2013 年		2014 年				
	11 月	12 月	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月
交通量 / 辆	115 051	55 352	缺失	缺失	缺失	139 138	132 502

首先，以灰色模型中的参数向量 \hat{a}_0 最优为目标函数，进行交通量的灰色模型反演预测。根据图 3 的计算流程图，采用 Matlab 语言编写相应反演计算程序。输入数据包括已测得的不连续月份下的月交通量与假定的灰色模型参数向量初始

$\hat{a} = [-0.1, 10000]$ 。这里将目标函数的控制值取为 $eps=0.01$ ，通过 14 次迭代计算得到的灰色模型参数向量为 $\hat{a}_0 = [-0.0422, 69982]^T$ ，相应的灰色 GM(1, 1) 模型的趋势方程为

$$y^{(1)}(k) = 72\,394e^{0.0422k}$$

比较灰色模型预测值和原始交通量见表 2, 灰色模型的预测值残差波动性较大, 需进一步通过马尔可夫模型对预测交通量进行修正。根据原始交通量实测值与灰色模型反演预测值的相对变化率 (见表 2), 将预测值分为以下 4 种状态空间 $\{H_1, H_2, H_3, H_4\}$,

相应的预测值修正系数如下:

$$H_1: \Phi_{11} = 2.03Y^{(1)}, \Phi_{21} = 1.61Y^{(1)}; \psi_1 = 1.82$$

$$H_2: \Phi_{12} = 1.61Y^{(1)}, \Phi_{22} = 1.19Y^{(1)}; \psi_2 = 1.40$$

$$H_3: \Phi_{13} = 1.19Y^{(1)}, \Phi_{23} = 0.77Y^{(1)}; \psi_3 = 0.98$$

$$H_4: \Phi_{14} = 0.77Y^{(1)}, \Phi_{24} = 0.35Y^{(1)}; \psi_4 = 0.56$$

表 2 实测值、灰色模型预测值、相对变化率和状态

时 间	实测值 $X^{(0)}$	预测值 $Y^{(1)}$	相对变化率 $X^{(0)}/Y^{(1)}$	状 态
2013 年 4 月	93 618	93 620	1.00	H_3
2013 年 5 月	152 892	75 510	2.02	H_1
2013 年 6 月	缺失	78 770	—	未知
2013 年 7 月	40 483	82 160	0.49	H_4
2013 年 8 月	29 980	85 710	0.35	H_4
2013 年 9 月	109 616	89 400	1.23	H_2
2013 年 10 月	100 438	93 250	1.08	H_3
2013 年 11 月	115 051	97 270	1.18	H_3
2013 年 12 月	55 352	101 470	0.55	H_4
2014 年 1 月	缺失	105 840	—	未知
2014 年 2 月	缺失	110 400	—	未知
2014 年 3 月	缺失	115 160	—	未知
2014 年 4 月	139 138	120 120	1.16	H_3
2014 年 5 月	132 502	125 300	1.06	H_3

由于缺失数据的状态未知, 因此利用 matlab 根据图 4 所示的马尔可夫模型反演方法编写相应计算程序, 确定最优的更新状态空间, 进而对灰色模型的预测值进行修正。通过枚举方法得到了 4 种状态空间 $\{H_1, H_2, H_3, H_4\}$ 的转移方式, 其中 $\{H_1, H_2, H_3, H_4\} \rightarrow \{H_1, H_3, H_3, H_4\}$ 转移方式计算的实测值与预测值的残差平方和最小。迭代计算中所有的 $4^4=256$ 种缺失点初

始状态中有 14 种初始状态满足该转移方式 (GX1, GX2, ..., GX14), 如表 3 所示, 并计算得到相应的所有交通量预测值。针对缺失点出现的可能交通量预测值, 采用加权平均计算缺失点的最终灰色马尔可夫模型的交通量预测值。以 2013 年 6 月的交通量预测值为例, 出现的三种预测值的权重分别为 0.64、0.29 和 0.07, 因而预测值计算如下:

$$g^{(2)}(3) = 0.64 \times 143\,361 + 0.29 \times 44\,111 + 0.07 \times 77\,195 = 110\,278 \text{ (辆)}$$

图 5 为交通量实测值和灰色 GM (1, 1) 模型及灰色马尔可夫模型预测结果的比较, 灰色模型预测值与实测值比值的平均值 (AVG) 为 1.26, 变异系数 (COV) 为

58.3%; 灰色马尔可夫模型的比值平均值为 1.00, 变异系数为 23.6%。可见, 灰色马尔可夫模型预测结果比灰色 GM (1, 1) 模型更接近实测值, 并且能对缺失点的交

交通量进行更准确的预测。

灰色马尔可夫模型预测值与实测值之间的误差与状态转移概率模型有关，通过枚举法筛选得到的残差平方和最小的状态转移矩阵可实现预测值更逼近实测值，并充分挖掘已知数据的信息进行缺失数据或

未来数据的预测。此外，状态空间的划分个数也影响预测的精确度，随着状态空间个数的增多，预测值的精度将有所增加，但同时随枚举个数的增多，迭代次数以幂次方形式增加，因此当数据量较小时宜划分较少的状态空间数。

表 3 满足最优状态转换的灰色马尔可夫模型交通量预测值

月份	GX1 /辆	GX2 /辆	GX3 /辆	GX4 /辆	GX5 /辆	GX6 /辆	GX7 /辆	GX8 /辆	GX9 /辆	GX10 /辆	GX11 /辆	GX12 /辆	GX13 /辆	GX14 /辆	GX /辆
2013年4月	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748	91 748
2013年5月	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428	137 428
2013年6月	143 361	143 361	143 361	143 361	143 361	143 361	143 361	143 361	143 361	77 195	44 111	44 111	44 111	44 111	110 278
2013年7月	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010	46 010
2013年8月	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998	47 998
2013年9月	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612	87 612
2013年10月	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385	91 385
2013年11月	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325	95 325
2013年12月	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823	56 823
2014年1月	59 270	59 270	59 270	59 270	59 270	59 270	59 270	59 270	59 270	59 270	192 629	192 629	192 629	59 270	87 847
2014年2月	200 928	200 928	200 928	108 192	108 192	108 192	61 824	61 824	61 824	61 824	200 928	200 928	200 928	200 928	147 936
2014年3月	209 591	112 857	112 857	112 857	112 857	209 591	112 857	112 857	64 490	209 591	209 591	112 857	112 857	209 591	143 950
2014年4月	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718	117 718
2014年5月	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794	122 794

注：GX1 表示 4 个缺失月份的初始状态分别为 $\{H_1, H_4, H_1, H_1\}$ ，同上，GX2: $\{H_1, H_4, H_1, H_2\}$ ，GX3: $\{H_1, H_4, H_1, H_3\}$ ，GX4: $\{H_1, H_4, H_3, H_2\}$ ，GX5: $\{H_1, H_4, H_3, H_3\}$ ，GX6: $\{H_1, H_4, H_4, H_1\}$ ，GX7: $\{H_1, H_4, H_4, H_2\}$ ，GX8: $\{H_1, H_4, H_4, H_3\}$ ，GX9: $\{H_1, H_4, H_4, H_4\}$ ，GX10: $\{H_2, H_4, H_1, H_1\}$ ，GX11: $\{H_4, H_1, H_1, H_1\}$ ，GX12: $\{H_4, H_1, H_1, H_2\}$ ，GX13: $\{H_4, H_1, H_1, H_3\}$ ，GX14: $\{H_4, H_4, H_1, H_1\}$ 。

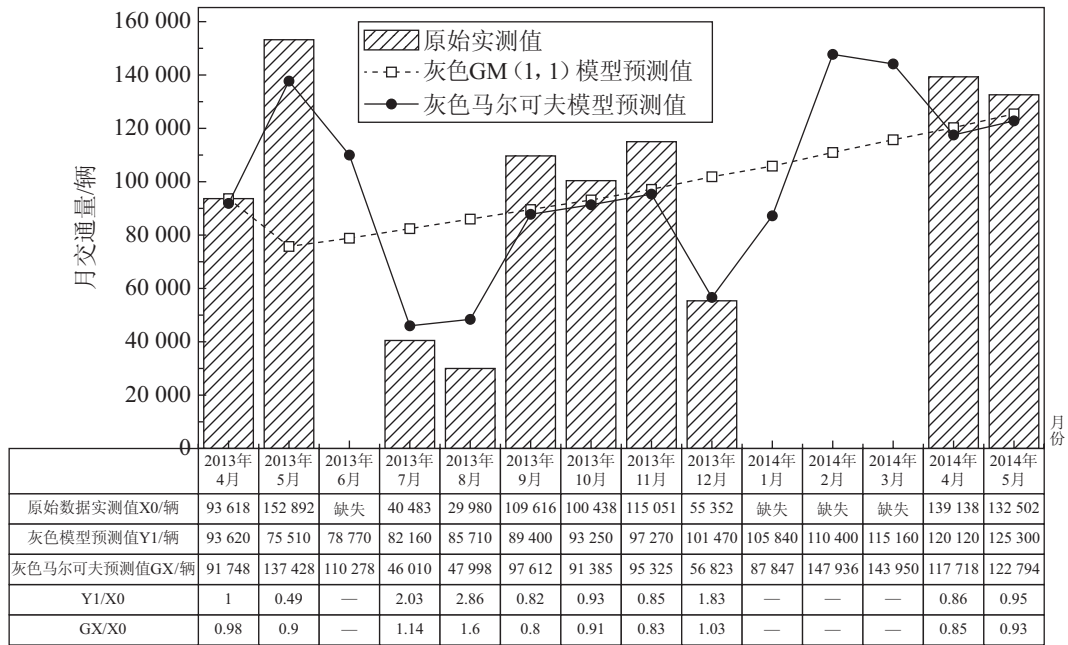


图 5 实测值与预测值的比较

4 结论

(1) 灰色马尔可夫模型作为一种结合灰色系统和马尔可夫过程的预测模型, 不仅能预测交通量发展趋势, 而且可充分挖掘已有数据提供的信息, 提高预测的精确度和可信度。将其用于交通量的反演计算中, 可重构在连续时间段内的桥梁通行车辆状况, 较好地进行缺失交通量数据的预测。

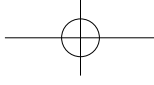
(2) 通过 104 国道公路桥梁的实际交通量数据的灰色马尔可夫预测模型反演方法计算结果表明, 该方法可以实现对连续时间段内缺失数据的预测分析, 并且与灰色 GM(1, 1) 模型相比, 相对误差明显减小。

(3) 灰色马尔可夫模型的反演预测方法对原始数据没有特殊要求, 不仅可进行后续时间的数据预测, 也可向前或对数据序列中的缺失数据进行预测, 而且缺失数据的个数和位置也没有特别要求, 因而可应用的范围较广。

(4) 灰色马尔可夫模型反演方法的预测误差主要与状态转移矩阵和状态空间的划分个数有关。前者与最终的更新状态空间向量有关, 通过枚举筛选残差平方和最小的状态转移矩阵可得到更准确的预测值。后者的选取需权衡计算精度与速度, 一般数据量较小时宜划分较少的状态空间数。

参考文献

- [1] 谭冬莲. 基于影响线理论应用监测信息反演桥上车辆荷载[J]. 力学与实践, 30(2), 2008: 62-66.
- [2] 李庆瑞, 万发祥, 卢毅. 公路交通量预测理论与方法综述[J]. 中外公路, 25(6), 2005: 151-155.
- [3] 向红艳, 朱顺应. 路段短时交通量预测自适应控制法[J]. 公路交通科技, 23(1), 2006: 116-119.
- [4] 董宏辉, 孙晓亮, 贾利民, 等. 多模态的交通量预测模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 41(3), 2011: 645-649.
- [5] 刘宗明, 贾志绚, 李兴莉. 基于灰色马尔可夫链模型的交通量预测[J]. 华东交通大学学报, 29(1), 2012: 30-34.
- [6] 任明仑, 沐爱敏, 张世铭, 等. 道路超限超载预测的灰色马尔可夫模型[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 35(12), 2012: 1709-1713.
- [7] 蒋丽忠, 李春丹, 唐斌, 等. 基于灰色马尔可夫链的桥梁荷载随机过程交通量预测[J]. 公路交通科技, 27(7), 2010: 128-132.
- [8] 杨志勇. 基于灰色系统和神经网络的实时交通量预测组合模型研究[J]. 公路, (3), 2015: 104-108.
- [9] Zhang, X.Z., Yao, W.J., Li, Y., Song, F.. Load prediction of in-service bridges by using an unbiased grey markov forecasting model[J]. Journal of Statistics Applications and Probability, 2012,1(1):29-34.
- [10] Qi, Y., Ishak, S.. A hidden markov model for short term prediction of traffic conditions on freeways[J]. Transportation Research Part C, 2014, 43:95-111.
- [11] Lu, C., Wang, W., Chen, J.. Gray markov model in the intersection of short-term traffic flow prediction[J]. Fifth International Conference on Transportation Engineering, 2015, Sept. 26-27, Dailan, China.



AR 技术在道路交通标志和标线设置中的应用探讨

林斌峰 张凌辉
(台州市公路管理局)

摘要: 道路交通标志和标线的本质是信息, 那我们就做好信息的传达工作, 做到准确高效。AR 技术在信息传达上无须依赖物理介质, 是一个理想的选择。

关键词: 道路交通标志; 道路交通标线; AR; 增强现实; 安全; 革新。

1 传统道路交通标志和标线的局限性

道路交通标志和标线是引导道路使用者有秩序地使用道路, 以促进道路交通安全、提高道路运行效率的基础设施, 用以告知道路使用者道路通行权利, 明示道路交通禁止、限制、遵行状况, 告示道路状况和交通状况等信息。

由上述定义看, 道路交通标志和标线的实质是道路通行信息, 我们日常生活所见所指的道路交通标志和标线则只是这些信息的物理媒介。在提倡“互联网+”并且着手建立物联网的当今中国社会, 这样的信息传递手段无异于洞穴壁画, 原始而低效。此外, 因为要依托物理实在, 传统道路交通标志和标线还有着自身的局限性。既然是物理实在, 就需要材料、加工和保养维护。天气、地形以及时段等环境因素还会影响信息本身的传达。

面对这些局限性, 作为以道路通行安全保畅为己任的路政人, 不得不开始思考道路交通标志和标线的未来。既然道路交通标志和标线的本质是信息, 那我们就做好信息的传达工作, 做到准确高效。AR

技术在信息传达上无须依赖物理介质, 是一个理想的选择。

2 AR 技术, 什么是 AR

AR, Augmented Reality, 增强现实是交互设计的一个令人兴奋的领域, 在增强现实中虚拟内容可以无缝地整合到真实场景的现实中。随着可产生有趣的增强现实效果的个人移动设备的兴起, 增强现实的巨大潜能开始被发掘出来, 其在道路交通标志和标线的设置改革中的应用也是其中之一。前文所述传统标志标线的局限就是虚拟的道路通行信息依赖现实物质来表现, 而 AR 恰恰提供了一条将虚拟内容直接添加到正式场景的道路, 无须真实的物体。

AR, 术语“增强现实”描述的是一个技术组合, 即向真实视频显示中实时融入计算机生成内容的技术。习惯上, AR 要与现在流行的另一种技术 VR 加以区分。VR, Virtual Reality, 虚拟现实技术与 AR 是不同的概念, 虚拟现实是指创建完整的、身临其境的 3D 环境; 而 AR, 增强现实是指使用各种硬件技术来创造一个基于真实

世界的、带注解的或者“增强的”复合场景。

3 AR 技术与道路交通标志标线的设置革新

这里，要先说明一下 AR 实现真实世界与虚拟内容之间交互的方式，可以通过使用图像处理和计算机视觉技术让计算机生成元素与影像内容进行逼真的交互。大部分当前基于计算机视觉的方法是依赖预先确定的物理标记来让计算机视觉系统获得它在 3D 空间中的方位；也存在不需要做特定标记的增强现实系统，这种系统被称为无标记增强现实系统。无标记增强现实系统是一个不断进步的研究领域，并且在不久的将来，不需要标记的强大视觉增强现实系统必将获得广泛应用。

无标记视觉增强现实方法在智能手机平台上日益普及。这些方法会使用设备的全球定位系统（GPS），或者其他位置跟踪数据和加速数据来确定这个设备位于哪里，以及正面向哪一个方向。标签和注释就是基于这些信息叠加到场景上的。比较常见的例子，如诺基亚手机的 AR 浏览器 Live View。当你打开浏览器时，屏幕显示的是摄像头拍摄到的实际街景，同时浏览器会根据手机 GPS 提供的你的当前位置数据，将数据库中存储的各种地理位置信息添加到屏幕显示的街景中。屏幕显示的街景里就会看到现实世界中其实不存在的各种广告牌、路标以及各种告示板。

同样，在道路标志标线的设置中，完全可以照搬这一技术。实际道路上的交通标志和标线可以完全拆除，将其所承载的所有路况信息全部存入数据库中，只要根据车辆实际的 GPS 数据显示所需的内容就

可以了。而且，摆脱实际物质束缚的纯粹信息内容，还可以得到加强。比如传统标志受到本身标志板面以及车速和环境的影响，设置只能以点的形式在某一位置集中出现。驾驶员取得信息的时间短，信息容量大，容易造成误判，这会带来时间的损失，甚至威胁通行安全。

举个例子，沈海高速吴岙互通指路标志的设置就因为传统标志的局限，一直没有完美的解决方案。吴岙互通宁波方向，从牛官头隧道出口到互通岔路口距离过短，所以龙门架上的四块指示标志距离隧道出口很近，驾驶员从隧道出来，无法完整解读标志提供的信息，常常造成开过头开错方向的情况。目前虽通过在隧道前方、隧道内以及隧道出口添加辅助指路标志的方法缓解了这一情况，但是治标不治本。如果不依靠车载 GPS，驾驶员还是来不及靠标志本身判断方向。如果 AR 技术成功引入，因为是虚拟信息的投影，就不会受到地形的限制。在隧道内，从正常的指路标志设置距离开始，就可以在显示器上投影出标志，并且在不影响驾驶安全的情况下持续显示，增强信息传达效果，还可以方便地添加指示标线进行辅助。这样，道路信息的传达效果，完胜固定式的传统标志和标线。

4 AR 技术应用与现有 HUD 技术的比较

平视显示器（Head Up Display，以下简称 HUD），是运用在航空器上的飞行辅助仪器。“平视”是指飞行员不需要低头就能够看到他需要的重要资讯。平视显示器最早出现在军用飞机上，降低飞行员低

头查看仪表的频率，避免注意力中断以及丧失对状态意识的掌握。因为 HUD 的方便性以及能够提高飞行安全的特性，民航机也纷纷跟进安装。现在 HUD 已经在大部分车辆上实装，虽然目前的车载 HUD 已经能将道路标志等一些路况信息投影在挡风玻璃上来实现道路标志的功能，但是它的功能和传统的车载 LED 显示器的信息提供方式是一样的，只是把显示器换了一种表现形式而已。而 AR 技术则不然，通过路况信息本身的位置数据以及当前的环境信息，AR 技术投影的虚拟标志标线是直接和周边真实环境紧密结合的。从投影显示器上看，就和真的在现场立了标志，画了标线一样，具有最直观的信息传达能力。

5 AR 技术实际投入所需硬件设施

因为 AR 标志标线的表现形式是与真实环境紧密结合，所以显示方式的革新也是必要的。基础的，就是现有车辆的挡风玻璃及车窗玻璃全面升级，更换为 AR 显示器。车载中央处理器将会根据车辆位置信息和标志标线的位置信息处理好标志标线的 3D 投影图像，显示在 AR 显示器上。

升级版，则是视网膜成像技术。根据人眼的视觉残留现象，利用低频无害激光

在视网膜上高速扫描进行成像，比车窗改造成本更低。因为在车内驾驶员的位置固定，驾驶员眼球的转动位置也基本可以确定，只要在车厢相应位置装上摄像头监控眼球位置，然后由车辆中央处理器矫正激光投影仪一直对准驾驶员的眼球进行实时投影，直接将 AR 标志标线结合到驾驶员的主观视觉内，更准确高效。

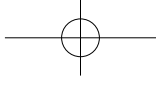
终极版，由大脑芯片给视觉中枢传递微电荷信息，直接在大脑中 AR 数据与视神经传回的光感数据结合。

6 AR 技术与智慧公路的结合

在智慧公路技术实时提供路况信息的支持下，通过 AR 技术可以做到大雾、夜晚等低能见度环境下的安全行驶。通过接受公路传感器传回的信息，再通过 AR 显示器直接标明实际通行环境情况，由计算机生成虚拟图像补正视觉不良部分。其他车辆也可以根据其位置信息直接由生成的虚拟图像明确标出，特别是施工路段，事故路段，更可以通过 AR 生成虚拟图像，以加强警示作用。

参考文献

- [1] 穆勒. 增强现实：必知必会的工具与方法 [M]. 北京：机械工业出版社，2013.



