

基于MATLAB和Pro/E的离心鼓风机叶轮三维造型

张波, 赛庆毅, 李斌

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海
Email: zhangbo__10@163.com

收稿日期: 2021年3月25日; 录用日期: 2021年5月7日; 发布日期: 2021年5月14日

摘要

利用MATLAB平台, 结合叶轮理论和数学算法, 编写离心鼓风机叶片参数化设计程序, 凭借MATLAB良好的互通性, 将叶片参数化设计数据导入Pro/E进行叶轮三维造型, 达到离心鼓风机叶轮设计与造型数字化、一体化的目的。实例证明利用该方法能够实现子午面形状多变、加载规律多样、叶片厚度灵活变化、带分流叶轮的离心鼓风机叶轮的快速三维造型。

关键词

离心鼓风机, MATLAB, Pro/E, 参数化设计, 三维造型

Three-Dimensional Modeling of Centrifugal Blower Impeller Based on MATLAB and Pro/E

Bo Zhang, Qingyi Sai, Bin Li

School of Energy and Power, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: zhangbo__10@163.com

Received: Mar. 25th, 2021; accepted: May 7th, 2021; published: May 14th, 2021

Abstract

Based on the MATLAB platform, combined with impeller theory and mathematical algorithms, a parametric design program for centrifugal blower blades is written. Relying on the good inte-

roperability of MATLAB, the parametric design data of the blades are imported into Pro/E for the three-dimensional modeling of the impeller, so as to achieve the purpose of digitalization and integration of the design and modeling of the centrifugal fan impeller. The example proves that the method can realize the rapid three-dimensional modeling of the centrifugal blower impeller with variable meridian shape, various loading rules, flexible blade thickness, and split impeller.

Keywords

Centrifugal Blower, MATLAB, Pro/E, Parametric Design, Three-Dimensional Modeling

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

叶轮作为离心鼓风机的核心组成部件之一,是使气体提高能量的唯一途径[1],常被比喻为离心鼓风机的“心脏”。叶轮三维造型一直是离心鼓风机设计开发中的重要环节。早期的离心叶轮造型方法是使用手动计算和手动绘制方法绘制叶片形状,并用易于绘制的简单线条(例如直线和圆弧)代替了复杂的自由曲线。这种方法不仅不准确、精度低、繁琐耗时,而且容易受到人为因素的影响,存在不可避免的缺点[2]。随着三维建模软件的不断发展,具有强大曲线、曲面造型功能的三维建模软件(UG、Pro/E、CATIA等)被广泛应用于离心叶轮的三维造型[3][4][5][6][7]。

新中国成立尤其是改革开放以来,中国制造业飞速发展,推动了工业化和现代化进程,然而与世界先进制造水平相比,还存在明显差距。“中国制造 2025”计划为中国制造业设计顶层规划和路线图,中国正从一个制造业大国向制造业强国转变。数字化技术是推动制造技术由经验制造向科学制造的转变的强劲动力,建模与仿真已成为数字化制造的核心[8]。计算机辅助几何设计(CAGD)技术的发展[9],将人的创造性思维和综合分析能力与计算机的数据处理能力和几何造型能力结合起来,实现缩短研发周期,减低成本和提高产品质量的目的[10]。

1984年, MATLAB 由 Math Works 公司正式推向市场的商业数学软件。随着 MATLAB 的商业化和软件本身的不断升级,其功能越来越强大,集数值与符号运算、函数和数据可视化、实现算法、创建用户界面、连接其它编程语言等功能于一体,被广泛应用于科学研究和工程设计开发领域[11][12]。

本文基于 MATLAB 平台,利用 Bezier 曲线定义离心鼓风机叶片子午面形状,给定叶片的加载规律和叶片厚度分布规律,进行参数化设计编程和可视化处理,建立叶片的空间参数模型,结合 Pro/E 软件实现对离心鼓风机叶轮的三维实体造型,提高离心鼓风机设计开发效率,符合数字化制造的趋势。

2. 叶片参数化造型程序

叶片参数化造型在 MATLAB 平台编程完成,程序流程图如图 1 所示。

2.1. 叶轮初始参数

本文以某已生产运行单级高速离心鼓风机为例,其设计流量为 2.1 kg/s,转速为 27,000 rpm,压比为 1.7。叶轮为半开式叶轮,叶片形式为后弯式,如图 2 所示。叶轮基本几何参数列于表 1 中。

