

燃机压气机启动工况影响因素数值模拟研究

席晓雨¹, 张劭钦², 吴亚东², 欧阳华²

(1. 上海交通大学 国家电投智慧能源创新学院, 上海 200240; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对燃气轮机启动阶段压气机旋转失速及喘振问题突出的现象, 对某燃气轮机压气机部件的启动过程进行了数值模拟, 并比较了不同升转速率及进口可调导叶角度的升转过程中, 速度云图、沿叶高总压分布等相关参数。模拟结果显示: 不同的升转速率对于叶高较低位置流场的影响不大, 但是在0.9叶高处会存在明显差异, 2 r/s²升转速率下, 动叶尾缘流动分离较弱, 4 r/s²升转速率下, 低速区基本占据流道空间; 动叶片尖端的流动分离现象在进口可调导叶逆时针旋转5°时, 较其他工况得到明显抑制; 进口可调导叶角度的变化带来流场改变的同时, 在叶顶间隙会出现一个沿着压力侧的高速区。

关键词: 失速; 数值模拟; 轴流压气机; 启动工况; 压气机进口导叶

中图分类号: TK221 文献标识码: A DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.01.006

[引用本文格式] 席晓雨, 张劭钦, 吴亚东, 等. 燃机压气机启动工况影响因素数值模拟研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(1): 50-58. XI Xiao-yu, ZHANG Shao-qin, WU Ya-dong, et al. Research on numerical simulation of influencing factors of gas turbine compressor under starting conditions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(1): 50-58.

Research on Numerical Simulation of Influencing Factors of Gas Turbine Compressor under Starting Conditions

XI Xiao-yu¹, ZHANG Shao-qin², WU Ya-dong², OUYANG hua²

(1. College of Smart Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240;
2. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, China, Post Code: 200240)

Abstract: In response to the prominent issues of compressor stall and surge during the start-up stage of a gas turbine, numerical simulations were conducted on the start-up process of a certain gas turbine compressor component, and relevant parameters such as velocity cloud maps and total pressure distribution along blade height were compared during the start-up process at different acceleration rates and inlet guide vane (IGV) angles. The simulation results show that different acceleration rates have little effect on the flow field at lower blade heights, but there is a significant difference at 0.9 blade height. Among them, at 2 r/s² acceleration rate, there is a smaller flow separation at the trailing edge of moving blade, while at 4 r/s² acceleration rate, low-speed zone basically occupies the flow channel space; the flow separation phenomenon at the tip of the moving blade is significantly suppressed when the IGV rotates counterclockwise by 5° compared to that under other operating conditions; the change in IGV angle brings about changes in the flow field, and at the same time, a high-speed zone along the pressure side will appear in the blade tip gap.

Key words: stall, numerical simulation, axial compressor, starting condition, inlet guide vane (IGV) of compressor

引言

燃气轮机因其具有结构紧凑、启停迅速、安全可靠等特点,在能源、航空、航天、船舶等领域发挥着重要的作用。而作为燃气轮机三大部件之一,轴流压气机的性能将直接影响燃气轮机的性能。由于燃气轮机在启动工况下随机因素多,压气机易受影响,且低工况条件下压气机变工况条件差,性能点往往超出设计点,容易发生启动失速乃至喘振现象,而其一旦发生,机组将出现剧烈振动,导致叶片断裂、零部件损坏等。这不仅影响了压气机自身性能,还对航空发动机和燃气轮机乃至飞机和电站的性能带来极大影响^[1-2]。为此,对压气机启动工况失速机理进行探究,具有十分重要的意义。

重型燃气轮机是典型的非线性多变量系统,燃气轮机启动过程中内部流动复杂,数学建模尤为困难^[3]。目前国内对燃气轮机的变工况和动态过程的研究较多,但是对燃气轮机的启动过程的研究由于缺乏设计数据和没有相应的详细实验数据作对照,研究较少。郑绪生^[4]以某涡轴发动机为对象进行了其启动建模技术的相关研究,对影响启动性能的各种因素进行了分析研究,研究结果对以后燃气轮机启动过程的进一步建模研究与仿真起到了参考作用。清华大学张文杰^[5-6]参考 Kim 等人^[7-10]的研究方法以 GE9FA 机组为研究对象进行了全工况特性的仿真研究,对燃气轮机启动机系统进行了建模,并通过与实际运行数据比较得出所建模型能够很好地模拟燃气轮机实际启动过程的结论。杨晓峰等人^[11]采用一维模拟对 80 MW 小 F 重型燃气轮机进行启动过程研究,并提出了放风优化方案。韩磊等人^[12]通过自编程序搭建了压气机启动过程进气射流和放气模型并进行计算,完成了不稳定状态预测。业界虽然缺乏对轴流压气机启动工况三维数值模拟研究,但对于离心叶轮等叶轮机械的启动过程已进行了系统的研究工作。Tsukamoto 等人^[13]对一台低比转速离心泵的启动性能进行了试验测试。国内王乐勤和吴大转等人^[14-15]针对离心泵启动过程的瞬态流动,采用 PIV 等测试手段进行了研究工作,并使用大涡模拟对离心泵启动过程三维瞬态流动进行了求解,得到了瞬态内部流动分析的预测结果。

