

GM(1,1)正弦模型修补气温监测缺失数据的探讨

郭赞洪, 唐其环

(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 目的 建立预测精度较好的大气温度监测缺失数据修补的方法和模型。方法 采用正弦函数对GM(1,1)标准模型进行修正,建立分段的GM(1,1)正弦修正模型对缺失数据进行修补。以万宁试验站某天监测的温度日记时值数据为试验数据,同时建立GM(1,1)标准模型、GM(1,1)时序修正模型和GM(1,1)正弦修正模型,对比分析各模型的修补误差,确立较好的修补模型。结果 从模型的拟合效果分析,GM(1,1)标准模型和GM(1,1)正弦修正模型的拟合性最好,GM(1,1)时序修正模型的拟合性相对较差一些;从预测精度上分析,GM(1,1)标准模型和GM(1,1)时序修正模型预测修补效果差,平均相对误差分别达到22.54%和17.70%,而GM(1,1)正弦修正模型预测修补的平均误差仅为3.14%,得到了较大的改进,预测效果好。结论 正弦修正模型能很好地修补缺失数据,其修补效果比时序修正模型和标准模型都要好。

关键词: GM(1,1); 正弦修正模型; 时序修正模型; 标准模型; 模型拟合; 预测修补

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2015.01.006

中图分类号: TJ99; N941 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2015)01-0025-06

Exploration of Repairing Temperature Monitoring Patch Missing Data with GM(1,1) Sinusoidal Model

GUO Zan-hong, TANG Qi-huan

(South West Institute of Technical Engineering, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To establish a method and model with better prediction accuracy for repairing atmospheric temperature monitoring missing data. **Methods** GM(1,1) standard model was modified by sine function, and the missing data was repaired by the segmented GM(1,1) sinusoidal model established. Using the temperature diary time value data monitored one day in Wanning station as the test data, the GM(1,1) standard model, GM(1,1) timing corrected model and GM(1,1) sinusoidal model were established at the same time. Missing data repairing by the three models were comparatively analyzed, and the relatively better repair model was determined.

Results From the analysis of the model fitting results, the fitting of the GM(1,1) standard model and GM(1,1)

收稿日期: 2014-09-21; 修订日期: 2014-10-25

Received: 2014-09-21; Revised: 2014-10-25

作者简介: 郭赞洪(1989—),男,四川人,硕士研究生,主要研究方向为环境数据分析与处理。

Biography: GUO Zan-hong(1989—), Male, from Sichuan, Master student, Research focus: environmental data analysis and processing.

通讯作者: 唐其环(1965—),男,四川人,高级工程师,主要研究方向为环境腐蚀性评估。

Corresponding author: TANG Qi-huan(1965—), Male, from Sichuan, Senior engineer, Research focus: environment corrosiveness evaluation.

sinusoidal model was the best, while fitting of the GM (1, 1) timing corrected model was relatively poor. From the prediction accuracy of the analysis, GM (1, 1) standard model and GM (1, 1) timing corrected model showed poor results in repairing prediction, with the average relative errors of 22.54% and 17.70% , respectively. Whereas the average prediction error of GM (1, 1) sinusoidal model was only 3.14% , which showed great improvement, and had a good prediction result. **Conclusion** GM (1, 1) sinusoidal model could well repair the missing data, and its result was better than those of GM (1, 1) standard model and GM (1, 1) timing corrected model .

KEY WORDS: GM(1, 1); sinusoidal model; timing corrected model; standard model; model fitting; repairing prediction

环境条件对装备的使用或长期放置有重要的影响,文献[1—5]介绍了不同环境条件对于装备器械的影响,因此,了解环境的各性质很重要。其中,温度是气象站或者相关试验站所要监测的一个基本气象因素。由于在监测过程中,仪器的突然损坏、采集数据记录时突然出错等原因,会造成某段时间温度数据的缺失,如何对这部分数据进行修补至关重要。同时,环境温度受到各种自然环境因素的影响,温度变化难以预测,但是对于大部分天气没有突然转变的情况,温度变化是具有一定的规律性的。文中将对具有规律性的温度数据进行缺失修补研究分析。文静等人^[6]研究了人工监测数据和自动站监测数据的相互填补,但随着信息自动化,人工检测将被完全取代。灰色系统法^[7-9]中的GM(1,1)模型法近些年在许多领域中常用于缺失数据修补^[7-9],而且是灰色系统法中应用最多的方法^[10]。

