

可控曲率半径的圆柱形叶片逐点绘型方法

严俊峰, 陈 晖

(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, 根据叶片进出口边界条件, 以逐点绘型方法为基础, 提出了一种新的曲率半径可控的叶片绘型方法。该方法的主要特点是曲率半径比值可作为设计常量由设计人员根据需要事先给定, 随后分析了曲率半径及比例因子对叶片安放角、叶片包角、相对速度及速度矩等的影响。结果表明, 不同曲率半径比值下的叶型参数及流动参数变化范围很大, 曲率半径比值较大时, 节流损失较大, 泵扬程较低, 曲率半径比值较小时, 脱流损失较大, 泵效率较低, 存在较优的曲率半径比值区间 $[1.4, 2.4]$, 使叶片安放角平滑变化, 泵的综合性能较优, 在该优化区间内, 取较大的曲率半径比值有利于获得较优的汽蚀性能, 比例因子为 0 时叶片安放角的变化较为平稳, 可用于开展离心泵的初步设计。

关键词: 离心泵; 叶片绘型; 曲率半径给定; 逐点绘型法

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2017) 01-0038-05

Point-by-point drawing method for cylindrical blade with adjustable curvature radius

YAN Junfeng, CHEN Hui

(Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

Abstract: According to the boundary conditions at blade inlet and outlet, a new drawing method for cylindrical blade with adjustable curvature radius is proposed for low-specific-speed centrifugal pump (LSPCP), which is based on the point-by-point construction method. The most notable feature of this new method is that the curvature radius can be specified as a design constant by impeller designer. The influence of curvature radius and scale factor on blade angle, vane wrap angle, relative velocity and velocity moment is analyzed. The results indicate that the parameters of blade profile and flow have a very large change range at different curvature radius ratio: the throttling loss increases and head of pump decreases with the increase of curvature radius ratio, the off-flow loss increases and efficiency of pumps decreases with the decrease of curvature radius ratio. When the ratio of curvature radius is in the interval of $1.4 \sim 2.4$, the blade angle change is smooth and the performances of the pump are optimal. In the optimal interval, the larger curvature radius ratio is in favour of getting the optimal cavitation

收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2016-05-23

作者简介: 严俊峰 (1980—), 男, 硕士, 研究领域为涡轮泵设计

performance. In practical applications, the blade angle changes smoothly if the scale factor equals to zero. Therefore, it can be used in the initial pump design.

Keywords: centrifugal pump; blade profile drawing; curvature radius preset; point-by-point construction method

0 引言

离心泵叶轮结构对泵的性能有密切影响^[1]。对于中小型低比转速离心泵来说, 加工方便、成本较低的圆柱形叶片得到了广泛的应用。绘制这种叶片一般采用圆弧法^[2-3]、逐点积分绘型法^[3-4]、对数螺旋线法^[5]和叶片包角可控法^[6-9]等。采用逐点积分绘型法能够设计出相对速度、叶片安放角及速度矩等符合设计意图的叶轮, 采用叶片包角可控法能够设计出叶片包角满足设计意图的叶轮, 而对数螺旋线法本质上是设定叶片包角的方法。上述方法从不同角度设定了相对速度、叶片安放角、叶片包角及速度矩等的变化规律, 有利于据此获得合理的叶型。

曲率半径作为重要的叶型参数之一, 将影响叶片形状及其做功能力, 从而对离心泵性能产生重要影响。本文以逐点绘型方法为基础, 通过迭代求解获得满足曲率半径变化规律的叶型, 探讨了曲率半径比对叶型参数的影响及其可能的取值范围, 进一步丰富了圆柱形叶片设计方法。

1 叶片逐点绘型过程

在逐点绘型法中, 尽管相对于进口曲率半径 ρ_1 的曲率半径比 ρ/ρ_1 分布规律很多, 但为了避免出现“S”弯, 其基本类型可分为上弯、直线及下弯三种, 如图 1 所示。

