

基于拆卸信息提取的多零件堆叠结构设备 动态干涉分析方法

王云帆^{1,2} 朱利斌^{1,2} 崔创创^{1,2} 黄海鸿^{1,2*}

1.合肥工业大学机械工程学院,合肥,230009

2.机电产品低碳循环利用技术与装备安徽省重点实验室,合肥,230009

摘要:针对设备多零件堆叠结构导致零件拆卸干涉检测效率与精度低的问题,提出一种基于拆卸信息提取的多零件堆叠结构设备动态干涉分析(DIA)方法,以提高拆卸信息获取的准确性、缩短零件拆卸时间。通过包容盒与实体相交两阶段干涉检测,提取设计模型中的拆卸信息并将其量化为优先矩阵;结合装配体与零件的双坐标系变换,精确提取动态变化的拆卸信息。为验证该方法的可行性与有效性,通过CAD设计模型实验,分别获得DIA与传统干涉检测方法生成的优先矩阵,并以此作为结构拆卸约束信息,输入蝴蝶-遗传新型混合优化算法寻优以获得最优拆卸序列。实验结果表明,DIA生成优先矩阵的准确性比传统方法提高了28.57%,所获最优拆卸序列的拆卸时间缩短了3.31%。

关键词:可拆卸设计;拆卸信息提取;动态干涉分析;蝴蝶-遗传优化算法

中图分类号:TH166

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2025.06.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



DIA Method for Multi-part Stacked Structure Devices Based on Disassembly Information Extraction

WANG Yunfan^{1,2} ZHU Libin^{1,2} CUI Chuangchuang^{1,2} HUANG Haihong^{1,2*}

1.School of Mechanical Engineering,Hefei University of Technology,Hefei,230009

2.Anhui Province Key Laboratory of Low Carbon Recycling Technology and Equipment for
Mechanical and Electrical Products,Hefei,230009

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and accuracy of disassembly interference detection due to the multi-part stacked structure devices, a DIA method was proposed based on DIE to improve the accuracy of disassembly information acquisition and shorten the disassembly time of parts. The disassembly information in the design model was extracted and quantified as a priority matrix through two-stage interference detection involving the boundary box and solid intersection. The dynamically changing disassembly information was accurately extracted by combining the dual coordinate system transformation of the assembly and parts. In order to verify the feasibility and effectiveness of this method, CAD design model experiments were conducted. The priority matrix generated by DIA and traditional interference detection methods were obtained and used as structural constraint information, which were input into the BOA-GA to search for the optimal disassembly sequence. The experimental results demonstrate that the accuracy of the priority matrix generated by DIA is increased by 28.57% compared with the traditional method, and the disassembly time of the optimal sequence is shortened by 3.31%.

Key words: design for disassembly; disassembly information extraction(DIE); dynamic interference analysis(DIA); butterfly-genetic hybrid optimization algorithm(BOA-GA)

0 引言

随着现代科学技术的飞速发展,设备的技术迭代不断加速^[1]。在设备定期拆卸维护时,考虑零件间的干涉对精确、快速地提取拆卸信息至关重要。目前,关于多零件堆叠结构设备拆卸的研

究主要集中于提高产品末端拆卸效率^[2],缺乏对零件拆卸干涉信息获取效率与精度的研究。有效、精确地提取拆卸信息,用以寻找合理高效的拆卸序列,确定最优或次优的拆卸序列方案,缩短拆卸时间,降低拆卸成本,是产品绿色设计的有力支撑。

目前,国内外学者针对不同产品提取拆卸信息时,将识别产品结构与表征拆卸过程作为关键

步骤。早期研究主要趋向于基于人为经验的拆卸模型构建与信息提取,如 XU 等^[3]根据人为经验识别产品内部结构,建立与或图模型以描述零件拆卸过程。随着产品结构愈发复杂,单一的图论模型无法准确表达完整的拆卸信息,故一些学者建立混合或改进的拆卸模型,并从产品中获取更多的拆卸信息,如 FU 等^[4]提取了以组合节点的有向图表示的子装配体或零件优先约束关系信息。上述拆卸模型需要大量的人工资源来定位零件间的约束关系从而确定拆卸优先级,为减少人为干预带来的拆卸信息模糊或丢失,一些学者借助产品 CAD 模型自动提取拆卸模型所需数据。JI 等^[5]基于二次开发技术从 CAD 中提取产品功能件的支撑矩阵、连接矩阵、干涉矩阵等拆卸约束矩阵。为了将相关拆卸信息数据应用于更加复杂的机械产品结构,MUNKER 等^[6]划分 CAD 模型子组件,并提取其连接矩阵、范数矩阵、距离加权连接矩阵等数据,并以梁式蒸汽机与气缸直径向发动机为例提取相关矩阵进行拆卸序列规划。另外,一些学者研究了手机的拆卸信息提取方法。CHEN 等^[7]建立手机零部件间的约束关系模型,根据经验提取产品零件间的约束关系;尹凤福等^[8]构建了手机零件的五元组拆卸混合图模型,并根据拆卸经验提取连接矩阵和约束矩阵。

上述文献为拆卸模型构建及相关信息提取的研究奠定了良好基础。然而,随着技术的迭代,设备复杂度的提高,某一个方向上零件堆叠密集,内部约束关系复杂,难以通过人工经验准确识别产品内部结构组成与各零件位置,易造成零件拆卸干涉;而现有干涉检测方法判断多零件干涉情况时,受零件状态变换次数与步长参数设置的影响,计算复杂度高。另外,多零件堆叠结构设备中零件的拆卸移动方向与装配体坐标轴之间存在夹角,而现有干涉检测方法只适用于零件拆卸移动方向平行于装配体坐标轴的情况。为提高拆卸信息获取的完整性与准确性,本文研究装配体模型结构及约束关系,提出一种基于拆卸信息提取的多零件堆叠结构设备动态干涉分析方法。首先,通过动态干涉分析方法从 CAD 模型中提取优先矩阵;然后,以优先矩阵作为拆卸序列规划的结构限制条件输入蝴蝶-遗传新型混合优化算法(BOA-GA),以维修效益最大、拆卸时间最短为目标,计算零件最优拆卸序列;最后,以手机 CAD 模型为例,验证该方法在零件虚拟拆卸过程中获得更加稳定准确拆卸序列的可行性与有效性。

1 问题描述

1.1 多零件堆叠结构设备

多零件堆叠结构设备是指产品设计时,将产品零件按照一定顺序及空间布局,在同方向上组装,形成具有复杂功能的集成系统。通常,多零件堆叠结构设备具有空间利用率高、体积小、功能复杂等特点,多应用于智能移动通信设备领域。典型的多零件堆叠结构设备包括手机、平板电脑、智能手表等。

1.2 拆卸信息

拆卸信息是指与拆卸某一产品相关的所有详细指导经验和数据信息,本文将其分为产品基础信息和拆卸过程信息。产品基础信息指产品零件名称、编号、材料、数量等;拆卸过程信息包括拆卸约束、零件拆卸顺序、拆卸工具、可拆卸性评估等。

1) 拆卸约束。拆卸约束是指影响工业产品零部件拆卸的因素,本文将其分为结构因素和目标因素。结构因素通常指零件的空间位置、布局等影响零件拆卸优先级的因素。目标因素包括零件拆卸时间、拆卸能耗、回收质量、回收利润、工作站拆卸任务分配情况等^[9]。为了描述多零件堆叠结构设备的拆卸问题,本文通过研究 CAD 模型的零件拆卸信息提取方法,提高拆卸效率、缩短拆卸时间、提高维修效益,以利于产品维修和升级。

