

文章编号: 1000-8055(2009)01-0137-06

利用周向涡量对压气机进行气动数值优化

郭 明, 李秋实, 周 盛

(北京航空航天大学 航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191)

摘 要: 采用人工神经网络结合遗传算法, 利用周向涡量, 对一单级低速压气机转子空间弯掠积叠曲线进行了气动数值优化. 优化目标为小流量工况下绝热效率最大. 结果表明, 优化后转子出口的周向涡量分布改善, 压气机级在小流量区域的效率得到很大提高, 稳定工作裕度得以拓宽. 该方法不仅在数学和物理上使得优化进程高效的收敛于最优解, 而且能给后续的压气机级提供一个组织有序的流场.

关 键 词: 气动数值优化; 低速压气机; 涡量动力学; 周向涡量

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Aerodynamic optimization of a low speed compressor based on circumferential vorticity

GUO Ming, LI Qiu-shi, ZHOU Sheng

(National Key Laboratory on Aero-Engines,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Based on artificial neural network and genetic algorithms, the aerodynamic optimization of stacking curve for a low-speed compressor rotor was implemented by controlling circumferential vorticity. The adiabatic efficiency under small flow rate condition was optimized. The numerical results show that the distribution of circumferential vorticity at the exit of rotor is improved, the adiabatic efficiency under small flow rate zone is enhanced, and the stall margin is greatly increased. The optimization approach have high efficiency, and can provide a ordered flow field for compressor.

Key words: aerodynamic optimization; low speed compressor; vorticity dynamics; circumferential vorticity

制约风扇/压气机流场性能恶化的因素众多, 但是, 最本质的根源可以归结到由于流体粘性产生的旋涡运动. 但是, 现在压气机气动分析设计体系中, 并未将其直接融入. 尽管旋涡图谱、涡量分布等也常常被用于流场分析, 但是, 旋涡运动究竟如何影响、制约性能, 彼此间有何定性、定量关系, 如何将其直接用于气动设计和优化?

涡量动力学是一门研究涡量产生、演化、发展及其与物面交互作用的一门学科. 因此, 从涡量动力学入手, 来探索其与压气机总体性能间的联系,

进而指导气动设计和优化, 不失为一个好的思路.

外流方面, 在涡量动力学研究方法的基础上, 吴介之和吴建民^[1-2]等将翼型所受的升力和阻力用边界涡量流 (Boundary vorticity flux, 缩写为 BVF) 的积分来表示, 从而建立了涡量生成与翼型性能间的直接联系. 并利用 BVF 替代压力分布对翼型进行气动数值优化, 使升阻比大大提升.

而在内流方面, 借鉴外流的思想, 李秋实和郭明等^[3-4]针对总性能参数进行了简化约定, 对其实施导数矩变换 (Derivative moment transforma-

收稿日期: 2007-12-29; 修订日期: 2008-04-22

作者简介: 郭明(1977 -), 男, 江西万载人, 博士生, 主要从事叶轮机气动热力学研究.

tion, DMT), 使原有的被积函数变为它的空间导数的矩, 从而将 BVF 和涡量引入到压气机总体性能的评价指标中. 通过对高、低速压气机的诊断分析, 进一步将叶片表面表面 BVF 及流场周向涡量 ω (即圆柱坐标系下, 涡量的周向分量, 简称为周向涡量) 提取作为关键因子. 吴宏等^[5]利用 BVF, 对一高性能跨声风扇转子叶型进行优化, 使转子在近峰值效率工况下压比提升 7.69%, 效率提高 1.92%.

本文工作在此基础上, 利用周向涡量对一个低速压气机转子的空间弯掠形式进行了气动优化, 进一步探索将涡量动力学应用于压气机气动优化设计的方法.

1 优化方案分析

压气机中最重要的两个总体性能参数是总压比和绝热效率. 总体上来讲, 压气机性能的提升, 就是在保证一定的通流量的前提下, 尽可能增加总压比, 提高效率. 但在气动分析中, 这些仅用常规物理量表达的性能参数并无法反映其与物面上及流场中的涡量动力学根源的联系.

事实上, 可以换个角度来描述压气机的性能提升, 即: 通过转子叶片给气体做的功 ΩM_z (Ω 是旋转角速度, M_z 是叶片作用在气体上的轴向力矩), 尽可能多的转变为出口截平面上的总压 p^* 升.

