

文章编号:1000-8055(2011)03-0481-08

基于流场仿真的涡扇发动机清洗系统 参数优化设计

蒋科艺¹, 沈伟¹, 李本威¹, 刘海峰¹, 马力²

(1. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 烟台 264001;

2. 中国人民解放军海军 海军驻沈阳地区发动机专业军事代表室, 沈阳 110015)

摘 要: 给出了某型涡扇发动机的清洗方式、时机及清洗系统初始设计参数;利用流场仿真验证技术,对清洗系统进行了仿真验证和参数优选,结果表明:清洗液与空气的质量百分比不大于 3% 时,喷入清洗液不会影响风扇的稳定工作;300 μm 左右的液滴用于清洗综合效果较佳;在系统其他参数相当的情况下,喷嘴喷雾锥角越大,液滴对风扇进口的径向覆盖越好;无法通过压气机流场仿真来确定喷嘴背压和清洗液流量对清洗效果的影响。

关 键 词: 涡扇发动机; 清洗系统; 在线清洗; 流场仿真; 清洗效果

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Parameters optimizing for a turbofan engine cleaning system using flow field simulation

JIANG Ke-yi¹, SHEN Wei¹, LI Ben-wei¹, LIU Hai-feng¹, MA Li²

(1. Department of Aircraft Engineering,

Naval Aeronautical and Aeronautical University, Yantai 264001, China;

2. Engine Military Representatives Office of Navy in Shenyang,

The Chinese People's Liberation Army Navy, Shenyang 110015, China)

Abstract: An initial cleaning project was presented, including cleaning types, frequency and its design parameters for a turbofan engine. Using flow field simulation technique, the initial cleaning project was validated and its designing parameters were optimized. All these works show that: detergents injection will not affect this engine fan's stability at detergents-to-air ratios less than 3% by mass; the larger nozzle spraying angle means better droplets cover of the fan in the radial direction at equivalent other system parameters; flow field simulation of compressor can not confirm the effectiveness of the nozzle fluid pressure and detergents-to-air ratios to cleaning efficiency.

Key words: turbofan engine; cleaning system; on-line washing; flow field simulation; cleaning efficiency

航空发动机的性能会随着工作时间的增长而恶化。JT90-3A 发动机的历史数据表明在飞行 200 h 后发动机推力等性能参数将减小 1.5%, 其中 55% 的性能衰退来自于压气机性能的衰退^[1]。

综观国外航空发动机使用状况,发动机维护规程基本上都规定了发动机定期、不定期清洗的要求^[2-3]。发动机清洗目的主要有两个:一是针对海上飞行条件和环境,对发动机叶片进行飞行后防

收稿日期:2010-02-27; 修订日期:2010-08-07

作者简介:蒋科艺(1977-),男,湖南宁乡人,讲师,博士,主要从事航空发动机健康状态管理与综合保障的研究。

腐清洗,清除风扇、高压压气机等部件上的盐雾,预防机件腐蚀;二是在发动机气流通道因积垢等因素造成压气机、涡轮等部件流通能力和效率下降,从而导致发动机推力减小、耗油率升高时,对发动机气流通道进行的清洗,以保持或恢复发动机整机性能。

本文首先基于国内外发动机清洗技术研究成果,初步确定了某型发动机清洗系统初始设计方案;然后基于流场仿真验证技术,对清洗系统初始设计方案进行仿真验证与参数优化,形成了能够用于指导发动机清洗用喷嘴设计、发动机上清洗系统管路设计和开展发动机整机清洗效果试验的清洗系统设计参数方案。

1 某型发动机清洗系统初始设计方案

1.1 基本清洗方式及时机

美欧等航空技术先进国家都对燃气轮机、航空发动机的清洗技术进行了广泛的研究,可以将航空发动机的清洗分为在线和离线两种清洗方式,通过清洗可以很好的恢复航空发动机或燃气轮机的性能^[2-11],且离线清洗的效果要远好于在线清洗,经常采用在线清洗的方式能够有效降低发动机性能衰退速度。

本文结合某型发动机的使用特点,将某型发动机清洗按照清洗时机和目的的不同分为在线和离线两种清洗方式。

发动机在线清洗是指发动机处于慢车状态时,向发动机风扇进口注入一定量的由水和专用清洗剂混合配比构成的水基清洗液来完成发动机的清洗任务,其主要目的是:发动机风扇、压气机叶片的防腐,清洗时机结合飞行检查任务进行。

发动机离线清洗是指发动机处于起动机带动的冷开车状态,向风扇、高压压气机、燃烧室和涡轮等部件同时注入由水和专用清洗剂混合配比构成的水基清洗液,通过一定时间的浸泡、清洗,以实现发动机核心机部件的污垢清洗,主要目的是在发动机气流通道由于部件积垢等因素造成各部件流通能力下降或效率降低,使得整机推力降低和(或)耗油率升高时,用以恢复发动机的整机性能,一般视情或者结合定检(油封)时机进行。

