

doi: 10.7690/bgzdh.2019.07.016

基于免疫算法的装备维修人员调配方法

张宏远¹, 王志杰², 胡紫城^{2,3}, 张剑波⁴(1. 陆军防化学院指挥系, 北京 102205; 2. 陆军防化学院研究生队, 北京 102205;
3. 火箭军参谋部, 北京 100085; 4. 中国人民解放军 66325 部队保障部, 北京 102200)

摘要: 为提高维修人员维修工作安排合理性、时效性与人员作业量的均衡性, 提出一种基于免疫算法的装备维修人员调配方法。对装备大修过程中维修人员调配问题进行分析, 利用矩阵寻址和均衡度评判, 采用改进免疫算法抗体的生成方式和评价标准, 构建装备维修人员的调配优化方法, 利用 Matlab 编程计算调配结果, 并通过 Flexsim 软件仿真进行验证。仿真结果表明, 该方法对装备维修效率的提高和人员作业量的均衡分配具有较好效果。

关键词: 维修人员调配; 免疫算法; Flexsim 仿真

中图分类号: TJ07 **文献标志码:** A

Deployment Method of Equipment Maintenance Personnel Based on Immune Algorithm

Zhang Hongyuan¹, Wang Zhijie², Hu Zicheng^{2,3}, Zhang Jianbo⁴(1. Department of Command, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China;
2. Brigade of Postgraduate, Institute of NBC Defense, Beijing 102205, China;
3. Staff Department of Rocket Force, Beijing 100085, China;
4. Security Department, No. 66325 Unit of PLA, Beijing 102200, China)

Abstract: In order to improve the rationality, timeliness, and balance of the workload of maintenance personnel, an equipment maintenance personnel deployment method based on immune algorithm is proposed. Analyze the maintenance personnel deployment during equipment overhaul; optimization method for equipment maintenance personnel is constructed by using matrix addressing and equalization evaluation and improving immune algorithm antibody generation methods and evaluation criteria. The results of the deployment is calculated by using Matlab programming and verified by Flexsim software simulation. The simulation results show that the method has better effect on the improvement of equipment maintenance efficiency and the balanced distribution of personnel workload.

Keywords: deployment of maintenance personnel; immune algorithm; Flexsim simulation

0 引言

对装备进行大修^[1]时, 通常需要将故障装备绝大部分部件甚至全部部件进行检测维修。装备的大修涉及维修工序数量多, 人员需求量大, 能否根据已有的工序合理安排维修人员, 将直接影响维修效率。有的研究采用多规则约束的调配方法, 实现多规则与多目标相对应^[2]; 有的研究人员与任务、项目或资源匹配的调配方法, 以优化人员的调配^[3-5]; 有的研究结合人员的柔性度分析, 利用智能算法解决人员调配问题^[6-7]。

调查发现: 各类有关人员调配的研究大多为 job-shop 类型^[8], 而对拥有多工序、多约束条件和固定工艺流程的单个复杂装备维修过程的维修人员调配问题研究甚少; 因此, 笔者以单个大型装备维修过程完成时间最短, 兼顾维修人员工作量分配较

均衡为目标, 构建基于矩阵寻址和均衡度评判的免疫算法来优化装备维修人员的调配。首先利用矩阵寻址方式随机生成多种基于维修工序的维修人员调配情况, 作为免疫算法的抗体群输入; 然后经免疫迭代, 在保证维修时间最短的情况下, 通过评价各维修人员作业时间长短差距, 选择工作量较为均衡的调配情况作为最终优化结果。

1 装备大修过程中维修人员调配需求分析

从维修工序的工种、优先级和维修人员专业、技术等级等方面分析装备维修过程特点, 可以确定维修人员的调配需求。

在组织装备大修时, 自装备入场检查与清洗到维修完毕, 期间会经历拆卸、检测、修理等几十甚至几百道维修工序。针对维修人员的调配, 需对各工序进行工种分类, 将有利于维修资源的准备, 提

收稿日期: 2019-03-22; 修回日期: 2019-04-18

作者简介: 张宏远(1972—), 男, 黑龙江人, 博士, 教授, 从事装备保障信息化、智能化、装备仿真研究。E-mail: zhybeijing@sina.com。

