

# 航空项目资源均衡优化问题的蚁群-模拟退火算法

## Ant Colony-Simulated Annealing Algorithm of Aviation Project Resource Leveling and Optimizing Problems

西北工业大学管理学院 舒湘沅

西北工业大学机电学院 杨铭 王延平

**[摘要]** 为有效提高复杂航空项目资源利用率、节约项目成本,提出了一种求解大规模网络计划资源均衡优化问题的蚁群-模拟退火算法。该方法中,首先采用预处理方法对航空项目分级网络计划实施合并,并结合资源指数与搭接网络关系定义建立了资源优化目标函数。然后,探讨了以网络计划为基础的蚁群-模拟退火算法解空间构建方法,给出了算法的状态转移规则、信息素更新规则,提出了增加搜索效率的模拟退火局部搜索策略,并建立了详细的资源均衡优化方案求解步骤。最后,采用典型实实验证了方法的有效性。

**关键词:** 航空项目 资源均衡 蚁群算法 模拟退火算法

**[ABSTRACT]** To raise the utilization efficiency of aviation project resources and reduce project cost, an ant colony-simulated annealing optimization to solving the problem of network plan resource leveling and optimizing is proposed. Firstly, the project hierarchical network plan are incorporated by using the pretreatment algorithm, and a object function for optimizing resources is established considering the relationship of resource index and the overlapping network. Secondly, the key-space-constructing method of ant colony-simulated annealing arithmetic based on network plan is discussed. Besides, the rules of arithmetic's state-shift, pheromone updating and the effectively simulated-annealing-local-search-strategy are proposed, and a detailed approach for resource leveling and optimizing is established. Finally, the arithmetic is illustrated by using representative instance.

**Keywords:** Aviation project Resource leveling Ant colony algorithm Simulated annealing algorithm

受市场竞争与产品复杂度上升的影响,航空研制领域的项目管理难度不断增大、业务逻辑日趋复杂,航空项目执行过程中的工期滞后与资源冲突现象时有发生,追加资源已成为保证航空项目目标顺利实现的重要手

段。但是,由于航空项目任务数量大、涉及的资源种类众多,简单的直接性资源追加原则容易导致成本大幅上升,进而损害企业的整体效益。实际上,有相当一部分资源竞争情况可以采用资源均衡方法来解决,只有建立在资源均衡基础上的资源追加方案才是必要的。

通常,管理人员在计划制定之初较难完整地考虑资源的需求情况,所编制的计划对资源的需求容易出现高峰和低谷,进而导致资源的使用效率降低。针对资源均衡问题,国内外研究学者进行了大量研究:例如,国外的 Gordon<sup>[1]</sup>、Brucker P<sup>[2]</sup> 等人对项目管理中的资源均衡问题进行了定义与分类,并对一些常用方法进行了对比;国内的研究学者先后探讨了网络计划的资源均衡数学模型<sup>[3-4]</sup>,资源均衡的启发式方法<sup>[5]</sup>、粒子群算法<sup>[6-7]</sup>、遗传算法<sup>[8]</sup>等,取得了大量的研究成果。但是,当前大多数研究较少考虑项目编制过程的分级体系,任务约束的定义一般都是简单的紧前/紧后逻辑,实际上是一种理想状态,较难进行工程应用。如果考虑上述问题,资源均衡优化问题的求解规模和逻辑都将发生重大变化。

