

文章编号: 1000-8055(2002)01-023-06

单转子风扇的三维反问题气动设计

陈乃兴¹, 徐燕骥¹, 黄伟光¹, 陈俊杰², 陈晓东²

(1 中国科学院 工程热物理研究所, 北京 100080;

2 奥克兰大学, 新西兰 奥克兰)

摘要: 采用准三维流函数反问题设计方法与三维 N-S 求解方法的相互迭代对单转子风扇进行气动设计。在叶片初步计算中得到叶栅进出口气流角沿径向分布, 并将它作为本文的目标函数。采用准三维反问题求解方法, 依次构造出各个 s_1 流面上的叶片几何形状和气流角分布。然后再采用 N-S 方程的求解方法, 对叶片进行全三维流场的数值计算。通过 N-S 方程计算结果与目标函数的对比, 重新修正叶片出口气流角分布, 并作为下一次反问题设计的目标函数。经过反问题与 N-S 方程求解的反复迭代, 最终得到满足设计要求的叶型。

关键词: 风扇设计; 反问题; 流函数; N-S 求解; 叶轮机械气动热力学

中图分类号: V 231.3

文献标识码: A

An Inverse Method for 3-D Aerodynamic Design of Fans and Pumps

CHEN Nai-xing¹, XU Yan-ji¹, HUANG Wei-guang¹

John J J Chen², CHEN Xiao-dong²

(1. Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

2 The Auckland University, Auckland Private Bag 92019, New Zealand)

Abstract: The method for 3-D design of fans or pumps in the present paper is presented which is based on the solutions of a quasi-3D inverse method and a 3D N-S solver. At beginning the flow rate, the pressure ratio and the geometry of meridian pattern were given. The span-height distributions of inlet and exit pitch-wise-averaged flow angles (or blade circulation) of the blade channel were obtained by the preliminary calculations. They are served to be the target parameters of the present calculation. Successively using a quasi-3D inverse method and a N-S solver, a 3-D blade configuration can be obtained. As an example, an axial single rotor fan is shown.

Key words: fan design; inverse problem; stream function;

N-S solution; aerothermodynamic of turbomachinery

1 前言

随着计算机科学和计算技术的发展, 计算流体力学在叶轮机械的产品设计中得到了广泛的应用。众所周知, 一般的反问题和杂交问题的最大特

点, 是在给定压力面和吸力面上的压力分布或速度分布条件下, 能直接得到叶片的几何形状, 其不足之处在于很难给定优化的叶片压力分布, 无法考虑机械强度的要求(如叶片厚度分布等), 并且有时会得到一个非物理解。若在设计计算中引入

收稿日期: 2001-04-10; 修订日期: 2001-06-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(59876041)

作者简介: 陈乃兴(1933-), 男, 中国科学院工程热物理研究所研究员

叶片负荷分布和厚度分布,则可消除以上缺陷。

本文提出一个由流函数反问题与 N-S 算法相结合的气动设计体系,通过这两类不同算法的相互迭代,最终得到满足进出口气流角分布(或环量)、流量、总压比等设计参数要求的三维叶片。本文计算体系中所采用的目标函数为叶片气流角(或环量)。准三维流函数反问题造型的目标函数是沿子午面坐标线的相对环量分布和叶片厚度,在计算中,通过适当调整叶片前后缘附近的环量分布,使得进出口气流角满足无冲角条件和 Kutta-Joukowski 条件,并且获得优化的设计叶型。

由于篇幅所限,本文只对某一单转子风扇进行气动设计。计算结果表明,本文所提出的方法可按照设计者的不同设计要求,如进出口气流角分布或负荷分布,自动构造出不同半径上的叶型,并且可获得详细的流场分布以及总压比、总温比、绝热效率等气动性能参数。

2 计算方法

2.1 基本思路

本文叶片设计的基本思路是:即通过准三维反问题和三维 N-S 求解方法的相互迭代,来满足叶片进出口沿径向气流角的分布规律,其目标函数为叶片气流角(或环量)。计算过程中,当然可采用任何一种反问题和 N-S 解法。

