



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2402375

引用格式:代晓晴,郭保,张云亮.水滴速度对涡扇发动机内涵进水量影响分析[J].科学技术与工程,2025,25(4):1717-1722.

Dai Xiaoping, Guo Bao, Zhang Yunliang. Analysis of the influence of water speed on the amount of water entering inner duct[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(4): 1717-1722.

# 水滴速度对涡扇发动机内涵进水量影响分析

代晓晴<sup>1,2</sup>, 郭保<sup>3</sup>, 张云亮<sup>1,2</sup>

(1. 中国航发商用航空发动机有限责任公司先进技术研究部, 上海 200241; 2. 上海商用飞机发动机工程技术研究中心, 上海 200241; 3. 中国人民解放军 95960 部队, 西安 710089)

**摘要** 依据航空发动机适航规章中吸雨条款要求,对某无增压级风扇部件开展吸雨特性研究,用拉格朗日方法追踪不同水滴初始速度下其在风扇中的运动轨迹,获得了发动机内涵进水量,探讨了涡扇发动机在吸雨适航符合性验证中对喷水装置的喷水速度的要求,以支撑中国涡扇航空发动机吸雨适航符合性设计与验证。研究发现,某慢车转速下随着水滴速度的减小,撞击在风扇叶片等壁面上的雨水流量增大,且没有水滴能够穿过风扇叶片直接进入内涵,当水滴速度为 250 m/s 时,内涵进水量占总雨水流量的 15.3%,为 10 m/s 时的 19.1 倍;在同一水滴速度下,随着分流环与风扇叶片间距的减小,内涵进水增加率增大;不同转速下,内涵进水量随风扇进口水滴初始速度的变化趋势是一致的,基本随着水滴速度的增大先增大后保持不变甚至略微减小。

**关键词** 涡扇发动机; 吸雨; 水滴速度; 运动轨迹; 内涵进水量

中图分类号 V235; 文献标志码 A

## Analysis of the Influence of Water Speed on the Amount of Water Entering Inner Duct

DAI Xiao-qing<sup>1,2</sup>, GUO Bao<sup>3</sup>, ZHANG Yun-liang<sup>1,2</sup>

(1. Department of Advanced Technology Research, AECC Commercial Aviation Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Civil Aero Engine, Shanghai 200241, China;

3. 95960 Troops of the PLA, Xi'an 710089, China)

**[Abstract]** According to the requirements of rain ingestion of airworthiness regulations, the rain ingestion calculation was carried out for the no booster fan part. The movement trajectory of water droplets with different water speeds was studied based on Lagrangian particle tracking, and the separation amount of water droplets ingested to inner duct was obtained. Further more, the requirements for water spray speed from the rain ingestion test rig in the certification for turbofan engine was discussed, which can support the design and verification of rain ingestion airworthiness of turbofan engine. The results show that with the decrease of water speed, the amount of rain impacting on the fan blade and other walls increases, and no water droplets can pass through the fan blade and enter the inner duct. The water entering the engine inner duct at 250 m/s is 15.3 percent of the total amount of water, about 19.1 times of that at 10 m/s. Under the same water velocity, as the distance between the splitter and the fan blade decreases, the increase in water ingested to inner duct increases. At different fan rotational speeds, the change trend of the water ratio ingested to inner duct with initial water velocity is consistent, basically increasing with the increase in water drop velocity, and then remaining or slightly decreasing.

**[Keywords]** turbofan engine; rain ingestion; water speed; trajectory; water ingested to inner duct

发动机吸雨后可能会对其性能造成不利影响,导致一系列工作异常,如发生喘振、失速、熄火等,威胁飞行安全<sup>[1-3]</sup>。为保障民航安全,美国联邦航空局、欧洲航空安全局、中国民航局均就航空发动机吸雨制定了适航标准<sup>[4-6]</sup>。因此,需要对发动机吸雨特性进行研究,以采取措施提高发动机

在极端降雨环境下安全运行的能力,而其中风扇部件的吸雨特性研究尤为关键。被吸入风扇部件中的雨水受离心力以及与壁面的撞击等的作用会改变其运动轨迹,期间还会发生破碎,导致雨水流量和粒径重分布,流经分流环进行内外涵道的分离,影响核心机进水量和水滴粒径。因此,开展风