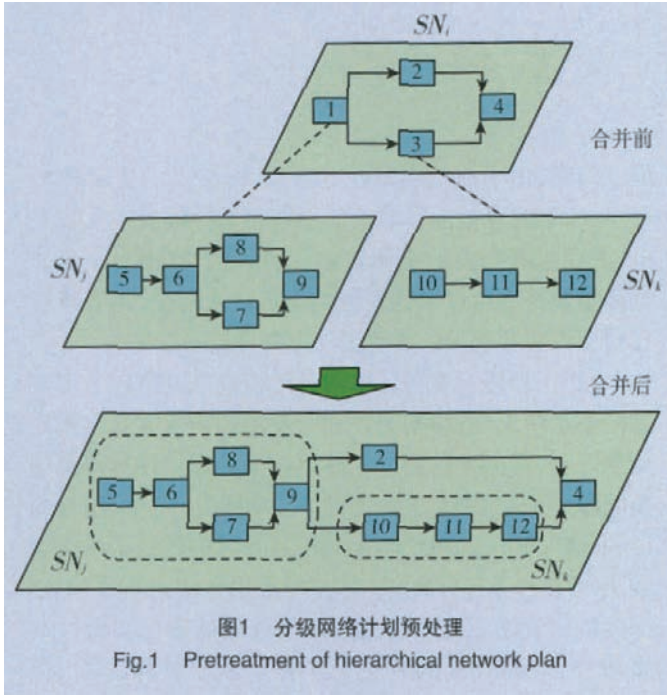
因此,本文在航空项目分级网络计划的基础上,结合具有工程应用意义的任务搭接关系约束,建立了一种资源均衡优化的蚁群-模拟退火算法,为航空项目管理者提供切实可行的资源优化配置方案,降低航空项目成本。

### 1 分级网络计划预处理

航空项目涉及的部门众多,由此产生的网络计划具有普遍的分级特征。通常,若直接对某个部门计划实施资源均衡优化操作,是无法获得全局最优解的。为获得资源均衡优化的全局最优解,首先需要对分级网络计划进行预处理,预处理的核心思想是合并分级网络计划,从而得到单一的、完整的综合项目计划。

设航空项目分级网络计划中包含的个体序列为  $SN = \{SN_1, SN_2, \dots, SN_n\}$ , 与其对应的任务序列集合为  $T = \{T_1, T_2, \dots, T_n\}$ 。其中,若  $SN_i$  为  $SN_j$  的父级个体网络,则说明  $SN_j$  是以  $SN_i$  中的某个任务  $t_m \in T_i$  分解产生的个

体网络计划。因此,在合并过程中可用  $SN_j$  的任务集合替换。在上述原理的基础上,管理者可从顶层网络计划开始,逐层采用任务节点分解产生的子个体网络计划任务集合替换父个体中的单个任务。最终,分级网络计划被合并为一个大型网络计划,如图 1 所示,可作为航空项目整体资源均衡优化的基础。



## 2 资源均衡优化问题描述

### 2.1 目标函数的构建

航空项目执行过程中涉及的资源种类与数量较多,同时考虑这些资源是比较困难的。但在实际管理中,管理者通常只对一种或少数几种关键资源比较关注,这种情况有助于降低优化方案求解的复杂度,但无法改变多资源优化问题的根本性质。为实现多资源向单资源优化问题的转化,本课题依据资源对航空项目的重要程度,给出资源指数的定义。

定义 1: 设任务  $j$  在时间段  $t$  内按资源重要程度计算出的统一资源需求量为  $\hat{r}_{tj}$ , 称为任务  $j$  的资源指数, 并有以下计算公式:

$$\hat{r}_{tj} = \sum_{k=1}^K Q_k r_{jk} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } 0 \leq Q_k \leq 1, k \in (1, 2, \dots, K), \text{ 且 } \sum_{k=1}^K Q_k = 1$$

$$\sum_{j \in W_t} r_{jk} \leq R_{tk}$$

其中,  $r_{jk}$  为任务  $j$  需要使用的第  $k$  种资源的数量;  $Q_k$  表示第  $k$  种资源的权重系数, 可由人工给出;  $K$  为航空项目中资源种类的数量;  $W_t$  为  $t$  时段正在执行的任务的

