

多级涡轮三维气动优化设计的可行性分析与实现

赵洪雷, 王松涛, 韩万金, 冯国泰

(哈尔滨工业大学 能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要: 多级涡轮三维气动优化设计由于计算量大、计算时间长、变量样本空间过于庞大, 在实践中往往设计周期长, 且难以有效实现。随着计算机硬件和计算软件的发展, 计算能力已经大为改善, 多种设计方法亦实现了有效融合。大力开展多级涡轮三维气动优化设计研究, 将传统设计方法与现代自动优化设计方法相结合是解决前述困难, 实现多级涡轮优化设计的一个有效途径。文中分析了将准三维设计和多级局部优化联合实现多级涡轮三维设计的可行性, 给出了一个多级涡轮气动优化设计流程。准三维设计主要是 S2 流面正问题计算, 通过准三维设计进行初步设计, 初步提高性能, 确定总体参数, 为下一步的优化设计打下基础。然后采用多级局部优化设计, 多级局部优化过程使用 Numeca/design 3D 软件, 优化联合采用人工神经网络和遗传算法, 通过提高局部性能来提高总体性能。流场计算采用全三维粘性流 $N-S$ 方程求解, 并以一个 3 级涡轮和一个 4 级涡轮为例, 说明此方法的可行性。

关 键 词: 叶轮机械; 多级涡轮; 气动优化设计; 准三维设计; 设计流程; 遗传算法; 人工神经网络

中图分类号: TK402 文献标识码: A

引 言

对于叶轮机械, 气动设计是其设计核心, 没有高水平的气动设计就没有高水平的性能。涡轮气动设计大致经历了基元、准三维、单列三维和多级三维设计 4 个阶段。近年来, 大量采用自动优化设计提高叶轮机械性能。例如: Andrea 等人采用 CFD 分析和优化技术对高升力涡轮叶栅进行设计^[1]。Martina 等人对超低展弦比跨音涡轮静叶进行优化设计来减少二次流动^[2]。但对于将现代优化设计方法引入三维设计对多级涡轮进行三维气动优化设计的研究, 目前还很少见到这方面的文献。

本文分析了多级涡轮三维优化设计面临的困难及解决的可能性, 给出一个实现多级涡轮气动优化设计的设计流程, 并以两个多级涡轮为例说明此方

法的可行性。

1 多级三维优化设计面临的困难

多级涡轮三维优化设计主要面临的困难是设计周期长, 这主要由以下 3 个方面造成:

(1) 流场数值计算量大: 由于多级涡轮叶列数较多, 每一叶列生成三维网格后造成网格总数较大, 使每一次数值模拟计算量很大;

(2) 流场数值计算时间长: 由于多级涡轮叶列数较多, 每次流场计算收敛需要较多的迭代步数, 而优化设计需要进行多次数值模拟, 所以造成计算时间过长;

(3) 变量样本空间庞大: 由于多级涡轮叶列数较多, 参数化后, 每列叶栅至少需要上百个变量描述, 总变量达几百个, 直接进行自动优化需要极其庞大的样本空间, 优化算法和流场计算量均太大, 并且过大的样本空间使优化无法正常进行。

2 多级三维优化设计的实现

针对以上困难采取以下方法进行解决:

(1) 随着计算机硬件和计算软件的发展, 以及并行计算的使用, 计算能力得到显著提高;

(2) 流场数值计算时, 采用粗细网格交替的方法, 可以大大减少计算量。具体为优化过程中采用粗网格进行流场计算, 最后对优化结果用细网格进行校核;

(3) 流场数值计算时, 采用以相近几何条件的收敛解作为初场进行计算, 使迭代收敛步数明显减少, 大为减少流场计算时间;

(4) 通过合理结合不同设计方法的优点来解决多级设计的困难, 实现多级优化设计, 这是最为主要的方法。本文给出一个多级涡轮气动优化设计流

程,将传统设计方法与现代优化设计方法结合,首先应用准三维设计进行初步设计使总体参数分布尽量合理,再采用现代优化设计方法进行多级局部优化,每次优化只需调整相对较少的变量,样本空间大为减少,需要的流场模拟和优化算法的计算时间均大为减少。

