

文章编号:1671-8879(2012)05-0085-06

基于四因素法的公路交通网络布局优化模型

苏国辉,吴群琪,陈文强

(1. 长安大学 经济管理学院,陕西 西安 710064; 2. 厦门市政府办公厅,福建 厦门 361018)

摘要:为提高公路网整体运行效率,从交通网络布局不合理的外在表现形式——畅通性(拥堵、过度畅通)问题分析入手,提出交通网络布局不合理是由于路网布局设计时未能考虑运输需求特性约束,导致现实路面布局与运输流不匹配。以路网整体效率最优为目标,以运输流和交通流匹配为网络优化手段,构建以线路优化成本、占用土地机会成本、运输成本和路网效率四因素为变量的交通网络布局优化比选模型,并利用实例验证模型的科学性。结果表明:利用基于四因素的公路交通网络布局优化方法,优化后的路网效率比传统的优化效果高出 60%,提出的模型方法具有较好的操作性和科学性。

关键词:交通工程;交通网络;网络效率;四因素;网络布局

中图分类号:U491 **文献标志码:**A

Traffic networks layout and optimization model in transportation channel based on four-factor method

SU Guo-hui, WU Qun-qi, CHEN Wen-qiang

(1. School of Economics and Management, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;
2. General Office, Xiamen Municipal Government, Xiamen 361015, Fujian, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of the overall road network, from the external manifestation of the unreasonable transportation network layout (congestion, over-smooth) problem, this paper analyzed the underlying causes of its formation. It was pointed that the reasons were the road network layout design failed to consider the transportation demand and the transportation flow didn't match the traffic flow. The optimization model of traffic network was built with four factors as decision variables, such as expense of section optimizing, opportunity cost of land occupation, transportation fee and network efficiency. Analysis result shows that the service efficiency of transportation networks after optimization is 60% more than that of traditional planning, so the model is reasonable feasible. 5 tabs, 2 figs, 10 refs.

Key words: traffic engineering; transportation network; network efficiency; four factors; network layout

0 引言

公路运输作为综合运输体系的重要组成部分,

对国民经济和社会发展至关重要^[1]。改革开放以来,中国公路交通基础设施发展迅速,公路网络规模不断扩大,网络结构得到改善,设施装备水平较大提

高,运输能力显著增强。但也凸显出一些问题,例如,公路网络布局不合理:一些路段交通量过于饱和,造成“通而不畅”,甚至拥堵,路段负荷过大;而一些路段“少车问津”,车流量极少,路段利用率极低,资源闲置和浪费^[2]。这些问题都影响了公路网络系统功能的发挥。随着社会经济的快速发展,人们对于运输需要更多的转向“质量、效率”方面,要求更方便、更及时、更节省,“质量、效率”成为影响交通行业发展的主导要素,而公路交通技术经济特性决定了其要承担更多的需求,继而对公路网的效率输出提出了更高的要求^[3]。因此,优化交通网络布局,发挥公路网络系统功能,是目前亟需解决的问题之一。目前,关于公路交通网络优化研究成果很多,例如,Bell等提出用双层数学规划方法来求解路网整体优化问题^[3];随后,Chen等提出了用户最优约束的路网优化模型^[4];陈艳艳等则针对公路网设计了基于正交枚举法的启发式算法^[5];此外,Daganza等也为路网优化研究做了大量的工作^[6-8]。但大部分研究采用“需求追随型”的模式:根据差异点的指示,提出相应的优化对策,而对造成差异点的原因没有分析,这样提出的对策极有可能陷入恶性循环之中,产生“唐斯-汤姆森悖论”^[9]。为此,本文突破传统思维,从交通网络布局不合理的外在表现形式——畅通性(拥堵、过度畅通)问题分析入手,研究其形成的内在原因,以路网整体效率最优为目标,以运输流和交通流匹配为网络优化手段,构建交通网络布局优化比选模型,并利用实例验证模型的科学性。

