

航空发动机研制费估算工作的现状与展望

刘锦¹, 张海涛²

(1. 中国航空工业经济技术研究院, 北京 100000; 2. 中国航空工业发展研究中心, 北京 100012)

摘要: 针对在立项论证阶段对航空发动机项目经费进行快速并有效的估算的问题, 基于中国航空发动机的研制现状和型号数据的积累情况, 分析了发动机研制经费估算工作的重点与难点以及相应的解决途径, 并采用偏最小二乘法建立了航空发动机研制经费估算模型。计算结果表明: 该发动机模型精度较高, 已经应用于国产某型涡扇发动机的经费测算工作中, 并可用于中国未来航空发动机型号的研制经费估算。

关键词: 航空发动机; 研制经费; 估算方法; 偏最小二乘法

中图分类号: V21 **文献标识码:** A **doi:** 10.13477/j.cnki.aeroengine.2014.01.013

Status and Prospects of Aeroengine Development Cost Estimation

LIU Jin¹, ZHANG Hai-tao²

(1. China Aviation Industry Economic and Technical Institute, Beijing 100000;

2. China Aviation Industry Development Research Center, Beijing 100012)

Abstract: Aiming at estimating the project funds quickly and effectively in the demonstration phase, the emphasis, difficulty and solutions of aeroengine development cost estimation were analyzed based on the development status and the accumulated data. The engine development cost estimation model was established by the partial least squares. The calculation results show that the model has higher precision and has been used for a turbofan engine funds predication. It can be used for the development cost estimation of future aeroengine.

Key words: aeroengine; development cost; estimation method; partial least squares

0 引言

随着技术的发展、研制周期延长以及需求变化等, 航空发动机研制经费大幅增长, 对世界军民航空发动机的使用和发展产生了重要影响。美国 F404 的研制经费约为 7 亿美元, 法国 M88-II 的研制经费达到 16 亿美元, 而第 4 代发动机 F119 的研制经费达到了 26 亿美元, F135 的研制经费已经超过 75 亿美元^[1]。因此, 面对不断上涨的经费需求, 需要在型号研制早期设定项目经费基线时, 充分明确项目需求, 进行有效的研制经费估算。中国相关研究机构和学者对航空发动机的研制经费估算方法进行了大量研究工作, 取得了一些卓有成效的成果。其中, 在涉及参数法建模的研究中大多采用普通线性回归方法, 但这种方法

在一定程度上并不适合中国发动机型号少且技术经济数据不全的现状。

本文在相关研究成果的基础上^[2-7], 采用偏最小二乘法建立了适合小样本建模的航空发动机研制经费估算模型, 并已在某型重点型号的经费论证中取得了良好的效果。

1 航空发动机研制经费估算的几个难点

1.1 中国发动机型号少, 技术经济数据不全

中国军用发动机大多还是测绘、仿制或改进改型, 自行研制的发动机还未真正走完完全过程, 民用涡扇发动机仍属空白。这种差距的直接体现就是国产发动机所经历的研制型号比较少, 相关技术经济数据不够全面, 尤其是军用涡喷/涡扇发动机, 涡桨和涡轴

收稿日期: 2012-03-28

作者简介: 刘锦(1975), 男, 自然科学研究员, 中国航空工业经济技术研究院财务管理部部长, 从事航空行业财经研究和型号费用分析工作。

引用格式: 刘锦, 张海涛. 航空发动机研制费估算工作的现状与展望[J]. 航空发动机, 2014, 40(1): 75-78. LIU Jin, ZHANG Haitao. Status and prospects of aeroengine development cost estimation [J]. Aeroengine, 2014, 40(1): 75-78.

发动机的技术经济数据缺少积累。从总体数据来说,个别型号发动机的技术参数欠缺,只有10余个型号的研制经费、生产成本和价格数据;从详细数据的层面说,可以分解到8大项和单元体/部件/系统的费用数据就更少了。可用于建立研制经费估算模型的样本十分有限。这不仅影响了模型的精确性,也影响了模型的可用性。

1.2 传统的估算方法对样本量的需求大,且估算精度较低

目前,中国外用于航空发动机经费估算的方法主要有参数估算法、工程估算法、类比估算法和专家判断法等。在项目的不同阶段进行费用估算时,应该采取相应适宜的方法。在项目初期,系统设计存在着不确定性,已知信息比较少,而参数估算法仅选用少数对费用影响最大的因素做自变量,并且允许在系统管理和技术方面加入一些修正量,使用简便,且具有一定的可信度,是方案设计与论证阶段首选的费用估算方法^[9]。

