

doi: 10.7690/bgzd.2013.10.002

舰空导弹武器装备寿命周期费用分析

杨志刚¹, 王海涛², 彭绍雄³, 安进²

(1. 中国人民解放军 92840 部队 14 分队, 山东 青岛 264405; 2. 海军航空工程学院研究生管理大队, 山东 烟台 264001; 3. 海军航空工程学院飞行器工程系, 山东 烟台 264001)

摘要: 针对传统费用分析方法在舰空导弹武器装备寿命周期费用预测中存在的不足, 引入灰色理论的 GM(1,1) 模型对寿命周期费用进行拟合和预测。同时为了进一步提高预测的精度, 对 GM(1,1) 模型加以改进, 重构了背景值公式, 通过与原有 GM(1,1) 模型预测结果进行比较, 表明背景值优化后 GM(1,1) 模型的预测精度显著提高, 可为舰空导弹武器装备的使用保障、退役和更新提供更为有效的决策依据。

关键词: 舰空导弹; 寿命周期费用; GM(1,1) 模型; 背景值

中图分类号: TJ762.3 **文献标志码:** A

Analysis of Life Cycle Cost for Ship-to-Air Missile Weaponry

Yang Zhigang¹, Wang Haitao², Peng Shaoxiong³, An Jin²

(1. No. 14 Team, No. 92840 Unit of PLA, Qingdao 264405, China;

2. Administrant Brigade of Postgraduate, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China;

3. Department of Aircraft Engineering, Naval Aeronautical & Astronautical University, Yantai 264001, China)

Abstract: According to the shortage of traditional cost analysis method in the prediction of life cycle cost for ship-to-air missile weaponry, the GM(1,1) model of grey system theory is applied to cost fitting and prediction. Meanwhile, the GM(1,1) model is improved by reestablishing the formula of background value in order to further raise forecast accuracy. The prediction outcome shows that the improved GM(1,1) model has higher accuracy compared with the original GM(1,1) model, which provides more effective decision for the use, retirement and update of ship-to-air missile weaponry.

Key words: ship-to-air missile; life cycle cost; GM(1,1) model; background value

0 引言

作为一种高技术密集、结构复杂的大型综合武器系统, 为了承担服役年限内的使用、维护与保障任务, 舰空导弹武器系统需要耗费大量的资源。科学估算舰空导弹武器装备的寿命周期费用, 确定其经济寿命, 对于促进舰空导弹武器装备使用维修的科学管理, 发挥武器装备效能, 提高部队战斗力具有十分重要的意义。

舰空导弹武器装备寿命周期费用具有种类多、范围广、数据离散和复杂多变的特点^[1], 很难寻找到费用的统计规律和概率分布。传统的分析方法主要采用建立完整的费用线性模型, 要求样本量大, 且具有较好的分布规律, 预测结果与实际相比误差较大^[2]。灰色预测模型能够充分利用装备已有的数据, 有效解决费用数据丢失、数据不全的问题; 因此, 引入灰色理论的 GM(1,1) 模型, 对寿命周期费用进行拟合和预测, 并且重构了 GM(1,1) 模型的背景值计算公式, 进一步提高预测的精度。

1 舰空导弹武器装备寿命周期费用构成

寿命周期费用 (life cycle cost, LCC) 是武器装

备整个寿命周期的费用总和。舰空导弹武器系统寿命周期费用大致可分为研制生产费、使用与保障费以及退役处置费等。对于部队用户来说, 研制生产费就是武器装备的购置费^[3]。使用与保障费用是武器装备寿命周期费用主要组成部分, 也是寿命周期费用估算和分析的关键。舰空导弹武器装备寿命周期费用构成如图 1 所示。

