

文章编号: 1000 8055(2010)07-1588-07

单级压气机性能衰退定量研究

李本威¹, 李 冬², 李姜华³, 王永华¹, 杨欣毅¹
(1. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 烟台 264001;
2. 海军航空工程学院 研究生管理大队, 烟台 264001;
3. 青岛科技大学 中德科技学院, 青岛 266061)

摘 要: 压气机叶形改变会导致其性能的下降. 以往计算其性能衰退通常假定叶形表面变化是均匀的, 或在性能模型中引入损失系数, 结果会产生误差. 采用在易积垢部位增加随机尺寸的方法来模拟叶片积垢等原因造成的形状改变, 并分析了叶片积垢、叶顶间隙增大等因素对压气机性能的影响. 通过仿真获得了压气机在各种不同工况下性能定量衰退程度, 以及压气机叶片表面气流流场、总温的变化情况. 结果对发动机性能衰退研究和故障分析具有一定的理论与应用价值.

关 键 词: 压气机; 性能衰退; 叶形; 积垢沉淀; 叶顶间隙

中图分类号: V231.3

文献标识码: A

Quantitative research on performance degradation of single stage compressor

LI Ben wei¹, LI Dong², LI Jiang-hua³, WANG Yong-hua¹, YANG Xin-yi¹

(1. Department of Aircraft Engineering,
Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
2. Graduate Student Brigade,
Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China;
3. Technology College of China and Germany,
Qingdao Technolgy University, Qingdao 266061, China)

Abstract: The change of the blade shape will result in the performance degradation of compressor. Traditionally, the calculation of the compressor performance degradation is accomplished by assuming that the blade surface varies evenly, or the loss coefficient is introduced into the model, which often produces error. The paper simulated the change of the blade shape caused by fouling using the method of adding random size in the fouling position. Meanwhile, the effect of the ingredients of the blade foul and tip clearance increase on the compressor performance was analyzed. The quantitative performance degradation at different work conditions, and the change of the air float field and the total temperature around the blade surface were gained. The results offer theoretical and applicative value for the research of the engine performance degradation and fault analysis.

Key words: compressor; performance degradation; blade shape; fouling; tip clearance

收稿日期: 2009 06 13; 修订日期: 2009 11 09

作者简介: 李本威(1962-), 男, 山东威海人, 教授、博导, 博士, 从事专业研究方向为航空发动机故障诊断、状态监控、测试与维护技术.

压气机作为航空发动机的核心部件之一,其性能的好坏对发动机性能优劣有着重大的影响.目前使用的发动机经常处在高温潮湿,多盐雾的环境之中,加重了对压气机的腐蚀.以往人们往往专注对整机性能下降的研究,忽略了对单个部件性能衰退的研究.计算压气机性能下降时,采取的方法大都在计算模型中引入损失系数,计算结果往往会存在偏差.本文主要针对引起压气机性能衰退最常见的两种因素——叶片积垢沉淀和叶顶间隙增大,及两种因素并存的情况,研究它们对压气机部件性能下降产生的影响.采用在叶片积垢部位增加不同尺寸随机数的方法,来近似模拟由积垢沉淀和侵蚀造成叶片形状的改变,进而研究其对压气机性能的影响.

1 压气机性能衰退影响因素

压气机在使用过程中,由于积垢沉淀、侵蚀、腐蚀及疲劳氧化等各种因素都会造成压气机性能的衰退.其中,叶片积垢沉淀、叶顶间隙增大是造成压气机性能衰退常见的表现形式.

1.1 积垢沉淀

积垢沉淀是指吸入发动机的空气中所含的各种粉尘、微粒在液态物质的黏性效应作用下,在风扇、压气机的叶片、通道壁等部件表面形成黏附和堆积.将导致叶片、通道壁面等表面粗糙度增大,并在一定程度上改变其几何形状,减小通道的有效流通面积,降低部件的效率和流通能力,进而影响整机性能.

