航空发动机作战试验探索性研究

于锦禄，张小强，胡雅骥，黄丹青，王吉川
（空军工程大学 航空工程学院，西安 710038）

摘要：航空发动机作战试验（可分为作战效能和作战适用性）是在发动机研制和使用初期，在近似实战的环境下，对其进行考核与评估的综合过程。为了提高航空发动机综合战技效能、优化发动机体系结构、确定编配运用原则和为训练保障要素提供参考依据，初步构建包含2类103项试验内容的作战试验体系。采用综合评估分析法初步建立了效能评估模型，对发动机的综合效能进行初步研究，结果将为航空发动机作战使用与保障提供方法指导。

关键词：作战试验；作战效能；作战适用性；效能评估；航空发动机
中图分类号：V23 **文献标识码：**A doi：10.13477/j.cnki.aeroengine.2021.S1.001

Exploratory Research on Aeroengine Operational Test

YU Jin-lu，ZHANG Xiao-qiang，HU Ya-ji，HUANG Dan-qing，WANG Ji-chuan
（College of Aeronautics Engineering，Air Force Engineering University，Xi'an 710038，China）

Abstract：Aeroengine operational test（which can be divided into operational effectiveness and operational applicability）is a comprehensive process of assessment and evaluation of aeroengine in the early stage of development and use under the environment of similar actual combat. In order to improve the comprehensive combat and technical efficiency of aeroengine，optimize the engine architecture，determine the allocation and application principles，and provide reference for training support elements，a operational test system including two types of 103 items of test content was initially constructed. The effectiveness evaluation model was established by using the comprehensive evaluation analysis method and the comprehensive effectiveness of aeroengine was studied. The results will provide guidance for the operational use and support of aeroengine.

Key words：operational test；operational effectiveness；operational applicability；performance evaluation；aeroengine

0 引言

作战试验是在装备全寿命周期内，为考核装备的作战效能和作战适用性，构建近似实战的、逼真的试验环境，运用多种试验方法手段，对装备进行考核与评估的综合过程[1]。航空发动机作为飞机的心脏，性能的优劣直接影响飞机的性能与作战能力。发动机的作战试验是指在其研制和使用初期，为确定其作战效能和作战适用性，在近似实战的环境下，运用多种试验方法，在单独或装机条件下，对发动机进行考核与评估的综合过程。

作战试验在本质上是一种把数学方法和科学试验手段相结合的对军事作战问题进行研究的科学方法。国外部分国家非常重视作战试验，在长期的试验工作中积累了丰富的经验，构建了1整套科学完善的作战试验组织管理体系、法规标准体系、技术手段体系和人才队伍体系，成立了作战试验的相关部门，具有先进性、科学性、综合性等显著特点，并将作战试验贯穿于全寿命周期的各阶段[2]。方甲永等[3]研究武器装备作战试验设计与分析的步骤，提高了作战试验的科学性；吕久明等[4]和赵儒桐等[5]提出把信息系统与作战试验相结合，为优化论证武器装备作战性能提供了可靠依据；陈浩光[6]等优化了武器系统效能评估方法，为武器系统效能评估提供了依据；柯宏发等[7]研究了雷达对抗装备作战试验项目规划方法，为雷达对抗装备作战试验奠定了基础；F100发动机的作战试验考核了其推力和性能限制，为快速生成战斗力提供

收稿日期：2019-05-30
作者简介：于锦禄（1981），男，博士，副教授，研究方向为推进系统气体热力理论、等离子点火及航空发动机作战试验；E-mail：yujinlu1@163.com。

引用格式：*于锦禄，张小强，胡雅骥，等.航空发动机作战试验的探索性研究[J].航空发动机，2021，47(增刊1)：1-7. YU Jinlu，ZHANG Xiaoqiang，HU Yaji，et al. Exploratory research on aeroengine operational test[J]. Aeroengine，2021，47(S1)：1-7.*

了数据支撑[8];F119发动机的作战试验考核了其耐久性和作战适用性,验证了其满足使用要求和达到规定寿命的能力,为其研制改进提供了依据[9];张宝诚[10]提出的发动机试验和测试技术,为发动机作战试验提供了技术依据;F135发动机依托于F-35飞机,对其适用性、生存能力和整体任务能力进行了评估[11]。由于试验工作的特殊性,国外相关研究的公开资料较少,而目前中国关于发动机作战试验的相关研究也相对偏少。

