

飞机任务效能评估体系及评估方法研究



徐琳, 卢琛, 姜兵

中国航空研究院, 北京 100012

摘要:飞机任务效能评估作为装备体系规划与战斗力生成的核心命题,其理论范式与方法体系伴随航空装备跨代际演进、多域任务形态演变及建模仿真技术突破,呈现持续演进与技术革新。针对当前真实任务环境下装备任务效能评估存在的场景覆盖局限性与模型置信度瓶颈问题,本文基于效能评估理论发展的历时性视角,通过解析任务效能评估概念内涵、剖析任务指标拓扑关系、分析数据驱动评估方法等研究路径,系统阐释效能评估迭代的内在逻辑,对其发展趋势进行了分析并对未来飞机效能评估的研究方向进行了探讨。提出了基于真实-虚拟-构造(LVC)系统的试训数据评估等方法体系,为航空装备体系化发展与能力量化评估提供理论支撑。

关键词:飞机任务效能评估;效能;飞机任务能力;评估方法;LVC

中图分类号:E926.3

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2025.07.010

飞机任务效能评估研究已成为航空装备体系化发展与能力生成链路的关键,其科学价值不仅体现在装备全生命周期(全生命周期)论证的规划阶段,更直接关系到战斗力的生成。随着信息技术的深化运用,任务形态正经历从单平台独立执行向多域异构体系协同的样式跃迁。这一变革使得传统基于确定性场景假设的静态化评估模型,与动态涌现的体系特征间产生显著冲突。当前,装备任务能力优势的生成与验证,亟须建立与新型概念相匹配的效能评估理论体系。

本文重点聚焦于构建“任务-能力-指标”的映射解析方法,探索虚实结合的评估路径,以提升评估置信度。根据飞机任务效能评估体系的构建过程,从多个维度对任务效能评估进行梳理、研究,并结合飞机、训练系统和评估方法的发展提出未来飞机任务效能评估的趋势。

1 国内外飞机效能理论体系发展

飞机效能分析理论起源于20世纪60年代美苏两国,这与两国在航空领域前期的技术研发能力及对空中运用的迫切使用需求密切相关。苏联通过系统化地对各类航空器进

行效能分析与评估,逐步构建了一套完整的航空装备效能分析理论体系,特别是在空中射击效能理论及反导弹效能评估理论方面取得了显著成果^[1]。与之相对,美国的效能评估理论则是在仿真模型技术发展的背景下逐步形成的,其理论进步主要依托于分析评估方法的创新,如兰彻斯特方程、系统效能分析(ADC)法,以及蒙特卡罗模拟等方法的引入^[2-3]。这些方法的运用不仅丰富了效能评估的理论内涵,也推动了该领域方法论的重大突破。美苏两国在效能评估理论构建路径上的差异,衍生出了两种不同的理论体系。苏联侧重于从实战需求出发,建立以任务为导向的效能评估模型;而美国则更注重通过数学建模和仿真技术优化效能评估方法。这两种理论体系至今仍在不断发展迭代,对全球效能评估理论体系的发展均产生了深远影响。

20世纪80年代起,我国航空领域技术不断发展,飞机效能评估理论体系逐步建立,其初期阶段存在标准不统一、术语体系混乱等现象^[4]。随着对效能评估理论研究的深入,我国借鉴国际经验,初步形成了规范化的效能概念、理论体系及方法论框架。在此基础上,国内学者在效能评估理论的研究对象、研究手段及方法等方面均取得了创新^[5]。

收稿日期: 2025-01-02; 退修日期: 2025-03-24; 录用日期: 2025-04-23

基金项目: 航空科学基金(2022Z004004001)

引用格式: Xu Lin, Lu Chen, Jiang Bing. Research on aircraft mission effectiveness evaluation system and evaluation methods [J]. Aeronautical Science & Technology, 2025, 36(7): 77-86. 徐琳, 卢琛, 姜兵. 飞机任务效能评估体系及评估方法研究[J]. 航空科学技术, 2025, 36(7): 77-86.

在研究对象上,研究范围从单一平台扩展至整个体系,研究维度从单一任务结果扩展至任务全维空间^[6];在研究方法上,提出了灰色系统等理论,为非典型系统的效能评估提供了重要的理论支撑;在研究手段上,逐步突破了纯实物或纯模拟试验的局限,转向虚实结合的试验方法,提升了评估的准确性与效费比^[7]。

网络化、智能化、无人化技术的深化运用带来了评估对象的复杂化、多样化和不确定化,使得传统效能评估理论越发局限。当前国内外的评估方法逐步向整体性与相关性方向发展,评估手段则更加注重准确性与动态性^[8]。

2 飞机任务效能评估概念研究

效能,即系统期望达到一组具体任务要求的程度。一般来说,根据研究对象的不同,效能被分为装备效能和行动效能。就目标而言,行动效能关注于计划和行动方案,装备效能关注于装备本身。关于效能的分类之前业界已经达成一定的共识,但近年来由信息化和网络化带来的多系统复杂状态已经无法使用单一系统效能的简单综合进行描述,所以体系效能被越来越多地作为一个综合概念进行讨论和分析。效能主要分类如图1所示。

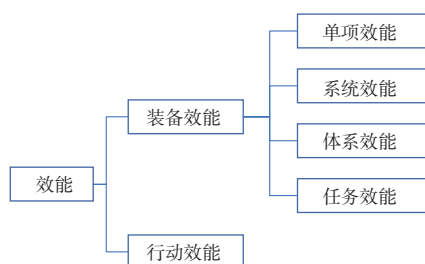


图1 效能分类

Fig.1 Classification of effectiveness

按系统论观点来看,单项效能是系统效能的基础组成,体系效能是系统效能的有机综合,任务效能是上述效能的结果和最终目的。在主流定义中,任务效能是指在预定或规定的使用环境以及所考虑的组织、战略、战术、生存能力和威胁等条件下,由有代表性的人员使用特定装备完成规定任务的能力^[9]。