1.2 清洗系统的设计参数

参照国外发动机清洗研究结果,某型发动机在线清洗系统参数的选择主要包括清洗液的流

量、雾化质量、喷嘴处的压降范围和雾化锥角等几个参数^[2,8-9]。Mund 和 Pilidis 在其研究中指出水或清洗液雾化颗粒的大小、速度和进口压力是影响发动机清洗效果的主要因素^[8]。考虑到清洗系统设备控制的不稳定性或可能对压气机叶片的侵蚀,典型的在线清洗系统中,清洗液和空气的质量流量之比通常都控制在一个比较低的比例,介于 0.2% 到 0.8% 之间^[8]。但文献[4]在 GE J85-13 发动机的在线清洗试验中,得出了如下结论:①对于在线清洗来说,当清洗液与空气的质量流量比越大清洗效果越明显,其采用的水与空气的质量流量之比上限达到 3%;②在线清洗对于压气机前几级叶片的清洗效果明显,当清洗液和空气的质量流量比较小时也会造成压气机前几级清洗下来的污染物对后几级叶片的重复污染;③当清洗液滴直径越小时,对压气机后几级叶片的重复污染越严重。由于该型发动机在线清洗是发动机处于慢车状态时实施,为不对发动机带来损伤和导致性能恶化,同时提高清洗效果,在线清洗时喷入清洗液的最大流量应当以发动机吞水试验时慢车状态最大流量为限,即清洗液与空气的质量流量之比小于 5%。

研究表明,清洗液雾化液滴直径过小时极易受气流的影响,在未接触叶片前已经蒸发,起不到清洗的作用;当清洗液雾化颗粒直径逐步增大时,则可能会导致压气机叶片的侵蚀,清洗液的雾化液滴颗粒直径(D_{sm})一般介于 50~250 μm 之间^[2]。考虑到文献[4]得出的第三条研究结果,对该型发动机在线清洗的雾化质量选择来说,应当在不会对压气机叶片造成侵蚀,且不会产生其他累积机械或结构损伤的前提下,以达到最佳清洗效果为目标,需要适当增大液滴直径以避免对压气机后几级叶片的重复污染,尽可能选择较大的液滴直径, D_{sm} 应介于 80~300 μm 之间。

受到某型发动机尺寸、安装方式、管路布置等实际条件的限制,清洗喷嘴仅能安装于进气机匣上,且不能影响发动机的气流通道;考虑清洗设备的流量和管路强度限制,清洗喷嘴背压初步定为不超过 1.0 MPa。

由于喷嘴必须安装在压气机进气机匣上,需要喷嘴有足够好的雾化效果,因此选用离心雾化喷嘴,初步选取大雾化锥角的喷嘴,希望能够尽量覆盖整个压气机进口。

依据上述分析给定的某型发动机在线清洗系统参数范围,选取典型参数值形成具体设计方案

如表1所示,以指导清洗喷嘴设计和清洗系统的流场仿真验证工作。

表1 某型发动机在线清洗系统技术参数

Table 1 Parameters of a given type engine on-line cleaning system

序号	压力/MPa	喷雾角/(°)	液滴直径 $D_{sm}/\mu m$	清洗液流量/(kg/s)	清洗液与空气质量流量比/%
1	0~1.0	120	300	0.54	3
2	0~1.0	120	300	0.36	2
3	0~1.0	120	300	0.18	1
4	0~1.0	120	200	0.54	3
5	0~1.0	120	200	0.36	2
6	0~1.0	120	200	0.18	1
7	0~1.0	120	100	0.54	3
8	0~1.0	120	100	0.36	2
9	0~1.0	120	100	0.18	1
10	0~1.0	120	80	0.18	1
11	0~1.0	120	80	0.14	0.8

2 理论模型

2.1 几何模型和网格划分

在线清洗主要是对风扇清洗。某型发动机包括3级风扇和9级高压压气机,采用全三维数值模拟方式,建立了发动机风扇的动叶轮和静叶轮几何模型,如图1所示。由于流场为动态流场,为模拟叶轮间的流动和液滴的穿越过程,采用滑动网格方法,按每一级叶轮为一计算区域剖分流道。叶轮通道全为结构网格,个别小间隙区域采用非结构网格,将转子区域的流道网格直接设置为转动网格,所对应的整个区域网格均以一定的速度旋转,并通过滑动平面与静子流道区域的网格相连接,简化的叶轮网格示意图如图1所示。

