

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.06.048

吸雨对航空发动机及其压缩部件的影响研究

赵文燕, 曹传军

(中国航发商用航空发动机有限责任公司, 上海 200241)

摘要:航空发动机飞行中遭遇暴雨等恶劣天气不可避免,大量雨水侵入发动机会诱发压气机失速、喘振,发动机推力降低甚至熄火停车。雨水对航空发动机性能的影响十分复杂,目前人们对很多机制性问题认识不足。阐述当前国内外吸雨理论和试验研究成果,对雨滴在发动机内部的运动机制进行了介绍,包括雨滴的蒸发、碰撞、破碎、附着在壁面形成水膜等过程,分析不同含水量、雨滴直径对发动机整机尤其是压缩部件性能的影响,指出该领域目前面临的难点和挑战,为开展发动机吸雨研究提供参考。

关键词:航空发动机;压气机;多相流;吸雨;吞水;性能

中图分类号:V231.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)06-0262-07

Research on Effects of Rain Ingestion on Aero-engine and Its Compression Components

ZHAO Wenyan, CAO Chuanjun

(China Aerospace Development Commercial Aero-engine Corporation, Shanghai 200241, China)

Abstract: Heavy rainfall and other adverse weather conditions in flights inevitably encountered by aero-engine causing massive rainwater intrusion into the engines may lead to compressor stall, surge, engine thrust reduction and even engine stop, and the influence of rainwater on the performance of aero-engines is varied and complex, leaving many mechanistic issues yet to be clearly recognized. This paper reviews the current theoretical and experimental research results at home and abroad. The mechanism of droplet movement inside the engine is introduced, including the processes of evaporation, break-up, fragmentation and the forming of water film by the interaction with the wall., the effects of different water concentration and droplet diameter on engine machine especially compressor performance is analyzed, and the difficulties and challenges in this field are indicated, providing a reference for the research of rain ingestion.

Keywords: aero-engine; compressor; multiphase flow; rain ingestion; water ingestion; performance

0 引言

随着航空技术的飞速发展,飞机在恶劣天气下的飞行安全受到越来越多人的重视。飞机在强降雨天气下降落时,发动机转速低,空气流量小,工质含水量大,这一系列因素不仅会引起压缩部件的性能恶化、喘振,甚至导致发动机熄火以及硬件损坏。1977年,一架搭载有两台PWJD-9D发动机的DC-9客机在穿越大量积雨云时吸入大量雨水,压气机喘振,最终坠机^[1]。2002年印度尼西亚装有两台CFM56-3发动机的波音737客机在即将降落时遭遇特大雨/雹天气,发动机熄火停车^[2]。在21世纪初,由于吸雨导致发动机停车的事故仍在发生。发动机吸入雨水后,最先受到影响的部件是风扇增压级和高压压气机。风扇对内外涵水量分配有十分重要的影响,其比例取决于涵道比和

风扇工作转速,涵道比越大,工作转速越高,进入内涵的水量越少^[3]。对于商用大涵道比涡扇发动机吸入雨水后,在空中慢车等吸雨严苛状态点,通过打开中介机匣处VBV可排出大部分进入高压压气机的雨水。雨水在风扇增压级和高压压气机中蒸发吸热有利于压缩过程,从而提高效率,但雨水在压气机叶片上附着、对叶尖间隙处流场的干扰以及雨滴撞击叶片产生的激振力同时也会造成其性能恶化^[4]。

国内外学者对发动机由于吸雨而导致性能恶化的问题展开了大量理论及实验研究,但雨水在压气机内部的流动规律,以及空气-雨滴相互作用所导致的流动不均匀性进而造成压气机性能损失和流动失稳的原理尚不十分清晰。本文介绍了雨滴在发动机内部的运动机制,分析了不同含雨量、雨滴直径等对发动机及其压缩部件性能的影响,为发动机吸雨试验和仿真方法研究提供参考。

第一作者简介:赵文燕(1997—),女,河南平顶山人,硕士,研究方向为压气机设计与试验,2072994890@qq.com。

1 吸雨验证要求

吸雨导致发动机空中停车会引发灾难性事故,因此美国联邦航空局(FAA)和欧洲航空安全局(EASA)均规定航空发动机在投入使用前必须进行地面吞水考核实验。MORAVEC 等^[5]对世界范围内的降水率和雨滴直径的大小进行了分析,将单位质量干空气中液态水含量(liquid water content,LWC)等于 20 g/m^3 定为发动机吸雨试验标准值,该值随后被 FAA 和 EASA 相继采纳。

