

基于灰色理论的 172 飞机故障预测方法

李立群¹, 唐寿根², 谢家雨¹

(1. 中国民用航空飞行学院 航空工程学院, 四川 广汉 618307;

2. 中国民用航空飞行学院 三星通用航空公司, 四川 成都 610051)



摘 要: 针对塞斯纳 172 基本型飞机在运行过程中的高故障率问题, 提出了一种基于灰色理论的故障预测方法, 该方法首先是将 172 基本型飞机故障信息数据集中处理和分析, 分析了 172 基本型飞机故障千时率, 其次建立预测模型 GM (1,1), 通过 GM 模型数据计算完成飞机设备的失效预测, 最后对误差精度进行拟合检验, 模型预测结果表明, 此方法有效的预测塞斯纳 172 基本型飞机故障, 实现用较少的数据得到较高的预测精度, 降低 172 基本型飞机设备的故障率, 提高设备可靠性, 保障飞行安全。

关键词: 塞斯纳 172 基本型飞机; 灰色模型 GM (1,1); 故障预测; 检验

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Failure Prediction on the Cessna Plane Based on Grey Theory

LI Li-qun¹, TANG Shou-gen², XIE Jia-yu¹

(1. Aviation Engineering Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China; 2. Samsung General Aviation, Civil Aviation Flight University of China, Chengdu 610051, China)

Abstract: A new scheme based on the grey fault prediction is proposed because of the high failure rate of the Cessna 172 basic plane in the process of operation. By centralized data processing and analysis using 172 basic aircraft fault information, the time failure rate of 172 basic aircraft is analyzed, the prediction model GM (1,1) is used to predict the aircraft equipment failure. Besides, the error precision is inspected. The experiment result shows that the scheme can effectively predict the 172 basic aircraft failure, achieve higher prediction accuracy with less data and reduce the failure rate of 172 basic aircraft equipment, improve the equipment reliability and ensure the safety of flight.

Key words: Cessna 172 basic plane; grey model GM (1,1); failure prediction; verification

1 引 言

飞机在运行过程中, 故障的产生是随机的, 因而飞机运行时, 在什么时候发生故障, 出多少故障, 是无法预知的, 这对航空安全带来极大威胁^[1-2]。随着大量高新技术在飞机系统中的应用, 其综合化、智能化不断提高, 对飞机系统安全保障工作提出了更高的要求。传统的方法是故障出现后再进行维修和总结, 随着对飞机系统安全性和可靠性要求的进一步提高, 需要在系统出现故障征兆之前就能够采取科学方法, 准确地预测可能出现的故障, 做到预防维修, 以保证系统的持续适航性^[3]。这种处理方法要求建立在大样本量的基础上, 数据越多越好,

对于飞机这个复杂系统来说, 是难以实现的, 即使找到典型的统计规律, 也只能预测故障产生的概率, 同时由于飞机使用时各个方面条件不一样, 因而预测误差较大^[4]。塞斯纳 172 基本型飞机故障预测面临样本少, 不确定性大、确定性解析预测模型难以建立, 符合灰色系统理论研究问题的特点。

利用灰色理论的故障预测方法, 建立塞斯纳 172 基本型飞机预测模型 GM(1,1), 通过 GM 模型数据计算完成飞机系统的失效预测, 对误差精度进行拟合检验, 有效的预测塞斯纳 172 基本型飞机故障。

收稿日期: 2015-10-23; **修回日期:** 2017-05-25

基金项目: 中国民航飞行学院自然科学面上项目(XM1503)。

作者简介: 李立群(1983-), 女, 贵州沿河人, 研究生, 高级实验师, 主要从事航空器电子电气维修技术等方面的教学与科研工作; 谢家雨(1983-), 男, 四川绵阳人, 研究生, 副教授, 主要从事航空仪表检测、虚拟仪器技术等方面的教学与科研工作。

2 基于灰色理论的故障预测模型

GM(1,1)预测模型是最为常见的灰色预测模型,通过已知信息寻求系统运行规律,能够处理或量化不确定量,适用于小样本、信息贫瘠系统,具有短期预测精度高的特点^[5-6]。

