

DOI: 10.7652/xjtuxb201705015

高压比离心叶轮气动强度多学科优化与知识挖掘

李琛玺, 王静, 宋立明, 李军, 丰镇平

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 通过引入数据挖掘技术,耦合 RANS 方程求解技术、有限元分析方法、自适应多目标差分进化算法和非均匀 B 样条曲面造型方法,提出了高压比离心叶轮多学科多目标设计优化方法。该方法包括:利用研发的优化平台获取给定设计空间内性能最优的解,涉及优化算法、参数化方法、约束处理和多学科性能评估 4 个模块,前 3 个模块通过自主编程完成,最后 1 个模块通过编写软件接口、利用 NUMECA 和 ANSYS 软件生成;利用数据挖掘技术,如总变差分析,对设计空间进行知识挖掘,由此识别出对性能影响显著的变量。以等熵效率最高和叶轮表面最大离心应力最小为目标,开展了典型高压比离心叶轮 SRV2-O 的优化设计,优化后等熵效率提高了 2.00%,最大应力降低了 2.08%;通过对优化设计的分析和对设计空间的知识挖掘知,对类似高压比离心叶轮进行设计时,应重点控制扩压段轮盖的设计以减小叶顶泄漏流的影响,通过减小流动通道面积以减小泄漏流的损失。该结果可为类似离心叶轮设计提供借鉴。

关键词: 高压比离心叶轮;自适应多目标差分;进化算法;多学科设计优化;知识挖掘

中图分类号: TK47 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)05-0102-10

Aero-Mechanical Multidisciplinary Optimization and Knowledge Discovery of High Pressure Ratio Centrifugal Impeller

LI Chenxi, WANG Jing, SONG Liming, LI Jun, FENG Zhenping

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

Abstract: Integrating data mining techniques, RANS solver technique, finite element method (FEM), self-adaptive multi-objective differential evolution (SMODE) algorithm and B-spline surface parameterization method, a multidisciplinary and multi-objective design optimization strategy for centrifugal impeller is proposed to obtain the optimal properties in given design space on an optimization platform. This strategy includes modules optimization algorithm, parameterization method, constraint handling and multidisciplinary assessment. The first three modules are established by self-coding program, and the last module is implemented by the software NUMECA and ANSYS. Data mining techniques, like total variation analysis, are introduced to discover the significant variables in design space, the design optimization is carried out for maximizing isentropic efficiency and minimizing the maximum stress in impeller surface of a typical high pressure ratio centrifugal impeller SRV2-O. After optimization, the efficiency increases by 2.0% and the maximum stress lowers by 2.08%. Knowledge discovery of design space is carried out, and the effects of design variables on aerodynamic and mechanical performances of impeller are also analyzed. It is indicated that for centrifugal impeller with

收稿日期: 2016-09-27。 作者简介: 李琛玺(1993—),女,博士生;宋立明(通信作者),男,副教授。

网络出版时间: 2017-02-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170223.1113.010.html>

similar high pressure ratio, the shroud of diffuser section ought to be mainly controlled in design to weaken tip leakage flow, and flow passage area ought to be reduced to decrease leakage flow loss.

Keywords: high pressure ratio centrifugal impeller; self-adaptive multi-objective differential; evolution algorithm; multi-disciplinary optimization design; knowledge discovery

高压比、高负荷离心压气机广泛应用于航空航天、能源动力等领域。目前,利用优化算法和计算流体动力学(CFD)数值模拟进行叶轮机械优化设计是研究的热点和主流方向^[1]。郭振东等采用自适应多目标差分进化算法完成了高压比离心叶轮气动多目标优化设计^[2]。刘波等采用神经网络结合遗传算法的方法对带分流叶片的离心压气机进行了优化设计^[3]。Siller 等结合 Kriging 方法、人工神经网络(ANN)及 Kriging 方法完成了轴流式跨声速叶栅的优化设计^[4]。Verstraete 等结合 ANN 和进化算法,同时考虑叶片气动和强度性能,将多学科设计优化问题转化为带约束的单目标问题,完成了离心压气机气动强度多学科设计^[5]。事实上,气动性能最优的叶轮无法满足强度设计的要求,为此本文利用多目标优化算法,对某高压比离心叶轮进行气动强度多学科设计优化,旨在利用 Pareto 解对叶轮的气动性能和强度性能进行权衡,获取气动和强度综合性能较优的解。

叶轮机械优化设计中面临着一个难题,即设计变量与性能函数之间没有明确解析的函数关系。Obayashi 等应用数据挖掘技术(总变差分析和自组织图技术)来权衡相互制约的目标函数,分析不同设计变量对目标函数的影响^[6]。Oyama 等采用本征正交方法(POD)对一亚声速机翼的 Pareto 最优解进行了数据挖掘^[7],又结合散点图矩阵(SPM)和 POD 数据挖掘技术分析了太阳观测台轨道设计中 Pareto 解选择最优设计^[8]。Kipouros 等将平行坐标系技术应用到涡轮机械气动优化设计中,从数据本身分析了变量与目标函数之间的关系^[9]。Koziel 等结合空间映射法 CO-Kriging 对跨声速机翼形状进行优化设计,以改善阻力与俯仰力矩系数^[10]。

本文通过引入数据挖掘技术,耦合自适应多目标差分进化算法和径流式叶片及流道型线参数化方法,建立了高压比离心叶轮气动强度多学科、多目标优化设计平台,并对经典叶轮 SRV2-O 进行了优化设计,同时利用数据挖掘技术对复杂设计空间进行了知识挖掘,识别出对性能函数影响显著的设计变量,由此分析目标函数间的相互制约关系,以期会同

类设计提供参考。

1 计算模型与数值方法

1.1 计算模型

本文选择半开式、跨声速、高转速且带有分离叶片的高压比离心叶轮(SRV2-O)作为研究对象,而 SRV2-O 叶轮是由德国宇航局的 Krain 设计完成的,具有相对完整的试验数据^[11-12]。叶轮的几何参数如表 1 所示。

表 1 SRV2-O 叶轮的几何参数

参数	数值	参数	数值
Z_m	13	D_{t1}/mm	78
Z_s	13	D_{t2}/mm	112
t_{in}/mm	0.5	h_{out}/mm	10.2
t_{out}/mm	0.3	$\beta_1/(\text{^\circ})$	52
D_{r1}/mm	30	$\beta_2/(\text{^\circ})$	26.5

