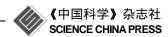
www.scichina.com

tech.scichina.com



射流频率对转子失速裕度影响的探索

周军伟*, 侯安平, 周盛

北京航空航天大学航空发动机气动热力重点实验室, 北京 100191

 $*\,E\text{-mail:}\,zhou_junwei@foxmail.com$

收稿日期: 2009-08-09; 接受日期: 2009-10-27

摘要 转子叶尖射流能够有效的提高压气机的失速裕度,其中,周期性射流是研究中常见的射流形式.本文的目的在于探索射流频率对转子失速裕度的影响.采用非定常数值方法对不同频率射流作用下的转子流场进行了模拟.对不同频率射流作用下转子失速裕度的对比发现,存在一个转子扩稳的最优射流频率,当射流频率远离这个最优频率,射流扩稳效果逐渐降低.对于本文的转子,最优射流频率与叶尖泄露涡振荡频率之比约为1.5.对98.5%叶高位置叶片负荷的时均分布分析发现,与其他射流频率相比,最优射流频率下转子前缘附近负荷最低,因此能够推迟失速的发生.

关周轴非失叶负键期流定速尖荷词性压常裕泄分

高推重比是航空发动机发展的大趋势,这就要求压气机必须提高级负荷以满足推重比的需求. 压气机级负荷的提高使得叶栅流动更容易失稳. 对压气机流动失稳现象的研究发现,转子叶尖的流动失稳是其中的主要原因之一[1-3].

为了保证压气机的稳定工作裕度,必须采取一些措施来控制转子叶尖的流动失稳,常见的措施如处理机匣、转子叶尖射流等. Day^[4]较早的利用射流成功的拓宽了转子的稳定工作裕度. 而后, Weigl^[5]探索了射流中定常因素与非定常因素对射流扩稳效果的影响,结果发现,定常因素是射流扩稳的主要因素,而采用主动控制射流方式能够进一步提高射流的扩稳效果. Suder 等人^[6]与 Khaleghi 等人^[7]对被动射流的参数进行分析后发现,影响射流扩稳效果的主要因素是射流速度与射流角度.

从以上射流的几何分布形式来看,这些射流形式都为周向分布的离散式射流,即在转子上游机匣上沿周向离散的分布若干射流器.在压气机运行过

程中,转子叶片周期性的扫过这些射流器,从转子坐标系下来看,相当于射流周期性作用于转子流场.当转子的转速一定,周期性射流的频率随射流器的数目线性变化.因此,不管射流形式是主动的还是被动的,射流对转子流场的作用总是非定常的.由此可见,射流对转子流场的作用不仅仅是射流速度与角度的问题,而且存在非定常激励对非定常流场作用的问题.

Qiu 等人^[8]在静止环形叶栅叶尖前缘的合成射流 实验中发现,叶栅损失系数会随射流频率的变化曲 线表现出明显的峰值特征,即当射流频率与叶栅脱 落涡频率一致或为倍频关系时,叶栅损失系数最低; 随着射流频率远离叶栅脱落涡频率,叶栅损失系数 增大. 那么,不同频率的周期性射流对转子失速裕度 的影响会不会具有类似特征呢?

本文受以上工作的启发,对不同频率射流作用下转子失速裕度的变化进行了探索.首先给出了文中所用转子的设计参数、射流形式,以及数值方法,

而后初步分析了转子叶尖流场的受迫振动现象,最后给出了不同射流频率对转子裕度的影响及其流动机理的解释.

1 转子设计参数及射流分布形式

本文所用的转子设计参数如表 1 所示.

对于周向离散的射流形式,例如周向均布 6 个射流器,如图1所示,即使在固定坐标系下是定常的射流,从转子坐标系下来看,射流仍然表现为非定常性的.

转子叶片感受的射流频率可以表达为

$$f_i = f_{\rm R} \times N_{\rm iniector},\tag{1}$$

其中 N_{injector} 为射流器的数目, f_{R} 为转子频率, 表达如下:

$$f_{\rm R} = \frac{14440}{60} = 240.7 \,\text{Hz}.$$
 (2)

当转子转速一定时,改变射流器的数目即改变 了转子叶片感受的射流频率.为了在数值模拟中方 便实现不同的射流频率,本文通过在转子坐标系下 施加周期性射流的方法,达到与真实射流情况相似

表 1 转子设计参数

叶片数	21
设计转速(r/min)	14440
叶尖切线速度(m/s)	311.5
叶尖进口相对 Ma 数	1.13
设计压比	1.25
机匣半径(mm)	206
进口轮毂比	0.7
叶尖间隙(mm)	0.5
展弦比	1.037
叶尖设计攻角(°)	0.5
叶根设计攻角(°)	1.5

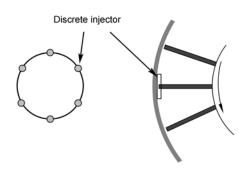


图 1 离散分布的射流器

的效果. 射流频率为转子频率的整数倍, 并采用矩形波射流形式(占空比 0.5). 具体的射流方法在数值方法中详细介绍.

