

文章编号:1006-2467(2005)01-0113-04

基于实体模型的计算机辅助刀具选择系统

徐和国, 王 玉, 周雄辉

(上海交通大学 国家模具 CAD 工程研究中心, 上海 200030)

摘 要: 论述了数控粗加工、半精加工和精加工中基于实体模型的计算机辅助刀具选择的基本方法和流程, 提出了粗加工中实现多刀组合优化的基本方法、步骤和算法, 建立了在一定目标下的优化数学模型。所有算法都在 UG/Open 环境下进行了编程实现和实例验证。结果表明, 所提出的方法和算法可行有效。

关键词: 刀具选择; 实体模型; 刀具组合优化

中图分类号: TH 391 **文献标识码:** A

Computer-Aided Tool Selection System Based on Solid Model

XU He-guo, WANG Yu, ZHOU Xiong-hui

(National Die & Mold CAD Eng. Research Center, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: Computer-aided tool selection (CATS) is one of CAPP system functions and plays a very important role in metal removal processes. As the geometry of free-form surfaces varies significantly, it is difficult to infer any rules or equations to determine the optimum cutting tools. The methods, which realize the automatic selection of cutting tools in three steps, i. e. roughing, semi-roughing and finishing, during metal removal processes, were discussed based on solid models in specific optimization objectives, and a mathematical optimization model of cutting tools selection for rough cut was built. All proposed algorithms were implemented under UG/Open API environments, and an example case was given to show their feasibility and validity.

Key words: tool selection; solid model; tool set optimization

近几年来,合理选择刀具的重要性逐渐被人们所重视。用户纷纷开发出各种类型的产品加工过程中的计算机辅助刀具选择软件。例如, Sandvik Coromant 公司推出了 Coroguide 软件,能迅速选用车、铣、钻削用的刀具,还能获得有关各种刀具的详细信息,推荐了这种刀具加工的切削用量;Valenite Modco 公司的 Spectra 软件,可对加工钢和铸铁用的刀具材料和新型刀片切削槽型几何形状进行选择;Iscar 公司推出了 Pro-Grip 软件,可以简化通用

Cut-Grip 和 Top-Grip 车刀车削工序的编程工作等等。此外,许多企业也纷纷开发出针对自己产品的计算机辅助刀具选择系统软件。这些刀具选择软件都具有特定的使用范围和各自的特点,而且大多是用用户交互式的,且无优化过程或优化目标单一化。本文研究了基于实体模型的计算机辅助刀具选择(Computer-Aided Tool Selection, CATS)方法与优化系统,用户操作无需输入参数,优化效果非常明显。

收稿日期:2003-12-19

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20020248017)

作者简介:徐和国(1979-),男,安徽安庆人,硕士,主要从事 CAD/CAM/PDM 方面的研究。周雄辉(联系人),男,博士生导师,

电话(Tel.):021-62813438;E-mail:xhzhou@sjtu.edu.cn.

1 刀具自动选择的实现方法

1.1 刀具选择的优化目标

刀具选择在加工中应该保证:①加工质量.能满足零件的各项技术要求,不与零件发生干涉;②生产效率.在保证质量的前提下尽可能使用较大刀具直径;③产品成本.要求合理选择刀具材料,以降低成本.

在CATS系统中,上述3个优化目标就成为选择刀具的出发点和选刀准则.一个产品从毛坯到零件一般都要经历粗加工、半精加工、精加工3个阶段,各阶段任务的侧重点不同,选刀的准则和方法就不同,下面分别讨论各阶段的刀具自动选择方法.

1.2 粗加工刀具的自动选择

粗加工就是留有一定的精加工余量后尽可能以一次或较少的走刀次数将毛坯加工到接近零件的形状.可见,粗加工的目标是在最短的时间内切除多的材料,即尽可能地提高效率,而加工质量在此不是考虑的重点.因此,粗加工的刀具选择应该围绕着如何提高加工效率这个问题进行.