2.1 GM(1,1)模型

GM(1,1)预测模型是一阶单变量模型,构建此模型仅需 1 个数列,需对前期多次记录的数据进行预处理^[7-8]。

① 构建原始数列

$$X^{(0)} = \{x^{(0)}(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$$

② 累加生成 $X^{(0)} = \{x^{(0)}(i) | i = 1, 2, \dots, n\}$ 进行一次累加生成:

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

式中, $x^{(1)}(i) = \sum_{j=1}^i x^{(0)}(j)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。

③ 建立 GM(1,1)模型, GM(1,1)灰色预测模为

$$x^{(0)}(i) + ax^{(1)}(i) = b \quad (2)$$

式中, a 为发展系数, b 为灰色作用量。

$x^{(1)}$ 的紧临均值生成序列为

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

式中 $z^{(1)}(i) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(i) + x^{(1)}(i-1))$, $i = 2, 3, \dots, n$ 。

GM(1,1)灰色预测模型的白化方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = b \quad (4)$$

④ 求解白化方程

令参数列 $u = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$, 采用最小二乘法对 u 估值:

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

式中,

$$Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) & 1 \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) & 1 \end{bmatrix}$$

白化方程的解为

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

$x^{(0)}$ 的预测值为

$$\hat{x}_1^{(0)}(i+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) (1 - e^a) e^{-ai} \quad (7)$$

⑤ 残差计算及修正

GM(1,1)残差修正模型^[9-10]:

$$\hat{x}_1^{(0)}(i+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} \right) e^{-ai} + \frac{b}{a} \quad (8)$$

$$\delta(i-s) a_e (\varepsilon_0(1) - \frac{b_e}{a_e}) e^{-a_i s}$$

$$\varepsilon_0 = (\varepsilon_0 1, \varepsilon_0 1, \dots, \varepsilon_0 n); \varepsilon_0 k = x^{(1)}(k) - \hat{x}^{(1)}(k);$$

$$\delta i - s = \begin{cases} 1(i \geq 1) \\ 0(i < 1) \end{cases}; \quad s = (n - n').$$

原始预测值为

$$\hat{x}^{(0)}(i+1) = \hat{x}^{(1)}(i+1) - \hat{x}^{(1)}(i); i = 1, 2, \dots, n-1 \quad (9)$$

残差:

$$\Delta x = \frac{|x^{(0)}(i) - \hat{x}^{(0)}(i)|}{x^{(0)}(i)}; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

2.2 GM(1,1)适用范围

当 $-a \leq 0.3$ 时, GM(1,1)模型可用于中长期预测;

当 $0.3 < -a \leq 0.5$ 时, GM(1,1)模型可用于短期预测,中长期预测慎用;

当 $0.5 < -a \leq 0.8$ 时, 用 GM(1,1)模型作短期预测应十分谨慎;

当 $0.8 < -a \leq 1$ 时, 应采用残差修正 GM(1,1)模型。

3 塞斯纳 172 基本型飞机故障预测实例分析

3.1 故障千时率预测可行性分析

从 2012 年 1 月截止到 2012 年 12 月, 172 机群飞行 54 972 小时, 其中, 飞行中 41 333 小时(故障千时率按此时间计算)。共发生、发现故障缺陷 582 起, 飞行中 461 起, 其中, 机务发现 121 起, 占总故障的 20.8%, 飞行中故障千时率(每月飞机使用困难报告数/飞行小时)11.15‰。

根据 2012 年 172 基本型飞机群故障数据做出故障千时率走势图, 如图 1 所示。

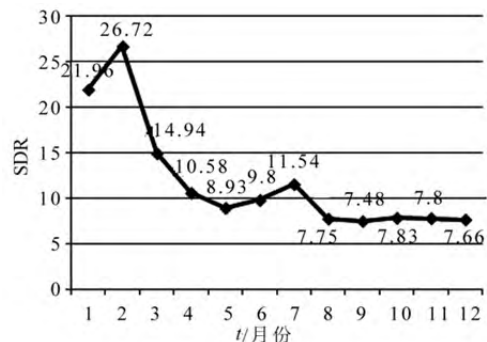


图 1 2012 年 172 基本型飞机故障千时率走势图

Fig. 1 172 basic aircraft failure rate in 2012

根据调查资料显示, 导致前 3 个月故障千时率较高的主要原因是: 该期间飞机使用 95 号燃油, 电嘴污染引起的故障较突出。对故障数据分析之后, 发现了数据之间有一定的内在联系, 可采用故障千

