

基于前景理论的物流配送干扰管理优化调度方法

宁涛^{1,2}, 王旭坪^{2†}, 胡祥培², 焦璇³

(1. 大连交通大学 软件学院, 辽宁 大连 116054; 2. 大连理工大学 系统工程研究所, 辽宁 大连 116023; 3. 大连东软信息学院 会计学院, 辽宁 大连 116023)

摘要: 为减少物流配送过程中可能发生的不同种类干扰问题的影响,设计物流配送干扰管理的多目标优化模型和基于前景理论的用户敏感度决策模型. 以用户心理预期时间为参考点,用前景理论度量用户对货物期待时间的心理感知程度,设计用户心理期望感知曲线和价值函数曲线. 为减少配送过程干扰因素的影响,并寻求多目标优化问题的较优解,提出基于动态缩进调整步长的改进量子细菌觅食算法. 最后通过已经存在的经典算法收敛性的比较和对 Solomon 算例的运行测试,验证所提出方法的有效性.

关键词: 物流配送; 干扰管理; 心理感知; 前景理论

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Disruption management optimal scheduling for logistics distribution based on prospect theory

NING Tao^{1,2}, WANG Xu-ping^{2†}, HU Xiang-pei², JIAO Xuan³

(1. College of Software, Dalian Jiaotong University, Dalian 116054, China; 2. Institute of Systems Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China; 3. Institute of Accountancy, Dalian Neusoft University, Dalian 116023, China)

Abstract: In order to resolve the disturbance in the process of logistics distribution, a multi-objective optimization model and the user sensitivity decision model for disruption management are established. Acting the user's psychological perception time as the reference point, the psychological perception of the expected time is measured using the prospect theory, and the psychological perception curve and the value function curve are designed. In order to reduce the impact of disruption in the distribution process and obtain the optimum solution of multi-objective optimization problem, an improved quantum bacterial foraging algorithm based on dynamic indentation step is proposed. The effectiveness of the proposed method is verified through the comparison with some existing classical algorithms and the test on the Solomon example.

Keywords: logistics distribution; disruption management; psychological perception; prospect theory

0 引言

末端物流配送的对象存在对时间敏感、访问随机等特点,使得我国物流企业在此类环节的问题日益严重. 如何实时快速地选取配送方案进行调度,使配送作业的效率、成本及客户满意度受到的扰动最小,是限时解决末端物流调度问题亟待解决的关键问题. 干扰管理根据问题的扰动程度和性质,设计对应的优化模型和方法来生成尽可能小的扰动更新策略以及局部调整初始方案^[1-3]. 相关领域的学者从多个

角度对物流优化调度的干扰管理进行了研究^[4-6]. 例如,李琳等^[7]从提高配送工具的使用率和企业配送效率的角度,设计了两阶段启发式算法对已交货配送单和未交货配送单进行整合配送. 蒋丽等^[8]针对车辆故障救援问题从运力干扰管理的角度对问题进行了系统的分析. 王杜鹃等^[9]研究了加工工件初始计划执行中计划外多个新工件到达的干扰管理问题,并分析了 Pareto 最优解特性. 丁秋雷等^[10]基于前景理论,设计了能够均衡各方利益的干扰管理方案. 王旭坪

收稿日期: 2017-07-04; 修回日期: 2017-09-30.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71531002, 71471025); 中国博士后科学基金项目(2017M611231); 辽宁省博士启动基金项目(201601244, 20170520229).

责任编委: 刘宝碇.

作者简介: 宁涛(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事物流调度及其应用等研究; 王旭坪(1962—), 男, 教授, 博士, 从事突发事件及应急管理研究.

†通讯作者. E-mail: daliann1@126.com

等^[11]研究了带模糊时间窗的车辆调度组合干扰管理模型及算法. 徒君等^[12]通过数值实验验证了物流配送中不对称信息和风险规避对最优配送时间契约的影响. Zeimpekis 等^[13]提出处理城市物流配送中干扰问题的管理系统框架, 设计了解决车辆延迟问题和车辆抛锚问题的管理系统. Potvin 等^[14]研究了针对快递收集任务中新增顾客的需求和旅行事件中干扰的问题. 以上学者对末端物流调度存在的干扰管理问题进行了有意义的研究, 但其对基于用户心理感知的行为因素在最优解可行性方面的影响考虑不够.