首先,所选的刀具必须保证不和零件表面发生干涉,即刀具在每一层切削面上的切除区域都不可和零件的对应截面区域发生重叠,否则,刀具在加工过程中将产生过切现象,致使零件报废.如何避免过切现象,就涉及到一个零件几何约束的提取问题.以型腔加工为例(见图1),型腔内含2个岛(型腔内凸起部分,其四周边界与腔壁之间无相邻),则这2个岛之间以及岛与腔壁之间有一个最小距离 d ,称之为刀具最小通道.显然,要使刀具在加工过程中顺利通过岛与岛和岛与腔壁之间的间隙,则所选刀具直径必须小于刀具最小通道.刀具最小通道的确定是CATS系统中选择粗加工刀具的一项重要内容,其求解方法通常采用偏移法或构造Voronoi图法^[1].

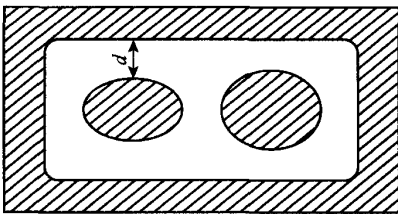


图1 型腔零件截面图

Fig.1 Section of a cavity part

然后,确定最优刀具.在保证不发生干涉的前提下确定刀具的选择范围后,对这一系列直径刀具进行优化分析,最终确定最优刀具组合.为了提高

加工效率,选出的粗加工刀具尽可能使总切削量 V_r 最大和总切削时间 T_r 最短.在研究切削量和切削时间之间的关系之前,引进切削速率 $R(\text{mm}^3/\text{min})$ 概念.用 R 来衡量一把刀具的切削效率^[2]:

$$R = \alpha D a_p n f z \quad (1)$$

式中: α 为参与切削部分的刀具直径所占的比例系数; D 为刀具直径(mm); a_p 为刀具切削深度(mm); n 为主轴的转动速度(r/min),

$$n = 1000v/(\pi D) \quad (2)$$

f 为每齿的进给量(mm); z 为刀具的齿数(齿/转); v 为刀具的切削速度(m/min).将式(2)代入式(1)得:

$$R = 10^3 \alpha a_p v f z / \pi \quad (3)$$

一般来说, D 越大,最大切深 $a_{p,\max}$ 和 f 越大. v 的选择与工件材料和刀具材料等因素有关,而与 D 并无很大关系,在选刀具前就可以确定下来.因此,从式(3)中可以得到一个结论:影响 R 的主要因素是 D ,即 $R \propto D^2$.而刀具的切削时间

$$t_r = V/R \quad (4)$$

在切削量 V 不变的情况下,增大 D ,则 R 增大,加工时间减小.假设一个零件粗加工需要 N 把刀,刀 i 的切削时间为 t_{ri} ,切削量为 V_i ,辅助时间为 t_c ,则总的粗加工时间为

$$t_r = \sum_{i=1}^N t_{ri} + t_c \quad (5)$$

粗加工总切削量:

$$V_r = \sum_{i=1}^N V_i \quad (6)$$

虽然选择大直径刀具可使 R 增大, t_r 相应缩短,但是, D 增大, a_p 也相应增大,则有可能导致 V_i 下降,这种反比例关系在带曲面和斜面的零件中表现非常显著.在这种情况下,即使加工时间很短,但过多的切削剩余量必将给后面的半精加工和精加工阶段带来很大的困难,达不到粗加工的理想效果.目前,许多CATS系统中粗加工部分的刀具优化都是仅仅以 t_r 为优化依据^[3],这在某种程度上是不科学的,尤其是在3D型腔类粗加工以及带斜面的零件加工中,优化的结果更加不理想.为此,把 t_r 和 V_r 结合起来考虑,引进一个优化参数 ω ,计算公式如下:

$$\omega = t_r V_r / (1 - \eta) \quad (7)$$

式中: V_r 为粗加工后剩余切削量; η 为粗加工后剩余切削量占总切削量的百分比.从式(7)可以看出,当 t_r 、 V_r 、 η 都很小时, ω 亦很小,此条件下的组合刀具(也可能就只有一把刀具)加工效率最高.如果一个零件粗加工中有多种刀具组合,可以计算每种组合下的 ω 并进行比较,则 ω_{\min} 对应的那组刀具就是最