收稿日期: 2024-04-02; 修订日期: 2024-11-24

基金项目: 上海市青年科技英才扬帆计划(22YF1453300)

第一作者: 代晓晴(1990—),女,汉族,河南商丘人,硕士,工程师。研究方向:航空发动机适航技术。E-mail:daixiaoqing12@163.com。

投稿网址:www.stae.com.cn

扇部件吸雨特性研究,获得雨水运动轨迹及其性能影响,并确定通过风扇进入内涵的雨量,以研究雨水的吸入对发动机核心机和整机工作性能的影响,对涡扇发动机吸雨特性研究是至关重要的。此外,研究雨水在风扇部件内的运动特性,可指导开展合理的结构设计,将水尽可能排出到外涵道,进而减轻对发动机性能的影响,如将进气锥形状设计为先椭后锥、加大风扇叶片与分流环的间距等<sup>[7]</sup>。

在风扇中,雨水的运动过程较为复杂。水滴会撞击在帽罩、机匣、风扇叶片等壁面上,影响运动轨迹。此外,由于与气流之间存在滑移速度,水滴将会受气流剪切力而发生破碎,导致粒径减小。而且,雨水在风扇中运动的过程中,会与周围气流发生热量、质量和动量交换。因此,雨水在风扇部件中的运动是一个双向耦合的复杂气液两相流动过程,涉及到雨水对发动机气动、结构、热力等性能的影响,并且伴随着雨水的蒸发、撞壁、破碎等运动过程,研究难度较大。

外国对发动机吸雨特性的研究起步较早,开展了大量的试验和仿真模拟工作,并开发了相关的计算分析工具<sup>[8-10]</sup>,但是中国对发动机吸雨特性的研究较少,也鲜有公开发表的相关文献。在水滴的运动特性方面,主要关注对水滴的气动破碎、蒸发以及运动轨迹等的研究。张琦等<sup>[11]</sup>研究了吸雨试验中,在不同发动机状态下进气道内水滴粒径变化和分布特性。刘奥铨等<sup>[12]</sup>研究了某三级压气机周向均匀吞雨和非均匀吞雨等不同工况下,雨水的蒸发特性及其对压气机性能的影响。Das等<sup>[13]</sup>聚焦粒径为 30 μm 的小水滴,用拉格朗日方法追踪流场中水滴的轨迹,研究了转速对水滴撞击叶片特性的影响。但是,尚未有针对水滴初始入射速度对风扇部件撞击特性以及内涵道进水量影响的研究,而喷水试验经验表明喷水装置喷出的水滴速度将会显著影响内涵进水量。作为核心机吸雨特性评估的输入,发动机内涵进水量直接关系到吸雨对核心机和整机性能的影响。因此,有必要开展水滴速度对涡扇发动机内涵进水量影响研究,以支撑中国涡扇航空发动机吸雨适航符合性设计与验证。

基于此,采用 CFX 软件中的欧拉-拉格朗日多相流计算模型对气液两相流动的双向耦合作用进行模拟计算,考虑连续相与离散相之间的动量与能量运输、传热、气动破碎等物理过程,开展某无增压级风扇部件吸雨特性计算,定量研究不同转速、不同分流环位置处水滴速度对雨水在内外涵道的分

离等运动特性的影响,并探讨吸雨适航符合性验证试验中对喷水装置的技术要求。

## 1 计算方法

雨水在发动机中运动的过程中与周围气流发生热量、质量和动量交换,两相之间是双向耦合过程。在数值研究中,需要准确模拟两相之间的双向耦合作用,既要模拟两相间的传热传质和动量交换,又要考虑雨滴离散相的运动轨迹、气动破碎、与叶片等的撞击特性等。由于雨水浓度相对较低,水滴颗粒属于稀疏相,因此在模拟中可以忽略水滴颗粒之间的相互作用,即不考虑水滴之间的碰撞、聚合等现象。雨水运动过程涉及各种形态的复杂运动形式,如水滴撞击壁面后形成水膜及其运动破碎等,数值研究中难以实现真实而全面的模拟,因此忽略水膜形成和运动等复杂运动特性的模拟。风扇部件中温度相对较低,且水滴运动速度较快,蒸发量很小,因此本研究中暂不考虑雨水的蒸发,对水滴颗粒离散相主要考虑颗粒运动、热传递、撞壁、气动破碎等运动特性。计算中,采用 CFX 软件中的欧拉-拉格朗日多相流模型,即用欧拉法求解气相连续相控制方程,用拉格朗日法求解水滴颗粒的离散相控制方程。

