

跨音速透平叶栅多目标优化设计

西安交通大学 童彤* 丰镇平

【摘要】 本文在应用二维 Euler 方程及边界层方程相结合的跨音速粘流的计算方法基础上,以叶栅损失和做功能力为目标函数,采用无量纲化的多目标最小偏差法构造统一函数,然后采用可变容差法进行优化求得较为满意的解,从而形成了一种带有多混合变量、多约束以及多目标的跨音速叶栅优化设计方法。

主题词: 跨音速透平 叶栅 多目标 优化

分类号: V 235 TB 21

1 引言

透平叶栅的气动设计技术是透平机械设计的重要部分,它直接关系到透平效率、功率甚至其运行的安全可靠。由于透平叶栅内部流动的复杂性,要进行优化设计难度很大。目前,对于优化设计的具体问题来说,都是针对某一性能参数进行单一目标的优化^[1]。但应看到:在现代工程设计中,往往会提出许多设计要求,此时单凭一个指标难于判断设计质量的优劣,而必须同时综合考虑多方面指标,因此涉及到多目标优化的问题^[2,3]。本文设计了一种应用多目标最小偏差法及可变容差法,结合跨音速叶栅粘流计算的方法来进行跨音速透平叶栅的气动多目标优化设计,并对两个典型叶栅进行了以气动损失和做功能力为目标函数的两目标优化设计,旨在为工程设计人员提供一种多目标优化设计手段,推动多目标优化方法在工程设计中的应用。

2 多目标优化设计方法

一般多目标优化设计数学模型为:

$$V = \begin{cases} \min & F_1(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_l(x)]^T \\ \max & F_2(x) = [f_{l+1}(x), f_{l+2}(x), \dots, f_m(x)]^T \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g_j(x) \geq 0, j = 1, 2, \dots, p; \quad h_k(x) = 0, k = 1, 2, \dots, q; \quad x \in R^n$$

其中, $f_1(x), f_2(x), \dots, f_l(x)$ 为 l 个极小化目标函数; $f_{l+1}(x), f_{l+2}(x), \dots, f_m(x)$ 为 $m-l$ 个极大化目标函数; $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为设计变量。由此可看到,多目标优化问题与通常的单目标优化问题本质区别在于,前者的目标为一向量函数。因此,在多目标优化过程中,往往要比较这些向量函数的“大小”,为此通常引入一个“有效解”,即 Pareto 最优解的概念^[2]。

对于多目标优化问题,人们设法求解的既是问题的有效解(或弱有效解),又是在某种意义

下令决策者满意的解。根据问题的特点以及决策者的意图,构造一个统一目标函数:

$$\tilde{F}(x) = \tilde{F}[f_1(x), f_2(x), \dots, f_m(x)] \quad (2)$$

采用不同形式的统一目标函数可求得不同意义的解,并对应于不同的求解方法。本文采用最小偏差法,取统一目标函数为:

$$\min \tilde{F}(x) = \sum_{i=1}^l \frac{f_i(x) - f_i^*}{f_i' - f_i^*} + \sum_{j=l+1}^m \frac{f_j^* - f_j(x)}{f_j^* - f_j'} \quad (3)$$

其中, f_i^* 和 f_j^* 分别表示对应于极小化目标函数 $f_i(x)$ 与极大化目标函数 $f_j(x)$ 单个目标最优解的相应函数值; f_i' 和 f_j' 分别表示对极小化目标函数 $f_i(x)$ 的最大期望值与对极大化目标函数 $f_j(x)$ 的最小期望值。其特点在于仅需要分析和决策者的局部信息,即各个目标函数的最优解,而无需知道其相对重要性。每个目标采用的分式偏差均为对应目标函数值和最优解的差与最大偏差的比值。用统一目标函数,可将多目标优化问题归结为求解相应的单目标优化问题。

