

综合交通运输网络规划研究综述\*

宋京妮<sup>1</sup> 吴群琪<sup>\*,1</sup> 薛晨蕾<sup>1</sup> 包旭<sup>2</sup> 杜凯<sup>3</sup>

(1. 长安大学经济与管理学院, 西安 710064; 2. 江苏省交通运输与安全保障重点实验室, 淮安 223003;  
3. 长安大学电子与控制工程学院, 西安 710064)

**摘 要:**综合交通运输网络的合理规划是实现交通运输又好又快可持续发展的先决条件。只有整合不同层次的规划,才能建立可靠、高效、可持续发展的综合运输系统。本文从战略规划、战术规划和运营规划三个层面系统梳理和归纳国内外综合交通运输网络规划的相关研究成果,并指出了不同规划层次所面临的挑战。结果表明,亟需对综合交通运输网络的总体布局进行战略规划,以“增量”建设带动“存量”优化;基于可靠性的综合交通运输服务网络设计问题有待解决;建立合理的数学模型和设计高效可操作的求解算法对解决综合交通运输网络规划的相关问题至关重要。

**关键词:**综合交通运输;网络规划;战略规划;战术规划;运营规划;综述  
**中图分类号:**U1 **文献标识码:**A

Review of Integrated Transport Network Planning Research\*

SONG Jingni<sup>1</sup> WU Qunqi<sup>\*,1</sup> XUE Chenlei<sup>1</sup> BAO Xu<sup>2</sup> DU Kai<sup>3</sup>

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, China;  
2. Key Laboratory for Traffic and Transportation Security of Jiangsu Province, Huai'an 223003, China;  
3. School of Electronic and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:**Rational planning of integrated transport network is a prerequisite for achieving sound, rapid and sustainable transport. Only integrated different levels of transport planning can establish a reliable, efficient and sustainable transport system. In this thesis, relevant research findings on integrated transport network planning at home and abroad are sorted and summarized systematically from the aspects of strategic planning, tactical planning and operational planning. Underlying challenges in different levels of planning are pointed out. Results show that, strategic planning for the overall layout of integrated transport network is urgently required, and the construction of “increment” is to lead the optimization of “the storage quantity”; based on the reliability of integrated transport service network design is to be resolved; establishing a reasonable mathematical model and designing an efficient, operational algorithm for integrated transport network planning issues are crucial.

**Key words:**integrated transport; network planning; strategic planning; tactical planning; operational planning; review

1 引言

综合交通运输网络是综合交通运输体系的构成基础。合理的交通网络布局是实现综合运输体系真正优化的基础性、先决性、关键性的条件。网络规划是否合理直接影响综合交通运输体系的运作效率和效益。关于综合交通运输网络规划的问题, Macharis<sup>[1]</sup>、Crainic<sup>[2]</sup>和 SteadieSeif<sup>[3]</sup>认为其主要由战略规划、战术规划和运营规划组成。战略规划主要涉及

基础设施投资、综合交通实体网络优化等问题,属综合交通基础设施物理网络规划范畴。而战术规划主要研究在现有基础设施实体网络下的枢纽选址、运行路径设计、联合运输组织、多式联运组织及各种运输方式的能力分配、时间表设计等,属综合交通运输规划范畴。运营规划是基于既定的运输网络寻求最优的运输服务,主要研究运输服务网点布局、运输联盟、服务方式选择、运输工具更新等,属综合交通运输服务范畴。综合交通运输网络规划包括城间与城市综合交通规划问题,城间综合交通网络规划是指连接城市之间、城乡之间、乡村之间的综合交通网络,是相对于城市内部综合交通网络的概念。从规划目标、规划依据、规划条件、规划内容、规划方法等方面看,城间与城市综合交通网络规划完全不同。

受限于篇幅,本文不予探究城市综合交通运输、

2016-07-19 收稿,2016-09-23 接受  
\* 高等学校博士学科点专项科研基金(20130205110001),中央高校基本业务费项目(2014G6231001,2014G6231003,310823160101),陕西省科技工业攻关项目(2015GY033),江苏省交通运输与安全保障重点实验室开放基金(TTS2015-04)资助  
\*\* 通讯作者,E-mail:wqq@chd.edu.cn

