

文章编号: 1674-8190(2022)03-164-07

民用飞机ETOPS重要系统适航审定研究

王稳江¹, 李新²

(1. 上海飞机设计研究院 飞机架构集成工程技术所, 上海 201210)
(2. 中国民用航空上海航空器适航审定中心 动力装置室, 上海 200335)

摘要: 延程运行(ETOPS)是国际民航组织为了保证民航飞机安全飞行提出的一项运行要求,被广泛应用于洲际航线,尤其是跨洋飞行。ETOPS型号设计批准的核心是ETOPS重要系统的适航审定。对ETOPS重要系统的审定工作进行研究和讨论,分析ETOPS重要系统相关的适航条款要求,提出ETOPS重要系统确定方法和验证方法,明确有时间限制ETOPS重要系统的审定要求。结果表明:本文所提出的ETOPS重要系统的确定方法和验证方法在工程实践的应用中取得了实质性进展,能够为自主研制大型客机的ETOPS型号设计和适航审查工作提供指导。

关键词: 民用飞机;适航审定;条款研究;延程运行;ETOPS重要系统

中图分类号: V221

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.03.19

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Civil Aircraft ETOPS Significant Systems Airworthiness Certification

WANG Wenjiang¹, LI Xin²

(1. Aircraft Architecture Integration Engineering Technology Institute, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)
(2. Department of Power Unit, Shanghai Aircraft Airworthiness Certification Center of CAAC, Shanghai 200335, China)

Abstract: Extended Operations (ETOPS) is an operational requirement put forward by the International Civil Aviation Organization (ICAO) to ensure the safe flight of civil aviation aircraft, which is widely used in intercontinental routes, especially for cross ocean flight. The core of ETOPS type design approval is the airworthiness certification of ETOPS significant systems. ETOPS significant systems airworthiness certification is studied and discussed. The airworthiness requirement that refers to ETOPS significant systems is analyzed. The determination and verification methods of ETOPS significant systems are proposed, and the approval requirement for time-limited ETOPS significant systems is analyzed. The results show that the proposed determination and verification methods of ETOPS significant systems applied in engineering practice has achieved the substantive progress, and can provide the guidance for independent large civil aircraft ETOPS type design and airworthiness certification.

Key words: civil aircraft; airworthiness certification; rule study; Extended Operations; ETOPS significant systems

收稿日期: 2021-11-12; 修回日期: 2022-04-02

通信作者: 王稳江, wangwenjiang@comac.cc

引用格式: 王稳江, 李新. 民用飞机ETOPS重要系统适航审定研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 164-170.

WANG Wenjiang, LI Xin. Research on civil aircraft ETOPS significant systems airworthiness certification[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 164-170. (in Chinese)

0 引言

延程运行(Extended Operations,简称ETOPS)^[1-2]是指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^[3]。

ETOPS被广泛应用于民用航空大型客机的洲际航线,尤其是跨洋飞行。民用飞机进行ETOPS航线运行需同时具备两个条件^[4]:

(1) 飞机一发动机组合获得适航当局的ETOPS型号设计批准;

(2) 运营机构(航空公司)获得适航当局的ETOPS运行批准。

飞机一发动机组合获得ETOPS型号设计批准是先决条件。波音和空客对于ETOPS型号设计(审定)都非常成熟,其现役的大型客机基本都具备ETOPS资质认证。由于国内民用大型客机研发起步晚,加上国外的技术封锁,我国自主研发大型客机的ETOPS型号设计和取证仍是空白。尽管国内的航空公司具备多年的ETOPS航线运行经验(南方航空公司早在1997年成为亚洲首家运行120 min ETOPS的航空公司^[5]),但是,国内对于民用飞机ETOPS型号设计和审定的研究却是近些年在国产大型客机项目的牵引作用下才逐渐发展的。王稳江等^[6]对ETOPS型号设计进行探索研究;李昊燃等^[7]研究了发动机的ETOPS型号设计和符合性验证方法;谈琳妮等^[8]研究了ETOPS试飞验证技术。然而,上述研究对于ETOPS重要系统的适航审定,仍然缺乏系统性的理论研究和方法指导。