### 1.1 水滴颗粒运动方程

在风扇部件中,水滴在运动的过程中,将会受到气动曳力、重力、虚拟质量力、压力梯度力、离心力和科氏力等力的作用。其中,气动曳力、离心力和科氏力相较于其他作用力较为显著,在计算中予以考虑,水滴颗粒运动方程为

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = \mathbf{F}_R + \mathbf{F}_D \quad (1)$$

式(1)中: $m_p$ 为水滴颗粒的质量; $\mathbf{u}_p$ 为水滴颗粒的速度; $\mathbf{F}_R$ 为水滴颗粒旋转产生的离心力和科氏力; $\mathbf{F}_D$ 为水滴受到的气动曳力,曳力系数采用 Schiller Naumann经验公式。

### 1.2 水滴颗粒传热方程

水滴颗粒与空气流场之间的热传递方程为

$$m_p C_w \frac{dT_p}{dt} = \pi d_p \lambda Nu (T - T_p) + \frac{dm_p}{dt} h_g \quad (2)$$

式(2)中: $C_w$ 为水滴的比热; $d_p$ 为水滴颗粒粒径; $\lambda$ 为空气连续相的热传导率; $T$ 为流场温度; $T_p$ 为水滴温度; $Nu$ 为努塞尔数; $h_g$ 为水滴的蒸发潜热,但是由于风扇中的温度相对不高,且水滴粒径相对较大,雨水的蒸发很小,在此忽略不计。

### 1.3 气动破碎模型

在运动过程中,如果水滴与气流之间存在较大

的滑移速度,水滴会变形,甚至发生气动破碎。在液滴气动破碎研究中,有两个重要的无量纲参数:韦伯数( $We$ )和奥内佐格数( $Oh$ )。研究表明,当液滴颗粒  $We$  大于 1 时,开始发生严重变形;当  $We$  大于某一临界值时,液滴开始发生破碎,并且随着  $We$  的变化,可发生多种形式的破碎,如振荡破碎、袋状破碎等<sup>[14]</sup>。

CFX 软件中提供了多种气动破碎模型,如 Reitz 和 Diwakar 模型、TAB 模型、Schmehl 模型等,其中 Reitz 和 Diwakar 模型较为简单,认为颗粒破碎仅依赖于单一的  $We$ 。TAB 模型来源于弹簧质量系统与液滴振荡、变形之间的泰勒类比,将液滴变形描述为一维、强迫、阻尼谐振。采用相同的液滴变形机理,根据破碎后的子液滴与母液滴关系式不同发展了 ETAB 模型和 CAB 模型。TAB 及其发展模型中判断液滴破碎准则不再依赖于一个单一的韦伯数,而且能够考虑液体粘性的影响,应用较为广泛。Schmehl 模型中液滴破碎依赖于  $We$  和  $Oh$ ,定义发生气动破碎的临界韦伯数,并且根据韦伯数的大小定义多种破碎形式,如袋状破碎、多模态破碎、剪切破碎,应用也较为广泛。借鉴 Roumeliotis 等<sup>[15]</sup>的计算方法,选择 Schmehl 模型。

Schmehl 模型中定义的液滴破碎临界韦伯数  $We = 12 \times (1 + 1.077Oh^{1.6})$ ,对于每种破碎形式分别给出了判断准则和破碎后的粒径如下。

(1) 袋状破碎。

袋状破碎判断准则为

$$12 \times (1 + 1.077Oh^{1.6}) < We < 20 \times (1 + 1.20h^{1.5}) \quad (3)$$

破碎后的液滴颗粒粒径为

$$d_{32} = d_p \left[ 1.5Oh^{0.2} \left( \frac{We}{1 + 1.077Oh^{1.6}} \right)^{-0.25} \right] \quad (4)$$

