

带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题

李珍萍[†], 张煜炜

(北京物资学院 信息学院, 北京 101149)

摘 要: 研究顾客具有多种需求, 分别需要由不同类型车辆提供服务, 且同一顾客多种需求的服务时间具有固定先后顺序的车辆路径问题. 在考虑各个顾客需求的服务时间窗, 同一顾客不同需求的服务顺序、服务时间间隔, 以及各种车型的车容量及最大行驶时间等约束的前提下, 以满足顾客多种需求的车辆运行成本和等待成本之和最小化为目标, 建立混合整数规划模型. 进一步设计求解模型的联合优化遗传算法, 并利用车辆路径问题的标准测试集构造具有两种需求的测试算例, 分别利用所提出的联合优化遗传算法与文献中的两阶段遗传算法进行模拟计算与分析, 验证所提出算法的有效性. 将经典的单一需求车辆路径问题推广到多种需求的情形, 建立带约束的多需求车辆路径问题的数学模型并设计求解模型的有效算法, 为解决实际问题提供了决策依据.

关键词: 多需求; 时间窗; 服务顺序约束; 车辆路径问题; 混合整数规划; 联合优化遗传算法

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

Multiple demands vehicle routing problem with time windows and service order constraints

LI Zhen-ping[†], ZHANG Yu-wei

(College of Information Science, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China)

Abstract: A vehicle routing problem with multiple demands is investigated, where each type of demand needs a special type of vehicles to provide service and the service order of one customer's multiple demands is fixed. Considering the constraints of time windows, the service order of multiple demands, the interval between different service, the capacity and total running time of each vehicle, a mix integer programming model is formulated to minimize the total costs of all vehicles. A joint optimal genetic algorithm is developed for solving the model. The effectiveness of the algorithm is verified by simulations on instances with two types of demands derived from the VRP benchmarks. This paper not only extends the classical single-demand vehicle routing problem to the multiple demands case, but also formulates a mathematical model of the multiple demands vehicle routing problem with constraints and designs an effective algorithm for solving the model, which provides a decision basis for solving practical problems.

Keywords: multiple demands; time windows; service order constraint; vehicle routing problem; mixed integer programming; joint optimal genetic algorithm

0 引 言

经典车辆路径问题 (VRP) 及各种扩展情况均属于单一需求的车辆路径问题, 即每个顾客只有一种服务需求, 只需要一辆车提供一次服务即可满足^[1-3]. 实际中经常遇到顾客有多种服务需求的车辆路径问题, 如快递配送中的取货和送货需求^[4], 家电销售中的配送和安装需求^[5-7], 家庭医疗服务中的器械运输和医疗服务^[8]等. 顾客有多种需求的车辆路径问题可以分为两种情况: 一是每个顾客的多种需求可以由同

一辆车提供服务^[9-11]; 二是每个顾客的多种需求必须由不同类型的车辆分别提供服务^[7-8, 12-13].

对于顾客有多种需求且分别需要由不同车辆提供服务的情况, 又可以进一步细分为考虑服务顺序约束和不考虑服务顺序约束的问题. 不考虑服务顺序约束的问题可以等价地转化为多个相互独立的单需求车辆路径问题. 考虑服务顺序约束的多需求车辆路径问题是指为同一个顾客提供多种服务的时间存在固定的先后顺序, 如为同一个顾客点配送家电的车

收稿日期: 2017-12-01; 修回日期: 2018-03-06.

基金项目: 国家自然科学基金项目 (71771028); 2018 年北京市属高校高水平教师队伍建设支持计划-创新团队项目 (IDHT20180510); 2018 年北京市自然科学基金重点研究专题项目 (Z18J0008).

责任编辑: 魏秀琨.

[†]通讯作者. E-mail: lizhenping66@163.com.

辆必须在安装车辆到达之前完成配送服务. 由于这类问题中不同顾客的需求种类和需求量不同且不同需求的服务时间存在固定的先后顺序约束,因而无法简化为多个独立的单需求车辆路径问题.

