

# 超/跨音风扇气动设计体系 有关流动模型改进探讨

北京航空航天大学 赵拥军\* 邢秀清 周 盛

【摘要】当前超/跨音风扇准三维气动设计体系中,二维气动设计与三维流场分析在模型上不匹配。为加强二者之间的关联,提出了气动设计体系三角形概念。作为其实现方法的一部分,提出了内部气流脱轨角及其偏差作为定量指标,以对设计流场进行评价,并对下一轮设计进行指导。根据有限算例,探讨了内部以气流脱轨角及其偏差作为定量准则的可能性。

主题词: 跨音速流动 风扇 气动特性 模型

分类号: V 211

## 1 前 言

风扇/压气机气动设计体系经历了二元设计体系、准三元设计体系和正在发展的全三元设计体系3个阶段<sup>[1]</sup>。目前已经成熟地应用的准三元设计体系,主要包括气动设计、叶片造型和计算流体力学分析(CFD)3个部分。该设计体系主要涉及两类模型:(1)二维设计模型— $S_{2m}$ 流面模型,属反问题;(2)三维流场分析模型,属正问题。两者在设计过程中需交互使用。由于正、反问题所依据的流动模型颇有差别,造成现有设计体系尚有一定局限性。对于低速情况尚不严重,但当速度增高时,气流发生分离的可能性越来越大,其局限性日益明显。本文拟从正、反问题所依据的流动模型所存在的差别的角度,来探讨如何对现有超/跨音风扇气动设计体系进行改进,并以本组原来发展的气动设计体系为具体对象,探讨改进的方法。

## 2 现有设计体系之局限及改进思路

现有设计体系包括流线曲率通流气动设计( $S_{2m}$ ),叶片任意造型(AR)和三维 Euler/N-S 流场分析(CFD)部分。设计体系的框图如图1。

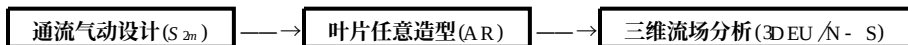


图1 设计体系框图

通过分析,现有设计体系有以下值得改进之处:

(1)在上述设计体系中,通流气动设计是在基元流动和周向平均假设的基础上,计算 $S_{2m}$ 流面的二维设计参数如气流角等。而三维 Euler/N-S 流场分析,计算的对象为整个叶片排的

三维空间流场, 考虑实际叶片的作用, 得到三维的气动参数分布。因此, 通流气动设计和三维流场分析两者之间存在着物理模型的差别, 二者之间的关联尚不够紧密。

(2) 三维 Euler/N-S 流场分析作为校核计算, 对流场进行评价的指标有效率、流量、压比、压力分布等。其中效率作为定量指标, 只是对流场整体进行综合评价, 不能反映流场中的细致问题。而其他指标尚未建立相应的定量准则, 以据此定量评价设计流场中各点气流流动质量的优劣。因而三维 Euler/N-S 流场分析对流场进行评价的指标, 尚不能充分地评价流场中的细节问题。由于以上原因, 当对设计结果不满意而需改进设计时, 就难以依据流场分析反映的信息, 有针对性地适当修改通流气动设计的二维设计参数, 以得到更好的设计。

为完善设计体系, 需加强通流气动设计与三维欧拉/N-S 流场分析之间的关联, 使设计体系诸环节之间的关联更为紧密。据此, 提出气动设计体系三角形的构想如图 2 所示。

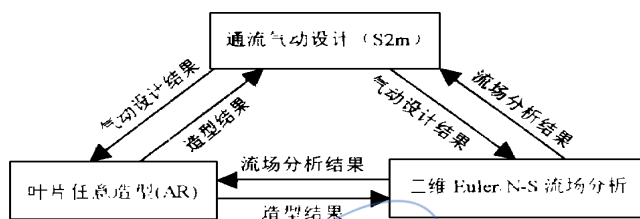


图 2 气动设计体系三角形简图

这一过程是: 通流气动设计得到  $S_{2m}$  流面上二维气动设计参数, 经叶片任意造型和积迭得到整个设计叶片, 根据所得的叶片几何形状来进行三维 Euler/N-S 流场分析, 计算出三维气动参数, 并将三维结果进行周向平均, 以及与二维气动设计参数进行比较, 得到对流场进行细致描述的沿  $S_{2m}$  流面上的内部脱轨角及其偏差分布、 $D$  因子偏差等定量指标, 以对设计结果进行评价。利用上述诸定量指标所提供的信息, 反馈到下一轮通流气动设计和叶片任意造型之中, 调整加功量、攻角、落后角以及激波结构与强度等设计参数, 以改进设计。

