

# 压气机内部旋转不稳定的研究综述\*

楚武利<sup>1</sup>, 陈向艺<sup>1,2</sup>

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710129;

2. 德累斯顿工业大学 叶轮机械与飞行推进中心, 德国 德累斯顿 01062)

**摘要:** 旋转不稳定是压气机工作在高负荷近失速工况时的一种常见现象。研究旋转不稳定在降低压气机工作噪声、减小流致振动以及保障航空发动机稳定工作等方面具有重要意义。首先对旋转不稳定现象进行了回顾, 详细讨论了旋转不稳定的特征。其次, 重点调研了旋转不稳定的起源和机理, 将旋转不稳定产生的原因归纳为叶尖泄漏流、涡脱落以及流动剪切等类别。此外, 回顾了模拟旋转不稳定的数值方法, 讨论了多种流动控制手段对旋转不稳定的作用效果。最后, 对旋转不稳定的研究现状进行了总结, 对未来的研究趋势进行了展望。

**关键词:** 压气机; 旋转不稳定; 叶尖泄漏流; 涡脱落; 非定常流; 数值模拟; 流动控制; 综述

**中图分类号:** V231.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2024) 05-2309003-15

**DOI:** 10.13675/j.cnki.tjjs.2309003

## 1 引言

航空发动机和燃气轮机作为典型的布雷顿式热力循环(Brayton cycle)叶轮机械, 被广泛用于航空、航海以及电力等国计民生领域, 其相关技术已成为一个国家科技水平、军事实力和综合国力的重要标志之一<sup>[1-2]</sup>。在2015年两会上, 两机重大专项首次被写入政府工作报告, 从而上升为国家战略。在我国“碳达峰”和“碳中和”的大背景下, 未来需要对航空发动机和燃气轮机朝着低碳、环保、高效的方向进行升级, 并对关键技术进行突破。

航空发动机和燃气轮机包含压气机、燃烧室、涡轮等主要部件。其中, 压气机作为升压部件位于前端, 其性能影响着下游燃烧室以及涡轮的特性, 并对整机性能产生重要影响。在压气机中, 由于转子叶片和固定的机匣之间存在相对运动, 叶片顶端与机匣间需保留一定间距, 从而导致了叶尖间隙的存在。在以叶片表面压力差为主要驱动力的作用下, 流体跨过叶尖间隙, 产生了叶尖泄漏流这一流动结构。由于叶尖泄漏流属于与通道内部主流不同的二次流, 在与主流相互作用后发生强烈的混合和剪切, 往

影响着压气机的效率、压升以及稳定工作范围等特性<sup>[3-5]</sup>。

当压气机工作时, 气体的压力和密度随着流动逐渐增大, 压气机通道面积逐渐减小。在确定的叶尖间隙下, 间隙与叶片高度的比例相对增加, 从而导致叶尖泄漏流的影响愈发明显。对于叶尖间隙相对较大的压气机(级)而言, 当运行到高负荷的近失速工况时(此时压气机依然稳定工作), 叶尖附近常常监测到旋转不稳定(Rotating instability, RI)这一现象。在叶尖附近机匣壁面压力时序信号对应的频谱图上, RI表现为低于叶片通过频率(Blade passing frequency, BPF)的高能驼峰。与之相比, 压气机进入失速后(压气机不稳定工作工况)的信号则表现为0.1倍BPF量级的低频单峰。

由于RI往往发生在压气机的近失速工况, 挖掘RI的物理机制有助于解答失速与其它压气机稳定性相关的问题。从本质上讲, RI属于一种非定常的空气动力学现象, 其存在提升了噪声级且往往会导致叶片振动, 从而引发叶片疲劳甚至更加致命的结构性问题。鉴于RI的重要性, 相关的研究工作在近几十年来得到了科研人员和工程师们的广泛关注<sup>[6]</sup>。

\* 收稿日期: 2023-09-01; 修订日期: 2023-11-17。

基金项目: 国家科技重大专项(J2019-I-0011); 国家自然科学基金(52076179)。

作者简介: 楚武利, 博士, 教授, 博导, 研究领域为叶轮机械气动热力学。

通讯作者: 陈向艺, 博士, 研究领域为叶轮机械气动热力学。E-mail: xiangyi\_chen@foxmail.com

引用格式: 楚武利, 陈向艺. 压气机内部旋转不稳定的研究综述[J]. 推进技术, 2024, 45(5):2309003. (CHU W L, CHEN X Y. Review of rotating instability in compressors[J]. Journal of Propulsion Technology, 2024, 45(5):2309003.)

尽管如此,由于RI产生的因素复杂并涉及多学科领域,迄今为止,对于其机制的解释在学术界仍存在较大的争议。考虑到RI的潜在影响,探索并厘清RI的机理有助于为航空发动机和燃气轮机的更新迭代提供技术储备。综合上述背景,本文对该领域已有研究进行了评述、总结和展望。

## 2 旋转不稳定的特征

### 2.1 低转速压气机

在低速旋转的压气机中,RI的主要影响在于噪声方面。关于RI的研究可以追溯到20世纪80年代。在研究早期,由于针对该现象可借鉴的参考资料较少,对于叶尖流场信号对应频谱上所表现出来的低频“驼峰”,并没有一个统一的命名。通过对一台低速轴流压气机的实验测量,Mathioudakis和Breugelmans<sup>[7]</sup>在压气机近失速工况监测到了周向传播的低频扰动。由于该扰动与常规的旋转失速(此处作者将常规旋转失速称为“大失速(Big stall)”)具有不同特性,这样的现象被命名为“小旋转失速(Small rotating stall)”。该扰动对应的振幅与运行工况有关,且其传播速度随着流量系数的降低而减小。

1990年,Longley和Hynes<sup>[8]</sup>对一台BPF为2.8 kHz的低速轴流压气机进行了实验测量。结果表明,在失速前,该压气机中出现了频率位于500~1 000 Hz的非定常现象。由于该现象可能造成间歇性的流动紊乱和随机性的流动复原,因此其所对应的工况被称为“不平稳运行(Rough running)”。

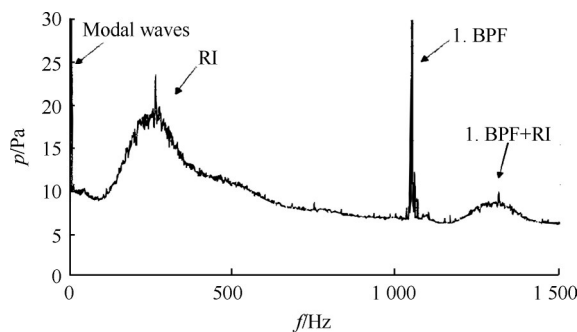
对于描述上述这一在频域上具有带宽的非定常现象,“旋转不稳定(RI)”一词的提出可以追溯到Choi<sup>[9]</sup>和Kameier<sup>[10]</sup>的博士论文。尽管针对“RI”中“不稳定(Instability)”这个描述是否使用恰当曾引发了一些争论(例如在文献<sup>[11]</sup>后所附的Mailach等与Cumpsty的讨论),该词如今已被相关领域的研究人员广泛使用。

Kameier等<sup>[12]</sup>在对一台低速轴流风扇进行噪声测量时注意到,当叶尖间隙增大时,噪声的声压级在BPF以下的狭窄频带内明显增大。针对叶尖间隙大小的影响,Kameier等<sup>[13-14]</sup>基于相同的试验台进行了进一步的研究。实验结果表明,随着叶尖间隙的增大,位于BPF以下的频带所对应的能量有明显的增加。而当风扇被节流时,RI对应的频率向低频移动。类似的现象在Liu等<sup>[15]</sup>的研究中也有所体现。根据Liu等所述,当流量减小时,RI对应的频率降低。此外,RI在频谱上并非离散的表现,相反,其分布位于

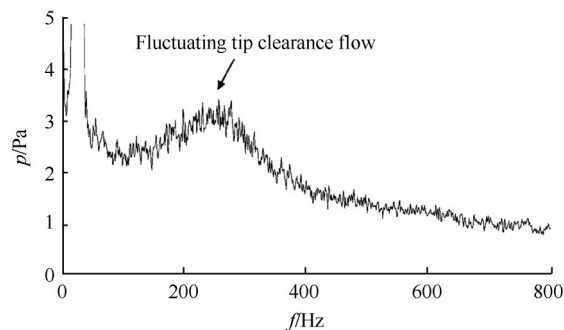
一个较窄的频带上。对于较小流量工况而言,RI和旋转失速同时被观察到,且两者频率之间并没有谐波的关系。基于同一实验台,近年来Pardowitz等<sup>[16-17]</sup>进行了一系列的实验研究,并指出RI的特性在很大程度上取决于风扇的运行工况。

以德累斯顿工业大学的4级低速轴流压气机以及低速叶栅风洞为研究对象,Mailach等<sup>[11,18]</sup>对RI进行了一系列关键性的研究。基于压气机的实验结果表明,只有当叶尖间隙相对较大且压气机节流至接近于失速工况时,RI才能被监测到(频谱如图1(a)所示)。相比于旋转失速,RI在周向空间具有更高阶数的模态,且其主导的模态阶数大概是转子叶片数的一半,而对应的周向传播速度则为转子转速的50%~60%。将具有与压气机相同参数的叶片应用于叶栅风洞中,在与压气机所监测到RI时工况类似的进口条件下,RI扰动出现在了叶尖附近(频谱如图1(b)所示)。此外,基于同一实验台,Rolfes等<sup>[19]</sup>和Chen等<sup>[20]</sup>分别对一台1.5级压气机和单转子结构进行了研究。结果皆表明RI与叶尖间隙大小有关。当叶尖间隙尺寸超过一定范围时,在小流量工作点能监测到RI的出现。

