

# 基于组合预测模型的指挥系统 维修器材消耗规律研究

瞿福琪, 舒畅, 涂建华

(武汉军械士官学校指挥控制系, 湖北, 武汉, 430075)

**摘要:** 指挥系统维修器材消耗规律是当前装备保障工作中急需研究的重点问题。针对维修器材消耗规律的固有特点, 本文建立基于灰色系统理论和 BP 神经网络理论的组合预测数学模型, 并确定了该模型的预测效果评价指标, 最后通过实例数据验证了该模型的有效性和性能指标。

**关键词:** 组合模型; 消耗规律; 维修器材

## 0 引言

在现代战争中, 指挥自动化系统是起到战争倍增器作用的关键系统。伴随着我军新时期不断提高部队信息化程度的建设任务, 先进的指挥系统陆续装备部队。指挥系统装备维修器材是指挥系统装备保障的重要资源, 不仅直接影响故障装备的及时修复, 也是保障工作中经费投入最大的方面。如何预测指挥系统装备维修器材消耗量, 成为当前指挥系统装备保障工作中急需研究的重点问题。指挥系统装备维修器材消耗量受自身可靠性、使用强度、使用环境、使用条件、管理环境、维修策略等诸多因素的制约, 不是完全随机变化的, 具有一定的规律性; 同时, 维修器材消耗量与影响因素之间的非线性关系特征明显, 大大增加了器材消耗规律研究的难度。鉴于指挥系统维修器材消耗规律的上述特点, 结合灰色系统理论和神经网络理论在预测方面的优势<sup>[1][2]</sup>, 本文研究基于灰色系统和神经网络组合模型的指挥系统维修器材消耗规律。首先介绍灰色系统 GM(1,1)模型和 BP 神经网络模型, 在此基础上建立组合数学模型, 最后通过实例数据验证组合模型的有效性。

## 1 灰色系统和 BP 神经网络预测模型

### 1.1 GM(1, 1)灰色系统预测模型<sup>[3]</sup>

GM(1,1)预测模型的实质是对原始序列做一次累加生成, 使生成的序列满足灰色建模所具有的准指数规律, 然后建立一阶差分方程模型, 求得拟合曲线对系统进行预测。GM(1,1)的一阶差分方程模型形式为

$$Y^{(0)}(t) + aY^{(1)}(t) = b \quad (1)$$

式中,  $Y^{(0)}$  表示采集到的原始序列,  $Y^{(1)}$  表示原始序列一阶累加后所得序列。

解差分方程 (1) 从而求得 GM(1,1)模型的时间响应式为

$$\hat{Y}^{(1)}(t+1) = (Y^{(1)}(0) - \frac{b}{a})e^{-at} + \frac{b}{a} \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$\hat{x}^{(1)}$  表示累加序列的预测值, 作累减还原, 得原始序列的预测模型

$$\hat{Y}^{(0)}(t+1) = \hat{Y}^{(1)}(t+1) - \hat{Y}^{(1)}(t) \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

### 1.2 BP 神经网络预测模型

BP 神经网络, 是前馈式神经网络的一种, 具有很强的非线性函数逼近能力。Kolmogorov 定理证明, 只

要有足够的隐层和隐节点数, 网络可以以任意精度逼近任意的非线性函数关系。设共有  $P$  个学习样本  $x^1, x^2, \dots, x^P$ , 期望输出值为  $Y^1, Y^2, \dots, Y^P$ , 实际输出值为  $\hat{Y}^1, \hat{Y}^2, \dots, \hat{Y}^P$ 。隐含层有  $m$  个神经元, 输出层有  $n$  个神经元。隐含层中第  $j$  个神经元与第  $i$  个输入的连接权值为  $w_{ij}$ , 该神经元的阈值为  $h_j$ 。输出层第  $k$  个神经元与隐含层第  $j$  个神经元的连接权值为  $v_{jk}$ , 阈值为  $\theta_k$ 。本文采用梯度法, 对每个神经元的权值和阈值进行修正, 使平方和总误差向减小的方向变化, 直到满足精度要求为止。BP 算法的具体过程在很多文献中都有描述<sup>[4]</sup>。

## 2 基于组合模型的建模

适当的组合模型能提高预测效果<sup>[5][6]</sup>, 但不同的组合模型预测的效果是不同的, 如何得到最佳的组合预测模型是我们需要解决的重要问题。本文应用基于灰色理论和 BP 神经网络的广义加权平均组合预测模型建立指挥系统装备维修器材消耗的数学模型, 研究其消耗规律。