效能评估是通过实战、训练或模拟获得数据对装备在特定环境条件下完成规定任务的能力进行量化评估的过程。评估是阶段性、统计性的结果,在实际交战或训练中,多次行动能够增加效能评估的准确性和适用度,其可以作为辅助决策机构对整体态势进行评估,也可以作为战斗结

束后基于实战和仿真数据对预先定义的指标进行量化评估^[10-13]。

飞机任务效能评估是对飞机执行任务的完成度进行估计度量。从任务效能的定义来看,评估飞机任务效能仅仅分析其可靠性、维修性、固有能力、保障性等飞机一般性能^[14]是不够的,还必须考虑飞机任务执行环境、人员等非装备因素。同时,在体系化的前提下,飞机任务效能还应考虑协同、指挥、态势分析、信息处理等多重因素。

3 任务效能评估指标体系

对任务效能进行有效评估的前提是对对象的能力以及对象应用的任务场景进行合理且有效的分解构建。一般飞机任务能力伴随着飞机设计技术和设计理念的进步,或有跨越,或有继承,或有舍弃,不过总体来说,呈现出愈加复杂的趋势。

3.1 飞机任务能力演进

飞机任务效能指标体系构建基于实际任务场景,在实际效能评估中,根据任务场景不同会强调不同的飞机能力,梳理飞机任务能力发展是进行任务效能评估的基础。

技术进步推动飞机能力发展,设计需求决定最终飞机能力。飞机任务能力在不同时期具有不同的发展特点。按功能来看,飞机任务能力主要划分为飞机飞行能力、生存能力、保障能力、探测感知能力、对抗能力和辅助能力。飞机任务能力分类如图2所示。

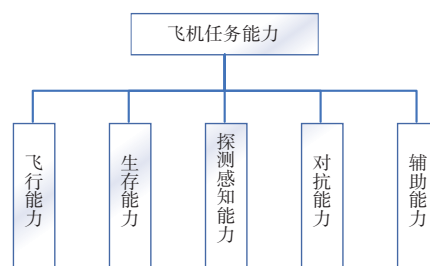


图2 飞机任务能力分类

Fig.2 Fighter combat capability classification

飞机任务执行能力在设计之初便已基本定型,飞机设计理念与空战形态相互作用、相互影响,在不同时代延伸出不同的空战准则。角度准则和能量准则深刻影响着冷战时期飞机设计理念。以观察-判断-决策-行动(OODA)环为代表的体系准则更是影响着80年代以来所有执行战斗任务的飞机设计^[15]。OODA环在不同技术条件下具有不同的内涵,深刻影响飞机任务能力的发展。如中距空空导弹带

来的超视距战斗模式促使现代飞机设计从“机动为王”转向“信息为王”，抗干扰、信息压制/摧毁、隐身等飞机能力都是在该理念指导下设计和发展的^[16]。

3.1.1 飞行能力

飞行能力是飞机基本性能，其伴随着发动机技术和气动外形的发展而不断进步。

发动机是飞机的核心，喷气发动机技术奠定了现代飞机动力的基本特性。涡轮喷气式发动机和加力涡扇发动机的发展极大地提高了飞机的最大推力，为飞机的最大飞行速度、升限、升降速度等一系列基本性能的飞跃提供了可能^[17]。

为了适应发动机进步和不断变化的任务需求，飞机气动外形也在不断进步和发展。跨/超声速气动布局满足了空战对高空高速性能的需求；混合流型布局不仅满足了飞机在中/低空飞行中的速度需求，同时也拓展了飞机的亚/跨声速机动性能。飞机飞行能力性能指标见表 1。

表 1 飞行能力性能指标

Table 1 Flight capability performance indicators

技术发展	性能指标
离心式涡轮发动机	最大平飞速度、最大飞行高度、爬升率等
轴流式涡喷发动机 跨声速气动布局	高空最大平飞速度，高空巡航速度
加力涡扇发动机 混合流型布局	亚/跨声速机动性 中/低空最大平飞速度，中/低空巡航速度

3.1.2 生存能力

飞机生存能力是飞机躲避或承受敌对环境的能力。其不仅包括基础的飞机防护性能和机动性能，还包括飞机航电技术带来的电子对抗能力以及隐身涂层技术带来的隐身能力^[18]。其生存能力性能指标见表 2。

表 2 生存能力性能指标

Table 2 Survivability performance indicators

技术发展	性能指标
基础技术	飞机尺寸、易损性、机动性等
综合航电	抗干扰能力、信息压制/摧毁能力、通信能力等
隐身涂层	隐身性能

3.1.3 探测感知能力

飞机探测感知能力包含探测和感知两种。飞机探测能力是指利用雷达、光电探测设备等各类传感器对环境进行探知。所以飞机探测能力的发展主要依赖于雷达等探测设备的进步^[19]。飞机感知能力主要指对探测所获数据进行分析，如发现、识别、定位以及跟踪目标等。最初的飞机感知

能力主要依赖于飞行员的识别和定位，后逐渐通过对机载计算机对目标进行识别定位和跟踪。其探测感知性能指标见表 3。

表 3 探测感知能力性能指标

Table 3 Detection-perception performance indicators

技术发展	性能指标
脉冲多普勒雷达	探测距离、方位角、全天候侦察等
光电探测 相控阵雷达	危险感知、目标识别、跟踪目标数、目标定位等

3.1.4 对抗能力

飞机对抗能力是飞机进行空战的能力，是飞机进行任务效能评估的关键。对抗能力的主要设备是机载武器，即机炮和导弹。飞机对抗能力是影响飞机执行任务的关键能力，尤其是导弹的出现和发展深刻地改变了空战形态^[20-21]。飞机对抗能力的性能指标见表 4。