目前针对多种服务需求的车辆路径问题研究成果还很少,且大部分研究都集中在多种服务需求可以由同一类型车辆提供服务的情况^[9-11,14]. 顾客的多种需求必须由不同类型车辆分别提供服务的车辆路径问题是最近几年提出的新问题,部分学者对带服务顺序约束的双需求车辆路径问题进行了初步研究. Kim等^[5]研究了考虑配送和安装两种需求的车辆路径问题;庞海军等^[6]和Bac等^[7]分别设计了两阶段遗传算法求解同时考虑配送与安装两种需求的车辆路径问题.

本文拟研究带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题,在考虑第1类服务软时间窗约束、多类服务顺序约束及多类服务时间间隔约束的前提下,建立多需求车辆路径问题的联合优化模型,进一步设计求解模型的联合优化遗传算法.

1 带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题的数学模型

带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题可以描述为:某区域内有1个配送中心(配送中心集合记为 $J = \{0\}$),分别用 m 种车型为 n 个顾客(顾客集合记为 $I = \{1, 2, \dots, n\}$)提供 m 种不同类型的服务(服务需求类型集合记为 $K = \{1, 2, \dots, m\}$),每种类型的车辆只能提供单一类型的服务. 已知配送中心与各个顾客点之间的距离和车辆行驶时间,每个顾客有一种或多种服务需求且需求量已知. 已知各种类型车辆的最大服务能力,为各个顾客提供服务需要的时间,以及每种类型车辆的固定动用成本和行驶单位距离的成本等. 对于同时具有两种或两种以上需求的顾客,其第1种服务需求必须在给定的时间窗内完成,且第 $k+1$ 种需求的开始服务时间与第 k 种需求的完成服务时间间隔不能超过给定的值 SL_k . 问如何安排各类型车辆的路径才能在给定的时间窗和服务顺序约束下满足所有顾客点的多种需求,并且使总成本最低.

为了简化问题,作出如下假设:

- 1) 各种类型的车辆均从配送中心 J 出发,完成任务后仍回到原配送中心.
- 2) 每个顾客的一种需求只需要被同类型车辆服务一次.
- 3) 每条路径上的顾客总需求量不能超过车辆的

最大服务能力.

4) 每辆车的总行驶时间不能超过规定的最长行驶时间.

5) 每个顾客的第1种需求对应的时间窗为软时间窗,服务车辆早到或晚到会产生等待或惩罚费用.

6) 具有多种服务需求的顾客,其各类需求的服务顺序为 $1, 2, \dots, m$,即同一顾客的第 k 类服务完成时间必须早于第 $k+1$ 类服务的开始时间,且时间间隔不能超过最大允许时间间隔 SL_k (服务水平).

定义以下符号: $I = \{1, 2, \dots, n\}$ 为顾客点集合; $K = \{1, 2, \dots, m\}$ 为需求类型集合; $J = \{0\}$ 为配送中心集合; A^k 为具有第 k 类需求的顾客点集合; H^k 为为顾客提供第 k 类服务的可用车辆集合; d_{ij} 为配送中心或顾客点 i 与 j 之间的距离; t_{ij}^k 为第 k 类服务车从点 i 行驶到点 j 需要的时间; g^k 为动用1辆第 k 类车产生的固定费用; c^k 为第 k 类服务车行驶单位距离的成本; s_i^k 为车辆为顾客点 i 提供第 k 类服务需要的服务时间; $[e_i, l_i]$ 为顾客点 i 的第1类服务需求对应的时间窗; q_i^k 为顾客点 i 的第 k 类服务需求量; T^k 为第 k 类车辆允许的最长工作时间; Q^k 为第 k 类车辆的最大服务能力; SL_k 为同一个顾客点的第 k 类服务完成时间与第 $k+1$ 类服务开始时间之间的最大间隔; p_1 为顾客点提供第1类服务的车辆早于时间窗到达顾客点时,单位时间的等待成本; p_2 为顾客点提供第1类服务的车辆晚于时间窗到达顾客点时,单位时间的惩罚成本.

