

文章编号:1674-8190(2018)01-126-05

反推力系统适航设计与符合性验证分析

邱朝群, 孙世东

(第一飞机设计研究院 适航与通用质量特性研究所, 西安 710089)

摘要: 现代涡喷飞机大多设计有反推力系统以提高飞机的经济性、可用性和安全性,然而反推力系统若发生故障则可能引发灾难性的飞行事故。因此,反推力系统的设计和适航符合性验证已成为适航当局重点关注的审定问题。本文通过对中、美、欧适航当局反推力系统的相关适航标准、咨询通告和修正案的研究,给出涡喷飞机反推力系统的适航要求和简析,反推力系统“操纵性”和“可靠性”验证思路及注意事项;此外,结合某型飞机的反推力系统,给出“可靠性”验证思路的实例验证过程和符合性结论。研究结果可为我国进行飞机反推力系统适航设计和符合性验证提供有益参考。

关键词: 反推力系统;适航设计;符合性验证;操纵性;可靠性

中图分类号: V228.7⁺4

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2018.01.017

Airworthiness Design and Analysis of Compliance Demonstration for Reversing System

Qiu Chaoqun, Sun Shidong

(Department of Airworthiness and General Quality Characteristics, The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Most of the modern turbojet airplanes are installed with reversing system, which can promote the economy, availability and safety of airplanes. However, failures of reversing system may have significant effect on airplane and people on-board and on the ground. The design and compliance demonstration of reversing system is also one of the key certification issues that the authorities usually focus on. Through the analysis of regulations, Advisory Circulars(ACs), and amendments of CAAC, FAA and EASA, the applicable airworthiness requirements and their brief analysis, the controllability and reliability compliance options and respective considerations of turbojet reversing system are illustrated. Additionally, the reliability option is applied to a specific aircraft reversing system, and the exact compliance demonstration items as well as compliance conclusion are given. The results can provide a useful reference for airworthiness design and compliance verification of aircraft thrust reversing system in china.

Key words: reversing system; airworthiness design; compliance demonstration; controllability; reliability

0 引言

反推力系统用于给飞机提供负推力以使飞机减速,大部分涡轮喷气发动机飞机(以下简称涡喷飞机)的反推力系统仅供飞机在地面阶段使用,用于帮助飞机在着陆或中断起飞时减速;另有少部分飞机(例如 DC-8 飞机、“协和号”飞机等)的反推力

系统可供飞机在飞行中使用。正常着陆时,使用反推力系统可以减少机轮和刹车片的磨损,提高其经济性;如需中断起飞,使用反推力系统可以快速降低滑跑距离,帮助飞机尽快停在跑道上;若跑道被污染时,使用反推力系统可有效降低着陆滑跑距离,保证人机安全。例如,通用公司某发动机在冰污染跑道上着陆时使用了反推力系统,使飞机的着陆滑跑距离降低了约 66%(如图 1 所示^[1])。综上所述,仅供地面使用的反推力系统,可提高飞机的经济性和可用性。此外,配备有反推力系统的飞机可用于跑道长度小于其设计着陆距离的机场,提高

飞机的机场适应性。

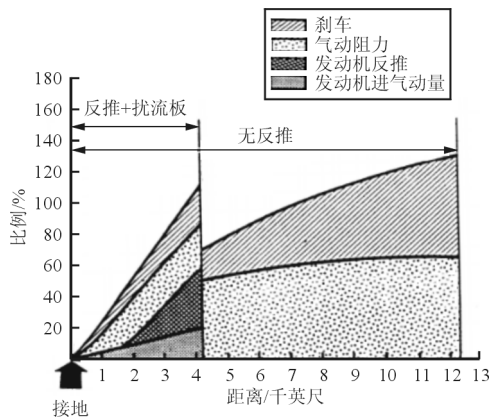


图 1 冰污染跑道上着陆时反推的减速效果

Fig. 1 The reverser effect on aircraft landing on icy runway

20 世纪 60 年代,反推力系统开始出现并被广泛使用,几乎安装于所有大型运输类飞机,仅个别机型除外,例如福克 28、BAe146 飞机。但在飞行中,若反推力系统非指令打开,会导致严重的飞行事故。1988 年 9 月 9 日,一架 DC-10 飞机在美国丹佛机场着陆时一号反推由于打开故障引起了不对称反推力,导致飞机发生事故;1991 年 5 月 26 日,瑞士劳达航空公司的一架波音 767 飞机在泰国曼谷机场起飞爬升过程中,由于反推力系统非指令打开导致飞机空中解体,造成全机 223 人罹难的重大空难。鉴于涡喷飞机的反推力系统如若发生故障会引起严重后果,各国民航局制定了相应的标准对运输类飞机的反推力系统的设计和验证提出要求,要求发动机和飞机制造商在设计中贯彻落实相关要求,防止非指令的反推打开,以表明反推力系统在正常和失效情况下均不会造成不安全状况。

