

基于改进 Bezier 曲线的复合叶轮式离心泵 参数化设计及性能仿真*

李 嘉¹, 韩小宝², 李华聪², 王 玥³, 张 伟⁴

- (1. 长安大学 工程机械学院, 陕西 西安 710064;
2. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710072;
3. 中国航发西安动力控制科技有限公司, 陕西 西安 710077;
4. 陕西空天动力研究院有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 针对复合叶轮式燃油离心泵在设计中的叶轮型线复杂、难以实现快速迭代的问题, 提出一种基于改进 Bezier 曲线的叶轮参数化设计方法, 并进行了试验验证及性能仿真分析研究。引入比例系数来约束五点四次贝塞尔样条曲线的控制点参数, 并采用该方法设计叶轮轴面轮廓型线。结合辅助叶片偏置设计方法, 完成复合叶轮的参数化设计, 并对某型燃油离心泵进行设计及三维建模。最后, 通过外特性试验验证设计方法和仿真方法的有效性, 并将改进 Bezier 曲线和未改进 Bezier 曲线设计的复合叶轮结果进行对比。结果表明: 仿真与试验结果预测的扬程和效率误差均在 5% 以内, 所提出的设计方法和采用的仿真方法是有效的。相比未改进的 Bezier 曲线, 采用改进 Bezier 曲线设计的复合叶轮其内部流动更加平稳且水力损失更少。

关键词: 燃油离心泵; 复合叶轮; 样条曲线; 参数化设计; 试验验证

中图分类号: V231.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2022) 07-201009-10

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.201009

Parametric Design and Simulation for an Aero-Fuel Centrifugal Pump with Compound Impeller Based on Improved Bezier-Curve

LI Jia¹, HAN Xiao-bao², LI Hua-cong², WANG Yue³, ZHANG Wei⁴

- (1. School of Construction Machinery, Chang'an University, Xi'an 710064, China;
2. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
3. China Avic Xi'an Aero-Engine Controls Technology Co., Ltd., Xi'an 710077, China;
4. Shaanxi Province Aerospace and Astronautics Propulsion Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: Aiming at problem of the complex impeller profile and difficult to rapid iteration for an aero-fuel centrifugal pump with the compound impeller, a parametric design method based on the improved Bezier-curve is proposed, where the experimental verification and simulation analysis are carried out. The proportional coefficient is introduced to constrain the control points for a five-point fourth-order Bezier-curve, and then the improved Bezier-curve is used to complete the design of the axial profile of the impeller. Combined with the auxilia-

* 收稿日期: 2020-12-21; 修订日期: 2021-03-31。

基金项目: 陕西省自然科学基金(青年)(2020JQ-335); 中央高校项目(300102259101); 国家科技重大专项(2017-V-0013-0065)。

通讯作者: 李 嘉, 博士, 讲师, 研究领域为燃油泵性能与可靠性一体设计技术。

引用格式: 李 嘉, 韩小宝, 李华聪, 等. 基于改进 Bezier 曲线的复合叶轮式离心泵参数化设计及性能仿真[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 201009. (LI Jia, HAN Xiao-bao, LI Hua-cong, et al. Parametric Design and Simulation for an Aero-Fuel Centrifugal Pump with Compound Impeller Based on Improved Bezier-Curve[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(7): 201009.)

ry blade offset design method, the parameterized design of the compound impeller is completed. Then, a certain type of aero-fuel centrifugal pump is taken as an example for designing and 3-D modeling. Finally, the effectiveness of the design and simulation methods is verified through the experiments, and the performance is analyzed by comparing the improved Bezier-curve with original Bezier-curve. The results show that the head and efficiency predicted by simulations and experiments are both within 5%, and the proposed design method and the adopted simulation method are effective. Compared with the unimproved Bezier-curve, the compound impeller designed by the improved Bezier-curve has more stable internal flow and less hydraulic loss.

Key words: Aero-fuel centrifugal pump; Compound impeller; Bezier-curve; Parametric design; Experiment verification

1 引言

离心泵作为重要的能源设备之一,在很多工业领域得到了大量的应用^[1-3]。由于其流量范围大、增压能力强、持续工作能力可靠且稳定,燃油离心泵可作为航空发动机燃油系统中的前级增压泵或加力泵,为燃烧室供给充足的动力,其性能优劣严重影响着发动机的工作状态、工作性能^[4-5]。由于航空发动机需要面临越来越严酷的飞行环境,且超机动飞行、超声速巡航等要求,迫使发动机供油系统需要在更宽广的飞行包线内,使得大流量、高可靠、高效等成为了燃油离心泵的发展趋势。因此,高性能燃油离心泵的设计及应用非常关键,而复合叶轮设计便是其中一个重要的关键技术。该型叶轮可保证大范围飞行包线下泵的高效及稳定工作^[6-7]。

国内外相关研究人员针对离心泵设计方法开展了大量研究工作,包括:基于相似换算法或速度系数法的设计方法、基于智能优化算法的设计方法以及叶轮型线的参数化设计方法等。相似换算法或速度系数法是最为传统且基本的设计方法^[8],但对优异的水力模型和设计人员经验的依赖过多,无法明确叶轮结构与流道内液体流动规律之间的联系。基于智能优化算法的设计方法以大量的试验数据或仿真数据为基础,利用先进的数学优化算法,结合代理模型所建立的结构参数与性能参数的关系,对泵的性能进行寻优^[9-10]。该方法对模型依赖度较大,且需要借助大量的仿真或试验数据才能保证模型的精度。相比前两种设计方法,叶轮型线的参数化设计方法能克服各自的缺点。一方面,利用速度系数法得到基本结构参数,进而结合流动理论完成叶轮轴面设计,确保叶轮设计更符合流动规律。另一方面,利用参数化曲线来实现对叶片型线的快速控制,为优化设计提供丰富的数据基础,可有效提高设计速度和精度^[11-13]。可见,燃油离心泵的参数化设计方法能够保

