

数控加工无干涉刀具轨迹生成的偏置算法

杨勇生 王冷干 王珉

(南京航空航天大学机电工程学院, 南京 210016)

摘要 提出了用偏置方法来检查复杂曲面 NC 加工的刀具干涉及生成相应的刀具轨迹。通过对加工曲面进行上包络偏置表面操作, 以及边界曲线“保护表面”的引入和导动平面与加工曲面求交时出现的非唯一性问题的处理, 可获得一种生成 3 轴 NC 加工无干涉刀具轨迹的通用算法。该方法实现简单, 算法稳定, 具有广泛的适用范围。

关键词 CAD/CAM, 数控加工, 偏置表面, 干涉

1 引言

在复杂曲面数控加工中, 如何确定各类刀具(球头刀, 平底刀和环形刀)的无干涉刀具轨迹, 至今仍是一个十分棘手的难题。特别是由于非球面刀的形状各异, 且不具有球头刀的法矢自适应性, 因而与球头刀相比, 在生成刀具轨迹进行干涉检查时更困难。3 轴 NC 加工与 5 轴加工相比, 简单的几何运动便于计算、模拟和实现, 操作较容易, 而 5 轴加工仅限于 3 轴不能加工或需提高加工效率的情况。可见, 3 轴 NC 加工仍具有较广泛的应用范围。因此, 研究 3 轴 NC 加工无干涉刀具轨迹的生成算法仍具有重要的现实意义。本文提出了一种 NC 加工干涉处理的新算法。该算法首先对加工曲面进行偏置处理, 定义曲面边界的偏置曲线, 然后用一组导动平面去截加工曲面的偏置表面, 得一组偏置表面的交线, 通过对偏置表面交线进行上包络操作处理, 可生成一条无干涉的刀具轨迹。该方法适用于 3 轴球头刀和非球面刀 NC 加工的情况, 具有良好的通用性。

2 加工曲面的偏置

2.1 偏置表面的定义

偏置表面的定义如下:

定义 1 设 $S=S(u, v)$ 是 C^1 连续的曲面, P 是

其上一点, τ_p 为 S 面在 P 点处的切平面, 则 P 点的偏置点 $S_{off}(P)$ 为刀具控制点(刀具顶点)的位置, 且刀具完全位于 S 曲面 P 点处的外法线切 τ_p 平面的半空间内。

图 1 为 3 种常用刀具: 球头刀, 环形刀和平底刀 P 点处的偏置点 $S_{off}(P)$ 的定义。曲面 S 的偏置表面 $S_{off}(S)$ 则为 S 曲面上所有点 P 的 $S_{off}(P)$ 的集合。在 3 轴加工的情况下, 偏置表面 $S_{off}(S)$ 一般可表示为:

$$S_{off}(S) = S(u, v) + F(\mathbf{n}(u, v), T_{geom}) \quad (1)$$

式(1)中 F 为曲面单位法矢 \mathbf{n} 和刀具形状 T_{geom} 的函数, 刀具的几何形状可用刀具半径 R 和圆角半径 r 来表示, 在整个加工过程中均为常数, 因而 $S_{off}(S)$ 只是参数 u, v 的函数。3 种典型刀具的 $S_{off}(S)$ 可分别表示如下:

球头刀:

$$S_{off}(S) = S(u, v) + R \times (\mathbf{n}(u, v) - T_{axis}) \quad (2)$$

环形刀:

$$S_{off}(S) = S(u, v) + r \times (\mathbf{n}(u, v) - T_{axis}) + (R - r) \times \mathbf{n}_{xy} \times (u, v) \quad (3)$$

平底刀:

$$S_{off}(S) = S(u, v) + R \times \mathbf{n}(u, v) \quad (4)$$

式(2~4)中 T_{axis} 为刀具轴向单位矢量, \mathbf{n}_{xy} 为 $\mathbf{n}(n_x, n_y, n_z)$ 在 xy 平面上的单位法向投影。如图 2 所示, 为平底刀加工时 $S_{off}(S)$ 构成的一个例子。

