

文章编号: 1000-6893(2000)01-0070-04

作战飞机总体设计评价准则和评估方法研究

黄俊¹, 武哲¹, 孙惠中², 吴炳麟²

(1. 北京航空航天大学 513 教研室, 北京 100083)

(2. 中国贵州航空工业集团, 贵州 安顺 561000)

STUDY ON EVALUATION CRITERIA AND ASSESSMENT METHODOLOGY FOR CONCEPTUAL/PRELIMINARY DESIGN OF COMBAT AIRCRAFT

HUANG Jun¹, WU Zhe¹, SUN Hui-zhong², WU Bing-lin²

(1. Faculty 513, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. China National Guizhou Aviation Industry Group, Anshun 561000, China)

摘要: 空中力量是高技术局部战争取胜的决定性因素, 作战飞机是空军最关键的武器装备。基于现代武器装备的作战能力、可靠性、维修性、保障性、安全性、生存力、适应性等性能标准和作战飞机的寿命周期费用, 考虑用户要求和工程设计专家意见, 建立了作战飞机总体设计的综合评价准则。给出了评价准则的计算公式和作战飞机总体设计的评估方法。

关键词: 飞机; 总体设计; 综合评价

中图分类号: V 211.4 **文献标识码:** A

Abstract: The air force is a decisive element for winning a local high-tech war. Combat airplanes are the most critical weapons the air force equipped with. The research basis of this study is the performance standards of modern weapons, such as operational capability, reliability, maintainability, supportability, safety, survivability, suitability, and the life cycle cost of a combat aircraft. Taking into consideration the customer requirements and the ideas from engineering design experts, an integrated evaluation criterion for the conceptual/preliminary design of combat aircraft has been established. Calculation formula for the criterion was described. Assessment methods for conceptual/preliminary design of combat aircraft were presented and finally an example. It is shown that the criterion acts a positive role in the parameter analysis, system synthesis and scheme comparison of combat aircraft design.

Key words: airplane; conceptual/preliminary design; integrated evaluation

现代作战飞机的发展是一个庞大的系统工程, 需要巨额研制经费和众多高水平的科研、设计和工程人员, 同时飞机的采购价格和使用维护成本越来越高。飞机设计高度综合各种先进科学技术, 可分为方案设计、初步设计和详细设计 3 个主要阶段^[1]。根据我国的实践, 一般称前 2 个阶段为总体设计。总体设计完成后, 飞机的气动布局、结构、系统和设备配置就基本确定了。

作为作战飞机研制过程的关键环节, 总体设计方案的评审一直受到广泛的重视。传统的做法是在飞行性能、空气动力、重量和推力之间作权衡, 后来发展到也对结构、航电、飞控、R&M 和隐身等进行折中^[2]。近来的重点为系统效能, 如综合了飞机性能、R&M 和生存性的出动架次率 (SGR)^[3], 考虑军机可支付性 (Affordability)、任

务能力、飞行安全性、生存性和可用性等 5 种属性的总体评价准则 (OEC)^[4]等。基于现代武器装备性能标准^[5]和作战飞机寿命周期费用 (LCC), 本文讨论一种反映用户要求, 根据具体条件可进行人为干预的作战飞机总体设计的综合评价准则, 并提出作战飞机总体设计的评估方法。

1 综合评价准则

现代武器装备的性能属性包括毁伤力、命中精度、机动性、可靠性、维修性、保障性、安全性、生存力和适应性。随着武器装备的现代化, 作战飞机的寿命周期费用已成为在总体设计阶段必须重视的因素。用作战能力代替作战飞机装备的毁伤力、命中精度和机动性, 计及专家意见, 作战飞机总体设计的综合评价指数表示为

$$z = \prod_{j=1}^8 \xi_j \Omega_j \quad (1)$$

式中: Ω_j ($j=1, 2, \dots, 8$) 分别为作战飞机的寿命周

期费用、作战能力、可靠性、维修性、保障性、安全性、生存性和适应性; $\xi_j (j = 1, 2, \dots, 8)$ 为各属性的重要性系数, 即基于用户要求和工程设计经验的加权系数, 它们的总和等于 1。