假设某一预测问题在某一时段的实际值为  $Y(t) (t=1, 2, \dots, n)$ , 对此预测问题有  $m$  种预测模型, 其预测值分别为  $\hat{Y}_j(t) (t=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ , 又设这  $m$  种预测模型的加权系数为  $W = (w_1, w_2, \dots, w_m)^T$  并满足归一化约束条件和非负约束条件:

$$\begin{cases} E^T W = 1 \\ W \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中  $E = (1, 1, \dots, 1)^T$ 。记组合预测值为  $Y(t) (t=1, 2, \dots, n)$ , 显然, 希望  $Y(t)$  对群组预测值  $Y_j(t) (j=1, 2, \dots, m)$  的逼近程度愈小愈好。

设性能指标为:

$$\min J(t) = \sum_{j=1}^m w_j [(f(\hat{Y}(t)) - g(\hat{Y}_j(t)))^p]^2 \quad t=1, 2, \dots, n, p \neq 0 \quad (5)$$

其中  $f, g$  均为连续可微函数, 一般应取相同的函数形式,  $p$  为非零参数,  $f(Y(t)) \neq 0$  且  $f$  可逆。

令  $\frac{\partial J(t)}{\partial \hat{Y}(t)} = 0$ , 且  $\frac{\partial f(\hat{Y}(t))}{\partial \hat{Y}(t)} \neq 0$ , 整理后得到:

$$\hat{Y}(t) = f^{-1} \left[ \sum_{j=1}^m w_j (g(\hat{Y}_j(t)))^{1/p} \right] \quad t=1, 2, \dots, n; p \neq 0 \quad (6)$$

此模型为本文提出的广义加权函数平均组合预测模型。具有广泛的代表性, 包括算术、对数、指数平均组合预测模。

(1) 广义加权算术平均组合预测模型

在上式中取  $f(\hat{Y}(t)) = \hat{Y}(t), g(\hat{Y}_j(t)) = \hat{Y}_j(t)$ , 则有:

$$\hat{Y}(t) = \left[ \sum_{j=1}^m w_j (\hat{Y}_j(t))^p \right]^{1/p} \quad t=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

(2) 广义加权对数平均组合预测模型

在上式中取  $f(\hat{Y}(t)) = \ln \hat{Y}(t), g(\hat{Y}_j(t)) = \ln \hat{Y}_j(t)$ , 则有:

$$\hat{Y}(t) = \exp \left[ \left( \sum_{j=1}^m w_j (\hat{Y}_j(t))^p \right)^{1/p} \right] \quad t=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

(3) 广义加权指数平均组合预测模型

在上式中取  $f(\hat{Y}(t)) = \exp \hat{Y}(t)$ ,  $g(\hat{Y}_j(t)) = \exp \hat{Y}_j(t)$ , 则有:

$$\hat{Y}(t) = \ln \left[ \left( \sum_{j=1}^m w_j (\hat{Y}_j(t))^p \right)^{1/p} \right] \quad t = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

为了使组合预测模型最优, 应使:

$$\min J_p = \sum_{t=1}^n \varepsilon_p^2(t) \quad (10)$$

考虑到归一化约束条件和非负约束条件, 应有:

$$\min J_p = \sum_{t=1}^n \varepsilon_p^2(t) = E_p^T E_p = W^T (Y_p^T Y_p) W, \quad s.t. E^T W = 1, W \geq 0 \quad (11)$$

此模型为一个二次规划问题, 根据二次规划理论, 该模型在  $Y_p^T Y_p$  为正定矩阵的情况下一定有唯一最优解, 但它没有一般的求解方法。在  $W > 0$  的情况下, 可以用 Lagrange 乘子法求解。

为了检验组合预测方法的有效性, 必须制定评价指标对组合预测效果进行全方位的综合性和评价。按照预测效果评价的原则和惯例, 采用以下评价指标作为参考:

(1) 平方和误差

$$SSE = \sum_{t=1}^n (Y(t) - \hat{Y}(t))^2 \quad (12)$$

其中,  $Y(t)$  实际值,  $\hat{Y}(t)$  为预测值。

(2) 平均绝对误差

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Y(t) - \hat{Y}(t)| \quad (13)$$

