

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.027

基于彻体力模型的进气道与压气机一体化模拟

黄臣, 胡骏, 徐昊天, 季佳佳, 马帅

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘 要: 基于彻体力模型思想对压气机进行模化降阶, 实现进气道与压气机的一体化计算, 从而减少进气道与压气机的一体化计算分析过程中对计算资源的需求。通过三维 RANS 计算与彻体力计算之间的数值传递与边界条件的交换, 搭建一体化计算模型, 并利用该模型对某 S 弯进气道与风扇转子进行耦合计算。结果表明: 计算模型捕获到了 S 弯进气道出口典型的流场特征以及进气道出口流场畸变对压气机性能的影响, 验证了计算模型的可行性, 对推进系统设计早期预测进气道与压气机之间的作用具有工程意义。

关键词: 航空发动机; 进发匹配; 进气道压气机一体化; 三维彻体力模型; 进气畸变

中图分类号: V231.3 **文献标志码:** B **文章编号:** 1671-5276(2025)06-0145-05

Integrated Simulation of Inlet and Compressor Based on Body Force Model

HUANG Chen, HU Jun, XU Haotian, JI Jiajia, MA Shuai

(College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the idea of the body force model, the compressor is modeled and reduced, and the integrated calculation of the inlet and the compressor is realized, thereby reducing the demand for computing resources in the integrated calculation and analysis process of the inlet and the compressor. Through the exchange of numerical transfer and boundary conditions between three-dimensional RANS calculation and body force calculation, the integrated calculation model is constructed, with which the coupling is calculated between an S-shaped-inlet and a fan rotor. The results show that the calculation model captures the typical flow field characteristics of the S-shaped-inlet outlet and the influence of the inlet outlet flow field distortion on the compressor performance, which verifies the feasibility of the calculation model. It is of engineering significance to predict the interaction between the inlet and the compressor in the early stage of the propulsion system design.

Keywords: aeroengine; inlet - engine matching; inlet compressor integration; three - dimensional body force model; inlet distortion

0 引言

压气机作为航空燃气涡轮发动机的重要部件, 主要对气体起到做功增压的作用, 由其工作特点所决定, 压气机中的气体流动通常是强逆压力梯度的, 这就导致其具有气动失稳特性。而当压气机进入不稳定工作状态时, 会造成巨大危害^[1]。因此, 保证航空压气机的稳定工作是十分重要的环节。

在实际工作过程中, 存在各种降稳因子影响压气机的稳定性, 进气畸变便是其中的主要因素^[2]。进气道作为压气机的上游部件, 是压气机进气畸变的主要来源, 进气道发动机匹配中的进气畸变及其相关的稳定性问题也是稳定性评估中的重要内容, 贯穿于推进系统设计始终^[3-5]。

早期碍于技术水平有限, 进行进发匹配的研

究时, 采用的方法多是在进气道与压气机之间设置 AIP 截面, 从而将压气机与进气道分开。孤立地研究进气道出口畸变以及畸变对压气机的影响, 并结合后期试验暴露设计问题, 通过设计与试验反复迭代的方式进行。随着技术水平发展, 为了更精细地研究进气道与压气机之间的作用, 学者们开始针对进气道与压气机模型开展一体化数值仿真研究, 以分析进气道与压气机之间的相互影响, 从而达到充分发挥部件性能, 降低研制风险与成本的目的^[6-10]。然而, 不得不面对的问题便是在进气道出口流场畸变下压气机全环数值计算对计算资源的巨大需求。当压气机级数较多, 模型较为复杂时, 即便是进行均匀进气下特性的计算所需资源都是十分可观的^[11-13], 畸变进气条件下则更甚^[14-15], 在现阶段而言仍是较难令人接受的。

近年来, 三维彻体力模型得到迅速发展, 并在

航空叶轮机械的数值模拟中取得较好的应用,是现阶段较好的一种折中手段^[16-18]。采用彻体力模型思想对压气机进行模化降阶,在此基础上实现进气道与压气机的联算,可以大大降低对计算资源的需求^[19]。

