

Research on Vehicle Scheduling Problem of Multi Warehouse Collaborative Distribution and Its Application

Kewei Chen¹, Fangyan Dong^{1,*}, Xusheng Wang^{2,*}, Yuecong Zhu³, Xiaomin Chu³, Kaoru Hirota⁴

¹College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, China

²Graduate College of Engineering and Technology, Fudan University, Shanghai, China

³Graduate College of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo, China

⁴Automation College, Beijing Institute of Technology, Beijing, China

Email address:

chenkewei@nbu.edu.cn (Kewei Chen), dongfangyan@nbu.edu.cn (Fangyan Dong), 18110860054@fudan.edu.cn (Xusheng Wang), 2111081274@nbu.edu.cn (Yuecong Zhu), 2111081085@nbu.edu.cn (Xiaomin Chu), hirota@bit.edu.cn (Kaoru Hirota)

*Corresponding author

To cite this article:

Kewei Chen, Fangyan Dong, Xusheng Wang, Yuecong Zhu, Xiaomin Chu, Kaoru Hirota. Research on Vehicle Scheduling Problem of Multi Warehouse Collaborative Distribution and Its Application. *Science Discovery*. Vol. 9, No. 6, 2021, pp. 401-409.

doi: 10.11648/j.sd.20210906.31

Received: October 28, 2021; Accepted: November 24, 2021; Published: December 2, 2021

Abstract: In the modern society with highly developed logistics, while paying attention to structural and functional strategic layout and global scale services, it is also our ultimate goal to pursue efficient transportation / high-quality logistics services, reduce logistics transportation costs and reduce CO₂ emissions. This paper proposes a new concept of multi warehouse collaborative distribution Vehicle Dispatching Problem (VDP/MD) and its customization, and provides a solver for complex scenarios in real new transportation problems. Aiming at the VDP/MD problem, an enhanced computing model with hierarchical and multiple structure is introduced, which is called HIMS++ computing model. It consists of three layers: the atomic layer is the fluctuation area of system regulation cost, the molecular layer is the formation area of system stable state, and the individual layer is the optimization decision area of scheduling plan. The HIMS++ model is constructed by using object-oriented programming software components; The optimization algorithm is realized by heuristic probability exploration and fuzzy decision-making method. The experiment was carried out using the 3-day order data obtained from the actual dispatching center in Tokyo Metropolitan Area, which has 27 oil tank vehicles (including 2 types). It is proved that the HIMS++ model is more accurate (10% improvement) and faster (12 times) than the results given by experts. HIMS++ model is also a convenient tool to solve the actual transportation combination optimization problem (multi parameter, multi constraint and multi-objective optimization problem), This study introduces a novel solution for digital logistics support and accurate Vehicle distribution scheduling.

Keywords: Vehicle Dispatching, HIMS Calculation Model, Tabu Search, Fuzzy Inference, Object-oriented Paradigm

多仓储协同配送车辆调度问题及应用研究

陈科伟¹, 董芳艳¹, 王旭升², 朱越聪³, 储晓敏³, 廣田薰⁴

¹宁波大学机械工程与力学学院, 宁波, 中国,

²复旦大学工程技术学院研究生院, 上海, 中国,

³宁波大学机械工程与力学学院研究生院, 宁波, 中国,

⁴北京理工大学自动化学院, 北京, 中国

邮箱

chenkewei@nbu.edu.cn (陈科伟), dongfangyan@nbu.edu.cn (董芳艳), 18110860054@fudan.edu.cn (王旭升), 2111081274@nbu.edu.cn (朱越聪), 2111081085@nbu.edu.cn (储晓敏), hirota@bit.edu.cn (廣田薰)

摘要：在物流高度发展的现代社会中，注重结构性与功能性战略布局和全球化规模服务的同时，追求高效率运输/高品质物流服务，降低物流运输成本，减少CO₂排放，也是我们日常追求的极致目标。本文提出了多仓储协同配送车辆调度问题（VDP/MD）及其定式化的新概念，并为真实新型运输问题中的复杂场景提供了求解器。针对VDP/MD问题引入了一种具有分层多重结构的增强型计算模式，称为HIMS++计算模型。它包含3层：原子层是系统调节成本的波动区，分子层是系统稳定状态的形成区，个体层是调度计划的优化决策区，使用面向应用编程的软件组件构建了HIMS++模型；其优化算法是通过启发式概率探索和模糊决策方法实现的。使用从东京都市区的实际调度中心获取的3天订单数据进行了实验，该中心拥有27辆油罐车（包含2种类型）。经证实，HIMS++模型比专家给出的结果更加准确（10%的提升）和快速（12倍）。HIMS++模型也是解决实际运输组合优化问题的便捷工具（多参数、多约束、多目标优化问题），本研究为数字化物流支援，精准配车配送及调度推出新颖的解决方案。

关键词：车辆调度，HIMS计算模型，启发式概率搜索，模糊决策，面向应用编程

1. 引言

在物流高度发展的现代社会中，战略上注重结构/功能性布局，全球化规模服务的同时，降低物流运输成本（GDP占比），减少CO₂排放（避免庸车/空车/低载率等非优化调度），提高服务品质（增加车辆有效行程率，高度满足客户在时间/场地/营业等方面的约束需求）也是物流业从业者日常追求的极致目标。

在过去的几年中，车辆调度[1]，配送路径优化[2]问题已经发展成为一个重要的研究领域。许多研究者试图回答其基础模式问题[3,4]，利用SA[5,6]、Tabu search[7,8]、GA[9,10]等实现快速求解方案。伴随着物流及运输方式变化的加速，订单/车辆实现共享，协同配送的车辆调度问题正式成为现实世界中一个全新的重要课题。此外，随着计算机算力的高度成长和数字地理信息系统(GIS)[11]的普及，对能够以灵活可行的方式解决实际交通问题的计算模型的需求正不断增强，共同配送问题是这些实际运输调度问题中的核心难题之一。

