

# 基于昆明城市空间整合的交通发展策略

张祖林<sup>1</sup>, 田利<sup>2</sup>

(1. 同济大学 经济与管理学院, 上海 200092; 2. 上海应用技术学院 建筑系, 上海 200235)

**摘要:** 分析城市空间要素、交通空间、交通方式和交通模式的关联性, 探讨城市交通问题的综合解决策略, 研究伦敦、香港、洛杉矶和库里蒂巴的城市与交通发展模式、经验和各种具体途径, 分析在昆明城市发展及交通空间之间存在的问题, 提出围绕交通空间进行的昆明城市空间整合的策略与方法, 为城市发展和交通改善提供理论、实证和策略上的指导与启示。

**关键词:** 城市空间; 整合; 交通发展策略; 交通空间

**中图分类号:** TU 984.191

**文献标识码:** A

## Transport Strategies Based on Kunming's Urban Spatial Integration

ZHANG Zulin<sup>1</sup>, TIAN Li<sup>2</sup>

(1. College of Economics & Management, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Department of Architecture, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China)

**Abstract:** The paper presents an analysis of the relevance between urban spatial elements, traffic space, transport means and traffic patterns, and a discussion of the synthetic solutions of urban transportation. Based on a research of the urban and traffic development patterns, experience and specific ways from London, Hong Kong, Los Angeles and Curitiba, an investigation is made into the relationship of the Kunming's spatial development and traffic state of affairs, and strategies are put forward for Kunming's urban spatial integration on the basis of the traffic space. And these research results provide a theoretical, empirical and strategic guidance and inspiration for urban development and its traffic improvement.

**Key words:** urban space; integration; transport strategy; traffic space

城市空间是城市生活的物质载体。广义地说, 作

为一个与实体相对应的概念, 城市空间应指在城市范围内由各种实体界定、围合而成的所有虚体部分, 既包括建筑物的内外空间, 也包括地面、地上和地下空间, 如交通空间、广场空间、绿地空间、水系空间等。在信息时代, 复杂化、多元化的城市生活对城市空间提出了更高的要求。城市空间各要素之间相互渗透、重叠、结合, 既是开放的, 又是密切关联的有机整体, 是一个复杂系统。其中交通空间是人的移动空间, 本质上是人和物的移动空间, 而不只是车辆通行的空间, 不仅社会文化活动离不开人员的流动, 而且城市的发展和扩大也有赖于人员的流动<sup>[1]</sup>。交通空间不仅是连接出行起终点的过程空间, 而且是融合文化、讯息、生态元素、科技元素的多元综合体, 具有巨大的交通功用。它除了要表现安全、舒适、便捷、高效之外, 还需要考虑地域文化、城市规划、交通模式、通讯信息空间转换、人性化、可持续发展等内容, 涉及自然科学、社会科学和人文科学中多个门类知识及其融合。现有文献大多从城市设计的角度来研究城市空间整合问题, 本文中探讨围绕交通空间进行的城市空间整合策略与方法<sup>[2-4]</sup>。

快速城市化与机动化、交通方式、不同的交通发展模式、交通空间与城市空间结构的关联是多个角度的, 城市发展令人关注, 交通空间应为整个社会所共有, 保障广大公众的交通利益<sup>[5]</sup>。

## 1 城市交通问题的综合解决策略

### 1.1 交通发展策略

(1) 综合交通协同与动态整合策略。综合交通是指城市内部的各种交通的总和, 包括公共客运交通、货运交通、小汽车道路交通、轨道交通、慢行交通

收稿日期: 2009-09-07

基金项目: 上海市重点学科建设资助项目(B310)

作者简介: 张祖林(1959—), 男, 博士生, 主要研究方向为城市管理。E-mail: zzl@km.gov.cn

田利(1972—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为建筑学与城市规划。E-mail: archtian@163.com

以及城市各类对外交通等.综合交通的协同是以可持续为最高准则,运用系统学的理论和方法,全面高效整合各种交通系统,持续动态地协调交通与经济社会、生态环境、城市空间的各种复杂关系,最大程度地发挥综合交通的整体效应.

