

文章编号: 1000-8055(2007)08-1330-05

平板上有叶片绕流的源项模型

高立虎¹, 张锡文¹, 何 枫¹, 朱 宇²

(1. 清华大学 航天航空学院, 北京 100084; 2. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

摘 要: 将源项模型应用于叶片涡流发生器的数值模拟中, 以叶片在当地流场中产生的升力作为源项一个分量原型, 并引入了法向力作为源项另一个分量原型. 该源项由叶片的形状、大小、位置以及来流条件等参数决定. 在数值模拟中, 叶片位于平板上, 其高度约为当地边界层厚度的 $1/5$. 在相同计算条件下, 对“升力-法向力”源项模型计算结果和全网格计算结果及实验数据进行比较. 源项模型可以得到与全网格数值模拟基本一致的诱导速度场和涡量场, 而网格量减少了 65%.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 叶片; 源项模型; 涡流发生器; 法向力; 流向涡

中图分类号: V228.7

文献标识码: A

Source term model of vane flow on a flat plate

GAO Li hu¹, ZHANG Xi wen¹, HE Feng¹, ZHU Yu²

(1. School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Shenyang Aircraft Research Institute, Shenyang 110035, China)

Abstract: A source term model was applied to numerical simulation of a vane vortex generator, where the lift force created by a vane vortex generator was used as one part of the prototype of source term model, and a normal force was introduced as the other one. The source term depends on the shape, size and location of the vane and the freestream conditions. During numerical simulation, the vane was located on a flat plate, with its height about one fifth of the thickness of local boundary layer. The calculated results of “lift & normal force” source term model were compared under the same conditions with the calculated results and experimental data for a full gridded vane vortex generator. This source term model helps to predict the velocity and vortex fields in consistent with a full gridded vane vortex, but the grid number reduces by 65%.

Key words: aerospace propulsion system; vane; source term model; vortex generator; normal force; streamwise vortex

为了减少飞行器的制造成本和提高飞行器的隐身性能, 人们已经在战斗机或无人作战飞机中应用 S 形进气道, 但这种进气道会大大增加其出口截面处的流场畸变, 影响发动机的性能, 于是人们在进气道内壁面边界层分离处安置了涡流发生器, 它们会对流场产生小的扰动, 进而大大降低进

气道出口处的流场畸变^[1], 通常用叶片和射流涡流发生器在流场中产生涡流.

随着计算机的飞速发展和普及, 利用 CFD 技术对进气道进行数值模拟设计已经变得普遍了. 研究人员已经确认 CFD 技术可以模拟涡流发生器诱导的复杂流场和涡流, 可以比较准确地得到

收稿日期: 2006-07-31; 修订日期: 2006-11-25

作者简介: 高立虎(1983), 男, 江苏徐州人, 硕士生, 主要从事流体仿真方面的研究.

通讯作者: 何枫, 清华大学航天航空学院, 100084, hefeng@tsinghua.edu.cn.

涡流发生器下游的流场和诱导流向涡的各种性质, 包括流向涡的大小、形状、位置和衰减等^[2]. 涡流发生器的尺度很小, 直接对它们进行全网格数值模拟需要生成数量巨大的网格并由此带来巨大的计算量, 因此, 应用 CFD 技术来数值模拟安置了大量涡流发生器的进气道仍然十分艰难. 基于这种原因, Bender 提出以叶片在流场中产生的升力为原型的源项模型代替涡流发生器进行数值模拟^[3]. Waithe^[4] 利用该“升力”源项模型对平板上有叶片绕流的流场进行源项数值模拟, 该源项模型与全网格的数值模拟结果基本吻合, 但其对流向涡核心位置的模拟则比较差. Waithe^[5] 还利用“升力”源项模型对安置涡流发生器的进气道进行了源项模型数值模拟, 得到了与全网格数值模拟较为一致的结果. Chima 等人^[6] 在 Bender 的基础上同时引入当地流场对叶片产生的升力和阻力为原型作为源项对涡轮机械组进行源项模型数值模拟.