对于启动过程中升转速率的选取多依据经验,而非流动机理。对进口可调导叶角度的研究已经较为成熟。张国臣等人^[16]通过数值模拟结果,得知可调导叶角度为 -5° 时,压气机的整体性能优于导叶角度为 0° 的情况。宫伟等人^[17]研究发现,进口导叶角度存在一个调节范围,在该范围内可以增大压气机的稳定工作范围。

国内外学者对轴流压气机启动过程瞬时特性的三维仿真研究很少,基本集中于一维仿真及试验研究,对于轴流压气机内部的流动细节了解甚微。本文依据一维仿真与试验数据对升速方式进行设定,对轴流压气机启动过程三维瞬态流动进行模拟分析。

1 数值模拟方法

1.1 研究对象

数值研究对象为某燃气轮机亚音双级轴流压气机,其包含进口可调导叶、两级动静叶片以及出口导叶,其中第 1 级动叶数为 51,第 2 级动叶数为 56,其余各级静子叶片数均在 70 以上。计算区域入口延伸至进口可调导叶的 3 倍弦长处,出口段延长 5 倍导叶弦长处,模型如图 1 所示,压气机设计参数如表 1 所示。

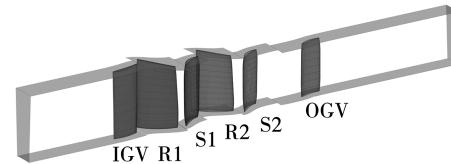


图 1 叶片流道示意图

Fig. 1 Schematic diagram of blade flow channel

表 1 压气机设计参数

Tab. 1 Design parameters of compressor

参 数	数 值
转速/r·min ⁻¹	4 600
压比	1.5
绝热效率/%	90.2
质量流量/kg·s ⁻¹	58.6
叶顶间隙/mm	0.5

1.2 研究方法

1.2.1 网格划分

采用 CFD 数值模拟进行轴流压气机启动工况

研究。压气机叶片采用 Ansys 软件的 Turbogrid 模块生成单流道网格,采用 H-Grid 网格结构生成网格。在近壁面处,由于流场参数变化剧烈,因此近壁面网格通过加密处理来捕捉附面层的详细流动情况。湍流模型采用 Shear Stress Transport 模型,同时保证第 1 层网格的 $y^+ < 1$,设置第 1 层网格厚度为 $3 \mu\text{m}$ 。在网格划分过程中,计算域入口段长度为 3 倍弦长,出口段长度为 2 倍弦长,以保证进出口流场的均匀性。

1.2.2 网格无关性验证

采用上述方法,对压气机模型进行网格划分。经网格无关性验证,如图 2 所示。在大流量情况下 90 万、120 万、150 万网格数下的计算结果基本一致;SST 模型与 $k-\varepsilon$ 模型定常计算结果相似,在小流量条件下存在 1% 以内的误差,综合计算精度以及成本最终选择 120 万网格,采用 SST 模型进行数值计算与启动工况模拟。同时,为节省计算成本,对于多级采用单流道定常计算进行性能校验,非定常启动过程仅提取进口可调导叶以及第 1 级动叶进行计算,单流道网格数为 460 480,非定常计算模型如图 3 所示。

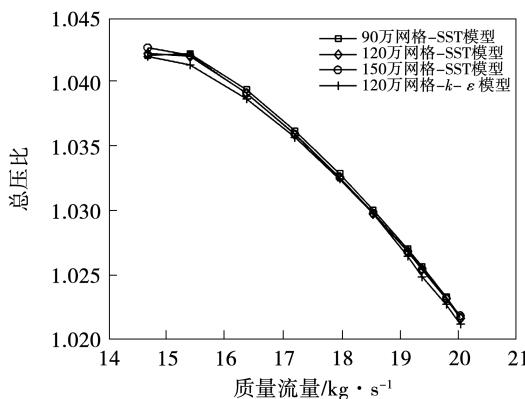


图 2 网格无关性验证

Fig. 2 Grid independence verification

1.2.3 边界条件

网格划分后,应用 CFX 流体分析软件三维计算,后处理时对内部流场细节进行分析处理,在叶片前缘和尾缘设置压力监控点以对升转过程中的不稳定因素进行观测。根据实际流动情况,控制方程选择 Navier-Stokes 方程,对流项数值离散方法采用

High resolution,使得流体域中修正值与物理值基本保持一致,湍流方程的离散格式设置为 Second Order Backward Euler。

模拟工质的物性条件为理想气体,流场侧面定义为周期性边界条件,叶片轮毂和机匣壁面边界条件为光滑无滑移、绝热壁面。进口湍流强度设定为 5%,入口条件给定总压总温,出口条件为质量流量,初场设置按进口边界条件给定均匀初场,由于计算启动条件下,由零转速开始计算,因此设定参考压力为 $1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$,温度设置为常温,气流速度为 0 m/s。动/静叶交界面采用 Transient Rotor Stator,保证交界处流量、动量和能量守恒。收敛残差设置为 1.0×10^{-4} ,时间步长为 0.000 1 s,计算时间根据升转速率进行设定,以使得不同工况最终均升转至 0.1 转速位置。在升速过程,设定转速曲线:

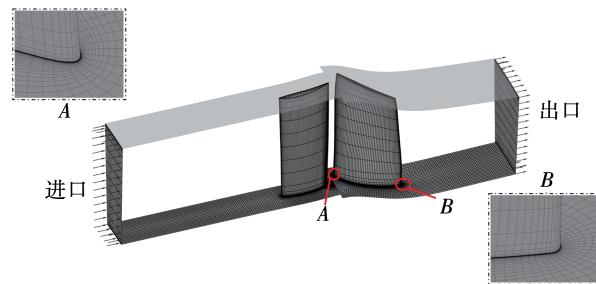


图 3 非定常计算模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of unsteady calculation model

$$V = \begin{cases} 2kt \frac{\pi}{60}, & t \leq 480/k \\ 16\pi, & 480/k \leq t \leq 480/k + 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: V —压气机转速; k —升转速率; t —时间,其中 k 分别取 120, 240, 360。

压气机分别以 2, 4 和 6 r/s 进行启动,设定目标转速为 0.1,由于升转过程中转速变化,质量流量也相应增加。参考定常计算结果,通过图 4 转速与流量的曲线拟合得到升转过程中质量流量变化曲线,由此得到升转过程中质量流量随时间变化关系式:

$$m = \begin{cases} \frac{k}{120} \times \frac{1.3}{52}t, & t \leq 480/k \\ 0.1, & 480/k \leq t \leq 480/k + 1 \end{cases} \quad (2)$$

在进口可调导叶变角度升转计算中,导叶的安装角变化范围为 $-5^\circ \sim +5^\circ$,以 2° 为间隔分别进行

非定常计算。在变进口可调导叶角度条件下,升转速率作为不变量均以 4 r/s^2 进行升转,其余条件均保持一致。

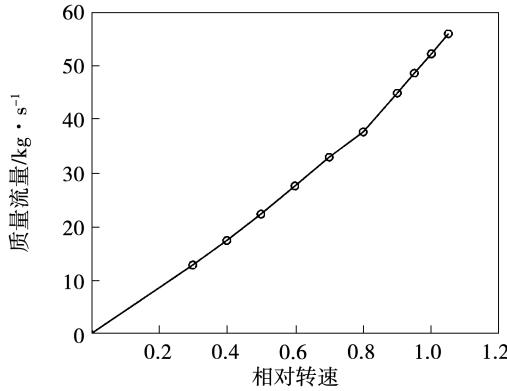


图 4 转速与质量流量曲线

Fig. 4 Variation curve of rotating speed
vs. mass flow rate

2 压气机启动工况影响因素讨论

2.1 升转速率

对于压气机启动过程数值模拟中升转速率的设定,参照前人一维仿真与试验数据可以发现,转速的提升基本按照线性函数进行^[18~26]。依据实际升转速率,并综合考量所需的计算量,本文选定升转速率分别为 2, 4 和 6 r/s^2 , 时间步长设定为 0.000 1 s, 以此探究升转速率对压气机启动的影响。

图 5(a)为燃气轮机在启动工况中转速随时间的变化趋势。由于燃机压气机的旋转失速及喘振基本发生于机组的启动升速过程中,其转速变化应处于图 5(a)的 400 s 之前的工作。因此,在仿真计算中,选定目标转速为 0.1 倍设计转速即 480 r/min, 同时对 0~0.5 倍设计转速的启动工况进行了 1 组计算,以进行补充。按照图 5(b)的转速曲线进行仿真计算,分别得到升转过程中的三维流动细节。

图 6 为转子以不同升转速率升速到 360 r/min 下动叶 0.9 叶高处瞬态流场图。通过对比不同升转速率下速度云图可以明显发现:在 2 r/s^2 升转速率情况下,流动分离区域最小,流动情况最好;在 4 r/s^2 的升转速率下,动叶尾缘的流动分离最为强烈,通道内出现明显的低速区,叶片通道内已近似堵塞;而在升

