

采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计

刘小民, 张文斌

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对离心叶轮多目标自动优化设计, 首先提出了一种离心叶轮参数化方法, 通过对离心叶轮型线数据进行转换, 分别建立了圆柱坐标系下叶轮控制参数与归一化长度参数之间的关系, 采用非均匀有理 B 样条进行叶型重构, 获得叶片和叶轮子午流道构型. 将离心叶轮参数化方法、多目标遗传算法及商业化数值计算软件 NUMECA 相结合, 建立起离心叶轮自动优化设计平台. 以总压比和效率为设计目标, 在设计工况下, 采用该方法对 Krain 高速离心叶轮进行气动优化设计, 获得一系列优化叶轮, 并采用数值模拟方法对叶轮内部流动特性及其气动性能进行了比较分析. 结果表明, 优化叶轮的总体气动性能有不同程度的改善, 在叶轮出口截面上流场分布更加均匀, 总压比和等熵效率约提高了 2.5% 和 1.0%, 同时也验证了所发展的多目标离心叶轮自动优化设计方法的有效性.

关键词: 离心叶轮; 三维重构; 多目标优化设计; 参数化; 数值模拟

中图分类号: TH452 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)01-0031-05

Multi-Objective Automatic Optimization Design of Centrifugal Impeller Based on Genetic Algorithm

LIU Xiaomin, ZHANG Wenbin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A parameterization method is developed to perform the multi-objective optimization design of centrifugal impellers. The relationship of the impeller parameters and the dimensionless length in the cylindrical coordinate system is established by the transformation of impeller profile data. Non-uniform rational B-spline is used to reconstruct the impeller to obtain the profile of the blade and the meridional surface. An automatic optimization design platform for the centrifugal impellers is constructed by the multi-objective genetic algorithm combined with parameterization method and the commercial computational fluid dynamics software NUMECA. The Krain high-speed centrifugal impeller is optimized by using the present method at the design condition, and the aerodynamic performance and the flow characteristics are analyzed. The numerical results show that the aerodynamic performance of the optimal impellers is improved to some extent. The flow field distribution at the outlet of the optimal impellers is more uniform. The total pressure ratio and the isentropic efficiency increases by about 2.5% and 1.0% respectively. These findings confirm that the present multi-objective optimization design method for the centrifugal impellers is effective.

Keywords: centrifugal impeller; three-dimensional reconstruction; multi-objective optimization design; parameterization; numerical simulation

随着基于最优解概念的多目标遗传算法的改进 以及性能优良的数值计算方法的出现, 使得将计算

流体动力学(CFD)与多目标遗传算法相结合来进行离心叶轮多目标优化设计得到越来越广泛的实际应用. 丁伟^[1]针对一个典型的双目标函数优化问题, 考察了多目标遗传算法的寻优能力及其保持种群多样性的能力, 并对某 6 级高压压气机进行了优化. Oyama 等人^[2]以最大化等熵效率和总压比为设计目标, 进行了基于进化计算的多级轴流压气机多目标优化设计. 可以看出, 多目标遗传算法在叶轮机械优化设计领域有着广阔的应用前景, 但研究对象关注较多的是航空翼型、透平叶栅及叶片, 对于离心叶轮的优化设计方法研究则相对较少. 郑赞韬等人^[3]根据液体火箭发动机用离心泵的性能参数, 分别以扬程、效率和轴功率为优化目标对离心叶轮进行单目标和多目标优化设计. 然而, 这些研究关注的是离心叶片的优化, 并没有对子午流道参数进行优化. 卢金铃等人^[4]则利用反问题计算对叶片进行参数化, 结合神经网络技术建立了一种基于三维黏性流动分析的叶轮优化设计方法. 但是, 该方法对叶轮的优化是在优化叶片的基础上进行叶轮子午流道的优化, 这样可能会丢失一些优秀的叶轮形状. 此外, 该方法在处理扬程和效率两个目标时, 是将其转化为单个目标进行, 并不是严格意义上的多目标优化设计.

离心叶轮设计过程中同时涉及到多个相互制约的设计目标, 例如效率、压比、可靠性等, 而效率和压比是两个相互关联的重要的气动性能指标. 基于此, 本文以效率和压比为设计目标, 提出了一种基于三维流动分析的离心叶轮多目标气动优化设计方法, 主要包括对离心叶轮进行参数化处理, 采用非均匀有理 B 样条(NURBS)^[5]进行叶轮重构, 获得叶片和叶轮子午流道形状控制参数; 同时兼顾叶轮的效率和压比, 采用多目标遗传算法进行优化搜索, 获得系列优化叶轮; 通过对叶轮内部流动特性及其气动性能的数值模拟, 揭示了优化叶轮性能改善的内在机理, 并验证了本文发展的多目标离心叶轮自动优化设计方法的有效性.