注: Z_m 为主流叶片数; Z_s 为分流叶片数; t_{in} 为叶顶前缘间隙厚度; t_{out} 为叶顶尾缘间隙厚度; D_{r1} 为前缘叶根半径; D_{t1} 为前缘叶顶半径; D_{t2} 为叶轮顶端半径; h_{out} 为叶片出口高度; β_1 为叶片后掠角; β_2 为前缘叶片角。

1.2 数值方法验证

1.2.1 气动性能验证 本课题组在以往的工作中已对 SRV2-O 叶轮气动性能的数值计算方法进行了实验验证^[2],结果表明数值模拟得到的等熵效率和总压比与 Krain 的数值模拟结果^[12]吻合较好,总体变化趋势与实验值一致。所以,本次多学科优化中气动性能计算采用了相同的数值模拟方法,即采用商用软件 NUMECA 进行计算,其中湍流模型采用 Spalart-Allmaras 模型,空间离散采用中心差分格式,时间项离散采用显式迭代的四阶 Runge-Kutta 法,计算采用 FINE/Turbo 模块进行 RANS 方程组的求解。

1.2.2 强度性能验证 SRV2-O 叶轮强度性能分析采用有限元软件 ANSYS 完成,计算时只考虑叶轮的主叶片和分流叶片所受的离心应力。验证时叶片材料为结构钢,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$,弹性模量为 0.2 MPa ,泊松比为 0.3 ,计算精度满足静强度分析要求的 Solid45 单元类型。高压比离心叶轮的叶片

弯扭度较大,网格划分时使用了软件自动划分功能,网格划分如图1、图2所示,同时设置叶轮转速为50 000 r/min,约束主叶片和分流叶片的下端壁在

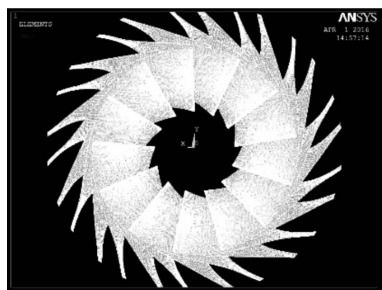


图1 叶轮计算网格划分

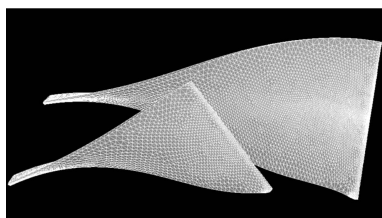


图2 叶轮局部网格细节

轴向、周向和径向的位移均为0。

由于SRV2-O叶轮的静强度计算没有相应的试验数据,所以本文采用叶轮机械叶片表面离心应力的经验公式^[13]进行验证

$$\sigma = k\rho_m u_\varphi^2 \quad (1)$$

式中: k 为经验系数,取值区间为0.2~0.4; ρ_m 为材料密度; u_φ 为叶片最大圆周速度。

计算得出的SRV2-O叶轮的 von Mises 等效应力最大值为906.471 MPa,材料密度为7 800 kg/m³,叶片表面最大圆周速度为586.43 m/s,带入式(1)求出 k 为0.33,满足经验公式的取值范围。

2 优化设计方法

2.1 优化平台

引入数据挖掘技术,耦合RANS方程求解技术、有限元分析方法(FEM)、自适应多目标差分进化算法(SMODE)^[14]及非均匀B样条曲面造型方法,建立了高压比离心叶轮多学科设计优化与知识挖掘的方法(BMOE),如图3所示。该方法包括以下两部分。

(1)利用本课题组研发的优化平台获取给定设计空间内性能最优的解,涉及优化算法、参数化方法、约束处理和多学科性能评估4个模块,前3个模块通过自主编程完成,最后1个为样本性能评估模块,通过编写软件接口、利用商用软件 NUMECA

和有限元软件 ANSYS 自动完成。各模块相互独立,具有较强的鲁棒性和可扩展能力。

(2)在完成优化设计后利用数据挖掘技术,如总变差分析,对设计空间进行知识挖掘,识别出对性能影响显著的变量。

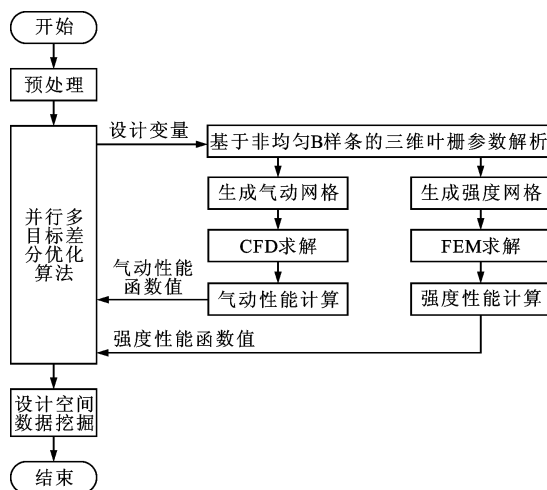


图3 叶轮机械多学科设计优化平台

2.2 参数化方法

本文对叶轮及流道同时进行气动、强度多学科设计优化。参数化造型分为叶片和子午流道两部分。

(1)叶片。叶片的参数化过程如图4所示^[2]。沿翼展方向选择近根部截面和近顶部截面,用非均匀B样条曲线对各截面中弧线和厚度分布进行拟合;选择一定的可调控点(见图4a)沿B样条曲线法向方向进行调整,获得新中弧线和厚度分布曲线;根据新中弧线和厚度分布曲线生成新截面型线;选取主叶片和分流叶片的周向积叠参数对截面型线进行空间积叠,采用蒙面法生成新的三维叶片型线。

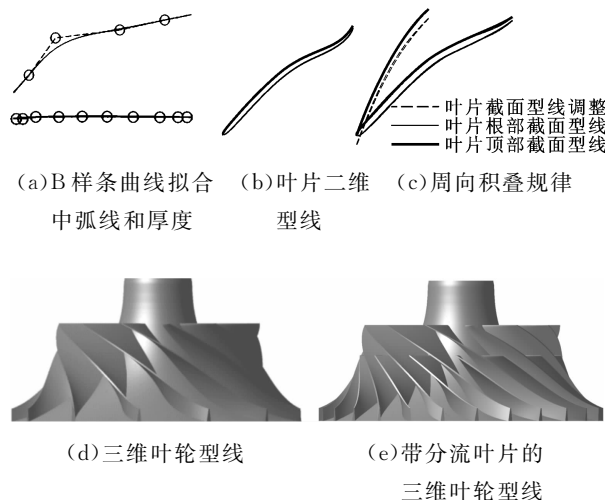


图4 叶片的参数化过程

(2)子午流道。子午流道参数化时采用非均匀B样条曲线对轮毂和轮盖型线进行拟合,在拟合后的曲线上选取一定数量的控制点用于微调,如图5a中空心圆所示。通过在一定范围内对可控制点的变动,得到新的轮毂和轮盖型线,如图5b所示。