已知出口曲率半径比值 (ρ_2/ρ_1) 为 ξ , 定义比例因子 K 为平均半径 r_m 处曲率半径比 ξ_m 较平均曲率半径比 $(1+\xi)/2$ 的相对变化量, 即

$$K = \frac{2\xi_m - 1}{1 + \xi} \quad (1)$$

为了保证曲率半径比单调平滑变化, 由极值约束条件可确定出比例因子的取值范围:

$$K_{\min} = \frac{1 - \xi}{2(1 + \xi)}$$

$$K_{\max} = \frac{\xi - 1}{2(1 + \xi)} \quad (2)$$

方便起见, 定义 $K = kK_{\max}$, $k \in [-1, 1]$ 。显然, k 大于 0 时曲率半径呈上弯形状, k 为 0 时呈线性分布的直线形状, k 小于 0 时呈下弯形状。

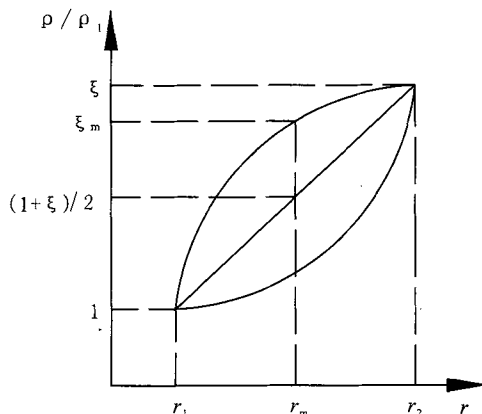


图 1 曲率半径比分布类型

Fig. 1 Distribution types of curvature radius ratio

不失一般性, 假设曲率半径比沿半径的分布规律为二次曲线, 即

$$\rho/\rho_1 = ar^2 + br + c \quad (3)$$

其中

$$a = -2K(1 + \xi)/(r_2 - r_1)^2$$

$$b = (\xi - 1)/(r_2 - r_1) - a(r_1 + r_2)$$

$$c = (r_2 - \xi r_1)/(r_2 - r_1) + ar_1 r_2$$

则曲率半径可控的叶片逐点绘型过程如下:

步骤 1, 沿半径方向均布 n 个半径为 r_i 的分布圆, 计算不同半径对应型线上各点处的曲率半径比 $\rho_i/\rho_1 \triangleq \xi_i$ (直线分布时, $(\xi_i)^n = \xi$);

步骤 2, 设第一段叶型圆弧的曲率半径为 ρ_1 , 结合曲率半径比 ξ_i 计算出各点的曲率半径 ρ_i ;

步骤 3, 结合叶型起点 P_1 及进口叶片安放角 β_1 , 确定第一段圆弧的圆心 O_1 及其与分布圆 $r_{i=2}$ 的交点 P_2 , 然后在线段 P_2O_1 上做点 O_2 , 并使 $|P_2O_2|=\rho_2$;

步骤 4, 以 O_1 为圆心, ρ_1 为半径做过点 P_1 且与分布圆 r_{i+1} 交于 P_{i+1} 的圆弧, 直至 $i=n$, 做线段 OP_n 并确定出 $\angle OP_nO_n \triangleq \beta'_2$;

步骤 5, 若 $|\beta'_2-\beta_2|/\beta_2<\varepsilon$ (ε 为收敛精度, 可取为 10^{-6}), 则绘型结束, 否则设第一段叶型圆弧的曲率半径为 ρ_1' , 并重新进行步骤 3, 步骤 4, 直至出口安放角满足收敛精度要求为止。

