

不同吞雨形式下压气机特性数值模拟

刘奥铖¹, 郑 群¹, 王静宜², 罗铭聪¹

(1. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 上海航天动力技术研究所, 上海 201109)

摘 要:为研究不同吞雨条件下雨滴的运动形式以及各级压气机的性能变化特点,以某三级压气机为研究对象,使用 CFX 软件进行数值模拟,选择 $k-\varepsilon$ 湍流模型,针对压气机干压缩、整周均匀吞雨和周向非均匀吞雨 3 种不同工况,对比分析雨水对压气机流场和性能的影响机理。结果表明:雨滴和空气之间的粘性力引起的额外流动损失以及雨滴的蒸发效果在各级压气机内存在差异,雨水在进口局部区域浓度较大将导致流场沿周向分布不均匀;相比于均匀吞雨,多级压气机非均匀吞雨工况下整机性能下降幅度增大,稳定工作范围进一步减小;雨滴的蒸发强度沿流动方向逐渐增大,因此前两级工作特性变化情况与整机较为一致,而第 3 级在部分工况点的效率略有升高。

关 键 词:多级压气机;非均匀吞雨;整周计算;两相流动

中图分类号:V231.3 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.10.014

[引用本文格式]刘奥铖,郑 群,王静宜,等. 不同吞雨形式下压气机特性数值模拟[J]. 热能动力工程,2021,36(10):105-112. LIU Ao-cheng, ZHENG Qun, WANG Jing-yi, et al. Numerical study on compressor characteristics under different rain ingestion forms [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10):105-112.

Numerical Study on Compressor Characteristics under Different Rain Ingestion Forms

LIU Ao-cheng¹, ZHENG Qun¹, WANG Jing-yi², LUO Ming-cong¹

(1. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code:150001;
2. Shanghai Space Propulsion Technology Research Institute, Shanghai, China, Post Code:201109)

Abstract: To investigate the movement of raindrops and the performance change characteristics of each stage in different rain injection condition, a three-stage compressor is researched for numerical simulation by CFX, meanwhile using $k-\varepsilon$ turbulence model. The impact mechanism of rain on compressor flow field and performance by raindrops distribution form was compared and analyzed, which based on three different working conditions of compressor: dry compression, uniform rain ingestion on the whole week and non-uniform rain ingestion in the circumferential direction. The results show that, the additional flow loss caused by speed slip between raindrops and air and evaporation effect of raindrops are different at each stage, The more concentrated form of rain in the local area will lead to the uneven circumferential distribution of the flow field. Compared with the uniform rain ingestion condition, the performance of the multi-stage compressor decreases more seriously and the stable operating margin decreases further under the non-uniform rain ingestion condition. The evaporation strength of raindrops increase along the flow direction gradually, the variation of performance at the first and second stage is consistent with the whole com-

收稿日期:2021-04-13;修订日期:2021-05-07

基金项目:国家科技重大专项(2017-II-0006-0019, 2017-I-0009-0010);国家自然科学基金(52006042);黑龙江省博士后面上基金(LBH-Z20126)

Fund-supported Project: National Science and Technology Major Project(2017-II-0006-0019, 2017-I-0009-0010); National Natural Science Foundation of China(52006042); HeiLongJiang Postdoctoral Fund(LBH-Z20126)

作者简介:刘奥铖(1997-),男,黑龙江哈尔滨人,哈尔滨工程大学硕士研究生。

通讯作者:罗铭聪(1986-),男,黑龙江伊春人,哈尔滨工程大学副教授。

pressor, but the efficiency increases on some working points at the third stage.

Key words: multistage compressor, rain ingestion unevenly, full circle calculation, two phase flow

引 言

飞机在不同天气条件和环境中飞行时,发动机将不可避免地吸入雨水,雨水入侵到高温、高压、高负荷的压气机内部时会造成复杂的影响^[1-2]。现阶段关于航空发动机吞雨现象的研究均是针对单级压气机或单通道的进口均匀吞雨工况展开的,且主要集中在压气机流场和性能变化^[3-5]、雨滴本身在多重因素作用下的形态变化^[6-7]和运动特点^[5,8]、雨水与叶片表面之间的相互作用形式及作用效果等方面^[9]。飞机在起降过程中偶尔存在大攻角起飞、地面积水等特殊情况^[10],此时发动机非均匀吸入雨滴,针对在压气机进口雨水不规则分布条件下,压气机内流场的畸变现象以及各级性能变化情况的研究较少。