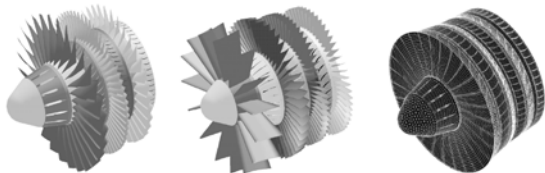


图1 发动机风扇的动叶、静叶轮几何模型及网格模型

Fig.1 Geometry model and gridding model of engine fan rotor blades and stator vanes

2.2 湍流模拟

由于为全三维动态模拟,计算量相当可观,因此采用 Spalart-Allmaras(S-A) 方程的湍流模型。该模型广泛运用于航空航天领域,具有相对小的

计算量和适用的计算精度,并且计算结果对网格精细程度的依赖性相对小,模型对湍流的模拟通过计算黏滞系数得到。流场计算除求解三维 Navier-Stokes(N-S)方程组外,主要求解

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \bar{v} u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_v} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \bar{v}) \frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right] + C_{b2\rho} \left[\frac{\partial \bar{v}}{\partial x_j} \right]^2 \right\} - Y_v + S_v$$

湍流的有效黏性表示为

$$\mu_t = \rho \bar{v} f_{v1}$$

考虑风扇为典型的有压力梯度流场,采用改进的壁面函数,以减小计算结果对网格精细程度的依赖性;考虑到黏性的影响,将壁面网格进行了局部加密,但壁面计算网格由于计算量的限制不可能太精细,为有效捕获近壁面黏性层的影响,仅尽量保证壁面无量纲距离 y^+ 的值在 $y^+ \approx 20 \sim 30$ 之间。

2.3 液滴模拟

在给定喷嘴初始背压、特性参数等前提下,采用线性不稳定液膜雾化模型^[12]估算液滴直径、速度以及初始分布。采用拉格朗日直接模拟方法模拟液滴的运动,其受力与运动方程如下:

$$\frac{du_p}{dt} = F_d(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x$$

积分每个液滴的运动方程即可得到液滴的运动轨道。计算中考虑液滴和气流的相互作用,因流

动通道中,尤其是转子通道中气流速度在 100 m/s 以上,液滴的粒子雷诺数远远大于 20,对液滴受到的拖曳阻力可采用高马赫数模型或动态阻力模型计算.同时计算中必须考虑液滴的碰撞和破裂,对大直径的液滴在高速气流中的破裂因其韦伯数往往大于 100,因此采用波动破碎理论模型预测液滴破碎.综合考虑液滴速度和碰撞、破碎,最后阻力模型采用动态阻力模型,并在计算中考虑了颗粒所受的重力作用.

此外对每个液滴都进行跟踪,计算量无法完成,因此计算典型的液滴包轨迹,并认为每个包中含有相当数目的同等条件的液滴.设定每个喷头每一时刻向流场喷入 10 个液滴包,这样每个液滴包中所包含的液滴数会相对多,精度稍差,但时间步较多,因此不影响整体效果.

2.4 仿真条件

仿真验证的输入条件为:①转子转动速度为慢车转速;②入口条件为标准大气条件;③慢车状态下的风扇出口压力.受到该型发动机尺寸、安装方式、管路布置等实际条件的限制,喷嘴为非对称分布,如图 2 所示.两喷嘴轴线在发动机径向同一平面,即垂直于机匣轴线喷入流场.

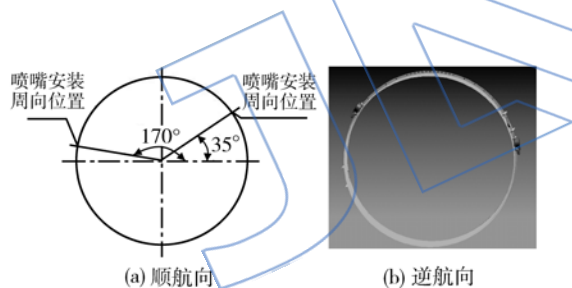


图 2 清洗喷嘴在进气机匣上的径向位置

Fig. 2 Radial location of cleaning nozzles on air intake

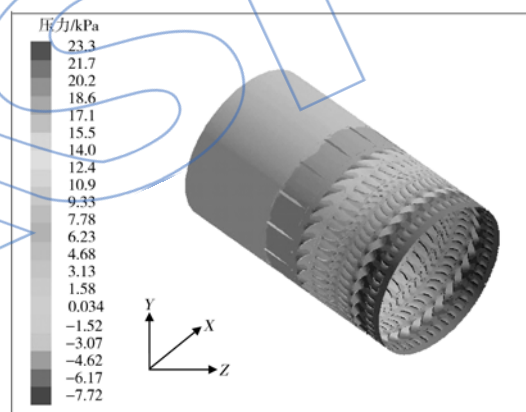
转子、静子以及轮毂机匣形成的壁面和液滴的相互作用是模拟液滴穿越叶栅阵列的重要边界条件,但是液滴在动静壁面的附着,被转子离心力甩离,被气流吹除等过程,尚无力学模型可以描述.在此假设液滴和壁面碰撞即被吸附且不再飞出.这类似以最严格的条件考核液滴能否穿越叶栅阵列.

