

风力机叶片三维线框图的设计和显示

杨自栋

(山东工程学院设备系, 山东淄博 255012)

杜白石

(西北农业大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

TK83 TH126

摘要 根据风力机叶片设计的实际过程, 在三次参数样条曲线拟合叶片翼型曲线的基础上, 提出了一种在计算机上能立体显示叶片截面及其结构的程序设计方法。即把叶片截面外形各点的坐标经过旋转变换形成叶片三维线框模型数据, 将三维坐标经过投影变换到平面坐标上(称为世界坐标), 再将世界坐标变换到设备坐标上, 最后通过绘图函数将变换后的数据用图形显示在屏幕上。本研究可为风力机叶片及其它相似复杂形体的计算机绘图提供了依据。

关键词 三次参数样条曲线, 风力机叶片, 三维线框图
中图分类号 TH132.4

风力发电机叶片

风力机叶片计算机3D绘图的研究国内才刚刚起步。中国众多的微机用户缺乏专用的几何造型系统, 限制了计算机绘图的实际应用^[1], 另一方面由于风力机叶片CAD的研究还不够深入, 其设计方法和专用软件正处在不断完善之中, 专门讨论叶片3D绘图的文献很少, 有的文献给出的方法通用性不强^[2]。风力机叶片截面形状复杂, 不同位置处截面与投影面夹角不同, 用二维屏幕绘图法得到叶片结构的主视图及安装角的变化图(图1), 即使再画其俯视图和侧视图也能直观地表达叶片的空间结构。本文针对上述情况, 根据风力机叶片动态设计的需要, 在每一种叶片的具体设计中

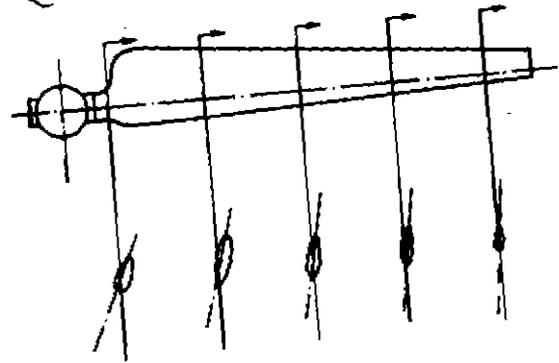


图1 沿不同叶片截面叶素的变化

用C语言编制出可随时观察中间和最终设计结果的绘图程序, 用AutoLISP语言在AutoCAD绘图平台上开发出显示叶片三维线框模型正轴侧投影图参数化绘图程序。上述方法实现了叶片的计算机3D绘图, 有助于提高叶片CAD的设计质量。由于翼型曲线已知的离散数据较少, 必须先采用拟合效果很好的三次参数样条曲线对翼型曲线进行拟合插值, 然后用基于点的坐标的几何变换来求出叶片各截面在空间实际位置的三维坐标, 最后用绘图程序完成叶片三维线框图正轴侧投影的计算机3D绘图。

1 用三次样条函数拟合翼型曲线

现代大中型风力发电机的叶片长度已达20~40m, 截面弦长在1~2m之间^[3], 叶片

收稿日期 1997-04-29
作者简介 杨自栋, 男, 1970年生, 硕士

的截面形状由翼型曲线上各点相对于弦长的离散坐标给出。由于离散点较少,当截面弦长较大时,各点之间距离就变得较大,这时若用翼型已知离散坐标进行绘图,得到的结果将与实际形状相差甚远,因此,必须补充出较多的符合实际形状的插值点。根据风力机叶片结构特点,对翼型曲线拟合函数的要求是既要

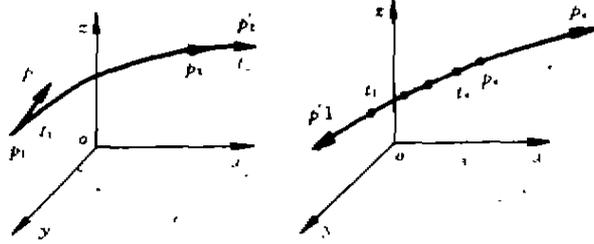


图 2 三次样条曲线

保证通过所有的已知型值点,又要在各型值点处保持光滑平顺(在数学上表现为原函数和一阶导数连续),而三次参数样条曲线恰好都满足上述要求,因此这里选用它来进行翼型曲线的拟合和插值^[4]。