(2) 公共交通优先发展策略.公共交通是集约化的客运方式,是大城市交通的主力军.公共交通的主体是公共汽车、地铁、轻轨等大容量的运输工具,也包括出租车等.其最大的特点是公共性和平等性.优先发展公共交通几乎是世界上所有大城市的共同选择<sup>[6]</sup>.

(3) 机动交通畅达策略.机动交通畅达策略是体现“畅通”、“易达”并重的原则,充分运用交通规划、交通工程、智能交通、交通经济、交通管理等多种理论与技术,在城市不同地带确保尽可能多的机动车在可承受的服务状态中,实现机动车辆内人与物的空间移动.需要从源头上对交通需求加以引导和控制,通过适当超前的交通设施建设,实施各类交通管理措施,保持不断增长的交通需求和有限的供应能力之间的平衡.

(4) 交通先导与交通引导开发策略.交通发展先导就是要以发展和引导开发为准则,坚持城市交通基础设施适度超前、优先发展、充分发挥交通建设对城市改造与拓展的引导和支持作用.保持交通与土地利用之间的互动关系,以交通发展引导城市空间布局调整,在交通规划、交通投资、交通建设等各个环节实施引导城市开发的政策.

## 1.2 城市交通发展模式

(1) 伦敦的经验——整体交通模式<sup>[7]</sup>.伦敦是世界上既古老又现代的大都市,凭借其高密度、网络化、多模式协调组合的交通体系,构筑一体化交通,使城市永保生气与活力.

交通设施采用高水准轨道交通系统与常规式道路系统.交通需求为协调各种交通通行方式,由于小汽车受到限制和拥挤收费的原因,内伦敦公共交通占主导,外伦敦则以小汽车交通为主.

(2) 香港的经验——公共交通主导<sup>[8]</sup>.香港是一个土地面积小、用地紧张、人口密度高的国际性城市,狭小的城市空间和用地布局迫使其不得通过发展公共交通来解决交通问题,公共交通主导城市居民的工作与生活,引导城市用地结构和空间的发展.通过3次综合交通规划研究,动态协调各种交通模式,优先发展轨道交通并扩展轨道网络,成功抑制

了小汽车的增长,适应了高密度的城市用地布局,开创了绿色交通.

交通设施采用集约高效的轨道与简单式汽车道路系统.轨道交通是服务于中心城区的地铁系统和服务于郊区的广九铁路系统,公共交通出行量占89%(其中上班93%、上学97%).采用动态整合与协调高效的交通战略,香港公交日均客流基本维持在1000万~1100万乘次的水平,人均每日乘公交1.6次,是世界上人均公交出行强度最大的城市.

(3) 洛杉矶的经验——交通拥堵管理<sup>[9]</sup>.弱中心、低密度、散状式小汽车大都市洛杉矶是世界著名的小汽车交通城市.进入20世纪90年代以来,面临严重的交通拥堵问题.2000年,注册机动车652万辆,平均每3人拥有2辆车,是世界机动车拥有量最高的城市.市区公交出行量不到10%,自驾车出行量达到70%.经济的增长、人口与就业岗位的持续发展使其意识到小汽车交通发展的问题,不得不制定交通拥堵管理计划来实现城市交通的畅达.

交通设施采用高标准、高密度的道路网络系统.洛杉矶市区拥有世界上规模最大的城市道路系统,道路总长10240km,高速公路256km.采用集约交通改善市区与高速公路的拥堵状况的发展交通战略.发展高载客数汽车专用道(high occupancy vehicle, HOV)、扩展快速公交(bus rapid transit, BRT)、实施交通需求管理(transport demand management, TDM)计划和土地使用分析计划,将交通设施建设、运行与土地开发结合起来.

(4) 库里蒂巴的经验——快速公交先导<sup>[10]</sup>.库里蒂巴是世界著名的交通规划引导城市发展(transit oriented development, TOD)的城市,以公交专用道为中心轴线的“三元”道路系统规划设计理念 and 以BRT为核心的一体化公交系统设计,促进城市轴向组团化的用地布局,城市空间密度得到优化,成功地防止了城市“摊大饼式”的发展,使其成为生态型宜居城市.市中心较小,主要居住和就业集中在5条快速交通走廊上,轴线之间是低密度的城市用地和绿地,公共交通是城市交通的核心和主导.

