

文章编号: 1000-8055(2007)10-1715-07

离心压缩机进口导叶/叶轮动静 相干的数值研究

周 莉¹, 席 光², 蔡元虎¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;
2. 西安交通大学 能源与动力工程学院, 西安 710049)

摘 要: 对不同预旋角度下进口导叶/叶轮的相干进行了非定常的数值模拟, 讨论了动静相干效应的主要因素, 分析了非定常效应对叶轮内流场结构的影响。结果表明, 在较大的负预旋角度下, 叶轮流动呈现出周期性; 造成叶轮内非定常性的主要因素是上游进口导叶的尾迹区, 尤其是大尺度分离涡团导致叶轮的进口流动不稳定。导叶尾流的影响只涉及到叶轮通道的一部分(约 30 %叶片长度), 而叶轮的势影响范围从进口导叶尾缘到约 20 %左右叶片弧长处。叶轮叶片通过频率和叶片旋转频率同时影响着进口导叶内部的非定常流动。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 预旋角度; 动静相干; 尾流; 叶片通过频率; 叶片旋转频率

中图分类号: V211. 15

文献标识码: A

Numerical investigation on IGV/impeller interaction in a centrifugal compressor stage

ZHOU Li¹, XI Guang², CAI Yuan-hu¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Numerical simulations on the unsteady inlet guide vane (IGV)-impeller interaction were performed under different prewhirl angles. The main factors to IGV-impeller interaction were also discussed to analyze the influence of unsteady flow effect upon flow field of impeller. The results show that the impeller flows periodically under large negative prewhirl angle. In such case, the wake of IGV outlet, especially the large size vortice formed behind IGV, was the key factor to strong unsteady flow in the downstream impeller inlet. The unsteady influence of IGV wake involved only a part of impeller passage (about 30 percent of the blade chord), and the potential repercussion of the impeller ranged from IGV trail edge to 20 percent of the chord. Both the passing frequency and rotating frequency of the blade have influence on the unsteady flow in IGV.

Key words: aerospace propulsion system; prewhirl angle; IGV- impeller interaction; wake; passing frequency of the blade; rotating frequency of the blade

离心压气机进口导叶与叶轮相干非定常作用 非常强烈, 而且作用机理也很复杂, 解决不好, 不

收稿日期: 2006-09-17; 修订日期: 2006-12-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(50576073), 西北工业大学青年科技创新基金

作者简介: 周莉(1978-), 女, 河南信阳人, 讲师、博士后, 主要从事热机气动热力学的研究。

仅引起气动性能恶化,而且更严重时还会引起叶片共振,导致叶轮叶片疲劳破坏的严重事故.由此可见,离心压气机与其进口可调导叶之间的相干非定常作用,已成为影响现代离心压气机装备安全可靠性的重大问题.但是,目前关于离心压气机与其进口可变导叶之间相干非定常流动的研究报道很少.这方面的工作主要着眼于采用进口可变导叶改变来流预旋条件,以提高机器的总体气动性能,如文献[1-2].

影响动/静相干非定常作用力的因素并非仅仅是转速与导叶叶片数的函数,而非定常流动的结构,特别是变工况条件下导叶尾缘出现的大尺度分离涡团有重要关系.开展离心压气机进口导叶与叶轮之间的相干非定常作用机理的研究,掌握导叶尾迹及大尺寸分离涡团对叶轮叶片产生非定常激振的规律,是提高大型离心压缩机的设计和运行安全性必须进行研究的科学问题.本文对 0° 、 30° 进口导叶负预旋角度下的进口导叶/叶轮的相干非定常进行了计算,研究了进口导叶与叶轮之间的动静相干的机理.

1 数值计算方法

1.1 基本控制方程及数值算法

本文数值计算采用 Numeca 软件包,求解三维非定常 Navier-Stokes 方程组.计算中采用了 Baldwin-Lomax 的混合长度理论模型来求得紊流粘性系数.应用格子中心有限体积法,空间差分采用中心差分格式.时间项采用四阶 Runge-Kutta 法迭代求解.计算中使用全多重网格方法,结合隐式残差光滑方法及当地时间步长法,以获得最快的收敛速度[3].

