

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2026.03.018

铰链式畸变元件总压畸变特性数值仿真及建模

袁新渊¹, 贾春强², 王英锋¹, 黄鑫源¹

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016; 2. 中国航发四川燃气涡轮研究院, 四川 成都 610500)

摘要: 为了得到组成可调铰链式压力畸变发生器的基本单位——铰链元件下游的总压损失特性, 采用数值模拟方法研究了铰链元件张开角度、宽高比、开孔和马赫数对下游测量截面总压损失特性的影响, 并通过随机森林回归和 BP 神经网络算法建立单个铰链元件下游测量截面总压分布模型。结果表明: 元件张开角度较小时, 下游测量截面呈现为两个对称的低压区, 并且低压区之间的距离会随着宽高比的增加而增大; 元件宽高比和张开角度的增加会使得相同截面的总压损失增大; 在元件上开孔主要改变测量截面的总压损失程度, 且与元件张开角度相关; 元件几何特征对总压分布影响的重要程度排名依次为张开角度、宽高比和开孔率。

关键词: 航空发动机; 总压畸变; 畸变发生器; 随机森林回归算法; BP 神经网络算法

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2026)03-0088-07

Numerical Simulation and Modeling of Total Pressure Distortion Characteristics of Hinged Distortion Elements

YUAN Xinyuan¹, JIA Chunqiang², WANG Yingfeng¹, HUANG Xinyuan¹

(1. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. AECC Sichuan Gas Turbine Research Academy, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to obtain the total pressure loss characteristics of the hinge element downstream, which is the basic unit of the adjustable hinge pressure distortion generator, this research adopts numerical simulation to look into the influence of the hinge element opening angle, aspect ratio, opening hole and Mach number on the total pressure loss characteristics of the down-stream measurement section, and establishes the total pressure distribution model of the downstream section of a single hinge element by random forest regression and BP neural network algorithm. The results show that when the opening angle of component is small, the measurement section of the downstream component presents two symmetrical low-pressure regions, and the distance between low pressure regions increases with the increase of aspect ratio. Also, the increase of aspect ratio and opening angle will add to the total pressure loss of the same section. The opening of the element mainly changes the total pressure loss of the measured section, and is related to the opening angle of the element. Finally, the extent of influence of the geometrical characteristics of elements on the total pressure distribution is in the order of opening angle, aspect ratio and opening rate.

Keywords: aeroengine; total pressure distortion; distortion generator; random forest regression algorithm; BP neural network algorithm

0 引言

随着现代作战飞机的飞行速度、高度和机动性不断增大, 当飞机在大机动飞行时, 进气道和发动机工况往往随之偏离设计状态, 造成总压畸变^[1]。总压畸变作为影响发动机性能的主要降稳因子之一, 其不仅会降低发动机性能, 严重时还会使压气机发生失速或喘振。

为了评定总压畸变对发动机稳定性和性能的影响, 在发动机研制过程中要进行发动机及其部

件的总压畸变试验^[2]。总压畸变试验首先需要通过总压畸变模拟装置(总压畸变发生器)在发动机进口产生总压畸变流场。目前, 我国使用的总压畸变发生器包括畸变网、模拟板和插板^[3]。

现代作战飞机在超机动飞行时, 会导致压力畸变图谱的快速变化^[4], 因此对畸变发生器提出了不停机改变畸变图谱的进气畸变模拟需求。但是, 目前我国使用的畸变发生器均无法满足此项需求。畸变网和模拟板需要停机更换装置来改变畸变图谱; 移动插板虽然可以不停机改变畸变参

基金项目: 国家科技重大专项项目(J2019-V-0017-0112)

第一作者简介: 袁新渊(1999—), 男, 内蒙古自治区人, 硕士研究生, 研究方向为叶轮机气动力学, yuanxinyuan@nuaa.edu.cn。

通信作者简介: 黄鑫源(2000—), 男, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为叶轮机气动力学, sx2202120@nuaa.edu.cn。

数^[5],但不能精确模拟特定畸变图谱。

铰链式总压畸变发生器的概念最初在 1996 年提出^[6],它是由多个小型的“V”型铰链式畸变元件排列而成,每个元件可打开不同角度,铰链式畸变元件示意图如图 1 所示。当元件张开时,可在流场中形成一定的堵塞区域,气流绕过元件在下游形成尾迹,产生总压畸变。通过控制各畸变元件的张开角度,可在下游产生目标图谱式的畸变流场。CRAMER^[7]考查了驱动多元件铰链式压力畸变发生器的方法,证实了可以使用步进电机驱动铰链元件。某中心设计并制造了全功能的铰链式压力畸变发生器^[8],如图 2 所示。通过试验测试了其总压畸变模拟能力。结果表明其具有良好的稳态总压畸变模拟能力和通过远程控制快速改变畸变图谱的能力。

