

一种城市交通路网实时动态 多路口路径导航量子搜索方法

胡文斌, 聂 聪, 邱振宇, 杜 博, 袁 泉

(武汉大学计算机学院, 湖北武汉 430072)

摘 要: 城市交通拥堵日益严重, 高效的路径导航方法一直是当前研究的热点和缓解拥堵的主要途径. 现有的研究成果主要集中在对单个车辆行驶时间的路径寻优和小规模路网的多车辆均衡化的路径导航, 没有实现大规模多车辆多路口的实时动态路径导航. 当前研究主要存在以下局限: (1) 导航方案评价指标单一, 不能充分表示导航方案的优劣; (2) 无法实现大规模路网的实时导航. 针对这些问题, 本文提出一种城市交通路网实时动态多路口路径导航量子搜索方法 (A Route Guidance Method based on Quantum Searching for Real-time Dynamic Multi-intersections in Urban Traffic Networks, RGQS), 该方法充分考虑各种因素, 实时提供大规模路网的路径导航. 本文的实验分别在人工路网和真实路网中验证了 RGQS 方法相比于对比算法可以使行驶时间减少达到 20%.

关键词: 交通拥堵; 路径导航; 多路口; 效用值; 量子搜索

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2018)01-0104-06

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn> **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2018.01.015

A Route Guidance Method Based on Quantum Searching for Real-Time Dynamic Multi-Intersections in Urban Traffic Networks

HU Wen-bin, NIE Cong, QIU Zhen-yu, DU Bo, YUAN Quan

(Department of Computer Science, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China)

Abstract: Traffic congestion is more and more serious. Efficient route guidance has been the main way to relieve congestion. The existing research results mainly concentrate on optimizing single vehicle routing or multi-vehicles route guidance with small traffic network scale. There is no real-time and dynamic route guidance for large-scale multi-vehicles and multi-intersections. The current studies mainly have the following limitations: (1) the need for an appropriate metric or factor for the evaluation a route guidance project; (2) access to real-time route guidance for multiple vehicles in large scale multiple intersection urban networks. In view of the above problems, this paper proposes a route guidance quantum searching (RGQS) method for real-time dynamic multi-intersections in urban traffic network, which takes full account of various factors and provides real-time route guidance to avoid local congestion. The extensive experiments show that the RGQS method can reduce the traveling time by 20% compared with the comparison algorithms in the artificial road network and the real road network, respectively.

Key words: traffic congestion; route guidance; multi-intersection; utility value; quantum search

1 引言

本文采用动态路径导航, 而动态路径导航不适合应用于复杂大规模路网的实时路径导航, 因为动态的实时预测模型难以平衡计算过程的复杂性和导航结果

的准确性之间的矛盾, 而本论文通过全面考虑众多影响因素来评估所预测路径导航方案的优劣解决了准确性的问题, 并使用高效的量子计算^[1], 并改进量子搜索算法^[2]使之适用于最大效用值搜索问题, 解决了复杂性的问题, 本论文解决了动态路径导航中准确性和复

收稿日期: 2016-07-06; 修回日期: 2017-01-12; 责任编辑: 李勇锋

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 61572369, No. 61711530238); 湖北省自然科学基金 (No. 2015CFB423); 武汉市重大科技计划项目 (No. 2015010101010023)

杂性两方面的矛盾。

量子搜索算法已被证明是性能最优的搜索算法^[3],并且可以搜索有多个解的情况,可以适用于搜索出若干最佳导航方案中的一个,而量子计算的高并行性可以实时计算效用值,因此本文在此基础上进行了一些改进,提出 RGQS 方法,解决大规模路网的路径导航问题.量子搜索算法已在其他众多领域得到应用^[4],比如基于谷歌网页搜索算法(Google's PageRank algorithm)而提出的量子网页搜索算法^[5],在依据网页重要性搜索无序的网页数据库时,量子搜索算法的性能明显优于传统算法.量子搜索算法对路由表搜索的应用^[6]可以更有效实现网络路由表搜索从而提高网络效率.然而,无论是量子网页搜索还是量子路由表搜索都是已知目标网页和已知目标路由地址的情形下进行数据搜索,而本文提出的 RGQS 方法在改进了量子搜索算法后在不知道最佳效用值的前提下依然可以完成搜索任务.