证泵的结构与流动符合确定的规律,同时提高了型线的设计精度和速度。

目前,大多采用NURBS曲线曲面理论实现对型线参数的控制。国外针对离心泵的参数化设计做了很多工作。Han等^[14]结合NUMECA,遗传算法以及神经网络方法等提出了一种综合的型线优化设计方法,实现了叶轮和蜗壳的多目标优化。Zhao等^[15]利用贝塞尔(Bezier)曲线对一种低比转速离心泵进行了参数化设计,结合CFD仿真模拟完成了性能验证。Kim等^[16]将因子分析方法应用于叶轮的参数化设计中,利用耦合曲面响应完成了优化设计。相比国外,国内学者也进行了一定的研究工作,如:杨军虎等^[17]采用CAD,Proe等软件,建立了离心泵参数化设计软件,并结合CFD和试验完成了验证。张人会等^[18-19]基于参数化设计和伴随理论相结合的方法,提出了一种离心泵的优化设计方法。谭鑫等^[20]采用NURBS曲线进行离心泵叶轮前、后盖板轴面流线和流线展开线的设计,并结合液力透平对其性能进行了优化。李嘉等^[21]采用多项式空间曲线拟合了一体式叶轮的型线控制方程,并对其叶轮进行了优化。可见,国内外针对离心泵参数化设计方面做了大量研究并取得了显著的研究成果。

然而,专门针对复合叶轮的参数化设计研究很少。且相比其他工程领域,航空燃油离心泵的工作边界变化更为宽广、工作环境更为严酷,其流动问题更加突出,寻求更加符合其流动规律的设计方法很有必要。另外,Bezier样条曲线大量应用在叶轮型线设计中,建立了一定的研究基础。采用基于Bezier曲线的叶轮参数化设计方法能够有效地降低离心泵研制过程中的试验次数,保证一定的设计效率和设计精度,为叶轮的复杂扭曲型线进行快速迭代提高技术支持。相比其他多次多点Bezier曲线,如何用更少的控制点完成曲线轮廓更好的拟合,且能够达到设计要求,显得尤为重要。因此,提出一种改进的五次

四阶 Bezier 曲线和辅助叶片偏置的方法,进行复合叶轮式燃油离心泵的参数化设计,并基于 CFD 技术完成性能验证和复合式叶轮离心泵的性能分析。

2 复合叶轮参数化设计方法

离心泵的整体设计方案如图 1 所示。根据离心泵最基本的性能指标进行过流部件设计,需兼顾泵的流量、额定转速、入口压力、出口压力及工作油液性质等。在分析离心泵内部基本流动基础上,采用速度系数法对基本结构参数进行设计。进而,结合一元设计理论等对泵的叶轮进行详细设计,包括:叶轮轴面流线、叶片中心流线等,使其流动更符合期望流动。最后,借助 CAD,CFD 等技术等完成设计验证,缩短设计周期、提高设计效率。

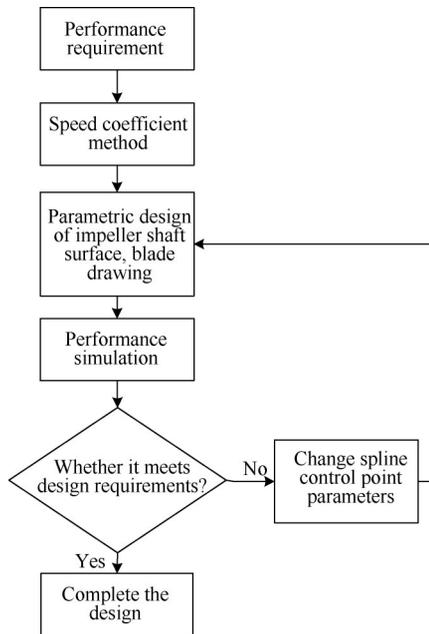


Fig. 1 Overall program

其中,通过样条控制点来实现叶轮轴面流线的参数化造型,完成复合叶轮主叶片和辅助叶片的轴面轮廓型线设计。采用五点四次 Bezier 曲线建立叶轮前后盖板型线,通过内切圆校核方法对叶轮过流截面面积随流线长度变化情况进行检查及迭代,以保证叶片型线、曲面光滑,使流体尽可能的不发生分离流动。另外,以叶轮流道内不产生流动失速为准则,采用辅助叶片偏置的方法,完成复合叶轮一级辅助叶片的布置。

2.1 改进五点四次 Bezier 曲线设计方法

通过对样条曲线控制点的参数化控制,使复合叶轮轴面轮廓型线不发生曲率突变,为参数化建模、

优化提供模型基础。此处,给出基于改进的五点四次 Bezier 曲线的复合叶轮型线设计方法。

用控制顶点定义的 Bezier 曲线可用下式表示,为

$$p(t) = \sum_{j=0}^n b_j B_{j,n}(t), 0 \leq t \leq 1 \quad (1)$$

式中 b_j 称为 Bezier 点或者控制顶点,其基函数为

$$B_{j,n}(t) = C_n^j t^j (1-t)^{n-j} \quad (2)$$

根据式(1),结合抛物线三切线定理,可以将一条二次曲线建立成两条一次 Bezier 曲线,即

$$b_0^2 = (1-t)^2 b_0 + 2t(1-t)b_1 + t^2 b_2 \quad (3)$$

可以看到,二次 Bezier 曲线是两条一次 Bezier 曲线的线性组合,通过多项式曲线控制点的坐标位置实现一条曲线型线的修改。为了使叶轮轴面轮廓型线更加灵活控制,使用高次 Bezier 曲线。因此,需要将式(1)推广到高阶,即:由 $n+1$ 个控制点决定的 n 次 Bezier 曲线。可以被定义为两个由 n 个控制点决定的 $n-1$ 次 Bezier 曲线的线性组合,因此,得到高次 Bezier 曲线的显式表达式为

$$p(t) = \sum_{j=0}^{n-k} b_j^k B_{j,n-k}(t) = \dots = b_0^n \quad (4)$$

式中中间控制点为

$$b_j^k = \begin{cases} b_j & ; k=0 \\ (1-t)b_j^{k-1} + tb_{j+1}^{k-1} & ; 0 < k < n; 0 \leq j \leq n-k \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5),得到五点四次 Bezier 曲线,即

$$p(t) = (1-t)^4 b_0 + 4(1-t)^3 t b_1 + 6(1-t)^2 t^2 b_2 + 4(1-t)t^3 b_3 + t^4 b_4 = b_0^4 \quad (6)$$