表 4 对抗能力性能指标

Table 4 Countermeasures performance indicators

技术发展	性能指标
航炮	航炮口径、有效射程、毁伤能力、精度等
空中格斗弹 中/远距空空导弹	射程、机动性、毁伤力、杀伤半径、命中率、抗干扰能力等

3.1.5 辅助能力

飞机辅助能力主要是由于战场环境的复杂化和战场信息的爆炸式增长而发展出来的帮助飞行员快速理解战场态势和快速决策的能力，主要包括态势认知能力和辅助决策能力。态势认知能力是综合多架飞机的探测信息通过计算机对整体态势进行分析预测并为飞行员进行清晰呈现的能力。辅助决策能力是通过运用大数据和人工智能技术分析出飞机下一步行动的可能路线，以此增加飞行员决策效率。当然目前飞机辅助决策能力还较为初级，尚无明确性能指标分析。飞机态势感知能力性能指标见表 5。

表 5 态势感知能力性能指标

Table 5 Situational awareness performance indicators

技术发展	性能指标
计算机技术	体系信息支撑能力、数据融合能力、态势预测能力、态势显示能力等

3.1.6 未来飞机任务能力初探

随着信息化、网络化技术的发展，无人装备应用、体系化任务部署等概念层出不穷。未来飞机的任务能力随着空

战体系的演变而不断发展。未来空战能否实现全无人化尚无定论^[22],有人/无人协同依然是飞机能力的重要指标^[23-24];在无人战场中,智能化水平是决定胜负的关键因素,其表现为无人机信息处理能力和无人机自主规划和自主决策能力^[25-29]。

3.2 任务效能指标体系建立

在构建任务效能指标体系的任务场景时,战斗能力一般被安排在任务流程之后,能力只在某一流程内起作用。将能力与任务流程相结合的做法,能够突出任务中关键的影响因素,并简化计算过程,这对于传统的任务构建来说是恰当的。然而,在体系化的复杂任务中,这种做法可能会导致评估精度不足。随着未来战场中规模更大、复杂性更高的空战场景变得越来越普遍,这种结构不再能全面反映飞机任务效能。传统的针对单兵种、单一装备的指标体系建立方法,已经越来越难以适应现代化的多兵种协同和有人/无人联合效能评估体系的建立。

为了实现对装备体系和战斗体系更加全面、精准的描述,体系结构框架被广泛应用于体系结构组织和构建,其中尤以美国国防部体系结构框架(DoDAF),以及统一体系结构框架(UAF)使用最为广泛^[30-33]。

DoDAF是一种顶层架构,通过以特定任务为背景,根据任务使命分析任务需求,进而得到活动与能力的映射关系,从而建立起某任务的体系结构视图和可执行模型。通过建立8种视图模型,以先活动后系统、先静态后动态的顺序,按照模型关系约束以及反复迭代的原则,分步骤建立DoDAF体系结构^[34]。

体系结构框架构建动态模型的能力非常优秀,对日益强调动态效能的指标体系构建非常契合,目前体系结构框架广泛应用于指标体系的结构建模中^[35-37],但使用该思想开展效能评估尚未系统化应用^[38-40]。

4 任务效能评估方法

从效能分析理论的发展来看,每一次效能评估分析方法的发展都会带来效能评估效果的革新。不同的效能评估方法拥有不同的应用场景和适用范围,确切了解不同评估方法的优缺点和适用范围能够大大提高效能评估的效果。

自20世纪40年代以来,引入或发展出了许多种基本的分析方法,如兰彻斯特方法、ADC方法、层次分析法等。这些方法虽多有不同,但总体来说可以分为专家评估法、解析分析法、统计分析法和模拟仿真法。另外,随着体系复杂性

的日益增长,传统的分层结构在描述复杂体系结构间的非线性关系方面并不全面。基于整体论思想的新型评估方法,可能正是解决这类复杂非线性问题的有效途径之一。

4.1 专家评估方法

专家评估方法注重经验作用,可以在某些数据缺失或难以对指标进行量化时快速进行系统效能评估。最初是以专家打分的形式对系统显著指标进行评估,后发展出了模糊综合评价法、群体多属性决策法以及层次分析法等。其中层次分析法(AHP)目前应用最为广泛。

层次分析法是美国运筹学家Saaty在20世纪70年代提出的一种简易决策方法,其将专家的经验 and 知识模型化,对复杂问题进行分析,抽象出基础要素以及要素的相互关系,然后将基础要素分为不同层次,将要素关系抽象成判断矩阵,通过判断矩阵对各层要素进行比较和打分,最终得出该层各要素的权重,以此为基础对不同层次要素进行加权组合,最终得到各层要素对最终目标的组合权重。

层次分析法自80年代引入国内后迅速得到广泛应用,如陈奇等^[41]使用AHP对海军演习进行效能评估;姜本超^[42]对直升机体系贡献率进行评估等。由于AHP在进行判断矩阵指标权重的确定时具有一定的主观性,同时采用层次分析法的场景往往处于信息不透明或存在信息缺失的场合,所以通常使用一些形式化方法来减弱其主观性,如马九方等^[23]使用灰色层次分析法对有/无人协同作战效能进行评估;李守奇^[43]将AHP和模糊评价法相结合对C3I系统进行效能评估。

