

文章编号:1671-1637(2018)02-0111-09

定量化交通网络效率评价方法比较

秦 进¹, 贺钰昕^{1,2}

(1. 中南大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410075; 2. 香港城市大学 科学与工程学院, 香港 999077)

摘 要:比较了既有定量化交通网络效率评价方法,考虑了网络结构、交通需求、出行选择和出行成本等因素,分别从解析计算、固定网络结构下交通需求对网络效率的影响规律和固定交通需求下网络结构对网络效率的影响规律方面,研究了3种评价方法的评价结果合理性,总结了不同方法的优缺点和适用范围。比较结果表明:赋权网络运行效率计算方法(方法1)未考虑交通网络拥挤效应,计算的效率是交通需求的单调函数,不能用于交通拥挤网络;交通拥挤网络效率计算方法(方法2)能适用于拥挤网络的效率评价,但在需求不变的前提下,计算的效率是OD间连通路数数的单调递增函数,不能反映网络结构对交通网络效率的影响规律;交通网络效率计算方法(方法3)能更加真实地反映交通网络结构、交通需求、出行成本与出行选择对网络效率的综合影响效应,而且采用该方法计算的效率能够与交通网络中的“Braess”诡异现象进行相互解释,证明了该方法在评价交通网络的实际运行绩效方面具有相对更好的合理性;在固定结构的交通网络中,总存在一个交通需求量,使采用方法3计算的效率最大;在固定需求的交通网络中,总存在一个网络结构,使采用方法3计算的效率最大。

关键词:交通规划;交通网络效率;定量化评价方法;网络结构;交通需求;影响规律

中图分类号:U491.1

文献标志码:A

Evaluation methods comparison of quantitative transportation network efficiency

QIN Jin¹, HE Yu-xin^{1,2}

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, Hunan, China;
2. College of Science and Engineering, City University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The existing evaluation methods of quantitative traffic network efficiency were compared. Network structure, traffic demand, travel choice, travel cost and other factors were considered, and the evaluation result rationalities of three methods were studied from the following three aspects, namely the analytic calculation, influence rule of traffic demand on network efficiency under fixed network structure, and influence rule of network structure on network efficiency under fixed traffic demand. The pros, cons and applications of different methods were summarized. Comparative result shows that the calculation method of weighted network operation efficiency (method 1) does not consider the congestion effect of transportation network, and the calculated network efficiency is a monotone function of traffic demand, so it cannot be used in traffic congested network. The calculation method of transportation congested

收稿日期:2017-08-30

基金项目:国家自然科学基金项目(71101155);湖南省自然科学基金项目(2015JJ2184)

作者简介:秦 进(1978-),男,湖北荆门人,中南大学教授,工学博士,从事交通运输工程研究。

通讯作者:贺钰昕(1992-),女,陕西宝鸡人,香港城市大学工学博士研究生。

network efficiency (method 2) is suitable for the efficiency evaluation of congested network, but for the premise of constant demand, the efficiency is a monotonous increasing function of connected path numbers between OD, and cannot reflect the influence rule of network structure on traffic network efficiency. The calculation method of transportation network efficiency (method 3) can give a true reflection of comprehensive influence effect of network structure, traffic demand, travel cost and travel choice on network efficiency. In addition, the network efficiency calculated by method 3 and the Braess paradox can explain with each other, which indicates that method 3 have a relatively better rationality on the real operation performance. In the fixed structure of traffic network, there always exists a traffic demand to ensure the maximal network efficiency calculated by method 3. In the fixed demand of traffic network, there always exists a network structure to ensure the maximal network efficiency calculated by method 3. 3 tabs, 6 figs, 28 refs.

Key words: transportation planning; transportation network efficiency; quantitative evaluation method; network structure; traffic demand; influence rule

Author resumes: QIN Jin(1978-), male, professor, PhD, qinjin@csu.edu.cn; HE Yu-xin(1992-), female, doctoral student, yuxinhe2-c@my.cityu.edu.hk.

0 引 言

随着经济发展和城市化进程的加快,城市交通系统的供需矛盾日益突出,交通拥堵问题也早已经成为困扰城市发展的世界性难题之一。仅仅依靠增加基础设施来满足不断增长的交通需求,并不能完全解决日益严重的城市交通拥堵问题。实际上,为有效改善交通网络的拥堵状况,国内外学者设计了许多优化模型,并在实际工程中得到应用。但是这些传统的交通网络规划理论与方法都是在满足约束条件的同时,以路网改造的总投资额最小或用户盈余最大等为目标进行优化决策,在此过程中都缺少对交通网络综合运行状况的反馈机制,因此,由传统规划方法得到的交通网络优化方案,往往很难保证整体网络运行效率。

交通网络效率是交通网络综合运行状况的真实反映,因此,影响交通网络效率的因素是多方面、多层次的,主要因素至少应包括交通网络结构、交通基础设施状况、交通需求与交通管理措施等。国内外学者在研究解决城市交通拥堵难题时,往往都会从供、需 2 个方面来寻求解决方法,都是基于交通均衡分配的思想进行优化决策,各有优缺点,但却都忽略了网络效率这一决定城市道路交通供给与交通需求关系的重要中间因素。

