

引入基因修复技术的产品装配序列规划方法

刘 诚^{1,2}, 付宜利¹

(1. 哈尔滨工业大学 现代生产技术中心, 哈尔滨 150001, lw9265@sohu.com;

2. 东北林业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150040)

摘 要: 将基于遗传学原理的基因修复技术引入用于求解装配序列规划问题的遗传算法, 该算法采用基因组描述装配过程中的零部件顺序信息, 通过建立先序关系矩阵描述装配过程中零部件的装配优先关系及几何可行性约束. 利用基因“修复”操作, 将子代个体中违反先序约束的基因“修复”为有效基因, 从而保证了整个种群的基因多样性, 避免了进化过早地收敛于局部最优解, 使得最终结果的评价指标更优. 某二级减速器的装配规划实例表明, 该方法是一种具有工程实际意义的产品装配序列规划方法.

关键词: 基因修复; 装配序列规划; 遗传算法

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2010)01-0079-04

Product assembly sequences planning based on gene repair technology

LIU Cheng^{1,2}, FU Yi-li¹

(1. Advanced Manufacture Technology Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150000, China, lw9265@sohu.com;

2. Mechanics and Electronics College of North-east Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: In order to acquire an optimal and feasible assembly sequence, the gene repair technology is introduced into the gene algorithm for solving the assemble sequence planning problem, and a new genetic algorithm is proposed which adopts gene to describe the sequence information in the process of assembly. A relation matrix is built to describe the geometric constraints and the order relation of parts, then the gene which violates the constraints in filial generation can be modified with gene repair technology. Therefore, the gene diversity can be ensured, and the premature convergence can be avoided. An example of reduction gear is provided to illustrate the availability and effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: gene repair; assembly sequences planning; genetic algorithms

装配序列规划问题是产品装配规划的重要组成部分. 该问题在本质上是一个 NP 难题, 当产品中零部件数目很多时, 将会出现装配序列组合爆炸, 使应用传统的空间搜索方法难于求解. 为解决这一问题, 20 世纪 90 年代, 研究人员将遗传算法应用到装配序列规划领域, 使用直接、随机搜索的方式, 无需遍历整个解空间, 就能得到一个近似最优解, 可以较好地解决寻优过程中的组合爆炸问

题, 并已在部分产品装配序列规划问题的求解中得到了成功应用^[1-6].

但是, 利用遗传算法求解产品装配序列规划问题存在如下问题: 一是在适应度函数设计时, 对遗传所得几何不可行的子代往往人为降低其适应度函数值, 使其尽早淘汰. 这种处理办法虽然逻辑简单, 计算效率较高, 但不符合生物遗传学中的基因多样性原则, 易使算法过早收敛于局部最优解, 对装配序列规划问题而言则可能导致计算输出的序列非整体最优. 二是运用遗传算法求解装配序列规划问题的效果, 在很大程度上取决于初始种群的规模和质量, 对于零部件数目较多, 初始种群

收稿日期: 2008-10-30.

基金项目: 黑龙江省科技计划资助项目(GC02A125).

作者简介: 刘 诚(1975—), 男, 博士研究生, 副教授;
付宜利(1966—), 男, 教授, 博士生导师.

规模较小且其中的几何不可行序列较多时,可能会导致算法失败.这在装配体零部件约束关系较复杂且初始种群为随机生成时尤为严重.

本文借鉴了遗传学和人工辅助生殖研究中的基因修复思想^[7],首先对由遗传过程得到的子代个体进行几何可行性判别,找出违反先序关系的基因片段,然后通过“基因修复”操作,将这些基因“修复”为满足先序关系的有效基因,再进行评价函数的计算以确定新的种群,从而保证了解的可行性,避免了进化过早地收敛.