以全隐式格式求解流场控制方程,流场中无高温和明显的激波存在,仅从算法稳定性和风扇气动性能模拟要求来讲可以以较大的时间步长计算.由于时间步长过大会引起动网格和静网格之间移动相对大,造成动、静叶之间相对液滴穿越计

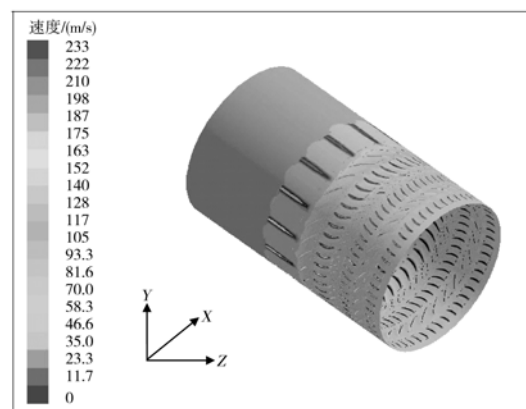
算的不真实间隙(虽然对气动特性计算的影响有限),因此采用小的时间步长.

2.5 模型验证

图 3 给出了按试验给定均匀反压值后计算得到的风扇平均直径圆柱面的静压分布和速度分布.此时风扇工作在慢车转速,并无液滴喷入,计算得到的风扇流量为 34.56 kg/s ,试验测定的流量约为 36.0 kg/s ,误差在 5% 以内.此时空气的压缩程度不大,在空气流量、几何构型和转速一致的条件下,叶栅通道中速度参数也基本一致.因此认为,所建仿真模型能够符合风扇实际运行状况,进行的数值模拟得到的流场可以用于进一步计算液滴穿越流场的过程.图 3 给出的平均直径圆柱面的速度分布中,为减小进口边界对计算的影响,计算区域在进气机匣的基础上有所延长,进气机匣中的速度为 40 m/s 左右,直观地看,风扇对液滴有足够的吸力.



(a) 静压分布(相对压力)



(b) 速度分布

图 3 平均直径圆柱面的静压分布和速度分布

Fig. 3 Static pressure and velocity distribution on the average diameter cylinder

3 仿真结果及分析

为了评估该型发动机在线清洗方案的清洗效果,对以下五个方面的内容进行了仿真验证:①发动机喷入清洗液对发动机(重点在风扇)流场的影响;②喷嘴雾化质量对清洗效果的影响;③喷嘴喷雾锥角对清洗效果的影响;④喷嘴背压对清洗效果的影响;⑤清洗液流量对清洗效果的影响。

3.1 喷入清洗液对发动机流场的影响

主要验证在不同的液滴直径、流量(每喷嘴流量)下对风扇流场的影响。以液滴直径(D_{sm})分别为180 μm 和410 μm 三种典型情况对风扇流场的影响进行仿真验证,喷水0.3 s后流场和液滴大部分的参数都已经稳定,结果如图4所示。可见由于有液滴的存在,并且由于喷嘴安装的不对称、数目少等原因,液滴会引起压力场的某些不对称

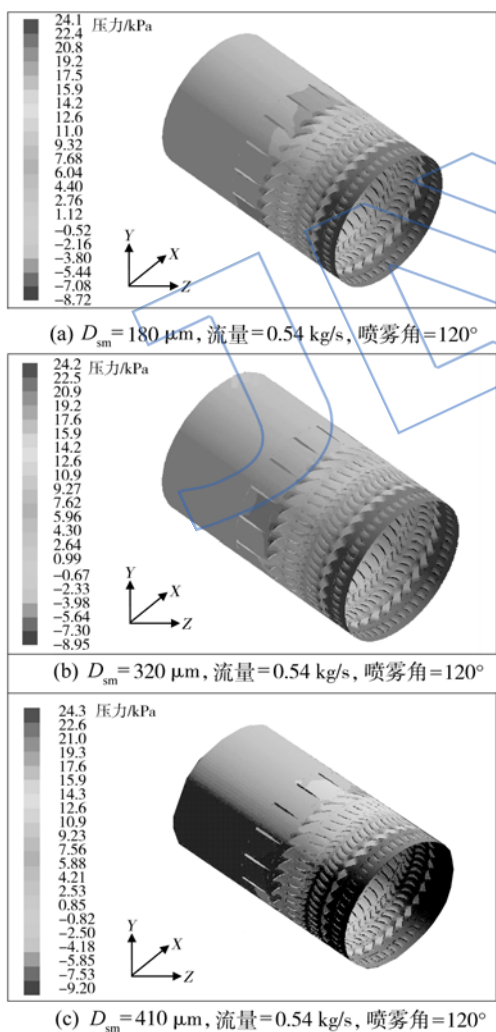


图4 喷头背压1 MPa,喷雾0.3 s后风扇的压力分布
Fig. 4 Fan pressure distribution after 0.3 s washing with 1 MPa nozzle fluid pressure