另外,为了与非定常射流对比,文中也给出了定常射流下的数值结果,即在转子前施加全周向均匀的射流^[7](uniform injection).

2 数值方法

本文研究的射流形式如图 2(c)所示,射流效果与文献[5~7]类似.为了便于射流在数值上的实现,采用模化的机匣边界来达到射流的效果.模化的机匣边界位置如图 2(c)所示. 当在叶尖施加轴向射流,射流区域附近流场的周向速度与径向速度仍近似为零,轴向速度为射流速度,其中轴向速度沿轴向的分布大致为图 2(b)中所示^[7].

为了避免在数值模拟中模化的机匣边界两端的速度梯度过大而造成数值不稳定,将图 2(b)中轴向速度的分布光顺为图 2(a)中的分布形式,其中 V,分布规律为

$$V_x(x') = V_{x,\text{max}} e^{-\frac{(10x')^2}{2}},$$
 (3)

x'为轴向位置的无量纲量, 表达为

$$x' = \frac{x - x_{\text{leading}}}{x_{\text{trailing}} - x_{\text{leading}}},$$
 (4)

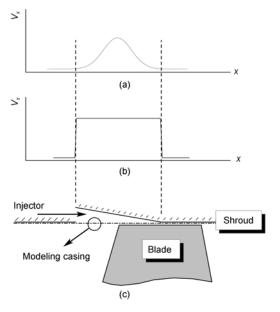


图 2 射流边界示意图

x'范围为-0.5~0.5. $V_{x,max}$ 为射流最大速度,参照文献[6] 中的射流速度,这里取

$$\frac{V_{x,\text{max}}}{U_{\text{tin}}} = 0.483.$$
 (5)

数值方法采用有限差分法,控制方程为雷诺平均 NS 方程,湍流模型选用 BL模型.为了使算法在时间与空间上都具有高精度,时间导数项采用三步三阶的 Range-Kutta 法,对流项采用矢通量分裂的五阶精度迎风格式.文献[9]中给出了文中所用程序代码的定常校验,在此不做重述.

计算网格用 H 型网格,叶片前缘与尾缘采用削尖处理. 网格数为(前延伸段+叶栅通道+后延伸段-2)×周向×径向=(17+41+25-2)×37×41 \approx 1.23×10⁵. 为了提高计算效率,采用 Fortran+MPI 的并行算法. 图 3 给出了转子 blade-to-blade 面、子午面及转子叶尖间隙的网格示意图.

进口边界采用给定总温、总压及进口气流角的定常边界,进气条件为标准状态下的大气条件,轴向进

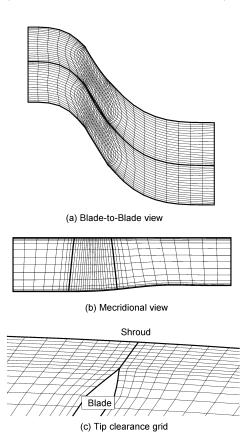


图 3 计算用网格

气;出口边界给定静压,通过改变背压条件来逼近失速点;前后延伸段采用周期性边界;叶片表面无滑移、绝热.

图 4 给出了本文转子在无射流情况与定常射流情况下转子的压升特性曲线. 由于本文所用程序基于非定常 NS 方程, 因此以上结果是在流场收敛后转子转动一圈过程中均匀选取 200 个时间步时刻流场进行时间平均后获得的. 当流场中参数(例如进出口流量、流场中某点压力、速度等)呈现比较稳定的或周期性的波动时,则认为流场收敛.

失速点的捕捉依据转子流量与流场的共同分析. 当转子流量发生剧烈变化,或者转子叶尖流场出现不稳定的流动现象时,则认为失速开始发生.图 5 给出了无射流情况下转子失速过程中流量的收敛过程.对应于图 5 中的 A 点时刻,其流场分析如图 6 所示.

