

# 基于 Tabu 搜索与遗传算法研究拆卸序列优化

王 波 王宁生

( 南京航空航天大学 CIMS 工程研究中心 江苏 南京 210016 )

**摘要** 针对废弃装配体的拆卸序列优化, 提出建立描述装配体结构的干涉-自由矩阵以及“拆卸楔”的概念和算法, 据此计算各个零件从装配体上可以拆卸下来的方向和次序. 鉴于遗传计算过程中, 其邻域往往过早地收敛于局部优化点上, 于是将 Tabu 搜索组合到遗传算法之中. 实例验证表明, 用这种组合优化方法解决装配体拆卸序列优化问题, 所生成的可行拆卸序列在适应度函数值、数量、分布范围等方面均优于单纯的由遗传算法生成的结果.

**关键词** 拆卸序列; Tabu 搜索; 遗传算法; 绿色制造

中图分类号: TP391      文献标识码: A      文章编号: 1000-198X( 2005 )05-0584-04

对废弃的装配体进行科学拆卸, 既可以使许多零部件得以重新使用, 也便于有效处理有毒有害物质. 装配体拆卸序列是指在机电产品的拆卸过程中, 将零件从装配体上分离下来的先后次序. 拆卸序列的选择与确定直接影响产品的回收经济性<sup>[1]</sup>. 以往人们多凭借经验和常识判断拆卸序列, 而本文采用系统化和自动化的方法进行判断, 则具有全面、优化及工作效率提高等多方面的优势.

## 1 装配体建模

要研究装配体的拆卸序列, 首先必须清楚地描述装配体上各个零件之间的空间关系. 本文提出采用干涉-自由矩阵表达拆卸中的几何优先关系. 如图 1 所示, 装配体上的零件可分别沿  $+x$ ,  $-x$  和  $+y$  方向拆卸. 如果其中零件  $P_i$  沿方向  $k$  移动足够距离而不与零件  $P_j$  发生碰撞, 则  $F_{k, i, j} = 1$ , 否则  $F_{k, i, j} = 0$ . 按此原则, 可以依据装配体上各个零件之间的空间关系, 分别写出其  $F_1(+x)$ ,  $F_2(-x)$  和  $F_3(+y)$  3 个干涉-自由矩阵

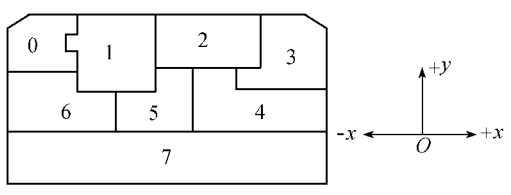


图 1 装配体实例  
Fig.1 Example of assembly

$$F_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F_2 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$F_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

图 1 所示的例子只有 8 个零件, 比较简单, 但是这种技术可用于较大的或是更加复杂的装配体. 当然, 零件数量越多, 描述它的矩阵也随之扩大. 而根据并行工程的原理, 一个较大的装配体通常可以拆分成几个零件数在 15~20 个以下的较小规模的部件、组件等, 这样又可以用图 1 的方法进行拆卸.

无干涉拆卸序列可由装配体的干涉-自由矩阵来检测. 零件  $P_i$  可以无干涉地从装配体上拆卸下来的方向, 称为“零件  $P_i$  的拆卸楔”(  $T_{\text{DAW}}(P_i)$ , Disassembly Wedge of  $P_i$  ). 拆卸楔可由 6 元向量(  $v_1, v_2, \dots, v_6$  )表示  $P_i$  在 6 个方向上的干涉信息(  $d_1, d_2, \dots, d_6$  )=(  $+x, -x, +y, -y, +z, -z$  ). 对于二维结构,  $T_{\text{DAW}}(P_i)$  只包含 4 个元

素(  $v_1, v_2, v_3, v_4$  ) 相应于方向集合(  $d_1, d_2, d_3, d_4$  )=(  $+x, -x, +y, -y$  ). 如果  $v_j = 1$  则  $P_i$  可沿  $d_j$  方向拆卸 ; 如果  $v_j = 0$  则  $P_i$  沿  $d_j$  方向拆卸会发生干涉.

