

基于流固耦合的压气机转子叶片非同步振动分析

汪松柏, 霍嘉欣, 赵星, 陈勇, 吴亚东, 张军

ANALYSIS ON NON-SYNCHRONOUS VIBRATION OF COMPRESSOR ROTOR BLADES BASED ON FLUID-STRUCTURE INTERACTION

Wang Songbai, Huo Jiaxin, Zhao Xing, Chen Yong, Wu Yadong, and Zhang Jun

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.6052/0459-1879-23-435>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于ALE有限元法的流固耦合强耦合数值模拟

A PARTITIONED STRONG COUPLING ALGORITHM FOR FLUID-STRUCTURE INTERACTION USING ARBITRARY LAGRANGIAN-EULERIAN FINITE ELEMENT FORMULATION

力学学报. 2018, 50(2): 395-404

水中高压脉动气泡与浮体流固耦合特性研究

FLUID-STRUCTURE INTERACTION BETWEEN A HIGH-PRESSURE PULSATING BUBBLE AND A FLOATING STRUCTURE

力学学报. 2021, 53(4): 944-961

瞬态载荷下L4/L5椎间盘内流固耦合效应

EFFECT OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION OF L4/L5 INTERVERTEBRAL DISC UNDER TRANSIENT LOADS

力学学报. 2021, 53(7): 2058-2068

黏性流体环境下V型悬臂梁结构流固耦合振动特性研究

ANALYSIS OF FLEXURAL VIBRATION OF V-SHAPED BEAMS IMMERSED IN VISCOUS FLUIDS

力学学报. 2018, 50(3): 643-653

动脉粥样硬化晚期斑块局部应力的流固耦合分析及体外反搏作用干预机制的研究

FLUID-STRUCTURE INTERACTION ANALYSIS OF LOCAL STRESSES IN ATHEROSCLEROTIC PLAQUE AND THE INTERVENTION OF ENHANCED EXTERNAL COUNTERPULSATION TREATMENT

力学学报. 2018, 50(1): 138-146

“2018流固耦合力学在船舶与海洋新能源中的应用研究领域科学家论坛”学术综述

REVIEW OF THE 2018 SYMPOSIUM ON APPLICATION OF FLUID-STRUCTURE INTERACTION IN NAVAL ARCHITECTURE AND OFFSHORE RENEWABLE ENERGY

力学学报. 2019, 51(1): 292-297



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

基于流固耦合的压气机转子叶片非同步振动分析¹⁾汪松柏^{*,†} 霍嘉欣[†] 赵星[†] 陈勇^{*,2)} 吴亚东^{*} 张军[†]^{*}(上海交通大学机械与动力工程学院, 上海 200240)[†](中国航发四川燃气涡轮研究院, 成都 610500)

摘要 压气机转子叶片非同步振动是近年来发现的一类新气动弹性问题, 表现为叶片振动频率与转频不同步且具有锁频现象, 严重影响航空发动机的可靠性和运行安全, 目前对其产生机理并不完全清楚. 为了深入研究压气机内不稳定流动与叶片非同步振动之间的耦合机制, 基于时间推进的方法建立了多级压气机转子叶片全环的双向流固耦合模型, 数值研究了刚性叶片与非同步振动柔性叶片的非定常流场、气流激励频率和结构响应特征, 揭示了压气机转子叶片非同步振动的流固耦合机制. 结果表明: 近失速工况下, 转子叶尖吸力面径向分离涡的周期性脱落及再附过程是导致叶尖压力剧烈波动的主要原因, 其 3 倍谐波激励频率与转子一阶弯曲固有频率接近, 提供了叶片非同步振动的初始气流激励源. 叶片非同步振动发生时, 位移响应表现为等幅值的极限环特征, 振动以一阶弯曲模态主导, 径向分离涡产生的非整数倍气流激励频率及其谐波频率最终锁定为叶片一阶弯曲固有频率, 非同步振动的运动胁迫使得相邻通道叶尖流场周向趋于一致. 研究成果及对叶片非同步振动流固耦合机制的认识可为压气机内部不稳定流动诱发的叶片振动失效分析提供有益参考.

关键词 压气机转子叶片, 非同步振动, 流固耦合, 极限环, 非定常流动

中图分类号: V231.3 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-23-435

ANALYSIS ON NON-SYNCHRONOUS VIBRATION OF COMPRESSOR ROTOR
BLADES BASED ON FLUID-STRUCTURE INTERACTION¹⁾Wang Songbai^{*,†} Huo Jiaxin[†] Zhao Xing[†] Chen Yong^{*,2)} Wu Yadong^{*} Zhang Jun[†]^{*}(School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)[†](AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Chengdu 610500, China)

Abstract The non-synchronous vibration (NSV) of compressor rotor blades is a new type of aeroelastic problem discovered in recent years, the characteristics is manifested as the non synchronization between the vibration frequency and the rotating frequency and exhibiting frequency locking phenomena, which seriously affects the reliability and operation safety of aeroengine. Currently, the mechanism is not fully understood. In order to deeply investigate the interaction mechanism between the unstable flow and non-synchronous vibration of blades, a time domain fluid-structure interaction method of multistage compressor full-annulus rotor blades was established, the unsteady flow field, aerodynamic excitation frequency and structural response characteristics of rigid and flexible blades were numerically studied to reveal the fluid-structure interaction mechanism of NSV. The results indicate that the periodic shedding and reattachment process of radial separation vortices on the tip suction surface causes the severe pressure fluctuation under

2023-09-05 收稿, 2023-11-07 录用, 2023-11-08 网络版发表.

1) 国家科技重大专项资助项目 (J2022-IV-0010-0024).

