

特殊风力机叶片实体建模方法研究

四川城市职业学院 周梅

风力机叶片的制造过程中，无论是叶片模具型腔的设计加工，还是复合材料叶片的铺层设计，都需要使用叶片的三维实体或曲面模型。因此，将叶片曲面方程转化为相应的三维实体或曲面模型，是叶片从设计变成产品必不可少的一环。本文以某风力发电机叶片方程为例，研究了特殊风力发电机叶片实体建模的实现方法。实际建模效果证明，本文提供的方法能够快速精确地建立叶片模型，为后续制造环节提供强有力的支撑。

一、叶片实体建模思路

通常的叶片设计方法，采用离散方法进行，即选取几个截面，计算这些截面的最佳截面形状，然后将这些截面光滑的连接起来，得到叶片的模型。这种方法的优点是计算量小，但缺点是使用较少的截面，无法对叶片形状进行精确的描述，常导致设计出的叶片工作性能不佳。

本文采用解析法进行叶片设计，可以避免这一问题，即通过解析计算，直接得到叶片的曲面方程，然后通过曲面方程获得叶片模型。解析法的优点是能够精确描述叶片的曲面，只要建模精度足够，获得的叶片工作性能与理论设计结果一致。缺点是叶片的方程较为复杂，通过方程直接建立叶片曲面模型，技术上比较复杂。

根据业务需求，对智能服务化排产与调度的要素进行详细分析，依据制造系统的分层架构，逐层分析和判断各要素对制造系统的影响，有选择的保留对制造系统有重要影响的要素，忽略影响较小的要素。明确智能服务化排产与调度的要素，通过物联网将车间各要素进行关联，包括设备、物料、工装工具、人员等，实现各要素状态可感知、数据可采集以及过程可监控。

二、三维建模实现方法

本文通过一个实际案例，重点讨论根据叶片曲面方程建立叶片精确实体模型的技术路线，以及在此过程中可能需要注意的问题。本文拟定的技术路线为：通过 SolidWorks 二次开发，计算得到叶片任意截面上的型线，并自动插入 SolidWorks 建模环境；然后通过放样、拼接等操作，生成完整叶片模型。

1. 插入截面曲线

(1) 曲面方程及其讨论。定义叶片坐标系如图 1 所示： y 轴为翼型弦线方向（由前缘指向后缘为正）， z 轴与远方风速方向相同， x 轴与 Oyz 平面垂直（由叶根指向叶尖方向为正）。

(3) 通过排产调度算法库构建，实现智能服务化排产调度向同行业推广。在已有的理论研究和企业应用基础上，总结了六类常用排产算法，包括基于规则的排产算法、约束理论、模拟退火算法、禁忌搜索算法和遗传算法。通过分析各类算法的优缺点以及应用场景，构建航空复材生产车间排产调度算法库，便于在不同的生产环境中选用合适的算法，以提升排产效率并获得最优排产方案。

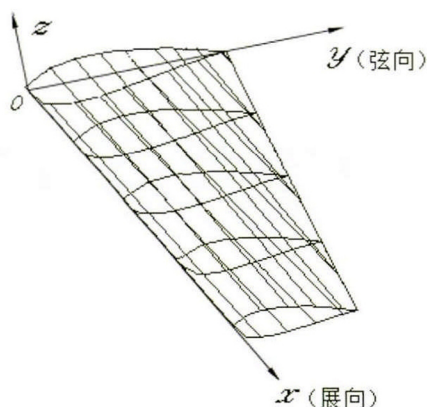


图1 叶片坐标系示例

$$\begin{cases} y = \frac{C(x)}{R} y_c \cos \beta(x) - \frac{C(x)}{R} f(y_c) \sin \beta(x) \\ z = \frac{C(x)}{R} y_c \sin \beta(x) + \frac{C(x)}{R} f(y_c) \cos \beta(x) \end{cases}$$

