

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.002

# 基于分布估计算法的并行拆卸序列规划研究\*

郭砚荣<sup>1</sup>, 张秀芬<sup>2</sup>

(1. 内蒙古化工职业学院 测控与机电工程系, 内蒙古 呼和浩特 010070;

2. 内蒙古工业大学 机械学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:**针对目前并行拆卸效率低的问题,对产品的拆卸模型的构建方法、编码与解码以及分布估计算法进行了研究,提出了一种基于分布估计算法的并行拆卸序列的规划方法。通过构建层次拆卸任务图,表达了零件间的拆卸优先关系,并存储了层次拆卸任务图的邻接矩阵;以邻接矩阵为依据,采用自然数编码方法进行了编码,并运用了扫描解码方法进行解码;建立了合适的分布估计算法的概率模型和更新方法,以最小化拆卸完工时间为优化目标,通过不断迭代获取了并行拆卸的最优解,通过实例验证了算法的正确性。研究结果表明:该方法在求解的质量和效率之间取得了很好的平衡。

**关键词:**并行拆卸序列规划;层次拆卸任务图;分布估计算法

中图分类号:TH122

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)10-1023-07

## Parallel disassembly sequence planning based on estimation of distribution algorithm

GUO Yan-rong<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-fen<sup>2</sup>

(1. The Department of Measurement and Control & Mechanical and Electrical Engineering, The Inner Mongolia

Vocationall College of Chemical Engineering, Hohhot 010070, China; 2. The College of

Mechanical Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Aiming at the low efficiency of parallel disassembly, the construction method of product disassembly model, coding and decoding and estimation of distribution algorithm (EDA) were studied, a method of parallel disassembly sequence planning (PDSP) based on estimation of distribution algorithm was developed. The disassembly priority relationship between parts was express by constructing the hierarchical disassembly task diagram (HDTD) and storing adjacency matrix of HDTD. Based on adjacency matrix, the natural number coding method was used to code, and the scanning method was used to decode. The appropriate probabilistic model and updated method of EDA were established, taking the minimization of completion time as the optimization objective, the optimal solution of parallel disassembly was obtained through continuous iteration, the correctness of the EDA was verified by an example. The results indicate that the method has a good balance between the quality and the efficiency of the solution.

**Key words:** parallel disassembly sequence planning (PDSP); hierarchical disassembly task graph; estimation of distribution algorithm(EDA)

## 0 引言

拆卸序列规划是根据产品的装配关系、零部件的

结构、尺寸以及拆卸资源,推理出将产品上的一个或多个零件拆下的最优拆卸顺序的求解过程<sup>[1-4]</sup>。产品的拆卸是回收再制造的关键步骤之一,良好的拆卸序列

收稿日期:2018-02-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51565044);内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2017MS(LH)0510);内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划资助项目(NJYT-17-B08);内蒙古化工职业学院科学技术项目(HYZR1503)

作者简介:郭砚荣(1982-),男,内蒙古呼和浩特人,硕士,讲师,主要从事可拆卸设计技术方面的研究。E-mail:guo\_8203@163.com

可以大大提高拆卸效率。对于大型复杂机械产品的拆卸工作往往是多人参与,这就要求在考虑拆卸约束的情况下,合理地分配每个拆卸操作者的拆卸任务,以便提高效率。因此,研究并行拆卸对实际拆卸工作有重要意义。

目前,并行拆卸序列规划(PDSP)已受到了国内外学者的关注。早期的研究有 CHEN 等<sup>[5]</sup>“剥蒜”法、KANG 等<sup>[6]</sup>的整数规划法等。“剥蒜”法仅适用于二维装配体的并行拆卸序列规划,整数规划法可以精确获得最优解,但在产品零件数目多的情况下会产生组合爆炸。近期的研究集中于基于智能算法的并行拆卸序列规划方法。例如,张雷等<sup>[7]</sup>利用传递闭包算法进行聚类分析,并通过人工蜂群算法规划复杂产品的并行拆卸序列,但该方法仅适用于有多个组件的产品;蔡凯骏等<sup>[8]</sup>提出分阶段迭代的蚁群算法进行拆卸序列规划,该算法在解的质量和效率之间很好地取得了平衡,但其前提是所有零件的基本拆卸时间相等,而实际拆卸中,多人协作的并行拆卸序列和各个被拆零件的基本拆卸时间有关;REN 等<sup>[9]</sup>以多目标的人工蜂群算法规划并行拆卸序列,获得最优解的效率较高,但该方法前提是假定每步拆卸多人同时开始拆卸。