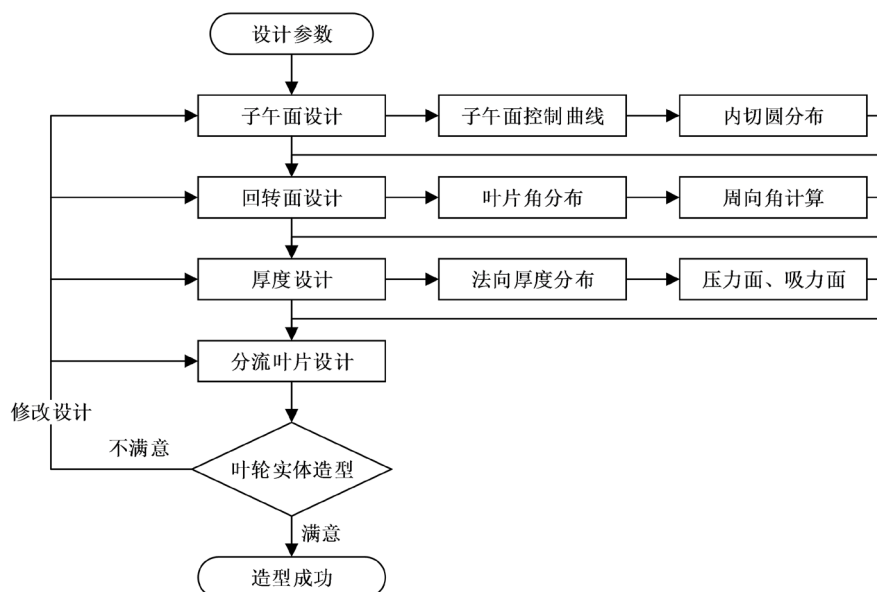


Figure 1. Flow chart of blade parametric design program
图 1. 叶片参数化设计程序流程图

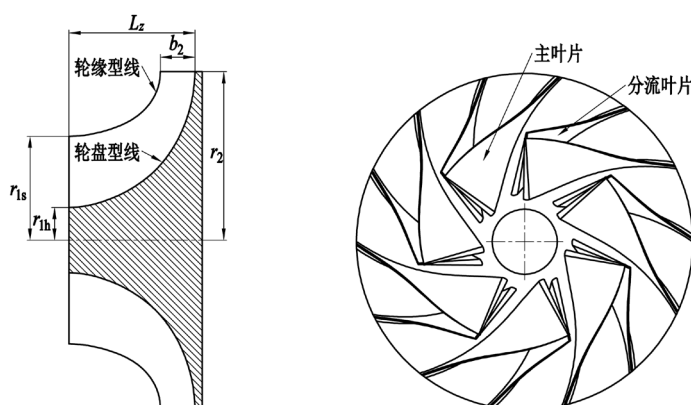


Figure 2. Schematic diagram of centrifugal blower impeller
图 2. 离心鼓风机叶轮示意图

Table 1. Basic geometric parameters of impeller
表 1. 叶轮基本几何参数

叶轮几何参数	数值	叶轮几何参数	数值
进口轮缘半径 r_{1s}/mm	72.0	主叶片数 Z_1	7
进口轮盘半径 r_{1b}/mm	22.5	分流叶片数 Z_2	7
叶轮出口半径 r_2/mm	117	进口轮盘叶片角 $\beta_{1b}/^\circ$	35
叶轮轴向长度 L_z/mm	88	进口轮缘叶片角 $\beta_{1s}/^\circ$	53
叶轮出口宽度 b_2/mm	23.8	出口叶片角 β_2	55

2.2. 叶片子午面设计

叶轮子午面形状对气体在离心鼓风机内的流动至关重要[13], 本文采用平面 Bezier 曲线定义进行叶片子午面轮缘、轮盘型线, 实现对叶轮的子午面参数化设计。

2.2.1. 子午面控制曲线

离心叶轮叶片子午面的定义方法经历长期的发展。从最初的简单圆锥曲面[14] [15]，到复杂的 Coons 曲面[16] [17]，最后发展到广泛使用的 Bezier 曲线、曲面[18]。利用 Bezier 曲线来设计叶轮型线有如下优势：曲面由解析方程定义，可以系统地对曲面形状进行改进，并且可以给出任意次的连续导数；解析方程的参数形式使叶片曲面坐标可以通过任意数量的点以任何合适的分布获得，该方法为压缩机叶片几何造型提供了一种简单而准确的设计方法，而且适用于嵌入计算机辅助设计程序，故被广泛应用于各种离心叶轮的设计中[19]。

Bezier 曲线是由参数方程控制的空间曲线， n 次 Bezier 曲线由 $n+1$ 个控制点控制，其参数方程为：

$$\begin{aligned}\bar{B}(u) &= (1-u)^n \bar{P}_0 + n(1-u)^{n-1} u \bar{P}_1 + \frac{n(n-1)}{2} (1-u)^{n-2} u^2 \bar{P}_2 + \cdots + u^n \bar{P}_n \\ &= \sum_{k=1}^n C_n^k (1-u)^{n-k} u^k \bar{P}_k\end{aligned}\quad (1)$$

其中， u 为参数，其取值范围为 0~1，图 3 为空间 Bezier 曲线示意图， \bar{P}_k 是依次连接所有控制点的多边形，称为控制多边形。

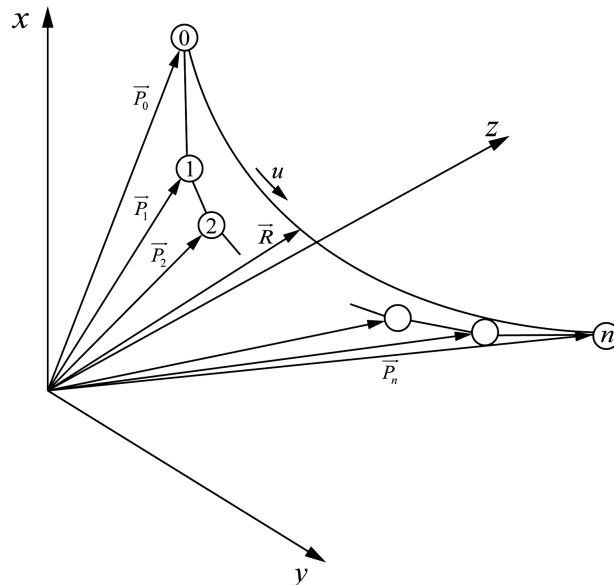


Figure 3. Schematic diagram of spatial Bezier curve

图 3. 空间 Bezier 曲线示意图

本文采用平面四次 Bezier 曲线来设计离心鼓风机叶轮子午面型线，其参数方程为：

$$\begin{cases} z(u) = a_0(1-u)^4 + 4a_1(1-u)^3u + 6a_2(1-u)^2u^2 + 4a_3(1-u)u^3 + a_4u^4 \\ r(u) = b_0(1-u)^4 + 4b_1(1-u)^3u + 6b_2(1-u)^2u^2 + 4b_3(1-u)u^3 + b_4u^4 \end{cases}\quad (2)$$

如图 4 所示， (a_0, b_0) 、 (a_1, b_1) 、 (a_2, b_2) 、 (a_3, b_3) 和 (a_4, b_4) 为五个控制点的坐标，可以发现，确定了控制点坐标，Bezier 曲线也随之确定。以子午面轮盘型线为例，控制点根据 Bezier 曲线的端点性质求取：