4.2 解析分析方法

解析分析法的思路是通过分析体系的组织结构,分解提炼出影响能力的关键因素并建模分析,将不同因素之间的关系转化为函数关系,最终聚合成一个综合性的指标。常用的解析分析方法有ADC模型、灰色评估法、指数法、兰彻斯特方程法、数据包络分析法等,其中应用最为广泛的是ADC模型法。

ADC模型法,又称系统效能分析法,是美国工业界武器系统效能咨询委员会于20世纪60年代提出的一种系统效能指标计算模型,是一套评估过程相对全面、层次清晰的综合评估方法^[44]。

ADC模型将装备的维修性、可靠性、保障性、生存力、作战能力等因素综合为可用性(A)、可信性(D)和固有能力和作战能力等要素综合为可用性(A)、可信性(D)和固有能力和作战能力的关联函数,指明了装备系统构成、工作可靠性与战斗指标之间的内在联系。

ADC模型应用广泛,但评估复杂系统时会出现指标变化不灵敏甚至失真的情况。目前对ADC模型的适应性改进多为扩展模型因子,如刘登攀等^[45-46]都采用引入环境和人的变量因子来增加计算精度。这些改进虽然增大了ADC方法对复杂系统的适用范围,但更复杂的能力矩阵构建在某些复杂情况下存在着难以求解的问题。

4.3 统计分析方法

统计分析法是通过典型的概率论或数理分析方法对体系历史数据或演习数据进行分析,从而提炼出一般性的原理和结论。数理统计类方法(如假设检验、参数估计等)的数理基础已经得到充分的证明,所以在数据真实的条件下,一般能够获得准确的评估结果,因此,可以用于对其他效能评估方法的检验以及优化^[47-48]。

数据真实性和数量是该方法评估准确度的关键。目前,正在不断发展的真实仿真训练系统可以在一定程度上弥补初始数据真实性和数量;另外,在小样本条件下的数据分析和推理理论也是该方法未来行之有效的研究方向。

4.4 模拟仿真法

模拟仿真法是一种通过构建模型来分析试验和活动,进而揭示普遍规律的技术。其通过输入真实的武器装备数据,根据历史战争经验建立战场和作战力量模型,再通过设置可能的战场任务目标以及相应的战场规则对可能战场动态进行推演模拟,最终获得全维度的作战数据,然后基于对数据的全方位分析,获得对作战体系关键能力、动态演化以及整体效能的综合评估判断。在一次全面的模拟仿真过程中,不同评估方法都能得到应用,并各自发挥其效用。

模拟的概念源远流长,人工沙盘模拟便是较早的模拟思想的应用。随着计算机技术的兴起,仿真成为模拟的核心支撑。因此,现代模拟仿真方法主要依赖于计算机模拟模型来执行仿真试验任务。通过仿真试验,可以收集关于任务过程和结果的数据,并通过直接分析或统计处理来估算效能指标,最终得出一个综合效能评估值。模拟仿真的发展如图3所示。

计算机仿真虽得到了大量应用,但仿真结果准确性和可用性问题的限制了其应用场景。到了20世纪90年代,美国战争综合演示室(STOW)提出了真实-虚拟-构造(LVC)模

拟的概念并于1994年第一次进行实践。LVC技术不仅弥补了计算机仿真的不足,而且能够生成大量高真实性的仿真数据。此外,LVC技术还能让受训者体验到与真实军事演习相仿的训练效果,真正实现试训一体。

基于LVC的演训体系将士兵、装备、地面模拟器和数字仿真节点组成动态网络,能够以低成本获得高逼真度且贴近实战的可靠数据^[49]。

4.5 基于数据的新型评估方法

体系化带来的不确定性和涌现性的特点促进人工智能和大数据技术被应用于效能评估领域。这类技术通常不深入探讨体系内部的结构嵌套和耦合问题,而是专注于整体性能指标之间的关联性^[50]。

区别于传统的统计分析方法,新型评估方法基于计算机智能算法,通过训练进行回归和分类,以此达到预测的目的^[51]。其基本原理为:以作战需求为导向、作战任务为牵引,通过特征提取、非线性函数映射等方法进行有监督的学习和评估,从大量底层数据中根据相关性提炼总结出一般性的作战规律,摆脱对于相关领域知识依赖的同时减少主观性,避免了对复杂系统作战结构的研究分析。

智能化方法在需要自适应、集群化能力以及自我学习能力的领域中具有出色的容错能力并取得优势。如王翀等^[52]应用遗传算法结合BP神经网络对无人艇协同效能进行评估;顾忠征等^[53]应用蚁群优化算法对预警机空天协同效能进行评估。这些应用都收获了良好的效果。

4.6 不同效能评估方法对比

飞机任务场景复杂、种类繁多,不同评估方法都有应用。飞机任务效能评估根据评估内容的实质差别,需要采用不同评估方法进行评估,准确把握不同评估方法的使用范围和优缺点可以大大加强效能评估的准确性。不同效能评估方法的适用范围和优缺点见表6。

5 结论及展望

飞机任务效能评估既要掌握飞机能力体系,也要掌握一般任务效能评估的方法。本文从飞机任务效能的发展入手,分别对飞机任务效能评估的概念、飞机能力体系的构建以及一般效能评估方法的相关问题进行了研究,最终致力



