

基于比例因子的离心泵圆弧叶片造型研究

严俊峰, 陈 晖, 王文廷
(西安航天动力研究所, 陕西 西安 710100)

摘 要: 针对中低比转速离心泵, 提出了能够统一各种圆弧叶片造型方法的比例因子法, 推导了叶型参数的计算公式, 分析了比例因子对叶片安放角、叶片长度等的影响, 并采用数值模拟方法对不同比例因子下的泵内流场进行了性能预测。结果表明, 不同比例因子下的叶型参数、流动参数及性能参数变化范围很大。比例因子较小时, 节流损失较大, 泵扬程较低; 比例因子较大时, 脱流损失较大, 泵效率较低, 存在较优的比例因子区间 $[0.15, 0.35]$, 使叶片安放角平滑变化, 泵的综合性能较优, 对应的曲率半径比为 $1.4\sim 1.9$ 。采用 Pfleiderer 方法及本文的角度平均法获得的叶片安放角变化较为平稳, 可用于离心泵的初步设计。

关键词: 离心泵; 圆弧叶片造型; 比例因子法; 叶型参数; 性能预测

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2016) 03-0045-05

Research on shape construction of circular blade in centrifugal pump based on scale factor method

YAN Junfeng, CHEN Hui, WANG Wenting
(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: A scale factor method is put forward, which can unify the different construction methods of circular blade for low-specific-speed centrifugal pumps (LSPCPs). A general formula to calculate the parameters of blade profile is deduced. The blade angle and length vs. scale factor are analyzed. The performances of flow field in a LSPCPs at different scale factors are predicted with numerical simulation method. The results indicate that the parameters of blade profile, flow and performance of LSPCP change in a wide range at different scale factors, the throttling loss increases and pump lift decreases when the scale factor decreases; the off-flow loss increases, efficiency of pumps decreases and the better scale factor intervals 0.15 and 0.35 exists when the scale factor increases, which may make the blade setting angle smooth and the combination property better. The ratio of corresponding curvature radius is $1.4\sim 1.9$. The blade setting angle obtained by Pfleiderer method and the angle-average method has smooth change. Therefore, the method can be used in the initial design of centrifugal pump.

Keywords: centrifugal pump; circular blade shape construction; scale factor method; parameter of blade profile; performance prediction

收稿日期: 2015-09-19; 修回日期: 2015-12-20

作者简介: 严俊峰 (1980—), 男, 高级工程师, 研究领域为涡轮泵设计

0 引言

离心泵叶轮结构对泵的性能有密切影响,在小型泵或中低比转速泵中,由于叶轮水力损失及冲击损失相对较小^[1-2],因此造型简单、加工方便、成本较低的圆弧叶片得到了广泛应用。主要的圆弧叶片造型方法有单圆弧法^[2]、双圆弧法(如 Schultz 法^[3]、Pfleiderer 法^[4]、中间圆法^[5])、三圆弧法^[6]等。由于三圆弧叶型在实际应用中并没有显示出比双圆弧叶型有多大优越性,因此主要围绕单圆弧法及双圆弧法开展研究。

在双圆弧法中,仅根据叶片进出口半径及安放角无法确定进口段圆弧半径,为了绘制出完整的两段圆弧,还需要补充曲率半径等约束条件,由此产生了不同的造型方法。本文提出基于比例因子的圆弧叶片造型方法(简称比例因子法),对不同的单圆弧及双圆弧造型方法进行统一,并利用几何关系得到型线上各点叶片安放角及包角等的变化规律,通过流场仿真研究了各圆弧型线的特点,为叶片设计提供了指导。

1 比例因子法造型过程

定义进口段圆弧半径 r_{10} 较基准半径的相对伸长量为比例因子 k ,即

$$k = \frac{r_{10}}{r_1 \cos \beta_1} - 1 \quad (1)$$

式中: r_1 为进口半径; β_1 为叶片进口角。

则图 1 中引入比例因子约束条件后的圆弧叶片造型方法如下:

