

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2023062124061982

文章编号: 1674-599X(2024)03-0135-09

引用格式: 郑勋, 张政, 郭鹏辉. 路径选择准则对随机供需路网运行效率的影响[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(3): 135-143.

Citation: ZHENG Xun, ZHANG Zheng, GUO Penghui. The influence of route choice criteria on the operating efficiency for road network with stochastic supply and demand[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 135-143.

## 路径选择准则对随机供需路网运行效率的影响

郑勋<sup>1</sup>, 张政<sup>2</sup>, 郭鹏辉<sup>1</sup>

(1. 湖南省农林工业勘察设计研究总院, 湖南 长沙 410007;

2. 深圳市智慧城市科技发展集团有限公司, 广东 深圳 518046)

**摘要:** 为研究不同路径选择准则对随机供需路网运行效率的影响, 在假定需求服从对数正态分布、容量服从 Beta 分布的前提下, 构建了三种路径选择准则: 期望行程时间最短、行程时间预算最短以及超预算期望行程时间最短。基于这三种准则, 分别构建了相应的交通分配变分不等式模型, 并设计了求解算法。从交通周转角度出发, 提出了路网运行效率的测算方法。通过算例分析, 探讨了三种路径选择准则以及路段容量降级程度、需求结构、需求总量和行程时间可靠度对路网运行效率的影响。研究表明: 期望行程时间最短择路准则下的路网运行效率最高, 而超预算期望行程时间最短准则下的路网运行效率最低; 无论采用哪种择路准则, 路网运行效率均随路段容量降级程度的增加而显著下降; 当路段容量降级程度与需求的“均值-方差比”一定时, 在三种路径选择准则下, 均存在一种特定的需求结构与总量, 使运行效率达到最大值; 在行程时间预算和超预算期望行程时间最短准则下, 路网运行效率随行程时间可靠度的增加而显著下降。

**关键词:** 供需不确定性; 随机路网均衡; 期望行程时间; 行程时间预算; 超预算期望行程时间; 路网运行效率

中图分类号: U491

文献标志码: A

## The influence of route choice criteria on the operating efficiency for road network with stochastic supply and demand

ZHENG Xun<sup>1</sup>, ZHANG Zheng<sup>2</sup>, GUO Penghui<sup>1</sup>

(1. Hunan Prospecting Designing & Research General Institute for Agriculture Forestry & Industry, Changsha 410007  
China; 2. Shenzhen Smart City Technology Development Group Co., Ltd., Shenzhen 518046, China)

**Abstract:** To investigate the impact of different route choice criteria on the operational efficiency of road networks, three criteria based on mean travel time, travel time budget, and mean-excess travel time are established, assuming that OD (origin-destination) demand follows a Log-normal distribution and link capacities follow a Beta distribution. Traffic assignment variation inequality models are constructed according to those criteria, and algorithms are developed to solve them. From the perspective of traffic turnover, a calculation method for road network operating efficiency is proposed. The influence of three route choice criteria, degree of link capacity degradation, demand structure, demand quantity, and travel time reliability on road network operating efficiency are analyzed through case studies. The results show that: 1) Road network operational efficiency is highest under the mean travel time (MTT) criterion and lowest under the mean-excess travel time (METT) criterion; 2) Operational efficiency decreases notably as link capacity degradation increases; 3) There exists a

收稿日期: 2023-06-21

基金项目: 湖南省教育厅重点项目 (20A023)

通信作者: 郑勋 (1982—), 男, 高级工程师, 主要从事道路交通方面的研究工作。E-mail: 87536550@qq.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

specific demand structure and volume that maximizes operational efficiency under each criterion when the degree of link capacity degradation and demand mean-variance ratio are fixed; 4) For travel time budget (TTB) and METT route choice criteria, operational efficiency decreases significantly as travel time reliability increases.

**Key words:** uncertainty in traffic supply and demand; stochastic road network equilibrium; mean travel time; travel time budget; mean-excess travel time; road network operating efficiency

随着中国经济社会的快速发展及汽车保有量的持续增长,城市交通需求增长迅猛,由此带来的交通拥堵也日益严重,甚至影响到城市经济社会的正常运转。因此,如何确保交通流的高效运行,提高交通网络运行效率已成为研究者关注的焦点。

关于路网运行效率,国内外学者开展了大量研究。俞礼军等<sup>[1]</sup>分别从路网的生产率、机动性、可达性和效用4个维度提出了4种效率测度方法。叶彭姚等<sup>[2]</sup>从微观层面的断面、中观层面的路段和宏观层面的路网出发,提出了对应的效率评价指标与方法。LEVINSON<sup>[3]</sup>采用可达性、机动性、公平性等指标综合评价交通网络效率。龙科军等<sup>[4]</sup>通过同时考虑路网投入与运行产出指标,基于数据包络分析法建立了城市路网效率评价体系。余孝军等<sup>[5]</sup>采用网络均衡分析方法,综合考虑OD(origin-destination)需求、出行成本及路段流量,分别提出了固定需求和弹性需求下的路网效率度量方法。NAGURNEY等<sup>[6-7]</sup>、过秀成等<sup>[8]</sup>、LATORA等<sup>[9]</sup>、秦进等<sup>[10]</sup>分别从OD对或路段出发,采用单位出行成本能够服务的出行者数量或车公里数来评价路网效率。姚远等<sup>[11]</sup>以上海市快速路为研究对象,研究了基于线圈数据的效率体征指标计算方法,并分析了降雨对路网运行效率的影响。张志清等<sup>[12]</sup>用速度偏差率刻画了网络中道路的运行效率,并探讨了效率和时空资源对路网可靠性的影响。ZHANG等<sup>[13]</sup>基于效率指标研究了不同路网水平下的道路维修计划优化方法。

