

刀具扫描体与曲面法矢求交新算法

王大镇 冯培锋 韩荣第

(集美大学机械工程学院, 福建 厦门 361021; 哈尔滨工业大学机电学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 提出一种实现刀具扫描体与曲面矢量求交的有效算法. 将扫描体与复杂曲面法矢的求交问题, 转化为三角网格与有向线段之间的求交计算. 建立此两者求交计算的求交子集, 减少以往算法中不必要的求交计算, 提高算法的效率. 文中同时给出, 基于该算法的整体叶轮叶片复杂曲面加工的应用实例.

关键词 复杂曲面, 刀具扫描体, 曲面法矢, 求交算法

中图分类号 TG 710.2; TH 161; TP 319

文献标识码 A

NC 程序的自动化图形验证对于保证数控加工质量, 提高加工效率具有十分重要的意义, 尤其在 5 轴数控加工中心进行整体叶轮这样的复杂曲面铣削加工更是如此^[1~3]. 以往传统的加工仿真系统, 在解决 NC 程序验证的精度检验问题时, 方法不同效果也不同. 其中基于曲面离散技术的 NC 验证方法, 能较好地满足复杂曲面 NC 验证对精度的要求^[4~6]. 该方法首先将设计曲面离散成点集, 并计算各离散点处的曲面法矢, 精度检验通过表面上的点及该点的法矢与刀具扫描体间的求交运算完成. 不难理解, 随着复杂曲面复杂性的增加 (如整体叶轮叶片), 数控铣削程序的行数也会迅速增加, 导致离散点集和刀具扫描体数量的扩大. 因此, 在保证精度的前提下, 提高曲面法矢与刀具扫描体的求交效率是本文研究的重点. 针对这个问题, 本文以整体叶轮叶片复杂曲面 5 轴 NC 程序精度检验为目的, 以提高求交效率为根本出发点以 PC 机为硬件环境, 对曲面法矢与刀具扫描体求交新算法进行了研究.

1 问题描述

本文所要解决的曲面法矢与刀具扫描体求交的问题应满足下面两个前提条件. (1) 设计曲面由离散点集表达为

$$S = \bigcup_{i=1}^m P_i(x_i, y_i, z_i, \mathbf{n}_i), \tag{1}$$

式中 S 代表设计曲面, P_i 代表 S 上的第 i 个离散点, (x_i, y_i, z_i) 为 P_i 在工件坐标系下的坐标值, \mathbf{n}_i 为 S 在 P_i 点的单位法矢量, m 为离散点数. (2) 刀具扫描体由数控程序中相邻两行代码确定, 其边界曲面已根据刀轴扫描面偏置法近似表达为三角网格. 即

$$\partial S_{\sigma}(T) = \bigcup_{f=1}^{n_{ul}} t_{\sigma f}(p_{f1}, p_{f2}, p_{f3}),$$

式中 $\partial S_{\sigma}(T)$ 代表由刀具 T 沿路径 σ 形成的刀具扫描体的边界曲面, n_{ul} 即 Number1, p_{f1} , p_{f2} 和 p_{f3} 为三角面片 $t_{\sigma f}$ (Triangulation _{σf}) 的 3 个顶点, 并按顺时针组织 $t_{\sigma f}$ (Triangulation _{σf}) 的外法矢指向观察者, n_{ul} (Number1) 代表三角面片数.

2 预处理

为减少不必要的求交计算, 首先对曲面法矢与刀具扫描体进行预处理, 建立相应的求交子集.

收稿日期 2004-11-09

作者简介 王大镇 (1962-), 男, 副教授, 博士, 主要从事数控技术的研究. E-mail: dazhenwang@163.com

基金项目 福建省青年创新基金资助项目 (2001J021); 厦门市科技计划基金资助项目 (3502Z20031110)

2.1 曲面法矢的预处理

如图 1 所示, 在以往的求交计算中, 曲面法矢被看作从一点开始, 指向某一方向的有向线段. 这样, 无论刀具如何运动, 都可能存在与其相交的射线, 即要进行相应的求交计算. 但在实际的数控加工中, 刀具的每一次运动, 并不一定都与毛坯发生接触. 因此, 当刀具扫描体并未与毛坯发生接触时的求交计算是完全不必要的. 为解决这一问题, 在实际求交计算之前对曲面法矢进行了预处理. 即求曲面法矢与毛坯外表面的交点 P'_i (为了计算量有限, 假设毛坯外型非常规则), 将曲面法矢转化成沿法矢方向的有向线段, 二者之间的映射表示为

$$P_i(x_i, y_i, z_i, \mathbf{n}_i) \rightarrow S_{ei}(x_i, y_i, z_i, x'_i, y'_i, z'_i, \mathbf{n}_i),$$
式中 (x'_i, y'_i, z'_i) 为曲面法矢与毛坯外表面的交点 P'_i . 至此, 曲面法矢与刀具扫描体的求交问题已转化为有向线段与三角网格的求交问题.