ETOPS型号设计批准过程中一项重要工作就是ETOPS重要系统适航审定^[9-10]。ETOPS重要系统,对于民用飞机制造商而言,是民用飞机

ETOPS型号设计与取证过程中主要的设计与验证对象;对于民用飞机运营商而言,是民用飞机ETOPS运营过程中的主要监控和维护对象。由此可见,ETOPS重要系统的适航审定,贯穿民用飞机主制造商的研制和运营商的运营过程,无论对于制造商的ETOPS型号设计批准,还是运营商的ETOPS运行都至关重要。目前,国内对于ETOPS重要系统适航审定的理论研究和方法指导鲜有研究。我国自主研发大型客机ETOPS型号设计批准处于起步阶段,扎实做好ETOPS重要系统相关的设计和验证工作,能够为国产大型客机的ETOPS型号设计批准和将来的ETOPS运行批准打下坚实基础。

本文主要针对ETOPS重要系统适航审定开展研究,分析ETOPS重要系统相关适航条款要求,提出ETOPS重要系统的确定方法和验证方法,以期为我国自主研发大型客机的ETOPS型号设计审查人员和设计人员提供指导。

1 ETOPS重要系统概述

1.1 ETOPS发展现状

自1984年FAA首次提出ETOPS概念^[11]以来,世界民用航空运输业得到了飞速发展,大规模的ETOPS航线得以开辟(1984年ETOPS航线如图1所示,2018年ETOPS航线如图2所示),双发飞机也被大量用于跨洋飞行。波音和空客现役的双发飞机型号基本都具备180 min及以上的ETOPS能力(如表1所示)。



图1 ETOPS航线(1984年)^[12]

Fig. 1 ETOPS flights in 1984^[12]

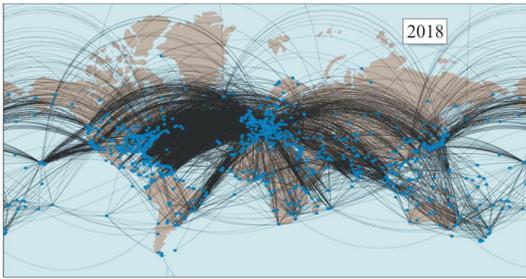
图2 ETOPS航线(2018年)^[12]Fig. 2 ETOPS flights in 2018^[12]

表1 波音和空客双发机型的ETOPS能力
Table 1 Boeing and Airbus twin-engine aircraft
ETOPS capability

机型	最大ETOPS改航时间/min
A300-600	180 ^[13]
A310/A310-600	180 ^[13]
A318/A319/A320/A321	180 ^[13]
A330	180 ^[13]
A350-900	370 ^[14]
B737NG	180 ^[15]
B757	180 ^[16]
B767	180 ^[16]
B777-300ER	330 ^[17]
B787	330 ^[18]

1.2 ETOPS重要系统

在“ETOPS Significant System”(ETOPS重要系统)^[1]这个概念被正式提出之前,FAA在咨询通告 AC120-42A^[11]中曾用“critical”“primary”和“essential”搭配“ETOPS Systems”作为术语,但并未给出明确定义。

“ETOPS Significant System”(ETOPS重要系统,也译作ETOPS关键系统^[3,19])这一名词,最早是由波音提出的,是对那些受ETOPS维护要求影响的飞机系统(包括动力装置系统)的统称。

ETOPS重要系统是指失效或者故障时可能对ETOPS飞行的安全,或者对在ETOPS改航过程中飞机的继续安全飞行和着陆产生不利影响的飞机系统,包括推进系统^[10]。

1.3 ETOPS重要系统分类原则

根据 AC120-42B/AMC20-6 rev. 2/AC25.

1535-1X(草案),ETOPS重要系统可以分为两类^[4,20-21]。对于ETOPS重要系统分类原则,虽然AC和AMC在表述上略有差异,但本质上是一致的。鉴于AMC20-6 rev. 2中对于组类2的ETOPS重要系统的描述更为详细,在民用飞机ETOPS型号设计和适航审定过程中建议依据AMC20-6 rev. 2的分类原则开展工作。

ETOPS重要系统按以下原则分为组类1和组类2^[20]。

组类1系统包括与飞机发动机数量相关,并且对于飞机安全进行ETOPS飞行很重要的任何系统。

(1) 失效—安全冗余特性与发动机数量直接相关的系统;

(2) 对发动机正常功能的影响程度达到可能导致空中停车或非指令推力丧失的系统;

(3) 对单发失效ETOPS改航的安全性至关重要,并且特意为因单发失效而丧失的系统提供冗余度的系统,包括备用系统;