公共交通、短驳衔接运输、综合枢纽规划等问题,而是主要从战略、战术和运营三个层面对国内外城间综合交通网络规划的相关文献进行系统梳理和归纳,并对综合交通运输网络规划的未来发展方向进行展望。

2 战略规划

2.1 国外相关研究

2.1.1 网络规划理论与方法研究

综合交通运输体系内各种运输方式协调发展的前端决定因素是交通实体网络。20 世纪 80 年代以前,国外主要以数理解析法、经验调查法及四阶段法等进行路网布局规划,未有涉及综合交通网络规划理论与方法的相关文献。80 年代后,随着计算机技术的普及,关于交通网络设计问题的研究逐渐增多,但多以定性研究为主。Peter<sup>[4]</sup>认为城际综合交通规划应更多考虑政策和经济因素,其提出的综合交通网规划思想有一定的借鉴价值,但尚未给出具体的规划方法。Lindquist<sup>[5]</sup>和 Blandford<sup>[6]</sup>研究了综合交通网络规划与土地利用效率的关联模型,且综合考虑运输、土地利用、经济发展及环境四因素,并提出了具体的模型构架,但缺乏实用参考价值。Bougromenko<sup>[7]</sup>针对发展中国家和俄罗斯联邦地区构建了综合交通网战略规划的专家系统,该系统考虑了社会、经济、生态、地理等因素,并讨论了城市和区域空间发展的综合交通网络战略规划问题,然而其过分突出宏观因素的影响,对交通运输自身因素、特别是运输供给与需求的因素研究不够,因此没有产生明显的社会反响。研究发现大部分文献分析的是基于特定枢纽的中心辐射型综合交通网络规划问题,但其更多属于存量优化利用范畴。此外,部分文献在规划方法上进行了相关定量研究,Chiou<sup>[8]</sup>建立了针对交通网络设计问题的双层规划模型,上层目标为提高运输能力的投资费用和总耗时最小,下层规划为均衡配流,从而实现用户最优。Ukkusuri<sup>[9]</sup>和 Mudchanatongsuk<sup>[10]</sup>则研究了在需求和费用不确定且相互独立的条件下多阶段交通运输网络的设计问题,并对其求解。

2.1.2 实践探索

实践中,综合交通网络拓扑结构主要有直接连接型、通道型、中心辐射型、连接中心型、静态路径和动态路径等类型<sup>[11]</sup>(图 1)。观察大量国外文献发

现,较多欧洲文献研究中心辐射型网络规划问题,而对其他网络拓扑研究较少。但实践研究表明,通道型网络结构也具有一定的应用价值。因此,下文介绍综合交通运输通道规划的相关研究。

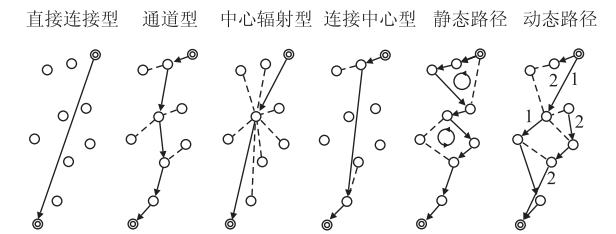


图 1 交通网络拓扑图(10 节点)<sup>[11]</sup>

纵观各发达国家,尤其是美国,其先后编制各专项运输通道规划,重点逐渐由城市交通通道规划扩展为区域、国家尺度的运输通道规划,使得美国的交通运输超前发展。80 年代,以美国、德国为首的发达国家交通基础设施网络基本建成,而关于运输通道规划的研究主要集中于高速公路通道,这与国外运输通道形成过程中高速公路起重要作用有关。Yeates<sup>[12]</sup>从 8 个方面系统分析了美国 Windsor - Quebec 运输通道,并运用成本 - 效益法对通道的 6 条备选线路进行择优选择。90 年代后,发达国家在交通运输基础设施实体网络方面则主要集中于局部微观网络优化。Crainic<sup>[13]</sup>讨论了选址模型、网络设计模型和区域多式联运规划模型,认为这些模型均与基础设施网络配置有关,基于此,作者提出根据运营效率来研判现有运输网络中是否应增加新的运输方式。Loureiro<sup>[14]</sup>提出了针对城际货物运输网络规划投资决策的非线性多商品多方式网络模型,在原有运输网络的基础上添加新的连接路径,从而使原有运输网络能力得到提高。Southworth<sup>[15]</sup>借助 GIS 构造多方式货物运输网络。Tan<sup>[16]</sup>则建立了基于离散仿真模型的货物联运网络,该模型模拟了卡车、火车和船的运动及货物在不同方式之间的转运,演示不同方式之间的互动作用,从而优化既存的交通运输网络。

