

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.04.002

基于多种群遗传算法的废旧手机拆卸序列规划

尹凤福¹, 刘广阔¹, 王晓东¹, 李新宇², 李林¹

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266061; 2. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:为解决废旧智能手机对环境的污染问题,高效率求解废旧智能手机完全拆卸序列最优方案,文章针对废旧手机完全拆卸提出一种多种群遗传算法。根据废旧智能手机的连接特点,建立废旧智能手机拆卸混合图模型,并利用该模型描述约束关系,同时考虑紧固件的连接关系;提出一种拆卸可行性评估方法,建立拆卸时间、拆卸利润、拆卸能耗等多目标优化数学模型,并利用多种群遗传算法进行优化分析;以“小米 5”手机为例验证提出算法的可行性,并分析多目标不同权重系数对生成结果的影响。结果表明:与人工经验拆卸相比,优化后拆卸手机成本利润提高 0.303 5 元/台,拆卸时间缩短 30 s/台,拆卸人工能耗减少 0.272 J;多种群比单种群收敛速度更快;相较于并行拆解,废旧智能手机等小型精密电子产品更适合于串行序列拆解。

关键词:废旧智能手机;拆卸模型;多种群遗传算法;序列规划

中图分类号: TP18; X76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-5060(2023)04-0438-09

Disassembly sequence planning of used mobile phones based on multi-population genetic algorithm

YIN Fengfu¹, LIU Guangkuo¹, WANG Xiaodong¹, LI Xinyu², LI Lin¹

(1. School of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China; 2. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: In order to solve the problem of the environmental pollution caused by used smartphones, and efficiently solve the complete disassembly sequences of used smartphones, a multi-population genetic algorithm is proposed for the complete disassembly of used mobile phones. According to the connection characteristics of used smartphones, the disassembly mixed graph model of used smartphones is established to describe the constraint relations while considering the fastener connection relations. A feasibility assessment method for disassembly is proposed, the mathematical model of multi-objective optimization of disassembly time, disassembly profit and disassembly energy consumption is established, and the multi-population genetic algorithm is used for optimization analysis. Taking Xiaomi Mi 5 mobile phone as an example, the three weight coefficients are used to prove that compared with manual experience disassembly, the disassembly profit of each phone after optimization is increased by 0.303 5 yuan, the disassembly time is shortened by 30 s, and the labor energy consumption of disassembly is reduced by 0.272 J. In the case of multiple populations, the convergence speed is faster than that of a single population. Meanwhile, compared with parallel disassembly, small precision electronic products such as used smartphones are more suitable for serial disassembly.

Key words: used smartphone; disassembly model; multi-population genetic algorithm; sequence planning

收稿日期:2021-10-26;修回日期:2022-01-20

基金项目:科技部重点研发计划资助项目(2020YFB1713004)

作者简介:尹凤福(1969—),男,山东潍坊人,博士,青岛科技大学教授,博士生导师;

李林(1987—),男,山东临沂人,博士,青岛科技大学副教授,硕士生导师,通信作者, E-mail:ll@qust.edu.cn.

0 引言

我国智能手机报废数量位居世界前列,预估2025年产生废旧手机达到4.75亿部^[1]。废旧手机电路板富含Cu、Al、Au、Ag、Pd、Pt等普通金属和贵金属,且部分零部件具有循环再利用价值^[2-4],废旧手机回收可减少环境污染,避免资源浪费。目前废旧手机的研究集中于对生命周期评价与结构优化设计方面^[5-6],对废旧手机拆卸序列的规划研究较少。由于废旧手机结构紧凑具有多重约束性,且内部零部件体积小、质量轻、存在大量精密元器件,其人工拆卸过程具有非常大的优化空间,而找到回收的最优或次优解是当前拆卸序列规划研究的重点。

拆卸序列规划是典型的NP-hard(non-deterministic polynomial hard)问题,零部件数目较多时易产生组合爆炸现象^[7]。文献^[8]提出一种蚁群算法,结合拆卸路径求解工具实现拆卸信息图的构建和拆卸方案的搜索,但该方法效率低、优化时间长,不适用于废旧手机等零部件较多的情况;文献^[9]提出一种解释结构模型,对连接结构的拆卸性做了分析,但废旧手机零部件较小、连接方式繁多,遍历起来非常困难;文献^[10]利用基于二叉树的遗传算法对拆卸序列进行了优化,但单纯的树状图理论很难代表废旧手机复杂连接情况;文献^[11]提出并行拆卸方式建模及序列规划,采用人工蜂群算法对拆卸序列进行优化,但此方法更适用于大型设备,对精密度较高、体积较小的废旧手机并不适用;文献^[12]提出一种拆卸混合图与粒子群算法相结合的拆卸序列规划方法,该方法倾向于连接方式的配置;文献^[13]对废旧发动机产品拆卸建模,在优化目标建模及人员配置方面做了有价值的研究,为废旧手机拆解数学建模提供了借鉴。

