

透平进气阀箱的数值模拟

西安交通大学 李思琦* 张 荻 杜占波 孙 弼

【摘要】 用数值方法模拟了透平进气阀箱的内部流动。为了改善计算的收敛性和提高计算精度,程序采用了SIMPLEST迭代求解方法,并引入 $k-\epsilon$ 湍流模型、壁面函数法和空度的概念进行了数值计算。计算结果表明,本文的方法能够较好的模拟进气阀箱内部复杂的流动,并与已有的一些实验结果吻合良好。

主题词: 透平 进气箱 数值模拟

分类号: V235.113 TK263.5

1 理论模型和数值方法及边界条件的处理

在计算中,为了真实模拟阀箱内部的流动,程序在采用贴体坐标(BFC)的基础上引入空度的概念,解决了如何描述流场内部复杂形状的问题。并相应开发了适用于任何结构阀箱和运行工况的贴体网格自动划分程序及空度自动生成程序。

采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型的匀流控制微分方程组,可写成如下的通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}[\rho\vec{V}\Phi] - \Gamma\Phi\text{grad}\Phi = S\Phi \quad (1)$$

对于进气阀箱内的流动,可处理成定常、可压、三维、湍流流动。在控制微分方程组的基础上,引入一些辅助公式(状态方程、比热公式等)便可使得方程组封闭,再加上边界条件,便构成一个完整的数学问题。这种以非线性性和耦合为特征的二阶偏微分方程组用数值方法求解。为了与进气阀箱吹风实验结果作比较,计算采用空气作为计算工质,引入理想气体状态方程。当用于蒸汽透平计算时,程序采用文献[1]中的过热水蒸汽状态方程。计算时采用了交错网格系统,混合差分格式和全隐式方案^[2],用控制容积法建立有限区域方程组,借助SIMPLEST方法求解^[2]。由控制微分方程组离散化可得到代数方程组,其统一形式是:

$$\Phi_P = \frac{a_E\Phi_E + a_W\Phi_W + a_N\Phi_N + a_S\Phi_S + a_H\Phi_H + a_L\Phi_L + a_T\Phi_T + S}{a_E + a_W + a_N + a_S + a_H + a_L + a_T + a_P} \quad (2)$$

这里 Φ 表示变量,下标 P, E, W, N, S, H 和 L 表示该变量所处的方位,下标 T 表示前步时间值, a 表示系数。在具体的求解过程中,用整场求解的数值方法求解压力校正方程,使用贴体坐标(BFC)并引入了空度的概念和方法^[3]。空度是指流体可流通区域在整个积分区域中所占的比例。在网格化了的积分区域中,各个网格可以有不同的空度。空度分为体空度和面空度,前者表示一个网格内流体占据的体积分数,后者表示一个网格面中可供流体通过的面积分数。对于实心固体,体空度和面空度均为零。这样,通过读入空度数据参与计算,可较好解决积分区域

内实心固体和不规则几何边界的问题。下面给出体现空度影响的控制方程组:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Phi V P_{ov})_P + \sum_{\substack{e, w, n \\ s, h, l}} [(\rho \nabla \Phi - \Gamma \nabla \text{grad} \Phi) A P_{\alpha}] = (S \Phi V P_{\alpha})_P \quad (3)$$

其中: A 代表网格面积, V 代表网格体积, P_{oa} 表示面空度, P_{ov} 表示体空度。

认为入口气流均匀, 只有 Y 方向的速度, X 和 Z 方向的速度为零。在壁面附近粘性底层的流动计算中, 采用了壁面函数法^[2]。并在固体壁面上采用无滑移条件。

2 结果分析

运用上述方法, 对某实验用进气阀箱进行了计算与初步分析, 并和该阀箱的实验数据作了比较。定义沿 X, Y 和 Z 方向的速度分别为 U, V 和 W 。入口压力 p 取 1.06258×10^5 Pa, 入口速度 V 为 17 m/s。该阀箱内部装有 3 个大小不同的调节阀, 中间的阀座高于两侧的阀座, 两侧装有侧止回流挡板。图 1 所示为三维计算网格示意图, 网格节点数 = $I \times J \times K = 79 \times 20 \times 42$ 。计算时需要 48 M 内存。算例为进气阀箱的全开工况, 当求解变量最大相对误差小于 10^{-6} 时, 认为计算收敛。