其中, R 为叶片长度; x 为截面曲线的展向相对位置, 变化区间为 $[0, 1]$; y_c 为翼型弦向相对位置, 变化区间为 $[0, 1]$ 。上式中, 弦长函数 $C(x)$ 为分段函数, 其定义为:

$$C(x) = \begin{cases} 0.1273R & (0 < x \leq 0.05) \\ (-0.0989x + 0.152)R & (0.05 < x \leq 0.78) \\ \frac{8\pi R}{3} \frac{\bar{a}(1-\bar{a})x}{0.85\left(6x + \frac{\bar{a}g}{6xf}\right)\sqrt{\left(6x + \frac{\bar{a}g}{6xf}\right)^2 + g^2}} & (x > 0.78) \end{cases}$$

$$\text{叶尖损失修正系数: } f = \frac{2}{\pi} \text{ArcCos} \left[e^{-\frac{3(1-x)\sqrt{1+81x^2}}{2x}} \right]$$

$$\text{平均轴向又到速度因子: } \bar{a} = \frac{1}{3} + \frac{1}{3}f - \frac{1}{3}\sqrt{1-f+f^2}$$

$$\text{中间变量: } g = 1 - \frac{a}{f}$$

叶片扭角函数 $\beta(x)$ 也是分段函数, 其表达式如下:

$$\beta(x) = \begin{cases} 0.4353 & (x \leq 0.05) \\ \frac{200\pi}{9} \frac{\bar{a}(1-\bar{a})x}{(-0.0974x + 0.1506)\left(6x + \frac{\bar{a}g}{6xf}\right)\sqrt{\left(6x + \frac{\bar{a}g}{6xf}\right)^2 + g^2}} + \frac{180}{\pi} \left(\arctan \frac{6g\bar{f}x}{36\bar{f}x^2 + \bar{a}g} + 3.6 \right) & (0.05 < x \leq 0.78) \\ \frac{180}{\pi} \left(\arctan \frac{6g\bar{f}x}{36\bar{f}x^2 + \bar{a}g} - 3.5 \right) & (x > 0.78) \end{cases}$$

叶片方程中的翼型上、下型线函数 $f(y_c)$ 定义为:

$$f(y_c) = \begin{cases} p_u y_c (1 - y_c) + q_u y_c^{0.5} (d_u - y_c)^{c_u} \\ p_l y_c (1 - y_c) + q_l y_c^{0.5} (d_l - y_c)^{c_l} \end{cases}$$

式中, 上型线系数:

$$p_u = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.05) \\ 0.1 + 0.1 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 0.2 & (x > 0.25) \end{cases}$$

$$p_u = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.05) \\ 0.1 + 0.1 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 0.2 & (x > 0.25) \end{cases}$$

$$c_u = \begin{cases} 0.5 & (x \leq 0.05) \\ 1 + 0.5 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 1.5 & (x > 0.25) \end{cases}$$

$$d_u = \begin{cases} 0.3 & (x \leq 0.05) \\ 0.65 + 0.35 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 1 & (x > 0.25) \end{cases}$$

下型线系数:

$$p_l = \begin{cases} 0 & (x \leq 0.05) \\ 0.01 + 0.01 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 0.02 & (x > 0.25) \end{cases}$$

$$q_l = \begin{cases} 1 & (x \leq 0.05) \\ 0.685 - 0.315 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 0.37 & (x > 0.25) \end{cases}$$

$$c_l = \begin{cases} 0.5 & (x \leq 0.05) \\ 1 + 0.5 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 1.5 & (x > 0.25) \end{cases}$$

$$d_l = \begin{cases} 0.3 & (x \leq 0.05) \\ 0.65 + 0.35 \sin[\pi(-0.75 + 5x)] & (0.05 < x \leq 0.25) \\ 1 & (x > 0.25) \end{cases}$$

至此, 叶片曲面方程被完全确定。

按照上节讨论的建模思路, 当给定不同的展向位置 (即令 $x = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, \dots, 1$) 时, 通过上述方程, 即可获得 x 位置的截面曲线。进一步对这些截面曲线放样, 即可得到叶片的曲面。

进一步观察该曲面方程, 可以获得以下几个结论: ①

由 $C(x)$ 函数的定义可知, x 取值不能为 0, 否则会出现除数为零的错误。也就是说, $x=0$ 的截面, 无法通过程序计算得到, 只能手工添加; ②由 f 和 g 的定义可知, x 取值不能为 1。当 $x=1$ 时, $f=0$, g 无法算出。因此, 叶片尖端, 无法通过程序计算得到其数据, 只能在最后手工封头; ③由 $f(y_c)$ 的定义可知, 对于具体的某个截面曲线而言, y_c 取值不能大于 d_u (上曲线) 或 d_l (下曲线)。④在 $x \leq 0.05$ 区间, 叶片根部曲面实际上是个圆柱面。

