

doi: 10.7690/bgzd.2021.10.016

# 一种多阶段航空物资运输规划方法

田尧<sup>1</sup>, 王戈<sup>1</sup>, 宛延成<sup>2</sup>, 刘博<sup>1</sup>, 陆正宏<sup>1</sup>

(1. 中国人民解放军 78092 部队, 成都 610031; 2. 中国人民解放军 31401 部队 90 分队, 济南 250001)

**摘要:** 针对航空运输体系的复杂性特征, 对航空物资运输进行基本分析, 构建一种基于整数规划的航空物资运输规划模型, 并结合情景案例求解计算, 得出运输机驻停起降、物资输送等方面的特点规律。计算结果证明: 该模型可有效优化科学规划航空物资运输方案, 为制定运输计划提供辅助支撑。

**关键词:** 航空运输; 多阶段; 整数规划; 运输体系

**中图分类号:** TJ85 **文献标志码:** A

## A Multi Stage Air Material Transportation Planning Method

Tian Yao<sup>1</sup>, Wang Ge<sup>1</sup>, Wan Yancheng<sup>2</sup>, Liu Bo<sup>1</sup>, Lu Zhenghong<sup>1</sup>

(1. No. 78092 Unit of PLA, Chengdu 610031, China; 2. No. 90 Team, No. 31401 Unit of PLA, Ji'nan 250001, China)

**Abstract:** According to the complexity of the air transportation system, basically analyzes the air material transportation. Constructs an air material transportation planning model based on integer programming, and combines with the scenario case to solve the calculation, obtains the characteristics and laws of the landing of transport aircraft and material transportation. The calculation results show that the model can effectively optimize and scientifically plan the air material transportation scheme, and provide auxiliary support for the formulation of transportation plan.

**Keywords:** air transportation; multistage; integer programming; transportation system

## 0 引言

一般的航空物资运输过程可分为若干个阶段, 首先将分布在各物流基地仓库中的物资使用陆运方式集中至空运机场, 然后通过空运手段将其投送至事发地区机场, 再运用陆运方式将物资输送至前方需求地点。结合上述多个阶段, 在制定航空物资运输计划时, 需综合考虑运输路线、需求时间、运输能力等约束条件, 规划出运载工具输送策略、投送工具投送序列、配送工具输送方式、物资分配方法等。

目前, 国内有关航空运输的研究以定性分析为主。海军等<sup>[1]</sup>从提升航空战略投送能力、服务质量、管理水平等方面, 提出加强新时代我军航空运输投送系统建设发展的对策建议; 秦敬辉等<sup>[2]</sup>在分析空军综合保障基地军事物流建设的优势和需求基础上, 提出综合保障基地军事物流建设的对策措施; 刘宝新等<sup>[3]</sup>提出建立健全快速动员机制、增强民用运输机的军事适用性、发展运输机和创新战略投送模式等建议。

针对目前研究定性多、定量少的情况, 基于航空物资运输的主要特点和一般过程, 辨析运输体系

的基本构成, 分析航空运输的主要阶段, 研究运输过程中的各类约束条件, 结合航空运输的体系性、动态性、时效性和经济性等特点, 构建一种混合整数规划数学模型, 探索航空物资运输的规划方法。

## 1 航空物资运输基本分析

在投送行动中, 前、后方机场仅起到远距离快速中转物资的作用, 自身并无储备功能, 也无物资需求。引入仓库(物资储备方)、需求点(物资需求方)等参与方, 共同构成航空运输体系。一般航空运输过程大致可分为如图 1 所示的 3 个阶段。

1) 集结阶段: 将未统一部署、分散在各个仓库的物资, 在规定时间内统一集结于后方机场。此阶段多个仓储库房向后方机场配送物资, 参与主体有仓储库房、物资、陆运运载工具、后方机场等, 涉及物资配送约束、时间统一规划调度、物资调拨等条件约束。

2) 投送阶段: 将统一集结的物资向事发区域进行空中输送。此阶段参与主体有后方机场、物资、装卸载工具、空中投送工具等, 需要考虑物资的装载、卸载, 空运飞机的装载体积、重量约束, 物资的种类搭配等问题。