本文利用 ANSYS-CFX 软件,基于欧拉-拉格朗日两相流理论,建立了气液两相耦合过程的计算模型。对于压缩和不同形式吞雨条件进行数值模拟,得到雨滴的运动规律,并结合各级压气机叶顶流场分析雨滴对气流的影响方式,对比分析干压缩和不同形式吞雨条件下各级压气机总压比、总温比以及效率等性能参数的变化特点。

1 研究方法

1.1 控制方程及湍流模型

在压气机内空气占体积分量的绝大部分,所以可将空气当做连续相来描述,利用欧拉法对空气建立质量守恒方程、动量方程和能量方程。雨滴占空间的体积分数很小,将雨滴当做流场中的离散相,使用拉格朗日法捕捉追踪雨滴在空间中的运动轨迹,离散相由牛顿第二定律建立独立的动量方程。

雨滴在运动过程中不断汽化形成水蒸气,其与空气共同组成湿空气即为连续相,连续相工质的温度变化依据多系数定压比热容公式来计算^[11],变比热系数项取值如表 1 所示。

$$c_p = R(a_0 + a_1T + a_2T^2 + a_3T^3 + a_4T^4) \quad (1)$$

表 1 变比热系数项取值

Tab. 1 Values of variable specific heat coefficient

系数	空气	水蒸气
a_0	3.653	4.07
a_1	-1.337	-1.108
a_2	3.294	4.152
a_3	-1.913	-2.964
a_4	0.2763	0.807

采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟压气机中的湍流过程,在近壁面区域使用 Scalable 壁面函数,弥补 $k-\varepsilon$ 湍流模型模拟低雷诺数区域能力不足的问题。

1.2 雨滴破碎模型及蒸发模型

由于雨滴与气流之间的滑移速度以及雨滴粘性和表面张力等因素,其易发生变形、气动力破碎和喷溅等现象。主要考虑液滴的气动力二次破碎模型、液滴间碰撞模型及液滴-壁面相互作用模型。

进入高速气流时液滴与空气之间存在滑移速度 u_s ,当滑移速度的作用力足够大时,液滴表面张力 σ_1 不足以保持液滴的原有状态,引起液滴变形以及破碎。通过韦伯数 We 表征液滴的破碎形态,当 $We = 1$ 时,液滴发生变形;当 We 大于临界值时,液滴发生气动破碎。韦伯数的表达式为:

$$We = \frac{\rho_l u_s^2 d_p}{\sigma_1} \quad (2)$$

应用 CAB 破碎模型模拟液滴变形与破碎现象,液滴的变形破碎与韦伯数存在一定的相关性。父液滴破碎为子液滴的生成规律中,子液滴产生率与液滴数量成正比,破碎前后液滴直径变化表现为:

$$d_{p,1}/d_{p,0} = e^{-K_{br}t} \quad (3)$$

式中: $d_{p,1}$ 、 $d_{p,0}$ —液滴破碎前、后直径; t —液滴形变时间; K_{br} 为液滴破碎的常系数,表达式为:

$$K_{br} = \begin{cases} k_1w, & 5 < We < 80 \\ k_2w \sqrt{We}, & 80 < We < 350 \\ k_3wWe^{3/4}, & We > 350 \end{cases} \quad (4)$$

式中: w —振荡频率; k_i —液滴破碎因子。雨滴在压气机内运动时与空气发生对流换热,表面温度不

断升高,液滴汽化为水蒸气伴随着单向传质的蒸发过程。雨滴的相变过程与自身温度有关,包括蒸发和沸腾两种形式。当液滴内部温度小于沸点时表现为液滴表面的汽化蒸发现象,则液滴蒸发速率定义为:

$$dm_p/dt = \pi d_p \rho_v D_v Sh \frac{M_v}{M} \log\left(\frac{1 - f_p}{1 - f}\right) \tag{5}$$

式中: ρ_v, D_v —蒸汽密度及扩散系数; M_v, M —水蒸气和混合空气的摩尔质量; f_p, f —液态与气态水的摩尔分数; Sh —舍伍德数,表达式为:

$$Sh = 2 + 0.6 Re^{1/2} (\mu/\rho_v D_v)^{1/3} \tag{6}$$

式中: Re —雷诺数; μ —动力粘性系数。

当液滴温度大于沸点时表现为液滴内部和表面同时发生剧烈的汽化沸腾现象,此时液滴蒸发速率可定义为:

$$dm_p/dt = - \pi d_p \lambda Nu (T - T_p)/h_{fg} \tag{7}$$

式中: Nu —努塞尔数; h_{fg} —相变潜热。

1.3 网格划分及边界条件

研究对象为某三级轴流压气机,此三级轴流压气机包含 1 列进口导叶,共 7 列叶片排,部分参数如表 2 所示。

表 2 三级压气机各级叶片数

Tab. 2 Number of blades of three-stage compressor

叶片位置	叶片数
进口导叶	20
第 1 级动叶	15
第 1 级静叶	18
第 2 级动叶	17
第 2 级静叶	23
第 3 级动叶	22
第 3 级静叶	29

