

文章编号: 1000-8055(2003)02-0283-06

# 三维直叶栅非定常流动的并行计算研究

张志斌<sup>1</sup>, 李新亮<sup>2</sup>, 沈孟育<sup>1</sup>

(1 清华大学 工程力学系, 北京 100084;

2 中国科学院 力学研究所 LNM 国家重点实验室, 北京 100080)

**摘要:** 流动分离直接关系到压气机运行的安全性与效率, 对分离流动的研究是叶轮机械真实流动研究中的一个重大课题。本文针对三维压气机单转子叶片中截面所构成的三维直叶栅跨音速分离流开发了通用数值计算程序, 该程序基于 B-L 湍流模型及高精度差分方法。多种工况的数值计算显示本程序结果与实验值吻合比较理想, 验证了程序的正确性。10 攻角下分离区脉动压力的频谱与实验结果的数量级吻合, 说明本程序能够较好地模拟大攻角分离流这种非常复杂流动。为了提高计算规模及计算速度, 作者对程序进行了并行化并针对微机型群系统进行了并行优化。实际计算表明本程序具有较高的并行效率。

**关键词:** 航空、航天推进系统; 分离流; B-L 模型; 高精度差分格式; 并行计算

**中图分类号:** O 241.3

**文献标识码:** A

## Parallel Numerical Study of the Unsteady Flow in 3-Dimensional Linear Cascade

ZHANG Zhi-bin<sup>1</sup>, LI Xin-liang<sup>2</sup>, SHEN Meng-yu<sup>1</sup>

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 LNM, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Dynamic separation is directly connected with the issue of the safety and economy in compressor operation. Therefore, the study of separated flow is of great significance in the investigation of flow field in turbomachinery. In this report a general program code for numerical simulation of 3-Dimensional linear compressor cascade is developed. In this code, high accuracy difference schemes and B-L turbulence model are used. For testing the code, numerical simulations of the 3-Dimensional flow field in compressor cascade for various attack angles are performed and compared with experimental results. The numerical results agree well with the corresponding experimental results, thus the code is verified. The spectrum of pressure fluctuation at the attack angle of 10 degree agrees with those from experiment qualitatively, it shows that this code can be used to simulate the dynamic separation flow. The code is deserialized and optimized for PC Cluster, actual computations show that the code has very high parallel efficiency.

**Key words:** aerospace propulsion; dynamic separation; B-L turbulence model;  
high accuracy difference scheme; parallel computation

## 1 引言

叶轮机械内部的流动分离经常发生<sup>[1,2]</sup>, 难以完全避免, 压气机中气流为扩压流动, 因而分离更容易出现, 且更加严重。较大的分离往往会触发叶

片的失速颤振或引起压气机喘振, 进而造成严重事故。认识压气机内部真实流动的特点, 特别是流动分离的发生、发展规律, 进而对分离进行控制和利用, 对于提高压气机的安全性, 改善其性能都具有重要的意义。对压气机分离流的研究目前有

收稿日期: 2002-01-17; 修订日期: 2002-05-08

作者简介: 张志斌(1974-), 男, 山西灵石人, 清华大学工程力学系博士生, 主要从事计算流体力学研究

实验及数值计算两种手段。与实验相比,数值计算具有周期短,所需资源少的优点。数值计算可以给出整个流场的全部信息,这是目前的实验手段无法得到的。数值计算与实验相互配合,是研究压气机分离流的有效手段。

对于叶轮机械,早期的数值计算多数采用低精度的数值方法和较粗糙的计算网格,其结果往往是得到一组定常解。这些计算对于解决实际工程问题是有意義的,但对于研究流动机理,特别是研究大范围分离流的发生、发展机制及控制方法则帮助不大。因此,运用高精度数值方法及精细的计算网格,开发可以模拟叶轮机械大攻角非定常分离流的数值计算程序,对于分离流的机理研究是很有意义的,国内外不少学者已经进行了相应的工作。