2) 拆卸信息提取。拆卸约束提取方法包含两类:一是基于人工经验识别产品结构,并构建描述零件间约束关联的拆卸图论模型,此模型进一步处理转化为数值矩阵,以便于进行可行拆卸序列计算与优化;二是依托计算机辅助设计工具,利用三维建模软件的应用程序接口 API 智能识别并解析产品 CAD 模型的几何结构与拓扑信息,无需绘制拆卸图,直接获取结构拆卸约束的数值矩阵,为后续拆卸序列规划提供精确的约束条件。多零件堆叠结构设备结构复杂、信息提取精度要求高,本文通过三维建模软件 API 识别并解析产品 CAD 模型的几何结构与拓扑关系,以满足拆卸信息的高效、高精度提取需求。

1.3 拆卸优先图模型

为了描述零件拆卸优先级信息,本文构建多零件堆叠结构设备的拆卸优先图模型,将其内部零件复杂的结构与连接关系简明表达。拆卸优先图以预拆卸零件为节点,以有向箭头表示拆卸的先后顺序,简洁有效地表示零件拆卸优先级^[10]。

将以上优先图量化得到优先矩阵。假设某工业产品共有 n 个零件,则优先矩阵为

$$P = [p_{ij}]_{n \times n} \quad (1)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, n$$

若优先图中存在 i 指向 j 的有向边, p_{ij} 值为 1; 否则, p_{ij} 值为 0。

2 动态干涉分析

基于拆卸信息提取的多零件堆叠结构设备动

态干涉分析方法流程图见图 1。考虑多零件堆叠结构设备特性, 需先处理 CAD 模型, 本文通过动态干涉分析方法提取结构拆卸约束信息即优先矩阵。利用 Creo Parametric 进行产品建模, 根据 API 接口 Pro/Toolkit, 通过二次开发技术提取零件信息和拆卸约束, 并将信息数据转换为优先矩阵。

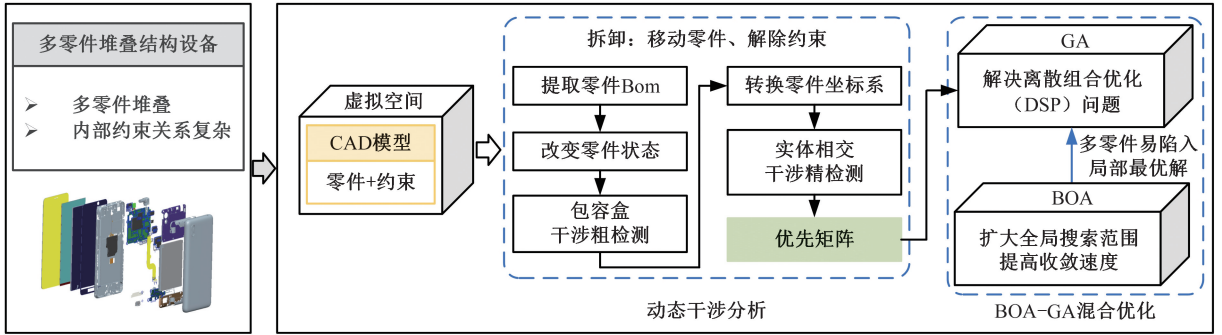


图 1 基于拆卸信息提取的多零件堆叠结构设备动态干涉分析方法流程图

Fig.1 Flowchart of dynamic interference analysis method for multi-part stacked structure devices based on disassembly information extraction

动态干涉分析是一种自动生成结构拆卸约束的方法, 能够解决传统干涉检测方法对多零件堆叠结构计算复杂度高与适用性差的问题, 并能够提高检测的精度。它以计算机辅助设计软件为平台, 模拟拆卸操作中零件之间的动态变化关系, 即在系统组件或零件之间考虑相对运动, 并分析运动过程中的干涉是否成为结构拆卸约束。它有两个关键点: 一是零件在虚拟空间内相对运动; 二是干涉检测和分析。

2.1 零件运动控制

生成结构拆卸约束 (优先矩阵) 首先需要获取式(1)中的 n 值, 即优先矩阵的行列数 n 。本文基于 Creo Parametric 建立三维装配体模型, 利用 C/C++ 语言在 Visual Studio 平台上实现装配零件基本信息的提取。首先遍历装配体, 提取构成装配体的零件 BOM 信息, 包括零件序号和零件名称, n 即为零件序号个数。

为实现零件在 Creo Parametric 中相对运动以模拟拆卸过程, 本文以位姿矩阵表示装配零件在虚拟空间中的位置与姿态。通过改变位姿矩阵内的值, 控制零件在空间内的移动、旋转、投影等变换。

零件的位姿变换示意图见图 2, 其中装配体坐标系中心为 O , 坐标轴为 X, Y, Z ; 零件坐标系中心为 O' , 坐标轴为 X', Y', Z' 。 X' 与 X, Y, Z 三轴之间的夹角为 α, δ, λ , Y' 与 X, Y, Z 三轴之间的夹角为 ϵ, β, μ , Z' 与 X, Y, Z 三轴之间的夹角为 ζ, ν, γ 。则位姿矩阵表示为

$$L = \begin{bmatrix} a_{i11} & a_{i12} & a_{i13} & a_{i14} \\ a_{i21} & a_{i22} & a_{i23} & a_{i24} \\ a_{i31} & a_{i32} & a_{i33} & a_{i34} \\ a_{i41} & a_{i42} & a_{i43} & a_{i44} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$a_{3 \times 3} = \begin{bmatrix} a_{i11} & a_{i12} & a_{i13} \\ a_{i21} & a_{i22} & a_{i23} \\ a_{i31} & a_{i32} & a_{i33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \epsilon & \cos \zeta \\ \cos \delta & \cos \beta & \cos \nu \\ \cos \lambda & \cos \mu & \cos \gamma \end{bmatrix}$$

式中: $a_{3 \times 3}$ 为零件在装配体坐标系中的姿态, 通过该矩阵内部数值变化控制零件在空间内旋转; $a_{i11}, a_{i12}, a_{i13}$ 分别为 O' 在装配体坐标系上的位置, 这三个值控制零件在空间内平动; $a_{i14}, a_{i24}, a_{i34}$ 为零件在装配体坐标系三个轴上的投影; a_{i44} 为零件位姿变换因数。

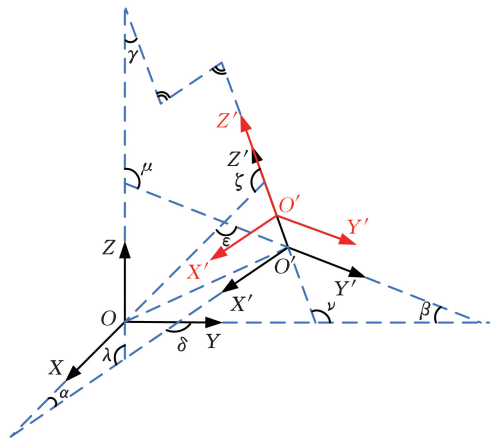


图 2 零件位姿变换

Fig.2 Part position and attitude changes

为判断零件间干涉情况, 需控制零件旋转或平动, 而设备的同方向多零件堆叠结构特性使零件同方向的平动控制尤为重要。

假设零件在装配体坐标系中的初始坐标为

(x_0, y_0, z_0) , 零件的平动距离在装配体坐标系 X, Y, Z 轴方向的分量为 (x_t, y_t, z_t) , 则零件平动后的坐标为 (x, y, z) , 表达式为

$$(x, y, z, 1) = (x_0, y_0, z_0, 1) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ x_t & y_t & z_t & 1 \end{bmatrix} = (x_0 + x_t, y_0 + y_t, z_0 + z_t, 1) \quad (3)$$