- 1) 以半径 r_1 做进口圆,以出口半径 r_2 做出口圆,以直径 $d_1 = 2r_1 \sin \beta_1$ 做辅助圆;
- 2) 将进口圆按叶片数 z 等分为 $A、B \dots$;
- 3) 过点 A 做长度为 r_{10} ,且与辅助圆相切于点 D 的直线 AC ;
- 4) 以点 C 为圆心做过点 A 的圆弧,该圆弧与 CB 延长线交于点 E ;
- 5) 以 EC 延长线上某点 F 为圆心,以 $|FE|$ 为半径做过点 E 并与出口圆交于点 G 的圆弧,要求点 G 处角度为叶片出口角 β_2 ,对应的圆弧 AE 及

EG 即为叶片中线。

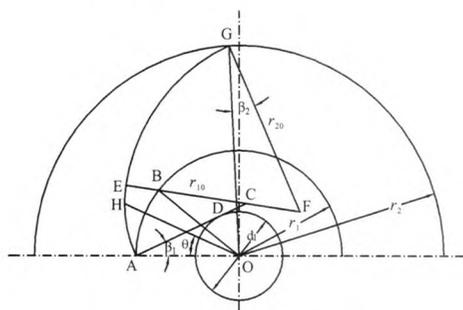


图 1 采用比例因子法绘制的圆弧叶片

Fig. 1 Circular blade drawn with scale factor method

Schultz 法^[3]中,点 C 与点 D 重合,对应的 $k=0$ 。

Pfleiderer 法^[4]中,线段 BC 与辅助圆 d_1 相切, $\angle DOC = 360/z$,则 $k = \tan \beta_1 \tan(180/z)$ 。

单圆弧法^[2]中的点 C 与点 F 重合,注意到 $\triangle OFA$ 与 $\triangle OFG$ 共用 OF 边,其圆弧半径为

$$r_{10} = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2(r_2 \cos \beta_2 - r_1 \cos \beta_1)} \quad (2)$$

则单圆弧法对应的比例因子为

$$k = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2r_1 \cos \beta_1 (r_2 \cos \beta_2 - r_1 \cos \beta_1)} - 1 \quad (3)$$

文献 5 提出了假设平均半径处叶片安放角 $\beta_m = (\beta_1 + \beta_2) [(r_1 + r_2)/2 - r_1] / (r_2 + r_1)$ 的造型方法。由于该方法对应的安放角变化过于剧烈,这里提出“角度平均法”,即在使用比例因子法时保证平均半径处 $\beta_m = (\beta_1 + \beta_2)/2$,从而获得相应的比例因子。

2 叶型参数的数学表达式

图 1 中 $\triangle AOC$ 、 $\triangle BOC$ 与 $\triangle EOC$ 共用 OC 边,并注意到 $\angle AOB = 360/z$,利用几何关系可以计算出 $|OC|$ 、 $|BC|$ 、 $\angle AOC$ 及 $\angle BCO$,进而计算出点 E 处叶片半径 r_E 及安放角 β_E ,且 $\triangle EOF$ 与 $\triangle GOF$ 共用 OF 边,则可获得出口段圆弧曲率半径 r_{20} ,进而获得曲率半径比。

以进口段圆弧为例推导圆弧型线的数学表达

式。设 C 点坐标为 (X_1, Y_1) , 则圆弧 AE 的方程为

$$(X-X_1)^2+(Y-Y_1)^2=r_{10}^2 \quad (4)$$

极坐标下,

$$\begin{cases} X_1=r_{10}\cos\beta_1-r_1 \\ Y_1=r_{10}\sin\beta_1 \\ X=-r\cos\theta \\ Y=r\sin\theta \end{cases} \quad (5)$$

将式 (5) 代入式 (4) 得

$$r^2+2[r_{10}\cos(\beta_1+\theta)-r_1\cos\theta]r+r_1(r_1-2r_{10}\cos\beta_1)=0 \quad (6)$$