上述成果为拆卸序列规划研究奠定了基础。在考虑废旧手机内部紧固件连接时,将紧固件视为连接方式,生成拆卸序列之后将紧固件插入序列得到拆卸序列^[14],此方法可以减少零部件数目,减小零部件连接关系的建模难度,但忽略了紧固件的连接作用,会生成不可行的拆卸序列,影响算法的正确性。因此将一层中一类紧固件视为一个部件,可以有效避免零部件过多带来的组合爆炸问题。

本文在考虑简化紧固件的同时,在遗传算法的基础上使用多种群遗传算法进行优化改进,通

过拆解约束关系混合图模型,建立拆卸时间、拆卸利润、拆卸能耗等多目标优化数学模型;以“小米5”智能手机为例验证算法的可行性,并分析多目标不同权重系数对生成结果的影响,同时与双种群遗传算法进行对比分析^[15],并对废旧智能手机组件进行聚类规划分析^[11],讨论聚类分析后对拆卸序列规划的影响。

1 产品拆卸混合图模型描述

1.1 产品拆卸模型的基本定义

拆卸模型是产品拆卸序列规划研究的基础,拆卸模型信息包括产品的连接关系、约束关系、拆卸工具、拆卸方向、拆卸时间、拆卸能耗等^[16]。产品的连接关系表示方法有无向约束图、有向约束图、与或图、混合图等^[17]。本文采用五元组拆卸混合图,连接关系可表示为 $G=(V, E, E_D, E_C, T_f)$ 。其中: $V=\{V_1, V_2, V_3, \dots, V_N\}$ 表示拆卸单元,即零部件或子装配体; E 为无向边,即2个拆卸单元间有连接关系,用直线表示; E_D 为有向边,即2个拆卸单元之间有强物理约束关系,用有箭头的实线表示,如 $V_1 \rightarrow V_2$ 表示 V_1 对 V_2 有强物理约束关系; E_C 表示零部件间不连接但存在优先关系,即空间约束,用有箭头的虚直线表示^[18]; T_f 为产品拆卸工具信息, $T_f=\{t_{f1}, t_{f2}, t_{f3}, \dots, t_{fn}\}$, t_{f1}, t_{f2} 等分别表示拆卸过程中的工具种类。拆卸方向主要包括+X、-X、+Y、-Y、+Z、-Z 6个方向^[19]。

1.2 产品拆卸模型的矩阵表达式

根据产品拆卸模型建立产品拆卸混合图,拆卸过程是将所有约束去掉使每个零件满足独立性的过程,整个拆卸过程每个节点只遍历1遍,每次只拆卸1个零件或部件。拆卸混合图可用连接矩阵 G_1 和约束矩阵 G_2 2个数学矩阵描述。若拆卸整体共有 n 个零部件,则对应的连接矩阵 G_1 和约束矩阵 G_2 分别为:

$$G_1 = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix},$$

$$G_2 = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \cdots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & \cdots & q_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ q_{n1} & q_{n2} & \cdots & q_{nn} \end{bmatrix}。$$

连接矩阵 G_1 为对角矩阵,主对角元素为0;当 i 与 j 之间连接方式为螺钉连接、卡扣连接、过

盈连接等紧密连接方式时, $p_{ij}=3$; 当 i 与 j 之间连接方式为搭扣、板对板连接、同轴线连接等轻微相互连接时, $p_{ij}=2$; 当 i 与 j 之间连接方式为面接触等接触连接时, $p_{ij}=1$; 当 i 与 j 之间相互独立无接触时, $p_{ij}=0$ 。

G_2 表示优先约束矩阵, 主对角元素为 0, 即 $i=j$ 时 $q_{ij}=0$; 当 j 不阻挡 i 拆卸时, $q_{ij}=0$; 当 j 阻挡 i 拆卸时, $q_{ij}=1$; 当 $\sum_{j=1}^n q_{ij}=0$ 时, 代表没有零件对 j 零件产生约束, 即零件 j 可拆。

2 产品拆卸数学模型描述

产品拆卸序列规划的实质是找到最优的拆卸序列, 从而找到最少的拆卸时间、最高的拆卸利润、最低的拆卸能耗、最少的拆卸工具等, 选择不同的拆卸目标会对整个拆卸序列的生成产生较大的影响。一些专家在对拆卸目标进行规划时, 多选择如拆卸时间、拆卸能耗、拆卸利润等单一目标来研究^[20], 而选取单一影响因素作为拆卸序列规划依据不符合实际情况。本文以拆卸时间、拆卸利润、拆卸能耗 3 个目标函数来综合评价拆卸指标, 并考虑影响目标函数的多个因素, 相较于单目标评价, 更能准确地评价拆卸序列的优劣程度, 更符合拆卸实际情况。