我国在 2011 年颁布的航空发动机适航规定 CCAR-33 中对民用航空发动机吸雨试验标准做出了明确要求^[6]。根据大气中雨水情况详细规定了吸雨试验中的雨水浓度(表 1)、雨滴尺寸(表 2)和喷水位置,要求 50% 的雨水喷入发动机进口 $1/3$ 的扇形面积内。试验通过的标准为发动机在持续 3 min 的吸雨周期内,压气机不发生无法恢复的失速、喘振,发动机不降转、熄火、产生严重的推力损失和机械损坏。

表 1 合格审定标准的大气雨浓度

海拔/m	雨水含量/(g/m^3)
0	20.0
6 100	20.0
8 020	15.2
9 970	10.8
11 980	7.7
14 020	5.2

表 2 合格审定标准的大气雨滴直径分布

雨滴直径/mm	总雨水含量分布/%
0~0.49	0
0.5~0.99	2.25
1.00~1.49	8.75
1.50~1.99	16.25
2.00~2.49	19.00
2.50~2.99	17.75
3.00~3.49	13.50
3.50~3.99	9.50
4.00~4.49	6.00
4.50~4.99	3.00
5.00~5.49	2.00
5.50~5.99	1.25
6.00~6.49	0.50
6.50~7.00	0.25

2 雨滴运动机制研究

2.1 雨滴与气流相互作用

航空发动机的吸雨过程本质上属于气液两相流动的范畴,雨滴进入压气机后通过蒸发作用持续与气流进行传热传质,由于气体在压气机内的流动是不断增温、增压的过程,所以雨滴蒸发程度与压气机级数、转速相关。ZHENG 等^[7]建立了压气机湿压缩过程模型,指出水滴在长度约 1 m 的轴流压气机中停留的时间约为 0.01 s,直径小于 $20 \mu\text{m}$ 的水滴颗粒在压气机流道中可以得到充分蒸发。

雨滴进入压气机后在气流剪切力的作用下发生变形和破碎,大量学者用表征黏性力与表面张力大小的无量纲韦伯数 We (式(1))来衡量雨滴是否破碎^[8]。

$$We = \frac{\rho \Delta u^2 d_p}{\sigma} \quad (1)$$

式中: ρ 为气流密度; Δu 为气流与雨滴速度差; d_p 为雨滴直径; σ 为雨滴表面张力。

LIU 等^[9]将雨滴破碎形态分为帽状破碎和剪切破碎(图 1)。VARGA 等^[10]根据韦伯数的范围将液滴破碎模式细分为 3 种,判断当 $12 < We < 80$ 时,水滴发生帽状破碎;当 $We > 80$ 时,水滴发生剪切破碎;当 $We > 350$ 时,水滴将发生震荡破碎。研究表明,帽状破碎多发生在较低的气流速度和液滴速度下且破碎前需要较长的变形时间。发动机在慢车工况下吸入雨滴时,液滴主要发生剪切破碎。

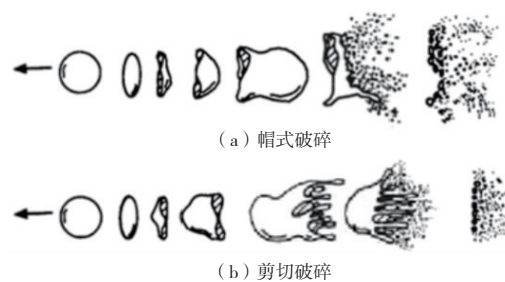


图 1 液滴破碎类型

雨滴在风扇及压气机流道中运动时,不仅会受到惯性力及重力作用,还会受到气流拖曳力作用,其中离心力对雨滴运动影响最大。AGARD 报告也表示,直径 $70 \mu\text{m}$ 液滴的大部分撞击到叶片表面上,而直径为 $10 \mu\text{m}$ 的液滴大部分随气流流出。

