

基于流固耦合的反推力装置负载特性

谢容璋^{1,4}, 苏三买¹, 杨恒辉², 高昊浩³

- (1. 西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072;
2. 中国航空工业集团有限公司 西安航空计算技术研究所, 西安 710068;
3. 西安电子科技大学 机电工程学院, 西安 710071;
4. 中国人民解放军第 5719 工厂, 成都 611936)

摘 要: 反推力装置负载特性是其运动机构及驱动作动器强度设计的基础, 其中阻流门所受气动载荷及其应力分布计算是核心。以叶栅式反推力装置为对象, 采用重叠网格方法实现阻流门和滑动整流罩的旋转以及平移运动网格划分, 在 STAR-CCM+ 软件环境下确定了流固耦合交界面的数据映射与交换关系, 由此建立了反推力装置流固耦合数值分析模型。对反推力装置在飞机降落时正常打开和起飞滑跑紧急终止时应急打开两种动态过程进行仿真, 结果表明: 随阻流门旋转, 阻流门所受气动载荷与等效力快速增加, 并在旋转角度为 50° 附近达到最大, 且在应急终止起飞状态下打开反推力装置, 阻流门承受的最大气动载荷是正常打开过程的 3 倍以上。

关 键 词: 反推力装置; 阻流门; 流固耦合; 气动载荷; 应力分布
中图分类号: V228.7 **文献标志码:** A

Load characteristics of thrust reverser based on fluid-structure coupling method

XIE Rongzhang^{1,4}, SU Sanmai¹, YANG Henghui², GAO Wuhao³

- (1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. Xi'an Aeronautics Computing Technique Research Institute, Aviation Industry Corporation of China Limited, Xi'an 710068, China;
3. School of Mechano-Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;
4. The 5719 Factory, People's Liberation Army, Chengdu 611936, China)

Abstract: The load characteristics of the thrust reverser are the basis of the strength design of its kinematic mechanism and drive actuator, in which the calculation of the aerodynamic load and stress distribution on the blocker door is the core. Taking the cascade thrust reverser as the object, the overlapping grid method was used to achieve the movement of the boundary grid of the translating sleeve and blocker door components, at the same time, the data mapping and exchange relationship of the fluid-structure coupling interface was formed in the STAR-CCM+ software environment. Based on these, the fluid-structure coupling numerical analysis model of the thrust reverser was established. The two dynamic processes of the thrust reverser normal opening during landing and emergency opening during takeoff were simulated. Results showed that with the rotation of the blocker door, the aerodynamic load and equivalent stress on the blocker door increased rapidly, and reached the maximum near the rotation angle of 50°.

收稿日期: 2021-12-31

作者简介: 谢容璋(1996—)男, 硕士生, 主要从事航空发动机排气系统流场仿真研究。E-mail: rongzhang_xie@mail.nwpu.edu.cn

通信作者: 苏三买(1968—)男, 副教授, 博士, 主要从事航空发动机控制建模与仿真研究。E-mail: microeng@nwpu.edu.cn

引用格式: 谢容璋, 苏三买, 杨恒辉, 等. 基于流固耦合的反推力装置负载特性[J]. 航空动力学报, 2023, 38(10): 2460-2472. XIE Rongzhang, SU Sanmai, YANG Henghui, et al. Load characteristics of thrust reverser based on fluid-structure coupling method[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(10): 2460-2472.

Moreover, the maximum aerodynamic load on the blocker door was more than 3 times of the normal opening process when the thrust reverser was opened under emergency termination takeoff state.

Keywords: thrust reverser; blocker door; fluid-structure coupling; aerodynamic load; stress distribution

随着大型飞机的运载能力不断增加,大涵道比甚至是超大涵道比涡扇发动机得到了广泛运用。运载飞机大型化的发展对飞机着陆提出了更高要求,特别是降低对着陆机场滑跑距离的要求以及应对起飞和降落时突发紧急情况时,需要飞机具有高效可靠的减速系统^[1]。目前,大型客机或运输机广泛采用叶栅式反推力装置^[2-3]为减速装置。

叶栅式反推力装置主要由滑动整流罩、叶栅、液压作动器、阻流门及阻流门拉杆等运动机构组成。系统工作时,在反推力控制信号的作用下,作动器做直线运动,带动滑动整流罩移动,进而带动阻流门运动机构,从而实现反推力装置的打开与关闭。反推力装置打开过程,滑动整流罩向后移动,露出叶栅通道,同时阻流门旋转堵住外涵道使气流转向并经过叶栅向前排出,以产生反向推力^[4-6]。

反推力装置中的阻流门受气流的冲击,是整个装置运动机构中受力变化的源头,其受气动力及机械力,并通过连接装置向各个运动机构传导。在反推力装置打开过程中,阻流门旋转使外涵道气流转向,变化的气流冲击使得阻流门上载荷和应力分布持续变化,其中气流与阻流门的相互作用是典型的流固耦合过程。

开展反推力装置负载特性分析计算,是反推力装置运动组件及作动系统设计的依据。现有相关研究文献中,具有代表性的有陈著^[7]采用 CFD 方法计算分析了反推力装置打开时外涵道流场、风扇背压与阻流门受力特性;张少军等^[8]采用简化的阻流门气动载荷算法,将阻流门典型状态下的分布载荷转化为了等效节点集中应力并进行插值计算得到了阻流门的受载和传力特性;陈永琴等^[9]对反推力装置进行了运动学和动力学仿真,得到了各部件的位移、速度及受力特性曲线,但在反推力装置的受力特性研究忽略了工作过程中阻流门受气动载荷的变化;高昊浩等^[10]以阻流门所受气动载荷最大值为输入,以运动机构负载为优化目标函数,对运动机构进行了结构优化设计。上述关于反推力装置负载特性研究的不足,一是流场按 CFD 计算不能真实反映反推力装置打开

时气流对折流门气动作用力的动态流固耦合变化过程;二是将气流作用在折流门上的分布力按照均匀分布等效折合为集中力处理不能更真实反映反推力装置的负载。

综上,本文以叶栅式反推力装置为对象,采用流固耦合数值分析以及重叠网格动态方法,对反推力装置工作过程中流场与阻流门的负载特性进行研究。

1 叶栅式反推力装置结构及三维模型

叶栅式反推力装置由左右两个半部共同构成,其中一个半部实物如图 1,其结构简图如图 2 所示,其运动机构包括:滑动整流罩、叶栅、液压作动器、阻流门及阻流门拉杆。叶栅以组件方式沿发动机机匣的圆周呈扇形排列。反推力装置的每个半部均匀分布有 5 个阻流门,沿周向安装在机匣内侧,通过铰链与滑动整流罩相连接,通过阻流门拉杆与发动机外涵道内壁面连接。阻流门为弧形平板结构,在反推力装置关闭时可贴合外涵道外壁面曲面,并且上下沿同为弧形,在反推力装置打开时可以贴合外涵道内外壁面,减小气流泄漏^[11]。

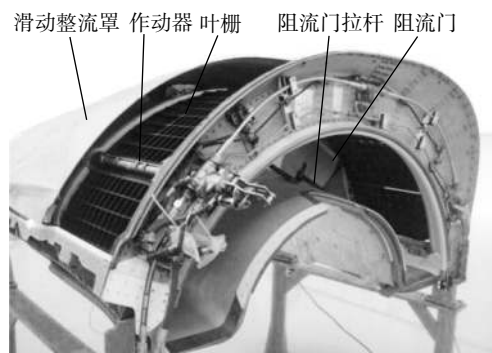


图 1 叶栅式反推力装置实物图

Fig. 1 Physical diagram of the cascade thrust reverser

当发动机工作在正推力状态时,反推力装置关闭(收回),滑动整流罩与阻流门将叶栅完全遮盖,发动机外涵气流向后排出;当发动机工作在反推力状态时,液压作动器将滑动整流罩向后推出,叶栅露出,同时阻流门在拉杆的作用下转动,

