

装备维修器材生产路径决策的两阶启发式算法*

滕尚儒¹, 何成铭¹, 丛彬²

(1. 陆军装甲兵学院 装备保障与再制造系, 北京 100072; 2. 陆军装备部信息保障室, 北京 100072)

摘要:当前装备供应保障系统中维修器材存在短缺、积压以及配送系统效率低下等问题,亟须对生产、库存和配送作业环节进行集成优化。为客观反映各个决策环节,将该问题公式化为一个混合整数线性规划模型,针对该模型多变量、多约束的特点,提出了一个基于数学规划的两阶启发式算法对其进行求解。结合算例,检验模型的可行性,并选取求解器 CPLEX 和一个类似的迭代算法与该算法在求解质量和运算时间方面进行对比与分析。结果表明,提出的模型是合理可行的,该算法在求解不同规模实例时表现出优异的性能。

关键词:装备保障;生产路径;优化模型;两阶启发式算法;近似访问成本

中图分类号:TN95 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2020)05-126-10

A two-level heuristic approach for the production routing decisions of equipment maintenance material

TENG Shangru¹, HE Chengming¹, CONG Bin²

(1. Equipment Support and Remanufacturing Department, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;
2. Information Security Room of the Armament Department of PLA Army, Beijing 100072, China)

Abstract: Aiming at the shortage and backlog of equipment maintenance material, and the inefficiency of equipment distribution system in the current equipment supply system, the integrated optimization of production, inventory and distribution operational links is a critical need. In order to reflect each decision link, the problem was formulated as a MILP with multivariable and multiple constraints. A two-level mathematical-programming-based heuristic was developed to solve it. In an actual example, the proposed model was validated; the algorithm and the CPLEX solver and a similar algorithm were compared and described in aspects of solution quality and computation time. Results show that the proposed model is feasible, and the algorithm exhibits extraordinary performance in solving different scales of instances.

Keywords: equipment support; production routing; optimization model; two-level heuristic; approximate visit cost

装备维修器材供应保障是装备保障工作的重要组成部分,直接影响着装备完好率、任务成功性以及寿命周期费用,其重要性毋庸置疑^[1]。其主要目的是保证器材供应的不间断,涉及军工企业生产、仓库存储、车辆配送到部队用户消耗全过程的决策问题。

如何对生产控制、库存管理和配送路径进行集成优化决策的问题称为生产路径问题(Production Routing Problem, PRP),涵盖了两类相互关联和相互制约的子决策问题:生产一直达配送问题(Production Direct-distribution Problem, PDP)和库存一配送问题(Inventory Routing Problem, IRP)。其中,PDP旨在同时确定生产调度计划和直达配送计划,使得整个规划周期内工厂的生产、生产准备和库存总成本最小^[2];IRP是指在规划周期内由

单工厂向多用户提供配送服务,在满足一定约束条件下,确定每个决策阶段的库存策略以及相应的配送策略,使存储和配送总成本最小,其实质就是研究库存补充和配送之间的协调问题^[3]。

现有研究主要根据下列特征对 PRP 的约束条件进行分类:单工厂或多工厂;单品种或多品种产品;带或不带能力约束。表 1 给出了 PRP 的部分代表性研究文献。通过分析发现,学者针对此类问题的研究大多集中在单工厂、单品种和带能力约束的经典 PRP,较少涉及多品种 PRP。此外,现有研究通常假设工厂产量始终能满足用户需求,但在实际运行过程中,单靠内部生产往往不能及时满足用户需求^[4]。外包是指从外部公司获得半成品、成品或服务以及及时满足客户需求的行,在 PRP 中采用外包策略能够进一步降低系统

* 收稿日期:2019-05-08

基金项目:国家部委基金资助项目(61400010301)

作者简介:滕尚儒(1992—),男,江苏连云港人,博士研究生,E-mail:261704706@qq.com;

何成铭(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:hechengming2012@163.com

表1 生产路径问题的代表性研究文献
Tab.1 Representative research literature of PRP

作者	问题特征							外包
	生产			库存		配送		
	工厂	品种	能力	容量	车型	车辆数	容量	
Chandra	单	多	√		同	无限	√	
Chandra 和 Fisher	单	多	√		同	无限	√	
Fumero 和 Vercellis	单	多	√		同	有限	√	
Lei 等	多	单	√	√	异	有限	√	
Boudia	单	单	√	√	同	有限	√	
Boudia 和 Prins	单	单	√	√	同	有限	√	
Bard 和 Nananukul	单	单	√	√	同	有限	√	
Solyali 和 Sural	单	单		√	同	有限	√	
Ruokokoski 等	单	单			同	单		
Armentano 等	单	多	√	√	同	有限	√	
Archetti 等	单	单		√	同	单	√	
Adulyasak 等	单	单	√	√	同	无限	√	√
Absi 等	单	单		√	同	无限	√	
本文	单	多	√	√	同	有限	√	√

成本并提高服务水平^[5]。Adulyasak 等^[6]在研究需求不确定的单品种 PRP 时间接地考虑了外包,其他较少有研究涉及允许外包的多品种 PRP。

组成 PRP 的 IRP 中涉及的 VRP 是 NP - 难题,因此 PRP 更加复杂。CPLEX 是当前求解整数规划问题的主流软件,以分支定界法作为算法框架,其本质上是基于精确算法,虽然求解精度高,但无法避开指数爆炸问题,局限于求解小规模问题且需耗费大量计算时间,很少被用来研究 PRP^[7];而且 PRP 中,PDP 和 IRP 存在依赖关系,单一的启发式算法难以同时解决两个子问题^[8],不能保证 PRP 的全局最优。近年来,部分学者提出了基于数学规划的启发式算法,在求解 PRP 方面展现出良好的性能,且灵活性较强。代表性的研究有:Absi 等^[9]提出了一种两阶迭代启发式算法(two-phase Iterative heuristic Method,IM)对未约束生产能力的 PRP 进行求解,该算法在测试实例上表现优异。通过模型分解,将初始 PRP 分解为一个 PDP 和由此产生的一系列 VRPs;之后 IM 在第一阶段求解一个 PDP 来确定生产、存储和给每个客户交付的器材量,第二阶段求解一系列 VRP 或旅行商问题(Traveling Salesman Problems, TSPs)来整合车辆路径。该算法在给定迭代次数内不断更新近似访问成本这个迭代变量,在达到最大迭代次数或解再无改进时停止运行。此后,

