

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.11.002

基于多因素约束度函数的拆卸序列规划研究*

陈 建, 胡俊康, 王建勇

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对拆卸过程中多个因素对其序列规划产生影响的问题,对零部件的基本外形复杂程度、拆卸的相对位置以及零部件间的约束关系、拆卸工具等方面进行了研究,得到了约束状态图拆卸模型,提出了形质比和拆卸距离的概念以及计算公式。将拆卸工具和拆卸级别统一换算成拆卸成本,并将影响因素进行标准化处理,建立了多因素下的约束度函数以及对应的约束度矩阵,在此基础上对粒子位置速度进化规则进行了离散化处理,通过拆卸算子和约束度矩阵建立了粒子的适应度函数,利用离散化粒子群算法生成了适应度最小的拆卸序列。研究表明:根据产品的装配图,利用所提方法能简单、快速地得到约束度矩阵和适应度函数,从而通过算法得到最优拆卸序列。

关键词:拆卸序列规划;约束状态图;约束度;粒子群算法

中图分类号:TH162

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)11-1145-07

Disassembly sequence planning based on multi-factor constraint degree function

CHEN Jian, HU Jun-kang, WANG Jian-yong

(Key Lab of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology, Minister of Education/Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problems affected several factors in the disassembly sequence planning, the complexity of the part's appearance, the relative position and the constraint relationship between parts, the disassembly tool, etc were studied. The disassembly model was obtained from the constrained state diagram, and the concept of the mass-to-mass ratio and disassembly distance and the calculation formula were proposed. The disassembly tool and disassembly level were uniformly converted into disassembly costs. After the standardization process, the constraint degree function under multiple factors and the corresponding constraint degree matrix were established. On this basis, the particle position velocity evolution rules were discretized, the particle fitness function was established, and the disassembly sequence was generated by the discrete particle swarm algorithm. The example results show that according to the assembly drawing of the product, the proposed method can use a simple and fast constraint matrix and fitness function to obtain the optimal disassembly sequence by the algorithm.

Key words: disassembly sequence planning; constraint state graph; constraint degree; particle swarm optimization

0 引 言

拆卸是再制造工程的重要工序,其关键在于拆卸序列规划,高效率、高质量的拆卸序列能够使产品在生命终端时可重用部分可以得到有效的利用^[1]。

目前,国内外许多专家学者对拆卸序列规划方法进行了研究,提出了一些可行的拆卸序列规划方法^[2-3]。ZHANG Xiu-fen 等^[4]根据装配约束、拆卸优先系数、拆卸时间因子、拆卸工具系数和组合类型因子,建立了平行拆卸的映射模型进行序列规划;WANG

收稿日期:2018-03-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175473);浙江省自然科学基金资助项目(LY15E050021)

作者简介:陈 建(1975-),男,山东泰安人,副研究员,主要从事绿色设计、数字化设计与制造等方面的研究。E-mail:chenjian@zjut.edu.cn

Heng-yu 等^[5]建立了一种有向约束图模型,并采用破坏性拆卸方法来优化目标拆卸序列规划;王伏林等^[6]考虑拆卸过程中稳定性因素,得出了可行的最优的或近似最优的拆卸序列;PINTZOS G 等^[7]从产品设计文件中生成拆卸相关信息,并基于反汇编优先图生成算法,提出了一个估算拆卸过程时间的拆卸序列规划方法;VANEGAS P 等^[8]提出了一种 eDiM 方法,通过操作技术来计算操作序列的时间进一步分析可拆卸性;宋守许等^[9]通过拆卸混合图表达产品零部件之间的连接关系和优先约束关系,建立了拆卸序列规划数学模型和适应度计算公式;蔡凯骏等^[10]根据零件配合关系以及可拆卸性的表达,提出了以等待时间为主的拆卸序列方法;LUO Yong-tao 等^[11]根据产品结构建立多层表示法的动态产品数据模型,利用蚁群算法以获得最佳拆卸方案;王攀等^[12]通过 Petri 网建立拆卸模型,并利用混沌粒子群算法进行了拆卸序列规划;MAROUA K 等^[13]考虑到拆卸约束不仅在产品生命周期的环境中是重要的,而且在其生命周期中也是重要的,提出了一种基于蚁群算法的自动拆卸序列规划方法;刘志峰等^[14]将模拟退火粒子群优化算法应用于拆卸序列规划求解过程;HIDEYUKI N 等^[15]提出了一种基于遗传算法的拆卸调度方法,该方法通过拆卸多个产品的拆卸过程和后工序对拆卸零件进行拆卸和回收,从而使整个拆卸和后处理时间最小化。