为便于迭代求解, 将上式改写为

$$\theta=\arctan\left[\frac{r^2+2r\cos\theta(r_{10}\cos\beta_1-r_1)}{2rr_{10}\sin\beta_1\cos\theta}+\frac{r_1(r_1-2r_{10}\cos\beta_1)}{2rr_{10}\sin\beta_1\cos\theta}\right] \quad (7)$$

当 $r=r_E$ 时, 由式 (7) 迭代求出的极角 θ 即为进口段叶片包角 Φ_1 。注意到 ΔAEO 与 ΔAEC 共用 AE 边, 由几何关系可计算出圆心角 $\angle ACE$, 则进口段叶片长度为 $L_1=r_{10}\angle ACE$ 。

此外, 根据微分几何关系, 有

$$\tan\beta=\frac{r'(\theta)}{r(\theta)} \quad (8)$$

结合式 (6) 得叶片安放角:

$$\beta=\arctan\frac{r_1\sin\theta-r_{10}\sin(\beta_1+\theta)}{r_1\cos\theta-r_{10}\cos(\beta_1+\theta)-r} \quad (9)$$

3 叶型参数的变化规律

以比转速为 124 的离心泵叶轮为例分析不同比例因子下圆弧型线的特点。叶轮相关参数^[7]见表 1。

表 1 叶轮的主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of impeller

流量/(kg/s)	扬程/m	转速/(r/min)	进口半径/ mm	出口半径/ mm	进口安放角/ (°)	出口安放角/ (°)	叶片数
41.6	18	1 450	65	129	25	21	7

圆弧型线如图 2 所示。叶片安放角及液流相对速度随半径的变化规律如图 3 和图 4 所示。叶片长度随比例因子的变化关系如图 5 所示。其中, 对于表 1 中相关参数, Pfeleiderer 法对应的比例因子为 0.22, 角度平均法对应的比例因子为 0.34, 单速率圆弧法对应的比例因子为 0.71。

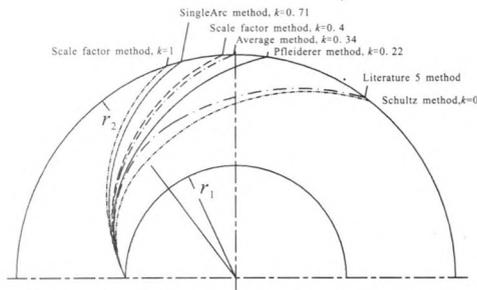


图 2 圆弧型线

Fig. 2 Circular arc line

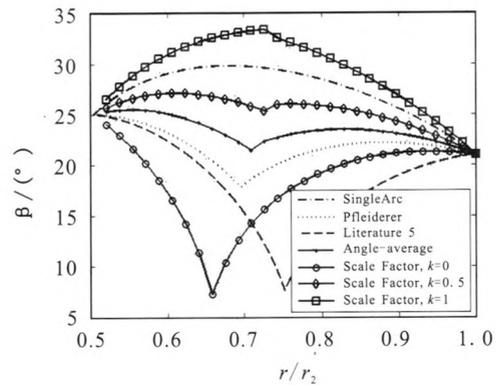


图 3 叶片安放角

Fig. 3 Blade setting angle

显然, 圆弧叶片难以实现叶片安放角及相对速度的单调变化, 比例因子较小时还表现出剧烈的不连续性, 且不同比例因子下的流动参数变化范围很大。比例因子较小时, 随着半径的增大, β 角先减小后增大。介质在这种叶型构成的流道

中的相对运动相当于在收缩管内的流动，叶片进口区相对速度较大，增加节流损失。此外，比例因子越小，叶片包角越大，叶片过长致使摩擦损失增大。比例因子较大时，随着半径的增大，角先增大后减小。介质在这种叶型构成的流道中的相对运动相当于在曲率较大的弯管内的流动，易在叶片出口区产生脱流漩涡，增加水力损失。此外，比例因子越大，叶片包角越小，叶片过短使流道内扩散严重，不利于叶片与介质间的能量交换。因此，过大及过小的比例因子均将恶化离心泵的水力性能。

