

基于遗传算法的复杂型腔类零件刀具优化^①



杨昌尧, 黄 瑞, 蒋俊锋, 陈正鸣

(河海大学 图形图像与骨科植入物数字化技术常州市重点实验室, 常州 213022)

通讯作者: 黄 瑞, E-mail: huangrui053469@163.com

摘 要: 针对复杂型腔数控加工的刀具组合优选问题, 提出了一种基于遗传算法的复杂型腔类零件刀具优化方法。首先通过偏置环算法构建可行的型腔加工刀具集; 其次为解决型腔类零件每个特征与整体最优刀具组合的差异性问题, 建立以加工效率和刀具成本为优化目标的复杂型腔零件刀具组合优化模型, 并通过有向图和改进的遗传算法对多刀具组合优化模型进行求解; 最终, 以某复杂型腔零件数控加工刀具组合优选为例进行实验, 验证了方法的可行性。

关键词: 型腔数控加工; 计算机辅助设计; 刀具组合; 遗传算法; 优化模型

引用格式: 杨昌尧, 黄瑞, 蒋俊锋, 陈正鸣. 基于遗传算法的复杂型腔类零件刀具优化. 计算机系统应用, 2021, 30(5): 176-183. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/7891.html>

Tool Optimization for Complex Pocket Parts Based on Genetic Algorithm

YANG Chang-Yao, HUANG Rui, JIANG Jun-Feng, CHEN Zheng-Ming

(Key Laboratory of Graphics, Images, and Orthopedic Implants of Changzhou City, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract: To address the optimization of tool combination in the NC machining of complex pockets, we propose a tool optimization method for complex pocket parts based on the genetic algorithm in this study. First, a feasible tool set for pocket machining is constructed by an offset loop algorithm. Secondly, with machining efficiency and tool cost as the optimization objective, an optimization model of tool combination for complex pocket parts is established to decrease the difference between each feature of the pocket parts and the overall optimal tool combination. Furthermore, a directed graph and an improved genetic algorithm are developed to solve the optimization model of tool combination. Finally, the feasibility of the proposed method is verified by testing the optimization of NC machined tool combination for a complex pocket part.

Key words: pocket NC machining; CAD; tool combination; genetic algorithm; optimization model

随着全球迈入第四次工业革命, 以“智能化”为灵魂的工业 4.0, 在动态变化的竞争环境下将势必推动产业的升级, 并对产品制造提出新的挑战^[1]. 在当前数控加工领域, 加工刀具的选取一直是一项复杂而有深远影响的基础性工作, 合理的刀具组合选择对于降低制造成本, 提高加工效率具有十分重要的意义. 传统方法

往往需要工艺设计人员根据自身的经验手动进行决策, 但是由于编程人员和技术人员水平参差不齐, 刀具选取的质量难以保证^[2], 而如何能够合理并智能地对刀具组合进行选取, 已经成为数控加工工艺规划中一个亟待解决的关键问题.

近年来, 国内外相关学者针对如何进行型腔工件

① 基金项目: 国家自然科学基金 (52075148, 51875474); 装备预研领域基金 (61409230102-3); 中央高校基本科研业务费专项资金 (2016B03214)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (52075148, 51875474); Pre-research Project of Equipment (61409230102-3); Special Fund of Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (2016B03214)

收稿时间: 2020-09-08; 修改时间: 2020-09-25; 采用时间: 2020-10-09; csa 在线出版时间: 2021-04-28

数控加工的刀具组合优化问题展开了广泛的研究. Veeramani^[3] 针对 2.5D 型腔加工的刀具选择问题, 根据 Voronoi 图和动态规划的方法选取出最优的刀具组合; 但是方法缺乏对于系统的刀具选取理论知识. D'Souza^[4,5] 综合考虑了与刀具组合优化相关的各种影响因素, 通过分解型腔为子特征和有向图构建刀具序列的方法, 利用 Dijkstra 算法进行最优刀具序列的决策, 并将研究方向由 2.5D 转向 3D 型腔; 然而, 该方法独立考虑每个子特征, 无法从零件层面获取全局最优刀具序列. Chen 等^[6] 通过获取型腔的中轴线建立其数据的树图, 得到实际数控加工的刀轨, 通过遗传算法进行刀具最优组合的选择; 但是没有考虑到实际加工过程中的加工效率、加工成本等因素. 王玉等^[7] 提出了一种综合考虑时间和整体效率的刀具组合优化方法, 但是该系统与数控软件独立, 仍需要大量的人工交互. 张英杰^[8] 以制造成本最低为目标, 利用扫描线算法获取刀具的加工面积, 并建立了加工成本估算模型; 然而该方法将所有刀具价格固定为同一值, 不符合实际加工情景. 尹震飏等^[9] 提出一种识别刀具集中冗余刀具的方法, 可以通过快速去除冗余刀具, 进而实现给定模具型腔粗加工刀具组合序列的快速优化, 但是当处理复杂型腔特征时该方法的执行速度将大大降低. 李聪波等^[10] 综合考虑了能耗和加工成本, 提出了一种多目标的刀具组合优化模型并利用有向图和 Dijkstra 算法进行了模型的求解; 然而, 简单的轮廓线偏置法容易产生偏置曲线的自相交问题.

