

变路网情况下车辆路径问题建模及应用

陈 森 李孟军 李本先 王 鹏

(国防科技大学信息系统与管理学院 长沙 410073)

摘 要 受车辆调度中的一类现实需求启发,提出了路网结构可变情况下的车辆路径问题。探讨了路网变动对车辆路径的影响,在描述可变路网的基础上,基于路网、路径双层优化思想,建立了问题优化模型。考虑到路网变化给问题求解带来的复杂性,给出了改进遗传算法与随机递归算法相结合的求解策略。作为模型的直接应用和说明,最后的算例验证了模型和算法的合理性、有效性。

关键词 可变路网结构,路径规划,双层优化,改进遗传算法,随机递归算法

中图分类号 TP39 **文献标识码** A

Model and Application of Vehicle Routing Problem with Variable Network Structure

CHEN Sen LI Meng-jun LI Ben-xian WANG Peng

(College of Information System & Management, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract Initiated by the need of vehicle routing problem in reality, this article presented a non-deterministic vehicle routing problem with variable network structure. The impact derived from variable network structure was discussed. Combining the road network and vehicle routing, a combinatorial optimization model was developed. An improved genetic algorithm and random recursion heuristics were designed to solve this problem. As an application and a demonstration of our results, a numerical example was presented to highlight the significance of the proposed model as well as the efficacy of the proposed algorithm.

Keywords Variable network structure, Path planning, Bi-level optimization, Genetic algorithm, Random recursion heuristics

1 引言

车辆路径问题(Vehicle Routing Problem, VRP)自 Dantzig等^[1]于1959年提出以来,一直是运筹学与组合优化领域的热点问题,在图论与网络分析、物流等学科有着最广泛、最成功的应用研究^[2]。近年来,围绕各种约束条件而展开的VRP变型问题研究不断涌现出来。常见的有满载/非满载VRP^[3]、单/多车型VRP^[4]、弧/点需求的VRP^[5]、单/双程的VRP^[6]、确定性/不确定性VRP^[7]、以及带能力/距离/时间窗约束的VRP^[8,9]等。上述约束条件基本上都是针对车辆本身、服务对象以及服务方式的限制,仅有时间窗约束涉及车辆运行网络。此外,文献^[10]提出了时变网络概念。由于交通流量、天气变化等因素的影响,导致路网中各路径上的运行成本、时间等发生相应的变化。从严格意义上讲,实际的车辆运行网络都属于时变、动态网络,因此时变网络下的VRP研究更具有实用性^[10],目前研究重心主要集中在网络中各路径权重的动态变化上。

在实际系统应用中,车辆运行路网还有结构动态变化的情况。具体可分为两类:一类是被动性质的变化。典型情况如突发事件干扰,路网中某些道路在车辆调度周期内受阻而

无力恢复,此时多采取重调度策略^[11]加以研究。另一类则可以理解为主动变化。如在作战或抗灾救援行动中,保障作战(救灾)资源至战(灾)区需求点时,往往抢修因战(灾)受损的交通道路,以确保资源及时到位。两类情况均是力求达到最优目标,不同之处在于,前者重调度之后的结果往往不及原目标^[12];而后者则不同,主动抢修损毁道路可视为先期对路网结构的优化可取得更理想的效益。

通常情况下,优化路网结构需耗费一定的资源,但可获得车辆运行时间上的收益。基于双层优化思想,研究资源耗费与时间收益之间的权衡与转换途径,对于解决该类可变路网结构情况下的VRP具有实际意义。

2 可变路网结构描述

为便于理解和建模研究,不失一般性和扩展性,给定图 $G=(V, A)$,如图1所示。 $V=\{v_0, v_1, \dots, v_n\}$ 为顶点集, $A=\{(v_i, v_j), i \neq j, v_i, v_j \in V\}$ 为弧集。 v_0 表示库房,储存有 M 个单位的资源,用于服务客户。其它顶点即表示资源需求客户,需求数量和服务期限已知。在 A 上定义矩阵 $C=(c_{ij})$,其元素 c_{ij} 表示点 v_i 到点 v_j 的行程时间。有 m 辆载重量为 Q 个资源单位的车(m 为常数)。虚线弧段表示该弧段失效,若恢复通行

到稿日期:2011-04-21 返修日期:2011-07-16

陈 森(1980—),男,博士生,讲师,主要研究方向为科技与教育管理、管理决策技术, E-mail: csen0636@sina.com; 李孟军(1964—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为管理决策技术、系统优化及系统集成; 李本先(1977—),男,博士生,主要研究方向为系统优化及系统集成; 王 鹏(1982—),男,博士生,主要研究方向为科技与教育管理、管理决策技术。

