

面向犁体优化设计的三维 CAD 系统

金昊^① 籍国宝 柯冬香

(中国农业大学机械工程学院) (北京工业大学)

摘要 研究开发了参数化犁体 CAD 三维(3D)图形系统(PSCAD),以辅助犁体优化设计。将 3D 概念引入 CAD,开发 3D 绘图与实体造型的三维图像模拟技术,保证了犁体研究与优化过程的直观和透明。该系统采用达到二阶参数连续的犁体曲面、样板曲线通用数学模型和参数造型,较传统建模方法光顺性有大幅度提高,可满足任意复杂及不同型式犁体的设计要求。

关键词 三维 CAD 系统;犁体;几何模型;实体造型;模拟

中图分类号 S 222.121.2; TP 391.72

Development of 3D CAD System for Plough Designing

Jin Hao Ji Guobao Ke Dongxiang

(College of Machinery Engineering, CAU) (Beijing University of Technology)

Abstract The parameterized 3D graphic CAD system is developed to aid optimizing and designing of various plow bottoms. Advanced 3D image simulation technology are introduced into the system to guarantee visualization of developing processes. The C^2 -continuous math models including 3D parameterizations in common use of plough surfaces are presented to produce better smoothness than the traditional methods, and satisfy the designs of any types of plow surface.

Key words 3D CAD system; plough; geometric model; solid modeling; simulation

当前为适应耕作理论和技术的发展,铧式犁呈现出多样化发展方向。如实现“半翻半松,原地扭堡”的新型高速低阻犁^[1],以及缩小犁体纵向间距的横排犁等都是为适应新耕作思想而设计的。新式犁开发过程的关键环节是犁体曲面的优化设计。传统的二维犁体 CAD 与手工绘图在设计过程中没有不同,仅提高了一些绘图效率,不能完成全面的辅助设计;三维可视化是更好理解工程数据的关键。笔者将三维可视化技术与 CAD 结合起来,开发出参数化犁体 CAD 三维图形系统(PSCAD),通过可视化计算,使逼真的三维模型贯穿在整个产品系列的设计过程中,为 CAD/CAM 一体化提供了造型基础。

1 三维几何建模

犁体曲面形状复杂多样,单一曲面片无法表达,传统建模方法采用人工分片描述。设计人员根据每片特点选择不同的二次曲面模型,但由于数据格式不同,效率很低;同时由于影响因素复杂,计算量很大(如各曲面片扭矢应保证某种特定关系),传统方法难以突破一阶参数连续

收稿日期:1997-10-28

①金昊,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)213 信箱,100083

来解决曲面片边界连接问题,影响整体光顺性的提高.特别在新型犁体(如新型高速低阻犁)的设计阶段,要准确表达犁面的局部复杂性,必须增加分片,这使CAD效率显著下降,而且造成光顺性劣化,严重影响设计质量.笔者从提高犁面光顺性角度出发,综合自由曲面造型技术及三维数据的参数造型法,创建了3D犁体曲面规范化参数造型和通用数学模型.

1.1 参数造型

笔者将二维Foley法^[2]改进扩展为三维双参数造型.采用修正系数对因曲线段绝对曲率偏大、与实际弧长相比实际弦长偏短进行修正,使其光顺性方面的优点较其他参数造型更为突出.犁体曲面的光顺要求侧重在样板曲线与翻土曲线方向,所以定义参数造型以样板曲线或翻土曲线方向为参数 u ,并根据拓扑关系自动搜索数据库,按 u, v 方向构造 $(m+1) \times (n+1)$ 犁体曲面拓扑矩阵:

$$\begin{bmatrix} d_{0,0} & d_{0,1} & \cdots & d_{0,n} \\ d_{1,0} & d_{1,1} & \cdots & d_{1,n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{m,0} & d_{m,1} & \cdots & d_{m,n} \end{bmatrix}$$

$d_{i,j}$ 是由样板曲线或翻土曲线初始数据的原始二维表转换成的三维坐标参数.犁体曲面规范化双参数造型(图1)如下:

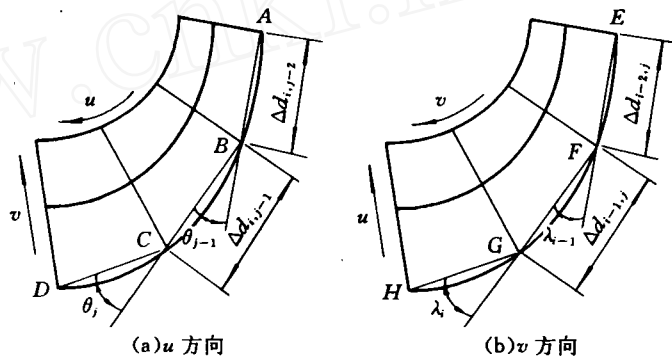


图1 曲面片与双参数造型说明

$$1) \begin{cases} u_{i,0} = 0 \\ u_{i,j} = u_{i,j-1} + k_{i,j} |\Delta d_{i,j-1}| \Rightarrow u_i = \frac{1}{n+1} \sum_{j=0}^n u_{i,j} \end{cases}$$

$$k_{i,j} = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{|\Delta d_{i,j-2}| \theta_{j-1}}{|\Delta d_{i,j-2}| + |\Delta d_{i,j-1}|} + \frac{|\Delta d_{i,j}| \theta_j}{|\Delta d_{i,j-1}| + |\Delta d_{i,j}|} \right)$$