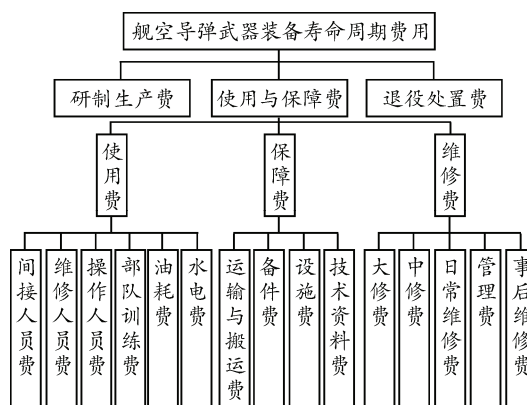


图 1 舰空导弹武器装备 LCC 分解结构

由图 1 可得, 舰空导弹武器装备寿命周期费用可表示为

$$LCC = SC + OC - TC$$

收稿日期: 2013-04-05; 修回日期: 2013-05-12

作者简介: 杨志刚(1974—), 男, 山东人, 学士, 工程师, 从事舰空导弹技术保障工作。

式中：SC 为舰空导弹武器装备的购置费；OC 为使用与保障费；TC 为退役处置费。

2 改进 GM(1,1)模型

GM(1,1)模型是灰色预测的基础，其实质是对原始数据作一次累加(AGO)生成，使生成的数据序列呈一定的规律，再作一次累减生成(1-AGO)，求得拟合曲线，用以对系统进行预测^[4]。

2.1 原始数据检验与处理

在舰空导弹武器装备寿命周期费用中，购置费属于一次性投资，建模时不用考虑，只需对使用与保障费用进行分析，其原始数列记为 $x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$ 。

首先对原始数列进行光滑性检验，计算级比 $\lambda(k) = x^{(0)}(k-1)/x^{(0)}(k)$ ，检验所有的级比 $\lambda(k)$ 是否落在可容覆盖 $(e^{-\frac{2}{n+1}}, e^{\frac{2}{n+2}})$ 内，当 $\lambda(k)$ 均落入可容覆盖，则数列 $x^{(0)}$ 可以作为模型 GM(1,1)的数据进行预测。否则需对 $x^{(0)}$ 进行平移变换，即

$$\sigma^{(0)}(k) = x^{(0)}(k) + c \quad (1)$$

让数列 $\sigma^{(0)} = (\sigma^{(0)}(1), \sigma^{(0)}(2), \dots, \sigma^{(0)}(n))$ 的级比 $\sigma(k) = \frac{\sigma^{(0)}(k-1)}{\sigma^{(0)}(k)}$ 落在可容覆盖内。

2.2 GM(1,1)模型的建立

对原始数列做一次累加(AGO)生成数列为

$$x^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n)) \quad (2)$$

其中 $x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i)$ 。GM(1,1)模型的白化微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (3)$$

相应的差分形式，即灰色微分方程为

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (4)$$

将式(4)展开得

$$\begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

令 $\hat{u} = [a, b]^T$, $Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T$, \hat{u} 为 GM(1,1)模型参数列，其中 a 和 b 是待辨识常量。 \hat{u} 由最小二乘法求解

$$\hat{u} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (5)$$

$$\text{式中： } B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = B \cdot \hat{u}.$$

灰色 GM(1,1)模型的近似时间相应式为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (6)$$

再做一次累减生成，得 $x^{(0)}$ 的灰色预测模型为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (7)$$

式中： $k = 1, \dots, n-1, \dots$ 。

2.3 背景值优化

由式(7)可知，GM(1,1)模型的拟合和预测值的精度取决于参数 a 和 b ，而这两者的值又依赖于原始序列和背景值 $z^{(1)}(k)$ 的构造形式，因此合理构造模型的背景值可以提高模型的预测精度^[5-6]。

在 $[k-1, k]$ 上，对式(3)两边求积分得

$$x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1) + a \int_{k-1}^k x^{(1)}(t) dt = b \quad (8)$$

已知 $x^{(0)}(k) = x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)$ ，比较式(8)和式(4)可知，应满足

$$z^{(1)}(k) = \int_{k-1}^k x^{(1)}(t) dt \quad (9)$$

传统 GM(1,1)模型背景值的计算公式为 $z^{(1)}(k) = [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]/2$ ，其误差来源于以梯形面积 $[x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)]/2$ 代替曲边梯形面积 $\int_{k-1}^k x^{(1)}(t) dt$ 。

