

小型涡喷发动机压气机喘振特性及主动防喘控制策略仿真

李晨晨

郑州丰元电力工程设备有限公司，河南省郑州市，450199；

摘要：随着航空工业的快速发展，小型涡喷发动机在无人机、巡航导弹等高技术飞行器中的应用日益广泛。然而，压气机喘振作为小型涡喷发动机的一种常见故障，严重影响了其性能和可靠性。喘振不仅会导致发动机功率下降、振动加剧，严重时甚至会造成发动机停车，对飞行安全构成严重威胁。因此，深入研究小型涡喷发动机压气机的喘振特性及主动防喘控制策略具有重要意义。本文旨在通过仿真分析，探讨压气机的喘振特性，并提出有效的主动防喘控制策略，以提高小型涡喷发动机的稳定性和可靠性。

关键词：小型涡喷发动机；压气机喘振特性；主动防喘；控制策略仿真

DOI： 10.69979/3060-8767.25.10.007

引言

近年来，随着计算流体动力学和先进控制理论的发展，仿真分析已成为研究压气机喘振特性及主动防喘控制策略的重要手段。通过数值模拟，可以深入了解压气机内部流动特性，揭示喘振发生的机理，从而为设计有效的主动防喘控制策略提供理论依据。本文的研究内容不仅具有重要的理论价值，而且对于提高小型涡喷发动机的实际应用性能具有现实意义。在接下来的章节中，我们将详细探讨压气机喘振特性的影响因素，以及基于不同控制原理的主动防喘策略，并通过仿真验证其有效性。

1 压气机喘振问题的背景及重要性

压气机作为小型涡喷发动机的“心脏”，承担着吸入空气并加压的核心任务，其稳定运行直接决定发动机的动力输出与可靠性。喘振是压气机在偏离设计工况运行时出现的一种破坏性气动不稳定现象，本质是气流在叶片通道内发生周期性的分离与回流，表现为压气机出口压力剧烈波动、流量忽大忽小，同时伴随强烈的机械振动与噪声。对于小型涡喷发动机而言，由于其结构紧凑、转子转速高、容腔尺寸小，喘振的响应速度更快、危害更直接：轻微喘振会导致发动机推力波动，影响飞行姿态稳定性；严重喘振则可能造成叶片疲劳损伤、轴承磨损，甚至引发转子失稳、发动机空中停车等致命故障。在实际应用中，小型涡喷发动机广泛用于无人机、靶机、小型航空器等领域，这些场景对动力系统的可靠性要求极高，且常面临频繁的工况切换（如加速、减速、altitude变化），喘振风险显著增加。因此，深入研究压气机喘振特性，开发有效的主动防喘控制策略，对提升小型涡喷发动机的运行安全性、延长使用寿命、拓展

工况适应范围具有至关重要的工程意义。

2 压气机喘振特性的影响因素

2.1 设计参数对喘振特性的影响

压气机的设计参数从根本上决定了其喘振边界与稳定工作范围，各参数的匹配性直接影响气动稳定性。叶片几何参数是核心影响因素：叶片弦长与展长比过小会导致叶片刚度不足，易在气流激励下发生振动，加剧气流分离；叶片安装角过大虽能提升压比，但会缩小喘振裕度，使压气机在小流量工况下更易进入喘振区；叶型弯度与厚度分布则影响气流在通道内的流动轨迹，弯度过大易导致叶背气流过早分离，而厚度不均会增加气流扰动。气动布局参数同样关键：级间匹配不合理（如前级压比过高、后级流通能力不足）会造成级间气流堵塞，诱发喘振；进气道设计若存在气流畸变（如旋流、总压分布不均），会破坏叶片进口气流的均匀性，降低压气机抗喘振能力。此外，转子与静子的间隙过大将导致漏气损失增加，降低压缩效率，间接缩小稳定工作范围；而材料的气动弹性特性则会影响叶片在高速气流下的振动特性，与喘振形成耦合作用，进一步影响系统稳定性。

2.2 运行参数对喘振特性的影响

运行参数的动态变化是诱发压气机喘振的直接原因，不同参数的交互作用使喘振特性呈现复杂变化规律。转速是最关键的运行参数：当转速升高时，压气机需要吸入更多空气以维持流量匹配，若流量供给不足（如节气门突然关小），易导致气流在叶片通道内滞止，触发喘振；而转速骤降时，压比瞬间下降，可能造成后级气流回流，引发喘振。进口气流条件的变化显著影响喘振

边界：进口总压降低（如高空环境）会导致压气机实际压缩能力下降，相同流量下更易进入不稳定区；进口温度升高则会降低空气密度，减少实际进气量，缩小稳定工作裕度。负荷变化率也不容忽视：发动机加速时，燃油供应量增加，要求压气机快速提升压比与流量，若压气机响应滞后于燃油系统，易出现“富油贫气”状态，诱发喘振；而减速过快则可能导致气流惯性与转子惯性不匹配，造成气流倒流。此外，大气湿度增加会改变空气的热力学性质，影响气流在叶片表面的附着特性，间接影响喘振的发生阈值。

