

文章编号:1000-8055(2013)05-1037-10

轴径流组合压气机中动叶尾迹与势流叠加特性的数值研究

刘尹红¹, 杨 策¹, 赵 奔¹, 老大中², 马朝臣¹

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081;

2. 北京理工大学 宇航学院, 北京 100081)

摘 要: 对一级轴流和离心叶轮组成的组合压气机非定常流场进行模拟,通过影响因素分组法,讨论了上游轴流叶轮尾迹与下游离心叶轮势流共同对中间静叶气流非定常流动的干涉特性及离心叶轮势流单独对静叶气流非定常流动造成的影响,并得到轴流叶轮与静叶间、轴流叶轮与离心叶轮间和静叶与离心叶轮间的干涉现象对下游离心叶轮进口气流产生的影响。结果表明:当上游轴流叶轮叶片尾迹和下游离心叶轮势流在中间静叶流道内发生耦合叠加时,会导致两种影响因素出现彼此相互激励或抑制现象;在离心叶轮进口处,轴流叶轮与静叶间、轴流叶轮与离心叶轮间和静叶与离心叶轮间的叠加干涉相位不同,将会导致此处气流产生畸变,直接影响离心叶轮进口气流角的非定常波动幅值。

关 键 词: 轴径流组合压气机; 尾迹; 势流; 叠加; 非定常

中图分类号: V231.3

文献标志码: A

Numerical investigation on superimposed effect of wake/potential interaction in axial-radial combined compressor

LIU Yin-hong¹, YANG Ce¹, ZHAO Ben¹, LAO Da-zhong², MA Chao-chen¹

(1. School of Mechanical Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. School of Aerospace Scientific Engineering,

Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Three-dimensional unsteady viscous numerical simulation was conducted on an axial-radial combined compressor to study the interaction characteristic of wake/potential and downstream potential effects on the mid stator vane. The axial rotor/stator vane, axial rotor/impeller and stator vane/impeller interaction effects on the impeller inlet angle were also investigated by using the effect factor split of the combined compressor unsteady flow. The results show that upstream wake and downstream potential lead to reinforce/suppress effect while coupling in the mid vane passage. Due to the different phases of axial rotor/stator vane, axial rotor/impeller and stator vane/impeller interaction, work fluid at impeller inlet encounters distortion, which directly affects the amplitude of inlet angle.

Key words: axial-radial combined compressor; wake; potential; superimpose; unsteady

收稿日期: 2012-05-17

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20130508.0949.201305.1037_011.html

基金项目: 国家自然科学基金(51176013); 高等学校博士学科点专项研究基金(20111101130002)

作者简介: 刘尹红(1983—),女,湖南株洲人,博士生,主要从事叶轮机械气动热力学研究。

在叶轮机械中,不同叶片排之间产生的干扰导致叶轮机械内部流场流动具有很强的非定常性.这些干扰在本质上可分为无黏势流干扰和黏性流干扰.无黏干扰的下游势流与黏性干扰的上游叶片尾迹都对多级叶轮机械中间叶片排的气流非定常流动产生影响.如果在设计过程中,能够合理地组织这两个非定常扰动源,将有利于进一步提高叶轮机械气动性能.但由于目前对这两个非定常扰动源的叠加特性研究还很少,很难实现有效匹配,因此着重研究上游叶轮尾迹与下游叶轮势流影响的叠加特性是一项很有意义的工作.

转-静叶片排之间的相互干涉是由转子叶片与静子叶片的相对运动造成的非定常流动现象.转-静干涉既影响叶轮机械的工作性能,还因造成的非定常气动力影响叶轮机械的疲劳寿命.因此,叶轮机械中转-静干涉始终是研究叶轮机械内部非定常流动的热点之一,受到广泛关注,存在大量的研究成果,其中 Mailach 等人^[1-3]采用激光多普勒测速仪(LDV)方法测量了多级压气机内部中间叶高和叶尖位置上的流场参数,详细描述了上游叶片尾迹在中间转子叶片槽道内的传播过程,建立了尾迹与叶尖泄漏流动相互作用模型. Gorrell^[4-6]研究了某一跨声速压气机上游静子与转子叶排间距大小对其性能的影响规律,结果显示,质量流量、压比和效率都随轴向间隙减小而降低,且质量流量、压比和效率随轴向间隙变化的幅度因叶片稠度的增大而加大.国内学者王英锋、胡骏等人^[7]通过研究转-静干涉对叶片表面压力和气动力的影响,分析了流量、轴向间距及转速等因素对轴流压气机转-静干扰影响的规律.史亚锋、吴虎等人^[8]和李鹏、乔渭阳等人^[9]也做了类似的研究.这些学者的研究工作填补并丰富了转-静干涉理论.

在多级叶轮机械中,中间叶片排受到上下游叶片气动叠加干涉影响,气体的非定常流动状态将变得更加复杂.为了实现今后叶轮机械非定常设计,就需要充分认识这些复杂的流动现象.如何有效区分出上游和下游叶片对中间叶片排非定常流动的诱导效应是非常有意义的一件事情.一种特殊的方法是对多排叶片进行分解. Hsu 等人^[10]在这方面进行了有益的尝试,在其研究工作中将轴流压气机分解为转-静、静-转和转-静-转3种模型,通过实验的方法,分别得到上游动叶尾迹和下游动叶势流对静子表面非定常压力波动的影响,结果表明,当上游尾迹撞击到下游叶片前缘吸力

面侧时,静子表面压力波动最大;当下游转子前缘掠过静子尾缘时,势流对静子表面压力波动影响最小. Miller 等人^[11]则通过将1.5级涡轮分解为静-转和静-转-静两种模型研究了上下游静叶对中间叶片表面非定常静压的影响.两者的研究表明这种将多排叶片进行分解的方法可以用于研究多排叶片气动耦合干涉现象.

目前,国内外学者主要研究了上游叶片尾迹和下游叶片势流扰动对叶片表面气动载荷的影响,很少关注尾迹与势流扰动在中间叶排通道的叠加干涉特性,更没有关注这种不同的叠加干涉特性对下游叶轮进口条件造成的影响.而这些影响是否会使下游叶轮进口畸变加剧,目前相关研究资料还很有限.