2) 通讯作者: 陈勇, 讲师, 主要研究方向为航空发动机结构强度. E-mail: yongchen@sjtu.edu.cn

引用格式: 汪松柏, 霍嘉欣, 赵星, 陈勇, 吴亚东, 张军. 基于流固耦合的压气机转子叶片非同步振动分析. 力学学报, 2024, 56(3): 635-643

Wang Songbai, Huo Jiaxin, Zhao Xing, Chen Yong, Wu Yadong, Zhang Jun. Analysis on non-synchronous vibration of compressor rotor blades based on fluid-structure interaction. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2024, 56(3): 635-643

near stall conditions. Its three times harmonic aerodynamic excitation frequency is close to the first-order bending natural frequency and provides the initial aerodynamic excitation for the NSV. During the NSV, the displacement response of rotor blade exhibits equal amplitude limit cycle oscillation, and dominated by the first-order bending model. The non-integer multiple aerodynamic excitation and its harmonic frequencies generated by radial separation vortex are ultimately locked-in the first-order bending natural frequency. The motion stress of NSV causes the circumferential flow field of adjacent channels to become consistent. This present result and the mechanism understanding of fluid-structure interaction of NSV can provide useful references for the analysis of blade vibration failure induced by unstable flow in compressor.

Key words compressor rotor blade, non-synchronous vibration, fluid-structure interaction, limit cycle oscillation, unsteady flow

引言

压气机叶片的流致振动问题涉及气体动力学和结构动力学,是航空发动机中典型的流固耦合问题.低成本和轻量化设计要求使得压气机单级气动负荷不断提高,结构上普遍采用轻质低阻尼的整体叶盘设计,这一设计趋势在提高部件性能的同时,也使得叶片气动弹性问题越来越突出,国内外主要航空发动机公司在新型发动机压气机的研制过程中均遭遇过一类新的气动弹性问题——非同步振动(non-synchronous vibration, NSV)^[1-5].非同步振动通常发生在风扇/压气机进口级的非设计转速工况,表现为叶片振动频率与转频不同步,呈非整数倍关系,并具有锁频特征.由于不稳定流体与叶片之间相互耦合,可产生较大的振动应力,常导致叶片高周疲劳失效甚至引发严重事故.

转子叶片非同步振动常发生于高负荷压气机的非设计工况.1995年, Baumgartner 等^[6]首次报道了高压压气机第一级转子叶片的非同步振动现象,通过机匣壁面动态压力传感器和叶片表面应变片的综合测试捕捉到叶片的高幅值振动.非同步振动的频率特征就是叶片振动频率与转频呈非整数倍的关系,即两者非同步,认为转子叶尖旋转不稳定涡是诱发叶片非同步振动的主要原因.2003年, Kielb 等^[7]实验研究了 GE (General Electric) 公司轴流压气机第一级转子叶片非同步振动现象,结果表明第一级转子叶片非同步振动表现为锁频锁相的典型特征. Jüngst 等^[8]采用动态压力测试阵列、叶片表面应变片和非接触叶尖定时 (blade tip timing, BTT) 综合测试手段研究了某 1.5 级高速轴流压气机转子非同步振动.在大径向间隙的近失速边界,当频率接近且气

动模态和结构模态匹配时,叶片非同步振动现象发生,主要由叶尖间隙泄漏流引发的压力高幅值振荡引起.这种多物理场的综合测试方法,能够开展叶片非同步振动的流固耦合实验研究.由于非同步振动实验测量较难且存在较大的危险性,其机理研究还依赖于有效的物理模型及可靠的数值模拟.

Hollenbach 等^[9-11]提出一种两自由度的范德波尔振荡降解模型模拟叶片非同步振动,揭示了非同步振动锁频、极限环振动的典型特征,为非同步振动背后的物理机理研究提供了一种新思路. Gan 等^[12-13]采用双向流固强耦合方法对 GE 公司某压气机第一级转子叶片非同步振动的锁频机理进行了研究,非同步振动发生时,叶片表现为一阶扭转模态振动,气流激励主导频率与刚性叶片的气流激励频率一致,未发生气流激励频率锁定至叶片一阶扭转固有频率的现象,呈现出气流强迫激起的极限环振动特征. Han 等^[14-15]采用叶片强迫运动方式结合动网格技术,数值研究了压气机转子叶尖泄漏流和叶片非同步振动的耦合机制.发现叶片振动幅值和振型对非同步振动锁频有重要的影响,间隙泄漏流和振动频率之间的频差小于 1%~1.6% 时,可能会出现锁频现象,且锁频区域随振幅的增加而变宽. Zhu 等^[16]通过全环的非定常流场数值模拟结合叶片结构的谐响应分析研究了汽轮机末级叶片的非同步振动锁频,结果表明叶片振动节径与旋转不稳定模态数重合时,会发生锁频现象,且叶片非同步振动锁频时振动幅值可达未锁频时的近 20 倍.由此可见,非同步振动锁频时可产生较大的振动应力,常导致叶片振动应力超限,对叶片高周疲劳和安全性构成严重的威胁^[17-21].

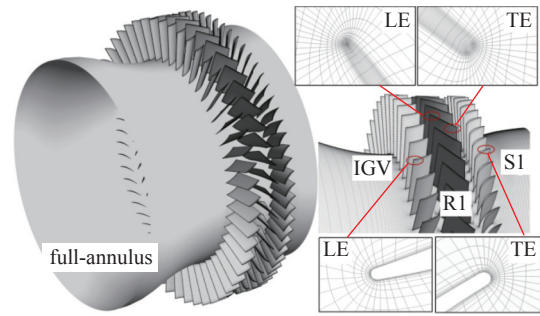
压气机转子叶片非同步振动现象属于气动弹性问题, 国内外针对压气机转子叶片非同步振动的产生机制并不完全清楚, 尚无统一论. Thomassin 等^[22-24]认为非同步振动是因为叶尖射流冲击波和反馈波周期性振荡诱发了叶片的高振幅振动, 基于此理论提出一种预测非同步振动发生的临界转速模型. 文献^[25-31]认为叶尖旋转不稳定性是诱发叶片非同步振动的气流激励源. 不管是前缘龙卷涡的运动、间隙泄漏流的周期性振荡, 还是泄漏流与分离流间的相互作用, 都表现出类似“旋转不稳定性”的特征. 然而, 由于上述研究结果并未发生显著的叶片振动超限问题, 并未对转子叶尖旋转不稳定性与叶片结构响应间的耦合机制作深入探讨. 文献^[32-34]认为压气机内不稳定涡的声波与叶片共振是非同步振动产生的主要原因.