零件若沿着自身坐标系平动, 相当于零件在装配体坐标系中旋转一定角度后再平移一段距离。设零件在其自身坐标系中的坐标为 (x_p, y_p, z_p) , 平动后的坐标为 $(x_{p,t}, y_{p,t}, z_{p,t})$, 则在零件坐标系中的平动变换矩阵为

$$T_{p,t} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \Delta x & \Delta y & \Delta z & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$\Delta x = x_{p,t} - x_p$ $\Delta y = y_{p,t} - y_p$ $\Delta z = z_{p,t} - z_p$
将 X', Y', Z' 轴分别旋转 α, β, γ 角度, 变换公式参考文献[11]; 最后进行矩阵逆变换:

$$T_i^{-1} = T_i^* / |T_i| \quad (5)$$

式中: T_i 为零件绕 X', Y', Z' 轴分别旋转 α, β, γ 角度的旋转变换矩阵, $i = 1, 2, 3$ 。

得到零件位姿变换矩阵:

$$T = T_1 T_2 T_3 T_{p,t} T_3^{-1} T_2^{-1} T_1^{-1} \quad (6)$$

故零件变换后在装配体坐标系中的位姿矩阵为

$$L_{tr} = L T_1 T_2 T_3 T_{p,t} T_3^{-1} T_2^{-1} T_1^{-1} \quad (7)$$

2.2 干涉检测和分析

干涉检测是一种对零部件模型进行几何分析并识别可能发生干涉问题的方法。动态干涉分析方法是零件拆卸过程中的干涉检测, 通过改变零件模型的几何位置或姿态而使零件间干涉状态发生变化, 导致干涉检测的结果不同, 进一步分析则能得到零件的优先矩阵。

传统的干涉检测首先将零件移动固定距离的步长, 通过检测当前位置的干涉状态以确定干涉量, 检测计算复杂度受零件状态变换次数的影响, 在零件数目较多时需要多次改变零件状态, 计算量随之增加。同时检测结果受步长参数的影响, 步长设置过小则检测的次数更多, 计算量更大; 步长设置过大则导致小零件被忽略, 最终影响干涉分析过程。另外, 传统干涉检测方式的参照坐标系为装配体坐标系, 故此方法只适用于零件拆卸移动方向平行于装配体坐标轴的情况, 若零件拆卸移动方向与装配体坐标轴之间存在夹角, 则检测分析结果不准确。为解决上述问题, 本文提出

首先以装配体坐标系为参考坐标系执行包容盒干涉粗检测, 以降低检测计算复杂度; 然后以零件坐标系为参考坐标系执行实体相交干涉精检测, 以增加检测精确度; 同时将步长设置为自适应变化的量, 减小对检测结果的影响。

包容盒干涉粗检测的执行方式如下: 以图 3 所示拆卸主动零件螺栓、被动零件螺母为例, 将两零件分别设置主被动包容盒, 包容盒边线方向平行于装配体坐标系三轴方向, 主被动包容盒对角线上的两个顶点分别为坐标极小值点和极大值点, 根据极值点获取零件拆卸方向上的长度 l_1, l_2 和间隔距离 D 。为实现自适应变化步长, 比较 l_1, l_2 大小, 以较小值作为拆卸移动自适应步长 L , 主动零件移动的距离为自适应步长与零件间隔距离之和。零件状态变化后判断包容盒是否干涉, 若干涉则表明两零件包容盒干涉, 但实体未必发生干涉, 否则两零件不干涉。零件自适应移动步长设置过程伪代码如下:

输入: 零件沿拆卸方向的长度及间隔距离

输出: 零件自适应移动步长

while 零件未被检测 do

 获取零件主被动包容盒沿拆卸方向的长度 l_1, l_2 , 间隔距离 D

 if $l_1 > l_2$

 自适应步长 $L = l_2$

 else

 自适应步长 $L = l_1$

 end if

 主动零件移动距离 = $D + L$

end while

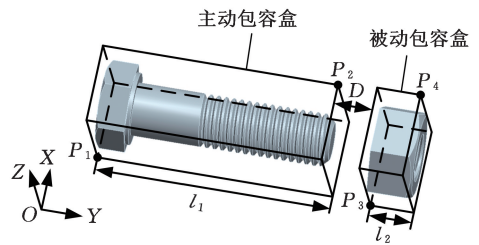


图 3 包容盒检测

Fig.3 Boundary box detection

本文采用包容盒干涉粗检测与实体相交干涉精检测相结合的方法, 其干涉检测过程分为两个阶段: 第一阶段为沿着装配体坐标轴移动零件的包容盒干涉粗检测; 第二阶段为沿零件自身坐标轴移动零件的实体相交干涉精检测。两个检测阶段中, 根据检测方式不同变换零件移动参照坐标系, 使干涉判断准确适应零件状态变化。

坐标系转换方法如下: 设 P 为装配体中某零件

上的一点,通过 API 函数 ProAsmcomppathTrf-Get 获取 P 点所在零件的装配路径,据此直接获得第一阶段 P 在装配体坐标系 A 的坐标为 (x_a, y_a, z_a) ,第二阶段 P 在零件坐标系 B 的坐标为

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ z_a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (e_1^a)^T e_1^b & (e_1^a)^T e_2^b & (e_1^a)^T e_3^b \\ (e_2^a)^T e_1^b & (e_2^a)^T e_2^b & (e_2^a)^T e_3^b \\ (e_3^a)^T e_1^b & (e_3^a)^T e_2^b & (e_3^a)^T e_3^b \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $e_i^a (i = 1, 2, 3)$ 为坐标系 A 的基向量; $e_j^b (j = 1, 2, 3)$ 为坐标系 B 的基向量。

动态干涉检测与分析方法的核心是判断两零件干涉状态。首先进行第一阶段包容盒干涉检测,零件移动距离 D 和 L 后执行检测,若两零件包容盒不干涉,则两零件一定不干涉;若两零件包容盒干涉,则两零件的包容盒有相交部分,但两零件实体不一定干涉,此时进行第二阶段零件实体相交检测,若检测出有干涉量,则判定两零件干涉,若未检测出干涉量,则继续将零件移动距离 L ,再次执行干涉检测,直到移动的距离大于 $l_1 + l_2 + D$ 时都未检测出干涉量,则判定两零件不干涉,结束检测。具体的干涉检测与分析的整体流程如图 4 所示。实施步骤如下:① 选取待检测的两零件,获取它们在装配体坐标系上的主被动包容盒;② 确定零件拆卸移动方向即干涉检测方向,获取该方向上的零件长度 l_1, l_2 与间隔距离 D ;③ 控制主动零件沿干涉方向移动距离 D ;④ 获取自适应移动步长 L ,并根据式(2)与式(7)控制主动零件沿干涉方向移动距离 L ;⑤ 判断干涉情况,若两零件包容盒干涉,则根据式(8)将装配体坐标系转换为零件坐标系,再将待检测零件沿零件自身坐标轴反方向移动后,进行实体相交干涉检测;⑥ 再次判断干涉情况,若有干涉量,则判定两零件干涉,否则跳至步骤④;⑦ 判断零件移动距离是否不小于 $l_1 + l_2 + D$,若是,则判定两零件不干涉,否则执行步骤⑧;⑧ 判断零件是否全部被检测,若是,则输出检测结果结束程序,否则跳至步骤①。