将外涵道流道逐渐关小,直至关闭,外涵道气流通过叶栅排出,产生反向推力。

建立研究对象的三维模型是进行流固耦合分析的基础。参考文献[12]反推力装置及其参数,建立的叶栅式反推力装置三维几何模型如图3所示。

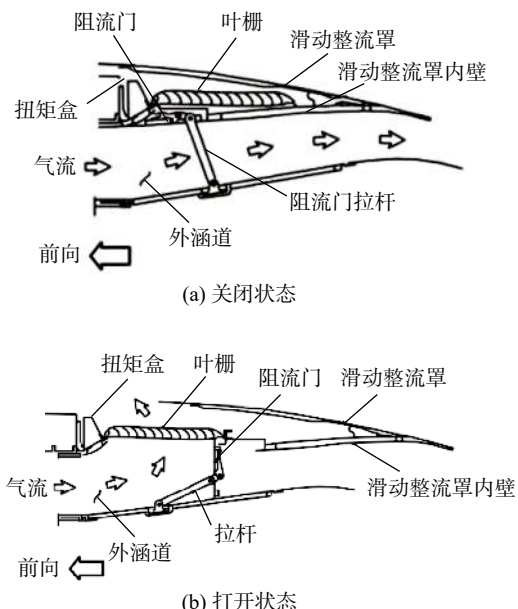


图2 叶栅式反推力装置工作原理示意图
Fig. 2 Working principle schematic diagram of cascade thrust reverser

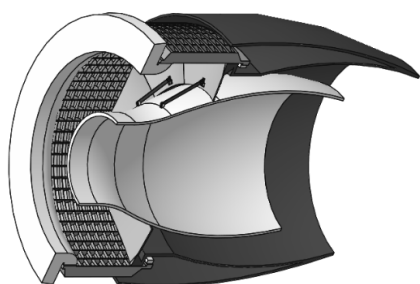


图3 叶栅式反推力装置三维几何模型
Fig. 3 Three-dimensional geometric model of cascade thrust reverser

2 流固耦合分析模型

2.1 流固耦合求解方法

进行流固耦合计算,需先确定流体与固体界面、耦合数据映射与传递关系以及计算边界条件,在此基础上,对流体域和固体域的控制方程进行耦合求解。为便于说明上述条件确定及方程求解方法,首先对流体控制方程与固体控制方程进行分析。

1) 流体控制方程

流体控制方程^[13]包括雷诺时均形式的质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,其中质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho V_j) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial (\rho V_i V_j)}{\partial x_i} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\mu \frac{\partial V_i}{\partial x_j} - \rho \overline{V_i' V_j'} \right) \quad (2)$$

能量守恒方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho T)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho V_j T)}{\partial x_j} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial T}{\partial x_j} - \rho \overline{V_j' \theta} \right) + \frac{1}{c_p} (\Phi + \dot{q} - \nabla g q_r) \end{aligned} \quad (3)$$

式(1)~式(3)中,下角标*i*与*j*分别表示定义的坐标系中垂直的两个分量, ρ 为流体介质时均密度, c_p 为流体的比定压热容, V_i 与 V_j 分别为 x_i 与 x_j 方向上的时均速度, V_i' 与 V_j' 分别为 x_i 与 x_j 方向上的脉动速度, p 为时均压力, $-\rho \overline{V_i' V_j'}$ 为雷诺应力张量在各方向上的分量, T 为时均温度, Γ 为有效导热系数, $-\rho \overline{V_j' \theta}$ 表示紊流热流。能量方程考虑导热、对流和辐射换热方式作用下的能量平衡, Φ 、 $\dot{q}$ 和 $\nabla g q_r$,分别对应黏性耗散、燃烧和辐射换热产生的热流源项,其中下角标*r*表示辐射(radiation)。

2) 固体控制方程

固体控制方程^[13]为

$$\rho_s \ddot{\mathbf{d}}_s = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma}_s + \mathbf{f}_s \quad (4)$$

式中下标*s*表示固体(solid), ρ_s 为固体密度, $\boldsymbol{\sigma}_s$ 为柯西张量, $\mathbf{f}_s$ 为体积力矢量, $\ddot{\mathbf{d}}_s$ 为固体的加速度矢量。

在流固耦合界面处,满足流体与固体的应力、位移、热流率、温度等变量相等或守恒,用下标*s*表示固体(solid)、*f*表示流体(fluid),则具体关系为

$$\begin{cases} \tau_f \mathbf{n}_f = \tau_s \mathbf{n}_s \\ \mathbf{d}_f = \mathbf{d}_s \\ \mathbf{q}_f = \mathbf{q}_s \\ \mathbf{T}_f = \mathbf{T}_s \end{cases} \quad (5)$$

对式(1)~式(5)的流体域与固体域耦合控制方程,在给定条件下可求解实现流体的压力、流速、温度等参数计算。本文选择采用 STAR-CCM+流体仿真软件进行求解,其中流体域与固体域之间的耦合数据映射与传递关系,可在导入

如图 3 的三维模型、指定流体与固体接触界面后自动确定。

针对本文所研究的叶栅式反推力装置,在阻流门及连接部件的流固耦合分析中,耦合交界面上交换的物理量为阻流门与气流接触表面上的压力,方程求解具体仿真时,分别对流体与固体设定领先与滞后模拟,在流体域领先模拟运行指定的迭代次数后暂停,发生映射操作,然后共享区域中的数据传输到等待的阻流门固体域滞后模拟,滞后模拟使用该数据作为其求解的一部分并运行。固体区域计算达到要求后,流体域的计算继续进行。数据的映射与传输在耦合计算中持续进行,直到两个求解都满足其停止条件。

2.2 基于重叠网格方法的计算域与网格划分

重叠网格方法是指将计算域划分为不同的区域,即背景区域(background region)和重叠区域(overset region),这些区域按照模拟所要研究的内容进行组合,不同区域之间采用单独区域网格划分,再通过灵活的耦合方式,将网格进行划分、重组^[14]。采用重叠网格方法的优点是可实现背景区域和重叠区域的网格之间存在重叠、交错的情况下,将多余的无效网格删除,最终形成一套可以用于数值仿真的完整网格。相比传统的网格划分方法,重叠网格方法大大降低了网格设计、生成的难度,特别适用于存在运动和复杂外形扰流的流动问题^[15]。

采用重叠网格进行网格划分时,根据网格的不同活动行为可将网格单元区分为活动单元、插值单元和非活动单元。流体控制方程只在活动网格中进行求解和数据交换,而在非活动网格中,不做求解运算,并且在计算域运动时,非活动网格可能转化为活动网格。插值网格将活动网格和非活动网格分隔开,同时用于将一个区域内活动网格中的变量插值传递至另一个区域的活动网格中,实现不同区域间的数据交换。

针对叶栅式反推力装置,考虑到阻流门拉杆为薄体结构,对流场影响较小且受气动载荷很小,在流体计算域划分中将其忽略。为实现对滑动整流罩和阻流门边界的运动,在划分流体计算域时,根据反推力装置的结构与运动特点,结合重叠网格方法的要求,将包含叶栅、外涵道等静止结构的区域设置为背景区域,将包裹反推力装置的滑动整流罩和阻流门的区域设置为重叠区域。因反

推力装置在其周向上对称,且反推力装置每个半部包含 5 个阻流门,每个阻流门相对独立,沿周向均布,因此在选取流体计算域时,本文选择仅包含一个阻流门及对应的外涵道、叶栅以及滑动整流罩的区域。划分的计算区域如图 4 所示。

重叠网格采用非结构多面体网格,并在重叠的区域和叶栅区域进行了网格加密,划分结果如图 5 所示,图中分别用-2.0~1.0 之间的值对不同属性的网格进行标记,其中红色表示非活动网格,草绿色表示活动网格,蓝色表示插值网格。可见