时延下,延误资源量越大影响就越大。 λ 为权重常数,体现需求点对资源数量满足度和服务时延之间的偏好。 B 、 E 是足够大的正整数。

约束式(2)是车辆数目的限制;约束式(3)表示每辆车去每个需求点最多一次;约束式(4)一式(7)保证车辆排序的可行性,一旦车辆到达需求点时刻迟于要求的期限,就会出现时间延迟;约束式(8)是车载量限制;约束式(9)一式(10)保证资源流可行性;约束式(11)体现资源数量守恒,表示用于恢复失效弧段的资源加上服务于需求点的资源等于仓库的资源;约束式(12)是对决策变量的限制。

4 模型求解

求解的核心问题是需要不同路网约束下反复求解路径优化问题。为最大限度降低整体系统运行成本,设计高效的求解算法至关重要。由于弧段恢复只是局部变动路网,因此可以假定,不同路网下的最优解具有不同程度的相似性,即会含有一定数量连接结构相同的弧段。基于此,这里拟对求解过程采取两种不同的算法——改进的遗传算法与随机递归算法相结合的求解策略。

4.1 首次求解采用改进的遗传算法

由于目标式的非线性属性,使传统的工具和方法不再适用。考虑到遗传算法在求解组合优化问题时的优越性,尤其是具有不必对目标函数求导就能得到全局最优解的优点,这里首次求解 VRP 时拟采用改进的遗传算法。具体设计为:

- 编码及初始种群。采用简单、直观的自然数编码方式构造染色体。基因表示需求节点,其排列顺序表示具体路线。随机产生染色体,重复进行,直至构成初始种群。

- 适应度函数。优化目标为最小值、非负,若直接将目标函数作为适应度函数,由于目标值相对差别很小,从而个体选择概率差别也很小,这将导致算法的选择功能弱化,故采用其倒数作为适应度函数。

- 控制参数。控制参数中交叉概率 p_c 和变异概率 p_m 是影响遗传算法行为和性能的关键所在。 p_c 越大,新个体产生速度就越快,但遗传模式被破坏的可能性也越大; p_c 过小,会使搜索过程缓慢,以至停滞不前。对于 p_m ,如果过小,则不易产生新个体结构;如果 p_m 过大,则遗传算法就近似为随机搜索算法。基于此,这里采用文献[13]思路, p_c 和 p_m 能够随适应度自动改变。其表达式为:

$$p_c = \begin{cases} p_{c1} - \frac{(p_{c1} - p_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg} \\ p_{c1}, & f' < f_{avg} \end{cases}$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m1} - \frac{(p_{m1} - p_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}}, & f \geq f_{avg} \\ p_{m1}, & f < f_{avg} \end{cases}$$

式中, $p_{c1}=0.9$, $p_{c2}=0.6$; $p_{m1}=0.1$, $p_{m2}=0.001$ 。 f_{max} 为群体中最大适应度值; f_{avg} 为平均适应度值; f' 为要交叉个体中较大的适应度值; f 为要变异个体的适应度值。

- 遗传算子。选择算子采用精英种群策略,将种群中最好的个体直接复制到下一代种群;交叉操作采取类 OX 法。

- 算法终止准则。解的适应值无明显改进时,令算法终止。

4.2 其余次求解变动路网下 VRP 时采用随机递归算法

随机递归算法在每次迭代过程中,改进是局部的,被改进解的大部分没有改变,避免了长距、高阶的大积木块不易生存

的问题,因此特别适合路网局部变动时的 VRP 多次求解。该算法详细步骤在文献[14]中有阐述,这里仅给出相关参数的设置。

- 将首次运用改进遗传算法求得的解作为随机递归的初始个体。随机递归算法在迭代过程中能够有效避免长距、高阶的大积木块被拆分,将首次求得的解作为初始个体能够有效提升随机递归算法的效率。

- 不同于文献[14],这里随机邻域变换采用 3-opt 方式。从大量计算中发现^[15],3-opt 比 2-opt 好,而 4-opt 并不比 3-opt 好多少,况且 k 越大,运算时间越长,故本文采用 3-opt 算法。

- 最大贪婪和邻域搜索范围均设为 50,递归概率设为 0.95。

对求得解进行排序,确定最优解,进而得出最佳资源分配、最佳毁损弧段恢复规划以及该规划下最优的车辆路径。

5 应用算例分析

重大自然灾害后,某地域路网结构如图 1 所示。应急资源配送受条件限制,只能依托地面车辆。影响区域内有 14 个需求点,急需矿泉水、压缩饼干、口罩等生活、防疫用品,以及救灾的铁锹、铁镐工具等。受灾害影响,以虚线标示的两处道路受阻,点 v_6 到点 v_9 之间标示为 X_I ,点 v_9 到点 v_{12} 之间标示为 X_{II} 。若抢修受阻道路,则可有效缩短配送时延。