上述方法虽然在并行拆卸序列方面取得了重大成果,但是存在的主要问题是:(1)产品的拆卸往往是多人协作的工作过程,存在着平行或交叉的拆卸作业,现有的并行拆卸序列大多是多条串行拆卸序列的简单合并,没有全面考虑人力的调度;(2)许多算法容易产生大量的无效解,搜索时间长,容易陷入局部最优。

分布估计算法(EDA)是将统计学与遗传进化算法相结合的一种算法<sup>[10-11]</sup>。传统的遗传算法采用交叉与变异生成新一代群体,从而求解问题;而分布估计算法是用精确的概率模型更新下一代种群,由于不需要交叉与变异操作,分布估计算法解决了传统遗传算法由于交叉、变异操作所导致的优良模式破坏问题。该算法目前已经在多目标规划、调度问题和路径规划等领域得到成功应用。

为此,本文全面考虑拆卸约束、人力的调度和拆卸任务的分配等约束,提出基于分布估计算法的并行拆卸序列规划方法,以实现并行拆卸序列规划的快速求解。

## 1 拆卸模型的建立

### 1.1 层次拆卸任务图

零件在装配体中的装配深度不同,其对应的拆卸

层次也不同。为了将产品零件之间的拆卸优先关系更直观的表达出来,笔者基于逐层拆卸的思想,构建产品的层次拆卸任务图  $G$ ,其定义为  $G = (V, E)$ 。

其中: $V = (v_0, v_1, v_2, \dots, v_n, v_{n+1})$ ,

$v_1, v_2, \dots, v_n$ —实节点,表示零件  $n$ —零件的个数;  
 $v_0, v_{n+1}$ —添加的拆卸任务开始和结束的虚节点,表示虚任务,开始的虚节点指向所有实际开始的任务,所有最后结束的实任务指向结束的虚节点; $E$ —节点之间的有向边,对于实节点之间的有向边表示不同装配层次的两个零件间的拆卸约束关系,用带箭头的实线表示,箭尾指向的零件的拆卸优先级高于箭头指向的零件,而虚节点和其他实节点之间用带箭头的虚箭线连接,表示虚任务。箭尾所指节点称为箭头所指节点的紧前拆卸任务,反过来,箭头所指节点称为箭尾所指节点的紧后任务。

本研究以滑动轴承为例说明层次拆卸任务图的信息含义。滑动轴承装配图及其层次拆卸任务图如图 1 所示。

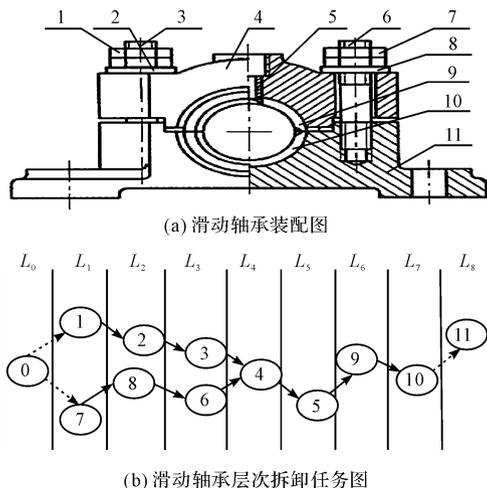


图 1 滑动轴承装配图及其层次拆卸任务图

其中,节点 0 是添加的开始虚节点,虚节点 0 与实节点 1 之间的虚箭线表示一项虚任务;而节点 11 是轴承座,相当于基体,基体一般都是最后拆卸,当其他所有零件都拆卸完成后,只剩下基体了,相当于基体也拆卸了,所以节点 11 相当于结束的虚节点,无需再添加另外的结束虚节点,因此节点 10 与节点 11 之间用虚箭线表示,增加虚节点主要是为了使每个实任务都有紧前和紧后任务,以方便后续的处理;而其他实任务之间用实箭线连接。 $L_0 \sim L_8$  表示 8 个不同拆卸层次, $L_0$  层是虚任务, $L_1$  层的零件是可以最先拆卸掉的零件,而  $L_8$  层的零件需要解除掉  $L_1$  层至  $L_7$  层的对应的约束才可以拆卸。