Chitsaz 等^[10]提出了一个类似的三阶迭代算法。算法在第一阶段确定一个带有总近似访问成本的生产计划;在固定该生产计划后,第二阶段确定生产、库存和给每个客户交付的数量;第三阶段求解规划周期内的所有 VRP 并更新近似访问成本。在 288 个测试实例上,该算法更新了其中 70% 的最优解。

装备维修器材供应保障模式通常都为成对多,即从兵工厂或军需仓库配送到各分散的作战单元,具有用户多、分布广、要求繁杂等特质,如何科学高效地将各作战单元所需器材供应到位,就成了亟须解决的问题。本文旨在立足于我军装备维修器材供应保障实际,为决策者提供一个有效的装备维修器材供应保障优化决策方法。在资源和能力约束下,将生产、库存、运输和外包总成本作为优化目标,构建一种适用于军事要求的生产路径问题优化决策模型。

本文借鉴文献[9]中 IM 算法分解与迭代的求解思想,提出一种两阶启发式算法(Two-Level Heuristic, TLH)来寻求模型的近似最优解。与 IM 相比,TLH 的创新之处在于:IM 在每一次迭代中都生成生产调度计划 TLH 只在第一次迭代和多样化迭代中生成生产调度计划,节约了求解时间;IM 利用局部分支不等式改变生产调度计划以多样化搜索,TLH 则通过不断更新近似访问成本来多样化寻优区域搜索;IM 一旦求得非可行解,便

对其进行修正,而 TLH 只在第二阶段对非可行解进行修正。

1 装备维修器材 PRP 模型构建

装备维修器材 PRP 优化决策模型具有多变量、多约束等特点^[11]。鉴于此,本节在资源和能力约束下,建立以最小化总成本为目标的装备维修器材 PRP 混合整数规划(Mixed Integer Linear Programming, MILP)模型。

1.1 问题描述

假设用有向图 $G = (N, A)$ 表示供应保障网络,其中, $N = \{0, 1, \dots, n\}$ 表示节点集, A 为弧集。节点 0 表示器材生产工厂,其库存能力记为 U_0 ,最大生产能力记为 C 。工厂可生产多品种器材 $P = \{0, 1, \dots, |P|\}$,并可调用一组容量为 V 的同类型车辆 $K = \{1, 2, \dots, |K|\}$ 。图 G 中分布有一组作战单元 $R = \{1, 2, \dots, n\}$,每个作战单元 $i \in R$ 的最大库存能力为 U_i ,在阶段 $t \in T$ 对器材 $p \in P$ 的需求量记为 d_i^t 。

允许外包的装备维修器材 PRP 优化决策问题是指在满足各部队用户需求的前提下,对生产计划、库存计划、运输路径规划和外包策略进行集成,以最小化生产、库存、运输和外包总成本。每阶段的主要决策内容包括:工厂的生产量;给每个作战单元的交付量;工厂和作战单元需存储的器材量;配送路径;第三方供应商需要承担的器材供应量。本文中,器材的外包供应成本由第三方供应商与军队装备管理部门协商制订。该问题可用图 1 概略描述。

为简化建模过程,在上述保障过程描述的基础上,做出如下几点假设和说明:每辆车在完成每

次配送任务后返回工厂;每阶段每辆车至多执行一次配送任务;每阶段每个作战单元仅能由同一车辆为其提供一次服务。

1.2 符号说明

参数设定如下:

c_{ij} : $(i, j) \in A$ 的运输成本;

a_p : 器材 $p(p \in P)$ 的单位生产成本;

e_p : 器材 $p(p \in P)$ 的外包供应成本;

b_p : 器材 $p(p \in P)$ 的生产准备成本;

C : 工厂的生产能力;

d_i^t : 阶段 $t(t \in T)$ 内作战单元 $i(i \in R)$ 需要的器材 $p(p \in P)$ 的量;

U_i : 节点 $i(i \in N)$ 的库存能力;

h_i^p : 器材 $p(p \in P)$ 在节点 $i(i \in N)$ 产生的单位存储成本;

V : 车辆最大允许装载量。

决策变量定义如下:

q_{pt} : 阶段 t 内器材 p 的生产量;

z_i^t : 阶段 t 内由第三方供应商交付给作战单元 i 的器材 p 的量;

w_{pt} : 0-1 变量,若阶段 t 内工厂生产了器材 p ,则 $w_{pt} = 1$,否则其值为 0;

I_i^t : 阶段 t 内结束时作战单元 i 持有器材 p 的量;

y_i^{kt} : 阶段 t 内车辆 k 给作战单元 i 交付的器材 p 的量;

v_i^{kt} : 0-1 变量,若阶段 t 内作战单元 i 被车辆 k 访问,则 $v_i^{kt} = 1$,否则其值为 0;