来自九州大学的研究团队对一台低速压气机中的RI开展了较为全面的实验。虽然相关文献中没有直接使用“RI”这个词来描述被监测到的低频非定常



(a) Spectra in compressor<sup>[11]</sup>



(b) Spectrum in cascade<sup>[18]</sup>

Fig. 1 Wall pressure spectra in the TU Dresden low-speed compressor with large tip clearance

现象,但根据观察结果可知,该现象与RI高度相关。在早期的实验中,Inoue等<sup>[21]</sup>注意到,随着压气机的节流,压气机内部出现了一个所谓的“小尺度的失速团(Short-length-scale stall cell)”。然而与许多压气机中观察到的“突尖失速先兆(Spike-type stall inception)”不同,该失速团随着时间的改变并没有迅速增长。鉴于此,该团队将出现“小尺度失速团”时的工况命名为“温和失速状态(Mild stall state)”。通过进一步的研究,Inoue等<sup>[22]</sup>指出,对于所测试的压气机而言,“温和失速阶段”只存在于叶尖间隙较大的结构之中。此时,随着流量系数的降低,总压升逐渐减小,小尺度扰动增加。如图2所示,在转子叶片前缘附近的壁面静压对应的频谱上,“小尺度失速团”表现为低频带的高能量信号,这与前文中所讨论的RI具有相同特性。此外,Yamada等<sup>[23]</sup>指出,在具有大叶尖间隙的压气机中,即使存在旋转扰动,压气机也并没有进入失速状态。

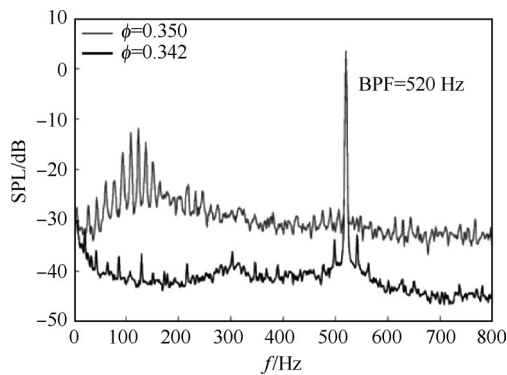


Fig. 2 Wall pressure spectra in the Kyushu university compressor at two flow coefficients<sup>[22]</sup>

基于一台单级低速轴流压气机,来自上海交通大学的研究团队针对RI这一课题进行了详细的实验和数值模拟研究。Wang等<sup>[24-25]</sup>指出,随着压气机工作流量的减小,RI并非突然在频谱上出现。相反,该现象是逐渐演变而来的。随着流量系数的降低,RI信号逐步增强,且其对应的主导频率从高往低移动。此外,对同一实验台的进一步测量表明,RI的周向传播速度保持在转子转速的40%~45%的区间范围<sup>[26]</sup>。在靠近叶尖前缘附近,压力信号波动最为明显。通过减小叶尖间隙尺寸,RI所对应的驼峰能量逐渐减小,直到小间隙情形下,RI完全消失<sup>[27]</sup>。姚丹等<sup>[28]</sup>基于空间傅里叶的周向模态分解发现,RI的主模态具有稳定的周向传播结构,而其它模态波的幅值和相位存在较大波动。Yang等<sup>[29-30]</sup>采用模态分解方法,对RI的特征进行了进一步讨论。

除了上述研究对象外,有关RI的研究亦在其它的一些低速试验台上展开。Schrapp等<sup>[31]</sup>通过使用粒子图像测速(Particle image velocimetry)技术对低速压气机和叶栅的内部流场分别进行了测量。当压气机处于小流量工况或叶栅处于大攻角状态时,可以观察到RI现象。而对于处于大流量系数的压气机和小攻角下的叶栅结构,则没有表现出RI的迹象。对于一个可调节安装角的低速轴流风扇,Nishioka等<sup>[32]</sup>指出在大安装角情形下,RI在中高叶片负荷的工况下被观察到。Geng等<sup>[33]</sup>则在一个低速单转子轴流压气机转子中注意到,RI的模态阶数可能取决于压气机的工作条件和其它几何参数。此外,Xu等<sup>[34]</sup>通过实验探索了单级低速轴流压气机中RI与入口畸变之间的关系。结果表明,RI的强度与进口畸变成正相关,即畸变越大,RI越明显。

## 2.2 高转速压气机

在高转速压气机中,RI除了使得噪声增加外,还可能与运动的叶片之间发生耦合。在RI产生的非定常气动激励作用下,叶片发生流致振动,并对转子叶片的强度产生潜在的负面影响。针对一台多级高压压气机,Baumgartner等<sup>[35]</sup>在压气机第一级的转子叶片上测得了高振幅水平的叶片振动,且其频率与转子转速的谐波没有关系。通过进一步的分析发现,使得叶片产生高振幅振动的激励是由气动现象引起的,且该激励与第一级压气机叶尖区域的RI有关。对此,Baumgartner等将RI相关的激励作了如图3所示的分类。基于产生的原因,RI引发的振动被归入自激振动一类。

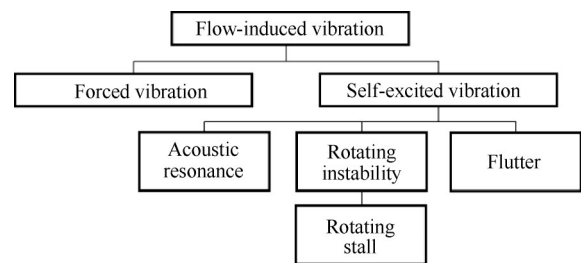


Fig. 3 Classification of flow-induced vibration by Baumgartner et al<sup>[35]</sup>

与上述发现类似,Kielb等<sup>[36]</sup>在一台高速轴流压气机的第一级也监测到了由于流动引起的振动,而且他们将该振动归为非同步振动(Non-synchronous vibration)。从实验和数值模拟的共同结果来看,非同步振动的主要特征与叶尖处的RI有关。通过对同一压气机开展进一步数值模拟,Im等<sup>[37-38]</sup>指出,压气



机中的非同步振动出现在压气机的稳定工况下,且与RI的发生同步。

与RI相关的振动在达姆施塔特工业大学的单级跨声速压气机上亦有所体现<sup>[39]</sup>。如图4所示,根据机匣壁面的压力频谱分布可知,随着压气机工况从最高效率点移动到近失速点时,在靠近叶片前缘的叶尖泄漏涡的附近位置存在一个频带激励,且该频带大约位于50% BPF。此外,叶尖间隙处的非定常扰动并不会导致压气机失稳,即在RI出现的工况下,压气机依旧稳定运行。

尽管大量研究表明RI出现在压气机稳定的工作状态,且其对应的旋转扰动不会破坏压气机的气动稳定性,但Hah等<sup>[40]</sup>指出,RI导致的非同步振动可能会引发高周疲劳(High cycle fatigue)等结构问题。基于达姆施塔特工业大学的单级跨声速压气机,Holzinger等<sup>[41]</sup>的实验数据显示,RI是一种气动现象,且有可能发展成为自激振动。鉴于上述观察,该团队对流动导致的振动作了类似图3中提出的分类。

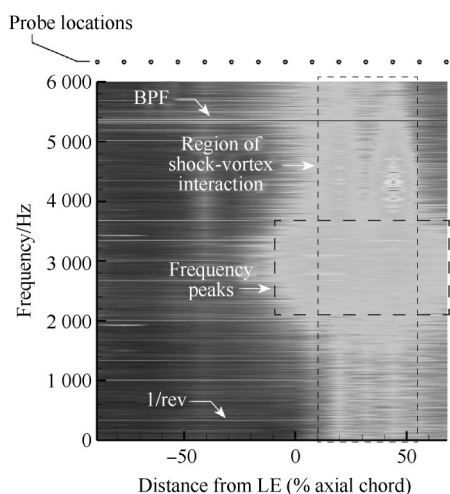


Fig. 4 Wall pressure spectra in the single-stage transonic compressor at TU Darmstadt<sup>[39]</sup>

基于西北工业大学的高速单级压气机,Wu等<sup>[42]</sup>在压气机工作在近失速边界时观察到了RI,且RI的强度在靠近叶片前缘的位置相对较高,并沿轴向呈逐渐下降的趋势<sup>[43]</sup>。针对同一研究对象,Chen等<sup>[44]</sup>则观察到,RI的主导频率随着转子转速的增大而降低。而当流量减小时,RI的主导频率向低频移动,这与一些低转速结构<sup>[15,25]</sup>中表示出的趋势相似。

除了上述研究之外,Schreiber等<sup>[45]</sup>在一台3.5级高速轴流多级压气机中观察到RI表现为具有稳定周向传播速度的非定常扰动。另外,Yang等<sup>[46]</sup>在高速压气机中监测到了RI,并分析了RI与NSV之间的关

系。汪松柏等<sup>[47]</sup>讨论了高负荷压气机中RI对转子叶片NSV的影响。测量结果表明,随着级负荷的升高,流动诱发的频率与叶片一阶固有频率耦合,最终激发了转子叶片高振幅值振动。

## 2.3 静子结构

除了旋转机械外,研究人员在一些静子结构中亦观察到了RI的存在。通过对一个具有轮毂间隙的环形叶栅测量发现<sup>[48]</sup>,当叶片载荷(攻角)增加到一定值时,可以监测到RI的出现,且RI的平均传播速度是进口速度圆周分量的48%。此外,在没有任何旋转部件的柏林工业大学的轴流压气机静子级试验台中,研究人员测量到了位于宽频带内的一些离散的高能驼峰<sup>[49-53]</sup>,并将其与RI相关联。其中,Beselt等<sup>[52]</sup>通过对具有不同轮毂间隙静子级的测量发现,即使在没有任何轮毂间隙的情况下,上述驼峰亦能监测到(如图5所示)。这不同于前文所述基于转子结构中的发现。

