DOI: 10.3901/JME.2021.17.226

基于双种群遗传算法的废旧智能手机拆卸序列规划*

尹凤福 杜泽瑞 李林 梁振宁 安瑞 王瑞东 刘广阔
(青岛科技大学机电工程学院 青岛 266061)

摘要: 为解决手机大批量报废带来的环境和资源问题,对废旧智能手机进行了拆卸回收技术的研究。针对废旧智能手机的完全拆卸,提出了一种基于双种群遗传算法 (Genetic algorithm, GA) 的拆卸序列规划方法,通过分析智能手机的结构零部件信息,特别是零部件间的约束关系,建立了五元组混合图拆卸模型,并利用连接矩阵和优先矩阵,描述了拆卸智能手机的约束关系。以拆卸时间和回收利润作为决策目标,同步考虑了影响拆卸时间和回收利润的多个指标,创新构建了拆卸双目标决策优化数学模型,并设计了一种双种群 GA 搜索优化解,确定智能手机最优或次优的拆卸序列方案。以“iPhone6”智能手机为实例,利用所设计的算法求解了其对应的优化拆卸序列,并与经验拆卸和基本 GA 对比,结果显示拆卸时间缩短了 11.2%和 5.6%,回收利润提高了 6.6%和 3.0%,验证了该方法的可行性和高效性。

关键词: 废旧智能手机; 双目标优化; 双种群 GA; 拆卸序列规划

中图分类号: TP18; X76

Disassembly Sequence Planning of Used Smartphone Based on Dual-population Genetic Algorithm

YIN Fengfu DU Zerui LI Lin LIANG Zhenning AN Rui
WANG Ruidong LIU Guangkuo

(College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266000)

Abstract: In order to solve the environmental and resource problems caused by the mass scrapping of mobile phones, the dismantling and recycling technology of waste smartphones is studied. For the complete disassembly of waste smartphones, a disassembly sequence planning (DSP) based on dual population GA (genetic algorithm) is proposed. By analyzing the structural component information of smartphones, especially the constraints between the parts, a five-tuple mixed graph disassembly model is established, and the connection matrix and priority matrix are used to describe the constraint relationship of disassembly of smartphones. Taking disassembly time and recovery profit as the decision goals, considering multiple indicators that affect the disassembly time and recovery profit simultaneously, a mathematical model of disassembly dual-objective decision optimization is constructed innovatively. A dual-population GA search optimization solution is designed to determine the optimal or suboptimal disassembly sequence scheme. Taking the "iPhone6" smartphone as an example, the corresponding optimized disassembly sequence is solved using the designed algorithm. Compared with the experience disassembly and basic GA, the results show that the disassembly time is shortened by 11.2% and 5.6%, and the recovery profit increased by 6.6 % and 3.0%, which proves the applicability and efficiency of the method.

Key words: waste smartphones; dual-objective optimization; dual-population GA; disassembly sequence planning

0 前言

随着 5G 时代的到来,智能手机更新换代的速度日益加快,被淘汰的废旧智能手机对资源和自然

环境造成了严重影响,已成为亟需解决的问题。目前,关于智能手机的研究主要集中于讨论智能手机的理论生命周期^[1]、设计改进智能手机的结构^[2]等,缺乏对废旧智能手机拆卸和回收的研究。拆卸回收过程是产品生命周期的必要环节,在拆卸过程中,寻找合理高效的拆卸序列,确定最优或次优的序列方案,可提高智能手机拆卸效率,也为手机新产品的绿色设计提供了有力的支撑。

* 国家科技重点研发计划资助项目(2018YFC1902300)。20200816 收到初稿,20210309 收到修改稿

近年来,国内外的学者针对不同产品拆卸进行了广泛研究,其中,拆卸模型的建立和序列优化是拆卸研究的关键步骤。YANG 等^[3]建立了基于 Petri 网的装备拆卸模型,提高了拆卸效率。LIU 等^[4]提出了一种改进的 AND/OR 图,充分表达了产品信息。张秀芬等^[5]针对传统复杂产品拆卸模型构建困难和效率低等,构建了基于联接元的拆卸模型。JEUNET 等^[6]建立了基于优先图模型表示大中型产品实例的拆卸操作及其优先关系。然而,随着产品结构复杂度的提高,传统的图模型已经不能满足设计者的需求。对此,一些学者采用数学矩阵的方式进行建模,表达产品的约束关系,丰富模型的信息量。XU 等^[7]利用拆卸稳定性矩阵、紧固件优先矩阵、紧固件组件矩阵和组件运动优先矩阵建立拆卸模型,分析产品零部件间的约束关系。REN 等^[8]建立了基于 AND/OR 图的拆卸模型,同时形成优先矩阵和异或矩阵来描述组件或操作之间的优先关系和异或关系。模型是拆卸问题的基础,规划则是拆卸的核心,随着产品零部件数量的增多,人工智能算法用于产品的拆卸序列规划研究逐渐受到重视,KHEDER 等^[9]提出了一种具有优先保护交叉的遗传算法 (Genetic algorithm, GA),用于寻找汽车后轴最佳可行拆卸顺序。TIAN 等^[10]提出了一种同时考虑零件质量不确定性和拆卸作业成本变化的拆卸顺序规划问题,以拆卸利润最大化为优化目标,设计了一种模糊仿真与人工蜂群相结合的混合智能算法进行优化求解。REN 等^[11]提出了一个异步并行拆卸规划问题模型,采用 GA 对 HG5-20 三轴五速机械变速器以最短拆卸时间为目标进行序列优化。WANG 等^[12]构造了带有废打印机的随机双面部分拆卸线,设计

