

基于资源受限免疫网络的加工工序设计缺陷辨识与最优修复



张鑫^{1,2,*}, 陈昌安¹, 李瑞琴²

¹亚龙智能装备集团股份有限公司, 浙江温州 325105

²中北大学机械工程学院, 山西太原 030051

摘要: 为了提高加工工序智能化设计的质量和效率, 提出了一种基于资源受限免疫网络加工工序设计缺陷辨识与最优修复方法。在该免疫辨识与修复算法中, 将待加工零件的加工工序及其加工精度要求作为抗原, 将特定生产资源的加工工序设计方案作为抗体。首先, 在对抗体代表的加工工序方案进行四层实数编码的基础上, 设计了加工工序设计的缺陷辨识因子和启发局部变异规则; 其次, 分别利用该缺陷辨识因子和启发式局部变异规则对具有设计缺陷的抗体进行智能辨识与自动修复, 并通过缺陷辨识因子对修复结果进行验证; 最后, 利用选择、变异和交叉等三种免疫操作对抗体进行优化, 从而获得无可加工性设计缺陷的最优抗体。此外, 为了实现可加工性设计缺陷的无损优化修复, 引入能量函数和惩罚因子保证了最优加工工序能够满足所有约束关系, 并且通过数值实例的仿真验证, 表明了该算法的有效性和合理性。

关键词: 可加工性; 设计缺陷; 资源受限免疫网络; 辨识与修复

DOI: 10.57237/j.mse.2022.01.002

Identification and Optimal Correction for Manufacturing Procedure Design Defects Based on Resource Limited Immune Network

Zhang Xin^{1,2}, Chen Chang'an¹, Li Ruiqin²

¹Yalong Intelligent Equipment Group Company Limited, Wenzhou 325105, China

²School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China

Abstract: In order to improve the quality and efficiency of intelligent design of manufacturing procedure, a identification and optimal correction for manufacturing procedure design defects based on resource limited immune network is proposed. In this immune identification and correction method, the processing process of the parts to be processed and its processing accuracy requirements are taken as antigens, and the process design of a specific production resource is used as an antibody. Firstly, on the basis of four-layer real coding of the manufacturing procedure represented by the antibody, a defect identification factor and a heuristic local mutation rule of manufacturing procedure were designed. Secondly, the defect identification factor and the heuristic local mutation rule were respectively used for

基金项目: 2021 年度温州市科协服务科技创新项目 (kjfw40)

*通信作者: 张鑫, zhangxin891221@163.com

收稿日期: 2022-09-07; 接受日期: 2022-09-30; 在线出版日期: 2022-12-01

<http://www.mechscieng.com>

intelligent identification and automatic correction of antibodies with design defects, and the modified results are verified by defect identification factors. Finally, three immunological operations, namely selection, mutation and crossover, are used to optimize the antibody, so as to obtain the optimal antibody without processing design defects. Moreover, to realize the correction of nondestructive optimal for machining design defects, the introduction of energy function and penalty factor to ensure the fact that the optimal manufacturing procedure can satisfy all the constraints, and the effectiveness and rationality of the algorithm are verified by numerical examples.

Keywords: Machinability; Design Defect; Resource Limited Immune Network; Identification and Correction

1 前言

现代机械产品的设计过程及功能结构是越来越复杂, 开发时间是越来越短, 这导致了传统的机械产品设计开发过程无法满足市场的实际需要。主要是因为传统的机械产品设计过程中, 缺陷辨识与修复工作开始的太迟, 导致了设计缺陷的定位和更正的难度和工作量都非常大, 尤其可加工性设计缺陷更是在产品的生产加工阶段才被发现, 这样不仅影响产品的开发周期, 而且使得发现缺陷、修复缺陷复杂度大大增加的同时代价也非常高, 严重影响了机械产品设计的质量和效率。造成这种矛盾的主要原因有:

①没有将缺陷的辨识、修复工作与设计工作同等重要程度对待, 往往注重设计而忽略设计缺陷的辨识与修复工作。

②辨识与修复工作开始的太迟, 没有与设计工作很好的结合, 起不到规范设计的作用, 从而影响了机械产品设计的质量与效率, 使得设计缺陷的修复工作十分困难。

③没有完备的、系统级的、可复用的辨识与修复模型、方法和策略对机械产品进行整体评价。

然而, 机械产品最终都是由特定的加工企业进行生产加工, 因此一个产品能否加工与加工企业具体拥有的制造资源及制造知识有密切的关系[1]。目前, 国内外有关最优加工工序的设计方法相对较多, 其中遗传算法以其计算性能好以及具有全局搜索能力和隐含并行性等优点成为了研究加工工序设计的热点[2-8]。