流场的数值模拟中存在无粘和有粘两大类方法。由于无粘方法忽略了流体粘性,因此无法对分离流动进行正确的模拟。有粘方法直接求解完全粘性 N-S 方程,具有扎实的物理基础,可以模拟包括大范围分离流在内的各种流动,该方法已经成为目前计算流体力学的主攻方向。

与其他方法相比,求解完全粘性的 N-S 方程对计算机的容量及计算速度需求很大,这是限制该方法应用的主要原因之一。目前兴起的并行计算可以大幅提高数值计算的规模和速度,克服了计算机容量及速度对求解完全 N-S 方程的限制。在并行计算中,首先对计算区域进行分解,不同区域的数值计算由不同处理器独立完成,处理器之间通过数据交换来完成区域间的耦合。并行计算需要并行计算机,微机机群(PC Cluster)是目前非常流行的并行机系统,该系统简单,易于构建和维护,并且具有非常高的性能—价格比,是并行计算的有效工具。

本文开发了适用于跨音速压气机三维分离流数值模拟的并行计算程序。该程序采用 5 阶精度的迎风差分格式及 6 阶精度的中心差分格式。与目前工程计算中采用的低精度格式相比,本方法的耗散误差及色散误差更小,数值精度更高,适合于含有分离的非定常复杂流动的数值计算。为了减少计算量,本文采用 B-L 湍流模型,该湍流模型在叶轮机械流场数值计算中被广泛采用<sup>[3]</sup>。实际算例表明,本文的数值方法是有效的。

为了提高计算规模及缩短计算时间,本文对程序进行了并行化并针对机群系统进行了优化,在微机机群上的实际计算表明,本程序具有很好

的并行效率。为了考核程序,本文对三种攻角下三维直叶栅内部流动进行了数值模拟,叶片表面压力分布与实验值吻合较好,验证了本程序的正确性。同时在 10° 攻角时得到了大范围分离流场,分离区瞬时压力的脉动频谱与实验得到的频谱范围的数量级吻合。

本文开发的数值计算程序可以部分地代替实验进行压气机叶栅大攻角分离流的研究,以认识涡脱落的发生、发展规律,流场结构与气动参数的关联等特点,认识涡脱落对于叶栅气动性能的影响,为减少流动损失,提高叶栅气动性能及安全性提供线索。

## 2 数值计算方法

### 2.1 控制方程

在一般惯性曲线坐标系  $(\xi, \eta, \zeta)$  中,无量纲的守恒形式的三维可压缩 N-S 方程可表达如下<sup>[4]</sup>:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial \xi} + \frac{\partial F}{\partial \eta} + \frac{\partial G}{\partial \zeta} = 0 \quad (1)$$

其中:

$$Q = Q/J$$

$$E = \frac{1}{J} (\xi E + \eta F + \zeta G)$$

$$F = \frac{1}{J} (\eta E + \eta F + \eta G)$$

$$G = \frac{1}{J} (\zeta E + \zeta F + \zeta G)$$

### 2.2 边界条件

在本文数值计算中,边界条件分为以下几种类型:

(1) 进口边界条件:对于轴向亚音速来流,需给定四个流动参数。本文采用的方法是,进口给定总压、总温和两个进气角。

(2) 出口边界条件:对于轴向亚音速出流,需给出一个流动参数,本文给定为出口处的静压。

(3) 壁面边界条件:在叶栅表面、轮毂面和机匣面等固体壁面上,我们采用无滑移条件。对于温度采用绝热条件  $\partial T / \partial n = 0$ 。

(4) 周期性边界条件:在周期性区域的对应边界点处,全部流动参数满足周期性条件。

### 2.3 湍流模式

压气机叶栅内的流动为湍流运动,本文采用湍流模式理论,将湍流对流动的影响归结为对运动粘性系数的影响。

$$\mu = \mu_L + \mu_T$$

其中,  $\mu_L$  为流体的分子粘性系数,由 Sutherland

公式确定:

$$\mu_L = \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S_0}{T + S_0}$$

其中:

$$T_0 = 273 \text{ K} \quad , \quad S_0 = 124 \text{ K}$$

$\mu_T$  为湍流粘性系数, 该系数由湍流模式决定.

$$Pr = \mu / (\mu_L Pr_L^{-1} + \mu_T Pr_T^{-1})$$

其中:  $Pr_L = 0.70$  为层流普朗特数,  $Pr_T = 0.86$  为湍流普朗特数.