### 1.2 层次拆卸任务图的邻接矩阵

层次拆卸任务图和其对应的邻接矩阵可以相互转换,层次拆卸任务图在计算机内是通过存储其邻接矩阵  $M_r$  实现的,  $mr_{ij} = 1$  表示  $i$  是  $j$  的紧前任务,  $j$  是  $i$  的紧后任务, 否则为 0。图 1(b) 的滑动轴承层次拆卸任务图可以用如下邻接矩阵表示:

		紧后拆卸任务											
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
紧 前 拆 卸 任 务	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	6	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 1.3 拆卸约束矩阵

拆卸约束矩阵是反映产品零件之间拆卸优先关系的矩阵,其数学表达式如下:

$$M_c = \{mc_{ij}\}_{n \times n} \quad (1)$$

其中:

$$mc_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当零件 } j \text{ 对零件 } i \text{ 构成拆卸} \\ & \text{约束且 } j \text{ 优先 } i \text{ 拆卸时} \\ 0, & \text{当零件 } i \text{ 与 } j \text{ 之间没有} \\ & \text{拆卸优先关系或 } i = j \text{ 时} \end{cases}, n \text{— 零件个数};$$

零件  $i$  可拆卸的条件为:  $\sum_{j=1}^{j=n} mc_{ij} = 0$ 。

### 1.4 层次拆卸任务图构建方法

层次拆卸任务图的构建主要有以下步骤:

(1) 在产品的三维模型中通过二次开发提取零件间的装配约束关系信息,并通过人工补充约束生成产品的拆卸约束矩阵;

(2) 利用式(1)的零件拆卸条件判断当前所有可拆卸零件,并将其存储到第一层集合  $L_1$  中,然后更新拆卸约束矩阵,继续利用式(1)判断更新后的矩阵中的可拆卸零件,直至拆卸约束矩阵为空矩阵,并依次将可拆卸零件放入对应的  $L_k$  层中;

(3) 依据拆卸约束矩阵的约束信息添加不同层次零件之间的拆卸约束,生成产品的层次拆卸任务图。

层次拆卸任务图生成流程图如图 2 所示。

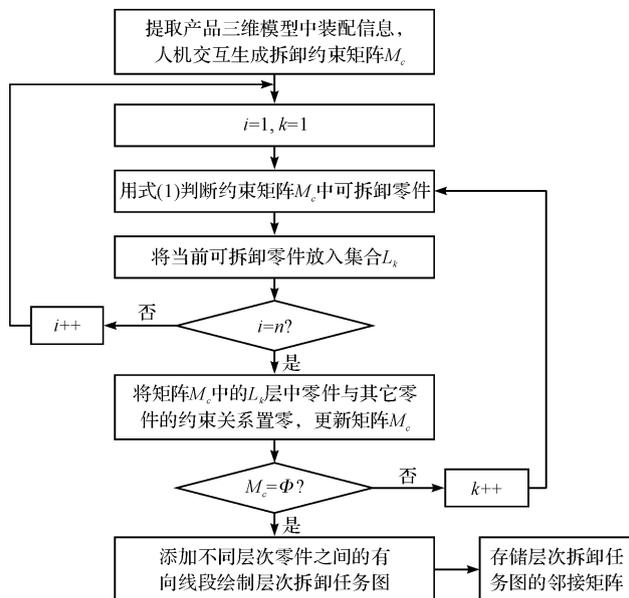


图 2 层次拆卸任务图生成流程

## 2 问题描述

并行拆卸序列规划问题的求解就是在满足目标函数条件下,找到最优的拆卸序列,并对拆卸任务制定分配方案。

为了降低并行序列求解的复杂程度,本文作以下假设:

- (1) 每个零件由一个拆卸人员拆卸;
- (2) 多人拆卸时,操作者拆卸区域互不干涉;
- (3) 不同拆卸人员拆卸相同零件所需的时间相同。

因为本文的拆卸序列规划以拆卸总时间最少为优化目标,产品的并行拆卸实际上是在综合考虑拆卸约束和拆卸资源的情况下,合理安排拆卸活动中各个零件拆卸的开始时间和结束时间。

