

压气机平面叶栅试验台中尾板调节的数值研究

刘畅¹,杨荣菲¹,王晖²,向宏辉²,高杰²

(1. 南京航空航天大学,江苏 南京 210016; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院,四川 绵阳 621024)

摘 要:针对压气机平面叶栅试验台中尾板影响叶栅出口流场周期性的特征,以包含高亚音静子叶栅的全尺寸叶栅试验台为研究对象,数值研究了尾板长度和角度改变时叶栅出口流场的周期性变化情况。结果表明:相同叶栅进出口压比情况下,尾板越长,叶栅进口马赫数越高;在高亚音马赫数进口情况下,不同进气攻角下的压气机叶栅流场在不同尾板长度下都保持较好的周期性;在较低亚音马赫数进口情况下,选取较长尾板并进行角度调节有利于改进不同攻角下叶栅流场的周期性。

关键词:压气机;平面叶栅;数值模拟;尾板调节;叶栅流场周期性

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)03-0045-05

Numerical Study on Tailboard Adjustment in Compressor Linear Cascade Test Rig

LIU Chang¹, YANG Rongfei¹, WANG Hui², XIANG Honghui², GAO Jie²

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621024, China)

Abstract: Aimed at the characteristics that the tailboard in the compressor linear cascade test rig influences the periodicity of the cascade outlet flow field, and with the full-scale cascade test rig with high subsonic stator cascade as the research object, the numerical study on the periodicity variation of the cascade outlet flow field with the change of the tailboard length and angle is conducted. The results show that longer tailboard leads to higher inlet Mach number of the cascade under the same pressure ratio; for high subsonic inlet Mach number, the cascade flow field maintains good periodicity under different tailboard length and angle of attack, while for lower subsonic inlet Mach number, choosing a longer tailboard and adjusting its angle is beneficial for improving the periodicity of cascade flow field at different angles of attack.

Keywords: compressor; linear cascade; numerical simulation; tailboard adjustment; periodicity of cascade flow field

0 引言

平面叶栅试验对了解压气机叶片性能、叶栅流场特性等具有重要作用^[1]。而在叶栅试验中,保证叶栅试验数据可靠的一个重要条件是叶栅出口流场须满足周期性特征,其中在叶栅出口附近的两侧壁加装尾板是改善叶栅流动周期性的一个常用方法。

国内外研究人员对叶栅试验流动周期性进行了一些研究。BUFFUM D H 等^[2]在平面振荡叶栅实验中发现部分叶间相位角下由于受风洞壁反射压力波影响导致周期性较差。SONG B 等^[3]的实验研究结果表明进口马赫数 0.62 时,使用尾板可显著改善流动周期性。LEPICOVSKY J 等^[4]通过预测的叶栅中间通道流线对端壁形状进行调整,以将端壁干扰降至最低。RONA A 等^[5]通过数值方法对叶栅出口开孔尾板结构进行设计使其最小化端壁反射波。TIAN S M 等^[6]以流动周期性为目标变量对叶栅优化设计,发现敏感度最高的变量是尾板角度,认为尾板角度决定了出口气流角。时瑞超等^[7]通过数值研究发现调整下尾缘板角度能改善叶栅周期性,下尾缘板角度应与叶栅出口气流角一致。杨泳等^[8]认为采用叶片代替上下端壁

导流尾板、改变近端壁两端通道宽度可有效改善栅前周期性分布。罗金汉等^[9]认为改进导流板结构可减少周向受堵塞影响通道数而改善周期性。陈宇等^[10]对跨音平面叶栅尾板开孔率对叶栅周期性的影响进行了数值研究。徐文峰等^[11]的研究表明侧板抽吸能够减弱扇形叶栅流道堵塞程度并改善周期性。

上述关于叶栅尾板对流动周期性的研究主要针对有无尾板、尾板开孔结构以及尾板角度调节对周期性的影响,关于尾板长度的影响研究较少。本文以某叶栅试验台为研究对象,通过全三维数值仿真计算,开展尾板长度和角度变化对叶栅流场周期性的影响研究,研究结果将为平面叶栅实验中尾板的使用和调整提供参考。