图 2 所示为五点四次 Bezier 曲线的示意图。可以看到,首尾两点固定后,需要三个中间顶点的坐标,即 6 个参数控制曲线形状。

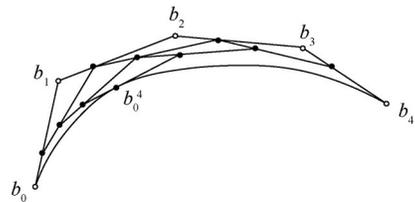


Fig. 2 Schematic diagram of the Bezier curve with five-point and four-order

为了减少控制变量个数,引入比例系数 t_1 和 t_2 来约束移动位置,使中间控制顶点 b_1 和 b_3 只能在线段 $b_0 b_2$ 和 $b_2 b_4$ 中间移动。比例系数 t_1 和 t_2 表示为

$$t_1 = \frac{|b_0 b_1|}{|b_0 b_2|} \quad (7)$$

$$t_2 = \frac{|b_2 b_3|}{|b_2 b_4|} \quad (8)$$

因此,式(4)中的控制点参数发生了减少,即

$$b_1 = (1 - t_1)b_0 + t_1 b_2 \quad (9)$$

$$b_3 = (1 - t_2)b_2 + t_2 b_4 \quad (10)$$

绘制删减控制点后的改进五点四次 Bezier 曲线方程图形,如图 3 所示。可以看出,变量为 b_2 的坐标、系数 t_1 与 t_2 共 4 个。使 b_2 位置不变,又将变量减小为系数 t_1 和 t_2 两个变量。进而,用上述方法分别绘制叶轮轴面轮廓的轮缘与轮毂型线,如图 4 所示。

图 4 可以看到,通过对 Beizer 曲线中控制点的修改,能够实现叶轮轴面流道的有效控制。

图 5 给出了改变控制点参数的叶轮型线轮廓的对比结果,可以看到,通过调整比例系数 t_1 和 t_2 ,能够有效控制叶轮型线轮廓。另外,图 6 所示为选择了 4 组参数下流道面积检查 ($F-L$) 的对比结果,可以看到,通过改变控制点能够改变设计性能,第 2 组参数的流道检查结果最优。

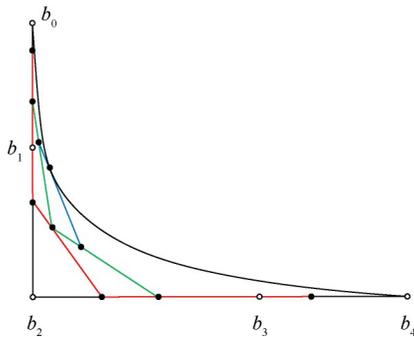


Fig. 3 Schematic diagram of the optimized Bezier curve with five-point and four-order

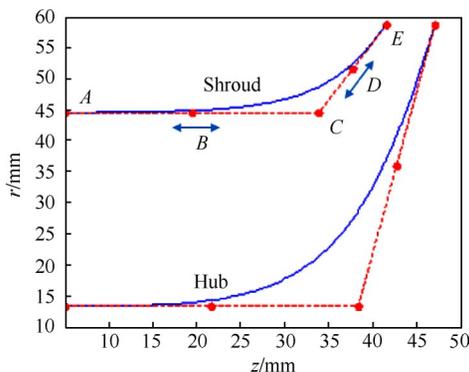


Fig. 4 Shroud and hub lines of axial section

2.2 辅助叶片偏置设计方法

复合叶轮需要专门对辅助叶片进行设计。采用主叶片偏置的方法进行一级辅助叶片的设计。

确定叶轮进口边位置。将叶片向进口段延伸,

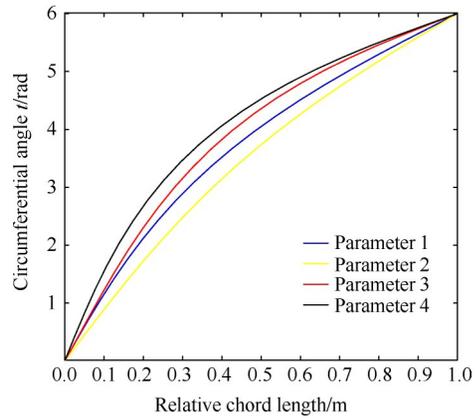


Fig. 5 Comparison result of impeller profile

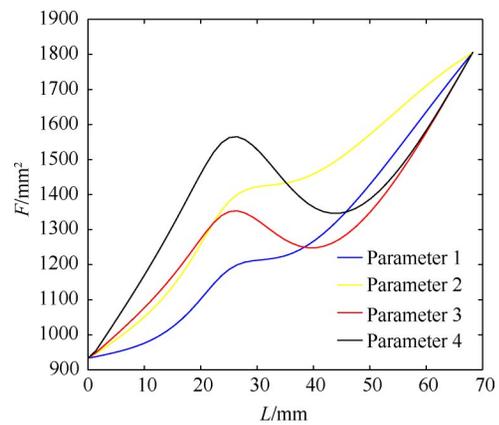


Fig. 6 Comparison result of $F-L$

有助于提高叶轮的效率和扬程,叶片与前后盖板的夹角不应过小,选择在 75° 以上。同时,根据所设计的叶轮进出口安放角,给定叶轮进出口角度。

以叶轮流道内不产生流动失速为准则完成辅助叶片的布置。根据式(11)、式(12)确定辅助叶片起始处直径。

$$0.9 \leq \frac{w_1}{w_i} \leq \frac{w_1}{w_2} \leq 1.7 \quad (11)$$

$$D_i = 0.4 \sim 0.6 (D_1 + D_2) \quad (12)$$

式中 w_1 , w_2 和 w_i 分别为叶片进口、叶片出口和辅助叶片起始处的液流相对速度。 D_1 , D_2 和 D_i 分别为叶轮进口直径、叶轮出口直径和辅助叶片起始处的直径。