本文以某一轴径流组合压气机为研究对象,通过三维数值模拟获得压气机中气流的非定常流动结构.采用影响因素分组法^[12],分析了上游轴流叶轮尾迹与下游离心叶轮势流对中间静叶片气流非定常流动的干涉特性.依据静-转模型数值结果,捕捉到下游离心叶轮势流单独对中间静叶片气流非定常流动造成的影响.最后,通过分析转-静-转和静-转两种模型中下游离心叶轮进口气流角的波动情况,建立相应叠加假设,用相位叠加原理解释气流角波动特性变化机理.

1 研究对象、方法及验证

1.1 研究对象

文中采用的研究对象是文献^[12]的组合压气机,由一级轴流叶轮和一级离心叶轮组成,其模型如图1所示.主要几何参数为:第1排轴流叶轮叶顶半径为52 mm,叶片数目为12;第2排轴流静子叶片数目为17;第3排离心叶轮出口半径为75 mm,主叶片数目为9,分流叶片数目为9;设计质量流量为1.15 kg/s,转速为60 000 r/min.



图1 组合压气机三维计算模型

Fig. 1 3-D calculational model of combined compressor

本文对两种压气机模型进行了非定常计算. 模型 1 为转-静-转模型: 将组合压气机静叶数目修改为 18, 使叶片数目为 12-18-9, 如图 2 所示(图示为 1/3 周). 模型 2 为静-转模型, 为保证此模型的进口条件与转-静-转模型保持一致, 采用文献 [10] 中所述方法, 将转-静-转模型的进口轴流叶轮向上游移动 60 mm, 约为 2 倍轴流叶轮轴向弦长距离, 以尽可能消除轴流叶轮尾迹对静叶的影响, 同时又能保证静子叶片进口所需要的气流角度. 此时模型 2 叶片数目为 18-9, 如图 3 所示(图示为 1/3 周). 压气机修改前后的几何模型在相同转速、质量流量和进口条件的情况下进行非定常计算, 并做对比分析.

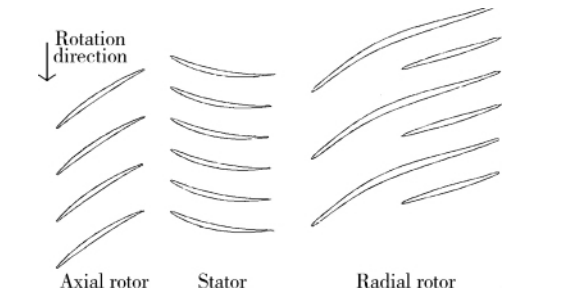


图 2 轴流叶轮(R12)-轴流静叶(S18)-离心叶轮(R9)
Fig. 2 Axial rotor(R12)-axial stator(S18)-impeller(R9)

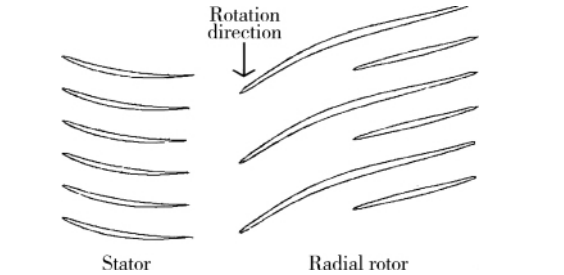


图 3 轴流静叶(S18)-离心叶轮(R9)
Fig. 3 Axial stator(S18)-impeller(R9)

1.2 数值方法

计算网格采用 H-O 型结构化网格, 由 NUMECA 软件包中的 IGG/Auto Grid 模块生成. 其中进口延伸段及扩压器采用 H 型网格, 各排叶片采用 O 型网格. 表 1 对比了不同数量网格在设计质量流量点定常计算结果. 从表中数据可以看出, 中等网格数量计算结果与粗网格相比压比和效率偏差分别为 5.5% 和 3.88%, 而与细网格相比, 差别分别为 0.69% 和 0.33%. 因此认为采用中等网格进行流场模拟计算是可以满足计算精度的^[13], 以下计算均采用的是中等网格.

表 1 网格无关性验证
Table 1 Confirmation of grid independency

	网格点数	压比	效率
Coarse	741 789	3.7254	0.76335
Medium	1 176 321	3.9302	0.79298
Fine	2 005 501	3.9574	0.79560

数值计算采用软件 NUMECA 的 FINE/TURBO 软件包, 求解三维定常/非定常的 Navier-Stokes(N-S)方程组, 选用 2 阶精度的中心离散格式, Spalart-Allmaras(S-A)湍流模型, 全流场为湍流. 时间项采用显式龙格-库塔时间推进和双时间步长.

1.3 实验结果与计算结果对比

图 4 和图 5 给出了组合压气机在转速为 60 000 r/min 定常计算条件下, 效率-质量流量和压比-质量流量实验与计算结果对比情况. 图中横坐标为无量纲质量流量(测量质量流量除以设计质量流量). 结果表明, 由数值模拟得到的组合压气机性能曲线与实验得到的性能曲线变化趋势一

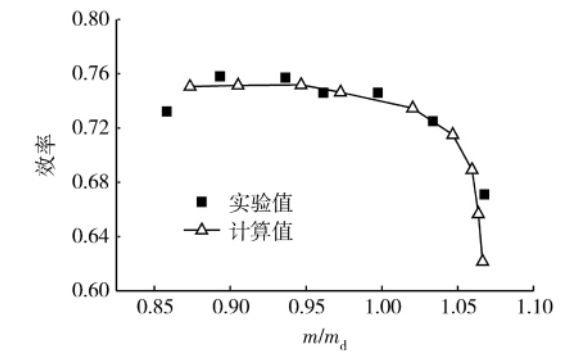


图 4 效率-质量流量曲线
Fig. 4 Curve of efficiency vs. mass flow rate

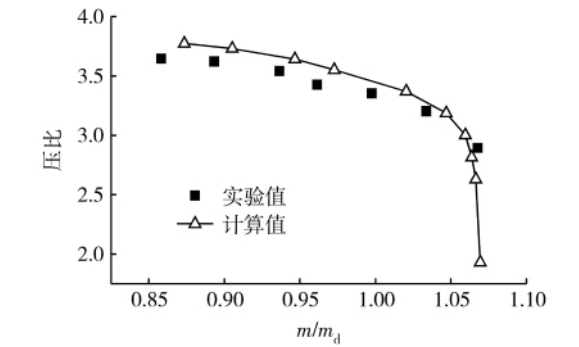


图 5 压比-质量流量曲线
Fig. 5 Curve of pressure ratio vs. mass flow rate

致,总体吻合较好.其中,效率最大偏差小于2%,压比最大偏差小于2.5%.