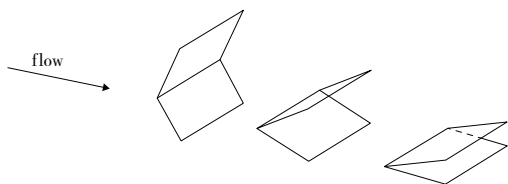


图 1 铰链式畸变元件示意图

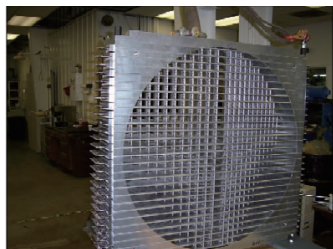


图 2 某中心设计制造的铰链式总压畸变发生器

相比于目前我国使用的总压畸变发生器,铰链式总压畸变发生器可通过实时调节各个元件的张开角度实现不停机更换畸变图谱,使其有望满足模拟超机动飞行过程中畸变图谱快速变化的需求。

在铰链式畸变发生器的使用中,如何获得模拟目标图谱对应的各元件角度开合方案是一个关键问题。依靠不断试凑的方法势必花费大量时间,如果能够实时预估元件下游流场的畸变参数,就可快速获得畸变发生器各元件调节方案。

本文通过数值模拟方法,开展了铰链元件的几何参数、来流马赫数对下游测量截面总压损失影响的研究,在掌握流场演化规律的基础上,通过机器学习算法建立了单个畸变元件下游截面的总压损失特性模型。

1 数值模拟方法

1.1 铰链式畸变元件模型

铰链式畸变元件的几何模型如图 3 所示,畸变元件由两块矩形板铰接而成。其几何参数定义如下:元件高度 H ,元件长度 L ,元件开孔率 θ ,张开角度 α 。其中,元件开孔率 θ 定义为所有孔面积与元件两块矩形板面积的比值,另外,元件两块矩形板的厚度为原件高度 H 的 $1/10$ 。

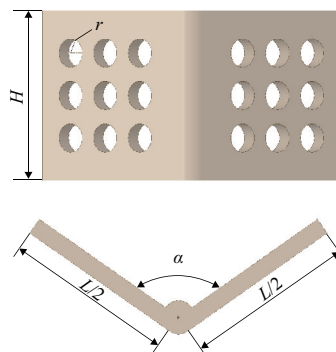


图 3 铰链式畸变元件几何特征示意图

1.2 计算域及边界条件

流体介质为空气,计算域为一长方体区域,如图 4 所示。入口位于元件上游为 $5H$ 处,出口位于元件下游 $50H$ 处;计算域入口截面长为 $5L$,宽为 $5H$ 。采用混合网格划分,在靠近畸变元件处,采用四面体网格,外围采用六面体网格。入口面设为压力入口,总压为 $101\,325\text{ Pa}$,总温为 288.15 K ;出口面为压力出口,通过改变出口表压调节来流速度。铰链式畸变元件表面采用无滑移固壁边界条件,计算域表面采用对称边界条件。

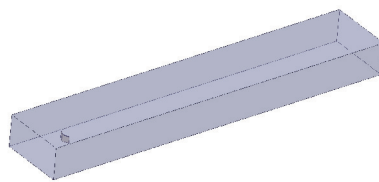


图 4 计算域示意图

1.3 计算条件及方法

使用 Fluent 软件进行定常计算,采用 $k-\omega$ SST 湍流模型,该模型考虑湍流切应力的传递,能够更好地预测流动分离。计算参数及数值如表 1 所示,它是研究马赫数、元件宽高比、开孔和元件张开角度对铰链式畸变元件的总压损失特性的影响。

表 1 计算参数

参数	数值
马赫数	0.1、0.2、0.3、0.4
元件高度 H/mm	20
元件宽高比 L/H	1、2
元件开孔率 θ	0、0.2
元件张开角度 $\alpha/(\circ)$	30、60、90、120

2 计算结果及分析

2.1 测量距离对总压损失特性的影响

气流经过铰链式元件会在下游形成尾迹区,尾迹区的速度低于主流速度,总压也会降低。宽高比 2、120°无孔元件下游各测量截面的总压分布示意图如图 5 所示。随着测量距离的增加,尾迹与周围流体不断掺混,测量截面的低压区范围逐渐增大。不同下游测量距离截面上水平中心线的总压分布如图 6 所示。由图 6 可知,在靠近元件处,测量截面的总压分布随着测量距离的变化较快,随着测量截面与元件之间距离的增大,测量截面的总压分布趋于稳定。