波形钢腹板 PC 组合箱梁桥内衬混凝土钢混组合段抗剪验算

江越胜¹ 孙天明² 仵云飞¹

(1. 湖州市交通规划设计院; 2. 浙江中隧桥波形钢腹板有限公司)

摘要: 本文介绍了国内几座波形钢腹板 PC 组合箱梁桥内衬混凝土钢混组合段构造, 通过对内衬混凝土钢混组合段 3 种剪力分配计算方法的对比, 研究了内衬混凝土钢混组合段抗剪验算, 为同类桥梁设计提供借鉴。

关键词: 波形钢腹板; PC 组合梁桥; 内衬混凝土; 钢混组合段; 抗剪。

1 引言

波形钢腹板 PC 组合梁桥是利用波形钢腹板代替普通混凝土腹板组成的一种新型组合结构梁桥。这种新型结构充分发挥各种材料性能: 顶底板混凝土抗弯、波形钢腹板抗剪, 结构受力更加合理; 腹板采用波形钢腹板, 有效解决了传统 PC 箱梁桥腹板开裂这一常见病害, 提高了腹板抗剪性能和结构耐久性; 波形钢板的手风琴效应, 提高了预应力效率; 用波形钢腹板代替普通混凝土腹板, 箱梁自重减轻 20% 左右。

波形钢腹板 PC 组合梁桥源于法国, 近年来在日本得到了深入的研究和广泛的应用, 已建和在建的波形钢腹板预应力箱梁桥有 200 余座。目前国内有关高校及设计单位也对这种组合结构进行了研究和工程应用, 已建、在建的波形钢腹板 PC 箱梁桥有 20 余座。

波形钢腹板 PC 组合梁桥在墩顶部位附近的钢腹板内侧设置内衬混凝土, 有助

于剪应力的流畅传递, 增大钢腹板的抗屈服能力, 缓和局部应力^[1]。内衬混凝土钢混组合段受力复杂, 下面通过对国内典型的 8 座波形钢腹板连续梁桥内衬混凝土构造的分析, 选取 1 座桥梁尝试对内衬混凝土钢混组合段抗剪验算做研究分析。

2 波形钢腹板连续梁桥内衬混凝土构造设计

国内跨径较大的 8 座波形钢腹板连续梁桥, 内衬混凝土构造设计如表 1 所示。

通过表 1 可见, 墩顶部位两侧内衬混凝土的设置区间一般从 0 # 块中横梁侧面起至挂篮悬臂浇筑第一节段末, 少数设置到 0 # 块节段末; 内衬混凝土厚度一般 30 ~ 80cm; 除南京滁河大桥采用等厚度外, 其余均采用变厚度; 现有国内规范河南省地标《公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范》(DB41/T 643—2010)(以下简称河南地标 DB41/T 643—2010) 要求: 内衬混凝土厚度不宜小于 20cm。

表 1 内衬混凝土段构造设计

桥名	跨径 (m)	已建 / 在建	支点 / 跨中梁高 (m)	桥宽 (m)	中支点附近内衬混凝土		
					组合段长度 (cm)	根部厚度 (cm)	结束点厚度 (cm)
浙江湖州应界桥	52+90+52	在建	5.8/2.8	13.5	670	80	29
南京滁河大桥	53+96+53	已建	6.5/3.0	16.55	410	55	55
桃花峪黄河大桥	75+135+75	在建	7.5/3.5	16.05	640	40	30
邢台南水北调大桥	70+120+70	在建	7.5/3.5	14.00	400	36.5	30
郾城黄河公路大桥	70+11*120+70	在建	7.0/3.5	13.5	400	43.5	36.5
兰州桥	58+3*100+58	在建	6.8/3.2	12.0	530	73.5	73.5
深圳南山桥	80+130+80	未实施	7.5/3.5	13.75	720	87.5	30
深圳平铁大桥	80+130+80	未实施	7.5/3.5	13.5	400	80	30

3 内衬混凝土钢混组合段抗剪验算

当前，内衬混凝土钢混组合段剪力计算方法有三种：①波形钢腹板承担全部剪力；②波形钢腹板和混凝土二者按剪切刚度比分担剪力；③混凝土承担全部剪力。

下面以湖州应界桥为研究对象对内衬

混凝土钢混组合段的剪应力验算做计算分析。计算选取主墩附近 8 个控制截面进行分析：39#、41# 截面（支点中横梁边缘处截面），37#、43# 截面（距支座中心约 H/2 处截面），34#、46# 截面（距支座中心约 H 处截面），32#、48# 截面（内衬混凝土结束点截面），具体详见图 1。

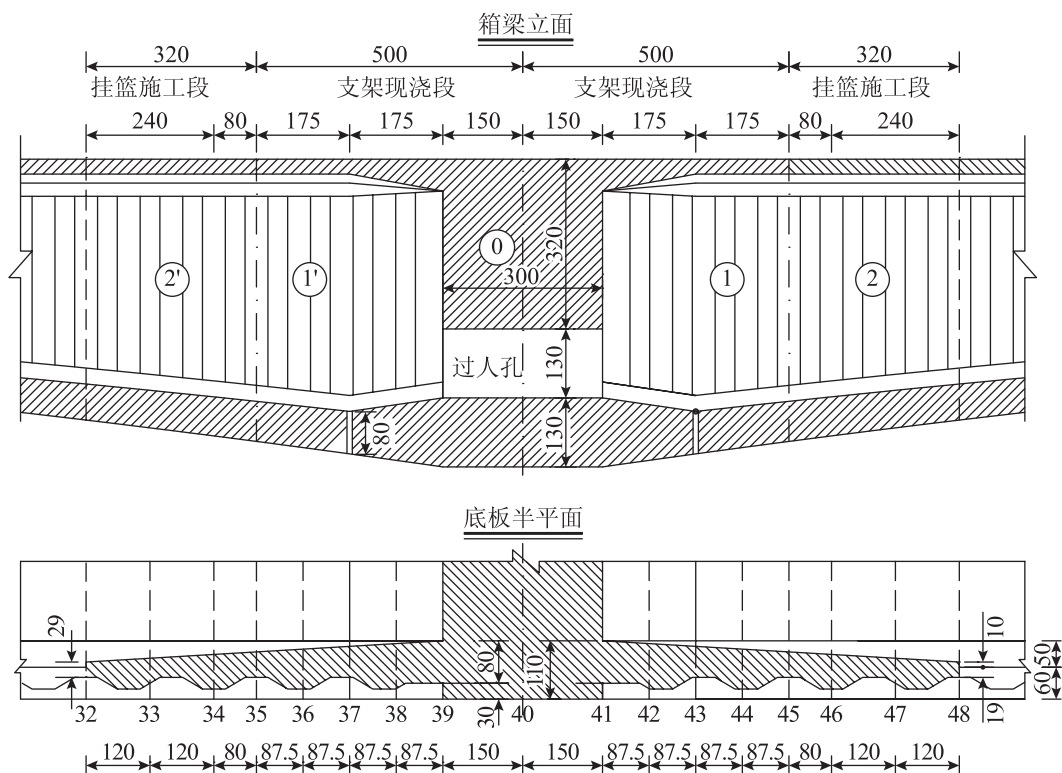


图 1 应界桥内衬混凝土段构造图

采用 Midas Civil 有限元分析软件整桥建模计算, 上述控制截面的设计剪力 (从整体梁单元模型中提取) 如表 2 所示, 其

中 V_{d1} 为考虑结构重要性系数 ($\gamma_0 = 1.1$) 的作用效应极限组合设计值, V_{d2} 为作用效应标准组合设计值。

表 2 钢—砼组合段剪力 (单位: kN)

控制截面	32	34	37	39	41	43	46	48
V_{d1} (极限组合)	17 416	18 942	20 439	22 215	23 881	22 618	20 867	19 356
V_{d2} (标准组合)	9 865	11 033	9 596	15 830	11 573	12 555	11 366	10 217
$V_{d1} - V_p$	14 362	15 900	14 827	18 492	17 613	18 287	16 672	15 155

3.1 波形钢腹板剪应力验算理论

波形钢腹板的剪应力主要包括弯曲剪应力和自由扭转剪应力^[2], 根据河南地标 DB41/T 643-2010, 波形钢腹板的剪应力验算, 应符合下列规定:

$$\tau_a + \tau_t \leq f_v \quad (1)$$

式中: τ_a 为弯曲剪应力; τ_t 为自由扭转剪应力; f_v 为钢板抗剪强度设计值。

弯曲剪应力按下式计算:

$$\tau_a = \frac{V_w}{A_w} = \frac{V_d - V_p}{\sum t_i h_w} \quad (2)$$

式中: V_d 为竖向剪力设计值 (按作用极限组合计算); V_p 为预应力的竖向分力设计值; t_i 为同一断面中第 i 个波形钢腹板厚度; h_w 为波形钢腹板高度。

自由扭转剪应力按下式计算:

$$\tau_t = \frac{T}{2A_m \cdot t_w \cdot (1 + \alpha)} \quad (3)$$

式中: T 为组合箱梁所受的扭矩设计值; t_w 为波形钢腹板厚度; A_m 为箱梁截面积, $A_m = h_m \times b_m$, h_m 为顶板与底板中心线之间的距离; $b_m = (b_1 + b_2)/2$, 其中 b_1 、 b_2 分别为顶、底板处钢腹板中心线之间的距离。 α 为修正系数, $\alpha = 0.4 \cdot h_m / b_m - 0.060$; $h_m / b_m < 0.2$ 时, $\alpha = 0$ 。

3.2 内衬混凝土验算理论

根据河南地标 DB41/T 643—2010, 内衬混凝土主拉应力按下式计算:

$$\sigma_{tp} = \frac{1}{2} (\sigma_c - \sqrt{\sigma_c^2 + 4\tau^2}) \quad (4)$$

$$\tau = \frac{V_{cd} \cdot S_c}{b_c I_c} \quad (5)$$

式中: σ_{tp} 为内衬混凝土的主拉应力; σ_c 为内衬混凝土的轴向压应力; τ 为内衬混凝土的剪应力; V_{cd} 为内衬混凝土承担的剪力设计值 (按作用效应标准组合计算); S_c 为内衬混凝土最小厚度断面, 剪应力计算点外侧部分面积对中性轴的一次矩; I_c 为内衬混凝土最小厚度断面, 相对断面中性轴的二次矩; b_c 为内衬混凝土最小厚度。

根据计算所得的混凝土主拉应力, 按下列规定设置箍筋^[3]:

在 $\sigma_{tp} \leq 0.5f_{tk}$ 的区段, 箍筋可仅按构造要求设置; 在 $\sigma_{tp} > 0.5f_{tk}$ 的区段, 箍筋的间距 S_v 可按下列公式计算:

$$S_v = \frac{f_{sk} \cdot A_{sv}}{\sigma_{tp} b} \quad (6)$$

根据内衬混凝土承担的剪力值, 对弯起钢筋及箍筋进行配置, 其斜截面的抗剪承载力计算应按规范 JTG D62—2004 的规定采用^[2]; 其斜截面抗剪承载力计算应符合下列规定^[3]:

$$\gamma_0 V_{cd} \leq V_{cs} + V_{sb} + V_{pb} \quad (7)$$

式中： V_{cd} 为验算截面处内衬混凝土承担的剪力设计值（按作用效应极限组合计算）； V_{cs} 为斜截面内混凝土和箍筋共同的抗剪承载力设计值，按规范 JTG D62—2004 公式 5.2.7-2 计算； V_{sb} 为与斜截面相交的普通弯起钢筋抗剪承载力设计值，腹板内衬混凝土一般不配置弯起钢筋， $V_{sb}=0$ ； V_{pb} 为与斜截面相交的预应力弯起钢筋抗剪承载力设计值，内衬混凝土在计算其分担的剪力值时先减去预应力作用效应，故此处 $V_{pb}=0$ 。

其抗剪截面应符合下列规定^[3]：

$$\gamma_0 V_{cd} \leq 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} b_c h_0 \quad (8)$$

式中： $f_{cu,k}$ 为混凝土强度标准值，C50 混凝土 $f_{cu,k}=50\text{MPa}$ ； b_c 为验算截面处内衬混凝土最小厚度； h_0 为验算截面有效高度。

3.3 波形钢腹板承担全部剪力

根据波形钢腹板预应力混凝土梁整体结构受力基本假定^[1]：纵向弯矩由混凝土顶、底板承受，剪切由波形钢腹板承受，且剪应力沿竖向均匀分布。对内衬混凝土钢混组合段，沿用这一假定，保守考虑剪力全部由波形钢腹板承担。则控制截面波形钢腹板的剪应力验算结果详见表 3。

表 3 波形钢腹板抗剪验算结果

截面参数		32	34	37	39	41	43	46	48
$V_{dl}-V_p$	kN	14 362	15 900	14 827	18 492	-17 613	-18 287	-16 672	-15 155
T	kN	4 179	4 452	4 656	4 959	-5 938	-5 840	-5 568	-5 304
t_w	mm	16	16	18	18.0	18.0	18.0	18	18.0
h_w	mm	3 238	3 480	3 755	3 600	3 600	3 755	3 480	3 238
τ_a	MPa	139	143	110	143	-136	-135	-133	-130
b_m	mm	690	690	690	690.0	690.0	690.0	690	690.0
h_m	mm	4 438	4 708	5 015	4 850	4 850	5 015	4 708	4 438
A_m	m ²	30.62	32.49	34.60	33.47	33.47	34.60	32.49	30.62
α	—	0.00	0.21	0.23	0.22	0.22	0.23	0.21	0.00
τ_t	MPa	4.26	3.53	3.04	3.37	-4.04	-3.81	-3.93	-4.81
$\tau_a+\tau_t$	MPa	142.9	146.3	112.7	146.1	139.9	139.1	137.0	134.8
f_v	MPa	150	150	150	150	150	150	150	150
Yes/No		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

由表 3 可见，在承载能力极限状态下，波形钢腹板各截面的剪应力均在容许范围，满足要求。

3.4 二者按剪切刚度比分担剪力

根据河南地标 DB41/T 643—2010，在荷载作用下，内衬混凝土承担的剪力值

按其和波形钢腹板两者的剪切刚度进行分配。内衬混凝土及波形钢腹板承担的剪力分别按下列公式计算：

$$V_{cd} = \frac{G_c \cdot A_c}{G_c \cdot A_c + G_s \cdot A_s} V_d \quad (9)$$

$$V_{sd} = \frac{G_s \cdot A_s}{G_c \cdot A_c + G_s \cdot A_s} V_d \quad (10)$$

式中： V_{cd} 为内衬混凝土承担的剪力设计值； V_{sd} 为波形钢腹板承担的剪力设计值； G_c 为内衬混凝土的剪变模量； A_c 为内衬混凝土的平均断面面积； G_s 为波形钢腹板的剪变模量； A_s 为波形钢腹板的有效断面面积， $A_s = h_w \cdot t_w \cdot \eta$ ， η 为波形钢腹板的形状系数； V_d 为内衬混凝土钢混组合段截面竖向剪力设计值，此处应采用 $V_{d1} - V_p$ 。

剪切刚度分配波形钢腹板与内衬混凝土分担的剪力见表 4。

显然，波形钢腹板承担的剪力 $V_{sd} < V_{d1} - V_p$ ，前面采用 $V_{d1} - V_p$ 验算波形钢腹板的抗剪承载力，均满足要求，故此处无须再行验算。

根据规范 JTG D62—2004，对内衬混凝土抗剪验算结果详见表 5。

表 4 按剪切刚度分配计算二者的剪力 V_{cd} 和 V_{sd}

截面参数		32	34	37	39	41	43	46	48
$V_{d1} - V_p$	kN	14 362	15 900	14 827	18 492	-17 613	-18 287	-16 672	-15 155
A_c	M ²	0.939	1.535	2.648	2.880	2.880	2.648	1.535	0.939
$C_c A_c$	kN	1.41E+07	2.30E+07	3.97E+07	4.32E+07	4.32E+07	3.97E+07	2.30E+07	1.41E+07
A_s	M ²	0.048	0.052	0.062	0.060	0.060	0.062	0.058	0.054
$G_s A_s$	kN	3.81E+06	4.09E+06	4.93E+06	4.76E+06	4.76E+06	4.93E+06	4.60E+06	4.28E+06
V_{cd} 比例	—	0.79	0.85	0.89	0.90	0.90	0.89	0.83	0.77
V_{cd}	kN	11 306	13 500	13 189	16 656	15 864	16 267	13 893	11 621
V_{sd}	kN	3 056	2 400	1 638	1 836	1 749	2 020	2 778	3 534

表 5 内衬混凝土抗剪验算结果

截面参数		32	34	37	39	41	43	46	48
V_{cd}	kN	11 306	13 500	13 189	16 656	15 864	16 267	13 893	11 621
b_c	mm	580	882	1 420	1 600	1 600	1 420	882	580
h_0	mm	4 777	5 076	5 449	5 500	5 500	5 449	5 076	4 777
V_{RJ}	kN	9 992	16 145	27 904	31 735	31 735	27 904	16 145	9 992
Yes/No		NO	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	NO
V_{cs}	kN	13 175	19 541	30 009	33 461	33 928	30 472	19 980	13 175
Yes/No		Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes

表中取 $V_{RJ} = 0.51 \times 10^{-3} \sqrt{f_{cu,k}} b_c h_0$ ， $f_{cu,k} = 50 \text{MPa}$ ， b_c 为二腹板之和；从表 5 可见，按照剪切刚度分配剪力，对内衬混凝土进行抗剪验算，32[#]、48[#] 截面构造尺寸不满足规范要求，截面抗剪承载力满足规范要求。

3.5 内衬混凝土承担全部剪力

沿用普通混凝土连续梁设计思路，假设混凝土承担全部剪力，忽略波形钢腹板的作用，对内衬混凝土抗剪验算结果详见表 6。

表 6 内衬混凝土抗剪验算结果

截面参数		32	34	37	39	41	43	46	48
V_{cd}	kN	14 362	15 900	14 827	18 492	-17 613	-18 287	-16 672	-15 155
b_c	M	580	882	1 420	1 600	1 600	1 420	882	580
h_0	M	4 777	5 076	5 449	5 500	5 500	5 449	5 076	4 777
V_{RJ}	kN	9 992	16 145	27 904	31 735	31 735	27 904	16 145	9 992
Yes/No		N0	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	N0	N0
V_{cs}	kN	13 175	19 541	30 009	33 461	33 928	30 472	19 980	13 175
Yes/No		N0	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	N0

可见,若考虑混凝土承担全部剪力,32[#]、46[#]、48[#]截面构造尺寸不满足规范要求,32[#]、48[#]截面抗剪承载力不满足规范要求。

4 内衬混凝土组合段计算方法对比

方法一假设竖向剪力全部由钢腹板承担,验算结果表明钢腹板剪应力小于钢材剪切屈服应力,结构抗剪承载力满足要求,充分发挥钢材抗剪性能。

方法二假设内衬混凝土承担的剪力值按其与钢腹板两者的剪切刚度进行分配。内衬混凝土分担的剪力在 75% 以上,内衬混凝土结束点附近抗剪截面构造尺寸和抗剪承载力验算不满足要求。从验算结果判断,需加厚内衬混凝土的厚度;但若在结束点附近加厚内衬混凝土,结构刚度形成突变截面,势必带来更大的应力集中。

结合方法一验算结果判断,方法二中截面尺寸验算不能通过的截面,即使内衬混凝土损坏开裂后退出工作,钢腹板的抗剪承载能力还是满足要求的,不会出现安全问题。此时,内衬混凝土作为减小应力集中的构造措施,一方面在满足最小构造尺寸的前提下尽量减小结构刚度突变;另一方面应采取构造措施保证内衬混凝土与钢腹板不剥离,其自身也不开裂,与钢腹

板形成一体共同受力。

方法三沿用普通混凝土连续梁设计思路,假设混凝土承担全部剪力,需要较厚的混凝土腹板截面,未考虑发挥钢材的高强度抗剪性能,显然不合理,设计不建议采用。

5 结论

综合上述分析,对波形钢腹板 PC 组合梁桥内衬混凝土组合段抗剪验算,应先考虑剪力全部由钢腹板承担,验算必须满足钢腹板材料强度要求。然后按剪切刚度分配剪力,对内衬混凝土进行抗剪验算,设计应配置必要的钢筋使其抗剪承载力满足要求。对截面尺寸验算不能满足要求的区段,不能盲目地增加尺寸加大结构刚度突变,使应力集中增大;应采取加强两者连接的措施和混凝土抗裂构造措施。

为实现波形钢腹板与内衬混凝土的有效连接,应在波形钢腹板上植焊栓钉连接,对内衬混凝土配置必要的抗裂钢筋,并在靠近纯波形钢腹板附近采用弹性栓钉,缓冲应力集中效应,使二者连接紧密,协作变形,共同受力。另外,内衬混凝土组合段钢板厚度宜与其相邻的纯波形钢腹板的板厚相同,以减小应力集中效应。

与纯波形钢腹板相邻的一定区域的内

衬混凝土钢混组合段，由于存在明显的应力集中现象，在两种材料变形协调过程中会产生应力重分布；要精确的计算二者的实际剪应力，尚需通过数值模拟结合实体模型检测，进一步研究二者的剪力分配关系。

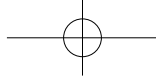
参 考 文 献

[1] 陈宜言. 波形钢腹板预应力混凝土桥设计与施

工 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

[2] 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司 .DB41/T 643—2010, 公路波形钢腹板预应力混凝土箱梁桥设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.

[3] JTG D62—2004, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.



不考虑荷载变化的沉降预测方法

沈理斌

(嘉兴市交通投资集团有限责任公司)

摘要: 文章针对不考虑荷载变化的沉降预测方法, 主要介绍了数学分析法、固结系数法、半立方模型等预测方法, 提出了沉降速率与沉降呈半立方非线性关系的双曲型曲线预测模型。根据半立方模型接近传统方法的平均值, 在不考虑荷载变化的沉降预测情况下结果可靠度更高, 供设计和施工探讨。

关键词: 荷载; 沉降; 半立方模型; 精度控制。

0 引言

目前, 基于路基实测资料的沉降预测方法, 按照预测机理可分为地基参数法和数学分析法两大类, 按照预测的适用性可分为本级预测和越级预测两大类。

本级预测方法不能考虑荷载变化, 主要是些传统的沉降预测方法, 只适用于荷载完成后或多级荷载间隙期的沉降预测, 不能进行越级预测。按照预测机理可分为数学分析法、固结系数法以及优性组合预测等。

1 数学分析法

1.1 双曲线法

双曲线法认为实测沉降曲线($s-t$ 曲线)自拐点 $B(t_0, s_0)$ 开始近似于一条双曲线, 通过曲线外延来推算未知时刻的沉降量和最终沉降量。双曲线方程为

$$xy = K,$$

$$x = a + (t - t_0), \quad y = (s_\infty - s_0) - (s_t - s_0)$$

式中: s_∞ ——最终沉降量;

s_t —— t 时刻的沉降量;

a ——参数;

K ——常数。

当 $t = t_0$ 时, $x = T_{\text{inf}}$, $y = s_\infty - s_0$, 则 $K = T_{\text{inf}}(s_\infty - s_0)$, 并代入上式有

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0) \frac{(t - t_0)/a}{(t - t_0)/a + 1} \quad (1)$$

此时将 s_∞ 、 a 看作待定参数, 利用 n 次实测资料优化求出, 并代入式 (1) 推求任一时刻的沉降量。

甘友文、王志亮等提出的双曲线模型修正, 实际上是将 s_0 也作为待定参数, 从而提高了双曲线模型预测的精度。

式 (1) 变形得

$$s_\infty - s_t = (s_\infty - s_0) \frac{1}{(t - t_0)/a + 1} \quad (2)$$

对 (2) 求导, 并利用上式得

$$\begin{aligned} \frac{ds_t}{dt} &= \frac{(s_\infty - s_0)}{a} \frac{1}{[(t - t_0)/a + 1]^2} \\ &= \frac{1}{a(s_\infty - s_0)} (s_\infty - s_t)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

上式说明, 双曲线模型的沉降速率与剩余沉降呈二次下凹的非线性关系。当 $t = t_0$ 时, 有

$$\frac{ds_t}{dt} = \frac{1}{a} (s_\infty - s_0)$$

1.2 指数曲线法

指数曲线法认为实测沉降曲线 ($s-t$ 曲线) 自拐点 $B(t_0, s_0)$ 开始近似于一条指数曲线, 通过曲线外延来推算未知时刻的沉降量和最终沉降量。指数曲线方程为

$$y = ae^{-\beta x}, \quad x = t - t_0,$$

$$y = (s_\infty - s_0) - (s_t - s_0)$$

式中: s_∞ ——最终沉降量;

s_t —— t 时刻的沉降量;

a 、 β ——参数。

当 $t = t_0$ 时, $x = 0$, $y = s_\infty - s_0$, 则 $a = s_\infty - s_0$, 并代入上式有

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0)(1 - e^{-\beta(t-t_0)}) \quad (4)$$

此时将 s_∞ 、 β 看作待定常数, 利用 n 次实测资料优化求出, 并代入式 (4) 推求任一时刻的沉降量。为了提高曲线的预测精度, 也可将 s_0 作为待定参数。

由式 (4) 可得

$$s_\infty - s_t = (s_\infty - s_0)e^{-\beta(t-t_0)} \quad (5)$$

对 (4) 求导, 并利用上式得

$$\frac{ds_t}{dt} = (s_\infty - s_0)\beta e^{-\beta(t-t_0)} = \beta(s_\infty - s_t) \quad (6)$$

上式说明, 指数模型的沉降速率与剩余沉降呈一次线性关系。当 $t = t_0$ 时, 有

$$\frac{ds_t}{dt} = \beta(s_\infty - s_0)$$

可以证明, $T_{\text{inf}} = \frac{1}{\beta} + t_0$ 时, 在

$s_t \sim \ln(t - t_0)$ 出现拐点, 拐点处沉降

$$s_{\text{inf}} - s_0 = (1 - e^{-1})(s_\infty - s_0) \approx 0.6321(s_\infty - s_0)$$

1.3 增长型曲线

宰金眠、梅国雄在 2000 年认为, 随着荷载逐步施加, 土路基沉降变化基本经历了“发生—发展—稳定—极限”的过程,

与成长曲线一样呈现 S 形曲线特征。从而, 引入 Pearl 模型进行了全过程的沉降量预测方法研究。赵明华、刘煜等研究了其他增长型曲线的应用。增长型曲线是一种曲线拟合法。