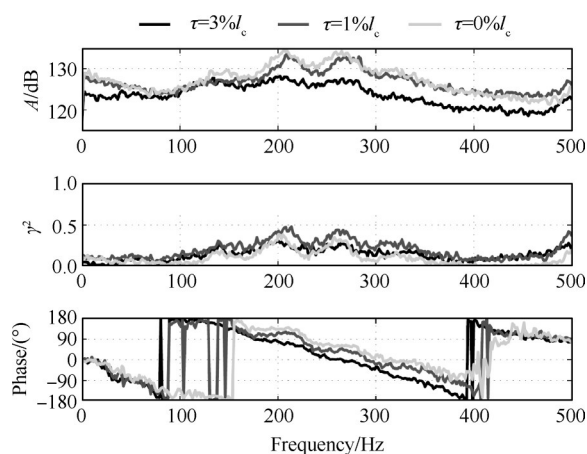


Fig. 5 Spectral coherence analysis of wall pressure in TU Berlin stator stage with different tip clearance<sup>[52]</sup>

## 3 旋转不稳定的产生机制

### 3.1 叶尖泄漏流触发旋转不稳定

根据已知公开文献,大多数研究认为RI与叶尖泄漏流紧密相关。在叶尖间隙分别为1.3%弦长和4.3%弦长的低速轴流压气机中,Mailach等<sup>[11,18]</sup>通过非定常压力测量证实,RI只在后者中出现,并伴随着叶尖泄漏流的剧烈波动。通过进一步的分析,他们提出了如图6所示的模型,即RI是由叶尖泄漏流和相邻叶片的流动之间的周期性相互作用引起的,且叶尖泄漏流的波动是这种流动现象的起源。当叶尖泄漏流不影响相邻叶片的流动时,则无RI的发生。

基于同一压气机试验台的单转子结构为研究对

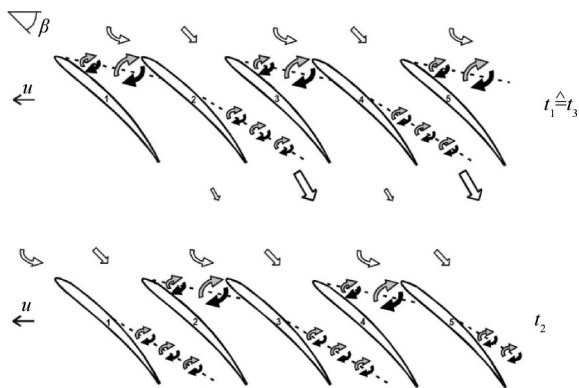


Fig. 6 Model of tip flow evolution for RI<sup>[11]</sup>

象, Chen等<sup>[54]</sup>采用动力学模态分解(Dynamic mode decomposition)对非定常数值模拟结果进行了处理,获得了主导模态的三维可视化结果以及对应流场演变的情况(如图7所示),证明了RI本质上是叶尖泄漏流的跨通道周期性波动的一种表现。泄漏流的周期性波动导致叶顶吸压力面压差随时间变化,继而周期性地影响着另一个叶片通道泄漏流的生成和发展。由于波动是随机扰动的一种体现,叶尖泄漏流在不同周期性压力波动的叠加之下,在频谱上表现为具有带宽的驼峰。

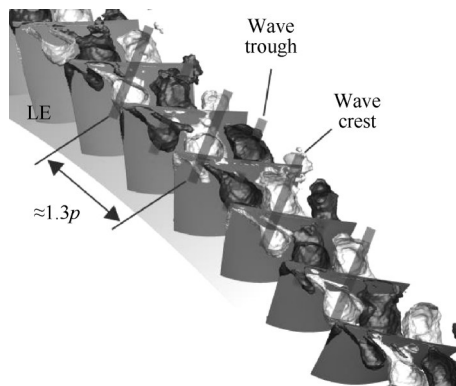


Fig. 7 Visualization of the top-ranked mode for RI<sup>[54]</sup>

此外,通过对一台叶尖间隙为1.7%弦长的单级跨声速压气机实验结果进行分析, Biela等<sup>[59]</sup>总结出了一个类似于上文中所提到的机制。他们指出,叶尖泄漏流的影响波及两个叶片通道范围,且RI所对应的叶尖间隙处的扰动并不会破坏压气机的稳定性。

通过对单级低速轴流压气机(叶尖间隙为2.2%叶展高度)中RI和近机匣壁面的流动的相关性分析, Wang等<sup>[24]</sup>认为叶尖泄漏流和相邻叶片之间的相互作用与RI的起源密切相关。从锁相平均压力分布来看,两个相邻叶片叶尖泄漏流的相互作用是导致近壁面流场波动的最可能原因。这一点在数值模拟的

结果中亦有明显的体现<sup>[25]</sup>。进一步的计算表明,RI与叶尖泄漏流的发展有关,且RI往往出现在当叶尖泄漏流的尾迹延伸到相邻叶片后缘之时<sup>[55]</sup>。此外,叶尖泄漏流与叶片前缘涡合并后沿周向传播,并在相邻的通道上形成新的叶尖泄漏流结构<sup>[27]</sup>。叶尖泄漏流和RI的主模态一致,从而揭示了叶尖泄漏流是产生RI的主要原因。

基于叶尖间隙分别为2.8%和5.6%弦长的低速轴流风扇试验台,通过实验和全环通道的非定常模拟, März等<sup>[56]</sup>观察到叶尖泄漏流、机匣附近的轴向反向流和叶片前缘附近的来流相互作用,最终形成独特的涡结构(如图8所示)。他们认为,该涡流的形成可能是诱导RI发生的主要原因。与传统的旋转失速现象不同,当RI发生时,叶尖流并不会从前缘溢出到另一个叶片通道内,这也说明了为什么即使监测到了RI,压气机依旧能稳定运行。针对一台跨声速高压压气机, Hah等<sup>[40,57]</sup>通过大涡模拟(Large eddy simulation, LES)发现,RI导致的非同步振动与叶尖泄漏流的跨叶片通道流动相互作用有关。分析表明,RI是由间歇性出现的非定常涡在整周传播引起的,其对应的频带位于40%~60% BPF。

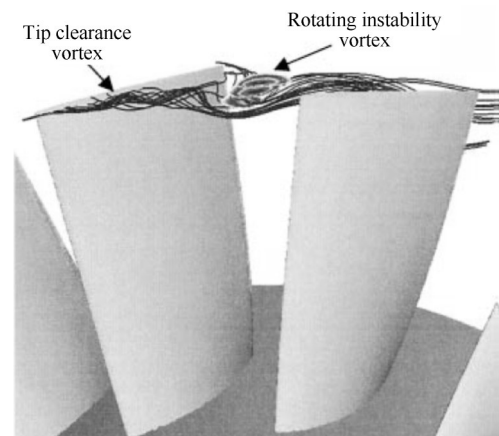


Fig. 8 Instantaneous flow distribution in the numerical simulation result<sup>[56]</sup>

关于RI的另一经典模型如图9所示。由于在低速叶栅(叶尖间隙为3%弦长)风洞的实验中测量到了叶尖泄漏流的破碎, Schrapp等<sup>[31]</sup>怀疑RI是由于涡破碎导致的周期性振荡所致,且涡破碎与叶片载荷变化有关。此外,根据对一孤立亚声速轴流压气机转子的模拟, Vo等<sup>[58]</sup>将RI与叶尖间隙的回流联系起来。他们认为,与RI相关的流动振荡很可能是由叶片后缘压力面的叶尖间隙回流冲击造成的,并建议消除回流或流动冲击以抑制RI和非同步振动。

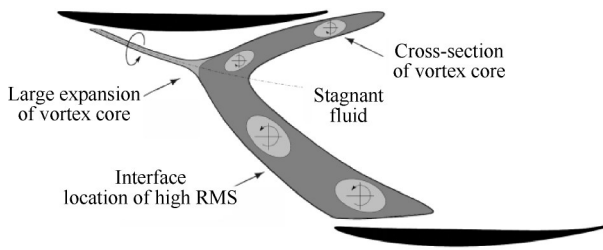


Fig. 9 Schematic of the breakdown of tip leakage vortex<sup>[31]</sup>

对叶尖间隙为 1.7% 弦长的西北工业大学高速单级压气机的数值模拟结果展开分析,通道中叶尖流动的非定常性来源于所谓“二次间隙流(Secondary clearance flow)”的周期性振荡,且该振荡可能与 RI 有关<sup>[59]</sup>。Chen 等<sup>[44]</sup>指出,当叶尖泄漏流表现的非定常性传播到相邻叶片的压力面后,会使得相邻通道中的流动也变得非定常,非定常流以旋转扰动波的形式周向传播,最终导致了 RI 的出现。此外,基于对跨声速压气机的数值模拟研究,该研究团队对上述的工作进行了进一步的扩展,并提出旋转扰动波出现的必要条件是“叶尖二次涡(Tip secondary vortex)”的周期性振荡能够诱导流动阻塞横穿叶片通道<sup>[60]</sup>。