转速率 6 r/s^2 的情况下,流动分离有所减弱。

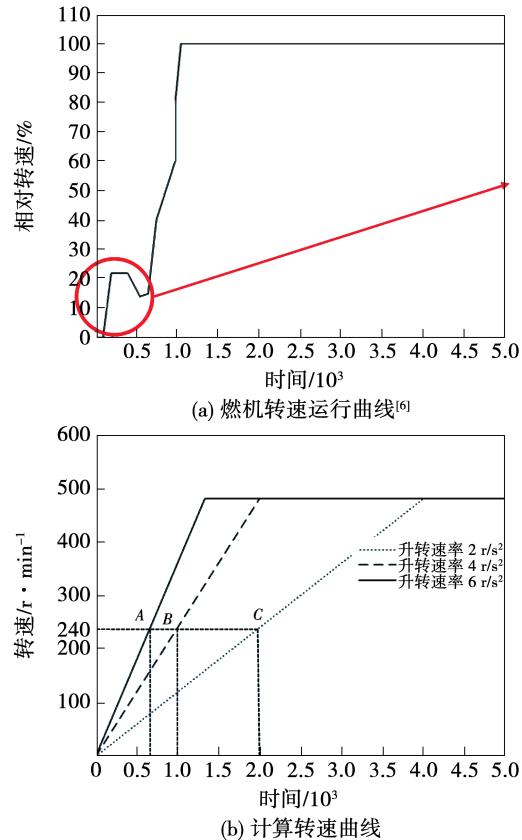


图 5 转速随时间变化关系

Fig. 5 Variation relationships between rotating speed and time

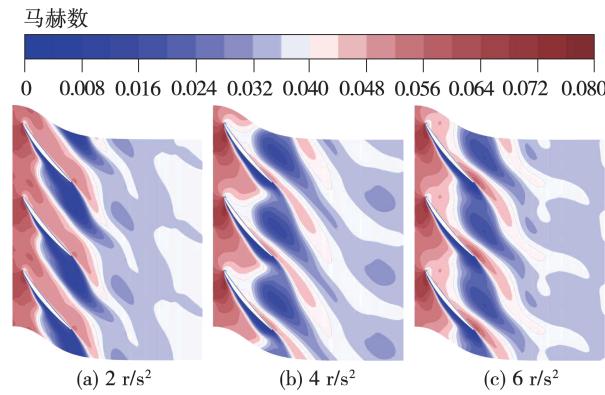


图 6 不同升转速率下 0.9 叶高处速度云图

Fig. 6 Velocity contours at 0.9 blade span under different acceleration rates

由图 6 可知,在压气机的升速过程中,升转速率并不是越高越好,也并非越低越好。在实验过程中,需要综合燃气轮机本身的设计,既要避免转速

在临界转速停滞时间过长,也应当避免过高的升转速率带来的不稳定影响因素过大,从而导致失速乃至喘振工况的出现。

图 7 为出口压力变化曲线。在计算最初 0.05 s 内,由于零初始条件,在启动过程中流场会出现较大变化,因此在不同的升转速率下,在计算的 0.05 s 内都存在较大的波动,而后压力均保持在 1.015×10^5 Pa 附近。

叶片监控点压力波动与出口压力一致,在经过一定的时间后,3 个升转速率条件下,均出现一定的波动。 2 r/s^2 条件下,在 $t_3 = 2.1447 \text{ s}$ 时刻压力达到最高点; 4 r/s^2 条件下,在 $t_2 = 1.0884 \text{ s}$ 时刻压力达到最高值;在 6 r/s^2 条件下,在 $t_1 = 0.7347 \text{ s}$ 时刻压力达到最大点。这三者瞬时速度分别为 257.36, 261.216 和 264.692 r/min, 均在 260 r/min 附近。且根据速度-压力曲线可以发现, 波动速度起始点也基本一致。

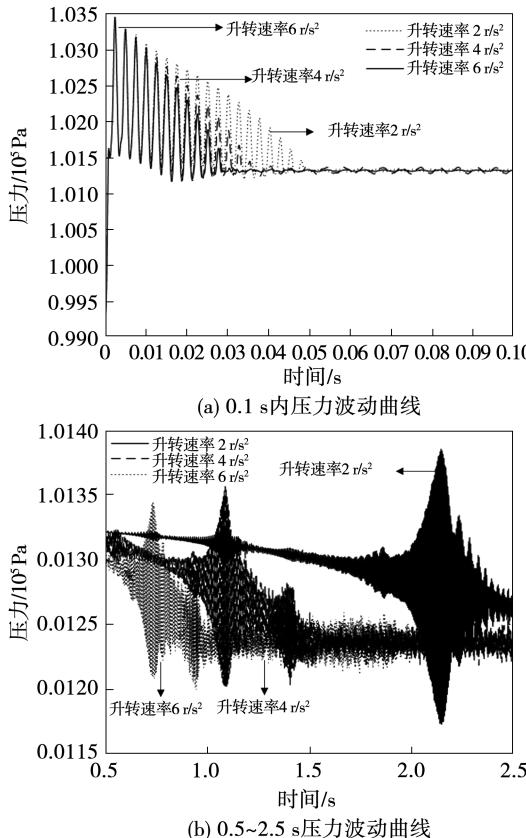


图 7 出口压力变化曲线

Fig. 7 Variation curves of outlet pressure

图 8 为 2 r/s^2 升转速率下, 0.001, 0.0012, 0.0014, 0.0016, 0.0018 和 0.0500 s 时刻动叶 0.9 相对叶高处速度云图。在升速过程中, 叶片前缘压力侧有明显的高速区, 而在叶片前缘吸力侧位置则有低速区的出现, 高速区与低速区随着转速的提升向前缘移动; 叶片尾缘压力侧有 1 个低速区, 而吸力面则是有 1 个较大的高速区, 随着转速的提升高速区与低速区向尾缘移动。与图 7 中压力的波动一致, 高速区在流道范围内随之周期性波动, 并在 500 步即 0.05 s 以后稳定, 且处于明显低速状态。