高维修专业性和效率。此外，装备维修过程有严格的工艺流程规定，工序间存在着维修优先级划分。

维修人员依据维修专业可分机械、电子等。维修人员专业划分要求与维修工序的工种划分相适应。维修人员还有技术等级划分，如初级、中级、高级等，不同技术等级的人员对应同一道维修工序的维修工时不同。

2 维修人员调配问题数学模型

2.1 维修人员调配问题描述

笔者研究的问题是在基于已有工序的工种和优先级，维修人员数量、专业和技术等级条件下，如何调配维修人员，实现单个装备维修过程完成时间最短且人员工作量分配较均衡。

2.2 维修过程条件限定

假设一个维修组有 m 名维修人员，装备维修工序数量为 n ，其他如维修工具、维修消耗器材等维修资源充足。对维修人员的调配进行以下条件限定：

- 1) 同一时刻一名维修人员只能维修一道工序，且每道工序只需一名人员维修；
- 2) 维修人员在维修某道工序过程中不能中断，必须等该工序维修完毕才能维修下一道工序；
- 3) 各工序可以选择对应专业的任何一名空闲的维修人员进行维修。

2.3 维修人员调配情况评判标准

人员调配情况通过装备维修过程完成时间长短和维修人员工作量均衡度来评判。装备维修过程完成时间为整个装备第一道工序开始到最后道工序结束所经历的时间。维修人员工作量的均衡度以各专业人员在整个维修过程中作业时间的长短差异来表示。

分别将 n 道维修工序和 m 名维修人员进行编号， $o=\{1,2,\dots,i,\dots,n\}$ ， $p=\{1,2,\dots,k,\dots,m\}$ 。维修过程耗时包括各工序维修耗时 t_{oi} 与工序间等待耗时 $t_{l_{i,j}}$ 。维修过程中要尽量使各工序维修耗时与等待耗时的和 f 最短，具体表达式如下：

$$f = t_o + t_l,$$

$$t_{oi} = t_{e,i} - t_{s,i}, 1 \leq i \leq n,$$

$$t_{l_{i,j}} = t_{s,j} - t_{e,i}, 1 \leq i, j \leq n. \quad (1)$$

其中 $t_{s,i}$ 、 $t_{s,j}$ 分别为工序 i 、 j 维修开始时间， $t_{e,i}$ 为工序 i 维修结束时间， m, n, i, j, k 为自然数。

各维修人员之间的作业时间标准差可以反映人员工作量的离散程度：标准差值小，说明人员工作量离散程度小，即均衡度高。在保证装备维修时间最短的条件下，要尽量选择维修人员作业时间标准差最小的调配情况。作业时间标准差公式如下：

$$\text{std} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (T_k - \bar{T})^2}. \quad (2)$$

其中： T_k 为 k 号人员作业时间； \bar{T} 为人员平均作业时间。

3 维修人员调配方法构建

如图 1 所示，笔者基于免疫算法，构建了装备大修过程中维修人员的调配方法。该方法通过 2 部分实现：

- 1) 矩阵寻址生成可行解。通过矩阵寻址方式随机生成多种可行的基于维修工序种类对应的维修人员调配情况，作为免疫算法初始抗体群输入。
- 2) 基于均衡度评判的免疫迭代搜寻最优解。初始抗体群经算法多次迭代，得到一种或多种维修过程完成时间最短的维修人员调配情况，再通过均衡度评判，从中选择人员工作量最均衡的一种，作为装备维修过程中维修人员调配的最终优化结果。

