

双层车辆路径问题的混合启发式算法^{*}

何江^{1,2}, 黄翰³

(1. 华南理工大学工商管理学院, 广州 510641; 2. 广州市社会科学院产业经济与企业管理研究所, 广州 510410; 3. 华南理工大学软件学院, 广州 510006)

摘要: 针对与城市物流密切相关的双层车辆路径问题(2E-VRP), 提出了一种用来求解的混合启发式算法。该算法利用贪心算法的快速性、蚁群算法的搜索多样性以及邻域搜索算法较强的局部寻优能力来提高求解质量, 加速算法的收敛性。把该算法应用于22个测试算例和3个大规模的算例, 并与同类研究进行了比较。实验结果表明, 混合启发式算法不仅能保证较高的精确性, 而且具有很高的效率; 与精确性最高的同类算法相比, 虽然在解的质量方面稍逊, 但在求解速度方面表现出了明显的优势。实验结果还显示了构建双层城市物流系统的潜在收益, 中转站的设置能够在一定条件下显著提高城市物流效率。

关键词: 双层车辆路径问题; 混合启发式算法; 城市物流; 中转站

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2013)02-0350-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.02.007

Hybrid heuristic algorithm for two-echelon vehicle routing problem

HE Jiang^{1,2}, HUANG Han³

(1. School of Business Administration, South China Technology University, Guangzhou 510641, China; 2. Industrial Economy & Enterprise Management Institute, Guangzhou Association of Society Science, Guangzhou 510410, China; 3. School of Software Engineering, South China Technology University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Aiming at the two-echelon vehicle routing problem (2E-VRP) closely related to city logistics, the paper put forward a kind of hybrid heuristic algorithm to solve 2E-VRP. In order to improve the solution quality and accelerate the convergence of algorithm, the algorithm took advantage of the rapidness of greedy algorithm, the search diversity of ant colony algorithm and the strong local optimization ability of local search algorithm. It applied the algorithm to 22 benchmark examples and 3 large-scale examples, and compared the results with similar studies. The experimental results show that the hybrid heuristic algorithm can not only guarantee a high accuracy, but also have high efficiency. Compare with the similar algorithm of the highest accuracy, although the hybrid heuristic algorithm performs somewhat less well in solution quality, but shows great advantage as far as the solving speed is concerned. The experimental results also show potential benefit of constructing the two-echelon city logistics system, and that setting satellites in certain conditions can significantly improve the city logistics efficiency.

Key words: two-echelon vehicle routing problem(2E-VRP); hybrid heuristic algorithm; city logistics; satellites

0 引言

随着城市中货运车辆越来越多,城市交通管理和环境保护面临越来越严峻的挑战^[1]。在这样的背景下有人提出构建多层城市物流系统^[2-4],以提高物流效率,减轻城市货物运输所带来的负面影响,从而为城市经济社会可持续发展提供有效支撑。双层物流系统是多层城市物流系统的最简单形式。相对于单层物流系统而言,双层物流系统拥有一种新的物流设施,即中转站。大型货车把货物从仓库(或城市物流配送中心)运送到中转站,然后把货物转运到环境友好的小型货车,再由它们完成最后一段的货物运输。这种双层物流系统可以有效地把大型货车限制在城市中心之外,并能在一定条件下减少货车在城市内的行驶里程,因此有助于在减少污染排放,改善城市交通的同时,提高城市物流效率。

双层车辆路径问题(2E-VRP)与城市物流系统规划及运作

管理密切相关^[5,6]。不论是战略层面的城市物流系统规划,还是日常运作层面的车辆路径管理,往往需要求解双层车辆路径问题,并对算法的求解精度和速度有着较高要求。在长期规划方面,求解2E-VRP是仿真模型必须要解决的问题,由于实验过程中会多次求解,因此要求算法的速度要快。对于运作层面的实时优化问题,也必须快速获得可行解。另一方面,解的精确性也是非常重要的,因为目标函数的较小改进都有可能在实际运用中产生巨大的效益。由于2E-VRP是比经典VRP更加复杂的NP难题,因此在兼顾速度和精度的条件下,如何求解该问题是一个更加困难的问题。从文献检索结果来看,关于2E-VRP算法的文献相对较少,已有的算法可以分为两类,即确定性算法和启发式算法。Feliu等人^[7]和Perboli等人^[8,9]提出了一些有效的不等式约束,运用分支定界法对双层车辆路径问题进行求解。这类确定性算法仅适用于小规模2E-VRP,无法在合理的时间内求解较大规模的问题。Perboli等人^[10]构造了两种启发式算法来求解2E-VRP,实验表明这两种启发式算法

