

自由曲面设计及刀具路径生成技术的研究

负敏,于源,王小椿

(西安交通大学数控技术研究所,陕西 西安 710049)

摘要:提出了一种采用运动学中空间位移的方法,基于可变形 NURBS(D-NURBS)自由曲线构造数控加工中刀具扫描体曲面的 CAD 模型,使原来的几何曲线曲面具有物理曲面的特性,这样就允许设计人员以自然的、可预测的方法运用许多基于力的工具进行交互式造型,直接设计型面,所得曲面易满足所使用的特殊的数控加工机床的运动和动力学限制,同时得到了自由曲面数控加工的刀具路径设计的新方法,该方法将运动学、计算机辅助几何设计与 CAD/CAM 技术结合起来,为并行几何形状设计和制造提供了基础。

关键词:计算机辅助设计/计算机辅助制造;空间位移;D-NURBS;刀具路径

中图分类号: TG 475; TP 291 **文献标识码:** A

0 引言

在实际产品设计与制造中,常常会遇到这样一类曲面,它们不能用明确的数学表达式表示,在图纸上往往只给出一些离散信息(定义点、切矢、三阶导矢等),我们称这类曲面为自由曲面,如汽车的车身、飞机的机身、船体等外形曲面,以及涡轮的叶片等,即为自由曲面。自由曲面的精加工一般是采用球头铣刀、鼓形铣刀或平底铣刀来完成。如今自由曲面的 CAD/CAM 中,存在的一个普遍问题是加工曲面与设计曲面不一致,这是因为曲面设计与其刀具路径生成过程是分别进行的。曲面的 CAD 模型一般是通过 Bezier、B 样条、NURBS 等参数形式定义,然后根据得到的曲面模型生成三轴或五轴加工的刀具路径。这种方式在三轴加工中比较适用,但在将其推广至五轴加工的过程中出现了一些问题^[1]。因为直接从所给的 CAD 模型中很难得到精确的、无干涉的五轴加工刀具路径。基于零件几何的刀具路径生成技术不可能同时考虑刀具的几何限制及所使用数控加工机床的运动和动力学限制。从并行工程的观点来看,在曲面设计阶段就应将这些限制考虑进来。尤其值得注意的是,如果利用刀具的几何和运动直接用来造型自由曲面的话,在产生刀具路径中的一些问

题可能会被排除、减少或易于解决。

此外,在 CAGD 的曲面表示方案中,NURBS 已经成为一种工业标准。其最重要的优点就是既能够表示自由形状,又能够表示标准解析形状。NURBS 形体可以通过调整与 NURBS 曲面片相关的控制顶点及权因子来设计。虽然有许多算法和交互式设备,但这一间接的设计过程还是存在着局限性。近年来,随着能量优化造型技术的发展,使用 NURBS 表示的可变形自由曲线曲面造型使原来的几何曲线曲面具有物理曲面的特性,这样就允许设计人员以自然的、可预测的方法运用许多基于力的工具进行交互式造型,直接地设计型面。因此,在本文中将采用可变形 NURBS(D-NURBS)自由曲线曲面构造曲面的 CAD 模型,并将运动学、计算机辅助几何设计与 CAD/CAM 技术相结合来研究自由曲面设计及其刀具路径生成过程,为并行几何形状设计和制造提供了一个基础。

1 空间位移的齐次参数化^[2]

设三维欧几里得空间静坐标系为 F ,固联于运动物体上的动坐标系为 M 。研究一个物体的空间位移时,设空间运动的齐次坐标变换表示为

$$\begin{bmatrix} X \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & d \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

收稿日期:2001-05-10;修订日期:2001-06-30

作者简介:负敏(1974-),女,陕西省渭南市人,西安交通大学博士研究生,主要从事 CAD/CAM 数控技术方面的研究。

其中: X, x 分别是运动物体上一点在动、静坐标系中同一点的笛卡儿坐标; $[R]$ 为 M 相对于 F 的旋转矩阵; $d = (d_1, d_2, d_3)^T$ 为运动的平移矢量。