基于此, 从总动能方程出发, 定义 $p^* u_z$ 为“总压流”, 那么, 其在任意垂直于轴向截面上的积分

$$\int p^* u_z dS$$

实际上反映了流道中沿程增压的实际变化过程. 在温度变化不是很大的气动过程中, 我们可以用“总压流”这样的动力学概念从另一个角度逼近“总焓”这样的热力学概念.

在不可压流动过程中, 进出口截面的总压流增益

$$G \equiv \int p^* u_z dS - p_\infty^* U S_{in}$$

实际上就是叶轮机械施加给流体的气动有用功. 因而叶轮机的效率可表示为

$$\eta = \frac{G}{\Omega M_z}$$

于是, 我们将问题转化为: 如何构建这两个指标 ΩM_z 和 G 与涡量动力学根源间的联系.

通过对 G , ΩM_z 进行基于涡量动力学的导数矩变换, 可得到

$$\begin{aligned} \int p^* u_z dS &= -\frac{1}{2} \int r \frac{\partial(p^* u_z)}{\partial r} r dr d\theta = \\ &= -\frac{1}{2} \int r \frac{\partial p^*}{\partial r} u_z r dr d\theta - \frac{1}{2} \int r p^* \frac{\partial u_z}{\partial r} r dr d\theta = \\ &= -\frac{1}{2} \int r \frac{\partial p^*}{\partial r} u_z r dr d\theta - \frac{1}{2} \int r p^* \frac{\partial u_z}{\partial z} r dr d\theta + \\ &= \frac{1}{2} \int r p^* \omega r dr d\theta = \frac{1}{2} \int r (p^* + \rho u_z^2) \omega r dr d\theta - \\ &= \frac{1}{2} \int r p^* \frac{\partial u_z}{\partial z} r dr d\theta + \frac{1}{2} \int r u_z \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} r dr d\theta - \\ &= \frac{1}{2} \int r \rho u_z u \omega r dr d\theta - \frac{1}{4} \int r u_z q^2 \frac{\partial \rho}{\partial r} r dr d\theta - \\ &= \frac{1}{4} \int r u_z [q^2 f(M) \frac{\partial \rho}{\partial r} + \rho \frac{\partial(f(M) q^2)}{\partial r}] r dr d\theta \end{aligned} \quad (1)$$

最后一项为可压流总压修正项, 在不可压情况下可忽略.

$$M_z = -\frac{1}{2} \int \rho r^2 \sigma_{pz} dS + \frac{1}{2} \oint_{\partial \Omega_b} r^2 dz \quad (2)$$

其中 σ_{pz} 是 σ_p 的轴向分量, $\sigma_p \equiv \frac{1}{\rho} \nabla p$ 是壁面切向压力梯度引起的边界涡量流.

结合式(1)和(2), 对压气机进行的气动诊断分析, 发现叶片表面 BVF 及尾流截面上周向涡量 ω 是影响性能的最关键因子. 进而我们建立了一些相关气动分析的基本判据和方法, 以对压气机的改进设计作出指导.

然而, 这种分析更多的是从大势研判上解决改什么或者从哪该的思路, 而改多少的问题依然极多的依赖于设计者自身的经验和技能.

因此, 我们考虑是否可与气动数值优化结合已增强其可用性. 在文献[5]中, 结合 BVF 将式(2)的变形作为目标函数对转子叶型进行了优化. 式(2)对应的是转子的加功量, 因而对其优化直接导致了压比的很大提升; 而式(1)对应的是流体获得的有用功, 那么我们可以考虑利用其有针对性的优化压气机效率.

本文以一个单级低速压气机实验件来分析这个问题, 其转子外形见图 1, 主要设计参数: 质量流量为 2.88 kg/s; 总压升为 1470 Pa; 绝热效率为 85%; 转速为 3000 r/min.