确定辅助叶片的偏置角度。选择偏置角度遵循以下原则:(1)选择偏置角度为 50%,即等分处,保证减弱吸力面的尾迹效应。(2)偏置角度稍向压力面靠近,减弱叶轮出口处的速度滑移,保证出口的轴对称流动。(3)将辅助叶片设计稍偏向吸力面。如选择偏置角度为 45%,有利于流道两侧的流量平衡,降低叶轮所受径向力。图 7 所示为辅助叶片偏置角度示意图。

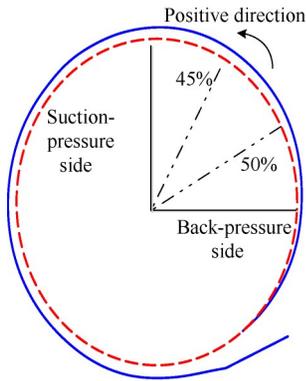


Fig. 7 Relationship of auxiliary blade offset angle

完成叶轮轴面轮廓型线设计、辅助叶片偏置后,需要对叶轮轴面流线进行设计,完成中间流面展开,并对叶片进行加厚,最后完成三维造型。

3 某型复合叶轮式燃油离心泵参数化设计

以某型航空燃油离心泵为对象,进行参数化设计及性能仿真分析。该型泵为单级叶轮、单级蜗壳结构,性能指标为:工作介质为航空煤油(RP-3),密度 ρ 为 753kg/m^3 ;流量 Q_d 为 38000L/h ;泵增压 Δp 为 13MPa 。根据上述性能参数,基于速度系数法进行基本结构参数设计。部分结构参数计算如下。

(1) 当量直径 D_s

$$D_s = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v_1}} \quad (13)$$

(2) 叶轮进口直径 D_1

$$D_1 = \sqrt{D_s^2 + d_h^2} \quad (14)$$

(3) 轮毂直径 d_h

$$d_h = (1.2 \sim 1.25) d_{\min} \quad (15)$$

(4) 叶轮出口直径 D_2

$$D_2 = K_{D_2} \sqrt[3]{\frac{Q}{n}} \quad (16)$$

式中 K_{D_2} 为经验系数,可按式(17)计算

$$K_{D_2} = (9.35 \sim 9.6) \left(\frac{n_s}{100}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (17)$$

(5) 叶轮进口安放角 β_1

$$\beta_1 = \arctan(v_1/u_1) \quad (18)$$

式中 v_1 和 u_1 分别为叶轮进口绝对速度和相对速度。另外,选择叶轮出口安放角 β_2 为 15° 。

(6) 蜗壳第八断面面积 A_8

$$A_8 = \frac{Q}{v_3} \quad (19)$$

式中 v_3 为蜗壳中的液流速度,计算如式(20)

$$v_3 = K_3 \sqrt{2gH} \quad (20)$$

(7) 其他断面面积根据线性变化的原则,可按式(21)分别求出

$$A_N = \frac{n}{8} A_8 \quad (21)$$

式中当 N 从 1 到 8 时, n 从 1 到 7。参数计算结果如表 1 所示。

根据以上公式完成离心泵叶轮、蜗壳基本结构参数的设计。如表 1 所示。

Table 1 Prototype structure geometry

| Parameters | Value |
|---------------------------|-------|
| D_s/mm | 42 |
| D_1/mm | 58 |
| D_2/mm | 115 |
| D_h/mm | 24 |
| $\beta_1/(\text{^\circ})$ | 17 |
| $\beta_2/(\text{^\circ})$ | 15 |

完成基本结构参数计算后,对叶轮进行详细设计,设计流程如图 8 所示。

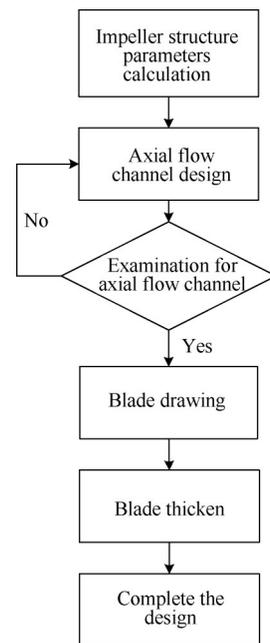


Fig. 8 Overall program of impeller

具体设计过程及结果如下:

(1) 根据改进五点四次 Bezier 曲线和一级辅助叶片偏置方法进行复合叶轮的主叶片、一级辅助叶片型线设计、进口边的设计,并完成轴面流道过流面积检查。设计结果如图 9 所示。

(2) 按照流量均分原则划分过流截面的中间流线。考虑到高压离心泵轴向长度较大,叶轮进口扭曲的特点,给定包角和叶片安放角,将叶片型线从轮

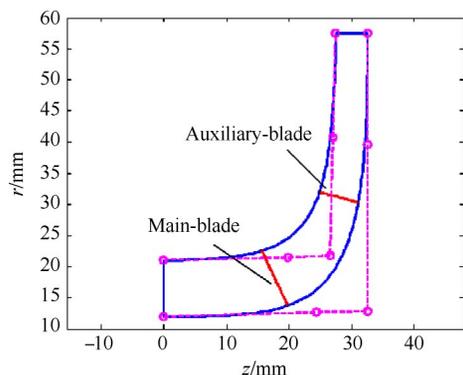


Fig. 9 Axial section contour line and inlet position of compound impeller

毂向轮缘总共展开 4 条流线,划分得到的叶轮轴面流线如图 10 所示。

(3) 获得叶轮叶片轴面流线之后展开前、后盖板型线和中间流线型线,获得叶片的中心面。其中,选定一级辅助叶片的偏置角度为流道中心。根据轴面流线的展开关系,得到主叶片和一级辅助叶片的中心曲面。给定叶片流面厚度沿流线长度方向为线性变化,并对叶片进行加厚,得到主叶片和一级辅助叶片的造型,如图 11 所示。