图3 模拟仿真法的发展过程

Fig.3 The development process of simulation and emulation methods

表 6 不同效能评估方法比较

Table 6 Comparison between different effectiveness evaluation methods

评估方法	适用范围	优点	缺点
专家评估法	信息缺乏或不完全、不充分的情况	应用快速,无须大量数据,可解决不确定因素	主观性较强,比较难以进行定量评估
解析分析法	评估结构较为清晰明确;模型复杂性较低或抽象度较高	适用范围广,数据需求量低,思路步骤简洁明确,使用灵活	面对多状态系统模型会变得复杂,无法模拟动态系统
统计分析法	拥有大量真实可靠数据;效能评估优化;验证新方法有效性	在拥有真实数据条件下评估准确,操作简单,方法成熟	不适合体系效能或复杂系统效能评估,需要大量样本
模拟仿真法	一般任务场景模拟;任务场景想定而无实际数据;需要人员与模型交互	评估过程直观,评估结果更具说服力,可以实现对体系较真实的模拟,可以产生初始数据	大型模拟成本投入大,建设周期长,复杂性较高,对模型准确性要求高
新型评估法	数据量庞大且未经整理;评估结构不清晰且难以梳理;具有智能化需求	较准确评估体系效能,无须对评估目标结构进行详细分解	严重依赖初始数据,需要大量样本,方法可用性验证较少

于总结飞机效能评估的一般步骤,即结合飞机任务和场景构建飞机效能指标体系,根据初始数据和模型结构选取合适的效能评估方法对飞机任务效能进行评估。

依照飞机效能评估的步骤,飞机效能评估可能会向如下方向发展。

(1)体系化构建效能评估体系

在体系总体框架构建方面,以 DoDAF 和 UAF 为代表的体系结构框架具有极为优秀的体系结构构建分析能力。目前,其较广泛地应用于体系构建,在效能评估体系中却刚刚起步。未来,使用体系结构框架模型研究效能体系结构的模型框架和顶层概念,构建全面系统的体系结构描述并合理深入地进行动态活动分析,有助于提高整体效能评估的准确性。

(2)未来空战能力指标构建

从飞机能力发展来看,未来飞机能力是构建评估体系的基础,准确判断未来空战所需的飞行能力是构建未来飞机任务效能指标体系的基础和前提。就目前来看,未来飞机所需要的关键能力有如下几个方向:一是智能化,包括自规划能力、自组织能力、自决策能力、自适应能力等。二是有人/无人协同能力,包括协同感知能力、协同通信能力、协同规划能力、协同执行能力等。三是无人机间的联系能力,包括实时通信能力、信息共享能力、数据处理能力和数据安全性等。

(3)基于LVC的训练数据评估

在数据获取方面,真实可靠的初始数据是效能评估准确度的关键,但是真实数据是难以获得且耗时耗力的。目前主流的数据获取方法是通过计算机仿真或者专家评估方法获得。但是,计算机仿真的数据真实度相对不高,而专家评估法的主观性较强,这些都会导致效能评估的结果可靠性和可信度不高。基于LVC的训练系统可以有效解决真

实数据获取的成本问题,如何对LVC训练系统获得的初始数据进行高效利用也是未来研究的方向之一。

(4)复合评估方法

在评估方法的改进方面,动态的任务是一个信息缺失、关系混沌的非线性系统,单一的评估方法往往难以收获较好的效果。对不同方法进行融合或者对同一效能评估任务的不同部分使用不同的评估方法可以弥补单一方法的缺点,增加评估准确性和效率。但是,如何处理好不同方法之间的矛盾以及如何将评估过程有机地分解切段是评估人员需要注意和警惕的,也是评估人员在评价评估结果合理性时需要多加考虑的。

AST

参考文献

[1] 汪民乐,高晓光,蔡付东. 作战飞机效能分析研究综述[J]. 飞行力学, 2001,19(4): 1-5.
Wang Minle, Gao Xiaoguang, Cai Fudong. Overview of research on military aircraft combat effectiveness analysis [J]. Flight Dynamics, 2001, 19(4): 1-5.(in Chinese)
[2] 李传方,许瑞明,麦群伟. 作战能力分析研究方法研究综述[J]. 军事运筹与系统工程, 2009, 23(3): 72-77.
Li Chuanfang, Xu Ruiming, Mai Qunwei. Summary of research on combat capability analysis methods [J]. Military Operations Research and Assessment, 2009, 23(3): 72-77.(in Chinese)
[3] Hill R R, Miller J O. A history of United States military simulation[C]. 2017 Winter Simulation Conference (WSC). IEEE, 2017: 346-364.
[4] 毕长剑,董冬梅,张双建,等. 作战模拟训练效能评估[M]. 北京:国防工业出版社,2014.
Bi Changjian, Dong Dongmei, Zhang Shuangjian, et al.