集合,  $R_{tk}$  表示  $t$  时间段内第  $k$  种资源的最大使用量。

在资源指数  $\hat{r}_{tj}$  定义的基础上, 使用资源需求量的均方差  $\delta^2$  作为资源均衡优化的目标函数, 可具体表示为:

$$\text{Min } \delta^2 = \sum_{t=1}^{T/n} (R_t - \bar{R})^2 \quad (2)$$

$$\text{s.t. } R_t = \sum_{j \in W_t} \hat{r}_{tj}$$

$$\bar{R} = \frac{T}{n} \sum_{t=1}^{T/n} R_t$$

其中,  $R_t$  表示  $t$  时段时航空项目对资源的需求总量,  $\bar{R}$  为整个航空项目工期内单位时段内平均资源需求量,  $T$  为航空项目总工期,  $n$  为计算最小时间段。对式(2)中的固定项实施化简, 目标函数可简化为:

$$\text{Min } \delta^2 = \sum_{t=1}^{T/n} R_t^2 \quad (3)$$

### 2.2 优化约束的添加

以网络计划为基础的资源均衡优化过程中, 任务紧前/紧后关系是常用的优化约束。然而, 对于航空项目来说, 这种约束无法精确定义不同任务间的交付关系。因此, 本课题引入搭接网络关系来拓展资源均衡过程中的任务关系约束, 用以满足更广泛的工程需求。

设任务  $i$  的持续时间为  $D(i)$ , 实际开始时间为  $S(i)$ , 最迟开始时间为  $LS(i)$ ,  $Z(ij)$  为搭接关系产生的任务  $i$  与  $j$  的总延时量 (表示任务  $i$  结束后多久任务  $j$  开始), 则传统的紧前/紧后关系拓展为 4 种, 分别为结束到开始关系 (Finish To Start, FTS), 开始到开始关系 (Start To Start, STS), 结束到结束关系 (Finish To Finish, FTF) 以及开始到结束关系 (Start To Finish, STF)。并建立搭接网络资源均衡优化的约束条件:

$$S(i) + D(i) + Z(ij) \leq S(j) \leq LS(j) \quad \forall i \in P_j \quad (4)$$

其中,  $P_j$  为任务  $j$  的前置任务集合。

## 3 资源均衡优化的蚁群 - 模拟退火算法

资源均衡优化问题解由一组任务的开始时间组成, 任务间的逻辑关系与工期都已确定, 但因网络计划中存在时差, 非关键任务的开始时间并未固定, 存在一个取值空间。因此, 非关键任务取不同开始时间产生的组合会对资源的使用情况产生不同影响, 资源均衡优化就是寻找资源最为均衡的一种影响。本课题利用蚁群算法 (Ant Colony Optimization, ACO) 的分布式、正反馈、并行搜索特性来解决上述问题<sup>[8]</sup>。但是, 由于分级网络计划合并产生的计划规模较大, 同时引入模拟退火算法

(Simulated Annealing, SA) 作为局部邻域搜索方法来进行进一步提高蚂蚁算法的搜索效率。上述思想既能够发挥 ACO 的优势, 又能借助 SA 对较差的邻域解根据概率接受的特点, 从而有效避免算法的局部收敛。

### 3.1 资源均衡优化问题的解空间构建

使用蚁群 - 模拟退火算法进行航空项目资源均衡优化, 首先要将问题转化为蚁群算法可解的问题。因蚁群算法起源于自然界中蚂蚁寻找食物的过程, 其常见的解空间一般为平面中两点间路径的集合。因此, 需将资源均衡优化问题的解集转换为类似的路径集。资源均衡优化问题解空间可表示为有向图  $G=(N,A)$ 。其中,  $N=\{TS_j(i)\}$  是图中结点集合, 每个结点  $TS$  代表航空项目中一个任务的一种状态, 既  $TS_j(i)$  代表任务  $i$  的第  $j$  种状态。  $A$  是图  $G$  中连接结点集  $N$  中各结点的有向弧集合。连接结点  $TS_j(i)$  和  $TS_k(i+1)$  的有向弧, 方向为从  $TS_j(i)$  到  $TS_k(i+1)$ 。人工蚂蚁在图  $G$  中搜索可行解, 其可选的结点集合为  $N^a\{TS_j(i)\}=\{TS_k(i+1) | k \in \text{allowed}\}$ , 是结点  $TS_j(i)$  的可行邻域集合, 其中  $k \in \text{allowed}$  表示任务  $i+1$  所有的状态。

