

DOI:10.16356/j.1005-2615.2015.01.003

## 用于复杂装备费用驱动因子筛选的灰色凸关联模型

方志耕<sup>1</sup> 方世力<sup>1,2</sup> 吴利丰<sup>1</sup> 于亮<sup>1</sup>

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京, 211106; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076)

**摘要:**针对复杂装备费用预测中样本少和费用影响因素繁多的问题,分析以往灰色关联度的缺陷,运用改进的灰色凸关联度建立费用影响因素与费用之间的灰色关联模型。依据灰色凸关联度的大小和接近程度筛选费用驱动因子,利用所选择的驱动因子建立多元回归模型。与已有文献中的方法进行对比,结果表明本文方法具有较高的预测精度,说明改进的灰色凸关联度模型能够诊断复杂装备费用的关键影响因素。

**关键词:**复杂装备费用;灰色凸关联度;驱动因子

**中图分类号:** V37; O241.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2015)01-0025-04

## Convex Grey Correlation Model for Identification of Driving Factors of Complex Equipment Cost

Fang Zhigeng<sup>1</sup>, Fang Shili<sup>1,2</sup>, Wu Lifeng<sup>1</sup>, Yu Liang<sup>1</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 211106, China;  
2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing, 100076, China)

**Abstract:** In view of the problems like fewer samples and various influencing factors in the prediction of complex equipment costs, the defects in the previous grey relational degree are analyzed and a new grey correlation model of influence factors and cost is established by using improved convex grey correlation. The size of the convex grey correlation degree and the proximity are used to screen the cost driving factor, and a multiple-regression model is established based on the chosen driving factors. Compared with the existing methods, the proposed method has higher prediction accuracy, which means the improved convex grey correlation can diagnose key factors of complex equipment cost.

**Key words:** complex equipment cost; convex grey correlation; driving factors

复杂装备是指客户需求复杂、产品组成复杂、产品技术复杂、制造过程复杂、项目管理复杂的一  
类装备,如航天器、飞机、航空母舰、武器系统等。随着科技飞速发展及其在军事领域的广泛应用,复

**基金项目:**国家社会科学基金(12AZD102)重点资助项目;国家自然科学基金(71401051,91324003,71372080)资助项目;“大型飞机”国家科技重大专项(2009ZX11002)资助项目;中央高校基本科研业务费专项基金(NP2014105, NP2015208)资助项目;江苏省科技思想库(BR2013075)资助项目;江苏省高等学校哲学社会科学重点研究基地(2014JDXM015)资助项目;国家级教学团队基金(10td128)资助项目。

**收稿日期:** 2014-12-25; **修订日期:** 2015-01-18

**作者简介:**方志耕,男,教授,博士生导师;研究方向:管理科学与工程,工业工程,质量与可靠性管理,经济博弈论;兼任中国优选法统筹法与经济数学研究会理事,复杂装备研制管理专业委员会秘书长;主持或参与省部级以上项目 29 项,发表论文 90 余篇,其中 45 篇论文被 SSCI, SCI, Ei 等数据库收录。

**通信作者:**方志耕, E-mail: zhigengfang@163.com。

杂装备研制费用增长在国内外都成为普遍现象。影响研制费用的因素很多,有性能因素、物理因素、时间和计划因素等,能够找到对复杂装备研制费用影响较大的费用驱动因子,就可以对重要因素进行权衡与控制,也可以根据费用驱动因子估算复杂装备的研制费用,对设备选型有指导意义。

样本少和影响费用的因素繁多是复杂装备费用预测中两个难点,费用驱动因子的选择既要考虑每个驱动因子对费用的驱动效应,又要考虑驱动因子之间的多重共线性。当前费用驱动因子的选择方法有:(1)主成分分析法及其扩展——因子分析法<sup>[1-4]</sup>; (2)基于偏F检验的方法<sup>[5]</sup>; (3)灰色关联分析法<sup>[6-8]</sup>; (4)其他方法<sup>[9-11]</sup>。这些方法在费用驱动因子筛选中取得了可喜的成绩,但是现有方法存在以下缺点:(1)主成分分析法给回归模型的解释带来一定的复杂性;(2)现在灰色关联分析的模型很多,无量纲化的方法也很多,同一个关联模型中运用不同的无量纲化方法就得出不同的结果,从而限制了灰色模型的应用。

