

基于设计不确定性的航空装备研制与生产费用估算

靳静^{1, 2,*}, 常文兵², 黄兆东³

1 中航工业成都凯天电子股份有限公司, 四川 成都 610000

2 北京航空航天大学 可靠性与系统工程学院, 北京 100028

3 中航工业发展研究中心 财经研究部, 北京 100029

摘要: 在航空装备研制的早期阶段, 由于需求不明确、未知因素多以及设计过程中的不确定性, 装备设计存在不确定性。针对装备设计不确定性, 将装备效能作为一个新的变量和费用的影响因素, 利用蒙特卡洛仿真和区间数等理论, 建立了设计不确定条件下装备研制与生产费用估算模型。

关键词: 不确定性; 效能指数; 航空装备; 费用

中图分类号: V2-9 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2014) 04-0028-05

航空装备研制与生产费用的准确估算对于国防经费管理具有重要的意义^[1]。但由于设计之初用户需求的不明确, 众多未知因素导致装备费用存在不确定性。传统的费用估算研究中, 将系统中不确定性量假定为确定性量^[2-4], 并且没有考虑航空装备设计的不确定性, 这样假设下估算的结果与实际相差甚远。

本文在对航空装备研制与生产费用估算中, 结合装备设计的不确定性, 尝试将效能指数作为建立估算模型的一个指标, 体现装备效能对其研制与生产费用的影响, 为航空装备研制与生产费用估算提供参考。

1 基于分布型区间数的不确定信息表现形式

实际工程中, 很多情况下使用单个数值表示变量会造成信息的丢失。在对航空装备进行研制与生产费用估算时, 由于设计存在不确定性, 导致某些参数无法用确定的数值来描述, 而是在某一范围内变动, 并且为了对参数描述更加准确, 可以通过模糊统计找出参数在这一范围内变化的规律, 从而以区间数为基础, 加上辅助的随机分布信息, 采用分布型区间数来表达参数。

分布型区间数可表示为:

$$A = \{[\underline{x}, \bar{x}], AI\} \quad (1)$$

即是在一般区间数的基础上增加了一个辅助信息—— AI 。 AI 是某个累计分布。

2 建立研制与生产费用估算模型

2.1 装备效能指数的构建

美国工业界装备效能咨询委员会认为, 系统效能是预期一个系统满足一组特定任务要求的程度的度量, 是系统的可用性、可信性和固有能力的函数^[5]。这是应用最广泛的系统效能的表述, 它将可靠性、维修性和固有能力等指标效能综合为可用性、可信性、能力三个综合指标效能。而装备在研制过程中存在大量的风险因素, 导致装备效能受到影响。在估算装备效能时, 必须考虑到这些风险因素。根据上述理论, 航空装备综合效能指数可表述如下:

$$E = F_E \varepsilon_A \varepsilon_D (1 - P) \quad (2)$$

式中,

F_E 为装备的综合作战能力指数, 代表装备的固有能力;

P 为装备研制风险指数;

收稿日期: 2013-12-04; 录用日期: 2014-01-06

*通讯作者. Tel.: 15008432696 E-mail: jin.g989@163.com

引用格式: JIN Jing, CHANG Wenbin, HUANG Zhaodong. Development and production costs estimating for aviation equipment based on uncertainty design[J]. Aeronautical Science & Technology, 2014, 25(04): 28-32. 靳静, 常文兵, 黄兆东. 基于设计不确定性的航空装备研制与生产费用估算[J]. 航空科学技术, 2014, 25(04): 28-32.