3 多级涡轮气动优化设计流程

3.1 优化流程

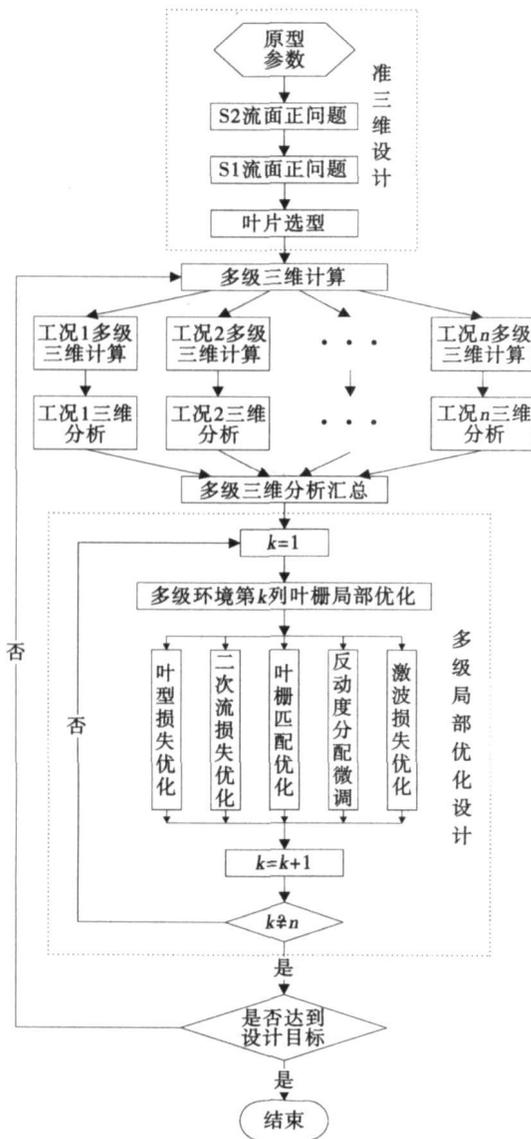


图1 多级涡轮三维气动优化设计流程示意图

图1为优化设计流程示意图。由于设计一般为改型设计或有相关设计作为参考设计,所以准三

维设计由原型(或参考设计)参数出发直接进行S2流面正问题计算。计算采用哈工大S2流面正问题程序,主要功能是计算S2流面参数,分析参数沿叶高分布是否合理与确定流量、功率、效率等总体参数。接着进行S1流面正问题设计,采用Fluent软件,对每列叶片根中顶截面进行分析,然后进行叶片选型。采用准三维设计进行初步设计,使参数分布尽量合理,可以在较短的时间内初步提高总体性能,并为优化打下基础。然后采用多级环境下的三维局部优化,每次只对某一列叶栅进行局部优化,只调整此列叶栅的部分变量,使样本空间尽量小,优化得以有效进行,并且可以在较短的时间内完成,这部分是设计中最重要和最困难的部分。首先对准三维设计结果进行三维计算和分析,若为多工况设计,分别进行计算和分析,再将分析结果汇总。根据分析结果,逐次对各列叶栅进行多级环境下的局部优化,各列叶栅均优化后,第一轮局部优化结束,若达到设计目标,优化结束,否则,对第一轮结果再次进行三维计算和分析,然后根据分析结果进行第二轮局部优化,如此循环,直到达到设计目标。对于每列叶栅进行优化时,根据分析结果,此列叶栅中可能分别存在较大的叶型损失、二次流损失、叶栅匹配损失、激波损失,以及反动度分配不合理等的一项或者几项,可以分别或者组合对它们进行优化。优化目标为效率最大,同时亦控制流量变化不大。若为多工况设计,需各个工况效率最大,为多目标优化问题,根据各子目标的重要程度,通过给赋予不同权重来实现多目标优化,各个子目标均采用罚函数的方法控制效率为最优。

3.2 叶型参数化

子午流道由多义线表述,优化时不改变子午流道。对于动静叶,均由7个截面重叠而成,每个截面采用压力面和吸力面的方法描述,它们均以与中弧线的相对位置来表述。中弧线采用二阶贝塞尔曲线描述,通过安装角、进口几何角、出口几何角表述。压力面和吸力面采用贝塞尔曲线,在吸力面上分布5个控制点,在压力面上分布4个控制点,它们连同前缘、尾缘半径,尾缘楔形角控制点共同控制各截面的叶型,每个截面有15个独立变量,每列叶片共有105个变量。空间积叠方式,静叶采用前缘积叠,动叶采用重心积叠,可以基本保证强度性能满足要求。径向和周向的积叠线形式均采用两端为贝塞尔曲线,中间为直线的组合方式描述,径向有15个独立变量,周向有7个独立变量。所以每列叶片共有127