上述结论, 在后续编程时, 都需要加以注意。

(2) 基于 SolidWorks 二次开发自动插入截面曲线。接下来按照所列的方程及一些简单的性质, 可以计算出相应截面曲线上的各个点坐标, 并在 SolidWorks 建模环境中插入对应的曲线。这里涉及到截面数量、每个截面曲线的分段数、每个截面曲线的上曲线和下曲线插入方式等几个问题。

插入叶片截面曲线的二次开发程序, 应该具备以下功能: ①具备参数输入界面, 可允许用户输入截面数量和每个截面曲线的分段数量。②具备自动计算所需数据, 自动插入曲线的功能。③具备容错机制, 可自动处理数值计算误差造成的错误, 数据输入不当造成的错误等。

通过 SolidWorks 二次开发, 可实现自动插入叶片的截面曲线, 并且截面数量, 每个截面上的分段点数都可以人为控制, 从而控制叶片建模的精度。

2. 放样得到曲面

大多数三维设计软件均提供了放样功能。以 SolidWorks 为例, 只需将需要放样的曲线, 顺序的选中, 即可预览放样曲面的形状。但是, 要达到较好的放样曲面质量, 则需要较多精细的调整, 主要包括: 各条截面曲线的连接点需要对齐、放样曲面的起始和结束位置, 采用什么方法控制曲面切向、不支持封闭曲线和不封闭曲线之间进行放样等。

了解上述情况后, 再来看前面插入完成的叶片截面曲线, 会发现有些曲线没有封闭, 因此, 无法通过一次放样得到整个叶片, 只能分段放样曲面, 再拼接起来。本例采取的方法是: 分段, 分片进行放样, 然后再拼接为完整的曲面。放样得到的分片曲面如图 2 所示。



图 2 分段放样曲面

3. 曲面拼接和修补

对分段的曲面进行修补和拼接, 首先, 对于叶片曲面开口部分的修补本例采用放样曲面功能实现。放样的两个边界, 即为开口位置两侧边线, 本例使用的控制方法及参数如图 3 所示。

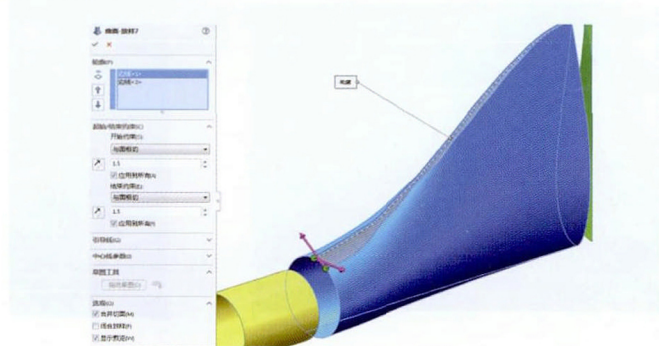


图 3 曲面开口的修补

其次, 对于叶尖封头, 叶片的上下曲面在此交汇, 形成了一个棱边。如图 4 所示。

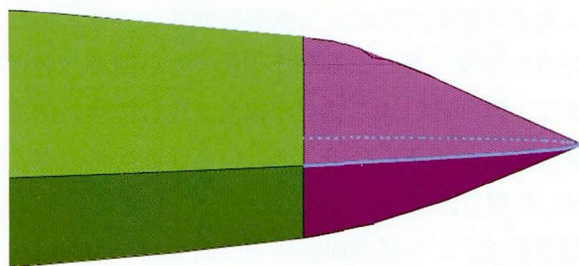


图 4 上下曲面的封头

因此, 对于封头位置, 本文采用的建模策略是先建立一个空间曲线作为棱边, 然后利用叶片曲面边线和棱边进行放样, 得到所需的封头曲面。棱边曲线需要和叶片端部两侧的边线相切, 同时, 棱边的高度需等于一个截面截距。在本例中, 建立长度为 1000mm 的叶片, 截面数量取为 100, 因此一个截面截距为 10mm。

