航空发动机及燃气轮机整机性能仿真综述

董 威1,尹家录2,郑培英2,程显达1

(1.上海交通大学机械与动力工程学院,上海 200240;2.中国航发沈阳发动机研究所,沈阳 110015)

摘要:整机总体性能仿真是航空发动机及燃气轮机仿真的重要组成部分,在航空发动机及燃气轮机的设计制造和使用全寿命 周期內发挥着重要作用。综合70多年来航空发动机及燃气轮机总体性能仿真的发展成果,梳理了各时期总体性能仿真的发展历 程。从基本方法、模型精细化、求解算法和修正方法等角度,分析了国内外以部件级模型为代表的基于物理机理的总体性能仿真 方法研究现状;探讨了以人工神经网络、支持向量机和深度学习为代表的人工智能算法在总体性能仿真中的应用现状;介绍了机 载模型、机理-数据混合模型和多维度模型基本方法和主要成果。基于目前的研究成果和技术发展趋势,认为航空发动机及燃气 轮机总体性能仿真应向物理机理模型更精细化、人工智能技术更深入和应用模型构建更为规范化的方向发展。

Review: Engine-level Performance Simulation of Aeroengine and Gas Turbines

DONG Wei¹, YIN Jia-lu², ZHENG Pei-ying², CHENG Xian-da¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Engine-level performance simulation is an integral aspect of aeroengine and gas turbine simulation, and plays a crucial role throughout the entire life cycle of design, manufacturing, and operation. This paper presents a comprehensive analysis of the development process of aeroengine and gas turbine performance simulation in each historical stage, building upon the accomplishments made over the past 70 years. The research status of physical mechanism performance simulation, primarily represented by the component-level model, was examined from various perspectives including basic methods, model refinement, solution algorithms, and correction methods. Furthermore, the application of artificial intelligence algorithms, such as the artificial neural network, support vector machines, and deep learning, in engine-level performance simulation, was discussed. The paper also provided an overview of the fundamental methods and key achievements of on-board models, mechanism-data hybrid models, and multi-dimensional models. Finally, based on current research findings and technological development trends, it is believed that the engine-level performance simulation of aircraft engines and gas turbines should develop towards a more refined physical mechanism model, deeper artificial intelligence technology, and more standardized application model construction.

Key words: aeroengine; gas turbine; engine-level performance; simulation; physical mechanism model; artificial intelligence; application model

0 引言

随着仿真技术的进步,航空发动机及燃气轮机的 设计正逐渐从"试验设计"向"预测设计"转变。实践 证明:采用先进的设计仿真工具可大幅降低燃气轮机 研发费用,缩短研制周期,降低试车风险¹¹⁻²¹。

收稿日期:2023-06-15 **基金项目:**航空动力基础研究项目资助 作者简介:董威(1970),男,教授。 总体性能仿真是航空发动机及燃气轮机仿真的 重要组成部分,其主要任务是预测污染物排放、成本 寿命及给定燃油流量所发出的推力或轴功率,并确定 机组在稳态和瞬态条件下,在整个包线范围内能否稳 定安全地运行¹³。整机总体性能仿真在航空发动机 及燃气轮机设计制造使用的全寿命周期内均发挥重

引用格式: 董威, 尹家录, 郑培英, 等. 航空发动机及燃气轮机整机性能仿真综述[J]. 航空发动机, 2023, 49(5): 8-21. DONG Wei, YIN Jialu, ZHENG Peiying, et al. Review: engine-level performance simulation of aeroengine and gas turbines[J]. Aeroengine, 2023, 49(5): 8-21.

要作用[4-5]:

(1)确定概念设计的技术可行性。在新机组的概 念设计阶段,需要对其进行充分的热力学分析、经济 性能分析及畑分析,以确定动力循环的技术可行性, 分析潜在的技术风险,避免不必要的资源浪费¹⁵⁻⁷¹。

(2)指导部件设计。在初步设计阶段,需要根据 原始设计目标,结合当前技术水平,利用设计点计算 方法确定各部件的设计参数,完成各部件的初步设 计^[8-9]。随后,为使燃气轮机能够在全包线范围内安 全稳定运行,还需要通过仿真模型计算燃气轮机非设 计点以及瞬态的性能表现,进一步指导部件的非设计 点设计,从而保证燃气轮机满足设计目标要求。

(3)制定控制策略、验证控制系统。燃气轮机部 件设计完成后,需要根据实际部件特性,利用仿真模 型分析燃气轮机在不同工况下的运行特性,确定各控 制参数对燃气轮机在不同工况下的运行特性,确定各控 制参数对燃气轮机的性能影响规律,从而制定合理的 控制策略,以保证稳态和瞬态运行时燃气轮机满足设 计需求^[10]。在控制策略确定后,需设计相应控制算 法,通过仿真模型与控制算法的联合仿真确定控制算 法参数,验证控制算法的有效性^[11-12]。控制系统硬件 开发完成后,则可通过半物理仿真,利用仿真模型模 拟真实燃气轮机运行状态,进一步验证控制器和执行 机构硬件的有效性和可靠性,从而有效规避试验风 险,缩短研发周期^[13-14]。

(4)指导台架试验。在燃气轮机样机开发完成后 的试验测试阶段,首先通过仿真模型计算试验条件下 的燃机性能,根据燃气轮机指标需求和安全工作需 求,对其起动规律、供油规律和导叶调节规律等进行 合理调整,以避免潜在的喘振、超温和熄火风险,从而 有效规避试验风险,缩短研发周期。

(5)用作机载模型。由于航空发动机及燃气轮机运行条件恶劣、安装空间受限等原因,实际安装在其上的传感器很少,无法满足控制以及监测系统的需要。将仿真模型安装在燃气轮机控制系统内,可实现燃气轮机各工作状态下不可测参数的实时估计,并为可测参数提供解析冗余,从而满足控制和监测系统需求,实现燃气轮机稳态和动态性能的实时有效调整^[15-17]。

(6)用于运行和维护。在运行阶段,用户需要利 用仿真模型预测不同环境条件等因素下燃气轮机输 出功率和热效率,从而合理调整生产计划^[18-19]。航空 发动机及燃气轮机维护策略正经历从"事后维护"、 "定期维护"到"视情维护"的转变^[20],要求对其健康状态进行实时检测,诊断当前和潜在的故障,预测剩余 使用寿命。通过仿真模型可计算不同故障模式下的 发动机性能参数,预测其性能退化规律,为其故障诊 断^[21]和寿命预测^[22]提供依据。

整机总体性能仿真与航空发动机及燃气轮机设 计运维的各阶段都紧密相关。因此,国内外学者在这 一领域开展了大量研究工作。本文梳理了总体性能 仿真的发展历程,分析基于物理机理和基于数据驱 动的仿真方法研究现状,探讨应用于不同场景的总 体性能仿真方法,在此基础上对未来发展趋势进行 展望。

1 总体性能仿真的发展历程

从20世纪50年开始,整机性能仿真就被用于燃 气轮机研发工作。Otto等[23]采用1阶线性微分方程构 建单轴涡喷发动机的动态模型,用于评估发动机转速 随燃油流量的变化特性;Dugan等[24]构建了双轴发动 机仿真模型,用于分析加减速时的部件特性变化规 律。60年代,美国空军航空推进实验室基于部件匹 配技术开发了SMOTE程序^[25],但该程序局限于稳态 性能计算,在此基础上继续完善的SMITE 仿真程序提 高了收敛精度和稳定性;Fishbach等^[26]在SMOTE程序 的基础上继续改进,开发了GENENG和GENENGII程 序;Sellers等^[26]在GENENG程序的基础上发展推出了 DYNGEN 程序,该程序除了保留 GENENG 程序的稳 态计算能力外,最重要的是加入了过渡态计算模块, 考虑了部件的转动惯量和容积效应,并采用欧拉校正 法进行微分方程的求解,提高了过渡态仿真的精度; 刘易斯研究中心^[27]在NEPCOMP程序的基础上通过集 成部件参数优化技术及变几何部件仿真技术,发展了 NNEP程序。80年代,在NNEP程序基础上改进完善 的NNEPEQ程序^[28]和NNEP89程序^[29]分别具有化学离 解计算和复杂化学组分计算的能力;同时期 Daniele 等^[30]开发的DIGTEM程序适用于结构较为复杂的燃 气轮机,不足之处是在热力计算过程中采用了简单的 物性计算方法; Pilidis^[31]基于热力循环过程和部件特 性提出了燃气轮机稳态和过渡态预估模型,对包括单 转子、双转子、3转子和带有外涵道的双转子、3转子 航空燃气轮机在内的共计11种结构进行了模拟,在 性能仿真时除了采用绝热边界条件,还考虑了过渡态 过程中叶尖间隙、传热、封严等对部件特性的影响; Sanler等^[32]为燃气轮机过渡态仿真开发了 DEAN 程 序,DEAN 具备 DIGTEM 的全部功能,并采用4种不同 的算法求解定义模型的1阶常微分方程组,包括2阶 Runge-Rutta 法、4阶 Runge-Rutta 法、Adms 预估校正 器和刚性系统的 Gear法等。