对该低速压气机数值模拟结果的分析表明, 式(1)中, 起支配性作用的是 $\frac{1}{2} \int r p^* \omega r dr d\theta$ 积分项. 由于 p^* 变化不大, 实际上该积分项又由周向涡量控制. 因此, 为增加总压流, 从周向涡量分布上讲, 大的正周向涡量应尽量靠近叶尖(机匣)

以增大其对总压流的正贡献,而大的负周向涡量应尽量靠近叶根(轮毂),以减小其对总压流的负贡献。

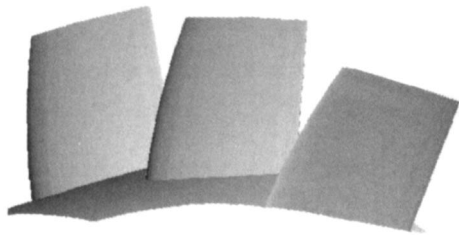


图 1 转子原型

Fig. 1 Original rotor

对转子出口截面的周向涡量分布的分析发现,近机匣处,周向涡量高的正峰值区域向叶面位置堆积,并沿着叶面朝叶中方向扩散,这一现象在小流量工况下(图 2)表现的尤其明显。根据式(1),它表明此时叶尖处的加功增压能力急剧减弱。因此,抑制机匣附近的周向涡量高值区域向叶中扩散的趋势,是改进设计的主要方向。

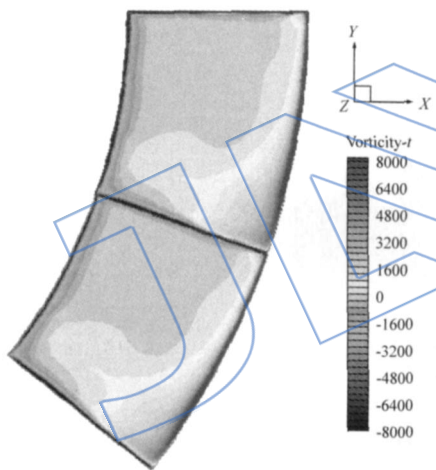


图 2 小流量工况下转子出口截面周向涡量分布

Fig. 2 Circumferential vorticity distribution at the outlet of rotor under small flow rate condition

叶片表面产生的边界涡量流是流场中所有涡量产生的最本质根源,而其演化、发展则更多的受到叶片空间积叠形式(弯掠规律)及流道形状的影响。因此,可采用前掠以增加叶尖载荷,同时,结合叶片反弯来改进气动特性,以尽量使周向涡量高值区域限制在近机匣区域。

如何将周向涡量与叶片的气动弯掠的数值优化结合呢?由式(1),总压流增益直接决定了压气机的效率,而 $\frac{1}{2} \int r p' \omega r d r d \theta$ 又是其中的最关键项,可以将其作为优化的目标函数。但是,若将其作为目标函数存在一定的问题。首先,该项是总压

流主导项,但是并不等价,因此,可能导向错误结果;其次,高的周向涡量区域大部分集中在近壁面区域,要获得准确的周向涡量,必须在选用合适的湍流模型的基础上,加密网格,这将极大的增加计算量。

因此,本文工作将周向涡量分布作为优化进程的判定准则和约束条件,通过将其与优化算法适当的结合,可为优化进程限定一个物理意义上的正确方向。这样,能在保证原有优化进程尽可能高效而快速的同时,获得一个对压气机系统而言可用的最优解,这个最优解有一个良好、组织有序的流场,而不仅仅有着高效率或高压比这样的空泛数字。

2 优化模型

2.1 优化算法

优化算法采用人工神经网络结合遗传算法。

人工神经网络具有自组织、自适应及自学习和记忆联想能力,是解决复杂的非线性问题的有效工具,其预测能力大大优于多元回归分析和判别分析。常结合 BP 算法,具有简单和可塑的优点。但是, BP 算法是基于梯度的方法,收敛速度慢,且常受到局部极点的困扰。

遗传算法是基于自然选择与遗传学机理的并行全局优化搜索算法,算法具有寻优的全局性。其利用群体进化,在求解过程中,通过使种群不断优化,从而找到满意解或最优解,适合大规模并行。简单的自然选择法则也使得遗传算法具有不受搜索空间限制性条件(如可微、连续、单峰等)及其它辅助信息(如导数)制约的特点。这些使得遗传算法用于优化具有传统优化算法无法比拟的优越性,在许多复杂问题的解决中都取得了巨大成功。

遗传算法解最优化问题的计算效率比较高、适用范围相当广。但是,将遗传算法用于解决各种实际问题后,会由于各种原因过早向目标函数的局部最优解收敛,从而很难找到全局最优解。其中有些是由于目标函数的特性造成的;另外一些则是由于算法设计不当。此外,当全局搜索空间较复杂,遗传选择路径较多时,也会出现效率不高的问题。

为保证优化过程快速而高效的收敛至最优解,初始样本、优化参数、约束条件以及优化选择机制的设定都非常重要。这些设定不仅要在数学上,而且要在物理上可适。因为,对于具体的压气机气动优化问题,不仅要获得总性能参数上的最

优化,而且要获得物理上组织有序的流场.单纯的数值优化算法是保证不了这一点的,而将周向涡量与这些设定结合,能在充分利用算法本身优点的同时,避免其在物理意义表达上的缺陷.