了一种基于 Pareto 的多目标离散花授粉算法优化求解。TSENG 等^[13]设计了一种基于块的 GA 来优化打印机拆卸序列。XU 等^[14]提出了一种基于 Pareto 的离散蜜蜂算法来寻找简化计算机最优拆卸序列。TIAN 等^[15]针对复杂产品,提出了一种基于 GA 的协同拆卸序列与任务规划方法,对提升机进行了序列优化求解。REN 等^[8]提出了一种改进的 GA 求解以拆卸相关成本为目标的序列优化问题。邢宇飞等^[16]针对多目标拆卸规划问题,提出了基于 Pareto 集多目标蚁群优化算法。

上述研究成果为拆卸序列规划研究奠定了良好基础,但已有的研究成果主要以机械产品或大型家电产品拆卸为主。目前,智能手机作为数量最多的电子电器设备,其内部零件数量多且零件间存在多层约束。拆卸时,需要同步考虑拆卸层次关系和零件间约束关系,对生成可行拆卸序列的要求高。但智能手机体积小,使用周期短,报废数量庞大,高精度的元器件具有较高的回收价值。因此,对智能手机进行拆卸回收研究具有一定实际意义。故本文对智能手机进行拆卸回收研究,提出了一种基于双种群 GA 的拆卸序列规划方法,图 1 给出了拆卸序列规划方法流程图,该方法从选择拆卸的智能手机开始,确定智能手机拆卸深度,以混合图理论为基础,建立五元组混合图拆卸模型,分析智能手机零部件间的相关性,并以拆卸时间和拆卸回收利润作为决策目标,创新构建了双目标优化数学拆卸模型,同时设计一种双种群 GA 进行智能手机的拆卸序列规划,提高整体拆卸效率,获取最优或次优拆卸回收方案。

图1 智能手机拆卸序列规划方法流程图

1 智能手机的拆卸模型

对智能手机进行拆卸过程的研究,首先要创建

拆卸模型。拆卸模型是产品拆卸序列规划研究的基础,可详细描述拆卸研究所需的基本信息。

1.1 智能手机拆卸相关信息

拆卸是一个较复杂的过程,在拆卸前,需要了

解和获取产品的拆卸相关信息,包括产品基本信息和产品拆卸过程信息。产品基本的信息主要包括产品结构信息和零部件基本信息;产品拆卸过程信息主要包括产品装配过程信息、约束关系等。

目前,获取产品拆卸信息的主要途径有三维模型提取方式和人工交互方式,由于智能手机体积小,小型零部件数量多且内部约束关系复杂,建模复杂且不易获取全面信息,因此本文采用人机交互方法,获取了智能手机全面、准确的信息。

1.2 五元组混合图拆卸模型

现阶段,产品的拆卸模型多种多样,有无向图、与或图、Petri 网等模型^[17-19]。本文根据智能手机的相关信息和图论思想,建立由无向图和有向图组成的五元组混合图模型。在建模中,一些学者^[20]为简化产品信息的复杂度,常常忽略产品的连接件,为使智能手机拆卸更贴于实际,有必要将连接件作为零件考虑。由于智能手机中的连接件数量较多,如进行单一标号会增加拆卸的复杂性且与实际拆卸不符,鉴于手机连接件位置具有层次性,因此将同一层的连接件统一拆卸,可缩短拆卸时间,提高拆卸效率且符合实际拆卸。

混合图拆卸模型由五元组表示,即 $G = \{V_s, V_c, U_e, D_r, D_v\}$ 。其中,式中 G 表示混合图, V_s 为顶点,表示产品待拆卸的零件; V_c 表示所有待拆卸的连接件; U_e 为无向边,用实线表示,表示零件间有连接关系; D_r 为有向边,用带箭头的实线表示,表示零件间相互连接且存在优先关系; D_v 为有向边,用带箭头的虚线表示,表示零件间不相互连接但存在优先关系。其中,有向边的箭头方向为约束零件指向被约束零件。