Logistic 模型, 又称 Verhulst 模型, 或 Pearl 模型

$$s_t = \frac{s_\infty}{1 + ae^{-bt}} \quad (7)$$

Gompertz 模型

$$s_t = s_\infty e^{-ae^{-bt}} \quad (8)$$

Richards 模型

$$s_t = \frac{s_\infty}{[1 + ae^{-bt}]^r} \quad (9)$$

Weibull 模型

$$s_t = s_\infty - ae^{-bt^r} \quad (10)$$

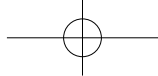
Morgan-Mercer-Flodin 模型

$$s_t = \frac{ab + s_\infty t^r}{b + t^r} \quad (11)$$

式中: s_∞ 、 L 、 a 、 b 、 r 均为大于零的参数。上述 5 种 S 形增长模型的渐近线均为直线 $s = s_\infty$; 参数 b 与响应变量 s 与从初值改变到终值的速度有关; 参数 r 用于增加数据拟合模型的灵活性。由 S 型增长模型的特性, 如单调递增性、不过原点性、有界性以及存在反弯点, 可以看出它能较准确地反映软土地基固结沉降的变化规律^[8]。

下面以 Logistic 模型为例讨论增长曲线应用时值得商讨的几个问题。

(1) 增长模型中生物繁殖系统的初始值 (基数) 是增长的必要条件, 因为没有基数无增长可言, 生物增长的时程发展主要取决于系统内在的规律。而沉降不一定必须有瞬时 (初始) 沉降才能继续发展, 瞬时沉降以及加荷过程中的沉降发展不仅



与地基自身性质有关，还与加荷大小和速率有极其重要的关联。沉降增长型预测系统未考虑荷载因素，从机理来讲是一个不完善的沉降预测系统。

(2) 由式 (7) 可得，当 $t=0$ 时， $s_0=s_\infty/(1+a)$ ，因此有

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0) \frac{1 - e^{-bt}}{1 + ae^{-bt}} \quad (12)$$

其隐含了初始沉降与最终沉降关联，而事实上，初始沉降与最终沉降无直接关系。

(3) 增长曲线的重要特点是沉降曲线 $s-t$ 存在拐点，式 (7) 的拐点时间 t_{inf} 为

$$t_{inf} = \frac{\ln a}{b}, \quad s_{inf} = \frac{s_\infty}{2} \quad (13)$$

而事实上，沉降曲线的拐点一般出现在加荷结束时，上式无法考虑加荷过程的影响，拟合的拐点可能在加载过程中。

(4) 式 (7) 可以推导出沉降速率与沉降的关系

$$\frac{ds_t}{dt} = b(s_\infty - s_t) \frac{s_t}{s_\infty} \quad (14)$$

它反映了在沉降全过程中，沉降速率是沉降的二次上凸曲线。但是，大量实测资料表明，在荷载稳定后，速率一般是沉降的下凹曲线或接近直线。因此，该模型预测的最终沉降可能偏小。

1.4 考虑流变的预测方法

梅国雄、宰金珉等 2004 年建立以下的沉降与时间关系曲线预测模型

$$s_t = s_f \frac{(t/T_{\text{eop}})^b + c}{(t/T_{\text{eop}})^b + a + c} \quad (15)$$

式中： a, b, c 为预测未知参数，均大于或等于 0； s_f 为最终沉降； T_{eop} 为 $s_t - \ln t$ 的一个拐点，认为主次固结的分界点。为了

保证沉降速率变得越来越慢，即 d^2s_t/dt^2 ，需限制 $b \leq 1$ 。可以看出，该模型也是一种曲线拟合法。

拐点存在是由于主次固结变形的机理有差别，对于主次固结比较明显的土类，可认为拐点对应的时间为 T_{eop} ，即有 $t = T_{\text{eop}}(a+c)^{1/b} = T_{\text{eop}}$ ，从而有 $a+c=1$ 。事实上，主固结和次固结通常是同时发生，只是在刚开始阶段，主固结占主要部分，到后面次固结占主要部分而已，从而导致 $a+c$ 在 1 附近左右波动。

式 (15) 可得：当 $t=0$ 时， $s_0 = s_f \frac{c}{a+c}$ ，

当 $t = T_{\text{eop}}$ 时， $s_t = s_{T_{\text{eop}}} = s_f \frac{1+c}{1+a+c}$ ，

当 $t = \infty \gg T_{\text{eop}}$ 时， $s_t = s_\infty = s_f$ (16)

事实上，由 (16) 可将 (15) 式改写为

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0) \frac{(t/T_{\text{eop}})^b}{(t/T_{\text{eop}})^b + d} \quad (17)$$

式中： $d = a+c$ ，应该注意到式 (15) 的 a, c 与 T_{eop} ，或 d 与 T_{eop} 并非完全独立的变量，不能同时求得。如果实测资料出现 $s_t - \ln t$ 的拐点，事先确定 T_{eop} ，才能确定 a, c 或 d ，使 $a+c \neq 1, d \neq 1$ 。在实测资料尚未出现 $s_t - \ln t$ 的拐点，需要进行预测时，只能先令 $a+c=1, d=1$ ，才能求得 T_{eop} 。因此，最一般的表达式是

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0) \frac{(t/T_{\text{eop}})^b}{(t/T_{\text{eop}})^b + 1} \quad (18)$$

式 (18) 变形得

$$s_\infty - s_t = (s_\infty - s_0) \frac{1}{(t/T_{\text{eop}})^b + 1} \quad (19)$$

对 (18) 求导，并利用上式得

$$\frac{ds_t}{dt} = (s_\infty - s_0) \frac{b(t/T_{\text{eop}})^{b-1}}{T_{\text{eop}} [(t/T_{\text{eop}})^b + 1]^2}$$

$$= \frac{b}{T_{\text{cop}}(s_{\infty} - s_0)} \frac{(s_{\infty} - s_t)^{1/b+1}}{(s_t - s_0)^{1/b-1}} \quad (20)$$

上式说明, 该模型的沉降速率与剩余沉降也呈二次下凹的非线性关系。

1.5 灰色模型法

灰色模型法预测的基本思路是: 把随时间变化的随机正的数据列, 通过适当的方式累加, 使之变成非负递增的数据列, 用适当的方式逼近, 以此曲线作为预测模型, 对系统进行预测。

一般的 GM 模型为 GM (n, h) 模型, 它表示对 h 个变量用 n 阶微分方程建立的模型。作预测用的 GM 模型一般为 GM (1, h) 模型, 即对 h 个变量用一阶微分方程。其中最重要的同时也是实际中应用最多的是 GM (1, 1) 模型。

设 $s^{(0)} = \{s^{(0)}(t_i), i=1, 2, \dots, n\}$ 为原始沉降增量系列, 该数列的一次累加数列为 $s^{(1)} = \{s^{(1)}(t_i), i=1, 2, \dots, n\}$, 且满足

$$s^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k s^{(0)}(i)$$

设其相应的 GM (1, 1) 模型为

$$\frac{ds^{(1)}}{dt} + as^{(1)} = u \quad (21)$$

其响应方程为

$$\hat{s}^{(1)}(k+1) = \left[s^{(0)}(1) - \frac{u}{a} \right] e^{-ak} + \frac{u}{a} \quad (22)$$

上式 $k=0$ 的初始值, $\hat{s}^{(1)}(1) = x^{(0)}(1)$, 然后确定 $k=1, 2, 3, \dots, n-1$ 时的值 $\hat{s}^{(1)}(2), \hat{s}^{(1)}(3), \hat{s}^{(1)}(4), \dots, \hat{s}^{(1)}(n)$, 进而得还原数列

$$\hat{s}^{(0)}(k+1) = \hat{s}^{(1)}(k+1) - \hat{s}^{(1)}(k), \quad k=1, 2, 3, \dots, n-1 \quad (23)$$

式 (21) 中 $\hat{a} = (a, u)^T$, 则由最小二乘法估计得

$$(a, u)^T = (\mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{y}_n \quad (24)$$

其中

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{y}_n = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$$

式 (22) 的最终沉降量 $s_{\infty} = \frac{u}{a}$ 。

传统的灰色模型 GM (1, 1) 的实质就是用指数函数作为拟合函数对等时距数据序列进行拟合。但在实际应用中所遇到的时段通常是非等长的, 这就大大限制了灰色预测理论的应用范围, 因此, 樊明杰等开展了非等时距灰色模型的研究。

张仪萍、柳治国等认为随着沉降发展, 地基固结排水后孔隙率变小, 渗透系数减小, 渗透系数减小反过来影响沉降的变化, 预测模型中的参数值也必然发生变化。因此, 应建立灰色时变参数模型控制方程如下

$$\frac{ds^{(1)}}{dt} + a(t)s^{(1)} = u(t) \quad (25)$$

式中: $a(t)$ 、 $u(t)$ 均为待定的时变参数, 可用适当次数的多项式近似逼近。张仪萍采用线性多项式逼近, 柳治国等采用 Legendre 多项式近似逼近, 实例计算表明, 灰色时变参数模型可以提高预测精度。

陈尚勇、侍倩认为常用的 GM (1, 1) 模型把累计沉降拟合指数形式, 因此推算的结果跟指数曲线法推算的一样偏小。利用非线性动态灰色模型——R • Usher 模型对软土地基的最终沉降量进行了推算

$$\frac{ds}{dt} + as = us^n \quad (26)$$

式中： a, u, n 均为待定参数。

其响应方程为

$$\hat{s}(t) = \left\{ \left[s^{1-n}(t_1) - \frac{u}{a} \right] e^{-a(1-n)(t-t_1)} + \frac{u}{a} \right\}^{\frac{1}{1-n}} \quad (27)$$

式 (27) 的最终沉降量 $s_\infty = \left(\frac{u}{a} \right)^{\frac{1}{1-n}}$ 。

陈尚勇等推算结果表明，该模型的推算值通常处于指数曲线法和双曲线法推算值之间，是可靠的。值得注意的是， n 一般在 $-5 \sim 0$ 之间， a, u 之间量级相差很大，因此作者建议编制计算程序时应该采用双精度型实数。

实际上，式 (27) 表示存在如下式的关系

$$s_\infty^{1-n} - s_i^{1-n} = (s_\infty^{1-n} - s_1^{1-n}) e^{-a(1-n)(t-t_0)}$$

上式表示，在 $(s_{j-1}^{1-n}, s_j^{1-n})$ 坐标系内，等时差沉降点对成直线。

2 固结系数法

2.1 一维太沙基固结理论

设土体是均质的、完全饱和的理想弹性材料，土颗粒和孔隙水均不可压缩，土体变形是微小的，土体中只发生竖向压缩变形和竖向孔隙水渗流。故图 1 所示单元土体的体积压缩量变化量 $\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} dz$ 应等于表面流量之差 $\frac{\partial q_z}{\partial z} dz$ ，则有

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial q_z}{\partial z} \quad (28)$$

式中： ε_v ——体积应变；
 q_z ——单位面积流量。

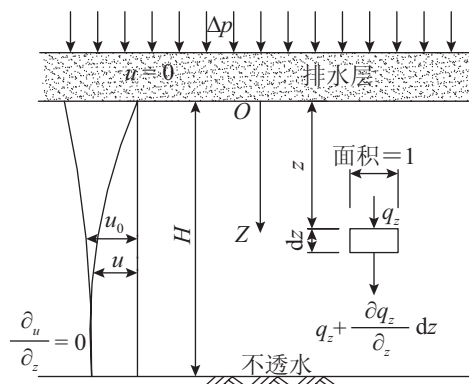


图 1 单向固结问题

设孔隙水渗流服从达西定律，渗透系数为常数，由达西定律有

$$q_z = -\frac{K}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial z} \quad (29)$$

式中： K ——渗透系数；
 γ_w ——水容重；

u ——孔隙水压力。

将 (29) 代入 (28) 得

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = -\frac{K}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (30)$$

又设荷载一次瞬时施加并维持不变，土体承受的总应力不随时间变化，故弹性土体单向压缩时，有

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = \frac{\partial \varepsilon_z}{\partial t} = -m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (31)$$

式中： ε_z ——竖向正应变；

m_v ——体积压缩系数， $m_v = a_v / (1+e)$ ；

a_v ——压缩系数； e 为孔隙比。

将式 (31) 代入式 (30)，得太沙基单向固结基本微分方程

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (32)$$

式中： $C_v = \frac{K}{\gamma_w m_v} = \frac{(1+e)K}{\gamma_w a_v}$ ——固结系数。

如图 1 所示的单向固结问题的初始条件和边界条件如下

$$u|_{t=0} = u_0, \quad u|_{z=0, t>0} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial z}|_{z=H, t>0} = 0 \quad (33)$$

式中: u_0 ——初始孔隙水压力;

H ——压缩层厚度。

在此条件下, 用分离变量法解式(32), 得解析解

$$u(z, t) = \sum_{m=1}^{\infty} \left(\frac{2}{H} \int_0^H u_0 \sin \frac{Mz}{H} dz \right) \sin \frac{Mz}{H} e^{-M^2 T_v} \quad (34)$$

式中: $M = \frac{(2m-1)\pi}{2}$;

$T_v = C_v t / H^2$ ——时间因素。

若压缩层内 u_0 为均匀分布, 由式(34)得

$$u(z, t) = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M} \sin \frac{Mz}{H} e^{-M^2 T_v} \quad (35)$$

整个压缩层 t 时刻平均孔隙水压力 \bar{u} 、平均固结度 U 及总压缩量 s 分别为

$$\bar{u}_t = \frac{1}{H} \int_0^H u dz = u_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (36)$$

$$U_t = \frac{u_0 - \bar{u}_t}{u_0} = 1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \quad (37)$$

$$\begin{aligned} s_t &= m_v \int_0^H (u_0 - u_t) dz \\ &= m_v u_0 H \left[1 - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 T_v} \right] \quad (38) \end{aligned}$$

对于弹性土体, 由式(37)和式(38)知, 反映孔隙水压力消散程度的固结度 U 应等于变形比, 即

$$U_t = \frac{u_0 - \bar{u}_t}{u_0} = \frac{s_t}{s_{\infty}} \quad (39)$$

式中: $s_{\infty} = m_v u_0 H$ ——最终沉降量。

式(37)的级数收敛得很快, 取前两项已足够精确, 即

$$U_t = 1 - \frac{8}{\pi^2} e^{-\frac{\pi^2}{4} T_v} \quad (40)$$

上式, 当 $U_t \leq 0.53$ 时, 还可近似表

示为

$$U_t = \sqrt{4T_v / \pi} \quad (41)$$

上述两式可合并为

$$U_t = \left[\frac{(4T_v / \pi)^m}{1 + (4T_v / \pi)^m} \right]^{\frac{1}{2m}} \quad (42)$$

式中: $m = 2.8$, 经验算, 式(42)代替式(37)的误差一般极小, 只有 $U_t = 90\% \sim 100\%$ 范围内, 才有不超过 3% 的误差, 完全可以满足计算精度要求。

式(42)用通式表示为

$$U_t = \left[\frac{(t/a)^m}{1 + (t/a)^m} \right]^{\frac{1}{2m}}, \quad \frac{t}{a} = \frac{U_t^2}{(1 - U_t^{2m})^{\frac{1}{m}}} \quad (43)$$

对上式求导得

$$\frac{dU_t}{dt} = \frac{1}{2a} \frac{(1 - U_t^{2m})^{\frac{1}{m}}}{U_t}$$

在室内试验中, 可以取固结初期两点、后期一点的读数, 用式(42)确定试验土样的固结系数, 因此可称之为三点固结系数法。

2.2 固结度指数法

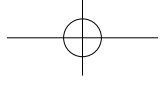
太沙基的一维固结理论认为孔隙水压力随时间变化过程线呈指数曲线关系, 对于线弹性土体, 应力定义固结度 U_{σ} 等于应变定义固结度 U_{ϵ} 。所以土体的压缩时间过程也符合指数曲线关系。

曾国熙考虑了径向排水固结度 U_r , 把 U_r 和 U_z 两者联合起来得出 U_{rz} , 并且固结度理论解用以下的普遍式来表示

$$U = 1 - \alpha e^{-\beta t}, \quad U \geq 53\% \text{ 时} \quad (44)$$

对于不同的排水条件都可用以上普遍式表达, 所不同的在于 α 和 β 两个参数。

$$\text{由 } U = \frac{s_t - s_0}{s_{\infty} - s_0} = 1 - \alpha e^{-\beta t} \text{ 可得}$$



$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0)(1 - \alpha e^{-\beta t}) \quad (45)$$

从表面上看, 式(4)与式(45)具有近似相同的形式, 但是, 式(4)基于地基沉降速率以负指数变化的自然规律, 考虑了次固结沉降的影响, 其中 $t-t_0$ 为相对时间, s_0 为 t_0 时已经发生的沉降, 包括瞬时、固结, 以及次固结沉降; 式(44)基于太沙基一维固结理论, t 为相对于瞬时加荷的时间, s_0 为加荷时产生的瞬时沉降, 忽略了次固结沉降的影响。需要注意, 式(44)中 $U_{t=0}=1-\alpha \neq 0$ 是由于采用固结度近似普遍式所带来的误差, 因此通常认为式(44)适用于固结度 U_t 大于 30% 时, 切不可混淆为瞬时固结或瞬时沉降。

式(45)还可表示为

$$s_t = s_0 + (s_\infty - s_0)(1 - e^{-\beta(t - \ln \alpha)})$$

因此, 如将 s_0 或 α 设置为优化参变量, 上式本质上变成了指数模型。

另外, 如果只考虑相对沉降 \bar{s}_t (沉降增量)、用相对时间 \bar{t} 表示时, 式(4)、式(45)可分别表示为

$$\bar{s}_t = \bar{s}_\infty(1 - e^{-\beta \bar{t}}), \quad \bar{t} = 0 \text{ 时}, \quad \bar{s}_t = 0 \quad (46)$$

$$\bar{s}_t = \bar{s}_\infty(1 - \alpha e^{-\beta \bar{t}}), \quad \bar{t} = 0 \text{ 时}, \quad \bar{s}_t \neq 0 \quad (47)$$

对式(47)求导得

$$\frac{ds_t}{dt} = (s_\infty - s_0)\alpha\beta e^{-\beta t} = \beta(s_\infty - s_t) \quad (48)$$

上式说明, 固结度指数模型的沉降速率与剩余沉降也呈一次线性关系。当 $t = 0$ 时, 有

$$\frac{ds_t}{dt} = \beta(s_\infty - s_0)$$

可以证明, $T_{\text{inf}} = \frac{1}{\beta}$ 时, 在 $s_t \sim \ln t$ 出现拐点, 拐点处沉降

$$s_{T_{\text{inf}}} - s_0 = (1 - \alpha e^{-1})(s_\infty - s_0)$$

经数学推导知, 瞬时加载的固结曲线的反弯点处 $U_{\text{inf}} = 70\%$, 因此可反算得 $\alpha = e(1 - U_{\text{inf}})$; 0.8155, 接近通常采用的 $8/\pi^2$ 。

2.3 三点指数法

在实际沉降—时间曲线 ($s-t$) 上, 任取三点 (t_1, s_1) 、 (t_2, s_2) 、 (t_3, s_3) , 并使得 $t_2 - t_1 = t_3 - t_2$ 。将这三点代入式(47)联立求解得

$$s_\infty = \frac{s_3(s_2 - s_1) - s_2(s_3 - s_2)}{(s_2 - s_1) - (s_3 - s_2)} \quad (49)$$

采用三点法推算最终沉降量, 一般要取观测资料持续时间较长, 在计算时尽可能取较长的时间段, 并根据实际情况, 多取几个不同的时间段来分别计算, 最后取其平均值作为推算的最终沉降量。

2.4 Asaoka 法

Asaoka (1978 年) 提出了一种从一定时间过程所得的沉降观测资料来预计最终沉降量和沉降速率的方法。

由 Mikasa (1963 年) 导出的以垂直 (体积) 应变表示的固结微分方程为

$$\frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \varepsilon_v}{\partial z^2} \quad (50)$$

该方程可近似地用一个以级数形式微分方程表示

$$s + a_1 \frac{ds}{dt} + a_2 \frac{d^2s}{dt^2} + \dots + a_n \frac{d^n s}{dt^n} + \dots = b \quad (51)$$

式中: s 为固结沉降量; $a_1, a_2, \dots, a_n, \dots$ 和 b 是取决于固结系数和土层边界的常数。

沉降—时间曲线 s_t 可分离成:

$t_j = j \cdot \Delta t$, $j = 1, 2, 3, \dots$, 且 Δt 为常数, s_j 为时间 t_j 时的沉降量。式(51)递推关系

表示如下

$$s_j = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i s_{j-i}$$

对大多数情况, 第一阶近似 ($n=1$) 就已足够满足工程精度要求, 则上式简化为

$$s_j = \beta_0 + \beta_1 s_{j-1} \quad (52)$$

根据实测沉降资料, 作图确定待定参数 β_0 、 β_1 和最终沉降量。

2.5 星野法

实际上, 式 (5-41) 在 $U_i \leq 30\%$ 时, 有

$$U_i; \sqrt{4T_v/\pi}; \sqrt{\frac{4T_v/\pi}{1+4T_v/\pi}} \quad (53)$$

星野根据现场实测值证明了固结沉降是时间平方根的函数, t 时刻固结沉降量计算式为

$$s_{cr} = s_{c\infty} \frac{\sqrt{(t-t_0)/k}}{\sqrt{1+(t-t_0)/k}} \quad (54)$$

则总沉降为

$$s_t = s_0 + s_{cr} = s_0 + (s_{\infty} - s_0) \frac{\sqrt{(t-t_0)/k}}{\sqrt{1+(t-t_0)/k}} \quad (55)$$

3 现有预测方法分析比较

从沉降—沉降速率关系来看, 可分为初期固结 (一般 $U < 33\%$)、中后期固结以及次固结有三个阶段, 如图 2 所示的 AB、BC、CD。上述各种沉降预测方法有各自适用性, 也都存在着一定的不足, 对于中后期固结沉降反映预测能力较强, 而对初期固结、次固结的预测尚不能得到较好的效果。

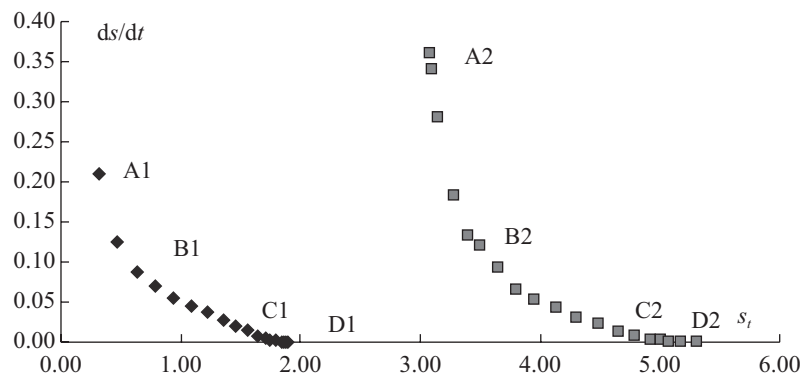


图 2 沉降速率—沉降关系图

总体可以分为指数型曲线、双曲线型曲线两大类。

3.1 双曲线型曲线法

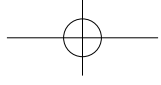
其中双曲线式 (1)、三点固结系数法式 (42)、星野法式 (55)、考虑流变模型式 (19), 均可归结为双曲线型曲线方法。

这些曲线可以表示为一般式

$$s_t = s_0 + (s_{\infty} - s_0) \left[\frac{((t-t_0)/a)^m}{1+((t-t_0)/a)^m} \right]^{\frac{1}{n}} \quad (56)$$

对上式 (56) 求导得

$$\frac{ds_t}{dt} = \frac{m}{an} (s_{\infty} - s_0) \left(\frac{s_t - s_0}{s_{\infty} - s_0} \right)^{1-\frac{n}{m}} \left[1 - \left(\frac{s_t - s_0}{s_{\infty} - s_0} \right)^n \right]^{\frac{1}{m}-1}$$



上式中, 应满足 $n \geq m$ 条件。

可以证明, $[(T_{\text{inf}} - t_0)/a]^m = 1/n$, 即 $T_{\text{inf}} = a(1/n)^{1/m} + t_0$ 时, $s_t \sim \ln(t - t_0)$ 出现拐点, 拐点沉降 $s_{\text{inf}} = s_0 + (s_\infty - s_0) \left(\frac{1}{1+n} \right)^{1/n}$ 。