为方便起见,我们用齐次坐标表示来研究自由曲面的空间运动及其轨迹。设一点的齐次坐标为 $p = (p_1, p_2, p_3, p_4)$, 所对应的笛卡儿坐标为 $x = (x_1, x_2, x_3)$ 。于是有关系式

$$p_1 : p_2 : p_3 : p_4 = x_1 : x_2 : x_3 : 1.$$

同理,运动平移矢量的齐次形式为

$$D_1 : D_2 : D_3 : D_4 = d_1 : d_2 : d_3 : 1. \quad (2)$$

旋转矩阵 $[R]$ 可用欧拉参数进行齐次参数化的形式为

$$Q_1 : Q_2 : Q_3 : Q_4 = s_1 \sin \frac{\theta}{2} : s_2 \sin \frac{\theta}{2} : s_3 \sin \frac{\theta}{2} : \cos \frac{\theta}{2}. \quad (3)$$

其中, $s = (s_1, s_2, s_3)$ 为沿着旋转轴的单位矢量; θ 为转动角。

$[R]$ 的齐次表示为^[3]

$$[R] = [A(Q)]/S^2.$$

而由 2 个四维矢量所确定的用来表示物体空间位移的双四元数^[4]为 $\hat{Q}(Q, Q^0)$, 其中, Q 由式(3)给定, Q^0 由下式确定:

$$\begin{bmatrix} Q_1^0 \\ Q_2^0 \\ Q_3^0 \\ Q_4^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -d_3 & d_2 & d_1 \\ d_3 & 0 & -d_1 & d_2 \\ -d_2 & d_1 & 0 & d_3 \\ -d_1 & -d_2 & -d_3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

这样,定义的双四元数满足 Plucker 条件

$$Q_1 Q_1^0 + Q_2 Q_2^0 + Q_3 Q_3^0 + Q_4 Q_4^0 = 0. \quad (5)$$

运动平移矢量可被表示为

$$d = (1/S^2)g(Q, Q^0), \quad (6)$$

$$g(Q, Q^0) = 2 \begin{bmatrix} Q_4^0 Q_1 - Q_1^0 Q_4 + Q_3^0 Q_3 - Q_3^0 Q_2 \\ Q_4^0 Q_2 - Q_2^0 Q_4 + Q_3^0 Q_1 - Q_1^0 Q_3 \\ Q_4^0 Q_3 - Q_3^0 Q_4 + Q_1^0 Q_2 - Q_2^0 Q_1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

这样,空间运动的齐次参数化形式为

$$p = [H(Q, Q^0)]p,$$

其中:

$$[H(Q, Q^0)] = \begin{bmatrix} [A(Q)] & g(Q, Q^0) \\ 0 & 0 & 0 & S^2 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

2 可变形非均匀有理 B 样条 (D-NURBS) 的运动

2.1 D-NURBS 曲线^[3]

D-NURBS 模型将时间、质量及变形能等物

理参数引入标准的 NURBS 形式,推广了 NURBS 的几何定义。这种基于物理模型的几何造型方法将 CAGD 中参数化几何描述方法与某些力学原理结合起来,通过后者在满足给定的几何约束条件的基础上,自动确定控制曲线、曲面形状的各种参数,从而赋予了几何曲线某些力学特性,如拉伸刚度、弯曲刚度等,使其在一定程度上与弹性梁或板壳的变形形态相似,因而具有自然、光顺的特点。设计人员可以应用基于力的工具进行直接的操纵及交互式造型。

D-NURBS 曲线是参数 u 和时间 t 的函数。

$$c(u, t) = \sum_{i=0}^n p_i(t) w_i B_{i,k} / \sum_{i=0}^n w_i B_{i,k}. \quad (9)$$