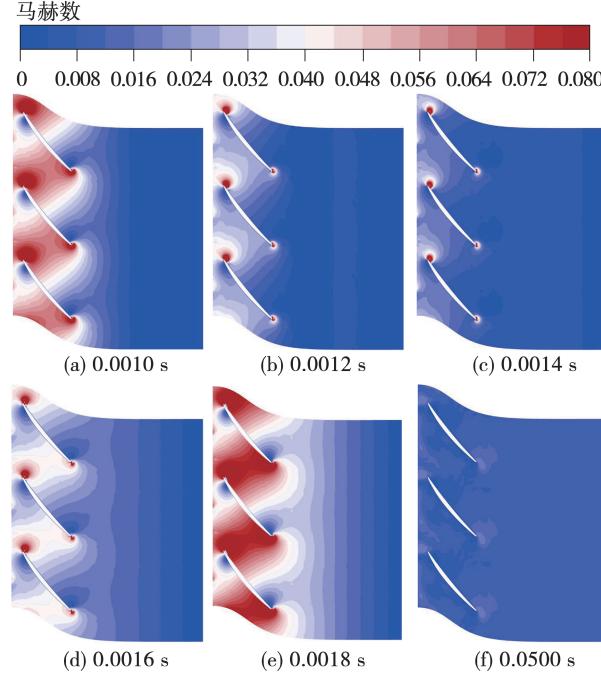


图 8 动叶 0.9 叶高处速度云图

Fig. 8 Velocity contours at 0.9 blade span

图 9 为不同升转速率下叶片尾缘总压沿叶高分布曲线。根据图 9, 沿叶高分布的总压在升转速率为 6 r/s^2 时最小, 升转速率为 4 r/s^2 时最大, 这可能也是 4 r/s^2 工况下流动分离最为剧烈的表现之一。而在近机匣和轮毂壁面的情况下, 由于压力波动较大, 在较大叶高处 3 个升速方案下, 在较大叶高处的速度出现明显差异。同时, 三者叶片尾缘总压均在 0.7 叶高处发生转折, 随着叶高的增加总压逐渐减小, 在 90% 叶高以上区域, 马赫数分布才会有明显变化。

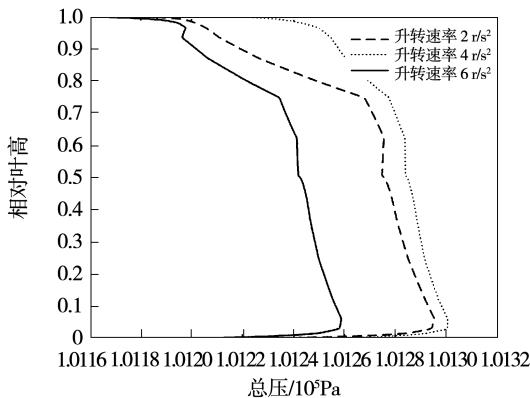


图 9 叶片尾缘总压分布曲线

Fig. 9 Total pressure distribution curve at trailing edge of blade

图 10 为 2 r/s^2 和 4 r/s^2 升转速率下, 不同时刻动叶 0.9 叶高处的压力曲线, 依据图 7 不同升转速率下, 在相同的速度下均会出现一定的压力波动, 依据波动范围选取不同时刻, 均以转速为 216 r/min 时刻为起始点, 以 12 r/min 的升速时间为间隔, 以转速为 300 r/min 时刻为终点。由图可以发现, 在监控点压力波动增加的同时, 沿叶片表面的压力曲线整体呈现下降趋势, 在 1.8 s 时刻叶片表面压力要比 2.5 s 时刻压力高 25 Pa 左右, 这一特征在 4 r/s^2 升转速率下同样出现。同时, 随着转速的增加, 叶片前缘的压力侧与吸力侧的压差也逐渐增大。而通过观察动叶不同时刻速度云图可以发现, 在这个波动的范围内, 动叶的尾缘出现了明显的流动分离现象, 且存在一定的脱落涡。在经过一定时间后, 流场逐渐稳定, 但仍存在较大范围的流动分离。

2.2 IGV 角度

为探究燃气轮机在启动过程中, 不同 IGV 安装角对压气机启动过程的影响, 进行不同 IGV 角度下压气机升转过程非定常计算, 其中, 设定进口可调导叶片以中轴线顺时针旋转为“+”、逆时针旋转为“-”, 且逆向旋转减小叶片开度。在变进口可调导叶角度数值计算中, 所有计算设定升转速率为 4 r/s^2 , 进口可调导叶角度以 2° 为间隔, 从 $-5^\circ \sim +5^\circ$ 分别进行启动工况数值计算。

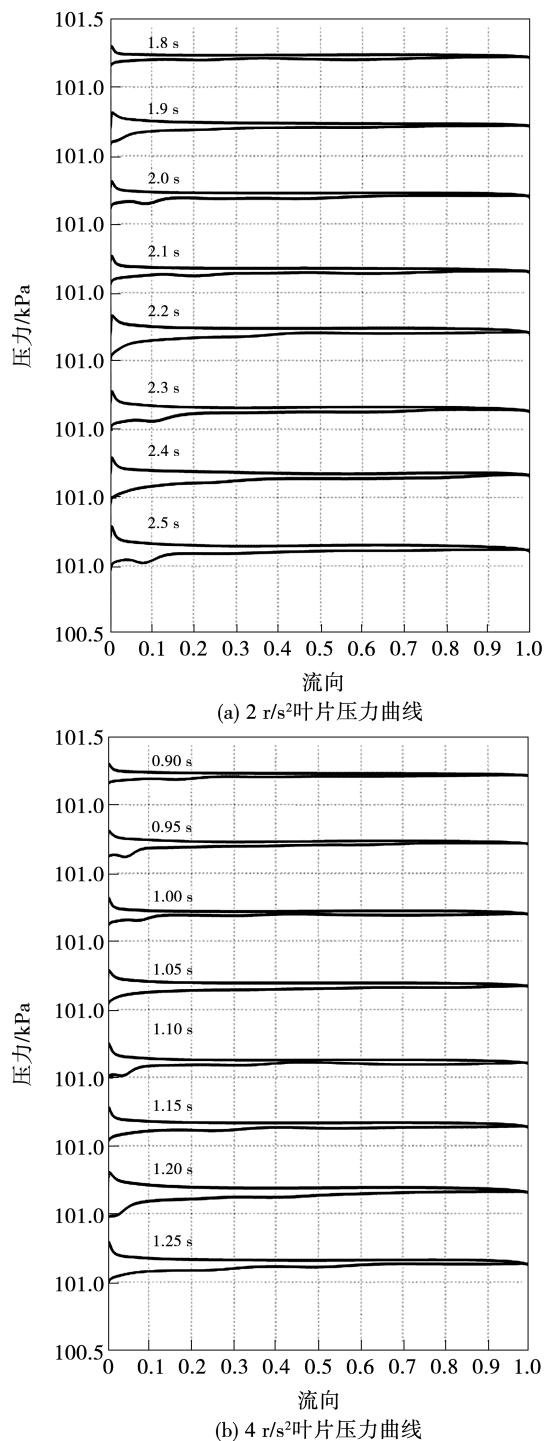
图 10 2 r/s^2 和 4 r/s^2 升速下不同时刻叶片压力曲线Fig. 10 Blade pressure curves at different times at acceleration rates of 2 and 4 r/s^2