混合图模型中,顶点代表着产品的零件,无向边和有向边分别表示零件间的连接关系和优先关系,连接矩阵则表示零件间的连接关系,表达式为 $G_1 = \{V_s, V_c, U_e\}$; 优先矩阵则表示优先关系,表达式为 $G_2 = \{V_s, V_c, D_r, D_v\}$ 。对于智能手机,采用数学矩阵表示零部件间约束关系。假设混合图中零件和连接件总数为 n ,则矩阵 G_1 和 G_2 可表达为

$$G_1 = (uc_{ij}) = \begin{pmatrix} uc_{11} & uc_{12} & \cdots & uc_{1n} \\ uc_{21} & uc_{22} & \cdots & uc_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ uc_{n1} & uc_{n2} & \cdots & uc_{nn} \end{pmatrix} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中,当 i 和 j 相互连接时, $uc_{ij} = uc_{ji} = 1$; 当 i 和 j 不连接时或 $i = j$ 时, $uc_{ij} = uc_{ji} = 0$ 。

$$G_2 = (dc_{ij}) = \begin{pmatrix} dc_{11} & dc_{12} & \cdots & dc_{1n} \\ dc_{21} & dc_{22} & \cdots & dc_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ dc_{n1} & dc_{n2} & \cdots & dc_{nn} \end{pmatrix} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中,当 j 必须在 i 之前拆卸时, $dc_{ij} = 1$, $dc_{ji} = 0$; 当 i 和 j 无优先关系或 $i = j$ 时, $dc_{ij} = dc_{ji} = 0$ 。

对于智能手机来说,零部件数量较多,内部连接复杂,因此在构建拆卸模型时,可选定一个零部件作为基础件,有助于提高拆卸效率。基础件(由经验指定)是产品装配的基础,且与产品中其他零件关联最多的零件,其优先级最低,即最后拆卸基础件。

2 双目标优化的数学模型

产品的拆卸应尽可能提高拆卸效率,降低拆卸成本,增加拆卸回收利润等,选择不同的决策目标,产生的拆卸路径也会存在较大差异。在过去研究中,一些学者通过选择拆卸时间、方向变化次数、工具变化次数或回收利润等作为决策目标,进行单目标优化。宋守许等^[21]将拆卸方向变化次数和拆卸工具变化次数作为判定指标,对内啮合齿轮液压泵进行了拆卸序列规划。CONG 等^[22]则采用拆卸回收利润作为决策目标,对硬盘驱动器(HDD)进行了拆卸序列规划。杨得玉^[23]针对涡轮减速器,选择拆卸时间作为决策目标,进行优化求解。根据上述单目标优化实例,产生的优化序列仅满足单指标要求,而没有综合考虑其他评价指标,使产生的序列优化程度不高。

本文综合考虑多方面评价指标,根据影响智能手机拆卸效率和回收利润的主要因素建立双目标优化数学模型,以拆卸时间和回收利润作为决策目标,同步考虑影响拆卸时间和回收利润的多个指标,全面分析了影响智能手机拆卸效率和回收利润的各个因素,为研究者提供了优化的决策空间。

数学模型分为拆卸时间模型和回收利润模型两部分。其中,拆卸时间直观反映了产品拆卸效率,是拆卸序列规划研究的重要决策目标,因此建立拆卸时间函数 T ,如式(3)所示,拆卸时间包括了基本时间和变化时间。

$$T = \sum_{i,k=1}^n T_{ik}^m + \sum_{i,k=1}^n t_{ik} \times T_{ik}^t + \sum_{i,k=1}^n d_{ik} \times T_{ik}^d \quad (3)$$

式中, T_{ik}^m 表示拆卸零件 i 到零件 k 拆卸基本时间,

T_{ik}^t 和 T_{ik}^d 为分别表示拆卸工具、方向变化时间, 根据拆卸工具变化时间标准表^[24]和常见基本拆卸动作的时间基准表^[23], 拆卸工具变化时间 T_{ik}^t (单位/s) 和拆卸方向变换时间 T_{ik}^d (单位/s) 一般设定为

$$T_{ik}^t = \begin{cases} 0 & \text{从零件 } i \text{ 到零件 } k \text{ 拆卸工具不变} \\ 4 & \text{从零件 } i \text{ 到零件 } k, \text{ 单个拆卸工具改变} \\ 4N & \text{从零件 } i \text{ 到零件 } k, N \text{ 个拆卸工具改变} \end{cases}$$

$$T_{ik}^d = \begin{cases} 0 & \text{从零件 } i \text{ 到零件 } k \text{ 拆卸方向不变} \\ 2 & \text{从零件 } i \text{ 到零件 } k, \text{ 拆卸方向改变 } 90^\circ \\ 4 & \text{从零件 } i \text{ 到零件 } k, \text{ 拆卸方向改变 } 180^\circ \end{cases}$$