2.2 目标函数

前面分析已指出,在小流量工况下(2.5 kg/s)流场性能显著恶化,这也表明小流量区域有较大改进潜力.因此目标函数设定为:在小流量工况下,压气机绝热效率最高,即

$$F = \text{Max}(\eta)$$

这是有实际意义的.因为好的压气机设计不仅应该在设计点的高效率,同时应该有在偏离设计点时的较高效率平台.

2.3 优化参数

转子采用后缘积叠方式,将积叠曲线分别投影到子午面和轴向,用来描述转子的掠形规律和弯曲规律.

曲线描述方程的选取应使用尽可能少的自由参数使曲线在尽可能大的合理范围内变化,同时,自由参数最好具有直观的表达.这里,我们选用2阶贝赛尔曲线.

图3是掠形曲线示意图.为使曲线描述更为直观,纵坐标采用展长,以叶根处为零,叶尖处为1.整个曲线通过展长为0,0.5,1的三个控制点来定义.这里,我们固定叶根端点,并将其它控制点转化为直观的控制角 β_1 和 β_2 ,以右旋为正,在图3中, β_1 为负, β_2 为正.

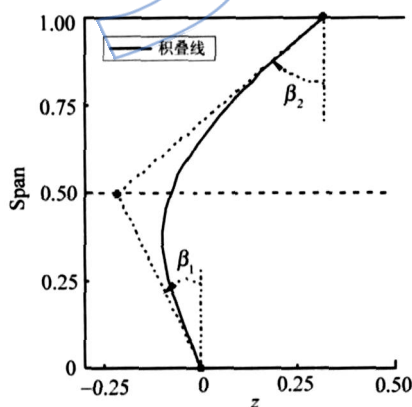


图3 掠形曲线示意图

Fig. 3 Swept curve sketch

弯曲规律描述曲线与此类似,但将横坐标变为转角 θ .

这样,共有4个优化参数.

2.4 约束条件

几何约束:为了使得优化过程中的积叠形式合理,同时加快收敛速度,对其加以约束是十分必要的.

对于掠形曲线,根据周向涡量分析,改进方向应采用前掠,因此,限定 β 在一较小的区间 $[-10^\circ, 10^\circ]$, β 变化区间则放大为 $[-40^\circ, 15^\circ]$.这里仍给与 β 一定的正角度是为了考察优化结果是否自然导向前掠.

对于弯曲曲线, β 在一较小的区间 $[-10^\circ, 10^\circ]$, β 变化区间适当放大为 $[-20^\circ, 20^\circ]$.

周向涡量约束:从周向涡量分布来看,优化方向是尽量减弱转子出口截面靠近机匣处周向涡量高值区域向叶中扩散的趋势.

所以,我们以原型转子出口处的50%至90%叶高周向涡量函数积分值

$$H_{\text{ref}} = \int_{rp} \omega r dr d\theta$$

为基准,将其引入遗传进化过程的约束选择机制.对违背约束的情况,依据其程度加以惩罚.遗传优化进程开始阶段,为收集到优化参数空间内尽可能多的全局性信息,对违背约束条件的样本施加较小的惩罚;随着优化进程的推进,为使得尽可能高效快速的获得优化参数空间内的精确解,对违背约束的样本逐渐加大惩罚.

效率约束:优化后的设计点效率 η_h 不低于原型,即

$$\eta_h \geq \eta$$

2.5 样本数据库生成

初始样本:合理的初始样本空间,应提供尽可能多的全局信息,并同时兼顾效率,确保遗传优化过程沿着一个合理的路径高效行进.当优化参数较多时,这一点尤为重要.在初始样本选取时就引入周向涡量限制,使初始样本提供一个周向涡量分布合理的样本空间.

具体做法是,通过优化参数空间随机取样,生成样本,再以近似函数预测

$$H_{\text{ref}} = \int_{rp} \omega r dr d\theta$$

的大小,最终选择生成的初始样本落在 $H < H_{\text{ref}}$ 的空间.