本研究引入了多仓储协同配送的车辆调度问题（VDP/MD）问题的概念，以统合的方式对复杂的实际运输情况进行具体地数学建模；提出了一种分层多重复合结构的增强型计算模型(HIMS++)来解决现实中的VDP/MD问题。HIMS++模型由3层组成：原子层（控制系统成本），分子层（控制和优化系统状态）和个体层（用模糊决策[12]

微调系统走向与平衡）。HIMS++模型是以面向应用编程技术实现的软件组件，基于启发式探索方法和模糊推论成员函数相组合实现其相应的优化算法。

使用来自日本东京实际调度中心的3天订单数据及简易数字地图进行了相应实验。共有27辆油罐车（包含2种类型），每天从3个仓库到约30-60个目的地进行共同配送；交通区域在东京都市区。根据实验结果，从算法、系统应用和实际执行的角度进行了细致地分析。结果和专家的评估证实，HIMS++模型是可行的、快速的、高效的，可以应用于现实生活中VDP/MD问题的调度支援系统中去。

第2章提出了VDP/MD问题的概念及基于模糊数学理论的定式化描述；第3章对HIMS++模型的结构和操作标准进行了公式化定义；第4章，展示了实验结果及其全面综合性评估。

2. VDP/MD问题

VDP/MD问题被引入现代社会中的日常配送活动，这对于运输行业的大规模、高效、协同配送非常重要。VDP/MD问题有很多实际应用，例如将食品或饮料产品运输到便利店，或为石油公司协同配送油品。尽管VRSDP/SD问题[13]已被引入日常配送工作，但VDP/MD问题能够应对更加复杂的情况，例如来自不同车队的合作配送和使用多个仓库以提高运输效率。

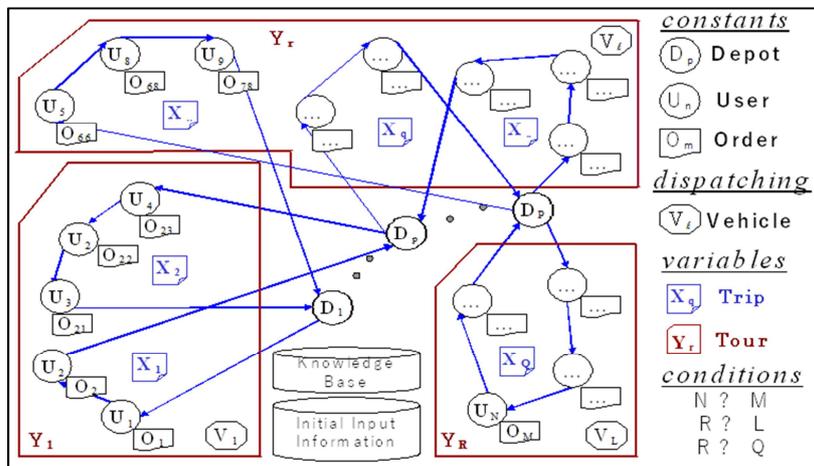


图1 VDP/MD问题的概念描述。

2.1. VDP/MD问题的概念

基于VDP/MD问题（图1）描述了一种新型的现代社会日常配送问题。来自多家公司的L辆车{V}被雇用在一些仓库D_p's（存放所有货物的配送中心）进行配送工作。考虑到配送成本，每辆车的起点（起始仓库所在点）虽不固定，但其终点（车库）通常固定在车库车场（指定仓库的车棚）。当M个订单{O_m}，在某个时间窗口内对某些商品的需求，从N个用户{U_n}，一些有约束条件的订单的消费者那里获得时，将制定车辆的调度计划，以便在第二天交货。问题是，在满足一些约束条件的情况下，如何为这些仓库制定合适的调度计划，同时为所有配送作业提供最佳路线和高效的调度方法。

2.2. 常量和变量

表1显示了VDP/MD问题中的常数集。在Depot项D_p中，整数区间[Bt_p, Et_p]是车辆可以完成装载工作的时间窗口。

表1 VDP/MD问题中的常量定义。

| 项目 | 定义 | 全集 |
|---------|---|---|
| Depot | D _p =(Bt _p ,Et _p) | D={D ₁ ,..., D _p ,..., D _P } |
| User | U _n =(Bt _n ,Et _n), SU _n) | U={U ₁ , ..., U _n , ..., U _N } |
| Order | O _m =(C _m , [Bt _m , Et _m], U ^{m_n); C_m ≅ SU^m_n} | O={O ₁ , ..., O _m , ..., O _M } |
| Vehicle | V = (SV, RWt, EWt, D _p) | V={V ₁ , ..., V _s , ..., V _L } |

表2 VDP/MD 问题中的变量定义。

| 项目 | 定义 | 全集 |
|------|--|---|
| Trip | J _m =(O _m , U ^m _n) | D={D ₁ ,..., D _p ,..., D _P } |
| Tour | X _q =(D ^q _L ,J ^q _{m1} ,J ^q _{m2} ,...,J ^q _{mK_q} ,D ^q _R), Y ^q , k _q ;K _q ≅ 1, 1 ≅ k _q ≅ K ^q _q U _n =(Bt _n ,Et _n), SU _n) | U={U ₁ ,..., U _n ,..., U _N } |

上面描述的所有这些常数信息都是预先给出的，因此可以根据这些常数信息和一些约束条件来计算由{X}和{Y}表示的对某个初始信息的解，这将在下一小节讨论。

2.3. VDP/MD问题的约束

在VDP/MD问题中必须满足下列的约束条件：

(1).车载负荷约束

等式(1)、(2)表示车辆的约束条件，即行程中订单的总容量不能超过相应车载负荷。C^q_{mj}是行程q中的第j次数量，SV^r是执行行程q的车辆尺寸。

$$C_{cnst}^q = \begin{cases} \text{if } \sum_{j=1}^{K_q} C_{mj}^q \leq SV_l^r & 0 \\ \text{else} & 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$C_{cnst} = \sum_{q=1}^Q C_{cnst}^q = 0 \quad (2)$$