2.2 准三维流函数反问题求解

如上所述,本文采用的设计方法是准三维反问题与三维 N-S 解法的相互迭代的算法体系,通过反问题与 N-S 解法的反复迭代,来获得满足叶片负荷(环量或气流角)的三维叶型。

本文所用的流函数反问题求解中将叶片环量作为目标函数之一。环量表示叶片对流体所作的功,叶片总环量可表示成如下形式:

$$\Gamma_0 = - (W r \sin \beta)_i \delta \varphi + (W r \sin \beta)_e \delta \varphi + (\Omega r^2 \sin \sigma)_i \delta \varphi - (\Omega r^2 \sin \sigma)_e \delta \varphi \quad (1)$$

其中下标 i 和 e 表示叶片进出口值; W 为相对速度,与绝对速度的关系为 $\vec{W} = \vec{V} - \vec{\Omega} \times \vec{r}$; Ω 为角速度; β 和 σ 分别表示气流角和子午面角; r 和 $\delta \varphi$ 分别为半径和一个叶片通道内的周向节距。

从上式不难看出,对于给定的叶片几何参数和转速,存在着唯一的一个与进口气流角相对应的总环量。叶片总环量也可由下式表示,即:

$$\Gamma_0 = \sum_{l_e}^{l_e} d\Gamma = \int_{l_e}^{l_e} \frac{d\Gamma}{dl} dl \quad (2)$$

$$\frac{d\Gamma}{dl} = - W_s \cos \beta_s + W_p \cos \beta_p \quad (3)$$

式中 Γ 表示从叶片前缘点到计算站的当地环量; $d\Gamma/dl$ 为当地环量的一阶导数; 下标 l_e 和 l_e 分别表示叶片的前缘点和尾缘点; s 和 p 分别表示吸力面和压力面。

本文采用相对环量,并作为目标参数分布,其表达式如下:

若 $0 \leq \bar{x} \leq a_1$, 则

$$\Gamma/\Gamma_0 = C_{a2}\bar{x}^2 + C_{a3}\bar{x}^3 \quad (4a)$$

若 $a_1 \leq \bar{x} \leq a_2$, 则

$$\frac{\Gamma}{\Gamma_0} = b_1 + a_1(\bar{x} - a_2) \frac{b_2 - b_1}{a_2 - a_1} \quad (4b)$$

在式(4a)和(4b)中

$$C_{a2} = \frac{g_{am1}}{a_1} + \frac{3b_1}{a_1^2} \quad \text{和} \quad C_{a3} = \frac{g_{am1}}{a_1^2} - \frac{2b_1}{a_1^3}$$

若 $a_2 \leq \bar{x} \leq 1$, 则

$$\Gamma/\Gamma_0 = C_{a0} + C_{a1}(\bar{x} - a_2) + C_{a2}(\bar{x} - a_2)^2 + C_{a3}(\bar{x} - a_2)^3 \quad (4c)$$

其中:

$$C_{a0} = b_2, \quad C_{a1} = g_{am1}$$

$$C_{a2} = 0.5 \frac{g_{am1} - 3C_{a3}(1 - a_2)^2}{1 - a_2}$$

$$\text{和} \quad C_{a3} = \frac{g_{am1}(1 - a_2) - 2(1 - b_2)}{(1 - a_2)^3} \quad (5)$$

