

文章编号: 1000-8055(2000)04-0360-04

一种离心压气机性能仿真数学模型

杨 策, 马朝臣, 老大中

(北京理工大学 车辆工程学院 301 实验室, 北京 100081)

摘要: 阐述了一种能够达到设计精度要求的快速简单离心压气机性能仿真数学模型, 模型中计及离心压气机内出现的各种损失, 采用迭代方法计算几个划分截面上的子午速度。为了保证计算精度, 叶轮出口和扩压器间流动划分成多段交错网格进行计算。采用建立的数学模型对 Krahn 离心压气机叶轮性能进行了模拟, 并把计算结果同三维 N-S 方程的计算结果进行了比较。结果表明, 采用建立的仿真模型能够用来模拟离心压气机叶轮性能, 为设计离心压气机提供了一个有利的工具, 而且对带有涡轮增压器的内燃机设计具有重要的实际意义。

关键词: 离心压气机; 性能; 数学模型; 仿真

中图分类号: V 235. 13

文献标识码: A

1 引言

在设计离心压气机过程中, 一个重要的环节是能否在初步设计阶段准确仿真离心压气机的性能, 只有这样, 才能缩短设计周期, 降低设计成本, 提高设计效率。仿真离心压气机性能对内燃机的设计也具有重要的意义, 它同样能够缩短内燃机的设计周期, 提高内燃机的设计效率。

从理论上讲, 采用求解三维 N-S 方程方法可以完成离心压气机性能仿真任务, 但存在很大问题。首先, 求解三维 N-S 方程方法非常费时, 在初步设计阶段使用求解三维 N-S 方程计算程序无疑会导致设计成本升高。同时, 由于离心压气机受离心力、哥氏力的影响, 导致内部流场非常复杂, 目前还没能搞清内部流场流动机理。因此, 即使是在设计转速下, 采用求解三维 N-S 方程方法也很难准确模拟离心压气机性能, 而在非设计转速小流量工况下则更难准确模拟。从已经公布的文献看, 文献[1, 2, 3]采用求解三维 N-S 方程方法成功计算了设计转速下离心压气机性能, 均取得满意的计算结果, 但都未涉及非设计转速小流量工况下的性能仿真, 因此很有必要开发一种简单实用, 能够模拟全工况性能又能保证计算精度的离

心压气机性能仿真数学模型。

2 数值模型

整个数学模型包括: 叶轮入口(截面 1)计算、叶轮出口(截面 2)计算、叶轮出口和扩压器入口中间区域计算、扩压器入口(截面 3)计算、扩压器出口计算(截面 4)计算。

2.1 叶轮入口(截面 1)计算

离心压气机叶轮入口面积由下式求得:

$$A_1 = \frac{\pi(r_{s1}^2 - r_{h1}^2)}{\sin \gamma} - \frac{Z \delta_1 (r_{s1} - r_{h1})}{\sin \gamma \cos \beta_{1,av}}$$

其中: r_{h1} 为入口轮毂半径, r_{s1} 为入口轮缘半径, Z 为叶轮叶片数目, δ_1 为入口平均叶片厚度, $\beta_{1,av}$ 为叶片入口平均相对气流角, γ 为叶片前缘和轴向之间的夹角。如果叶片前缘与轴向垂直时 $\gamma = 90^\circ$, 上式右边均为输入参数。叶轮入口参数通过迭代计算获得, 应获得的参数包括周向绝对速度, 子午速度, 相对速度, 绝对 Ma 数等。开始计算时, 假设一个初始进口子午速度, 然后迭代计算进口子午速度, 达到规定的误差标准后标志计算获得成功。