个变量。多级局部优化时一般不改变积叠方式, 所以共有 105 个变量。

3.3 优化方法

与叶轮机械设计相关联的优化问题通常涉及到许多约束和大量参数, 一般导致目标函数有许多极值点。目前常用的优化方法有: 遗传算法, 模拟退火, 基于梯度法等。其中遗传算法和基于梯度法使用最广泛, 基于梯度法可以有效收敛, 但不能确保产生全局最佳效果^[3]。遗传算法虽然有利于达到全局最佳效果, 但可能需要上千步迭代计算^[4], 直接与三维 $N-S$ 求解器进行耦合, 计算量过大, 不宜直接采用, 需要与其它方法联合使用。本文优化采用 Numeca/Design 3D 软件, 其优化技术基于函数近似的概念, 将人工神经网络和遗传算法联合使用, 主要优化思想是: 用人工神经网络代替流动求解方法执行连续设计估算, 它允许以有效的方式使用遗传算法^[5]。近似模型的目的是为了具有一个能够估算叶片气动性能的快速方法, 该估算过程应该尽可能地快, 并且尽可能精确地模拟由高精度 CFD 模型计算的真实叶片性能。该方法需要有包含多个叶片几何形状及其相应气动性能的数据库。采用优化算法计算出近似模型的适应值, 且仅对该取样进行 CFD 计算, 并将该取样几何参数及 CFD 结果存入数据库, 然后过程继续。随着在每一设计循环后数据库中取样数的增加, 近似模型会变得越来越精确, 将很快找到较好的叶片形状。

近似模型是采用人工神经网络来构造的。人工神经网络由若干称作节点的基本处理单元构成, 这些节点安排在各层上, 与被称作权重值的不同强度连接在一起, 构造成平行结构。网络通常由几层构成: 输入层、一个或若干隐层和输出层。输入向量的每个元素在第一层上通过权重值矩阵与每个节点相连, 每个节点对加权输入及偏差进行求和, 构成它自己的标量输出, 其结果由传递函数进行处理, 信息以同样的方式传播到下一层直至输出层。网络的学习过程是寻找连接权值和偏差, 从而得到与规定的输出相一致的实际输出。在训练的数据库中, 必须有成对的输入和输出向量, 以便网络能够学会预测, 经过训练的网络对于从没见过的输入能够给出合理的输出。因此, 通过具有代表性的成对输入与输出训练网络并获得好的结果是可能的, 而不是用所有成对的输入和输出训练网络。最普遍的学习算法称做“逆误差传播学习”, 第一步是用小的随机数初始化权值和偏差系数, 然后第一个训练取样的输入向量

被表示在网络的输入上, 接着信息传播到输出层。通常, 网络预测的输出向量与所期望的预输入向量相对应的实际输出向量不符合。网络预测的输出向量与所期望的输出向量之间的误差向后传播直到网络的输入层, 该误差用来调整连接权以减小误差。为实现学习过程, 要有一组输入向量和输出向量, 并表示在网络的输入上。对每一训练组, 重复输入和输出向量的表示及权值的修正过程直至达到收敛。神经网络的精度通过计算神经网络预测的输出和训练数据库中提取的目标输出之间的误差值来衡量。

4 算例

采用上述方法分别对一个 3 级涡轮和一个 4 级涡轮进行三维气动优化设计。

4.1 流场计算

图 2 为第一级网格示意图, 网格采用 HOH 型网格, 即入口、出口段采用 H 型网格, 叶片域采用 O 型网格。表 1 为优化和校核用网格

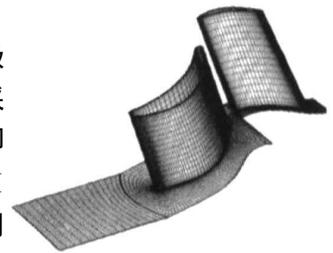


图 2 第一级网格示意图

汇总。流场计算采用定常计算, 湍流模型为 Spalart-Allmaras 模型, 空间离散采用二阶迎风格式。边界条件为进口给定总压、总温、气流方向, 出口给定静压, 壁面给定无滑移边界条件。