时率进行灰色预测。

3.2 灰色模型 GM(1,1)的建立

根据上述的故障千时率走势图分析,确定故障

千时率为预测灰数^[11-12]。故障千时率为基本变量输入建立 GM(1,1)模型。2012 年 172 基本型飞机群故障千时率,见表 1。

表 1 172 基本型飞机故障千时率表
Tab. 1 172 basic aircraft failure rate

| 月份 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----|-------|-------|-------|-------|------|------|-------|------|------|------|------|------|
| 千时率 | 21.96 | 26.72 | 14.94 | 10.58 | 8.93 | 9.80 | 11.54 | 7.75 | 7.48 | 7.83 | 7.80 | 7.66 |

因为将要做的是灰色理论的验证,所以在选取数据做原始序列时将最后 1 个数据去掉,用 12 月份的数据为检验样本来验证该模型。前 3 个月使用 95 号燃油电嘴污染比较严重,使故障千时率比较高,这种故障属于可控制的因素,故不计入预测计算。经过分析后,根据上表得出原始序列为

$$X^{(0)}(n) = (10.58, 8.93, 9.80, 11.54, 7.75, 7.48, 7.83, 7.80)$$

如果用原始序列直接进行预测计算,数据随机性比较大,预测结果不精确,误差大,预测结果为 7.248 5,与已知结果 7.66 相差了 0.411 5,误差还是比较大的,虽然说可以用于预测,但效果不好,为了减小误差,得到更精确的预测数据,需要对原始序列进行处理,采用缓冲算子减小或消除数据内部受到的不确定因素冲击影响^[13-14]。所以在原始模型上引入二阶弱化算子 D^2 ,令:

$$X^{(0)}D = (x^{(0)}(1)d, x^{(0)}(2)d, x^{(0)}(3)d, \dots, x^{(0)}(8)d)$$

$$x^{(0)}(k)d = [1/(8-k+1)] * [x^{(0)}(k)d + x^{(0)}(k+1)d + \dots + x^{(0)}(8)d]$$

$$(k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)$$

$$X^{(0)}D^2 = (x^{(0)}(1)d^2, x^{(0)}(2)d^2, x^{(0)}(3)d^2, \dots, x^{(0)}(8)d^2)$$

$$x^{(0)}(k)d^2 = [1/(8-k+1)] * [x^{(0)}(k)d^2 + x^{(0)}(k+1)d^2 + \dots + x^{(0)}(8)d^2]$$

$$(k=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)$$

于是:

$$X^{(0)}D^2 = (8.238\ 8, 8.135\ 2, 8.035\ 6, 7.902\ 7, 7.758\ 3, 7.772\ 8, 7.807\ 5, 7.800\ 0) \cong X = (X(1), X(2), X(3) \dots X(8))$$

得到生成的序列 X 后再利用生成的序列 X 进行下面的计算。对数据序列 X 做一次累加生成 1-AGO 序列:

$$x^{(1)}(n) = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2), x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3), \dots, x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2) + \dots + x^{(1)}(8)) = (8.238\ 8, 16.374\ 0, 24.409\ 6, 32.312\ 3, 40.070\ 6, 47.843\ 4, 55.650\ 9, 63.450\ 9)$$

紧邻均值生成序列为

$$Z^{(1)} = (12.306\ 4, 20.391\ 8, 28.361\ 0, 36.191\ 5, 43.957\ 0, 51.747\ 2, 59.550\ 9)$$

设:

$$d(x)^{(1)} / dt + ax^{(1)} = b,$$

由:

$$Y = ((2), (3), \dots, (n))^T = (8.135\ 2, 8.035\ 6, 7.902\ 7, 7.758\ 3, 7.772\ 8, 7.807\ 5, 7.800\ 0)$$

$$B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}(x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)) \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)) \\ \vdots \\ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)) \end{bmatrix}$$