收稿日期: 2021-06-08; 修回日期: 2021-07-27

作者简介: 田尧(1987—), 男, 重庆人, 博士, 助理研究员, 从事军事运筹与系统工程研究。E-mail: 1378145237@qq.com。

3) 配送阶段：将各类型物资运输至具体需求地，完成补充任务。此阶段参与主体有前方机场、物资、配送工具、需求点等，根据需求点对物资种类数量的具体需求情况，结合需求时限要求将其进行合理分配并运送到位。

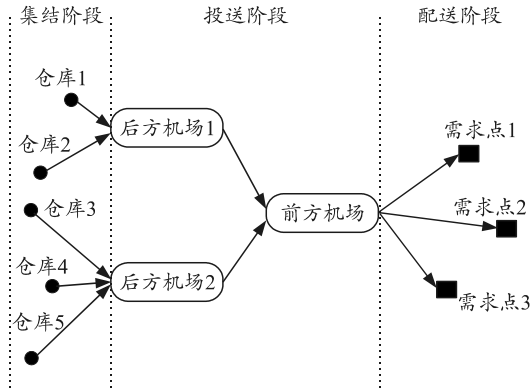


图 1 航空运输一般过程

基于航空运输一般过程建立混合整数规划模型时，应该重点考虑运输行动的体系性、时效性、动态性和经济性 4 个重要特性。

1) 体系性：航空运输是一个复杂系统，系统内部由仓库、机场、需求点、投送工具、运载工具和物资等多个要素构成。它们之间不断进行正向、负向关联作用，整体呈现出涌现性、聚合性特征，共同构设成一场完整的航空运输行动过程。

2) 时效性：需求点对物资的需求有具体时限要求，投送过程可以看成是各构成要素在时间轴上都有自身的行动指派，需要不断优化各自行为策略，以完成自身的时间节点任务。

3) 动态性：体系中仓库运输量、后方机场储备量、需求点需求满足量、运输机投送量和飞行位置状态等要素的行动状态都随着时间不断变化。这种动态性也从侧面反映了体系的复杂性特征。

4) 经济性：航空运输成本包括运输、投送、配送、储存和飞行等费用，应以最小的花费达成战略目的，降低航空运输行动的费效比。

## 2 多阶段航空物资运输规划模型构建

根据上述对航空运输一般过程和重要特性的基本分析，构建数学模型。

### 2.1 模型假设

对部分条件、情形进行一般假设和简化：1) 集结阶段、投送阶段和配送阶段前后衔接，不存在投送过程暂停的情况。2) 在集结阶段和配送阶段，一般采用陆运方式进行物资的转运，运输能力较强，

暂不考虑运载工具的容量限制。3) 投送阶段，空运运载能力有限，要考虑运载物资的重量、体积约束。

4) 前、后方机场均受制于机场跑道的客观限制，在同一时间只能起降有限架运输机，且装载、卸载物资也要占用一定时间。5) 每个仓库日常储备管理的物资种类、数量均较为充足。