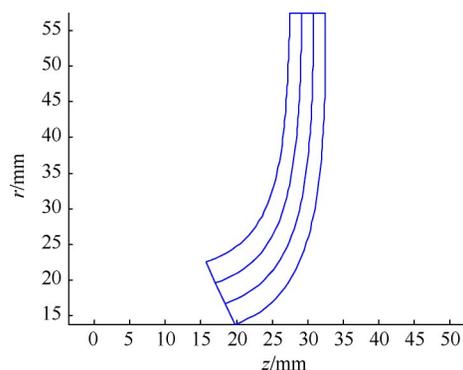


Fig. 10 Flow line at axial section

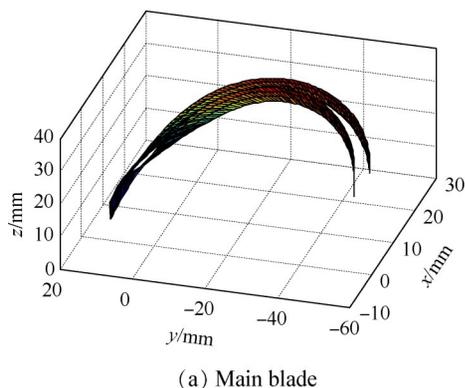
(4) 在 UG 环境中,完成三维模型建模,如图 12 所示。

4 试验验证及性能仿真分析

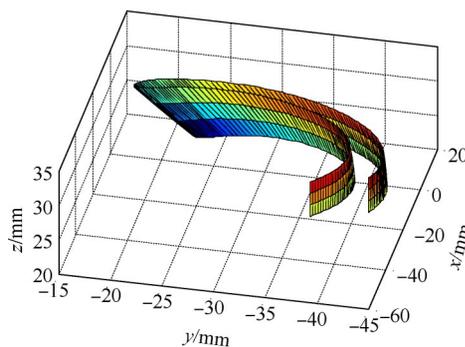
为了验证所提出的复合叶轮式燃油离心泵的参数化设计方法,并分析所设计的离心泵的性能,进行该型离心泵的试验验证及性能仿真研究。

4.1 网格模型和边界条件

进行性能仿真之前,需要建立泵的流场模型及网格模型^[20]。在 ICEM CFD 网格生成软件中完成叶轮和蜗壳网格模型的划分。其中,叶轮模型采用多块拓扑结构建立结构网格模型。考虑到蜗壳部件几

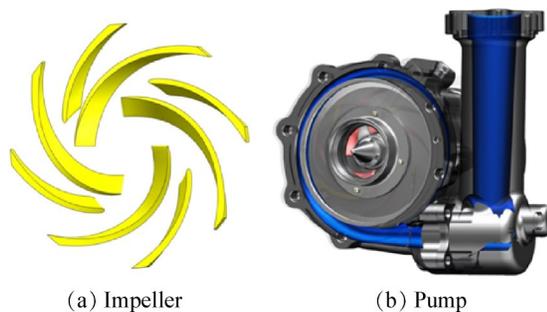


(a) Main blade



(b) Auxiliary blade

Fig. 11 Blade modeling

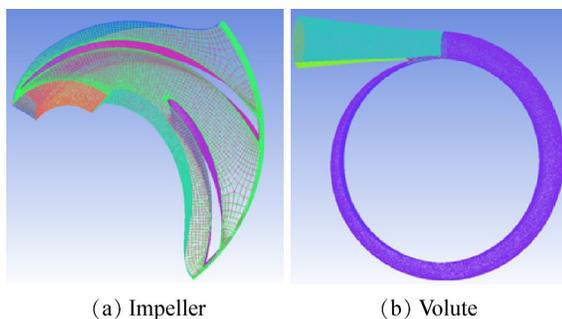


(a) Impeller

(b) Pump

Fig. 12 3-D models of impeller and pump

何复杂扭曲,采用非结构网格进行蜗壳的网格划分。离心泵的网格模型如图 13 所示。叶轮流道网格分布均匀,流道网格质量分布在 0.4 以上。同时,蜗壳流道网格质量为非结构网格,但整体质量在 0.13 以上,能够用于高精度的数值仿真。



(a) Impeller

(b) Volute

Fig. 13 Mesh models of impeller and volute

为了使网格模型对仿真结果的影响降到最小,以设计流量工况的扬程和效率作为指标对不同网格数目进行独立性检查,结果如表2所示。可以看出,当网格数由117262增加到253441时,扬程和轴功率变化波动值小于1%。满足计算需求,且兼顾计算时间和计算资源,因此,选用Grid-2网格作为泵的计算网格。

Table 2 Dependence check results of grid numbers

| Model | Grid numbers | Head/m | Efficiency/% |
|--------|--------------|--------|--------------|
| Grid-1 | 96925 | 1691.3 | 69.11 |
| Grid-2 | 117262 | 1692.3 | 69.64 |
| Grid-3 | 253441 | 1699.0 | 69.66 |
| Grid-4 | 348837 | 1688.5 | 70.47 |

选择 RNG $k-\epsilon$ 和 SIMPLE 算法进行仿真求解,方程离散方式采用二阶迎风格式,将平均残差值作为求解收敛的判别标准,计算精度为 10^{-5} 。边界条件采用多重坐标系,动静固壁面采用无滑移边界条件,近壁面区域采用标准壁面函数处理。另外,由于非定常的计算量较大,为了提高非定常仿真的精度和效率,对时间步长(即采样频率)进行独立性检查,确定合适的时间步长和迭代步数。

4.2 试验验证

通过不同流量工况下的数值模拟结果,对该型复合叶轮式燃油离心泵的扬程和效率进行预测,并与试验结果进行对比。一方面,验证所提出的设计方法的有效性;另一方面,验证所采用的仿真方法的有效性。图14所示为离心泵试验样机。