近年来,国外专家学者加强了运输通道与环境的协调性及可持续发展研究。Lennart<sup>[17]</sup>分析了在瑞典交通运输基础设施规划过程中,战略环境评估和环境影响评价这两个过程是如何对待环境累积效应的。此外,Manuel<sup>[18]</sup>系统介绍了西班牙的公路运输通道规划过程,首先通过一系列筛选确认备选通道,通道不仅要满足其自身功能,且与环境(群落保

护、景观、水质量)、领土(土地利用、城市规划)和建筑(地形、地质及岩土)标准一致,随后采用质量排序法来确定环境影响变量及评价标准,并以西班牙 2006~2008 年 22 个公路建设项目为例进行环境影响评价。

## 2.2 国内相关研究

### 2.2.1 理论研究进展

在国内,众多专家学者就综合交通网络规划问题进行了系统的理论研究,但其更多的是从宏观角度定性探讨了综合运输网络规划的相关理论问题。王庆云<sup>[19]</sup>从供给的角度指出,综合交通网规划的核心问题是构建一体化协调发展的综合交通网,从而建立一体化整体最优的综合交通系统,也就是说综合交通网规划方案主要解决三方面问题:综合交通网的规模问题、网络骨架问题以及网络节点或枢纽问题。刘强<sup>[20]</sup>从宏观、中观、微观和实施层提出了基于资源与环境等约束条件下的综合运输网络布局多层次规划方法与内容,为构建我国综合运输网络布局提供一定参考。但他们都忽略了运输需求对交通基础设施布局的引导作用,且其主导目标及发展理念上存在一定的局限性。而吴群琪<sup>[21,22]</sup>强调综合交通运输体系规划应立足于需求,并基于运输需求构建综合交通运输规划的理论框架,但要实现整个理论体系的整体突破,其对时间、资金及技术要求较高,故仍需要对大量的理论与方法问题进行系统分析。

此外,仅有少部分文献定量研究了区域综合交通网络的规划问题。高桂凤<sup>[23]</sup>基于空间结构与联系,探讨了常规需求下区域交通网络的布局模式并对其进行适应性和稳定性分析。熊巧<sup>[24]</sup>系统研究了区域综合交通网络的布局规划方法、布局优化模型,提出了智能群决策支持系统来辅助布局决策,并对南充市综合交通网络布局进行实证分析。此外,刘强<sup>[25]</sup>从定量计算的角度,基于用户、运输企业和决策者三个不同利益实体建立了同时考虑现有运输网络改造和新网络布设的区域运输通道布局优化三层模型,并采用启发式算法进行求解。但该类文献仅能解决局部微观网络问题。

在综合交通网络规划方法上我国仍存在一定的缺陷,目前主要采用“流强研究方法”来确定交通基本网络<sup>[26]</sup>,即以实际完成的运输量为依据,通过分析运输量的增长规律来代替运输需求发展趋势。但

所完成的运输量是在现有的运输供给条件下得到满足的运输需求,仅仅是运输需求的一部分,而发展交通运输是为了更多地满足有利于社会经济发展的潜在运输需求<sup>[27]</sup>,故该方法显然不具有科学性。因此,综合交通网络规划不仅需要理念上的改变,同时需要在规划方法和主要内容上进行创新探索<sup>[28]</sup>。