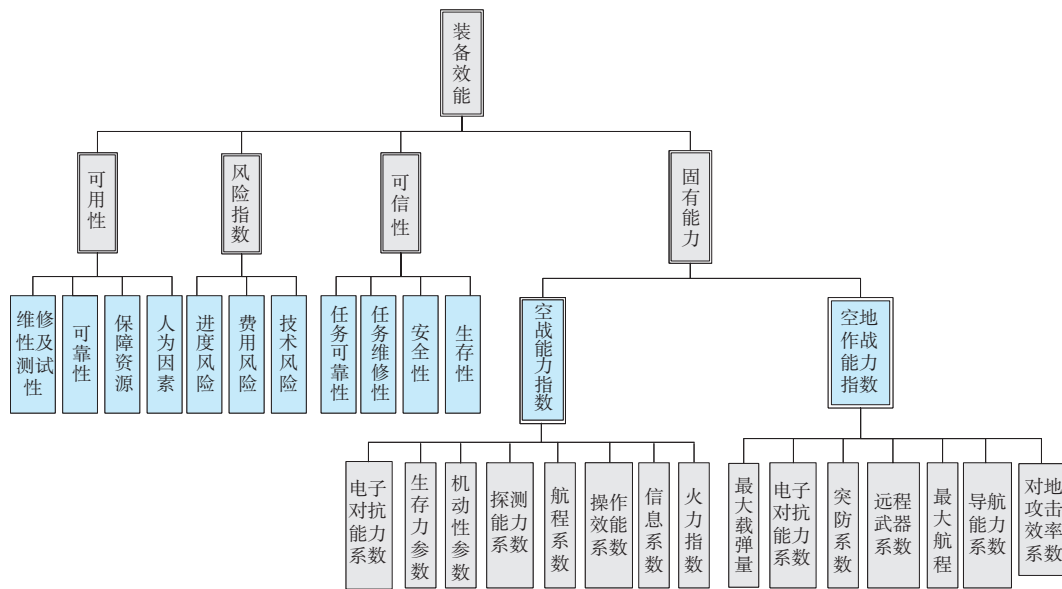


图1 航空装备效能指数结构

Fig.1 Efficiency index structure of aviation equipment

ε_A 为系统的可用性；

ε_D 为系统的可信性。

可建立如图1的航空装备效能指数结构：

具体装备作战能力指数计算公式可参考文献[5]。以下给出可用性、可信性及风险指数的计算。

(1) 可用性

由于装备使用可用度包含装备可靠性、装备维修性、装备测试性、保障资源等信息，因此，将使用可用度作为衡量装备可用性的指标。计算公式如下：

$$A_o = \frac{T_{BM}}{T_{BM} + T_D} \quad (3)$$

式中， T_{BM} 是平均维修间隔时间；

T_D 是平均不能工作时间。

(2) 可信性

装备可信性是指装备在任务开始时处于可用状态的情况下，在规定的任务剖面中的任一时刻，能够使用且能完成规定功能的能力。取决于任务可靠性和任务维修性。以任务可靠度为指标对其进行度量，即装备在规定的任务剖面内完成规定功能的概率。

(3) 风险指数

风险指数是估算军用飞机系统效能时不能不考虑的一个重要指标，风险指数是指设计方案抵御风险的能力，主要包含技术风险度、费用风险度和进度风险度三个方面的内容，具体计算公式见参考文献[6]。

本文给出风险指数的数学表述如下：

$$\begin{cases} P_r = P_{ra} P_{rc} P_{rt} \\ P_{ra} \leq P_{ra_0} \\ P_{rc} \leq P_{rc_0} \\ P_{rt} \leq P_{rt_0} \end{cases} \quad (4)$$

P_{ra_0} 、 P_{rc_0} 、 P_{rt_0} 分别表示技术、费用、进度风险的最大可接受值。

2.2 基于效能指数的估算模型

(1) 模型形式及求解方法

得到装备综合效能指数后，将综合效能指数作为装备研制与生产费用估算模型的一个变量。同时，参考DAPCA IV模型将最大飞行速度、飞机空重、产量作为其他主要变量，建立如下形式的费用模型：

$$C_{HC} = A W_e^\alpha V^\beta Q^\gamma E^\lambda \quad (5)$$

其中， C_{HC} 表示各项工时或者费用；

W_e 为飞机空重(kg)；

V 为最大飞行速度(km/h)；

Q 为产量；

E 为效能；

$A, \alpha, \beta, \gamma, \lambda$ 为回归系数。

采用对数线性关系式，利用多元回归方法求解各回归方程，并且对模型进行t检验、拟合优度(R^2)和F检验。

(2) 应用实例求解模型

收集某些型号的数据进行模型求解,由于收集的数据有限,在此建立的模型仅用于方法的说明。计算所用数据主要来自《世界飞机手册2011》和《国外航空统计数据》,以及专家经验和其他相关参考数据。按照前文所述效能的估算及模型的求解方法,应用多元回归分析得到如下的模型:

工程工时:

$$H_E = e^{3.08} W_e^{0.588} V^{0.962} Q^{0.236} E^{0.018} \tag{6}$$

工艺装备工时:

$$H_T = e^{10.25} W_e^{0.324} V^{0.039} Q^{0.4} E^{0.074} \tag{7}$$

制造工时:

$$H_M = e^{11.8} W_e^{0.063} V^{0.022} Q^{0.627} E^{0.432} \tag{8}$$

质量控制工时:

$$H_Q = \begin{cases} 0.076 H_M & \text{货运飞机} \\ 0.133 H_M & \text{其他飞机} \end{cases} \tag{9}$$

发展支援费用:

$$C_D = e^{9.32} W_e^{0.084} V^{1.13} E^{0.186} \tag{10}$$

飞行试验费用:

$$C_F = e^{4.31} W_e^{0.114} V^{1.39} FTA^{0.129} E^{1.004} \tag{11}$$

制造材料费用:

$$C_M = e^{9.032} W_e^{0.092} V^{0.559} Q^{1.031} E^{0.18} \tag{12}$$

发动机生产费用:

$$C_{Eng} = e^{-24249933.74} T_{max}^{73.52} M_{max}^{-175.69} t_{ti}^{13773.82} E^{-59284.02} \tag{13}$$

综合上述各项可得,计算单架飞机的研制与生产费用的数学模型为:

$$C_{RDT \& E \& P} = (H_E R_E + H_T R_T + H_M R_M + H_Q R_Q + C_D + C_M + C_F + C_{Eng} N_{Eng} + C_{av}) / Q \tag{14}$$

上面各式中,FTA为飞行试验机的架数;

N_{Eng} 为总产量乘以每架飞机的发动机台数;

T_{max} 为发动机最大推力;

M_{max} 为发动机最大Ma数;

t_{ti} 为涡轮进口温度(K);

C_{av} 为航空电子设备的费用,一般为飞机出厂成本的5%~25%。

R_E 、 R_T 、 R_M 、 R_Q 为综合费率,其具体取值可根据DAPCA IV模型中费率取值,利用通货膨胀率换算到当年经济年度。

模型的t检验值、 R^2 和F值如下:

t检验值:95.56,134.2,137.28,43.78;4.63,5.27,2.16,8.3;8.23,2.11,16.52,67.07;2.30,6.64,7.90;4.32,2.94,7.76,17.39;2.16,6.38,19.72,4.32,2.24,-1.34,1.25,-0.84。

可以看出,发动机生产费用的计算公式存在异常,且无

表1 检验值

Table 1 Test value

	H_E	H_T	H_M	C_D	C_F	C_M	C_{Eng}
R^2	0.998	0.989	0.999	0.962	0.952	0.999	0.879
F	1259.56	2155.88	4976.1	402.23	480.89	6640.35	81.38

法通过t检验。具体分析后发现,发动机的参数变量中, T_{max} 、 M_{max} 、 t_{ti} 等变量本身包含发动机的大部分性能信息,并且发动机一般都是通过单独研制与生产的,发动机的性能会影响装备的综合效能,但装备效能对发动机费用并不存在直接影响。因此,将效能指数作为发动机费用参数变量不太合理。经过试算,最终比较之后发现 DAPCA IV中估算发动机费用的线性参数模型仍然适用且效果比较好。具体计算公式如下:

$$C_{Eng} = 1.548 [0.095 T_{max} + 243.25 M_{max} + 0.54 t_{ti} - 2228] \tag{15}$$

从上式可以看到,发动机费用估算模型适合于直接采用线性关系式。

3 实例分析

由于航空装备设计存在不确定性,在估算其研制与生产费用时应该考虑不确定性,从而使估算结果与实际更符合。下面的案例中,结合装备设计的不确定,使用分布型区间数表示模型中的不确定变量,由于无论是效能模型中还是前面建立的研制与生产费用估算模型都涉及大量的不确定变量,且计算公式较多。如果采用解析法计算,不仅计算非常复杂,而且难度相当大。因此,可采用蒙特卡洛仿真方法进行计算。假设某型号的技术数据如表2所示。