2.2 雨滴与发动机壁面相互作用

航空发动机吸雨过程中,当雨滴以不同入射

速度、角度、尺寸的液滴撞击发动机壁面时,碰撞结果也不同^[11]。REIN^[12]指出水滴撞击薄膜表面和固体壁面时具有相似的飞溅特征。RIOBOO等^[13]定性分析了不同直径液滴在不同表面粗糙度固体壁面上的碰撞特性,总结出6种碰撞结果,包括壁面附着、诱导飞溅、冠状飞溅、破碎、部分反弹和完全反弹(图2),航空发动机吸雨情况下,由于液滴和固壁之间存在很大的相对速度,液滴将多发生飞溅情况。

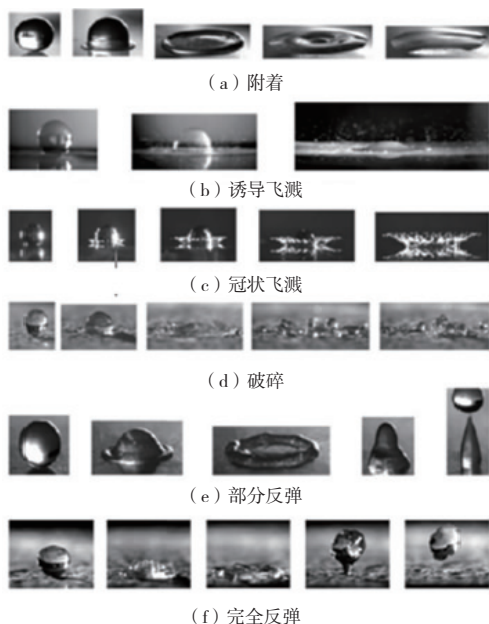


图2 液滴与固体壁面碰撞结果

3 吸雨对发动机整机及压缩部件的影响研究

3.1 吸雨对发动机整机的影响研究

飞机飞行过程中,进气道前部分空气在唇口处外溢,气流进入发动机的区域比几何入口区域要小,如图3所示。而对于质量较大的雨滴,基本不受外溢影响,其有效捕获大于气流捕获面积,这种现象被称为Scoop效应^[14]。Scoop效应会导致吸入发动机内气流的含水量大于大气含水量,当发动机处于慢车工况时,Scoop效应加剧,所以发动机在慢车工况更易受到吸雨影响。

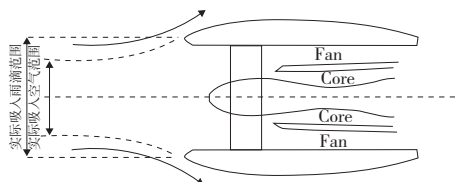


图3 Scoop效应

目前航空发动机整机吸雨研究大多采用试验手段,典型吸雨试验台如图4所示。通过发动机唇口前的喷水装置喷入所需水量,水滴的尺寸和喷水位置均可调整。AGARD报告中普惠发动机吞雨试验结果表明,约60%的雨水会进入发动机外涵,超过70%的水撞击到风扇叶片表面形成水膜,并向叶片尾缘处移动并形成新雨滴进入流道,新雨滴直径可以达到2.5 mm。ROUMELIOTIS等^[15]对大涵道比涡扇发动机风扇截面后的雨水分布进行了计算,结果如图5所示,进入核心机的雨水仅有22%。



图4 吸雨试车台

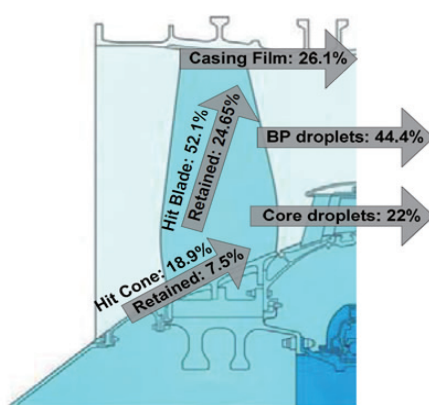


图5 发动机内水量分布

当发动机吞水量较大,雨滴进入燃烧室使燃料燃烧不充分,耗油率增加,发动机输出功率和热效率降低。2019年,中国航发的邢洋等^[16]开展了涡扇发动机整机吞水试验,火焰颜色随吞水量的增加由紫色变为红黄色。这是由于吸入蒸气导致进口氧气含量减小,油气比偏向富油燃烧方向。