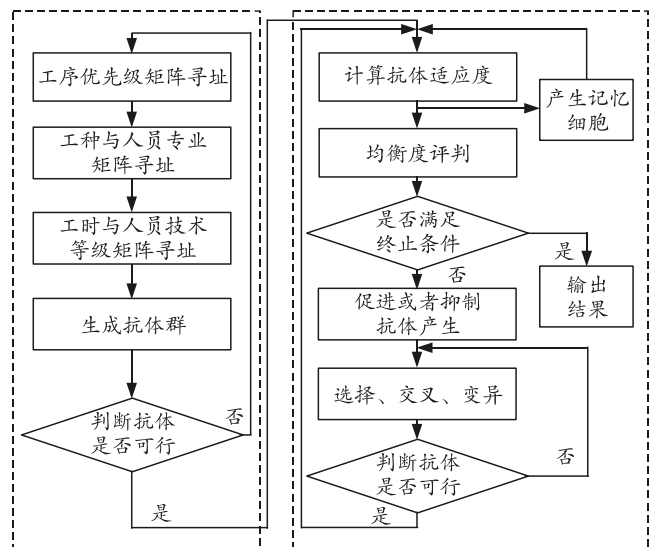


图 1 装备维修人员调配方法流程

3.1 矩阵寻址生成可行解

3.1.1 编码方式

笔者采用实数编码方式^[9]，以 1 维数组作为抗体的编码形式，表达式如下：

$$c = [o_1, o_2, \dots, o_i, \dots, o_n; p_1, p_2, \dots, p_i, \dots, p_n]. \quad (3)$$

式中， c 数组元素个数为 $2n$ ，前 n 个元素为不重复

的维修工序编号，刚好将数量为 n 的维修工序全部进行编码。后 n 个元素为可重复的维修人员编号，从 m 个维修人员编号中进行选择。编码含义为 p_i 号维修人员维修 o_i 号工序 ($1 \leq i \leq n$)。

3.1.2 矩阵寻址

将约束条件写入矩阵，按条件地址对元素进行搜索选择，以约束抗体的生成。具体实现方式如表 1 所示。

表 1 约束矩阵

行地址	列地址			
	列条件 1	列条件 1	...	列条件 n
行条件 1	元素(1,1)	元素(1,2)	...	元素(1, n)
行条件 2	元素(2,1)	元素(2,2)	...	元素(2, n)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
行条件 n	元素(n ,1)	元素(n ,2)	...	元素(n , n)

3.1.2.1 工序优先级矩阵寻址

对抗体工序部分进行编码，如编码形式 $[o_1, o_2, x_3, x_4, \dots, x_n; x_{n+1}, x_{n+2}, x_{n+3}, x_{n+4}, \dots, x_{2n}]$ (n 为自然数)， o 表示已编码工序，工序部分的 x 表示未编码工序，将与已编码工序相邻的一个未编码工序 x 记作后工序编码，将与后工序编码相邻的已编码工序记作本工序编码。在考虑后工序编码时，需要按工序优先级顺序在本工序编号对应的紧后工序编号中进行选择，即紧后工序寻址方式。随机选择一个紧后工序编号作为新的本工序编号，并判断该本工序编号对应的前工序是否都已经编码完成，即前工序寻址方式。若前工序编号都已编码完成，则该工序编号可选为新的本工序编号；否，则选择本工序编号中的紧后工序编号的其他部分作为新的本工序编号，并将未选中的部分作为后续编码备选编号。

3.1.2.2 维修工序的工种与人员专业矩阵寻址

对抗体人员部分进行编码时，人员专业类型需与工序的工种一一对应，即对某一工序安排人员编码时，需选择维修专业与该工序的工种相对应的人员编号。

3.1.2.3 工时与人员技术等级矩阵寻址

不同技术等级的维修人员对应着同一道维修工序的维修工时不同，计算维修过程时间时必须严格按照工序与人员技术等级对应情况选择工时。

3.1.2.4 判断抗体是否可行

首先依次判断抗体每个工序编码的排列是否符合优先级条件，再判断各工序编码对应的人员编

码所属专业是否与各工序的工种一一对应。若 2 个条件都满足，则抗体可行；若不满足，则重新生成抗体再判断，直到生成一定数量的可行抗体，作为下一步免疫算法的抗体群输入。