而在拆卸过程中, 拆卸工具、方向变化时间又与两者的拆卸变化次数紧密相关, 减少拆卸工具更换次数和拆卸方向变化次数, 可缩短拆卸时间, 提高拆卸效率。因此, 建立拆卸工具变化函数 T_t 和拆卸方向变化函数 T_d , 其函数可表达为

$$T_t = \sum_{i, k=1}^n t_{ik} \quad (4)$$

$$T_d = \sum_{i, k=1}^n d_{ik} \quad (5)$$

式中, t_{ik} 表示拆卸零件 i 到零件 k 拆卸工具变化系数, 当拆卸零件 i 和拆卸零件 k 拆卸工具一致时, $T_t=0$, 反之, $T_t=1$; d_{ik} 表示拆卸零件 i 到零件 k 拆卸方向($\pm X, \pm Y, \pm Z$)变化系数, 当拆卸零件 i 和拆卸零件 k 拆卸方向一致时, $T_d=0$, 反之, $T_d=1$ 。

其中, 在拆卸回收研究中, 拆卸回收利润是最直观的决策目标, 能够为研究者提供是否选择拆卸回收处理的决策, 因此建立拆卸回收利润函数 P , 其函数可表达为

$$P = \sum_{i=1}^n (r_i - c_i) - c_p - c_t - c_h \quad (6)$$

式中, r_i 表示拆卸零件 i 回收收入, c_p 表示产品购买成本, c_t 表示产品运输成本, c_h 表示产品库存成本, c_i 表示产品零件 i 拆卸成本(拆卸工具折旧成本和人工成本), 其函数可表达为

$$c_i = \left(\sum_{i, k=1}^n T_{ik}^m + \sum_{i, k=1}^n t_{ik} \times T_{ik}^t + \sum_{i, k=1}^n d_{ik} \times T_{ik}^d \right) \times (c_l + c_d) \quad (7)$$

式中, c_l 表示拆卸工具的折旧费, c_d 表示工时费。

运输成本 c_t 包括固定卡车(向运输公司付款)和装卸卡车的成本。假设卡车的总成本为 ce , 卡车每天运输 k_0 条路线, 其函数可表达为

$$c_t = \frac{ce \times q \times m_0}{cp \times k_0} \quad (8)$$

式中, q 表示智能手机购买数量, m_0 表示智能手机的重量, cp 表示载货量。

库存成本 c_h 是库存持有成本和维护成本总和, 其函数可表达为

$$c_h = A_0 \times c_a \times q \quad (9)$$

式中, A_0 表示平均库存水平, c_a 表示库存成本。故本文建立的双目标优化数学模型, 其函数 F 可表达为

$$F = \omega_1 \cdot \left(\sum_{i, k=1}^n T_{ik}^m + \sum_{i, k=1}^n t_{ik} \times T_{ik}^t + \sum_{i, k=1}^n d_{ik} \times T_{ik}^d \right) + \omega_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n (r_i - c_i) - C_p - C_t - C_h \right) \quad (10)$$

式中, F 为可行拆卸序列对应的双目标优化函数值, i, k 为拆卸序列中第 i, k 个零件, n 为总拆卸次数, ω_1 为拆卸时间权重系数, ω_2 为拆卸回收利润权重系数。

3 智能手机拆卸序列生成及优化

随着产品零件数量增加, 一般拆卸序列数量会呈指数增长。智能手机零部件数量较多, 产生的初始拆卸序列有数万条, 如由人工进行组合和优化, 过程繁琐, 难以实现。因此本文利用智能算法进行序列生成和优化求解, 根据不同优化目标选取符合条件的最优或次优拆卸序列。

3.1 智能手机的初始序列生成

拆卸可根据拆卸深度分为完全拆卸, 部分拆卸和目标拆卸。目前, 智能手机的拆卸研究还处于起步阶段, 相比其他非完全拆卸, 完全拆卸可以资源最大化, 且能够全面了解手机内部结构关系, 有利于产品结构的改进设计, 因此对智能手机进行了完全拆卸。

拆卸序列规划问题是一个具有复杂约束关系的离散组合优化问题。在序列规划前需要满足可行的拆卸约束条件, 根据智能手机结构零部件间约束关系, 定义当前零件可拆卸性, 必须同时满足式(11)和(12)的前提下, 当前零件方可拆卸。

$$\sum_{i, j=1}^n uc_{ij} \geq 0 \quad (11)$$

$$\sum_{i, j=1}^n dc_{ij} = 0 \quad (12)$$

废旧智能手机完全拆卸时, 通常初始种群不能充分获取拆卸混合图的信息, 因此本文设计了智能手机种群初始化流程, 对初始种群进行约束规划。定义产品中零件和连接件总数量为 n , 基准件为零件 m , 满足可拆卸性零件的序列表为 sqe , 拆卸序列初始种群($N \times n$ 矩阵)为 $Chrome$, 初始化种群个数为

