

DOI: 10.7652/xjtuxb201401001

长叶片透平级多学科多目标优化设计

李彬, 宋立明, 李军, 丰镇平

(西安交通大学叶轮机械研究所, 710049, 西安)

摘要: 针对长叶片透平级优化问题, 结合自适应多目标差分进化算法、基于 3 次非均匀 B 样条曲线的曲面造型技术及透平级气动和强度性能分析评价方法, 建立了长叶片透平级多学科多目标优化设计系统, 其中气动性能评估采用数值求解三维 RANS 方程完成, 长叶片强度分析采用有限元方法完成。长叶片透平级的优化设计目标是比功率最大和最大等效应力最小, 设计变量是透平级静叶和动叶型线的三维参数化控制参数。采用所建优化设计系统获得了长叶片透平级的 7 个多学科优化非受控解(Pareto 解)。3 个典型的 Pareto 解与参考叶型进行比较分析显示, 优化后 Pareto 解下的气动和强度性能均优于参考叶型设计方案, 从而验证了所建优化设计系统的实用性。

关键词: 长叶片; 透平级; 气动性能; 强度; 多学科设计优化

中图分类号: TK263 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)01-0001-06

Multidisciplinary and Multiobjective Optimization Design of Long Blade Turbine Stage

LI Bin, SONG Liming, LI Jun, FENG Zhenping

(Institute of Turbomachinery, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The multidisciplinary and multiobjective optimization design system based on the self-adaptive multi-objective differential evolution (SMODE) algorithm, cubic non-uniform B-spline curves based surface modeling technology, and aerodynamic and strength performance evaluation of turbine stage was developed for the optimization of long blade turbine stages. The aerodynamic performance of the designed long blade turbine stage is evaluated by the three-dimensional Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) solution. The strength of the long blade is obtained using the finite element analysis approach. The optimization design objectives of the turbine stage are the maximization of specific power and the minimization of maximum von Mises stress. The design variables are determined by the stator and rotor blade parameterization method. With the present optimization system, seven Pareto solutions of the long blade stage were obtained. The three typical Pareto solutions were selected to analyze the aerodynamic and strength performance of the optimized blade geometry and to compare with the original design. The results show that the aerodynamic and strength performance of the Pareto solutions obtained are superior to the original design, thus confirming the availability of the present multidisciplinary and multiobjective optimization design system for long blade turbine stages.

Keywords: long blade; turbine stage; aerodynamic performance; strength; multidisciplinary design optimization

汽轮机长叶片透平级的气动性能对机组通流效率影响很大,长叶片透平级动叶的刚度、离心应力和动应力等强度性能对机组安全运行具有重要影响^[1],因此设计时必须考虑气动和结构强度的综合性能,这是典型的多学科设计优化问题。

汽轮机长叶片透平级的分析、设计和优化是提高汽轮机通流效率的关键技术之一。Chen 等建立了透平叶片气动性能优化设计系统,完成了叶片的优化设计,以提高叶片的气动效率^[2];Oksuz 等采用多层次遗传算法,对轴流透平叶片以最大绝热效率、扭矩和最小质量为优化目标进行了多目标优化设计^[3];Bonaiui 等发展了基于反设计的透平叶片多目标多点优化设计系统,并采用响应面方法对叶片进行了多工况点的气动优化设计^[4];Jarrett 等采用流线曲率方法,针对透平通流部分建立了气动、强度多学科优化设计系统^[5];Luo 等以总压升和应力为优化目标,完成了压气机叶片的多学科优化设计,从而提高了压气机叶片的综合性能^[6]。

汽轮机长叶片透平级的气动设计和优化主要是针对气动性能进行的,然后采用有限元方法进行校核^[7],这样的设计流程需要多次反复,不仅降低了设计效率,而且增加了设计难度。因此,针对长叶片透平级开展耦合透平级的气动与强度性能的多学科优化设计具有现实意义。本文为此进行了研究,建立了多学科优化设计系统,基于并行计算机系统完成了典型长叶片透平级的多目标优化设计,同时验证了所提优化系统的实用性。