本文针对航空发动机作战试验开展研究,初步构建其作战试验体系和基于综合评估分析法的航空发动机综合效能评估模型,并对试验内容进行了分析。选用某发动机进行环境适用性试验,初步评估了发动机的综合环境适用性能。

1 作战试验体系的建立

基于武器装备作战试验的内涵,将航空发动机作战试验分为作战效能试验和作战适用性试验[12]。作战效能试验指在预期或规定的作战使用环境以及所考虑的组织、战略、战术和生存能力等条件下,由有代表性的人员检验该发动机完成规定任务的能力,是整个作战试验体系中的重要组成部分,是对其在作战使用过程中能力发挥程度的检验,是其自身性能的一种集中体现,发动机的作战效能的强弱直接决定飞机的作战性能;作战适用性试验指在考虑到可用性、互操作性、可运输性、可靠性、可维修性、人为因素、后勤保障、自然环境适用性、电磁兼容性和互用性、人员训练要求等因素的情况下,发动机使用并维持性能的满意程度[13]。

1.1 作战效能试验体系

根据层次分明和简明科学的原则,建立包含基本能力、生存能力、保障能力试验和体系贡献度4方面53项试验内容的航空发动机作战效能试验体系,部分试验内容如图1所示。

1.1.1 基本能力试验

航空发动机的基本能力试验是对发动机支持飞机飞行和机动性能的一种度量,反映了航空发动机为支持飞机正常飞行、迅速进入任务空域、转换攻防机位、躲避敌机或地面防空火力的攻击并进入攻击位置的性能。基本能力试验可以分为支持飞行能力试验和支持机动能力试验。支持飞行能力试验内容包括基本性能、巡航性能和使用包线试验;支持机动能力试验包括飞行操纵性能、快速部署能力、推力矢量、盘旋性能和使用包线试验。

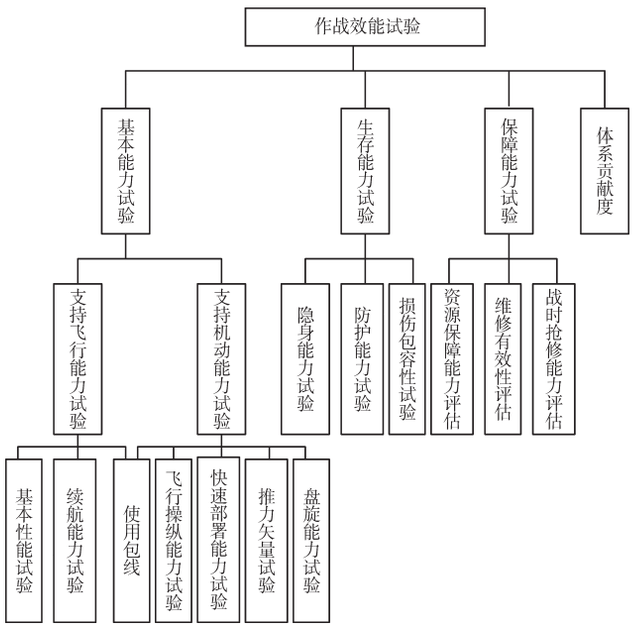

图1 航空发动机作战效能试验体系

1.1.2 生存能力试验

飞机生存能力体现在飞机规避和抵御人为敌对环境影响而不引起持久的性能削弱并保持连续有效地完成指定方案的能力[14]。航空发动机的生存能力是飞机生存能力的重要组成部分,具体试验内容包括隐身能力、防护能力和损伤包容性试验。隐身能力试验包括雷达隐身和红外隐身试验;防护能力试验包括半主动防护能力实验和被动防护能力实验;损伤包容性试验用来测试发动机保持基本工作所能承受的最大损伤。

1.1.3 保障能力试验

航空发动机作战维修保障能力试验指使用者在作战使用过程中为保持和恢复航空发动机完好的技术状况所进行的一系列保障和管理活动。航空发动机的作战维修保障能力试验体现了该发动机维修保障要求,可以为完善维修保障设计、战时维修保障资源建设提供依据;为战时维修保障体系建设提供依据;为实施作战维修保障工作提供依据;有助于使用单位制定维修保障方案。试验内容包括维修资源保障能力评估、维修有效性评估和战时抢修能力试验[15]。