1.2 边界条件

计算中给定了整个级的进出口条件.在进口导叶进口给定总温、总压及绝对气流角;在叶轮出口给定出口静压.上下游延伸部分的周向边界采用周期性边界条件.对于固体壁面,取不可渗透、无滑移及绝热壁面边界条件.定常计算中采用混合平面直接在交界面上对参数进行周向平均,非定常流计算则利用滑移界面方法在界面上插值以进行参数的传递.

2 计算模型

以某一离心压缩级(进口导叶和叶轮)为研究对象,对其级环境下的流动进行了数值模拟.离

心压缩级的主要几何参数见表 1.叶轮的转速为 $3\,030\text{ r/min}$,进口体积流量为 $2.75\text{ m}^3/\text{s}$.为了使计算所用各叶片排的通道数尽量少,把叶轮的叶片数由 20 调整到 21,进口导叶的叶片数由 12 改变至 14.这样根据区域缩放的原则,计算在 3 个叶轮通道和 2 个进口导叶通道内进行.每个通道的网格数均为 $41\times 33\times 81$,其中沿流向有 81 个计算站,周向有 33 个计算站,展向有 41 个.交界面位于动静部件中间的位置上.本文把叶轮通过两个进口导叶通道所用的时间作为一个周期,在进行非定常计算时,每个周期内设定 50 个物理时间步,分别对应 50 个不同的叶轮周向位置(相对于进口导叶),每个物理时间步下进行 30 次的虚拟时间步的内迭代.计算所采用的三维网格如图 1 所示.

表 1 离心压缩级的主要几何参数
Table 1 Geometric data of the centrifugal compressor stage

	进口导叶	叶 轮
进口直径 d_i/mm	222	222
进口叶片高度 h_i/mm		103.91
出口直径 d_o/mm	422	796
出品叶片高度 h_o/mm		43.8
叶片数 n	12	20

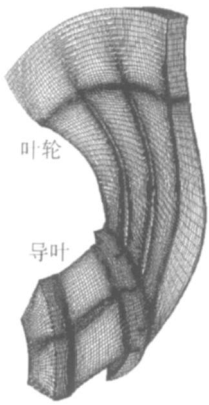


图 1 离心压缩级的三维计算网格图

Fig. 1 Structure mesh of the centrifugal compressor

3 计算结果及分析

3.1 0° 进口导叶预旋角度下的导叶/叶轮的相干非定常

首先对 0° 进口导叶预旋角度下的进口导叶/叶轮的相干进行了非定常计算.由于进口导叶的细长形状,其尾涡比方柱、圆柱绕流更难出现.文

献[4]计算表明,当零攻角时,流动并没有分离,无尾涡出现.图 2 给出了叶轮中间栅距处相对速度沿展向的分布图随时间变化的趋势,图中清楚的表明了,在 0 预旋角度下的进口导叶对叶轮的非常影响基本上不存在,叶轮内的流动几乎是定常的.因而有必要研究较大负预旋角度下进口导叶/叶轮的非常影响,探讨非常影响的成因.

