

文章编号:1674-8190(2022)02-129-07

民用航空发动机ETOPS型号设计和符合性验证方法研究

李昊燃¹,雷延生¹,龚昊伟²

(1.中国航发商用航空发动机有限责任公司 适航工程中心,上海 200241)

(2.中国航发商用航空发动机有限责任公司 科技委,上海 200241)

摘要: 航空发动机延程运行(ETOPS)资格是飞机延程运行的基础,为了给国内航空发动机ETOPS型号设计及适航符合性验证提供指导,研究ETOPS适航规章形成的历程及航空发动机早期ETOPS资格的设计和试验要求。分析发动机ETOPS适航条款与飞机ETOPS适航条款的关系,提出一种民用航空发动机ETOPS型号的设计及符合性验证方法。结果表明:本文提出的验证方法为指导民用航空发动机早期ETOPS型号设计和符合性验证提供了依据。

关键词: 航空发动机;延程运行;早期ETOPS型号资格;ETOPS型号设计;适航

中图分类号: V23; V217

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.02.19

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Type Design and Compliance Verification Method of ETOPS for Civil Aircraft Engine

LI Haoran¹, LEI Yansheng¹, GONG Haowei²

(1. Airworthiness Engineering Center, AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

(2. Science and Technology Commission, AECC Commercial Aircraft Engine Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: Aircraft engine extended operations (ETOPS) eligibility is the basis for aircraft extended operations. In order to provide the guide for the domestic aircraft engine ETOPS type design and airworthiness compliance verification, the formation process of the ETOPS airworthiness regulation and the design and test requirement for aircraft engine early ETOPS eligibility are studied. The relationship between the engine ETOPS regulation and aircraft ETOPS airworthiness regulation is analyzed. An aircraft engine ETOPS type design and compliance verification method is proposed. The results show that the proposed verification method in this paper can provide a reference for early ETOPS type design and compliance verification of domestic civil aircraft engine.

Key words: aircraft engine; extended operations; early ETOPS type eligibility; ETOPS type design; airworthiness

收稿日期:2021-04-23; 修回日期:2021-10-22

基金项目:国家科技重大专项(2017-IV-0009-0046); 工信部科研专项(xx-2016-D-26)

通信作者:李昊燃, lhr.wy@163.com

引用格式:李昊燃,雷延生,龚昊伟. 民用航空发动机ETOPS型号设计和符合性验证方法研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(2): 129-135.

LI Haoran, LEI Yansheng, GONG Haowei. Research on type design and compliance verification method of ETOPS for civil aircraft engine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 129-135. (in Chinese)

0 引言

随着交通运输行业的发展,洲际航行增多,飞机航路需要进行跨洋飞行或穿越荒芜人烟的地区飞行,在这些地区一旦出现单发失效的情况,可供备降的机场很少,因此,飞机通常选择沿海岸线飞行,这使得飞机消耗大量的时间和燃油。为了降低航空公司运营成本,开辟更多航线,国际民航组织(International Civil Aviation Organization,简称ICAO)和美国联邦航空管理局(Federal Aviation Administration,简称FAA)提出了延程运行(Extended Operations,简称ETOPS)的概念,允许飞机进行延程运行^[1-4]。

具备ETOPS资格的飞机,在缩短航程、节省时间和燃油以及提高运行有效性方面具有优势。航空发动机作为飞机的重要系统,获得早期ETOPS型号设计批准有助于提高其型号的市场竞争力。

国外航空发动机制造商大多具备ETOPS设计和符合性验证能力。PW公司按照FAR33要求完成3 000次起动停车循环试验、模拟改航试验、振动台阶试验,并配套B777获得180 min的ETOPS资格;GE公司GE90发动机开展模拟ETOPS任务循环持久试验,模拟投入服役两年的使用情况,并配合B777开展ETOPS飞行试验;RR公司的Trent系列发动机也已获得早期ETOPS型号设计批准。PW、GE、RR等航空发动机制造商所研制的发动机,已具备较高的可靠性水平,装配波音、空客飞机投入ETOPS航线运营。