对应的叶片型线绘制过程如图 2 所示。

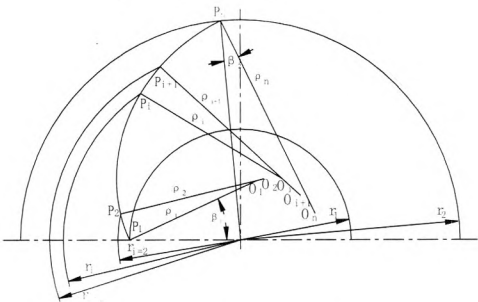


图 2 叶片型线绘制过程
Fig. 2 Drawing process of blade profile

2 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曲率半径比及比例因子下的叶片型线及其参数特点。叶轮相关参数^[4]见表 1。对应的叶片型线如图 3 所示。曲率半径、叶片安放角、叶片包角及速度矩等参数的变化规律如图 4 所示。可看出, 比例因子对叶型、叶片包角及叶片长度的影响较小, 对曲率半径、叶片安放角及相对速度有较大影响, 当出口曲率半径比值较大时还对速度矩产生影响。在出口曲率半径比值大于 2.0 时, 叶片安放角及相对速度在进口段变化较剧烈, 在出口段变化较平缓, 而速度矩则在进口段变化较平缓, 在出口段变化较剧烈, 反之亦然。

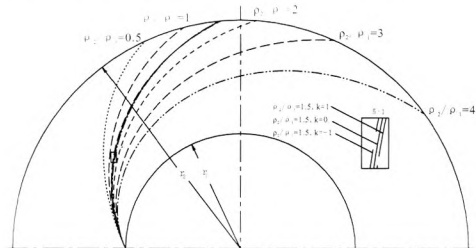
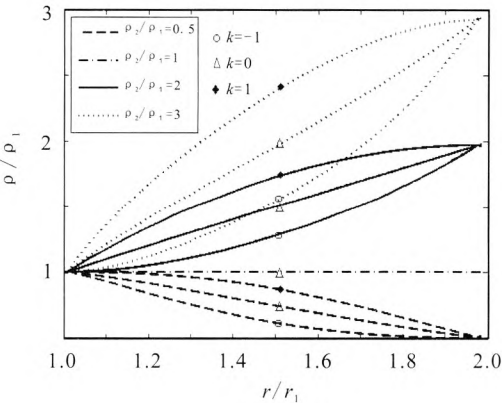


图 3 叶片型线
Fig. 3 Profile of blade

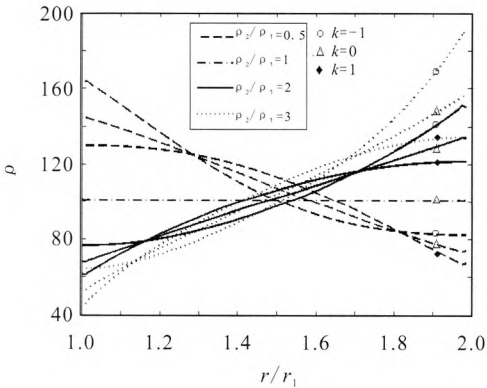
表 1 叶轮的主要设计参数

Tab. 1 Main design parameters of impeller

流量/ (kg·s ⁻¹)	扬程/m	转速/ (r·min ⁻¹)	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