(a) $m=1, n=1$ 时, 是一般双曲线模型

$T_{\text{inf}}=a+t_0$ 时出现拐点, $s_{\text{inf}} - s_0 = \frac{1}{2}(s_\infty - s_0)$

(b) $m=1, n=2$ 时, 成为星野模型

$T_{\text{inf}}=a/2+t_0$ 时出现拐点, $s_{\text{inf}} - s_0 = \sqrt{\frac{1}{3}}(s_\infty - s_0)$

(c) $m=b, n=1$, 成为考虑流变的梅国雄模型

$T_{\text{inf}}=a+t_0$ 时出现拐点, $s_{\text{inf}} - s_0 = \frac{1}{2}(s_\infty - s_0)$

(d) $m=n/2$, 将成为三点固结系数模型

在 $T_{\text{inf}} = a \left(\frac{1}{n} \right)^{\frac{2}{n}} + t_0$ 时出现拐点,
 $s_{\text{inf}} - s_0 = (s_\infty - s_0) \left(\frac{1}{1+n} \right)^{\frac{1}{n}}$

上式可见, n 的主要作用是调整出现 $s_t - \ln(t - t_0)$ 拐点时的固结度 ($t_0 = 0$)。

设有 3 点等时差 Δt 的时间系列 $t_0, t_1 = t_0 + \Delta t, t_2 = t_1 + \Delta t$, 对应沉降系列为 $s_0, s_1 = s_0 + \Delta s_1, s_2 = s_1 + \Delta s_2$, 记相邻增量衰减比例 (率) k_1 为

$$k_1 = \frac{\Delta s_2}{\Delta s_1} < 1 \quad (57)$$

根据沉降增量 $\Delta s_1, \Delta s_2$, 可由式 (56) 推得双曲型模型的参数为

$$s_\infty - s_0 = \Delta s_1 (1 + k_1) \left[\frac{2^m - 1}{2^m - (1 + k_1)^n} \right]^{\frac{1}{n}},$$

$$a = 2\Delta t \left[\frac{(1 + k_1)^n - 1}{2^m - (1 + k_1)^n} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (58)$$

上式中, 当 $n > m$ 时, 如果 Δt 较小, $k_1 \rightarrow 1$, 存在 $2^m - (1 + k_1)^n \leq 0$ 的可能, 此

时星野模型、梅国雄模型以及三点固结系数模型无法预测 500 或者预测的 s_∞ 偏大。

双曲线 $n = m = 1$, 上式简化得

$$s_{h,\infty} - s_0 = \Delta s_1 \frac{1 + k_1}{1 - k_1}, \quad a = 2\Delta t \frac{k_1}{1 - k_1} \quad (59)$$

3.2 指数型曲线法

除双曲型模型, 大多数预测模型都用指数函数 $e^{-\beta t}$ 来反映地基沉降的增长规律, 张仪萍等研究表明 GM (1, 1) 灰色模型、Asaoka 法、指数法以及 Voigt-Kelvin 黏弹性模型都反映了沉降速率与沉降的线性关系。

非线性 R · Usher 指数模型, 可根据沉降增量 $\Delta s_1, \Delta s_2$, 推得参数估计为

$$s_\infty - s_0 = \Delta s_1 \left[\frac{1}{2 - (1 + k_1)^{1-n}} \right]^{\frac{1}{1-n}},$$

$$\beta = - \frac{\ln \left[(1 + k_1)^{1-n} - 1 \right]}{\Delta t (1 - n)} \quad (60)$$

陈尚勇等推算 n 一般在 $-5 \sim 0$, 上式可以看出当 $n < 0$ 时, 如果 Δt 较小, $k_1 \rightarrow 1$, 存在 $2 - (1 + k_1)^{1-n} \leq 0$ 的可能, 此时 R · Usher 预测的 s_∞ 将偏大。

线性指数模型 $n = 0$, 上式简化得

$$s_{e,\infty} - s_0 = \frac{\Delta s_1}{1 - k_1}, \quad \beta = - \frac{\ln k_1}{\Delta t} \quad (61)$$

上式实际上就是三点指数法的另一种表达式, 可以直接表达出 k_1 对最终沉降的影响。

为了验证预测方法对初期固结沉降预测的适用性, 结合现场观测频率, 设有时差 10d 历时 2.5a 的观测系列, 共 90 点, 最终沉降 $s_\infty = 1000\text{mm}$ 。以式 (38) 计算

固结度、推算各时刻点的沉降，现验证各种预测方法对于主固结沉降的预测性能。

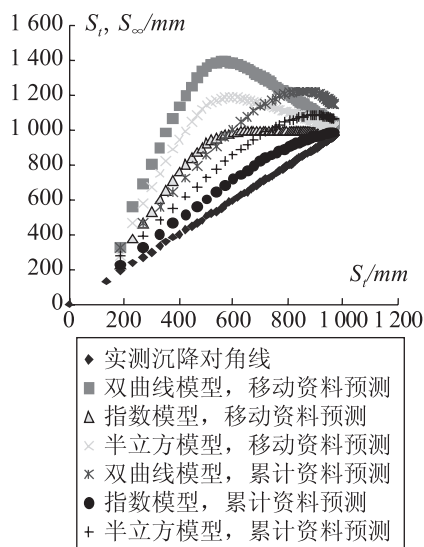


图3 双曲线、指数与半立方模型预测固结沉降比较

从 $t = 30\text{d}$, $U = 19\%$ 时已有三点资料开始, 不断利用最新三点资料预测沉降, 或利用包括初期资料在内的累计资料进行沉降预测, s_{∞} 的预测结果如图3中所示。从中可以看出①双曲线、指数模型在初期预测沉降的效果, 均不理想。②适当舍弃旧资料, 可以提高预测精度。③指数预测值始终小于或等于理论最终沉降量, 双曲线预测值由小增大, 取得最大值后, 后期逐渐减小接近理论值, 最大时是理论值的1.2~1.4倍。④双曲线预测值始终大于指数预测值, 一般在1.15~1.5倍左右。

4 半立方双曲型模型

4.1 预测新模型的提出

现将指数模型、双曲线模型的沉降速率与剩余沉降关系式综合表示为

$$v_t = \frac{ds_t}{dt} = c(s_{\infty} - s_t) \left(\frac{s_{\infty} - s_t}{s_{\infty} - s_d} \right)^n \quad (62)$$

式中, $n=0$ 时为指数模型、 $n=1$ 时为双曲线模型。

根据固结度早期 $U < 40\%$ 的实测沉降数据来预测时, 双曲线法预测性能优于指数法。大量工程实践表明, 在中后期双曲线虽然从某种程度上适当反映了次固结影响, 但预测的沉降量往往偏大。指数法以 Terzaghi 一维固结理论为基础, 反映的是土体的主固结沉降, 在 $U > 53\%$ 时才能获得较满意的预测结果, 由于没有考虑次固结沉降等因素, 其最终沉降的预测量一般都是偏小的。

比较通式(62), 如设有沉降速率与剩余沉降成半立方关系, 取 $n=0.5$ 时, 预测的剩余沉降是否会介于指数模型和双曲线模型的预测值之间呢?

$$\frac{ds_{m,t}}{dt} = c(s_{m,\infty} - s_{m,t}) \sqrt{\frac{s_{m,\infty} - s_{m,t}}{s_{m,\infty} - s_{m,d}}} \quad (63)$$

对上式进行变量分离为

$$(s_{m,\infty} - s_{m,d})^{1/2} (s_{m,\infty} - s_{m,t})^{-3/2} ds_{m,t} = c dt \quad (64)$$

再进行积分, 并根据初始条件

$$s_{m,t=0} = s_{m,d} \text{ 得}$$

$$\sqrt{\frac{s_{m,\infty} - s_{m,d}}{s_{m,\infty} - s_{m,t}}} = 0.5ct + 1 \quad (65)$$

则剩余沉降可表达式为

$$s_{m,\infty} - s_{m,t} = (s_{m,\infty} - s_{m,d}) \frac{1}{(0.5ct + 1)^2} \quad (66)$$

最后整理得

$$s_{m,t} = s_{m,d} + (s_{m,\infty} - s_{m,d}) \frac{(0.5ct + 1)^2 - 1}{(0.5ct + 1)^2} \quad (67)$$

上式表示 $s_{m,t}$ 是一条对称于 $t = -2/c$ 的双曲型曲线。

4.2 半立方模型的特点

根据三点等时差 Δt 的沉降增量 Δs_1 、 Δs_2 ，可由式 (66) 反演得本文方法的参数为

$$s_{m,\infty} - s_{m,d} = \frac{1+k_1}{1-k_1 \tan^2 \theta} \Delta s_1,$$

$$c = 2 \frac{\sqrt{1+k_1} \cos \theta - \sqrt{k_1}}{\sqrt{k_1} \Delta t},$$

$$\frac{\pi}{6} \leq \theta \leq \frac{\pi}{3} \arccos \left(-\sqrt{\frac{k_1}{1+k_1}} \right) \leq \frac{\pi}{4} \quad (68)$$

可以证明，一般情况下半立方曲线的预测值始终介于指数曲线法和双曲线预测值之间。

4.3 在工后沉降预测中的应用

对某高速公路工后观测资料较连续完整，而且实测工后沉降增量大于 20mm 的 520 个测点进行预测（见图 4 ~ 图 8），半立方预测沉降始终处于指数、双曲线预测之间，预测的工后总沉降是指数法的 1.07 ~ 1.47 倍，双曲线的 0.78 ~ 0.94 倍。

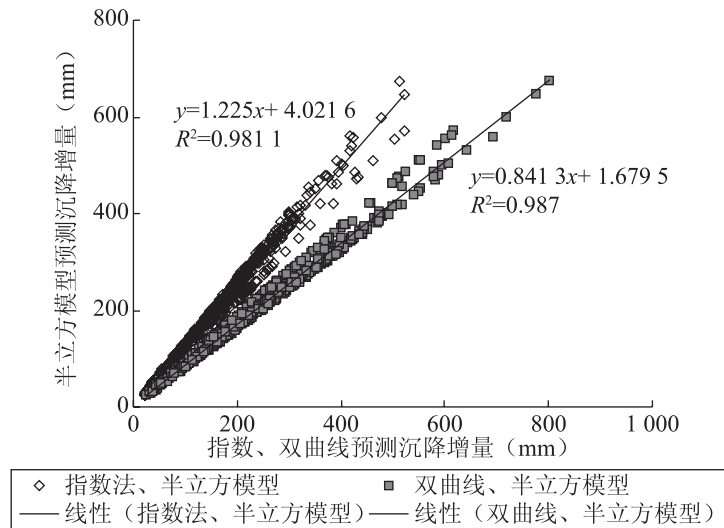


图 4 双曲线、指数与半立方模型预测比较

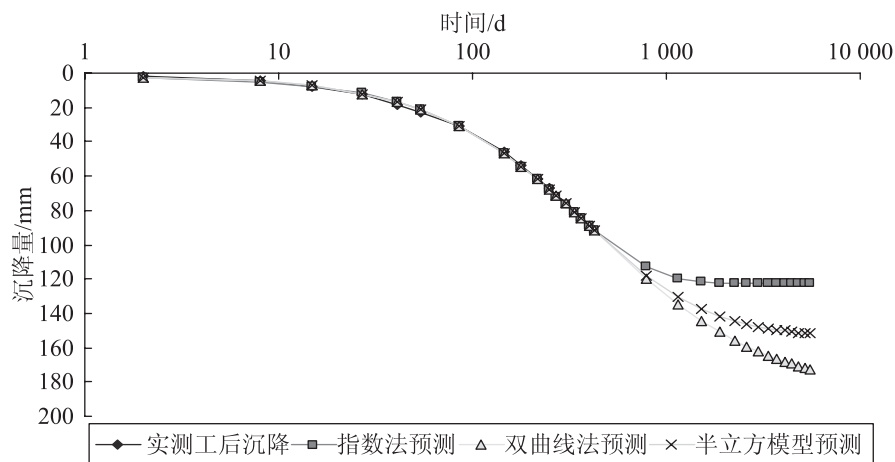


图 5 K90+790 工后沉降预测比较

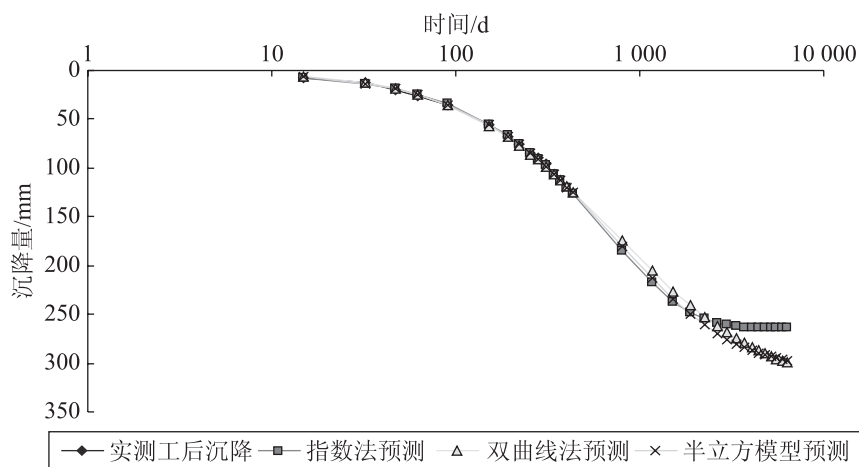


图 6 K97+920 工后沉降预测比较

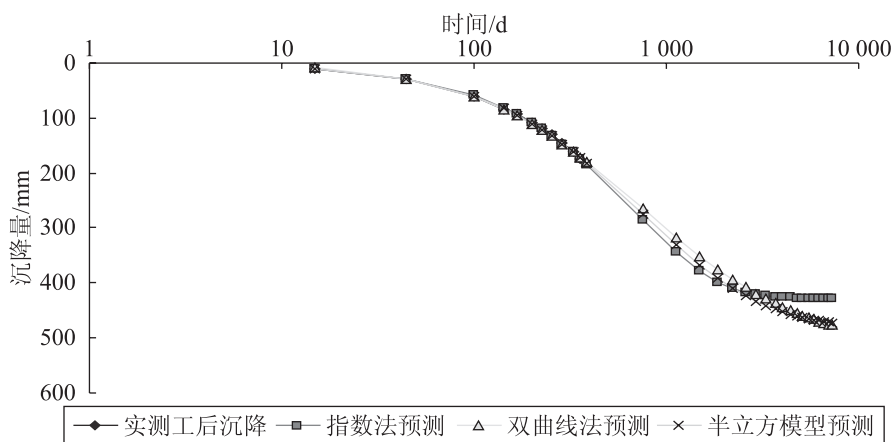


图 7 K101+272 工后沉降预测比较

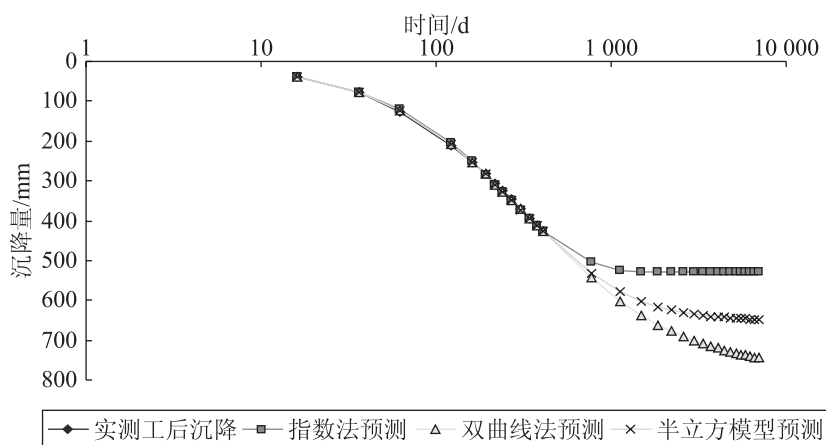
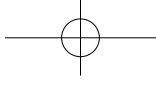


图 8 K111+172 工后沉降预测比较



5 小结

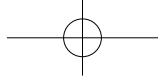
(1) 目前, 不考虑荷载变化的沉降预测方法, 主要包括双曲型曲线法、指数型曲线法以及基于系统分析和控制理论的灰色模型、神经网络法等。对增长型曲线在预测沉降方面存在的不足, 进行了分析归纳总结。

(2) 指数曲线法由于没有考虑次固结沉降等因素, 预测的沉降量偏小; 应用双曲线法预测沉降量是安全的, 但往往偏大较多, 因而提出了沉降速率与沉降呈半立方非线性关系的双曲型曲线预测模型。

(3) 应用半立方模型对某工后沉降进行了预测。理论分析和实例推算结果表明, 该模型的推算值通常处于指数曲线法和双曲线法推算值之间, 且接近这两种传统方法的平均值, 预测结果的可靠度会更高些。

参考文献

- [1] JTG F80/1—2004, 公路工程质量检验评定标准 [S].
- [2] JTJ 017—96, 公路软土路堤设计与施工技术规范 [S].
- [3] JTG F10—2006, 公路路基施工技术规范 [S].
- [4] 徐泽中. 公路软土地基路堤设计与施工关键技术 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.



电力监控系统在高速公路长大隧道设备管理中的应用

傅志明

(浙江交通投资集团杭金衢分公司)

摘要: 以黄衢南高速达坞隧道应用电力监控系统为例,详细介绍了电力监控系统原理、组网架构和实现的各种功能,为高速公路隧道设备管理和安全可靠运行提供了保障。

关键词: 电力监控;高速公路;隧道设备管理。

高速公路隧道管理是高速公路运营管理中的重要环节和组成部分,隧道的安全畅通直接关系到整条高速公路的安全运营和广大司乘人员的人身财产安全。高速公路隧道内设备种类多、数量大、呈狭长带状分布的特点和设备管理面临人员少、维护劳动强度大的困境,要求高速千米设备管理部门必须采用高科技、新设备对隧道内各种设备进行全面管控。

近年来,随着计算机技术、自动化控制技术和光纤通信技术的发展,各种电气设备智能化程度的提高,电力监控系统已陆续在我国高速千米隧道设备管理中得到了应用。

1 电力监控系统原理

电力监控系统以计算机、通信设备、测控单元为基本工具,为变配电系统的实时数据采集、开关状态检测及远程控制提供了基础平台,它可以和检测、控制设备构成任意复杂的监控系统,在变配电监控中发挥核心作用,可以帮助企业消除孤岛、降低运作成本、提高生产效率、加快变配

电过程中异常的反应速度。

整个电力监控系统可以分为三层结构:站控管理层(也称中心主站层)、网路通信层和现场设备层。第一层与第二层通过主干光纤以太网结合一体,第二层与第三层通过区域内部光纤数据网或总线数据网结合一体。这种分层管理可以全部实现监控的远程集中管理、维护及远程升级,保证分控点的不间断运行,便于监控规模的扩展及管理维护。详细网络拓扑结构如图1所示。

2 电力监控系统可实现的功能

电力监控系统的主要功能有遥信对象、遥控对象、遥测对象、数据采集和处理、人机界面(远程操控、打印图形、曲线、报表等)、系统安全管理等。具体功能说明如下:

(1) 对电力电缆运行状况的监控。比如电缆的绝缘状况、负载水平、电缆接头状况、运行温度等,通过采集电力电缆的相关参数来实现对电力电缆运行状况的实时监控。

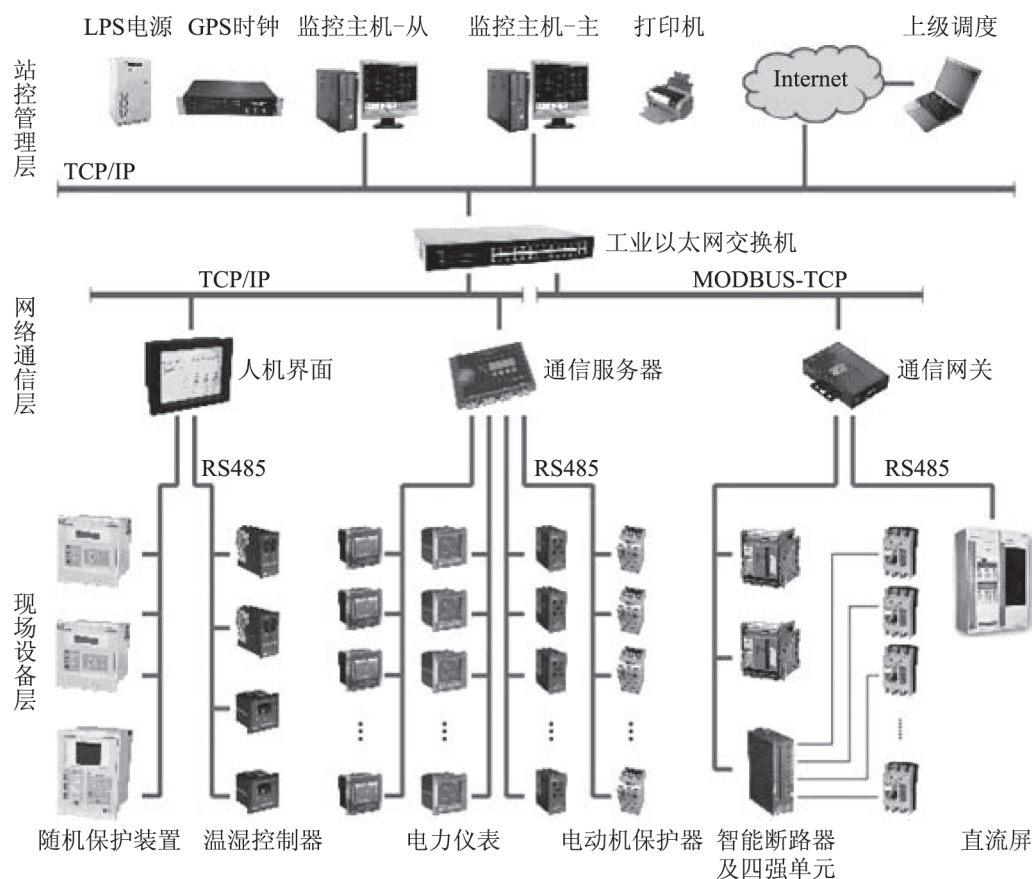


图1 电力监控系统层级图

(2) 对设备运行环境的监测。通过采集配电房内的温度、湿度、烟雾、水位、气体成分等信息来监测配电房的运行状态，以提高设备运行的可靠性。

(3) 对设备发生状况进行准确告警。告警后通过与辅助设备系统的联动来实现对灾害的紧急预案处理，将灾害控制在最小的影响范围之内，以保证电网的安全稳定和人身安全。

K1533处，左洞长3550米，右洞长3510米。该隧道已全面应用了电力监控系统，实现了对隧道供配电、照明通风、发电机组、UPS等设备的远程控制。下面简要阐述该隧道电力监控系统的组网架构和实现功能。