本文结合行为学中的用户心理感知研究方法和运筹学中定量分析的手段, 建立末端物流配送干扰管理模型, 并提出基于前景理论和量子理论的扰动度量策略及求解方法.

1 基于前景量子理论的扰动度量策略

1.1 问题界定与假设

有扰动问题的物流配送调度可描述为: 运载车辆离开配送车场, 首先完成对既定数量客户点的全部服务, 之后再返回配送车场; 当系统发生扰动时, 需修改初始配送方案后进行局部的干扰管理^[15]. 而上述描述是在完全理性假设的条件下进行的仿真研究, 难以直接适用于实际物流配送问题的干扰管理, 因此本文提出基于前景理论的扰动度量策略.

1.2 基于前景理论的函数表示

前景理论是一种用来描述用户在不确定条件下对结果敏感程度的决策模型. 基于前景理论, 问题的总体评价值 V 可表示为 τ 和 v 的函数, 即

$$V(x, m; y, n) = \tau(m)v(x) + \tau(n)v(y). \quad (1)$$

其中: m 和 n 表示带来负面影响 (亏损) 的客观概率值和带来正面效应 (盈利) 的客观概率值, $\tau(m)$ 和 $\tau(n)$ 分别表示概率 m 和 n 的决策权重函数, 即 $\tau(0) = 0$, $\tau(1) = 1$; v 表示价值函数, $v(x)$ 和 $v(y)$ 表示相对于参考点的用户主观价值. 价值函数模型 $V(x)$ 如下所示:

$$V = \begin{cases} x^\alpha, & x \geq 0; \\ -\lambda(-x)^\beta, & x < 0. \end{cases} \quad (2)$$

其中: α 和 β 分别对应盈利和亏损区间价值幂函数的凸凹程度, 即凸型表示亏损区间, 凹型表示盈利区间, 若值小于 1, 则表示敏感性递减; 参数 λ 对应亏损区间比盈利区间更陡峭的特征, 其值若大于 1, 则表示亏损厌恶. 用户对货物配送的心理感知受配送系统多方面信息的影响, 如主干物流的效率、末端物流的路况以及配送员的主观决策等. 如果货物配送时间与用

户的心理期望时间相差较大, 则会增大用户的心理厌恶值, 从而影响到配送服务的心理感知度. 从用户订单发出的时间点开始, 用户会通过不同渠道获取货物即将配送到达的时间信息 T_h , 从而产生心理期望时间 T_0 , 即 $(T_h - T_0)$ 的值越大, 用户对配送服务心理厌恶感知度越高.

1.3 用户心理期望感知分析

用户对货物期望心理感知涉及到物流企业、用户的心理状况、货物实际到达的时间 T_f . 如果用户急切期待货物时, 则相应的期望决策权重函数如下所示:

$$\begin{aligned} \tau(m(T_f)) &> \tau(m) > 0, \\ \tau(n(T_f)) &> \tau(n) > 0. \end{aligned}$$

而用户对配送的期望判断表示如下:

$$\begin{aligned} V(T_f) &= \tau(m(T_f))v(x) + \tau(n(T_f))v(y) < \\ \tau(m)v(x) &+ \tau(n)v(y) = V. \end{aligned} \quad (3)$$

