

基于矢量分析的数控加工轨迹设计方法研究*

孙玉文 束长林 刘 健

(大连理工大学精密与特种加工教育部重点实验室 大连 116023)

摘要: 描述了基于矢量分析和 NURBS 的数控加工轨迹设计方法。基于给定的被加工曲面在其参数域上的优化走刀方向集合,并依据标量场与梯度场的转化关系,建立了精确逼近离散方向矢量的走刀矢量场拟合模型,由此给出了数控加工轨迹的矢量表达形式。以 NURBS 作为发生矢量场的流函数并借助其较强的局部调控能力,通过调整控制点列,可望实现数控加工轨迹拓扑形状的整体优化调控。验证实例表明该方法能够进行复杂形状数控加工轨迹的精细设计,有利于保证精度指标下曲面加工效率的最大化。

关键词: 加工轨迹 矢量场 NURBS

中图分类号: TP391

0 前言

数控加工作为信息时代的标志性加工技术,在航空航天、国防和汽车等行业中占据着主导地位^[1]。复杂形状零件/模具的数控加工是一个非常耗时的过程,其中精加工与手工打磨时间又占到了整个加工时间的 75%以上^[2]。刀具轨迹规划是影响数控加工精度和效率的重要因素,但当前的 5 轴刀具轨迹规划还不完善,仍处于发展之中,采用何种拓扑形状的刀具轨迹将直接关系到所生成加工程序的质量好坏。因此,高质量的设计数控加工轨迹,实现精密复杂零件的少/无打磨加工,提高数控加工的精度与效率具有重要的工程应用价值。

在参数曲面的轨迹规划中,等参数线法、等残留高度法是最为常用的加工路径生成方法,但前者路径重叠大、效率低,后者存在孤立环和轨迹光滑性问题^[3],因此加工效果并不尽如人意。为此,一些基于给定采样点处优化走刀方向的轨迹设计方法得到重视。如 Y. S. Lee 等^[4]在铣削力或与加工精度综合约束下构造采样点处的最大进给速率图,并在各点选择进给率最大的方向为走刀方向,使得模具加工质量尤其是效率上得到较大改善,且在具体生成加工轨迹时,给出了四种具有单一或多个走刀方向和进给率的简化加工模式;C. J. Chiou 等^[5]基于刀具和工件几何、刀位及加工精度等多种因素,在加工曲面采样点处优选加工带宽最大的方向为走刀方向,由此提出了加工能量场方法,同等参数线法相比效率提高 50%以上,但并未明确指出其具体的

轨迹生成方法,若单纯采用线性的插值方法,将使轨迹的光滑性有所下降;T. Kim 等^[6]注意到高速加工机床执行器发展的滞后性,提出在各执行器转距速度曲线及加工精度等约束下优化确定采样点处的走刀方向,并采用了 Bezier 矢量建模技术,易于操作且加工效率提高较为显著,但在轨迹整体调控能力上有待加强。可见,不同的走刀路线形式及其轨迹光滑程度,对数控加工效率、质量以及机床性能的影响很大,这是精加工及高速加工中应着重解决的问题。

目前,在曲面建模和加工中普遍采用 NURBS(Non uniform rational B-splines)形式,且 NURBS 在 STEP(Standard for exchange of product model data)标准中已被确定为工业产品几何形状的标准数学表达,有利于 CAD/CAM 系统间的数据交换。因此如能实现曲面建模与数控加工轨迹设计的 NURBS 方法集成,进而提高曲面建模/加工的精度与效率,无疑是一种更好的选择。为此,着重介绍了一种基于 NURBS 的数控加工轨迹精细设计的矢量方法,以期实现多轴数控的高精高效加工。

1 矢量线型轨迹设计的基本原理

在数控加工中,刀触点轨迹不仅是被加工表面上的几何曲线,也可看作是质点运动的轨迹,是矢量线或者等值线,而整族曲线则构成了曲面的切向矢量场或等值面。所以,曲面的数控加工轨迹规划可看成是从曲面的特定切向光滑矢量场中合理选择矢量线的问题,路径的产生是并行的光滑的。在矢量分析^[7]中明确指出,标量场和矢量场是互有联系的,标量场的梯度场就是一个矢量场。在标量场及其梯度和等值线间存在必然的联系。设一标量场(流

* 国家自然科学基金(50405044)和辽宁省自然科学基金(20010102087)资助项目。20040309 收到初稿,20041030 收到修改稿

函数)为 $f(x, y, z)$, 则其梯度可表示为

$$\nabla = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z} \right) \quad (1)$$

该流函数上的等值线为

$$f(x, y, z) = c \quad (2)$$

式中 c ——常数

若该标量场为参数形式, 即为 $f(x(u, v, w), y(u, v, w), z(u, v, w))$, 由链导法可得参数曲面上一点的梯度为

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \\ \frac{\partial f}{\partial z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial x}{\partial v} & \frac{\partial x}{\partial w} \\ \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial v} & \frac{\partial y}{\partial w} \\ \frac{\partial z}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial v} & \frac{\partial z}{\partial w} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial u} \\ \frac{\partial f}{\partial v} \\ \frac{\partial f}{\partial w} \end{bmatrix} \quad (3)$$