尽管关于路网运行效率的评价和应用研究已取得较大进展,但仍存在以下不足:①忽视了供需的随机性,往往以非降级路网和稳定的交通需求为前提,但受供需随机性影响而导致的行程时间可变性对交通系统的评估具有显著影响<sup>[14-15]</sup>;②大多数研究侧重于路网规模、出行费用等方面,而忽略了与交通网络效率密切相关的交通流量分布。因此,本文假定需求服从对数正态分布、路段容量服从Beta分布,提出了量化路网运行效率测算方法,并

深入比较分析了三种路径选择准则以及路段容量降级程度、需求结构、需求总量和行程时间可靠度对路网运行效率的影响。

## 1 路网运行效率评价方法

设交通网络为赋权有向图 $G=(N,A)$ ,其中 $N$ 为节点集合, $A$ 为路段集合;用 $W$ 表示OD对的集合, $w$ 为OD对; $n_A$ 和 $n_N$ 分别表示网络路段和节点的数量; $n_w$ 为路网中OD对的数量; $v_a$ 为路段 $a$ 的交通流量; $t_a(v_a)$ 表示路段 $a$ 的旅行时间关于流量 $v_a$ 的函数; $l_a$ 表示路段 $a$ 的长度; $q^w$ 是OD对 $w$ 之间的交通需求。

目前,路网效率定量化的评价方法主要有以下三种:

1) LATORA等<sup>[9]</sup>提出从路段行程时间或距离的角度去度量路网运行效率,即定义路网效率为网络中所有节点对的路径长度平均值,其计算公式如下:

$$E(G) = \frac{1}{n_N(n_N - 1)} \sum_{i,j \in N, i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (1)$$

式中: $d_{ij}$ 为从节点 $i$ 到节点 $j$ 的最短路径长度,若从节点 $i$ 到 $j$ 无路径连接,则 $d_{ij} = +\infty$ 。

2) NAGURNEY等<sup>[6-7]</sup>综合考虑OD对数量、交通需求、旅行费用等因素,将路网运行效率定义为均衡状态下每个OD对上单位出行时间能够服务的出行者数量,其计算公式如下:

$$E(G, q) = \frac{1}{n_w} \sum_{w \in W} \frac{q^w}{\lambda_w} \quad (2)$$

式中: $\lambda_w$ 为OD对 $w$ 之间被使用的路径上的最短行程时间。

3) 秦进等<sup>[10]</sup>综合考虑网络结构、交通需求、旅行费用、出行者出行选择等因素,定义路网效率为均衡状态下每条路段上单位出行时间所能承担的交通量,其计算公式如下:

$$E(G, q) = \frac{1}{n_A} \sum_{a \in A} \frac{v_a}{t_a(v_a)} \quad (3)$$

本文综合考虑网络结构、交通需求、出行费用

等因素,从交通运输周转的角度来衡量路网运行效率,即定义路网运行效率为每个路段上单位行程时间可以服务的平均交通周转量,其计算公式如下:

$$E(G, q) = \frac{1}{n_A} \sum_{a \in A} \frac{v_a l_a}{t_a(v_a)} \quad (4)$$

显然,交通网络达到均衡状态后的交通流量分布是交通网络结构、用户出行路径选择行为等多种因素综合作用的结果。因此,这种评价方法能够综合考虑网络规模、出行费用、交通需求以及用户出行选择等多种因素来评价路网运行效率,同时能够较好地反映路网的运输服务水平及周转情况。

## 2 考虑供需随机性的网络均衡流模型

### 2.1 交通需求分布

用  $q^w, v_a, f_k^w$  分别表示 OD 需求、路段流量和路径流量的均值,则有:

$$q^w = E(Q^w) = \sum_{k \in P_w} f_k^w, w \in W \quad (5)$$

$$v_a = E(V_a) = \sum_{w \in W} \sum_{k \in P_w} \delta_{a,k}^w f_k^w, a \in A \quad (6)$$

$$f_k^w \geq 0, k \in P_w, w \in W \quad (7)$$

式中:  $E(\cdot)$  表示求期望运算;  $\delta_{a,k}^w$  为路段与路径关联变量,如果路段  $a$  位于 OD 对  $w$  之间的路径  $k$  上,则取值为 1,否则取值为 0;  $f_k^w$  表示 OD 对  $w$  之间的路径  $k$  在平衡状态下的流量;  $P_w$  为 OD 对  $w$  之间路径的集合;  $Q^w$  为 OD 对  $w$  之间的随机交通量需求;  $V_a$  为路段  $a$  上的随机流量。

又假定:① OD 需求服从对数正态分布,且路径流量与 OD 需求具有相同形式的概率分布;② OD 需求、路径流与路段流具有相同的“方差-均值比”  $R_{VMR}$ ;③ 路网内各路径的流量之间相互独立<sup>[16-17]</sup>。

用  $\varepsilon_q^w, \varepsilon_f^{w,k}, \varepsilon_v^a$  分别表示  $Q^w, F_k^w, V_a$  的方差,则根据上述假设有:

$$\varepsilon_q^w = \text{Var}(Q^w) = q^w R_{VMR}^w, w \in W \quad (8)$$

$$\varepsilon_{f_k^w}^w = \text{Var}(F_k^w) = f_k^w R_{VMR}^w, k \in P_w, w \in W$$

根据路段与路径之间的关系,路径  $k$  的行程时间  $T_k^w$  为组成该路径的各路段行程时间之和,即:

$$T_k^w = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^w T_a, k \in P_w, w \in W \quad (19)$$

为简化问题,本文假定路段行程时间相互独立,则  $T_k^w$  的均值  $t_k^w$ 、方差  $\varepsilon_{k,t}^w$  可进一步表示为:

$$\varepsilon_{f_k^w}^w = \text{Var}(F_k^w) = f_k^w R_{VMR}^w, k \in P_w, w \in W \quad (9)$$

$$\varepsilon_v^a = \text{Var}(V_a) = \sum_{w \in W} \sum_{k \in P_w} \delta_{a,k}^w (f_k^w R_{VMR}^w), a \in A \quad (10)$$