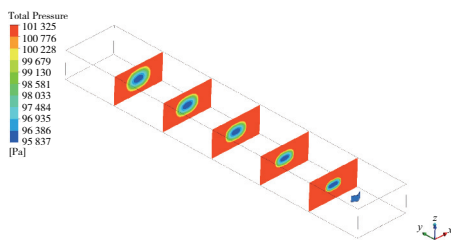


图 5 铰链元件下游各测量截面总压云图

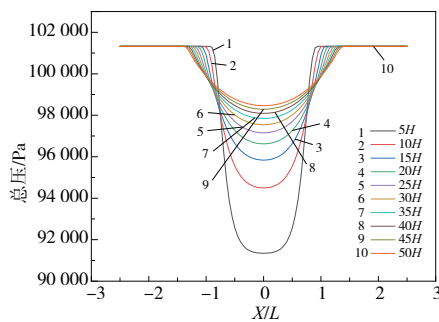


图 6 测量截面水平中心线总压分布图

2.2 元件张开角度对总压损失特性的影响

气流在流过畸变元件时,由于堵塞形成了大的剪切流动,在元件后方发展为漩涡,漩涡与主流不断掺混,使得元件下游流场总压降低。由于元件张开角度的不同,气流经过元件产生涡的位置

和大小存在一定差异。在 0.4 马赫、高度 20 mm、宽高比为 2 的情况下,4 种不同张开角度元件的流线图如图 7 所示。图 7 中 120°元件在元件的上下两侧和左右两侧均产生了尺度相当的涡。随着元件张开角度的减小,元件在流场中形成的矩形堵塞区的上下两边长度减小,元件上下两侧产生的涡减少,涡主要集中在元件的左右两侧。不同张开角度的元件下游截面上的总压分布形式也存在差异。上述元件在下游 30H 处的总压分布云图如图 8 所示。图 8 中 120°元件在下游测量截面的低压区范围同时向上下两侧和左右两侧延伸,产生的低压区为一个整体,这是上下两侧和左右两侧的涡相互作用并结合在一起的结果。随着元件角度的减小,元件上下两侧的涡尺度逐渐减小,在左右两侧的一对涡的作用下,元件下游的低压区开始向左右两侧移动并分离形成两个单独的低压区。

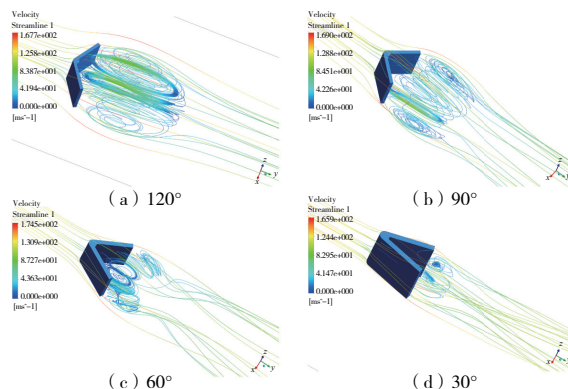
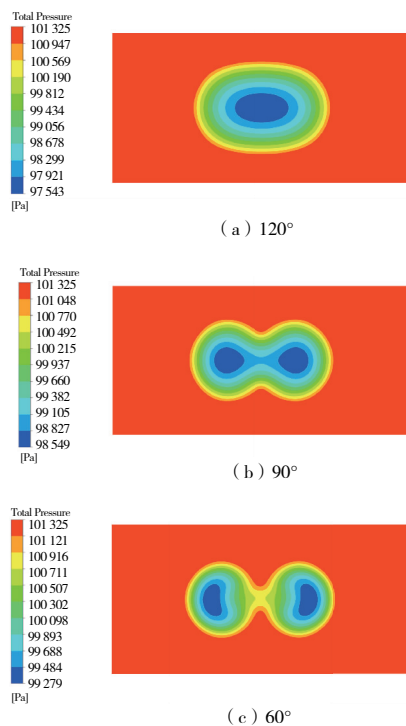
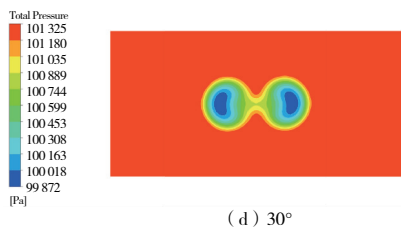