特别地, 刘璐, 宋海草和姜天华等针对绿色制造车间的调度问题, 以最小化车间能耗为目标, 提出了一种适用于柔性作业车间节能调度的改进生物迁徙算法[9]; 孙爱红, 宋豫川和杨云帆等针对资源抢占是加工质量向非关键件倾斜导致加工质量无法保证的问题, 以加工周期为主要优化目标、关键件加工质量和整体加工质量为辅助优化目标, 建立柔性作业车间调度问

题模型, 并提出了一种适用于该模型求解的两级嵌套蚁群算法[10]; 杨帆, 方成刚和吴伟伟在传统柔性作业车间调度问题中加入运输和装配环节, 提出了一种适用于柔性作业车间多资源调度的遗传-粒子群混合算法[11]; 张守京, 杜昊天 and 侯天天针对操作工人之间存在效率差异的柔性车间调度的问题, 构建了以生产时间最小化、生产成本最小化和绿色制造评价系数最小化为目标的柔性车间调度优化模型, 并提出了一种求解该优化模型的 NSGA-II 算法[12]。

但是, 现有的研究方法均是在无限资源条件下设计的车间调度或零件加工工序方案, 并未考虑资源受限条件下加工工序设计的模型和方法。因此, 本文针对以往研究方法并未在特定的生产资源条件下验证加工工序设计方案是否满足相关加工要求的情况, 对可加工性设计缺陷的辨识与修复的模型、方法和策略进行相关研究。结合免疫仿生机理和加工工序设计的特点, 以工序的加工精度要求为例研究了资源受限条件下的加工工序设计缺陷辨识与修复的模型和方法, 提出了一种资源受限免疫网络辨识与修复算法。

2 加工工序设计问题的数学模型

机械产品加工工序设计缺陷的自动辨识与修复是要确定产品在加工工序设计过程中违反了哪些特定生产资源的约束关系, 并进行相应的优化修复, 实现无可加工性设计缺陷的最优加工工序设计。加工工序设计问题的描述如下: 一个机械产品由 n 个零件组成, 每个零件均包含一道或多道加工工序, 而多道加工工序的顺序是事先确定的, 且每道加工工序都有相应的加工精度要求; 某特定加工企业具有 m 台加工机器对每道工序进行加工, 每道工序均可以在多台不同的加工机器上进行加工, 而不同的加工机器对不同的加工工序具有不同的加工精度

和加工时间。加工工序设计的目标是在特定的生产资源条件下，为每道加工工序选择满足其加工精度要求的最恰当的加工机器，并确定每台加工机器上各个加工工序的最佳加工顺序及开始时间，使加工系统的某些性能指标达到最优。其相应的数学模型如下[13-16]：

- (1) 待加工零件集 $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ， p_i 表示第 i 个待加工零件， $i=1\sim n$ 。
- (2) 待加工工序集 $MP=\{mp_1, mp_2, \dots, mp_n\}$ ， $mp_i=\{mp_{i1}, mp_{i2}, \dots, mp_{ik}\}$ 表示第 i 个待加工零件的加工工序。
- (3) 待加工精度设计要求集 $MAD=\{mad_{i1}, mad_{i2}, \dots, mad_{ik}\}$ ， mad_{ij} 表示第 i 个待加工零件 p_i 的第 j 道待加工工序 mp_j 的待加工精度设计要求， $j=1\sim k$ 。
- (4) 待选加工机器集 $MM=\{mm_1, mm_2, \dots, mm_m\}$ ， mm_j 表示第 j 台待选加工机器， $j=1\sim m$ 。
- (5) 可选加工机器集 $MPM=\{mp_{i1}, mp_{i2}, \dots, mp_{ik}\}$ ， $mp_{ij}=\{mp_{ij1}, mp_{ij2}, \dots, mp_{ijk}\}$ 表示第 i 个待加工零件 p_i 的第 j 道待加工工序 mp_j 的可选加工机器。
- (6) 待选加工精度集 $MA=\{ma_1, ma_2, \dots, ma_m\}$ ， ma_j 表示第 j 台待选加工机器可以完成的加工精度， $j=1\sim m$ 。
- (7) 可以完成的加工精度集 $MPA=\{mpa_{ij1}, mpa_{ij2}, \dots, mpa_{ijk}\}$ 表示第 i 个待加工零件 p_i 的第 j 道待加工工序 mp_j 的可选加工机器 mp_{ijk} 可以完成的加工精度。
- (8) 使用可选机器加工零件工序的时间矩阵 T ， $t_{ijk} \in T$ ，表示第 i 个待加工零件 p_i 的第 j 道待加工工序 mp_j 使用第 k 台可选机器的加工时间。
- (9) 使用可选机器加工零件工序的费用矩阵 C ， $c_{ijk} \in C$ ，表示第 i 个待加工零件 p_i 的第 j 道待加工工序 mp_j 使用第 k 台可选机器的加工费用。
- (10) 使用可选机器加工零件工序的成本函数如式(1)所示：

