

基于效能指数的军用飞机经济性建模

严盛文¹, 郭基联², 张 蕾²

(1. 西北工业大学 管理学院, 陕西 西安 710072; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要:以军用飞机整机的费用估算为研究对象,探讨解决参数模型构建过程中合理选取说明性变量与保持模型有效性之间的矛盾,分析并确立了基于效能指数的费用建模思路,针对费用估算建模的需要研究了效能指数的构建方法。通过一个实例分析,建立和分析了基于效能指数的费用模型。作为比较,同时采用 DAPCA 模型形式建立了模型。结果表明:基于效能指数的费用参数模型既比较全面地考虑了对费用有明显驱动的参数指标,又减少了回归分析的变量数,从而使模型具有较强的有效性。

关键词:军用飞机;效能指数;经济性;费用;参数模型

中图分类号: TP181 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)01-0028-05

参数估算法由于其突出的优点,正成为飞机等复杂设备早期费用估算的首选方法。从全球范围看,以 PRICE 软件为代表的参数模型已在复杂设备的费用估算中发挥重要作用,参数模型作为项目预算的直接工具已逐渐成为一种趋势^[1]。

长期以来,在参数模型的构建过程中,一直存在着合理选取说明性变量与保持模型有效性之间的矛盾。这是因为对于一定数量的样本数据,如果选取的说明性变量过少就难以反映费用的发生机理,而选取的说明性变量过多则会使回归模型不能通过统计检验,降低模型的有效性甚至导致模型的失效。因此,利用高度综合的参数进行费用的回归建模是参数估算法发展的趋势,一方面可以全面考虑对费用有明显驱动的参数指标;另一方面又可减少回归分析的变量数,从而提高回归的有效性。PRICE 的建模过程就是这种思想的典型代表。目前国内也在作类似的研究,本文之前,已有部分文献针对具体设备进行了有益的探索^[2-3]。

1 建模思路

1.1 效能指数的评估内容

军用飞机的综合作战效能 E 通常用下式表示^[4]:

$$E = CAD \quad (1)$$

式中: C 为飞机的作战能力指数; A 为飞机的可用度指数; D 为飞机完成任务可信度指数。其中,作战能力指数 C 包括空空作战能力及空地(空海)作战能力,它是作战效能评估的重点,也是飞机概念研究、方案论证阶段的主要工作。有时也称 C 为不包括 A 、 D 的飞机作战效能,它的评估主要包括以下几个方面的内容:

1) 飞机平台:几何参数;重量、油量系数;升阻特性数据;过载及迎角限制等使用包线;动力装置系统特性,如推力、耗油等;隐身能力、推力矢量特性、过失速机动能力等。

2) 航空电子设备:雷达、红外、激光等各种探测系统功能及特性;导航引导系统特性及数据;干扰、抗干扰系统特性及数据;机上综合控制系统的特性及数据。

3) 机载武器系统:航炮的口径、射速、杀伤概率;导弹的气动、重量的推力特性、引导方式、抗干扰能力及

* 收稿日期:2008-07-20

基金项目:国防预研基金资助项目(51319080201)

作者简介:严盛文(1971-),男,浙江桐庐人,博士生,副教授,主要从事装备管理与论证研究。

E-mail: guo_jl71@yahoo.com.

使用包线等;航空炸弹、火箭及其他武器的特性及数据。

实际上,以上的参数与特性中多数对费用具有明显的驱动作用,但考虑到导弹、炸弹、火箭等外挂武器一般来说具有通用性,并不针对某型飞机研制。因此从费用建模的角度应该将其从效能评估中分离出来。

目前,对于 C (作战能力指数) 的评估可采用性能参数法、专家评估法、对数效能指数法、概率分析法等方法^[4]。在本文的研究中,作为费用建模的综合参数,适于采用对数效能指数法进行评估。因此,下文中直接将 C 称为效能指数,并且为了区别于费用的符号,改用符号 E 表示。