其中 $\theta_j = \min(\pi - \angle BCD, \pi/2)$, $|\Delta d_{i,-1}| = |\Delta d_{i,n}| = 0$, $\Delta d_{i,j} = d_{i,j+1} - d_{i,j}$

$$2) \begin{cases} v_{i,0} = 0 \\ v_{i,j} = v_{i-1,j} + l_{i,j} |\Delta d_{i-1,j}| \Rightarrow v_j = \frac{1}{m+1} \sum_{i=0}^m v_{i,j} \end{cases}$$

$$l_{i,j} = 1 + \frac{3}{2} \left(\frac{|\Delta d_{i-2,j}| \lambda_{j-1}}{|\Delta d_{i-2,j}| + |\Delta d_{i-1,j}|} + \frac{|\Delta d_{i,j}| \lambda_j}{|\Delta d_{i-1,j}| + |\Delta d_{i,j}|} \right)$$

其中 $\lambda_j = \min(\pi - \angle HCF, \pi/2)$, $|\Delta d_{-1,j}| = |\Delta d_{m,j}| = 0$, $\Delta d_{i,j} = d_{i+1,j} - d_{i,j}$

式中: $|\Delta d_{i,j-1}|$ 为两点间曲线段的弦线长度; $k_{i,j}, l_{i,j}$ 均为弦长的修正系数; θ_j, λ_j 均为相临弦线夹角的外角(为避免发生打圈自交现象,该值应不超过 $\pi/2$)。

1.2 犁体曲面模型

令样板曲线或翻土曲线方向以 u 为参数,使犁体曲面以达到二阶连续的样板曲线和翻土曲线为初始网格骨架.按拓扑关系从工程数据库中提取由三次样板曲线或翻土曲线数据转换的三维坐标参数的有效数据,建立 $(a+1) \times (b+1)$ 阶犁体曲面拓扑矩阵:

$$\begin{bmatrix} d_{0,0} & d_{0,1} & \cdots & d_{0,b} \\ d_{1,0} & d_{1,1} & \cdots & d_{1,b} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{a,0} & d_{a,1} & \cdots & d_{a,b} \end{bmatrix}$$

提取双参数造型产生的参数列 u_i 和 v_j , 取双参数方向两端节点重复度为 4, 内部节点重复度为 1, 定义二阶连续的犁体曲面模型(规定 $0/0=0$):

$$p(u, v) = \sum_{i=k-3}^k \sum_{j=l-3}^l d_{i,j} N_{i,3}(u) N_{j,3}(v), \quad u \in [u_k, u_{k+1}], k=3, 4, \dots, a; v \in [v_l, v_{l+1}]$$

$$\begin{cases} N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 (u_i \leq u \leq u_{i+1}) \\ 0 (u > u_{i+1} \text{ 或 } u < u_i) \end{cases} \\ N_{i,e}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+e}-u_i} N_{i,e-1}(u) + \frac{u_{i+e+1}-u}{u_{i+e+1}-u_{i+1}} N_{i+1,e-1}(u) \quad (e=1, 2, 3) \\ N_{j,0}(v) = \begin{cases} 1 (v_j \leq v \leq v_{j+1}) \\ 0 (v > v_{j+1} \text{ 或 } v < v_j) \end{cases} \\ N_{j,f}(v) = \frac{v-v_j}{v_{j+f}-v_j} N_{j,f-1}(v) + \frac{v_{j+f+1}-v}{v_{j+f+1}-v_{j+1}} N_{j+1,f-1}(v) \quad (f=1, 2, 3) \end{cases}$$

其中 $N_{i,3}(u)$ 与 $N_{j,3}(v)$ 为便于计算机处理的三次规范 B 样条基函数的递推关系表达式。

新的数学模型通过调配函数 $N_{i,3}(u)$ 和 $N_{j,3}(v)$ 的二阶导矢连续, 使相邻二次曲面片之间理所当然有连续二阶导矢^[3], 解决了曲面片间的连接问题, 并保证曲面网格控制顶点数目不受限制, 以单一方程准确表达其他组合曲面难以表达的复杂形状。在 PSCAD 中采用该模型, 只需调整拓扑矩阵阶次 a 和 b , 系统即可自动提取三次样板曲线或翻土曲线相应的有效数据, 在拓扑矩阵阶次大于 50 时获得插值原始数据的犁面或在 9~49 范围内调整 a 和 b , 使造型光顺以获得最优的犁体曲面。

