

# 军用飞机仿制与改型研制费用的类比修正函数

郭基联, 钟 忠, 严盛文

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

**摘 要:**国产军用飞机有相当部分机型是通过仿制与改型研制的, 这样的样本不能直接用于新研型号研制费用的统计分析。为了弥补当前国产军用飞机研制费用建模样本的不足, 以国产4个机种17个机型的改型研制工作量和改型费用数据的统计为基础, 定义了修正类比函数, 构建了函数形式, 进而根据统计数据给出了函数的参数估计, 用于修正仿制与改型型号的研制费用。进一步利用偏最小二乘回归方法的数据分析工具对结果进行了验证。

**关键词:**军用飞机; 研制费用; 类比修正函数

**中图分类号:** V37; TP181      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-3516(2008)02-0010-04

在定量预测方法中, 数据是建立数学模型的基础, 缺少数据或数据异常, 将不能建立符合事物客观发展规律的模型, 因而也得不到正确的预测结论<sup>[1]</sup>。因此, 应对数据资料产生的背景进行分析, 鉴别其真实性和可靠性, 以便去伪存真, 必要时还需加以修正或复原。在国产军用飞机研制费用建模研究中就存在这样的问题。国产军用飞机经历了仿制(测绘)、改型(部分研制), 再到自行设计这样一个漫长的过程<sup>[2]</sup>。而迄今为止, 真正属于自行研制且已服役的机型很少。表1是国产主要歼击机性能与机体研制费用的统计结果<sup>[3]</sup>(已对数据进行了处理, 但不影响结果分析)。表1中:  $C$ 为机体研制费用;  $W$ 为机体空重;  $V$ 为最大平飞速度;  $H$ 为实用升限;  $R$ 为作战半径;  $L$ 为起飞滑跑距离;  $V_y$ 为爬升率;  $N_g$ 为最大过载;  $W_g$ 为外挂质量;  $T$ 为机体首翻期。这些参数体现了目前国产军用飞机最主要的性能特征。机体研制费用已换算成同一标准财年。

表1中真正属于自行研制的机型为  $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $J$ 、 $A$ 、 $C$  为仿制机型, 其余的机型中,  $B$  为  $A$  机型的改型 ( $B$  为教练机),  $D$  为  $C$  机型的改型,  $H$ 、 $I$  为  $G$  机型的改型。

表1 飞机性能与机体研制费用原始数据

Tab. 1 Original data about performance and airframe R&D cost of aircrafts

机型	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
$N_y$	5	7	7	7	6	7	10	9	9	14
$W/\text{kg}$	3 650	4 170	3 830	4 470	4 060	5 530	6 850	7 430	7 750	12 160
$V/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	1 450	1 320	2 180	2 260	2 180	1 240	2 340	2 340	2 340	1 880
$H/\text{m}$	17 500	16 000	17 500	18 000	17 300	16 500	20 800	20 200	19 100	15 200
$R/\text{km}$	400	400	400	420	400	400	750	800	900	850
$L/\text{m}$	515	750	900	800	800	700	680	640	529	780
$V_y/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	125	115	135	150	150	106	180	200	220	200
$N_g$	8.0	7.5	7.0	8.5	7.0	8.0	7.5	7.5	8.0	7
$W_g/\text{kg}$	1 500	1 000	1 500	1 500	1 500	1 500	2 000	2 500	2 500	3 500
$T/\text{h}$	600	800	800	1 000	1 000	800	1 000	1 200	1 200	1 500
$C$	736	2 287	1 428	4 892	6 487	4 877	17 138	11 546	16 439	63 674

偏最小二乘回归方法在样本容量小、自变量多、变量间存在严重相关关系问题的回归分析中具有独特的优势<sup>[4-5]</sup>。同时, 该方法还具有强大的数据分析能力。具体方法的介绍读者可参阅文献[6]、[7]。直接引用该方法的第一主成分散点图和特异样本椭圆图工具<sup>[8]</sup>分析样本数据的特异性。

以研制费用建模中常用的对数线性模型形式进行分析。表1中原始数据的第一主成分散点图如图1所

收稿日期: 2007-09-28

作者简介: 郭基联(1971-), 男, 浙江兰溪人, 副教授, 博士, 主要从事军用飞机效费分析等研究。

E-mail: guo\_jl71@yahoo.com.cn

示;图2为特异样本椭圆图。图1中  $t_1$  为性能参数的第一主成分,  $u_1$  为机体研制费用的第一主成分。由图1可见,仿制机型A、C和改型机型H、I的费用值明显偏低,并直接导致样本总体比较分散,线性趋势不明显,而且正是因为这几个型号的拉动,直线模型的斜率显著减小。

