

三角网格模型五轴加工刀轴矢量调整及优化

祁杨停, 黄常标, 林俊锋

(华侨大学 厦门市数字化视觉测量重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为消除全局干涉,提出了一种基于 K-D 树及刀具离散的高效刀轴矢量调整算法.算法首先以有限个点离散表示刀具,然后利用 K-D 树快速查找刀具的可能干涉点,并在此基础上计算调整后的刀轴矢量.为避免过大的刀轴矢量突变,提出一种分角度区域方法优化刀轴矢量.实例验证表明:算法能够高效实现全局干涉避免及刀轴矢量优化.

关键词: 五轴数控加工;全局干涉避免;刀轴矢量优化;K-D 树检索

中图分类号: TG 659; TP 391

文献标志码: A

三角网格模型因定义简单明确、拓扑适应能力强而成为几何模型的主要表示形式之一,并且广泛应用于逆向工程、快速原型等领域.在加工复杂曲面方面,五轴数控加工可以获得比三轴加工更好的加工质量和更高的加工效率^[1].刀轴矢量控制是五轴数控加工的关键问题,不仅关系着零件的加工质量和效率,更与机床设备的性能息息相关.刀轴矢量研究主要分为两方面:一是避免刀具全局干涉的刀轴矢量调整;二是避免刀轴突变过大的刀轴矢量优化.目前,提高全局干涉检索效率的方法主要是建立基于空间对象的模型检索数据结构,如八叉树和 OBB 包围盒相结合的算法^[2]和 BSP 树检索方法^[3]等.为提高检索效率,一般将连续的刀具模型离散化,通过几何求交判断干涉^[4];或以垂直于刀具的法矢与被加工表面求交判断全局干涉^[5].刀轴矢量不仅会影响加工质量和加工效率,还与机床旋转轴运动和切削力变化有关.因此,近年来国内外众多学者对刀轴矢量优化进行了大量研究,并提出了多种算法:1)在同一切削行或同一区域内固定刀轴,如基于区域划分的方法^[6]、基于分行定轴的方法^[7]等;2)基于刀具可达性的方法^[8-9];3)符合机床刚度性能和运动学特性的方法^[10-12];4)相邻刀轴矢量插值计算,常用的方法是四元数插值法^[13-14].但这些方法存在使用范围窄,或计算复杂,耗费大量时间等缺点.本文结合三角网格模型的表示特点,基于 K-D 树检索方法,提出一种高效的全局干涉处理算法,一种分角度区域的刀轴矢量优化策略.

1 五轴数控加工全局干涉避免

全局干涉检测时往往需要遍历搜索整个被加工模型,从而判断可能发生干涉的区域.因此,提高模型搜索效率是加快全局干涉检测的关键.

1.1 刀具离散模型

为了从包含大量数据的模型中快速找到可能的干涉点,须建立模型数据的快速检索数据结构.K-D 树^[15]是基于点区域划分的空间索引结构,具有存储需求低、高效查询等优点^[16].基于 K-D 树检索可采用范围查询,创建 K-D 树时,以三角网格模型的顶点作为输入数据,顶点坐标 X, Y, Z 为划分依据.通过 K-D 树的创建,建立三角网格模型顶点的空间检索拓扑信息,可快速检索刀具的可能干涉点.

收稿日期: 2013-09-13

通信作者: 黄常标(1976-),男,教授,主要从事数字化设计制造技术、计算机图形学、逆向工程的研究. E-mail: huangcb@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51105150);福建省自然科学基金资助项目(2013J01190);华侨大学中青年教师科研提升资助计划(ZQN-PY102)

球头刀加工适应性强,且生成刀具轨迹相对简单等优点^[17].为减少 K-D 树的检索次数,沿刀轴方向离散刀具,以有限个点来表示刀具,离散示意图如图 1 所示.图 1 中:点 O 为刀心点;刀具半径为 r ;刀柄半径为 R ; L 为刀杆长度; H 为刀具全长;虚线表示检索范围;点 $P_i(i=0,\cdots,n)$ 表示刀杆第 i 个离散点; P_j 为刀柄离散点.