式(4a)~(4b)中的系数可采用 L u u^[1]的推荐值,

即: $a_1 = 0.1$, $b_1 = 0.07$, $a_1 = 0.9$

$$b_1 = 0.93, \quad g_{am1} = (b_2 - b_1)/(a_2 - a_1) \quad (6)$$

对于本文的算例,通过流函数方程的求解,我们可以得到叶片的环量沿流向分布。叶片进出口气流角变化量则可由环量求出。

本文所采用的反问题计算所采用的另一个目标参数是沿叶片子午面方向和叶高方向的叶片厚度分布,这是考虑到叶片的强度要求。

2.3 流函数方程

每一个回转流面上的叶型可由下面的流函数方程求出,即:

$$A_1 \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{r}} + A_2 \frac{\partial}{\partial \bar{a}} \left[\frac{\partial \varphi}{\partial \bar{\varphi}} \right] + A_3 \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{a}^2} + A_4 \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{\varphi}} + A_5 \frac{\partial \varphi}{\partial \bar{a}} = A_6 \quad (7)$$

式中的所有系数以及方程的求解过程详见文献[4,5]。只要将沿叶高方向所有坐标线上的任意回转面进行求解完,就可得到 1 个三维的叶片和一

个为求解三维N-S 方程用的三维计网。

2.4 N-S 方程求解

本文应用压力修正法求解三维N-S 方程, 湍流模型为 $k-\epsilon$ 模型。为适应复杂叶片通道的几何形状, 本文采用坐标变换, 将直角坐标的N-S 方程变换成任意曲线坐标形式, 并引入逆变速度分量以简化方程的表述形式, 速度求解变量仍为直角坐标系下的相对速度分量。本算法的详细推导以及相应算例的验证, 请详见参考文献[8]。

任意曲线坐标系下的控制方程可表示如下:

$$\frac{\partial(\rho\sqrt{g}\Phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho W^1\Phi)}{\partial \alpha^1} + \frac{\partial(\rho W^2\Phi)}{\partial \alpha^2} + \frac{\partial(\rho W^3\Phi)}{\partial \alpha^3} = \frac{\partial}{\partial \alpha^1} \left[J \Gamma g^{11} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha^1} \right] + \frac{\partial}{\partial \alpha^2} \left[J \Gamma g^{22} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha^2} \right] + \frac{\partial}{\partial \alpha^3} \left[J \Gamma g^{33} \frac{\partial \Phi}{\partial \alpha^3} \right] + S_i(x^1, x^2, x^3)$$

(8)

其中 W^1, W^2, W^3 分别为相对逆变速度分量, 可表示为:

$$\begin{aligned} W^1 &= J \left\{ \frac{w_x \alpha^1}{dx} + \frac{w_y \alpha^1}{dy} + \frac{w_z \alpha^1}{dz} \right\} \\ W^2 &= J \left\{ \frac{w_x \alpha^2}{dx} + \frac{w_y \alpha^2}{dy} + \frac{w_z \alpha^2}{dz} \right\} \\ W^3 &= J \left\{ \frac{w_x \alpha^3}{dx} + \frac{w_y \alpha^3}{dy} + \frac{w_z \alpha^3}{dz} \right\} \end{aligned}$$

(9)

式中 J 为雅克比行列式; $S_i(x^1, x^2, x^3)$ 为源项。任意变量和有效扩散系数可写成:

$$\Phi = 1, w_x, w_y, w_z, I, k, \epsilon$$

(10)

$$\Gamma \Phi = 0, \mu_{eff}, \mu_{eff}, \mu_{eff}, \frac{\lambda_{eff}}{c_p}, \frac{\mu_t}{\alpha_k}, \frac{\mu_t}{\alpha_\epsilon}$$

(11)

其中: $w_x, w_y, w_z, I, k, \epsilon$ 分别为求解变量, 即直角坐标系下的相对速度分量、转焓、湍流动能以及扩散率; $\mu_{eff} = \mu_l + \mu_t$ 和 $\lambda_{eff} = \lambda + \lambda_t$ 分别为有效粘性系数和有效导热系数; 湍流粘性系数可由 $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \epsilon$ 求出; $\alpha_k, \alpha_\epsilon$ 分别为经验系数, 取为 1.0 和 1.3; C_1, C_2, C_μ 分别为湍流模型的经验系数, 取为 1.47, 1.92 和 0.09。