进入20世纪90年代后,随着计算机技术的进步, 燃气轮机性能仿真的一种发展趋势是面向对象建模, 可有效解决原有建模体系效率低下的问题。Drummond 等^[33]在 DIGTEM 程序的基础上采用 C++语言按 照面向对象的理念对其进行了改写,虽然类属层次结 构较为合理,但由于体系结构局限于DIGTEM程序, 扩展能力不足;Curlett 等^[34]则对 DIGTEM 程序进行了 彻底改写,同时兼顾了未来维护和发展需要,具备了 现代意义上面向对象建模的特点;Palmer等[35]开发了 模块化仿真代码TURBODYNE,燃气轮机和控制系统 的配置可通过相应的"CODEWORDS"模块进行简单 描述,TURBOTRANS则可用于稳态或过渡态性能仿 真:Garrard^[36]开发了燃气轮机1维动态仿真程序,基 于隐式和显示求解器求解了1维时间相关的欧拉方 程;窦建平^[37]采用面向对象的设计方法,基于C++语 言编写了燃气轮机部件、工具、算法和图形界面类库, 建立了燃气轮机稳态和过渡态仿真模型,实现了可重 用仿真平台框架的目标;周文祥^[38]对航空燃气轮机及 控制系统面向对象的建模方法进行了深入研究,涉及 部件及控制系统模型、地面及高空起动模型、控制算 法等;徐鲁兵¹⁹⁹按功能将各部件进行模块化分解,设 计了可二次开发的航空燃气轮机仿真框架,可以完成 航空燃气轮机的稳态和过渡态性能计算。

与此同时,一些成熟的商业软件逐步发展起来,

其功能各有千秋。Kurzke等[40]开发的GasTurb软件可 根据不同类型燃气轮机进行设计点和非设计点性能 计算,具有友好的用户界面和便捷的数据处理功能, 已逐渐成为国际市场上的主流性能仿真软件。基于 Java语言的仿真框架 Onyx 能够对燃气轮机进行从零 维性能到3维流动的不同精细化层度的模拟[41-42]。基 于DYNGEN 程序发展而来的GSP软件[43] 允许用户通 过拖拽的方式组合各部件,实现了任意结构形式燃气 轮机性能模拟,已被用于各类燃气轮机非设计点性能 分析[44]、排放计算[45]、控制系统设计和故障诊断领域, 更加先进的其他应用案例包括控制逻辑验证、热端部 件热负载计算和分析等。PROOSIS 软件[46]是专门用 于燃气轮机性能仿真的工具包,用户可根据标准部件 数据库开发更加复杂和满足特定需求的部件模型。 NPSS项目^[47]立足于推进系统数值仿真,主要应用领 域包括燃气轮机及火箭发动机推进系统。当前代表 性的商业软件的主要功能和优缺点见表1。

基于商业软件二次开发既可保留商业软件普遍 具有的鲁棒性好、操作人性化的优点,又满足了用户 特定需求。Sethi^[48]基于 PROOSIS标准部件数据库建 立了不同燃油种类的多维度流体物性参数表,改进了 模型的仿真精度;Martin等^[49]基于 Simulink 搭建了双 轴燃气轮机过渡态非线性仿真模型,验证了1个具有 无扰动转换和抗积分饱和功能的增益可调控制器;张 书刚等^[50]基于 GasTurb 及其源代码,利用过渡态链接 库技术实现了过渡态仿真,并建立了22种航空燃气 轮机部件级 Simulink 模型库。

随着燃气轮机结构形式的愈发复杂,基于物理模型的仿真需要考虑的因素越来越多,获得准确发动机性能模型的难度也越来越大。过去几年间,随着大数据和人工智能技术的发展,人工神经网络等数据驱动

软件	主要功能	优点	缺点
Gasturb	(1)稳态和瞬态性能仿真(2)压气机和涡轮特性处理(3)参数优化	(1)用户界面友好 (2)程序稳定性高	二次开发困难
PROOSIS	(1)稳态和瞬态性能仿真(2)参数优化	(1)可与控制、燃油、电气等系统等联合仿真(2)建模方式灵活	创建库时需要使用特有建模语言
GSP	(1)稳态和瞬态性能仿真(2)故障分析	(1)建模方式灵活	需要输入较多参数才能完成计算, 非专业人员不友好
T-MATS	(1)稳态和瞬态性能仿真	(1)开源软件	功能相对较少
NPSS	(1)稳态和瞬态性能仿真(2)多维度仿真	(1)易于二次开发(2)可用于多维度仿真	仅对NASA相关机构开放

表1 主要商业软件对比

的方法为燃气轮机建模提供了新的思路。发展至今, 燃气轮机总体性能预测仿真主要有2种方法,即基于 物理机理的方法和基于数据驱动的方法。

2 基于物理机理的性能仿真方法研究现状

基于物理机理的模型又被称为白盒模型或者第 一性原理模型,根据燃气轮机内部的流体动力学、工 程热力学等相关物理知识构建,并结合一定的数学算 法进行求解。

2.1 基本的建模方法

在基于物理机理的模型中,部件级模型是目前主 流的且较为成熟的总体性能仿真方法,这种方法首先 根据每个部件的特性建立其相应的物理模型,随后根 据部件间协同工作关系实现整机性能求解。通常可 将燃机运行状态分为稳态和瞬态,稳态是指燃机处于 稳定运行的状态,瞬态则是指燃机处于起动、关闭、加 减速、负载变化和环境条件变化导致的过渡运行状 态。因此部件级模型也分为稳态求解和瞬态求解。 在稳态求解时,基本的部件模型包括进气道、压气机、 燃烧室、涡轮和排气系统等,对于瞬态计算,还应包括 转子动力学和容积动力学模型等。

其中,压气机和涡轮的准确建模是部件级模型的 关键。一种有效的建模方法是采用描述了压比、换算 流量、换算效率以及换算转速之间的关系的压气机和 涡轮部件特性图^[51]。当部件特性图缺失时,可以采用 缩放法^[52]、级叠加法^[53]、回归法^[54-55]等对特性图进行构 造或替代。缩放法是已知其他型号压气机或涡轮特 性图后,通过对特性图进行缩放作为当前型号部件特 性图;级叠加法是根据空气动力学及计算流体力学相 关理论,计算单级叶片特性,随后通过逐级计算获得 部件整体特性;回归法是假定部件图中的特性曲线为 高次多项式或椭圆函数等数学形式,基于实测数据对 待定系数进行拟合。此外,还有一些研究使用人工神 经网络等机器学习算法模拟部件特性^[56]。

2.2 模型的精细化

在部件级模型的基础上,航空发动机及燃气轮机 性能仿真不断朝着更加精细化方向发展,主要研究方 向包括热惯性建模,叶尖间隙变化建模,执行机构建 模等。

热惯性是影响发动机瞬态性能的重要因素,当燃 机处于变工况运行时,与燃气直接接触的金属部件与

燃气之间存在较大温差,会在短时间内吸收或放出大 量热量。热惯性会导致燃气温度、叶尖间隙和冷气流 量等发生改变,从而对发动机瞬态性能造成显著影 响,严重时会引发喘振[57]。Khalid等[58]率先开发了考 虑热惯性的总体性能仿真模型,用于提升涡扇发动机 瞬态性能仿真精度;为了表征热惯性对发动机性能的 影响,Jaakko^[59]提出了针对热惯性的部件特性修正方 程;Vieweg^[60]等利用仿真模型对发动机实测数据进行 预测,发现在模型中考虑热惯性对于提高模型精度是 必要的:在最近的研究中,Li等[61-62]建立了一种新颖 的针对航空发动机压气机、涡轮和燃烧室的简化热惯 性模型,并与主要气路部件模型集成,实现在概念和 初步设计阶段对发动机进行更精确的瞬态性能模拟: Chen 等^[63]在基于模型的故障诊断系统中加入了热惯 性模型,用以提升故障诊断精度。复杂循环燃气轮机 通常使用各种类型的换热器实现间冷、回热等功能, 与其他部件相比,换热器具有更大的热容和换热面 积,因此对燃气轮机瞬态性能的影响更为明显。 Visser等^[64]采用热网络方法构建了换热器的1维热惯 性模型,并用于微型燃气轮机仿真中;Kim等^[65]采用 准稳态的方法构建分段的换热器模型,并通过运行数 据确定其热惯性。除了部件的热惯性外,温度传感器 在燃气轮机瞬态过程中也存在时间延迟;Kim 等^[66]采 用集总参数法构建了热电偶热惯性模型,用于模拟航 空发动机温度传感器响应。