GM(1, 1)标准模型法适合于具有指数型性质增加或减小的数据^[11-14],而不是所有的数据都恰好满足这样的要求。因此,不同领域的学者们对GM(1, 1)标准模型进行改进,以适用于该领域数据变化情况^[15-21]。Zou Lihua^[22]、倪凯^[23]和彭涛^[24]分别在振动数据、量测数据和软基沉量数据方面采用将GM(1, 1)模型进行研究改进,结果可知,针对不同数据变化规律将GM(1, 1)模型进行改进后,预测效果得到了较大的提高。唐五湘等人^[25-26]提出的时序修正法改进后的GM(1, 1)模型即GM(1, 1)时序修正模型,对于某些时序数据的预测具有一定的改进。文中研究的对象是大气温度数据,根据大气温度数据的变化情况,提出了以正弦函数对GM(1, 1)标准模型进行改进,得到GM(1, 1)正弦修正模型,对大气温度数据具有较好的预测修补作用。

文中将以万宁试验站监测的温度数据作为原始数据,采用GM(1, 1)正弦修正模型与GM(1, 1)时序修正模型以及GM(1, 1)标准模型进行缺失修补对比分析研究。

1 数学模型

1.1 GM(1, 1)标准模型

根据GM(1, 1)标准模型法的建模过程要求,对原始数据 $X^{(0)}$ 数据进行一次累加生成得到 $X^{(1)}$,如下:

$$X^{(0)} = \{X^{(0)}(1), X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)\}$$

作一次累加公式为:

$$X^{(1)}(j) = \sum_{i=1}^j X^{(0)}(i) \quad (j=1, 2, 3, \dots, n)$$

得到:

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

建立 $X^{(1)}$ 如下的白化微分方程为:

$$\frac{dX^{(1)}}{dt} + aX^{(1)} = u \quad (2)$$

式(2)中的 a 和 u 为待求参数,记参数列为:

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} a \\ u \end{bmatrix} \quad (3)$$

采取最小二乘法^[13]求解 \hat{a} , $\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T y_n$ 。其中, B 和 y_n 分别为:

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(X^{(1)}(1) + X^{(1)}(2)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(X^{(1)}(n-1) + X^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$y_n = [X^{(0)}(2), X^{(0)}(3), \dots, X^{(0)}(n)]^T \quad (5)$$

解出白化微分方程的解为:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a} \quad (6)$$

式(4)即为通过原始数据建立起来的GM(1, 1)模型。

1.2 GM(1, 1) 时序修正模型

根据唐五湘^[25]提出的时序修正法对GM(1, 1)模型进行改进。该文提出GM(1, 1)标准模型已经确定

了参数 a 和 b , 在模型中只剩下参数 t , 最终的预测精度就只和参数 t 相关, 因而该作者讨论了输入变量 t 的 GM(1,1) 模型。该模型的建立过程如下:

$$\otimes t = t + \varepsilon t$$

$$\hat{X}^{(1)}(\otimes t + 1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-a\otimes t} + \frac{u}{a} \quad (7)$$

$$\text{得到: } \otimes t = -\frac{1}{a} \ln \frac{X^{(1)}(t+1) - \frac{u}{a}}{X^{(1)}(1) - \frac{u}{a}}$$

$$(t=0, 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

$$\otimes t_i = \hat{B}t^{-\hat{p}}e^{\hat{b}t} \quad (9)$$

其中:

$$\hat{p} = \frac{(n-1) \sum_{t=1}^n (\ln \frac{\otimes t+1}{\otimes t}) (\ln \frac{\otimes t}{\otimes t+1}) + (\ln n) (\ln \frac{\otimes n}{\otimes 1})}{(n-1) \sum_{t=1}^n (\ln \frac{\otimes t}{\otimes t+1})^2 - (\ln n)^2}$$

$$\hat{b} = \frac{1}{n-1} (\ln \frac{\otimes n}{\otimes 1} + \hat{p} \ln n)$$

$$\hat{B} = \frac{\sum_{t=1}^n \otimes t^{-\hat{p}} e^{\hat{b}t}}{\sum_{t=1}^n t^{-2\hat{p}} e^{\hat{b}t}}$$