本文计算中, 采用压力修正法求解N-S 方程。控制方程的离散化时, 对流项采用迎风格式, 扩散项采用中心差分格式, 并应用线松弛迭代法求解。

3 计算算例

为了验证本文提出方法的精度和可靠性, 本

文对一个低速轴流风扇进行了气动设计。该风扇的流量为 19 kg/s, 总压比为 1.015, 转速为 1200 r/min。进口气流角可依据零攻角原则估算出:

$$\beta_1 = -\tan(\Omega r_{inlet} / V_{x, inlet})$$

(12)

其中 Ω, V 分别表示转速和绝对速度; r 为半径; 下标 x 和 $inlet$ 分别表示轴向和进口参数。

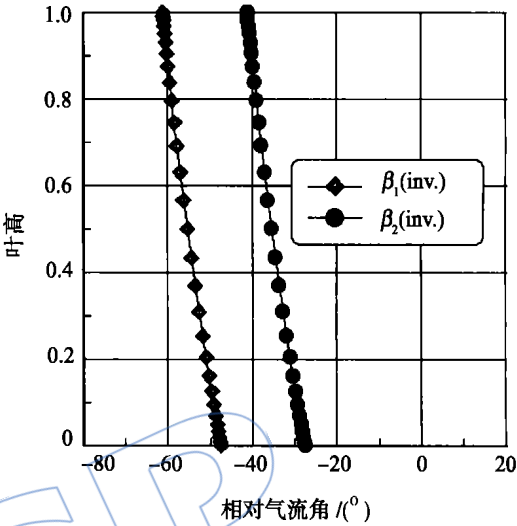


图 1 目标相对气流角沿叶高的变化

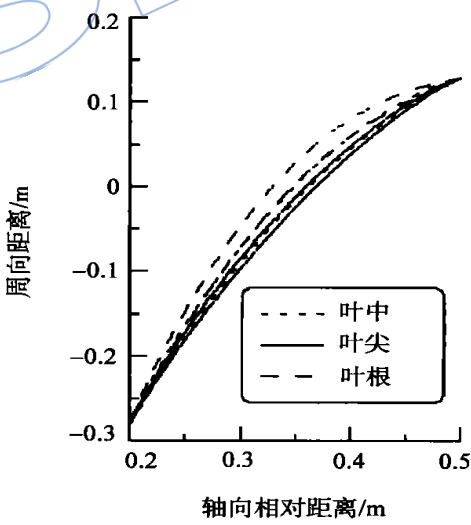


图 2 反问题初次近似所的叶片形状

叶片进出口气流角的径向分布可由初步设计计算获得, 并作为本文的目标函数, 如图 1 所示。在同一半径处, 进出口气流角的变化量为 20°。图 2 为第一次反问题求解出的叶片根部、中部和顶部叶型。所得的初步的三维网格如图 3 所示。气流角分布可由N-S 方程求出, 如图 4 所示。