1) Bezier 曲线和其控制多边形分于起点、合于终点。据此可知 Bezier 曲线起点和终点分别是其第一个、最后一个控制点，因此点 0 和点 4 的位置由叶轮基本几何参数确定：

$$z_0 = z(0) = a_0 \quad (3)$$

$$z_4 = z(1) = a_4 \quad (4)$$

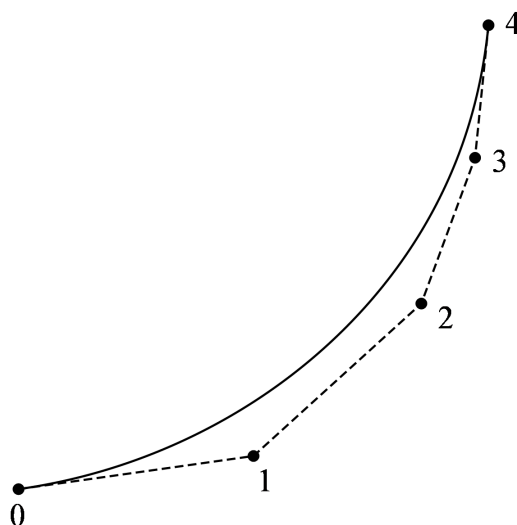


Figure 4. Planar quartic Bezier curve
图 4. 平面四次 Bezier 曲线

2) Bezier 曲线和其控制多边形的第一条、最后一条边相切于起点和终点，切矢量的模长为相切边边长的 n 倍。对于四次 Bezier 曲线，参照图 4 可知，特征多边形的边 0-1、3-4 的斜率为曲线端点处的斜率，长度分别为端点处 dB/du 值的 $1/4$ 。因此，端点处的斜率决定点 1 和点 3 的方向，而端点处的 dB/du 值决定边 0-1、3-4 的长度，通过给定端点处的斜率和 dB/du 值可改变控制 1、3 的位置，从而改变曲线形状。由于实际计算过程中 dB/du 难以给定，可通过给定 dz/du 和 dr/du 来替代：

$$z'_0 = \left. \frac{dz}{du} \right|_{u=0} = 4(a_1 - a_0) \quad (5)$$

$$z'_4 = \left. \frac{dz}{du} \right|_{u=1} = 4(a_4 - a_3) \quad (6)$$

3) 点 2 的位置影响两个端点处的斜率，由给定的端点处曲率确定点 2 位置[20]：

$$z''_0 = \left. \frac{d^2z}{du^2} \right|_{u=0} = 12(a_0 - 2a_1 + a_2) \quad (7)$$

$$z''_4 = \left. \frac{d^2z}{du^2} \right|_{u=1} = 12(a_2 - 2a_3 + a_4) \quad (8)$$

由曲率公式有：

$$\begin{cases} a_2 = \frac{z'_0 F_4 - z'_4 F_1}{z'_0 r'_4 - z'_4 r'_0} \\ b_2 = \frac{-r'_4 F_0 + r'_0 F_4}{z'_0 r'_4 - z'_4 r'_0} \end{cases} \quad (9)$$

将式(3)~(8)代入式(9)，整理得：

$$\begin{cases} r'_0 a_2 - z'_0 b_2 = -r'_0(a_0 - 2a_1) + z'_0(b_0 - 2b_1) - \frac{1}{12} K_0 (z_0'^2 + r_0'^2)^{\frac{3}{2}} = F_0 \\ r'_4 a_2 - z'_4 b_2 = r'_4(2a_3 - a_4) + z'_4(2b_3 - b_4) - \frac{1}{12} K_4 (z_4'^2 + r_4'^2)^{\frac{3}{2}} = F_4 \end{cases} \quad (10)$$

当 $z'_0 r'_4 - z'_4 r'_0 \neq 0$ 时, 可解得 2 点的坐标:

$$\begin{cases} a_2 = \frac{z'_0 F_4 - z'_4 F_0}{z'_0 r'_4 - z'_4 r'_0} \\ b_2 = \frac{-r'_4 F_0 + r'_0 F_4}{z'_0 r'_4 - z'_4 r'_0} \end{cases} \quad (11)$$

而当 $z'_0 r'_4 - z'_4 r'_0 = 0$ 时, 两个端点处的切线平行, 与实际情况不符。

通过上述方法得到子午面轮盘、轮缘型线控制点, 如表 2 所示, 通过控制点画出子午面轮盘、轮缘型线, 分别连接首尾端点生成叶片子午面, 如图 5 所示。

Table 2. Coordinates of control points of blade meridian wheel and rim profile

表 2. 叶片子午面轮盘和轮缘型线控制点坐标

轮盘型线控制点	控制点坐标	轮缘型线控制点	控制点坐标
0	(0.00, 23.00)	0	(0.00, 72.00)
1	(32.00, 23.00)	1	(25.00, 73.00)
2	(78.12, 46.00)	2	(52.99, 82.28)
3	(85.50, 85.50)	3	(62.00, 97.00)
4	(88.00, 117.00)	4	(64.00, 117.00)

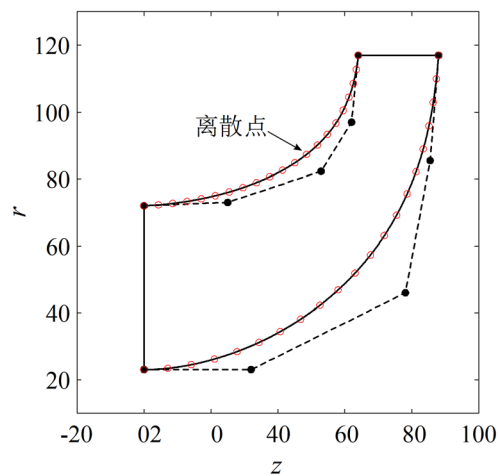


Figure 5. Result of dispersion of blade meridian profile

图 5. 叶片子午面型线离散结果

2.2.2. 叶片子午面内切圆

子午面流道宽度分布规律是评价叶片子午面设计是否合理的重要指标[21], 流道宽度分布规律即为子午面轮盘、轮缘型线的内切圆半径沿子午面型线弧长的变化规律。对子午面轮盘、轮缘型线进行离散, 离散点数 n 可按设计者的需求输入, 编程求出子午面型线总长度和按等弧长原则离散的离散点坐标, 定义相对弧长 L_{rel} :

$$L_{rel} = \frac{L_i}{L} \quad (12)$$

式中, L_i 为子午面型线起点到离散点的弧长, L 为子午面型线总弧长, 根据定义可知 L_{rel} 的值域为 $[0, 1]$ 。
 图 5 所示为将叶片子午面轮盘、轮缘型线按等弧长原则离散为 20 段, 共 21 个离散点。任意离散点 M 的内切圆如图 6 所示, 内切圆 C 与子午面轮盘、轮缘型线分别交于点 M 和点 O, 圆心为点 P。

