doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.006

基于自由曲面变形方法的离心泵叶片载荷优化*

张人会^{1,2} 樊家成¹ 杨军虎^{1,2} 李仁年^{1,2}

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 兰州 730050; 2. 兰州理工大学甘肃省流体机械及系统重点实验室, 兰州 730050)

Optimization of Centrifugal Pump Blade Load Based on Free Form Deformation

Zhang Renhui^{1,2} Fan Jiacheng¹ Yang Junhu^{1,2} Li Rennian^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China

2. Key Laboratory of Fluid Machinery and Systems, Gansu Province, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: According to the limitation of traditional inverse problem of centrifugal pump blade and its optimization, the free form deformation (FFD) inverse method of centrifugal pump impeller based on load driving was proposed to design the centrifugal pump impeller. A more stable and effective deformation function was established. The centrifugal pump blade load was parameterized by using sectional spline according to the characteristic of centrifugal pump impeller load. The design of experiment was implemented in the designed variables space, and the response surface method was introduced to optimize the distribution of blade load. The three-dimensional transient turbulent flow in pump was simulated by using commercial software. The control and deformation of blade shape and analysis of blade load were implemented by Matlab code. The computation of FFD and CFD was coupled. The relationships between distribution of blade load for low specific speed pump blade was deduced. The calculation case results showed that the proposed centrifugal pump blade load optimization theory and method were rational. **Key words**: Centrifugal pump Impeller Blade Inverse problem Free form deformation Response

surface

引言

水力机械反问题及其优化一直是该领域的热点

及难点,复杂的内部流动约束导致水力机械叶片反问题的优化难以进行^[1-5]。水力机械叶片反问题是 在给定流场参数的条件下反求对应的叶片几何形

收稿日期: 2014-11-17 修回日期: 2015-01-01

^{*}国家自然科学基金资助项目(51109104、51469014)、"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2013BAF01B02)、甘肃省高校基本科研业务 费专项资助项目和兰州理工大学优秀青年教师计划资助项目

作者简介:张人会,副教授,主要从事水力机械内部流动及性能优化研究,E-mail: zhangrh@lut.cn

39

 $\gamma = \rho g$

状。在反问题的优化过程中主要存在叶形的控制和 修改不便、难以给出理想的载荷分布、计算量巨大等 问题。叶片载荷的分布与叶片形状、叶轮的水力性 能密切相关。吴达人等^[6]在两类流面反问题方法 的基础上对某离心泵叶轮的载荷特性进行了分析。 刘正先等^[7]在准三元理论的基础上对离心压缩机 叶片盘、盖侧的9种不同载荷进行了反问题的优化 研究,得到了离心压缩机叶片载荷优化的理论依据。 常书平等[8]根据叶片型线方程,分析了混流泵前载 型、中载型及后载型3种不同载荷分布对叶轮外特 性的影响。杨魏等^[9]采用三维无粘反问题方法结 合试验设计及模拟退火算法对离心风机叶片进行优 化研究。在传统的离心叶轮反问题中均采用势流理 论进行流场的预估,在正-反迭代的反问题方法中对 叶片的控制及修改策略难以定量掌握,由此不足导 致反问题方法中目标载荷与实际得到叶型的载荷间 存在较大的误差,载荷的优化难以进行。本文提出 基于自由曲面变形方法的离心泵叶片反问题方法, 依据目标载荷与实际载荷的差值来驱动叶片的变 形,并在此基础上进行基于试验设计的离心泵叶片 载荷优化研究。

基于自由曲面变形(FFD)方法的叶片反 1 问题方法

针对离心泵叶片传统反问题方法的不足,采用 基于 FFD 方法的离心泵叶片反问题方法进行离心 泵叶片载荷的优化研究。

1.1 FFD 方法的基本思想

自由曲面变形方法^[10-11]的基本思想是将待变 形的曲面嵌入到一个由晶格点参数化控制的控制体 内,建立待变形曲面与控制体间的相对位置关系,通 过改变控制晶格点的位置实现控制体的变形,而待 变形曲面与控制体间的相对位置关系保持不变,待 变形曲面随控制体的变形而发生变形,实现了对待 变形曲面的参数化控制。叶片曲面形状的控制方程 为

$$X(s,t,u) = \sum_{i=0}^{l} \sum_{j=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} P_{i,j,k} B_{il}(s) B_{jm}(t) B_{kn}(u)$$
(1)

