

文章编号: 1000-8055(2003)04-0542-04

双函道叶轮机通流反问题的加质量法

单 鹏, 刘锡阳

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 在小函道比风扇级的设计中, 本文将风扇转子叶片、外函、内函静子叶片的通流设计反问题与分流机匣的气动设计问题有机结合, 而成为一个统一的双函道叶轮机通流反问题。在内函静子叶片流线、外函静子叶片流线、分流机匣流线和机匣位置四者实现一个统一的准径向平衡之后, 造型出转子叶片、静子叶片和分流机匣, 从而一次完成风扇级设计和确保准确函道比的机匣设计。实现本方法的关键是引入一个通流中的加质量流动。本方法可加入现有通流算法中。本方法的第二个重要应用是可对带减震凸台的转子叶片进行通流设计。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 流线曲率; 通流; 分流机匣; 减震凸台

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

A Mass Addition Approach to the Bypass Turbomachine Through Flow Inverse Design Problem

SHAN Peng, L U Xirang

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: In the design of a low bypass ratio fan stage, this paper links the through flow inverse problem of the fan rotor, the core channel fan stator and the bypass channel fan stator together, as an organic whole, with the splitter aerodynamic design problem. It forms thus a unified through flow inverse problem for two channel turbomachines. After an overall quasi-radial-equilibrium is iteratively achieved among four parts- the stream lines of the core channel fan stator, the bypass channel fan stator, the splitter and the position of the splitter, the blading processes for one fan blade, two fan vanes and one splitter are performed. This method designs in one pass a fan stage and a splitter with a precise value of bypass ratio. Its primary and key approach scheme is the introduction of a mass addition half way through the through flow stream line development. This scheme can serve as a new feature which can be inserted into existing through flow programs. When subtracting mass flow after adding a mass flow, alternatively, this scheme can also be used to treat the problem of inverse design of fan/compressor rotor blades with part-span shrouds.

Key words: aerospace propulsion system; stream line curvature; through flow; fan splitter; shrouded rotor blade

收稿日期: 2003- 02- 21; **修订日期:** 2003- 04- 11

作者简介: 单鹏(1955-), 男, 北京人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院副研究员, 博士, 主要从事高负荷压气机气动设计理论与实验、气体动力学的 CFD 方法、涡轮式和冲压式和活塞螺旋桨式发动机总体等研究

1 问题的提出

叶轮机 S2 流面流线曲率法反问题通流设计方法至今仍作为生成各种叶轮机叶片型面的理性方法, 被广泛使用着。特别对于经验尚少的工程和研究来说, 该方法更有揭示、协助理解叶轮机流动的规律及特征的重要作用。早在 Smith (1966)^[1], Novak (1967)^[2] 分别正式表述完全径向平衡方程和流线曲率法的较早发展阶段, Novak 就一并提出了流线曲率法在实用中的一个重要应用方面: 用于涡扇发动机的风扇部件加分流机匣加双函道系统的通流设计。他提出的技术方法是 (参见图 1): 先作包含上游进气道在内的外函通道与外函叶轮机一体系统的通流设计, 又作包含上游进气道在内的内函通道或部分通道与内函叶轮机一体系统的通流设计, 再对于这两个以轴对称环套形式接壤的通流设计的交界环面的子午流线, 进行通流与通流层次的多轮迭代, 直至两个通流的交界面上的流线形状和流线上静压参数收敛。显然, 这样做的必要性在于, 若两个通流给出不同的交界面流线上的静压, 则首先转子、静子叶片的型面将出现台阶式接壤, 其次, 流动中当函道比由内、外函道下游反压控制为设计值时, 由于设计流线两侧的静压差, 使真实流线扭曲而产生额外的损失。

在小函道比风扇级的设计中, 本文发展了一种新方法, 其可以用外函、内函统一的一个通流设计反问题, 在一个准径向的 (即适用于非径向计算站的) 平衡方程的控制下, 同时定出叶片型面、外、内函通道型面和分流机匣的位置。这就避免了通流与通流的迭代, 提高了设计精度和设计效率。该方法的核心技术是引入和控制一个通流中的加质量流动。由于在各种流线曲率法中, 动量方程和连续方程都是被分别处理而不是同步使用的, 故知本加质量流动方法适用于各种形式的流线曲率法通流原理, 包括 Smith 的周向平均概念下使用径向计算站的, Novak 的轴对称概念下使用径向计算站的, Hearsy (1973)^[3] 的平均流面 S_{2m} 概念下使用较完善的准径向计算站的, 以及 Hearsy^[4] 和 Wennerstrom (1975) 后来又改进了动量方程的。本文的发展具体使用的流线曲率法反问题通流设计模型是基于其中 1975 年原理的。