可见, 3D 标量场的梯度方向是等值面的法向, 而 2D 标量场的梯度方向是等值线的法线方向。在数控加工时, 可首先建立被加工曲面的采样点网格, 并在每点根据曲面的局部几何性质和刀具形状确定出最优的走刀方向, 再根据这些给定的走刀方向解算出相应的走刀轨迹。在工程中经常使用的是 NURBS 曲面, 如果直接建立该曲面的切向矢量场, 加工轨迹的精修和补偿较为困难, 因此最好是在参数域上建立加工曲面的 2D 走刀矢量场(如图 1), 从而便于路径的调控、补偿和精修。

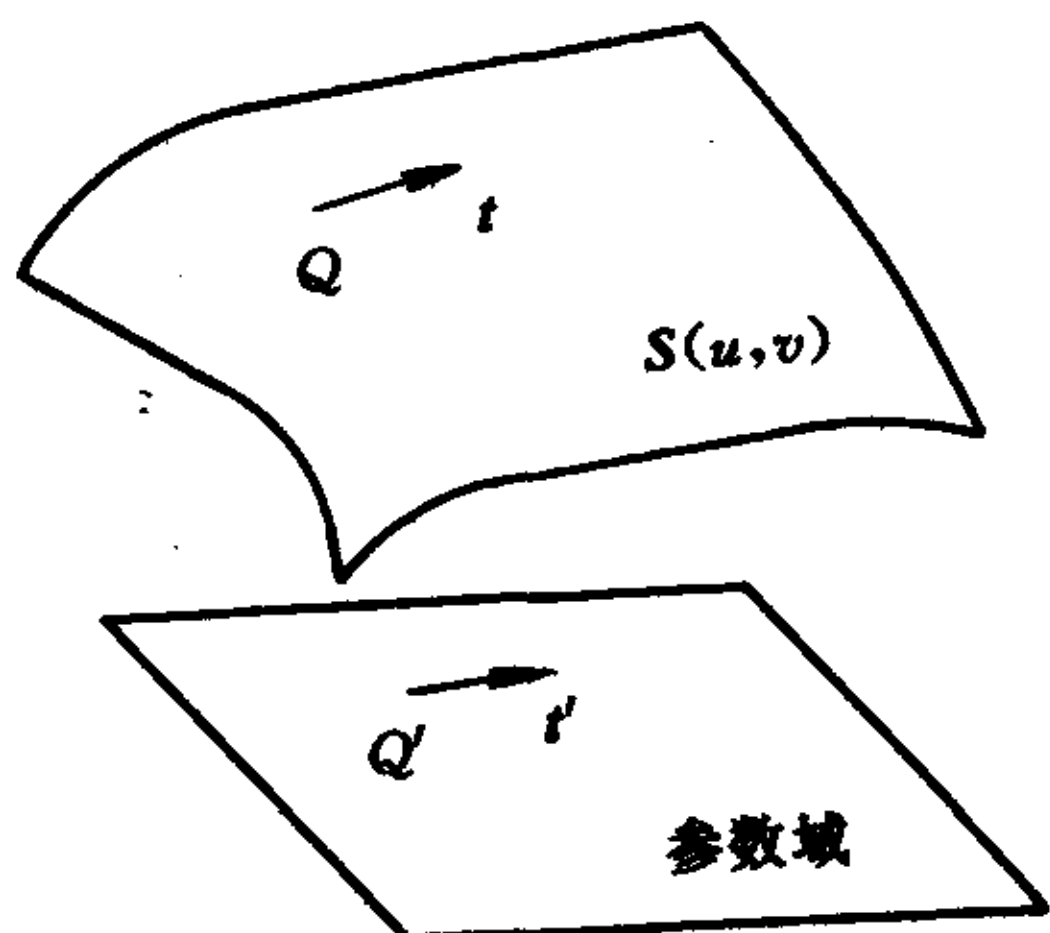


图 1 曲面上切向矢量在参数域上的表达

2 轨迹精细设计的数学模型

采用矢量场方法设计数控加工轨迹时, 矢量线或者等值线均可作为加工的轨迹, 二者是一正交线族, 在建模上并不存在差别, 都需要首先建立发生矢量场的流函数, 但采用等值线时所需要的是其在参数域上的对应轨迹。

2.1 曲面上走刀方向在其参数域上的表达

既然用矢量场形式建模参数域上的数控加工轨迹, 所以必须首先求得 NURBS 曲面上优化走刀方向在其参数域上的对应表达。为便于叙述, 不妨设

作用在参数域 $(u, v) \in [0, 1]$ 上的待加工型面的 NURBS 曲面方程为^[8]

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q w_{i,j} P_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q w_{i,j} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)} \quad (4)$$

式中 $P_{i,j}$ ——控制顶点

$w_{i,j}$ ——权值

$N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$ ——B 样条基函数

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \mu_i \leq u \leq \mu_{i+1} \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - \mu_i}{\mu_{i+p} - \mu_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{\mu_{i+p+1} - u}{\mu_{i+p+1} - \mu_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

$N_{i,k}(u)$ 的节点矢量定义区间为

$$U = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{p+1}, \mu_{p+1}, \dots, \mu_n, \underbrace{1, \dots, 1}_{p+1} \right\}$$

$N_{j,q}(v)$ 的节点矢量定义区间为

$$V = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_{q+1}, \tau_{q+1}, \dots, \tau_m, \underbrace{1, \dots, 1}_{q+1} \right\}$$