ETOPS对国内民航制造界是一个较新的概念,目前没有国内民用飞机、航空发动机获得ETOPS型号设计批准。在国外对ETOPS型号设计核心技术封锁的背景下,近年来国内研究者对于ETOPS型号设计及适航符合性验证开展探索和研究。2013年,韩冰冰等^[1]总结我国ETOPS型号设计批准现状,并预测未来的发展趋势;2015年,王稳江等^[2]提出了民用飞机ETOPS型号设计思路;2017年,谢辉松^[3-4]提出了ETOPS时间限制系统时间性能的估算方法,从飞机设计的角度提出了ETOPS型号设计需关注的要点;2018年,孙铁源等^[5]给出了飞机ETOPS系统计划维修要求制定过程;2019年,谈琳妮等^[6]对民用飞机延程运行飞行试验技术开展研究;2020年,李新等^[7]给出了ETOPS型号设计批准中评估飞机成熟度、可靠性

的指标和ETOPS事件报告流程;赵明等^[8]提出我国民用飞机和航空发动机ETOPS技术研究方向。目前国内对ETOPS技术研究主要针对民用飞机,对航空发动机的相关技术研究较少,而航空发动机作为飞机的重要系统,其早期ETOPS设计和适航符合性验证对飞机ETOPS型号设计批准有重要影响。为使国内航空发动机配套民用飞机早日投入ETOPS航线运营,应开展航空发动机ETOPS相关技术研究。

本文在研究航空发动机及飞机ETOPS相关适航资料的基础上,从飞机—发动机组合角度出发,对航空发动机相关ETOPS型号设计批准要求进行分析,提出民用航空发动机ETOPS型号设计与适航符合性验证方法。

1 ETOPS介绍

1.1 ETOPS概念

在发动机型号合格审定中,ETOPS是指除了全货运行以外,飞行期间有部分飞行是在超出CCAR121部《大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则》和CCAR135部《小型航空器商业运输运营人运行合格审定规则》所规定的时间极限下进行的一种运行^[9]。对于该时间极限,我国适航规章CCAR121部W章“延程运行与极地运行”第121.711条规定:“合格证持有人除经局方批准外不得实施以下运行:在飞机计划运行的航路上至少存在一点到任一延程运行可选备降机场的距离超过飞机在标准条件下静止大气中以经批准的一台发动机不工作时的巡航速度飞行60 min对应的飞行距离(以两台涡轮发动机为动力的飞机)或超过180 min对应的飞行距离(以多于两台涡轮发动机为动力的载客飞机)的运行”^[10]“只有当机体发动机组合获得中国民航局颁发的延程运行型号设计批准时,合格证持有人才有资格实施延程运行”^[10]。

ETOPS认证等级以时间划分,例如B787已获得330 min的ETOPS型号设计批准,A350已获得370 min的ETOPS型号设计批准,A320和B737NG已获得180 min的ETOPS型号设计批准^[3]。

1.2 ETOPS适航规章发展历程

1953年,基于当时活塞发动机的可靠性,

FAA在FAR121.161中规定双发或三发飞机不得在距备降机场单发飞行时间超过60 min的航线上飞行。国际民航组织ICAO随后采取了类似的规定,即“60 min限制”^[1]。

1964年,FAA对于三发飞机免去“60 min限制”,而双发飞机由于运行中可靠性不足,依然受限于60 min的规定^[11]。

20世纪70年代,随着发动机可靠性的增加,国际民航组织ICAO认可了空客公司提出的90 min改航标准^[2]。

随着民航技术的进步,高涵道比涡扇发动机相继投入使用,发动机可靠性的不断增加。FAA先后于1985年和1988年颁布咨询通告AC120-42和AC120-42A,对于延程运行引入ETOPS的概念,允许双发飞机超越FAR121部的时间限制运行。AC120-42允许双发飞机在证明了特定的服役经验和系统可靠性后,可在距备降机场120 min航程的航线上运行。AC120-42A将这一限制提升至180 min^[12],这使得飞机可飞越世界大部分地区。

应工业界要求,2000年FAA颁布政策信函EPL20-1,针对北太平洋地区,允许在AC120-42A规定的180 min改航时间基础上增加15%改航时间,即最大207 min改航时间运行^[1]。

2007年FAA发布FAR25部第120修正案,在25部中增加25.1535“ETOPS批准”,将ETOPS主要设计技术要求和符合性验证方法置于附录K中^[13]。同时,FAA在33部中增加33.201“早期ETOPS资格的设计和试验要求”,对申请安装于早期ETOPS资格的双发飞机的发动机给出设计和试验要求^[14]。

