

doi: 10.7690/bgzd.2015.11.001

## 基于灰色模型的艇载导弹测试电源系统故障预测

万峻, 肖凡

(海军潜艇学院, 山东 青岛 266042)

**摘要:** 针对艇载导弹测试电源系统故障分析问题, 提出一种基于灰色模型的艇载导弹测试电源系统故障预测方法。为了提高导弹地面电源的工作效率, 从分析历史检测数据入手, 采用灰色理论的分析方法, 建立了适合导弹地面电源故障时间预测的 GM(1,1)模型, 详细阐述了模型检验的方法, 并通过实例清晰地说明了模型运用和检验的具体步骤。数据检验结果表明: 该故障预测模型不但能够较好地模拟历史灾变数据, 而且其预测的故障时间与实际情况相吻合。

**关键词:** 导弹地面电源; 灰色理论; GM(1,1); 故障; 预测

**中图分类号:** TJ760.6 **文献标志码:** A

## Submarine Missile Test Power System Failure Forecast Based on Grey Model

Wan Jun, Xiao Fan

(Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China)

**Abstract:** For submarine missile test power system fault analysis, a missile test power system fault prediction method based on grey model was put forward. In order to raise missile ground power working efficiency, the suitable missile ground power failure forecast model of GM(1,1) was established by analyzing the record test data and using gray theory. And the check method of the model was detailed explained. The examples clearly show the model use steps. The data test show that the fault forecast model can simulate history disaster record data accurately, and the forecast fault time is the same as the actual situation.

**Keywords:** missile ground power; grey theory; GM(1,1); failure; forecast

### 0 引言

艇载导弹武器系统由测试设备、发射装置及导弹组成, 是一个复杂的技术密集型系统。测试电源是导弹地面测试设备的重要组成部分, 可以分为直流电源和交流电源, 承担着给众多测试设备供电的任务。由于弹上电池多为一次性的化学电池, 所以在测试及发射过程中地面电源还给导弹控制系统提供工作电源。艇载导弹一般还具有数量多的特点, 因此测试电源供电对象众多。地面电源额定输出电流大、电压高而且使用频率高, 受艇载环境影响, 其内部元件易因受热烧蚀等原因造成输出参数不稳定或者不合格等故障, 导致导弹武器系统无法正常工作。针对这一问题, 现在的处理方法一般是故障出现时对元件进行更换, 恢复设备的正常工作状态: 文献[1]针对某型导弹地面交流电源故障诊断提出了神经网络的处理方法; 文献[2]采用小波和神经网络相结合的方法对导弹故障诊断进行了研究; 文献[3]探讨了Labview和神经网络相结合对导弹发射设备的故障诊断方法; 文献[4]则从工程角度出发提出

了一种在线检测导弹故障的方法。显然, 这些都没有解决导弹设备故障预报的问题。如果能够对导弹地面电源故障的出现时间进行预测, 则能有效地提高地面测试设备的使用效率; 同时对于维修的准备工作也有极大的促进作用, 大幅提高维修的效率。然而, 这方面的工作由于建模的困难性, 方法和成果相对缺乏, 目前鲜有报道。

灰色系统理论能够对“小样本、贫信息”的不确定性问题进行有效分析<sup>[5]</sup>。导弹地面电源的故障信息符合这一范畴, 笔者就使用这一理论解决导弹地面电源故障预测的问题进行研究。

### 1 灰色灾变预测

灰色灾变预测的实质是异常值预测, 其任务是给出一个或者几个异常值出现的时刻, 以便提前准备, 采取对策<sup>[6-7]</sup>。本节就灰色灾变预测的相关理论作简单介绍。

灾变序列定义:

设原始序列  $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ , 给定某一灾变值(异常值)  $\eta$ , 称  $X$  的子序列

收稿日期: 2015-07-16; 修回日期: 2015-08-25

作者简介: 万峻(1974—), 男, 湖南人, 硕士, 工程师, 从事作战指挥及仿真研究。

$$X_\eta = (x(q(1)), x(q(2)), \dots, x(q(m))) = \{x(q(i)) | x(q(i)) \geq \eta; i = 1, 2, \dots, m\} \quad (1)$$

为上灾变序列；若

$$X_\eta = (x(q(1)), x(q(2)), \dots, x(q(s))) = \{x(q(i)) | x(q(i)) \leq \eta; i = 1, 2, \dots, s\}, \quad (2)$$