本文运用无需消除量纲的灰色凸关联度来筛选复杂装备费用驱动因子,并利用所选择的驱动因子建立多元回归模型。

## 1 基于灰色凸关联的复杂装备费用驱动因子筛选模型

### 1.1 改进的灰色凸关联度

**定义 1** 对于系统行为特征序列  $X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n))$ , 相关因素序列为

$$X_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(n))$$

⋮

$$X_m = (x_m(1), x_m(2), \dots, x_m(n))$$

称  $\gamma(x_0(k), x_i(k)) = |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|$  为  $X_0$  与  $X_i$  的灰色凸关联系数, 其中  $\Delta_i(k) = \frac{x_i(k+2) + x_i(k)}{x_i(k+1)}$ ,  $k=1, 2, \dots, n-2$ , 则称  $\gamma_{oi} = 1 -$

$$\frac{\sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}$$

为  $X_0$  与  $X_i$  的灰色凸关联度。若相关因素行为序列  $X_i, X_j$ , 有  $\gamma_{oi} \geq \gamma_{oj}$ , 则称因素  $X_i$  优于因素  $X_j$ , 记为  $X_i > X_j$ , 其中“>”为有灰色凸关联度导出的灰色关联序。

显然, 灰色凸关联度不受量纲影响, 在保留原

始信息的基础上, 避免了量纲一化方法对结果的影响。然而以往灰色关联度采用各种量纲一化方法, 不仅造成了一定程度上的信息丢失, 还导致出现多种结果。例如灰色关联度在文献[7]的错误使用, 导致文献[7]的结果为: 空机质量与研制费用的相关程度最大, 其关联度为 0.7643; 如果把文献[7]中表 3 的第 1 列数据和第 2 列数据调换, 按照文献[7]中计算步骤, 结果为: 飞机研制费用与海平面爬升率的关联度最大, 其关联度为 0.789; 如果把文献[7]中表 3 的第 4 列数据和第 1 列数据调换, 按照文献[7]中计算步骤, 结果为: 飞机研制费用与最大平飞速度的关联度最大, 其关联度为 0.911。之所以出现这样的错误, 问题在于文献[7]对数据无量纲化处理时, 对于截面数据不适合用初值化消除量纲, 可以采用均值化消除量纲。

类似于原灰色凸关联度<sup>[12]</sup>, 改进的灰色凸关联度具有以下性质。

**定理 1** 灰色凸关联度具有以下性质:(1)规范性, 即  $0 \leq \gamma_{oi} \leq 1$ ; (2)偶对称性, 即  $\gamma_{oj} = \gamma_{jo}$ ; (3)相似性, 即  $x_j(k)$  与  $x_0(k)$  越接近,  $\gamma_{oj}$  越大; (4)可比性, 唯一性; (5)数乘变换一致性; (6)数乘变换保序性; (7)干扰因素独立性。

关联度的区分度决定了关联度性质的优劣, 为此文献[13~14]致力于提高关联度的区分度。但是在传统的灰色关联模型中, 关联度计算公式一般采用  $\frac{1}{1+x}$ , 如果  $x$  较小时,  $\frac{1}{1+x}$  会变大; 反之, 当  $x$  较大时,  $\frac{1}{1+x}$  会变小, 经常出现结果差距很小的情况, 降低了模型的质量。因此本文采用

$\sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|$  先集结各点的的灰色凸关联

系数, 再利用  $\frac{\sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}$  对集结结果

进行归一化,  $\frac{\sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}$  越小, 说明

$X_0$  与  $X_i$  的灰色凸关联度越大。为了更符合直观

感觉, 作  $\gamma_{oi} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}{\sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{n-2} |\Delta_0(k) - \Delta_i(k)|}$  处理, 这

样  $\gamma_{oi}$  越大,  $X_0$  与  $X_i$  的灰色凸关联度大。

如何评价各种灰色关联度的区分度,至今缺乏一个通用的标准。本文将关联度的方差作为评价灰色关联结果区分度的标准,方差越大,区分度越大;反之,方差越小,区分度越小。针对文献[15]的例子,分别运用灰色凸关联度、改进的灰色凸关联度、投影关联度<sup>[14]</sup>及邓氏关联度进行实验,并比较 4 种关联度的区分度,结果见表 1。

表 1 4 种关联度的结果比较

Tab. 1 Comparison of results of four kinds of correlation

关联度	$\gamma_{01}$	$\gamma_{02}$	$\gamma_{03}$	方差
凸关联度	0.947 25	0.675 240	0.901 78	0.021
改进的凸关联度	0.982 87	0.120 866	0.896 26	0.225
投影关联度	0.273 82	0.000 030	0.166 10	0.019
邓氏关联度	0.972 80	0.850 300	0.942 30	0.004