Fig. 14 Prototype of the centrifugal pump

根据式(22)、式(23)分别预测该型燃油离心泵的扬程和效率

$$H = \frac{P_{out} - P_{in}}{\rho g} \quad (22)$$

$$\eta = \frac{\rho g Q H}{P \times 1000} \quad (23)$$

式中 Q 为实际流量, H 为扬程, P 为轴功率。

表3所示为设计流量工况下,该型离心泵的设计需求指标、仿真预测结果以及试验结果的对比结果。

Table 3 Comparison results among design requirement, simulation and experiment

| | Design requirement | Simulation | Experiment | Deviation/% |
|--------------|--------------------|------------|------------|-------------|
| Head/m | 1700 | 1692.3 | 1645.6 | 3.2 |
| Efficiency/% | 70 | 69.64 | 66.8 | 4.6 |

可以看出,所设计的复合叶轮式燃油离心泵在设计工况下,扬程和总效率误差很小,均不超过5%,处于性能允差范围内,满足设计要求。表明所提出的复合叶轮式离心泵的参数化设计方法是有效的。

在不同流量工况下,分别完成该型离心泵的性能预测,并拟合性能曲线(流量 Q -扬程 H 曲线,流量 Q -效率 η 曲线)。图15所示为仿真预测结果与试验结果的性能曲线对比结果。

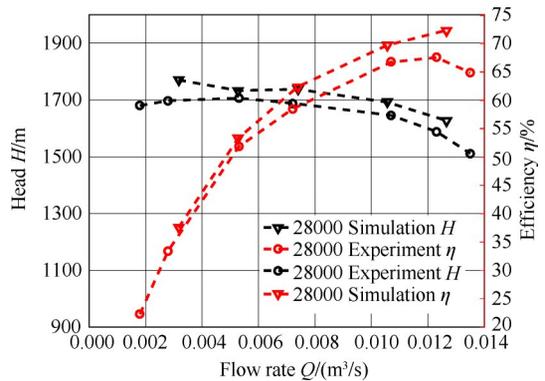


Fig. 15 Comparison results between simulation and experiment for performance curve

图中可以看到,随着流量增大,泵的扬程降低,即:泵的增压能力减弱。同时,小流量工况下泵的效率较低,在中间流量增加较快,直至最大流量,均符合离心泵的基本性能特点。另外,在各个流量工况下,仿真预测的外特性结果随流量的变化趋势与试验结果基本一致,误差较小。尤其是中间流量工况时,两者的扬程和效率误差均为最大,达到了3.6%和4.8%,但误差均不超过5%,仍能够满足要求。表明所采用的仿真方法能够完成该型离心泵的性能仿真。

4.3 离心泵性能仿真分析

为了更为清晰地分析该型泵的水力性能,进行非定常特性仿真并给出仿真结果。在进口压力

0.1MPa 下, 分别对 $0.6Q_d$, $0.8Q_d$, Q_d , $1.2Q_d$ 四个流量工况进行非定常仿真计算。

图 16, 图 17 分别为四个流量工况下, 泵中间截面的总压分布结果和流线分布结果。

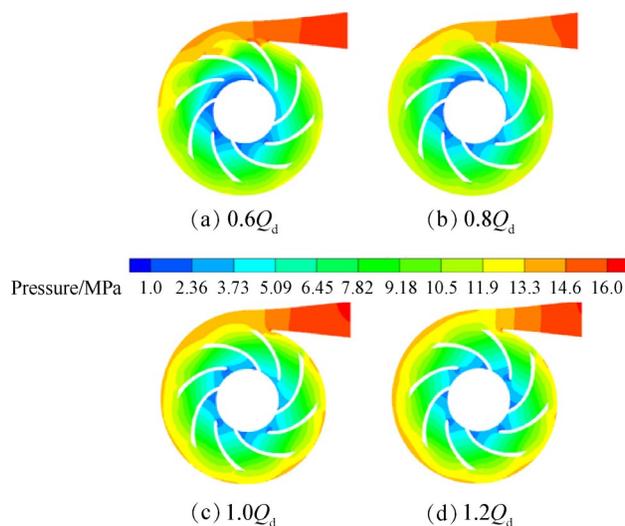


Fig. 16 Pressure distributions

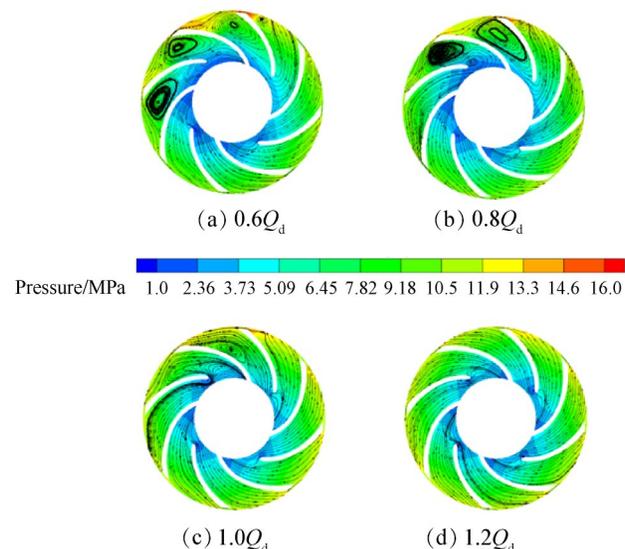


Fig. 17 Streamline distributions

图 16 中, 在各个工况下, 从泵进口到蜗壳出口的压力变化趋势基本相似。在工作过程中由于离心力的作用下, 叶轮旋转区域的压力较低, 蜗壳外围流域处的压力较高。随着流量的不断增加, 压力中心处和外围区域的压力差逐渐减小。叶轮各流道内, 流动具有一定的周期性。叶片进口处无明显的回流现象, 具有一定的抗汽蚀性能。叶片出口区域存在小范围压力损失, 这是尾迹流动引起的, 但程度较弱。蜗壳隔舌区域, 无明显的低压损失区域。整体来看, 该型泵压力分布相对均匀。