3.1 迭代过程

从图 4 可看出, 计算出的气流角与目标函数存在着一定的差别, 因此需要对气流角分布进行

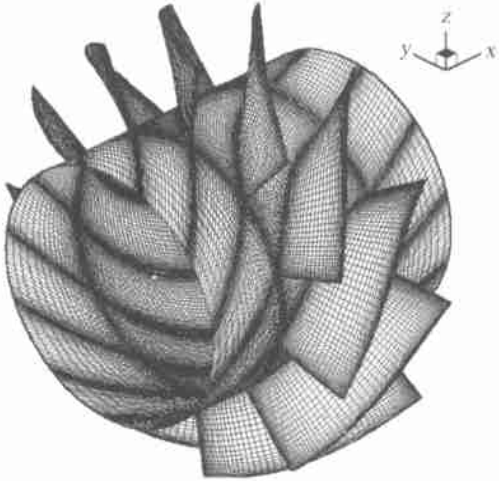


图 3 由问题求解所得的三维计算网格

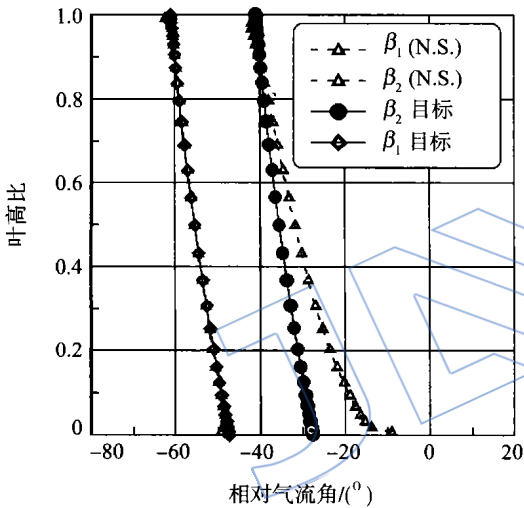


图 4 由 N-S 方程求解所得的相对气流角

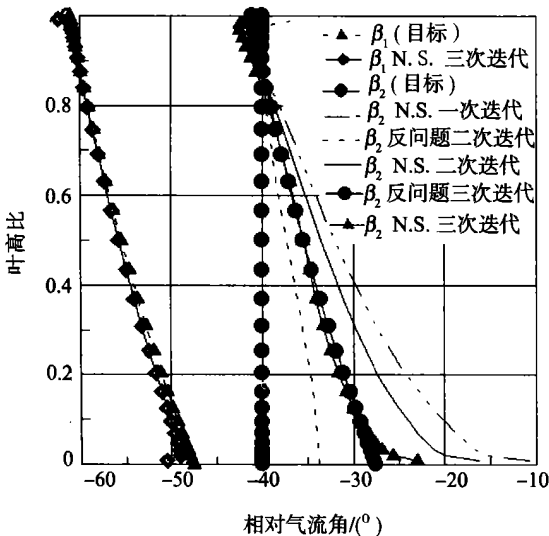


图 5 逐次近似所得的相对气流角分布

重新修正。首先根据修正后的气流角,应用反问题求解方法重新生成三维叶型和网格;然后采用 N-S 算法对新生成的叶型重新计算。通过对计算值与目标函数再次比较与分析,确定下一次迭代的修正值。经上述过程的反复迭代,直至收敛,并最终得到满足设计要求的叶型。气流角分布的收敛过程如图 5 所示。对于本文的算例,整个迭代次数仅需 3 次。迭代时采取类似数值求解的原则。