(2).客户停放容量约束

等式(3)、(4)表示车辆尺寸必须小于或等于其执行的行程中所有用户的停放容量约束。SU^m_n是用户在行程q中第j个顺序的停车位。

$$U_{cnst}^q = \begin{cases} \text{if } SV_l^r \leq SU_n^{mj} \text{ for } j=1, \dots, K_q & 0 \\ \text{else} & 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$T_c^q = t_{DL,U_1}^q + \sum_{i=1}^{K_q-1} t_{U_i,U_{i+1}}^q + t_{U_{K_q},DR}^q + t_{load}^q + \sum_{i=1}^{K_q} (t_{unload,U_i}^q + t_{wait,U_i}^q) \quad (9)$$

在User项U_n中，整数区间[Bt_n,Et_n]为用户营业时间的窗口，SU_n为U_n中可输入的最大车辆数。在Order项O_m中，C_m表示O_m的容量，U^m_n是O_m的用户，[Bt_m, Et_m]是期望的交货时间窗口。

表2显示了在VDP/MD问题中使用的总行程和日程的变量。在Trip（总行程）项中，J_m是一个带有订单/用户对（总数为K_q）的子作业，表示订单信息和相关用户的约束。Y^q_r为X_q所属的日程，k_q表示X_q在日程Y^q_r中的索引号。D^q_L是装载站，D^q_R是拉力站（下一个装载站或仓库站）。在Tour（日程）项中，Y_r表示车辆V^r在一天内进行的一次行程。其中，[X^r_{q1},X^r_{q2},...,X^r_{qK_r}]是Y_r中的行程序列。SD^r_p是一个起始站，它可以根据调度计划而变化。其中，D^{q1}_R=D^{q2}_L等条件为中间出货条件，D^{q1}_L=SD^r_p为起始条件，D^{qK_r}_R=D^r_p为结束条件，即车辆必须返回仓库。

$$U_{cnst} = \sum_{q=1}^Q U_{cnst}^q = 0 \quad (4)$$

(3).营业时间约束

等式(5)、(6)表示所有装载工作必须在仓库营业时段内完成。其中，At^q_p是行程X_q的车辆到达站点D_p的时间。

$$D_{cnst}^q = \begin{cases} \text{if } Bt_p \leq At_p^q \leq Et_p & 0 \\ \text{else} & 1 \end{cases} \quad (5)$$

$$D_{cnst} = \sum_{q=1}^Q D_{cnst}^q = 0 \quad (6)$$

(4).车辆调度约束

$$N \leq M; R \leq L; R \leq Q \quad (7)$$

等式(7)中的每个约束表示：

- I).用户每天必须至少有一个订单；
- II).日程数量(R)必须小于或等于车辆总数(L)；
- III).每一次行程必须至少包含一次日程。

2.4. 评估函数的定式化

(1).总稼动成本

$$T_c = \sum_{q=1}^Q T_c^q \Rightarrow \min \quad (8)$$

等式(8)定义了总稼动成本。等式(9)计算 X_q 的运行成本(时间、距离等)。 $t_{a,b}^q(a,b \in \{U_n\} \cup \{D_p\})$ 是a和b之间的移动成本, t_{load}^q 是加载成本, t_{unload,U_i}^q 和 t_{wait,U_i}^q 是分别是用户 U_i 的卸载成本和等待成本。其中, U_i 表示有订单 O_{mi}^q 的用户。这些成本信息可以根据包含仓库、用户和路网信息的数据库计算得出。

(2).平均积载率

$$C_{cost} = (\sum_{q=1}^Q C_{cost}^q) / Q \Rightarrow \max \quad (10)$$

$$C_{cost}^q = (\sum_{j=1}^{K_q} C_{mj}^q) / SV_l^r (\in [0,1]) \quad (11)$$

等式(10)、(11)代表所有行程的平均积载率。较高的 C_{cost} 值对于运输效率的提高有更大的作用。

(3).稼动平衡

$$B_{cost} = \sum_{r=1}^R |B_{cost}^r - B_{cost}^{mean}| / R \Rightarrow \min \quad (12)$$

$$B_{cost}^r = \sum_{i=1}^{K_r} T_{cost}^{qi} \quad (13)$$

$$B_{cost}^{mean} = (\sum_{r=1}^R B_{cost}^r) / R \quad (14)$$

每辆车的稼动平衡也需纳入考虑,这对于所有驾驶员的劳动条件平等很重要。 B_{cost}^r 是行程 Y_r 的稼动成本, T_{cost}^{qi} 是行程 X_{qi}^r 的运行成本,由式(9)定义。

(4).稼动能力

$$V_{cost} = L - R \Rightarrow \max \quad (15)$$

在协同配送的情况下,最好尽量减少工作车辆的数量。这个标准方程(15)被称为稼动能力。

(5).时间稼动约束

$$S_T = \sum_{q=1}^Q S_T^q / Q \Rightarrow \max \quad (16)$$

$$S_T^q = \sum_{j=1}^{K_q} \mu_o^{mj} / K_q \quad (17)$$

用户的订单通常有指定的交货时间,必须尽可能满足。 μ_o^m 假设为用户 U_n^m 对 O_m 到达时间的满意程度,可以通过图2所示的模糊隶属函数计算得到。

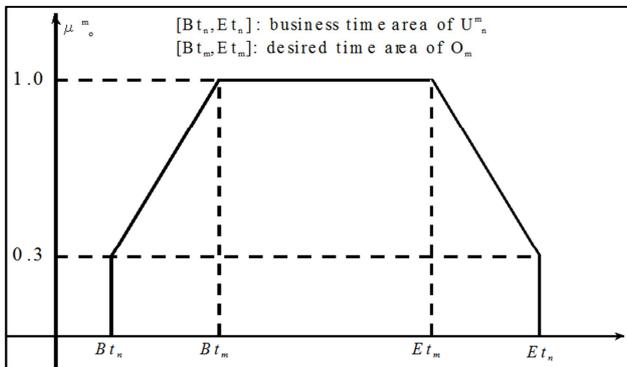


图2 时间稼动约束的模糊隶属函数。

(5).驾驶员劳动条件约束

在现代社会,必须考虑驾驶员的劳动条件。它被称为车辆工作的约束,由式(18)表示。车辆驾驶员的劳动条件 V 表示为模糊隶属函数 μ_v (图3)。尽管该约束不像时间稼动约束的情况那么重要,但是可以通过考虑使用车辆的数量和限制稼动时间的设置值之间的权衡来改进。