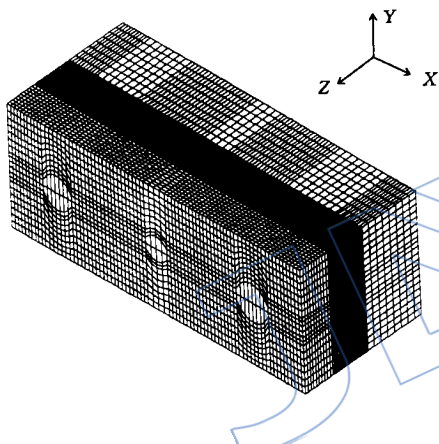


图 1 三维计算网格示意图

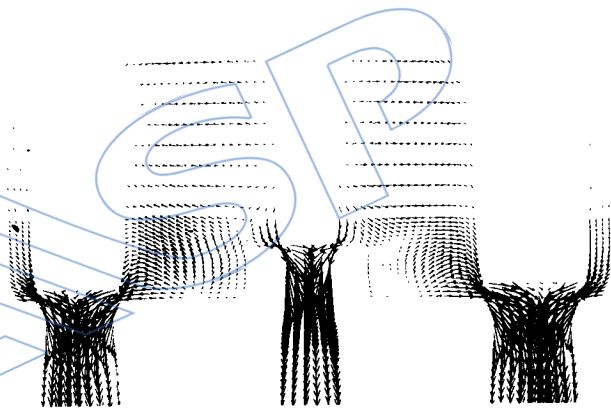


图 2 $y = 11$ 截面流场图

从图 1 可以清晰看到阀箱出口的 shape 和位置以及阀体的大致位置。图 2 是 Y 方向对称平面的流场图谱。图 3 为阀箱出口处的流场图谱, 可以看到出口气流带有很强的旋转性, 这是由于阀座入口气流条件造成的, 这点从图 8 中可以清晰看出。

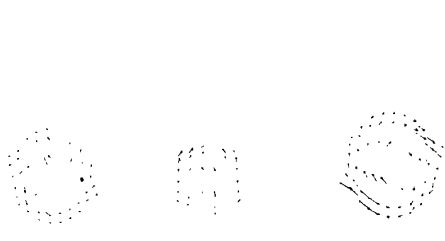


图 3 出口截面流场图

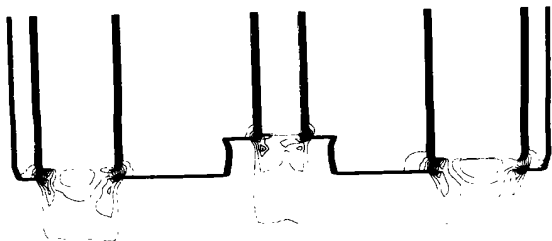


图 4 $Y = 11$ 截面压力等值线图

图 4 和图 5 均为等压线图。图 5 是图 4 中间部分的局部放大图。从压力梯度的分布来看, 在阀头的下部存在着一个低压区。从图 4 两侧阀头下部的等压线上可以明显的看到这个低压

区的存在。其产生的原因主要是: 阀头与阀座之间形成了一个环形的喷管, 气流通过时得到了加速。当加速气流进入阀座时, 由于进气流角的存在, 会使阀头下部与气流脱离形成一个“空穴区”, 在粘性输运的作用下, 空穴里的气体会不断被其下游的气流所带走, 这种抽吸作用使空

