

# 一类非确定性车辆路径问题模型及其算法设计

陈 森, 姜 江, 陈英武, 沈永平

(国防科学技术大学信息系统与管理学院, 长沙 410073)

**摘 要:** 提出一类路网结构未定、需求随机的非确定性车辆路径问题(N-DVRP), 通过分析路网结构变动和需求随机双重不确定性对车辆路径选择的影响, 建立 N-DVRP 的优化模型, 并设计求解该问题的动态加速自适应遗传算法。仿真实验结果验证了该问题模型及其求解算法的合理性和有效性。

**关键词:** 非确定性车辆路径问题; 随机需求; 车辆调度; 动态加速

## A Class of Non-deterministic Vehicle Routing Problem Model and Its Algorithm Design

CHEN Sen, JIANG Jiang, CHEN Ying-wu, SHEN Yong-ping

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

**【Abstract】** This paper proposes a class of Non-deterministic Vehicle Routing Problem(N-DVRP) with stochastic demand and variable network structure. By analyzing the impact derived from uncertainty of stochastic demand and variable network structure, a N-DVRP model is constructed, and a Dynamical Accelerating Adaptive Genetic Algorithm(DA-AGA) is designed to solve the problem. Simulation results show the rationality and feasibility of the model and algorithm proposed.

**【Key words】** Non-deterministic Vehicle Routing Problem(N-DVRP); stochastic demand; vehicle schedule; dynamical accelerating DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2011.14.062

### 1 概述

在车辆调度过程中, 常常发生交通管制、恶劣天气、交通堵塞等干扰事件, 致使调度周期内路网中某些路段功能失效而无法通行, 决策者不得不调整预定调度路线, 一般情况下这将增加运行成本, 严重时甚至会威胁调度目标的实现。目前, 应对干扰事件的策略主要是在原调度方案的基础上做动态调整, 最大限度地控制干扰事件的不利影响<sup>[1]</sup>。虽然新方案也是以节省成本为目标, 但相对于原方案, 成本仍将有增无减。原因在于, 干扰事件改变了原有有利的路网结构, 而变动对调度目标的影响往往较大。在只能被动承受干扰后果的情况下, 仅考虑变动后的路网结构, 上述策略是可行的。

在实际应用系统中, 存在一类可主动改变干扰事件后果的情况。如在作战或抗灾救援行动中, 保障作战(救灾)物资至战(灾)区需求点时, 往往有选择地抢修因战(灾)受损的交通道路, 维护相对完善的路网结构状态, 以更好地完成保障任务。该类情况实质上可视为为寻求目标效益的最大化而主动改变(不利的)路网结构。路网结构的变动需付出一定的成本。如果该成本低于因不变动而造成的损失, 那么变动是具有正效益的。进一步地, 不同的变动将产生不同的效益。该类情况已引起部分学者和相关决策部门的重视, 但在变动的决策中, 目前主要依靠决策者的主观经验, 缺乏系统、定量的分析, 可靠性及其效益难以保证。将路网结构变动带来的不确定性引入车辆路径问题是值得深入研究的。

车辆路径问题一直是运筹学与组合优化领域的热点问题。在经典的确定性车辆路径问题中, 需求点的数量、需求量、车辆的载重量以及行驶速度都是可知的, 由于没有考虑实际中的一些不确定性因素, 因此应用受限。在实际的问题中, 最普遍的不确定性因素是需求量随机<sup>[2]</sup>。

本文通过研究路网结构变动和需求随机变化 2 种不确定性情况下的车辆路径问题, 提出一类新的非确定性车辆路径问题(Non-deterministic Vehicle Routing Problem, N-DVRP), 并构建了 N-DVRP 模型, 同时为提高算法执行效率、降低不确定性因素给问题带来的高复杂性, 设计了一种动态加速自适应遗传算法(Dynamically Accelerating Adaptive Genetic Algorithm, DA-AGA)。