将式(9)代入式(7)得到:

$$\hat{X}^{(1)}(\otimes t + 1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-a\otimes t} + \frac{u}{a} \quad (10)$$

式(10)即为 GM(1,1) 时序修正模型。

1.3 GM(1,1) 正弦修正模型

根据大气温度的类似周期变化性质, 每天的温度变化类似于正弦函数的变化规律。文中提出了以正弦函数 $\sin x$ 修正 GM(1,1) 标准模型后的 GM(1,1) 正弦修正模型。并且将 GM(1,1) 模型中的 t 以 24 h 的整点时间带入, 即 $t \in (1, 2, \dots, 24)$, 经过试验带入, 过程如下。

标准模型为:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a}$$

改进 1:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-a \cdot \sin t} + \frac{u}{a}$$

改进 2:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{2.1a \cdot \sin t} + \frac{u}{a}$$

改进 3:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{2.1a \cdot \sin((t+6)\pi/19)} + \frac{u}{a}$$

改进 4:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{2.1a \cdot \sin((t+11)\pi/19)} +$$

$$\frac{u}{a} + 24(t+1)$$

改进 5:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{2.1a \cdot \sin((t+11)\pi/24)} +$$

$$\frac{u}{a} + 24(t+1)$$

经检验后, 模型建模部分采用标准模型建模, 预测部分采用改进 5 建模。因为标准模型和改进 5 模型分段使用时具有较好的拟合性, 对该类温度数据具有较好的适应性。故 GM(1,1) 正弦修正模型为:

$$\begin{cases} \hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{-at} + \frac{u}{a}, t < n \\ \hat{X}^{(1)}(t+1) = (X^{(0)}(1) - \frac{u}{a})e^{2.1a \cdot \sin((t+11)\pi/24)} \\ + \frac{u}{a} + 24(t+2), t \geq n \end{cases}$$

其中 n 为建模时的原始数据个数。

2 实例应用

文中以万宁试验站所监测的温度数据为基础, 对以上模型进行检验。该试验站 9 月份的连续小时温度数据见表 1。根据表 1 的原始数据建立相应模型。

2.1 GM(1,1) 模型建立

用前 9 个数据作为原始数据建立 GM(1,1) 模型。

表 1 万宁试验站 9 月份的某天的 24 h 温度数据

Table 1 24 hour temperature data in Wanning test station on one day in September

时间/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
温度/°C	28.0	27.6	26.9	26.5	26.1	26.2	25.9	25.2	25.1	26.0	28.0	30.4
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	31.0	31.4	31.2	31.8	32.0	31.8	30.8	28.2	27.3	27.0	26.9	27.0

2.2 GM(1,1)标准模型

根据表1、式(3)和式(4),建立GM(1,1)标准模型为:

$$\hat{X}^{(1)}(t+1) = -2\ 169.527\ 04e^{-0.012\ 69t} + 2\ 197.562\ 04 \quad (12)$$

2.3 GM(1,1) 时序修正模型

根据式(8)可以求出具体数值,见表2。

表2 ⊗t的计算值

Table 2 The calculated values of ⊗t

t/h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
⊗t/h	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
	13.29	14.36	15.43	16.51	17.58	18.65	19.72	20.80	21.87	22.94	24.01	25.09

$$\begin{cases} \hat{X}^{(1)}(t+1) = -2\ 169.527\ 04e^{-0.012\ 69t} + 2\ 197.562\ 04, t < n \\ \hat{X}^{(1)}(t+1) = -2\ 169.527\ 04e^{0.012\ 69\sin((t+11)\pi/24)} + 2\ 197.562\ 04 + 24(t+2), t \geq n \end{cases} \quad (14)$$

3 结果分析

分别对式(12),(13)和(14)进行计算,对结果进行精度检验,得到绝对误差和相对误差精度检验。见表3。(预测精度=1-相对误差)