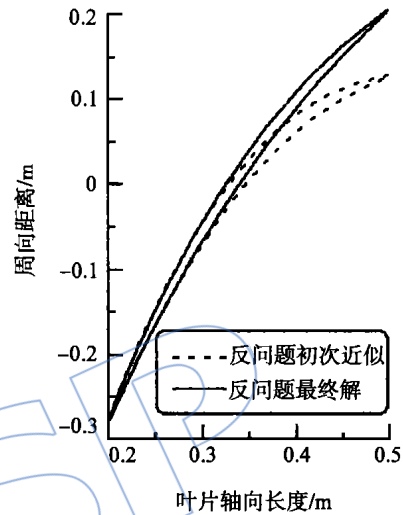


图 6 初次近似和最终解所得的根部叶型

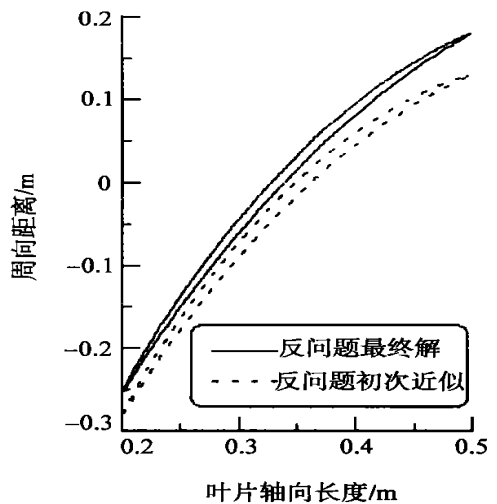


图 7 初次近似和最终解所得的中部叶型

3 2 计算结果

由于本文采用了 N-S 求解方法,因此我们就可得到详细的气动参数分布,如周向平均的径向分布,不同回转面上的等参数等值线图以及总参数分布等。图 6~ 图 8 分别为第一次和第三次迭代后所生成的叶片根部、中部和顶部叶型。计算得到的速度分量和绝热效率的径向分布如图 9 和图