国外对发动机研制经费的参数化估算研究,从最初的按质量估算或从类似系统的经验推断法等发展到回归分析法,并建立了不少参数模型。由于样本量大,数据比较充分完备,由此为统计分析和模型建立奠定了很好的基础。最初,中国学者对国外模型进行修正,并也运用了回归分析法,利用发动机数据建立了一些模型。但由于自行研制发动机的历史较短,而且变化影响因素多,样本点比较少,建模所需的数据不足,而且发动机样本点与国外模型样本点还具有一个非常重要的区别,中国发动机大都走的是改型或仿制途径,而国外模型的样本点几乎都是新研或重大改型。这一重要区别会导致技术指标与经济指标的关系存在显著不同。因此,传统的回归分析方法并不能完全适用于中国发动机研制经费估算模型的建立,应采用适用于样本数量比较少的回归分析方法,建立1种新型的、适用于中国型号特点的研制经费估算模型。

1.3 表征研制经费的技术参数很多,且相互之间存在多重共线性

在参数估算法中,多元回归分析是1种普遍应用的统计分析与预测技术。它是根据已经投入使用的多种型号发动机的实际费用消耗的统计数据,经回归分析而整理出来的1套计算公式。它对选择多元线性回归模型的自变量的基本要求是,模型中应包含所有对因变量有重要解释意义的因素,并且在用于反映这些

因素的自变量之间不存在密切的线性关系,即所谓的多重共线性是要避免的。然而,现代发动机研制是十分复杂的系统过程,表征发动机特征的设计参数很多,甚至达到10余个。这些参数之间不可避免地存在着严重的多重相关,即使经过变量筛选,通常也会留有6~9个与费用密切相关的变量,它们之间通常依然存在较为严重的多重相关性问题。这种变量多重共线性会严重影响参数估算的精度,扩大模型误差,并破坏模型的稳健性^[9]。

2 针对难点的解决办法

2.1 建立内容详实的技术经济数据库,为研制费估算建模做好数据准备

在数据库建立中,技术性能数据的收集难度相对较小,费用数据的收集难度比较大。中国发动机的管理体制几经变化,在原有体制下发动机的有关经费存在多头管理问题,要完全搞清发动机的全部历史数据几乎不可能。在计划经济时代以及经济转轨时期,发动机研制经费的数据也是不够准确。此外,发动机经济性的概念在国内近几年才引起人们的注意,技术经济数据的规范化管理工作还未引起有关单位的充分重视,各家单位归集费用的方式与格式也不够统一。另外,许多部门或设计制造单位将这些费用信息列为商业或军事机密,不愿意免费或不能公开。同时,发动机所经历的型号较少,而且大多为仿制或改型,相应的费用数据也较少或不全,而且在一定程度上并不具有代表性。由此给技术经济数据的收集工作造成了很大的困难。

目前,通过对国内现有的数据进行统一整理和汇总,形成了数据库。该数据均来自于集团公司年度科研经费报表的数据,从发动机研究所、生产厂家收集的数据,还有部分来自相关研究机构研究报告的数据。所有数据都经过多方面的查证核实,确认无误后才被录用,确保了原始数据准确可靠。目前数据库中包含32个中国发动机型号的技术参数、研制、生产成本、单台价格、经费构成、投资强度等数据。另外,还对国内外的相关研究成果进行系统分析,提炼出研制经费估算建模所能用到的数据。

2.2 研究适宜的建模方法,解决样本点少和自变量多重共线性的问题

根据中国航空发动机数据积累情况,目前可用于建立研制经费参数法模型的方法有主成分回归、岭回

归、偏最小二乘回归、神经网络、支持向量基、灰色系统理论等。其中,神经网络方法由于需要的样本量较大,虽然估算精度较高,但在解决研制经费估算问题上还是不合适;支持向量基方法比较先进的,需要样本量少、估算精度也比较高,但其技术还处于发展之中,存在很大的不确定性;灰色系统理论方法在技术上比较成熟,估算精度也较高,但其对样本量有一定要求;岭回归方法、主成分回归方法、偏最小二乘回归方法都属于成熟的技术方法,虽然估算精度不是最高,但其需要的样本量相对较少,工程上也比较适用。以美国的12种军用发动机型号为例,研究了采用岭回归方法、主成分回归方法和偏最小二乘回归方法等3种新方法在估算发动机研制经费上的适用性。结果表明:当侧重发动机研制经费预测效果时,首先使用偏最小二乘回归方法;侧重考察各项技术指标对研制费的影响程度和进行直观的控制时,首选岭回归方法;当对某些难于数量化的综合因素特别关心(比如制度方面),又需要将其拟合进回归方程时,可考虑选用主成分回归方法。综合考虑,应采用偏最小二乘法建立模型。