假设产品有  $n$  个待拆卸零件,将每个待拆卸零件看作一项拆卸任务,则产品的拆卸活动由  $n$  个任务构成集合  $DT = \{0, 1, 2, \dots, n, n+1\}$ , 任务 0 和任务  $n+1$  分别为附加的开始和结束的虚任务,这样可以使得每个实际非空任务都至少有一个直接前向任务和后向任务,以便于后续的处理。 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ —拆卸操作人员集合; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ —零件基本拆卸时间集合,即每个任务的持续时间; $t_j (1 \leq j \leq n)$ —第  $j$  个任务的持续时间; $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n, s_{n+1}\}$ —每个任务的开始时间集合; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n, e_{n+1}\}$ —每个任务的结束时间集合。基于以上假设,建立产品的并行拆卸数学模型。

优化目标:

$$\text{Min} \{ \max(e_1, e_2, \dots, e_n) \} \quad (2)$$

拆卸约束条件:

$$e_i \leq e_j - t_i, \forall (i, j) \in C \quad (3)$$

拆卸操作人员数量约束:

$$\sum_{i \in S_t} m \leq M \quad (4)$$

式中:集合  $C$ —任务的时序约束,由两个任务组成的任务对构成, $C$  可以通过层次拆卸任务图的邻接矩阵  $M_r$  获取; $S_t$ —全部在时刻  $t$  正在进行的任务的集合。

### 3 并行拆卸序列规划问题的求解

#### 3.1 编码与解码

考虑并行拆卸序列和 EDA 算法的特点,本文采用基于任务的编码方法,把每个待拆卸零件看作一个拆

卸任务。其解的形式采用自然数排列编码,自然数是零件的编号,数字出现的顺序代表零件的拆卸顺序,数字越靠前表示对应的拆卸任务越需优先完成,比如有 6 个编号为 1 ~ 6 的待拆卸零件的编码为 {0,6,5,3,2,1,4,7}。其中,“0”和“7”为开始的虚任务,“6”在第一位表示编号为 6 的零件是首先要拆卸的实际任务,而编号为“4”的零件是最后拆卸的任务,而多人协作的并行拆卸规划是每一个拆卸任务的开始时间与结束时间的调度方案,所以还需将这种编码解码为每一个任务的时间安排。

本文采用扫描法生成任务调度方案进行解码<sup>[12]</sup>。即根据拆卸任务的约束,对拆卸人员进行调度,生成并行调度方案,即对给定的编码解里的各项拆卸任务,在满足拆卸约束的条件下,在给定的拆卸人数限制下进行并行调度。解码流程图如图 3 所示。