以往的研究往往只对单个型腔特征最优刀具组合进行研究, 并未能从零件层面进行整体研究获取型腔组合间的最优解, 简单地将所有特征的最优刀具进行组合并不能得到零件的最优刀具解. 当型腔零件结构复杂时, 需要考虑的特征难度增加, 传统的研究方法往往不能很好的满足实际需求, 目前也缺乏对于复杂型腔零件粗加工刀具组合优化问题的研究.

为了解决上述问题, 本文提出了一种基于遗传算法的复杂型腔类零件刀具组合优化方法. 首先介绍了本文方法的总体流程, 运用现有的研究成果识别型腔制造特征, 获取加工区域; 其次通过偏置环算法构建可行的型腔加工刀具集; 最后建立以加工效率和刀具成本为优化目标的复杂型腔零件刀具组合优化模型, 并提出了一种基于有向图和改进的遗传算法对于多刀具组合优化模型进行求解的方法, 并通过实验验证了模型以及方法的可行性和有效性.

1 本文框架

型腔的粗加工目的在于快速地去料, 通常通过使用平底铣刀并应用层切法来进行铣削, 所以 3D 型腔可以被认为是由若干个 2.5D 型腔组成. 在很大程度上, 2.5D 型腔刀具序列优化是 3D 型腔刀具序列优化的基础, 因此本文的研究对象为 2.5D 型腔. 图 1 给出了本文方法的总体流程, 包括: 型腔制造特征识别, 加工区域获取, 刀具可行加工域确定, 可行刀具集构建, 刀具组合多目标优化模型的建立及求解.

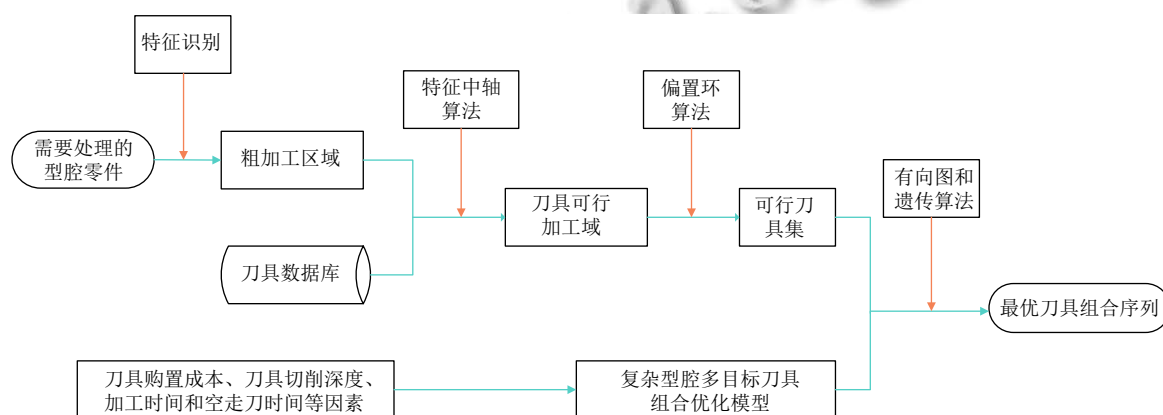


图 1 总体框架

(1) 型腔制造特征识别, 加工区域获取

这部分主要将型腔从可制造性角度进行分割, 生成子加工区域集, 构建它们之间的几何依赖关系, 以及

CAM 模型中设计人员交互设定工艺参数 (如, 驱动几何、刀具、方向等) 的提取, 获取实际的加工区域. 本文采用文献 [11] 中的方法, 这里不再赘述.

(2) 可行刀具集构建

通过基于特征中轴的复杂型腔粗加工区域计算方法^[12], 解决了偏置曲线自相交问题, 得到了刀具实际可行的加工区域, 并以此为基础, 将可行刀具集选出并分为关键刀具集和绩效刀具集, 以备后续使用。

(3) 刀具组合多目标优化模型建立及求解

为了准确量化各个刀具组合方案在实际加工过程中的好坏, 本文建立了综合考虑刀具成本和加工效率的复杂型腔零件刀具组合优化模型, 通过单源有向无环图和遗传算法对于上述的多刀具组合优化模型进行求解, 满足了实际型腔加工中对于刀具组合的选取要求。

2 可行刀具集构建

目前对于刀具的筛选主要从以下3个约束条件考虑: (1) 设备约束, 如刀柄的规格, 刀具的刃长, 机床的主轴转速等; (2) 工艺约束, 如走刀方式, 加工精度等; (3) 几何约束, 如型腔加工的深度, 型腔最小圆角半径等。这三者存在着相互制约的关系, 且都属于基本约束。随着现代智能机床逐步取代传统机床, 刀具材料优选方法日益成熟, 相较于以往研究, 设备约束条件重要性已经淡化, 并且数控驱动的数控工艺设计方案也日趋完善, 工艺意图引导的自适应数控工艺设计克服了传统人工手动测量的缺点, 目前看来工艺约束条件方向的相关研究成果已较为完善, 高粒度的优化空间不足。型腔零件的几何外观是前两类约束的基本依据, 在刀具筛选过程中起着至关重要的作用, 因此本文依据型腔零件的几何约束进行研究并构建可行刀具集。

