

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.016

装备维修器材供应保障优化决策问题研究

滕尚儒¹, 何成铭¹, 赵嵩²

(1. 陆军装甲兵学院装备保障与再制造系, 北京 100072;

2. 中国人民解放军 32289 部队, 辽宁 抚顺 113300)

摘要: 为解决传统经验型决策结果不精确的问题, 对装备维修器材保障中的生产、库存和配送路径环节集成优化决策进行研究。根据优化决策的基本思想, 对协同决策问题网状结构进行分析, 以 PRP 优化决策理论为基础, 建立器材供应保障决策问题的 MILP 优化模型, 并利用小规模算例验证模型的有效性。实例验证结果表明, 该研究可为实施低成本、高精度的装备维修器材供应保障工作提供参考。

关键词: 装备维修器材; 供应保障; 生产路径问题; 优化决策

中图分类号: E92 **文献标志码:** A

Research on Optimization Decision Problem for Equipment Maintenance Material Supply Support

Teng Shangru¹, He Chengming¹, Zhao Song²

(1. Department of Equipment Support & Remanufacturing, Army Academy of Armored Forces, Beijing 100072, China;

2. No. 32289 Unit of PLA, Fushun 113300, China)

Abstract: In order to solve the problem of inaccuracy resulting from experience type decision, research on integration and optimization decision of manufacturing, inventory and distribution routing. According to basic principle of optimization, analyze the wrong network structure of coordination decision, establish the MIL optimization model of equipment maintenance material supply support based on PRP optimization decision theory, and use small scale example to verify model effectiveness. The verification results show that the research can provide reference for the implementation of low-cost and high-precision equipment maintenance material supply support work.

Keywords: equipment maintenance material; supply support; production routing problem; optimization decision

0 引言

装备维修器材供应保障决策常常面对瞬间多变的信息、错综复杂的环境、紧缺有限的资源和稍纵即逝的战机。现代智能化形态战争条件下, 财力、物力损耗惊人, 要用有限的资源来完成器材供应保障任务, 必须准确分析装备维修器材供应保障决策问题的特点, 引入现代供应链集成优化决策模型、信息技术和智能方法, 对规模庞大、结构复杂、目标多元的决策问题作出准确分析和科学判断, 以精细准确地策划和运用保障资源, 在达到共赢的基础上寻求需求与资源的最佳整合, 最大限度地发挥保障系统的能力, 需要决策者科学优化决策, 力求使保障决策由“粗放极大化保障”向“精确效益型保障”转变^[1]。

对生产控制、库存管理和配送路径进行集成优化的问题称为生产路径问题 (production routing problem, PRP), 在过去的近 30 a 里引起了广泛关

注。PRP 涉及图论、管理科学与工程、交通运输工程、计算机应用等众多学科的交叉融合, 既是供应链集成优化理论的问题之一, 又是解决其他类似问题的有效工具。各种研究和实践表明: 实施 PRP 可以强化系统的同步, 降低产品成本, 提高服务水平。Chandra 等^[2]指出, 集成化管理生产、库存和配送活动可将总运营成本降低 3%~20%。Kellogg 公司在 1995 年运用集成规划系统, 节省了 450 万美元^[3]。同时, 实施 PRP 能降低客户面临的缺货风险并让客户享受到高水平的服务^[4-5]。

装备维修器材供应保障涉及到器材承制单位、车辆、部队用户等诸多实体单元, 集成优化涉及诸多目标。这种多目标、多约束、多要求的特点, 使得现有的优化模型的应用受到很大限制^[6]。笔者构建适于装备维修器材供应保障要求的 PRP 优化决策模型, 以确保在完成保障任务的前提下, 能够极大地提高器材供应系统的军事效益, 降低系统的运营

收稿日期: 2020-08-03; 修回日期: 2020-09-30

基金项目: 装备预研领域基金项目 (61400010301)