3.1 达坞隧道电力监控组网架构

达坞隧道采用双电源供电带自备电源模式，具体三遥（遥信、遥控、遥测）布局，如图2所示。

3 电力监控系统在黄衢南高速公路隧道中的应用

达坞隧道位于京台高速（G3）黄衢南

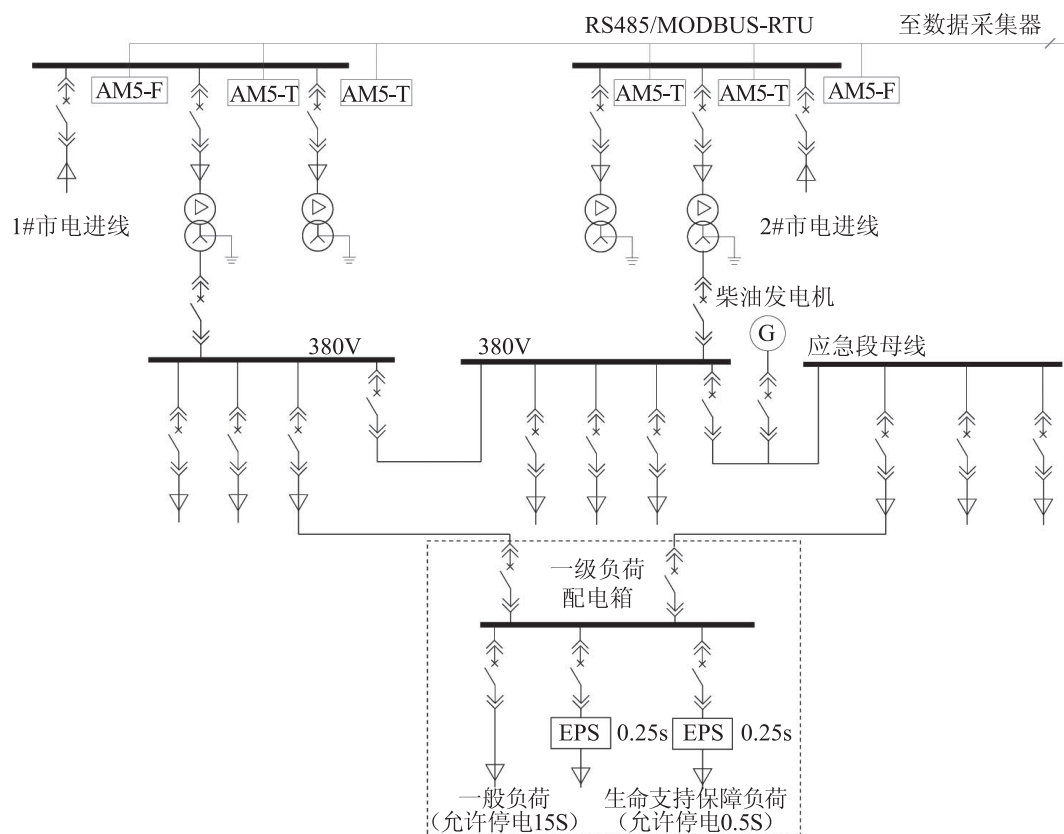


图2 隧道电力监控三遥控制图

3.2 电力监控在达坞隧道所能实现的功能

1. 高压 10kV 系统电力监控功能

进线/出线回路：可测量三相电压，电流，频率，有功功率，功率因数，控制开关分、合闸。

线路变压器组：可测量有功功率 P ，无功功率 Q ，三相电压 U ，三相电流 I ，功率因数 $\cos\phi$ ，非电量信号，遥控本线路的遥跳、遥合。详见图 3。

2. 0.4kV 系统电力监控功能

进线回路：可监测有功功率 P ，无功功率 Q ，三相电压 U ，三相电流 I ，功率因数 $\cos\phi$ ，开关位置信号，故障脱扣信号等；可以对进线开关（低压断路器或电操）进行远程分合闸控制。

出线回路：可监测开关位置信号、回路分闸状态、故障脱扣信号。

电容补偿：对电容柜三相电力参数、电容投切组数等电容器组的运行工况进行监测。详见图 4。

3. 照明风机回路电力监控功能

对低压出线回路进行监控，并监视控制隧道照明系统和隧道通风系统；通过组态软件对照明回路实现远程控制开关、定时控制和光强控制等。详见图 5。

4. 发电机组电力监控功能

遥测量：发电机出口三相电压、三相电流、有功功率、无功功率、频率、功率因数等电量参数；监测发电机组油压、水温、转速、日期、运行时间、电池电压等非电量参数。



图3 高压10kV系统电力监控功能图

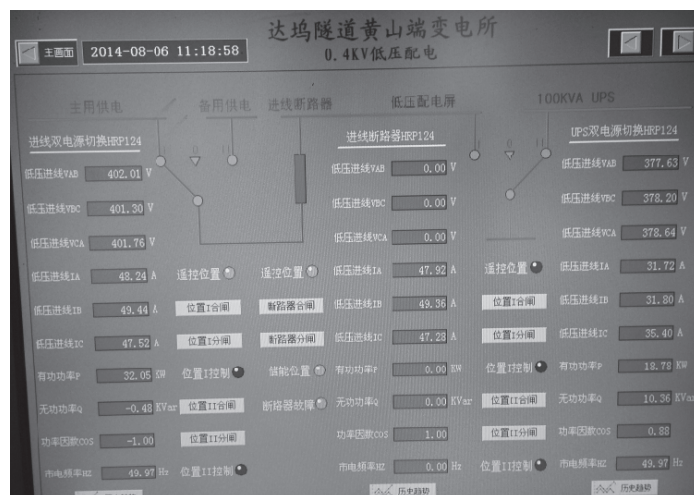


图4 0.4kV系统电力监控功能图

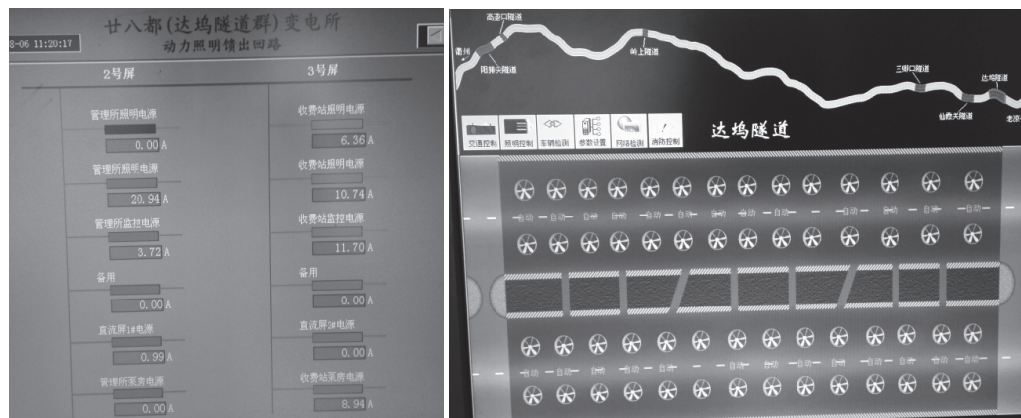


图5 照明风机回路电力监控功能

遥信量：发电机运行状态信号、故障信号、各类报警信号等。

遥控：远程控制发电组的启动/停止。

5. UPS 电力监控功能

系统全面诊断 UPS 运行状况，实时监视 UPS 的各种参数；监测 UPS 运行状态，包括对出线电压、电池电压、电流、功率等实时量的监测；监控 UPS 各出线开关的分合状态。

6. 报警方式电力监控功能

可区分多级报警级别，报警事件发生时系统可自动按事件级别排队报警、处理，以电子地图行驶弹出相应的报警窗口，并可在电子地图上有明显的变化，报警事件实现分组处理，不同的事件反馈到相关的人员分组，达到优化报警处理方式的效果。

7. 报表功能

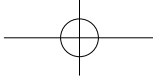
系统提供整点记录、日报表、月报表和年报等不同形式报表，内容包括系统运行报表，系统具有实时报警报表、历史报警报表、操作员记录报警及历史数据记录报表。

结束语

电力监控系统采用先进成熟的光纤主环网技术、现场控制网络技术以及监控数据、报警及视频信息联网传输技术，一是解决了隧道配电房采用电工值守和隧道内设备多人维护管理模式效率低、成本高的问题，节省系统运行维护成本，节约能耗；二是方便管理控制。对高速公路隧道的供配电、照明通风等电气设备进行分布式监控和集中管理，提高了隧道管理水平，使隧道管理更人性化、合理化和科学化，也为隧道设备的管理积累了一些经验。

参考文献

- [1] 张阳. 高速公路隧道电力监控系统的研究与设备[J]. 交通科技, 2008 (S1).
- [2] 马世平. 基于工业以太网的高速公路隧道电力监控系统[J]. 电压电气, 2006 (8).
- [3] 黄琳. 隧道综合电力监控系统方案设计与探讨[J]. 北方交通, 2010 (6).



GIS 技术在宁波市县乡公路网调整规划中的应用研究

竺石磊¹ 丁蓓妍² 雷 电³ 黄 赛⁴

(1、3. 宁波市公路管理局; 2. 长安大学; 4. 北京工业大学)

摘 要: 本文基于宁波市县乡公路普查数据, 建立 ARCGIS 数据库, 利用 ARCGIS 技术的空间分析能力和数据处理能力, 完成了调整规划过程中规模预测、节点选择、路网布局等工作, 解决了县乡公路网调整规划过程中数据繁杂、不易管理和应用的问题, 介绍了一种新的数据处理的设计思路和实现方案, 为进一步的研究提供了依据。

关键词: 县乡公路; ARCGIS; 规模预测; 调整规划。

1 宁波市县乡公路网调整规划概况

1.1 调整背景

伴随国家高速公路网、国道网和浙江省对省道网规划的布局调整以及逐步建成, 现有县乡道交通功能及其与干线公路的衔接, 已经不能满足发展需要; 宁波市农村公路近年来得到了快速发展, 部分公路未确定行政等级、营运管理难度大、管理养护不到位等矛盾急需解决; 随着宁波市农村城镇化和城乡一体化发展, 城市范围快速扩大, 部分县乡公路实际或即将成为城市道路, 但建管养主体还是公路部门, 这不利于其与城市道路的衔接和协调作用的发挥。上述三方面原因严重制约了农村公路的持续、健康发展, 现有县乡公路网布局、管养等方面局部出现的不科学、不合理、低效率等问题, 亟须通过县乡公路网调整规划, 落实与综合交通体系、城乡一体化发展相适应的县乡公路布局。

1.2 调整规划数据分析需求特点

收集、处理、分析和展示大量的与网

络区域地理空间位置相关的空间和属性信息是本次规划中的重点和难点, 除了县乡公路之外, 已有的村、镇、县的经济节点和产业发展点(含规划)众多, 调整后的县乡公路可能需要新建, 也可能直接利用已有的村道或未统计但是已有的社区、园区路。这就需要基于数以千计的经济节点和数以万计的各类型道路, 并考虑城市、村镇的规划范围, 合理选定调整后的路网布局。

宁波市县乡公路路段众多, 涉及的社会、经济、人口、区域面积等数据信息量更是多达 50 万条, 依靠传统的做法进行计算并将结果图示表现, 十分费时、费力, 且难以胜任规划中的各个环节。地理信息系统 (geographic information system, GIS) 结合地理学与地图学, 是用于输入、存储、查询、分析和显示地理数据的空间信息系统, 以其强大的数据管理、分析及图形显示等功能广泛地应用在不同的领域。针对上述问题, 本次规划利用已经形成的各种地理信息数据, 利用 GIS 技术来处理复杂庞大的县乡公路网数据, 将基于复杂因素的县乡公路网规划布局规划进行

了落实,取得了计算上的高效、地理位置与布局分析的准确、多属性经济发展分析的灵活、成果上的直观和美观等效果。

1.3 基于 GIS 的数据分析特点

本次规划以县乡村公路普查 GIS 路网库为基础数据库,应用 ARCGIS 软件模块工具对区位—节点重要度布局思路研究进行了优化处理,主要开展了以下工作:

(1) 在 GIS 软件平台和规划区域县乡公路网普查数据支持下,建立基于 ARCGIS 的公路网综合信息数据库。

(2) 分析规划区域社会经济的发展 and 公路网的实际需求特点,确定规划区域内县乡公路网的合理规模。

(3) 基于县乡路网布局调整的方法理论,在 ARCGIS 平台建立规划区域的数字高程模型进行三维模拟,利用 ARCGIS 相

关工具对节点的重要度进行量化显示以解算主要区位线,形成县乡公路网理论布局。

(4) 利用 GIS 相关模块工具对数据进行分析统计,分析调整效果。

2 GIS 技术应用情况

2.1 路网

本研究中的路网包括现有路网和规划方案路网两部分,其中每部分按等级将分为六级:高速、国道、省道、县道、乡道、村道。路网数据包含大量的信息,如路线的编码、路段的编号、路线的起始点、起始桩号、行政等级、技术等级、所属县市、路段长度等,在构建 ARCGIS 数据库时这些信息必须全部纳入,如图 1^[1]所示。

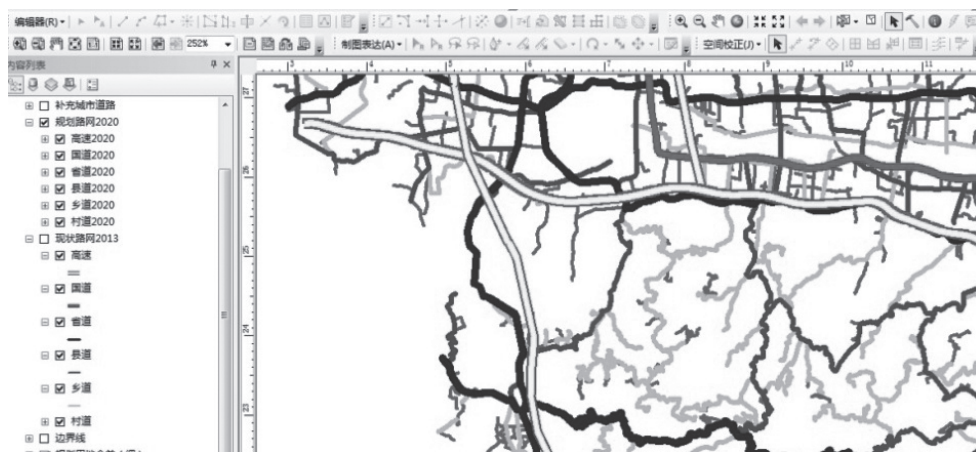


图 1 图层示例

2.2 节点选择

纳入规划的节点分为行政节点、交通节点和经济节点^[2],每个节点包含多个不同的属性信息值,数据量庞大且分散。

行政节点主要包括市政府驻地、区县

中心驻地、乡镇驻地、建制村所在地等部分。这些不同级别的节点依据投影坐标直接生动地表现出规划区域内部的行政区划布局现状位置。属性信息值主要包括名称、面积、人口、财政状况、重要度、行政等级、

坐标值、所属县市等信息。

交通节点主要包括汽车站、火车站、机场、码头、港口、主要对外出入口、收费站、县市间主要通道口等。这些不同级别的节点依据投影坐标直接生动地表现出规划区域内部的行政区划布局现状位置。交通节点在规划调整中应重点考虑。属性信息值主要有名称、投影坐标、所属县市区域等。

经济节点主要包括工、农业园区，经济技术开发区，名胜古迹所在地等图层。属性信息值包括名称、投影坐标、所属县市区域等。区域经济的发展紧密联系其公路规划布局方案的选取，应将必要的经济节点纳入现状数据库中。

2.3 城市化道路调整

宁波市目前处于快速城市化扩展期，这一阶段城市空间不断向郊区延伸，郊区土地功能转变，开发强度增加，人流和物流流动加快，交通分布复杂，路网压力增大，城乡接合部出现了城市道路和公路并存、道路机非混行严重、公路向城市道路演变等现象。在这些城乡接合部地区，许多县乡公路在承担过境交通和城市出入境交通功能的同时，也成为服务城市内部交通的重要基础设施，为城市郊区的行人和非机动车辆提供出行服务^[3]。经过逐县逐段核对，发现整个宁波市城市化公路共 399.7 千米，其中县道 277.41 千米，乡道 62.3 千米，需根据城市发展需要，将移交作为城区道路的县乡公路梳理明晰。

表 2 宁波市公路网各行政等级规模推荐值（千米）

年份	国道	省道	县道	乡道	专用公路	村道	合计
2020	1 058	1 385	2 985	2 800	53.83	4 772	13 053.83

3 规划成果

3.1 县乡公路网规模预测

国土系数法^[4]根据国土系数理论以公路网所在区域的面积、人口、经济水平等社会经济指标来计算区域内的理论公路长度，可操作性强，能较好地反映公路网规模与其主要影响因素之间的函数关系，但是该方法考虑的经济影响因素过少，会降低计算结果的准确度。

生长曲线模型^[5]选用类比法标定模型参数，考虑因素较全面，定性分析和定量分析相结合，比较符合地区公路发展的实际；但是类比关系中，各类比变量因子权重确立缺乏严格的论证，预测结果受个人经验积累的影响较大。

因此，本次规划以宁波市社会经济指标和历年公路网总里程为基础数据，采用国土系数法和生长曲线模型预测的平均值作为宁波市公路网总里程规模，如表 1 所示。

表 1 宁波市公路网规模测算（千米）

年份	2015	2020	相关系数
国土系数法	13 018.92	12 182.14	0.981
生长曲线模型法	11 305.28	12 186.34	0.985
平均值	11 728.38	13 000.35	

以宁波市公路网总规模预测值为总量控制^[6]，保证国道公路总里程发展规模符合上位规划的发展要求，并类比南京、苏州、杭州、厦门等沿海发达城市的县乡公路网结构比例，推算出宁波市各公路行政等级发展规模，如表 2 所示。

3.2 县乡公路网布局规划

1. 交通区位布局分析

(1) 数字高程模型 (DEM) 的建立

利用已有等高线和高程点, 以及已有的规划区域边界、水系等信息作为硬断线, 利用水体作为生成 TIN 格网的分割多边形, 生成的部分区域 TIN 格网如图 2 (a) 所示; 在 ArcGIS 软件中的 3D Analyst 已有工具下, 通过 ArcScene 部件, 将已生成的 TIN 格网近似的拟合出规划区域的地表形态, 结果如图 2 (b) 所示; 针对已加载的 TIN 格网, 使用转换工具: 3D Analyst- 转换工具 -TIN 格网转换 DEM, 可得到地理地表的数字高程模型, 实现将 DEM 转换为栅格格式数据, 并进行栅格计算的工作, 如图 2 (c)、2 (d) 所示。

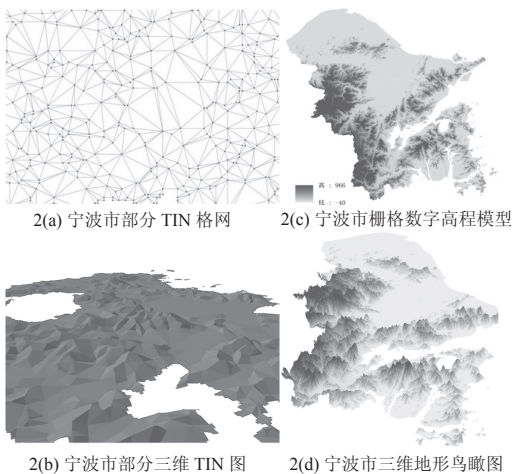


图 2 数字高程模型 (DEM) 的建立

(2) 交通区位布局分析

交通区位布局法^[7]是通过对规划区域的地理特征、经济发展模式和资源分布的分析, 结合规划区的地位, 从根本上找出交通产生可能性最大的地带, 并以此为路线布局走向的依据来布局交通干线。

总结以往的规划实例, 交通区位布局法多为在二维的平面地图上构建, 这种方法不但局限于操作者的个人主观经验和规划水平, 而且人工标注和分级工作较为主观和烦琐。结合先进的 GIS 模型工具, 可以利用规划区域的等高线数据构建三维的数字高程模型, 拟合规划区域地形分布, 明确区域内山脊线等地理特征位置走向。GIS 模型工具调用加载在 GIS 数据库中的重要节点数据图层的三维坐标, 来实现重要节点和实际地理形态走向分布的高度吻合, 然后完成区位线的绘制和节点重要度的计算。

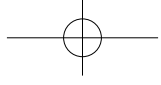
根据宁波市各个乡镇、建制村、主要农工业园区、开发区、对外主要出入口、较大的运输节点所处的地理位置以及经济地位做聚类分析后, 可得到 3 070 个节点, 其中实节点 2 980 个, 包括宁波市 10 个县市、136 个乡镇节点, 2 834 个建制村; 虚拟节点 90 个, 包括交通节点和经济节点^[8]。以所有节点作为控制点, 连点成线, 可解算出宁波市的交通区位线, 包括 11 条对外交通区位线 (7 横 4 纵) 和 11 条区内交通区位线 (6 横 4 纵 1 环)。

2. 节点重要度计算分析

本次规划采用经验做法, 选取权重归一法量化计算宁波市 3 070 个节点的重要度并进行排序, 用以明确宁波市这些节点在规划区域的功能和地位, 之后重新进行动态聚类分析将上述节点划分为 6 个层次:

第一层次: 2 个节点。实节点 1 个, 宁波市中心 (包括海曙区、江东区、江北区和鄞州区); 虚拟节点 1 个, 北仑港区。

第二层次: 23 个节点。实节点 10 个,



虚拟节点 13 个。

第三层次：52 个节点。实节点 26 个，包括 22 个中心镇和部分经济人口排在宁波市前列的乡镇街道；虚节点 26 个。

第四层次：101 个节点。实节点 81 个，各县市不属于第三层的乡镇街道；虚拟节点 20 个。

第五层次：306 个节点。实节点 276 个，各县市中心村及经济人口排在所属县市前列的村庄，其中象山县 33 个，宁海县 73 个，奉化市 31 个，鄞州区 29 个，余姚市 39 个，江北区 18 个，慈溪市 17 个，镇海区 31 个，北仑区 5 个；虚拟节点 30 个。

第六层次：2 586 个节点。剩余的各个县市的基层村。

需对求解、分层完成后的节点进行连接，但鉴于路网之间有地理地势、政策资金等限制，不能逐一做到点点相连，需要分析节点之间如何连接可以实现县乡路网的最高效率。因此在这里引出路段重要度的概念，路段重要度即所在路段的单位长度的重要度强度。之后得到重要度最大树，即区域内的节点全部连通且内部不成圈的路网形态。根据节点进行分层解算最大树，确保解算得到的路网的重要度总和最大化，这样就形成了规划区域的路网主体架构。

利用均势重要度法^[9]解算重要度最大树的思路是分层次进行布局工作。当完成第一层布局工作后，将所有节点的重要度动态更正成已连接节点的平均值，然后进行下一等级节点的连接工作，从而解算重要度最大树。用 GIS 解算出宁波市节点重要度最大树图。

3. 理论布局方案

交通区位线和节点重要度最大树构成主骨架布局；根据主骨架布局和节点层次

划分，最终形成宁波市公路网的理论布局方案。

理论布局方案中：

第一层路网将宁波市各县市中心区和宁波市市中心、宁波市对外出口以及重要的交通经济节点连接起来，等级对应着宁波市国道功能。

第二层路网使宁波市所有县市之间能够高效快捷地通达，甚至使各县市的中心镇和所在县市以及相邻县市的中心区衔接起来，等级对应着宁波市省道功能。

第三层路网是对第一、二层路网的补充，使宁波市各个乡镇之间连通度高，交通运输通畅，等级对应县道功能。

第四层路网的作用是连接当地主要的建制村，人流量较大、经济较为发达的中心村与邻近的乡镇，主要用来集散宁波市客货运交通量，等级对应乡道功能。

第五层路网，主要是作为邻近的建制村之间的链接，作为建制村的主要出入道路，等级对应村道功能。

3.3 调整情况

本次调整规划结果共有 324 条调整方案，其中县道调整方案 110 条，乡道调整方案 214 条，形成了层次分明、结构合理的县乡公路网布局。调整后，县乡公路里程增幅显著，其中县道 3 094.545km（237 条），调增 7.27%；乡道 2 801.978km（744 条），调增 28.02%。

调整后，形成了层次分明、结构合理的县乡公路网布局。至 2020 年宁波市公路网总体规模为 12 579.484km（4 826 条），调增 15.50%。其中县道 3 094.545km（234 条），调增 7.27%；乡道 2 816.978km（746 条），调增 28.71%；村道 4 140.831km（3 820

条)，调减 7.19%，县乡道路网密度由 51.69km/100km² 提高至 60.22km/100km²。调整后高速公路、普通国道、普通省道、县道、乡道、村道比例为 2:1:3:7:7:10，各等级公路比例呈现金字塔结构。

