

运输类飞机燃油箱可燃性适航符合性方法

张瑞华¹, 刘卫华¹, 刘春阳², 薛 勇³

- (1. 南京航空航天大学 航空学院, 南京 210016;
2. 中国民用航空上海航空器适航审定中心 燃油动力室, 上海 200335;
3. 中国商用飞机有限责任公司 上海飞机设计研究院, 上海 201203)

摘 要: 基于国内运输类飞机适航认证需要,系统分析了 CCAR/FAR25.981 条款变迁历史、内涵与指标要求;并从型号申请人的角度针对适航取证过程中拟采取的符合性方法开展了初步探讨,归纳总结出不同类型油箱可燃性指标及符合性验证方法;在此基础上,研究了美国联邦航空局(FAA)官方颁布的油箱可燃性评估应用程序。研究表明:①燃油箱可燃性适航符合性验证工作重点是可燃性暴露时间评估方法的应用;不同类型油箱,所允许的机队平均可燃性暴露水平不同,其中,机身油箱是适航审定关注的重点;②为了确定隔舱的平均燃油温度、气相空间温度和油箱壁面温度,并根据平均燃油温度计算燃油箱隔舱的热时间常数和平衡温差以用于蒙特卡洛分析,最经济有效的方法是建立燃油箱热模型;③计算机队平均可燃性暴露时间的难点在于平衡温差与时间常数的准确获取,对于该问题,可以通过遗传算法追踪来予以解决。

关 键 词: 适航条款;符合性验证;燃油系统;运输类飞机;可燃性暴露水平

中图分类号: V217 **文献标志码:** A

Flammability and airworthiness compliance method of fuel tank for transport aircraft

ZHANG Ruihua¹, LIU Weihua¹, LIU Chunyang², XUE Yong³

- (1. College of Aerospace Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. Fuel Power Department,
Shanghai Airworthiness Certification Center of Civil Aviation of China, Shanghai 200335, China;
3. Shanghai Aircraft Design and Research Institute,
Commercial Aircraft Corporation of China Limited, Shanghai 201203, China)

Abstract: Based on the airworthiness certification needs of domestic transport aircraft, the changing history, the connotation and index requirements of CCAR/FAR25.981 were systematically analyzed. From the perspective of the model applicant, a preliminary discussion on the conformity methods to be adopted in the process of airworthiness certification was conducted. Meanwhile, the flammability indexes and conformity verification methods of different types of fuel tanks were summarized. Subsequently, the fuel tank flammability as-

收稿日期: 2019-11-07

基金项目: 国家自然科学基金民航联合基金(U1933121); 获江苏省科研与实践创新计划资助(KYCX19_0198); 中央高校基本科研业务费专项资金; 江苏高校优势学科建设工程

作者简介: 张瑞华(1997—),女,博士生,主要从事运输类飞机适航技术研究。

引用格式: 张瑞华,刘卫华,刘春阳,等. 运输类飞机燃油箱可燃性适航符合性方法[J]. 航空动力学报,2020,35(5):1099-1108.
ZHANG Ruihua,LIU Weihua,LIU Chunyang,et al. Flammability and airworthiness compliance method of fuel tank for transport aircraft[J]. Journal of Aerospace Power,2020,35(5):1099-1108.

assessment application issued by Federal Aviation Administration (FAA) was studied. Research shows that: (1) the revision of airworthiness regulations is the result of the development of fuel tank safety technology and knowledge level, and the airworthiness regulations must be closely combined with the current mainstream technology level; (2) different types of fuel tanks allow different levels of fleet average flammability exposure, among which fuselage fuel tank is the focus of airworthiness certification; (3) the difficulty of the average flammability exposure time of the computer team lies in the accurate acquisition of the balance temperature difference and time constant, which can be solved through establishment of fuel tank thermal model and genetic algorithm tracking.

Key words: airworthiness terms; compliance verification; fuel system; transport aircraft; flammability exposure level

民机燃油箱可燃性暴露水平不仅关系到飞机生存力,同时也关乎着乘员的生命安全,据统计,自 1960 年至 2008 年,全球范围内民用运输类飞机燃油箱燃爆事故已发生 18 起,造成了 542 人遇难,油箱燃爆已成为民用航空安全的主要威胁之一^[1-4],并引起世界各国适航管理当局的严重关注。

为充分降低民用运输类飞机油箱燃爆事故发生概率,美国联邦航空局(Federal Aviation Administration,FAA)率先对涉及油箱点燃防护的 FAR25.981 条款进行了 3 次修订,即:25-11 修正案、25-102 修正案和 25-125 修正案^[5-9]。

在 FAA 对燃油箱点燃防护条款内容不断演变、修正与完善的同时,欧洲航空安全局(European Aviation Safety Agency,EASA)亦于 2008 年 7 月 17 日发布了 NPA(Notice of Proposed Amendment) No. 2008-19《降低燃油箱可燃性》修正案草案通告^[10],提出了对 CS25 部进行相应的修订。需要强调的是:EASA 和 FAA 在燃油箱可燃性要求上尚存在着一定差异,但双方在燃油箱防爆安全方面的政策正逐步协调一致。

中国民用航空局(Civil Aviation Administration of China,CAAC)规章体系类似于 FAA,虽燃油箱可燃性要求晚于 FAA 发布,但规章间的逻辑关系是一致的^[11-12]。

随着世界各国对于燃油箱点燃防护的要求愈加严苛,民用运输类飞机的可燃性适航审定已成为型号申请人所面临的重大技术难题。本文基于国产民用运输类飞机适航认证需要,就 FAR25.981 条款变迁历史、内涵与指标要求进行了分析;并从型号申请人的角度针对适航取证过程中宜采取的符合性方法展开探讨,归纳总结不同类型油箱可燃性指标及适航符合性方法;在此