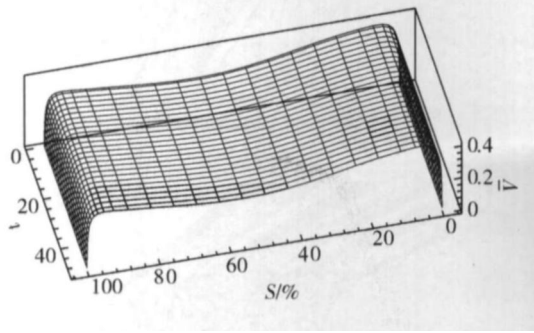


图 2 中间栅距处速度随时间变化的分布图
Fig. 2 Variation of the velocity with time at mid-pitch

3.2 30 进口导叶负预旋角度下的导叶/叶轮的非常影响

3.2.1 不同截面位置处叶轮叶片表面的静压分布图

图 3 给出了叶轮叶片表面在轮盘附近、中间叶高和轮盖附近瞬态静压分布的变化包线.可以明显地看出,在叶轮通道的前半部分(约 30 %叶片长度),尤其靠近前缘处,由于进口导叶尾流的非常影响,叶轮叶片表面的瞬态静压的非常影响变化范围比后半部分大,叶轮通道后半部分的静压变化幅值很小,流动几乎呈定常性.靠近叶轮轮盘和轮盖附近,叶轮叶片受进口导叶尾流的非常影响更加敏感.在沿叶轮叶高方向的各个截面,同叶轮叶片压力面相比,吸力面的静压变化幅度相对增大,这同文献[5]的结果相当吻合.同样的,为了研究叶轮对上游进口导叶的势反冲影响,图 4 给出了进口导叶叶片表面在不同叶高处瞬态静压分布的变化包线,同时还给出了尾缘附近静压幅值变化较大处的局部放大图.从图中可以看出叶轮对进口导叶的势反冲影响的范围从进口导叶的轮盖到轮盘,沿叶高方向不断的增大.在进口导叶轮盖附近,叶轮的势影响范围从进口导叶尾缘到 33 %叶片弧长处,而在进口导叶轮盘附近,其影响范围增大到 23 %叶片弧长处.在进口导叶的前半部分,静压值在各个时间步下几乎不发生改变.在图中仍然可以看出进口导叶吸力面所感受到的叶轮的势反冲影响范

围比压力面大.从以上分析中可以看出,进口导叶和叶轮的非常影响的最大值主要集中在进口导叶尾缘和叶轮的进口前缘处.

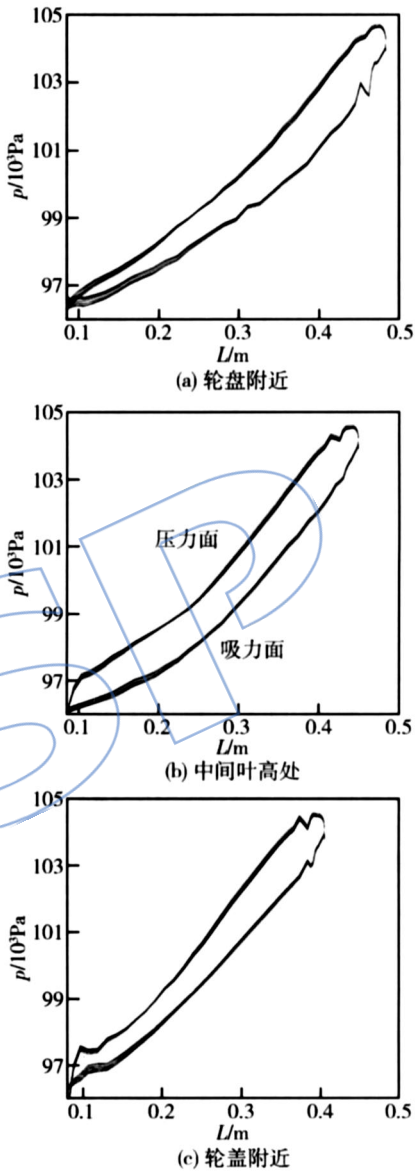


图 3 叶轮叶片表面瞬态静压的变化包线
Fig. 3 Static pressure distribution on the impeller blade

3.2.2 不同叶高处的轴向速度分布图

由于进口导叶的偏转,流动在进口导叶的翼型后方出现流动分离,流场内存在分离涡团.为了分析进口导叶尾流对叶轮内流动的影响,图 5 给出了叶轮转过 6/25 周期角位置时进口导叶/叶轮在不同叶高处轴向速度分布图.由图可知,在进口导叶通道内,沿叶高方向在进口导叶的背腹面上轴向速度出现了负值,即出现了涡团.轴向速度从进口导叶的前缘沿流向到叶轮叶片前缘处逐渐呈辐射状而减小,在中间叶高处的轴向速度最大.在