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (t_{ij} + c_{ij}) \quad (1)$$

式中， F 是指可选机器加工零件工序的成本函数，其值越小则说明加工工序设计方案越优； n 是指待加工零件的总数； m_i 是指第 i 个待加工零件 p_i 的待加工工序的总数； t_{ij} 和 c_{ij} 分别是指第 i 个待加工零件 p_i 的第 j

道待加工工序 mp_j 的加工时间和加工费用。

此外，加工工序的设计问题还需要满足的约束关系包括：①每个零件的各道工序只能在一台机器上加工，且同一时刻同一台机器只能加工零件的一个工序，不能中途中断加工；②同一加工零件的多道加工工序之间有先后顺序约束，而不同加工零件的加工工序之间没有先后顺序约束，且不同的加工零件具有相同的优先级约束。

3 资源受限免疫网络辨识与修复算法

人工免疫网络模型是基于免疫学的免疫网络原理抽象得到的。根据人工免疫网络模型的特点，将可动态规划的特定生产资源模型引入到网络模型中，提出了一种用于可加工性设计缺陷辨识与修复的资源受限免疫网络算法（Resource Limited Immune Network Algorithm, RLINA）。RLINA 是将待加工零件的加工工序及其加工精度要求作为抗原，将特定生产资源的加工工序设计方案作为抗体，并通过抗体与抗原、抗体与抗体之间的相互促进和相互抑制作用组成网络结构，实现可加工性设计缺陷的自动辨识与修复。

3.1 抗体的编码

抗体的编码方式为四层实数编码，每个抗体表示全部待加工零件的加工工序及其加工精度要求。其中，抗体的第一层表示所有待加工零件的加工工序，第二层表示第一层对应零件加工工序的加工精度要求，第三层表示第一层对应零件加工工序的加工机器号，第四层表示第三层对应加工机器可以完成的加工精度，编码结构如图 1 所示。

2	3	2	1	1	3	2	3	1
5	6	5	5	6	5	6	7	8
2	1	3	1	2	1	2	3	2
5	4	6	4	5	4	5	6	5

图 1 抗体的四层编码结构

3.2 设计缺陷辨识与修复

3.2.1 设计缺陷辨识因子

在进行设计缺陷辨识之前，首先确定特定企业生产资源条件下的加工能力，建立待选加工机器的加工精度模糊评价函数，以某机床的车削精度为例，如图 2

所示（在实际应用时，可根据特定加工企业的具体情况适当调整）；然后根据评价函数的特点，将某机床加工精度模糊评价结果为“较困难”的加工精度作为该机床可以完成的加工精度；最后利用该加工精度完成抗体的编码。

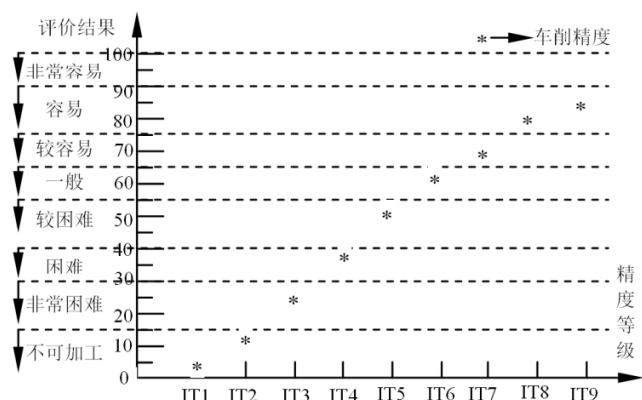


图2 某机床的车削精度的模糊评价示例

在抗体的编码结构中，当第二层编码结构中的某位数据小于第四层相应位的数据时(= (即待加工工序的加工精度要求高于可选加工机器的加工精度)，则说明该零件的加工工序不能通过该机器进行加工，即该加工工序方案存在可加工性设计缺陷。为了便于算法实现，本文引入缺陷辨识因子(Defect Identification Factor, DIF)，当 $DIF(i)=0$ 时，则说明抗体的第 i 位无可加工性设计缺陷，当 $DIF(i)=1$ 时，则说明抗体的第 i 位存在可加工性设计缺陷，其实现过程如图3所示。

```

缺陷辨识因子 DIF 的实现算法
Begin:
  for i = 1 to length(antibody1)
    if ACS2(i) < ACS4(i)
      DIF(i) = 1;
    else DIF(i) = 0;
    end
  end
end

```

图3 缺陷辨识因子 DIF 的实现算法

3.2.2 设计缺陷修复算法

由设计缺陷辨识因子可知，加工工序设计方案的设计缺陷是某一个加工工序或某几个加工工序的可选机器的加工精度无法满足该工序的设计要求，通过资源受限免疫网络所蕴涵的启发式信息指导存在设计缺