国外,一些飞机制造商(例如波音、空客公司)通过多机型取证,积攒了丰富的反推力系统设计和验证经验。而我国自主研发的民用运输类飞机较少,有关反推力系统审定方面的研究和取证经验也较少,所能查阅到的资料中,仅毛文懿等^[2]对反推力装置的符合性验证思路进行了分析,靳宝林等^[3]、杜刚等^[4]、邵万仁等^[5]和沙江等^[6]分别对反推力系统的发展、原理、设计关键技术等进行了研究。

本文从适航审定角度,对反推力系统适用的适航要求、一般设计考虑、适航性设计和符合性验证思路等方面进行研究,对我国某型涡喷飞机反推力系统开展的验证工作进行检查,给出符合性结论。

1 反推力系统适航要求及分析

1.1 适用条款

在现行有效的 CCAR-25 部^[7]和 CCAR-33 部^[8]中,仅供地面使用的涡喷飞机反推力系统适用的条款包括:25.901(c)、25.903(b)、25.933(a)(1)、25.934、25.1155、25.1305(d)(2)、25.1309 和 33.97,共 8 条。

1.2 适用条款简析

25.901(c)、25.1309 和 25.903(b)为反推力系统失效分析和安装隔离的一般要求,要求该系统单个失效或组合失效不会危及飞行安全,且单个反推力系统的单个失效或组合失效不会影响其余反推。25.933(a)(1)要求反推力系统的设计必须能够保证飞机能适应或消除反推力系统带来的不安全隐患和各种故障模式,即反推力系统处于正常使用或故障情况时飞机均能安全飞行和着陆^[9-10]。25.934 规定了反推装置在 CCAR-25 部和 CCAR-33 部之间的验证关系,不论反推装置由发动机供应商提供还是由飞机制造商设计,均需满足 33.97 条的要求,即反推装置的系统试验必须装在发动机上和发动机持久、校准、工作和振动试验一起进行,评估反推力系统的符合性和兼容性。25.1155 要求反推的每一操纵器件必须有设计措施以防止飞行中对反推进行非指令的和非预期的操作。25.1305(d)(2)要求反推位置指示装置能够向机组指示反推未处于所选位置或处于反推位置的信息。

1.3 CCAR/FAR/CS 25.933(a)(1)要求对比

25.933(a)(1)是反推力系统设计和验证的核心条款,CCAR 与 FAR 25.933(a)(1)条的内容无差别,但 25.933(a)(1)是 FAR 25 和 CS 25 的重大差异条款。现行有效的 CCAR/FAR/CS 25.933(a)(1)内容分别如下。

1.3.1 CCAR/FAR 25.933(a)(1)反推力系统

(a) 涡轮喷气发动机反推力系统

(1) 仅预定在地面使用的反推力系统必须设计成,在飞行中处于任何反推力位置时,发动机不会产生大于飞行慢车状态的推力。此外,必须通过分析或试验,或两者兼用来表明满足下列要求:

(i) 反推力装置能收回到推力位置;

(ii) 反推力装置处于任何可能的位置时飞机能继续安全飞行和着陆。

1.3.2 CS 25.933(a)(1)反推力系统

(a) 涡轮喷气发动机反推力系统

(1) 仅预定在地面使用的发动机反推力系统必须设计成满足下列其一:

(i) 当反推力系统飞行中打开时和打开后,飞机能继续安全飞行和着陆;或

(ii) 证明飞行中推力反向是极不可能的且不会由单点失效或故障导致。

1.3.3 对比分析

CAAC 和 FAA 认为反推非指令打开后具有可回收能力和反推在任何位置飞机须能保证安全飞行二者同等重要,均需满足。而 EASA 认为根据历史经验,反推空中非指令打开后通常会损坏而收不回,因此不要求反推装置能收回到推力位置,只需满足反推非指令打开后飞机能安全飞行或反推非指令打开不会发生(概率小于 $10^{-9}/\text{FH}$)其一即可。即 FAA 的要求比 EASA 的要求更严格。