刀具离散的原则是:从刀心点 O 开始,沿刀轴方向等距离离散,检索范围需覆盖整个刀杆和刀柄.

1) 刀具离散距离 h 由刀具体具体情况确定, h 过大,会造成干涉点检索不完整,影响干涉检测结果; h 过小,则增加了刀具离散点数,耗费 K-D 树查找时间和干涉检测时间. P_0 与刀心点 O 之间距离为 h ,为保证搜索范围的完整性,检索范围均定为 d ,且 $d=\sqrt{h^2+r^2}$.

2) 以离散距离 h 、检索范围 d 为离散参数,沿刀轴方向确定离散点 P_i ,直到检索范围覆盖整个刀杆,最后一个离散点的检索范围应超出刀杆长度.刀杆的有限离散点个数为 $n=\text{floor}((L-r)/h)$,其中: $\text{floor}()$ 函数为下取整函数.

3) 若离散点 P_n 的检索范围未完全覆盖刀杆末尾部分,即当 $r^2+(L-r-n\cdot h)^2>d^2$ 时,需在 P_n 后再添加一个离散点,直到 P_n 满足离散原则.否则,刀杆离散完毕.

4) 鉴于刀柄具有较小的长宽比,不适合多次离散,以刀柄中心为离散点 P_j ,以 D 为检索范围.其中: $D=\sqrt{R^2-((H-L)/2)^2}$.

1.2 全局干涉快速检测及避免方法

刀具离散后,以刀具的有限个离散点 P_0,\cdots,P_n,P_j 作为 K-D 树的检索中心,以对应的检索范围作为 K-D 树查询范围.首先搜索模型中可能发生干涉的目标顶点,然后,计算目标顶点到刀轴的距离,并判断是否发生干涉,如果存在干涉则调整刀轴矢量以消除干涉.

1) 干涉误判点的识别

干涉顶点判别时,刀杆检索中心对应的目标顶点需位于刀杆长度范围内,而刀柄检索中心搜索到的目标顶点应在刀柄内.根据上述刀具离散方法,刀杆及刀柄会出现干涉误判区域,误判情况如图 2 所示.图 2(a)中:点 p_i 为检索中心 P_n 搜索到的目标顶点,该点到刀轴的距离小于刀具半径 r ,是刀杆干涉顶点,但该点在刀柄内,超出了刀杆长度范围,属于刀杆干涉误判顶点.图 2(b)中:点 p_i,p_j 为检索中心 P_j 搜索到的目标顶点,两点到刀轴的距离均小于刀柄半径 R ,但这两点都不在刀柄内,属于刀柄干涉误判顶点.因此,针对 P_n,P_j 搜索到的目标顶点,应先判断其是否符合当前检索中心条件.对于刀杆检索中心,其搜索到的目标顶点的 z 坐标值应满足 $z\in[0,L-r]$;由刀柄检索中心搜索到的目标顶点的 z 坐标值应满足: $z\in[L-r,H-r]$.

2) 刀轴矢量调整计算

计算目标顶点 P 到刀轴的距离 d_T .设刀轴单位矢量为 T ,则 $d_T=\|\mathbf{OP}\times\mathbf{T}\|$.通过比较 d_T 与刀具半径 r 或刀柄半径 R 的大小判断 P 点是否为干涉点,找出各检索中心对应的最大干涉点及干涉距离.