分布,一般是 D_{sm} 越大,影响程度也越大。但是整体扰动程度有限,在1 kPa左右,并不会影响风扇的工作,尤其是后面级基本无影响。同时风扇吸入空气的流量变化在0.1 kg/s以内,不会影响发动机的正常工作。

3.2 雾化质量对清洗效果的影响

图5和图6分别给出了不同直径的液滴在径向和轴向的分布情况,图中同时给出了液滴直径分布。

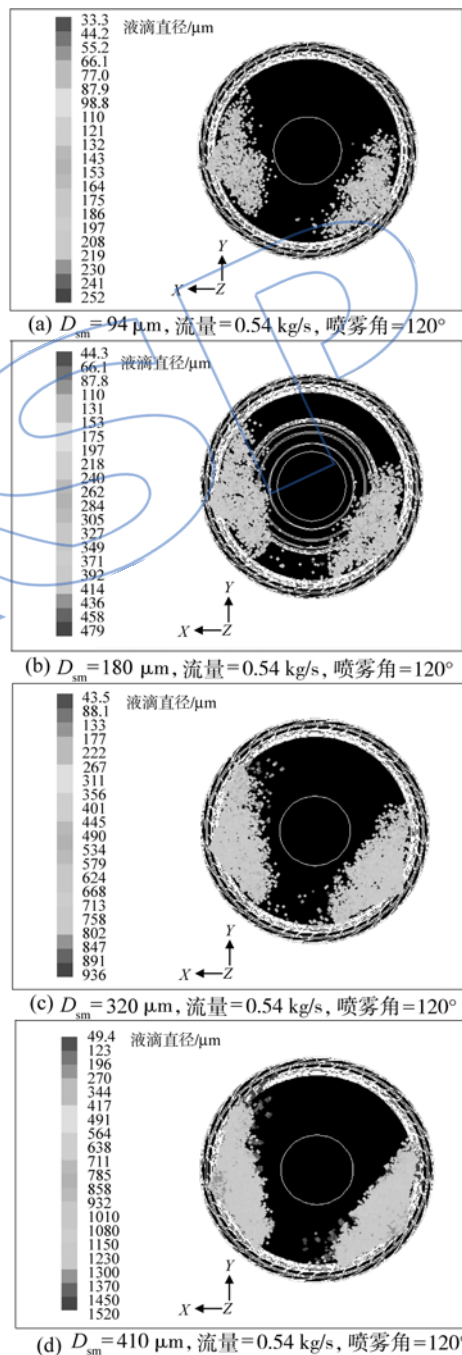


图5 喷头背压1 MPa,喷雾0.3 s后液滴的径向分布
Fig. 5 Radial distribution of droplets after 0.3 s washing with 1 MPa nozzle fluid pressure

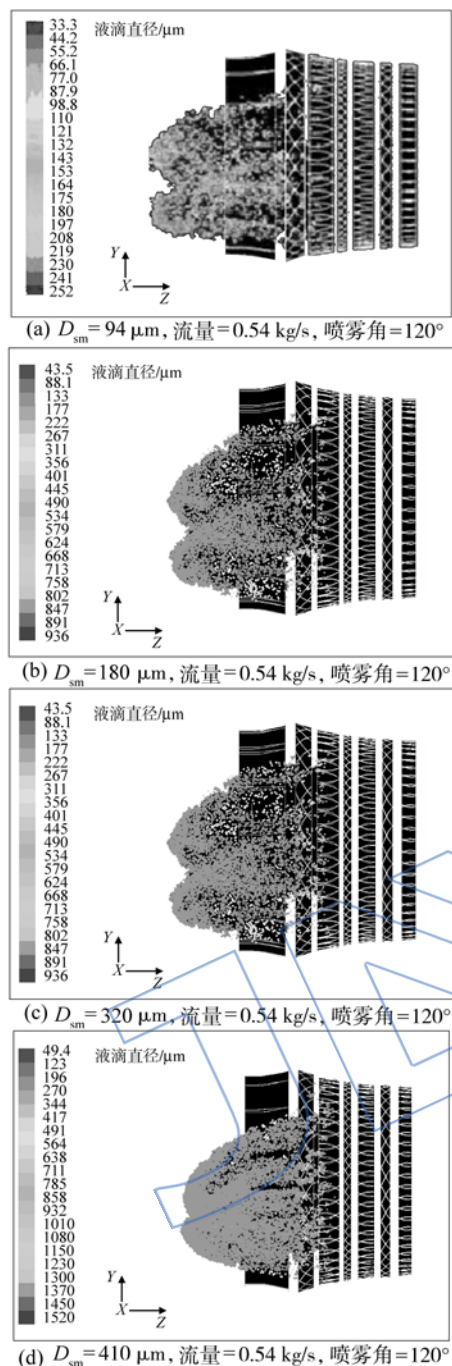


图6 喷嘴背压1 MPa,喷雾0.3 s后液滴的轴向分布

Fig. 6 Axial distribution of droplets after 0.3 s washing with 1 MPa nozzle fluid pressure