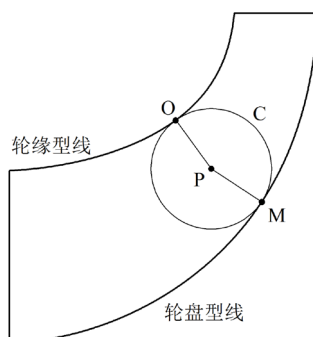


Figure 6. Schematic diagram of the inscribed circle of the meridional flow channel of the blade
 图 6. 叶片子午面流道内切圆示意图

以子午面轮盘型线为基准, 求解内切圆半径的具体方法为:

1) 计算出离散点 M 的坐标, 求出点 M 处的子午面轮盘型线法线, 如图 7 所示, 法线与子午面轮缘型线只有一个交点 K, 求出点 K 的坐标。求点 K 坐标时采用二分法, 程序框图及其运行结果如图 8 和图 7 所示。程序框图中, $f(u)$ 为法线方程, $rs(u)$ 为子午面轮缘型线 r 值的方程, $Bs(u)$ 为子午面轮缘型线上参数为 u 的点, $a1$ 为设置的精度。

2) 求子午面轮缘型线上到线段 MK 中点 N 距离最短的点。用中点公式求出线段 MK 的中点 N, 假设轮缘型线上到线段 MK 中点 N 距离最短的点为点 A, 设置参数 u 的区间 0 值到 1, 递增值为 $du1$, 求出轮缘型线上所有点到点 N 的距离数组 $distance$, 调用 MATLAB 的求最小值函数 $\min()$, 找到最短距离 $distance_min$, 输出最短距离对应的点即为点 A, 根据几何关系, 线段 AN 即为子午面轮缘型线过点 A 的法线。程序框图如图 9 所示, 图 10 为程序运行结果。程序框图中, z_N 、 r_N 分别表示点 N 坐标的 z 值和 r 值, 以此类推。

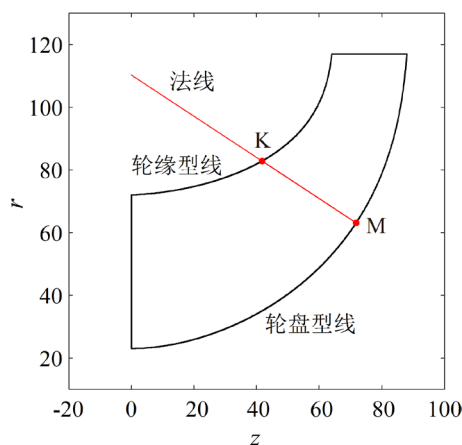


Figure 7. Find the intersection point program running result
 图 7. 求交点程序运行结果

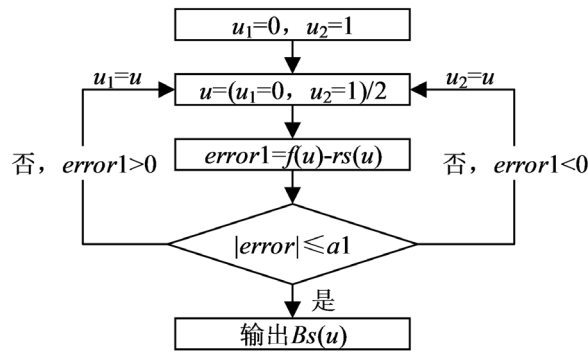


Figure 8. Block diagram of the dichotomy to find the point of intersection

图 8. 二分法求交点程序框图

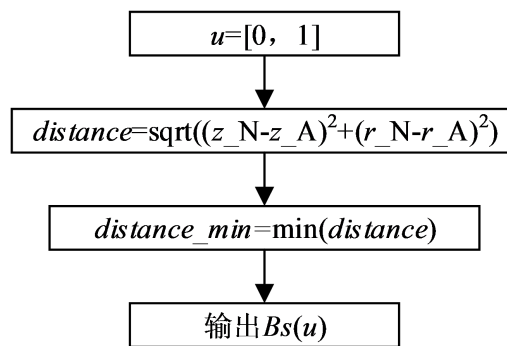


Figure 9. Find point A block diagram

图 9. 求点 A 程序框图

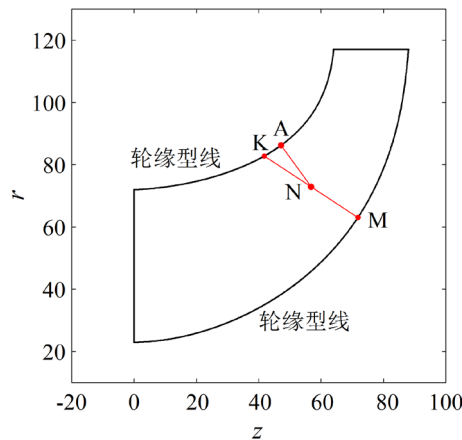


Figure 10. Find point A program running result

图 10. 求点 A 程序运行结果

3) 求内切圆半径。由图 10 可知，若线段 MN 的长度等于线段 AN 的长度，点 N 即为子午面轮盘、轮缘型线的内切圆圆心，若不相等则不是。假设实际圆心为点 P，子午面轮缘型线上到点 P 最短距离点为点 O，点 P 始终位于线段 MK 上，MP 的长度为内切圆半径 R。采用递增或者递减参数 u 使 P 沿线段 MK 移动，求得实际圆心 P，若线段 MN 的长度大于线段 AN 的长度，则实际圆心 P 位于 N 点右侧，使点 P 沿 MK 向右侧移动，反之则向左侧移动。设置变量 du2，每当 u 值改变一个单位 du2，采用求点 A 的方法求得点 O，当点 P 到轮缘型线的最短距离(即线段 OP 长度)与线段 MP 长度之差小于设置精度 a2