2 反推力系统适航性设计与符合性验证思路

2.1 反推力系统相关失效及危害

飞机反推力系统的主要失效模式包括:丧失单发反推力、未通告丧失单发反推力、丧失全部反推力、非指令性打开反推力、一个或以上发动机反推装置不能收回、丧失任意一侧两发反推力(四发飞机)等。通常,非指令性打开反推力和反推非对称打开对飞机的危害最大,可能造成飞机损毁、飞行员和乘员在飞机损毁时绝大部分或者全部死亡的灾难性后果。飞机反推力系统设计应尽量可靠地避免发生以上两类故障,或采用设计措施限制反推力装置的任何不利影响。

2.2 反推力系统一般设计考虑

对于仅供地面使用的反推力系统,其设计重点是在地面滑跑过程中为飞机提供较大的减速力,同时应避免吸入外来物、飞机表面的喷流冲击和滑跑时的操纵困难。现代典型运输类飞机采用高涵道比发动机作为动力,此类飞机对空中推力反向情况的操纵裕度已下降,因此针对反推力使用的关注焦点是限制反推力系统的任何不利影响。根据 EA-

SA AMC 25.933(a)(1)^[11],设计反推力系统时通常需要考虑以下三个方面:

(1) 发动机位置。发动机的布置位置(翼吊或尾吊)会影响反推非指令打开后对飞机操纵性、性能和结构完整性的影响。因此布置发动机位置时需考虑反推影响,应尽量避免对喷流冲击敏感的飞机表面,并减小反推的力矩。

(2) 发动机/反推力系统设计。设计时需考虑:需优化发动机/反推装置的集成度和可靠性;当发生非指令推力反向时,需设计措施以快速减少发动机气流;考虑飞机的俯仰、偏航和滚转特性;考虑有效的喷流直径和面积,反推直接喷流要远离飞机关键区域;快速探测非指令推力反向,并在反推力系统内提供快速的补偿措施;对仅供地面使用的反推,在空中进行抑制,即使飞行员操作也不能打开;考虑反推非指令打开后的收回能力。

(3) 机身/系统设计。飞机设计需最大化气动操纵能力,能快速探测推力反向,通过其他系统提供快速补偿(例如自动慢车),并考虑机组程序和反应。

2.3 符合性验证思路

反推力系统需通过设计说明、分析计算、安全性分析、试验室试验、飞行试验、机上检查等验证方法表明对上述 8 条适用条款的符合性。但限于篇幅,本文主要参考 EASA AMC 25.933(a)(1),对核心条款 25.933(a)(1)的验证思路进行说明。

2004 年以前,FAA 的立场是验证反推非指令打开后飞机可“操纵”^[9,12],尽量降低不利影响;EASA 的立场是证明反推力系统足够“可靠”,尽量降低反推非指令反向的概率。经验表明,“操纵性”和“可靠性”这两种验证思路均不能既实际又有效,经过 FAA 和 EASA 协同评估,EASA 文件 NPA 13-2004^[13]描述基于“操纵性”和“可靠性”的符合性设计和验证双方均可接受。但在具体型号实践中 FAA 仅接受“可靠性”验证作为等效安全。此外,申请人还可选择将“可靠性”和“操纵性”思路相结合来进行验证。实际上,考虑到验证难度和成本,大部分飞机制造商会选择“可靠性”思路。

(1) “操纵性”思路。需验证发生任何空中推力反向事件后飞机可控,能继续安全飞行和着陆。验证时,必须考虑飞机的结构完整性、飞行性能和品质等方面,且飞机所需的性能和品质需结合飞行

中非指令推力反向的概率考虑。采用该思路时,按照 AC 25.1309-1A^[14]给出的方法进行安全性分析得出非指令空中推力反向的发生概率大于 $10^{-9}/\text{FH}$ 。该种验证思路符合性方法包括设计说明(MC1)、分析计算(MC2)、安全性分析(MC3)、飞行试验(MC6)、模拟器试验(MC8)等。

(2)“可靠性”思路。验证飞机不会发生任何空中推力反向。按照 AC 25.1309-1A^[14]给出的方法进行安全性分析得出非指令空中推力反向发生的概率需小于 $10^{-9}/\text{FH}$ 。进行验证时,还需考虑系统的可靠性、可维护性、容错性、结构完整性和对特殊区域风险(例如发动机非包容性转子爆破、着火等)的防护等。该种验证思路符合性方法包括设计说明(MC1)和详细的安全性分析(MC3)。