1 长叶片透平级多学科优化设计系统

图1是汽轮机长叶片透平级多学科多目标优化

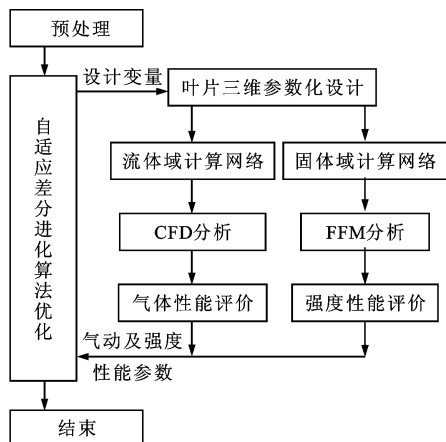


图1 汽轮机长叶片透平级多学科多目标优化设计系统的流程

设计系统的流程。该系统主要包括优化进程控制的预处理、叶片三维参数化设计、优化方法和气动与强度性能评价4个模块。

1.1 透平级叶片参数化方法

图2为长叶片透平三维参数化设计。针对长叶片透平级的静叶和动叶,分别选取特征截面。本文优化的透平级中,静叶沿叶高选取3个特征截面,动叶沿叶高选取4个特征截面,每个二维特征截面均采用非均匀B样条函数来拟合叶型型线。图2中,特征截面的吸力面上有非均匀B样条的控制点,通过改变控制点可以改变二维截面型线。三维叶片是以二维叶型型线为基准进行径向积叠形成三维叶型型线,然后采用蒙面方法生成的。

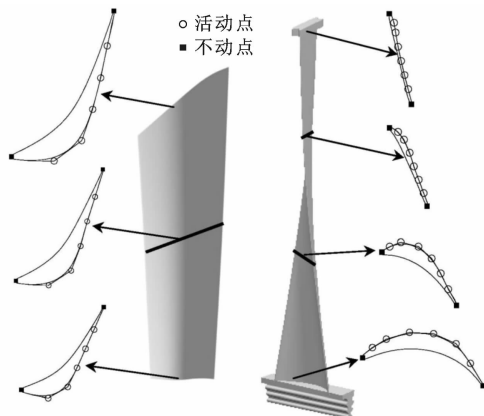


图2 长叶片透平级三维参数化设计

1.2 性能评价方法

长叶片透平级的气动性能分析采用商用计算流体力学(CFD)软件 NUMECA、通过数值求解 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 方程完成。湍流模型选用 S-A 湍流模型,空间离散采用有限体积法,格式采用二阶中心差分格式,时间离散采用四阶 Runge-Kutta 方法。为加速收敛,计算过程中采用了多重网格加速技术和隐式残量平均法。透平级动叶的强度性能分析采用商用软件 ANSYS 完成。对于本文算例的长叶片透平级动叶强度分析,采用8节点的 SOLID 45 单元,同时考虑了相邻阻尼围带接触面的非线性接触作用,即摩擦系数为0.5,刚度矩阵为非对称矩阵,并对叶根与轮毂的接触面进行了位移约束处理。动叶转速与气动性能分析一致,借以施加离心载荷。

1.3 自适应多目标差分进化算法

优化算法模块控制优化的进程,算法性能在很大程度上决定着优化设计的成败。本文全局优化算法中采用自适应多目标差分进化算法(self-adaptive

multi-objective differential evolution, SMODE)^[8]来控制优化进程。SMODE 是基于拥挤度距离的多样性保持方法、快速非支配排序和自适应机制,在差分进化算法的基础上针对多目标优化提出的优化算法。

