

doi: 10.7690/bgzd.2022.07.015

## 基于改进 ABC 的复杂装备并行拆卸研究

黄少罗, 姚 恺, 梁庆海

(陆军工程大学石家庄校区军政基础系, 石家庄 050003)

**摘要:** 为解决复杂装备拆卸过程中生成并行拆卸序列的问题, 采用“模型+算法”的拆卸研究思想, 分析装备部件的装配关系。根据零件爆炸图模型依次形成并导出拆卸混合图模型和拆卸关系矩阵, 引入全域搜索因子改进人工蜂群算法 (artificial bee colony algorithm, ABC), 应用计算机程序辅助规划并得到了并行拆卸序列。实验结果表明, 该方法对复杂装备不同部件拆卸序列研究具有一定的借鉴价值。

**关键词:** 战场维修; 并行拆卸序列; 混合关系图; 蜂群算法

**中图分类号:** TJ07 **文献标志码:** A

## Research on Parallel Disassembly of Complex Equipment Based on Improved ABC

Huang Shaoluo, Yao Kai, Liang Qinghai

(Department of Military and Political Foundation, Shijiazhuang Campus,  
Army Engineering University of PLA, Shijiazhuang 050003, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of generating parallel disassembly sequence in the process of complex equipment disassembly, the disassembly research idea of “model + algorithm” is used to analyze the assembly relationship of equipment components. A disassembly hybrid graph model and a disassembly relation matrix are formed and derived in turn according to the part explosion graph model, and a global search factor is introduced to improve the artificial bee colony algorithm (ABC), and a computer program is used to assist the planning and obtain a parallel disassembly sequence. The experimental results show that the method has a certain reference value for the study of disassembly sequence of different parts of complex equipment.

**Keywords:** battlefield maintenance; parallel disassembly sequence; hybrid relation graph; bee colony algorithm

### 0 引言

随着我国国际军事地位的提高, 武器装备的复杂度、信息度、集成度也在不断提升, 给维修工作带来了新的挑战和机遇。复杂装备维修背景的调整, 迫使相关维修研究向着更贴近实战的方向发展。拆卸与装配是维修的基础, 关键问题是精准化指向损坏零件的拆卸序列生成与执行; 因此, 复杂装备拆卸序列研究始终是装备维修工作的热点话题<sup>[1]</sup>。

基层装备维修采用定点式维修保障或伴随式维修保障的方式, 营区环境下依托修理车间或露天空旷地进行维修作业, 野战环境下依托修理帐篷或简易修理阵地进行维修作业, 通常可根据训练任务的不同、故障部件的尺寸合理选择维修场地。维修作业过程实际需要多名维修人员共同协作完成, 在维修作业相互不影响的情况下, 满足并行作业的假设条件。

装备拆卸序列研究的基本思路是“提炼模型+

优化算法”, 常用的装备模型包括有向图、无向图、混合图和层次结构树, 拆卸算法为基于人工蚁群、人工蜂群、模拟退火等智能算法的优化模型。笔者以某型复杂装备底盘系统中的鼓式制动器为研究对象, 采用混合图对部件进行分解建模, 再利用改进的 ABC 算法对其进行规划求解, 从而得到目标设备的优化拆卸序列。

### 1 建立拆卸混合图模型

#### 1.1 拆卸的界定

按照不同的分类标准, 拆卸能够被划分为不同类型。考虑基层武器装备维修实际, 通常的分类标准包括拆卸目的、拆卸过程是否具有破坏性和同步作业数量<sup>[2-3]</sup>。

