

文章编号:1674-8190(2020)04-556-07

试飞试用阶段的飞机可靠性评估研究

郭鹏¹, 赵晓东²

(1. 航空工业第一飞机设计研究院 总体气动研究所, 西安 710089)

(2. 航空工业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: 飞机的可靠性水平是飞机设计定型时考核的重要指标之一, 为保证评估结果的客观与准确性, 在飞机试飞试用阶段开展可靠性评估研究尤为重要。本文从工程实际需求出发, 通过规范评估对象故障信息的采集方式, 明确故障判定准则与统计原则, 给出完整的飞机可靠性评估流程; 基于上述流程, 针对某型飞机一年中的试飞试用信息, 进行多维度的可靠性评估。结果表明: 评估结果能够较好地反映飞机的可靠性水平, 满足工程需要。

关键词: 试飞; 可靠性; 故障信息; 判定准则; 统计方法; 评估流程

中图分类号: V215.7

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2020.04.014

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Aircraft Reliability Assessment in Flight Test and Service Period

GUO Peng¹, ZHAO Xiaodong²

(1. General Configuration and Aerodynamic Department, AVIC The First Aircraft Institute, Xi'an 710089, China)

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

Abstract: The reliability level is one of the most significant indexes to be considered in aircraft design process. In order to guarantee the objectivity and accuracy of results, the study on aircraft reliability assessment in flight test and service period is particularly essential. Proceeding from the practical engineering requirement, the whole reliability assessment process for aircraft is obtained through regulating the acquisition method of fault information as well as specifying the failure criterion and statistical principles. Based on the above process, utilizing the fault information in flight test and service, the reliability level of assigned aircraft is assessed in multiple dimensions. The results show that the eventual assessment results can reflect the real reliability level of aircrafts and satisfy the requirement of practical engineering.

Key words: flight test; reliability; failure information; failure criterion; statistical approach; assessment process

0 引言

可靠性工作贯穿于飞机研制的全寿命过程中, 其主要技术内容包括可靠性预计、可靠性设计、可

靠性试验、可靠性分析与评估等^[1]。可靠性分析与评估是可靠性工作的重要组成部分, 是指在整个寿命周期内, 根据产品的可靠性结构、分布模型, 以及有关的可靠性信息, 利用统计方法, 对产品的可靠

收稿日期: 2020-01-01; 修回日期: 2020-03-26

通信作者: 郭鹏, avic-guopeng@qq.com

引用格式: 郭鹏, 赵晓东. 试飞试用阶段的飞机可靠性评估研究[J]. 航空工程进展, 2020, 11(4): 556-562.

GUO Peng, ZHAO Xiaodong. Study on aircraft reliability assessment in flight test and service period[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020, 11(4): 556-562. (in Chinese)

性指标给出评估的过程^[2]。随着部队需求的提高,飞机通用质量特性的重要性日益凸显,并成为影响使用效能的关键因素^[3]。因此,飞机的可靠性水平对飞机的作战能力、生存能力、部署机动性、维修保障和全寿命周期费用等都具有重要的影响。

试飞阶段是发现设计、制造、工艺和材料等方面的问题并不断改进,是机务维修人员的技术水平持续提高的过程,飞机的可靠性水平主要受这些因素的影响,此阶段可靠性评估结果的满足情况也是对飞机研制阶段可靠性目标值的检验^[4]。随着我国航空工业的不断发展,通过对新研飞机开展试飞活动验证可靠性设计指标已成为必须要求。对民用飞机而言,新研或改型的航空器要投入运行,首先要通过型号合格审定过程,取得民航当局颁发的型号合格证或补充型号合格证等证件。而型号合格审定所规定的符合性方法中的一类就是飞行试验,即试飞^[5]。功能与可靠性试飞属于型号合格审定要求的试飞活动,但又区别于合格审定试飞,以确保飞机及其部件的设备功能运转正常且可靠。对军用飞机而言,可靠性指标是飞机设计定型/鉴定试飞阶段重要的考核要求。在设计定型/鉴定试飞或部队试用阶段,各方对可靠性评估工作越来越重视,将可靠性置于和性能同等重要的地位^[5]。