基础上,就油箱可燃性评估程序具体应用进行较为深入的研究。

1 CCAR/FAR25.981 条款变迁历史与要求分析

1.1 CCAR/FAR25.981 条款变迁历史

历史上,与飞机燃油箱可燃性相关的适航条款已历经多次修订,具体如表 1 所示。

就油箱可燃性而言,25-11 修正案第一次对油箱燃爆问题提出了审定要求,新增了 FAR25.981“燃油箱温度”条款,旨在通过限制“燃油箱温度”防止可燃蒸汽自燃、杜绝燃油箱燃爆事故的发生。

在一系列油箱燃爆航空事故发生后,FAA 对燃油箱燃爆的潜在安全性问题展开了深入研究,于 1999 年颁布立法咨询通告 NPRM NO. 99-18,对新设计的飞机首次提出将燃油箱可燃性降至最低的建议;2001 年 5 月,FAA 发布《运输类飞机燃油箱系统设计评审、降低可燃性,以及维护和检查要求》最终法规及 FAR21 部特别适航条例 SFAR88《燃油箱系统容错评估要求》,初步提出对燃油箱可燃环境控制的要求,随后,FAA 颁布了 25-102 修正案,并将 FAR25.981 条款标题由“燃油箱温度”修订为“燃油箱点火防护”,修订后的 FAR25.981 条款既要求防止燃油箱点火源的产生,又同时要求限制燃油箱可燃蒸汽的发展。

在 25-102 修正案的基础上,2008 年 9 月 19 日,FAA 颁布了 25-125 修正案,与 25-102 修正案不同,25-125 修正案将降低运输类飞机燃油箱可燃性作为其修订重点,在保持 25-102 修正案中关于对点火源严格防范要求的基础上,进一步细化了对于可燃性暴露时间的限制要求,同时,对机身燃油箱也提出了更严苛的可燃性控制指标要求。

表 1 适航条款修订简史

Table 1 Brief history of airworthiness amendments

颁布机构	条款	关注内容	生效日期
FAA	FAR25. 981 11 修正案	燃油箱温度要求	1967. 06. 04
	FAR25. 981 102 修正案	燃油箱点火源防护要求及初步可燃环境要求	2001. 06. 06
	FAR25. 981 125 修正案	燃油箱点火源防护要求及细化可燃环境要求	2008. 09. 19
EASA	CS 25. 981	燃油箱温度变化	2003. 10. 17
	CS 25. 981 1 号修正案	燃油箱点火源防护要求(无 CDCCL 要求)及初步可燃环境要求	2005. 12. 12
	CS 25. 981 6 号修正案	燃油箱点火源防护要求(无 CDCCL 要求)及细化可燃环境要求	2009. 06. 26
	CS 25. 981 9 号修正案	增加 CDCCL,其他同上	2010. 08. 05
CAAC	CCAR25. 981(R3)	燃油箱温度要求	1985. 12. 31
	CCAR25. 981(R4)	燃油箱点火源防护要求及细化可燃环境要求	2011. 11. 07
	中华人民共和国交通运输部令 2016 年第 19 号《运输类飞机适航标准》	同上	2016. 04. 17

中国民用航空局规章体系类似于 FAA,2011 年 11 月 7 日颁布了 CCAR25-R4《运输类飞机适航标准》,对于新型号运输类飞机的燃油箱可燃性,CCAR25. 981(b)、(d)款及附录 M 明确了定性与定量要求;2016 年 3 月 17 日,交通运输部以中华人民共和国交通运输部令(2016 年 19 号)的形式对油箱可燃性适航要求进行了重新修订。

通过梳理飞机燃油箱可燃性适航条款的变迁历史,可以清晰地得出,任何新修正案的提出都是基于当时的认知与技术水平、是认知水平的提高与新技术应用紧密结合的必然结果。对于型号申请人而言,适航符合性方法的提出应基于当前行之有效的最新技术与业界的认知水平,并预留充足的发展空间。

1.2 可燃性适航条款要求分析

民用运输类飞机燃油箱点燃防护相关适航要求主要包含在 CCAR/FAR25. 981 条款和附录 M、N 之中,其附录与条款正文具有等效性,对其简要分析如下:

1) CCAR/FAR 25. 981“燃油箱点燃防护”条款分析

CCAR/FAR25. 981 条款制订目的是防止飞机在正常工作和失效情况下热表面或其他点火源的出现,同时结合对可燃环境的控制,降低燃油箱的可燃性暴露时间,以双管齐下的方式来防止灾难性事故的发生。

CCAR/FAR25. 981 共包含 4 款内容,其中:(a)款的主旨是严禁点火源的出现,它包含在正常、失效及故障等工作状态下,制造、老化、磨损及损伤等因素对点火源出现的影响,其主要内容涉及燃油箱的温度、燃油箱内各部件的故障模式及失效概率,它提出了在任何状态条件下,燃油箱内最高温度应低于预定使用的燃油自燃温度,并留有一定的安全余量。单点失效不能引发燃油箱内点火源、各种组合失效导致燃油箱内出现点火源的概率应小于 10^{-9} 等要求;(b)款提出了不同油箱的机队可燃性暴露时间限制要求并规定了燃油箱可燃性暴露时间评估方法,确定了可燃性暴露水平的定性和定量要求,并指定型号申请人必须采用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法来进行燃油箱可燃性分析,其提出的可燃性暴露评估时间(flammability exposure evaluation time,FEET)控制指标综合了经济性、安全性等诸多因素的考虑,对于位于机身轮廓线内的辅助燃油箱则提出了更严格要求;(c)款提供了(b)款的一个替代选项、即减轻点燃影响措施(IMM),(b)、(c)两条款旨在点火源防护基础上,通过显著降低飞机燃油箱内无油空间的可燃性或减轻点燃后对飞行安全的影响,以从根本上解决燃油箱燃爆安全问题;(d)款要求建立关键设计构型控制限制(CDCCL)和强制性维护、检查措施以防止可燃性水平上升或点火源防护及减轻点燃影响措施的性能退化和可靠性降低。