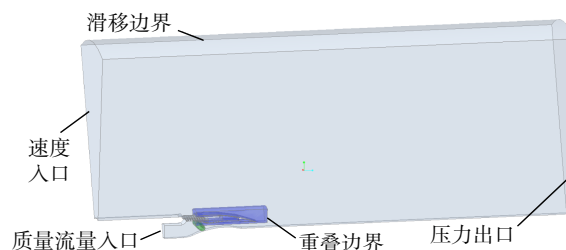


图 4 计算域示意图

Fig. 4 Schematic diagram of computing domain

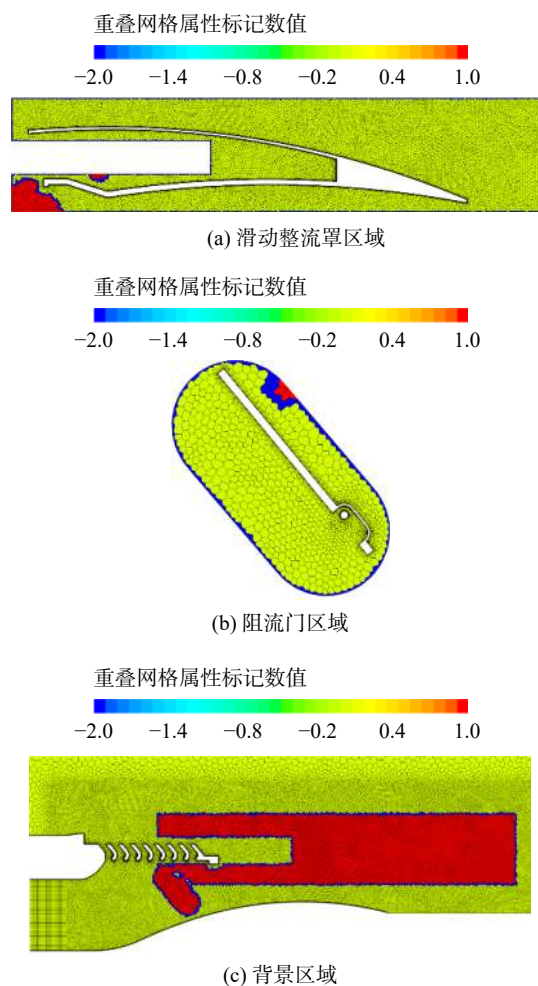


图 5 重叠网格划分结果

Fig. 5 Overset meshing results

红色与草绿色网格未直接接触,即重叠网格有效。阻流门的固体区域网格采用非结构四面体网格,划分结果如图 6 所示。

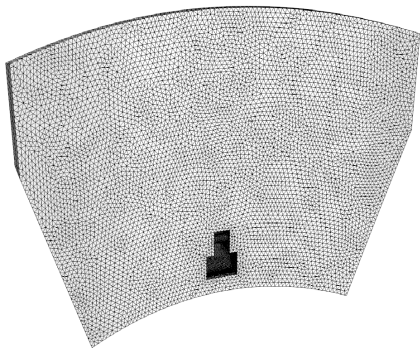


图 6 阻流门网格划分结果

Fig. 6 Meshing results of blocker door

2.3 反推力装置运动规律

反推力装置部件的运动规律,特别是滑动整流罩移动与阻流门旋转规律,将直接影响流场的变化情况。通常,反推力装置从关闭状态至完全打开的时间不大于 2 s^[16]。采用文献 [17] 反推力装置运动特性分析方法,得到滑动整流罩和阻流门典型的运动规律如图 7 所示,其中纵坐标分别为滑动整流罩速度 v 和阻流门旋转角度 α 。

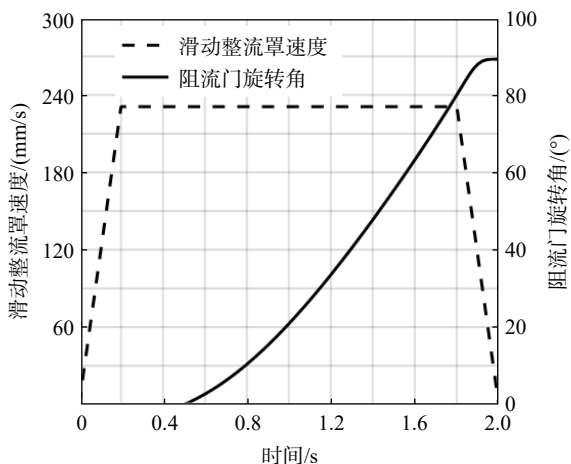


图 7 滑动整流罩及阻流门运动规律

Fig. 7 Motion law of translating sleeve and blocker door

在 STAR CCM+环境下进行流固耦合分析时,可通过 Field Function 功能定义滑动整流罩位移与阻流门旋转角运动规律,作为运动规范施加至对应的区域。其中滑动整流罩为平移运动,阻流门为旋转运动与平移运动的叠加。

2.4 边界条件及求解设置

流固耦合计算的边界条件包括入口速度、质

量流量以及出入口压力。根据反推力装置工作及流场特点,边界条件为:外界自由流入口选择速度;外界自由流出口选择压力,主要计算区域较远的远场边界选择为滑移边界,外涵道入口采用质量流量^[18]。求解时,流体湍流模型选择 Realizable $k-\varepsilon$ 模型,时间步长取最小网格尺寸与运动速度之比的 1/2。

3 计算结果及分析

为研究反推力装置流场及阻流门负载特性,采用上述所建立的流固耦合分析模型,首先对反推力装置的打开状态典型工况进行稳态分析,以验证流固耦合方法的可行性。

3.1 反推力装置打开状态稳态分析

选择某型反推力装置完全打开、反推打开时发动机低压转速为 60% 的状态进行流固耦合稳态分析。反推力装置流场的流线及压力云图如图 8 所示,阻流门表面气流矢量及压力分布如图 9 所示。

由图 8 与图 9 可以看出,外涵道气流受到阻流门阻挡,速度降低,压力升高;气流经过叶栅时

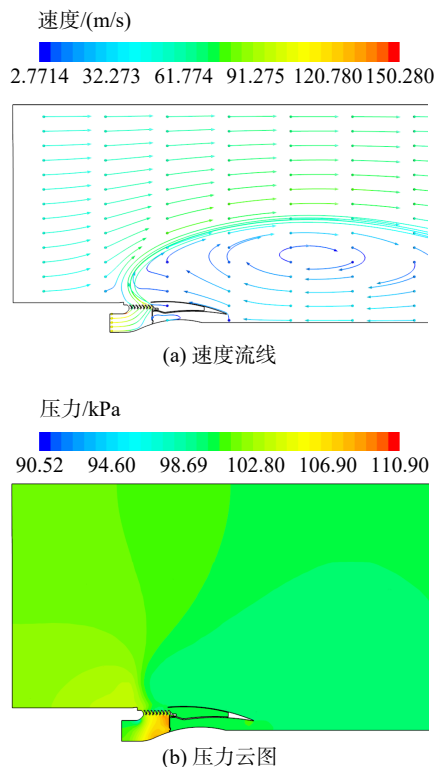


图 8 打开状态下流场流线与压力云图

Fig. 8 Flow field streamline and pressure cloud chart on opening state

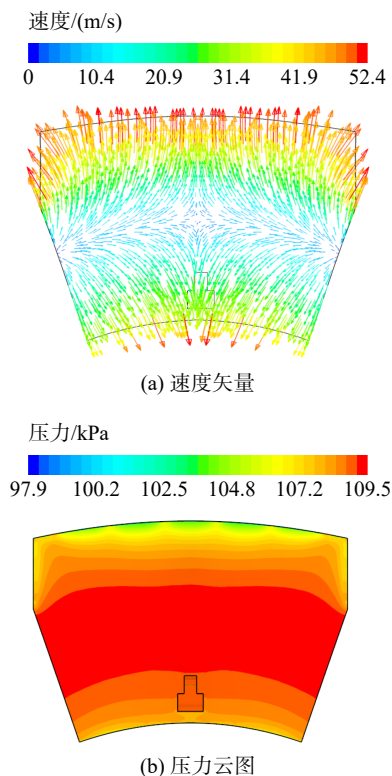


图 9 阻流门正面速度矢量及压力云图

Fig. 9 Front velocity vector and pressure cloud chart of blocker door

速度增加, 排出叶栅后与外界自由流掺混, 速度快速降低。气流冲击阻流门中部区域, 造成此区域内压力较大, 随后大部分气流转折向上流动, 速度逐渐增加, 压力降低。

通过流固耦合分析求解计算, 得到阻流门的等效应力分布如图 10 所示。最大等效应力出现在阻流门正面下端开口与拉杆铰链连接处, 并在阻流门与滑动整流罩铰链连接处等效应力也较大, 这与实际工程中阻流门经常发生断裂的区域相符。