分析表3数据可知,从模型的拟合情况分析,GM(1,1)正弦修正模型与GM(1,1)标准模型具有相同的拟合平均误差(和平均相对误差),平均绝对误差只有0.2,平均相对误差也仅0.60%,具有与原始数据相当好的拟合效果。GM(1,1)时序修正模型的拟合平均绝对误差为0.6,平均相对误差为2.29%,虽然略大于另外两种,但拟合效果也不错。预测值的准确性的程度才是我们最关心的,GM(1,1)标准模型的预测平均绝对误差为6.7,平均相对误差为22.54%;GM(1,1)时序修正模型的预测平均绝对误差为5.3,平均相对误差为17.70%;GM(1,1)正弦修正模型的预测平均绝对误差为0.9,平均相对误差为3.14%。无论是从平均绝对误差还是相对误差来分析,GM(1,1)正弦修正模型相较于GM(1,1)标准模型和GM(1,1)时序修正模型有了很大的改进,预测的准确性得到了很大的提高。GM(1,1)标准模型的预测值的误差基本都超过了

将⊗t带入式(9)和式(10)中,得到GM(1,1)时序修正模型,即为:

$$\hat{X}^{(1)}(\otimes t + 1) = -2\ 169.527\ 04e^{-0.012\ 69t} + 2\ 197.562\ 04 \quad (13)$$

2.4 GM(1,1) 正弦修正模型

根据原始数据和式(11),可以求出GM(1,1)正弦修正模型为:

20%, GM(1,1)时序修正模型的预测误差也超过17%,而GM(1,1)正弦修正模型的预测误差绝大部分未超过6%,非常好地预测了原始值。

GM(1,1)标准模型、GM(1,1)时序修正模型、GM(1,1)正弦修正模型与原始数据的图形对比如图1所示,从模型的拟合分析来看,前9个点为模型拟合,GM(1,1)标准模型和GM(1,1)正弦修正模型的拟合很好,GM(1,1)时序修正模型的拟合相对较差一些。从预测部分看,GM(1,1)正弦修正模型从趋势和数值上很好地贴近原始数据的变化情况,而GM(1,1)标准模型和GM(1,1)时序修正模型则与原始数据相差太多,也未能符合原始数据的变化趋势,数值上也相差太多,所以,GM(1,1)正弦修正模型的预测效果远高于另外两种模型。因而,无论从模型拟合还是预测效果上,GM(1,1)正弦修正模型

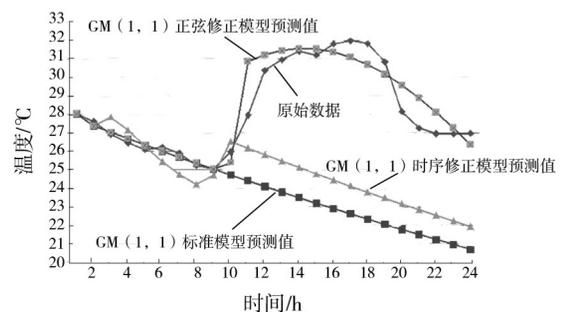


图1 GM(1,1)标准模型、时序修正模型及正弦修正模型预测值与原始值比较

Fig.1 Comparison of the predicted and original values of the GM(1,1) standard model, GM(1,1) timing corrected model and GM(1,1) sinusoidal model