最大刀具直径 D_{\max} 指型腔各个轮廓线之间在没有发生过切情况下之间距离的最大值, 最小刀具直径 D_{\min} 指型腔中与刀具内切的各圆弧直径和轮廓线之间各个通道宽度中的最小值, 而关键刀具直径 D_{key} 指所有能无干涉地加工整个型腔刀具中直径最大的刀具, 并且被认为是唯一存在的。传统基于几何约束的方法往往如上面所述考虑, 但是当型腔零件较为复杂时, 其需要考虑几何约束的标注也会成倍增加, 会给设计人员带来巨大的负担。能满足整个型腔加工需求的刀具有时候也不止一把, 而直接将最小刀具定义为关键刀具也会直接排除了一些实际可行的刀具组合, 对最优刀具组合选取的结果产生影响。

定义1. 轮廓线偏置环。根据文献^[12]中的方法, 将每个连通子图所对应简单子轮廓以径向余量为距离

偏置可以获得相同数量的子加工区域, 每个子加工区域的轮廓定义为型腔的一个轮廓线偏置环。

本文采用了一种轮廓线偏置环算法确定了最小最大刀具直径和关键刀具直径, 具体步骤如算法1。

算法1. 轮廓线偏置环算法

- 1) 遍历刀具数据库的所有 m 把刀具, 将刀具按刀径从大到小排序并编号 $1, 2, \dots, m$, 并选出 D_1 作为初始遍历的刀具直径 D_{m1} 。
- 2) 根据给定的径向余量 δ_r 和直径为 D_{m1} 的刀具计算出型腔轮廓线偏置环的个数并进行判断, 如果偏置环个数不为0, 转3) 否则, 将 D_{m1} 替换成当前刀具序列遍历刀具编号的下一把刀具, 并进行偏置环个数的计算和判定。
- 3) 将当前刀具的直径 D_{m1} 设定为最大刀具直径 D_{\max} , 并将直径 D_{m1} 刀具编号的下一把刀具设为下一轮初始遍历的刀具, 直径为 D_{m2} 。
- 4) 根据给定的径向余量 δ_r 和直径为 D_{m2} 的刀具计算出型腔轮廓线偏置环的个数并进行判断, 如果偏置环个数为1, 将当前刀具的直径 D_{m2} 设定为关键刀具直径 D_{key} , 并将编号为 m 的刀具的直径 D_m 设为最小刀具直径 D_{\min} ; 否则, 将 D_{m2} 替换成当前刀具序列遍历刀具编号的下一把刀具, 并进行偏置环个数的计算和判定。如果遍历到最后一把编号 m 的刀具时偏置环个数仍然不为0, 则认为刀具数据库中不存在合理的关键刀具直径 D_{key} 和最小刀具直径 D_{\min} 。
- 5) 若实验结果中最小最大刀具和关键刀具均存在, 则将所获得的结果进行存储, 以便于建立和划分型腔加工可行刀具集; 若结果有缺漏不合理, 则通知相关技术人员重新制定刀具组合方案。

根据上述对于2.5D型腔零件的二维平面轮廓的几何约束判断所得到的最小最大刀具和关键刀具的直径尺寸, 可获得型腔加工所需要的关键刀具集和绩效刀具集。具体的关键刀具集和绩效刀具集的判别式如下:

$$\begin{cases} T_k = \{D(T_k) | D_{\min} \leq D(T_k) \leq D_{\text{key}}\} \\ T_f = \{D(T_k) | D_{\text{key}} \leq D(T_f) \leq D_{\max}\} \end{cases} \quad (1)$$

假设 n_1, n_2 分别为符合条件式(1)中的关键刀具集和绩效刀具集要求的刀具数量。则关键刀具集 T_k 和绩效刀具集 T_f 可以表示为:

$$\begin{cases} T_k = \{T_{k1}, T_{k2}, \dots, T_{kn1}\} \\ T_f = \{T_{f1}, T_{f2}, \dots, T_{fn2}\} \end{cases} \quad (2)$$

在上述公式中, T_{ki} ($i=1, 2, 3, \dots, n_1$), T_{fj} ($j=1, 2, 3, \dots, n_2$) 均表示按照直径从大到小排序的刀具。将关键刀具集和绩效刀具集合并得到符合加工需求的可行刀具集。

3 刀具组合多目标优化模型的建立及求解

3.1 复杂型腔类零件刀具组合多目标优化模型

为了准确地对不同的刀具组合加工方案进行优劣性的量化评价, 完善型腔加工的工艺规划环节, 需要对复杂型腔类零件刀具组合建立多目标优化模型。

考虑实际的型腔加工过程中成本损耗不仅有刀具使用和磨损的成本,这些相关数据由刀具厂家提供.型腔加工还会附带有机床折旧成本、刀具装夹成本、刀具空行程成本等,但这些成本在2.5D型腔铣削加工中相对于刀具成本而言影响比重较轻,在这里用机床折旧因子 γ_1 对其进行表示.