图 7 不同张开角度元件流线图

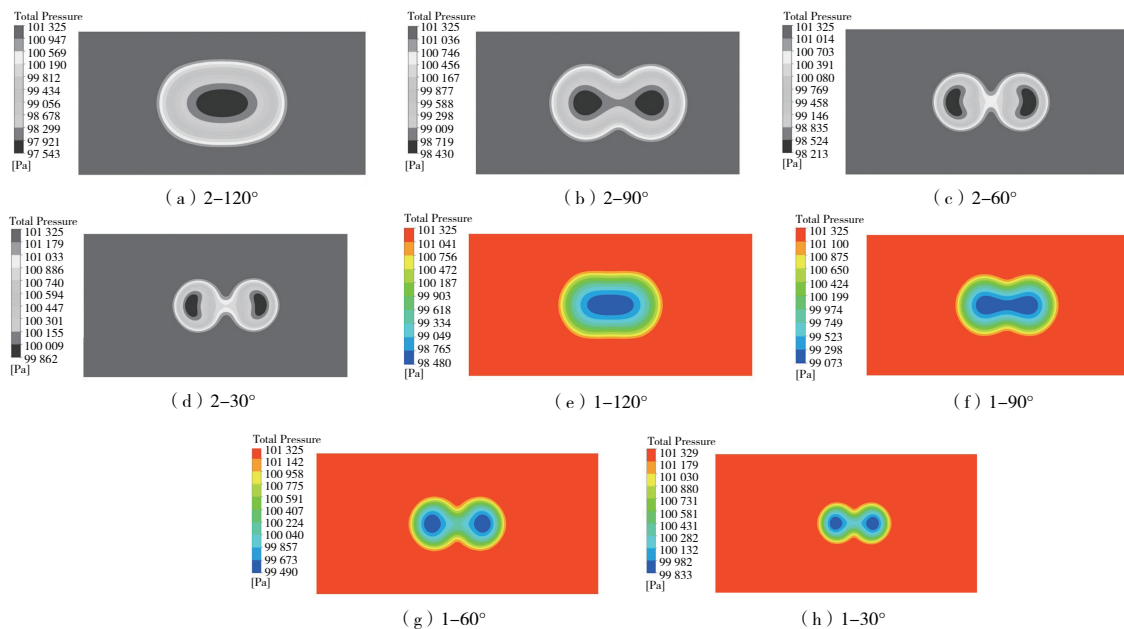
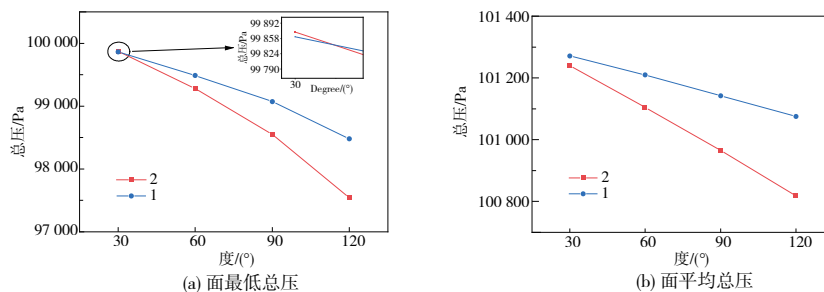


图8 各角度元件下游 $30H$ 处总压分布云图

2.3 宽高比对总压损失特性的影响

为了研究宽高比对元件下游总压分布的影响,计算了两组高度 H 相同、宽度分别为 H 和 $2H$ 且含4种角度的元件。宽高比不同的两组下游 $30H$ 截面总压分布如图9所示,对比相同角度、宽

高比不同的元件总压云图发现,随着宽高比的增加,元件下游低压区范围增大, 90° 及以下角度的元件下游截面形成的两个低压区之间的距离也会随着元件宽高比的增大而增加。两组宽高比下、各角度元件下游 $30H$ 截面处最低总压和面平均总压对比如图10所示。除了 30° 元件,元件下游 $30H$ 截面处最低总压和面平均总压均随着宽高比的增大而降低。而在 30° 元件情况下,宽高比为2的元件下游的最低总压略高于宽高比为1的元件,但是面平均总压仍低于宽高比为1的元件,其原因在于宽高比为1的 30° 元件下游左右两侧的低压区未完全分离。总体来看,由于增大元件宽高比意味着元件在流场中堵塞面积的增大,使得下游测量截面的总压损失增加。

图9 宽高比1和2各角度元件下游 $30H$ 总压分布云图图10 宽高比1和2元件下游 $30H$ 截面最低总压和面平均总压

2.4 开孔对总压损失的影响

在模拟板设计过程中,常使用开孔的方法来调整模拟板的畸变强度^[9]。其原理是通过在模拟板上开孔可以打碎由于堵塞板后方形成的涡旋,

使得开孔区域后方的涡旋尺度减小^[10]。因此,可通过在组成畸变元件的两块矩形板打通孔来改变其畸变特性。相同条件下开孔元件和不开孔元件的流线如图11所示。开孔元件后方的漩涡尺度