本文采用 Baldwin-Lomax 代数湍流模式计算湍流粘性系数  $\mu_T$ :

$$\mu_T = \begin{cases} \mu_{Tinner} & , \quad y \leq y_{crossover} \\ \mu_{Touter} & , \quad y \geq y_{crossover} \end{cases}$$

其中:

$$\mu_{Tinner} = \rho l^2 |\omega|$$

$$l = ky [1 - \exp(-y^+ / A^+)]$$

$$|\omega| =$$

$$\sqrt{(u_y - v_x)^2 + (v_x - w_y)^2 + (w_x - u_z)^2}$$

$$y^+ = \frac{y \sqrt{\rho_w \tau_w}}{\mu_w}$$

$$\mu_{Touter} = KC_{\text{cp}} \rho F_{\text{wake}} F_{\text{kleb}}(y)$$

$$F_{\text{wake}} = \min(y_{\text{max}} F_{\text{max}}, C_{\text{wk}} y_{\text{max}} q_{\text{dif}}^2 / F_{\text{max}})$$

$$F(y) = y |\omega| [1 - \exp(-y^+ / A^+)]$$

$$F_{\text{kleb}}(y) = [1 + 5.5(y C_{\text{kleb}} / y_{\text{max}})]^{-1}$$

上式中, 模式常数为:

$$A^+ = 26 \quad , \quad C_{\text{cp}} = 1.6 \quad , \quad C_{\text{kleb}} = 0.3$$

$$C_{\text{wk}} = 0.25 \quad , \quad k = 0.4 \quad , \quad K = 0.0168$$

$y_{\text{crossover}}$  定义为  $\mu_{Tinner} = \mu_{Touter}$  时的  $y$  值,  $y_{\text{max}}$  定义为  $F(y)$  最大时的  $y$  值,  $F_{\text{max}}$  为  $F(y)$  的最大值,  $q_{\text{dif}}$  为沿物面法线上边界层内最大速度与最小速度的差值.

2.4 数值格式

本文采用差分法对 N-S 方程进行离散, 时间推进采用三步三阶 Runge-Kutta 方法, 设原 N-S 方程为:  $Q_t = F(Q)$  其中  $F(Q)$  为右端项, 则:

$$Q^{(1)} = Q^n + F(Q^n) \Delta t$$

$$Q^{(2)} = \alpha Q^n + \beta_1 (Q^{(1)} + FQ^{(1)}) \Delta t$$

$$Q^{(3)} = \alpha Q^n + \beta_2 (Q^{(2)} + FQ^{(2)}) \Delta t$$

$$Q^{n+1} = Q^{(3)}$$

其中:  $\alpha_1 = 3/4 \quad , \quad \beta_1 = 1/4$

$$\alpha_1 = 1/3 \quad , \quad \beta_1 = 2/3$$

对于无粘项, 采用矢通量分裂技术:

$$f_i = f_i^+ + f_i^-$$

分裂后分别采用 5 阶精度的迎风差分格式求解, 对于正通量, 采用如下差分格式:

$$f_j' = \frac{1}{\Delta x} (a_1 f_{j-3} + a_2 f_{j-2} + a_3 f_{j-1} + a_4 f_j + a_5 f_{j+1} + a_6 f_{j+2})$$

其中系数为:

$$a_1 = -\frac{1}{30} \quad , \quad a_2 = \frac{1}{4} \quad , \quad a_3 = -1$$

$$a_4 = \frac{1}{3} \quad , \quad a_5 = \frac{1}{2} \quad , \quad a_6 = -\frac{1}{20}$$