目前, 对压气机内不稳定流动与叶片非同步振动之间的流固耦合机制认识不清, 难以指导叶片非同步振动的机理分析及减振设计. 本文采用时间推进的双向流固耦合数值仿真方法, 对比研究了某 1.5 级压气机刚性转子内不稳定气流激励与流固耦合作用下叶片非同步振动的结构响应特征, 揭示了压气机转子叶片非同步振动的产生机制, 为流固耦合条件下压气机转子叶片非同步振动失效的机理分析及叶片减振设计提供参考.

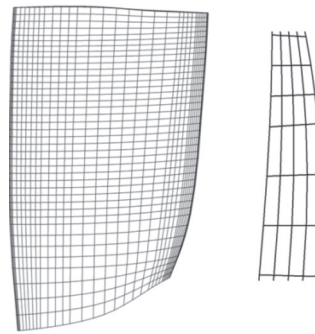
1 研究对象及数值方法

1.1 研究对象及网格离散

本文以某 1.5 级跨声速压气机为研究对象, 几何包含进口导叶、转子叶片和静子叶片, 叶片数分别为 52, 47 和 68. 转子展弦比为 1.48, 轮毂比为 0.74, 径向间隙与叶尖弦长比值为 0.5%, 转子叶片非同步振动的物理转速为 9564 r/min. 全环非定常流场计算模型和转子有限元模型如图 1 所示. 流体网格采用 IGG/AutoGrid5 生成, 叶片周围采用正交性较好的 O 型网格拓扑, 其他区域采用 H 型网格, 叶尖间隙采用蝶形网格拓扑, 全环模型流体网格节点总数约为 3500 万, 近壁面第一层网格 y^+ 值在 15~25 之间. 转子固体网格为六面体的结构化网格, 采用 Solid186 高精度实体单元, 单个转子叶片单元数为 14276. 转子叶片材料为钛合金, 其性能参数为: 密度 $\rho = 4500 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 112 \text{ GPa}$, 泊松比 $\mu = 0.36$.



(a) 全环模型流体网格及细节
(a) Full-annulus fluid grid and detailed views



(b) 固体计算网格及细节
(b) Structure computational grid and detailed view

图 1 数值计算网格

Fig. 1 Numerical calculation grid

1.2 流体动力学数值求解

压气机非定常流场通过商业软件 CFX 求解三维非定常雷诺平均 (unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes, URANS) 方程, 空间离散采用高精度格式, 时间离散采用二阶 Euler 格式. 湍流模型采用 $\kappa-\varepsilon$ 模型, 该模型采用自适应壁面函数 (scalable) 处理边界层, 允许叶片近壁面第 1 层贴体网格 y^+ 较大, 避免叶片运动时叶尖流体网格出现负体积, 提高流固耦合仿真的鲁棒性和计算效率, 众多学者^[35-36]采用该湍流模型开展压气机内不稳定流动机理研究. 计算工况: 转速 9564 r/min, 轴向进气, 进口总温 294 K, 总压 58 kPa, 湍流度为 5%, 出口给定满足径向平衡方程的平均静压, 固体边界为无滑移、绝热壁面条件. 非定常物理时间步为 $4.45 \times 10^{-6} \text{ s}$, 每个物理时间步内流体域计算迭代 8~10 次, 每个流体域时间步内固体域迭代 6 次, 转静交界面选取动静叶滑移边界 (transient rotor-stator).

1.3 结构动力学数值求解

每一个时间步内对叶片结构动力学方程进行求解, 叶片瞬态动力学方程为

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (1)$$

其中 $\ddot{\mathbf{X}}, \dot{\mathbf{X}}, \mathbf{X}$ 表示各节点的加速度响应向量、速度响应向量、位移响应向量; \mathbf{M} 为质量矩阵, \mathbf{C} 为阻尼矩阵, \mathbf{K} 为刚度矩阵; \mathbf{F} 为载荷向量. 求解时叶根给定固支边界条件, 转子叶片表面为流固耦合交界面, 通过交界面实现物理参数的多物理场传递.

1.4 双向流固耦合方法

为了研究压气机内不稳定流体与叶片非同步振动之间的流固耦合过程, 转子叶片非同步振动的流固耦合数值模拟采用流体域和固体域双向耦合迭代方案, 如图 2 所示. 流固耦合计算由内外两个循环控制, 外循环控制流固耦合非定常时间推进, 内循环控制流体域和固体域交界面上的插值和数据传递, 当内循环流体域和结构域的载荷和位移都达到收敛状态时迭代结束, 进入下一个物理时间步的外循环. 流固耦合的交界面上, 采用守恒插值法在每一个时间步内将气动载荷和结构边界的位移等信息在耦合交界面交换以实现流场和结构场信息传递, 保证能量传递守恒和几何位移传递守恒, 其表达式如下

$$\sum F_i = \int p_j ds \tag{2}$$

$$\sum F_i u_i = \iint p_j ds u \tag{3}$$

$$v_{fi} = v_{si} \tag{4}$$

式中, F_i 为固体耦合面上节点载荷; u_i 为节点位移; p_j 为流体耦合面上的表面压力; v_{fi} 表示流体交界面网格节点运动速度; v_{si} 表示固体交界面网格节点运动速度.