式中:控制顶点 $p_i(t)$ 与权因子 $w_i(t)$ 形成 D-NURBS 的广义坐标。虽然 D-NURBS 曲线的权值随时间的变化而变化,但在任一固定时刻 $t = t_0$, D-NURBS 曲线恒为 NURBS 曲线,因此 NURBS 曲线具有的性质也是 D-NURBS 曲线的性质。但由于时间的引入,该曲线具有动态物理特性。

但是,可变形非均匀有理 B 样条 (D-NURBS) 设计时所引入的时间参数 t 和在讨论空间位移运动时所讨论的时间 t 是完全不同的。D-NURBS 设计时所引入的时间参数 t 仅仅只是为了设计出自然光顺的曲线、曲面。

2.2 可变形非均匀有理 B 样条 (D-NURBS) 的运动

三维空间物体位移的连续单参数集所定义的空间运动为 $[H(t)]$, t 为时间。由物体上的一点 c 所得的运动形成的曲线 $C(t)$ 是点的轨迹曲线

$$C(t) = [H(t)]c. \quad (10)$$

如果齐次矩阵 $H(t)$ 的所有元素是最高阶为 n 的有理多项式,那么,三维空间里所有点的轨迹是最高阶为 n 的有理曲线,该运动称为 n 阶有理运动。

如果空间运动的齐次参数化形式 (Q, Q^0) 中的参数被定义为时间 t 的有理多项式函数,就可以得到有理运动的表达形式。这一运动是三维空间中关于一个固定轴的螺旋运动。

在设计可变形非均匀有理 B 样条 (D-NURBS) 的运动时,先根据 D-NURBS 的设计过程得到自然、光顺的曲线,然后将其代入式(9)就可以得到其运动表示形式。

3 基于运动学的造型过程

NC 加工是由 NC 指令控制刀具运动完成的。

在执行每一段 NC 指令的过程中,刀具从某一起始位置经某一路径运动到另一位置,在此过程中,刀具在空间扫过了一定的体积,我们把刀具在运动过程中包络的空间形体称为这一段轨迹内的刀具扫描体.利用可变形非均匀有理 B 样条(D-NURBS)的运动,产生了有理运动的扫描体造型的快速算法.这就得到了一个新的、基于运动的、直接根据运动体(或刀具)的几何和运动表示自由曲面的几何造型的方法学.有了刀具几何,刀具运动及其扫描体可由不仅满足几何和功能需要,而且不存在自由曲面的可加工性问题.基于运动的设计方法学在曲面设计时不仅考虑了几何形状,还考虑了 CNC 机床的运动和动力约束,为并行几何设计和制造提供了基础.

如果运动的物体是一条直线(如侧铣刀的刀刃),则其与运动路径曲线形成的扫描体为有理可展曲面.这样,有理运动就定义了加工曲面的五轴 NC 机床的刀具运动.设 $n = (n_1, n_2, n_3)$ 是直线相对于动坐标系测量的单位方向向量, n_4 为 F 的原点到直线的距离,则直线的齐次坐标被定义为

$$p_1^* : p_2^* : p_3^* : p_4^* = n_1 : n_2 : n_3 : n_4.$$

在有理运动 $[Q(t), Q^0(t)]$ 下,代表同一直线相应于 M 的齐次坐标的轨迹为

$$p^*(t) = \begin{bmatrix} 0 \\ [A(Q)] \\ 0 \\ (g^*)^T \\ S^2 \end{bmatrix} p^*,$$

$[A(Q)]$ 由式(4)确定, g^* 由下式给出

$$g^* = -[A]^T g =$$

$$\begin{bmatrix} Q_4^0 Q_1 - Q_1^0 Q_4 - Q_2^0 Q_3 + Q_3^0 Q_2 \\ Q_4^0 Q_2 - Q_2^0 Q_4 - Q_3^0 Q_1 + Q_1^0 Q_3 \\ Q_4^0 Q_3 - Q_3^0 Q_4 - Q_1^0 Q_2 + Q_2^0 Q_1 \end{bmatrix}.$$