2 系统模型

本文提出的模型针对一个封闭的多路口多路径城市交通路网,模型实时动态地为所有车辆提供路径导航.路径导航方案的优劣取决于很多因素,本文用效用值 U 评价路径导航方案的优劣,影响效用值大小的因素既包括其值越大效用值越高的因素,如路段是否可达 Fr 、路段状况 Rs 、速度限制 Sl 、路段照明状况 Ls 、司机对推荐路径遵从程度 Os 、司机对路段的熟悉程度 Fd ,也包括其值越大效用值越低的因素,如突发的交通事故或临时管制带来的交通影响 Ta 、所选路径的时间代价 Tc 、所选路径的距离代价 De 、所选路径的油耗代价 Oc 、交通灯等待时间 Tl ,前者本文整合为偏好值 P ,后者整合为成本值 C ,效用值 U 的计算公式如式(1)所示.

$$U = P - C \quad (1)$$

某路段的偏好值 P 计算公式如式(2)所示.

$$P = Fr \times (\alpha_1 \times Rs + \alpha_2 \times Sl + \alpha_3 \times Ls + \alpha_4 \times Os + \alpha_5 \times Fd) \quad (2)$$

其中 $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 分别是各影响因素对应的独立乘法因子,其值与城市规模、决策目标的设定有关,乘法因子数值越大,该因素越重要,对效用值 U 的影响越大,五个乘法因子相加和为 1,本文通过对真实路网中大量历史数据的严密分析和比较确定了式中参数, $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.3$, $\alpha_3 = \alpha_4 = 0.1$, $\alpha_5 = 0.2$. 在任一条可选路径中,各路段的偏好值累加即为该路径的偏好值,偏好值越大,表示该路径越优.

路径的成本值 C 可如式(3)计算得到.

$$C = \beta_1 \times Ta + \beta_2 \times Tc + \beta_3 \times De + \beta_4 \times Oc + \beta_5 \times Tl \quad (3)$$

其中, $\beta_i (i = 1, 2, \dots, 5)$ 是成本值 C 的各影响因素的独立乘法因子,5 个乘法因子相加和为 1,本文通过对真实路网中大量历史数据的严密分析和比较确定了式中参数, $\beta_1 = \beta_4 = \beta_5 = 0.1$, $\beta_2 = 0.4$, $\beta_3 = 0.3$. 当某路径成本值 C 越小,该路径越优,所有车辆的成本值累加即为该路径导航方案最终的成本值.

车辆的平均行驶时间 Tl 与路段的车辆数 vol 存在一定的函数关系,本文采用 BPR 函数来预测平均行驶时间 Tl ,计算公式如式(4)所示.

$$Tl(vol) = t \left(1 + \frac{\phi}{\varphi + 1} \left(\frac{vol}{vol_{max}} \right)^\varphi \right) \quad (4)$$

式(4)中 ϕ 的值很小, $5 \geq \varphi > 1$, t 表示车辆在路段自由流时平均行驶时间, vol_{max} 表示路段的阈值容量.

3 RGQS

当所有车辆的行驶路径(即一种路径导航方案)确定时,根据第 2 章中的方法可以计算其效用值,当所有可能路径导航方案的效用值 U 获得后,选择出最佳效用值 U_{max} 的路径导航方案进行车辆诱导,就实现了最佳的交通导航.然而对一个大型城市路网而言,所有可能的路径导航方案数是巨大的,使用普通的计算机进行计算搜索时,由于计算速度和搜索速度的限制,无法实现整个路网车辆调度的实时性.而量子计算可以实现连续变量真正意义上的并行计算,并且量子搜索算法已被证明是最高效的搜索算法,因此本文提出一种城市交通路网实时动态多路口路径导航量子搜索方法 RGQS 解决此问题,如算法 1 所示, RGQS 方法由 UVCQC 算法和 RUNQS 算法构成, UVCQC 算法突破了计算速度的限制, RNUQS 算法突破了搜索速度的限制,实现了整个路网的实时路径导航.