(1) 寿命周期费用 寿命周期费用包含研究、发展、试验和评审 (RDT&E), 生产、使用和维护 (O&M), 以及退役和处置。用下式说明 LCC 的构成

$$LCC = RDT\&E + PC + O\&M \quad (2)$$

其中: PC 为飞机的单机价格。参考文献[1]第 18 章给出了寿命周期费用的分析方法和计算公式。

(2) 作战能力 飞机作战能力用“对数法”^[6] 计算。

$$C = kC_{aa} + (1 - k)C_{ag} \quad (3)$$

其中: 飞机的空对空作战能力

$$C_{aa} = [\ln B + \ln(A_1 + 1) + \ln(A_2)] \epsilon_1 \quad (4)$$

式中: B, A_1 和 A_2 分别为飞机的机动性参数、火力参数和探测能力参数; $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ 和 ϵ_4 分别为操纵效能系数、生存力系数、航程系数和电子对抗能力系数。飞机的空对地作战能力

$$C_{ag} = [\ln(R_{eq}) + \ln(W_{eq})] \epsilon_5 \quad (5)$$

式中: R_{eq} 为当量航程; W_{eq} 为当量载弹量。

(3) 可靠性 可靠性是飞机在规定的条件下和规定的时间内, 完成规定功能的能力^[7]。通常用平均故障间隔时间 (MTBF) 作为作战飞机可靠性度量

$$MTBF = T_0 / N_f \quad (6)$$

式中: T_0 为飞机工作时间; N_f 为总故障数。

(4) 维修性 维修性是飞机在规定的条件下和规定的时间内, 按规定的程序和方法进行维修时, 保持或恢复到规定状态的能力^[7]。用平均修复时间 (MTTR) 作为度量

$$MTTR = \sum_{k=1}^n (\lambda M_{ctk}) / \sum_{k=1}^n (\lambda_k) \quad (7)$$

式中: M_{ctk} 为飞机第 k 个部件平均修复时间; λ_k 为飞机第 k 个部件故障率; n 为可修部件总数。

(5) 保障性 保障性是系统的设计特性和计划的保障资源能满足平时战备及战时使用要求的能力^[7], 用作战飞机的战备良好率或使用可用度 (A_0) 度量。

$$A_0 = \frac{MTBM}{MTBM + MDT} \quad (8)$$

其中: MTBM 为飞机的平均维修间隔时间;

MDT 为飞机平均不能工作时间。

(6) 安全性 安全性是飞机在飞行期间连续地保持保证飞行任务而无飞行事故的那些系统和设备处于能工作状态的一种特性^[8]。用发动机引起的损耗指数 (EA I)^[4] 作为作战飞机的安全性指标。

$$EA I = \frac{N_p - N_{LCE}}{N_p} \quad (9)$$

式中: N_p 为采购的飞机数; N_{LCE} 为发动机引起的事故造成的飞机损失数。

(7) 生存性 生存性是指飞机避免和(或)经受住人为的敌对环境的能力^[9], 由下式确定。

$$P_s = 1 - P_H P_{K/H} \quad (10)$$

式中: P_H 飞机的敏感性; $P_{K/H}$ 为飞机的易损性。

(8) 适应性 适应性是指飞机在作战、训练、储存、运输等过程中, 对自然环境、诱发环境和特殊环境的适应能力^[5]。根据具体情况选取飞机上某关键系统或设备的环境适应能力、最大使用速度或/和最大使用过载等作为适应性 (S) 度量。

2 飞机总体设计评估方法

(1) 多目标决策 可行域 $R = \{g_i(X) \mid 0, i = 1, 2, \dots, m\}$ 上有 p 个目标函数 $f_j(X) (j = 1, 2, \dots, p)$, 且 $f_j(X) > 0$, 要求前 r 个目标函数值越小越好, 后 $p - r$ 个越大越好, 可得多目标决策问题

$$\left. \begin{aligned} \min_{X \in R} F(X) &= [f_1(X), \dots, f_r(X), 1/f_{r+1}(X), \\ &\dots, 1/f_p(X)]^T \\ R &= \{X \mid g_i(X) \leq 0, i = 1, 2, \dots, m, X \in E^m\} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