1 研究对象及数值方法

1.1 研究对象

本文数值研究对象为中国航发四川燃气涡轮研究院超跨声速平面叶栅试验器,试验段主要由左壁面、右壁面、圆盘以及上驻室、下驻室等组成。图 1 为试验段及叶栅圆

盘几何模型二维示意图。圆盘直径 1 000 mm, 两侧壁面末端装有一定长度和安装角度的尾板, 其中上尾板、下尾板定义在图 1 中给出。叶片展向高度为 160 mm, 圆盘厚度为 10 mm。栅前 2 倍栅距处设置 15 个马赫数监测点, 取平均值得到进口马赫数, 叶栅出口位于叶片尾缘下游 6 mm 处, 计算该处总压恢复系数分布以分析流场周期性。叶栅试验件为某轴流压气机静叶根部截面, 其主要设计参数见表 1, 共有 8 个叶片, 叶片的编号见图 1。

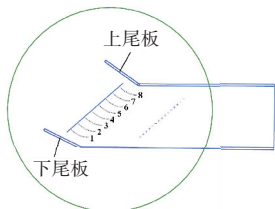


图 1 叶栅试验段及圆盘二维几何模型

表 1 叶栅主要设计几何参数

参数	数值
进口马赫数 M_1	0.87
进口气流角 $\beta_1/(\circ)$	41.5
出口气流角 $\beta_2/(\circ)$	78.9
攻角 $i/(\circ)$	-3.5
叶片弦长 b/mm	90.93
栅距 t/mm	45

1.2 网格划分

图 2 是三维计算域示意图。出口为较大的远场以避免影响叶栅流场, 远场区域直径为叶片高度的 27 倍; 计算域展向总高度为 6.4 倍叶高, 叶栅通道网格拓扑结构为 4HO, 叶栅网格展向节点数为 53, 叶片表面第一层网格高度为 0.001 mm, 单叶栅通道网格量约 90 万。端壁、尾板表面第一层网格高度为 0.004 mm, 壁面处 $Y^+ < 6$ 。全叶栅试验台网格总量约为 1 300 万。图 3 给出叶栅试验台端壁及叶片表面网格分布。

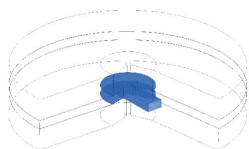


图 2 200 mm 尾板的计算域模型

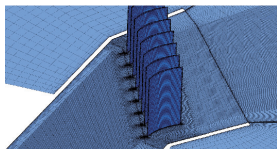


图 3 全叶栅试验台局部网格分布

1.3 数值计算方法及验证

数值计算采用 CFX 进行三维定常求解, 湍流模型选择 SST。按照实验条件给定边界条件, 垂直于进口边界面进气, 给定进气总温 295.5 K, 出口给定远场静压为 93 770 Pa, 叶片表面、端壁及尾板均为无滑移绝热壁面。计算过程中调整进口总压以改变进口马赫数, 调节安装叶栅的圆盘角度以改变叶栅进气攻角。

在进口 $Ma=0.87$ 、攻角为 -3.5° 的实验工况下进行数

值验证, 对比实验和数值计算得到的 4 号叶片吸力面及 5 号叶片压力面的等熵马赫数, 等熵马赫数按式 (1) 定义, 对比结果见图 4。数值计算结果与实验数据吻合较好, 认为所采用的网格及数值计算方法可靠。

$$Ma_{is} = \sqrt{\frac{2}{k-1} \left[\left(\frac{p_1^*}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]} \quad (1)$$

式中: p_1^* 为进口总压; p 为叶片表面静压。

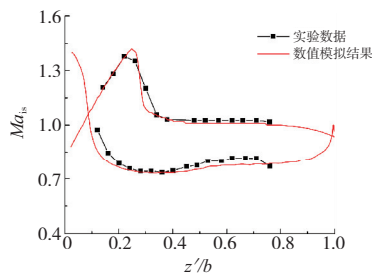


图 4 数值计算与实验结果对比

2 尾板长度对叶栅流场的影响

在尾板长度研究的数值计算方案中, 尾板的角度保持不变, 上、下尾板与进口来流方向夹角分别为 35° 和 26° , 改变尾板长度分别为 0 mm (无尾板)、50 mm、100 mm、200 mm 和 300 mm。

