

# 无人作战飞机目标价格参数化估算方法初探

## Parameter Method of Target Price Estimating of Unmanned Combat Aircraft

张海涛 / 中国航空工业发展研究中心

**摘要:** 通过收集整理国外10余种大型无人侦察机和察打一体无人机的技术数据和成本数据,建立了无人机平台机体、雷达系统、光电/红外传感器和地面控制站的目标价格估算模型,并以X-47B作为算例,验证了该模型用于估算无人作战飞机系统目标价格的适用性。

**关键词:** 无人作战飞机; 目标价格; 估算

**Keywords:** unmanned combat aircraft; target price; estimating

### 0 引言

进入21世纪,世界航空强国竞相发展无人作战飞机。无人作战飞机也被称为取代有人作战飞机的第六代战斗机。如何依据军方订货部门的订货计划和经费、确定的战技指标及研制技术方案等信息,在立项论证阶段确定目标价格,成为目前军品定价的重要问题。而在项目初期进行目标价格估算时,有关设计信息不多,只知道有关飞机的总体性能参数,这时费用估算适合使用参数模型,选取重要的战术技术参数,可以快速估算出型号批产阶段的采购价格。

目前,国内学者和研究机构在估算无人机成本时,大多采用有人机模型,并考虑无人机在系统构成、结构安全性、过载限制等方面的特殊性,修正出基本适用于无人机目标价格估算的模型。而无人作战飞机处于研制阶段,无法得到采购成本的数据,且没有样本点可用于建模。所以,本文系统地收集了国外10余种大型无人侦察机和察打一体无人机的技术数据和成本数据,建立了无人机平台

机体、雷达系统、光电/红外传感器和地面控制站的采购价格估算模型,并用X-47B作为算例,验证了该模型用于估算无人作战飞机系统目标价格的适用性。

### 1 无人机系统目标价格估算模型的建立

#### 1.1 样本点的产生

世界上处于批产阶段的无人机型

号较多,但大多为小型或微型无人机,对建立适合于估算无人作战飞机这种大型无人机系统的成本估算模型并没有太大的借鉴意义。本文系统收集了国外10余种无人机系统的平台机体、任务设备和地面控制站的采购成本数据(用采购成本可以推算出目标价格),建立了无人机平台机体、任务载荷和地面控制站的采购成本估算模型,样本点包含

表1 无人机成本数据库

平台	承包商成本报告	成本数据	合同	项目文件	成本研究报告	公开文献
Dragon Eye“龙眼”						×
Fire Scout“火力侦察兵”	×	×	×	×		×
Global Hawk“全球鹰”A/B	×	×	×	×	×	×
Hunter“猎人”	×	×	×	×		×
Outrider“先驱者”						×
Pioneer“先锋”		×	×			×
Predator“捕食者”A/B/C	×	×	×	×	×	×
Pointer“指针”						×
Shadow“影子”200	×	×	×	×		×
Desert Hawk“沙漠鹰”						×
Eagle Eye“鹰眼”	×	×	×	×		×
SkyEye“天眼”						×
Gnat“蚱蜢”	×	×	×	×		×

“全球鹰”、“捕食者”、“火力侦察兵”、“猎人”等大中型无人机型号(表1)。

## 1.2 建模方法

由于国外大型无人机系统的型号较少,因此可用于建模的样本十分有限,且样本的技术经济数据不全。这不仅影响了模型的精确性,也影响了模型的可用性。

为了解决以上问题,目前在参数化建模时可以采用除传统线性回归以外的一些方法,如偏最小二乘回归、岭回归、主成分回归等。一些新近发展的理论方法,如灰色系统理论方法、支持向量基方法、神经网络方法等,也可以获得更好的效果。

本文对目前可用于估算建模的方法进行了比较,在考虑方法的成熟性、模型的有效性前提下,选用偏最小二乘法建立大型无人机系统采购成本估算模型。偏最小二乘回归是一种新型的多元统计分析方法,近十几年来,它的理论、方法和应用都得到了迅速地发展,能较好地处理基于传统最小二乘回归方法难以解决的问题,主要特点如下。

1)能够在自变量存在严重多重相关性的条件下进行回归建模;

2)可以比最小二乘回归更简捷地进行自变量的筛选,偏最小二乘回归方法丰富的辅助分析技术可以在建模的同时实现对自变量的筛选;

3)通过主成分分析和综合变量的提取,允许在样本个数少于自变量个数的条件下进行回归建模,这是普通多元回归无法解决的问题;