如图 1 所示, 对 NURBS 曲面上任意一点 $Q(u, v)$, 不妨令该点处的走刀方向矢量为 $t(u, v)$, 因该矢量位于切平面上, 故可表示为

$$t(u, v) = aS_u + bS_v \quad (5)$$

对等式两边分别做点乘得

$$\begin{cases} t \cdot S_u = Ea + Fb \\ t \cdot S_v = Fa + Gb \end{cases} \quad (6)$$

式中

$$E = \frac{\partial S}{\partial u} \cdot \frac{\partial S}{\partial u} \quad F = \frac{\partial S}{\partial u} \cdot \frac{\partial S}{\partial v} \quad G = \frac{\partial S}{\partial v} \cdot \frac{\partial S}{\partial v}$$

于是可解得

$$\begin{cases} a = [G(t \cdot S_u) - F(t \cdot S_v)] / (EG - F^2) \\ b = [E(t \cdot S_v) - F(t \cdot S_u)] / (EG - F^2) \end{cases} \quad (7)$$

则可知 $Q(u, v)$ 点走刀矢量 $t(u, v)$ 在其参数域上的对应单位矢量为 $(\xi, \zeta) = (a / \sqrt{a^2 + b^2}, b / \sqrt{a^2 + b^2})$ 。于是, 对于给定的曲面上的采样点及其走刀矢量, 依据式(7)就可获得其参数域上的对应矢量。

2.2 守恒场

一般来说, 等参数线型等数控加工轨迹均符合守恒场条件, 所以在以矢量线法设计加工轨迹时也希望如此。设有函数关系 $f: \mathbf{R}^2 \rightarrow \mathbf{R}$, 则对应于该函数的某一等值线

$$C = \{(x, y) | f(x, y) = k\}$$

对等值线 C 上一点 $P(x, y)$, 且 $\nabla f(x, y) \neq 0$, 则该点处的法线的斜率为

$$-1/(dy/dx) = -1/(-f_x/f_y) = f_y/f_x$$

其中梯度 $\nabla f = [f_y, f_x]^T$ 为等值线上点 P 的法矢量。于是可知, 函数 $f(x, y)$ 在点 $P(x, y)$ 的梯度方向与等值线 C 在该点的切向正交。同时还可得到

$$\nabla \times (\nabla f(x, y)) = 0 \quad (8)$$

即梯度场的旋度为 0, 也就是梯度场是守恒场^[7]。

2.3 参数空间上的矢量场逼近

如果被加工曲面 $S(u, v)$ 上存在一系列离散的走刀方向, 则在其参数空间上亦可得到其对应的方向集合。对在参数域上如何有效逼近给定方向的问题, 一个自然的想法是假定给定矢量数据来源于一个守恒场。由此, 数控加工轨迹设计自然转化为离散矢量场的光滑逼近问题。关于矢量场建模, 当前已有一些较为成熟的算法^[9], 如通过构造出符合条件的径向基流函数求得矢量场的方法等。由此可知, 守恒场可通过标量场的梯度场表示, 但该标量场的函数表达可存在多种选择。因 NURBS 函数具有较强的整体平滑能力和局部支撑性、可微性, 为此把该梯度场的标量场 $\theta(u, v)$ (流函数) 取为 NURBS 函数是一种合理的选择, 即

$$\theta(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q w_{ij} d_{ij} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)}{\sum_{i=0}^p \sum_{j=0}^q w_{ij} N_{i,p}(u) N_{j,q}(v)} \quad (9)$$

式中 $d_{ij} \in \mathbf{R}$

令参数域上在点 (u_k, v_k) 处的给定走刀方向为纯量场 $\theta(u, v)$ 在该点的梯度矢量, 即

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial u}, \frac{\partial \theta}{\partial v} \right]_{u=u_k, v=v_k}^T = [\lambda \xi_k, \lambda \zeta_k]^T \quad (10)$$

实际操作中可令 $w_{ij} = 1$, 则

$$\left[\frac{\partial \theta}{\partial u}, \frac{\partial \theta}{\partial v} \right]_{u=u_k, v=v_k}^T = \left[\sum_{i=0}^{n-1} \sum_{j=0}^m N_{i,p-1}(u_k) N_{j,q}(v_k) d_{i,j}^{(1,0)}, \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{m-1} N_{i,p}(u_k) N_{j,q-1}(v_k) d_{i,j}^{(0,1)} \right]^T$$

式中 $d_{i,j}^{(1,0)} = p \frac{d_{i+1,j} - d_{i,j}}{\mu_{i+p+1} - \mu_i}$

$$U^{(1)} = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_p, \mu_{p+1}, \dots, \mu_n, \underbrace{1, \dots, 1}_p \right\}$$

$$V^{(1)} = V^{(0)}$$

$$d_{i,j}^{(0,1)} = p \frac{d_{i,j+1} - d_{i,j}}{\tau_{j+q+1} - \tau_{j+1}}$$

$$U^{(1)} = U^{(0)}$$

$$V^{(1)} = \left\{ \underbrace{0, \dots, 0}_q, \tau_{q+1}, \dots, \tau_m, \underbrace{1, \dots, 1}_q \right\}$$

