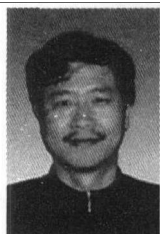


文章编号:1671-7848(2010)S<sub>2</sub>-0195-03

## A320 飞机空调系统故障预测模型研究

曾学锋<sup>1,2</sup>, 邓建茜<sup>2</sup>, 陈静杰<sup>2</sup>

(1. 北京飞机维修工程有限公司, 北京 100621; 2. 中国民航大学 航空自动化学院, 天津 300300)



**摘 要:** 故障预测对飞机空调系统的维护具有重要意义。基于灰色预测建模理论, 传统 GM(1,1) 预测模型只适用于对较强指数规律序列进行预测, 不适合预测波动序列。而 A320 飞机空调系统的参数具有波动性的特点, 因此, 对传统的 GM(1,1) 预测模型进行了改进: 对原始波动序列采用 3 点均值法进行预处理, 并修正了背景值, 建立了少数据样本情况下的预测模型, 提高了预测精度。最后以 A320 空调系统的水分离器出口温度为例进行了预测分析, 结果证明该模型满足预测精度要求, 该模型是有效的。

**关 键 词:** 飞机空调系统; GM(1,1) 预测模型; 故障预测; 波动序列

**中图分类号:** TP 27 **文献标识码:** A

## On Fault Prediction Model for A320 Aircraft Air Conditioning System

ZENG Xue-feng<sup>1,2</sup>, DENG Jian-qian<sup>2</sup>, CHEN Jing-jie<sup>2</sup>

(1. Aircraft Maintenance Engineering Company of Beijing, Beijing 100621, China;

2. College of Aeronautical Automation, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**Abstract:** Fault prediction is of great importance to maintain the aircraft air conditioning system. Based on grey prediction model theory, traditional GM(1,1) prediction model could be used only in the sequences with more obvious exponential characters. And it is not suitable for fluctuant sequence. Considering the parameters of aircraft air conditioning system are fluctuant, traditional GM(1,1) prediction model is improved and a prediction model is built under small sample circumstance. The improvement prediction model introduces an operator of three points to dispose of the original fluctuant sequences and corrects the background sequences using a new method. The forecasted sequence of the water extractor A320 air conditioning system shows that the improvement prediction mode satisfies the accuracy requirement and it is validated.

**Key words:** aircraft air conditioning; GM(1,1) prediction model; fault prediction; fluctuant sequence

## 1 引 言

A320 空调系统故障预测是针对空调系统当前运行状态, 预测系统在未来时间段的运行情况。将预测结果及时给维护人员提供保障决策, 或在出现始料未及的故障时触发一种简单的维修活动, 对飞机空调系统维护工作有重要意义。

目前, 国内外对飞机空调系统的研究主要是针对故障排除<sup>[1-2]</sup>, 对飞机空调系统故障预测的研究还很少。本文考虑飞机空调系统中, 有的信息能知道, 有的信息难以获取, 故障预测就是利用已知信息, 预测含有不可知信息系统的状态和发展趋势, 是一个灰色系统的白化过程<sup>[3]</sup>。灰色理论预测法已经在故障预测方面得到了广泛应用<sup>[4-8]</sup>。因此, 本文针对 A320 飞机空调系统性能参数容易波动的特性, 对传统 GM(1,1) 预测模型进行了改进, 最后

以飞机空调系统水分离器出口温度为研究对象并进行预测, 满足精度要求。

## 2 传统 GM(1,1) 预测模型

GM(1,1) 预测模型是灰色预测的基本模型, 要求预测序列满足平滑性要求才能建立有效的预测模型<sup>[3]</sup>, 下面介绍其建模过程。

令  $x^{(0)}$  为系统某一特征量的观测值:

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

对  $x^{(0)}$  进行一次累加, 得  $x^{(0)}$  的 AGO 序列  $x^{(1)}$ :

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

式中,  $x^{(1)} = x^{(0)}(1), x^{(1)}(k) = \sum_{m=1}^k x^{(0)}(m)$ 。

令  $z^{(1)}$  为  $x^{(1)}$  的均值 (MEAN) 序列:

$$z^{(1)}(k) = 0.5(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)) \quad (3)$$

$$z^{(1)} = (z^{(1)}(2), z^{(1)}(3), \dots, z^{(1)}(n)) \quad (4)$$

收稿日期: 2010-06-25; 收修定稿日期: 2010-07-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60832011, 60572166); 天津市重点科技攻关项目 (06YFGZGX00700); 博士启动基金资助项目 (QD03X02)