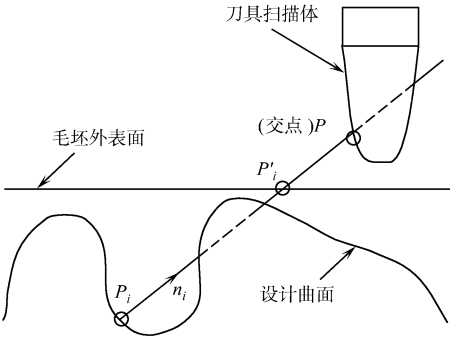


图 1 曲面法矢与刀具扫描体的求交示意图

2.2 刀具扫描体的预处理

对每个刀具扫描体而言, 并不是所有的有向线段都可能与其相交. 大多数情况下, 与刀具扫描体相交的有向线段只是很少的一部分. 为进一步减少不必要的求交计算, 采用立方体作为的包容盒, 包容盒定义为 $C_o(x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}, z_{min}, z_{max})$, 式中 $x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max}, z_{min}$ 和 z_{max} , 代表包容盒在工件坐标系下沿坐标轴方向的极限值. 如果有向线段不与包容盒相交, 则它一定不会与刀具扫描体相交. 这样, 就可直接将这些有向线段删除, 不必进行与刀具扫描体的求交计算.

2.3 有向线段求交子集的建立

据 $S_{ei}(\text{Segment}_i)$ 与 $C_o(\text{Container})$ 间几何位置关系, 可做出 S_{ei} 与 C_o 相交判断. S_{ei} 可能与刀具扫描体相交, 存入有向线段求交子集 $S_{es}(\text{Segment Subset})$ 中; 否则, 删掉. 有向线段求交子集定义为

$$S_{es} = \bigcup_{j=1}^n S_{ej},$$

式中 $n < m$ 代表扫描体离散点总数.

2.4 三角面片求交子集的建立

5 轴刀具扫描体边界曲面的表达往往需要成百上千个三角面片, 其导致的求交计算量非常大. 但如图 2 所示, 精度检验求交计算的目的是要确定过点 P_j 和 P'_j 的直线, 沿 \mathbf{n}_j 方向与刀具扫描体的第一个交点 P_1 . 因此, 求交计算过程中, 只需考虑满足条件(2)的三角面片即可. 有 $\mathbf{n}_j \cdot \mathbf{n} \leq 0$, 式中 \mathbf{n}_j 代表有向线段的方向, \mathbf{n} 代表三角面片的外法矢. 根据条件式(2), 可建立与有向线段 $(P_j P'_j)$ 相对应的三角面片求交子集为

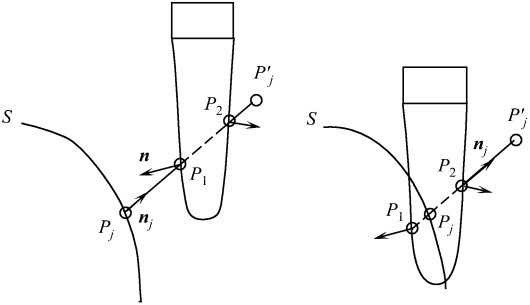


图 2 方向判断示意图

$$T_{rs}(P_j P'_j) = \bigcup_{e=1}^{n_{u2}} t_{re},$$

式中 T_{rs} 即 Triangulation Subset, $n_{u2} < n_{u1}$ 但不同的有向线段对应不同的三角面片求交子集.