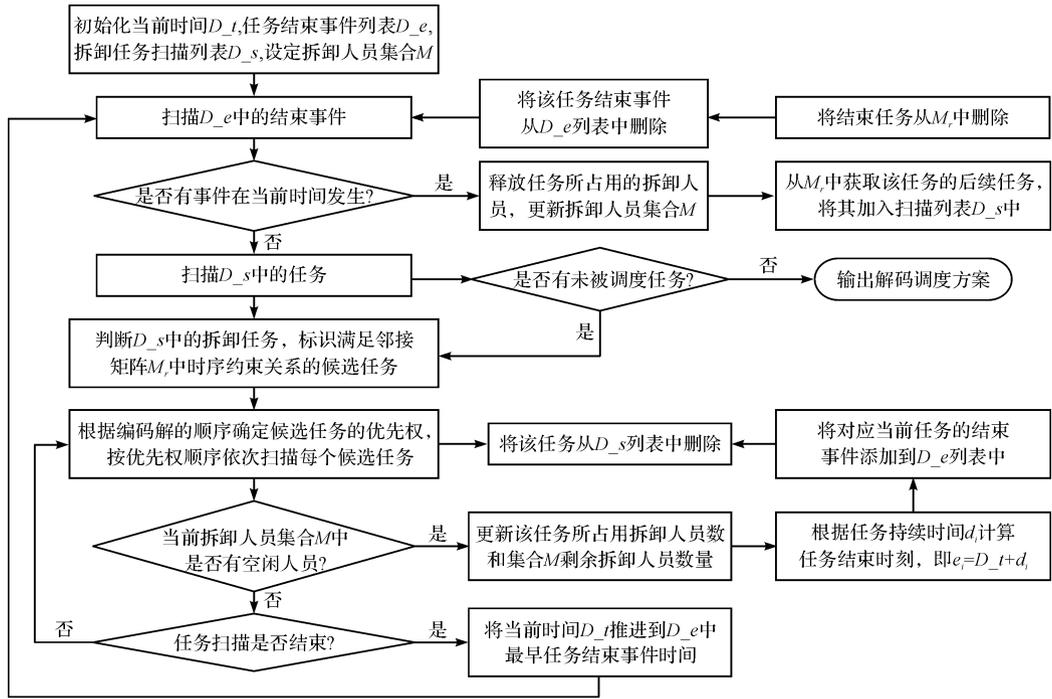


图 3 解码流程图

主要有以下 5 个步骤:

(1) 首先初始化当前时间  $D_t$  为零、结束事件列表  $D_e$  为空,并设定拆卸任务扫描列表  $D_s$  的初始值为邻接矩阵  $M_r$  中最先开始的虚任务 0;

(2) 判断在当前时刻  $D_t$ ,事件列表  $D_e$  中是否有事件发生,如果有则处理事件,并释放任务所占拆卸人员,更新拆卸人员集合和当前可用人员数量,根据该结束任务从邻接矩阵中找出满足时序约束的紧后任务加入到任务扫描列表  $D_s$  中,并将该任务结束事件从列表  $D_e$  和矩阵  $M_r$  中移除;

(3) 如果当前时刻没有事件发生且仍然有未被调

度任务,转(4),如果没有未被调度任务,转(7);

(4) 通过矩阵  $M_r$  依次判断列表  $D_s$  中的任务的时序约束关系,标识满足时序约束关系的候选任务;

(5) 根据编码的顺序确定候选任务的优先权,并依次扫描每个候选任务,判断当前是否有空闲拆卸人员,如果有则开始执行任务,包括更新拆卸人员数量,从零件的基本拆卸时间集合  $T$  中获得任务的持续时间  $t_i$ ,通过公式  $e_i = D_t + t_i$  计算该任务结束事件的时刻,并将该任务添加到  $D_e$  列表中,同时将其从  $D_s$  列表中删除;

(6) 当扫描完  $D_s$  列表中满足时序约束的任务

后,将当前时间  $D_t$  推进到  $D_e$  中最早结束事件的时刻,跳到(2);

(7) 结束,输出调度方案。

以图 1 中的滑动轴承为例,轴承各零件的基本拆卸时间如表 1 所示。

表 1 滑动轴承各零件的基本拆卸时间

零件编号	零件名称	基本拆卸时间 /s	零件编号	零件名称	基本拆卸时间 /s
1	螺母 1	2	7	螺母 2	2
2	垫片 1	1	8	垫片 2	1
3	螺柱 1	3	9	上轴衬	0.5
4	轴承盖	2	10	下轴衬	0.5
5	销套	1	11	轴承座	0
6	螺柱 2	3			

其中,  $A = \{0,1,7,2,8,6,3,4,5,9,10,11\}$  是一个符合拆卸约束的可行的编码解。假定参与并行拆卸的人数为 2,对该编码解通过扫描法解码,得到的滑动轴承并行拆卸调度图如图 4 所示。

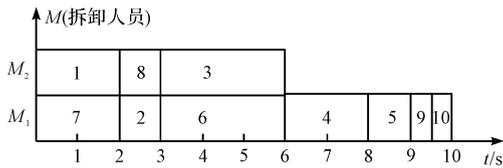


图 4 滑动轴承并行拆卸调度图

图 4 中横坐标表示时间,纵坐标表示拆卸人员。通过此种解码方式,本文计算出了 2 个人并行拆卸产品所需的总时间为 10 s。

### 3.2 概率模型及更新方法

EDA 算法是通过从种群中选取部分优势个体,运用统计学习的手段建立一个概率模型,从而描述候选解在空间的分布情况,再根据建立的概率模型随机采样产生新的种群以实现进化。

用 EDA 求解问题,关键要选择合适的概率模型。本文给出如下概率模型及更新机制。假设一个待拆卸产品有  $n$  个待拆卸零件,即  $n$  个拆卸任务,其 EDA 算法的概率模型可用矩阵来表示:

$$PR(t) = \begin{pmatrix} pr_{11} & \cdots & pr_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ pr_{n1} & \cdots & pr_{nn} \end{pmatrix} \quad (5)$$