N , 被拆卸的零件为 k , 初始种群生成流程如下。

(1) 确定智能手机型号, 获取拆卸相关信息, 确定基准件 m (如: 案例中, m 是零件 20)。

(2) 构建五元组拆卸混合图, 生成连接矩阵 G_1 和优先矩阵 G_2 (如: 案例中的图 5)。

(3) 初始化种群个数 N 、赋值和清空列表 $\text{Chrome}(N \times n \text{ 矩阵})$ (如: 案例中, N 为种群大小 100)。

(4) 判断语句: i 是否小于 N , 若是, 执行步骤 (6), 若不是, 跳转到步骤 (11)。

(5) 初始化零件个数 n 、列表 sqe (如: 案例中, n 为 “iPhone6” 的零件个数 20)。

(6) 根据零件可拆卸条件式 (11)、(12), 将满足可拆零件中任一零件 k 放入列表 sqe 中。

(7) 判断语句: n 是否大于 0, 若是, 执行步骤 8, 若不是, 跳转到步骤 (9)。

(8) 删除零件 k , 更新连接矩阵 G_1 和优先矩阵 G_2 , 并转到步骤 (7)。

(9) 得出列表 sqe , 储存到列表 Chrome (如: 案例中, 列表 sqe 是 1×20 矩阵, 列表 Chrome 是 100×20 矩阵)。

(10) 并跳转步骤 (4), 继续执行判断语句。

(11) 输出列表 Chrome , 终止程序。

3.2 拆卸序列规划

根据上述初始种群的生成流程, 获得可行序列数量高达数万条, 因此需要根据不同的决策目标进行优化处理, 选择最优或次优的拆卸序列。

本文研究的废旧智能手机拆卸序列规划, 属于具有复杂约束的离散组合优化问题。针对该问题, GA 是最常用的优化算法, 但基本 GA 种群单一、搜索能力有限, 易陷入局部最优解。因此, 设计了一种双种群 GA, 该算法本质是一种并行 GA, 较大程度上保留其原有进化机制, 具有较强的全局搜索能力, 并且该算法采用两个子种群独立进化, 确保了子种群的多样性。同时, 两个优秀种群通过种群间染色体随机部分交换, 扩大了算法搜索空间, 加快了搜索速度, 提高了优化解的质量, 具有良好的搜索能力和收敛性能。图 2 为双种群 GA 流程图。其中, 双种群 GA 主要流程如下。

(1) 实数编码。

针对本问题, 染色体的编码需要满足拆卸连接关系和优先关系的约束, 因此采用实数编码。每个基因代表一个拆卸的零件, 其编码长度等于拆卸零件个数。该编码方式确保每一个染色体是一种可能的拆卸方式, 减少计算量, 加快算法的进程。

(2) 适应度函数。

适应度函数是衡量种群个体好坏的唯一标准,

也是优化算法实施的关键。在遗传算法中, 适应度函数与目标函数具有一定转化关系。根据上述双目标优化数学模型, 采用完全拆卸的拆卸时间和拆卸回收利润双目标作为适应度函数, 搜索拆卸时间的最小值和拆卸回收利润的最大值。双目标适应度函数 $f(x)$ 可表达为

$$\min f(x) = \left[T(x), \frac{1}{P(x)} \right] \quad (13)$$

图 2 双种群 GA 流程图

针对双目标适应度函数, 采用加权求和方法将拆卸时间和拆卸回收利润整合为一个适应度函数。对拆卸时间和回收利润进行归一化处理, 如公式 (14) 和 (15) 所示。得出加权求和双种群 GA 的最终适应度函数如式 (16)

$$T_{\text{value}} = (T - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\min}) \quad (14)$$

$$P_{\text{value}} = (P_{\max} - P) / (P_{\max} - P_{\min}) \quad (15)$$

$$f = \omega_1 \cdot T_{\text{value}} + \omega_2 \cdot P_{\text{value}} \quad (16)$$

式中, $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别是最大和最小拆卸时间。 $P_{\max}$ 和 $P_{\min}$ 分别是最大和最小拆卸回收利润。 ω_1 和 ω_2 分别是 T_{value} 、 P_{value} 的权重系数, 一般, 相对权重的关系为: $\omega_1 + \omega_2 = 1$, 权重系数的分配根据优化目标的重要程度所确定。

(3) 交叉算子设计。

采用单点交叉方式，随机产生一个交叉点，选择染色体 1 中待交叉的序列：7，5，9。在染色体 2 中搜寻基因 7,5,9 的排列方式(根据拆卸约束关系)，并作为染色体 1 尾部新基因排列，成为新一代种群(子代)。同理，交叉操作后染色体 2 尾部新基因排列为：7，6，9，交叉后产生的子代个体均满足拆卸约束关系。

(4) 变异算子设计。

在染色体中，随机产生 2 个变异点，把变异点间的基因删除，然后按照拆卸约束关系，将删除的基因重新组合，插入到删除区域形成新的染色体，产生的子代满足拆卸约束关系。

(5) 种群个体交换设计。

两种群间染色体部分交换，且互换数目随机产生，交换后产生新一代种群。本文采用双种群搜索，相比基本 GA 的单种群搜索，双种群通过两个优秀种群间染色体随机部分交换，扩大了算法的搜索空间，加快了搜索速度，提高了收敛性能。