1.2 叶顶间隙增大

叶顶间隙,包括转子叶片的叶顶与机匣之间的间隙,以及静子叶片的叶顶与轮毂之间的间隙,是在腐蚀、摩擦及热疲劳这三种主要因素的综合作用下形成并逐渐扩大的.腐蚀与热气流侵蚀是造成叶顶间隙增大的主要原因,摩擦却可以使腐蚀和热疲劳的作用加速.在发动机使用的初期,叶片和机匣的摩擦带无腐蚀发生;在发动机使用的中期,叶片和机匣前、后壁面开始出现腐蚀现象,叶顶间隙增大;在使用的后期,由于进一步腐蚀,叶片变短,叶顶间隙也随之进一步增大^[12].

2 模型建立、求解与验证

2.1 模型建立与数值方法

本文以某单级轴流式压气机为研究对象,利用下述 3 个方程建立模型并求解.其中,连续方

程为

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + u \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + v \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \omega \frac{\partial (\rho \omega)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程即雷诺平均的 Navier-Stokes (N-S) 方程

$$\frac{\partial (\rho u_i u_i)}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]}{\partial x_j} \quad (2)$$

Spalart-Allmaras (S-A) 模型方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{\nu}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i \tilde{\nu}) &= G_{\nu} + \\ \frac{1}{\sigma} \left\{ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] + C_{b2} \rho \left[\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right]^2 \right\} &- Y_{\nu} + S_{\tilde{\nu}} \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)中 $\tilde{\nu}$ 是湍流动黏滞率, μ 为黏性系数.

建模采用的是某压气机标准叶形数据.采用时间追赶的有限体积法,求解三维定常黏性的雷诺平均 N-S 方程.空间离散采用中心差分法,时间离散采用四级龙格库塔法^[3].并采用隐式残差光顺法和多重网格技术来加速收敛^[4].总体求解步骤如下:

使用前处理模块生成压气机叶片几种不同情况的单通道“HOH”网格^[5],主通道沿气流方向有 3 个网格分区,其中叶片型面附近采用“O”型网格,叶片通道前后延伸段则采用“H”型网格.生成不同情况的压气机计算模型,如图 1.其中,叶片型面附近节点分布为 $21 \times 49 \times 155$ (O),前后延伸段节点分布均为 $41 \times 49 \times 17$ (H).叶顶间隙采用蝶形网格,节点分布 $9 \times 9 \times 159$.级的网格节点总数约为 24 万.节点分布数对应周向 $\times$ 径向 $\times$ 轴向,控制近壁面区域网格加密,保证壁面第一层网

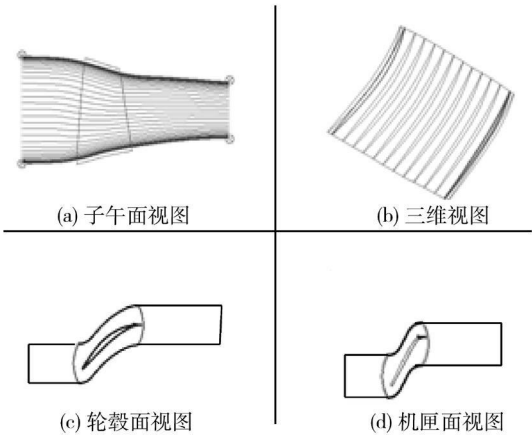


图 1 前处理模块生成的叶片
Fig. 1 Blade generated by pre disposal module

格 $0 < y^+ < 10$. 如图 2. 设置进出口边界类型, 进一步得到压气机全通道模型.

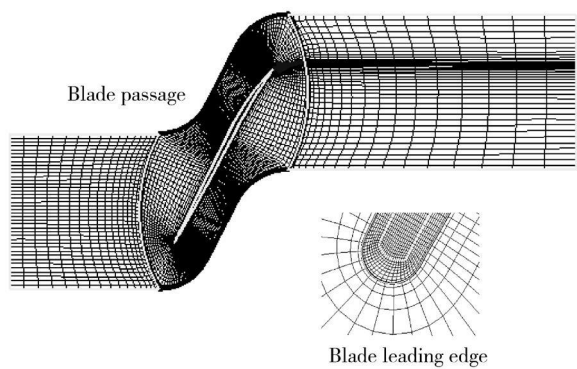


图 2 叶片通道及前缘网格
Fig. 2 Mesh of blade passage and leading edge

在计算模块中, 对压气机性能衰退的几种影响因素进行仿真计算, 得出参数数值.