明显小于无孔元件。开孔也使畸变元件的总压损失特性发生改变,相同条件下开孔元件和不开孔元件下游 $30H$ 的总压云图如图 12 所示。对比后发现开孔对下游截面的低压区分布范围的影响较小。开孔的差异主要体现在总压损失程度上,相同条件下开孔元件和不开孔元件在下游 $30H$ 处的最低总压和面平均总压对比图如图 13 所示。对于 120° 元件,开孔会使相同测量截面的最低总压和面平均总压增大,说明开孔使其下游截面的总压损失减小。但是对于 30° 、 60° 、 90° 元件,情况相反。原因是铰链元件有一定的厚度,当张开角度较小时,气流在通过孔时会受到一定的阻力,损失部分机械能,并随着元件张开角度的减小,损失进一步增大。气流通过孔的流线如图 14 所示。可以看到,气流无法直接通过小角度元件上的孔,流动方向发生偏转。

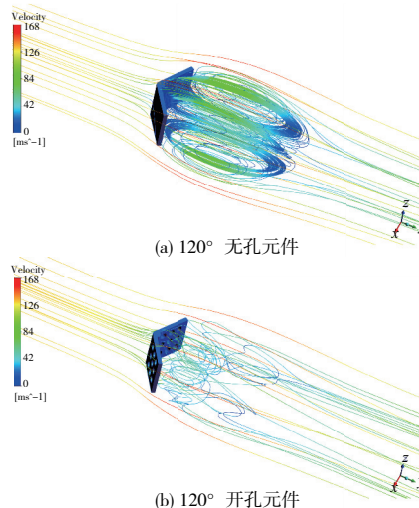


图 11 铰链式元件流线图

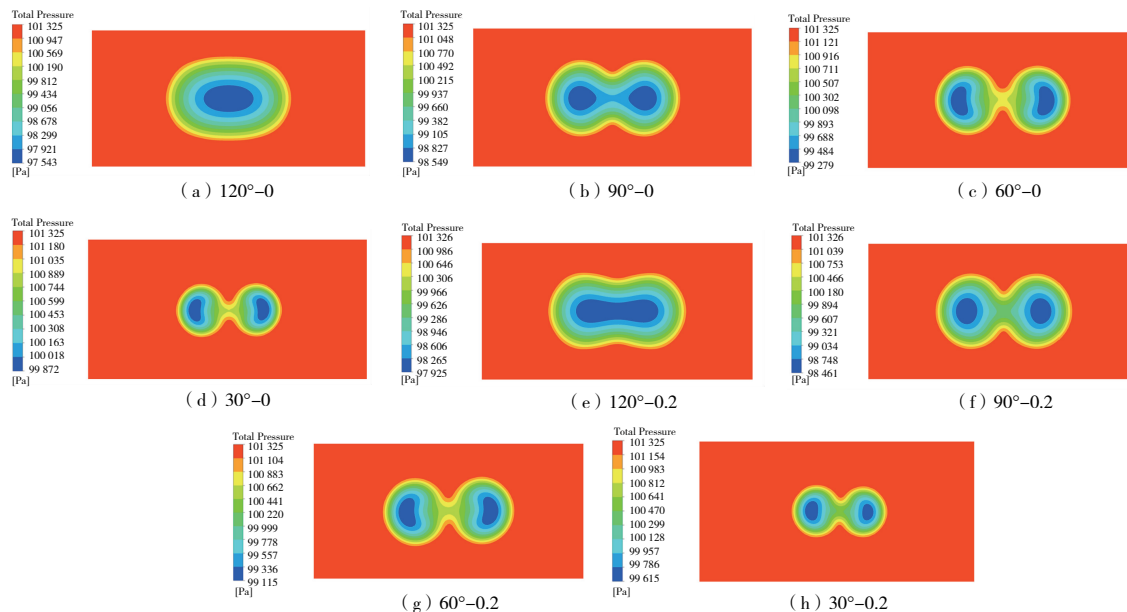
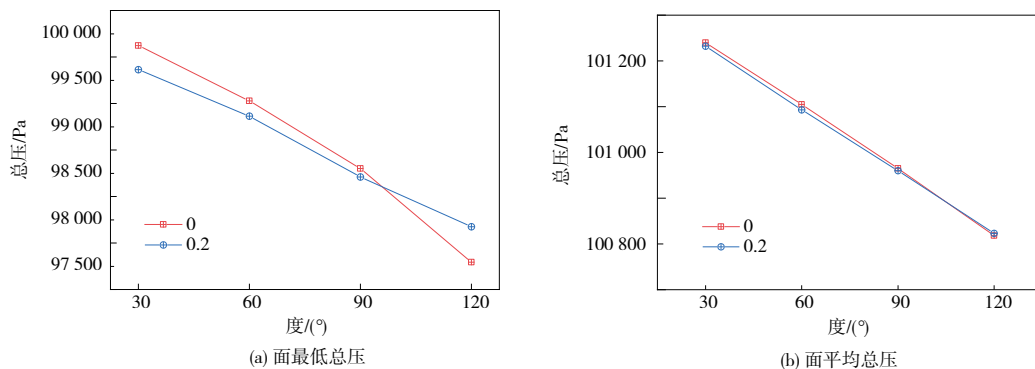


