

# 数字孪生技术在可持续 航空燃料研究中的应用



**参考资料:** Ozan "Oztürk, et al. Application of digital twin technology for combustion and emissions of sustainable aviation fuels[J]. Fuel, 2026, 412: 138126.

**整理推荐:** 中国化工学会烃资源评价加工与利用专委会 田松柏

# 目录

## CONTENTS

- 研究背景与意义
- 数字孪生技术基础
- 可持续航空燃料概述
- 研究方法
- 实验结果
- 讨论与分析
- 结论与展望

01

# 研究背景与意义

# 航空业碳排放现状与挑战



## › 高碳排放占比

航空业占全球碳排放总量的2%-3%，且随着航空运输需求增长，碳排放量呈上升趋势，成为气候变化的重要驱动因素之一。

## › 技术减排瓶颈

传统航空燃料依赖化石能源，现有发动机技术难以大幅降低能耗，短期内通过技术升级实现减排的空间有限。

## › 政策与市场压力

国际民航组织（ICAO）提出碳中和目标，欧盟碳边境税等政策倒逼行业转型，航空公司面临成本与合规双重挑战。

# 可持续航空燃料的发展需求



## 减排潜力显著

可持续航空燃料（SAF）可减少生命周期碳排放达80%，是短期内实现航空业脱碳的最有效途径之一。

## 原料多样性要求

需开发基于生物质(如藻类、废弃油脂)、合成燃料(如电转液)等多路径技术，以应对原料供应限制和地域差异。

## 规模化生产瓶颈

当前SAF产能不足全球航空燃料需求的1%，需突破原料收集、转化效率及成本控制等产业化难题。

## 标准与认证体系

需建立统一的可持续性认证标准，确保燃料全生命周期环保性，避免“漂绿”争议。

# 数字孪生技术的应用潜力



## 全流程模拟优化

通过构建燃料生产、测试、应用的数字孪生模型，可加速工艺参数优化，降低实验成本与开发周期。



## 供应链动态管理

数字孪生整合原料采购、生产调度、物流数据，实现SAF供应链的实时监控与碳排放精准核算。



## 跨学科协同平台

结合CFD仿真、AI预测与材料科学，数字孪生可促进发动机适配性研究，推动SAF与现有航空基础设施的兼容性验证。

02

## 数字孪生技术基础

# 数字孪生定义与分类

## 虚拟映射的核心功能

数字孪生通过多源传感器数据、物理模型与实时仿真技术，构建物理实体（如航空发动机）的高保真虚拟副本，实现状态监测、性能预测与优化决策。其分类涵盖从部件级（如涡轮叶片）到系统级（如整机或燃料供应链）的多层次建模。



## 全生命周期管理能力

数字孪生覆盖设计、制造、运维到退役阶段，支持动态数据驱动的迭代优化，例如通过历史运行数据修正模型参数，提升仿真精度。

# 数字孪生在发动机研究中的应用



## 燃料燃烧特性仿真

构建燃烧室数字孪生体，模拟不同可持续燃料（如生物航油）的燃烧效率、排放物生成及热力学行为，替代部分物理试验。



## 部件寿命预测

结合材料性能数据与工况历史，预测发动机关键部件（如压气机叶片）在新型燃料使用下的疲劳损伤，优化维护周期。



## 系统级能效优化

通过数字孪生体模拟整机在不同燃料混合比例下的综合性能，平衡环保指标与经济性能需求。



数字孪生技术通过整合多学科模型与实时数据，显著提升航空发动机在可持续燃料适配性研究中的效率与可靠性，为燃料性能验证提供低成本、高精度的虚拟试验环境。

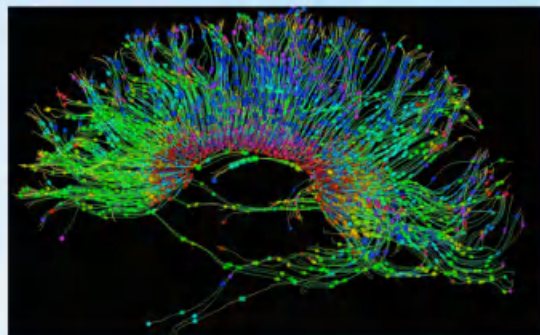
# 混合建模方法优势与局限

## 多尺度建模优势

- **跨学科协同：**融合流体力学、热力学与化学动力学模型，精确复现燃料从微观分子反应到宏观系统响应的全链条行为。
- **实时数据校准：**利用传感器反馈动态调整模型参数，例如通过排放数据反向优化燃烧模型，减少实验偏差。