则称为下灾变序列。上灾变序列和下灾变序列统称为灾变序列。

设  $X$  为原始序列，若

$X_\eta = (x(q(1)), x(q(2)), \dots, x(q(m))) \subset X$  为灾变序列，则称

$$Q = (q(1), q(2), \dots, q(m)) \quad (3)$$

为灾变日期序列。

设公式序列 (3) 的 1-AGO<sup>[5]</sup> 序列为

$$Q^1 = (q^{(1)}(1), q^{(1)}(2), \dots, q^{(1)}(m))。 \quad (4)$$

$Q^1$  的紧邻均值生成序列<sup>[5]</sup>为  $Z^1$ 。则称

$$q(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (5)$$

为灾变 GM(1,1)<sup>[7]</sup> 模型，其中：第 1 个“1”表示“一阶方程”；第 2 个“1”表示“1 个变量”。

令

$$\left. \begin{aligned} Y &= [x(2) \quad x(3) \quad \dots \quad x(n)]^T \\ B &= \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix} \\ \hat{A} &= [a \quad b]^T \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

则最小二乘估计

$$\hat{A} = (B^T B)^{-1} B^T Y。 \quad (7)$$

参数  $-a$  为发展系数， $b$  为灰色作用量。方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (8)$$

为 GM(1,1) 模型公式 (5) 的白化方程。

灾变日期序列的 GM(1,1) 序号响应式<sup>[5]</sup>为：

$$\left. \begin{aligned} \hat{q}(k+1) &= \hat{q}^{(1)}(k+1) - \hat{q}^{(1)}(k) \\ \hat{q}^{(1)}(k+1) &= \left( q(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ak} + \frac{b}{a} \end{aligned} \right\}。 \quad (9)$$

设  $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$  为原始序列， $n$  为现

在时刻，给定异常值(灾变值)  $\eta$ ，相应的灾变日期序列为  $Q = (q(1), q(2), \dots, q(m))$ ，其中： $q(m) (m \leq n)$

为最近一次灾变发生的日期，则称  $\hat{q}(m+1)$  为下一次灾变的预测日期；对任意  $k > 0$ ， $k$  为整数，称  $\hat{q}(m+k)$  为未来第  $k$  次灾变的预测日期。

## 2 故障预测建模

艇载导弹测试电源的故障具有典型的灰色系统特点：首先，虽然平均无故障时间较长，但是使用频率高，其故障发生仍然具有不确定性；其次，故障信息属于小样本，无法进行概率统计分析；再次，故障信息属于贫信息，无法进行经典数学解析建模。下面，结合某导弹地面电源检测数据进行故障预测方法的详细阐述。

### 2.1 数据整理

首先，将记录的检测数据和发生时间，依据时间发生的先后分别进行排序，整理成灾变序列和日期序列。然后，根据输出设计指标设定灾变值。据此，对某导弹地面电源检测的原始数据进行整理后，序列如下(单位：V)。

原始数据为：

$$X = (x(1), x(2), \dots, x(18)) = (223, 221, 208, 226, 218, 219, 220, 200, 221, 195, 222, 224, 221, 185, 217, 223, 201, 224)。 \quad (10)$$

上述数据对应的检测时间分别为：2010 年的 1—12 月及 2011 年的 1—6 月，每月检测 1 次。根据电源设计参数，可令灾变值为  $\eta = 210$ ；因此，可得下限灾变序列

$$X_\eta = (x(3), x(8), x(10), x(14), x(17)) = (208, 200, 195, 185, 201)。 \quad (11)$$

对应的灾变日期序列为

$$Q = (q(1), q(2), q(3), q(4), q(5)) = (3, 8, 10, 14, 17)。 \quad (12)$$

### 2.2 预测建模

因此  $Q$  的 1-AGO 序列为

$$Q^1 = (3, 11, 21, 35, 52)。 \quad (13)$$

$Q^1$  的紧邻均值生成序列为

$$Z^1 = (7, 16, 28, 43.5)。 \quad (14)$$

设  $q(k) + az^{(1)}(k) = b$ ，因此，  
由公式 (6) 有：

$$B = \begin{bmatrix} -7 & 1 \\ -16 & 1 \\ -28 & 1 \\ -43.5 & 1 \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} 8 \\ 10 \\ 14 \\ 17 \end{bmatrix}; \quad (15)$$

$$\hat{A} = [a \quad b]^T = [-0.253 \ 61 \quad 6.258 \ 452]^T. \quad (16)$$

由公式 (9) 有：

$$\left. \begin{aligned} q^{(1)}(k+1) &= 27.667e^{0.253 \ 61k} - 24.667 \\ q(k+1) &= 27.667(e^{0.253 \ 61k} - e^{0.253 \ 61(k-1)}) \\ &= 6.199 \ 8e^{0.253 \ 61k} \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