根据不同的拆卸目的, 拆卸可分为完全拆卸、部分拆卸和目标拆卸。完全拆卸用于科研、教学, 指将装备对象拆卸至不可拆卸零件的过程, 拆卸工

收稿日期: 2022-03-13; 修回日期: 2022-04-28

作者简介: 黄少罗(1965—), 男, 湖南人, 博士, 教授, 从事装备保障与应用研究。E-mail: 826652584@qq.com。

作量大、难度高。部分拆卸用于产品、零件再回收，指将具有回收价值的零件从装备主体拆卸剥离的过程，拆卸目标可以是单个零件，也可是多个零件的组合。目标拆卸应用于装备维修作业中，通常将故障零部件作为拆卸目标，通过解除目标零件周围的约束关系，最终将其拆卸。

根据拆卸过程是否具有破坏性，拆卸可分为破坏性拆卸和非破坏性拆卸。在拆卸过程中破坏性拆卸会对一个或多个装备零部件造成不可逆的损伤，损伤单元结构被完全破坏，在装配过程中不能被逆向重复利用，会造成装备维修成本的提高。非破坏性拆卸应用较多，拆卸过程不会对任何零部件造成损伤，所有单元结构完整、性能良好。

根据同步作业数量，拆卸也可分为串行拆卸和并行拆卸。串行拆卸指按照拆卸顺序逐个拆卸零件的过程，每次只能对一个零件进行拆卸。并行拆卸可同时对 2 个或多个零件进行拆卸。在实际拆卸过程中，可根据目标装备零部件的结构模型及零件间的约束关系，合理选择顺序拆卸或并行拆卸。

### 1.2 混合图模型

拆卸混合图是装备拆卸信息的载体，由设备零部件及相互之间的约束关系组成，包括有向图和无向图<sup>[4]</sup>。定义零件为混合图的顶点，则混合图模型可表示为：

$$G=(V, E, DE)。$$

式中：混合图  $G$  由集合  $V$ 、 $E$ 、 $DE$  组成，集合  $V$  为目标拆卸零件的非空集合，所含元素为混合图的顶点；集合  $E$  为零件间无向约束关系的有穷集合，所含元素为混合图的无向边；集合  $DE$  为零件间有向约束关系的有穷集合，所含元素为混合图的有向边。如图 1 所示，就包含的拆卸信息而言，有向约束关系比无向约束信息更加精确。笔者以文献[5]中的手电筒混合图进行说明。

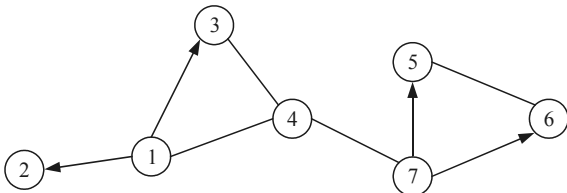


图 1 手电筒的拆卸混合

上图中，手电筒由 7 个零件组成，相互间既有无向约束关系，又有有向约束关系。“①→③”表示零件①、零件③之间为有向约束关系，即在拆卸零件③之前应先拆卸零件①；换言之，拆卸有向图

蕴含的拆卸信息包含拆卸零件先后顺序，分析拆卸混合图内的信息，可以达到关于目标零件的拆卸序列。

设图  $G$  是具有  $n$  个零件顶点的混合图，为便于表达，常用矩阵形式表示图中各顶点之间的接触和优先关系，其实质为  $n$  组 2 维数组，用 0/1 进行表示，图  $G$  的邻接矩阵  $G_R$  和优先约束矩阵  $G_P$  可表示为：

$$G_R=[r_{ij}]=\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \cdots & r_{nn} \end{bmatrix};$$

$$G_P=[p_{ij}]=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}。$$

式中， $r_{ij}$  和  $p_{ij}$  分别为零件  $i$  与零件  $j$  在拆卸对象中的邻接关系和优先级关系。而且：

$$r_{ij}=\begin{cases} 0, & i \text{ 和 } j \text{ 无接触关系} \\ 1, & i \text{ 和 } j \text{ 有接触关系} \end{cases};$$

$$p_{ij}=\begin{cases} 0, & i \text{ 和 } j \text{ 无优先级关系} \\ 1, & j \text{ 优先于 } i \text{ 进行拆卸} \end{cases}。$$