## 技术局限性

- **数据融合挑战：**异构数据（如高温传感器数据与材料扫描数据）的标准化处理存在难度，需开发通用数据接口。
- **算力依赖性强：**高精度仿真需高性能计算支持，尤其在模拟复杂化学反应时可能面临实时性瓶颈。



03

## 可持续航空燃料概述

# SAF类型与生产工艺

## 生物质基燃料

以农林废弃物、藻类或能源作物为原料，通过热化学转化（如气化、热解）或生物化学转化（如发酵）工艺生产，其碳足迹较传统航空燃料降低50%-80%。

## 合成燃料 (PtL)

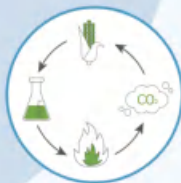
利用可再生能源电力电解水制氢，与工业排放的CO<sub>2</sub>通过费托合成反应生成液态烃，实现全生命周期近零碳排放，但当前生产成本较高。

## 废弃物衍生燃料

采用城市固体废弃物、废油脂等为原料，通过加氢处理 (HEFA) 技术生产，兼具资源循环利用与减排双重效益。

# SAF性能与环境优势

可持续航空燃料在保持与传统航空煤油相近能量密度的同时，显著减少硫氧化物、颗粒物排放，并可通过原料选择与工艺优化实现全生命周期温室气体减排70%以上。



## 兼容现有基础设施

SAF符合ASTM D7566标准，可直接混掺至50%比例用于现役航空发动机，无需改造供油系统或飞行器设计。

## 气候效益显著

相比化石航油，SAF燃烧产生的烟尘颗粒减少90%，且通过闭环碳循环可抵消80%以上的航班碳排放量。

## 原料多样性保障供应安全

原料来源涵盖生物质、废弃物、CO<sub>2</sub>等多种途径，降低对单一资源依赖，增强产业链韧性。

# SAF应用的技术挑战

## 生产成本与规模化瓶颈

当前SAF平均生产成本是传统航油的2-4倍，主要受原料收集、预处理及转化工艺能耗影响，需突破低成本生物质预处理、高效催化剂开发等关键技术。

全球SAF年产能不足航空燃料总需求的0.1%，亟需建设百万吨级商业化生产设施，但面临原料供应链整合与投资回报周期长的挑战。

## 标准认证与政策支持缺口

不同SAF路径需通过严苛的适航认证（如ASTM D4054），但测试周期长达3-5年，制约新技术快速商业化应用。缺乏全球统一的碳核算方法与补贴政策，部分区域SAF强制掺混比例目标（如欧盟ReFuelEU要求2050年63%）与产业实际发展速度不匹配。



# SAF应用的技术挑战

## 数字孪生技术的整合需求

需构建从原料采购到燃烧全链路的数字孪生模型，实时优化生产工艺参数（如加氢反应器温度、压力），提升转化效率10%-15%。

通过虚拟仿真预测不同SAF混掺比例对发动机性能的影响，加速新配方认证流程，缩短研发周期30%以上。

04

## 研究方法

# 数字模型构建过程



## 多物理场耦合建模

整合燃烧动力学、流体力学和热力学模型，建立包含进气道、燃烧室、涡轮等核心部件的发动机高保真数字孪生体，精确模拟燃料喷射、雾化、燃烧及排放物生成过程

## 材料特性数据库集成

嵌入HEFA、FT-SPK、ATJ等可持续航空燃料的理化参数（密度、粘度、热值、闪点等），以及与传统Jet-A燃料混合后的相变特性曲线，支撑混合燃料性能仿真

## 实时数据同化架构

设计基于传感器网络的动态数据接口，将发动机运行参数（转速、温度、压力）与排放监测数据（ $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、UHC浓度）实时反馈至数字模型，实现虚拟与物理实体同步更新