2.2 叶轮出口(截面 2)计算

在叶片进口参数获得后, 可根据进口情况求得叶轮出口流动参数。在求解出口流动参数过程

收稿日期: 1999- 10- 29; 修订日期: 2000- 01- 04

作者简介: 杨策(1964-), 男, 北京理工大学讲师, 博士

中,需要求解两个迭代过程,一是求解效率的迭代过程,另一个是求解叶轮出口子午速度的迭代过程,在开始求解时要对上面两个参数赋初值。叶轮出口面积为 $A_2 = (2\pi r_2 - Z\delta_2/\cos\beta_2)b_2$, 其中, r_2 为叶轮出口半径, δ_2 为叶片出口边平均厚度, β_2 为叶片出口角, b_2 为出口叶片高度。求解叶轮出口参数过程中,一个很重要的参数是滑移因子 μ 的求解。计算滑移因子的公式很多,完全从理论上来确定 μ 是很困难的,故通常是按照一些经验公式来确定,本模型在设计工况下采用了 Eckert^[4] 公式和 Stanitz^[5] 公式计算 μ_0 。而在非设计工况下分几种情况对滑移因子进行修正: (1) 如果叶轮入口攻角为正,且计算获得的叶轮出口相对气流角 β_2 大于设计工况下叶轮出口相对气流角 β_{2d} 的情况下,滑移因子 μ 的计算公式为:

$$\mu = (\mu_d - 1)(W_2/W_{2d})^2 + 1$$

其中: μ_d 为设计工况的滑移因子, W_{2d} 和 W_2 分别为设计工况和非设计工况出口气流相对速度。(2) 如果叶轮入口攻角为正,且计算获得的叶轮出口相对气流角 β_2 小于设计工况叶轮出口相对气流角 β_{2d} , 此时滑移因子 μ 的计算公式为:

$$\mu = 1 + (\tan\beta_2 - \tan\beta_{2b})/U_2/C_{m2}$$

其中: β_{2b} 为叶片出口几何角, C_{m2} 为叶轮出口气流子午速度。(3) 如果叶轮入口攻角为负,采用方法(2)计算滑移因子 μ_0 。在 μ 确定后,可根据 μ 确定叶片出口气流角 $\beta_2 = \tan^{-1}\{\tan\beta_{2b} - U_2/C_{m2}(1 - \mu)\}$ 。在相对气流角确定以后,即可求得其它气流参数。

2.3 叶轮出口和扩压器入口(截面 3)

间区域计算

离心压气机叶轮出口流场流动参数分布并不均匀,一般存在“射流—尾迹”流动结构,导致离心压气机效率下降较大。因此,如何准确模拟叶轮和扩压器间的相互作用对仿真数学模型的精确与否是非常关键的。为了保证模拟精度,本数学模型把这一区域沿径向划分成多个交错网格^[6]进行计算,在一个网格内同时求解两个一阶非线性微分方程。这一区域流道宽度 b 沿径向的变化规律规定为: $b/b_2 = 1 + B(r/r_2 - 1) + C[(r/r_2)^2 - 1]$ 。其中, B 和 C 为输入常数。压力沿径向的变化表示为:

$$C_r \frac{dC_r}{dr} - \frac{C_\theta^2}{r} = -\frac{1}{2\rho} \frac{dp}{dr} + \frac{\tau_r}{\rho b b_2}$$

其中, C_r 为径向速度, C_θ 为周向速度, ρ 为密度, τ 为粘性剪切应力。子午速度沿径向的变化可表示

为: $C_\theta + r dC_\theta/dr = c_f C_\theta r (r_2/b_2) \sqrt{C_r^2 + C_\theta^2}$ 其中, c_f 为粘性系数。粘性系数的计算公式为:

$$c_f = 2c_{fk}/(Re)^{1/5} \{1 + [(k - 1)/2] M^2\}^{0.45}$$

式中, c_{fk} 为输入常数。粘性剪切应力的计算公式

$$\tau = 1/2 \rho c_f C_r \sqrt{C_r^2 + C_\theta^2}$$

2.4 扩压器出口(截面 4)气流参数的计算

为了求得扩压器出口气流参数,必须求得扩压器入口到出口的压力损失,这一参数可由下式求得:

$$\Delta p_{3,4} = \frac{\rho_3 C_3^2}{2} \left\{ 1 + 4.4 \left[1 - \left(\frac{r_3}{r_2} - 1 \right)^{1/3} \right] \times \left[1 - \frac{W_3}{W_{s1}} \right]^3 \left[0.07 + 0.0038 \left(\frac{C_{max}}{C_4} - 1 \right)^3 + 0.0038 \left(\frac{C_3}{C_4} - 1 \right)^3 \right] \right\} \quad (1)$$

其中, ρ_3 为扩压器入口密度, C_3 为扩压器入口绝对速度, W_{s1} 为叶轮入口轮缘处相对速度, W_3 为扩压器入口相对速度, C_4 为扩压器出口绝对速度, $C_{max} = C_3(1 + i\xi_c)$ 。其中, ξ_c 为一输入系数, i 为攻角。扩压器出口密度为:

$$\rho_4 = \frac{\rho_3 - |\Delta p_{3,4}|}{RT_{o2}} \left(1 - \frac{C_4^2}{2T_{o2}C_p} \right)^{\frac{1}{1-k}}$$

其中, T_{o2} 为叶轮出口总温。扩压器出口其它参数的计算公式不再给出。

2.5 各种损失模型

损失模型是离心压气机性能仿真模型中的一个重要组成部分,有必要给出部分计算公式,下面给出的损失模型均为无量纲形式。叶片表面摩擦损失为: $\Delta q_{sf} = 2c_f L_B / d_{HB} (\bar{W}/U_2)^2$ 。

其中, $\bar{W} = (2W_2 + W_{1s} + W_{1h})/4$

$$L_B = \frac{\pi d_2 - (d_{s1} + d_{h1})/2 - b_2 + 2L_z}{4 \cdot 0.5(\cos\beta_{s1} + \cos\beta_{h1}) + \cos\beta_2}$$

L_z 为叶轮轴向长度, d_{HB} 为平均水力直径。转子顶部间隙损失是离心压气机损失中的一个重要组成部分,可按式计算:

$$\Delta q_1 = 0.6 \left(\frac{\Delta x_1}{b_2} \right) \left(\frac{C_\theta}{U_2} \right) \cdot \sqrt{\frac{4\pi}{b_2 Z} \left[\frac{r_{s1}^2 - r_{h1}^2}{(r_2 - r_{s1}) \left(1 + \frac{\rho_2}{\rho_1} \right)} \right] \left(\frac{C_\theta}{U_2} \right) \left(\frac{C_{m2}}{U_2} \right)} \quad (2)$$

其中, Δx_1 是叶片顶部间隙。扩压器出口损失为: $\Delta q_{ex} = (K_{ex}/2)(C_4/U_2)^2$, 其中 K_{ex} 为一输入系数。在求得各种损失后,即可求得叶轮效率和绝热级效率。

3 三维 N-S 方程计算程序简介

本文计算使用的三维 N-S 方程计算程序是采用时间推进的有限体积方法编制的, 在这个程序中, 方程的自变量选取在控制体的顶点, 采用简单的 H 形网格离散微分方程, 离散后的代数方程使用显式时间推进方法求解。为了提高计算效率, 一些数值方法, 如多重网格方法, 当地时间步长方法均在程序中得到使用。流场的湍流粘性是通过 Baldwin-Lomax 模型进行模拟的。使用这个程序计算了 Krahn 离心压气机性能及内部流场^[1], NASA 67[#] 跨音速风扇转子内部流场^[7], NASA 37[#] 跨音速压气机转子内部流场^[8], 均取得满意的计算结果, 证明这个程序能够用来计算轴流、径流叶轮机械内部流场。关于这个程序的详细计算方法参阅有关文献。