终确定的粗加工刀具。

把式(4)~(7)整理变形,可得第 k 组刀具组合的优化参数 ω_k 计算公式:

$$\omega_k = \left(\sum_{i=1}^N \frac{V_i}{R_i} + t_c \right) \left(V / \sum_{i=1}^N V_i - 1 \right) V \quad (8)$$

式中: $k=1, 2, \dots, m$; m 为刀具组合数; i 为刀具的序号; R_i 为第 i 把刀的切削速率,可通过式(3)求得。式中 V_i 根据粗加工切削特点很容易求得。

综上所述,可以把 CATS 系统中粗加工选刀过程归纳如图 2 所示。

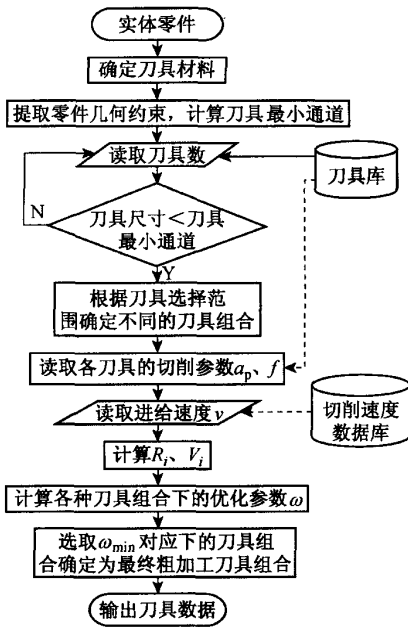


图 2 粗加工刀具自动选择流程图

Fig. 2 Flowchart of the tool selection for roughing

1.3 半精加工刀具的自动选择

半精加工主要是除去粗加工后残留下来的台阶状轮廓使之更加接近零件的表面形状和尺寸,使精加工能顺利进行并达到理想的加工精度。因此,半精加工要求所选的刀具必须能够完全切除台阶状轮廓,这一要求也就成为 CATS 系统中半精加工的刀具选择准则。

为了能够完全切除台阶轮廓,刀具所允许的最大切深必须要稍大于单一台阶面到零件表面的距离^[4]。图 3 所示为一个台阶状轮廓示意图,阴影部分是它的横剖面。刀具切深必须大于台阶轮廓的台阶尖角到零件近似表面的距离 x ,下面分析如何计算 x 的近似值。

图 3 中: A_i 为第 i 个切削面的截面积; l_i 为第 i 个切削层的外轮廓周长; h 为刀具的切削深度。两个切削层之间的平均轮廓长度:

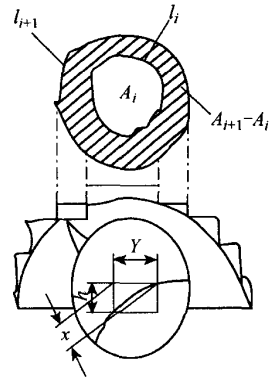


图 3 台阶状轮廓示意图

Fig. 3 Illustration of the step profile

$$\bar{l}_i = (l_{i+1} + l_i) / 2 \quad (9)$$

第 i 个阶梯的体积近似计算公式为

$$V_s \approx \bar{Y} \bar{l}_i h = (A_{i+1} - A_i) h \quad (10)$$

式中, \bar{Y} 为切削层台阶的平均宽度。由图 3 的三角形几何关系可以求得 x 的近似值,其计算公式为

$$x \approx \bar{Y} h / \sqrt{h^2 + \bar{Y}^2} \quad (11)$$

CATS 系统中半精加工刀具选择过程如图 4 所示。在实际半精加工过程中,由于必须留有一定的精加工余量,因此刀具的实际切削深度不能为 h ,可以用阶梯角到相应的零件表面的距离 x 的近似值表示半精加工要切除的材料高度,即切削深度。当每个阶梯对应的 x 值都求出以后,选取其中最大的 x 值