1.2 模型形式

尽管利用对数效能指数法获得的效能指数可以包含众多对费用有明显驱动作用的参数,但费用模型中仅仅考虑效能指数还是不够的。

首先,作为费用建模研究的核心参数,飞机重量是必不可少的。而且在效能指数的评估中并没有直接纳入重量这一参数。通常,采用飞机空重来衡量这一参数。

其次,可靠性及其相关的参数必须纳入。现代飞机,可靠性、维修性、保障性(RMS)是对效能和费用都有重大影响的重要指标。可靠性参数很多,主要的有寿命、首翻期、平均无故障间隔时间(MTBF)、可用度等。通常,采用固有可用度或飞机首翻期纳入模型。

参照著名的 DAPCA 模型(模型 16),采用如下的模型形式进行费用估算:

$$C = AE^{a_1} W^{a_2} R^{a_3} \quad (2)$$

式中: C 为费用; A , a_1 , a_2 , a_3 为回归系数; E 为效能指数; W 为飞机空重; R 为飞机首翻期或固有可用度。

式(2)所示费用模型主要用于研制费用的估算,进行产量及熟练曲线效应的修正后也可用于生产费用及单机价格的估算。模型中,飞机空重和飞机首翻期或固有可用度都可以在研制方案中直接给出,而效能指数的构建则是一个比较复杂的过程。

2 效能指数的构建

国内外对该部分内容的研究已经比较成熟^[4-7],这里主要参阅了文献[4-5],并为适应费用模型的建立对其中若干内容进行了适应性改造。为节省篇幅,这里主要列出核心公式。飞机的作战效能包括空战效能和空地效能两部分。

2.1 空战效能指数

选用与空战有关的 7 个主要因素来衡量飞机空战能力:机动性、火力、探测目标能力、操纵效能、生存力、航程和电子对抗能力。其效能指数 E_k 表示成:

$$E_k = [\ln B + \ln(\sum A_1 + 1) + \ln(\sum A_2)] \varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \varepsilon_4 \quad (3)$$

式中: B 为机动性参数; A_1 为火力参数; A_2 为探测能力参数; ε_1 为操纵效能系数; ε_2 为生存力系数; ε_3 为航程系数; ε_4 为电子对抗能力系数。上述所有参数的取值均对应飞机的正常挂载方案。

1) 机动性参数

$$B = (n_{y \max} + n_y^{\text{cir}} + P_{\text{SE}} \frac{9}{300}) (\frac{\alpha_{\text{av}}}{24})^{0.5} \quad (4)$$

式中: $n_{y \max}$ 为最大允许过载; n_y^{cir} 为最大稳定盘旋过载; P_{SE} 为最大单位重量剩余功率; α_{av} 为过失速机动可用最大迎角。

2) 火力参数

武器系统一般具有通用性,因此从费用建模的角度在效能评估中不予考虑,即令 $A_1 = 0$ 。

3) 探测能力参数

$$\sum A_2 = A_2^{\text{r}} + A_2^{\text{IR}} + A_2^{\text{eye}} \quad (5)$$

式中: A_2^{r} 为雷达探测能力参数; A_2^{IR} 为红外搜索跟踪装置探测能力参数; A_2^{eye} 为目视能力参数。其中, A_2^{r} 按下式计算:

$$A_2^{\text{r}} = (D_d^2/4) \times \left(\frac{A_{\text{bear}}}{360} \right) \times P_d \times K_2 \times (m_1 \times m_2)^{0.05} \quad (6)$$

式中: D_d 为最大发现目标距离(RCS为 5 m^2); A_{bear} 为最大搜索方位角; P_d 为发现目标概率; K_2 为雷达体制衡量系数,根据不同雷达体制在 $0.3-1.0$ 间取值; m_1 、 m_2 分别为同时跟踪和允许攻击目标数量。