在燃气轮机运行期间,热惯性、离心力以及磨损 等因素都会导致动叶叶尖间隙发生改变,进而导致部 件流量和效率降低。叶尖间隙的准确评估通常需要 结合试验或有限元分析手段。在总体性能仿真中,通 常基于试验数据拟合或基于高维模型降维得到叶尖 间隙模型。Nielsen等^[67]利用轮缘试验数据对叶尖间 隙变化导致的部件效率、流量和空气系统流量变化进 行了修正,从而获得了比原方案更精确的瞬态性能仿 真结果;Merkler等^[68]讨论了3种瞬态过程中的传热及 其导致的间隙变化的建模方法,包括替换结构模型、 脉冲响应模型和状态空间模型,通过比较认为状态空 间模型应用潜力最大;朱之丽^[69]给出了一种估算燃气 轮机加、减速过程中叶尖间隙及效率随时间变化的简 化方法;Kratz^[70]分析了叶尖间隙变化对发动机性能的 影响,用于主动间隙控制的研究中;Chapman等^[71]提出 了一种1维的高压涡轮叶尖间隙模型,并将其集成在 性能仿真程序中;杨阳等^[72]在Chapman的研究基础上, 结合机器学习模型提出了叶尖间隙实时预测方法。

执行机构建模也是决定燃气轮机仿真精度的重 要因素。燃气轮机主要的执行结构包括燃油系统、可 调导叶、发动机尾喷管、放气阀等。执行机构对发动 机性能的影响主要表现在从控制器发出指令到控制 执行存在一定的时间延迟。Ma等[73]开发了用于燃气 轮机起动时的燃料控制系统瞬态模型; Wang 等[74]建 立了燃油系统中各个液压元件的物理模型,并集成到 发动机瞬态计算模型中,分析了燃油系统延迟对发动 机性能造成的影响;Kim等^[75]利用他们开发的瞬态模 型,分析了燃料流量和可调导叶的时间滞后影响:张 亚东等师使用2个连续的1阶环节分别表示燃料进入 燃烧室的延迟以及燃烧过程的延迟,并分析了不同延 迟时间对动力涡轮转速的影响; Mohammadian 等^[77]在 仿真程序中对可变入口导叶、压气机放气阀和燃料阀 进行了模拟,以精确捕获它们对燃气轮机瞬态行为的 影响;Barbosa等^[78]模拟了具有可变入口导叶的小型 燃气轮机模型,用于实时控制传递函数的校准。

此外,进气畸变^[79]、压气机级间引气^[80]、二次空气 系统^[81]、旋转失速^[82]、燃料特性^[83]、积冰^[84]和性能退 化^[85]等诸多因素也被考虑在总体性能仿真中,以提高 燃机性能仿真精度。

2.3 求解算法

发动机性能的稳态求解通常基于"平衡技术"实 现,即首先假设部分参数,然后根据流量平衡、功率平 衡和转速平衡等条件构造非线性方程组,通过非线性 方程组求解假设参数,完成性能计算。常用的非线性 方程组求解方法包括 Newton - Raphson 算法^[75]和拟牛 顿法^[86]等。在瞬态性能求解时,有2种主要算法:连 续质量流量(Constant Mass Flow, CMF)算法或迭代算 法、部件间体积(Intercomponent Volume, ICV)算法或 无迭代算法。CMF算法是稳态算法的一种延伸,假 设在燃机瞬态运行时的每个时间步内,流量始终处于 平衡状态,通过在每个时间步内迭代流量连续方程构 造的非线性方程组实现性能求解:ICV则是一种显式 的求解方法,假设瞬态运行过程中始终不满足流量平 衡条件,并在每个部件后添加了1个控制容积,通过 容积动力学方程和转子动力学方程构造了描述燃气 轮机瞬态运行过程的常微分方程组,通过欧拉法[87]或

者龙格库塔法^[88]等实现性 能求解。ICV方法作为一 种显式求解算法,过大的 时间步长可能带来结果失 真和数值不稳定等问题; 而隐式的CMF方法则在单 个时间步内有着更多的计 算量。通常这2种方法的



计算效率相当^[89],但ICV方法的1个优点是在急剧的 瞬态过程中,能够在部件特性图上获得更平滑的操作 线,如图1所示^[90]。此外,还有一些改进的算法被提 出,用于提高CMF方法或ICV方法的性能^[61,91]。

2.4 模型修正技术

模型修正是指通过调整燃机模型中未知且不可 测的组件参数(如部件流量、效率退化系数)以匹配可 测参数(如沿程温度和压力)的过程。有多个原因促 进了模型修正技术的发展。对于需要开发燃气轮机 模型的设备用户,由于缺少部件特性图,只能根据已 知的其他型号燃机部件信息进行重构,导致仿真结果 与试验数据的显著偏差。对于燃气轮机制造商,一方 面,最精细的模型也无法充分反映真实复杂的实际物 理过程;另一方面,由于部件制造安装偏差、性能退化 等原因,即使是相同型号的燃气轮机性能也会存在差 异。这造成了燃气轮机模型与实测数据之间不匹配。 因此在将燃气轮机模型用于性能预测之前,有必要使 用性能修正技术缩小仿真与预测之间的差异。典型 的模型修正方法如图2所示。首先使模型处于与真 实燃机相同的环境条件和控制参数u下,随后通过一 定的迭代优化算法,调整模型中参数X,使模型预测 参数Y与实测参数Y之间的偏差达到最小,完成模型 的修正。



图2 性能修正流程[92]

当前主要的修正方法是对压气机和涡轮特性曲

线进行调整,这包括"缩放"方法和"回归"方法。在 "缩放"方法中,压气机和涡轮特性曲线上的参数(包 括流量、压比和效率)都被乘上不同的缩放系数,通过 调整部件缩放系数实现模型的修正^[93]。Li等^[94]开发 了1套应用于单转子涡轴发动机的性能修正方法,利 用遗传算法搜索使预测和实测差异最小的缩放因子, 从而实现模型的修正。在后续的研究中Li等^[95]又采 用最小二乘法对遗传算法进行改进,从而可以确定性 地选择搜索范围,提高修正效率。Kim等^[66]在部件缩 放的基础上,通过在热电偶建模中引入新的传热校正 因子,以提高瞬态模型精度。此后,Kim^[96]通过数据聚 类技术,用来从时间序列适应因子中排除物理上不合 理的数据点,使其可以应用于存在大量实测数据的燃 气轮机模型修正。

"回归"方法与第2.1节中部件特性建模中的回归 法相似,直接对特性曲线进行重构,重构曲线的数学 形式则通过试验数据调整。Kong等^[54]假定压气机同 一条换算转速线上的流量与压比呈3阶方程形式,利 用遗传算法最小化误差从而寻找性能修正过程中的 方程系数;Tsoutsanis等^[55,92]假设压气机中转速线下的 压比与流量关系呈椭圆函数,效率则是流量的3阶多 项式,随后利用遗传算法来确定椭圆函数和多项式的 系数。此后,Tsoutsanis等^[97]又分别利用5次多项式 和三角函数表征涡轮特性图中压比与流量的关系以 及效率与压比的关系,并实现了模型瞬态仿真精度的 提升。

3 基于数据驱动的性能仿真方法研究现状

数据驱动的模型又被称作"黑盒模型",它利用实 测或模拟数据来训练模型,自动发现输入与输出之间 的非线性关系,而无需明确的专业领域知识^[98]。目 前,应用于燃气轮机性能仿真的数据驱动模型主要包 括人工神经网络、支持向量机和深度学习模型等。除 此之外,迁移学习^[99]、集成学习^[100]等方法也被用于性 能仿真中。