3 求交运算

3.1 求交分析

图 3 有向线段与三角面片间的位置关系有 3 种情况. (1) 不相交(图 3a). (2) 交点在有向线段上(图 3b). (3) 交点在有向线段的反向延长线上(图 3c). 图 3 用有向体积(Signed Volume)^[1] 概念区分这几种情况. 设 $A(x_a, y_a, z_a), B(x_b, y_b, z_b), C(x_c, y_c, z_c)$ 和 $D(x_d, y_d, z_d)$ 为空间 4 点, 它们形成的四面体的有向体积定义为

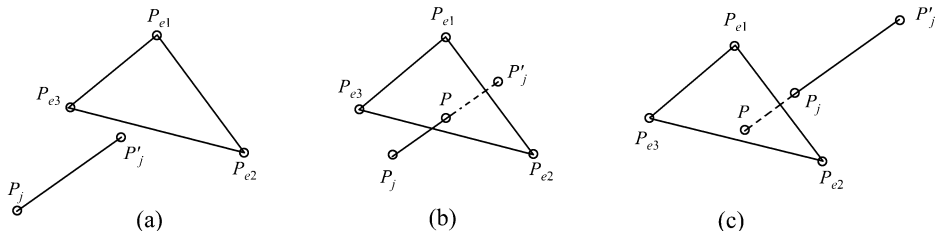


图 3 有向线段与三角面片的位置关系

$$[DA BC] = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} x_a & y_a & z_a & 1 \\ x_b & y_b & z_b & 1 \\ x_c & y_c & z_c & 1 \\ x_d & y_d & z_d & 1 \end{vmatrix},$$

如果从点 D 向 $\triangle ABC$ 看去, A, B, C 这 3 点按顺时针连接, 则 $[DA BC] > 0$. 由计算机图形学中提出的用有向体积解决点的包容性测试的问题, 即判断空间一点是否位于某实体内部的问题, 可知空间一点 Q 位于四面体 $(OABC)$ 内的充要条件为

$$[QAB C] \geq 0, \quad [QAC B] \geq 0, \quad [QAO B] \geq 0, \quad [QBO C] \geq 0.$$

若点 Q 位于四面体 $(OABC)$ 内, 换个角度讲, 也就是说线段 (CQ) 的延长线与三角形 (AOB) 所在的平面相交, 且交点属于三角面片. 因此, 对有向线段 $(P_j P'_j)$ 和三角面片 $(P_{e1} P_{e2} P_{e3})$ 的空间位置可作如下判断. (1) 如果满足不等式方程组 (3), 则交点位于有向线段 $(P_j P'_j)$ 上. 有

$$\begin{cases} [P_j P_{e1} P_{e2} P_{e3}] \geq 0, \\ [P'_j P_{e1} P_j P_{e2}] \geq 0, \\ [P'_j P_{e3} P_j P_{e2}] \geq 0, \\ [P'_j P_{e1} P_{e3} P_j] \geq 0. \end{cases} \quad (3)$$

(2) 如果满足不等式方程组 (4), 则交点位于有向线段 $(P_j P'_j)$ 的反向延长线上. 有

$$\begin{cases} [P_j P_{e1} P_{e2} P_{e3}] < 0, \\ [P'_j P_{e1} P_j P_{e2}] < 0, \\ [P'_j P_{e3} P_j P_{e2}] < 0, \\ [P'_j P_{e1} P_{e3} P_j] < 0. \end{cases} \quad (4)$$

3.2 求交计算

如图 3 所示, 由微分几何的知识可知, 有向线段初始点 P_j 在 t_{re} (Triangulatione) 法矢上的投影为 $n_e \cdot p_j$. 投影点距离此三角面片某一点的距离为 $n_e \cdot p_j - (Ax_0 + By_0 + Cz_0)$, 则有向线段初始点 P_j 到 t_{re} 所在平面的有向距离 L_j 为

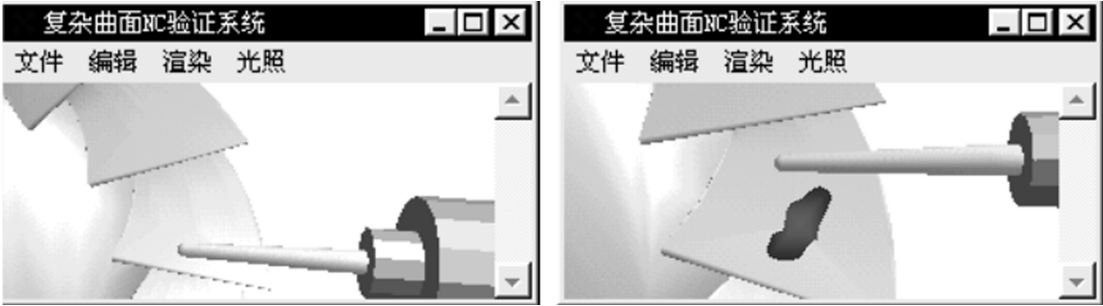
$$L_j = \frac{((n_e \cdot p_j) + D)}{n_e \cdot n_j}, \quad (5)$$

