

航空发动机吸雨吸雹适航审定符合性研究

吴晶峰, 宋建宇, 查筱晨

(中国民用航空适航审定中心, 北京 100102)

摘 要:中国民航规章《航空发动机适航规定》CCAR 33.78 要求,航空发动机吸入雨水和吸雹后不发生熄火或喘振,没有不可接受的机械损伤和功率或推力损失。本文对遭遇雨和雹之后对航空发动机的影响进行了分析,同时对发动机吸雨和吸雹后的试验判据进行了研究,对 3% 持续功率/推力损失和 10% 功率/推力退化的实质内涵进行了分析并给出了明确的定义。在对国外型号的认可审查中,FAA 及 EASA 局方接受了本文所提出的功率/推力损失和功率/推力退化定义,并完善了符合性证据。

关 键 词:发动机;吸雨;吸雹;适航

中图分类号:V231

文献标志码:A

文章编号:1009-2889(2020)01-0001-06

航空发动机在实际大气条件下运行经常会遇到雨天和冰雹气候的自然环境,大量雨水和冰雹会被发动机吸入,严重时可能会使燃烧室熄火,导致发动机空中停车,严重威胁飞机的飞行安全和乘客的生命安全。

2002 年,印度尼西亚 Gardua 航空公司 1 架波音 737-300 客机装配 2 台 CFM56-3 发动机在抵达机场上空时,突然遭遇特大雨/雹的恶劣气候条件,当时飞机发动机处于空中慢车功率状态。飞机进入暴雨区 90 秒后,双发熄火,飞行员 3 次起动发动机失败,飞机最终迫降于河道上并撞击岩石。此次事件造成 1 名空乘死亡、多人受伤,飞机严重受损报废的重大事故。此前,1987 年 5 月至 1989 年 9 月之间,CFM56-3 发动机就发生过 4 次降落过程中遭遇大暴雨熄火事件,造成 3 次高空双发熄火和 1 次高空单发熄火事故^[1]。

在 20 世纪 80 年代初,GE 公司发动机也曾多次在吸入雨水后引起压气机喘振^[2]。经分析,其原因在于雨水吸入时撞到压气机进口处温度传感器的线圈,使温度指示偏离正常值约 5℃,导致可调静子叶片不能精确调节,最终引起压气机喘振。

鉴于此,中国民航规章《航空发动机适航规定》CCAR 33.78 条款对发动机吸入雨和冰雹提出了要

求,规章要求分为两类:第一类为一次性吸入与发动机进气道面积成比例的大颗粒冰雹,不得引起不可接受的机械损坏或不可接受的功率或推力损失,或者要求发动机停车;第二类为在突然遭遇浓度达到 CCAR 33 部附录 B 中定义的雨和冰雹时,在发动机整个规定的工作包线范围内仍有可接受的工作能力,发动机不熄火、不降转,不发生持续或不可恢复的喘振或失速,不失去加速和减速的能力;吸入雨和雹后没有不可接受的机械损坏,没有不可接受的功率或推力损失和其他不利的发动机异常情况。其中,不可接受的功率或推力损失分别为不超过 3% 的持续功率/推力损失,以及不超过 10% 的功率/推力退化。

国内外有专家在发动机吸雨和吸雹方面开展了许多工作,包括吞水对发动机整机性能的影响和对部件效率的影响^[1-4],也有一些对适航符合性的研究^[5-6]。国内过去在民用航空发动机型号取证上的经验较少,对于条款中发动机吸入三种不同物体(大冰雹、雨、冰雹)的实质影响不清楚,在分别开展试验时选择关键试验点应考虑的因素方面也研究较少,对吸雨吸雹试验表明符合性缺乏足够的经验和理论研究;另外,在符合性判据方面,国内外工业方和审定局方对于“功率/推力损失”和“功率/推力退

收稿日期:2019-10-28 改稿日期:2019-12-13

作者简介:吴晶峰(1983—),男,江西人,博士,高级工程师,从事航空发动机适航审定及压气机和燃烧室内部复杂流动数值模拟,E-mail: wujf_acc@caac.gov.cn。

化”定义长期以来存在混淆和定义不清,对两种功率变化之间的实质内涵缺乏研究。

基于上述问题,本文首先从吸雨吸雹关键点分析要素着手,对吸入雨水和冰雹对发动机的影响进行研究,包括对压缩系统、燃烧室、涡轮和控制系统的影 响。然后对发动机吸雨吸雹符合性判据进行研究并给出明确定义。最后通过国外型号认可审查对分析结果予以验证。