影响2.5D型腔加工效率的主要因素有加工时间、空走刀时间、刀具每次切削的深度等.空走刀时间由加工过程中不同加工区域刀具的出刀点和出刀点位置所决定,此处使用加工时间损耗因子 γ_2 进行表示.若 T_i 表示在某刀具组合(共计 n 把刀具)中第 i 把刀具,考虑到刀具切削能力与刀具实际参与的切削深度和刀具本身径长相关联,在相同的切削深度条件下,刀具的直径越长,一般会采用低转速、低进给速度、高背吃刀量和高铣削宽度.故刀具 T_i 的切削能力 $f(T_i)$ 可以表示为:

$$f(T_i) = D_i^\varepsilon \quad (3)$$

式中, D_i 为刀具 T_i 的径长(mm), ε 表示为刀具切削能力平衡系数,与刀具的材料和加工方式有关.

刀具的损耗成本与刀具径长、刀具实际切削面积以及刀具单价相关,其中第 i 把刀具单价(元) $c(T_i)$ 由生产厂家决定.在型腔中铣削加工过程中的刀具损耗往往通过刀具路径长度进行计算,但是每把刀具在设定路径加工过程中存在大量重复切削的区域,刀具在加工过程中只切削了部分区域甚至可能存在空走刀现象,影响了实际的刀具损耗成本的判定,本文通过刀具实际切削面积和刀具径长的比值来近似刀具有效切削损耗路径长度.因此,第 i 把刀具的损耗成本 $\cos t(T_i)$ 为:

$$\cos t(T_i) = \left(\frac{A_i}{D_i} + \lambda \right) c(T_i) \quad (4)$$

式中,刀具序列按照刀具径长由大到小排序. A_i 表示为每把刀具在型腔加工过程中实际切削的面积(mm^2),其与所对应刀具的径长比值可以近似为该刀具有效切削损耗路径长度,但与实际加工路径长度有误差,这里使用参数 λ 在模型计算过程中进行平衡,具体数值由实验结果和人工设计经验和需求来决定.刀具组合进行型腔加工时优先以大刀具进行切削,再用小刀具进行补足加工,故加工时按照大直径刀具在先、小直径刀具在后的顺序进行. A_i 的表达式如下:

$$\cos t(T_i) = \left(\frac{A_i}{D_i} + \lambda \right) c(T_i) \quad (5)$$

式中,刀具序列按照刀具径长由大到小排序. A_i 表示为每把刀具在型腔加工过程中实际切削的面积(mm^2),其与所对应刀具的径长比值可以近似为该刀具有效切削损耗路径长度,但与实际加工路径长度有误差,这里使用参数 λ 在模型计算过程中进行平衡,具体数值由实验结果和人工设计经验和需求来决定.刀具组合进行型腔加工时优先以大刀具进行切削,再用小刀具进行补足加工,故加工时按照大直径刀具在先、小直径刀具在后的顺序进行. A_i 的表达式如下:

$$A_i = \begin{cases} S_i, & i = 1 \\ S_i - S_{i-1}, & i \neq 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中, S_i 表示第 i 把刀具在给定型腔加工范围内能够进行无干涉切削的最大加工区域面积(mm^2).为了满足实际加工过程中用户对于加工效率和生产成本(绝大部分为刀具成本)综合考量的需求,越高的加工效率往往需要越高的刀具损耗成本,而加工效率与刀具切削的深度以及刀具切削能力等因素相关.对此采用加工成本和加工效率的倒数求积的方式平衡优化指标来进行决策.对于给定型腔 P 的第 k 个子特征加工区域,将前述的多目标优化问题转换成单目标优化问题,可以得到基于刀具成本和加工效率的复杂型腔类零件刀具组合多目标优化模型如下:

$$f_{P_k} = \omega \sum_{i=1}^n \frac{H_i}{f(T_i)} \cos t(T_i) + \gamma_1 + \gamma_2 \quad (7)$$

式中, n 表示为所选取刀具组合的刀具总数量(把), H_i 表示为刀具 T_i 在型腔加工过程中实际参与的切削深度(mm). ω 为成本效率平衡参数,表示成本和效率的偏重,由用户自身决定(通常设定为1).在规定的刀具数量条件下,能够取得该优化模型最小值的解即为最优刀具组合.一个完整的型腔通常由大小深度不一的多个子特征构成,且部分子特征往往形状复杂难以决策,利用本文的方法可以得到给定型腔 P 中 m 个子特征综合考虑的刀具组合多目标优化模型如下:

$$f_P = \sum_{j=1}^m \left[\omega_j \sum_{i=1}^n \frac{H_{ji}}{f(T_{ji})} \cos t(T_{ji}) \right] + m(\gamma_1 + \gamma_2) \quad (8)$$

3.2 基于有向图的刀具序列构建方法

刀具的序列构建在整个型腔加工过程中是一个必不可少的环节.利用有向图可以准确清晰地遍历所有可行的刀具组合.