式中: $pr_{ij}$ —将任务  $i$  安排在任务序列位置  $j$  的概率; $t$ —进化的代数。

初始化种群时,初始概率矩阵的值可用矩阵表示:

$$p = \begin{pmatrix} \frac{1}{n} & \cdots & \frac{1}{n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{n} & \cdots & \frac{1}{n} \end{pmatrix} \quad (6)$$

概率模型更新时,首先从种群中选择  $E$  个较优的精英解,再更新计算:

$$pr_{ij}(t+1) = (1-\beta) \cdot pr_{ij}(t) + \frac{\beta}{E} \sum_{k=1}^E I_{ij,k} \quad (7)$$

式中: $\beta$ —学习进度; $k$ —精英解中的个体,在个体  $k$  中如果任务  $i$  安排在第  $j$  个位置,则  $I_{ij,k} = 1$ ,否则, $I_{ij,k} = 0$ 。

生成新个体时,编码的位置  $j$  上安排任务  $i$  的概率为:

$$p_{ij} = \frac{pr_{ij}}{\sum_{s \in M} pr_{sj}} \quad (i \in M) \quad (8)$$

式中: $M$ —序列的对应位置的满足时序约束(拆卸约束)的全部可选择的拆卸任务集合,该集合可以通过搜索层次拆卸任务图获得,然后用轮盘赌方法生成新的解。

### 3.3 适应度函数

本文用最短拆卸完工时间作为评价指标,可行编码解的完工时间可表示为:

$$f(A) = \max(e_1, e_2, \dots, e_n) \quad (9)$$

式中: $f(A)$ —对应编码解  $A$  的拆卸完工时间,当解码生成前向调度方案后便可获得每个拆卸任务的完工时间。

### 3.4 拆卸序列规划流程

流程主要分 3 大步骤:

(1) 通过人机交互方式构建产品的拆卸约束矩阵,并根据 1.4 的方法构建产品的层次拆卸任务图,然后设定各个零件的基本拆卸时间、并行拆卸的人数;

(2) 设定种群数  $N_p$  以及最大迭代次数,初始化概率矩阵、初始化种群;

(3) 运用扫描法解码并评价解的适应度,直至达到最大迭代次数,最后输出最优解。

基于 EDA 的并行拆卸序列规划算法流程图如图 5 所示。

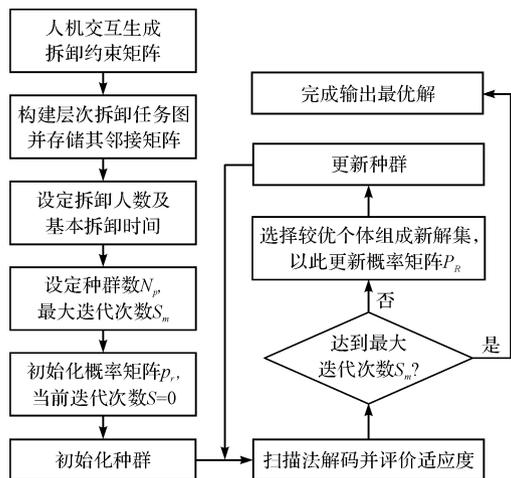
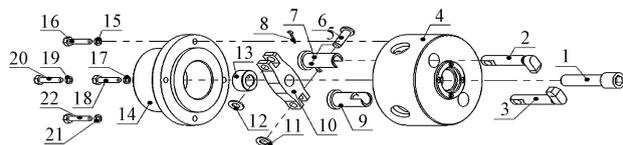
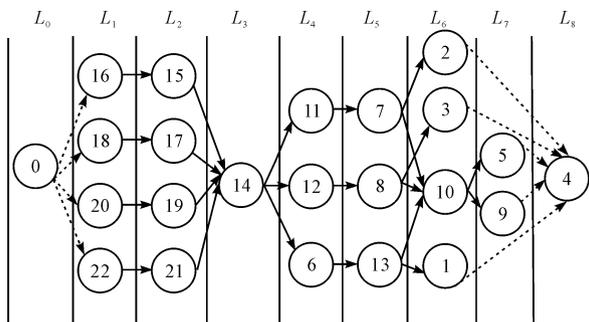