非定常计算针对设计工况点,采用区域比例缩放法,缩放后用于计算的叶片数为4-6-3.计算网格点数约为446万.转子叶栅每旋转 2° 设定一个物理时间步长,由此推出一个计算周期内的物理时间步长数为60,虚时间求解步数为50.在流道内随机设定4个监控点,通过监测监控点的压力分布情况来判定压气机内部流场的非定常计算收敛情况,如图6所示.从图6中可以看到,4个监控点的压力以60个时间步为周期呈周期性波动,因此,可认为此时非定常计算已满足收敛条件,文献[14]也采用了同样的判定方法.

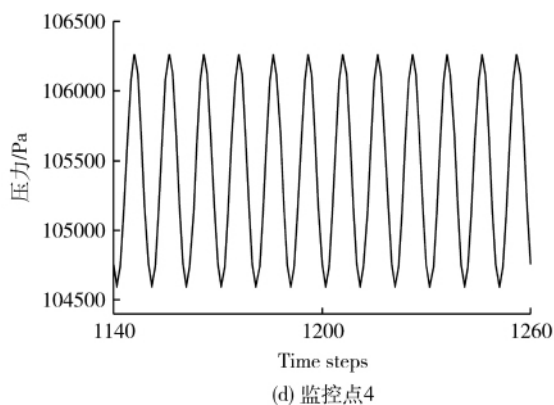
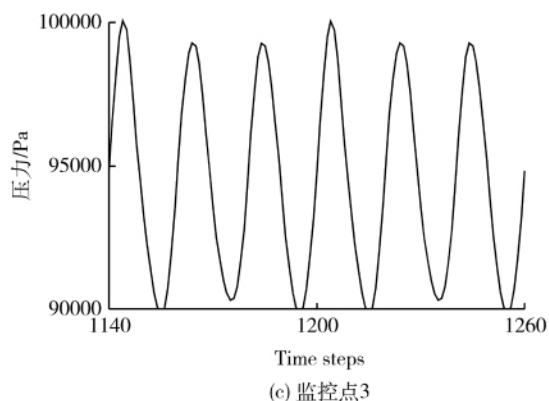
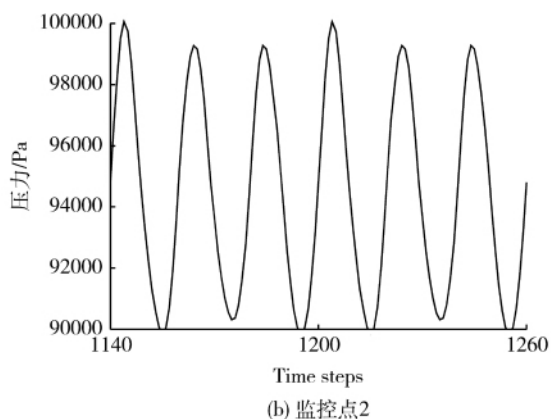
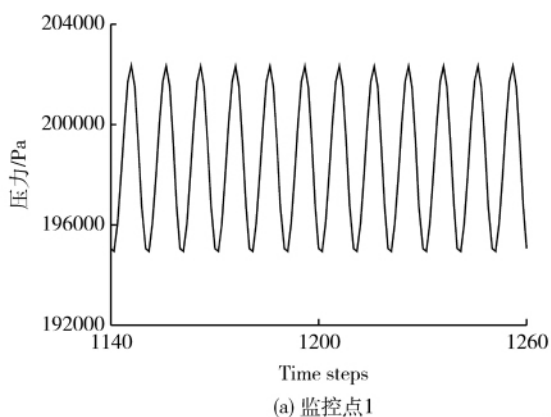


图6 不同监控点位置压力随时间变化情况

Fig. 6 Static pressure varying with time at different monitoring points

2 数据处理

研究涉及的轴向速度与相对气流角数据均来自于非定常计算结果.叶片顶部区域气体流动情况较其他叶高位置更为复杂,且高叶高位置也是叶片容易发生损坏区域,因此本文重点研究80%叶高位置处非定常流动的叠加特性.为此,在静叶通道中和离心叶轮叶片前缘附近选择两个监控点,分别为监控点1和监控点2.对于监控点1,目的是发现上下游转子叶片在静子叶片中所产生干扰的叠加特性.对于监控点2,目的是确定上游轴流叶轮尾迹和中间静叶尾迹对该位置上流动参数所产生的影响.监控点1位于静叶通道中间流线60%轴向弦长位置,监控点2位于离心叶轮叶片前缘附近位置,具体如图7所示.

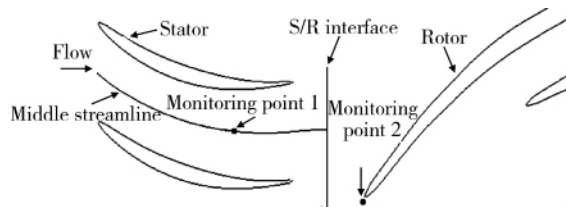


图7 研究数据提取位置(80%叶高)

Fig. 7 Location of investigated data (80% span)

在多排叶片相互干涉环境下,叶片通道内气流处于非定常流动状态,气流的轴向速度与相对气流角将随时间发生波动.基于这种考虑,将组合压气机中具有非定常波动特性的轴向速度分解为时均值和波动值

$$V_z = \bar{V}_z + \tilde{V}_z \quad (1)$$

上式中的非定常轴向速度时均值由下式计算:

$$\bar{V}_z = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} V_{z,i} \quad (2)$$

同样将非定常相对气流角分解为时均值和波动值

$$\beta = \bar{\beta} + \tilde{\beta} \quad (3)$$

上式中的非定常相对气流角时均值由下式计算:

$$\bar{\beta} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \beta_i \quad (4)$$