陷的抗体进行“局部变异”，完成缺陷修复，其变异规则如图4所示，其中灰色部分表示“局部变异操作”。

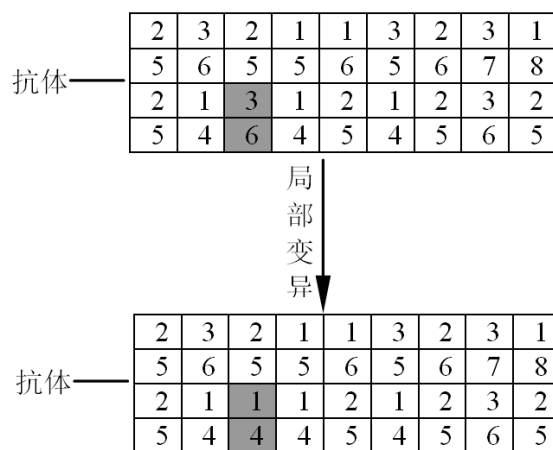


图4 设计缺陷修复的局部变异规则示意图

3.2.3 免疫检验

通过验证缺陷辨识因子 DIF 的值是否为零，对设计缺陷的修复结果进行免疫检验， DIF 如式(2)所示。

$$DIF = \sum_{i=1}^k DIF(i) \quad (2)$$

式中， DIF 是指缺陷辨识因子的值； $DIF(i)$ 是指抗体第 i 位的缺陷辨识因子的值； k 为抗体编码结构中第二层编码的个数。

若 $DIF=0$ ，则说明修复完成，继续进行免疫优化操作；若 $DIF>0$ ，则说明抗体仍存在可加工性设计缺陷，并判断抗体中的哪一位 $DIF(i)=1$ ，对其继续进行局部变异操作，直到 $DIF=0$ 为止。

3.3 免疫优化操作

3.3.1 选择操作

选择操作首先计算种群中所有抗体的适应度值，然后以一定的概率选择适应度较好的抗体，其选择概率为：

$$P_s(i) = \frac{FS(i)}{\sum_{i=1}^n FS(i)} \quad (3)$$

式中， $P_s(i)$ 是指抗体 i 在每次选择操作中被选中的概率； $FS(i)$ 是指抗体 i 的适应度值； n 是指抗体的个数。

3.3.2 变异操作

变异操作首先从种群中随机选取变异抗体, 然后随机选择变异位置 1 和位置 2, 最后把抗体中每一层的位置 1 和位置 2 的基因进行互换, 为了加速算法快速收敛, 规定进行变异的位置 1 与位置 2 所包含的工序基因不相同, 如图 5 中抗体 1 变换到抗体 1' 的灰色部分所示。在进行变异的过程中, 为了避免变异后的抗体出现不正确的基因 (即某些零件加工工序对应的加工精度设计要求、可选加工机器号、加工精度发生错乱等), 按照变异前的加工工序对变异位置 1 和变异位置 2 之间 (包括边界) 某些基因的错乱位进行局部调整, 如图 5 中抗体 1' 的灰色部分所示。