若以用户的心理期望时间 T_0 为参考点, 则结合前景理论, 当 $T_f < T_0$ 时, 用户的心理期望厌恶感知度很小. 当 T_f 的值不断逼近于 T_0 时, 用户的心理期望厌恶程度不断增加; 当 $T_f > T_0$ 时, 用户的心理期望厌恶感知度会显著增加. 因此, 当以物流配送时间为横坐标, 用户心理期望感知程度为纵坐标时, 根据前景理论价值曲线可推导出用户对物流货物到达时间的心理期望感知曲线. 设当 $T_f = T_0$ 时, 期望厌恶度表示为 D_0 , 根据前景理论的函数模型, 用户心理期望感知函数模型设为

$$D(T) = -V(-x + T_0) + D_0.$$

2 物流配送干扰管理模型及求解算法

2.1 配送优化调度模型

本文构建降低配送货物实际到达时间与用户心理期望感知间的差值和最小化扰动因素两个目标函数. 根据对问题的假定, 数学模型可构建如下:

$$\begin{aligned} \min Z &= \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{N+M+1} \sum_{j=1}^{N+M+1} c_{ij}x_{ijk} + \\ &\sum_{k=K+1}^{K+L} \sum_{i=1}^{N+M+1} \sum_{j=1}^{N+M+1} c_{ij}x_{ijk} + \\ &\sum_{k=K+1}^{K+L} F_k \sum_{j=1}^N x_{(N+M+1)jk}. \end{aligned} \quad (4)$$

式(4)表示求解扰动问题的目标函数, 客户点编号设为 $1, 2, \dots, N$; 配送中心车辆编号设为 $1, 2, \dots, K$; i 和 $j(i, j \in 1, 2, \dots, N)$ 分别表示配送车场点及客户

点;车辆 k 从客户点 i 出发的载货量为 $q_{ik}(t)$,且 $q_{ik}(t)$ 小于车辆的满载量; q_i 为客户 i 的需求量;车辆行驶的固定成本为 F_k ;车辆从客户点 i 到客户点 j 的行驶时间为 t_{ij} ; i 到 j 之间的费用为 c_{ij} ;车辆 k 从 i 到 j 的运输量为 w_{ijk} . 约束条件表示如下:

$$\text{s.t. } D = \begin{cases} -(T_0 - T_f)^\alpha + D_0, & T_f \leq T_0; \\ \lambda(T_f - T_0)^\beta + D_0, & T_f > T_0; \end{cases} \quad (5)$$

$$\sum_{k=1}^{K+L} y_{ik} = 1, \quad \forall i; \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{N+M+1} x_{ijk} = y_{ik}, \quad \forall i, k; \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^{N+M+1} x_{ijk} = y_{jk}, \quad \forall j, k; \quad (8)$$

$$w_{(N+M+1)jk} = x_{(N+M+1)jk} Q, \quad \forall j, k. \quad (9)$$

其中:式(5)表示用户对配送货物获取时间的心理期望感知函数;式(6)表示每个客户都必须被服务;式(7)和(8)表示每个客户仅能被一辆车服务;式(9)表示刚从车场出发时车辆应是满载状态.

2.2 求解算法

细菌觅食算法是一类全局随机搜索算法^[16-17],考虑到量子理论能保证个体出现在有全局搜索能力可行性空间的任何位置^[18],本文提出改进的量子细菌觅食算法(QBFO).

个体细菌的状态和位置在量子空间是不确定的,且个体被波函数 $\psi(Y, t)$ 确定,个体位置的概率密度函数表示为 $|\psi|^2$.在吸引子的每一维建立了基于 δ 势阱模型的吸引势.势能函数可表示为 $\text{PE}(Y) = -\gamma\delta(Y)$, $Y = x_{id} - P_d$,表示个体 i 所处位置 x_{id} 与吸引子 P_d 间的距离.它引入了薛定谔方程

$$j\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(Y, t) = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + \text{PE}(Y) \right] \psi(Y, t), \quad (10)$$

在每一个维度来获取 $\psi(Y, t)$ 和 $Q(Y)$ 的值(其中 σ 表示 δ 的特征长度),即

$$\psi(Y) = \frac{1}{\sqrt{\sigma}} e^{-\frac{|Y|}{\sigma}}, \quad (11)$$

$$Q(Y) = |\psi(Y)|^2 = |\psi(x_{id} - P_d)|^2 = \frac{1}{\sigma} e^{-\frac{2|x_{id} - P_d|}{\sigma}}. \quad (12)$$