4 实例

图 1 为一条直线沿一条可变形 NURBS 曲线运动形成的直纹面;图 2 为一叶轮叶片的型面,由一圆柱铣刀经有理运动形成的扫描体表示.利用文中所提出的算法,在造型过程中已经考虑了刀具路径生成问题,这种将刀具的几何和运动直接用来造型自由曲面,在产生刀具路径中的一些问题可能会被很易于解决.除此之外,这种方法使得在形状设计阶段考虑数控机床的限制的一些问题变得容易解决.

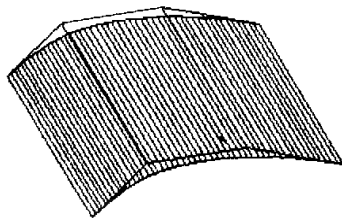


图 1 直线沿可变形 NURBS 曲线运动形成的直纹面

Fig.1 Ruled surface formed by the motion of line along the

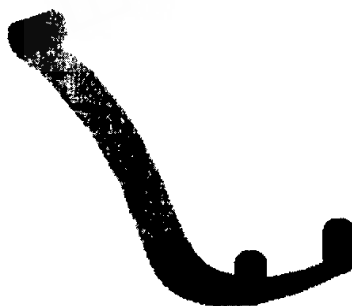


图 2 叶片型面及刀具路径

Fig.2 Vane surface and its tool path deformable NURBS curve

5 结束语

本文将运动学、计算机辅助几何设计与 CAD/CAM 技术结合起来,研究了自由曲面设计及其刀具路径生成过程,文中采用可变形 NURBS(D-NURBS)自由曲线构造刀具扫描体曲面的 CAD 模型,所得曲面易满足所使用的特殊的数控加工机床的运动和动力学限制.本文通过实例证明了该算法的正确性及可行性.实践证明,文中所提出的算法具有较大的实用性,具有一定的推广价值.

参考文献:

- [1] HUANG Y, OLIVER J H. Non - constant parameter NC tool path generation on sculptured surfaces[J]. ASME Computers in Engineering Conference, 1992, 1: 411 - 419.
- [2] JEFFREY Q. Kinematics - Driven Geometric Modeling: A framework for Simultaneous NC tool - path generation and sculptured surface design[A]. LOS Alanitos. IEEE International Conference on Robotics and Automations[C]. Calif: IEEE Computer society, 1996. 1819 - 1824.

(下转 74 页)

- [3] TERZOPOULOS D, QIN H. Dynamic NURBS with geometric constraints for interactive sculpting[J]. ASM Transaction on Graphics, 1994, 13(2): 103 - 135.
- [4] TERZOPOULOS D, PLATT J, BARR A H, et al. Elastically deformable models[J]. Computer Graph, 1987, 21(4): 205 - 214.
- [5] TERZOPOULOS D, FLEISCHER K. Deformable models [J]. The Visual Computer, 1988(4): 306 - 331.

Synchronism Research on Free - formed Surface and Tool Path Generation Technology

YUN Min, YU Yuan, WANG Xiao - chun

(Institute of NC Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on deformable NURBS(D - NURBS) free - formed curve, a kind of space displacement method in kinematics is used to construct the CAD model of tool sweeping body in NC machining. Then the primary geometry curve and surface are provided with the characteristics of physical surface. In this way, it is allowed that the designer can exert many tools based on force with the natural and dividable method to sculpt interactively and design the surface directly. Therefore, the surface can satisfy the kinematics and mechanics limit in the special NC machine easily. At the same time, the new method to design the NC machining tool path of free - formed surface. The technology of kinematics, CAGD and CAD/CAM are integrated in this method, and provide the base for synchronism shape design and manufacture.

Key words: CAD/CAM; space displacement; D - NURBS; tool path