2) 附录 M“燃油箱系统降低可燃性的措施”条款分析

条款规定:除主燃油箱以外,其他位于机身内的燃油箱均需要满足附录 M 的要求。

附录 M 中含有降低可燃性措施(FRM)的详细规范要求,以确保 FRM 的性能和可靠性。其主要内容包括:①每个燃油箱的机队平均可燃暴露不能超过 3%的可燃性暴露评估时间(FEET),如果采用了 FRM,则在这 3%中,必须保证在 FRM 工作但燃油箱没有惰化且可燃和 FRM 不工作但燃油箱可燃这两种情况下,每段时间均不得超过 FEET 的 1.8%;②燃油箱机队平均可燃性暴露分析中应包括地面或起飞/爬升阶段;③须提供可靠性指示来识别 FRM 的隐性失效,确保 FRM 满足条款中的最低可靠性要求;④对于 FRM 部件失效会影响燃油箱满足指定可燃性暴露的 FRM 系统,进行了适航限制。

3) 附录 N“燃油箱可燃性暴露和可靠性分析”

附录 N 规定了为满足第 25.981(b)款和附录 M 所需进行的燃油箱机队平均可燃性暴露分析的要求。附录 N 含有表明受影响的飞机燃油箱符合建议的可燃性暴露限制所需的全部或温暖天气条件下燃油箱可燃性暴露值的计算方法。其中:N25.2给出了附录N中使用的与可燃性和分

析方法相关的具体定义;N25.3 给出了燃油箱可燃性暴露分析方法及相关参数定义;N25.4 给出了燃油箱可燃性暴露分析中相关变量和数据表。

2 适航符合性方法研究

2.1 油箱可燃性的适航符合性方法

燃油箱可燃性符合性审定依据的是适航规章与条款,申请人通过提交各适用条款的符合性证明材料,完成相应的分析报告、验证实验以表明所涉及的飞机满足适航规章的要求。

中国民航管理程序 AP-21-AA-2011-03-R4《航空器型号合格审定程序》中给出了常用的适航符合性验证方法,但对于飞机燃油箱可燃性适航符合性验证而言,方法具体应用见表 2。

为了表明燃油箱可燃性的适航符合性,型号申请人通常需至少开展与燃油箱热模型验证和燃油箱惰化系统性能及模型验证相关的地面/飞行试验,并提交相关试验报告供适航审定当局审查。

申请人应提交的审定报告一般包括:①燃油系统设计符合性说明;②燃油箱可燃性分析报告;③惰化系统安全性、可靠性评估报告;④燃油惰化系统地面/飞行试验大纲;⑤燃油惰化系统地面/飞行试验报告;⑥燃油惰化系统设备鉴定试验大纲/报告。

表 2 油箱可燃性的符合性验证方法
Table 2 Fuel tank flammability conformity verification method

符合性方法	要求描述
MC1 说明性文件	所提供的说明性文件(譬如设计图纸、设计方案、持续适航文件等)能够表明燃油箱的布局、外翼油箱是否为传统非加热铝制机翼油箱、机身油箱(若有)的热量输入是否已最小化、以及必要的适航限(CDCCL、特殊维护/检查等)等。
MC2 分析/计算	对燃油箱可燃暴露水平进行定性或定量分析,包括采用必要的地面试验和飞行试验数据进行修正/验证,来综合确定燃油箱的可燃暴露水平是否满足要求。定量分析/计算须采用指定的 Monte Carlo 分析程序。
MC3 安全评估	采用 FRM 措施降低燃油箱可燃性时,需要对新引入系统开展必要的安全性评估(包含 SFHA、FTA、FMEA 等)以及可靠性分析等,确保新引入系统达到要求的安全性、可靠性指标。
MC5 /MC6 地面试验/ 飞行试验	对于高可燃性油箱,需开展 Monte Carlo 定量分析工作,而该分析需要的输入由必要的地面试验和飞行试验来获得。
MC9 设备合格性	燃油箱系统/惰化系统的部件均须通过设备鉴定试验/必要的计算分析或相似性分析,来证明系统设计满足预定要求和性能。对于燃油箱系统采用的减轻点燃影响措施,其设备也需开展合格鉴定试验/分析,确认其满足抑制燃油箱爆炸,而且不会妨碍继续飞行和着陆的要求。

2.2 燃油箱可燃性适航符合性验证要素分析

目前,我国对运输类飞机燃油箱可燃性适航审定的技术标准与依据是 CCAR25. 981-R4 条款及其附录 M、N,适航符合性指导文件则主要采用 FAA 咨询通告 AC25. 981-2A。由于当前民用运输类飞机均未采用 IMM 措施,故本文假定型号申请人在未使用 IMM 措施的情况下开展燃油箱可燃性适航符合性验证要素分析,如图 1 所示,其中对带 * 标记的要素应重点予以关注。

对于满足 CCAR25. 981(d) 条款的 CDCCL

建立、检查或其他程序的适航符合性验证工作将具体体现在提交的适航限制文件、维修手册等材料中;燃油箱可燃性适航符合性验证工作重点是 CCAR25. 981(b)条款的符合性及其附录 M/N 规定的可燃性暴露时间评估方法应用。