1 公路交通网络布局不合理表现形式——畅通性问题分析

公路交通网络布局问题主要表现为公路的畅通性问题:通的程度和通的效率。通的程度,即交通流在路网上的运行状况,一般可通过平均运行速度、饱和度、交通密度、平均行程延误等来反映;通的效率是指路网运行的效率。通的程度是相对于需求主体而言的,而通的效率主要针对线路的供求主体,2个指标各有所侧重,且通过“交通量”、“路网通行能力”因素相互影响。一般情况下,路网通行能力越大,交通量越小,车辆的平均运行速度就越大,畅通的程度就越好;反之亦然。但从通行效率来讲,路网通行能力不是越大越好,也不是越小越好。

一般情况下,路网通的程度基本上可以反映路网通的效率,因此,路段的畅通性问题评价可以转化为路段的通的程度评价。通的程度,一般可通过平

均运行速度、饱和度、交通密度、平均行程延误等来反映;本文取饱和度因素来评价。影响饱和度取值因素较多,主要有路段通行能力、车流量、行车速度、工程设计、行车环境、自然环境、突发事件等因素。考虑到研究的可操作性,本文取交通量和路段通行能力作为决定饱和度值的因素。饱和度与影响因素之间的函数关系为

$$S_i = \frac{v_i}{c_i} \quad (1)$$

式中: S_i 为路段*i*的饱和度; v_i 为*i*路段的交通量; c_i 为*i*路段的通行能力。

饱和度与输出效率的关系如图1所示。

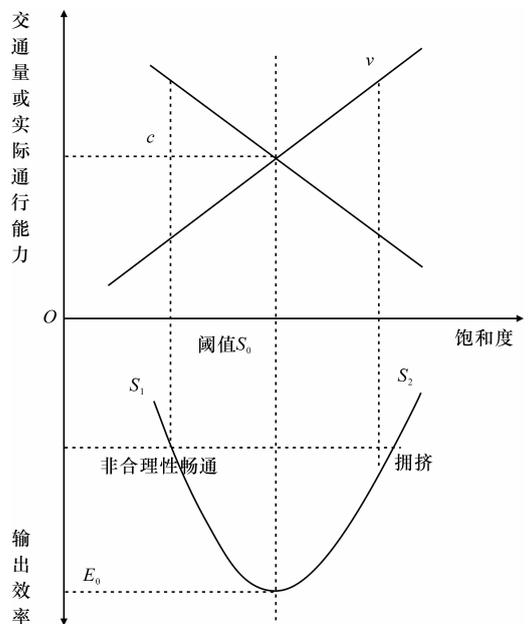


图1 饱和度与输出效率的关系

Fig. 1 The relationship of saturation and output efficiency

通过图1可以看出,交通网络布局中的畅通性问题主要有2种形式,拥堵和非合理性畅通, S_i 取某一阈值(S_0)时,*i*路段的服务水平好,此时对于路段的整体效率是最好的,对经济贡献也是最大的。如果 S_i 超过(拥堵)或低于(过度畅通) S_0 时,*i*路段的整体效率 E_i 输出不是最优($E_0 > E_i, i = 1, 2, \dots, n$, 且 $i \neq 0$), E_0 为输出效率临界值。

所谓的拥堵是指一定时间内的交通量远远大于路段的通行能力,导致部分交通量滞留在道路上,饱和度太高,平均车速小于一定的临界值,此时道路交通运行状况很差。拥堵意味着此路段交通需求大于交通供给,造成路段通行能力供不应求的原因(本文不分析由于交通事故、恶劣气候等偶发性因素造成的拥堵),一是路段技术等级低,通行能力有限;二是