上述研究中主要考虑拆卸过程中拆卸工具的使用次数、拆卸方向变换次数、两零部件拆卸时所需要的时间或者拆卸成本等因素,并选取其中一项影响因素作为拆卸序列规划的依据,从而导致生成的拆卸序列与实际操作不符。事实上在拆卸过程中,这些影响因素是共同存在的,必须综合考虑。另外拆卸时,零部件本身的外形复杂程度以及它自身重量也会在一定程度上影响拆卸序列的规划。

本文将根据零部件之间的约束关系,建立约束状态图,并根据拆卸过程中的主要影响因素,提出多因素下的综合约束度函数,并利用粒子群算法实现生命终端产品的最优拆卸序列生成。

1 多因素下约束度函数的构建

1.1 拆卸模型的建立

拆卸序列规划的基础是建立拆卸模型^[16]。产品是由零部件以一定的约束关系组成结构稳定且具有特定功能的装配体。通常,设约束状态图 $G = (V, L)$ 为顶点和连接这些顶点的线(边)的集合,其中: $V = (v_1, v_2,$

$\dots, v_N)$ —图中所有节点的集合,为一个有限集; N —最小拆卸单元(零件或子装配体)个数; $L = (l_1, l_2, \dots, l_m)$ —图中所有边的集合,也是有限集,表示两顶点之间存在约束关系,用直线表示; M —约束关系的数量。约束状态示意图如图 1 所示。

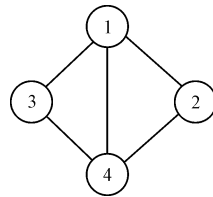


图 1 约束状态示意图

1.2 零部件的外形描述

本研究根据零部件的基本外形尺寸以及零件的质量,对零部件外形复杂程度进行量化处理,再通过对加工方式和零部件类型的不同进行分类描述。

切削加工是机械制造中最主要的加工方法。若零件的外形尺寸越复杂,加工量越多,则去除的材料越多,因此通过计算毛坯与零件的质量比可以形象地描述零件的形状复杂程度,即形质比。若零部件外形越复杂,则形质比越大;反之零部件外形越简单,则形质比越小。

各类切削加工工件形质比示意图如图 2 所示。

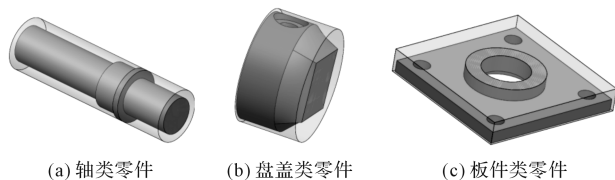


图 2 切削加工工件形质比示意图

图中,透明框部分为拟合加工之前的毛坯,实体部分为加工完成之后的零件。

铸件的零件表面较为复杂,箱体类和叉架类零件多为铸件,可以通过拟合一个毛坯的方式用于计算零件的形质比。

各类铸件类形质比示意图如图 3 所示。

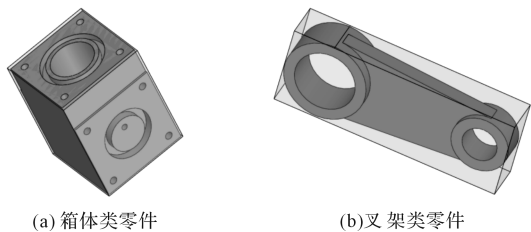


图 3 铸件类形质比示意图

图中,透明框部分为拟合毛坯,实体部分为加工完成之后的零件。

其中,箱体类零件主要由钣金件或者简单杆件构成,加工制造方法简单,钣金件和杆件重量也都比较轻。但箱体类零件多为其他零件安装的基础零件,可将其视为机架部分,多为不拆卸部分或者最后拆卸部分,因此根据拟合的毛坯计算形质比。对于机架而言,形质比应越大越好。