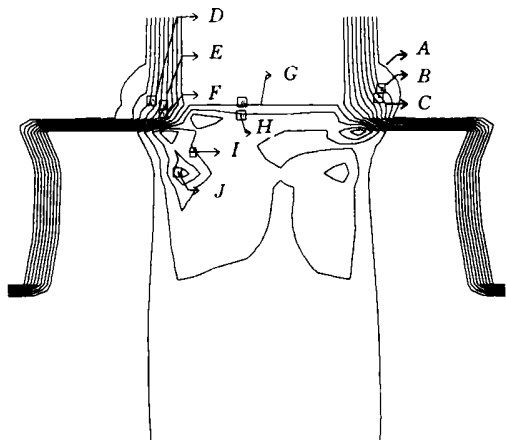


图 5 $Y=11$ 截面中间阀体及阀座压力等值线图

A=1.04620E+5
B=1.04167E+5
C=1.03713E+5
D=1.03259E+5
E=1.02806E+5
F=1.02352E+5
G=1.01898E+5
H=1.01445E+5
I=1.00991E+5
J=1.00537E+5

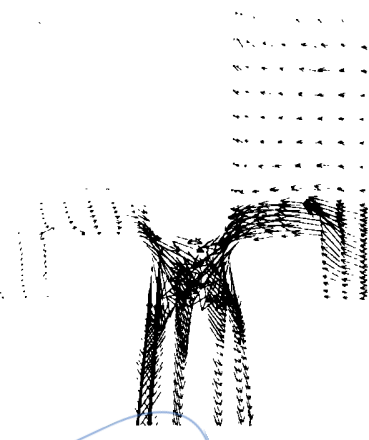


图 6 $X=40$ 截面流场图

穴内压力下降, 形成低压区。图 6 是 X 方向对称平面的流场图谱, 由于凸台的存在使流动恶化, 并在凸台的后面出现了滞止回流区, 增加了流动损失。

图 7 和图 8 为 Z 方向的流场图谱。从图 7 可以看到由于阀套(A)和侧止回流挡板(B)的存在, 使流动产生一些小碎涡。从图 8 可以看到气流是沿阀座喷管壁旋转流入喷管的。

图 9 为计算值与实验值对比。 p_i 是阀箱内各测点的全压值(15 个测点位置见图 8), p_{IN} 是阀箱进口全压值。计算值与实测值的趋势比较吻合, 但在数值上还存在一定的误差。这主要是由于流动模型与实际情况不完全相符造成的。例如考虑到计算的收敛性和计算速度, 程序采用了各向同性的 $k-\epsilon$ 湍流模型和壁面函数法, 而没有采用低雷诺数修正的 $k-\epsilon$ 模型降低了计算精度, 由于计算机内存的限制无法使用精细网格也限制了计算精度的提高。而从表 1 中可以看到

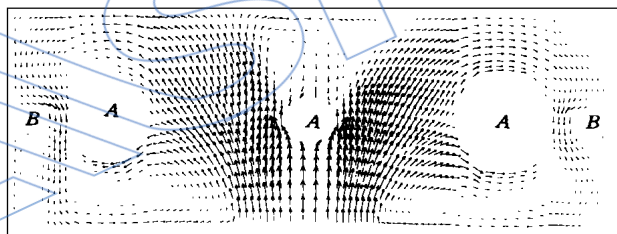


图 7 $Z=10$ 截面流场图

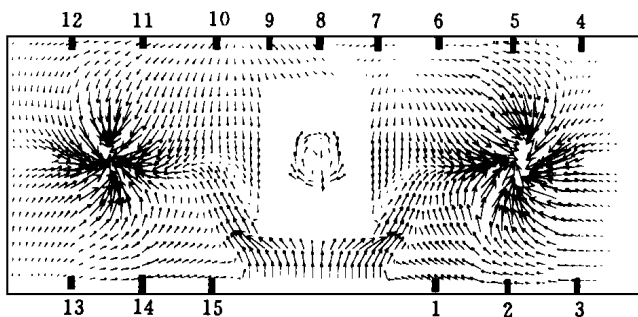


图 8 $Z=26$ 截面流场图

各阀损失系数的计算值与实测值还是吻合的较好(损失系数的定义:(阀箱进口全压—阀出口

表 1 各阀损失系数计算值与实验值对比表

阀编号	计算值 a	实验值 b	$(a - b) / b$
阀 1	0.9698	0.9364	4.5%
阀 2	1.7981	1.8018	- 0.2%
阀 3	1.6353	1.6407	- 0.3%