无论是交通供给管理,还是交通需求管理,其根本目的都是要提高交通网络的综合运行效率。如果能基于网络效率进行交通网络的设计和管理,必然

会为城市交通的可持续发展奠定重要基础。然而由于一直以来都缺乏一个客观、有效的量化交通网络效率评价方法,导致直接以优化网络效率为目标的交通网络设计理论与方法的研究,到目前为止仍未能取得有效的进展。

交通网络效率是在近年来随着交通网络研究的不断深入才开始兴起并逐渐成为研究热点之一,一般被定义为一定的交通投入对交通需求的满足程度。但是交通网络效率的内涵是多层次的,根据不同的利益主体、系统目标与研究角度等,对交通网络效率的理解和评价都是不一样的。

根据所采用研究方法的性质,可以将当前的交通网络效率评价的研究分为定性和定量两大类。在定性研究方面,交通网络效率的评价研究以多指标评价方法为主。Costa 等分析了城市内部公共交通服务的生产效率问题^[1];吴文化将交通运输效率分为城市交通效率与城间交通效率,并用综合指标评价法对城间交通效率进行定性评价^[2];Levinson 将交通网络效率从机动性、效益、可达性、生产效率和公平性 5 个角度进行评价^[3];俞礼军等从机动性、可达性、生产效率和效用 4 个方面分别度量交通效率^[4];叶彭姚等提出了以断面交通效率、路段输送效率和路网运行效率来衡量交通网络效率的方法^[5],但在计算时将单位时间内通过断面的车辆数与车辆平均速度作为 2 个相互独立的参数,这显然是不合理的;Nait 等分析了常规公交网络绩效,并将旅客等待时间作为衡量公交网络绩效优劣的唯一

指标^[6],实际上评价的是公交网络中不同线路上车辆在交叉点的协调性,而并非整个网络的效率;Gudmundsson 等利用数据包络分析或随机前沿分析方法,研究交通网络的投入产出效率^[7-8],得到的效率实际上是企业投入产出比的相对效率而非网络运行效率。上述多指标定性评价方法在一定程度上可反映交通网络的运行情况,但是在其评价过程中存在过多的主观环节,因此,难以保证评价结果的客观性和合理性。

在定量研究方面,Roughgarden 等使用网络阻抗度量交通网络效率,并研究不同条件下的效率损失问题^[9];北京航空航天大学黄海军教授课题组在此基础上又开展了一系列深入的研究^[10-16],并取得了丰富的研究成果,但是仅以网络阻抗作为单一指标来衡量网络运行效率显然是不完全的;Latora 等提出了赋权网络效率计算方法,用任意两点之间的最短距离作为参数进行网络效率的评价,并将其应用在复杂网络的相关研究中^[17-22],但该方法未考虑拥挤效应,不能直接用于交通网络的效率衡量;Nagurney 等基于路径阻抗和交通需求,提出了一种交通拥挤网络的量化效率衡量方法,但未考虑交通网络规模对效率的影响^[23-25];Qin 等提出的交通网络效率定量评价方法能反映网络结构、交通需求以及用户选择行为等对网络效率的影响,同时计算的效率能够与交通网络中的“Braess”诡异现象进行相互解释^[26]。

总的来说,目前国内外对交通网络效率的研究,仍是以主观定性的多指标评价为主,客观定量的评价大多不能直接用于带有拥挤效应的交通网络,而能在数学模型中加以运用的量化交通网络效率评价方法,还处于研究初始阶段。基于此,本文将对3种交通网络运行效率的定量评价方法进行比较分析,探讨三者的合理性与适用性。

1 量化的交通网络效率评价方法

定义交通网络 $G=(N,A)$,其中 N 和 A 分别为网络的节点和路段的集合; n_N 和 n_A 分别为网络节点和路段的数量; W 为网络中 OD 对的集合,网络中共有 n_W 个 OD 对; q_w 为 OD 对 $w \in W$ 间的出行需求; K_w 为连接 OD 对 w 的路径集合,路径 $k \in K_w$; x_a 和 $t_a(x_a)$ 分别为交通网络达到均衡后路段 $a \in A$ 上的交通流量和旅行时间; f_w^k 为 k 上的交通流量。定义决策变量为

$$\delta_w^{a,k} = \begin{cases} 1 & a \text{ 在 } k \text{ 上} \\ 0 & a \text{ 不在 } k \text{ 上} \end{cases}$$

近年来关于不同条件下的交通均衡问题有大量的研究,但是既有的量化交通网络评价方法,关注的重点仍然是达到平衡后的交通流量等因素,因此,本文仅以经典的固定需求下交通网络平衡模型为基础开展相关研究。

固定需求下交通网络平衡模型描述为

$$\min Z(x) = \sum_{a \in A} \int_0^{x_a} t_a(x_a) dx_a \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \begin{cases} \sum_{k \in K_w} f_w^k = q_w \\ x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} f_w^k \delta_w^{a,k} \\ f_w^k \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

