

航空发动机失速预警技术的研究进展

Research Development of Aero Engine Stall Warning Technology

■ 夏增虎 高晗庭 董旭 孙大坤 孙晓峰 / 北京航空航天大学 万能 李大鹏 许广伟 / 中国航空发动机研究院

以可调叶片为代表的主动控制技术可以实现压气机稳定裕度的扩大，而失速预警技术是主动控制的关键一环，如何通过行之有效的预警方法获得更长的预警时间是研究人员一直追求的目标。

现代航空发动机迈向更高推重比的目标促使设计人员进一步地提升压气机的总压比或级负荷，而高压比、高负荷的设计却往往遭到流动稳定性问题的制约。航空发动机流动稳定性问题通常是指压气机的旋转失速和喘振。这两种失稳状态会影响发动机的正常工作，导致发动机推力下降、结构损坏、甚至在空中熄火停车，对飞行安全性造成严重危害。研究如何避免压气机进入不稳定工作状态具有十分重要的现实意义。目前发动机扩稳技术分为两大类：风扇/压气机旋转失速/喘振主动控制技术和以机匣处理为代表的被动控制技术。失速预警技术一直以来是风扇/压气机稳定性主动控制所关注的焦点之一。对于主动控制技术，控制单元需要知道何时启动扩稳装置，即需要知道哪种信号可以用来判断压气机是否工作在裕度不足的状态，控制系统需要一种失速预警方法来实现这一目的（见图1）。失速预警技术自20世纪90年代开始发展，近年来业界将热门的人工智能技术与之结合进行了诸多研究。

失速先兆探测

早期对失速预警技术的研究一般集中于对失速先兆的探测。1990年，

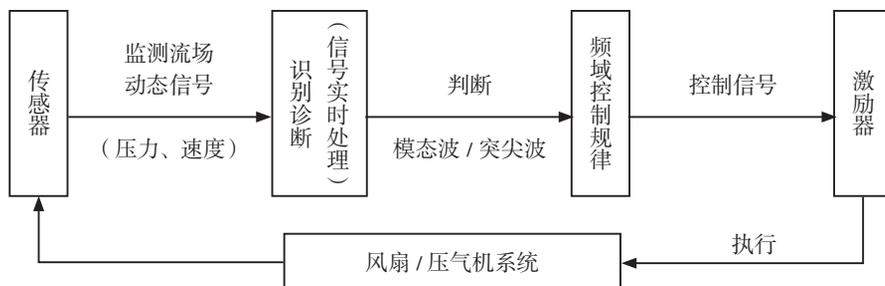


图1 主动控制流程

麦克杜格尔 (McDougall) 等在一台低速压气机上利用6个周向均匀布置的热线在失速前成功观察到了模态 (modal) 型失速先兆。典型的模态波类型的失速先兆 (见图2 (a)) 在压力信号图中表现为温和平缓的周期性波动。模态型失速先兆通常在压气机失速前的多个转子周期前即出现，是一种逐渐发展起来的扰动波，在时间和空间上难以准确界定其起始点。模态波扰动表现为一种小幅值、发生在全叶高范围的扰动，其周向尺度与压气机的圆周尺寸相当，相对另一种失速先兆来说在周向具有较大的空间尺度，因此又称为大尺度扰动。模态波扰动通常发生在压升特性线的斜率为0或略为正的工作点，从产生到演化为完全发展的旋转失速团约有几十个转子周期，在周向传播的速度通常小于50%转子速度，在整个周向范围内对压气机产生影响。它发生的物理

机制通常被认为是特性线斜率的改变使得压缩系统中的阻尼由正值变为负值，扰动的增长无法得到抑制，从而引起旋转失速的发生。

1993年，戴 (Day) 在试验中首次发现了一种与大尺度的模态失速先兆不同的位于叶尖区的突尖 (spike) 型失速先兆。典型的突尖型的失速先兆 (见图2 (b)) 在原本平稳的压力或轴向速度信号图中表现为突然出现的尖刺状脉冲，并在出现之后迅速发展为旋转失速。这种突尖型的先兆波最早出现在压气机叶片排中的某一个局部位置。刚出现时，它的周向尺度范围很小，通常只有1~3个叶片通道的宽度，因此也称为短尺度扰动。突尖形成之后在周向快速传播，传播速度通常在60%~80%转子速度之间，而且叶片排中的叶片通道数目越少其传播速度越快。在周向传播的过程中，突尖的空间尺度快速增长而传播速