3.1 人工神经网络

人工神经网络是1个试图模仿大脑神经结构的 计算模型,它由多个相互连接和分层的神经元组成, 在每个神经元中均被添加激活函数以增加神经网络 模型的非线性。神经网络中的每个神经元通过连接 到其他神经元,这些连接的权重会随着学习的进行而 相应调整,从而实现对输入输出映射关系的逼近。

全连接神经网络是一种经典的神经网络模型,它 由1个输入层、1个或多个隐藏层和1个输出层构成。 全连接神经网络中的神经元采用层间无连接、层间全 连接的方式连接,计算时从输入层到输出层依次计 算。全连接神经网络在燃气轮机建模方面已经得到 了广泛的应用。Nikpey等^[101]利用Turbec T100微型燃 气轮机测试数据训练全连接人工神经网络模型,模型 的输出包括功率和关键位置的压力和温度。结果表 明:神经网络模型预测结果与试验结果吻合良好;Liu 等^[102]分别使用人工神经网络和高维模型表示(High Dimensional Model Representation, HDMR)方法预测 重型燃气轮机中压气机和涡轮的特性,并将其嵌入整 机仿真程序中。结果表明这些模型输出与实测结果 非常吻合:Talaat等^[103]利用热力学模型生成的燃机退 化性能数据训练了1个人工神经网络模型,并将其用 于实际发动机部件性能退化预测;Sabzehali等^[104]利用 深层全连接神经网络构建了PW100发动机状态参数 与发动机推力、耗油率和畑效率的映射关系,以用于 优化发动机设计参数。

另一种燃气轮机建模中常用的神经网络模型是 具有外部输入的非线性自回归神经网络(Nonlinear Auto-Regressive model with Exogenous Inputs, NARX) 模型。与全连接神经网络相比,NARX 最大的特点是 其输入包含了网络输出的反馈,从而可以反映系统的 动态特性,因此可以更好地用于动态系统建模中。 Asgari 等^[105]开发了模拟重型燃气轮机起动过程的 NARX 模型,表明 NARX 可以较好的捕捉燃气轮起动 期间的动态特性;Bahlawan等[106]在此基础上进一步 改进了模型训练过程,使NARX可以更高精度地模拟 燃机起动过程;Giorgi等[107]利用NARX预测瞬态运行 条件下的航空发动机排气温度,表明NARX针对不同 飞行任务所做的预测非常可靠,且可以对排气温度进 行超前预测; Alsarayreh 等^[108]比较了 NARX 和卷积神 经网络(Convolutional Neural Network, CNN)在燃气 轮机过渡态模拟时的精度,表明二者均具备较高精 度,并且NARX 略优于卷积神经网络; Mehrpanahi 等^[109]通过NARX模型利用状态监测数据来估计燃气 轮机起动操作期间的轴转速。此外,燃气轮机性能仿 真常用的神经网络模型还包括径向基神经网络[110]、 极限学习机[111]、广义回归神经网络[112]和动态神经网

络[113]等。

3.2 支持向量机

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是一 种常用的机器学习算法。通过寻找1个决策超平面 来实现样本的划分,划分原则是使样本数据距离决策 超平面的几何间隔最大化。当样本线性不可分时,支 持向量机通过核方法将样本数据映射到高维空间,以 实现样本的非线性划分。通过构造合理的损失函数, 支持向量机可用于解决回归问题,用于回归问题的支 持向量机模型又被称为支持向量回归(Support Vector Regression, SVR)。Zhang等^[114]采用支持向量机回 归方法建立了航空发动机主要性能参数的预测模型 来监测航空发动机的健康状况,所构建的模型与非线 性基线模型相比最大相对误差不超过±0.3%: Ren^[115] 等提出了一种批量学习与在线学习相结合的新型支 持向量回归模型训练机制,以提高模型效率和精度; Nieto等^[116]将支持向量机模型用于预测发动机剩余使 用寿命,并利用粒子群优化算法调整支持向量机模型 中的超参数。

3.3 深度学习方法

深度学习是机器学习的1个分支,采用具有多个 隐藏层的神经网络结构,与浅层网络相比,深度网络 具有更强的非线性学习能力。常用的深度学习模型 包括卷积神经网络和循环神经网络(Recurrent Neural Network, RNN)。卷积神经网络是一种含有卷积 操作并具有深度结构的前馈神经网络,其基本结构包 括输入层、卷积层、池化层、全连接层和输出层。其 中,卷积层是卷积神经网络的核心,它利用卷积核与 输入矩阵进行点积运算,这种方式可以在保证特征学 习能力的基础上显著减少模型中训练参数数量。循 环神经网络是递归神经网络的一种推广,它在传统神 经网络的基础上,增加了自身输出指向输入的循环连 接,从而具备了时序建模的能力^[117]。长短期记忆网 络(Long Short-Term Memory, LSTM)和门循环单元网 络(Gated Recurrent Unit, GRU)是循环神经网络的2 个重要变体。LSTM和GRU通过添加长期记忆单元, 来解决传统RNN中难以学习长期序列以及梯度爆炸 的问题[118-119]。

目前深度学习在燃气轮机建模领域已经取得了 一定的研究成果。Asgari1等^[120]使用循环神经网络构 建了单轴燃气轮机模型,生成的模型针对测试数据集 进行了验证,表明 RNN模型对输入参数变化的响应 以可接受的精度跟随系统输出;Hipple等^[121]比较了基 于 LSTM 方法和基于物理方法的燃气轮机性能预测 精度,表明与传统的基于物理方法的模型相比,LSTM 方法在预测精度上具有显著优势;Chang等^[122]构造了 结合 CNN 和 RNN算法的时间序列分析模型用于预测 燃气轮机排气温度,并分别采用 LSTM 和 GRU算法以 获得更鲁棒和准确的模型;Aygun等^[123]结合 CNN 和 LSTM 混合算法,用于预测涡扇发动机排放参数; Omer等^[124]建立了 SVM 和 LSTM 模型,用于估计涡扇 发动机在起飞阶段的排放参数和烟效率。

4 其他性能仿真方法

除了部件级模型和数据驱动模型外,研究人员也 开发了其他类型的性能仿真模型,以满足不同情景需 求,代表性的包括机载模型、机理-数据混合模型和 多维度模型等。

4.1 机载模型

机载模型主要应用于控制系统、监测系统以及健 康管理等。在这些场景下,需要计算资源小、计算效 率高的模型,以满足实时计算需求。分段线性模 型[125] 是一种常用的机载模型,通过偏导数法、拟合法 等方法在一系列稳态点附近将部件级模型线性 化[126],随后通过插值的方法确定2个平衡点之间的性 能参数。但由于平衡点位置发生的切换是刚性的,分 段线性模型在平衡点处动力学不光滑16,一种改进方 法是采用线性参数变化(Linear Uarameter Varying, LPV)模型^[127-128]。LPV模型中系统状态方程矩阵中的 元素是调度参数的函数,并通过可测的调度参数反映 系统的非线性。除此之外,机器学习算法也被应用于 机载模型的构建。对此,可利用燃气轮机实测数据直 接训练机器学习模型[129],也可以使用部件级模型产 生的数据训练机器学习模型,训练后的模型作为部件 级模型的代理模型使用[130]。

由于发动机安装公差以及性能退化等原因,机载 模型可能无法准确计算发动机性能。因此,根据传感 器数据对模型实时自适应调整是机载模型的另一关 键技术^[131]。自适应过程通常需要在模型中预先定义 表征发动机状态的参数,随后利用实测数据,通过参 数辨识的方法对所定义的参数进行实时估计。常用 的参数辨识方法包括气路分析法^[62]、卡尔曼滤 波[132-133]、粒子滤波[134]和遗传算法[135]等。

4.2 数据-机理混合模型

出于物理机理模型精度不足、数据驱动模型泛化 性能差等原因,一些研究人员构建了将2种模型相结 合的混合模型。混合模型最早被应用于机载模型中, Volponi^[136]提出了将分段线性模型和多层感知机结合 的增强型机载模型,在训练阶段多层感知机学习分段 线性模型和实测数据之间的偏差,随后在应用阶段将 结果补偿到分段线性模型中,结果表明混合模型具有 更高的精度和鲁棒性。在最近几年,Xu等^[137]提出了 一种将部件级模型和极限学习机结合的混合建模方 法,用于提高涡扇发动机稳态和瞬态的仿真精度;李 景轩等^[138]设计了3种机理-数据混合模型结构,结果 表明,基于燃机整体并联补偿的混合模型结构对截面 参数的仿真精度最高。