### 3.2 涡脱落触发旋转不稳定

关于 RI 起源的另一经典理论则将 RI 与涡脱落(非叶尖泄漏涡)相关联。20 世纪 90 年代初,Kameier 和 Neise<sup>[13]</sup>通过热线测量发现,只有当叶尖间隙中存在反向流动时,RI 才会出现。在随后的研究中<sup>[14]</sup>,RI 被认为是一个振荡源或者涡结构,且大概以一半于叶轮转速旋转。这种旋转扰动的周向分布是不均匀的,且可以用空间傅里叶分量的叠加来表示。如果扰动的周向波长等于叶片栅距,脱落的涡和每个叶片之间会发生剧烈的相互作用,从而导致叶尖间隙噪声的产生。

基于上述的涡脱落理论,Heinze 等<sup>[61]</sup>进行了进一步的基础研究。如图 10 所示的模型,他们将压气机类比为圆柱体和一个固定片,而 RI 现象则好比于圆柱体下游脱落涡打在固定片上的流动。如果在圆柱体和固定片之间的距离正好是波长的整数倍,由于共振效应,RI 所对应的能量会明显增大。

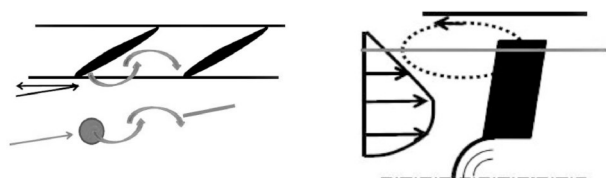


Fig. 10 Schematic of tip vortex shedding in analogy to the cylinder-plate structure<sup>[61]</sup>

Baumgartner 等<sup>[35]</sup>则通过如图 11 所示的涡脱落模型来揭示 RI 产生的机理。当叶片数和脱落涡形成的压力波频率接近时,则会导致共振的产生。与旋转失速的机制类似,RI 以小于转子的转速相对于叶片移动。由于旋转失速自身表现为一个固定大小的低速团,其在相对坐标系下并非产生压力的波动,因此在频谱上其只对应一个单一的离散频率。相比之下,由于 RI 是一个随时间变化的波动,其在频谱上对应的则是一个特征频带。

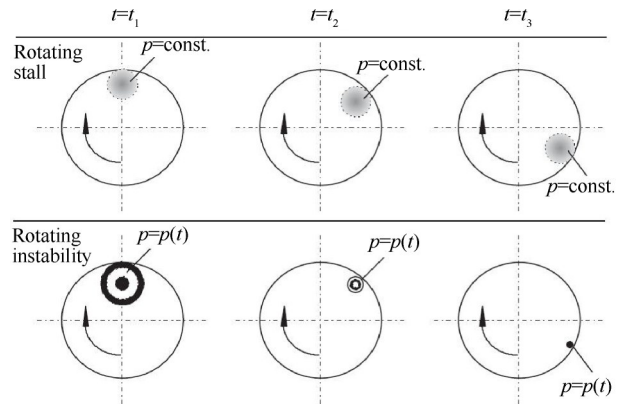


Fig. 11 Pressure variation in rotating stall and rotating instability<sup>[35]</sup>

通过对九州大学低速轴流压气机流场中的压力测量,Inoue 等<sup>[22,62]</sup>发现,转子叶片前缘存在一个明显的非定常运动的低压泡。据此,该团队提出了如图 12 所示的“龙卷风状结构(Tornado-like structure)”经典模型。其中,低压泡意味着流动分离。涡脱落发生在叶片表面,并向通道内部延伸。

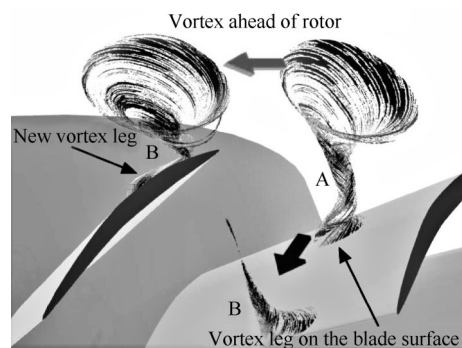


Fig. 12 Schematic of the tornado-like structure<sup>[62]</sup>

基于数值模拟,Im 等<sup>[37-38]</sup>也通过使用“龙卷风状结构”的模型讨论了高速轴流压气机中的非同步振荡和 RI 之间的关联。模拟结果表明,在叶片 80% 高度以上的区域,RI 对应的龙卷风状涡在相对坐标系下以相反于叶片旋转的方向移动,从而使得叶片前



缘和尾缘附近各存在着一个低压区。这两个低压区产生了一对耦合力,最终为非同步振动的发生提供了扭转力矩。

### 3.3 流动剪切触发旋转不稳定

基于对强剪切流动中非正常信号的分析,除了前文所述的机理外,一些文献将RI产生的原因归结于流动剪切层的不稳定性。Pardowitz等<sup>[49]</sup>根据柏林工业大学轴流压气机静子级的实验,提出了如图13所示的模型。该模型表明,叶顶反向流动的存在使得不同速度层之间存在剪切,从而导致不稳定扰动产生。其中,不同波长对应的剪切层不稳定性随机产生,并在周向传播与发展。另外,根据Beselt等<sup>[50]</sup>对实验和数值模拟结果比较,RI与压气机叶片上游轮毂附近周向涡的形成有关,这一点在叶片前缘的轮毂壁上的压力波动谱中有所体现。

除了对静子试验台上的RI现象进行解释以外,将RI与剪切层不稳定性关联这一观点亦被用于阐述

旋转机械中的RI机理。基于对一低速轴流风扇的测量<sup>[17,63]</sup>结果可知,RI的产生与工况密切相关,且RI只表现为特定的频率和模态。由于在带冠的转子叶片中亦可观察RI,因此,Pardowitz等<sup>[63]</sup>认为非定常的涡系并非RI产生的机制。相反,RI与包含不同波长的不稳定波有关,且这些不稳定波是由覆盖叶尖整个圆周的回流产生的剪切所致。

通过对单级低速轴流压气机的测量和模拟,Eck等<sup>[53]</sup>进一步发展了上述“非稳定剪切层”理论。该研究采用“预失速不稳定(Prestall instability)”来描述RI。根据图14中所示的模型,“预失速不稳定”取决于压气机的工作条件。当压气机工作于图中所示的工作范围“A”时,叶尖区域流通顺畅,此时压气机内部没有“预失速不稳定”现象的发生。随着流量的进一步减小,当叶尖区域被叶尖泄漏涡阻塞,且未达到转子的临界攻角时(如图14所示的工作范围“B”),才会出现“预失速不稳定”现象。流场中的扰动表现为

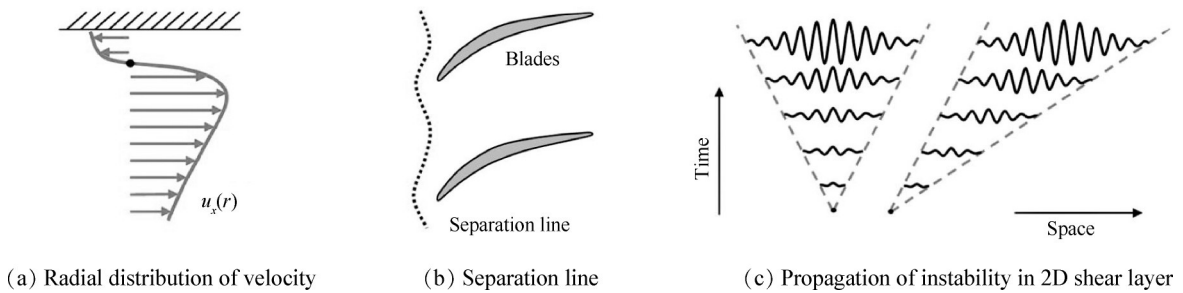


Fig. 13 Mechanism behind RI caused by flow shearing<sup>[49]</sup>

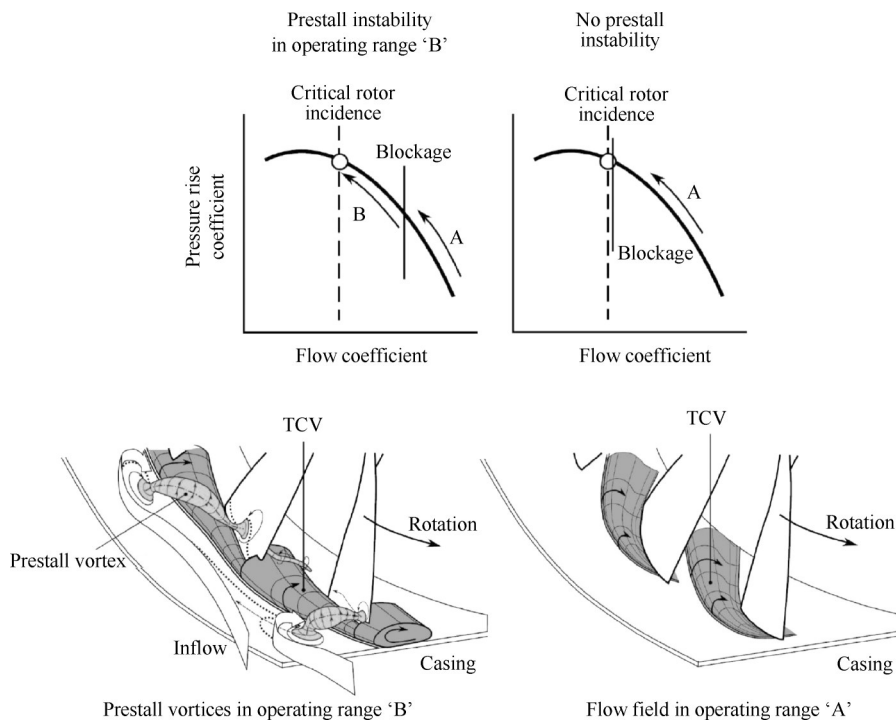


Fig. 14 Model of “Prestall instability”<sup>[53]</sup>

离散的涡结构,并显示为周向传播的低压区域。当转子的整个叶尖区域受到泄漏流阻塞的影响时,流动中的开尔文-亥姆霍兹不稳定(Kelvin-Helmholtz instability)最终触发了“预失速不稳定”现象的产生,并在频谱上表现为RI信号。

