

多级轴流压气机展向掺混的数值模拟*

西北工业大学 姚吉先** 周新海

【摘要】 在紊流扩散模型的基础上,通过引入二次流造成的气流过转折/欠转折影响,完成了 S_2 流面的展向掺混数值模拟。分别用 Gallimore-Cumpsty 掺混模型或 Baldwin-Lomax 紊流模型计及紊流扩散的作用;落后角的预估在二维 Carter 公式基础上引入了 Roberts 二次流修正模型。应用上述方法对两台 3 级轴流压气机进行了计算。计算的出口总温、总压等参数与实验较吻合,与其他单独考虑紊流扩散和二次流效应的掺混计算结果比较表明了本文方法的有效性。

关键词: 展向掺混 紊流扩散 欠/过转折

1 前言

随着轴流压气机气动设计向着更高的级负荷和更低的展弦比方向发展,气流展向再分布得以加强。因此,在多级轴流压气机的气动设计和分析中引入展向掺混效应已成为一个迫切需要解决的关键问题。

在展向掺混的机理分析与预测中,先后有 Adkins-Smith^[1]和 Gallimore-Cumpsty^[2]两种模型,前者认为决定展向掺混的主要因素是二次流对流效应;后者则认为随机的紊流扩散起了主导作用。后来,Wisler^[3]的研究则给出了更为严谨和全面的分析,他的结论是二次流和紊流扩散在展向掺混过程中都起了重要作用—紊流扩散效应是处处存在的,但在端壁区和叶片表面附近,二次流对流作用有与紊流扩散相同或更高的量级。

值得指出的是,文献[1、3]中都特别强调了二次流造成的气流在叶排中的欠/过转折的作用,文献[3]认为这是二次流分析中的一个最重要的方面,而在掺混模型的讨论中却往往被忽视了。

基于这一观点,本文在 S_2 流面通流的展向掺混计算中,以紊流扩散模型为基础,引入了二次流造成的气流欠/过转折的影响。对紊流扩散的贡献分别用 G-C 模型^[2]和 B-L^[4]模型进行模拟,以 Carter 公式加 Roberts^[5]修正得到落后角来考虑二次流造成的气流欠/过转折。计算发现,用 G-C 模型并引入 Roberts 二次流角度修正的做法得到了相当好的结果。

2 主方程

连续方程

$$G_B = \int_{hub}^{tip} 2\pi r B \rho W_m \cos(\varphi + \lambda) dl$$

站向运动方程

$$\begin{aligned}
W_m \partial W_m / \partial = & [\partial / \partial - T \partial \partial / \partial] - (V_{ur} - \omega r^2) / r^2 (\partial V_{ur} / \partial) + W_m \sin(\varphi + \lambda) \partial W_m / \partial n \\
& + W_m^2 \cos(\varphi + \lambda) \partial \varphi / \partial n - \sin \lambda / \cos \varphi [\partial / \partial n - T \partial \partial / \partial n] \\
& + \sin \lambda (V_{ur} - \omega r^2) / r^2 (dV_{ur} / dz) \big|_{\varphi} + [\cos(\varphi + \lambda) / \cos \varphi] r E_u \\
& - W_m \cos(\varphi + \lambda) (dV_{ur} / dz) \big|_{\varphi} \big] F_r / (r F_u) - E_r \cos(\varphi + \lambda) / \cos \varphi
\end{aligned}$$

周向运动方程

$$W_m dV_{ur} / (rdz) \big|_{\varphi} \cos \varphi = F_u + E_u$$

焓方程

$$\begin{aligned}
\partial / \partial n = & 1 / (\rho W_m) \{ \Phi + 1/r [\partial(rk \partial T / \partial r) / \partial r + \partial(rk \partial T / \partial z) / \partial z] \} \\
& + (V_{ur} - \omega r^2) / (r W_m) E_u + E_r \sin \varphi + E_z \cos \varphi
\end{aligned}$$