CCAR25. 981(b)条款及其附录 M、N 的符合性验证具体可分为燃油箱类型与功能梳理、机队平均可燃性暴露时间指标要求与评估方法和 FRM 性能与可靠性^[13] 等三个方面,其工作内容如图 2 所示。

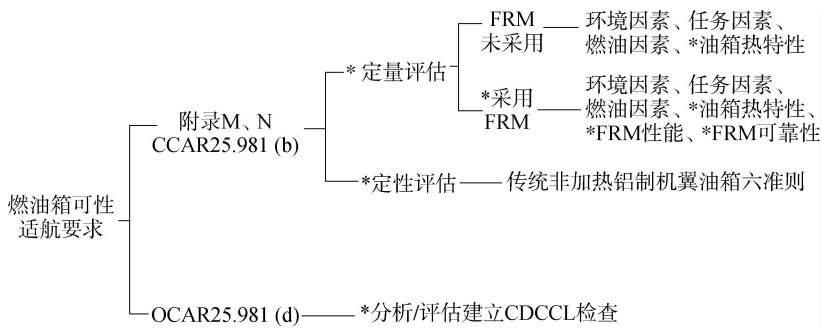


Fig. 1 Fuel tank flammability airworthiness compliance verification elements

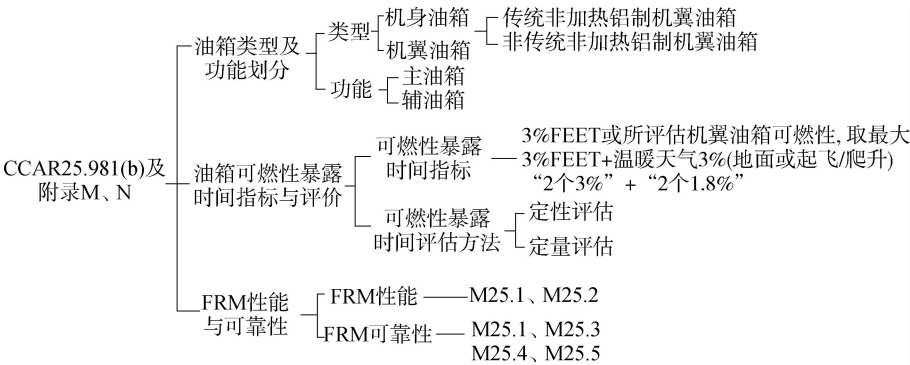


图 2 CCAR25. 981(b)条款及其附录 M/N 符合性验证内容

Fig. 2 CCAR25. 981(b) provisions and appendix M/N compliance verification

2.3 可燃性指标与符合性验证工作流程分析

2.3.1 不同类型油箱可燃性指标

不同类型油箱有着不同的可燃性暴露时间要求。就机翼油箱而言,对于传统的机翼油箱,并没有可燃性定量指标要求,它仅需型号申请人从飞机构型描述、油箱内或邻近区域热源清单、飞机燃油牌号、油箱相对于周围大气静压的运行压差、油箱材料、油箱的气动表面积等六个方面来证明该

油箱符合传统机翼油箱定义,采用可燃性定性分析即可;而对于非传统的机翼油箱,其可燃性暴露时间要求为: 不大于可燃性暴露评估时间(FEET)的 3%或所评估机型传统机翼燃油箱的可燃性暴露时间,取较大者。就机身油箱而言,可燃性暴露时间要求不超过 FEET 的 3%,且不超过 FEET 中温暖天气条件下处于地面或起飞/爬升阶段部分的 3%。对于主油箱,可燃性暴露时

间要求不大于 FEET 的 3%或所评估机型机翼燃油箱的可燃性暴露时间,取较大者。

当油箱可燃性暴露时间超出适航指标要求时,适航当局建议采用 FRM 措施来降低油箱可燃性。对于采用了 FRM 的油箱,FRM 机身油箱要求为:机队平均可燃暴露时间不超过 FEET 的 3%,且在这 3%中,FRM 工作但燃油箱没有惰性化并且可燃和 FRM 不工作且燃油箱可燃两种情况下,每段时间均不得超过 FEET 的 1.8%;机队平均可燃暴露时间不可超过 FEET 中温暖天气条件下处于地面或起飞/爬升阶段部分的 3%(这也是惰化系统工程设计的难点)。FRM 机翼油箱一般难以表明其为等效的传统非加热铝制机翼油箱,对可燃性暴露水平的控制依赖于 FRM 的性能和可靠性,其可燃性暴露要求与 FRM 机身油箱相同。

2.3.2 不同类型油箱适航符合性验证工作流程

机翼油箱的符合性验证流程如图 3 所示,其具体工作可分为四步:①判断该油箱是否为“传统非加热铝制机翼油箱”或等效的“传统非加热铝制机翼油箱”;②如果满足,则可直接采用定性评估,否则,需采用定量评估;③定量评估中,如果该油箱不满足 3%FEET 指标要求,则推荐采用 FRM 措施;④对于 FRM 措施油箱,需将 FRM 模型嵌套进入可燃性评估程序中,以判别其是否满足相关适航条款要求^[13-15]。

机身油箱的符合性验证流程如图4所示,其

工作流程也可分为四步进行:①判断是否为主油箱;②对于机身辅助油箱进行机队平均可燃性暴露分析,判断是否满足不大于 3%FEET 和“温暖天气条件” 3%的 FEET 的要求;③对不满足上述两个 3%指标的机身辅助油箱判断是否实施了 FRM 措施;④对实施 FRM 措施的机身辅助油箱机队平均可燃性暴露进行分析,并要求其满足 2 个 3%和 2 个 1.8%以及对应的可靠性要求等。