为了进一步改善源项模型对叶片诱导流向涡核心位置的模拟, 本文以流场对叶片产生的升力^[3]和法向力为原型引入源项的两个分量, 采用“升力-法向力”源项模型对平板上放置的有攻角的矩形叶片进行数值模拟, 并将该源项模型数值模拟的结果与相同计算条件下的全网格数值模拟的结果进行比较.

1 源项模型的提出

Bender 等人发展的源项模型可以应用 Navier-Stokes 方程进行求解, 该模型以叶片在流场中产生的升力作为源项的原型, 该源项记作 L , L 与当地流矢量垂直并平行于平板平面, 其表达式由 (1) 式给出, 并可进一步写成式 (2) 的形式^[3]

$$L = c S_{vc} \rho |U|^2 \cdot j \tag{1}$$

$$L = c S_{vc} \rho (U \cdot n) (U \times b) \left[\frac{U}{|U|} \cdot t \right] \tag{2}$$

其中, c 为经验常数, S_{vc} 为叶片的单侧表面积, α 为叶片的攻角, ρ 为当地流的密度, U 为当地流的速度矢量, j 为升力的单位方向矢量, b , t 和 n 为叶片沿高、长、厚三个方向的单位方向矢量, L 的方向由 $(U \times b)$ 确定.

本文引入了法向力 G 作为源项的另一个分量, 参见图 1. 叶片位于边界层底部, 叶片上缘附近流体的速度 U_T 略小于来流速度 U_∞ , 而叶片下缘附近流体的速度 $U_B \rightarrow 0$ 且 $U_B < U_T$, p_B , p_T , p_B 分别为叶片上下缘处的静压, 因此, 叶片受到

一个法向方向的力 T .

$$T = (p_B - p_T) S_B \cdot k \approx \frac{1}{2} \rho |U_T|^2 S_B \cdot k \tag{3}$$

其中, k 为 T 的单位方向矢量, 这里, k 的方向为 z 轴的正方向, S_B 为叶片的底面积. 而对于流场中的流体来说, 它们会受到叶片对它的沿法向向下的反作用力 G , 它与 T 的大小相等、方向相反. 本文中, 在以源项代替叶片进行数值模拟时, 除了以叶片在流场中的升力为原型引入 L 作为源项的一个分量外, 还引入一个以法向力源项 G 为原型的源项分量 G , 其表达式为

$$G = c' \rho |U_T|^2 S_B \cdot k \tag{4}$$

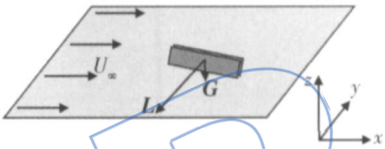


图 1 叶片源项
Fig. 1 Source term of a vane

2 计算条件

空间内有一平板, 自由来流自平板左缘流入, 来流的速度为 $U_\infty = 34 \text{ m/s}$, 叶片放置在平板入口下游 3.23 m 处, 叶片为长方体, 尺寸为 71 mm (长) $\times 1 \text{ mm}$ (厚) $\times 10.2 \text{ mm}$ (高), 叶片与自由来流的夹角 $\alpha = 10^\circ$, 计算区域为 430 mm (x) $\times 400 \text{ mm}$ (y) $\times 400 \text{ mm}$ (z).

数值模拟使用的软件为商用软件 FLU-ENT 6.2, 源项的加入利用其内部的 UDF 功能. 数值求解的是三维定常的 N-S 方程, 入口条件为速度入口, 平板边界条件为壁面, 叶片两侧边界的边界条件为周期性边界条件, 相当于在 y 方向放置了一列间距的叶片, 湍流模型为 $k-\omega$ 中的 SST 湍流模式.

计算网格为由“ICEMCFD”生成的六面体网格, 在叶片处局部加密, 叶片长、厚、高三个方向划分的网格数分别为 r , s , t , 本文中, 全网格数值模拟时, $r = 23$, $s = 5$, $t = 34$, 总网格数约为 260 万, 源项数值模拟时, $r = 7$, $s = 1/3$, $t = 34$, 总网格数约为 90 万.