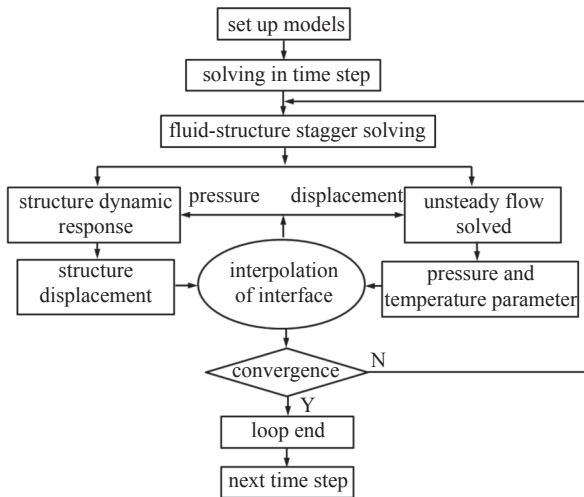


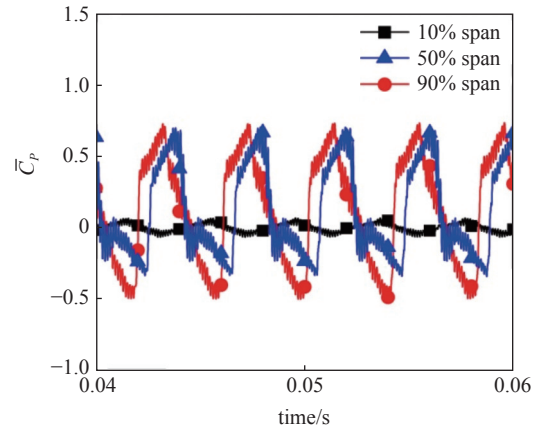
图 2 流固耦合迭代方案

Fig. 2 Fluid-structure interaction scheme

2 刚性叶片结果分析

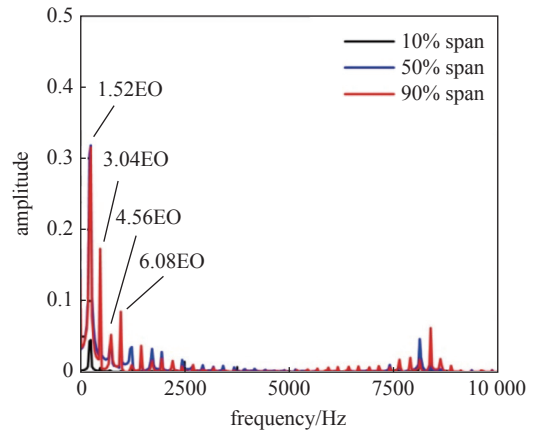
某发动机高压压气机第一级转子叶片在非设计转速的近失速工况出现非同步振动问题, 振动发生时表现为机匣压力脉动的急剧增加, 第一级转子叶片振动应力超限, 本文针对第一级转子叶片非同步振动发生工况开展数值仿真和分析.

为了揭示转子叶尖不稳定流体与叶片非同步振动之间的耦合机制, 首先采用非定常数值模拟对刚性叶片的全环非定常流场进行了数值模拟. 图 3 为转子不同叶高数值探针静压波动的时间历程和频谱, 分别监测了 10%, 50% 和 90% 叶高前缘点的静压波动. 从时程图中可以看出, 10% 叶高静压波动的幅值较小, 其波动幅值约为 1.5%. 50% 和 90% 叶高静压波动剧烈, 90% 叶高最大, 其波动幅值可达 12.5%. 90% 叶高监测点波峰静压绝对值为 52.1 kPa,



(a) 静压波动随时间变化

(a) Time history plots of static pressure fluctuation



(b) 频谱图

(b) Frequency spectrum

图 3 不同叶高数值探针静压波动的时间历程和频谱

Fig. 3 Time history and frequency spectrum of static pressure fluctuation of numerical probes for different spans

波谷静压绝对值为 21.2 kPa。对监测点静压波动的时程曲线进行快速傅里叶变换获取频谱信息, 从频谱图中可知流场存在非整数倍气流激励频率 1.52EO (engine order) 及其谐波频率 (3.04EO, 4.56EO 和 6.08EO), 且非整数倍气流激励频率幅值较叶片的通过频率幅值大, 叶尖区域非整数倍气流激励频率幅值明显较叶根大, 表明诱发非整数倍气流激励的不稳定流动出现在转子叶尖区域。

图 4 为刚性转子 98% 叶高截面相对马赫数云图, 叶尖区域流场出现明显的周向非均匀性现象, 流场的周向非均匀性可影响至压气机进口。转子叶尖吸力面相邻通道出现间歇性分离涡摆动, 分离涡的周期性脱落及再附过程导致了叶尖压力的剧烈波动。由于相邻通道的压力波动具有相位延迟, 从相对坐标系下观察, 叶尖不稳定流体运动与转子旋转方向相反, 其绕转子的周向运动从而产生了与转速不同步的气流激励频率。

图 5 为刚性转子出口相对马赫数分布, 叶尖周向存在 2~3 个叶栅通道形成的低速区, 低速区周向个数为 19, 为叶尖不稳定流体的周向主模态数。为了进一步分析叶尖不稳定流体的周向空间结构, 对不同叶高前缘的周向静压波动分布分别进行空间快速傅里叶变换 (spatial fast Fourier transform, SFFT), 从而得到周向不同尺度的流场结构数量。从图 6 静压波动的 SFFT 谐波分析结果可知, 叶尖不稳定流场周向主模态数为 19 阶, 其他 2 阶、9 阶和 28 阶模态数幅值相对较小。从不同叶高 19 阶主模态幅值对比也可以看出, 不稳定流动在叶尖的扰动明显比叶根强烈。