x_{ij}^{kt} : 0-1 变量,若阶段 t 内车辆 k 从点 i 行驶到点 j ,则 $x_{ij}^{kt} = 1$,否则其值为 0。

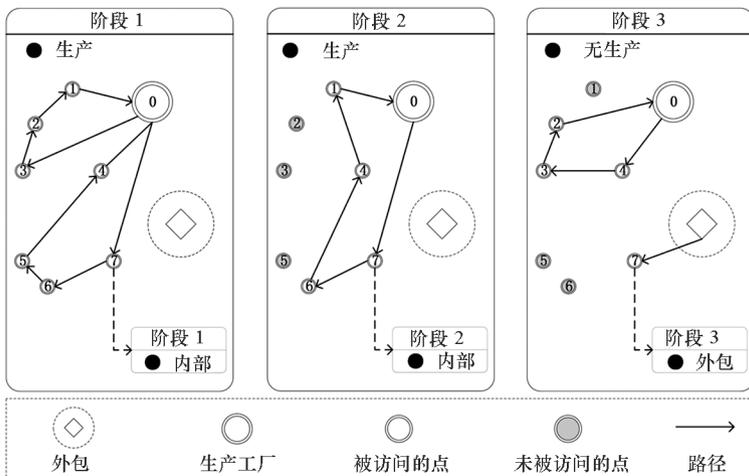


图 1 允许外包的生产路径问题网络规划

Fig. 1 Network representations of PRP with outsourcing

1.3 模型建立

综上所述,可用如下 MILP 模型 P 描述允许外包的装备维修器材 PRP。

$$\text{Min} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (a_p q_{pt} + b_p w_{pt}) + \sum_{i \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} e_p z_i^{pt} + \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_i^p I_i^{pt} + \sum_{\langle i,j \rangle \in A} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} c_{ij}^k x_{ij}^{kt} \quad (1)$$

约束条件:

$$I_0^{pt} = I_0^{p,t-1} + q_{pt} - \sum_{i \in R} \sum_{k \in K} y_i^{pkt}, \forall (p \in P, t \in T) \quad (2)$$

$$I_i^{pt} = I_i^{p,t-1} + z_i^{pt} + \sum_{k \in K} y_i^{pkt} - d_i^{pt}, \forall (p \in P, t \in T) \quad (3)$$

$$\sum_{p \in P} q_{pt} \leq C, \forall t \in T \quad (4)$$

$$q_{pt} \leq C w_{pt}, \forall (p \in P, t \in T) \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P} I_i^{pt} \leq U_i, \forall (i \in N, t \in T) \quad (6)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{p \in P} y_i^{pkt} \leq V, \forall (k \in K, t \in T) \quad (7)$$

$$\sum_{p \in P} y_i^{pkt} \leq V v_i^{kt}, \forall (i \in R, k \in K, t \in T) \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} v_i^{kt} \leq 1, \forall (i \in R, t \in T) \quad (9)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{ij}^{kt} = \sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{ji}^{kt}, \forall (i \in N, k \in K, t \in T) \quad (10)$$

$$\sum_{j \in N \setminus \{i\}} x_{ij}^{kt} = v_i^{kt}, \forall (i \in R, k \in K, t \in T) \quad (11)$$

$$\sum_{i \in R} x_{0i}^{kt} \leq 1, \forall (k \in K, t \in T) \quad (12)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S \setminus \{i\}} x_{ij}^{kt} \leq |S| - 1, \forall (S \subseteq R, |S| \geq 2) \quad (13)$$

$$q_{pt} \geq 0, \forall (p \in P, t \in T) \quad (14)$$

$$z_i^{pt} \geq 0, \forall (i \in R, p \in P, t \in T) \quad (15)$$

$$I_i^{pt} \geq 0, \forall (i \in N, p \in P, t \in T) \quad (16)$$

$$y_i^{pkt} \geq 0, \forall (i \in R, p \in P, k \in K, t \in T) \quad (17)$$

$$w_{pt} \in \{0, 1\}, \forall (p \in P, t \in T) \quad (18)$$

$$v_i^{kt} \in \{0, 1\}, \forall (i \in R, k \in K, t \in T) \quad (19)$$

$$x_{ij}^{kt} \in \{0, 1\}, \forall ((i, j) \in A, k \in K, t \in T) \quad (20)$$

其中:目标函数(1)表示最小化生产、外包、库存和运输总成本;式(2)、式(3)保证了工厂和作战单元之间的库存守恒;式(4)保证了每阶段生产器材所占用的产能都不能超过工厂现有的总产能;式(5)表示没有生产计划时,器材的生产量为0;式(6)限制了作战单元的库存能力;式(7)保证了车辆不超载;式(8)表示器材的交付活动只在作战单元被访问时发生;式(9)表示每个作战单

元至多被一辆车访问;式(10)确保了车辆的进和出发生在同一节点;式(11)表示任意作战单元只与两个作战单元相连;式(12)保证了每辆车每阶段至多执行一次配送任务;式(13)表示子回环消除约束;式(14)~(20)界定了决策变量的取值范围。

2 求解方法

针对模型特点,设计了一个 TLH 算法,来寻求模型 P 的近似最优解,分为以下两步:

步骤1:初始解生成。步骤1旨在构造一个较好的初始解。为降低求解难度,原问题首先被分解为一个 PDP 和一系列 $VRP(t)$ 。之后利用两阶迭代方法(Two-phase Iterative Method, TIM)来求解分解后的子问题,从而构造一个初始解。将初始解带到 P 中检测是否满足约束条件,若满足,则该初始解是 P 的一个可行解,否则在步骤2中对其进行修正。

步骤2:不可行性修正。步骤2旨在修正步骤1提供的非可行解,直到满足 P 的所有约束条件,即可得出 P 的一个可行解。该步骤依次求解一个规模更小,即变量数比原问题少的限制 PDP (Restricted PDP, RPDP) 和一系列 $TSP(t, k)$ 。如果步骤1得到的解可行,便可直接求解 $TSP(t, k)$ 来整合车辆路径,从而得到一个完整的可行解。

