

智能燃烧室技术的发展与挑战

Development and Challenges of Intelligent Combustor Technology

■ 金武 潘玮 田世泽 李建中 / 南京航空航天大学

伴随人工智能技术的飞速发展，具备“感应”功能和主动“思考”能力的智能燃烧室迎来了新的发展机遇，相关工程设计难题一旦实现突破，智能燃烧室技术将为航空发动机性能全面提升和环保目标的实现注入强劲动力。

航空发动机的性能直接关系到飞机的机动性、环境友好性和安全性。燃烧室作为关键部件，其性能的提升和优化一直是业界追求的目标。随着航空发动机对整体性能要求的日益增加，未来航空发动机燃烧室在维持现有点火性能的基础上，不仅要有更高的温升、更紧凑的结构，还需具备超低排放、高效率及低成本等特点。性能提升与排放降低的双重目标促使燃烧室技术革新，面临的主要技术挑战包括新一代高温升高热容燃烧室^[1]进口参数的大幅变化、宽广的性能范围，以及在各种运行状态下保持优异性能的复杂性，特别是大工况无可见冒烟与慢车贫油熄火（及高空点火）特性变差的矛盾、火焰筒冷却、出口温度分布优化等问题。此外，低排放燃烧室则因其贫燃特性，在进口温度、压力等参数变化时更容易产生燃烧不稳定现象。这表明无论是高温升还是低排放燃烧室，都需要对内部燃烧状态进行精准调控。传统燃烧室结构固定，空气流量分配不变，对广泛变化的工作条件反应不足，其性能进一步提升已进入瓶颈。因此，为适应未来航空发动机

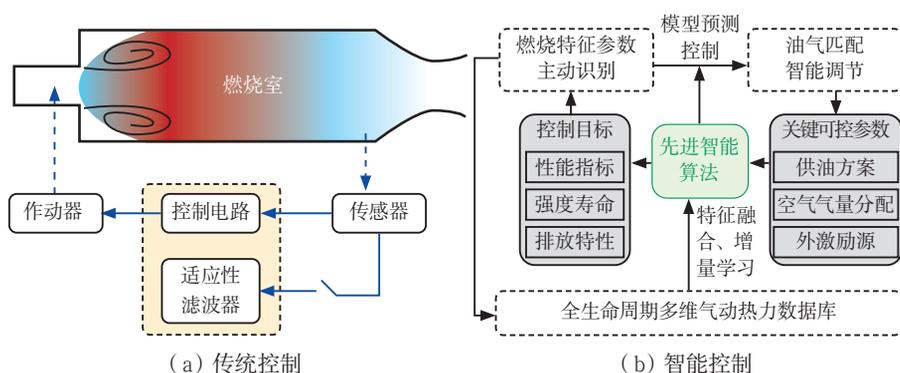


图1 智能燃烧室原理

燃烧室的要求，伴随当今人工智能技术的飞速发展，具有一定自主可控能力的智能燃烧室的概念应运而生。随着科技不断进步和航空业深入发展，智能燃烧室技术的研究和应用前景广阔。

原理概念

区别于按照固定模型的信号反馈闭环控制（见图1(a)），智能燃烧室的核心在于其不仅具备“感应”功能，而且能进行主动“思考”。这意味着智能燃烧室能够按照预设程序运作，同时也具备基于自主“思维”调整工作模式的能力。相比于传统燃烧室，智能燃烧室的性能提升显著，特别是在状态管理和单个发动机部件的主动控制上，这些改进为智能燃烧室提供了更优良的维护特