在后处理模块中, 对计算结果进行处理, 并做定量分析, 得出结论.

2.2 性能衰退影响因素(随机尺寸) 仿真方法

假定流动介质类型为理想气体, 流动计算湍流模型为 Spalart-Allmaras 湍流模型^[6]. 仿真经以下步骤完成: 设定叶片的计算参考特征数据; 压气机进出口边界参数; 计算边界条件为进口轴向进气, 总温 288K, 总压 101 325 Pa, 出口为指定半径处的静压; 采用加速收敛的数值计算模型; 设定叶片细网格计算和柯朗(CFL) 数等相关参数; 设定流场的初始条件; 运行计算模块, 得出结果. 仿真计算时, 在某一转速下, 逐渐增加背压向近失速点推进, 并取前一工况的计算结果为初场, 数值失速前的最后一个收敛解对应着近失速工况. 转速的改变是在计算模块相应的设置项中完成的.

本文计算分析了压气机叶片在洁净、叶片积垢部位不同积垢尺寸、叶顶间隙增大、叶片积垢和叶顶间隙增大并存等情况下的压气机性能衰退情况. 在叶片积垢影响计算中, 本文在确定总积垢尺寸(10^{-5} m 和 10^{-6} m) 的基础上, 在叶片易积垢部位采用增加一定范围随机尺寸的方法来近似模拟由于积垢等原因造成叶片形状的改变, 进而完成对压气机性能衰退的计算. 这与传统的叶片表面积垢均匀分布的假设相比, 更接近叶片的实际积垢情况. 对于不同积垢尺寸的叶形, 也采用这种方法. 由于叶形数据输入的规律性(叶形数据是沿气流流动方向、并且沿叶根到叶尖方向设置的, 叶形

坐标如图 3 所示), 为修改叶形尺寸提供了方便. 选定叶片叶盆和叶背部位作为易积垢的部位, 通过增加一定尺寸的随机数作为假定的积垢尺寸. 本文计算的前提是假定叶片积垢是相应增加叶片的周向坐标, 径向和轴向坐标保持不变. 对于叶顶间隙的调整是通过设置项完成的. 选取叶片在某一高度上的压力线, 其积垢尺寸和叶顶间隙减小程度^[7-8] 如图 4 所示.

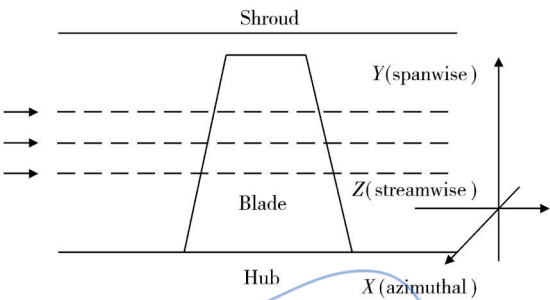


图 3 叶形坐标示意图
Fig. 3 Chart of the blade coordinate

2.3 模型验证

本文采用压气机特性数值计算与给定设计数值对比的方法, 对所建的压气机叶片洁净模型进行验证. 其中, 压气机一个设计工作点: 流量为 20.05 kg/s, 效率为 0.828, 压比为 2.04. 压气机特性曲线对比如图 5 所示.

由图 5 可知, 压气机特性曲线上的设计数值与计算出来的数值吻合的较好. 通过计算可知, 其中压比和效率平均相对误差分别为 0.61% 和 1.15%, 在允许的误差之内. 因此所建的模型是有效的.

3 仿真结果与分析

本文分别比较了压气机叶片在洁净、不同积垢厚度、叶顶间隙增大和叶片出现积垢并且叶顶间隙增大几种情况下, 压气机在不同工况下的压比和效率变化情况. 结果如图 6~ 图 8 所示.