式中，当  $i=j$  时， $r_{ij}=0$  且  $p_{ij}=0$ 。

由此分析图 1，该手电筒的拆卸邻接矩阵和可约束矩阵为：

$$G_R=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$G_P=\begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}。$$

### 1.3 可拆卸性判断模型

拆卸序列规划的实质，就是在产品零件随机组合中筛选出一条可行且最优的拆卸序列<sup>[6]</sup>。零件具

有可拆卸性是进行拆卸的前提，在此情况下，拆卸零件必须满足 2 个条件：

1) 目标零件与其他零件不存在优先级约束关系，即满足：

$$\sum_{j=1}^n p_{ij} = 0。 \quad (1)$$

2) 目标零件有且只与 1 个零件存在接触关系，即：

$$\sum_{i=1}^n r_{ij} = 1。 \quad (2)$$

在拆卸序列规划过程中，应该在完成零件拆卸后对剩余零件重新构建邻接矩阵和优先约束矩阵，按照可拆卸性的约束条件 1) 和 2) 继续后续拆卸序列生成步骤。

在现代战场环境下，时间是影响战局结果的关键因素，完成任务时间短、节奏紧凑同样也是衡量部队战斗力强弱的重要指标。基于时间关键性以及重要性的考量，无论是进行战场抢修或是日常维修训练，预先筹划不同状态下重要设备的可行且耗时最短的拆卸序列具有十分重要的意义。

在以往的研究中，众多学者或将拆卸方向变化次数、拆卸工具变换次数、拆卸费用消耗和拆卸环境影响等单一地作为拆卸目标，或是组合某几种作为拆卸目标。基于时间观点以及战场维修实际，拆卸目标的实质就是拆卸总时间最短。基于“木桶原理”，并行拆卸中不同步骤的拆卸时间取决于该步骤中耗时最长的单元。定义并行拆卸时间目标函数：

$$\text{Min } T(x) = \sum_{i=1}^n t_i。 \quad (3)$$

式中： $T(x)$  为目标设备  $x$  的拆卸总时间； $n$  为拆卸目标设备必需的并行拆卸步骤数量； $t_i$  为不同步骤中耗时最长的单元拆卸时间。为便于分析，计算过程中忽略拆卸不同零件时的转换间隔。

#### 1.4 并行拆卸序列的表示

并行拆卸可以将目标设备拆卸过程并行化，降低维修人员闲置率，减少拆卸总时间，提高维修效率。并行拆卸度指某时刻串行拆卸序列中可同时拆卸的最大单元数量，可以用字母  $D_p$  表示，该指标由维修工序中包含的维修人员数量以及设备所含零件的约束关系决定；因此，装备并行拆卸研究转化为在实现拆卸总时间最小化的同时实现并行拆卸度最大化。

通常情况下，目标装备零件数量是确定的，串行拆卸序列早已固化；但在紧急情况下(如战场抢

修)，伴随同步维修人员的增加，装备技况恢复时间的缩短，必须进行并行拆卸从而缩短拆卸总时间。受限于零件约束环境、单体零件拆卸时长、初始拆卸零件等因素，并行拆卸序列呈现不唯一且可变的特点，这也决定了确定且唯一的并行拆卸序列是不切实际的。

为解决上述问题，笔者引入可变矩阵表示法用以描述并行拆卸序列。假设某型装备关键设备并行拆卸序列已知，用可变矩阵  $p$  表示：

$$p = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,n} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{m,1} & p_{m,2} & \cdots & p_{m,n} \end{bmatrix}。$$

式中，矩阵  $p$  的大小代表目标装备拆卸对象包含  $m \times n$  个零件，纵列表示串行拆卸步骤，横列表示单个步骤同时可拆卸单元数量。可变矩阵大小随着并行拆卸度的变化会发生改变，当并行拆卸度为 1 时，可变矩阵表示串行拆卸序列。

