

民用大涵道比涡扇发动机 吸雨能力评估的方法研究

A Method for Estimating Rain Ingestion Effect on High Bypass Ratio Turbofan Engine Performance

王春晓 邓 潇 / Wang Chunxiao Deng Xiao

(中航商用航空发动机有限责任公司, 上海 201108)

(AVIC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 201108, China)

摘 要:

从发动机吸雨后性能改变的基本原理出发,建立了部件气动热力损失、机械损失和工质热力学通用模型,借鉴适航咨询通告初步定义了关键吸雨工况及水含量。基于商用性能分析软件,对一个大涵道比9的涡扇发动机各项性能的变化进行了计算与分析,提出了一种定量描述发动机吸雨能力的评估方法。

关键词:民用涡扇发动机;吸雨;适航

[Abstract] Rain ingestion in aero engine could cause compressor surge, combustor blow-out, mechanical damage and occasionally significant thrust lost. The paper analyses the effect of rain ingestion on the engine performance and describes a generalized model to estimate the mechanical, aerodynamic and thermal impact on the engine. These estimates are then used to evaluate the rain ingestion capability of a turbofan engine.

[Key words] Civil Turbofan Engine; Rain Ingestion; Airworthiness

0 引言

飞机在飞行中由于气象条件的变化,导致发动机进口可能吸入大量的雨水。这将会改变压气机、燃烧室、涡轮和喷管的工作状态,并可能造成发动机熄火、喘振、机械损坏,甚至严重的推力损失^[1]。在航空飞行史上曾多次发生由于飞机吸雨导致的严重空难。因此美国联邦航空局(FAA)和欧洲航空安全局(EASA)均颁布了关于吸雨的适航法规,对极端雨量环境下发动机的性能和结构强度完整性提出了安全要求。美国和欧洲的航空工业协会、各发动机制造厂商以及各大高校均开展了许多关于极端雨量环境条件下发动机功率损失和不稳定现象的研究。国内关于航空发动机吸雨问题的研究起步较晚,鲜有针对大涵道比涡扇发动机的相关研究报道。针对大涵道比涡扇发动机在极端雨量环境下发动机性能状态的变化展开研究,提供了一种用于评估发动机吸雨能力的方法,为民用航空发动机针对吸雨相关适航条款的符合性提供了验证

思路。

1 基本原理

1.1 概述

吸雨对发动机的影响通常可以分为三个方面。一是热力学的影响,比如水的蒸发,温度的畸变,气体特性改变等,其中水的蒸发是主要因素。二是气动性能的影响,会带来压比、效率和喘振裕度等方面的变化。三是机械的影响,水的进入导致压气机扭矩增加。^[2]从上述三个方面考虑吸雨对发动机性能的影响。

1.2 部件效率及损失的影响

由于雨水在经过燃烧室后,一般已经完全蒸发,因此此处吸雨状态下液态水的影响只针对压缩部件和燃烧室进行分析。

压缩部件特性一般在标准工况下进行计算或试验得到,所以在进行吸雨情况下的计算时特性需要进行修正,方法如下:

换算转速修正:

$$\frac{N}{\sqrt{\theta}} = \frac{N}{\sqrt{\theta}_{\text{map}}} \sqrt{\left(\frac{\gamma_m R_m}{\gamma_o R_o}\right) \left(\frac{\gamma_o + 3}{\gamma_m + 3}\right)} \quad (1)$$

换算流量修正:

$$\frac{W\sqrt{\theta}}{\delta} = \frac{W\sqrt{\theta}}{\delta_{\text{map}}} \left(\frac{4}{\gamma_m + 3}\right)^{\frac{\gamma_m + 1}{2(\gamma_m - 1)} \left(\frac{\gamma_o + 3}{4}\right)^{\frac{\gamma_o + 1}{2(\gamma_o - 1)}} \sqrt{\left(\frac{\gamma_m R_m}{\gamma_o R_o}\right)} \quad (2)$$

压比修正:

$$\frac{P}{P} = \frac{P}{P_{\text{map}}} \left(\frac{\gamma_m(1-0.1\gamma_o)}{\gamma_o(1-0.1\gamma_m)}\right) \quad (3)$$

式中, γ_m 为湿空气绝热指数; γ_o 为通用空气绝热指数; R_m 为湿空气气体常数; R_o 为通用空气气体常数。

由于混合物的分子重量小于干空气, 因此 R_m 大于 R_o , γ_m 小于 γ_o 。通过以上公式可知, 工质为湿空气时, 压缩部件换算转速提高, 换算流量减小而压比提升。

由于吸雨工况下工质的变化, 压缩部件的流量、压比不仅需要按上文方法进行修正, 而且部件的效率也会受到一定影响。图 1 给出了不同吸雨量下高压压气机效率损失随不同换算转速的变化规律^[3]。