交通需求过大;三是交通网络布局不合理(考虑通道内外需求交流规律)。如果在交通网络布局合理的前提下,线路拥堵是由路线技术等级过低造成的,可以按照交通规划理论对该线路进行改造或新建新线路。如果拥堵是由交通网络布局不合理造成的,就不能简单利用规划理论进行处理,而是要在了解造成拥堵的原因的前提下,对症下药,提出相应的解决对策。中国交通网络布局的主导思想是连通所有的重要节点,点线成网,应该不存在交通网络布局的合理性问题。但实际问题很多,造成交通网络布局不合理的原因主要有:①中国的国情决定了交通资源、资金短缺将长期存在,在资金、资源约束的前提下,要连通所有的重要节点,线路的技术等级和节点之间的空间联系量就可能出现不匹配情形,这种状况在一定程度上是由中国特定时期的社会经济发展水平所决定的,具有客观性;②线路规划过程中以交通量为核心数据,不重视需求的层次性,交通流和运输流不匹配,导致交通网络结构布局不合理,需求和供给的层次性失衡。

交通网络分布如图 2 所示,假设 A、B、C 为重度需求点, D、E、F、G 为一般需求节点,观察发现路段 AB 为容易发生拥堵路段。已知需求节点之间的空间运输联系(运输流)矩阵见表 1;需求节点间的交通阻抗见表 2(为研究方便,假设所有节点之间的路线技术等级是一样的,交通阻抗直接取 2 点之间的物理距离)。

选择非均衡分配方法中的全有全无法进行交通量分配,得出交通网络中需求节点之间的运输需求实现时的途径最短路径矩阵见表 3。

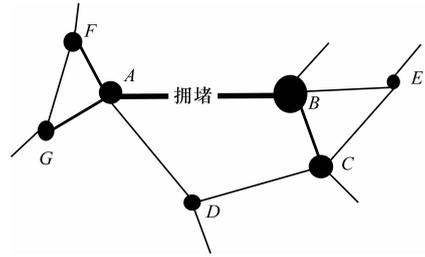


图 2 交通网络分布

Fig. 2 Transportation network

表 1 运输流分布矩阵

Tab. 1 Transport stream distribution matrix

节点	A	B	C	D	E	F	G	小计
A	0	q_{12}	q_{13}	q_{14}	q_{15}	q_{16}	q_{17}	P_1
B	q_{21}	0	q_{23}	q_{24}	q_{25}	q_{26}	q_{27}	P_2
C	q_{31}	q_{32}	0	q_{34}	q_{35}	q_{36}	q_{37}	P_3
D	q_{41}	q_{42}	q_{43}	0	q_{45}	q_{46}	q_{47}	P_4
E	q_{51}	q_{52}	q_{53}	q_{54}	0	q_{56}	q_{57}	P_5
F	q_{61}	q_{62}	q_{63}	q_{64}	q_{65}	0	q_{67}	P_6
G	q_{71}	q_{72}	q_{73}	q_{74}	q_{75}	q_{76}	0	P_7
小计	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6	A_7	Q

表 2 需求节点间最小阻抗矩阵

Tab. 2 Minimum impedance matrix between demand nodes

节点	A	B	C	D	E	F	G
A	0	5	∞	4	∞	1	2
B	5	0	2	∞	3	∞	∞
C	∞	2	0	4	3	∞	∞
D	4	∞	4	0	∞	∞	∞
E	∞	3	3	∞	0	∞	∞
F	1	∞	∞	∞	∞	0	3
G	2	∞	∞	∞	∞	3	0

表 3 运输节点间最短路径矩阵

Tab. 3 Shortest path matrix

节点	A	B	C	D	E	F	G
A	0	A-B	A-B-C	A-D	A-B-E	A-F	A-G
B	B-A	0	B-C	B-C-D	B-E	B-A-F	B-G
C	C-B-A	C-B	0	C-D	C-E	C-B-A-F	C-B-A-G
D	D-A	D-C-B	D-C	0	D-C-E	D-A-F	D-A-G
E	E-B-A	E-B	E-C	E-C-D	0	E-B-A-F	E-B-A-G
F	F-A	F-A-B	F-A-B-C	F-A-D	F-A-B-E	0	F-G
G	G-A	G-A-B	G-A-B-C	G-A-D	G-A-B-E	G-F	0