TLH 算法的主框架如图2所示。

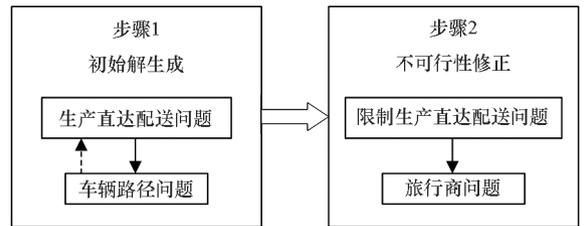


图2 TLH 算法主框架

Fig. 2 General framework of TLH

2.1 初始解生成

该步骤的主要思路是,将原问题分解为一个 PDP 和一系列 $VRP(t)$ 子问题,并对其不断迭代求解,直到达到停止标准。

2.1.1 多样化机制

在给定迭代次数内,如果现有解无改进,便可重新初始化一个访问成本来多样化搜索,称该机制为多样化机制,下一次迭代为多样化迭代。

多样化机制的目的是引导算法离开局部最优解,从而增强算法多样化搜索的能力。为节约运算时间,该算法仅在 TIM 的第一次迭代和多样化

迭代过程中生成生产调度计划。之后固定该生产调度计划并在随后的非多样化迭代过程中调用,直到再次出现多样化迭代。

2.1.2 子问题 PDP 求解

求解第一个子问题 PDP 可确定器材的生产阶段和生产量,以及每阶段需要交付到各作战单元的器材量,但无法得到车辆的配送路径。在此基础上求解一系列 $VRP(t)$,可将上述求得的器材量分配到具体车辆。

在第一次迭代和多样化迭代过程中,将与车辆相关的变量和约束从初始模型 P 中移除后,可得到一个新模型,记为 $P_1(s)$,这里定义以下参数和决策变量。

参数:

δ_u^s :第 s 次迭代过程中,阶段 t 内工厂到作战单元 i 的近似访问成本。当 $s = 1$ 时,令 δ_u^s 为一个特定的值;当 $s > 1$ 时,基于上一次迭代中 $VRP(t)$ 的解来更新 δ_u^s 。

决策变量:

y_i^p :阶段 t 内给作战单元 i 交付器材 p 的量;

v_i^t :0-1 决策变量,若阶段 t 内作战单元 i 被访问,则 $v_i^t = 1$,否则其值为 0。

通过移除车辆指标 k ,决策变量 v_i^t 和 y_i^p 分别取代了初始模型中的 v_i^k 和 y_i^{pk} ,约束式(7)~(13)变得多余,但模型 $P_1(s)$ 利用一个新的约束式(24)限制了每阶段车辆的总交付量,确保其不超过所有车辆的总装载量,模型 $P_1(s)$ 表示如下:

$$\text{Min} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} (a_p q_{pt} + b_p w_{pt}) + \sum_{i \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} e_p z_i^p + \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_i^p I_i^p + \sum_{i \in R} \sum_{t \in T} \delta_u^s v_i^t \quad (21)$$

$$I_0^p = I_0^{p,t-1} + q_{pt} - \sum_{i \in R} y_i^p, \forall (p \in P, t \in T) \quad (22)$$

$$I_i^p = I_i^{p,t-1} + z_i^p + y_i^p - d_i^p, \forall (i \in R, p \in P, t \in T) \quad (23)$$

$$\sum_{i \in R} \sum_{p \in P} y_i^p \leq |K|V, \forall t \in T \quad (24)$$

$$\sum_{p \in P} y_i^p \leq Vv_i^t, \forall (i \in R, t \in T) \quad (25)$$

$$y_i^p \geq 0, \forall (i \in R, p \in P, t \in T) \quad (26)$$

$$v_i^t \in \{0, 1\}, \forall (i \in R, t \in T) \quad (27)$$

此外,约束条件还包括模型 P 中的约束式(4)~(6)和式(14)~(16)以及式(18)。

显然, $P_1(s)$ 属于 NP-难题,但利用求解器 CPLEX 仍可获得一个可行解。求解 $P_1(s)$ 可确定生产准备计划 \hat{w}_{pt} 、生产量 \hat{q}_{pt} 、外包量 \hat{z}_i^p 、库存量

\hat{I}_i^p 、交付计划 \hat{v}_i^t 和交付量 \hat{y}_i^p 。

对于随后的非多样化迭代,在 $P_1(s)$ 生成的生产准备计划 \hat{w}_{pt} 的基础上,可将初始模型 P 更新为一个 RPDP,记为 $P'_1(s)$,表示如下:

$$\text{Min} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} a_p q_{pt} + \sum_{i \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} e_p z_i^p + \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_i^p I_i^p + \sum_{i \in R} \sum_{t \in T} \delta_u^s v_i^t \quad (28)$$

$$q_{pt} \leq C\hat{w}_{pt}, \forall (p \in P, t \in T) \quad (29)$$

此外,约束条件还包括模型 P 中的约束式(4)、式(6)、式(14)~(16)以及式(22)~(27)。

求解 $P_1(s)$ 或 $P'_1(s)$ 可确定交付计划 \hat{v}_i^t 和相应的交付量 \hat{y}_i^p 。

2.1.3 子问题 $VRP(t)$ 求解

在 $P_1(s)$ 或 $P'_1(s)$ 确定的交付计划 \hat{v}_i^t 和相应的交付量 \hat{y}_i^p 的基础上,调用 Li 等^[12]提出的一元启发式算法求解每阶段的 VRP ,可确定交付计划中所需的车辆数、每辆车需要访问的作战单元和相应的访问序列。在所有 $VRP(t)$ 的解中,如果需要的车辆数不超过现有车队规模 $|K|$, $P_1(s)$ 或 $P'_1(s)$ 和 $VRP(t)$ 的解可构成初始模型 P 的一个可行解。否则,可利用 TIM 提供的信息在步骤 2 构造一个可行解。

2.1.4 访问成本更新策略

近似访问成本的初始值一般设置为 $c_{0i} + c_{i0}$,表示给每个作战单元派一辆车配送并返回工厂,共形成 k 条 $0 \rightarrow i \rightarrow 0$ 运输路径。