由图5可见相同的时间内,液滴直径越大,在流场中体现出的惯性就越明显,径向分布区域将越大.但 D_{sm} 超过200 μm 后,这种增加趋势就比较缓慢了.

图6(a)给出了具有较小直径的液滴在风扇流场中的轴向分布,可见进口支板(第0级)对液滴的影响较小,液滴一部分被第一级转子捕获,其他能顺利穿越第一级,但液滴很难穿越第一

级静子.

图6(b),(c),(d)给出了大直径的液滴穿越叶栅的情况,从液滴直径分布以及液滴在流场中的停留时间可以看出,大直径的液滴在动叶之间的高速气流中存在明显的破碎现象.该破碎过程使得更多的液滴能穿越第一级转子达到后面的叶栅空间,即未清洗过前面叶片的“清洁”液滴可以更多的用于后面级的清洗.

比较图6(a),(b),(c)和(d)中液滴的分布可见:液滴直径越大,液滴破碎和穿越的效果越好.但是计算表明:液滴超过300 μm 增加的效果不明显,超过350 μm 后液滴破碎的作用和穿越的液滴数目基本不变.各种直径、速度的液滴沿叶高方向尚能布满整个通道空间.

从不同的 D_{sm} 在风扇轴向和径向上的分布情况来看, D_{sm} 在200~400 μm 之间的液滴直径分布均可选,直径为300 μm 左右的液滴用于清洗综合效果较佳.

3.3 喷雾锥角对清洗效果的影响

分别在喷嘴背压为0.5 MPa,每喷嘴流量为0.52 kg/s的情况下,对如下三组雾化液滴直径和喷雾角的组合:($D_{sm}=239 \mu\text{m}$,喷雾角=120°)、($D_{sm}=270 \mu\text{m}$,喷雾角=110°)、($D_{sm}=330 \mu\text{m}$,喷雾角=120°)进行了仿真,液滴的径向分布和轴向分布分别如图7、图8所示,结果表明:

1) 在 D_{sm} 相当的情况下喷雾角较大时,液滴对压气机风扇进口的径向覆盖越好;

2) 在喷雾角一定的情况下, D_{sm} 越大,液滴对压气机风扇进口的径向覆盖越好,轴向穿越能力也越强.

因此进行清洗喷嘴设计时,在满足喷嘴雾化质量和流量要求的前提下,应当尽量实现较大的喷雾角.

3.4 喷嘴背压对清洗效果的影响

改变喷嘴背压主要改变液滴的初始速度,如图9所示为每喷嘴流量为0.54 kg/s,喷雾角为120°,喷嘴背压分别为1.0 MPa和0.5 MPa时液滴的径向和轴向分布图.由图可见:在液滴 D_{sm} 相当的情况下,改变喷嘴背压时液滴对风扇进口的径向覆盖和轴向穿越都没有明显的影响,无法通过仿真来确定喷嘴背压对清洗效果的影响.

3.5 清洗液流量对清洗效果的影响

由于数值模拟难于给出不同流量水对应的清洗效果的直接评估,因此先进行了大流量喷嘴的

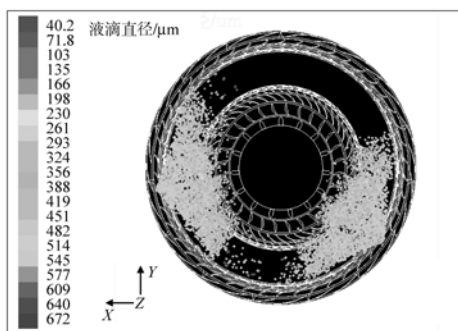
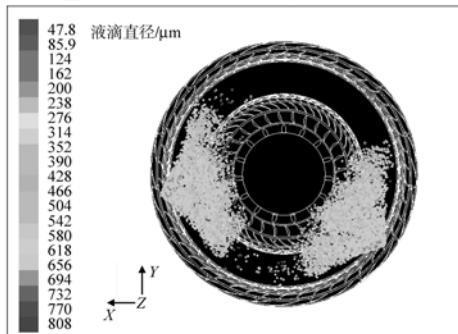
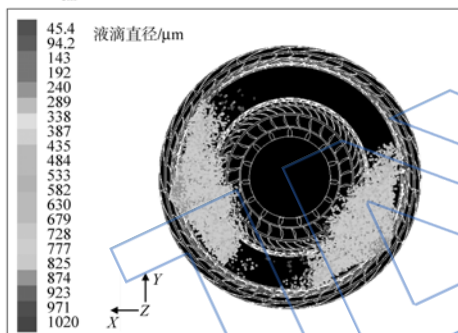
(a) $D_{sm} = 239 \mu\text{m}$, 流量 = 0.52 kg/s, 喷雾角 = 120°(b) $D_{sm} = 270 \mu\text{m}$, 流量 = 0.52 kg/s, 喷雾角 = 110°(c) $D_{sm} = 330 \mu\text{m}$, 流量 = 0.52 kg/s, 喷雾角 = 120°