(1)维修资源保障能力评估。测试待测发动机与维修人员的专业对口率和维修人员的专业技术水平,考察维修设备配套率和维修设备通用性。

(2)维修有效性评估。统计故障定位正确率、首次排故成功率和维修差错发生概率。

(3)战时抢修能力试验。模拟制造出战场损伤后进行抢修并检验其可行性。测量参数为抢修度、平均抢修时间、恢复功能用的任务时间和最大抢修时间。

1.1.4　体系贡献度

航空发动机的体系贡献度主要体现在对飞机武器系统、电气系统和机械系统工作性能的影响,试验内容包含测试航空发动机对挂载武器的限制以及评估飞-发结构与功率的匹配程度。

1.2　作战适用性试验体系

航空发动机作战适用性试验体系包括环境适用性、作战使用适用性、作战保障适用性、后勤保障性和经济性试验等5方面50项试验内容,部分试验内容如图2所示。

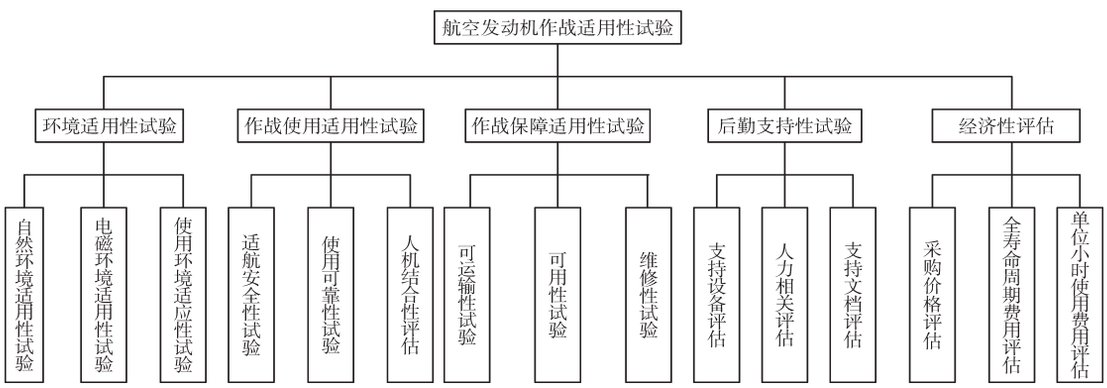

图2　航空发动机作战适用性试验体系

1.2.1　环境适用性试验

环境适用性体现了待测发动机在各种环境中的工作性能,主要包括自然环境、电磁环境和使用环境适用性。自然环境适用性试验包括温度适用性、盐雾适用性和吞物包容性试验等;电磁环境适用性试验包括电磁兼容性、电磁抗干扰能力和抗高强辐射能力试验;使用环境适用性试验包括吞烟、吞液和武器击发振动适用性试验。

发动机在使用过程中会受到各种气候、力学和电磁环境的单独、组合和综合的作用,造成发动机材料和结构腐蚀、破坏及元器件、部件和发动机性能劣化和功能失常,从而降低作战效能,使任务性能受到严重影响。战场环境因素可以分为自然环境因素和诱发环境因素。自然环境因素主要有地貌类型、海拔高度、温度高低、相对湿度、风速、辐射强度、降水量、离子化合物浓度和生物有机物种类等;诱发环境因素主要有沙尘浓度、污染物浓度,振动频率、电磁辐射强度等。飞机在沙漠条件下执行任务时,发动机可能会吸入沙砾从而磨损转子系统,降低寿命、损坏轴承;破坏结构的密封性,污染油液、堵塞油滤[16]。对在沙漠作战的飞机进行作战试验与评估时,效能评估权重中沙漠占的比重大于其他环境因素。典型的作战环境对执行作战方案发动机的影响和主要故障见表1。

表1　部分环境对发动机影响和典型故障

作战环境	主要影响	发动机典型故障
高温	金属氧化 设备过热 链接失效	结构强度减弱,电性能降低,元件失火损坏,润滑特性降低
沙漠	转子磨损 密封破坏 管路堵塞	降低使用寿命,污染油液,堵塞油滤
电磁场	干扰控制系统	控制系统信号动作错误,电气火花、爆炸
盐雾	产生冷腐蚀、叶片腐蚀、叶片凹坑	应力集中,加速疲劳断裂,腐蚀发动机