4 实证研究

目前智能手机产品正趋向同质化发展，手机结构大同小异，实例选择了“iPhone6”智能手机作为研究对象，“iPhone6”智能手机于 2014 年发布，作为苹果品牌历史最畅销的机型，销售量突破 2.5 亿部^[25]。目前，该机型已于 2019 年 5 月停产，大部分手机已被闲置，考虑到部分零部件还具有一定价值，因此对其进行拆卸回收研究，使资源最大化。通过人工拆卸“iPhone6”智能手机，获取其拆卸零部件如图 3 所示。

图 3 “iPhone6”智能手机拆卸零件图

本案例中的基本拆卸时间是由人工重复 3 次拆机试验，求取的平均值。而对于购买成本和回收收入，则取决于当前二手智能手机回收市场价格，价格会随着行情的变化具有不确定性，本案例中价格数据由深圳市爱博环保科技有限公司提供，其中“iPhone6”智能手机购买成本约 230 元/个，其余各零件的回收收入如表 1 所示。

表 1 “iPhone6”智能手机基本信息及参数

编号	零件名称	拆卸工具	拆卸方向	基本拆卸时间/s	回收收入/元
1	屏幕	吸盘 T2/撬棒 T6/螺丝刀 T3	-Z	38.0	80
2	螺钉 1	螺丝刀 T3	-Y	8.0	0.05
3	听筒	镊子 T4	+Z	4.0	3
4	螺钉 2	螺丝刀 T3	+Z	48.0	0.3
5	Home 键	镊子 T4	-Z	5.0	1.5
6	散热片	镊子 T4	-Z	6.0	4.5
7	前摄像头	镊子 T4	-Z	5.0	28
8	螺钉 3	螺丝刀 T3	+Z	158.0	0.75
9	电池	撬棒 T6	+Z	24.0	22
10	后摄像头	镊子 T4	+Z	4.0	40
11	主板	撬棒 T6/镊子 T4	+Z	30.0	65
12	尾插排线	撬棒 T6/镊子 T4	+Z	16.0	6.5
13	连接器	镊子 T4	+Z	3.0	0.1
14	卡托	卡针 T1	+X	4.0	0.5
15	振动器	镊子 T4	+Z	4.0	5
16	扬声器	撬棒 T6/镊子 T4	+Z	6.0	5
17	螺钉 4	螺丝刀 T3	+Z	22.0	0.27
18	电源排线	镊子 T4	-X	18.0	0.6
19	音量排线	镊子 T4	+X	12.0	0.4
20	后盖	镊子 T4	-Z	3.0	0.53

* 注：螺钉 1 为 2 颗固定后盖的螺钉、螺钉 2 为多颗固定散热片、前摄像头等零件的螺钉、螺钉 3 为多颗固定主板、振动器等零件的螺钉、螺钉 4 为多颗固定电源排线和音量排线的螺钉。

表 2 是双目标优化数学模型中的其他定量参数表^[22]，提供了拆卸回收时拆卸、运输、库存等参数。

表 2 定量参数表

定义	数值
卡车总成本 $ce/(元/辆)$	1 060
运输路线 k	10
产品重量 $m/(g/个)$	129
载货量 $cp/(kg/辆)$	1 000
平均库存水平 A_0	0.5
库存成本 $c_a/(元/个)$	0.1
工时费 $c_d/(元/时)$	84
拆卸工具的折旧费 $c_l/(元/时)$	3.5

根据上述拆卸模型生成“iPhone6”拆卸混合图如图 4 所示。同时获取其连接矩阵 G_1 和优先矩阵 G_2 如式(17)所示。

图 4 “iPhone6”智能手机拆卸混合图

$$\begin{aligned}
 G_1 = & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 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 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 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 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 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 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 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 & 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 & 1 \\ 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 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\
G_2 = & \begin{pmatrix} 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 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 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 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 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 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 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 & 0 \\ 1 & 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 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 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 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{17}$$

基于本文双种群 GA 算法, 使用 MATLAB R2019a 编写了相应算法程序。拆卸过程中, 各零部件的拆卸方向以屏幕拆卸方向-Z 为基准, 运用双种群 GA 确定最优的拆卸序列方案。同时为验证双种群 GA 优越性, 将该算法与经验拆卸和基本 GA 进

行对比, 两种算法均连续进行 30 次试验, 设置种群大小为 100, 迭代次数为 200, 交叉概率为 0.5 及变异概率为 0.08。另外, 由式(14)知, ω_1 和 ω_2 根据优化目标的重要程度来确定, 本案例采用基于拆解信息模型自动化生成的拆解序列优化^[26]一文中的权