上述模型中: $Z(x)$ 为目标函数,式(1)是对各路段的走行时间函数积分求和之后的最小值;式(2)中3个约束条件分别为流量守恒约束、网络中路段流量与路径流量的转换关系以及交通流量的非负约束。

上述模型的求解方法已经比较成熟,本文选择计算效率高的梯度投影(Gradient Projection, GP)算法对上述模型进行求解^[27-28]。

如前所述,目前能适用于城市交通网络效率定量化评价的方法主要有 Latora 等提出的赋权网络运行效率评价方法^[17]、Nagurney 等提出的交通拥挤网络效率^[23]与 Qin 等分别提出交通网络效率评价方法^[26],为描述方便,本文分别简称为方法1~3,表达如下。

1.1 方法1^[17]

根据 Latora 等提出的赋权网络的运行效率 E_1 为

$$E_1 = \frac{1}{n_N(n_N - 1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \quad (3)$$

式中: d_{ij} 为网络中节点 i, j 之间的最短路径长度,即交通网络达到均衡后两点之间的旅行时间。

方法1计算网络效率 E_1 时,仅考虑了两点之间的最短旅行时间和节点的数量。由于交通网络中的路段旅行时间必然会随交通流量的增大而增加,因此,效率 E_1 必然在当网络内流量为0时达到最大值,显然,这种网络效率始终随交通流量增大而单调递减的变化规律是不符合实际情况的。而事实上, E_1 表示网络中任意两点间的平均距离,即特征路径长度,定义为网络中所有节点对的路径长度的平均值。该网络效率度量方法可对加权网络和非加权网络给出精确的定量分析,对神经网络和通信网络的信息交换效率的评估较准确,

但是并不能准确反映交通网络的各种特征,所以可以认为方法 1 更适用于分析网络的小世界行为与通讯网络的特征^[17]。

1.2 方法 2^[23]

根据 Nagurney 等提出的交通拥挤网络效率 E_2 为

$$E_2 = \frac{1}{n_W} \sum_{w \in W} \frac{q_w}{t_w} \quad (4)$$

式中: t_w 为 OD 对 $w \in W$ 之间的最短旅行时间,即交通网络达到均衡后 OD 对 w 之间的路径旅行时间。

方法 2 计算网络效率 E_2 时,考虑的影响因素有 OD 对数量、交通需求与路径旅行时间,但是该方法中未能直接体现交通网络结构或规模对交通网络效率的影响。

1.3 方法 3^[26]

根据 Qin 等提出的交通网络效率 E_3 为

$$E_3 = \frac{1}{n_A} \sum_{a \in A} \frac{x_a}{t_a(x_a)} \quad (5)$$

方法 3 计算的网路效率 E_3 中考虑了网络规模(路段数量)、路段旅行时间和交通需求的影响。

2 网络效率比较

2.1 算例 1

考虑一个只有 2 个节点的简单交通网络,见图 1。网络中仅有一个 OD 对(1,2),其出行需求量为 q 。假设节点 1 和 2 之间共有 n 条路径,所有路径上的旅行时间函数相同且均采用 BPR 函数形式,即

$$t(x) = t_0 \left[1 + \alpha \left(\frac{x}{C} \right)^\beta \right] \quad (6)$$

式中: $t(x)$ 为路段旅行时间; x 为路段上的交通流量; t_0 为路段上的自由流时间; C 为路段通行能力; α, β 为给定参数。

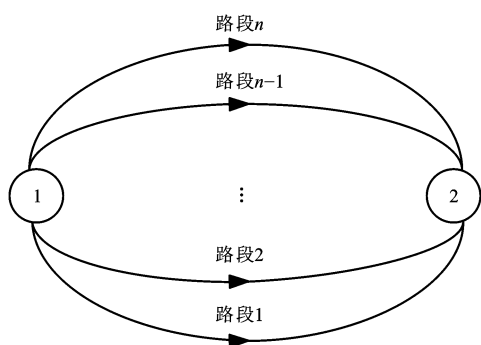


图 1 算例 1

Fig. 1 Example 1

根据效率计算式(3)~(5),可知 3 种网络效率计算如下

$$E_1 = \frac{1}{2t(x)} \quad (7)$$

$$E_2 = \frac{q}{t(x)} \quad (8)$$

$$E_3 = \frac{x}{t(x)} \quad (9)$$

显然,由于所有路段的旅行时间函数均相同,因此,达到均衡后的交通网络中,每条路段上的流量必然相等且均为 $x = \frac{q}{n}$ 。

由此,上述 3 种效率的计算式(7)~(9),分别针对路段数 n 求导,可以得到

$$\frac{\partial E_1}{\partial n} = \frac{\alpha \beta n^{\beta-1}}{2t_0 (n^\beta + \alpha q^\beta / C^\beta)^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial E_2}{\partial n} = \frac{q \alpha \beta n^{\beta-1}}{t_0 (n^\beta + \alpha q^\beta / C^\beta)^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial E_3}{\partial n} = \frac{q n^{\beta-2} [\alpha(\beta-1)q^\beta / C^\beta - n^\beta]}{t_0 (n^\beta + \alpha q^\beta / C^\beta)^2} \quad (12)$$