交通设施采用BRT为核心的一体化公共交通网络,主要由快速线、驳运线、区际线、直达线、主干线、传统线路等不同服务功能的线路构成.交通战略是BRT引导城市发展.以公共交通引导的城市总体规划体现了以交通空间为核心的城市空间要素的整合.

## 2 昆明城市空间发展现状与交通问题

### 2.1 昆明市交通图景

2007年,城市道路建设继续保持高强度资金投入,交通基础设施投资104.24亿元.2007年底,机动车拥有量89.23万辆,其中公交车2963标台,主城区公交车拥有率为每万人10.4标台(国标为每万人10.0~12.5标台).已建成5条公交专用道,总长46km.公共交通出行量占出行总量的21.0%,小汽车、慢行交通出行量分别为12.1%,60.0%.居民出行平均耗时26.2min,机动车出行呈现早晚双高峰态势.主城区道路建设以既有道路整治和改造为重点,像为了缓解主城区交通压力而实施的“一二一大街和学府路单行线方案”、“春城路交通管理改善方案”等交通改善项目.未来昆明主城区以调整和整理为主,主城交通拥堵问题的缓解与主城发展方针相协调,对小汽车交通采取疏导和限制的策略,大力发展公共交通,结合换乘枢纽形成综合性、一体化、多模式的城市交通空间.

### 2.2 昆明城市空间发展与交通问题

快速城市化进程中必然会出现交通问题<sup>[11]</sup>,这是世界性的难题.交通拥堵只是城市交通问题的表象,实质涉及一系列相关问题.昆明城市交通建设虽取得一定成果,但在迅猛的城市化和机动化的浪潮中,交通供给总是远远滞后于需求的快速增长,带来交通拥堵和环境问题,成为城市快速发展的瓶颈.

(1) 用地矛盾与城市扩张.1950~1990年期间的昆明城市总体规划,一直采取围绕老城向外拓展的“同心圆”发展模式.2007年主城区人口由1980年的80万猛增到272万,用地年增长率5.22%,快速城市化进程表现出强烈的空间需求,而受到“三面靠山、一面临水”的地理条件限制,城市用地紧张的矛盾日益激化.现代新昆明的发展战略和昆明城市总体规划修编(2008~2020年)提出一核多中心的城市空间发展格局,即跳出昆明老城区,发展呈贡新城、空港经济区,然后再沿着南北、东西2条发展轴拓展,如图1.新城、新区的发展虽然可以解决主城用地紧张的矛盾,但新城与主城间的交通体系建设,又会在土地利用、新城结构、交通空间之间产生新的矛盾.

(2) 城市布局结构不合理.昆明城市化发展迅猛,主建成区面积由1994年约100km<sup>2</sup>迅速发展到目前的225km<sup>2</sup>,但二环路以内中心区高强度的社会、经济活动局面持续强化,各类社会优质资源高度

密集,只占1/5主城区面积的地区拥有60%的就业岗位,外围地区功能相对单一,公共设施配套不足,呈现以居住为主发展形态,就业、就学和生活对中心区依赖性很强.中心区内部和进出交通分别占全市总出行量的45%和23%,两者之和占到总出行量近70%,中心区成为交通拥堵最严重的地区.