根据最小二乘法,参数 a , b 的估计值为

$$a = -0.007\ 3; b = 8.149\ 3$$

可得 GM(1,1)模型白化方程:

$$d(x)^{(1)} / dt - 0.007\ x^{(1)} = 8.149\ 3$$

其时间响应式为

$$x_1^{(1)}(k+1) = 1124e^{0.007\ 3k} - 1116$$

$$x_1^{(0)}(k+1) = x_1^{(1)}(k+1) - x_1^{(1)}(k)$$

根据模拟值计算得到模拟序列为

$$X_1 = (8.238\ 8, 8.060\ 2, 8.001\ 9, 7.944\ 0, 7.886\ 6, 7.829\ 5, 7.772\ 9, 7.716\ 7)$$

3.3 模型误差检验

由处理后的序列 $X(n)$ 减去模拟序列 X_1 得到残差序列为

$$\varepsilon^{(0)} = (0.000, 0.075\ 0, 0.033\ 7, -0.041\ 3, -0.128\ 3, -0.056\ 7, 0.034\ 6, 0.083\ 3)$$

相对误差序列为

$$\Delta k = |\varepsilon(k)| / x^{(0)}(k) = (0.000, 0.009\ 2, 0.004\ 2, 0.005\ 2, 0.016\ 5, 0.007\ 3, 0.004\ 4, 0.001\ 0)$$

该模型的残差和相对误差,见表 2。

表 2 预测数据表
Tab. 2 Forecast data

| 月份 | 弱化处理后 的值 | 预测值 | 残差 $\varepsilon(k)$ | 相对误差 $ \varepsilon(k) $ |
|----|-------------|---------|---------------------|----------------------------|
| 4 | 8.238 8 | 8.238 8 | 0 | 0 |
| 5 | 8.135 2 | 8.060 2 | 0.075 0 | 0.009 2 |
| 6 | 8.035 6 | 8.001 9 | 0.033 7 | 0.004 2 |
| 7 | 7.902 7 | 7.944 0 | -0.041 3 | 0.005 2 |
| 8 | 7.758 3 | 7.886 6 | -0.128 3 | 0.016 5 |
| 9 | 7.772 8 | 7.829 5 | -0.056 7 | 0.007 3 |
| 10 | 7.807 5 | 7.772 9 | 0.034 6 | 0.004 4 |
| 11 | 7.800 0 | 7.716 7 | 0.083 3 | 0.001 0 |

平均相对误差为 0.494 8 %< 0.01,模拟误差为 $\Delta 8=0.001\ 0<0.01$,拟合情况良好。

3.4 模型精度检验

设二阶弱化处理后的数据均值为 m , 残差均值为 n , 计算均值如下:

$$\begin{aligned} m &= 1/8 * (x(1) + x(2) + x(3) + x(4) + x(5) + x(6) + x(7) + x(8)) = 1/8 * (8.238\ 8 + 8.135\ 2 + 8.035\ 6 + 7.902\ 7 + 7.758\ 3 + 7.772\ 8 + 7.807\ 5 + 7.800\ 0) = 7.931\ 4 \\ n &= 1/8 * (\varepsilon(1) + \varepsilon(2) + \varepsilon(3) + \varepsilon(4) + \varepsilon(5) + \varepsilon(6) + \varepsilon(7) + \varepsilon(8)) = 1/8 * (0 + 0.075\ 0 + 0.033\ 7 - 0.041\ 3 - 0.128\ 3 - 0.056\ 7 + 0.034\ 6 + 0.083\ 3) = 0.000\ 037\ 5 \end{aligned}$$