由于参数 $\alpha, \beta, C, t_0, n, q$ 均大于 0,由此可以确定: $\frac{\partial E_1}{\partial n}, \frac{\partial E_2}{\partial n}$ 大于 0,这就意味着在上述简单网络内,在总的出行需求不变的前提下,效率 E_1 和 E_2 是关于路段数 n 的增函数,即此时网络内路段数越多,网络运行效率就会越高,显然,这并不符合交通网络的客观运行规律。

但是对于 $\frac{\partial E_3}{\partial n}$,若假设参数 $\beta > 1$ (实际计算中一般设置 $\beta = 4$),通过进一步计算可以发现,当 $n < \sqrt[\beta]{\alpha(\beta-1)q^\beta / C^\beta}$ 时, $\frac{\partial E_3}{\partial n} > 0$,此时 E_3 会随路段数 n 的增大而增大;当 $n > \sqrt[\beta]{\alpha(\beta-1)q^\beta / C^\beta}$ 时, $\frac{\partial E_3}{\partial n} < 0$,此时 E_3 会随路段数 n 的增大而减小;当 $n = \sqrt[\beta]{\alpha(\beta-1)q^\beta / C^\beta}$ 时,效率 E_3 达到最大值。这就说明当网络内的交通需求保持不变时,网络效率会随着路段数量的增加,呈现先增大后减小的变化规律。这种变化规律也表明,通过式(7)计算得到的网络运行效率 E_3 ,与 n, C, q ,甚至 α, β 均有关。

假定总的需求 $q = 10$,所有的路段旅行时间函数均为 $t(x) = 4 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x}{5} \right)^4 \right]$,则可计算各网络效率随连接路段数 n 的变化规律,见图 2。

对于 E_3 ,根据前面分析,其最大值应在 $n = \sqrt[4]{\frac{0.15 \times (4-1) \times 10^4}{5^4}} = 1.638$ 时取得,考虑到 n 为路段数,取整为 $n = 2$,图 2 中 E_3 的变化规律符合分

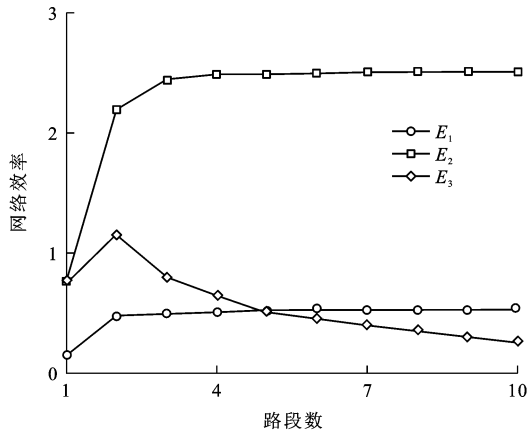


图2 网络效率随路段数变化曲线

Fig. 2 Changing curves of network efficiency with road number

析结果。

通过在简单网络中的分析,可知当交通网络内的出行需求不变时,随着交通网络规模的逐渐增大, E_1 和 E_2 呈现单调递增的趋势,而 E_3 则呈现出先上升后下降的变化规律,且其变化规律受交通网络内路段数、路段能力、交通需求等多种因素的制约。

网络规模和通行能力越大,用户旅行时间越短,从用户角度而言显然是有利的。但是从整个交通网络系统来看,规模和能力越大的网络,服务越少的用户反而会使网络整体运行效率越高,这显然是不合理的。相对 E_1 和 E_2 的单调递增变化, E_3 受多种因素影响的波动变化。从简单网络的分析可以看出 E_3 符合交通网络运行效率的客观规律,这一结论还需针对以下结构复杂的网络进行进一步研究和讨论。

2.2 算例 2

针对图 3 的交通网络,其中共有 6 个节点 1~6 和 7 个路段 a~g。网络中有 2 个 OD 对:(1,3) 和 (2,4),其出行需求分别为 $q_{1,3}=30$, $q_{2,4}=30$ 。网络中 7 个路段上的旅行时间函数分别设置为

$$t_a(x_a) = 8 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_a}{20} \right)^4 \right]$$

$$t_b(x_b) = 9 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_b}{20} \right)^4 \right]$$

$$t_c(x_c) = 2 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_c}{20} \right)^4 \right]$$

$$t_d(x_d) = 6 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_d}{40} \right)^4 \right]$$

$$t_e(x_e) = 3 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_e}{20} \right)^4 \right]$$

$$t_f(x_f) = 3 \left[1 + 0.15 \left(\frac{x_f}{25} \right)^4 \right]$$

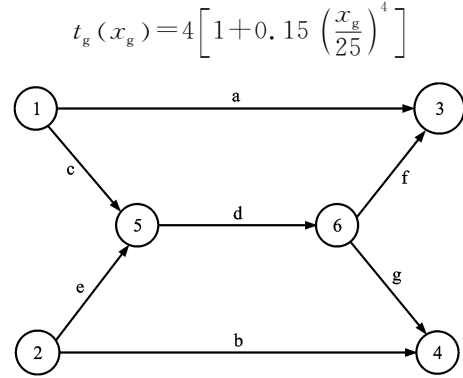


图3 算例 2

Fig. 3 Example 2

利用 GP 算法可以得到网络达到均衡后的路段流量为

$$(x_a, x_b, x_c, x_d, x_e, x_f, x_g) = (25.153\ 2, 16.239\ 6, 4.846\ 8, 8.607\ 2, 3.760\ 4, 4.846\ 8, 3.760\ 4)$$