2.1 拆卸时间计算模型

拆卸时间越长表明结构越复杂, 拆卸性越差, 拆卸时间可以用以下公式表示:

$$T_C = \sum_{i=1}^n t_d + \sum_{i=1}^n N t_r + \sum_{i=1}^n d_i t_a + \sum_{i=1}^n \beta_i t_e \quad (1)$$

其中: T_C 为拆卸总时间; n 为零件个数; t_d 为零件基本拆卸时间; N 为每个拆卸步骤更换的工具数; t_r 为工具转换时间; t_a 为基本方向转换时间; t_e 为难拆零件额外附加拆卸时间, 经过多层次约束的零件定义为难拆零件; β_i 为第 i 个零件的难拆延长系数, 当该零件的拆卸难度较大或者拆卸空间较小时 $\beta_i=1$, 否则为 0; d_i 为拆卸方向变换系数, 即

$$d_i =$$

$$\begin{cases} 0, & \text{从零件 } V_i \text{ 到零件 } V_{i+1} \text{ 拆解方向不变;} \\ 1, & \text{从零件 } V_i \text{ 到零件 } V_{i+1} \text{ 拆解方向变化 } 90^\circ; \\ 2, & \text{从零件 } V_i \text{ 到零件 } V_{i+1} \text{ 拆解方向变化 } 180^\circ. \end{cases}$$

2.2 拆卸利润计算模型

拆卸利润是整个拆卸过程直观有效的评估标准, 拆卸利润越高, 拆卸可行性越大。拆卸利润的数学模型可以用以下公式表示:

$$P = \sum_{i=1}^n P_i - C_{\text{cost}} \quad (2)$$

$$C_{\text{cost}} = C_b + C_d + C_e \quad (3)$$

$$C_d = \omega_1 T_C + \omega_2 \sum_{i=1}^n N t_r \quad (4)$$

$$C_e = \frac{C_{e1}}{22k} + \frac{C_{e2}}{22k} \quad (5)$$

$$\omega_1 = \frac{C_w}{22 \times 8 \times 3 \ 600} \quad (6)$$

$$\omega_2 = \frac{C_t}{N_t} \quad (7)$$

其中: P 为一部废旧手机整体拆卸回收利润; P_i 为平均每个零件的价格; C_b 为平均每部废旧手机的购买成本; C_d 为拆卸成本, 包括人工成本和工具折损成本; ω_1 为单位时间内人工成本系数; ω_2 为工具折损系数; C_w 为当地工人平均工资, 每月 22 个工作日, 每日 8 h 工作量; C_t 为工具成本; N_t 为工具使用寿命次数; C_e 为额外成本, 包括厂房成本和水电费用; C_{e1} 为人均厂房成本; C_{e2} 为每月人均水电费用; k 为人均拆卸手机数量。

2.3 拆卸能耗计算模型

拆卸能耗是评价序列优劣程度的重要指标, 废旧手机内部连接方式种类较多, 因为连接方式不同, 所以拆卸能耗也不相同, 拆卸总能耗是去除所有连接件产生的能耗总和^[21]。

拆卸能耗表达式为:

$$E = E_{d1} + E_{d2} + E_{d3} + E_{d4} + E_{d5} \quad (8)$$

其中: E 为拆卸总能耗; E_{d1} 为拆卸螺钉能耗; E_{d2} 为拆卸卡扣能耗; E_{d3} 为热风枪能耗; E_{d4} 为转移能耗, 包括转移手机能耗和改变方向能耗; E_{d5} 为吸盘拆卸后盖拉力能耗。

螺纹连接拆卸方式可以表示为:

$$E_{d1} = \sum_{i=1}^{m_1} K_i M \theta \quad (9)$$

$$M = K_t F D \times 10^{-3} \quad (10)$$

$$\theta = \frac{360}{\pi} \frac{M}{I_P \pi} \quad (11)$$

其中: K_i 为松开螺钉系数, 由于松开螺钉大约是拧紧螺钉力的 80%, 取 0.8; M 为拧紧力矩; θ 为螺纹转角; K_t 为力矩系数, 通常取 0.2; F 为拧紧力; D 为螺纹直径; I_P 为扭转刚度^[22]; m_1 为连接件个数。

搭扣的拆卸能耗定义为使搭扣连接高度产生变形所需要的能耗, 将搭扣连接简化成悬臂梁, 表达式为:

$$E_{d2} = \sum_{i=1}^{m_2} \frac{E l_i d_i^3 h_{2i}^2}{8 h_1^3} \quad (12)$$

其中: E 为材料弹性模量; l_i 为搭扣连接宽度; d_i 为搭扣连接处厚度; h_{1i} 为搭扣部分长度; h_{2i} 为搭扣的高度; m_2 为卡扣数目。