4 计算实例及计算结果分析

采用上述仿真模型计算了 Krahn 设计的离心压气机。因为这个叶轮有详细的激光测量结果, 同时给出了可靠的性能曲线, 因此, 国内外有很多学者使用这个压气机的实验结果验证和校准三维流场计算程序^[1~3,9]。本文用这个实例, 目的也是为了获得比较可靠的离心压气机性能仿真模型。

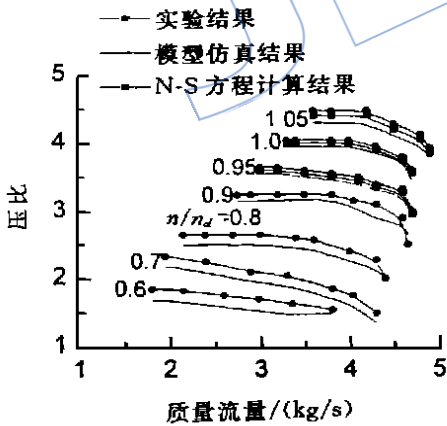
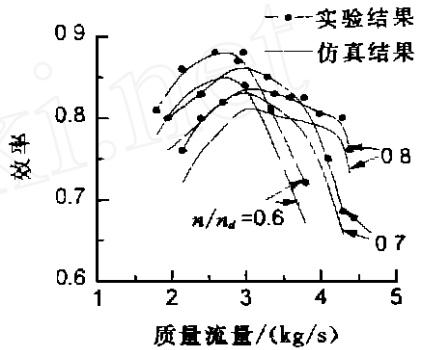


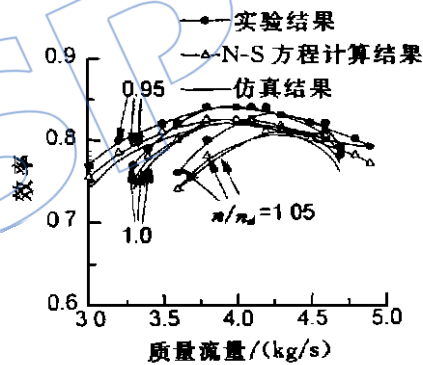
图 1 压比随质量流量变化曲线

图 1 给出了压比随质量流量变化的性能曲线, 其中包括实验结果、采用 N-S 方程的计算结果和采用本文数学模型的计算结果。而采用三维 N-S 方程只计算了 0.95, 1 和 1.05 设计转速下的特性线, 这主要是因为要想获得全部的特性曲线需要大量的计算时间。值得说明的一点是目前采用仿真模型不能获得喘振边界, 而采用三维 N-S 方程基本能获得喘振边界, 但需要大量的计算时

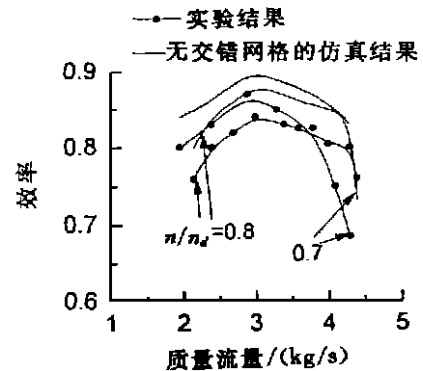
间。从图 1 中可以看出采用仿真模型预测的性能曲线和实验曲线在压气机全范围工况内符合的很好, 并且和三维 N-S 方程的计算精度相差很小。这主要是由于仿真模型考虑了各种损失模型, 而三维 N-S 方程方法没有全面考虑这些因素, 比如没有考虑叶轮内部间隙内的泄漏流动等。图 2(a)



(a)



(b)



(c)

图 2 效率随质量流量变化曲线

和 (b) 给出了效率随质量流量变化的性能曲线。从图中可以看出, 模型仿真结果和实验结果两者相差不大, 图 2(b) 还包括采用 N-S 方程计算获得的结果, 从图 2(b) 可以看出, 采用 N-S 方程的计算结果比本文数学模型的仿真结果更接近实验结