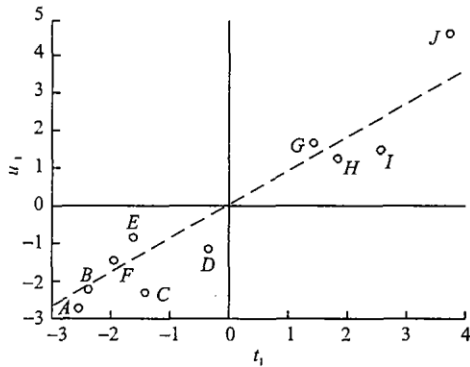


图1 第一主成分散点图

Fig. 1 Principal components distribution

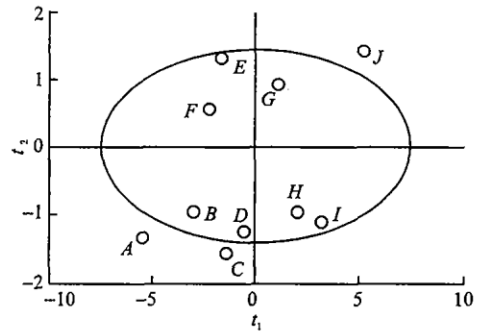


图2 椭圆图

Fig. 2 Ellipse figure

进一步观察图2,样本分布比较分散,A、C由于费用明显偏低已落在椭圆外,成为特异样本,同时还由于拉动作用,进一步引起有效样本J也成为特异样本。因此,在军机研制费用建模研究中,不能直接引用仿制和改型型号的费用数据作为分析样本<sup>[9]</sup>。这样就使得建模时遇到了一个矛盾:如果将仿制和改型的机型从样本中剔除,则样本容量太小,难以建模,而若保留这些机型,则会严重影响模型的精度和有效性。这样,如何合理修正并充分开发利用这些数据资源成为解决这一难题的关键。

## 1 类比修正函数的构建与参数估计

### 1.1 研制费用历史数据的统计分析

由于国产军机各机种的机型数量都不多,综合考察国产4个机种17个机型的改型研制工作量和改型费用,其研制费随改型研制工作含量变化的趋势<sup>[2]</sup>见图3。

图3中纵坐标为改型研制费用;横坐标为改型研制工作含量,以需研制的部件数占飞机所有部件数的比例计,可用下式进行估算:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^m (\eta_i \phi_i)}{\sum_{i=1}^n (\eta_i Q_i)} \quad (1)$$

式中: $y$ 为研制工作比例系数,且 $0 \leq y \leq 1$ ;  $\phi_i$ 为飞机第 $i$ 系统需研制的部件数; $Q_i$ 为第 $i$ 系统的部件总数; $\eta_i$ 为第 $i$ 系统先进性、复杂性以及规模性大小的加权系数; $n$ 为该机具有的系统总数; $m$ 为改型研制工作量的系统数。

### 1.2 类比修正函数的定义

在图3中,取各对应的 $y_i$ 时 $C(y_i)$ 的平均值 $\bar{C}(y_i)$ ,即取4个机种的平均值,

$$\bar{C}(y_i) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 C(y_i) \quad (2)$$

式(2)代表了国产飞机(这里根据机体数据统计,同理也可应用于发动机、机载电子设备等)研制费用随改型研制工作含量变化的平均趋势。定义修正函数如下:

$$g(x) = C_s / C_f \quad (3)$$

式中: $x$ 为不进行研制的工作含量,有 $x = 1 - y$ ;  $C_s$ 为标准状态的研制费; $C_f$ 为实际发生的研制费。

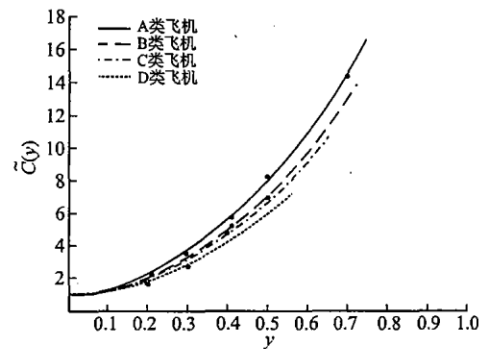


图3 研制费和改型研制工作含量的关系

Fig. 3 Relation of R&D cost and modified work

### 1.3 类比函数的构造

由  $x = 1 - y$  可知,当  $y$  为 0 时,  $x = 1$ , 此时的  $C_f$  最小,因此,  $g(x) = g(1)$  应达到最大,当  $y = 1$  时  $x = 0$ , 此时  $C_f$  最大,故  $g(x) = g(0)$  应达到最小。因此参照图 3, 可得到  $g(x)$  的曲线图 4。

