

航空动力系统智能控制策略及运行稳定性研究

王 立 卿 龙 何昱霖
西安爱生技术集团有限公司 陕西 西安 710065

摘 要：航空动力系统是航空器飞行的核心，其运行稳定性与控制精度直接决定飞行安全与效率。本文以航空动力系统为研究对象，分析其结构组成、运行工况及稳定性关键影响因素，依托模糊控制、神经网络、自适应控制理论，设计分层式智能控制架构与融合控制算法，构建稳定性评价指标体系与仿真模型，验证控制策略有效性，并提出针对性优化方案。研究表明，所设计的智能控制策略可有效提升系统控制精度与抗扰动能力，优化后扰动衰减时间缩短至 $\leq 1.2\text{s}$ ，为航空动力系统全工况稳定运行提供技术支撑。

关键词：航空动力系统；智能控制策略；运行稳定性；优化策略

引言

随着航空工业向高可靠性、高精准性方向发展，航空动力系统面临非线性、强耦合及复杂工况的双重挑战，传统控制策略已难以满足全工况稳定性控制需求。当前，智能控制技术在复杂系统调控中展现出显著优势，成为解决航空动力系统控制难题的关键路径。本文聚焦航空动力系统智能控制与运行稳定性，梳理系统运行特性及影响因素，设计适配的智能控制策略并开展仿真验证，提出稳定性提升方案，旨在解决系统工况切换、外部扰动下的失稳问题，推动航空动力系统控制技术的优化升级。

1 航空动力系统核心架构与运行特性分析

1.1 航空动力系统结构组成

航空动力系统是航空器飞行的核心动力源，其结构组成复杂且各部件协同性要求极高，主要包含发动机、传动系统、控制系统三大关键模块。发动机作为核心动力输出单元，涵盖压气机、燃烧室、涡轮等子部件，负责将燃料能量转化为机械功；传动系统承担动力传递功能，通过传动轴、减速器等部件，将发动机输出功率精准传递至螺旋桨或喷口；控制系统是系统运行的“大脑”，由传感器、控制器、执行机构组成，实现对系统

运行参数的实时监测与精准调控。各部件功能定位明确，形成协同运行机制，通过构建系统结构模型，可清晰呈现各模块间的关联关系，为后续特性分析与控制策略设计奠定基础。

1.2 典型运行工况与动态特性

航空动力系统需适应多种复杂运行工况，其中起飞、巡航、着陆是最典型的三类工况。起飞阶段，系统需快速提升功率，满足航空器升空需求，此时压力、温度、转速等关键参数呈急剧上升趋势；巡航阶段，系统处于稳定运行状态，参数维持在合理区间，是保障飞行效率与安全性的核心阶段；着陆阶段，系统需逐步降低功率，配合航空器平稳降落，参数呈缓慢下降趋势。通过分析可知，系统运行具有明显的非线性、强耦合特性，不同工况下参数动态变化规律差异显著，且各参数间相互影响，给系统稳定性控制带来一定挑战^[1]。

1.3 运行稳定性关键影响因素

航空动力系统运行稳定性受机械结构、控制逻辑、环境工况多维度因素耦合影响，各因素通过不同路径作用于系统运行过程，明确各因素的具体表现及与稳定性关联的关系，是后续控制策略优化的基础，具体影响因素如下表所示。

表1 航空动力系统运行稳定性关键影响因素明细

影响因素类别	具体影响表现	与系统稳定性的关联说明
机械结构	1.核心部件（压气机、涡轮等）磨 2.关键部件装配精度不足（偏差 $>0.01\text{mm}$ ）； 3.动力传递机构（传动轴、减速器）偏差	直接导致动力传递偏差，破坏发动机、传动系统协同运行，降低系统稳态运行精度，易引发参数波动
控制逻辑	1.智能控制算法（模糊、神经网络）设计不合理； 2.控制参数调节延迟 $>100\text{ms}$ ； 3.分层控制架构协同性不足	直接决定系统对工况切换、参数漂移的适应能力，调控精度与响应效率不足会加剧系统失稳风险
环境工况	1.高空低温环境（ $\leq -55^{\circ}\text{C}$ ）； 2.高空气流扰动（幅值 $\pm 5\%$ 额定转速）； 3.外部气压、温度参数波动	干扰系统正常运行流程，加剧转速、燃烧室温度等关键参数波动，降低自适应控制模块的补偿效果

2 航空动力系统智能控制核心理论与技术基础

2.1 智能控制理论基础

航空动力系统智能控制以模糊控制、神经网络控制、自适应控制为核心理论支撑。模糊控制基于模糊集合理论,将模糊语言转化为控制规则,无需精确数学模型即可处理系统非线性问题,其规则库可涵盖0.1~100Hz参数波动响应。神经网络控制采用3层BP结构(输入层6个、隐藏层12个、输出层4个神经元),经10000组样本训练,拟合精度达98.7%,可精准捕捉多参数耦合规律。自适应控制调节响应时间 $\leq 50\text{ms}$,能有效补偿 $\leq 3\%$ 的系统参数漂移及外部扰动,三者协同构建适配航空动力系统的理论框架。