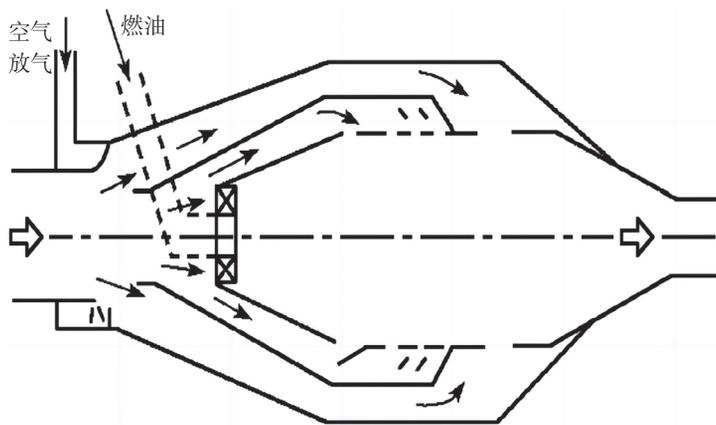
性。如图1(b)所示，智能燃烧室能够在全工况范围内实现最佳油气匹配状态控制，基于数据驱动进行状态识别，自主调整控制策略，以保障燃烧性能、稳定性和排放等指标。此外，还能持续监测燃烧室的健康状况，并对初期故障及时报警，同时精确诊断故障原因，开展延寿控制。智能燃烧室的感知和控制单元，也在获取信号数据和实施控制的过程中不断完善。

技术发展历程

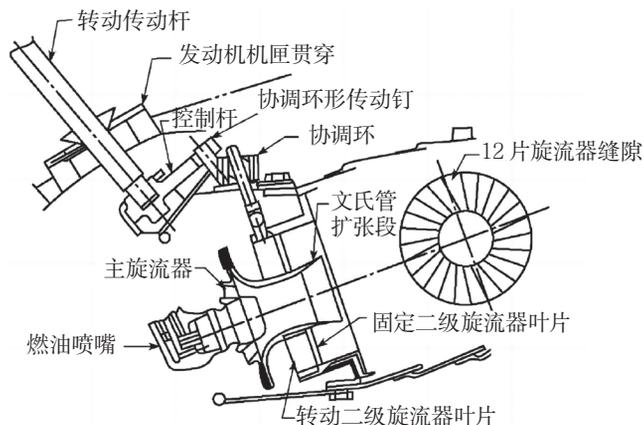
智能燃烧室技术的发展是航空发动机领域一项重要的技术革新，经历了从初期理论和概念的提出、理论探索到实验室研制的跨越。

变几何燃烧室技术

智能燃烧室技术的概念可追溯



(a) 涡流控制的可变几何燃烧室^[2]



(b) CF6-80 发动机可变几何燃烧室^[3]

图2 变几何燃烧室

至20世纪70年代，初期主要体现在可变几何燃烧室（VGC）的研究。该技术最早被引入燃气涡轮发动机设计，旨在改善航空发动机的空中点火性能和贫油熄火问题。如图2所示，主要通过如帽罩开闭、冷却结构、可变旋流器等几何可变结构，以满足不同工况点的要求。相关研究已经完成初步验证，能够实现拓宽点火熄火极限的目标。

主动燃烧控制

在20世纪80年代，智能燃烧室的研究领域迎来了新的发展方向——主动燃烧控制（ACC）。该技术通过逻辑变量来快速调节径向和周向燃油分布，与分级燃烧、值班火焰、优化的油气匹配和混合、优化的燃烧室结构等结合，发展了如开环控制、闭环控制、自适应控制等主动控制技术，并初步应用在先进燃烧室中，大大提升了燃烧室的稳定性、对出口温度场和污染排放等的调节能力。美国国家航空航天局（NASA）针对不同进口燃油供给量的调节方式，开发和应用了不同的控制方法和相对应的控制系统（见图3），以通过改变进口燃油供给量来改变燃烧室出口温度分布。

传感器、控制系统和初步的智能算法

进入21世纪，随着传感器和微电子技术的发展，智能燃烧室开始逐步成形。在这一阶段，研究重点转向了实时监测燃烧室内部状态的技术，包括温度、压力和流速等关键参数的精确测量。传感器技术的进步为收集高质量数据提供了支撑，而先进的控制系统则开始应用于燃烧过程的优化。