此时,通过式(3)~(5)计算网络效率分别为: $E_1=0.078\ 8$, $E_2=2.517\ 2$, $E_3=1.709\ 9$;网络内总的旅行费用为 720.077 5。

图 4(a)、(b)分别为删除路段 e 和 f 前后,3 种网络效率随网络内 OD 需求变化而变化的情况,可以看出:在复杂交通网络中,随着 OD 出行需求的增加, E_1 仍然是保持单调递减,而且删除路段之前的 E_1 始终大于删除路段之后,这符合前文的结论,即效率 E_1 是网络规模的增函数,因此,可以认为该效率并不能反映交通网络运行效率的真实变化规律。

E_2 和 E_3 随着网络结构和 OD 需求的变化呈现波动的变化规律。对于删除路段 e 或 f 之前的 E_2 和 E_3 ,两者的变化规律具有相似性,图形都有 2 个极值点,这是因为 OD 对(1,3)和(2,4)之间有 2 条连通路径,可以为相应 OD 需求承担分流的功能。但是在删除路段 e 或 f 后,OD 对(1,3)和(2,4)之间仅有 1 条连通路径,此时, E_2 和 E_3 均呈现出先上升后下降的规律,且仍有一个极值点。

从图 4 中还可以看出:删除路段之后的 E_2 在交通需求量 $q_{2,4} \in [1, 25]$ 且 $q_{1,3} \in [1, 40]$ 时, E_2 的值与删除路段前一致,直到 $q_{2,4} > 25$ 且 $q_{1,3} > 40$ 后, E_2 的数值明显小于删除路段之前。相反,对于效率 E_3 ,在删除路段 e 或 f 后,在一定的需求区间内,其值比删除路段之前反而要高,这正是交通网络中著名的“Braess”诡异现象,即路网能力的加强,反而会导致交通网络运行效率的下降^[28]。

通过上面分析可知:效率 E_1 是网络内交通需求的单调减函数,而效率 E_2 和 E_3 则随着网络内交通需求的变化而产生波动性变化,但是 E_3 的变化

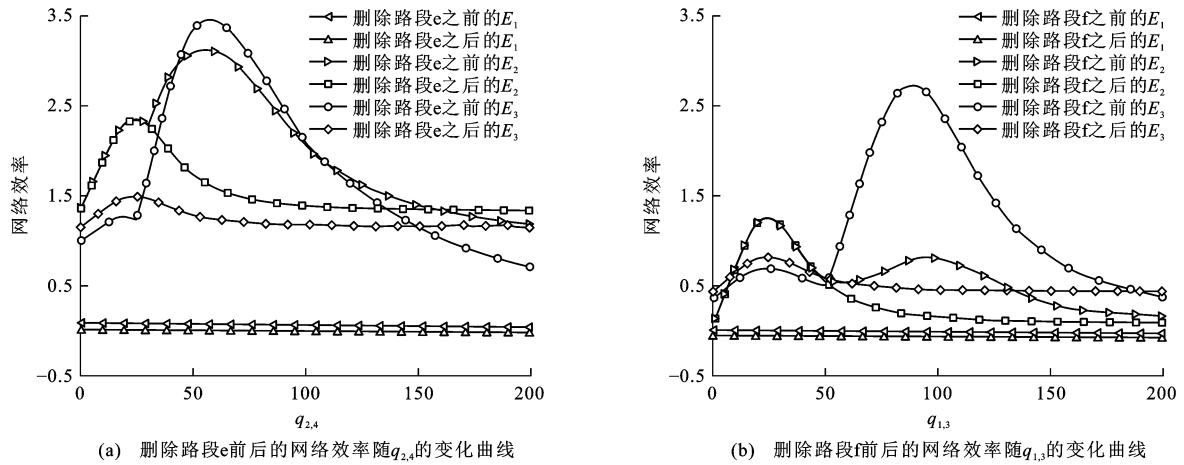


图 4 网络效率随交通需求的变化曲线

Fig. 4 Changing curves of network efficiency with traffic demand

同时能反映出交通网络中的“Braess”诡异现象,因而更具合理性。

3.3 算例 3

针对图 5 所示的交通网络,其中共有 20 个节点

和 28 个路段。网络中只有 1 个 OD 对(1,20),其出行需求取 $q_{1,20}$ 为 100 pcu,旅行时间函数采用 BPR 函数。其中各路段的零流时间 t_0 与路段能力 C 见表 1。