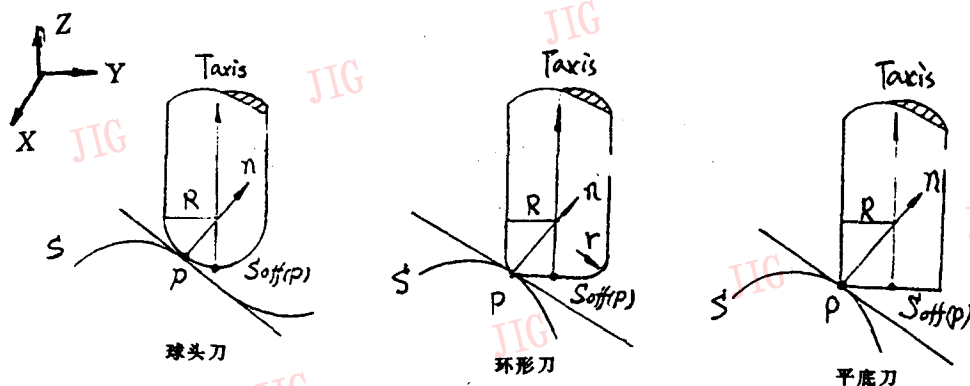


图 1 3种典型刀具加工时偏置点 $S_{off}(P)$ 的定义

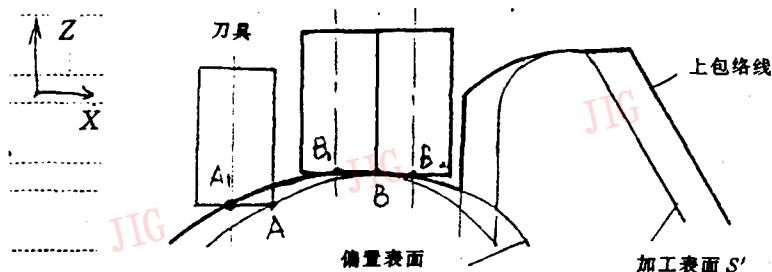


图 2 平底刀加工时偏置表面的构成

2.2 非唯一性问题及其处理

如图 3 所示,为偏置表面非唯一性问题的处理(由图 2 在 xy 平面上投影所得的局部图形)。当刀具在 B 点与加工曲面接触时,加工曲面的法矢 $n(u, v)$ 与刀具轴线 T_{axis} 平行,刀具可以接触点 B 点为圆心旋转,刀具中心点轨迹为以 r 为半径的圆,即由于曲线 C 的包络 $E(u, v)$ (详见第 3 节中定义)在此附近没有明确的定义,包络 $E(u, v)$ 出现一个“圆环”。这时其偏置表面不是唯一的(图 2 中 yz 平面内的 B_1 和 B_2 点,图 4 中 xy 平面内圆环)。从加工角度来看,“圆环”中的每一点都代表一个刀位,刀具在此位时,

在局部范围内没有干涉现象。在该区域偏置表面与导动平面求交时,Newton-Raphson 法注定找不到交线,这种非唯一性问题会出现令人困惑的异常现象。为此,给定一个区间 $[x', x'']$,在参数的定义域作进一步的递推来求出此交线,即在 2 端点间选一个 v 值(图 3 中 v 值为 0.49),且让此等参数曲线 $E(u, 0.49)$ 与 xz 平面相交。由于曲线 $E(u, v)$ 的连续性,则至少存在一个交点 x_1 位于 x' 和 x'' 之间。然后采用射线跟踪法来处理两新的区间 $[x', x_1]$ 和 $[x_1, x'']$,直至当前区间的 2 个端点的 u, v 参数间隔非常接近时停止。