2 优化结果与讨论

2.1 优化变量与目标函数

表 1 为优化的长叶片透平级的几何参数,表 2 为长叶片透平级气动和强度性能分析的边界条件和材料属性。在长叶片透平级的多学科设计优化过程中,选择比功率最大和最大等效应力最小作为目标函数,选择流量作为约束条件。比功率是单位质量工质的做功能力,其综合考虑了叶型损失、激波损失、次流损失以及余速损失的影响,能够很好地反映长叶片透平级的气动性能;最大等效应力是强度指标,其过大会导致材料损坏;流量变化范围在-3%~2%之间。长叶片透平级的优化目标函数和约束条件分别为

$$\max F(\gamma)=\max[F_1(\gamma),F_2(\gamma)]=\max[w,-\sigma_{\max}]$$
$$\text{s. t. } 0.97m_{\text{ref}}\leq m\leq 1.02m_{\text{ref}} \quad (1)$$

式中: γ 是设计变量; σ 是等效应力; m 是质量流量; $w=P/m$ 是比功率, P 是功率。

表 1 长叶片透平级的几何参数

参数	静叶	动叶
叶片数	48	86
转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	0	3 000
根径/mm	1 928	1 892
叶高/mm	876	1 029
中叶展直径/mm	2 804	2 921
中叶展节距/mm	183.5	106.7

表 2 长叶片透平级边界条件和材料属性

参数	数值
进口总焓/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	2 515.62
进口干度	0.952 2
出口静压/Pa	5 468.41
材料密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	7 930
弹性模量/GPa	196.86
泊松比	0.27

长叶片透平级静叶的设计变量基于叶根、中叶

展和叶顶 3 个截面在吸力面上的非均匀 B 样条的 5 个控制点,以及 2 个径向基叠规律控制点,共计 17 个控制点。动叶的设计变量基于沿叶高的 4 个特征截面在吸力面上的 6 个控制点,以及沿径向积叠的 2 个控制点,共计 26 个控制点。优化设计的长叶片透平级的设计变量总计 43 个。

2.2 优化结果与讨论

长叶片透平级的多学科设计的优化代数 为 100,在 24 核 96 GB 内存的超微工作站组成的并行计算机系统上完成优化设计。图 3 为长叶片透平级多学科优化设计的收敛历程。优化设计结果得到了 7 个 Pareto 解。本文分别选取比功率最大 D_1 、综合性能最优 D_2 和最大等效应力最小 D_3 这 3 个典型 Pareto 解与设计透平级参考叶型进行了对比分析。