定义如下决策变量: r_{iv}^k 为第 k 类车辆 v 到达顾客点 i 的时刻; E_{iv}^1 为第1类车辆 v 在顾客点 i 的早到等待时间; L_{iv}^1 为第1类车辆 v 在顾客点 i 的晚到惩罚时间;

$$x_{ijv}^k = \begin{cases} 1, & \text{第}k\text{类车辆}v\text{从点}i\text{直接行驶到点}j; \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$$y_{iv}^k = \begin{cases} 1, & \text{第}k\text{类车辆}v\text{为顾客点}i\text{提供服务;} \\ 0, & \text{否则;} \end{cases}$$

$$z_v^k = \begin{cases} 1, & \text{动用第}k\text{类车辆}v; \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题可以表示成如下混合整数规划模型:

$$\min w = \sum_{k \in K} \sum_{v \in H^k} g^k z_v^k + \sum_{k \in K} \sum_{v \in H^k} \sum_{i \in J \cup A^k} \sum_{j \in J \cup A^k} c^k t_{ij}^k x_{ijv}^k + \sum_{v \in H^1} \sum_{i \in A^1} (p_1 E_{iv}^1 + p_2 L_{iv}^1). \quad (1)$$

s. t.

$$\sum_{i \in J \cup A^k} x_{ijv}^k = y_{jv}^k, j \in A^k, v \in H^k, k \in K; \quad (2)$$

$$\sum_{i \in J \cup A^k} x_{iiv}^k = y_{jv}^k, j \in A^k, v \in H^k, k \in K; \quad (3)$$

$$\sum_{v \in H^k} y_{iv}^k = 1, i \in A^k, k \in K; \quad (4)$$

$$\sum_{j \in A^k} x_{0jv}^k = z_v^k, v \in H^k, k \in K; \quad (5)$$

$$\sum_{i \in A^k} q_i^k y_{iv}^k \leq Q^k, v \in H^k, k \in K; \quad (6)$$

$$r_{iv}^k + s_i^k + t_{ij}^k \leq r_{jv}^k + M(1 - x_{ijv}^k), \\ i, j \in J \cup A^k, v \in H^k, k \in K; \quad (7)$$

$$r_{iv}^k + s_i^k - M(1 - y_{iv}^k) \leq r_{iw}^{k+1} + M(1 - y_{iw}^{k+1}), \\ i \in A^k \cap A^{k+1}, v \in H^k, w \in H^{k+1}, k \in K; \quad (8)$$

$$r_{iv}^k + s_i^k + SL_k + M(1 - y_{iv}^k) \geq r_{iw}^{k+1} - M(1 - y_{iw}^{k+1}), \\ i \in A^k \cap A^{k+1}, v \in H^k, w \in H^{k+1}, k \in K; \quad (9)$$

$$e_i - M(1 - y_{iv}^1) \leq r_{iv}^1 + E_{iv}^1 - L_{iv}^1 \leq \\ l_i + M(1 - y_{iv}^1), i \in A^1, v \in H^1; \quad (10)$$

$$\sum_{i \in J \cup A^k} \sum_{j \in J \cup A^k} x_{ijv}^k t_{ij}^k \leq T^k, v \in H^k, k \in K; \quad (11)$$

$$r_{iv}^k \geq 0, i \in A^k, v \in H^k, k \in K; \quad (12)$$

$$x_{ijv}^k, y_{jv}^k, z_i^k \in \{0, 1\}, i, j \in A^k, v \in H^k, k \in K. \quad (13)$$

目标函数(1)表示极小化所有成本之和,包括动用各类车辆的固定成本、行驶成本以及违反时间窗的早到和晚到惩罚成本.约束条件(2)和(3)表示为顾客 j 提供第 k 类服务的车辆 v 必须到达顾客点 j ,服务完必须从顾客点 j 离开;约束条件(4)表示顾客点 i 的每一类需求恰好由一辆同类型的车提供服务;约束条件(5)表示动用的每一辆车都要从配送中心出发去往顾客点;约束条件(6)表示车辆的服务能力约束;约束条件(7)表示同一辆车到达相继两个顾客点的时间关系;约束条件(8)表示为同一个顾客点提供两种服务的时间顺序关系;约束条件(9)表示为同一个顾客提供两种服务的时间间隔限制;约束条件(10)表示车辆 v 为顾客点 i 提供第1种服务需求的时间窗约束;约束条件(11)表示车辆的总行驶时间不得超过最大允许时间;约束条件(12)和(13)为变量取值约束.