1 叶轮几何描述

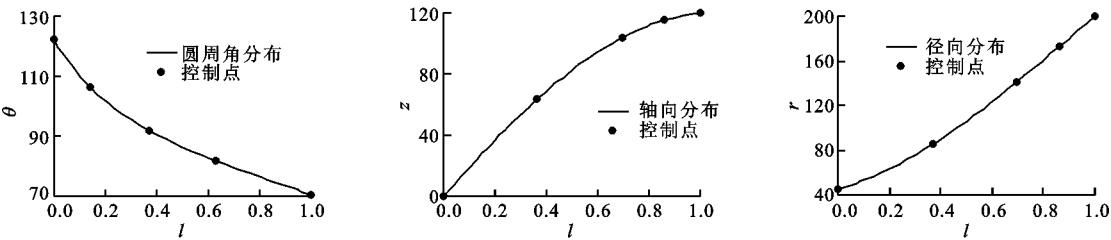
采用合适的几何描述对离心叶轮的优化设计来说具有十分重要的意义, 叶轮型线参数化要在保证完整描述叶轮几何形状的情况下使用尽可能少的控制点. 本文采用 NURBS 进行叶片几何形状描述, 剔除了对目标函数影响甚微的控制参数, 对叶轮几何形状进行局部调整时, 将调整的几何形状控制在局部范围内, 防止其发生扩散, 这对于叶轮性能的优化有着十分重要的作用.

1.1 叶轮参数化

针对离心叶轮的特点, 本文提出如下离心叶轮参数化方法:

- (1)离心叶轮叶片形状通过上下型线(分别对应叶片与轮盖和轮盘的交线)被确定, 叶片参数化问题转化为对叶片上下型线的参数化;
- (2)根据离心叶轮的旋转特性, 叶片上下型线在子午面上的投影形状即为叶轮子午流道, 通过组合叶片型线坐标中的参数 r, z 获得相应的叶轮子午流道控制参数.

离心叶轮参数化可以转化为对三维叶片的参数化, 其子午流道通过叶片相关参数的组合得到. 首先, 对叶片各型线分别进行型线长度的无因次化, 叶片上每个离散点对应一个归一化的长度(相对长度), 分别建立圆周角 θ 、径向坐标 r 、轴向坐标 z 与相对长度 l 之间的关系, 然后采用 NURBS 对控制参数进行曲线拟合. 本文以 Krain 离心叶轮为研究对象进行多目标气动优化设计, 叶轮型线参数详见文献[6], 在曲线上选取 5 个控制点进行 NURBS 的控制点反算. 图 1 给出了叶片吸力面上靠近轮盘处的型线圆周角分布和 NURBS 的型值点. 叶轮子午流道通过叶片上下型线投影直接得到, 因此子午流道参数化可以转化为采用 r, z 参数对叶型进行描述.

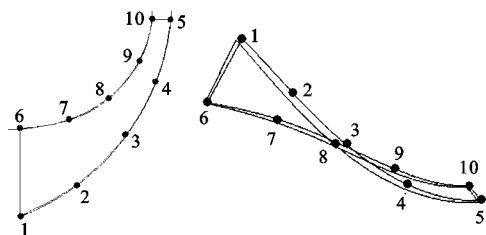


(a)圆周角与型线长度的关系 (b)轴向坐标与型线长度的关系 (c)径向坐标与型线长度的关系

图1 叶片型线控制参数分布与 NURBS 控制点

1.2 控制变量选取及其约束条件

叶轮子午流道及叶片的变量分布如图 2 所示:沿子午流道的轮盘和轮盖线分别选取 5 个型值点(1~5 点,6~10 点)作为子午流道的控制变量,其中子午面上由 1 点到 6 点沿 r 方向变化,由 5 点到 10 点沿 z 方向变化,其他对应点沿其切线的法向变化;在吸力面上型线和下型线上分别选取前 4 个控制点(1~4 点,6~9 点)作为叶片控制变量,共 8 个控制变量沿圆周方向变化,在压力面上控制变量的选取与吸力面相同.控制变量的约束条件采用搜索空间限定法,对每个设计变量设定一定的变化范围.