图 11 为不同进口可调导叶角度下, 转子升转至 360 r/min 运行 1 s 后动叶 0.9 叶高处速度云图。如图所示, 所有进口可调导叶角度方案中流场内的低速区均扩散到相邻叶片。在进口可调导叶逆时针旋

转一定角度后,叶片尾缘的流动分离明显减弱。在逆时针旋转 5°的情况下,尾缘的低速区占据通道内 50% 以上的区域;旋转 3°后,该现象明显减弱;在旋转 5°的情况下,分离区域得到明显改善。对于 5°以后的区域,由于并未进行相应的计算,其可能出现先抑制流动分离而后加强的情况,这一部分内容有待后续计算验证。

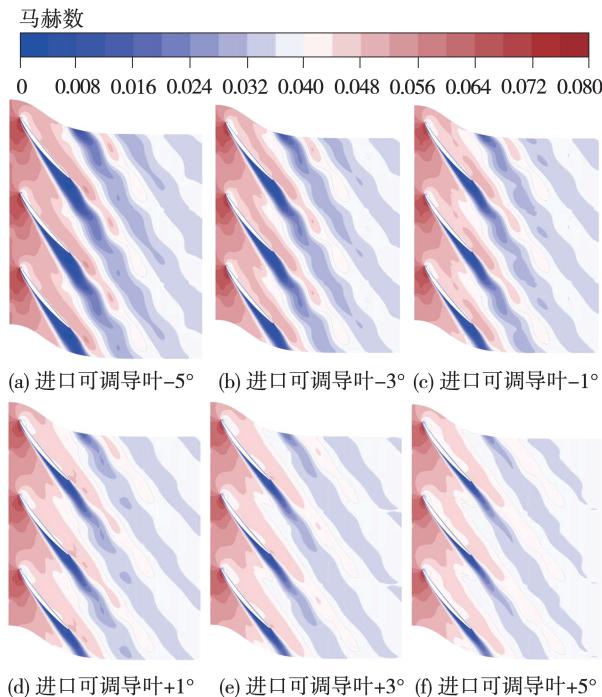


图 11 不同 IGV 角度下动叶速度分布云图

Fig. 11 Velocity contours of moving blade at different IGV angles

图 12(a)为不同进口可调导叶角度下出口压力随时间变化曲线。与变升速率的结果类似,在 260 r/min 转速下,压力波动达到最大值,且压力变化趋势基本一致,进口可调导叶角度变化对该现象的出现并没有影响。图 12(b)为不同进口可调导叶角度下叶片尾缘总压沿叶高分布。当进口可调导叶逆向旋转时,在低叶高位置的总压最小,即压力变化较小;但是除进口可调导叶角度不变以外,在较高叶高处,压力变化趋势基本一致,而进口可调导叶角度为 0° 时总压变化最为剧烈。通过图 11 可以发现,进口可调导叶角度为 -5° 情况下,叶片尾缘的低速区速度更低且低速流占据的空间更大;而进口可调