同时，初步的智能算法开始被引入到智能燃烧室的研究中，用于处理和分析大量数据，帮助理解燃烧过程的复杂性。实现智能诊断是

燃烧室迈向智能化的首要且关键一步，核心在于实现对燃烧室内部燃烧状态和外部气动结构参数的准确感知，因为只有充分理解这些关键参数的基础上，才能有效地进行后续分析和决策。这种感知能力是实现高效、优化决策的基石，对于提升燃烧室的整体性能和智能化水平至关重要。目前，主要研究手段是利用多特征信息融合和机器学习等方法，建立燃烧状态识别工具，尝试从大数据集分析的结果上获得如燃烧不稳定等不利现象的诱因，从而为控制决策提供支持。虽然这些早期的算法相对简单，但为后续

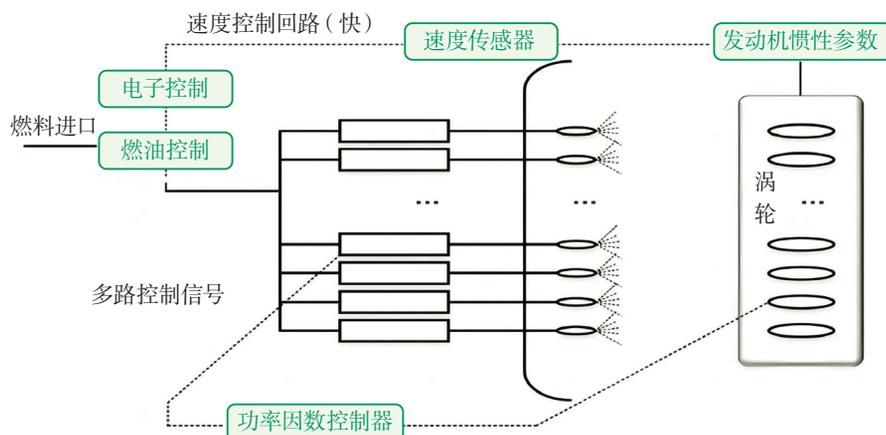


图3 NASA 出口温度分布主动控制系统

更高级的人工智能技术的应用奠定了基础。

人工智能的兴起及其影响

近年来，随着人工智能和计算能力的飞速发展，智能燃烧室技术迎来了新的发展机遇。深度学习算法在数据处理和分析、模式识别、预测建模等方面的能力，为智能燃烧室提供了更高级的决策支持。这些算法能够从大量的传感器数据中提取有用信息，预测燃烧过程的变化，甚至实现自适应和自学习的控制策略。人工智能算法的应用大大提升了智能燃烧室的性能，使其能够更加精确地控制燃烧过程，优化能源利用，减少排放，并提高整体的运行效率。

智能调控在燃烧室智能化过程中发挥着核心作用，成为智能诊断与变几何燃烧室之间的关键连接。若将智能诊断比喻为燃烧室的“眼睛”，变几何燃烧室比喻为“身体”，那么智能调控则是燃烧室的“大脑”。智能调控负责根据智能诊断提供的数据和信息，进行精确的调整和决策，以确保燃烧室在不同工况下实现最佳性能。因此，智能调控的效能直接影响智能燃烧室的整体智能化水平。

尽管人工智能技术带来了许多优势，但也存在诸多挑战需要克服。这包括但不限于高精度的数据采集、复杂系统的有效建模，以及实时响应的智能调控算法的开发。因此，深入研究这些领域对于实现更高效、环保的智能燃烧室至关重要。