(1)自然环境适用性试验:测试发动机在各种自然环境下的工作性能。包括温度试验,测试发动机在不同温度条件下工作时的性能;吞物包容性试验:测试发动机在吞鸟、吞砂、吞废气等条件下的工作性能。

(2)电磁环境适用性试验:测试发动机在复杂电磁环境工作时的抗干扰性、灵敏度、发动机系统内的电磁兼容性及发动机与搭配作战的飞机、搭载的武器装备之间的电磁兼容性[17]。

(3)使用环境适用性试验:测试发动机在吞液、吞冰、吞燃油、吞液压油等情况下的工作性能,检验发动机试验后的性能。吞液试验模拟发动机在雨天的工

作,用吞水量代替降雨量。

1.2.2 作战使用适用性试验

作战使用适用性反映了航空发动机在作战使用过程中的操作便利性的程度,作战使用适用性试验主要针对使用安全性、可靠性、人机结合性进行试验。试验内容包括发动机适航安全性、使用可靠性和人机结合性试验。

(1)适航与安全性试验:测试发动机零部件和子系统的整体性能和操作性能的系统安全性和物理完整性,评估发动机关键部位在不同损伤程度下保持额定性能的程度。

(2)使用可靠性试验:统计发动机平均故障时间、空中停车率、发动机故障引起的飞机严重损失率和提前换发率。

(3)人机结合性试验:评估维护人员的人机工程、发动机的操纵与飞行员操纵习惯的相符性。

1.2.3 作战保障适用性试验

航空发动机作战保障适用性体现了航空发动机在作战使用过程中,发动机得到及时有效地运输、抢修、维护保养的能力。试验内容包括可运输性、维修性和可用性试验。

(1)航空发动机可运输性试验:航空发动机的可运输性是指发动机在作战使用过程中,利用现有的或计划中的运输工具,通过铁路、公路、水路或航空运输,实施战场机动的固有能力。

a.能否利用通用型设备进行运输,在战时能否兼容民用车辆进行运输,能否进行模块化运输;

b.在运输设备搭载发动机后,能否符合从工厂、基地运输到目的地过程中需要途径的洞桥、隧道的尺寸和桥梁的质量限制,在运输中是否需要额外的处理手段进行保护;

c.评估该型号发动机从运输设备上安装、卸载的时间和在运输的全过程所需要的人力、物力成本。

(2)航空发动机可用性试验:评估发动机的可靠工作时间、预防性维修时间、平均修复时间、平均非计划性维修时间、使用可用度、可达可用度和固有可用度;

(3)航空发动机维修性试验:评估发动机是否符合最初设计时所制定的维修性设计准则。

a.评估发动机维护操作流程的简易程度,包括试车程序、不同地理环境下的发动机调整、探伤、连接件的拆装、油料更换等;评估维修活动的便捷性以及使用无损检测技术的最大限度;

b.评估维护操作对发动机损伤的程度:统计因维护流程设计问题导致维护人员在进行操作时发生差错的概率,评估不同等级的维修所需要的设备、材料和备件数量;

c.统计不同批次的航空发动机的零部件应在应急条件下进行互换而不引起发动机不正常工作概率。

1.2.4 后勤支持性试验

发动机后勤支持性指允许系统满足可靠性、可用性、可维护性和战时需求的后勤支持能力。试验内容包括对测量和诊断设备、备用和维修部件的设备、技术数据文件、支持设施、相关培训、人力和电子资源等保障资源的综合评估。

1.2.5 经济性评估

航空发动机经济性影响经费的使用与管理,其优劣决定了能否用得起,还会影响到其他经费的规划。评估内容包括发动机的研制费用、采购价格、生产费用和使用保障费用[18]。

2 作战效能评估

航空发动机的作战试验是大规模、综合性很强的科研试验项目,涉及到很多部门、人员以及设备,是一个庞大的系统。但是,发动机的某项特性到底好不好,某项指标到底合不合格,只分析试验结果往往得不到准确、定量的答案。对于1个成熟的航空发动机作战试验系统来说,还需要1套评估方案来对系统的试验机构、技术水平、组织管理、指挥活动、资源运用等一系列活动进行分析评价,对作战试验系统的固有能力和任务工作进行定量估算和定性评价,才能得出可靠的最终结论。