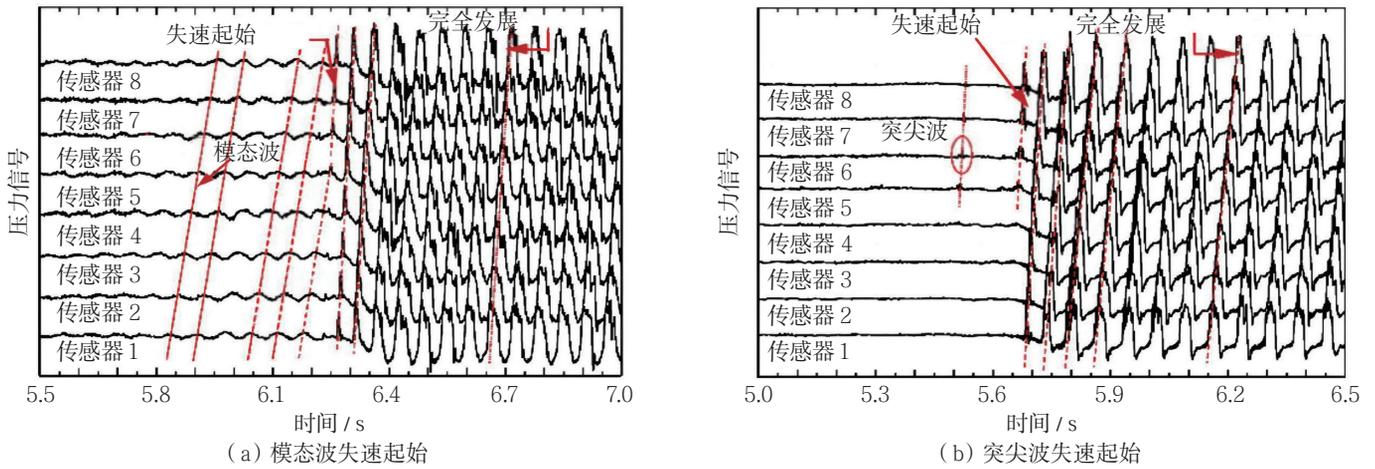


图2 失速起始的两种类型

度逐渐下降，最终发展为完整的失速团。结果表明突尖型失速先兆具有强烈的三维特性。突尖的发现对失速先兆的探测与识别提出了挑战，这种位于叶尖区域的小扰动毫无征兆的突然产生，且一旦出现便迅速传播发展，很快就成为完整的失速团，由于其非线性的特征，很难使用流动稳定性模型进行分析。

因此，研究人员对突尖产生的机理进行了非定常数值模拟研究，结果表明有两种流动情况会导致突尖扰动的产生，即转子叶尖泄漏流和主流交界面与前缘平齐，或者转子叶片尾缘处产生回流进入相邻的叶片通道。从研究结果来看，泄漏流增强是一个逐渐的过程，在这一过程中泄漏流和主流的交界线也会前移，到交界线和叶片前缘基本平行的时候就会直接影响下一个叶片的进气攻角，这时候便出现突尖扰动，距离压气机发生旋转失速就很短暂了。且叶尖泄漏流并非形成突尖扰动的必要条件，突尖扰动是由叶片前缘分离引起的，并且由于前缘涡脱落而在周向范围传播，在失速开始时，前缘的分离会造成堵塞，导致叶片排上游静压

升高，而前缘的脱落涡又会形成低压区，反映在压力信号中即为典型的突尖波。但试图从叶尖泄漏流或者角区分离这些表面流动现象中分析失速端倪，则非常困难。如果等到失速先兆出现标志着系统已处于失稳临界状态，此时采取控制措施为时已晚。