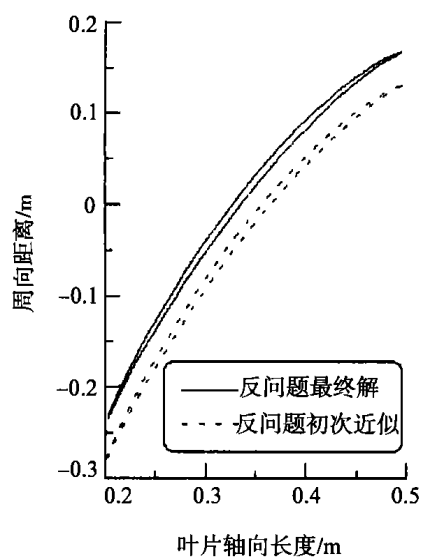


图 8 初次近似和最终解所得的顶部叶型

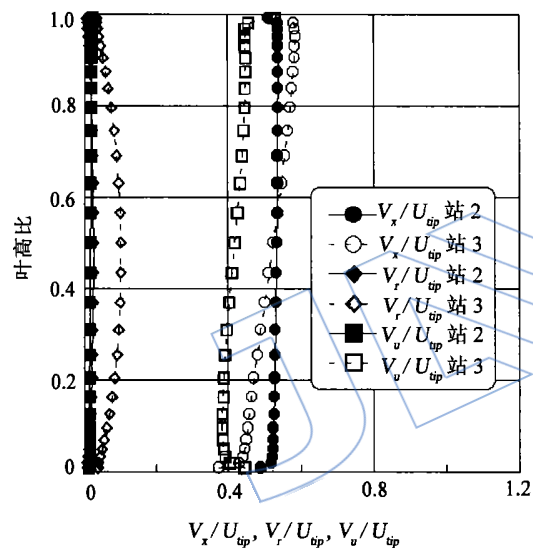


图 9 叶片前后的速度分量沿叶高的分布

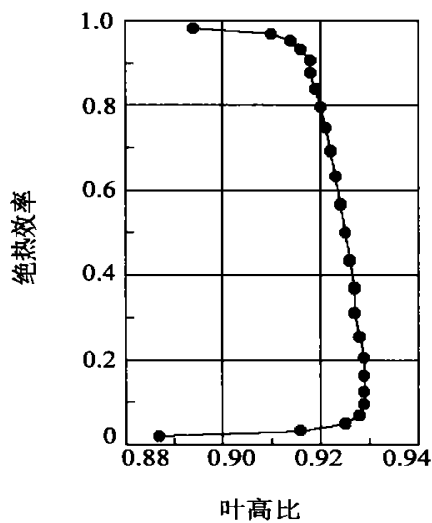


图 10 风扇的绝热效率沿叶高的分布

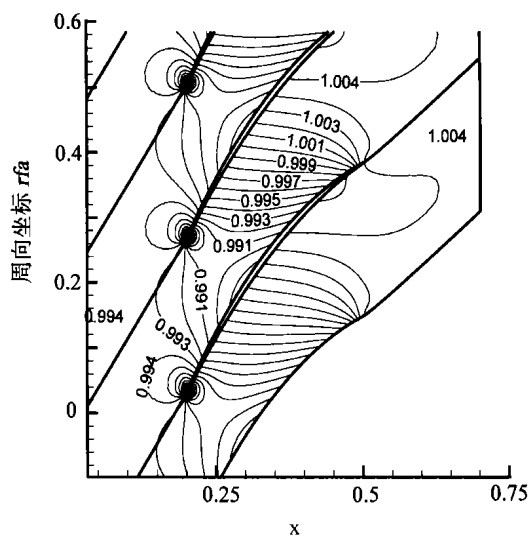


图 11 叶中任意回转面的静压分布

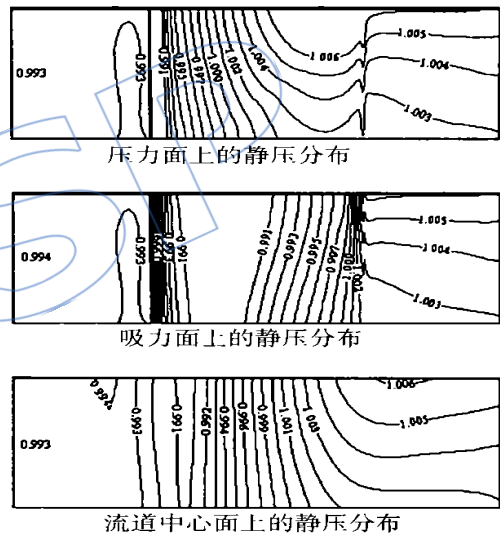


图 12 压力面、吸力面和流道中心面上的静压分布

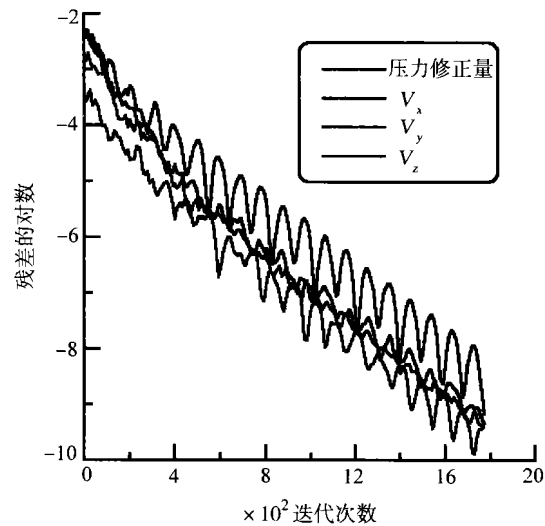


图 13 迭代的收敛历史

10 所示。为节省篇幅文中只给出少量的细节,如图 11 的叶片中部回转面上的静压等值图,图 12 的 S2 面上的静压等值线图。图 13 为 N-S 方程求解的收敛史。