本文建立的混合整数规划模型不仅考虑了为顾客提供第1种服务的软时间窗约束和为同一顾客点

提供多种服务的先后顺序约束,还考虑了同一个顾客多种需求的服务时间间隔约束以及各类车辆的总行驶时间(距离)约束等.以上模型成功推广了文献[7]中的研究成果.

2 联合优化遗传算法

由于带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题是非常复杂的NP难问题,设计求解模型的有效算法是解决这一类问题的关键.

文献[6-7]中基于家电配送与安装业务场景,设计了求解两种需求车辆路径问题的两阶段遗传算法.第1阶段确定配送车辆的行驶路径和车辆到达各个顾客点的时间;第2阶段确定安装车辆的行驶路径.由于两阶段算法中第2阶段的求解依赖于第1阶段的计算结果,因此容易陷于局部最优解.

本文将直接设计求解多需求车辆路径问题的联合优化遗传算法.

2.1 算法设计

1) 染色体编码规则.

采用自然数编码方式:一条染色体包括多个子序列,每个子序列对应一种车型的访问路径.例如包含1个配送中心和6个顾客点的配送与安装车辆路径问题中,1~6号顾客点有配送需求,2、5、6号顾客点有安装需求.假设完成配送任务需要动用2辆配送车,路径分别为0-6-4-1-0,0-3-2-5-0;完成安装任务需要动用1辆安装车,路径为0-6-2-5-0.则配送车的路径编码为641325,安装车的路径编码为625.两者合在一起构成包含两条子序列的染色体编码:第1条子序列为641325;第2条子序列为625.

2) 解码规则.

对给定的染色体中的每个子序列分别按照下列规则进行解码得到问题的可行解.以上述染色体中的第1条子序列641325为例.首先,安排第1辆配送车从配送中心出发,在满足车容量和车辆最大工作时间约束的前提下,依次为路径中尽可能多的顾客点提供服务,直到不满足约束为止,此时让第1辆车返回配送中心,并形成第1辆车的完整配送路径,如0-6-4-1-0;接着,安排第2辆配送车从配送中心出发,直接到序列中尚未得到服务的下一个顾客点3,按同样的规则解码并形成第2辆车的配送路径0-3-2-5-0.直到所有需求点均被服务为止.

3) 产生初始种群.

将具有同类需求的所有顾客点序号随机排列,形成一条子序列,将各种需求对应的子序列合在一起形成一条染色体.将以上操作重复 N 次,产生规模为 N

的初始种群.

4) 适应度函数.

首先,根据个体解码以后得到的车辆路径方案计算 $z = w + \mu n$. 其中: w 表示总费用,即模型的目标函数值; μ 表示单个顾客点违反服务顺序约束的惩罚值; n 表示违反服务顺序约束的顾客点总数. 然后,根据 $Fitness = 1/z$ 计算适应度值.

5) 选择操作.

采取轮盘赌法选择个体进入交配池,进行交叉变异操作.

6) 交叉操作.

采用次序交叉 (Order crossover) 方法对两个父代个体中相同类型子序列分别进行交叉,交叉过程如下所示.

交叉前:

父代A为75|143|826;

父代B为32|715|468.

交叉后:

子代A为27|143|568;

子代B为43|715|826.

7) 变异操作.

根据变异概率,随机选取一条染色体的某个子序列上的两个基因座,交换两个基因座对应的基因.

8) 构造临时种群.

对 N 条染色体进行交叉变异操作后,从 N 条染色体的同种类型子序列中任意选取 1 个组合成 1 个临时个体,共有 N^m 种组合,构成 N^m 个临时个体,由这些个体组成临时种群.