作者简介: 滕尚儒 (1992—), 男, 江苏人, 博士, 从事管理科学与工程研究。E-mail: 261704706@qq.com。

成本，提高系统的服务水平。

1 问题分析

装备维修器材供应保障优化是使装备维修中所需的器材能得到及时和充分的供应，并使器材的供应费用降至最低；或者在满足一定的费用要求下，使器材供应保障的军事效益达到最大。优化决策工作重点是对器材生产的规划、库存的控制以及配送路径的优化，保证装备的正常使用和维修有充足的器材。优化决策的基本思想即是将供需双方看成利益一致的统一体，然后确定供需双方的决策，使得整个供应链的绩效最大化^[6]。

1.1 核心要素

部队遂行高强度的作战或应急任务后，装备的损伤势必较重，维修任务量及相应的维修器材的需求量也必然加大。为便于机动，任务分队及机动抢修力量携行的器材数量有限，往往会导致携行器材不能满足维修保障需要，使得装备抢修作业无法及时完成；因此，装备保障部门需要组织专门的力量保障需求点的器材供应，使得装备抢修作业能够顺利进行。当面对多个需求点的不同需求时，在保障力量有限的情况下，就需要进行供应方案的决策，以求用最小的代价按要求完成器材供应保障任务；所以，要在全局考虑的基础上对区域内器材的生产、库存的分布以及运力的配置进行统一调度，最终实现器材从承制单位到一线部队的一体化运作。

由上述描述可知，装备维修器材供应保障决策问题由多种要素组成：如路径网络、车辆、器材承制单位、部队用户等实体；而这些实体的若干属性则构成了模型参数，如道路的距离、单位运输成本；车辆的数量、载质量；部队用户的器材需求量、服务时间窗等。核心要素的特征决定了器材供应保障优化模型的特点。

1) 路径网络。

路径网络是器材配送的基础。路径网络通常用一个由节点和有向弧组成的赋权图来表示。其中节点表示器材承制单位或者部队用户，弧代表路径网络中节点间的路径联接，节点间不允许出现子回路。对应于每条弧，赋有一个非负的权值，根据研究的需要，可以赋予它不同的含义，例如可以表示两点间的运输费用、运输距离、运输时间等。

2) 部队用户。

部队用户对应于网络图中一个节点，其典型特

征属性包括以下方面：① 消耗，部队用户每阶段都会消耗一定数量器材并产生器材需求；② 车辆在部队用户的器材装卸方式，器材需求量是一次满足，还是可拆分的，可拆分是指器材需求量可以由多车分批次满足；③ 服务时间，可以表示车辆在部队用户提供送货或取货服务所花费的时间；④ 服务时间窗，因某些部队用户在接收车辆服务时有特殊的时间期限要求，即每阶段车辆只可对部队用户在一个特定的时间区段内进行服务，该时段包括允许的最早开始服务时间和最迟开始服务时间，或仅有一个允许的最迟开始服务时间。

3) 器材承制单位。

器材承制单位是器材的生产节点，也是路径网络中每条车辆路径的起点或终点，车辆从器材承制单位对部队用户进行器材配送。其典型的特征属性包括以下方面：① 数量，单/多，一般情况下由一个主要军工企业负责器材承制任务，特殊情况下可协调地方供应商加入器材承制单位序列；② 产能，有限/无限；③ 开放时间窗，某些情况下，器材承制单位的开放时间有特殊要求，即每天车辆只允许在特定的时间期限内发车或回车，包括开放服务的最早时间和最迟时间。

4) 车辆。

车辆主要负责完成对部队用户的取货或送货服务，其典型的特征主要包括以下方面：① 车辆类型，同/异，一般模型均假设车辆为同一类型，即拥有相同的载重量，但实际配送过程中，车队一般是由多种车型的组成，即车辆间具有不同的装载能力、不同的单位运输成本，多车型问题的建模与求解更加困难；② 车辆装载能力，有限/无限；③ 单位运输成本，用单位公里的费用来衡量。

5) 服务周期。

服务周期是指服务部队用户的时间呈周期性，即保障时间可以是 1 周、1 月等，只要在周期内满足部队用户的全部需求即可，不必每天都服务所有部队用户。问题的优化目标为整个周期水平上的总成本最小，非周期性问题的保障时间通常为 1 d。

6) 运作目标。

根据实际研究的问题特征不同，运作目标可以分：① 单目标，最小化总行驶距离或时间，最小化车辆使用数量，最小化总费用，包括生产准备成本、单位器材生产成本、器材存储成本和运输成本等；② 层次化优化目标函数，即按目标的重要性