导叶角度为 +5° 时,流场低速区明显改善,且流动分离现象得到很大的抑制,但是两者之间的流动结构基本类似,并未发生太大的改变。

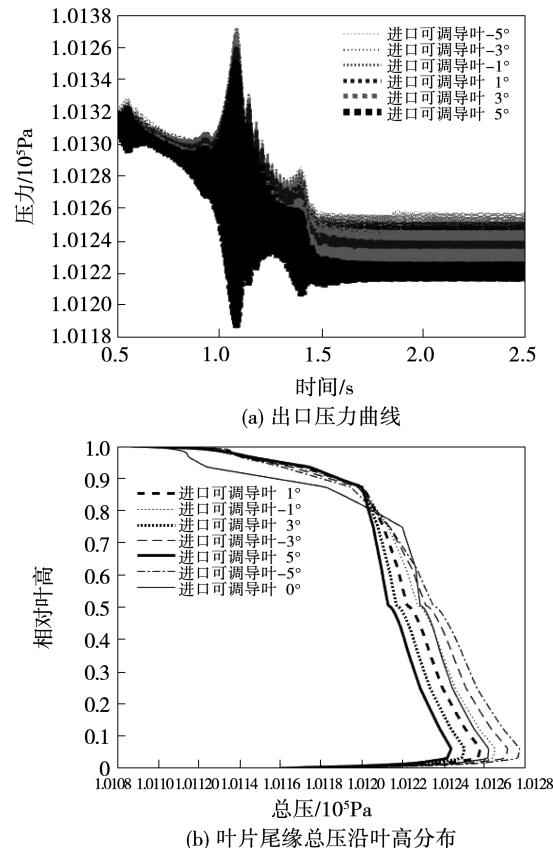


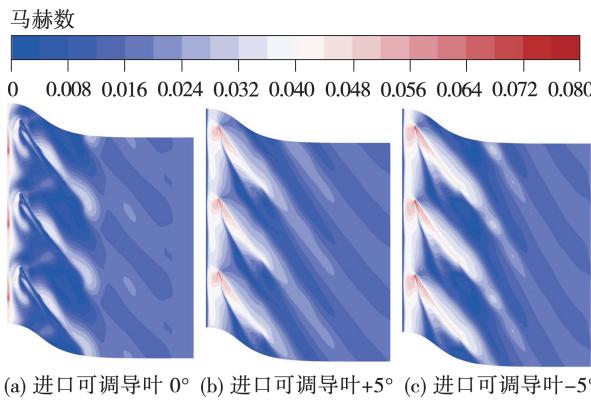
图 12 出口压力曲线与叶片尾缘总压沿叶高分布

Fig. 12 Outlet pressure curve and total pressure distribution at blade trailing edge along blade height

图 13 是动叶片顶间隙速度分布云图。

由于壁面的原因,在叶顶间隙区域基本处于低速区。进口导叶调整前后动叶前缘存在一个高速区。在导叶角度变化后沿动叶压力侧会出现一个高速区域。这是由于进口可调导叶角度的调整使得流向叶顶间隙区域的气流角发生变化,从而导致气流向轴向发展。

由进口可调导叶角度变化的计算结果可知,进口可调导叶逆向调整可以削弱动叶的流动分离现象,改善压气机的性能,一定程度上可以避免升速过程中失速乃至喘振的出现,其中进口可调导叶逆时针调整 5° 时效果最好。



(a) 进口可调导叶 0° (b) 进口可调导叶 +5° (c) 进口可调导叶 -5°

图 13 叶顶间隙速度分布云图

Fig. 13 Velocity contours of blade tip clearance

3 结 论

对某燃气轮机压气机部件的启动过程进行了数值模拟,并比较了不同升转速率及 IGV 角度的升转过程,通过对比速度云图、沿叶高总压比分布等相关参数,得出以下结论:

(1) 从变升转速率来看,变升转速率对压气机启动工况的影响并非线性,在计算结果中,4 r/s² 的结果最为恶劣,2 r/s²速度分布云图中流动分离区域较小,6 r/s²速度分布云图中流动分离区域有所改善,且动叶出口总压也是 4 r/s² 的情况最高。因此,在燃气轮机升速过程中,升转速率需要选取合理的范围,应避免使用流动不稳定的升转速率。

(2) 从变 IGV 角度来看,IGV 逆时针调整会使得压气机流场得到明显改善,其中在 IGV 逆时针调整 5°的情况下,提升最多,由低速区占据流道内 50% 以上区域改善到 30% 左右。其一定程度上可以抑制流动分离,改善压气机的性能,甚至避免升速过程中失速乃至喘振的出现。因此在燃气轮机启动之前选取合理的 IGV 角度可以避免失速工况的出现。

参考文献:

- [1] 许正武,刘云飞. M701 F4 燃气轮机启动过程旋转失速分析 [J]. 燃气轮机技术,2021,34(2):61–64.
XU Zheng-wu, LIU Yun-fei. Analysis on rotation stall of M701 F4 gas turbine during startup [J]. Gas Turbine Technology, 2021, 34(2):61–64.
- [2] 阎保康. PG9171E 型燃机喘振现象分析 [J]. 华东电力,1999, 27(2):21–23.
YAN Bao-kang. Analysis of flutterin PG9171E gas turbine [J]. East China Electric Power, 1999, 27(2):21–23.
- [3] CAMPOREALE S M, FORTUNATO B, MASTROVITO M. A modular code for real time dynamic simulation of gas turbines in simulink [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(3):506–517.
- [4] 郑绪生. 某型涡轴发动机起动建模技术研究 [D]. 南京:南京航空航天大学,2005.
ZHENG Xu-sheng. Research on starting modeling technology of a certain type of turboshaft engine [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [5] 张文杰. 基于 SIMULINK 单轴重型燃气轮机全工况仿真研究 [D]. 北京:清华大学,2011.
ZHANG Wen-jie. Research on full-condition simulation of single-shaft heavy-duty gas turbine based on SIMULINK [D]. Beijing: Tsinghua University, 2011.
- [6] 张文杰,刘尚明,蒲星星,等. 基于 Simulink 的单轴重型燃气轮机启动过程仿真研究 [J]. 燃气轮机技术,2012, 25 (1): 27–32.
ZHANG Wen-jie, LIU Shang-ming, PU Xing-xing, et al. Research on the startup simulation of single shaft heavy-duty gas turbine based on Simulink [J]. Gas Turbine Technology, 2012, 25 (1): 27–32.
- [7] KIM J H , SONG T W , KIM T S , et al. Dynamic simulation of full startup procedure of heavy-duty gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2002, 124(3):510–516.
- [8] KIM H K T S. Development of a program to simulate the dynamic behavior of heavy-duty gas turbines during the entire start-up operation including very early part [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(9):1–16.
- [9] KIM J H , KIM T S , MOON S J . Development of a program for transient behavior simulation of heavy-duty gas turbines [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30 (12): 5817–5828.
- [10] KIM J H , SONG T W , KIM T S . Model development and simulation of transient behavior of heavy duty gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001, 123(3):589–594.
- [11] 杨晓锋,朱 芳,赵连会,等. 80 MW 等级小 F 重型燃气轮机启动过程放风优化设计研究 [J]. 热能动力工程, 2022, 37(6):48–53.
YANG Xiao-feng, ZHU Fang, ZHAO Lian-hui, et al. Research on blow-off optimization design of 80 MW small F class heavy-duty gas turbine during start-up [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6):48–53.
- [12] 韩 磊,于婷婷,郑 群. 抽气射流控制燃气轮机启动过程建模及稳定性分析 [J]. 燃气轮机技术,2013,26(2):39–43.