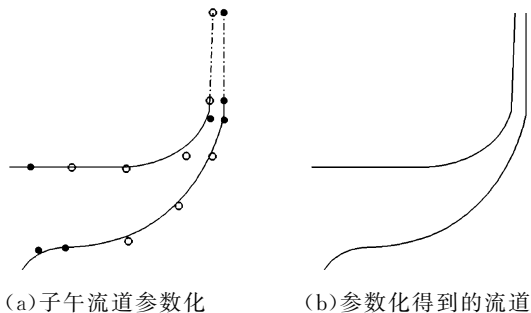


图5 子午流道的参数化过程

3 高压比离心叶轮多学科设计优化

3.1 设计变量与目标函数

在对SRV2-O叶轮的优化过程中共选取了26个设计变量,其中:子午流道中选择了8个可控制点,3个控制轮毂型线,5个控制轮盘型线;叶片中选择了18个可控制点,二维造型过程中主叶片和分流叶片的近根部、近顶部截面各分配4个可控制点,在主叶片和分流叶片各选择1个周向基叠参数进行空间基叠。可控制点的分布如图6所示。

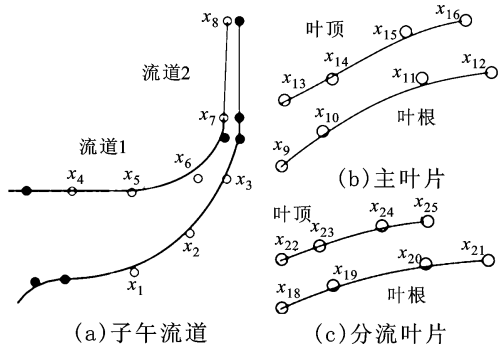


图6 可控制点的分布示意

在气动方面,优化时以出口截面等熵效率为目标函数对压比进行约束。考虑到单点设计优化可能导致变工况曲线偏移,在对设计工况点进行优化的同时对叶轮堵塞流量进行约束,即选取流量为0.96倍堵塞流量的工况作为优化设计点,设定堵塞流量偏差不超过参考叶轮的0.5%,优化设计点总压比偏差不超过参考叶轮的0.8%。

在强度方面,优化时选取最大静应力最小为目标函数。该目标函数为

$$\max F(x) = [\eta_{is}(x), -\max f_{str}(x)] \quad (2)$$

约束条件为

$$0.995\dot{m}_{ref} \leq \dot{m}_{opt}(x) \leq 1.005\dot{m}_{ref}$$

$$0.992P_2^i/P_{1ref}^i \leq P_2^i/P_1^i(x) \leq 1.008P_2^i/P_{1ref}^i \quad (3)$$

式中: $F(x)$ 为目标函数; $\eta_{is}(x)$ 为等熵效率; $\max f_{str}(x)$ 为最大静应力; $\dot{m}_{ref}$ 为参考设计堵塞流量; $\dot{m}_{opt}(x)$ 为优化设计堵塞流量; P_2^i/P_{1ref}^i 为参考设计出口静压与进口静压比; $P_2^i/P_1^i(x)$ 为优化设计出口静压与进口静压比。

3.2 优化结果分析

优化算法的初始种群数为61,即初始61个采样样本对应61个叶轮设计,终止代数数为150。总样本数为9150,目标函数计算采用CFD数值模拟。优化时台式工作站配置的CPU为Intel Xeon E5645,主频为2.4 GHz,内存为96 GB。单独完成一个样本、一个工况的计算时间为100 min,每个样本计算需完成优化设计工况和堵塞工况。优化时控制样本点的性能评估在本课题组自编的优化平台上完成,该平台为多进程并行计算,占用了22个CPU,优化总计算时间约60 d。

优化迭代收敛情况如图7所示,图中给出了代数分别为1、30、60、90、120、150时所得Pareto解($\eta_{is}(x)$, $\max f_{str}(x)$)及参考设计(ref)结果,其中用DA表示等熵效率最高优化设计,用DB表示最大应力最小优化设计,用DC(最大应力减小的Pareto解中取效率最高)表示综合性能最优化设计。由图知,优化结果随着代数的增加逐渐趋于收敛,至150代时得到了Pareto前沿,优化结束时共获得了6个Pareto解。

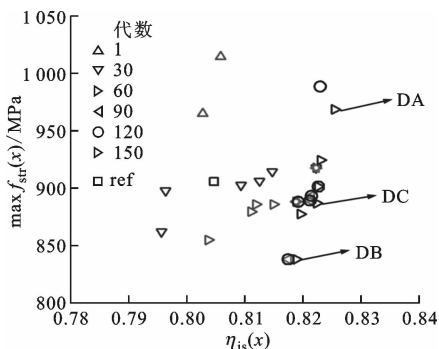


图7 优化迭代收敛情况

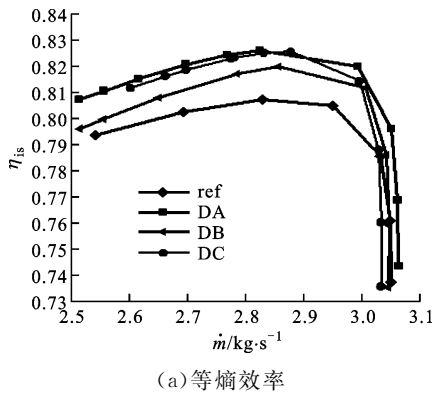
表2给出了3种优化下Pareto解与参考设计性能的对比,其中 $\dot{m}$ 为质量流量。