程度,同时优化多个目标,如以最小化总费用作为首要的优化目标,在此基础上优化对应的库存持有数量。

1.2 问题结构

笔者考虑由一个器材承制单位(地方供应商)和若干部队用户所构成的 2 阶供应链。装备维修器材供应保障分析考虑 3 种类型的成本:生产成本、库存持有成本和配送成本,统称供应成本。

为了开发装备维修器材供应保障的数学模型,笔者引入假设如下:1)器材承制单位在单位时间内面对的为部队用户的静态器材需求,由决策中心通过预测得出。2)由于每阶段器材的需求相异,各补货周期的供应成本与时间有密切关系,因而供应成本绩效的评价不能仅仅限于一个补货周期,应该在一个计划期内进行考察。文中的装备维修器材供应保障均在计划期跨度 $T=\{1,2,\dots,t\}$ 内构建。3)部队用户采取等周期补货,补货周期为 1,补货次数为 $|T|$,且提前期很短,可忽略不计。

需要对以下问题进行协同决策:1)确定器材承制单位的生产时机、各品种器材的生产量、每阶段给每个部队用户交付的器材量;2)确定每阶段器材承制单位和每个部队用户的库存持有量;3)确定运输车辆的数量和载重量,部队用户的配送次序。以上协同决策问题涵盖了 2 类决策问题,描述如下:

1) 生产—配送。

生产—配送问题(production direct-distribution problem, PDP)中,物流服务商采用直达运输的方式将器材承制单位生产的器材交付给部队用户,目的是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的生产成本、生产准备成本和器材承制单位处的库存成本之和最小^[7]。信息技术的发展,使前方部队用户的器材需求信息能够迅速地传递到器材承制单位,物流技术的进步,又使得器材承制单位生产的器材能以最快速度精确地投送到部队用户手中。

生产调度问题是指在决策中心的协调组织下,针对预测的大批量器材和灵活分散的补货需求,确定器材承制单位的流水线、批次化生产计划,包括生产的时机和生产器材的数量^[8]。由于在每个生产批量之间存在生产准备成本,若每阶段都启动生产,则会导致生产准备成本的增加;另一方面,若为了减少生产准备成本,而在某阶段生产大量器材,则会带来库存成本的增加。配送问题通常分为 2 个部

分:将部队所需求的器材装配给车辆—车辆物资装载问题(vehicle filled problem, VFP);给已装载器材的车辆制定合适路线—车辆路径问题(vehicle routing problem, VRP)。在实际的配送过程中,首先要确立需求关系,器材承制单位根据各部队用户的不同需求进行组配,根据器材的质量和体积、车辆的载重量,器材装载顺序与卸货顺序间的联系等方面的因素,将各类器材组合装车,尽量做到满载,再根据每辆车所装载的属于各部队用户的器材,依据实际中器材承制单位与部队用户间的实时路况信息,和各部队用户对其所需物品的时限要求、车辆在各部队用户处卸货所需耗时,以部队用户之间的空间距离分布关系及互通联系为基础,确定各车辆服务的部队用户,制定车辆行车路线,将器材通过车辆的运输从器材承制单位送达给部队用户。

2) 库存—配送。

库存—配送问题(inventory routing problem, IRP)指在 VMI 策略下,在有限计划期内由一个供应商向多个部队用户提供配送服务,在满足一定约束条件(车辆总数及其容量限制、客户需求时间及其库存容量限制等)的情况下,供应商需要确定每个决策阶段的库存策略(配送对象以及配送数量)以及相应的配送策略(配送路径),使系统总成本最小,实质是研究库存补充和配送之间的协调问题^[9]。

配送过程中,若采用直达方式访问每个部队用户,在车辆、人员方面很难得到保证,同时这样的单独配送也会造成浪费^[1]。基于此,需要科学地制订器材配送方案,安排合理的运算路线。VRP 即是如何安排车辆及其行驶路线,使由多辆车将器材从一个或多个仓库送到多个地理上分散的部队用户总效益最大的 NP 完全问题。IRP 涵盖了 VRP,但与常见 VRP 又有很大的不同。IRP 是一类研究如何更好地协调库存成本和运输成本 2 个具有“背反效益”因素之间的关系,从而使得整个物流系统获得最大经济效益的非确定多项式(one deterministic polynomial, NP-hard)问题。IRP 中,采取多次小批量配送策略能有效减少部队库存,库存成本降低,但配送成本上升;而采取大批量配送策略能减少配送的成本,会使部队积压大量库存,库存成本提高,同时影响部队的机动性。