A_2^{IR} 的计算公式与上式相同, K_2 根据不同红外搜索装置在 $0.3-1.0$ 间取值。

A_2^{eye} 与飞机风挡及座舱盖设计有很大关系,计算公式与上式一样,但 K_2 、 m_1 及 m_2 为 1.0 。

4) 驾驶员操纵效能系数

驾驶员操纵效能系数与飞机座舱布局、操纵系统及显示装置等因素有关,一般在 $0.6-1.0$ 间取值。

5) 生存力系数

生存力系数可用飞机的几何尺寸与雷达反射截面(S_{RC})为主要代表因素。计算公式为:

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{10}{l} \times \frac{15}{L_{\text{all}}} \times \frac{5}{S_{\text{RC}}} \right)^{0.0625} \quad (7)$$

式中: l 为翼展; L_{all} 为飞机全长; S_{RC} 为迎头或尾后方位 120° 左右之内的对应 3 cm 波长雷达的平均值。

6) 航程系数

$$\varepsilon_3 = (R_f/1400)^{0.25} \quad (8)$$

式中: R_f 为机内油最大航程。

7) 电子对抗系数

作战飞机上安装电子对抗设备主要有全向雷达警戒系统、消极干扰投放系统、红外导弹积极干扰器、电磁波积极干扰器、导弹临近告警系统等。按功能强弱,一般在 $1-1.2$ 间取值。

2.2 空地效能指数

空地作战效能指数 E_d 由两部分组成,即航程指数和武器效能指数。计算公式为:

$$E_d = [\ln(R_a) + \ln(B_e)] \varepsilon_4 \quad (9)$$

式中: R_a 为当量航程, B_e 为当量载弹量, ε_4 同(3)式。

1) 当量航程

$$R_a = R_{\text{max}} R_p R_m R_n \quad (10)$$

式中: R_{max} 为最大航程; R_p 为突防系数; R_m 为远程武器系数; R_n 为导航能力系数。

突防系数采用下式计算:

$$R_p = 0.25 \times \varepsilon_2 + 0.15 \times A_r + 0.1 \times (n_{y\text{max}}/9) + 0.25 \times (100/H_p) + 0.25 \times (V_p/1200) \quad (11)$$

式中: $n_{y\text{max}}$ 为最大允许过载,代表突防机动能力; H_p 为突防最低高度; V_p 为突防速度; A_r 为装甲系数根据装甲能力在 $0.2-1.0$ 间取值; ε_2 同式(3)。

远程武器系数需要考虑使用远程武器,包括滑翔炸弹、巡航导弹等因素,这些因素相当于延长了攻击飞机的航程。这里不作考虑,直接令其为 1.0 。

导航能力系数,根据不同的导航设备在 $0.5-1.0$ 间取值。

2) 当量载弹量

$$B_e = W_B P_a \quad (12)$$

式中: W_B 为最大载弹量; P_a 为对地攻击效率系数,计算公式为:

$$P_a = 0.2 N_{\text{um}}/15 + 0.4 \times A_{\text{cc}} + 0.4 \times A_{b_f} \quad (13)$$

式中: N_{um} 为挂架数量; A_{cc} 为武器精度系数,根据可以挂载的不同武器种类在 $0.5-1.0$ 间取值; A_{b_f} 为发现目标能力系数,根据不同的目标搜索设备在 $0.5-1.0$ 间取值。

2.3 效能指数的综合

空空作战能力和空地作战能力在战斗机总的作战效能评估中所占比重要根据使用方对该型战斗机的使用要求而定。总效能指数 E

$$E = a_1 E_k + a_2 E_d \quad (14)$$

式中: a_1 为空空任务分配系数; a_2 为空地任务分配系数。 a_1 、 a_2 的取值因机种不同而不同,没有严格的估算公式,权威的评估可采用专家意见确定。

