

# 径轴流涡轮动叶出口扭曲规律与几何参数一体化最优设计方法

陈林根 (海军工程学院)

〔提要〕本文以平均截面处参数 $\alpha_1, \beta_2, \mu, \bar{u}$ 和 $m = \frac{u_2}{u_1} \cos \beta_2$ , 及动叶出口处扭曲规律为变量, 以设计工况内效率为目标, 提出了一个带有多种约束条件的径—轴流涡轮一体化最优设计方法。给出了各种扭曲规律下的最优设计结果。计算表明本文提出的方法是有效且实用的。

关键词 向心涡轮 扭曲规律 最佳设计 数学模型

## 一、引言

为了获得涡轮机械的最优设计结果, 必须借助于最优化技术。有不少文献讨论了轴流涡轮级基于一元流动理论的数值优化<sup>[1]</sup>和向心涡轮平均截面参数的解析优化<sup>[2-7]</sup>及数值优化<sup>[8,9]</sup>。本文则在文献<sup>[9]</sup>的基础上, 将基于轴流涡轮进行的最佳扭曲规律研究<sup>[10,11]</sup>引入径—轴流式涡轮级的参数优化计算中。与文献<sup>[11]</sup>中分别研究通流部分及扭曲规律不同, 将通流部分平均截面参数和动叶出口扭曲规律的优化同时计算, 提出了一个一体化最优设计方法。

## 二、最优设计问题的数学模型

任何一个优化问题均用目标函数、设计变量和约束条件来表征, 可根据物理模型的特点来选取。

### 1. 目标函数

表征径轴流涡轮经济性的指标是轮周效

率 $\eta_u$ 和内效率 $\eta_i$ 。由于内效率考虑了实际级的各种损失, 更能代表级的实际性能指标, 因此本文以内效率为优化目标。

### 2. 优化变量

对按一元流动计算的径轴流涡轮, 有:

$$\eta_i = \eta_u - \xi_{\text{漏气}} - \xi_{\text{摩擦}}$$

$$\eta_u = f(\varphi, \psi, \mu, \alpha_1, \beta_2, \rho, \bar{u}_1, m)$$

由于级速度三角形的关联,  $\mu, \alpha_1, \beta_2, \rho, \bar{u}_1, m$ 中只有五个是真正的独立变量, 而速度系数 $\varphi, \psi$ 及漏气和摩擦损失系数取决于由六个参数中任意五个变量决定的热力和结构参数, 因此本文将平均截面处的参数 $\alpha_1, \beta_2, \mu, \bar{u}_1$ 和 $m$ 选为优化变量。

当动叶出口径高比小于一定值时, 应采用扭曲叶片。常用的扭曲规律均可用速度环量 $C_u$ 沿叶高的变化来描述。如环量沿叶高按指数规律变化可表示为 $c_u r = c_{1r} r^k / r^{k-1}$ ,  $k=1$ 时, 为等环量型;  $k=-1$ 时, 为刚体涡流型。等环量与等周向速度组合扭曲规律可表示为:  $c_u r = c_{ur} r \pm k(r - r_m)$

收稿日期: 1989-04-25 本文在湖北工程热物理学会1989年年会宣读。

可控涡扭曲规律可表示为环量沿叶高按抛物线规律变化： $c_n r = c_{n0} r_{中} \pm k(r - r_{中})^2$ 。后两式中， $k=0$  时即为等环量型，式中正负号分别对应于叶片的出口和进口截面。显然，各种扭曲规律的环量沿叶高分布规律系数  $k$  也是一独立变量。

因此，本文最终选定的一体化最优设计变量为：

$$X = [\alpha_1, \beta_2, \mu, \bar{u}_1, m, k]^T$$

### 3. 约束条件

根据径一轴流涡轮的设计要求和气动、结构限制，本文选取以下约束条件：

- 1) 喷嘴和动叶出气角  $\alpha_1, \beta_2$  在一定范围内；
- 2) 轮径化  $\mu = d_2/d_1$  及动叶出口根部轮径比  $\mu_{root} = d_{2root}/d_1$  在一定范围内；
- 3) 速度比  $\bar{u}_1$  在一定范围内；
- 4) 无因次数  $m = \frac{u_2 \cos \beta_2}{w_2}$  在一定范围内；
- 5) 环量沿叶高分布规律系数  $k$  在一定范围内；