3 叶尖泄露涡的震荡与受迫振动

叶尖泄露涡的震荡现象较早已有研究, Graf^[10]首先 发现了转子叶尖流场的周期性振动现象. Zhang 等人^[11]

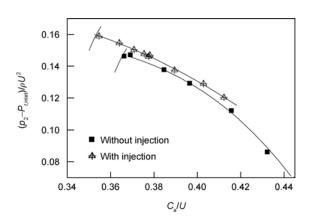


图 4 转子压升特性

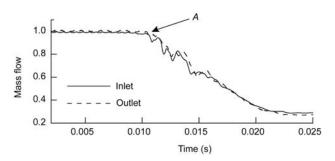


图 5 流量收敛曲线

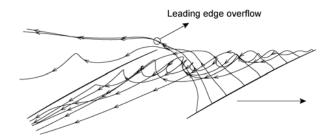


图 6 转子叶尖前缘溢出流

对叶尖泄露涡震荡的解释认为,这种现象是叶尖泄露流与叶尖负荷动态平衡的一种表现.

将压气机主流与转子叶尖射流分开来看,相当于利用周期性的射流作为驱动力来激励压气机流场这个弹性系统.为了分析叶尖泄露涡的振动频率,对叶尖泄露涡附近流场进行了监测.图7给出了文中转子数值模拟中叶尖泄露涡流场区域的监测点.监测点选取50%弦长位流道中间位置98.5%叶高处.

表3给出了6个工况下叶尖泄露涡振动频率的对比.可以看出,在无射流或均匀射流条件下,叶尖泄

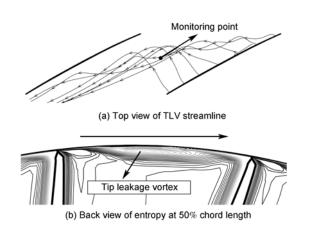


图 7 监测点位置

露涡的震荡频率相差不多;施加均匀射流的叶尖泄露涡频率要明显高于无射流情况. 在周期性射流作用下,叶尖泄露涡表现出与射流频率一致的振动,这与弹性系统的受迫振动现象相一致.

4 结果分析

首先给出转子在不同射流频率下的失速裕度的对比.对于失速点的判定方法, Huu Duc Vo 等人[1]认为,当转子叶尖流动出现了在尾缘向相邻叶片通道的泄露流,以及在前缘出现向相邻叶片通道的溢出流时,认为转子开始进入失速状态.本文中转子的数值模拟中出现了叶尖前缘的溢出流,因此以转子叶尖前缘溢出流为失速开始的判据,如图 6 所示.

图 8 给出了不同射流频率下转子裕度的对比. 综合裕度 *S.M.* 定义为

$$S.M. = \frac{(\pi_k^* / \dot{m})_{\text{Near stall}}}{(\pi_k^* / \dot{m})_{\text{Design point}}} - 1.$$
 (6)

图 8(a)中裕度以无射流情况下裕度为基准. 其中, 裕度增量表达为

$$\Delta S.M. = (S.M.)_{i} - (S.M.)_{R}, \tag{7}$$

下标 i 与 B 分别表示为射流与基准.

可以看出,均匀射流具备比所有非定常射流都强的扩稳能力;在非定常射流中, $12 \times f_R$ 周期性射流扩稳效果最好,并且表现出明显的峰值特性.对于转子的静压升特性, $12 \times f_R$ 周期性射流达到了比均匀射流更好的效果,如图 8(b)所示.

为什么不同频率下的射流扩稳能力会不一样? 非定常射流的扩稳机理与均匀射流的扩稳机理是不 是相同的呢?以下从转子负荷以及叶尖泄露涡的运 动等角度对这两个问题进行了分析.

表 3	叶尖泄露涡的震荡频率
1 C 2	1 7C1E bet 1/311 1/1C16/9/2/2

Index	P ₂ (kPa)	Injection condition		Frequency (Hz)	Remark
1	115	No		1815	Design point
2	117.1	No		1746	Near stall
3	117.1	Yes	Uniform	1982	
4	118.5	Yes	Uniform	2053	Near stall
5	118.5	Yes	$12 \times f_R$	2882	
6	118.6	Yes	$12 \times f_R$	2882	Near stall

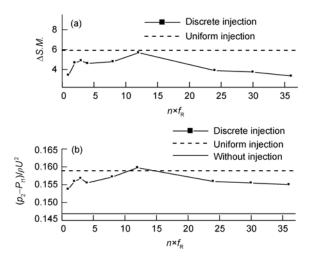


图 8 不同射流频率下转子特性

4.1 周期性射流对叶尖流场的作用

针对周期性射流对叶尖流场的作用,以下分别分析了射流对叶尖总压系数的作用,以及对叶尖泄露涡的作用.