式中下标 i 为第 i 个物理时间步长,下标 z 为轴向, N 为物理时间步长数(60)。

3 计算结果与分析

3.1 静叶叶栅通道内部上下游干涉叠加分析

图8为转-静-转模型中监控点1位置处(如图7所示)轴向速度波动图。在该模型中,上游轴流叶轮与下游离心叶轮都将对中间静叶排通道产生影响。文献[12]在研究相同的组合压气机叠加干涉时,用影响因素叠加公式描述中间静叶表面压力的非定常波动。本文采用同样的方法,将中间静叶排通道轴向速度表示为由下述影响因素的叠加形式:

$$V_{z,i,r/s/r} = V_{z,steady} + \bar{V}_{z,u} + \tilde{V}_{z,u,i} + \bar{V}_{z,d} + \tilde{V}_{z,d,i} + \bar{V}_{z,ud} + \tilde{V}_{z,ud,i} \quad (5)$$

式中下标 $r/s/r$ 为转-静-转模型; $V_{z,steady}$ 为假设该点处未受上下游干涉情况下的轴向速度值; $\bar{V}_{z,u}$ 为上游轴流叶轮单独作用引起该点处轴向速度变动量的时均值; $\tilde{V}_{z,u,i}$ 为上游轴流叶轮单独作用引起该点处轴向速度变动量的波动值; $\bar{V}_{z,d}$ 为下游离心叶轮单独作用引起该点处轴向速度变动量的时均值; $\tilde{V}_{z,d,i}$ 为下游离心叶轮单独作用引起该点处轴向速度变动量的波动值; $\bar{V}_{z,ud}$ 为轴流叶轮与离心叶轮之间的干涉引起该点处轴向速度变动量的时均值; $\tilde{V}_{z,ud,i}$ 为轴流叶轮与离心叶轮之间的干涉对该点处轴向速度变动量的波动值。

叶片边界层气体受多种因素影响,数值计算并不能精确模拟边界层内部流动,因此该公式并不适用于边界层内部流动的研究。

从图8中可以看到,受上下游转子干涉叠加的影响,静叶通道中间流线上(监控点1)轴向速度随时间变化呈多峰值状态(T 时间内)。4个峰值位置分别用A、B、C和D标示,其中B点处峰值最大,D点处峰值最小,而A点和C点处峰值处于两个极值之间。图中明显表明,同时存在尾迹与势流干扰时,静叶通道内轴向速度在 T 时间内

呈现出非周期性波动特性。

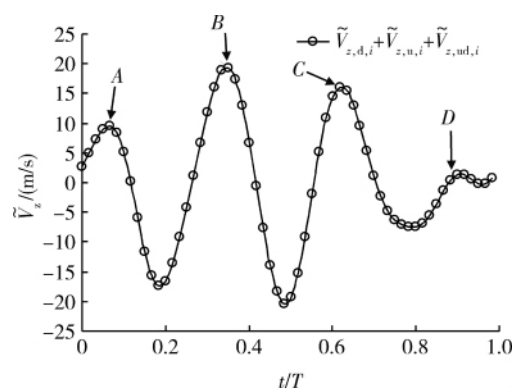


图8 转-静-转模型中监控点1位置处轴向速度波动图(80%叶高)

Fig. 8 Fluctuating curve of axial velocity at monitoring point 1 for rotor-stator-rotor configuration (80% span)

选用转-静-转模型,无法单独确定下游离心叶轮对静叶通道流场所产生的影响。采用静-转模型,可以基本排除上游轴流叶轮对静子叶片的干涉效应。因此,静-转模型静叶通道内可认为仅受下游离心叶轮势流的影响,此时中间静叶通道轴向速度可表示为由下述式中的一些变量组成:

$$V_{z,i,s/r} = V_{z,steady} + \bar{V}_{z,d} + \tilde{V}_{z,d,i} \quad (6)$$

式中下标 s/r 为静-转模型。

在受上下游动叶共同影响时,中间静叶通道所受影响主要包括:上游轴流叶轮尾迹、下游离心叶轮势流及两者之间的干涉作用。为了实现这种相互干涉因素的分解,可以通过式(5)减去式(6)将转-静-转模型静叶通道中轴向速度影响因素分为两组:一组是轴流叶轮尾迹($\tilde{V}_{z,u,i}$)及轴流叶轮尾迹与离心叶轮势流间的干涉作用($\tilde{V}_{z,ud,i}$);另一组是离心叶轮势流($\tilde{V}_{z,d,i}$)的影响。其中轴流叶轮尾迹及轴流叶轮尾迹与离心叶轮势流间的干涉作用可由下式计算:

$$V_{z,i,r/s/r} - V_{z,i,s/r} = \bar{V}_{z,u} + \tilde{V}_{z,u,i} + \bar{V}_{z,ud} + \tilde{V}_{z,ud,i} \quad (7)$$

借助式(6)和式(7),可以进一步揭示3排叶片之间的相互干涉现象。比如 $\tilde{V}_{z,d,i}$ 是否周期性变化, $\tilde{V}_{z,d,i}$ 和 $\tilde{V}_{z,u,i} + \tilde{V}_{z,ud,i}$ 相比哪一组波动幅值更大。如果 $\tilde{V}_{z,d,i}$ 波动幅值更大,则意味着下游离心叶轮势流干涉更加强烈。通过式(6)和式(7)获得的结果,还可以判定两组干涉之间的叠加特性。基于这一想法,图9根据式(6)和式(7)计算得到监控点1位置处(如图6所示)轴向速度两组影响因素波动曲线。据文献[15]可知,仅受上游轴流叶轮

尾迹影响的 $\tilde{V}_{z,u,i}$ 和仅受下游离心叶轮势流影响的 $\tilde{V}_{z,d,i}$ 在 T 时间内均呈周期性变化,这是由于只受单一叶片通过频率所决定.在图9中,受下游离心叶轮势流影响的 $\tilde{V}_{z,d,i}$ 曲线波动周期为 $(1/3)T$,而 $\tilde{V}_{z,u,i} + \tilde{V}_{z,ud,i}$ 曲线在 T 时间段内并不存在周期性.这一现象说明上游轴流叶轮尾迹与下游离心叶轮势流在中间静叶排产生的叠加干涉影响 $\tilde{V}_{z,ud,i}$ 在 T 时间内呈现非周期性波动,这是上下游动叶叶片通过频率不同导致的.