为了消除误差，采用指数拟合的方法，令 $x^{(1)}(t) = Ce^{At}$ ，其中 A 、 C 为待定常数且满足

$$x^{(1)}(k) = Ce^{Ak} \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

将 $x^{(1)}(t) = Ce^{At}$ 代入式(9)中得

$$z^{(1)}(k) = \int_{k-1}^k Ce^{At} dt = \frac{1}{A} [x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)] \quad (10)$$

又由 $\frac{x^{(1)}(k)}{x^{(1)}(k-1)} = \frac{Ce^{Ak}}{Ce^{A(k-1)}} = e^A$ 得

$$A = \ln x^{(1)}(k) - \ln x^{(1)}(k-1)$$

因此背景值 $z^{(1)}(k)$ 可构造为

$$z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{\ln x^{(1)}(k) - \ln x^{(1)}(k-1)} \quad (11)$$

2.4 费用预测值检验

为了评价费用实际值和估计值之间的接近程度，采用相对误差检验。残差序列为

$$\varepsilon^{(0)} = (\varepsilon(1), \varepsilon(2), \dots, \varepsilon(n))$$

式中： $\varepsilon(k) = x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)$ 。

相对误差序列为

$$\Delta = (\Delta_k)_{1 \times n} = \left(\left| \frac{\varepsilon(1)}{x^{(0)}(1)} \right|, \left| \frac{\varepsilon(2)}{x^{(0)}(2)} \right|, \dots, \left| \frac{\varepsilon(n)}{x^{(0)}(n)} \right| \right)$$

则对于 $k \leq n$ ，称 $\Delta_k = \left| \frac{\varepsilon(k)}{x^{(0)}(k)} \right|$ 为 k 点模拟相对

误差，称

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \Delta_k \quad (12)$$

为平均相对误差。

3 舰空导弹武器装备经济寿命决策模型

通常舰空导弹武器装备的服役年限都较长，在建立通信装备经济寿命模型时必须考虑资金时间价值(即利率)的影响。在舰空导弹武器装备的服役期内，其费用的流向图如图 2 所示。

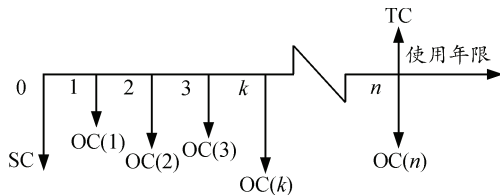


图 2 费用流向

由图 2 可得

$$LCC = SC + \sum_{k=1}^n \left[OC(k) \frac{1}{(1+i)^k} \right] - TC \frac{1}{(1+i)^n}$$

式中： i 为年折现率； $1/(1+i)^k$ 为一次支付现值系数，即将使用与保障费折现到与购置费同一时间点。

采用年均费用法为基础来建立经济寿命的模型，则年平均总费用 \overline{LCC} 为

$$\overline{LCC} = LCC \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} SC + \sum_{k=1}^n \left[OC(k) \frac{1}{(1+i)^k} \right] \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] - TC \frac{i}{(1+i)^n - 1}$$

式中： $i(1+i)^n / [(1+i)^n - 1]$ 为资本回收系数，其意义为寿命期内投入资本为 LCC ，每年至少应回收的金额为 \overline{LCC} 。

按上式求 \overline{LCC} 的最小值就可以得到舰空导弹

武器装备的经济寿命值 N ，即

$$N = \min[\overline{LCC}]_{\text{年份}}$$

4 实例计算

已知某型舰空导弹武器装备的购置费为 4 000 万元，退役处置费为 500 万元，考虑资金时间价值的影响，取年折现率 $i = 8\%$ ，2000—2006 年某型舰空导弹武器装备的使用与保障费用如表 1。

表 1 某型舰空导弹武器装备的使用与保障费

年限	OC/万元	年限	OC/万元	年限	OC/万元
2000	60.00	2003	83.05	2006	128.60
2001	67.12	2004	98.31		
2002	75.23	2005	113.43		