### 2.2.2 实践探索

在实践方面我国专家学者也进行了有力探索。2007 年 10 月国务院批准并公布了我国首个《综合交通网中长期发展规划》,这是在各种运输方式专项规划基础上汇总加工形成的<sup>[29]</sup>。然而综合交通规划的编制方法对规划编制单位来说仍然是一个新课题。因为早期各级综合交通规划的模式只是分方式规划的叠加,并不能真正体现综合交通的理念<sup>[28]</sup>,因此,其仅是具体化的开始,仍需要进行系统的创新研究。此外,徐宪平召集国内专家在系统评价的基础上对我国综合交通网络的规划内容和布局层次等进行了系统创新,解决了前阶段尚未解决的结构失衡问题,但仍缺乏对综合运输的需求分析<sup>[30]</sup>。而荣朝和<sup>[28]</sup>则基于运输需求提出了突出综合交通体系形态的规划思路,认为须跳出以分方式运输需求预测为基础、以项目建设为主要内容的传统规划模式,从更广的视角探索新的规划方法和内容,从而更好地满足运输需求。

因此,为使规划能真正起到协调各种运输方式发展的作用,迫切需要在规划理论、方法上进行积极探索,否则以政府为主导进行的决定各种运输方式发展方向、规模、水平等的规划,不仅不能促进综合发展,反而可能会对其形成制约<sup>[30]</sup>。由此可见,研究空间上的合理布局及运输方式合理结构的综合交通网规划理论与方法,是科学构建综合运输体系应解决的、系统性非常强的重大问题。

## 3 战术规划

战术规划问题更多考虑的是基于固定的交通网络,根据运输需求对各种运输方式进行运输能力分配、运输路径设计、时间表设计及运输频率规划等,使特定的基础设施得到最佳利用,从而尽可能最大限度实现供求双方的目标利益。有关网络设计与优化决策问题主要通过网络流规划理论(Network Flow Planning, NFP)和服务网络设计(Service Network Design, SND)的相关理论实现。前者是根据商品移动

的网络流进行综合规划;后者指商品移动时运输企业如何利用现有的运输资源,实现运输成本控制与服务质量综合优化,且最大限度满足运输需求,该理论在前者的基础上添加了实际运输生产的附加约束条件,因此实践应用效果更明显。服务网络设计理论可分为静态和动态服务网络设计问题,相比静态,动态服务网络设计问题引入时间维,考虑了决策的动态特性,因此其往往比静态服务网络设计模型的求解更复杂,适应于解决战术规划层接近操作规划一侧的问题。

3.1 服务网络设计问题

研究发现,仅有部分文献基于 NFP 理论探究了多式联运相关问题。Verma<sup>[31]</sup>提出了基于 NFP 的双目标优化模型,用于规划和管理危险货物多式联运问题,且利用迭代分解算法进行求解。Chang<sup>[32]</sup>将国际联运路线选择问题转化为多目标多方式多商品的网络流问题,建立了基于弧段的静态服务网络模型,并用分解算法进行求解。相比 NFP,较多文献研究服务网络设计问题,这表明决策者更倾向于寻求成本-效率的最优解决方案。Bai<sup>[33]</sup>针对较大规模的动态服务网络设计问题提出了一种新的本地搜索算法,并实证分析了 24 个著名的服务网络设计基准,结果表明,相比禁忌搜索算法,该算法可节省约 1/3 的计算时间。此外,服务网络设计问题也出现在综合交通运输货运规划流量控制等领域。Le<sup>[34]</sup>研究了腹地深海-内河码头的货物联合运输规划的战术问题,首次提出多式联运货物运输网络模型 (IFTN),从系统和控制角度寻求最佳的联运集装箱流量,为解决 IFTN 中交通需求动态性,提出了滚动时域联运集装箱流量控制 (RIFC) 方式,仿真结果表明 RIFC 方法具有一定的潜力且适合于大型网络的交通规划。

在国内,研究综合交通运输服务网络设计问题的文献较为少见,且以货物运输服务网络设计为主。其中,沈睿<sup>[35]</sup>探究了以确定运输服务频率为目标的 SND 问题,建立货运服务网络设计频度模型,并采用基于分解算法的启发式算法进行求解。申永生<sup>[36]</sup>深入分析了综合运输体系下货物运输的流量分配、频度服务设计和动态服务网络设计模型与求解算法。此外,黄纯辉<sup>[37]</sup>研究了食品冷链的库存优化和运输网络优化问题,构建了基于固定费用的食品冷链物流运输服务网络模型。