效能指数的综合比较繁杂,涉及的参数很多,计算量较大,用于工程应用时应编程进行计算。

3 基于效能指数的经济性建模实例

以部分飞机的数据进行单机价格估算。计算用主要尺寸和性能参数来自文献[8],少数合成参数和主观评估值如 SEP、操纵效能系数、电子对抗系数、任务分配系数等参考了文献[4-5]。飞机单价数据主要来自文献[9],并已统一按生产量为 200 架进行折算(生产熟练曲线斜率取 0.9),进一步按历年物价总指数折算到 \times 财年时的价格。由于费用数据的敏感性,这里对价格数据按同一比例进行了缩减。这样的缩减不会影响数据的分析和建模过程,但应注意由此建立的模型仅用于方法的说明。

按照第 2 节的方法评估各机型的效能指数,采用式(2)所示模型选取飞机空重、首翻期、效能指数为说明性变量,单机价格为因变量,应用多元回归分析建立模型:

$$C = 8.3548 \times 10^{-4} W^{0.0278} R^{1.7604} E^{1.8523} \quad (15)$$

式中: C 为飞机单价($\times 1000$ 万元,这样取是为了数据值的均衡,以减小计算误差,下同); W 为飞机空重(t); R 为飞机首翻期($\times 100$ 飞行小时); E 为效能指数。

W 、 R 、 E 的 t 检验值分别为 1.261、3.642、4.895,拟合优度 $R^2 = 0.971$, F 检验值为 56.13,模型平均相对误差 15.8%。模型拟合度很高,平均相对误差较小,并且顺利通过 F 检验和 t 检验($\alpha = 0.9$)。

以说明性变量 R 、 E 上下变动 5% 的幅度进一步作费用敏感性分析,结果见表 1。

由此可见,飞机的可靠性与效能对费用都很敏感,尤其是效能指数,几乎是按 2 倍的比例增加,即效能指数平均每增加 1%,单价就增加 2%。

从式(7)可得出,RCS 每降低一半,飞机生存力系数就增加约 4.42%,从而使飞机的空战效能指数增加 4.42%。假设某型制空战斗机通过隐身性能的设计改造,RCS 降为原来的 10%,则空战效能指数会增加 15.5%。如果按表 1 中费用敏感性数据计算,则单价应提高约 31%。同理可以分析其他机种飞机的 RCS 费用敏感性。由此可见,基于效能指数的费用参数模型可以方便地分析各种“现代”性能对费用的驱动作用,这是以前的模型很难做到的。

从理论上分析,为了提高飞机的可靠性和作战效能,在研制和生产中就应该采用更好的材料、更先进的工艺设备、更多更系统的试验等等,从而需要投入更高的成本,飞机的价格也就更高。这样,模型本身可以在理论上得到合理解释。

如果建模中不采用效能指数这一综合参数,那么一般从说明性变量集中选取有代表性的子集来建立模型,受回归分析方法的限制,子集中的说明性变量不能过多,因此大多数说明性变量对费用的驱动作用都难以得到反映。例如,参照著名的 DAPCA-III 的选取方法^[10],选取飞机空重、最大飞行 Ma 数(或最大平飞速度)、最大航程(或作战半径,机内燃油)为说明性变量,应用多元回归方法建立模型:

$$C = 8.6003 \times W^{-1.1993} M^{-1.9644} L^{3.9834} \quad (16)$$

式中: C 、 W 同式(15); M 为最大飞行 Ma 数; L 为最大航程($\times 1000$ km)。

W 、 M 、 L 的 t 检验值分别为 1.584、2.468、5.017,拟合优度 $R^2 = 0.699$, F 检验值为 3.117,模型平均相对误差 41.9%。模型拟合度较低,平均相对误差很大,不能通过 F 检验($\alpha = 0.9$),表明这些说明性变量总体上不能良好地解释因变量。而且 W 和 M 的指数都是负值,对费用的驱动作用是反向的,这从理论上也是难以解释的。选取其他说明性变量子集也存在类似问题。

4 结束语

利用效能指数作为说明性变量构建军用飞机费用估算模型是参数估算法的新思路,一方面可以全面考虑对费用有明显驱动的参数指标,另一方面又可减少回归分析的变量数,从而提高回归的有效性。这种方法的不足之处在于:效能指数的评估目前还没有一套权威方法,当其涉及了较多的主观参数值时更是如此。不同方法、不同专家评估的同一飞机效能指数有较大的差别。因此在具体应用中,所有飞机的效能指数都必须

