

含雕塑曲面和岛的模具型腔 粗加工刀具组合优化方法*

王 玉 徐和国 高崇辉 黄建中
(上海交通大学国家模具 CAD 工程研究中心 上海 200030)

摘要: 模具型腔粗加工正在从传统的单刀策略向多刀组合策略转变, 粗加工刀具组合优化可显著提高模具整体加工效率。现行的 CAM 编程软件刀具的选择主要基于编程者的经验, 易于出错且很难做到最优化。研究提出了模具型腔粗加工中基于 CAD 实体模型自动进行刀具选择和优化的系统化方法, 建立了优化数学模型, 设计了相应的算法, 包括截交轮廓的生成、内外环的判断以及搜索层的合并。所提方法和算法在 UG 二次开发环境下进行了编程实现和算例验证, 结果表明该方法是可行有效的。

关键词: 刀具选择 模具型腔 雕塑曲面 优化 数控加工

中图分类号: TH117

0 前言

随着高速加工中心在模具加工中的广泛使用, 模具型腔粗加工正在从传统的单刀策略向多刀组合策略转变^[1-4], 这主要是由于加工中心所具有的高主轴转速和快速自动换刀功能为进一步提高模具的加工效率提供了可能。然而现行的商用 CAM 编程软件并不支持这一转变, 刀具的选择主要基于编程者的经验, 易于出错且很难做到最优化。其主要原因是: 模具型腔几何通常较为复杂, 含有大量自由曲面及岛, 而 CAD 模型并不能直接提供影响刀具选择的几何约束(如岛和型腔壁之间的最小距离)的显式信息, 仅凭经验来进行刀具选择是困难的。因此研究模具型腔粗加工中的刀具自动优化组合以提高模具的整体加工效率(粗加工通常为精加工时间的 5~10 倍^[5])就显得十分必要和有意义。以含雕塑曲面和岛的模具型腔为例, 提出了基于型腔 CAD 模型进行刀具组合自动优化的系统化方法, 设计了相应的算法, 并在 UG 二次开发环境中得到了实现。

1 基本方法

型腔粗加工的目的就是最大化最高效率地去除多余的金属, 通常使用平头铣刀, 采取层切的方法。因此 3D 模具型腔的粗加工过程实际上就是对一系列 2.5D 模具型腔的加工。刀具优化的目的就是要寻

找一组刀具组合, 使其能够以最高的效率切除最多的金属。为了便于叙述, 首先给出若干相关的定义(见图 1、2)。

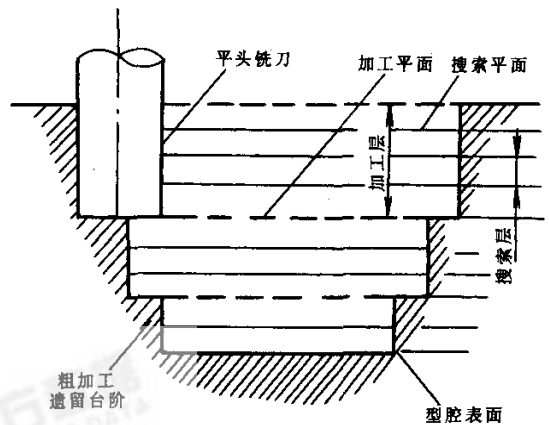


图1 模具型腔铣削加工

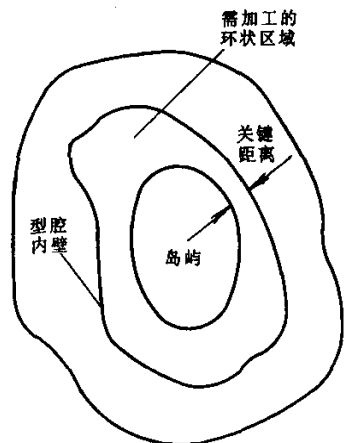


图2 含岛型腔关键距离

* 高等学校博士点基金资助项目(20020248017)。20040212 收到初稿, 20040830 收到修改稿

定义 1 搜索平面。一组垂直于进刀方向的截面平面,用以获得截面轮廓,提取影响刀具选择的几何约束。两个相邻的搜索平面之间的型腔实体称为搜索层。

定义 2 加工平面。两种不同规格的刀具加工的关键面,即一种刀具加工的终止面,另一种刀具加工的起始面。两个加工平面之间的型腔实体称为加工层,加工层由若干个搜索层根据一定的规则合并而成,因此加工平面必定和某个搜索平面重合。