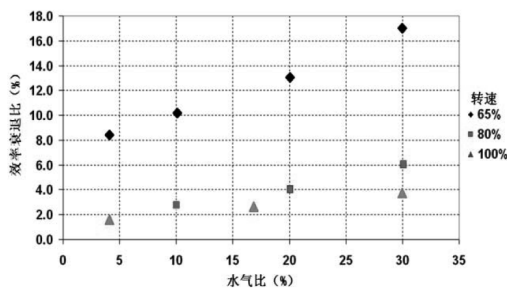


图 1 吸雨量对压气机效率损失的影响^[3]

燃烧室的效率和总压恢复系数在吸雨过程中也会受到影响。参考某型发动机, 在 4% 和 6% 水汽比情况下, 燃烧效率近似可取 86%, 而总压恢复系数的影响如图 2 所示^[3]。

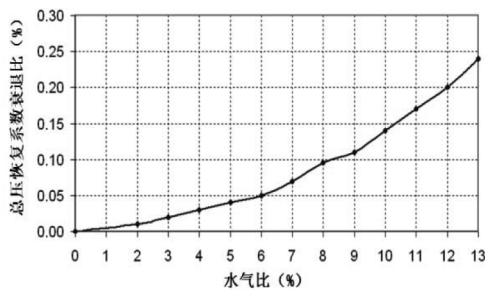


图 2 吸雨量对燃烧室总压恢复系数的影响^[3]

1.3 机械损失

在离心力作用下, 雨水会沿着机匣进入高压压气机。式(4)^[4]可以计算在某转速下吸入雨水所造成的发动机功率的增加量 ΔPW 。

$$\Delta PW = \frac{1}{2} m_{\text{water}} U_m^2 \times n_{\text{stage}} \quad (4)$$

式中, m_{water} 为雨水流量, 根据发动机各工况下空气流量和吸雨状态下的水汽比进行计算, 并与 VBV 水量排出能力有关; U_m 为高压压气机叶尖切线速度; n_{stage} 为高压压气机级数。

1.4 热力学的影响

工质中水蒸气的存在影响了气体性质, 由于雨水、气体混合物有不同的分子量, 因此其比热等气体性质数值与干空气也不同。可以用公式(5)~(9)修正不同含水量下的气体性质^[4]。

$$R_{\text{fac}} = \frac{R_m}{R_a} = \frac{R_o}{MW_m R_a} \quad (5)$$

R_{fac} 为湿空气与干空气的气体常数之比; MW_m 为湿空气分子质量, 可以根据水汽比按以下公式计算:

$$MW_m = \frac{1}{\left(\frac{WAR}{18.015} + \frac{1-WAR}{28.96}\right)} \quad (6)$$

同样的, 水汽混合物的绝热指数可以按以下公式计算:

$$\gamma_{\text{fac}} = \frac{\gamma_m}{\gamma_a} = \frac{WAR \gamma_{\text{molar}_w} + (1-WAR) \gamma_a}{\gamma_a} \quad (7)$$

式中, WAR_{molar} 为水和空气的摩尔数之比, 可以根据水汽比按以下公式来计算:

$$WAR_{\text{molar}} = WAR \left(\frac{28.96}{18.015}\right) \quad (8)$$

空气中气体水的存在也同样影响了比热 C_p , 该值取决于温度与气体性质, 根据公式(9)^[4]可以计算不同温度下干空气与水的定压比热:

$$C_p = A_0 + A_1 T_z + A_2 T_z^2 + A_3 T_z^3 + A_4 T_z^4 + A_5 T_z^5 + A_6 T_z^6 + A_7 T_z^7 + A_8 T_z^8 + A_9 T_z^9 + A_{10} T_z^{10} \quad (9)$$

式中, T_z 为静温 (K) 除以 1000; A_i 为常数^[4]。

雨水气体混合物与干空气的定压比热之比 $C_{p_{\text{fac}}}$ 即可用以下公式求出:

$$C_{p_{\text{fac}}} = \frac{C_{p_m}}{C_{p_a}} = \frac{WAR_{\text{molar}} C_{p_w} + (1-WAR_{\text{molar}}) C_{p_a}}{C_{p_a}} \quad (10)$$

同时雨水的蒸发会带走一定的热量, 利用能量守恒的方法可以计算其对温度的影响, 具体如下:

进口雨水焓值为:

$$H_{\text{water}} = 3.156 \cdot 10^{-12} T_{\text{water}}^6 - 2.934 \cdot 10^{-9} T_{\text{water}}^5 + 1.040 \cdot 10^{-6} T_{\text{water}}^4 - 0.167 \cdot 10^{-3} T_{\text{water}}^3 + 0.012 \cdot 10^{-1} T_{\text{water}}^2 + 3.876 \cdot 10^{-1} T_{\text{water}} + 0.745 \cdot 10^0 \quad (11)$$