全压)/阀体名义直径处动压),最大相对误差为 3.5%。综上所述,无论是对流动规律的研究,还是对实际流动现象的观察都表明在工程精度的范围内本文的计算结果是合理的。

3 结 论

通过上面的计算可以看出:本文用于透平进气阀箱内部流动数值模拟的理论模型,基本方程和数值方法,包括空度法、壁面函数法、整场迭代等方法都是有效的,所得到的结果与实验结果基本吻合。所做的计算和开发的计算程序为进气阀箱的气动性能进一步分析提供了坚实的基础。同时也为工程上设计和改造进气阀箱提供了一个新的思路和方法。

致谢 本文的工作得到了哈尔滨 703 研究所吴作民高级工程师热情的指导和帮助,在此表示由衷的感谢。

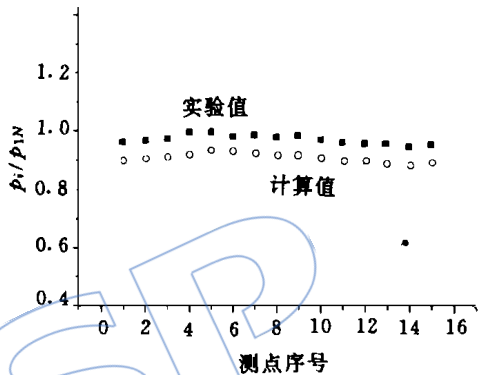


图 9 各测点的相对全压值

参 考 文 献

1 Young J B. An Equation of State for Steam for Turbomachinery and Other Flow Calculations. ASME, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1988, 110: 1- 7
2 陶文铨. 数值传热学. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
3 范维澄. 空度及其在计算流体力学中的应用. 中国科学技术大学学报, 1985, 15: 460- 464

(责任编辑 杨再荣)

engine in enhancement performance at high speed and improvement of the working conditions of the hot section components.

Key Words Turbopan engines Control Analysis Performance

NUMERICAL FLOW SIMULATION OF INLET VALVE BOX OF TURBINE

Li Siqu, Zhang Di, Du Zhanbo, Sun Bi

(Institution of Thermal Turbomachines. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710072)

ABSTRACT A computational fluid dynamics code is used to simulate the flow in a test inlet valve box of turbine. The work sets two major goals: to acquire a comprehensive understanding of the complex three-dimensional flowfields in the valve box at representative operating conditions and to find out an effective tool to optimize performance at the given operating conditions. In order to improve the convergence and precision of the calculation, the numerical algorithm employs Body-fitted Coordinate (BDC) grids, the SIMPLEST method, the standard $k-\epsilon$ turbulence model, wall function method and the porosity method. In the results, the calculated flow pattern in the valve box and the loss coefficients of the valves appeared are in an improved agreement with the measured data. The tested values of the total pressure diverge from the numerical results, but their trends are about the same.

Key Words Turbines Inlet boxes Numerical simulation

AN ASSESSMENT METHOD FOR BLADE VIBRATION RELIABILITY

Ou Yangde, Kong Ruilian, Song Zhaohong

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT A method is presented to assess the vibration reliability for blade design. The method based on Campbell diagram and the concept of PFTA (Probability Fault Tree Analysis) is used to improve conventional assessment methods, and aims at developing an effective method for resonance identification and assessment of the characteristics of blade resonance system, which consists of multiple resonant interception on the Campbell diagram at or near the operating speed. Much information will be obtained from this PFTA analysis, and it is useful for designer to improve the vibration characteristics of a given blade in design and in elimination of failure blade yielded from vibration fatigue.

Key Words Vibration Aircraft engines Blades Reliability estimation