通过拆卸物元的参数化模型,可以得知最小拆卸单元的外围形状尺寸、材料密度以及最小拆卸单元的质量,则形质比可表示为:

$$\eta = \frac{V \cdot \rho}{M} \quad (1)$$

$$V = \begin{cases} \frac{\pi}{4}d^2h, & \text{轴套类、盘盖类} \\ abc, & \text{其他类型} \end{cases}$$

式中: d —轴套类、盘盖类毛坯的直径; h —轴套类、盘盖类毛坯的高; a, b, c —其他类型毛坯的长、宽、高; ρ —零部件材料密度; M —零部件的实际质量。

若形质比越大,则零部件外形越复杂,拆卸时的难度也越大;若形质比越小,则零部件外形越简单,拆卸时的难度也越小。

举例:两板件类零件的毛坯长、宽、高都为 30 mm、30 mm、7 mm,材料 45 钢,但是两零件所打的孔个数不同,分别计算这两零件的形质比。

两板件类形质比示例图如图 4 所示。

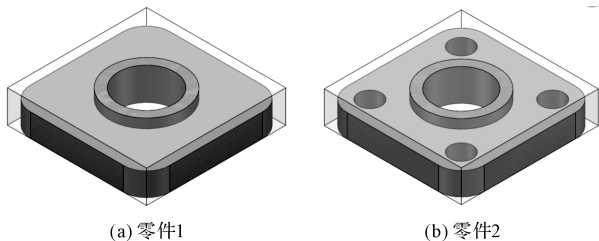


图 4 两板件类形质比示例图

$$\eta_1 = (30 \times 30 \times 7 \times 7800) / (0.031 \times 10^9) = 1.59,$$

$$\eta_2 = (30 \times 30 \times 7 \times 7800) / (0.026 \times 10^9) = 1.89$$

得到 $\eta_1 < \eta_2$, 零件 2 的形质比大,因此零件 2 的外

表 1 拆卸工具分类表

代号	工具名称	拆卸操作
TOOL1	手动	尺寸大小、重量适宜,不需要辅助工具,拆卸时间短
TOOL2	螺丝刀、扳手、翘片、吸盘、镊子、加磁器等	尺寸小、形状规则,需夹持类工具,拆卸力量小,拆卸时间短,一般无破坏
TOOL3	拔钉钳、撬棒、锤子、尖嘴钳、钢锯、拔销器等	尺寸过大或过小,需通过增大拆卸力实现拆卸,可能会使零件产生轻微变形或破损
TOOL4	专用拆卸钳、拉力器等	零件部分生锈但约束力小,尺寸、形状简单,需专用工具进行拆卸,会造成破坏性结果
TOOL5	电锯、电钻等	零件部分生锈,约束力大,尺寸、形状复杂,不易完全拆卸,需通过部分破坏拆卸实现,会造成破坏性结果
TOOL6	破碎机	零件破碎处理,材料回收

形相对更复杂。

1.3 零部件的拆卸距离

在整个产品中,各个拆卸单元的位置都是不同的,通常拆卸过程都是由外到内或者由一侧开始到另一侧结束,因此各个零件的相对位置影响拆卸顺序。在建立拆卸模型的时候,通常会选择一个不拆卸零部件或者最后拆卸零部件作为约束状态图的起点,即零部件 1。因此,在计算各个零件的相对位置时,笔者将约束状态图起点处的零部件定为中心件,以该零部件的几何中心为基准计算各个待拆卸零部件的几何中心到基准的距离,即拆卸距离。零部件拆卸距离示意图如图 5 所示。

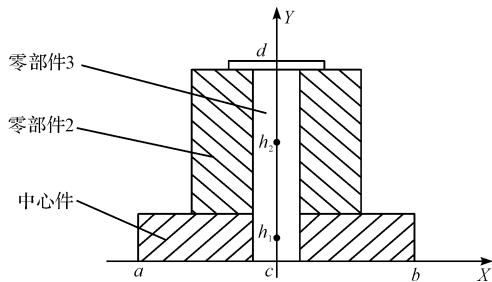


图 5 拆卸距离示意图

本研究以对称轴为基准建立坐标系,在 X 轴上待拆卸产品的外形尺寸区间为 $X_0 = \langle a, d \rangle$; Y 轴上待拆卸产品的外形尺寸区间为 $Y_0 = \langle c, d \rangle$ 。其中: $h_1(x_1, y_1)$ —中心件的几何中心; $h_2(x_2, y_2)$ —待拆卸零部件 2 的几何中心。则待拆卸零部件 2 与中心零部件 1 的拆卸距离为:

$$\rho = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (2)$$

根据拆卸序列规划原则,往往中心件是在中心或者一侧,可知拆卸物元的距越大,则距离中心件也越远,因此优先拆卸。

1.4 拆卸成本

约束关系的解除以及联接件的拆卸需要拆卸工具,本研究依据拆卸力、拆卸难度和拆卸消耗,在约束关系中把拆卸工具分为几类,如表 1 所示。

在拆卸完成后,因零部件间的约束关系、拆卸方式、拆卸工具不同,从而导致拆卸后的零部件会产生不同程度的损伤或者破坏。依据拆卸之后零部件再次利用的方式,将拆卸级别分为几类,如表 2 所示。

表 2 拆卸级别分类表

代号	选项	拆卸级别	结果
LEVEL1	直接使用	完全无损性拆卸	功能再利用
LEVEL2	修复后使用	目标修复性拆卸	性能恢复
LEVEL3	再制造后使用	关键目标拆卸	性能改进
LEVEL4	材料回收、再资源化	分类性拆卸	原料再利用
LEVEL5	废弃处置	破坏性拆卸	填埋、焚烧等

拆卸成本是衡量拆卸可行性的的重要判据。拆卸成本主要由人工成本和拆卸工具消耗成本组成。其中,人工成本包括拆卸时间和单位时间工资水平,拆卸时间又可分为拆卸工具准备时间和拆卸操作时间。拆卸工具消耗成本则主要与拆卸工具的价格和使用寿命(按使用次数)有关,此外还包括使用电力驱动所产生的能耗问题。因此,拆卸成本为:

$$C = T_{dis} S_w + C_r \quad (3)$$

式中: T_{dis} —拆卸时间; S_w —单位时间工资; C_r —拆卸工具消耗成本。

拆卸时间为:

$$T_{dis} = T_{ij} \times N^k \quad (4)$$

式中: T_{ij} —单次常规拆卸零部件*i*与零部件*j*之间约束所需的拆卸时间; N^k —零部件*i*与零部件*j*之间约束数量。

拆卸工具消耗成本为:

$$C_r = \frac{C_m}{N_e} \cdot N^k + P_{elec} \cdot T_o \cdot C_d \cdot N^k \quad (5)$$

式中: C_m —常规拆卸工具价格; N_e —常规拆卸工具的额定寿命(按使用次数); P_{elec} —电动常规拆卸工具的功率; T_o —电动常规拆卸工具随需的拆卸时间; C_d —使用地的电价。

在一定程度上,本文给出的一些具体量化数值是一个平均值。在拆卸时间方面,可根据不同连接情况下得到所需的拆卸时间,单位时间工资根据当时工资水平来获取。

常用拆卸工具参数以及不同拆卸级别的单次拆卸时间如表(3,4)所示。

表 3 常用拆卸工具参数表

拆卸工具	拆卸工具价格	额定寿命	功率/W
	C_m /RMB	N_e /次	
TOOL1	0	0	0
TOOL2	15	5 000	0
TOOL3	30	10 000	0
TOOL4	100	10 000	0
TOOL5	250	0	800
TOOL6	200 000	0	300 000

表 4 拆卸级别和拆卸工具对应的单次拆卸时间表

拆卸级别	拆卸工具	拆卸时间/s
LEVEL1	TOOL1	10
	TOOL2	15
LEVEL2	TOOL2	20
	TOOL3	30
LEVEL3	TOOL3	40
	TOOL4	60
LEVEL4	TOOL5	约 30
	TOOL5	约 60
	TOOL6	约 40

1.5 综合约束度

1.5.1 拆卸距标准化处理

对于拆卸距,拆卸距越大,则距离中心件越远,相应的拆卸性越好;反之拆卸距越小,则拆卸难度越大,属于负类属性影响因数。此处利用极差标准化法对拆卸距进行标准化,即:

$$k_1(i) = \frac{\max\{\rho_i\} - \rho_i}{\max\{\rho_i\} - \min\{\rho_i\}} \quad (6)$$