(4) 诸如防冰系统等,在单发高度延长运行所必需的系统。

组类2系统与飞机发动机数量无关,但是对飞机安全运行ETOPS飞行至关重要。

(1) 某些失效状态会降低飞机能力或机组处理ETOPS改航能力的系统;

(2) 时间限制系统;

(3) 系统失效会引起ETOPS改航过程中过多的机组工作负荷(比如在一次最大ETOPS改航中,令人疲乏不堪的飞行控制力,或要求持续燃油平衡以保持合适重心的系统失效);

(4) 为提高远程运行和ETOPS改航安全性特意安装的系统。

2 适航条款要求

CCAR-21-R4^[10], CCAR-25-R4^[9], CCAR-33-R2^[22]和CCAR-121-R7^[19]中都有ETOPS相关的条款,涉及ETOPS型号设计批准的条款主要内容收录在CCAR-25-R4附录K中,其中提及ETOPS重要系统的条款有12项,如表2所示。

表2 ETOPS重要系统的条款要求
Table 2 Airworthiness requirements of ETOPS significant systems

项目	条款号	标题	内容摘要	备注	
设计要求	K25.1.3(c)	有时间限制的系统	申请人必须确定每一个有时间限制的ETOPS重要系统的系统时间性能	时间性能	
	K25.1.7(d)(2)	飞机飞行手册	C级货舱或行李舱灭火系统以外的ETOPS重要系统的最大限制	时间性能	
批准方法	双发飞机	K25.2.1(d)	飞机系统评估	申请人必须使用候选飞机一发动机组合的ETOPS重要系统的可用在役可靠性数据表明飞机系统符合第25.1309(b)条。	系统评估
		K25.2.1(e)	飞机飞行试验	申请人必须进行飞行试验以证实飞行机组有能力在一台发动机失效、且出现服役过程中可能发生的ETOPS重要系统失效和故障的最坏情况下安全进行ETOPS备降。	演示试飞
		K25.2.2(a)	以前经本部合格审定的飞机相关经历的评估	申请人必须确定已经针对候选飞机采取专门纠正措施,以防止申请人制造的经本部合格审定的飞机先前发生的设计、制造、运行和维修相关的问题。	系统评估
		K25.2.2(c)	维护和运行程序	申请人必须验证ETOPS重要系统的所有维护和运行程序。	
		K25.2.2(g)	飞机演示	非正常条件下的飞行,以演示在服役过程中可能发生的ETOPS重要系统的故障或失效的最坏情况下,飞行机组有能力安全进行ETOPS备降。	演示试飞
	K25.2.2(i)	接受标准	飞行试验程序和飞机演示飞行试验程序过程中发生的ETOPS重要系统失效和故障的类型和频度,必须与目前已获ETOPS批准的已取证飞机预期发生的失效和故障的类型和频度相一致。	演示试飞	
	多发飞机	K25.3.1(b)	飞机系统评估	申请人必须用候选飞机一发动机组合ETOPS重要系统的可用在役可靠性数据显示飞机系统符合第25.1309(b)条。	系统评估
		K25.3.1(c)	飞机飞行试验	申请人必须进行飞行试验以证实飞行机组有能力在一台发动机失效、且出现服役过程中可能发生的ETOPS重要系统失效和故障的最坏情况下安全进行ETOPS备降。	演示试飞
		K25.3.2(a)	维护和运行程序	申请人必须证实ETOPS重要系统的所有维护和运行程序。	
		K25.3.2(d)	飞机演示	演示飞行试验程序需包括非正常条件下的飞行,以演示在使用过程中可能发生的ETOPS重要系统的故障或失效的最坏情况下,飞行机组有能力安全进行ETOPS备降。	演示试飞
K25.3.2(f)		接受标准	飞行试验程序和飞机演示飞行试验程序过程中发生的ETOPS重要系统失效和故障的类型和频度,必须与目前已获ETOPS批准的已取证飞机预期发生的失效和故障的类型和频度相一致。	演示试飞	

除表2所列的条款外,K25.1.1和K25.1.6条款虽然没有直接提到ETOPS重要系统,但是参考AC25.1535-1X的解读,K25.1.1条款是ETOPS重要系统相应要求的来源和通用性条款;而K25.1.6条款所要求的《构型、维护和程序》(Configuration, Maintenance, and Procedures,以下简称CMP)^[2]文件中主要构型、运行和维护要求、硬件寿命、MMEL等都和ETOPS重要系统密切相关。