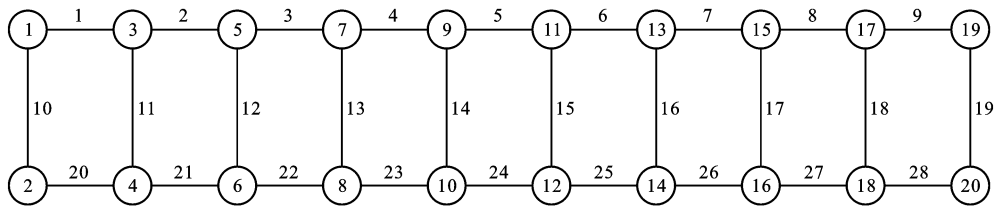


图 5 算例 3

Fig. 5 Example 3

表 1 路段基本信息

Tab. 1 Basic information of road sections

路段	t_0/h	$C/(\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1})$	路段	t_0/h	$C/(\text{pcu} \cdot \text{h}^{-1})$
1	20	5	15	8	9
2	8	4	16	12	8
3	14	3	17	18	7
4	16	6	18	12	5
5	24	6	19	24	8
6	20	7	20	12	6
7	16	8	21	16	4
8	26	5	22	20	6
9	28	6	23	14	9
10	32	4	24	16	8
11	26	7	25	18	9
12	28	8	26	12	7
13	24	7	27	20	8
14	20	8	28	26	7

当 $q_{1,20}$ 固定时,针对 OD 对(1,20)间的一条路

径:1-3-5-7-9-11-13-15-17-19-20,计算 E_1 、 E_2 、 E_3 在——删除路径中的路段后的数值变化。为了便于表达,用 X_1 、 X_2 、 \dots 、 X_{11} 分别表示路段删除后的不同网络结构,如表 2 所示,计算结果见图 6。

表 2 网络结构状态标识

Tab. 2 State notations of network structure

状态标识	网络结构
X_1	初始网络
X_2	删除路段 19 后的网络
X_3	删除路段 9、19 后的网络
X_4	删除路段 8、9、19 后的网络
X_5	删除路段 7~9、19 后的网络
X_6	删除路段 6~9、19 后的网络
X_7	删除路段 5~9、19 后的网络
X_8	删除路段 4~9、19 后的网络
X_9	删除路段 3~9、19 后的网络
X_{10}	删除路段 2~9、19 后的网络
X_{11}	删除路段 1~9、19 后的网络

由图 6 可知:在算例 3 中,无论 $q_{1,20}$ 为 25 还是

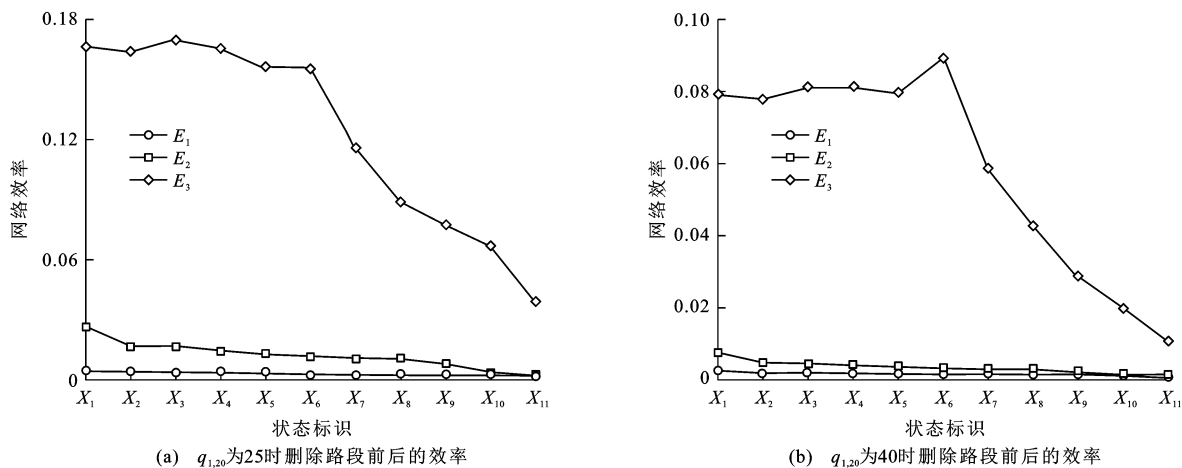


图6 网络效率比较

Fig. 6 Comparison of network efficiencies

$q_{1,20}$ 为 40 时, E_1 随路径中路段删除数量的增加缓缓减小,但由于数值较小变化幅度不易被观察,符合前面对 E_1 的分析结果,即 E_1 是关于路段数 n 的增函数且不能够反映网络的结构变化;当 $q_{1,20} = 25$ 时, E_2 则在删除一条路段 19 后由初始值 0.026 4 开始下降至 0.016 5,之后删除路段 9 和 19 后效率依旧为 0.016 5,这是因为路段 9 和 19 都在且仅在 OD 对间的同一条路径上,且删除后不影响其他路径的连通,所以效率不变,而之后删除更多路段, E_2 的下降趋势也是微乎其微,这同样说明 E_2 是关于路段数 n 的增函数;另外,针对 OD 对间的某一条路径,只要删除其中一条路段后,该路径就不连通了,此时 E_2 会急剧减小,之后删除该路径中的更多条路段后 E_2 的变化很小,不能反映出网络结构所发生的变化,因此,可以认为它不能够反映网络结构的相关信息。