在整周压气机计算的过程中,使用 NUMECA 的 Autogrid5 对此三级压气机进行结构化网格划分,并对进口和出口进行了延长,延长长度约为 1.5 倍叶片弦长,以消除气流流动发展不充分所带来的影响。网格划分得到全周网格节点数 1 688 万,压气机全周模型及网格划分如图 1 所示。

进口边界条件设定为总压 101 325 Pa、总温 288.15 K,出口边界条件为给定不同背压值,以得到

该压气机在不同工况下的多组特性曲线。选取 3 种进口雨滴分布形式:进口干空气,进口整周均匀吞雨和进口 120° 扇形区域吞雨,其他 240° 区域为干空气,如图 2 所示。

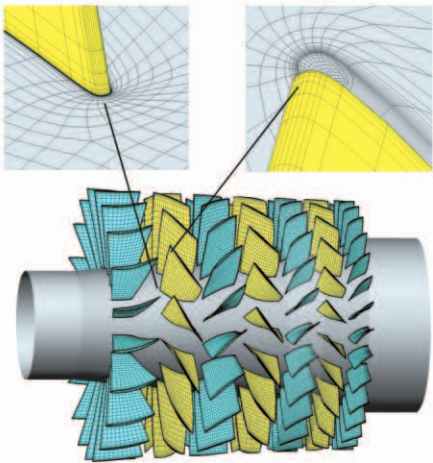


图 1 三级压气机网格划分

Fig. 1 Grid division of three-stage compressor



图 2 压气机进口雨滴分布形式

Fig. 2 Different distribution forms of rain droplets at compressor inlet

大气中雨滴的直径服从 Rosin-Rammler 分布^[12],不同直径雨滴的质量流量分布计算式为:

$$R = 1 - \exp[-(d_p - d_e)^\gamma] \tag{8}$$

式中: d_p —实际雨滴直径; d_e —雨滴的特征直径; R —所有直径小于 d_p 雨滴的质量分数; γ —颗粒均匀指数。

选取的颗粒均匀指数和雨滴直径分别为 3 和 100 μm ,均匀吞雨和非均匀吞雨工况的吞雨量均为压气机进口流量的 2%。

1.4 效率及周向角度

雨滴进入压气机后与空气发生能量交换和质量交换,雨滴表面蒸发形成水蒸气,水蒸气和空气混合形成的湿空气比定压热容、密度均发生变化。动叶

对湿空气做功,压气机出口流量略有增加。由于液相的加入,压气机效率发生改变^[13],吞雨工况下压气机效率计算式为:

$$\eta_w = W_i / W_t \tag{9}$$

$$W_i = (W_a + tW_v) / (1 + t) \tag{10}$$

$$W_t = n \cdot N / 9550 m_{out} \tag{11}$$

式中: W_i , W_t —湿空气的等熵压缩比功和转子实际压缩比功,湿空气等熵压缩比功由干空气等熵压缩比功 W_a 和水蒸气等熵压缩比功 W_v 组成, W_t 可以由压气机转子转速和 3 级动叶的总扭矩 N 以及出口湿空气流量 m_{out} 计算得到; t —水蒸气占湿空气的质量分数。

由于非均匀吞雨工况下雨滴在各截面沿周向的分布形式不同,压气机各圆周截面周向角度示意图如图 3 所示。

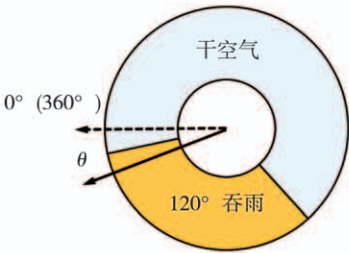


图 3 压气机各截面周向角度示意图

Fig. 3 Schematic diagram of circumferential angle on each section of compressor

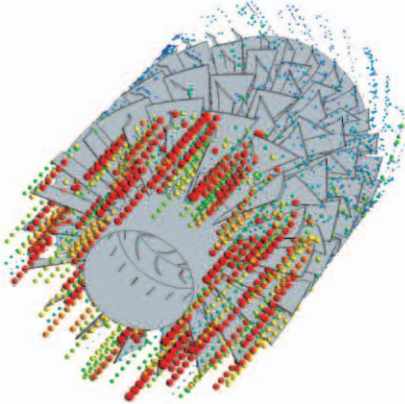
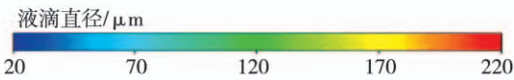
2 数值模拟结果及分析

