

航空供油系统流量控制优化策略研究

李梓岳

北京航天益森风洞工程技术有限公司, 北京市, 100074;

摘要: 航空供油系统作为航空器燃油传输与管理的关键环节, 其流量控制的精准性直接影响飞行安全与燃油利用效率。在航空器复杂的飞行工况下, 供油系统需应对不同高度、速度及姿态变化带来的流量波动, 传统控制方式常面临响应滞后、调节精度不足等问题。本文从航空供油系统的工作特性出发, 分析流量控制的核心需求与影响因素, 探讨基于动态调节、智能算法及硬件优化的流量控制策略, 阐述各策略在提升系统稳定性、响应速度及节能性方面的作用机制。研究表明, 通过多策略协同应用, 可实现航空供油系统流量的精准调控, 为航空器的高效安全运行提供保障。

关键词: 航空供油系统; 流量控制; 优化策略; 动态调节; 智能算法

DOI: 10.69979/3041-0673.26.03.091

引言

燃油系统是飞机的关键系统之一, 它用于储存燃油并在不同飞行状态下安全可靠的将一定流量的燃油供给发动机, 以保证飞机的飞行安全和飞行性能。地面模拟试验是飞机研制过程中的重要阶段, 能为相应系统提供设计数据, 验证系统功能, 分析系统可靠性。流量控制系统的用于模拟发动机的燃油输送过程, 是飞机燃油系统地面模拟试验的关键子系统之一。也是保证飞机燃油系统设计的合理性、正确性, 检验系统性能, 发现和排除故障的重要手段。传统的流量控制多采用机械阀门调节或简单闭环控制, 难以适应复杂工况下的动态需求, 可能出现流量超调、调节滞后等问题, 影响发动机性能甚至危及飞行安全。

随着航空技术的发展, 航空器对供油系统的流量控制提出了更高要求, 不仅需要满足宽范围的流量调节需求, 还需具备快速响应、高稳定性及低能耗的特点。现代控制理论与智能技术的应用为流量控制优化提供了新的解决方案, 通过融合动态调节机制、智能算法及硬件升级, 可实现供油系统流量的精准、高效控制。本文系统分析航空供油系统流量控制的关键问题, 探讨多种优化策略的应用路径, 旨在为提升航空供油系统的控制性能提供理论参考。

1 航空供油系统流量控制的核心需求与影响因素

1.1 流量控制的核心需求

航空供油系统的流量控制需满足多维度的性能要求, 首要目标是保障流量的稳定性与精准性。发动机在不同工况下对燃油流量的需求具有严格标准, 流量过高

可能导致发动机过热或富油燃烧, 流量过低则可能造成动力不足, 因此需将流量控制在预设范围内, 确保发动机工作在最佳状态。

1.2 影响流量控制的主要因素

外部环境变化对流量控制的影响显著。航空器在不同飞行高度时, 大气压力与温度存在较大差异, 导致燃油的密度、黏度等物理性质发生变化, 进而影响管路中的流量特性。例如, 高空低温环境会使燃油黏度增加, 流动阻力增大, 若控制策略未及时调整, 可能导致实际流量低于需求值。

2 基于动态调节机制的流量控制优化

2.1 分段式流量调节策略

分段式流量调节根据发动机的工况需求, 将流量控制范围划分为多个区间, 针对不同区间采用差异化的控制参数与调节逻辑, 以提升各区间内的控制精度。在低流量区间(如巡航阶段), 采用小增益比例积分微分控制, 减少调节过程中的超调与震荡, 确保流量的稳定性; 在高流量区间(如起飞阶段), 则增大控制增益以加快响应速度, 满足发动机对流量的快速需求。通过区间切换时的平滑过渡算法, 可避免因参数突变导致的流量波动, 保证整个调节过程的连续性。

分段式调节还需结合燃油的物理性质变化进行动态补偿。在不同温度与压力条件下, 通过实时测量燃油的密度与黏度, 修正流量计量公式, 确保实际流量与需求流量的一致性。

2.2 前馈-反馈复合控制机制

前馈-反馈复合控制结合了前馈控制的预见性与反

馈控制的校正能力，可有效提升流量控制的动态性能。前馈控制基于发动机的工况指令（如推力需求）与外部环境参数（如高度、温度），通过建立的数学模型提前计算出所需的流量调节量，在扰动发生前即发出控制指令，减少扰动对流量的影响。例如，当航空器进入加速阶段时，前馈控制可根据发动机的推力增长速率，提前增加燃油流量，避免出现动力滞后。