3 计算结果及分析

3.1 经验常数 c 及 c' 的选取

式 (2) 中经验常数 c 的取值需要考虑源项数

值模拟时得到的叶片下游某位置处二次流的强度,二次流的强度由表示,的表达式参见式(5)^[3], u, v, w 为当地速度的三个分量, A 为速度的积分区域,这里, A 取叶片下游 $x=0.152\text{ m}$ 处的 yz 平面为积分区域.

$$K = \frac{\int \rho (v^2 + w^2) dA}{\int \rho u^2 dA} \tag{5}$$

图 2 给出了源项模型数值模拟和全网格数值模拟关于 $K^{1/2}$ 的比较,源项模型分别数值模拟了沿叶片厚度方向不同网格层数 $s=3, s=2, s=1, s=1/3$ 和不同的经验常数 $c=0.4, c=0.7, c=0.8, c=1.0$ 时的算例.

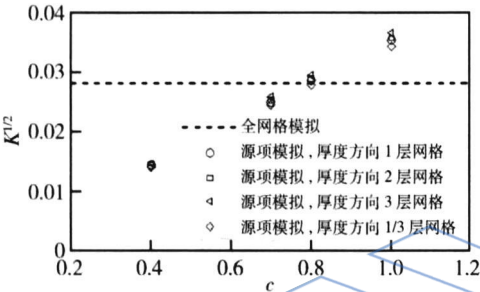


图 2 不同 c 时、不同网格层数时的 $K^{1/2}$ 值
Fig.2 $K^{1/2}$ versus calibration constant c and grid cells

当源项模型数值模拟时的 $K^{1/2}$ 值与全网格数值模拟时的 $K^{1/2}$ 值接近时,认为此时的 c 值是比较适合的,因此,在进行源项模型计算时,取经验常数 $c=0.8$,可以得到较好的结果.

由库塔儒可夫斯基条件,可知,绕平板有攻角流动的升力 Y 的大小近似为

$$Y = 2\pi S v_\infty \alpha \rho |U|^2 \tag{6}$$

而本文中用到的源项分量 L 的大小为

$$|L| = c S v_\infty \alpha \rho |U|^2 \tag{7}$$

比较(3),(4),(6),(7)式,可以得到 c' 的取值为 $c' = -c/4\pi \approx -0.0637$.

3.2 计算结果及分析

3.2.1 诱导流向涡的涡心性质分析

叶片会在其后的流场中诱导出流向涡,衡量源项数值模拟结果好坏最重要的指标之一即为叶片诱导流向涡的各种性质,如流向涡的涡心位置 x, y, z 和涡量极值 $|\omega_{\max}|$.图 3 给出了源项模型数值模拟、全网格数值模拟以及实验^[2]关于流向涡的涡心位置和涡量极值的比较,图中还比较了本

文提出的“升力-法向力”源项模型和“升力”源项模型对流向涡的涡心位置和涡量极值的模拟.涡心的坐标值均用叶片位置处的边界层厚度 δ 进行了无量纲化,其中, $\delta=0.045\text{ m}$.可以看出,“升力-法向力”源项模型数值模拟与全网格数值模拟关于流向涡的涡心位置和涡量极值的模拟基本一致,“升力-法向力”源项模型改善了“升力”源项模型对流向涡涡心位置的模拟.