从图9中还可以看到,在监控点1位置处,下游离心叶轮势流的影响大于上游轴流叶轮尾迹和轴流叶轮尾迹与离心叶轮势流间的干涉共同产生的影响.在 $t/T \approx 0.1$ 到 $t/T = 0.2$ 时间段和 $t/T \approx 0.8$ 到 $t/T = 0.9$ 时间段内, $\tilde{V}_{z,d,i}$ 与 $\tilde{V}_{z,u,i} + \tilde{V}_{z,ud,i}$ 两者叠加干涉相位近似呈“峰-谷”叠加状态,此时两组影响为相互抑制状态;在 $t/T \approx 0.35$ 至 $t/T \approx 0.6$ 时间段内,两者叠加干涉虽存在一定的相位差,但基本呈现出“峰-峰”叠加状态,此时两组影响为相互激励状态.这说明当上游轴流叶轮尾迹与下游离心叶轮势流在中间叶片排叠加干涉时必将产生相互激励和相互抑制区域.

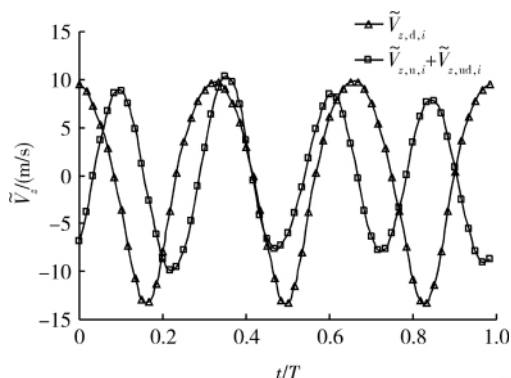


图9 监控点1位置处轴向速度波动曲线分解
(80%叶高)

Fig. 9 Decomposition of fluctuating curve of axial velocity at monitoring point 1
(80% span)

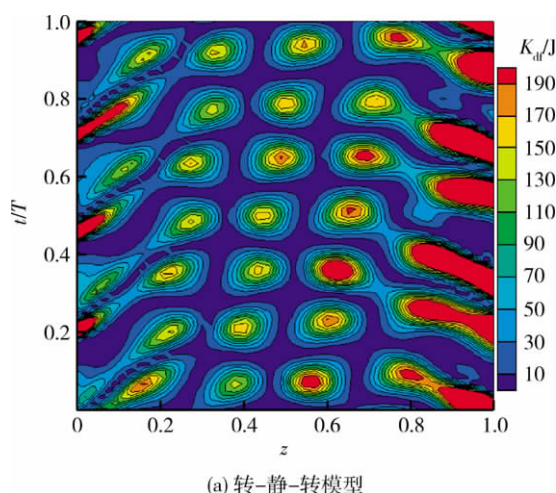
轴向确定性波动动能能够更清楚地表现轴向速度波动值大小.定义轴向确定性波动动能为

$$K_{df} = (V_z - \bar{V}_z)^2 / 2 \quad (8)$$

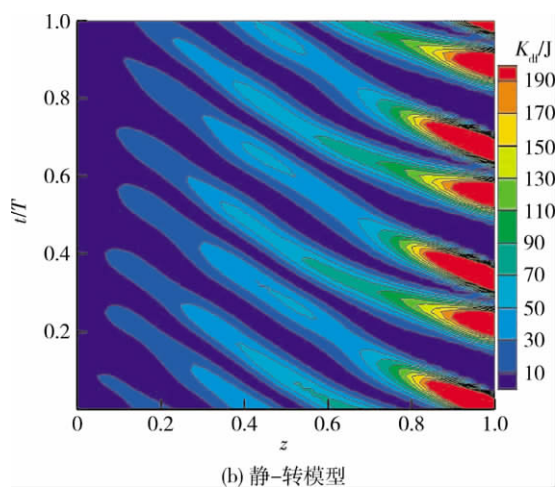
式中 V_z 为气流轴向速度分量的瞬时值, $\bar{V}_z$ 为轴向速度分量的时均值.

为进一步说明这种抑制与激励状态在静叶通道内的变化情况,用轴向确定性波动动能分布时空图表征激励和抑制区域的分布情况.

图10给出了两种模型静叶通道80%叶高中间流线处(如图7所示)轴向确定性波动动能分布时空图,其中横坐标为轴向位置,纵坐标为无量纲时间.从图10(a)中可以看到,转-静-转模型静叶通道中上游轴流叶轮尾迹与下游离心叶轮势流的叠加干涉作用随时间发生改变.当上下游干涉相互激励时,呈现出轴向确定性波动动能较大的3列离散点窝状;当上下游干涉相互抑制时,则为轴向确定性波动动能较小的离散点窝状之间的蓝色区域.另外,在不同轴向位置处,静叶通道中叠加干涉区域呈现倾斜状,每列离散点窝状区域均随时间变化而向右侧倾斜.这说明在转-静-转模型静叶通道中激励/抑制区域的轴向位置随时间发生变化.



(a) 转-静-转模型



(b) 静-转模型

图10 静叶通道确定性波动动能分布时空图
(80%叶高)

Fig. 10 Distance-time distribution of deterministic fluctuation kinetic energy in stator passage
(80% span)

图 10(b) 为静-转模型静叶通道 80% 叶高中间流线处(如图 7 所示)轴向确定性波动动能分布时空图. 排除了上游轴流叶轮的影响后, 静叶通道只受到下游离心叶轮的势流影响. 从图中可以看到, 波动动能呈倾斜条带状分布. 依据条带的倾斜方向, 可以判断出非定常扰动从静叶下游向上游传播, 其影响可以逆主流传播到静子叶片前缘位置处.

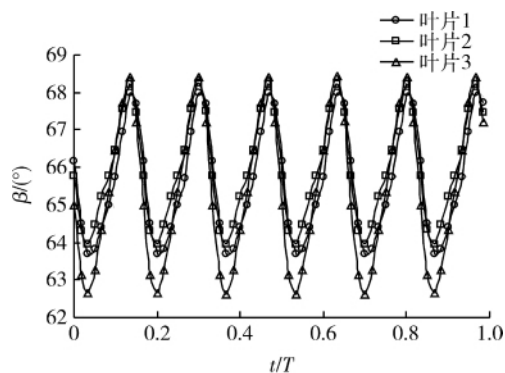
依据图 10(a) 和图 10(b) 两幅关于轴向确定性波动动能时空图的分布情形, 可以推出静叶通道中间流线上只受上游动叶尾迹影响时, 轴向确定性波动动能也应呈条带状分布, 但条带的倾斜方向应与图 10(b) 相反.