该设置可驱使 PDP 求解程序得到以较低配送频率满足较远作战单元需求的解,从而减少运输成本。但该设置没有考虑到配送区域聚类,即无法衡量单一阶段访问的作战单元的邻近性,这就导致相互距离较远的作战单元聚簇并在同一阶段被访问,从而产生较高的运输成本。因此,在之后的迭代中,要根据路径问题解中包含的信息来更新访问成本,从配送区域聚类的角度驱使 PDP 求解程序产生更好的解。

基于上述考虑,第 s 次迭代结束后,算法根据 $VRP(t)$ 的现有最优解来更新访问成本 δ_u^{s+1} ,更新策略描述如下。

如果第 $s + 1$ 次迭代是多样化迭代,则由式(30)计算 δ_u^{s+1} ;如果阶段 t 作战单元 i 被访问,则由式(31)来计算 δ_u^{s+1} ;否则,由式(32)来计算 δ_u^{s+1} 。式(30)~(32)表示如下:

$$\delta_u^{s+1} = RGIF[\min_{j \in N} \{c_{ij}\}, c_{0i} + c_{i0}] \quad (30)$$

$$\delta_{ii}^{s+1} = \mu(c_{i-i} + c_{ii^+} - c_{i-i^+}) + \rho(1 - L^{kt}/V)c_{0i} \quad (31)$$

$$\delta_{ii}^{s+1} = \min_{k \in K} \{ \mu \Delta_i^{kt} + \rho(1 - L^{kt}/V)c_{0i} \} \quad (32)$$

式中:RGIF表示从区间中随机生成一个整数; $\mu(0 \leq \mu \leq 1)$ 和 $\rho(0 \leq \rho \leq 1)$ 为参数; i^- 和 i^+ 分别表示节点*i*在现行解配送路径中的紧前和紧后节点, $c_{i-i} + c_{ii^+} - c_{i-i^+}$ 表示连接节点*i*的紧前和紧后节点后节约的配送成本; L^{kt} 表示阶段*t*内车辆*k*交付的器材总量, L^{kt}/V 为车辆载荷利用率; Δ_i^{kt} 为将节点*i*插入阶段*t*内车辆*k*配送路径中的最低插入成本。该更新策略同时考虑到客户点聚类 and 车辆载荷利用率,并利用参数 μ 和 ρ 来调整权值,以更好地逼近访问成本。

在求解 $P'_1(s+1)$ 时,可以利用式(30)随机生成一些 δ_{ii}^{s+1} 来多样化 $P'_1(s+1)$,从而重启迭代程序。同时,该更新策略能够兼顾同一路径和不同路径上各作战单元的相互影响关系:如果 δ_{ii}^{s+1} 值较大,式(31)和式(32)会驱使求解器在下次迭代中将节点*i*从当前路径中移除,之后连接节点*i*的紧前和紧后节点,便可获得一条可行路径;如果 δ_{ii}^{s+1} 值较小,式(31)和式(32)则会驱使求解器在阶段*t*现行解的路径中插入该节点*i*,之后选择最佳插入位置所在的路径作为可行路径。

算法在给定迭代次数内重复上述过程,之后停止运算并输出最优解,供步骤2使用。

2.2 不可行性修正

步骤2旨在修正步骤1提供的非可行解并整合车辆路径,通过求解一个RPDP和一系列TSP(*t*,*k*)来构造初始模型*P*的一个可行解。

在步骤1获得的解中,生产计划记为 $W = \{ \hat{w}_{pt} | p \in P, t \in T \}$ 。阶段 $t \in T$ 中,实际使用的车辆数记为 $|K_t|$,如果存在任意阶段*t*,使 $|K_t| > |K|$,即超过了车辆总数,则该解是*P*的一个非可行解。这种情况下,将车辆按其交付量的非递增顺序排序,构成一个现有车辆集合 $K = \{1, \dots, |K|\}$ 和一个虚构车辆集合 $V = \{|K| + 1, \dots, |K_t|\}$ 。令 R^{kt} 为阶段*t*内车辆*k*访问的作战单元,则虚构车辆访问的作战单元可记为 $B = \{i | i \in R^{kt}, t \in T, k \in V\}$,现有车辆访问的作战单元记为 $D = \{i | i \in R/B, k \in K, t \in T\}$ 。

之后通过松弛路径约束式(10)~(13),固定生产计划 $W = \{ \hat{w}_{pt} | p \in P, t \in T \}$ 和交付计划 $D = \{i | i \in R/B, k \in K, t \in T\}$,可将初始模型*P*更新为一个RPDP,记为 P_2 。定义一个参数 σ_i^{kt} ,表

示阶段*t*内车辆*k*到作战单元*i*的近似访问成本。在步骤1获得的最优解中,若阶段*t*内作战单元*i*被访问,则令 σ_i^{kt} 为 $c_{i-i} + c_{ii^+} - c_{i-i^+}$;否则,令 σ_i^{kt} 为 Δ_i^{kt} 。 P_2 表示如下:

$$\text{Min} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} a_p q_{pt} + \sum_{i \in R} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} e_p z_i^{pt} + \sum_{i \in N} \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} h_i^p I_i^{pt} + \sum_{i \in B} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} \sigma_i^{kt} v_i^{kt} \quad (33)$$

约束条件:

$$q_{pt} \leq C \hat{w}_{pt}, \forall (p \in P, t \in T) \quad (34)$$

$$\sum_{p \in P} y_i^{pht} \leq V \delta_i^{ht}, \forall (i \in R/B, k \in K, t \in T) \quad (35)$$

$$\sum_{p \in P} y_i^{pht} \leq V v_i^{ht}, \forall (i \in B, k \in K, t \in T) \quad (36)$$

$$\sum_{k \in K} v_i^{kt} \leq 1, \forall (i \in B, t \in T) \quad (37)$$

$$v_i^{kt} \in \{0, 1\}, \forall (i \in B, k \in K, t \in T) \quad (38)$$

其中,约束式(34)表示每阶段的生产量必须服从给定的生产计划;约束式(35)和式(36)表示器材的交付活动只在作战单元被访问时才发生;约束式(37)表示每阶段作战单元*i* ∈ *B*所需器材必须一次性交付。此外,约束条件还包括模型*P*中的约束式(2)~(4)、式(6)~(7)以及式(14)~(17)。