2 流线曲率法迭代模型分析

轴流级 S2 流面流线曲率法反问题的流场迭

代分为从内至外的 3 层:

(1) 求相对 (静子时绝对) 轴向分速 w_z (或 w_m) 的速度迭代。在轴向 (或流向) 计算站 I , 展向流线 J 处用隐式法积分准径向平衡方程, 例如:

$$\frac{\partial w_z}{\partial \eta} = A w_z + \frac{B}{w_z} + C \quad (1)$$

其中: ∂ 表示函数在流面上的偏导, 非线性函数 A, B, C 中包含 w_z 本身、流线倾角 σ 和指定的设计环量 $c_u r$ 在 z, η 两方向的流面偏导, 转焓、熵在 η 方向的流面偏导, 相对周向分速 w_u 、流线曲率、流面角等子午面上的函数。

(2) 使流量积分达到指定值 m° 的流量迭代。在计算站 I 上积分总流量, 并就流量迭代。所使用的流线曲率法连续方程落实为站 I 流量方程:

$$m^\circ = 2\pi K_m \int_{\text{hub}}^{\text{tp}} r B \rho \frac{w_z}{\cos \sigma} \cos(\sigma - \Theta) d\eta \quad (2)$$

其中: $B(\eta) < 1$ 为叶片金属堵塞系数, 流量系数 K_m 是环壁附面层堵塞后的实际流量和无这一堵塞时的流量之比, 是经验值。

(3) 求新流线簇的全场迭代。在计算站 I 处, 根据在当前流线展向分布 (即流量分布) 下径向平衡了的新 w_z 对应的新的流量展向分布, 插值出设计指定流量展向分布所对应的新的流线展向分布。此举从计算站 $I=1$ 至 $I=I_{\max}$ 实施。

各计算站上流量迭代的收敛准则是本站总流量必须等于 m° , 即设计指定的叶轮机物理总流量。首先注意到, 若 m° 的值在不同站之间有变化, 或其为沿流管的变量, 则由于动量方程、连续方程是不同步使用的, 使得流线曲率法迭代照样可以收敛。其次注意到, 在某计算站上用准径向 η 向动量方程进行速度迭代时, 对给定的对应于平均子午速度的某合理范围的任 m° 值, 动量方程都将找到该站上一个相应的轴向分速 w_z (或子午速度 w_m) 的分布解, 只是流管簇厚度分布和流速分布随 m° 值的不同而不同。综此两点, 完全可以在不同计算站改变所指定的 m° 值, 又在不同流管内改变所指定的 Δm° 值, 而得到对于流线形状和流管簇厚度的控制。

3 加质量流模型

将分流机匣前缘唇口的外函一侧定位于子午面网格的 (I_0, J_0) 点 (图 1), 这里 J_0 点以上流管的流量和与 J_0 点以下流管的流量和之比等于发动机函道比 α 。通流逻辑的改动点有:

(1) 在原通流模型指定的 $J=2$ 至 $J=J_{\max}$ 各

流管内累积百分比流量,例如 5%, 10%, …的基础上,在进入上述最外层迭代即全场迭代后,对 I_0 站下游的第 $J_0 - 1$ 流管及其以上所有流管,指定流量增加以后的新的累积百分比流量。新流量的系列作为一个数组,其元素根据外函、内函叶轮机流通面积收缩的需要而取值。例如本文算例用线性分段函数分析取值为:

$$\Delta m^\circ(I, J) = \frac{J - 1}{J_{\max} - 1} + K_{\text{spitter}} \times \min \left(1, \frac{I - I_0}{I_{\text{massadd}}} \right) \quad (I \geq I_0, J \geq J_0) \quad (3)$$