4)允许在最终模型中包含原有全部自变量,最大限度地利用数据信息。

## 1.3 估算模型的建立

依据偏最小二乘回归方法的建模原理和建模步骤,选择重要的技术性能

参数,建立了基于性能与重量的无人机平台机体、任务设备(光电/红外传感器+雷达)和地面控制站的采购成本估算模型:

$$AV_1 = a_1 \times (MGTOW)^{a_2} \times e^{a_3(Prod1/0)} \quad (1)$$

$$AV \text{ Prod} = AV_1 \times X^{\ln(b)/\ln 2} \quad (2)$$

$$EO/IR = p_1 \times (\text{Avg. Resolution})^{p_2} \times e^{p_3} \times e^{p_4(\text{FF\_Year}-1900)} \quad (3)$$

$$\text{Radars} = k_1 \times (\text{Aper})^{k_2} \times (\text{Ave Pwr Out})^{k_3} \times (\text{Freq})^{k_4} \times e^{k_5(Prod1/0)} \times (\text{Qty})^{k_6} \quad (4)$$

$$GCS = o_1 \times (\text{Range})^{o_2} e^{o_3} \quad (5)$$

其中,AV1为首架飞机平台机体的单机成本(2003年万美元);MGTOW为平台机体最大起飞重量(kg);Prod1/0为批产飞机时取1,演示验证与型号研制时取0;AV Prod为平台机体平均采购成本(2003年万美元);X为平台批产数量(架);b为熟练曲线斜率;EO/IR为光电/红外传感器采购成本(2003年万美元);Avg. Resolution为传感器平均视场( $\text{cm}^2$ );FF\_Year为首飞年;Radars为雷达系统采购成本(2003年万美元);Aper为雷达天线截面积( $\text{cm}^2$ );Ave Pwr Out为最大输出功率(W);Freq为平均输出频率(GHz);Qty为批产数量;GCS为地面控制站采购成本(2003年万美元);Range为地面站最大作用距离(km); $a_n$ 、 $p_n$ 、 $k_n$ 、 $o_n$ ( $n=1, \dots, 6$ )为常系数。

## 2 参数化估算方法适用性研究

本文建立的模型是基于大中型无人侦察机作为样本点,选取关键的性能参数,建立的成本-性能-重量估算关系式。而无人作战飞机采用飞翼布局,隐身性要求更高,平台机体的成本会有较大变化。任务设备除武器系统之外,采用的雷达系统,光电侦察相机与红外行扫仪与无人侦察

机没有太大区别。动力系统、机械电气系统、飞机管理系统和链路机载数据终端等更是没有本质上的差别。因此,只需对建立的平台机体成本估算模型进行一定的调整,即可进行无人作战飞机的适用性研究。估算的结果为3115万美元。而预测国际给出的数据为3000万美元左右,估算误差仅为3.8%,证明该模型完全可以用于估算无人作战飞机采购成本(目标价格),具体估算过程如下。

1)平台机体单机成本(2168万美元)

X-47B采用飞翼布局,机长11.65m,翼展18.94m(机翼折叠时为9.42m),空重9300kg,最大起飞重量20215kg,最大平飞速度852km/h。

无人作战飞机平台机体单机成本估算关系式为:

$$AV = k_1 \times (MGTOW)^{k_2} \times e^{k_3(Prod1/0)} \times X^{\ln(b)/\ln 2} \times A_{TF} \times C_{AMC} \times C_{LO}$$

其中,MGTOW取20215kg;Prod1/0取1;X取100架;b取0.95;ATF为先进技术(隐身设计、推力矢量等)修正因子,取1.3;CAMC为先进材料修正因子,取1.1;CLO为隐身材料修正因子,取1.3。

另外,根据美国海军费用分析中心(NCCA)发布的飞机采购价格浮动率,由模型计算出X-47B平台机体的单机成本为2168万美元(2011年美元币值)。而预测国际公司给出的数据为2000万美元左右,模型估算误差为8.4%,完全可以接受。

2)发动机采购成本(475万美元)

X-47B装1台F100-PW-220U无加力涡扇发动机,重1481kg,推重比7.28,持续推力63.9kN,涡轮前温度1399℃。根据预测国际公司的航空发动机研究报告所给出的数据,