对于负通量, 采用如下差分格式:

$$f_j' = \frac{1}{\Delta x} (a_1 f_{j-2} + a_2 f_{j-1} + a_3 f_j + a_4 f_{j+1} + a_5 f_{j+2} + a_6 f_{j+3})$$

其中系数为:

$$a_1 = \frac{1}{20} \quad , \quad a_2 = -\frac{1}{2}$$

$$a_3 = -(1/3) \quad , \quad a_4 = 1$$

$$a_5 = -\frac{1}{4} \quad , \quad a_6 = \frac{1}{30}$$

3 并行计算及程序的并行化

3.1 并行计算简介

所谓并行计算, 就是将一个计算任务分配给多个处理器, 这些处理器同时进行计算, 每个处理器完成该任务的一部分, 以达到提高计算速度及提高计算容量的目的.

3.2 本文数值计算的并行化及其优化

并行计算的基本思路就是把一个任务分配给多个处理器, 由每个处理器相对独立地承担计算任务. 为了提高并行效率, 一个好的任务分配方案需要考虑任务的均衡性及减少节点间的耦合. 对于机群系统, 节点间一般采用通用网络 (基于 TCP/IP 的以太网), 同 CPU 与内存之间的通信速度相比, 节点间的通信要慢许多. 因此尽量减少节点之间的数据交换是提高并行效率的关键之一。

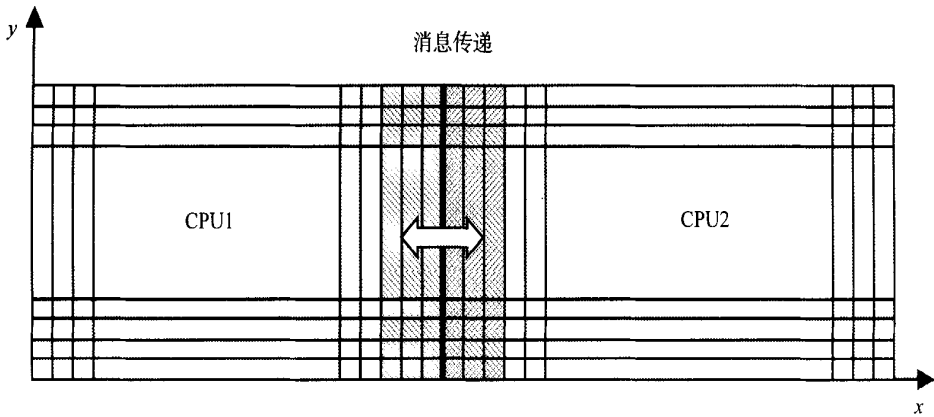


图 1 区域分割示意图

Fig 1 Diagrammatic sketch of domain partition

图 1 为计算任务分割原理示意图。假设有两个 CPU 参与并行计算, 则左半部分计算区域网格点上的计算任务分配在 CPU 1 上, 右半部分区域的计算任务分配在 CPU 2 上。对计算方法进行分析发现, 在求  $x$  方向导数  $\partial f / \partial x$  时, 两半部分交界的区域(图中的阴影区域)需要交换数据; 其他计算(包括流通矢量分裂, 计算  $y, z$  方向导数, 时间推进)无需交换数据, 而且即使在求  $x$  方向导数时, 交界区域之外的点也无需交换数据, 因此数据交换量与计算量相比是很小的。两个 CPU 之间的数据交换是通过互相发送—接收消息来完成的。

对于本计算问题, 由于计算区域的狭长性, 本文采用一维分割, 只是沿  $x$  方向对计算域进行分割。举例而言, 本文采用的计算网格沿  $x, y, z$  方向为  $150 \times 41 \times 31$ , 若采用 3 个节点(CPU)进行并行计算, 则每个节点上计算的网格点为  $50 \times 41 \times 31$ 。