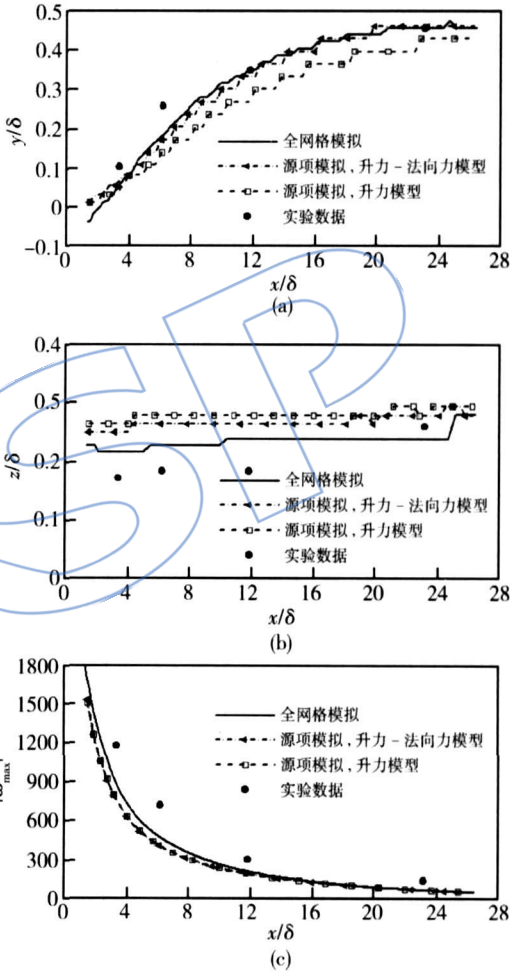


图 3 不同 x/δ 处流向涡的涡心参数, $\delta=0.045\text{ m}$
Fig.3 Parameters of peak streamwise vortex versus nonr dimensional x coordinate by $\delta, \delta=0.045\text{ m}$

3.2.2 诱导速度场和诱导涡量场的比较分析

叶片在流场中的诱导速度场和诱导流向涡量场是衡量源项模型结果好坏的重要指标之一.

沿 x 方向在叶片下游截取四个位置: $x=0.152\text{ m}, x=0.276\text{ m}, x=0.533\text{ m}, x=1.04\text{ m}$.图 4 分别给出了“升力-法向力”源项模型数值模拟和全网格数值模拟的在这四个位置处 yz 平面内的流向速度等值线图 and 流向涡量等值线图,通过对比可以发现它们的结果基本一致.