优化前后叶栅等熵效率及总压比随流量的变化如图8所示。由图知:DA下等熵效率提高显著,在

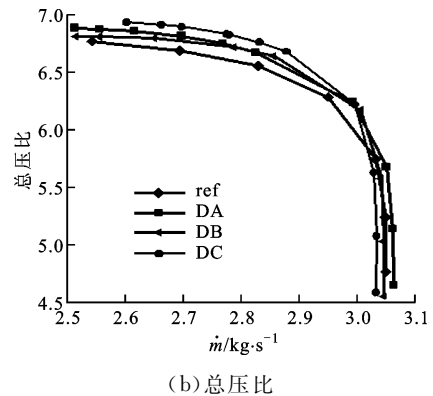
整个变工况范围内等熵效率最高提升了 2.3% 左右,总压比在整个工作范围内较原始叶轮明显增大;DB 下等熵效率最高提升了 1.6% 左右,总压比的最大值提升了 3.5% 左右;在整个工况范围内及 DC 下等熵效率最高提高了 2.1% 左右,总压比最高提升了 4.4% 左右。总体而言,对单工况优化后,优化叶轮的变工况性能较 SRV2-O 叶轮明显提高,除 DC 以外,优化后叶轮在变工况范围的性能均有所提高。

表 2 优化设计与参考设计性能对比

设计	$\eta_{is}(x)/\%$	$\max f_{str}(x)/\text{MPa}$	$\dot{m}/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$
ref	80.458	906.471	2.899 6
DA	82.532	969.319	2.899 3
DB	81.871	838.849	2.900 5
DC	82.460	887.578	2.902 0
DA 下变化量/%	2.07	6.93	-0.01
DB 下变化量/%	1.41	-7.46	0.03
DC 下变化量/%	2.00	-2.08	0.08



(a) 等熵效率



(b) 总压比

图 8 优化前后叶栅等熵效率与总压比随流量的变化

DA、DB、DC 优化设计和参考设计的子午面相对马赫数分布如图 9 所示。由图知,相比于参考设计,在主叶片进口顶部附近 DA、DB、DC 优化设计的高马赫数区范围略微增大,但在分流叶片进口顶

部附近 3 种设计的超声速区域消失,这对于减小叶片进口弓形激波有着积极的贡献,同时也有利于减小进口边界层分离以及边界层与下游顶部间隙的相互作用,使得进口激波减弱,激波损失减小,等熵效率提高。

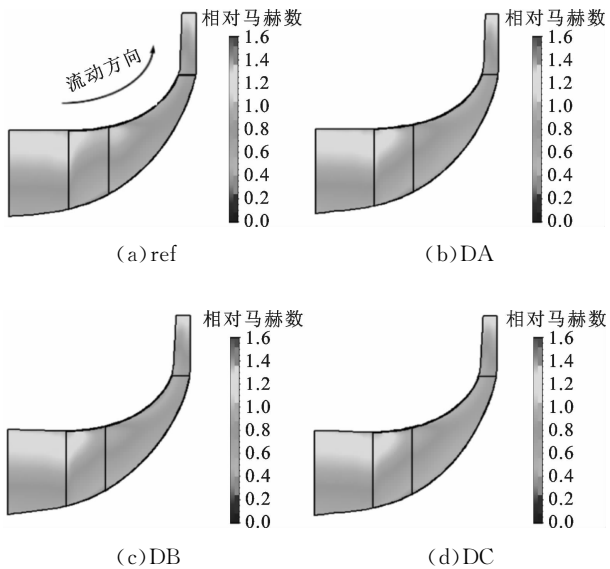


图 9 3 种优化设计和参考设计的子午面相对马赫数分布

3 种优化设计与参考设计的子午面熵值分布如图 10 所示。由图知:熵值分布图与相对马赫数分布相对应,相比于参考设计,DB 设计与参考设计相似,熵值较大的区域几乎没有变化;DA 设计与 DC 设计相似,主叶片进口靠近轮盖附近熵增较大的区域减小,叶轮出口扩压段靠近轮盖区域的熵值相比参考设计显著减小,表明顶部泄漏流损失减小。

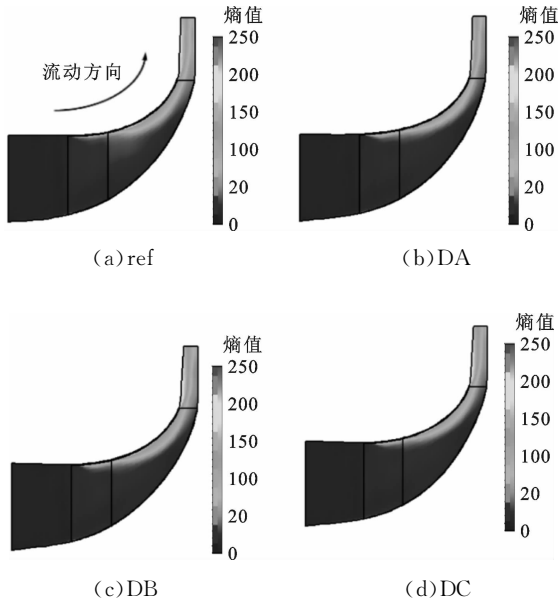


图 10 3 种优化设计和参考设计的子午面熵值分布

优化设计和参考设计在 90%叶高截面的相对马赫数云图如图 11 所示。由图知,相比参考设计,DA、DB、DC 设计中主叶片进口前缘吸力面处激波的强度显著减小,流动通道内低速区域的流动速度显著提高,这大大减小了主叶片进口弓形激波引起边界层分离造成的损失,以及向下游发展时与叶顶间隙泄漏流相互作用引起的低速流体团造成的流动损失,其中 DA 设计在叶片进口前缘吸力面处的激波和流动通道内低速流体流动的改善最为明显。