三次样条函数可由一段曲线的位置矢和切矢决定(图 2)。根据三次参数样条曲线的函数形式,通过翼型曲线各型值点的第 i 段(p_i, p_{i+1})曲线以 t 为参数的方程可写为:

$$p_i(t) = A_i + B_i t + C_i t^2 + D_i t^3 \quad (0 \leq t \leq t_i) \quad (1)$$

式中, $p_i(t)$ 为样条上任一点处的位置向量; A_i, B_i, C_i, D_i 为参数方程待定系数; t 为参变量,为了取得较好的拟合效果,方程中 t_i 的最大值取该段曲线的弦长,即:

$$t_i = \sqrt{(X_{i+1} - X_i)^2 + (Y_{i+1} - Y_i)^2 + (Z_{i+1} - Z_i)^2} \quad (2)$$

对(1)式取一阶和二阶导数,得:

$$p'_i(t) = B_i + 2C_i t + 3D_i t^2 \quad (3)$$

$$p''_i(t) = 2C_i + 6D_i t \quad (4)$$

代入边界条件:

$$t=0 \text{ 时, } \begin{cases} p_i(0) = p_i = A_i \\ p'_i(0) = p'_i = B_i \end{cases} \quad (5)$$

$$t=t_i \text{ 时, } \begin{cases} p_i(t_i) = p_{i+1} = A_i + B_i t_i + C_i t_i^2 + D_i t_i^3 \\ p'_i(t_i) = B_i + 2C_i t_i + 3D_i t_i^2 \end{cases} \quad (6)$$

解式(5)、(6)组成的方程组,可得:

$$\begin{cases} A_i = p_i \\ B_i = p'_i \\ C_i = \frac{3}{t_i^2}(p_{i+1} - p_i) - \frac{1}{t_i^2}(p'_{i+1} + 2p'_i) \\ D_i = \frac{1}{t_i^2}(p'_{i+1} + p'_i) - \frac{2}{t_i^3}(p_{i+1} - p_i) \end{cases} \quad (7)$$

当代入第 i 段翼型曲线两端点的位置矢 p_i, p_{i+1} 及切矢 p'_i, p'_{i+1} 后,即可求出该段样条函数的系数 A_i, B_i, C_i, D_i , 然后代入参数 t 的不同值,就可求出多个插值点来。在计算程序中,实际输入的数据是翼型曲线的离散点坐标值和两端点自由的连续边界条件 $p'_i(0) = p'_i(t_i) = 0$ ^[5], 就可以对翼型的上下弧分别进行拟合和插值。

2 叶片各截面空间实际位置坐标的求解

假设叶片是由如图3所示的叶片微元沿前缘绕X轴连续光滑旋转形成的。设叶片根部截面面积最大的截面的原始位置在如图3(b)所示的坐标系中的XOY面中,前缘位于坐标原点,翼型曲线上弧离散点的坐标为 (X_0, Y_0, Z_0) ,下弧为 $(X_0, -Y_0, Z_0)$,其中 $Z_0=0$,下面以上弧上点 (X_0, Y_0, Z_0) 为例说明求解过程,下弧的计算与上弧完全相同。

为了得到图3(d)所示的各截面实际位置上的坐标,需要进行一系列坐标的几何变换,每一步变换含有一个变换矩阵 T_i ,整个变换是上述每步变换组成的复合变换。变换过程如图3(b)~3(d)所示:

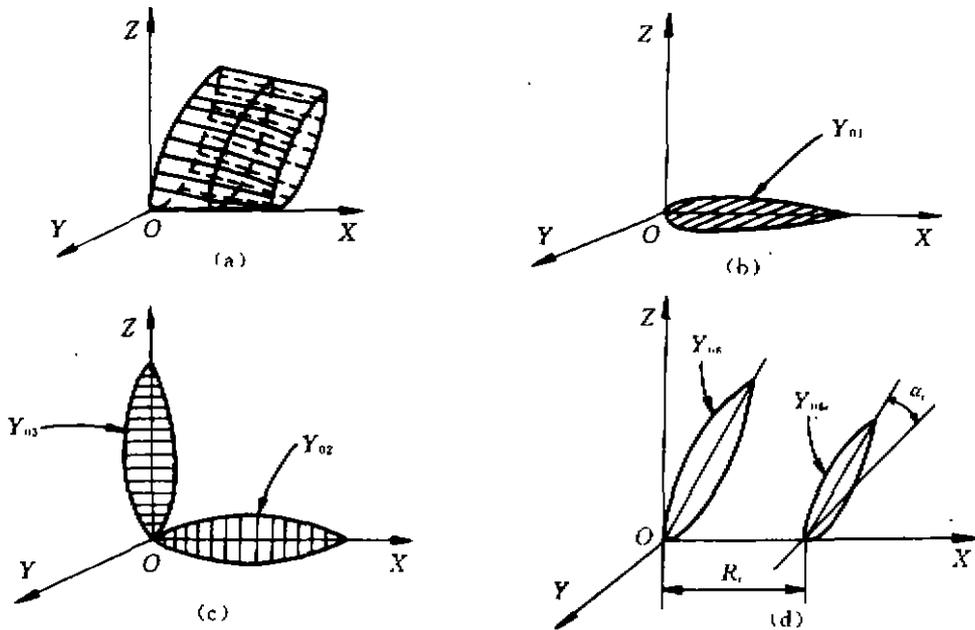


图3 叶片线框微元及翼型坐标几何变换

第一步: Y_{01} 绕X轴方向旋转 90° ,至 Y_{02} 位置,变换矩阵 T_a 为:

$$T_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 90^\circ & \sin 90^\circ & 0 \\ 0 & -\sin 90^\circ & \cos 90^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第二步: Y_{02} 绕Y轴旋转 90° 至 Y_{03} ,则:

$$T_b = \begin{bmatrix} \cos 90^\circ & 0 & -\sin 90^\circ & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \sin 90^\circ & 0 & \cos 90^\circ & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第三步: Y_{03} 绕Z轴旋转 90° 至 Y_{04} 位置,则:

$$T_c = \begin{bmatrix} \cos 90^\circ & \sin 90^\circ & 0 & 0 \\ -\sin 90^\circ & \cos 90^\circ & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第四步: Y_{04} 绕 X 轴旋转 α_0 至 Y_{05} , 则:

$$T_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_0 & \sin \alpha_0 & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_0 & \cos \alpha_0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第五步: 将 Y_{04} 沿 X 轴平移 R_i , 可得 R_i 处叶片截面在平行于 ZOY 面中的相对坐标, 其变换矩阵为:

$$T_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ R_i & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第六步: 将 Y_{04} 平移结果绕 X 轴旋转 α_i 度, 得 R_i 处截面实际位置坐标, 则:

$$T_n = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & \sin \alpha_i & 0 \\ 0 & -\sin \alpha_i & \cos \alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

第七步: 取翼型相对弦长 $l=1$, 则坐标放大系数 $K_i = \frac{L_i}{L} = L_i$, 将经上述过程得到的 Y_{06} 、 Z_{06} 处翼型相对坐标乘以坐标放大系数, 可得截面实际坐标的大小^[6], 则:

$$T_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_i \end{bmatrix}$$

设 R_i 处截面实际坐标的齐次坐标为 $(X_i, Y_i, Z_i, 1)$, 则其计算公式为:

$$\begin{aligned} [X_i, Y_i, Z_i, 1] &= [X_0, Y_0, Z_0, 1] \cdot T \\ &= [X_0, Y_0, Z_0, 1] \cdot T_a \cdot T_b \cdot T_c \cdot T_d \cdot T_{a_0} \cdot T_n \cdot T_k \end{aligned} \quad (8)$$

3 用三维线模型进行计算机 3D 绘图

在计算机图形学中, 表示形体的三维模型主要有线框模型、表面模型和实体模型。由于三维线框模型可以很真实自然地模拟风力机叶片结构的设计过程, 所以非常适合表达叶片的空间结构^[1]。为了能进行计算机 3D 绘图, 还需将上述所得坐标 (X_i, Y_i, Z_i) 进行正轴侧投影变换和窗口区与视窗区间坐标的变换:

第八步: 坐标的正轴侧投影变换:

$$T_{3D} = T_z T_x T_y = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

第九步:窗口区与视图区间坐标的变换,经 T_{3D} 变换后得到的坐标是在用户坐标系中的值,将整个叶片正轴侧投影图放在一个窗口区中,然后在显示器屏幕上相应开一个图形输出的视图区,它们之间坐标变换矩阵为:

$$T_{3D'} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b & 0 \\ c & 0 & d & 1 \end{bmatrix}$$

其中, a, b, c, d 根据窗口区和视图区的选取可定出。

经过上述两步变换,得到的各截面外形上各点在屏幕上视窗区中的齐次坐标 $(X_s, Y_s, Z_s, 1)$,则其计算公式为:

$$[X_s, Y_s, Z_s, 1] = [X_i, Y_i, Z_i, 1] \cdot T_{3D} \cdot T_{3D'} \quad (10)$$

然后,将同一截面上各点用直线连结形成翼型曲线,将不同截面间相同次序的点用直线联结起来形成叶片微元,上述过程用 AutoLISP 语言编程就可画出整个叶片的三维线框模型的正轴侧投影图来,在 AutoCAD 平台上进行参数化绘图时,只要采用人机对话方式输入叶片设计结果数据文件,便可进行叶片三维线框图绘制,其结果如图 4 所示。