式(4)中: $d_p$ 为破碎前颗粒粒径; $d_{32}$ 为破碎后颗粒粒径。

(2) 多模态破碎。

多模态破碎判断准则为

$$20 \times (1 + 1.20h^{1.5}) < We < 32 \times (1 + 1.50h^{1.4}) \quad (5)$$

破碎后的液滴颗粒粒径与袋状破碎一致。

(3) 剪切破碎。

剪切破碎判断准则为

$$We > 32 \times (1 + 1.50h^{1.4}) \quad (6)$$

破碎后的液滴颗粒粒径为

$$d_{32,red} = \frac{4d_{32}d_c}{5d_c - d_{32}} \quad (7)$$

式(7)中: $d_{32,red}$ 为剪切破碎后液滴粒径; $d_c$ 为临界破碎状态下液滴最大粒径。

## 1.4 计算模型与设置

以某无增压级风扇部件为例开展计算分析,网格采用 AUTOGRID 进行划分,所有叶片网格拓扑结构为 O4H,分流环采用 C 型网格。所有叶片均采用单通道计算,计算域网格如图 1 所示,总网格量为  $219.5 \times 10^4$ 。此外,通过调节分流环与风扇叶片间距研究分流环位置对内涵进水量的影响,设计另外两个计算模型,并采用相同的网格划分方法。

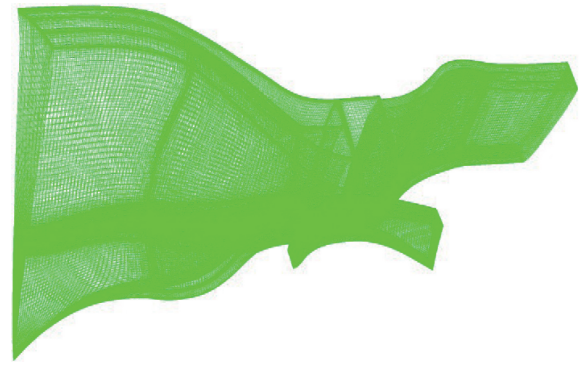


图1 计算域网格

Fig. 1 Computation mesh

对于空气连续相,设为理想气体,进口边界条件给定总温、总压,出口给定静压,温度压力均按照标准大气条件给定。固壁为绝热、无滑移边界条件。对于水滴颗粒离散相,采用拉格朗日方法进行计算,需给定颗粒速度、颗粒位置、颗粒数、颗粒质量流量、颗粒粒径等。结合目前中国试制的喷水装置的喷水速度能力水平,以及发动机吸雨关键工况状态下飞行速度水平,将风扇进口水滴速度  $V_0$  设定在  $10 \sim 250$  m/s 的范围内。各计算点,水滴质量流量均为某一定值。对于水滴撞壁后的运动特性,用法向速度  $V_{pe}$  和切向  $V_{pa}$  速度反弹恢复系数进行表征。

## 2 计算结果与分析

假设水滴颗粒在风扇部件中运动的过程中,撞击到风扇叶片、轮毂等壁面上后完全附着,即法向和切向速度反弹恢复系数均为 0,得到某慢车转速下水滴在风扇部件中的质量流量分布如表 1 所示,并给出了水滴在最小 10 m/s 和最大 250 m/s 初始水滴速度下其在风扇部件中的运动轨迹分别如图 2 和图 3 所示。可以看出,当水滴速度为 10 m/s 时,占总喷水量 85.0% 的水滴将会撞击到风扇叶片上,7.8% 的水能够穿过风扇叶片进入外涵,由于水滴速度较小,在风扇单通道旋转时间内没有水滴能够直接穿过风扇叶片进入内涵;而当水滴速度增大到 250 m/s 时,撞击到风扇叶片上的水量降低为