上式第一项为原通流模型指定的第 $J - 1$ 流管累积百分比流量。 $K_{\text{spitter}} < 1$ 可称为分流机匣金属堵塞系数,其下限值可用分流机匣最大迎风面积与叶轮机总体设计所得外、内函静子出口处通道面积之和之比。 I_{massadd} 可称为加流量站数,即经过 I_{massadd} 个站以后流量不再增加。

(2) 在某站 I 的流量迭代开始前,指定该站的加质量物理流量,例如对应式(3)模型有:

$$m_{\text{massadd}}^\circ(I) = m^\circ \times \left[1 + K_{\text{spitter}} \times \min \left(1, \frac{I - I_0}{I_{\text{massadd}}} \right) \right] \quad (I \geq I_0) \quad (4)$$

上式与式(3)本质相同,其中 m° 可为无量纲化流量。加质量流量 $m_{\text{massadd}}^\circ(I)$ 用于收敛判断。

(3) 将每步流量迭代对速度改动量 Δw_z 的建立式中的质量流量 m° 换为加质量流量,成为:

$$\Delta w_z = \frac{m_{\text{massadd}}^\circ(I) - m_{wz}^\circ(I)}{\rho(I, J_{\text{middle}})A(I)} \quad (I \geq I_0) \quad (5)$$

其中: m_{wz}° 是当前的 w_z 分布所对应的积分流量, ρ 常取通道中部流线上的值, A 是通道面积。

(4) 将流量迭代的收敛判断式中的质量流量 m° 也换为加质量流量 $m_{\text{massadd}}^\circ(I)$, $I \geq I_0$ 。

(5) 在站 I 流量迭代收敛后,将提供给求新流线簇的全场迭代的刚求出的站 I 物理流量展向累积分布 $m_{wz,J}^\circ(I, J)$, 按设计指定的叶轮机物理总流量 m° 计算累积百分比,即:

$$\Delta m_{wz}^\circ(I, J) = \frac{m_{wz,J}^\circ(I, J)}{m^\circ} \quad (I \geq I_0) \quad (6)$$

因为展向加质量,这样得到的累积百分比流量 $\Delta m_{wz}^\circ(I, J)$ 从某流管开始将越出 100%。

(6) 在全场迭代完成后,计算结果后处理之前,按式(3)第一项恢复原通流模型指定的各流管累积百分比流量 5%, 10%, …。

4 算 例

一小函道比高负荷单级前掠风扇实验部件的通流设计结果见图 1。其风扇流量 11.286 kg/s, 级增压比 2.10, 级效率 0.85, 转子直径 0.314 m,

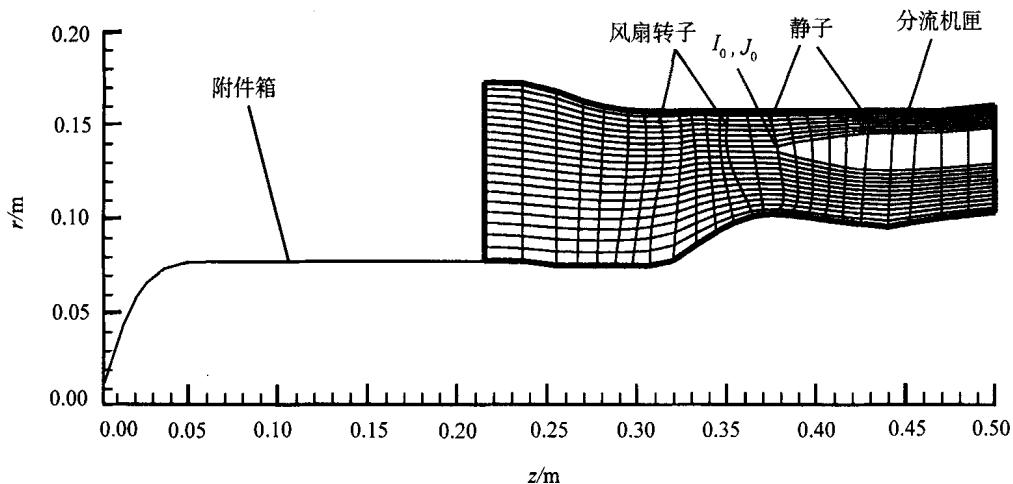


图 1 双函道叶轮通流设计问题和加质量法统一通流设计结果

Fig 1 The bypass turbomachine through flow inverse problem and its unified through flow design result using the mass addition approach