3 发动机研制经费估算模型的建立与算例分析

3.1 模型的建立

关于偏最小二乘法的建模理论、具体的计算过程和建模平台的选择相对比较成熟,另外发动机研制经费估算模型的结构以及影响费用的技术参数相对比较固化,本文不过多描述。

使用偏最小二乘法中自变量对因变量的投影重要性指标VIP,结合自变量与研制费以及自变量之间的相关关系计算,在上百次不同自变量组合的测算基础上,选取压气机总增压比、研制继承系数、军用耗油率、加力推力、设计空气流量、军用推力、原型机数量、完成时间、涡轮进口温度、翻修寿命、发动机推质比和发动机净重等12个指标作为说明性变量。

同时,从数据库中的32个型号的数据筛选出19个型号的技术数据和研制经费数据用于建模。同时,使用偏最小二乘法对19个样本进行分析,发现不存在特异点。最终建立了研制经费估算模型^[10]。

$\ln$ 研制费 = $a_0 + a_1 \times \ln$ 加力推力 + $a_2 \times \ln$ 军用推力 - $a_3 \times \ln$ 军用耗油率 + $a_4 \times \ln$ 空气流量 + $a_5 \times \ln$ 总增压比 + $a_6 \times \ln$ 涡轮进口温度 + $a_7 \times \ln$ 发动机净重 - $a_8 \times \ln$

翻修寿命 + $a_9 \times \ln$ 原型机数量 + $a_{10} \times \ln$ 完成时间 - $a_{11} \times \ln$ 继承系数 + $a_{12} \times \ln$ 发动机推质比

其中: $a_n(n=1,2,\cdots,12)$ 为常数。

模型的拟合曲线如图1所示,从图中可见,模型的拟合效果比较理想。



图1 研制经费观测值与拟合值的曲线

19个样本的估算误差如图2所示,从图中可见,模型对发动机研制经费的估算误差平均值为4.19%,除1个型号的误差较大以外,其他型号的误差都在10%以内,完全可以满足立项阶段和方案设计阶段的研制经费估算需求。

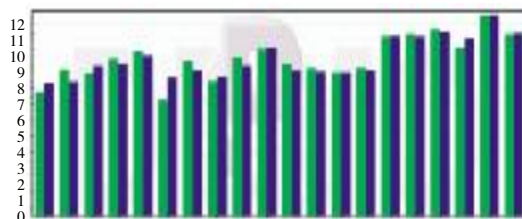


图2 研制经费实际值与估算值比较

3.2 算例分析

中国从20世纪70年代开始发动机研制经费的估算工作,也建立了一些参数法模型。由于发动机型号的数据是后来才不断补充和完善的,所以当时的数据库内容还不能完全反映先进发动机的情况,且先进的小样本建模方法还没有出现,所采用的都是最基本的最小二乘法回归方法,并不能很好地解决自变量多重共线性问题。经估算结果与其他模型的对比分析表明,新模型的估算误差在10%左右,可以满足型号研制初期经费估算要求,并可为先进涡喷/涡扇发动机项目立项和方案设计提供支持。同时,该模型通过了某新型涡扇发动机研制经费的估算,估算结果基本符合研制经费总需求的预期。

另外,基于技术经济数据库和估算模型研究的基础上,开发了信息量庞大的发动机技术经济分析软件,内容涵盖国外200多个型号和国内32个型号的技术经济数据以及典型的经费估算模型,可为发动机技术经济分析工作提供简便快捷的解决分析手段。

4 结束语

随着航空工业的跨越式发展,新型航空发动机会不断出现,其技术性能和费用结构可能会产生较大改变,因此随着时间的推移,建模所需的数据库还会不断得到充实,估算模型也会得到进一步的完善,这是参数法本身固有的特点,也是国际上多年来一直遵循不变的合理做法。