收稿日期: 2012-07-21; 修回日期: 2012-08-31 基金项目: 国家社会科学基金资助项目(12CTJ009)

作者简介: 何江(1971-),男,河南封丘人,副研究员,博士研究生,主要研究方向为物流与供应链管理(hj768@sohu.com);黄翰(1980-),男,副教授,博士,主要研究方向为计算智能、蚁群算法等。

在计算速度和解的质量方面都有良好的表现。Crainic 等人^[11]提出了一种基于聚类的启发式算法,将 2E-VRP 分解为两个单层车辆路径问题,然后对这两个子问题迭代求解。他们^[12]还对文献[11]中的算法进行了改进,提出了一种多起点的启发式算法,实验结果表明,该算法在效率和精度方面超过了已有的启发式算法。从近年来的研究趋势来看,随着 2E-VRP 算法研究得到了越来越多的关注,构造高质量和高效率的启发式算法成为该问题研究的主要发展方向。

本文把贪心、蚁群优化和邻域搜索等几种启发式算法集成在一起,提出了一个具有较高精度,同时具有较高效率的混合启发式算法来求解双层车辆路径问题。

1 问题描述

本文仅考虑最简单的双层车辆路径问题^[7,10]。双层物流系统中只有一个仓库,中转站的数量和位置是既定的。系统第一层连接仓库和中转站,第二层连接中转站和客户。货物必须经过中转站才能运送到目标客户,运输流程如下:a)货物到达仓库,集并后装入第一层的货车;b)每辆第一层货车访问中转站的一个子集,完成货物运输后返回仓库;c)货物在中转站被装入到第二层货车;d)每辆第二层货车从中转站出发,执行一条最优路径逐次服务指定的客户,然后返回中转站,准备下一个循环。

系统中货车和中转站都有容量限制,同一层中的货车具有相同的容量限制,第一层货车要比第二层货车的载货量大。在系统的第一层,允许货车的容量小于中转站的容量,中转站的需求是可分割的,可以由多辆货车提供送货服务,每辆货车也可以一趟服务多个中转站。在系统的第二层,每个客户的需求提前知道,需求必须被满足。客户的需求小于第二层货车的容量,需求不能被分割,只能由一辆货车提供配送服务,每辆货车在执行配送任务的过程中可以服务多个客户。优化目标是在满足货车数量约束的条件下,合理配置每个中转站的货运量,选择最佳车辆行驶路径,最小化总运输成本。

2 算法说明

混合启发式算法利用了贪心算法的快速性、蚁群算法的搜索多样性以及局部搜索算法较强的局部寻优能力,提高求解质量,加速算法的收敛性。该算法的基本思路是首先使用基于距离的贪心算法,将双层车辆路径问题转换为若干个经典车辆路径和一个可分割送货的车辆路径问题,然后运用改进的蚁群算法对各个子问题进行求解,最后用基于阈值的局部搜索算法改进可行解。

2.1 基于距离的贪心算法

按照距离最短的原则,对客户进行聚类^[13],将他们分配给不同的中转站,一个客户只能属于一个中转站,从而把第二层的车辆路径问题划分为若干个相互独立的经典车辆路径问题。用这种基于距离的贪心算法分配客户时,应该服从第二层货车数量的约束。例如,假设系统中有两个中转站,第二层货车一共有 4 辆,每辆货车的容量都是 60 单位,客户的总需求是 210 单位。在这样的假设条件下,如果分配给一个中转站的客户需求是 130 单位,分配给另一个中转站的客户需求是 80 单位,为了完成配送任务就需要 5 辆货车,这就超出了货车数量约束,因此是不可行的。如果分配某个客户给中转站是不可行的,就

将该客户分配给距离该客户第二近的中转站,依此类推,直到找到可行的中转站。

2.2 改进的蚁群优化算法

Hansen 等人^[14]认为,蚁群优化算法属于基于群体的元启发式算法,而多邻域下降搜索则属于轨迹法。基于群体的元启发式算法善于发现可能存在最优解的区域,而轨迹法则是善于在某个区域中找到更好的解。本文结合两者的优势,构造一种改进的蚁群优化算法来求解单层 VRP。