3.2 叶排干涉对离心叶轮叶片前缘的影响

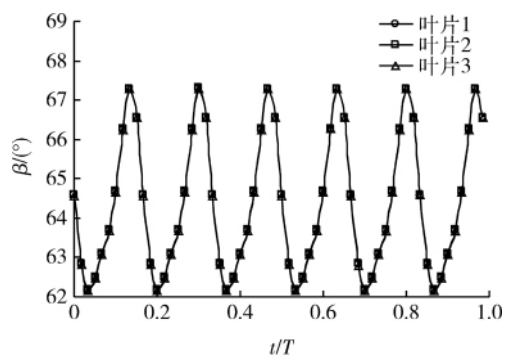
对于离心叶轮, 上游叶片排的存在会导致离心叶轮进口流场产生畸变, 通过观察不同叶片进口相对气流角随时间变化曲线, 可以清楚发现进口流场存在的差异. 图 11 分别为转-静-转和静-转两种模型中监控点 2 位置处(如图 7 所示)相对气流角随时间变化曲线图. 从图 11(a) 中可以看到, 在转-静-转模型中, 离心叶轮 3 个叶片前缘的进口相对气流角波动幅值差别较大, 其中以叶片 3 的相对气流角波动幅值最大, 其次是叶片 1, 波动幅值最小的是叶片 2. 在图 11(b) 中可以看到, 排除上游轴流叶轮的影响后, 离心叶轮的 3 个叶片前缘进口相对气流角波动幅值基本一致. 这说明在转-静-转模型中, 由于存在上游轴流叶轮影响, 离心叶轮 3 个叶片前缘气流分布存在畸变, 这种畸变使得此处的相对气流角波动幅值增大.

在轴流转子叶片和轴流静子叶片的影响下, 离心叶轮进口相对气流角分布出现不均匀现象, 这种现象直接影响下游离心叶轮叶片攻角大小, 因此有必要深入探究其波动机理, 明确产生这种差异性的原因. 为此, 图 12 给出了转-静-转和静-转两种模型离心叶轮前缘 80% 叶高处, 在相同标尺下某一时刻的熵增分布. 从图 12 左侧云图中可以看到, 离心叶轮 3 个叶片前缘所受影响存在明显差异. 上游轴流叶轮尾迹部分撞击到离心叶轮叶片 1 和叶片 2 前缘处, 其中叶片 2 前缘受到上游轴流叶轮尾迹影响强度大于叶片 1, 但这种影响强度差别很小. 因此, 图 11(a) 中叶片 1 与叶片 2 前缘相对气流角变化差别较小. 对于叶片 3, 上游轴流叶轮尾迹并未直接作用到叶片 3 前缘, 而是通过离心叶轮相邻两个主叶片之间区域, 直接进入离心叶轮通道, 其结果是叶片 3 前缘基本未

受到轴流叶轮尾迹影响. 而图 11(a) 中叶片 3 前缘相对气流角波动幅值大于叶片 1 和叶片 2. 这一现象说明, 上游轴流叶轮尾迹输运到下游离心叶轮进口处时, 如果未掺混完全的尾迹撞击到离心叶轮前缘处, 对离心叶轮叶片前缘进口相对气流角的波动具有抑制作用. 在图 12 的右侧云图中, 离心叶轮 3 个叶片前缘所受影响基本一致, 这是图 11(b) 中 3 个叶片前缘相对气流角波动幅值



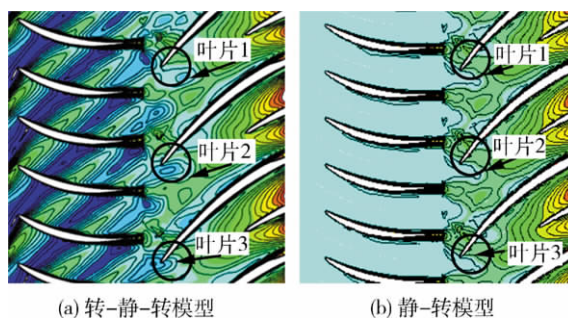
(a) 转-静-转模型离心叶轮叶片前缘



(b) 静-转模型离心叶轮叶片前缘

图 11 监控点 2 位置处相对气流角随时间变化曲线图(80% 叶高)

Fig. 11 Curves of relative angle varying with time at monitoring point 2 (80% span)



(a) 转-静-转模型

(b) 静-转模型

图 12 离心叶轮前缘不同时刻熵增分布(80% 叶高)

Fig. 12 Entropy distribution of impeller leading edge at different moments (80% span)

一致的原因.这也说明下游离心叶轮叶片进口气流角波动幅值受上游轴流叶轮尾迹影响.

3.3 离心叶轮叶片前缘影响因素叠加相位分析

文献[11]表明,在多排叶片排环境下,上游叶片排尾迹与下游叶片排势流将会发生相互干涉作用,这种干涉作用会造成下游叶片排前缘气流分布产生畸变.文献[16]表明,在3排轴流风扇中,上游2排叶片尾迹的相互干涉作用将会对下游第3排叶片前缘进口气流角产生明显影响.文献[17-18]表明,同名叶片之间也存在一种相互干涉作用,这种干涉作用影响着第2排同名叶片的出口气流角.

上述文献的研究表明,气流流过叶片排时,不同叶片排之间将会产生一种相互干涉作用,通过观察这种干涉作用来分析气流角的变化情况,是一种有效的研究方法,但这些文献并没有阐明干涉作用导致气流或气流角分布不均匀的机制.在本文的组合压气机中,转-静-转模型监控点2位置位于离心叶轮前缘,上流轴流叶轮、中间轴流静叶和下游离心叶轮都会对其产生影响,气流流过这3排叶片时必定会产生一些相互干涉作用.基于这种想法,将离心叶轮叶片前缘监控点2位置处的相对气流角表示为

$$\beta_{i,r/s/r} = \beta_{steady} + \bar{\beta}_{us} + \bar{\beta}_{us,i} + \bar{\beta}_{ud} + \bar{\beta}_{ud,i} + \bar{\beta}_{sd} + \bar{\beta}_{sd,i} \quad (9)$$

式中 $\bar{\beta}_{us}$ 为轴流叶轮与静叶之间的干涉引起该点处相对气流角变动量时均值; $\bar{\beta}_{us,i}$ 为轴流叶轮与静叶之间的干涉引起该点处相对气流角变动量波动值; $\bar{\beta}_{ud}$ 为轴流叶轮与离心叶轮之间的干涉引起该点处相对气流角变动量时均值; $\bar{\beta}_{ud,i}$ 为轴流叶轮与离心叶轮之间的干涉引起该点处相对气流角变动量波动值; $\bar{\beta}_{sd}$ 为静叶与离心叶轮之间的干涉引起该点处相对气流角变动量时均值; $\bar{\beta}_{sd,i}$ 为静叶与离心叶轮之间的干涉引起该点处相对气流角变动量波动值.