系统集成和试验验证

随着各项关键技术的进步，智能燃烧室现已进入系统集成和试验验证的关键阶段，涉及多个复杂的

技术领域，包括传感器技术、数据处理算法、控制系统设计等。这一阶段的研究重点在于如何将先进的传感器、智能算法、控制系统和作动机构有效地集成到一个统一的燃烧室系统中。如图4所示，智能燃烧室系统有机融合感知、识别、控制等功能，如基于深度学习发展时序信号多特征融合识别技术，建立燃烧不稳定主动识别程序和预测模型，通过敏感性分析找出主控因素，针对性地通过主动调控流道喉道面积，实现燃烧不稳定的主动抑制。

技术挑战

智能燃烧室技术在性能提升和延寿控制等方面具有先进性和优势，但也面临诸多挑战，特别是确保系统的稳定性和可靠性，以及在真实的航空发动机环境中的性能验证。在实际应用中，这些技术需要在极端的高温高压环境中稳定运行，这对材料、设计和系统集成提出了极高

的要求。

高温高压环境下的元器件可靠性

在航空发动机燃烧室中，极端的高温和高压环境对传感器、作动机构的性能和寿命提出了严峻挑战。相关元器件必须能够在这些恶劣条件下稳定工作，准确地监测燃烧状态，可靠地完成控制动作。因此，开发耐高温、耐腐蚀、抗振动的感知和控制元器件是当前的重要研究方向。

数据处理和分析的复杂性

智能燃烧室系统需要处理和分析大量来自传感器的数据。这要求具有高效的数据处理能力和先进的分析算法，以实时识别和响应燃烧过程中的变化。发展高效的数据处理架构和采用先进的人工智能算法，如深度学习和机器学习，是解决这一挑战的关键。

实时控制系统的设计难题

智能燃烧室技术的核心之一是实时和精准的控制系统。这要求系

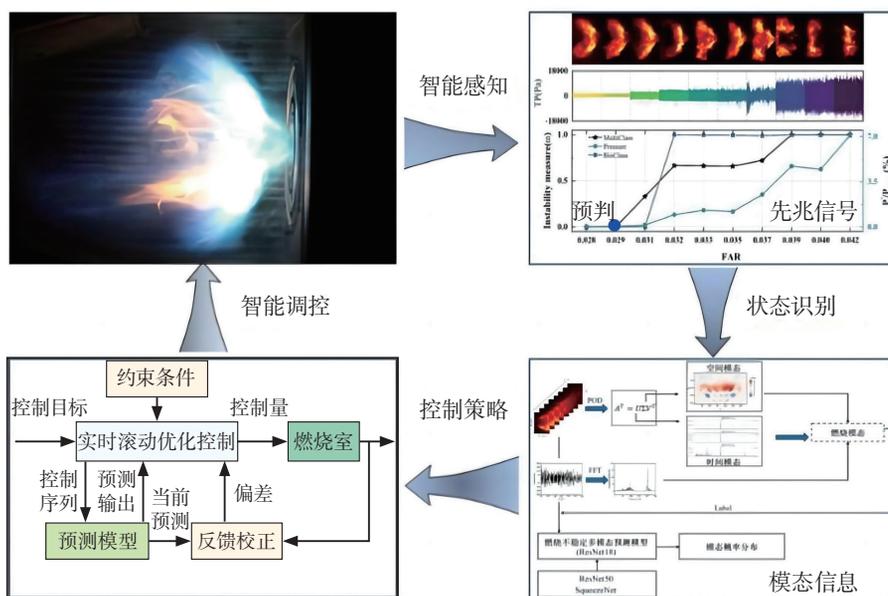


图4 智能燃烧室系统对燃烧不稳定的识别与控制

统不仅要快速响应燃烧室内部的变化，还要确保长期稳定运行。因此，设计和实现一个高效、可靠、自适应的控制系统是智能燃烧室技术的一个重要挑战。

系统集成和兼容性问题

将智能燃烧室技术整合到现有的航空发动机设计中，需要考虑系统集成和兼容性问题。这包括硬件和软件的兼容性，以及与发动机其他部件的协同工作问题。解决这一挑战需要跨学科的协作和系统工程方法。