$$S_V = \sum_{l=1}^L \mu_V^l / L \Rightarrow \max \quad (18)$$

3. 增强的HIMS++模型

已经针对VRSDP/SD问题提出了一种具有分层多重复用结构的计算模型[13]。在本文中,针对VDP/MD问题提出了HIMS模型的增强版本,称为HIMS++模型(图4)。与HIMS模型一样,HIMS++模型由三层组成:原子层是控制系统成本的波动区域,分子层是控制和优化系统状态的形成区域,以及个体层是系统计划(调度计划)的决策区域。与HIMS模型相比,HIMS++模型可以处理分子层的两个主要元素(订单、车位),并通过改变装载车位来主动修改总行程、日程、仓库之间的关系。

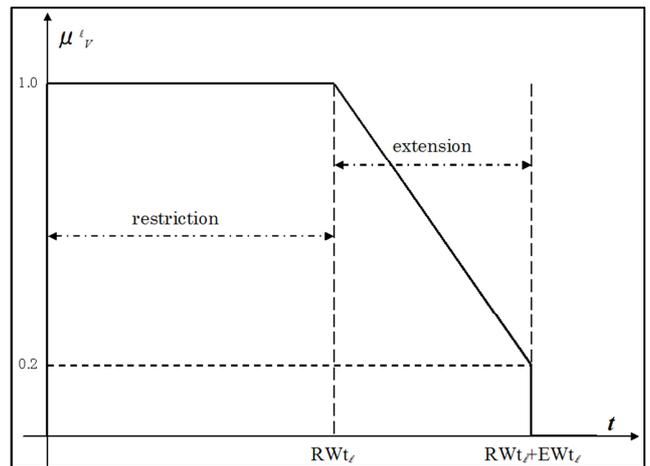


图3 驾驶员劳动条件约束的模糊隶属度函数。

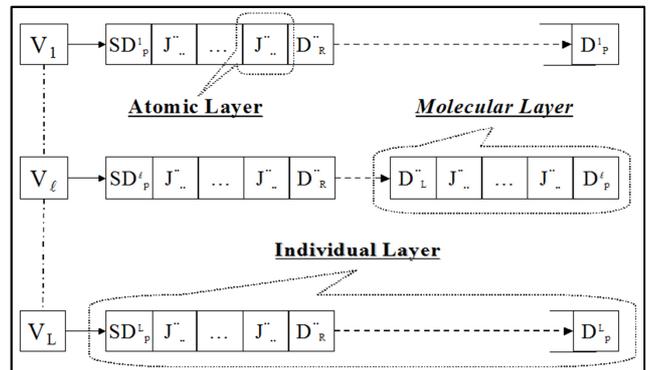


图4 HIMS++模型的概念。

HIMS++模型还模仿了人类专家的分层计算和推理特性,将VDP/MD问题分解为子问题,每个子问题在不同层中单独解决。在本章中,描述了HIMS++模型的运行策略、一些测量标准和选择函数以及优化算法。

3.1. 原子层策略

原子层的主要目的是:

- (1) 最小化稼动成本,
- (2) 提高负载能力,
- (3) 提高驾驶员劳动条件约束的满意度.

首先, M个行程(每个行程一个命令)作为初始状态, 然后①和②操作(图5)重复执行。每次操作后, 通过改变其作业顺序, 为每次更新的行程(X_a or X_b) 计算最短路线(TSP(X_q)), 并搜索降低运行成本的可行解决方案。

像禁忌搜索[14]这样的启发式探索方法用于应用订单移动/交换操作和SA[15]搜索最短路线(TSP(X_q))。

$$\exists X_a = ([D_L^a, J_{m1}^a, \dots, J_{mi}^a, \dots, J_{mKa}^a, D_R^a], Y_r^a, k_a), \quad 1 \leq a \leq Q;$$

$$\exists X_b = ([D_L^b, J_{m1}^b, \dots, J_{mj}^b, \dots, J_{mKb}^b, D_R^b], Y_r^b, k_b), \quad 1 \leq b \leq Q;$$

①. Order Move Operation

$$X_{a'} = ([D_L^a, J_{m1}^a, \dots, J_{mi}^b, J_{mj}^a, \dots, J_{mKa}^a, D_R^a], Y_r^a, k_a),$$

$$X_{b'} = ([D_L^b, J_{m1}^b, \dots, J_{mj-1}^b, J_{mj+1}^b, \dots, J_{mKb}^b, D_R^b], Y_r^b, k_b);$$

②. Order Exchange Operation

$$X_{a'} = ([D_L^a, J_{m1}^a, \dots, J_{mi-1}^a, J_{mj}^b, J_{mi+1}^a, \dots, J_{mKa}^a, D_R^a], Y_r^a, k_a),$$

$$X_{b'} = ([D_L^b, J_{m1}^b, \dots, J_{mj-1}^b, J_{mi}^a, J_{mj+1}^b, \dots, J_{mKb}^b, D_R^b], Y_r^b, k_b);$$

To Satisfy:

- I. $TSP(X_{a'}), TSP(X_{b'}),$
- II. $T_{cost}^{a'} + T_{cost}^{b'} \leq T_{cost}^a + T_{cost}^b;$

图5 原子层中的操作和标准。

3.2. 分子层策略

分子层的主要目的是:

- (1) 改善稼动平衡,
- (2) 提高负载能力,
- (3) 提高时间稼动约束的满意度,
- (4) 降低运行成本.

$$\exists Y_a = (SD_p^a, [X_{q1}^a, \dots, X_{qi}^a, \dots, X_{qj}^a], V_l^a), \quad 1 \leq a \leq R;$$

$$\exists Y_b = (SD_p^b, [X_{q1}^b, \dots, X_{qj}^b, \dots, X_{qi}^b], V_l^b), \quad 1 \leq b \leq R;$$