2.1 雨滴运动形式

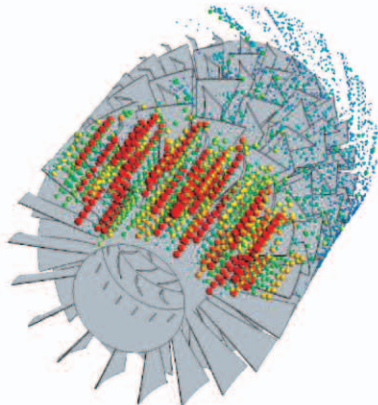
图 4 为不同进口条件下雨滴在压气机内部的分布情况。雨滴在压气机内部的运动形式差异较大,随着雨滴进入压气机内部,其受到气流粘性力和叶片的撞击,运动轨迹有所变化,雨滴进入第 1 级动叶后与气流间存在速度差,并且二者速度夹角较大,大部分雨滴在第 1 级动叶通道内发生二次破碎。

均匀吞雨工况下,雨滴遍布全周通道,而非均匀吞雨工况下绝大多数雨滴存在于 120° 扇形区域,极少数雨滴受多方面因素影响扩散至其他 240° 区域。非均匀吞雨工况下,进口处的雨滴分布在 120° 扇形区域内,由于雨滴的速度总是小于气流速度,因此雨滴分布相比于动叶的旋转方向有所落后,如图 4(d)

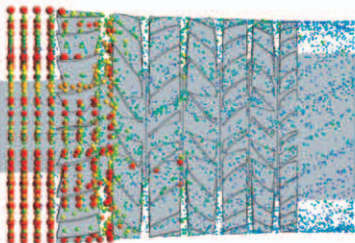
所示。



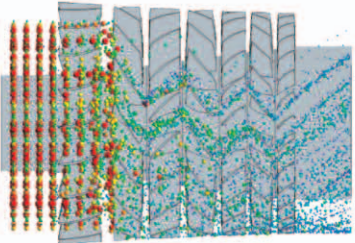
(a) 均匀吞雨工况雨滴分布情况主视图



(b) 非均匀吞雨工况雨滴分布情况主视图



(c) 均匀吞雨工况雨滴分布情况侧视图



(d) 非均匀吞雨工况雨滴分布情况侧视图

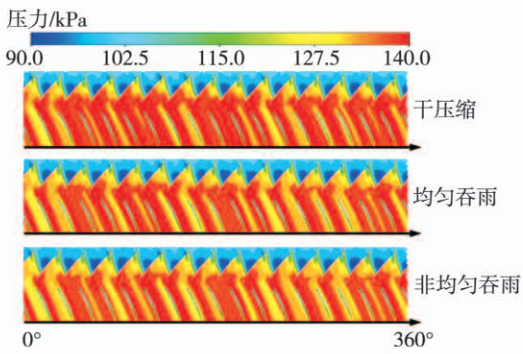
图 4 不同工况下雨滴在压气机内分布情况

Fig. 4 The distribution of rain droplets in the compressor under different working conditions

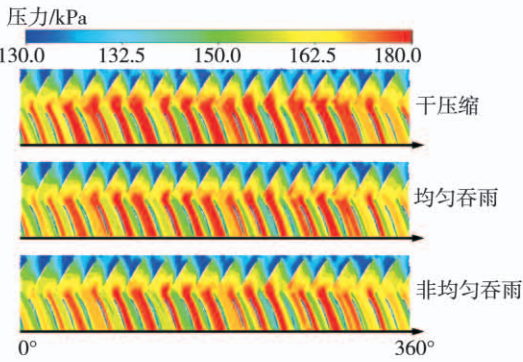
2.2 各级压气机流场变化

为了更加清晰地分析不同吞雨形式对压气机性能的影响,需要了解在吞雨过程中不同级之间的匹配特性。选取干压缩、均匀吞雨、非均匀吞雨在无量纲流量 m/m_d 为 1.007 工况下的计算结果(m 为压气机当前流量, m_d 为设计流量),对压气机各级 90% 叶高流场进行分析。