1 发动机吸入雨雹影响分析

1.1 吸雨对压缩系统的影响

压气机是发动机首先接触雨水的关键部件,因此很多学者和专家对于吸雨对压缩系统的影响开展了研究。

Nikolaidis 等人^[7]对轴流压气机吸雨后水滴直径与气流流线之间的关系进行了研究。研究发现,水滴直径为 1 微米时,水滴轨迹与气流基本重合。水滴直径从 5 微米增长到 10 微米及 100 微米,水滴轨迹与气流轨迹相差越来越大。

Murthy 和 Mullican^[8]对涡扇发动机吸雨瞬态性能变化也进行了研究,发现很小的雨量就足够导致发动机性能退化,并且,性能退化改变大小与吸入的雨量大小并非线性关系,同时,发动机吸雨时可能无法达到稳定工况。

Nikolaidis^[9]对一级压气机吸入雨水后的性能开展了相关研究。研究显示,吸入雨水后的压气机压比有所损失。随着空气中雨水的增加,不同转速下的压比损失随之增加。同时,压气机效率也有所降低,雨水含量越大,效率损失越大。压气机转速越高,效率损伤越小,抗雨水能力越强。

Murthy 等人^[10]对 6 级轴流压气机吸雨性能进行分析,Ivor Day 等人^[11]对某 3 级轴流压气机进行吸雨试验,均发现吸雨后压气机效率降低。

发动机吸入雨水后,由于空气中增加了液体工质这部分重量,压气机为了保持预定的转速,需要额外增加扭矩。Walsh 和 Fletcher 等人^[12]给出了由于吸雨要求压气机增加做功的简化关系式,得出压气机所需增加功率与吸入雨的质量成正比。Nikolaidis^[9]对一级压气机吸入雨水后的压气机扭矩开展了相关研究,显示随着雨水含量的增加,不同转速下压气机扭矩随之增加。

针对吸雨前后压气机喘振失速裕度的影响也开展了大量工作。Santa 等人^[13]于 2000 年对吸入不

同雨水含量的空气后压气机工作线的变化进行了研究,结果表明随着雨水-空气含量增加,压气机工作线逐渐上移,靠近喘振边界,压气机喘振裕度逐渐减小。

Ivor Day 等人^[11]对某压气机吸入雨水后的压气机喘振裕度变化开展了研究,研究显示,随着雨水含量的增加,喘振裕度减小迅速。

1.2 吸雨对燃烧系统的影响

发动机吸入雨水,经过压气机后,进入燃烧室,蒸发成水蒸气。吸雨对于燃烧室的影响如下。

Laing, Shastri 等人^[14]于 1993 年对燃烧室吸入雨水的影响进行了研究,研究显示吸入雨水后,燃烧室出口与预混上游处之间的压差增大,燃烧室压降增大。随着雨水含量的增加,燃烧室压力损失也随之增大。

Laing, Shastri 等人^[14]还对燃烧室吸入雨水后燃烧室的温度影响进行了研究,结果显示吸雨后出现燃烧室升温降低。

燃烧室吸入雨水,不仅对燃烧室压力和温度有影响,同时还对燃烧效率产生了影响,严重时还会造成燃烧室熄火。AGARD^[15]对某燃烧室吸雨前后的燃烧效率进行了研究,结果显示,随着雨水含量的增加,燃烧效率损失严重。

1.3 吸雨对涡轮的影响

发动机吸入雨水,经过燃烧室之后,水的形态发生了改变,经过燃烧室高温蒸发后雨水大部分以水蒸气的形态存在。但是,有部分水未进入火焰筒中进行蒸发,而是通过火焰筒外部冷却气进入下游,因此还有部分液态水流经燃烧室机匣,进入涡轮。水蒸气与空气混合后的比热容增加,有利于增加涡轮输出功。

AGARD^[15]的研究报告中提出,吸入雨水对于涡轮的性能影响可以忽略不计。但是,吸入雨水会造成涡轮叶片表面受到腐蚀,涡轮因此出现性能退化。其他研究人员也通过对涡轮吸水的长时效应研究,得到了相同的结论。