式中 P_{iik}——控制晶格点坐标

 $B_{il}(s) , B_{im}(t) , B_{kn}(u)$ —Bernstein 基函数 (s,t,u)——待变形曲面上各点在控制晶格 点阵中的相对坐标

通过控制晶格点 P_{iik}的位移实现控制体的变 形,叶片曲面形状随式(1)发生相应的变形。文 献[5]已将自由曲面变形方法应用于离心泵叶片的 反问题求解,建立了简便实用的晶格变形函数

$$\Delta \theta_i^{n+1} = \lambda \left(\frac{\partial H_i}{\partial m}(r_i) \middle|_{o} - \frac{\partial H_i}{\partial m}(r_i) \right)$$
(2)

其中 $H_i = p/\gamma + v^2/(2g)$ λ——步长系数 式中 r;——叶片型线上点的半径 m——叶片相对流线长度 θ——控制晶格点的圆周角坐标 n——迭代次数 H_i——介质能量 p——介质压力 γ — 一比重 v——介质速度 g——重力加速度

下标 0 表示目标载荷。因为假定叶轮轴面不变,研 究叶片型线与载荷间的关系,柱坐标系中叶片表面 上点的 r 及 z 不变, 只控制 θ 的变形(其中 r、z、 θ 为 柱坐标系坐标变量),式(2)中控制晶格点的变形量 与目标载荷及实际载荷间的差值成正比。

在基于 FFD 方法在叶片反问题方法中,根据 式(2)对参数化的控制体进行变形,然后保持嵌入 在控制体内的待变形曲面上各点的相对坐标(s,t, u)不变,根据式(1)更新叶片形状,实现了基于载荷 驱动的叶片反问题的求解。

1.2 变形函数的构建

基于正-反迭代的反问题中最关键的问题在于 如何根据正问题的计算结果对叶片型线进行修改, 式(2)对于单调递增的载荷分布规律简单有效,但 对于前加载、后加载等复杂的载荷分布规律很难实 现精确的反设计。叶片载荷的作用在于使得液体的 能量参数 $Uv_{\mu}(ext{ of } H_i)$ 的变化(其中 U 为圆周速度, v_{μ} 为绝对速度的圆周分量),由叶轮机械欧拉方程及 速度三角形分析可知 $\arctan\beta = v_m/(\sigma U - v_n)$ (其中 v_m 为轴面速度, σ 为 Stodola 滑移系数), 且有 v_{μ} = $v_{u1} + \Delta v_u$ (其中 v_{u1} 为液体进口预旋),因此载荷分布 与叶片安放角间的关系有

$$\arctan \beta = \frac{v_m}{\sigma U - \left(v_{u1} + \frac{1}{r} \int \left[\partial(v_u r) / \partial m\right] dm\right)}$$
(3)

式中 β——叶片安放角

 $\partial(v_n r) / \partial m$ ——速度矩的梯度

由此可知,叶片安放角随载荷分布 ∂(v,r)/ ∂m(或 ∂H₄/∂m)的增大而增大,由图1所示的控制体变形 过程中晶格点坐标线安放角与圆周角坐标间的关系 可构造晶格点的变形函数

$$\Delta \theta_{i+1}^{n+1} = \Delta \theta_i^{n+1} + \lambda \left(\frac{\partial H_i}{\partial m} (r_i) \middle|_0 - \frac{\partial H_i}{\partial m} (r_i) \right)$$
(4)

由图1可以看出,控制晶格点坐标线在 i 点的



Fig. 1 Deformation of control lattices

安放角变化量 Δβ 与 $\Delta \theta_{i+1}^{n+1} - \Delta \theta_i^{n+1}$ 成正比。由式(4) 可知根据给定的叶片目标载荷可以实现对晶格点坐 标线安放角的控制,由于叶片型线上各点与控制晶 格点的相对坐标始终保持不变,因此实现了对叶片 安放角的控制。与式(2)不同,式(4)的实质是根据 载荷的差值来修正叶片安放角,能够实现叶片前部 的变形对后部变形的影响,方便地实现各种不同载 荷分布规律的叶片反问题求解。后面的算例计算结 果表明,在反问题的迭代过程中该变形函数能更快 捷、准确地实现各种目标载荷分布。