2.3 基于动态干涉分析的优先矩阵构建方法

动态干涉分析首先需要在虚拟空间中根据式(7)移动零件,移动的距离由自适应拆卸步长矩阵表示。假设装配体 M 由 n 个零件组成,规定主动零件为 i ,被动零件为 j 。首先设置主被动包容盒,若零件 i 沿着 d 方向移动,则它相对于零件 j 的拆卸步长矩阵为

$$S_M = \begin{bmatrix} 0 & s_{12d} & \cdots & s_{1nd} \\ s_{21d} & 0 & \cdots & s_{2nd} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{n1d} & s_{n2d} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

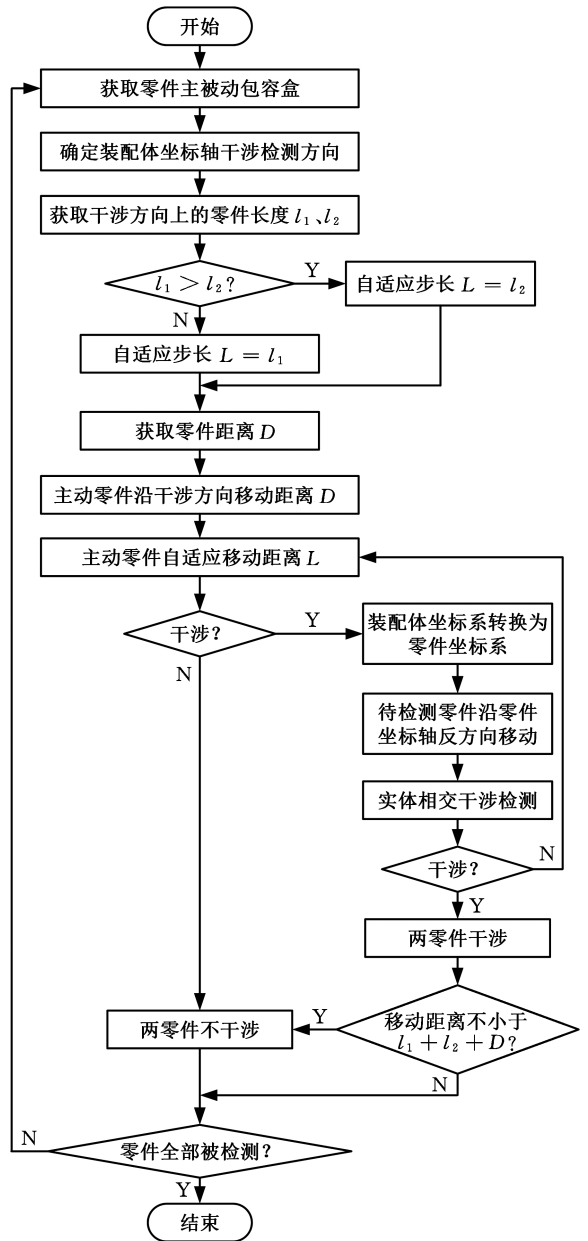


图 4 干涉检测流程图

Fig.4 Flowchart for interference detection

$$s_{ijd} = a_{ino} - a_{jno}$$

其中, a_{ino} 与 a_{jno} 为零件位姿矩阵式(2)中的值,参与主被动零件沿拆卸方向长度的比较, $(a_{ino} - a_{jno})$ 与 2.2 节所述的自适应距离 L 有关;下标 o 表示控制零件在参照坐标系内平动, $o = 1, 2, 3$ 。

零件移动完成后,检测零件 i 和 j 的干涉情况,每次沿着 d 方向移动零件 i 的距离为 s_{ijd} ,移动后零件 i 的状态改变,位姿矩阵变为

$$L_i^1 = \begin{bmatrix} a_{i11} & a_{i12} & a_{i13} & a_{i14} \\ a_{i21} & a_{i22} & a_{i23} & a_{i24} \\ a_{i31} & a_{i32} & a_{i33} & a_{i34} \\ a_{i41} + s_{ijx}^* & a_{i42} + s_{ijy}^* & a_{i43} + s_{ijz}^* & a_{i44} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: $s_{ijx}^*, s_{ijy}^*, s_{ijz}^*$ 为 d 方向上的 s_{ijd} 在 X, Y, Z 轴上的投影。

根据状态改变后的位置 L_i^1 ,进行双坐标系转

换的包容盒干涉粗检测与实体相交干涉精检测。若在该方向上没有与之干涉的零件,则该零件的拆卸优先级更高,式(1)中优先矩阵对应的值设置为“1”。动态干涉分析生成优先矩阵的实施步骤如下:①Creo Parametric 建模并提取 Bom 表信息,将零件按 Bom 表排序编号为 $0 \sim n-1$,零件总数为 n ;②初始化优先矩阵 \mathbf{P} 的行列数为 n ,并赋值为“0”;③选择拆卸主动零件 i (编号为 a),并获取其位姿矩阵;④从未被选择的装配零件中依次选取拆卸被动零件 j (编号为 b);⑤沿 d 方向移动零件 i ,移动距离利用式(9)计算;⑥进行图 4 所示的包容盒干涉粗检测与实体相交干涉精检测,如果零件 a 与 b 的干涉量不为 0,则 \mathbf{L}_i^j 第 $(a+1)$ 行、第 $(b+1)$ 列赋值为“1”,否则跳至步骤 ③;⑦如果零件全部选择完毕,则输出式(1)中 \mathbf{P} 的值并结束程序,否则跳至步骤 ③。

3 基于 BOA-GA 的动态干涉分析方法验证

3.1 BOA-GA

为验证动态干涉分析方法提取优先矩阵的可行性与有效性,本文将优先矩阵作为拆卸序列规划的结构约束条件进行验证。多零件堆叠结构设备零件数量多,可行拆卸序列数量有上万条,因此需要根据不同目标进行优化决策^[2],本文以维修效益最大、拆卸时间最短为目标进行优化。多零件堆叠结构设备的拆卸序列规划(disassembly sequence planning, DSP)问题是具有复杂多约束的离散组合优化问题。遗传算法(genetic algorithm, GA)由于具有良好的随机搜索与并行搜索能力而在解决 DSP 问题上应用广泛,但 GA 的收敛速度较慢、搜索能力有限,对大规模解的寻优问题易陷入局部最优解,从而导致最优解不稳定出现^[12]。蝴蝶优化算法(butterfly optimization algorithm, BOA)拥有全局与局部两种状态切换的搜索机制^[13],能够弥补传统遗传算法选择初始种群时易陷入局部最优解的缺陷。本文将这两种算法融合,提出一种新型混合优化算法——蝴蝶-遗传算法(BOA-GA),即在遗传算法获取初始种群时引入蝴蝶优化算法的寻优机制。

3.1.1 算法优化模型

GA 模拟生物在自然环境中的遗传和进化过程,其模型核心在于选择、交叉、变异操作^[13]。蝴蝶优化算法模拟蝴蝶觅食与求偶行为,蝴蝶作为搜索个体,其香味感知量为

$$f_i = cI^a \quad (11)$$

式中: c 为感觉形式; I 为刺激强度,与适应度有关; a 为香

味系数。

蝴蝶的寻优方式分为两个阶段:第一,全局搜索阶段,蝴蝶朝着香味最大的个体移动,即适应度更高的个体具有成为最优解的趋势,此时蝴蝶的位置表示为

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + (r^2 g_{\text{best}} - x_i^{(t)})f_i \quad (12)$$