表3 三种模型的误差及其精度计算结果

Table 3 The error and precision calculation results of the three kinds of models

序号 t	原始数据 x_0	GM(1,1)标准模型			GM(1,1)时序修正模型			GM(1,1)正弦修正模型		
		\hat{x}_0	d	$s/\%$	\hat{x}_0	d	$s/\%$	\hat{x}_0	d	$s/\%$
1	28.0	28.0	0.0	0	28.0	0.0	0	28.0	0.0	0
2	27.6	27.4	0.3	0.93	27.4	0.3	0.93	27.4	0.3	0.93
3	26.9	27.0	0.1	0.42	27.9	0.9	3.50	27.0	0.1	0.42
4	26.5	26.7	0.2	0.81	27.1	0.7	2.57	26.7	0.2	0.81
5	26.1	26.3	0.3	0.96	26.3	0.2	0.64	26.3	0.3	0.96
6	26.2	26.0	0.2	0.80	25.4	0.8	3.01	26.0	0.2	0.80
7	25.9	25.7	0.2	0.83	24.7	1.2	4.50	25.7	0.2	0.83
8	25.2	25.4	0.1	0.47	24.2	1.0	4.11	25.4	0.1	0.47
9	25.1	25.0	0.0	0.08	24.7	0.3	1.38	25.0	0.0	0.08
10	26.0	24.7	1.2	4.78	26.5	0.6	2.17	25.4	0.6	2.28
11	28.0	24.4	3.5	12.67	26.2	1.8	6.38	30.9	2.9	10.41
12	30.4	24.1	6.3	20.67	25.8	4.6	15.04	31.2	0.8	2.76
13	31.0	23.8	7.2	23.12	25.5	5.5	17.74	31.5	0.5	1.62
14	31.4	23.5	7.9	25.18	25.1	6.3	20.02	31.6	0.2	0.49
15	31.2	23.2	8.0	25.66	24.8	6.4	20.60	31.5	0.3	1.03
16	31.8	22.9	8.9	28.00	24.4	7.4	23.17	31.4	0.4	1.38
17	32.0	22.6	9.4	29.29	24.1	7.9	24.62	31.1	0.9	2.78
18	31.8	22.3	9.5	29.83	23.8	8.0	25.26	30.7	1.1	3.54
19	30.8	22.1	8.8	28.50	23.5	7.4	23.92	30.2	0.7	2.11
20	28.2	21.8	6.4	22.65	23.2	5.0	17.77	29.6	1.4	5.09
21	27.3	21.5	5.8	21.10	22.8	4.4	16.20	28.9	1.6	6.00
22	27.0	21.2	5.7	21.25	22.5	4.4	16.44	28.1	1.1	4.26
23	26.9	21.0	6.0	22.20	22.2	4.7	17.51	27.3	0.3	1.20
24	27.0	20.7	6.3	23.25	21.9	5.0	18.71	26.4	0.6	2.22
		拟合均值	0.2	0.60	拟合均值	0.6	2.29	拟合均值	0.2	0.60
		预测均值	6.7	22.54	预测均值	5.3	17.70	预测均值	0.9	3.14

注:表中 d 表示绝对误差, s 表示相对误差。

都比另外两种好很多,GM(1,1)正弦修正模型的预测值反应出了原始数据的变化规律,很好地预测了缺失数据。

总的来说,GM(1,1)标准模型的预测效果很差;GM(1,1)时序修正模型的预测效果虽然有一定的提高,但效果也不好;而GM(1,1)正弦修正模型预测效果高于前两种模型,很好地反映出了原始数据的变化规律,拟合很好。

4 结语

文中通过GM(1,1)正弦修正模型与GM(1,1)标准模型和GM(1,1)时序修正模型对环境温度数据进行建模预测,GM(1,1)正弦修正模型对比GM(1,1)

标准模型和GM(1,1)时序修正模型有了很大的改进,且预测值很好地符合了原始数据的变化规律,预测精度较另外两种模型提高了很多,具有较高的预测精度。由于分析数据具有一定的局限性,该模型有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 陈川,王俊,黄海军,等.我国南沿海与欧洲沿海风电机组服役境条件的差异性分析[J].装备环境工程,2013,5(10):22—26.
CHEN Chuan, WANG Jun, HUANG Hai-jun, et al. Discrepant Analysis between Service Conditions of Offshore Wind Turbine in Southeast China Coast and Europe Coast [J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 5(10): 22—26.