同时, 计划中任务开始时间范围由最早开始时间和总时差共同决定, 任务的最早开始时间是确定的, 所以开始时间由所选择的时差确定。在时差选择时, 由于任务的时差是相互影响的, 如果一个任务使用了部分时差, 其相关任务的总时差可能会受到影响而减少。所以, 任务在时差选择后, 需要进行可行性检验, 以保证所构造的解中所有任务开始时间的合理性。为便于讨论, 建立如下公式:

$$TF(i) = LS(i) - ES(i), \quad (5)$$

$$TS_n(i) = \frac{TF(i)}{MTU} + 1. \quad (6)$$

式(5)为任务总时差计算公式, 式(6)为任务状态计算公式。其中,  $TS_n(i)$  表示任务  $i$  的非自由时差产生的任务可选状态数,  $MTU$  表示最小时间调整单位。在一般的航空项目管理过程中, 通常以“日”为最小时间单位进行任务时间调整。如  $TF(i)=2$ , 以“日”为最小时间调整单位, 则任务的由自由时差产生的可选状态有  $TS_n(i)=3$ 。

解空间构建过程为: 由式(5)计算出任务的总时差; 由式(6)计算出任务的可选状态, 得到任务  $i$  的可选状态集  $TS(i)=\{TS_1(i), TS_2(i), \dots, TS_m(i), m=TS_n(i)\}$  作为解的结点集合  $N=TS_j(i)$ ; 根据任务编号建立连接弧, 属于任务  $i$  的节点集合可记为  $TS(i)$ , 弧仅存在于任务  $i$  和任务  $i+1$  的节点间, 并且方向为从  $TS(i)$  指向  $TS(i+1)$ , 将得到的弧存入集合  $A$ , 最终获得如图 2 所示的解空间。

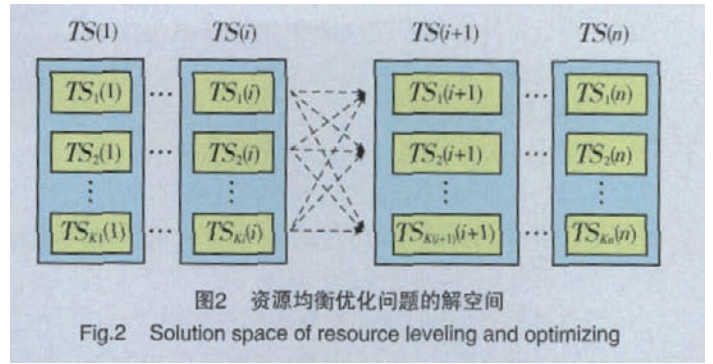


图2 资源均衡优化问题的解空间  
Fig.2 Solution space of resource leveling and optimizing

### 3.2 图搜索可见节点控制

使用算法在图  $G$  中进行搜索选择的过程中, 并不是所有的节点均可选, 符合可见规则的节点将放入 allowed 中, 具体过程如下:

步骤 1: 遍历已选择任务的所选状态, 构建已选任务的临时网络计划;

步骤 2: 将待选任务的所有状态代入临时网络计划, 产生多个待选临时网络计划;

步骤 3: 使用约束规则(4)对待选临时网络计划检查, 如果为可行状态则置于 allowed 中。

### 3.3 蚁群搜索的状态转移规则

在本文构建的解空间中, 蚂蚁从起始点出发通过一系列选择过程, 最终为所有任务选择一个起始状态, 构造出一个完整的资源均衡优化问题解。在该过程的第  $i$  步, 蚂蚁  $h$  位于节点  $TS(i)$  时, 可获得节点  $TS(i)$  的可行领域  $\text{allowed}_h(i+1)$ , 此时蚂蚁需要选择下一个可行领域节点, 即执行一次状态转移, 其规则如式(7)所示:

$$P_{i(i+1)}^{kl}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{i(i+1)}^{kl}(t)]^\alpha [\eta_{i(i+1)}^{kl}]^\beta}{\sum_{s \in \text{allowed}_h} [\tau_{i(i+1)}^{ks}(t)]^\alpha [\eta_{i(i+1)}^{ks}]^\beta}, & \text{若 } TS_{i(i+1)} \in \text{allowed}_h, \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