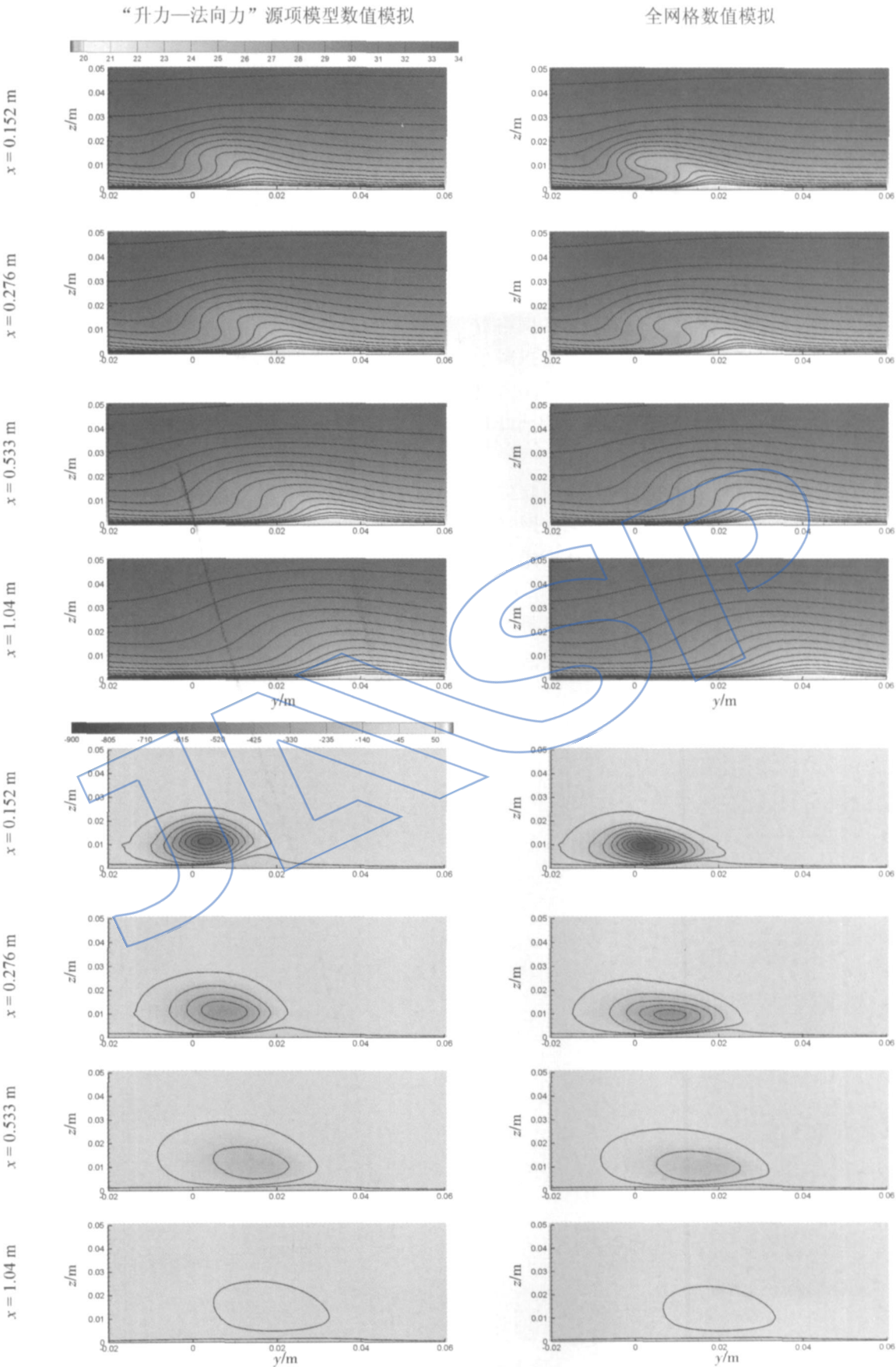


图 4 叶片下游不同位置处 yz 平面内的流向速度和流向涡量等值线

Fig. 4 Streamwise velocity and vorticity contours in plane yz at various distances downstream from the vane

4 结 论

一般来说, 源项数值模拟可以较为准确地模拟出叶片对下游流场的扰动, 它可以替代全网格来数值模拟得到叶片下游的速度场和流向涡量场. 与“升力^[3]”源项模型相比, 以“升力法向力”作为源项模型对叶片诱导流向涡的涡心位置的数值模拟更接近全网格数值模拟和实验^[2]的结果, 起到了改善源项数值模拟诱导流向涡的涡心位置的作用.

源项的使用可以使数值模拟所需要的网格数由 260 万左右下降到 90 万左右, 网格量可以减少 65%, 在叶片附近网格量更是可以减少 90% 以上, 这对利用数值方法模拟大量、紧密排列的叶片具有十分重要的意义.

源项模型的使用比较简单, 许多商用软件均可直接实现, 并且其得到的流场信息与全网格数值模拟基本一致, 因此该方法可以广泛应用于工程计算中.

在工程计算允许的误差范围内, 可以将本文中提出的“升力法向力”源项模型应用于安置涡

流发生器的进气道内的流场计算, 这样不仅可以大大减少计算的网格量, 还可以大大提高计算速度, 节省大量的时间.

参考文献:

[1] Wendt B J. Initial circulation and peak vorticity behavior of vortices shed from airfoil vortex generators[R]. NASA/CR-2001-211144, 2001.

[2] Allan B G, Yao C S, Lin J C. Numerical simulations of vortex generator vanes and jets on a flat plate[R]. AIAA 2002-3160, 2002.

[3] Bender E E, and Anderson B H. Vortex generator modeling for Navier Stokes codes [C] // Proceedings of the 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, San Francisco, California: [s. n.], July 18-23, 1999.

[4] Waithe K A. Source term model for an array of vortex generator vanes[R]. NASA/CR-2003-212157, 2003.

[5] Waithe K A. Source term model for vortex generator vanes in a Navier Stokes computer code[C] // The 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit Reno, Nevada: [s. n.], January 5-8, 2004.

[6] Chima R V. Computational modeling of vortex generators for turbomachinery [C] // Proceedings of TURBO EXPO Amsterdam, the Netherlands: [s. n.], 2002.