23.1%，穿过风扇叶片进入外涵的水量增大到61.8%，并有9.1%的水滴能够穿过风扇叶片直接进入内涵。

从表1给出的不同水滴速度下的雨水流量分布可以看出，随着水滴速度的减小，撞击在风扇叶片、轮毂等壁面上的雨水流量基本呈增大趋势。当雨水撞击到壁面上时，受雨水撞击角度、速度以及壁面物理特性的影响，水滴可能会发生击溅、反弹或者铺展等。受离心力等作用的影响，撞击到风扇叶片上的大部分水滴将会形成水膜，在风扇离心力的作用下沿径向运动，进而基本上全部被甩入外涵道，导致内涵进水量大幅降低，这将不利于内涵进水量达到高空飞行中遭遇雨水的实际情况。

表1 不同水滴速度下的水滴流量分布 ( $V_{pa} = V_{pe} = 0$ )

Table 1 Water flow distribution at different water speeds ( $V_{pa} = V_{pe} = 0$ )

水滴速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	水滴流量分布/%					
	风扇叶片	轮毂	机匣	分流环	外涵	内涵
10	85.0	4.2	3.0	0	7.8	0
50	87.4	7.7	3.9	0	1.0	0
100	46.8	8.1	5.6	0.5	38.8	0.2
150	31.2	6.9	4.0	1.5	53.9	2.5
200	30.8	5.0	2.7	0.9	57.2	3.4
250	23.1	3.0	2.1	0.9	61.8	9.1

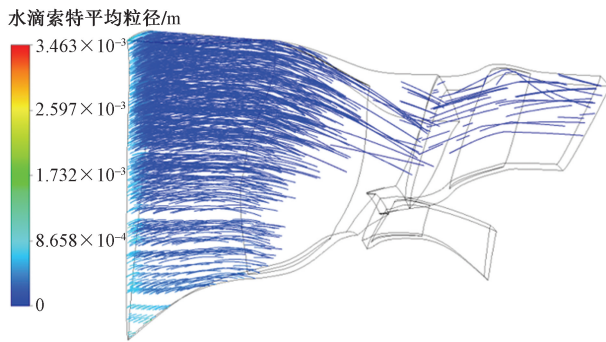


图2 水滴运动轨迹 ( $V_{pa} = V_{pe} = 0, V_0 = 10 m/s$ )

Fig. 2 Water particle trajectory ( $V_{pa} = V_{pe} = 0, V_0 = 10 m/s$ )

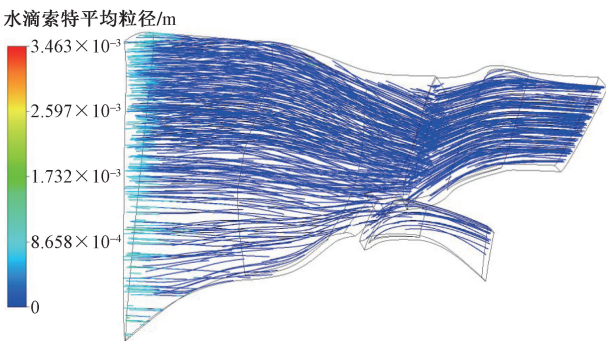


图3 水滴运动轨迹 ( $V_{pa} = V_{pe} = 0, V_0 = 250 m/s$ )

Fig. 3 Water particle trajectory ( $V_{pa} = V_{pe} = 0, V_0 = 250 m/s$ )

为定量研究雨水在内外涵道的分离情况，参考Nikolaidis等<sup>[9]</sup>的计算方法，将水滴撞击壁面后的切向和法向恢复系数均设为0.3，得到在最小10 m/s和最大250 m/s初始水滴速度下其在风扇中的运动轨迹分别如图4和图5所示，其内外涵进水量占总喷水量的比例如表2所示。可以看出，大部分水滴在运动过程中除受离心力外，还会因为撞击风扇叶片、轮毂等壁面改变其运动轨迹，进而被排出到外涵道，只有一小部分雨水进入内涵道，如当水滴速度为10 m/s时，统计发现99.2%的水滴将会进入外涵道，内涵进水量仅占总雨水流量的0.8%。随着喷水速度的增大，内涵进水量逐渐增大，当喷水速度增大到250 m/s时的内涵进水量达总雨水流量的15.3%，为10 m/s时的19.1倍。