- HAN Lei, YU Ting-ting, ZHENG Qun. The modeling of gas turbine start-up process by the control of deflation and jet flow [J]. *Gas Turbine Technology*, 2013, 26(2): 39–43.
- [13] TSUKAMOTO H, OHASHI H, et al. Transient characteristics of a centrifugal pump during starting period [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 1982, 104(1): 6–13.
- [14] 王乐勤, 吴大转, 郑水英, 等. 混流泵开机瞬态水力特性的试验与数值计算 [J]. 浙江大学学报: 工学版, 2004, 38(6): 751–755.
- WANG Le-qin, WU Da-zhuan, ZHENG Shui-ying, et al. Study on transient hydrodynamic performance of mixed-flow-pump during starting period [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2004, 38(6): 751–755.
- [15] 吴大转, 王乐勤, 胡征宇. 离心泵快速启动过程外部特性的试验研究 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(1): 68–70.
- WU Da-zhuan, WANG Le-qin, HU Zheng-yu. Experimental study on explicit performance of centrifugal pump during rapid starting period [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2006, 27(1): 68–70.
- [16] ZHANG G, LIU B, ZHANG P, et al. Flow analysis of 1.5 stage compressor with variable-camber inlet guide vanes [C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 2015.
- [17] 宫伟, 张宏武, 聂超群. 三级轴流压气机变工况条件下导叶/静叶和转速联动的调节规律 [J]. 航空动力学报, 2009, 24(5): 1122–1128.
- GONG Wei, ZHANG Hong-wu, NIE Chao-qun. Investigation on the aerodynamic between inlet guide vane, stator, and operating speed of three-stage axial compressor [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2009, 24(5): 1122–1128.
- [18] ASTRUA P, PUPPO E, CECCHI S, et al. A method for axial compressor start-up assessment [C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition, 2015.
- [19] 汤鑫宇, 胡振超, 陈金伟, 等. 基于精细化模型的燃气轮机启动过程建模及半物理仿真验证 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(10): 197–203.
- TANG Xin-yu, HU Zhen-chao, CHEN Jin-wei, et al. Modeling of gas turbine start-up process based on the detailed model and verifying through semisphysical simucation [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(10): 197–203.
- [20] 徐强, 孟惠, 计京津. 某 F 级重型燃气轮机启动过程仿真研究 [J]. *热力透平*, 2016, 45(4): 269–274.
- XU Qiang, MENG Hui, JI Jing-jin. Simulation of start-up for an F-class heavy-duty gas turbine [J]. *Thermal Turbine*, 2016, 45(4): 269–274.
- [21] 刘建生. 燃气轮机压气机旋转失速原因分析 [J]. *发电设备*, 2017, 31(3): 193–195.
- LIU Jian-sheng. Cause analysis on compressor rotating stall in a gas turbine [J]. *Power Equipment*, 2017, 31(3): 193–195.
- [22] 谢心喻, 鲁亚明, 王晓放, 等. 基于不同压气机特性曲线预测方法的单轴燃气轮机动态性能仿真研究 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(3): 26–34.
- XIE Xin-yu, LU Ye-ming, WANG Xiao-fang, et al. Simulation investigation on dynamic performance of single shaft gas turbine based on different compressor characteristic curve prediction methods [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(3): 26–34.
- [23] 管金, 何宗泽, 吕小静, 等. 30 kW 微型燃气轮机发电机组启动实验研究 [J]. *发电技术*, 2021, 42(4): 404–411.
- GUAN Jin, HE Zong-ze, LYU Xiao-jing, et al. Experimental study on startup of 30 kW micro gas turbine generator set [J]. *Power Generation Technology*, 2021, 42(4): 404–411.
- [24] 刘森林, 余琴, 严晓. H 级燃机基础谐响应与启动阶段瞬态分析研究 [J]. 武汉大学学报: 工学版, 2020, 53(S1): 130–136.
- LIU Sen-lin, YU Qin, YAN Xiao. Research on the harmonic response analysis and startup transient analysis of the H class gas turbines foundation [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2020, 53(S1): 130–136.
- [25] BUECKER D, SPAN R, WANGER W, et al. Thermodynamic property models for moist air and combustion gases [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2003, 125: 374–384.
- [26] 李志峰, 吴大转, 王乐勤. 圆柱和直桨叶突然启动瞬态流动的数值研究 [J]. 工程热物理学报, 2007, 28(6): 945–947.
- LI Zhi-feng, WU Da-zhuan, WANG Le-qin. Numerical simulation of transient flow past impulsively started circular cylinder and straight blade [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2007, 28(6): 945–947.

(姜雪梅 编辑)