2 叶片载荷的优化

2.1 载荷控制及试验设计

2.1.1 载荷分布规律及控制参数

离心泵叶轮叶片的载荷分布与其水力性能关系 密切,合理的叶片载荷分布有利于减少流动损失,提 高叶轮效率。Zangeneh 提出了高效叶片的载荷分布 规律,并使用二次曲线与直线组合的方式来控制载 荷^[12-14]。对叶片载荷分布进行优化首先必须对载 荷分布曲线进行参数化,载荷控制参数即为优化问 题的设计变量。选取低比转数离心泵 MH48 – 12.5 (流量 $Q = 12.5 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 H = 30.7 m,转速n =2 900 r/min,效率 $\eta = 53\%$)叶轮为研究对象,根据 给定的初始直叶片流场计算结果得到初始直叶片的 载荷曲线如图 2 所示。由于该叶轮的比转数较低, 二维圆柱叶片的前后盖板流线上叶片载荷分布几乎 完全一致。



综合考虑初始叶片载荷曲线及 Zangeneh 提出 的高效叶轮的载荷分布规律,载荷分布曲线可以通 过4个控制点进行控制,分别是:叶片进口处,叶片 前部相对流线长度为0.2处,叶片后部相对流线长 度为0.85处,以及叶片出口处。参照 Zangeneh 提 出的载荷分布规律,叶片进、出口处的载荷为零。因 此,控制叶片前、后部2个控制点处的载荷数值,就 可以实现对不同载荷分布规律的控制,如图3所示。



2.1.2 试验设计

响应面分析法的总计算量与设计变量的数目成 正比,设计空间中样本点的分布对分析结果的准确 性有很大的影响。因此,需要进行合理的试验设计。 常见的试验设计方法有全面试验法、正交试验法以 及均匀设计法^[15]。本研究中,叶片载荷分布曲线共 有2个设计变量,分别为沿相对流线长度0.2、0.85 处的载荷 $\Delta P_1, \Delta P_2$ 。设计变量数目较少,因此可选 用分析结果较准确的全面试验法。以图 2 所示的初 始直叶载荷为基础,考虑离心叶轮大多为后弯叶片, 选取设计变量 ΔP_1 的变化范围为 $[0, 2\Delta p'_0,], \Delta P_2$ 的变化范围为 $[0, \Delta p'_{0,ss}]$,其中 $\Delta p'_{0,ss}, \Delta p'_{0,ss}$ 为初始 直叶片相对流线 0.2、0.85 处的载荷。根据设计变 量取值范围,本次试验采用五水平二因素全面试验。 对设计变量 ΔP_1 、 ΔP_2 进行归一化处理得到变量空 义的,本次试验设计的实际试验数目为16。无量纲 变量空间 x₁、x₂ 的取值范围为(-1,-0.5,0,0.5, 1], 对应的设计变量 ΔP_1 的取值范围为(0, 0. 5Δ*p*[']_{0.2}, Δ*p*[']_{0.2}, 1. 5Δ*p*[']_{0.2}, 2. 0Δ*p*[']_{0.2}], Δ*P*₂的取值范 围为(0,0.25 $\Delta p'_{0.85}$,0.5 $\Delta p'_{0.85}$,0.75 $\Delta p'_{0.85}$, $\Delta p'_{0.85}$]。 相应的各载荷分布曲线如图3所示。

2.2 响应面分析及优化结果

根据各试验点给定的目标载荷分布,在初始叶片的基础上,采用 FFD 方法分别进行叶片反问题的 迭代求解。根据初始叶片流场 CFD 分析结果及 式(4)对控制体进行变形,保持叶片曲面上各点的 局部相对坐标不变,根据式(1)对叶片形状进行更新。