3.2 基于均衡度评判的免疫迭代搜寻最优解

将初始抗体群进行免疫迭代，用以搜寻最优的装备维修人员调配结果。迭代过程中根据本方法的要求提出了进行抗体的多样性评价^[10]、免疫操作和均衡度评判 3 大内容。

3.2.1 抗体的多样性评价步骤

1) 计算抗体与抗原亲和力。笔者求解的目标函数即抗体的适应度，是装备维修过程完成时间 F ，用目标函数的倒数 $\frac{1}{F}$ 表示抗体与抗原亲和力。

2) 计算抗体与抗体间亲和力。笔者考虑到抗体编码具有一定的优先顺序，先确定一个亲和度判定阈值 R ，2 个个体对应位置相同元素的个数占个体元素数目的比例如果大于 R 值，则表示 2 个个体近似相同，否则不同。亲和力计算公式为

$$S_{u,v} = \frac{K_{u,v}}{L} \quad (4)$$

其中： $K_{u,v}$ 为抗体 u 与抗体 v 对应位置元素相同的个数； L 为抗体编码长度。

3) 计算抗体浓度。抗体浓度表示群体中相似抗体所占得比例：

$$C = \frac{1}{G} \sum S_{u,v} \quad (5)$$

其中： G 为抗体总数； $S_{u,v} = \begin{cases} 1, S_{u,v} > T \\ 0, \text{其他} \end{cases}$ ， T 为激励度阈值。

4) 计算期望繁殖概率。个体通过一定的期望繁殖概率进行选择繁殖，概率的计算公式如下：

$$P = \alpha \frac{1/F}{\sum 1/F} + (1-\alpha) \frac{C}{\sum C} \quad (6)$$

其中 α 为多样性评价参数。

3.2.2 免疫操作步骤

免疫操作实现个体往最优方向进化，包括选择、交叉与变异 3 个步骤。

1) 选择操作。轮盘赌选择，根据式(6)计算出群体中每个个体概率作为选择比例，复制选择出的个体作为父代个体。

2) 交叉操作。如图 2 所示，为确保交叉完毕生成的子代解为可行解，笔者采用单点交叉方式。在个体工序编码部分随机选择一个交叉点 i ，对换 2 个个体交叉点前后相同工序编号对应的人员编号。

基因位	1	2	...	i	...	n	$n+1$	$n+2$...	$n+i$...	$2n$
父代1	o1	o2	...	o3	...	o4	p1	p2	...	p3	...	p5
父代2	o1	o2	...	o3	...	o5	p2	p1	...	p4	...	p6
子代1	o1	o2	...	o3	...	o4	p2	p1	...	p3	...	p5
子代2	o1	o2	...	o3	...	o5	p1	p2	...	p4	...	p6

图 2 2 个个体单点交叉过程

3) 变异操作。如图 3 所示，笔者对选中的变异个体随机选择变异点 i ，以将其对应人员编码替换为其他同专业人员编号的方式进行变异。

基因位	1	2	...	i	...	n	$n+1$	$n+2$...	$n+i$...	$2n$
父代	o1	o2	...	o3	...	o4	p1	p2	...	p3	...	p5
子代	o1	o2	...	o3	...	o5	p1	p2	...	p4	...	p5

图 3 个体变异过程

4) 抗体合理性判断。对通过选择、交叉、变异生成的新抗体群的合理性进行判断，判断方式同 3.1.2.4 节内容所述。

3.2.3 均衡度评判

为满足实际维修要求，希望在保证维修过程时间最短情况下尽量做到维修人员工作量分配均衡。笔者在免疫算法迭代过程中，通过选择在同一适应度 F 下，拥有最小标准差的个体作为人员工作量分配最均衡的调配情况。相应伪代码如下：

```

For(ii=1:迭代次数)
{
    计算适应度，并选出适应度最优个体；
    计算最优个体中人员作业时间标准差 std；
    If (本次迭代最优适应度小于前一次迭代最优适应度)
        取本次迭代个体作为最优个体；
    Else

```

取该适应度下人员作业时间标准差 std 最小的一个个体为最优个体；
}

4 实例分析

按照以上方法，对某装备的大修过程中维修人员调配问题进行研究，利用 Matlab 编程计算出调配结果，并通过 Flexsim 软件仿真，验证了结果的可行性。

4.1 实例描述

某修理机构现有 6 名维修人员在位，其中人员专业分 A、B、C 3 种，每种专业的人员数量各为 2 名，每种专业人员分别包含技术等级为初级和中级各 1 名。现需对某装备进行大修，基于该装备的大修工序对该 6 名维修人员进行调配，使装备维修完成时间最短。在保证装备维修完成时间最短条件下，尽量使人员工作量分配较均衡。