于是, 式(10)可展开为

$$\begin{cases} p \sum_{j=0}^m N_{j,q}(v_k) \left\{ -\frac{N_{1,p-1}(u_k)}{\mu_{p+1} - \mu_1} d_{0,j} + \sum_{i=1}^{n-1} \left[\frac{N_{i,p-1}(u_k)}{\mu_{p+i} - \mu_i} - \frac{N_{i+1,p-1}(u_k)}{\mu_{p+i+1} - \mu_{i+1}} \right] d_{i,j} + \frac{N_{n,p-1}(u_k)}{\mu_{n+p} - \mu_n} d_{n,j} \right\} = \lambda \xi \\ q \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u_k) \left\{ -\frac{N_{1,q-1}(v_k)}{\tau_{q+1} - \tau_1} d_{i,0} + \sum_{j=1}^{m-1} \left[\frac{N_{j,q-1}(v_k)}{\tau_{q+j} - \tau_j} - \frac{N_{j+1,q-1}(v_k)}{\tau_{q+j+1} - \tau_{j+1}} \right] d_{i,j} + \frac{N_{m,q-1}(v_k)}{\tau_{m+q} - \tau_m} d_{n,j} \right\} = \lambda \zeta \end{cases} \quad (11)$$

式中 λ 为系数, 可取为 1 或根据该点处的带宽或走刀速率选取, 于是进一步写成矩阵形式有

$$\begin{bmatrix} A_k^{(1)} \\ A_k^{(2)} \end{bmatrix} X = \begin{bmatrix} \lambda a_k \\ \lambda b_k \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中

$$X = [d_{0,0}, d_{0,1}, \dots, d_{0,m}, d_{1,0}, d_{1,1}, \dots, d_{1,m}, \dots, d_{n,m}]^T$$

$$A_k^{(1)} = [a_{k,0,0}^{(1)}, a_{k,0,1}^{(1)}, \dots, a_{k,0,m}^{(1)}, a_{k,1,0}^{(1)}, a_{k,1,1}^{(1)}, \dots, a_{k,1,m}^{(1)}, \dots, a_{k,n,m}^{(1)}]^T$$

$$A_k^{(2)} = [a_{k,0,0}^{(2)}, a_{k,0,1}^{(2)}, \dots, a_{k,0,m}^{(2)}, a_{k,1,0}^{(2)}, a_{k,1,1}^{(2)}, \dots, a_{k,1,m}^{(2)}, \dots, a_{k,n,m}^{(2)}]^T$$

矩阵中各系数定义如下

$$a_{k,i,j}^{(1)} = \begin{cases} -p N_{j,q}(v_k) \frac{N_{1,p-1}(u_k)}{\mu_{p+1} - \mu_1} & i=0 \quad j=0,1,\dots,m \\ p N_{j,q}(v_k) \left(\frac{N_{i,p-1}(u_k)}{\mu_{p+i} - \mu_i} - \frac{N_{i+1,p-1}(u_k)}{\mu_{p+i+1} - \mu_{i+1}} \right) & i=1,\dots,n-1 \quad j=0,1,\dots,m \\ p N_{j,q}(v_k) \frac{N_{n,p-1}(u_k)}{\mu_{n+p} - \mu_n} & i=n \quad j=0,1,\dots,m \end{cases}$$

$$a_{k,i,j}^{(2)} = \begin{cases} -q N_{i,p}(u_k) \frac{N_{1,q-1}(v_k)}{\tau_{q+1} - \tau_1} & j=0 \quad i=0,1,\dots,n \\ q N_{i,p}(u_k) \left(\frac{N_{j,q-1}(v_k)}{\tau_{q+j} - \tau_j} - \frac{N_{j+1,q-1}(v_k)}{\tau_{q+j+1} - \tau_{j+1}} \right) & j=1,\dots,m-1 \quad i=0,1,\dots,n \\ q N_{i,p}(u_k) \frac{N_{m,q-1}(v_k)}{\tau_{m+q} - \tau_m} & j=m \quad i=0,1,\dots,n \end{cases}$$

设曲面 $S(u, v)$ 上离散点方向矢量的个数为 M ，且 $(n+1) \times (m+1) < M$ ，将这些方向矢量在参数域上的对应矢量代入式(11)，则存在超定方程组

$$AX = B \quad (13)$$

式中 $A = [A_{0,1}, A_{0,2}, \dots, A_{M,1}, A_{M,2}]^T$

$A_{i,1}, A_{i,2}$ 等同 A_1, A_2 , $B = [B_{0,1}, \dots, B_{M,1}, B_{M,2}]$, $B_{i,1}, B_{i,2}$ 等同于 B_1, B_2 。当 $\text{rank}(A) < \text{rank}(A, B)$ 时，式(13)为一优化问题，可用 LSQ 法求得其最小二乘解 X ，进而得到所求的流函数，实现加工轨迹的矢量建模。

3 轨迹规划模型

基于矢量线法设计加工轨迹，刀具路径规划就是从矢量场中合理选择矢量线的过程。当选择等值线作为加工轨迹规划依据时，每条加工轨迹可表示为 $\mathcal{G}(u, v) = \eta$ 。因各加工轨迹位置的不同，决定了 η 取值的不同。具体的行距计算同当前方法并无区别，其关键是得到对应点间的参数坐标增量。设一目标轨迹 $C_k(u(t), v(t))$ 上一点为 $Q_{i,k}$ ，与 C_k 邻接的下一条加工轨迹对应的等值线为 C_{k+1} ，与 $Q_{i,k}$ 对应的点为 $Q_{i,k+1}$ ，因 $dC_k/dt \approx \Delta C/\Delta t$ ，且 $\Delta C = |Q_{i+1,k} - Q_{i,k}|$ ，于是求导轨迹参数方程可得

$$\Delta C \approx S_u \dot{u} + S_v \dot{v} = k_0 (S_u \xi + S_v \zeta) \quad (14)$$