式中: ρ_i —拆卸距。

经过极差标准化法后,拆卸距越大,则 k_1 越小;反之, k_1 越大,并且 $k_1 \in [0,1]$ 。

1.5.2 拆卸成本标准化处理

对于拆卸成本,拆卸成本越大,则拆卸所消耗的人力物力也越大;反拆卸成本越小,则拆卸所消耗的人力物力也越小,属于正类属性影响因数。此处利用极大值标准化法对拆卸成本进行标准化,即:

$$k_2(i,j) = \frac{c_{ij}}{\max\{c_{ij}\}} \quad (7)$$

式中: c_i —拆卸成本; $\sum c_i$ —整个产品的拆卸成本。

经过总和标准化法后,成本 k_2 越大,则越大;反之, k_2 越小,并且 $k_2 \in [0,1]$ 。

1.5.3 约束度函数的构建

约束度函数是一种对拆卸约束的综合度量,记为 $k_{i,j}(i,j$ —拆卸对象标号)。根据约束度函数的定义,两零部件拆卸越困难,则约束度函数越大;拆卸越简单,则约束度函数困难。因形质比、拆卸成本越大,则零部件拆卸越困难,因此与约束度函数成正相关关系;拆卸距离越大,则零部件拆卸越困难,因此与约束度函数成负相关关系;无约束关系约束度函数可设置为 0。因此,建立一个综合约束度函数如下:

$$k_{i,j} = \begin{cases} \eta_i(\alpha_1 k_1(i) + \alpha_2 k_2(i,j) + \alpha_3), & \text{零部件} \\ & i,j \text{ 有约束关系} \\ 0, & \text{零部件 } i,j \text{ 无约束关系} \end{cases} \quad (8)$$

式中: η_i —零部件*i*形质比; α_1, α_2 —比例系数,且 $\alpha_1 +$

$\alpha_2 = 1; \alpha_3$ —修正系数。

根据约束状态图模型,笔者利用上述综合约束度计算公式,可得综合约束度矩阵:

$$M = (k_{i,j})_{N \times N} \quad (9)$$

式中: N —最小拆卸单元个数; M — N 阶矩阵。

根据图 1 所示约束状态图模型,可得到约束状态矩阵为:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & k_{1,2} & k_{1,3} & k_{1,4} \\ k_{2,1} & 0 & 0 & k_{2,4} \\ k_{3,1} & 0 & 0 & k_{3,4} \\ k_{4,1} & k_{4,2} & k_{4,3} & 0 \end{bmatrix}$$

2 基于粒子群算法的拆卸序列生成

1995 年,KENNEDY 和 EBERHART^[17]首次提出粒子群算法(PSO),这是一种新的群体智能算法。

2.1 粒子初始化

粒子群的初始化是问题求解的关键。粒子 i 的位置 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$ 表示产品中所有需要拆卸的零部件的排列组合,即一个拆卸序列。其中: n —粒子的维数,即某一产品中零部件的总个数; x_{ij} —粒子 i 的第 j 维分量,表示零件的编号,即拆卸序列 i 中进行拆卸的第 j 个零件的编码。粒子的初始位置,即初始拆卸序列是随机生成的。粒子 i 的速度 $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$ 用以改变粒子的位置,与粒子位置的维数相同。

2.2 粒子的位置速度进化规则

拆卸序列规划问题属于离散型组合优化问题。为了针对具体问题进行分析,本研究将速度与位置更新公式中的运算法则进行重新定义。相应运算法则重新定义如下:

$$v_{ij}(t+1) = a \cdot v_{ij}(t) = \begin{cases} 1, & v_{ij} = 1, \text{ and } a \in (0,1) \\ 0, & v_{ij} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$p_{ij} - x_{ij} = \begin{cases} 1, & p_{ij} = x_{ij} \\ 0, & p_{ij} \neq x_{ij} \end{cases} \quad (11)$$

$$g - x_{ij} = \begin{cases} 1, & g_{ij} = x_{ij} \\ 0, & g_{ij} \neq x_{ij} \end{cases} \quad (12)$$

$$v_{ij}(t+1) = \begin{cases} 1, & (v_{ij} = 1) \text{ or } (p_{ij} - x_{ij} = 1) \text{ or } (g - x_{ij} = 1) \\ 0, & v_i = v_j = 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) \quad (14)$$