该装备的大修流程有 50 道维修工序，工序优先级划分如图 4 所示。

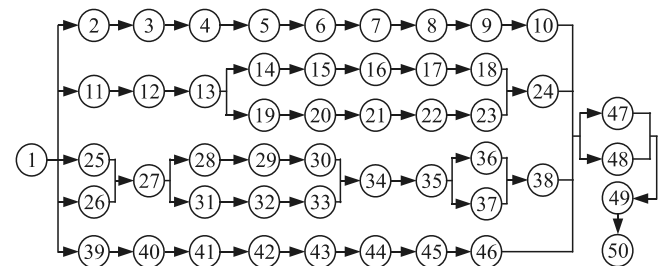


图 4 某装备大修工序优先级

工序包含 A、B、C 3 类工种，具体划分如表 2 所示。

表 2 装备大修工序的工种分类

工种类型	工序编号
A 类	1 2 3 6 7 10 11 12 16 17 21 22 25 26 29 30 32 33 41 42 43 47
B 类	4 5 8 9 14 15 19 20 28 31 39 40 44 45 48
C 类	13 18 23 24 27 34 35 36 37 38 46 49 50

为方便计算结果分析，笔者将拥有初级等级的维修人员对应工序的维修完成时间，作为工序的基础工时，记为 t ，将拥有中级等级的人员维修工时设定为 $80\%t$ 。工序基础工时如表 3 所示。

表 3 工序基础维修工时

编号	1	2	3	45	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
工时	30	10	50	60	120	96	60	144	60	240	60	60	60	60	60	120	120	120	240	90	90	90	60	90	30
编号	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
工时	30	60	40	60	40	40	60	40	90	30	20	20	150	40	40	60	30	30	40	60	50	20	20	30	10

min

4.2 装备维修过程中维修人员的调配结果求解

采用 Flexsim 仿真方法, 满足调配约束条件得出一种维修人员调配结果作为优化前结果; 再根据文中的优化方法, 通过 Matlab 计算得出一种较优的调配结果作为优化结果, 然后将两者对比分析。

4.2.1 采用 Flexsim 仿真方法生成的调配结果

利用 Flexsim 随机生成的一种满足调配约束条件的维修人员调配结果。Flexsim 软件提供 3 维图形化建模环境, 可以直接建立 3 维仿真模型, 支持离散系统和连续流体系统建模^[11]。利用 Flexsim 构建如图 5 所示模型, 以模拟维修人员调配情况。

处理器 Jm1~Jm6 代表各维修人员, 维修人员信息如表 4 所示。将待修区上小方块设置不同标签, 代表各维修人员对应的维修工序。从第一个小方块进入处理器开始到最后一个小方块离开处理器结束, 为装备整个维修过程。

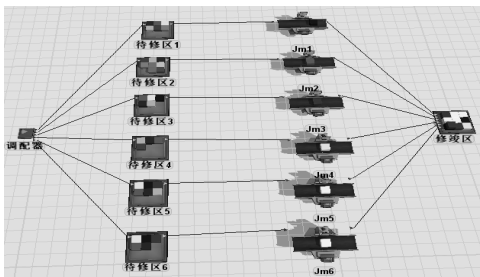


图 5 装备维修人员调配的 Flexsim 模型

表 4 维修人员信息表

人员编号	Jm1	Jm2	Jm3	Jm4	Jm5	Jm6
专业	A 类	A 类	B 类	B 类	C 类	C 类
等级	初级	中级	初级	中级	初级	中级

如图 6 所示, 将 Flexsim 模型按维修人员调配约束条件进行设定并仿真运行, 生成一种可行的维修人员调配结果。其维修过程完成时间为 2 098 min。

图 6 含义为: 第一象限各小方块内数字为维修工序编号, 对应其纵坐标的维修人员, 例如调配 1 号维修人员维修 2、10、11、17、22、25、32、42、43 号工序。