其中,  $\tau_{i(i+1)}^{kl}(t)$  为  $t$  时刻任务  $i$  的第  $k$  个状态节点到任务  $i+1$  的第  $l$  个状态节点之间有向弧上的信息素, 初始时刻  $\tau_{i(i+1)}^{kl}(0) = c$ ;  $\eta_{i(i+1)}^{kl}$  为启发函数, 表示在  $t$  时刻任务  $i$  的第  $k$  个状态节点到任务  $i+1$  的第  $l$  个状态节点之间的有向弧上的启发式信息;  $\alpha$  为信息启发因子,  $\beta$  为期望启发因子; 表示蚂蚁  $\text{allowed}_h$  下一步允许选择的可行领域。

通常在使用蚂蚁算法解决问题的过程中, 可利用问题所具有的特点设计启发函数, 以提高问题求解效率, 例如 TSP 问题, 可用两城市间距离构建启发函数。但由于资源均衡优化问题影响因素众多, 结点的选取对目标函数的影响难以预料, 难以使用类似的方法构建有效的启发函数, 故本文取  $\eta_{i(i+1)}^{kl} = 1$ 。启发信息的减少在一定

程度上扩大了算法搜索的全局性,有助于减小搜索过程快速陷入局部最优的可能性<sup>[9]</sup>。

### 3.4 模拟退火局部搜索

为快速获取最优解,模拟退火邻域搜索从一次蚂蚁搜索获得的最优解开始随机选择一个任务,并依据该解中其他任务的状态选择情况使用禁忌准则重新计算该任务的可选状态,从而产生另一个解,定义为 $x'$ 。

然后,根据前述的资源均衡优化目标函数,计算最优解和局部搜索解的目标函数值,分别为 $f(x)$ 和 $f(x')$ ,并以概率式(8)的方式接受新解 $x'$ 为当前最优解。

$$P(x \rightarrow x') = \begin{cases} 1 & , f(x) \leq f(x') \\ \exp\left(\frac{f(x) - f(x')}{T}\right) & , f(x) > f(x') \end{cases} \quad (8)$$

其中, $T$ 为温度控制参数,如式(9)所示:

$$T(t) = \frac{T_0}{1 + \eta t} \quad (9)$$

其中, $T_0$ 表示初始温度, $\eta$ 是一个调节参数,用于调整温度下降的速度。该方法符合热力学分子运动的特点,把寻优的重点放在了低温区,有利于提高局部邻域搜索过程的收敛性。

### 3.5 信息素更新规则

蚁群-模拟退火算法的信息素更新包含局部和全局更新2部分,局部更新是指人工蚁在构建问题解决的过程中,在构造路径的同时进行信息素更新;全局更新是指在每次循环后只对最优蚂蚁所走过的路径进行信息素更新。本课题使用式(10)、(11)对蚁群所经过的路径进行信息素的局部更新:

$$\Delta\tau_{i(i+1)}^{kl}(t) = \sum_{h=1}^m \Delta\tau_{i(i+1)}^{kl,h}(t) \quad (10)$$

$$\tau_{i(i+1)}^{kl}(t+1) = (1 - \rho_1)\tau_{i(i+1)}^{kl}(t) + \rho_1\Delta\tau_{i(i+1)}^{kl}(t), 0 < \rho_1 < 1 \quad (11)$$