式(10 ~ 14)中: a —随机数且 $a \in (0,1)$; p —个体极

值; g —全体极值。

在更新粒子的位置时,若速度 $V_i(t+1)$ 中的元素 $v_{ij}(t+1) = 1$,则不改变位置拆卸序列 $X_i(t+1)$ 中第 j 维对应的零件号,即 $x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t)$;若速度 $V_i(t+1)$ 中的元素 $v_{ij}(t+1) = 0$,则将拆卸序列 $X_i(t+1)$ 中的第 j 维对应的零件号与第 $j+1$ 维对应的零件号交换位置,即 $x_{ij} \leftrightarrow x_{i(j+1)}$ 。由于粒子位置与速度的维数相同,此位置更新公式保证了 $X_i(t+1)$ 的维数仍然是 n 。

根据以上重新定义的运算法则,通过一例子具体说明其运算过程。

设 $X_i(t) = (6,5,3,4,2,1), P_i(t) = (6,4,5,3,2,1), G(t) = (6,5,4,3,2,1), V_i(t) = (1,0,0,0,0,0)$,则计算过程如下:

$$P_i(t) - X_i(t) = (6,4,5,3,2,1) - (6,5,3,4,2,1) = (1,0,0,0,1,1);$$

$$G(t) - X_i(t) = (6,5,4,3,2,1) - (6,5,3,4,2,1) = (1,1,0,0,1,1);$$

$$V_i(t+1) = V_i + (P_i - X_i) + (G - X_i) = (1,0,0,0,0) + (1,0,0,0,1,1) + (1,1,0,0,1,1) = (1,1,0,0,1,1);$$

$$X_i(t+1) = X_i(t) + V_i(t+1) = (6,5,3,4,2,1) + (1,1,0,0,1,1) = (6,5,4,3,2,1)。$$

2.3 粒子适应度函数

拆卸序列规划的目的是得到拆卸最简单和拆卸消耗最少的可拆卸序列。本研究通过对各个拆卸影响因素进行全面的分析和量化处理,并建立综合约束度函数和约束度矩阵。根据综合约束度函数和约束度矩阵,将适应度函数定义为:

$$f = \sum_{j=1}^n \text{sum}(D_{x_{i(j-1)}} MD_{x_{i(j-1)}}, x_{ij}) \quad (15)$$

式中: $\text{sum}(D_{x_{i(j-1)}} MD_{x_{i(j-1)}})$ —计算矩阵 $D_{x_{i(j-1)}}$ 中第 x_{ij} 行所有元素之和。

在粒子群更新过程中,粒子的适应度函数值越低,表示得到可拆卸序列的拆卸方法最简单和消耗最少,因此拆卸序列越优。

则拆卸 x_{ij} 的拆卸算子 $D_{x_{i(j-1)}}$ 可表示为:

$$D_{x_{i(j-1)}} = \begin{bmatrix} a_1 & & & & & \\ & a_2 & & & & \\ & & \dots & & & \\ & & & a_i & & \\ & & & & \dots & \\ & & & & & a_{N-1} \\ & & & & & & a_N \end{bmatrix},$$

$$a_l = \begin{cases} 0, & l = x_{i(j-1)}, l = 1, 2, \dots, N \\ 1, & l \neq x_{i(j-1)} \end{cases}$$

并规定： $D_0 = \begin{bmatrix} 1 & & \\ & \dots & \\ & & 1 \end{bmatrix}_{N \times N}$ 。

例如：

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

，如果拆卸对象为： $x_{i(j-1)} = 1$ ，得

$$D_{x_{i(j-1)}} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

计算 $x_{ij} = 2$ 的适应度大小为： $\text{sum}(D_{x_{i(j-1)}}MD_{x_{i(j-1)}})$ ， $x_{ij} = 6$ 。

2.4 拆卸序列规划

利用粒子群优化算法进行产品拆卸序列规划，其本质是将基于图搜索和智能算法相结合。拆卸序列规划具体步骤如下：

- (1) 对产品的模型进行预处理，提取零部件之间的约束关系，根据这些约束关系建立约束状态图；
- (2) 计算各个零部件的外形复杂程度及其拆卸距离，并根据拆卸工具和拆卸级别计算出拆卸成本；
- (3) 利用综合约束度函数得到约束度矩阵；
- (4) 利用粒子群算法生成最优拆卸序列。