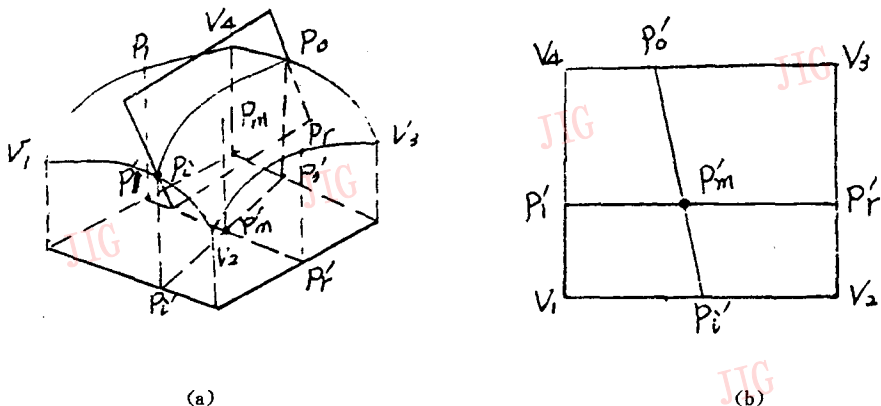


图 3 偏置表面非唯一性问题的处理

3 边界偏置曲线

进行复杂曲面 NC 加工时,干涉现象可能发生于加工曲面的边界(或连续)处。这是由于这些边界没有受到偏置表面足够保护的缘故。一般地,对于曲面 S 的边界点 P ,存在无数个刀位让刀具与 P 点接触,因而在边界点 P ,单靠 $S_{off}(P)$ 来保护干涉是不充分的,故我们引入了“保护表面”的概念。在偏置函数 $S_{off}(P)$ 中加入另一参数 n (n 为曲面切平面 τ_p 的单位法矢),变为 $S_{off}(P, n)$ 。在几何上, $S(P, n)$ 定义了刀具的控制点,刀具表面包含了边界点 P ,且该点的法向量为 n ,保护表面的定义如下:

定义 2: 设 S^2 为中心位于原点的单位上半球,即 $S^2 = \{(x, y, z): z \geq 0, \text{且 } x^2 + y^2 + z^2 = 1\}$,则 3D 空间内点 P 的保护表面为:

$$\text{grd}(P) = \{S_{off}(P, n); n \in S^2\} \quad (5)$$

设 C 是 3D 空间坐标下的 G^1 连续曲线,则 C 的偏置定义为所有点 $\{\text{grd}(P); P \in C\}$ 集合的包络面,即

$$S_{off}(C) = \{\text{grd}(P); P \in C\}^\delta \quad (6)$$

式(6)中符号 δ 表示 3D 点集上的边界操作。

4 偏置表面的应用

如图 2 所示,为导动平面内偏置曲线的生成。在复杂曲面的连接处(C^1 不连续),偏置表面的交线产生相交现象。若按原始偏置曲线进行走刀加工,必然产生刀具干涉,因此必须对原始偏置曲线进行上包络处理。上包络线为一单调函数 $Z=f(x)$,即在给定 x 值的所有相交曲线中,取 $f(x)$ 的最大值。按上包络曲线控制刀具走刀,即可消除干涉现象。如图 4 所示, S_1 和 S_2 两表面在边 E 处相交,对球头刀来说, S_1 和 S_2 的偏置表面 $S_{off}(S_1)$ 和 $S_{off}(S_2)$ 间存在一个间隙,须设法予以连接。若用直线段连接两偏置表面的交线时,则显然会在尖角处发生凸干涉。故一般用刀具半径 R 将此两间断直线连接起来。



图 4 凸干涉的偏置法处理

5 具体实施

5.1 边界偏置表面的处理

虽然保护表面提供了一种有效的干涉保护方法,但它仍然无法直接实现。这因为扫描体积分量的计算 $\{\text{grd}(P); P \in C\}$ 是一个积分计算,其边界表面通常会产生自交现象,这种自交即不能用参数形式定义,也不能用数值形式定义。对此,我们提出了用 3 个表面 $\text{grd}(P_1)$, $\text{grd}(P_2)$ 和 $E(C)$ 来代替偏置表面 $\{\text{grd}(P); P \in C\}^\delta$,其中 P_1, P_2 是曲线 C 的 2 端点,而 $E(C)$ 则是曲线 C 相对于刀具的包络面。这种替代须具备下列 2 个前提条件:(1) $E(C)$ 必须是可用参数或数值定义的;(2) $\text{grd}(P_1)$, $\text{grd}(P_2)$ 和 $E(C)$ 的上包络面必须等于 $\{\text{grd}(P); P \in C\}^\delta$ 。第 1 个条件保证了偏置表面与导动平面的交线可进行数值计算;第 2 个条件保证了提供了与 $\{\text{grd}(P); P \in C\}^\delta$ 同样的干涉保护。