3.4 调整效果评价

调整后，宁波市县乡公路网规模更趋合理，多项指标达到更高水平，主要体现在以下几方面：

(1) 县乡公路对外连通性更加优越，发挥对外连通的主体作用。乡道以上对外出入口由 40 个增至 54 个，其中县乡道对外出入口 29 个，占对外出入通道的 53.7%。

(2) 县乡公路的连通深度显著提高。乡道以上建制村通达率由 83.68% 提升至 91.8%，旅游节点通达率由 67.6% 提升至 72.5%，产业节点通达率由 69.5% 提升至 75.8%，交通节点通达率由 92.1% 提升至 96.1%。

(3) 县乡公路服务全市乡镇居民出行的能力显著增强。县乡道服务公交客运总里程、公交客运量分别由 1 808.2 千米、179.68 万人增至 1 925.9 千米、189.1 万人，增幅分别为 6.6%、5.2%；县乡道服务山区人口由 74.48 万人增至 82.12 万人，增幅 10.3%，乡道以上山区村庄覆盖率由 87.8% 提升至 92.7%。

(4) 县乡公路网调整进一步优化了公路网行政等级结构，提升了县乡公路网规模和密度。至 2020 年，调整后高速公路、普通国道、普通省道、县道、乡道、村道比例为 2:1:3:7:7:10，行政等级结构进一步优化；县乡公路规模由 5 073.478km 增至 5 896.523km，其中县道 394.545km (234

条)，调增 7.27%；乡道 2 801.978km (744 条)，调增 28.02%。县乡道路网密度由 51.69km/100km² 提高至 60.22km/100km²。

(5) 县乡公路网调整改善了居民出行效率以及城乡一体化发展与经济活动的条件。以海曙区和江东区为中心，乡道以上 0.5/1/2h 小时圈覆盖县域人口数为 35.2 万人 /212.2 万人 /332.3 万人、0.5/1/2h 小时圈通达乡镇数 15 个 /77 个 /126 个、0.5/1/2h 小时圈通达行政村数分别为 266 个 /1 477 个 /2 329 个。

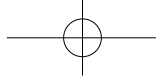
(6) 县乡公路布局对区域内环境、资源影响小。本规划高度注重资源保护，规划无涉及大型水源保护区的布局线位，与历史文物区无冲突。

4 优势分析

本次规划将 GIS 技术应用于县乡公路网规划的布局调整中，处理了复杂庞大的县乡公路网数据，将规划中一些具有地理特征的数据进行可视化处理，使数据提取分析更加灵活；在区位线方法的基础上，在 ArcGIS 平台建立数字高程模型，将研究区域地形表面进行了三维模拟，利用 ArcGIS 相关工具对节点的重要度进行量化，显示已解算主要区位线；对于重要度最大树的求解，实现了在 ARCGIS 软件自动求解和成图。

5 总结

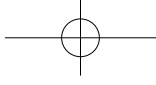
本次规划在宁波市县乡路网现状普查数据的基础上，建立宁波市公路网 ArcGIS 信息数据库（数据信息量达 50 万条），从县乡公路网规模预测出发，结合由节点重



要度法和交通区位线法得到的理论路网，结合目前广泛应用的 GIS 技术，对县乡公路网分层次进行调整和优化，形成主次分明的县乡公路布局体系，提高了县乡道的服务水平。

参 考 文 献

- [1] 魏瑶. 基于 GIS 数据库的县乡公路网布局调整研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [2] 王梅. 公路功能与公路行政等级的关系研究 [D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [3] 刘明林. 城市化地区县乡公路调整规划绩效研究 [D]. 西安: 长安大学, 2014.
- [4] [5] 吕新江, 吴伟航, 丘建锋. 区域公路网合理规模的预测方法研究 [J]. 职业圈, 2007, 6: 149-150.
- [6] 王元庆. 公路网规划理论的比较研究 [J]. 中国公路学报, 1997 (06).
- [7] 王元庆, 崔世华, 郝素斌. 重要度区位联合农村公路网布局法 [J]. 中国公路学报, 2002 (10).
- [8] 王元庆, 王梅, 夏超, 等. 宁波市县乡公路网调整规划研究报告 [R]. 西安: 长安大学, 2014.
- [9] 马珺杰. 基于 GIS 技术的发达地区县域公路网行政等级调整方法优化 [D]. 西安: 长安大学, 2014.



高架桥双支花瓶墩模板支架受力性能分析

周 琪¹ 池艳艳² 郭志奇³

(1. 温州市交通工程质量监督局; 2. 温州市交通重大项目前期工作办公室; 3. 宁波交通工程建设集团有限公司)

摘 要: 用有限元软件计算双支花瓶墩墩柱现浇混凝土模板支架结构位移和应力, 提出了模板支架制作和安装的计算数据, 并通过工程实例的实际应用, 取得了良好的效果, 为双支花瓶墩混凝土现浇模板支架的设计和施工提供了经验。

关键词: 双支花瓶墩; 现浇模板支架; 有限元软件; 位移; 应力。

1 引言

高架桥上部结构一般使用的箱梁以及 T 梁等这些梁式桥结构, 比较平淡以及单调, 下部结构的桥墩对美化高架桥起着重要的作用。外形相似于花瓶的花瓶墩既能承受上部结构的荷载, 又能给地面道路留出足够的空间, 同时美观流畅, 故得到了广泛的应用。花瓶墩分两类: 实体花瓶墩和镂空花瓶墩 (见图 1), 镂空花瓶墩空间开阔、轻巧纤细, 在狭窄、压抑的高架桥沉重的上部结构底下, 更显得美观、空旷, 富有活泼、轻盈和清新的感觉。



图 1 花瓶墩结构图

(左——实体花瓶墩, 右——镂空花瓶墩)

杭州湾跨海大桥杭甬高速连接线公路 (余夫至小曹娥互通段) 工程桥梁墩柱 A 型双支花瓶墩预制段如图 2 所示。A 型双

支花瓶墩墩身外扩幅度较大, 为保证墩身混凝土浇筑质量, 保证施工安全, 墩身分三次浇筑。

第一次浇筑直线段, 浇筑至直线段与曲线段交界面下 20cm 处, 钢筋接头一半在直线段, 一半在弧线段。

第二次浇筑曲线段, 浇筑至系梁底。曲线段模板部分不考虑落地支架进行受力支撑, 底部支撑由抱箍承受。模板分 4 个侧面, 高度方向每侧面为一整个单元块, 在现场用吊机逐块进行吊装拼接。安装时先安装外侧弧形模板, 外侧模板就位后, 利用施工操作平台对桁架模板支架 (包括盖梁端模板) 进行支撑, 承受模板自重, 然后绑扎钢筋, 钢筋绑扎结束后逐步安装剩余三面模板, 待模板安装完毕后, 固定四角斜拉拉杆, 对模板形成对拉, 同时利用地面缆风绳对模板进行垂直度调节。

第三次浇筑剩余曲线段及盖梁。安装外侧弧形模板, 并在盖梁底部搭设满堂支架, 安装系梁底模, 绑扎钢筋结束后安装其余模板, 并对拉紧固, 最后浇筑第三次混凝土。

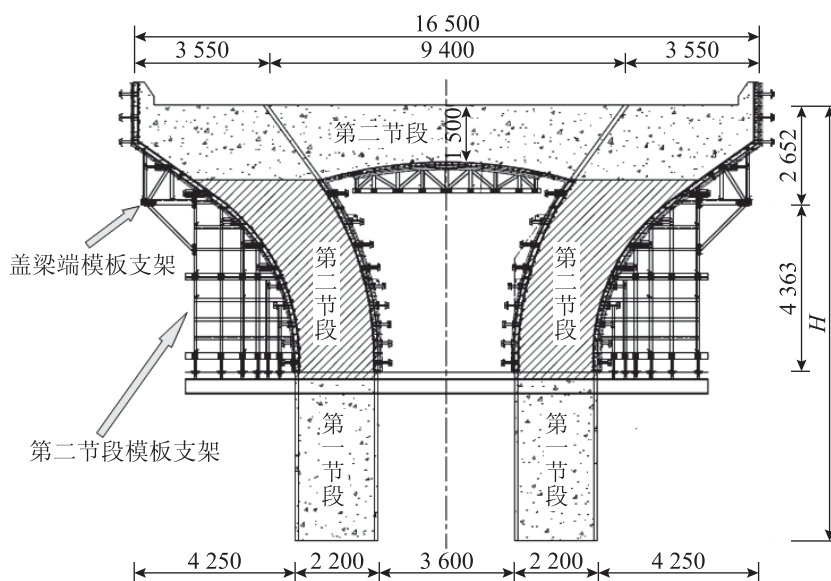


图2 墩柱施工分段图

2 有限元计算模型

2.1 建模思路

为尽可能精确地模拟双支墩三次浇筑中模板的受力过程，建模根据浇筑顺序分为三个节段，并分别进行受力的计算与分析。第一节段浇筑时，支架未形成，因此由模板自身承担未凝固混凝土的侧向作用力；第二节段和第三节段浇筑时，混凝土浇筑产生的侧向力由模板和模板支架共同承担，模板和模板支架、转角模板和平板模板之间均采用耦合自由度的方式进行连接，约束其三个方向的位移，而不约束转

角。建模中，坐标轴 x , y , z 三个方向分别代表横桥向、竖向和纵桥向。

2.2 单元选取

环向面板和四周的边框采用 shell63 板单元模拟和围绕在面板外的肋骨槽钢、围檩（另文发表），第二和第三节段模板支架和盖梁端模板支架的槽钢采用 beam188 梁单元模拟，模板转角处的精轧螺纹钢采用 link10 杆单元模拟（本文省略），第一节段模型共有 4 688 个单元和 3 742 个节点，第二节段模型共有 21 172 个单元和 16 378 个节点，第三节段模型共有 25 531 个单元和 17 995 个节点。三维有限元模型如图 3 所示。

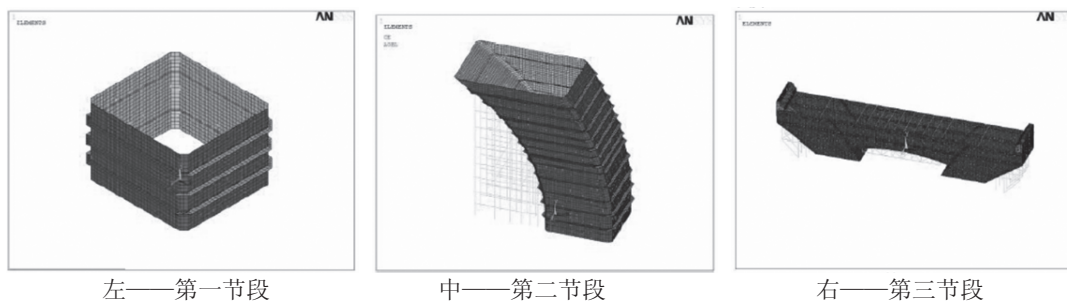


图3 模板和支架三维有限元模型

2.3 材料参数

模板支架各结构的材料参数如表1所示。

表1 材料参数表

构件	弹性模量 / Pa	泊松比	密度 / kg/m ³
16 竖撑槽钢	2.06×10 ¹¹	0.3	7 800
12 横撑槽钢	2.06×10 ¹¹	0.3	7 800
12 斜撑槽钢	2.06×10 ¹¹	0.3	7 800

2.4 截面特征

模板加劲肋和钢筋的截面特性如表2所示。

表2 支架槽钢的截面特性表

构件	截面积 / cm ²	惯性矩 J _{yy} / cm ⁴	惯性矩 J _{zz} / cm ⁴
竖撑槽钢	25.16	935	83.4
斜撑槽钢	15.69	391	38

2.5 边界条件

混凝土浇筑产生的侧向力由模板支架和模板共同承担，支架和模板、转角模板和平板模板之间均采用耦合自由度的方式进行连接，约束其三个方向的位移，而不约束转角。

2.6 荷载选取

考虑到浇筑混凝土的过程中，未凝固的混凝土将对模板产生侧向压力，因此对模板施加具有一定梯度的面荷载，方向始终垂直于模板的面板指向外侧，再传递给模板支架。

面荷载随高度呈线性变化，最大侧压力按照式(1)和(2)计算，并取两者中的较小值。

$$p = 0.43\gamma_c t_0 \beta V^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$p = \gamma_c H \quad (2)$$

式中： p ——新浇混凝土对模板的最大侧压力，kN/m²；

γ_c ——混凝土的重力密度，取26kN/m³；

t_0 ——新浇混凝土的初凝时间（单位： h ），可按实测确定；当缺乏试验资料时可采用 $t_0 = 200 / (t + 15)$ 计算 T 为混凝土的温度（单位： $^{\circ}C$ ）；

β ——混凝土坍落度修正系数；当坍落度在50～90mm， β 取0.85；当坍落度在100～130mm， β 取0.9；当坍落度在140～180mm， β 取1.0；

V ——混凝土浇筑高度（厚度）与浇筑时间的比值，即浇筑速度（m/h）；

H ——混凝土侧压力计算位置处至新浇筑混凝土顶面的总高度（m）；混凝土侧压力的计算分布图形见图4。图中混凝土有效高度 $h = p / \gamma_c$ 。

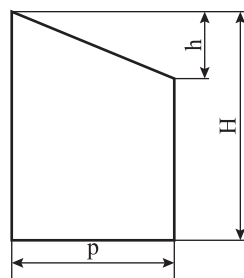


图4 混凝土侧压力分布图

3 第二节段模板支架计算结果

3.1 模板支架位移

(1) 模板支架位移计算

支架各方向位移如图5所示。

由图 5 可见，支架在横桥向产生最大位移 0.04mm，在纵桥向产生最大位移 0.05mm，在竖向产生最大位移 0.025mm，整体位移不超过 0.05mm。

(2) 计算结果

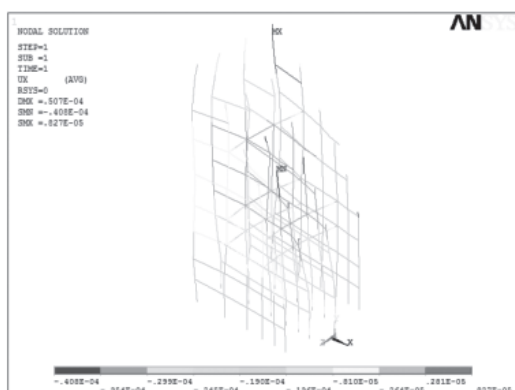
模板支架在纵桥向产生最大位移 0.05mm，小于变形允许值，满足设计要求。

3.2 模板支架应力

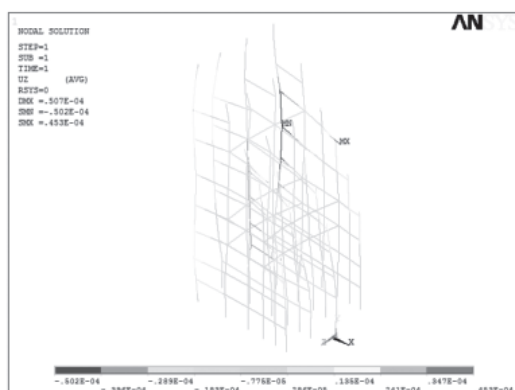
(1) 模板支架应力计算

第二节段模板支架的轴向应力及主应力分布如图 6 所示。

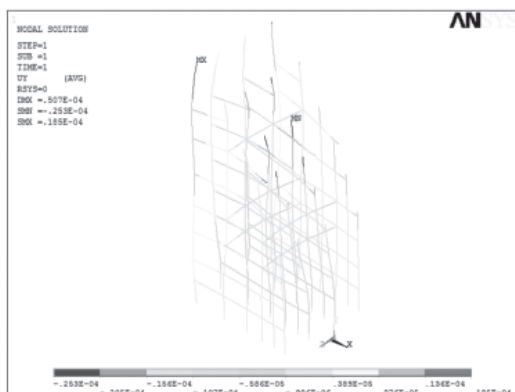
由图 6 可知，支架的轴向正应力大部分在 $-0.179 \sim 3.29\text{MPa}$ 范围内，最大压应力为 3.59MPa ，发生在支架底部，最大拉应力为 2.76MPa ，发生在最靠近模板的支架底部。主拉应力大部分在 0.18MPa 以内，最大值为 2.82MPa ；主压应力大部分在 1.67MPa 以内，最大值为 3.76MPa ；Mises 应力大部分在 2.71MPa 以内，最大应力为 4.06MPa 。



左——横桥向水平位移

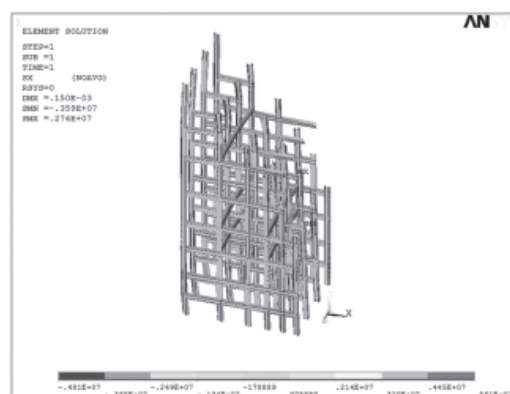


中——纵桥向水平位移

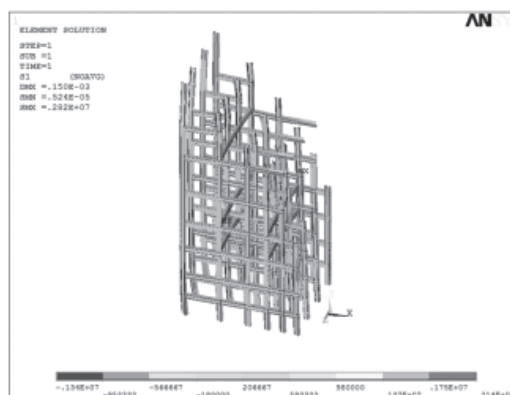


右——竖直位移

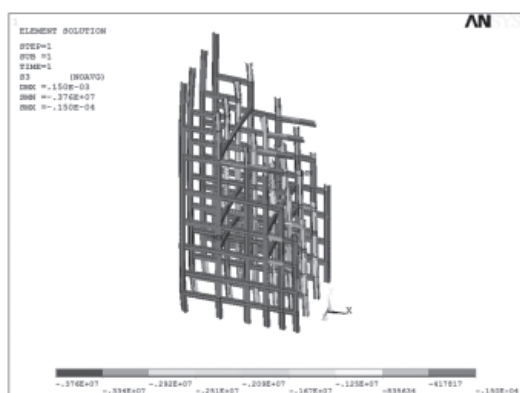
图 5 模板位移图 (单位: mm)



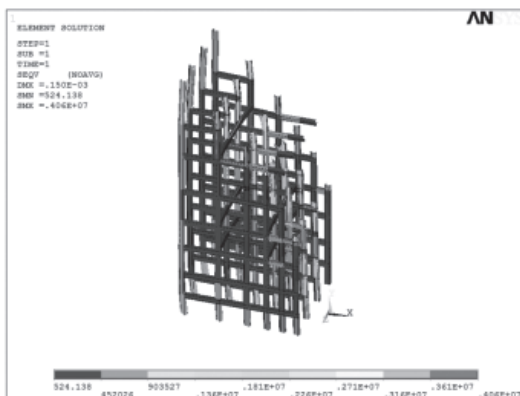
左——轴向应力分布



中左——主拉应力分布



右——Von mises 应力分布



中右——主压应力分布

图 6 支架轴向应力及主应力分布图
(单位: Pa)

(2) 计算结果

模板支架的最大轴向拉应力 2.76MPa, 发生在最靠近模板的支架底部; 最大主拉应力为 2.82MPa, 最大主压应力为 3.76MPa, 最大 Mises 应力为 4.06MPa, 小于 215MPa, 满足设计要求。

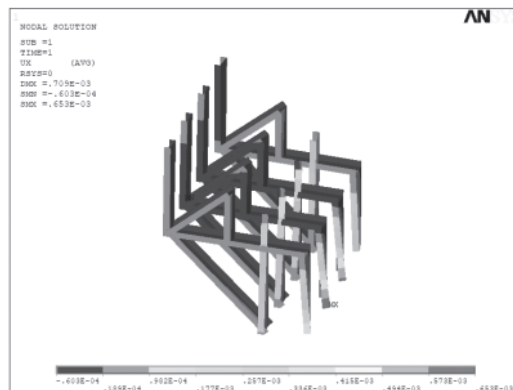
4 第三节段模板支架计算结果

4.1 模板支架位移

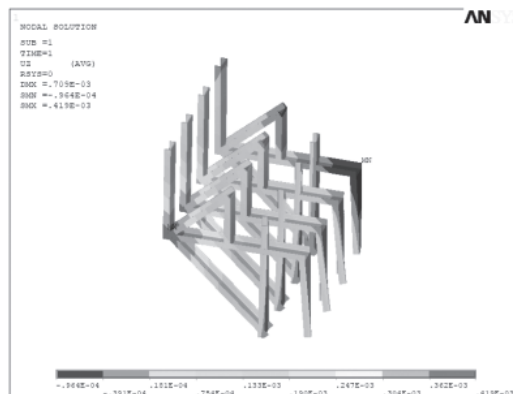
(1) 模板支架位移计算

模板支架各方向位移分布如图 7 所示。

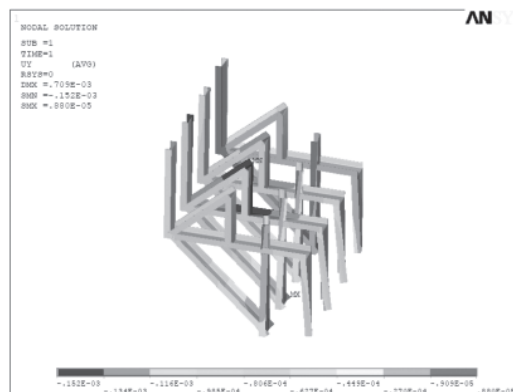
由图 7 可知, 支架在横桥向产生的水平位移最大值为 0.65mm, 在纵桥向产生的水平位移最大值为 0.42mm, 在竖向产生的最大位移为 0.15mm, 整体位移不超过 0.7mm, 满足设计要求。



左——横桥向水平位移分布



中——纵桥向水平位移分布



右——竖直位移分布

图 7 模板支架位移图 (单位: mm)

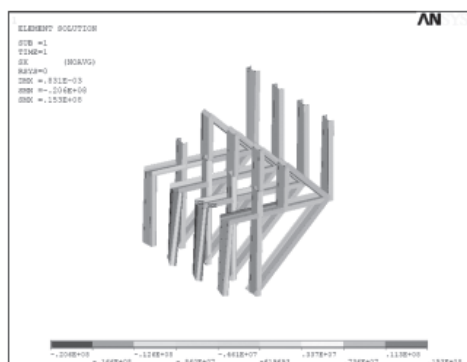
(2) 计算结果

模板支架产生的水平位移最大值为 0.7mm。

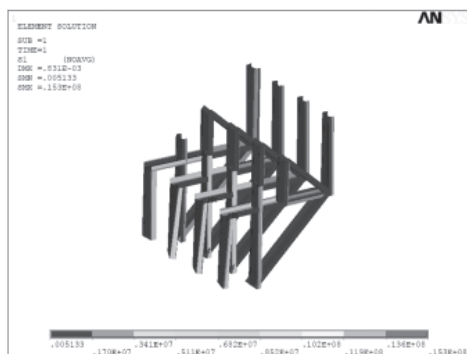
4.2 模板支架应力

(1) 模板支架应力计算

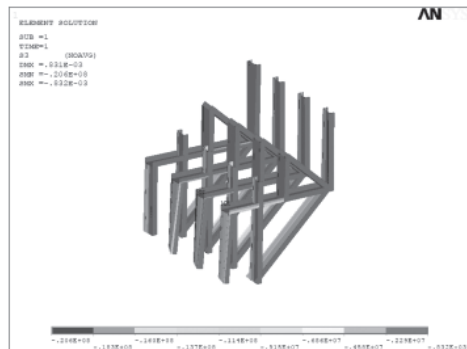
第三节段模板支架是对称结构，右侧支架的轴向应力及主应力分布如图 8 所示。



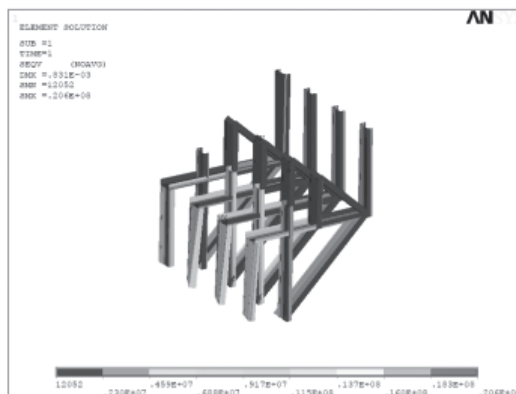
左——轴向应力分布



中左——主拉应力分布



中右——主压应力分布



右——Von mises 应力分布

图 8 支架轴向应力及主应力分布图 (Pa)

由图 8 可知，支架的轴向正应力大部分处于 -4.61 ~ 9.89MPa 范围内，最大压应力为 39.2MPa，最大拉应力为 34.4MPa；主拉应力大部分在 0.005 ~ 11.9MPa 以内，最大值为 15.3MPa。主压应力大部分在 0 ~ 13.7MPa 以内，最大值为 20.6MPa；Mises 应力大部分在 0.012 ~ 12.7MPa 以内，最大值为 20.6MPa。

(2) 计算结果

模板支架最大主拉应力为 15.3MPa，最大主压应力为 20.6MPa，Mises 最大应力为 20.6MPa，小于 215MPa，满足设计要求。

5 结语

(1) 花瓶墩模板系统应具有满足施工要求的强度和刚度，不得在施工过程中发生破坏和超出规范容许的变形。模板安装应具有良好的严密性，在混凝土施工过程中不得漏浆，不得影响混凝土的密实性和表面质量。模板的几何尺寸必须准确，必须符合施工图纸的尺寸要求。模板的配置必须具有良好的可拆性，便于混凝土模板拆除工作的顺利进行。

(2) 模板的支撑体系必须具备可靠的局部稳定及整体稳定性, 确保砼过程的正常施工。通过模板支架的计算数据, 设计稳定可靠的模板支架 (图 9)。

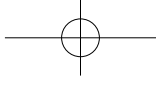


图 9 模板及支架施工图

(3) 工程施工中, 严格按有关规范操作, 墩柱完成后质量合格, 为下步上部结构施工提高良好的条件。

参 考 文 献

- [1] 惠中华. 大型盖梁模板支架体系设计、分析与加载试验 [D]. 哈尔滨工业大学学报, 2007 年 8 月, 39 (增刊 2): 348-351.
- [2] 汪铁钧. 大型高架桥无支架盖梁施工过程中模板受力特性原位试验 [D]. 上海交通大学学报, 2011 年 8 月, 45 (增刊): 42-47.
- [3] 孙翊. 新花瓶墩盖梁支架设计与施工 [J]. 中外公路, 2010, 30 (3): 157-160.
- [4] 史东库, 等. 模板工程现状与配模一体化研究 [J]. 建筑技术, 2012 年 8 月, 43 (8): 678-680.
- [5] 张迪. 组合工具式钢支架系统在先简支后连续桥盖梁施工中的应用 [J]. 建筑施工, 2014 (7): 874-875.
- [6] 国家标准. 混凝土结构工程施工规范 (GB 50666—2011).