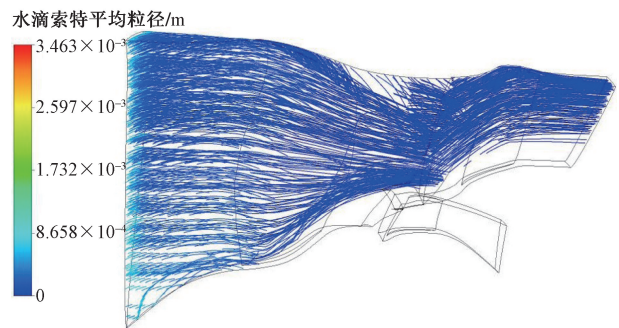


图4 水滴运动轨迹 ( $V_{pa} = V_{pe} = 0.3, V_0 = 10 m/s$ )

Fig. 4 Water particle trajectory ( $V_{pa} = V_{pe} = 0.3, V_0 = 10 m/s$ )

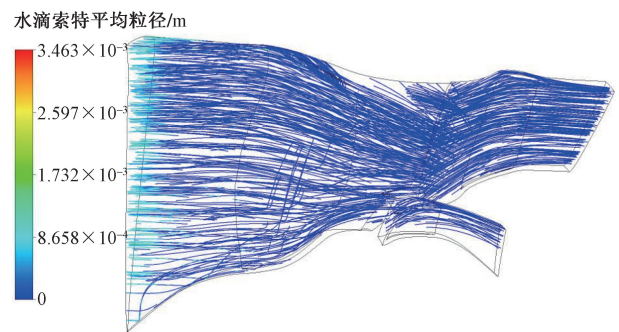


图5 水滴运动轨迹 ( $V_{pa} = V_{pe} = 0.3, V_0 = 250 m/s$ )

Fig. 5 Water particle trajectory ( $V_{pa} = V_{pe} = 0.3, V_0 = 250 m/s$ )

表2 不同水滴速度下内外涵进水量占总喷水量的比例 ( $V_{pa} = V_{pe} = 0.3$ )

Table 2 Water flow ratio of inner and bypass duct under different water speeds ( $V_{pa} = V_{pe} = 0.3$ )

水滴速度/ ( $m \cdot s^{-1}$ )	进水量/%	
	内涵	外涵
10	0.8	99.2
50	1.1	98.9
100	6.3	93.7
150	14.8	85.2
200	15.2	84.8
250	15.3	84.7

研究发现,分流环与风扇叶片间距对内涵进水量影响较大,为对其进行量化,将分流环位置分别由其与风扇叶片的距离为参考间距  $L_{ref}$  前移到 81% 间距和后移到 158% 间距位置处,得到如图 6 所示的不同分流环位置处水滴速度对内涵进水率(内涵进水量与风扇进口水量之比)的影响计算结果。从图 6 中可以看出,在同一水滴速度下,随着分流环与风扇叶片间距的减小,内涵进水率增大,且同等间距变化比例下,进水量增大的比例增大;不同分流环位置处,当水滴速度相对较小时,内涵进水率随风扇进口水滴初始速度的增大而增大,但当水滴速度继续增大,内涵进水量基本随着分流环与风扇叶片的间距的增大先减小再保持不变最后增大。