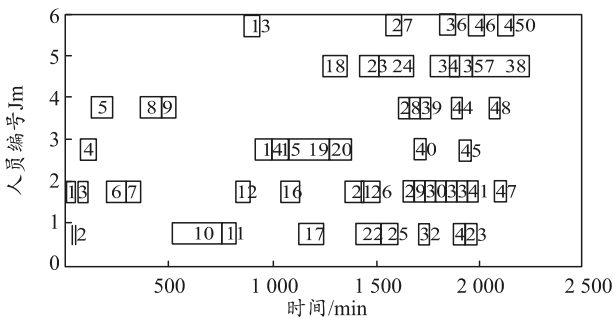


图 6 Flexsim 生成的装备维修人员调配情况甘特图

4.2.2 采用文中优化方法生成的调配结果

根据文中优化方法, 利用 Matlab 进行试验求解。免疫算法收敛过程如图 7 所示。在免疫迭代过程中, 随着迭代次数增加, 最优适应度(维修过程最短时间)随之减小, 最终趋于平稳。在最优适应度下, 选择维修人员作业时间标准差值最小的一种调配情况作为一次试验的最优结果。

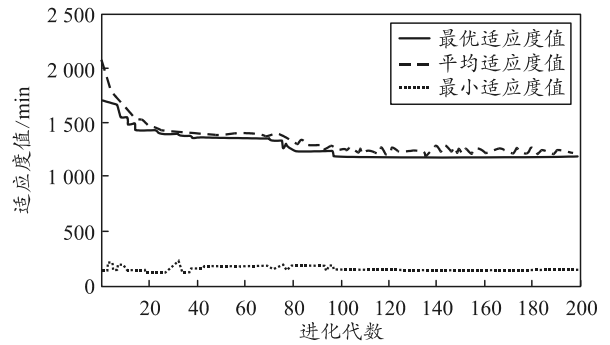


图 7 免疫算法收敛曲线

笔者设置迭代次数为 200 次, 经 Matlab 多次试验, 得出一组装备维修人员的调配情况, 对比列出一种较优的情况, 作为优化后维修人员调配结果如图 8 所示, 其维修过程完成时间为 1 184 min。

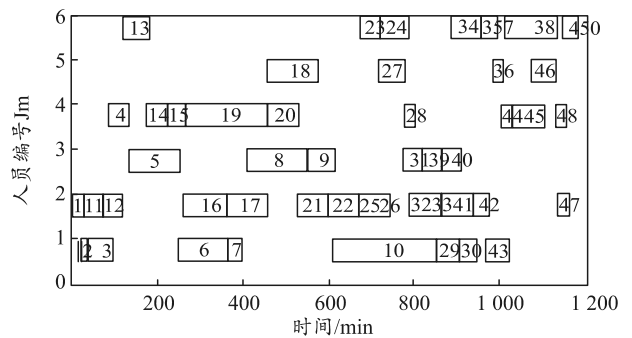


图 8 优化后的装备维修人员调配情况甘特图

4.3 采用文中优化方法后维修人员调配结果对比

4.3.1 装备整个维修过程完成时间对比

采用 Flexsim 仿真方法和文中方法优化生成的 2 种维修人员调配结果中, 装备维修过程完成时间分别为 2 098 min 和 1 184 min。可以看出: 经文中方法优化后, 装备维修过程时间缩短了 43.57%, 显著提高了装备维修效率。

4.3.2 维修人员作业情况对比

装备维修时间用维修人员作业时间表示。装备维修过程完成时间与维修人员作业时间呈正相关, 也与维修人员休息时间呈正相关。对比优化前后维修人员作业情况可知, 文中方法提高了装备维修过程效率。

4.3.2.1 优化后维修人员作业时间缩短

利用 Flexsim 统计工具统计上文优化前后 2 种情况下各维修人员的作业时间如表 5 所示。可以看出：文中方法能使等级较高的维修人员担任较多的维修工时，使得维修人员总的作业时间缩短。