国外关于飞机可靠性评估研究大多集中在飞机系统^[6-7]、结构寿命^[8]或评估方法选取与对比^[9]方面,整机可靠性指标则更关注于飞机的签派可靠性(Dispatch Reliability),对飞机级的基本可靠性指标关注极少,鲜有对试飞阶段基本可靠性指标的验证与评估。例如在A380飞机可靠性项目的确认与验证过程中,通过早期阶段开展产品的加速可靠性试验将相关设计缺陷进行了有效性排除,且通过与承制方签订协议采用满足可靠性指标的成熟产品,进一步提高整机的可靠性水平^[10]。国内在飞机可靠性评估方面的研究,也多集中在基于不同的建模方法与仿真,开展飞机系统级的可靠性评估^[11],对试飞阶段飞机级的基本可靠性评估研究涉猎不多。试飞阶段可靠性评估过程中关于故障信息采集要求、采集方式、责任故障的判定和统计方法等方面研究信息较少,而上述信息决定着飞机可靠性评估结果的客观与准确性。

鉴于飞机可靠性评估的重要性,特别是从试飞

和试用阶段开始,用户使用的反馈信息不断增大的情况下,如何对数据进行处理与评估,很大程度上影响到飞机可靠性评估结果的真实性和可信性。

本文对飞机试飞试用阶段可靠性评估流程进行研究,并以某型飞机在试飞和试用过程中的故障问题反馈为例,用较为实际的数理统计方法对飞机的可靠性水平进行评估。

1 可靠性评估

可靠性评估验证工作是在综合考虑生产方和使用方的利益以及试验费用等诸多因素的基础上制定科学合理的试验方案,利用科学合理的数理统计学手段处理试验数据,验证产品的可靠性指标是否满足要求^[11]。飞机的可靠性评估,具体而言,则是针对一段时间内的飞行信息(飞行时间和故障数等),运用可靠性评估方法,求得可靠性参数估计值的过程。

以美国波音和法国空客为代表的国外航空制造商,依靠长时间大型飞机的设计和制造经验,以及用户在使用中遇到的问题和反馈,积累了大量真实的可靠性数据。例如根据美国空军材料试验室(AFML)统计,1963~1975年,美国空军仅因发动机原因引起的事故就达到了1 664起,占总事故的43.5%^[12]。在这些事故中,由疲劳、断裂和腐蚀等原因引起的故障超过了60%。而通过不断地总结经验,其发动机的可靠性水平逐渐上升。例如将F-5E的J85发动机进行设计改进,不仅推重比翻倍,而且燃油消耗率也显著下降。美国国防部在20世纪80年代,颁发了可靠性军用标准及手册,提出了更加具体的可靠性要求^[13],为飞机、系统及设备的可靠性评估提供了更加坚实的理论基础。相比于国外,我国航空领域对可靠性的认识与研究都比较晚,直至20世纪90年代才进入全面发展阶段^[14]。

经典的可靠性评估方法有极大似然估计法^[15]和单侧置信下限估计方法^[16],以及威布尔分布法^[17]和区别于经典统计理论的贝叶斯方法^[18]等。但在概率密度函数及概率分布函数都难以确定的情况下,威布尔分布可靠性建模运算过程往往比较复杂,计算量大^[19]。贝叶斯方法则适用于小样本

量的情况,但要确定先验密度,同时对计算量要求较高。极大似然估计方法默认故障分布服从指数分布,且要求采样样本为完全样本量。

由于样本值的随机性以及小样本量的限制,利用极大似然估计显然无法对飞机/机队的可靠性指标进行准确评估。与此同时,区别于威布尔分布与贝叶斯等方法的复杂运算量,而在一定的置信水平条件下,通过默认飞机/系统/设备的故障率服从指数分布的特点,利用单侧置信下限法,则能实现对可靠性指标的快速评估,特别是随着飞机交付量的提高,外场故障信息持续增大的情况下。利用单侧置信下限法,能有效地降低评估过程中的运算量,为型号的设计定型工作提供指导依据。