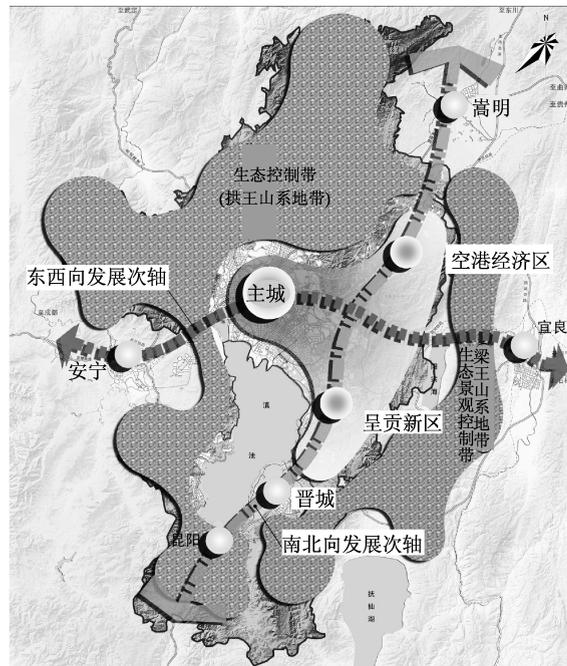


图1 昆明城市规划区用地布局结构

Fig.1 Structure and layout of land use in Kunming's urban planning area

(3) 尚未形成城市空间布局的交通基础设施“骨架”体系.既有铁路、航空和公路等对外客货运输设施能力不足,难以满足对外运输需求;城市道路设施规模相对较小,主城区人均城市道路面积6.6m<sup>2</sup>,而国标为人均7~15m<sup>2</sup>;公共交通设施供给水平相对较低,主要公交发展指标低于国标;机动车和非机动车停车设施发展缓慢,违章停车普遍;货运设施布局散乱,建设水平低,难以支持现代物流业的发展.

(4) 交通系统结构不合理.路网系统长期处于超饱和和拥堵状态,设施运行和利用效率低,内外交通体系未能有效合理衔接,对外客货站点周边交通秩序混乱、疏散困难;城市交通方式结构不合理,公交未形成合理的分级衔接线网,公交专用道效率未能充分发挥,各交通方式之间缺乏合理有效分工、衔接和整合;道路网功能级配不合理,快速路发展不足,次支路功能缺失,导致路网交通疏散能力较差;动静态交通发展失衡,停车设施未能有效发挥交通调控功能.

(5) 交通发展缺乏有效的保障和综合管理. 交通政策、法律、法规体系尚不健全, 城市交通工作缺乏必要和有效支持与监督; 交通工作机构和机制建设薄弱, 交通规划、建设、管理、运营缺乏统一协调; 交通投融资对公交和科技发展的投入力度不够; 交通科技应用水平不高, 交通智能化和信息化还处于初级发展阶段, 严重制约了各项交通工作的效率和科学性.

(6) 审批机制和规划编制体系不合理. 规划层次不清晰, 审批依据不足, 规划、建设、管理各环节存在脱节现象. 交通建设项目的审批依据只有总体规划或专项规划等宏观规划, 很难把握具体建设项目的特性; 建设项目在实施过程中各自为政, 规划部门关注大系统的整体构建, 建设部门着重于建设项目的实施难度和建设条件, 交通运营部门只关心其运输环境, 因此, 由于目标的不统一, 缺乏进一步的交通功能设计及审批环节, 项目建设可能会偏离预期的轨道, 严重阻碍道路功能的有效发挥.

### 3 围绕交通空间进行的昆明城市空间整合

城市本身是一个和谐有机体, 交通空间是其流动的命脉. 交通设施实体与空间和城市中的其他实体与空间互相关联、互相依托、互相制约.

#### 3.1 交通空间的立体化、网络化与综合交通协同发展

构建大城市具有活力的一体化交通是城市的必然选择, 即进行综合交通协同发展, 形成有机的一体化交通(图2). 综合交通协同应根据城市发展的需要, 对城市综合交通网络作出总体部署, 包括城市道路、公共交通、停车换乘等设施的网络骨架、规模与布局, 确定内外衔接与货运系统. 从城市空间规划角度来看, 还要协调与公共开放空间、建筑群体空间、景观空间、绿化体系之间的关系, 即协调各类交通空间的运行环境. 交通空间的立体化是对交通系统规划和土地利用规划的整合, 将地面、空中及地下空间进行立体利用来适应城市交通的复杂状况和实际需要. 多种交通设施的结合体现交通空间的网络化.

#### 3.2 交通空间以公共交通优先发展为主导

公共交通优先发展与主导的根本目的是在于科学合理引导城市空间布局和调整, 促进生态型的“组团式城市”, 保持城市空间有机生长和持续

发展. 公交优先是要建立以公共交通为主体的, 以多种交通方式协调运行、紧密衔接的综合客运体系. 公共交通应向速度化、舒适化、多样化、环保化发展.