个体在势场中的运动遵循 $|\psi|^2$,但在实际应用中,个体细菌必须在任何时刻都有一定位置.在(0,1)区间内获取本文中的个体运动方程将会通过Monte-Carlo随机数 μ ,这里 $\mu = e^{-2|x_{id} - P_d|/\sigma}$,则有个体 i 的 d 维变量位置更新方程

$$x_{id} = P_d \pm \frac{\sigma}{2} \ln\left(\frac{1}{\mu}\right), \quad \mu \sim U(0, 1), \quad (13)$$

$$L = 2\ell|m_{\text{best}} - x_{id}(t)|. \quad (14)$$

其中: ℓ 是收缩膨胀系数, $\ell < 1.782$ 是为了确保算法的收敛性^[19]; m_{best} 是种群最优位置矢量的平均值,有

$$m_{\text{best}} = \sum_{i=1}^M \frac{P_i}{M} = \left[\sum_{i=1}^M \frac{P_{i1}}{M}, \sum_{i=1}^M \frac{P_{i2}}{M}, \dots, \sum_{i=1}^M \frac{P_{iD}}{M} \right]^T. \quad (15)$$

当细菌游动固定步长过小时,算法可能会过早收敛;如果步长过大,则会降低算法的收敛速度.因此,本文提出了基于一种动态缩进控制策略控制细菌趋化步长的方法.量子细菌觅食算法的缩进步骤如下:

1) 初始化参数.初始化的参数包括细菌个体数量 s ,迁移次数 N_{ed} ,繁殖次数 N_{re} ,趋化次数 N_c ,游动次数 N_s 以及迁移概率 P_{ed} .

2) 初始化种群.在解空间中随机产生细菌个体 s 的矢量 x_i .

3) 计算每一个细菌个体的适应度函数 J ;转移周期 $l = 1 : N_{ed}$;繁殖周期 $k = 1 : N_{re}$;趋化周期 $j = 1 : N_c$.

4) 根据下式的动态缩进来改变细菌个体的游动步长:

$$C(i, j + 1) = AC(i, j). \quad (16)$$

其中: A 为动态缩进系数, $C(i, j)$ 为向前游动步长.

5) 基于量子行为的繁殖.完成了趋化循环后,当前个体最佳位置以及全局最优位置将被更新.

6) 判断循环是否完成.

3 数值实验

为验证本文所提出算法的性能,特选取经典的Solomon算例^[20]在Matlab7.0环境下对6类问题中每类选取的1个标准问题独立执行20次,并与已有的BFO^[21]、IBFO^[18]、AIA^[15]和QPSO^[22]算法进行比较.本文设计基于周期驱动和重调度因子驱动的混合策略,策略包含确定重调度周期和选择重调度事件两方面问题.

3.1 算法收敛性比较

使用标准测试函数Rastrigrin作为适应度函数来比较5种算法的性能,其函数表示为

$$f(y) = \sum_{i=1}^{20} [y_i^2 - 10 \cos(2\pi y_i) + 10]. \quad (17)$$

其中: $y_i \in [-100, 100]$,最大迭代次数为100.