- 6) 平均直径及根部反动度  $\rho, \rho_{root}$  大于一定值；
- 7) 轮毂比  $d_{2root}/d_{2top}$  在一定范围内；
- 8) 喷嘴相对长度在一定范围内；
- 9) 喷嘴和动叶个数在一定范围内；
- 10) 动叶子午面扩张角在一定范围内；
- 11) 动叶进口相对马赫数小于一定值；根据特别的要求还可有：
- 12) 动叶进口直径按系列化值给定；
- 13) 气体从动叶轴向排出 ( $\alpha_2 = 90^\circ$ )。
- 14) 动叶出口为给定的扭曲规律型式。

### 三、目标函数和约束条件的求值

问题的关键是透平内效率  $\eta_i$  的计算，而  $\eta_i$  的准确性取决于损失模型的建立。

#### 1. 损失模型

热力计算中计入喷嘴和动叶的损失（含粘性损失、冲击损失），出口余速动能损失，叶轮摩擦损失和间隙漏气损失，其中三维粘性损失由下式计算：

$$\xi_{3D} = \frac{E \cdot K \left( \frac{\theta_{tot}}{h R_e^{-0.2}} \right)_{ref} R_e^{-0.2} \left( \frac{h}{s} \right) \left( \frac{A_{3D}}{A_{2D}} \right)}{\cos \Phi - \frac{t}{s} - H \cdot K \left( \frac{\theta_{tot}}{h R_e^{-0.2}} \right)_{ref} R_e^{-0.2} \left( \frac{h}{s} \right)}$$

式中  $K$ ——损失修正因子；  
 $\Phi$ ——出口气流角；  
 $E, H$ ——能量及形状因子，与物性及出口流速与临界速度之比有关；

$\left( \frac{\theta_{tot}}{h R_e^{-0.2}} \right)_{ref}$ ——计入除摩擦损

失外涡轮流动中的端部二次流损失、尾迹损失、冲击损失及

冲波损失等项的参考系数；

$h/s$ ——表面长度与出口节距比，可表示为叶片弯曲角和稠度的函数；

$t/s$ ——尾缘厚度与节距比，可表示为与稠度和展弦比有关的函数；

$A_{3D}/A_{2D}$ ——三维表面积与二维表面积之比，分别与喷嘴和动叶几何模型有关。

### 2. 涡轮级内效率计算

参照[12]的方法进行热力计算。除动叶出口截面外，均按一元流动计算。在动叶出口截面处，将其分为若干个等厚度的环形区域作轴对称二元流动分析。当平均截面处的优化变量赋值后，得到动叶出口平均截面上的环量  $C_u$  中  $r$  中，再由选定的环量沿叶高变化规律 ( $k$  的赋值)，借助于功及流量的循环迭代得到沿叶高的参数分布，并求出透平级的总内效率。损失计算参加各截面的迭代计算，以利于损失沿叶高分布符合实际流动。本算法的特点是扭曲规律计算与平均截面计算同时进行，进而可在优化计算时避免通流部分与流型的不协调问题。

### 3. 约束条件的取值

根据气体在动叶中呈加速流动而不出现扩散流动的条件，可有轮径比  $\mu$ 、根部反动度  $\rho_{root}$  的最小界限值和速比  $\bar{u}_1$  的最大界限值[13]： $\mu_{min} = \sqrt{2(1 - \cos\alpha_1)}$ ，

$$\rho_{rootmin} = \bar{u}_1^2(1 - \mu^2_{root}), \bar{u}_{1max} = \frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{\rho}{(1-\rho)(1-\mu^2)}}$$