高压压气机出口水蒸气压力:

$$P_{\text{steam}} = \frac{P_3}{\left(\left(\frac{0.622}{SH}\right) + 1\right)} \quad (12)$$

其中 SH 为比湿,即每公斤干空气中所含的水蒸气。

出口雨水焓值为:

$$H_{\text{steam}} = 2.98 \cdot 10^{-4} T_{3\text{mix}}^2 - 1.83 T_{3\text{mix}} + 2500 - 5.142 \cdot 10^7 \frac{P_{\text{steam}}}{(T_{3\text{mix}} + 276)^3} - (1.033 \cdot 10^{37} P_{\text{steam}}^3 - 6.426 \cdot 10^{31} P_{\text{steam}}^5) / (T_{3\text{mix}} + 276)^{14.787} \quad (13)$$

$$Q_{\text{water}} = (H_{\text{steam}} - H_{\text{water}}) \dot{m}_{\text{water}} + \Delta P W \quad (14)$$

$$Q_{\text{air}} = \dot{m}_{\text{air}} C_p (T_{3\text{dry}} - T_{3\text{mix}}) \quad (15)$$

由 $Q_{\text{water}} = Q_{\text{air}}$ 即可迭代求解 $T_{3\text{mix}}$ 的温度^[4], 结合空气湿度表可以判定此时雨水在高压压气机出口是否完全蒸发或燃烧室进口尚有雨水, 并进一步计算雨水的蒸发率。

2 吸雨计算

2.1 计算条件

参考针对该条款的适航咨询通告等文献, 选取以下工况点为考核点:

表 1 考核工况点

状态	高度 (m)	温度 (K)	马赫数 Ma
高温起飞	0	ISA+15	0
襟翼放下进场	300	ISA	0.272

根据 CCAR-33R2 附件 B, 查表可得, 0 ~ 6 100m 之间, 雨水含量为 20g/m³, 则高度为 h 米下, 发动机风扇进口物理流量为 W_2 (kg/s) 时, 雨水的质量浓度 W_{water} (kg/s) 为:

$$W_{\text{water}} = 0.020 \frac{1000 W_2}{29} \cdot \frac{RT}{P} \quad (16)$$

考虑到发动机进气道对雨水的捕获能力^[1], 需要计算不同工况下和不同雨滴尺寸下进气道捕获流量系数, 该流量系数等于水捕获面积 (Ah) 与流管空气捕获面积 (Ac) 之比,

根据式 (17) 得到发动机进气道吸入雨水的流量 $W_{2-\text{water}}$, 在高速低工况时雨水增多效果。

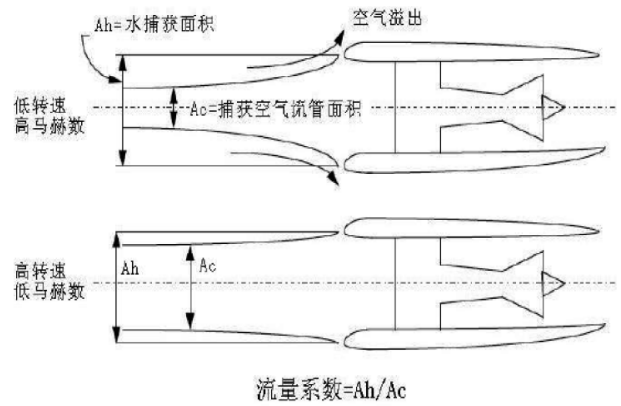


图 3 进气道捕获流量系数示意图

$$W_{2-\text{water}} = W_{\text{water}} \cdot \frac{A_h}{A_c} \quad (17)$$

根据上式可近似地确定进入发动机进气道的雨水量, 即:

(1) 高速低工况下, 如空中慢车等, 发动机进口吸入的雨水量相对于空气的质量流量比 (WTA) 为 6%;

(2) 低速高工况下, 如起飞状态等, 发动机进口吸入的雨水量相对于空气的质量流量比 (WTA) 为 4%。

计算的假设条件为:

(1) 在 4% 和 6% 的 WAR 条件下, 假设所有雨水在进入燃烧室之前完全蒸发;

(2) 水蒸气为理想气体;

(3) 雨水均匀分布在进口气体中, 即不考虑局部的雨水聚集点的影响。

2.2 计算结果

根据上述介绍的方法, 各工况点下的机械损失和部件性能损失如表 2 所示。

表 2 发动机吸雨后的机械损失和性能损失

工况	高温起飞	襟翼放下进场
WTA (%)	4%	6%
ΔPW (kW)	1 186	726
Delta η _{HPC}	-4%	-7%
Delta P _{burner}	-0.03	-0.05
η _{burner}	86%	86%
雨水蒸发率 (K/kg)	0.000 5	0.000 2