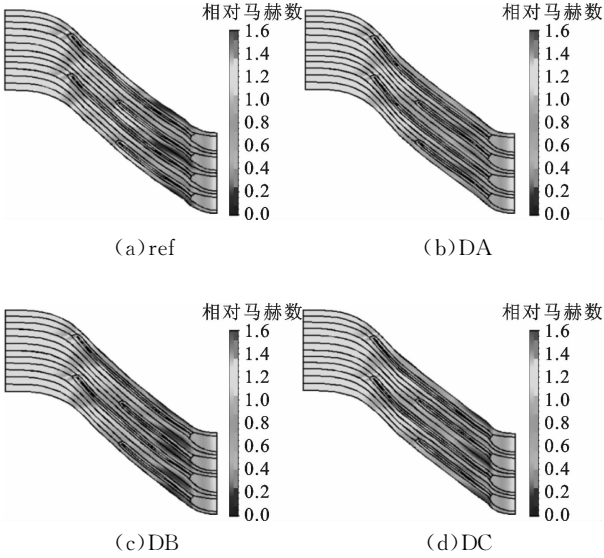


图 11 3 种优化设计和参考设计在 90%叶高处的相对马赫数分布

3 种优化设计和参考设计中 80%叶高处 B2B 截面的相对马赫数分布如图 12 所示。由图知,相比于参考设计,3 种优化设计中由主叶片压力面和分

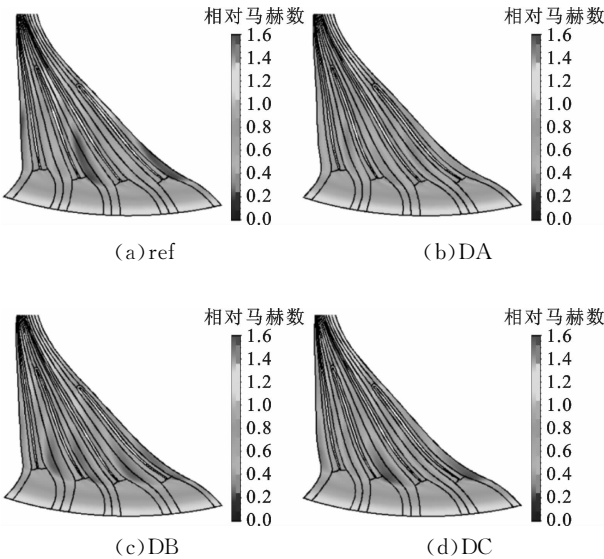


图 12 3 种优化设计和参考设计在 80%叶高处 B2B 截面的流动特征

流叶片吸力面组成的流动通道面积有所减小,对应的相对马赫数显著提高,表明通道中间隙泄漏引起的低速流体滞流造成的流动损失显著减小,其中 DA 设计表现最为明显,与图 10 分析一致。

由表 2 信息知,3 种优化设计中 DB、DC 设计的表面最大应力减小,而 DA 设计的增大。下面分析等效应力及强度性能变化的原因。

3 种优化设计和参考设计整体与局部的 von Mises 等效应力云图如图 13、图 14 所示。由图知,优化前后整体应力分布相似,叶片在叶顶处的表面应力小,叶根处表面应力大,叶片表面最大应力均出现在主叶片前缘根部靠近压力面的位置。原因是半径越小,承受旋转产生的离心应力的累积效应越强,这由底部截面承受整个叶片的离心力和压气机的旋

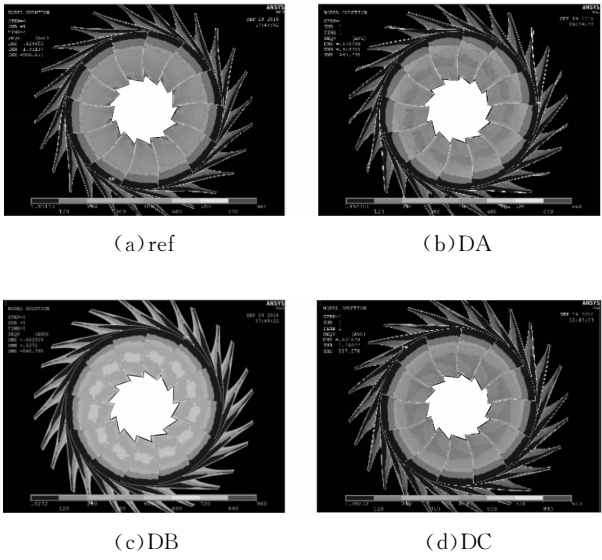


图 13 优化前后的整体 von Mises 等效应力云图

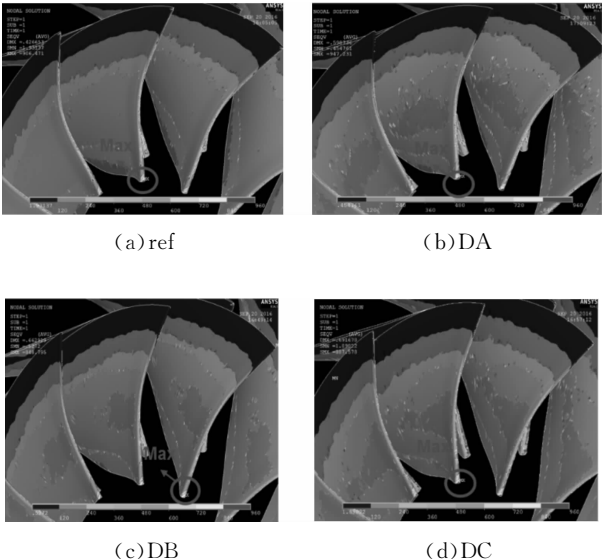


图 14 优化前后局部 von Mises 等效应力云图

转特性决定。

从局部等效应力分布图看出,优化后叶片的中部表面应力略有所增加,但位于叶片前缘根部位置的最大应力减小。原因是:优化会改变叶片的弯扭特性,其中强度结构最好的 DB 设计的弯扭程度明显减小,叶片表面应力变化最为明显,叶片中部表面应力有所增大,主叶片根部最大应力减小,但满足强度要求,相比提高了强度结构的可靠性;DC 设计的弯扭程度有所减小,相应强度结构性能也有所改善;DA 设计的弯扭程度与参考设计几乎一致,略有增加,叶轮表面最大应力有所增大。

综上可知,优化设计性能提高的原因主要是改善了通道中间隙泄漏的流动损失及进口激波损失,同时降低了叶片的弯扭程度,改变了叶片的表面应力分布,减小了主叶片根部最大表面应力,从而提高了气动性能与强度性能。

4 基于总变差分析的数据挖掘

工程中设计变量之间及其与目标函数之间的相互作用存在不确定性,属于黑盒子问题,数据挖掘技术可以处理这类问题。总变差分析(ANOVA)是一种基于方差分析的后处理数据挖掘技术,可将高维函数映射到低维空间,常用来分析目标函数中单变量及多变量对原函数的影响^[16-19]。

本文采用 ANOVA 技术,对 SRV2-O 叶轮的设计空间进行知识挖掘,识别出对目标函数影响显著的设计变量,进而分析设计变量影响规律及气动性能与强度结构间的相互作用。