反馈控制则通过实时监测实际流量与目标流量的偏差，对前馈控制的输出进行校正，消除模型误差或未预见扰动带来的影响。反馈回路采用自适应控制算法，能根据偏差的大小与变化趋势动态调整控制参数，在流量出现波动时快速收敛至目标值。前馈与反馈的协同作用，可使系统在应对工况突变与外部扰动时，既具备快速响应能力，又能保证调节精度，显著提升流量控制的鲁棒性。

2.3 压力-流量协调控制策略

压力与流量的耦合关系是影响供油系统控制性能的关键因素，压力-流量协调控制通过建立两者的联动调节机制，实现系统的整体优化。传统控制中常单独调节流量或压力，可能导致两者相互干扰，例如流量调节时阀门开度的变化会引起管路压力波动，进而影响流量的稳定性。协调控制策略通过构建压力与流量的耦合模型，将流量调节与压力调节视为一个整体，在调整流量的同时对压力进行补偿，避免因压力变化导致的流量偏移。

在具体实现中，采用双闭环控制结构：外环为流量控制环，根据目标流量计算所需的压力设定值；内环为压力控制环，通过调节泵组转速或阀门开度维持压力稳定，间接实现流量控制。这种协调机制可减少管路压力波动对流量的影响，尤其在多泵并联或多回路供油系统中，能均衡各支路的压力与流量分配，避免出现支路间的流量失衡，提升整个供油系统的稳定性。

3 基于智能算法的流量控制优化

3.1 模糊控制算法的应用

模糊控制算法适用于供油系统这类具有非线性、时变特性的复杂系统，其无需精确的数学模型即可实现有效的流量控制。该算法通过将流量偏差、偏差变化率等输入量模糊化，建立基于专家经验的模糊规则库，根据模糊推理输出控制量（如阀门开度、泵转速），实现流量的动态调节。在流量波动较大的工况下，模糊控制能快速响应偏差变化，通过渐进式调节减少超调；在流量接近目标值时，则自动减小调节幅度，保证控制精度。

3.2 模型预测控制的优化

模型预测控制基于系统的预测模型，通过滚动优化与反馈校正实现流量的精准控制，特别适用于存在约束条件的航空供油系统。该算法根据当前系统状态与历史数据，预测未来一段时间内的流量变化趋势，同时考虑泵组转速上限、阀门开度范围等约束条件，求解最优控制序列，仅执行序列中的第一个控制动作，在下一时刻重复上述过程。这种滚动优化机制可使系统在复杂工况下始终保持最优控制状态，避免因长期预测误差导致的性能下降。

3.3 神经网络与自适应控制的融合

神经网络与自适应控制的融合为流量控制提供了智能化解决方案，利用神经网络的非线性映射能力与自适应控制的参数调节能力，提升系统对复杂工况的适应能力。神经网络通过训练学习供油系统的输入输出关系，建立高精度的非线性模型，用于预测流量变化或补偿系统参数变化带来的影响。例如，利用神经网络预测不同温度下的燃油流量特性，为控制算法提供更精准的模型支持。

自适应控制则根据神经网络的预测结果与实际反馈，实时调整控制参数，使系统始终保持最佳控制性能。在系统出现参数漂移或外部扰动时，自适应机制能自动修正控制策略，避免流量偏差扩大。这种融合策略尤其适用于老旧航空器的供油系统改造，可在不更换硬件的情况下，通过算法升级提升流量控制性能，具有较高的经济性与实用性。

4 基于硬件与系统结构的流量控制优化

4.1 执行部件的性能升级

执行部件的性能直接影响流量控制的效果，对燃油泵、控制阀等核心部件进行升级是优化策略的重要组成部分。燃油泵的升级可采用变排量泵或变频调速技术，实现流量的连续调节与能耗优化。变排量泵通过改变柱塞行程或斜盘角度，在不同转速下提供所需流量，减少传统定量泵的节流损失；变频调速技术则通过调节电机转速改变泵的输出流量，响应速度快且能耗低，尤其适用于宽范围流量调节需求。

控制阀的优化可采用电液比例阀或伺服阀替代传统机械阀门，提升流量调节的精度与响应速度。电液比例阀能根据电信号成比例地调节开度，实现流量的连续控制，且抗污染能力较强，适合航空恶劣环境；伺服阀则具有更高的调节精度与动态响应特性，可满足高精度流量控制的需求。