## 2 ABC 算法

ABC 由 Karaboga 小组于 2005 年提出，是一种解决多目标函数优化的元启发式群体智能优化算法。算法模型由雇佣蜂、观察蜂和侦察蜂 3 种角色组成，全过程模拟蜂群寻找蜜源、信息交换、采蜜和更替蜜源的过程，将蜂群内部完整的分工协作机制转化为数学语言，用蜂群最小觅食选择模型优化组合问题<sup>[7]</sup>。

### 2.1 基本模型

在自然环境中，蜂群能够克服复杂的环境变化快速汲取蜜源，启发于蜜蜂群体采蜜机制所具有的自组织性和分工合作性。ABC 算法模型由雇佣蜂、观察蜂、侦察蜂 3 种角色组成，但蜂群中的 3 种蜜蜂角色并非一成不变，其数量也并非固定的，伴随蜜源更替的过程，角色之间可以相互发生转换，如图 2 所示，与现实中的蜂群状况相吻合。

群组蜜蜂分工协作过程主要分为 3 个阶段：

1) 初始化阶段。

在此阶段，蜂群在邻域范围内随机寻找蜜源，并生成蜜源位置，模型为：

$$x_{mi} = l_i + \text{rand}(0,1) * (u_i - l_i)。 \quad (4)$$

式中， $u_i$ 、 $l_i$  分别为搜索域的范围，即蜜源  $x_{mi}$  的最大边界值和最小边界值。

2) 雇佣蜂阶段。

侦察蜂发现高质量蜜源后，一部分转化为观察蜂，一部分转化为雇佣蜂。每个雇佣蜂对应一个蜜源，观察蜂跟随雇佣蜂完成采蜜行为，当蜜源中花蜜量为零时，雇佣蜂放弃并更换蜜源继续采蜜行为。模型为：

$$d_{mi} = x_{mi} + \varphi_{mi} * (x_{mi} - x_{ki}) \quad (5)$$

式中： $x_{mi}$  为旧蜜源； $d_{mi}$  为新蜜源； $\varphi_{mi}$  为  $[-a, a]$  内的随机数； $a$  为加速系数，通常情况取值为 1。

3) 跟随蜂阶段。

按照轮盘赌规则，观察蜂按照随机生成的累加概率值选择蜜源。模型为：

$$P_m = \text{fit}_m(\bar{x}_m) / \sum_{m=1}^{SN} \text{fit}_m(\bar{x}_m) \quad (6)$$

式中： $\text{fit}_m(\bar{x}_m)$  为蜜源  $m$  的花蜜量； $SN$  为搜索域内的蜜源数量。

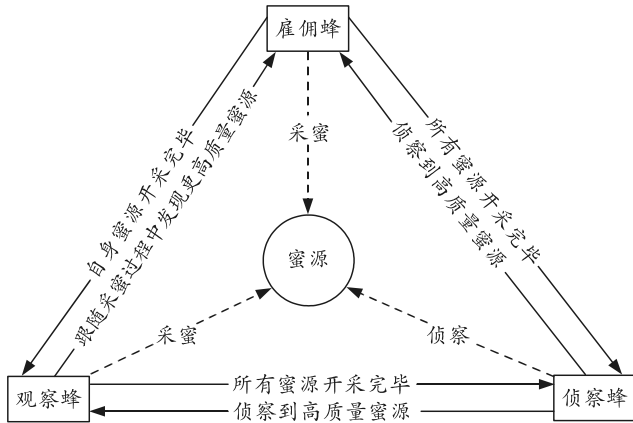


图 2 蜂群角色转换

2.2 改进的 ABC 算法模型

ABC 算法中，雇佣蜂依照贪婪法则择优选择更高质量的蜜源进行采蜜行为，蜜源质量比较公式能够合理给出新的蜜源位置，搜索能力强<sup>[8]</sup>；但基本搜索方法随机性强，容易陷入局部最优解，存在迭代速度慢的不足。针对这一问题，在式(5)的基础上，笔者引入全域因子优化蜜源位置迭代：

$$d_{mi} = x_{mi} + \varphi_{mi} * (x_{mi} - x_{ki}) + r_{mi} * (x_{\text{best},i} - x_{mi}) \quad (7)$$