- Operational simulation training effectiveness evaluation [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [5] 韩琦, 李为民, 李宁, 等. 作战概念及其建模研究综述 [J]. 指挥与控制学报, 2023, 9 (2): 123-134.
- Han Qi, Li Weimin, Li Ning, et al. A review on operational concept & its conceptual Modeling [J]. Journal of Command and Control, 2023, 9 (2): 123-134.(in Chinese)
- [6] 廖闯, 李晓莉, 陈潇楠, 等. 装备体系效能评估研究进展[J]. 舰船电子工程, 2023, 43(12): 10-13.
- Liao Chuang, Li Xiaoli, Chen Xiaonan, et al. Research progress on equipment system effectiveness evaluation [J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43(12): 10-13.(in Chinese)
- [7] 刘怡静, 李华莹, 刘然, 等. LVC空战演训系统发展研究[J]. 飞航导弹, 2020 (12): 55-60+77.
- Liu Yijing, Li Huaying, Liu Ran, et al. Development of LVC air combat training system [J]. Aerospace Technology, 2020 (12): 55-60+77.(in Chinese)
- [8] 于小岚, 熊伟, 韩驰. 基于神经网络的效能评估方法综述[J]. 兵工自动化, 2023, 42(3): 1-8+43.
- Yu Xiaolan, Xiong Wei, Han Chi. A survey of effectiveness evaluation methods based on neural network [J]. Ordnance Industry Automation, 2023, 42(3): 1-8+43.(in Chinese)
- [9] 刘飞, 陆凌云, 苏泓嘉, 等. 体系效能评估技术发展现状分析及建议 [J]. 指挥信息系统与技术, 2024, 15 (1): 1-8.
- Liu Fei, Lu Lingyun, Su Hongjia, et al. Analysis of development status and suggestions on effectiveness evaluation techniques for SoS [J]. Command Information System and Technology, 2024, 15 (1): 1-8. (in Chinese)
- [10] 张璐琳. 基地化训练裁决评估系统设计方法研究 [J]. 火控雷达技术, 2016, 45 (3): 85-90.
- Zhang Lulin. Study on design method of base training judgement and evaluation system [J]. Fire Control Radar Technology, 2016, 45 (3): 85-90. (in Chinese)
- [11] 刘剑超, 董斐, 姬嗣愚, 等. 基于LVC的舰载机作战指挥训练系统设计 [J]. 现代防御技术, 2024, 52 (1): 130-138.
- Liu Jianchao, Dong Fei, Ji Siyu, et al. Design of carrier-based aircraft operational command training system based on LVC [J]. Modern Defense Technology, 2024, 52(1): 130-138. (in Chinese)
- [12] 邱定, 于铭华, 桑耘, 等. 实装对抗训练数据采集与实时裁评系统设计实现 [J]. 科技创新与应用, 2024, 14(4): 16-19.
- Qiu Ding, Yu Minghua, Sang Yun, et al. Design and implementation of a data acquisition and real-time adjudication system for electronic warfare training [J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(4): 16-19. (in Chinese)
- [13] 尹晋. 基于对抗数据的水面舰艇电子侦察能力裁决模型设计 [J]. 舰船电子工程, 2022, 42 (6): 37-41.
- Yin Jin. Design of adjudication model for electronic reconnaissance capability of surface ships based on adversarial data [J]. Ship Electronic Engineering, 2022, 42 (6): 37-41.(in Chinese)
- [14] 王锐. 先进战斗机作战效能评估[D]. 西安: 西北工业大学, 2007.
- Wang Rui. Advanced fighter combat effectiveness [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2007. (in Chinese)
- [15] 樊会涛, 闫俊. 空战体系的演变及发展趋势 [J]. 航空学报, 2022, 43 (10): 296-305.
- Fan Huitao, Yan Jun. Evolution and development trend of air combat system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(10): 296-305.(in Chinese)
- [16] 杨伟. 关于未来战斗机发展的若干讨论 [J]. 航空学报, 2020, 41 (6): 524377.
- Yang Wei. Development of future fighters[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(6): 524377.(in Chinese)
- [17] 朱宝璠, 朱荣昌, 熊笑飞. 作战飞机效能评估[M]. 2版. 北京: 航空工业出版社, 2006.
- Zhu Baoli, Zhu Rongchang, Xiong Xiaofei. Effectiveness evaluation of combat aircraft[M]. 2nd Edition. Beijing: Aviation Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [18] Tirpak J A. The sixth generation fighter[J]. Air Force Magazine, 2009, 92(10): 38-42.
- [19] 李国知, 吕少杰. 直升机作战效能评估技术应用与研究进展 [J]. 航空科学技术, 2021, 32(1): 70-77.
- Li Guozhi, Lyu Shaojie. Application and research progress on operational effectiveness evaluation technology for helicopter [J]. Aeronautical Science & Technology, 2021, 32(1): 70-77.(in Chinese)
- [20] 谢彦宏, 孔挺, 王旭明, 等. 空空导弹发展趋势研究 [J]. 舰船电子工程, 2015, 35 (7): 11-14+34.
- Xie Yanhong, Kong Ting, Wang Xuming, et al. Development