图7 喷嘴背压 0.5 MPa, 喷雾 0.3 s 后液滴的径向分布

Fig. 7 Radial distribution of droplets after 0.3 s washing with 0.5 MPa nozzle fluid pressure

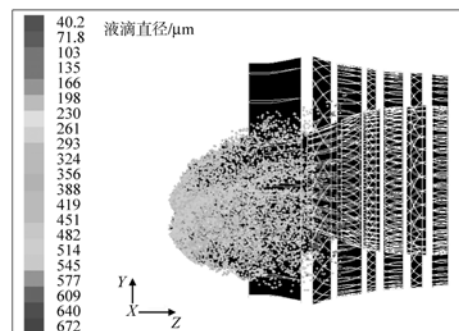
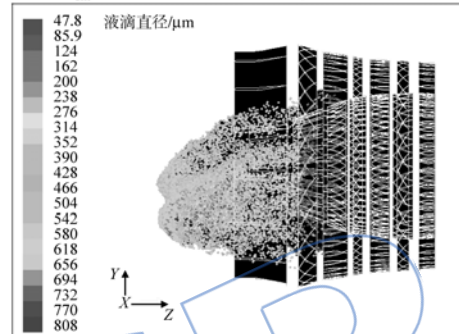
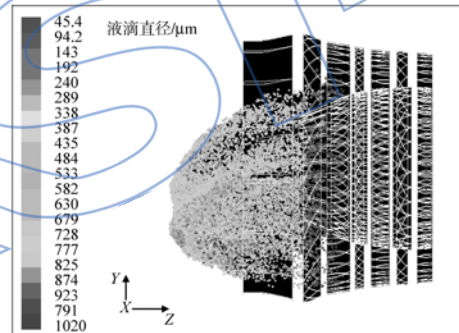
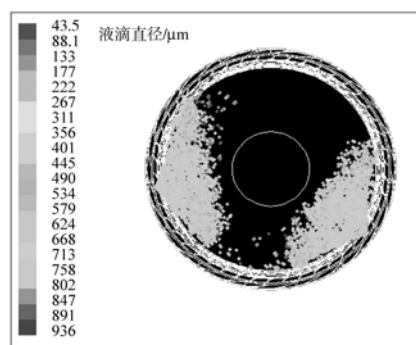
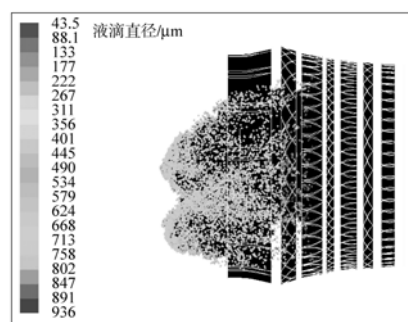
(a) $D_{sm} = 239 \mu\text{m}$, 流量 = 0.52 kg/s, 喷雾角 = 120°(b) $D_{sm} = 270 \mu\text{m}$, 流量 = 0.52 kg/s, 喷雾角 = 110°(c) $D_{sm} = 330 \mu\text{m}$, 流量 = 0.52 kg/s, 喷雾角 = 120°

图8 喷嘴背压 0.5 MPa, 喷雾 0.3 s 后液滴的轴向分布

Fig. 8 Axial distribution of droplets after 0.3 s washing with 0.5 MPa nozzle fluid pressure

(a) 喷嘴背压 = 1.0 MPa, $D_{sm} = 320 \mu\text{m}$, 液滴径向分布(b) 喷嘴背压 = 1.0 MPa, $D_{sm} = 320 \mu\text{m}$, 液滴轴向分布