从表 1 可以看出改进的凸关联度具有最大的方差,即该关联度的区分度最大。

## 1.2 复杂装备费用驱动因子筛选原则

设有  $n$  个复杂装备  $A_1, A_2, \dots, A_n$ , 每个装备有  $m$  个因素,  $c_i (i=1, 2, \dots, n)$  表示装备费用, 数据矩阵如下

$$\begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} & c_1 \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} & c_2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} & c_n \end{bmatrix}$$

设  $c_i (i=1, 2, \dots, n)$  为特征序列,  $x_{ij}$  为费用影响因素序列 ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ )。先按照定义 1 计算凸关联度,再依据关联度大小得出关联序。

相关因素  $x_j$  的关联度  $\gamma_{0j}$  越大, 因素  $x_j$  对费用的影响程度越大。如果选择费用驱动因子建立含有常数项的多元回归模型,按照关联度大小选择驱动因子的个数比样本量少 2 个即可。因为选取过多,不易建立多元回归模型;选取过少,所建模型丢失信息过多。如果 2 个费用因素的关联度极为接近,可认为这 2 个费用因素之间存在多重共线性。在建立多元回归模型时,可定性分析,选择一个变量代替这 2 个变量。

## 2 实例分析

为了便于比较,本文采用文献[15]的实例,选

择和文献[15]相同的样本。由于费用因素个数不小于样本量,不能采用传统的最小二乘法,文献[15]利用支持向量机预测 K 型号无人机的研制费用。利用传统的最小二乘法,本文方法可得关联度较大的 4 个驱动因子为续航时间、飞行高度、机长和巡航速度。不同型号的无人机拟合样本和测试样本如表 2 所示。建立多元回归模型如下

$$c = 0.061\ 98x_1 + 0.000\ 56x_2 + 0.099\ 14x_3 + 0.009\ 45x_4 + 0.384\ 62 \quad (1)$$

式中  $x_1, x_2, x_3$  分别表示机长、巡航速度、飞行高度和续航时间。

进一步利用式(1)预测 K 型号无人机的研制费用。采用不同方法的预测结果对比如表 3 所示。结果表明,预测的精度取决于外推精度,和文献[15]中 3 个预测方法进行比较,本文方法预测精度相对较高。

表 2 无人机研制费用拟合样本和测试样本

Tab. 2 Fitting and test samples of UAV development cost

机型	机长/ m	最大起飞 质量/ kg	巡航 速度/ (km · h <sup>-1</sup> )	飞行 高度/ km	续航 时间/ h	载荷/ kg	费用/ 10 <sup>9</sup> US\$
A	13.50	11 622	557	19.8	42	900.0	3.71
B	5.25	480	306	4.0	7	130.0	1.33
C	2.08	160	218	4.0	4	165.0	0.95
D	4.27	400	30	2.0	5	14.5	1.02
E	13.50	10 395	648	20.4	46	905.0	4.19
F	4.60	39 000	555	15.2	12	450.0	2.65
K	8.22	1 020	139	7.3	40	204.0	2.07

表 3 4 种预测方法的结果比较

Tab. 3 Comparison of results of four forecasting methods

预测方法	径向基 函数预 测法	反向传播 神经网络 预测法	支持向 量机预 测法	本文 方法	实际 费用
预测费用/ 10 <sup>9</sup> US\$	1.960	1.890	2.140	2.073	2.070
相对误差/%	5.30	8.70	3.40	0.01	

## 3 结束语

本文从复杂装备费用与其驱动因素的凹凸变化视角,改进原有的灰色凸关联度,运用此灰色关联度筛选费用驱动因子。实例表明利用所选择的费用驱动因子建立多元回归模型,预测精度较高,说明费用驱动因子识别的正确性。本文思想易于理解,方法较为客观,操作性强,可广泛应用于其他复杂装备的费用驱动因子筛选。