本文根据机群的特点对程序进行了并行优化, 采用区域边界交叠技术进行边界通信优化, 减少了区域边界的通信量; 同时将长消息切割成若干短消息进行发送/接收, 避免了多对多通信时的消息死锁现象。

3.3 本程序的并行效率

以工况 Dt-60 的并行计算(计算网格  $150 \times 41 \times 31$ )为例, 说明本程序的并行计算效率。本计算在清华大学工程力学系 SMC 气动技术中心的微机机群上进行, 该机群是由 16 台 PIII733 微机组成的, 单机内存为 512M bytes。

表 1 为每步计算需要的 CPU 时间及并行效率。

表 1 每步计算需要的 CPU 时间及并行效率  
Table 1 CPU time per step and parallel efficiency

| 节点数      | 1    | 2    | 3    | 5    | 6    |
|----------|------|------|------|------|------|
| CPU 时间/s | 10.3 | 5.5  | 3.7  | 2.7  | 2.3  |
| 并行效率/%   | —    | 93.6 | 92.8 | 76.3 | 74.6 |

其中:

并行效率 = 
$$\frac{\text{单 CPU 计算所需时间}}{\text{多 CPU 计算所需时间} \times \text{CPU 数}}$$

从表 1 可以看出, 本程序的并行效率是较高的。当并行节点数增加时, 并行效率有下降的趋势, 这是因为当运行节点增加时, 消息量与计算量的比值会增加。当计算规模加大时, 并行效率将会提高。

4 典型算例及结果分析

本文共计算了三个典型算例(针对同一叶片), 基本参数如表 2。

本文是针对三维压气机单转子叶片中截面所构成的三维直叶栅进行数值模拟, 其叶片的几何参数如下: 弦长 80.01 mm, 叶展 160 mm, 栅距 53.6 mm, 安装角  $70.12^\circ$ , 几何进气角  $48.4^\circ$ , 几何出气角  $91.23^\circ$ , 展弦比为 2。本文采用的计算网格为  $150 \times 41 \times 31$ , 并行节点数为 3。由于本文是非定常计算, 我们是通过观察测点静压随时间的变化曲线来确定非定常数值模拟的收敛, 当测点静压随时间的变化曲线达到准周期状态, 而且这种准周期模式不随时间变化时, 我们即认为计算达到收敛。

图 2 为工况 Dt-60 中截面上叶片表面时均压

表 2 三种工况的基本参数  
Table 2 Basic parameter of 3 cases

| 编号     | 攻角/(°) | 进口 $Ma$ | 进口 $Re$             | 进口总温/K | 进口总压/ $P_a$ | 出口静压/ $P_a$ |
|--------|--------|---------|---------------------|--------|-------------|-------------|
| D t-60 | 0      | 0.503   | $0.832 \times 10^6$ | 302.4  | 106309      | 94170       |
| D t-69 | 6      | 0.506   | $0.821 \times 10^6$ | 302.7  | 105612      | 94050       |
| D t-72 | 10     | 0.6     | $0.983 \times 10^6$ | 308.0  | 111368      | 93980       |

力分布图, 其中的曲线表示本文的计算值, 符号表示实验值, 可以看出, 本文的结果同实验吻合较好。图 3 为 D t-60 中截面的熵等值线图。从图 2 的实验结果来看, 尾缘发生了一定的分离。

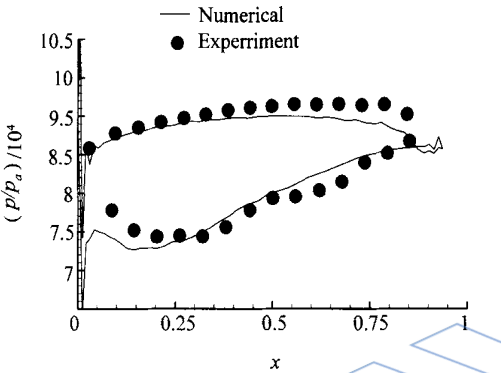


图 2 工况 D t-60 中截面上的压力分布图  
Fig 2 Pressure distribution at center plane for case D t-60