4.3 多维度模型

由于实际燃气轮机内部流动是3维过程,零维的 部件级模型在反映3维效应时不可避免地带来信息 丢失。因此,一些研究通过多维仿真的方法,将高维 的部件模型嵌入到零维程序中,以提高仿真精度。 Reitenbach等^[139]在部件级模型中添加了高压压气机2 维计算模型,用于优化可变导叶调节规律;Tang等^[140] 将3维部件模型与零维模型耦合,研究了低雷诺数对 发动机性能的影响;叶纬^[141]在iSIGHT环境下将计算 流体力学程序和零维的燃气轮机性能计算程序相结 合,开发了混合维数仿真模型,以反映内部流动细节, 提高部件特性的计算精度;宋甫等^[142]将风扇部件的2 维仿真模型嵌入到部件级模型中,并对比了不同的耦 合方案的算法差异。

5 展望

5.1 物理机理模型的更精细化

模型的精细化是物理机理模型精度提升的重要 手段。这需要对真实复杂物理过程进行更详细的分 析,将实际高维信息充分反映在0维的仿真模型当 中,并通过与模型修正技术的结合,使精细化的模型 参数充分反映物理实质,以提升仿真精度。此外,整 机全3维仿真是模型精细化的1个重要发展方向,目 前稳态的整机流场全3维仿真已可以实现^[146-148],但其 实际工程应用仍有待于仿真技术的进步和计算机性 能的提升。

5.2 人工智能技术的更深入应用

目前人工智能技术已经在众多领域取得了惊人 的成就,并仍在快速蓬勃发展。将更先进的人工智能 方法引入到航空发动机及燃气轮机性能仿真当中,可 促进相关领域取得更大的乃至颠覆性的发展。另一 方面,目前多数物理机理和数据驱动的混合模型仅是 二者的简单串并联结构,如何将专业知识引入数据驱 动模型,如何在物理机理模型中添加数据驱动方法, 仍需要未来更深入的研究。

5.3 模型构建更为规范化

燃气轮机与电气系统、液压系统和机械系统等共 同构成了相关工业系统,在构建系统整体模型时,不 同专业领域的建模方法有着较大差异。规范化模型 旨在建立统一的规范建模体系以提高建模效率。对 此,常用的方法包括键合图理论和基于模型的系统工 程(Model-Based Systems Engineering, MBSE)等。键 合图理论^[143-144]是一种从能量角度建立系统中的物理 信息流向和相互关系的模型构建方法,适用于各种能 源系统建模。MBSE^[145]则是建模方法的形式化应用, 用于支持从概念性设计阶段开始、持续贯穿到设计开 发以及后来的全生命周期阶段的系统需求、设计、分 析、验证和确认活动。通过规范化的建模方法,有助 于提高复杂大型系统的建模效率,将航空发动机及燃 气轮机仿真建模提升到新的高度。

参考文献:

[1] 曹建国. 航空发动机仿真技术研究现状、挑战和展望[J]. 推进技术,2018,39(5):961-970.

CAO Jianguo.Status, challenges and perspectives of aeroengine simulation technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2018, 39 (5) : 961–970. (in Chinese)

[2] 曹建国.数字化转型下航空发动机仿真技术发展机遇及应用展望 [J].系统仿真学报,2023,35(1):1-10.

CAO Jianguo. Development opportunities and application prospects of aeroengine simulation technology under digital transformation [J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(1): 1–10. (in Chinese)

- [3] Walsh P P, Fletcher P. Gas turbine performance [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004:167–201.
- [4] 王涛. 变几何三轴式燃气轮机总体性能及控制规律研究 [D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2019.

WANG Tao. Characteristic and control law investigations on variable geometry triaxial gas turbine [D].Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2019. (in Chinese)

- [5] Kayadelen H K, Ust Y. Thermodynamic, environmental and economic performance optimization of simple, regenerative, STIG and RSTIG gas turbine cycles [J]. Energy, 2017, 121: 751–71.
- [6] Zhang Q, Ogren R M, Kong S C. Thermo-economic analysis and multi-objective optimization of a novel waste heat recovery system with a transcritical CO₂ cycle for offshore gas turbine application [J]. Energy Conversion and Management, 2018, 172: 212–227.
- [7] Wang C, Yu X, Ha C, et al. Thermodynamic analysis for a novel chemical precooling turbojet engine based on a multi-stage precooling compression cycle [J]. Energy, 2023(1): 262.
- [8] Kumari A, Sanjay. Investigation of parameters affecting exergy and emission performance of basic and intercooled gas turbine cycles [J]. Energy, 2015, 90: 525-536.
- [9] 刘勤,李刚团,黄红超.3外涵变循环发动机循环参数匹配模拟
 [J]. 航空发动机,2016,42(6):51-54.
 LIU Qin, LI Gangtuan, HUANG Hongchao. Matching simulation on

cycle parameter of triple bypass variable cycle engine[J]. Aeroengine, 2016,42(6): 51–54. (in Chinese)

- [10] Kim M J, Kim T S. Integration of compressed air energy storage and gas turbine to improve the ramp rate [J]. Applied Energy, 2019, 247: 363-573.
- [11] 邬健, 余又红, 贺星.2种控制方案对发电用燃气轮机调速性能影响的仿真研究 [J]. 汽轮机技术, 2015, 57(5): 357-359,98.
 WU Jian, YU Youhong, HE Xing. Simulation study on the influence of requlation of gas turbine for power generation based on different control scheme [J]. Turbine Technology, 2015, 57(5): 357-359,98. (in Chinese)
- [12] 张亚东,姜里运,宋少华,等.3轴燃气轮机发电机组突变负载控制策略研究[J].热能动力工程,2016,31(11):26-31,118.
 ZHANG Yadong, JIANG Liyun, SONG Shaohua, et al. Study of the strategies for controlling the abruptly changed load of a three-shaft gas turbine power generator unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(11):26-31,118.(in Chinese)
- [13] Liu Y, Chen Q, Liu S, et al. Intelligent fault-tolerant control system design and semi-physical simulation validation of aeroengine [J]. IEEE Access, 2020, 8: 217204-217212.
- [14] 王冠霖. 燃气轮机发电模块转速控制策略半物理仿真研究 [J]. 热能动力工程, 2016, 31(7): 55-61,134.
 WANG Guanlin. Semi-physic simulation study of the rotating speed control of the power generation module in a gas turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(7): 55-61, 134. (in Chinese)
- [15] 袁春飞,姚华,杨刚. 航空发动机机载实时自适应模型研究 [J]. 航空学报, 2006, 27(4): 561-564.

YUAN Chunfei, YAO Hua, YANG Gang. On board realtime adaptive model of aeroengine [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2006,27(4): 561-564. (in Chinese)

[16] Lu F, Qian J, Huang J, et al. In-flight adaptive modeling using poly-

nomial LPV approach for turbofan engine dynamic behavior [J]. Aerospace Science and Technology, 2017, 64: 223-236.

- [17] Pang S, Li Q, Feng H. A hybrid onboard adaptive model for aeroengine parameter prediction [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 105:1–13.
- [18] De S A, Zubaidy S. Gas turbine performance at varying ambient temperature [J]. Applied Thermal Engineering, 2011, 31 (14–15) : 2735–2739.
- [19] Fernandez D A, Foliaco B, Padilla R V, et al. High ambient temperature effects on the performance of a gas turbine-based cogeneration system with supplementary fire in a tropical climate [J]. Case Studies in Thermal Engineering, 2021, 26:1–13.
- [20] 曹明,黄金泉,周健,等.民用航空发动机故障诊断与健康管理现状、挑战与机遇I:气路、机械和FADEC系统故障诊断与预测 [J].航空学报,2022,43(9):9-41,2.