2.1 相同进气攻角

1) 相同进出口压比

在叶栅进气攻角 -3.5° 、进气总压 130 520 Pa 和出口远场静压 93 770 Pa 条件下, 计算的进口 Ma 随尾板长度变化曲线见图 5。在相同压比条件下随叶栅长度的增加, 叶栅进口 Ma 先线性增加, 尾板长度达 200 mm 以后缓慢增加, 说明尾板的存在有利于增加叶栅流通能力, 节省高压气体能量, 即如需使叶栅进口 Ma 达到指定水平, 带尾板的叶栅试验件较无尾板叶栅试验件进口总压可相应降低。尾板长度增加至 200 mm 时, 进一步增加尾板长度并不能显著改善叶栅流通能力。

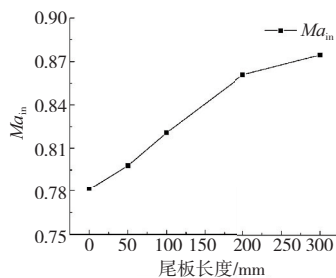


图 5 进口马赫数随尾板长度变化曲线

图 6 给出了不同尾板长度下叶栅出口处叶中截面的总压损失系数分布。总压损失系数 δ 由式 (2) 定义, 横坐标无量纲栅距 t 的原点位于 4、5 号叶片尾缘连线中点处, 图中数字“1, 2, ..., 8”代表图 1 中对应编号叶片的尾迹。可以看出尾板长度为 0 mm、50 mm 和 100 mm 时叶栅出口尾迹宽度不均匀, 流场周期性均较差, 尾板长度为 200 mm

和 300 mm 时,叶片 4 至叶片 7 的尾迹分布较为相似。因此,在相同进出口总压比情况下,尾板长度还会影响叶栅流场的周期性。

$$\delta = (P_1^* - P_2^*) / (0.5 \rho_1 V_1^2) \quad (2)$$

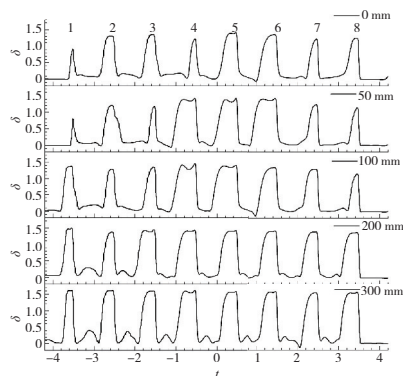
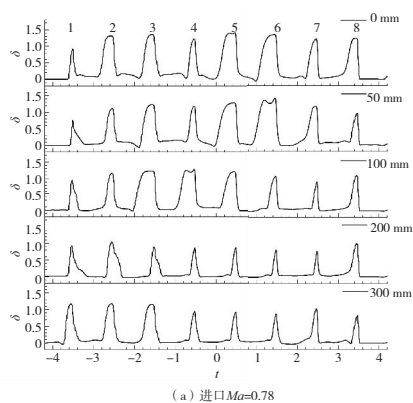


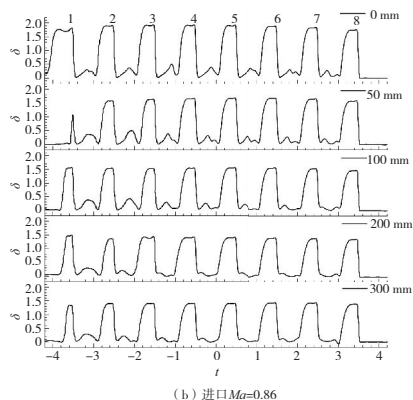
图 6 不同尾板长度下叶栅出口总压损失系数分布

2) 相同进口马赫数

为进一步探究尾板长度对叶栅流场周期性的影响,计算了进口马赫数分别为 0.78 和 0.86 下不同尾板长度的叶栅流场,对应叶栅出口总压恢复系数分布见图 7。进口马赫数 0.78 时,0 mm、50 mm 和 100 mm 长度尾板情况下叶栅出口总压恢复系数分布非周期,而 200 mm 和 300 mm 尾板的出口流场在多个叶片通道周期性良好;进口马赫数 0.86 时在所有尾板长度下流动周期性都很好,说明尾板长度对于高亚音叶栅流动周期性基本无影响,对相对较低的亚音叶栅流动周期性影响很大。