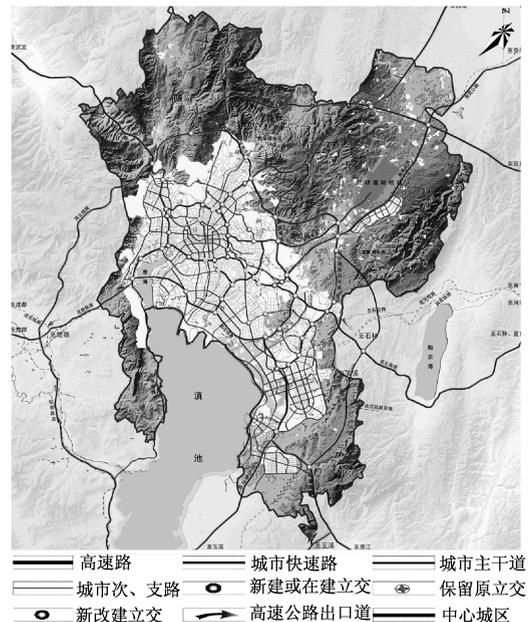


图2 昆明中心城区道路网络结构

Fig.2 Urban street network in Kunming

昆明在优先发展公交方面处于全国的前列, 从1990年中后期就开始着手建立BRT系统<sup>[12]</sup>, 已建成5条公交专用道, 形成中心城区“井”型公交专用道, TOD发展模式已初显, 以公交为主导的出行模式已确立, 交通方式与结构正逐步向可持续化发展, 目前公交系统正在向多样化和精致化迈进. 如对候车空间进行改善, 在步行道路与公交专用道之间增设自动扶梯等. 向库里蒂巴学习, 在不同服务功能的线路构成的多样化和换乘的便捷舒适上下功夫.

#### 3.3 城市慢行交通系统的建立与完善

慢行交通具有便捷的短距离出行和接驳公交的功能, 其网络的完整、连续和安全, 对提高城市生活品质至关重要. 作为一种重要交通方式, 它不仅是一种独立的出行方式, 又是其他机动化出行方式不可或缺的衔接组成, 应当精心设计慢行交通与公共交通的衔接系统.

图3是昆明城区道路慢行一体化过街方案示意图, 有非机动车和行人共板、非机动车左转二次过街2种实现方式, 设置缓坡适应非机动车的灵活性要求, 路中行人驻足区采用软化安全岛和矮墩, 充分体现“人性化”理念, 注重对行人和非机动车保护, 合法化、规范化路权, 保障其过街的安全性和舒适性.

### 3.4 交通换乘与城市建筑综合体

在综合交通体系中,重大的交通基础设施包括道路设施、轨道设施、枢纽设施、停车设施和管理设施.交通设施整合的关键在于构建一个以枢纽-换乘中心为核心的交通衔接系统.通过交通衔接系统将各种交通方式内部、各种交通方式之间、私人交通与公共交通、市内交通与对外交通有效衔接,发挥交通体系的整体效益.通过客运枢纽设施、紧凑的站点设置,提供公交乘客方便的换乘条件;通过“停车加换乘”实现公交与个体交通的有效转换;通过综合性枢纽和连接市内的道路、轨道,将航空、火车站和公路车站等对外交通设施与市内交通紧密相连;通过物流中心,对物流流程重新进行组合与调配,提高货运效率和效益.

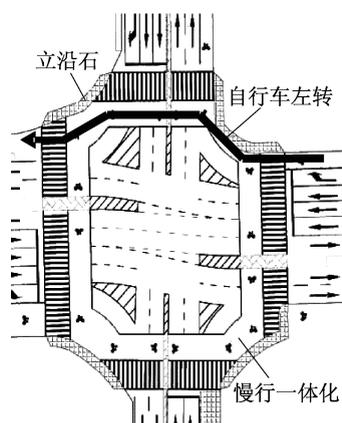


图3 非机动车与行人同步过街方式

Fig.3 A pattern of non-motor vehicle and pedestrian simultaneous crossing

### 3.5 交通空间与建筑群体空间的整合

为了在功能日益复杂的城市中活动,人们不断创造出多样化的交通空间,其目的仍是为了方便地联系城市中的各种活动空间.交通空间不应成为孤立封闭的单一功能空间,其与建筑群体空间的整合是塑造富有活力、便于活动的城市空间的关键.城市公共活动中心应与公交系统有机结合,交通节点处可以形成各种交流场所.交通换乘枢纽与各类客运中心本身就是交通空间与建筑空间的结合点.建筑空间与交通空间的结合与渗透有利于形成连续的街道界面.建筑空间开放化处理形成的城市“灰空间”,室内街道和室内城市广场都是交通空间与建筑空间结合而形成的复合空间.商业步行街在交通空间与建筑群体空间的整合中不断散发出活力.