据文献[11]，最佳的扭曲规律和最佳根部反动度有一一对应关系。根据这一结论并参照文献[11]的研究结果，得到环量指数型

变化规律和环量抛物线型变化规律的流型系数  $k$  的取值范围分别为  $[0.7, 1.2]$  和  $[0.001, 0.015]$ 。

其它诸约束的界限根据文献[5,14]的推荐值选取。

## 四、计算实例及分析

所述问题为一个多变量有约束非线性规划问题。本文采用 SUMT 外点法将其处理为无约束问题，再用 Powell 方法借助于抛物线拟合一维搜索得最优解。

本文以文献[5]附录一的向心涡轮为例进行计算。原始数据为： $N = 30$  千瓦， $T_0 = 350K$ ， $P_0^* = 0.18 \times 10^6 Pa$ 、 $P_2 = 0.1 \times 10^6 Pa$ 、 $n = 23500$  转/分。包括两种动叶出口扭曲规律的径一轴流涡轮一体化最优设计的部分结果见表1。表中原始方案一栏是按对应于最大轮周效率  $\eta_u$  的  $\bar{u}_1$ 、 $\rho$ 、 $m$  的最佳解析式求得的，因而其本身具有最佳性质，只是约束条件仅有单一的喷嘴动叶焓降平缘条件。表中给出了按一元流动计算的最佳值，以便与原始值及不同动叶出口扭曲规律的最佳方案进行比较。表中同时给出了各设计变量的上、下界限值。

表1 不同扭曲规律方案的最优设计结果

方案 \ 项目	$\alpha_1(^{\circ})$	$\beta_2(^{\circ})$	$\mu$	$\bar{u}_1$	$m$	$k$	$\eta_i(\%)$	
变量下限	12.00	15.00	$\sqrt{2(1 - \cos\alpha_1)}$	0.400	1.150	指数型	0.7000	—
						抛物线型	0.0010	
变量上限	30.00	45.00	0.85	$\frac{1}{\varphi} \sqrt{\frac{\rho}{(1-\rho)(1-\mu^2)}}$	1.270	指数型	1.2000	—
						抛物线型	0.0150	
原始方案	20.00	25.00	0.50	0.684	1.228	—	78.75	
一元流动最优方案	18.46	19.27	0.40	0.650	1.223	—	79.67	
环量指数型最优方案	17.23	20.42	0.39	0.654	1.225	0.9525	79.78	
环量抛物线型最优方案	17.88	19.83	0.38	0.651	1.224	0.0065	79.85	

计算表明,各种扭曲规律的最佳效率相差无几,但抛物线扭曲规律(可控涡流型)属最佳。采用扭曲叶片后,效率优于一元流动计算方案。灵敏度分析表明,对级效率影响最大的因素是  $m$  和  $\overline{u_1}$ 。由于平均截面参数和扭曲规律一体化最优设计,因而其相互间的协调使级效率优于基于一定的平均截面参数进行的扭曲规律优选结果。

### 五、结束汇

计算表明本文提出的模型对各种动叶出口扭曲规律的径一轴流式涡轮一体化最优设计是有效的,优化效果是显著的。本文有关通流部分平均截面参数和动叶出口扭曲规律对径一轴流涡轮效率的影响分析,对涡轮设计有一定的理论指导和工程实用价值。进一步的工作是引入重量、非设计工况效率等目标,建立起考虑动叶出口最佳流型的径一轴流式涡轮参数多目标优化方法。<sup>[14]</sup>

#### 参考文献

[1] 张俊迈,陈林根.轴流透平机械通流部分优化设计译文集.海军工程学院出版,1985  
 [2] 鞠如碧.透平膨胀机(膨胀涡轮)最佳参数的选择.制冷学报,1981,(2)