式中:  $\text{Var}(\cdot)$  为求方差运算;  $R_{VMR}^w = \varepsilon_q^w / q^w$ , 为 OD 对  $w$  之间交通需求的方差-均值比;  $F_k^w$  为 OD 对  $w$  之间路径  $k$  上的随机变量。

### 2.2 路段及路径行程时间分布

考虑路段拥挤效应,采用美国联邦公路局路阻函数 BPR 来描述路段的行程时间,则路段  $a$  的行程时间可表示为:

$$T_a = t_a^0 [1 + \beta (V_a / C_a)^n] \quad (11)$$

式中:  $t_a^0$  为路段  $a$  的零流旅行时间;  $C_a$  为路段  $a$  上的容量,为一个随机变量;  $\beta, n$  为 BPR 函数的参数。

为研究容量的随机变化对路段行程时间的影响,假定容量  $C_a$  服从 Beta 分布。记路段  $a$  的设计容量为  $c_a^{\max}$ ,则  $C_a$  可刻画为:

$$C_a = c_a^{\max} \times Z, \forall a \in A \quad (12)$$

式中:  $Z$  服从标准 Beta 分布。其密度函数为:

$$f_Z(x) = \frac{1}{B(l, m)} x^{l-1} (1-x)^{m-1}, 0 \leq x \leq 1 \quad (13)$$

式中:  $l, m$  为 Beta 分布的参数;  $B(\cdot)$  为 Beta 函数。

假定各路段的流量与容量之间相互独立,则路段行程时间  $T_a$  的均值  $t_a$  和方差  $\varepsilon_a^t$  分别为:

$$t_a = E(T_a) = E[t_a^0 + \beta t_a^0 (V_a / C_a)^n] = t_a^0 + \beta t_a^0 E(V_a^n) E[(1/C_a)^n] \quad (14)$$

$$E((T_a)^2) = (t_a^0)^2 + 2\beta(t_a^0)^2 E(V_a^n) E[(1/C_a)^n] + (\beta t_a^0)^2 E(V_a^{2n}) E[(1/C_a)^{2n}] \quad (15)$$

$$\varepsilon_a^t = \text{Var}(T_a) = E(T_a^2) - (E(T_a))^2 \quad (16)$$

那么,根据对数正态分布及 Beta 分布的特性,可以推导出路段行程时间的均值、方差分别为:

$$t_a = E(T_a) = t_a^0 + \beta t_a^0 \left[ \frac{B(l-n, m)}{(c_a^{\max})^n B(l, m)} \right] \exp \left[ n\mu_v^a + \frac{(n\sigma_v^a)^2}{2} \right] \quad (17)$$

式中:  $\mu_v^a, \sigma_v^a$  为路段流量对数正态分布的参数。

$$\varepsilon_a^t = \text{Var}(T_a) = \left\{ \left[ \frac{B(l-2n, m)}{(c_a^{\max})^{2n} B(l, m)} \right] \exp \left[ 2n\mu_v^a + \frac{(2n\sigma_v^a)^2}{2} \right] - \left[ \frac{B(l-n, m)}{(c_a^{\max})^n B(l, m)} \right] \exp \left[ n\mu_v^a + \frac{(n\sigma_v^a)^2}{2} \right] \right\}^2 \quad (18)$$

$$t_k^w = E(T_k^w) = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^w E(T_a), k \in P_w, w \in W \quad (20)$$

$$\varepsilon_{k,t}^w = \text{Var}(T_k^w) = \sum_{a \in A} \delta_{a,k}^w \text{Var}(T_a), k \in P_w, w \in W \quad (21)$$

据中心极限定理,若路径由许多相互独立的路段组成,无论路段行程时间服从何种分布,路径行

程时间  $T_k^w$  近似服从正态分布, 即  $T_k^w \sim N(t_k^w, (\sigma_{k,t}^w)^2)$ 。

其中  $\sigma_{k,t}^w = \sqrt{\varepsilon_{k,t}^w}$  为路径行程时间的标准差。

### 2.3 不同路径选择准则下的交通分配模型

#### 2.3.1 基于期望行程时间最短的均衡分配模型

基于期望行程时间最短的均衡配流模型是指出行者通过获知期望行程时间并不断调整其路径选择决策, 最终达到一种平衡状态, 即被选择的路径具有最短期望行程时间, 未被选择的路径其期望行程时间长于或等于最短期望行程时间, 即满足如下用户均衡条件(user equilibrium, UE):

$$t_k^w - \pi_t^w \begin{cases} = 0, & f_k^w > 0 \\ \geq 0, & f_k^w = 0 \end{cases}, \quad \forall k \in P_w, w \in W \quad (22)$$

式中:  $\pi_t^w$  表示 OD 对  $w$  之间的最短期望行程时间。

上述均衡条件等价于寻找一个路径流量  $f_k^{w*} \in \Omega$ , 使得:

$$\sum_w \sum_k t_k^w (f_k^w - f_k^{w*}) \geq 0, \quad \forall f_k^{w*} \in \Omega \quad (23)$$

式中:  $\Omega$  表示可行路径流的集合, 满足式(5)~(7)确定的约束条件。

#### 2.3.2 基于行程时间预算最短的均衡分配模型

交通供给与需求的随机性导致路段和路径行程时间的变化。因此, 若出行者不能确定行程时间, 大多数出行者会选择提前出发以确保准时到达或增加边际行程时间以避免迟到。根据行程时间预算的定义, 路径  $k$  的行程时间预算  $\xi_k^w$  可表述为:

$$\xi_k^w = t_k^w + s_k^w, \quad \forall k \in P_w, w \in W \quad (24)$$

式中:  $s_k^w$  表示行程时间的安全边际, 其值可以通过以下极小值规划获得:

$$\begin{aligned} \min_{s_k^w} \xi_k^w &= t_k^w + s_k^w, \quad \forall k \in P_w, w \in W \\ \text{s.t.} \quad &P(T_k^w \leq \xi_k^w) \geq \alpha \end{aligned} \quad (25)$$