航空发动机的作战效能评估是对发动机作战试验系统能力和作战试验系统效能的评估[19]。

2.1 评估方法

作战效能评估试验方法多种多样,各有特点,归纳起来主要有主观评定法、统计分析法、数学解析法、仿真模拟法。根据具体的评估指标、评估目的和进度要求可以选用其中的某种方法或综合运用[20]。本文采用综合评估分析法,对发动机作战试验的评估进行建模。传统的主成分分析法在计算过程中采用标准化方法处理原始指标,可以消除指标间相关性的影响,但计算过程中也存在着信息丢失,权重计算与实

际情况不符等缺陷。为减少发动机各指标间相关性的影响,使评估结果更加准确合理,本文采用对传统的主成分分析法进行改进后的综合评估分析法,主要步骤如下。

(1)选取航空发动机作战试验与评估体系中的某一性能进行试验,有n种试验项目,依据测试重点制定n种试验方案,得到$n\times n$组试验数据,利用专家赋权法给出每个方案各项试验内容的权重$\omega_1,\omega_2,\cdots,\omega_n$

$$\sum_{i=1}^{n}\omega_i = 1 \tag{1}$$

(2)将原始试验数据构成$n\times n$维矩阵,记为$\boldsymbol{Y}$;

(3)对ω进行处理,得到矩阵$\boldsymbol{X}$;

(4)求解$\boldsymbol{X}$的协方差矩阵$\boldsymbol{s}$的特征方程:$\boldsymbol{s}-\lambda_i=0$,得到$n$个特征值,记为$\lambda_i$,特征值对应的特征向量为

$$\boldsymbol{A}_i=(a_1,a_2,\cdots,a_n) \tag{2}$$

式中:a为向量。

(5)计算第i个主成分的贡献率f_i,其大小描述了各主成分能解释被评价对象的能力

$$f_i=\frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n}\lambda_i} \tag{3}$$

(6)求出变量主成分

$$F_i=\begin{cases}F_1=a_{11}y_{11}+a_{21}y_{21}+\cdots+a_{n1}y_{n1}\\F_2=a_{12}y_{12}+a_{22}y_{22}+\cdots+a_{n2}y_{n2}\\\vdots\\F_n=a_{1n}y_{1n}+a_{2n}y_{2n}+\cdots+a_{nn}y_{nn}\end{cases} \tag{4}$$

(7)计算样本评价值ξ_i,其大小表示第i个样本的评价值:

$$\xi_i=f_iF_i \tag{5}$$

(8)将ξ进行正交化得到样本的综合评价值W,代表该发动机某一能力的强弱,值越大代表其能力越强。

2.2　案例计算

选用某发动机进行环境适用性试验,评估发动机的综合环境适用性能。每项试验都有5种实施方案,方案1~5分别偏重高原、电磁、海洋、沙漠和高温环境。由专业人员对其性能发挥程度打分,该发动机性能发挥越好分数越高,试验数据见表2。结合试验方案,通过专家赋权法给出每个方案各指标的权重,各方案的权重见表3。

表2　发动机环境适用性试验数据

环境因素	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
海洋	0.632	0.687	0.824	0.475	0.754
沙漠	0.415	0.642	0.488	0.874	0.638
高原	0.874	0.587	0.568	0.768	0.774
高温	0.588	0.785	0.724	0.745	0.854
电磁	0.687	0.862	0.578	0.564	0.547

表3　发动机环境适用性试验各方案权重(ω)分布

环境因素	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
海洋	0.202	0.177	0.268	0.167	0.201
沙漠	0.175	0.185	0.224	0.253	0.185
高原	0.246	0.153	0.176	0.185	0.155
高温	0.223	0.238	0.185	0.222	0.288
电磁	0.154	0.247	0.147	0.173	0.171

对试验数据进行效能评估,得到特征值λ_1=1,λ_2=−0.0654+0.045i,λ_3=−0.0654−0.045i,λ_4=0.0584+0.0506i,λ_5=0.0584−0.0506i。

