DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2021.01.054

进口探针支杆诱发压气机转子叶片振动的流固耦合研究

刘氦旭1,杨荣菲1,向宏辉2,高杰2

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院,江苏 南京 210016;2. 中国航发四川燃气涡轮研究院,四川 绵阳 621000)

摘 要:针对某压气机试验中发现进口探针支杆的引入导致下游转子叶片发生振动失效的问题开展数值计算研究,采用 MPCCI 把 Numeca 和 ABAQUS 联合起来构建成流固耦合计算平台,数值分析了试验故障工况条件下有/无探针支杆对压气机转子叶片振动特性的影响。结果表明:无探针支杆时转子叶片振动收敛,有探针支杆时不同转子叶片的振动特征不同,至少存在一个转子叶片的振动位移及应变发散,对应于叶片振动失效。 关键词:压气机;进口探针支杆;流固耦合;振动失效 中图分类号:V231.3 文献标志码:A 文章编号:1671-5276(2021)01-0211-04

Study on the Influence of Probe Support on Dynamic Stress of Compressor Rotor Blade

LIU Haixu¹, YANG Rongfei¹, XIANG Honghui², GAO Jie²

(1. College of Energy and Power, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,

Nanjing 210016, China; 2. AECC Sichuan Gas Turbine Establishment, Mianyang 621000, China)

Abstract: In order to solve the problem of an inlet immersion probe causing a strong vibration of the downstream rotor blade in a compressor performance test, MPCCI was used to combine Numeca with ABAQUS to build a FSI platform. The influence of the probe support or non-support over the vibration characteristics of the compressor rotor blade under the condition of test failure was analyzed. The results show that there is a trend of convergence of blade vibration without probe strut. However, in the case of probe strut, each rotor blade has different vibration characteristics. In this case, at least one blade's displacement and stress are not convergent, which means that the blade will fail in vibration.

Keywords: compressor; inet probe support; fluid-structure interaction; vibration failure

0 引言

浸入式探针的存在会在原本干净的流场中产生扰动 源,造成堵塞影响流场结构,进而影响叶轮机械气动性能, 或因进口探针与压气机之间相互作用剧烈而导致压气机 转子进口气流角大幅值变化[1]使压气机的失速裕度大幅 降低。为了弱化探针对压气机性能的影响,叶型探针技术 被提出。将探头安装在叶片前缘以扣除探针支杆堵塞影 响,但探头的存在改变了叶片前缘几何形状,并严重改变 了当前叶片通道流场结构^[2]。采用更细的探针支杆,如 尺寸较长的长条型探针支杆^[3]、尺寸略微减小的尾缘修 型支杆^[4]被提出,以削弱探针支杆尾迹,进而减少支杆与 压气机相互作用。TERUNA C 等^[5] 数值研究发现探针脱 落涡冲击叶片会造成非常大的压力波动,但并没深入研究 对叶片振动的影响。由此可见国内外研究者基本集中于 研究探针对压气机气动性能或对叶片通道噪声的影响,而 忽略了探针对叶片振动的影响。在某次压气机远离失速 边界的试验过程中发现,某探针支杆的引入导致压气机第 一级转子叶片动应力超限。这个现象的发现意味着探针

支杆引起下游压气机转子振动问题并不能被完全忽略。

理论上来讲,探针诱导叶片应力超限是流固耦合问题,越来愈多的研究者开始通过流固耦合^[6]数值计算方 法对振动问题进行研究,并结合文献[7]指出相位延迟技 术能够大大提高计算叶片振动的速度,并能够有效预测叶 片气动阻尼等振动特性。因此本文将采用相位延迟流固 耦合数值计算方法研究有/无探针支杆影响下压气机转子 叶片振动特征。

1 研究对象及数值方法

1.1 研究对象

压气机流道示意图见图 1,共有 36 个 IGV 进口导叶, 62 个 S0 静子叶片, 87 个 R1 转子叶片。一支直径为 10 mm 圆柱型探针安装在截面 1a-1a 上,其距离 R1 叶中 前缘 3.5 倍轴向弦长、与展向夹角 6.217°。此时支杆叶中截面 相较 S0 周向位置、轴向位置以及进气角度如图 2 所示。

下文针对探针支杆诱发压气机振动失效工况开展流 固耦合数值计算研究,并与无探针方案进行对比,探讨转 子叶片动应力超限机理。

基金项目:民用飞机专项科研项目(MJ-2016-J-96)

第一作者简介:刘氦旭(1995—),男,重庆人,硕士研究生,研究方向为压气机内流 CFD 仿真。



图 1 压气机的子午流面及相关数据



图 2 叶中截面测试探针相对 S0 的周向位置

1.2 模型简化及网格划分

1)模型简化

由于全周数值模拟的总网格量将上亿,由于当前计算 资源限制,对图1中的真实模型进行简化。由文献[8]可 知,当叶片振动位移呈收敛趋势,采用单通道计算方法可 预测叶片振动特性,故在下文无探针模型中采用单通道。