1~10:选取的控制点

图 2 子午流道及叶片控制变量分布

2 优化方法

本文将发展的具有良好的多目标寻优能力的多目标遗传算法^[7]与离心叶轮参数化方法和商业化计算流体力学软件相结合,建立起一种针对离心叶轮气动性能的自动优化设计平台,其具体的实现步骤如下:

(1)设定对离心叶轮进行数值模拟的网格拓扑结构及流动数值计算的边界条件,保存成特定格式文件;

(2)采用叶轮参数化方法对离心叶轮进行三维重构,分别得到叶轮子午流道及叶片的控制变量,并设定该控制变量的变化范围;

(3)采用遗传算法对控制变量进行遗传操作,调用叶轮三维重构程序计算生成一系列新的离心叶轮几何形状,调用网格拓扑文件对新叶轮进行网格划分并采用 CFD 数值计算方法对流场进行模拟,获得目标函数值;

(4)采用遗传算法进行 Pareto 解搜索,得到当前代 Pareto 解,将其加到历史 Pareto 解集中重新进行 Pareto 解搜索,获得全部的 Pareto 解集;

(5)判定是否达到收敛准则,若达到收敛,算法终止,否则算法转到步骤(3)继续进行优化计算.

在气动优化设计过程中,目标函数值是通过气

动分析软件的数值模拟来获得的.本文采用商业化计算流体力学软件 NUMECA 中的 IGG/AutoGrid 子模块进行网格划分,事先设置好对离心叶轮的网格拓扑结构,使其能够实现对新生成叶轮网格的自动划分.气动计算调用 NUMECA 中的 Fine/Turbo 子模块来进行,该模块可以读取保存的计算参数并将其应用到对新生成叶轮的数值计算中.在本文计算中,雷诺时均 N-S 流动控制方程结合 Spalart-Allmaras 湍流模型被数值求解,其中控制方程的空间离散采用中心差分格式,时间离散采用显式四阶 Runge-Kutta 法,采用残差光顺法、当地时间步长法和多重网格法来加速收敛过程.

对于优化叶轮和原始叶轮,采用相同的网格拓扑结构.在由相邻叶片组成的计算区域内,沿流线方向、跨叶片圆周方向和叶高方向上网格布置分别为 129、41 和 33,网格节点总数为 220 970.在计算区域,叶片顶端到轮盖的间隙由前缘的 0.5 mm 变化到尾缘的 0.3 mm,从叶片顶端到轮盖共布置了 9 个网格节点.对优化叶轮和原始叶轮的数值模拟,在叶轮进口处给定总温总压边界条件,在出口处给定静压边界条件,叶轮固体壁面给定绝热无滑移边界条件.

3 优化结果分析

本文以总压比 ϵ 和等熵效率 η 为目标函数对 Krain 高速离心叶轮进行了优化设计.遗传算法参数设置如下:种群大小为 30,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.005,终止计算代数为 20 代.优化目标的约束条件设定为:优化叶轮目标函数值不低于原始叶轮.

优化迭代进程中种群分布如图 3 所示,可以看出,种群进化方向为总压比和等熵效率增加的方向.根据本文给定的优化目标约束,当迭代 15 次时,种群中个体的分布基本位于原始叶轮设计点的右上方,这表明优化个体在两个优化目标上都优于原始叶轮.本次优化共得到 9 个 Pareto 解,选取第 2 个与第 9 个优化个体作为研究对象进行进一步的分析.将个体 2 标识为优化叶轮 I,其对应的等熵效率和总压比分别为 0.881 23 和 4.722 3;将个体 9 标识为优化叶轮 II,其对应的等熵效率和总压比分别为 0.878 02 和 4.744 4.

与原始叶轮相比,优化叶轮子午面轮盖型线变化不大,轮盘型线头部和尾部有较大变化,并且优化叶轮 I 和优化叶轮 II 叶片头部较原始叶片沿周向向

相反的方向偏转. 优化叶轮 I 和优化叶轮 II 与原始叶轮在设计工况下的性能对比如表 1 所示. 从表中可以看出: 两个优化叶轮的等熵效率和总压比较原始叶轮都有不同程度提高, 其中优化叶轮 I 的等熵效率提高了 1.15%, 而叶轮 II 提高了 0.80%; 优化叶轮 II 的总压比提高了 2.54%, 而叶轮 I 提高了 1.99%. 尽管原始叶轮的实验测量结果与数值计算结果有一定差异, 但这并不影响对叶轮优化效果的评判, 因为这里比较的是优化叶轮对原始叶轮的相对改变量. 关于数值计算结果的可靠性分析, 详见文献[7].