表 1 计算网格

	进口段	各列叶栅	出口段
类型	H	O	H
优化	33×33×17	21×33×173	45×33×17
校核	33×73×17	25×73×185	45×73×17

4.2 3 级涡轮

此 3 级涡轮有两个相差较大的主要工况, 设计时要同时考虑, 所以采用多工况优化设计。优化用粗网格总数为 763 092, 校核用细网格总数为 2 127 512。

4.2.1 总体性能

优化改型设计后, 与原型相比, 总效率分别提高了 1.01% 和 1.15%, 流量和功率变化很小, 性能更优, 其中流量和功率给出的是与原型的相对值, 如表 2 所示。

表 2 3 级涡轮总体性能汇总

		效率/%	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	功率/MW
工况 1	原型	92.55	1.000 0	1.000 0
	改型	93.56	0.997 2	0.997 5
工况 2	原型	92.38	1.000 0	1.000 0
	改型	93.53	1.011 6	0.999 1

4.2.2 性能分析

图 3 为第三级动叶的能量损失系数沿叶高的分布,图 4~图 6 分别为第三级动叶顶部(约 90%叶高),中部(约 50%叶高),根部(约 10%叶高)截面表面静压分布,其中静压采用相对值。图中 ori_l 和 opt_l 分别表示原型和优化改型在工况 1 的结果,ori_h 和 opt_h 分别表示原型和优化改型在工况 2 的结果。可以看出,不论是原型还是改型,两工况的表面静压分布都相差较大,必须采用多工况设计。改型后叶顶的进口冲角改善明显,进口段的最低压力点的压力值增大,进口段的横向压力梯度减少,二次流损失和叶型损失均减小。改型后叶展中部的最低压力点的压力值增大,平均压力提高,但进口冲角有所

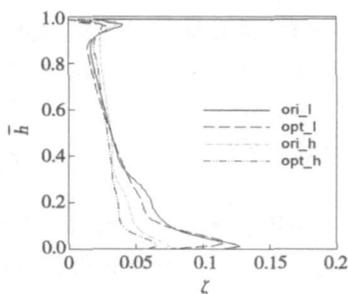


图 3 第三级动叶能量损失系数

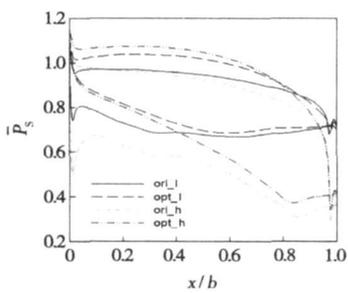


图 4 第三级动叶顶部表面静压

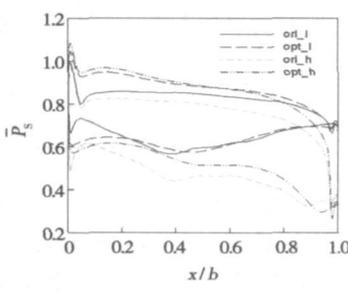


图 5 第三级动叶中部表面静压

恶化,所以损失变化不大。改型后叶根最低压力点的压力值增大,进口段的平均压力提高,二次流损失和叶型损失均减小,虽然冲角略有恶化,但总损失减少,这与图 3 的能量损失系数沿叶高分布相符。其

它各列分析情况与之类似。

4.3 4 级涡轮

此 4 级涡轮为高负荷低压涡轮,叶型负荷饱满,流场分离相对较大,设计难度大,优化用粗网格总数为 1 199 742,校核用细网格总数为 2 829 042。

4.3.1 总体性能

优化改型设计后,与原型相比,总效率提高了 0.70%,流量和功率变化不大。性能更优,其中流量和功率给出的是与原型的相对值,如表 3 所示。

表 3 4 级涡轮总体性能汇总

	效率/%	流量/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	功率/MW
原型	89.77	1.000 0	1.000 0
改型	90.47	0.995 3	0.992 3