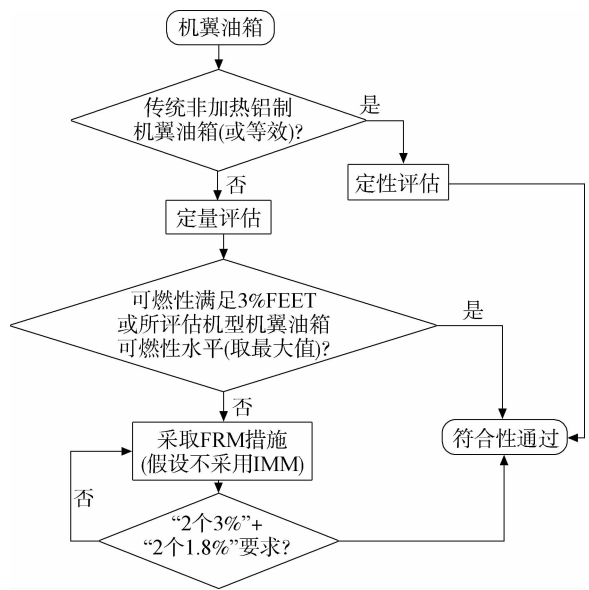


图 3 机翼油箱的适航符合性验证工作流程
Fig.3 Wing fuel tank airworthiness compliance verification workflow

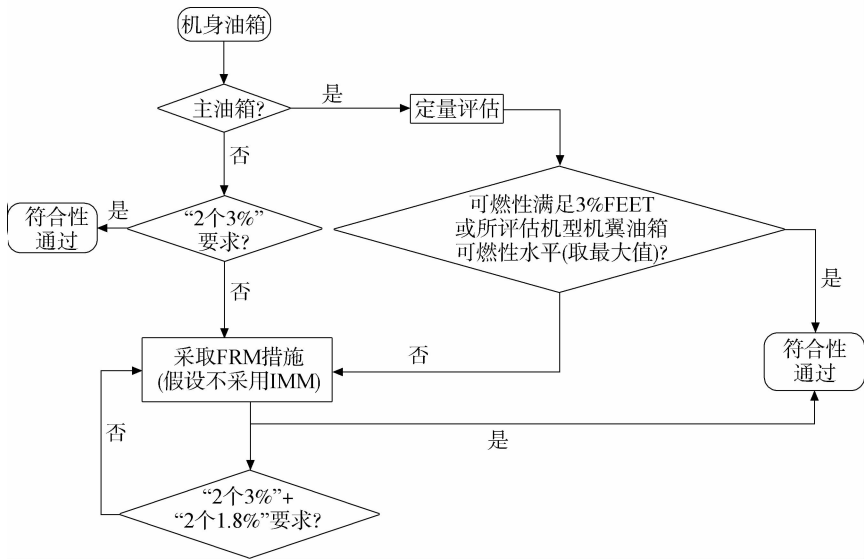


图 4 机身油箱的适航符合性验证工作流程
Fig.4 Airframe fuel tank airworthiness compliance verification workflow

3 可燃性暴露评估时间计算

基于 Monte Carlo 随机数产生技术,FAA 提出了燃油箱可燃性评估方法(FTFAM)^[16],该方法是在大量航段的基础上,针对部分未知变量的已知分布,利用 Monte Carlo 方法生成随机数据^[14];在用户输入相关参数后,计算各个航段的

可燃性暴露时间;并通过大量计算来产生统计学上的可燃性暴露水平数据。

燃油箱可燃性计算程序(模型)的总体框架如图 5 所示,程序中各主要计算模块的简化流程如图 6 所示,该方法已为我国适航当局所采用,并作为燃油箱可燃性暴露时间评估方法。图中 T_{amb} 为环境温度, T_{oa} 为外界空气温度。

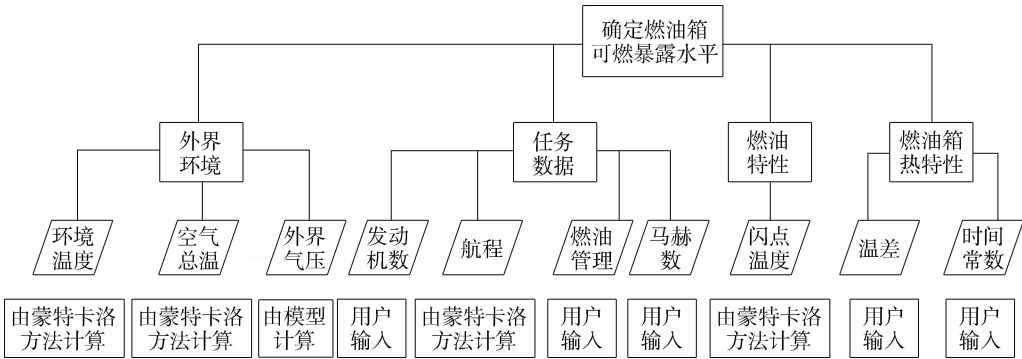


图 5 燃油箱可燃性计算程序(模型)的总体框架

Fig. 5 Overall framework of fuel tank flammability calculation program (model)