采用热风枪加热,根据做功公式所需能耗为:

$$E_{d3} = \omega(t_{p1} + t_{p2}) \quad (13)$$

$$E_{d4} = \sum_{i=1}^n F_i L_i \quad (14)$$

其中: ω 为热风枪功率; t_{p1} 为热风枪加热后盖时间; t_{p2} 为热风枪加热屏幕时间; F_i 为转移零件需要的力; L_i 为零件沿力方向转移的距离。

根据对拆卸序列规划目标的分析,建立多目标数学优化模型,在整个拆卸序列规划过程中,这些条件很难同时满足,应综合考虑各因素的影响关系。整个拆卸序列的综合评价可以表示为:

$$f(x) = \min(\alpha_1 T_c + \alpha_2 C_{\text{cost}} + \alpha_3 E) \quad (15)$$

其中: α_1 为拆卸时间权重系数; α_2 为拆卸利润权重系数; α_3 为拆卸能耗权重系数。指标权重系数 α_1 、 α_2 、 α_3 根据指标的重要程度确定,且 $\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 1$ 。

3 算法流程

完全拆卸有利于不同材料的零部件分类,对环境保护更加有利^[23],适合报废产品的拆卸,而选择性拆卸更适合机电产品的维修过程。对于废旧智能手机主要研究完全拆卸序列规划。

遗传算法是一种高度并行、随机、自适应的全局优化概率搜索算法,具有很强的鲁棒性和全局搜索能力,但依然存在早熟早敛的问题^[24]。对上述问题采用多种群遗传算法来代替传统的标准遗传算法进行优化。

多种群遗传算法突破了单个种群遗传的框架,引入多个种群同时进行优化搜索,不同的种群赋予不同的参数控制,实现不同的搜索,各种群之间通过移民算子进行联系,实现多种群的协同进化,人工算子保存进化代的最优个体,作为判断算法收敛的依据。

多种群遗传算法流程如图 1 所示,基本流程主要有以下几个方面。

(1) 实数编码。本算法编码需要满足连接方式,采用整数排列编码,对待拆卸的 n 个零件,染色体分为 n 段,每一段对应零件编号,确定每一个染色体为一个可能的拆卸序列编号。

(2) 初始化种群。根据手机内部连接关系建

立连接矩阵 G_1 和约束矩阵 G_2 。初始化种群数目与种群大小,种群规模太小会使种群进化不能产生期望数量,规模太大又难以收敛导致稳定性下降,种群数目最多选取 10 个,种群大小一般设为 0~100。

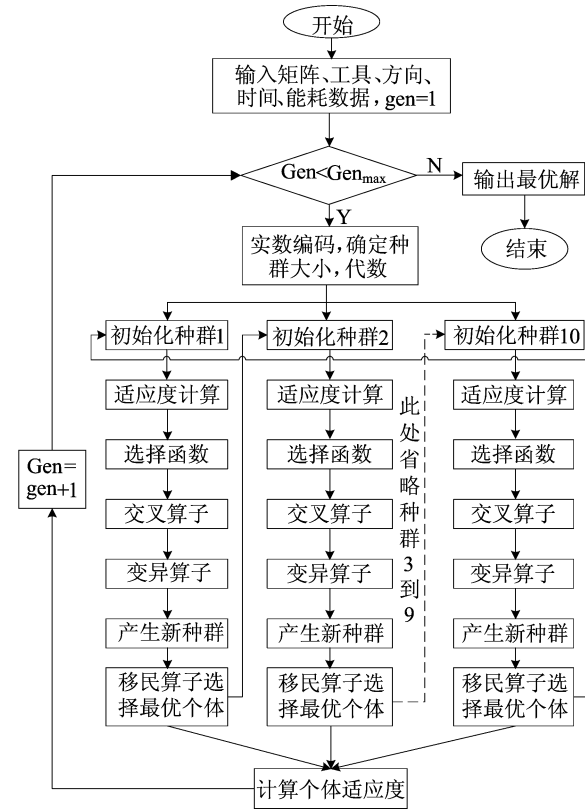


图 1 多种群遗传算法流程

筛选满足下式的子零件进入序列之中,若满足条件则删除本零件,并循环 n 次得到初始化序列,即

$$\sum_{j=1}^n q_{ij} = 0, \quad \sum_{j=1}^n p_{ij} > 0 \quad (16)$$

(3) 适应度函数。适应度函数是衡量一个算法优劣程度的指标,本遗传算法优化目标就是选择适应度函数尽可能优。根据上述多目标优化数学模型,本算法采用完全拆卸的拆卸时间、拆卸回收成本以及拆卸能耗值和的倒数作为适应度函数,权重系数根据所要重点优化的目标进行设计选择。适应度函数为:

$$\text{fitness}(i) = 1/[\alpha_1 T_c + \alpha_2 C_{\text{cost}} + \alpha_3 (E - E_{d3})] \quad (17)$$