CAO Ming, HUANG Jinquan, ZHOU Jian, et al. Current status, challenges and opportunities of civil aeroengine diagnostics &health management I: diagnosis andprognosis of engine gas pathmechanical and FADEC [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43 (9): 9-41,2. (in Chinese)

- [21] Fentaye, Baheta, Gilani, et al. A review on gas turbine gas-path diagnostics: state of the art methods, challenges and opportunities [J]. Aerospace, 2019, 6(7):1-13.
- [22] Tahan M, Tsoutsanis E, Muhammad M, et al. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: a review [J]. Applied Energy, 2017, 198: 122-44.
- [23] Otto E W, Taylor I B L. Dynamics of a turbojet engine considered as a quasi-static system [R]. NASA-1951-TR-1011.
- [24] Dugan J F. Component operating trends during acceleration and deceleration of two hypothetical two-spool turbojet engines [R]. NASA-1955-RM-E54L28.
- [25] Mckinney J S. Simulation of turbofan engine description of method and balancing technique [R].USA: Air Force Aero Propulsion Laboratory, 1967.
- [26] Sellers J F, Daniele C J. Dyngen: a program for calculating steadystate and transient performance of turbojet and turbofan engines [M]. USA:National Aeronautics and Space Administration, 1975:2-10.
- [27] Kowalski E J, Atkins R A. A computer code for estimating installed performance of aircraft gas turbine engines [R]. NASA-1979-D180-25481.
- [28] Fishbach L H, Gordon S. Nnepeq—chemical equilibrium version of the Navy/NASA engine program [R]. NASA-1989-TM-105186.
- [29] Plencner R M, Snyder C A. The Navy / NASA engine program (NNEP89): a user's manual [R]. NASA-CR-1991.
- [30] Daniele C J, Krosel S M, Szuch J R, et al. Digital computer program for generating dynamic turbofan engine models (DIGTEM) [R]. NASA-1983-TM-83446.

- [31] Pilidis P. Digital simulation of gas turbine performance [D]. Glasgow: University of Glasgow, 1983.
- [32] Sadler G, Melcher K. Dean-a program for dynamic engine a nalysis [C]//21st Joint Propulsion Conference.USA: AIAA, 2012;1354-1360.
- [33] Drummond C K, Follen G J, Putt C W. Gas turbine system simulation: an object-oriented approach [R]. NASA-1993-TM-106044.
- [34] Curlett B P, Felder J L. Object-oriented approach for gas turbine engine simulation [R]. NASA-1995-TM-106970.
- [35] Palmer J R, Cheng Z Y. Turbotrans: a programming language for the performance simulation of arbitrary gas turbine engines with arbitrary control systems [J]. International Journal of Turbo & Jet Engines, 1985,2(1): 19–28.
- [36] Garrard, Douglas G. Atec: the aerodyanmic turbine engine code for the analysis of transient and dynamic gas turbine engine system operations [D]. Tennessee: The University of Tennessee, 1995.
- [37] 窦建平. 面向对象的航空发动机建模与仿真 [D]. 南京:南京航空 航天大学, 2005.

DOU Jianping. Object-oriented modeling & simulation of aeroengines [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2005. (in Chinese)

[38] 周文祥. 航空发动机及控制系统建模与面向对象的仿真研究 [D]. 南京:南京航空航天大学, 2006.

ZHOU Wenxiang. Research on object-oriented modeling and simulation for aeroengine and control system [D].Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)

[39] 徐鲁兵. 面向对象的航空发动机性能仿真系统设计与实现 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

XU Lubing. Object-oriented design and implementation of aeroengine performance simulation system [D].Xi'an:Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)

- [40] Kurzke J. Gasturb 12: design and off-design performance of gas turbines [R]. Germany: Gasturb GmbH, 2012.
- [41] Reed J A, Afjeh A A. Computational simulation of gas turbines: part 1—foundations of component-based models [J]. Journal of Engineering Gas Turbines Power, 2000, 122(3): 366–376.
- [42] Reed J A, Afjeh A A. Computational simulation of gas turbines: part 2—extensible domain framework [J]. Journal of Engineering Gas Turbines Power, 2000, 122(3): 377–386.
- [43] Visser W P, Broomhead M J. Gsp a generic object-oriented gas turbine simulation environment [R].USA: National Aerospace Laboratory NLR, 2000.
- [44] Visser W P J, Kogenhop O, Oostveen M. A generic approach for gas turbine adaptive modeling [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 128(1): 13–19.
- [45] Visser W, Kluiters S. Modelling the effects of operating conditions and alternative fuels on gas turbine performance and emissions [D]. USA: National Aerospace Laboratory NLR, 1998.
- [46] Bala A, Sethi V, Gatto E L, et al. Proosis-a collaborative venture for

gas turbine performance simulation using an object oriented programming schema [C]//18th ISABE Conference. Beijing: ISABE, 2007: 1357.

- [47] Jones S M. An introduction to thermodynamic performance analysis of aircraft gas turbine engine cycles using the numerical propulsion system simulation code [R].NASA-2007-TM-214690.
- [48] Sethi V. Advanced performance simulation of gas turbine components and fluid thermodynamic properties [D]. UK: Cranfield University, 2008.
- [49] Martin S, Wallace I, Bates D G. Development and validation of a civil aircraft engine simulation model for advanced controller design [J]. Transactions of the ASME A Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(5): 51601–51700.
- [50] 张书刚,郭迎清,陆军.基于GasTurb/MATLAB的航空发动机部件级模型研究[J].航空动力学报,2012,27(12):2850-2856. ZHANG Shugang, GUO Yinqing, LU Jun. Research on aircraft engine component-level modelsbased on GasTurb/MATLAB [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(12):2850-2856. (in Chinese)
- [51] Kurzke J. How to get component maps for aircraft gas turbine performance calculations [C]//ASME 1996 International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition .USA: American Society of Mechanical Engineers, 1996; V005T16A001.
- [52] Alemu T, Fakhruldin B M H, Chalilullah R. Generating gas turbine component maps relying on partially known overall system characteristics [J]. Journal of Applied Sciences, 2011, 11(11): 1885–1894.
- [53] Spina P. Gas turbine performance prediction by using generalized performance curves of compressor and turbine stages [C] //ASME Turbo Expo 2009: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Netherlands: American Society of Mechanical Engineers, 2020: 73-1082.
- [54] Kong C, Ki J. Components map generation of gas turbine engine using genetic algorithms and engine performance deck data [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 129(2): 312– 317.
- [55] Tsoutsanis E, Li Y G, Pilidis P, et al. Part-load performance of gas turbines: part 1 — a novel compressor map generation approach suitable for adaptive simulation [C]//ASME 2012 Gas Turbine India Conference. India: American Society of Mechanical Engineers, 2012: 733-742.
- [56] 路绪坤. 燃气轮机压气机特性曲线拟合研究 [D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院工程热物理研究所), 2021.

LU Xukun. Research on the fitting of gas turbine compressor's characteristic curve [D].Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences), 2021. (in Chinese)

[57] Larjola J. Simulation of surge margin changes due to heat transfer effects in gas turbine transients [C]//Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air. USA: American Society of Mechanical Engineers, 1984:1–5.

- [58] Khalid S, Hearne R. Enhancing dynamic model fidelity for improved prediction of turbofanengine transient performance [C]//16th Joint Propulsion Conference.USA: AIAA, 1980:1–5.
- [59] Larjola J. Simulation of surge margin changes due to heat transfer effects in gas turbine transients [C]//ASME 1984 International Gas Turbine Conference and Exhibit.USA: American Society of Mechanical Engineers, 1984:V002T04A003.
- [60] Vieweg M, Wolters F, Becker R G. Comparison of a heat soakage model with turbofan transient engine data[C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2017: V001T01A011.
- [61] Li Z J, Li Y G, Korakianitis T. Gas turbine transient performance simulation with simplified heat soakage model [C]//ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. Online: American Society of Mechanical Engineers, 2020: V005T06A005.
- [62] Li Z, Li Y G, Sampath S. Aeroengine transient performance simulation integrated with generic heat soakage and tip clearance model [J]. The Aeronautical Journal, 2022, 126(1302): 1265-1287.
- [63] Chen Y Z, Tsoutsanis E, Xiang H C, et al. A dynamic performance diagnostic method applied to hydrogen powered aero engines operating under transient conditions [J]. Applied Energy, 2022(1): 317.
- [64] Visser W P J, Dountchev I D. Modeling thermal effects on performance of small gas turbines [C]//ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2015: V001T01A014.
- [65] Kim M J, Kim J H, Kim T S. Program development and simulation of dynamic operation of micro gas turbines [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108: 122–30.
- [66] Kim S, Kim K, Son C. A new transient performance adaptation method for an aero gas turbine engine [J]. Energy, 2020, 193:1–10.
- [67] Nielsen A E, Moll C W, Staudacher S. Modeling and validation of the thermal effects on gas turbine transients [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines Power, 2005, 127(3): 564–572
- [68] Merkler R S, Staudacher S. Modeling of heat transfer and clearance changes in transient performance calculations: a comparison [C]// ASME Turbo Expo 2006: Power for Land, Sea, and Air. Spain: American Society of Mechanical Engineers, 2006:37–45.
- [69] 朱之丽,廖阔. 燃气轮机过渡过程中叶尖间隙估算及间隙变化对加速过程的影响 [J]. 航空动力学报, 1995(2): 66-96.
 ZHU Zhili, LIAO Kuo. A model for estimating tip clearances in gas turbine engine transients [J]. Journal of Aerospace Power, 1995(2): 66-96. (in Chinese)
- [70] Kratz J L, Chapman J W. Active turbine tip clearance control trade space analysis of an advanced geared turbofan engine [C]//2018 Joint Propulsion Conference.USA: AIAA, 2018: 1–8.
- [71] Chapman J W, Guo T H, Kratz J L, et al. Integrated turbine tip clearance and gas turbine engine simulation [C]//52nd AIAA/SAE/

ASEE Joint Propulsion Conference.USA: AIAA, 2016: 1-8.