构造评价函数^[10]

$$h(F) = \left[\prod_{j=1}^r f_j(X) \right] / \left[\prod_{j=r+1}^p f_j(X) \right] \quad (12)$$

求出 $\min_{X \in R} \ln h(F)$ 的最优解 \bar{X} , 可以证明 \bar{X} 是多目标决策问题式(11)的有效解或弱有效解。

评价函数方法是多目标决策的解法之一。由于各种数值寻优方法已非常成熟, 并有现成计算程序, 所以多目标决策较多地用于飞机总体设计的参数分析。多目标决策可同时对多于一个目标函数的问题进行优化, 具有方便、直接和实用的特点, 但对约束条件要求较严格, 一般要预先分析其可行域和在优化后进行参数分析, 优选目标也不宜过多。

比如在飞机总体设计中, 选机翼、机身的几何参数作为设计变量, 以战技要求为约束条件, 用多

目标决策方法可以对飞机的起飞重量、航程、机动性(如单位剩余功率)等同时进行评估。

(2)“蛛网图”法 如有2个或2个以上飞机方案,可通过“蛛网图”^[4]来进行比较。图1示出了3个飞机方案的比较,方案A定为基准方案。

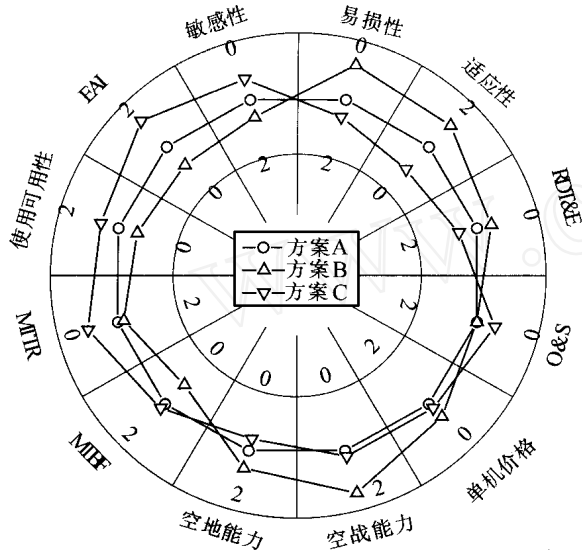


图1 飞机总体设计评估的“蛛网图”

“蛛网图”评估过程为选定要进行评定的飞机属性,根据属性种数把圆周分成扇区,每个扇区代表一种属性,并把它们标准化到 $[0, 2]$ 的区间上。图中的内圈表示该项属性指标的最小可接受值,外圈表示飞机总体设计的目标值或理想值。对不同属性的取值趋势可能不同,如寿命周期费用(RDT&E, 单机价格, O&S)的设计目标为越小越好,因而内圈取值为2,外圈取值为0;作战能力(空对空作战和空对地作战能力)的设计目标为越大越好,所以外圈取值为2,内圈取值为0。基准方案所有属性指标的取值恒为1,这样如果一个方案的大多数指标落在基准方案的外面,说明它优于基准方案。

“蛛网图”适用于2个或2个以上的总体方案评估,较好地反映了系统评价的实质,且具有简单、直观特点,但交互性较差,不能通过改变设计变量来修改方案,一般在参数分析的基础上,用该方法向领导或主管机构汇报作战飞机总体方案研究情况,供决策参考。