(3) 均方误差

$$MSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{t=1}^n (Y(t) - \hat{Y}(t))^2} \quad (14)$$

(4) 平均绝对百分比误差

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{Y(t) - \hat{Y}(t)}{Y(t)} \right| \quad (15)$$

(5) 均方百分比误差

$$MSPE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{t=1}^n \left( \frac{Y(t) - \hat{Y}(t)}{Y(t)} \right)^2} \quad (16)$$

### 3 实例验证

以上, 建立了基于对灰色系统理论和 BP 神经网络理论的指挥系统维修器材消耗规律数学模型。经部队和厂家调研, 得到某型指挥系统装备自 2002 年至 2011 年共 10 年某备件的消耗量统计数据, 如表 1 所示。以此具体实例检验本文所建模型的正确性及性能指标。

表 1 某型指挥系统某备件消耗量表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
时间/年	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11
消耗量/件	45	30	24	26	32	40	36	35	28	33

经计算可知，对于该指挥系统某备件：

广义加权算术平均组合预测模型，当  $p = -4.49122$  时效果最优，此时  $w_1 = 0.2506$ ， $w_2 = 0.0749$ ；

广义加权对数平均组合预测模型，当  $p = 0.0996$  时效果最优，此时  $w_1 = 0.2$ ， $w_2 = 0.809$ ；

广义加权指数平均组合预测模型，当  $p = -0.6029$  时果最优，此时  $w_1 = 0.1738$ ， $w_2 = 0.8262$ 。

将灰色模型、BP 神经网络模型及组合模型的预测结果作比较，可以得到各模型的预测值及预测效果评价表，在此为了降低计算量又不失一般性，原始序列中选择消耗量数据变化较大的部分（2005~2008 年）数据，BP 神经网络采用 4 层网络结构，结果分别见表 2、表 3。

表 2 实际消耗量与各模型的预测值

时间	实际消耗量	灰色模型预测值	神经网络模型预测值	广义加权算术平均组合预测值	广义加权对数平均组合预测值	广义加权指数平均组合预测值
2005	26	26.4	27.5	26.3	26.2	25.7
2006	32	28.1	28.7	30.2	30.5	31.1
2007	40	36.7	35.1	38.4	38.4	38.7
2008	36	34.8	33	34.7	34.9	35

表 3 消耗量预测效果评价

预测效果评价指标	SSE	MAE	MSE	MAPE	MSPE
灰色模型	27.7	2.2	1.3158	0.0696	0.0424
神经网络模型	46.15	3.175	1.6983	0.1	0.0524
广义加权算术平均组合模型	7.58	1.25	0.6883	0.0375	0.0206
广义加权对数平均组合模型	6.06	1.10	0.6154	0.0325	0.018
广义加权指数平均组合模型	3.59	0.875	0.4737	0.0257	0.0135

根据各类数学模型效果评价结果，从表 2 和表 3 中可以看出，广义加权指数平均组合预测数学模型是该指挥系统某备件预测的最佳数学模型，其模型参数最优，此时式 (9) 中， $n = 2$   $p = -0.6029$ ， $w_1 = 0.1738$ ， $w_2 = 0.8262$ 。

## 4 结论

在对指挥系统维修器材消耗规律建立基于灰色理论模型和基于神经网络的模型后,通过选择合适的组合预测模型及最佳的模型参数,广义加权函数平均组合预测模型能获得最佳的模型组合形式,从而能够有效地提高器材消耗的预测精度,对于维修器材的消耗预测能够取得较好的预测效果。

### 参考文献:

- [1] 徐廷学, 基于灰色预测法的军械维修器材消耗规律[J], 火力与指挥控制, 2011,36(1);
- [2] 赵建忠, 徐廷学, 等, 基于粗糙集和 BP 神经网络的导弹备件消耗预测[J], 兵工自动化, 2012 (07);
- [3] 刘琼,段亦彬,基于灰色理论的火炮维修器材消耗预测模型[J],四川兵工学报,2011,32(1);
- [4] 李友坤, BP 神经网络的研究分析及改进应用[D], 安徽理工大学, 2012:20-25;
- [5] 王亮,张清,刘军利,等,组合预测模型在车辆器材消耗规律中的应用研究[J],军事交通学院学报, 2008,10(1);
- [6] 贾保华, 但琦, 等, 油料消耗神经网络组合预测模型[J], 后勤工程学院学报, 2008 (04)。