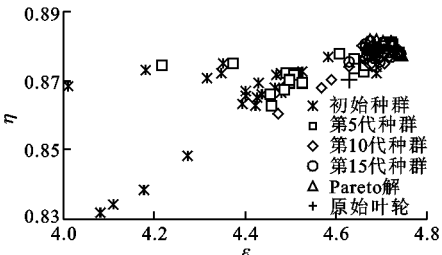


图 3 优化迭代过程种群分布及其对应的 Pareto 解

表 1 设计工况下叶轮性能对比

叶轮名称	效率		总压比	
	实验值	计算值	实验值	计算值
原始叶轮	0.841	0.871	4.700	4.631
优化叶轮 I		0.881		4.722
优化叶轮 II		0.878		4.744

优化叶轮气动性能提高的原因可以通过对叶轮内流动进行数值分析得到解释. 图 4 所示为优化叶轮与原始叶轮出口静压分布. 由静压分布图可以看出: 优化叶轮 I 和优化叶轮 II 高压区域明显增大, 出口静压值高于原始叶轮, 并且静压分布更加均匀, 可见优化叶轮出口压力被有效提高. 图 5 是叶轮出口周向平均相对静压 p_{re} 沿相对叶高 h/H 的分布图, 其中相对静压定义为静压与标准情况下大气总压的比值. 从图 5 可以看出: 原始叶轮出口周向平均相对静压 p_{re} 随叶高的增加逐渐减小, 而优化叶轮出口周

向平均静压沿叶高分布变得平坦, 其相对静压值较原始叶轮有明显提高. 图 6 给出了优化叶轮与原始叶轮出口周向平均相对速度 V_r 沿叶高方向的分布, 优化叶轮出口速度分布较原始叶轮更为均匀, 可见优化叶轮出口流动形态得到改善, 这对叶轮性能提高是有利的.

优化叶轮与原始叶轮的性能曲线如图 7 所示,

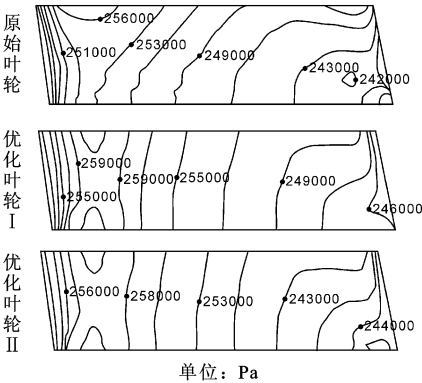


图 4 出口静压分布

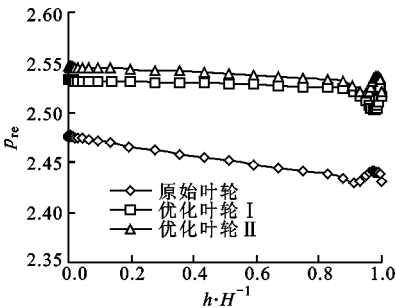


图 5 叶轮出口相对静压沿叶高分布

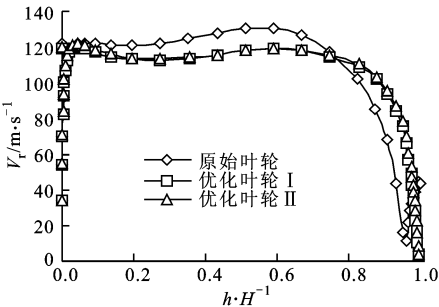


图 6 出口相对速度沿叶高方向分布

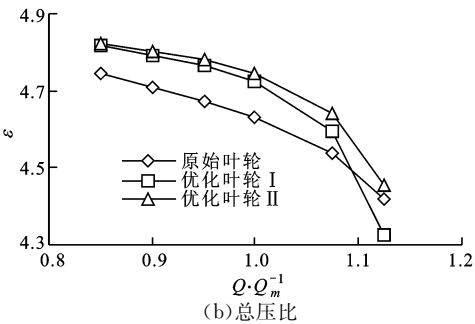
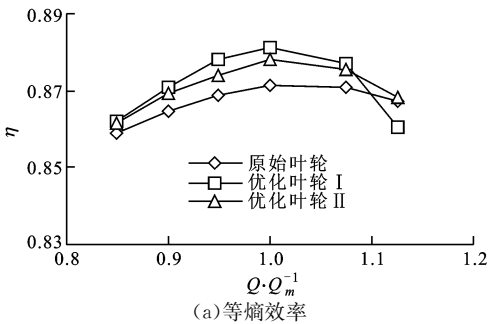