注:方框中节点表示途径路线 AB 的运输需求量。

根据运输需求实现时途经的最短路径矩阵,对途经路段 AB 的运输量(即表 3 中方框里的运输需求量)进行交通量转换,并对其进行叠加。令 AB 路段上叠加的交通量为 M_{AB} ,则

$$M_{AB} = q'_{12} + q'_{13} + q'_{15} + q'_{21} + q'_{26} + q'_{31} + q'_{36} + q'_{37} + q'_{51} + q'_{56} + q'_{57} + q'_{62} + q'_{63} + q'_{64} + q'_{72} + q'_{73} + q'_{75} \quad (2)$$

式中: q'_{ij} 为运输需求量 q_{ij} 对应的交通量。

如果需求节点之间的运输流和交通流完全匹配的话(所有节点都有相应线路进行连通),此时路段AB上交通量 $M'_{AB} = q'_{12} + q'_{21}$, AB路段就有可能不发生拥堵。由此可以看出, AB路段发生拥堵的原因是, 此路段上承担了其他节点之间的运输联系, 之所以承担了其他相关需求节点之间的运输联系, 根本原因是这些需求节点之间没有直接连线(或者连接线不能满足运输需求的技术经济特征的要求), 即运输流和交通流的不匹配。交通流是交通网络布局的结果, 因此, 交通网络布局与运输流的“不匹配”是产生拥堵的根本原因。

非合理性畅通是拥堵的对立面, 表现为路段饱和度过低, 车速很高, 道路交通运行状况好。非合理性畅通对于路段上车辆来说是理想的, 但是从路网运行效率角度来讲, 却是低效率、不经济的。造成路段不合理畅通的原因有2个, 一是总需求不足; 二是对应层次需求不足。总需求不足, 意味着道路运力等级配置过高; 对应层次需求不足, 意味着线路技术等级配置过高。

交通网络发生拥堵问题和非合理畅通问题内在原因在于交通网络布局不合理性, 即路网布局没有充分考虑运输需求特性约束, 导致现实路网布局与运输流的不匹配。这种“不匹配”既有“质”又有“量”范畴, 也有“方向性”范畴。

2 基于四因素法的公路交通网络布局优化比选模型

按照传统的优化理论, 路段发生拥堵, 根据路段的需求曲线, 适时对路段进行改进、新建或引线, 这种“需求追随型”的优化策略结果, 事实证明对于整个路网效率输出不是最优的。

本文将从项目实施的经济性角度, 以路段优化费用、占用土地机会成本、运输费用和路网效率四因素为决策变量, 构建交通网络畅通性问题优化比选模型, 以解决运输通道结构优化问题。

假设通道交通网络中有 s 个节点 $v_i (i = 1, \dots, s)$, 经过分析预测节点之间的运输联系规律, 获取规划期任意时点、任意2个节点之间线路的路况信息: 拥堵和非拥堵。本文引入相应的变量 a_{ij} 为

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{拥堵路段} \\ 0 & \text{正常路段} \end{cases} \quad (3)$$

式中: 1表示点 v_i 与 v_j 之间的路线是有问题的, 可能需要改扩建或新建连接线; 0表示正常。

规划期的整个交通网络中各节点之间线路畅通

性问题, 可以用邻接矩阵 $A_G = (a_{ij})_{s \times s}$ 表示为

$$A_G = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ 0 & 0 & 1 & 1 & \cdots & 0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