基于以上参数, 可以使用性能模型来模拟吸雨时的工况并分析吸雨对发动机性能的影响。

(下转第 50 页)

发动机几乎所有部件的共同工作,这些部件共同工作线位置或特性线上工作点位置有相应的改变,因此,发动机工作过程参数、截面温度和压力、发动机空气流量、单位参数和主要数据都有改变。变化的幅度还与具体发动机有关,也就是新工作点位置的效率有关。

(2)不同部件性能变化,不同的控制规律对部件的共同工作影响不同,有些参数变化方向可能相反,应具体分析。

(3)无论哪一种控制规律,高压部件效率的降

(上接第3页)

利用 Gasturb 软件对某涵道比为9的混排涡扇发动机进行了计算,其中高温起飞和最大连续工况的控制策略为低压换算转速不变,而进场慢车工况则控制高压换算转速不变。计算结果如图4和图5所示,由于共同工作线的提高,各工况高压压气机的喘振裕度均下降8%~10%,推力下降5%~8%,由于燃烧室的效率急剧下降等因素的影响,耗油率升高约20%。另外,从结果可以发现吸雨对发动机低状态时的影响更大。

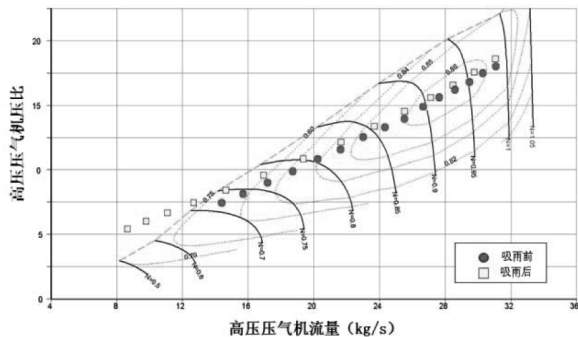


图4 高压压气机喘振裕度的影响(高温起飞)

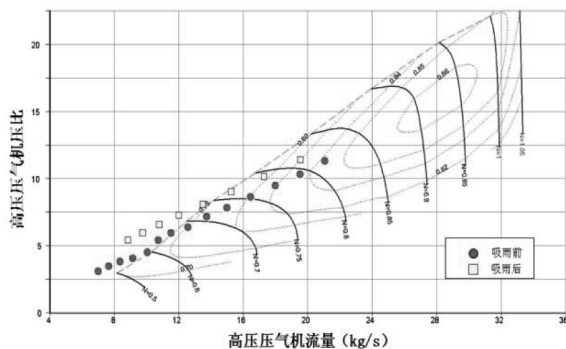


图5 高压压气机喘振裕度的影响(进场)

根据以上计算,可初步得到吸雨对性能及气动

低会导致低压喘振裕度降低,低压部件效率的降低不会改变高压部件共同工作线的位置。

(4)无论部件性能变化对共同工作的影响如何,部件效率降低,耗油率升高,推力与燃油流量有关,燃油流量增大,推力增大。

参考文献:

[1] 廉筱纯,吴虎. 航空发动机原理[M]. 西安:西北工业大学出版社,2005.

稳定性的影响。发动机吸雨后,喘振裕度下降较快,对加速性能造成较大影响。为了提高发动机吸雨状态下的安全性,可以考虑改进常用的控制规律,包括对换算转速与推力关系进行修正并配合其它变几何控制,如 VSV 角度控制,以保持吸雨工况时推力的稳定。

3 结论

针对发动机吸雨情况下的雨水对发动机的影响,建立了部件气动热力损失、机械损失和工质热力学通用模型,并借鉴适航咨询通告初步定义了关键吸雨工况及水含量。基于商用性能分析软件,在加入了雨水工况各种模型及修正下,初步分析了一个大涵道比9的涡扇发动机在吸雨工况下性能的变化。结果表明,吸雨工况下,压缩部件的喘振裕度下降8%~10%,推力下降5%~8%,耗油率升高约20%,对发动机的性能带来较大影响,吸雨对发动机低状态时的影响更大。

参考文献:

[1] AC33.78-1. Turbine engine power-loss and instability in extreme conditions of rain and hail.

[2] Day, I. . Rain Ingestion in Axial Flow Compressors at Part Speed[J]. Journal of Turbomachinery, 2008. 130: p. 011024-9.

[3] Theoklis Nikolaidis. Water Ingestion Effects on Gas Turbine Engine Performance[D]. PhD Thesis, Cranfield University, 2008.

[4] P. P. Walsh & P. Plethcer. Gas Turbine Performance[M]. Blackwell Science Ltd, 1998.