在此基础上,我们采用可变容差法(Flexible Tolerance Method)进行单目标优化^[3]。其基本思想是把多个约束条件的优化问题简化为一个单约束的问题,在可行域和近乎可行域中探索最优点。随着向最优解的逼近,逐步加强对近乎可行点的约束破坏量的限制,即缩小容差准则,从而缩小近乎可行域,直到最后都收缩到一可行点时才会被接受为止。其优点在于在迭代初期,约束条件不须严格得到满足,减少了迭代时间;此外可采用容差准则小于某一计算精度作为停止迭代的标准。特别值得注意的一点是,若设计变量中包括有离散变量时,优化过程中可先将所有离散变量按连续变量处理,然后采用邻近搜索法,在所得的离散变量连续解附近选取一定量的离散值之后,再在此基础上进一步优化。

3 跨音速透平叶栅粘流计算方法

本文对跨音速透平叶栅设计计算方法采用无粘流与边界层迭代技术。在无粘流场计算中,采用 Denton 提出的改进型时间推进有限体积法^[4]。对于平面叶栅来说,则转化为二维 Euler 方程的时间推进有限面积法进行流场计算。

在无粘流场计算基础上,采用积分法计算边界层:其中层流区域,应用 Cohen 和 Reshotko 方法^[5]对动量积分方程进行数值求解;紊流区域,应用 Sasmán 和 Cresci 方法^[6]对动量和动量矩方程联立求解。利用 Schlichting-Ulich-Granville 方法^[7],预测从层流到紊流边界层的转捩位置,用型参数等于 2.6 确定分离位置,并进一步得到位移厚度,从而通过 Euler 方程及边界层方程迭代完成整个流场计算,得到跨音速平面叶栅粘流特性及相应损失。

4 多目标优化设计算例及分析

为检验本文的多目标优化方法,我们取跨音速平面叶栅的两目标优化设计作为算例,其方法和原理适用于两个目标以上的优化设计。考虑到透平叶栅的设计是较为复杂的,这里我们仅考虑在已有的一元热力设计计算结果即叶栅的叶型—安装角—栅距已初步确定(本文作为初始设计结果)的基础上,进一步优化安装角和栅距,以获得损失 ξ 较小而做功 W 较大(仅对动叶而言)的设计。具体是取叶栅损失 ξ 和做功 W 为目标函数,在叶型一定但安装角 α 和叶片数 n 可作小量调整情况下进行气动优化设计。其数学模型为:

$$\begin{aligned} V = & \begin{cases} \min & \xi = f_1(\alpha, n) \\ \max & W = f_2(\alpha, n) \end{cases} \\ \text{s.t.} & \quad \alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2; \quad n_1 \leq n \leq n_2 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, ξ 为平面叶栅的能量损失系数; W 为平面叶栅(动叶)所做功; α 是指安装角, 为沿叶型弦长方向与轴向所夹的锐角, α_l 和 α_e 为所允许调整的最小与最大的安装角; n 为叶片数目, n_1 和 n_2 为所允许调整的最小与最大的叶片数。在这里选取的统一目标函数为:

$$\min \tilde{F}(x) = (\xi - \xi_{\min}) / (\xi' - \xi_{\min}) + (W_{\max} - W) / (W_{\max} - W)$$

本文选取 ξ 为叶栅初始设计的损失, W 为叶栅初始设计的做功; $\xi_{\min}$ 和 $W_{\max}$ 为相应的单目标优化结果。这些值在多目标优化前可分别求得。

现以北重叶栅及 RA 叶栅为例, 对上述方法用 Fortran 语言编程实现, 其优化设计的计算结果如图 1、图 2 和表 1 所示, 图中下方叶栅前缘点坐标保持不变。