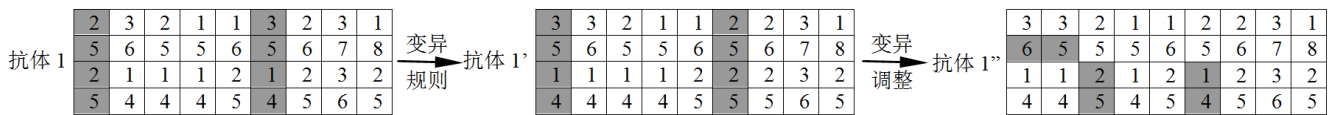


图 5 抗体的变异操作示意图

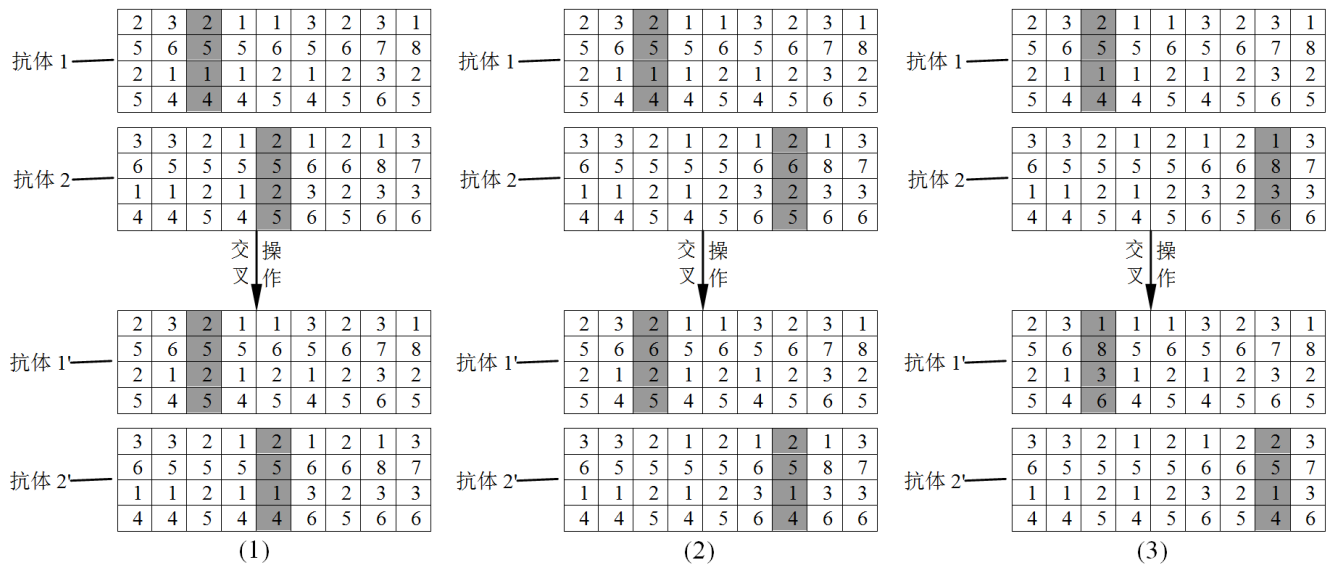


图 6 抗体的交叉操作示意图

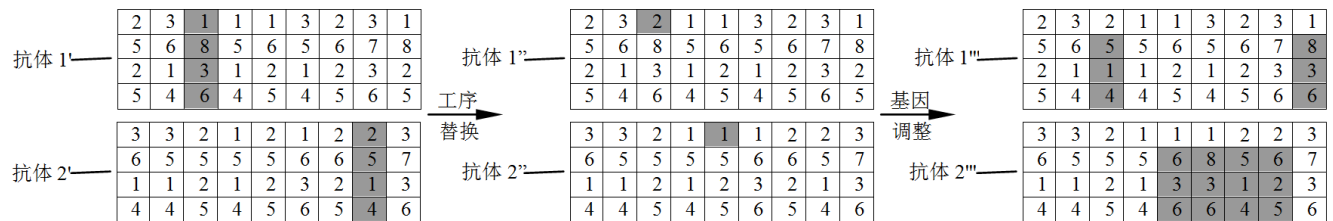


图 7 交叉操作的局部调整示意图

为了解决交叉操作后两种情况出现的工序基因错乱或工序多余、工序缺失问题, 以及加强免疫优化算法

的局部搜索能力,对交叉操作后的抗体进行局部调整,如图7抗体1”和抗体2”中灰色部分所示,其局部调整规则如下(以第三种情况为例,因为第二种情况只需去掉局部调整中的第一步工序替换,而其余步骤均相同):

①在交叉操作后的抗体中,从工序多余的基因中随机选取一位替换为工序缺失的基因。

②在工序完成替换后,首先将交叉位置对应的加工精度设计要求、可选加工机器号和可完成的加工精度按照其交叉前所在抗体中的加工工序替换交叉后其所在抗体中相应加工工序的基因位,然后再根据交叉后其所在抗体的交叉前加工工序对应的基因位替换交叉后抗体某些基因的错乱位。

3.4 能量函数

在特定加工企业的资源受限网络约束关系的基础上,将网络节点之间的所有连接权值之和定义为能量函数(Energy Function, EF),用来映射约束关系的满足情况。当某一约束关系不满足时,其对应的连接权值为“1”;当该约束关系完全满足时,其对应的连接权值为“0”。通过对能量函数值是否为零的判断,可以验证在进行免疫优化

操作与旧设计缺陷修复的过程中是否满足所有约束关系。

若能量函数值等于零,则继续下一步操作,计算抗体的适应度值;若能量函数值不等于零,则通过引入惩罚因子,并逐步加大惩罚力度,强制满足约束条件。从而确保在进行免疫优化操作与修复旧设计缺陷的过程中,不产生新的设计缺陷,达到设计缺陷无损优化修复的目的。

3.5 抗体的适应度函数

将可选机器加工零件工序成本函数的倒数作为抗体的适应度函数,如式(4)所示。成本函数值越小的抗体,适应度值越大,抗体越优。

$$FS = \frac{1}{F} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} (t_{ij} + c_{ij})} \quad (4)$$