式中:  $\alpha$  为行程时间可靠度;  $P(\cdot)$  表示概率运算。

因为  $T_k^w$  服从正态分布, 式(25)等价于

$$\begin{aligned} \min_{s_k^w} \quad & s_k^w \\ \text{s.t.} \quad & \int_{-\infty}^{t_k^w + s_k^w} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_{k,t}^w} \exp\left[-\frac{(x - t_k^w)^2}{2(\sigma_{k,t}^w)^2}\right] d(x) \geq \alpha, \quad \forall k \in P_w, w \in W \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \eta_k^w(\alpha) &= \frac{1}{(1-\alpha)} \int_{\xi_k^w(\alpha)}^{\infty} \frac{x}{\sqrt{2\pi} \sigma_{k,t}^w} \exp\left[-\frac{(x - t_k^w)^2}{2(\sigma_{k,t}^w)^2}\right] d(x) = \xi_k^w(\alpha) + \\ & \left\{ \frac{\sigma_{k,t}^w}{\sqrt{2\pi} (1-\alpha)} \exp\left[-\frac{(\phi^{-1}(\alpha))^2}{2}\right] - \phi^{-1}(\alpha) \sigma_{k,t}^w \right\}, \quad \forall k \in P_w, w \in W \end{aligned} \quad (33)$$

根据式(28)行程时间预算  $\xi_k^w(\alpha)$  的计算表达式, 可得:

求解式(26), 得:

$$s_k^w = \sigma_{k,t}^w \phi^{-1}(\alpha) \quad (27)$$

式中:  $\phi^{-1}(\cdot)$  为标准正态分布函数的逆函数。

最终, 行程时间预算可以表示为:

$$\xi_k^w(\alpha) = t_k^w + \sigma_{k,t}^w \phi^{-1}(\alpha), \quad \forall k \in P_w, w \in W \quad (28)$$

基于行程时间预算最短的均衡配流模型(reliability-based user equilibrium, RUE)考虑了出行的可靠性, 出行者通过获知路径行程时间预算, 不断调整路径选择, 最终达到一种平衡状态, 即所有被选择的路径具有相等且最短的行程时间预算, 未被选择的路径其行程时间预算长于或等于最短行程时间预算, 即满足如下用户均衡条件:

$$\xi_k^w - \pi_\xi^w \begin{cases} = 0, & f_k^w > 0 \\ \geq 0, & f_k^w = 0 \end{cases}, \quad \forall k \in P_w, w \in W \quad (29)$$

式中:  $\pi_\xi^w$  表示 OD 对  $w$  的最短行程时间预算。

均衡配流模型(RUE)等价于寻找一个路径流量  $f_k^{w*} \in \Omega$ , 则

$$\sum_w \sum_k \xi_k^w (f_k^w - f_k^{w*}) \geq 0, \quad \forall f_k^{w*} \in \Omega \quad (30)$$

#### 2.3.3 基于超预算期望行程时间最短的均衡分配模型

将 OD 对  $w$  之间路径  $k$  上具有  $\alpha$  可靠度的超预算期望时间  $\eta_k^w(\alpha)$  定义为: 路径行程时间  $T_k^w$  长于或等于行程时间预算  $\xi_k^w(\alpha)$  的条件均值<sup>[18]</sup>, 即:

$$\eta_k^w(\alpha) = E(T_k^w | T_k^w \geq \xi_k^w(\alpha)), \quad \forall k \in P_w, w \in W \quad (31)$$

式(31)表示为:

$$\begin{aligned} \eta_k^w(\alpha) &= \xi_k^w(\alpha) + \\ E(T_k^w - \xi_k^w(\alpha) | T_k^w \geq \xi_k^w(\alpha)), \quad \forall k \in P_w, w \in W \end{aligned} \quad (32)$$

根据式(32), 超预算期望行程时间可以分为两部分: 一部分为路径  $k$  的行程时间预算  $\xi_k^w(\alpha)$ , 反映了用户对行程时间可靠性的关注; 第二部分为超预算时间  $E(T_k^w - \xi_k^w(\alpha) | T_k^w \geq \xi_k^w(\alpha))$ , 反映了行程时间随机变化情况下的不可靠性。

路径行程时间服从正态分布, 据式(32)可得:



$$\eta_k^w(\alpha) = t_k^w + \frac{\sigma_{k,t}^w}{\sqrt{2\pi}(1-\alpha)} \exp\left[-\frac{(\phi^{-1}(\alpha))^2}{2}\right], \quad (34)$$

$$\forall k \in P_w, w \in W$$

基于超预算期望行程时间最短的均衡分配模型(mean excess-based user equilibrium, MEUE),考虑行程时间的可靠性与不可靠性,用户通过获知路径超预算期望行程时间不断调整其路径选择,当达到均衡状态时,同一个OD对之间所有被选择的路径具有相等且最短的超预算期望行程时间,即该模型满足如下用户均衡条件:

$$\eta_k^w - \pi_\eta^w \begin{cases} = 0, & f_k^w > 0 \\ \geq 0, & f_k^w = 0 \end{cases}, \quad \forall k \in P_w, w \in W \quad (35)$$

式中: $\pi_\eta^w$ 表示OD对 $w$ 之间的最短超预算期望行程时间。

均衡配流模型(MEUE)等价于寻找一个路径流量 $f_k^{w*} \in \Omega$ ,使得:

$$\sum_w \sum_k \eta_k^w (f_k^w - f_k^{w*}) \geq 0, \quad \forall f_k^{w*} \in \Omega \quad (36)$$