表2和表3中很多数据并不是一个确定的值,而是在一

表2 主要技术数据

Table 2 The main technical data

参数	数值	参数	数值
飞机空重 W_e /kg	7070~8020	单价飞机每年飞行 小时数 T_{fx} /h	300~500
飞机最大飞行速度 v /Ma	约2.0	巡航时的推力 T /kN	64.9左右
飞机试飞机架数 FTA/架	2~6	维护工时 T_{wh} /h	15~20
飞机的发动机台数 N_{ENG}	1	最大允许过载	9
发动机最大推力 T_{max} /kN	106~108	最大稳定盘旋过载	3~4
发动机最大转速 M_{max} /(r/min)	10400~12000	导弹有效射程/km	7
涡轮进口温度/K	约1670	导弹最大过载/g	26~35

表 3 不确定性变量
Table 3 Uncertainty variables

不确定变量	最小值	最大值	分布形式
发动机最大推力 $T_{\max}$ /kN	122	129	均匀分布
飞机空重 W_e /kg	7070	8080	正态分布
导弹有效射程/km	50	60	三角分布 (最可能值=57.6)
飞机最大飞行速度 v /Ma	2.0	2.2	贝氏分布 ($\alpha=3, \beta=5$)

个区间范围内或者是模糊数值。由于篇幅原因,这里只是列出了一些主要数据,在装备研制与生产费用估算中,这类数据还大量存在。因此,在计算时首先要对数据进行处理,根据专家经验以及对相关历史数据的分析将其转化为分布型区间数形式。例如,通过使用水晶球软件进行蒙特卡洛仿真计算见图2。