1.1 可靠性评估基本理论

飞机的可靠性评估过程中,通常使用的可靠性参数为平均故障间隔时间 T_{BF} 和平均故障间隔飞行小时 T_{FBF} 。

一般情况下,根据考核方要求,试飞试用阶段的飞机可靠性评估采用单侧置信下限法,给出了飞机/系统/设备以多大的可能性不小于统计计算值。

对单机或机群、系统进行可靠性评估时可采用 T_{FBF} ,对设备进行可靠性评估时则采用 T_{BF} 。

针对飞机单机或机群以及飞机系统的可靠性

水平评估,主要采用公式(1)计算平均故障间隔飞行时间单侧置信下限:

$$T_{FBFL} = \frac{2T_f}{\chi^2(\alpha, 2r+2)} \quad (1)$$

式中: T_{FBFL} 为平均故障间隔飞行时间单侧置信下限, fh ; T_f 为累积飞行小时数(飞机履历本记录的飞行时间), fh ; r 为累积责任故障数; α 为选定的显著性水平(一般取 0.2)。

机载设备可靠性试验由于受到试验设备、样品数量、时间、经费等方面的限制,工程上很难严格按照《可靠性鉴定与验收试验:GJB899A》开展验证。因此,其可靠性指标的验证采用外场试飞的方法来开展^[20]。针对设备的可靠性水平评估,主要采用公式(2)计算平均故障间隔时间单侧置信下限:

$$T_{BFL} = \frac{2T}{\chi^2(\alpha, 2r+2)} \quad (2)$$

式中: T_{BFL} 为平均故障间隔时间单侧置信下限, h ; T 为累积工作时间, h ; r 为累积责任故障数; α 为选定的显著性水平(一般取 0.2)。

1.2 数据采集方式

一般情况下,试飞和试用期间的飞行故障信息采集应分别由试飞单位和试用单位(相关设备的承制单位应协助)提供,具体内容如表 1 所示。

表 1 试飞试用飞行期间故障信息采集表

Table 1 Data collection from flight test and on service

故障日期 (年月日)	飞机 编号	飞行科目	地点	累计飞行 小时	故障部位/ 设备名称	承制 单位	所属 系统	故障 现象	外场故障 原因分析	返厂故障 原因分析	纠正 措施
---------------	----------	------	----	------------	---------------	----------	----------	----------	--------------	--------------	----------

1.3 数据采集要求

(1) 飞行时间要求

飞行时间的采集应满足整机可靠性定量指标的评估要求(建议按照考核值的 40 倍以上进行选取)。

(2) 地域要求

应选择在未来使用中的代表性地域开展,并综合考虑典型使用环境因素(如高寒、湿热、干燥、潮

湿、盐雾、沙尘等)的影响。

(3) 季节要求

夏季和冬季累积飞行小时数之和不应少于总累积飞行小时数的 1/2。

(4) 样本量要求

用于可靠性评估的飞机总数一般不应少于 6 架,单机累积飞行小时数不少于单机平均飞行小时的 1/2。

2 可靠性评估原则和流程

2.1 故障判定原则

(1) 飞机或系统、设备不能工作或部分设备丧失;

(2) 飞机或系统、设备功能降级;

(3) 飞机或系统、设备的机械及结构部件或元器件发生破裂、断裂或损坏。

2.2 责任故障判定

故障分为责任故障和非责任故障,只有责任故障才属于可靠性评估的故障,责任故障的主要内容为:

(1) 由于飞机级设计缺陷或制造工艺不良引起的故障;

(2) 由于设备级设计缺陷(硬件或软件设计缺陷)或制造工艺不良而引起的故障;

(3) 由于元器件潜在缺陷或失效引起的故障;

(4) 输出性能降低,经原位调整后,不能恢复到正常使用状态的故障;

(5) 非从属性故障原因引起的故障征兆;

(6) 飞行中发现且地面技术保障人员无法立即确认或排除的异常现象。

2.3 责任故障统计原则

责任故障的统计应服从以下原则:

(1) 经证实多种故障模式/现象都是由同一故障原因引起的,计为一次故障;

(2) 由同一原因引起,未真正排除而重复出现的故障或经分析确认采取纠正措施并验证有效后且不再发生,应合计为一次故障;