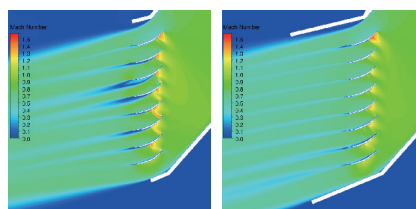
(a) 进口 $Ma=0.78$



(b) 进口 $Ma=0.86$

图 7 不同尾板长度下叶栅出口总压恢复系数分布

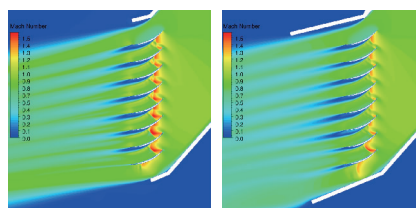
图 8、图 9 分别对比了使用 50 mm 尾板和 200 mm 尾板的叶中截面流场马赫数云图。在进口马赫数 0.78 时,相较 200 mm 尾板,50 mm 上尾板处存在更大的流动分离,上尾板与相邻叶栅之间形成更大的压力梯度,导致第 8 个叶片及相邻叶片进气攻角增加,进入叶片前缘的激波强度增加,引起更大的流动分离。从叶片 8 至叶片 1,叶片进气攻角逐渐减小。相较而言,下尾板长度对叶栅通道附近的流动影响不大。因此,在进口马赫数 0.78 时,上尾板形成的大尺度流动分离是影响叶栅周期性的主要因素。



(a) 50 mm 尾板

(b) 200 mm 尾板

图 8 尾板影响的叶栅流场马赫数云图 (进口 $Ma=0.78$)



(a) 50 mm 尾板

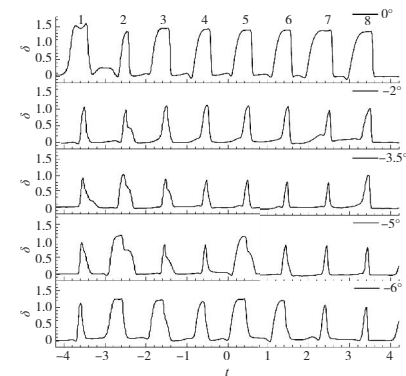
(b) 200 mm 尾板

图 9 尾板影响的叶栅流场马赫数云图 (进口 $Ma=0.86$)

叶栅进口马赫数 0.86 时,尾板长度对流场结构的影响机理一样,但沿流向流速更高使得上尾板大尺度流动分离引起 8 号叶片攻角的增加量不足以使相邻叶栅都变为正攻角状态,各个叶栅通道都处于负攻角,叶栅内流动相似且周期性较好。

2.2 不同进气攻角

为探究攻角改变时采用同样的尾板能否维持流场周期性良好,在采用 200 mm 尾板条件下计算了进口 $Ma=0.78$ 和 $Ma=0.86$ 时攻角分别为 0° 、 -2° 、 -3.5° 、 -5° 和 -6° 的叶栅流场,并与攻角 -3.5° 时叶栅出口总压损失系数分布结果对比如图 10 所示。在进口 $Ma=0.78$ 时, 0° 、 -2° 和 -3.5° 的情况下中间叶片处周期性较好,但增大负攻角的情况下叶栅出口流场周期性相对较差;进口 $Ma=0.86$ 时,不同进气攻角下叶栅出口都能保持良好的流动周期性。



(a) 进口 $Ma=0.78$

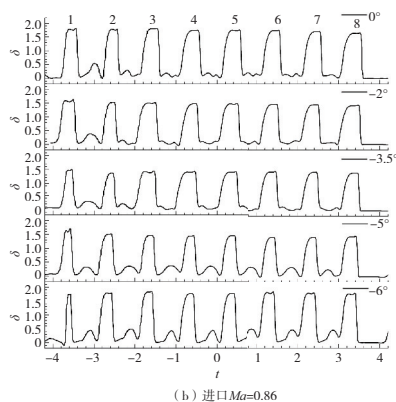


图10 不同攻角下叶栅出口总压损失系数分布

图11对比了不同进气攻角、不同进口马赫数下的叶中截面流场。进口 $Ma=0.78$ 时, -2° 攻角的流场周期性好于 -5° 攻角, 且攻角为 -2° 时上尾板处流动分离区相比攻角 -5° 的流场较小, 见图12; -5° 攻角下进口 $Ma=0.86$ 时8号叶片压力面的压力更大, 使上尾板流动分离程度较进口 $Ma=0.78$ 时更小, 流场周期性更好。3种工况下的下尾板流动分离程度相同, 但1号叶片攻角不同使叶栅通道内激波强度及位置不同。总体上, 上尾板流动分离更小时有利于叶栅流动周期性。