计算中熵方程用经验熵增代替。

其中

$$\begin{aligned}
\rho = & (p^* / RT^*) \{ 1 - 0.5(k - 1) (W_m^2 + V_u^2) / (kRT^*) \}^{1/(k-1)} \\
E_r = & (1/\rho) \{ [4/3] \partial(\mu \partial V_r / \partial r) / \partial r - (2/3) \partial(\mu \partial V_z / \partial z) / \partial z + \partial(\mu \partial V_r / \partial z) / \partial z \\
& - (2/3) \partial(\mu V_r / r) / \partial r + \partial(\mu \partial V_z / \partial r) / \partial z + 2\mu (\partial V_r / (r \partial r) - V_r / r^2) \} \\
E_u = & (1/\rho) \{ \partial(\mu \partial(V_{ur}) / \partial z) / (r \partial z) + \partial \{ \mu (\partial(V_{ur}) / (r \partial r) \\
& - 2V_{ur} / r^2) \} / \partial r + (2\mu / r) (\partial(V_{ur}) / (r \partial r) - 2V_{ur} / r^2) \} \\
E_z = & (1/\rho) \{ [4/3] \partial(\mu \partial V_z / \partial z) / \partial z - (2/3) \partial(\mu \partial V_r / \partial r) / \partial r + \partial(\mu \partial V_z / \partial r) / \partial r \\
& - (2/3) \partial(\mu V_r / r) / \partial z + \partial(\mu \partial V_r / \partial z) / \partial r + (\mu / r) (\partial V_z / \partial r + \partial V_r / \partial z) \}
\end{aligned}$$

3 计算方法

3.1 涡粘性

本文运用两种概念不同的涡粘性模型, 以比较各自的作用和效果。

3.1.1 Gallimore-Cumpsty (G-C) 模型^[2]

G-C 模型中的涡粘性 μ_t 和紊流传导性 k_t 是通过掺混系数确定的, $\mu_t = \rho \epsilon C_t$, $k_t = \mu_t C_p / P_{rt}$, 而掺混系数 ϵ 是由基于轴向速度 V_z 、轴向级长度 L_s 和掺混系数 ϵ 的雷诺数确定, 由 $Re = V_z L_s / \epsilon$, 得到 $\epsilon = V_z L_s / Re_0$

雷诺数 Re 反映了机器的掺混水平, 计算发现, 在一个合理的范围内变动雷诺数, 即使雷诺数较大 (这时掺混较少) 也较不计掺混对机器出口总温和总压分布有明显作用。本文考虑了从某一级而不总是从进口开始计及掺混的影响。

3.1.2 Baldwin-Lomax (B-L) 代数模型^[4]

B-L 模型避免了边界层厚度的计算。用 B-L 模型进行粘性计算时, 方程中的粘性系数 μ 和热传导系数 k 均为有效值, 即:

$$\mu = \mu_L + \mu_t, \quad k = k_L + k_t = C_p (\mu_L / P_{rt} + \mu_t / P_{rt})$$

其中的分子粘性用 Sutherland 公式计算, $P_{rt} = 0.72$, $P_{rt} = 0.9$ 。

3.2 落后角预估与修正

预估落后角用二维 Carter 公式。落后角的修正采用 Roberts^[5] 模型。该模型以实验数据为基础, 反映了二次流及其它三维流效应对落后角的影响。静子落后角修正受端壁边界层厚度、叶型弯角、稠度及通道比影响较大, 而转子落后角修正则与端壁边界层厚度、叶尖间隙与叶

展之比有关。模型中的关键是级进口边界层位移厚度, 本文采用 A dkins-Smith^[1] 满足重复级条件的公式计算, 以叶尖为例, 有:

$$\delta_{it}^* = \delta_{it}^*/h = (\delta_i^*/h|_{r-s} - \delta_i^*/h|_i)k + \delta_i^*/h|_i$$

其中, $\delta_i^*/h|_i$ 为假定的或已知的压气机进口值, $\delta_i^*/h|_{r-s}$ 为重复级值。从 Roberts 建立模型所用的数据可以明显看出, 在接近转子叶根处存在欠转折, W isler 实验的乙烯示踪图上也表现出了叶根欠转折, 我们的单级实验在叶根附近也测到了欠转折^[6], 但是, Roberts 给出的最终模型没有考虑这一趋势。因此, 在应用中对转子叶根附近要依据实验再加以修正。

3.3 边界条件

用 G-C 模型作掺混计算时, 采用: (a) 在两端壁固定流线上无掺混发生, 因此剪切应力为零; (b) 端壁是绝热的; (c) 端壁处速度为有滑条件。

用 B-L 模型作粘性计算时, 采用: (a) 壁面速度无滑移, 即 $V_m = 0$, 对旋转壁面 $V_u = u$, 对静止壁面 $V_u = 0$; (b) 壁面绝热, 即 $\partial T / \partial n = 0$, 并近似认为 $\partial p / \partial n = 0$, n 为壁面法向。