其中, $\rho_1$ 为局部信息素挥发系数, $\Delta\tau_{i(i+1)}^{kl,h}(t)$ 表示第 $h$ 只蚂蚁在一次局部搜索后,经过状态节点 $TS_k(i)$ 到 $TS_l(i+1)$ 的有向弧所产生的信息素量增量。当蚁群的一次搜索结束后,可能有多只蚂蚁经过同一有向弧,所以有向弧信息素的更新需包括所有蚂蚁的信息素增量, $\Delta\tau_{i(i+1)}^{kl}(t)$ 表示蚁群的一次搜索后,状态节点 $TS_k(i)$ 到 $TS_l(i+1)$ 有向弧上局部更新后的信息素。

在基本蚁群系统中,只有每次迭代中产生最优解的蚂蚁才被允许进行全局信息素更新,其目的是为了使得搜索过程更具有指导性。引入模拟退火邻域搜索的蚁群算法中,对每次迭代的最优解使用模拟退火局部搜索,局部寻优后的结果作为最优解用于全局信息素的更新。本课题使用式(12)、(13)进行信息素的全局更新:

$$\tau_{i(i+1)}^{kl} = (1 - \rho_2)\tau_{i(i+1)}^{kl} + \rho_2\Delta\tau_{i(i+1)}^{kl}, 0 < \rho_2 < 1 \quad (12)$$

$$\Delta\tau_{i(i+1)}^{kl} = \begin{cases} 1/\delta_{\min}^2 & , TS_l(i+1) \in \text{全局最优解} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $\rho_2$ 表示全局信息素挥发系数; $\delta_{\min}^2$ 表示目标函数值, $\Delta\tau_{i(i+1)}^{kl}$ 表示 $TS_k(i)$ 到 $TS_l(i+1)$ 有向弧上的信息素增量。

### 3.6 算法求解步骤

在上述讨论的基础上,本课题建立如下的算法求解步骤:

步骤1:蚁群参数的初始化;

步骤2:生成 $m$ 只蚂蚁,随机放置于任务1的各个状态节点上;

步骤3:For 每只蚂蚁 do

(1)按 § 3.2 方法计算集合;

(2)按式(7)计算选择概率 $p_{i(i+1)}^{kl,h}$ ,并以概率转移

至下一状态节点。

End for

按公式(10)、(12)进行信息素局部更新;

步骤4:按式(2)计算目标函数,得出本次全局搜索中的最优解;

步骤5:设定初始温度 $T_0$ ,使用步骤4得到的最优解作为初始最优解 $S_0$ ,令 $t=0$ ;

步骤6:对当前最优解 $S_t$ 进行随机邻域交换,产生变异解 $S'$ ;

步骤7:以式(8)的概率接受新解 $S'$ 为当前最优解,存为当前最优解;

步骤8:抽样稳定次数是否小于稳定准则规定次数,如果满足则转步骤9,否则转向步骤6;

步骤9:检查退火终止条件,如果满足则转向步骤11,否则转向步骤10;

步骤10:按照降温公式(9)计算下次迭代温度,转向步骤6;

步骤11:信息素全局更新,按公式(10)、(12)更新全局信息 $\tau_{i(i+1)}^{kl}$ ;

步骤12:If 循环次数 $N_c$ 小于最大迭代次数

$N_c \leftarrow N_c + 1$ ;

转至步骤2;

End if

步骤13:结束搜索过程,输出最终结果。

## 4 实例分析

以图3所示航空项目网络计划为例展开分析,其时间参数如表1所示,资源占用量如表2所示。假定利用

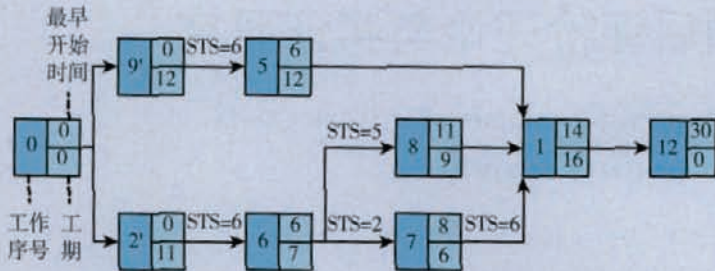


图3 实例任务网络计划图

Fig.3 Network planning diagram of task instance

表1 任务时间参数

序号	ES	LS	优化后开始时间	工期
1	14	14	14	16
2'	0	0	0	11
5	6	11	11	12
6	6	6	6	7
7	8	8	8	6
8	11	19	19	9
9'	0	6	0	12