图 17 中, 在较小的流量工况下 ($0.6Q_d, 0.8Q_d$), 靠近蜗壳隔舌角区域的几个叶轮流道, 产生了大量的流动漩涡, 随着旋转变化的, 该漩涡的尺度沿着流道慢慢变化, 产生旋转失速。另外, 在 $1.0Q_d$ 和 $1.2Q_d$ 流量工况下, 在短叶片的进口区域, 出现了一定幅度的小尺度漩涡, 但相较于传统的叶轮形式, 旋涡团较小, 抗汽蚀性能更好。蜗壳内隔舌到扩散管内的不均匀流动较为明显, 尤其是 $1.2Q_d$ 工况时扩散管内靠近叶轮一侧出现了明显的漩涡团。此外, 由于叶轮转动引起了上、下游流动时的非定长变化产生了一定的尾流和射流的现象, 尤其是小流量工况下较为明显。整体来看, 该型泵内部的不利非定常流动较少, 无明显的流动损失区域, 且进口流动有利于抗汽蚀性能。

为了更好地表现该型泵在进口区域的非定常流动特性, 考虑叶片进口处背力侧容易发生汽蚀, 因此, 对叶片进口处背力侧 (不同半径处) 进行了压力的监测, 并通过快速傅里叶变化 (FFT) 完成了压力信号的时频转换分析。其中, 设置的监测点如图 18 所示。

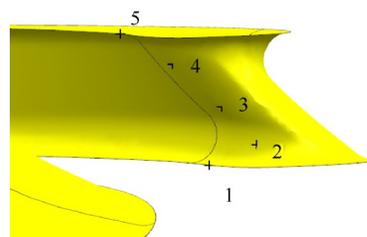


Fig. 18 Monitoring points at back-pressure surface of blade inlet

图 19 给出了设计流量 Q_d 工况下, 各个监测点静压力时频域分析结果。

图 19 中, 进口区域背力侧的压力变化基本一致, 压力脉动在单个旋转周期内呈现出了明显的 8 个波峰和 8 个波谷, 这和总叶片数为 8 个相关。压力的最大幅值为 4595390Pa , 出现在监测点 5。另外, 从频率变化结果可以看出, 5 个监测点上的压力脉动主频均为 468.6178Hz , 主频均对应的是泵的转频。整体来看, 与非定常流动分析结果一致, 该型泵进口区域的流动正常, 有利于泵的抗汽蚀性能。

4.4 改进 Beizer 曲线下复合叶轮的对比

分别对采用改进 Beizer 曲线、未改进 Beizer 曲线以及未使用参数化曲线设计的复合叶轮的内部流场仿真结果进行对比。

此处, 以设计流量 ($1.0Q_d$) 工况为例, 图 20 所示

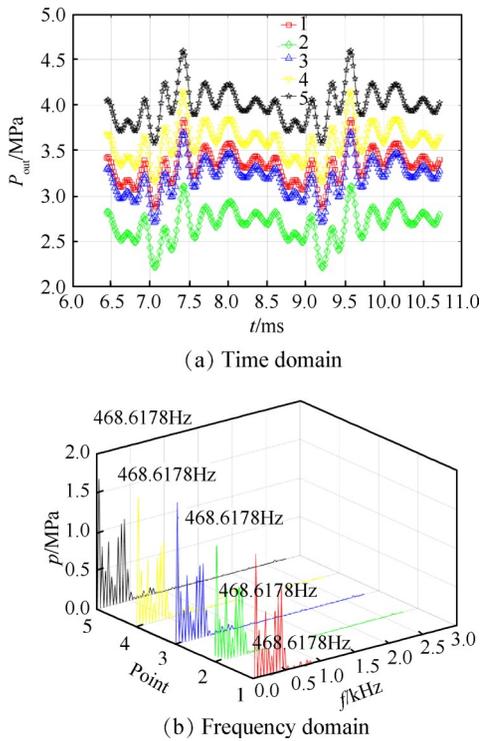


Fig. 19 Pressure results of time and frequency domains at back-pressure surface of blade inlet

为叶轮中间截面流线分布云图。图中,由于受到动静部件干涉的影响,都出现不同程度的不均匀流动现象。流体在叶轮均表现出明显的射流流动现象,且流道内部均出现明显的轴向涡流现象。然而,相比其他两种方法,采用改进 Bezier 曲线方法设计的复合叶轮流道内部压力增加比较平稳,且轴向涡流效应相对较轻,由此产生水力沿程损失和冲击损失更小,因此改进 Bezier 曲线所设计的离心泵效率较高。

图 21 所示为三种方法设计的复合叶轮轴面流线

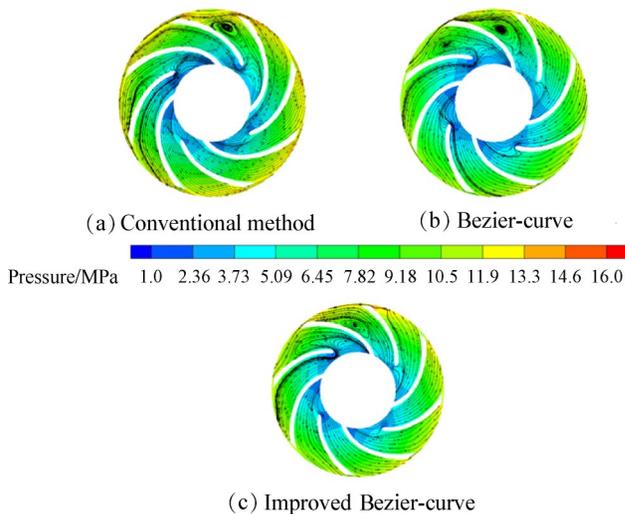


Fig. 20 Streamline at mix-section of impeller

分布仿真结果。图中,叶轮流道内部均从进口至出口压力逐渐增高,在叶轮出口处达到最高。且在叶轮进口轮毂和出口轮缘均存在明显的回流漩涡。相比其他两种方法,采用改进 Bezier 曲线方法设计的复合叶轮回流现象有所减小,增强了叶轮的做功能力,因此,降低了离心泵的功率消耗。