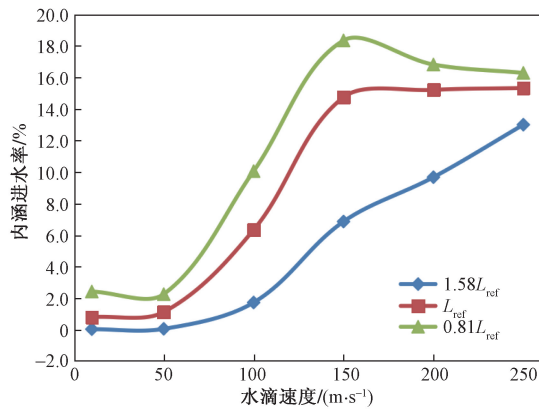


图 6 不同分流环位置处的内涵进水量

Fig. 6 Water ingested to inner duct at different positions of splitter

图 7 给出了某慢车状态转速以及转速分别变为该参考转速  $N_{ref}$  的 78% 和 111% 时,不同风扇进口水滴速度下的内涵进水率。可以看出,在同一水滴速度下,随着转速的增大,风扇对水滴的离心作用增加,更多的水滴被甩向外涵,导致内涵进水率减小;不同转速下,内涵进水率随风扇进口水滴初始速度的变化趋势是一致的,基本随着水滴速度的增大先增大后保持不变甚至略微减小。当水滴速度处于较小水平时,随着水滴速度的增大撞击在风扇叶片上的水滴减少且直接穿过风扇叶片进入内涵道的水滴增多,因此内涵进水率增大;当水滴速度增大到能够在一个通道旋转时间内通过风扇叶片时,内涵进水率达到最大;此后,随着水滴速度的增大,其与气流的相对速度也增大,水滴气动破碎愈加剧烈,粒径也愈小,而小水滴的随流性更好,更易于离心到外涵道,因此内涵进水量减小。

### 3 讨论

发动机吸雨适航条款的符合性可通过地面整

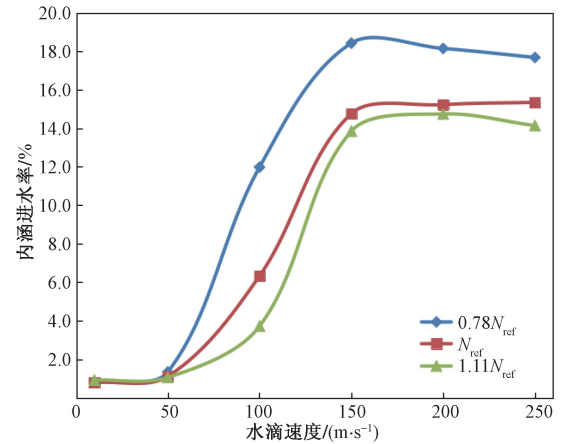


图 7 不同转速条件下的内涵进水量

Fig. 7 Water ingested to inner duct at different rotational speeds

机吸雨试验进行验证。而在试验前,需要通过试验和理论分析确定发动机吸雨关键点,即发动机工作包线内由于吸雨导致其工作性能裕度(如喘振和失速裕度、燃油控制降转裕度和燃烧室熄火裕度等)最低的点,然后在该点进行发动机吸雨试验以验证其足以经受极度降雨条件。试验中,要求地面试验条件的严苛度不低于高空飞行中真实遭遇情况<sup>[16]</sup>。研究发现,发动机吸雨关键点一般发生在慢车工况,此时发动机工作在低转速及高飞行速度状况下,将会发生较为显著的吸雨聚集效应,对发动机性能影响也较大。在发动机吸雨需要重点评估的关键工况点,飞机飞行速度可能会超过 200 m/s。理论上来说,为了模拟发动机在高空飞行中遭遇降雨的情况,地面整机吸雨试验中采用的喷水装置的喷水速度也应达到这一水平。但是,由于当前技术的限制,为了喷洒满足附录 B 合格审定标准的雨水浓度与雨滴粒径的水滴,将无法使喷水速度同时满足这一要求。可以推断,在地面整机吸雨试验中,即使喷水装置喷洒的水滴浓度满足适航规章附录 B 规定的合格审定标准大气雨水浓度要求,如果喷水速度较低,发动机内涵进水量仍将低于高空实际飞行遭遇情况。对此,可通过增大喷水浓度的方式进行补偿,但是这同时也会更加恶化风扇部件的工作性能,并可能导致推力的降低进而不满足适航规章对于吸雨后不会导致发生不可接受的推力或功率损失的要求。因此,水滴速度对其在涡扇发动机中运动特性及内涵道进水量影响,使得地面整机吸雨试验中对喷水装置的喷水能力提出了较高的要求。在发动机吸雨适航符合性验证试验前,需要进一步探索喷水装置设计技术,提高喷水速度,并综合评估增大喷水量对发动机性能带来的不利影响。