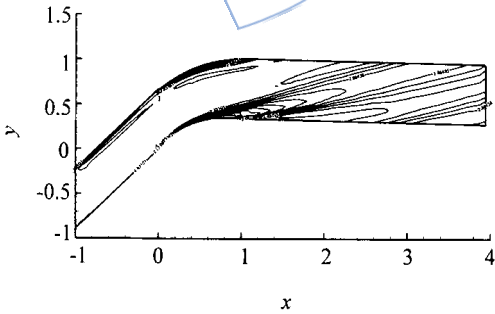


图 3 工况 D t-60 中截面的熵等值线图  
Fig 3 Entropy contour at center plane for case D t-60

图 4 为工况 D t-69 中截面上叶片表面时均压力分布图, 其中的曲线表示本文的计算值, 符号表示实验值, 可以看出, 本文的结果同实验吻合较好。

图 5 为 D t-69 中截面的熵等值线图。可以看出, 流场在叶栅尾缘附近存在分离区, 但分离范围不大。

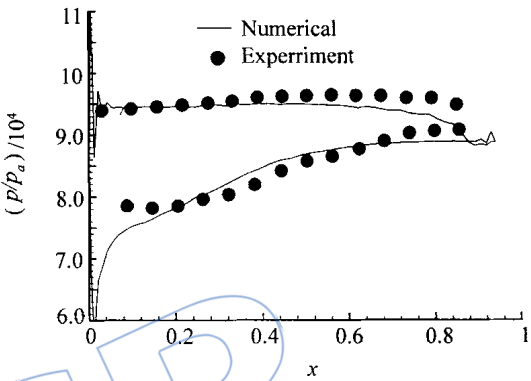


图 4 工况 D t-69 中截面上的压力分布图  
Fig 4 Pressure distribution at center plane for case D t-69

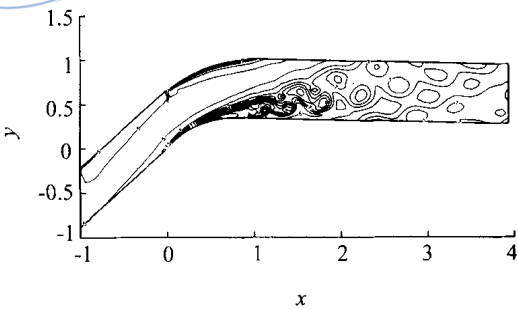


图 5 工况 D t-69 中截面的熵等值线图  
Fig 5 Entropy contour at center plane for case D t-69

图 6 为工况 D t-72 中截面上叶片表面时均压力分布图, 其中的曲线表示本文的计算值, 符号表示实验值, 可以看出, 本文的结果同实验吻合较好。

图 7 为工况 D t-72 中截面的熵等值线图, 可以看出在 10° 攻角下, 吸力面上出现了大范围的分离区。

图 8 为该工况下三个固定点处的瞬时(无量纲)压力随时间变化图。这三个固定点的位置分别为: Point 1 (0.995, 0.391, 1), Point 2 (2.964, 0.422, 1), Point 3 (0.942, 0.373, 1)。这三个测点

均位于分离区内,从图中可以看出这三个点上的压力波动幅度非常大,这说明从叶栅上脱落的涡是很强的。

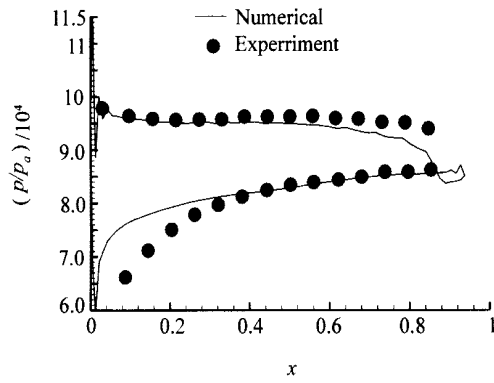


图 6 工况D t-72 中截面上的压力分布图  
Fig 6 Pressure distribution at center plane for case D t-72