由于无大型机械,道路抢修同样只能依靠铁锹、铁镐等工具,且只能在路段两端作业。为了抢修进度,需投入大量的人力轮番作业,这也将消耗部分生活和防疫必需品。现某临时仓库筹集有限资源。基于假定条件,对算例中涉及的数据、参量作以下说明和处理。

(1)在车辆配送周期内,无资源补充,将筹集的资源种类、数量归一化,假定为 160 个单位;假定配送车辆最大载运量为 75 个单位,3 辆车。

(2)车辆通过仓库与需求点及需求点与需求点之间的运行时间如图 1 所示。为统一量纲,将时间单位设为个,每个时间单位为 15min。利用 Dijkstra 算法^[16],求得点点间最短运行时间矩阵。

(3)各需求点的资源需求量及最迟满足时限数据根据实际灾害勘察情况而定。为便于算例仿真,这里由计算机随机产生,如表 1 所列。

表 1 各需求点的资源需求情况及最迟满足时限要求

	v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
资源需求量 q	11	6	9	6	10	14	20
最迟时限 dl	74	100	63	89	98	56	41
	v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}
资源需求量 q	7	18	17	10	15	5	12
最迟时限 dl	79	92	52	50	40	96	87

(4)假定抢修恢复路段 X_I 、 X_{II} 将分别消耗 8 个单位的资源。同样,实际中将依据路段具体毁损情况等确定;为体现社会救助公平性,资源未满足量依该点需求量大小成比例分配。

(5)遗传算法种群规模设为 50;权重参数 λ ,这里分别取值为 0.01、0.10,以进行结果比对。为便于计算机求解, B 、 E 均取值为 1000。

依照提出的模型、方法和上述参量设定,基于 Matlab 进行仿真。

结果显示,所设计的算法在执行效率上能被接受。随机递归算法执行时间均值与首次利用改进的遗传算法计算时间相比(2.1 : 10.9),有较大的优越性。下面是4种路网状态下的仿真结果,如表2—表4所列。

表2 4种路网结构状态下的车辆最优路径

		最优路径
全部恢复 (结构1)	路径1	$v_0 \rightarrow v_7 \rightarrow v_6 \rightarrow v_3 \rightarrow v_1$
	路径2	$v_0 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{11} \rightarrow v_{10} \rightarrow v_{14} \rightarrow v_{13}$
	路径3	$v_0 \rightarrow v_9 \rightarrow v_8 \rightarrow v_5 \rightarrow v_4 \rightarrow v_2$
恢复路段 X_I (结构2)	路径1	$v_0 \rightarrow v_7 \rightarrow v_6 \rightarrow v_9 \rightarrow v_3 \rightarrow v_1$
	路径2	$v_0 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{11} \rightarrow v_{14} \rightarrow v_{13}$
	路径3	$v_0 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_8 \rightarrow v_5 \rightarrow v_4 \rightarrow v_2$
恢复路段 X_{II} (结构3)	路径1	$v_0 \rightarrow v_7 \rightarrow v_6 \rightarrow v_3 \rightarrow v_1$
	路径2	$v_0 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{11} \rightarrow v_{14} \rightarrow v_{13}$
	路径3	$v_0 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_5 \rightarrow v_4 \rightarrow v_2$
不恢复 (结构4)	路径1	$v_0 \rightarrow v_7 \rightarrow v_6 \rightarrow v_3 \rightarrow v_1$
	路径2	$v_0 \rightarrow v_{12} \rightarrow v_{11} \rightarrow v_{14} \rightarrow v_{13}$
	路径3	$v_0 \rightarrow v_{10} \rightarrow v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_5 \rightarrow v_4 \rightarrow v_8 s_2$

表3 各需求点的资源未满足度、时间延迟

		v_1	v_2	v_3	v_4	v_5	v_6	v_7
结构1	U	1.10	0.60	0.90	0.60	1.00	1.40	2.00
	δ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
结构2	U	0.55	0.30	0.45	0.30	0.50	0.70	1.00
	δ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
结构3	U	0.55	0.30	0.45	0.30	0.50	0.70	1.00
	δ	0.0	8.3	0.0	7.3	0.0	0.0	0.0
结构4	U	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	δ	0.0	26.4	0.0	25.4	11.8	0.0	0.0
		v_8	v_9	v_{10}	v_{11}	v_{12}	v_{13}	v_{14}
结构1	U	0.70	1.80	1.70	1.00	1.50	0.50	1.20
	δ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
结构2	U	0.35	0.90	0.85	0.50	0.75	0.25	0.60
	δ	0.0	0.0	0.0	7.1	2.4	1.8	0.7
结构3	U	0.35	0.90	0.85	0.50	0.75	0.25	0.60
	δ	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
结构4	U	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	δ	0.4	0.0	17.4	7.1	2.4	1.8	0.7