重分配比，基于上述参数进行优化求解，生成的收敛特征曲线如图 5 所示，试验结果如表 3 所示。

图 5 收敛特征曲线图

表 3 三种求解方法试验结果对比

求解方法	最优结果： 时间/s-回 收利润/元	最差结果： 时间/s-回 收利润/元	收敛率 (%)	工具/方向 变化次数	最佳进化 代数
经验拆卸	536/21.37	—	—	13/15	—
基本 GA	488/22.50	504/22.12	33.3	9/7	40
双种群 GA	476/22.78	484/22.59	86.7	8/6	11

其中，图 5 显示了两种智能算法的收敛特性，由图中曲线可知，基本 GA 的适应度函数的数值远高于双种群 GA 适应度值，且双种群 GA 最佳适应度值为 0，本案例中适应度函数的数值越小越好。同时双种群 GA 相比基本 GA 达到最佳适应度值的进化代数更少，表明双种群 GA 收敛性能好，解的质量优。

表 3 显示了三种求解方法的拆卸序列规划试验结果，其中，经验拆卸序列为 2-1-9-4-14-8-5-16-6-10-7-13-3-11-17-18-12-19-15-20，经验拆卸是按照智能手机装配的逆顺序为原则，对“iPhone6”进行人工实际拆卸，所获得满足零部件拆卸可行性的随机拆卸序列。基本 GA 最佳拆卸序列为 2-1-14-9-8-16-10-13-15-12-11-4-17-3-6-18-19-7-5-20，该试验结果是通过执行优化程序 30 次得到的，其中，收敛率是算法收敛到最优解次数与试验次数 30 之比。

根据表 3 数据，结合图 5 可知，当双种群 GA 迭代到 11 代时，适应度值不再变化，此时拆卸序列为 2-1-14-9-8-13-15-10-12-16-11-17-4-3-18-19-7-5-6-20，最短拆卸时间为 476 s，最优回收利润为 22.78 元，拆卸工具变化次数为 8，拆卸方向变化次数为 6。

此外，随着进化代数的增加，双种群 GA 相比基本 GA 收敛率提高了 53.4%，最佳进化代数 11 也优于基本 GA 最佳进化代数 40。在拆卸时间和回收利润方面，双种群 GA 最短拆卸时间为 476 s，最优回收利润为 22.78 元，而经验拆卸的拆卸时间为 536 s，回收利润为 21.37 元，基本 GA 的最短拆卸时间为 488 s，最优回收利润为 22.50 元，最长拆卸时间为 504 s，最少回收利润为 22.12 元。双种群 GA 相比经验拆卸和基本 GA，拆卸时间缩短了 11.2%和 5.6%，回收利润提高了 6.6%和 3.0%，表明在智能手机序列优化中，双种群 GA 具有良好的寻优效果，收敛速度快，解的质量优，不易陷入局部解。

5 结论

(1) 运用双种群 GA 搜索，得出“iPhone6”智能手机的最优或次优拆卸序列为 2-1-14-9-8-13-15-10-12-16-11-17-4-3-18-19-7-5-6-20，最短拆卸时间为 476s，最优回收利润为 22.78 元。

(2) 实例结果表明，双种群 GA 相比经验拆卸和基本 GA，拆卸时间缩短了 11.2%和 5.6%，回收利润提高了 6.6%和 3.0%，表现出了良好的收敛性能和全局寻优，为研究者提供较大的决策空间。

本研究的重点是废旧智能手机的完全拆卸序列规划，提出了一种基于双种群 GA 的拆卸序列规划方法，而在实际拆卸中，往往需要考虑到不同拆卸方案和拆卸技术的影响，过程复杂，影响因素众多，拆卸过程可能面临很大不确定性，需要进一步探讨。此外，在后续研究中，将对本文设计的适合优化废旧智能手机拆卸序列的双种群 GA 与其他混合算法、改进算法进行具体的定量对比分析。

参 考 文 献

- [1] ZUFALL J, NORRIS S, SCHALTEGGER S, et al. Business model patterns of sustainability pioneers-analyzing cases across the smartphone life cycle[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 244(2): 1-15.
- [2] HERTHEL A B, SUBRAMANIAN A. Optimizing single-finger keyboard layouts on smartphones[J]. Computers & Operations Research, 2020, 120: 104947.
- [3] YANG Yanfang, YANG Pu, LI Jia, et al. Research on virtual haptic disassembly platform considering