- tendency for air-to-air missile [J]. Ship Electronic Engineering, 2015, 35 (7): 11-14+34. (in Chinese)
- [21] 樊会涛, 崔颢, 天光. 空空导弹 70 年发展综述 [J]. 航空兵器, 2016, 23(1): 3-12.
- Fan Huitao, Cui Hao, Tian Guang. A review on the 70-year development of air-to-air missiles [J]. Aero Weaponry, 2016, 23 (1): 3-12.(in Chinese)
- [22] 李金梁, 涂泽中, 刘振庭. 美第六代战斗机研究进展情况 [J]. 电光与控制, 2014, 21 (6): 9-12.
- Li Jinliang, Tu Zezhong, Liu Zhenting. The research progress of the sixth generation fighter of USAF [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21(6): 9-12.(in Chinese)
- [23] 马九方, 杨森, 黄欣鑫. 基于灰色层次分析法的有人/无人协同作战效能评估 [J]. 电讯技术, 2023, 63 (10): 1625-1630.
- Ma Jiufang, Yang Sen, Huang Xinxin. Effectiveness evaluation of manned-unmanned collaborative combat based on grey analytic hierarchy process [J]. Telecommunication Engineering, 2023, 63 (10): 1625-1630.(in Chinese)
- [24] 阴小晖. 有人机/无人机协同作战效能评估研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2013.
- Yin Xiaohui. Research on the effectiveness evaluation for cooperative combat of manned vehicle/unmanned aerial vehicle [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2013. (in Chinese)
- [25] 屈高敏. 对地攻击型无人机作战效能评估与软件开发[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2015.
- Qu Gaomin. The research of UCAV effectiveness assessment and software development [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2015.(in Chinese)
- [26] 王波, 于升涛, 孙凯华. 舰载无人机对海突击作战效能评估研究 [J]. 无人系统技术, 2023, 6 (1): 72-81.
- Wang Bo, Yu Shengtao, Sun Kaihua. Research on the effectiveness evaluation of shipborne UAV in sea assault operations [J]. Unmanned Systems Technology, 2023, 6 (1): 72-81.(in Chinese)
- [27] 邵明军, 刘树光, 严惊涛. 基于 ADC-BP 模型的对地攻击无人机自主作战效能评估 [J]. 空军工程大学学报, 2023, 24 (6): 112-119.
- Shao Mingjun, Liu Shuguang, Yan Jingtao. Assessment of autonomous combat effectiveness of ground-attack UAV based on ADC-BP model [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2023, 24 (6): 112-119.(in Chinese)
- [28] 邵明军, 刘树光, 李姗姗. 基于优化随机森林的对地攻击无人机自主作战效能评估 [J]. 航空兵器, 2023, 30 (6): 81-88.
- Shao Mingjun, Liu Shuguang, Li Shanshan. Assessment of autonomous combat effectiveness of ground-attack UAV based on optimized random forest [J]. Aero Weaponry, 2023, 30 (6): 81-88.(in Chinese)
- [29] 李滢, 黄诗怡, 刘宏明, 等. 无人机集群对抗决策算法研究综述 [J]. 航空科学技术, 2024, 35 (4): 9-17.
- Li Wei, Huang Shiyi, Liu Hongming, et al. Review of UAV swarm air-combat decision-making algorithms [J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35(4): 9-17.(in Chinese)
- [30] 张子伟, 郭齐胜, 董志明, 等. 体系作战效能评估与优化方法综述[J]. 系统仿真学报, 2022, 34(2): 303-313.
- Zhang Ziwei, Guo Qisheng, Dong Zhiming, et al. Review of system of systems combat effectiveness evaluation and optimization methods[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(2): 303-313.(in Chinese)
- [31] Giachetti R E. Evaluation of the dodaf meta-model's support of systems engineering[J]. Procedia Computer Science, 2015, 61: 254-260.
- [32] Martin J N, O'Neil D P. Enterprise architecture guide for the unified architecture framework (UAF)[C]. INCOSE International Symposium, 2021.
- [33] 董建宏. 面向复杂场景的体系建模关键技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2023.
- Dong Jianhong. Research on key technologies of architecture modeling for complex scenarios [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2023.(in Chinese)
- [34] 王新尧, 曹云峰, 孙厚俊, 等. 基于 DoDAF 的有人/无人机协同作战体系结构建模 [J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42 (10): 2265-2274.
- Wang Xinyao, Cao Yunfeng, Sun Houjun, et al. Modeling for cooperative combat system architecture of manned/unmanned aerial vehicle based on DoDAF [J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42 (10): 2265-2274.(in Chinese)
- [35] 高松, 滕克难, 陈健, 等. 基于 DoDAF 的防空反导电子对抗装备体系结构建模 [J]. 电光与控制, 2020, 27 (4): 26-31.
- Gao Song, Teng Kenan, Chen Jian, et al. DoDAF-based

- architecture modeling of equipment system of systems for electronic countermeasure in air defense and anti-missile combat [J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27 (4): 26-31. (in Chinese)
- [36] 陈璐, 吴虎胜. 基于 DoDAF 的无人机集群应急响应体系结构设计 [J]. 航空兵器, 2023, 30 (4): 78-84.
- Chen Lu, Wu Husheng. Design of emergency response architecture of unmanned aerial vehicle swarm based on DoDAF [J]. Aero Weaponry, 2023, 30 (4): 78-84. (in Chinese)
- [37] 崔瑞靖, 孙建彬, 杨克巍, 等. 基于 UAF 的装备作战试验指标体系构建方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2025(5): 1-18.
- Cui Ruijing, Sun Jianbin, Yang Kewei, et al. Construction method of operational test indicator systems based on UAF [J]. Systems Engineering and Electronics, 2025(5): 1-18. (in Chinese)
- [38] 陆志沣, 何舒, 杜君南, 等. 基于 UAF 的航母编队防空反导作战体系结构建模 [J]. 舰船电子工程, 2023, 43 (11): 96-101.
- Lu Zhifeng, He Shu, Du Junnan, et al. Research on architecture modeling of air defense and anti-missile operation of aircraft carrier formation based on UAF [J]. Ship Electronic Engineering, 2023, 43 (11): 96-101. (in Chinese)
- [39] 王瑛, 史翔宇, 李超. 基于 DoDAF 的无人机协同作战效能评估 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2020, 21 (6): 66-72.
- Wang Ying, Shi Xiangyu, Li Chao. Research on evaluation of UAV cooperative combat effectiveness based on DoDAF [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2020, 21 (6): 66-72. (in Chinese)
- [40] 申彦君. 基于 DoDAF 的体系结构建模在反潜飞机任务系统设计中的应用 [J]. 电光与控制, 2014, 21 (9): 90-94.
- Shen Yanjun. Application of DoDAF based architectural model in mission system design of anti-submarine aircraft [J]. Electronics Optics & Control, 2014, 21 (9): 90-94. (in Chinese)
- [41] 陈奇, 姜宁, 吕明山, 等. 基于效能的海军演习效果评估方法及关键技术 [J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(6): 1226-1230.
- Chen Qi, Jiang Ning, Lyu Mingshan, et al. Navy exercise effects evaluation methods and key technology based on combat effectiveness [J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(6): 1226-1230. (in Chinese)
- [42] 娄本超. 基于层次分析法的直升机体系贡献率评估方法 [J]. 直升机技术, 2020 (1): 6-10.
- Lou Benchao. Helicopter system contribution evaluation based on AHP [J]. Helicopter technique, 2020 (1): 6-10. (in Chinese)
- [43] 李守奇, 杨书豪. 基于 AHP 和模糊评价法的 C3I 系统效能评估 [J]. 舰船电子工程, 2009, 29(12): 52-55.
- Li Shouqi, Yang Shuhao. C3I system efficiency evaluation based on AHP and fuzzy synthetically evaluation method [J]. Ship Electronic Engineering, 2009, 29(12): 52-55. (in Chinese)
- [44] 程恺, 张宏军, 柳亚婷, 等. 作战效能及其评估方法研究综述 [J]. 系统科学学报, 2014, 22(1): 88-92.
- Cheng Kai, Zhang Hongjun, Liu Yating, et al. Review on operational effectiveness and evaluation method [J]. Journal of Systems Science, 2014, 22(1): 88-92. (in Chinese)
- [45] 刘登攀, 寇昆湖, 王超, 等. 基于改进 ADC 法的侦察无人机作战效能评估 [J]. 电光与控制, 2024, 31 (4): 121-127.
- Liu Dengpan, Kou Kunhu, Wang Chao, et al. Operational effectiveness assessment of reconnaissance UAS based on improved ADC method [J]. Electronics Optics & Control, 2024, 31 (4): 121-127. (in Chinese)
- [46] 常会振, 秦大国, 孙盛智, 等. 基于 ADC 模型优化的海上无人机作战效能评估 [J]. 兵器装备工程学报, 2023, 44 (9): 58-68.
- Chang Huizhen, Qin Daguo, Sun Shengzhi, et al. Operational effectiveness evaluation of marine aerial vehicle based on ADC model optimization [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44 (9): 58-68. (in Chinese)
- [47] 孔晨妍, 朱晶, 焦松, 等. 基于序贯仿真试验的作战体系能力分析优化方法 [J]. 系统仿真学报, 2018, 30 (9): 3333-3339.
- Kong Chenyan, Zhu Jing, Jiao Song, et al. Analysis and optimization for combat capability based on sequential simulation experiment [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30 (9): 3333-3339. (in Chinese)
- [48] 姚灿, 侯志强, 贾忠湖. 攻击机对地作战效能分析的全概率方法 [J]. 电光与控制, 2007, 14(3): 59-62.
- Yao Can, Hou Zhiqiang, Jia Zhonghu. Full probability based operational effectiveness analysis for air-to-ground attacking [J]. Electronics Optics & Control, 2007, 14(3): 59-62. (in Chinese)
- [49] 吴亮, 熊永坤, 吉玉洁. LVC 技术在舰艇作战效能评估中的应用研究 [J]. 舰船电子工程, 2023, 43(12): 171-174.
- Wu Liang, Xiong Yongkun, Ji Yujie. Application research of LVC technology in air self-defense combat effectiveness evaluation of warship [J]. Ship Electronic Engineering, 2023,