因此,本文主要基于彻体力模型思想,通过实现三维 RANS 计算与彻体力计算之间的数值传递,搭建了进气道与压气机的耦合计算模型,分析进气道出口流场畸变对压气机的影响。

1 计算方法

压气机的计算采用彻体力模型进行。彻体力模型的基本思想是在计算域中的叶片区不考虑叶片的具体造型,而是将叶片的作用模化为以场的形式存在的力,从而回避因复杂的三维几何造型导致的复杂网格划分工作。相关研究发现,彻体力模型对网格数量不敏感^[20],因此可以通过数量较少的粗网格,以时间推进的方式求解带源项的三维非定常控制方程来模拟压气机内部流场,以快速捕获叶轮机械内的三维流动特征。基于彻体力模型思想,可以大大减少压气机畸变进气下全环数值模拟计算对网格数量的需求,且网格简单均匀,质量较高,有利于数值计算的收敛,从而可以提高计算效率。

在进行耦合计算模型的搭建时,由于进气道的 CFD 计算通常是通过商用软件进行的,而压气机的计算采用的是课题组开发的彻体力计算程序^[21]进行。因此,如何实现边界条件的交换便是要解决的关键问题。本文搭建了如图 1 所示的计算框架,当进气道的三维 RANS 计算进行一定步数时,将进气道出口流场参数输出,并通过自编二维插值程序传递到压气机进口网格上,作为压气机彻体力计算的进口边界条件;而当彻体力计算收敛后,将压气机进口参数进行面平均并向上游传递到进气道的出口,用于更新进气道的出口边界条件。基于上述流程进行迭代计算,直至两个计算域的流量均不再变化且在误差允许范围内相等,则判定计算收敛,整个迭代过程通过 Isight 平台实现。

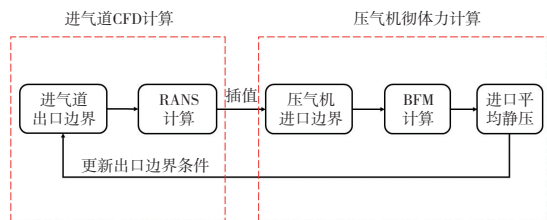


图 1 一体化计算的实现流程

2 计算模型

为了简化模型,便于调试,本文选取了某 S 弯进气道与风扇转子进行一体化计算模型搭建的研究。

2.1 风扇转子计算模型

计算所用风扇转子叶片数为 24,设计转速为 16 045 r/min,设计压比为 1.63,设计流量为 33.25 kg/s。基于彻体力模型思想对其进行建模,沿轴向划分了 85 个网格单元,径向划分 30 个网格单元,周向划分 36 个网格单元旋转一周形成三维计算域网格,总网格数在 9 万左右,其子午流道网格与进口周向网格划分如图 2 所示。