式中, FS 是指抗体的适应度函数,其值越大则说明抗体越优; F 是指可选机器加工零件工序的成本函数。

资源受限免疫网络辨识与修复算法的求解流程如图8所示。

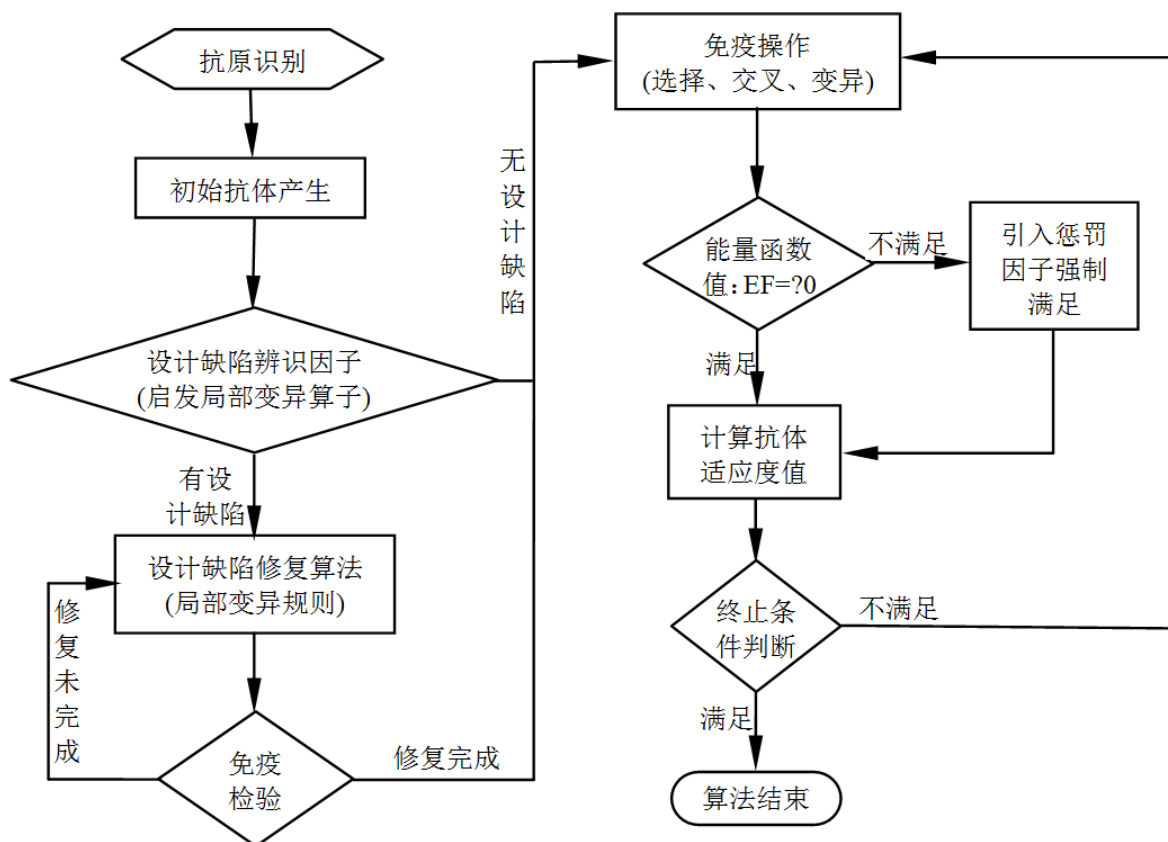


图8 资源受限免疫网络辨识与修复算法的求解流程

4 算例仿真与验证

本文以 5 个待加工零件（每个待加工零件均要经过 5 道待加工工序），在 8 台可选加工机器上进行加工，来验证所提出的资源受限免疫网络辨识与修复方法对加工工序设计的可行性与有效性。每个待加工零件工

序的加工精度设计要求、可选加工机器号以及相应的加工时间、加工费用和可完成的加工精度分别如表 1、表 2、表 3、表 4 和表 5 所示（在实际应用的过程中，可根据不同加工零件的设计要求和不同加工企业的具体情况适当调整）。

表 1 待加工工序的加工精度设计要求

精度 \ 工序	工序				
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5
零件 1	5	6	7	6	5
零件 2	4	6	8	6	7
零件 3	5	8	6	4	7
零件 4	6	8	5	7	6
零件 5	8	5	7	8	6

表 2 待加工工序的可选加工机器序号

机器 \ 工序	工序				
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5
零件 1	2/5	1/3	2/8	4/6	3/7
零件 2	3/5	2/6	5/8	3/7	1/6
零件 3	3/6	1/4	1/2	5/6	5/8
零件 4	2/7	2/7	4/6	3/4	1/4
零件 5	1/5	2/8	5/6	1/2	6/7

表 3 可选加工机器完成工序的加工时间

时间 \ 工序	工序				
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5
零件 1	5/7	9/6	5/8	7/7	10/12
零件 2	7/5	5/6	8/6	8/5	11/9
零件 3	6/5	8/11	5/8	6/5	9/7
零件 4	8/9	10/8	6/5	5/7	6/8
零件 5	8/6	6/5	8/6	6/8	10/11