定义 3 关键距离。岛与型腔内壁之间或者岛与岛之间的最小距离。

定义 4 可行刀具集。直径小于关键距离减去加工余量所得差的所有刀具规格的集合。

定义 5 残余体积。型腔粗加工后留待后续工序加工的体积。

基于以上定义,刀具组合优化的基本方法可描述如下。

(1) 以一定的步长做一组垂直于进刀方向的搜索平面和型腔实体相交。

(2) 求出截面轮廓。

(3) 计算内外环间或岛与岛间的关键距离。

(4) 根据一定的合并原则(如相邻关键距离相差小于某一阈值),对搜索层进行合并,确定加工平面和可行刀具集。

(5) 确定每一加工层使用的刀具,即型腔加工的刀具组合。

(6) 根据刀具推荐的加工参数(切削速度、切深和进给速度),计算材料去除率。

(7) 根据加工层实际切除的体积,计算每一加工层的加工时间。

(8) 计算型腔总的加工时间和残余体积。

(9) 对该组刀具组合总体加工效率进行评估。

(10) 重复(1)~(9),直至求出相对最优的刀具组合。

2 优化模型

2.1 以时间为目标

以时间为目标,即要求以整个型腔的加工时间 t 最短来优化刀具组合。基于上述方法,可建立如下形式化的优化模型

$$\min t = \sum_{i=1}^n t_i = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{\mu_i} = \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^m A_j h_{ij}}{\mu_i}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} < h \\ & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_j h_{ij} < V \\ & d_i \leq r_{ik} \quad k=1, \dots, l \\ & d_i = \max \{d \mid d_p, p=1, \dots, q\} \\ & \frac{|r_{ik} - r_{i,k+1}|}{r_{ik}} \leq \varepsilon_1 \quad i=1, \dots, n \quad k=1, \dots, l \\ & \frac{\Delta V}{V} = \frac{V - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m A_j h_{ij}}{V} \leq \varepsilon_2 \\ & \mu_i = d_i h_{ij} n f z \quad (\text{切割的截面积乘以进给率}) \end{aligned}$$

- 式中 n ——型腔加工层数量
 m ——每一加工层刀具切割次数
 l ——每一加工层中搜索层数量
 q ——每一加工层可行刀具数量
 h ——型腔深度
 h_{ij} —— i 加工层 j 切割层刀具切割深度
 A_j —— j 切割层底面积
 V_i —— i 加工层切削体积
 μ_i —— i 加工层材料去除率
 d_i —— i 加工层刀具直径
 d_p —— i 加工层可行刀具集合
 r_{ik} —— i 加工层 k 搜索层的关键距离
 ε_1 ——控制搜索层合并的常数
 ε_2 ——控制残余体积的常数
 V ——型腔体积
 ΔV ——残余体积
 n ——主轴转速
 f ——刀具每齿进给量
 z ——刀具齿数

2.2 以整体效率为目标

考虑到不同的搜索平面步长,会产生不同的加工层,从而导致不同的加工时间和残余体积。有时尽管总的加工时间较短,但残余体积可能较多。因此单独以加工时间为目标进行优化有时并不一定科学。为此,提出了效率系数的概念,综合考虑了加工时间和残余体积的因素,加工时间越短,残余体积越少,则效率系数就越高。

$$\text{令 } Q = \frac{t}{V - \Delta V} \times \frac{\Delta V}{V} = \frac{t \frac{\Delta V}{V}}{1 - \frac{\Delta V}{V}} = \frac{t\omega}{1 - \omega}$$