1 零部件装配过程的几何优先关系表达

为评价装配序列的几何可行性,本文采用干涉矩阵 F_v 来描述装配过程中零部件间的几何优先关系.零部件的装配方向一般用直角笛卡儿坐标系下的坐标轴方向 $\pm X, \pm Y, \pm Z$ 表示,即

$$v = 1, 2, \dots, 6.$$

其中: F_1 对应 $+X$ 方向, F_2 对应 $-X$ 方向,依此类推.装配时若零件 P_i 可沿方向 k 移动到装配位置而不与零件 P_j 发生干涉,则矩阵元素

$$F_{k,i,j} = 0,$$

否则

$$F_{k,i,j} = 1.$$

同时由于零件 j 沿 $-X, -Y, -Z$ 方向装配与零件 i 的干涉情况与零件 i 沿 $+X, +Y, +Z$ 方向装配与零件 j 的干涉情况相同,故实际应用中只需建立给定装配体在 $+X, +Y, +Z$ 3 个方向的干涉矩阵即可.

现设 $\{P_1, P_2, \dots, P_m\}$ 为零件 P_i 装配前已经装配完的零件序列,则零件 P_i 的可行装配方向可由式(1)的值进行求证:

$$v_k(P_i) = \sum_{j=1}^m F_{k,i,j}. \quad (1)$$

由前面干涉矩阵的定义得到,若 $v_k(P_i) = 0$,则零件 P_i 可沿 k 方向进行装配,反之则不能装配.若 $v_k(P_i) (k = 1, 2, \dots, 6)$ 中有一个等于 0,则可判断 $P_1, P_2, \dots, P_m, P_i$ 为几何可行装配序列.

2 基于基因修复技术的装配序列规划方法

2.1 基因编码

装配序列规划问题的目的是要找出一个几何可行的零件序列,并使其评价指标最优.用于求解装配序列规划问题的遗传算法编码通常采用实数序列,编码的每一位表示一个待装配零件的代码序号,其基本要求为编码的每一位无重复^[8].

设 P_i 代表第 i 个零件,整个装配序列共 n 个零件,则装配序列遗传算法编码为: $X = \{P_1, P_2, \dots, P_i, \dots, P_n\}$, 其中 $P_i \in P, P$ 为全部待装配零件集合.

2.2 适应度函数的设计

遗传算法中用适应度评估个体解的优劣,用来评估个体适应度的函数被称为适应度函数.遗传算法根据适应度函数求得个体的适应度,再决定其遗传到下一代的几率.适应度较高的个体遗传到下一代的几率较大,反之,适应度较低的个体遗传到下一代的几率较小.适应度函数一般由问题的目标函数转换而来,而对于零件装配序列规划问题,影响其最终目标(通常为装配效率、装配成本等)的因素很多,本文仅从装配工具更换次数、装配换向次数及沿零件重力方向装配次数 3 个方面来构造适应度函数^[1-3,9].

1) 装配工具的更换次数 T . 通过判断相邻两个零件装配时所使用的装配工具是否相同,累加计算出给定装配序列的装配工具改变次数,其量化表示了装配序列的聚合性.

2) 装配换向次数 C . 对某一给定装配序列,若相邻零件的装配方向改变,则计该序列的装配换向次数加 1,该指标反映了装配操作的复杂性信息.

3) 沿零件重力方向装配次数 P . 通过判断零件装配时是否沿其重力方向($-Z$)装入,计算出所有零件中沿重力方向装配的零件数目.

对于上述多目标优化问题,利用加权的方法构造适应度函数,具体做法为:设装配换向次数 C 的加权系数为 α ,装配序列中装配工具的改变次数 T 的加权系数为 β ,沿 Z 向装配零件数 P 的加权系数为 γ ,则装配序列的适应度函数为

$$F = \alpha C + \beta T - \gamma P.$$

式中: $\alpha + \beta + \gamma = 1$. 由于权重系数对遗传算法解的质量影响较大,实际应用时其值需要通过多次试验确定.下面以第 4 小节实例中的二级减速器为例,介绍权重系数的确定方法.

首先,为在解中全面体现各评价指标的影响,适应度函数中所有指标的权重值均不宜低于 0.1;其次,对于文中所设定的 3 个评价指标,装配换向次数由于与装配操作中的工装设备(换向机、专用夹具等)相关,故其所对应的权重不宜低于 0.4. 试验中 α 取 0.4 ~ 0.8, β 取 0.1 ~ 0.5 依次取值,同时令

$$\gamma = 1 - \alpha - \beta,$$

依第 4 小节设定各遗传参数后,每个值测试

10次,考察适应度函数均值的变化,结果列于表1中.