从已有的探测失速预兆实现失速预警的研究结果来看，从探测到突尖型失速先兆到压气机进入完全发展的旋转失速，通常仅有几十毫秒的时间。几十毫秒量级的提前预警自然无法给控制系统提供足够的时间启动主动控制装置，难以实现对失稳的控制。同时压气机的实际工作环境极其复杂，诱发先兆的因素难以确定，并且工作环境的微小改变都可能造成失速先兆的变化。同时传感器采集到的失速信号一般都与高频的主要流场扰动以及气动噪声等混杂在一起，对其的探测、识别也难以实现，何时启动主动机构的问题更是难以解决。且实践证明，在多级压气机中，工况的很小改变都能导致突尖的位置发生变化，因此连测量都很难在多级压气机的条件下实现，更遑论在整个压气机

中各处都布上可以高速响应后作动的喷气结构了。

因此，通过探测失速先兆的实现压气机的失速预警的效果往往不如人意。如何对压气机工作状态进行有效监测从而获得更长的预警时间的问题亟待解决。

传统失速预警技术

失速预警技术是实现压气机流动稳定性主动控制的重要一环，该技术需要预判压气机失稳边界，在其接近失速状态时发出信号预警，启动主动控制机构，以避免或延迟压气机进入失速工况。早期对失速先兆探测的研究工作表明，通过在失速先兆出现的短时间内进行精确探测获得的预警时间往往是不够的，为了得到更长的预警时间，研究人员采用了各种不同的分析方法开展了研究，主要方法还是一些信号处理方法，如傅里叶分析、小波变换等。小波变换可以应用于非线性、非平稳信号的分析，反映信号的局部特性，克服了短时傅里叶变换难以平衡时间和频率分辨率的缺点。林峰等采用小波变换的方法分析了来自

1台高速单级压气机和1台低速三级压气机上的动态压力信号，来研究流动的非定常性和旋转失速发生的关系。在低速压气机上的结果表明，小波变换的方法可以在失速发生前近百转的时间上准确地探测到失速先兆。然而小波变换并非是自适应的，其分析结果会由于研究人员选取的小波基不同而结果不同。

一些研究者通过试验观察，发现叶片通过某一固定位置是一个周期性事件。这一周期性会反映在近场压力传感器所采集到的压力信号上，并且会随着压气机工作点靠近失速边界而变差。这种周期性变坏的现象首先随机地发生在个别叶片通道，随着工作点逐渐靠近失速边界，这种现象逐步扩展到更多的叶片通道，发生频率也越来越高。这一现象可以看作压气机失速前的“孤立事件”。基于叶片周期性破坏，丁格拉 (Dhingra) 等建立了一种失速/喘振先兆检测方法，提出了一个名为“相关量度” (correlation measure) 的参数作为评价压力信号不规则程度的参数，试验结果表明这一参数是一个有效的指示失速起始的参数。然而，这是一种比较保守的方法，在应用中会产生虚警现象。随后，他们通过在相关量度概率分布研究的基础上发展了一个随机模型，将相关量度的减小看作一个随机事件，通过计算事件发生率随稳定裕度的变化来实现失速预警。同时，以上的失速预警方法皆是通过对试验现象的观察认识进行单纯的数据分析，对于其背后的物理机理，以及为什么传感器所采集到的动态压力信号在压气机的设计点和近失速工作点所表现出来的差别并没有清楚的认识。