由图 6~ 图 8 可知, 较之叶片洁净状态相比, 由于沉淀积垢和叶顶间隙增大引起叶片形状改变, 造成压气机的特性参数有所减少^[9]. 其中, 在 100% 转速时, 压比、效率和流量衰退比较明显; 在图 6~ 图 8 三种工况下, 90% 转速的特性参数衰退程度最弱. 其中大尺寸积垢沉淀比叶顶间隙增大引起的压气机性能衰退的效果略大些. 通过计算发现, 与叶片洁净状态相比, 在 60% 转速工况下, 小尺寸积垢发生时, 压比和效率分别衰退了 0.81% 和 0.61%.

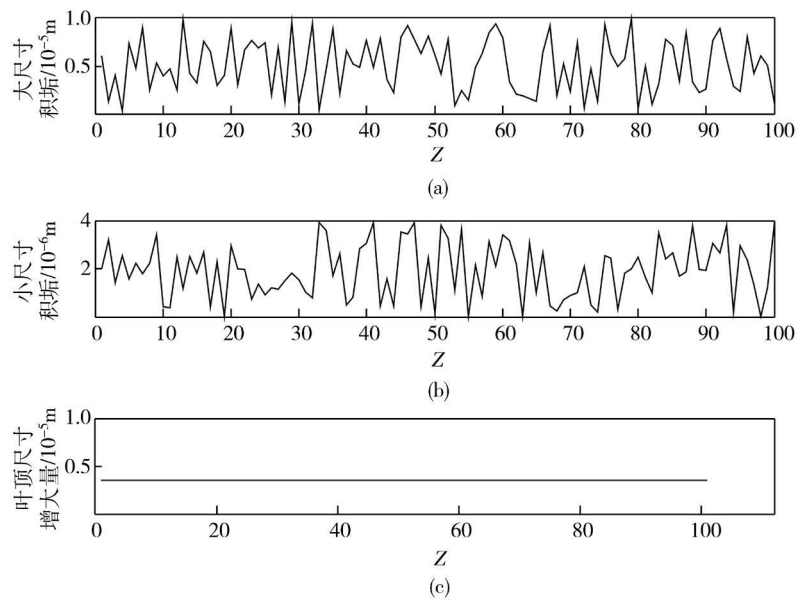


图 4 不同积垢尺寸和叶顶间隙增量

Fig.4 Different sizes of fouling and the increase of tip clearance

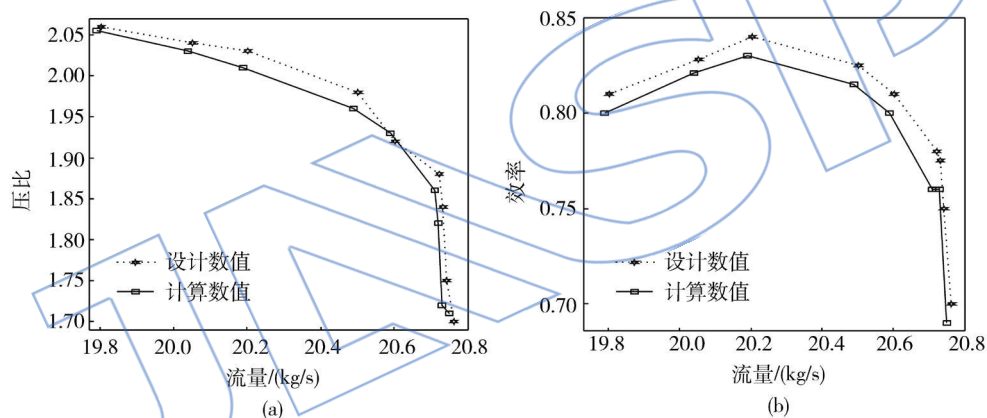


图 5 计算的压比、效率特性曲线与设计值的比较

Fig.5 Comparison between the characteristic map of calculated pressure ratio, efficiency and the design value