- [2] 黄海军,李婵,王俊. 典型大气腐蚀介质的灰色预测模型分析[J]. 装备环境工程, 2012, 1(9):13—16.
HUANG Hai-hun, LI Chan, WANG Ju. Study on Grey Prediction Model of Typical Atmospheric Corrosion Mediums [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 1(9): 13—16.
- [3] 陈群志,崔常京,王逾涯,等. 典型机场地面腐蚀环境数据库研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(3):47—50.
CHEN Qun-zhi, CUI Chang-ring, WANG Yu-ya, et al. Study on Database of Ground Corrosion Environment of Typical Airfield[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(3):47—50.
- [4] 张彩先,汪东林,蒋晓彦,等. 环境温度对直升机的影响及测试数据处理方法研究[J]. 装备环境工程, 2006, 4(3):45—49.
ZHANG Cai-xian, WANG Dong-lin, JIANG Xiao-yan, et al. Study of the Influences of Environmental Temperature on Helicopter and the Test Data Processing Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 4(3): 45—49.
- [5] 李慧,黄海军,王俊,等. 湿热沿海地区环境条件对风电组的影响分析[J]. 装备环境工程, 2013, 5(10):17—22.
LI Hui, HUANG Hai-jun, WANG Jun, et al. Influence of Environment Conditions on Wind Generating Set in Hot and Humid Coastal Areas[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 5(10): 22—26.
- [6] 文静,胡滨,马宏艳. 自动气象站与人工温湿度计观测湿度的对比研究[J]. 装备环境工程, 2009, 2(6):32—35.
WEN Jing, HU Bin, MA Hong-yan. Comparative Study of Temperature and Humidity Observation with Automatic Weather Station and Manual Operation[J]. Equipment Environmental Engineering, 2009, 2(6): 32—35.
- [7] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社, 2005.
DENG Ju-long. The Basic Method of Grey System[M]. Wuhan: Huazhong University of science and Technology Press, 2005.
- [8] 傅立. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京:科学技术文献出版社, 2010.
FU Li. Grey system theory and its application[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 2010.
- [9] 刘思峰. 灰色系统理论的产生、发展及前言动态[J]. 浙江万里学院学报, 2003, 16(40):14—17.
LIU Si-feng. Grey System Theory Generation, Development and Advanced Dynamic[J]. Journal of Zhejiang Wanli University, 2003, 16(40): 14—17.
- [10] YIN Mu-shang. Fifteen Years of Grey System Theory Research: A Historical Review and Bibliometric Analysis[J]. Expert Systems with Applications, 2013(40): 2767—2775.
- [11] CHEN Chun, HUANG Shou-jen. The Necessary and Sufficient Condition for GM(1, 1) Grey Prediction Model[J]. Applied Mathematics and Computation, 2013, 219: 6152—6162.
- [12] 王正新,党耀国,赵洁钰. 优化的GM(1, 1)幂模型及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(9):1973—1978.
WANG Zheng-xin, DANG Yao-guo, ZHAO Jie-yu. GM(1, 1) Power Optimization Model and Its Application[J]. System Engineering Theory and Practice, 2012, 32(9): 1973—1978.
- [13] HSU Yen-tseung, LIU Ming-chung, JEROME Yeh, et al. Forecasting the turning Time of Stock Market Based on Markov-Fourier Grey Model[J]. Expert Systems with Applications, 2009(36): 8597—8603.
- [14] 郑文琛,吉培荣,罗贤举. 改进无偏GM(1, 1)模型及其在长期电力负荷预测中的应用[J]. 继电器, 2008, 36(5): 36—40.
ZHENG Wen-chen, JI Pei-rong, LUO Xian-ju. Improvement of Unbiased GM(1, 1) Forecasting Model in the Long Term Power Load and Its Application[J]. Electric Relay, 2008, 36(5): 36—40.
- [15] LIN Yong-huang, LEE Pin-chan, CHANG Ta-peng. Adaptive and High-precision Grey Forecasting Model[J]. Expert Systems with Applications, 2009(36): 9658—9662.
- [16] LIN Yong-huang, LEE Pin-chan. Novel High-precision Grey Forecasting Model[J]. Automation in Construction, 2007(16): 771—777.
- [17] XIE Nai-ming, LIN Si-feng. Discrete Forecasting Model and Its Optimization[J]. Applied Mathematical Modelling, 2009(33): 1173—1186.
- [18] CUI Jie, LIU Si-feng, ZENG Bo, XIE Nai-ming. A novel grey forecasting model and its optimization. Applied Mathematical Modeling, 37(2013): 4399—4406.
- [19] JIN Xu, TAO Tan, MAO Tu, et al. Improvement of Grey Models by Least Squares[J]. Expert Systems with Applications, 2011(38): 13961—13966.
- [20] HSU Li-chang, WANG Chao-hung. Forecasting the Output of Integrated Circuit Industry Using a Grey Model Improved by the Bayesian Analysis[J]. Technological Forecasting & Social Change, 2007(74): 843—853.
- [21] 李明洋,姜福川. 基于最小二乘法的灰色GM(1, 1)改进模型在非煤矿山事故预测中的作用[J]. 中国安全生产科学技术, 2013, 11(9):83—90.
LI Ming-yang, JIANG Fu-chuan. The Improved GM(1, 1) Model in the Prediction of Non Coal Mine Accidents Based

出版社,2000.

YAO Tian-ren, JIANG Tai-hui. Digital Signal Processing [M]. Wuhan: Huazhong Univ of Sci & Tech Press, 2000.