三类协同决策问题的网状结构可用图 1 概略描述。

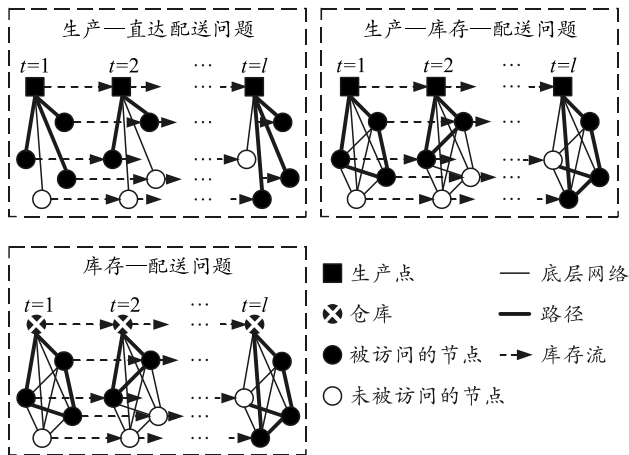


图 1 三类协同决策问题网状结构

1.3 决策特点

装备维修器材供应保障决策既要在资源、能力约束下，实现器材的合理生产、存储和配送，又要考虑器材供应保障的经济、军事效益，主要具有特点如下：

- 1) 大规模。装备维修器材供应保障决策问题涉及多个成员和多种资源，涵盖军队或军地双方。
- 2) 多目标。为实现器材精确保障的目的，装备维修器材供应保障决策问题必须满足及时、经济、高效、可靠等多种目标，必须在“供得上、供得准”的基础上追求器材保障的综合效益。
- 3) 多约束。在进行装备维修器材供应保障决策时，必须满足时间、能力、资源、安全等约束条件。
- 4) 多样性。装备维修器材供应保障决策涉及到器材供应保障规划、指挥及生产、仓储和配送等各项业务领域，又涉及到器材承制单位、车辆等不同资源、不同目标和不同条件限制的决策问题。同类问题在平战时又有不同的决策要求。

2 数学模型构建

装备维修器材供应保障优化模型是为了消除器材承制单位和部队用户之间的障碍，促进器材供应保障工作实现时间、空间、效率、效益等方面的最优^[10]，而将器材供应保障中生产、仓储、配送等环节的管理看作一个整体功能过程而开发的供应链管理功能。

2.1 建模准备

在建模技术方面，线性规划方法很早就被应用到企业生产或运输等决策活动之中，作为一种建模技术成为数学优化的主要方法。线性规划可以定义为一种数学的表示方法，目的是对不足的资源进行

规划，使其得到最好的可能分配方案。由于该模型的表述只用到线性函数，故称之为线性规划模型。笔者以 PRP 优化决策理论为基础，构建装备维修器材供应保障优化决策问题的混合整数规划 (mixed integer linear programming, MILP)，描述如下：

假设有向图 $G=(N,A)$ 表示配送网络，其中： $N=\{0,1,\dots,n\}$ 表示节点集， A 为弧集。节点 0 表示器材承制单位，其库存能力记为 U_0 ，最大生产能力记为 C 。器材承制单位可生产多品种器材 $P=\{0,1,\dots,P\}$ ，物流服务商可提供一组容量为 V 的同类型车辆 $K=\{1,2,\dots,K\}$ 。图 G 中分布有一组部队用户 $R=\{1,2,\dots,n\}$ ，每个部队用户 $i \in R$ 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^{pt} 。