1.4 吸雨对发动机控制的影响

发动机吸入雨水后会对发动机控制系统的工作造成影响。温度和空气流量传感器受到影响后可能会给出错误的测量结果并提交给发动机计算控制系统。

Russell 和 Victor^[2]提到了一次特征事故,GE 公司 CF6-50 发动机在吸雨条件中发生了压气机失

速。原因就在于由于液态水和空气的温度有差异,造成温度传感器测量的温度偏低,导致 IGV 调节没有与气流条件相匹配,引起压气机失速。

AGARD^[15]的报告中提到,吸入雨水可能堵塞压力传感器和通路,造成它们无法工作。

1.5 吸雹对发动机的影响

33.78 条款中,发动机吸入的冰雹分为两种,分别是大冰雹(hailstone)和冰雹(hailstorm),分别对应 33.78(a)(1)和 33.78(a)(2)。对于一定数量大冰雹的吸入,对发动机的影响主要在于对风扇叶片和机匣的击打损伤。Yangkun Song^[16]等人对大涵道风扇吸入 2 颗直径 4.22 cm 的圆柱型冰雹进行了研究,应力结果显示大冰雹对发动机的影响主要在风扇叶片和机匣的损伤,沿径向的应力分布和机匣表面应力水平反映出其击打损伤程度。大冰雹经风扇叶片击打后,发生了破裂,在离心力作用下沿径向运动,只有少部分冰雹碎粒进入低压压气机内。

国内外其它专家也对吸入大冰雹对发动机的影响进行了分析,主要是对风扇叶片(包括复合材料叶片)损伤的研究,冰雹吸入的影响主要集中在叶片的机械损伤^[17-19]。

对于另一种冰雹(hailstorm)的吸入,其影响介于大冰雹和吸雨之间,又同时包含了上述两种雨雹吸入的效应。在飞机下降时,发动机功率设置较低,此时发动机抗雨雹能力也较低。冰雹撞击风扇叶片后造成叶片结构损伤和风扇轴负载增加;冰雹破碎后进入外涵和内涵,进入内涵的冰雹碎粒将对压缩系统造成影响进而改变发动机工作状态,并融化为液态水及水蒸气,进入燃烧室。研究发现喘振裕度与熄火特性与冰粒的质量、尺寸以及速度有关^[20]。

2 吸雨吸雹符合性验证

33.78 条款从规章内涵上包含了两类考核,第一类为 33.78(a)(1)要求的对大冰雹(hailstone)的吸入考核,第二类为 33.78(a)(2)要求的对雨水和冰雹(hailstorm)的吸入考核。33.78(b)为针对旋翼类航空器对 33.78(a)(2)条款的替代符合性方式。

下面分别对这两类要求进行符合性验证阐述。

2.1 33.78(a)(1) 吸大冰雹

33.78(a)(1)要求发动机在吸入大冰雹后,不得引起不可接受的机械损坏或不可接受的功率或推力损失,或要求发动机停车。

33.78(a)(1)的考核目标主要是针对发动机压

缩系统尤其是风扇的结构强度不足带来的机械损伤,以及由于机械损坏导致的功率或推力损失或要求发动机停车。

针对吸入大冰雹的符合性验证,分为以下几步:

(1) 确定冰雹条件

发动机吸入大冰雹时,冰雹的数量和尺寸仅由发动机进气道几何面积决定,如下:

(a) 发动机进气道面积小于等于 0.064 m², 1 颗直径 25 mm 的冰雹;

(b) 发动机进气道面积大于 0.064 m² 时,每 0.096 8 m² 进气道面积或余数,1 颗直径 50 mm 冰雹和 1 颗直径 25 mm 冰雹;

(c) 冰雹比重为 0.8~0.9。

(2) 确定试验条件

吸冰雹试验的试验条件包括以下方面:冰雹吸入速度,风扇转速或压气机转速,冰雹吸入位置。试验条件的分析目标为寻找风扇叶片经受大冰雹打击时机械性能最薄弱的状态。

其中,冰雹吸入速度应考虑发动机飞行高度为从地面到 4 500 m 范围内飞行速度为飞机剧烈气流条件下的最大空速,在此基础上计算冰雹吸入的最大真实空速;发动机功率状态确定为最大连续功率状态;冰雹吸入方式为快速连续吸入冰雹,一半数量冰雹随机投向整个进气道正前方区域,一半数量投向进气道正前方关键区域,其中关键区域为经受打击能力较弱,影响功率或推力较大的区域。