时, 认为点 P 为内切圆圆心, 线段 MP 的长度为内切圆半径, 点 O 为内切圆与子午面轮缘型线的切点, 程序流程图及运行结果如图 11、图 12 所示。

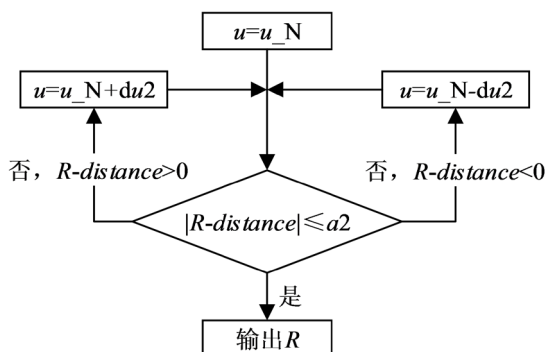


Figure 11. Block diagram of finding inscribed circle
图 11. 求内切圆程序框图

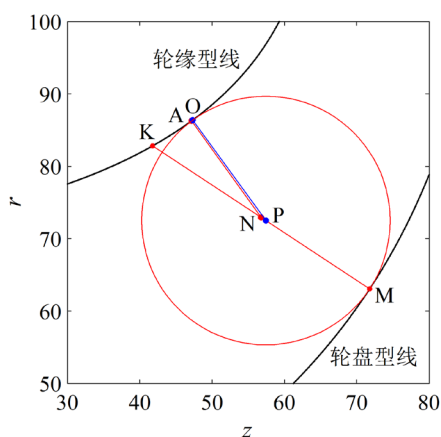


Figure 12. Find the center of the program running results
图 12. 求内切圆程序运行结果

利用程序求解目标叶片子午面流道内切圆运行结果如图 13 所示, 内切圆直径随轮盘相对弧长变化规律如图 14 所示。从图 14 可以看出, 内切圆直径均匀变化, 保证了叶轮通道无突变, 符合设计要求。

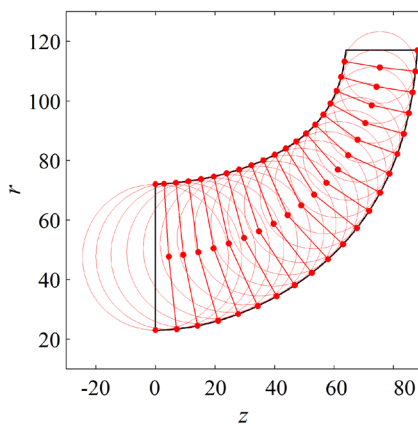


Figure 13. Solution results of the inscribed circle of the meridian flow channel
图 13. 子午面流道内切圆求解结果

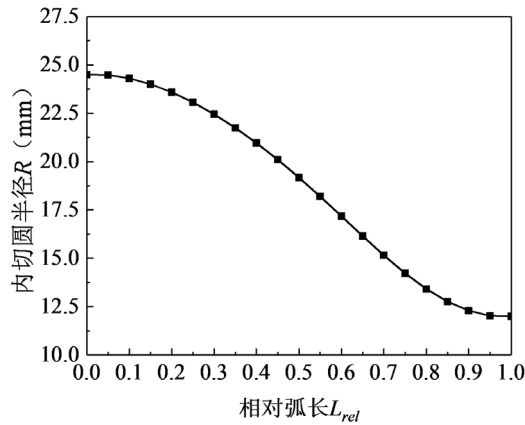


Figure 14. Distribution law of inscribed circle radius
图 14. 内切圆半径分布规律

2.3. 叶片回转面设计

2.3.1. 叶片角和周向角设计

叶片角的分布决定了离心鼓风机叶片的载荷分布，同时决定了叶片的空间形状。本程序在求得子午面型线的基础上，按照给定的叶片角分布规律进行加载，在叶片回转面内求解，得到叶片空间型线。

首先给出叶片角的定义，如图 15(a)所示，图中实线框为叶片中型面，两个虚线框为不同圆周位置的叶片子午面，左侧为初始子午面，右侧子午面可由初始子午面绕叶轮旋转轴旋转一定角度得到，该子午面与叶片中型面相交，点 T 为交线上一点。图 15(a)右下为点 T 附近的局部放大图，点 T 所在叶片型线在点 T 的切线方向为 TL，点 T 所在子午面型线在点 T 的切线方向为 TS，点 T 的圆周方向为 SL，矢量 TL 与 SL 之间的夹角为叶片角，记为 β 。点 B 为点 T 在 z 轴上的投影，以 BT 为半径绕 z 轴旋转作圆弧，该圆弧与初始子午面交于点 H，BT 与 BH 之间的夹角为点 T 处的周向角，记为 φ 。