(3) 有多个故障,当不能证明彼此为关联故障或由同一原因引起时,每个故障应计为独立故障;

(4) 在故障检测和修理期间,若发现飞机中还存在其他故障而不能确定是由原有故障引起的,则应将其视为单独责任故障进行统计^[21];

(5) 未丧失规定功能的轻微缺陷(如松动、漂移、噪声、渗漏等),且不经拆卸就可以进行原位修复的事件,不计入故障次数;

(6) 新交付飞机前 50 fh 内的责任故障不予统计。

2.4 评估流程

基于数据采集要求以及责任故障的判定和统计原则,给出可靠性评估的基本流程,如图 1 所示。

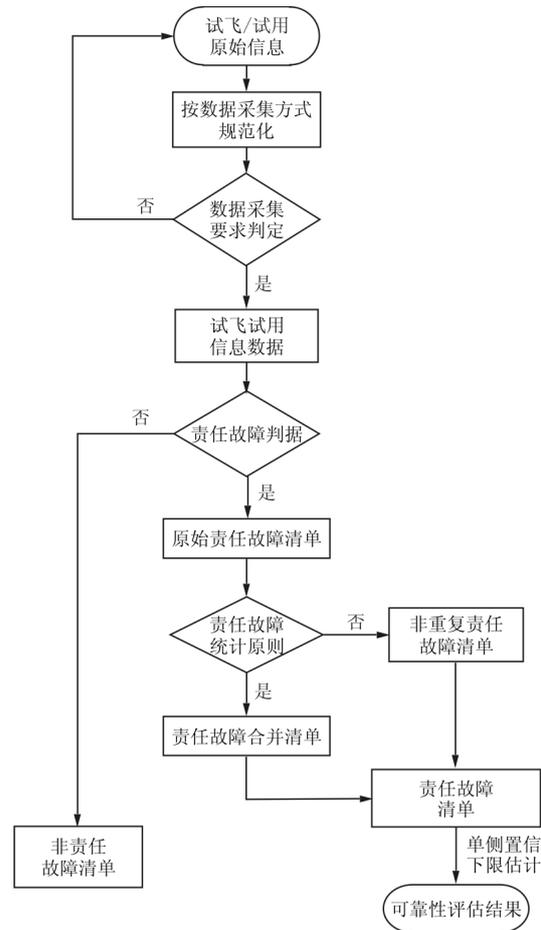


图 1 可靠性评估流程图

Fig. 1 Reliability assessment diagram

3 案例应用

选用试飞和试用部门的 8 架飞机,并以其在一年内试飞和试用过程中的故障信息为例,按照可靠性评估的流程开展评估工作。

3.1 数据采集

按照试飞数据的采集要求,可靠性评估部门分别从试飞和试用部门采集到若干条问题,并结合数据采集方式的规范化要求,给出上述问题的具体信息,鉴于数据量较大,此处仅给出示例如表 2 所示。

表 2 数据采集示例表
Table 2 Data collection sample

故障时间 (年月日)	飞机 编号	飞行 科目	地点	故障部位/ 设备名称	承制 单位	所属 系统	故障 现象	外场故障 原因分析	返厂故障 原因分析	纠正措施
2018-01-11	XXX	飞行 品质	试飞 部门	直流二次 电 源 子 系 统	XXX	供电 系统	1号变整电压 在 28 V 和 31 V跳变。	直 流 电 源 控 制 保 护 器 故障。	直流电源保护器元器件内 部封装形式不适应温度交 变要求,内部芯片键合引线 由于器件分层导致机械拉 断,信号调制解调异常,导 致输出电压波动的故障。	选用新型 元器件进 行 功 能 替代。
2018-01-06	XXX	检飞	试用 部门	惯 性/卫 星组合导 航设备	XXX	航电 系统	飞机起飞后, 飞行员反映 右侧惯导无 数据输出。	惯导故障,无 数据输出,经 检查为惯导 2 故障。	由于导航软件中央维护功 能设计存在缺陷。	对导航软 件 进 行 升级。