- disassembly process[J]. *Neurocomputing*, 2019, 348(S1): 74-81.
- [4] LIU Quan, LI Yongliang, FANG Yilin, et al. Many-objective best-order-sort genetic algorithm for mixed-model multi-robotic disassembly line balancing[J]. *Procedia CIRP*, 2019, 83: 14-21.
- [5] 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.
- ZHANG Xiufen, HU Zhiyong, WEI Gang, et al. Construction method of complex product disassembly model based on connection element[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(9): 122-130.
- [6] JEUNET J, DELLA C F, SALASSA F. Heuristic solution methods for the selective disassembly sequencing problem under sequence-dependent costs[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2019, 52(13): 1908-1913.
- [7] XU W, TANG Q, LIU J, et al. Disassembly sequence planning using discrete bees algorithm for human-robot collaboration in remanufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 62: 101860.
- [8] REN Y, MENG L, ZHANG C, et al. An efficient metaheuristics for a sequence-dependent disassembly planning[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 245: 118644.
- [9] KHEDER M, TRIGUI M, AIFAUI N. Disassembly sequence planning based on a genetic algorithm[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C-Journal of Mechanical Engineering Science*, 2014, 229(12): 2281-2290.
- [10] TIAN G, ZHOU M C, LI P. Disassembly sequence planning considering fuzzy component quality and varying operational cost[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, 15: 748-760.
- [11] REN Y, ZHANG C, ZHAO F, et al. An asynchronous parallel disassembly planning based on genetic algorithm[J]. *European Journal of Operational Research*, 2018, 269(2): 647-660.
- [12] WANG Kaipu, LI Xinyu, GAO Liang. A multi-objective discrete flower pollination algorithm for stochastic two-sided partial disassembly line balancing problem[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2019, 130(4): 634-649.
- [13] TSENG H E, CHANG C C, LEE S C, et al. A block-based genetic algorithm for disassembly sequence planning[J]. *Expert Systems with Applications*, 2018, 96: 492-505.
- [14] XU Wenjun, TANG Quan, LIU Jiayi, et al. Disassembly sequence planning using discrete bees algorithm for human-robot collaboration in remanufacturing[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2020, 62: 101860.
- [15] TIAN Y, ZHANG X, LIU Z, et al. Product cooperative disassembly sequence and task planning based on genetic algorithm[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2019, 105(5-6): 2103-2120.
- [16] 邢宇飞, 王成恩, 柳强. 基于 Pareto 解集蚁群算法的拆卸序列规划[J]. *机械工程学报*, 2012, 48(9): 186-192.
- XING Yufei, WANG Chengen, LIU Qiang. Disassembly sequence planning based on Pareto solution set ant colony algorithm [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2012, 48(9): 186-192.
- [17] ZHANG H C, KUO T C. A graph-based approach to disassembly model for end-of-life product recycling[J]. *IEEE Electronics Manufacturing Technology Symposium*, 1996, 5(7): 247-254.
- [18] GAO Jiangang, XIANG Dong, CHEN Haifeng, et al. Disassembly AND/OR graph model for "disassembly for recycling"[J]. *IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, 2003, 54-59.
- [19] KUO T C. Waste electronics and electrical equipment disassembly and recycling using Petri net analysis: Considering the economic value and environmental impacts[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 65(1): 54-64.
- [20] 韩筱婷. 滚筒洗衣机的拆卸序列规划研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
- HAN Xiaoting. Research on disassembly sequence planning of drum washing machine[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [21] 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.
- SONG Shouxu, ZHANG Wensheng, ZHANG Lei. Product disassembly sequence planning based on improved artificial bee colony algorithm[J]. *China Mechanical Engineering*, 2016, 27(17): 2384-2390.
- [22] CONG Liang, ZHAO Fu, SUTHERLAND John W. Integration of dismantling operations into a value recovery plan for circular economy[J]. *Journal of Cleaner*

- Production, 2017, 149(5): 378-386.
- [23] 杨得玉. 基于功构映射原理的机电产品拆卸设备设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
- YANG Deyu. Research on the design of electromechanical product disassembly equipment based on the principle of power structure mapping[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [24] 陈弋文, 陈伟达. 基于收益概率的不确定环境下的产品拆卸序列优化[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 793-798.
- CHEN Yiwen, CHEN Weida. Optimization of product disassembly sequence under uncertain environment based on profit probability[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2014, 20(4): 793-798.
- [25] 中国经营报. iPhone6 停产的背后[EB/OL].[2019-07-19]. [http : //www.360doc.com/content/19/0719/06/116554_849683488.shtml](http://www.360doc.com/content/19/0719/06/116554_849683488.shtml).
- China Business Journal.Behind the discontinuation of iPhone6[EB/OL].[2019-07-19]. [http : //www.360doc.com/content/19/0719/06/116554_849683488.shtml](http://www.360doc.com/content/19/0719/06/116554_849683488.shtml).
- [26] 闫顺. 基于拆解信息模型自动化生成的拆解序列优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- YAN Shun. Optimization of disassembly sequence automatically generated based on disassembly information model[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
-
- 作者简介: 尹凤福, 男, 1969 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究机电产品的绿色设计与制造。
E-mail: yinff@qust.edu.cn
杜泽瑞, 男, 1994 年出生, 硕士研究生。主要研究机电产品的拆解技术。
E-mail: 1073081050@qq.com
李林(通信作者), 男, 1987 年出生, 博士。主要研究机电产品的绿色设计与制造。
E-mail: ll@qust.edu.cn