(4) 交叉算子。部分映射杂交,父代样本两两分组合重复组合,在产生的染色体随机确定 2 个

位置,对 2 个位置中间数据进行交叉,不重复数字保留,冲突数字部分映射消除冲突,交叉后产生的子代个体均满足拆卸约束关系。

(5) 变异算子。随机选择 2 个点,将它们对换位置,选取 2 个染色体范围内的随机整数 r_1 、 r_2 并将位置调换,形成一个新的染色体。之后判断是否符合(16)式,以此来判断是否满足拆卸约束关系。若符合则形成一个新的变异染色体,若不符合则该变异染色体不成立。

(6) 移民算子。利用移民算子联系各种群,将前一个种群最优个体通过移民算子引入下个种群,达到信息交换的目的;同时为了保证种群个体不被破坏,扩大算法的搜索空间,则更易找到最优或次优解,也可以提高算法的收敛性能。

4 实例验证

4.1 基本信息参数

根据手机产品使用周期及结构特性,实例验证选用“小米 5”智能手机为研究对象。“小米 5”2016 年上市,已基本退出现有市场,适合进行拆机回收。

根据手工拆卸实验,“小米 5”手机可以拆出 18 个具有回收价值的零部件,具体拆卸零件图如图 2 所示。

根据实际拆卸关系,建立“小米 5”智能手机拆卸混合图,如图 3 所示。

“小米 5”手机基本拆卸信息及参数见表 1

所列。

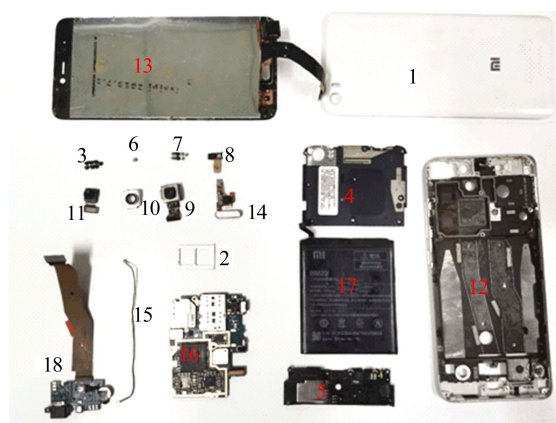


图 2 “小米 5”智能手机拆卸零件图

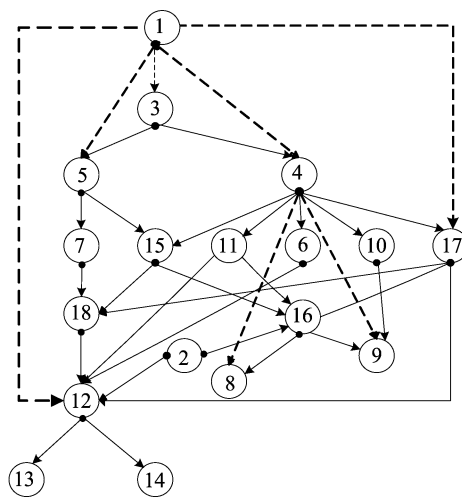


图 3 “小米 5”智能手机拆卸混合图

表 1 “小米 5”智能手机基本信息及参数

序号	零件名称	拆卸工具	连接方式	拆卸方向	拆卸时间/s	回收价格/元
1	后盖	吸盘、撬棒	卡扣	+Z	10	0.100
2	SIM 卡槽	卡针	插入限位	+X	6	0.010
3	第 1 层螺钉	螺钉刀	螺钉连接	+Z	6(1 个)	0.005
4	主板盖板	镊子	螺钉连接、卡扣	+Z	5	0.015
5	尾板盖板	镊子	螺钉连接、卡扣	+Z	4	0.015
6	第 2 层主板螺钉	螺钉刀	螺钉连接	+Z	6(1 个)	0.005
7	第 2 层尾板螺钉	螺钉刀	螺钉连接	+Z	6(1 个)	0.005
8	呼吸灯	镊子	卡扣	-Z	2	0.500
9	后摄	镊子	卡扣	+Z	2	15.000
10	后摄盖板	镊子	限位	+Z	4	0.015
11	前摄	镊子	卡扣	-Z	5	20.000
12	边框	热风枪、撬棒	密封胶、卡扣	+Z	135	1.500
13	屏幕	吸盘、镊子	密封胶、限位	-Z	30	30.000
14	按键	镊子	卡扣	-Z	10	0.010
15	射频线	镊子	嵌入	+Z	6	0.001
16	主板	镊子	限位、螺钉	+Z	12	45.000
17	电池	热风枪、镊子、吸盘	密封胶、限位、卡扣	+Z	60	15.000
18	尾板	螺钉刀、撬棒	螺钉、卡扣	+Z	16	20.000

表 1 中:拆卸时间为人工拆卸时间,通过人工拆卸 5 次取平均值计算求得;废旧手机购买成本及零部件回收价格取决于当前废旧手机回收市场价格,随着行情的变化具有不确定性,本文回收价格由深圳市爱博绿环保科技有限公司提供。