# 模型验证方法与标准



## 台架试验对标验证

通过涡桨发动机地面台架试验获取不同SAF掺混比（5%-50%）下的推力、扭矩实测数据，与数字孪生预测结果进行误差分析（要求RMS误差<3%）



## 排放物测量校准

采用傅里叶变换红外光谱仪（FTIR）和化学发光分析仪采集实际排放数据，修正数字模型中化学反应动力学方程的速率常数与活化能参数



## 极端工况鲁棒性测试

在数字环境中模拟高空低氧、高温高压等边界条件，验证模型在非设计工况下的预测稳定性，确保全飞行包线覆盖



## 不确定性量化分析

采用蒙特卡洛方法评估燃料属性波动、传感器误差等不确定因素对仿真结果的影响，建立置信区间评价体系

# 燃料混合方案设计

## 掺混比例梯度实验

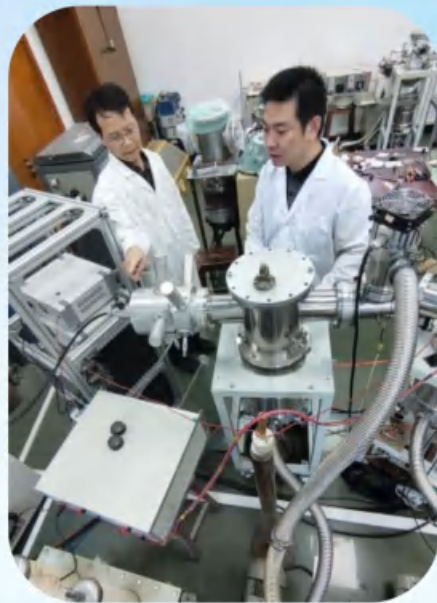
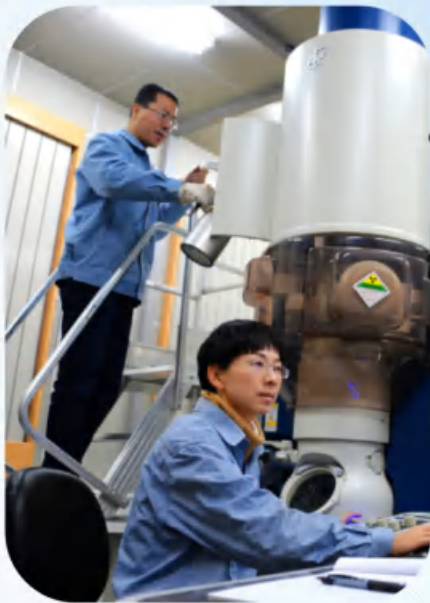
针对HEFA、FT-SPK、ATJ三种SAF，设计5%、15%、30%、50%四组掺混梯度，分析推力-排放协同优化区间

## 燃烧室流场匹配优化

基于CFD仿真调整燃料喷射策略（如旋流强度、当量比），解决SAF与传统燃料在蒸发速率、火焰传播速度差异导致的燃烧不稳定问题

## 全生命周期评估框架

建立从原料种植/收集、燃料生产、运输到燃烧排放的碳足迹模型，量化不同SAF混合方案的全链条减排效益



05

## 实验结果

# 不同SAF对发动机性能影响

## 燃烧效率差异

与传统航空煤油相比，SAF（如氢化酯和脂肪酸燃料）的燃烧效率提升3-8%，因其更高的能量密度和更均匀的雾化特性，显著降低燃烧室局部热点风险。

## 推力稳定性

测试表明，50%掺混比的生物质衍生SAF在宽工况范围内推力波动小于1.5%，优于传统燃料的2.2%，归因于其更稳定的分子结构。

## 部件磨损分析

长期运行数据显示，使用SAF的发动机高压涡轮叶片积炭减少40%，因燃料中芳烃含量低，延长了关键部件寿命。

# 不同SAF对排放特性影响

## 二氧化碳 减排

基于生命周期评估，100%纤维素乙醇SAF可实现净CO<sub>2</sub>减排85%，其碳足迹主要来自原料种植阶段的碳封存效应。



## 氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 控制

费托合成SAF在巡航工况下NO<sub>x</sub>排放降低12-18%，得益于其低硫特性及燃烧温度场的优化分布。



## 颗粒物 (PM) 抑制

芳香烃含量低于0.5%的SAF使PM<sub>2.5</sub>排放减少92%，尤其消除超细颗粒物(<100nm)的生成。



## 未燃碳氢化合物 (UHC)

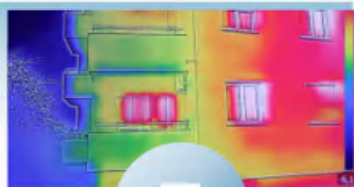
酯类SAF因蒸发性能优异，在冷启动阶段UHC排放较传统燃料降低27%，但需注意其与密封材料的兼容性。