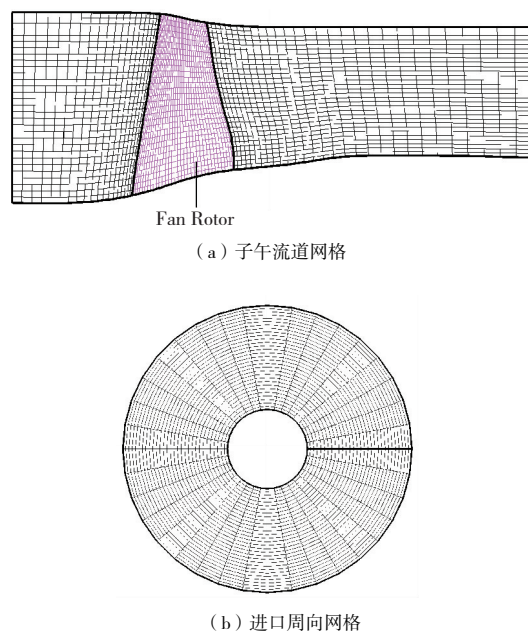


图 2 风扇转子计算模型的网格划分

首先对风扇转子进行均匀进气下的特性计算,并与实验结果进行对比,以验证彻体力模型的应用。在进行彻体力计算过程中,进口总压给定 101 325 Pa,总温 288.15 K,轴向进气,出口边界给定出口静压,并通过改变出口背压得到压气机的特性。对于稳定边界的处理,稳定边界点通过数值计算发散确定。计算了 60%与 90%转速下压气机的压比值与效率特性,其与有限实验数据的对比如图 3 所示,可知除稳定边界相差偏大外,计算结果与实验值整体符合较好。

2.2 S 弯进气道模型

与上述风扇转子相匹配的进气道为某 S 弯进气道,其进口为椭圆形,经型面过度到出口的圆形,该进气道的三维示意图如图 4 所示。

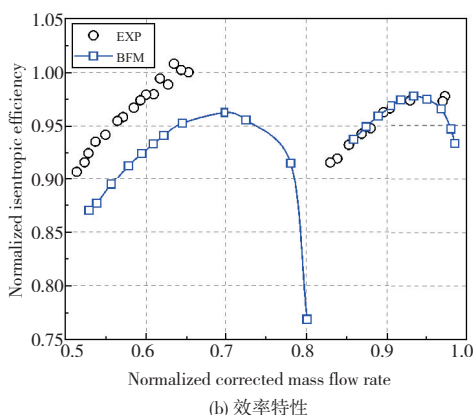
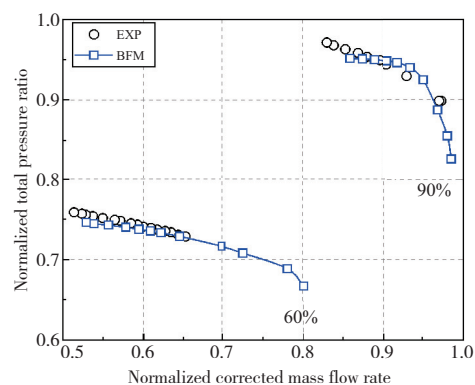


图3 风扇转子均匀进气下的特性

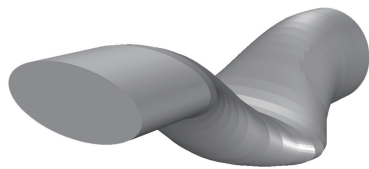


图4 S弯进气道三维示意图

进气道的数值仿真通过商用软件 Fluent 进行。计算时,选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,进口边界位于进气道的椭圆形进口,并设置为压力进口边界条件,总压给定 101 325 Pa,总温 288.15 K,轴向进气;出口设置为压力出口边界,并给定出口静压值;壁面均设置为绝热无滑移条件。

先在进气道出口给定某一静压进行孤立部件的计算,以作为进气道数值计算的初场,并保存计算的设置与结果文件,以便后续计算与调试时进行调用。

3 进气道与压气机的联算

将上述两部分计算模型通过边界条件的交换实现迭代计算,在计算过程中,将压气机的工作点匹配到了转速较低的 60% 转速。迭代过程中压气

机进口流量随迭代步数的变化如图 5 所示,可知经过 5 步左右的迭代计算后压气机进口流量已基本不再变化,且此时压气机进口流量与进气道出口流量在误差允许范围内相等,判定为耦合计算已经收敛。