式中： $r_{mi} * (x_{\text{best},i} - x_{mi})$  为全域因子； $r_{mi}$  为  $[0, 1]$  的随机数； $x_{\text{best},i}$  为质量最高的蜜源。该方法使得在蜜源选择中不仅考虑新旧蜜源适应度，而且将适应度最高的蜜源位置保留并参与到之后的迭代中，算法搜索的方向性更强，收敛速度更快。

3 实例验证

鼓式制动器是组成某型复杂装备底盘制动系统

的重要装置，主要用于行车制动和驻车制动 2 个阶段<sup>[9]</sup>。笔者以该类型制动器为例进行方法验证，图 3、表 1、图 4 分别为某型领从蹄式鼓式制动器的零件爆炸、零件组成和拆卸混合模型，表 2 中拆卸时间数据受装置磨损情况和操作人员水平等因素的影响而不同。

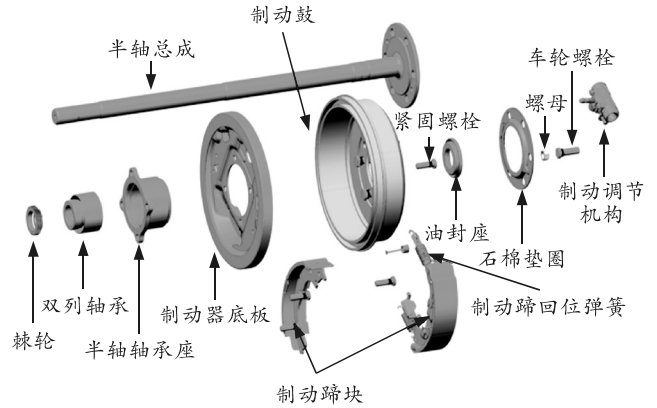


图 3 鼓式制动器爆炸

表 1 鼓式制动器零件组成及拆卸时间

| 序号 | 零件名称    | 数量 | 拆卸时间/min |
|----|---------|----|----------|
| 1  | 半轴总成    | 1  | 3        |
| 2  | 棘轮      | 1  | 3        |
| 3  | 双列轴承    | 1  | 2        |
| 4  | 半轴轴承座   | 1  | 4        |
| 5  | 制动器底板   | 1  | 2        |
| 6  | 制动器蹄块 1 | 1  | 2        |
| 7  | 制动器蹄块 2 | 1  | 2        |
| 8  | 制动鼓     | 1  | 1        |
| 9  | 制动蹄回位弹簧 | 1  | 2        |
| 10 | 紧固螺栓    | 4  | 3        |
| 11 | 油封座     | 1  | 1        |
| 12 | 石棉垫圈    | 1  | 1        |
| 13 | 螺母      | 6  | 5        |
| 14 | 车轮螺栓    | 6  | 3        |
| 15 | 制动调节机构  | 1  | 2        |