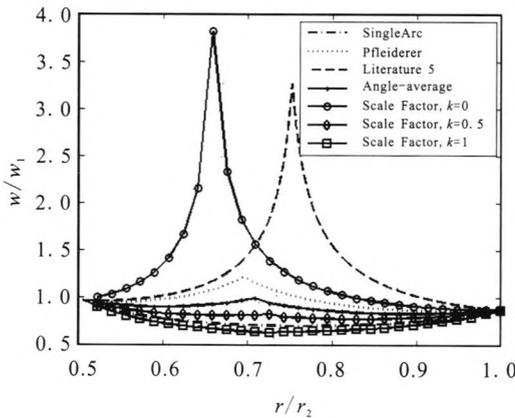


图4 相对速度
Fig. 4 Relative velocity

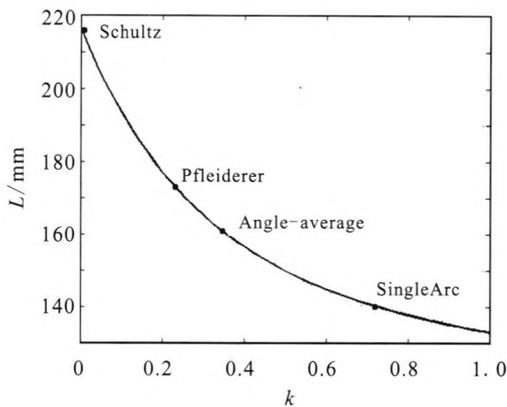


图5 叶片长度
Fig. 5 Blade length

叶片安放角（与沿半径线性分布相比）均方差及曲率半径比随比例因子的变化如图6和图7所示。

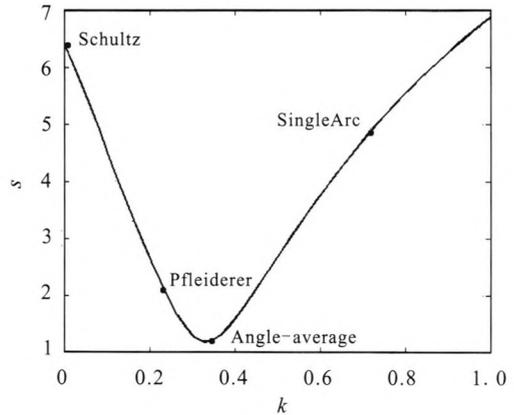


图6 叶片安放角均方差
Fig. 6 RMS of blade setting angle

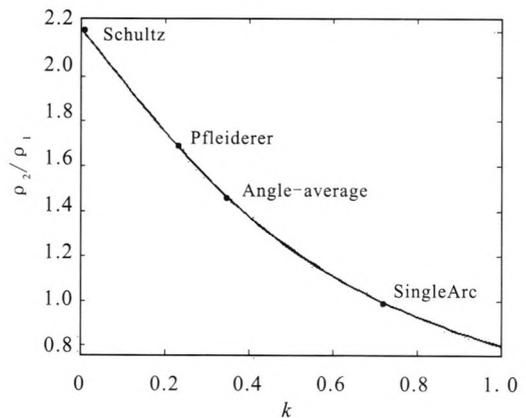


图7 曲率半径比
Fig. 7 Ratio of curvature radius

可以看出，存在最优的比例因子0.33使安放角均方差最小，以实现叶片安放角较平滑的变化，从而获得较优的泵性能，对应的曲率半径比为1.5，乘积 $z\Phi/360$ 为1.77。此外还可以看出，采用Pfleiderer法及本文提出的角度平均法获得的叶型较为合理，对应的叶片安放角均方差也较小，有利于获得较优的离心泵性能。