硬质沥青在丽水 330 国道莲都段改建工程中的应用

张瑜¹ 季宋平² 汤朝龙³ 张利忠⁴

(1. 浙江交工集团股份有限公司; 2、3. 330 国道莲都至缙云段改建工程建设指挥部; 4. 浙江交工钱潮交通建设有限公司)

摘要: 在交通量剧增、轴载增加、超载严重、车辆渠化、持续高温等因素的综合作用下,车辙已经成为我国沥青路面最严重的早期破坏形式之一。据高等级公路沥青路面维修原因的统计分析,车辙病害发生比率高达 80%。寻求高抗车辙能力的沥青材料一直是沥青路面研究领域的重点。硬质沥青具有黏度大、模量高、针入度小、价格低等特点,是强化沥青混合料高温性能的有效途径。

关键词: 硬质沥青; 试验段; 抗车辙能力; 跟踪观测。

0 引言

沥青混合料本身的抗车辙性能是预防车辙病害的关键因素之一。如何提高沥青混合料的抗车辙性能,并避免由此产生的低温性能、水损害及造价增加等负面影响,成为当前路面材料研究的重点问题。使用改性沥青能全面提高沥青混合料的性能,但改性沥青价格普遍比较昂贵,全部采用改性沥青混合料将直接导致道路建设成本的增加。国内外大量研究表明,提高沥青路面中下面层强度是解决车辙损坏的关键。因此,基于浙江省沥青路面结构设计,在中下面层采用新技术、新材料、新方法和新工艺,是防治公路沥青路面早期损坏的基础。

根据浙江省沥青路面的特点,有针对性地开展硬质沥青及其混合料的应用研究,尤其是对其高温性能、低温性能、水稳定性能和疲劳性能的全面考察,不仅能为公路沥青路面的质量提供经济、可靠的保证,减少路面早期损坏,提高路面使用

寿命,确保公路交通的畅通和安全,而且可以大大提高沥青路面结构设计和材料应用技术水平,促进交通建设与经济的快速健康发展,并为路面施工技术规范的修订提供有利的理论和实践基础,具有良好的社会效益。

在对硬质沥青原材料及混合料的技术性能指标进行长期充分研究的基础上,丽水市 330 国道莲都段改建工程指挥部在 330 国道莲都段选择了部分段落进行了硬质沥青试验路的铺筑,以验证硬质沥青及其混合料的各项路用性能。

1 丽水地区气候与交通量特征

丽水市属于中亚热带季风气候,四季分明,温暖湿润,雨量充沛,无霜期长,达 180~280 天,具有明显的山地立体气候。年平均气温 11.5~18.3℃,年内最高气温在 40℃以上,平均年日照 1 712~1 825 小时,是浙江省最热的地区之一。年平均降水量 1 400~2 275mm。按公路工程自然区划气

候分区属于夏季炎热、冬季温暖湿润区，具有高温、多雨的气候特点。

丽水地区的交通量稳步增长。以最接近项目的金丽温高速公路丽水段（见表1）为例，丽水段自通车以来，交通量增长迅

速，车辆组成中小客车所占比例较大。从交通发展和经济发展的相关性看，随着丽水市的经济开发与发展，该路段交通量处于平稳增长期，还有很大的增长空间。

表1 金丽温高速公路丽水段交通量增长表

时 间	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年
车辆 / (辆 / 日)	7 619	8 735	8 739	10 627	9 174	11 283	11 424
增长率 / %	/	14.6	0.1	21.6	-13.7	23	1.2
平均增长率 / %	8.3						

2 硬质沥青试验路实施方案

丽水 330 国道路面工程新建沥青混凝土路面的设计以双轮组单轴载 100KN 为标准轴载，设计年限为 15 年。路面厚度计算以设计弯沉值为路面整体刚度的设计指标，以容许弯拉应力进行计算。路面设计弯沉值为 24.5 (0.01mm)；当以设计弯沉值为指标及沥青层层底拉应力验算时，标

准轴载累计作用次数 880.9 万次。

试验路确定为一处长上坡桥梁桥面铺装及一处全长 1.49km 连续路段，长上坡路段桥面铺装确定为灵山大桥左幅 9 ~ 17 号孔及灵山大桥右幅 9 ~ 18 号孔，1.49km 连续路段桩号为 K138+000 ~ K139+490，两段试验段的桥面沥青混凝土铺装下面层及路面工程沥青混凝土层下面层沥青标号由原设计的 70 号沥青变更为 50 号沥青（见表 2）。

表 2 具体实施路段方案

方案	原路面方案		试验路方案	
	左幅	右幅	左幅	右幅
沥青层	5cm AC-13C 70 号 A 级道路沥青		5cm AC-13C 70 号 A 级道路沥青	
	7cm AC-20C 70 号 A 级道路沥青		7cm AC-20C 50# 道路石油沥青	
试验段桩号	灵山大桥左幅 9 ~ 17 号孔及灵山大桥右幅 9 ~ 18 号孔 及 K138+000 ~ K139+490 下面层			

3 原材料

试验段采用东海牌 50 号硬质沥青，其各项技术指标检测结果见表 3。

试验段所用的各种矿料、矿粉及沥青的密度试验结果见表 4。

表 3 50 号硬质沥青检测指标结果汇总

项 目	单 位	50 号沥青技术要求	试 验 结 果
针入度 100g, 5s, 25℃	0.1mm	40 ~ 60	53.0
针入度指数 PI	—	-1.5 ~ +1.0	+0.32
软化点 (TR&B), 不小于	℃	≥ 49	49.5
动力黏度 (60℃), 不小于	Pa.s	≥ 200	349.9
延度 5cm/min, 10℃	cm	≥ 15	21.0
延度 5cm/min, 15℃		≥ 80	>100
蜡含量 (蒸馏法), 不大于	%	≤ 2.2	2.1
闪点, 不小于	℃	≥ 260	345
溶解度 (三氯乙烯), 不小于	%	≥ 99.5	99.7
密度 (15℃)	g/cm ³	实测记录	1.042
TFOT (或 RTFOT) 后残留物			
残留质量变化, 不大于	%	≤ ±0.8	+0.108
残留针入度比, 不小于	%	≥ 63	70.7
残留延度 10℃	cm	≥ 4	5.0

表 4 集料及沥青密度试验结果

材 料 名 称	表观密度 / (g/cm ³)	毛体积密度 / (g/cm ³)	备 注
1#: 16 ~ 26mm 碎石	2.815	2.709	
2#: 10 ~ 16mm 碎石	2.780	2.700	
3#: 6 ~ 10mm 碎石	2.770	2.668	
4#: 3 ~ 6mm 碎石	2.774	2.666	
5#: 0 ~ 3 机制砂	2.749	/	/
矿粉		2.682	
沥青		1.031	

4 配合比设计

表 5 拌和楼各热料仓料筛分结果

材料	下列筛孔的通过率 / % (方孔筛)											
	26.5	19.0	16	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075 555
1# 仓	100	75.3	23.3	6.5.1	1.6	0.4	0.2	0.1	0	0	0	0
2# 仓	100	100	100	88.2	13.8	0.4	0.2	0	0	0	0	0
3# 仓	100	100	100	90.8	98.4	4.8	0	0	0	0	0	0
4# 仓	100	100	100	100	100	98.6	17.6	3.2	2.2	1.2	0.6	0.2
5# 仓	100	100	100	100	100	99.6	81	53.4	32.2	17.0	9.7	6.4
矿粉	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	90.1

表 6 沥青混合料马歇尔试验结果

指标结果	油石比 /%	毛体积相对密度	理论相对密度	空隙率 /%	稳定度 / kN	流值 /0.1mm	矿料间隙率 /%	沥青饱和度 /%	残留稳定度 /%
体积性质	4.5	2.427	2.548	4.7	13.93	28	14.7	68	92.2
技术要求	—	—	—	3.5 ~ 5.5	≥ 8.0	20 ~ 50	≥ 13	65 ~ 75	≥ 85

经试验得出中面层 AC-20C 沥青混合料生产配合比设计结果如表 7 所示。

表 7 矿料生产配合比及油石比

混合料类型	下列各种矿料所占比例 / %						油石比 / %
	1# (16 ~ 26mm)	2# (10 ~ 16mm)	3# (5 ~ 10mm)	4# (3 ~ 5mm)	5# (0 ~ 3mm)	矿粉	
AC-20C	22.0	19.0	22.0	3.0	30.0	4	4.5

表 8 最佳油石比及密度、空隙率

混合料类型	油石比 /%	毛体积密度 / (g/cm ³)	空隙率 /%	理论密度 / (g/cm ³)
AC-20C	4.5	2.427	4.7	2.548

5 试验段检测结果

指标（见表 9）均满足技术要求。

对 AC-20 的混合料路用性能指标进行

试验段施工完成后，对 AC-20 混合料的各项技术指标进行了检测，其各项技术

了检测，结果如表 10 所示。

表 9 AC-20 混合料性能检测

检测项目	矿料间隙率 /%	饱和度 /%	空隙率 /%	稳定度 /kN	流值 /mm
K125+049 ~ K125+695 右幅下面层	14.5	69.3	4.4	10.7	2.8
K137+730 ~ K139+170 右幅下面层	14.6	69.2	4.5	11.3	2.9
技术要求	≥ 14	65 ~ 75	4 ~ 7	≥ 8	1.5 ~ 4

表 10 沥青混合料性能检验指标

性能检验项目		AC-20 混合料 技术要求	实测结果
车辙试验动稳定度 / (次 /mm)		≥ 1 500	2 868
水稳 定性	浸水马歇尔试验，残留稳定度 /%	≥ 85	86.7
	冻融劈裂试验，残留强度比 /%	≥ 80	81.2
低温弯曲试验破坏应变 (μ ϵ)		≥ 2 000	2 868
渗水系数 / (ml/min)		≤ 100	80

在沥青混合料技术性能检验的基础上，对硬质沥青试验路的平整度、厚度、宽度、高程、横坡、压实度等各项性能指标均进行了检测，结果符合相关要求。施工完成后，对试验路的弯沉指标进行了检测，其检测结果如表 11 所示。

表 11 K137+630 ~ K139+110 右幅硬质沥青试验路弯沉指标检测

检测项目	弯沉平均值 /0.01mm	标准差 S	代表弯沉 /0.01mm	设计值
路基顶面	72.62	30.38	133.37	266.2
底基层	32.36	12.19	56.74	135.3
沥青下面层	9.42	4.3	18.02	27.7
沥青上面层	3.88	3	9.89	24.5

6 试验段跟踪观测情况

试验路完成后，相关各方对试验段的实施效果进行了长期跟踪观测。从现场观测情况看，桥面铺装试验路自 2015 年 7 月桥面铺装试验路铺筑完成至 2017 年 3 月的一年多时间里，沥青路面质量状况良好，中下面层抗车辙性能明显增强，没有出现明显的车辙、沉陷等病害；其中 2016 年年中开始，桥面铺装表面层出现局部的骨料磨损，但没有出现明显的坑洞，说明行车荷载对路面的作用开始显现；在此情况下，下面层仍然没有出现任何状况，说明混合料的 AC-20 下面层保持良好，没有出现明显病害。

路基段试验路从 2016 年 4 月铺筑，到 2017 年 3 月，将近一年的时间里，经受过了一个夏季高温的严峻考验，没有出现明显的病害。

7 结论

(1) 选用 50# 沥青替代传统 70# 沥青，其 AC-20 沥青混合料的各项技术指标均能满足相关标准要求；沥青混合料的最

佳沥青用量差别不大；动稳定度从 1 600 次 /mm 提升到 2 868 次 /mm，抗车辙能力明显增强。

(2) 在使用 50# 沥青替代 70# 沥青后，试验路下面层弯沉实测值为 18.2（设计值 19.7），上面层弯沉实测值为 9.9（设计值 24.5），各个层面的弯沉值均达到设计要求。

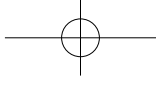
(3) 试验路从 2015 年 7 月开始铺筑，到 2017 年 4 月，经受了两个夏季高温季节的考验，没有出现明显的病害，桥面铺装和路面铺装下面层的抗车辙能力明显增强。

8 结语

硬质沥青能够提高沥青混凝土的模量，使其具有较强的抗高温变形和向下层传递荷载的能力。同时，硬质沥青与集料具有良好的黏结性能，能有效提高沥青混合料的抗水损害性能和抗疲劳性能。硬质沥青在丽水 330 国道莲都段改建工程沥青路面中的应用实践表明，硬质沥青具有良好的路用性能，适用于重载交通条件下的高等级沥青路面。

参 考 文 献

- [1] 周克力, 路凯冀. 国外硬质沥青及高模量沥青混凝土研究现状 [J]. 公路交通科技, 2005.5, Vol 22, No.5: 83-87.
- [2] 梁春雨. 30 号硬质沥青及沥青混合料的性能研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [3] 刘峰. 硬沥青及硬沥青混合料性能试验研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2007.
- [4] 张春海. 硬质沥青高温性能试验研究 [J]. 公路工程与运输, 2008, No6: 37-39.
- [5] 王玉顺. 硬质沥青用于沥青混凝土的性能研究 [J]. 公路交通科技, 2005.5, Vol 22No.5: 65-67.
- [6] 朱春阳, 杨毅, 刘学建. 不同标号沥青的弯曲梁流变试验对比分析研究 [J]. 中外公路, 2007.8, Vol 27, No.4: 289-291.



高速公路隧道行车火灾事故预防对策与应急救援

吕柱梁

(浙江金华甬金高速公路有限公司甬金管理处)

摘要: 高速公路隧道空间结构具有特殊性, 其内行车火灾事故经常发生, 且危害巨大。结合 G15w 常台高速盘龙岭隧道群内行车火灾安全事故, 针对高速公路隧道行车火灾安全事故的基本特征, 提出预防对策。并根据多年来高速公路隧道行车火灾安全事故应急施救的实践, 总结火灾安全事故应急施救经验, 可为高速公路安全运营提供借鉴。

关键词: 行车火灾; 安全事故; 预防对策; 应急施救。

公路隧道呈管状结构, 其空间具有密闭性与特殊性。隧道内一旦发生行车火灾安全事故, 产生的热量与烟雾不易散发, 并且急剧积累, 会严重威胁隧道的行车安全与畅通运营, 使隧道结构与设施受到损伤。高速公路隧道由于具有车流量大、车速高的特性, 其火灾事故产生的危害比一般路段的火灾要严重得多。为了做好高速公路隧道行车火灾事故的预防与施救工作, 减小危害程度, 笔者结合隧道管理工作实践, 以浙江省某一高速公路隧道群的一些实际数据和高速公路隧道行车火灾事故的预防与施救工作为例, 提出高速公路隧道行车火灾安全事故预防对策与应急施救方案。

1 高速公路隧道行车火灾安全事故统计

G15w 常台(上三)高速公路盘龙岭隧道群位于该高速公路 290~295km 之间。隧道群分为 1# 隧道和 2# 隧道, 1# 隧道左右洞全长为 1960m。2# 隧道左右洞全长为

4886m, 隧道净宽为 10.16m, 行车道宽为 7m, 净高为 6.98m, 限高 5m。隧道内平面线形为直线, 1# 隧道平均纵坡为 2.44%, 2# 隧道平均纵坡为 2.67%, 隧道内设有通风与照明设施。该隧道群是该高速公路中隧道洞身最长、纵坡最陡、管理设施设备最多、管理难度较大的隧道群。

按照隧道内行车火灾安全事故的发生时间、地点(里程桩号)、车型及简要情况分别统计 2005 年、2006 年和 2007 年的火灾安全事故, 得出下表所示数据。

2 隧道行车火灾安全事故基本特征

根据有关数据分析得出隧道火灾安全事故的几个基本特征:

(1) 从事故发生的时间分布上分析, 第二、三季度事故数量占 76.27%, 故第二、三季度是火灾事故的高发期。由于该段时间为夏、秋季, 气温较高, 气候干燥, 客观上为火灾事故提供了有利的气象条件。

表 1 盘龙岭隧道火灾事故台账

时间：2005—2007 年

序号	时 间	桩 号	类 型	简 要 情 况	天 气
1	2005 年 1 月 29 日 05:50	三门方向 291K+100	起火	一货车发动机起火，车辆发动机报废，前轮 爆破，无人员伤亡。	阴
2	2005 年 2 月 1 日 21:26	上虞方向 290K+780	起火	一大货车在行驶中突然起火，车辆烧损，无 人员伤亡。	晴
3	2005 年 4 月 5 日 11:50	上虞方向 292K+200	起火	一大货车在行驶中车头突然起火，车辆车头 损坏严重，无人员伤亡。	晴
4	2005 年 8 月 24 日 18:20	上虞方向 292K+500	起火	一大客车在行驶途中发动机起火，车辆发动 机损坏，无人员伤亡。	晴
5	2006 年 2 月 17 日 13:26	上虞方向 292K+400	起火	在上虞方向 K97+400m 主车道上，浙 JC4069 大货车在行驶途中突然起火，造成单车火灾 事故。大货车严重损坏。	阴
6	2006 年 5 月 10 日 11:28	上虞方向 291K+900	起火	在上虞方向 K97+430m 主车道上，豫 PA7679 大货车行驶中车头起火，造成单 车火灾事故。大货车车头损坏较严重。	雨
7	2006 年 10 月 8 日 9:55	上虞方向 291K+750	起火	在上虞方向 K97+250m 主车道上，吉 A40937 大货车行驶途中驾驶室突然起火，造成单车 火灾事故。大货车车头烧损。	晴
8	2007 年 2 月 25 日 14:25	上虞方向 292K+400	起火	在上虞方向 97K+900，一辆面包车在行驶中 自燃起火，造成单车火灾事故。	晴
9	2007 年 5 月 25 日 2:08	上虞方向 93K+100	起火	在上虞方向 98K+600，一辆大货车在行驶中 自燃起火，造成单车火灾事故。	晴
10	2007 年 8 月 26 日 20:59	三门方向 291K+210	起火	在三门方向 96K+710，一辆大货车在行驶中 自燃起火，造成单车火灾事故。	雨
11	2007 年 10 月 15 日 10:50	上虞方向 292K+600	起火	在上虞方向 98K+100，一辆货车在行驶中自 燃起火，造成单车火灾事故。	阴
12	2007 年 11 月 21 日 12:52	三门方向 293K+450	起火	在三门方向 98K+950，一辆大货车在行驶中 自燃起火，造成单车火灾事故。	晴

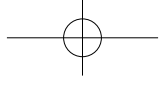
(2) 从事故发生的空间分布上分析，长陡坡路段是事故多发地段，2# 左洞洞长为 2 445m，纵坡为 2.65%，且处于 298K 开始的连续 7km 上坡路段的末端，事故数量占 59.32%；1# 右洞洞长为 1 020m，纵坡为 2.66%，事故数量占 22.03%，两者合计占事故数的 81.36%。

(3) 从火灾安全事故类别上分析，追尾引发的火灾安全事故占 42.37%，大货车的自燃事故占 57.63%，大货车的自燃事故是隧道行车火灾安全事故的主要形式。

(4) 从火灾安全事故肇事车型上分析，

肇事的大货车往往车况较差，严重超载，在高速公路上以超低速行驶。火灾发生原因一则是交通流中超载大货车以超低速行驶，而小汽车以高速行驶，二者有较大的速度差；加之隧道空间封闭的特性，遇隧道内为长陡坡时超载大货车尾部排出的浓烟不易散发而致使能见度差，极易造成尾随其后的小汽车发生追尾，从而引发火灾。二则是大货车车况较差，长时间超负荷行驶后，因发动机或电路发热等起火，自燃引发火灾。

(5) 从统计的数据分析，该隧道群



内发生的行车火灾事故绝对数量在逐年增加。但考虑隧道群内每年交通量的增加,该隧道群内发生的行车火灾事故相对数量在逐年减少。

(6) 经统计,近几年该隧道群内发生行车火灾事故的数量,是该高速公路其他隧道群行车火灾事故总数的几倍,排除一些偶然因素的影响,该隧道群本身洞身长、纵坡较陡等隧道先天的因素,在客观上决定了行车火灾事故的多发。