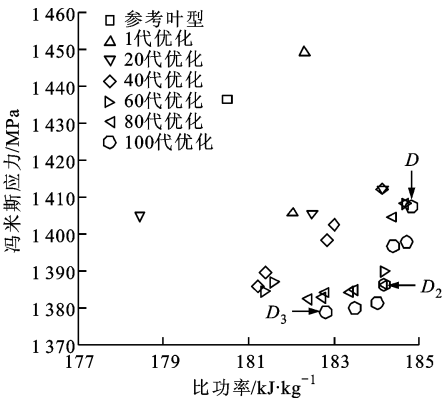
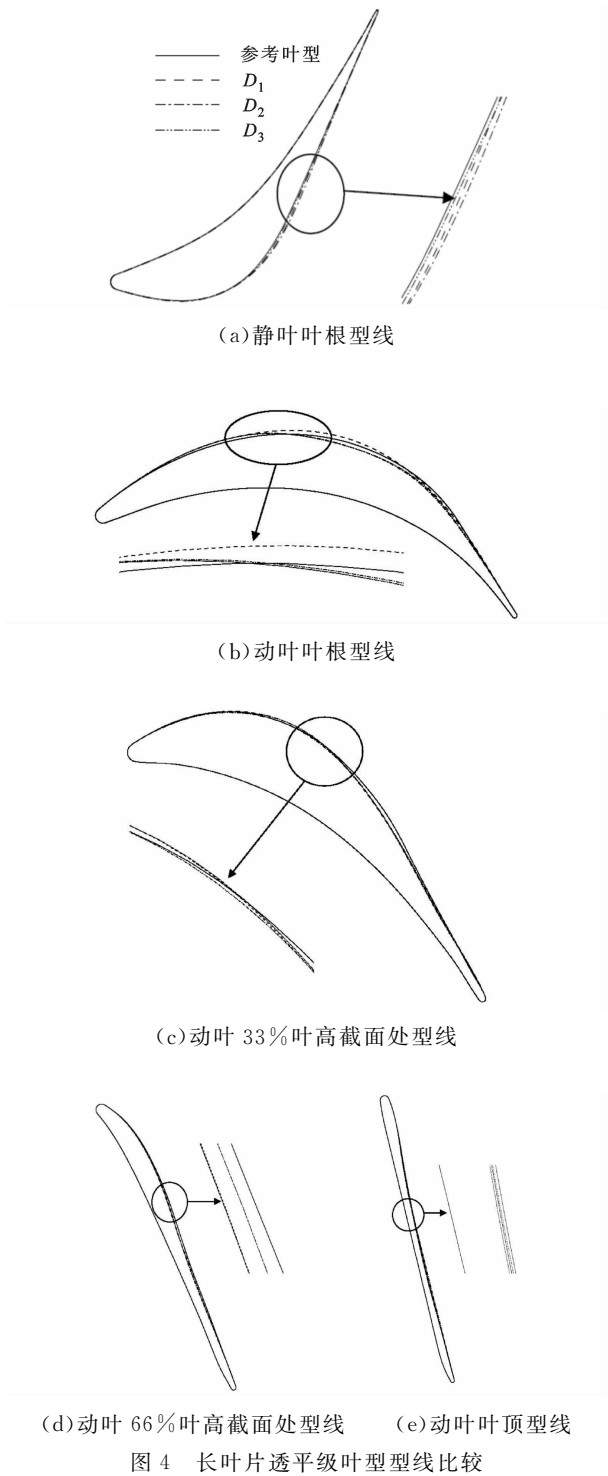


图 3 长叶片透平级多学科优化设计的收敛历程

图 4 为长叶片透平级静叶和动叶特征截面的参考叶型与 3 个典型 Pareto 解的对比。由于优化设计中静叶和动叶二维截面型线的控制点位于吸力面,所以透平级各截面型线的变化均在吸力面侧,而压力面无变化。与参考叶型相比,3 个 Pareto 解在静叶栅喉部的通流面积均减小,流量约束下静叶出口速度提高。