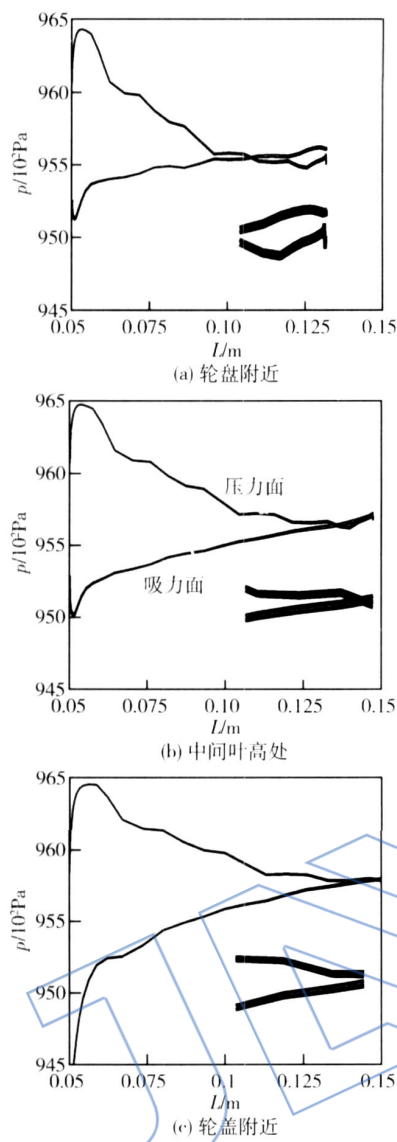


图 4 进口导叶叶片表面瞬态静压的变化包线
Fig. 4 Static pressure distributi on the IGV vane

叶轮通道内轮盘的截面上(图 5(a)),轴向速度在叶轮前缘附近的吸力侧形成高速区,在叶高中部高速区(图 5(b))出现在通道中部,而靠近轮盖处(图 5(c))则出现在叶轮前缘附近的压力侧,且在吸力侧附近轴向速度还出现负值.在叶轮中部以后,速度基本上不再发生变化,沿流向有比较均匀的分布.从上述不同叶高处轴向速度沿流向的分布可以看出,进口导叶的尾流强烈的影响着沿轴向的速度分布,同 0° 导叶预旋角度相比,30° 导叶偏转使得叶轮进口的流场分布更加不均匀,从轮盘到轮盖,叶轮通道内的轴向速度高速区的位置从吸力侧向压力侧迁移.但由图可知,进口导叶的尾流并不能影响着整个叶轮通道的流动范围,在进入叶轮通道不久后,速度基本上不再发生变化.

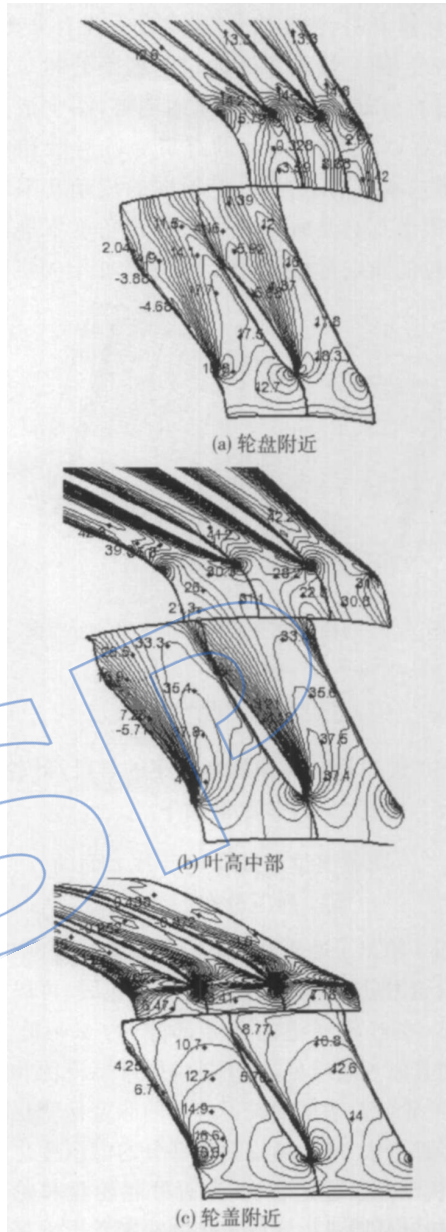


图 5 不同叶高处轴向速度的分布图
Fig. 5 Axial velocity distribution along the spanwise

3. 2. 3 轴向推力和扭矩的分布

进口导叶用于控制流量,其对压缩机在部分负载下的工况有益.在实验中可以观察到由于压缩机内部流场的非定常性而引起的进口导叶振动^[6-7].为了减小振动并提高压缩机的可靠性,本文对进口导叶和叶轮上的轴向推力和扭矩进行了分析.轴向推力和扭矩的数学表达式分别为

轴向推力
$$F(t) = \sum f \cdot n_z$$

扭矩
$$T(t) = \sum r \times f$$

其中 $F(t)$ 为在时间 t 时的轴向推力, $T(t)$ 为在时间 t 时关于转轴的扭矩. f 为时间 t 时作用在

局部面上某一元素点上的力, r 为某一元素点距转轴的距, S 为进口导叶或叶轮叶片的面积.