9) 从临时种群中筛选个体进入下一代.

对每个临时个体进行解码并计算其适应度值 (对应不可行解的个体适应度值定义为 0),从中选出适应度最大的前 N 个个体 (TOP N) 进入下一代.

10) 终止条件.

设定最大迭代次数作为终止条件.

2.2 算法流程图

算法流程如图 1 所示.

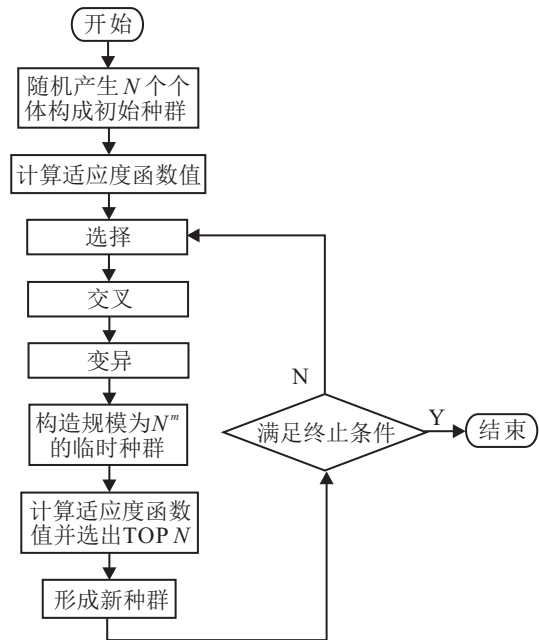


图 1 算法流程

3 模拟计算与结果分析

为了与文献 [6-7] 中的计算结果进行对比分析,本文构造包含两种类型需求的算例进行模拟计算.

3.1 小规模配送与安装车辆路径问题算例

首先利用文献 [6] 中包含一个配送中心和 16 个顾客点的算例进行模拟计算. 根据本文模型的特点,对算例信息作如下调整和补充: 配送中心和客户点的坐标单位为 km; 配送车和安装车的行驶速度均为 1 km/min, 单位行驶成本均为 1 元/min; 配送车和安装车的固定动用成本均为 20 元; 配送车的单位等待费用和晚到惩罚成本均为 2 元/min, 最大载重量为 15; 其余数据与文献 [6] 中相同. 分别利用文献 [6] 中的两阶段遗传算法和本文的联合优化遗传算法进行求解. 两种遗传算法均设定种群规模 100, 交叉概率 $P_c = 0.85$, 变异概率 $P_m = 0.15$, 最大迭代次数为 200.

表 1 不同算法的计算结果

算法类型	精确最优解	两阶段算法	联合优化遗传算法
配送车辆路径	0-5-4-2-1-3-6-0	0-4-2-1-3-6-7-8-0	0-2-1-3-6-4-5-0
	0-13-12-10-8-7-0	0-14-16-15-11-9-5-0	0-9-12-13-10-8-7-0
	0-9-11-15-16-14-0	0-13-12-10-0	0-11-15-16-14-0
安装车辆路径	0-6-1-2-0	0-12-10-6-1-2-0	0-11-16-13-0
	0-10-12-16-15-0	0-16-15-0	0-2-1-3-7-0
配送车行驶成本/元	171.961	184.7112	199.0454
安装车行驶成本/元	116.2083	126.6021	110.0378
车辆总行驶成本/元	288.1693	311.3133	309.0831
总成本/元	388.1693	411.3133	409.0831

同时,利用Lingo软件直接求解混合整数规划模型得到精确最优解,各种算法得到的详细结果见表1。

由表1可以看出,3种算法得到解均需动用3辆配送车和2辆安装车,只是车辆行驶路径、总行驶成本及总成本不相同。精确最优解的目标函数值最小,联合优化遗传算法的计算结果优于两阶段算法;联合优化遗传算法和两阶段遗传算法的近似比分别为1.073和1.080。