2.2.1 信息素初始化

这里首先使用基于距离的贪心算法构造一个初始解 s_0 ,并根据式(1)设定信息素初值,其中 n 为客户数量。

$$\tau_0 = 1/n \cdot f(s_0) \quad (1)$$

2.2.2 构建可行解

从仓库出发,随机选择一个客户,开始构建可行解 s 。根据伪随机比例规则式(2)从满足约束条件、尚未被访问的客户集合 V 中选择客户 k 插入到客户 i 与 j 之间。式(2)中 α, β 分别是 τ_{ijk} 和 η_{ijk} 的相对影响因子;式(3)中 τ_{ij} 是弧 (i, j) 上的信息素;式(4)中 η_{ijk} 是启发式信息, c_0 是客户与配送中心之间的距离, c_{ij} 是客户 i 与 j 之间的距离。

$$p_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ijk}]^\alpha [\eta_{ijk}]^\beta}{\sum_{h \in V} [\tau_{ijh}]^\alpha [\eta_{ijh}]^\beta} & j \in V \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$$\tau_{ijk} = (\tau_{ik} + \tau_{kj})/2\tau_{ij} \quad (3)$$

$$\eta_{ijk} = c_{0k} - (c_{ik} + c_{kj} - c_{ij}) \quad (4)$$

2.2.3 局部信息素更新

根据式(5)进行局部信息素更新,其中 $0 < \rho_1 < 1$ 是信息素挥发系数, s 是一个可行解。

$$\tau_{ij} = (1 - \rho_1) \tau_{ij} + \rho_1 \tau_0, \forall (i, j) \in s \quad (5)$$

2.2.4 全局信息素更新

每次迭代结束后,根据规则式(6)进行全局信息素更新,其中, s_{sb} 是 best_counts 个历史最优解集合。

$$\tau_{ij} = (1 - \rho) \tau_{ij} + \rho \Delta \tau, \forall (i, j) \in s_{sb} \quad (6)$$

$$\Delta \tau = 1/f(s_{sb}) \quad (7)$$

2.2.5 多邻域下降搜索

多邻域下降搜索的基本步骤是:从初始解出发,选择一种邻域结构进行局部搜索,直至找到最优解,再以此最优解为初始解重新开始搜索过程。若任何一种邻域结构都不能继续改进当前解时,结束搜索过程。本文使用了三种常用的邻域结构:插入法(insert)、节点交换法(swap)和 2-opt。实验发现,按照先插入,再交换,最后 2-opt 的顺序,算法性能表现最好。因此,在下面的实验中,均按照这个顺序使用这三种局部搜索方法。

2.3 基于阈值的局部搜索算法

在运用前面的方法获得强可行解的前提下,本文使用基于阈值的插入法和基于阈值的交换法来提高强可行解。通过实验发现,先执行基于阈值的插入法再执行基于阈值的交换法会获得更好的效果,基于阈值的插入法在小规模的数据集中更加有用,而基于阈值的交换法则是在比较大的数据集中体现它的作用。

2.3.1 基于阈值的插入法

这里的插入法就是在中转站容量允许的前提下,将客户从一个中转站中删除添加入另一个中转站,如果解的质量提高就保存交换,如不提高则不作交换。在客户较多,特别是多个中转站的时候,显然要花费很多计算时间,需要的计算时间至少为 $n \times m \times (m + 1) \times \text{time}$,其中 n 为客户数量, m 为中转站数量,

time 为求解单层 VRP 所需的时间。为了提高效率,减少计算时间,基于阈值的插入法定义了一个考察指标 $r(i,j,k)$,如式(8)所示。 S_j, S_k 分别表示第 j 个和第 k 个中转站,这里设定一个阈值 $\&$,当 $r(i,j,k)$ 大于这个阈值时才进行插入操作,当 $\&=0$ 时表示客户和所有的中转站都做插入操作。在本文的实验中,当中转站数量较少时设置 $\&=0$,数量较多时设置 $\&=0.7$ 。

$$r(i,j,k) = \text{客户 } i \text{ 到 } S_j \text{ 的距离} / \text{客户 } i \text{ 到 } S_k \text{ 的距离} \quad (8)$$

2.3.2 基于阈值的交换法

这里的交换法就是在中转站容量约束允许的前提下,将两个客户互换中转站。如果解质量提高则保存交换,如不提高则不作交换。但是这种算法在客户数量较多时,计算时间可能很长,需要的计算时间为 $n \times n \times (m+1) \times \text{time}_0$ 。与基于阈值的插入法类似,基于阈值的交换法也设定了一个阈值,如式(9)所示, d_{ij} 表示客户 i 和 j 之间的距离, n 表示客户数量。当两个附属不同中转站的两个客户距离不超过指定阈值,进行交换;否则,不交换。

$$V = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m d_{ij} / [(n-1)(n-1)] \times 2 \quad (9)$$