求解模型 P_2 可确定一个交付计划 $D = \{i | i \in R/B, t \in T, k \in K\}$,在此基础上可求得每个车辆的访问序列。由于步骤1已在不违反车辆装载能力约束的条件下指派了每辆车需要访问的作战单元,这里只需根据每个车辆访问的作战单元求解一个TSP,使运输成本最小即可。每次迭代过程中,总计要求解 $|T| \times |K|$ 个TSP(*t*,*k*),为节约求解时间,调用Lin等^[13]提出的Lin-Kernighan启发式算法来寻得一个较好的车辆访问序列。之后, P_2 和TSP(*t*,*k*)的解便构成*P*的一个可行解。

如果步骤1获得的解可行,便可直接利用 $D = \{i | i \in R/B, t \in T, k \in K\}$ 求解若干TSP(*t*,*k*),从而进一步改进解。

上述TLH算法的主流程如图3所示。

2.3 算法伪代码

该两阶段启发式算法的伪代码,见算法1。其中, sol^* 和 sol 分别用来储存得到的最优解和当前解; obj^* 和 obj 分别表示得到的最优目标值和当前目标值;*s*为迭代计数器;*M*表示TIM算法允许的总迭代次数;*flag*用作第一阶段的迭代指示器,其中 $flag = 0$ 表示第一次迭代或多样化迭代, $flag = 1$ 表示其他迭代。

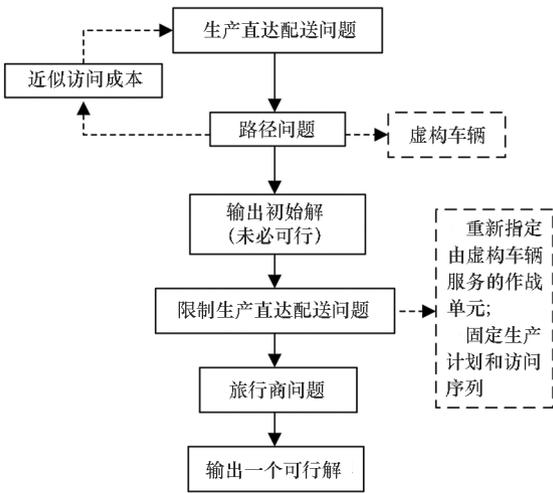


图 3 TLH 算法主流程

Fig. 3 Main process of TLH

算法 1 中,第 1~20 行表示初始解生成步骤。其中,第 1~9 行求解 PDP 和 $VRP(t)$ 来构造 P 的一个解,但该解未必可行;第 10~14 行更新最优解和近似访问成本;第 15~18 行表示多样化迭代;第 21~26 行表示不可行性修正步骤,其中,第 21~23 行修正不可行解,第 24 行求解若干 $TSP(t, k)$ 。

算法 1 两阶启发式算法

Alg. 1 Two-level heuristic

1. 初始化 $flag = 0, s = 1, sol^*, sol \leftarrow \emptyset, obj, obj^* \leftarrow +\infty, M, \delta_u^s$
2. While ($s \leq M$)
3. if ($flag = 0$)
4. 求解 $P_1(s)$, 输出 $\hat{w}_{pt}, \hat{q}_{pt}, \hat{z}_i^p, \hat{I}_i^p, \hat{v}_i^t$ 和 \hat{y}_i^p
5. else if ($flag = 1$)
6. 求解 $P_1^t(s)$, 输出 $\hat{q}_{pt}, \hat{z}_i^p, \hat{I}_i^p, \hat{y}_i^{pt}$ 和 \hat{v}_i^t
7. end if
8. 已知 \hat{v}_i^t 和 \hat{y}_i^p , 求解 $VRP(t)$
9. 构成 P 的一个解 sol 并计算 obj
10. if ($obj < obj^*$)
11. 令 $obj^* \leftarrow obj$ 并更新 $sol^* \leftarrow sol$
12. end if
13. 用式(31)和式(32)计算访问成本 δ_u^{s+1}
14. 令 $flag = 1$
15. if 满足多样化条件 then
16. 令 $flag = 0$
17. 用式(30)重置 δ_u^{s+1}
18. end if
19. 令 $s \leftarrow s + 1$
20. end while
21. if sol^* 不可行 then
22. 用 σ_i^{ht} 求解 P_2 , 输出 $\hat{q}_{pt}, \hat{z}_i^p, \hat{I}_i^p, \hat{y}_i^{ht}$ 和 \hat{v}_i^{ht}
23. end if
24. 已知 \hat{v}_i^{ht} , 求解一系列 $TSP(t, k)$
25. 构成 $P(s)$ 的一个可行解 sol 并计算 obj
26. 令 $sol^* \leftarrow sol, obj^* \leftarrow obj$

3 实例分析

3.1 模型可行性验证

在规划周期内,决策者需协调工厂应急生产多品种装备维修器材,并调用一组同类型车辆将器材配送给各作战单元。

首先利用一个包含 10 个作战单元,3 个品种器材,3 个阶段和 1 辆车的测试实例 1 来验证所提模型的可行性,实例 1 的参数设置如表 2~3 所示。其中,作战单元和工厂位置对应于有向图 G 中节点 i 的坐标,记为 (X_i, Y_i) ,从 $U[0, 1000]$ 中随机产生^[14]。行程费用 c_{ij} 用节点 i 和 j 之间的欧氏距离表示。在规划周期开始时,初始库存 I_i^0 为 0。

这里给出求解器 CPLEX 求得的车访问序列。阶段 1: $0 \rightarrow 4 \rightarrow 2 \rightarrow 5 \rightarrow 10 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 1 \rightarrow 0$, 节点 8、节点 9 的需求由第三方供应商满足;阶段 2 和阶段 3 无交付计划。