表2 网络计划中各任务的资源使用情况

序号	名称	工期内的资源 $r_1, r_2, r_3$ 占用情况
1	s <sub>8</sub> 装配	
2'	s <sub>1</sub> 制造	
5	s <sub>2</sub> 制造	
6	s <sub>3</sub> 制造	
7	s <sub>4</sub> 制造	
8	s <sub>5</sub> 制造	
9'	s <sub>6</sub> 制造	

经典加权法对资源归一化处理得到 3 种资源的权重分别为: 0.3、0.3、0.4, 令所有任务的实际开始时间等于该任务的最早开始时间, 此时资源方差为  $\delta^2=10.038$ 。

利用本文设计的蚁群-模拟退火算法对该实例进行计算, 设定具体参数为  $\alpha=4$ 、 $\rho_1=0.1$ 、 $\rho_2=0.1$ 、 $T_0=50$ 、 $\eta=0.98$ , 经搜索得到的最优方案所对应的各项任务优化开始时间如表 1 所示。此时资源方差为:  $\delta^2=3.9061$ 。图 4 表示了资源均衡前后的资源使用分布情况, 可看出均衡前的资源使用峰值在第 10 个工作日前后出现, 均衡

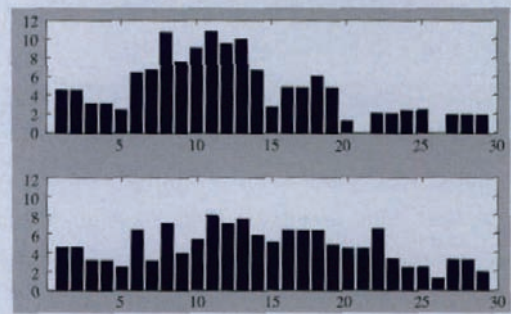


图4 资源均衡前后对比图

Fig.4 Comparison diagram before and after resource leveling and optimizing

后该资源使用峰值被有效消减。

由以上数据可得出, 使用本文所述方法进行资源均衡优化后, 各工作日的总资源使用量变化减小, 航空项目资源使用分布状况得到较大改善。

参考文献

- [1] Gordon J, Tulip A. Resource scheduling. International Journal of Project Management, 1997, 15(6):359-370.
- [2] Brucker P, Drexel A. Resource-constrained project scheduling notation, classification, models and methods. European Journal of Operational Research, 1999, 112(1):3-41.
- [3] 褚春超, 郑丕涛. 网络计划资源均衡模型的改进及其应用. 天津大学学报. 2006,39(2): 250-255.
- [4] 周远成. 网络计划优化与资源平衡的智能交互模式的研究与应用[D]. 华北电力大学, 2004.
- [5] 白思俊. 多资源约束的网络计划的启发式优化方法. 系统工程理论与实践, 1995,(7):42-47.
- [6] 单涓源, 邓莎. 一种求解项目调度中资源均衡问题的粒子群算法. 科学技术与工程, 2007, 7(22):5 805-5 809.
- [7] 郭云涛, 白思俊, 徐济超, 等. 基于粒子群算法的资源均衡. 系统工程, 2008,26(4):99-103.
- [8] 骆刚, 刘尔烈, 王健. 遗传算法在网络计划资源优化中的应用. 天津大学学报, 2004,37(2):179-183.
- [9] Marco Dorigo. Ant colony optimization. MIT Press, 2004.
- [10] Stutzle T, Hoos H H. MAX-MIN ant systems. Future Generation Computer Systems, 2000, 16: 889-914.

(责编 淡蓝)