泵内部流场计算采用 Fluent 14.5 来计算,流 场计算采用 RANS 方程及 RNG *k* - *ε* 湍流模型。 为便于叶片表面载荷的处理,在叶片的工作面和 背面生成结构化网格,对整个计算域进行网格无 关性检验,最后确定采用的网格数为 150 万。载 荷的分析、控制体的变形及叶片型线的更新等由 Matlab 程序代码实现。将更新了的叶片型线导入 三维建模软件中重新生成叶轮,并对泵内流动进 行 CFD 计算。经数次迭代计算后,得到各试验点 变形后的叶片载荷曲线与给定的目标载荷曲线比 较接近。图 4 为 4 种典型载荷试验点得到变形后 的控制体及叶片型线图。





Fig. 4 Blade shape of test samples by using FFD inverse method

图 5 为图 4 各试验点给定的目标载荷分布与设 计叶片的实际载荷分布对比图。从图 5 可以看出, 各试验点的实际叶片载荷与给定的目标载荷基本一 致。

图 5b 由于所给定的目标载荷在叶片后部较低,

叶片出口安放角较小,导致出口附近计算网格及载 荷数据处理不便,但理论上还是可以继续迭代直至 吻合得较好。因此,本研究提出的基于 FFD 方法的 离心泵叶片反问题方法能够精确地实现各种不同载 荷分布的叶片反设计。





根据各试验点泵内流动的 CFD 计算结果,结合 响应面分析法,可以得到在设计变量空间(x₁, x₂) 上不同的叶片载荷条件下离心泵水力效率(图6)及 扬程的等高线云图(图7)。从图6可以看出泵的效 率随 x₁、x₂的增大而减小,总体上看效率随着 x₂的变 化更为明显,说明对于该设计参数的泵,叶片后部的 载荷不宜过高。从图7可以看出泵的扬程随 x₂的增 大而增大,随 x₁的变化不明显,由于载荷曲线与横 坐标线所围成的面积即为叶轮的扬程,扬程将随着 x₁、x₂的增大而增大,图5a中在相对流线长度0.2 处 存在一定误差,另外由图3 所示的载荷分布的试验 设计可看出叶片前部分载荷变化的幅度小于后部分 载荷变化的幅度,这些因素导致实际载荷下的扬程 对 x₁的变化不够敏感。

以满足泵额定流量及额定扬程时的效率最高为 最优化目标,从效率及扬程的响应面关系分析可知,





在保证扬程满足条件的情况下,其效率最高的叶型 如图 8 所示,其叶片从进口到出口载荷分布曲线如 图 9 所示。与图 3 所示的设计变量空间的载荷分布

⁽a) (1,1)试验点 (b) (1,-0.5)试验点 (c) (0.5,0.5)试验点 (d) (0,0)试验点





Fig. 7 Contour of pump head in designed variables space





规律相比,最优叶片后部分的载荷相对较低,由于进口保持一定的正冲角,进口边载荷不为零,叶片载荷从进口到出口缓慢增大,然后在靠近出口边处稍有下降,由于叶片出口不满足 kutta 条件,出口边叶片载荷也不为零。

依据本研究提出的载荷优化方法得到的较为理 想载荷分布的叶轮水力性能与已有较好水力模型水 力性能的数值模拟对比结果如图 10、图 11 所示,可 以看出本优化方法得到的叶轮水力模型在额定流量 点与已有较好模型的水力性能相差很小,在大流量 点本研究得到模型的水力性能高于已有较好水力模 型。

算例计算结果表明所提出的基于自由曲面变形 方法的叶片载荷优化方法能够便捷地实现对泵内流 场的优化,其算法流程图如图 12 所示。

3 结论

(1) 建立了基于载荷驱动的离心泵叶片自由曲



图 10 已有水力模型与优化叶轮的 η - Q 曲线对比

Fig. 10 Comparison of $\eta - Q$ curve between optimized



图 11 已有水力模型与优化叶轮的 H - Q 曲线对比 Fig. 11 Comparison of H - Q curve between optimized impeller and prototype impeller





面变形反问题方法,进行 FFD/CFD 耦合,构建了更 为高效、稳定的晶格变形函数,通过对载荷分布曲线 进行参数化控制、试验设计,采用响应面方法对载荷 分布规律进行优化分析,得到低比转数离心泵叶片 较为理想的载荷分布规律。

(2)对低比转数离心泵叶片载荷优化结果表明低比转数离心泵的效率随着叶片后部分载荷的减小 而显著增大,离心叶轮的扬程随着后部分载荷的减 小而明显减小。低比转数离心泵叶片最优载荷从进