算法 1 RGQS

输入:车辆数 n ,起止点信息及每辆车的可选路径,所有路段路况信息,实时的交通信息等;

输出:满足要求的效用值 U_s 以及每辆车最佳行驶路径;

1. 初始化车辆 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 及其可选路径 $\{b_{1,d_1}, b_{2,d_2}, \dots, b_{n,d_n}\}$;
2. 对车辆及其可选路径进行量子编码 $\{|10\rangle, |11\rangle, \dots, |12^{n \times h} - 1\rangle\}$, 确定量子态可完全表示所有的路径导航方案;
3. 根据大量历史数据分析确定所有影响因素的乘法因子,确定路径导航方案 x 的效用值计算函数 $U(x)$;
4. 运用 UVCQC 算法(详见 3.1 节)制备路径导航方案的等权叠加态 $|X\rangle$, 并行计算每个路径导航方案 x 对应的效用值 $U(x)$, 得到效用值函数的等权叠加态 $|U(x)\rangle$;
5. 确定效用值的经验值 k , 对效用值函数的等权叠加态 $|U(x)\rangle$ 使用 RNUQS 算法(详见 3.2 节)进行搜索, 搜索出满足要求的效用值 $|U_s\rangle$;
6. 输出满足要求的效用值 U_s 及对应的路径导航方案, 对每辆车进行路径导航.

3.1 UVCQC 算法

本算法 UVCQC 主要实现了路径导航方案与量子编码的映射,并通过量子计算的并行性实时计算出所有路径导航方案的效用值.由于路径导航方案的数量随路网规模增大而呈指数增长,为保证实时导航,本文借助于量子计算机的并行计算能力,通过 UVCQC 算法将量子计算成功应用于路径导航,实现了所有路径导航方案的效用值的并行计算. UVCQC 算法流程如算法 2 所示.

算法 2 UVCQC

输入:车辆数 n , 起止点信息及每辆车的可选路径, 所有路段路况信息, 实时的交通信息等;

输出:所有路径导航方案的效用值的等权叠加态 $|U(x)\rangle$;

1. 将所有车辆编码 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 根据车辆起止点信息确定每辆车的可选路径;
2. 根据每辆车可选路径将每辆车的编码 $0, 1, \dots, b_i$;
3. 根据大量历史数据分析确定影响效用值的所有影响因素的乘法因子;
4. 根据车辆编码和每辆车的可选路径的编码确定所有的路径导航方案;
5. 确定所有路径导航方案的效用值计算函数 $U(x)$;
6. 将车辆编码和路径编码转化为量子编码 $\{|0\rangle, |1\rangle, \dots, |2^{n \times h} - 1\rangle\}$, 每种路径导航方案均有一个量子态表示, 量子态总数为 N ;
7. 利用 Hadamard 门制备自变量路径导航方案 $|x\rangle$ 的量子等权叠加态:

$$|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{N}}(|0\rangle + |1\rangle + |2\rangle + \dots + |N-1\rangle)$$
8. 设计函数对应的么正变换线路 $U_{U(x)}$ 及合适的辅助量子比特 $|z\rangle$;
9. 输入路径导航方案 $|x\rangle$ 的等权叠加态, 并行计算函数 $U(x)$;
10. 输出所有路径导航方案的效用值的等权叠加态 $|U(x)\rangle$.

路径导航方案的数目为 $b_1 \times b_2 \times \dots \times b_n$ 种 (b_i 表示车辆 i 的可选路径数目), 计算量过大因此本文采用量子计算解决实时计算问题.