使用上一步建立的棱边曲线, 接下来只要继续放样得到封头曲面即可, 如图 5 所示。

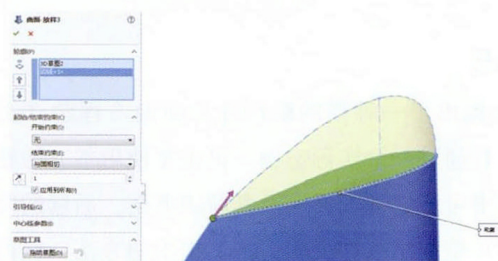


图 5 封头曲面放样示例

最后是叶片各分段之间的拼接，对于叶片柄部附近的部分，此处只需要放样曲面即可实现造型。放样曲面时，两侧采用与曲面相切的方法控制曲面形状，如图6所示。

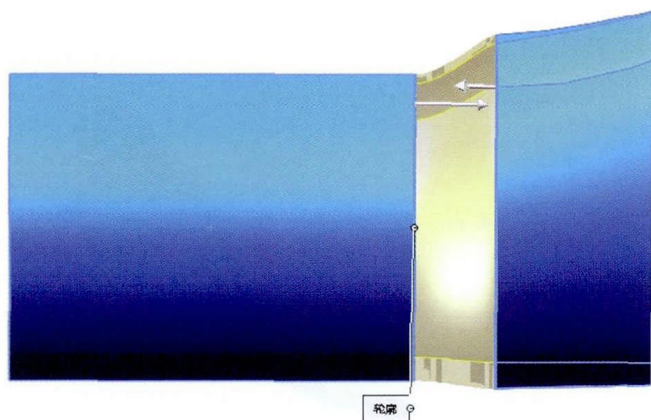


图6 放样曲面实现拼接

最后，需要拼接两段叶片曲面。但要拼接的两端，一端是带有圆角过渡的，而另一端是尖角，这种情况下，直接拼接完全无法保证拼接曲面与两侧曲面相切连续。因此，本例首先给尖角这一端，添加一个R0.1的小圆角，使拼接两端的曲线边界一致。然后使用放样曲面进行拼接。但这个方案再次失败，虽然可以生成曲面，但是曲面质量很差。研究其原因，发现在圆角过渡位置附近，有三个带有不同“凹凸”性质的曲面交汇，放样曲面需要同时满足与三个曲面相切，因此造成得到的曲面出现波纹。

依照曲面建模的一般原则，得通过简化曲面边界的方法，以获得质量更好的拼接结果。本例采用的方法是分片进行放样拼接，最后通过边界曲面修补圆角过渡位置。这样每次曲面放样操作的边界大大简化，就可以获得质量更好的曲面。其过程如图7所示。

通过上述细致的操作，本例就完成了整个叶片的曲面拼接。最后，将所有分段、分片曲面全部缝合，即可得到叶片实体模型。

三、结语

本文提出了一种新的根据叶片曲面方程建立实体模型的方法，并通过一个实际案例，讨论了使用本方法建立叶片模型过程中可能出现的问题及其解决方案。后续的叶片加工过程及叶片检测结果均证明，本文提出的方法，获得的叶片

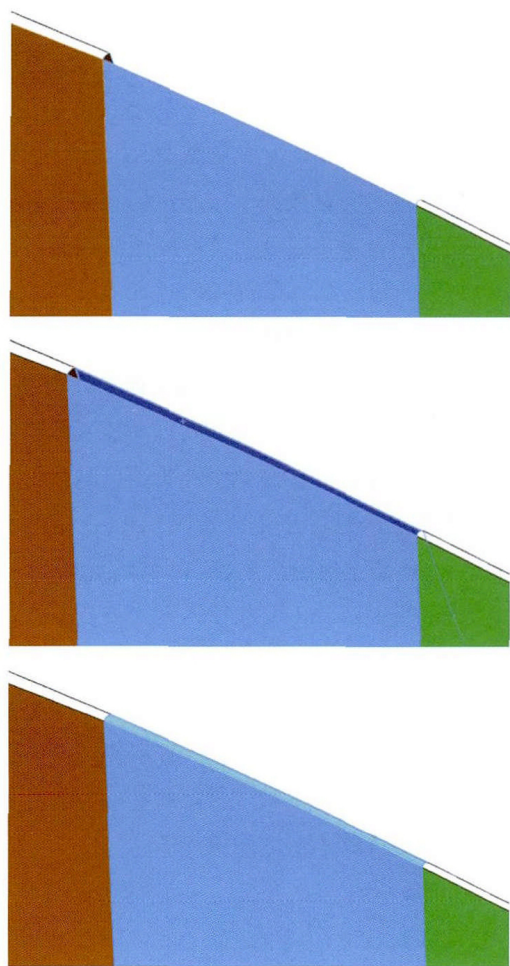


图7 分片放样最得到质量更好的曲面

曲面精度很高，曲面光顺性良好，为从理论设计的叶片曲面函数到实际的叶片产品，提供了有力的技术保障。IM