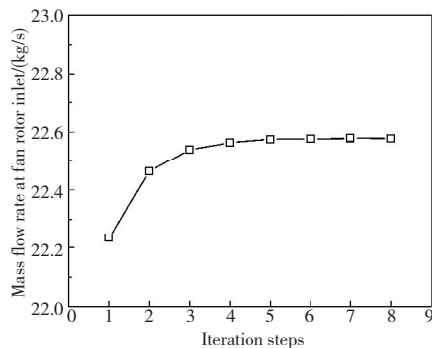


图5 迭代过程中风扇进口流量的变化过程

当迭代计算收敛后,压气机的工作点位置与均匀进气条件下特性的对比如图 6 所示。由图 6 可知相较于均匀进气条件,联算状态下的压气机工作点压比值下降了 4.33%,效率的下降则更为明显,达到了 18.13%。进气道出口流场畸变使得压气机压比值与效率存在较为明显的下降,严重影响了压气机的性能,且进气畸变会使压气机的稳定边界右移,使得压气机的稳定工作范围减小。

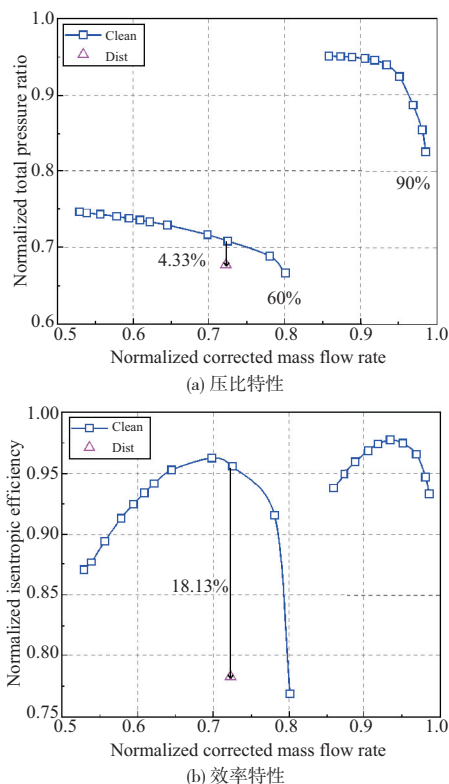


图6 联算状态下风扇转子工作点在均匀进气特性图上的位置

在计算过程中,由于进气道出口总温基本没有变化,且在截面上径向气流角的数值基本接近于0,因而在此算例中主要关注总压与周向气流角的分布。由于进气道出口周向气流角的幅值较大,因此在进行彻体力计算过程中,为了防止气体出现回流从而使得计算发散,对风扇转子进口周向气流角的最大值进行了限制,在该算例中将其限制在了 $\pm 60^\circ$,即周向气流角绝对值大于 60° 的部分将其强行赋值为 $\pm 60^\circ$ 。此时,进气道出口三维 RANS 计算结果与风扇转子进口总压与旋流角的分布如图 7 所示,其中,旋流角的定义为 $\alpha = \tan^{-1}(v_\theta/v_z)$, v_θ 与 v_z 分别为周向速度与轴向速度。

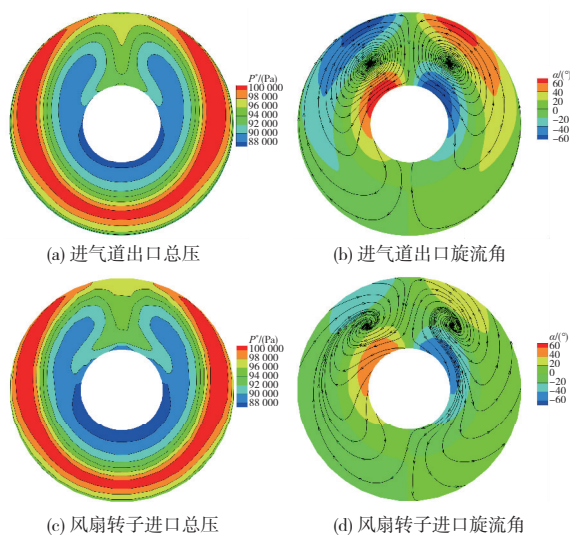


图7 进气道出口与风扇转子进口总压与周向气流角的分布

由计算结果可知,气流在 S 弯进气道管道中的分离使得进气道出口形成了较为明显的总压畸变以及旋流畸变,进而影响压气机的性能与稳定性。由流线与参数的分布可知,进气道出口上部气流角分布的极值区存在一对明显的漩涡,且其位置大致对应于进气道出口上部的低总压区,这是 S 弯进气道出口的典型流动特征。对涡旋流畸变的存在会使压气机进口气流存在一定预旋,从而影响气流攻角以及叶片负荷,改变压气机的稳定性与做功能力。