### 2.2 模型参数

模型中的参数变量定义如表 1 所示。

表 1 模型参数说明

参数	说明
$I$	仓库集合，用 $i$ 遍历
$J$	后方机场集合，用 $j$ 遍历
$K$	前方机场集合，用 $k$ 遍历
$L$	需求点集合，用 $l$ 遍历
$T$	时间集合，用 $t$ 遍历
$M$	物资类型集合，用 $m$ 遍历
$X_{i,j,m,t}$	时间 $t$ 仓库 $i$ 向后方机场 $j$ 运输物资 $m$ 数量
$Y_{j,k,m,t}$	时间 $t$ 后方机场 $j$ 向前方机场 $k$ 投送物资 $m$ 数量
$Z_{k,l,m,t}$	时间 $t$ 前方机场 $k$ 向需求点 $l$ 配送物资 $m$ 数量
$U_{j,m,t}$	时间 $t$ 后方机场 $j$ 物资 $m$ 数量
$V_{k,m,t}$	时间 $t$ 前方机场 $k$ 物资 $m$ 数量
$W_{j,t}$	时间 $t$ 后方机场 $j$ 驻停的运输机数量
$S_{j,k,t}$	时间 $t$ 后方机场 $j$ 向前方机场 $k$ 投送的运输机数量
$\alpha_{i,j}$	仓库 $i$ 到后方机场 $j$ 的运输时间
$\beta_{j,k}$	后方机场 $j$ 到前方机场 $k$ 的投送时间
$\gamma_{k,l}$	前方机场 $k$ 到需求点 $l$ 的配送时间
$\delta_j$	后方机场 $j$ 的装载时间
$\epsilon_k$	前方机场 $k$ 的卸载时间
$\zeta$	运输机的投送重量上限
$\eta$	运输机的投送体积上限
$\theta_m$	单个物资 $m$ 的重量
$\iota_m$	单个物资 $m$ 的体积
$\omega_{i,m}$	仓库 $i$ 物资 $m$ 的储备量
$\kappa_{l,m,t}$	时间 $t$ 需求点 $l$ 对物资 $m$ 的需求量
$\lambda_j$	后方机场 $j$ 在同一时间起飞运输机的数量上限
$\mu_k$	前方机场 $k$ 在同一时间降落运输机的数量上限
$\nu_j$	后方机场 $j$ 拥有的运输机数量
$\sigma$	集结阶段单个物资 $m$ 单位距离的运输费用
$\tau$	投送阶段单个物资 $m$ 单位距离的投送费用
$\varphi$	配送阶段单个物资 $m$ 单位距离的配送费用
$\chi$	单个物资 $m$ 在后方机场的储存费用
$\psi$	单架运输机单位距离的飞行费用

### 2.3 模型构建

模型构建如下：

$$\text{s.t. } \min \sum_{m,t} \left( \sum_{i,j} \sigma \alpha_{i,j} X_{i,j,m,t} + \sum_{j,k} (\tau \beta_{j,k} Y_{j,k,m,t} + 2\psi \beta_{j,k} S_{j,k,t}) + \sum_{k,l} \varphi \gamma_{k,l} Z_{k,l,m,t} + \sum_j \chi U_{j,m,t} \right); \quad (1)$$

$$\sum_{j \in J, t \in T} X_{j,t} \leq \omega_{i,m}, \forall i \in I, m \in M; \quad (2)$$

$$U_{j,m,t} = U_{j,m,t-1} + \sum_{i \in I} X_{i,j,m,t-\alpha_{i,j}} - \sum_{k \in K} Y_{j,k,m,t+\delta_j}, \forall j \in J, m \in M, t \in T; \quad (3)$$

$$\sum_k Y_{j,k,m,t+\delta_j} \leq U_{j,m,t}, \forall j \in J, m \in M, t \in T; \quad (4)$$

$$\sum_m \theta_m Y_{j,k,m,t} \leq \zeta S_{j,k,t}, \forall j \in J, k \in K, t \in T; \quad (5)$$

$$\sum_m \iota_m Y_{j,k,m,t} \leq \eta S_{j,k,t}, \forall j \in J, k \in K, t \in T; \quad (6)$$

$$W_{j,t} = W_{j,t-1} - \sum_{k \in K} S_{j,k,t} + \sum_{k \in K} S_{j,k,t-2\beta_{j,k}-\epsilon_k}, \forall j \in J, t \in T; \quad (7)$$

$$W_{j,t} + \sum_{t-2\beta_{j,k} < t' \leq t, k \in K} S_{j,k,t'} = \nu_j, \forall j \in J, t \in T; \quad (8)$$

$$\sum_{k \in K} S_{j,k,t} \leq \lambda_j, \forall j \in J, t \in T; \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} S_{j,k,t-\beta_{j,k}} \leq \mu_k, \forall k \in K, t \in T; \quad (10)$$

$$V_{k,m,t} = V_{k,m,t-1} + \sum_{j \in J} Y_{j,k,m,t-\beta_{j,k}-\epsilon_k} - \sum_{l \in L} Z_{k,l,m,t}, \quad \forall k \in K, m \in M, t \in T; \quad (11)$$