3.2 不同规模算例的计算结果分析

为了进一步分析联合优化遗传算法的计算效果,本文利用Solomon's Benchmark^[15]中不同规模的两个独立数据集C1和RC1中的部分数据分别产生测试算例。对于包含50个顾客点的数据集,随机生成20个需

要安装的顾客点,设定配送车辆载重量为200;对于包含100个顾客点的数据集,随机生成40个需要安装的顾客点,设定配送车辆载重量为1000,服务时间间隔设置为300。

两阶段遗传算法和联合优化遗传算法的种群规模均为100,交叉概率 $P_c = 0.85$,变异概率 $P_m = 0.15$,迭代次数为200。对每个算例用两种算法分别进行10次计算,记录每次计算得到的目标函数值,取10次计算的平均值,结果见表2。其中(1)为算例编号,(2)为算例规模,(3)和(4)分别为两阶段遗传算法和联合优化遗传算法得到的平均目标函数值,(5)为联合优化遗传算法比两阶段遗传算法对应目标函数值的降低值,(6)为联合优化遗传算法的目标函数值降低比率。

表2 不同数据集上使用两种算法得到的目标函数值对比表

算例编号 (1)	算例规模 (2)	两阶段遗传算法 (3)	联合优化遗传算法 (4)	目标函数降低值 (5) = (3) - (4)	目标函数值降低比率/% (6) = (5)/(3)
C101	50	37 728.02	32 868.68	4 859.34	13
C102	50	26 571.65	21 726.66	4 844.99	18
C103	50	19 401.01	14 563.33	4 837.68	25
C104	50	10 536.66	8 605	1 931.66	18
C105	50	34 226.65	30 880.02	3 346.63	10
R207	100	32 430.99	23 278.66	9 152.33	28
R208	100	23 306.98	17 933.01	5 373.97	23
R209	100	40 477.64	29 864.03	10 613.61	26
R210	100	42 995.96	30 331.71	12 664.25	29
R211	100	32 890.63	22 984.65	9 905.98	30

由表2可看出,对所有的测试算例,联合优化遗传算法得到的结果均优于两阶段遗传算法。对于50个点的算例,联合优化遗传算法比两阶段遗传算法得到的目标函数值平均降低10%~25%;对于100个点的算例,联合优化遗传算法比两阶段遗传算法得到的目标函数值平均降低23%~30%。可见,随着问题规模的增大,联合优化遗传算法的优越性越来越明显。

4 结 论

本文研究了带时间窗和服务顺序约束的多需求车辆路径问题,建立了混合整数规划模型,并设计了求解模型的联合优化遗传算法。通过模拟计算验证了算法的有效性。本文的研究一方面将经典的单一需求车辆路径问题推广到多需求的情况,而且考虑了同一顾客点的多种需求服务顺序约束以及服务时间间隔约束等;另一方面本文设计的联合优化遗传算法可以有效减少或避免传统的分阶段求解算法易陷入局部最优解的缺陷。

参考文献(References)

- [1] 王沛栋,唐功友,李扬.带容量约束车辆路由问题的改进蚁群算法[J].控制与决策,2012,27(11):1633-1638.
(Wang P D, Tang G Y, Yang L. Improved ant colony algorithm for capacitated vehicle routing problems[J]. Control and Decision, 2012, 27(11): 1633-1638.)
- [2] 张晓楠,范厚明.混合分散搜索算法求解带容量约束车辆路径问题[J].控制与决策,2015,30(11):1937-1944.
(Zhang X N, Fan H M. Hybrid scatter search algorithm for capacitated vehicle routing problem[J]. Control and Decision, 2015, 30(11): 1937-1944.)
- [3] 石建力,张锦.需求点随机的分批配送VRP模型与算法研究[J].控制与决策,2017,32(2):213-222.
(Shi J L, Zhang J. Model and algorithm for split delivery vehicle routing problem with stochastic customers[J]. Control and Decision, 2017, 32(2): 213-222.)
- [4] Kachitvichyanukul V, Sombuntham P, Kunnappadeelert S. Two solution representations for solving multi-depot vehicle routing problem with multiple pickup and delivery requests via PSO[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015, 89: 125-136.