对于两个向量 定义一个“ AND 算子 ”如下 :

$$(v_1, v_2, \dots, v_6) \wedge (w_1, w_2, \dots, w_6) = (v_1 \wedge w_1, v_2 \wedge w_2, \dots, v_6 \wedge w_6) \tag{1}$$

即两个向量做与运算 ,只是对应元素做与运算 .这里  $P_1, P_2, \dots, P_n$  表示每个零件的号码 ,而(  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  )表示拆卸序列 .于是 序列可以是(  $P_4, P_n, P_1, P_5, \dots$  ). 对于一个序列  $\Pi = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$  ,  $n$  是装配体上的零件总数 , $Q_i$  ( 某个  $P_i$  )表示第  $i$  个将要被拆卸的零件 .用  $\Omega_j$  代表  $Q_i$  之后要被拆卸的零件集 ,即装配体上还剩下的零件 .于是  $Q_i$  的拆卸楔为

$$T_{\text{DAW}}(Q_i) = (\wedge F_{1, Q_i, Q_j}, \wedge F_{2, Q_i, Q_j}, \dots, \wedge F_{6, Q_i, Q_j}) = (v_1, v_2, \dots, v_6) \quad Q_j \in \Omega_j \tag{2}$$

如果  $\forall i \in (1, n), T_{\text{DAW}}(Q_i) \neq 0$  则序列是 1 个无干涉的(可行的)序列 ;否则 ,序列  $\Pi$  就是一个有干涉的(不可行的)序列<sup>[2]</sup>.

在图 1 中 ,假设当前要拆卸的零件为 3 ,装配体上尚存的零件为 2, 4, 5, 6, 7. 对零件 3 而言 ,其可行的拆卸方向必须找到 .按上述拆卸楔的计算方法 ,零件 3 和 2 在(  $+x, -x, +y$  )的干涉信息是(  $F_{1,3,2}, F_{2,3,2}, F_{3,3,2}$  ). 所以

$$\begin{aligned} T_{\text{DAW}}(3) &= (F_{1,3,2}, F_{2,3,2}, F_{3,3,2}) \wedge (F_{1,3,4}, F_{2,3,4}, F_{3,3,4}) \wedge (F_{1,3,5}, F_{2,3,5}, F_{3,3,5}) \wedge \\ &\quad (F_{1,3,6}, F_{2,3,6}, F_{3,3,6}) \wedge (F_{1,3,7}, F_{2,3,7}, F_{3,3,7}) = \\ &\quad (1\ 0\ 0) \wedge (1\ 0\ 1) \wedge (1\ 0\ 1) \wedge (1\ 0\ 1) \wedge (1\ 1\ 1) = \\ &\quad (1\ 0\ 0) \end{aligned}$$

于是 ,零件 3 在  $-x$  和  $+y$  方向都有干涉 ,只有在  $+x$  方向可以无干涉地拆卸 .其他零件 2, 4, 5, 6, 7 的可拆卸方向均类此计算 .如果序列中的每个零件都有至少 1 个可拆卸方向 ,则该序列即为可行的.

## 2 Tabu 搜索与遗传算法组合优化策略

### 2.1 遗传算法 GAs( Genetic Algorithms )

遗传算法 GAs 是模拟生物进化过程的计算模型 .近年来 ,已成为人们研究的热点 ,并在计算机科学、优化调度、组合优化和工程优化设计等领域得到了广泛的应用<sup>[3]</sup> .遗传算法在进化搜索中 ,要以目标函数(适应度函数)为依据 .对一个拆卸序列优劣的评价 ,需要设计适应度函数 ,将要考虑的优化准则作为其自变量 .

大量生产的机电产品在废弃之后 ,由原来的生产厂家予以拆卸回收 .在拆卸生产线上 ,要把装配体上的零件逐渐拆卸完毕 ,这期间肯定有换向的需求 ,或者是装配体翻转 ,或者是原地调转方向等 .这种换向的代价是昂贵的 ,需要专用夹具、专用机械手、人工以及时间 .因此 ,本文以拆卸过程中最少的装配体换向次数作为优化目标 ,适应度函数设计为

$$\begin{cases} 2n - i(ds) & \text{可行的拆卸序列} \\ 2 & \text{不可行的拆卸序列} \end{cases} \tag{3}$$

式中 :  $n$ ——装配体上的零件总数 ;  $i(ds)$ ——要完成该拆卸序列  $ds$  所需要的换向次数 .不可行的拆卸序列因为不满足几何优先条件 ,故赋予低值适应度 .在以后的迭代计算中 ,有意让其尽早被淘汰 .

笔者运用 GAs 对装配体拆卸序列优化问题进行了研究 ,通过选择适当的控制参数(交叉概率、变异概率、群体规模等) ,在迭代几十次之后 ,可以得到一些可行的拆卸序列 .初始群体可以由操作者给出 ,也可以由系统随机生成 ,但前者的效果明显要好 .