①. Trip Move Operation

$$Y_{a'} = (SD_p^a, [X_{q1}^a, \dots, X_{qi}^b, X_{qj}^a, X_{qi+1}^a, \dots, X_{qj}^a], V_l^a),$$

$$Y_{b'} = (SD_p^b, [X_{q1}^b, \dots, X_{qj-1}^b, X_{qi+1}^b, \dots, X_{qj}^b], V_l^b);$$

②. Trips Exchange Operation

$$Y_{a'} = (SD_p^a, [X_{q1}^a, \dots, X_{qi-1}^a, X_{qj}^b, X_{qi+1}^a, \dots, X_{qj}^a], V_l^a),$$

$$Y_{b'} = (SD_p^b, [X_{q1}^b, \dots, X_{qj-1}^b, X_{qi}^a, X_{qj+1}^b, \dots, X_{qj}^b], V_l^b);$$

To Satisfy :

- I. $|B_{cost}^{a'} - B_{cost}^{b'}| < |B_{cost}^a - B_{cost}^b|$
- II. $C_{cost}^{a'} + C_{cost}^{b'} \geq C_{cost}^a + C_{cost}^b$
- III. $S_T^{a'} + S_T^{b'} \geq S_T^a + S_T^b$

图6 分子层中的操作。

作为初始状态, L个总行程(小于或等于工作车辆的数量)由若干个日程(在原子层中构建)组成。然后, 在日程之间执行行程移动/交换操作(图6)。每次操作后, 将重新

调整更新后的行程, 以使行程工作安排合理化。中间/起始站点更改操作(图7)也在总行程中尝试以降低运行成本。

禁忌搜索也用于在原子层中类似地应用于日程或仓库移动/交换操作。此外, 由于一次总行程中的日程数量并不多, 因此还使用了全局搜索对更新后的一次总行程中的日程进行重新排序以改进时间稼动约束, 。

$$\exists J^i = [J_{m1}^i, J_{m2}^i, \dots, J_{mKi}^i],$$

$$\exists Y_a = (SD_p^i, [\dots, X_{i-1}^i : (D_L^{i-1}, J^{i-1}, D_R^{i-1}), X_i : (D_L^i, J^i, D_R^i), \dots], V_l^a),$$

$$\forall i, \quad D_R^{i-1} = D_L^i \quad 1 \leq a \leq R, \quad 2 \leq i \leq K_a;$$

①. Middle Depot Change Operation

$$Y_{a'} = (SD_p^i, [\dots, X_{i-1}^i : (D_L^{i-1}, J^{i-1}, D_p), X_i : (D_p, J^i, D_R^i), \dots], V_l^a);$$

$$D_p \neq D_R^{i-1}, \quad D_p \neq D_L^i;$$

②. Start Depot Change Operation

$$Y_{a'} = (SD_p^i, [\dots, X_{i-1}^i : (D_L^{i-1}, J^{i-1}, D_R^{i-1}), X_i : (D_L^i, J^i, D_R^i), \dots], V_l^a);$$

$$SD_p^i \neq SD_p^j$$

To Satisfy: $T_{cost}^{a'} < T_{cost}^a$

图7 分子层中的库操作。

3.3. 个体层模糊推理

个体层的目标如下。

- (1) 提高车辆的稼动平衡性。
- (2) 分配适当数量的车辆。

图8和图9显示的是将专家的调度经验转化为模糊隶属度函数图像, 其中, T_R^T 为T类行程(由相同规模T的车辆实施)的总限制时间, T_{cost}^T 为所有T型车辆的总稼动时间。N(X_T)表示T型车辆实施的行程次数, N(Y_T)为T型车辆实施的日程次数。

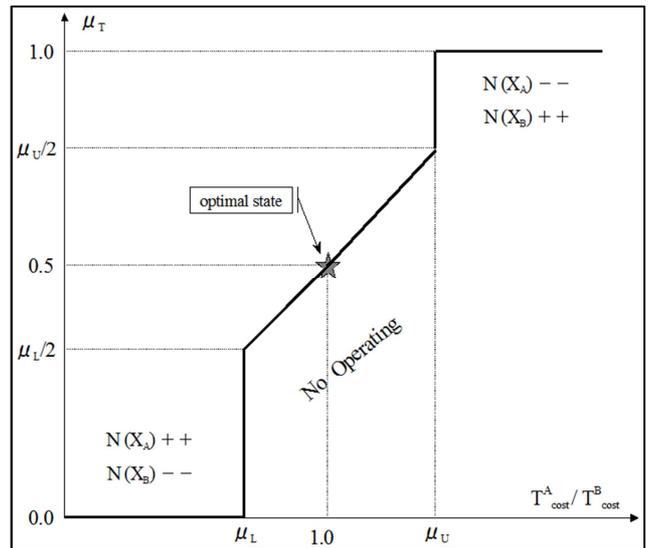


图8 行程±不同类型之间的操作。

图8显示了不同类型车辆之间的行程平衡操作。给出了行程平衡的基准线 μ_L (下边界)和 μ_U (上边界)。行程平衡的当前值(μ_T)可用于决定是否在个体层中调整行程平衡。

图9显示了相同类型车辆中的车辆平衡操作。还给出了车辆平衡的基准线 λ_L （下边界）和 λ_U （上边界）。车辆平衡的当前值（ λ_V ）用于决定是否在个体层中调整车辆平衡。