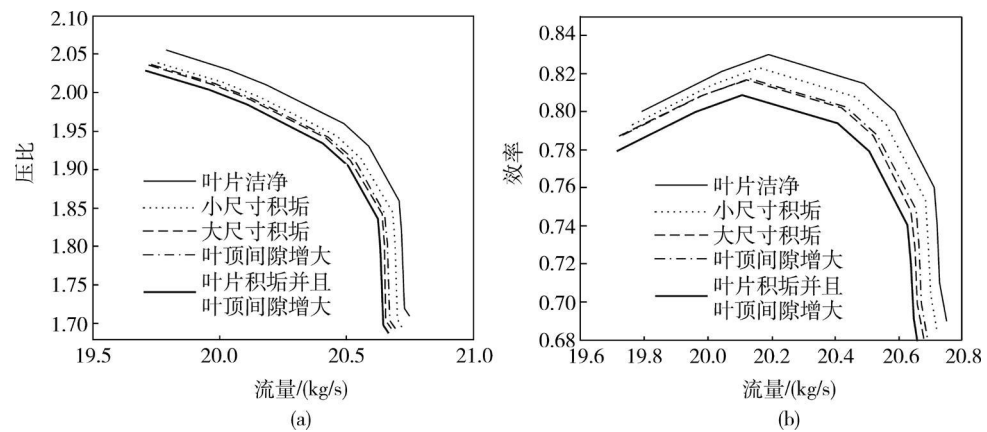


图 6 转速为 100% 时压气机特性线

Fig. 6 Characteristic map of the compressor at 100% rotate speed

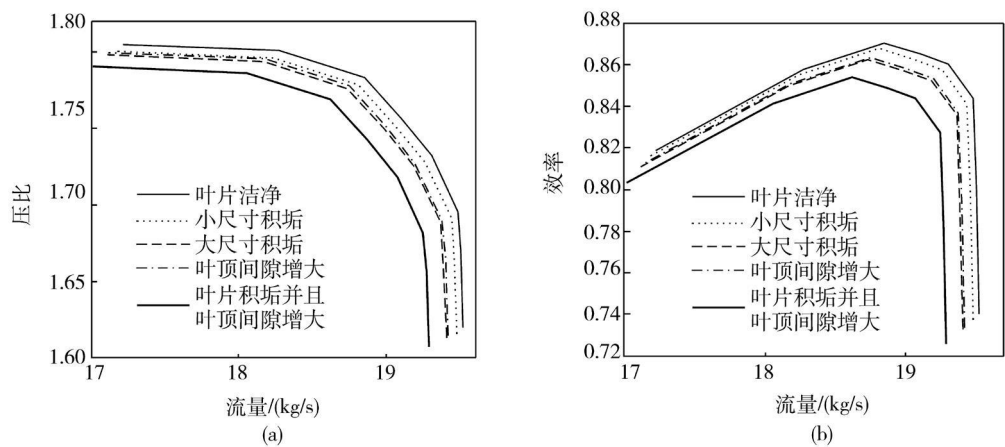


图 7 转速为 90% 时压气机特性线

Fig. 7 Characteristic map of the compressor at 90% rotate speed

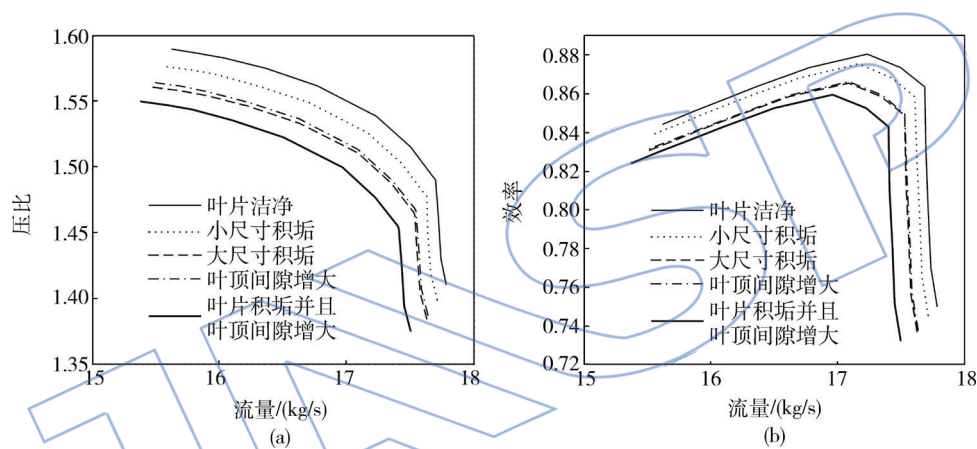


图 8 转速为 80% 时压气机特性线

Fig. 8 Characteristic map of the compressor at 80% rotate speed

表 1 压气机在不同转速下的性能衰退量

Table 1 Compressor capability deterioration at different rotate speeds

性能衰退量		转速/ %						
		17.4	29.1	46.5	58.2	70.0	87.3	98.0
小尺寸积垢/ 10^{-6}m	压比衰退量/ %	1.13	0.66	0.40	0.48	1.22	0.09	0.10