近失速工况下, 压气机仍可以正常工作。图 7 为转子叶尖流线图, 叶尖低速区主要分为两部分。一部

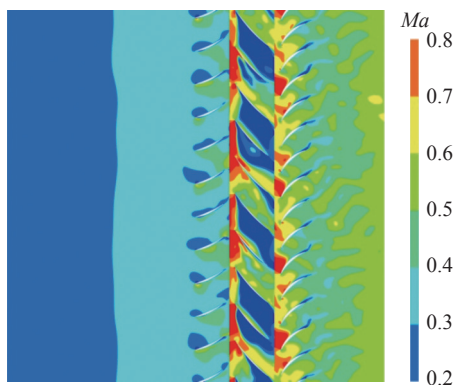


图 4 98% 叶高截面相对马赫数分布
Fig. 4 Distribution of relative Mach number at 98% span

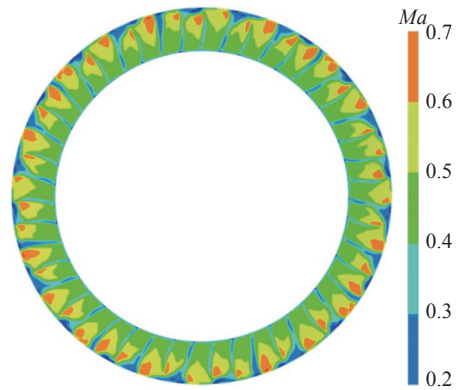


图 5 转子出口相对马赫数分布
Fig. 5 Distribution of relative Mach number at rotors exits

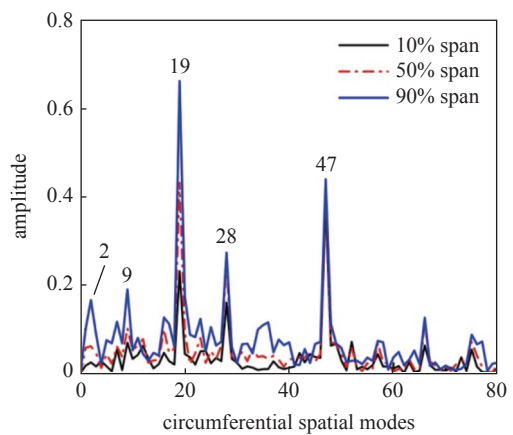


图 6 转子前缘静压波动的 SFFT 分析
Fig. 6 SFFT analysis of static pressure fluctuation at rotor leading edge

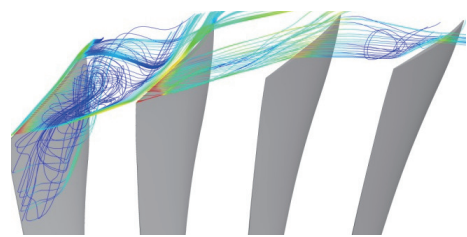
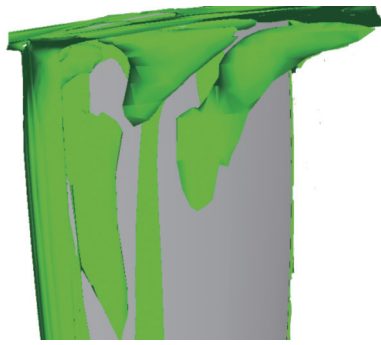


图 7 转子叶尖流线图
Fig. 7 Streamline diagram of rotor blade tip

分是由叶尖吸力面分离涡形成的大尺寸低速区, 起源于转子 70%~80% 叶高前缘, 分离涡具有明显的三维空间结构, 沿径向和周向向机匣壁面发展, 其尺度几乎占据了叶尖整个通道, 最终向下游运动流出叶片通道。另一部分流线穿过相邻通道的叶尖间隙形成间隙泄漏流, 与主流相互作用形成小尺度的低速区。从影响程度看, 分离涡的扰动明显较间隙泄漏流强烈, 是引起叶尖压力剧烈波动的主要原因。图 8 为 Q 准则下叶尖径向分离涡结构, 分离涡在空间具有三维“径向涡”结构, 起源于叶尖吸力面前中部,

图 8 Q 准则下叶尖径向分离涡结构Fig. 8 Radial separation vortex structure near the tip region using Q -criterion

向相邻叶片压力面周向运动, 结束于机匣壁面, 文献 [3,37-38] 称其为“tornado-like separation vortex”, 是突尖波 (spike) 型失速先兆的一种流动特征.

3 柔性叶片流固耦合分析

本节主要分析流固耦合下柔性叶片的非定常流场、不稳定气流激励及叶片非同步振动响应特征. 首先, 采用有限元分析软件 ANSYS 对转子叶片进行模态分析, 转子叶片前 3 阶固有频率及振型如图 9 所示. 第 1 阶振型为弯曲模态, 频率 714 Hz; 第 2 阶振型为扭转模态, 频率 1564 Hz; 第 3 阶振型为 2 阶弯曲模态, 频率 2142 Hz. 图 10 为转子叶片的共振转速图, 在第 1 级转子叶片发生非同步振动的等转速线上, 转子一阶弯曲固有频率 714 Hz (4.47EO) 与刚性转子非整数倍气流激励频率的 3 倍谐波频率 4.56EO 非常接近, 两者频差约为 1.8%, 位于 4 阶次和 5 阶次激励之间, 该频率可提供叶片非同步振动的初始气流激励源. 图 11 为流固耦合作用下转子叶片瞬态总位移云图分布, 叶根至叶尖位移逐渐增大, 转子叶片最大位移位置出现在叶尖前缘, 叶尖前缘至尾缘位移逐渐减小, 位移特征总体符合一阶弯曲