作者简介: 曾学锋 (1963-), 男, 北京人, 高级工程师, 主要从事发动机可靠性与飞机远程监控等方面的工作; 陈静杰 (1967-), 男, 教授。

则 GM(1,1) 的定义型, 即 GM(1,1) 的灰微分方程模型为

$$x^{(0)}(k) + az^{(1)}(k) = b \quad (5)$$

式中, 发展系数  $a$  与灰作用量  $b$  可以用最小二乘法求得, 即:

$$P = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T y_N \quad (6)$$

$$y_N = \begin{pmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{pmatrix}$$

从而得预测模型的白化型:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left( x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) \exp(-ak) + \frac{b}{a} \quad (7)$$

依次累减还原, 得模型预测值:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) \quad (8)$$

### 3 改进 GM(1,1) 预测模型

飞机空调系统受环境与天气变化影响比较大, 特征参数会产生波动。例如, 为在低的环境温度下防止冰冻和限制高的组件排气温度; 水分离器出口温度限制在  $2^\circ\text{C}$  ( $35.60^\circ\text{F}$ ) 和  $70^\circ\text{C}$  ( $158.00^\circ\text{F}$ ) 之间, 即水分离器出口温度在这个范围内波动。传统 GM(1,1) 模型不适合波动数据序列的预测, 可以采用加权均值生成数据的方法<sup>[6]</sup>, 将随机序列的数据强化成有规律的一个数据序列。这种方法保持了原有数据序列的故有特性, 但当原有数据序列个数多时会造成计算量大。为解决上述两类问题, 本文引入均值算子的方法, 对具有波动性质的原始数据列进行 3 点均值处理, 生成一个新的序列。另外, GM(1,1) 的预测精度取决于参数  $a$  和  $b$ , 而  $a$  和  $b$  的值依赖于原始序列和背景值的构造形式, 即  $z^{(1)}(k)$  的构造是导致预测精度的关键因素之一。传统 GM(1,1) 在背景值的取值上采用基本的紧邻均值法, 方法简单, 计算简便, 但预测精度不高。本文对背景值进行了改造, 弥补了该模型的不足。

1) 波动序列的均值预处理 定义  $\sigma_{x^0}(k)$  为初始观测序列  $x^{(0)}$  的级比, 且  $\sigma_{x^0}(k) = x^{(0)}(k-1)/x^{(0)}(k)$ ,  $x^{(0)}(k), x^{(0)}(k-1) \in x^{(0)}$ 。如果级比序列是  $\sigma_{x^0}(k) > 1$  与  $\sigma_{x^0}(k) < 1$  的混合序列, 且  $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} > 0.2$ , 则  $x^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))$  是波动序列。波动序列不满足传统 GM(1,1) 模型的光滑性要求, 因此对原始序列  $x^{(0)}$  进行 3 点均值处理, 生成新的序列  $x^{(0)} = \{x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n)\}$ , 即:

$$x^{(0)}(i) = \begin{cases} \sum_{k=i-2}^i x^{(0)}(k)/3, i \geq 3 \\ \sum_{k=1}^i x^{(0)}(k)/i, i < 3 \end{cases} \quad (9)$$

若数据波动的幅值较大, 则要取的点适当多一些。然后对序列  $x^{(0)}(i)$  进行预测, 最后通过均值逆运算还原即可得到  $x^{(0)}$  的预测序列。