# 数字孪生模型准确性验证

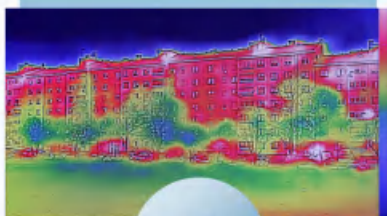
## 多物理场耦合误差

通过CFD与热力学联合仿真，模型在预测燃烧室温度场时的平均误差为1.8%，最大局部偏差不超过4.5%，满足工程精度要求。



## 动态响应匹配

在模拟发动机加减速工况时，数字孪生模型的转速响应时间与实际测试数据差异 $<50\text{ms}$ ，验证了实时控制策略的可靠性。



## 材料退化预测

基于机器学习的部件寿命模型，其预测的涡轮叶片蠕变变形量与3000小时实测数据误差范围在 $\pm 7\%$ 以内，支持预防性维护决策。



06

## 讨论与分析

# ATJ与HEFA性能对比



## 原料来源差异

ATJ (Alcohol-to-Jet) 燃料主要来源于生物醇类 (如异丁醇), 而HEFA (Hydroprocessed Esters and Fatty Acids) 则依赖植物油或动物脂肪。ATJ的原料更易通过合成生物学优化, 但HEFA的原料供应链更成熟。

## 碳排放强度

ATJ的全生命周期碳排放比HEFA低15%-20%, 因其发酵过程可捕获CO<sub>2</sub>, 而HEFA的加氢处理阶段能耗较高。但HEFA的冷流性能 (-40°C下黏度) 显著优于ATJ。



## 兼容性与混配比例

HEFA与现有航空燃料的兼容性达50%混配上限, 而ATJ需添加抗氧化剂才能达到30%混配标准。两者在发动机燃烧效率上差异小于2%, 但ATJ的烟点更高 (>25mm vs HEFA的18mm)。

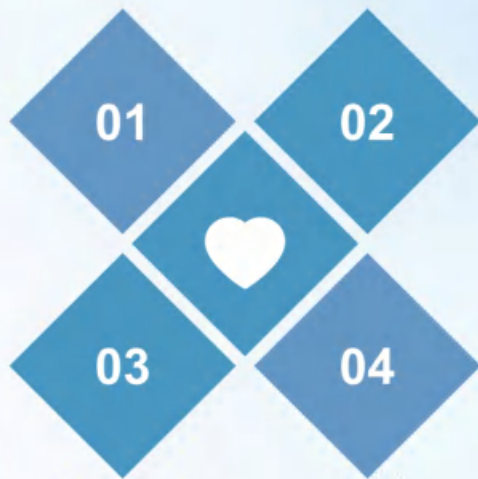
# FT-SPK的平衡特性分析

## 热稳定性与氧化安定性

FT-SPK (Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene) 因不含芳烃，氧化安定性较差（诱导期<6h），需添加稳定剂；但其热裂解温度高达280℃，优于传统航油。