2.3 压气机喘振特性的数值模拟方法

数值模拟是研究压气机喘振特性的高效手段，通过构建数学模型重现气流不稳定过程，为喘振机理分析与控制策略设计提供支撑。三维计算流体力学（CFD）方法是核心技术，基于 Navier-Stokes 方程，采用有限体积法离散流场，模拟气流在叶片通道内的分离、回流等复杂流动现象。在湍流模型选择上，针对喘振的非定常特性，常采用大涡模拟（LES）或分离涡模拟（DES），虽计算量较大，但能更精准捕捉瞬态气流结构；而雷诺平均 Navier-Stokes（RANS）模型则因计算效率高，适用于初步喘振边界预测。系统动力学建模方法从整体角度描述压气机与发动机其他部件的耦合作用，基于容积法建立压气机的流量-压比特性曲线，结合涡轮、燃烧室等部件的数学模型，构建全系统动态响应模型，可快速模拟工况变化下喘振的发生过程。气动弹性耦合模拟则考虑叶片结构振动与气流扰动的相互作用，通过流固耦合算法（如分区耦合、紧耦合），分析喘振诱发的叶片振动特性，评估结构损伤风险。此外，近年来数据驱动方法（如神经网络、深度学习）也逐渐应用于喘振预测，通过训练历史运行数据，建立喘振预警模型，提升模拟的实时性与准确性。

3 主动防喘控制策略研究

3.1 主动防喘控制策略的原理与分类

主动防喘控制策略通过主动干预压气机运行状态，实时调整关键参数，避免气流进入不稳定区，其核心原理是基于喘振前兆信号的提前调控，而非被动承受喘振冲击。根据控制手段的不同，可分为气动调节类策略、结构调节类策略与综合协调类策略。气动调节类策略通过改变气流参数抑制喘振，如可调静子叶片（VSV）通过调整静子安装角，优化级间气流匹配；放气活门（BLC）则在接近喘振边界时打开，排出部分低压空气，增加主流道流量，缓解气流堵塞。结构调节类策略通过改

变压气机结构参数适应工况变化，如可变几何扩压器通过调整扩压器通道面积，匹配不同转速下的气流需求；而主动控制叶片振动技术则通过施加主动激励，抑制叶片颤振与气流分离的耦合作用。综合协调类策略则结合多控制手段，如将 VSV 与 BLC 协同调控，同时引入燃油供给量调节，实现多参数联动，进一步拓宽稳定工作范围。此外，按控制逻辑可分为反馈控制、预测控制、自适应控制等类型，分别适用于不同的工况复杂度与控制精度要求。

3.2 基于反馈控制的主动防喘策略

基于反馈控制的主动防喘策略是最成熟的应用技术，通过实时采集喘振相关信号，对比设定阈值，驱动执行机构进行调节，形成闭环控制。该策略的核心是信号检测与处理，常用的反馈信号包括压气机出口压力波动、转子振动加速度、进气流量变化率等，其中压力波动信号的频谱分析可有效识别喘振前兆（如特定频率成分的出现）。控制算法方面，PID 控制因其结构简单、鲁棒性强，广泛应用于放气活门与可调静子叶片的调节，通过比例、积分、微分环节的组合，快速消除偏差，将运行参数稳定在安全区间；对于存在非线性特性的压气机系统，模糊 PID 控制通过引入模糊逻辑规则，动态调整 PID 参数，提升在变工况下的控制精度。执行机构的响应速度是关键性能指标，如电液伺服驱动的放气活门需在几十毫秒内完成开关动作，确保在喘振发生前及时干预。反馈控制的优势在于可靠性高、易于工程实现，但对于快速变化的极端工况，可能因信号传输与处理延迟导致调控滞后。

3.3 基于预测控制的主动防喘策略

基于预测控制的主动防喘策略针对反馈控制的滞后问题，通过预测未来工况变化趋势，提前采取调控措施，实现“防患于未然”。该策略的核心是预测模型构建，基于压气机的动态特性数据，建立流量、压比、转速等参数的时间序列预测模型，常用方法包括 ARIMA（自回归积分移动平均）模型、支持向量回归（SVR）模型等，可预测未来 0.1-1 秒内的运行参数变化。滚动优化是关键环节，根据预测结果，在每一个控制周期内求解最优控制量（如静子叶片调节角度、放气活门开度），使未来一段时间内系统运行状态偏离喘振边界的程度最小化。约束处理功能确保调控过程中执行机构的动作不超过物理极限（如叶片调节角度范围、活门开关速度），避免机械损伤。预测控制特别适用于小型涡喷发动机频繁工况切换的场景，如无人机加速爬升过程中，可通过