拥堵路段优化方案有2种: 改扩建和新建。每种优化方案对应的路线单位造价为 z_i , 设计宽度为 k_i , 设计交通量为 y_i , 单位运输费用为 $h_i (i = 1, 2)$; 土地等级共分为 r 种, 每种等级对应的单位面积占用(征地)费用为 $t_i (i = 1, \dots, r)$ 。点 v_i 与点 v_j 之间 ($i \neq j$) 的道路长度为 l_{ij} , 相应的交通量为 $\bar{y}_{ij} = F(a_{ij})$, 它是与 a_{ij} 有关的函数, 表示交通分配后的路段交通量; 而 \bar{y}_{ij} 表示此路段优化方案确定后设计交通量(即取值为某个 y_i), C_i 为该路段优化方案费用总和(包括该路段的建设投资、运输费用、占用土地费用)。假设需要优化的路段均为直线, 且在地图上建立二维直角欧氏坐标, 则 l_{ij} 即为两点间的直线距离 $d(v_i, v_j)$ 。假设 Q_1 表示路段优化建设费用, 表达式为

$$Q_1 = \sum_{j=1, j \neq i=1}^s \sum_{i=1}^s \sum_{i'=1}^p a_{ij} l_{ij} z_{i'} \quad (5)$$

设 Q_2 表示土地占用总费用, 表达式为

$$Q_2 = \sum_{j=1, j \neq i=1}^s \sum_{i=1}^s a_{ij} l_{ij} \left(\sum_{j'=1}^y \sum_{i'=1}^p \delta_{j'} k_i t_{i'} \right) \quad (6)$$

且 $\delta_{j'} \in [0, 1]$, $\sum_{j'=1}^y \delta_{j'} = 1$ 为待定系数。

设 Q_3 表示运输费用, 表达式为

$$Q_3 = \sum_{j=1, j \neq i=1}^s \sum_{i=1}^s a_{ij} l_{ij} \bar{y}_{ij} \left(\sum_{i'=1}^p T_{i'} h_{i'} \right) \quad (7)$$

且 $T_{i'} \in [0, 1]$, $\sum_{i'=1}^p T_{i'} = 1$ 为待定系数。

设 U 表示路网效率, 表达式为

$$U = \sum_{i=1}^n P_i / C_{X_i} \quad (8)$$

式中: U 为路网效率; P_i 为第 i 路段完成的运输周转量; C_{X_i} 为第 i 路段通行能力; n 为路网内路段个数。

通道交通网络局部畅通性问题优化的目标, 使优化路段工程建设投资、运输费用、占用土地费用最小, 同时保证整体路网效率输出最大。本文引入价值工程理论来解决这个问题。

价值工程的“价值”的含义是评价某一事物与实现它的耗费相比合理程度的尺度。在工程经济领域, 价值可以定义为产品的功能与成本的比值, 这里

的“产品”特指各优化方案。价值的表达式为

$$V = F/C \quad (9)$$

式中: V 为产品价值; F 为产品功能; C 为产品成本。

设 $F_i (i = 1, 2)$ 代表优化方案的功能,即优化项目实施前后路网效率的增加价值体现。其计算公式为

$$F_i = U' - U \quad (10)$$

式中: U' 为优化方案实施后预期的路网效率; U 为优化方案实施前的路网效率。

以 C_i 为该路段优化方案的成本,优化项目发生的成本由项目建设成本、项目占地机会成本、运输费用来体现。其计算公式为

$$C_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 \quad (11)$$

但是,在现实决策过程中,不同的决策者因为项目所处地域、时期、时空环境、资源禀赋等不同,对这 4 种因素有不同的价值评价倾向。比如,平原地区决策者对于优化项目占用土地价值要比山区赋予更多的考虑;某一时期可能更注重建设资金,而更少考量运输成本的大小,选择绕道而不是直线;目前发达地区打造小时经济圈,经济联系紧密,所以城市群内的公路优化应该更关注运输成本大小^[10]。综上所述,对以上模型可调整为

$$C_i = a_1 Q_1 + a_2 Q_2 + a_3 Q_3 \quad (12)$$

式中: a_1 、 a_2 、 a_3 分别为 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 价值调整系数,其值大小要视实际情况而定。

以 V_i 代表优化方案实施的价值,根据价值工程理论,其计算公式为

$$V_i = \frac{F_i}{C_i} = \frac{U' - U}{a_1 Q_1 + a_2 Q_2 + a_3 Q_3} \quad (13)$$