截至目前,FAA未对FAR25.1535和FAR33.201条款做出任何修订,我国的CCAR25.1535和CCAR33.201采纳以上条款内容^[15]。

2008年3月EASA发布NPA No. 2008-01,决定增加CS-E1040 ETOPS^[1]。2010年EASA颁布了最新的适航规章CS-E部“发动机审定规范”,作为民用航空发动机适航审定标准。CS-E1040 ETOPS条款的内容在CS-E第3修正案中首次出现,而在第3修正案以前CS-E1040仅保留条款编号无内容,CS-E第4修正案CS-E1040条款沿用第3修正案内容^[16]。

根据以上条款演化背景分析,中、美及欧洲国家和地区适航法规在发动机ETOPS型号设计批

准条款的要求具有一定关联性,版本对应关系如表1所示。

表1 航空发动机ETOPS条款对应关系

Table 1 Correspondence of ETOPS airworthiness for aircraft engine

条款	标题	修正案	生效日期
CCAR 33.201 ^[15]	早期ETOPS资格的设计和试验要求	CCAR-33-R2	2012-01-01
FAR 33.201 ^[14]	Design and test requirements for Early ETOPS eligibility	第33-21修正案	2007-02-15
CS-E1040 ^[16]	ETOPS	第4修正案	2015-03-12

目前CCAR33.201条款的有效版本与FAR33部第21修正案中关于ETOPS的内容保持一致。CS-E规章中的ETOPS条款从第3修正案到第4修正案未发生变化。CS-E1040条款具体要求在AMC20-6附录1中,FAR33.201条款与AMC20-6附录1关于3 000次起动—停车循环及3次模拟改航循环试验要求是相同的,其他要求有所差异,但本质要求是一致的^[17]。

2 ETOPS型号设计批准要求分析

2.1 发动机早期ETOPS资格型号设计要求分析

CCAR33.201条款适用于双发飞机的发动机,在没有25万飞行小时服役经历的条件下申请ETOPS型号设计批准^[15]。

根据CCAR33.201(a)~(b)的要求,为消除已知的故障、失效,或因发动机设计引发的空中停车、失去推力控制或其他功率损失的问题,增加审查方对发动机可靠性的信心,申请人应建立设计质量保证过程^[7]。同时,申请人应根据申请的ETOPS最大改航时间,制定发动机可靠性指标,满足空中停车率的要求,并将整机可靠性指标分解至部件/系统。结合飞机ETOPS改航场景,开展ETOPS安全性评估,确定部件/系统安全性指标。开展部件/系统故障树分析及故障模式、影响及危害性分析,依据分析结果完善设计,减少ETOPS相关故障的发生。进行部件/系统及整机可靠性评估及安全性评估,校验是否满足可靠性指标及安全性指标要求,若不满足要求则进行设计完善后开展可靠性评估及安全性评估,迭代该

过程直至满足部件/系统及整机可靠性指标及安全性指标要求。

CCAR33.201(c)要求通过模拟ETOPS任务循环的持久试验查明发动机服役中可能发生的问题或失效。除非申请人根据CCAR33.201(f)条款规定使用其他等效的任务循环持久试验代替CCAR33.201(c)中的持久试验^[15],否则需要通过CCAR33.201(c)的持久试验进行符合性验证。模拟ETOPS任务循环持久试验包括:转子不平衡量调节、起动停车循环、模拟改航、振动台阶试验等。

根据CCAR33.201(d)、(e)的要求,模拟ETOPS任务循环持久试验前及试验后分别进行校准试验,确保功率或推力特性的变化在批准的限值内。持久试验结束后应依据持续适航文件开展目视检查及分解检查,确认没有出现可以导致空中停车、失去推力控制或其他功率损失的磨损或损坏,并依据试验结果完善持续适航文件。

2.2 初始维修检查与ETOPS条款符合性验证关系

ETOPS与初始维修检查存在关联关系^[5],根据CCAR33.201(g),申请人通过模拟ETOPS任务循环持久试验验证CCAR33.90初始维修检查符合性的要求。该条款要求与CCAR33.90(b)相对应,通过CCAR33.201的试验支撑CCAR33.90

初始维修检查的验证。在完成初始维修检查要求与CCAR33.90(a)一致的试验的全部试验循环后,申请人可以中断33.201试验接受在翼检查或其他检查,以表明CCAR33.90的符合性,但在服役前仍需完成CCAR33.201剩余部分的试验。