上式中前一项反映了加工单位体积的时间系数,其中 $\omega = \frac{\Delta V}{V}$,为残余体积百分数。

这样效率系数可定义为 $k_e=1/Q$ 。

3 算法设计

所提方法的关键是求得影响刀具选择的关键距离，因此必须研究由截交曲线求环以及判断内外环的算法。算法的具体实现是基于 UG 软件提供的二次开发环境。

3.1 由截面曲线求环

所谓环，是指由一组首尾相连的线段构成的封闭曲线。这里将线段分为三种类型，即直线、圆弧、样条。定义如下

$$\text{loop} = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$$

$$c_i \in \{\text{line}, \text{arc}, \text{spline}\}$$

$$c_i = c_i(t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad i=1, 2, \dots, n$$

$$c_i(1) = c_{i+1}(0) \quad i=1, 2, \dots, n-1$$

基本思路是从某条线段出发，以其终点坐标为基准，查找端点坐标相同的线段。并依次类推，求得整个环。环的数据结构采用有头结点的链表形式，具体定义如下：

```

typedef struct loop_struct
{
    int id;//环的 id 号
    int curves_count;//该环有几条曲线组成
    tag_t* curves_tag;//数组的首地址，数组存放各曲线的 id 号
    struct loop_struct* next;//指向下一个结点的指针
}sloop;

```

基于相应数据结构的算法可描述为：对 UG 给出的存放曲线 id 的数组进行排序，把同属于一个环的曲线归并起来，在数组中连续存放，并记录下曲线数目和首元素的地址，赋给相应环结点中的整型变量 curves_count ，以及 curves_tag 指针(见图 3)。

3.2 内、外环判断

计算关键距离的基本思路是先由线段生成环，再由环生成面，两个面之间的最小距离(由 UG/Open API 函数计算)即关键距离。考察图 4 所示的内外环结构，记录从外界到达某个环必须经过的环的路径，从中可以发现处在路径的奇数层的环必是外环，偶数层的必是内环。按图形的拓扑规律，一个面只含有一个外环，因此统计奇数层含有几个不同的元素，就可确定整个图形中面的个数。至于每个内环到底属于哪个面(也就是属于哪个外环)，可以通过其路径提供的信息来确定。如对环 2，其路径为 0-1-4-2，则环 4 就是它的外环；对环 1，其路径为

0-1，则环 0 是它的外环。确定两个不同环的从属关系，即检验环 A 是否在环 B 内，只需取环 A 上一点，看是否包含于环 B。可通过 UG/Open API 中判断点和面关系的函数实现。

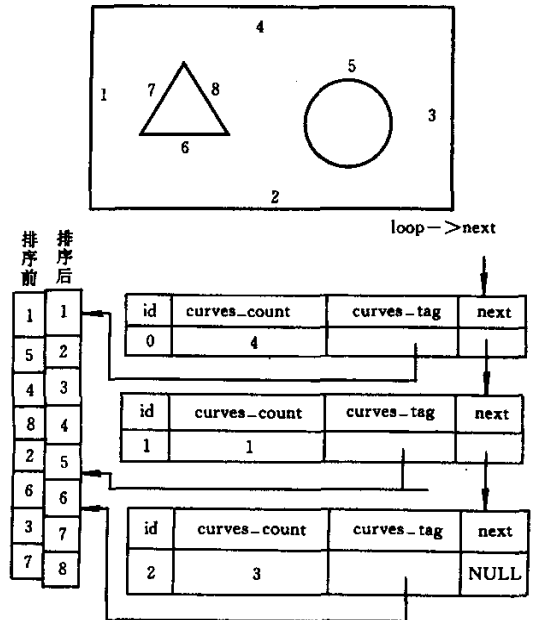


图 3 由截面曲线求环算法示意

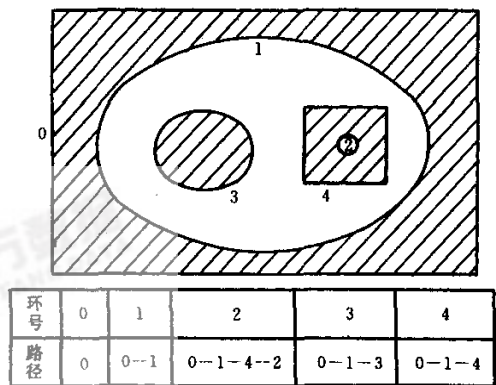


图 4 截面内外环及其路径示意

面的数据结构采用有头结点的链表形式，具体定义如下：

```

typedef struct face_struct
{
    tag_t id;//面在 UG 中的 id 号
    int inner_loop_count;//有几个内环
    int inner_loop_id[20];//内环号
    int outer_loop_id;//外环号
    struct face_struct * next;
}sfac;