3 实验

3.1 实例与参数说明

本文所采用的算例由 Christofides 和 Eilon 的 VRP 标准测试算例改造而来^[7],具体包括以下算例:E-n22-k4、E-n33-k4 和 E-n51-k5。表 1 显示实验所用算例的主要特征。第一行是原始 VRP 算例的名称, ns 和 nc 分别是中转站和客户的数量, m_1 和 m_2 分别为第一层和第二层的车辆数, c_1 和 c_2 分别是这两种货车的容量,satellites 是中转站的位置。本文中所有的算法都是用 Java 语言实现,并且在主频为 3.3 GHz、内存为 2 GB 的计算机上进行了实验。通过大量的实验,确定混合启发式算法的参数设置如下:蚂蚁数量 $\text{ant_num}=6$, $\rho=0.2$, $\rho_1=0.1$, $\alpha=1$, $\beta=2$, $\text{best_counts}=6$ 。

表 1 双层车辆路径问题测试算例的特征

VRP 算例	E-n22-k4	E-n33-k4	E-n51-k5	E-n51-k5
ns	2	2	2	4
nc	21	32	50	50
m_1	3	3	3	4
m_2	4	4	5	5
c_1	15 000	20 000	400	400
c_2	6 000	8 000	160	160
satellites	6,17	1,9	2,17	2,4,17,46
	8,14	2,13	4,46	
	9,19	3,17	6,12	
	10,14	4,5	11,19	6,12,32,37
	11,12	7,25	27,47	11,19,27,47
	12,16	14,22	32,37	

3.2 同其他算法的比较

运用混合启发式算法分别对上面的测试算例求解,每个算例都执行了 10 次,实验结果如表 2 所示。第一列是算例名称,第二列 ours 是使用混合启发式算法得到的最优解,其余四列是其他文献中的算例结果,其中,①和②分别代表文献[10]中的 Diving 和 Semi-continuous 算法,③和④分别代表文献[12]中的 PRIZE/50D_50W 和 RAND1/MIN_WEIGHT 算法。为了说明算法的有效性,下面把混合启发式算法与上述算法进行了比较。与 Diving 和 Semi-continuous 这两种算法比较,在 21 个算例中本文的算法分别在 16 个和 10 个算例中获得了更好的解,在 1 个和 2 个算例中得到了相同的解,总的来讲本文的算法比

这两种算法分别提高了 3.2% 和 1.0%。与 PRIZE/50D_50W 和 RAND1/MIN_WEIGHT 这两种算法比较,在 21 个算例中本文的算法分别在 9 个和 8 个算例中获得了更好的解,在 2 个和 2 个算例中得到了相同的解,总的来讲本文的算法稍微劣于这两种算法的结果。从运行时间来看,使用混合启发式算法,21 个算例的平均运行时间为 5.7 s,而 Diving、Semi-continuous、PRIZE/50D_50W 和 RAND1/MIN_WEIGHT 这四种算法的平均时间分别为 55.3、218.2、18.5 和 15.4 s,因此本文算法在效率上要明显优于上述算法。综合来看,混合启发式算法不仅能保证较高的求解精度,而且具有很高的效率。

表 2 双层车辆路径问题的算例测试结果

算例名称	ours	①	②	③	④
E-n22-k4-s6-17	417.07	417.07	417.07	417.07	417.07
E-n22-k4-s8-14	384.96	441.41	408.14	384.96	384.96
E-n22-k4-s9-19	470.60	472.23	470.60	472.23	472.26
E-n22-k4-s10-14	371.50	435.92	440.85	375.91	371.50
E-n22-k4-s11-12	444.66	487.45	429.39	444.83	444.83
E-n22-k4-s12-16	405.57	425.65	425.65	403.79	403.13
E-n33-k4-s1-9	774.54	772.57	736.92	757.56	757.56
E-n33-k4-s2-13	745.40	749.94	736.37	733.18	739.64
E-n33-k4-s3-17	801.16	801.19	739.47	754.65	787.29
E-n33-k4-s4-5	760.76	838.31	816.59	792.89	792.89
E-n33-k4-s7-25	756.19	756.88	756.88	756.88	756.88
E-n33-k4-s14-22	824.58	779.06	779.06	824.60	824.60
E-n51-k5-s2-17	626.23	666.83	628.53	614.17	611.88
E-n51-k5-s4-46	547.97	543.24	543.20	533.83	533.83
E-n51-k5-s6-12	555.23	560.22	554.80	546.92	546.92
E-n51-k5-s11-19	609.32	584.09	592.06	579.90	579.90
E-n51-k5-s27-47	533.55	538.20	538.20	535.77	535.77
E-n51-k5-s32-37	552.27	584.59	587.12	555.05	555.05
E-n51-k5-s24-17-46	574.13	590.63	542.37	565.00	565.00
E-n51-k5-s6-12-32-37	565.39	571.80	584.88	567.00	567.00
E-n51-k5-s11-19-27-47	613.46	724.09	724.09	600.00	600.00