2.2 33.78(a)(2) 遭遇雨和雹

33.78(a)(2)要求发动机突然遭遇雨和冰雹时,在整个工作包线范围内仍有可接受的工作能力,即发动机不熄火、不降转、不发生持续或不可恢复的喘振或失速,不失去加速和减速的能力。吸入雨和雹后没有不可接受的机械损坏,没有不可接受的功率或推力损失和其他不利的发动机异常情况。

因此,对于规章的实质考核目标可以得出,33.78(a)(2)一方面考核的是发动机突然持续吸入大量水(雨和冰雹)形成的冷工质冲击,造成发动机熄火、降转、喘振和失速等,考核的是发动机喘振和失速裕度、熄火裕度、发动机控制特性和工作线变化特性、仪表传感性能。另一方面“吸入后不能有不可接受的机械损坏和不可接受的功率或推力损失或其他不利的发动机异常情况”考核的是吸入水(雨和雹)形成的冷工质冲击带来的发动机热部件结构变形及机匣遇冷收缩,使机匣可能与转子部件碰

磨等。

针对飞行中遭遇雨和冰雹的符合性验证,分为以下几步:

(1) 确定雨水和冰雹条件

雨水和冰雹的条件包括雨水含量和冰雹水含量(均以每立方米空气中所含水的质量为表征),温度和雨滴/冰雹尺寸分布。CCAR 33 部附录 B 中对于不同海拔高度的雨水含量和冰雹水含量,以及雨滴/冰雹尺寸分布均有明确要求,因此在确定了发动机对应海拔高度考核点后,可查表得到相应雨水和冰雹条件。由于在试验中无法得到真实大气中的雨滴/冰雹尺寸分布,因此可用附录 B 中的平均直径予以代替。

关于雨水和冰雹的温度,应该反映试验关键点对应的发动机真实运行所遭遇的雨水和冰雹温度,需要结合大气条件下雨水和冰雹随海拔高度的分布确定。

(2) 确定试验条件

与吸入大冰雹不同,33.78(a)(2)考核发动机吸雨和吸雹,雨和雹的吸入速度以及击打位置不是关键试验条件,其关键试验条件包括发动机工作包线内的试验点选取和发动机功率状态。

吸雨造成发动机喘振失速裕度下降,既包括发动机低功率状态,也包括发动机高功率状态,尤其高功率时容易出现压气机稳定性问题,因此需要对这两种功率状态进行考核。在考核喘振失速影响时,发动机应设置为最大功率提取输出状态,但不进行引气,以增加考核严苛度。

对于燃烧室熄火裕度考核方面,要求发动机为低功率状态,因为低功率状态更容易熄火。

对于机匣收缩造成机械损失的考核方面,要求发动机为高功率状态,因为最大功率状态下,离心力造成核心机压气机转子叶片和盘的径向伸长量最大,核心机温度最高,转子叶尖间隙最小。压气机机匣受到吸入冷水后的冷却作用也最大,进一步收缩降低叶尖间隙,最可能导致叶尖与机匣碰磨。

对于仪器传感失效的考核可结合上述试验进行验证,无须单独开展验证。

3 符合性判据研究

由于 33.78 条款(a)(1)和 33.78(a)(2)考核目标不同,因此试验通过考核的类型也有所不同,但是两条款均包含一点要求,即“不得出现不可接受

的功率或推力损失”。

33.78 咨询通告对不可接受的功率或推力损失予以了进一步规定:不超过 3% 的持续功率/推力损失(sustained power or thrust loss),以及不超过 10% 的功率/推力退化(power or thrust degradation)。尽管 AC 中对这两种功率变化作了进一步解释,但是长期以来,在适航审定领域对二者的定义存在分歧和认识不清,不理解二者之间的内涵差异。

3.1 3% 持续功率/推力损失

工业界和审定界对于 3% 的持续功率/推力损失定义比较一致,其定义为吸雨试验前和吸雨试验之后,基于发动机主控参数(如风扇转速、发动机压比、扭矩、轴马力)所测量出来的发动机功率/推力的变化或误差。