(3)综合评估法 选定基准飞机或基准总体方案,将式(1)标准化得作战飞机总体设计的综合评价函数。

$$z = \xi_1 \left(\frac{LCC_{BL}}{LCC} \right) + \xi_2 \left(\frac{C}{C_{BL}} \right) + \xi_3 \left(\frac{MTBF}{MTBF_{BL}} \right) + \xi_4 \left(\frac{MTTR_{BL}}{MTTR} \right) + \xi_5 \left(\frac{A_0}{A_{0BL}} \right) + \xi_6 \left(\frac{EAI}{EAI_{BL}} \right) +$$

$$\xi_7 \left(\frac{P_s}{P_{SBL}} \right) + \xi_8 \left(\frac{S}{S_{BL}} \right) \quad (13)$$

式中:标“BL”代表基准飞机或飞机总体设计基准方案。

由军方(代表用户)和工业部门(代表研制单位)的 r 位专家组成权系数打分小组,确定各项指标在综合评价准则中的重要性。评分标准分为0~7分8个级别,得分越高表示该项指标在评价准则中越重要,可以给小数。评分结果列入表1。

表1 重要性系数评分结果

权系数	LCC	C	...	S
专	ξ_{11}	ξ_{12}	...	ξ_{18}
家	ξ_{r1}	ξ_{r2}	...	ξ_{r8}

事先给定一致性允许误差 $\epsilon > 0$,计算每项指标的平均权系数

$$\bar{\xi}_j = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \xi_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, r, j = 1, 2, \dots, 8) \quad (14)$$

如果 $|\xi_{ij} - \bar{\xi}_j| > \epsilon$,说明第 i 位专家给第 j 项指标的打分与其他专家的打分不一致,可以将其剔除

或通过讨论、协商解决。最后将 $\bar{\xi}_j$ 标准化使 $\sum_{j=1}^8 \bar{\xi}_j = 1 (j = 1, 2, \dots, 8)$,就得到作战飞机总体设计方案评估属性的重要性(或加权)系数。

作为一个无量纲的参数,综合评价准则既可用于飞机总体设计方案的比较,也可作为目标函数用数值寻优方法对飞机设计变量进行优化选择。根据飞机的总体气动布局、系统和设备布置、武器挂装型式可以估算飞机的寿命周期费用、作战能力和生存性(还与威胁环境有关),飞机的可靠性、维修性、保障性、安全性和适应性一般为合同规定指标,在总体设计阶段均应有改进这些属性的设计方案。对于基于统计资料的飞机属性指标,可由专门机构同总体设计并行地进行评定或估算。

综合评估法是多目标决策的一个升华,在作战飞机总体设计中既可用于参数分析,也可作为一个定量评价标准进行系统综合。

3 算例

一定型对地攻击飞机,机翼整体油箱没有任何防火和防爆措施,在作战中如果机翼被击中势必造成飞机损失,用户要求对飞机进行改进设计以提高飞机的战斗生存力。研制单位决定在改进设计方案中对机翼油箱使用了火灾和爆炸抑制技

术, 该技术的应用和可使飞机的易损面积降低 16.67%, 致命半径缩短 10.0%。在相同威胁条件下改进方案的生存力从 0.6084 提高到 0.6642。单机价格增加 0.25%, 平时 15 年寿命周期费用增加 0.167%。为了保持起飞重量不变, 飞机载弹量减小 75kg, 最大航程减少 50km, 对地作战能力(代表飞机的作战能力)从 11.187 下降到 11.149。飞机改进设计方案的其他属性维持与基准方案相同。

由专家确定的重要性系数 $\xi_1 \sim \xi_8$ 分别为: 0.326, 0.233, 0.093, 0.093, 0.046, 0.046, 0.139, 0.024, 根据式(13)计算得综合评价指数 $Z = 1.0114$, 可以将其解释为飞机改进设计方案的总体效能比基准方案提高了 1.14%, 可以认为对该机的改进设计是值得的。另外, 从专家确定的重要性系数可以看出, 飞机的主要用途是平时的作战训练。由于飞机生存性的改善可以降低实战条件下飞机的损失率, 从而减少飞机的补充费用以及机组的培训和更换成本, 如果飞机生存性加权系数更大一些, 飞机的总体效能提高会更多。