三维 N-S 流场分析较三维 Euler 流场分析能对流场进行更接近真实的描述, 但在设计过程中, 宜使用三维 Euler 流场分析解来与通流气动设计进行反复迭代, 这是因为三维 Euler 流场分析与通流气动设计在关于粘性的假设上更接近一致, 而 N-S 流场分析将粘性等因素考虑进去, 对于原始设计方案而言, 其所得的结果通常有大尺度分离团, 使迭代得不到收敛。

### 3 实现方法

作为实现上述设想的第一步, 本文结合流线曲率通流气动设计 ( $S_{2m}$ ), 叶片任意造型 (AR) 和三维欧拉流场分析这一设计体系, 初步探讨了实现上述思想的方法。

(1) 周向平均: 采用了密流平均方法, 得到三维欧拉流场分析的周向平均结果。

(2) 定量指标及定量准则: 对于成功的设计, 通流气动设计参数与三维流场分析的周向平均结果应该是一致的, 至少是相当接近的。否则, 设计将是不成功的。据此, 可以通过在  $S_{2m}$  流面各节点上比较二者所得的差值, 作为定量指标, 来对设计质量进行评价。这些定量指标将反映  $S_{2m}$  流面上流场的气流流动情况。本文只讨论相对气流脱轨角及其偏差这一定量指标。

记  $(\beta_{ijk})_{\text{cfd}}$  为欧拉流场分析所得到三维节点上的相对气流角,  $ijk$  表示节点编号。  $(\bar{\beta}_{ij})_{\text{cfd}}$  为  $(\beta_{ijk})_{\text{cfd}}$  经周向平均所得到的对应于  $S_{2m}$  流面上的周向平均值。  $(\beta_{ij})_{S2}$  为通流气动设计所得的  $S_{2m}$  流面上的 (相对) 气流角。  $(\beta_{ij})_m$  为任意造型所得的中弧线角 (金属角)。如果  $(\bar{\beta}_{ij})_{\text{cfd}}$  与  $(\beta_{ij})_{S2}$  足够接近, 其差值小于给定偏差, 即:  $\sigma_{\beta_{ij}} = |(\bar{\beta}_{ij})_{\text{cfd}} - (\beta_{ij})_{S2}| \leq \epsilon$  ( $\epsilon$  为给定偏差), 则认为该点的气动设计结果是可接受的, 否则, 需修改设计以满足上述条件。

记:  $DEV_{ij} = (\beta_{ij})_{s2} - (\beta_{ij})_m$ ,  $DME_{ij} = (\bar{\beta}_{ij})_{cfd} - (\beta_{ij})_m$ ,  $DS2_{ij} = (\bar{\beta}_{ij})_{cfd} - (\beta_{ij})_{s2}$   
 以上即是所定义的定量指标。其中,  $DEV_{ij}$  为  $S_{2m}$  流面上某点的内部脱轨角设计值(据经验给定),  $DME_{ij}$  为周向平均相对气流角与造型中的金属角之差,  $DS2_{ij}$  为周向平均相对气流角与通流设计相对气流角之差, 即流场分析结果与设计参数之差。

当  $DS2_{ij} \leq \epsilon_{ij}$  时( $\epsilon_{ij}$  为给定偏差), 则认为该点气流角是可接受的。

对于三维流场分析所得到的其他指标, 可用类似的方法, 建立相应的定量指标和定量准则, 以得到对流场更完整的评价。算例和分析表明, 内部气流脱轨角及其偏差, 已基本上反映出流场中的气流流动细节, 对流场作出正确评价。因而, 通过它已能实现二维气动设计与三维流场分析之间的关联。

(3) 利用定量指标及定量准则反馈改进设计: 利用所得到的定量指标及定量准则, 反馈到通流气动设计和造型之中, 调整加功量、攻角、落后角以及激波结构等设计参数, 以得到改进的设计结果, 是追求的最终目标。依据上述思想, 编制了相应软件, 以实现上述改进思路和方法。

## 4 算例分析

算例采用已设计成功的一台高级压比跨音单级风扇, 由进口导叶、转子、静子组成。首先得到了原设计的转子和静子的周向平均的气动参数和内部脱轨角及其偏差的分布。据此气动参数和定量指标, 对通流气动设计和任意造型的设计参数主要是加功量、攻角、落后角等作了初步调整, 以得到修改后的设计结果。对设计结果进行了分析, 并探讨了用内部脱轨角及其偏差作为定量准则的可能性。算例结果都以图形来直观地表达。