为了研究吸雨对发动机的影响,国内外学者均对发动机整机吸雨性能计算模型开发进行了尝试。MURTHY等^[17-19]根据飞机工作性能变化记录建立了发动机吸雨的稳态、瞬态模型,发现吞雨量较大时,发动机性能下降较为严重;而当温度升高时,发动机性能又得到了改善。此外,吞入雨水会对发动机排气、喷油等瞬态变化过程造成一定

的影响。ROUMELIOTIS 等^[20]在 PROOSIS 仿真平台中开发了发动机模型。研究表明,燃烧室水喷射结果为热效率降低,输出功率增加,但发动机性能的提升是以喘振裕度的损耗为代价,喘振裕度的减少与水/蒸汽的注入量有显著关系。

综上所述,发动机吸入雨水后整机的性能和可操作性均会受到影响。对于商用大涵道比涡扇发动机,吸入的雨水大部分被甩入外涵,仅有约 20% 的雨滴进入核心机,且基本可以在高压压气机中完全蒸发。雨滴在压缩部件中蒸发冷却会降低进口温度,增加空气密度和质量流量,压缩部件功率消耗逐渐增加,净功率输出上升^[21],增大发动机推力,但过量的雨水会对压缩部件产生不利影响,此原理将在 3.2 节进行详细分析。同时随着吸水量的增加,雨水未能在压缩部件完全蒸发而进入燃烧室时,燃烧效率降低,会造成整机推力损失,甚至熄火导致灾难性事故。

3.2 吸雨对压缩部件的影响研究

吸雨对压气机性能的影响研究主要涉及空气动力学、热力学和结构力学 3 个学科。空气动力学是以压气机级性能来描述的,水吸入会影响压气机的压比、效率和稳定性。从结构力学角度来说,雨滴附着在叶片上会形成水膜,增加压气机转子的转矩,且雨滴高速撞击叶片会增加叶片所受激振力,从而诱发颤振、旋转失速等^[22]。从热力学角度来说,水进入压气机内部形成两相流动过程,空气和雨滴之间的传热传质会改变工质的热力学性质,引起压气机内部温度畸变。吸雨对压缩部件的影响与吸雨量和雨滴尺寸相关。

1) 低吸雨量、小雨滴对压气机性能的影响

在较低的吞水量、雨滴尺寸较小时,压气机中蒸发效应占主导,此时压气机性能反而得到改善,压比增高,其效果与工业燃气轮机的湿压缩技术相似。WHITE 等^[23]基于液滴蒸发和平均线计算对较小吸水量下的一台十二级轴流压气机湿压缩过程进行了模拟。如图 6 所示,随着吞水量增加,压气机特性线逐步向较高的质量流动和压比转变,特性变得更陡。

DAY 等^[24]在其试验研究中也得到了相似的结论,当吞入液态水的比例在 2%~4% 的条件下,压气机的气动性能没有发生明显恶化。ROUMELIOTIS 等^[25]在一台九级轴流压气机上进行了吞水量为 1%、不同液滴直径的吞水试验,压气机性能变化如图 7 所示。压气机流量压比均增

大,特性线向右上方移动,直径 5 μm 的水滴蒸发更好,特性线变化幅度更大。以上研究均证实了在合适的条件下,吸雨对压气机性能会产生一定的改善作用。

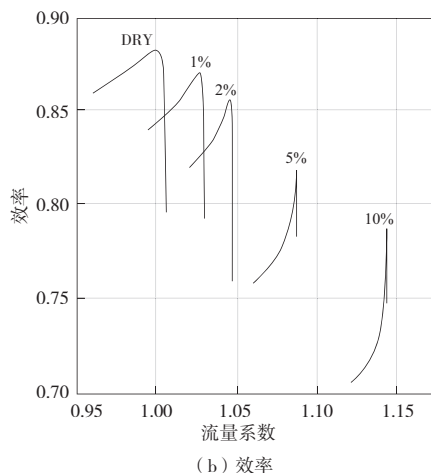
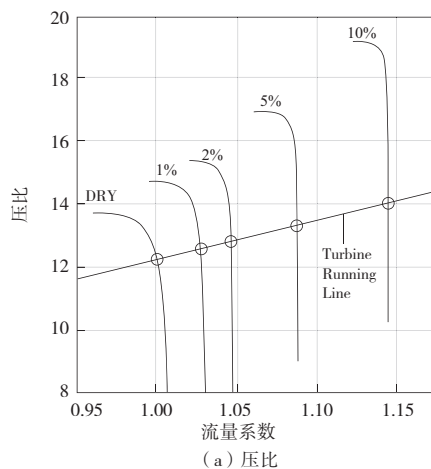