### 2 N-DVRP 模型

不同失效路段在路网中的位置不同, 产生的影响也不同。在处理路网结构不确定性因素时, 为获得最优路网结构, 需做出变动哪些失效路段的决策。在失效路段有限的情况下, 可通过变动不同的路段生成不同的结构状态, 然后在每种结构状态下求解随机需求车辆路径问题的最优解, 对最优解排序即可确定最优的结构状态, 进而可得变动具体路段的最优决策方案。

不失一般性, 本文对随机需求车辆路径问题描述如下: 记路网图  $G=(V, A)$ , 其中,  $V=\{0, 1, L, n\}$  为顶点集, 0 表示库房, 其余表示需求点;  $A=\{(i, j) | i \neq j, i, j \in V\}$  为弧集。车辆从存有物资的库房出发, 满载物资用于保障需求点的物资需求。车辆出发前并不知道每个需求点确切的需求量, 只知道其概率分布。车辆到达需求点时才能知道准确的需求量, 因此, 只能根据需求点的需求概率设计车辆路径。车辆具有车载量和最大行程限制, 以总成本最小为目标, 总成本包括变动失效路段成本、车辆运行成本。

**作者简介:** 陈 森(1980—), 男, 博士研究生, 主研方向: 调度算法, 管理决策; 姜 江, 博士研究生; 陈英武、沈永平, 教授、博士生导师

**收稿日期:** 2010-12-24 **E-mail:** csen0636@sina.com

为便于建立模型, 做以下变量、参数和符号约定: (1)  $n$ : 需求点数量; (2)  $L$ : 失效路段集; (3)  $K$ : 车辆数量; (4)  $k$ : 车辆编号,  $k=1, 2, L, K$ ; (5)  $c_{k \max}$ : 车辆  $k$  的最大车载量; (6)  $S$ : 车辆  $k$  的最大行程; (7)  $\xi_i$ : 需求点  $i$  的随机需求量; (8)  $d_{ij}$ : 库房到需求点以及需求点与需求点之间的距离,  $i \neq j$ , 若  $(i, j) \in L$ , 则  $d_{ij} = \infty$ ; (9)  $X_{ijk}$ : 0-1 变量, 车辆  $k$  经过  $(i, j)$  时为 1, 否则为 0; (10)  $Y_{ik}$ : 0-1 变量, 需求点  $i$  的任务由车辆  $k$  完成时为 1, 否则为 0。

数学模型如下:

$$\min z = C_{re} + \alpha E(l_{\min}) \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n \xi_i Y_{ik} \leq c_{k \max}, k=1, 2, L, K \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} X_{ijk} \leq S, i \neq j, k=1, 2, L, K \quad (3)$$

$$\sum_{i=0}^n X_{ijk} = Y_{jk}, j=0, 1, L, n, k=1, 2, L, K \quad (4)$$

$$\sum_{j=0}^n X_{ijk} = Y_{ik}, i=0, 1, L, n, k=1, 2, L, K \quad (5)$$

$$X_{ijk} \in \{0, 1\}, Y_{ik} \in \{0, 1\} \quad (6)$$

式(1)为目标式, 其中, 第 1 项是修复成本, 随修复失效路段的不同而不同; 第 2 项中  $E(l_{\min})$  是某一路网结构状态下最短期望路长, 假设各需求点相互独立且服从相同分布, 可由文献[3]的方法获得,  $\alpha$  是单位路长的车辆运行成本, 两者的乘积即是车辆运行成本。在约束式中, 式(2)是车载量限制; 式(3)是车辆最大行程限制; 式(4)、式(5)保证需求点有且仅有一辆车服务; 式(6)是对决策变量的限制。