设 P 为曲线 C 上的一点, τ_p 为 C 在 P 点处的单位切矢量,以 $N(P)$ 表示 P 点处的法半圆,为半球面 S^2 与含有原点并垂直 τ_p 的平面交线。

一般地

$$N(P) = \{v; v \in S^2 \text{ and } v \cdot \tau_p = 0\} \quad (7)$$

引入 $N(P)$ 后, P 点处的保护表面 $\text{grd}(P)$ 可重新定义如下:

$$\text{grd}_n(P) = \{S_{off}(P, n); n \in N(P)\} \quad (8)$$

显然, $\text{grd}_n(P)$ 为 $\text{grd}(P)$ 沿曲线 C 在 P 点处切向方向的轮廓,也就是, $\text{grd}_n(P)$ 满足扫描量 $\{\text{grd}(P); P \in C\}$ 的包络标准,而表面 $E(C)$ 则为曲线 C 上所有点 P 的 $\text{grd}_n(P)$ 集合,即 $E(C) = \{\text{grd}_n(P); P \in C\}$ 。假设 $C(u)$ 是 C^1 连续的参数曲线 ($0 \leq u \leq 1$), $E(C)$ 可用参数形式表示

$$\begin{aligned} E(C) = E(u, v) = \text{grd}_n(C(u)) = \\ S_{off}(C(u), N(C(u), v)), \\ 0 \leq u \leq 1, 0 \leq v \leq \pi \end{aligned}$$

由于 $C(u)$ 具有 C^1 连续,曲线 $C(u)$ 上 P 点处平面 τ 的切矢量等于 $\frac{dc}{du} / |\frac{dc}{du}|$,故函数 $N(C(u), v)$ 和 $E(u, v)$ 是连续的,并能在整个 u, v 参数域上进行数值计算。

5.2 具体算法

经过上述算法实施中几个问题的处理,将保护表面与偏置方法结合起来,获得一种生成无干涉刀

具轨迹的通用算法。以环形刀 NC 加工为例,设参数曲面的定义域是 $[u_0, u_n] \times [v_0, v_m]$,控制精度为 δ ,其具体步骤如下:

(1) 计算曲面 S 上的点坐标 $P(u_i, v_j)$ 及其法矢 $n(u_i, v_j)$;

(2) 若 n 不平行于 Z 轴,则计算 n 在 xy 平面上投影 n_{xy} ,偏置点 $S_{off}(u_i, v_j) = P + r \times n + (R-r) \times n_{xy}$;否则,偏置点 $S_{off}(u_i, v_j)$ 为以 P 为中心, $(R-r)$ 为半径的圆环;

(3) 计算曲面上一新的偏置点 $S_{off}(u_i + \nabla u, v_j)$;

(4) 计算弦 $S_{off}(u_i, v_j) S_{off}(u_i + \nabla u, v_j)$ 逼近相应曲线的误差。若 $\epsilon < \delta$, $u_{i+1} = u_i + \nabla u$;若 $u_i < u_n$,转(3),否则转下一步;

(5) 在 u_i 取值范围内均匀采样 u_0, u_1, \dots, u_4 ,且 $u_4 = u_n$;计算用弦 $S_{off}(u_k, v_j) S_{off}(u_k, v_j + \nabla v)$ 逼近相应曲线的误差 ϵ , $k=0, 1, \dots, 4$;若 $\epsilon < \delta$, $v_{j+1} = v_j + \nabla v$,转(1);若 $v_j > v_m$,则转下一步;

(6) 对于曲面 S 上每一条边界曲线 $C_i(u)$,计算其偏置表面 $S_{off}(c_i)$;