根据建立的灰色预测模型，对 2006 年后使用与保障费进行估算，使用与保障费的原始数列为 $x^{(0)} = (60, 67.12, 75.23, 83.05, 98.31, 113.43, 128.60)$ 。进行光滑性检验： $\sigma(2) = 0.893 9$ ， $\sigma(3) = 0.892 2$ ， $\sigma(4) = 0.905 8$ ， $\sigma(5) = 0.844 8$ ， $\sigma(6) = 0.866 7$ ， $\sigma(7) = 0.882 0$ ，所有级比 $\sigma(k) \in [0.778 8, 1.248 8]$ ，满足要求。

对 $x^{(0)}$ 作一次累加后的数列为 $x^{(1)} = (60, 127.12, 202.35, 285.40, 383.71, 497.14, 625.74)$ ，重构后的背景值序列为 $Z^{(1)} = (-89.399 5, -161.831 1, -241.499 7, -332.133 6, -437.979 7, -588.976 7)$ ，求得相应的数据矩阵 B 和数据向量 Y 。

对 $\hat{u} = (a, b)^T$ 进行最小二乘估计得

$$\hat{u} = (B^T B)^{-1} B^T Y = \begin{bmatrix} -0.134 3 \\ 55.518 7 \end{bmatrix}^T$$

可知 $a = -0.134 3$ ， $b = 55.518 7$ 。于是建立如下模型：

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} - 0.134 3x^{(1)}(t) = 55.518 7$$

求解得

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = 458.571e^{0.134 3k} - 398.57$$

由上式可得，使用与保障费的预测模型为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = 57.629 7e^{0.134 3k}$$

依据所建立的预测模型，分别计算出原 GM(1,1) 模型和改进后模型的使用与保障费用预测值，结果如表 2。

表 2 2 类 GM(1,1) 模型的模拟精度比较

年限	原始数据 $x^{(0)}(k)$	模拟数据 $\hat{x}^{(0)}(k)$		残差 $\varepsilon(k)$		相对误差 Δ_k	
		原模型	新模型	原模型	新模型	原模型	新模型
2000	60.00	60.000 0	60.000 0	0	1.219 2	0.025 5	0.018 2
2001	67.12	65.407 5	65.900 8	1.712 5	-0.141 3	0.009 5	0.001 9
2002	75.23	74.518 6	75.371 3	0.711 4	-3.152 9	0.032 5	0.038 0
2003	83.05	85.746 8	86.202 9	-2.699 8	-0.281 0	0.004 5	0.002 9
2004	98.31	97.870 3	98.591 0	0.439 7	0.670 6	0.011 8	0.005 9
2005	113.43	112.093 2	112.759 4	1.336 8	-0.364 0	0.004 3	0.002 8
2006	128.60	128.051 0	128.964 0	0.549 0	1.219 2	0.025 5	0.018 2

由表 2 可得, 原 GM(1,1)模型的平均相对误差为 $\bar{\Delta} = (\sum_{k=1}^7 \Delta_k) / 7 = 0.0126$, 改进后的 GM(1,1)模型的平均相对误差 $\bar{\Delta} = 0.0099$, 根据文献[7]可知, 原模型的精度属于 2 级, 改进后的模型精度达到 1 级, 显然背景值重构后 GM(1,1)模型的精度得到较大的提高, 模拟效果更好。

用改进后的 GM(1,1)模型, 得到 2006 年之后舰空导弹武器装备使用与保障费用的预测值如表 3。

表 3 后几年使用与保障费预测值

年限	OC/万元	年限	OC/万元	年限	OC/万元
2007	147.49	2012	288.64	2017	564.86
2008	168.69	2013	330.12	2018	646.03
2009	192.94	2014	377.57	2019	738.87
2010	220.66	2015	431.83	2020	845.06
2011	252.37	2016	493.88	2021	966.50

根据经济寿命模型, 得到年均寿命周期费用 \overline{LCC} 的变化曲线如图 3。

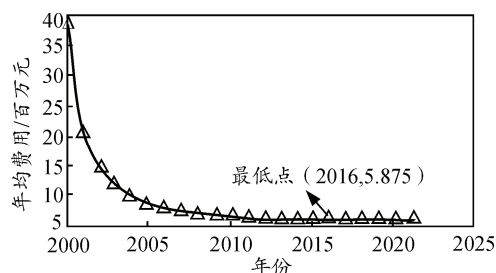


图 3 年均寿命周期费用变化曲线

(上接第 3 页)