图 12 铰链式元件总压云图

图 13 各开孔率元件下游 $30H$ 处最低总压和面平均总压

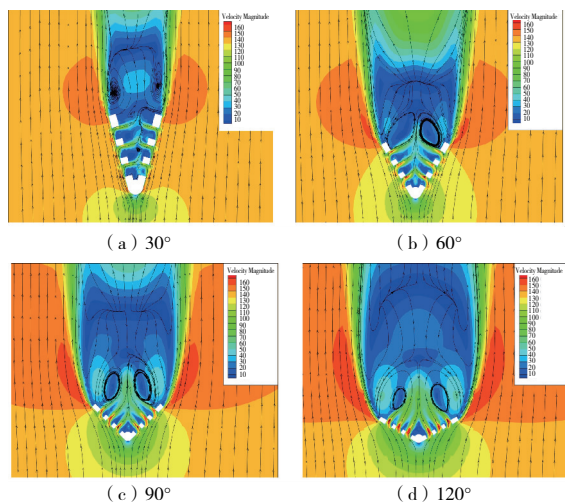
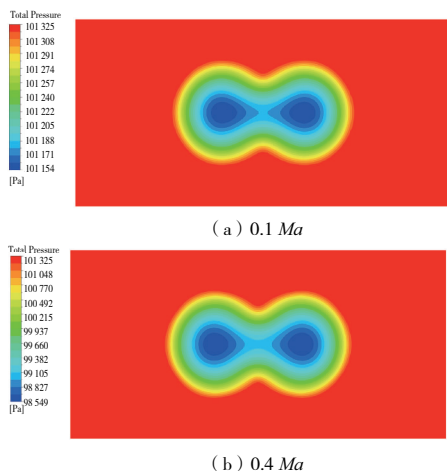
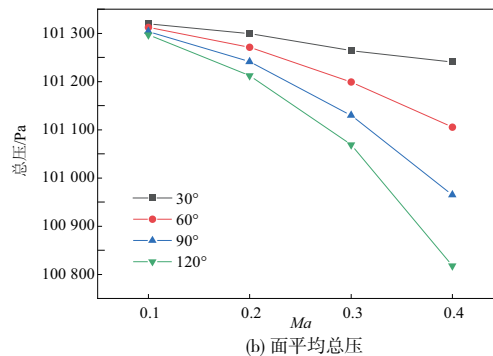
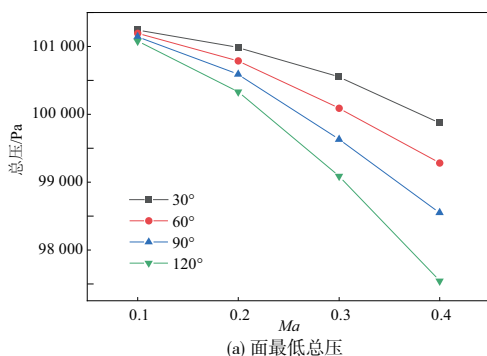


图 14 开孔元件水平中心截面流线图

2.5 马赫数对总压损失特性的影响

宽高比 2、90° 不开孔元件下游 $30H$ 测量截面的总压云图如图 15 所示。可以看到,低压区范围不会随马赫数的增加而明显改变。各角度元件 $30H$ 截面的最低总压和面平均总压随马赫数的变化如图 16 所示。由图 16 可知,铰链元件下游测量截面的总压损失程度随着马赫数的增加而增大。

图 15 不同马赫数下元件下游 $30H$ 截面总压云图图 16 元件下游 $30H$ 测量截面的面最低总压和面平均总压

3 铰链式畸变元件总压分布模型

在铰链式压力畸变发生器设计过程中,如何快速获得目标畸变图谱的元件开合方案至关重要。若能够建立实时获得元件下游总压分布模型,便可修正后得到多元件铰链式畸变发生器下游的压力畸变图谱,进而快速完成畸变发生器元件开合方案迭代设计。

3.1 数据收集

铰链元件下游截面的总压分布主要与铰链元件的几何特征、来流马赫数测量截面与元件的距离有关。铰链元件的几何特征可以通过张开角度、开孔率、宽高比等参数进行描述。总压分布可通过采集低压区附近一定数量点的数据进行描述。由于稳态计算得到的总压分布结果呈对称式分布,因此可选取右上角 $1/4$ 区域的数据作为模型的输出变量,如图 17 所示。各点之间的水平距离和垂直距离为 $0.5H$,共选取 3×6 个点作为总压采样点。从元件下游 $5H$ 测量截面开始,每隔 $5H$ 开始采集数据,最终得到 597 组数据。