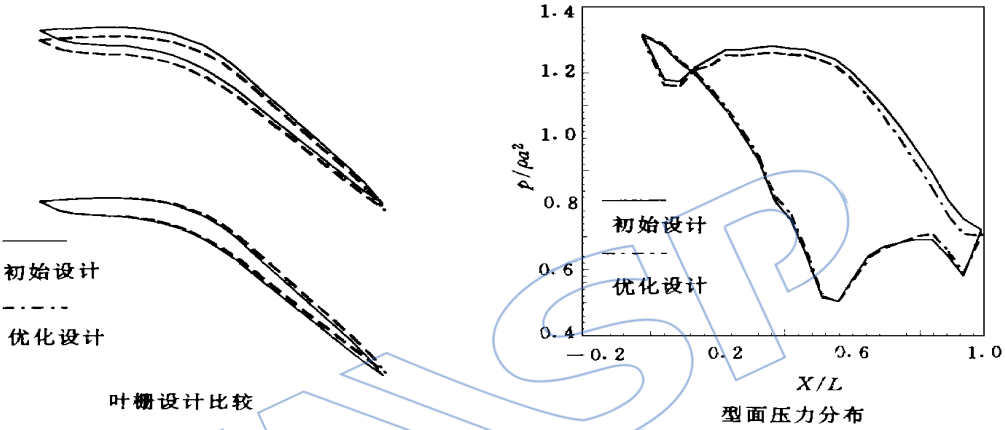


图 1 北重叶栅优化结果及其型面压力分布

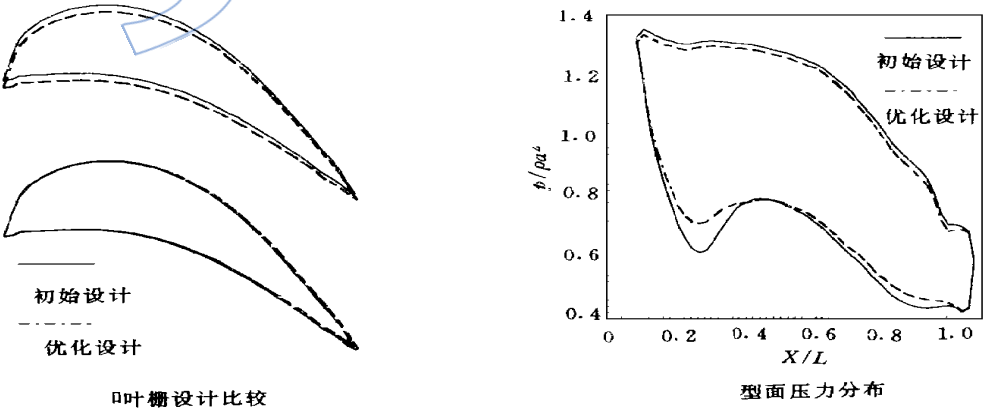


图 2 RA 叶栅优化结果及其型面压力分布

由图 1 和图 2 中可以看出, 优化前后两种叶栅安装角变化皆较小, 而叶栅节距变化明显, 即叶栅数目有一定变化, 这是符合叶栅设计原则的。北重叶栅的叶面压力分布在吸力面变化较小, 压力面变化较大, 但是 RA 叶栅的叶面压力分布在吸力面与压力面变化皆较大, 这是因为

两者的叶型存在较大的区别,后者要比前者的流道变化剧烈。

表 1 北重叶栅和 RA 叶栅优化结果

设计变量 及 目 标		安装角 α	叶片数 n	节弦比 t/B	进口 Ma_1	出口 Ma_2	损 失 ξ	做功 W $\text{Pa} \cdot \text{m}$	统一目标 函数 $\bar{F}^*$
北重 叶栅	初始设计	39.74	34	0.8138	0.3707	1.0020	0.0264	119634.8	2.00
	优化设计	38.98	36	0.7603	0.3726	0.9922	0.0257	120367.4	1.51
RA 叶栅	初始设计	35.68	43	0.7798	0.5314	1.1990	0.0425	323076.3	2.00
	优化设计	35.20	45	0.7398	0.5273	1.2082	0.0418	329363.5	1.33

备注: 北重叶栅 $\xi_{\text{in}} = 0.0246, W_{\text{max}} = 127063.4 \text{ Pa} \cdot \text{m}$; RA 叶栅 $\xi_{\text{in}} = 0.03948, W_{\text{max}} = 334316.0 \text{ Pa} \cdot \text{m}$ 。