图 6 不同吞水量压气机特性线变化

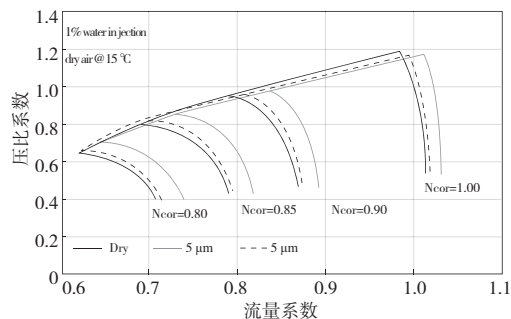


图 7 吸水引起的压气机特性线变化

2) 高吸雨量、大雨滴对压气机性能的影响

当压气机吞水量较大,且雨滴直径也相对较大(约 100 μm 以上)时,压气机的气动性能会迅速恶化。2005 年, WILLIAMS^[26]通过改变喷水量和液滴颗粒大小对一台低速四级轴流压气机进行

了大量计算和实验。压气机压比的变化与喷水量之间不是简单的线性关系。如图 8 所示,当喷水量超过 4% 后,压比会随喷水量增加而迅速下降。与此同时,叶片上水膜受离心力作用将增大压气机的耗功,喷水量越大,造成的叶片额外转矩越大。

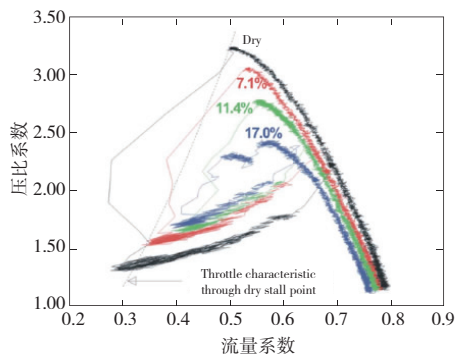


图 8 不同含水量下压比特性

WILLIAMS 等^[27]得到叶片吸力面的水膜分布如图 9 所示,大量的水膜聚集在叶尖间隙处影响了二次涡流,转子尖端附近的正常流动模式被打乱。WILLIAMS 等还发现,只有当失速首发级受到喷水的不利影响时,喘振线才会下移。其研究的四级轴流压气机失速首先发生在第一级,相同喷水量下,轴向动量较大的雨滴会直接通过第一级而未被甩至机匣区域,其喘振线不受影响;而低轴向动量的雨滴对第一级转子叶尖间隙处流动影响较大,失速提前发生,喘振线下移。

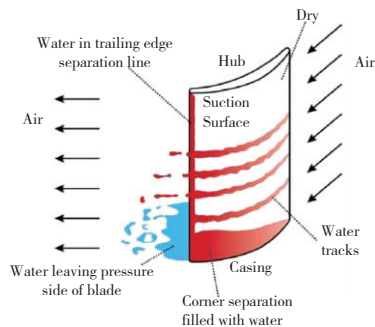


图 9 叶片吸力面的水膜分布

NIKOLAIDIS 等^[28]通过数值计算分析了直径为 1 mm、不同吞水量的液滴对单级轴流压气机的影响,发现吸入的水量越大,叶片转速越低,水膜越厚;当转速降低 80% 时,水膜厚度增加 64%。水膜形成会改变叶型轮廓,且空气剪切力和雨滴动量使水膜的波浪状特征发生变化,在叶片的表面引入额外的“表面粗糙度”,从而导致阻塞增加,降低叶片作功能力。LIU 等^[29]通过试验发现

液滴撞击转子前缘后会在叶尖和机匣壁面之间形成液膜并沿流动方向延伸至叶片中部,当压气机逐渐被节流到更小的流量时,水膜后边缘向前移动并发生肉眼可见的波动,直到水膜从前缘溢出,压气机发生失速。