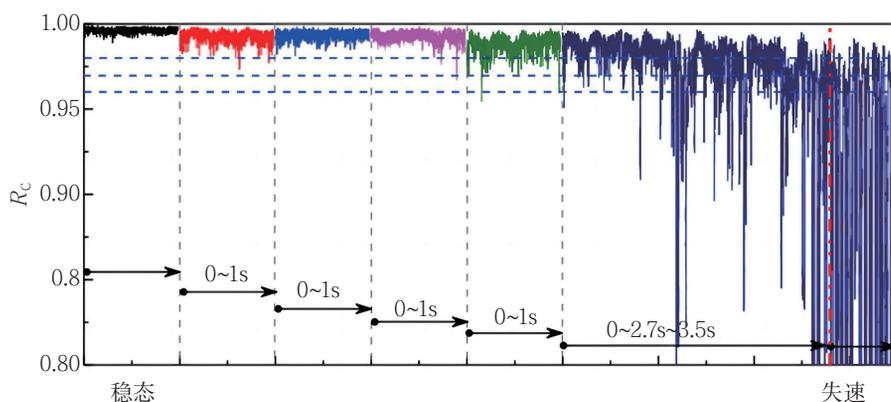


图3 低速轴流压气机设计转速下 R_c 在不同工作点的分布

北京航空航天大学孙晓峰团队根据气动声学的基本原理揭示了这一现象产生背后的机理。在设计点，压气机通道内流动平稳，流场的非定常效应并不明显，此时每个叶片的环量基本是不变的，则叶片载荷近似不变，这使得压力信号较为平稳。而在近失速点，流动变得不稳定，流动分离和叶尖泄漏效应增强所造成的频繁的涡脱落现象使得叶片环量波动，则导致叶片载荷产生变化，压力信号波动急剧增长。据以上认识，定义了一个参数 R_c 来量化评价压气机由设计点到近失速点期间内压力信号周期性的变化。当压气机由设计点向失速点靠近时，流场非定常特性增强，其中导致叶片环量下降的涡脱落等现象使叶片载荷发生变化，而叶片载荷的变化产生相应的压力波会被传感器记录下来，当传感器记录的某一周期内的叶片信号与上一周期不同时，则会体现在 R_c 的变化上。当 R_c 越接近1时表示压力信号周期性越好，越接近0表示压力信号周期性越差（见图3）。并且为了解决 R_c 在大流量工作点突然出现下降而导致的失速误报警问题，研究了该参数的统计特性，以分布函数的方式发展了一种

基于涡动力学和升力定理的实时失速预警方法，并结合机匣处理技术，建立了稳定性主动控制系统。试验表明该系统可以在压气机接近失速边界时发出预警信号起动机匣处理，实现压气机失速裕度的扩展，且预警时间提高了80~100倍。

以上方法仍面临一些问题。例如，阈值的选取，不单指阈值大小问题，更关键在于面对不同工况如何选择合适的阈值，这需要预警参数学习；还有信号的质量，传感器的精度、安装位置以及进口畸变都会影响信号质量，降低预警准确性。这些问题都有待进一步解决。

智能化预警技术

由于转速波动会导致锁相压力数据相移，同时由于叶尖间隙分布不均匀和周向进气畸变使得传感器的周向位置也会对信号质量造成影响，而基于同一周向位置的自相关分析法严重依赖于传感器的布置，可靠性难以保证。而后互相关分析法逐渐发展，该方法通过分析周向上两个对称传感器之间一个转子转数的相关性达到失速预警的目的，可以一定程度上降低传感器周向位置对信号质量的影响，但相较于自相关

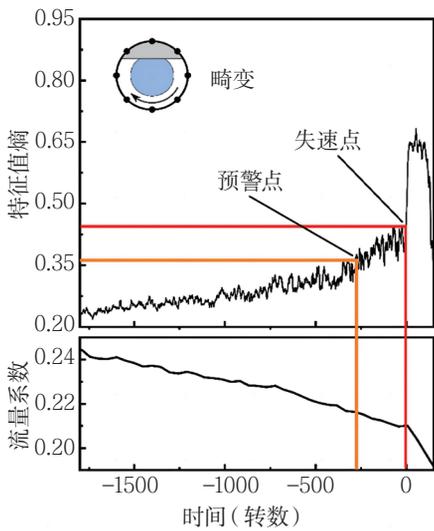


图4 进口畸变条件下多相关分析法的失速预警结果

算法，互相关算法需布置一对传感器同时测得畸变区与稳定区域的压力信号，因此互相关算法对畸变更敏感，也更容易受进气畸变影响降低预警可靠性。

进气道畸变除了会带来额外的扰动外，还会在压气机的不同周向位置造成明显的流量差异。现有的失速预警方法如自相关、互相关法只使用1~2个传感器，容易受到畸变引起的强不均匀性的影响，难以保证预警可靠性。基于此分析，北京航空航天大学孙晓峰团队提出了多信号相关分析来解决畸变带来的影响。该方法对于不同位置的8支传感器，将其信号排列成矩阵形式，通过求解信号之间的相关矩阵，计