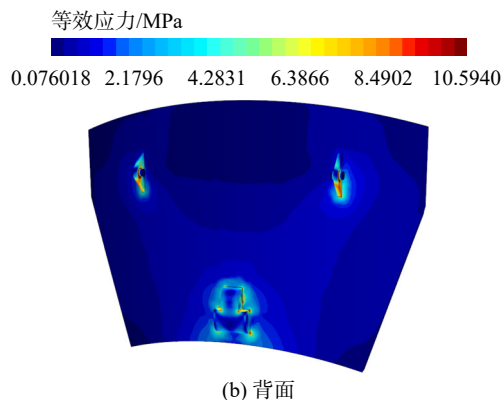
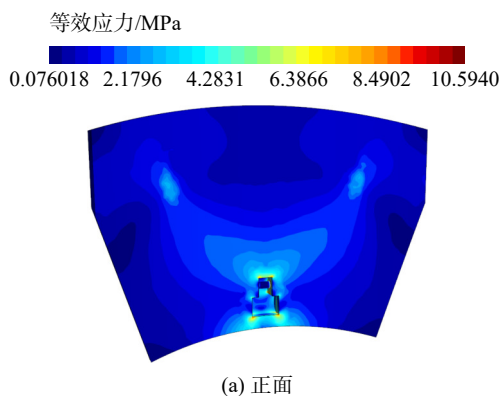


图 10 阻流门等效应力分布

Fig. 10 Equivalent stress distribution of blocker door

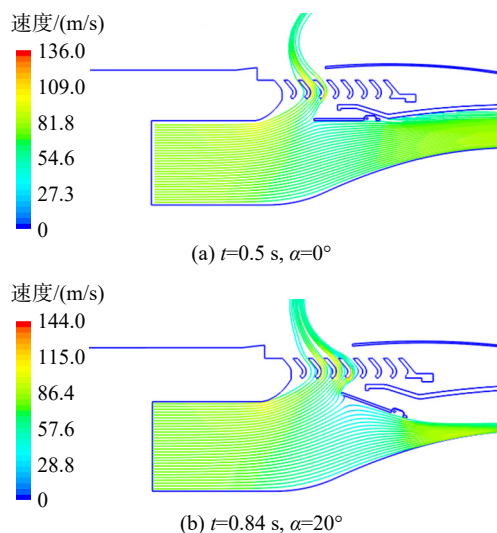
3.2 反推力装置打开过程动态分析

上述以反推力装置完全打开的稳态为例, 分析了流固耦合在反推力装置流场特性及阻流门受载中的应用方法, 得到了反推装置在工作稳定后的流场特性以及阻流门压力、应力分布规律。然而, 反推力装置工作是动态过程, 在反推力装置打开的动态过程中, 滑动整流罩及阻流门的运动将显著影响流场及阻流门受载特性。

针对反推力装置打开的动态过程, 本文采用重叠网格方法, 对滑动整流罩及阻流门的平移与旋转运动过程进行网格划分, 在此基础上进行流固耦合计算分析。

3.2.1 反推正常打开过程流场特性及阻流门受载

以与文献 [7] 中相同风扇直径的大涵道比涡扇发动机为例仿真。在反推力装置正常打开过程, 发动机工作在慢车状态。随着阻流门的旋转, 外涵道的空气流速与压力分布持续变化, 计算得到流场在不同时刻的速度流线如图 11 所示, 压力云图如图 12 所示。



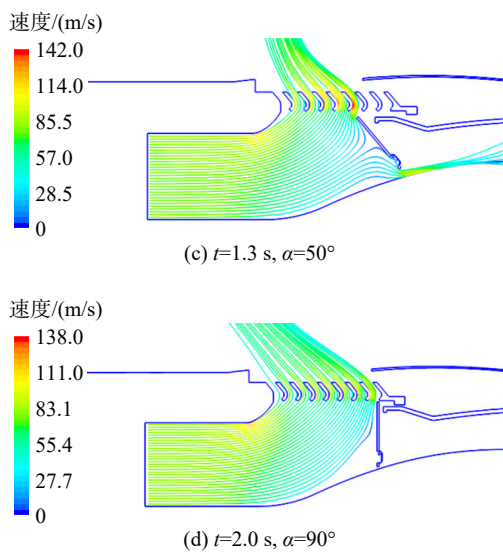


图 11 反推力装置正常打开状态时流场流线图
Fig. 11 Flow field streamline diagram of thrust reverser on normal opening state

图 11~图 12 中,在 $t=0.5$ s 时,滑动整流罩以直线运动开始向后移动,叶栅的两个通道逐渐开启,少部分外涵道气流通过叶栅通道流出,此时阻流门即将开始旋转。在叶栅前,外涵道外壁向

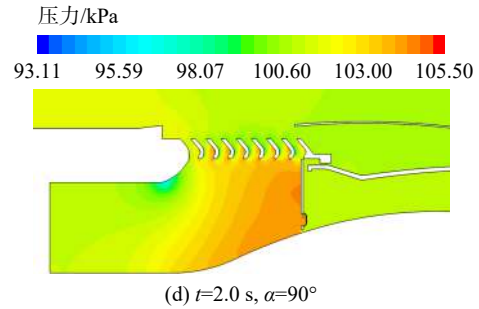
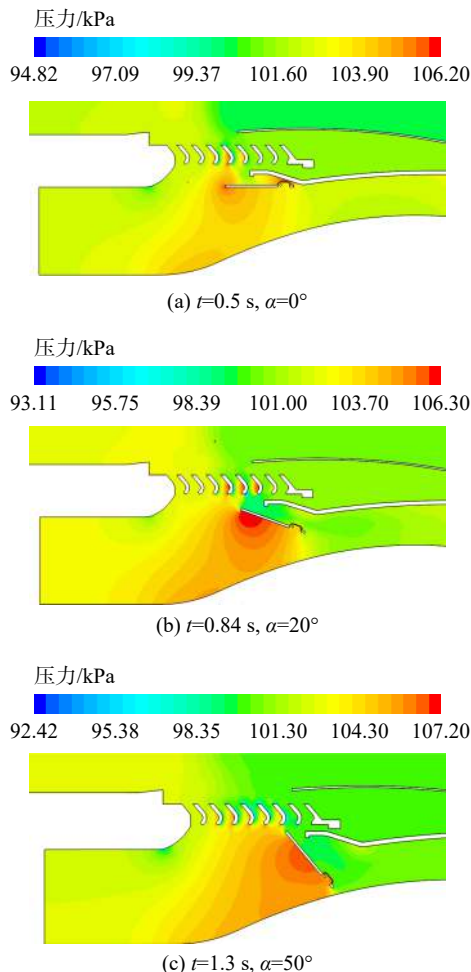


图 12 反推力装置正常打开时流场压力云图
Fig. 12 Flow field pressure cloud chart of thrust reverser on normal opening state

外弯折,贴壁气流流速增加,使得外涵道流速分布不均匀,速度从外涵道内壁至外壁弯折处逐渐增大。在 0.84 s 时,阻流门旋转角度约为 20° ,叶栅前 3 个通道开启,且因阻流门部分关闭,外涵道大约 1/3 面积被阻挡,此时只有小部分气流经叶栅导向斜向前流出,而大部分气流依旧通过外涵道流出。阻流门中上部区域受气流冲击压力升高,气流一分为二,一股往叶栅通道弯折,另一股流向外涵道后方。在阻流门与外涵道内壁面之间形成收敛流道,气流在收敛流道内速度升高,压力降低。到 1.3 s 时,阻流门旋转角度约为 50° ,叶栅前 5 个通道开启,大部分气流经叶栅并加速后斜向前排出,此时阻流门将 2/3 左右的外涵道流道面堵塞,阻流门中部区域受气流冲击使压力升高,少部分气流转向从阻流门与外涵道内壁之间形成的收敛流道加速流出。到 2 s 时,阻流门旋转 90° ,滑动整流罩完全推出,叶栅完全露出,阻流门将外涵道内壁完全堵塞,除少许气流通过阻流门下沿与外涵道内壁面之间的缝隙流出,其余均经过叶栅排出产生反向推力。