从仿真结果可以看出,由于变量的不确定导致费用的不确定,计算得到的研制与生产费用是一个近似于正态分布

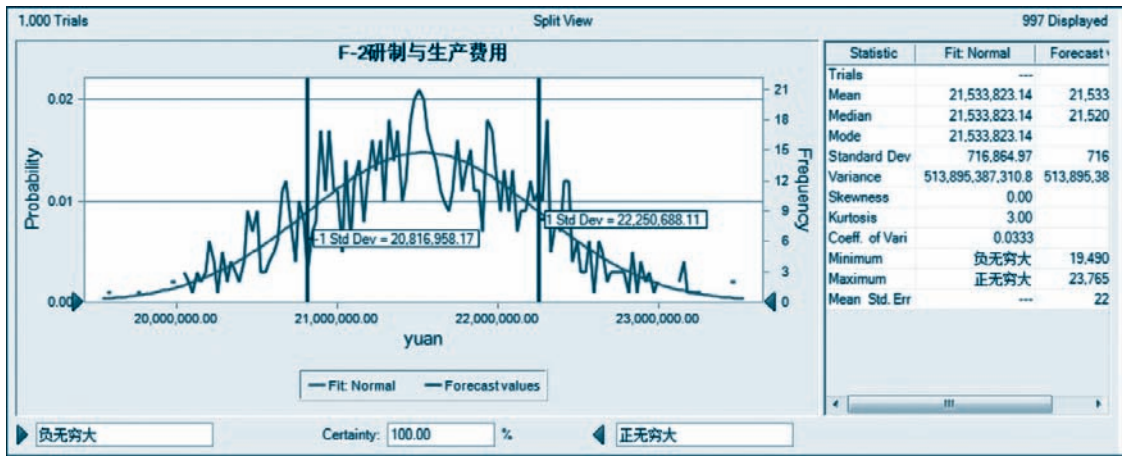


图2 研制与生产费用仿真结果
Fig.2 Simulation results of development and production cost

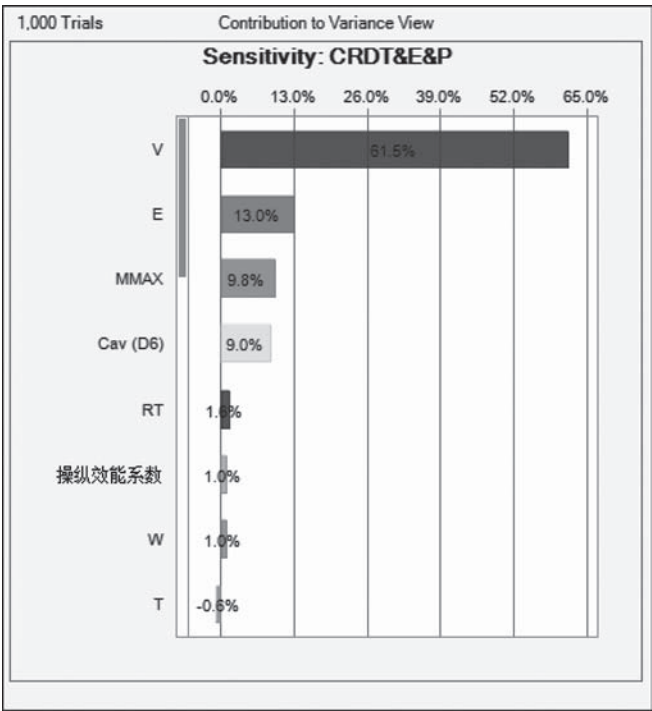


图3 参数灵敏度图
Fig. 3 Parameter sensitivity

的区间值,均值为2153万美元,标准差为71.6万美元,且通过了拟合优度的检验。图3是对研制与生产费用变量参数的灵敏度分析,可以看出,影响装备研制与生产费用较大的因素有最大飞行速度(V)、效能(E)、发动机最大Ma数(MMAX)以及航空电子设备的费用(Cav),其中最大飞行速度对飞机研制与生产费用的影响最为明显,并且也说明了飞机效能对飞机的研制与生产费用有较大影响。

4 结论

本文从航空装备设计不确定的工程实际出发,考虑航空装备效能对其研制与生产费用的影响,建立了基于效能指数的航空装备研制与生产费用估算模型,并在此基础上结合区间数方法,提出设计不确定条件下研制与生产费用估算方法,为研究航空装备的费用估算进行了有益地探索。结果表明,引入效能指数估算装备研制与生产费用是有意义的。但由于效能指数评估方法存在多样性和灵活性,因此在实际应用中,应该遵循采用同一种效能指数评估方法对研制与生产费用进行估算。

参考文献

- [1] 张金春,高炳欣,姜晨. 关于武器装备研制生产费用的研究[J]. 飞航导弹.2001(11):33-36.
ZHANG Jinchun, GAO Bingxin, JIANG Chen. Research on the development and production cost of weapon equipment [J]. Winged Missiles Journal. 2001(11):33-36. (in Chinese)
- [2] 刘健. 航天型号寿命周期费用估算及报价系统研究与实现[D]. 长沙:国防科学技术大学. 2004.
LIU Jian. Research and implementation of life cycle cost estimation and quotation system for aerospace[D]. Changsha: National University of Defence Technology. 2004. (in Chinese)
- [3] Federal Highway Administration. Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design: In Search of Better Investment Decision[Z]. U.S.: Federal Highway Administration, 1997.
- [4] U.S. Department of Energy. DOE G 430.1-1, Cost Estimating

- Guide[S]. U.S.: U.S. Department of Energy, 1997.
- [5] 张恒喜,朱家元,郭基联等. 军用飞机型号发展工程导论[M]. 北京:国防工业出版社, 2004.
ZHANG Hengxi, ZHU Jiayuan, GUO Jilian, et al. Introduction of military aircraft development project[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [6] 孙康文,黄俊. 面向可承受性的飞机总体方案评估方法[J]. 飞机设计, 2007, 4(2): 15-20.
SUN Kangwen, HUANG Jun. Evaluation method of aircraft general scheme oriented affordability[J]. Aircraft design, 2007, 4(2): 15-20. (in Chinese)

作者简介

靳静(1989—)女,硕士。主要研究方向:装备经济可承受性。
Tel: 15008432696 E-mail: jin.g989@163.com

Development and Production Costs Estimating For Aviation Equipment Based on Uncertainty Design

JIN Jing^{1,2,*}, CHANG Wenbin², HUANG Zhaodong³

1 AVIC Chengdu CAIC Electronics Co.Ltd, Chengdu 610000, China

2 School of Reliability and Systems Engineering, Beihang University, Beijing 100037, China

3 The Ministry of Finance and Economics Research, AVIC Development Research Center, Beijing 100029, China

Abstract: In the early equipment development, because of unclear needs, lots of unknown factors and uncertainty in design, equipment design exists uncertainty problem. In view of uncertainty, taking equipment effectiveness index as a new variable and a impact factor, using mathematical theories such as Monte Carlo Simulation and interval number, an evaluation model of development and production cost for aviation equipment was established under the condition of uncertainty design.

Key Words: uncertainty; effectiveness index; aviation equipment; cost

Received: 2013-12-04; Accepted: 2014-01-06

* Corresponding author. Tel.: 15008432696 E-mail: jin.g989@163.com