### 3 DA-AGA 设计

遗传算法目前已在函数优化、机器学习、图像识别等诸多领域得到了广泛应用, 具有不必对函数求导就能得到全局最优解等优点<sup>[4]</sup>, 其优越性得到学术界的一致认可, 但也存在局部搜索能力差、收敛速度慢等缺点, 因此, 寻找性能更优的改进算法仍是研究的难点与热点。车辆路径问题几乎都是 NP-hard 问题, 本文又引入随机变量, 对求解算法的执行效率提出了更高要求。本文通过对 GA 中的适应度函数、搜索空间及参数进行多种改进, 形成一种动态加速自适应遗传算法, 具体如下:

#### (1) 动态适应度函数设计

动态适应度函数通过动态、自适应地放大或缩小群体适应度值范围, 针对如下 2 种情况进行控制: 1) 针对初始群体中可能存在个别个体的适应度值超常而使算法收敛于局部最优的情况, 可限制超级个体的繁殖。2) 在算法逐渐收敛时, 针对群体中个体适应度值比较接近而造成个体适应度值在最优解附近摇摆的情况, 可放大适应度值范围以提高选择能力。

适应度函数设置如下:

$$f = \frac{z}{f_{\max} - f_{\min} + \theta} \quad (7)$$

其中,  $f$  为适应度值;  $z$  为目标函数值;  $f_{\max}$  为本代中适应度值上界;  $f_{\min}$  为下界;  $\theta$  用于避免分母为 0 以及维护遗传算法的随机性, 在  $(0, 1)$  内取值。随着  $f_{\max} - f_{\min}$  的增大, 适应度值范围变小, 可防止超级个体控制群体。适应度值范围变大, 则可增强选择能力。

#### (2) 动态搜索空间设计

动态搜索空间是指通过动态、自适应地调整搜索区间,

实现算法的加速收敛, 而且整个加速过程将随着不同进化阶段的特点呈现动态变化。具体是将进化过程中优秀个体中的前  $N$  个变量的变化区间作为新的初始变化区间, 以此不断缩小搜索空间范围, 实现加速。何时加速、加速尺度等因素对算法收敛有一定的影响。在加速过程中, 优秀个体数目取值大小目前并无固定的准则可循。

由于遗传算法进化前期全局搜索能力强、种群多样, 因此加速尺度可设置得大些; 后期主要为局部搜索, 个体趋向一致, 此时可降低加速尺度, 具体方法如下: 1) 将进化过程分为 2 个阶段。设  $\rho \in [0, 1)$ , 最大进化代数  $G$ 。第 1 阶段为  $[0, G_1]$ , 第 2 阶段为  $[G_1, G]$ ,  $G_1 = INT(\rho G)$ , 其中,  $INT$  为取整函数。2) 选取不同的加速策略。设  $\sigma \in [0.5, 1)$ , 取  $N = INT(\sigma P)$ , 其中,  $P$  为种群规模, 在第 1 阶段, 若  $N > INT((1-\sigma)P)$ , 则  $N = N - 3$ , 否则,  $N = INT((1-\sigma)P)$ ; 在第 2 阶段, 若  $N > INT((1-\sigma)P)$ , 则  $N = N - 1$ , 否则,  $N = INT((1-\sigma)P)$ 。

#### (3) 动态交叉算子设计

动态交叉算子通过定义并调整个体相似度阈值, 自适应地改变交叉力度, 从而优化交叉性能。相似度阈值定义如下:

$$Ap(CHx, CHy) = 1 - (\sum_{i=1}^n CHx_i \oplus CHy_i) / n \quad (8)$$

其中,  $n$  是染色体串的长度;  $CHx_i$  是个体  $CHx$  对应染色体的第  $i$  个基因;  $CHy_i$  是个体  $CHy$  对应染色体的第  $i$  个基因;  $\oplus$  是异或运算符。由于采用自然数编码, 因此  $\oplus$  定义如下:

$$CHx \oplus CHy = \begin{cases} 1 & \text{if } CHx \neq CHy \\ 0 & \text{if } CHx = CHy \end{cases} \quad (9)$$