### 3.6 交通空间与城市景观体系的整合

交通空间与城市景观结合起来可以创造更有价

值的城市空间.城市广场、公园以及绿地系统都会给单调的交通空间带来生机,绿化植被同时可以降低交通噪声,减少污染,美化道路.慢行交通系统与城市开放空间、绿化景观系统的结合将形成这个城市最有魅力的核心.城市的自然、历史和文化景观有时会将交通空间消融在其中,使人们忘却周边的喧嚣与嘈杂.

昆明中心城园林绿地系统规划的结构是利用昆明“三面临山、一面临水”的自然风貌特色,塑造中心城外圈的绿色生态空间,构成“生态基质-绿色廊道-绿地板块”的绿地系统结构.以周边的自然生态环境为背景,营造河流绿带和道路绿化为主体的绿色廊道.道路两侧设置绿带,中心城街和公共开放空间设置各类开放式园林,开放空间与城市慢行系统之间建立密切和谐的联系,城市的绿化景观系统充满活力.

## 4 结论

昆明城市空间发展遇到用地紧张和交通拥堵的瓶颈问题,解决问题的策略与方法就是采取综合交通协同与动态整合、公共交通优先发展、交通先导与交通引导开发的交通综合解决策略,借鉴伦敦整体交通、香港公共交通主导、洛杉矶交通拥堵管理和库里蒂巴快速公交先导的城市与交通发展模式和经验,进一步完善立体化与网络化的交通空间、公交优先与主导、城市慢行交通系统、交通换乘与城市建筑综合体、交通空间与建筑群体空间、交通空间与城市景观体系等方面的整合,提供更为安全、便捷和舒适的交通环境,更多的令人愉快的居住和工作场所,提高居民生活质量,建设可持续的生态城市.

### 参考文献:

- [1] 朱洪.交通空间与城市景观协调的设计理念[J].交通与运输,2007,23(4):3.  
ZHU Hong. Harmonious design of traffic space and urban landscape[J]. Traffic & Transportation, 2007, 23(4): 3.
- [2] 刘威,张玉一.浅析沈阳市城市空间形态与道路网体系的相互关系[J].现代城市研究,2008(8):21.  
LIU Wei, ZHANG Yuyi. On the correlativity between urban spatial form and road network system of Shenyang city[J]. Modern Urban Research, 2008(8): 21.
- [3] 钟华颖,韩冬青.城市设计中的交通换乘体系[J].规划师,2004(1):70.  
ZHONG Huaying, HAN Dongqing. The traffic transfer system in city design[J]. Planners, 2004(1): 70.