3.2 RNUQS 算法

量子搜索算法只能解决已经确定目标效用值的情况下的搜索问题, 并且无法百分之百搜索成功, 为了百分之百成功搜索出最大效用值, 本论文在量子搜索算法基础上提出一种路网效用值量子搜索算法 RNUQS, 在不知道目标态的情况下, 可以找到一个近似最优解, 并提出 QEDS 策略, 规避错误输出并使得搜索成功率达到百分之百. RNUQS 算法可以从 3.1 节得到的效用值量子叠加态中搜索到符合要求的效用值, 并得到对应的路径导航方案.

3.1 节获得了效用值的等权叠加态, 即同时获得了所有路径导航方案的效用值, 路径导航问题转化为一个最优结果搜索问题, 搜索的集合为 $\{|U\rangle\} = \{|U_0\rangle, |U_1\rangle, \dots, |U_{N-1}\rangle\}$, 效用值态的个数是 S , 目标态(即需

要输出的态)是 U_{\max} (最大的效用值), 但 U_{\max} 是未知的, 因此不能直接通过量子搜索算法获得最大的效用值和与之对应的路径导航方案. 而本节提出的 RNUQS 算法给出了解决方案, 在城市路网中, 不会产生拥堵的最小效用值可以认为是一个固定的经验值 k , 那么大于经验值 k 的效用值均可以作为结果输出, 假设大于经验值 k 的效用值个数为 m , 那么这 m 中的任何一个均满足输出条件.

本文提出的 RNUQS 算法流程如算法 3 所示.

算法 3 RNUQS

输入:所有路径导航方案的效用值的等权叠加态 $|U(x)\rangle$;

输出:每辆车合适的导航路径;

1. 根据具体的城市路网状况及车辆分布给出合理的效用值的经验值 k ;
2. 给出用于确定目标态的谕示函数 $f(y)$ (见式(5)), 并设置对应的量子线路;
3. 将谕示函数返回 1 的态累加, 得出目标态数 m 并计算综合效用值目标态 $|U_m\rangle$;
4. 根据 $|U_m\rangle$ 确定谕示询问 O , 确定 O 变换;
5. 根据等权叠加态 $|\varphi\rangle$ 确定 D 变换;
6. 由 O 变换和 D 变换确定一次 G 变换 $G = DO$;
7. 对 3.1 节给出的效用值函数的等权叠加态 $|U(x)\rangle$ 进行 $\text{round}(\frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{N}{m} - \frac{1}{2}})$ 次的 G 变换;
8. 观测输出的效用值态 $|U_{\text{out}}\rangle$ 及与之对应的路径导航方案 $|x_{\text{out}}\rangle$, 根据 QEDS 策略, 在时限内搜索出满足要求的效用值 $|U_s\rangle$;
9. 输出效用值态 $|U_s\rangle$ 对应的路径导航方案 x_s 中为每辆车选中的导航路径.

目标态个数为 m , RNUQS 算法中用来确定目标态的函数称为谕示函数, 令 $y = U(x)$, 本算法采用的谕示函数如式(5)所示, $y \geq k$ 时表示输出的效用值大于经验值 k , 则将该态标记为 1, 否则标记为 0.

$$f(y) = \begin{cases} 1, & \text{if } y \geq k \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

算法中 G 变换表示 Grover 变换, 参见文献[2], D 变换和 O 变换为 Grover 的两个子变换. 经过若干次量子迭代后最终能得到目标效用值的概率只是接近 1, 因此有输出出错的可能, 在实际的路径导航中, 错误是不被允许的. 针对这一问题, 本文提出一种量子检错策略 (Quantum Error Detection Strategy, QEDS), QEDS 策略指的是量子搜索后进行检错, 发生错误时进行重新搜索, 并在保证实时性的前提下多次搜索, 寻找更优的结果的一种搜索策略.

4 实验分析

为了全面验证 RGQS 方法的有效性, 本文分别

采用简易的人工模拟路网和真实的城市路网进行实验.