式中 k_0 ——常数

由式(14)可进一步推出

$$\|\Delta C\| = \|\dot{u}^T G \dot{u}\|^{1/2} = k_0 \|\dot{u}_0^T G \dot{u}_0\|^{1/2} \quad (15)$$

式中 $\dot{u} = [\dot{u} \ \dot{v}]$ $G = \begin{bmatrix} E & F \\ F & G \end{bmatrix}$ $\dot{u}_0 = [\xi \ \zeta]$

因 $\|\Delta C\|$ 即为行距 l ，所以可继续推得

$$k_0 = l / \|\dot{u}_0^T G \dot{u}_0\|^{1/2} \quad (16)$$

式中 l ——走刀行距

目前利用各种类型刀具进行数控加工的行距计算模型已有很多^[3,10]，可根据情况选用精确或近似方法。在给出走刀行距后，轨迹上该校验点的参数增量即为 $\Delta u = k_0 \xi$ ， $\Delta v = k_0 \zeta$ 。当然这是一种近似算法，一般已可满足工程需要，如需精确计算增量值则要迭代得到。将轨迹上所有校验点的参数增量 $(\Delta u_{i,j}, \Delta v_{i,j})$ 代入式(9)中有

$$\theta(u_{i,j} + \Delta u_{i,j}, v_{i,j} + \Delta v_{i,j}) = \eta_{i,j+1}$$

由此，可得到下一条等值线型轨迹的确定公式

$$(\Delta u_i, \Delta v_i) = (\Delta u_{i,j}, \Delta v_{i,j})_{|\eta_{i,j+1} - \eta_i| = \min} \quad j = 1, \dots, n \quad (17)$$

可见，使势值差最小的等值线就是下一条目标等值线。在最后加工轨迹表达时，只需记录流函数模型和矢量线或等值线的参数值即可。

4 算例

为验证所给方法，进行了矢量重构及刀具轨迹规划的实例验证。图 2 给出的是曲面参数域上的离散方向矢量。其中，离散方向采样点为 121 个，定义的 NURBS 流函数的控制点阵为 7×6 ，节点矢量取两端夹紧的均匀节点矢量。图 3 为在参数域上重构的等值线型迹线图，实现了具有复杂拓扑的矢量重构。此外，以使采样点处具有较大加工带宽的走刀方向为采样走刀方向，进行了矢量线型走刀轨迹的规划。图 4 给出了在参数域上的矢量线型重构轨迹；图 5 是在最大残留高度为 0.05 mm 时的曲面刀触点轨迹图。同等参数线法相比，效率提高较为明显；同等残差轨迹相比，生成的刀具轨迹相对更为光滑，而且可根据实际加工精度进行矢量线的选择，刀具轨迹的产生是并行的。可以看出，提出的方法能够适应具有复杂拓扑形状的数控加工轨迹的精细设计，实现了基于离散走刀方向的数控加工轨迹的光滑重建，有利于保证加工的平稳。