图1是利用算法对测试函数运算的最优解收敛曲线。由图1可以看出,本文提出的QBFO算法的收敛速度比其他算法显著提高,具有较好的全局寻优能力。

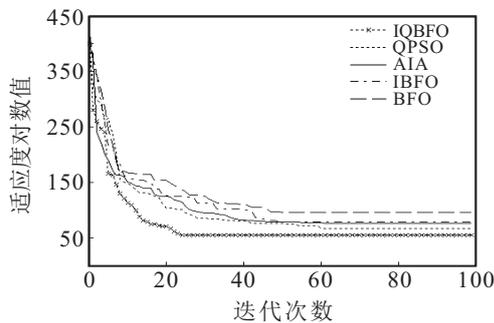


图1 5种算法适应度收敛曲线

3.2 算法性能检验

本文运行文献[23]中针对动态车辆路径问题的重调度算法与本文提出的QBFO对Solomon算例进行测试。首先对每个算例在3种不同时间区间(早峰、中峰、晚峰)内随机生成扰动事件,然后QBFO对相同的扰动事件执行10次。运行结果显示了各个算例在3种时间区间求得的非支配最优解集中的配送成本及客户要求时间窗偏离度的标准差占平均值的百分比分配,对算例按照17个C类、23个R类以及16个RC类顺序编码排列。在早峰时间区间内的结果标准差较高,但问题的目标值(配送成本和时间窗偏离)都位于较低的水平;晚峰时间区间内的结果标准差较低,但问题的目标值都位于较高水平;中峰时间区间内的标准差和目标值都位于居中的水平。这表明:

1) 扰动事件发生得越早,配送路线可能调整的灵活度越高;扰动事件发生得越晚,配送路线可能调整的灵活度越低。

2) 相同时间区间内,R类问题的标准差低于C类问题的标准差,RC类问题则介于两者之间,即相对于C类问题,R类问题配送路线可调整的灵活度高。

3) 无论哪类问题的哪个时间段下,算法执行10次的非支配最优解集中的配送成本和时间窗偏离程度都可以控制在5%以内,这验证了算法的鲁棒性。

4 结论

本文结合前景理论,针对物流配送干扰管理问题,提出了价值函数度量方法及配送过程中考虑客户心理感知的干扰管理策略;通过多目标规划的方法,构建了物流配送干扰管理的多目标优化模型,同时提出了改进的量子细菌觅食算法,并与经典算法比较,验证了所提出算法的有效性和先进性。下一步研究

工作的重点是如何将动态演化情景嵌入模型以最小化修改原有调度策略。

参考文献(References)

- [1] Teodorovic D, Radivojevic G. A fuzzy logic approach to dynamic Dial-A-Ride problem [J]. *Fuzzy Set and Systems*, 2000, 116(16): 23-33.
- [2] Hu X P, Sun L J, Liu L L. A PAM approach to handling disruptions in real-time vehicle routing problems[J]. *Decision Support Systems*, 2013, 54(3): 1380-1393.
- [3] Wang X P, Ruan J H, Shi Y. A recovery model for combinational disruptions in logistics delivery: Considering the real-world participators[J]. *Int J of Production Economics*, 2012, 140(4): 508-520.
- [4] Yu G, Qi X T. *Disruption management: Framework, models and application*[M]. Singapore: World Scientific Publishing Company, 2004.
- [5] Qi X T, Jonathan F B, Yu G. Disruption management for machine scheduling: The case of SPT schedulers[J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 103(1): 166-184.
- [6] Cacchiani V, Huisman D, Kidd M, et al. An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2014, 63(2): 15-37.
- [7] 李琳, 刘士新, 唐加福. B2C环境下带信息流的多阶段订单配送问题[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(10): 1293-1299.
(Li L, Liu S X, Tang J F. Multistage order-delivery problem with information flow under B2C environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(10): 1293-1299.)
- [8] 蒋丽, 丁斌, 臧晓宁. 基于干扰管理的车辆故障救援模型[J]. *系统工程*, 2010, 28(6): 111-116.
(Jiang L, Ding B, Zang X N. The model of vehicle breakdown rescue based on disruption management[J]. *System engineering*, 2010, 28(6): 111-116.)
- [9] 王杜鹃, 王建军, 刘春来, 等. 具有恶化效应的新工件到达生产调度干扰管理[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(2): 368-380.
(Wang D J, Wang J J, Liu C L, et al. Disruption management for multiple new orders in production scheduling with deteriorating processing time[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2015, 35(2): 368-380.)
- [10] 丁秋雷, 胡祥培, 姜洋. 基于前景理论的物流配送干扰管理模型研究[J]. *管理科学学报*, 2014, 17(11): 1-9.
(Ding Q L, Hu X P, Jiang Y. A model for disruption management based on prospect theory in logistic distribution[J]. *J of Management Sciences in China*, 2014, 17(11): 1-9.)