3.3 风扇特性

本文所设计的风扇特性曲线如图 14 和图 15 所示,分别表示总压比、总温比以及绝热效率与流量的关系。这对设备的正常运行非常重要。

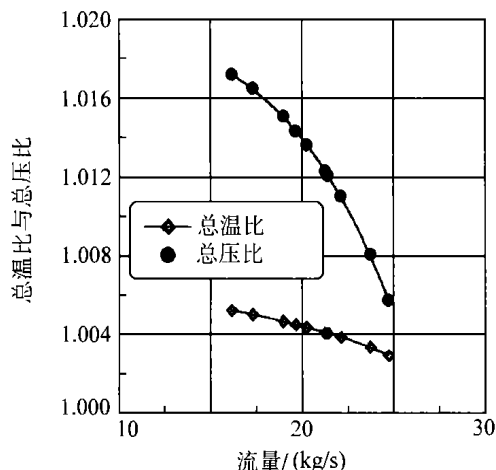


图 14 总温比和总压比与流量之间的关系

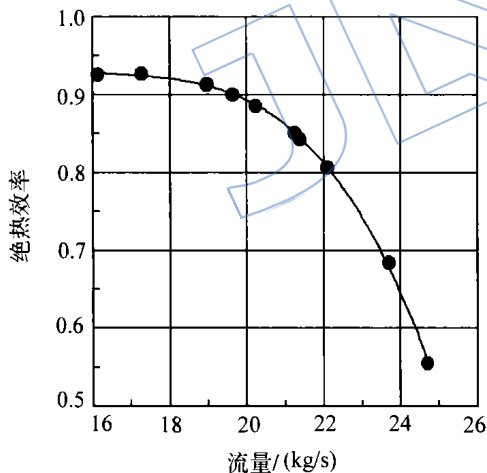


图 15 绝热效率与流量之间的关系

4 结 论

本文提出一种反问题求解与 N-S 方程算法相结合的气动设计方法。该方法将反问题与 N-S 正问题解有效地结合起来,首先采用反问题求解以构造出三维叶型和网格,然后应用 N-S 算法计算出叶片气动性能参数,通过两种算法反复迭代最终得到所需的叶型。本文设计方法具有很好的实用价值,特别是在反问题与 N-S 算法的选取上

具有很大的灵活性。本方法计算稳定性好,速度快,对于风扇算例,仅需 3 次迭代,即可获得满足气动与强度设计要求的三维叶型,因此本方法可作为叶轮机械气动设计的一种有效工具。

致谢 本文工作得到国家重点基础研究项目 973 与国家自然科学基金项目的资助,作者在此表示深深的谢意。我们对于新西兰科学与技术研究基金的部分资助和奥克兰大学给予第一作者的计算机的使用,也表示衷心的感谢。

参考文献

- [1] Luu T S, Viney B, Bencherif L. Inverse Problem Using S1 and S2 Approach for the Design of the Turbomachine with Splitter Blades [J]. *Revue Francaise de Mecanique*, 1992, (3).
- [2] Chen Naixing, Li Weihong. A Method for Solving Aerodynamic Hybrid Problem of Profile Cascade on S1 Stream Surface of Revolution by Employing Stream-Function Equation Expressed with Non-Orthogonal Coordinate System [A]. *Proc. International Conference on Inverse Design-Concepts in Engineering Sciences (ICDES)* [C], Edited by G. S. Dulikravich, 1984.
- [3] Chen Naixing, Zhang Feng-xian, Li Weihong. An Inverse (Design) Problem Solution Method for Blade Cascade Flow on Stream Surface of Revolution [J]. *Journal of Turbomachinery*, Trans. ASME, 1986, 108(2): 194-199.
- [4] Chen Naixing, John J J, Chen X D. A SFC Inverse Method with the Distribution of Target Circulation or its First Derivative for Turbomachine Design [A]. *Proceeding, the 7th International Rotational Machinery Conference* [C], Feb., 1998: 1386-1393.
- [5] Chen Naixing. Numerical Methods for Inverse Solution in Aerodynamic Design of Turbomachinery [J]. *Recent Development of Aerodynamic Design Methodologies-Inverse Design and Optimization*, Edited by K. Fujii and G. S. Dulikravich, Friedr. Vieweg and Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 1999: 113-145.
- [6] Chen Naixing, Xu Yan-ji. Numerical Computation of 3-D Turbulent Flow in Turbine Cascade [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1990, 35(14).
- [7] Chen Naixing, Xu Yan-ji. Numerical Solution of 2-D and 3-D Turbulent Internal Flow Problems [J]. *Int. Journal of Numerical Methods in Fluids*, 1991, 13(4).
- [8] Chen Naixing, Xu Yan-ji, Huang W G, Ma H W, Jiang H K. Numerical Study on 3-D Turbulent Flow in a Low-Speed Axial Single Rotor Compressor and its Comparison with Experiment [R]. *Contributed Paper, No. 009, Proceeding of the Fourth International Symposium on Experimental and Computational Aerothermodynamics of Internal Flow*, Aug. 31-Sept. 2, 1999.

(责任编辑 杨再荣)