4 结论

(1) 武器系统总体设计方案的评估具有两重性: 系统本身和用户需求。综合评价准则不仅覆盖了作战飞机设计方案的方方面面, 而且能充分反映用户的要求。新型作战飞机的发展不仅取决于国家的经济实力和国防工业基础, 而且与现实和未来的政治、经济、军事和敌对环境的态势有关, 用户根据具体情况可以强调某些属性而忽略其他。

(2) 改进改型是作战飞机武器系统发展的重要方式, 通过综合评价准则对飞机改进或改型设计方案进行评估, 可为决策机构作出正确决定提供客观、现实和有利的支持。

(3) 综合评价准则全面反映作战飞机武器系统的主要属性, 弥补了传统的单一指标作为目标函数优选飞机总体设计方案的片面性和局限性。

(4) 综合评价准则中包含的所有属性均可根据飞机的总体设计方案进行计算、评定或预测, 具有可操作性。在计算设备和计算方法高度发展的今天, 综合评价准则将对作战飞机武器系统总体设计的参数分析、系统综合和方案比较产生积极的影响。

参 考 文 献

[1] Daniel P R. Aircraft design: A conceptual approach[M].

Washington D C: AIAA Inc, 1989.

- [2] Hollowell S, Bitten R. Multidisciplinary optimization of conceptual aircraft[R]. AIAA 92-1196, 1992.
- [3] Saad Al-Ahmed, Fielding J. Integrating combat effectiveness disciplines into the conceptual/Preliminary design process[R]. AIAA 95-3904, 1995.
- [4] Mavris D N, deLaentis D. An integrated approach to military aircraft selection and concept evaluation[R]. AIAA 95-3921, 1995.
- [5] 钱海皓. 武器装备学[M]. 北京: 军事科学出版社, 1998. 12~14.
- [6] 朱宝镠, 朱荣昌, 熊笑飞. 作战飞机效能评估[M]. 北京: 航空工业出版社, 1993. 64~90.
- [7] 张建华. 空军装备的可靠性和维修性管理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993. 81~115.
- [8] 安采利奥维奇. 飞机可靠性、安全性和生存性[M]. 唐必铭, 盛永才, 韩翠英译. 北京: 宇航出版社, 1993. 10~16.
- [9] Ball R E. The fundamentals of aircraft combat survivability analysis and design[M]. New York: AIAA Inc, 1985.
- [10] 吴文江, 袁仪方. 实用数学规划[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 414~466.

作者简介:



黄俊 1964年10月生, 高级工程师, 1997年获北京航空航天大学硕士学位, 现为北京航空航天大学飞行器设计与应用力学系博士研究生。曾任某型歼击教练机主管设计师, 参加过该飞机多个改进型号的设计。已发表论文十多篇, 主要研究领域为飞机总体设计, 武器系统效能分析等。电话: 010-

82317503。



武哲 1957年2月生, 1988年获工学博士学位, 1991年博士后出站, 北京航空航天大学飞行器设计专业教授, 博士生导师。现任北京航空航天大学副校长。主要从事飞机总体设计技术及相关领域的科研和教学工作, 近年来获部级科技进步二等奖两项、三等奖三项。E-mail: wuzhe@buaa.edu.cn。



孙惠中 1945年9月生, 自然科学研究员, 现任中国贵州航空工业集团飞机设计所总设计师。曾获部级科技进步一、二、三等奖各一次, 先后在国内发表或交流论文 10 多篇。主要研究领域为战斗教练飞机设计, 侧重于飞机机械系统设计、试验研究。通讯地址: 贵州省安顺市 44 号信箱。



吴炳麟 1946年3月生, 研究员, 国家有突出贡献的中青年专家。曾任贵航集团飞机设计所总设计师、所长, 两个型号飞机第一副总设计师, 某型号飞机总设计师, 长期从事飞机设计研究。现任贵航集团副总经理、飞机总工程师, 主持全集团飞机科研生产工作。获国家科技进步奖一项, 部级科技进步

一等奖 2 项, 二等奖 1 项, 发表论文数 10 篇。0853-3854801, WBL_GAIC@China.com。