CCAR-25-R4对ETOPS重要系统的要求中,可以归结为以下六个方面的审查要素。

(1) 申请人应确定出候选飞机一发动机组合的ETOPS重要系统清单;

(2) 型号设计阶段的ETOPS重要系统验证;

(3) 试飞/服役阶段的ETOPS重要系统验证;

(4) 申请人应确定时间限制的ETOPS重要系统的时间性能;

(5) ETOPS重要系统相关的构型、维护、程序等信息收录在CMP文件中;

(6) 模拟ETOPS重要系统失效的演示试飞。

3 ETOPS重要系统的确定方法

适航条款中除了对发动机有空中停车率(In-Flight Shut Down)^[9]有明确阈值要求外,对其他ETOPS重要系统的设计指标并没有明确的量化要求,因此在ETOPS型号设计过程中,申请人应从飞机型号设计的具体系统设计和架构出发,以安全性评估的定性分析过程为手段,同时需要考虑具体型号设计的ETOPS运行目标,如ETOPS

最大飞行时间^[21]、最大ETOPS改航时间^[21]等,对全机各系统开展失效影响分析(Failure Effect Analysis)^[10,20],再依据本文1.3节中列出的ETOPS重要系统分类原则,从系统级到分系统级逐级进行筛选,将失效影响对应ETOPS重要系统分类原则的系统/分系统都列入ETOPS重要系统清单,然后再依据ETOPS重要系统分类原则进行分类,最终形成ETOPS重要系统清单,并与适航当局达成一致。

4 ETOPS重要系统的验证方法

ETOPS重要系统验证方法的过程分为两个阶段:设计验证阶段和试飞/服役验证阶段。

设计验证阶段的ETOPS重要系统验证,主要是采用安全性评估的定量分析过程为手段,考虑平均ETOPS任务时间^[20](综合考虑飞机一发动机组合航程范围内会如何使用,并分析潜在可用的航线结构和城市对而确定)和最大ETOPS改航时间^[20],确认满足飞机在ETOPS航线飞行过程以及ETOPS改航期间的安全飞行和着陆要求。具体来说,对于飞机系统,应表明符合CCAR25.1309的要求^[9];对于推进系统,则应表明符合CCAR25.901(c)的要求^[9]。在设计验证阶段,如果出现个别系统/子系统/设备无法满足ETOPS设计指标要求,那就需要进行必要的设计更改。此时的设计更改,应权衡考虑采用更为严格的维护/操作程序,或者增加限制,或者通过更换可靠性更高的系统/子系统/设备这三种方法中之一,如果能够达到ETOPS设计指标要求,那就产生了ETOPS构型项,应纳入到CMP文件中,验证过程如图3所示。

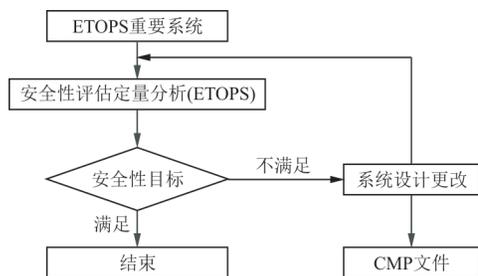


图3 设计验证阶段ETOPS重要系统验证流程示意
Fig. 3 Verification process of ETOPS significant system in design and verification phase

如果上述三种方法都无法满足ETOPS设计指标要求,那就要考虑更改系统构架设计,比如增加系统冗余度等。

试飞/服役验证阶段的ETOPS重要系统验证,对于服役经历方法的ETOPS型号设计批准,采用候选飞机一发动机组合的ETOPS重要系统,在试飞/服役过程中可用的在役可靠性数据表明飞机系统的CCAR25.1309(b)^[9]条款的符合性,此时,候选飞机一发动机组合在试飞/服役验证阶段的ETOPS重要系统评估是CMP要求的主要来源;而对于早期ETOPS方法的ETOPS型号设计批准,可以采用“技术转移分析”(Technical Transfer Analysis)的方法^[6,13],将早期ETOPS机型和候选飞机一发动机组合的试飞/服役过程的在役可靠性数据应用于候选飞机一发动机组合的ETOPS重要系统评估中,相应地,CMP要求增加了另一个来源:附录K25.2.2(h)条指定的问题跟踪和解决系统下遇到和报告的问题的纠正措施^[9]。