(a) 曲率半径比



(b) 曲率半径

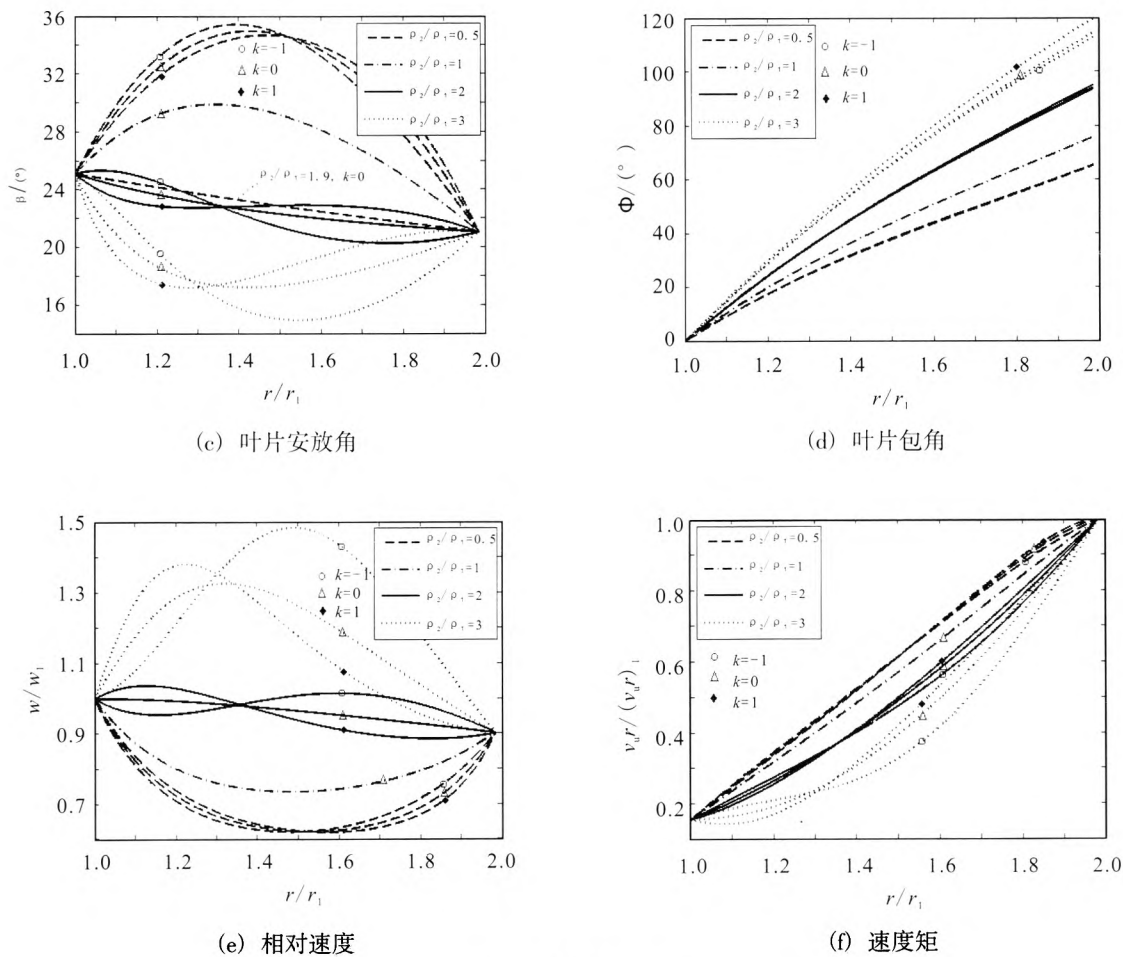


图 4 叶片参数分布
Fig. 4 Distribution of blade parameters

比较而言, 出口曲率半径比值对叶型及叶片参数的影响较大。该比值较大时, 叶片进口曲率半径较小而出口曲率半径较大, 叶片安放角呈先减小后增大的趋势。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, 从而增加节流损失, 降低泵扬程; 此外, 较大的叶片包角及叶片长度也将增大摩擦损失。出口曲率半径比值较小时, 叶片进口曲率半径较大而出口曲率半径较小, 叶片安放角呈先增大后减小的趋势。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, 易在叶片流道间产生逆压梯度, 形成脱流漩涡, 降低泵效率; 此外, 叶片包角过小, 叶片过短致使流道内扩散严重, 不利于叶片与介质间的能量交换。因此, 过大及过小的出口曲率半

径比值均将恶化离心泵的水力性能。此外, 出口曲率半径比值越大, 叶片的进口段速度矩梯度就越小, 有利于使叶轮获得较优的抗汽蚀性能。

3 出口曲率半径比值及比例因子的取值范围

(与沿半径线性分布相比) 不同出口曲率半径比值及比例因子下的叶片安放角均方差见图 5。可以看出, 出口曲率半径比值为 1.4~2.4 时, 实际叶片安放角与线性分布的叶片安放角的差异较小, 对应的相对速度的变化较均匀, 叶轮内流动较平稳, 有利于获得较优的离心泵性能。进一步的分析表明, 出口曲率半径比值为 1.8~2.0 时, 叶片安放角及相对速度的变化最平缓。