2.4 符合性验证注意事项

(1)“操纵性”思路。直接符合 CCAR 25.933(a)(1)通常需要采用大量的飞行试验或服役经验。飞行试验中,可使用应急程序,但不需要特殊的飞行员驾驶技巧和操纵力。飞行试验程序和准则应符合 AC 25-7C^[15]中对反推力系统飞行试验的规定。飞行试验应在正常飞行包线内的临界点或临界点附近进行,且在确定飞行科目时需考虑飞机的不同构型、低速/高速、不同推力状态和抖振的影响,并可借鉴相似反推构型飞机的服役经验。对于大部分飞机而言,起飞和触地时若反推非指令打开而飞机具有足够的操纵性是不大可能的,通常选择证明起降阶段反推非指令打开的概率是极不可能的而不证明操纵性。设计反推收放结构和飞发连接结构时,25.303 条中的安全系数适用,但也可采用 AMC 25.933(a)(1)中规定的与失效概率成函数关系的更小的安全系数。此外,反推非指令打开后飞机安全飞行和着陆所需的最低飞行性能和品质应结合反推非指令打开的概率及飞机的预期任务和限制进行评估。当概率大于 $10^{-7}/\text{FH}$,CCAR-25 部 B 分部中的性能和品质要求需全部通过飞行试验进行验证;当概率在 $10^{-7}/\text{FH} \sim 10^{-9}/\text{FH}$ 之间时,通常不要求采用飞行试验评估,可采用计算分析和模拟器试验验证。

(2)“可靠性”思路。证明反推力系统是“可靠的”,安全性分析结果应为飞机不会发生任何灾难性的推力反向。根据 FAA 对飞机服役历史的评估,采用失效—安全概念设计的反推力系统不能一

直防止非指令推力反向。若采用失效—安全概念设计反推力系统,表明其符合性则较为困难。通常需要进行结构传力路径分析、系统安全性分析、非包容性转子失效分析等,需充分评估可能的失效模式和影响,并规定降低危险因素的可接受方法。

3 反推力系统符合性验证实例

某型飞机反推力系统验证 25.933(a)(1)采用了“可靠性”思路,符合性验证方法为设计说明(MC1)和安全性分析(MC3)。

(1)设计说明。某型飞机反推力系统包括飞机正/反推力操纵系统和发动机本体反推力操纵系统两部分。飞机反推装置操纵系统主要由正/反推力油门台、自动油门执行机构、推拉钢索、传动比变换装置和连轴器等组成。发动机本体反推力操纵系统包括反推装置操纵系统(操纵和联锁机构、液压系统、反推装置工作的信号系统、“油门—反推”操纵附件、电气导线)和反推装置(机匣、调节门、承力梁、调节门传动机构、调节门机械锁、防火墙、调节门传动机构的整流罩、调节门闭锁信号器、调节门位置信号器等)。

为了防止反推在空中打开,设计了正、反推互锁和油门台反推慢车电磁锁。使用正推杆时,反推杆被锁定在慢车位置,不能单独运动,只能与正推杆随动。使用反推杆时,正推杆被锁定在慢车位置,不能运动,反推杆则能单独移动。油门台上有两个反推慢车电联锁,互为备份(同时工作),在接收到起落架系统的“解锁”信号(轮载和速度)后解锁,才能操作反推杆,限制反推只能在地面使用。

(2)安全性定性定量分析。动力系统进行了功能危险分析(FHA)、故障树分析(FTA)、系统安全性分析(SSA)、故障模式和影响分析(FMEA)、特殊风险分析(鸟撞安全性分析、非包容转子爆破分析)等。FHA 分析得出反推力系统共 6 项功能故障,含 I 级 2 项,II 级 1 项,III 级 2 项,IV 级 1 项。反推力系统设备和零部件的 FMEA 表明,反推力系统部件共存在 44 种失效模式,其中危害等级为 I 类的 1 项,危害等级为 II 级的 23 项,危害等级为 III 类的 15 项,危害等级为 IV 类的 5 项,I 类和 II 类故障采用相应设备进行定期维护检查可被发现。

FTA 定量分析表明,相应功能失效概率满足 FHA 确定的概率要求,反推力系统发生非指令推

力反向的概率小于 $10^{-9}/FH$ 。动力系统共模分析、鸟撞、轮胎爆破影响评估和区域安全性检查表明,没有单个危险源或单次外部事件会导致非指令打开反推力系统。