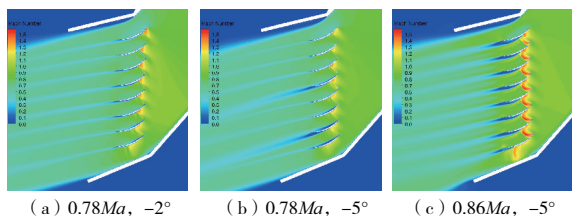


图11 不同攻角及进口马赫数下的马赫数云图

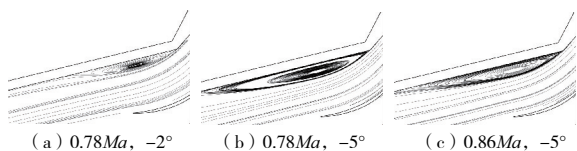


图12 上尾板区域流线图对比

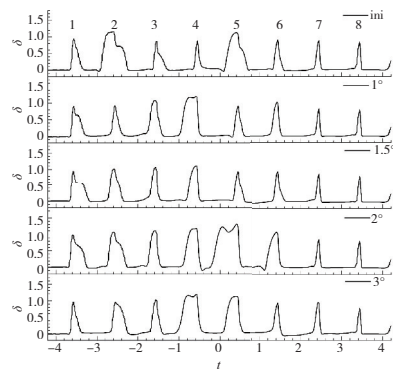
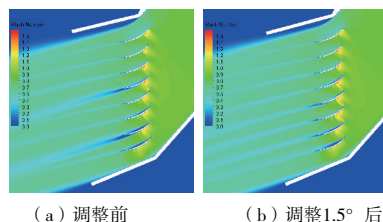
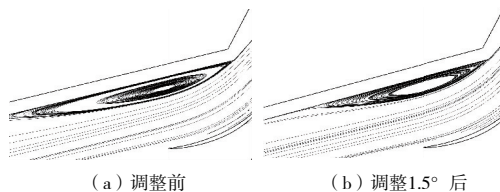
3 尾板角度对叶栅流场的影响

基于上文分析结果, 在进口 $Ma=0.78$ 时, 大的负攻角工况下叶栅流动周期性较差。本节针对进气攻角为 -5° 、尾板长度为200mm的条件进行尾板角度调节, 分别计算分析进口 Ma 为0.78和0.86时尾板角度对叶栅流场周期性的影响。

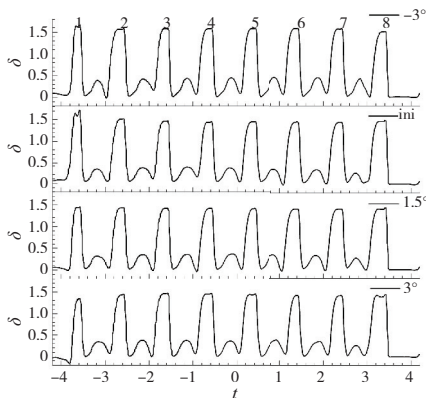
3.1 上尾板角度调整的影响

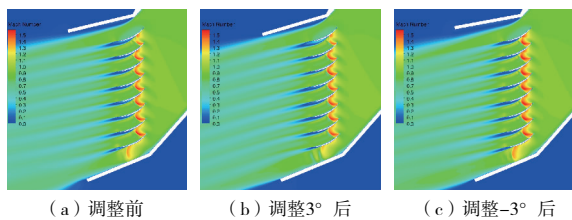
首先调整上尾板角度, 按上文分析使流动分离减小的上尾板调节能提升叶栅流场周期性, 故设计上尾板向靠近主流方向逆时针偏转 1° 、 1.5° 、 2° 和 3° , 进口 $Ma=0.78$ 时计算得到叶栅总压损失系数栅向分布结果见图13。可以看出上尾板偏转 1.5° 时叶片尾迹宽度相对其他偏转角度