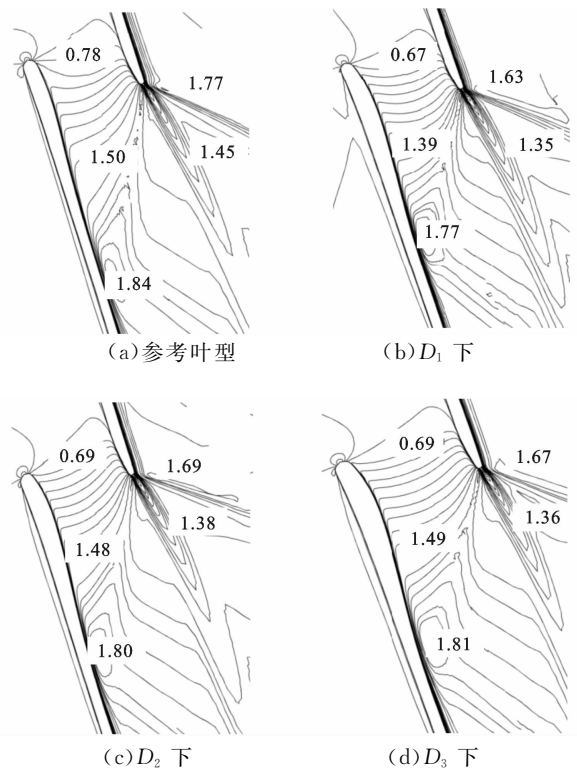
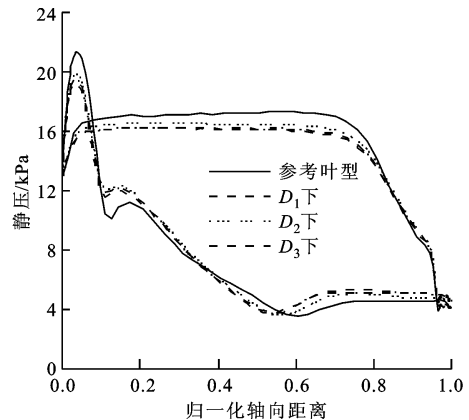
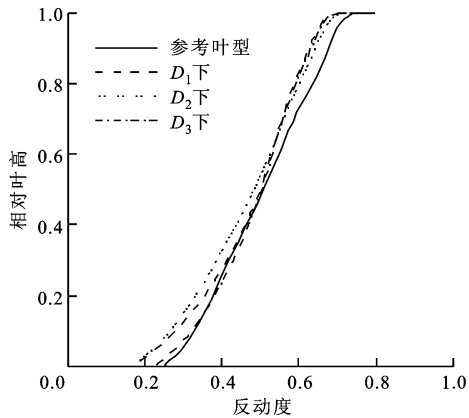
图 5 为反动度沿叶高的分布比较。反动度整体变动主要由优化前后静叶、动叶栅喉口面积比发生变化引起。相对于参考叶型,优化后 3 个 Pareto 解的反动度沿叶高均有所减小,特别在叶顶区域,透平级的做功能力提高。优化后叶根区域反动度最小,为 0.2,表明在小流量下,汽轮机的安全运行可以得到保障。顶部反动度的减小有利于降低长叶片顶部载荷(见图 6),有利于长叶片的安全运行,可以减少动叶泄漏损失,提高整级效率。

图 7 为动叶的参考叶型与优化叶型在 90% 叶高截面处的相对马赫数等值线分布比较。比较参考



叶型和 D_1 发现:叶栅通道进口马赫数有所降低;优化后在动叶 90% 叶高截面处,吸力面尾缘的斜激波强度相对于参考叶型有所减弱。

对于汽轮机末级长叶片,其出口气流直接进入排气缸且无法做功,因此降低末级余速损失是提高透平气动性能的重要手段。图 8 和图 9 分别为优化前后绝对出口气流速度及绝对出口气流角沿叶高的



分布。优化后绝对出口气流速度降低,特别是在 D_1 下,叶根区域和 40%~100% 叶高范围内,绝对出口气流速度下降明显。同时,优化前后的绝对出口气流角均保证在 $70^{\circ}\sim 110^{\circ}$ 的范围内,近似于轴向排气。