式中: $x_i^{(t+1)}$ 、 $x_i^{(t)}$ 分别为第 i 只蝴蝶迭代至 $(t+1)$ 、 t 代的位置; r 为 $0 \sim 1$ 之间的随机数; g_{best} 为当前迭代中蝴蝶找到的最优解。

第二,局部搜索阶段,蝴蝶在解空间内随机移动,以扩大搜索范围,此时蝴蝶所在的位置表示为

$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + (r^2 x_j^{(t)} - x_k^{(t)})f_i \quad (13)$$

两阶段通过转换概率 p 切换^[14]。感觉形式的更新表达式为

$$c^{(t+1)} = c^{(t)} + (b/c^{(t)} \times N_g) \quad (14)$$

式中: b 为常数; N_g 为最大迭代次数。

采用 BOA-GA 算法进行多零件堆叠结构设备的拆卸序列规划时,将蝴蝶个体对应解空间中的零件可行拆卸序列,并向适应度最大的蝴蝶移动;蝴蝶算法随机优选出来的种群作为遗传算法的初始种群,此时的每条拆卸序列对应遗传算法中的一条染色体,即遗传可行解编码。另外,采用动态干涉分析方法生成的优先矩阵作为解决 DSP 问题的约束条件,优先矩阵中的值若满足

$$\sum_{j=1}^n p_{kj} = 0 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

式中: k 为装配体中某零件序号。

则表明该零件可拆卸。

3.1.2 适应度函数

本文 BOA-GA 算法以零件维修效益最大、拆卸时间最短为优化目标,故拆卸序列规划的适应度函数由拆卸时间 T 与维修效益 V 两部分组成,计算式分别为

$$T = \ln T_z \quad (16)$$

$$T_z = \sum_{i=1}^n T_i^m + \sum_{i,j=1}^n T_{ij}^l + \sum_{i,j=1}^n T_{ij}^d$$

$$V = 1/\ln\left(\sum_{i=1}^n (c_i - c_i^p - c_i^l)\right) \quad (17)$$

$$c_i^p = T_z c_r \quad c_i^l = T_z c_x$$

式中: T_i^m 为拆卸零件的基础时间; T_{ij}^l 为零件 i 到 j 拆卸工具变换时间; T_{ij}^d 为零件 i 到 j 拆卸工具的方向变化时间; c_i 为零件拆卸维修价值; c_i^p 为拆卸零件本身的代价(人工成本); c_r 为工时费用; c_i^l 为拆卸零件所用工具的折旧成本; c_x 为拆卸工具折旧费用。

因此,BOA-GA 的适应度函数为

$$f = w_1 V + w_2 T \quad (18)$$

式中: w_1 为维修效益权重因子; w_2 为拆卸时间权重因子。

3.2 BOA-GA 实施步骤

BOA-GA 算法的流程图见图 5,它包括初始

化、蝴蝶优化、方案决策、遗传优化、终止判定 5 个阶段,最优拆卸序列通过蝴蝶优化、方案决策、遗传优化这 3 个阶段的迭代而生成。

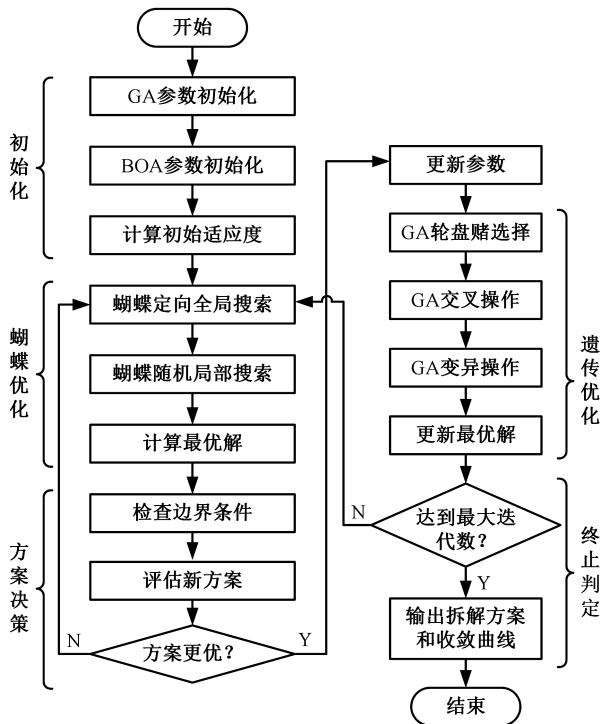


图 5 BOA-GA 流程图

Fig.5 Flowchart of the BOA-GA algorithm

利用动态分析方法可以得到装配体中零件数量 n 与零件拆卸优先矩阵 P 。将式(1) 优先矩阵 P 、式(18) 优化算法的适应度函数作为执行 BOA-GA 算法的约束条件,优化步骤如下:① 初始化种群规模 pop_size 及转换概率 p 等参数,可拆卸零件用数组 $down_array$ 存储;② 利用式(18) 计算每只蝴蝶的适应度,记录最优适应度值 f_{min} 和最优拆卸序列;③ 对于每只蝴蝶,利用式(11) 计算其香味感知量,若 $r < p$,则根据式(12) 执行蝴蝶全局搜索;否则,根据式(13) 执行蝴蝶局部搜索;④ 检查边界条件,利用式(18) 重新计算蝴蝶的适应度,记录新的最优适应度值 F_{min} ,如果 $F_{min} < f_{min}$,则更新最优适应度值和最优拆卸序列;⑤ 采用轮盘赌方式进行遗传选择操作,以及交叉、变异操作;⑥ 重新计算适应度,如果 $F_{min} < f_{min}$,则更新最优适应度值和最优拆卸序列;⑦ 根据式(14) 进行香味感知量的更新;⑧ 判断是否达到最大迭代数,若是则输出最优适应度和最优拆卸序列,否则跳至步骤 ③。

4 案例研究

4.1 案例介绍

手机作为典型的多零件堆叠结构设备,适合

用上述方法提取拆卸信息,故本文以手机 CAD 模型为例验证方法的可行性与有效性。结合当前市场上流行的手机结构设计软件 Creo,本案例采用的手机实体模型基于 Creo Elements/Proe 5.0 建立,如图 6 所示。另外,对于模型中焊接或一般不拆卸的小零件,若它们不影响拆卸序列规划结果,则在设计模型中进行简化删除预处理,如主板、副板上焊接的小零件等。