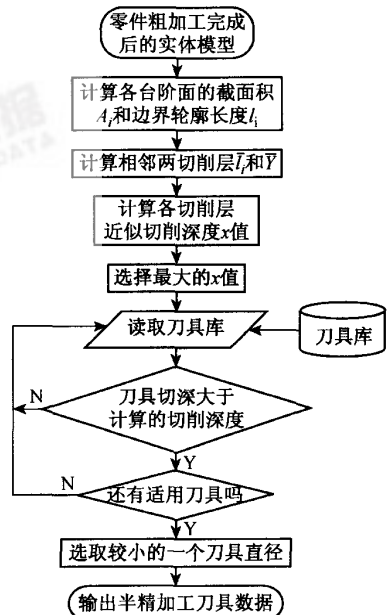


图 4 半精加工刀具自动选择流程图

Fig. 4 Flowchart of the tool selection for semi-roughing

作为半精加工的选刀依据. 这样, 根据待选刀具的最大切深必须大于这个 x 值的要求, 可以从刀具库或检验公式 $D=x/0.6$, 获得半精加工刀具尺寸大小.

1.4 精加工刀具的自动选择

精加工主要是将材料加工到最后要求的尺寸形状以及需要达到的精度. 它追求的是加工质量, 因而加工时间放在第 2 位. 为了能加工成零件的几何形状, 精加工的刀具直径必须小于零件表面的最小曲率半径 r . 另一方面, 如果曲率半径过小, 将给选刀带来很大困难, 此时可以检查刀具库, 如果刀具库里没有直径比零件表面最小曲率半径小的刀具, 则选择最小直径刀具. CATS 系统中精加工自动选刀过程步骤可归纳如图 5 所示.

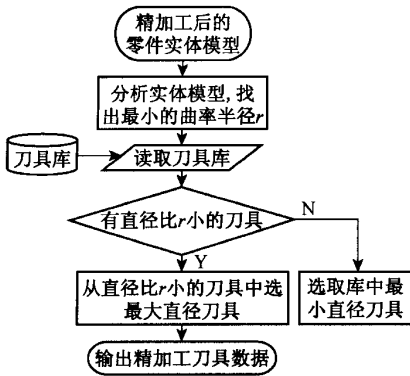


图 5 精加工刀具自动选择流程图

Fig. 5 Flowchart of the tool selection for finishing

可见, 精加工的选刀过程非常简单, 关键是要根据模型求出零件的表面最小曲率半径^[5].

2 实例

本文介绍的刀具自动选择方法以及优化模型已成功应用于 CAPP 系统软件的 CATS 功能模块之中, 图 6 为该模块的系统框架图.

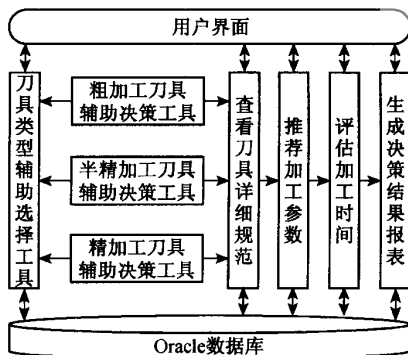


图 6 CATS 系统框图

Fig. 6 Framework for a CATS system

图 7 为系统对一个含有自由曲面以及 2 个岛的型腔实体模型进行分析的界面. 图 8 为优化的结果. 未使用 CATS 系统进行优化前该模具实际生产过程中粗加工选择 D30 和 D8 的刀加工, 其生产时间约为 8.47 min, 粗加工剩余体积约为 24 092.298 7 mm³, 占待加工总体积的 7.92%. 而从图 8 中看出, 优化后生产时间约为 7.14 min, 粗加工剩余体积仅为 6.342%, 可见生产效率明显提高. 实验结果表明, 对复杂的多腔体零件加工的刀具选择, 其优化效果更好.



图 7 刀具组合优化窗口

Fig. 7 Window for the tool set optimization

粗加工刀具组合优化结果			
刀具直径 [0.00]	加工速度位置 [74.9589]	加工结束位置 [60.0000]	
刀具刀高 [0.00]	加工速度位置 [20.0000]	加工结束位置 [55.0000]	
刀具直径 [8.000]	加工速度位置 [55.0000]	加工结束位置 [54.0000]	
刀具直径 [10.000]	加工速度位置 [54.0000]	加工结束位置 [53.0000]	
刀具加工时间 [224567.8323]	刀具加工时间 [3.5677]		
刀具加工时间 [52049.3407]	刀具加工时间 [2.7252]		
刀具加工时间 [4446.8972]	刀具加工时间 [0.2910]		
刀具加工时间 [3883.3478]	刀具加工时间 [0.4972]		
增加加工时间 (分钟)		7.1412	
粗加工剩余体积 (立方毫米)		19292.2509	
剩余体积百分比		6.342%	
说明: 刀具直径和加工速度位置均为毫米, 加工结束位置为毫米。 加工时间单位为分钟, 加工时间单位为分钟。			
[OK] [Back] [Cancel]			