图 5 基于 EDA 的并行拆卸序列规划算法流程



(a) 阀盖头夹具爆炸图



(b) 阀盖头夹具层次拆卸任务图

图 6 阀盖头夹具爆炸图及层次拆卸任务图

## 4 实例应用

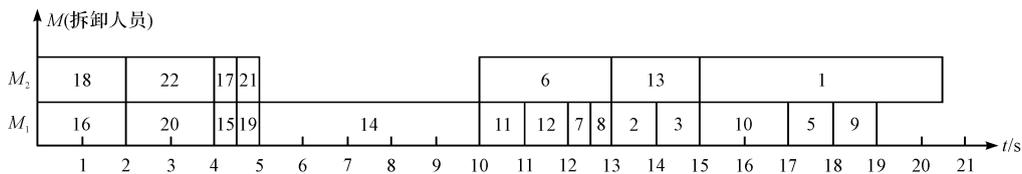
本研究以阀盖头夹具验证本文的拆卸序列规划方法。阀盖头夹具爆炸图及其层次拆卸任务图如图 6 所示。

阀盖头夹具零件信息及编号如表 2 所示。

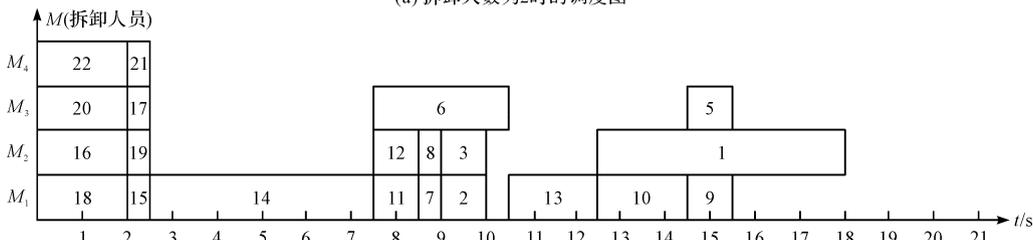
本研究以 Matlab 为实验平台, 设置种群规模为 30、精英解个数为 10、最大迭代次数为 50, 进行运算。阀盖头夹具并行拆卸调度图如图 7 所示。

表 2 阀盖头夹具零件信息及编号

编号	名称	基本拆卸时间/s	编号	名称	基本拆卸时间/s
1	球形螺钉	5.5	12	挡圈 2	1
2	钩形压板 1	1	13	背帽	2
3	钩形压板 2	1	14	盘根	5
4	夹具体	0	15	垫片 1	0.5
5	套筒 1	1	16	螺钉 1	2
6	背帽螺钉	3	17	垫片 2	0.5
7	销轴 1	0.5	18	螺钉 2	2
8	销轴 2	0.5	19	垫片 3	0.5
9	套筒 2	1	20	螺钉 3	2
10	铰链压板	2	21	垫片 4	0.5
11	挡圈 1	1	22	螺钉 4	2



(a) 拆卸人数为 2 时的调度图



(b) 拆卸人数为 4 时的调度图

图 7 阀盖头夹具并行拆卸调度图

笔者将本文方法与遗传算法、分支定界算法规划的 2 人并行拆卸结果进行对比研究<sup>[13-14]</sup>, 结果如表 3

所示。

表 3 研究结果对比表

方法	最短拆卸完工时间/s	运行时间/s
本文方法	20.5 s	0.425
遗传算法	23 s	0.233
分支定界算法	23	387.928

从表中可看出:本文所规划的并行拆卸完工时间远比其他两种方法规划的时间短,本文方法的运行时间略高于遗传算法的运行时间。

利用改进人工蜂群算法对本例进行 2 人并行拆卸规划<sup>[15]</sup>,得到的最优拆卸序列为(16,18)→(20,22)→(15,17)→(19,21)→(14)→(11,12)→(7,8)→(6,2)→(3,13)→(10,1)→(5,9),总的拆卸时间为 23 s,大于本文方法规划的拆卸时间 20.5 s。