在附录K25.2.1(e)、K25.2.2(g)、K25.3.1(c)和K25.3.2(d)要求的演示试飞中^[9],要对服役过程中可能发生的ETOPS重要系统失效和故障的情况进行模拟,并证明飞机的ETOPS改航能力。具体需要在演示试飞中模拟验证哪些ETOPS重要系统失效和故障状态,由审查方和申请人共同决定。

5 有时间限制的ETOPS重要系统的审定

有时间限制的ETOPS重要系统是一类比较特殊的ETOPS重要系统,所谓有时间限制,是指系统一旦开始工作,其功能/性能只能持续有限的时间。最典型的例子就是货舱抑火系统,由于灭火瓶容量限制,灭火剂一旦开始释放,其作用时间显然是有时间限制的。

附录K25.1.3(c)条款要求申请人确定每一个有时间限制的ETOPS重要系统的系统时间能力^[9]。附录K25.1.7(d)要求AFM中列出最受时间限制的C级货舱或行李舱火警抑制系统之外最受时间限制的ETOPS重要系统的系统时间能力^[9],还要求AFM列出除C级货舱或行李舱火警

抑制系统之外最受时间限制的ETOPS重要系统的系统时间能力。由于这两类ETOPS重要系统的时间能力在运行规章中确定ETOPS航线最长改航时间的方法不同,因而有必要在AFM中指定每一类ETOPS重要系统的时间能力。

针对不超过180 min的ETOPS和北太平洋区域内的不超过207 min的ETOPS,在标准条件下静止大气以经批准的一台发动机失效巡航速度备降至计划的ETOPS指定备降机场所需的时间,不能超过该飞机时间限制最严格的ETOPS重要系统(包括货舱抑火系统)所规定的最长时间限制减去15 min^[3]。

针对超过180 min的ETOPS,对于货舱抑火系统,在正常的全发巡航高度,修正了风和温度的影响,以全发运行的巡航速度备降至计划的ETOPS指定备降机场所需的时间,不能超过该飞机抑火系统的最大合格审定时限减去15 min;对于货舱抑火系统之外的ETOPS重要系统,在正常的一台发动机失效巡航高度上,修正了风和温度的影响^[23],以经批准的一台发动机失效巡航速度备降至计划的ETOPS指定备降机场所需的时间,不能超过该飞机ETOPS重要系统(不包括货舱抑火系统)最大时限减去15 min^[3]。

6 结 论

(1) ETOPS重要系统适航审定是ETOPS型号设计批准的重要环节,对于制造商的ETOPS型号设计批准,以及运营商的ETOPS运行都至关重要。

(2) 本文所提出的ETOPS重要系统的确定方法和验证方法,在国内大型民用客机项目工程实践中得到了实践检验,并取得了实质性进展。实践证明,本文所提出的方法合理可行,并且能够为大型民用客机的ETOPS型号设计与审定工作提供指导。

参 考 文 献

- [1] FAA. 14 CFR part 1-definitions and abbreviations[S]. US: FAA, 2009.
- [2] FAA. 14 CFR part 25-transport category airplanes[S]. US: FAA, 2009.
- [3] 中国民用航空局. 延程运行和极地运行: AC-121-FS-2012-009R1[S]. 北京: 中国民用航空局, 2012.
- CAAC. ETOPS and polar operations: AC-121-FS-2012-009R1[S]. Beijing: CAAC, 2012. (in Chinese)
- [4] FAA. Extended operations (ETOPS and polar operations): AC120-42B[S]. US: FAA, 2008.
- [5] 赵伟. 中国南方航空公司的ETOPS营运达到国内唯一世界一流的水平[J]. 民航经济与科技, 2000(11): 43.
- ZHAO Wei. The ETOPS operation of China Southern Airlines has reached the only world-class level in China[J]. Civil Aviation Economy and Technology, 2000(11):43. (in Chinese)
- [6] 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. Research on civil aircraft ETOPS type design[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2015, 6(3): 377-381. (in Chinese)
- [7] 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 ETOPS type design and compliance method for civil aviation engine[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(2): 129-135. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
- CAAC. Airworthiness standards-transport category airplanes: CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [10] 中国民用航空局. 民用航空产品和零部件合格审定规定: CCAR-21-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2017.
- CAAC. Regulations on certification of civil aviation products and parts: CCAR-21-R4[S]. Beijing: CAAC, 2017. (in Chinese)
- [11] FAA. Extended range operation of two-engine airplanes (ETOPS): AC120-42A[S]. US: FAA, 1985.
- [12] ICAO. Module 2-EDTO foundation[EB/OL]. [2021-11-12]. <https://www.icao.int/WACAF/Documents/Meetings/2019/EDTO/EDTO%20Module%202%20-%20EDTO%20Foundation.pdf>, 2019.
- [13] Airbus. Getting to grips with ETOPS[M]. Toulouse, France: Airbus, 1998.
- [14] BROADBENT M. A350-900 ETOPS approval[J]. Air International, 2014, 87(6): 31.
- [15] Boeing. 737 standard selections[M]. US: Boeing, 2008.