静-转模型中离心叶轮所受干涉影响主要来自静叶和离心叶轮之间的干涉,其进口相对气流角可表示为由下述式中的变量组成:

$$\beta_{i,s/r} = \beta_{steady} + \bar{\beta}_{sd} + \bar{\beta}_{sd,i} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10)可将影响离心叶轮进口相对气流角波动的影响因素分为两组:一组为轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉 ($\bar{\beta}_{us,i} + \bar{\beta}_{ud,i}$); 另一组为静叶与离心叶轮间的干涉 ($\bar{\beta}_{sd,i}$). 由式(9)减去式(10)即可得到轴流叶轮与

静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉影响.分解方法如式(11)所示

$$\beta_{i,r/s/r} - \beta_{i,s/r} = \bar{\beta}_{us} + \bar{\beta}_{us,i} + \bar{\beta}_{ud} + \bar{\beta}_{ud,i} \quad (11)$$

图13结合式(10)和式(11)给出了监控点2位置处(如图7所示)相对气流角两组干涉影响因素波动曲线.从图中可以看到,在监控点2位置处, $\bar{\beta}_{sd,i}$ 波动幅值远大于 ($\bar{\beta}_{us,i} + \bar{\beta}_{ud,i}$) 波动幅值,

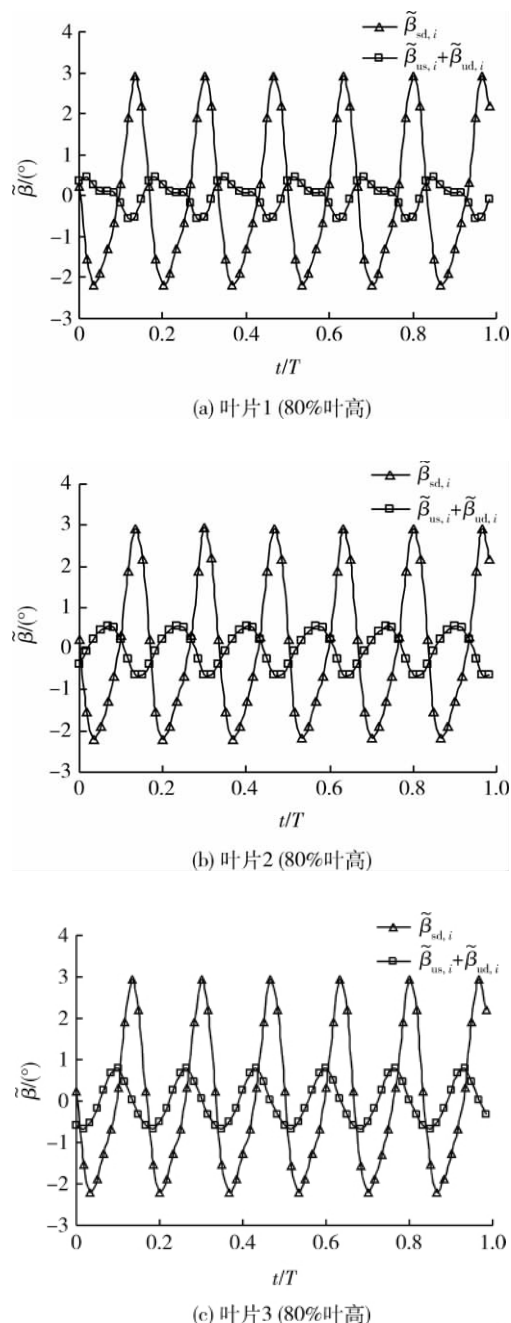


图13 监控点2位置处相对气流角波动曲线分解

Fig. 13 Decomposition of fluctuating curve of relative angle at monitoring point 2 (80% span)

这说明静叶与离心叶轮间的干涉远大于轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉,两组干涉效应波动周期均为 $(1/6)T$ 。在离心叶轮叶片1和叶片2前缘,这两组叠加干涉相位呈“峰-谷”叠加状态,此时轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉 $(\tilde{\beta}_{us,i} + \tilde{\beta}_{ud,i})$ 对静叶与离心叶轮间的干涉 $(\tilde{\beta}_{sd,i})$ 有抑制和削弱作用。另外,图13(b)叶片2中 $(\tilde{\beta}_{us,i} + \tilde{\beta}_{ud,i})$ 曲线波动幅值大于图13(a)叶片1中 $(\tilde{\beta}_{us,i} + \tilde{\beta}_{ud,i})$ 曲线波动幅值,这说明叶片2前缘轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉强度比叶片1前缘干涉强度大。由于此时两组干涉效应处于抑制状态,使干涉强度大的叶片2前缘的相对气流角波动幅值小于干涉强度小的叶片1,这在图11(a)中可得到印证。在离心叶轮叶片3前缘,轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉 $(\tilde{\beta}_{us,i} + \tilde{\beta}_{ud,i})$ 强度较叶片1和叶片2前缘干涉强度大,虽未和静叶与离心叶轮间的干涉 $(\tilde{\beta}_{sd,i})$ 曲线完全处于“峰-峰”叠加状态,但在特定的时间段内两组干涉效应仍处于激励状态,这种激励状态使得图11(a)中离心叶轮叶片3前缘相对气流角曲线波动幅值大于两组干涉效应处于抑制状态的叶片1和叶片2前缘相对气流角波动幅值。这一现象说明,转-静-转模型中由于上下游动叶通过频率不同,使离心叶轮3个叶片前缘处叶片的叠加干涉相位产生不同,这种不同的叠加相位是此处气流分布存在畸变的主要原因。这一畸变使得离心叶轮不同叶片进口相对气流角产生明显差异,直接影响离心叶轮的进口条件。