## 4 结论

依据航空发动机适航规章吸雨条款要求,定量研究了水滴速度对雨水在内外涵道的分离等运动特性的影响,获得发动机内涵进水量。得出如下结论。

(1)随着水滴速度的减小,撞击在风扇叶片等壁面上的雨水流量增大,且没有水滴能够穿过风扇叶片直接进入内涵,当水滴速度为 250 m/s 时,内涵进水量占总雨水流量的 15.3%,为 10 m/s 时的 19.1 倍。

(2)在同一水滴速度下,随着分流环与风扇叶片间距的减小,内涵进水率增大,且同等间距变化比例下,进水量增大的比例增大;不同分流环位置处,随着水滴速度和分流环与风扇叶片间距的增大,内涵进水率变化趋势由一致增大变化为先减小后增大。

(3)在同一水滴速度下,随着转速的增大内涵进水率减小;不同转速下,内涵进水率随风扇进口水滴速度的变化趋势是一致的,基本随着水滴速度的增大先增大后保持不变甚至略微减小。

(4)水滴速度对其在涡扇发动机中运动特性及内涵道进水量影响,使得地面整机吸雨试验中对喷水装置的喷水能力提出了较高的要求。

### 参 考 文 献

- [1] Mathioudakis K, Roumeliotis I. Evaluation of interstage water injection effect on compressor and engine performance[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2006, 128: 849-856.
- [2] Roumeliotis I, Mathioudakis K. Water ingestion effects on compressor stage operation[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 2007, 129: 778-784.
- [3] Yang L, Zheng Q, Lin A Q, et al. Unsteady performance and thermodynamic analysis of aero engine compressor at different water ingestion conditions[J]. *International Journal of Energy Research*, 2020, 44(3): DOI:10.1002/er.5389.
- [4] Federal Aviation Administration. CFR part 33 airworthiness standards; aircraft engines[S]. Washington, D. C. : Federal Aviation Administration, 1998.
- [5] European Aviation Safety Agency. Certification specifications and acceptable means of compliance for engines; CS-E amendment 4 [S]. Cologne; European Aviation Safety Agency, 2015.
- [6] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定: 33R2[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- [7] Civil Aviation Administration of China. Airworthiness regulations for aircraft engines: 33R2[S]. Beijing; Civil Aviation Administration of China, 2011.
- [7] 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.
- [8] Advisory Group for Aerospace Research and Development. Recommended practices for the assessment of the effects of atmospheric water ingestion on the performance and operability of gas turbine engines: 332[R]. Neuilly-sur-Seine; Advisory Group for Aerospace Research and Development, 1995.
- [9] Nikolaidis T. Water ingestion effects on gas turbine engine performance[D]. Cranfield; Cranfield University, 2008.
- [10] Day I, Williams J, Freeman C. Rain ingestion in axial flow compressors at part speed [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2008, 130: 011024.
- [11] 张琦, 朱焕娜, 孙科, 等. 航空发动机吸雨试验中进气道内水滴粒径变化 [J]. *科学技术与工程*, 2022, 22(18): 8133-8138.
- Zhang Qi, Zhu Huanna, Sun Ke, et al. Variation of water droplet size in inlet of aeroengine rain ingestion test [J]. *Science Technology and Engineering*, 2022, 22(18): 8133-8138.
- [12] 刘奥铨, 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 Aocheng, Zheng Qun, Wang Jingyi, 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.
- [13] Das K, Hamed A, Basu D. Droplet trajectories and collection on fan rotor at off-design conditions [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo Power for Land, Sea and Air. Barcelona; ASME, 2006; DOI:10.1115/GT-2006-91214.
- [14] Lee C H, Reitz R D. An experimental study of the effect of gas density on the distortion and break up mechanism of drops in high speed gas stream [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2000, 26: 229-244.
- [15] Roumeliotis I, Alexiou A, Aretakis N, et al. Development and integration of rain ingestion effects in engine performance simulations [C]//Proceedings of ASME Turbo Expo: Turbine Technical Conference and Exposition. Düsseldorf; ASME, 2014; DOI:10.1115/GT2014-26556.
- [16] Federal Aviation Administration. Advisory circular-turbine engine power-loss and instability in extreme conditions of rain and hail: 33.78-1[S]. Washington, D. C. : Federal Aviation Administration, 2000.