4.1 总变差分析原理

采用基于 Kriging 响应面进行总变差分析^[20],设 Kriging 响应面函数为 $f(x_1, \dots, x_n)$, $x_1, \dots, x_n$ 为设计变量。为了单独分析某个变量 x_i 对目标函数的影响,ANOVA 技术将除变量 x_i 外的其他变量 $(x_1, \dots, x_{i-1}, x_{i+1}, \dots, x_n)$ 积分成常数,使得预测值函数变为只含有 x_i 一个变量的一元函数,用 $a_i(x_i)$ 表示,方差为 $S_i(x_i)$ 。对 $a_i(x_i)$ 作图可得预测值函数随变量 x_i 的变化规律,即主效应。交互效应定义:将目标函数中除 x_i 和 x_j 两项以外的变量积分成常数,从而预测函数变为只含有某两个变量的二元函数,用 $a_{ij}(x_i, x_j)$ 表示,方差为 $S_{ij}(x_i, x_j)$ ^[20]。方差 $S_i(x_i)$ 、 $S_{ij}(x_i, x_j)$ 二者反映的不是样本点之间的差异,而是描述函数在某特定区间内的动态变化情况。方差比 $S_i(x_i)/S$ 表征各效应的重要程度,其值越高,变量对目标函数的影响就越大。本文以

$S_i(x_i)/S$ 的大小筛选出显著变量,并通过饼状图给出显著变量相对目标函数的重要程度。

主效应和相应方差的计算式如下

$$a_i(x_i) = \int \cdots \int [f(x_1, \dots, x_n) - a_0] \cdot dx_1 \cdots dx_{i-1} dx_{i+1} \cdots dx_n \quad (4)$$

$$S_i(x_i) = \int_0^1 a_i^2(x_i) dx_i \quad (5)$$

交互效应和相应方差的计算式如下

$$a_{ij}(x_i, x_j) = \int \cdots \int [f(x_1, \dots, x_n) - a_i - a_j - a_0] \cdot dx_1 \cdots dx_{i-1} dx_{i+1} \cdots dx_{j-1} dx_{j+1} \cdots dx_n \quad (6)$$

$$S_{ij}(x_i, x_j) = \int_0^1 \int_0^1 [a_{ij}(x_i, x_j) - a_i(x_i) - a_j(x_j)]^2 dx_i dx_j \quad (7)$$

预测函数的总方差计算式如下

$$S = \sigma^2 = \int \cdots \int [f(x_1, \dots, x_n) - a_0]^2 dx_1 \cdots dx_n \quad (8)$$

由于 ANOVA 是基于 Kriging 响应面进行的,所以在进行总变差分析前,首先需要保证响应面的精确性,其可采用交叉验证的方法来验证。交叉验证的基本思想:将某样本值(如 $y(\mathbf{x}^{(i)})$)从样本中移出,利用剩余的 $n-1$ 个样本对移出的样本进行估计,相应响应面预测值即称为 $y(\mathbf{x}^{(i)})$ 的交叉验证值,并用 $\hat{y}_{-i}(\mathbf{x}^{(i)})$ 表示,最后利用估计值与相应的真值的偏差对 Kriging 模型进行验证。该偏差可选择交叉验证残差

$$e_i = \frac{y(\mathbf{x}^{(i)}) - \hat{y}_{-i}(\mathbf{x}^{(i)})}{s_{-i}^2(\mathbf{x}^{(i)})} \quad (9)$$

式中: $s_{-i}^2(\mathbf{x}^{(i)})$ 为 Kriging 模型的均方差^[21]。若假设模型的置信概率为 99.75%, $e_i \in [-3, 3]$, 则 e_i 对应正态分布 $N(0, \sigma^2)$ 中的 3σ 准则。如果 $e_i \in [-3, 3]$ 对所有 $\hat{y}_{-i}(\mathbf{x}^{(i)})$ 均成立,则模型的不确定性均在控制范围之内,模型精确;如果 $e_i \in [-2, 2]$, 则模型相当精确。

进行 ANOVA 分析前,本文制作了交叉验证残差 e_i 与交叉验证值 $\hat{y}_{-i}(\mathbf{x}^{(i)})$ 之间的关系图,通过观测 e_i 的变化范围来验证模型预测的精确性,保证 ANOVA 分析的可靠性。

4.2 SRV2-O 叶轮样本总变差分析

采用 SRV2-O 叶轮优化时的 61 个采样样本进行总变差分析,分析设计变量对气动性能和强度结构的影响,筛选出影响显著的设计变量,并与通过优化设计提高性能的原因分析进行对比,获得设计空间详细信息,进一步为优化设计提供参考。

等熵效率交叉验证结果如图 15 所示。由图知,关于设计工况下等熵效率的交叉验证残差均在 $[-3, 3]$ 内变动,同时预测值与样本值的相对误差的平均值为 1.19%,相对误差的均方根为 1.96%。该相对误差在可接受的范围内,表明利用总变差分析方法建立的响应面精度较好,分析结果具有一定的可信度,可以较为准确地分析各设计变量对等熵效率(气动性能)的影响程度。

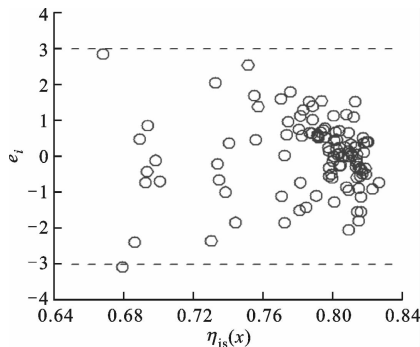


图 15 设计工况下等熵效率的交叉验证结果

各变量(图 7 控制点)对设计工况下等熵效率的影响程度如图 16 所示。本文选取方差贡献率大于 1%的影响变量为显著变量。由图知, x_5 对设计工况下等熵效率起着决定性的作用,其主效应的影响所占比例高达 42.3%,与其他设计变量的交互作用所占比例也十分显著,除此之外, x_6 、 x_7 、 x_9 、 x_{12} 、 x_{13} 的作用也较为显著。

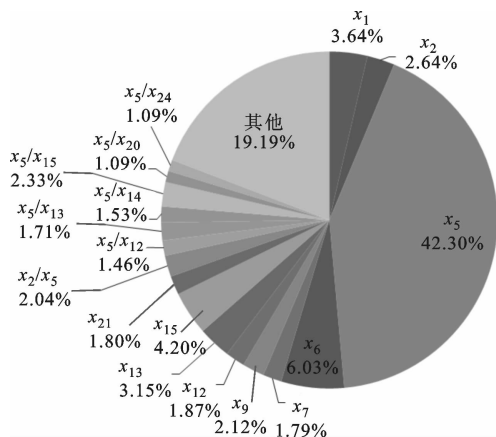


图 16 各变量对设计工况等熵效率的影响程度

由 SRV2-O 叶轮的特性及设计变量知: x_5 、 x_6 、 x_7 位于子午流道的扩压段,控制了叶片高度,变动 x_5 、 x_6 、 x_7 会改变叶轮的通流能力,改变堵塞工况的流量,因此优化设计中需对流量进行约束,同时 x_5 、 x_6 、 x_7 也会影响叶片尾缘顶部泄漏流,对叶轮的气动性能产生显著影响; x_9 、 x_{13} 对应主叶片前缘位置,直接影响前缘进口激波的强度; x_{12} 对应主叶片根部