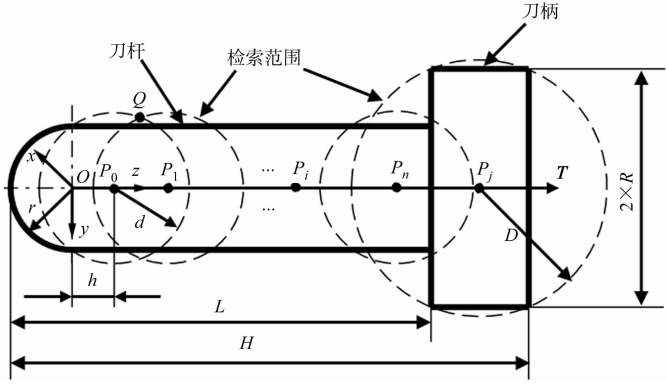
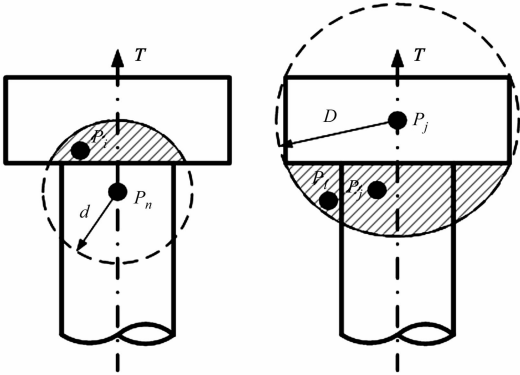


图 1 刀具离散模型

Fig. 1 Cutter discretized model



(a) 刀杆干涉误判 (b) 刀柄干涉误判

图 2 刀杆误判处理

Fig. 2 Misjudgment of of tool rod

Figure 1 consists of two diagrams. Diagram (a) shows a 3D coordinate system with principal stress directions T_1 , T_2 , and T_3 originating from point O . The principal stresses are p_1 , p_2 , and p_3 . Distances d_1 , d_2 , and d_3 are marked along these directions. Diagram (b) shows a vector v from point P to point Q on the T_1 axis. The distance from O to Q is $r(R)$, and the angle between T_1 and OQ is θ .

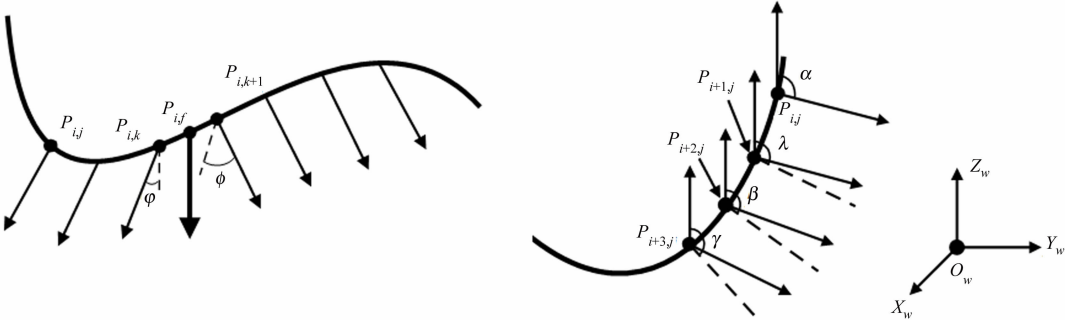
Fig. 3 Tool axis vector adjustment strategy

插入点的刀轴单位矢量为

$$\mathbf{T}_k = \frac{(\mathbf{T}_{i-1} + \mathbf{T}_i)/2}{\|(\mathbf{T}_{i-1} + \mathbf{T}_i)/2\|}.$$

(8)

分角度区域刀轴矢量调整策略,如图 4 所示.图 4(a)中:刀位点 $P_{i,j}$ 到 $P_{i,k}$ 间的刀轴矢量均一致;刀位点 $P_{i,k+1}$ 对应的刀触点法矢 $N_{i,k+1}$ 与未优化前的刀轴矢量 $\mathbf{T}_{i,k+1}$ 的点积小于 $\cos \theta$;刀轴矢量突变角度过大.