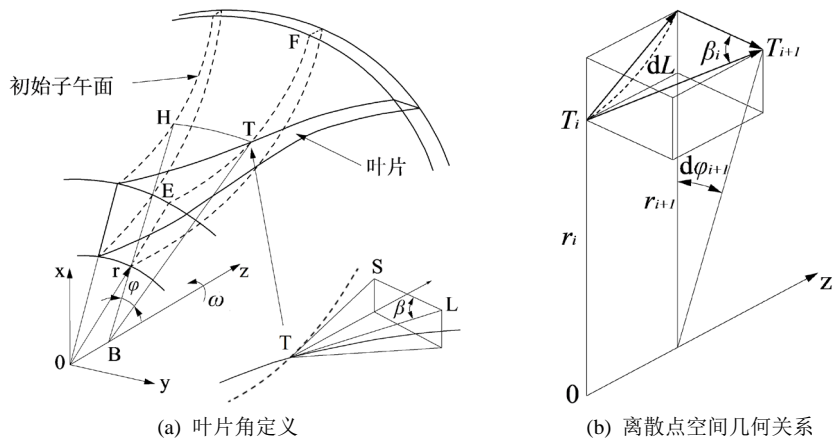


Figure 15. Schematic diagram of blade angle
图 15. 叶片角示意图

图 15(b)为叶片型线上离散点空间几何示意图，由图可知，叶片角和周向角之间有如下几何关系：

$$d\varphi = \frac{dL}{r \tan \beta} \quad (13)$$

从子午面型线起点到止点积分可求得叶片周向角：

$$\varphi = \int_0^l \frac{dL}{r \tan \beta} \quad (14)$$

式中, $d\varphi$ 为周向角微分, dL 为子午面型线弧长微分, r 为叶片角 β 处对应半径。

由式(13)和式(14)可知, 给定叶片角沿子午面型线的分布规律, 可求得叶片周向角。本文求解叶片型线的具体步骤如下:

1) 根据给定的叶片角分布规律, 求出离散点叶片角, 用于计算周向角 $d\varphi$ 。每个离散点 T_{i+1} 相对于前一个离散点 T_i 的圆周角 $d\varphi_{i+1}$ 为:

$$d\varphi_{i+1} = \frac{dL}{r_{i+1} \tan \beta_i} \quad (15)$$

2) 离散点 T_i 相对于起点的周向角 φ_i 可通过累加之前每个计算点的周向角 $d\varphi$ 得到:

$$\begin{cases} \varphi_i = \sum_{i=2}^n d\varphi_i, (i = 2, 3, \dots, n) \\ \varphi_1 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

为了便于数据的输入和调用, 程序在给定叶片角分布时采用相对叶片角的方式, 定义相对叶片角度:

$$\beta_{rel} = \frac{\beta - \beta_{in}}{\beta_{out} - \beta_{in}} \quad (17)$$

式中, β_{in} 、 β_{out} 分别为叶轮进口、出口处叶片角。

程序中叶片角分布规律可以按函数关系和具体数值两种形式给定, 利用 MATLAB 数据处理能力, 以相对弧长为横坐标, 相对叶片角为纵坐标, 将叶片角的分布规律拟合光滑曲线, 既保证了叶片角变化的连续性, 又便于读取任意离散点处叶片角的值。

对目标叶轮进行测量, 根据测量数据拟合如图 16 所示的叶片角分布规律, 按此规律对子午面型线进行加载生成叶片中型面, 叶片角具体分布数值如表 3 所示。

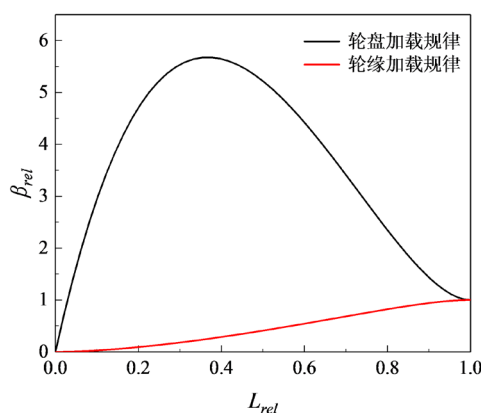


Figure 16. The law of blade angle distribution

图 16. 目标叶轮叶片角分布规律

Table 3. Blade angle distribution

表 3. 叶片角分布

i	1	2	3	4	5	6	7
L_{rel}	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30
$\beta_{in} / ^\circ$	53.00	56.36	59.13	61.28	62.87	63.96	64.62
$\beta_{s} / ^\circ$	35.00	35.60	35.99	36.55	37.25	38.06	38.97

Continued

i	8	9	10	11	12	13	14
L_{rel}	0.35	0.40	0.45	0.50	0.55	0.60	0.65
$\beta_w/^\circ$	64.90	64.85	64.52	63.95	63.18	62.26	61.22
$\beta_s/^\circ$	39.98	41.06	42.23	43.46	44.75	46.08	47.44
i	15	16	17	18	19	20	21
L_{rel}	0.70	0.75	0.80	0.85	0.90	0.95	1
$\beta_w/^\circ$	60.11	58.97	57.86	56.82	55.92	55.27	55.00
$\beta_s/^\circ$	48.82	50.18	51.52	52.76	53.85	54.66	55.00

注: i 为计算点序号, β_h 为轮盘型线叶片角, β_s 为轮缘型线叶片角。

2.3.2. 叶片厚度设计

叶片厚度作为叶轮结构特征之一, 对叶轮的结构强度和性能具有较大的影响[22] [23]。本文叶片厚度设计与叶片角有异曲同工之处, 以相对弧长 L_{rel} 为自变量, 分别给定轮盘、轮缘叶片相对厚度分布规律, 可设计出沿流线方向和叶高方向变厚度叶片。定义叶片相对厚度:

$$\delta_{rel} = \frac{\delta_{ni}}{\delta_n} \quad (18)$$

式中: δ_n 为轮盘、轮缘处叶片法向厚度。

具体设计步骤如下:

1) 计算离散点叶片周向厚度。叶片法向厚度与周向厚度的几何关系如图 17 所示, 两者之间存在如下关系:

$$\delta_{ui} = \frac{\delta_{ni}}{\sin \beta_i} \quad (19)$$

式中, δ_{ni} 为离散点 T_i 叶片法向厚度, δ_{ui} 为周向厚度。

2) 求解叶片压力面、吸力面型线。将离散点叶片周向厚度转化为周向角度, 加在叶片中型面型线的周向角上, 通过偏置轮盘型线和轮缘型线生成吸力面和压力面型线。在离散点 T_i 处, 叶片周向厚度与压力面吸力面之间的周向角之间几何关系如图 17 所示:

$$\theta_i = \frac{\delta_{ui}}{r_i} \quad (20)$$

式中, θ_i 为离散点 T_i 处吸力面和压力面之间的周向角, 则偏置角为 $\theta_i/2$ 。

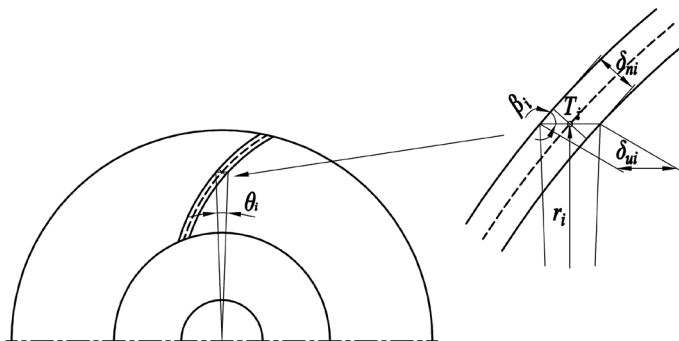


Figure 17. Schematic diagram of blade thickness geometric relationship
图 17. 叶片厚度几何关系示意图

目标叶轮沿流线方向厚度一致，叶高方向呈现梯形变化规律，即轮盘处厚、轮缘处薄。轮盘处叶片法向厚度为 4 mm，轮缘处叶片法向厚度为 0.8 mm。将法向厚度换算为周向厚度，求出对应的压力面、吸力面偏置角，加载在叶片中型面型线上生成压力面、吸力面型线。

2.3.3. 分流叶片设计

分流叶片能够有效改善离心叶轮性能，与无分流叶片叶轮相比，带分流叶片的叶轮叶片负荷小、吸力面附面层分离程度低、横向压力梯度小，叶轮效率高[24]。分流叶片通常由主叶片截断形成，设计时主要有两方面主要参数，前缘位置(截断位置)和周向位置，具体设计分为两个步骤：

1) 计算截断位置。分流叶片采用和主叶片相同的叶型，设计时需要给定子午面轮盘和轮缘型线上的截断位置。如图 18 所示，图中 T_h 、 T_s 为分流叶片子午面型线起点，定义分流叶片前缘位置参数 l_{rels} 和 l_{relh} ：

$$l_{rels} = \frac{L_{Ts}}{L_s} \quad (21)$$

$$l_{relh} = \frac{L_{Th}}{L_h}$$

式中 L_{Ts} 、 L_{Th} 为主叶片子午面型线起点到分流叶片子午面型线起点的弧长， L_h 、 L_s 为主叶片子午面轮盘、轮缘型线弧长。

2) 计算周向位置。以主流叶片为基准，绕转轴旋转给定角度，获得分流叶片周向位置。如图 18 所示，定义分流叶片周向位置参数 θ_{rel} ：

$$\theta_{rel} = \frac{\theta_{main}}{\theta_{split}} \quad (22)$$

式中， θ_{main} 为相邻主叶片之间角度， θ_{split} 为主叶片吸力面侧与相邻分流叶片之间夹角。

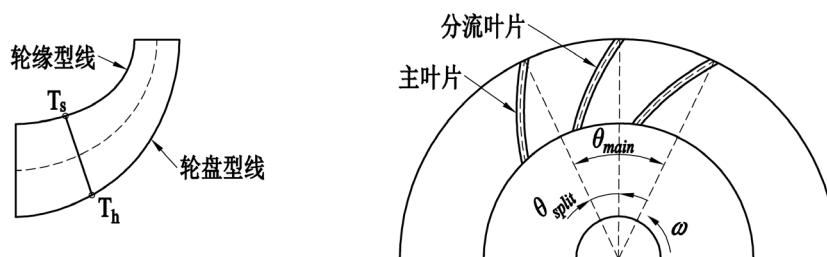


Figure 18. Schematic diagram of the position of the splitter blade
图 18. 分流叶片位置意图

目标叶轮的前缘位置参数 l_{rels} 和 l_{relh} 均为 0.3，周向位置参数为 0.5。根据叶片数计算出 θ_{main} ，结合给定周向位置参数计算出 θ_{split} 。

3. 叶轮实体造型

叶片参数设计程序计算数据保存为 .ibl 文件，将其导入 Pro/E 进行叶轮生成。在 Pro/E 中的叶轮实体造型主要步骤为：

1) 导入叶片型线参数生成曲线。需要生成的曲线有：子午面轮盘、轮缘曲线，主叶片和分流叶片压力面、吸力面型线。

2) 先将分流叶片压力面和吸力面型线绕叶轮旋转轴旋转 θ_{split} ，然后由主叶片和分流叶片的压力面、吸力面型线生成压力面、吸力面以及轮盘、轮缘、前缘、尾缘处曲面，构成封闭空间。图 19(a)所示为主