4.3.2 性能分析

图 7 为第三级静叶的能量损失系数沿叶高的分布,图 8~图 10 分别为第三级静叶顶部(约 95%叶高),中部(约 50%叶高),根部(约 5%叶高)截面表面静压分布,其中静压采用相对值。图中 ori 和 opt 分别表示原型和优化改型结果。可以看出改型后,叶根、叶展中部和叶顶的进口冲角均减少,冲角损失减少,最低压力点的压力值均增大,平均压力提高,进口段的横向压力梯度减少,出

图 7 第三级静叶能量损失系数

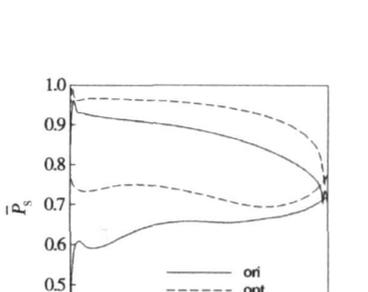


图 8 第三级静叶顶部表面静压

口段逆压梯度段和逆压梯度均减少,二次流损失和叶型损失均减小,这与图 7 的能量损失系数沿叶高分布相符。其它各列

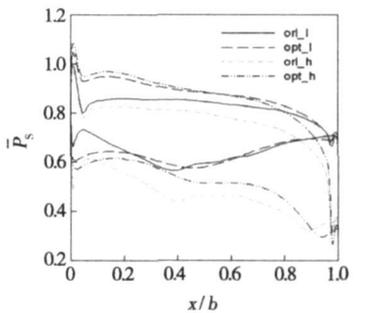


图 6 第三级动叶根部表面静压

分析情况与之类似。

5 结 论

分析了多级涡轮三维优化设计面临的困难和解决方法, 说明如何实现多级涡轮的三维优化设计, 可以得出如下结论:

(1) 虽然多级涡轮三维优化设计存在许多困难, 但是随着计算机硬件和计算软件的发展, 采用合理的设计方法和设计流程可以实现多级涡轮的三维优化设计。

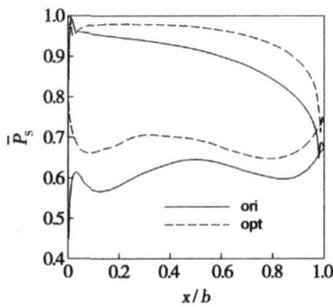


图 9 第三级静叶中部表面静压

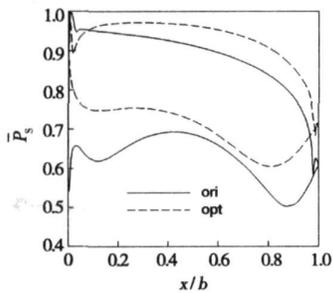


图 10 第三级静叶根部表面静压

(2) 使用准三维设计和现代自动优化设计联合的多级涡轮优化设计流程可以在减少人力和计算时间的情况下完成多级涡轮三维优化设计。

(3) 优化过程采用粗网格进行流场计算, 对优化结果在细网格上进行校核的方法可以在保证设计要求的情况下, 大大减少计算时间, 提高优化效率。

参考文献:

- [1] ANDREA ARNONE, DUCCIO BONAIUTI, ANTONIO FOCACCI, et al. Parametric optimization of a high-lift turbine vane[J]. ASME GT 2004-54308, 2004.
- [2] MARTINA HASENJAGER, BERNHARD SENDHOFF, TOYOTUKA SONODA, et al. Three dimensional aerodynamic optimization for an ultra low aspect ratio transonic turbine stator blade[J]. ASME Paper GT2005-68680, 2005.
- [3] VANDERPLAATS G N. Numerical optimization techniques for engineering design[M]. New York: McGraw-Hill, 1984.
- [4] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, Optimization and machine learning[M]. Boston: Addison Wesley Professional, 1989.
- [5] AIAIN DEMEULENAERE, ALBAN LIGOUT, CHARLES HIRSCH. Application of multipoint optimization to the design of turbomachinery blades[J]. ASME GT 2004-53110, 2004.