- [4] 潘海啸. 城市交通空间创新设计——建筑行动起来! [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.  
PAN Haixiao. Innovative design of urban traffic space——construction into action! [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [5] 吕晓明. 解决城市交通问题的可持续发展思想[J]. 城市规划汇刊, 1997(2): 61.  
LV Xiaoming. Thought of sustainable development for solving urban traffic problems [J]. Urban Planning Review, 1997(2): 61.
- [6] 林卫. 对公交引导城市发展的思考[J]. 城市交通, 2006, 14(2): 47.  
LIN Wei. Thinking about urban development under guidance of public transportation [J]. Urban Transport of China, 2006, 14(2): 47.
- [7] John Segal, Edward O'Loughlin. TfL's response to transport for London's south western rail corridor plan [EB/OL]. [2009-06-20]. [http://www.mvaconsultancy.com/publications/TfL\\_South\\_Western\\_Rail\\_Paper.pdf](http://www.mvaconsultancy.com/publications/TfL_South_Western_Rail_Paper.pdf).
- [8] 林燕. 浅析香港建筑综合体与城市交通空间的整合[J]. 建筑学报, 2007(6): 31.  
LIN Yan. Preliminary analysis of the integration of Hong Kong building complex with traffic space [J]. Architectural Journal, 2007(6): 31.
- [9] Martin Wachs. Learning from Los Angeles: transport, urban form, and air quality [J]. Transportation, 1993, 20(4): 329.
- [10] Pienaar P A, Krynauw M N, Perold A D. Public transport: lessons to be learnt from Curitiba and Bogota [EB/OL]. [2009-06-20]. <https://www.up.ac.za/dspace/bitstream/2263/6417/1/131.pdf>.
- [11] 赵伟. 昆明应建拥堵应急处理机制 [EB/OL]. [2009-06-22]. [http://www.clzg.cn/kmpap/2008-01/22/content\\_1163239.htm](http://www.clzg.cn/kmpap/2008-01/22/content_1163239.htm).  
ZHAO Wei. An emergency handling mechanism for congestion in Kunming [EB/OL]. [2009-06-22]. [http://www.clzg.cn/kmpap/2008-01/22/content\\_1163239.htm](http://www.clzg.cn/kmpap/2008-01/22/content_1163239.htm).
- [12] 阿川. 中国城市 BRT 建设示例——昆明快速公交 [EB/OL]. [2009-05-27]. <http://www.21its.com/Common/SpecialDetail.aspx?ID=2009052713150169651>.  
A Chuan. Examples of BRT construction of Chinese cities——BRT in Kunming [EB/OL]. [2009-05-27]. <http://www.21its.com/Common/SpecialDetail.aspx?ID=2009052713150169651>.

(上接第 503 页)

## 4 结语

从力学角度对分布式光纤应变传感的精度进行了系统的理论分析和实验研究, 基于考虑光纤-基材之间的力学耦合作用, 系统建立了两者耦合效应即应变传递的分析方法和分析模型, 得到了应变传递关系的理论解以及应变检测精度的范围; 分析了涂层对光纤应变感知能力的影响, 根据分析结果研制了具有工程实用化意义的传感光纤; 对普通二次涂敷通讯光纤及研制的样本分别进行了分布式应变检测试验, 发现理论分析结果存在偏高倾向, 但与实测数据相差不超过 2%, 表明所建立的理论分析方法具有一定的可靠性, 从而为分布式光纤应变传感的优化设计及性能分析提供了理论参考。

### 参考文献:

- [1] Whittle M, Bullough W A. The structure of smart fluids [J]. Nature, 1992(358): 373.
- [2] Kang H K, Park J W, Hong C S, et al. Development of fiber optic ingress/egress methods for smart composite structures [J]. Smart Materials and Structures, 2000, 9(2): 149.
- [3] Measres R M. Smart structures with nerves of glass [J]. Prog Aerospace Sci, 1989, 26(4): 289.
- [4] Fabien Ravet, Fabien Briffod, Glisic Branko, et al. Detection of sub-millimeter faults with a time domain distributed Brillouin sensor [C] // Proc SPIE. Bellingham W A: The International Society for Optical Engineering, 2008, 7004: 70042-1-70042-4.
- [5] 刘浩吾, 吴永红, 丁睿, 等. 光纤应变检测的非线性有限元分析和试验 [J]. 光电子激光, 2003, 14(5): 526.  
LIU Haowu, WU Yonghong, DING Rui, et al. Nonlinear finite element analysis and test of fiber optic strain sensing [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2003, 14(5): 526.
- [6] 吴永红. 光纤光栅水工渗压传感器封装的结构分析与实验 [D]. 成都: 四川大学水电学院, 2003.  
WU Yonghong. Structural analysis and test of FBG hydraulic engineering seepage sensor encapsulation [D]. Chengdu: Sichuan University. College of Water Resource and Hydropower, 2003.
- [7] Farhad Ansari, Yuan Libao. Mechanics of bond and interface shear transfer in optical fiber sensors [J]. J Eng Mech, 1998, 124(4): 385.
- [8] LI Dongsheng, LI Hongnan. Strain transferring of embedded fiber bragg grating sensors [C] // Pro SPIE. Bellingham W A: The International Society for Optical Engineering, 2005, 5765: 1085.