3.3 大规模算例的实验

实际应用中的双层车辆路径问题往往是较大规模的问题,为了说明混合启发式算法用于大规模实例的可行性和有效性,这里对 VRP 测试算例 G-n262-k25 进行改造,得到三个 2E-VRP 问题(表 3),然后使用本文算法进行求解,每个算例都执行了 10 次,实验结果如表 4 所示。表 3 和 4 中的 ns 、 nc 、 m_1 、 m_2 、 c_1 、 c_2 、satellites、ours 等符号的含义同表 1、2。表 4 中第一列是 VRP 算例名称,括号内是该 VRP 算例的最优解,最后一列是求解 2E-VRP 的计算机运行时间。实验结果表明,本文算法用于大规模的算例,能在合理的时间内得到较好的可行解。从这三个算例结果可以发现,中转站的设置的确可以减少运输成本。例如,设置 12 个中转站,采用双层物流配送策略要比单层物流配送策略减少约 16.7% 的运输里程,这是相当显著的改进。然而中转站的数量并不是越多越好,设置 12 个中转站就要比设置 20 个中转站的效果好,可见中转站的数量有一个最优值,这一点与文献[15]研究发现相同。

表 3 大规模双层车辆路径问题测试算例的特征

VRP 算例	ns	nc	m_1	m_2	c_1	c_2
G-n262-k25	8	261	10	25	1 250	500
	12	261	10	25	1 250	500
	20	261	10	25	1 250	500

表 4 大规模双层车辆路径问题的算例测试结果

VRP(opt)	satellites	ours	时间/s
	7,13,21,33,58,75,83,99	5 264.46	12.5
G-n262-k25 (6119)	1,10,7,13,21,33,58,75,83,99,180,190	5 094.52	20.1
	1,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100,110,120,130,140,150,160,170,180,190	5 442.26	54.5

4 结束语

双层车辆路径问题与大城市的物流系统设计密切相关,然而关于双层车辆路径问题的算法研究还比较缺乏。本文把贪心算法、蚁群优化算法和邻域搜索算法结合在一起,构造了一种混合启发式算法,用于求解双层车辆路径问题。该算法利用了贪心算法的快速性,蚁群优化算法的搜索多样性以及局部搜索算法较强的局部寻优能力,以提高求解质量,加速算法的收敛性。将该算法应用于22个测试算例和3个大规模的算例,并与同类研究进行了比较。实验结果表明,本文所提出的混合启发式算法能够在较短时间内获得算例的最优解或强可行解。与精确性最高的同类算法相比,虽然本文算法在解的精确性方面稍逊,但在求解速度方面显示出了较大的优势。综合来看,该算法用于求解2E-VRP,不仅能保证较高的精确性,同时具有很高的效率。实验结果还表明,在一些算例中,2E-VRP的表现要好于经典VRP,这显示了构建双层城市物流系统的潜在收益;在一定条件下中转站的设置可以显著减少车辆行驶里程,但是它的数量并不是越多越好,而是有一个最优值。

参考文献:

- [1] DABLANC L. Goods transport in large European cities: difficult to organize, difficult to modernize[J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2007, 41(3): 280-285.
- [2] CRAINIC T G, RICCIARDI N, STORCHI G. Advanced freight transportation systems for congested urban areas[J]. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 2004, 12(2): 119-137.
- [3] GRAGNANI S, VALENTI G, VALENTINI M P. City logistics in Italy: a national project[M]//TANIGUCHI E, THOMPSON R G. *Logistics Systems for Sustainable Cities*. [S. l.]: Elsevier, 2004: 279-293.
- [4] CRAINIC T G, RICCIARDI N, STORCHI G. Models for evaluating and planning city logistics transportation systems[J]. *Transportation Science*, 2009, 43(4): 432-454.
- [5] BENJELLOUN A, CRAINIC T G. Trends, challenges and perspectives in city logistics[C]//Proc of International Conference on Trans-

portation and Land Use Interaction. Bucharest: Editura Politecnica Press, 2008: 269-284.