F100-PW-220U的单台采购成本为340万美元,去掉加力系统,若不考虑其他改进措施对成本的影响,加力系统按整机成本的10%计,则X-47B配装的无加力F100-PW-220U的单台价格为306万美元。根据国外经验,发动机本体占整个动力装置系统和燃油系统价格的80%,则X-47B发动机系统(动力装置系统+燃油系统)的单机价格为383万美元。按照兰德公司飞机成本估算模型DAPCA-Ⅲ中的假设,对于生产型飞机,发动机备份系数取25%,则X-47B的单机发动机采购价格为479万美元(2011年美元币值)。

3) 任务载荷采购成本(474万美元)

X-47B将集成具有合成孔径/地面移动目标指示等工作方式的有源相控阵雷达、AN/ALR-69电子支援设备和光电/红外传感器。机腹设有2个内埋弹舱,目前预定的主要武器为2枚907kg级的JDAM GBU-31制导炸弹。

4) 雷达(196万美元)

X-47B采用的有源相控阵雷达型号目前仍不得而知,本文参考MQ-9“收割者”无人机系统采用的AN/APY-8“山猫”合成孔径/地面移动目标指示雷达的相关技术数据,采用雷达成本估算模型对X-47B的雷达系统的单机成本进行估算。

AN/APY-8雷达主要用于MQ-9“收割者”无人机、MQ-1“捕食者”无人机、C-12系列、U-21系列和UH-60“黑鹰”直升机上,重52kg,雷达天线罩半径为48.26cm(19in),最高输出功率为320W,平均输出频率为16.7GHz。

雷达单机成本估算关系式为:

$$\text{Radars} = k_1 \times (\text{Aper})^{k_2} \times (\text{Ave Pwr Out})^{k_3} \times (\text{Freq})^{k_4} \times e^{k_5(\text{Prod1/0})} \times (\text{Qty})^{k_6}$$

其中, Aperi取2329cm<sup>2</sup>; Ave Pwr Out取320W; Freq取16.7GHz; Prod1/0取1; Qty取100。根据NCCA发布的飞机采购价格浮动率,由模型计算出X-47B有源相控阵雷达的单机成本为196万美元(2011年美元币值)。而预测国际公司给出的数据为120~200万美元之间,模型估算的结果在此范围内。

5) 光电/红外传感器(172万美元)

X-47B采用的光电/红外传感器的型号目前仍不得而知,本文参考MQ-9“收割者”无人机系统采用的AN/DAS-1 MTS-B光电/红外侦察设备的相关技术数据,采用DASA-CE模型对X-47B的光电/红外传感器的单机成本进行估算。

MTS-B光电/红外侦察设备主要用于MQ-9“收割者”无人机,重104kg,平均视场 $3.3 \times 10^{-3}$ mrad。

光电/红外传感器的单机成本估算关系式为:

$$\text{EO/IR} = k_1 \times (\text{Avg. Resolution})^{k_2} \times e^{k_3} \times e^{k_4(\text{FF\_Year}-1900)}$$

其中, Avg. Resolution取 $3.3 \times 10^{-3}$ mrad; FF\_Year取2011年;根据NCCA发布的飞机采购价格浮动率,由模型计算出X-47B光电/红外传感器的单机成本为172万美元(2011年美元币值)。而预测国际公司给出的数据为160万美元之间,模型估算的误差为7.5%,完全可以接受。

6) 其他任务载荷成本(100万美元)

预测国际关于机载电子设备与武器系统的研究报告指出,AN/ALR-69的单套价格为100万美元。另外,X-47B为预程式自主飞行模式,没有地面控制系统与设备。

### 3 结束语

本文选取国外10余种大中型无人机平台机体、雷达、侦察设备和地面站的采购成本数据,结合重要的战术技术参数,建立了适合于无人机系统目标价格估算的参数模型,并以美国X-47B无人作战飞机为算例,分析了该模型在估算无人作战飞机采购成本(目标价格)上的适用性。同时,该模型已经用于国内某型无人机的目标价格估算工作中,在考虑中美航空制造业上的差距的基础上,得到了基本满意的初步结果。但由于资料所限,机械电气系统、飞机管理系统和链路机载数据终端等系统的成本数据不全,没有建立适合于无人机系统的估算模型,目前只能按照经验比例进行折算。如何估算无人机系统的机载成品采购成本,建立适合的模型,将是今后研究工作中的重点问题。

AST

### 参考文献

- [1] 飞机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2011.
- [2] 飞机设计手册编委会. 飞机设计手册(22): 技术经济设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [3] 陆凯. 无人战斗机系统及其全寿命周期费用研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2002.

### 作者简介

张海涛, 工程师, 主要从事军用飞机与无人机系统全寿命周期费用研究。