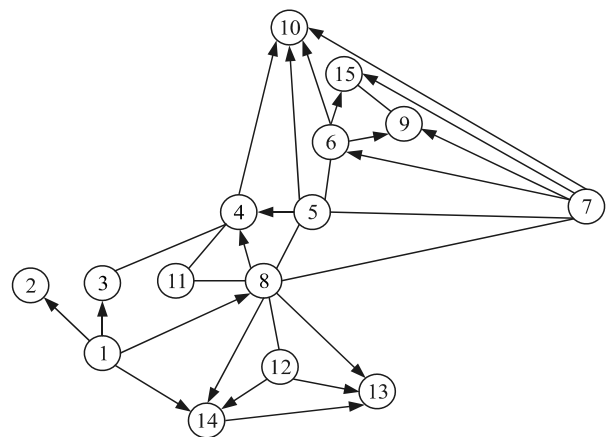


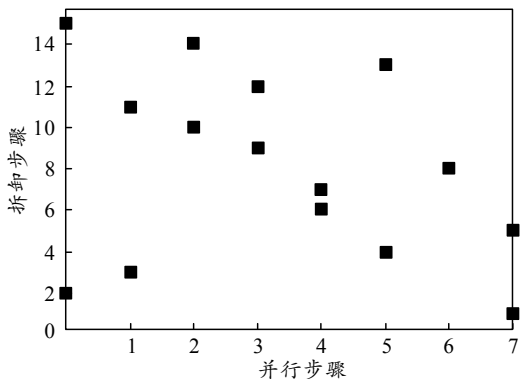
图 4 鼓式制动器零件拆卸混合模型

分析不同零件之间的邻接关系以及优先约束关系，得到如下矩阵：

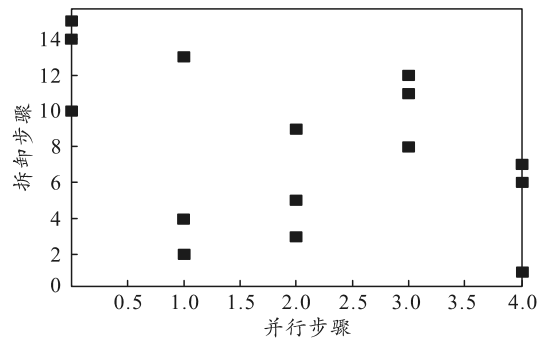
$$G_r = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$G_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}。$$

以 python 程序为例，将上文矩阵作为数据输入求解拆卸序列，结果如图 5 所示。实验结果表明，增加拆卸并行度，拆卸总时间减少；换言之，实行并行拆卸，能够有效缩短拆卸时间，提高拆卸效率。



(a) 并行度 2 时的拆卸结果



(b) 并行度 3 时的拆卸结果

图 5 拆卸序列求解结果

其中，当并行度为 2 时，最优拆卸序列为(2、15)→(3、11)→(10、14)→(9、12)→(6、7)→(4、13)→8→(1、5)，最短拆卸总时间为 21 min；当并行度为 3 时，最优拆卸序列为(10、14、15)→(2、4、13)→(3、5、9)→(8、11、12)→(1、6、7)，最短拆卸总时间为 14 min。

通过上述方法，可以得到复杂装备的并行拆卸序列以及拆卸总时间。并行度并非越大越好，当并行度大于 7 之后，拆卸序列总时间不再发生变化，即针对该部件应用改进 ABC 算法，最大并行拆卸度为 7；随着并行度的增大，同步维修所需的维修人员也相应增加，并行拆卸虽然可以提高维修效率，但过高并行度同样会造成维修资源浪费。

### 4 结论

笔者引入改进 ABC 算法的复杂装备并行拆卸序列规划方法，通过分析装备部件的零件爆炸图模型，搜集装备维修数据，形成拆卸混合图模型，导出邻接矩阵和优先约束矩阵，定义零件接触关系以及优先拆卸关系，运用改进 ABC 算法求解并行拆卸度与拆卸总时间的关系问题。实验结果表明，该方法对规划复杂装备并行方式下的拆卸序列具有一定的实际价值。

### 参考文献：

- [1] 刘玉娟, 易朋兴, 胡玖坤, 等. 基于改进 Floyd 算法的转向机拆卸序列研究[J]. 机电工程, 2018, 35(9): 916-920.
- [2] 潘晓勇. 三维环境下产品拆卸分析及关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2003.
- [3] 甘茂治, 康建设, 高崎. 军用装备维修工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 95.
- [4] 张雷, 阚欢迎, 田晓飞. 面向高效的并行拆卸序列优化方法[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 73-77.