GAs 的不足之处 ,就在于它容易收敛于局部最优点 ,具体表现在生成的序列都是以某个零件打头 ,仅是后边有些位置上的零件有所差异 .经分析可知 ,这是由 GAs 本身固有的性能决定的 .

### 2.2 Tabu 搜索与遗传算法组合优化算法

Tabu 搜索( Tabu Search :TS )最早由 Glover<sup>[4]</sup>提出 ,是一种全局逐步寻优算法 ,是对人类智力过程的一种模拟 .TS 通过引入一个灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索 ,并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优化状态 ,进而保证多样化的有效搜索 ,并最终实现全局最优<sup>[5]</sup> .组合优化是一个离散最优化问题 .近些年新出现的模拟退火、Tabu 搜索和遗传算法等在组合优化问题中获得了广泛的应用<sup>[6]</sup> .在本文研究中 ,作者将 Tabu 搜索和遗传算法加以组合 ,用于解决装配体拆卸序列的优化问题 .与单纯的 GAs 不同 ,通过引入禁忌表结构 ,存

放每一次迭代之后的最优解序列,并设立一定的禁忌周期,以此控制解集不至于陷在某个局部最优解的邻域中。为了扩大寻优范围,在 GAs 计算的每一代解序列群体之中,抽取其劣等解(其适应度函数值偏小者)数量占种群的 20%,对其施加变异操作,然后纳入到解序列群体中,参加下一代的运算。这样,新的种群或者候选拆卸序列集合就由 4 大部分组成:(a)从禁忌表中出栈的优良序列;(b)直接由上一代传过来的若干序列;(c)由 GAs 操作之后新生成的若干序列;(d)扩展劣等解而生成的若干序列。这样,就在 GAs 的基础上加入了 Tabu 搜索的特性,可望进一步提高系统的寻优能力。依据上述设计思想,TS+GAs 组合优化的总体算法描述如图 2 所示。

3 算例研究

3.1 一个算例

本组合优化算法已经在微机上用 VC++6.0 编程实现。目标是找到若干个拆卸序列,在保持几何可行性的同时,需求最少的换向次数和最少的夹具。以图 1 为例, $F_1$ ,  $F_2$  和  $F_3$  矩阵表达了各个零件之间的空间关系,其先后拆卸几何优先次序关系也在其中。拆卸序列的编码形式和适应度函数如前所述。禁忌表(Tabu List)设为 3,交叉概率设为 0.5,变异概率设为 0.1,初始群体规模设为  $m_i = 3 \sim 14$ ,最终群体规模  $m = 15 \sim 20$ 。由两种方法生成的结果如图 3 和表 1 所示。

表 1 两种计算方法结果对比

| Table 1 Comparison of two kinds of computed results |        |             |        |
|-----------------------------------------------------|--------|-------------|--------|
| GAs 结果                                              |        | TS + GAs 结果 |        |
| 序                                                   | 适应度函数值 | 序           | 适应度函数值 |
| (1)                                                 | 14     | (1)         | 16     |
| (2)                                                 | 14     | (2)         | 15     |
| (3)                                                 | 13     | (3)         | 15     |
| (4)                                                 | 12     | (4)         | 14     |
|                                                     |        | (5)         | 14     |
|                                                     |        | (6)         | 13     |
|                                                     |        | (7)         | 12     |

3.2 分析讨论

由图 3 可见,在 GAs 中加入 TS 的特性,其效果非常明显。原来单纯的 GAs 只能达到近优解 14,但是在十几代之后就收敛了。而组合优化方法可达到更好的近优解 15,16 等,说明 GAs 本身不能产生更强的候选解,从而引导这种盲目搜索进入更有希望的区域。如表 1 所示,左边是 GAs 生成的可行序列,右边是由 TS+GAs 生成的可行序列。相比之下,由后者生成的序列适应度函数值更高一些,数量也更多。而且从解的分布来看,后者有许多不同的零件打头,覆盖面广泛,这是由 TS 分散搜索功能实现的。TS 分散搜索功能大大扩展了寻优的搜索范围。