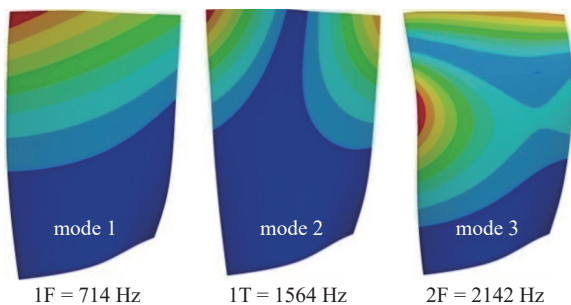


图 9 转子叶片前 3 阶模态

Fig. 9 The first three-order of rotor blade

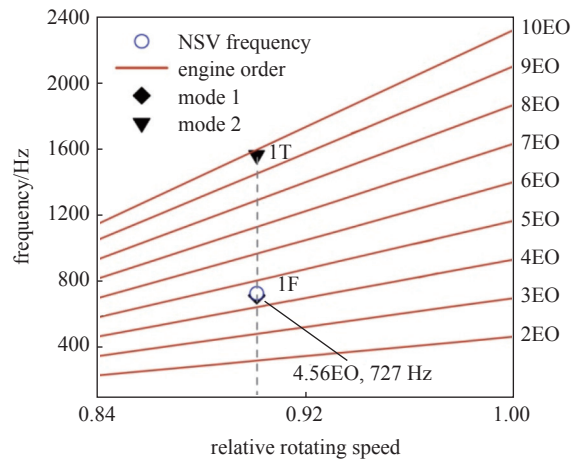


图 10 转子叶片共振转速图

Fig. 10 Campbell diagram of rotor blade

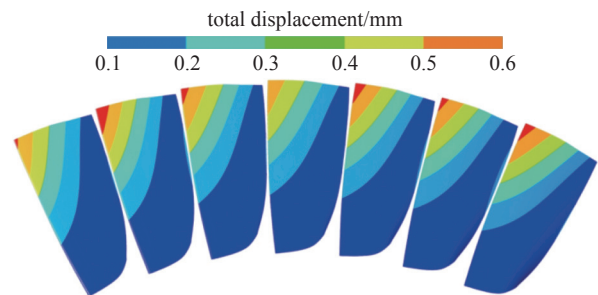


图 11 转子叶片瞬态总位移云图

Fig. 11 Total transient displacement of rotor blades

模态振型, 表明第 1 级转子叶片处于以一阶弯曲振型主导的非同步振动.

图 12 为转子叶片非同步振动下 90% 叶高前缘监测点静压波动的时间历程和频谱. 转子叶片非同步振动下叶尖静压波动幅值与刚性转子叶尖静压波动幅值相当. 气流激励频率为非整数倍的 4.47EO 和 12.23EO 频率, 其中 4.47EO 为转子叶片的一阶弯曲固有频率, 12.23EO 为不稳定流动的气流频率, 是由叶片振动导致的非定常流场改变引起. 与图 3(b) 的对比可以看出, 具有明显尖峰的非整数倍气流激励频率及其谐波倍频消失, 诱发叶片非同步振动的气流激励频率锁定为叶片一阶弯曲固有频率. 图 13 为转子叶片叶尖前缘总位移响应时间历程和频谱. 转子叶片非同步振动发作时其响应位移并未发散, 总体呈现等幅值的极限环振动特征. 振动的位移响应频率为一阶弯曲固有频率, 同时可见叶片的一阶扭转固有频率, 但其幅值相对较小, 即叶片非同步振动以一阶弯曲模态主导, 这与图 11 中转子叶片瞬态总位移分布特征是一致的. 图 14 为转子叶片非同步振动叶尖前缘响应的相位图, 叶片振动相位图为封

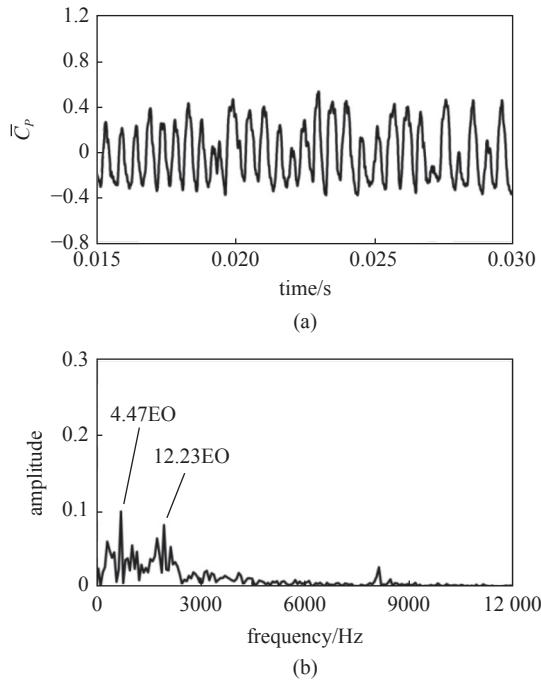


图 12 非同步振动下数值探针静压波动的时间历程和频谱
 Fig. 12 Time history and frequency spectrum of static pressure fluctuation of numerical probes during NSV

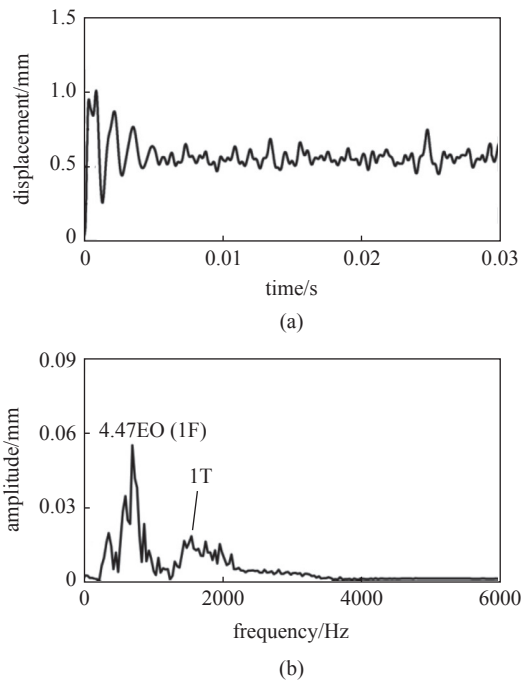


图 13 转子叶尖前缘总位移响应的时间历程和频谱
 Fig. 13 Time history and frequency spectrum of total displacement response at leading edge

闭的环形曲线, 振动特征表现为极限环振荡状态, 其动力学响应最终呈收敛状态。

图 15 为转子叶片非同步振动下 98% 叶高截面的相对马赫数, 与图 4 刚性转子叶尖相邻通道间歇

性分离涡不同, 非同步振动下转子叶尖每个通道存在周期性的分离涡, 且分离涡位置更靠近尾缘, 原先刚性转子通道内间歇性分离涡的流动状态被叶片的极限环振动所胁迫, 体现了叶片非同步振动与叶尖不稳定流动之间的耦合作用。图 16 为非同步振动下转子出口相对马赫数分布, 转子叶尖各通道的流动