拆卸工具定义为将每个零件拆卸完成用到的全部工具,共 8 种:工具 1 为吸盘与撬棒;工具 2 为卡针;工具 3 为螺钉刀;工具 4 为镊子;工具 5 为热风枪与撬棒;工具 6 为螺钉刀与撬棒;工具 7 为吸盘与镊子;工具 8 为热风枪、吸盘、镊子。

以 10 次转换工具时间取平均值计算得到拆卸工具转换时间为 4 s/个。以 t_{12} 表示工具 1 切换至工具 2 所需的时间, t_{21} 表示工具 2 切换至工具 1 所需的时间,两者不一定相同,如工具 1 切换至工具 2 需切换 1 次,而工具 2 转换成工具 1 需切换 2 次。

拆卸工具切换时间矩阵 t_r 如下:

$$t_r = \begin{bmatrix} 0 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 8 \\ 8 & 0 & 4 & 4 & 8 & 8 & 8 & 12 \\ 8 & 4 & 0 & 4 & 8 & 8 & 8 & 12 \\ 8 & 4 & 4 & 0 & 4 & 8 & 4 & 8 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 0 & 4 & 8 & 8 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 8 & 0 & 8 & 12 \\ 8 & 4 & 4 & 0 & 8 & 8 & 0 & 4 \\ 4 & 4 & 4 & 0 & 4 & 8 & 4 & 0 \end{bmatrix}$$

“小米 5”手机拆卸成本参数见表 2 所列。从闲鱼平台网购“小米 5”废旧手机的成本为 90~150 元/台,按平均值 120 元/台计算;根据人力资源与社会保障局发布的青岛市企业人工成本参考水平,人工成本约 160 元/d;根据中工招商网数据,厂房平均月租 30 元/m²;人均操作面积为 5 m²,人均拆卸手机数量为 60 台/d。根据以上数据,计算得到表 2 结果。

表 2 “小米 5”智能手机拆卸成本参数

参数	名称	数值
$C_b/(\text{元} \cdot \text{部}^{-1})$	购买成本	120
$\omega_1/(\text{元} \cdot \text{h}^{-1})$	人工成本系数	20
$\omega_2/(\text{元} \cdot \text{次}^{-1})$	工具损耗系数	0.004
$C_{E1}/(\text{元} \cdot \text{台}^{-1})$	厂房成本	0.113
$C_{E2}/(\text{元} \cdot \text{台}^{-1})$	水电成本	0.05

“小米 5”智能手机拆卸能耗参数见表 3 所列,其中列举了拆卸过程中 5 个重要拆卸能耗。根据拆卸信息可知“小米 5”手机螺钉型号有 M1.4、M1.6 2 种:第 1 层螺钉共 16 颗,型号为

M1.4;第 2 层主板螺钉 1 颗,尾板螺钉 2 颗,型号为 M1.6,均为 8.8 级。以 M1.4 螺钉为例进行拆卸能耗计算,其公称直径为 1.38 mm,螺距为 0.3 mm,拧紧力标准值为 4.8 N,304 不锈钢的弹性模量为 200 GPa, θ 扭转角约为 8.5°,计算得拆卸能耗为 0.009 J;同理可得 M1.6 螺钉拆卸能耗约为 0.010 J。搭扣拆卸能耗计算以最典型屏幕排线为例,其 h_1 为 16 mm, l 为 11 mm, h_2 为 1 mm, d 为 1 mm,铝的弹性模量为 72 GPa,计算可得屏幕排线搭扣的拆卸功耗为 0.024 J。手机维修热风枪的功率一般为 300 W,加热时间根据实际情况实验可得。“小米 5”后盖拆卸拉力经过测力计测量 10 次取平均值为 19.6 N,拉开距离为 0.02 m,手机标准质量为 139 g,转移距离为 0.5 m,每次拆卸方向改变转移 0.05 m。

表 3 “小米 5”智能手机拆卸能耗参数

参数	名称	数值
$E_{d1}/(\text{J} \cdot \text{个}^{-1})$	M1.4 螺钉拆卸能耗	0.009
	M1.6 螺钉拆卸能耗	0.010
$E_{d2}/(\text{J} \cdot \text{个}^{-1})$	搭扣拆卸能耗	0.024
$E_{d3}/(\text{W} \cdot \text{s}^{-1})$	热风枪能耗	300.000
$E_{d4}/(\text{J} \cdot \text{次}^{-1})$	转移手机能耗	0.680
	改变拆卸方向能耗	0.068
$E_{d5}/(\text{J} \cdot \text{次}^{-1})$	吸盘拆卸能耗	0.392

总拆卸能耗分为人工拆卸能耗和电力拆卸能耗 2 类。人工拆卸能耗包括拆卸螺钉和卡扣、转换拆卸方向、移动手机和吸盘拉力能耗;电力拆卸能耗为使用热风枪能耗。电力拆卸能耗已计算于水电成本中,因此优化过程只考虑人工能耗。