### 3.4 其它理论

除了前述理论外,针对RI机制还存在其它的一些讨论。Mathioudakis和Breugelmans<sup>[7]</sup>通过对实验结果的分析指出,所谓的“小旋转失速”(早期描述RI现象的术语)可归因于叶片边界层分离与叶片通道内流动的相互作用。Nishioka等<sup>[32]</sup>通过对低速轴流风扇三种安装角的实验和数值研究,指出上游来流、叶顶反流与端壁反流的干涉作用是导致RI的原因。纵观上述分析,关于RI的机制解释虽然百花齐放,但对应的理论往往只适用于特定的场景。如何探讨并总结可以系统性概括RI的机理,将是未来RI领域的重点探索方向。

## 4 旋转不稳定的模拟方法

由于RI具有较强的非定常性,且其流动机制极其复杂,单凭实验往往难以获得充足的数据来揭示其本质机理。随着计算机技术的发展,数值模拟逐渐成为重要的辅助分析工具。本小节针对RI的数值模拟方法进行了文献调研,讨论了湍流模拟方法、网格通道数目等因素可能对计算结果产生的影响。

早在2002年,März等<sup>[56]</sup>对德国宇航院(DLR)的低速单级风扇进行了数值模拟。计算采用雷诺应力模型,以全环通道网格为计算域,分析了叶顶流动与RI的关系。此外,作为一方程的Spalart-Allmaras(SA)湍流模型亦受到了研究人员的青睐。Im等<sup>[37-38]</sup>选择了SA模型对高速轴流压气机进行了尝试模拟,探讨了RI所引发的流固耦合问题。上海交通大学研究团队则以低速轴流压气机为对象,进行了一系列的对比研究。其中Wang等<sup>[24-25]</sup>采用全环通道进行模拟,获得了与实验信号非常接近的结果。以西北工业大学高速轴流压气机台为对象,Wu等<sup>[59]</sup>选取5个叶片通道(对应1/6个圆周)作为计算域,部分地捕捉到了RI对应的信号。此后,该课题组的Chen等<sup>[44,64]</sup>使用同一种模拟方法对RI信号对应的流动特征进行了较为详细的分析。

除了上述湍流模型外,作为经典的二方程模型, $k-\varepsilon$ 在预测RI方面亦得到了广泛的应用。针对高速轴流压气机,杜克大学的Kielb等<sup>[36]</sup>选取了周向范围

为5个叶片通道的计算域(对应1/7个圆周),将RI导致的非同步振动与叶尖以及涡脱落相关联。Vo<sup>[58]</sup>则基于低速轴流压气机单转子GE E<sup>3</sup> Rotor B,选用6通道网格(对应6/54个圆周),讨论了RI与非同步振动的特点。Geng等<sup>[33]</sup>以中科院工程热物理研究所的低速轴流压气机台为对象,分析了15个网格通道(对应1/4个圆周)得到的模拟结果,并讨论了叶顶流动的非定常性与RI的关系。Wu等<sup>[60]</sup>通过模拟跨声速压气机NASA Rotor 35,认为RI与叶尖涡的非定常波动有关。近年来,Yang等<sup>[46]</sup>和Wu等<sup>[27]</sup>使用全环网格,分别对高速轴流风扇和低速轴流压气机进行了模拟,探讨了RI的产生及发展机制。

另外,Kowshik等<sup>[65]</sup>通过 $k-\omega$ 模型模拟离心通风机,关联了RI对应的流动特征。选取同样的湍流模型,柏林工业大学的Beselt等<sup>[50]</sup>则通过对低速环形叶栅进行模拟,将极限流线和通道内流动进行可视化,对RI进行了探讨。此外,作为另一个经典的二方程模型,Shear stress transport(SST)则在低速轴流风扇<sup>[32]</sup>和低速轴流压气机<sup>[66]</sup>中有所应用。

除了传统的求解雷诺平均方法,高保真度的数值模拟方法亦被用于RI的研究之中。Hah等<sup>[57]</sup>通过大涡模拟(Large eddy simulation,LES),对一跨声速轴流压气机的内部流场进行了预测,并将RI与涡振荡关联。Yamada等<sup>[23,67]</sup>使用脱落涡模拟(Detached eddy simulation,DES),对低速轴流压气机内部的非定常流进行了预测,并将叶顶流场的周期性波动归功于“龙卷风状涡结构(Tornado-like vortex)”的演变。针对高速轴流压气机的非同步振动,Im等<sup>[68]</sup>通过使用Delayed DES,对非同步振动的机理进行了探索。Eck等<sup>[53]</sup>采用基于SST模型的尺度自适应模拟(Scale-adaptive simulation,SAS),对低速轴流压气机进行全环模拟,得到了如图15所示与实验较为接近的模拟结果。Chen等<sup>[20,54]</sup>使用分区式大涡模拟(Zonal large eddy simulation)对德累斯顿工业大学的低速轴流单转子进行了模拟,讨论了通道数对数值模拟的影响,并最终确定了模拟方案。如图16所示,该数值模拟方法对于RI的捕捉表现出色。

为了方便读者对比和查阅已有文献中RI的模拟方法,上文所列举的具体的信息汇总见表1。综合而言,由于RI对应宽频的多尺度非定常扰动,基于RANS的数值模拟方法对RI的捕捉能力总体较弱,使用高保真度模拟方法是未来预测RI的趋势。



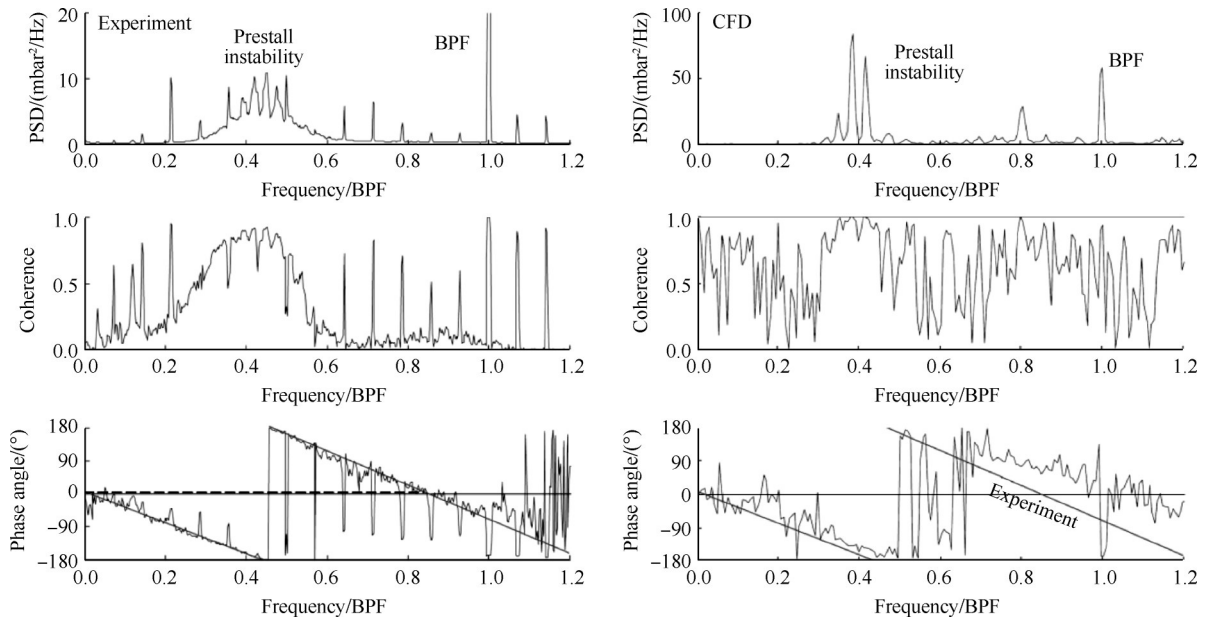


Fig. 15 Comparison of RI in experiments and simulations in a low-speed compressor<sup>[53]</sup>

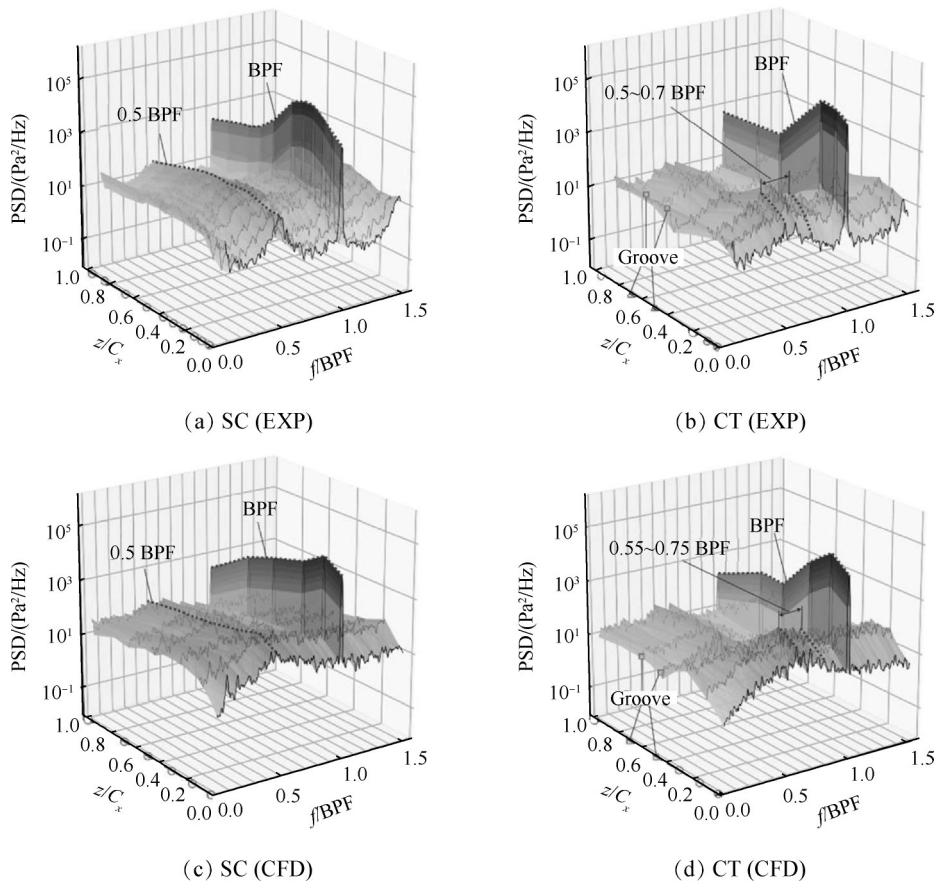


Fig. 16 Power spectral density of wall pressure in experiments and simulations<sup>[54]</sup>