(编辑 伟)

新技术

高性能的新颖轴承和密封

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2006 年 12 月号报道, 新轴承采用钢环和轴承等级氮化硅(Si_3N_4)滚动件。这些混合式轴承显示了满足燃气轮机要求的所有特性, 具有比普通轴承更高速的能力, 坚固的结构导致比全钢轴承更长的使用寿命, 并具有优异的电绝缘等级。

因为氮化硅的密度只是轴承钢密度的 40%, 所以这种新型轴承的滚动件比普通设计的重量更轻、惯性更小, 这导致较低的保持架应力和高转速下更低的摩擦。

氮化硅滚动件具有比钢滚动件更低的热膨胀, 导致对轴承内的温度梯度较不敏感和更精确的预加载控制, 使得轴承特别适于柴油机和燃气轮机所经受的高温运行。

由于氮化硅具有比钢更高的硬度和更高的弹性模数, 轴承具有增加的刚性和在污染环境下更长的使用寿命。

为了使轴承经受更高的运行温度并保护轴承免受污染, 已经研制出新一代的密封。这些密封使用了最新的工程塑料, 诸如 PTFE(聚四氟乙烯)和 FKM(氟橡胶)。

即使在苛刻的环境条件下, 这些密封也提供了极好的耐磨损特性, 并可以承受高达 200 °C 的工作温度。

(吉桂明 供稿)

大型燃气涡轮叶片冷却技术= **Blade Cooling Technology of Heavy-duty Gas Turbines**=[刊, 汉]/ZHANG Xiao-wei, ZHU Hui-ren (College of Power and Energy Source, Northwestem Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2008, 23(1). —1~6

In recent years heavy-duty gas turbine performance has undergone a continuous improvement. To further reduce the consumption of effective gases, the authors have proposed a steam-mist two-phase flow cooling scheme, under which turbine blades are cooled by mist-and-steam dual working media instead of air. The scheme in question has become the focus of study with each passing day. A great deal of research shows that the steam-mist cooling method enjoys a variety of merits, such as quick cooling, high cooling efficiency, small flow resistance and simple configuration etc., which will play a major role in the cooling of turbine blades of next-generation high performance gas turbines. A numerical simulation of the cooling process in an impingement gas-film structure has identified a significantly higher average cooling efficiency with the low temperature zone being extended remarkably. **Key words:** gas turbine blade, blade cooling technology, steam cooling, steam mist cooling

预旋对迷宫密封内流动传热特性影响的研究= **A Study of the Influence of Inlet Pre-swirl on Flow and Heat Transfer Characteristics of a Labyrinth Seal**[刊, 汉]/YAN Xin, LI Jun, FENG Zhen-ping (Turbomachinery Research Institute, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2008, 23(1). —7~10

By adopting a three-dimensional periodical model, a study was conducted of the flow and heat transfer characteristics of a labyrinth seal with a transpiration-type smooth surface. As a result, obtained was the variation relationship of the windage-heat coefficient of the labyrinth seal with circumferential mach numbers under two different flow rates with and without an inlet pre-swirl. The relationship in question was compared with that obtained from experimental values, empirical formulae and two-dimensional axially-symmetric models. It has been found that the above model can simulate relatively well the heat transfer characteristics of the labyrinth seal incorporating an inlet pre-swirl. Under a same flow rate and same inlet pre-swirl ratio, the windage heat coefficient will increase with an increase of rotating speed. At a same flow rate and rotating speed, the imposition of an inlet pre-swirl can significantly lower the total temperature rise in the labyrinth seal and reduce the windage heat coefficient, but will not influence the velocity field on a meridian plane. Under the condition of a same rotating speed and inlet pre-swirl ratio, an increase of the flow rate will lead to a decrease of the windage heat coefficient and an increase of the velocity on a meridian plane. The structure of the flow field, however, will not change. **Key words:** labyrinth seal, inlet pre-swirl, windage heat coefficient, numerical simulation

多级涡轮三维气动优化设计的可行性分析与实现= **Feasibility Analysis and Realization of a Three-dimensional Aerodynamic Optimization Design for a Multi-stage Turbine**[刊, 汉]/ZHAO Hong-lei, WANG Song-tao, HAN Wan-jin, et al (College of Energy Science and Engineering Harbin Institute of Technology, Habrin, China, Post Code: 150001)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2008, 23(1). —11~15