$$\sum_{l \in L} Z_{k,l,m,t} \leq V_{k,m,t}, \forall k \in K, m \in M, t \in T; \quad (12)$$

$$\sum_{k \in K, t' \in T, t' \leq t} Z_{k,l,m,t'-\gamma_{k,l}} \geq \kappa_{l,m,t}, \forall l \in L, m \in M, t \in T; \quad (13)$$

$$X_{i,j,m,t}, Y_{j,k,m,t}, Z_{k,l,m,t}, U_{i,m,t}, V_{k,m,t}, W_{j,t}, S_{j,k,t} \in \mathbb{N}, \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in L, m \in M, t \in T. \quad (14)$$

式(1)为以运输过程所产生的运输费、投送费、配送费、储存费等总费用的最小模型求解目标；式(2)为仓库向外物资运输量不能超过自身储备限制；式(3)为后方机场物资储存量，等于上一时刻储存量、仓库运输量和向外投送量的差值；式(4)为后方机场向前方机场的投送量不能超过该时刻自身储存量；式(5)和式(6)分别从投送重量、体积对投送量进行约束，不能超过运输机的最大运载重量和体积；式(7)为对后方机场驻停的运输机数量进行约束，等于上一时刻运输机数量、返回与起飞的运输机数量的差值；式(8)为对体系中运输机总量的限定，表示运输机有且仅有驻停和飞行 2 种状态；式(9)和式(10)为对同一时刻的后方机场运输机最大派出量和前方机场运输机最大接收量的限定；式(11)为对前方机场储存量的约束，等于上一时刻储备量、到达该前方机场投送量与向外配送量的差值；式(12)为前方机场向外派送量不能超过自身储存量；式(13)为对需求点时变需求量的满足，表示配送累积量应该超过该时刻需求量；式(14)为主要变量都应取正整数。

### 3 算例

#### 3.1 情景设定

某部进行一场航空运输演练，依托 3 个后方机

场向 2 个前方机场投送物资，以保障前方 5 个需求点对 3 类物资(物资 a、b、c)的动态需求。由于后方机场自身并未储备物资，需从附近 5 个仓库临时调拨。仓库与后方机场、前方机场与需求点之间均以运输车陆运为主，后方机场与前方机场之间以运输机空运为主。如何对航空运输进行合理规划，给出物资的运输投送方案计划，能在满足需求点随时间变化物资需求的前提下，使得整场投送行动的能效比最高？

主要参数设定如下：设定此场演练时间为 20 天，仓库到后方机场、前方机场到需求点的运输时间服从正太分布  $N(0.3, 0.1^2)$ ，单件物资单位距离运输费用在区间[30, 60]中随机选取，后方机场到前方机场的投送时间在区间  $N(0.45, 0.2^2)$ 中随机选取，单件物资单位距离投送费用在区间[150, 350]中随机选取，运输机后方机场装载物资、前方机场卸载物资时间在区间[0.1, 0.2]随机选取，运输机运载重量和体积在区间[100, 200]随机选取，单件物资在后方机场的储备费用为 100。

#### 3.2 计算结果分析

对上述构建的整数规划模型编写 Lingo 程序，将上述设定参数代入程序中求解计算，求得全局最优解以及投送行动的最小化总成本为 406 564，如图 2 所示。模型为整数规划模型(pure integer linear programming, PILP)，模型共计整数变量 2 502 个，约束条件 1 233 个，非零参数 14 328 个，耗费内存 579 k，运算时间 3'49"。