在反推力装置的打开过程中,旋转中的阻流门持续受到外涵道气流冲击,在阻流门的迎风面、背风面形成较大的压力差,因此在阻流门上产生气动载荷。图 13 为反推力装置正常打开过程中阻流门正面气流压力分布。

由图 13 可以看出,在反推力装置打开过程中,阻流门表面压力分布变化明显。在阻流门旋转初期,高压区域集中于阻流门上段部分;随着旋转角度增大,高压区域逐渐变大并下移。在旋转角度约为 50° 时,高压区域处于阻流门中部,且面积较大,此后,随着旋转角度继续增大,高压区域依旧处于阻流门中部,但面积逐渐缩小。此外,由于阻流门左右两端尚未闭合而存在缝隙,所以左

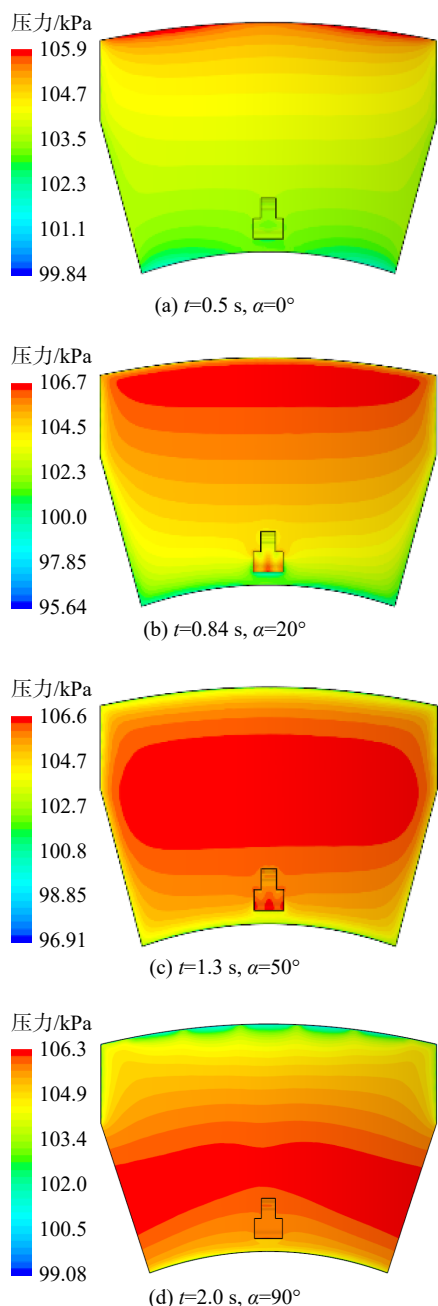


图 13 反推力装置正常打开时阻流门正面压力分布
Fig. 13 Blocker door front pressure distribution of thrust reverser on normal opening state

右接近边缘区域附近的空气流速较大而压力较低。

将计算所得结果与文献 [7] 结果对比, 在反推力装置正常打开过程中, 阻流门所受气动载荷随旋转角度变化的结果对比如图 14 所示。

当阻流门开始旋转后, 气动载荷快速增加, 并在 50° 左右达到最大, 随后小幅度降低。由图 14 对比可知, 采用本文计算方法所得的阻流门气动载荷变化与文献结果变化趋势相近。更进一步, 在阻流门打开初期, 虽然外涵道气流的流动近似

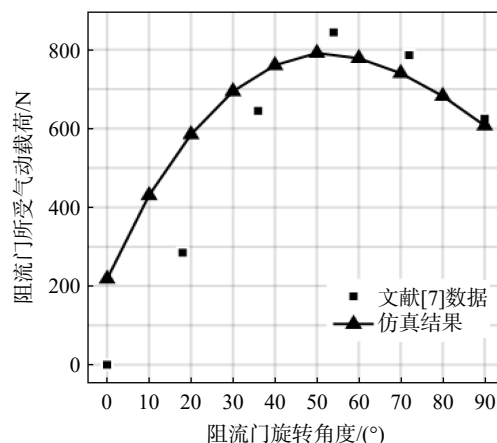
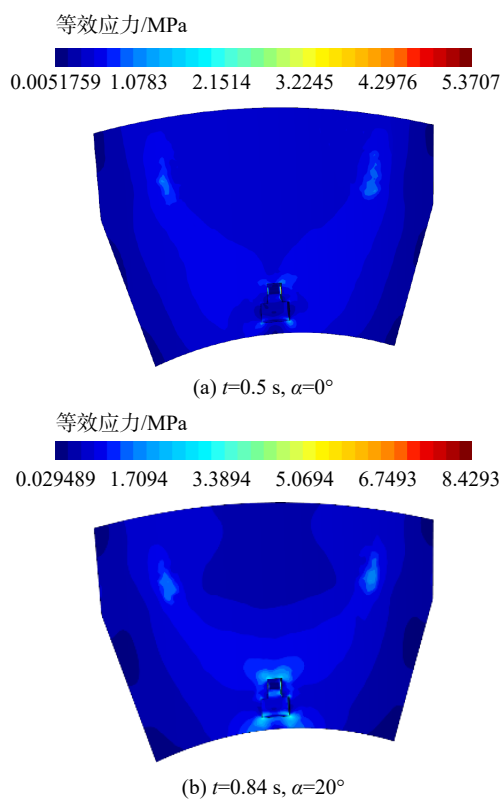


图 14 反推力装置正常打开过程阻流门气动载荷变化
Fig. 14 Variation of aerodynamic load on blocker door during thrust reverser normal opening process

与折流门平行, 但由于气流具有一定的压力, 因此作用在折流门上有一定的气动力(气动力不为零)。由此表明本文采用动态计算获得的结果更符合工程实际。

在反推力装置正常打开过程中, 因阻流门所受气动载荷的变化, 作用在其上的应力分布也发生变化。图 15 和图 16 分别为正常打开反推过程中阻流门正反面等效应力分布图。可以看出, 受表面压力分布变化的影响, 阻流门等效应力分布也有所变化。在阻流门开始旋转后, 气动载荷增



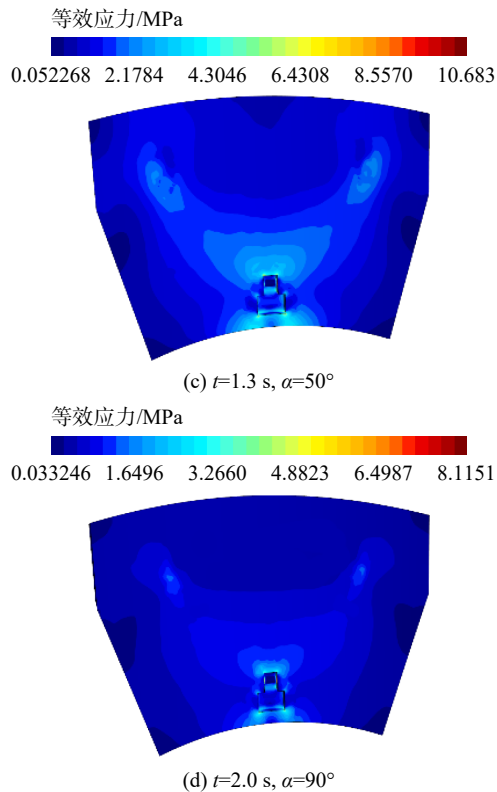


图 15 反推力装置正常打开时阻流门正面等效应力分布

Fig. 15 Equivalent stress distribution on the front of blocker door on thrust reverser normal opening state

大, 铰链处等效应力快速增大; 随着阻流门旋转角度达到 50° 附近, 阻流门中间区域以及与拉杆连接区域的应力明显增大; 随后, 中间区域的应力略微减小, 同时最大等效应力开始降低。

3.2.2 反推应急打开过程流场特性及阻流门受载

上述分析了反推力装置正常打开过程流场特性及阻流门受载。实际上, 对反推力装置作动器及运动机构进行强度设计时, 应考虑负荷最大的工况。通过对飞机反推力系统全部工况^[19]分析表明, 当飞机起飞滑跑过程遇到紧急情况需要终止起飞时, 可打开反推力装置用于应急制动, 该状况与飞机降落时正常打开反推力装置不同, 此时发动机工作在最大状态, 外涵道压力高, 流量大, 反推力装置打开过程中作用在阻流门的负载与应力最大。