表 1 各说明性变量的费用敏感性

Tab. 1 Cost sensitivity of independent variables

变量名	变动幅度	平均单价改变比例
飞机首翻期 R	+5%	8.97%
	-5%	-8.63%
效能指数 E	+5%	9.46%
	-5%	-9.06%

采用同一方法、同一标准进行评估。

参考文献:

- [1] Parametric Estimating Handbook [M]. California:PRICE Corp, 2004:11-12.
- [2] 后小明,花兴来,叶安键,等. 雷达的综合性能指数模型及其在费用估算中的应用[C]//设备寿命周期费用第四届年会论文集,北京,2000:64-67.
HOU Xiaoming, HUA Xinglai, YE Anjian, et al. Synthesized Performance Index Model of Radar and Its Application in Cost Estimation [C]//the LCC Papers of the Fourth Annual Forum. Beijing:[s.l.], 2000:64-67. (in Chinese)
- [3] 何萌. 基于LS-SVM的无人机费用预测[J]. 空军工程大学学报:自然科学版,2008, 9(1):22-25.
HE Meng. Cost Prediction of UAV Using Least Squares Support Vector Machines [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 9(1):22-25. (in Chinese)
- [4] 朱宝鏊,朱荣昌. 作战飞机效能评估[M]. 北京:航空工业出版社,2006:63-88.
ZHU Baoliu, ZHU Rongchang. Effectiveness Assessment of Combat Aircraft [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2006:63-88. (in Chinese)
- [5] 董彦非,王礼沅. 战斗机空战效能评估的综合指数模型[J]. 航空学报,2006,27(6):1084-1087.
DONG Yanfei, WANG Liyuan. Synthesized Index Model for Fighter Plane Air Combat Effectiveness Assessment[J]. Acta Aeronautica and Astronautica Sinica, 2006, 27(6):1084-1087. (in Chinese)
- [6] 徐浩军. 航空作战体的作战效能评估[M]. 北京:国防工业出版社,2004:46-55.
XU Haojun. Effectiveness Assessment of Aeronautic Combat System [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004:46-55. (in Chinese)
- [7] Brown Kevin W. Measuring the Effectiveness of Weapons Systems in Terms of System Attributes [D]. Virginia: University of Virginia of the United States, 1995:26-43.
- [8] 卢成文. 世界飞机手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2000.
LU Chengwen. World's Aircraft Handbook [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2000. (in Chinese)
- [9] 《飞机设计手册》编委会. 飞机设计手册 22 分册:技术经济性[M]. 北京:航空工业出版社,2001:191-194.
< Aircraft Design Manual > Edit Committee. Aircraft Design Manual, 22nd Fascicle: Technologic Economic Analysis [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001:191-194. (in Chinese)
- [10] Levenson G S, Stephen Barro. Cost-estimating Relations for Aircraft Airframes[R]. Rand Corporation:AD-AD12091.

(编辑:姚树峰,徐敏)

Research on Affordability Modeling of Aircrafts Based on Effectiveness Indexes

YAN Sheng-wen¹, GUO Ji-lian², ZHANG Lei²

(1. School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: Aimed at the whole military aircraft, the paper tries to solve the contradictory between keeping model effective and choosing the right expository variables. The basic modeling idea based on Effectiveness Indexes is analyzed and the form of models is established. According to the demand of cost modeling, the Effectiveness Indexes' constructing method is studied deeply. Finally, the cost modeling process based on Effectiveness Indexes is introduced through an example. In order to compare the effect of methods, some other models are established at the same time with the DAPCA model and PLSR. The comparison results explain that the models based on Effectiveness Indexes are better, because more parameters which impact the cost obviously are considered and the variables in the regression process are reduced, thus the models' validity is guaranteed.

Key words: military aircraft; effectiveness index; economy; cost; parameter model