图 8 粗加工刀具组合优化结果

Fig. 8 The optimal results of the tool set for roughing

结 语

本文论述了粗加工、半精加工和精加工中 CATS 的基本流程, 提出了粗加工中实现多刀组合优化的基本方法步骤和和算法. 应该指出, 由于金属的切削过程千变万化, 存在很多不确定因素, 难以被精确描述, 选择刀具时很难对全部因素进行考察, 这样, 切削刀具的选择必然存在不确定性质. 因此, CATS 是一个需要不断完善的系统, 考虑的因素越多, 选择出的刀具就越合理, 优化的效果也将越明显. 比如在实际选刀过程中, 还要考虑诸如机床刀具的切削刚性、切削用量的优化等因素. 因此, 尚待进一步深入研究探索.

(下转第 120 页)

动对加工误差的影响较小,可采用小的进给速度进一步消除它的影响,故浮动跟刀架具有振动的补偿控制作用,可大幅度地提高细长轴的加工质量.细长轴振动幅值最大位置处是以走刀速度的1/2沿轴向运动的,这给进一步控制振动、减轻振动提供了依据.

参考文献:

- [1] Shawky A, Rosenberger T, Elbestawi M. In-process monitoring and control of thickness error in machining hollow shafts [J]. *Mechatronics*, 1998, 8(4): 301-332.
- [2] Park Cheol-Woo, Kim Dae-Eun, Lee Sang-Jo. Shape prediction during the cylindrical traverse grinding of a slender workpiece [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 88(1-3): 23-32.
- [3] Choudhury S K, Sharath M S. On-line control of machine tool vibration during turning operation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 47(3-4): 251-259.
- [4] Chiou R Y, Liang S Y. Chatter stability of a slender cutting tool in turning with tool wear effect [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 1998, 3(2): 315-327.
- [5] 黄跃华, 张景勤, 李德滋. 细长轴车削特性的研究 [J]. *科技通报*, 2001, (4): 41-45.
- HUANG Yue-hua, ZHANG Jing-qin, LI De-zi. Research on dynamic properties for the slender shaft [J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2001, (4): 41-45.
- [6] 季文美, 方同, 陈松淇. *机械振动* [M]. 北京: 科学出版社, 1985. 120-180.

(上接第116页)

参考文献:

- [1] Lai W, Faddis T, Robert S. Incremental algorithms for finding the offset distance and minimum passage width in a pocket machining tool path using the Voronoi technique [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, 100(1): 30-35.
- [2] Lee Y S, Choi B K, Chang T C. Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining [J]. *International Journal of Production Research*, 1992, 30(6): 1447-1470.
- [3] Lee Y S, Fang S C. Optimal cutter selection and machining plane determination for process planning and machining of complex surfaces [J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 1998, 17(5): 371-388.
- [4] Lin A C, Wei C L. Automated selection of cutting tools based on solid models [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997, 72(3): 317-329.
- [5] Lee Y S, Chang T C. CASCAM: An automated system for sculpture surface cavity machining [J]. *Computers in Industry*, 1991, 16(3): 321-342.



主动约束层阻尼杆结构纵振的多层谱有限元法

王 森, 方之楚

(上海交通大学 工程力学系, 上海 200030)

摘要: 针对主动约束层阻尼(ACL D)覆盖的杆结构的纵向振动, 采用一种新型的多层谱有限元法(MLSFEM)进行研究. 该方法能避开使用谱有限元法(SFEM)须求解带未知参数的高阶特征方程以形成动力形状函数的困难, 同时又保留 SFEM 仅用很少单元却精度高的优点. 采用 MLSFEM 的典型算例表明, 该方法比有限元法(FEM)更有效、精确. 此外, 研究了不同控制策略对悬臂 ACL D 杆结构频响函数的影响.