### 3 模型检验

因此灾变日期序列的模拟序列可由式 (17) 计算：

$$\hat{Q} = (\hat{q}(1), \hat{q}(2), \hat{q}(3), \hat{q}(4), \hat{q}(5)) = (3, 7.989, 10.296, 13.268, 17.098). \quad (18)$$

由残差公式<sup>[5]</sup>：

$$\varepsilon(k) = q(k) - \hat{q}(k); \quad k=1, 2, \dots, 5, \quad (19)$$

有

$$\varepsilon = (\varepsilon(1), \varepsilon(2), \varepsilon(3), \varepsilon(4), \varepsilon(5)) = (0, 0.011, -0.296, 0.732, -0.098). \quad (20)$$

由相对误差公式<sup>[5]</sup>：

$$\Delta_k = \left| \frac{\varepsilon(k)}{q(k)} \right|; \quad k=1, 2, \dots, 5. \quad (21)$$

得相对误差序列：

$$\Delta = (0, 0.1\%, 2.96\%, 5.1\%, 0.6\%). \quad (22)$$

平均相对精度为

$$1 - \bar{\Delta} = 1 - \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \Delta_k = 1 - 1.75\% = 98.25\%. \quad (23)$$

因此，可用

$$q(k+1) = 6.199 \ 8e^{0.253 \ 61k}. \quad (24)$$

进行该型导弹地面电源故障的预测。实际曲线和故障预测曲线如图 1 所示。

据此，可以预测 2011 年 6 月以后发生的第 1 次电源故障的时间为： $\hat{q}(5+1) = 6.199 \ 8e^{0.253 \ 61 \times 5} \approx 22$ ，

即以后的第 5 个月 ( $\hat{q}(6) - \hat{q}(5) = 22 - 17 = 5$ )，为 2011 年的 11 月。实际情况是，2011 年的 11 月下旬出现过一次电源输出只有 180 V 的情况，经过修理后故障排除。

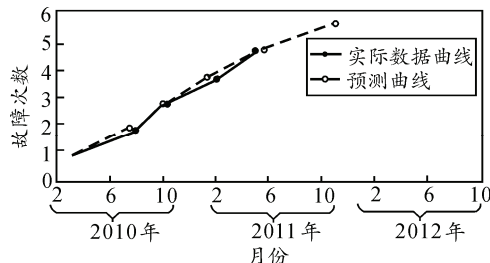


图 1 实际曲线和预测曲线

### 4 结束语

笔者从分析检测数据及故障发生时间信息入手，借助灰色系统的相关理论，建立了适合该系列数据的 GM(1,1) 预测模型。数据检验结果表明：所建立的模型具有很高的模拟精度，而且对未来故障的预测也较为准确，从而有效地解决了该故障预报问题，对提高设备的使用效率和做好维修准备工作具有一定的意义。由于不同电源间的故障数据及发生时间存在差异，文中所建立的模型不一定适合其他场合。不同场合的预测模型需要进行模型参数的调整，这方面的工作需视具体情况作进一步研究。

### 参考文献：

- [1] 杨俊河, 范金锁, 张合新. 基于神经网络的某导弹地面交流电源故障诊断[J]. 传感器与微系统, 2007(11): 17-21.
- [2] 李莉. 基于小波和神经网络的某导弹故障诊断方法[J]. 电子测量技术, 2011(4): 100-102.
- [3] 刘爱东, 杨健, 张永强, 等. 导弹自动发射仪系统智能故障诊断技术研究[J]. 火箭与制导学报, 2010(1): 229-232.
- [4] 崔宇, 黄心汉, 王敏. 导弹故障检测的一种工程方法[J]. 火箭与制导学报, 2009(3): 213-216.
- [5] 刘思峰, 党耀国. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 199-207.
- [6] 邓聚龙. 灰色系统理论教程[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1990: 23-26.
- [7] 王学萌, 张继忠, 王荣. 灰色系统分析及实用计算程序[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 301-329.