从优化方案的效益角度审视式(13)计算过程, V_i 反映了优化方案成本对路网效率的贡献度。

根据以上分析,拥堵问题的最优方案是 V_i 最大的方案,其比选的目标函数为

$$V = \max\{V_i\}, (i = 1, 2) \text{ 且} \\ \text{s. t. } \begin{cases} \bar{y}_{ij} > r\bar{y}_{ij} (i, j = 1, 2, \dots, s, i \neq j) \\ a_{ij} \in \{0, 1\}, d_{i'} > 0, i' = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (14)$$

3 实证研究

选择广湛(广州—湛江)运输通道为研究对象。根据广湛运输通道内的交通网络现状,结合需求分析结果,得出广湛通道交通方式结构和交通网络布局暂时没有“无”的问题,即通道内的各个重要节点之间目前都有直接的连通线路。因此,本文主要研究在“有”的前提下通过对局部路段进行优化配置来实现交通网络优化。

3.1 关键问题识别与分析

通过对广湛运输通道交通网络分析,分别得出通道内节点在 2015、2020 年饱和度大于 1 的路段,并确定其为拥堵路段,见表 4、表 5。可以看出 G325 上广州—阳江段是拥堵的。在进行方案优化中,本文将结合各拥堵路段实际情况进行路网优化。

表 4 2015 年 G325 线预测拥堵路段

Tab. 4 Forecast congestion in road G325 in 2015

路段	饱和度
广州—佛山	1.537 0
佛山—江门	2.430 2
江门—开平	1.661 5
开平—恩平	1.428 7
恩平—阳江	1.834 8

表 5 2020 年 G325 线预测拥堵路段

Tab. 5 Forecast congestion in road G325 in 2020

路段	饱和度
广州—佛山	2.055 1
佛山—江门	3.196 0
江门—开平	2.165 6
开平—恩平	1.811 0
恩平—阳江	2.324 7

从广湛运输通道内 21 个重要节点之间的空间运输联系(运输流)矩阵所提供的各节点运输量数据,结合各个路段的阻抗,可以很直观地找出造成相关路段拥堵的原因。G325 广州—阳江段拥堵的原因:①G325 是国道,其路段的技术等级低,通行能力有限;②G325 上交通需求过大,尤其体现在广州—阳江路段,在修建 G15 之前广湛之间就存在大量的货、客运输需求,G325 在“量”和“质”上都不能满足运输需求,所以修建了 G15 进行分流,但现状是,由于 G325 收费低于 G15,大部分货车和部分客车还是倾向于选择 G325,G15 分流效果不明显。

3.2 公路拥堵优化方案

对于拥堵路段,结合广湛运输通道的实际路网情况,考虑采用改建或扩建的办法进行优化。考虑改建或扩建 G325 国道的广州—阳江段,以提高其通行能力,满足规划期各路段的交通需求,而不改变现有路网线路布局。

根据评价结果,广湛运输通道中有问题路段为 G325(广州—阳江段)。根据优化比选模型,结合有关数据对有问题路段进行优化。

G325 广州—阳江路段地处于珠江三角洲经济发展水平相对较高地区,各地区之间的经济联系比较紧密,地区之间的交通运输量比较大,考虑到运输成本以及超载超限的原因,选择高速公路的相对较

少,使得广州—阳江复合路段的交通量产生了结构性失衡。

(1)2015年广州—阳江路段畅通性问题优化方案设计

优化方案一:适当降低G15广州—阳江路段的收费标准,分流超过G325设计通行能力的交通量,优化成本为 $C_1=12.6525$ 亿元,效用值为0.0435。

优化方案二:对G325进行改扩建,使得G325的设计通行能力达到2015年预测的交通量,优化的总成本 $C_2=73.5863$ 亿元,效用值为0.0063。

根据价值工程理论,方案一单位的优化费用的效用值0.0435大于方案二的单位成本优化效用值0.0063,效用增加85%。因此建议采用方案一对广州—阳江路段进行优化。