由图 4 可见,  $g(x)$  函数具有如下特征:①类似于指数函数且变化率较大;②  $x$  较小时比较平缓,  $x$  较大( $x > 0.4$ ) 时变化较为明显,因此,其一阶导数大于 0,二阶导数也应大于 0;③当  $x = 0$  时,  $g(x) = g(0) = 1$ 。

根据特征①,可设  $g(x) = e^{kx}$ ,  $k > 1$ , 由特征②可得式(4)。式(4)的一阶导数为式(5)。

$$g(x) = (e^{kx} - 1)/kx \quad (4)$$

$x \geq 0, k > 1$ , 所以,  $(kx - 1)e^{kx} + 1 \geq 0; kx^2 \geq 0; g'(x) \geq 0$ 。而  $g''(x) = ((x + k - 3)kxe^{kx} + 2(e^{kx} - 1))/kx^3$  同理,其分子分母均大于 0,所以  $g''(x) \geq 0$ 。

式(4)中,当  $x = 0$  时,  $g(x) = 0/0$ , 但  $\lim_{x \rightarrow 0} g(x) = (e^{kx} - 1)' / (kx) = 1$ 。所以式(4)符合③的特征。

### 1.4 参数 $k$ 的估计

采用均值法确定一个合适的  $k$  值。在图 4 上选取 5 个点,先用迭代法求出各点的  $k$  值,然后求出均值  $\bar{k}$ 。具体数据及计算结果见表 2,最后确定的  $k$  值为 4.786。因而得到了类比修正函数的最后形式为

$$g(x) = e^{4.786x} / 4.786x \quad (6)$$

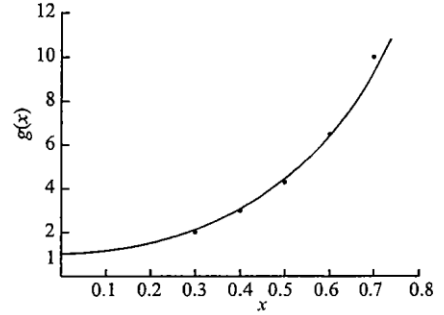


图 4  $g(x)$  的指数函数曲线

Fig. 4 Exponential function curve of  $g(x)$

$$g'(x) = ((kx - 1)e^{kx} + 1)/kx^2 \quad (5)$$

表 2  $k$  值的确定

Tab. 2 Calculation of  $k$

$x$	$g(x)$ 实际值	方程	$k$	$\bar{k}$	$g(x)$ 计算值
0.3	2.10	$e^{0.3k} - 0.63k - 1 = 0$	4.45	4.786	2.23
0.4	3.05	$e^{0.4k} - 1.22k - 1 = 0$	4.83		3.02
0.5	4.21	$e^{0.5k} - 2.11k - 1 = 0$	4.82		4.16
0.6	6.01	$e^{0.6k} - 3.61k - 1 = 0$	4.87		5.80
0.7	9.00	$e^{0.7k} - 6.30k - 1 = 0$	4.96		8.21

## 2 仿制与改型研制费用数据的修正和分析

利用类比修正函数式(6)对表 1 中仿制和改型型号的研制费用进行修正。修正结果见表 3。

表 3 仿制与改型型号机体研制费用的修正结果

Tab. 3 Modified results of airframe R&D cost

机型	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
$x$	0.6	0.3	0.55	0.25	-	-	-	0.3	0.25	-
$g(x)$	5.804	2.231	4.903	1.930	-	-	-	2.231	1.930	-
$C$ (修正前)	736	2 287	1 428	4 892	6 487	4 877	17 138	11 546	16 439	63 674
$C$ (修正后)	4 272	5 102	7 001	9 442	6 487	4 877	17 138	25 759	31 727	63 674

表 3 中实际研制工作量  $x$  值根据调研统计结果确定,这里列出的数据作了一定处理,仅作参考分析用。

再次利用偏最小二乘回归方法进行比较精确的分析。仍以对数线性模型形式进行分析。修正后原始数据的第一主成分散点图见图 5; 特异样本椭圆图见图 6。由图可见,第一主成分具有显著的对数线性关系,图中各样本没有明显偏离回归直线的点,统计有效性较好,表明相应性能对应的各机型研制费用值是合理的。