3.2 责任故障判定与统计

3.2.1 责任故障判定

按照责任故障的判定原则,试飞、试用过程中出现的若干条问题,非责任故障 798 项,责任故障 382 项(含重复责任故障),由于不牵扯新机交付问题,飞机前 50 fh 的责任故障不予考虑。

3.2.2 责任故障统计

将试飞部门和试用部门的责任故障,按照故障模式与机理类型相同的原则进行合并,有效责任故障共 325 项,合并后的责任故障数和累计飞行时间如表 3 所示。

表 3 责任故障信息表
Table 3 Valid fault information

部门	机号	责任故障/项	累计飞行时间/fh
试飞部门	001	22	138.37
	002	21	190.93
	003	27	212.45
	004	20	221.97
试用部门	005	66	427.50
	006	60	458.98
	007	37	286.42
	008	72	472.33

3.3 可靠性评估

3.3.1 机群可靠性评估

利用式(1)对机群的可靠性水平进行评估,其中试飞部门的机群可靠性水平 T_{FBF1} 为

$$T_{\text{FBF1}} = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2n+2)} = 7.72 \text{ fh}$$

利用式(1)对机群的可靠性水平进行评估,其中试用部门的机群可靠性水平 T_{FBF2} 为

$$T_{\text{FBF2}} = \frac{2T}{\chi^2_{1-\alpha}(2n+2)} = 6.61 \text{ fh}$$

综合评估结果为

$$T_{\text{FBF}} = T_{\text{FBF1}} \times 0.4 + T_{\text{FBF2}} \times 0.6 = 7.05 \text{ fh}$$

综上所述,某型飞机在一年内的基本可靠性水平为 7.05 fh。

3.3.2 系统可靠性评估

利用式(1)对机群各系统的可靠性水平进行评估,如表 4 所示。

表 4 飞机各系统可靠性评估
Table 4 Reliability assessment for systems of aircraft

系统名称	系统故障/项	区间估计/fh
航电系统	71	30.48
飞控系统	44	47.68
环控系统	19	101.93
机体结构	6	265.44
起落架结构	21	93.30
液压系统	13	141.59
供电系统	17	112.36
机电综合管理系统	14	132.91
起落架控制系统	23	86.05
照明系统	20	97.42
燃油系统	19	101.93
动力装置系统	11	163.02
APU 系统	13	141.59
氧气系统	8	211.69
环境防护系统	9	192.43
防/灭火系统	7	235.42
任务系统	5	304.70
水/废水系统	3	436.80
生活设施	2	562.97

从表4可以看出:航电系统和飞控系统在试飞试用过程故障较多,可靠性评估值较低,未达到系统可靠性分配值要求。航电系统和飞控系统部门,可根据上述评估结果,有针对性地对相关故障进行分析与设计改进。

3.3.3 设备级可靠性评估

对飞机设备级的可靠性水平进行评估时,设备的工作时间应进行适当修正,充分考虑设备的机上装机数量、运行比以及环境因子等因素,得到修正后的可靠性水平为

$$T_{\text{修正}} = T_{\text{th}} \times K_2 \times N \times K_e \quad (3)$$

式中: T_{th} 为飞行时间; K_2 为运行比(设备在空中和地面总工作时间与飞行时间的比值 $T_{\text{OH}}/T_{\text{th}}$); N 为设备的装机数量; K_e 为环境因子。

运行比是需要根据机载设备在整个飞行过程

中的工作特点,并综合考虑飞行前后的工作时间,该数值一般经系统设计人员计算给出。

环境因子的数值,一般情况下应基于大量的统计数据得出。国内目前尚无军标、规范等文献资料给出不同产品在各种环境下的环境因子。通常情况下,把试验室条件下的失效率作为基准失效率,即环境因子为1^[22]。其他环境下,环境因子可以进行适当修正,修正时应综合考虑多种环境因素的影响,如温度变化、湿度变化以及振动和冲击等因子的影响。