而从 E_3 的变化中可以看出它不是关于路段数的单调函数,当 $q_{1,20} = 25$ 时, E_3 随着路段 19 的删除由初始值 0.166 5 开始下降至 0.163 8,然而,删除路段 9 和 19 后 E_3 又上升至极值点 0.170 2,这是因为该网络在交通需求 $q_{1,20}$ 为 25 时,由于删除路段 19 使得 OD 对 (1,2) 间的一条路径已不再连通,此时路段 9 的存在反而没有起到分配流量的作用,所以删除路段 9、19 后网络效率反而会增大。另外,删除路段 9、19 后的网络效率为该交通需求条件下的最大值,说明这一网络结构为当前交通需求下最合理的结构;当 $q_{1,20} = 40$ 时, E_3 同样是随着路段 19 的删除由初始值 0.078 9 下降至 0.077 8,随后在删除路段 9 和 19 后,上升至 0.080 7,直到删除路段 6~9、19 后,网络效率达到最大值 0.089 3,这说明在 $q_{1,20}$ 为

40 时,删除路段 6~9、19 后的网络结构为此时最适宜的网络结构,因此,可以认为针对不同的交通需求,最适宜的交通网络结构也不尽相同。

另外,观察图 6(a)、(b) 均可发现:随着删除 5~9、19 乃至更多的路段, E_3 开始急剧下降,这主要是因为当前的 OD 需求下,删除路段数越多,导致 OD(1,20) 间连通的路径数越来越少,路段越来越拥挤,从而使得网络效率迅速下降,因此,对算例网络来说,删除路段 6~9、19 后的网络结构为满足网络基本运行效率的分界点,倘若在此基础上再删除路段,则无法满足网络的稳定及正常运作效率。

另外,从 E_3 的变化可以发现:网络效率并不完全取决于路段数,还取决于网络结构,在一个固定的交通需求下,通过计算 E_3 随网络中路段数及网络结构的变化可以找到使交通网络效率最大的网络结构。那么,可以认为 E_3 相对 E_1 和 E_2 来说,能够反映出更多有关网络结构等方面的信息,也就更具有合理性。

综上,结合本文相关的理论分析和算例计算得出的结论,将 3 种方法的适用范围及优缺点总结见表 3。

3 结 语

(1) 对 3 种交通网络运行效率的定量评价方法进行了比较分析,相对既有的 2 种效率 E_1 和 E_2 , E_3 从路段平均费用的角度重新定义了网络效率为均衡状态时,交通网络上平均单位出行成本的付出可以服务的出行者数量。

(2) 不同规模的算例分析均表明,网络效率 E_3 能反映网络结构、交通需求以及用户选择行为等因

表 3 评价方法比较
Tab. 3 Comparison of evaluation methods

方法	1	2	3
效率	$E_1 = \frac{1}{n_N(n_N - 1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}}$	$E_2 = \frac{1}{n_W} \sum_{w \in W} \frac{q_w}{t_w}$	$E_3 = \frac{1}{n_A} \sum_{a \in A} \frac{x_a}{t_a(x_a)}$
适用范围	更适用于信息流效率分析,不适用拥挤网络效率评价	能适用于拥挤网络的效率评价	能适用于拥挤网络的效率评价
优点	可对加权网络和非加权网络给出精确的定量分析,对神经网络和通信网络的信息交换效率的评估较准确	能反映交通需求、出行成本和用户选择行为对网络效率的综合影响	能反映网络结构、交通需求、出行成本以及用户选择行为对网络效率的综合影响
缺点	未考虑拥挤效应,不能直接用于拥挤网络效率评价	不能反映网络结构对网络效率的影响	计算复杂度相对较高

素对交通网络效率的综合影响,而且还能够与交通网络中的“Braess”诡异现象进行相互解释,尤其是相对其他 2 种网络效率, E_3 能更真实地反映交通网络的实际运行绩效。

(3)当交通网络结构固定时,网络效率随交通需求的变化而波动,但总会存在一个最大值。相应地,当网络内的交通需求固定时,也总有一个能使网络效率最大的网络结构。

(4)本文使用理论网络探索网络效率与交通需求及网络规模之间的相关规律,今后的研究将考虑对真实世界的交通网络进行计算并展开更深层的分析。

参 考 文 献 :

References :

[1] COSTA A, MARCELLOS R N. Evaluating public transport efficiency with neural network models[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1997, 5(5): 301-312.

[2] 吴文化. 中国交通运输效率评价体系研究分析[J]. 综合运输, 2001(3):32-35.

WU Wen-hua. Research and analysis on the evaluation system of transportation efficiency in China[J]. Comprehensive Transportation, 2001(3): 32-35. (in Chinese)

[3] LEVINSON D. Perspectives on efficiency in transportation[J]. International Journal of Transport Management, 2003, 1(3): 145-155.