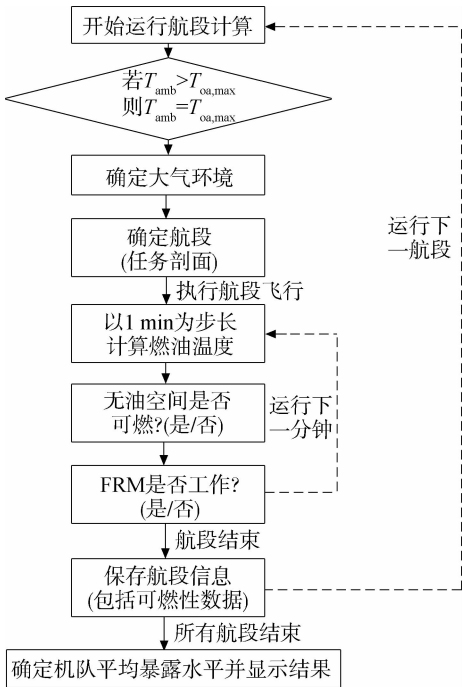


图 6 程序中各主要计算模块的简化流程

Fig. 6 Simplified flow of each main calculation module in the program

燃油箱可燃性评估方法对于每一时间单位的可燃性判定过程都可以看作一个比较过程,它包含两类判据,第一类是针对可燃界限提出的,用于判断燃油箱中温度是否落入可燃界限内;第二类是针对氧浓度极限提出的,用于判别燃油箱是否处于惰性化状态。对于未采用 FRM 的燃油箱,

计算程序仅考虑了可燃界限判据;对于采用了 FRM 的燃油箱则需要同时考虑上述两个判据。因此,对于可燃性暴露评估时间的计算需要分为“未采用 FRM”和“采用 FRM”两种情况来进行。

对于未安装 FRM 油箱,可燃性暴露时间计算主要涉及到燃油温度和可燃界限;对于已安装 FRM 油箱,除燃油温度和可燃界限外,还涉及到氧浓度水平,即 FRM 性能与可靠性,如图 7 所示。图中 UFL (upper flammable limit), LFL (lower flammable limit)。

燃油箱可燃性计算源程序中,黄色标注着用户输入项,其余部分为非用户输入项,以最大航程为 8 334 km,发动机数量为 2,最大飞行时间为 610 min 为例,某机型燃油箱可燃性暴露时间的计算结果如图 8 所示。

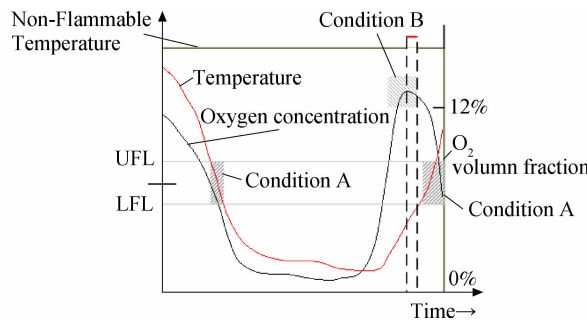


图 7 燃油温度、氧体积分数与可燃性暴露时间

Fig. 7 Fuel temperature, oxygen volumn fraction and flammability exposure time

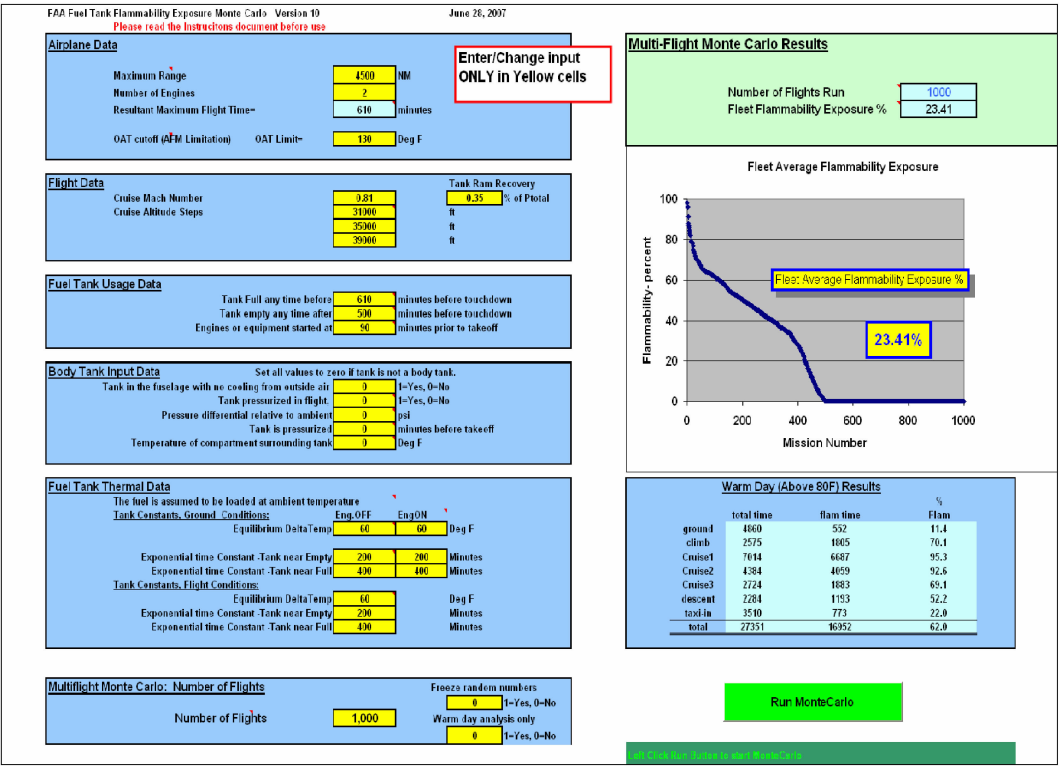


图 8 燃油箱可燃性暴露时间计算
Fig. 8 Fuel tank flammability exposure time calculation

3.1 燃油温度计算

在可燃性暴露时间计算中,燃油温度变化规律的确定是其关键。基于经济性,实用性等方面的考虑,型号申请人通常采用热模型分析法来获取准确的燃油温度变化规律。所谓的燃油箱热模型法就是基于能量守恒原则建立燃油箱热传递数学模型,通过数值积分方法来求取燃油温度的变化规律。该方法可在设计研发阶段为燃油箱内外热源系统的布置安装提供指导,在适航取证阶段为 Monte Carlo 分析提供支持。