(a) 同一轨迹上的刀轴矢量调整

(b) 相对 Z 轴矢量的刀轴矢量调整

图 4 分角度区域刀轴矢量调整策略

Fig. 4 Adjustment strategy of tool axis vector based on angled region

刀轴矢量优化方法为:点 $P_{i,k+1}$ 处的刀轴矢量设定为该点处对应的初始刀轴矢量,按式(7)在点 $P_{i,k}$ 与 $P_{i,k+1}$ 间插入一个新刀位点 $P_{i,f}$,并根据式(8)计算 $P_{i,f}$ 处的刀轴矢量,从而达到减小刀轴矢量剧烈突变的效果.

2) 若对应刀触点的法矢与 Z 轴矢量的夹角大于或等于设定的角度阈值 λ ($90^\circ < \lambda < 180^\circ$),则调整刀轴矢量使其与 Z 轴的夹角略小于 λ .

刀位点 P_i 的刀轴矢量相对于 Z 轴矢量的不合理判别方法为

$$N_i \cdot Z \leq \cos \lambda.$$

(9)

式(9)中: N_i 为刀位点 P_i 对应的刀触点单位法矢.

相对于 Z 轴矢量的刀轴矢量优化方法是:以刀位点 P_i 为旋转中心,将刀轴矢量 \mathbf{T}_i 沿 Z 轴矢量方向旋转角度 δ ,保证调整后 \mathbf{T}_i 与 Z 轴矢量的点积大于 $\cos \lambda$,其中: $\delta = \lambda - (5^\circ \sim 10^\circ)$, λ 的取值大小与机床相关,保证 λ 在刀具旋转角度范围内且主轴与工作台不发生碰撞.

由图 4(b)可知:点 $P_{i+1,j}$ 处的点积等于 $\cos \lambda$, $P_{i+2,j}$, $P_{i+3,j}$ 处的点积均小于 $\cos \lambda$,不满足机床要求量.按照上述优化方法,分别调整点 $P_{i+1,j}$, $P_{i+2,j}$, $P_{i+3,j}$ 的刀轴矢量:分别以各刀位点为旋转中心,将刀轴矢量沿 Z_w 轴方向旋转角度 $\lambda - \delta$, $\beta - \delta$ 和 $\gamma - \delta$,使其与 Z_w 轴矢量的点积大于 $\cos \lambda$.

分角度区域算法的基础是无干涉刀位轨迹,可获得同一轨迹上相邻刀轴矢量变化较小、较均匀的刀轴集合.与现有方法相比,文中算法可使得同一轨迹上的刀轴矢量变化更小,刀轴平稳性更好;算法计算简单,效率高,耗费时间较少;特别地,算法还考虑了刀轴矢量相对 Z 轴矢量的特殊性,确保了刀轴矢量在实际加工中的可适用性.

3 实验验证

算法在 Visual Studio 2010 环境下编程实现,对全局干涉处理算法和刀轴矢量优化方法进行验证.算法在 Inter(R) Core(TM) i5-2320 CPU 3.00 GHz ,4 GB 内存微机上运行,全局干涉处理前后的刀轴矢量对比,如图 5 所示.由图 5(a)可知:多个刀位点位置发生全局干涉.由图 5(b)可看出:利用提出的全局干涉检测及避免算法,可以有效地避免全局干涉.当相邻刀轴矢量突变角度过大时,同一轨迹上刀轴矢量优化前后对比,如图 6 所示.由图 6(a)可知:1,2,3 处的相邻刀轴矢量,在某些位置会发生相邻刀轴矢量剧烈突变的情况.由图 6(b)可知:在对应的位置添加刀位点并确定合适的刀轴矢量,可以有效缓解和避免相邻刀轴矢量的剧烈突变.相对于 Z 轴矢量的刀轴矢量优化前后对比,如图 7 所示.由图 7(a)可知:刀轴矢量优化前,刀轴矢量与 Z_w 的夹角过大,实际情况下若刀具以该姿态加工,不仅超出了刀具旋

转角度,更会引起主轴与工作台的碰撞. 由图 7(b)可知:利用本算法可以避免此类情况. 由图 5~7 可以看出:本算法能有效实现刀轴矢量的调整和优化.