4 流场仿真模拟

为了进一步优化比例因子取值范围，验证离心泵性能，在上述叶型参数分析的基础上，对泵内流场进行了数值模拟分析^[8]，流场仿真结果如图8所示。

可以看出，当 k 在0~1区间范围内变化时，效率的变化范围为5%，扬程的变化范围达10%；

随着 k 的增大,效率曲线先上升后下降,扬程曲线呈现明显的“S”形状。 k 小于 0.1 时,叶片进口部位产生较严重的节流损失,降低了泵的扬程。 k 为 0.15~0.35 时,流动平稳顺畅,综合性能较优。随着 k 的增大,叶片对液流的约束较弱,靠近隔舌处叶片间出现回流,致使泵水力效率较低。 k 为 1.0 时的叶片最短,水力摩擦损失最小,扬程最高,但由于叶片对液流的约束较弱,靠近隔舌处叶片间存在严重的回流,致使泵水力效率很低。

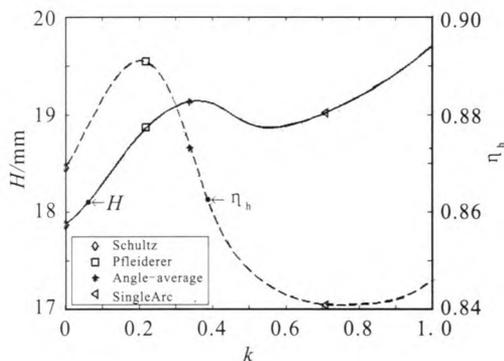


图8 流场仿真结果

Fig. 8 Results of numerical simulation for flow field

进一步结合叶型参数的变化规律可以看出,当 k 在 0.15~0.35 范围内变化时,泵的综合性能较优,对应的曲率半径比为 1.4~1.9,从而为圆弧叶片离心泵的水力设计提供指导。

5 结论

1) 常见的各种圆弧叶片造型方法是比例因子法的特例,采用不同的比例因子能够控制叶片包角及曲率半径比等参数,从而为中低比转速叶轮设计提供了一种新的圆弧叶片设计方法。

2) 不同比例因子下的叶型参数及流动参数变化范围很大,比例因子较小时,介质在这种叶型构成的流道中的相对运动相当于在收缩管内的

流动,节流损失较大,泵扬程较低;比例因子较大时,介质相当于在曲率较大的弯管内流动,脱流损失较大,泵效率较低;较优的比例因子为 0.15~0.35 时,对应的曲率半径比为 1.4~1.9。

3) Pfeleiderer 法及本文提出的角度平均法对应的叶片安放角均方差较小,叶型分布较合理,有利于获得较优的性能,可用于开展离心泵的初步设计。

4) 存在最优的比例因子,使叶片安放角平滑变化,从而获得最优的离心泵综合性能。

参考文献:

- [1] 严俊峰,陈炜. 基于遗传算法的低比转速高速泵优化设计[J]. 火箭推进, 2006, 32(3): 1-7.
YAN Junfeng, CHEN Wei. Optimum design of low-specific-speed high-speed centrifugal pump based on genetic algorithm[J]. Journal of rocket propulsion, 2006, 32(3):1-7.
- [2] GULICH J F. Centrifugal pumps[M]. Berlin: Germany Springer, 2007.
- [3] 赫尔姆特·舒尔茨. 泵原理、计算与结构[M]. 吴达人, 周达孝, 译. 北京: 机械工业出版社, 1991.
- [4] 普弗莱德芮尔 C. 叶片泵与透平压缩机[M]. 奚启棣, 译. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [5] 离心泵设计基础编写组. 离心泵设计基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1974.
- [6] 马捷声, 薛学功, 李威. 三圆弧形叶片型线理论及其泵的性能测试[J]. 有色设备, 2003(1): 19-20.
- [7] 洛马金 A A. 离心泵与轴流泵[M]. 梁荣厚, 译. 北京: 机械工业出版社, 1978.
- [8] 严俊峰, 陈炜. 高速复合叶轮离心泵多相位定常流动数值模拟[J]. 火箭推进, 2007, 33(1): 28-31.
YAN Junfeng, CHEN Wei. Numerical analysis of flow features of a high-speed centrifugal pump with a complex impeller with multi-phase position[J]. Journal of rocket propulsion, 2007, 33(1): 28-31.

(编辑: 王建喜)