对比图 7 流动参数的图谱可知,总体上来看,虽然存在一定差别,但风扇转子进口大体上捕获到了进气道出口流场参数分布特征,插值程序将进气道出口边界条件较好地传递到了风扇转子进口,使得彻体力模型可以把进气道出口压力畸变与旋流畸变对压气机的影响耦合进去。

此时,风扇转子出口气流角与流线分布如图 8 所示。由图 8 可知与进口相比,经过风扇转子做功后,旋流角的最大值相较于转子做功前有所减小,旋流畸变强度得到了一定削弱,且进口的对涡已经衰减,此时周向气流角的分布主要是由风扇转子出口静压分布不均匀引起的高压区与低压区气流的掺混作用造成的。

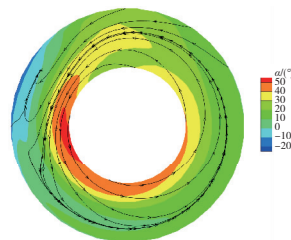


图8 风扇转子出口流线分布

4 结语

本文基于彻体力模型思想针对压气机进行简化,搭建了进气道压气机的一体化计算模型,用于分析进发匹配过程中进气道出口流场畸变对压气机的影响,从而减少对计算资源的消耗,在计算资源有限的情况下,捕获进气道与压气机之间的影响。利用某 S 弯进气道与风扇转子模型进行验证,结果表明耦合计算模型捕获到了 S 弯进气道出口流场特征以及畸变流场对风扇转子的影响,可以满足推进系统设计早期对压气机与进气道之间作用预测的需求。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 胡骏. 航空压气机气动稳定性分析方法[M]. 北京:国防工业出版社,2015.
- [3] 姜健,于芳芳,赵海刚,等. 进气道/发动机相容性评价体系的完善与发展[J]. 科学技术与工程, 2009, 9(21): 6474-6483.
- [4] 侯敏杰,叶巍,彭生红. 关于未来进气道/发动机相容性技术的探讨[J]. 航空科学技术, 2012, 23(5): 5-8.
- [5] 任智博,谢业平,杨瀚超,等. 航空发动机进发匹配优化研究[J]. 航空发动机, 2019, 45(6): 15-19.
- [6] 刘雷,陈浮,陈焕龙,等. S 弯进气道出口畸变对风扇性能影响研究[J]. 工程热物理学报, 2014, 35(4): 655-658.
- [7] 赵伟辰. S 弯进气道与跨音速风扇流动特性一体化研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2019.
- [8] ALAN H, DAVIS M, SIRBAUGH J. A numerical simulation capability for analysis of aircraft inlet-engine