[5] Kim K C, Sun J U, Lee S W. A hierarchical approach to vehicle routing and scheduling with sequential services using the genetic algorithm[J]. *Int J of Industrial Engineering Theory Applications and Practice*, 2013, 20(1): 99-113.

[6] 庞海军, 丁以中. 基于软时间窗的产品配送与安装相分离的车辆调度优化[J]. *上海海事大学学报*, 2012, 33(1): 20-25.
(Pang H J, Ding Y Z. Optimization for vehicle routeing with separated delivery and installation of products based on soft time windows[J]. *J of Shanghai Maritime University*, 2012, 33(1): 20-25.)

[7] Bae H, Moon I. Multi-depot vehicle routing problem with time windows considering delivery and installation vehicles[J]. *Applied Mathematical Modeling*, 2016, 40(13): 6536-6549.

[8] Liu R, Xie X, Augusto V, et al. Heuristic algorithms for a vehicle routing problem with simultaneous delivery and pickup and time windows in home health care[J]. *European J of Operational Research*, 2013, 230(3): 475-486.

[9] Avci M, Topaloglu S. An adaptive local search algorithm for vehicle routing problem with simultaneous and mixed pickups and deliveries[J]. *Computers and Industrial Engineering*, 2015, 83: 15-29.

[10] 周蓉, 沈维蕾, 刘明周, 等. 带时间窗装卸一体化车辆路径问题的混合离散粒子群优化算法[J]. *中国机械工程*, 2016, 27(4): 494-502.
(Zhou R, Shen W L, Liu M Z, et al. A hybrid discrete particle swarm optimization algorithm for vehicle routing problem with time windows and simultaneous pickup and delivery[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(4): 494-502.)

[11] Shi Y, Boudouh T, Grunder O. A hybrid genetic algorithm for a home health care routing problem with time window and fuzzy demand[J]. *Expert Systems with Applications*, 2017, 72: 160-176.

[12] Mancini S. A real-life multi depot multi period vehicle routing problem with a heterogeneous fleet: Formulation and adaptive large neighborhood search based matheuristic[J]. *Transportation Research Part C Emerging Technologies*, 2015, 70: 100-112.

[13] Kergosien Y, Lenté C, Billaut J C, et al. Metaheuristic algorithms for solving two interconnected vehicle routing problems in a hospital complex[J]. *Computers and Operations Research*, 2013, 40(10): 2508-2518.

[14] Kalayci C B, Kaya C. An ant colony system empowered variable neighborhood search algorithm for the vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery[J]. *Expert Systems with Applications*, 2016, 66: 163-175.

[15] Solomon's benchmark problems[Z]. (2005-03-24)[2017-12-01]. <http://w.cba.neu.edu/msolomon/problems.htm>.

作者简介
李珍萍(1966—), 女, 教授, 博士, 从事运筹学理论及其应用、智能算法等研究, E-mail: lizhenping66@163.com;
张煜炜(1992—), 女, 硕士生, 从事车辆路径问题的研究, E-mail: morbenvy@126.com.

(责任编辑: 孙艺红)

下 期 要 目

二维弹道修正机构方案与修正控制算法综述	雷晓云, 等
基于深度学习的城市轨道交通短时客流量预测	龙小强, 等
基于三角 Pythagorean 模糊集的多准则决策方法	范建平, 等
基于电气介数的电网故障无功规划选址与定容	李 晖, 等
基于随机模型预测控制的含大规模风电接入的电力系统优化调度	王 锐, 等
自适应协同进化蝙蝠算法	刘 振, 等
基于事件驱动的二次凸优化问题分布式优化算法	赵中原, 等
考虑需求响应的水火电优化调度改进型花朵授粉算法	沈艳军, 等
基于精英混沌搜索策略的交替正余弦算法	郭文艳, 等
求解约束优化问题的新型帝国竞争算法	雷德明, 等
基于非线性干扰观测器的变几何进气道飞行器自适应模糊控制	窦立谦, 等
DoS 干扰攻击下的信息物理系统状态反馈稳定	汪慕峰, 等