通过个体层使用的这两个模糊隶属度函数，不仅可以调整总行程和日程之间的关系，还可以适当调度不同类型的车辆。

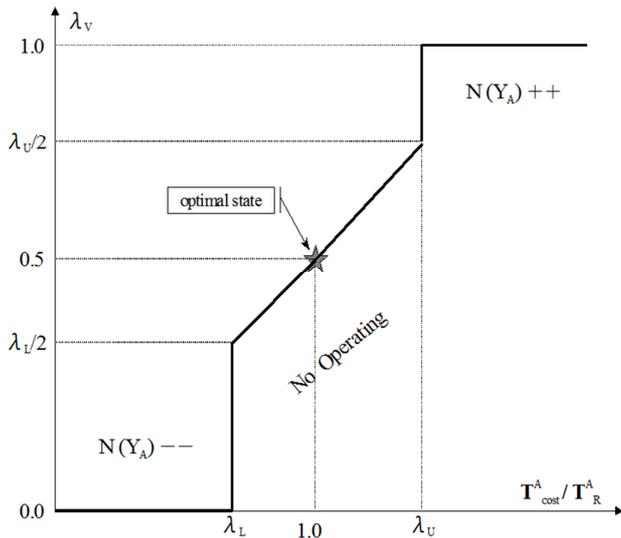


图9 车辆±同类型操作。

3.4. 测量与选择

本小节定义了临时状态的测量标准和{X}和{Y}的局部最优状态的选择标准。

3.4.1. 测量品质的描述

(1). 总稼动时间测量

$$g_1(X^k) = 1 - T_{cost}^{[k]}/T_{cost}^{[0]} \in [0,1] \quad (19)$$

(2). 平均负载能力测量

$$g_2(X^k) = C_{cost}^{[k]} \in [0,1] \quad (20)$$

(3). 稼动平衡测量

$$g_3(Y^k) = 1 - B_{cost}^{[k]}/B_{cost}^{[0]} \in [0,1] \quad (21)$$

(4). 稼动能力测量

$$g_4(Y^k) = 1 - 1/(1 + V_{cost}^{[k]}) \in [0,1] \quad (22)$$

(5). 时间指定约束测量

$$g_5(X^k) = S_T^{[k]} \in [0,1] \quad (23)$$

(6). 驾驶员劳动条件约束测量

$$g_6(Y^k) = S_V^{[k]} \in [0,1] \quad (24)$$

等式(19)~等式(24)描述了每个目标状态的测量标准，其中上标[0]表示每个目标状态的初始值，上标[k]表示第k代（临时状态的状态值）。 g_x 的值越高，目标状态就越好。

$$g(X^k, Y^k) = \sum_{i=1}^6 \rho_i g_i(X^k | Y^k); \rho_i \in R^+ \quad (25)$$

等式(25)描述了所有目标项的通用测量公式，其中 ρ_i 为加权系数，表示每个目标项的重要程度。

3.4.2. 优化目标选择标准的定义

等式(26)定义了HIMS++模型的适应度值，该值可用于捕获VDP/MD问题的局部最优状态。

等式(27)表示是否记录{X}和{Y}的较好状态，其中 $a_i(i=1, \dots, 6)$ 是每个测量目标的最低限值。

$$eval(k) = \frac{g(X^k, Y^k) - g(X^0, Y^0)}{g(X^*, Y^*) - g(X^0, Y^0)} \quad (26)$$

$$g(X^*, Y^*) = \begin{cases} \text{if } eval(k) > 1 & g(X^k, Y^k) \\ \text{else} & g(X^*, Y^*) \end{cases}$$

$$s.t. g_i \geq a_i \quad (i = 1 \sim 6) \quad (27)$$

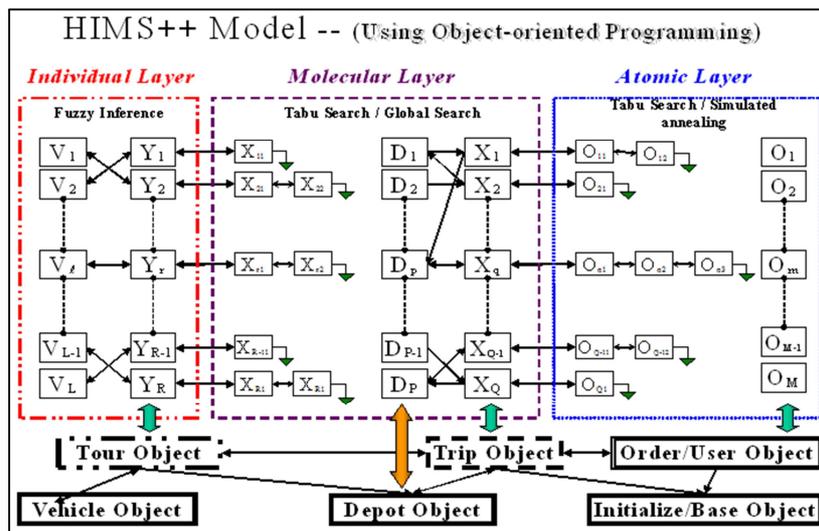


图10 HIMS++模型的数据结构。

3.5. HIMS++模型的实现

提出了一种适用于面向应用编程的HIMS++模型的数据结构。本小节还描述了使用多重启发式探索方法的优化算法。

3.5.1. HIMS++模型的数据结构

HIMS++模型的实现采用了面向应用的编程技术（图10）。通过对象类和双向链接指针，HIMS++模型中的主要元素之间存在隐藏的连接关系，可以直接获取信息。每一层（原子、分子和个体）中的操作都是通过概率探索算法和模糊决策的方法来执行的。

HIMS++模型的数据结构可以通过分层多重复用数据结构将VDP/MD问题等多对象合成问题分解为子问题。因此，可以通过概率探索算法搜索所有元素的组合，并且可以通过不同层的模糊决策编程来调整元素之间的关系。

3.5.2. 优化算法

HIMS++数据结构的优化算法如图11所示。

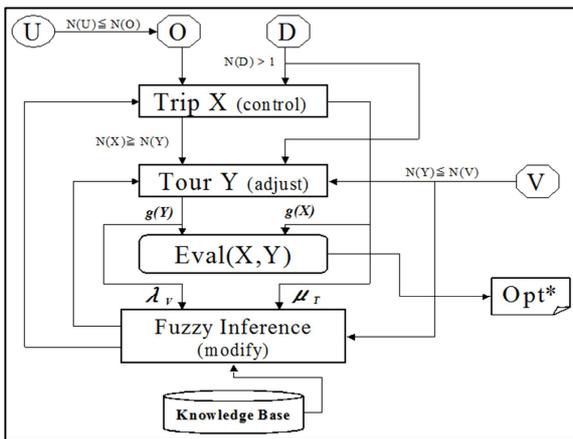


图11 HIMS++模型的算法。

启发式探索方法，禁忌搜索，用于根据{O}、{U}和{D}的信息在原子层构造{X}（处理调度问题）。基于{X}和{V}的信息，{Y}也可以通过分子层中的禁忌搜索来制作。通过分析{X}、{Y}、{V}之间的关系，可以在个体层通过模糊推理进行综合调整。从这些操作中，可以获得VDP/SD问题的最佳状态。