### 5 旋转不稳定的流动控制方法

为了改善叶轮机器的总体性能,弥补设计中未考虑到的缺陷,流动控制方法已被广泛应用于试验验证和实际工程中。由于RI的非定常特性可能导致

噪声和叶片结构强度等方面的问题,通过流动控制方法降低甚至消除RI的负面影响具有重要意义。本节将对一些关于RI的典型流动控制技术进行回顾。

就抑制RI的影响而言,早期的工作可以追溯到20世纪90年代。针对一台轴流风扇,Kameier和

**Table 1 Summary of approaches for simulating RI**

模拟方法 (湍流模型)	研究对象	网格通道数/ 总叶片数
雷诺应力	低速单级风扇 <sup>[56]</sup>	全环
SA	高速轴流压气机 <sup>[37-38]</sup>	5/35
SA	低速轴流压气机 <sup>[24]</sup>	1/21
SA	低速轴流压气机 <sup>[25,69]</sup>	全环
SA	高速轴流压气机 <sup>[44,60,64]</sup>	5/30
$k-\epsilon$	高速轴流压气机 <sup>[36]</sup>	5/35
$k-\epsilon$	低速轴流压气机转子 <sup>[58]</sup>	6/54
$k-\epsilon$	低速轴流压气机 <sup>[33]</sup>	15/60
$k-\epsilon$	跨声速压气机 <sup>[60]</sup>	6/36
$k-\epsilon$	高速轴流风扇 <sup>[46]</sup>	全环
$k-\epsilon$	低速轴流压气机 <sup>[27]</sup>	全环
$k-\omega$	离心通风机 <sup>[65]</sup>	全环
$k-\omega$	低速环形叶栅 <sup>[50]</sup>	20
SST	低速轴流风扇 <sup>[32]</sup>	8/16
SST	低速轴流压气机 <sup>[66]</sup>	全环
LES	跨声速轴流压气机 <sup>[57]</sup>	全环
DES	低速轴流压气机 <sup>[67]</sup>	8/24
DES	低速轴流压气机 <sup>[23]</sup>	全环
Delayed DES	高速轴流压气机 <sup>[68]</sup>	5/35
SST-SAS	低速轴流压气机 <sup>[53]</sup>	全环
Zonal LES	低速轴流压气机 <sup>[20,54]</sup>	9/63

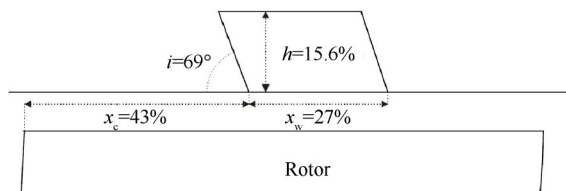
Neise<sup>[13]</sup>将涡流发生器(Velcro 尼龙搭扣)插入到叶尖的间隙中以降低二次流动带来的影响。最终使得 RI 对应的噪声降低了 30 多分贝,与此同时风扇压比和效率分别提高了 14% 和 7%。

针对同一试验台,Neuhaus 和 Neise<sup>[70]</sup>则使用定常和非定常的喷气来控制 RI 的影响。实验数据表明,当采用定常的喷气时,RI 所导致的叶尖间隙流致噪声几乎从频谱中消失。此外,相比于定常喷气而言,非定常喷气更适合于提高风扇压力并抑制 RI。

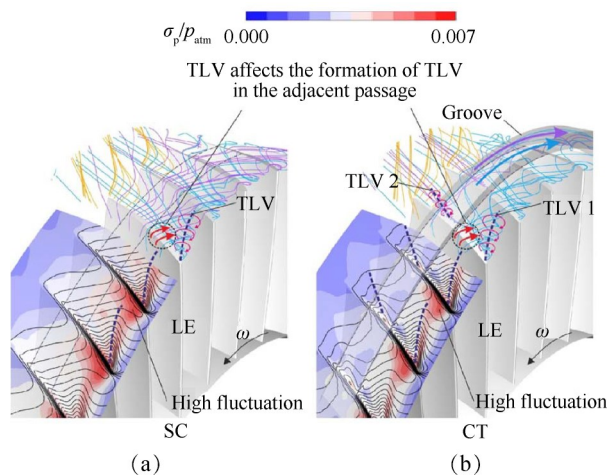
作为一种被动流动控制的手段,机匣处理(Casing treatment)已被广泛用于改善压气机或风扇的性能。关于机匣处理的早期研究可以追溯到 Bailey 等<sup>[71]</sup>、Osborn 等<sup>[72]</sup>以及 Prince 等<sup>[73]</sup>的工作。

在各种各样的机匣处理结构中,周向槽是一个典型的代表。由于周向槽几何形状简单,相对而言易于装配,对于叶片尺寸小、相对间隙大的后面压气机级来说,该类型的机匣处理不失为一个合适的方案。在低速压气机<sup>[74-75]</sup>、高速亚声速压气机<sup>[76]</sup>、跨声速压气机<sup>[77-79]</sup>等结构中,周向槽的机理和应用得到了广泛的探索。如图 17 所示,Rolfes 等<sup>[80]</sup>针对德累斯顿工业大学的低速 1.5 级轴流压气机设计了周向槽机匣处理。结果表明,当叶尖间隙较大时,周向槽对

RI 的抑制作用明显。基于同一周向槽结构,结合实验和数值模拟结果,Chen 等<sup>[54]</sup>则详细分析了周向槽对单转子结构中 RI 的影响机制,并指出周向槽机匣处理的引入降低了跨通道叶尖流动之间的干扰(如图 18 所示)。由于 RI 主要由跨通道叶尖流动的相互作用所决定,因此机匣处理使得扰动进行跨通道传播的可能性减小,从而最终降低了 RI 的强度。



**Fig. 17 Schematic of a circumferential groove casing treatment<sup>[80]</sup>**



**Fig. 18 Tip flow in simulation results<sup>[54]</sup>**

Ye 等<sup>[81]</sup>在跨声速压气机中嵌入周向槽,并对其效果进行了数值研究。数据显示,无论在何种压气机转速下,周向槽均能有效降低近失速工况下的流动波动。另外,Li 等<sup>[82]</sup>则将一轴向斜缝应用至轴流压气机中,最终使得 RI 的振幅得到了明显的下降。张永杰<sup>[83]</sup>研究了圆弧斜缝机匣处理与叶顶喷气对 RI 的影响,结果表明,两种流动控制方法可以通过改变叶尖泄漏流的发展轨迹,减小叶尖泄漏流的跨通道传播,从而抑制了 RI。总体而言,关于 RI 的流动控制方法可参考的文献较为有限,迄今为止并未出现对流动控制机理的全面系统的解释。在未来的研究中,需要进一步对 RI 以及控制方法的机制进行更加深入的分析和讨论。

## 6 结论与展望

旋转不稳定(RI)是一种常见于压气机高负荷工

况下的非定常空气动力学现象,且在叶尖附近流场信号对应的频谱中,表现为低于叶片通过频率的局部高能驼峰。在低转速压气机中,RI的影响主要在于噪声的显著增加;而在高转速的压气机中,除了噪声外,RI还能引发转子叶片的非同步振动甚至是结构疲劳等问题。因此探讨RI的物理机制从而降低RI带来的负面影响,对压气机的气动设计、改型、稳定性预测和结构优化等方面起着举足轻重的作用。

值得注意的是,虽然RI往往发生在接近压气机旋转失速的高负荷(小流量)工况点,但鲜有证据表明RI与旋转失速存在直接的关联。大多数文献依然认为,RI是一种波动(非定常)但稳定的物理现象。而RI中的Instability(不稳定)这一描述实际上属于历史遗留问题。本文通过RI的特征、机理、模拟方法和控制手段四个方面,回顾了近40年国内外在RI方面的研究进展,梳理了研究方法和结论,并对该方向的未来发展提供了思路方面的拓展。虽然学术和工业界针对RI的研究不胜枚举,但对于RI的一些开放性问题依旧未得到全面的解答:

(1)就RI机理的解释而言,通过对国内外文献的提炼,可以大致将RI的起源总结为叶尖附近通道之间的流动、涡的周期性脱落、流动剪切导致的Kelvin-Helmholtz Instability等方面。但这些讨论和分析仅仅针对特定的对象。迄今为止,尚未出现可以解释不同研究对象中RI的统一理论。笔者认为,未来的研究中,一方面可以开展更多定量方面的工作,选择合理的方法,探讨决定RI频率、幅值等特征的因素;另一方面,借助高精度的模拟方法,结合数据挖掘(如模态分解)等学科交叉手段,探索关于RI的深层物理特征。概括并总结RI的统一性理论,将是RI研究领域的重点探索方向。

(2)在RI的模拟方面,选择合适的模型对于RI的预测至关重要。由于RI对应的流动现象十分复杂(宽频多尺度非定常扰动),如何准确模拟RI也是学术和工业界一直关心的话题。其中,RANS这种数值模拟方法由于存在对湍流解析不足等固有缺陷,对RI这一非定常扰动的捕捉能力总体较弱。相比之下,高保真度模拟方法具备更强的湍流解析能力,可以更准确地捕捉多尺度扰动。然而后者所需要的计算资源相比于前者呈指数倍的增加。因此,如何合理地选择RI预测的模拟方法,是未来RI研究领域的另一个重点课题。

(3)关于RI的流动控制,虽然相关文献表明叶顶喷气、涡流发生器、机匣处理等方法可以有效降低RI

带来的负面影响,但总体而言,研究涉及的样本数较少,所得到的结论不具备普适性。为了进一步探索RI的流动控制方法,笔者认为,一方面需要增大研究的样本数,建立充足的数据库;另一方面,需要进一步深化RI机理的研究。举例而言,针对周期性波动的RI,可将其类比为动态系统,通过发展降阶模型或使用数据驱动的方法来定量地刻画动态系统,从而进一步探索影响RI的关键因素,并提出新的有效的流动控制方法。挖掘RI的本质机理以及流动控制方法的物理机制有利于减小压气机的噪声、解决流致振动带来的压气机叶片结构失稳等工程应用问题,从而为先进航空动力系统的研发提供技术储备。

**致谢:**感谢国家科技重大专项和国家自然科学基金的资助。

## 参考文献

- [1] 刘大响,程荣辉. 世界航空动力技术的现状及发展动向[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(5).
- [2] 冯南平,向巧,沈荣,等. 航空发动机关键核心技术攻关的组织策略研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(4): 222-229.
- [3] KHALID S A, KHALSA A S, WAITZ I A, et al. End-wall blockage in axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(3): 499-509.
- [4] HOYING D A, TAN C S, VO H D, et al. Role of blade passage flow structures in axial compressor rotating stall inception[J]. Journal of Turbomachinery, 1999, 121(4): 735-742.
- [5] VO H D, TAN C S, GREITZER E M. Criteria for spike initiated rotating stall[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(1): 011023.
- [6] 吴亚东,李涛. 压气机旋转不稳定性的研究进展[J]. 推进技术, 2021, 42(1): 68-81. (WU Y D, LI T. Research progress on rotating instability of compressor[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(1): 68-81.)
- [7] MATHIOUDAKIS K, BREUGELMANS F A E. Development of small rotating stall in a single stage axial compressor[C]. Houston: Proceedings of the ASME 1985 International Gas Turbine Conference and Exhibit, 1985.
- [8] LONGLEY J P, HYNES T P. Stability of flow through multistage axial compressors[J]. Journal of Turbomachinery, 1990, 112(1): 126-132.
- [9] CHOI J S. Experiments on the unsteady flow field associated with noise generation in centrifugal turbomachinery[D]. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 1991.
- [10] KAMEIER F. Experimentelle untersuchung zur entstehung



- ng und minderung des blattspitzen-wirbellärms axialer strömungsmaschinen[M]. Berlin: VDI-Verlag, 1994.
- [11] MAILACH R, LEHMANN I, VOGELER K. Rotating instabilities in an axial compressor originating from the fluctuating blade tip vortex[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2000, 122(3): 453-460.
- [12] KAMEIER F, NAWROT T, NEISE W. Experimental investigation of tip clearance noise in axial flow machines [C]. Aachen: 14th DGLR/AIAA Aeroacoustics Conference, 1992: 250-259.
- [13] KAMEIER F, NEISE W. Experimental study of tip clearance losses and noise in axial turbomachines and their reduction[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1997, 119(3): 460-471.
- [14] KAMEIER F, NEISE W. Rotating blade flow instability as a source of noise in axial turbomachines[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1997, 203(5): 833-853.
- [15] LIU J M, HOLSTE F, NEISE W. On the azimuthal mode structure of rotating blade flow instabilities in axial turbomachines [C]. Georgia: 2nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 1996.
- [16] PARDOWITZ B, PETER J, TAPKEN U, et al. Visualization of secondary flow structures caused by rotating instability: synchronized stereo high-speed PIV and unsteady pressure measurements [C]. Dallas: 45th AIAA Fluid Dynamics Conference, 2015.
- [17] PARDOWITZ B, TAPKEN U, NEUHAUS L, et al. Experiments on an axial fan stage: time-resolved analysis of rotating instability modes [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, 137(6): 062505.
- [18] MAILACH R, SAUER H, VOGELER K. The periodical interaction of the tip clearance flow in the blade rows of axial compressors [C]. New Orleans: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2001, 2001.
- [19] ROLFES M, LANGE M, MAILACH R. Investigation of performance and rotor tip flow field in a low-speed research compressor with circumferential groove casing treatment at varying tip clearance [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, DOI: 10.1155/2017/4631751.
- [20] CHEN X, KOPPE B, LANGE M, et al. Rotating instabilities in a low-speed single compressor rotor row with varying blade tip clearance [J]. *Energies*, 2021, 14(24): 8369.
- [21] INOUE M, KUROMARU M, TANINO T, et al. Propagation of multiple short-length-scale stall cells in an axial compressor rotor [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2000, 122(1): 45-54.
- [22] INOUE M, YOSHIDA S, YAMADA K, et al. Effect of tip clearance on stall evolution process in a low-speed axial compressor stage [C]. Vienna: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2004, 2004: 385-394.
- [23] YAMADA K, KIKUTA H, FURUKAWA M, et al. Effects of tip clearance on the stall inception process in an axial compressor rotor [C]. San Antonio: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2013, 2013.
- [24] WANG H, WU Y D, OUYANG H, et al. Casing pressure measurements and numerical simulations of a 1.5 stage axial compressor: tip leakage flow and rotating instability [C]. Düsseldorf: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014, 2014.
- [25] WANG H, WU Y D, OUYANG H, et al. Investigations of rotating instability and fluctuating tip clearance flow in a low-speed axial compressor [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 230(6): 981-994.
- [26] TIAN J, YAO D, WU Y D, et al. Experimental study on rotating instability mode characteristics of axial compressor tip flow [J]. *Experiments in Fluids*, 2018, 59(4): 2239-2250.
- [27] WU Y D, LI T, LAI S Z, et al. Investigation of rotating instability characteristics in an axial compressor with different tip clearances [J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2021, 235(15).
- [28] 姚丹, 田杰, 欧阳华, 等. 压气机旋转不稳定性的周向模态特性及其分解方法 [J]. *航空动力学报*, 2018, 33(2): 431-439.
- [29] YANG Z, WU Y D, OUYANG H. Investigation on mode characteristics of rotating instability and rotating stall in an axial compressor [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2022, 144(6): 061010.
- [30] YANG Z Y, WU Y D, LIU Z, et al. Tip flow on rotating instability on an axial compressor with different tip clearances [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 139: 108364.
- [31] SCHRAPP H, STARK U, SAATHOFF H. Breakdown of the tip clearance vortex in a rotor equivalent cascade and in a single-stage low-speed compressor [C]. Berlin: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008, 2008: 115-129.
- [32] NISHIOKA T, KANNO T, HIRADATE K. Rotor-tip flow fields near inception point of rotating instability in an axial-flow fan [C]. Vancouver: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011, 2011: 1493-1502.
- [33] GENG S J, LIN F, CHEN J Y, et al. Evolution of unsteady flow near rotor tip during stall inception [J]. *Journal of Thermal Science*, 2011, 20(4): 294-303.

