

航空发动机安全边界与“即用性”燃料 认证方法

杨晓奕, 丁水汀
(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191)

摘 要: 在航空替代燃料缺乏足够飞行数据,几乎不可能通过有限发动机和飞行实验来评价其安全特性状况下,研究开发了一种简便却可保证适航安全性的方法来研究航空替代燃料的安全性能。“即用性”航空替代燃料被认为是发动机更换最频繁的部件,从而采用相似类比、使用经验方法来验证“即用性”燃料的适航符合性.以航空煤油实际使用经验为基准,提炼燃料性能、燃料系统、燃烧性能、发动机性能、飞机性能 5 个层次上参数化描述的安全边界,与通过航空替代燃料在 5 个层次上得到的工作边界进行相似类比,从而预测发动机使用替代燃料的安全性.该方法提炼了替代燃料在发动机安全性上的判定准则,还降低了认证流程的燃料成本和时间成本.

关 键 词: “即用性”燃料; 航空发动机模型; 不依赖燃料的安全标准; 相似类比; 安全准则

中图分类号: V239 **文献标志码:** A

Aero-engine certification method and safety margin of “drop-in” fuel

YANG Xiao-yi, DING Shui-ting
(School of Energy and Power Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A convenient method ensured the safety of airworthiness was developed to re-search the safety performance of aviation alternative fuel in case of lacking enough flight data of aviation alternative fuel, and it is almost impossible to evaluate the safety performance by limited engines and flight experiments. On the base of the fuel as one of the engine replace-ment parts, the safety of alternative fuels can be complied with compliance verification meth-od, including to extract a fuel-independent safety criterion from the history experience and to compare the aero-engine safety of alternative fuels by similar analogy. The critical paramet-ers with the characteristic parametric numerical description have been extracted on five lev-el: fuel specification level, fuel system level, component level, engine level and aircraft lev-el. The work margin of critical parameters obtained from alternative fuel are analogized with the safety margin of critical parameters based on kerosene flight experience, and accordingly the results can be analyzed and identified the safety of aero-engine in alternative fuel. This certification process help to achieve on the safety of alternative fuel and the cost on the refi-ning fuel required as same as kerosene. Accordingly, the safety margin can bridge the gap

收稿日期:2014-06-19

基金项目:国家高技术发展计划(2012AA052102); 欧盟框架项目(Grain 2)

作者简介:杨晓奕(1968—),女,山东济南人,教授、博士生导师,博士,主要从事航空替代燃料研发及性能评价方面的工作.

通讯简介:丁水汀(1967—),男,辽宁铁岭人,教授、博士生导师,博士,主要从事航空适航、通航发动机及发动机气动热力方面的研究.

from kerosene flight experiences to aviation alternative fuel safety certification. The optimization methodologies for the production and distribution of alternative fuel will be established based on the safety sensitivity analysis of aero-engine and a fuel-independent safety standard.

Key words: “drop-in” alternative fuel; aero-engine model;
fuel-independent safety standard; similar analogy; safety criterion

航空替代燃料承担碳减排和国家能源安全的双重责任^[1].“即用性”燃料因不改变航空发动机、飞机以及基础设施而被认为会最先进入市场,近年来取得多项发展^[2].美国材料与试验协会出版了针对合成碳氢燃料的标准 ASTM(American society for testing and meterials) D7566(《包含合成碳氢燃料的航空涡轮燃料的标准规范》),并在理化特性测试、适用性测试、热端测试、部件测试以及整机测试方面更新了标准 ASTM 4054-09(《新型航空涡轮燃料认证与审批的标准规程》).此外,费托合成,甘油酯加氢燃料,合成异构烷烃,乙醇原料制备的航空燃料通过了飞行测试,并通过了 ASTM D4054 的认证.

基于航空煤油 70 多年使用经验,针对石油馏分航空燃料测试标准(ASTM 1655),并根据这一标准制定了《包含合成碳氢燃料的航空涡轮燃料的标准规范》(ASTM7566-13).虽然此标准没有规定替代燃料化学组成,但是规定了具体理化特性的使用范围,这实际上就限制了其化学组成的理化性质必须在一定的范围内才能使用,间接限制了组成范围.由于替代燃料的化学组成不能完全与航空煤油的组成完全一致,单依靠理化性质无法给安全性提供足够的判据.从而, ASTM D4054 要求对“即用性”燃料进行认证,从理化、适用性到热端测试、部件测试和整机测试,而且有些测试项目没有给出测试条件及接受准则.另外,标准规定中还要求有资格的原始设备制造商(OEM)进行测试并进行判定,由于发动机制造公司对燃料认证缺乏兴趣和经验,导致目前认证流程测试成本高、测试燃料消耗大,且没有发动机安全性的判定准则,这已成为替代燃料安全性认证的国际难点和热点.本文拟在航空煤油使用经验基础上提炼出适用替代燃料航空发动机安全性的判定准则.该方法是基于 ASTM D7566 及 ASTM D4054 使用中存在问题,建立了依赖发动机安全性的“即用性”替代燃料安全性认证方法,