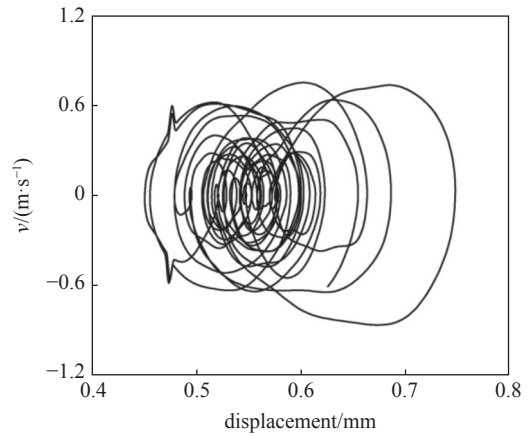


图 14 转子叶片非同步振动响应的相图
 Fig. 14 Phase diagrams of rotor blades during NSV

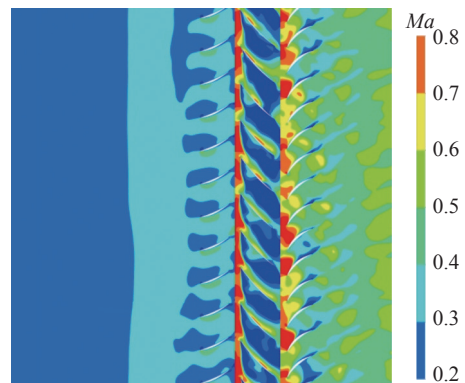


图 15 非同步振动下 98% 叶高截面相对马赫数分布
 Fig. 15 Distribution of relative Mach number at 98% span during NSV

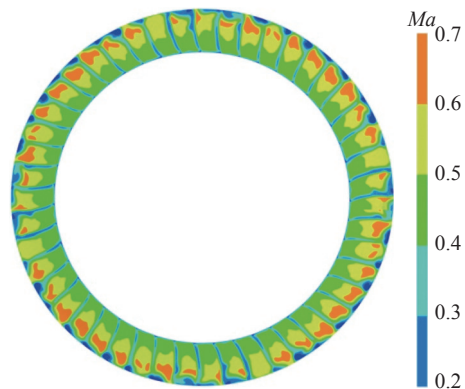


图 16 非同步振动下转子出口相对马赫数分布
 Fig. 16 Distribution of relative Mach number at rotors exits during NSV

状态在周向趋于一致, 叶尖低速区的周向个数相比刚性转子增加, 这与图 12 中非整数气流激励频率增加是一致的。

4 结 论

本文基于时间推进的方法建立了多级压气机转子叶片全环的双向流固耦合模型, 在近失速工况下, 对比研究了某 1.5 级压气机刚性转子叶尖不稳定流动的气流激励频率与流固耦合作用下叶片非同步振动的结构响应特征, 可得出如下结论。

(1) 近失速工况下, 转子吸力面径向分离涡是引起叶尖区域压力脉动增大的主要原因, 径向分离涡的周期性脱落与再附过程产生了非整数倍气流激励频率, 其 3 倍谐波频率与叶片一阶弯曲固有频率接近, 提供了叶片非同步振动的初始气流激励, 诱发了以一阶弯曲模态主导的非同步振动。

(2) 转子叶片非同步振动表现为极限环特征, 其动力学响应最终呈收敛状态。基于时间推进的双向流固耦合方法能够获取压气机内不稳定流动与叶片振动之间的耦合关系, 可用于分析压气机内复杂的流致振动问题。

(3) 转子叶片的非同步振动会明显改变叶尖不稳定流动, 刚性叶片表现为相邻通道间歇性的分离涡结构, 非同步振动叶片每个通道均存在周期性的分离涡, 且分离涡位置更靠近尾缘。非同步振动发生时, 非整数倍气流激励频率及其谐波倍频最终锁定至叶片一阶弯曲固有频率, 转子叶尖周向流场被极限环振动所胁迫而趋于一致, 体现了不稳定流动与叶片非同步振动之间的耦合。

参 考 文 献

- 王增增, 马宏伟. 航空发动机轴流压气机非整阶振动实验研究进展. 航空动力学报, 2022, 37(11): 2416-2429 (Wang Zengzeng, Ma Hongwei. Overview of experimental reasearch on non-synchronous vibration in aero-engine axial compressor. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(11): 2416-2429 (in Chinese))
- 许登科, 董旭, 徐瑞泽等. 压气机流动稳定性自适应控制方法研究进展. 力学学报, 2022, 54(3): 559-576 (Xu Dengke, Dong Xu, Xu Ruize, et al. Research progress of adaptive control methods for compressor flow stability. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(3): 559-576 (in Chinese))
- Moller D, Schiffer HP. On the mechanism of spike stall inception and near stall nonsynchronous vibration in an axial compressor. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2021, 143: 041001
- Yang ZY, Wu YD, Liu ZL, et al. Tip flow on rotating instability on an axial compressor with different tip clearances. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 139: 108364
- Zheng Y, Gao QZ, Yang H. Non-synchronous blade vibration analysis of a transonic fan. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2023, 36(1): 178-190
- Baumgartner M, Kameier F, Hourmouziadis J. Non-engine order blade vibration in a high pressure compressor//Proceedings of the 12th International Symposium on Airbreathing Engines, 1995
- Kielb R, Barter JW, Thomas JP, et al. Blade excitation by aerodynamic instabilities: A compressor blade study//Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, GT2003-38634
- Jüngst M, Holzinger F, Schiffer HP, et al. Analysing non-synchronous blade vibration in a transonic compressor rotor//Proceedings of the 11th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamic & Thermodynamics, 2015
- Hollenbach R, Kielb R, Hall K. Extending a van der pol-based reduced-oeder model for fluid-structure interaction applied to non-synchronous vibrations in turbomachinery. *Journal of Turbomachinery*, 2022, 144(3): 031006
- Hollenbach R, Kielb R, Hall K. A fluid-structure interaction tool using a van der pol-based reduced-order model for buffet and nonsynchronous vibrations. *Journal of Turbomachinery*, 2023, 145(1): 011009
- Hollenbach R, Kielb R, Hall K. An improved preliminary design tool for turbomachinery blades using van der pol based reduced-order model for non-synchronous vibrations//Proceedings of ASME Turbo Expo 2022: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2022, GT2022- 86120
- Gan J, Im HS, Espinal D, et al. Investigation of a compressor rotor non-synchronous vibration with and without fluid-structure interaction//Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition, 2014, GT2014-26478
- Gan J, Im HS, Zha GC. Numerical examination of lock-in hypothesis of non-synchronous vibration in an axial compressor//Proceedings of ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2017, GT2017-65244
- Han L, Wei DS, Wang YR, et al. Lock-in phenomenon of tip clearance flow and its influence on aerodynamic damping under specified vibration on an axial transonic compressor rotor. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2022, 35(3): 185-200
- Han L, Wei DS, Wang YR, et al. Locked-in phenomenon between tip clearance flow instabilities and enforced blade motion in axial transonic compressor rotors//Proceedings of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020, GT2020-16050
- Zhu XC, Hu P, Lin T, et al. Numerical investigations on non-synchronous vibration and frequency lock-in of low-pressure steam turbine last stage. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2022, 236(4): 647- 661
- 程荣辉, 余华蔚, 汪松柏等. 多级压气机转子负荷系数对叶片非同步振动的影响. 航空学报, 2023, 44(14): 628722 (Cheng Ronghui, Yu Huawei, Wang Songbai, et al. Effect of aerodynamic loading coefficient on occurrence of non-synchronous vibration in a multi-stage compressor. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(14): 628722 (in Chinese))
- 汪松柏, 张少平, 余华蔚等. 高负荷压气机旋转不稳定诱发转子叶

