

Research on the construction methods of cost estimation models for standalone aerospace products

Jiahui Yu Yongxin Cheng Sihai Hu Yongsheng Song Hao Ren

China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076

Abstract

As competitive procurement of aerospace equipment advances, effective cost estimation is crucial for limit-price design and cost control, playing a vital role in equipment design and mission implementation. This paper investigates the methodology for establishing cost estimation models for single-unit aerospace products based on small sample sizes, analyzing and elaborating on the selection of cost drivers, the basic form of the model, and its construction. Following the approach for model establishment, we introduce the process of constructing cost models for different types of single-unit products, providing new insights for modeling costs of single-unit aerospace products with small sample sizes.

Keywords

Aerospace single-unit products, cost model, parametric method

航天单机产品成本测算模型构建方法研究

于佳暉 程永欣 胡四海 宋永生 任浩

中国运载火箭技术研究院, 中国·北京 100076

摘要

随着航天装备竞争性采购深入推进,有效的成本估算是开展限价设计、成本控制的重要基础,对于装备设计及任务实施至关重要。针对航天单机产品类型及成本构成的特点,本文研究了基于小样本量的航天单机产品成本测算模型建立方法,对单机产品成本动因选择、模型基本形式分析、模型构建进行了分析和阐述。根据成本测算模型建立思路,介绍了不同类型产品单机成本模型的构建过程,为小样本量航天单机产品成本建模提供新的思路。

关键词

航天单机产品、成本模型、参数法

1 背景

随着国家航天装备竞争采购政策的深入推进,装备价格政策相继出台并发生了重大变化,呈现出严格、细化、多变的特点^[1]。目前订购目标价格论证、过程成本监控等,缺少有效共识手段,亟需推进航天装备成本价格测算模型建立,指导航天装备价格全流程管理和管控^[2]。

我国航天装备在立项论证阶段对于目标价格的确定仍停留在类比、成本累加阶段,缺少更为先进的、快速的参数测算方法。成本模型通过构建技术指标与成本数据的映射关系,真实客观的测算技术指标对成本的影响,一定程度上消除主观因素影响,为成本估算提供科学高效方法。另一方面,国内尚没有成熟可实用的成本测算模型。美国商业化 PRICE 成本估算软件被美国 NASA、空军、海军、波音公

司等广泛用于军品的成本估算^[3]。但由于 PRICE 软件采用美国基础数据库,且软件计算为黑盒,无具体计算方法,模型应用与验证存在较大难度。

因此需建立适用于国内航天单机产品成本测算模型,提高目标成本论证过程效率,保证目标成本测算科学性。

2 成本模型构建方法研究

常见的成本建模方法主要包括类比法、工程法以及参数法等^[4]。

类比法主要是新研产品与现有产品类似时,可利用历史数据和现行实际数据,考虑功能及性能参数差异,对成本费用加以适当修正。类比法可使用参数较少,测算准确度偏低,且难以量化创新型号的成本。通常适用于对已有产品的改进费用估算和对继承性较大航天产品进行费用估算。由于技术与能力随时间不断演变,类比法应包括调整系数,体现以往装备与新装备之间的差异,根据数据分析尽可能客观地进行调整,可能要进行加法或减法式调整,在其他情况,可能要采用比例因子说明尺寸、性能、技术和复杂性方面的

【作者简介】于佳暉(1993-),女,中国山西五台人,硕士,工程师,从事成本价格管理研究。

差异。

工程法主要基于某种确定的技术状态，将航天产品分解为更小的工作单位，然后对每个工作单元的重复性劳动的工时和材料等估算其费用，自下而上累加得出产品总费用估算值。这种方法要求费用的分析和估算人员对产品的研制生产过程具有一定的了解，且分解越细工作量越大^[5]。

参数法主要是根据历史型号数据，成本驱动因素数据作为变量建立成本估算关系式，定量计算并预测新产品成本。参数法测算优势为在缺乏具体设计方案、工艺方案以及供应商信息时，参数法测算成本可以加快成本测算进度。但在模型的选择、基础数据的准确性等方面要求较高。