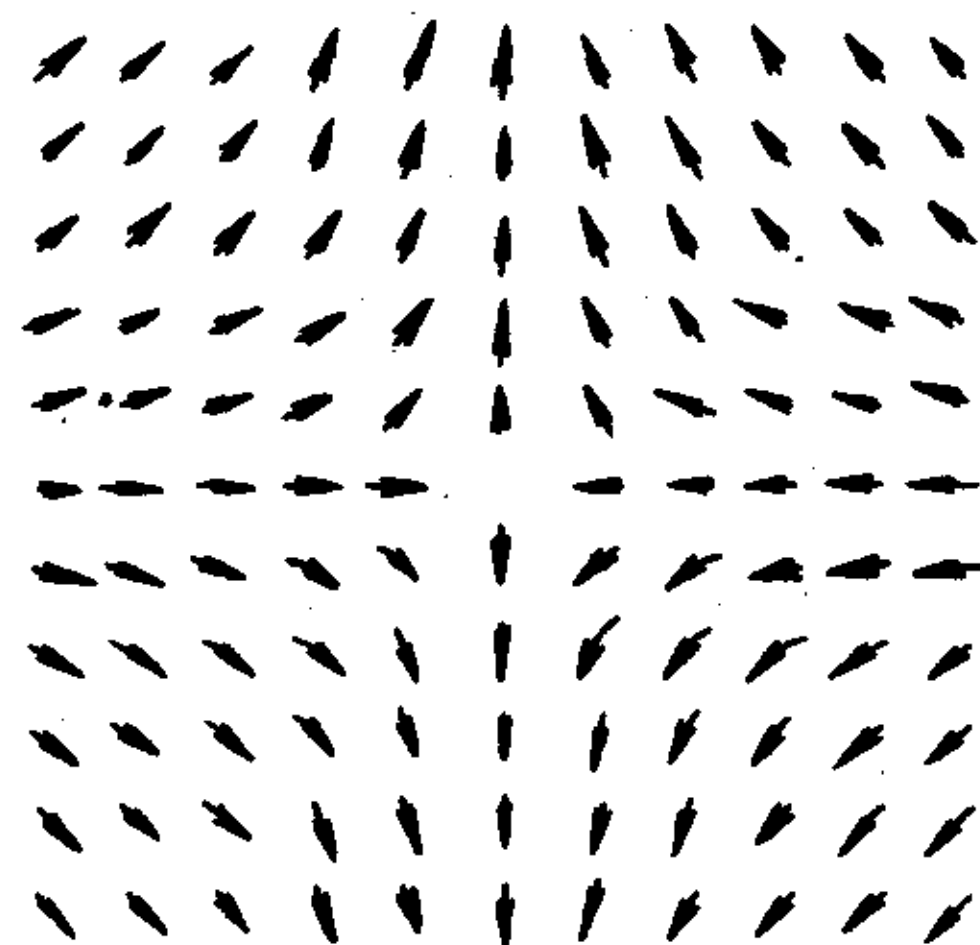


图 2 参数域上离散方向矢量

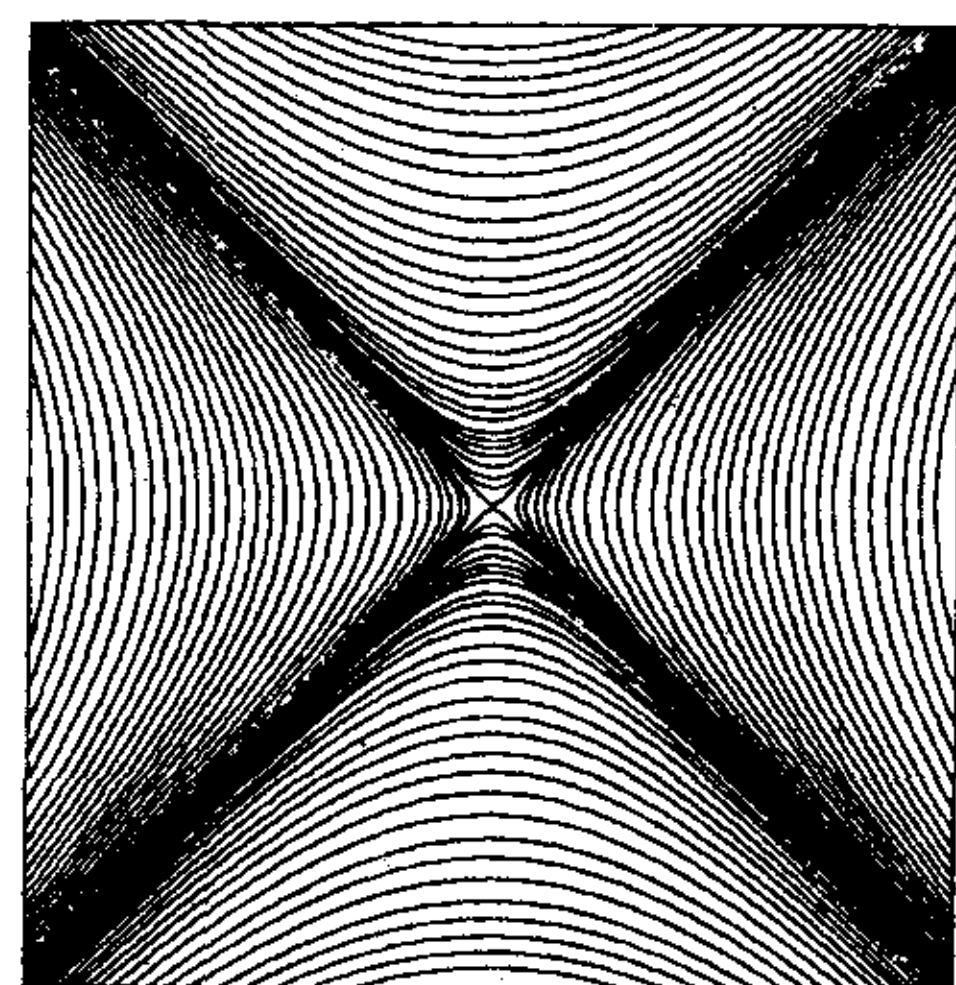


图 3 参数域上的重构矢量线族

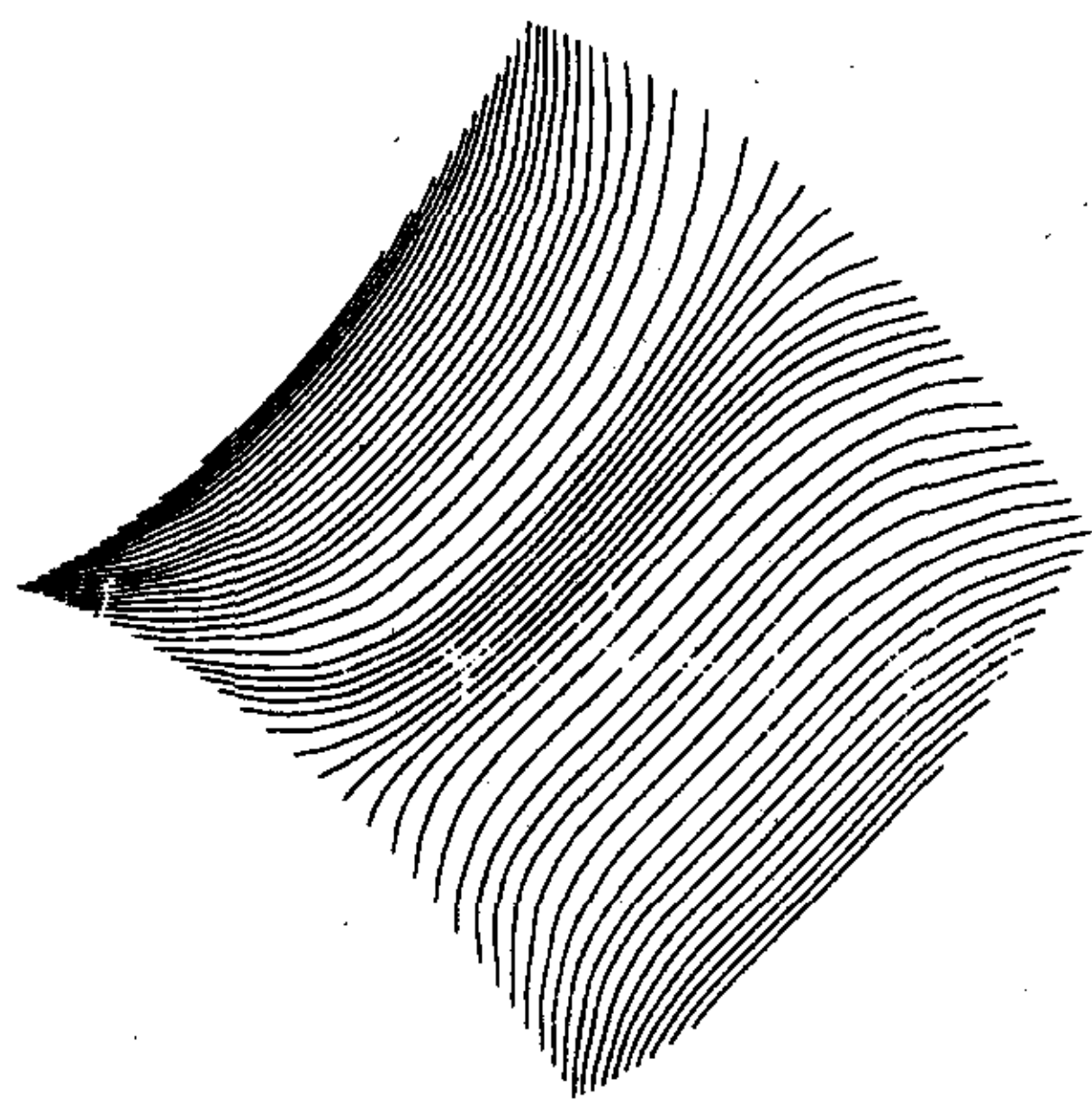


图 4 参数域上对应的加工轨迹

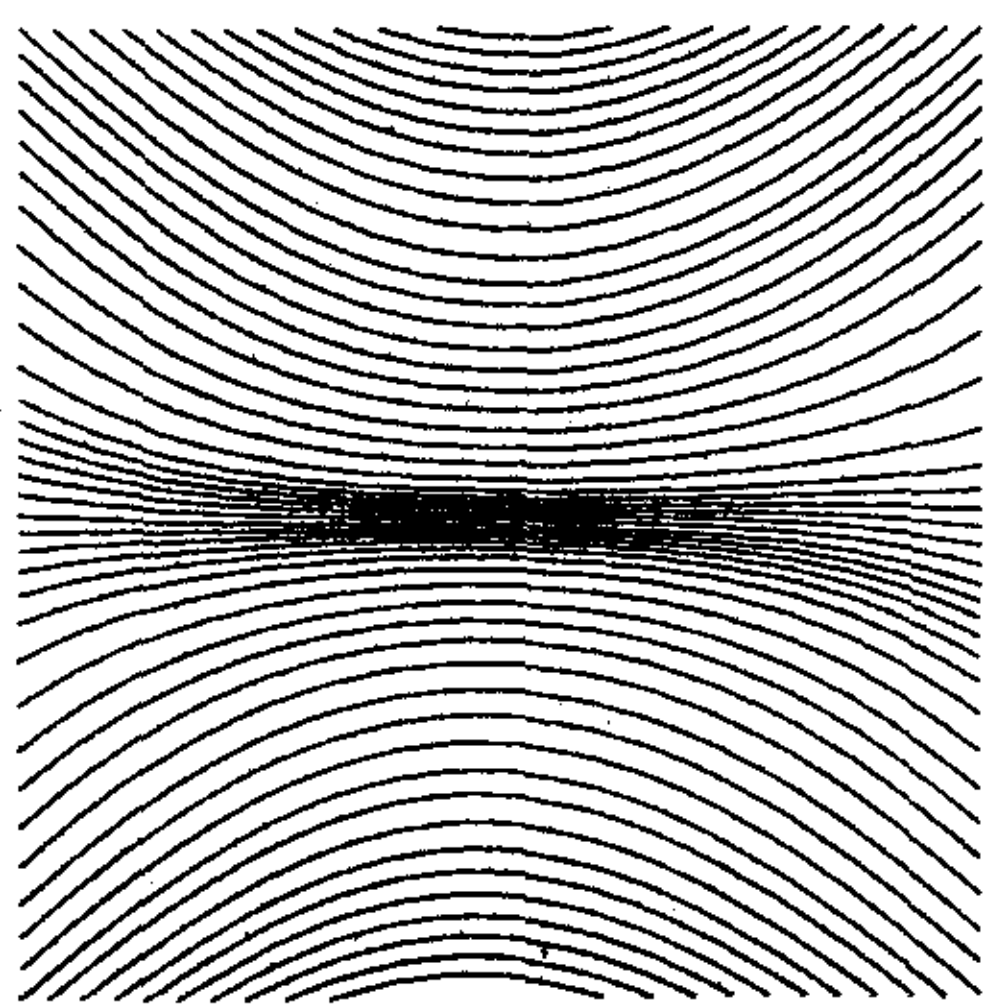


图 5 加工曲面上的刀触点轨迹

5 结论

给出了基于矢量分析和 NURBS 的数控加工轨迹的精细设计方法。以矢量线表示逼近自由曲面在其参数域上的优化走刀方向,保证了轨迹的光滑且有利于路径的补偿与精修。采用 NURBS 函数作为发生矢量场的流函数,增强了轨迹的局部调控能力,通过改变矢量线型加工轨迹的拓扑几何形状,有望形成被加工曲面的最优轨迹规划,实现复杂型面几何建模与加工的 NURBS 方法的一体化设计,保证精度指标下曲面加工效率的最大化,同时克服了单纯采用多项式型流函数时存在的不足。实例验证了方法的可行性与精确性,非常适于精密复杂型面高效数控加工轨迹的整体精细设计。计算表明,当只想反映走刀的总体趋势时,可用较少的控制点数;反之,在做精确的轨迹逼近时可采用较大的控制点列。此外,该方法也可与现有的轨迹规划方法结合使用,如可首先采用矢量方法找到满足用户特定指标的加工轨迹的总体趋向,以此作为初始基准进行等残差型轨迹规划将使加工效率更高。需要指出的是,这种矢量规划方法较为适合单张参数曲面,对于组合曲面及裁剪曲面尚待研究。

参 考 文 献

- 1 周济,周艳红. 数控加工技术. 北京: 国防工业出版社, 2002
- 2 Mason F. Die and mold finishing, how fast? *Manufacturing Engineering*, 1995, 115(3): 35
- 3 Lee Y S. Non-isoparametric tool path planning by machining strip evaluation for 5-axis sculptured surface machining. *Computer Aided Design*, 1998, 30(7): 559~570
- 4 Chiou C J, Lee Y S. A machining potential field approach to tool path generation for multi-axis sculptured surface machining. *CAD*, 2002, 34(5): 357~371
- 5 Lim E M, Menq C H. Integrated planning for precision machining of complex surfaces, Part I: Cutting-path and feedrate optimization. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 1997, 37(1): 61~75