随机取样模式:优化进程中采用离散层取样,以保证样本全局性.这样会影响优化效率,周向涡量选择机制的融入恰可以作出弥补.

同时,可通过即时生成的样本的周向涡量分

布图监视样本数据库填充状况,对明显不符合物理预期的样本予以直接剔除。

本文工作采用“Numeca”作为核心计算和校核软件,湍流模型为 B-L 模型。优化时仅针对转子部分,最后采用整级校核。

3 优化结果及气动分析

图 4 是优化后的转子叶片效果图。图 5 是优化后的积叠线在子午面及轴向投影示意图,积叠

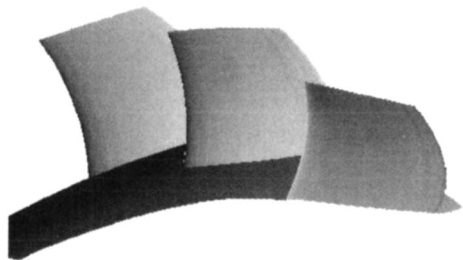
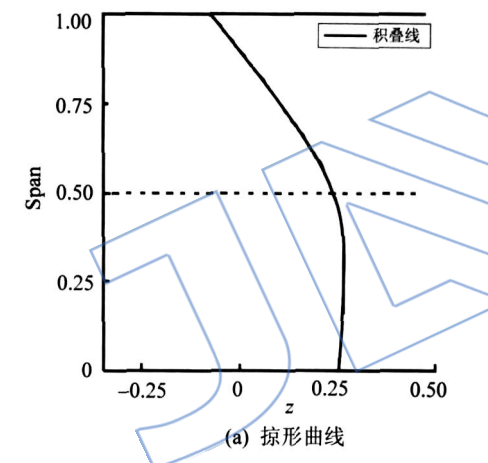
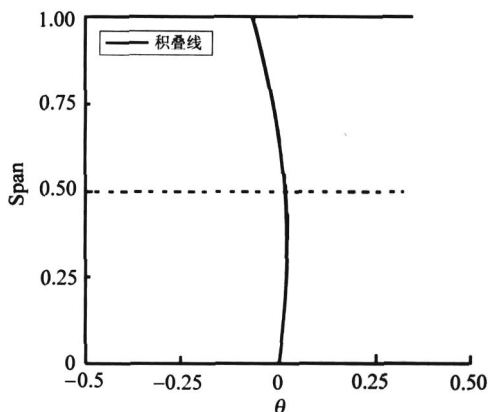


图 4 优化后转子

Fig. 4 Optimized rotor



(a) 掠形曲线



(b) 弯曲曲线

图 5 优化后积叠线

Fig. 5 Optimized stacking curve

线已自然的形成叶尖前掠和反弯,与我们通过周向涡量分析得出的改进预期相符。事实上,在初始样本数据的生成过程中,我们就发现一个基本事

实:当叶尖后掠和正弯时,无法获得效率高、周向涡量分布有序的本。

图 6、图 7 是优化后压气机的数值模拟特性线与原型的数值模拟及实验结果对比。从效率特性图上可以看到,优化后,小流量工况下效率得到了很大提高,高效率平台区域大大扩展。相比较而言,从压比特性图上可看到,压比的提升不大。这主要是因为叶型并未改变,加功量变化不大。同时,设置的优化变量较少,也减弱了优化效果。

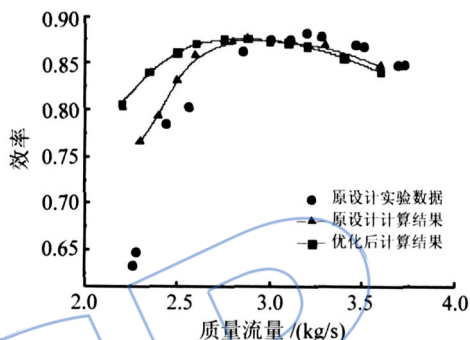


图 6 绝热效率特性线对比

Fig. 6 Comparison of efficiency characteristics

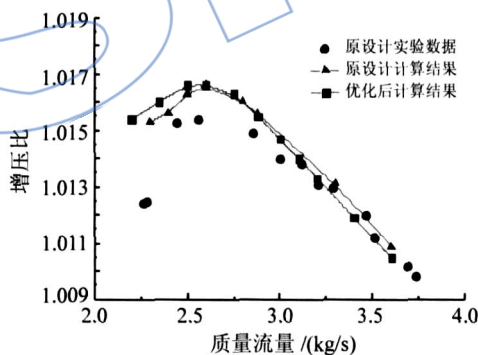


图 7 压比特性对比

Fig. 7 Comparison of pressure characteristics

图 8 是优化后小流量工况下的转子出口截面周向涡量分布图。与原型相比,周向涡量高的正值向通道内扩散,尤其是沿着叶面向通道内扩散的趋势得到了很好的抑制,周向涡量分布趋向于组织合理有序,这对后续的静子稳定工作是极其有利的,由此带来了整个压气机级的效率和稳定工作裕度得以提升。