3.2 服务网络设计模型的求解算法

关于综合交通运输服务网络设计模型的求解算法,主要有数学模型求解和计算机模拟仿真求解。前者又可分为数值求解和近似求解,Chang<sup>[32]</sup>基于多目标、具有交货时间要求、运输规模经济等特性建立了精确的数学模型,通过分解技术进行求解,结果表明该数值求解算法运行高效。此外尚未发现相关文献使用近似求解算法进行求解。针对大规模网络设计、变量关系复杂、约束条件较多的问题,启发式和元启发式等非数值算法往往在效率和准确性方面表现更好。其中,禁忌算法是比较流行的元启发式算法<sup>[33,38]</sup>。然而,各种算法解决实际问题的效果好与否,尚缺乏一定的评判基准。Bektas<sup>[39]</sup>在解决小规模的非线性问题时,比较了基于服务弧段和网络流的分解算法,结果表明,基于服务弧段的分解算法具有更好的收敛,但耗时长。整体来说,两种算法均可有效处理非线性问题。Zhu<sup>[40]</sup>探究了随机数据集规模的大小与混合算法和最先进的解算器求解性能之间的关系。研究表明,随着数据规模的递增,混合算法在时间节省与准确性方面表现更优。而 Ayar<sup>[41]</sup>从公路和海上多式联运服务运营商的角度出发,以 34 个节点、167 种运输服务和 400 ~ 1000 种商品为例探讨了多商品路径问题。研究表明,随着商品数量的增加,最优间隙降低;增加有效不等式加强了线性规划的松弛特性,且算法在时间节省和准确性方面效果显著。

4 运营规划

运营规划问题考虑了基于既定的运输服务网络寻求最优的运输服务和运输方式组合,从而最大化满足运输需求。运营规划主要解决两大问题,即资源管理和行程规划。这类问题相对比较复杂,具有鲜明的动态性和特殊性。因此,设计准确快速的算法显得尤为重要。

4.1 资源管理

资源管理主要解决运输网络的资源分配,主要从空载单元重新定位和车队管理两方面探讨。

关于空载单元重新定位,用户未来的需求往往未知,其目标是尽可能减少空驶运输及仓储成本。Alan<sup>[42]</sup>研究了拥有 10 个港口、900 个订单和 1000 个集装箱的运输网络,对比了当前和三个备选空载单元定位策略(即时定位、每日有限次定位、每周次

定位),研究发现,即时定位更有助于减少成本,提高资源利用效率。Chang<sup>[43]</sup>提出要使旅行时间和成本最小化,需解决空载单元重新定位问题,其利用分支定界算法(B&B)对具有 12 和 8 个收发货者、2 个集装箱中转站、1 个码头及 985 个集装箱的运输系统进行求解。此外,Bandeira<sup>[44]</sup>使用分解和优先级算法,分析了集装箱的数量对运输性能的影响情况。

关于车队管理优化方面的研究文献较多,但多集中于单一运输方式。其主要分为静态车队管理和动态车队管理问题,后者又可分为确定性和随机性动态车队管理问题,由于静态车队管理问题容易导致决策错误,因此动态车队管理越来越受专家学者的青睐。Topaloglu<sup>[45]</sup>将车队管理问题转化为近似动态规划,且试图解决多个车型的车队管理问题。李冰<sup>[46]</sup>则详细描述动态车队管理问题,设计线性逼近函数将其分解为多个单时段单节点问题,并进行求解。此外,周长峰<sup>[47]</sup>提出了具有随机行驶时间的动态车队管理问题的随机模型,并将其构造为动态规划问题,采用阶梯价值函数近似求解。尽管研究学者从不同角度对动态车队管理问题进行了分析,不断地改进模型和设计不同的求解算法,但问题的多态性仍未得到有效解决。