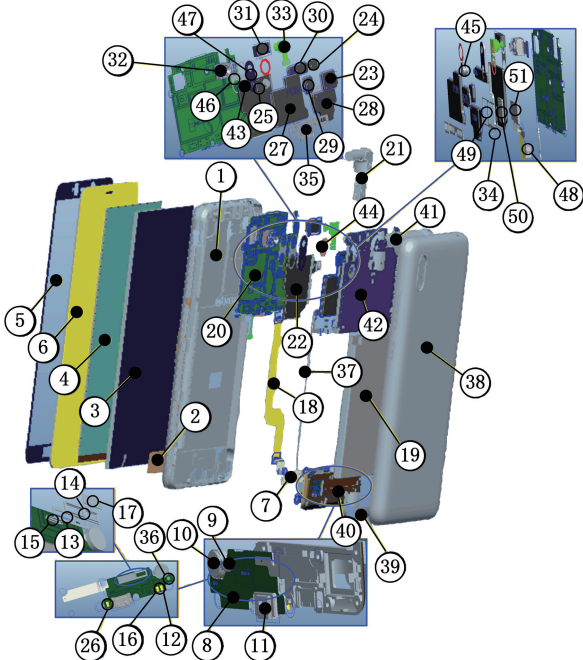


图 6 手机 CAD 设计模型

Fig.6 CAD design model of mobile phone

案例中提取手机 CAD 模型中的优先矩阵及相关信息,并将优先矩阵与适应度函数作为拆卸序列规划算法的约束条件,最终得到最优或次优的零件拆卸序列,以验证信息提取方法的有效性。

4.2 方法验证

4.2.1 相关数据收集

通过动态干涉分析方法生成 Creo 插件并注册使用,获取该设计模型的零件 BOM 表信息,包括序号和名称,信息整理在表 1 中,零件对应的序号在图 6 中作出标识。本案例中手机零件的实际拆卸时间为人工熟练拆卸 10 部手机零件的平均时间,即拆卸零件的基础时间 T_i^m ;而手机零件的维修价格随市场价值波动,表 1 中维修物料价格数据为 10 部手机平台官网维修价格均值,即零件拆卸维修价值 c_i 。

本文优化模型中其他参数来源如下:参考手机拆卸相关文献,设置拆卸工具变换时间与拆卸工具方向变化时间^[2] 如表 2 所示;参考循环经济回收价值相关文献^[15],设置工时费用 $c_r = 84$ 元/时,拆卸工具折旧费用 $c_z = 3.5$ 元/时;维修效益与拆

表 1 手机设计模型基本信息及相关统计参数

Tab.1 Basic information and related statistical parameters of Mobile phone design model

零件序号	零件名称	拆卸工具	拆卸方向	实际拆卸时间 /s	维修价格 / 元
1	中框	手 / 撬棒	-Z	0.60	23.00
2	屏幕连接器	镊子	+Z	15.31	5.00
3	内屏	镊子	+Z	277.60	600.00
4	屏幕中间层	镊子	+Z	32.23	252.00
5	外屏	镊子 / 吸盘	+Z	28.56	50.00
6	中屏	镊子	+Z	22.00	300.00
7	扬声器	撬棒 / 镊子	-Z	3.68	33.50
8	副板	撬棒 / 镊子	-Z	14.40	67.50
9	副板与振动马达连接件	镊子	-Z	0.60	3.00
10	振动马达	镊子	-Z	3.42	5.00
11	充电接口	镊子	+X	3.11	12.00
12 ~ 17、26、36	副板上小连接件	镊子	-Z	5.90	3.00
18	主副板 BTB 连接器	镊子	-Z	17.00	6.00
19	电池	手 / 撬棒	-Z	30.12	132.00
20	主板	镊子	-Z	19.70	2229.00
21	耳机孔插入件	手 / 镊子	-X	1.22	10.00
22 ~ 25、27 ~ 30	主板上屏蔽罩	镊子	-Z	6.21	3.70
31	麦克风	镊子	-Z	3.68	31.87
32	后置摄像头	镊子	-Z	15.30	401.50
33	前置摄像头	镊子	-Z	12.80	75.50
34	主板上与 RF 连接零件	镊子	-Z	4.50	7.00
35.00	电池插孔配件	镊子	-Z	3.56	2.00
37	RF 连接器	镊子	-Z	14.73	10.65
38	后盖	手 / 撬棒	-Z	56.22	199.00
39	副板防尘盖	镊子	-Z	4.34	13.00
40	副板盖板	螺丝刀 / 镊子	-Z	42.55	18.00
41	主板防尘盖	镊子	-Z	4.34	14.00
42	主板盖板	螺丝刀 / 镊子	-Z	72.70	48.00
44	后摄像头小零件	镊子	-Z	5.80	30.00
45	闪光灯	镊子	-Z	3.68	15.00
43、46、47	后置摄像头盖	镊子	-Z	3.20	5.00
48	主板上 BTB 连接器	镊子	-Z	8.60	8.00
49	SIM 和 SD 卡槽	镊子	-Z	5.96	5.00
50	SIM 卡	镊子	-Z	2.00	15.00
51	SD 卡	镊子	-Z	2.00	15.00

表 2 拆卸工具相关参数设置

Tab.2 Parameter settings for disassembly tools

参数类型	变量情况	取值
拆卸工具变换时间 T_{ij}^t/s	零件 i 到 j 拆卸工具不变	0
	零件 i 到 j 改变单个拆卸工具	4
	零件 i 到 j 改变 N 个拆卸工具	$4N$
拆卸工具方向变化 时间 T_{ij}^d/s	零件 i 到 j 拆卸方向不变	0
	零件 i 到 j 拆卸方向变化 90°	2
	零件 i 到 j 拆卸方向变化 180°	4

4.2.2 优先矩阵生成

根据动态干涉分析方法,以最大面积所在面的法向作为零件拆卸移动的方向,通过装配体与零件的双坐标系转换,结合包容盒干涉粗检测与实体相交干涉精检测生成该模型的优先矩阵及“1”值分布情况,如图 7 红色框所示,该矩阵表达 CAD 模型中零件的拆卸优先顺序。

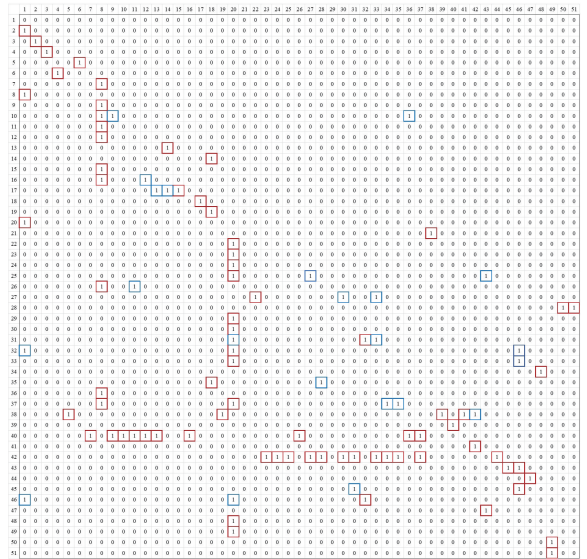


图 7 动态干涉分析与传统干涉检测生成的优先矩阵

Fig.7 Priority matrix generated by dynamic interference analysis method and conventional interference detection method

为验证该优先矩阵的准确性,采用传统的干涉检测方法检测各零件间干涉情况,即进行实体相交干涉检测得到优先矩阵及“1”值分布情况,如图 7 红色框与蓝色框所示,蓝色框体现增加的“1”,对比发现,该矩阵中“1”值增加了 28.57%。出现这种结果的原因可能是零件沿着装配体坐标轴移动,而零件本身坐标轴方向与装配体坐标轴存在角度偏移,导致检测出的干涉体积更大,影响拆卸约束判断。

将两种方法生成的优先矩阵分别用于 BOA-GA 算法,得到的优化结果如表 3 所示。实验结果表明,两种方法得到的优先矩阵使算法的搜索时间不同,搜索到的最优解不同。