## 2.4 模型求解算法

基于路段的交通分配求解算法,如Frank-Wolfe算法,并不适用于求解路径行程时间不可加的交通分配模型。为此,本文针对各OD对预设路径集合,采用二次加权平均交通分配算法MSA来求解上述三个变分不等式模型。算法的求解步骤如下:

Step 1:初始化。设迭代精度为 $e$ ,据预先指定

的路径集合,初始化路径流量 $f^{(k)}$ ,令迭代次数 $k=1$ 。

Step 2:更新路径行程时间。基于路径流量 $f^{(k)}$ 分别计算路段及路径行程时间的均值和标准差,更新各路径的期望行程时间 $T_{MTT}$ 、行程时间预算 $T_{TTB}$ 、超预算期望行程时间 $T_{METT}$ 。

Step 3:搜索方向。利用更新后各路径的期望行程时间、行程时间预算、超预算期望行程时间执行一次0-1分配,生成路段附加流量 $y^{(k)}$ 。

Step 4:更新路径流量。基于MSA算法,更新路径流量。

$$f^{(k+1)} = f^{(k)} + (y^{(k)} - f^{(k)})/(k+1) \quad (37)$$

Step 5:迭代终止条件判定。如果路段流量满足预定的迭代精度,则转入Step 6;否则,令 $k=k+1$ ,转入Step 2。算法收敛准则为:

$$\sqrt{\sum_k (f_k^{(n+1)} - f_k^{(n)})^2} / \sum_k f_k^{(n)} \leq e \quad (38)$$

Step 6:路网运行效率计算。依据三种不同路径选择准则下的均衡路段流量、路段旅行时间,采用式(4)计算路网运行效率。

## 3 算例分析

### 3.1 测试路网及参数设定

测试网络如图1所示,共有13个节点和19条路段。在图1中,路段旁数据分别表示各路段的零流

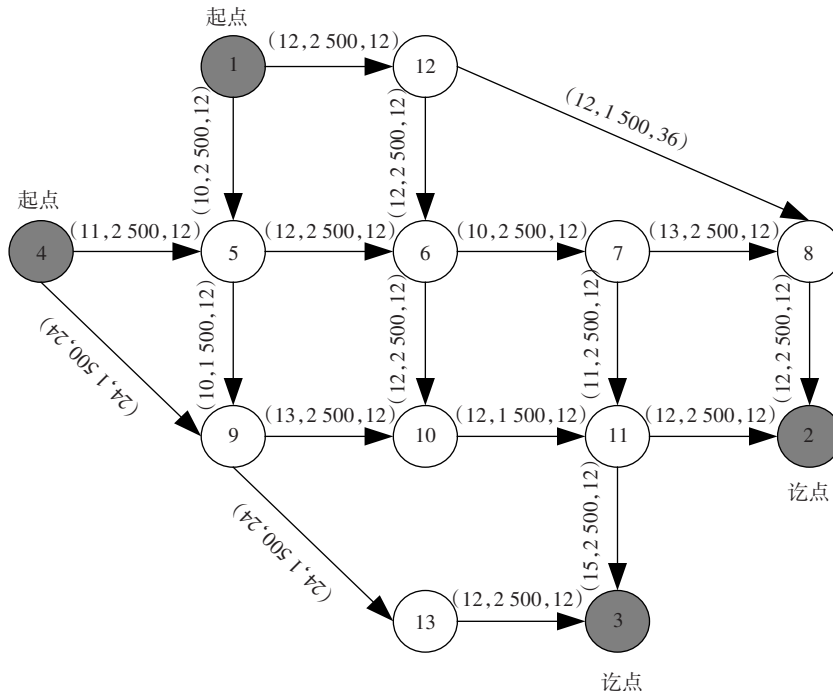


图1 Nguyen-Dupuis测试网络

Fig. 1 Nguyen-Dupuis test network

时间(min)、路段容量(辆/h)和路段长度(km)。假定有4个OD对,各OD对的需求服从对数正态分布,需求期望分别设定为: $q_{12}=2\,500$ 辆/h, $q_{13}=2\,000$ 辆/h, $q_{42}=2\,000$ 辆/h, $q_{43}=2\,000$ 辆/h,需求的方差均值比均为 $R_{VMR}=0.5$ 。假定各路段的容量均服从Beta分布,分布参数为 $l=30, m=10, a \in A$ 。BPR函数的参数取值设为 $\beta=0.15, n=4$ ;行程时间可靠度 $\alpha=0.95$ 。

### 3.2 不同路径选择准则下的效率比较分析

利用基于路径的MSA算法对测试路网进行路网均衡分析,基于三种路径选择准则得到路段流量及行程时间,见表1。

从表1可以看出,相较于UE模型,MEUE、RUE模型的路段配流结果更加均衡,但路段行程时间更长。这是因为RUE模型考虑了出行时间的可靠性,MEUE模型同时考虑了出行时间的可靠性与不可靠性,导致行程时间预算与超预算期望行程时间长于期望行程时间。

根据式(4)计算三种路径选择准则下的路网运行效率,可得期望行程时间、行程时间预算、超预算期望行程时间路径选择准则下的路网运行效率 $E_{MTT}$ 、 $E_{TTB}$ 、 $E_{METT}$ 分别为111 323、102 920、98 598,显然 $E_{MTT}>E_{TTB}>E_{METT}$ 。在这三种准则下用户均是以行程时间作为出行路径选择准则的,行程时间会影响路网流量分布情况,因此路网运行效率受行程时间影响较大。而行程时间预算和超预算期望行程时间路径选择准则下用户为规避迟到风险,会相应增加行程时间,导致在均衡状态下路网单位行程时间内服务的交通周转量更少,即路网运行效率更低。这表明:忽略出行的可靠性与不可靠性会高估路网运行效率,这与实际情况是不相符的。