表 4 可选加工机器完成工序的加工费用

费用 \ 工序	工序				
	工序 1	工序 2	工序 3	工序 4	工序 5
零件 1	10/8	5/7	8/5	6/8	12/15
零件 2	8/10	8/7	6/6	10/8	5/7
零件 3	6/10	15/12	6/3	6/7	12/8
零件 4	9/8	12/13	8/12	8/5	10/8
零件 5	9/8	8/10	7/9	5/9	12/11

表 5 可选加工机器可完成的加工精度

可选加工机器序号	机器 1	机器 2	机器 3	机器 4	机器 5	机器 6	机器 7	机器 8
可完成的加工精度	6	6	5	6	4	5	5	5

资源受限免疫网络辨识与修复算法的求解参数设定为：种群大小 AntiBodyNum=30，迭代次数 MaxGen=60，交叉概率 PCross=0.6，变异概率 PMutation=0.8。由于篇幅所限，仅将算法辨识出的一

个存在可加工性设计缺陷的加工工序设计方案给出, 如图 9 所示, 其中矩形框中的三位数表示某待加工零件的某道待加工工序 (例如: 302 表示待加工零件 3 的第 2 道待加工工序), 矩形框下方数据表示该道加工工序的开始加工时间和终止加工时间, 而灰色矩形框则表示存在设计缺陷的加工工序。

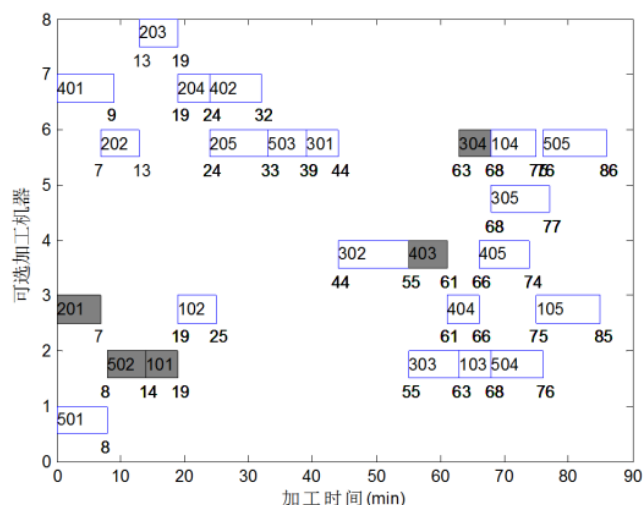


图 9 存在加工工序设计缺陷的加工甘特图

资源受限免疫网络算法求解的无可加工性设计缺陷的最优加工工序设计方案的加工甘特图如图 10 所示, 得到的所有待加工零件加工完成的最短时间为 47min, 其搜索过程如图 11 所示, 从图 11 中可以看出仅仅通过 37 代的免疫优化就达到了最优的加工成本 (时间成本和费用成本之和) 243。