- compatibility[C]//ASME Turbo Expo 2004; Power for Land, Sea, and Air, Vienna, Austria; 2008:127-137.
- [9] 魏巍,任思源,达兴亚. 边界层吸入对方转圆进气道、风扇耦合影响[J]. 航空动力学报, 2020, 35(9): 1943-1953.
- [10] CUI R, LI Q S, PAN T Y, et al. Streamwise-body-force-model for rapid simulation combining internal and external flow fields [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2016, 29(5): 1205-1212.
- [11] 夏欢,王英锋. 低雷诺数条件对风扇/压气机效率的影响[J]. 机械制造与自动化, 2023, 52(3): 11-15.
- [12] 王志强,沈锡钢,胡骏,等. 大涵道比涡扇发动机风扇转子叶片优化[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9): 2202-2209.
- [13] 郑覃,杨小贺,叶俊,等. 内涵工况对风扇增压级双涵匹配的影响[J]. 航空学报, 2022, 43(7): 177-192.
- [14] 张皓光,吴俊,楚武利,等. 进口畸变对轴流压气机流场影响的全通道数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(8): 1056-1063.
- [15] 赵清伟,孟德君,陈业辉. 压力畸变对某三级风扇性能影响研究[J]. 推进技术, 2022, 43(12): 111-120.
- [16] XU L. Assessing viscous body forces for unsteady calculations[C]//ASME Turbo Expo 2002; Power for Land, Sea, and Air, Amsterdam; The Netherlands; 2009: 323-331.
- [17] XIE T B, URANGA A. Capturing aero-propulsive coupling effects with a body-force propulsor model[C]// AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum. VIRTUAL EVENT. Reston, Virginia; AIAA, 2021: 3456.
- [18] 刘超,宁方飞. 黏性彻体力建模方法及其应用[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 128-135.
- [19] 张亚飞,刘涛,冷林涛,等. 基于多流路体积力模型的翼身融合布局飞机计算方法[J]. 航空动力学报, 2021, 36(6): 1169-1176.
- [20] 徐诸霖,达兴亚,范召林,等. 一种适用于进气道/风扇一体化计算的体积力模型[J]. 推进技术, 2019, 40(4): 732-740.
- [21] 郭晋,胡骏,屠宝锋. 多级轴流压气机彻体力模型:理论方法及简化应用[J]. 航空动力学报, 2018, 33(8): 1954-1963.

收稿日期:2023-12-07

(上接第 119 页)

- [35] NGUYEN MINH D, DUONG TRONG L, MCEWAN A. An efficient and fast multi-band focused bioimpedance solution with EIT-based reconstruction for pulmonary embolism assessment; a simulation study from massive to segmental blockage[J]. Physiological Measurement, 2022, 43(2): 025003.
- [36] KUK W J, WRIGHT N R. Bedside diagnosis of pulmonary embolism using electrical impedance tomography: a case report[J]. A&A Practice, 2022, 16(7): e01606.
- [37] WANG X C, ZHAO H, CUI N. The role of electrical impedance tomography for management of high-risk pulmonary embolism in a postoperative patient[J]. Frontiers in Medicine, 2021, 8: 773471.
- [38] PRINS S A, WELLER D, LABOUT J A M, et al. Electrical impedance tomography As a bedside diagnostic tool for pulmonary embolism[J]. Critical Care Explorations, 2023, 5(1): e0843.
- [39] WU Y, CHEN B, LIU K, et al. Shape reconstruction with multiphase conductivity for electrical impedance tomography using improved convolutional neural network method[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(7): 9277-9287.
- [40] BORSIC A, HALTER R, WAN Y, et al. Electrical impedance tomography reconstruction for three-dimensional imaging of the prostate[J]. Physiological Measurement, 2010, 31(8): S1-16.
- [41] TAN H, ROSSA C. Electrical impedance tomography for robot-aided internal radiation therapy[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2021, 9: 698038.
- [42] HUBBARD R A, KERLIKOWSKE K, FLOWERS C I, et al. Cumulative probability of false-positive recall or biopsy recommendation after 10 years of screening mammography: a cohort study[J]. Annals of Internal Medicine, 2011, 155(8): 481-492.
- [43] AKHTARI-ZAVARE M, LATIFF L A. Electrical impedance tomography as a primary screening technique for breast cancer detection[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention, 2015, 16(14): 5595-5597.
- [44] LEE J, GWEON S, LEE K, et al. A 9.6-mW/ch 10-MHz wide-bandwidth electrical impedance tomography IC with accurate phase compensation for early breast cancer detection[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2021, 56(3): 887-898.

收稿日期:2025-07-26