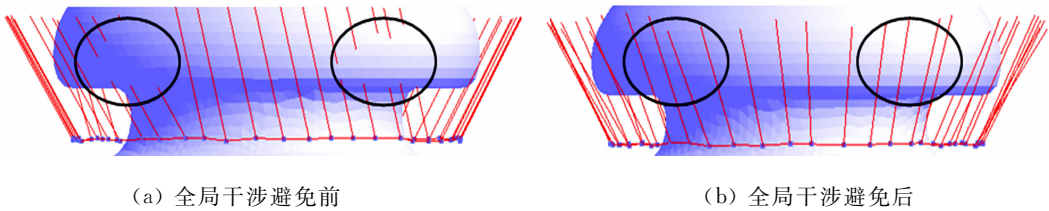


图 5 全局干涉处理前后的刀轴矢量对比

Fig. 5 Comparison of non-avoidable and avoidable global interference

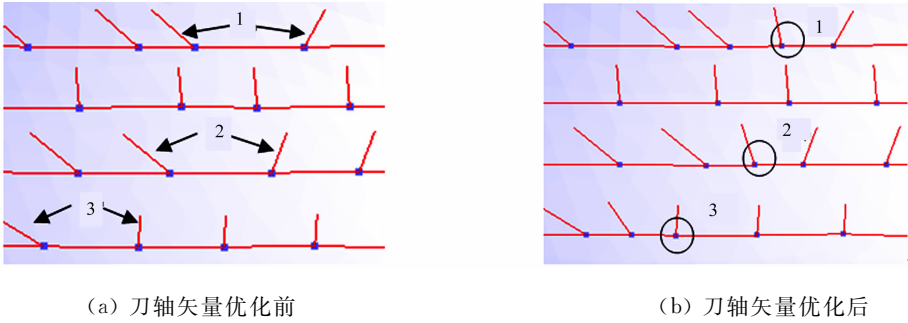


图 6 同一轨迹上刀轴矢量优化前后对比

Fig. 6 Comparison of non-optimized and optimized tool axis vector at the same tool path

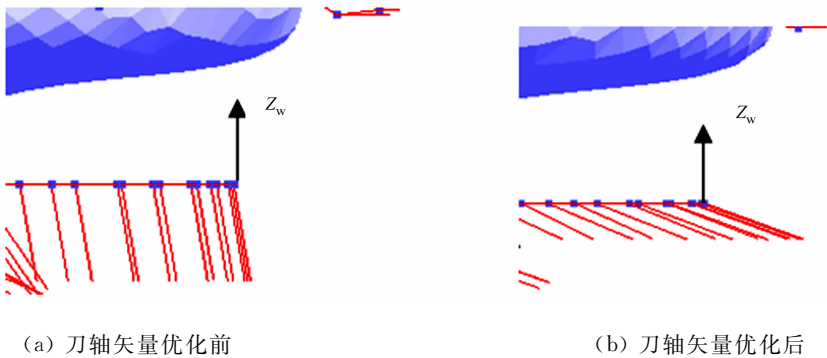


图 7 相对于 Z 轴矢量 III 处的刀轴矢量优化前后对比

Fig. 7 Comparison of non-optimized and optimized tool axis vector relative to the Z axis

4 结束语

刀轴矢量控制对五轴数控加工具有重要意义. 从刀轴矢量调整和刀轴矢量优化两方面出发, 针对三角网格模型, 提出基于 K-D 树快速查找干涉点的全局干涉避免算法, 算法提高了全局干涉避免的效率. 针对刀轴矢量突变角度过大以及相对主轴角度过大的问题, 提出分角度区域的刀轴矢量优化方法, 有效优化了刀轴矢量, 并使其满足实际加工时的刀轴要求.

参考文献:

[1] DAVIM J P. Machining of complex sculptured surfaces[M]. London:Springer Verlag,2012:4-6.