- 6 Kim T, Sarma S E. Toolpath generation along directions of maximum kinematic performance; a first cut at machine-optimal paths. *CAD*, 2002, 34(6): 453~468
- 7 Piegl L, Tiller W. *The NURBS book*. Second Edition. Berlin: Springer, 1997
- 8 Marsden, Jerrold E. *Vector Calculus*. Forth Edition. New York: W. H. Freeman, 1996
- 9 Mussa-Ivaldi F A. From basis functions to basis field: vector field approximation from sparse data. *Biological Cybernetics*, 1992, 67(5): 479~489
- 10 Lee S G, Yang S H. CNC tool-path planning for high-speed high-resolution machining using a new tool-path calculation algorithm. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2002, 20(4): 326~333

VECTOR ANALYSIS BASED TOOLPATH GENERATION FOR PRECISION SURFACE MACHINING

Sun Yuwen Shu Changlin Liu Jian
(Key Laboratory for Precision & Non-traditional Machining of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116023)

Abstract: A toolpath generation method is presented for NC machining based on vector analysis and NURBS. Given optimal cutting directions at sampled points in the parameter domain of the NURBS surface, a vector field model fitting to these scattered vectors is established according to the conversion between scalar field and gradient field. Thus, tool paths in
(下转第 170 页)

RESEARCH ON THE SMALL REGION DATA PROCESSING IN RAPID PROTO- TYPING MANUFACTURE

Zhang Jiayi Liu Weijun Wang Tianran

(Advanced Manufacturing Lab, Shenyang Institute