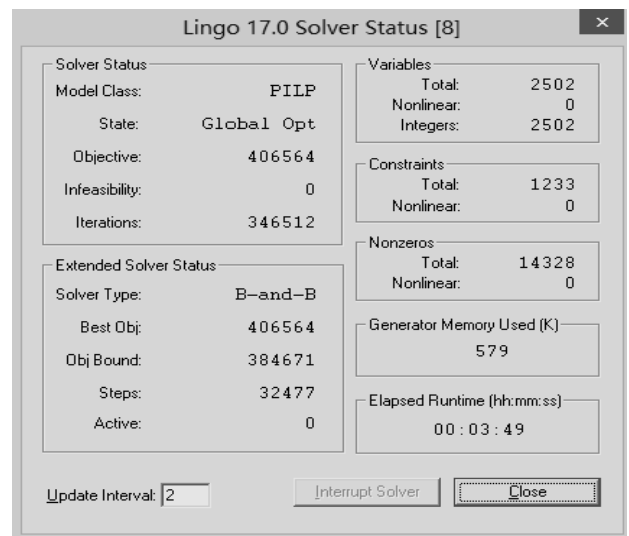


图 2 Lingo17 求解器最终求解状态

整数规划模型的核心代码如图 3 所示。通过运行程序求得的计算结果如图 4—图 8 所示。

```

min = @sum(M(mm):@sum(T(tt):@sum(I(ii):@sum(J(jj):sigma*alpha(ii,jj)*X(ii,jj,mm,tt)))+
@sum(K(kk):@sum(L(ll):phi*gamma(kk,ll)*Z(kk,ll,mm,tt)))+
@sum(J(jj):@sum(K(kk):tau*beta(jj,kk)*Y(jj,kk,mm,tt)+
2*psi*beta(jj,kk)*S(jj,kk,tt)))+@sum(J(jj):chi*U(jj,mm,tt)));
@for(I(ii):@for(M(mm):@sum(J(jj):@sum(T(tt):X(ii,jj,mm,tt))<=omega(ii,mm)));
@for(J(jj):@for(M(mm):@for(T(tt)|tt#gt#1:U(jj,mm,tt)=U(jj,mm,tt-1)+
@sum(I(ii):X(ii,jj,mm,tt-alpha(ii,jj)))-@sum(K(kk):Y(jj,kk,mm,tt+delta(jj))));
@for(J(jj):@for(M(mm):U(jj,mm,1)=0));
@for(J(jj):@for(M(mm):@for(T(tt):@sum(K(kk):Y(jj,kk,mm,tt+delta(jj))<=U(jj,mm,tt)));
@for(J(jj):@for(K(kk):@for(T(tt):@sum(M(mm):theta(mm)*Y(jj,kk,mm,tt))<=zeta*S(jj,kk,tt)));
@for(J(jj):@for(K(kk):@for(T(tt):@sum(M(mm):iota(mm)*Y(jj,kk,mm,tt))<=eta*S(jj,kk,tt)));
@for(J(jj):@for(T(tt)|tt#gt#2:W(jj,tt)=W(jj,tt-1)-@sum(K(kk):S(jj,kk,tt))+
@sum(K(kk):S(jj,kk,tt-2*beta(jj,kk)-epsilon(kk))));
@for(J(jj):W(jj,1)=nu(jj));
@for(J(jj):@for(T(tt)|tt#gt#1:W(jj,tt)+@sum(K(kk):
@sum(T(tt_)|tt_#gt#tt-2*beta(jj,kk))&and#(tt_#le#tt):S(jj,kk,tt_))=nu(jj));
@for(J(jj):@for(T(tt):@sum(K(kk):S(jj,kk,tt))<=lambda(jj));
@for(K(kk):@for(T(tt)|tt#gt#1:@sum(J(jj):S(jj,kk,tt-beta(jj,kk))<=mu(kk));
@for(K(kk):@for(M(mm):@for(T(tt)|tt#gt#1:V(kk,mm,tt)=V(kk,mm,tt-1)+
@sum(J(jj):Y(jj,kk,mm,tt-beta(jj,kk)-epsilon(kk)))-@sum(L(ll):Z(kk,ll,mm,tt))));
@for(K(kk):@for(M(mm):V(kk,mm,1)=0);
@for(K(kk):@for(M(mm):@for(T(tt):@sum(L(ll):Z(kk,ll,mm,tt))<=V(kk,mm,tt)));
@for(L(ll):@for(M(mm):@sum(K(kk):@sum(T(tt_)|tt_#le#tt)&and#(tt_#gt#1):
Z(kk,ll,mm,tt-gamma(kk,ll))>=kappa(ll,mm,tt)));