## 参考文献:

- [1] 张小海,金家善,耿俊豹,等.用DEA优化主成分回归的寿命周期费用建模[J].海军工程大学学报,2011,23(1):32-37.  
Zhang Xiaohai, Jin Jiashan, Geng Junbao, et al. Modeling for life cycle cost by using DEA to optimizing principal components regression[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2011,23(1):32-37.
- [2] 姜鹏,郭铜修,孟德运,等.基于PLSR-CER模型的大飞机成本风险控制[J].南京航空航天大学学报,2012,44(3):425-430.  
Jiang Peng, Guo Tongxiu, Meng Deyun, et al. PLSR-CER cost risk control model of large-size airplane[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2012,44(3):425-430.
- [3] 王礼沅,郭基联,张恒喜.递阶偏最小二乘回归在飞机研制费用预测中的应用[J].航空学报,2009,30(8):1580-1583.  
Wang Liyuan, Guo Jilian, Zhang Hengxi. Application of hierarchical partial least square regression to development cost prediction of aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30 (8): 1580-1583.
- [4] 徐哲,刘荣.偏最小二乘回归法在武器装备研制费用估算中的应用[J].数学的实践与认识,2005,35(3):152-158.  
Xu Zhe, Liu Rong. The application and research of PLS in estimating the cost of development in armament [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2005,35(3):152-158.
- [5] 刘晓东.装备寿命周期费用分析与控制[M].北京:国防工业出版社,2008:58-59.
- [6] 张乔斌.基于灰色关联度和SVM舰船设备维修费用预测[J].计算机与数字工程,2010,38(10):15-18.  
Zhang Qiaobin. Estimated for the equipments of ship's maintain expenses based on grey connection and SVM[J]. Computer & Digital Engineering, 2010, 38(10):15-18.
- [7] 解建喜,宋笔锋,刘东霞,等.基于灰色关联分析理论和等工程价值比方法的飞行器研制生产费用研究[J].兵工学报,2007,38(2):223-227.  
Xie Jianxi, Song Bifeng, Liu Dongxia, et al. Research on developmental and productive cost for aircraft based on grey correlation analysis theory and equalization-engineering value-rate method [J]. Acta Armament Aarii, 2007,38(2):223-227.
- [8] 孙林凯,金家善,耿俊豹.基于修正邓氏灰色关联度的设备费用影响因素分析[J].数学的实践与认识,2005,35(3):140-145.  
Sun Linkai, Jin Jiashan, Geng Junbao. Research on the influence factors of the equipment's expense based on the amend grey correlation[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2005,35(3):140-145.
- [9] 孙林凯,金家善,耿俊豹.基于加权精度的 $\epsilon$ -SVR组合参数优化[J].系统工程与电子技术,2011,33(8):1820-1823.  
Sun Linkai, Jin Jiashan, Geng Junbao. Combined parameter optimization for  $\epsilon$ -SVR based on weighted accuracy[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011,33(8):1820-1823.
- [10] Mittas N, Papatheocharous E, Angelis L, et al. Integrating non-parametric models with linear components for producing software cost estimations [J]. Journal of Systems and Software, 2015,99:120-134.
- [11] 孙朝辉,白思俊,刘丽华.基于聚类和灰色模型的固体火箭发动机价格模型研究[J].系统工程理论与实践,2005,25(8):114-118.  
Sun Zhaohui, Bai Sijun, Liu Lihua. The price estimation of solid rocket engine based on cluster analysis and grey model[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2005,25(8):114-118.
- [12] 吴利丰,王义闹,刘思峰.灰色凸关联度及其性质[J].系统工程理论与实践,2012,32(7):1501-1505.  
Wu Lifeng, Wang Yinao, Liu Sifeng. Grey convex relation and its properties[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2012,32(7):1501-1505.
- [13] 刘震,党耀国,周伟杰,等.新型灰色接近关联模型及其拓展[J].控制与决策,2014,29(6):1071-1075.  
Liu Zhen, Dang Yaoguo, Zhou Weijie, et al. New grey nearness incidence model and its extension[J]. Control and Decision, 2014,29(6):1071-1075.
- [14] 张娟,党耀国,王俊杰,等.基于投影的灰色关联模型及其性质[J].控制与决策,2014,29(12):2301-2304.  
Zhang Juan, Dang Yaoguo, Wang Junjie, et al. Grey incidence model based on projection and its properties [J]. Control and Decision, 2014,29(12):2301-2304.
- [15] 武涛,王端民,张亮,等.军用无人机研制费用的支持向量机预测[J].装备指挥技术学院学报,2007,18(5):73-75.  
Wu Tao, Wang Duanmin, Zhang Liang, et al. Prediction of military UAV development cost by support vector machine[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2007,18(5):73-75.