4 结 论

采用数值模拟的方法研究了一个轴径流组合压气机内部非定常流场。使用影响因素分组法,分析了上游轴流叶轮尾迹与下游离心叶轮势流共同影响和离心叶轮势流单独影响两种情况下,中间静叶通道中气流的非定常流动特性。并得到轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间,以及静叶与离心叶轮间的两组干涉分别对离心叶轮叶片前缘造成的影响。

在静叶通道中,上游轴流叶轮尾迹与下游离心叶轮势流的叠加干涉,在不同时间段内存在“峰-峰”与“峰-谷”两种叠加方式,使得两者呈现相互激励和相互抑制两种状态,且激励区与抑制区的轴向位置随时间发生改变,导致轴向速度波动在一个计算周期内呈多峰状。但由于异频干涉

原因,并不存在周期性,且波动幅值变化较大。

在离心叶轮叶片前缘,静叶与离心叶轮间的干涉影响远大于轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉影响。在不存在轴流叶轮影响前提下,静叶与离心叶轮间的干涉对离心叶轮不同叶片进口条件产生的影响基本一致。而轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉,以及静叶与离心叶轮间的干涉两者相互叠加时,则会造成离心叶轮3个叶片进口条件发生较大改变,使离心叶轮进口气流分布存在畸变。轴流叶轮与离心叶轮的异频干涉是其中很重要的因素之一。

另外,当上游轴流叶轮尾迹撞击到离心叶轮叶片前缘时,轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间,以及静叶与离心叶轮间的两组叠加干涉相位近似呈“峰-谷”叠加状态,此时轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉对静叶与离心叶轮间的干涉有抑制和削弱作用;当上游轴流叶轮尾迹未撞击到离心叶轮叶片前缘时,轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间的干涉强度增大,并对静叶与离心叶轮间的干涉产生一定的激励作用。即在离心叶轮进口处,轴流叶轮与静叶间和轴流叶轮与离心叶轮间,以及静叶与离心叶轮间的两组干涉存在相互抑制和相互激励的区域。

参考文献:

- [1] Mailach R, Vogeler K. Aerodynamic blade row interaction in an axial compressor: Part II unsteady profile pressure distribution and blade forces[J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(1): 45-51.
- [2] Mailach R, Muller L, Vogeler K. Rotor-stator interactions in a four-stage low-speed axial compressor: Part I unsteady profile pressures and the effect of clocking[J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(4): 507-518.
- [3] Mailach R, Muller L, Vogeler K. Rotor-stator interactions in a four-stage low-speed axial compressor: Part II unsteady aerodynamic forces of rotor and stator blades[J]. Journal of Turbomachinery, 2004, 126(4): 519-526.
- [4] Gorrell S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator-rotor interactions in a transonic compressor: Part I effect of blade-row spacing on performance[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(2): 328-335.
- [5] Gorrell S E, Okiishi T H, Copenhaver W W. Stator-rotor interactions in a transonic compressor Part II: effect of blade-row spacing on performance[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(2): 336-345.
- [6] Gorrell S E, Car D, Puterbaugh S L, et al. An investigation of wake-shock in a transonic compressor with DPIV and time-accurate CFD[R]. ASME Paper GT2005-69107, 2005.
- [7] 王英峰, 胡骏, 王志强. 转静干涉对叶片非定常表面压力的

- 影响[J]. 推进技术, 2010, 31(2): 198-203.
- WANG Yingfeng, HU Jun, WANG Zhiqiang. Effect of stator-rotor interactions on the blades surface pressure[J]. Journal of Propulsion Technology, 2010, 31(2): 198-203. (in Chinese)
- [8] 史亚锋, 吴虎, 陈立新, 等. 轴向间距对某跨声速轴流压气机叶排间干扰的影响规律[J]. 航空动力学报, 2011, 26(5): 1085-1090.
- SHI Yafeng, WU Hu, CHEN Lixin, et al. Effect of different axial spacing between blade rows on transonic axial compressor performance[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(5): 1085-1090. (in Chinese)
- [9] 李鹏, 乔渭阳, 谭洪川. 轴向间距对涡轮时序效应影响的数值研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(20): 4994-4999.
- LI Peng, QIAO Weiyang, TAN Hongchuan. Numerical investigation about the effects of axial gap on turbine clocking effects[J]. Science Technology Engineering, 2010, 10(20): 4994-4999. (in Chinese)
- [10] Hsu S T, Wo A M. Reduction of unsteady blade loading by beneficial use of vertical and potential disturbances in an axial compressor with rotor clocking[J]. Journal of Turbomachinery, 1998, 120(4): 705-713.
- [11] Miller R J, Moss R W, Ainsworth R W, et al. Wake, shock, and potential field interactions in a 1.5 stage turbine; Part I vane-rotor and rotor-vane interaction[J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(1): 33-39.
- [12] ZHAO Ben, YANG Ce, HU Liangjun, et al. Investigation of separating and utilizing the influences of up and down stream blade rows[R]. ASME Paper GT2012-68371, 2012.
- [13] 赵奔, 杨策, 张继忠, 等. 组合压气机中导流叶片的尾迹抖动特性[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 410-418.
- ZHAO Ben, YANG Ce, ZHANG Jizhong, et al. Stator wake variability in a combined compressor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 410-418. (in Chinese)
- [14] He N, Tourlidakis A, Elder R L. Comparisons of steady and time-averaged unsteady flow predictions for impeller-diffuser interactions in a centrifugal compressor stage[R]. ASME Paper GT2007-27985, 2007.
- [15] 石葵, 邓清华, 李军, 等. 一级半轴流式透平的非定常流动干涉与时序效应[J]. 动力工程, 2009, 29(2): 111-116.
- SHI Yan, DENG Qinghua, LI Jun, et al. Interaction and clocking effect of unsteady flow in a one and half axial-flow turbine stage[J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29(2): 111-116. (in Chinese)
- [16] Albert J S, Sanford F. Rotor blade-to-blade wake variability and effect on downstream vane response[J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(2): 456-464.
- [17] Key N L, Lawless P B, Sanford F. Rotor wake variability in a multistage compressor[J]. Journal of Propulsion and Power, 2010, 26(2): 344-352.
- [18] Key N L, Lawless P B, Sanford F. Vane clocking in a three-stage compressor; frequency domain data analysis[J]. Journal of Propulsion and Power, 2009, 25(5): 1100-1107.