2.3 CCAR33部与CCAR25部ETOPS条款关联关系

CCAR33部与CCAR25部ETOPS条款紧密相关。CCAR25部附录K“ETOPS批准”规定了飞机ETOPS型号取证的三种方法,其中,双发飞机早期ETOPS中K25.2.2(b)推进系统设计,要求“用于申请人飞机设计的发动机必须按CCAR33部进行早期ETOPS合格批准”^[18],也就是说,若双发飞机申请人希望通过早期ETOPS进行CCAR25.1535条款的符合性验证,则安装于该双发飞机上的发动机必须取得CCAR33.201“早期ETOPS资格的设计和试验要求”的型号合格证^[14]。同时,根据CCAR25部K25.1.4K(c)的要求,发动机滑油箱设计需符合33.71(c)第(4)条的要求。根据CCAR25部K25.1.5的要求,发动机状态监控程序需符合A33.3(c)的要求^[19]。CCAR33部与CCAR25部ETOPS条款关系如图1所示。

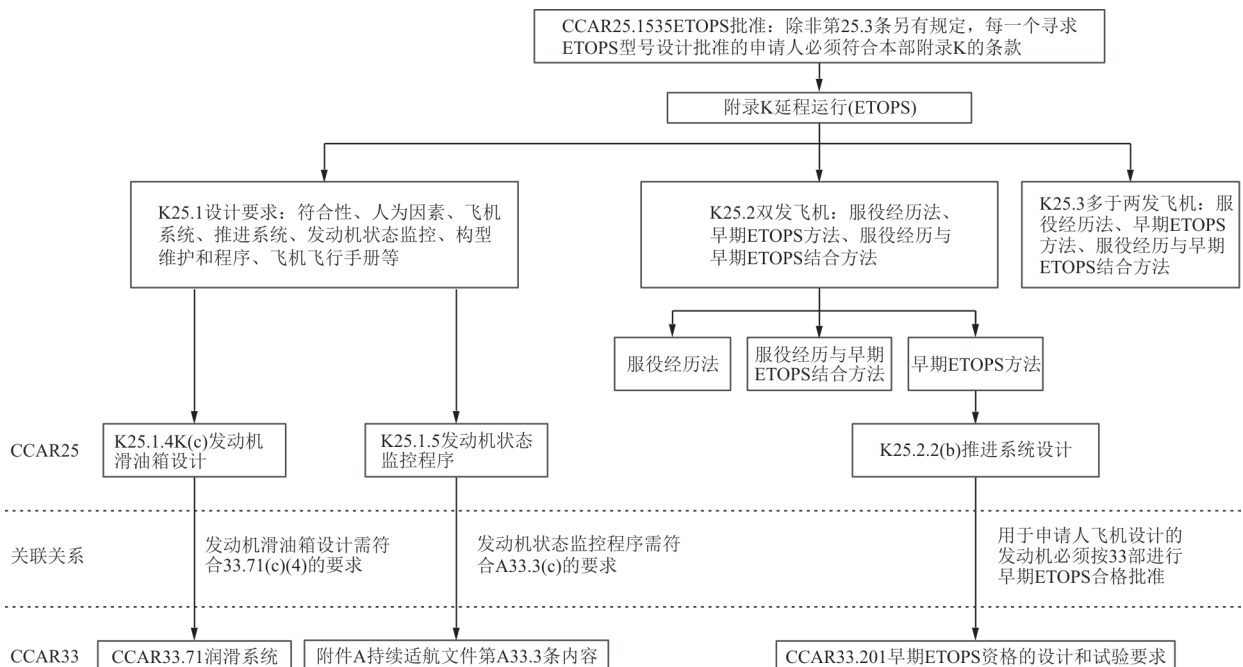


图1 CCAR33部与CCAR25部ETOPS相关条款关联关系

Fig. 1 Connection relations between CCAR33 and CCAR25 ETOPS related regulations

3 发动机早期ETOPS资格型号设计与符合性验证方法

在航空发动机研制过程中,有必要在产品研发初期开展ETOPS型号设计,并在型号合格审定各阶段开展ETOPS型号设计的适航符合性验证。基于对航空发动机及飞机ETOPS适航条款及相关咨询通告的研究^[2],本文提出一种航空发动机早期ETOPS资格型号设计与符合性验证方法,具体内容如图2所示。