在进化前期, 个体相似度比较低, 此时应加强交叉的力度。而到后期, 大多数个体都接近于最优解, 相似度较高。这时, 继续进行交叉操作很难产生新的个体, 且搜索空间也在缩小, 此时可减小相似度阈值以加强变异的力度。

### 4 仿真实验

假设库房的位置在坐标  $(5, 5)$  处, 需求点的数量为 20 个, 位置在平面上  $10 \times 10$  的正方形区域内随机生成。令车辆的最大车载量为 5 个物资单位, 最大行程为 15。各需求点需求分布独立, 服从  $[0, 0.5]$  上的二项分布,  $p = 0.9$ 。假定 2 个失效路段, 标示为  $X_I$ 、 $X_{II}$ , 如图 1 所示。

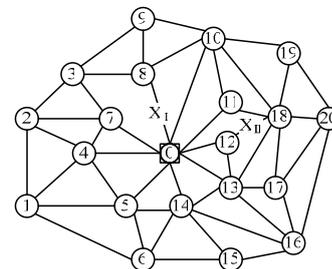


图 1  $n=20$  时的车辆调度网络结构

为便于计算机处理, 点与点之间未直接相连的距离设为 1 000, 失效路段不变动的按不直接相连处理, 变动后取 2 点间的实际距离值。在相同数据下, 分别采用文献[5]的 H-PSO 优化算法和本文算法进行测试, 相应的期望最短路长以及 CPU 计算时间如表 1 所示。H-PSO 算法全局搜索能力与收敛速度均有优异的表现<sup>[5]</sup>。由表 1 可以看出, 本文的 DA-AGA 与 H-PSO 相比, 运行结果不相上下, 在状态 2 和状态 4 下两者性能相同, 在状态 3 下后者较优, 在状态 1 下前者较优,

且均相差不大。在计算效率方面,本文算法均较优,说明本文的动态加速策略是有效的,算法整体表现值得肯定。

表1 本文算法与文献[5]算法的性能对比

状态	期望最短路长/km		CPU 计算时间/s	
	H-PSO	DA-AGA	H-PSO	DA-AGA
变动 $X_I$ (状态 1)	82.009	80.163	2.21	2.13
变动 $X_{II}$ (状态 2)	82.580	82.580	1.93	1.89
均变动(状态 3)	71.740	73.472	2.14	2.08
不变动(状态 4)	91.904	91.904	2.02	1.93

4种网络结构下利用本文算法得出的车辆线路如下:

(1)变动  $X_I$

- 0→7→2→3→9→8→0
- 0→10→19→20→18→11→0
- 0→12→13→17→0
- 0→4→2→1→5→0
- 0→14→16→15→6→0

(2)变动  $X_{II}$

- 0→7→3→9→8→10→0
- 0→4→2→1→5→0
- 0→14→6→15→16→0
- 0→12→13→17→0
- 0→11→18→20→19→0

(3)均变动

- 0→7→3→9→10→8→0
- 0→4→2→1→5→0
- 0→14→6→15→0
- 0→13→16→17→0
- 0→12→18→20→19→11→0

(4)不变动

- 0→7→3→9→8→0
- 0→10→19→20→18→11→0
- 0→12→13→17→0
- 0→14→15→16→0
- 0→4→2→1→5→6→0

假定变动  $X_I$ 、 $X_{II}$  的成本分别为 12、6,  $\alpha$  取不同值时,4种路网结构下的最小成本值( $\min z$ )如表2所示。由表2可以看出,当  $\alpha$  取不同值时(应用时,其值可根据实际系统状况

(上接第185页)

6 结束语

在实时系统中存在的资源限制和时间-空间约束是导致实时系统形成冲突和冲撞的最重要因素。本文主要分析了基于时间不确定性的实时系统资源冲突问题,采用模糊时间知识推理方法,结合模糊时间 Petri 网的建模,研究实时系统冲突的检测方法,并对冲突的消解给出解决方案。最后,通过铁路系统的实例验证了该方法的有效性。今后工作为:(1)对更复杂的混杂系统模型进行综合的描述分析;(2)保证系统安全的情况下对系统的效率进行进一步分析并建立评价模型。

参考文献

[1] Tasi J J P, Yang S J. Timing Constraint Petri Nets and Their Application to Schedulability Analysis of Real-time System Specifications[J]. IEEE Trans. on Software Engineering, 1995, 21(1): 32-49.