每个λ对应的特征向量为$\boldsymbol{A}_1$=(0.4518,−0.3993−0.2503i,−0.3993+0.2503i,0.6063,0.6063),$\boldsymbol{A}_2$=(0.4584,−0.0636−0.4665i,−0.0636+0.4665i,−0.2397−0.0605i,−0.2397+0.0605i),$\boldsymbol{A}_3$=(0.448,0.5412,0.5412,0.3074+0.2472i,0.3074−0.2472i),$\boldsymbol{A}_4$=(0.4787,0.0009+0.3694i,0.0009−0.3694i,−0.2478−0.372i,−0.2478+0.372i),$\boldsymbol{A}_5$=(0.3949,−0.0791+0.3474i,−0.0791−0.3474i,−0.4261+0.1854i,−0.4261−0.1854i)。

根据式(3),贡献率f为f_1=1.0142,f_2=−0.06633+0.04564i,f_3=−0.06633−0.04564i,f_4=0.05923+0.05132i,f_5=0.05923−0.05132i。

根据式(4),主成分F_i为F_1=1.3977,F_2=−0.0649+0.118i,F_3=−0.095−0.0343i,F_4=−0.135−0.0733i,F_5=0.153+0.0016i。

根据式(5),样本评价值ξ为ξ_1=1.4176,ξ_2=−0.00108−0.01079i,ξ_3=0.004733+0.0066i,ξ_4=−0.004234−0.01127i,ξ_5=0.009144−0.007757i。

得出所有方案的综合评价值见表4。

表4　综合评价值W

方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
1.4176	0.0108	0.0081	0.01204	0.01199

从表4中可见,方案1的综合评价值最高,证明其

代表的发动机的综合环境适用性最强，即该发动机在高原环境中的工作性能较好，在海洋环境中的工作性能最差。在该发动机研制改进时应着重提高其在海洋环境中的性能；在该发动机使用时应优先考虑高原环境。

3 结论

本文从航空发动机的使用需求出发，初步建立了发动机的作战试验体系。根据目前武器系统效能评估的常用方法，将综合评估分析法应用于发动机效能评估，初步建立了发动机包括作战效能、作战适用性在内的综合效能评估模型，得到以下结论：

（1）初步建立了发动机作战效能和作战适用性试验体系，并对部分典型的试验项目进行了介绍；

（2）针对建立的发动机作战效能和作战适用性试验体系，通过查阅有关文献、专家打分赋值，采用综合评估分析法建立了航空发动机作战试验评估模型；

（3）经过试验数据计算验证可知，基于综合评估分析法的发动机综合效能评估模型合理、可行，符合客观规律和数学原理，所得结果可以应用于发动机综合效能评估。

参考文献：

[1] 王凯，赵定海，闫耀东，等. 武器装备作战试验[M]. 北京：国防工业出版社，2015：2-10.
WANG Kai, ZHAO Dinghai, YAN Yaodong, et al. Operational test of weapons and equipment [M]. Beijing: Defense Engineering Industry Press, 2015:2-10.(in Chinese)

[2] 徐松林，王海哲. 美军武器装备试验与鉴定管理体系[J]. 国防科技，2015，36(4)：42-47.
XU Songlin, WANG Haizhe. Test and identification management system of weapons and equipment in the U.S. army [J]. National Defense Technology, 2015, 36(4): 42-47. (in Chinese)

[3] 方甲永，徐浩翔，李永宾，等. 武器装备作战试验设计与分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)，2017，18(2)：101-105.
FANG Jiayong, XU Haoxiang, LI Yongbin, et al. A design and analysis of operational test for weapon equipment[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natura Science Edition), 2017, 18(2): 101-105. (in Chinese)

[4] 吕久明，戴威，戚文香，等. 基于信息系统的作战试验指挥控制技术及发展分析[J]. 国防科技，2016，37(4)：30-35.
LYU Jiuming, DAI Wei, QI Wenxiang, et al. Research of battle test command and control technology based on information system and development analysis [J].National Defense Technology, 2016, 37(4): 30-35. (in Chinese)

[5] 赵儒桐，刘鹏，王晓曼. 作战试验中的信息存储技术研究[J]. 长春理工大学学报(自然科学版)，2017，40(2)：102-105.
ZHAO Rutong, LIU Peng, WANG Xiaoman. Research on information storage technology in operational test[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 40(2): 102-105. (in Chinese)

[6] 陈浩光，李云芝. 武器系统效能评估与评估创新[J]. 装备指挥技术学院学报，2004，15(4)：1-5.
CHEN Haoguang, LI Yunzhi. Effectiveness evaluation and evaluation method innovation of weapon system[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2004, 15 (4): 1-5. (in Chinese)