所用方法和工具不仅有助于航空替代燃料的认证过程,降低燃料认证流程成本.此外,通过敏感性分析还将为燃料制备技术及其与航空发动机安全性之间提供耦合技术方法,以指导航空替代燃料生产,降低燃料制造成本.

1 基本理论

符合性验证方法是指采用各种验证手段,以验证结果证明所验证对象是否满足民用航空发动机适航条例的要求.常用符合性验证方法主要有检查、取样验证、台架试验、部件试验、整机试验、飞行试验、说明性文件、分析、相似类比、使用经验.现有对替代燃料的符合性认证方法 ASTM D7566 和 ASTM D4054,主要采用了检查、取样验证、台架试验、部件试验、整机试验、飞行试验、分析及说明性文件的方法.而本研究提出相似类比与使用经验方法判定“即用性”燃料安全性,原理见图 1.该方法的建立需要建立两个关键映射关系,一是从煤油性能,通过燃料系统、燃烧室、发动机,一直到飞机性能的映射关系,另一个是提取燃料在不同水平的关键安全参数,以建立参数化的安全边界,得到判定准则和测试条件,从而进行煤油与替代燃料在不同水平上的对比.

评估方法是基于从传统航煤获取得到非燃料性能表征的发动机安全准则,并且预测替代燃料在航空发动机中的安全性.系统安全性评价的参照系是航空煤油,对照系是替代燃料.首先,获取不同水平安全性相关的关键参数,包括安全临界参数(SCPs)和性能临界参数(PCPs),这些参数划定了不同水平的临界参数波动范围. SCPs 表征安全性, PCPs 表征性能. SCPs 和 PCPs 集不仅包括燃料系统、燃烧室、发动机,也包括飞机. SCPs 和 PCPs 数据集形成安全工作区间,其可用来评价燃料的在不同水平的安全性,这样就得到了替代燃料在发动机水平上的安全性评价标准.

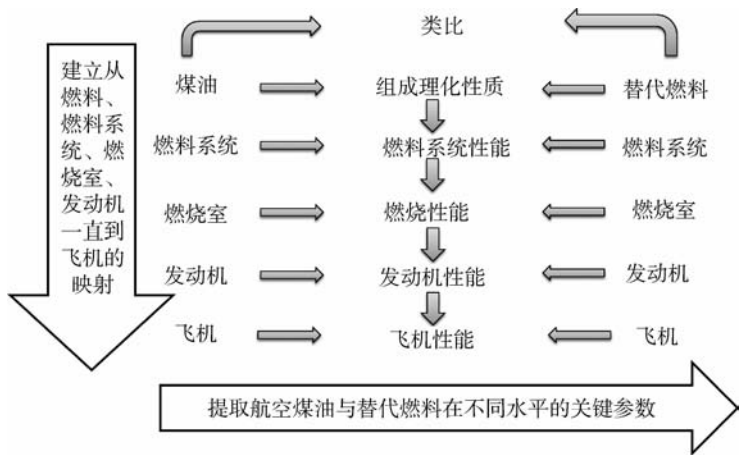


图 1 相似类比方法的基本原理

Fig. 1 Basic principle of similar analogy method

2 安全性判定方法

2.1 建立映射关系

建立所述航空燃料的组成空间和基础理化特性的数据库和映射关系;基于所述航空燃料的基础理化特性和组成空间的数据库对所述航空燃料的基础燃烧性能数据进行统计、测试,并建立基于所述航空燃料的组成空间的理化特性数值的数值模拟模型;根据现役航空发动机的燃烧室结构,采用相似准则提炼标准缩比燃烧室,基于所述标准缩比燃烧室建立三维瞬态燃烧室模型,以所述航空燃料的基础燃烧性能数据和所述航空燃料的数值模拟模型中的基础理化数值为输入,燃烧室部件性能参数为输出,然后通过标准燃烧室试验数据以校正所建立的三维瞬态燃烧模型^[3-6]。

根据现役航空发动机的结构,采用相似准则缩比得到标准缩比发动机,然后,根据使用航空燃料建立的发动机一体化模型为基础,用标准缩比发动机建立标准发动机一体化模型,通过标准发动机试验和航空发动机一体化模型仿真的数据以校正所建立的标准发动机一体化模型,其中,所述标准发动机一体化模型为:包括所述三维瞬态燃烧室模型的一次流空气系统、以及二次流空气系统瞬态耦合的发动机模型^[7-9]。