(2)2020年广州—阳江路段畅通性问题优化方案设计

优化方案一:计算广州—阳江复合通道供需均衡系数,对于供需均衡系数小于1的拥挤路段进行扩建,扩建以后仍然超过道路设计通行能力的路段,用其平行线路G15对其进行分流。扩建以后已经基本解决了广州—阳江复合路网供给不足的问题,接下来就要进行结构性调整,G15分流一部分流量。总的优化成本 $C_1=40.4875$ 亿元,根据价值工程理论,其优化效用值为0.0179。

优化方案二:对G325广州—阳江段进行扩建,以满足2020年预测交通量。由于广佛同城化的不断推进,2020年G325广州—佛山路段近似可以认为是城市内部道路。因此,解决2020年G325广州—佛山交通拥挤问题,一方面可以通过扩建,另一方面,可以修建城市内部的快速路,或者通过交通引导等方式来解决。根据综合路网效率及优化成本的计算方法,总的优化成本 $C_2=80.4155$ 亿元,采用方案二的优化效用值为0.0071。

根据价值工程理论,方案一单位优化费用的效用0.0179大于方案二单位成本优化效用0.0071,效用增加60%,因此建议采用方案一对广州—阳江路段进行优化。

4 结 语

(1)从交通网络布局不合理的外在表现形式——畅通性(拥堵、过度畅通)问题分析入手,研究其形成的内在原因,以路网整体效率最优为目标,以运输流和交通流匹配为网络优化手段,构建以线路优化成本、占用土地机会成本、运输成本和路网效率

四因素为变量的交通网络布局优化比选模型,并利用实例验证模型的科学性。

(2)基于四因素的公路交通网络布局优化方法具有很好的效果,比传统优化结果高出60%。

参考文献:

References:

- [1] 王庆云. 交通运输规划模型的基本原理及应用[J]. 交通运输系统工程与信息, 2002, 2(1): 20-23, 29.
WANG Qing-yun. The radical principle and applying of transport plan modeling [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2002, 2(1): 20-23, 29. (in Chinese)
- [2] 王元庆. 公路网规划理论的比较研究[J]. 西安公路交通大学学报, 1997, 17(2B): 39-43.
WANG Yuan-qing. A comparative study on the theories of highway plannings[J]. Journal of Xi'an Highway University, 1997, 17(2B): 39-43. (in Chinese)
- [3] Bell M G H, Lida Y. Transportation network analysis [M]. London: John Wiley Sons England, 1997.
- [4] Chen H K, Hsueh C F. A model and a algorithm for the dynamic user-optimal route choice problem[J]. Transportation Research Board, 1998, 32(1): 219-234.
- [5] 陈艳艳, 梁颖, 刘小明. 公路网布局优化设计的正交枚举法[J]. 土木工程学报, 2003, 36(7): 14-17.
CHEN Yan-yan, LIANG Ying, LIU Xiao-ming. Orthogonal enumeration method for the layout scheme optimization of road network[J]. China Civil Engineering Journal, 2003, 36(7): 14-17. (in Chinese)
- [6] Daganzo C F. The cell transportation model [J]. Transportation Research Board, 1995, 29(2): 79-93.
- [7] Daganzo C F. Properties of link travel time functions under dynamic loads [J]. Transportation Research Board, 1995, 29(1): 277-286.
- [8] 罗霞, 黄平. 高速公路网规划的几个关键问题[J]. 中国公路学报, 2001, 14(2): 96-99.
LUO Xia, HUANG Ping. Several key questions of freeway network planning [J]. China Journal of Highway and Transport, 2001, 14(2): 96-99. (in Chinese)
- [9] Mills E S. Handbook of regional and urban economics [M]. Amsterdam: North Holland, 2003.
- [10] 张国伍. 我国综合交通若干理论与实践问题分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(2): 1-7.
ZHANG Guo-wu. Analysis on some issues of compressivetransport system of China [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(2): 1-7. (in Chinese)