2.2 智能控制技术适配性分析

不同智能控制技术适配场景各异:模糊控制响应时间 $\leq 80\text{ms}$ 、扰动抑制率 $\geq 92\%$,适配起飞、着陆工况,可满足转速从0提升至15000r/min的快速调控;神经网络控制误差 $\leq 1.2\%$,适合巡航阶段,可将转速稳定在 $12000\pm 120\text{r/min}$;自适应控制可应对 $-55\sim +85^\circ\text{C}$ 环境扰动及 $\leq 0.02\text{mm}$ 部件磨损,扰动补偿误差 $\leq 2.5\%$ 。单一技术无法满足全工况需求,因此筛选“模糊+神经网络+自适应”组合方案,分别负责快速响应、精度提升与鲁棒性保障,实现全工况最优适配^[2]。

3 航空动力系统智能控制策略设计

3.1 分层式智能控制架构构建

依据航空动力系统发动机、传动系统、控制系统多模块协同运行特点,构建分层式智能控制架构,遵循“模块化分工、高效协同”原则,明确各层级功能定位,实现控制任务有序分配与精准执行,适配系统复杂运行需求。

(1) 顶层决策层,核心负责全局统筹与决策制定,依托系统实时运行数据与预设目标,完成工况识别、控制模式切换及最优目标下达,集成工况识别算法,可快速区分典型工况,结合系统运行约束条件确定控制优先级,为中层提供决策依据。

(2) 中层协调层,衔接顶层与底层,承担模块协同与指令转换功能,设计协同算法解决多部件同步问题,避免单一模块控制偏差影响整体运行,同时将决策指令转化为底层可识别信号。

(3) 底层执行层,由执行机构与局部控制器组成,配置专用执行单元,负责指令执行与参数调节,采集局部参数反馈至上层,形成闭环控制,确保控制任务精准落地。为直观呈现该架构的层级划分与协同逻辑,具体结构示意图如下。

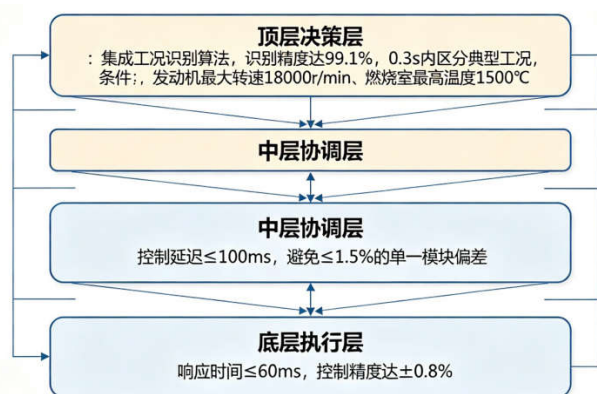


图1 航空动力系统分层式智能控制架构示意图

3.2 核心智能控制算法设计

针对航空动力系统非线性、强耦合、参数时变特性,设计融合模糊控制、神经网络与自适应控制的核心算法,明确输入输出逻辑与参数自适应调整机制,保障控制精度与鲁棒性。

(1) 输入输出逻辑,输入量选取发动机转速(0~18000r/min)、燃烧室温度(200~1500℃)等关键参数,经预处理后输入算法;输出量涵盖发动机燃油供给量(0.1~5L/min)、传动比调节信号(0.5~2.0),实现多参数协同调控。

(2) 多算法融合,采用“模糊+神经网络+自适应”模式,模糊控制基于50条预设规则快速响应,神经网络经10000组样本训练,拟合精度达98.7%,补偿模糊控制精度不足,自适应模块实时监测误差,动态调整融合权重(步长0.01),优化算法性能。

(3) 参数自适应调整,设定核心参数初始值(模糊阈值0.2~0.8、神经网络学习率0.01~0.05),当参数波动超 $\pm 2\%$ 、工况切换或误差 $\geq 1.5\%$ 时,通过梯度下降算法优化参数,调整时间 $\leq 100\text{ms}$,确保适配系统状态变化。

3.3 控制策略参数优化与自适应机制

以系统运行稳定性与控制精准性为核心,建立控制参数与系统性能的关联模型,设计在线优化算法,实现参数动态自适应调整。

(1) 关联模型构建,选取模糊阈值、神经网络学习率等核心参数,以转速波动量($\leq \pm 120\text{r/min}$)、推力控制误差($\leq \pm 2\%$ 额定推力)、能耗($\leq 8\text{L}/(\text{h} \cdot \text{kN})$)为评价指标,通过试验拟合与仿真,建立量化关联模型,拟合优度 $R^2 \geq 0.96$ 。

(2) 在线优化算法,采用粒子群优化算法(粒子50个、迭代100次),以控制精度最高、波动最小、能耗最低为准则,实时采集数据,迭代寻优得到最优参数组合,更新周期 $\leq 200\text{ms}$ 。

(3) 自适应机制完善, 整合优化算法与状态监测模块, 场景识别响应时间 $\leq 50\text{ms}$, 状态变化时自动触发优化, 同时设置参数调整保护机制, 限定调整幅度 $\leq 5\%/次$, 避免参数突变导致系统失稳, 实现全工况自适应控制^[3]。