实验选取的对比算法共 2 个,包括基于偏好的算法^[7]和最短路径算法^[8],这 2 种对比算法或者只考虑自身偏好最大,或者只考虑各自成本最小,评价指标单一,未全面考虑影响导航方案的众多因素.本文将 2 种对比算法与本文提出的 RGQS 方法分别在不同规模的人工路网和真实城市路网中进行实验验证,通过行驶时间减少的百分比来验证本文算法的有效性.

图 1 为构造的人工模拟路网,有 16 个路口和若干个双向路段,实箭头表示该方向可通行,虚箭头表示该方向不可通行,图 2 为武汉市武昌区和洪山区的部分真实路网,图 2(a)表示真实路网,图 2(b)表示简化后的路网,图 2(c)表示经过映射后的图形,在本小节为了充分验证 RGQS 方法的性能,设定人工模拟路网的规模依次是 16(4×4)个、100(10×10)个、400(20×20)个和 10000(100×100)个路口,16(4×4)个路口的人工模拟路网如图 1 所示,100(10×10)个路口,400(20×20)个路口和 10000(100×100)个路口的人工路网依照图 1 中所示路网进行扩展即可得到.

在四种人工路网和真实路网中,本文均选取 5 种交通状况进行实验:(1)道路车辆数小于道路的阈值容量(取三个样本值),(2)道路车辆数等于道路的阈值容量(取一个样本值),(3)道路车辆数大于道路的阈值容量但小于道路的拥堵容量(取三个样本值),(4)道路车辆数等于道路的拥堵容量(取一个样本值),(5)道路车辆数大于道路的拥堵容量(取三个样本值).在人工模拟路网中各道路路段状况、车辆分布、起点终点设置与真实路网中尽量一致,车辆在路网中行驶,有各自的起点和终点,每辆车的司机可接受的可选路径有若干条,道路长度、路面状况、时速限制等是可获取的,当所有车辆都确定了行驶路径,每辆车需花费的时间、油耗和距离代价等即可确定,从而可以计算效用值,并在所有的可行路径导航方案中搜索出一个最优路径导航方案.分别使用本文提出的 RGQS 方法和 2 种对比算法对该路网中的车辆进行导航,相对于每种对比算法,本文提出的 RGQS 方法可以使平均行驶时间减少的百分比与路网中车辆数目的关系如图 3 所示.

从图 3 和图 4 的实验结果可以得出如下结论.

- (1) 交通越拥堵, RGQS 方法越有效.
- (2) 路网规模越大, RGQS 优势越明显.
- (3) 当路网规模增大时, RGQS 方法依然能保证实时导航.
- (4) 在人工路网和真实城市路网中, RGQS 方法优势同样明显.

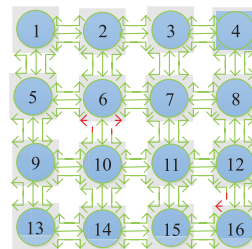


图1 16个路口的人工模拟路网

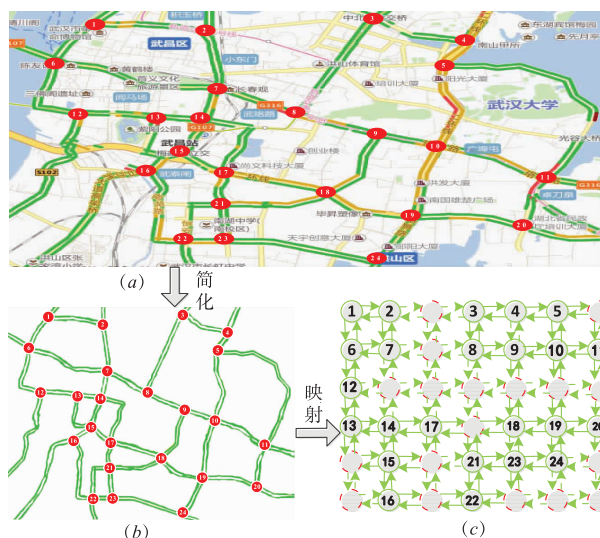


图2 真实路网和模型映射

5 结论

为了解决城市路网交通拥堵问题,本文提出了一种实时动态多路口路径导航模型,该模型可以全面评估路径导航方案的优劣;本文还提出了一种 RGQS 方法,解决了效用值的并行计算和最优搜索问题.为了验证 RGQS 方法的有效性,本文分别在人工模拟路网和真实路网中进行了实验,并得到如下结论.