2 工程数据库

PSCAD 的绘图水平在很大程度上依赖于工程数据库。设计中取样板曲线或翻土曲线初始三维坐标作主参数, 通过计算、查询获得辅助参数。为使软件与设计者逻辑思维方式相吻合, 保证数据结构符合软件运行方式和数据间相互联系, 设计了将样板曲线和翻土曲线参数由原始二维表形式转换为三维结构的工程数据库子程序和专门数据检索模块。其管理系统的编写采用双向链表技术, 系统根据程序申请和回收内存空间, 数据处理量只受内存容量制约, 存储更加灵活。这种体系结构的数据库容量可随信息量的增长而扩展, 能处理和采集大规模数据。

3 绘图程序库

绘图程序库把设计与绘图有机地联系起来, 形成参数设计与绘图一体化的综合设计系统。主要包括二阶连续的二维样板曲线和翻土曲线绘制模块、三维犁体曲面绘制模块、作为实体造型的基础参与现实模拟与设计的三维几何造型模块和采用法向量插值光照模型(shading model, PHONG)生成犁体的虚拟数字模型及其动态图像的犁体实体造型生成模块。

PSCAD 采用 Auto CAD 支持下的各类几何体素作为基础运算单元, 抽取犁体形体特征

为造型基础,通过并、交、差集合运算及光照模型实施犁体造型,使设计者在设计绘图时不再与点、线、弧、圆打交道,而是在三维空间上开展研究分析。系统采用变差几何法进行参数化实体造型,通过修改参数,可方便地在屏幕上显示虚拟犁体模型和动态仿真图像并模拟土壤在表面上的运动轨迹以替代实物模型的制作,使开发过程大为简化。另外,可视化实体造型不会产生缺边少面或一条边穿入零件实体的差错。实体造型还是犁面造型光顺性分析的重要依据。PSCAD 利用三维造型系统的帧动画 (frame animation) 技术,即对显示帧缓冲区 (frame buffer) 进行直接操作和填写,将犁体图像色素 (picture element) 的色码信息直接写入视频存储器的指定位置并迅速在显示终端得到虚拟产品逼真的动态模拟效果。PSCAD 采用 PHONG 光照模型绘制犁体 3D 彩色图像。该模型沿扫描线对多面体表面离散的法向量作双线性插值,对每一像素都根据插值所得的法向量按照光亮度 (luminance) 计算公式计算光的强度及色彩分量 (RGB 三基色)。设 $P_1(x_1, y_1), P_2(x_2, y_2)$ 和 $P_3(x_3, y_3)$ 是凸多边形任意 3 个顶点在屏幕上的投影,建立三角形的仿射坐标系 (α, β) , 其中 P_1, P_2 和 P_3 的仿射坐标分别为 $(0, 0), (0, 1)$ 和 $(1, 0)$ 。从屏幕坐标至三角形坐标的仿射变换为 $\alpha = a_1x + b_1y + c_1, \beta = a_2x + b_2y + c_2$ 。令 N_1, N_2 和 N_3 分别为 3 个顶点的法向量,其插值公式为

$$N(x, y) = (1 - \alpha - \beta)N_1 + \alpha N_2 + \beta N_3 = Ax + By + u \tag{1}$$

式中

$$A = a_1N_2 + a_2N_3 - (a_1 + a_2)N_1, B = b_1N_2 + b_2N_3 - (b_1 + b_2)N_1,$$

$$u = c_1N_1 + c_2N_2 + (1 - c_1 - c_2)N_3$$

将式(1)代入含环境反射、漫反射和镜面反射三分量组合的光亮度公式,即得到非线性的 PHONG 光照模型。由法向量计算方法可知 PHONG 模型是在局部范围内模拟表面弯曲性,因而可得到较好的犁体曲面绘制效果,尤其是镜面高光显得更加真实。

4 应用实例

PSCAD 从工程数据库中提取 BT35 型犁与新型高速低阻犁样板曲线或翻土曲线的初始数据后转换成三维特别数据文件,经样板曲线数学模型处理,得到二阶连续的样板曲线群并输出其工程曲线图形(图 2),经曲面数学模型处理和透视变换计算,将犁体的三维信息转换为在