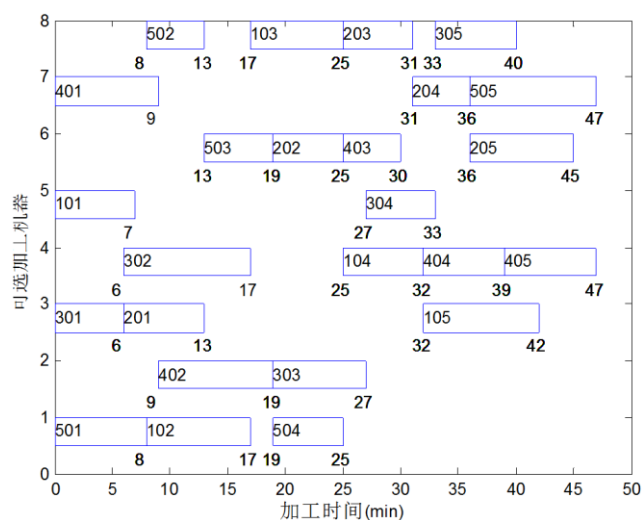


图 10 无设计缺陷的最优加工工序设计方案的加工甘特图

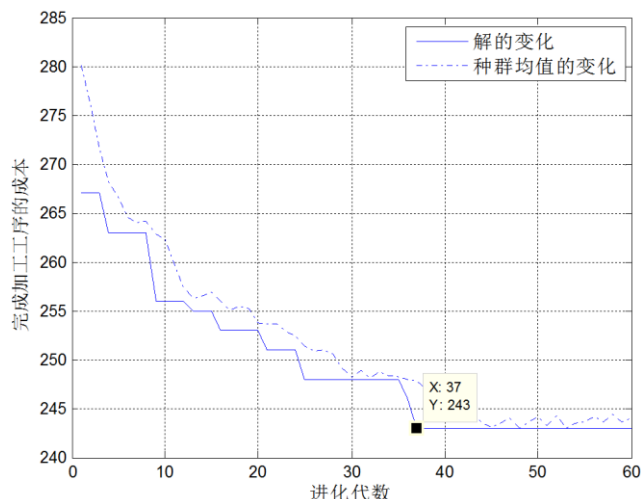


图 11 资源受限免疫网络算法的搜索过程

5 结论

- (1) 在资源受限免疫网络辨识与修复的过程中, 引入免疫优化操作 (选择、变异、交叉) 不仅可以改变加工工序设计的优先顺序, 而且还可以对某些工序的可选加工机器进行调整, 有利于在加强算法快速收敛的同时强化算法的局部搜索。
- (2) 为了在进行旧设计缺陷修复和免疫优化操作的过程中不产生新的设计缺陷, 建立了一种用于检验修复与优化后的抗体是否满足所有约束关系的能量函数, 并引入强制约束满足的惩罚因子, 实现了可加工性设计缺陷的无损优化修复。
- (3) 本文以加工工序的精度要求为例研究了资源受限条件下的加工工序设计缺陷辨识与修复的模型和方法, 这对于加工特征、加工材料和加工误差等相关方面的可加工性设计缺陷的辨识与修复具有一定的借鉴性和扩展性, 对于推动无可加工性设计缺陷的机械产品加工系统方案设计具有显著的参考意义和实用价值。

参考文献

- [1] 邱清盈, 冯培恩. 制造资源有限情况下产品可加工性定量评价方法研究[J], 计算机辅助设计与图形学学报, 2003, 15 (4): 463-466, 474.
- [2] ZHANG H P, GEN M. Multistage-based genetic algorithm for flexible job-shop scheduling problem [J]. Complexity International, 2005, 11: 223-232.

- [3] MASTROLILLI M, GAMBARDILLA L M. Effective neighborhood functions for the flexible job shop problem [J]. Journal of Scheduling, 2000, 3 (1): 3-20.
- [4] MOHAMMAD S M, PARVIZ F. Flexible job shop scheduling with tabu search algorithms [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (S0268-3768), 2007, 32 (5): 563-570.
- [5] 张长泽, 李引珍, 尹胜男, 等. 多目标模糊柔性作业车间调度问题优化 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20 (3): 1099-1106.
- [6] GAO L, PENG C Y, ZHOU C, et al. Solving flexible job-shop scheduling problem using general particle swarm optimization [C] // Proceedings of The 36th International Conference on Computers & Industrial Engineering, Taipei, China. 2006: 3018-3027.
- [7] 张国辉, 高亮, 李培根, 等. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. 机械工程学报, 2009, 45 (7): 145-151.
- [8] 刘爱军, 杨育, 邢青松, 等. 多目标模糊柔性车间调度中的多种群遗传算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17 (9): 1954-1961.
- [9] 刘璐, 宋海草, 姜天华, 等. 基于改进生物迁徙算法的双资源柔性作业车间节能调度问题 [J/OL]. 计算机集成制造系统. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.5946.TP.20220711.1504.002.html>.
- [10] 孙爱红, 宋豫川, 杨云帆, 等. 考虑关键件加工质量的双资源约束柔性作业车间调度算法 [J/OL]. 中国机械工程 <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1294.TH.20220104.0839.002.html>.
- [11] 杨帆, 方成刚, 吴伟伟. 基于遗传-粒子群混合算法的柔性作业车间多资源调度问题 [J]. 制造技术与机床, 2020 (2): 138-142, 146.
- [12] 张守京, 杜昊天, 侯天天. 求解多目标双资源柔性车间调度问题的改进 NSGA-II 算法 [J]. 机械科学与技术, 2022, 41 (05): 771-778.
- [13] 史峰, 王辉, 胡斐, 等. MATLAB 智能算法 30 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [14] 何斌, 张接信, 张富强. 一种求解作业车间调度问题的改进遗传算法 [J]. 制造业自动化, 2018, 40 (8): 113-117.
- [15] 邹泽桦, 曾九孙, 蔡晋辉. 改进遗传算法求解柔性作业车间调度问题 [J]. 计算机测量与控制, 2017, 25 (4): 167-171.
- [16] 安璐, 张鹏, 聂宇晨. 改进遗传算法解决带有机恶恶化效应的柔性作业车间调度问题 [J]. 大连交通大学学报, 2020, 41 (6): 112-116.

作者简介

张鑫

1990 年生, 中北大学与亚龙智能装备集团股份有限公司联合培养博士后, 主要研究方向: 机构学与机器人, 智能装备设计自动化及智能制造。

E-mail: zhangxin891221@163.com