4 结 论

对于仅预定在地面使用的涡轮喷气发动机反推力系统,推荐采用等效安全方法,即“可靠性”验证思路以满足 CCAR 25.933(a)(1)的要求,将反推力系统设计得足够可靠,进行严格和详细的定量和定性安全性分析,考虑内部共因、内外部特殊风险,证明反推非指令打开的概率小于 $10^{-9}/FH$ 。

如果采用操纵性思路验证,反推非指令打开的概率范围是 $10^{-7}/FH \sim 10^{-9}/FH$,通常不进行飞行试验演示符合 CCAR-25 部 B 分部要求。反推非指令打开概率大于 $10^{-7}/FH$,CCAR-25 部 B 分部中的所有飞行性能、操纵品质和配平要求需要全部通过飞行试验进行验证,且验证 CCAR-25 部 B 分部某些性能要求时,应使用临界非指令反推打开代替常规临界单发失效。

参考文献

- [1] Federal Aviation Administration. AC 91-79A Mitigating the risks of a runway overrun upon landing[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2016.
- [2] 毛文懿, 杨铁链, 李涛, 等. 反推力装置适航符合性验证思路研究[J]. 航空科学技术, 2014, 25(7): 34-37.
Mao Wenyi, Yang Tielian, Li Tao, et al. Research of airworthiness compliance verification considerations for thrust reversers[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(7): 34-37. (in Chinese)
- [3] 靳宝林, 邢伟红, 刘殿春. 飞机/发动机推进系统反推力装置[J]. 航空发动机, 2004, 30(3): 48-52.
Jin Baolin, Xing Weihong, Liu Dianchun. Thrust reversers of aircraft/engine propulsion system [J]. Aeroengine, 2004, 30(3): 48-52. (in Chinese)
- [4] 杜刚, 金捷. 大型运输机发动机反推力装置[C]. 中国航空学会 2007 年学术年会, 深圳: 2007.
Du Gang, Jin Jie. Thrust reversers of large transport airplanes[C]. 2007 Academic Annual Meeting of China Aviation Society, Shenzhen: 2007. (in Chinese)
- [5] 邵万仁, 叶留增, 沈锡钢, 等. 反推力装置关键技术及技术途径初步探讨[C]. 中国航空学会 2007 年学术年会, 深圳: 2007.
Shao Wanren, Ye Liuzeng, Shen Xigang, et al. A primary discussion on thrust reversers critical technologies and implement approaches of large airplanes[C]. 2007 Academic Annual Meeting of China Aviation Society, Shenzhen: 2007. (in Chinese)
- [6] 沙江, 徐惊雷. 发动机反推力装置及其研究进展[C]. 中国航空学会 2007 年学术年会, 深圳: 2007.
Sha Jiang, Xu Jinglei. Engine thrust reversers and their evolution[C]. 2007 Academic Annual Meeting of China Aviation Society, Shenzhen: 2007. (in Chinese)
- [7] 中国民用航空局. CCAR-25-R4 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. CCAR-25-R4 Airworthiness standards: transport category airplanes[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [8] 中国民用航空局. CCAR-33-R2 航空发动机适航规定[S]. 北京: 中国民用航空局, 2002.
Civil Aviation Administration of China. CCAR-33-R2 Airworthiness requirements for aero engines [S]. Beijing: CAAC, 2002. (in Chinese)
- [9] Federal Aviation Administration. FAR 25.933/1301 Policy information regarding inflight thrust reverser certification [S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1993.
- [10] Federal Aviation Administration. FAA letter criteria for assessing transport turbojet fleet thrust reversing system safety[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1994.
- [11] European Aviation Safety Agency. AMC25.933(a)(1) of CS-25 Certification specification and acceptable means of compliance for large airplanes[S]. Kolner: European Aviation Safety Agency, 2016.
- [12] Federal Aviation Administration. AC 20-18B Qualification testing of turbo jet engine thrust reverser[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2015.
- [13] European Aviation Safety Agency. No.13/2004 Notices of proposed amendment: miscellaneous powerplan[S]. Kolner: European Aviation Safety Agency, 2004.
- [14] Federal Aviation Administration. AC 25.1309-1A System design and analysis[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 1988.
- [15] Federal Aviation Administration. AC25-7C Flight test guide for certification of transport category airplanes[S]. Washington: Federal Aviation Administration, 2012.

作者简介:

邱朝群(1986—),女,硕士,工程师。主要研究方向:总体气动、动力系统适航设计和验证。

孙世东(1983—),男,高级工程师。主要研究方向:动力系统适航设计和验证。

(编辑:马文静)