4.2 传感与监测系统的优化

传感与监测系统的优化是提升流量控制精度的基础,通过采用高精度、高响应的传感器及先进的数据处理技术,为控制算法提供可靠的参数依据。流量传感器的选择需满足宽量程、高分辨率的要求,如采用科里奥利质量流量计直接测量燃油质量流量,避免体积流量受温度、压力影响导致的误差。压力传感器与温度传感器需布置在关键节点(如泵出口、发动机入口),实时监测管路状态,为流量补偿提供数据支持。

数据处理技术的应用可提升监测系统的可靠性,通过多传感器数据融合算法,对不同传感器的测量值进行加权处理,减少单一传感器故障或测量误差带来的影响。

4.3 系统结构的模块化设计

系统结构的模块化设计通过将供油系统划分为多个功能模块(如储存模块、输送模块、分配模块),实现流量控制的分布式与协同化。每个模块配备独立的控制单元,负责本模块内的流量调节,同时通过数据总线实现模块间的信息交互与协同控制。这种设计可减少集中控制的计算负担,提升系统的响应速度,同时便于故障隔离与维护,当某一模块出现问题时,其他模块仍可正常工作,提高系统的容错能力。

5 流量控制优化策略的协同应用与验证

5.1 多策略的协同机制

单一优化策略难以满足航空供油系统复杂的流量控制需求,多策略的协同应用可发挥各策略的优势,实现整体性能的提升。动态调节机制与智能算法的协同是核心,动态调节提供基础的控制框架与快速响应能力,智能算法则通过优化控制参数、预测流量变化进一步提升调节精度与适应性。

硬件升级与控制策略的协同可充分发挥硬件性能,例如高精度伺服阀与模糊控制算法的结合,能利用伺服阀的快速响应特性与模糊控制的动态调节能力,实现宽范围、高精度的流量控制。系统结构的模块化设计则为多策略协同提供了平台支持,各模块可根据自身特点采用不同的控制策略,通过模块间的信息交互实现整体优化。多策略的协同需建立统一的控制目标与协调机制,避免策略间的冲突,确保流量控制的稳定性与高效性。

5.2 验证方法与评价指标

流量控制优化策略的有效性需通过科学的验证方法与评价指标进行评估。仿真验证是重要手段,通过建

立供油系统的数学模型,模拟不同飞行工况与外部扰动,对比优化前后的流量控制性能。仿真模型需包含燃油泵、管路、阀门、传感器等核心部件的动态特性,准确反映系统的非线性与耦合关系。实物试验则在地面试验台或飞行试验中进行,验证策略在实际环境中的应用效果,重点测试流量调节精度、响应速度、稳定性及故障容错能力。

评价指标应涵盖多个维度,包括静态指标与动态指标。静态指标主要考察流量的稳态精度,即稳态时实际流量与目标流量的偏差;动态指标包括调节时间(流量从扰动到恢复稳定的时间)、超调量(流量的最大偏差与目标值的比值)及抗干扰能力(在外部扰动下流量的波动幅度)。

6 结语

航空供油系统流量控制的优化是提升航空器性能与安全性的关键环节,需要从动态调节机制、智能算法及硬件系统等多方面协同发力。分段式调节、前馈-反馈复合控制等动态策略可提升系统的响应速度与稳定性;模糊控制、模型预测控制等智能算法能增强系统对复杂工况的适应能力;而执行部件升级、模块化设计等硬件优化则为控制策略的实施提供了物质基础。多策略的协同应用可实现流量控制的精准化、高效化与智能化,满足现代航空器对供油系统的高性能需求。

未来,随着航空技术的不断发展,流量控制优化将向更智能、更集成的方向发展。基于数字孪生的虚实融合控制、基于大数据的自适应学习控制等新技术有望得到应用,进一步提升流量控制的精度与自适应能力。同时,需加强供油系统与发动机控制系统的一体化设计,实现燃油流量与发动机性能的深度协同,为航空器的高效、安全飞行提供更有力的保障。

参考文献

- [1]刘振侠,张丽娜,吕亚国.航空发动机燃油系统动态特性研究[J].航空动力学报,2018.
- [2]王占学,李华聪,黄开明.航空燃油泵控系统流量调节策略[J].推进技术,2019.
- [3]吴宏,张晓峰,李军.基于模糊PID的航空供油系统流量控制[J].航空学报,2017.
- [4]黄向华,刘刚,王勇.大型运输机供油系统动态流量分配特性[J].航空学报,2020.
- [5]张宝诚,李秋红,赵斌.航空燃油系统智能控制技术进展[J].航空工程进展,2019.