- [6] BENJELLOUN A, CRAINIC T G, BIGRAS Y. Towards a taxonomy of city logistics projects[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2010, 2(3): 6217-6228.
- [7] FELIU J G, PERBOLI G, TADEI R, *et al.* The two-echelon capacitated vehicle routing problem[R]. Torino: Control and Computer Engineering Department, Politecnico di Torino, 2007.
- [8] PERBOLI G, TADEI R, MASOERO F. Valid inequalities for the two echelon capacitated vehicle routing problem[R]. Montreal: Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation, 2009.
- [9] PERBOLI G, TADEI R, TADEI R. New families of valid inequalities for the two-echelon vehicle routing problem[J]. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 2010, 36(1): 639-646.
- [10] PERBOLI G, TADEI R, VIGO D. The two-echelon capacitated vehicle routing problem: models and math-based heuristics[J]. *Transportation Science*, 2011, 45(3): 364-380.
- [11] CRAINIC T G, MANCINI S, PERBOLI G, *et al.* Clustering-based heuristics for the two-echelon vehicle routing problem[R]. Montreal: Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation, 2008.
- [12] CRAINIC T, MANCINI S, PERBOLI G, *et al.* Multi-start heuristics for the two-echelon vehicle routing problem[M]//MERZ P, JINKAO H. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Berlin: Springer, 2011: 179-190.
- [13] DONDO R, CERDÁ J. A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 176(3): 1478-1507.
- [14] HANSEN P, MLADENOVIC N. Variable neighborhood search: principles and applications[J]. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 449-467.
- [15] CRAINIC T G, PERBOLI G, MANCINI S, *et al.* Two-echelon vehicle routing problem: a satellite location analysis[J]. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 2010, 2(3): 5944-5955.

(上接第349页)解决了仅采用实时数据得到的导航路径存在因路况信息变化过于频繁而造成车辆实际行驶花费时间比最初预测花费时间明显更长的问题。采用重庆市部分地图进行有效性验证,实验结果表明,本文提出算法所得的路径行程时间从整体上优于基于实时数据的导航算法,导航路径变化较少,具有更好的实用价值。

参考文献:

- [1] 葛燕,王健,孟友新,等.车辆导航动态路径规划的研究进展[J]. *公路交通科技*, 2010, 27(11): 113-117.
- [2] ZHU Zheng-yu, LI Jin-yan, WANG Li-na, *et al.* A simplified time-division based on road network model considering intersection delay for vehicle navigation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 52-54: 1226-1232.
- [3] ZHU Zheng-yu, LIU Wei, LIU Lin, *et al.* A simplified real-time road network model considering intersection delay and its application on vehicle navigation[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2011, 58-60: 1959-1965.
- [4] NANNICINI G, BAPTISTE P, BARBIER G, *et al.* Fast paths in

large-scale dynamic road networks[J]. *Computational Optimization and Applications*, 2010, 45(1): 143-158.

- [5] XU Jia-jie, GUO Li-min, DING Zhi-ming, *et al.* Traffic aware route planning in dynamic road networks[C]//Lecture Notes in Computer Science, vol 7238. 2012: 576-591.
- [6] 刘张雷,史忠科.城市动态时间最短路径诱导系统实现研究[J]. *控制工程*, 2010, 17(3): 351-355.
- [7] BURIOL L, RESENDE M, THORUP M. Speeding up dynamic shortest path algorithms[J]. *INFORMS Journal on Computing*, 2008, 20(2): 191-204.
- [8] DELLING D, NANNICINI G. Bidirectional core-based routing in dynamic time-dependent road networks[C]//Lecture Notes in Computer Science, vol 5369. 2008: 812-823.
- [9] 史慧敏.城市路网实时动态交通信息预测方法的研究[D].大连:大连理工大学, 2009.
- [10] 沈国江,王啸虎,孔祥杰.短时交通流量智能组合预测模型及应用[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(3): 561-568.
- [11] 陆如华,徐传玉,张玲,等.卡尔曼滤波的初值计算方法及其应用[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(1): 34-42.