[2] DING S,MANNAN M A,POO A N. Oriented bounding box and octree based global interference detection in 5-axis machining of free-form surfaces[J]. Computer-Aided Design,2004,36(13):1281-1294.

[3] WANG Qing-hui,LI Jin-rong,ZHOU Ru-rong. Graphics-assisted approach to rapid collision detection for multi-axis machining[J]. The International Journal of Adv Hanced Manufacturing Technology,2006,30(9/10):853-863.

[4] 张和明,张玉云,熊光楞. 复杂曲面五坐标数控加工干涉检查及刀位修正[J]. 清华大学学报:自然科学版,1998,38(2):67-70.

[5] 谭光宇,袁哲俊,姚英学. 加工过程碰撞干涉的矢量法检验[J]. 中国机械工程,1999,10(5):513-515.

- [6] 李炳林,王学林,胡于进,等. 基于区域划分的刀具方向控制方法[J]. 中国机械工程,2010,21(4):452-457.
- [7] 任军学,何卿功,姚倡锋,等. 闭式整体叶盘通道五坐标分行定轴加工刀轴矢量规划方法[J]. 航空学报,2012,33(10):1923-1930.
- [8] LI L L,ZHANG Y F,LI H Y,et al. Generating tool-path with smooth posture change for five-axis sculptured surface machining based on cutter's accessibility map[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2011,53(5):699-709.
- [9] 王晶,张定华,罗明,等. 复杂曲面零件五轴加工刀轴整体优化方法[J]. 航空学报. 2013,34(6):1452-1462.
- [10] 闫蓉,彭芳瑜,李斌,等. 多轴数控加工刀具姿态优化及其刚度性能指标分析[J]. 中国机械工程,2008,19(22):2699-2702.
- [11] 罗明,吴宝海,李山,等. 自由曲面五轴加工刀轴矢量的运动学优化方法[J]. 机械工程学报,2009,45(9):158-163.
- [12] 章永年,赵东标,陆永华,等. 平底刀最优刀轴矢量规划算法[J]. 机械工程学报,2012,48(5):180-186.
- [13] HO M C,HWANG Y R,HU C H. Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture,2003,43(12):1259-1267.
- [14] LUO Ming,ZHANG Ding-hua,WU Bao-hai,et al. Tool orientation control using quaternion interpolation in multi-axis milling of blade[C]// Sixth International Conference on Manufacturing Automation. Washington D C: IEEE Computer Society Conference Publishing Service,2010:128-132.
- [15] 栾丽华,吉根林. 树型空间索引及其在聚类中的应用研究[J]. 计算机工程与应用,2005(19):166-169.
- [16] 郑坤,朱良峰,吴信才,等. 3D GIS 空间索引技术研究[J]. 地理与地理信息科学,2006,22(4):35-39.
- [17] 吴宝海,罗明,张莹,等. 自由曲面五轴加工刀具轨迹规划技术的研究进展[J]. 机械工程学报,2008,44(10):9-18.
- [18] 张永超,于洋. 五坐标加工中使用坐标内插法控制刀具轴向研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2011(8):39-42.

Adjustment and Optimization of Tool Axis Vector of Triangular Mesh Model in 5-Axis Machining

QI Yang-ting, HUANG Chang-biao, LIN Jun-feng

(Xiamen Key Laboratory of Digital Vision Measurement, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: According to triangular mesh model, for eliminating the global interference, an efficient algorithm to adjust tool axis vector was presented based on the K-D tree and cutter discretization. Firstly, the cutter was represented with a finite number of discrete points. Then, the possible interference points were found quickly using the K-D tree, and the tool axis vector after adjustment was calculated based on this step. In order to avoid the dramatic change of tool axis vector, a method of angled region was presented to optimize the tool axis vector. The example showed that the algorithm can efficiently achieve the global interference avoidance and the tool axis vector optimization.

Keywords: 5-axis NC machining; avoidance of global interference; tool axis vector optimization; K-D tree retrieval

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 杨建红)