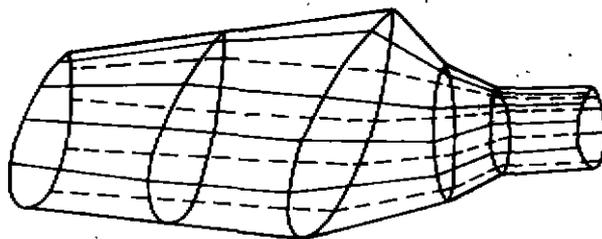


图 4 叶片的三维线框图

4 结 论

1) 三次参数样条函数满足翼型曲线拟合和插值要求,该法与多项式拟合插值相比,其计算结果精度较高。

2) 三维线框模型很适合描述叶片的空间结构,用基于坐标的几何变换公式推导出的叶片空间实际位置三维坐标的计算公式,可用于其它类似结构计算机 3D 绘图的计算。

3) 上述过程已用 AutoLISP 语言编成了通用性较好的绘图程序,只要人机对话输入叶片结构参数,视窗坐标值等数据文件名,即可完成绘图过程。

参 考 文 献

- 1 孙家广,杨长贵编著. 计算机图形学. 北京:清华大学出版社,1996
- 2 徐利军,叶枝全. 基于一种新的优化方法的水平轴风力机风轮设计软件. 太阳能学报,1996,17(1):9~13
- 3 叶 凡,郭 军等. 20 kW 风力与 40/12 kW 柴油发电机组并联运行系统风轮玻璃钢叶片研制. 太阳能学报,1995,16(1):29~31
- 4 赵月芳主编. 微机绘图与 AutoCAD. 北京:电子工业出版社,1995
- 5 徐士良编. C 常用算法程序集. 北京:清华大学出版社,1995
- 6 杨自栋. 风力发电机叶片 CAD 及其系统运行研究[硕士学位论文]. 陕西杨陵:西北农业大学机电学院,1997

The Design and Display of 3D-block Diagram of Wind Energy Conversion System Blades

Yang Zidong¹ Du Baishi²

(1 Department of Equipment, Shandong Engineering College, Zibo, 255012)

(2 College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwestern Agricultural University, Yangling, Shaanxi, 712100)

Abstract On the basis of blade airfoil curve fitted with triple spline function and the practical process, a kind of program design method is offered to display the section of WECS blades and its structure. Firstly, the data of shape's point of blades are revolved and converted to form the data of 3D-block diagram of WECS blades. Secondly, the 3D coordinate is projected on the 2D coordinate (known as the World Coordinate). Then the World Coordinate is transformed to the Device Coordinate. Finally, the varied data are drawn on computer screen by drawing function. In the paper the program design method provides a means to realize WECS blades and other analog complicated structures.

Key words triple spline function, wind energy conversion system (WECS) blades, 3D-block diagram

· 简 讯 ·

西北农业大学研制的 2BFS-3 型施水硬茬播种机通过了成果鉴定并获实用新型专利

由我校机械与电子工程学院杨青教授和薛少平高级工程师主持研制的“2BFS-3 型施水硬茬播种机”已通过了成果鉴定,其结论是:“整机性能居国内领先水平,该机的施水系统和蕊锋——铲式开沟器均属国内首创”。同时与该机配套的播种开沟器已被中国专利局授予实用新型专利权。

为了解决我国农业干旱问题,李岚清副总理于 1995 年 7 月 24 日在西安召开了有农机、水利专家参加的座谈会。随即,我校成立了“旱地移动式节水灌溉技术及设备研究”课题组,这次通过鉴定的施水硬茬播种机是该大课题的内容之一。在以陕西省科委为组织单位,省农业厅为主持单位的鉴定会上,专家们考察了样机,详细审查了各种技术资料、文件、图纸,观看了播种机现场录像,大家一致认为:该机可一次完成开沟、施水、施肥、播种、覆土等工序,实现了联合作用,保证了干旱条件下的出苗率。根据陕西省农机产品质量监督检测站、陕西省农业机械鉴定站的检测,该机的性能指标符合标准规定,达到了计划任务书的要求,能达到抗旱播种的农业技术要求。

2BFS-3 型施水硬茬播种机是发展农业生产、节约水资源的新型播种机,具有可观的经济效益和广泛的实用性,符合我国发展效益型农业的要求,对发展高效优质农业有重要意义。

(罗永娟 供稿)