叶片压力面和吸力面。

3) 将封闭空间经实体化生成叶片,如图 19(b)所示。并通过 Pro/E 建模功能构造圆形前缘,如图 19(c)所示。

4) 通过绕轴旋转子午面轮盘型线生成轮盘。

5) 按照设计需求阵列叶片,完成叶轮造型,如图 19(d)所示。

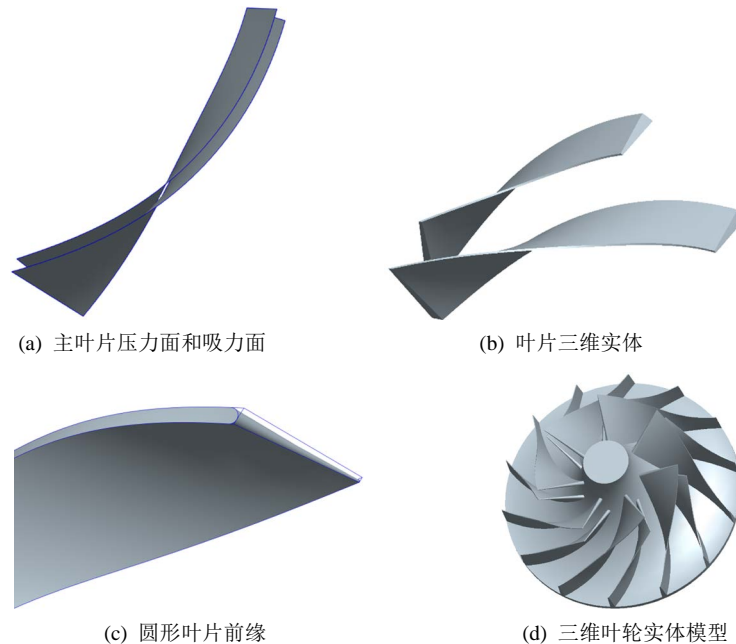


Figure 19. Schematic diagram of 3D modeling of impeller
图 19. 叶轮三维造型示意图

4. 结论

1) 基于 MATLAB 平台,编写参数化设计程序,实现了对离心鼓风机叶片的数字化建模设计。核心方法包括:利用 Bezier 曲线定义叶片子午面形状,通过控制点修改形状,以内切圆半径分布规律评估合理性;根据几何关系将给定分布规律的叶片角计算为圆周角,完成叶片中型面设计;将叶片法向厚度换算为周向厚度,通过偏置中型面生成压力面和吸力面;利用位置参数设计分流叶片。

2) 以 .ibl 文件作为媒介,利用 Pro/E 软件按照叶片参数化设计数据进行离心鼓风机叶轮三维实体造型,通过合理运用 Pro/E 建模功能生成圆形叶片前缘,成功造型。

3) 实例证明本文介绍的结合 MATLAB 和 Pro/E 的离心鼓风机叶轮造型方法的可行性,利用该方法可造出子午面形状多变,多种加载规律、叶片厚度沿叶高方向和型线方向变化、带有分流叶片的离心鼓风机叶轮,达到了离心鼓风机叶轮高效化,数字化造型目的。

参考文献

- [1] 徐忠. 离心压缩机原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 赵文生, 罗京翔, 范玉青. NURBS 方法设计离心叶轮轴面流线[J]. 航空精密制造技术, 1996(6): 20-23.
- [3] 樊小波, 张东东, 王彩君. 基于 UG 三维建模功能在绞吸泵设计与建模中的应用[J]. 科技与创新, 2019(20): 9-11+13.
- [4] 王艳. 采用 UG NX8.5 对氯气压缩机三元流叶轮建模[J]. 聚氯乙烯, 2019, 47(6): 30-32.

- [5] 姚姗姗, 王军, 王录, 杨玉桂. 基于 Pro/E 的离心压缩机叶轮三维造型[J]. 风机技术, 2008(1): 57-60.
- [6] 乔金宇, 马琨岩, 宋龙波. 基于 Pro/E 的石油化工流程泵三维建模研究[J]. 煤矿机械, 2018, 39(1): 139-140.
- [7] 刘国田, 宋瑞东, 李松, 阎长罡. 基于 CATIA 的叶片曲面造型技术研究[J]. 现代机械, 2015(2): 43-46.
- [8] 宁汝新, 刘检华, 唐承统. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. 机械工程学报, 2006(7): 132-137.
- [9] 莫蓉, 常智勇. 计算机辅助几何造型技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [10] 赵晓运, 陈燕丽, 宋绪丁. 基于 MATLAB 和 NURBUS 的叶片曲面造型[J]. 机械设计与制造工程, 2016, 45(2): 21-26.
- [11] 夏爱生, 刘俊峰. 数学建模与 MATLAB 应用[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016.
- [12] 温正. 科学与工程计算技术丛书 MATLAB 科学计算[M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.
- [13] 杨策, 胡辽平, 买靖东, 老大中, 王航. 两个离心压气机叶轮的设计与性能比较[J]. 北京理工大学学报, 2004(9): 778-781.
- [14] Eckardt, D. (1979) Flow Field Analysis of Radial and Backswept Centrifugal Compressor Impellers. I—Flow Measurements Using a Laser Velocimeter. *Proceedings of the Twenty-Fifth Annual International Gas Turbine Conference and Exhibit and Twenty-Second Annual Fluids Engineering Conference*, New Orleans, 9-13 March 1980, 77-86.
- [15] Whitfield, A., Atkey, R.C., Wallace, F.J. (1978) Computer Aided Design and Testing of Radial and Mixed Flow Centrifugal Impeller with Straight and Backward Swept Blades. Paper C21/78, 1.
- [16] Coons, S.A. (1967) Surfaces for Computer-Aided Design of Space Forms. DTIC Document. <https://doi.org/10.21236/AD0663504>
- [17] 刘海晨, 汤文成. 固定边界 Coons 曲面的造型方法研究[J]. 机械设计, 2005(4): 24-26.
- [18] Casey, M.V. (1983) A Computational Geometry for the Blades and Internal Flow Channels of Centrifugal Compressors. *Journal of Engineering for Power*, **105**, 288-295. <https://doi.org/10.1115/1.3227414>
- [19] 王友涛, 孙洪玉, 张磊. 基于 Bezier 曲线的离心压缩机叶片设计[J]. 化工装备技术, 2016, 37(5): 6-11.
- [20] 陈宏冀. 子午流道 Bezier 曲线造型中的几何问题[J]. 工程热物理学报, 1997(4): 445-449.
- [21] 汪杰. 基于 UG 的压气机叶轮造型系统设计研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京理工大学, 2013.
- [22] 冀春俊, 李春阳, 房俊翌, 张雪薇, 刘君男. 叶片厚度分布对流道式叶片性能的影响分析[J]. 热科学与技术, 2019, 18(4): 321-326.
- [23] 席光, 唐永洪, 田玉宝, 张梅. 任意空间曲面三元叶轮叶片厚度对气动性能的影响[J]. 工程热物理学报, 2020, 41(2): 354-360.
- [24] 戴韧, 陈康民, 王企鲲. 离心压气机叶轮内部流动的数值研究: 分流叶片的作用[J]. 工程热物理学报, 2004(S1): 47-50.