### 3.3 路网运行效率敏感性分析

#### 3.3.1 路段容量降级对运行效率的影响

为了分析三种路径选择准则下路段容量降级对运行效率的影响,采用路段容量降级程度下的路网运行效率与设计通行能力下的路网效率之比 $\omega$ 作

表1 路段均衡流量及行程时间

Table 1 Link flow and travel time at equilibrium state

路段 编号	UE 模型		RUE 模型		MEUE 模型	
	路段流量/(辆·h <sup>-1</sup> )	$T_{MTT}/\text{min}$	路段流量/(辆·h <sup>-1</sup> )	$T_{TTB}/\text{min}$	路段流量/(辆·h <sup>-1</sup> )	$T_{METT}/\text{min}$
1	1 381.234 0	10.010 6	2 041.926 0	13.790 3	2 079.455 0	14.198 0
2	3 118.766 0	17.862 6	2 458.074 0	15.899 2	2 420.545 0	16.430 1
3	3 291.249 0	13.919 1	2 505.953 0	14.885 0	2 455.410 0	15.241 9
4	708.751 1	24.024 4	1 494.047 0	24.908 7	1 544.590 0	25.510 9
5	1 726.753 0	12.386 5	2 015.305 0	14.725 4	2 044.829 0	14.970 1
6	2 945.730 0	10.965 5	2 532.574 0	10.696 0	2 490.036 0	10.676 4
7	4 375.356 0	12.532 6	4 037.209 0	13.646 4	4 023.040 0	14.970 1
8	470.162 8	12.018 1	436.170 2	12.059 2	442.333 8	12.075 0
9	2 019.423 0	15.274 7	2 046.310 0	15.054 1	2 048.609 0	17.799 3
10	2 355.933 0	11.488 2	1 990.899 0	16.665 3	1 974.431 0	11.554 7
11	2 019.423 0	14.099 7	2 046.310 0	11.665 3	2 048.609 0	16.430 1
12	1 924.806 0	13.376 7	2 215.817 0	14.725 4	2 219.653 0	15.064 3
13	733.196 7	26.081 6	1 254.838 0	27.501 4	1 300.075 0	27.912 3
14	2 394.969 0	12.341 7	2 651.987 0	13.592 7	2 661.987 0	15.817 9
15	2 480.577 0	14.003 7	2 453.690 0	15.392 9	2 451.391 0	17.037 6
16	2 270.324 0	17.775 2	2 189.196 0	19.360 7	2 185.027 0	19.857 3
17	3 118.766 0	14.099 7	2 458.074 0	16.665 3	2 420.545 0	16.430 1
18	0.000 0	36.000 0	0.000 0	36.000 0	0.000 0	36.000 0
19	1 729.676 0	13.040 8	1 810.804 0	13.750 7	1 814.973 0	13.956 2

为指标。通过设定路段容量降级参数,  $l=10, m=[5, 10, \dots, 50]$ , 得到三种路径选择准则下的路网运行效率之比的变化情况, 如图2所示。

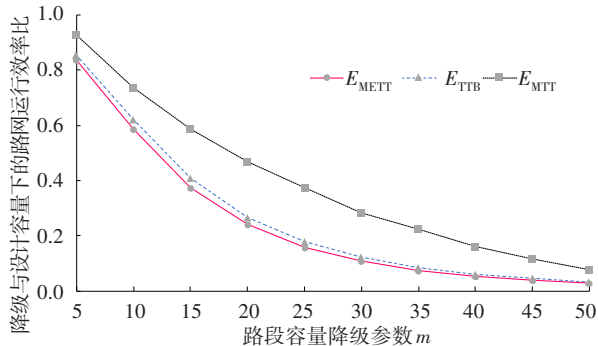


图2 不同容量降级程度下路网运行效率之比的变化

Fig. 2 The variation in road network operating efficiency ratios under different levels of capacity degradation

从图2可以看出,随着参数 $m$ 的增加,路段容量的降级程度也不断加剧,导致路网运行效率显著下降。同时,相较于行程时间预算与最短超预算期望行程时间,在最短期望行程时间路径选择准则下路网运行效率的下降速度更慢。这表明:在给定的需求水平下,路段容量的降级会加剧路网的拥挤程度,导致路段行程时间的显著增加,进而使得单位时间内各路段能够服务的交通周转量下降。因此,忽视交通供给方面的随机变动将高估路网的运行效率。

### 3.3.2 需求结构对运行效率的影响

假定路段容量降级程度参数为 $l=30, m=10$ , 考察在某一容量降级程度下需求结构的变动对路网运行效率的影响。设定路网的OD总需求为8 500辆/h, 其中均值方差比为0.8, 进一步设OD对 $q_{43}$ 和 $q_{42}$ 的需求均为2 000辆/h。在保证 $q_{13}$ 和 $q_{12}$ 需求总量之和为4 500辆/h的前提下,以500辆/h为步长调整需求结构,即当 $q_{12}=0$ 辆/h时,  $q_{13}=4 500$ 辆/h;  $q_{12}=500$ 辆/h时,  $q_{13}=4 000$ 辆/h。路网运行效率随需求结构的变化情况如图3所示。

从图3可以看出,在三种路径选择准则下,路网运行效率均呈先上升后下降的变化趋势,即在某一容量降级程度下存在使路网运行效率达到最大值的某种需求结构。此外,当OD对12间的需求量较小时,三种准则下的路网运行效率相差不大;但当需求量超过某一临界值后,基于期望行程时间准则下的效率会明显比基于行程时间预算与最短超预算期望行程时间准则下的高。这表明:需求结构对