算矩阵特征值以及特征值熵，用特征值熵表示信号矩阵中各个信号之间的整体相关程度。如果矩阵中任意两个信号的相关系数都为1，则此时特征值熵为0，如果矩阵中任意两信号之间相关系数都为0，此时矩阵特征值熵为1。图4为多相关分析法在畸变条件下的预警效果。在风扇/压气机发生失稳后，失速团与喘振产生的强烈流动波动会显著影响信号的整体相关性。因此通过计算安装在机匣壁面的8支传感器所测量信号之间的整体相关性，对风扇和压气机的工作状态进行评估，同时一定程度上避免由于畸变等周向不均匀的工作状态导致的错误评估，从而提高预警可靠性。

近年来，还出现了结合人工智能的失速预警手段。2021年，赵宏阳首次将深度学习与压气机的失速预警结合起来建立了压气机失速预测模型。该模型对某一组失速数据测试验证结果如图5所示，深度学习模型可以较传统预警方法（如小波分析、方差分析）给出更早的预警信号，在考虑其自适应性不会引入主观经验的限制更其优秀表现。2022年，仵凯将表征非定常载荷的RMS脉动量和表征定常载荷的平均脉动量作为失速特征输入，以长短时记忆网络为基础，引入注意力机制，建立了基于深度学习网络的失

速预警模型，最终利用全连接网络输出为该时间步压气机的失速概率。这表明深度学习方法是用来解决压气机失速预测问题的。但是该模型仍通过检测失速先兆实现失速预警，所以当面临出现时间极短的突尖失速先兆时无法获得较长的预警时间。同时由于压气机失速具有强非线性和不确定性的特征，如何定义一个有效的参数作为压气机工作状态的表征、如何提高模型适用范围以适应复杂工况以及网络模型和训练方法的优化等问题仍需解决。随着计算机能力的提升，人工智能技术的日益成熟与革新，相信深度学习结合失速预警的智能化预警技术将大有可为。

结束语

失速先兆的发现为航空发动机的扩稳方法提供了新的契机与思路。主动控制作为一种最直接的失速先兆消除方式引起业界的广泛关注。为了更早地发现失速先兆波，研究人员发展了失速预警技术，如小波变换、傅里叶分析、相关性分析等。这些方法在一定程度上都提前了失速预警时间，但都存在一些共性问题，即预警阈值需要人为主观选取，且不同转速下无法统一，不具有通用性，在压力波动大的情况下容易报虚警等。随着相关算法的发展，智能预警技术为失速预警提供了新的思路。相信在未来智能化迅速发展的时代，智能化预警技术能在很大程度上解决航空发动机的主动控制所面临的困境。

航空动力

（夏增虎，北京航空航天大学，硕士研究生，主要从事航空发动机流动稳定性方向研究）

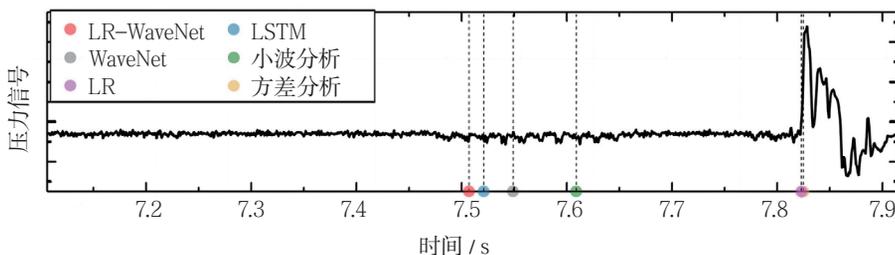


图5 深度学习模型与传统方法预警时刻对比