所以均方差为

$$\begin{aligned} S_1^2 &= 1/8 * (x(k) - m)^2 = 0.199, (k=1,2,3,4,5,6,7) \\ S_2^2 &= 1/8 * (\varepsilon(k) - n)^2 = 0.004\ 5, (k=1,2,3,4,5,6,7) \\ S_1 &= 0.446\ 3, S_2 = 0.067 \end{aligned}$$

计算小误差概率 P : $0.674\ 5\ S_1=0.301\ 1$

$$\begin{aligned} |\varepsilon(1) - n| &= 0.000\ 037\ 5, |\varepsilon(2) - n| = 0.074\ 9, \\ |\varepsilon(3) - n| &= 0.033\ 66, |\varepsilon(4) - n| = 0.041\ 3, \\ |\varepsilon(5) - n| &= 0.128\ 3, |\varepsilon(6) - n| = 0.056\ 7, \\ |\varepsilon(7) - n| &= 0.034\ 5, |\varepsilon(8) - n| = 0.083\ 3, \\ P &= P(|\varepsilon(k) - n| < 0.674\ 5\ S_1) = 1 > 0.95. \end{aligned}$$

求得均方差比值 C 和小误差概率 P 后根据下表的标准对预测模型的精度进行分级, 见表 3。

表 3 精度等级表
Tab. 3 Accuracy class

| P | C | 精度等级 |
|------------------|------------------|----------|
| $P>0.95$ | $C<0.35$ | 良好(一级) |
| $0.8<P\leq 0.95$ | $0.35\leq C<0.5$ | 合格(二级) |
| $0.7<P\leq 0.8$ | $0.5\leq C<0.65$ | 勉强合格(三级) |
| $P\leq 0.7$ | $0.65\leq C$ | 不合格(四级) |

根据表 3, 均方差比值 $C=S_2/S_1=0.150\ 1<0.35$, 小误差概率为 $P=1>0.95$, 本预测精度为一级, 故可以直接用该 GM(1,1)模型对故障千时率进行预测。

根据以上模型预测出下个月故障千时率为 7.660 8, 和已知 12 月故障千时率 7.66 几乎一样, 在误差范围之内, 说明运用灰色理论预测故障千时率是有效的。

3.5 实验分析

实验中我们首先在原始模型上引入二阶弱化算子 D^2 , 采用缓冲算子减小或消除数据内部受到的不确定因素冲击影响, 接着对模型误差进行检验和修正, 确保模型的残差和相对误差拟合良好, 最后对模型精度进行检验, 使均方差比值 C 和小误差概率 P 的预测精度为一级, 证明此预测模型的预测结果与实际测量值的一致性较好, 如图 2 所示。

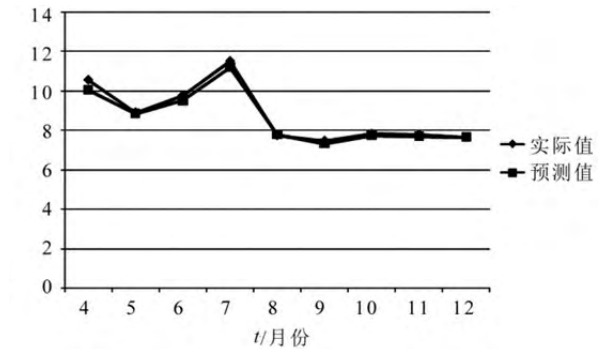


图 2 实际值和预测值比较
Fig. 2 Comparison of actual values and forecasted values

从表中的数据可以明显看出, 预测值与实际值误差小, 预测精度高。此外, 本文算法是建立在原始模型基础之上的, 算法的复杂度大大提高, 使得计算时间也大大增加。

5 结 论

从实验结果可以看出, 本文提出的残差修正 GM(1,1)预测模型对塞斯纳 172 基本型飞机故障预测是有效的。

通过分析塞斯纳 172 基本型飞机故障数据(千时率)建立 GM(1,1)模型, 使用灰色理论建模软件根据模型对数列进行一系列的运算, 得到结果以后再验证结果的准确性, 最后确定最终预测结果。对系统故障在接下来的时间内进行预测, 知道故障趋势, 不仅减少了维护工作的工作量也节约了维护成本, 保障飞行安全。