对于给定的型腔 F_0 ,假设在刀具数据库中满足其加工需求的绩效刀具集刀具共计 n_1 把,关键刀具集刀

具共计 n_2 把, 型腔状态有向图如图 2 所示, 图中所示每个节点代表型腔的某一状态, S_{start} 表示型腔未加工的毛坯状态, S_{end} 表示给定刀具组合加工完成后的型腔状态, 选取刀具集中所有刀具按照刀具径长由大到小依次排序, S_i 表示为型腔在经过序号 i 的刀具加工后的状态. 节点之间由有向边进行连接, 箭头方向即为型腔在大刀具加工过后转向小刀具加工的状态, 有向边表示为型腔状态转换时的加工时耗和加工成本等因素, 从节点 S_{start} 到节点 S_{end} 中每一条由有向边组成的路径记为一种可选的刀具组合, 每一种刀具组合既包含绩效刀具又包含关键刀具, 可以保证整个加工过程中刀具选取的有效性.

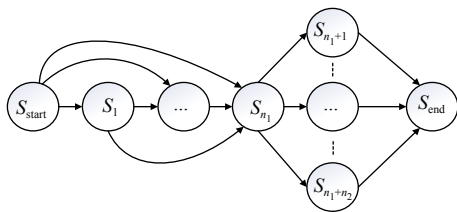


图 2 型腔加工状态有向图

3.3 基于遗传算法的最优刀具组合求解模型

遗传算法 (genetic algorithm) 作为一种概率搜索技术, 具有很好的收敛性, 计算时间少, 鲁棒性高. 本文的优化目标是获取刀具组合在型腔加工多目标优化模型的最小解, 这里选取遗传算法对其进行优化求解.

在以往的研究过程中^[13], 将刀具序列按照刀具直径排序并进行二进制编码, 如果某刀具被选用, 则对应位置编码为“1”, 否则为“0”, 后续按照传统的遗传算法求解方法即可得到最优解. 但是该方法并不能满足技术人员对于实际加工刀具个数的选取, 频繁地刀具更换并不一定符合现代制造绿色高效加工的要求, 并且直接将最小刀具作为关键刀具进行加工也不能完全符合型腔加工适应值最高的目标. 本文在文献 [13] 的基础上将现有的遗传算法求解方式进行优化, 主要有以下创新点: (1) 利用动态数组取代原有固定长度数组的二进制编码方式, 保证在遍历过程中所选取的总刀具数量一致性; (2) 在前述划分好的刀具集中保证关键刀具集中固定选取一把刀具, 绩效刀具集选取剩余固定数量的刀具, 并且分别进行交叉变异, 最后合并结果集.

本文将刀具选取数量的决定权交付给技术人员, 并在保证满足加工要求的前提下, 将更多刀具组合考虑进实验中, 具体求解最高适应值 F_{max} 刀具组合的方法如下:

算法 2. 最优刀具组合遗传算法

- 1) 通过前文判定符合型腔 F 加工要求的刀具共 m 把并按径长从大到小依次排序, 其中绩效刀具集 m_1 把, 关键刀具集 m_2 把 ($m_1+m_2=m$), 需要从中选取 $n(n \geq 2)$ 把刀具进行型腔加工. 根据经验决定合适的染色体种群大小 k , 随机生成初代的染色体种群, 其中染色体中前 m_1 位编码“1”的个数为 $n-1$, 后 m_2 位编码“1”的个数为 1, 每个染色体代表可用的刀具和要选择的多个刀具.
- 2) 对于每个染色体, 计算目标函数值. 在所有染色体中, 具有最大目标函数值的一条染色体是最佳的.
- 3) 比较了该最佳染色体和先前搜索过程中最佳染色体的目标函数值; 如果新一代中最好的更好, 则先前搜索中的最佳染色体会更新为新的最佳染色体.
- 4) 为了产生新一代, 基于染色体的目标函数值, 采用轮盘赌方法选择两个染色体. 以 m_1 为界, 将两个染色体前 m_1 位编码和后 m_2 位编码分别对应进行交叉运算.
- 5) 将上述两个交叉过后的染色体前 m_1 位编码和后 m_2 位编码分别进行随机变异运算, 并保证染色体中前 m_1 位编码“1”的个数为 $n-1$, 后 m_2 位编码“1”的个数为 1 的条件不变. 更新当前一代所有染色体的目标函数值, 创建新一代染色体种群.
- 6) 重复步骤 2) 至 5), 直到满足以下条件: 当前种群迭代次数达到规定最大值或者最大目标函数值收敛.
- 7) 通过算法的最优刀具序列得到符合型腔 F 加工要求的最优刀具组合并输出.

根据前文可知当对应染色体的目标函数值最大时, 其所对应解码得到刀具组合在本文提出的多目标优化模型的解为最小解, 从而得到符合型腔加工要求的最优刀具组合, 算法的流程图如图 3 所示.

4 实验验证与讨论

为了验证本文算法的有效性和正确性, 以 Microsoft Visual Studio 2013 为集成开发工具, 在 UG NX 12.0 的环境下实现了综合、考虑加工效率和刀具成本复杂型腔类零件刀具优化模型和求解方法的构建, 并在 Inter(R) Core(TM) i7-6500U CPU@2.5 GHz, 8 GB 内存的 PC 机上对其进行了测试.