拆卸序列规划算法流程如图 6 所示。

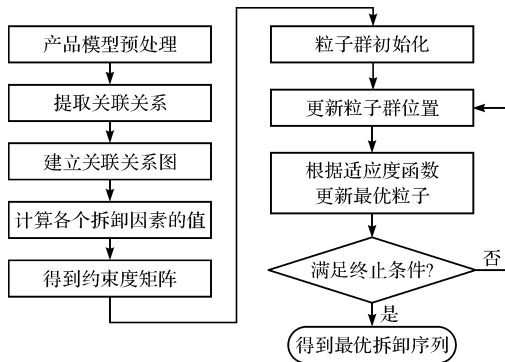


图 6 拆卸序列规划流程

3 实验及结果分析

平口钳是一种通用可调夹具，由于其定位精度较高、夹紧迅速、通用性好、操作方便而得到广泛应用。平口钳是亦损亦耗品，研究对平口钳进行拆卸回收具有重要意义。

平口钳装配示意图以及对应的约束状态图如图 (7,8) 所示。

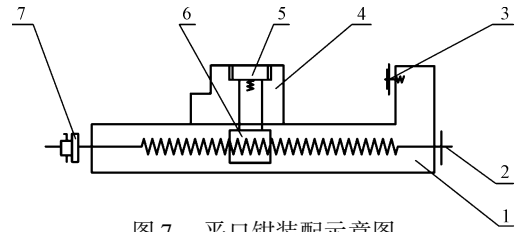


图 7 平口钳装配示意图

1—固定钳身；2—螺杆；3—钳口板；4—活动钳身；5—紧固螺钉；6—螺母；7—固定圆环

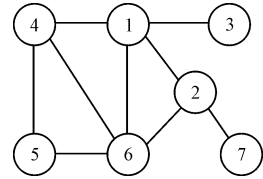


图 8 平口钳约束状态图

本研究根据公式 (1 ~ 3) 计算各个零部件的外形复杂程度及其拆卸距离，并根据拆卸工具和拆卸级别计算出拆卸成本。

各个零部件对应的形质比如表 5 所示。

表 5 零部件的形质比

零部件序号	形质比	拆卸距离
1	4.28	0
2	2	31.3
3	1.23	36.1
4	1.59	71.6
5	1.04	72.0
6	1.94	62.1
7	1.48	119.8

各个约束关系对应的拆卸成本如表 6 所示。

表 6 约束关系的拆卸成本

约束关系	拆卸工具	拆卸级别	拆卸成本
1 - 2	TOOL1	LEVEL1	0.05
1 - 3	TOOL2	LEVEL1	0.075
1 - 4	TOOL1	LEVEL1	0.05
1 - 6	TOOL3	LEVEL2	0.15
2 - 6	TOOL2	LEVEL1	0.075
2 - 7	TOOL4	LEVEL2	0.15
4 - 5	TOOL1	LEVEL1	0.05
4 - 6	TOOL1	LEVEL1	0.05
5 - 6	TOOL2	LEVEL1	0.075

根据公式 (5,7,9)，取 $\alpha_1 = 0.4, \alpha_2 = 0.6, \alpha_3 = 1$ ，可得到约束度矩阵：

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 5.27 & 5.56 & 6.34 & 0 & 7.49 & 0 \\ 3.41 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.55 & 2.95 \\ 2.18 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2.26 & 0 & 0 & 0 & 2.66 & 1.86 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.74 & 0 & 1.81 & 0 \\ 3.29 & 3.39 & 0 & 2.77 & 2.42 & 0 & 0 \\ 0 & 2.81 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

最后在 PSO 中取惯性权重 $\omega = 1$, 加速常数 $c_1 = c_2 = 2$, 种群规模为 10, 利用粒子群算法进行拆卸序列生成, 可得到最优拆卸序列为 3-7-2-5-4-6-1。粒子群收敛过程如图 9 所示。