国内也对压气机吸雨进行了大量试验和仿真研究,中国科学院的张宏伟^[30]搭建雨雾模拟器,通过试验发现在大间隙情况下,少量液态水吸入会增强叶尖泄漏流,导致压气机失速提前发生,但当水量增大到一定程度,反而抑制了叶尖泄漏流,推迟失速发生。哈尔滨工程大学也在燃气轮机湿压缩领域开展了大量试验研究和数值模拟^[31],发现叶尖喷水在减弱流动分离、降低叶尖泄漏流的强度和流动损失、提高压气机通流能力、抑制失速方面有很大潜力。

雨滴对压气机性能的不利影响可以总结为三个方面,一是雨滴撞击压气机叶片会产生额外的附加转矩,压气机耗功增加;二是压气机叶尖流动复杂,而雨滴在离心力的作用下堵塞在叶尖间隙附近会干扰原有的流场,压气机性能对叶尖附近流场十分敏感;三是雨滴附着在压气机叶片表面会增大其表面粗糙度,致使边界层增厚,发生堵塞。压气机吸雨后的性能变化随吸雨量和雨滴尺寸的增加存在一个迅速恶化的拐点。

3) 压气机吸雨性能预测程序开发

目前,关于干空气下压气机特性计算的方法已经较为成熟,如级迭加法和基元叶栅法等^[32]。但针对压气机吸雨性能计算模型的研究非常匮乏,国内尤其罕见。HORLOCK^[33]考虑了进口雾化、温度降低和液滴在压气机的前几级持续蒸发,开发了一种预测压气机湿压缩性能的分析方法,认为进口雾化会导致压缩机后几级接近失速点。压气机吸雨预测模型的构建不仅需要考虑雨滴蒸发造成工质热力学性质的改变,还需要综合考虑雨滴与叶片表面相互作用所带来的损失。目前关于压气机吸雨计算模型的研究较少,考虑因素不够全面,缺乏与试验结果的对比,计算结果与实际情况存在偏离,无法量化。

4 研究难点及展望

1) 由于发动机吸雨耦合了空气动力学、结构力学和热力学 3 个学科,雨滴在发动机内部的运动涉及气液两相流动和与壁面的相互作用。雨滴蒸发对压气机性能的正面影响与雨滴撞击叶片并附着在叶片表面造成的负面影响相互杂糅。现有

的 CFD 技术和开发的预测模型难以充分考虑所有因素,且难以评估雨滴侵蚀叶片所造成的性能退化。

2) 由于商用航空发动机吸雨适航要求为持续吸雨,且当前的喷水试验装置控制调节速率慢,因此各大航空发动机公司如 GE、PW 和 RR 虽然均建立了相应的吸雨验证平台,但大多开展的是稳态吞水试验,研究不同吞水量对整机性能的影响,发动机过渡态吞水试验较为匮乏,吸雨机制研究较少。

3) 发动机吸雨试验中,压气机出口气体和液体混合在一起,使用传统的温度传感器直接测量气体温度会受到液体传热影响^[34],此时温度测量误差较大,需重新考虑效率计算方法。除此之外,由于转子速度快,目前仍然没有定量测量叶片表面及叶尖间隙水膜分布的测试方法。

5 结语

针对发动机吸雨情况,对雨滴的运动机制以及雨滴对整机和压缩部件的性能影响进行了评述,总结如下结论。

1) 雨滴在发动机的运动过程中会持续发生蒸发、碰撞和破碎。对于商用大涵道比涡扇发动机,约 60% 的液态水会在离心力的作用下被甩入发动机外涵道。当吸入雨量较多时,核心机中未完全蒸发的雨水进入燃烧室会降低燃烧效率,同时使各部件共同工作线重新匹配,发动机的性能发生变化。

2) 当吸入雨水含量较低(4% 以下),雾化良好,液滴直径在几十微米附近时,压气机中的湿压缩效应占主导,压气机压比升高,耗功降低,发动机输出功率和经济性提高。

3) 当吸雨量和雨滴直径加大(100 μm 以上)时,雨滴在压气机叶片表面形成水膜,不仅使叶片转矩增加,还会改变叶片轮廓,增加叶片表面粗糙度,导致附面层变厚,产生堵塞。同时水膜在离心力的作用下向机匣移动,大量水膜堆积在叶尖间隙附近影响叶尖泄漏流,压气机气动性能迅速恶化,喘振边界线下移。