### 4.1 原设计情形

原设计是一成功的设计, 其周向平均结果定量指标应该是规则且符合经验规律的。图 3 (a) 和 (b) 分别是转子、静子沿不同流线的定量指标  $DEV_{ij}$ ,  $DME_{ij}$ ,  $DS2_{ij}$  的轴向分布。由图可以看出, 周向平均气动参数的轴向分布相当规则, 符合传统经验, 脱轨角设计值  $DEV_{ij}$  具有典型的经验特征, 脱轨角计算值  $DME_{ij}$  与脱轨角设计值  $DEV_{ij}$  具有同样的形状, 符合 W ennerstrom<sup>[2]</sup> 提出的脱轨角分布准则, 而取值偏小。因而脱轨角偏差  $DS2_{ij}$  出现负值, 意味着气流过转。其原因可能是三维 Euler 流场分析没有考虑粘性所致, 或通道内部三维激波使气流没有按预定方向偏转所致, 也可能二者兼有。从总体上看, 周向平均气动参数及气流脱轨角偏差等定量指标, 所反映的信息正确描述了一个成功的风扇的气动特征。

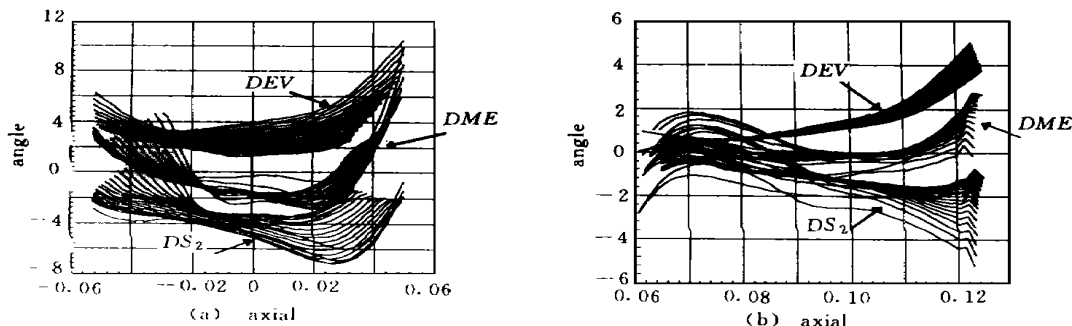


图 3 转子、静子沿不同流线的定量指标  $DEV_{ij}$ ,  $DME_{ij}$ ,  $DS2_{ij}$  的轴向分布 (a 转子 b 静子)

## 4.2 修改的情形

修改的情形基于以下思路: 为考察定量指标能否对不成功的设计作出正确评价, 对原设计参数的加功量、攻角、落后角等关键设计参数作了较大修改, 使其明显不合理, 得到一个设计结果。然后, 逐步调整这些参数向原设计参数靠近, 并跟踪定量指标的变化。图 4(a) 和 (b) 分别是

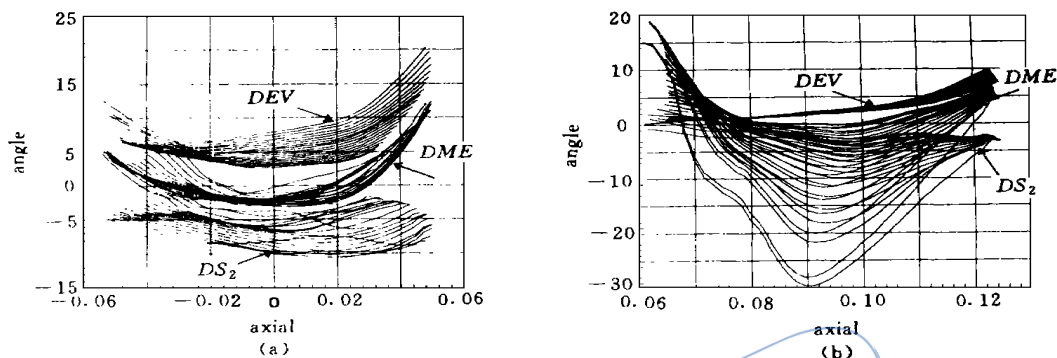


图 4 修改设计参数后的转子、静子的定量指标轴向分布(a 转子 b 静子)