#### 4.2 行程规划

行程规划问题主要研究时间表的实时优化、方式路线选择及应急规划等问题,从而使服务质量最优,而这需要整个运营过程实现连续、实时响应。因此,更新过程、准确度及更新速度极大影响系统的运作性能。Groothedde<sup>[48]</sup>提出了以内河-公路为例的快速移动消费品的分配协作中心网络,以成本最小化为目标建立模型,并用改进的启发式算法求解,该仿真模型也可用于基础设施网络结构规划。Meisel<sup>[49]</sup>建立了产品和联合运输规划相结合的 Branch Cut 模型,该模型包含产品数量、工厂数量、联合运输节点的货运量和方式运输能力的设定量等参数,并结合案例说明某化学公司从综合规划中节省了 6% 的成本,同时有助于建立环境友好的分配过程。Verma<sup>[50]</sup>提出在运输风险和成本双目标约束下的危险货物运输公铁联运路径优化框架,且采用禁忌算法来解决多目标规划问题,结果表明运输风险中短驳费占较大比例;联运列车的组合取决于决策者利益。另外,较多文献研究多式联运的方式选择,建立多目标函数并对其求解,且更多的是基于非集计理

论建立交通方式选择的离散选择模型。如张迦南<sup>[51]</sup>建立综合运输通道旅客选择行为的 Logit 模型。孙启鹏<sup>[52]</sup>建立了基于动态广义费用最小的交通方式选择 Logit 模型,并采用简单迭代法进行求解验证。Ana<sup>[53]</sup>采用离散选择模型对货物运输方式选择进行需求分析,并开展意向调查以提高实验数据质量,该模型可用于分析从公路到其他运输方式的潜在分流等问题。

### 5 结论与展望

综合交通运输网络规划是保证综合交通运输系统高效运转的重要手段。只有整合不同层次的规划,才能提供一个更可靠、更高效、可持续发展的综合运输系统。本文从战略规划、战术规划和运营规划三个层面系统综述了国内外的相关研究现状。研究发现,尽管综合运输网络规划已受到广泛的关注与重视,但各个层次的规划仍面临诸多挑战。

1) 战略规划。国外综合交通运输发展的“自然演进”特征决定了其运输规划更注重存量优化利用,而我国亟需开展综合交通运输的总体布局优化规划,以“增量”建设带动“存量”优化,其不仅需要发展理念的改变,同时也需要在规划方法和主要内容上进行创新探索。此外,现有相关研究成果尚未形成完整的理论体系,尤其是运输通道的发展机制、演化规律及内部交通结构研究较少。且研究不同运输方式的能力限制、运行时间、转运成本及可行性等相关参数,对综合运输网络规划设计至关重要,尤其是多种运输方式的成本结构,这还需进一步的研究关注。另外,由于时间敏感型、危险品货物运输等需要特殊的运输结构、政策及目标,因此考虑多商品多目标的运输网络规划也值得研究。

2) 战术规划。在综合交通运输网络规划中,建立一个可靠、低成本-高效率的服务网络既重要又艰巨。可靠性是综合运输服务网络的关键环节,现有关于运输服务网络设计问题的研究尚未考虑拥堵、事故及其他不可抗力等随机因素,严重影响整个运输服务网络资源的优化配置效率,因此基于可靠性的综合交通运输服务网络设计问题亟需解决。此外现有的服务网络设计优化模型及求解算法仅适用于小规模问题,针对大规模服务网络设计问题的有效求解算法仍需进一步研究。

3) 运营规划。既有的综合运输运营规划相关

文献中,往往只考虑单一运输方式选择问题,对多式联运运输方式缺乏进一步研究。此外,运输方式选择及其运营成本、中转成本也值得研究。由于运营规划问题涉及大量动态数据,对大规模运营问题的并行计算及求解算法的时间及精度要求较高,因此,如何建立更加合理的数学模型和设计高效易操作的求解算法也是目前亟待解决的问题。