刀具数据库由 10 把 4 刃 55 度平底钨钢铣刀组成, 螺旋角度 35 度, 每把刀具直径尺寸从大到小依次为 {20.0, 18.0, 16.0, 14.0, 12.0, 10.0, 8.0, 6.0, 4.0, 2.0} mm, 并按序编号 T_i ($i=1, 2, 3, \dots, 10$). 由于型腔加工工序中为保证加工质量, 在粗加工过程中留有工件径向余量以备后续半精加工及精加工实现, 故认为型腔粗加工刀具组合切削的横截面积大于总型腔切削特征面积的 90% 即视为完成粗加工工序.

图 4 所示为 2.5D 多特征复杂型腔零件 P_1 , 其子特征总数量大于 100 (共计有 183 个) 且子特征中存在非

基本图形简单偏置可以获得的轮廓面(如图5(a)所示的型腔特征 F_1, F_2), 故可认为是复杂型腔加工零件, 使用传统方法往往很难得到最优刀具解.

P_1 包含区域大小不一子特征, 使用传统的研究方法进行分析方法复杂, 并且只能对每个型腔特征逐一获取最优刀具组合, 耦合度较低难以获取特征组合最

优刀具组合. 通过本文可行刀具集的构建方法, 可以确定符合型腔零件 P_1 加工需求的绩效刀具集 $T_f=\{T_4, T_5, T_6, T_7, T_8\}$ 和关键刀具集 $T_k=\{T_9, T_{10}\}$ (型腔加工条件要求径向加工余量为 0 mm 且刀具刃长须大于所加工型腔特征的最大粗加工深度), 表 1 给出了可行刀具集中刀具的有效参数.

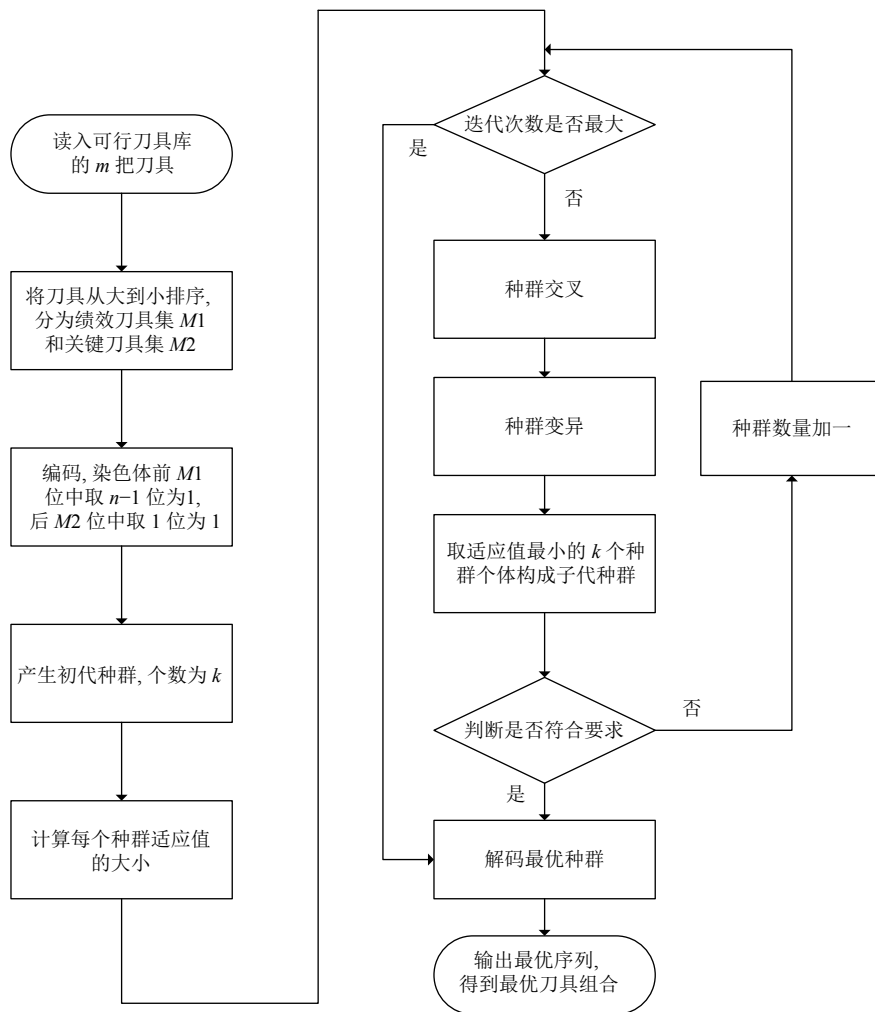


图 3 遗传算法流程图

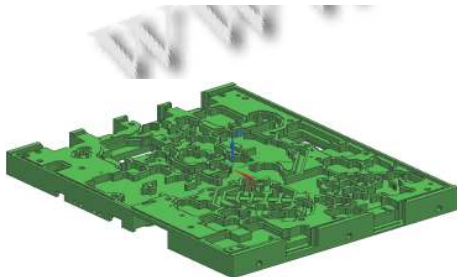


图 4 2.5D 多特征复杂型腔零件 P_1

以固定使用 3 把刀具为例, 对图 5(a) 中型腔零件 P_1 由 $\{F_1, F_2, F_3\}$ 构成的子特征集合 F_s 进行加工刀具组合优化求解, 并分别对每个子特征单独进行最优刀具组