- 片非同步振动的实验研究. 推进技术, 2023, 44(2): 22010036 (Wang Songbai, Zhang Shaoping, Yu Huawei, et al. Experimental research on rotor blade non-synchronous vibrations induced by rotating instability of high load compressor. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(2): 22010036 (in Chinese))
- 19 Gao FL, Yang MS, Zhang ZB, et al. Experiment and theoretical analysis of a type of non-synchronous vibration in a high pressure compressor//Proceedings of the 32nd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, 2021
- 20 许志远, 杨明绥, 王萌. 压气机声共振特征理论预测与试验研究. 航空学报, 2023, 44(14): 628236 (Xu Zhiyuan, Yang Mingsui, Wang Meng. Theoretical prediction and experimental study on acoustic resonance characteristics of certain type of compressor. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(14): 628236 (in Chinese))
- 21 汪松柏, 陈勇, 吴亚东等. 轴流压气机转子叶片非同步振动的研究进展. 航空学报, 2023, 44(17): 628044 (Wang Songbai, Chen Yong, Wu Yadong, et al. Research progress on non-synchronous vibration of axial compressor rotor blade. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(17): 628044 (in Chinese))
- 22 Thomassin J, Vo HD, Mureithi NW. Blade tip clearance flow and compressor NSV: The jet core feedback theory as the coupling mechanism//Proceedings of ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, 2007, GT2007-27286
- 23 Thomassin J, Vo HD, Mureithi NW. Experimental demonstration of the tip clearance flow resonance behind compressor non-synchronous vibration//Proceedings of ASME Turbo Expo 2008: Power for Land, Sea, 2008, GT2008-50303
- 24 Thomassin J, Vo HD, Mureithi NW. The tip clearance flow resonance behind axial compressor nonsynchronous vibration. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(4): 041030
- 25 Patel P, Yang YC, Zha GC. Improved delayed detached eddy simulation of a 1.5 stage axial compressor non-synchronous vibration//Proceedings of ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2020, GT2020-15073
- 26 Im HS, Zha GC. Investigation of non-synchronous vibration mechanism for a high speed axial compressor using delayed DES//Proceedings of the 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014
- 27 Im HS, Zha GC. Investigation of flow instability mechanism causing compressor rotor-blade nonsynchronous vibration. *AIAA Journal*, 2014, 52(9): 2019-2031
- 28 März J, Hah C, Neise W. An experimental and numerical investigation into the mechanisms of rotating instability//Proceedings of ASME Turbo Expo 2001, GT2001-0536
- 29 Vo HD. Role of tip clearance flow in rotating instabilities and non-synchronous vibrations. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(3): 556-561
- 30 Tian J, Yao D, Wu YD, et al. Experimental study on rotating instability mode characteristics of axial compressor tip flow. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(4): 63
- 31 Wang H, Wu YD, Yue SY, et al. Numerical investigation on the flow mechanism of multi-peak frequency feature of rotating instability. *Journal of Thermal Science*, 2021, 30(2): 668-681
- 32 Camp TR. A study of acoustic resonance in a low-speed multistage compressor. *Journal of Turbomachinery*, 1999, 121(1): 36-43
- 33 Brandstetter C, Paoletti B, Ottavy X. Acoustic and convective mechanisms contributing to non-synchronous-vibrations in a multistage compressor//Proceedings of ASME Turbo Expo 2019: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2009, GT2019-91514
- 34 Fiquet AL, Aubert S, Brandstetter C, et al. Acoustic resonance in an axial multistage compressor leading to non-synchronous blade vibration. *Journal of Turbomachinery*, 2021, 143(9): 091014
- 35 Wu Y, An G, Chen Z, et al. Origins and structure of rotating instability-part 2: Numerical observations in a transonic axial compressor rotor//Proceedings of ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, 2016, GT2016-56223
- 36 Du J, Li J, Lin F, et al. The self-induced unsteadiness of tip leakage flow in an axial low-speed compressor with single circumferential casing groove. *Journal of Thermal Science*, 2013, 22(6): 565-572
- 37 Pullan G, Young AM, Day IJ, et al. Origins and structure of spike-type rotating stall. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137: 051007
- 38 Yamada K, Kikuta H, Iwakiri K, et al. An explanation for flow features of spike-type stall inception in an axial compressor rotor. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(2): 021023