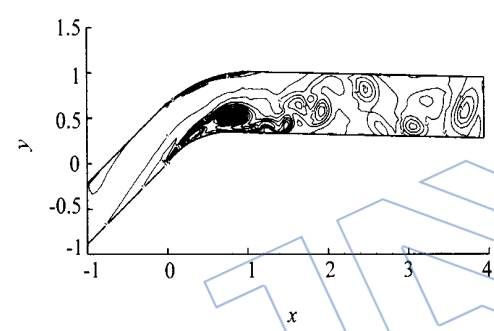


图 7 工况D t-72 中截面的熵等值线图  
Fig 7 Entropy contour at center plane for case D t-72

图 9 为测点 3 上脉动压力的频谱图,从中可以看出,最高峰值出现在 250 Hz 左右,实验测得的频谱峰值出现在 590 Hz,两者的数量级吻合,但数值尚有一定的差别,我们解释如下:由于空风洞的吹风实验并非是严格的定常流,而是有一定的脉动频率,实验所测得的频谱峰值包含这一脉动频率的影响,但数值计算尚未考虑这一影响。另外湍流模式对于非定常流动频率的影响也是一个未知的因素。总之,由于本文是初步的研究以及实际问题的复杂性,实验与数值计算所得的频谱峰值尚有一定的差别,在后续的研究工作中会进一步系统地探讨这个问题。

从以上结果可以看出,本文采用的雷诺平均

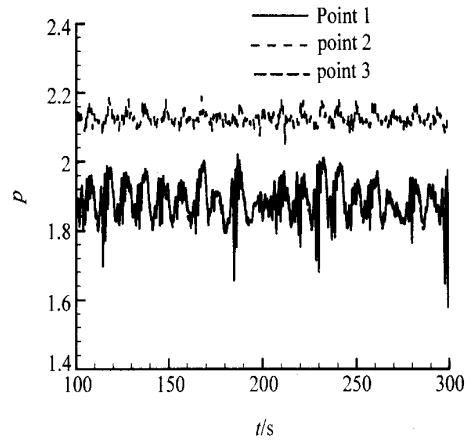


图 8 三个测点上瞬时无量纲压力随时间的变化  
Fig 8 Variation of instantaneous non-dimensional pressure at 3 check points

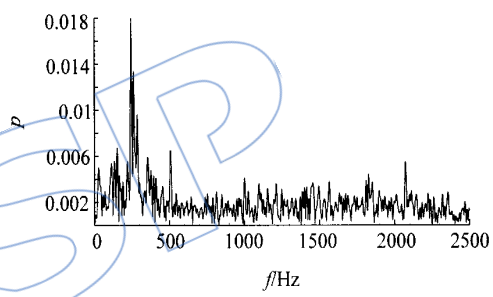


图 9 测点 3 上无量纲脉动压力的频谱图  
Fig 9 Spectrum of non-dimensional fluctuant pressure at check point 3

N-S 方程加B-L 湍流模型的方法可以较好描述本类流动,采用高精度差分格式可以取得较好的数值结果。本文开发的数值计算程序对于跨音速叶栅大范围分离流是有效的。

参考文献

[1] Wei Ning, Li He. Some Modelling Issues on Trailing Edge Vortex Shedding[R]. 99- GT- 183

[2] Carscallen W E, Currie T C, Hogg S I, Gostebw J P. Measurement and Computation of Energy Separation in the Vortical Wake Flow of a Turbine Nozzle Cascade[J]. J. of Turbomachinery, 1999, 121(4): 703- 708

[3] Baldwin B, Lomax H. Thin Layer Approximation and Algebraic Model for Separated Flows[R]. AIAA - 78- 257.

[4] Dale A, Anderson, et al Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer [M]. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1984