[7] 柯宏发，祝冀鲁，张军奇. 雷达对抗装备作战试验项目规划方法研究[J]. 兵工自动化，2016，35(4)：35-39.
KE Hongfa, ZHU Jilu, ZHANG Junqi. Planning research of operational test project for rader countermeasure equipment[J]. Ordnance Industry Automation, 2016, 35 (4) : 35-39. (in Chinese)

[8] MOE G. F-15A/F100-PW-220 engines: propulsion and limited performance evaluation[R]. AFFTC-TR-1986-19.

[9] Welch L D. Study on the mission, roles, and structure of the missile defense agency (MDA)[R]. Virginia: Institute for Defense Analyses Alexandria VA, 2008.

[10] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京：北京航空航天大学出版社，2005：5-9.
ZHANG Baocheng. Aeroengine test and test technology[M]. Beijing: Beijing University Of Aeronautics and Astronautics Press, 2005: 5-9. (in Chinese)

[11] 许赟. F-35战斗机开始初始作战试验和评估[EB/OL].2018-12-07/2019-02-27.https://mp.weixin.qq.com/s/8htceyCmrnKFysqjs-OOeQ.
XU Yun. F-35 begins initial operational testing and evaluation[EB/OL]. 2018-12-07/2019-02-27.https://mp.weixin.qq.com/s/8htceyCmrnKFysqjs-OOeQ . (in Chinese)

[12] 曹裕华，王元钦. 装备作战试验理论与方法[M]. 北京：国防工业出版社，2016：15-26.
CAO Yuhua, WANG Yuanqin. Theory and method of equipment combat test [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2016: 15-26. (in Chinese)

[13] Francis P. Defense acquisitions: status of the safety, performance, and reliability of the expeditionary fire support system[R]. Washington: Government Accountability Office Washington DC, 2008.

[14] 曹裕华，高化猛，刘淑丽. 实体型装备作战生存性试验评估研究[J]. 装备学院学报，2015，26(1)：111-115.
CAO Yuhua, GAO Huameng, LIU Shuli. Research on operational survivability test evaluation of physical equipment[J]. Journal of Equipment Academy, 2015, 26 (1): 111-115. (in Chinese)

[15] 国防科学技术工业委员会. 可靠性维修性保障性术语：GJB451A-2005 [S]. 北京：原总装备部，1-20.
Commission for Science, Technology and Industry for National Defense. Reliability maintenance assurance terminology: GJB451A -

2005 [S]. Beijing:The Former General Equipment Department,1-20.

[16] 张伦武,何新洲,杨万均. 环境对装备的影响及装备环境工程标准分析[J]. 装备环境工程, 2005,2(6):28-33.
ZHANG Lunwu, HE Xinzhou, YANG Wanjun. Analysis of the environmental effects and environmental engineering standard for materiel [J]. Equipment Environmental Engineering, 2005, 2(6): 28-33. (in Chinese)

[17] 钟培道. 环境因素对航空装备失效的影响与对策[J]. 装备环境工程,2005,2(6):82-86.
ZHONG Peidao. Influence and countermeasure of environmental factors to the failure of aeronautical Equipmen[J]. Equipment Environmental Engineering,2005,2(6):82-86. (in Chinese)

[18] Tzee-Nan K, Balaban H S, Devers W C, et al. Cost of unsuitability: assessment of trade-offs between the cost of operational unsuitability and research, development, test and evaluation costs[R]. Virginia: Insttute for Defense Analyses Alexandria VA, 2008.

[19] 国防科学技术工业委员会.装备费用—效能分析:GJB1364-1992 [S]. 北京:国防科学技术工业委员会,1992:1-9.
Commission for Science, Technology and Industry for National Defense. Equipment cost-effectiveness analysis: GJB1364-1992 [S]. Beijing: Commission for Science, Technology and Industry for National Defense, 1992: 1-9. (in Chinese)

[20] 王亮.武器装备作战试验评估方法研究[J]. 装备学院学报,2016,27(2):117-122.
WANG Liang. Study on the assessment method of weaponry operational test[J]. Journal of Equipment Institute, 2016, 27(2): 117-122. (in Chinese)

(编辑:刘　亮)