表1 适应度函数均值与权重系数 α, β 的关系

α	β									
	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	
0.4	3.67	3.29	3.49	4.00	4.33	4.49	4.52	4.88	4.44	
0.5	3.17	3.13	3.56	3.44	3.27	3.52	3.78			
0.6	3.75	3.90	4.17	4.33	4.85					
0.7	4.52	4.84	5.02							
0.8	4.75									

由表1可知,当 $\alpha = 0.5, \beta = 0.15, \gamma = 0.35$ 时,适应度函数的均值最小,结果较为满意.

2.3 装配先序约束及其生成

在对复杂装配体进行装配序列规划的过程中,有关零件装配顺序的约束主要存在于两个方面.一是由各类工艺因素决定的部分零件间的装配顺序,如零件 i 若为零件 j, k 的装配基准,则通常要求零件 i 先于 j, k 进行装配;二是由于干涉矩阵所表示的零件间的几何约束关系.例如,若某方向干涉矩阵的第 (i, j) 个元素的值为1,则说明在该方向上零件 j 将阻挡零件 i 的装配.这实质上提出了一个在该方向上的装配顺序问题,即若要在该方向上进行装配,那么零件 i 必须在零件 j 之前进行装配.据此,可将其转化为在该方向先序约束序列中添加的如下约束规则:零件 i 为零件 j 的先序装配零件.

2.4 基因修复操作

基因修复是指将子代个体中违反先序约束的基因“修复”为有效基因,从而避免了进化过早地收敛,使得最终结果的各项评价指标更优.具体的步骤为

- 1) 取出位置 i 的零件编号Temp;
- 2) 依次查看零件Temp的先序零件号;
- 3) 如果零件Temp有先序零件,则将装配序列位置 i 以后的所有零件号与取出的零件Temp的先序零件号进行比较,若位置 i 以后的某个零件为Temp的先序零件,则交换其位置.

例如:存在已生成的某装配序列

3—1—4—6—2—5,

有如下源于干涉矩阵的先序约束序列:

1;2;2:无;3;1,2;4:无;5:无;6:无.

则基因修复的过程为

1—3—4—6—2—5,

1—2—4—6—3—5,

2—1—4—6—3—5.

2.5 遗传算子的设计

2.5.1 交叉算子

本文采用双点交叉与基因修复相结合的方式处理基因组之间的交叉操作,其实现步骤如下:

- 1) 在父代编码上随机确定两点,此两点间的部分为匹配区;
- 2) 交换匹配区子串;
- 3) 从匹配区找到匹配对,并将匹配区以外的串用匹配对进行替代,从而得到最终的交叉结果.

2.5.2 变异算子

变异算子与交叉算子一样,都是用来生成新个体的,其区别在于交叉算子是生成新个体的主要方法,同时决定了遗传算法的全局搜索能力,而变异算子是生成新个体的辅助方法,主要决定遗传算法的局部搜索能力.

本文采取相邻交换的方法来进行变异操作.具体方法为:装配序列编码 $\{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ 按相邻关系进行分组,当零部件数量 n 为偶数时,分组为 $(P_1, P_2), (P_3, P_4), \dots, (P_i, P_{i+1}), \dots, (P_{n-1}, P_n)$;当零部件数量 n 为奇数时,分组为 $(P_1, P_2), (P_3, P_4), \dots, (P_i, P_{i+1}), \dots, (P_{n-2}, P_{n-1}), (P_n, P_1)$.

然后在各组内部进行倒序操作.通过这样的变异操作不仅最大限度地打破了装配序列的排列顺序,同时交换了所有相邻的序列.

3 算法执行过程

基于传统遗传算法求解装配序列规划问题的一般思路,本文提出的基于基因修正技术的遗传算法的算法流程如下:

- 1) 设定初始种群的大小 p_{pop} 、交叉概率 p_c 、变异概率 p_m ,并设定进化代数 $n = 1$.
- 2) 根据初始种群的大小 p_{pop} ,随机生成或人工输入装配序列作为初始种群 G_n .
- 3) 对 G_n 中的个体进行可行性约束判别,若其违反约束则进行基因修复,然后计算其适应度函数值.
- 4) 利用交叉算子和变异算子生成新个体, $n = n + 1$,返回步骤3).
- 5) 当迭代次数达到预先设定的某值时,输出结果个体,即为优化的装配序列.