图 7 优化前后离心叶轮性能的比较

可以看出:优化叶轮的等熵效率 η 和总压比 ϵ 在较大工况范围内较原始叶轮都有提高,尽管优化叶轮 I 在大流量工况($Q/Q_m > 1.1$)时性能有较大幅度的下降。这主要是由于本文优化设计是在设计工况下进行的,没有考虑其他工况条件下叶轮性能的改善,但从叶轮总体性能曲线来看,优化叶轮相对于原始叶轮仍然具有良好的变工况性能。

4 结 论

本文建立了一种基于多目标遗传算法和三维流动数值模拟的离心叶轮自动优化方法。首先,对三维叶型数据进行参数化处理,建立起叶片参数(r 、 z 和圆周角)与叶片相对长度之间的关系,其中圆周角参数主要控制叶片的变化, r 、 z 参数控制子午流道的生成。然后,采用 NURBS 确定控制变量,完成对离心叶轮的间接参数化。将多目标遗传算法与叶轮参数化方法和商业化计算流体力学软件 NUMECA 相结合,构建离心叶轮自动优化设计平台。这种自动优化设计方法主要体现在事先设置好离心叶轮控制参数、网格拓扑结构、初边值条件及数值计算方法,给定目标约束条件,实现程序对叶轮的自动优化过程。

采用发展的多目标气动优化设计方法,以效率和总压比为目标函数,对 Krain 高速离心叶轮进行优化设计,获得一系列优化叶轮,其性能得到不同程度的改善,验证了本文提出的自动优化设计方法的有效性。同时,以原始叶轮、优化叶轮 I 和优化叶轮 II 为研究对象,采用 CFD 方法对叶轮内流动特性进行数值分析,揭示了叶轮性能提高的内在机理。

参考文献:

- [1] 丁伟. 基于多目标遗传算法的轴流压气机气动优化设计技术研究[D]. 西安:西北工业大学动力与能源学院, 2006.
- [2] OYAMA A, LIOU M S, OBAYASHI S. Transonic axial-flow blade optimization: evolutionary algorithms/three-dimensional Navier-Stokes solver[J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(4):612-619.
- [3] 郑赞韬,蔡国飙,尹贵增. 液体火箭发动机离心泵叶轮的多目标优化设计[J]. 火箭推进, 2006, 32(1): 14-18.
ZHENG Yuntao, CAI Guobiao, YIN Guizeng. Multi-objective optimization and design for centrifugal impeller of rocket engine pumps[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2006, 32(1):14-18.
- [4] 卢金铃,席光,祁大同. 三元叶轮子午流道和叶片的优化方法[J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(9): 1022-1025.
LU Jinling, XI Guang, QI Datong. Optimization method of meridional channel and blade in 3-D impeller [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(9):1022-1025.
- [5] 施法中. 计算机辅助几何设计与非均匀有理 B 样条[M]. 北京:高等教育出版社, 2001.
- [6] XI Guang. Discussion on the geometry and the secondary flow vortex structure of krain's experimental compressor impeller [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2000, 21(4):440-442.
- [7] 张文斌. 基于遗传算法和近似模型的离心叶轮叶片多目标优化设计[D]. 西安:西安交通大学能源与动力工程学院, 2009.

(编辑 王焕雪)

(上接第 12 页)

- [6] 王高峰,马成飏,王宝源,等. 激波诱导甲烷点火化学反应区的可视化实验研究[J]. 科学通报, 2008, 53(19):2371-2378.
WANG Gaofeng, MA Chengbiao, WANG Baoyuan, et al. Direct observations of reaction zone structure in shock-induced ignition of methane air mixture[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(19):2317-2378.
- [7] DAVIDSON D F, HAYLETT D R, HANSON R K. Development of an aerosol shock tube for kinetic stud-

ies of low-vapor-pressure fuels [J]. Combustion and Flame, 2008, 155(1/2):108-117.

- [8] DAVIDSON D F, OEHLSCHLAEGER M A, HERBON J T, et al. Shock tube measurements of iso-octane ignition times and OH concentration time histories[J]. Proceedings of Combustion Institute, 2002, 29:1295-1301.

(编辑 王焕雪)