### 参考文献

- [1] MACHARIS C, BONTEKONING Y M. Opportunities for OR in intermodal freight transport research: a review[J]. *Europe Journal of Operational Research*, 2004, 153(2): 400-416.
- [2] CRAINIC T, KIM K. Intermodal transportation. In C. Barnhart, & G. Laporte (Eds.), *Transportation [Z]. Handbooks in operations research and management science*, 2007, 467-537.
- [3] STEADIESEIFI M, DELLAERT N P, NUIJTEN W. Multimodal freight transportation planning: a literature review[J]. *Europe Journal of Operational Research*, 2014, 233(1): 1-15.
- [4] PETER C, SIMON L, MARCELO M. Comprehensive transportation models: current developments and future trends[J]. *ITE Journal (Institute of Transportation Engineers)*, 1989, 59(6): 33-38.
- [5] LINDQUIST E. Moving toward sustainability: transforming a comprehensive land use and transportation plan[J]. *Transportation Research Record*, 1998, (1617): 1-9.
- [6] BLANDFORD B, GROSSARDT T, RIPPY J. et al. Integrated transportation and land use scenario modeling by visual evaluation of examples: Case study of Jeffersonville, Indiana [J]. *Transportation Research Record*, 2008, (2076): 192-199.
- [7] BOUGROMENKO V. An expert system for sustainable urban and regional transport development[J]. *Traffic and Transportation Studies Proceedings of ICTTS 2002. ASCE*, 2002, 2: 1369-1376.
- [8] CHIOU S W. Bilevel programming for the continuous transport network design problem[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2005, 39(4): 361-383.
- [9] UKKUSURI S V, MATHEW T V, WALLER S. Travis. Robust transportation network design under demand uncertainty[J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, 22(1): 6-18.
- [10] MUDCHANATONGSUK S, ORDONEZ F, LIU J. Robust solutions for network design under transportation cost and demand uncertainty [J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2008, 59(5): 652-662.
- [11] WOXENIUS J. Generic framework for transport network designs: Applications and treatment in intermodal freight transport literature [J]. *Transport Reviews*, 2007, 27: 733-749.
- [12] YEATES M. *Main Street: Windsor To Quebec City* [M]. Ottawa, Canada: The Macmillan Company of Canada Limited, 1975.
- [13] CRAINIC T G, LAPORTE G. Planning models for freight transportation[J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 97(3): 409-438.
- [14] LOUREIRO C F G. Modeling investment options for multimodal transportation networks: Loureiro, Carlos Felipe Grangeiro [D]. Knoxville: University of Tennessee, 1994.
- [15] SOUTHWORTH F, PETERSON B E. Intermodal and international freight network modeling[J]. *Transportation Research Part C*, 2000, 8(1-6): 147-166.
- [16] TAN A, BOWDEN R, ZHANG Y L. Virtual simulation of statewide intermodal freight traffic [J]. *Transportation Research Record*, 2004, (1873): 53-63.
- [17] LENNART F, HANS A, HELLDIN J O. Planners' views on cumulative effects. A focus-group study concerning transport infrastructure planning in Sweden[J]. *Land Use Policy*, 2013, 30(1): 243-253.
- [18] MANUEL L, ROSA M A, EMILIO O. et al. Road-corridor planning in the EIA procedure in Spain. A review of case studies[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2014, 44: 11-21.
- [19] 王庆云. 关于综合交通网规划的方法与实践[J]. *交通运输系统工程与信息*. 2005, 2(5): 11-15.
- [20] 刘强. 我国综合运输网络布局规划研究[J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2009, 33(2): 203-206.
- [21] 吴群琪, 孙启鹏. 综合运输规划理论的基点[J]. *交通运输工程学报*, 2006, 6(3): 122-126.
- [22] 吴群琪, 李兆磊. 运输需求视角的综合交通规划理论框架研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 1(11): 13-19.
- [23] 高桂凤. 区域交通网络布局形态与需求特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2007.
- [24] 熊巧. 区域综合交通网络布局优化与决策研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [25] 刘强, 陆化普, 王庆云. 区域运输通道布局优化三层规划模型[J]. *清华大学学报 (自然科学版)*. 2010, 50(6): 815-819.
- [26] 国家发展改革委交通运输部《综合交通网络布局规划研究》课题组. 我国综合交通网络布局规划研究[J]. *综合运输*, 2005, (10): 4-6.
- [27] 王庆云. 交通运输与经济发展的内在联系[J]. *综合运输*, 2003, (7): 4-7.
- [28] 荣朝和. 综合交通运输体系研究-认知与建构[M]. 北京: 经济科学出版社, 2013.
- [29] 国家发改委主要负责人就我国中长期综合交通网规划公布答记者问[EB/OL]. 2007-11-12. [www.ndrc.gov.cn](http://www.ndrc.gov.cn)
- [30] 徐宪平. 我国综合交通运输体系构建的理论与实践[M]. 北京: 人民出版社, 2012.
- [31] VERMA M, VERTER V. A lead-time based approach for planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 202(3): 696-706.
- [32] CHANG T. Best routes selection in international intermodal networks [J]. *Computers and Operations Research*, 2008, 35(9): 2877-2891.
- [33] BAI R, KENDALL G, QU R. et al. Tabu assisted guided local search approaches for freight service network design[J]. *Information Sciences*, 2012, 189: 266-281.
- [34] LE L, RUDY R N, BART D S. Intermodal freight transport planning - A receding horizon control approach[J]. *Transportation Research*