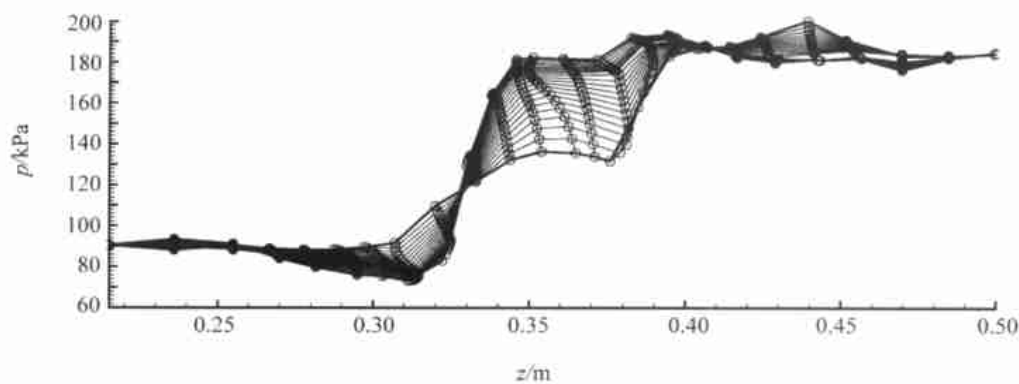


图 2 高负荷单级前掠风扇和分流机匣统一通流设计的静压沿计算域全长和展向 21 根流线的分布

Fig 2 The static pressure distribution along the full axial domain and 21 spanwise stream lines of the unified through flow design of a single stage high loading forward-swept fan and its splitter

线速度 502.6 m/s, 函道比 0.54。用 S_{2m} 流面流曲线率法加入本文风扇与分流机匣统一反问题功能后进行通流设计。

风扇所配用内函压气机的通道形式已被固定, 因此风扇内函静子通道必须光滑连接风扇转子通道与第一级压气机转子通道。外函机匣取为圆柱体。据函道比而将分流机匣前缘唇口的外函一侧置于 $I_0 = 15, J_0 = 14$ 处。取 $I_{massadd} = 5$, 即站 $I = 20$ 以后不再加质量。初取 $K_{splitter} = 0.397$, 根据外、内函静子进出口轴向速度比的合理经验取值, 或即根据转子、外、内函静子反力度的合理分配值, 最终调定 $K_{splitter} = 0.457$ 。如此统一通流而同时得到外壁、内壁走向即静压分布合理、光滑, 分流准确的分流机匣设计, 和风扇转子、外、内函静子设计。分流机匣内壁面真实曲线可按内函流簇展向分布规律而从 $J = 13$ 流线向外推出。全级静压分布见图 2, 可见第 13 流管两侧有与展向较大位变相对应的明显静压差分布。

5 结 论

(1) 由通流的速度迭代原理可知, 加入的质量具有与流管内原质量完全相同的气动热力参数, 因此不破坏按径向平衡方程所得流场的精度。

(2) 外、内函统一设计的静子叶片可按一排叶片机械加工而大大降低成本。

(3) 本方法有效, 并免除了通流之间的迭代而提高了双函道叶轮机的设计效率, 适用于各种流簇曲率通流方法, 且易于经改进现有程序而得到。

(4) 对于大函道比风扇级, 当风扇总体流路设计造就了实现一个内、外函道统一的径向平衡流动的条件, 则本方法也可以应用。

参考文献

[1] Smith Jr L. H. The Radial-Equilibrium Equation of Turbomachinery[J]. Journal of Engineering for Power, Transactions of the A S M E, 1966, 88(1): 1- 12

[2] Novak R A. Streamline Curvature Computing Procedures for Fluid-Flow Problems[J]. Journal of Engineering for Power, Transactions of the A S M E, 1967, 89(4): 478- 490

[3] Hearsey R M. A Computer Program for Axial Compressor Design, Vol. I, Theory, Descriptions, and Users Instructions [R]. AD- 764733, Air Force Aero Propulsion Laboratory, Ohio, 1973

[4] Hearsey R M. A Revised Computer Program for Axial Compressor Design, Vol. I, Theory, Descriptions, and Users Instructions [R]. AD - A009 273, Dayton University, Ohio, January, 1975