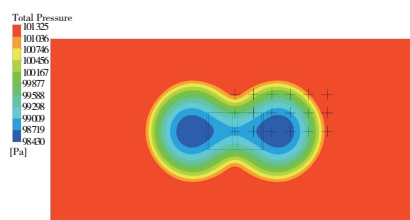


图 17 总压采样点示意图

3.2 模型构建

基于 CFD 计算得到数据集进行模型构建,分别采用随机森林回归和 BP 神经网络两种算法构建铰链式畸变元件总压分布模型。模型的特征变量为马赫数、元件张开角度、元件宽高比、开孔率

和测量距离,目标变量为各采样点总压值。训练集比例为 70%。

3.3 预测分析

BP 神经网络和随机森林 (RF) 回归建立的模

型在前 6 组测试集中的预测值和真实值的对比图如图 18 所示。模型预测结果与实际结果的趋势大致相同,但 BP 神经网络建立的模型的个别预测结果与实际结果偏差较大。

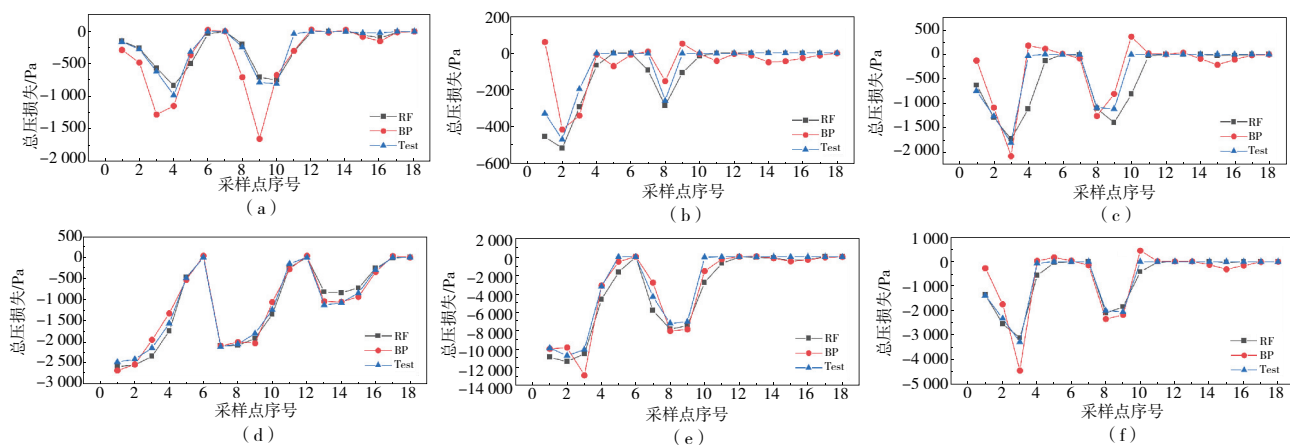


图 18 模型预测值与实际值对比图

使用平均绝对误差 (MAE) 作为模型评价指标,表示预测值和真实值之差的绝对值。平均绝对误差越小,说明模型的性能越好。MAE 的计算公式如下

$$M_{AE}(y, \hat{y}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n | \hat{y}_i - y_i | \quad (1)$$

式中: $\hat{y}_i$ 为模型预测值; y_i 为实际值。

验证集比例为 30%, 经过调参后, 两种方法建立的模型在验证集的性能如表 2 所示。相比于 BP 神经网络, 随机森林回归算法建立的模型误差更小、性能更好。

表 2 不同方法建模的性能评价

建模方法	平均绝对误差 (MAE)
随机森林回归	153.39
BP 神经网络	209.65

随机森林得到的各特征变量对目标变量的重要程度如图 19 所示。由图 19 可知, 元件张开角度对下游截面的总压分布的影响最大, 而开孔率对下游测量截面总压分布影响较小。

4 结语

本文通过数值模拟研究了组成可调铰链式总压畸变发生器单个畸变元件的总压损失特性, 分别研究了元件张开角度、宽高比等几何参数和来流马赫数对元件下游测量截面总压损失特性的影

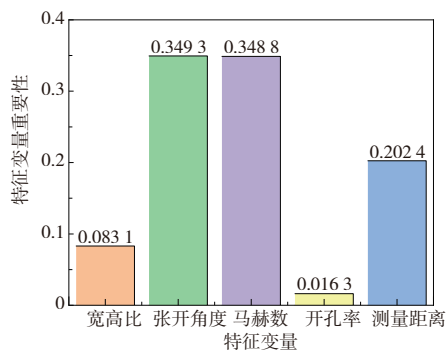


图 19 随机森林模型特征变量重要性

响, 并建立了单个铰链元件下游测量截面的总压分布模型, 主要得到了以下结论:

1) 铰链元件的张开角度会影响元件后方的涡分布形式, 进而改变下游测量截面的总压分布形式。120°元件下游测量截面的低压区为一个整体, 90°、60°、30°元件下游测量截面则发展为两个单独的低压区。

2) 在相同元件高度情况下, 增加元件宽高比和张开角度意味着增大元件在流场中的堵塞面积, 使下游测量截面上的总压损失增加。

3) 在铰链元件的矩形板上开孔可降低元件下游的漩涡尺度。由于铰链元件本身具有一定厚度, 气流在穿过小角度元件的孔时受到的阻力增加, 导致开孔后使元件下游的总压损失增大。

(下转第 179 页)

- [2] 许翰卿,胡欢,李天剑,等. 一种基于机器视觉的轴孔装配控制方法[J]. 机床与液压,2025,53(9):23-30.
- [3] 孟明辉,周传德,陈礼彬,等. 工业机器人的研发及应用综述[J]. 上海交通大学学报,2016,50(增刊1):98-101.
- [4] 刘宝临,邹汶材. 基于视觉定位的机器人智能拆垛系统[J]. 计算机系统应用,2023,32(7):138-144.
- [5] 尹仕斌,任永杰,刘涛,等. 机器视觉技术在现代汽车制造中的应用综述[J]. 光学学报,2018,38(8):11-22.
- [6] 蒋彬. 基于机器视觉的目标检测与多轴孔精密装配系统研究[D]. 扬州:扬州大学,2023.
- [7] 王新,郭俊. 工业机器人单目视觉装配系统研究[J]. 机械设计与制造,2024(6):342-347.
- [8] 朱福康. 工业机器人轴孔装配视觉定位方法[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [9] 国正. 基于机器人手眼系统的无纹理工业堆叠零件识别与定位研究[D]. 上海:上海交通大学,2020.
- [10] 王诗宇. 智能化工业机器人视觉系统关键技术研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院沈阳计算技术研究所),2021.
- [11] 石岩青,常彩霞,刘小红,等. 面阵相机内外参数标定方法及进展[J]. 激光与光电子学进展,2021,58(24):1-21.
- [12] 洪立. 基于圆形标定板的相机标定改进方法研究[D]. 大庆:东北石油大学,2024.
- [13] ZHANG Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence,2000,22(11):1330-1334.
- [14] 张亚奇. 量子图像的阈值分割及形态学方法研究[D]. 大庆:东北石油大学,2025.
- [15] 孔盛杰,黄翔,周崩,等. 基于机器视觉的齿形结构齿顶圆检测方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(4):247-255.
- [16] 杜广胜. 面向工业机器人装配的单目视觉定位方法[D]. 大连:大连理工大学,2018.
- [17] 曾鹏. 基于单目视觉的工件定位与机器人抓取技术研究[D]. 大连:大连理工大学,2017.

收稿日期:2024-01-05

(上接第94页)

4)通过建立铰链元件下游测量截面的总压分布模型,可快速得到下游截面的总压分布情况,且随机森林方法建立的模型性能优于BP神经网络;几何特征对总压分布影响的重要程度从大到小依次为张开角度、宽高比和开孔率。

参考文献:

- [1] 杨权. 航空发动机进气压力畸变评估试验装置的选择[C]. //大型飞机关键技术高层论坛暨中国航空学会2007年年会论文集. 深圳:2007:303-307.
- [2] 刘大响,叶培梁,胡骏. 航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术[M]. 北京:航空工业出版社,2004.
- [3] GJB 9891-2020 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机进气压力畸变试验方法[S].
- [4] BEALE D,DAVIS M,SIRBAUGH J. Requirements and advances in simulating aircraft inlet total pressure distortion in turbine engine ground tests[C]// ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air, Barcelona, Spain: 2008:25-36.
- [5] 刘阳,陈杰,黄国平. 管内插板后稳动态流动规律研究[J]. 机械制造与自动化,2022,51(3):125-129.
- [6] DIPIETRO T. Fundamental wind tunnel experiments for total pressure distortion generator concept selection[R]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1996.
- [7] CRAMER K B. Design of a total pressure distortion generator for aircraft engine testing [D]. Virginia Tech, 2002.
- [8] BEALE D,WIELAND S,REED J,et al. Demonstration of a transient total pressure distortion generator for simulating aircraft inlet distortion in turbine engine ground tests[C]// ASME Turbo Expo 2007: Power for Land, Sea, and Air, Montreal, Canada: 2009:39-50.
- [9] 叶巍,陆德雨,李丹,等. 畸变模拟板的设计与试验研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2001,14(2):1-8.
- [10] 王勤,刘世官,王振华. 某型发动机进气总压畸变流场中涡旋尺度的计算及其变化特征[J]. 航空发动机,2003,29(2):29-33.

收稿日期:2024-01-09