	效率衰退量/ %	1.04	0.58	0.66	0.15	0.55	1.00	1.15
大尺寸积垢/ 10^{-5}m	压比衰退量/ %	1.78	1.66	0.96	1.73	2.59	0.26	0.25
	效率衰退量/ %	1.81	1.81	1.24	1.30	1.81	2.31	1.59
叶顶间隙增大/ 10^{-5}m	压比衰退量/ %	1.28	1.12	0.90	1.11	2.33	0.25	0.20
	效率衰退量/ %	1.56	1.73	0.69	0.76	1.12	1.97	1.48
叶顶间隙增大并且叶片积垢	压比衰退量/ %	3.15	2.78	1.96	3.06	3.14	0.44	0.60
	效率衰退量/ %	3.05	3.12	2.16	2.37	2.36	3.72	3.19

当叶片出现积垢沉淀和叶顶间隙同时增大时, 性能衰退最明显. 其中, 压比下降了 2.50%, 效率下降了 2.41%. 本文计算了不同转速的几个状态点 (进出口条件相同), 得到具体性能参数平均衰退量, 见表 1. 由表 1 可知, 一般在高转速下, 压比衰退不明显. 压气机叶片在洁净、叶顶间隙增大、叶片积垢、积垢并且叶顶间隙同时增加等几种情况下流场中总温以及叶片表面气流流场的变化如图 9 和图 10 所示.