- (1) RGQS 方法对规模较大的城市路网表现出更好的性能.
 - (2) RGQS 方法对拥堵的城市路网表现出更好的性能.
 - (3) RGQS 方法受路网状况、道路情况、实时状况等因素的影响较小.
 - (4) RGQS 方法比较复杂,应用之前需要大量实时数据,而现有算法则相对精简.
- 本文在以下两个方面需要进一步研究.
- (1) 进一步研究效用值的影响因素和路网规模限制以及优化 RNUQS 算法的检错和寻优能力.
 - (2) 充分考虑交通参数的变化对导航算法的影响.

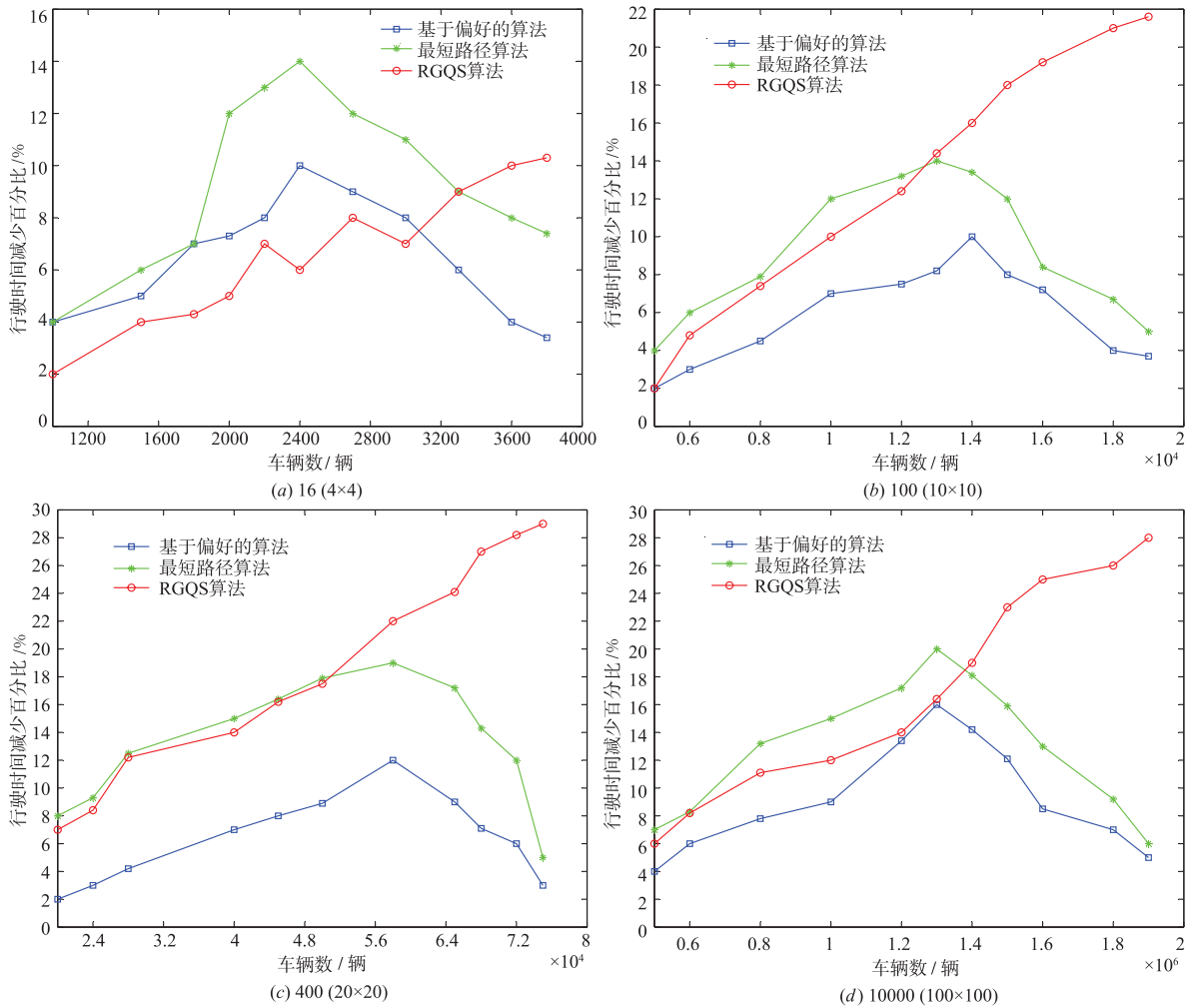


图3 人工模拟路网不同道路规模下RGQS方法相对于对比算法的行驶时间减少百分比

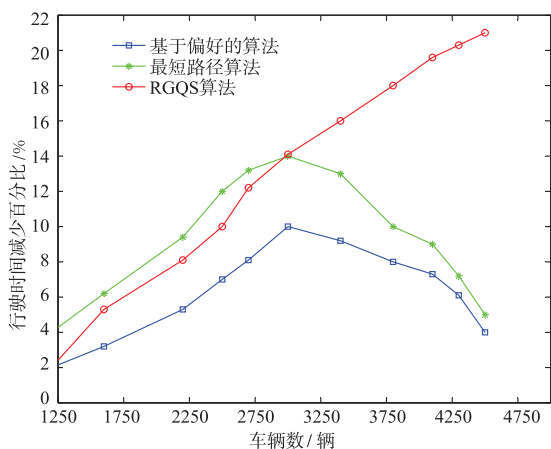


图4 真实路网中RGQS算法相对于对比算法的行驶时间减少百分比

参考文献

[1] Benioff Paul. The computer as a physical system; a microscopic quantum mechanical Hamiltonian model of comput-

ers as represented by Turing machines [J]. Journal of Statistical Physics, 1980, 22 (5) : 563 - 591.

[2] Grover L K. A fast quantum mechanical algorithm for database search [A]. Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing [C]. Philadelphia: ACM, 1996. 212 - 219.

[3] Zalka C. Grover quantum searching algorithm is optimal [J]. Physical Review A, 1999, 60(4) : 2746 - 2751.

[4] Tang Yi, Su Sheng-hui. Application of Grover's quantum search algorithm to solve the transcendental logarithm problem [A]. Proceedings of the Tenth International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS) [C]. Kunming: CIS, 2014. 445 - 449.