安全性和可靠性的保障

在航空领域，安全性和可靠性始终是最重要的考量。智能燃烧室技术的应用必须确保飞行安全不受影响。因此，进行全面的安全性评估和可靠性测试，以及开发故障诊断和预测技术，是实现智能燃烧室工程应用的必要条件。

未来发展趋势

智能燃烧室的开发将综合运用现有燃烧调控技术与人工智能感知、建模技术成果，以期打造出具有卓越性能、经济承受力强和高生存能力的新一代航空动力系统，未来的技术发展方向主要包括以下几个方面。

先进传感器技术

为了实时监测燃烧室内部状态，最新的传感器技术必须适应高温高压的工作环境，能够准确测量温度、压力、振动等参数，为主动控制提供实时的数据支持。

光纤传感器在高温环境下具有出色的稳定性，可以用于测量温度和压力等参数，其优势在于对电磁干扰的抗性和能够在狭小空间内灵活布置。

深度学习的应用

深度学习是基于大量数据的模型构建方法，其成功在很大程度上依赖于高质量数据的收集。因此，收集尽可能多的高质量数据，并开展多源异构数据挖掘与知识获取，对深度学习模型的有效性和准确性至关重要。采用基于物理信息的神经网络建模方法，在较小训练集的情况下能达到较高的预测精度，并提升模型的泛化性。必须从训练数据中抽象出燃烧室通用的物理参数，用物理定律来对解空间进行约束，将物理规则作为一个正则器来正则化训练集，用结构化的数据来训练模型，使模型可以从同样规模的数据中学到更多的内容。

燃烧室主动控制技术

解决控制机构设计和可变结构简化的相关问题，可以通过方案优化设计，获得结构简单、工程可行性高的几何结构调控方案，实现燃烧室全工况状态下的最优油气匹配。考虑到机械结构调控存在调节机构和控制规律复杂、火焰筒结构复杂和质量增加等缺点，可开发如等离子体调控、激光助燃、超声波雾化等非机械式调控方案，推进智能燃烧室技术工程应用。

实时模型预测与优化控制

实时模型预测基于先进的数学模型，预测燃烧室内部动态变化，采取及时的控制策略。这种方法结合了数学建模和实时控制，以更好地应对燃烧系统的非线性和时变性。还可以应用最优化算法，通过在线调整控制参数以最大化燃烧效率或实现其他性能目标，包括基于模型的优化、遗传算法、粒子群算法等。

结束语

随着航空工业对环保和性能的要求日益增高，智能燃烧室技术在航空发动机领域的重要性愈发凸显。经过数十年的发展，智能燃烧室已从理论基础和概念的形成进入到面向工程的集成与应用研究新阶段。尽管当前技术仍面临多项挑战，如传感器可靠性、数据处理复杂性、实时控制系统设计难题等，但随着科技不断进步，这些挑战正逐步被克服。

未来，我们可以预见，随着研究的深入和技术的成熟，智能燃烧室有望在航空领域中发挥更加重要的作用。在这一过程中，跨学科的合作和创新思维将发挥关键作用。特别是，人工智能和新型材料等先进技术的应用将为智能燃烧室的优化和智能化带来更多可能性。

航空动力

(金武，南京航空航天大学，副教授，主要从事航空发动机燃烧诊断识别和智能调控方法研究)

参考文献

- [1] 林宏军, 尚守堂, 程明, 等. 高油气比燃烧技术工程应用与发展分析 [J]. 航空发动机, 2021, 47(4):10.
- [2] SCHULTZ D F. Ground idle performance improvement of a double-annular combustor by using simulated variable combustor geometry[R]. NASA TM x-3176, 1975.
- [3] GUPTA A K, CHOMIAK J, MARCHIONNA N, et al. Burner geometry effects on combustion and NO(x) emission characteristics of variable geometry swirl combustor[J]. Journal of Propulsion & Power, 1991, 7(4):473-480.