根据文献 [20], 以发动机为最大状态为例, 对飞机起飞应急打开反推力装置过程的流场特性及阻流门受载进行仿真。其中流场流线如图 17 所示, 压力云图如图 18。与反推力装置正常打开时的流场进行对比可以发现: 在反推力装置应急打开初期, 有更多比例的空气通过叶

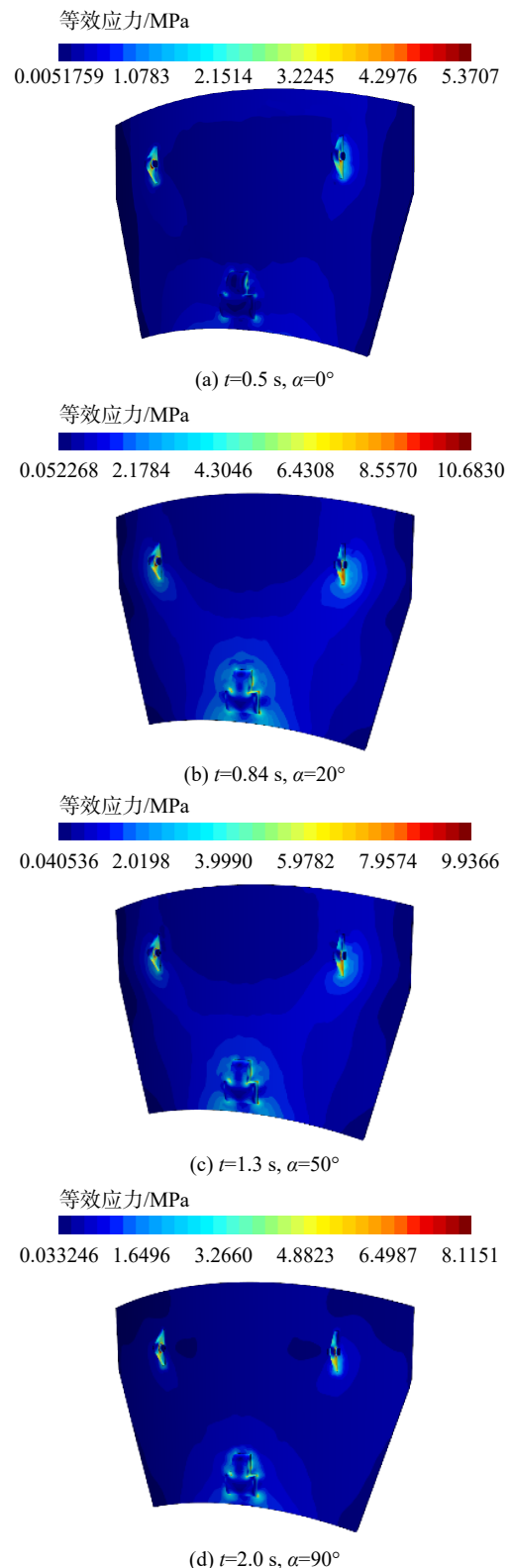


图 16 反推力装置正常打开时阻流门背面等效应力分布

Fig. 16 Equivalent stress distribution on the back of blocker door on thrust reverser normal opening state

栅向外排出, 这是由于应急终止起飞状态下, 外涵道流量较大且气压较高。较大的压差使得

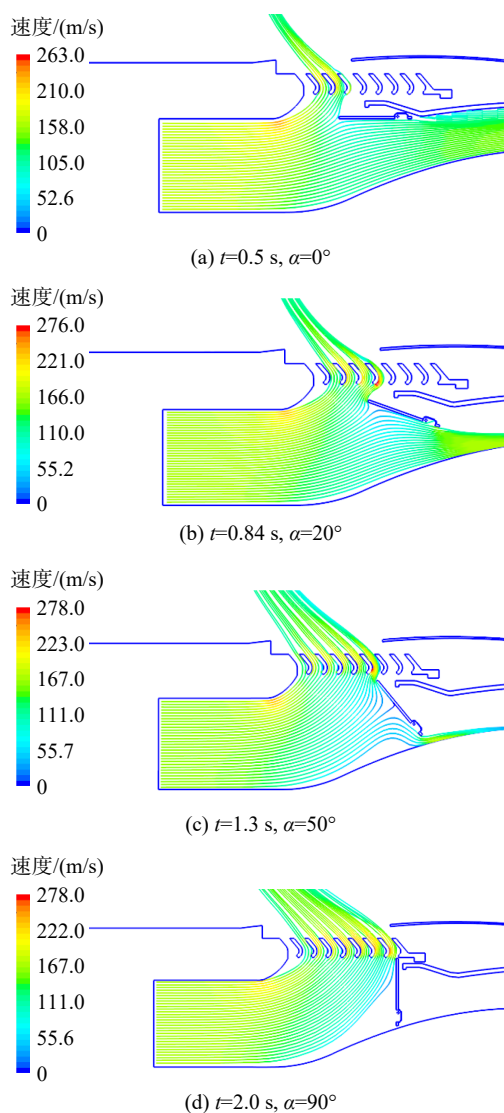


图 17 反推力装置应急打开时流场流线图

Fig. 17 Flow field streamline diagram of thrust reverser on emergency opening state

更多的空气通过叶栅被“吸”出外涵道,表现在阻流门开始旋转前,相同叶栅打开面积下,更多空气通过叶栅通道排出。当反推力装置运动时间为 1.3 s 时,阻流门旋转角度大约为 50° ,大部分空气通过叶栅排出,此时叶栅通道内的气流流量较为均匀,说明叶栅通道打开面积与通过叶栅的空气流量匹配较好,叶栅效率较高。随着阻流门旋转角度继续增大,外涵道面积继续减小后,叶栅通道的气流流量持续增加且压力小幅度升高,叶栅打开面积逐渐无法排出较大的空气流量,第一级叶栅通道内出现分离现象,此时气流已偏离设计状态,即叶栅无法消化外涵道空气流量,叶栅效率降低。

应急打开反推时的阻流门正面气流压力分布

如图 19 所示。

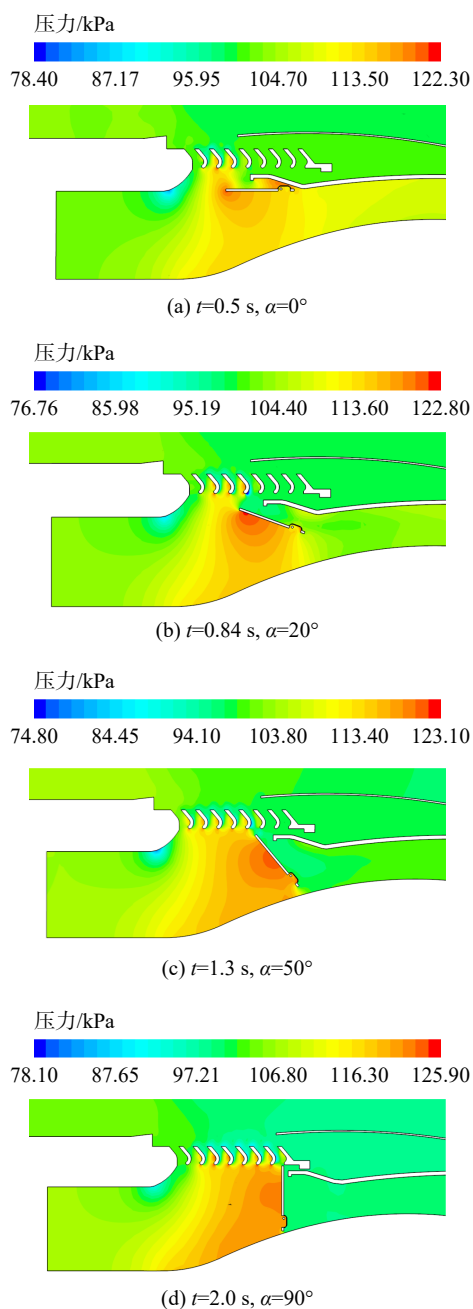
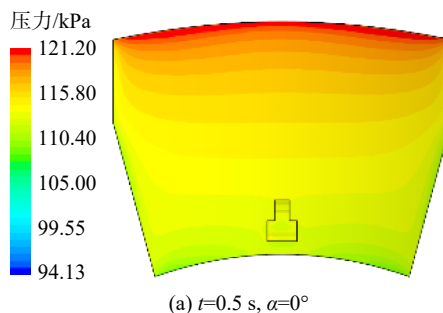