由于机载设备的装机数量并不唯一,因此在进行设备的可靠性评估时,该设备的总飞行时间应为单套设备的飞行时间乘以装机总数。

基于式(2)和式(3),选择故障次数较多的典型机载设备进行可靠性评估,如表5所示。

表5 飞机典型设备可靠性评估
Table 5 Reliability assessment of typical devices

机载设备名称	故障次数	飞行时间/h	装机数量	运行比	环境因子	修正时间/h	可靠性评估值/h
机轮温度压力监控装置	14	2 408.95	1	1.00	1.1	2 649.85	146
刹车控制分系统	11	2 408.95	1	1.09	1.1	2 888.33	195
座舱压力控制分系统	6	2 408.95	1	1.00	1.1	2 649.85	292
辅助动力装置(APU)	5	2 408.95	1	1.25	1.1	3 312.31	419
短波电台	7	2 408.95	2	1.05	1.1	5 564.67	544
气源分系统	5	2 408.95	1	1.05	1.1	2 782.34	352
惯性/卫星组合导航设备	4	2 408.95	1	1.05	1.1	2 782.34	414
攻角传感器	3	2 408.95	2	1.05	1.1	5 564.67	1 009
中央告警设备	3	2 408.95	1	1.05	1.1	2 782.34	504
超短波电台	3	2 408.95	1	1.05	1.1	2 782.34	504

从表5可以看出:机载设备多集中在航电系统,且评估结果也未达到相应的可靠性要求值。飞机设计部门结合表4和表5的可靠性评估反馈,重点对影响全机可靠性水平的系统和机载设备进行故障分析与设计改进,开展可靠性提升工作。

4 结 论

(1) 本文对试飞和试用阶段飞机可靠性评估进行研究,通过故障信息收集的规范化,加强了对故障个体的深入研究(例如提出对外场故障原因以及返厂后故障原因的双重分析及相关纠正措施),确保了信息收集的准确性,为责任故障的判定提供了科学依据。

(2) 试飞和试用阶段的可靠性从飞机级(机群)、系统级和设备级进行了评估,评估结果可以作

为飞机设计部门开展飞机可靠性提升工作的重要依据。

(3) 本文建立的试飞和试用阶段的飞机可靠性评估流程,有助于设计单位实现从个体可靠性水平(具体机载设备的故障状态)到飞机整体可靠性波动的全流程监控与跟踪,推动飞机的持续设计改进,提高新研飞机的可靠性水平。

参考文献

- [1] 郭鹏. 基于Petri网的飞机复杂系统可靠性分析方法研究[J]. 航空工程进展, 2016, 7(2): 174-180.
GUO Peng. Research on the reliability analysis method of the complex aircraft system based on the Petri net[J]. Advances in Aeronautics Science and Engineering, 2016, 7(2): 174-180. (in Chinese)
- [2] 任淑红. 民航发动机性能可靠性评估与在翼寿命预测方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