注:该案例中以充电接口拆卸方向为 +X 方向,屏幕拆卸方向为 +Z 方向。

卸时间的权重因子表示两者在优化中的重要程度,参考多目标优化相关文献^[16],设置为 $\omega_1 = \omega_2 = 0.5$ 。

表 3 基于动态干涉分析和实体相交干涉检测方法的 DSP 对比结果

Tab.3 DSP comparison results based on dynamic interference analysis and solid intersection interference detection methods

求解算法	方法	求解时间/s	最优序列	最大维修效益/元	预估拆卸时间/s
BOA-GA	动态干涉分析	6.37	21-38-41-42-29-19-5-39-6-40-27-44-7-36-23-11-4-34-16-10-9-25-12-28-13-37-26-24-33-30-31-35-3-50-48-14-47-51-2-22-43-18-49-17-45-15-46-8-32-20-1	2350	593.12
	实体相交干涉检测	8.66	38-41-42-21-29-5-19-39-6-40-4-26-10-33-30-7-24-16-12-34-11-9-13-27-36-3-28-23-50-25-44-2-31-35-14-48-51-22-37-47-49-18-43-20-17-45-15-46-8-32-1	2104	612.75

另外,根据人为构建拆卸优先图并转化为优先矩阵的原则^[10],通过实际拆卸实验判断零件间拆卸约束关系,图 8 所示即拆卸优先图,将有向边对应值置“1”构成优先矩阵,结果与图 7 红色框所示动态干涉分析方法提取的矩阵一致。

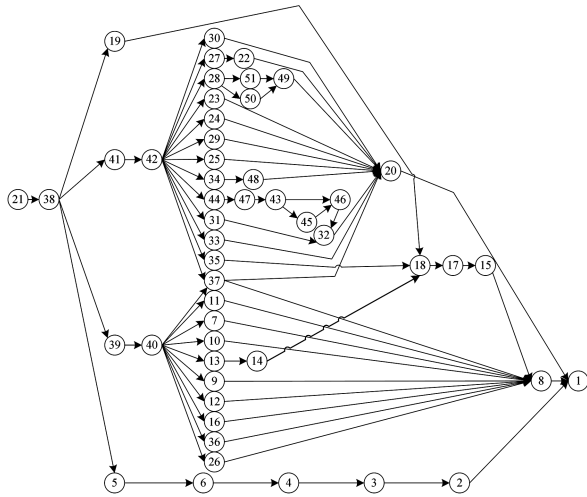


图 8 人为构建拆卸优先图

Fig.8 Artificially constructed disassembly prioritization map

4.2.3 基于 DSP 的手机动态干涉分析方法验证

基于 BOA-GA 混合优化算法执行 DSP,以图

7 所示动态干涉分析方法生成的优先矩阵作为结构约束条件,以维修效益最大与拆卸时间最短为目标,生成基于 BOA-GA 的最优拆卸序列。参数设置如下:初始种群数 100,迭代次数 200,交叉概率 0.5,变异概率 0.08^[16],蝴蝶数量 100,转换概率 0.8,香味 0.3,感觉形式 0.01^[13]。另外,通过与传统 GA 算法、灰狼-遗传优化算法(GWO-GA)、鲸鱼-遗传优化算法(WOA-GA)及实际拆卸作对比,其中 GA 相关参数与上述保持一致,GWO^[17]与 WOA^[18]的参数设置与文献一致。4 种算法分别连续进行 30 次实验,生成的收敛曲线见图 9,算法优化和实际拆卸实验结果如表 4 所示。

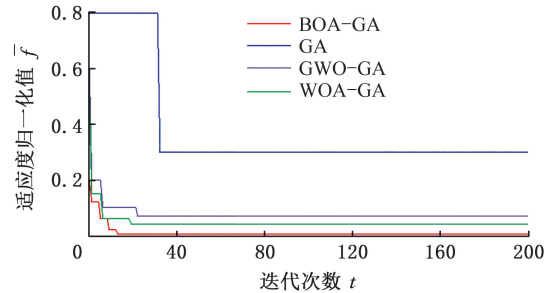


图 9 收敛曲线对比图

Fig.9 Convergence curve comparison plot

表 4 4 种算法优化结果与实际拆卸结果对比

Tab.4 Comparison of the optimization results of the four algorithms with the actual disassembly results

求解算法	最优序列	最大维修效益/元	最佳迭代次数	收敛率/%	预估拆卸时间/s
BOA-GA	21-38-41-42-29-19-5-39-6-40-27-44-7-36-23-11-4-34-16-10-9-25-12-28-13-37-26-24-33-30-31-35-3-50-48-14-47-51-2-22-43-18-49-17-45-15-46-8-32-20-1	2350	14	83.33	593.12
GA	21-38-29-5-19-41-39-42-6-31-40-4-30-23-7-24-27-12-34-11-28-26-3-16-36-33-9-13-44-25-10-14-35-48-50-37-2-22-51-18-47-17-43-49-45-20-15-46-8-32-1	2186	44	33.33	642.91
GWO-GA	21-38-29-39-19-5-41-6-40-4-42-10-12-16-11-9-26-28-7-13-30-3-27-36-31-34-25-23-24-14-2-33-44-35-37-50-47-48-51-22-43-18-45-49-17-20-46-15-32-8-1	2210	28	56.67	614.55
WOA-GA	21-38-29-39-5-19-41-6-40-4-42-9-10-13-12-44-31-28-36-34-16-30-7-26-11-14-33-25-23-47-27-3-24-37-51-2-50-48-22-35-49-43-18-17-20-45-15-8-46-1-32	2295	31	63.33	621.34
实际拆卸	21-38-41-42-30-28-51-50-49-27-22-23-24-25-29-44-47-43-45-46-32-34-48-33-31-35-37-20-19-39-40-11-7-10-13-14-12-16-9-36-26-18-17-15-8-5-6-4-3-2-1	2137			657.77

由式(18)可知,本文适应度值越小说明维修效益越大、拆卸时间越短。图 9 展示了 4 种优化算法的收敛特性,可以看出,BOA-GA 算法收敛到最佳结果后与 GA、GWO-GA、WOA-GA 算法相比适应度值最小,且可以收敛到 0.0004。同时,BOA-GA 达到最优解的迭代次数也比其他 3 种算法少,说明 BOA-GA 混合优化算法在解决 DSP 问题上收敛速度更快,解的质量更优。

4.3 结果分析

表 3 实验结果表明,相比于传统实体相交干涉检测方法生成的优先矩阵,将采用动态干涉分析方法生成的优先矩阵用于 BOA-GA 算法寻找零件最优拆卸序列时,求解时间缩短了 26.44%,优先矩阵的准确性提高了 28.57%;所求最优序列与传统方法相比最大维修效益提高了 10.47%,拆卸时间缩短了 3.31%。表明本文通过动态干涉分析方法获得优先矩阵能将零件拆卸优先关系准确表达,而传统干涉检测方法获得优先矩阵存在零件拆卸优先关系表达冗余。

为了验证本文所提混合优化算法解决手机拆卸序列规划问题的优势,表 4 展示了 4 种算法的优化结果,收敛率是算法收敛到最优解次数与实验总次数 30 之比。其中,利用 BOA-GA 算法寻找最优解时,迭代 14 次后适应度值不再变化,此时的最大维修效益为 2350 元,相较于 GA、GWO-GA、WOA-GA 提高了 6.98%、5.96%、2.34%,比实际拆卸的维修效益提高了 9.06%;预估拆卸时间为 593.12 s,理论拆卸时间比 GA、GWO-GA、WOA-GA 缩短了 8.39%、3.61%、4.76%,比实际拆卸时间缩短了 10.9%;收敛率为 83.33%,相比 GA、GWO-GA、WOA-GA 收敛率提高了 50%、26.66%、20%,说明 BOA-GA 的优化结果更具稳定性。