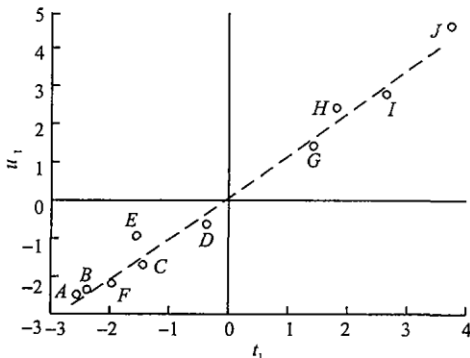


图 5 第一主成分散点图

Fig. 5 Principal components distribution

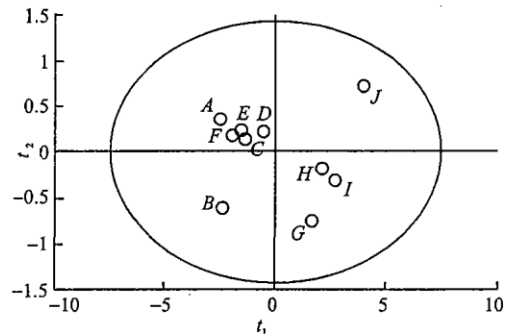


图 6 椭圆图

Fig. 6 Ellipse figure

进一步观察特异样本椭圆图。图中所有样本点都在椭圆内,样本中没有特异点,并且各样本相对比较集中,表明修正后的仿制和改型型号研制费用原始数据已达到建模分析要求,可以作为有效样本纳入统计。

### 3 结束语

统计样本少,样本有效性差是国产军用飞机研制费用建模研究中的一个难题。本文构建的类比修正函数为提高样本的有效性并进一步增加样本容量提供了一种新的方法。该方法的基本思路可进一步推广应用于我军其他装备的类似研究。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 赵英俊,刘 铭. 武器型号费用参数模型的数据诊断与识别[J]. 上海航天,2000,(2):43-45.  
ZHAO Yingjun, LIU Ming. Data Diagnosis and Identification of Weapon Types' Cost Parametric Models[J]. Shanghai Space, 2000,(2):43-45. (in Chinese)
- [ 2 ] 张恒喜,朱家元. 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. Introduction to Development Engineering of Aircraft Types[M]. Beijing: Defense Industry Public, 2004. (in Chinese)
- [ 3 ] 郭基联. 小样本多元数据分析及其在飞机 LCC 建模中的应用[D]. 西安:空军工程大学,2002.  
GUO Jilian, Multivariate Data Analysis Methods And Applications in LCC Analysis of Aircrafts with Few Observations[D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2002. (in Chinese)
- [ 4 ] Fornell C, Bagozzi R P. Advanced Methods of Marketing Research[M]. Cambridge, MA: Basil Blackwell, 1994.
- [ 5 ] Yin Li, Liu Qiang, Wang Huiwen. Supplementary Approach of Partial least Squares for Modeling and Analysis of Cutting Tool Wears, ICPMT2002[C]. Xi'an: [s. n. ], 2002: 790-795.
- [ 6 ] 王惠文. 偏最小二乘回归方法及其应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999.  
WANG Huiwen. Partial Least - Squares Regression - Method and Applications[M]. Beijing: Defense Industry Public, 1999. (in Chinese).
- [ 7 ] 王惠文. 偏最小二乘回归的线性与非线性方法[M]. 北京:国防工业出版社,2006.  
WANG Huiwen. Partial Least - Squares Regression - Linear and Nonlinear Methods[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2006. (in Chinese)
- [ 8 ] Chin W W. PLS - Graph User's Guide[M]. USA: College of Business, University of Houston, 2001.
- [ 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.  
《Aircraft desing manual》editor committee. Aircraft design manual, 22nd, Technologic Economic Analysis[M]. Beijing: Aviation Industry Public, 2001. (in Chinese)

(编辑:姚树峰)

## Modification Function of Research and Development (R&D) Cost of Imitated and Modified Aircrafts

GUO Ji - lian, ZHONG Zhong, YAN Sheng - wen

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract:** A large parts of home - made military aircrafts are developed through imitation and modification; their R&D cost can not reflect the truth when they are developed as a new type. So, these data can not be used directly in the study of R&D cost for a new type. In order to apply these data reasonably, a modification function is defined based on the statistic data of 17 homemade aircraft types. Then, according to the statistic data of home - made aircrafts, the parameter's value of the modification function is evaluated and the modified R&D cost for the Imitated and Modified Aircrafts is calculated. Finally, the results are validated by using the Partial Least - Squares Regression (PLSR).

**Key words:** military aircraft; research and development (R&D) cost; modification function