图 18 反推力装置应急打开时流场压力云图

Fig. 18 Flow field pressure cloud chart of thrust reverser on emergency opening state

(a) $t=0.5\text{ s}, \alpha=0^\circ$

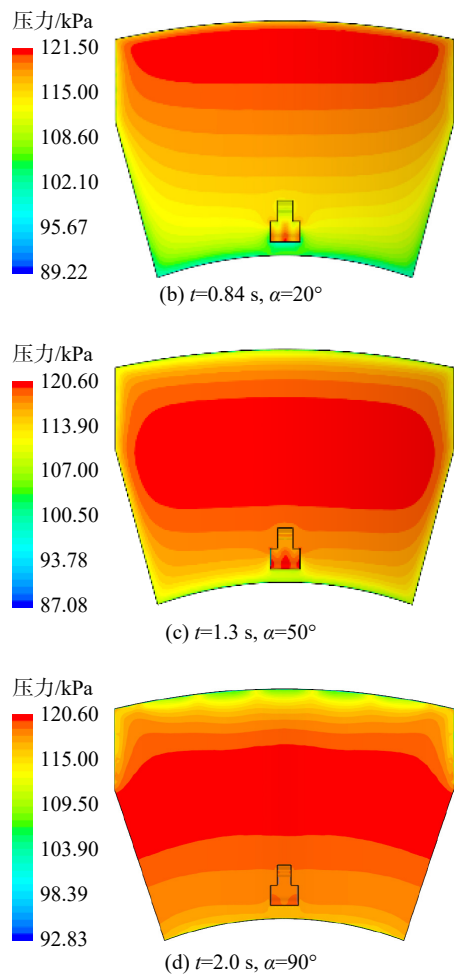


图 19 反推力装置应急打开时阻流门正面压力分布
Fig. 19 Blocker door front pressure distribution of thrust reverser on emergency opening state

由图 19 可知, 压力分布与趋势与正常打开状态近似, 都呈现出随着阻流门旋转, 高压区域逐渐下移并扩大, 在 50° 左右达到最大, 随后高压区域略微减小的特点, 但应急终止起飞状态打开反推力装置时阻流门表面压力更高、压差更大。

由于应急终止起飞状态下风扇后空气流量较大, 气流对阻流门的冲击作用急剧增大, 阻流门表面压力与压差的增大共同导致了阻流门将承受较大的气动载荷。

图 20 为正常和应急两种状态下反推力装置打开过程阻流门所受气动载荷对比。由图 20 可以看出, 在反推装置打开而阻流门尚未开始旋转前, 阻流门承受气动载荷力基本不变; 阻流门开始旋转后, 气动载荷力快速增加, 在 50° 左右达到最大, 应急打开时的负荷约是正常打开时的 3 倍。

应急终止起飞时, 较大的气动载荷使阻流门等效应力升高, 在不同旋转角度下阻流门的等效

应力分布如图 21 和图 22 所示。

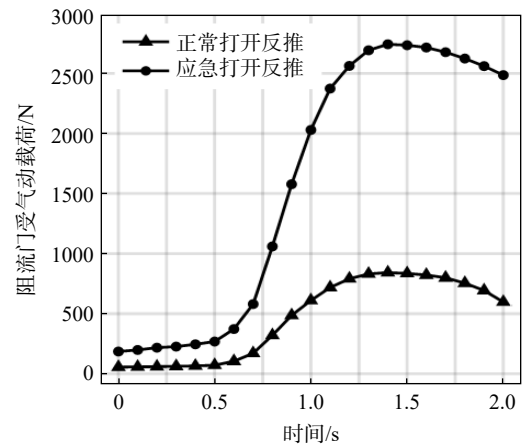
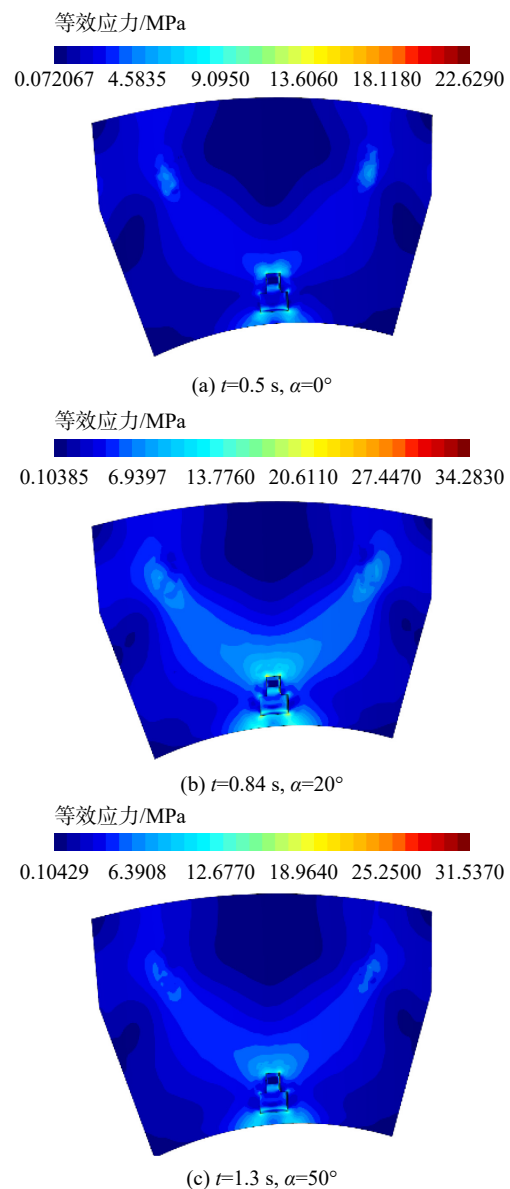


Fig. 20 Variation of aerodynamic load on blocker door with time



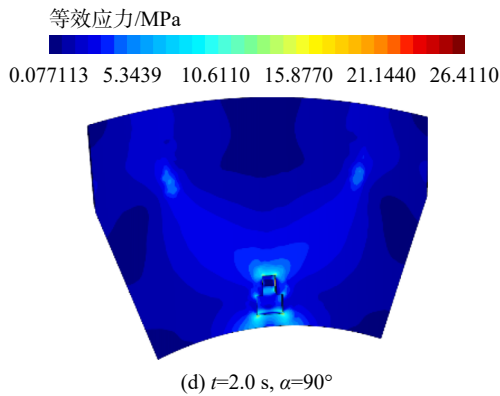


图 21 反推力装置应急打开时阻流门正面等效应力分布
Fig. 21 Equivalent stress distribution on the front of blocker door on thrust reverser emergency opening state

由图 21 与图 22 可以看出,在应急终止起飞时,因阻流门表面压力分布变化剧烈,阻流门所受气动载荷更高,受阻流门在旋转过程中等效应

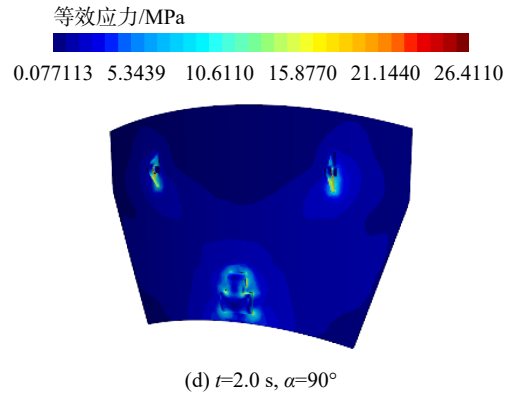


图 22 反推力装置应急打开时阻流门背面等效应力分布
Fig. 22 Equivalent stress distribution on the back of blocker door on thrust reverser emergency opening state