当跟踪系统对未知运动轨迹的目标进行捕获、跟踪、测量时, 由于先验资料很少甚至根本没有, 无法计算出它的轨迹, 这时要求系统在跟踪目标的同时有预测轨迹的能力。

3 结束语

笔者针对俯仰一方位型跟踪系统在飞机过顶的情况下无法进行平稳跟踪甚至丢失这一问题, 从结构上进行了理论分析以及仿真验证。对于跟踪飞机的地面站遥测接收系统, 既要求下行传输信息的时间尽可能长, 又要求飞机过顶时能保持地空通信的正常传输。对过顶目标跟踪 3 种解决方案的优缺点进行仔细对比, 并分别给出了实现步骤, 其各有利弊, 可根据实际情况选择满足系统要求的方案, 无论使用何种方案都必须提前预测飞机飞行的轨迹, 使系统在飞机过顶后能继续自动跟踪目标, 对提高通信效率与跟踪稳定性, 具有非常重要的现实意义。

参考文献:

[1] Borretto M A, Leslie D, Hyman H. Shipboard disturbance control for the rapid optical beam steering (ROBS)

由图 3 可以看出, \overline{LCC} 呈现逐年降低的趋势, 当到 2016 年时, \overline{LCC} 达到最小值, 为 587.5 万元, 之后 \overline{LCC} 又逐年增加, 因此该型舰空导弹武器装备的经济寿命为 17 a。

5 结束语

通过具体的计算, 可知改进后的 GM(1,1)模型模拟数据和实际值有着很好的吻合性, 预测的准确度有较大的提高, 可为舰空导弹武器装备的寿命周期费用管理和退役处理提供有利参考。

参考文献:

- [1] 刘国宝, 张海林. 新型地空导弹装备使用保障费用预测模型[J]. 四川兵工学报, 2009, 30(12): 58-60.
- [2] 徐乐, 韩景恂, 等. 航空装备维修费用的组合预测模型[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(6): 102-105.
- [3] 朱松山, 唐大德, 等. 武器装备经济基本理论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 31-32.
- [4] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 175-177.
- [5] 罗党, 刘思峰, 党耀国. 灰色模型 GM(1,1)优化[J]. 中国工程科学, 2003, 5(8): 50-52.
- [6] 徐进军, 王海成, 白中洁. 灰色预测模型若干改进方法[J]. 测绘信息与工程, 2011, 36(4): 1-3.
- [7] 司守奎, 孙奎菁. 数学建模算法与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 566-567.
- [8] pointing and tracking system[C]. New York: Proceedings of the American Control Conference, 2002: 3186-3190.
- [9] Zhai K, Yang D, Sun X S. The in-depth research on the tracking laws of the wiser satellite's satellite-satellite antenna in TDRSS Flight Dynamics[J]. Communications of the ACM, 2004, 22(3): 88-91.
- [10] Li X P. The zenith pass tracking of the antenna pedestal[J]. Fire Control Radar Technology, 1993, 22(2): 51-56.
- [11] Tyler S R. A trajectory preprocessor for antenna pointing[R]. New York: The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report, 1994: 42-118.
- [12] 吉桐伯, 陈娟, 杨秀华, 等. 地平式光电望远镜天顶盲区影响因素[J]. 光学精密工程, 2003, 11(3): 296-300.
- [13] 王万玉. 倾斜机构在极地卫星过顶跟踪中的应用[J]. 遥测遥控, 1999, 20(1): 35-38.
- [14] 刘蕴才. 导弹卫星测控系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996: 19-23.
- [15] 温桂森. 低轨道卫星的过顶跟踪技术[J]. 无线电工程, 1997, 27(4): 16-18.
- [16] 陈娟. 伺服系统低速特性与抖动补偿研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2001: 5-11.
- [17] 张燕. 过顶跟踪的天线座设计方法[J]. 无线电工程, 1997, 27(4): 37-39.
- [18] 何照才, 胡保安. 光学测量系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 65-71.