参数设定如下：

c_{ij} : $(i,j) \in A$ 之间的运输成本； a_p : 器材 $p \in P$ 的单位生产成本； b_p : 器材 $p \in P$ 的生产准备成本； C : 器材承制单位的生产能力； d_i^{pt} : 阶段 $t \in T$ 部队用户 $i \in R$ 需要的器材 $p \in P$ 的量； U_i : 节点 $i \in N$ 的库存能力； h_i^p : 器材 $p \in P$ 在节点 $i \in N$ 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 器材 p 的生产量； w_{pt} : $0 \sim 1$ 变量，若阶段 t 器材承制单位生产了器材 p ，则 $w_{pt}=1$ ，否则其值为 0； I_i^{pt} : 阶段 t 结束时，部队用户 i 持有器材 p 的量； y_i^{pkt} : 阶段 t 车辆 k 给部队用户 i 交付的器材 p 的量； v_i^{kt} : $0 \sim 1$ 变量，若阶段 t 部队用户 i 被车辆 k 访问，则 $v_i^{kt}=1$ ，否则其值为 0； x_{ij}^{kt} : $0 \sim 1$ 变量，若阶段 t 车辆 k 从点 i 行驶到点 j ，则 $x_{ij}^{kt}=1$ ，否则其值为 0。

每阶段需要决策的问题包括：器材承制单位生产多少；给每个部队用户交付多少；器材承制单位和每个部队用户各需持有多少库存；如何确定最佳运输路径。

为了简化建模过程，作出如下假设和说明：

- 1) 每辆车在完成每次配送任务后，返回器材承制单位；
- 2) 每阶段每辆车至多执行一次配送任务；
- 3) 每阶段每个部队用户仅能由同一车辆为其提供一次服务。

2.2 参考模型

每一个优化问题，都有一个或多个方案中所追求的目标，可以用变量的函数来表示，称为目标函数。目标函数是评价系统方案优化性能的准则性函数，又称为评价函数。笔者将生产、库存、运输总成本作为优化的目标，在资源和能力约束下建立器材供应保障决策问题的 MILP 优化模型^[11]，记为模型 P 。

目标函数由生产、库存和运输成本组成：

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

约束条件：

1) 库存约束。

式(2)、式(3)为确保器材承制单位和部队用户之间的库存守恒：

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

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

式(4)为限制了部队用户的最大库存：

$$\sum_{p \in P} I_i^{pt} \leq U_i, \quad \forall i \in N, t \in T. \quad (4)$$

2) 生产约束。

式(5)为确保器材承制单位每阶段的生产量不超过其最大生产能力：

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

式(6)表示没有生产计划时，器材承制单位生产的器材量 0；

$$q_{pt} \leq C w_{pt}, \quad \forall p \in P, t \in T. \quad (6)$$

3) 配送约束。

式(7)为确保车辆在配送过程中的实际载货量不超过其最大允许装载量：

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

式(8)表示只有部队用户被访问时才允许车辆交付器材：

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

式(9)表示每个部队用户至多被一辆车访问：

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

式(10)表示车流量守恒，即车辆到达一个节点

后必须从该节点离开：

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

式(11)表示对于任意部队用户，只有 2 个部队用户与其相连：

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

式(12)为确保每辆车每阶段至多执行一次配送任务：

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

式(13)消除了子回环，避免了子回路解产生：

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

图 2 描述了约束式(13)如何消除子回路。假设 $|S|=3$ ，式(13)会驱使集合 S 外的一条弧与 S 内的一个节点链接，同时不允许集合 S 内出现 2 条以上的弧。

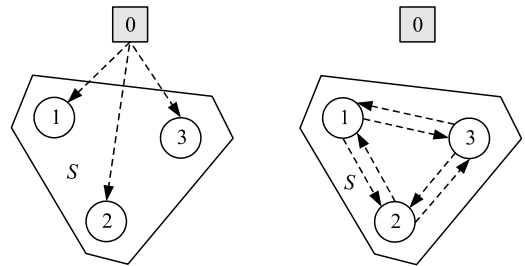


图 2 式(13)的消除子回路

式(14)–(19)界定了决策变量的取值范围：

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

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

$$y_i^{pkt} \geq 0, \quad \forall i \in R, p \in P, k \in K, t \in T; \quad (16)$$

$$w_{pt} \in \{0, 1\}, \quad \forall p \in P, t \in T; \quad (17)$$

$$v_i^{kt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in R, k \in K, t \in T; \quad (18)$$

$$x_{ij}^{kt} \in \{0, 1\}, \quad \forall (i, j) \in A, k \in K, t \in T. \quad (19)$$