2) 背景值  $z^{(1)}(k)$  的构造 构造示意图, 如图 1 所示。

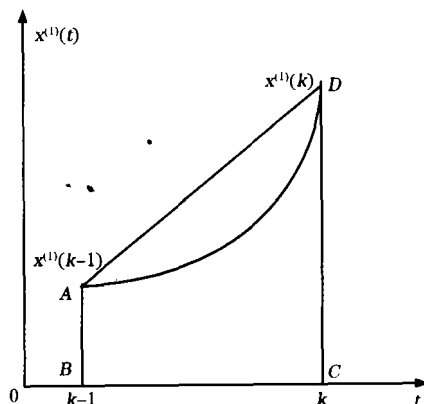


图 1  $z^{(1)}(k)$  的构造示意图

在图 1 中, 时间  $t$  为横轴,  $t$  时刻的采样值  $x^{(1)}(t)$  为纵轴, 则传统 GM(1,1) 预测模型背景值  $z^{(1)}(k)$  的改造可以看成是梯形 ABCD 的面积<sup>[5]</sup>。灰色预测的理论实质是利用灰色理论将无规则的原始数列  $x^{(0)}(k)$  进行累加生成, 得到接近指数规律的生成数列  $x^{(1)}(k)$  再重新建模。因此,  $x^{(1)}(k)$  应该是凹的, 曲线 AD 在区间  $[k-1, k]$  上对应的面积始终小于梯形 ABCD 的面积。因而,  $z^{(1)}(k)$  的取值总是大于实际的值, 模型会产生滞后误差。原始序列增长变化越剧烈, 滞后误差就越大, 这也就是 GM(1,1) 模型的发展系数  $a$  的绝对值很小时才能获得较高预测精度的原因。为提高预测精度, 本文采用文献[7]的方法, 对  $z^{(1)}(k)$  的取值进行了改造。

设  $x^{(1)}(t)$  按指数规律变化, 可用以下曲线近似表示  $x^{(1)}(t) = \alpha \exp(\rho t)$ , 该曲线过  $(k-1, x^{(1)}(k-1))$  和  $(k, x^{(1)}(k))$  两点, 因此有:

$$\begin{cases} x^{(1)}(k-1) = \alpha \exp[\rho(k-1)] \\ x^{(1)}(k) = \alpha \exp(\rho k) \end{cases}$$

计算上式, 得:

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

则曲面 ABCD 面积:

$$\begin{aligned} z^{(1)}(k) &= \int_{k-1}^k x^{(1)}(t) dt = \int_{k-1}^k \alpha \exp(\rho t) dt = \\ &= \alpha / \rho \left( \exp(\rho k) - \exp[\rho(k-1)] \right) = \\ &= \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{\ln x^{(1)}(k) - \ln x^{(1)}(k-1)} \end{aligned} \quad (10)$$

用  $z^{(1)}(k) = \frac{x^{(1)}(k) - x^{(1)}(k-1)}{\ln x^{(1)}(k) - \ln x^{(1)}(k-1)}$  代替  $z^{(1)}(k) = 0.5(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1))$ ，更接近实际值。

3) 残差检验与精度计算

①残差检验 令  $\varepsilon(k)$  为预测模型的残差，则有：

$$\varepsilon(k) = \frac{x^{(0)} - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} 100\% \tag{11}$$

一般预测模型要求  $\varepsilon(k) < 20\%$ ，最好  $\varepsilon(k) < 10\%$ 。 $\varepsilon(k)$  越小，表明预测值越接近实际测量值。

②精度计算 令  $p$  为精度，则有：

$$p = (1 - \varepsilon_{\text{avg}}) 100\% \tag{12}$$

式中， $\varepsilon_{\text{avg}} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=2}^n |\varepsilon(k)|$ ，表示平均参差。

一般要求  $p > 80\%$ ，最好  $p > 90\%$ 。 $p$  越大，表示预测模型越有效。

4 预测算例

为在低环境温度下防止冰冻和限制高的组件排气温度，水分离器出口温度限制在 2℃ (35.60°F) 和 70℃ (158.00°F) 之间。温度高说明空调系统的热交换器有故障或者通道堵了，温度低说明引气系统有问题。本文利用某段时间内得到的 A320 空调系统水分离器出口温度数据验证这种预测模型的有效性，为 A320 空调系统故障预测提供方法支持。得到的数据，见表 1。

表 1 A320 某段时间水分离器出口温度

序号	1	2	3	4	5	6	7
$x^{(0)}(k)$	25.2	24.0	28.2	27.9	24.9	30.5	31.9

取表 1 中的前 5 个数据作为原始序列  $x^{(0)}$ ，进行级比计算。级比序列  $\sigma_{x^0} = \{\sigma_{x^0}(2), \sigma_{x^0}(3), \sigma_{x^0}(4), \sigma_{x^0}(5)\} = \{0.952\ 4, 1.175\ 0, 0.989\ 4, 0.892\ 5\}$ ，其中， $\sigma_{x^0_{\max}} - \sigma_{x^0_{\min}} = 1.175\ 0 - 0.892\ 5 = 0.282\ 5 > 0.2$ ，序列  $x^{(0)}$  是波动序列。用前文的 3 点均值法对其进行预处理，生成新序列  $x^{(0)'} = \{25.2, 24.6, 25.8, 26.7, 27\}$ ， $\sigma_{x^0_{\max}} - \sigma_{x^0_{\min}} = 1.048\ 8 - 0.976\ 2 = 0.072\ 6 < 0.2$ 。原始序列进行预处理后波动减小。