5 结论

1)利用动态干涉分析方法得到手机 CAD 模型的拆卸约束,并表达为优先矩阵;与传统的实体相交干涉检测并分析结果得到的优先矩阵相比,准确率提高了 28.57%,求解时间缩短了 26.44%。

2)将动态干涉分析方法所获优先矩阵输入蝴蝶-遗传优化算法(BOA-GA),得到最优解时间为 6.37 s,比传统方法缩短了 35.95%;最大维修效益为 2350 元,比传统方法提高了 10.47%;预估拆卸时间为 593.12 s,比传统方法缩短了 3.31%。

3)以优先矩阵为约束条件并运用 BOA-GA 算法搜索,预测出该手机的零件最优拆卸序列为

21-29-38-19-41-5-39-6-40-42-27-44-7-36-23-11-4-34-16-10-9-25-12-28-13-37-26-24-33-30-31-35-3-50-48-14-47-51-2-22-43-18-49-17-45-15-46-8-32-20-1,最短拆卸时间为 593 s,最大维修效益为 2350 元。

4)手机 CAD 模型实验结果表明,BOA-GA 相比于 GA、GWO-GA、WOA-GA,拆卸时间缩短了 8.39%、3.61%、4.76%,比实际拆卸时间缩短了 10.9%;最大维修效益提高了 6.98%、5.96%、2.34%,比实际拆卸的维修效益提高了 9.06%,表现出良好的收敛性能和全局寻优功能。

在实际拆卸中,有更多的不确定因素如零件缺损、拆卸操作复杂等,零件拆卸的优先顺序仍需进一步考虑。在后续研究中,将在本文动态干涉分析提取的优先矩阵基础上提取拆卸不确定信息并用于优化算法,提高算法在解决 DSP 问题上的准确性。

参考文献:

- [1] LILHORE U K, DALAL S, SIMAIYA S. A Cognitive Security Framework for Detecting Intrusions in IoT and 5G Utilizing Deep Learning[J]. *Computers & Security*, 2024, 136:1-22.
- [2] 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.
YIN Fengfu, DU Zerui, LI Lin, et al. Disassembly Sequence Planning of Used Smartphone Based on Dual-population Genetic Algorithm[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2021, 57(17):226-235.
- [3] XU Xiaoming, HUANG Song, LING Ling, et al. Modelling and Solving of Product Disassembly Activity Logic Network[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2004, 23(3/4):220-226.
- [4] FU Wenlong, LIU Xing, CHU Fanwu, et al. A Disassembly Sequence Planning Method with Improved Discrete Grey Wolf Optimizer for Equipment Maintenance in Hydropower Station[J]. *Journal of Supercomputing*, 2023, 79(4):4351-4382.
- [5] JI Jiaqi, WANG Yong. Selective Disassembly Sequence Optimization Based on the Improved Immune Algorithm[J]. *Robotic Intelligence and Automation*, 2023, 43(2):96-108.
- [6] MUNKER S, SWOBODA D, EL ZAATARI K, et al. CAD-based Product Partitioning for Automated Disassembly Sequence Planning with Community Detection[C]// *Production Processes and Product Evolution in the Age of Disruption: Proceedings of*

- the 9th Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production Conference. Bologna, 2023; 570-577.
- [7] CHEN Zepeng, LI Lin, ZHAO Fu, et al. Disassembly Sequence Planning for Target Parts of End-of-life Smartphones Using Q-learning Algorithm[J]. Procedia CIRP, 2023, 116:684-689.
- [8] 尹凤福, 刘广阔, 王晓东, 等. 基于多种群遗传算法的废旧手机拆卸序列规划[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2023, 46(4):438-446.
YIN Fengfu, LIU Guangkuo, WANG Xiaodong, et al. Disassembly Sequence Planning of Used Mobile Phones Based on Multi-population Genetic Algorithm[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2023, 46(4):438-446.
- [9] 周凯. 基于零件优先图和遗传烟花算法的退役电动汽车电池组拆解序列优化[D]. 大连:大连理工大学, 2021.
ZHOU Kai. Disassembly Sequence Optimization of Battery Packs for Retired Electric Vehicles Based on Part Priority Graph and Genetic Fireworks Algorithm[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2021.
- [10] 郭洪飞, 陈志彬, 任亚平, 等. 基于零件回收综合评价的废旧产品拆解序列与拆解深度集成决策研究[J]. 机械工程学报, 2022, 58(4):258-268.
GUO Hongfei, CHEN Zhibin, REN Yaping, et al. Research on Disassembly Sequence and Disassembly Length Integrated Decision of End-of-life Products Based on Parts Recovery Comprehensive Evaluation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(4):258-268.
- [11] 赵佳琪. 基于 CREO 的虚拟装配路径规划技术研究[J]. 航天制造技术, 2016, 1:61-67.
ZHAO Jiaqi. Research on Virtual Assembly Path Planning Technique based on CREO Software[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2016, 1: 61-67.
- [12] 朱卓悦, 徐志刚, 沈卫东, 等. 基于遗传蝙蝠算法的选择性拆卸序列规划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(11):2120-2127.
ZHU Zhuoyue, XU Zhigang, SHEN Weidong, et al. Selective-disassembly Sequence Planning Based on Genetic-bat Algorithm[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2018, 52(11): 2120-2127.
- [13] ARORA S, SINGH S. Butterfly Optimization Algorithm: a Novel Approach for Global Optimization[J]. Soft Computing, 2018, 23(3):715-734.
- [14] 丁元明, 夏清雨, 张然, 等. 蝴蝶优化算法研究综述[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(7):2705-2712.
DING Yuanming, XIA Qingyu, ZHANG Ran, et al. Review of Literature Survey of Butterfly Optimization Algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(7):2705-2712.
- [15] CONG Liang, ZHAO Fu, SUTHERLAND J W. Integration of Dismantling Operations into a Value Recovery Plan for Circular Economy[J]. Journal of Cleaner Production, 2017, 149:378-386.
- [16] 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. Disassembly Sequence Optimization Based on Automatic Generation of Disassembly Information Model[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [17] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, LEWIS A. Grey Wolf Optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69:46-61.
- [18] LIN Xiaokun, YU Xianxing, LI Weidong. A Heuristic Whale Optimization Algorithm with Niching Strategy for Global Multi-dimensional Engineering Optimization[J]. Computers & Industrial Engineering, 2022, 171:1-15.

(编辑 袁兴玲)

作者简介:王云帆,女,2000年生,硕士研究生。研究方向为可拆卸性设计。E-mail:15234511210@163.com。黄海鸿*(通信作者),男,1980年生,教授、博士研究生导师。研究方向为绿色设计与制造。E-mail:huanghaihong@hfut.edu.cn。

本文引用格式:

王云帆,朱利斌,崔创创,等.基于拆卸信息提取的多零件堆叠结构设备动态干涉分析方法[J].中国机械工程,2025,36(6):1269-1279.

WANG Yunfan, ZHU Libin, CUI Chuangchuang, et al. DIA Method for Multi-part Stacked Structure Devices Based on Disassembly Information Extraction[J]. China Mechanical Engineering, 2025, 36(6):1269-1279.