表4 不同模型参数 λ 下的 $\min z$ 值

		结构1	结构2	结构3	结构4
$\min z$ 值	$\lambda=0.01$	16.0	9.3	8.9	8.5
	$\lambda=0.10$	16.0	20.6	17.4	85.0

通过表2—表4中的数据不难看出,在车辆运行路网结构可变的情况下,首先改变不理想的网络结构而后实施路径规划,能够取得较单纯路径规划更为理想的结果。

具体分析如下。

(1)恢复不同的毁损路段,将形成不同的路网结构。而在不同的路网结构下,车辆规划的最优路径不同,如表2所列。

(2) λ 的取值大小,体现需求点对恢复道路耗费、收益之间的权衡。 λ 的取值与 $\min z$ 值相关,而 $\min z$ 值决定着调度车辆的最优路线和救援资源在毁损路段之间的分配。 λ 的取值越大,对应需求点对于配送时间延迟越重视。重视程度的不同,恢复路段的决策也不同。具体到本算例,当 λ 取值为0.01时,结构2即仅恢复路段 X_{II} 最优;而 λ 取值为0.10时,结构1即全部恢复最优。

(3)不同的路网结构状态下,路径层最大效益值不同。在运行网络可变的情况下,不考虑改变结构状态,单纯实施路径规划,或者仅凭主观经验进行改变,其可靠性、效益无从保证。从整体上分析建模,探索不同路网结构对路径规划的影响,具有积极意义和实际价值。

结束语 车辆运行路网结构变动可影响VRP最优解,现有相关文献均是以最小化结构变动对原规划的干扰为目标,研究重心聚焦于网络结构变动后车辆路径的重规划。本文则基于一类路径规划问题的现实需求,提出了一类可变路网结构情况下的车辆路径问题,即在实施路径规划之前,先期改变非满意的路网结构,以求得较单纯路径规划更为理想的结果。在具体描述可变路网结构的基础上,基于路网、路径联合优化思想建立模型,给出了合理、明晰的求解方法,并设计了适用的智能算法。最后以重大自然灾害为背景构建了应用算例,算例结果检验了问题模型和求解方法的实效性,为一类可变路网结构情况下的车辆路径问题研究提供了直观、规范的研究思路和方法。

本文模型和结果是在一系列假设条件下建构和获得的。考虑更多约束和环境不确定因素的情况下,增、删部分假设,扩展模型结构,都将是值得进一步研究的问题。

参考文献

[1] Dantzig G B, Ramser J H. The truck dispatching problem [J]. Management Science, 1959, 6(1): 80-91

[2] William H, George T S, Ping J, et al. A hybrid genetic algorithm for the multi-depot vehicle routing problem [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21: 548-557

[3] 张明善, 唐小我. 多车场满载货运车辆优化调度的网络流算法[J]. 系统工程学报, 2002(17): 216-220

[4] Abdellah E F, Christian P, Roberto W C. A memetic algorithm and a tabu search for the multi-compartment vehicle routing problem [J]. Computers & Operations Research, 2008, 35: 1725-1741

[5] 郭强, 谢秉磊. 随机旅行时间车辆路径问题的模型及其算法[J]. 系统工程学报, 2003(18): 244-247

[6] Zhi W W, Zheng G W. A novel two-phase heuristic method for vehicle routing problem with backhauls [J]. Computers and Mathematics with Applications, 2009, 57: 1923-1928

[7] 杨垣会, 刘震宇. 含结点等待费用的离散时变最短路径[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 1: 113-117

[8] 陆琳, 谭清美. 一类随机需求VRP的混合粒子群算法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2006, 28(2): 244-247

[9] Dondo R, Cerda 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: 1478-1507

[10] 郭耀煌, 钟小鹏. 动态车辆路径问题排队模型分析[J]. 管理科学学报, 2006, 9(1): 33-37

[11] Jing Q L, Denis B, Mirchandani P B. A decision support system for the single-depot vehicle rescheduling problem [J]. Computers & Operations Research, 2007, 34: 1008-1032

[12] Silva C A, Sousa J M, Runkler T A. Rescheduling and optimization of logistic processes using GA and ACO [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2008, 21: 343-352

[13] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002

[14] 步立新, 罗文钰, 冯允成. 随机递归算法求解车辆路径问题[J]. 系统工程理论与实践, 2008, 11: 142-148

[15] Tan K C, Lee L H, Zhu Q L, et al. Heuristic methods for vehicle routing problem with time windows [J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2008, 15: 281-295

[16] 王海英, 黄强, 李传涛, 等. 图论算法及其MATLAB实现[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010