根据“小米 5”的拆卸混合图模型得到拆卸连接矩阵和约束矩阵,即

$$G_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 3 & 3 & 0 & 1 & 1 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 \\ 1 & 3 & 0 & 1 & 1 & 3 & 0 & 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.2.3 串行拆卸与并行拆卸分析

文献[11]提出了一种针对复杂模型的并行拆卸建模与规划方法,利用传递闭包法进行聚类,将产品分成若干集合,并对每个集合及零件进行拆卸规划,按此思路根据连接关系,经过传递闭包计算,所有零件可以聚类为4个组件。组件1包括1、2、3、4、5;组件2包括8、9、10、11、16;组件3包

括15、17、18;组件4包括6、7、12、13、14。通过拆卸优先矩阵逐步排查4个组件,组件1优先于其他组件拆卸,用遗传算法对不含优先拆卸的零部件进行序列规划计算,可采用3条并行拆卸线,故并行拆卸硬件成本上比串行扩大3倍,从整体到组件化过程中也存在3次转移能耗。

不同序列规划结果见表5所列。

表5 不同序列规划结果

拆卸模式	拆卸序列	利润/元	时间/s	人工能耗/J
并行序列	2-1-3-4-5-6-7- $\left\{ \begin{array}{l} 16-10-11-8-9 \\ 15-17-18 \\ 12-13-14 \end{array} \right.$	21.263	455	5.124
串行序列	2-1-3-4-10-11-5-15-17-7-6-18-12-14-16-13-9-8	21.285	465	3.081

由表5可知,并行序列在拆卸时间上比串行序列更快,由于并行拆卸序列硬件成本上扩大3倍,利润上比串行序列减少0.022元/台,且在组件化的过程中产生3次转移能耗,并行序列比串行序列产生人工能耗多2.043J。

综合拆卸时间、拆卸利润、拆卸能耗3个评价指标可知,串行序列更适合手机等精密电子产品的拆卸。

5 结 论

针对废旧手机拆卸序列规划问题,本文基于多种群遗传算法,考虑连接件关系,建立混合图模型,利用连接矩阵、优先约束矩阵描述待拆智能手机的约束关系,并结合拆卸时间、拆卸利润和拆卸能耗等指标建立了多目标评价函数,且与双种群算法和并行拆卸进行对比,以“小米5”为例进行验证。得到以下结论:

(1) 当拆卸序列为2-1-3-4-10-11-5-15-17-7-6-18-12-14-16-13-9-8时:回收利润最高,为21.285元;拆卸时间最短,为465s;人工能耗也最高,为3.081J;此时变换9次拆卸工具,转换3次拆卸方向。当拆卸序列为2-1-3-4-5-15-7-6-10-11-17-18-12-16-9-14-13-8时:回收利润为21.249元;拆卸时间为467s;人工能耗最低,为3.013J;此时转换10次工具,2次拆卸方向。

(2) 多种群算法和双种群算法采用不同的优化机制,双种群遗传算法最优进化代数为22代,多种群遗传算法最优进化代数为8代,虽然双种群遗传算法也具有较好的寻优效果,但多种群算

法收敛速度更快,更不易陷入局部解。

(3) 以“小米5”智能手机为例,并行拆卸序列与串行拆卸序列相比,并行拆卸能减少10s拆卸时间,但利润比串行序列减少0.022元/台,且在组件化过程中产生的人工能耗比串行序列多2.043J,综合拆卸时间、拆卸利润、拆卸能耗3个评价指标可知,串行序列更适合手机等小型精密电子产品的拆卸。

[参 考 文 献]

- [1] 马晓琴,王颖婕.我国废弃智能手机回收利用研究[J].北京交通大学学报(社会科学版),2021,20(1):116-124.
- [2] 马浩博,朱明伟,何杰,等.废旧电路板的低温熔融混碱处理和有机金属提取[J].中国有色金属学报,2021,31(2):443-452.
- [3] 郭钧,王振东,杜百岗,等.考虑不定拆卸程度的选择性异步并行拆卸序列规划[J].中国机械工程,2021,32(9):1080-1090.
- [4] ANNAMALAI M, GURUMURTHY K. Characterization of end-of-life mobile phone printed circuit boards for its elemental composition and beneficiation analysis[J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2021, 71(3): 315-327.
- [5] 宋小龙,李博,吕彬,等.废弃手机回收处理系统生命周期能耗与碳足迹分析[J].中国环境科学,2017,37(6):2393-2400.
- [6] ZUFALL J L, NORRIS S, SCHALTEGGER S. Business model patterns of sustainability pioneers-analyzing cases across the smartphone life cycle[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244(2): 1-15.
- [7] 张艳,张明路,蒋志宏,等.动态环境下移动机器人路径规划的研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(10):1297-1306.