由表 1 可看出, 优化前后两种叶栅损失变化皆较小, 而做功变化较大, 但是均有所改善。这也表明, 本文采用的方法与仅以气动损失最小的单目标优化设计相比, 提供了一种更为有效的能考虑两个或多个设计参数影响的跨音速叶栅的多目标优化设计方法。

5 结 论

本文发展的跨音速透平叶栅的多目标优化设计方法, 在叶栅设计中不但有助于降低叶栅的能量损失系数, 而且有利于提高叶栅的做功能力, 从而找到一个较好的折衷设计方案。算例表明最小偏差法是一种有效的多目标优化方法, 而且无需太多的主观信息。总之, 本文提出的多目标优化方法, 能够更为有效地考虑多个设计参数的影响, 可为工程设计所应用。但是应该指出, 本文对叶栅多目标优化的研究结果仅是初步的, 在多目标优化参数和目标选取以及叶栅优化的物理模型方面, 还需进行深入的探讨; 同时, 在多目标优化设计中, 对如何寻求一组有效解以适应不同的设计要求, 值得进一步探索和研究。

致谢 本文工作得到了西安交通大学研究生院博士论文基金(编号:DFXJU 1997- 18)资助和孟庆集教授、沈祖达教授两位先生的指教和鼓励, 特此致谢。

参 考 文 献

1 李军, 丰镇平, 沈祖达, 常建忠. 透平跨音速叶栅的优化设计. 航空动力学报, 1997, 12(3):
2 胡毓达. 实用多目标最优化. 上海科学技术出版社, 1990
3 刘惟信. 机械最优化设计(第二版). 北京: 清华大学出版社, 1994
4 Denton J D. An Improved Time Marching Method for Turbomachinery Flow Calculation. ASME 82- GT- 239, 1982
5 Cohen Clarence B, Reshotko Eli. The Compressible Laminar Boundary Layer with Heat Transfer and Arbitrary Pressure Gradient. NACA TR 1294, 1956
6 Sansman P K, Cresci R J. Compressible Turbulent Boundary Layer with Pressure Gradient and Heat Transfer. AIAA J., 1966, 4 (1)
7 Schlichting H, Ulich A. Zur Berechnung des Umschlages Laminar- Turbulent. Jahrbuch der Luftfahrtforschung, 1942, (1):

(责任编辑 王震华)

FULL - LENGTH PAPERS

CONNECTION BETWEEN LOSS COEFFICIENT AND BLOCK COEFFICIENT USED IN TRANSONIC FAN DESIGN

Xing Xiuqing and Zhou Sheng

(National Laboratory of Aeroengine Aerodynamics & Thermodynamics, BUAA, Beijing 100083)

Zhang Jian

(Gas Turbine Establishment Jiangyou Sichuan 621703)

ABSTRACT

Loss coefficient and block coefficient are interrelated in fact and the relation between them represents the relation between loss and separation. An engineering model is established to connect them, based on an analysis of many fan designs. The model determines the block coefficient from the loss coefficient, because the block coefficient derived from test loss coefficient is more believable than that from experience. At the same time, a computation test of a transonic fan is given as an example to verify the feasibility of the model. A conclusion has been drawn from the computation results that this model can estimate exactly the block coefficient and flow direction at the trail edge of rotor so as to improve the situation of the stator. It also explains why the rotor efficiency is superior to the stage efficiency.

Key Words Transonic Fan cascades Aerodynamic characteristics Separated flow
Loss coefficients

MULTIOBJECTIVE OPTIMIZATION DESIGN FOR TRANSONIC TURBINE CASCADES

Tong Tong and Feng Zhenping

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

ABSTRACT

This paper presents a multiobjective optimization design method for transonic cascades with mixed variables and constraints. On the basis of the computation method of two-dimensional Euler equations coupled with boundary equations for transonic viscous flow, the cascade aerodynamic losses and work potential are considered as the two objective functions, and a united objective function is formulated using dimensionless minimum-deviation method, by which the two-objective optimization problem is divided into two single-objective optimization problems. Then, the efficient optimal solution is obtained with the optimization algorithm of flexible tolerance method.

Key Words Transonic turbine Cascades Multiple objectives Optimization