鉴于近年民航维修已逐渐从事后维修转为预防性维修, 一般来说, 对于航线维护中故障率较高的机械类故障如点火系统、起落架系统, 如何有效的、准确的做到预防性维修, 本文的方法就显得十分重要。针对不同分系统、不同故障类别建立故障预测模型, 在这一类的实际应用中也将取得令人满

意的结果,为飞机系统性能从以前保证系统可靠性维修转入预防性维修转移提供参考。

参考文献(References)

- [1] 许喆平, 郎荣玲, 邓小乐. 飞机性能参数预测的不确定性处理[J]. 航空学报, 2012, 3(6):1100-1107.
Xu Z P, Lang R L, Deng X. Uncertainty of the aircraft performance parameter prediction [J]. Journal of Aeronautics, 2012, 3 (6): 1100-1107.
- [2] 姚云峰, 冯玉光, 于磊. 基于灰色理论的电子系统状态预测方法[J]. 火力与指挥控制, 2012, 37(5): 52-59.
Yao Y F, Feng Y G, Yu L. Method for predicting status of electronic system based on grey theory [J]. Fire Control and Command Control, 2012, 37(5):52-59.
- [3] 祝华远, 崔亚君, 高峰娟. 灰色预测模型在军机飞控系统故障预测中的应用[J]. 四川兵工学报, 2014, 35(6): 44-46.
Zhu H Y, Cui Y J, Gao F J. Fault forecast for flight control system based on grey mode [J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2014, 35(6): 44-46.
- [4] 杨天社, 杨萍, 董小社. 基于灰色系统理论的航天器故障状态预测方法[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(9): 1284-1307.
Yang T S, Yang P, Dong X S. Method for predicting fault status of satellite based on gray system theory [J]. Computer Measurement and Control, 2008, 16(9): 1284-1307.
- [5] 张毅. 基于灰色理论的军事配送能力预测[J]. 沈阳理工学院学报(自然科学版), 2014, 24(4): 69-70.
Zhang Y. Military logistics capability based on the theory of grey prediction [J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural science edition), 2014, 24(4):69-70.
- [6] Yang T S. Method of satellite fault diagnosis based on Bayesian network [J]. Engineering Science 2005, 21(3): 52 - 57.
- [7] 谢开贵. 一种灰色预测模型的新方法[J]. 系统工程理论与实践, 1998, 5(2) : 523 - 528.
Xie K G. A new method of grey forecasting model [J]. Systems Engineering-Theory and Practice, 1998, 5(2):523-528.
- [8] Luo Y X. Grey system judgment on reliability of mechanical equipment [J]. Plant Engineering and Management, 2001, 20 (3):106 -110.
- [9] 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):50-53.
Luo D, Liu S F, Dang Y G. Grey model GM (1, 1) optimization [J]. Engineering Sciences, 2003, 5(8):50-53.
- [10] 尚军亮, 方敏. 一种优化的高精度灰色GM(1,1)预测模型[J]. 电子与信息学报, 2012, 32(6):1301-1303.
Shang J L, Fang M. An optimization of high precision of grey GM (1, 1) prediction model [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2012, 32(6):1301-1303.
- [11] 张怡, 魏勇. 灰色模型GM(1,1)的一种新的优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(4):141-143.
Zhang Y, Wei Y. A new optimization method of Grey model GM (1,1)[J]. Systems Engineering-theory and Practice, 2007, 27(4): 141-143.
- [12] Field B, Arthur. Moving averages provide a simple solution [J]. Futures, 2011, 40(4):30-36.
- [13] Luo Y X. Grey GM (1, 1) model with function transfer method for the wear trend prediction and its application [J]. Plant Engineering and Management, 2001, 20(4):319-323.
- [14] 孙秀云, 方勇纯, 申辉, 等. 无人直升机姿态通道模型预测控制[J]. 控制工程, 2014, 21(5): 643-647.
Sun X Y, Fang Y C, Shen H, et al. Model predictive control for the attitude channel of an unmanned helicopter [J]. Control Engineering of China, 2014, 21(5):643-647.