4 航空动力系统智能控制下的运行稳定性分析

4.1 稳定性评价指标体系构建

结合航空动力系统非线性、强耦合特性, 摒弃单一指标局限性, 从稳态精度、动态响应、抗扰动能力三个核心维度, 构建多维度、量化的运行稳定性评价指标体系。稳态精度指标选取发动机转速稳态误差(实际与设定转速差值占比 $\leq \pm 1\%$)、推力稳态波动量(单位时间内极值差 $\leq$ 额定推力 2%)、燃烧室温度稳态偏差($\leq \pm 5^\circ\text{C}$)；动态响应指标中, 起飞、着陆工况响应时间 $\leq 0.5\text{s}$, 巡航工况 $\leq 1\text{s}$, 超调量 $\leq 5\%$ ；抗扰动能力指标包括扰动衰减时间 $\leq 1.5\text{s}$ (波动幅度衰减至 5% 以内), 恢复精度满足稳态要求, 适配高空气流、部件磨损等场景。

4.2 智能控制策略对稳定性的影响机理

从理论层面剖析智能控制策略对系统稳定性的调控机理, 聚焦控制算法参数与控制逻辑的影响。控制算法参数中, 模糊控制规则阈值决定响应灵敏度, 取值不当易引发滞后或振荡；神经网络学习率影响拟合精度, 过高易过拟合、过低拟合缓慢；自适应调节系数决定扰动补偿能力, 取值不合理会降低抗扰动稳定性。控制逻辑方面, 分层架构通过模块化分工避免偏差扩散, 多算法融合形成闭环调控, 减少非线性与不确定性因素影响。基于Lyapuno稳定性理论, 推导稳定性判定条件, 建立量化关联模型, 明确各因素影响权重, 为仿真验证提供支撑。

4.3 稳定性仿真分析模型构建

基于航空动力系统结构与运行特性, 整合智能控制模块, 搭建“系统机理+智能控制+稳定性监测”一体化仿真模型, 涵盖发动机、传动系统、控制系统核心模块, 实现运行与控制过程同步仿真。结合实际参数, 设定发动机额定转速、推力等基础参数, 选取起飞、巡航、着陆三种典型工况, 以及高空低温、气流、部件磨损三种扰动场景, 明确参数范围与触发条件。仿真验证模块嵌入评价指标计算功能, 实时采集参数、自动计算

指标, 记录算法调整与参数波动曲线, 为后续分析与优化提供数据支撑。

5 航空动力系统智能控制稳定性提升优化策略

针对智能控制下稳定性薄弱环节, 制定以下针对性优化策略, 进一步提升系统全工况稳定性:(1) 控制算法参数迭代优化, 基于仿真数据调整核心参数, 模糊控制规则阈值优化为 $0.3\sim 0.7$, 避免响应滞后与参数振荡；神经网络学习率调整至 $0.02\sim 0.04$, 提升多参数耦合拟合精度；自适应调节系数采用分段自适应模式, 扰动场景下系数提升至 $0.3\sim 0.4$, 增强扰动补偿能力, 降低参数波动幅度。(2) 分层控制架构协同优化, 优化中层协调算法, 将协同延迟缩短至 $\leq 80\text{ms}$, 解决多模块耦合干扰问题；底层执行层增加局部反馈校准模块, 校准频率 100Hz , 修正执行机构微小偏差, 避免偏差累积影响系统稳定性；顶层决策层加入工况预判模块, 提前 0.2s 识别工况切换趋势, 实现控制策略提前适配。(3) 增设多源扰动预警与抑制模块, 整合温度、压力、振动等多维度监测数据, 设定扰动预警阈值, 当监测参数异常波动达 3% 时, 提前启动自适应抑制机制；针对高空气流、部件磨损等高频扰动, 增加专项抑制算法, 进一步缩短扰动衰减时间至 $\leq 1.2\text{s}$, 提升系统抗扰动稳定性。

结束语: 本文围绕航空动力系统智能控制策略及运行稳定性展开系统研究, 完成了系统特性分析、控制策略设计、稳定性验证及优化方案制定等工作, 明确了多维度因素对系统稳定性的影响机制, 构建了高效可行的智能控制体系。后续可进一步结合实测数据优化控制算法参数, 完善扰动预警机制。本文研究成果可为航空动力系统智能控制技术的工程应用提供理论参考与实践指导, 助力提升航空器飞行安全性与可靠性。

参考文献

- [1]张丁予,沈挺.航空混合动力系统能量管理策略研究综述[J].航空发动机,2025,51(1):12-20.
- [2]修心岩,王锐,陈志超,罗潇冉,李程镐,王思博,王聪,秦江,黄洪雁.液氨-航空煤油化学回热燃料电池/涡轴发动机混合动力系统的设计与性能评估[J].推进技术,2025,46(11):285-298.
- [3]李成杰,徐世依,王思博,秦江,魏立秋.航空甲醇重整燃料电池混合动力系统性能分析与应用评估[J].推进技术,2025,46(11):259-269.