由于本实例中的器材存储成本较小,各作战单元在规划周期内产生的库存积压费用要小于配送费用,故各作战单元在规划周期内的总需求量在阶段 1 便得到全部满足。CPLEX 的求解结果比较符合实际情况,这表明本文提出的模型可行。

3.2 实验对比分析

影响 TLH 算法以及求解器 CPLEX 运行效率与效果的主要因素是作战单元数、阶段数以及器材品种数。因此,为评估 TLH 算法的有效性,参考文献[15]中参数的生成规则,利用 60 个随机小规模实例进行对比实验计算,包括 12 组不同规模问题,每组问题下生成 5 个实例。

对比实验采用以下符号定义来评价 TLH 算法与求解器 CPLEX: obj^* 列表示 TLH 求解的最优值; obj^c 列表示 CPLEX 求解的最优值或下界值; Gap 列表示 TLH 求解的最优值与 CPLEX 求解的最优值的相对误差,由 $Gap = (obj^* - obj^c) / obj^c \times 100\%$ 计算得出; $T-TLH$ 列和 $T-CPLEX$ 列分别表示 TLH 和 CPLEX 的求解时间。实验结果如表 4 所示。

分析表 4 中各列实验数据可以看出:

1) TLH 求解的最优值与 CPLEX 求得的最优解的相对误差平均只有 1.77%;

2) TLH 的平均求解时间为 116 s, 是 CPLEX 的 1/24, 且随着问题规模的增大, CPLEX 求解时间的增幅明显高于 TLH 算法。

综上, TLH 算法在小规模实例上求解效果好, 计算效率优于求解器 CPLEX。

表 2 工厂参数设置
Tab.2 Parameters on factory

n	坐标	C	U_0	V	a_1	a_2	a_3	b_1	b_2	b_3	e_1	e_2	e_3
0	(739,758)	1728	5184	673	6	5	10	180	150	300	9	9	19

表 3 作战单元参数设置
Tab.3 Parameters on combat unit

n	坐标	U_i	h_i^1	h_i^2	h_i^3	d_i^{11}	d_i^{21}	d_i^{31}	d_i^{12}	d_i^{22}	d_i^{32}	d_i^{31}	d_i^{32}	d_i^{33}
1	(375,860)	235	1.28	1.06	0.63	8	16	18	17	14	24	9	21	14
2	(678,250)	147	0.64	0.51	1.4	15	14	23	7	11	21	22	15	19
3	(255,477)	276	1.34	0.98	0.53	19	25	24	11	13	6	6	20	16
4	(799,522)	282	0.96	0.67	1.21	9	18	22	11	17	22	5	19	19
5	(581,171)	210	1.47	0.7	0.5	10	20	5	10	12	5	5	20	18
6	(52,556)	240	1.05	0.75	1.4	23	8	15	15	21	20	14	14	14
7	(399,756)	70	1.4	1.42	0.76	10	25	5	11	6	12	8	6	22
8	(943,42)	216	0.77	1.23	0.77	19	16	9	9	8	6	12	21	10
9	(979,917)	141	0.95	0.64	1.02	25	5	23	15	13	25	8	7	20
10	(381,397)	200	1.27	0.74	1.21	17	14	5	21	5	8	9	25	18

表 4 小规模实例计算结果
Tab.4 Computational results on small-sized instance

n	$ T $	$ P $	obj^*	obj^c	$Gap/\%$	$T-TLH/s$	$T-CPLEX/s$
10	3	3	16 345	16 120	1.40	1.5	186.3
		6	34 321	34 112	0.61	2.0	340.6
		12	56 786	56 542	0.43	10.9	2032.5
	6	3	34 578	33 876	2.07	8.1	3854.2
		6	59 789	57 897	3.27	51.2	4635.3
		12	113 564	112 112	1.30	589.3	4769.5
16	3	3	26 456	26 312	0.55	2.9	1786.3
		6	41 687	41 454	0.56	7.8	1897.3
		12	78 456	77 643	1.05	19.3	1458.4
	6	3	48 563	46 556	4.31	19.9	4054.6
		6	80 875	79 450	1.79	55.5	3014.4
		12	181 455	174 556	3.95	623.6	4236.5
平均值	64 406	63 052	1.77	116	2688.8		

3.3 算法性能评估

为进一步检验 TLH 算法,在文献[16]提出的两组基准实例集 A 和 B 上测试了 TLH 算法和 IM 算法求解一般 PRP 的性能。集合 A 共包含 1440 个实例,根据参数设置不同可分为 A1、A2

和 A3 三组不同规模的子集,各包含 480 个实例;集合 B 共包含 90 个实例,根据参数设置不同可分为 B1、B2 和 B3 三组不同规模的子集,各包含 30 个实例。表 5 给出了基准实例集 A 和 B 的详细信息。

表 5 基准实例信息

Tab. 5 Summary of benchmark information

实例子集	A1	A2	A3	B1	B2	B3
实例数	480	480	480	30	30	30
阶段数	6	6	6	20	20	20
用户数	14	50	100	50	100	200
车辆数	1	∞	∞	5	9	13
需求	C	C	C	V	V	V
生产能力	∞	∞	∞	C	C	C
工厂库存能力	∞	∞	∞	C	C	C
用户库存能力	C	C	C	C	C	C
工厂初始库存	0	0	0	V	V	V
用户初始库存	V	V	V	0	0	0
车辆容量	C	C	C	C	C	C

注: V 表示相异, C 表示固定, ∞ 表示无限。

表 6 给出了在两组实例集上测试 TLH 和 IM 的实验结果。表中, *diff* 列表示 TLH 和 IM 求得目标值的平均偏离程度, 由 $diff = \frac{obj^2(IM) - obj^2(TLH)}{obj^2(TLH)} \times 100\%$ 计算得出, 式中 obj^2 表示算法求得的目标值; *N* 列表示算法求得最优解或已知最优解的实例数量; *T* 列表示算法的求解时间。