3 隧道行车火灾事故的预防对策

“防范胜于救灾”,做好隧道行车火灾安全事故的预防工作具有十分重要的意义。根据上述事故的基本特征分析,建议采用以下几种预防对策。

3.1 抓好隧道行车火灾安全事故源头控制

严重超载的大货车与车况不良的病车是引发各种行车事故的罪魁祸首,必须严格禁止其驶上高速公路。高速公路所辖的各收费站点,必须严格执行有关“治超”的规定,不仅要堵截严重超载驶上高速公路的大货车,还要控制各种车况不良的病车和无证危险品车驶上高速公路。同时,应不断向联管会呼吁,所有联网高速公路上的各收费站点必须统一标准,严格执行相关规定。这样,可在源头上真正清除隐患,达到事半功倍的效果。

3.2 进一步完善隧道内外的安全服务设施

该高速公路处于山岭重丘地带,道路横断面特别是硬路肩较窄,当大货车需应

急停靠时,往往会侵占行车道。在行驶过程中,当大货车出现故障时,司机由于怕停车占道受到处罚,除非迫不得已,一般不愿停车检修。当遇到长陡坡的隧道时,就将隐患带进了洞内,增加了隧道内事故的风险。因此,在长陡坡隧道进口前的合适地段,可以增设应急停车场(带),以方便故障车检修,将事故隐患消除在隧道之外。

3.3 切实加强各种隧道内行车安全知识的宣传

高速公路隧道内一般都设有较为完善的消防救灾设施。如该高速公路各长隧道内,每隔50m就设带有消防栓和灭火器的消防柜,但大多数司乘人员对此并不知道也不会使用。当隧道内发生行车火灾事故时,往往会看到很多司乘人员六神无主,就算消防设施近在眼前也不知使用。究其原因,一是司乘人员发现火势后本能地出现了慌乱心理;二是司乘人员不具备救火的常识。然而,司乘人员在火灾发生的初始几分钟内的自救是极其重要的,延误了最初的施救期火势就会加大。因此,加强灭火救灾知识的宣传普及十分重要。可以通过印制包含行车安全、灭火救灾等知识的小册子,在各收费站点发放,使各司乘人员事先掌握一些基本知识。另外,还可以通过广播、电视等媒介举办专题节目,对相关知识进行普及。

4 隧道行车火灾安全事故的应急施救

灭火救灾的及时、迅速,是隧道内行车火灾事故得以控制的关键。为了做好隧

道行车火灾事故的施救工作，本文结合管理工作中的经验和教训，谈以下几点应急施救的体会。

4.1 要不断研究应急预案，加以细化和完善

高速公路管理公司一般都已制定有关隧道火灾事故处置的相关预案，但作为一个整体方案，通常只列明了各隧道都适用的共性部分。由于每个隧道的道路条件不同，因此有必要针对各自的实际情况进行细化，制定适合自身的实施细则。只有预案真正实用、有效，才能发挥指导作用，才能使施救人员在事故救援中做到心中有数、忙而不乱。同时要根据道路条件、管理方式等的变化情况，不断对预案进行更新、完善，做到灵活应用。

4.2 要加强实战演练，提高应急处置能力

隧道管理中紧急事件的应急处置是一项非常重要的管理内容，应通过不断温习，使每位员工熟练掌握预案内容，明确各自的分工。还要不断组织全体员工进行灭火的实战演练，通过与火焰面对面的接触，消除人对火灾这一危险事物因本能而产生的恐慌感，培养员工处惊不慌、临危不乱的胆识。同时，应通过演练提高施救的出警速度，使救援人员能在第一时间迅速赶到火灾现场施救，通过争取初始的几分钟时间，取得火灾控制的主动权。

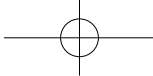
4.3 要完善应急施救网络，增强救援协作水平

要不断研究在施救过程中暴露出的新问题，在硬件设施和指挥协调上不断完善施救网络。如在硬件设施上，针对该隧道内发生火灾等重大事故后，隧道被迫封闭，致使后续车辆拥堵道路，后方施救车辆无法赶到现场的新情况，研究提出了实施隧道口应急匝道工程的方案。通过该方案的实施，当出现上述情况时，施救车辆就能通过后方的收费站或应急匝道出口，绕道附近的县乡公路，经隧道口的应急匝道到达施救现场。又如，为加快非驻点侧隧道内非正常事件的处置速度，提出在前方隧道口回车道处设立值勤点等设施，实行人员全天候值守，这些在硬件上极大地完善了施救网络。

在构建施救的外部协作网络中，要注重与当地专业消防部门的沟通和联系。通过与之签订协作协议的方式，邀请其进行日常检查和指导，为做好施救工作，相互进行探讨交流，共同出谋划策，从而提高施救协作水平。

5 结语

高速公路隧道行车火灾安全事故的预防和应急施救，是一项复杂的系统工作。它始终伴随着高速公路的安全运营，作为一项重要的课题，需要高度关注，不断加以研究、分析与总结。



高压空气喷砂机清理公路隧道墙身旧涂层的应用探讨

张 献

(宁波交通工程建设集团有限公司)

摘 要: 高压空气喷砂机清理公路隧道墙身旧涂层是射流技术的具体应用, 比传统的人工清理和高压水清理方法具有较大的优越性。对杭州湾跨海大桥南岸连接线长溪岭隧道和石子山隧道墙身旧涂层的清理, 合理选择喷砂机的型号、喷砂颗粒尺寸、喷射速度、高压空气压力和喷射作用时间等参数, 达到了预期的目的, 为后续翻修新涂层的涂喷打下了良好的基础。

关键词: 高压空气喷砂机; 公路隧道; 旧涂层; 清理; 效果。

1 前言

公路隧道洞内墙身涂装层是公路隧道洞内结构的外表层, 对环境因素(温度和湿度等)及洞内火灾对混凝土结构损伤有直接保护作用, 还能在一定程度上隔断隧道渗水, 有利于美化隧道洞内环境和提高行车安全。由于隧道内部空间相对封闭, 隧道洞内墙身涂装层直接暴露在隧道潮湿环境中, 穿行于隧道里的车辆排放出大量的尾气, 与空气中的扬尘等杂质混合后积附在隧道内壁, 形成污渍, 更容易使隧道墙身混凝土涂装层发生龟裂、起壳、脱落等病害。如不及时维护或维护不当, 将影响隧道结构安全和使用寿命。

因公路隧道翻修施工通常采用半封闭半通行的施工方法, 洞内视线较差, 特别是高速公路, 具有速度快、流量大、车流密集的特点。常规隧道墙身涂装翻修, 采用高压水枪喷射冲刷老化涂装层, 待基层干透后, 进行人工涂装, 施工周期较长, 湿作业施工易损坏电气线路等机电设备。此外长时间隧道交通管制, 密集交通流量

导致施工人员产生安全危险, 同时令路段交通压力增大, 影响高速公路畅通。

杭州湾跨海大桥南岸连接线长溪岭隧道和石子山隧道墙身涂层翻修采用喷砂机快速清除老化涂装层, 随后采用机械设备涂料喷涂进行重新涂装, 既不损伤隧道墙身衬砌混凝土结构, 又加快了隧道墙身涂层的翻修速度。

2 高压空气喷砂机工作原理

2.1 磨料射流分类

射流技术是 20 世纪 70 年代发展起来的一项技术, 多用于船舶、管道和设备清洗、除垢等方面。在高压空气中掺入很细的磨料颗粒, 即形成磨料射流来达到降低压力同时增强射流的冲击力的目的, 这就形成了磨料射流技术。磨料射流是由磨料颗粒(石榴石、石英砂等)与高压空气混合而形成的气固两相介质的射流, 将射流连续冲击作用变为磨料冲击、冲蚀作用, 从而大大提高了射流的品质和工作效率。

根据供料方式不同,磨料射流分成后混合磨料射流和前混合磨料射流两种。

(1) 后混合式磨料射流

后混合式磨料射流发生系统利用高压空气射流的引射作用来供给磨料,射流在磨料喷头内卷吸空气,从而造成磨料输送管内的空气流动,当气流速度达到一定值后,磨料粒子能在气流作用下进行气力输送。后混合式是早期出现的一种磨料射流,实现方式较为方便,由于其仅依靠自然负压力的抽吸作用,无须额外的设备,故在某种程度上有利于降低投资。后混合磨料射流喷嘴管壁(指混合段)磨损较小,且物件切割时的切缝较窄。但经研究发现,由于磨粒附于高压射流的边界,未能进入其中心而使高压空气与磨粒动量交换较

小,磨料加速有限,从而限制了其进一步发展应用。

(2) 前混合式磨料射流

前混合是指事先在磨料罐中将磨料与气体相混合,再通过增压或直接加速将磨料混合体送至喷嘴进行作业。与后混合磨料射流相比,它具有射流压力较低、能量消耗少、磨料获得的动能大等优点。隧道墙身涂层返修机车载喷砂机是磨料前混合式磨料射流技术的一种应用。

车载喷砂机是隧道墙身旧涂层翻修清理的关键设备(见图1),其工作原理是将砂(石英砂、金刚砂、铁砂、海砂等)装入密封容器内,靠空压机提供的高压高速气流将砂以高速喷射到需要清理的结构表面,借助砂的冲击作用,清除隧道墙身旧涂层。

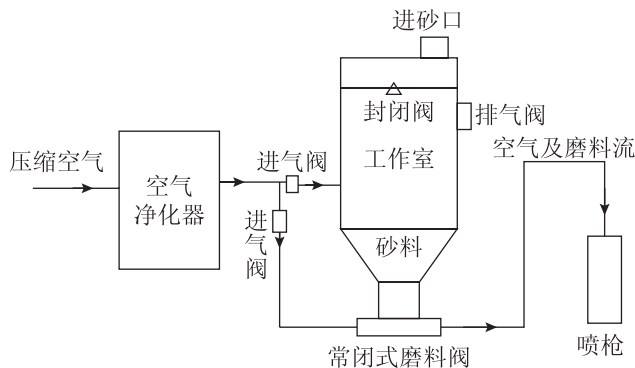


图1 喷砂机和工作原理图

喷砂机为全气控式,砂料由进砂口被加入储料罐,进砂口设过滤筛网,以滤除砂料中混入的大颗粒、大尺寸杂物,避免堵塞磨料阀、喷枪和喷砂管道;压缩空气经净化后分两路,一路进入储料罐,封闭储料罐进砂口,同时压缩空气作用在储料罐内;另一路经进气阀进入磨料阀内,与从储料罐下来的砂料在磨料阀内均匀混合,再经软管、喷枪加速后,喷射到待

清理表面以完成清理工作。为便于喷枪移动清理,喷枪与磨料阀间采用软管连接。

2.2 前混合式磨料射流理论分析

1. 磨料射流影响因素

当磨料射流入射速度达到某一临界值,就会造成被冲蚀物体的冲蚀。被冲蚀物体的冲蚀率指单位重量颗粒造成材料流失的重量或体积,它不是材料的固有性质

而是一个受系统因素影响的参数。冲蚀率主要受三方面因素控制：环境参数，如颗粒的速度、浓度、入射角、环境温度；磨料性质，如硬度、粒度、可破碎性及材料性能，如热物理性能和材料强度等。

(1) 喷砂颗粒攻角

攻角指颗粒入射轨迹与表面的夹角，当正面冲击时攻角为 90°。大量实验结果表明，材料冲蚀率随攻角变化明显。塑性材料在 20° ~ 30° 攻角时冲蚀率出现最大值。而脆性材料在一般情况下最大冲蚀率出现在接近 90° 的攻角处，据实验数据取值，计算公式为

$$\varepsilon = A \cos^2 \alpha \sin(n\alpha) + B \sin^2 \alpha \quad (1)$$

式中 ε ——冲蚀率，无因次；

α ——喷砂颗粒的攻角，度；

A 、 B ——常数，对脆性材料 $A=0$ ；塑性材料 $B=0$ ；

$$n \text{——常数，} n = \frac{\pi}{2\alpha}。$$

许多工程材料往往具有塑脆两种组织，因而表现出介于两者之间的冲蚀率。因此小攻角下，塑性项起主要作用，而大攻角下脆性项起主要作用。只需改变上式中的 A 、 B 值便能满足这种要求。

对于公路隧道喷砂机清理旧涂层为塑性材料，则有

$$\begin{aligned} \varepsilon &= A \cos^2 \alpha \sin(n\alpha) + B \sin^2 \alpha \\ &= A \cos^2 \alpha \sin\left(\frac{\pi}{2\alpha} \alpha\right) + B \sin^2 \alpha \\ &= A \cos^2 \alpha \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) + B \sin^2 \alpha \end{aligned} \quad (2)$$

式中 A 由试验确定。

(2) 喷砂颗粒速度

颗粒速度对材料冲蚀率的影响是研究冲蚀机理的重要内容。大量材料受不同颗

粒冲蚀得到的结果可以归纳为

$$\varepsilon = K v^\eta \quad (3)$$

式中 v ——喷砂颗粒的速度， m/s ；

η 、 K ——常数。

冲蚀率与喷砂颗粒速度呈指数关系，不因粒子种类、材料类型和攻角大小而变化，这就表明：颗粒动能是造成材料冲蚀的主要原因。早期的实验结果 η 约为 2.0，但随材料由塑性扩展到脆性， η 值从 2.1 ~ 2.4 变化到 6.5。实验结果证实攻角增大， η 值也稍有上升。

喷砂颗粒入射速度低于某一下限时，只在冲击时出现弹性变形而无材料流失，称此速度下限为门槛速度值。这个速度值随粒子材质、形状以及材料性能而变化。对于喷砂式冲蚀，在 10m/s 以下时，直径 0.3mm 的球形铸铁丸冲击玻璃的门槛速度为 9.9m/s，而 0.23mm 粒径的石英砂冲击 11%Cr 钢，门槛值只有 2.7m/s。

(3) 冲蚀时间

冲蚀磨损不同于黏着磨损和磨粒磨损，它呈现出较长的潜伏期或孕育期。首批喷砂颗粒冲击材料表面时主要造成加工硬化和表面粗糙化，不一定立刻出现材料流失。经过一定的积累损伤后才能逐渐过渡到稳定冲蚀阶段。对于喷砂型冲蚀，冲蚀初期可能因粒子嵌入而呈现“增重”。在小攻角情况下，“增重”现象明显小于大攻角。

(4) 环境温度

环境温度对材料的影响比较复杂，现有的研究表明，随温度增加，材料冲蚀率上升，但温度过高材料表面可能氧化。氧化膜的出现反而会提高材料的抗冲蚀能力，从而改善其抗冲蚀性能。

(5) 入射喷砂颗粒性能

喷砂颗粒的形状和粒度对冲蚀有很大影响。当喷砂颗粒超过临界尺寸后,冲蚀率趋于平稳。喷砂颗粒尖颗粒造成的破坏要比球形颗粒严重,硬颗粒产生的冲蚀破坏比软颗粒严重,喷砂颗粒冲击时颗粒有发生破裂碎化的趋势,随着攻角的增加,喷砂颗粒冲击后发生破碎的概率增大,破碎喷砂颗粒屑片将会对凹凸不平的表面产生第二次冲蚀。

2. 冲蚀磨损的力学模型

根据弹塑性假设,单颗喷砂颗粒沿垂向冲击物料时的旧涂层塑性破坏体积(见图2)和计算公式为

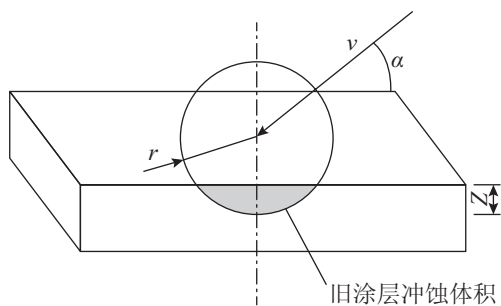


图2 单颗喷砂颗粒作用下旧涂层破坏体积

$$V_p = \frac{m(v-v_0)^2}{2e} \quad (4)$$

式中 V_p ——旧涂层破坏体积, m^3 ;
 m ——喷砂颗粒的质量, kg ;
 v ——喷砂颗粒的速度, m/s ;
 v_0 ——旧涂层发生变形的喷砂颗粒门槛速度值, m/s ;
 e ——单位体积旧涂层破碎需要的能量, J ;
 r ——喷砂颗粒半径, m ;
 z ——旧涂层破坏厚度, m 。

3 应用实例

3.1 喷砂机参数试验调试

对于具体的隧道旧涂层清理,需调整喷砂机的有关参数,选择喷砂机的型号、喷砂颗粒尺寸、喷射速度、高压空气压力和喷射作用时间等参数。

3.2 隧道施工交通管制

(1) 因隧道全断面涂层翻修需24小时连续施工,为保证施工人员及行车安全,在车流行驶进入隧道洞口上游区域设置300m的上游过渡区和100m的缓冲区,上游过渡区和缓冲区内每隔10m设置一盏高杆灯,保证夜间路面照度。

(2) 在缓冲区内设置10道防撞水马作护栏,施工封道区域内采用附设闪烁灯的锥形交通路标,并在上游过渡区内临时诱导路标采用太阳能电子导向牌,引导车辆行驶安全。在封道区内配备6名值班人员24小时轮流执勤,维护封道设施正常运转。

3.3 材料与机械设备进场

(1) 喷砂颗粒金刚砂的化学成分是碳化硅,分天然的与合成的两种。比重为3.20~3.25,莫氏硬度约9度。金刚砂的粒径如混凝土的中细砂均可使用,一般要求粒径小于3mm,细度模数1.6~3。

(2) 隧道涂层翻修机的四大设备(见图3)按施工前进方向依次为第一辆为车载登高脚手架,第二辆为喷砂机和喷涂机,第三辆为空压机和储气罐,第四辆为车载发电机组。隧道涂层翻修机分两种情况进行移动和定位:

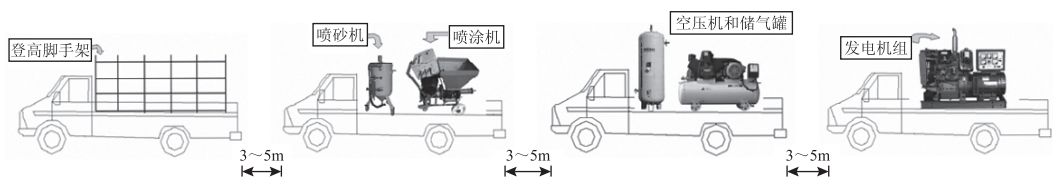


图3 隧道涂层翻修机的四大设备示意图

①车载设备移动时，拆除相邻设备连接管（线），由专人统一指挥，第一辆车载设备首先移动到设定的地点停车，其余车载设备后续缓慢移动，车辆行驶速度不高于 10km/h，相邻两车辆车尾与车头之间距离一般 20m 为宜。

②车载设备固定施工时，相邻两辆车车尾与车头之间距离应小于其相邻设备连接管（线）的长度，以方便施工为准，一般保持 3 ~ 5m 间距，停车稳当并在轮胎着地处设置防滑块，然后连接相互之间的设备连接管（线）。

（3）隧道涂层翻修机车道定位施工顺序一般为公路隧道夜间车流量相对于白天较少，为保证行车和施工作业安全，故夜间进行第 2 车道隧道旧涂料清除施工（封闭第 2、第 3 车道或封闭第 1、第 2 车道），白天进行第 1 车道或第 3 车道隧道旧涂料清除施工（封闭第 1 车道或封闭第 3 车道），每次只进行一个车道的施工作业（见图 4）。

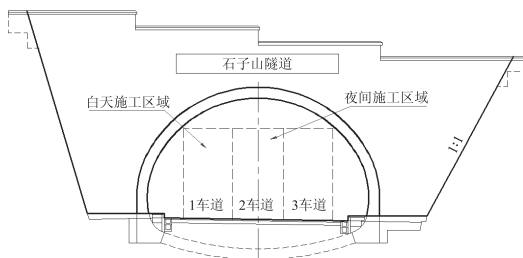


图4 隧道横断面作业区域划分图

3.4 清除旧涂层

（1）试验性喷砂清理旧涂料

确认连接管通畅、接口牢固后，喷砂

机投料口开始放入金刚砂，进行试验性喷砂清理旧涂料，取得经验后正式展开隧道墙身旧涂层清理作业。

（2）清除旧涂层作业

①隧道纵断面施工顺序从车流出洞口位置往车流入洞口位置方向进行（见图 5），可以使施工人员迎行车面施工，对驶来车辆的异常状况，可以起到提早预警的效果。

②操作人员在登高脚手架上站稳后，启动喷砂机，由高到低逐渐清理旧涂料。

③对于隧道灯、消防箱盖等设施周边旧涂料，采用人工打磨方式进行清除。

④在金刚砂喷砂清理墙身旧涂层时，使用洒水车将两套带莲蓬头的水管立即对喷口周围进行喷洒，控制扬尘污染。

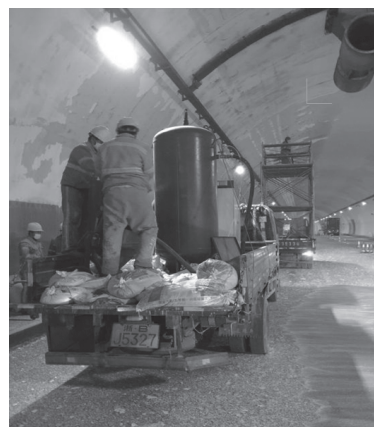


图5 旧涂料清除作业图

（3）清理效果检查

①隧道二次衬砌表面清理质量检查：用目测、敲打、刻划等方式检查（见图 6），若发现混凝土表面有裂缝、坑槽的缺陷，轻微的缺陷用 I 级聚合物砂浆进行修补，

严重裂缝缺陷应采取相应措施进行修补，修补后表面不得有明显接缝。如发现有空鼓、起层、剥离的表层，先清除松动表层，用洁净的水润湿后，再用 I 级聚合物砂浆进行修平。

②清除旧涂料后，由班组进行自检，检查有无未清除的涂层，检查边角旧涂层清除情况（见图 6）。自检合格后，再由质量员进行验收，验收合格后，方进行下道工序施工。



图 6 旧涂料清理检查质量情况图

(4) 清理清除下来的旧涂层皮屑、回收金刚砂：专门配置 3 个人，对洒落在路面上的涂层皮屑和金刚砂进行清扫搜集装袋外运，并分类和过筛，旧涂层皮屑集中堆放、销毁，金刚砂烘干后以备二次使用。

3.5 质量控制

(1) 根据旧涂料实际清理效果，确定喷砂机喷口与清理面的距离和角度，过近或角度反向，容易造成金刚砂回弹伤人；喷砂机喷口与清理面的距离过远，喷出去的砂到接触点冲击力不足，旧涂料难以剥落。根据试验结果，喷出去的金刚砂与需清理基层接触面到喷口的距离应控制在 1.8 ~ 3m，攻角 20° ~ 30° 为宜，喷砂机压力为 0.4 ~ 0.8MPa。

(2) 合格隧道二次衬砌表面不起砂，无空鼓、起层、开裂和剥离现象。

(3) 旧涂层清除检查和验收标准（见表 1）

表 1 旧涂层清除检查和验收标准表

项次	项目	允许值或误差	检查方法和频率	备注
1	隧道墙身表面总体外观	露出混凝土新鲜面	目测	
2	边角或电气设备遮挡旧涂层余留	≤ 2%	尺量，每 20 延米抽查 3 处	不影响防水或下步施工和美观要求
3	毛糙点或毛糙面	≤ 5%	尺量，每 20 延米抽查 3 处	毛糙点或毛糙面不连片，需抹面处理
4	场内洒落旧涂层皮屑	清洁	目测	清理外运
5	场内粉尘	少许	目测	不影响行车安全和操作人员健康

3.6 安全措施

(1) 严格按隧道施工交通导行方案和《公路养护安全作业规程》（JTG H30—2004）要求对隧道边施工边通行的交通管制及封道（见图 7）。

(2) 施工现场用电及各种电器设备的

安全使用，必须按供电部门的安全用电要求及有关规定执行，严禁违章用电。

(3) 高空作业前应仔细检查登高工具和安全用具，如安全帽、安全带、梯子、跳板、脚手架等，如有不符合要求的应立即改进或拒绝登高作业。