[4] 俞礼军,靳文舟. 交通效率的度量方法研究[J]. 公路,2006(10): 102-106.

YU Li-jun, JIN Wen-zhou. A study on measures of transportation efficiency[J]. Highway, 2006(10): 102-106. (in Chinese)

[5] 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.

YE Peng-yao, CHEN Xiao-hong. Study of urban optimal density of road network based on transportation efficiency[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(4): 94-98. (in Chinese)

[6] NAIT S M A, MANIER M A, MOUDNI A E. Spectral analysis for performance evaluation in a bus network[J].

European Journal of Operational Research, 2009, 193(1): 289-302.

[7] GUDMUNDSSON S. Efficiency and performance measurement in the air transportation industry[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2004, 40(6): 439-442.

[8] YU Ming-Miin, LIN E T J. Efficiency and effectiveness in railway performance using a multi-activity network DEA model[J]. Omega, 2008, 36(6): 1005-1017.

[9] ROUGHGARDEN T, TARDOS É. How bad is selfish routings[J]. Journal of the ACM, 2002, 49(2): 236-259.

[10] 黄海军,欧阳恋群,刘天亮. 交通网络中用户均衡行为的效率损失上界[J]. 北京航空航天大学学报,2006,32(10):1215-1219.

HUANG Hai-jun, OUYANG Lian-qun, LIU Tian-liang. Upper bounds of efficiency loss for user equilibrium behavior in traffic networks [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(10): 1215-1219. (in Chinese)

[11] 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.

YU Xiao-jun, HUANG Hai-jun. Measuring the network efficiency and computing the component importance [J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2012, 32(7): 1546-1552. (in Chinese)

[12] 余孝军,黄海军,刘天亮. 固定需求网络中多用户类随机均衡的效率损失[J]. 交通运输系统工程与信息,2009,9(4):83-89.

YU Xiao-jun, HUANG Hai-jun, LIU Tian-liang. Efficiency loss of the multi-class stochastic traffic equilibrium assignment with fixed demand[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(4): 83-89. (in Chinese)

[13] 余孝军,黄海军. 收费情形下多用户类随机用户均衡交通分配的效率损失上界[J]. 吉林大学学报:工学版,2009,39(增 2): 71-75.

YU Xiao-jun, HUANG Hai-jun. Bounding efficiency loss of multiclass stochastic user equilibrium traffic assignment under road pricing[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2009, 39(S2): 71-75. (in Chinese)

- [14] 刘天亮,欧阳恋群,黄海军. ATIS作用下的混合交通行为网络与效率损失上界[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(4): 154-159.
- LIU Tian-liang, OUYANG Lian-qun, HUANG Hai-jun. Mixed travel behavior in networks with ATIS and upper bound of efficiency loss[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2007, 27(4): 154-159. (in Chinese)
- [15] GUO Xiao-lei, YANG Hai, LIU Tian-liang. Bounding the inefficiency of logit-based stochastic user equilibrium[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(2): 463-469.
- [16] 石超峰,徐寅峰. 交通网络效率损失上界的估计方法[J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 945-947.
- SHI Chao-feng, XU Yin-feng. Estimation methods for upper bounds of efficiency loss in traffic networks[J]. Systems Engineering—Theory and Practice, 2010, 30(5): 945-947. (in Chinese)
- [17] LATORA V, MARCHIORI M. Efficient behavior of small-world networks[J]. Physical Review Letters, 2001, 87(19): 198701-1-4.
- [18] LATORA V, MARCHIORI M. Economic small-world behavior in weighted networks[J]. European Physical Journal B, 2003, 32(2): 249-263.
- [19] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston subway a small-world networks? [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2002, 314(1-4): 109-113.
- [20] LATORA V, MARCHIORI M. How the science of complex networks can help developing strategies against terrorism[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2004, 20(1): 69-75.
- [21] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M, et al. Efficiency of scale-free networks: error and attack tolerance[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2003, 320: 622-642.
- [22] CRUCITTI P, LATORA V, MARCHIORI M, et al. Error and attack tolerance of complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2004, 340(1-3): 388-394.
- [23] NAGURNEY A, QIANG Qiang. A network efficiency measure for congested networks[J]. EPL, 2007, 79(3): 1-5.
- [24] NAGURNEY A, QIANG Qiang. A network efficiency measure with application to critical infrastructure networks [J]. Journal of Global Optimization, 2008, 40(1-3): 261-275.
- [25] QIANG Qiang, NAGURNEY A. A unified network performance measure with importance identification and the ranking of network components[J]. Optimization Letters, 2008, 2(1): 127-142.
- [26] QIN Jin, HE Yu-xin, NI Ling-lin. Quantitative efficiency evaluation method for transportation networks[J]. Sustainability, 2014(6): 8364-8378.
- [27] QIN Jin, NI Ling-lin, SHI Feng. Mixed transportation network design under a sustainable development perspective[J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 1-8.
- [28] CHEN A, LEE D H, JAYAKRISHNAN R. Computational study of state-of-the-art path-based traffic assignment algorithms[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 59(6): 509-518.