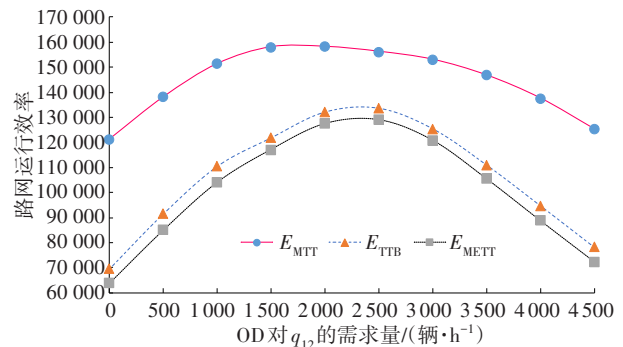


图3 需求结构对路网运行效率的影响

Fig. 3 The influence of demand structure on road network operating efficiency

路网运行效率影响显著,合理的需求结构可以确保路网运行效率保持在一个较高的水平;随着OD对12需求量的增加,路网内各路径的流量均值和方差会发生变化,这些变化对行程时间预算、超预算期望行程时间影响显著,进而较大程度上影响了路网运行效率。

### 3.3.3 需求总量对运行效率的影响

探究在一定的路网容量降级(参数 $l=30, m=10$ )程度下,需求总量对路网运行效率的影响。设定需求总量为 $Q=[500, 0, 0, 0]+\lambda[500, 500, 500, 500]$ , 其中 $\lambda$ 为需求乘子,取值范围为 $[0, 1, \dots, 12]$ , 总共13组需求情境。不同需求情境下路网运行效率的变化如图4所示。

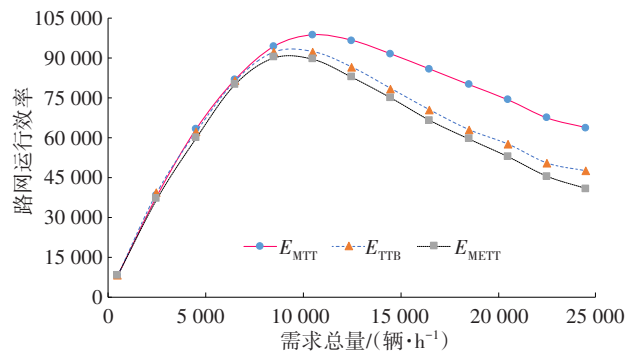


图4 不同需求总量情境下的路网运行效率

Fig. 4 The road network operating efficiency under different traffic demand quantity scenarios

从图4可以看出,随着需求总量的增加,三种路径选择准则下的路网运行效率均呈现先增加后下降的趋势。当需求总量较小时,三种路径选择准则下的运行效率相差不大;当需求总量达到某个临界值后,随着需求总量的持续增加,各路径选择准则下的运行效率开始下降,但不同路径选择准则下的运行效率降幅差异较大,最短超预算期望行程时间

和行程时间预算路径选择准则下的路网运行效率下降程度更为显著。这表明:当需求达到临界值后,随着需求不断增长,路网运行状况进一步恶化,导致行程时间显著增加。为了规避潜在的出行风险,出行者需要预留更多时间。因此,行程时间预算和超预算期望行程时间的增加幅度会更大,即路网单位时间内可以服务的交通周转量大幅下降。

### 3.3.4 行程时间可靠度对运行效率的影响

为了进一步研究在特定路网降级程度(参数  $l=30, m=10$ )和交通需求( $Q=[2\ 500, 2\ 000, 2\ 000, 2\ 000]$ )结构下,行程时间可靠度对路网运行效率的影响,设定不同的可靠度水平  $p=[0.50, 0.55, 0.60, \dots, 0.95]$ ,分析行程时间可靠度变化对路网运行效率的影响,如图5所示。

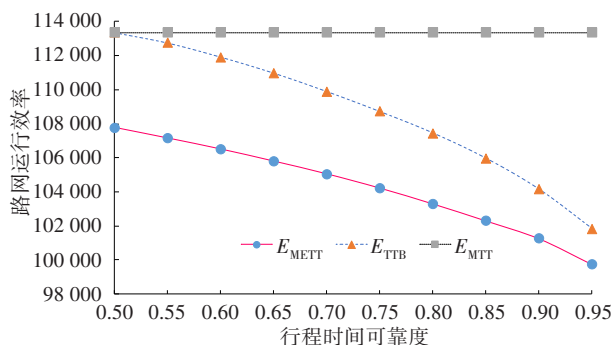


图5 行程时间可靠度对路网运行效率的影响

Fig. 5 The influence of travel time reliability on the road network operating efficiency

从图5可以看出,随着行程时间可靠度的不断增加,在最短期望行程时间路径选择准则下的路网运行效率保持不变,而在行程时间预算与最短超预算期望行程时间路径选择准则下,运行效率随着可靠度的增加而大幅下降。这表明:在最短期望行程时间准则下,用户不考虑行程时间的可靠度,路网流量的分布情况不变,路网运行效率保持不变;而在行程时间预算与最短超预算期望行程时间路径选择准则下,随着可靠度的增加,用户为规避迟到风险,会预留更多的边际行程时间或超预算时间,这导致行程时间预算与超预算期望行程时间显著增加,进而使得在路网单位时间内能够服务的交通周转量大幅减少,从而降低了路网运行效率。

## 4 结论

以随机供需路网为研究对象,从交通运输周转的角度出发,本文基于网络均衡分析提出了定量的

路网运行效率测算方法。通过算例分析,探讨了三种路径选择准则、路段容量降级程度、需求结构、需求总量和行程时间可靠度对路网运行效率的影响。得出以下结论:

1) 在期望行程时间路径选择准则下,路网运行效率最高,而超预算期望行程时间准则下的路网运行效率最低。若忽略行程时间的可靠性与不可靠性,会高估路网的实际运行效率。

2) 在三种路径选择准则下,路网运行效率均随着路段容量降级程度的增加而显著下降。当容量降级程度与需求均值-方差比一定时,在三种路径选择准则下,均存在特定的需求结构与总量使路网运行效率达到最大。

3) 在行程时间预算以及超预算期望行程时间路径选择准则下,路网运行效率随着行程时间可靠度的增加而显著下降。

未来的研究方向包括:①充分考虑路段流量及行程时间的相关性,进一步考虑出行者的感知误差,使模型更贴近实际路网环境;②鉴于本文选用的路网运行效率测算方法计算相对复杂,因此需要对评价指标的选取做深入研究,选取更合理且全面的路网效率评价指标与方法。