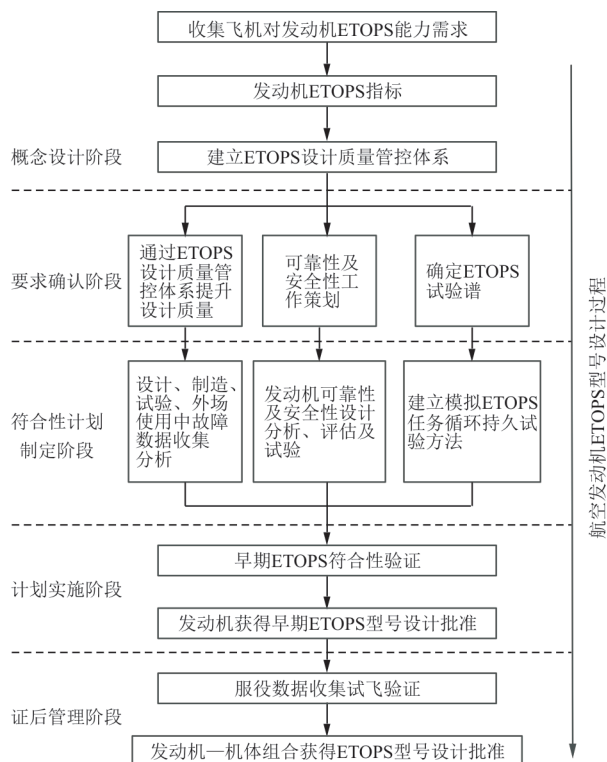


图2 航空发动机早期ETOPS型号设计与符合性验证方法
Fig. 2 Aircraft engine early ETOPS type design and compliance verification flow

3.1 概念设计阶段

收集发动机目标机型及航空公司对发动机ETOPS能力的需求,根据客户需求及发动机型号市场定位,确定发动机ETOPS能力的设计目标。

根据飞机方需求,确定发动机ETOPS指标:ETOPS最大改航时间^[4]及空中停车率等。

申请人与审查方开展ETOPS相关规章熟悉性交流,对规章要求及符合性问题初步达成共识。

建立ETOPS设计质量管控体系,确保研发、生产各环节满足ETOPS质量要求,同时,在后续各阶段持续收集设计、制造、试验、外场使用中

ETOPS相关故障数据,进行分析并给出纠正措施。

3.2 要求确认阶段

基于对规章要求的理解,编制ETOPS条款技术状态表,梳理规章资料、规章理解及符合性方法等;明确专用条件、豁免的使用;确定ETOPS条款技术要求及符合性方法。

3.3 符合性计划制定阶段

形成ETOPS符合性验证思路,绘制ETOPS符合性验证路线图;制定ETOPS符合性验证实施方案,确定CAI、CPI项;根据规章要求,明确ETOPS符合性验证技术要求,最终形成ETOPS适航审定计划。

3.4 计划实施阶段

(1) 通过ETOPS设计质量管控体系提升设计质量

通过设计质量管控体系积累的故障数据及改进措施,持续提升发动机设计质量,表明已消除已知的故障、失效,或因发动机设计引发的空中停车、失去推力控制或其他功率损失的问题,增强审查方对发动机可靠性的信心^[7]。

(2) 开展可靠性和安全性设计、分析及评估

进行可靠性工作策划及安全性工作策划,在项目中设定可接受的可靠性指标及安全性指标,并规定所开展的设计分析、评估与验证活动。

依据可靠性工作策划及安全性工作策划,将发动机可靠性指标及安全性指标分解到部件/系统,依据可靠性指标及安全性指标开展设计、分析及相关评估与验证。

① 开展故障树分析,明确可导致发动机空中停车、失去推力控制或其他功率损失的失效、故障、缺陷和维修错误等问题。

② 针对故障树分析得到的失效、故障、缺陷和维修错误等问题,分析故障原因,给出设计保证措施、检测方法等,确保零组件的设计特征最大限度地减少这些问题的发生。

③ 进行可靠性评估及安全性评估,表明设计状态满足可靠性指标及安全性指标要求,并通过部件/系统试验验证相关数据。

(3) 建立ETOPS循环试验谱及试验方法

根据适航条款及相关咨询通告要求,制定

ETOPS循环试验谱,包括起动—停车循环试验谱及ETOPS模拟改航试验谱。

起动—停车循环试验谱应包含以下飞行剖面:起动、地面慢车、起飞、爬升、巡航、下降/最小慢车、进近慢车/下滑道切入、降落、反推打开(如果适用)、停车。

ETOPS模拟改航试验谱需满足如下要求^[20]:

①最大改航时间与申请的ETOPS资格一致。

②最大连续额定推力运行时间不小于最大改航时间。

③试验任务谱包含空中等待状态运行15 min。

④试验任务谱包含复飞运行1 min。

根据33.201(c)~(e)条款要求建立开展整机ETOPS持久试验方法,制定维护检查计划。申请人应在持久试验前及持久试验后进行发动机推力校准,持久试验期间还应进行定期维护检查,试验前应明确振动检查计划及试验期间维护检查计划。其中,关于振动检查AC33.201-1建议检查间隔不大于500个起动—停车循环,推荐使用发动机缓慢加速缓慢减速的方法测定振动峰值,并给出等效振幅判定公式,累积损伤不满足要求需进行加罚循环试验^[20]。

申请人开展模拟ETOPS任务循环持久试验,应满足如下要求^[20]:

①进行至少3 000次起动—停车循环试验,以最大连续功率或推力进行3次模拟改航飞行至最大改航时间。

②模拟改航试验需均匀分布在3 000次循环中,其中最后一次试验必须在3 000次循环结束前的100次以内进行。

③试验需包含发动机起动和停车,停车时高压轴转速应不大于由于大气主导风向导致的风车转速。

④试验需包含至少50次的冷起动(发动机关闭至少3 h后再起动)。

⑤试验需包含最大功率起飞推力、降功率推力(如果适用)以及最大连续推力工况。

⑥试验需包含正常的发动机引气及功率提取。如发动机使用引气防冰,则3 000次任务循环中至少三分之一需要开启防冰引气;试验需要与飞机方共同确认试验工况、引气量和功率提取值等。

⑦进行高压转子台阶试验:在高压转子工作

转速范围内,以60~200 r/min任意转速台阶递增开展试验。工作转速范围包括代表起飞、爬升、降落、进近、着陆和反推的稳态转速点。当以60 r/min为递增台阶,则试验全程内该台阶应至少进行三百万次振动循环;当以大于60 r/min为递增台阶,则最小振动循环数相应地线性增加;达到200 r/min则应进行至少一千万次循环(试验全程)。而从最小空中慢车到巡航功率,当以60 r/min为递增台阶,在该台阶至少进行三十万次振动循环(试验全程);当以大于60 r/min为递增台阶,最小振动循环数相应地线性增加;达到200 r/min时,最小振动循环数为一百万次(试验全程)^[20]。

(4) 早期ETOPS符合性验证

为获取发动机早期ETOPS型号设计批准,开展ETOPS符合性验证,包括设计质量保证过程符合性验证、整机可靠性评估及开展ETOPS任务循环持久试验等。

其中,ETOPS任务循环持久试验,发动机应在不超限(推力、转子转速、燃气温度、滑油压力、滑油温度、发动机振动、滑油消耗率)的前提下达到建议的推力等级,且无明显异常情况。

试验结束后通过目视检查、试验后分解检查判断零部件的可用性,并依据试验结果完善持续适航文件。

(5) 早期ETOPS型号设计批准

获得ETOPS批准后,申请人将批准的ETOPS最大改航时间写入型号合格证数据单(Type Certificate Data Sheet,简称TCDS)。

根据适航取证安排,可同时验证33.90(b)的符合性。如没有服役经历,可在适航当局颁发型号合格(TC)后申请ETOPS型号设计批准^[20]。

3.5 证后管理阶段

发动机装配飞机积累服役经历,收集服役数据,根据CCAR25部ETOPS相关条款要求,开展试飞验证^[6],表明飞机ETOPS能力,获得ETOPS型号设计批准。

本文提出的验证方法已应用于国内某机型的符合性验证,并获得局方认可。

4 结 论

(1) 航空发动机早期ETOPS型号设计,对航

空发动机各部件系统的设计、可靠性、安全性提出了更高的要求,国产航空发动机应在研制初期引入ETOPS设计验证理念,并贯穿型号设计和适航取证的各阶段。

(2) 航空发动机早期ETOPS型号设计和符合性验证方法为国产民用航空发动机早期ETOPS资格适航取证提供指导,为国产民用航空发动机早日装配飞机投入ETOPS航线运营提供思路。