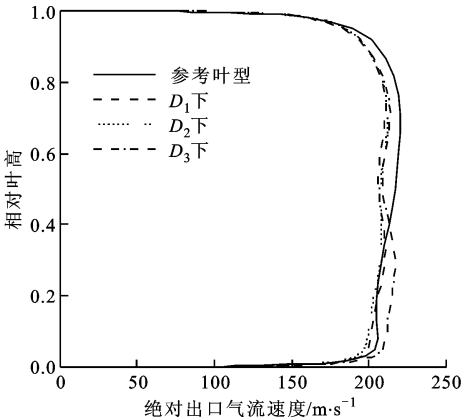


图 8 绝对出口气流速度沿叶高的分布

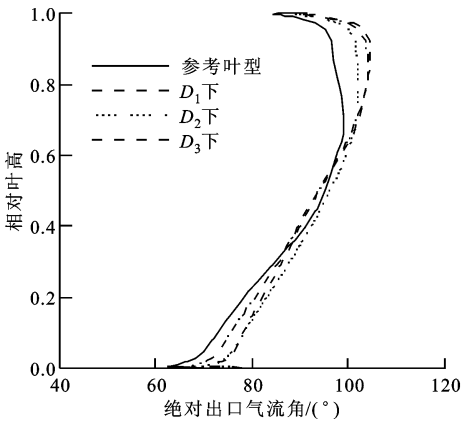


图 9 绝对出口气流角沿叶高的分布

图 10 为总静等熵效率沿叶高的分布。总静等熵效率定义如下

$$\eta = (H_{01} - H_{03}) / (H_{01} - H_{3ss}) \quad (2)$$

式中: H_{01} 是透平级进口总焓; H_{03} 是透平级出口总焓; H_{3ss} 是透平级等熵出口静焓。由于汽轮机末级出口气流不做功,因此余速损失对末级气动性能的影响很大。总静等熵效率可综合反映末级的气动性能,所以优化后动叶根区域和 40%~100% 叶高范围内气动性能表现优异,特别是在 D_1 下,主要原因是优化透平级的叶型损失和余速损失均得以减小。

图 11 为长叶片透平级动叶枞树形叶根的表面等效应力分布云图比较。参考叶型和 3 个 Pareto 解下的动叶叶根最大等效应力均出现在叶片压力面侧的第 1 级榫齿上表面靠近前缘之处。优化前后叶身表面应力分布差异较小,叶根表面应力分布得到

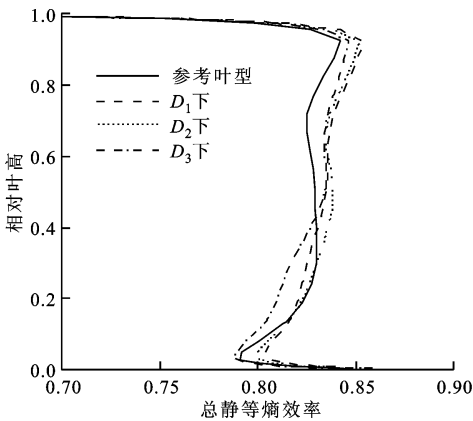
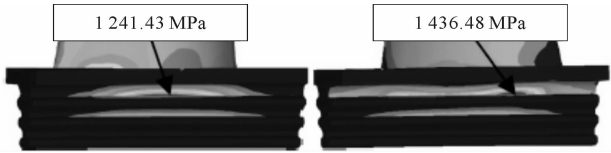
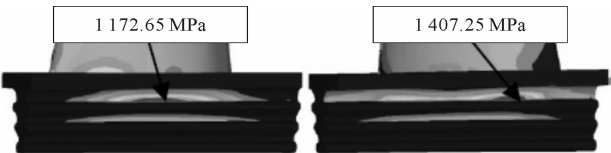


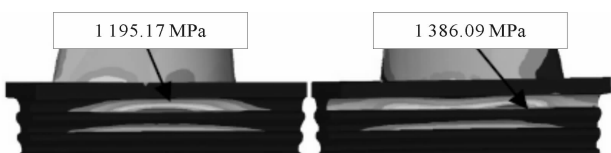
图 10 总静等熵效率沿叶高的分布



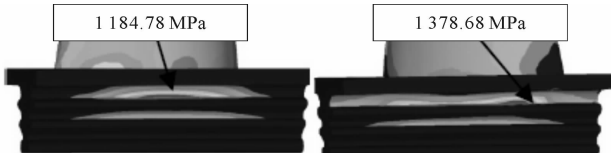
(a)参考叶型



(b) D_1 下



(c) D_2 下



(d) D_3 下

图 11 长叶片透平级动叶枞树形叶根的表面等效应力分布云图比较

了改善。4 种设计下的等效应力分布大体一致,最大等效应力逐渐减小,优化后最大等效应力明显降低。

参考叶型和 3 个 Pareto 解下的叶片气动和强度性能比较如表 3 所示。从表 3 可见:3 个 Pareto 解下的气动和强度性能均明显提高, D_1 下的总静等熵效率提高了 1.31%,比功率提高了 2.39%,出口