综合考虑各类建模方法的优缺点，本文选择参数法建立成本测算模型，为目标成本论证提供工具。通过技术指标与成本数据，拟合构建特定的函数关系，建立成本模型。

3 基于小样本量航天单机产品成本模型构建方法

本文提出了一种基于小样本量的航天装备单机产品成本模型构建方法，建立航天装备产品成本与技术指标的成本估算关系式。以下将对模型的成本动因分析、数据收集及相关性分析、基本形式、模型构建过程和校验应用方式进行具体阐述。

3.1 确定成本动因

基于产品技术方案中技术指标分析成本动因，通过专家打分法初步筛选影响装备的技术指标。影响成本的技术指标筛选原则：一是在设计和研制初期确定的参数，优先选择总体设计方案中相关技术指标。二是对产品成本的影响较大的技术指标。三是技术指标具有实际的物理或工程意义，可计量为确定的数值，无经验系数。

3.2 数据收集及相关性分析

成本建模源数据的准确性是成本模型精确测算的根本前提。收集总结航天单机产品的技术指标与成本价格数据，通过数据清洗及处理形成规范化成本数据，形成技术指标-成本价格综合数据。

针对技术指标多于样本数量的情况，为构建成本模型，需对技术指标进行降维处理，进行指标间以及指标与成本间的相关性分析，计算相关性因子。

相关性因子 $r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$ ，其中， \bar{X} 、 \bar{Y} 分别表示 X、Y 的平均值。

选择影响成本主要的技术指标（指标与成本的相关性因子大），删除非相关技术指标或冗余技术指标，避免建模时出现过拟合现象。若指标间存在相关性，则通过合并技术指标将其转换为综合指标（与其他指标无相关性）。

3.3 模型基本形式分析

参数法建立模型时，需建立特定的函数关系，表征成

本与技术参数的映射关系。根据单机产品类型及产品成本构成，形成了成本模型估算公式构建方法。

计算技术指标与成本之间的相关性因子，若某一指标对成本的相关性因子特别高（大于 0.9），且其他指标与成本的相关性因子较小，则判断为存在主指标影响因子类型。建立模型时可建立基于主指标影响因子的模型形式。

$$\text{线性 } C = (\sum_1^i a_i * X_i + b) * X_1 + c$$

$$\text{非线性 } C = a * X_1^{\sum_2^i b_i * X_i + c}$$

其中 C 为测算成本，Xi 为技术指标参数，a、b、c 为拟合系数。

若存在多个指标对成本的相关性因子均较高，且指标之间独立不存在共线性，则判断为多指标影响因子类型。建模时可建立多个指标影响因子的模型形式。

$$\text{线性 } C = \sum_1^i a_i * X_i + b$$

$$\text{非线性 } C = \prod_1^i a_i * X_i^{b_i}$$

其中 C 为测算成本，Xi 为技术指标参数，a、b 为拟合系数。

3.4 模型构建

参数法建模拟合方法通常有多元回归、偏最小二乘法、高斯回归、神经网络、遗传算法等理论方法。其中高斯回归、神经网络等方法预测过程为黑盒或需要大量训练数据^[6]，由于航天单机产品数据为小样本量数据，且显性的函数关系式更利于沟通交流，经数据验证，模型构建时选择使用偏最小二乘法拟合的理论方法。

偏最小二乘回归方法基于类似主成分回归的方式克服自变量的共线性问题，不仅吸取了主成分回归中解释变量提取信息的思路，同时还注意了主成分回归中所忽略的自变量对因变量的解释问题^[7]。因此适于多因变量对多自变量的回归建模以及处理观察值数量少和自变量多重自相关等情况，并允许在最终模型中包含原有全部自变量，最大限度的利用数据信息。

设有 q 个因变量 y_1, \dots, y_q 和 p 个自变量 x_1, \dots, x_p 。偏最小二乘回归分别在自变量 $X=(x_1, \dots, x_p)$ 与因变量 $Y=(y_1, \dots, y_q)$ 中提取主成分 t_1 和 u_1 (t_1 是 X 的线性组合， u_1 是 Y 的线性组合)，并要求 t_1 和 u_1 尽可能多地携带原变量的变异信息，同时 t_1 和 u_1 的相关程度达到最大。