- 43(12): 171-174. (in Chinese)
- [50] 王浩宇,陈灯,李磊,等. 基于集成学习的空战作战体系效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2023, 48 (9): 82-91.
- Wang Haoyu, Chen Deng, Li Lei, et al. Effectiveness evaluation of air combat system based on ensemble learning [J]. Fire Control&Command Control, 2023, 48 (9): 82-91. (in Chinese)
- [51] 窦立谦,任梦圆,张秀云,等. 基于强化学习的飞行器自主规避决策方法[J]. 航空科学技术, 2024, 35(06): 96-103.
- Dou Liqian, Ren Mengyuan, Zhang Xiuyun, et al. Autonomous avoidance decision method for aircraft using reinforcement learning[J]. Aeronautical Science & Technology, 2024, 35 (06): 96-103. (in Chinese)
- [52] 王翀,倪海参,王赢旋,等. 基于 GA-BP 神经网络的多无人艇协同作战效能评估[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(1): 109-114.
- Wang Chong, Ni Haishen, Wang Yingxuan, et al. Effectiveness evaluation for multiple unmanned surface vehicles cooperative combat based on GA-BP neural network [J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(1): 109-114. (in Chinese)
- [53] 顾忠征,陈善静,李伟鹏. 预警机空天协同作战典型样式效能仿真分析及对策[J]. 空军工程大学学报, 2024, 25(1): 65-70.
- Gu Zhongzheng, Chen Shanjing, Li Weipeng. The effectiveness simulation analysis and countermeasures for typical model of early warning aircraft aerospace collaborative operations[J]. Journal of Air Force Engineering University, 2024, 25(1): 65-70. (in Chinese)

Research on Aircraft Mission Effectiveness Evaluation System and Evaluation Methods

Xu Lin, Lu Chen, Jiang Bing

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100012, China

Abstract: Assessment of aircraft mission effectiveness, as a core proposition in the planning of equipment systems and the generation of combat effectiveness, has undergone continuous evolution and technological innovation in its theoretical paradigms and methodological systems. This progress is driven by the cross-generational development of aviation equipment, the evolution of multi-domain mission forms, and breakthroughs in modeling and simulation technologies. Focusing on the limitations in scenario coverage and model credibility that exist in current assessments of equipment mission effectiveness under real mission conditions, this paper adopts a diachronic perspective on the development of effectiveness assessment theory. Through a research approach that includes analyzing the connotations of mission effectiveness assessment concepts, dissecting the topological relationships of mission indicators, and examining data-driven evaluation methods, this study systematically elucidates the internal logic of iterative effectiveness assessment. It also analyzes its development trends and explores future research directions for aircraft effectiveness assessment. This study proposes a methodological system, including evaluation based on trial and training data from Live, Virtual, and Constructive (LVC) systems, to provide theoretical support for the systematic development of aviation equipment and the quantitative assessment of capabilities.

Key Words: aircraft mission effectiveness evaluation; effectiveness; aircraft mission capability; evaluation methods; LVC

Received: 2025-01-02; **Revised:** 2025-03-24; **Accepted:** 2025-04-23

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2022Z004004001)