力分布也有较为显著的变化。与正常打开反推相比,应急终止起飞打开反推时,阻流门铰链处等效应力最高。

4 结 论

基于流固耦合方法,并采用重叠网格划分,实现了叶栅式反推力装置负载特性分析,结论如下:

1) 采用重叠网格划分与流固耦合结合,可较准确实现反推力装置滑动整流罩和阻流门的平移以及旋转运动网格划分,进而实现反推力装置打开动态过程负载特性仿真。

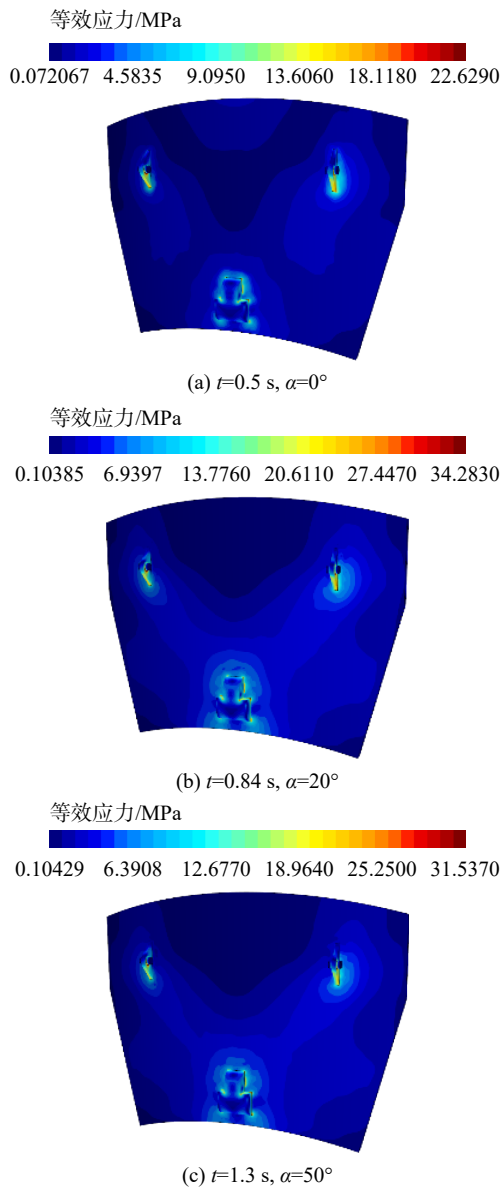
2) 反推力装置打开过程中阻流门负载特性及应力分布,规律特征是阻流门载荷与最大等效应力随阻流门的旋转角度而增加,且在旋转角度为 50° 左右时达到最大。

3) 反推力装置在应急终止起飞状态打开时,阻流门承受的最大气动载荷是正常打开过程的 3 倍以上。

本文所采用的重叠网格划分与流固耦合结合进行反推力装置负载特性的计算方法,可为类似机构流固耦合分析提供参考借鉴。

参考文献:

- [1] YETTER J A. Why do airlines want and use thrust reversers? [R]. NASA TM-109158, 1995.
- [2] 靳宝林,邢伟红,刘殿春. 飞机/发动机推进系统反推力装置[J]. 航空发动机, 2004, 30(4): 48-52, 58.
JIN Baolin, XING Weihong, LIU Dianchun. Reverse thrust device of aircraft/engine propulsion system[J]. Aeroengine, 2004, 30(4): 48-52, 58. (in Chinese)
- [3] 左志成,钱瑞战. 民机反推力装置对发动机进气口流场畸变影响数值模拟研究[J]. 飞机设计, 2007, 27(5): 60-64.
ZUO Zhicheng, QIAN Ruizhan. Numerical simulation investiga-



- tion of effect of thrust-reverser operating on engine inlet flow distortion for civilian transport[J]. *Aircraft Design*, 2007, 27(5): 60-64. (in Chinese)
- [4] 饶祺, 盛鸣剑, 韩涛锋, 等. 发动机反推力装置研究[J]. *科技广场*, 2014(2): 91-94.
- RAO Qi, SHENG Mingjian, HAN Taofeng, et al. Research on engine thrust reverser[J]. *Science Mosaic*, 2014(2): 91-94. (in Chinese)
- [5] ANDRADE F O D, FERREIRA S B, SILVA L F F D, et al. Study of the influence of aircraft geometry on the computed flowfield during thrust reversers operation[R]. AIAA 2006-3673, 2006.
- [6] 邵万仁, 叶留增, 沈锡钢, 等. 反推力装置关键技术及技术途径初步探讨[R]. 广东深圳: 大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会学术年会, 2007.
- [7] 陈著, 单勇, 沈锡钢, 等. 叶栅式反推力装置开启过程的三维非稳态数值模拟与分析[J]. *航空动力学报*, 2017, 32(9): 2132-2138.
- CHEN Zhu, SHAN Yong, SHEN Xigang, et al. Three-dimensional unsteady numerical simulation and analysis of deployment for cascade thrust reverser[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2017, 32(9): 2132-2138. (in Chinese)
- [8] 张少军, 王汉平, 何江军, 等. 叶栅式反推装置的受载与传力[J]. *四川兵工学报*, 2015, 36(3): 56-59.
- ZHANG Shaojun, WANG Hanping, HE Jiangjun, et al. Load and force transmission of cascade thrust reverser[J]. *Journal of Sichuan Ordnance*, 2015, 36(3): 56-59. (in Chinese)
- [9] 陈永琴, 何杰, 苏三买. 反推力装置运动学与动力学仿真[J]. *航空动力学报*, 2019, 34(11): 2316-2323.
- CHEN Yongqin, HE Jie, SU Sanmai. Kinematics and dynamics simulation of thrust reverser[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2019, 34(11): 2316-2323. (in Chinese)
- [10] 高昊浩, 陈永琴, 苏三买, 等. 反推力装置结构优化设计[J]. *航空动力学报*, 2022, 37(8): 1724-1731.
- GAO Wuhao, CHEN Yongqin, SU Sanmai, et al. Structural optimization design of thrust reverser[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2022, 37(8): 1724-1731. (in Chinese)
- [11] HEGEN G H, KOOI J W. Investigation of aircraft performance with deployed thrust reversers in DNW[R]. AIAA 2005-3702, 2005.
- [12] DIETRICH D, LUIDENS R W. Experimental performance of cascade thrust reversers at forward velocity[R]. NASA TM X-2665, 1973.
- [13] 王福军. 计算流体动力学分析: CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [14] 李鹏, 高振勋, 蒋崇文. 重叠网格方法的研究进展[J]. *力学与实践*, 2014, 36(5): 551-565.
- LI Peng, GAO Zhenxun, JIANG Chongwen. The progress of the overlapping grid techniques[J]. *Mechanics in Engineering*, 2014, 36(5): 551-565. (in Chinese)
- [15] 李明, 李明高. STAR-CCM+与流场计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [16] 唐伟, 刘启国, 汪东. 军用反推力装置通用规范技术要素的确定[J]. *航空标准化与质量*, 2013(5): 7-10, 18.
- TANG Wei, LIU Qiguo, WANG Dong. Determination of technical elements of general specification for military reverse thrust device[J]. *Aeronautic Standardization and Quality*, 2013(5): 7-10, 18. (in Chinese)
- [17] 何杰. 飞机反推力装置动力学分析及结构优化[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- HE Jie. Dynamic analysis and structure optimum of aircraft thrust reverser[D]. Xi'an: Xidian University, 2020. (in Chinese)
- [18] NOBEL T, WOODEN P, ARLEDGE R. Experimental thrust reverser design with computational analysis[R]. AIAA 94-0021, 1994.
- [19] Boeing 737-800 flight crew operations manual[M]. Chicago, US: Boeing Commercial Airplane Group, 2012.
- [20] 王志强, 沈锡钢, 胡骏. 反推状态下大涵道比涡扇发动机气动稳定性预测与评估[J]. *航空学报*, 2017, 38(2): 120202.1-120202.11.
- WANG Zhiqiang, SHEN Xigang, HU Jun. Prediction and evaluation of aerodynamic stability of high bypass ratio turbofan engine deployed with thrust reverser[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(2): 120202.1-120202.11. (in Chinese)

(编辑: 王碧琚)