目前建立的模型仍只停留在军用涡喷/涡扇发动机的整机层次,还未建立1整套部件级、系统级的研制经费估算模型,需要在这方面开展进一步的工作。但是,这项工作需要大量的技术经济数据做支撑,需要改进和规范费用数据收集渠道和标准,需要积极开展费用估算技术的理论研究和经验交流。

另外,如何将参数化估算方法与工程实际紧密结合,是研究工作中的重点,使用基于工程化的参数估算PRICE软件将是今后发展的重要方向。目前,正在开展的PRICE软件在航空发动机领域的应用研究,以某大型涡扇发动机为研究对象,建立了详细的经费估算分解结构,已经取得了初步成效。今后还需做进一步的深化研究。

参考文献:

- [1] Michael S. Analysis of costs for the Joint Strike Fighter engine program[R]. New York:United States Government Accountability Office, 2007.
- [2] 胡军. 航空发动机研制成本分析研究报告[R]. 北京:中国航空工业发展研究中心, 2009.
HU Jun. Aeroengine development cost analysis report[R]. Beijing: China Aviation Industry Development Research Center, 2009.(in Chinese)
- [3] 李俊秀. 飞机、发动机经济数据库及费用预测系统 [R]. 北京:中国航空系统工程研究所, 1993.
LI Junxiu. Aircraft, engine database and cost forecasting system [R]. Beijing:China Aerospace Systems Engineering Research Institute, 1993.(in Chinese)
- [4] 经济性课题组. 发动机全寿命费用分析研究总结[R]. 西安:中国人民解放军空军工程学院, 1991.
Economic Research Group. Summary of aeroengine life cycle cost analysis [R]. Xi'an:Chinese People's Liberation Army Air Force Engineering College, 1991.(in Chinese)
- [5] 彭友梅. 航空发动机全寿命费用分析研究[R]. 北京:中国航空系统工程研究所, 1997.
PENG Youmei. Aeroengine life cycle cost analysis [R]. Beijing: China Aerospace Systems Engineering Research Institute, 1997.(in Chinese)
- [6] 李俊秀.航空发动机技术经济分析研究报告[R].北京:中国航空系统工程研究所, 1996.
LI Junxiu. Aeroengine technical and economic analysis report [R]. Beijing: China Aerospace Systems Engineering Research Institute, 1996.(in Chinese)
- [7] 李屹晖. 军用航空发动机全寿命费用分析研究[R]. 北京:北京航空航天大学, 2000.
LI Yihui. Military aeroengine life cycle cost analysis [R]. Beijing: Beihang University, 2000.(in Chinese)
- [8] Younossi O. Technology basics and cost-estimating methodology[R]. Santa Monica:RAND, 2002.
- [9] Nelson G. An approach to the life cycle analysis of aircraft turbine engines[R]. Santa Monica:RAND, 1979.
- [10] 张海涛,吴静敏. 航空发动机研制费估算方法研究[R]. 北京:中国航空工业发展研究中心, 2010.
ZHANG Haitao, WU Jingmin. Aeroengine development cost estimation method research [R]. Beijing: China Aviation Industry Development Research Center, 2010.(in Chinese)
- [11] Curry C. Engine life cycle cost modeling in the conceptual phase[R]. AIAA-75-1228.
- [12] Gibson J D S. Engine life cycle cost considerations during the validation phase[R]. AIAA-75-1289.
- [13] Sinigern W B. Engine life cycle cost[R]. AIAA-76-754.
- [14] Skira C A. Cost reduction of advanced turbine engines[R]. AIAA-95-3024.
- [15] Wanger W G. Apsicost-model and method for turbine engine design to life cycle cost[R]. AIAA-76-750.
- [16] 尹峰. 航空发动机研制费用测算方法分析[J]. 航空发动机, 2013, 39(3): 89-94.
YIN Feng. Calculation method of aeroengine development cost [J]. Aeroengine, 2013, 39(3): 89-94.

(上接第16页)

- heavy tip rubs using an implicit time marching method[R]. ASME 2011-GT-45495.
- [16] Sinha S K. Non-linear dynamic response of a rotating radial

Timoshenko beam with periodic pulse loading at the free-end [J]. International Journal of Nonlinear Mechanics, 2005, 40: 113-149.