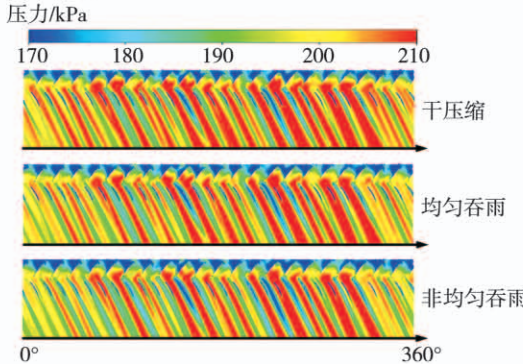
图 5 给出了 3 种工况下压气机在各级 90% 叶高截面总压云图。



(a) 第1级压气机90%叶高截面



(b) 第2级压气机90%叶高截面

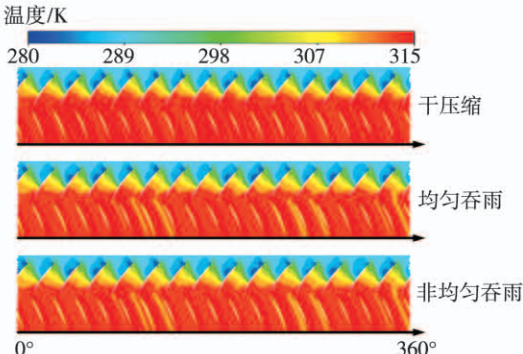


(c) 第3级压气机90%叶高截面

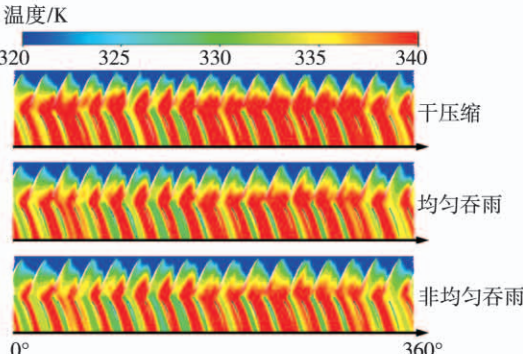
图 5 3 种工况下压气机各级 90% 叶高截面总压云图
Fig. 5 Cloud chart of total pressure at 90% blade height of each stage of compressor under three working conditions

对比干空气和均匀吞雨两工况下压气机每级的总压云图可知,雨滴进入压气机后流场总压下降,压气机每级流场总压下降程度沿级数逐渐升高,其中压气机第 3 级总压降最大,每级静叶区域总压下降较动叶更为明显。非均匀吞雨工况下雨滴的非均匀分布引起压气机内局部流场出现总压不均匀现象,雨滴分布密集的区域总压降低程度更大。

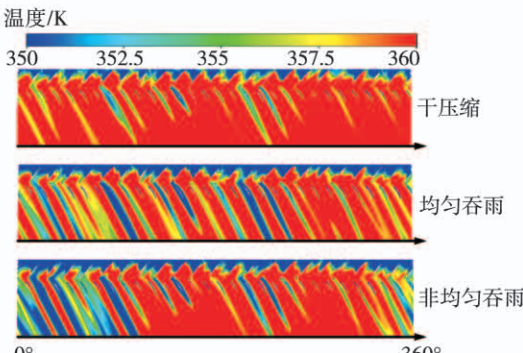
图 6 给出了 3 种工况压气机各级在 90% 叶高截面总温云图。



(a) 第1级压气机90%叶高截面



(b) 第2级压气机90%叶高截面



(c) 第3级压气机90%叶高截面

图 6 3 种工况下压气机各级 90% 叶高截面总温云图
Fig. 6 Cloud chart of total temperature at 90% blade height of each stage of compressor under three working conditions

对比干空气和均匀吞雨两工况下压气机每级的总温云图可知,压气机第 1 级内雨滴和空气的换热强度较低,流场温度略有下降。空气经过压气机第 1 级的增压作用后总温升高,雨滴和空气之间的温差逐渐升高,换热强度随之增大,此时雨滴的蒸发冷却作用显著,压气机的总温降低幅度明显。非均匀吞雨工况下,雨滴分布密集区域的流场温度下降 10 K 以上。