通过对比可以看出,本文的算法在求解的效率与质量之间达到了较好的平衡。原因是本文选取的对比文献中的编码方法都是假设并行拆卸的每步任务同时执行,比如并行度为 2 时,只有两人都完成了上一步任务才同时开始执行下一步任务,而实际当中由于有些零件的基本拆卸时间不同会导致两人的任务完成时间不同步,完工早的拆卸人员可以马上进入下一个可行拆卸任务,不必等待另一名拆卸人员;而本文的方法可充分地多名拆卸人员及时调度,所以方案优化效果更佳。

## 5 结束语

本文在总结现有并行拆卸序列规划的基础上,提出了基于分布估计算法的并行拆卸序列的规划方法,具体如下:

(1)研究了产品层次拆卸任务图的构建方法并存储其邻接矩阵,通过层次拆卸任务图清楚的表达出各项拆卸作业的时序约束关系;

(2)将每一个被拆零件视为一项拆卸任务,以拆卸任务为基础进行编码,编码时依据层次拆卸任务图的邻接矩阵按任务的时序约束进行,避免了无序编码的产生。运用扫描法对多人参与的拆卸作业进行并行解码,该解码方法既考虑了零件间的拆卸约束,又根据拆卸人员的状态与数量合理的安排拆卸任务,从而提高了解的优化效果;

(3)以最短拆卸完工时间为优化目标,运用分布估计算法获得产品的并行拆卸序列最优解,并通过实例验证该方法可以获得质量较优解。

## 参考文献(References):

- [1] 张秀芬,张树有. 基于粒子群算法的产品拆卸序列规划方法[J]. 计算机集成制造系统,2009,15(3):508-513.
- [2] 赵柏萱,刘检华,宁汝新,等. 一种基于运动规划的选择拆卸序列规划技术[J]. 机械工程学报,2014,50(7):136-144.
- [3] 宋守许,张文胜,张雷. 基于改进人工蜂群算法的产品拆卸序列规划[J]. 中国机械工程,2016,27(17):2384-2390.
- [4] 叶琳,沈延安. 基于 Jack 平台的虚拟设备维修拆卸序列规划[J]. 指挥控制与仿真,2017,39(4):128-133.
- [5] CHEN S F, OLIVER J H, CHOU S Y, et al. Parallel disassembly by onion peeling[J]. **Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASEM**, 1997,119(2):267-273.
- [6] KANG J G, LEE D H, XIROUCHAKIS P, et al. Parallel disassembly sequencing with sequence-dependent operation times [J]. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, 2001,50(1):343-346.
- [7] 张雷,彭宏伟,卞本阳,等. 复杂产品并行拆解建模及规划方法研究[J]. 中国机械工程,2014,25(7):937-809.
- [8] 蔡骏骏,张伟明,张海军,等. 面向多人同时作业的拆卸序列规划[J]. 计算机集成制造系统,2016,22(12):2767-2776.
- [9] REN Ya-ping, TIAN Guang-dong, ZHAO Fu, et al. Selective cooperative disassembly planning based on multi-objective discrete artificial bee colony algorithm[J]. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, 2017(64):415-431.
- [10] 王圣尧,王凌,方晨,等. 分布估计算法研究进展[J]. 控制与决策,2012,27(7):961-965.
- [11] 张守刚,吴龙成,王艳等. 基于分布估计算法的硫化车间调度[J]. 系统仿真学报,2017,29(9):2181-2188.
- [12] 贾艳. 资源受限项目调度问题的仿真优化方法及其应用研究[D]. 武汉:华中科技大学机械科学与工程学院,2012.
- [13] 张秀芬,蔚刚,王磊,等. 支持复杂产品并行拆卸序列规划的遗传算法[J]. 计算机辅助设计与图形学,2015,27(7):1327-1333.
- [14] ZHANG X F, ZHANG S Y. Product cooperative disassembly sequence planning based on branch-and-bound algorithm [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2010,51(9-12):1139-1147.
- [15] 张文胜. 基于改进人工蜂群算法的机电产品并行拆卸序列规划研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械工程学院,2017.

[编辑:周昱晨]

### 本文引用格式:

郭砚荣,张秀芬. 基于分布估计算法的并行拆卸序列规划研究[J]. 机电工程,2018,35(10):1023-1029.

GUO Yan-rong, ZHANG Xiu-fen. Parallel disassembly sequence planning based on estimation of distribution algorithm[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018,35(10):1023-1029.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>