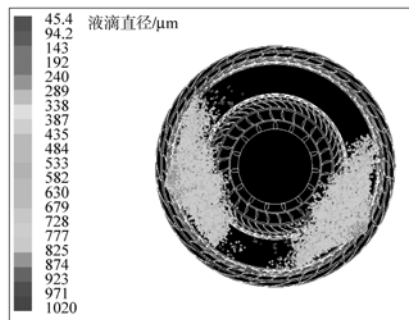
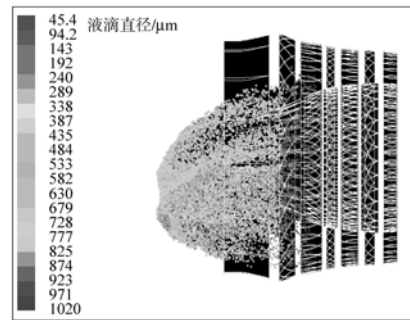
(c) 喷嘴背压=0.5 MPa, $D_{\text{nozzle}}=330\mu\text{m}$, 液滴径向分布(d) 喷嘴背压=0.5 MPa, $D_{\text{nozzle}}=330\mu\text{m}$, 液滴轴向分布

图9 每喷嘴流量 0.54 kg/s, 喷雾角度 120°, 喷雾 0.3 s 后液滴的径向和轴向分布

Fig. 9 Radial and axial distribution of droplets at 0.54 kg/s nozzle flow rate and 120 degrees spraying angle after 0.3 s washing

模拟. 从图5~图8中液滴的周向分布可见, 各种直径、速度的液滴沿叶高方向尚能布满整个通道空间. 但在所进行了的模拟计算中尚没有发现哪种方式可以在径向和轴向均满足覆盖整个通道空间. 由于该模拟工作暂时没有考虑二次液滴效应, 仅仅是以最苛刻的条件: 液滴的穿越效果来判断清洗效果, 实际效果如何应综合考虑一次液滴和二次液滴, 数值模拟难于给出不同流量清洗液对清洗效果的影响.

4 结 论

发动机清洗系统参数确定是一个反复和逐步递进的过程. 通过上述研究可以对该型发动机在线清洗系统的雾化质量和喷雾锥角参数进行优选, 但无法实现对喷嘴背压和清洗液流量参数的优选, 可以得出如下四个方面的结论:

1) 喷入清洗液会引起发动机风扇压力场的某些不对称, 液滴直径越大, 影响程度越大. 但整体扰动程度有限, 不会影响风扇的工作.

2) 就液滴穿越叶栅的效果而言, 直径为 300 μm 左右的液滴用于清洗综合效果较佳.

3) 在其他参数相当的情况下, 喷嘴喷雾角越大, 液滴在压气机风扇进口的分布越均匀, 径向覆盖越好.

4) 无法通过压气机流场仿真来确定喷嘴背压和清洗液流量对清洗效果的影响.

下一步将结合发动机整机清洗试验, 依据整机清洗效果来最终确定最终的清洗液流量和喷嘴背压.

参考文献:

[1] Kurz R, Brun K. Degradation in gas turbine systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2001,

123(1):70-77.

- [2] Meher-Homji C B, Bromley A. Gas turbine axial compressor fouling and washing[C]// Proceedings of the Thirty-third Turbomachinery Symposium, Houston, Texas; Texas A&M University, 2004:163-192.
- [3] Kurz R, Brun K. Gas turbine tutotial; maintenance and operating practices effects on degradation and life [C]// Proceedings of the Thirty-sixth Turbomachinery Symposium, Texas; Texas A&M University, 2007:173-185.
- [4] Syverud E, Bakken L E. Online water wash tests of GE J85-13[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(1):136-142.
- [5] Mund F C, Pilidis P. Gas turbine compressor washing; historical developments, trends and main design parameters for online systems[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2006, 128(2):344-353.
- [6] Harry M. U. S. Navy on-line compressor washing of marine gas turbine engines[C]// Proceedings of ASME Turbo Expo. Atlanta, Georgia; ASME, 1991.
- [7] Lambert P, Gorden R, Burnett M. Developments in on-line gas turbine compressor[C]// Proceedings of Institution of Diesel and Gas Turbine Engineers 2nd Gas Turbine Conference, Milton Keynes, UK; IDGTE, 2004:136-142.
- [8] Mund F C, Pilidis P. A review of online washing systems [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo. , 2004. Vienna, Austria; ASME, 2004:519-528.
- [9] Asplund P. Gas turbine cleaning upgrade (compressor wash) [C]// ASME ASIA'97 Congress and Exhibition, Singapore; ASME, 1997:105-117.
- [10] Asplund P, Hjerpe C J. A method for cleaning a stationary gas turbine unit during operation; United States, 7428906 [P]. 2008-09-30.
- [11] Syverud S, Bakken L E, Langnes K, et al. Gas turbine operation offshore; on line compressor wash at peak load [C]// Proceedings of ASME Turbo Expo. , 2003. New Orleans, Louisiana; ASME, 2003:17-27.
- [12] Schmidt D P, Nouar I, Senecal P K, et al. Pressure-swirl atomization in the near field[R]. SAE Paper 1999-01-0496, 1999.