参考文献:

- [1] KISSEL G J. Rain and hail extremes at altitude[J]. Journal of Aircraft, 1980, 17(7): 464-467.
- [2] 陈光. 雨水对飞机发动机的影响[J]. 航空发动机, 2013, 39(4): 1-4.
- [3] 薛文鹏, 宋江涛, 张琦. 涡扇发动机内外涵道水量分布比例数值仿真[J]. 航空发动机, 2022, 48(3): 7-12.
- [4] 杨璐, 郑群, 罗铭聪. 吸雨对轴流压气机压缩失稳机

制的影响研究[J]. 推进技术, 2023, 44(2): 70-81.

- [5] MORAVEC B, PATNOE M, MORAVEC B, et al. Recommended values of rain and hail concentrations to be considered in the design of turbine engines [C]// 1997 World Aviation Congress. Anaheim, CA. Reston, Virginia: AIAA, 1997: 5655.
- [6] 中国民用航空局. CCAR-33-R2 航空发动机适航规定[S].
- [7] ZHENG Q, SUN Y F, LI S Y, et al. Thermodynamic analyses of wet compression process in the compressor of gas turbine [J]. Journal of Turbomachinery, 2003, 125(3): 489-496.
- [8] 王梓伟, 罗铭聪, 王静宜, 等. 多级轴流压气机吸雨性能变化的数值研究[J]. 热能动力工程, 2021, 36(11): 57-63, 71.
- [9] LIU H M, ALTAN M. Science and engineering of droplets: fundamentals and applications [J]. Applied Mechanics Reviews, 2002, 55(1): B16.
- [10] VARGA C M, LASHERAS J C, HOPFINGER E J. Initial breakup of a small-diameter liquid jet by a high-speed gas stream [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2003, 497: 405-434.
- [11] 白杰, 陈岩康, 傅文广, 等. 吞雨对航空发动机风扇气动性能的影响[J]. 中国民航大学学报, 2021, 39(3): 49-55.
- [12] REIN M. Phenomena of liquid drop impact on solid and liquid surfaces [J]. Fluid Dynamics Research, 1993, 12(2): 61-93.
- [13] RIOBOO R, TROPEA C, MARENGO M. Outcomes from a drop impact on solid surfaces [J]. Atomization and Sprays, 2001, 11(2): 12.
- [14] VENKATARAMANI K, MCVEY L. Scoop effects in inclement weather operation [C]// 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada. Reston, Virginia: AIAA, 2006: 207.
- [15] ROUMELIOTIS I, ALEXIOU A, ARETAKIS N, et al. Development and integration of rain ingestion effects in engine performance simulations [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2015, 137(4): 041202.
- [16] 邢洋, 王常亮, 李兆红, 等. 航空涡扇发动机吞水性能变化[J]. 航空动力学报, 2019, 34(8): 1717-1723.
- [17] MURTHY S. Effect of atmospheric water ingestion on the performance and operability of flight gas turbines [C]// 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit. Lake Buena Vista, FL. Reston, Virginia: AIAA, 1996: 3059.
- [18] MURTHY S, EHRESMAN C. Effects of water ingestion into jet engine [C]// 22nd Aerospace Sciences Meeting. Reno, NV. Reston, Virginia: AIAA, 1984: 542.
- [19] MURTHY S. Effect of heavy rain on aviation engines [C]// 27th Aerospace Sciences Meeting. Reno,

- 收稿日期:2024-03-29

- [17] 李晓峰,周世新. 长大平车车体钢结构模态频率优化方法[J]. 铁道机车车辆,2024,44(5):80-87.
- [18] 刘贝尔. 铁道客车车体模态提升方案设计及关键参数优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2023.
- [19] 田永康,龚运息,邹平,等. 某型汽车滑移门灵敏度分析与多目标轻量化设计[J]. 机械强度,2024,46(1):122-128.
- [20] 杜子学,化杨,文孝霞,等. 基于隐式参数化模型的地铁车体轻量化设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2024,43(3):116-120,134.

收稿日期:2023-12-05