[2] 叶阳东, 王 娟, 贾利民. 基于模糊时间 Petri 网的列车运行时

获取),4种路网结构状态下的  $\min z$  值是变化的。当  $\alpha = 1$  时,4种路网结构状态下的  $\min z$  值排序为:状态 1>状态 4>状态 3>状态 2,即变动  $X_{II}$  最优,均变动、不变动、变动  $X_I$  依次次之;而当  $\alpha = 2$  时,4种路网结构状态下的  $\min z$  值排序为:状态 4>状态 1>状态 2>状态 3,此时均变动最优,变动  $X_{II}$ 、变动  $X_I$ 、不变动依次次之,与  $\alpha = 1$  时不同。由此可见,在路网结构可变的情况下,从整体上分析建模、探索不同路网结构对路径调度的影响具有积极意义和实用价值。

表2 4种路网结构状态下的最小成本值

状态	$\alpha=1$	$\alpha=2$
变动 $X_I$ (状态 1)	92.163	172.326
变动 $X_{II}$ (状态 2)	88.580	171.160
均变动(状态 3)	91.472	164.944
不变动(状态 4)	91.904	183.808

5 结束语

考虑到实际应用系统中存在路网结构变动和需求随机的情况,本文提出一类新的非确定性车辆路径问题,探讨了处理2种不确定性的策略,并建立了模型,针对问题的复杂度,在标准遗传算法的基础上融入了动态加速自适应策略,形成动态加速自适应遗传算法,用于求解问题,仿真实验验证了问题模型和求解算法的可行性、实效性,相关成果可用于解决作战或抗灾救援行动中的物资保障问题。

参考文献

[1] Yu Gang, Qi Xiangtong. Disruption Management: Framework, Models and Applications[M]. Singapore: World Scientific Publishing Co. Ltd., 2004.

[2] 樊建华, 王秀峰. 随机需求多车辆路径问题的重优化算法[J]. 南开大学学报: 自然科学版, 2008, 41(2): 103-107.

[3] 张启义, 朱 杰. 退火单亲遗传算法求解随机需求 VRP 问题[J]. 江南大学学报: 自然科学版, 2010, 9(2): 198-200.

[4] 吴晓燕, 刘希玉, 徐 庆. 基于改进遗传算法的分形图像编码[J]. 计算机工程, 2010, 36(5): 205-206.

[5] 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.

编辑 张 帆

间不确定性问题的处理[J]. 铁道学报, 2005, 27(1): 6-13.

[3] 刘雪艳, 吴慧欣, 张 强, 等. 基于面向对象时间 Petri 网的密码协议分析[J]. 计算机工程, 2009, 35(13): 156-159.

[4] 袁崇义. Petri 网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 35-36.

[5] 周 航, 黄志球, 胡 军, 等. 基于 Time Petri Nets 的实时系统资源冲突检测[J]. 计算机研究与发展, 2009, 46(9): 1578-1585.

[6] Ye Yangdong, Lu Hongxing, Ma Junxia, et al. Uncertain Temporal Knowledge Reasoning of Train Group Operation Based on Extended Fuzzy-timing Petri Nets[C]//Proc. of ICFIE'07. Guangzhou, China: [s. n.], 2007: 59-64.

[7] Murata T. Temporal Uncertainty and Fuzzy-timing High-level Petri Nets[C]//Proc. of the 17th International Conference on Application and Theory of Petri Nets. New York, USA: Springer, 1996: 11-28.

编辑 陆燕菲