燃油箱热模型的建模及仿真计算流程如图 9 所示。

建模中,应选取燃油温度基本相同油箱隔舱作为热分析单元,并以密封肋或半密封肋作为油箱隔舱划分边界,通过对燃油箱所涉及的流动和换热问题分析,简化出典型的分析单元和热源;利用集中参数法划分节点(质量块),并采用热阻建立各节点之间的换热关系(导热、对流换热、热辐射);通过设置不同节点和热阻的参数来代表不同油箱隔舱的形状、体积及热量流入和流出,依据换热关系及能量守恒原则来获取各节点温度,以实现在各种飞行状态下对燃油系统质量流动、热焓流动的动态计算^[17-20]。

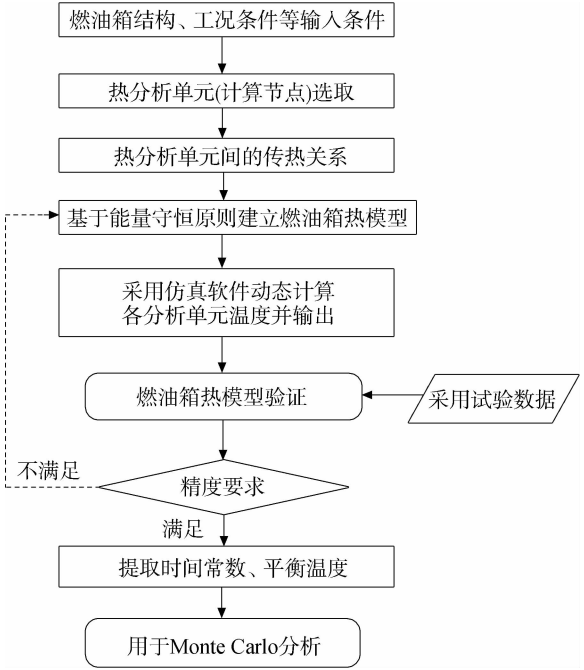


图 9 燃油箱热模型建模及仿真计算流程
Fig. 9 Fuel tank thermal model modeling and simulation process

油箱热模型建立后还需进行必要的试验验证与完善,模型验证合格的标准是:计算所获取的燃油温度与地面/飞行条件下实测燃油温度变化规律基本一致,且实测值不大于计算值 1.67 K 或大

于 1.67 K 的持续时间不超过 5 min。

通过油箱热模型获取燃油温度变化规律后,评估工作的难点将主要体现在平衡温度和时间常数的确定上,这是因为在 Monte Carlo 程序中,为了简化计算,运用集总参数法建立了油箱热模型,如式(1)所示。

$$qA_f - h(T - T_a)A_c = \rho Vc \frac{dT}{dt} \tag{1}$$

式中 q 为流入热流, A_f 为等效面积, A_c 为与外界换热面积, T_a 为大气总温, ρ 为燃油密度, c 为比热容, T 为温度, V 为体积。

式(1)的解析解为

$$\frac{T^{i+1} - T^i}{(T_a^{i+1} + \Delta T) - T^i} = 1 - e^{(-\frac{\Delta T}{\tau})}$$

其中 $\Delta T = \frac{qA_f}{hA_c}$, $\tau = \frac{\rho Vc}{hA_c}$, t 为时间。

即: Monte Carlo 程序中,燃油温度的变化规律采用幂指数函数的形式,通过时间常数 τ 和平衡温差 ΔT 模拟燃油温度每一时刻的变化,用户需要自行输入不同状态下的时间常数和平衡温差,为此,在采用 Monte Carlo 程序开展燃油箱可燃性暴露时间计算时,申请人还必须依据热模型求取的温度变化曲线来确定不同阶段的时间常数和平衡温差,并在图 8 所示的相应输入框中输入。

时间常数和平衡温差反演问题,实质是参数优化问题,优化的变量就是不同阶段的时间常数和平衡温差,优化的目标是在所优化变量下,计算得到的燃油温度和测量的(或根据验证的燃油热模型预测的)燃油温度误差平方和最小,即

$$\min J(\tau, \Delta T) = \sum_{i=0}^N (T_i - T_{mi})^2 \tag{2}$$

式中 T 为计算所得燃油温度, T_m 为测量燃油温度。

由于遗传算法是群体搜索,易于并行化处理,适应度函数不受连续、可微等条件的约束,适用范围很广,通用性强,编程方便,为此,本文建议采用遗传算法进行参数寻优工作^[21]。

3.2 可燃界限

评估程序中,可燃界限将由油箱压力高度和燃油闪点共同决定。这里的油箱压力高度是指与燃油箱压力相同时的大气环境高度,它并不是飞机飞行时所处于的真实环境高度;在每次飞行中,燃油闪点将由 Monte Carlo 随机数产生。

在程序中, JET A 或 JET A-1 燃油的上下可燃界限可由式(3)、式(4)表示:

$$U = [(f_p - 273.15) \times 1.8] + 95.5 - 6.4h \tag{3}$$

$$L = [(f_p - 273.15) \times 1.8 + 22] - 4.06h \tag{4}$$

式中 f_p 为燃油闪点, h 为燃油箱压力高度。

3.3 情化系统性能与可靠性

若采用了 FRM 技术,申请人还需将经适航审定当局认可、可准确反映 FRM 系统性能与可靠性的数学模型嵌入 Monte Carlo 程序中,才能进行燃油箱可燃性暴露时间计算。