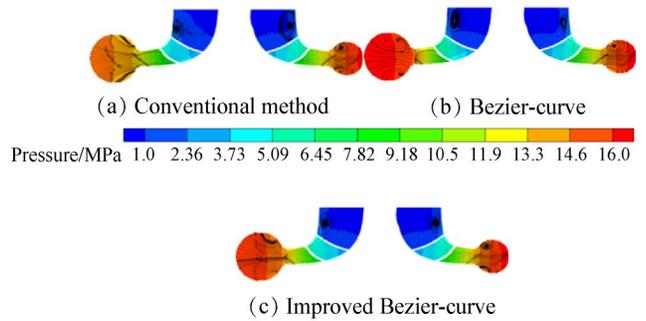


Fig. 21 Streamlines at axial-section

研究中取得了一定的成果,但后续仍有大量工作需要开展。因此,将以下内容作为重点:(1)利用参数化设计方法进行该型泵的优化设计研究;(2)分析该型泵内部的非定常流动结构、关键区域的压力脉动时频特性等。

5 结论

针对复合叶轮式燃油离心泵的参数化设计问题,提出了一种改进五点四次 Bezier 曲线的设计方法,完成了某型航空燃油离心泵的设计,并进行了试验验证及性能仿真分析研究。主要结论为:

(1)所设计的离心泵性能符合设计指标要求,且性能仿真结果与试验结果预测的扬程和效率误差均在 5% 以内。所提出的改进五点四次 Bezier 曲线和一级辅助叶片偏置的复合叶轮参数化设计方法可行可信,同时,所采用的仿真方法能够实现所设计的复合叶轮式燃油离心泵的性能仿真分析。

(2)相比未改进的 Bezier 曲线,采用所提出的改进 Bezier 曲线设计的复合叶轮,其内部压力分布更加平稳,流动损失更小,且叶轮流道的不利流动得到了改善。

致谢:感谢陕西省自然科学基金(青年)、中央高校项目以及国家科技重大专项的资助。

参考文献

[1] 崔宝玲, 朱祖超, 陈 鹰, 等. 长中短叶片离心叶轮内部流动的数值模拟[J]. 推进技术, 2006, 27(3): 243-247. (CUI Bao-ling, ZHU Zu-chao, CHEN Ying,

- et al. Numerical Simulation of Inner Flow Field in Centrifugal Pump Impeller with Long Middle and Short Blades [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2006, 27(3): 243-247.)
- [2] 关醒凡. 现代泵理论与设计[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2011.
- [3] 刘尚勤. 离心泵用作航空发动机主燃油泵研究[J]. 航空发动机, 2006, 32(2): 43-45.
- [4] 樊思齐. 航空发动机控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2008.
- [5] 周宗才. 某型飞机推进系统控制[M]. 西安: 空军工程学院, 1997.
- [6] 刘会琴. 基于CFD分析的多级离心泵全流道优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [7] 赵国伟, 咸丽霞, 赵国寿, 等. 分离叶片对离心泵空化性能影响的数值预报[J]. 兰州理工大学学报, 2019, 45(4): 56-62.
- [8] 贺青, 王玥, 张海涛, 等. 航空燃油离心泵增压设计及仿真[J]. 液压与气动, 2020, (11): 39-44.
- [9] 童哲铭, 陈尧, 童水光, 等. 基于NSGA-III算法的低比转速离心泵多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2020, 31(18): 2239-2246.
- [10] 张宇, 覃刚, 张云清, 等. 基于克里金元模型的离心泵水力性能多目标优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 54-57.
- [11] Deb K, Jain H. An Evolutionary Many-objective Optimization Algorithm Using Reference-Point-Based Non-dominated Sorting Approach, Part I: Solving Problems with Box Constraints [J]. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2014, 18(4): 577-601.
- [12] 刘显为, 李华聪, 史新兴, 等. 基于离子群算法的航空离心泵复合叶轮优化设计研究[J]. 推进技术, 2019, 40(8): 1743-1751. (LIU Xian-wei, LI Huacong, SHI Xin-xing, et al. Optimization Design of Composite Impeller of Aero-Centrifugal Pump Based on Particle Swarm Optimization [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(8): 1743-1751.)
- [13] 张宇, 覃刚, 张云清, 等. 基于克里金元模型的离心泵水力性能多目标优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 54-57.
- [14] Han X D, Kang Y, Sheng J P, et al. Centrifugal Pump Impeller and Volute Shape Optimization via Combined NUMECA, Genetic Algorithm, and Back Propagation Neural Network [J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 61: 381-409.
- [15] Zhao A, Wu P, Wu D Z, et al. The Optimization of a Low Specific Speed Pipeline Pump [C]. *Beijing: In Proceedings of the 6th International Conference on Pumps and Fans with Compressors and Wine Turbines*, 2013.
- [16] Jang C M, Kim K Y. Optimization of a Stator Blade Using Response Surface Method in a Single-Stage Transonic Axial Compressor [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2005, 219(8): 595-603.
- [17] 张人会, 杨军虎, 李仁年. 离心叶轮的参数化设计[J]. 排灌机械, 2009, 27(5): 310-313.
- [18] 张人会, 郭苗, 杨军虎. 基于自由曲面变形方法的离心泵叶片反问题方法研究[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 84-88.
- [19] 张人会, 樊家成, 杨军虎. 基于自由曲面变形方法的离心泵叶片载荷优化研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(10): 38-43.
- [20] 谭鑫, 郭慧婧, 李会, 等. 基于NURBS曲线的离心透平叶型设计[J]. 热能动力工程, 2017, 32(3): 47-53.
- [21] 李嘉, 李华聪, 王淑红, 等. 一体式多级导流诱导轮与叶轮型线优化研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2015, 41(5): 953-960.

(编辑:张贺)