[5] Wang Hui-quan, Wu Jun-jie, Yang Xue-jun, Chen Ping-xing, Yi Xun. An enhanced quantum pagerank algorithm integrated with quantum search [A]. Proceedings of the Eighth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing (IMIS) [C]. Birmingham: IMIS, 2014. 74 - 81.

- [6] Varga T, Bacsardi L. Efficient simulation of quantum-based searching [A]. Proceedings of the 22nd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM) [C]. Split: SoftCOM, 2014. 403 - 407.
- [7] Campigotto Paolo, Rudloff Christian, Leodolter Maximilian, Bauer Dietmar. Personalized and situation-aware multi-modal route recommendations; The FAVOUR algorithm [J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2017, 18(1): 92 - 102.
- [8] Zhang Xi-peng, et al. A design of intelligent route guidance system based on shortest path algorithm [A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Service Operations And Logistics, And Informatics (SOLI) [C]. Hammamet: SOLI, 2015. 12 - 17.

作者简介



胡文斌 男, 1976 年出生于湖北武汉, 现为武汉大学计算机学院教授、博士生导师, 主要研究领域为人工智能、智能交通、调度优化。
E-mail: hwb@whu.edu.cn



聂 聪 男, 1993 年出生于湖北应城, 现为武汉大学计算机学院硕士研究生, 主要研究领域为智能仿真与优化。
E-mail: zhenxinhui@whu.edu.cn