FRM 性能影响取决于其在预期的工作状态时维持空余空间不可燃的能力,在编写 FRM 性能程序的过程中应考虑到该系统在所有飞行条件下可能达到的性能,同时应通过 FRM 分析和试验来确保该性能程序的准确性。

FRM 的可靠性影响由 FRM 潜在故障分析决定,此潜在故障可能导致系统失去作用。为了确定这些影响,申请人还应向 FRM 工作表中输入:两次失效的平均间隔时间(MTBF),预期的 FRM 系统两次失效事件之间间隔的小时数;失效探测能力,预期的探测出 FRM 系统失效前的航班数量,此数值由系统监控和信息显示以及运行程序(例如 FRM 维修检查频率)决定;最低设备清单假设,在 FRM 系统失效被检测出来后,系统恢复所需的平均期望时间(飞行小时)。

4 结 论

1) 燃油箱可燃性适航符合性验证工作重点是可燃性暴露时间评估方法的应用;不同类型油箱,所允许的机队平均可燃性暴露水平不同,其中,机身油箱是适航审定关注的重点;

2) 可依据能量守恒原理建立燃油箱热模型来获取油箱各隔舱的平均燃油温度、气相空间温度和壁面温度,模型合格的标准是:计算所获取的燃油温度与地面/飞行条件下实测燃油温度变化规律基本一致,且实测值不大于计算值 1.67 K 或大于 1.67 K 的持续时间不超过 5 min;

3) 计算机队平均可燃性暴露时间的难点在于平衡温差与时间常数的准确获取,对于该问题,可以通过遗传算法追踪来予以解决。

参考文献:

[1] Aviation Rulemaking Advisory Committee (ARAC). Fuel tank harmonization working group final report[R]. Washington DC:FAA, ECfthwgT1-1231998, 1998.

[2] LANGTON R, CLARK C, HEWITT M, et al. Aircraft fuel system[M]. New York: John Wiley and Sons, 2010: 225-237.

[3] 中国民用航空局航空安全办公室. 中国民航航空安全报告 (2013 年)[R]. 北京: 中国民用航空局, 2014.

[4] 孟昭蓉, 杨春生. 世界航空事故汇编[M]. 北京: 中国民用航空杂志社, 2002.

[5] Federal Aviation Administration. Transport airplane fuel tank system design review, flammability reduction, and maintenance and inspection requirements; Notice No. 99-18 [S]. Washington DC: Federal Register, 1999: 41-44.

[6] Federal Aviation Administration. Transport airplane fuel tank system design review, flammability reduction, and maintenance and inspection requirements; Amendment Nos. 21-78, 25-102[S]. Washington DC: Federal Register, 2005: 13.

[7] Federal Aviation Administration. Reduction of fuel tank system flammability in transport category airplanes; No. Amendment Nos. 25-125 [S]. Washington DC: Federal Register, 2008: 14-15.

[8] Federal Aviation Administration. Reduction of fuel tank flammability in transport category airplanes; Notice No. 05-14[S]. Washington DC: Federal Register, 2005: 34-36.

[9] Federal Aviation Administration. Fuel tank flammability reduction means; AC25. 981-2A[S]. Washington DC: Federal Register, 2008: 11-12.

[10] European Aviation Safety Agency. Fuel tank flammability reduction; NPA No. 2008-19[S]. Cologne, Germany: EASA, 2008: 23-25.

[11] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011: 11.

[12] 刘春阳, 李新, 鲍梦瑶. 民用运输类飞机燃油箱可燃性要求[J] 国际航空, 2018(3): 74-76.

LIU Chunyang, LI Xin, BAO Mengyao. Fuel tank flammability requirement for civil transport aircraft[J]. International Aviation, 2018, (3): 74-76. (in Chinese)

[13] The Boeing Company. Fuel tank flammability reduction and inerting system and methods thereof; US6016078 B2 [P]. 2012-12-16.

[14] SUMMER S M. Fuel tank flammability assessment method user's manual[R]. Washington DC: Air Traffic Organization Operations Planning Office of Aviation Research and Development, DOT/FAA/AR-05/8, 2008.

[15] 刘卫华, 刘春阳, 薛勇. 油箱可燃性与适航符合性方法[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 118-121.

[16] ARAC Report. Fuel tank harmonization working group final report[R]. Washington DC: Aviation Rulemaking Advisory Committee, 1998.

[17] 兰江, 朱磊, 赵竞全. 通用油箱热模型的建模与仿真[J]. 航空动力学报, 2014, 29(7): 1623-1630.

LAN Jiang, ZHU lei, ZHAO Jingquan. Modeling and simulation of universal fuel tank thermal model[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(7): 1623-1630. (in Chinese)

[18] 郭军亮. 基于 Matlab/Simulink 的民用飞机燃油箱热模型建模[R]. 江苏: 江苏省航空航天学会, 2012.

[19] 张斌. 民用飞机燃油箱系统热模型分析研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2013(1): 23-26.

ZHANG Bin. Thermal model analysis of fuel tank system of civil aircraft[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2013(1): 23-26. (in Chinese)

[20] 童升华, 邵垒, 古远康. 外热源作用下机翼油箱边界温度变化规律研究[J]. 航空兵器, 2014(1): 48-52.

TONG Shenghua, SHAO Lei, GU Yuankang. Study on boundary temperature variation of wing oil tank under the action of external heat source [J]. Aviation Weapons, 2014(1): 48-52. (in chinese)

[21] COELLO C A. An updated survey of GA-based multiobjective optimization techniques[J]. ACM Computing Surveys, 2000, 32(2): 109-143.

(编辑: 张 雪)