果。图 2(c) 给出了在叶轮出口没有采用交错网格时在 0.7 和 0.8 设计转速情况下的仿真结果和实验结果。从图中可以看出仿真获得的效率明显比实验结果高, 在其它转速下也有类似现象。上述现象说明在叶轮出口采用交错网格用以提高仿真精度是完全必要的, 这主要是因为实际情况下叶轮出口速度分布十分的不均匀, 普遍称之为“射流—尾迹”流动现象, 这种现象的存在引起整个叶轮级产生很大的效率损失。因此在仿真模型中必须考虑叶轮和扩压器之间的相互影响、相互作用。在叶轮出口采用交错网格, 并近似引入壁面粘性即是为了有效模拟叶轮和扩压器之间的相互干涉现象。

5 结 论

(1) 使用本文建立的离心压气机性能仿真数学模型能够模拟离心压气机性能。

(2) 用求解三维 $N-S$ 方程方法模拟离心压气机性能需要大量计算时间, 且由于程序中没有考虑叶片顶部间隙内流动, 同时受湍流模型的限制, 模拟结果与实验数据间同样存在一定的差别。

(3) 比较计算结果表明, 在叶轮出口和扩压器之间建立一个交错网格区域, 用以提高模拟精度是非常必要的。

(4) 采用本文建立的数学模型能够指导离心压气机设计和带有涡轮增压器的内燃机设计。

参考文献

- [1] 杨策, 索沂生, 蒋滋康. 用粘性体力方法计算高速离心压气机叶轮内部流场[J]. 航空动力学报, 1999, 14(1): 11-14
- [2] Krain H, Hoffman W. Verification of an Impeller Design by Laser Measurements and 3D - Viscous Flow Calculations[R]. ASME Paper, 1989, No. 89- GT- 159
- [3] Hah C, Krain H. Secondary Flow s and Vortex Motion in a High- Efficiency Backswept Impeller at Design and off- Design Conditions[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 7- 13
- [4] Stanitz J D. Approximate Design Method for High- Solidity Blade Elements in Compressors and Turbines[R]. 1961, NASA TN- 2408
- [5] 王延生, 黄右生. 车辆发动机废气涡轮增压器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984
- [6] Patanker S V, Spalding D B. A calculation Procedure for Heat, Mass and Momentum Transfer in Three - dimensional Parabolic Flow s[J]. Internal Journal of Heat Mass Transfer, 1972, 15: 1787- 1806
- [7] 蔡瑞中, 杨策, 蒋滋康, 老大中. 跨音速低展弦比轴流风扇转子内部流场的数值研究[J]. 推进技术, 1998, 19(5): 70- 74
- [8] 杨策. 轴流、径流叶轮机械内部流场数值研究: [博士学位论文][D]. 北京: 清华大学热能工程系, 1998
- [9] Kunz R, Lakshminarayana B. Navier- Stokes Investigation of a Transonic Centrifugal Compressor Stage Using an Algebraic Reynolds Stress Model[R]. AIAA Paper, 1992, 92- 3311

(责任编辑 杨再荣)

Mathematical Model to Simulate Centrifugal Compressor Performance in Design and off-Design Regimes

YANG Ce, MA Chao-chen, LAO Da-zhong

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: A rapid and simplified mathematical model used to simulate the centrifugal compressor was developed. In the mathematical model, the compressor is divided into several sections, and the parameters in the sections are calculated using iterative method. The stagger grid is used in the region between the impeller exit and diffuser inlet to guarantee accurate simulation. Predicted compressor performance is compared with experimental data for Krain's compressor. The predicted results using 3-D Navier-Stokes equations are also presented for comparison. It is shown that the mathematical model can properly simulate the centrifugal compressor performance.

Key words: centrifugal compressor; performance; mathematical model; simulation