[3] 计光华.透平膨胀机.机械工业出版社,1982  
 [4] 郭有仪,汪荣顺,计光华.90°排气低温透平膨胀机的设计优化.低温工程,1986,(2)  
 [5] 米特罗欣 В Т.向心涡轮稳态和动态参数的选择和计算.国防工业出版社,1980  
 [6] 舒远发.径流向心涡轮热计算参数的选择.武汉造船,1982,(4)  
 [7] Крылов И И, Литвяцкий В В. О выборе оптимальных параметров радиально-осевых турбин. Известия Вузов, Серия Энергетика,1985,29(3)  
 [8] 姜正良.航空制冷透平机参数优化设计.流体工程,1986,(7)  
 [9] 陈林根,龚建政.带有多种约束条件的径-轴流涡轮参数数值优化方法.汽轮机技术(待发表)  
 [10] 邹溢祥.轴流透平叶片的控制环量设计与扭曲,规律优化的研究.工程热物理学报,1982,3(2)  
 [11] 邹溢祥,袁丁,李晓玲.轴流透平级的几何参数与叶片扭曲规律联合优化设计计算方法.航空动力学报,1987,2(4)  
 [12] Glasman A J. Computer program for design analysis of radial-inflow turbines. NAST TN D-8164(1975)  
 [13] 刘颖.船舶柴油机原理.国防工业出版社,1980  
 [14] 陈林根.考虑动叶出口最佳流型的径一轴流式涡轮多目标优化方法.航空动力学报,1989,4(3)

## An Integrated Optimization Design Method for a Radial-Axial Flow Turbine with Optimum Criteria of Blade Twist at the Blade Outlet

Chen Lingen

(Naval Academy of Engineering)

#### Abstract

This paper provides an integrated optimum design method for a radial-axial

flow turbine with constraints of engineering construction conditions, in which five parameters at mean radius, i.e.  $\alpha_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\bar{\mu}$ ,  $u_1$ , and  $m = u_2/w_2 \cos \beta_2$ , and the criteria of blade twist at blade outlet, are taken as design variables and the internal efficiency of design conditions as an objective function. Some results of optimization for a variety of twisted blades are also presented. The results of calculation show that the method presented is valid and effective.

**Key words:** *centripetal turbine, criteria of blades, twist mathematical models, optimum design.*

**新产品、新技术信息**

**NOR89-11 ST-11 电弧刨割条** 在电弧高温下能产生喷射气流, 按规定的操作法能吹去熔化金属。该产品具的刨割钢、生铁、不锈钢、硬质合金和铜合金等多种金属, 还具有对金属穿孔的功能。在使用时不需要专门设备, 只需普通手弧焊机(直流或交流)就能清除缺陷, 操作简便, 节省电能, 不含有毒气体, 是一种补充碳弧气刨不足的新材料

ST-11 电弧刨割条在 1988 年通过部级鉴定, 产品性能已达到国外先进国家同类产品的水平。

ST-11 电弧刨割条主要适用于焊工自检返修, 短浅缺陷的清除和焊缝反面清根等方面, 现已应用于化工、船舶、机械、电力、建筑安装等行业。

(如需以上技术和产品请与编辑联系)

**简讯**

**苏联在燃气轮机方面的一些研究开发项目**

据“燃气轮机世界”1989年9—10月号报导, 1989年7月13日起美国机械工程师学会国际燃气轮机研究所(ASME, IGTI)代表团一行35人对苏联一些燃气轮机工厂和研究所进行了为期二周的参观访问。实地考察了苏联的燃气轮机制造工业, 其中包括各型燃气轮机机组的性能、设计水平、研究动态。考察表明, 目前苏联燃气轮机制造方面的工程师、研究人员正在从事许多研究开发项目和一些新的工艺技术, 其中许多研究项目与西方国家是平行相似的。这些项目包括:

1. 多孔燃气轮机叶片直接的蒸汽冷却(发散热冷却)。无结污的三万小时试验。注入蒸汽可以使循环效率从不喷注蒸汽时的33%增加到38%。

2. 为增加循环寿命, 给叶片涂以涂层

和加合金。已经表明, 离子束表面处理可以使循环寿命增加4倍; 硼合金可使循环寿命增加40%。

3. 对高温下工作的水冷涡轮叶片进行研究和实验室的试验。

4. 500吨/小时流化床煤的气化联合循环动力装置的理论研究。

5. 为了加大输出功率而喷注蒸汽。蒸汽喷注量最大达10%空气流量, 可使输出功率增加30%, 燃料消耗减少12%。

6. 试验用的闭式循环燃气轮机, 它以温度为982°的氦气作为工质。

7. 在涡轮轮盘内部加上一些叶片以便抵消复合向心力, 它可以使轮盘冷却增加3~4倍。

(吉柱明 供稿)