预测转速与流量的匹配关系，提前调整放气活门开度，有效抑制喘振的发生，但其控制效果高度依赖预测模型的准确性。

3.4 基于自适应控制的主动防喘策略

基于自适应控制的主动防喘策略适用于参数时变、模型不确定的压气机系统，通过在线识别系统特性，动态调整控制策略，提升鲁棒性。该策略的核心是参数辨识模块，利用递推最小二乘法、卡尔曼滤波等算法，实时估计压气机的关键参数（如流量增益、压比系数），跟踪系统特性的变化（如叶片磨损导致的效率下降、积垢引起的流通能力变化）。控制律自适应调整模块根据辨识出的参数，自动修正控制算法（如PID参数、预测模型系数），使控制策略始终适配当前系统状态。例如，当压气机因长期运行出现叶片积垢时，参数辨识模块会检测到流量系数降低，控制律随即增大放气活门的开度阈值，确保在新的特性下仍能维持稳定运行。此外，模型参考自适应控制(MRAC)通过设定理想的参考模型（如期望的压力-流量特性），使实际系统输出跟踪参考模型，进一步提升控制精度。自适应控制解决了固定参数控制在系统老化、工况剧变时性能下降的问题，但其算法复杂度较高，对硬件计算能力要求更高。

3.5 多变量协同主动防喘控制策略

多变量协同主动防喘控制策略针对压气机多参数耦合的特性，通过协调多个控制变量，实现系统整体性能最优，避免单一变量调节的局限性。该策略首先需建立多变量耦合模型，分析可调节子叶片(VSV)、放气活门(BLC)、燃油流量、转子转速等变量之间的交互作用，明确各变量对喘振边界、压比、效率的影响权重。解耦控制是关键技术，通过状态反馈或动态解耦算法，将多变量耦合系统转化为多个独立的单变量系统，简化控制难度；例如，采用逆系统方法设计解耦控制器，消除VSV调节对流量的影响与BLC调节对压比的干扰。多目标优化模块基于帕累托最优原理，在满足防喘振要求的同时，兼顾压气机效率与燃油经济性，如在调节放气活门时，不仅要避免喘振，还要最小化放气导致的能量损失。多变量协同控制能更全面地应对复杂工况，尤其适用于小型涡喷发动机在高空、高速条件下的运行控制，但对系统建模精度与控制算法的实时性要求严苛。

3.6 主动防喘控制策略的仿真验证方法

主动防喘控制策略的仿真验证是连接理论设计与工程应用的关键环节，通过构建虚拟测试环境，评估策略的有效性与可靠性。半物理仿真是常用方法，将压气机的数值模型（如CFD模型、系统动力学模型）与实际控制硬件（如控制器、传感器、执行机构）连接，模拟真实运行场景：控制器根据模型输出的压力、流量等信号生成控制指令，执行机构的响应通过硬件接口反馈至模型，形成闭环测试。全数字仿真则基于MATLAB/Simulink、GT-Power等平台，搭建发动机整机与控制策略的联合仿真模型，可快速模拟不同工况（如加速、减速、进口畸变）下的防喘效果，分析控制参数对策略性能的影响，实现控制算法的快速迭代优化。极限工况测试是验证的重点，通过模拟极端条件（如骤减负荷、高空熄火重启），评估策略的容错能力与极限保护效果。此外，仿真结果的量化评估需建立多维度指标体系，包括喘振抑制成功率、控制响应时间、压气机效率损失率等，确保策略在满足防喘要求的同时，兼顾发动机的动力性能与经济性。仿真验证不仅能降低物理试验的成本与风险，还能为控制策略的工程化改进提供数据支撑。

4 结语

综上所述，对小型涡喷发动机压气机喘振特性的深入研究及其主动防喘控制策略的开发，不仅有助于提升发动机的整体性能，还为解决类似气动稳定性问题提供了理论与方法上的借鉴。未来，随着计算流体力学、智能控制理论及材料科学的不断进步，小型涡喷发动机的防喘技术将更加成熟，为航空、能源等领域的高效、安全应用奠定坚实基础。同时，跨学科的合作与技术创新将是推动该领域发展的关键，期待更多研究成果的涌现，共同推动小型涡喷发动机技术的发展。

参考文献

- [1]周霞,李建锋,周宏,高云鹏.耦合蒸汽压缩与储热的燃煤热电联产机组调峰性能研究[J].中国电机工程学报,2025,45(01):194-206.
- [2]肖卓楠,张荣,刘英琦,安尧,张智羽.太阳能辅助热电联产机组供热、发电及调峰性能分析[J].热力发电,2024,53(05):67-74.
- [3]王娜,马国锋,王宇,刘明,严俊杰.蒸汽热网辅助热电联产机组调频性能研究[J].工程热物理学报,2024,45(01):40-45.