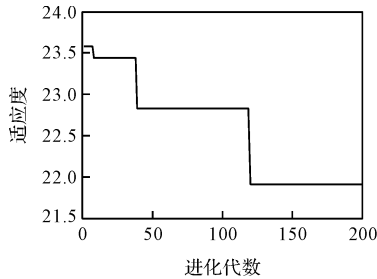


图 9 粒子群收敛过程

4 结束语

通过分析零部件间的约束关系, 本文建立了约束状态图拆卸模型, 并根据零部件的外形复杂程度, 提出了形质比的概念以及计算公式来理想化描述零部件外形复杂程度以及产品的一般拆卸过程, 建立了拆卸距离的计算方法, 用于描述零部件之间的相对位置; 另一方面利用了拆卸成本的计算公式, 对拆卸工具和拆卸级别进行了统一换算; 在对上述的影响因素的量值进行标准化处理后, 构建了多因素下的约束度函数和约束度矩阵, 然后重新定义了粒子的位置速度进化规则, 利用约束度矩阵构建了粒子适应度函数, 并用粒子群生成拆卸序列。

研究表明: 该拆卸序列规划方法降低了拆卸序列生成的复杂程度, 减少了拆卸序列规划的工作量。目前该方法还处在人工拆卸阶段, 在今后的研究中, 将结合机器视觉实现智能拆卸。

参考文献 (References):

[1] 郭砚荣, 张秀芬. 基于联接知识的产品可拆卸设计方法研究[J]. 现代制造工程, 2015(4): 11-16.
 [2] 黄开敏, 王 华, 周晓军. 考虑拆卸序列和随机故障的机会维护策略[J]. 计算机集成制造系统, 2015(11): 3088-3094.
 [3] SONG X, ZHOU W, PAN X, et al. Disassembly sequence planning for electro-mechanical products under a partial destructive mode[J]. **Computer Integrated Manufacturing Systems**, 2012, 18(5): 927-931.

[4] ZHANG X F, YU G, HU Z Y, et al. Parallel disassembly sequence planning for complex products based on fuzzy-rough sets[J]. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2014, 72(1-4): 231-239.
 [5] WANG H, PENG Q, ZHANG J, et al. Selective disassembly planning for the end-of-life product [J]. **Procedia CIRP**, 2017(60): 512-517.
 [6] 王伏林, 吴 博, 胡仲勋, 等. 一种面向拆卸稳定性的产品拆卸序列规划方法[J]. 机械科学与技术, 2016(12): 1857-1864.
 [7] PINTZOS G, MATSAS M, PAPAKOSTAS N, et al. Disassembly line planning through the generation of end-of-life handling information from design files[J]. **Procedia CIRP**, 2016(57): 740-745.
 [8] VANEGAS P, PEETERS J R, CATTRYSSSE D, et al. Ease of disassembly of products to support circular economy strategies [J]. **Resources Conservation & Recycling**, 2017(6): 1-12.
 [9] 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.
 [10] 蔡凯骏, 张伟明, 张梅军, 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(12): 2767-2777.
 [11] LUO Y, PENG Q, GU P. Integrated multi-layer representation and ant colony search for product selective disassembly planning[J]. **Computers in Industry**, 2016(75): 13-26.
 [12] 王 攀, 程培源, 王 威, 等. 基于拆卸 Petri 网和混沌粒子群的拆卸序列规划[J]. 机械设计与制造, 2015(1): 251-255.
 [13] KHEDER M, TRIGUI M, AIFAUI N. Optimization of disassembly sequence planning for preventive maintenance [J]. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2017, 90(5-8): 1337-1349.
 [14] 刘志峰, 杨德军, 顾国刚. 基于模拟退火粒子群优化算法的拆卸序列规划[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2011, 34(2): 161-165, 179.
 [15] NONOMIYA H, TANIMIZU Y. Optimal disassembly scheduling with a genetic algorithm[J]. **Procedia CIRP**, 2017(61): 218-222.
 [16] 罗留祥, 邢彦峰. 基于改进粒子群算法的装配序列规划研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(1): 19-23.
 [17] 周利军, 彭 卫, 邹 芳, 等. 自适应变异粒子群算法[J]. 计算机工程与应用, 2016, 52(7): 50-55.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

陈 建, 胡俊康, 王建勇. 基于多因素约束度函数的拆卸序列规划研究[J]. 机电工程, 2018, 35(11): 1145-1151.

CHEN Jian, HU Jun-kang, WANG Jian-yong. Disassembly sequence planning based on multi-factor constraint degree function[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2018, 35(11): 1145-1151.
 《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>