- Part C, 2015, 60: 77-95.
- [35] 沈睿, 刘军, 季常煦. 货物运输服务网络设计频度模型的研究[J]. 北京交通大学学报. 2006, 30(6): 36-40.
- [36] 申永生, 何世伟, 王保华, 等. 综合运输体系货运流量分配与网络综合优化[J]. 综合运输. 2010, (12): 49-52.
- [37] 黄纯辉. 食品冷链物流运输服务网络优化研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- [38] VERMA M, VERTER V, ZUFFEREY N. A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials[J]. Transportation Research Part E, 2012, 48(1): 132-149.
- [39] BEKTAS T, CHOUMAN M, CRAINIC T G. Lagrangean-based decomposition algorithms for multicommodity network design problems with penalized constraints[J]. Networks, 2010, 55(3): 171-180.
- [40] ZHU E, CRAINIC T, TEODOR G. et al. Scheduled service network design for freight rail transportation[J]. Operations Research, 2014, 62(2): 383-400.
- [41] AYAR B, YAMAN H. An intermodal multicommodity routing problem with scheduled services[J]. Computational Optimization and Applications, 2012, 53(1): 131-153.
- [42] ALAN L E, JUAN C M, MARTIN S. Global intermodal tank container management for the chemical industry[J]. Transportation Research Part E, 2005, 41(6): 551-556.
- [43] CHANG H, JULA H, CHASSIAKOS A. et al. A heuristic solution for the empty container substitution problem[J]. Transportation Research Part E, 2008, 44(2): 203-216.
- [44] BANDEIRA D L, BECKER J L, BORENSTEIN D. A dss for integrated distribution of empty and full containers[J]. Decision Support Systems, 2009, 47(4): 383-397.
- [45] TOPALOGLU H, POWELL W B. Sensitivity analysis of a dynamic fleet management model using approximate dynamic programming[J]. Operations Research, 2007, 55(2): 319-331.
- [46] 李冰. 随机动态车队管理问题[J]. 系统工程. 2005, 23(1): 96-101.
- [47] 周长峰, 谭跃进, 廖良才. 行驶时间不定条件下动态车队管理问题随机模型及算法[J]. 系统管理学报. 2007, 16(4): 432-436.
- [48] GROOTHEDDE B, RUIJGROK C, TAVASSZY L. Towards collaborative, intermodal hub networks. A case study in the fast moving consumer goods market[J]. Transportation Research Part E, 2005, 41(6): 567-583.
- [49] MEISEL F, KIRSCHSTEIN T, BIERWIRTH C. Integrated production and intermodal transportation planning in large scale production - distribution-networks[J]. Transportation Research Part E, 2013, 60: 62-78.
- [50] VERMA M, VERTER V, ZUFFEREY N. A bi-objective model for planning and managing rail-truck intermodal transportation of hazardous materials[J]. Transportation Research Part E, 2012, 48(1): 132-149.
- [51] 张迦南, 赵鹏. 综合运输通道旅客出行方式选择行为研究[J]. 中国铁道科学. 2012, 33(3): 123-131.
- [52] 孙启鹏, 朱磊, 陈波. 基于动态广义费用的客运通道交通方式选择 Logit 模型[J]. 交通运输系统工程与信息. 2013, 13(4): 15-22.
- [53] ANA I A, MARÍA F V, LEANDRO G M, et al. Modelling mode choice for freight transport using advanced choice experiments[J]. Transportation Research Part A, 2015, 75: 252-267.