计算实践表明, 上述边界条件有效地保证了计算收敛。

4 结果分析

本文运用上述方法对 P&W 公司的两台 3 级压气机^[7,8] 3S1 和 3S2 进行了计算。首先运用 B-L 紊流模型计及紊流扩散的作用, 计算的出口总温低于实验值, 也低于用 G-C 模型计算的出口总温水平。然后单独运用 Carter 的二维落后角模型进行计算, 结果表明, 出口总压水平低于 Gallimore 的计算结果, 但与实验相比仍然过高地估计了出口总压水平。最后运用 G-C 模型加 Roberts 二次流修正进行了计算。

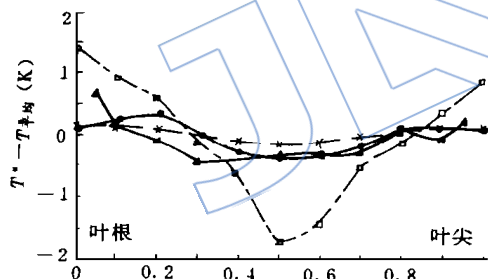


图 1 3S1 出口总温分布形态比较

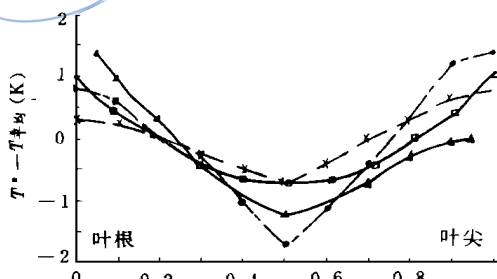


图 2 3S2 出口总温分布形态比较

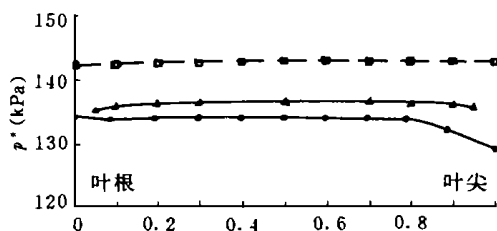


图 3 3S1 出口总压分布比较

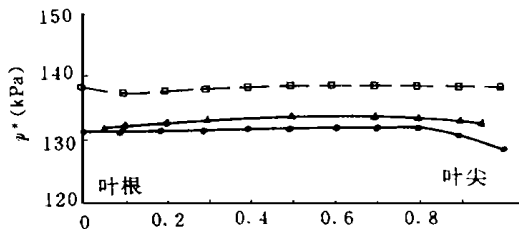


图 4 3S2 出口总压分布比较

图 1 和图 2 (○本文结果, ×文献 [2], ●文献 [1], △实验^[8]) 分别给出了运用 G-C

模型加 Roberts 二次流修正的计算出口总温与 Gallimore 和 Adkins-Smith 计算结果及实验的出口总温展向分布形态的比较 (在表现展向掺混效应时, 绝对水平的差别并不重要^[2]), 表明本文方法比单独计及紊流扩散和二次流对流的计算结果有明显改善。

图 3 和图 4 (○本文结果, □文献 [2], △实验^[8]) 分别是对 3S1 和 3S2 压气机静子出口总压分布与 Gallimore 计算结果及实验的比较。可以看出, 在叶根附近, Roberts 的修正使计算总压更接近实验, Gallimore 的结果过高地预计了出口总压水平, 因此, Roberts 对 Carter 公式的修正是卓有成效的。

参 考 文 献

- 1 Adkins G G, Smith L H Jr. Spanwise Mixing in Axial Flow Turbomachines. ASME Paper 81-GT-57
- 2 Gallimore S J, Cumpsty N A. Spanwise Mixing in Multistage Axial Flow Compressor. Part 1/2 ASME 86-GT-20/21
- 3 Wisler D C, et al. Secondary Flow Turbulent Diffusion and Mixing in Axial Flow Compressor. ASME 87-GT-16
- 4 Baldwin B S, Lomax H. Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Turbulent Flows. AIAA 78-257
- 5 Roberts W B, et al. Modeling the 3-D Flow Effects on Deviation Angle for Axial Compressor Middle Stages. ASME Paper 85-GT-189
- 6 李平, 周新海. 考虑二次流影响的压气机流动分析计算. 工程热物理学报, 1992, 13 (1)
- 7 Burdshall E A, et al. Core Compressor Exit Stage Study 1. Aerodynamic and Mechanical Design. NASA CR 159714
- 8 Behlke R F, et al. Core Compressor Exit Stage Study 2. Final Report. NASA CR 159812

(责任编辑 魏星禄)