针对带探针支杆的压气机模型,探针支杆和 S0 可以 合并为一个静子域,与压气机转子非定常作用问题仍可以 采用相位延迟方法预测叶片振动。因此,调整探针和 S0 的数目为 10 和 60,约化为 6/1 模型见图 3。由文献[9]结 果可知本文均布的 10 支探针合理,能够避免相邻探针之 间产生干扰。此外 S0 叶片数降低仅使负荷增加 3%,对压 气机流场结构不会产生太大影响。由于探针支杆尾迹影 响 3~4 个转子通道,故转子计算域选择 4 个转子通道。 最终带支杆的压气机计算模型见图 3,图中沿转子旋转方 向对转子叶片标号为 r1、r2、r3、r4。



2) 网格划分

流体域网格由 Autogrid5 自动生成,壁面第一层网格 高度为 0.003 mm,y+为 1.01。各叶排网格量及端壁间隙量见 表 1,图 4 给出了叶中截面网格及支杆、转子间隙内网格。

表1 各叶排网格量及间隙特征

参数	探针	SO	R1
网格量/万	300	30×6	40×4
间隙/mm	4.9(轮毂)	—	0.5(叶尖)



流固耦合计算时仅考虑转子振动,使用 ABAQUS 软件对转子固体域划分 Tet 型有限元网格,沿展向、流向分别布置 30、50 个节点,并加密前尾缘附近节点以保证前缘 尾缘的几何不失真,总网格量为 68 480,如图 5 所示。



1.3 网格无关性验证

1) 流体网格

计算得到表 2 中不同网格量下 S0、R1 叶片 50% 叶高 截面静压见图 6,可以发现,三种网格计算得到的叶片静 压曲线完全重合,故从缩短计算时间考虑,本文流体计算 网格选择 mesh1。

表 2 个同网格重					
参数	mesh 1	mesh 2	mesh 3		
网格量(S0+R1)/万	30+40	50+50	70+70		



2) 固体网格

转子叶片材料为通用铝合金,密度2770kg/m³,弹性

模量7.1×10¹⁰ Pa, 泊松比0.33。使用 ABAQUS 对4种不同 网格量的有限元模型在转速4600 r/min 载荷下进行瞬态 动力学计算,时间步长0.01 s, 计算时长1 s。对比图5中 蓝点位置的应力见表3(因本刊为黑白印刷, 有疑问之处 可咨询作者)。从表3可以看出, 当固体网格节点超过6.8 万后, 应力预估值收敛, 考虑采用 FE_4 网格进行振动计算所需时间是 FE_3 模型的十几倍, 最终选择 FE_3 网格 作为固体域计算网格。

表 3	不同网格量-	下转子叶片	表面振动应力	h
10 5			~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~	⁄ 」

网络模型	网格量	应力/MPa	
FE_1	28 582	30.50	
FE_2	48 324	31.83	
FE_3	68 480	31.87	
FE_4	122 232	31.87	

1.4 流固耦合数值方法

利用 MPCCI 软件平台将 Numeca 软件计算的流动结果 与 ABAQUS 软件计算的固体振动结果进行流固耦合面的信 息交互,以实现压气机的流固耦合计算,计算流程见图 7。



Numeca 采用 SA 湍流模型,并采用双精度求解,进出 口边界条件按照试验给定,进口给定总温、总压、进气角, 出口给定反压,固壁绝热无滑移,侧向周期性边界及转静 交界面使用相位延迟边界,同时选择 IDW(inverse distance weighting)多层动网格技术模拟转子叶片运动。流体域计 算时间步长定义为一个转子叶片通道计算 20 步,对应的 时间步长为t_{CFD} = 7.496 251 87×10⁻⁶ s。

由于 Abaqus 指定的时间精度最多为 5 位, Numeca 双 精度计算方法时间精度大于 5 位, 在时间尺度上两个软件 难以完全一致, 因此设定 ABAQUS 计算时间步长为 7.5× 10⁻⁶ s, 流固耦合计算过程中采用非匹配时间步长耦合 方法。

ABAQUS 计算时叶片底部自由度均设置为 0, 施加 4600 r/min 预应力载荷,并在每个转子叶片的吸力面 90% 叶高、距前缘 20%轴向弦长处监控叶片位移以及动应力, 监测点位置见图 5 中的灰点标识。