尾缘位置,改变主叶片压力面与分流叶片吸力面组成的流动通道所占栅距的比例,对叶轮出口附近根部区域的流动情况会造成一定的影响。

参照图 9、10 优化设计和参考设计的子午面流动特征知,叶轮出口扩压段靠近轮盖熵增较大的区域显著减小,叶顶泄漏流损失减小;对应图 11 中 90% 叶高相对马赫数分布和图 12 叶片通道内马赫数分布知,优化设计主叶片压力面与分流叶片吸力面所组成的流动通道所占栅距的比例减小,通道内低速流动损失减小;从图 9 子午面马赫数和图 11 中 90% 叶高相对马赫数分布知,最优设计分流叶片进口顶部附近超声速区域消失,主叶片顶部前缘相对马赫数降低,进口激波强度减弱。以上结论表明,数据挖掘结果的分析与优化设计的分析一致,两者可相互验证。

4.3 表面应力总变差分析

叶轮表面最大应力的总变差分析结果如图 17 所示。由图知,叶轮表面最大应力总变差分析所得的交叉验证残差均在 $[-3, 3]$ 内变动,除了 2 个残差略大一点外,其余点均在 $[-2, 2]$ 内变动。同时,预测值与样本值的相对误差平均值为 2.43%,相对误差的均方根为 3.04%,该相对误差在可接受范围内。这一结果表明,用总变差分析方法建立的响应面精度较好,分析结果具有一定的可信度,可以较为准确地分析各变量对叶轮表面最大应力的影响程度。

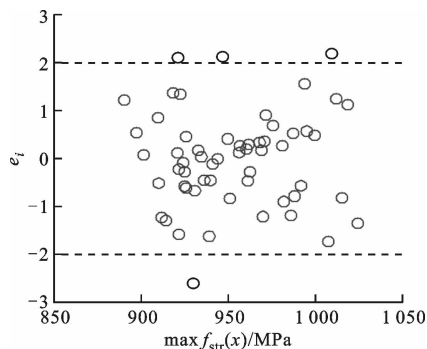


图 17 叶轮表面最大应力的交叉验证结果

各变量对叶轮表面最大应力的影响程度如图 18 所示。选取方差贡献率大于 1%的变量为显著变量。由图知,对叶片表面最大应力影响最大的变量为 x_{13} 、 x_9 ,占主导地位,其余 x_2 、 x_5 、 x_{21} 、 x_{24} 的影响也较为显著。

对应各设计变量位于 SRV2-O 叶轮的位置知, x_9 、 x_{13} 分别控制主叶片顶部截面前缘和根部前缘,其余影响较大的设计变量分布在子午面流道进口位

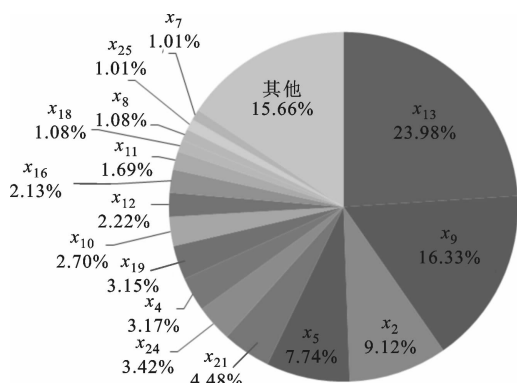


图 18 各变量对叶片表面最大应力的影响程度

置和主叶片根部,其中 x_9 、 x_{13} 控制主叶片的叶高、倾掠特性以及主叶片的弯扭特征,从而影响叶片表面应力分布以及根部受力情况。

参照 SRV2-O 叶轮优化设计的强度分析(见图 14 的等效应力图)可知,叶片表面等效应力在顶部最小,根部增大,而最大应力均出现在主叶片前缘根部靠近压力面的位置。最优设计也是改变叶片的弯扭程度,从而影响叶片表面应力分布,虽然叶片中部表面应力可能略有增大,但在叶根处最大应力有所下降,满足强度要求,这样强度结构更加可靠。以上数据挖掘结果分析与优化设计分析结果一致,两者相互得以验证。

5 结 论

耦合基于总变差分析的数据挖掘技术、自适应差分进化算法,同时对叶片型线及流道进行参数化,完成了高压比离心叶轮 SRV2-O 气动强度多学科设计优化与设计空间知识挖掘,主要结论如下。

(1)优化后获取了 6 个 Pareto 最优解,选取其中典型个体与参考设计进行对比分析,得出等熵效率最高提高了 2.07%,最大应力最小减小了 7.46%,综合性能最优设计的等熵效率提高了 2.00%,最大应力减小了 2.08%,即优化后叶轮的气动强度性能均明显提升。同时,对优化了的叶栅变工况气动性能进行了校核,变工况曲线表明,优化叶轮在整个工作范围内的性能均有所提高,从而验证了优化方法的有效性。

(2)在优化的基础上,利用总变差分析技术识别出对性能影响显著的变量,由此进行设计空间知识挖掘:①在气动方面,子午流道扩压段轮盖对主叶片前缘和尾缘的对气动性能影响较大,子午流道扩压段的顶部设计会影响叶片尾缘顶部泄漏流,主叶片前缘设计控制了进口激波强度,主叶片靠近尾缘的

型线设计会改变主叶片压力面与分流叶片吸力面所组成的流动通道面积及其与叶栅面积的占比,从而影响泄漏流损失;②在强度方面,主叶片根部前缘、顶部前缘等对强度影响较大,其均是通过控制主叶片的叶高、倾掠特性以及主叶片的弯扭特征来影响主叶片根部所发生的形变,改变应力分布,从而影响表面最大等效应力。

(3)基于对优化设计的分析和对设计空间的知识挖掘,建议:对类似高压比离心叶轮进行设计时,重点控制扩压段轮盖的设计,减少对顶部泄漏流的影响;主叶片顶部前缘和尾缘向压力面偏移,通过减弱激波损失,减小主叶片压力面与分流叶片吸力面所组成的流动通道面积,可以减小泄漏流损失;主叶片根部前缘向压力面偏移,通过减弱主叶片的弯扭特征,可以优化叶轮的气动性能和强度性能。