- REN Shuhong. Research on methods of performance reliability assessment and life on wing prediction for civil aero-engine[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [3] 徐小芳, 宋海靖, 郭毓文. 从飞行试验看飞机通用质量特性研制现状[J]. 测控技术, 2018, 37(1): 57-60.
XU Xiaofang, SONG Haijing, GUO Yuwen. Development status of general quality characteristics for aircraft judging from flight test[J]. Measurement & Control Technology, 2018, 37(1): 57-60. (in Chinese)
- [4] 徐小芳, 吕宝, 冯凯. 飞机试飞阶段可靠性评估技术应用研究[J]. 环境与可靠性, 2017(1): 41-44.
XU Xiaofang, LÜ Bao, FENG Kai. Aircraft reliability assessment technical research in flight test stage[J]. Environment and Reliability, 2017(1): 41-44. (in Chinese)
- [5] 郭超. 运输类飞机功能和可靠性试飞研究与实施策略[C]//2013年首届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2013: 1-8.
GUO Chao. Transport category airplanes function and reliability test research and implementation strategy [C]//Proceedings of 2013 First China Aeronautics Science and Technology Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2013: 1-8. (in Chinese)
- [6] VENKATARAMAN R, LUKÁTSI M, VANEK B, et al. Reliability assessment of actuator architectures for unmanned aircraft[EB/OL]. [2020-01-01]. <https://core.ac.uk/download/pdf/48295328.pdf>.
- [7] JENAB K, RASHIDI K. Operational reliability assessment of an aircraft environmental control system[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2009, 94(2): 456-462.
- [8] TONG Y C. Literature review on aircraft structural risk and reliability analysis[R]. Melbourne: DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001.
- [9] GULLO L. In-service reliability assessment and top-down approach provides alternative reliability prediction method [C]// Proceedings of 1999 Annual Reliability and Maintainability Symposium. Washington, DC: IEEE, 1999: 1-8.
- [10] ARTHASARTSRI S, REN H. Validation and verification methodologies in A380 aircraft reliability program [C]// 2009 8th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety. Chengdu: IEEE, 2009: 1-5.
- [11] 高雅娟, 陆山. 试飞阶段可靠性评估方法及试验方案设计[J]. 航空发动机, 2014, 40(3): 66-70.
GAO Yajuan, LU Shan. Reliability assessment method and test scheme design during flight test[J]. Aeroengine, 2014, 40(3): 66-70. (in Chinese)
- [12] 王德明. 航空发动机外场可靠性信息及可靠性研究[D]. 长春: 吉林大学, 2005.
WANG Deming. Reliability data in field and reliability design of aeroengine[D]. Changchun: Jilin University, 2005. (in Chinese)
- [13] DAVID R. Overview of Bayesian statistics[R]. New York: PubMed, 2020.
- [14] 王亚菲, 邬海峰. 基于威布尔分布的汽车寿命估计方法[J]. 江南大学学报, 2015(2): 248-252.
WANG Yafei, WU Haifeng. Weibull distribution parameters estimation for the automobile life[J]. Journal of Jiangnan University, 2015(2): 248-252. (in Chinese)
- [15] GORANSON U G. Fatigue issue in aircraft maintenance and repairs[J]. International Journal of Fatigue, 1997, 20(6): 413-431.
- [16] 常士基. 现代民用航空维修工程管理[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2002.
CHANGE Shiji. Modern civil aviation maintenance engineering management[M]. Taiyuan: Shanxi Science Press, 2002. (in Chinese)
- [17] 金少华, 李志刚, 陆俭国, 等. 关于威布尔分布的 1 种参数估计方法[J]. 天津轻工业学院学报, 2003, 18(1): 43-45.
JIN Shaohua, LI Zhigang, LU Jianguo, et al. A parameter estimation method for Weibull distribution[J]. Journal of Tianjin Institute of Light Industry, 2003, 18(1): 43-45. (in Chinese)
- [18] 李良巧. 可靠性工程师手册[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012: 241-242.
LI Liangqiao. Handbook of certified reliability engineer [M]. Beijing: China Renmin University Press, 2012: 241-242. (in Chinese)
- [19] 李景奎, 段飞飞, 蒯瑞管, 等. 飞机整体驱动发电机可靠性评估及寿命预测[J]. 中国工程机械学报, 2018, 16(5): 399-403.
LI Jingkui, DUAN Feifei, LIAN Ruiguan, et al. Aircraft integrated drive generator reliability evaluation and life prediction [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2018, 16(5): 399-403. (in Chinese)
- [20] 魏玉凡, 郭建峰. 环境因子在机载电子信息系统试飞试验可靠性[J]. 中国电子科学研究院学报, 2003, 8(5): 449-452.
WEI Yufan, GUO Jianfeng. Application of environment factor in electronic information system flight-test reliability evaluation[J]. Journal of CAEIT, 2003, 8(5): 449-452. (in Chinese)
- [21] 练学辉, 孟庆鹏. 改进型电子设备基本可靠性综合评价方法研究[J]. 现代雷达, 2009, 31(8): 25-28.
LIAN Xuehui, MENG Qingpeng. A study on basic reliability evaluation method for modified electronic equipment[J]. Modern Radar, 2009, 31(8): 25-28. (in Chinese)
- [22] 李光均. 控制检测可靠性[M]. 北京: 宇航出版社, 1996.
LI Guangjun. Control detecting reliability [M]. Beijing: Aerospace Press, 1996. (in Chinese)

作者简介:

郭鹏(1987—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机试飞与可靠性设计分析。

赵晓东(1975—),男,学士,高级工程师。主要研究方向:可靠性设计分析。

(编辑:丛艳娟)