气流速度降低了 3.13%，总体气动性能表现最好； D_3 下的最大等效应力降低了 4.02%，平均应力降低了 3.41%，总体强度性能表现最好； D_2 下的全局性能处于 D_1 和 D_3 之间，均优于参考叶型。 D_1 、 D_2 和 D_3 下的流量均处于约束范围之内。

表 3 参考叶型与 3 个 Pareto 解下的叶片气动和强度性能比较

性能参数	参考叶型	D_1 下	D_2 下	D_3 下
总静等熵效率/%	82.68	83.76	83.51	83.24
总静等熵效率相对变化/%	0.00	1.31	1.00	0.68
比功率/ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	180.49	184.81	184.17	182.81
比功率相对变化/%	0.00	2.39	2.04	1.29
出口气流速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	203.70	197.32	197.46	200.75
出口气流速度相对变化/%	0.00	-3.13	-3.06	-1.44
流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	87.02	84.40	84.58	85.51
流量相对变化/%	0.00	-3.00	-2.80	-1.74
最大应力/MPa	1 436.48	1 407.25	1 386.09	1 378.68
最大应力相对变化/%	0.00	-2.03	-3.51	-4.02
平均应力/MPa	198.42	203.19	189.72	191.65
平均应力相对变化%	0.00	2.40	-4.38	-3.41

3 结 论

结合自适应多目标差分进化算法、叶片参数化方法和气动与强度性能评价方法，建立了汽轮机长叶片透平级多学科多目标优化设计系统，完成了以比功率最大和等效应力最小为优化目标的长叶片透平级优化设计，比较分析了参考叶型与 3 个典型 Pareto 解下设计的气动性能和等效应力。在长叶片透平级多学科多目标优化设计得到的 3 个典型的

Pareto 解下的气动性能和等效应力强度性能均优于参考叶型，从而验证了本文发展的长叶片透平级多学科设计系统的实用性和有效性。

参考文献：

[1] 谢永慧, 张荻. 复杂阻尼结构汽轮机末级长叶片寿命评估相关研究进展及展望 [J]. 汽轮机技术, 2007, 49(6): 401-405.
XIE Yonghui, ZHANG Di. Review and prospect for life of last stage blade with complex damper in steam turbine [J]. Turbine Technology, 2007, 49(6): 40-405.

[2] CHEN B, YUAN X. Advanced aerodynamic optimization system for turbomachinery [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 021005.

[3] OKSUZ U, AKMANDOR I S. Multi-objective aerodynamic optimization of axial turbine blades using a novel multilevel genetic algorithms [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2010, 132(4): 041009.

[4] BONAIUTI D, ZANGENEH M. On the coupling of inverse design and optimization techniques for the multiobjective, multipoint design of turbomachinery blades [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2009, 131(2): 021014.

[5] JARRELT J P, DAWES W N, CLARKSON P J. An approach to integrated multi-disciplinary turbomachinery design [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2007, 129(3): 488-494.

[6] LUO C, SONG L, LI J, et al. A study on multidisciplinary optimization of an axial compressor blade based on evolutionary algorithms [J]. ASME Journal of Turbomachinery, 2012, 134(4): 054501.

[7] SENOO S, OGATA K, NAKAMURA T, et al. Three-dimensional design method for long blades of steam turbines using fourth-degree NURBS surface, GT2010-22312 [R]. New York, USA: ASME, 2010.

[8] SONG Liming, LUO Chang, LI Jun, et al. Automated multi-objective and multidisciplinary design optimization of a transonic turbine stage [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2012, 226(2): 262-276.

(编辑 苗凌)