4. 实验与评价

在本章中，HIMS++模型的收敛性和有效性仅通过实验来展示，因为很难通过分析方法来证明HIMS++模型等复杂模型的这些特性。

将HIMS++模型的一个组件应用于3家实际石油公司用于共同配送的真实数据集。日本东京都市区的交通网络也以数字地图的形式给出（图12），从中可以通过Dijkstra算法计算成本信息。

本章介绍3天订单数据的实验。基于实验结果，从多个角度评估了HIMS++模型对VDP/MD问题的效率和灵活性。

4.1. 调度实验

实验中使用的数据集由东京的一个实际调度中心提供，该中心有两种类型（14kl和20kl）的27辆油罐车可用于日常协同配送。应当注意的是，就运输成本而言，实际使用的车辆数尽可能的少。配送作业为区域转发，每天约有100位用户发出30~60个订单。三个不同所有者的仓库用于节省运行成本。

限制时间(RWt)设置为8小时，最大延长时间(EWt)设置为4小时。日程边界(μ_T)和车辆平衡边界(λ_V)设置为 $\mu_T \in [0.45, 0.55]$ 和 $\lambda_V \in [0.45, 0.55]$ （模糊推理值）。实验的目的是制定一个车辆最少的调度计划，同时保持所有评估目标的最佳平衡。

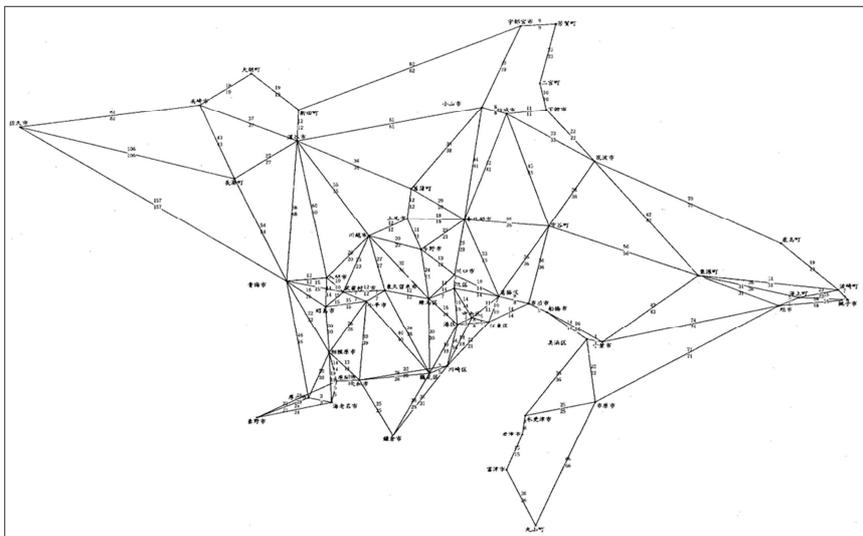


图12 东京都市区配送地图。

表3 实验结果。

| 日期 | $T_{cost}^{[1]}$ | $C_{cost}^{[1]}$ | $B_{cost}^{[1]}$ | $V_{cost}^{[1]}$ | $S_T^{[1]}$ | $S_V^{[1]}$ | 最优状态 |
|-------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------|-------------|-------|
| 11/02 | 9359 | 90.1 | 65.8 | 8 | 94.9 | 92.6 | 184th |
| 11/06 | 10491 | 91.4 | 52.9 | 6 | 91.4 | 92.9 | 102th |
| 11/08 | 9059 | 92.7 | 56.6 | 8 | 94.1 | 94.7 | 71th |

实验是在与专家在现实世界中相同的条件下进行的。重点是稼动成本 (T_{cost})、负载能力 (C_{cost}) 和稼动平衡 (B_{cost}) 的指标。还考虑了稼动能力来验证模糊推理的有效性。表3显示了这些实验的结果，最佳状态分别记录在第184、102和71代。

4.2. 实验结果分析

基于对上述实验中计算过程的分析，本小节将从实验结果、算法和系统应用的角度讨论HIMS++模型的优势。

4.2.1. 关于实验结果的讨论

考虑到实际协同配送的性质，在运输成本最小化,车辆数量固定的条件下进行了实验。表4显示了HIMS++模型制定的计划与经验丰富的操作员制定的计划之间的比较。

表4 实验结果的比较。

| 系统对比 | T_{cost} | C_{cost} | B_{cost} | V_{cost} | S_T | S_V |
|----------------|------------|-------------|-----------------------|------------|-------------|-------|
| HIMS++(20 min) | 更好 | $\geq 90\%$ | $\leq 66 \text{ min}$ | 更好 | $\geq 90\%$ | 更好 |
| 专家(0.5 day) | 好 | $\geq 83\%$ | $\leq 90\text{min}$ | 好 | $\geq 80\%$ | 好 |

结果表明，HIMS++模型是解决VDP/MD问题的一种快速有效的方法，可以生成比配车调度专家更好的计划。

4.2.2. 关于算法的讨论

表5 关于操作程序的比较。

| 系统对比 | 处理方式 | 数据类型 | 数据结构 | 优化方式 |
|--------|------|-------------|------|------------|
| HIMS++ | 综合 | Fuzzy [0,1] | 面向应用 | Meta策略模糊推理 |
| 专家 | 个体 | Crisp {0,1} | —— | 经验 |