其中子回路消除解：

$$x_{01t} + x_{02t} + x_{03t} \geq 1,$$

$$x_{12t} + x_{21t} + x_{13t} + x_{31t} + x_{23t} + x_{32t} \leq 2.$$

3 CPLEX 优化求解

CPLEX 优化求解器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。实验均在 Windows 10, CORE CPU 2.4 GHz, 8 GB RAM 下用 Visual Studio 2010 和 CPLEX Version 12.6.0 进行。

为验证上述优化模型的可行性，笔者选取某重型合成旅陆地阵地进攻战斗装备保障为研究背景。在规划周期内，装备保障管理部门需协调某器材承制单位应急生产多品种装备维修器材，并提供一组同类型车辆将器材配送给阵地上各部队用户。装备保障管理部门需依据以往战斗装备损坏规律，为未来几天的战斗制定一个装备维修器材供应保障计划，包括每天的生产量，每天给每个部队用户的交付量，以及车辆配送路径。

如表 1 所示，给出 CPLEX 求得的一个包含 10 个部队用户、3 个品种器材、3 个阶段和 1 辆车实例

的计算结果。

CPLEX 求得的车辆访问序列：

阶段 1：

0→4→9→8→2→5→10→3→6→7→1→0。

阶段 2：无交付计划。

阶段 3：无交付计划。

由于算例设置的器材存储成本较小，各部队用户在规划周期内产生的库存积压费用要小于配送费用，故各部队用户在规划周期内的器材总需求量在阶段 1 便得到全部满足。CPLEX 优化求解器的求解结果比较符合实际情况，表明笔者提出的模型可行。

表 1 实例参数设置

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^{23}	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	1.40	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	0.70	0.50	10	20	5	10	12	5	5	20	18
6	(52,556)	240	1.05	0.75	1.40	23	8	15	15	21	20	14	14	14
7	(399,756)	70	1.40	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

4 结束语

针对传统的依赖决策者阅历、知识和偏好的经验型决策带来的协调性差、灵活性不足、效益较低等问题，笔者以 PRP 优化决策理论为指导，将决策问题转换为优化问题，构建该问题的数学模型，并对模型假设条件、参数、变量、目标函数和约束进行详细说明，最后验证了该方法的可行性，为实施低成本、高效率、适应性好、敏捷性高的装备维修器材供应保障工作提供理论和方法支撑。

参考文献：

[1] 凌海风, 郑宇军, 萧毅鸿. 装备保障智能优化决策方法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015: 9.
 [2] CHANDRA P, FISHER M L. Coordination of production and distribution planning[J]. European Journal of Operational Research, 1994, 72(3): 503-517.
 [3] BROWN G, KEEGAN J, VIGUS B, et al. The Kellogg Company Optimizes Production, Inventory, and Distribution[J]. Interfaces, 2001, 31(6): 1-15.
 [4] BARD J F, NANANUKUL N. The integrated

production-inventory-distribution-routing problem[J]. Journal of Scheduling, 2009, 12(3): 257-280.
 [5] THOMAS D J, GRIFFIN P M. Coordinated supply chain management[J]. European Journal of Operational Research, 1996, 94(1): 1-15.
 [6] 孙广磊. 基于时变需求的集成多级供应链的最优生产库存问题研究[D]. 郑州: 河南科技大学, 2018.
 [7] FEDERGRUEN A, TZUR M. Time-partitioning heuristics: Application to one warehouse, multiitem, multiretailer lot-sizing problems[J]. Naval Research Logistics, 2015, 46(5): 463-486.
 [8] 鲁奎. 考虑运输成本和多供应商的动态经济批量问题研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
 [9] CAMPBELL A M, SAVELSBERGH M W P. A Decomposition Approach for the Inventory-Routing Problem[J]. Transportation Science, 2004, 38(4): 488-502.
 [10] 赵崇远. 基于遗传算法的边防连队运输保障车辆调度问题研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
 [11] BARD J F, NANANUKUL N. Heuristics for a multiperiod inventory routing problem with production decisions[J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(3): 713-723.