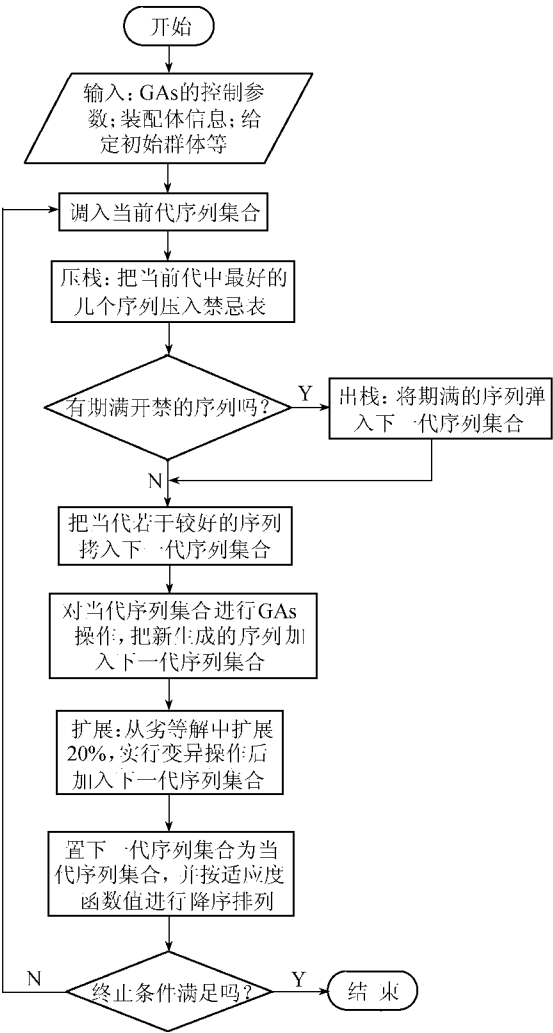


图 2 TS+GAs 组合优化拆卸序列算法流程

Fig.2 Flow chart of the TS + GAs methodology for optimizing disassembly sequence

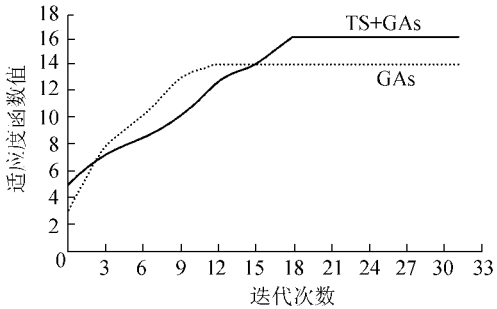


图 3 GAs 和 TS+GAs 搜索特性对比

Fig.3 Comparison between GAs and TS + GAs in search property

## 4 结 语

针对装配体拆卸序列的优化问题,建立了装配体的干涉-自由矩阵,据此计算零件的可拆卸方向.在 GAs 的基础之上,加入 Tabu 搜索方法,通过对局部优化解的邻域及未搜索过的区域进行搜索,结果表明,GAs 与 TS 组合优化算法可以扩大寻优范围,有效地防止搜索过程陷入局部优化点.

### 参考文献:

[ 1 ] KIM H J , LEE D H , XIROUCHAKIS P , et al. Disassembly scheduling with multiple product types[ J ]. Annals of the CIRP , 2003 , 52 ( 1 ) : 403—406.

[ 2 ] SMITH S S. Automatic stable assembly sequence generation and evaluation[ J ]. Journal of Manufacturing Systems , 2001 , 20 ( 4 ) : 225—235.

[ 3 ] 王凌. 智能优化算法及其应用[ M ]. 北京: 清华大学出版社 , 2001. 67—79.

[ 4 ] GLOVER F. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence[ J ]. Computers and Operations Research , 1986 , 13 : 533—549.

[ 5 ] 阎平凡, 张长水. 人工神经网络与模拟进化计算[ M ]. 北京: 清华大学出版社 , 2000. 377—382.

[ 6 ] GAO Mei-mei , ZHOU Meng-chu. Integration of disassembly leveling and bin assignment for demanufacturing automation[ J ]. IEEE Transactions on Robotics&Automation , 2002 , 18 ( 6 ) : 867—874.

## Optimization of disassembly sequence based on Tabu search and genetic algorithms

WANG Bo , WANG Ning-sheng

( Research Center of CIMS Engineering , Nanjing Universtiy of Aeronautics and Astronautics , Nanjing 210016 , China )

**Abstract** :The aim of the study was to optimize disassembly sequences about worn-out or malfunctioning products. Firstly , it was proposed to build an interference-freeness matrix to describe the structure of assembly , and new ideas about and algorithm for disassembly wedge were proposed. Then , the order for each part to be disassembled from assembly was determined. In consideration of the fact that the neighborhood may converge too fast and limit the search to a local optimum prematurely during the process of genetic algorithms ( GAs ) , a detailed flow chart of the hybrid approach was presented by combination of Tabu search with GAs. Case study shows that the valid disassembly sequences obtained by the present method are superior to those derived by GAs alone in fitness value , number , and range.

**Key words** :disassembly sequence ; Tabu search ; genetic algorithm ; green manufacturing