表 6 算法对比

Tab. 6 Comparison of two algorithms

实例	<i>diff</i> /%	<i>N</i>		<i>T</i> /s	
		IM	TLH	IM	TLH
A1	-0.15	293	168	16.9	33.8
A2	0.27	34	115	290.3	45.3
A3	0.41	16	170	1036.7	146.9
B1	0.19	3	7	532	290
B2	0.05	1	4	1956	478
B3	—	0	0	4375	632

分析表 6 中各列数据可以发现:

1) 对于基准实例集 A, TLH 在中规模实例集 A2 和大规模实例集 A3 上求得最优解的实例数量要多于 IM, 且质量较好; 但在小规模实例集 A1 上的求解效果不如 IM。求解的计算时间方面, TLH 在 A2 和 A3 上明显占优, 且随着问题规模的增大, IM 求解时间的增幅要明显高于 TLH。

2) 对于基准实例集 B, TLH 和 IM 在最大规

模实例集 B3 上都没有求得最优解, 但 TLH 在实例集 B1 和 B2 上的求解效果要强于 IM。从算法的求解时间可以看出, TLH 的计算效率更高。

总体来看, TLH 算法在基准实例集上表现出了较好的性能, 与 IM 算法相比, 在中规模和大规模实例上求解效果较好, 计算效率较高。

4 结论

装备维修器材供应保障是装备保障中的关键一环。本文首先将器材供应保障中的生产、库存和配送环节的集成优化决策问题转化为经典的生产路径优化决策问题进行研究, 并在集成过程中考虑了供应任务外包。以此为基础, 构建了一个混合整数线性规划模型, 之后提出了一个两阶启发式算法进行求解。该算法首先将原问题分解为两个子问题, 并采用两阶迭代方法来获得一个初始解, 之后采用修正策略寻得一个可行解。将提出的模型与算法应用于装备保障实例, 结果显示: 求解器 CPLEX 的求解结果比较符合实际情况, 表明本文提出的模型可行; TLH 算法的求解结果与求解器 CPLEX 求得的最优解的相对误差很小, 所用的平均求解时间更短。基准实例的测试结果表明: TLH 算法与 IM 算法相比, 在中等规模和大规模实例上求解效果好、计算效率高。本文研究成果可为决策者制订装备维修器材供应保障计划提供科学依据, 提出的模型和算法也适用于其他类似的单目标优化决策问题。

参考文献 (References)

- [1] 董晓雄, 陈云翔, 孟祥飞, 等. 装备寿命周期备件供应网络优化方法 [J]. 国防科技大学学报, 2018, 40(4): 127-133.
DONG Xiaoxiong, CHEN Yunxiang, MENG Xiangfei, et al. Supply network optimization for spare parts of equipment based on the life cycle [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2018, 40(4): 127-133. (in Chinese)
- [2] Federgruen A, Tzur M. Time-partitioning heuristics: application to one warehouse, multi-item, multi-retailer lot-sizing problems [J]. Naval Research Logistics, 1999, 46(5): 463-486.
- [3] Campbell A M, Savelsbergh M W P. A decomposition approach for the inventory-routing problem [J]. Transportation Science, 2004, 38(4): 488-502.
- [4] Brahimi N, Aouam T. Multi-item production routing problem with backordering: a MILP approach [J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(4): 1076-1093.
- [5] Qiu Y Z, Qiao J, Pardalos P M. A branch-and-price algorithm for production routing problems with carbon cap-and-trade [J]. Omega, 2017, 68: 49-61.
- [6] Adulyasak Y, Cordeau J F, Jans R. Benders decomposition

- for production routing under demand uncertainty [J]. *Operations Research*, 2015, 63(4): 851–867.
- [7] Archetti C, Bertazzi L, Paletta G, et al. Analysis of the maximum level policy in a production-distribution system[J]. *Computers & Operations Research*, 2011, 38(12): 1731–1746.
- [8] Boudia M, Prins C. A memetic algorithm with dynamic population management for an integrated production-distribution problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 195(3): 703–715.
- [9] Absi N, Archetti C, Dauzère-Pérès S, et al. A two-phase iterative heuristic approach for the production routing problem[J]. *Transportation Science*, 2014, 49(4): 784–795.
- [10] Chitsaz M, Cordeau J F, Jans R. A unified decomposition matheuristic for assembly, production and inventory routing[J]. *Inform Journal on Computing*, 2019, 31(1): 1–192.
- [11] 江雨,姜大立,姜玉宏,等. 基于 IIM & OWA 的军事供应链风险传递和控制 [J]. *后勤工程学院学报*, 2016, 32(6): 67–72.
JIANG Yu, JIANG Dali, JIANG Yuhong, et al. Risk transmission and control of military supply chain based on IIM & OWA[J]. *Journal of Logistical Engineering University*, 2016, 32(6): 67–72. (in Chinese)
- [12] Li F, Golden B, Wasil E. Very large-scale vehicle routing: new test problems, algorithms, and results [J]. *Computers and Operations Research*, 2005, 32(5): 1165–1179.
- [13] Lin S, Kernighan B W. An effective heuristic algorithm for the traveling-salesman problem [J]. *Operations Research*, 1973, 21(2): 498–516.
- [14] Absi N, Archetti C, Dauzère-Pérès S, et al. Comparing sequential and integrated approaches for the production routing problem [J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 269(2): 633–646.
- [15] Archetti C, Bertazzi L, Paletta G, et al. Analysis of the maximum level policy in a production-distribution system [J]. *Computers and Operations Research*, 2011, 38(12): 1731–1746.
- [16] Adulyasak Y, Cordeau J F, Jans R. Optimization-based adaptive large neighborhood search for the production routing problem [J]. *Transportation Science*, 2014, 48(1): 20–45.