合优化求解. 其中 F_1, F_3 的型腔加工深度为 3.15 mm, F_2 型腔加工深度为 3.34 mm, 径向加工余量设定为 0.3 mm, 确定符合型腔零件 P 子特征集合加工需求的绩效刀具集 $T_f=\{T_4, T_5, T_6, T_7, T_8, T_9\}$ 和关键刀具集 $T_k=\{T_{10}\}$. 刀具机床折旧因子 γ_1 设定为 70, 加工时间损耗因子 γ_2 设定为 30, 刀具切削平衡系数 ε 设定为 2, 加工路径平衡参数 λ 设定为 100, 成本效率平衡参数 ω 设定为 1, 遗传算法遍历次数设定为 30. 图 5(b) 为刀具优化模型遗传算法每次遍历的结果.

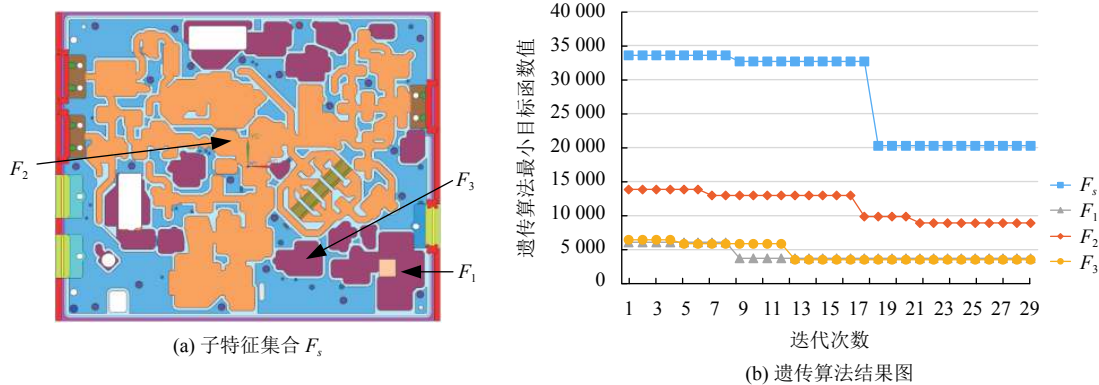


图5 子特征集合 F_s 遗传算法结果

表1 可行刀具集刀具参数

刀具参数	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}
直径(mm)	14.0	12.0	10.0	8.0	6.0	4.0	2.0
刃长(mm)	45.0	30.0	25.0	20.0	15.0	10.0	5.0
价格(元)	235.6	136.4	97.0	55.1	30.9	17.9	12.3

根据图5(b)中刀具优化遗传算法的结果,表2给出了每个子特征 F_1 、 F_2 和 F_3 及子特征集合 F_s 的最优刀具组合解及其对应多目标优化函数的遗传算法目标函数值。通过表中的结果可以观察到 F_s 最优的刀具组合为 $\{T_7, T_9, T_{10}\}$, 其对应的目标函数值大于每个子特征目标函数值的和。将每个子特征单独求得的最优刀具组合解进行组合得到的刀具集 $\{T_7, T_8, T_9, T_{10}\}$ 共计有4把刀具, 若将此刀具集采用本文提出的刀具组合优化方法进行求解得到的目标函数值为32694.143大于所求得 F_s 对应3把刀具最优刀具组合解的目标函数值, 说明: (1) 子特征组合的最优刀具组合解并不一定是每个子特征所对应的最优解, 全局最优解无法得到局部最优解; (2) 对于每个子特征最优刀具组合解合并成的无重复刀具集合, 除了刀具数量超出限制条件外, 其刀具组合解大于 F_s 的3把刀具组合最优解, 单纯将每个特征最优刀具组合依旧无法获得多特征最优刀具组合, 局部最优解无法获得全局最优解。

表2 型腔 F 特征最优刀具组合解

型腔特征	F_s	F_1	F_2	F_3
最优刀具组合	$\{T_8, T_9, T_{10}\}$	$\{T_7, T_9, T_{10}\}$	$\{T_8, T_9, T_{10}\}$	$\{T_7, T_9, T_{10}\}$
目标函数值	20278.94	3744.35	8927.22	3524.96

图6为 F_s 的最优刀具组合 $\{T_7, T_9, T_{10}\}$ 中每把刀具所对应的型腔加工区域示意图, 通过 T_7, T_9, T_{10} 刀具依次加工的顺序可以得到保留径向加工余量要求下的粗加工型腔工件。

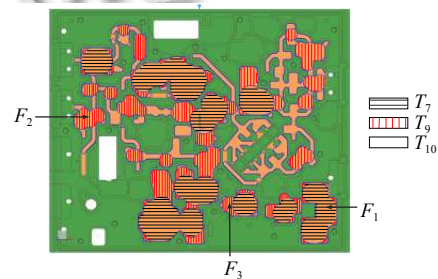


图6 F_s 最优刀具组合中每把刀具加工区域

为了增强实验的有效性, 此处引入零件 P_2 进行对比, 图7所示其共有69个大小不一的子特征且不存在非基本图形偏置无法得到的轮廓面, 故可认为是简单型腔零件。这里构建零件 P_2 的子特征集合 $F_l = \{F_1, F_2\}$