2.3 各级压气机性能参数变化

为了更加清晰地说明吞雨工况下雨滴对压气机各级性能的影响,分析干压缩、整周均匀吞雨、120°区域非均匀吞雨 3 种工况下压气机每级的性能参数变化情况。图 7 给出了不同工况下压气机无量纲流量 - 总压比特性变化曲线。每级之间压比分布为:第 1 级 > 第 2 级 > 第 3 级。吞雨前后压气机的各级压比特性曲线走势大致相同,但是在部分工作点压比变化有明显差异。第 1 级压气机在吞雨后总压比降低,特性线整体向下移动,各工况下压比均有下降,其中非均匀吞雨工况压比下降幅度最大;第 2 级总压比变化在近喘点与第 1 级有所差异,均匀吞雨工况压比特性曲线与干工况基本重合;第 3 级均匀吞雨工况在近喘点压比略高于干工况、压比逐渐上升,非均匀吞雨工况压比较干工况的下降幅度有所减小,特性曲线有重合的趋势。

图 8 为不同工况下压气机无量纲流量 - 总温比特性曲线,吞雨工况下压气机各级的总温比均低于干压缩的,且级数越高总温下降程度越大。非均匀吞雨工况下,绝大多数雨滴分布在 120°扇形区域内,并且雨滴的蒸发量较均匀吞雨工况减小,而其他区域流场的温度受雨滴的影响较小,所以雨滴对压气机内部空气的冷却作用减弱,非均匀吞雨工况下后两级压气机的总温比较均匀吞雨有所升高。

吞雨过程中雨滴对压气机内流场及性能的影响较复杂,雨滴对气流的粘性力使空气流动损失增加、增压能力下降,而雨滴对流场的冷却作用使得空气更易被压缩,多重因素的共同作用使得压气机各级的工作效率发生不同程度变化。图 9 为不同工况下压气机各级无量纲流量 - 等熵效率特性曲线,各级效率在吞雨前后存在着较大差异。第 1 级工作效率

在不同吞雨工况下均有所下降;第 2 级在喘振边界附近工作效率降低幅度减小,特性曲线逐渐逼近干工况,此时非均匀吞雨工况效率略高。第 3 级的效率变化曲线与前两者呈现出较大区别,由于雨滴对流场的冷却作用较为明显,从设计点至喘振边界均匀吞雨和非均匀吞雨工况的级效率逐渐高于干工况。

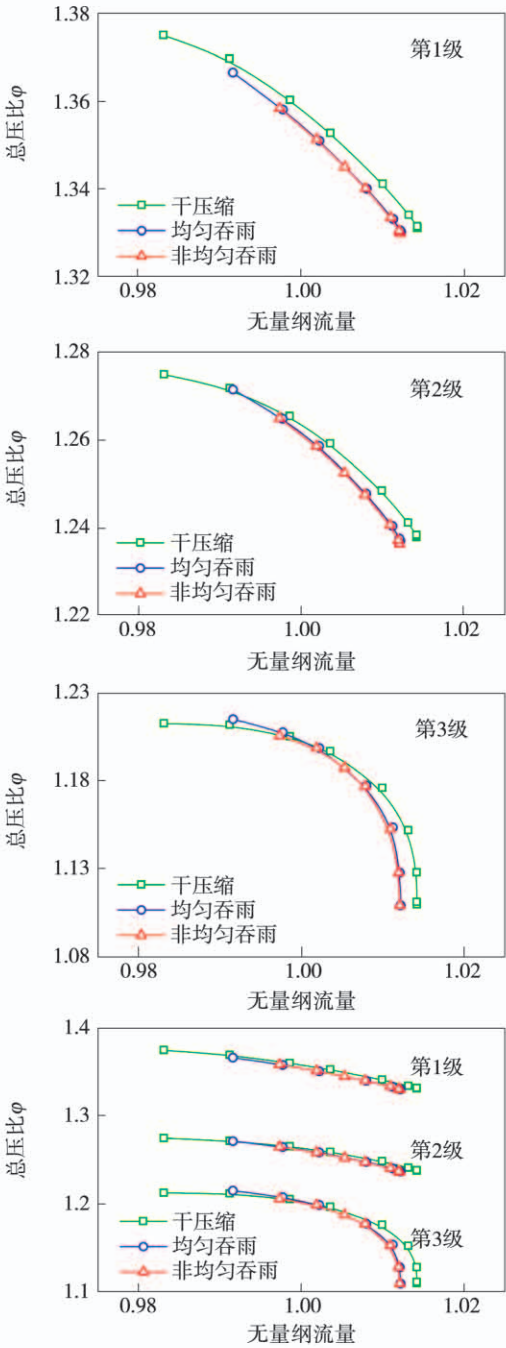


图 7 各级无量纲流量 - 总压比特性曲线
Fig. 7 Characteristic curves of dimensionless mass flow rate vs. total pressure ratio at each stage