图 9 给出了相同背压条件下均匀射流与无射流

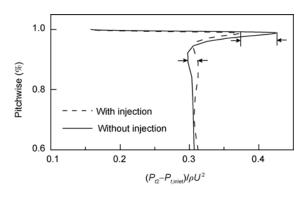


图 9 射流对负荷径向分布的影响

转子出口时均总压系数沿叶高的分布.可以看出,在约 98.5%叶高转子负荷有大幅度的降低,相应的,在90%叶高左右,叶片负荷有所上升,以维持负荷平均.

图 10 给出了同一背压条件下无射流、均匀射流与 $12 \times f_R$ 周期性射流作用下转子出口 98.5%叶高总压系数随时间的变化.

可以看出,1)不同射流情况下叶尖总压系数都有一定程度的振荡,无射流情况下振荡最小,均匀射流次之,12×f_R周期性射流的振幅相比最大;2)相比无射流情况,均匀射流与周期性射流的平均总压系数都要小一些,这说明在射流降负的现象上均匀射流与非定常射流是一致的;3)均匀射流与周期性射流达到的总压极小值几乎一样,可见射流的最大降负能力几乎与射流频率无关.

图 11 给出了相同背压条件下均匀射流与 $12 \times f_R$ 周期性射流作用下叶尖泄露涡轨迹随时间的变化. 定义 β_{TLV} 为叶尖泄露涡上游一侧与转子额线的夹角, 如图 12 所示. 由于通常情况下叶尖泄露涡的形状带有一定的曲率, 因此本文中 β_{TLV} 由其余角 β_{TLV} 求得.

可以看出,在均匀射流作用下,叶尖泄露涡的轨迹基本不变;而在周期性射流激励作用下叶尖泄露涡的轨迹做周期性振荡.从 Chen^[12]对叶尖泄露涡流动机理的分析来看,在叶型一定的情况下,叶尖泄露涡的轨迹主要与叶尖来流速度方向有关.如此则不难解释图 11 中叶尖泄露涡轨迹的变化规律.由于射流的影响,叶尖轴向速度发生了周期性变化,而叶尖切线速度则不变,因此气流角发生周期性变化,导致叶尖泄露涡轨迹发生周期性变化.而对于均匀射流的情况,由于射流速度不变,因此叶尖气流角不变,泄露涡的轨迹则不变.

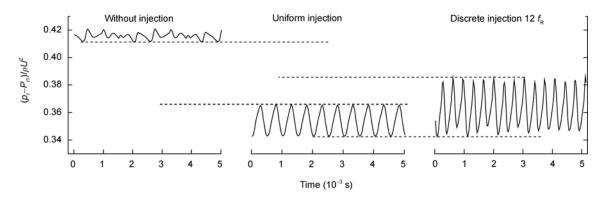


图 10 转子出口 98.5% 叶高总压系数随时间的变化

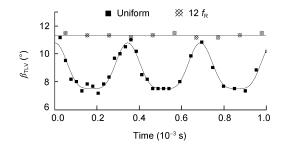


图 11 叶尖泄露涡位置随时间的变化

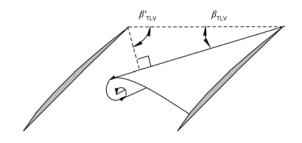


图 12 叶尖泄露涡示意图

从以上分析可以看出,周期性射流与均匀射流 在扩稳机理上存在共同点,即二者都是对叶尖流动 进行控制,够降低叶尖负荷,将叶尖泄露涡的轨迹向 下游推移,从而拓宽稳定工作裕度.所不同的是,在 周期性射流作用下,由于流场对射流的动态响应,叶 尖泄露涡随射流作用而周期性的摆动.

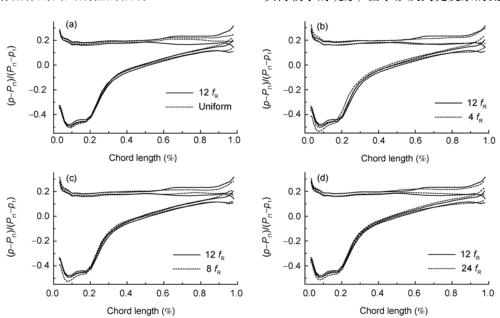


图 13 不同频率的叶片表面压力分布波动

4.2 不同射流频率下的转子负荷对比

以下对转子在不同射流频率下扩稳能力的差异进行分析. 压气机负荷与其流动稳定性密切相关. 为了分析不同射流频率对转子失速裕度的影响, 以下对不同射流频率下叶片表面的压力分布进行了分析.