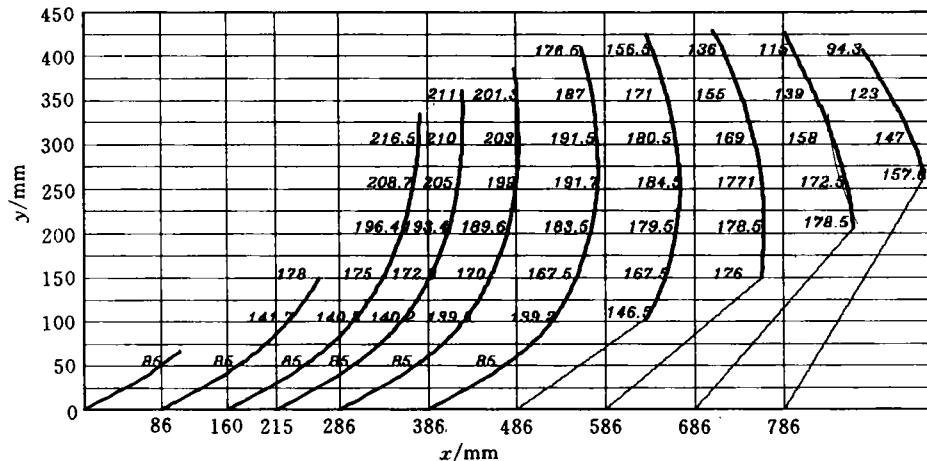


图 2 BT35 型犁样板曲线族工程图形

图形设备上输出的二维透视图(图 3),再通过构造实体造型,自动生成 2 种犁体的静、动态三维彩色图像(图 4)。通过对比观察 2 种犁体数字模型的动态图像及虚拟土壤在犁体曲面上的 3D 运动场景可知,新型高速低阻犁犁胸窄,犁壁采用使土堡先抬升、后扭转的造型,从前方看,犁锋切下土堡的左边一半直接落入犁沟,右边一半沿犁壁上升,依靠翼部扭曲产生原地扭转,翻身后盖在直接落下的土堡上,实现覆盖。

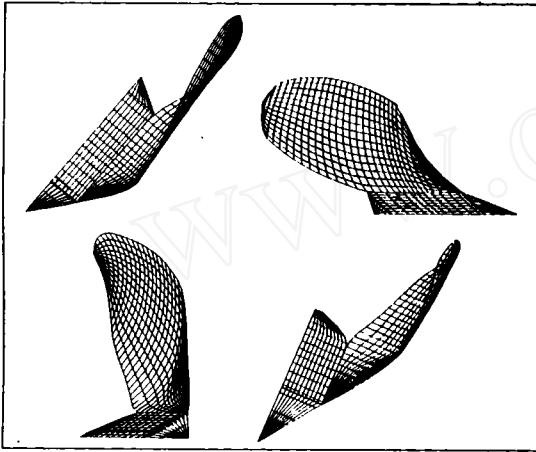


图 3 BT35 犁(上)与高速低阻犁(下)
犁体的二维透视图

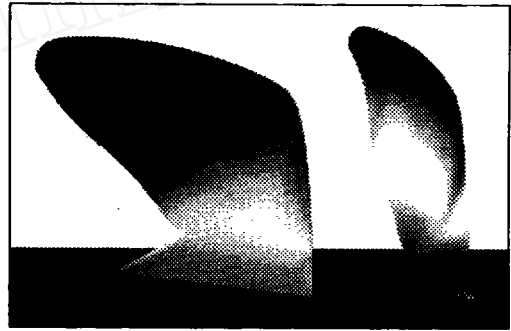


图 4 BT35 犁(左)与高速低阻犁(右)
实体造型的 3D 图像

5 结 论

PSCAD 创建了达二阶连续的犁体样板曲线和曲面的通用数学模型,以单一方程及数据库格式表达整片任意型式的犁体曲面,克服了常规分片处理造成的弊端,表现出良好的光顺性处理效率;采用 C 语言、Auto LISP/Auto CAD 等为主要开发工具,开发了工程数据库、参数设计程序库和绘图程序库等模块,界面友好,具良好的维护性和可扩充性^[4,5,6],并以三维绘图和图像模拟贯穿开发过程,生成 3D 数字模型及模拟工作场景,使犁体曲面优化设计的研究更加方便和直观。

参 考 文 献

- 1 金 昊,金毓铭.降低铧式犁比阻的新工作原理.农业机械学报,1994,25(2):122~124
- 2 Farin G. Curves and Surfaces for Computer Aided Geometric Design: A practical Guide. New York: Academy Press, 1988. 67~88
- 3 Woodward C D. Skinning techniques for interactive B-spline surface interpolation. CAD,1988,20(8):441~451
- 4 UDC681.3 GB8566—88 计算机软件开发规范
- 5 GB/T 12504—90 计算机软件质量保证计划规范
- 6 GB/T 12505—90 计算机软件配置管理计划规范