序列  $x^{(0)'}$  一次累加生成的序列  $x^{(1)} = \{25.2, 49.8, 75.6, 102.3, 129.3\}$ ，根据前文背景值  $z^{(1)}(k)$  的构造法得背景值序列  $z^{(1)} = \{36.114\ 3, 61.805\ 1, 88.278\ 1, 115.273\ 5\}$ ，由最小二乘法得参数  $a = -0.030\ 6, b = 23.718\ 7$ 。

根据式(7)得 AGO 序列  $x^{(1)}$  的预测值  $\hat{x}^{(1)}$  序列， $\hat{x}^{(1)} = \{25.2, 50.068\ 4, 75.709\ 5, 102.147\ 3, 129.406\ 7\}$ ，累减还原得  $x^{(0)}$  的预测序列  $\hat{x}^{(0)} = \{25.2, 24.868\ 4, 25.641\ 1, 25.437\ 8, 27.259\ 4\}$ ，

再通过 3 点均值逆运算得原始序列  $x^{(0)}$  的预测值  $\hat{x}^{(0)}(k)$ 。

分别用传统 GM(1,1) 预测模型和改进后的 GM(1,1) 预测模型对原始序列  $x^{(0)}$  的预测值，并进行了对比。对比结果，见表 2。

表 2 两种预测模型的拟合值与残差对比

序号	1	2	3	4	5	
$\hat{x}^{(0)}(k)$	改进模型	25.200 0	24.563 8	27.186 5	27.590 1	27.001 5
	传统模型	25.200 0	26.031 3	26.258 8	26.488 2	26.719 6
$\varepsilon(k)(\%)$	改进模型	0	2.236 7	-3.594 0	-1.110 8	8.439 8
	传统模型	0	8.463 8	-6.883 7	-5.060 2	7.307 6

根据式(12)，分别计算两种预测模型的精度。传统 GM(1,1) 预测模型的精度  $p = 93.07\%$ ，改进 GM(1,1) 预测模型的精度为  $p = 96.15\%$ 。改进 GM(1,1) 预测模型精度比传统 GM(1,1) 预测模型精度提高了 3 个百分点。这说明本文建立的改进 GM(1,1) 预测模型具有很好的拟合度。利用改进 GM(1,1) 模型对后续 2 个采样时刻的数据进行预测，结果见表 3。

表 3 改进 GM(1,1) 预测模型的预测值与相对误差

序号	6	7
$x^{(0)}(k)$ 预测值	29.727 4	30.210 6
$\varepsilon(k)(\%)$	-2.533 1	-5.296 5

残差都在 10% 以内。

5 结 语

本文基于灰色预测建模理论，针对传统 GM(1,1) 预测模型不适合预测波动序列的缺陷，对原始波动序列采用 3 点均值法进行预处理，并对背景值进行重新构造，提高了预测精度。最后将这种改进的 GM(1,1) 预测模型应用在 A320 飞机空调系统水分离器出口温度的变化趋势预测上，预测结果满足精度要求，证明了该模型的有效性。为 A320 飞机空调系统故障预测提供方法支持。

参考文献：

[1] 刁雄. A320 空调系统故障的分析与处理[J]. 航空维修与工程, 2004, 3: 44-45.  
[2] 朱江, 胡静. B737 飞机空调系统常见故障分析[J]. 中国民航学院学报, 2004, 26(4): 32-35.  
[3] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.  
[4] 赵亚琴, 唐桂忠, 陈惠明. 基于 KPCC 和灰色模型的凝汽器故障预测[J]. 控制工程, 2009, 16(6): 780-782.  
[5] 郭阳明, 姜红梅, 翟正军. 基于灰色理论的自适应多参数预测模型[J]. 航空学报, 2009, 30(5): 925-931.  
[6] 蔡琼, 陈萍. 灰色 GM(1,1) 模型及其在电力负荷预测中的应用[J]. 控制理论与应用, 2006, 25(3): 24-26.  
[7] 徐艳玲, 张新国, 朱容芳, 等. 飞机操纵面故障的多参数预测模型[J]. 计算机仿真, 2008, 25(11): 101-105.  
[8] 王晗中, 邹君华, 刘飞. 改进 UGM(1,1) 模型在雷达故障预测中的应用[J]. 空军雷达学院学报, 2009, 23(5): 321-323.