[11] 王旭坪, 阮俊虎, 张凯, 等. 有模糊时间窗的车辆调度组合干扰管理研究[J]. 管理科学学报, 2011, 14(6): 2-15.
(Wang X P, Ruan J H, Zhang K, et al. Research on vehicle scheduling combination interference management with fuzzy time windows[J]. J of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 2-15.)

[12] 徒君, 黄敏. 不对称信息下第四方物流配送时间契约设计[J]. 控制与决策, 2016, 31(8): 1429-1434.
(Tu J, Huang M. Delivery time contract design under asymmetric information for fourth party logistics[J]. Control and Decision, 2016, 31(8): 1429-1434.)

[13] Zeimpekis V, Giaglis G M, Minis I. A dynamic real-time fleet management system for incident handling in city logistics[C]. Vehicular Technology Conf. Stockholm, 2005, 5: 2900-2904.

[14] Potvin J Y, Xu Y, Benyahia I. Vehicle routing and scheduling with dynamic travel times[J]. Computers & Operations Research, 2006, 33(4): 1129-1137.

[15] Sasipriya S, Ravichandran C S. Performance analysis of overloaded CDMA system under imperfect synchronization using parallel/successive interference cancellation[J]. Telecommunication Systems, 2014, 56(4): 509-518.

[16] Chatzis S P, Koukas S. Numerical optimization using synergetic swarms of foraging bacterial populations[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(12): 15332-15343.

[17] Xu J J, Hong L. Impact factors of choosing willingness for picking up service[J]. Engineering and Technology, 2013, 36(14): 2509-2513.

[18] Vijaychakaravarthy G, Marimuthu S, Naveen Sait A. Comparison of improved sheep flock heredity algorithm and artificial bee colony algorithm for lot streaming in *m*-Machine flow shop scheduling[J]. Arabian J for Science and Engineering, 2014, 39(5): 4285-4300.

[19] Wang W. Research on logistics delivery networks of online retailers[J]. J of System and Management Science, 2013, 3(2): 51-59.

[20] Solomon M. Solomon benchmark problems[EB/OL]. [2009-02-28]. <http://www.idsia.ch/luca/macsvrptw/problems/welcome.htm>.

[21] Ning T, Huang M, Liang X, et al. A novel dyanmic scheduling strategy for solving flexible job-shop problems[J]. J of Ambient Intelligent and Humanized Computing, 2016, 7(5): 721-729.

[22] 宁涛, 郭晨, 陈荣. 一种动态车辆路径问题决策策略仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(12): 2942-2947.
(Ning T, Guo C, Chen R. Simulation study on scheduling strategy of dynamic vehicle routing problem[J]. J of System Simulation, 2015, 27(12): 2942-2947.)

[23] Sheng Xinyi, Xi Maolong, Sun Jun, et al. Quantum-behaved particle swarm optimization with novel adaptive strategies[J]. J of Algorithm & Computational Technology, 2015, 9(2): 143-162.

(责任编辑: 孙艺红)

下 期 要 目

具有未建模动态和输出约束的耦合系统的分散自适应控制	张天平, 等
遮挡场景的光场图像深度估计方法	张旭东, 等
灾后动态环境下基于MPC的应急运输实时调度	刘亚杰, 等
基于混合PSO-Adam神经网络的外协供应商评价决策模型	李益兵, 等
面向原油总氢物性预测的数据扩增预处理方法	易 令, 等
基于新型Type-1 PLL的永磁同步电机转子位置估计方法	王大志, 等
供应链环境下带越库配送的多配送中心车辆路径问题	葛显龙, 等
基于均值漂移和双层群结构模型的群目标GMPHD滤波	宋骊平, 等
基于动态事件触发的混沌系统故障容错同步问题	马大中, 等
自适应的非支配排序遗传算法	王嵘冰, 等
基于尖峰自组织模糊神经网络的需水量预测	乔俊飞, 等
粒计算中基于属性分类的形式概念属性约简	徐 怡, 等