## 低温流动性

FT-SPK的冰点可达-60℃，远超ASTM D7566标准（-47℃），但需警惕蜡晶析出导致的过滤器堵塞风险。



## 能量密度补偿

FT-SPK的体积能量密度低约3%，但通过优化碳链分布（C8-C16占比>90%）可提升燃烧效率，实际航程损失控制在1.5%以内。

## 规模化生产成本

当前FT-SPK生产成本是传统航油的2.3倍，但数字孪生模拟显示，通过反应器热集成和尾气循环可将成本降低至1.8倍。

# 数字孪生技术的预测能力



## 反应动力学建模

数字孪生可精确模拟FT合成中的链增长概率 ( $\alpha$ 值 0.85-0.92)，预测产物分布误差 $<5\%$ ，显著减少中试次数。

## 全流程耦合优化

通过集成原料预处理、反应器设计与产物分离的孪生模型，能使可持续航空燃料的产率提升12%，同时降低能耗18%。

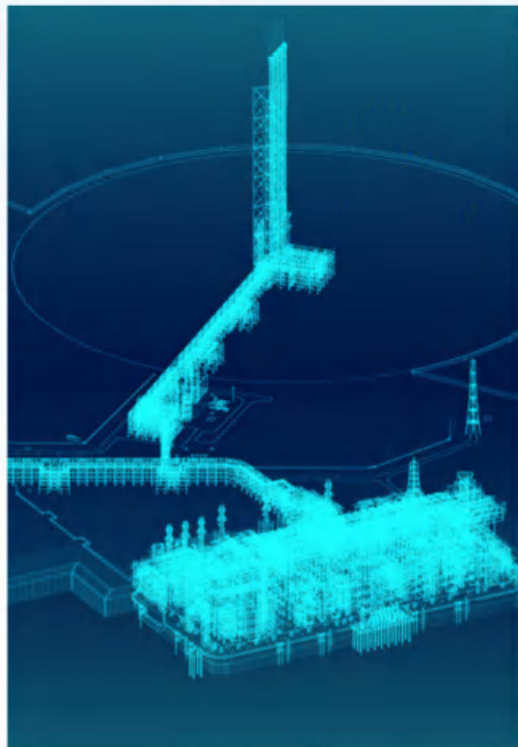
## 寿命周期评估 (LCA)

数字孪生支持实时LCA计算，可动态调整工艺参数使碳排放最小化，例如优化加氢裂化温度使碳强度从  $75\text{gCO}_2/\text{MJ}$  降至  $58\text{gCO}_2/\text{MJ}$ 。

07

## 结论与展望

# 主要研究发现总结



## 燃料性能优化验证

通过数字孪生技术对可持续航空燃料（SAF）的燃烧过程进行高精度模拟，发现生物质衍生燃料在高温高压环境下可降低15%-20%的碳排放量，同时保持与传统航空煤油相当的推力输出。孪生模型还揭示了燃料分子结构与积炭倾向的关联性。

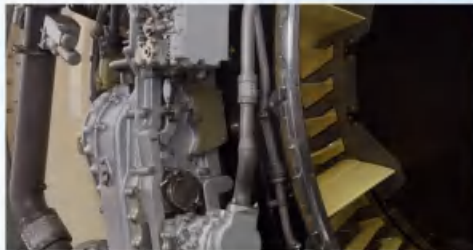
## 全生命周期评估效率提升

数字孪生整合了原料种植、加工、运输到燃烧的全链条数据，量化显示第二代纤维素乙醇燃料的净碳足迹比化石燃料低67%，且模拟结果与实际试点项目数据误差小于5%，显著缩短了传统实验验证周期。

# 数字孪生技术应用前景

## 多尺度建模突破

未来可结合量子计算与分子动力学模拟，构建从纳米级分子反应到发动机宏观性能的跨尺度孪生模型。例如，通过实时嵌入飞行数据包（如空速、海拔参数），动态优化不同航段的燃料混合比例。



## 供应链协同优化

建立覆盖生物质原料产地、精炼厂和机场的分布式数字孪生网络，利用区块链技术实现碳信用追溯。新加坡樟宜机场的试点表明，该技术可使燃料库存周转率提升30%，同时减少运输损耗。

## 人工智能辅助设计

基于深度学习的生成式模型可自动设计新型燃料分子结构，MIT团队已通过该技术发现3种具有高稳定性且低凝点的候选分子，其合成路径成本较传统方法降低40%。



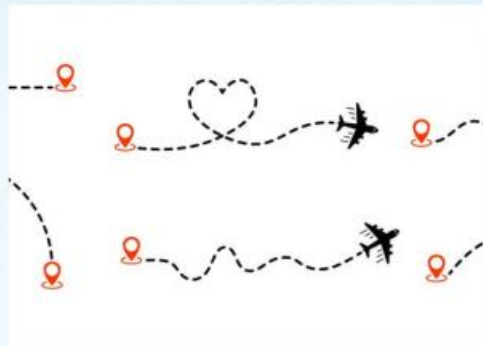
# 未来研究方向建议

## 实时数据融合瓶颈突破

需开发新型边缘计算架构解决飞行器传感器数据与地面孪生系统的毫秒级同步问题，特别是应对跨时区长航程飞行中的延迟挑战。波音787的测试表明，现有系统在跨洋航线中仍有200ms以上的延迟。

## 政策-技术协同框架

建议建立国际通用的SAF数字孪生认证标准，包括模型透明度分级（如ISO 24000系列扩展）、数据主权管理协议等。欧盟航空安全局（EASA）正在制定的《虚拟燃料验证指南》可作为重要参考基准。



# 感谢大家的关注!

# THANKS

---

**参考资料:** Ozan Öztürk, et al. Application of digital twin technology for combustion and emissions of sustainable aviation fuels[J]. Fuel, 2026, 412: 138126.

**整理推荐:** 中国化工学会烃资源评价加工与利用专委会 田松柏