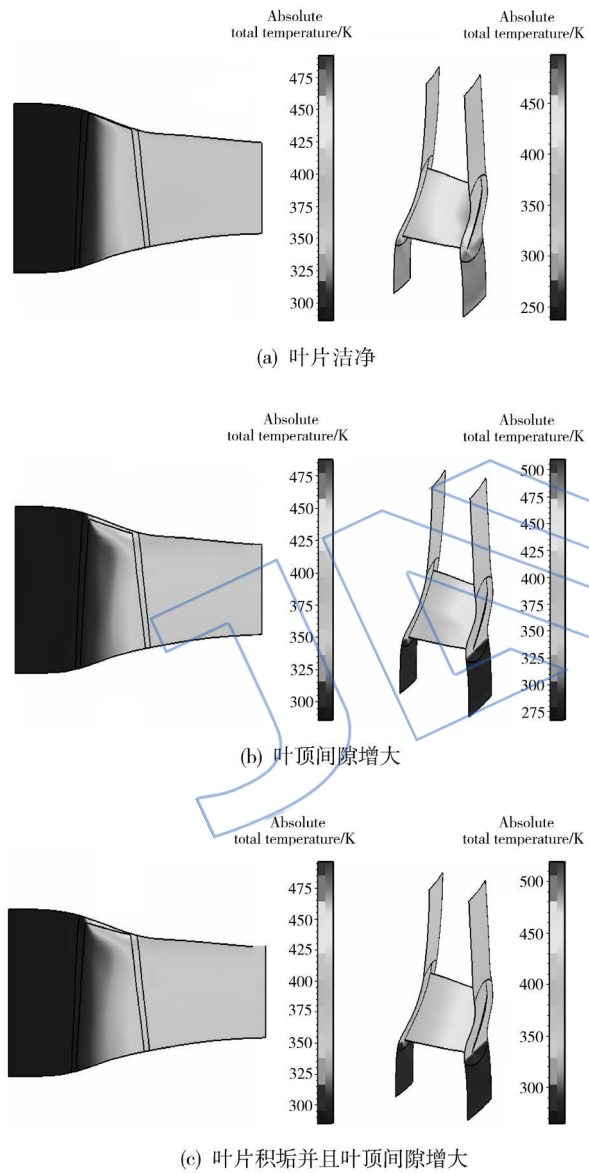


图 9 叶片在不同情况下流场中总温的变化

Fig. 9 Variation of total temperature in the flow field under the different conditions

从图 9(a) ~ (c) 看出, 当叶片发生积垢沉淀和叶顶间隙增大后, 总温较之正常情况相比, 都有不同程度的升高, 整个叶片中上部位和靠近叶顶

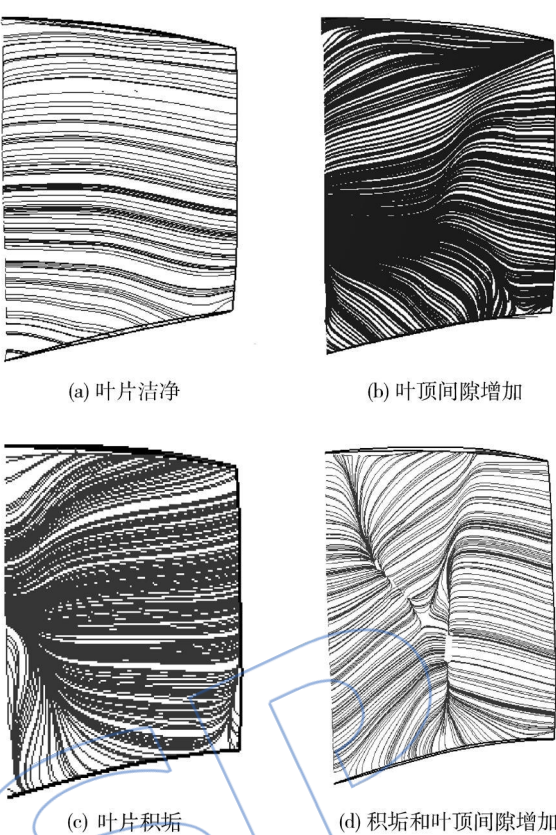


图 10 叶片在不同情况下表面气流流场变化
Fig. 10 Variation of air flow field of the surface under the different conditions

机匣部位表现的比较明显. 由图 9(b) 和 (c) 可知, 叶顶间隙增大后, 叶顶部位总温明显升高. 当叶片积垢和叶顶间隙增大同时发生时, 总温增大更为明显, 叶片承受着更大的负荷. 由图 10(a) ~ (d) 可以看出, 在正常情况下, 叶片表面气流流动比较均匀. 当叶顶间隙增大或者叶片积垢后, 叶片前缘和后缘部气流出现了小面积分离现象^[10], 但叶片积垢影响的区域略大些; 当两种失效形式同时发生时, 叶片表面气流流动很剧烈, 叶片前缘部分出现较大面积的分离现象. 进一步得到叶片清洁时叶片气流最大速度为 468.125 m/s, 叶片积垢时为 457.822 m/s, 叶顶间隙增大时为 456.469 m/s, 叶片积垢和叶顶间隙增大同时发生时, 最大速度衰减为 450.901 m/s. 由此可见, 当叶片本身失效因素越多时, 压气机性能衰退的越大, 损失也越严重. 对于本文来说, 当积垢尺寸和叶顶间隙增加量处在同一数量级上时, 叶片积垢对性能衰退的影响略大于叶顶间隙增大的影响.