2 流固耦合计算结果分析

2.1 固体域振动特性分析

图 8 给出了探针支杆影响下计算域中 4 个转子叶片 监测点周向位移以及动应力随时间变化情况,可以看出, r1、r2 叶尖位移逐渐增加,r3、r4 叶尖位移逐渐衰减,表明 r1、r2 叶片可能会出现振动失效问题,r3、r4 叶片处于振动安全状态,其中r2 叶片振动位移增加最大,对应的r2 叶片是探针支杆尾迹影响下最容易出现振动失效的叶 片。除此之外,图8(b)中r1、r2、r3 叶片的动应力时变曲 线呈发散趋势,r4 叶片的动应力时变曲线呈衰减趋势, 且r2 的动应力增加幅值最大,与振动位移曲线获得的结 果一致。

图 9 给出了无探针时转子叶片监测点振动特征,可以 看出,叶片的位移以及动应力随时间均逐渐衰减,说明叶 片不会发生振动失效。



图 8 有探针时叶片沿 y 方向的位移、动应力



图 9 无探针时叶片沿 y 方向的位移、动应力

图 10、图 11 给出了转子振动位移最大时刻的吸力面 瞬时动应力和位移分布云图,其中图 10 为探针支杆影响 下 r2 叶片振动时刻 t=0.005 6s,图 11 为无探针支杆影响 工况。对比可以发现,有/无探针支杆时叶片吸力面的应 力、位移分布基本相同,仅幅值不同,在探针支杆影响下, 转子吸力面应变、位移都近似无探针情况的 2 倍,说明探 针支杆的存在影响整个叶片的振动特征。





2.2 流体域特性分析

为了获得探针支杆引起转子叶片振动失效的流动机 理,图 12、图 13 分别给出了有/无探针支杆影响下转子叶 片表面瞬时静压分布云图。可以看出,有探针支杆时,r2 叶片的前缘叶尖的静压大于其他叶片,并远大于无探针时 叶片相同位置点的静压,表明支杆尾迹改变了转子叶片表 面静压分布。







图 13 无探针时叶片表面瞬时静压云图(t=0.008 7 s)

图 14 进一步给出了有探针时转子叶片 90% 叶高处的 瞬时静压分布,发现不同叶片前缘负荷不同,r1、r2 叶片前 缘附近都是吸力面静压大于压力面静压,对应于叶片处于 负攻角状态,同时叶片后半部分都是压力面静压大于吸力 面静压,这类压力分布最终造成叶片扭转;而 r3、r4 叶片 整个弦长都是压力面静压大于吸力面,对应于叶片处于正 攻角状态,叶片出现弯曲变形。由此可以推断,支杆尾迹 引起叶片表面静压大幅变化,使得转子叶片振动形式由弯 曲到扭转的周期性变化,是造成转子振动应力失效的 原因。



3 结语

对比上述有探针和无探针的计算结果,发现如下 结论:

1)无探针时叶片振动呈收敛状态,有探针时各叶片的振动形式各不相同,其中 r2 叶片振动位移及应变时间曲线发散,造成探针支杆影响下叶片高周疲劳失效。

2) 探针支杆尾迹引起压气机转子叶片前缘负荷大幅 变化,转子叶片振动形式从弯曲变为扭转,是叶片失效的 主要原因。

参考文献:

- [1] 赵建通. 稳态测试布局对压气机气动性能的影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.
- [2] MA H W, JIN C, ZHAO L P, et al. Effects of airfoil-probe tubes on the flow field of a compressor cascade[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(4): 321-330.
- [3] SANDERS C, TERSTEGEN M, HÖLLE M, et al. Numerical studies on the intrusive influence of a five-hole pressure probe in a high-speed axial compressor[C]//. ASME Turbo Expo, 2017: Turbomachinery Technical Conterence and Exposition, 2017.
- [4] 高杰,向宏辉,杨荣菲,等.尾缘修型对探针支杆尾迹抑制 作用的数值研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2017,30(1): 28-31,35.
- [5] TERUNA C, RAGNI D, AVALLONE F, et al. A rod-linear cascade model for emulating rotor-stator interaction noise in turbofans: a numerical study[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 90: 275-288.
- [6] 钟永恒, 钟易成, 田野, 等. 充液管道中弯头流固耦合振动 分析数学建模研究[J]. 机械制造与自动化, 2019, 48(3): 120-124.
- [7] YANG G, SALAS M G, PETRIE-Repar P, et al. Forced Response analysis of a radial turbine with different modelling methods[C]. ASME Turbo Expo 2019, 2019.
- [8] 陶海亮,朱阳历,郭宝亭,等. 压气机叶片流固耦合数值计 算[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 1054-1060.
- [9] 庞建华, 宗智, 周力. 基于高雷诺数的并联双圆柱绕流研究 [J]. 船舶力学, 2017, 21(7): 791-803.

收稿日期:2020-01-06