通过式(2)计算得出优化前后维修人员工作量标准差分别为 181.46 和 146.60 min，优化后的维修人员工作量标准差小，工作量较均衡。

表 5 优化前后各维修人员作业时间 min

专业 人员编号 等级	A 类		B 类		C 类		合计
	Jm1 初级	Jm2 中级	Jm3 初级	Jm4 中级	Jm5 初级	Jm6 中级	
优化前	670	604.8	610	403.2	560	184	3 032
优化后	586	672.0	444	536.0	250	432	2 920
优化后- 优化前	-84	67.2	-166	132.8	-310	248	-114

4.3.2.2 优化后维修人员休息时间缩短

笔者利用 Flexsim 软件提供的 Dashboards 工具，分析优化前后 2 种情况的维修人员作息时间如图 9 所示。可以看出：优化后的结果中，维修人员作业时间比例增加，维修人员休息时间缩短。

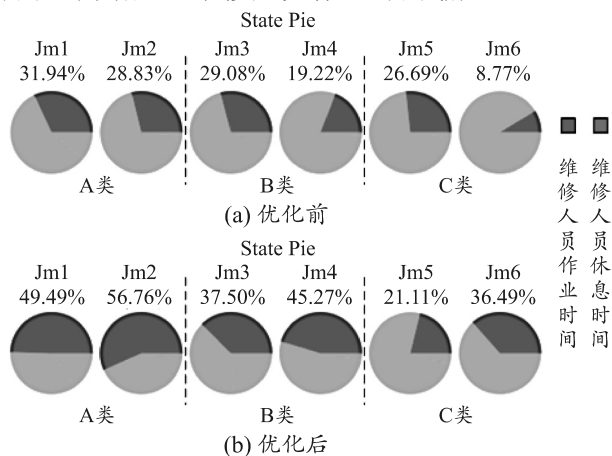


图 9 优化前后各维修人员作业时间占维修过程时间比例

对比上文优化前后的维修人员调配结果可知：笔者提出的方法缩短了装备维修过程中维修人员的作业时间和休息时间，从而有效缩短了装备整个维

修过程时间，且能使维修人员工作量分配较均衡。

5 结论

笔者利用免疫算法计算，采用矩阵寻址方式生成可行抗体，可以弥补实数编码方式在工序数量多的情况下生成可行抗体困难的缺点。研究结果表明：通过构建基于矩阵寻址和均衡度评判的免疫算法来优化装备维修人员的调配，可以显著提高装备维修过程效率，且维修人员工作量分配较均衡，但算法的收敛速度以及针对维修人员工作量分配的全局收敛性还有待提高，有待于后期进行改进。

参考文献：

- [1] 张乐伟, 赵亮清, 陈桂明, 等. 基于质量价值流的装备大修精细化管理技术[J]. 兵工自动化, 2013, 32(4): 1-5.
- [2] 曾强, 杨育, 王小磊. 基于多规则设备分配及工序排序的 FJSP 多目标集成优化方法[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(5): 980-989.
- [3] 李英姿, 张晓冬, 张硕. 基于人员-任务-资源匹配度的产品设计项目静态调度[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(3): 74-80.
- [4] 廖婷婷, 徐哲, 李明. 软件开发项目多技能人力资源均衡调度模型[J]. 工业工程, 2015, 18(03): 69-74.
- [5] 谷玉波, 贾云献. 基于维修任务的维修人员预测模型[J]. 火力与指挥控制, 2013, 38(11): 107-110.
- [6] 林仁, 周国华, 夏方礼. 人员柔性度对作业车间调度的影响研究[J]. 计算机应用研究, 2016, 33(10): 3017-3020, 3025.
- [7] 张维存, 赵晓巧. 柔性作业车间人员配置及作业排序问题研究[J/OL]. 计算机应用研究, 2018(12): 1-9.
- [8] BRUCKER P, SCHLIE R. Job-shop scheduling with multi-purpose machines[J]. Computing, 1990, 45(4): 369-375.
- [9] HERRERA F, LOZANO M. Gradual distributed real-coded genetic algorithms[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2000, 4(1): 43-63.
- [10] 史峰, 王辉, 郁磊. MATLAB 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 120.
- [11] 秦天保, 周向阳. 实用系统仿真建模与分析——使用 Flexsim[M]. 北京: 清华大学出版社, 2016: 5.