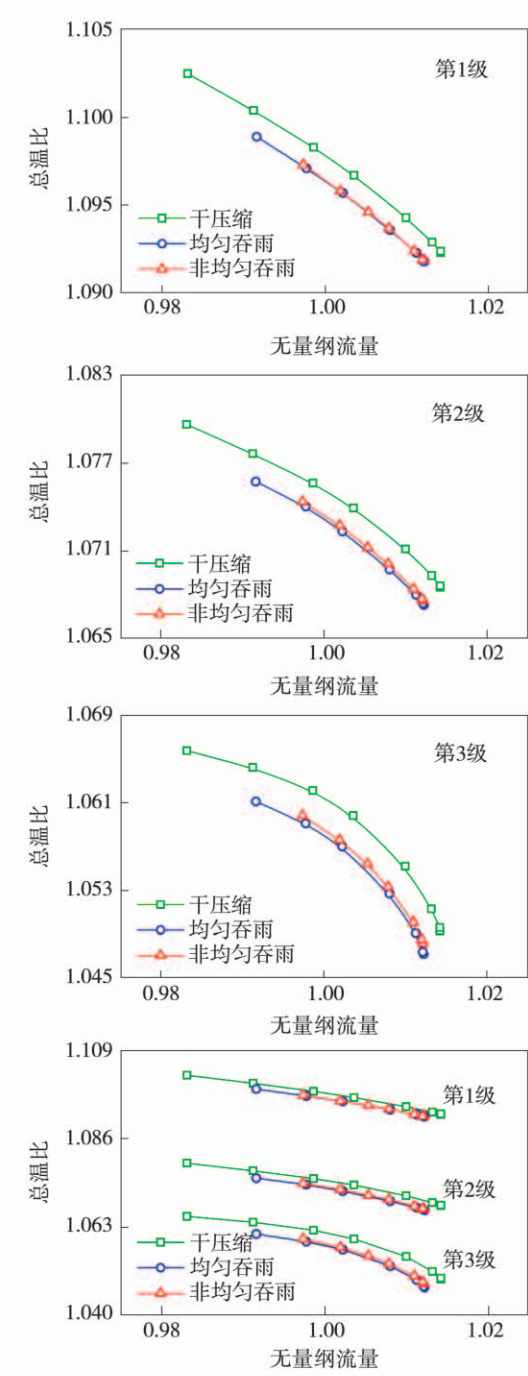


图 8 各级无量纲流量 – 总温比特性曲线

Fig. 8 Characteristic curves of dimensionless mass flow rate vs. total temperature ratio at each stage

综合比较压气机各级特性曲线,吞入雨滴后压气机稳定工作边界变窄,非均匀吞雨对压气机的负面影响程度增大。

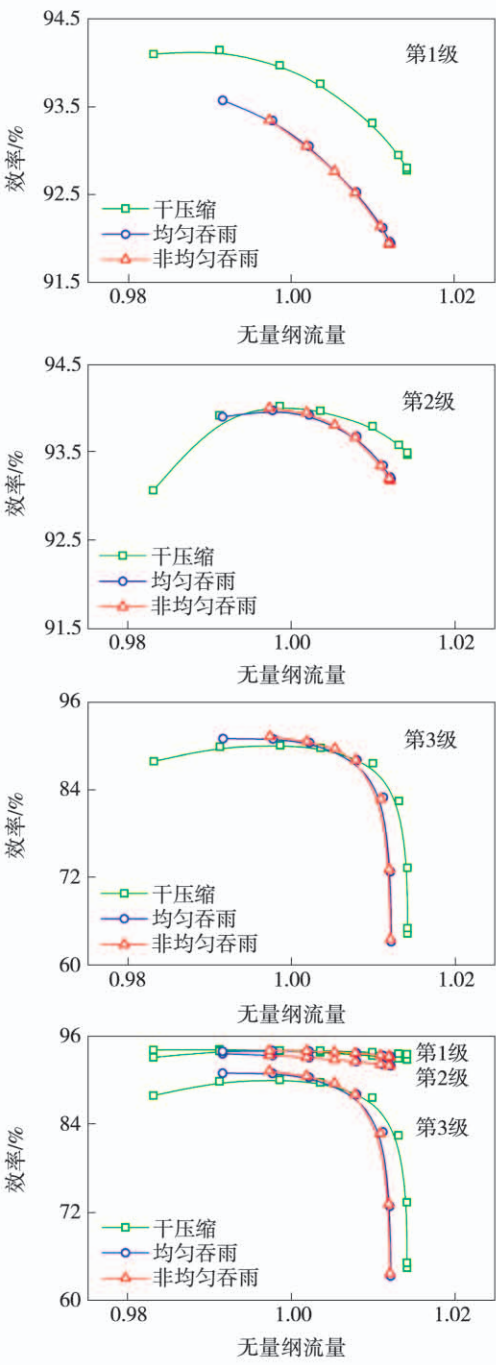


图 9 各级无量纲流量 – 效率特性曲线

Fig. 9 Characteristic curves of dimensionless mass flow rate vs. efficiency at each stage