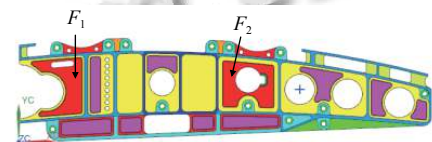


图7 简单型腔零件 P_2

为了获取型腔子特征集合 F_s 和 F_l 在不限加工刀具数量下的最优刀具组合解, 分别对刀具总数为1、2、3和4的所有刀具组合方案进行求计算最优刀具组合解。

通过表3的结果可以观察到无论是型腔零件复杂还是简单, 最优刀具组合解与刀具数量都呈非线性关系, 并且随着零件复杂程度的提高, 算法所需要的时间也会成倍增加。实验结果表明本文的方法在处理简单和复杂型腔零件的最优刀具组合问题的解决都具有一定的辅助作用, 可以帮助设计人员高效且准确地选取最优刀具组合方案并划分各刀具在型腔特征中的粗加工区域。

表3 不同刀具总数下 F_s 和 F_t 最优刀具组合解

子特征集合	刀具总数	1	2	3	4
F_s	最优组合	{ T_{10} }	{ T_8, T_{10} }	{ T_7, T_9, T_{10} }	{ T_6, T_8, T_9, T_{10} }
	目标函数值	22457.27	14652.64	20278.94	32595.85
	计算时间	1 min 15 s	2 min 6 s	3 min 34 s	5 min 29 s
F_t	最优组合	{ T_{10} }	{ T_8, T_{10} }	{ T_6, T_9, T_{10} }	{ T_2, T_7, T_9, T_{10} }
	目标函数值	5725.27	5576.39	3911.92	3029.42
	计算时间	45 s	1 min 12 s	1 min 58 s	2 min 23 s

5 结论与展望

本文提出了一种基于遗传算法的复杂型腔类零件刀具优化方法,主要的创新点总结如下:(1)以基于特征中轴的型腔刀具粗加工区域计算方法为基础,将刀具集进行合理分割备用;(2)提供了综合刀具成本和加工效率的复杂型腔刀具组合优化的建模新思路;(3)创新性地利于改进的遗传算法获取最优刀具组合。本文相较于传统方法对于型腔单特征最优刀具解研究,更注重型腔零件层面的最优解的获取,并通过实验结果验证了本文方法的可行性。

降低算法运行的时间以及将本文方法研究范围拓展到其他模具特征(例如孔、曲面),形成完整的复杂型腔工艺规划方法将是今后工作的重点。

参考文献

- Huang R, Zhang SS. An effective adaptive dynamic evolution computing approach of roughing process for part with complex pockets. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, 96(9-12): 3279-3293.
- 郑国磊, 郑祖杰, 周敏, 等. 飞机结构件数控加工工序计算技术. *航空制造技术*, 2016, (16): 16-23.
- Veeramani D, Gau YS. Selection of an optimal set of cutting-tool sizes for 212D pocket machining. *Computer-Aided Design*, 1997, 29(12): 869-877. [doi: 10.1016/S0010-4485(97)00042-0]
- D'Souza RM, Sequin C, Wright PK. Automated tool sequence selection for 3-axis machining of free-form pockets. *Computer-Aided Design*, 2004, 36(7): 595-605. [doi: 10.1016/S0010-4485(03)00137-4]
- D'Souza RM. On setup level tool sequence selection for 2.5-D pocket machining. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, 22(3): 256-266. [doi: 10.1016/j.rcim.2005.06.001]
- Chen ZC, Fu Q. An optimal approach to multiple tool selection and their numerical control path generation for aggressive rough machining of pockets with free-form boundaries. *Computer-Aided Design*, 2011, 43(6): 651-663. [doi: 10.1016/j.cad.2011.01.020]
- 王玉, 高崇辉, 徐和国. 模具型腔数控加工计算机辅助刀具选择研究. *计算机集成制造系统*, 2004, 10(2): 226-229. [doi: 10.3969/j.issn.1006-5911.2004.02.020]
- 张英杰. 面向多刀具组合方案选择的加工成本评价模型的研究. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(8): 1545-1549.
- 尹震飏, 刘飞, 刘霜, 等. 一种支持型腔粗加工刀具序列高效优化的刀具筛选方法. *机械工程学报*, 2011, 47(21): 116-122.
- 李聪波, 吴磊, 沈欢, 等. 面向能耗的 2.5D 型腔数控铣削加工刀具组合优化选择. *计算机集成制造系统*, 2017, 23(2): 293-304.
- 黄瑞, 张树生, 白晓亮. 可制造性驱动的三维 CAD 模型相交制造特征识别方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2013, 25(7): 1089-1098. [doi: 10.3969/j.issn.1003-9775.2013.07.020]
- 黄瑞, 蒋俊锋, 张树生. 关联工艺引导的型腔类零件局部结构检索方法. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2018, 30(4): 707-718.
- Ahmad Z, Rahmani K, D'Souza RM. Applications of genetic algorithms in process planning: Tool sequence selection for 2.5-axis pocket machining. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2010, 21(4): 461-470. [doi: 10.1007/s10845-008-0201-6]