[4] LINDA S, MALENKA M, WOLFGANG M, et al. Optimized Spectral Estimation for Nonlinear Synchronizing Systems[J]. Physical Review, 2014, 89(3):032912.

[5] GJB 150.16A—2009, 军用装备实验室环境试验方法 第16部分 振动试验[S].
GJB 150.16A—2009, Military Equipment Laboratory Environmental Test Methods Part 16: Vibration Test[S].

[6] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests, Method 514.5 vibration[S].

[7] TURGAY K, MELIH C I. The Obtaining of Window Function Having Useful Spectral Parameters by Helping of Genetic Algorithm[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2013, 83:563—568.

[8] ALEKSEEV V G. "Welch-Type Estimator for a Spectral Density Function, the Case of Discrete-Time Parameter", [J]. Avtometriya, 2001(6):77—91.

[9] ALEKSEEV V G, SUKHODOEV V A. Welch-Type Spectral Density Estimator, Additional Recommendations[J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2008, 44(4):302—305.

[10] ALEKSEEV V G, SUKHODOEV V A. Welch-Type Estimator for a Spectral Density Function, Case of a Continuous-time[J]. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, 2009, 45(2):107—112.

[11] RICHARD K B, JORGE Q, HARIHARAN K I. The Present Status of Confidence Interval Estimation for One-factor Random Models[J]. Journal of Statistical Planning and Inference, 2006, 136:4307—4325

[12] JOANNA T. Confidence Intervals for the Power of Student's t-test[J]. Statistics & Probability Letters, 2005, 73: 125—130.

[13] DENNIS G, MINGFEI L. A Note on Confidence Intervals for the Power of T-test[J]. Statistics & Probability Letters, 2008, 78:488—489.

[14] 纽兰 D E. 随机振动与谱分析概论[M]. 北京:机械工业出版社, 1980.
NEWLAND D E. An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis[M]. Beijing: China Machine Press, 1980.

[15] 戴诗亮. 随机振动实验技术[M]. 北京:清华大学出版社, 1984.
DAI Shi-liang. Random Vibration Experiment Technique [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1984.

[16] 蒋书法. 最短置信区间的求解[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(2): 188—192.
JIANG Shu-fa. Solution to the Shortest Confidence Interval [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(2):188—192.

[17] 吴昌昊, 龚俊, 刘子琪. 基于 C U D A 实现经典功率谱估计[J]. 四川兵工学报, 2013(10):98—101.
WU Chang-hao, GONG Jun, LIU Zi-qi. Achievement of Classic Power Spectrum Estimation Based on CUDA[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2013(10):98—101.

(上接第30页)

on Least Squares Function[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2013, 11(9):83—90.

[22] ZOU Li-hua, DAI Su-liang, JOHN B, et al. Grey for Forecasting Model Active Vibration Control Systems[J]. Journal of Sound and Vibration, 2009, 322:690—706.

[23] 倪凯. 灰色系统在量测数据处理中的应用[J]. 中国水运, 2012, 12(8):47—49.
NI Kai. Grey System in Measure Ment Data Handl[J]. Chinese Waterway, 2012, 12(8): 47—49.

[24] 彭涛, 杨岸英, 梁杏, 等. BP-神经网络与灰色系统法的联合模型来预测软基沉降量[J]. 岩土力学, 2005, 26(11): 1810—1814.
PENG Tao, YANG An-ying, LIANG Xing, et al. The Joint Model of BP-neural Net Work and Grey System Method to Predict Soft Ground Settlement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(11):1810—1814.

[25] 唐五湘. GM(1,1)时序修正模型及其应用[J]. 云南环境科学, 2003, 22(4):20—21, 45.
TANG Wu-xiang. GM(1,1) Timing Correction Model and Its Application[J]. Yunnan Environment Science, 2003, 22(4):20—21, 45.

[26] 李希灿, 李丽. 时序残差GM(1,1)模型[J]. 系统工程与理论, 1998, 18(10):59—63.
LI Xi-chan, LI Li. Time Residuals GM(1,1) Model[J]. System Engineering and Theory, 1998, 18(10):59—63.

勘误:《装备环境工程》2014年第11卷第6期第6页第2栏第16行“10~15天”更正为“20~30天”。