(7) 计算导动平面(xz 平面)与偏置表面(边界偏置曲线)的交线(交点);

(8) 对所求交线进行上包络操作;

(9) 采用局部等参数步长法生成无干涉刀具轨迹;结束。

6 结论

(1) 加工曲面 S 上任一点的偏置点为该点刀具控制点的位置,偏置表面则为曲面上所有点的偏置点集合;

(2) 当刀具轴线与加工曲面法矢平行时,偏置表面存在非唯一性问题,可采用双线性插值法来处理;

(3) 将曲面边界曲线与“保护曲面”联系起来,可使曲面与其他所有的表面法线隔离开来,提供一

种有效的干涉保护方法;

(4) 传统的偏置方法与上包络操作结合起来,可获得一种 3 轴 NC 加工无干涉的刀具轨迹的生成算法。该方适用于表面凸形且有 G^0 连续的任意形状刀具的加工情况。

该方法已在个人微机 CAD/CAM 系统中实现。

参考文献

- 1 Saeed S E, Dodsworth J R. Offsetting in geometric modeling. Comput. -Aided Des, 1988, 20(2): 67~74
- 2 Wang W P, Wang K K. Geometric modeling for Swept volume of moving Solids. IEEE comput. Graph. Appl, 1986, 6(12) 8~17.
- 3 Tang k K, Cheng C C, Dayan Y. Offsetting surface boundaries and 3 - axis gouge-free surface Machining. Computer-Aided Des, 1995 , 27(12): 915~927.



杨勇生 男, 31 岁, 讲师, 博士研究生, 主要从事切削加工及加工自动化方面的研究, 已发表学术论文 20 余篇, 取得了部级研究成果 1 项。



王冷千 男, 25 岁, 硕士研究生, 主要从事 CAD/CAM 及多媒体技术方面的研究。

王珉 男, 46 岁, 博士, 教授, 博士生导师, 中国机械工程学会高级会员, 已出版专著 5 部, 学术论文 100 余篇。

Offsetting Method for Generating Gouge-Free Tool Paths in Multi-Surface NC Machining

Yang Yongsheng, Wang Lengan, Wang Min

(Mechanical Engineering Institute, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016)

Abstract This paper describes a new offsetting method for detecting cutter interference in multi-surface NC machining, and generating its tools paths. The method can be applied in 3-axis NC machining with a cutter of arbitrary shape.

Keywords CAD/CAM, NC machining, Offsetting surfaces, Gouging

Artmedia 雅美达推出含 Intel MMX166/233 技术高智能笔记本电脑 M3012/M3013

Artmedia 雅美达推出含 Intel MMX166/233 技术高智能笔记本电脑 M3012/M3013, 采用专为笔记本电脑设计的超省电 Pentium 处理器 (Intel Mobile Module), 特殊的导热装置, 可避免因长时间使用而产生的高热, 进一步延长电池的使用时间, 也确保了整机工作的稳定性。特别配备 TFI 液晶显示屏, 画质清晰, 色彩明亮, 观看的角度大且没有拖影, 是一级的视觉享受。而内置 128 位 PCI 高速图形显示卡, 含 2MB VRAM, 则提供了高效能及高视讯品质。在《PC World》评比中在同档次的笔记本电脑中名列前茅。

在内存方面, 除原有内置 16MB 内存外, 内插式插槽还可供用户自行扩充至 144MB, 升级是轻而易举。至于多媒体应用的部分包括高音质 3D 声卡, 内置麦克风与立体声喇叭, 及可更换式 20 倍速的光驱。而双 PCMCIA 接口, 可接 Modem 卡及网卡, 用户都能自由浏览 Internet 网络世界, 无论在任何地方均能轻易掌握资讯来源及潮流动态。

M3012

采用 Intel IMM166 处理器, 32MB RAM, 256KB Cache。

12.1 英寸 TFT 液晶 (LCD) 显示屏, 解晰度可达 800×600。

可更换 2.1GB E-IDE LBA 硬盘, 20 倍速光驱, 智能型锂电池。