- [72] 杨阳,张建超,项洋,等.基于航空发动机工况的叶尖间隙智能预测方法 [J]. 航空动力学报,2023,38(7):1-9.
 YANG Yang, ZHANG Jianchao, XIANG Yang, et al. Intelligent prediction method of tip clearance under different aero-engine operating conditions [J]. Journal of Aerospace Power, 2023,38(7): 1-9. (in Chinese)
- [73] Ma S, Tan J, Ning Y, et al. Modeling and simulation of gas turbine starter and fuel control system [C]//2017 36th Chinese Control Conference (CCC). Dalian; IEEE, 2017:26–28.
- [74] Wang C, Li Y G, Yang B Y. Transient performance simulation of aircraft engine integrated with fuel and control systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 114: 1029–1037.
- [75] 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.
- [76] 张亚东,姜里运,韩晓光,等.燃气轮机发电机组突变负荷对性能的影响[J].航空动力学报,2016,31(12):2824-2832.
 ZHANG Yadong, JIANG Liyun, HAN Xiaoguang, et al. Effects of mutational load on performance of gas turbine generator set [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(12):2824-2832. (in Chinese)
- [77] Mohammadian P K, Saidi M H. Simulation of startup operation of an industrial twin-shaft gas turbine based on geometry and control logic [J]. Energy, 2019, 183: 1295-1313.
- [78] Barbosa J R, Bringhenti C, Tomita J T. Gas turbine transients with controlled variable geometry [C]//ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. Denmark: American Society of Mechanical Engineers, 2012:415-421.
- [79] Kurzke J. Effects of inlet flow distortion on the performance of aircraft gas turbines [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(4):1–7.
- [80] Hackney R, Nikolaidis T, Pellegrini A. A method for modelling compressor bleed in gas turbine analysis software [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 172:1–10.
- [81] 杨学森,程显达,王天赤,等. 燃机总体性能与二次空气系统耦合的过渡态仿真 [J]. 航空动力学报,2023(1):1-11. YANG Xuesen, CHENG Xianda, WANG Tianchi, et al. Transient simulation for gas turbine overall performance coupled with secondary air system [J]. Journal of Aerospace Power, 2023(1):1-11. (in Chinese)
- [82] Mikhailov A E, Mikhailova A B, Akhmetov Y M, et al. Simulation of gas turbine engines considering the rotating stall in a Compressor [J]. Procedia Engineering, 2017, 176: 207–217.
- [83] Singh V, Axelsson L U, Visser W P J. Transient performance analysis of an industrial gas turbine operating on low-calorific fuels [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2016, 139(5): 1–7.
- [84] Jorgenson P C, Veres J P, Wright W B, et al. Engine icing modeling

and simulation (part I): ice crystal accretion on compression system components and modeling its effects on engine performance [R].SAE–2011.

- [85] Li Y G. Gas turbine performance and health status estimation using adaptive gas path analysis [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2010, 132(4):1–9.
- [86] 叶纬,陈玉春,崔高锋,等. 拟牛顿法在航空发动机特性仿真中的应用 [J]. 计算机仿真, 2007, (10): 78-81.
 YE Wei, CHEN Yuchun, CUI Gaofeng, et al. Application of Quasi-Newton method to aeroengine performance simulation [J]. Computer Simulation, 2007(10): 78-81. (in Chinese)
- [87] Yepifanov S, Zelenskyi R, Sirenko F, et al. Simulation of pneumatic volumes for a gas turbine transient state analysis [M]. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2017: 22–40.
- [88] Chacartegui R, Sánchez D, Muñoz A, et al. Real time simulation of medium size gas turbines [J]. Energy Conversion and Management, 2011, 52(1): 713-724.
- [89] Baqir H M, Mansouri M, Assadi M. Dynamic performance and control strategies of micro gas turbines: state of he art review, methods, and technologies [J]. Energy Conversion and Management: X, 2023, 18:1–24.
- [90] Hashmi M B, Lemma T A, Ahsan S, et al. Transient behavior in variable geometry industrial gas turbines: a comprehensive overview of pertinent modeling techniques [J]. Entropy, 2021, 23(2):1–48.
- [91] Tsoutsanis E, Meskin N. Dynamic performance simulation and control of gas turbines used for hybrid gas/wind energy applications [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 147: 122-142.
- [92] Tsoutsanis E, Meskin N, Benammar M, et al. A component map tuning method for performance prediction and diagnostics of gas turbine compressors [J]. Applied Energy, 2014, 135: 572–585.
- [93] Kong C, Ki J, Kang M. A new scaling method for component maps of gas turbine using system identification [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2003, 125(4): 979–985.
- [94] Li Y G, Ghafir M F A, Wang L, et al. Nonlinear multiple points gas turbine off-design performance adaptation using a genetic algorithm
 [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133 (7):1-9.
- [95] Li Y G, Abdul G M F, WANG L, et al. Improved multiple point nonlinear genetic algorithm based performance adaptation using least square method [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 134(3):49-60.
- [96] Kim S. A new performance adaptation method for aero gas turbine engines based on large amounts of measured data [J]. Energy, 2021 (1): 221.
- [97] Tsoutsanis E, Meskin N, Benammar M, et al. Transient gas turbine performance diagnostics through nonlinear adaptation of compressor and turbine maps [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(9):1–12.

- [98] Xie J, Sage M, Zhao Y F. Feature selection and feature learning in machine learning applications for gas turbines: a review [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2023, 117:1–22.
- [99] Zhou D, Hao J, Huang D, et al. Dynamic simulation of gas turbines via feature similarity-based transfer learning[J]. Frontiers in Energy, 2020(14):817-835.
- [100] Pawełczyk M, Fulara S, Sepe M, et al. Industrial gas turbine operating parameters monitoring and data driven prediction [J]. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability, 2020, 22 (3): 391–399.
- [101] Nikpey H, Assadi M, Breuhaus P. Development of an optimized artificial neural network model for combined heat and power micro gas turbines [J]. Applied Energy, 2013, 108: 137–148.
- [102] Liu Z, Karimi I A. Gas turbine performance prediction via machine learning [J]. Energy, 2020, 192:1–10.
- [103] Talaat M, Gobran M H, Wasfi M. A hybrid model of an artificial neural network with thermodynamic model for system diagnosis of electrical power plant gas turbine [J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2018, 68: 222-235.
- [104] Sabzehali M, Hossein R A, Alibeigi M, et al. Predicting the energy and exergy performance of F135 PW100 turbofan engine via deep learning approach [J]. Energy Conversion and Management, 2022, 265:1-19.
- [105] Asgari H, Chen X, Morini M, et al. NARX models for simulation of the start-up operation of a single-shaft gas turbine [J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 93: 368-376.
- [106] Bahlawan H, Morini M, Pinelli M, et al. Development of reliable NARX models of gas turbine cold, warm, and hot start-up [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(7):1-13.
- [107] Giorgi M G, Quarta M. Hybrid multigene genetic programming artificial neural networks approach for dynamic performance prediction of an aeroengine [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 103:1-12.
- [108] Alsarayreh M, Mohamed O, Matar M. Modeling a practical dual-fuel gas turbine power generation system using dynamic neural network and deep learning [J]. Sustainability, 2022, 14(2):1-25.
- [109] Mehrpanahi A, Hamidavi A, Ghorbanifar A. A novel dynamic modeling of an industrial gas turbine using condition monitoring data [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 143: 507–520.
- [110] Li Z Q, Zhao Y P, Cai Z Y, et al. A proposed self-organizing radial basis function network for aero-engine thrust estimation [J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 87: 167–177.
- [111] Menga N, Mothakani A, Giorgi M G, et al. Extreme learning machine-based diagnostics for component degradation in a microturbine [J]. Energies, 2022, 15(19):1-21.
- [112] Wang Z, Zhao Y. Data-driven exhaust gas temperature baseline predictions for aeroengine based on machine learning algorithms [J]. Aerospace, 2022, 10(1):1–19.