- [34] XU R, HU J, WANG X G, et al. Experimental investigation of rotating instability in an axial compressor with a steady swirl distortion inlet [J]. *Energies*, 2021, 14 (23): 8057.
- [35] BAUMGARTNER M, KAMEIER F, HOURMOUZIAS J. Non-engine order blade vibration in a high pressure compressor[C]. Melbourne: Proceedings of the 12th International Symposium on Airbreathing Engines, 1995.
- [36] KIELB R E, THOMAS J P, BARTER J W, et al. Blade excitation by aerodynamic instabilities: a compressor blade study[C]. Atlanta: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2003, 2003: 399-406.
- [37] IM H, ZHA G C. Simulation of non-synchronous blade vibration of an axial compressor using a fully coupled fluid/structure interaction[C]. Copenhagen: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012, 2012: 1395-1407.
- [38] IM H, ZHA G C. Investigation of flow instability mechanism causing compressor rotor-blade nonsynchronous vibration[J]. *AIAA Journal*, 2014, 52(9): 2019-2031.
- [39] BIELA C, MÜLLER M W, SCHIFFER H P, et al. Unsteady pressure measurement in a single stage axial transonic compressor near the stability limit[C]. Berlin: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008, 2008: 157-165.
- [40] HAH C, BERGNER J, SCHIFFER H P. Tip clearance vortex oscillation, vortex shedding and rotating instabilities in an axial transonic compressor rotor [C]. Berlin: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2008, 2008: 57-65.
- [41] HOLZINGER F, WARTZEK F, JÜNGST M, et al. Self-excited blade vibration experimentally investigated in transonic compressors: rotating instabilities and flutter [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2016, 138(4): 041006.
- [42] WU Y H, LI Q P, TIAN J T, et al. Investigation of pre-stall behavior in an axial compressor rotor-part I: unsteadiness of tip clearance flow [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(5): 051027.
- [43] WU Y H, WU J F, ZHANG G G, et al. Experimental and numerical investigation of flow characteristics near casing in an axial flow compressor rotor at stable and stall inception conditions [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2014, 136(11): 111106.
- [44] CHEN Z Y, WU Y H, AN G Y, et al. Investigation into the flow mechanism of rotating instability in a subsonic axial flow compressor rotor [J]. *Fluid Dynamics Research*, 2018, 50(6): 065509.
- [45] SCHREIBER J, PAOLETTI B, OTTAVY X. Observations on rotating instabilities and spike type stall inception in a high-speed multistage compressor [J]. *International Journal of Rotating Machinery*, 2017, DOI:10.1155/2017/7035870.
- [46] YANG W C, WANG Y R, HAN L, et al. Effect of rotating instabilities on aerodynamic damping of axial flow fan blades [C]. Phoenix: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2019, 2019.
- [47] 汪松柏, 李绍斌, 宋西镇. 转静干涉对跨声速压气机叶片静气动弹性的影响 [J]. *推进技术*, 2017, 38(2): 341-347. (WANG S B, LI S B, SONG X Z. Effects of rotor-stator interaction on static aeroelasticity of a transonic compressor blade [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(2): 341-347.)
- [48] WEIDENFELLER J, LAWERENZ M. Time resolved measurements in an annular compressor cascade with high aerodynamic loading [C]. Amsterdam: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2002, 2002: 751-758.
- [49] PARDOWITZ B, TAPKEN U, ENGHARDT L. Time-resolved rotating instability waves in an annular cascade [C]. Colorado: 18th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2012.
- [50] BESELT C, RENNINGS R V, THIELE F, et al. Experimental and numerical investigation of rotating instability phenomenon in an axial compressor stator [C]. New Orleans: 42nd AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit 2012, 2012.
- [51] PARDOWITZ B, TAPKEN U, SORGE R, et al. Rotating instability in an annular cascade: detailed analysis of the instationary flow phenomena [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2014, 136(6): 061017.
- [52] BESELT C, PARDOWITZ B, RENNINGS R V, et al. Influence of the clearance size on rotating instability in an axial compressor stator [C]. Lappeenranta: 10th European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics, 2013.
- [53] ECK M, GEIST S, PEITSCH D. Physics of pre-stall propagating disturbances in axial compressors and their potential as a stall warning indicator [J]. *Applied Sciences*, 2017, 7(3): 285.
- [54] CHEN X, KOPPE B, LANGE M, et al. Influence of casing groove on rotating instabilities in a low-speed axial compressor [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2023, 145 (7).
- [55] YUE S, WANG Y R, ZHANG Z, et al. Experimental investigation of rotating instability in a contra-rotating axial flow compressor [J]. *Aeronautical Journal*, 2021, 125 (1286): 742-762.
- [56] MÄRZ J, HAH C, NEISE W. An experimental and numerical investigation into the mechanisms of rotating instability [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2002, 124 (3): 367-374.

- [57] HAH C, VOGES M, MUELLER M, et al. Characteristics of tip clearance flow instability in a transonic compressor[C]. Glasgow: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010, 2010: 63-74.
- [58] VO H D. Role of tip clearance flow in rotating instabilities and nonsynchronous vibrations[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(3): 556-561.
- [59] WU Y H, CHEN Z Y, AN G Y, et al. Origins and structure of rotating instability: part 1-experimental and numerical observations in a subsonic axial compressor rotor[C]. Seoul: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2016, 2016.
- [60] WU Y H, AN G Y, CHEN Z Y, et al. Origins and structure of rotating instability: part 2-numerical observations in a transonic axial compressor rotor[C]. Seoul: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2016, 2016.
- [61] HEINZE R, KAMEIER F, BIEDERMANN T, et al. Noise and vibration interference effects of bodies in the flow: an analogy with rotating instability in axial flow machines[C]. Lyon: 22nd AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2016.
- [62] INOUE M, KUROMARU M, TANINO T, et al. Comparative studies on short and long length-scale stall cell propagating in an axial compressor rotor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2001, 123(1): 24-30.
- [63] PARDOWITZ B, MOREAU A, TAPKEN U, et al. Experimental identification of rotating instability of an axial fan with shrouded rotor[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 2015, 229(5): 520-528.
- [64] CHEN Z Y, WU Y H, YANG G W, et al. Investigation into flow mechanism leading to the step change in aerodynamic modes of rotating instabilities in a subsonic axial compressor rotor[C]. Charlotte: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017, 2017.
- [65] KOWSHIK C K P, TSUGITA D, TAKEYAMA Y, et al. Rotating instability in a centrifugal blower with shrouded impeller[C]. Copenhagen: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2012, 2012: 685-694.
- [66] LI T, WU Y H, OUYANG H. Numerical investigation of tip clearance effects on rotating instability of a low-speed compressor[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 111(4): 106540.
- [67] YAMADA K, KIKUTA H, IWAKIRI K, et al. An explanation for flow features of spike-type stall inception in an axial compressor rotor[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2013, 135(2): 021023.
- [68] IM H, ZHA G C. Investigation of non-synchronous vibration mechanism for a high speed axial compressor using delayed DES[C]. Maryland: AIAA 52nd Aerospace Sciences Meeting, 2014.
- [69] WANG H, WU Y H, WANG Y R, et al. Evolution of flow instabilities in an axial compressor rotor with large tip clearance: an experimental and URANS study[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2020, 96: 105557.
- [70] NEUHAUS L, NEISE W. Active flow control to improve the aerodynamic and acoustic performance of axial turbomachines[C]. Monterey: 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, 2002.
- [71] BAILEY E E, VOIT C H. Some observations of effects of porous casings on operating range of a single axial-flow compressor rotor[R]. NASA-TM-X-2120, 1970.
- [72] OSBORN W M, LEWIS Jr G W, HEIDELBERG L J. Effect of several porous casing treatments on stall limit and on overall performance of an axial flow compressor rotor[R]. NASA-TN-D-6537, 1971.
- [73] PRINCE Jr D C, WISLER D C, HILVERS D E. A study of casing treatment stall margin improvement phenomena[C]. Houston: Proceedings of the ASME 1975 International Gas Turbine Conference and Products Show, 1975.
- [74] HOUGHTON T, DAY I. Enhancing the stability of subsonic compressors using casing grooves[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(2): 021007.
- [75] LI J C, LIN F, WANG S C, et al. Extensive experimental study of circumferential single groove in an axial flow compressor[C]. Düsseldorf: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2014, 2014.
- [76] LU X G, CHU W L, ZHU J Q, et al. Mechanism of the interaction between casing treatment and tip leakage flow in a subsonic axial compressor[C]. Barcelona: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2006: Volume 6: Turbomachinery, Parts A and B, 2006: 79-90.
- [77] WILKE I, KAU H P. A numerical investigation of the influence of casing treatments on the tip leakage flow in a HPC front stage[C]. Amsterdam: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2002, 2002: 1155-1165.
- [78] MÜLLER M W, SCHIFFER H P, HAH C. Effect of circumferential grooves on the aerodynamic performance of an axial single-stage transonic compressor[C]. Montreal: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2007, 2007: 115-124.
- [79] HAH C. Steady and unsteady flow effects of circumferential grooves casing treatment in a transonic compressor rotor[C]. Osaka: International Gas Turbine Congress 2011 (IGTC 2011), 2011.
- [80] ROLFES M, LANGE M, VOGELER K. Experimental investigation of circumferential groove casing treatments for large tip clearances in a low speed axial research com-



- pressor[C]. Montreal: Proceedings of the ASME Turbo Expo 2015, 2015.
- [81] YE S B, ZHAO Q J, ZHOU X Y, et al. The impact of circumferential casing grooves on rotating instability in a transonic axial compressor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(8): 2868–2893.
- [82] LI T, WU Y D, OUYANG H. Influence of axial skewed slots on the rotating instability of a low-speed axial compressor[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, 2021, 235(3): 385–401.
- [83] 张永杰. 叶顶泄漏流控制对压气机旋转不稳定性影响研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.

(编辑:梅 瑛)

## Review of rotating instability in compressors

CHU Wuli<sup>1</sup>, CHEN Xiangyi<sup>1,2</sup>

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China;  
2. Chair of Turbomachinery and Flight Propulsion, Technische Universität Dresden, Dresden 01062, Germany)

**Abstract:** Rotating instability (RI) can be observed when high-loaded compressors operate at near-stall conditions. Studying RI is of great significance for reducing the working noise of the compressor, mitigating flow-induced vibration, and ensuring stable operation of aircraft engines. This paper reviews the observations of RI and discusses the corresponding features and characteristics. In addition, the origins and the mechanisms of RI are comprehensively studied. The causes of RI are thus classified into blade tip clearance flow, vortex shedding, flow shearing, and other aspects. Furthermore, the numerical approaches in simulating RI are reviewed, and the effects of flow control methods on RI are evaluated. The research progress of RI is finally summarized, and the outlook is further proposed.

**Key words:** Compressor; Rotating instability; Blade tip clearance flow; Vortex shedding; Unsteady flow; Numerical simulation; Flow control; Review

**Received:** 2023-09-01; **Revised:** 2023-11-17.

**DOI:** 10.13675/j.cnki. tjjs. 2309003

**Foundation items:** National Science and Technology Major Project of China (J2019-I-0011); National Natural Science Foundation of China (52076179).

**Corresponding author:** CHEN Xiangyi, E-mail: xiangyi\_chen@foxmail.com