以某型涡扇发动机为例,3% 持续功率/推力损失对应如图 1 所示,纵坐标为推力,横坐标为风扇转速。该型发动机以风扇转速为主控参数。

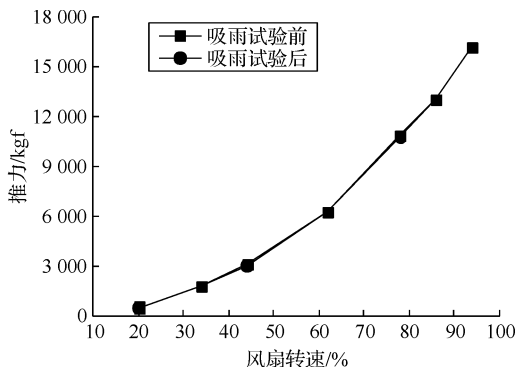


图 1 某型发动机吸雨前后推力对比示意图

3% 持续功率/推力损失的实质内涵是考虑发动机本体做功能力的下降以及测量系统的误差。以涡扇发动机为例,发动机本体做功能力下降的可能因素为风扇叶片遭受冰雹击打造成叶片本体破坏,从而在风扇转速相同的情况下输出的推力减小。测量系统的误差来源于测量系统的变动特性和固有精度误差。

3.2 10% 功率/推力退化

在对 10% 功率/推力退化表明符合性时,某型涡扇发动机给出试验前后的排气温度(Exhaust Gas Temperature, EGT)数据表明对该判据的符合性,如图 2 所示。

尽管 EGT 变化可以一定程度上代表发动机的性能变化,但是不能完全代表 10% 功率/推力退化的含义。其本质原因在于 EGT 的变化与推力的变化之间并非线性关系。

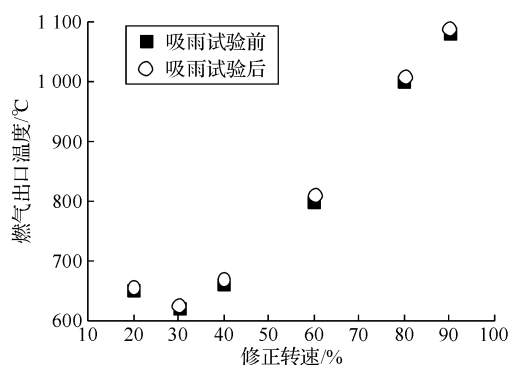


图2 某型涡扇发动机 EGT 变化示意图

10% 推力/功率退化的定义应该为试验前后发动机修正推力或功率的变化,该推力/功率是基于申请人的标准性能参数计算出来的推力/功率数值。性能参数包括排气温度 EGT 和转子转速等。

经过与国外局方(包括 FAA 和 EASA)和发动机公司的反复讨论,最后,对方接受了上述定义,补充了符合性证据,对试验前后相同 EGT 条件下的发动机推力进行了计算及对比。图3是某款涡扇发动机型号试验前后的推力退化示意图。

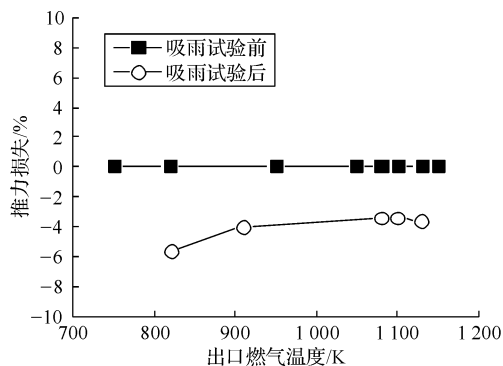


图3 某型发动机推力退化示意图

10% 推力/功率退化的实质内涵反映的是发动机在经受非正常工况后发生的状态的恶化情况。尽管做功部件(如风扇叶片)和测量系统一切正常,但是发动机在维持某功率/推力输出时需要位于更高的工况点,例如发动机 EGT 温度的升高。因此,需要对吸雨前后发动机的状态进行评估。

4 结论

本文对航空发动机吸雨吸雹进行了研究,包括吸雨对压缩系统、燃烧室、涡轮和控制系统的影

响,增加涡轮输出功,但部分未蒸发的液态水会造成涡轮叶片表面腐蚀,长时间后会造成涡轮性能退化。

本文还对航空发动机吸雨吸雹符合性进行了研究,对开展试验需考虑的要素进行了分析,对符合性判据 3% 持续功率/推力损失和 10% 推力/功率退化进行了定义并通过国外发动机型号认可审查予以了验证,可作为国内外航空发动机吸雨吸雹条款符合性验证及适航审查过程中的参考。