更均匀, 流场周期性最好, 从图14的流场马赫数云图也可以看出; 其他偏转角度下流场周期性均较差。上尾板角度未调整及角度调整 1.5° 时上尾板附近流动分离情况见图15。尾板角度偏离 1.5° 时分离区明显减小, 而尾板角度调节过小时尾板上分离区的减小量不够, 尾板角度调节过大则会显著增大8号叶片进气攻角, 因此非 1.5° 偏转的上尾板调节没能改善叶栅出口流动周期性。

图13 不同上尾板角度总压损失系数分布 ($Ma=0.78$)图14 上尾板角度调整前后流场马赫数云图 ($Ma=0.78$)图15 上尾板区域流线图对比 ($Ma=0.78$)

将上尾板分别偏转 1.5° 、 3° 和 -3° , 观察进口 $Ma=0.86$ 下叶栅流动的周期性。进口 $Ma=0.86$ 的叶栅总压损失系数栅向分布(图16)和流场马赫数云图(图17)表明, 上尾板角度调整对该马赫数下叶栅流动周期性无明显影响。

图16 不同上尾板角度总压损失系数分布 ($Ma=0.86$)

图 17 上尾板角度调整前后流场马赫数云图($Ma=0.86$)

3.2 下尾板角度调整的影响

在上尾板角度偏转 1.5° 情况下,继续调整下尾板角度,偏转方向以远离主流的方向即逆时针方向为正。进口 $Ma=0.78$ 时下尾板调整幅度分别为 $\pm 3^\circ$ 、 $\pm 2^\circ$ 、 $\pm 1^\circ$ 和 1.5° ,图 18 对比了下尾板偏转不同角度时叶栅出口流场总压损失系数分布。当下尾板角度调节角度 2° 时流场周期性略有改善,其他尾板角度调节下流场周期性改善不明显甚至恶化。

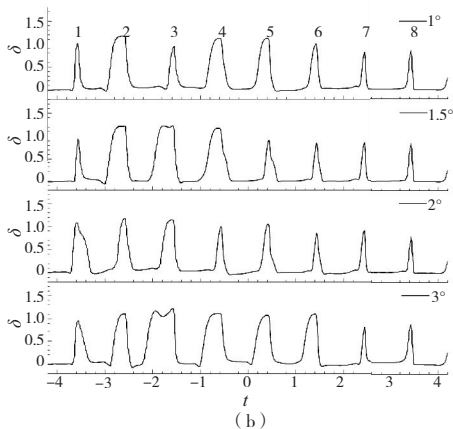
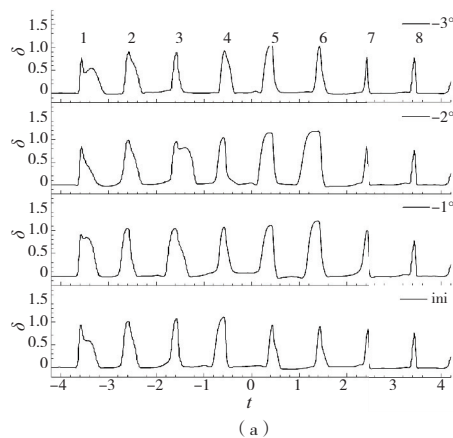
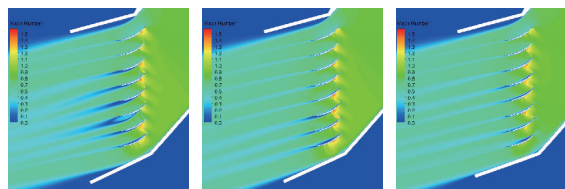
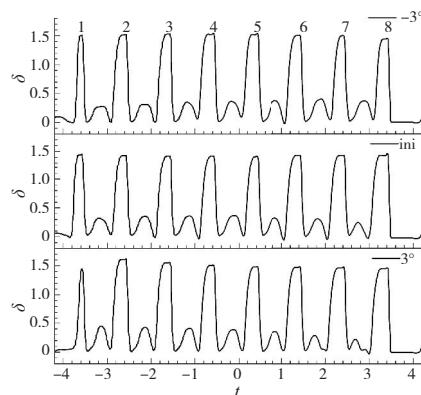
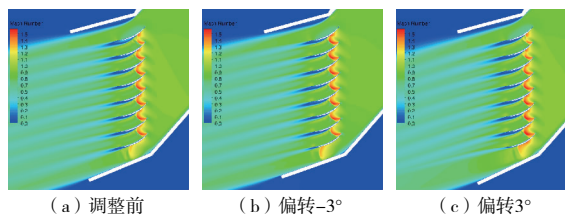
图 18 不同下尾板角度总压损失系数分布对比($Ma=0.78$)