轮的扬程也随之增大,但其效率却随之下降,进一步 验证了叶片的做功能力与效率之间的制约关系。

参考文献

- 1 彭国义.水力机械反问题数值研究与进展[J].甘肃工业大学学报, 1997,23(4):31-35.
 Peng Guoyi. The numerical approach of the inverse problem of hydraulic machinery runner and its development [J]. Journal of Gansu University of Technology, 1997,23(4):31-35. (in Chinese)
- 2 罗兴琦,陈乃祥,林汝长. 有厚叶片的 S₂ 流面反问题计算[J]. 水利学报,1995,26(3):8-15. Luo Xingqi, Chen Naixiang, Lin Ruchang. Inverse calculation on S₂ streamsurface with blade thickness[J]. Journal of Hydraulic Engineering,1995, 26(3):8-15. (in Chinese)
- 3 杨琳,陈乃祥.水力机械转轮三维反问题研究及其新进展[J].水力发电学报,2004,23(1):97-101. Yang Lin, Chen Naixiang. The new research and development of three-dimensional inverse problem of runners of hydraulic machinery[J]. Journal of Hydroelectric Engineering,2004,23(1):97-101. (in Chinese)
- 4 余志毅,曹树良,彭国义.运用正反问题迭代法进行叶片式气液混输泵叶轮的水力设计[J]. 机械工程学报,2006, 42(4):135-141.

Yu Zhiyi, Cao Shuliang, Peng Guoyi, Hydraulic design of a multiphase rotodynamic pump and test verification [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006, 42(4):135 - 141. (in Chinese)

- 5 张人会,郭苗,杨军虎,等.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. Zhang Renhui, Guo Miao, Yang Junhu, et al. New inverse method of centrifugal pump blade based on free form deformation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014, 45(1):84-88. (in Chinese)
- 6 吴达人,陈胜利. 离心泵叶轮的载荷分布和性能关系的研究[J]. 农业机械学报,1988,19(2):58-65.
 Wu Daren, Chen Shengli. The relation between loading distribution and characteristics in impeller of centrifugal pump[J].
 Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1988, 19(2):58-65. (in Chinese)
- 7 刘正先,邢海澎,陈丽英.基于叶片载荷分布的离心叶轮气动优化[J].工程热物理学报,2013,34(3):454-457. Liu Zhengxian, Xing Haipeng, Chen Liying. The aerodynamic analysis and optimization of centrifugal impeller performance affected by blade loading[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(3):454-457. (in Chinese)
- 8 常书平,王永生,靳栓宝,等.载荷分布规律对混流泵叶轮设计的影响[J].排灌机械工程学报,2013,31(2):123-127. Chang Shuping, Wang Yongsheng, Jin Shuanbao, et al. Influences of blade loading distribution law on design of mixed-flow pump impeller[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering,2013,31(2):123-127. (in Chinese)
- 9 杨魏,王宏,吴玉林. 离心风机叶轮三维反问题气动优化设计[J]. 农业机械学报,2012,43(9):43-48. Yang Wei, Wang Hong, Wu Yulin. Aerodynamic optimization design of centrifugal fan impeller based on three-dimensional inverse design method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9):43-48. (in Chinese)
- 10 Sederberg T W, Parry S R. Free-form deformation of solid geometric models [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4):151-160.
- 11 Jamshid A Samareh. Aerodynamic shape optimization based on free-form deformation [C]. AIAA 2004 4630,2004.
- 12 Zangeneh M, Goto A, Harada H. On the role of three-dimensional inverse design methods in turbomachinery[J]. Proc. IMech E, Part C: Journal of Mechanical Engineering, 1999, 213(1):27-42.
- 13 Zangeneh M, Goto A, Takemura T. Suppression of secondary flows in a mixed-flow pump impeller by application of three dimensional inverse design method: part 1—design and numerical valdition [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1996, 118(7):536-542.
- 14 Zangeneh M, Goto A, Harada H. On the design criteria for suppression of secondary flows in centrifugal and mixed flow impellers [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(10):723 - 735.
- 15 赵选民. 试验设计方法 [M]. 北京:科学出版社,2006.