- [113] Tayarani-bathaie S, Sadough V Z N, Khorasani K. Dynamic neural network-based fault diagnosis of gas turbine engines [J]. Neurocomputing, 2014, 125: 153–165.
- [114] Zhang C, Wang N. Aeroengine condition monitoring based on support vector machine [J]. Physics Procedia, 2012, 24: 1546–1552.
- [115] Ren L H, Ye Z F, Zhao Y P. A modeling method for aeroengine by combining stochastic gradient descent with support vector regression [J]. Aerospace Science and Technology, 2020(1): 99.
- [116] Nieto P J, García-gonzalo E, Lasheras F, et al. Hybrid PSO SVM-based method for forecasting of the remaining useful life for aircraft engines and evaluation of its reliability [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015, 138: 219–231.
- [117] Zhong S, Li Z, Lin L, et al. Aeroengine exhaust gas temperature prognostic model based on gated recurrent unit network [C]//2018 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM). USA; IEEE, 2018:11–13.
- [118] Liu Y, Meenakshi V, Karthikeyan L, et al. Machine learning based predictive modelling of micro gas turbine engine fuelled with microalgae blends on using LSTM networks: an experimental approach [J]. Fuel, 2022(1): 322.
- [119] Dursun O O, Toraman S, Aygun H. Modeling of performance and thermodynamic metrics of a conceptual turboprop engine by comparing different machine learning approaches [J]. International Journal of Energy Research, 2022, 46(15): 21084–21103.
- [120] Asgari H, Ory E, Lappalainen J. Recurrent neural network based simulation of a single shaft gas turbine [C]//Finland Linköping Electronic Conference Proceedings, Proceedings of The 61st SIMS Conference on Simulation and Modelling SIMS, Virtual Conference. Finland: AIMS, 2020:99–106.
- [121] Hipple S M, Reinhart Z T, Bonilla-alvarado H, et al. Using machine learning to increase model performance for a gas turbine system [C]//ASME 2020 Power Conference collocated with the 2020 International Conference on Nuclear Engineering. Online: American Society of Mechanical Engineers, 2020: V001T12A003.
- [122] Hong C W, Kim J. Exhaust temperature prediction for gas turbine performance estimation by using deep learning [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023(1):3117–3125.
- [123] Aygun H, Dursun O O, Toraman S. Machine learning based approach for forecasting emission parameters of mixed flow turbofan engine at high power modes [J]. Energy, 2023, 271:1–13.
- [124] Dursun O O, Toraman S, Aygun H. Deep learning approach for prediction of exergy and emission parameters of commercial high bypass turbofan engines [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(10): 27539–27559.
- [125] Teren F. Minimum time acceleration of aircraft turbofan engines by using an algorithm based on nonlinear programming [R]. NASA-1977-TM-X-73624.
- [126] Yu H, Yuecheng Y, Shiying Z, et al. Comparison of linear models

for gas turbine performance [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2014, 228(8): 1291–301.

- [127] Shamma J S. Analysis and design of gain scheduled control systems [D].USA: Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [128] Yu D, Zhao H, Xu Z, et al. An approximate non-linear model for aeroengine control [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2011, 225 (12): 1366-1381.
- [129] Tavakolpour-saleh A R, Nasib S A R, Sepasyan A, et al. Parametric and nonparametric system identification of an experimental turbojet engine [J]. Aerospace Science and Technology, 2015, 43: 21–29.
- [130] Cheng X, Zheng H, Yang Q, et al. Surrogate model-based realtime gas path fault diagnosis for gas turbines under transient conditions [J]. Energy, 2023, 278:1–16.
- [131] Wei Z, Zhang S, Jafari S, et al. Gas turbine aero-engines real time on-board modelling: a review, research challenges, and exploring the future [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 121:1-16.
- [132] Lu F, Gao T, Huang J, et al. Nonlinear Kalman filters for aircraft engine gas path health estimation with measurement uncertainty [J]. Aerospace Science and Technology, 2018, 76: 126–40.
- [133] Simon D. A comparison of filtering approaches for aircraft engine health estimation [J]. Aerospace Science and Technology, 2008, 12 (4): 276-284.
- [134] 余臻,刘洋,魏芳,等.基于无迹粒子滤波算法的航空发动机排
 气温度预测 [J]. 航空发动机,2021,47(6):1-6.
 YU Zhen, LIU Yang, WEI Fang, et al. Prediction of aeroengine exhaust gas temperature based on unscented particle filter algorithm
 [J]. Aeroengine, 2021, 47(6): 1-6. (in Chinese)
- [135] Breikin T, Kulikov G, Arkov V, et al. Dynamic modelling for condition monitoring of gas turbines: Genetic algorithms approach [J]. IF-AC Proceedings Volumes, 2005, 38(1): 739–742.
- [136] Volponi A J. Use of hybrid engine modeling for on-board module performance tracking [C]//ASME Turbo Expo 2005: Power for Land, Sea, and Air. USA: American Society of Mechanical Engineers, 2005: 525-533.
- [137] Xu M, Wang J, Liu J, et al. An improved hybrid modeling method based on extreme learning machine for gas turbine engine [J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107:1–13.
- [138] 李景轩,周登极,肖旺,等.燃气轮机机理-数据混合建模方法研究 [J]. 热能动力工程,2019,34(12):33-39.
 LI Jingxuan, ZHOU Dengji, XIAO Wang, et al. Hybrid modeling of gas turbine based on neural network [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(12):33-39. (in Chinese)
- [139] Barbosa J O R, Silva J D S, Tomita J T, et al. Influence of variable geometry transients on the gas turbine performance [C]//ASME 2011 Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Canada: American Society of Mechanical Engineers, 2011;273-281.

- [140] Tang H L, Chen M, Jin D H, et al. High altitude low Reynolds number effect on the matching performance of a turbofan engine [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2013, 227(3): 455-466.
- [141] 叶纬. 混合维数航空发动机总体性能计算程序构架初步研究 [D].西安:西北工业大学, 2007.

YE Wei. Research on program architecture of multi-level of complexity analysis for aeroengine performance simulation [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2007. (in Chinese)

- [142] 宋甫,周莉,王占学,等.不同维度缩放方法在航空发动机总体 仿真中的应用 [J]. 推进技术, 2020, 41(5): 974-983.
 SONG Fu, ZHOU Li, WANG Zhanxue, et al. Application of different zooming strategies in aeroengine simulation [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41(5): 974-983.
- [143] Montazerigh M, Fashandi S A M, Abyaneh S. Real-time simulation test-bed for an industrial gas turbine engine's controller [J]. Mechanics & Industry, 2018, 19(3); 311.
- [144] Montazerigh M, Fashandi S A M. Bond graph modeling of a jet engine with electric starter [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering,

2019, 233(9): 3193-3210.

[145] 孙胜楠. 基于 MBSE 的燃气轮机系统建模及仿真方法研究 [D]. 上海:上海交通大学, 2020.

SUN Shengnan, Research on modeling and simulation of gas turbine system based on MBSE[D].Shanghai:Shanghai Jiaotong University, 2020. (in Chinese)

[146] 张剑,卫刚,黄维娜. 航空发动机核心机全3维数值仿真方法研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2020, 33(1): 1-5.
 ZHANG Jian, WEI Gang, HUANG Weina. Three-dimensional sim-

ulation of a core engine [J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2020, 33(1): 1–5. (in Chinese)

- [147] Claus R W, Lavelle T, Townsend S, et al. Coupled high-fidelity engine system simulation [C]//26th International Congress of the Aeronautical Sciences. USA: ICAS, 2008:1–10
- [148] Turner M. Lessons learned from the GE90 3-D full engine simulations [C]//48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Florida: AIAA, 2010:1-6.

(编辑:程 海)