```

图 3 模型核心代码

如图 4 所示，每个仓库所担负的运输任务量均有不同。仓库 3 的运输量最多，仓库 4 的运输量最少，主要因为后方机场离仓库 3 平均距离最近、离仓库 4 平均距离最远，为节约运输成本做出运输决策；仓库 5 和仓库 6 的各类物资运输量较为接近，是由于 2 个仓库对各类物资储备量没有侧重，较为平均。

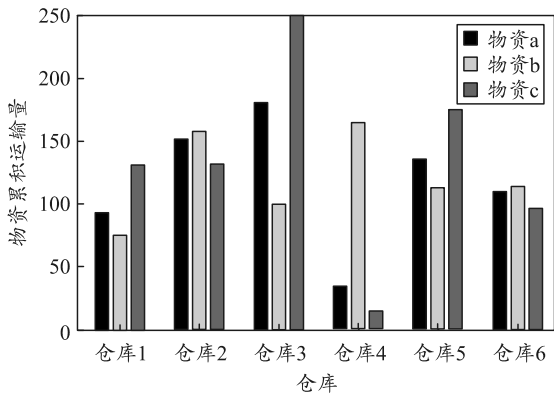


图 4 仓库各类物资累积运输量

后方机场向前方机场、前方机场向前方需求点的配送物资量都会随时间不断变化(各类物资合并统计)，具体情况分别如图 5、图 6 所示。从图中可以看出，后方机场和前方机场在演练过程中的投送配送量状态较为相似，在演练前半段投送量不断走高，中期总体较为平稳，后半段随时间有逐渐向下递减的过程。这是因为前方需求点的物资需求随着时间推移逐渐释放，为保证需求保障的稳定性和持续性，物资的投放时变量也要平稳适中。说明在运输行动中，后方机场和前方机场均较好地起到了物资快速中转、快速配送的作用。

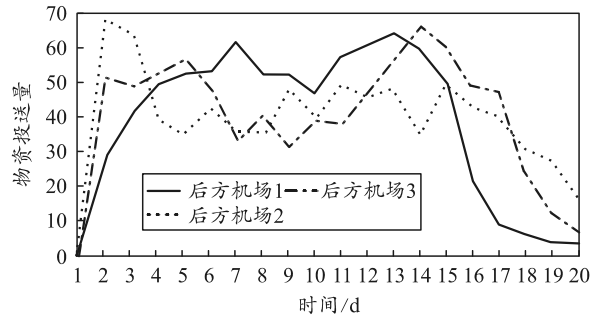


图 5 后方机场向前方机场投送物资时变总量

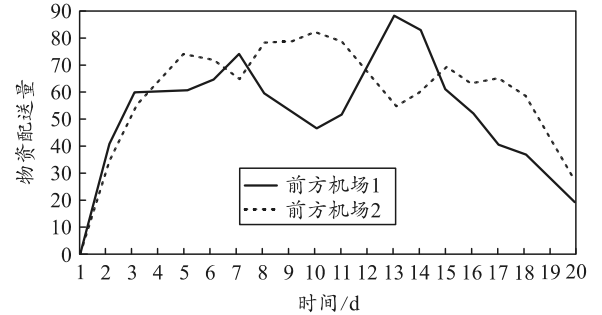


图 6 前方机场向需求点配送物资时变总量

后方机场的运输机驻停情况和出动架次分别如图 7、图 8 所示。从图中可以看出：后方机场 2 和 3 的累积出动架次较多，担负了主要的物资投送任务，除时间 T1 外的运输机驻停量均为零。同时 2 座机场均有主要的投送对象，分别保障前方机场 1、2。这是在满足机场起降条件(允许同一时间起飞降落的运输机数量)前提下，优先满足投送时间短、费用低的投送策略。后方机场 1 主要定位为机动机场，没有固定的投送对象，主要通过灵活保障的方式满足投送需求。