Due to the massive computation load and time as well as an excessively huge variable-sample database space specific to the three-dimensional aerodynamic optimization design of a multi-stage turbine, a long design cycle often results, which is difficult to cope with effectively in practice. With the development of computer software and hardware the computation ability of computers has seen a dramatic improvement. As a result, an effective integration of varied design methods has been implemented. A vigorous development of the three-dimensional aerodynamic optimization-design study of a multi-stage turbine, which combines a traditional design method with that of a modern automatic optimization design, represents an effective approach for overcoming the above-mentioned difficulties and realizing an optimization design of the turbine in question. The feasibility for combining a quasi-three-dimensional design with the multi-stage local optimization to realize a three-dimensional design of the turbine was analyzed with the aerodynamic optimization design process of the turbine being given. The quasi-three-dimensional design mainly involves a direct problem computation of stream surface S2. Based on the design in question, a preliminary design was performed for improving performance and detemining the overall parameters, thus setting the stage for a further optimization design. Then, by employing a multi-stage local optimized design and

process, Numeca/design 3D software was used. By an optimized joint employment of an artificial neural network and a genetic algorithm, the general performance can be enhanced by way of an increase in localized performance. The flow field thus involved was calculated by seeking a solution for the full three-dimensional viscous flow N-S equation. Moreover, the authors have verified the feasibility of the method under discussion with a three-stage turbine and a four-stage one serving as examples. **Key words:** turbo-machinery, multi-stage turbine, aerodynamic optimization design, quasi three-dimensional design, design flow path, genetic algorithm, artificial neural network

涡轮静叶栅二次流的数值模拟 = **A Study of the Numerical Simulation of Secondary Flows in Turbine Stator Cascades** [刊, 汉] / LI Jun, SU Ming (Education Ministry Key Laboratory on Turbo-machinery and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China, Post Code: 200030) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 16 ~ 20

By adopting CFD (computational fluid dynamics) Software Fluent a numerical solution for the three-dimensional flows in turbine stator cascades featuring a big turning angle has been achieved. The secondary flows along the flow direction on various sections of the cascade and its aerodynamic characteristics were analyzed along with an investigation of the influence of any change in blade height and inlet incidence on cascade secondary flows. It has been found from the calculation results that the intensity of the secondary flows, which move from the cascade pressure surface to the suction one, increases gradually along the flow direction, giving rise to the continuous consolidation of the boundary layer on endwall near the suction surface and also a curling-up at the rear portion. Moreover, the foregoing also has led to a drastic change of the total pressure loss coefficient and the outlet flow angle along the blade height. A comparison of the various cascade operating conditions shows that a decrease of blade height and an increase of incidence will drastically increase the cascade secondary-flow losses, the intrinsic cause of which invariably lies in the expansion of the area occupied by the secondary flows in the cascade passage. **Key words:** secondary flow, turbine, stator cascade, numerical simulation

转子物性对超临界汽轮机启动热应力的影响 = **The Influence of Rotor Physical Property on Thermal Stresses in a Supercritical Steam Turbine during its Startup** [刊, 汉] / LIU Yan-feng, HAO Run-tian, GAO Jian-qiang, et al (College of Energy Source and Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 21 ~ 23

In most cases steam turbine rotors are made of 30CrMoV low carbon alloy steel, the physical property parameters of which change significantly with temperature. The model established for calculating rotor thermal stresses has taken into account the influence of the temperature-dependent change of rotor-material physical property. Through a simulation test, analyzed was the variation tendency of rotor thermal stresses in a domestically-made 600 MW supercritical steam turbine under the following four start-up operating conditions, namely, cold-state, warm-state, hot-state and extremely-hot-state. Moreover, the tendency in question was compared with that obtained from a thermal-stress model featuring a rotor of constant physical property. It has been shown that the change of rotor material physical parameters with temperature will significantly influence the magnitude of the start-up thermal stresses. The above finding can provide a helpful reference for enhancing the calculation accuracy of an on-line monitoring model involving turbine-rotor thermal stresses. **Key words:** steam turbine rotor, physical property, thermal stress, model

凝汽器运行状态的物元模型及可拓评价方法 = **An Object-element Model for Depicting the Operating States of a Condenser and its Extensible Evaluation Method** [刊, 汉] / LU Xu-xiang, LI Lu-ping (College of Energy Source and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha, China, Post Code: 410076) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(1). — 24 ~ 27

On the basis of establishing indexes for evaluation of the operating states of condensers, presented was an extensible method for the above evaluation in the light of diversity and fuzziness of the evaluation indexes. The proposed method was based on an object-element model and extensible correlation functions. In combination with currently available literature