```

结合图 4, 具体算法过程可描述如下:

在 loop 链表中查找处在最外层的环, 找到环 0, 确定其为外环, 为 face 链表添加一个结点, 把环 0 结点从 loop 链表移到另一个名为 temp_loop(带头结点)链表上, 另外再用指针 current 指向被移走的第一个环结点(环 0 结点), 令其也成为一链表; 再通过 loop 链表找最外层的环, 找到环 1, 比较环 1 和上一步找到的外环的关系(通过链表 current), 发现其包含于环 0, 则确定环 1 是环 0 的内环, 如此, 就可以确定一个面, 最后把环 1 结点移到 temp_loop 上。

重复以上步骤, 直到找到两个外环, 环 3 和环 4, 则为 face 链表添加两个结点, 把环 3、4 的结点都移到 temp_loop 上; 接下来找到的最外层的是环 2, 和上一步找到的两个外环分别比较, 确定其为环 4 的内环, 移走环 2 结点。当 loop->next=NULL, 则说明内、外环已判断完毕。

3.3 搜索层的合并

考虑到一般情况下由搜索平面获得的模具型腔的关键距离应为一单调递减数列(否则制件将不能脱模), 搜索层的合并可采用两两合并的原则, 即依次比较相邻两个关键距离的大小, 如果其差值不大于事先设定的阈值, 则合并之; 反之, 则暂不合并, 留待下一次循环。每次循环轮空者则直接进入下一循环。同时阈值的设定值相应增大, 以保证合并的效率。考虑到工业加工的实际情况, 将粗加工所用刀具的最大组合数设定为 4, 即合并后最多形成 4 个加工层, 使用 4 把刀具。

4 算例

所提方法在 UG/Open API 环境下进行了编程实现。计算中用到的刀具数据和相应的加工参数来自德国 WALTER 公司的硬质合金刀具综合样本。为了验证方法的可行性, 我们建造了一个模具型腔 CAD 模型(见图 5), 该模型含岛, 但其中的曲面均为解析曲面, 不含自由曲面, 表 1 是部分计算结果。图 6 为工业中一个真实的零件, 不但有多个岛, 而且包含自由曲面, 表 2 为其优化结果。计算中工件材料假定为中碳钢, 切削速度为 100 m/min, 切深取为刀具直径的 1/2, 进给量根据刀具推荐值由程序自动修正计算。同时假定刀具库中现有平头铣刀刀具规格为 $\phi 3, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 16, 20$ 。表 1 显示的计算结果表明, 如果以单位体积时间系数为优化目标, 则刀具组合为 12, 8, 6, 这时残余体积百分数为 9.7%; 而如果以效率系数最大为优化目标, 则

刀具组合为 8, 5, 残余体积百分数为 1.9%, 实际中应根据具体情况和要求确定。表 2 的优化结果是以效率系数为目标, 残余体积为 7.6%。

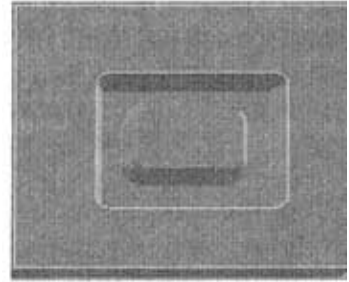


图 5 含岛型腔 CAD 模型

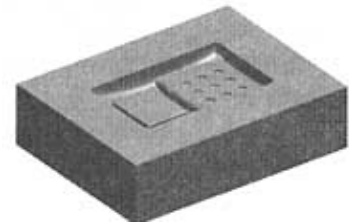


图 6 含雕塑曲面和岛的型腔 CAD 模型

表 1 部分计算结果

刀具组合	加工时间 t/min	残余体积百分数 $\omega/\%$
8,5	33.3	1.9
8,6	29.3	4.6
10,5	30.8	3.1
12,6,5	31.5	3.9
12,8,6	23.2	9.7
12,10,6	23.2	10.9
10,8,6	24.6	6.5