## 参考文献(References):

- [1] 俞礼军, 靳文舟. 交通效率的度量方法研究[J]. 公路, 2006, 51(10): 102-106. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2006.10.026.  
YU Lijun, JIN Wenzhou. A study on measures of transportation efficiency[J]. Highway, 2006, 51(10): 102-106. DOI: 10.3969/j.issn.0451-0712.2006.10.026.
- [2] 叶彭姚, 陈小鸿. 基于交通效率的城市最佳路网密度研究[J]. 中国公路学报, 2008, 21(4): 94-98. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.04.016.  
YE Pengyao, CHEN Xiaohong. Study of urban optimal density of road network based on transportation efficiency[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 94-98. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2008.04.016.
- [3] LEVINSON D. Perspectives on efficiency in transportation[J]. International Journal of Transport Management, 2003, 1(3): 145-155. DOI: 10.1016/j.ijtm.2004.01.002.
- [4] 龙科军, 李磊, 肖向良, 等. 城市路网交通运行效率评价[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(增刊1): 430-435.  
LONG Kejun, LI Lei, XIAO Xiangliang, et al. Operating efficiency evaluation for urban road network



- [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(sup 1): 430-435.
- [5] 余孝军, 黄海军. 交通网络效率的度量 and 元件重要性的计算方法[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(7): 1546-1552. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6788.2012.07.020. YU Xiaojun, HUANG Haijun. Measuring the network efficiency and computing the component importance[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2012, 32(7): 1546-1552. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6788.2012.07.020.
- [6] NAGURNEY A, QIANG Q. A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks[J]. Journal of Global Optimization, 2008, 40(1): 261-275. DOI: 10.1007/s10898-007-9198-1.
- [7] NAGURNEY A, QIANG Q. A relative total cost index for the evaluation of transportation network robustness in the presence of degradable links and alternative travel behavior[J]. International Transactions in Operational Research, 2009, 16(1): 49-67. DOI: 10.1111/j. 1475-3995.2009.00659.x.
- [8] 过秀成, 涂圣文, 张小辉. 基于路网效率的城市结点对外交通组织模式[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(4): 849-853. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2014.04.030. GUO Xiucheng, TU Shengwen, ZHANG Xiaohui. Organization mode of external traffic in city area based on road network efficiency [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2014, 44(4): 849-853. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2014.04.030.
- [9] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient behavior of small-world networks [J]. Physical Review Letters, 2001, 87(19): 198701. DOI: 10.1103/PhysRevLett. 87.198701.
- [10] 秦进, 贺钰昕. 量化交通网络效率评价方法比较[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 111-119. DOI: 10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.02.012. QIN Jin, HE Yuxin. Evaluation methods comparison of quantitative transportation network efficiency[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2018, 18(2): 111-119. DOI:10.19818/j.cnki.1671-1637.2018.02.012.
- [11] 姚远, 吴超腾, 吉静. 基于体征指标的快速路运行效率量化方法研究[J]. 上海公路, 2021(3): 123-127, 144. DOI: 10.3969/j.issn.1007-0109.2021.03.025. YAO Yuan, WU Chaoteng, JI Jing. Study of quantification method of expressway operation efficiency based on signs index[J]. Shanghai Highways, 2021(3): 123-127, 144. DOI: 10.3969/j. issn. 1007-0109.2021.03.025.
- [12] 张志清, 闫天朋, 付金秀, 等. 基于效率和时空资源的交通网络可靠性评价分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(16): 6719-6727. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815.2022.16.044. ZHANG Zhiqing, YAN Tianpeng, FU Jinxiu, et al. Reliability evaluation and analysis of transportation network based on efficiency and time-space resources [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(16): 6719-6727. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2022.16.044.
- [13] ZHANG L X, QIN J, HE Y X, et al. Network-level optimization method for road network maintenance programming based on network efficiency[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12): 4882-4889. DOI: 10.1007/s11771-015-3040-6.
- [14] 陈瑞雅, 许项东. 基于L-偏度和L-峰度的行程时间可变性表征方法[J]. 中国公路学报, 2022, 35(10): 254-267. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.10.022. CHEN Ruiya, XU Xiangdong. Characterization of travel time variability based on L-skewness and L-kurtosis [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(10): 254-267. DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.10.022.
- [15] 张可可, 韩春阳, 周京, 等. 精准管控下的城市交通拥堵状态研判与建模[J]. 交通科学与工程, 2022, 38(3): 113-120. DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022.03.009. ZHANG Keke, HAN Chunyang, ZHOU Jing, et al. Towards smart management and control: a novel approach to identify traffic congestion states in urban areas [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2022, 38(3): 113-120. DOI: 10.16544/j. cnki. cn43-1494/u.2022.03.009.
- [16] 况爱武, 黄中祥, 况群. 随机需求道路网络出行时间可靠性评估方法[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(5): 861-867. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.05.025. KUANG Aiwu, HUANG Zhongxiang, KUANG Qun. Evaluation method for travel time reliability of road network with stochastic demand [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(5): 861-867. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2011.05.025.
- [17] 吕彪, 刘一骝, 刘海旭. 协同考虑脆弱性与可靠性的城市道路网络设计[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(5): 1093-1103. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20180812. LYU Biao, LIU Yiliu, LIU Haixu. Urban road network design with balance between vulnerability and reliability [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(5): 1093-1103. DOI: 10.3969/j. issn. 0258-2724.20180812.
- [18] CHEN A, ZHOU Z. The  $\alpha$ -reliable mean-excess traffic equilibrium model with stochastic travel times [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2010, 44(4): 493-513. DOI: 10.1016/j.trb.2009.11.003.

(责任编辑:罗容;英文编辑:张洪)