尽管机匣高值正涡量区域向叶中扩散得到了抑制,但同时发现,近轮毂处负涡量开始沿着叶面向叶中扩散,这是一种不利的发展趋势。因为,要获得更大的总压流增益,叶根处负的涡量高值区域应尽量靠近叶根。同时,从流场结构上讲,负的周向涡量向叶中的扩散也意味着局部流场的恶化。

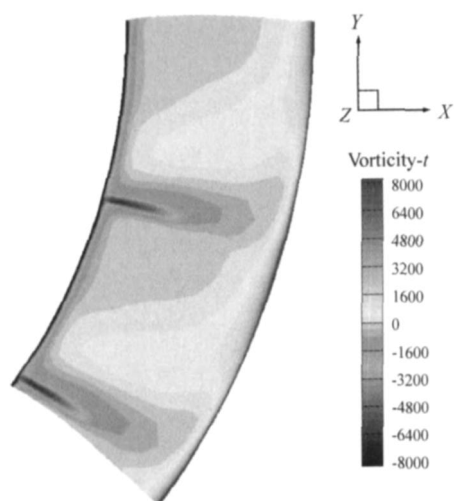


图8 优化后小流量工况下转子出口截面周向涡量分布
Fig.8 Circumferential vorticity distribution at the outlet of optimized rotor under small flow rate condition

出现这种现象的原因在于,一方面,周向涡量的分布受全局影响,在一定区域的调整必然会引起其它区域的变化;另一方面,我们在优化时将重点放在叶尖区域,因而将周向涡量的限制和约束集中在了叶中到叶尖区域,未对叶根处施加约束.并且,积叠线优化参数的选取也使得叶根处的可优化空间小,无法作出很好的适应.

4 结论与展望

1) 本文利用周向涡量,对压气机转子的空间弯掠进行气动数值优化,使得压气机在小流量区域的效率得到提高,大大拓宽了稳定工作裕度.

2) 将周向涡量作为约束和优化发展判定因子,不仅在数学和物理上使得优化进程高效而快

速的收敛于最优解.而且,对于一个压气机系统而言,它能给后续的压气机级提供一个良好、组织有序的流场.

3) 空间掠主要改变轴向加功量分布,进而决定周向涡量的轴向发展演变.空间弯曲改变径向压力梯度,从而改变周向涡量的径向扩散态势.为获得更好的优化效果,可在充分进行基于涡量动力学分析的基础上,细化工作,有所侧重的变更基于周向涡量的遗传进化选择机制.同时,还可以适当的增加优化参数,以扩大优化变化空间.

参考文献:

- [1] Wu J Z, Zheng T G, Lu X Y, et al. Towards new aerodynamic diagnostics and optimization of total force and moment in terms of boundary vorticity flux [R]. AIAA-96-0550.
- [2] Wu J Z, Roach R L, Lo C F, et al. Aerodynamic diagnostics and design based on boundary vorticity dynamics [R]. AIAA-99-3103.
- [3] 李秋实,郭明. 基于局部动力学的一个低速压气机诊断与设计[J]. 自然科学进展, 2005, 15(2): 221-228.
LI Qiushi, GUO Ming. Diagnostic and design of a low speed compressor based on local dynamics [J]. Progress in Natural Science, 2005, 15(2): 221-228. (in Chinese)
- [4] GUO Ming, LI Qiushi, HOU Anping, et al. A diagnostic and design approach of axial compressor based on local dynamics [R]. ASME GT2006-91116.
- [5] 吴宏,李秋实,郭明,等. 跨声风扇转子的BVF气动优化方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(1): 14-17.
WU Hong, LI Qiushi, GUO Ming, et al. Aerodynamic optimization method of a transonic fan rotor based on BVF [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2007, 33(1): 14-17. (in Chinese)