由于计算所用的两个进口导叶通道和三个叶轮通道的叶片在三维空间中处于不同的位置, 轴向推力和扭矩分别在 x, y 和 z 方向上得到分量, 总的轴向推力和扭矩可以看作是推力和扭矩矢量的模.

$$|F(t)| = \sqrt{F(t)_x^2 + F(t)_y^2 + F(t)_z^2}$$

其中 $F(t)_x, F(t)_y, F(t)_z$ 分别为在时间 t 时作用在叶片上轴向推力在 x, y 和 z 方向上的分量.

$$|T(t)| = \sqrt{T(t)_x^2 + T(t)_y^2 + T(t)_z^2}$$

其中 $T(t)_x, T(t)_y, T(t)_z$ 分别为在时间 t 时作用在叶片上扭矩在 x, y 和 z 方向上的分量.

图 6 和图 7 中分别给出了在一个周期中作用在进口导叶两个叶片和叶轮三个叶片上轴向推力和扭矩随时间的分布图, 相应的频谱分析的能量谱强度如图 8 和图 9 所示. 由于本文计算的对象

是两个进口导叶通道和三个叶轮通道, 转过三个叶轮通道所用的时间记为一个周期. 从图 6 和图 7 中可以看出进口导叶上的轴向推力和扭矩在一个周期内发生三次显著的周期性变化, 而作用在叶轮叶片上的轴向推力和扭矩在一个周期内则发生两次有规律的变化. 还可以从图中看出, 作用在进口导叶两个叶片上的轴向推力和扭矩随着时间同步的推进不断的向下进行周期性的漂移, 而且两个进口导叶叶片的推力和扭矩不但有相位上的偏差, 而且在幅值上也差别较大, 导叶 2 的幅值大于导叶 1 的幅值. 但作用在三个叶轮叶片上的推力和扭矩仅在相位上存在滞后, 幅值上几乎完全相等. 在相应的 FFT 分析图中, 可以看出在进口导叶在导叶 2 上的能量谱强度小于导叶 1, 而且存在两个峰值, 分别对应的频率为 353.5 Hz, 1 060 Hz, 即除了有叶片通过频率外, 还存在叶片旋转频率. 但在叶轮叶片上的能量谱强度分布图中, 三个叶轮叶片几乎完全重合仅存在一个峰值, 所对应的频率为 1 060 Hz, 为叶片的通过频率.