图 19 给出了下尾板角度调节为 3° 、 2° 和 -3° 时的流场结构。可以看出,下尾板角度调节明显改变了 1 号叶片附近的流场结构,尾板角度增加 3° 时,1 号叶栅与下尾板之间的流动类似于短尾板设置下的流动,流线经过尾板后发生弯曲,1 号叶栅的进气攻角较大;尾板角度增幅较小或者尾板角度减小时,下尾板壁面流动基本无分离,1 号及相邻叶栅的进气攻角变化不大,叶栅流场结构相较于初

始流场变化不明显。

图 19 不同下尾板偏转角度流场马赫数云图($Ma=0.78$)

对进口 $Ma=0.86$ 在上尾板角度偏转 1.5° 的情况下,下尾板角度分别调整 -3° 和 3° ,叶栅出口流场总压损失系数分布见图 20。该马赫数下叶栅流动周期性在不同下尾板角度下同样保持良好。由图 21 流场马赫数云图可看出,下尾板角度调整改变了 1 号叶栅通道的局部流场结构,但总体上流动周期性没有受到明显影响。

图 20 不同下尾板角度总压损失系数分布对比($Ma=0.86$)图 21 不同下尾板偏转角度下流场马赫数云图($Ma=0.86$)

4 结语

本文对带尾板的压气机叶栅试验台进行了三维数值模拟,研究了尾板的长度和角度调节对叶栅流场周期性的影响,得出以下结论。

1) 压气机平面叶栅试验台中,尾板越长,达到相同进口马赫数所需的叶栅进气总压越低,且存在临界尾板长度,使得进一步增加尾板长度不能大幅降低叶栅进气总压需求。

2) 叶栅出口流场周期性与尾板长度及角度调节、进气 Ma 及进气攻角有关。在高进气马赫数 0.86 下,尾板长度对不同进气攻角下叶栅周期性影响较小,在低进气马赫数 0.78 下,长尾板有利于改善叶栅周期性。

(下转第 78 页)

由图 8 可知,3 种方法的求解效率均随着离散点数目的增多逐渐降低,其中信赖域法虽然对于初值设定不敏感,但是求解效率最低,而且随着计算规模的增大,求解耗时急剧增大。牛顿法等联合方法和 PBD 方法的求解效率高,但是牛顿法等联合方法的初值设定困难,容易产生不收敛的情形,本文所提出的 PBD 方法具有最好的求解效率,同时对计算规模的敏感度最小,针对较大计算规模的线缆仿真问题,求解时间也能保持在 100 ms 以内。因此该方法能够保证对线缆的形变进行真实模拟的同时,可以满足实际敷设过程中的实时性要求。

5 结语

本文在 Cosserat 弹性杆模型的基础之上,提出一种结合 PBD 算法的柔性线缆实时仿真方法。

1) 该方法首先在 Cosserat 理论下导出线缆的拉伸-剪切、弯曲-扭转变形的形变矢量,并将形变矢量进行四元数参数化,实现了模型中形变约束的一致性。

2) 对连续线缆模型进行离散化处理,采用 PBD 算法进行线缆空间位姿的计算,该方法避免了求解复杂的偏微分动力学方程组,通过约束投影的方式更新线缆离散节点和离散单元的空间状态,并通过实例验证了该物性模型能够模拟线缆扭转和弯曲变形。

3) 为了验证采用 PBD 方法的计算效率,给出在不同离散点数目下的线缆位姿求解时间,并与牛顿法等联合方法和信赖域法进行对比,结果表明:使用改进 PBD 算法可以取得较好的效率,在长度为 1 m、离散点数目小于 300 时,改进 PBD 算法将求解时间维持在 100 ms 以内,可以满足虚拟环境下线缆敷设仿真的实时性要求。

参考文献:

- [1] LV N J, LIU J H, XIA H X, et al. A review of techniques for modeling flexible cables [J]. Computer-Aided Design, 2020, 122:102826.
- [2] LV N J, LIU J H, DING X Y, et al. Physically based real-time interactive assembly simulation of cable harness [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43:385-399.
- [3] BENDER J, ERLEBEN K, TRINKLE J. Interactive simulation of rigid body dynamics in computer graphics [J]. Computer Graphics Forum, 2014, 33(1):246-270.
- [4] ZHANG Y, CHEN D S, QIAN H L. Computational method for the deformation mechanism of non-prestressed cable net structures based on the vector form intrinsic finite element method [J]. Engineering Structures, 2021, 231:111788.
- [5] JAWED M K, NOVELIA A, O'REILLY O M. A primer on the kinematics of discrete elastic rods [M]. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [6] 刘检华,赵涛,王春生,等. 虚拟环境下的活动线缆物理特性建模与运动仿真技术[J]. 机械工程学报, 2011, 47(9):117-124.
- [7] 王泽怡. 基于粘弹性杆模型的柔性电缆装配验证[D]. 大连:大连海事大学, 2020.
- [8] GRÉGOIRE M, SCHÖMER E. Interactive simulation of one-dimensional flexible parts [J]. Computer-Aided Design, 2007, 39(8):694-707.
- [9] 林海立,刘检华,唐承统,等. 基于 Cosserat 弹性杆理论的柔性线缆物理建模方法[J]. 图学学报, 2016, 37(1):34-42.
- [10] MÜLLER M, HEIDELBERGER B, HENNIX M, et al. Position based dynamics [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2007, 18(2):109-118.

收稿日期:2021-12-14

(上接第 49 页)

3) 进口 $Ma=0.78$ 时,尾板角度调节改变了其上的流动分离进而改变了相邻叶栅的进气攻角,实验中有必要根据流场特征同时调节上、下尾板角度以获得周期性流场。进口 $Ma=0.86$ 时尾板角度对周期性影响较小。

参考文献:

- [1] 高丽敏,蔡明. 压气机叶型的风洞试验研究[J]. 风机技术, 2018, 60(4):9-15.
- [2] BUFFUM D H, FLEETER S. Wind tunnel wall effects in a linear oscillating cascade [C]//Proceedings of ASME 1991 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Orlando, Florida, USA: 2015.
- [3] SONG B, GUI X M, LI S M, et al. Flow periodicity improvement in a high speed compressor cascade with a large turning-angle [C]//38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Indianapolis, Indiana. Reston, Virginia: AIAA, 2002:3539.
- [4] LEPICOVSKY J, CHIMA R V, MCFARLAND E R, et al. On flowfield periodicity in the NASA transonic flutter cascade [J]. Journal of Turbomachinery, 2001, 123(3):501-509.

- [5] RONA A, PACIORRI R, GERON M. Design and testing of a transonic linear cascade tunnel with optimized slotted walls [J]. Journal of Turbomachinery, 2006, 128(1):23-34.
- [6] TIAN S M, PETRIE-REPAR P, GLODIC N, et al. CFD-aided design of a transonic aeroelastic compressor rig [J]. Journal of Turbomachinery, 2019, 141(10):101003.
- [7] 时瑞超,王丁喜,黄秀全. 平面叶栅试验台周期特性数值模拟研究 [C]//中国航天第三专业信息网第四十届技术交流会暨第四届空天动力联合会议,昆明:2019:91-96.
- [8] 杨泳,徐开俊,李珊珊,等. 平面叶栅周期性特性数值研究 [J]. 液压与气动, 2018(9):92-97.
- [9] 罗金汉,孙鹏,傅文广,等. 导流板抽吸对扇形叶栅实验件流场的周期性影响 [J]. 热能动力工程, 2018, 33(2):61-68.
- [10] 陈宇,徐惊雷,黄帅,等. 平面叶栅尾流板开孔率对跨声速涡轮叶栅流道影响的数值分析 [J]. 航空动力学报, 2018, 33(1):209-214.
- [11] 徐文峰,孙鹏,黄龙盛,等. 扇形叶栅结构设计与应用研究 [J]. 工程热物理学报, 2021, 42(4):875-885.

收稿日期:2022-01-04