利用所述标准发动机一体化模型及所述航空燃料的历史经验数据获取发动机系统关键安全参数空间的安全工作区域,并校正从航空燃料到发动机系统关键安全参数空间的映射关系。

2.2 判定准则和测试条件提取

在 5 个层次上评价航空替代燃料的安全性,5 个层次的关联关系必须建立,而且安全性必须参

数化. 参数化通过在 5 个层次上提炼安关键安全参数和它们的安全工作区间实现. 基于航空煤油的历史经验数据,获取安全性相关关键参数的工作区间。通过大量航空煤油运行实际统计数据得到发动机关键安全参数空间的安全操作区间,即发动机安全边界与安全裕度,从而成为航空发动机安全性判定准则,并校正从航空燃料到发动机关键安全参数空间的映射关系. 该步骤为替代燃料的发动机安全性提供了判定准则。

把关键安全参数空间的安全边界和安全裕度作为目标,把航空燃料理化特性作为变量,进行全局敏感性分析,将航空发动机关键安全参数空间(发动机级及部件级)的操作安全边界分为依赖燃料和依赖发动机的安全边界、依赖燃料而不依赖发动机的安全边界以及不依赖燃料而依赖发动机的安全边界. 对于依赖燃料和依赖发动机的安全边界,例如热值、密度、黏度、冰点,分析其最敏感区域的发动机运行条件,从而确定必须进行发动机测试,并依据关键参数的工作范围,判定其符合性。依赖燃料而不依赖发动机的安全边界,可直接通过理化性能测试来确定其符合性^[10-15]。

2.3 替代燃料在航空发动机中安全性认证方法

根据相似类比原理,基于航空煤油运行经验,假设航空煤油在发动机、飞机上的使用是安全的,对比航空替代燃料在发动机水平上的安全性,形成燃料航空发动机“即用性”使用安全性认证流程,如图 2 所示。

步骤 1 基于航空燃料的历史经验数据和航空发动机的结构特征,获取与发动机系统安全性相关的关键安全参数,并基于关键安全参数得到发动机系统的关键安全参数空间,其中,关键安全