图 13 分别对比了相同背压下 $12 \times f_R$ 周期性射流与其他四种射流的 98.5% 叶高叶片表面压力分布. 可以看出,除了在 50% 弦长之后 $12 \times f_R$ 周期性射流的压力波动较大,很难发现其他的差异. 图 14 对比了该叶高下叶片两侧时均压力差分布,发现在前缘附近,叶片负荷明显较低.

根据 Chen 等人^[12]对叶尖泄露涡的分析,叶尖泄露涡的强度及位置都与叶尖位置叶片两侧的压差密切相关.小的压差使得叶尖泄露流削弱,从而使叶尖泄露涡更靠近叶片表面. Hoying 等人^[13]在三维数值研究中发现,当流量系数减小,叶尖泄露涡的轨迹向上游移动;当流量减小到叶尖泄露涡与来流方向垂直时,叶尖泄露涡不再稳定存在,失速开始发生. 从以上分析可以看出,叶片负荷、叶尖泄露涡的轨迹以及叶尖流动失稳三者之间存在着确定的关系. 对于12×f_R 周期性射流情况,由于其前缘附近负荷较小,因此叶尖泄露涡相对稳定,因而在逼近失速点的过程中,其较低的负荷使其具备更高的负荷能力.

对于 $12 \times f_R$ 周期性射流情况下转子叶尖前缘附近负荷较小的现象,由于涉及到更复杂的流动机理问题,

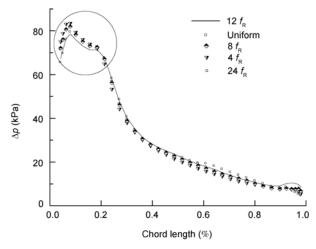


图 14 不同频率 98.5% 叶高叶片两侧压力差

在此很难作出解释,需要进一步的研究来揭示.

5 小结

本文探索了不同射流频率对转子扩稳的影响, 得到如下结论.

- 1) 周期性射流扩稳机理与均匀射流机理一致, 都是 降低转子叶尖负荷, 并将叶尖泄露涡的轨迹向下游推移.
- 2) 对于周期性射流,不同射流频率下扩稳效果不同.在叶尖泄露涡自振频率附近存在一个扩稳效果的极大值,并且在该频率下,周期性射流能够使转子获得比定常射流更好的压升能力.对流场的分析发现,该频率周期性射流情况下转子叶尖前缘区域负荷最低.

参考文献

- 1 Vo H D, Tan C S, Greitzer E M. Criteria for spike initiated rotating stall. ASME Paper, 2005-GT-68374
- 2 Camp T R, Day I J. A study of spike and modal stall phenomena in a low-speed axial compressor. J Turbomach, 1998, 120(3): 393-401
- 3 Mailach R, Lehmann I, Vogeler K. Rotating instabilities in an axial compressor originating from the fluctuating blade tip vortex. J Turbomach, 2001, 123(3): 453-463
- 4 Day I J. Active suppression of rotating stall and surge in axial compressors. J Turbomach, 1993, 11(1): 40-47
- 5 Weigl H J, Paduano J D, Frechette L G, et al. Active stabilization of rotating stall and surge in a transonic single stage axial compressor. J Turbomach, 1998, 120(4): 625–636
- 6 Suder K L, Hathaway M D, Thorp S A, et al. Compressor stability enhancement using discrete tip injection. J Turbomach, 2001, 123(1): 14-23
- 7 Khaleghi H, Teixeira J A, Tousi A M, et al. Parametric study of injection angle effects on stability of transonic axial compressors. J Propul Power, 2008, 24(5): 1100-1107
- 8 Qiu Y X, Ge J D, Lu Y J, et al. Research on sound-vortex resonance in enhancing performance of an annular cascade. ASME Paper, 2003-GT-38022
- 9 Xiong J S, Hou A P, Zhou S. Compressor stage wake induced unsteady flow analysis and utilization (in Chinese). J Eng Thermophys, 2007, 28(1): 43-45
- 10 Graf M B. Effects of Stator Pressure Field on Upstream Rotor Performance. Dissertation of Doctoral Degree. Cambridge: MIT, 1996
- 21 Zhang H W, Deng X Y, Lin F, et al. A study on the mechanism of tip leakage flow unsteadiness in an isolated compressor rotor. ASME Paper, 2006-GT-91123
- 12 Chen G T, Greitzer E M, Tan C S, et al. Similarity analysis of compressor tip clearance flow structure. J Turbomach, 1991, 113(2): 260—269
- 13 Hoying D A, Tan C S, Vo H D, et al. Role of blade passage flow structures in axial compressor rotating stall inception. J Turbomach, 1999, 121(4): 735-742