专家将VDP/MD问题与日程、仓库和总行程分开处理。尽管HIMS++模型由三个操作层组成，但它通过综合多目标规划将这些元素集成到日程、行程和车辆调度中。表5显示了HIMS++模型和配车调度专家之间操作程序的差异。

4.2.3. 关于应用的讨论

表6 系统协同配送软件应用评价。

| 应用 | 输入参数 | 目标函数 | 客观平衡 | 处理时间 | 灵活性 |
|--------|------|------|------|------|-----|
| HIMS++ | 少量 | 较多 | 更好 | 更快 | 更好 |

另一个关注点是如何将HIMS++计算模型用作系统应用程序的核心引擎工具。表6从实际系统应用的角度展示了HIMS++模型的优点。

5. 结论

本论文介绍了现实世界中VDP/MD问题这一新概念，并利用模糊数学理论对其进行了表述。提出了一种具有分层多重结构的加强计算架构 (HIMS++) 及其基于启发式探索的优化计算和模糊推理的操作策略。HIMS++模型是使用面向应用编程作为软件组件实现的。其优化算法通过概率探索算法和模糊决策来实现的。

通过对实际调度中心的数据集进行实验，在保持各评价目标最佳平衡的情况下，以较少的车辆制定完美的调度计划。实现将两种类型 (14kl和20kl) 的27辆油罐车用于日常协同配送，并使用三个来自不同所有者的仓库来节省

运营成本。HIMS++模型的实验结果在六个评价目标上均优于经验丰富的调度员。由于HIMS++模型及其算法在三层 (原子层、分子层和个体层) 中利用了面向应用建模、启发式探索方法和模糊推论技术，因此它可以找到一个精准性和灵活性接近专家调度员的有效决策 (配车配送计划)。由于初始使用核心关键输入参数较少，且计算引擎封装在软件组件中，因此HIMS++模型是解决现实世界中VDP/MD问题的一种方便有效的系统应用工具。第4章中的分析和评估结果证实，与专家的结果相比，HIMS++组件是可行、快速和高效的。尽管HIMS++模型的收敛性未通过数学分析证明，但针对目标函数和约束条件之间的复杂关系，HIMS++模型的操作和选择标准保证了计划的品质 (随着运行成本的降低，朝着上限单调增加)。通过分析实验记录的过程信息，验证了HIMS++模型在实际应用中的稳定性，高度精准性。

HIMS++模型为COP（组合优化问题）和CSP（约束满足问题）等问题提供了实际求解基础。HIMS++模型将能够涵盖现实世界中类似的陆运（每日）、空运（每周）和海运（每月）等复杂运输问题；本研究的实际问题定式化描述为其后数字化对象计算提供了清晰的数据表现及计算架构创建明示了方向；最后模糊函数与现实约束的精准标定，为整体优化决策奠定了基础。

参考文献

- [1] Xinguo Shuia, Xingquan Zuoa, Cheng Chena and Alice E. Smithb, A clonal selection algorithm for urban bus vehicle scheduling, *Applied Soft Computing*, vol. 36 pp 36-44, (2015).
- [2] Wu, Z, Optimization of distribution route selection based on particle swarm algorithm, *International Journal of Simulation Modelling*, pp 230-242, (2014).
- [3] Ehsan M, Azizolah J, Homa A and Rashed S, A novel transportation location routing network for the sustainable closed-loop supply chain considering the quality of returns, vol. 10, *Journal of Remanufacturing*, Amsterdam, pp 79-106, (2020).
- [4] Maaik H, Yossiri A, Wout D and Patrick J, The Robust Vehicle Routing Problem with Time Window, vol. 55, *Transportation Science*, (2021).
- [5] Afifi S, Dang D and Moukrim A, A Simulated Annealing Algorithm for the Vehicle Routing Problem with Time Windows and Synchronization Constraints 7th International Conference, Learning and Intelligent Optimization (LION7) (Catania, Italy). Pp 259-65, (2013).
- [6] Gallo C and Capozzi V July A Simulated Annealing Algorithm for Scheduling Problems, *Journal of Applied Mathematics and Physics* pp 2579-94, (2019).
- [7] Cheeneebash J and Nadal C, Using Tabu Search Heuristics in Solving the Vehicle Routing Problem with Time Windows: Application to a Mauritian Firm. (2010).
- [8] Dorner K and Schilde M February, The Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem with Soft Time Windows (Johannes Kepler Universitat Linz), (2017).
- [9] Jordan M, Yi M, Juergen B, Mengjie Z, Genetic Programming Hyper-Heuristics with Vehicle Collaboration for Uncertain Capacitated Arc Routing Problems, vol. 28, *Evolutionary Computation*, pp 563-593, (2020).
- [10] Lee LH, Chew EP, Tan KC and Wang YA, Vehicle dispatching algorithms for container transshipment hubs, vol. 32, *OR SPECTRUM*, pp 663-685, (2010).
- [11] Fang Huang, Dingsheng Liu, Xiaowen Li, Lizhe Wang and Wenbo Xu, Preliminary study of a cluster-based open-source parallel GIS based on the GRASS GIS, *International Journal of Digital Earth*, vol. 4 pp 402-420, (2011).
- [12] Shulin Lan, Hao Zhang, Ray. Y Zhong and G. Q. Huang, A customer satisfaction evaluation model for logistics services using fuzzy analytic hierarchy process, *Industrial Management & Data Systems*, vol. 116 pp 1024-1042, (2016).
- [13] Chen K, Dong F and Hirota K, A Calculation Model of Hierarchical Multiplex Structure with Fuzzy Inference for VRSD Problem, *Recent Development in Fuzzy logic and fuzzy sets*, *Studies in Fuzziness and Soft Computing* (Springer Science and Business Media), Vol 391 pp 175-99, (2020).
- [14] Guo Jinjin, Zhang Huiying, Sun Guie and Mu Zhendong, Transportation Path Optimization of Modern Logistics Distribution considering Hybrid Tabu Search Algorithm, vol. 2021, *Advances in Multimedia*, (2021).
- [15] Julian Lee and David Perkins, A simulated annealing algorithm with a dual perturbation method for clustering, *Pattern Recognition*, vol. 112, (2020).