式中 n_e 代表 t_{re} 的单位外法矢, p_j 为点 P_j 的矢量形式, n_j 为有向线段的方向矢量, D 是与 t_{re} 所在平面有关的系数. 该平面可表达为 $Ax + By + Cz + D = 0$. 将三角面片的任意一点坐标值代入上式, 可计算得到系数 D . 这样, 有向线段与三角面片所在平面的交点 P'_j 可用矢量形式表达为

$$p'_j = p_j + L_j n_j. \quad (6)$$

4 应用实例

以上述内容为理论基础. 我们开发了曲面法矢与刀具扫描体的求交算法, 并将其集成在我们利用 Visual C++ 6.0 自主开发的复杂曲面 NC 验证软件系统中. 图 4 所示, 它为用锥球头铣刀加工整体叶轮叶片时的情景. 图中的黑色区域表示当铣刀加工中经过叶片表面产生过切. 过切表明该区域的曲面法矢与刀具扫描体之间的有向距离 L_j 为负, 且超出了设计误差. 图中的仿真环境为瑞士 Bevilard 公司的 5 轴加工中心 WAHLI200; 锥球头铣刀为前角 $\alpha = 5^\circ$, 球头半径 $r = 3 \text{ mm}$; 运行环境为奔腾 IV 个人电脑.



(a) N50 执行前的图像 (b) N50 执行后的图像

图 4 整体叶轮叶片 NC 程序验证精度检验实例

1G, 256M 内存. 测试的数控程序为

```
N40 G01 X15.120 Y0.270 Z-15.790 A0.000 B18.720,  
N50 X21.610 Y0.640 Z-12.760 A5.160 B18.720(设计误差为:  $T_m = T_g = 0.1\text{ mm}$ ).
```

5 结 束 语

介绍了一种用于实现复杂曲面 NC 精度检验的曲面法矢与刀具扫描体求交的新算法. 将刀具扫描体与曲面法矢之间的求交运算, 转化为有向线段和三角网格间的求交问题. 由于避免了非线性方程组的求解, 因而其算法的效率及检验过程的稳定程度都得到了显著的提高.

参 考 文 献

1 Oliver J H, Goodman E D. Direct dimension NC verification[J]. Computer Aided Design, 1990, 22(1) : 3~ 9
2 韩向利, 袁哲俊, 肖田元. 直线与刀具扫描体求交算法及其应用研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 1997, 9 (2): 123~ 129
3 Liu Chong, Donald Esterling. Solid modeling of 4 axis wire EDM cut geometry[J]. Computer Aided Design, 1997, 29(12): 803~ 810
4 Robert L D, Robert B J, et al. Discrete simulation of NC machining[J]. Algorithmic, 1989, 4: 33~ 60
5 王大镇, 韩荣第. 结构运动的特性矩阵的 NC 程序验证及效果[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2003, 24(3): 275~ 280
6 刘雄伟, 王增强. 五坐标数控加工后置处理[J]. 组合机床与自动化加工技术, 1994(1), 35~ 40

A New Algorithm for Seeking the Intersection of Tool Sweep Volume with Surface Normal during NC Machining of Impeller Surface

Wang Dazhen Feng Peifeng Han Rongdi

(College of Mechanical Engineering, Jimei University, 361021, Xiamen, China;
College of Electromechanical Engineering, Harbin Institute of Technology, 150001, Harbin, China)

Abstract An effective algorithm is presented here for seeking and realizing the intersection of tool sweep volume with surface vector. The intersection of sweep volume with complicated surface normal is transformed into computation of intersection between triangular mesh and directed line segment. The efficiency of algorithm is enhanced by setting up intersection subset of these two in the previous algorithm. An example is given here to show the application of this algorithm to the complicated surface machining of impeller vanes as a whole.

Keywords sculptured surface, tool sweep volume, surface normal, intersection algorithm