第一个成分被提取后，偏最小二乘回归分别实施 X 对 t_1 的回归以及 Y 对 t_1 的回归。如果回归方程已经达到满意的精度，则算法终止；否则，利用 X 被 t_1 解释后的残余信息以及 Y 被 t_1 解释后的残余信息进行第二轮的成分提取。如此往复，直到能达到一个较满意的精度为止。若最终对 X 共提取了 m 个成分 t_1, \dots, t_m ，偏最小二乘回归将通过 y_k 对 t_1, \dots, t_m 的回归，进而表达成 y_k 关于原自变量 x_1, \dots, x_p 的回归方程。

4 案例应用

4.1 结构类单机产品成本模型

结构类单机（如金属结构、非金属耐热结构等）成本主要影响因素有重量、材料、结构特征等因素，其中以重量及材料为主要技术指标影响因子，拟合不同材料的基于重量的成本模型。

以铸铝金属舱段为例，介绍结构类单机产品的成本模型构建过程。铸铝金属结构舱段首先分析了尺寸、材料、窗口数量、支架数量、结构形式、表面处理、热处理、涂层、验收试验等技术指标为主要成本动因。其次统计了二十余个铸铝金属舱段技术指标与成本数据。根据技术指标与成本数据，计算相关性因子，发现重量对于成本的影响最敏感，相关性达到 0.97。其中窗口数量和支架数量对成本影响较小。

表 1 金属结构舱段铸件技术指标、成本相关性分析

	重量	窗口数量	支架数量	表面处理	热处理	检测方式	成本
重量	1.000	-0.096	0.582	-0.213	-0.605	-0.334	0.97
窗口数量		1.000	0.071	-0.454	-0.423	-0.526	-0.11
支架数量			1.000	-0.277	-0.541	-0.354	0.22
表面处理				1.000	0.565	0.843	-0.44
热处理					1.000	0.671	-0.55
检测方式						1.000	-0.39
成本							1.00