- [8] 王辉向. 东段广洪基于蚁群算法的产品拆卸序列规划研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006(9):1431-1437.
- [9] 张雷, 刘志峰, 杨明, 等. 基于解释结构模型的产品零部件拆卸序列规划[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(4):667-675.
- [10] 吴昊, 左洪福. 基于改进遗传算法的选择性拆卸序列规划[J]. 航空学报, 2009, 30(5):952-958.
- [11] 张雷, 彭宏伟, 卞本阳, 等. 复杂产品并行拆卸建模及规划方法研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(7):937-943.
- [12] 张秀芬, 胡志勇, 蔚刚, 等. 基于联接元的复杂产品拆卸模型构建方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(9):122-130.
- [13] 任亚平. 废旧产品拆卸序列规划问题建模与优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [14] ZHANG H C, KUO T C. A graph-based approach to disassembly model for end-of-life product recycling [C]// IEEE/CPMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium. [S. l.]: IEEE, 1996:247-254.
- [15] 尹凤福, 杜泽瑞, 李林, 等. 基于双种群遗传算法的废旧智能手机拆卸序列规划[J]. 机械工程学报, 2021, 57(17):226-235.
- [16] YANG Y S, YUAN G, ZHUANG Q W. Multi-objective low-carbon disassembly line balancing for agricultural machinery using MDFOA and fuzzy AHP [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 233:1465-1474.
- [17] LIU Q, LI Y L, FANG Y L. Many-objective best-order-sort genetic algorithm for mixed-model multi-robotic disassembly line balancing[J]. Procedia CIRP, 2019, 83:14-21.
- [18] TSENG H E, CHANG C C, LI J D. Modular design to support green life-cycle engineering[J]. Pergamon, 2008, 34(4):2524-2537.
- [19] 赵柏萱, 刘检华, 宁汝新. 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):136-145.
- [20] XU W J, TANG Q, LIU J Y. Disassembly sequence planning using discrete bees algorithm for human-robot collaboration in remanufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 62:641-650.
- [21] 任亚平, 郭洪飞, 张超勇, 等. 考虑产品制造过程内含能的选择性拆解规划能耗优化研究[J]. 机械工程学报, 2021, 57(6):200-210.
- [22] 汤可石, 王玉琳. 产品拆卸过程的碳排放分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(1):18-23.
- [23] BAHUBALENDRUNI M V A R, VARUPALA V P. Disassembly sequence planning for safe disposal of end-of-life waste electric and electronic equipment[J]. National Academy Science Letters, 2021, 44(3):243-247.
- [24] TSENG H E, CHANG C C, LEE S C. Hybrid bidirectional ant colony optimization (hybrid BACO): an algorithm for disassembly sequence planning [J]. Pergamon, 2019, 83:45-56.

(责任编辑 胡亚敏)

(上接第 437 页)

用改进抽样策略的 RANSAC 算法拟合齿顶圆得到精确的齿轮中心。实验结果表明, 本文算法在轮廓存在缺陷、图像受到噪声干扰的情况下依然具有较高的定位精度, 具有较强的实用性。

[参 考 文 献]

- [1] 冯鹏鹏, 曾志强, 李忠华, 等. 基于视觉技术的尼龙齿轮分度圆测量[J]. 制造技术与机床, 2020(1):132-135.
- [2] 汤洁, 刘小兵, 李睿. 未知参数小模数齿轮齿距和齿廓偏差视觉测量[J]. 光学精密工程, 2021, 29(1):100-109.
- [3] 支珊, 赵文珍, 段振云, 等. 视觉测量齿轮定位偏心对齿距测量精度的影响[J]. 仪器仪表学报, 2019, 40(2):205-212.
- [4] 程敏杰. 基于机器视觉的直齿轮在线测量方法研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2020.
- [5] 魏效玲, 崔岳, 王晓鹏. 基于机器视觉的轮齿缺陷检测研究[J]. 煤矿机械, 2020, 41(9):35-37.
- [6] 王宁, 段振云, 赵文辉, 等. 视觉检测中齿轮外轮廓分段[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2016(4):117-120.
- [7] 邵勇, 张钰婷, 顾桂鹏, 等. 基于最小凸包的直齿圆柱齿轮检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(9):1385-1393.
- [8] 孔盛杰, 黄翔, 周蒯, 等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(4):247-255.
- [9] 杨婷婷, 顾梅花, 章为川, 等. 彩色图像边缘检测研究综述[J]. 计算机应用研究, 2015, 32(9):2566-2571.
- [10] 刘相湖, 王涛, 张小哲. 对 Freeman 链码分析的角点检测算法[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(4):202-208.
- [11] FISCHLER M A, BOLLES R C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography [J]. Communications of the ACM, 1981, 24(6):381-395.

(责任编辑 胡亚敏)