参考文献

- [1] 韩冰冰,沈浩,李新,等. 运输类飞机延程运行型号设计审定的发展[J]. 航空维修与工程, 2013(3): 89-91.
HAN Bingbing, SHEN Hao, LI Xin, et al. The development of transport category aircraft etops type design approval [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2013(3): 89-91. (in Chinese)
- [2] 王稳江,谢辉松,李晨. 民用飞机延程运行型号设计浅析[J]. 航空工程进展, 2015, 6(3): 377-381.
WANG Wenjiang, XIE Huisong, LI Chen. Analysis of civil aircraft extended operations type design [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(3): 377-381. (in Chinese)
- [3] 谢辉松. 一种估算ETOPS时间限制系统时间性能的方法[J]. 航空计算技术, 2017, 47(1): 43-46.
XIE Huisong. An evaluation method of time performance for ETOPS time limited systems [J]. Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(1): 43-46. (in Chinese)
- [4] 谢辉松. ETOPS特点与设计的特殊考虑[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(2): 25-28.
XIE Huisong. The characteristics and design of extended operations [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2017(2): 25-28. (in Chinese)
- [5] 孙铁源,孙见忠. 民机延程运行计划维修要求的制定[J]. 航空维修与工程, 2018(1): 80-82.
SUN Tiejuan, SUN Jianzhong. Formulation on SMR for civil aircraft ETOPS [J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2018(1): 80-82. (in Chinese)
- [6] 谈琳妮,戴维,李峥. 民用飞机延程运行飞行试验技术与研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2019(2): 64-70.
TAN Linwei, DAI Wei, LI Zheng. ETOPS flight test technology and research for civil aircraft [J]. Civil Aircraft Design & Research, 2019(2): 64-70. (in Chinese)
- [7] 李新,韩冰冰,庄皓琬,等. 民用飞机ETOPS型号合格审定的可靠性评估与事件报告[J]. 民航学报, 2020, 4(6): 33-36, 62.
LI Xin, HAN Bingbing, ZHUANG Haowan, et al. Reliability assessment and events reporting for ETOPS certification of civil aircraft [J]. Journal of Civil Aviation, 2020, 4(6): 33-36, 62. (in Chinese)
- [8] 赵明,岳宁. 航空器ETOPS型号设计批准要求研究[J]. 航空标准化与质量, 2020(3): 38-41.
ZHAO Ming, YUE Ning. Aircraft ETOPS type design approval requirements [J]. Aviation Standardization and Quality, 2020(3): 38-41. (in Chinese)
- [9] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards—definitions and abbreviations: 14CFR part 1 [S]. USA: FAA, 2016.
- [10] 中国民用航空局. 大型飞机公共航空运输承运人运行合格审定规则: CCAR121 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2020.
CAAC. Operation requirements: large aircraft public air transport carriers: CCAR121 [S]. Beijing: CAAC, 2020. (in Chinese)
- [11] Federal Aviation Administration. Extended operations (ETOPS and polar operations): AC120-42B [S]. USA: FAA, 2008.
- [12] Federal Aviation Administration. Extended range operation with two-engine airplanes (ETOPS): AC120-42A [S]. USA: FAA, 1988.
- [13] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards—transport category airplanes: 14CFR part 25 [S]. USA: FAA, 2009.
- [14] Federal Aviation Administration. Airworthiness standards: transport engines: 14CFR part 33 [S]. USA: FAA, 2007.
- [15] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定: CCAR33-R2 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
CAAC. Airworthiness standards: aircraft engines: CCAR 33-R2 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [16] European Aviation Safety Agency. Certification specifications and acceptable means of compliance for engines CS-E [S]. France: EASA, 2015.
- [17] European Aviation Safety Agency. Extended range operation with two-engine aeroplanes ETOPS certification and operation: AMC20-6 [S]. Köln: EASA, 2010.
- [18] Federal Aviation Administration. Certification of transport category aircraft for extended operations (ETOPS) (draft): AC25.1535-1X [S]. USA: FAA, 2015.
- [19] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR25-R4 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
CAAC. Airworthiness standards: transport category airplanes: CCAR25-R4 [S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [20] Federal Aviation Administration. Extended operations (ETOPS) eligibility for turbine engines: AC33.201-1 [S]. USA: FAA, 2010.

作者简介:

李昊燃(1988—),女,硕士,工程师。主要研究方向:适航技术等。

雷延生(1984—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:适航技术等。

龚昊伟(1988—),男,博士,工程师。主要研究方向:适航技术、工程管理等。

(编辑:丛艳娟)