参考文献:

- [1] ASHIMARA K, GOTO A. Turbomachinery blade design using 3-D inverse design method, CFD and optimization algorithm; 2001-GT-0358 [R]. New York, USA: ASME, 2001.
- [2] GUO Z, SONG L, ZHOU Z, et al. Multi-objective aerodynamic optimization design and data mining of a high pressure ratio centrifugal impeller [J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines & Power, 2015, 137(9): 092602.
- [3] 刘波, 杨晰琼. 带分流叶片离心压气机优化设计 [J]. 推进技术, 2014, 35(11): 1461-1468
LIU Bo, YANG Xiqiong. Optimization design of a centrifugal compressor with splitters [J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(11): 1461-1468.
- [4] SILLER U, VOß C, NICKE E. Automated multidisciplinary optimization of a transonic axial compressor [C] // 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston, VA, USA: AIAA, 2009: 94765.
- [5] VERSTRAETE T, ALSALIHI Z, BRAEM-BUSSCHE R A V D, et al. Multidisciplinary optimization of a radial compressor for micro gas turbine application [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132(2), 1291-1299.
- [6] CHIBA K, OYAMA A, OBAYASHI S, et al. Multi-disciplinary design optimization and data mining for transonic regional-jet wing [J]. Journal of Aircraft, 2007, 44(4): 1100-1112.
- [7] OYAMA A, NONOMURA T, FUJII K. Data mining of Pareto-optimal transonic airfoil shapes using proper orthogonal decomposition [J]. Journal of Aircraft,

- 2010, 47(5): 1756-1762.
- [8] OYAMA A, KAWAKATSU Y. Data mining of Pareto-optimal solutions of a solar observatory trajectory design problem [C] // AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit. Reston, VA, USA: AIAA, 2012: 2442.
- [9] KIPOUROS T, MLECZKO M, SAVILL A M. Use of parallel coordinates for post-analyses of multi-objective aerodynamic design optimisation in turbomachinery [C] // 4th AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialist Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2008: 2138.
- [10] SLAWOMIR K, TESFAHUNE Y A, AMRIT A, et al. Rapid multi-objective aerodynamic design using co-Kriging and space mapping [C] // 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Reston, VA, USA: AIAA, 2015: 0418.
- [11] KRAIN H. Swirling impeller flow [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1988, 110(1): 122-128.
- [12] KANG S. Numerical investigation of a high speed centrifugal compressor impeller [C] // Proceedings of ASME Turbo Expo 2005. New York, USA: ASME, 2005: 813-821.
- [13] 徐秉业, 刘信声. 应用弹塑性力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1995: 99-108.
- [14] 宋立明. 基于进化算法的轴流式叶轮机械叶栅气动优化设计系统的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.
- [15] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1993, 2(3): 221-248.
- [16] ROOSEN C B. Visualization and exploration of high-dimensional functions using the functional ANOVA decomposition [D]. Stanford, CA, USA: Stanford University, 1995.
- [17] SHIMOYAMA K, SUGIMURA K, JEONG S, et al. Performance map construction for a centrifugal diffuser with data mining techniques [J]. Journal of Computational Science and Technology, 2010, 4(1): 36-50.
- [18] KUMANO T. Multidisciplinary analysis and optimization for regional jet design [D]. Sendai, Miyagi, Japan: Tohoku University, 2009.
- [19] GUO Z, SONG L, LI J, et al. Research on meta-model based global design optimization and data mining methods [C] // ASME Turbo Expo 2015. New York, USA: ASME, 2015: 42554.
- [20] SCHONLAU M, WELCH W J. Screening the input variables to a computer model via analysis of variance and visualization screening [M]. Berlin, Germany: Springer, 2006: 308-327.
- [21] JONES M S D R, WELCH W J. Efficient global optimization of expensive black-box functions [J]. Journal of Global Optimization, 1998, 13: 455-492.

[本刊相关文献链接]

艾子健, 秦国良, 林静祥, 等. 对旋风机两级叶轮等功率第二级叶轮变转速匹配研究. 2017, 51(3): 1-6. [doi: 10.7652/xjtuxb201703001]

任芸, 吴登昊, 牟介刚, 等. 考虑旋转和曲率的湍流模型修正及应用. 2016, 50(9): 25-30. [doi: 10.7652/xjtuxb201609004]

李亮, 薛太旭, 李森. 考虑气动和湿汽损失综合影响的低压多级透平优化. 2016, 50(3): 22-28. [doi: 10.7652/xjtuxb201603004]

赵燕杰, 谭俊飞, 党飞龙, 等. 离心风机集流器的响应面优化设计. 2015, 49(11): 49-54. [doi: 10.7652/xjtuxb201511009]

刘小民, 赵嘉, 李典. 单圆弧等厚叶片前后缘多元耦合仿生设计及降噪机理研究. 2015, 49(3): 1-10. [doi: 10.7652/xjtuxb201503001]

赵会晶, 王志恒, 唐永洪, 等. 叶片前缘倾掠对离心叶轮气动性能的影响. 2015, 49(11): 1-7. [doi: 10.7652/xjtuxb201511001]

官武旗, 伍儒康. 求解流线曲率法反命题的一种新型有限差分方法. 2015, 49(3): 11-13. [doi: 10.7652/xjtuxb201503002]

孙晔晨, 田玉宝, 席光, 等. 三元叶片型面造型对离心压缩机叶轮气动性能影响的数值研究. 2015, 49(11): 135-141. [doi: 10.7652/xjtuxb201511022]

周俊安, 刘立军, 肖萍, 等. 带叶片扩压器离心压缩机模型级内流研究. 2015, 49(9): 30-35. [doi: 10.7652/xjtuxb201509006]

燕浩, 刘梅清, 梁兴, 等. 大型轴流泵空化特性的数值模拟. 2014, 48(11): 44-50. [doi: 10.7652/xjtuxb201411008]

张明宇, 王永生, 靳栓宝, 等. 喷水推进泵压力脉动特性数值计算及分析. 2014, 48(11): 51-57. [doi: 10.7652/xjtuxb201411009]

李学臣, 席光. 离心叶轮出口流动分离区影响因素的数值研究. 2013, 47(9): 16-22. [doi: 10.7652/xjtuxb201309003]

(编辑 苗凌)