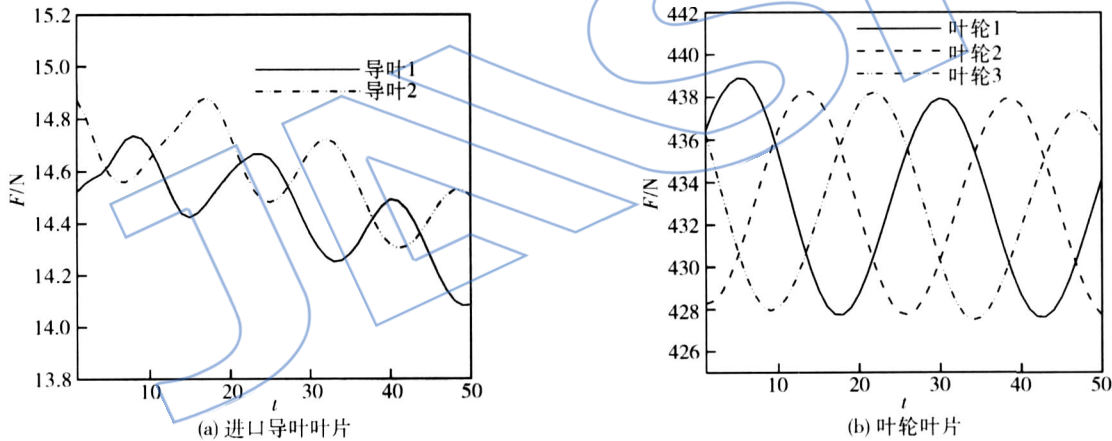


图 6 轴向推力随时间步长的变化图

Fig. 6 Variation of axial thrust with time

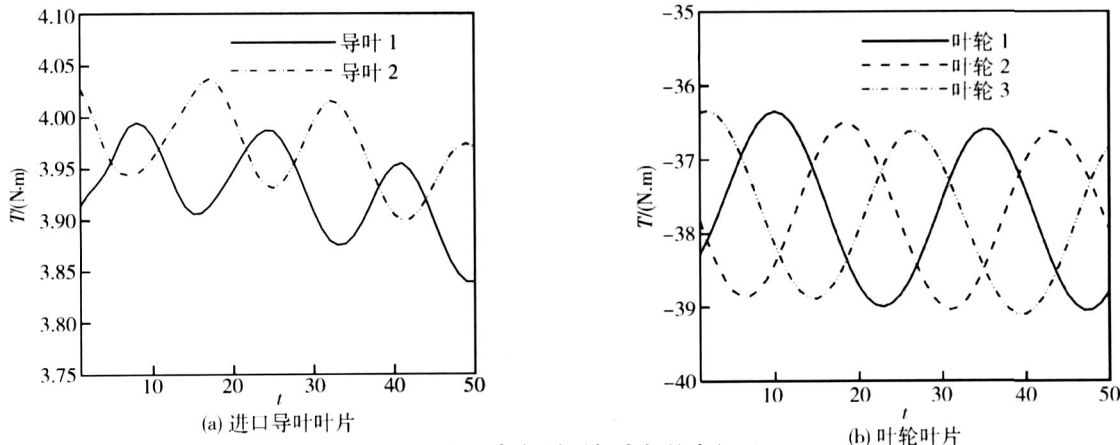


图 7 扭矩随时间步长的变化图

Fig. 7 Variation of axial torque with time

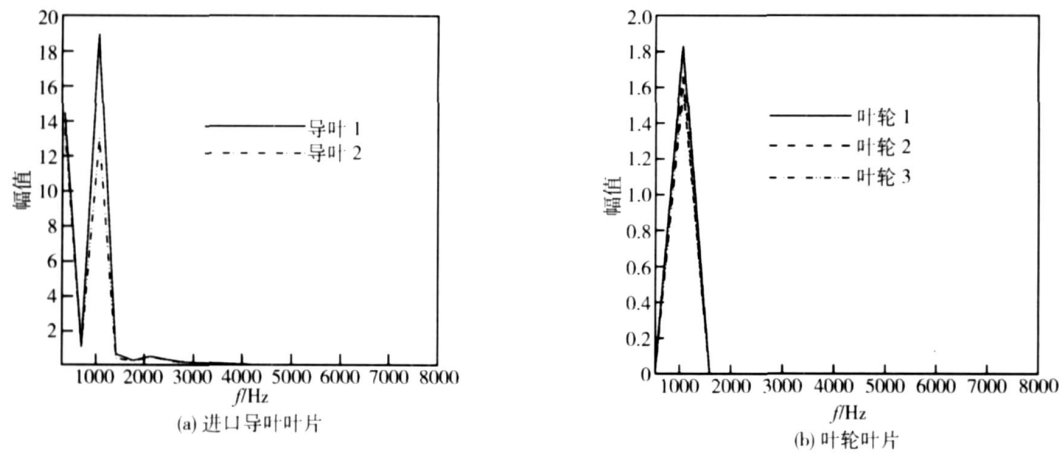


图 8 轴向推力能量谱强度的分布

Fig.8 Energy intensity distribution of the axial thrust

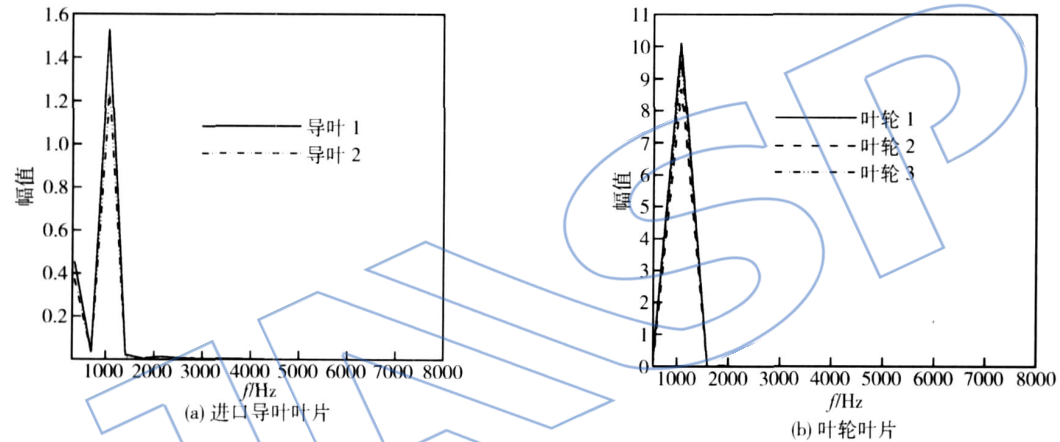


图 9 扭矩能量谱强度的分布

Fig.9 Energy intensity distribution of the torque

4 结 论

本文对进口导叶/叶轮的动静相干非定常流动进行了数值模拟,并详细分析了其内部的流场,主要结论如下:

- (1) 0 预旋角度下的进口导叶对叶轮的非常影响基本上不存在,叶轮的流动几乎是定常的;
- (2) 在较大的负预旋角度下,叶轮流动呈现出周期性,而造成叶轮内非常特性的主要因素是由于叶轮转过进口导叶的不同位置时,导叶尾流尤其是大尺寸分离涡团导致叶轮的进口是不稳定的.动静相干效应导致了叶轮进口流动条件较大的变化,因此对叶轮内部的流动产生了很大的影响.而出口流态则显示出并不是叶轮通道内的所有流动都具有非常性,导叶尾流的影响只涉及到叶轮通道的一部分(约 30 %叶片长度),这是因为尾流被掺混均匀了;

(3) 叶轮对进口导叶的势反冲影响的范围从进口导叶的轮盖到轮盘,沿叶高方向不断的增大.叶轮的势影响范围从进口导叶尾缘约到 20 %左右叶片弧长处;

(4) 作用在进口导叶两个叶片上的轴向推力和扭矩随着时间步的推进不断的向下进行周期性的漂移,而且还存在相位和幅值上的偏差.但作用在三个叶轮叶片上的推力和扭矩仅在相位上存在滞后,幅值上几乎完全相等.在进口导叶上的能量谱强度存在两个峰值,分别对应的频率为叶片通过频率和叶片旋转频率.但在叶轮叶片上的能量谱强度分布图中,仅存在一个叶片的通过频率.

参考文献:

[1] Whitfield A, Abdullah A H. Performance of a centrifugal compressor with high inlet prewhirl[J]. ASME Journal of Turbomachinery, 1998, 120(2) : 487-493.
[2] Rodgers C. Centrifugal compressor inlet guide vanes for

- increased surge margin[R]. ASME paper , 90- GT-158.
- [3] Shu C W, Osher S. Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes [J]. Journal of Computational Physics , 1989 , 83(1) : 32-87.
- [4] 席光, 周莉, 王尚锦. 离心压气机进口导叶尾涡非定常发展的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2003 , 24 (6) : 958-960.
- XI Guang, ZHOU Li, WANG Shangjin. Numerical analysis of the unsteady confined wakes behind the inlet guide vanes of centrifugal compressors[J]. Journal of Engineering Thermophysics , 2003 , 24(6) : 958-960.
- [5] Manwaring S R. Rotor blade unsteady aerodynamic gust response to inlet guide vane wakes[J]. Journal of Turbomachinery , 1997 , 115(1) : 197-206.
- [6] Michael M C. Effect of suction elbow and inlet guide vanes on flow field in a centrifugal compressor stage[R]. ASME Paper , GT-2002-30376.
- [7] Michael M C. Unsteady flow around suction elbow and inlet guide vanes in a centrifugal compressor[R]. ASME Paper , GT-2004-53273.