3 结 论

(1) 雨滴轨迹具有一定的规律性,能够保持与进口分布形式较为相似的运动规律。非均匀吞雨工况下雨滴在压气机中大致分布在一定的扇形区域内,且分布密度较大,雨滴在该区域对流场的影响也

更为明显。

(2) 雨滴与气流之间的滑移速度引起额外的流动损失,导致压气机叶栅做功能力变差,压气机每级压比均呈下降趋势,级间匹配性能恶化。雨滴在运动过程中破碎、蒸发,其对压气机后两级的冷却作用较为明显。

(3) 非均匀吞雨条件下,压气机压比的下降程度和均匀吞雨工况较为相似,但稳定工作范围逐渐变窄、裕度更小。雨滴在某区域的集中分布将导致压气机内流场畸变,由于动叶对空气的掺混作用,各级动叶通道内流场总压、总温畸变程度相对较小,静叶通道流场变化更明显,随着级数的增加压气机内流场畸变程度增大。

参考文献:

- [1] 陈 光. 雨水对飞机发动机的影响[J]. 航空发动机, 2013, 39(4): 1-4.
CHEN Guang. Influence of rain on aeroengine[J]. Aeroengine, 2013, 39(4): 1-4.
- [2] LOEBIG J, VITTAL B, BOOHER M. Numerical simulation of water/methanol evaporation in an axial flow gas turbine compressor [C]//Aiaa/asme/sae/asee Joint Propulsion Conference & Exhibit, 1998.
- [3] 侯圣文, 郑 旭, 马树波, 等. 降雨环境下进气道吸雨数值计算分析[J]. 风机技术, 2020, 62(6): 35-44.
HOU Sheng-wen, ZHENG Xu, MA Shu-bo, et al. Numerical calculation and analysis of inlet water ingestion[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(6): 35-44.
- [4] 夏国正, 陆禹铭, 夏全忠, 等. 轴流压气机吸雨特性的数值研究[J]. 风机技术, 2020, 62(4): 1-10.
XIA Guo-zheng, LU Yu-ming, XIA Quan-zhong, et al. Numerical research of water ingestion effect on axial flow compressor[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2020, 62(4): 1-10.
- [5] MURTHY S N B. Effect of heavy rain on aviation engines [C]//27th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno NV, 1989.
- [6] SUN Lanxin, ZHENG Qun, LUO Mingcong, et al. On the behavior of water droplets when moving onto blade surface in a wet compression transonic compressor[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2011, 133(8): 1-10.
- [7] 蔡 斌, 李 磊, 王照林. 液滴在气流中破碎的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2003(4): 613-616.
CAI Bin, LI Lei, WANG Zhao-lin. Numerical analysis of liquid drop breakup in airflow[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003(4): 613-616.
- [8] LU Yang, HAI Zhang, AQIANGQIANG Lin. Effects of water ingestion on the tip clearance flow in compressor rotors[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Aerospace Engineering, 2019, 233(11): 1-12.
- [9] Lu Yang, Jie Zhou, Shuangming Fan, et al. Method and numerical simulation for evaluating the effects of water film on the performance of low-speed axial compressor[J]. Aerospace Science and Technology, 2019, 84: 1-12.
- [10] MURTHY S N B. Effect of atmospheric water ingestion on the performance and operability of flight gas turbines [C]//32nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Lake Buena Vista, FL, 1996: AIAA 96-3059.
- [11] AQIANG Lin, QUN Zheng, HAMZA Fawzy, et al. Effect of water injection cooling on flow field characteristics in the cooling section of precooled turbine-based combined cycle engine[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 141: 615-626.
- [12] P. Aarne Vesilind. The Rosin-Rammler particle size distribution [J]. Resource Recovery and Conservation, 1980, 5(3).
- [13] 罗铭聪, 郑 群, 岳国强, 等. 跨音速级压气机湿压缩数值研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(5): 86-94.
LUO Ming-cong, ZHENG Qun, YUE Guo-qiang, et al. Numerical simulation of wet compression in a transonic compressor stage [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(5): 86-94.

(王治红 编辑)