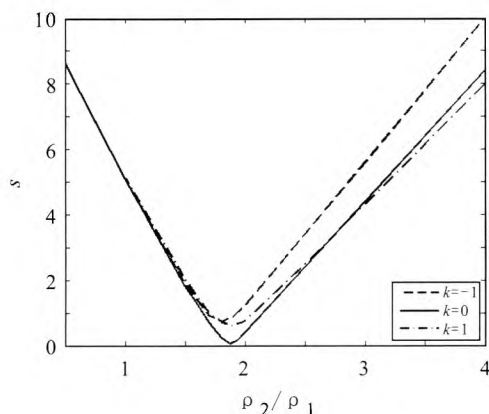


图5 安放角均方差

Fig. 5 Mean square error of blade angle

结合速度矩的分布规律可以看出, 为了获得较优的水力性能, 出口曲率半径比值可取为 1.4~2.0, 为了获得较优的抗汽蚀性能, 出口曲率半径比值可取为 2.0~2.4。

从图 5 还可看出, 出口曲率半径比值小于 1.4 时, 不同比例因子下的叶片安放角均方差保持一致; 出口曲率半径比值大于 1.4 且小于 2.8 条件下, 比例因子为 0 时的叶片安放角均方差最小。

进一步的分析表明, 出口曲率半径比值为 1.8~2.8 且比例因子非零时, 叶片安放角将出现严重的“S”弯, 如图 6 所示。此时, 液流相对速度将出现“加速-减速-加速”等流动突变现象, 从而增大节流损失或脱落损失等。因此, 在较优的出口曲率半径比值下, 初始设计时比例因子可取为 0, 当然, 可通过调整比例因子达到对叶型进行局部调整优化的目的。

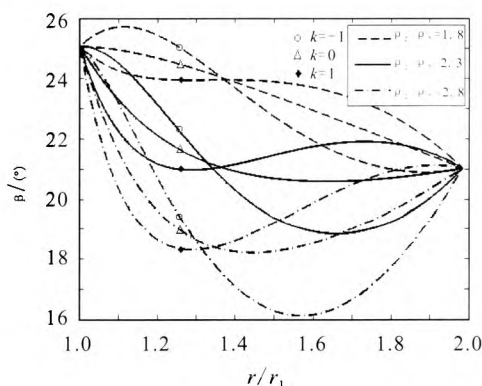


图6 叶片安放角分布

Fig. 6 Distribution of blade angle

4 结论

1) 曲率半径对叶轮的水力及汽蚀性能有显著影响, 研究中提出以逐点绘型方法为基础, 通过迭代求解获得满足曲率半径变化规律的叶片造型方法有利于进一步丰富圆柱形叶片设计方法。

2) 出口曲率半径比值对叶型及叶片参数有重要影响, 初始设计可取为 1.9。为了获得较优的水力性能, 出口曲率半径比值可取为 1.4~2.0, 为了获得较优的抗汽蚀性能, 可取为 2.0~2.4。

3) 比例因子对叶片安放角及相对速度的分布有较大影响, 初始设计时可取为 0, 优化设计时可在极值范围内选取。

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] 严俊峰, 陈晖, 王文廷. 基于比例因子的圆弧叶片造型研究[J]. 火箭推进, 2016(3): 45-49.
YAN Junfeng, CHEN Hui, WANG Wenting. Research on shape construction of circular blade in centrifugal pump based on scale factor method[J]. Journal of rocket propulsion, 2016, 42(3): 45-49.
- [4] 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.
- [5] 董志豪, 钱正峰. 三种圆柱形叶片型线方程比较[J]. 排灌机械, 1998, 16(1): 16-18.
- [6] 汪建华, 蒋文书. 低比转速泵圆柱形叶片型线的研究[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2009, 6(3): 85-87.
- [7] 严敬, 张江源, 何敏, 等. 离心泵可控包角圆柱形叶片型线方程[J]. 排灌机械, 2008, 26(5): 46-49.
- [8] 谭磊, 曹树良. 中比转速离心泵叶轮的优化设计及数值模拟[J]. 排灌机械工程学, 2010, 28(4): 283-285.
- [9] 孙庆冲. 离心泵叶片型线对泵性能影响的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2011.

(编辑: 王建喜)