某修改设计参数后的转子、静子的定量指标轴向分布图。由图可知: 与原设计结果比较, 定量指标的分布呈明显不规则, 尤其是静子, 脱轨角及其偏差的取值和分布已与 W ennerstrom<sup>[2]</sup>提出的分布准则相差甚远, 计算脱轨角  $DME_{ij}$  和脱轨角偏差  $DS2_{ij}$  的取值甚至达到 +20 到 -30°。这说明, 定量指标能对不成功的设计结果作出正确评价。

## 4.3 定量准则的取值及分布

本文的算例, 仅提出内部脱轨角及其偏差的构想。事实说明, 它能够正确描述流场气流流动的细节, 反映设计中存在的问题。因而, 以它作为定量准则是可行的。

成功的设计, 其内部脱轨角分布符合 W ennerstrom<sup>[2]</sup>提出的分布准则, 且取值较小, 在槽道内部, 其绝对值不大于 1°; 脱轨角偏差取值较小, 分布曲线与脱轨角分布近似, 取值在槽道内部不大于 2°。

**小结** 针对现有超/跨音风扇气动设计体系进行了分析, 发现在  $s_{2m}$  流面上进行的通流气动设计与三维流场正问题分析这两个主要组成部分所依据的流场模型之间存在着很大的差别, 并导致二者之间的关联尚不够紧密。为此, 在本文中提出了“气动设计体系三角形”概念, 以改善各组成部分之间的联系。提出了以内部气流脱轨角及其偏差作为设计流场的定量指标和定量准则。这些新定量指标涉及流场中的各点, 是对效率等定量指标的有益补充。依据定量指标反映的流场细节来修改加功量、攻角、落后角以及激波结构等设计参数, 可以得到改进的设计结果。根据算例, 初步认为上述设想是可行的。

## 参 考 文 献

- 1 蒋浩兴, 王尚义, 蔡晓钟. 风扇和压气机全三元气动设计体系的研究和发展. 航空发动机, 1996, 4(4): 13-27
- 2 W ennerstrom A J. Transonic And Supersonic Compressor Blading design. AGARD-LS-167, June 1989

(责任编辑 杨再荣)

## PREDICTION OF INTERNAL FLOW FIELD IN A HIGH SPEED IMPELLER WITH VISCOUS BODY FORCE TECHNIQUE

Yang Ce, Suo Yisheng, Jiang Zikang, Zhu Wei

(Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084)

Lao Dazhong (Beijing University of Technology, Beijing 100081)

**ABSTRACT** It is very important of understanding the internal flow field in high speed centrifugal compressor in order to design an impeller with higher efficiency and high pressure ratio. In this paper, a three- dimensional viscous code has been developed to solve simplified Reynolds- averaged Navier- Stokes equations. The viscosity is simulated with viscous body force method. The governing equations are spatially discretized in the cell- vertex finite volume scheme on a simple H mesh and temporally integrated by an explicit two- step Runge- Kutta scheme. The turbulence closure is made by using Baldwin- Lomax model. This code is demonstrated for predicting the internal flow field of a high speed impeller. Some laser measure data are also illustrated to testify the calculated results.

**Key Words** Centrifugal compressors Three- dimensional flow Calculation

## A MODIFIED MODEL OF SUPERSONIC/TRANSONIC FAN AERODYNAMIC DESIGN SYSTEM

Zhao Yongjun, Xing Xiuqing, Zhou Sheng

(4th Dept Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

**ABSTRACT** The two- dimensional aerodynamic design and the three- dimensional flow field analysis, which are two of the three main parts of supersonic/transonic fan aerodynamic design system, do not match in flow model. Therefore, a triangular model of aerodynamic design system is put forward to improve the design system. As a part of its implementation a quantitative indicator is provided which uses the inner flow deviation angle and its deviation to evaluate quantitatively the designed flow field and to guide the next design iteration. The possibility of developing the indicator into a criteria is also discussed.

**Key Words** Transonic flow Fans Aerodynamic characteristics Modelling

## NUMERICAL SIMULATION OF BOUNDARY LAYER ON BLADE SURFACE UNDER DIFFERENT INLET FLOW CONDITIONS

Liu Bo and Wang Yangang

(7th Dept Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072)

**ABSTRACT** The boundary layer flow pattern on the blade surface of a two dimensional cascade is simulated numerically to investigate the transition process from laminar to turbulent flow and the length scale of transition region under different inlet Mach number and incidence. The influence mechanism of some inlet flow conditions on the transition is also