刀具组合	单位体积时间系数 k_t	效率系数 k_e
8,5	0.339	1.55
8,6	0.307	0.71
10,5	0.318	1.01
12,6,5	0.328	0.78
12,8,6	0.256	0.40
12,10,6	0.260	0.35
10,8,6	0.263	0.58

表 2 刀具组合优化结果

编号	直径 d/mm	起点位置 z_0/mm	终点位置 z_1/mm	加工体积 V/mm^3
1	20	74.958 9	60.000 0	224 567.832 3
2	12	60.000 0	56.000 0	43 679.616 2
3	8	56.000 0	54.000 0	8 893.794 4
4	5	54.000 0	53.000 0	3 803.347 8

编号	加工时间 t/min	残余体积 V/mm^3	残余体积百分比 $\omega/\%$	总加工时间 t_i/min
1	3.527 5	—	—	—
2	1.905 8	23 211.6781	7.631	6.612 7
3	0.582 0	—	—	—
4	0.597 4	—	—	—

5 结论

模具的开发周期在很大程度上决定着产品的上市周期,因此研究如何提高模具的加工效率具有重要意义。现行的 CAM 编程其刀具选择、工艺参数的确定都依赖于编程者的经验,不能实现从 CAD 到 CAM 的集成化、自动化。研究提出了基于模具型腔 CAD 实体模型自动进行刀具选择和优化的系统化方法,建立了优化数学模型,设计了相应的算法,并在 UG 二次开发环境下进行了编程实现,算例表明该方法是可行有效的。我们的目标是开发一个计算机辅助刀具选择系统(Computer aided tool selection system, CATS),下一步的工作将对该方法进一步完善,如在残余体积给定的情况下进行刀具组合优化等,同时还将研究半精加工、精加工的刀具选择方法,以实现从 CAD 模型到 CAM 编程的自动化。

参 考 文 献

- 1 Lin A C, Gian R. A multiple-tool approach to rough machining of sculptured surfaces. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 1999, 15(2): 387~398
- 2 Chen Y H, Lee Y S, Fang S C. Optimal cutter selection and machining plane determination for process planning and NC machining of complex surfaces. *Journal of Manufacturing Systems*, 1998, 17(5): 371~388
- 3 Veeramani D, Gau Y S. Selection of an optimal set of cutting tool sizes for 2.5D pocket machining. *Computer-Aided Design*, 1997, 29(12): 869~877
- 4 Kyoung Y M, Cho K K, Jun C S. Optimal tool selection for pocket machining in process planning. *Computers Ind. Engng.*, 1997, 33(3, 4): 505~508
- 5 Hatna A, Grieve R J, Broomhead P. Automatic CNC milling of pockets: geometric and technological issues. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1998, 11(4): 309~330

METHODOLOGY FOR TOOL COMBINATION OPTIMIZATION OF DIE/ MOLD CAVITY ROUGH MACHINING WITH SCULPTURED SURFACES AND ISLANDS

Wang Yu Xu Heguo Gao Chonghui
Huang Jianzhong

(National Die/Mold CAD Engineering Research Center, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: The strategy for die/mold cavity CNC rough machining is transforming from traditional single-tool approach to a combination of several cutting tools due to the application of high-speed CNC center. Tool combination optimization for roughing can increase the total machining efficiency significantly. The tool selection by using existing CAM software is mainly based on experience, so it is error-prone and hard to reach optimum results. A systematic methodology for automatic tool selection in die/mold cavities roughing based on CAD model intersecting by a series of hunting planes is proposed. A mathematical model for tool combination optimization is established, and various algorithms, including loop generation, inner and outer loop identification and hunting layer merging, are presented. The methodology is implemented in UG/open context, and two examples are given to show the validity and feasibility of the proposed methodology.

Key words: Tool selection Die/mold cavity

Sculptured surface Optimization CNC

作者简介:王玉,男,1963年出生,博士,副教授。主要从事 CAD/CAM 及 PDM 等制造业信息化方面的研究。

E-mail: yuwang999@sina.com