- [16] 高宇, 李楠. 延程运行的发展与运用[J]. 中国民用航空, 2011(12): 24-27.
GAO Yu, LI Nan. Development and application of extended range operation[J]. Civil Aviation of China, 2011(12): 24-27. (in Chinese)
- [17] KAMINSKI-MORROW D. Air New Zealand stretches to 330 min ETOPS on 777s[J]. Flight International, 2012, 181: 15.
- [18] Anon. Boeing 787 was awarded 330 min extension operation certification[J]. International Airlines, 2014(6): 1.
- [19] 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: CCAR-121-R7[S]. 北京: 中国民用航空局, 2021.
CAAC. Operation certification rules for large aircraft public air transport carriers: CCAR-121-R7[S]. Beijing: CAAC, 2021. (in Chinese)
- [20] EASA. Extended range operation with two engine aeroplanes ETOPS certification and operation: AMC20-6[S]. France: European Aviation Safety Agency, 2008.
- [21] FAA. Certification of transport category aircraft for extended operation (ETOPS): AC25.1535-1X[S]. US: FAA, 2001.
- [22] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定: CCAR-33-R2[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
CAAC. Aeroengine airworthiness regulations: CCAR-33-R2[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [23] 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)

作者简介:

王稳江(1985—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞机总体设计。

李新(1970—),男,硕士,研究员。主要研究方向:航空器动力装置适航审定。

(编辑:丛艳娟)

(上接第 163 页)

- SONG Ya, XIA Tangbin, ZHENG Yu, et al. Remaining useful life prediction of turbofan engine based on Autoencoder-BLSTM[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2019, 25(7): 1611-1619. (in Chinese)
- [11] NTANTIS E L, BOTSARIS P N. Diagnostic methods for an aircraft engine performance[J]. Journal of Engineering Science & Technology Review, 2015, 8(4): 64-72.
- [12] REMADNA I, TERRISSA S L, ZEMOURI R, et al. Leveraging the power of the combination of CNN and Bi-directional LSTM networks for aircraft engine RUL estimation [C]// 2020 Prognostics and Health Management Conference (PHM-Besançon). [S.l.]: IEEE, 2020: 116-121.
- [13] ORDÓÑEZ C, LASHERAS F S, ROCA-PARDINAS J, et al. A hybrid ARIMA-SVM model for the study of the remaining useful life of aircraft engines[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2019, 346: 184-191.
- [14] 郭庆, 李印龙, 郑天翔. 基于非线性 Wiener 过程航空发动机性能退化预测[J]. 推进技术, 2021, 42(9): 1956-1963.
GUO Qing, LI Yinlong, ZHENG Tianxiang. Aero-engine performance degradation prediction based on nonlinear Wiener process[J]. Journal of Propulsion Technology, 2021, 42(9): 1956-1963. (in Chinese)
- [15] SAXENA A, KAI G, SIMON D, et al. Damage propagation modeling for aircraft engine run-to-failure simulation [C]// 2018 International Conference on Prognostics and Health Management. [S.l.]: IEEE, 2018: 1-8.
- [16] ZHANG B, LI Y, BAI Y, et al. Aeroengines remaining useful life prediction based on improved C-loss ELM[J]. IEEE Access, 2020, 8: 49752-49764.
- [17] ZHU X M. Vibration analysis of coupled faults diagnosis in a rotor system using wavelet de-noising and KPCA data fusion [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 192: 233-236.

作者简介:

胡启国(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:机械系统可靠性,机械系统动力学。

白熊(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:机械系统可靠性与剩余寿命预测。

杜春超(1995—),男,硕士研究生。主要研究方向:机械系统可靠性与剩余寿命预测。

(编辑:丛艳娟)