of Automation Chinese Academy of Sciences,
Shenyang 110016)

Abstract: The problem is deep into studied that bring of the small region data processing in rapid prototyping manufacture. The necessity of distinguish the over burning regions is dis-

cussed. The neglect of the small region scanning can produce the throwing of small characteristic of the prototype piece. If the small region proceeds to burn, then the prototype piece may break for lack of bond strength between layers. Based on appropriate enlarging the small district area to reduce the small region to burn excessively, a viable remedy method is put forth and the application of the new method is efficient.

Key words: Rapid prototyping Small region

Scanning path

作者简介: 张嘉易, 男, 1968 年出生, 博士研究生。研究方向为快速成形技术数据处理和相关理论。

E-mail: jy Zhang@sia.ac.cn

(上接第 164 页)

the parameter domain can be represented as vector curves of a 2D vector field. Moreover, using NURBS as the stream function of generating gradient field, a global shape optimization of tool-paths can be easily completed by adjusting the control point array of the stream function. The example shows that the

precise design method of tool paths is very useful in high- efficiency machining of complex shapes.

Key words: Tool paths Vector field NURBS

作者简介: 孙玉文, 男, 1971 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为先进制造技术、反求工程和 CAD/CAM 等, 发表论文 20 余篇。

E-mail: xiands@dlut.edu.cn