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(04): 1-4.
- [2] RUSSELL R R, VICTOR I W. Evaluation and correction of the adverse effects of (i) inlet turbulence and (ii) rain ingestion on high bypass engines[R]. San Diego, California: AIAA, 1984.
- [3] 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(08): 1717-1723.
- [4] 王春晓, 邓潇. 民用大涵道比涡扇发动机吸雨能力评估的方法研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(S2): 1-3, 50.
- [5] 代晓晴, 张翔, 李森, 等. 某民用涡扇发动机飞行包线内吸雨量计算分析[J]. 航空学报, 2017, 38(07): 220-228.
- [6] 王丰产. 大型民用航空发动机吸雨和吸雹适航验证方法研究[C]//2010 年航空器适航与空中交通管理学术年会论文集. 北京, 2010.
- [7] NIKOLAIDIS T, PILIDIS P. The effect of water ingestion on an axial flow compressor performance[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 2014, 228(3): 411-423.
- [8] MURTHY S N B, MULLICAN A. Transient performance of fan engine with water ingestion[R], United States: NASA, 1933.
- [9] NIKOLAIDIS T. Water ingestion effects on gas turbine engine performance[D]. Cranfield: Cranfield University, 2008.
- [10] MURTHY S N B, EHRESMAN C M, HAYKIN T. Direct and system effects of water ingestion into jet engine compressors[C]//Proceedings of the Fourth Joint Fluid Mechanics, Plasma Dynamics, and Lasers Conference. New York: American Society of Mechanical Engineers, 1986.
- [11] DAY I, WILLIAMS J, FREEMAN C. Rain ingestion in axial flow compressors at part speed[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(1): 1-10.
- [12] WALSH P, FLETCHER P. Gas turbine performance[M]. London: Blackwell Science, 1998.
- [13] SANTA I. The effect of water ingestion on the operation of the gas turbine engine[C]//22nd International Congress of Aeronautical Sciences. United Kingdom: Harrogate, 2000: 524.1-524.9.
- [14] LAING P, SHASTRI R P, EHRESMAN C M, et al. Three-dimensional prediffuser combustor studies with air-water mixture[R]. Monterey: AIAA, 1993.
- [15] Advisory Group for Aerospace Research & Development. Recommended practices for the assessment of the effects of atmospheric water

ingestion on the performance and operability of gas turbine engines [R]. Neuilly-sur-Seine, France; AGARD, 1995.

- [16] SONG Y, BAYANDOR J. Analysis of progressive dynamic damage caused by large hailstone ingestion into modern high bypass turbofan engine[C]//USA 57th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. San Diego:[s. n.], 2016.
- [17] CHUZEL Y, COMBESURE A, NUCCI M. Development of hail material model for high speed impacts on aircraft engine[C]//11th International LS-DYNA User Conference. Michign, USA:[s. n.], 2010.

- [18] DOUBRAVA R, OBERTHOR M. Bird and hail stone impact resistance analysis on a jet engine composite air inlet [C]//MATEC Web of Conferences. London:[s. n.], 2018.
- [19] SINHA S K, JAIN N. Soft-body impact on jet engine components made-up of composites [C]//International SAMPE Technical Conference. Eincinnati, OH:[s. n.], 2007.
- [20] PAN H, RENDERT P M. Impact characteristics of hailstones simulating ingestion by turbofan aeroengines[J]. Propuls Power, 1996, 12(3):457-462.

Investigation of Ingestion of Rain and Hail Certification Compliance in Aircraft Engine

Wu Jingfeng, Song Jianyu, Zha Xiaochen

(Airworthiness Certification Center, CAAC, Beijing 100102, China)

Abstract: According to China Civil Aviation Regulations *Airworthiness Standards: Aircraft Engines* 33.78, aircraft engines shall be capable of acceptable operation throughout its specified operating envelope. After ingestion of rain and hail, each engine shall not be flame out or surge, and there is no unacceptable mechanical damage, unacceptable power or thrust loss, or other adverse engine anomalies. The impact of ingestion of rain in aircraft engines is investigated first, and then the test criteria are also analyzed and investigated. The 3% sustained power or thrust loss and 10% power or thrust degradation are identified. During the validation of type certification of foreign engines, the above identifications are accepted by FAA and EASA. Some specific compliance data is created and submitted.

Key words: aircraft engine; rain ingestion; hail ingestion; airworthiness

欢迎订阅 欢迎投稿

E-mail: RQLJ1988@163.com

网址: <http://www.gasturbine-technology.com>