4 仿真实例

为测试前述算法的有效性,本文利用Visual C++编程实现了基于基因修复技术的装配序列规划算法,并以某二级减速器为例进行了装配仿

真验证.

测试中,为考察在不具有问题解空间先验知识的情况下算法是否有效,初始种群中的个体均以随机的方式产生,即让计算机以同概率随机产生一系列整数,每个整数代表一个待装配零件的序号,因此,初始种群中不保证存在可行解.程序运行时,初始种群的规模 $p_{pop} = 10$,中止迭代条件设定为 $g_{max} = 100$,交叉概率和变异概率 (p_c, p_m) 分别取 (0.85, 0.15). 图 1 为利用该算法得到的某二级减速器的装配仿真过程截图(上箱体隐藏). 程序输出的最优装配顺序为下箱体—低速轴—低速轴平键—低速轴齿轮—低速轴轴承 1—低速轴轴承 2—高速轴—高速轴平键—高速轴齿轮—高速轴轴承 1—高速轴轴承 2—上箱体—紧固螺栓—通气孔塞,该顺序所对应的适应度函数值为 2.65.

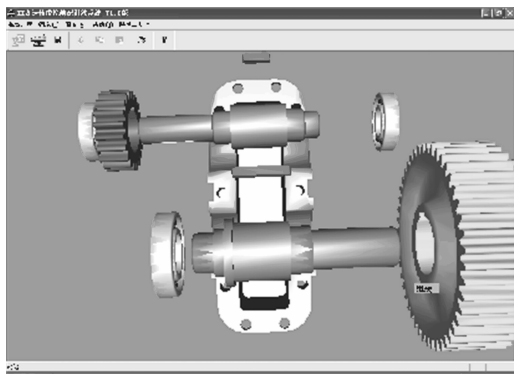


图 1 某二级减速器装配过程截图

5 结束语

1) 基于基因修复技术的装配序列规划算法. 利用先序关系矩阵描述装配过程中零部件的装配优先关系及几何可行性约束. 通过源于先序关系矩阵的基因“修复”操作,将子代个体中不满足装

配优先关系的基因片断“修复”,使该个体所代表的装配序列几何可行,从而保证了种群的多样性,最终结果的评价指标也更好.

2) 实例证明,该方法是一个行之有效的产品装配序列规划方法,能够搜索到具有工程实际意义的最优或近优装配序列.

参考文献:

- [1] 杨鹏,刘继红,管强. 面向装配序列优化的一种改进基因算法[J]. 计算机集成制造系统,2002,8(6): 467-471.
- [2] 李原,张开富,王挺,等. 基于遗传算法的飞机装配序列规划优化方法[J]. 计算机集成制造系统,2006(2):188-191.
- [3] 周开俊,李东波. 基于遗传模拟退火算法的产品装配序列规划方法[J]. 计算机集成制造系统,2006(7): 1037-1041.
- [4] CHEN S F. Assembly planning - a genetic approach [C]//Proceedings of the 24th ASME Design Automation Conference. Atlanta:[s. n.], 1998: DETC98/DAC-5798.
- [5] SMITH G C, SMITH S S F. An enhanced genetic algorithm for automated assembly planning [J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2002 (18): 355-364.
- [6] LAZZERINI B, MARCELLONI F. A genetic algorithm for generating optimal assembly plans[J]. Artificial Intelligence in Engineering, 2000 (14):319-329.
- [7] SHIN S Y, KIM D M, LEE I H, et al. Evolutionary Sequence Generation for Reliable DNA Computing [C]//Proc of Congress on Evolutionary Computation. [S. l]: IEEE Computer Society Press,2002.
- [8] 米凯利维茨. 演化程序——遗传算法和数据编码的结合[M]. 北京:科学出版社,2000.
- [9] 李磊,魏生民,张军波. 装配序列的模糊综合评价[J]. 中国机械工程,2003,14(18): 1606-1609.

(编辑 杨波)