使用参数法建立成本模型，由于重量与成本具有强相关性，其他技术指标作为复杂度因子建立成本公式。模型采用幂函数形式，具体如下：

$$C=M^{hi}$$

其中， hi 代表金属舱段铸件综合复杂度， M 为舱段重量。通过偏最小二乘回归方法拟合得到舱段测算成本公式。

$$C=M^{(a+b*热处理+c*阳极化等效面积+d*检测验收)}$$

其中，热处理及检测验收为分类函数，具有热处理为 1，不具有热处理为 0。具有检测验收为 1，不具有检测验收为 0。

阳极化等效面积为舱段包络尺寸的表面积。其中 a 、 b 、 c 、 d 为拟合值，通过拟合得到。

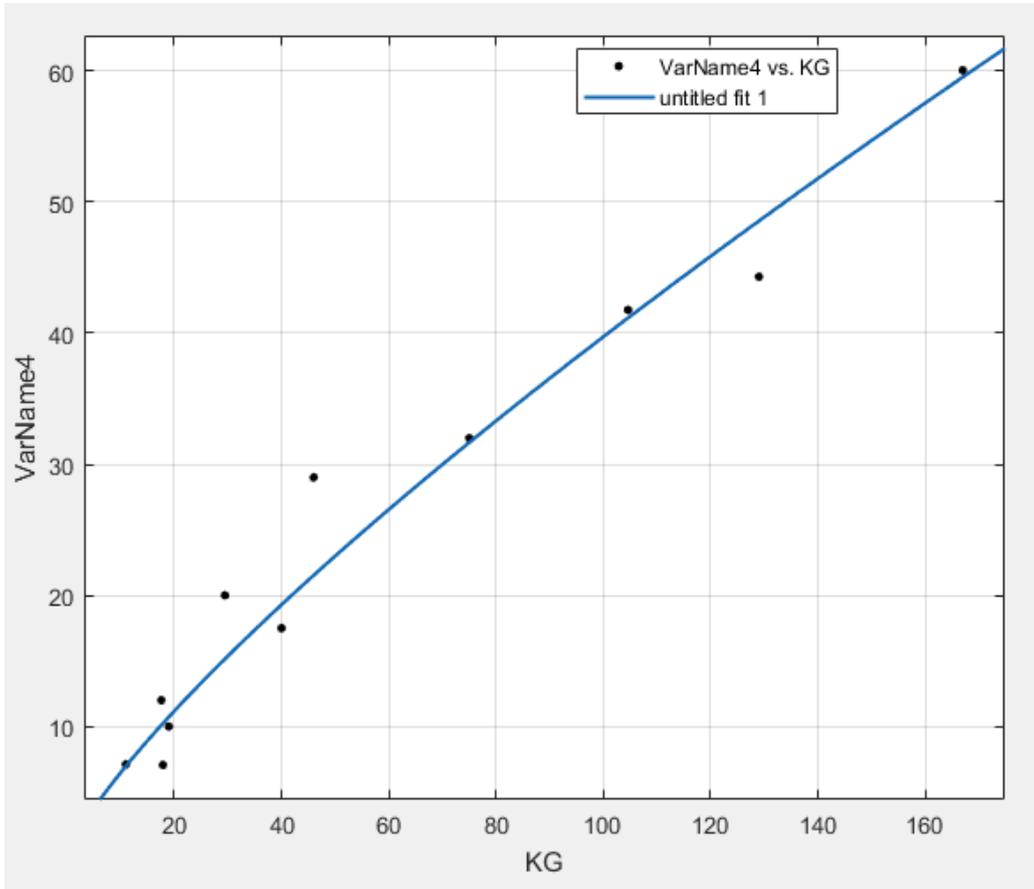


图 1 金属结构舱段模型拟合结果

使用三个舱段校验计算结果，模型建立时未使用相关数据，如表2所示，测算误差均在±10%以内。

表2 金属结构舱段模型计算结果

单机产品	测算误差 = (测算成本 - 实际成本) / 实际成本
样例1 金属壳体组件	-4.79%
样例2 金属壳体组件	5.76%
样例3 金属壳体组件	-4.15%

4.2 机电类单机产品成本模型

机电类单机构成较为复杂，既有机械结构又具有电子设备，通常为非线性模型，故首先考虑拟合非线性模型。以舵机驱动器为例，介绍机电类单机产品成本模型构建过程。舵机驱动器成本动因主要有通道数量、设计余度、电压、最大电流等。

通过计算相关性因子，各参数与成本相关性均0.8~0.92之间，指标之间不存在共线性，使用多指标影响因子类型。电压及最大电流确定控制器的最大功率，建模时统一考虑两个参数。通道数量与设计冗余与元器件数量相关。

模型采用非线性函数形式，使用最小二乘法拟合公式

$$C = a * (V * I / 1000)^b * (T + R)^c$$

其中C为舵机驱动器成本，V为舵机驱动器电压，I为舵机驱动器最大电流，T为舵机驱动器通道数量，R为设计冗余。a, b, c, d为拟合值。

选择未参与建模的某舵机驱动器验证模型，测算结果如表3所示，成本模型计算结果与实际成本测算误差在±15%以内。

表3 舵机驱动器成本测算误差

类型	机构类型	测算误差 S = (C2 - C1) / C1
样例1 舵机驱动器	机电	9.37%
样例2 舵机驱动器	机电	-13.20%

5 结论

本文提出了航天单机产品的成本测算模型建立方法，详细阐述了小样本量的不同类型航天单机产品成本模型的构建过程，为在其他航天产品的成本模型构建提供方法。除文中介绍的单机产品，还开发了多种产品的成本模型。后续工作中，将进一步建立各类航天产品成本模型，并开发一套信息化系统和数据库，实现线上便捷、可信的应用成本模型开展成本测算。

参考文献

- [1] 杨林超,谢宜,魏法杰,鲁萍. 激励约束机制下的装备采购定价研究[J]. 航空财会,2021,(5).
- [2] 魏法杰,鲁萍,杨林超. 基于材料费的军品定价成本模型研究[J]. 航空财会,2020,(5).
- [3] 杨志翔,于亮,张涛,凌铭博,王易南. 基于PRICE软件的装备目标价格定价方法研究[J]. 航天工业管理,2017,(6).
- [4] 于芹章,张福元,艾克武,陈庆华. 武器装备全寿命费用估算建模有关问题研究[J]. 装备指挥技术学院学报,2003,(4).
- [5] 彭亮,岳冬梅. 舰船装备全寿命周期费用估算方法研究[J]. 舰船电子工程,2013,(5).
- [6] 江洋溢,孟科,张恒喜,徐鑫. 基于粗糙集与BP神经网络的多因素预测模型[J]. 计算机工程,2007,(5).
- [7] 刘芳,张海涛. 小样本理论在航空发动机研制费估算中的应用[J]. 北京航空航天大学学报,2014,(11).