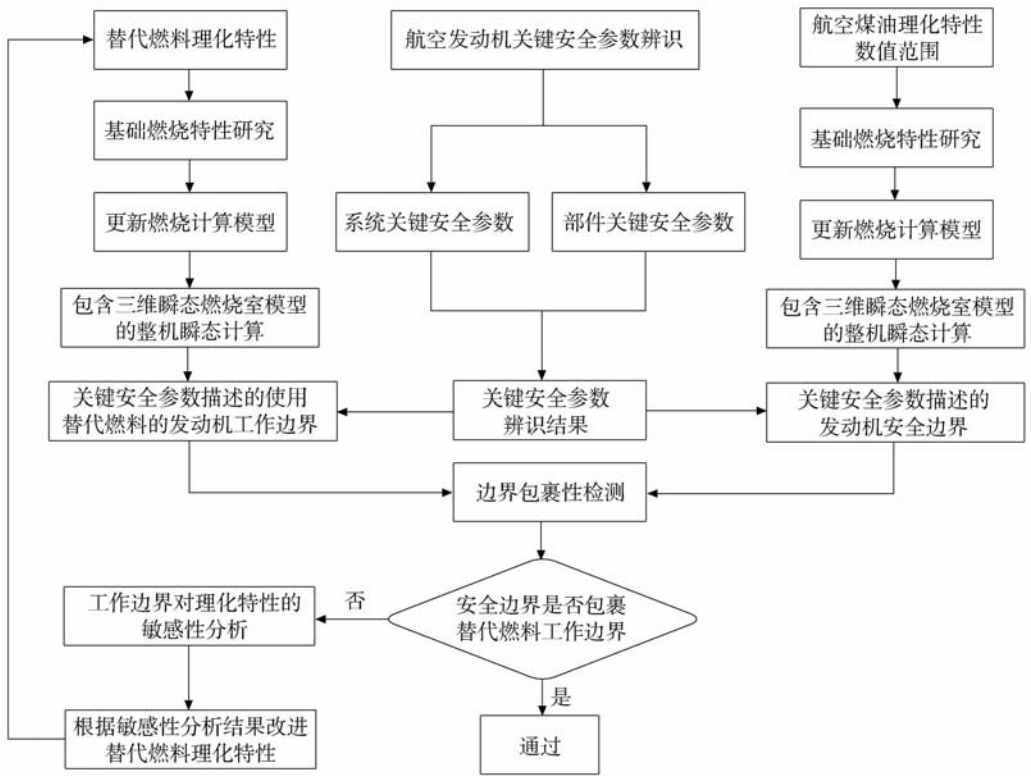


图 2 “即用性”燃料航空发动机使用安全性认证方法

Fig.2 Aero-engine safety certification method of “dop-in” fuel

参数包括发动机级关键安全参数和部件级关键安全参数。

步骤 2 利用航空燃料的历史经验数据，基于获取的发动机系统关键安全参数空间，获取发动机系统关键安全参数空间的安全工作区域，并在此过程中，确定所建立的从航空燃料到发动机系统关键安全参数空间的映射关系，其中，所述映射关系包括航空燃料的组成空间和基础理化特性的映射关系、航空燃料的基础理化特性与燃烧室部件性能的映射关系、以及燃烧室部件性能与航空燃料的发动机系统关键安全参数的映射关系。

步骤 3 利用所建立的从航空燃料到发动机系统关键安全参数空间的映射关系，获取使用替代燃料的发动机系统关键安全参数空间的工作区域，基于上述所得到的航空燃料的发动机系统关键安全参数空间的安全工作区域对替代燃料进行安全性判定。

3 结 论

本研究建立一套系统安全性的评价方法，提供了替代燃料在发动机安全性上的判定准则，减少了认证测试流程的燃料成本。另外，提供了替代

燃料改进的方法，分别是安全水平的提高和精制成本的缩减。

参考文献：

[1] WANG Haiying, CHEN Zhongming, YANG Xiaoyi. Life cycle analysis of alga alternative aviation bio-fuel[R]. Beijing: The Third China Energy Scientist Forum, 2011.

[2] CHEN Zhongming, YANG Xiaoyi, PENG Zhijun. The development of alternative jet fuel for aviation[R]. Beijing: The Second China Energy Scientist Forum, 2010.

[3] Kumar K, Sung C J, Hui X. Laminar flame speeds and extinction limits of conventional and alternative fuels[J]. Fuel, 2010, 90(3): 1004-1011.

[4] Garby R, Selle L, Poinot T. Large-eddy simulation of combustion instabilities in a variable-length combustor[J]. Comptes Rendus Mécanique 2013, 341(1/2): 220-229.

[5] Smith C E, Nickolaus D, Leach T, et al. LES blowout analysis of premixed flow past V-gutter flameholder [J]. AIAA-2007-170, 2007.

[6] Xin Y, Sung C J, Law C K. A mechanistic evaluation of Soret diffusion in heptane/air flames[J]. Combust Flame 2012, 159(9): 2345-2351.

[7] DING Shuiting, LI Guo, LUO Bin. Active control thermal-loading method to ameliorate stress in aeroengine turbine disk[J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2013, 27(2): 274-285.

[8] DING Shuiting, LI Guo, DENG Mingchun. Experimental study of an actively managed thermal loading method in turbine disk [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2014, 28(1): 39-49.

[9] ZHANG Gong, DING Shuiting. Safety analysis of flow parameters in a rotor-stator cavity [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(6): 831-838.

[10] DING Shuiting, QIU Tian, LIU Xiaofeng, et al. Dynamic coupled systems FHA: a simulation-aided approach [J]. Procedia Engineering, 2014, 80: 479-493.

[11] DING Shuiting, QIU Tian, LIU Xiaofeng, et al. FHA method for VBV position control function of FADEC system based on aero-engine dynamic model [J]. Procedia Engineering, 2011, 17: 567-579.

[12] DING Shuiting, LI Guo. Experimental study of flow through a blade trailing edge with a wavy partition [J]. Experimental Heat Transfer, 2011, 24(3): 266-284.

[13] DING Shuiting, BAO Mengyao. Causality diagram based safety analysis of micro turbojet engine [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 28(30): 262-268.

[14] 丁水汀, 张弓, 蔚夺魁, 等. 航空发动机适航概率风险评估方法研究综述 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(7): 1441-1451.
DING Shuiting, ZHANG Gong, YU Duokui, et al. Airworthiness probability risk assessment study on aviation engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(7): 1441-1451. (in Chinese)

[15] 丁水汀, 鲍梦瑶, 杜发荣. 航空活塞发动机涡轮增压系统的安全边界研究 [J]. 航空动力学报, 2011, 26(11): 2534-2542.
DING Shuiting, BAO Mengyao, Du Farong. Aviation piston engine turbo system security boundary [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(11): 2534-2542. (in Chinese)

(编辑:王碧琚)