4 结 论

压气机使用一阶段时间后, 叶片由于积垢沉

淀和侵蚀作用造成其性能衰退,特性参数均会有不同程度的衰减^[11].压气机第一级叶片由于其处在最前端位置,受到的影响是最严重的^[12].在计算叶片积垢沉淀过程中,采用增加一定范围随机尺寸的方法,较传统方法相比,叶片表面积垢情况更接近于实际.仿真结果可以为研究的压气机性能衰退或正确分析故障提供参考.仿真结果表明,大尺寸积垢引起压比和效率的衰退值在1.5%左右;小尺寸积垢性能衰退量不足1%;叶片发生积垢和叶顶间隙同时增大时,特性参数衰退量在3%附近.所得结果需要进一步进行实验验证.

参考文献:

- [1] 刘大响,叶培梁,胡俊.航空燃气涡轮发动机稳定性设计与评定技术[M].北京:北京航空工业出版社,2004.
- [2] Kurz R, Brun K. Degradation in gas turbine system [R]. ASME Paper 2000-GT-345, 2000.
- [3] 周敏,王如根.改变开孔位置对风扇叶片气动特性的影响[J].汽轮机技术,2007,49(5):359-361.
ZHOU Min, WANG Rugen. The pneumatic characteristic influence of the fan vane for changing the hole [J]. Turbine Technology, 2007, 49(5): 359-361. (in Chinese)
- [4] 王如根,周敏,赵英武,等.跨声速压气机低雷诺数下流动失稳机制研究[J].航空动力学报,2009,24(2):414-419.
WANG Rugen, ZHOU Min, ZHAO Yingwu, et al. Research on flow instability mechanism of transonic compressor at low Reynolds number [J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 414-419. (in Chinese)
- [5] 李绍斌,苏杰先,冯国泰,等.动静叶片干扰下跨声压气机级性能与叶片型面静压研究[J].航空动力学报,2007,22(7):1153-1160.
LI Shaobin, SU Jiexian, FENG Guotai, et al. Study of performance and profile pressure distribution of transonic compressor under rotor stator interaction condition [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(7): 1153-1160. (in Chinese)
- [6] 李本威,李冬,沈伟,等.涡轮叶片粗糙度对其性能衰退的影响研究[J].航空计算技术,2009,39(5):26-29.
LI Benwei, LI Dong, SHEN Wei, et al. The research on turbine blade roughness influence on its performance degradation [J]. Aeronautical Computing Technique, 2009, 39(5): 26-29. (in Chinese)
- [7] 张楚华,王宝潼,栾辉宝,等.叶顶间隙对离心叶轮气动特性影响研究[J].流体机械,2006,34(12):13-16.
ZHANG Chuhua, WANG Baotong, LUAN Huibao, et al. Study on influence of tip clearance on aerodynamic performance of centrifugal impeller [J]. Fluid Machinery, 2006, 34(12): 13-16. (in Chinese)
- [8] 李强,楚武利,吴艳辉,等.叶顶间隙对离心泵性能影响的数值模拟研究[J].计算机仿真,2008,25(12):230-234.
LI Qiang, CHU Wuli, WU Yanhui, et al. Numerical simulation of the influence of tip clearance on centrifugal pump impeller [J]. Computer Simulation, 2008, 25(12): 230-234. (in Chinese)
- [9] 刘建勇,袁巍,周盛,等.不同顶部间隙对跨声风扇转子的影响分析[J].航空动力学报,2007,22(11):1874-1878.
LIU Jianyong, YUAN Wei, ZHOU Sheng, et al. Analysis for influence of different tip clearance on transonic fan rotor [J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(11): 1874-1878. (in Chinese)
- [10] Mecke R J. Mapping and predicting air flows in gas turbine axial compressors [R]. ASME Paper GT-2003-38745, 2003.
- [11] Pinelli M, Venturini M. Improvement of the accuracy in gas turbine health determination [R]. ASME Paper 2001-GT-0476, 2001.
- [12] 刘正发,徐哲,张春梅,等.某型压气机叶片防护层耐腐蚀性研究[J].热能动力学报,2007,22(5):490-494.
LIU Zhengfa, XU Zhe, ZHANG Chunmei, et al. A study of the corrosion resistant characteristics of the blades of a compressor and their protective coatings [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2007, 22(5): 490-494. (in Chinese)