电力系统可靠性原始参数的滚动预测和残差修正

任 震,吴敏栋,黄雯莹
(华南理工大学 电力学院,广东 广州 510640)

摘要: 可靠性原始参数的分析与确定是电力系统可靠性评估的基础。针对电力系统可靠性原始参数匮乏的情况,利用灰色系统小样本的特点,运用滚动预测对可靠性原始参数的预测进行残差检验,在考虑数据新陈代谢的同时又能减少计算量。并对滚动残差的变化规律作了分析,建立其单调区间的灰色预测模型,进行残差修正,补偿原有的预测数据,使预测值能更好地拟合原始数据。最后,通过实例计算和模型精度检验说明该方法有较高精度。

关键词: 可靠性参数; 滚动预测; 残差修正

中图分类号: TM 732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2006)07-0010-03

0 引言

电力系统的任务是向用户不间断地提供优质电能,电能生产和消费的同时性使电力系统可靠性显得尤为重要。因此,在电力系统设计规划和运行过程中,可靠性是一个重要指标[1]。可靠性原始参数的分析与确定是提高设计和运行管理水平的基础,它是电力系统可靠性研究中最基本、最重要的工作。通常,通过对设备现场工作的长期观察和记录,再进行分析得到可靠性参数。但这种方法需要大样本系统,在可靠性原始数据缺乏的情况下得出的原始参数可信度较低。因此,使用小样本系统对电力系统可靠性原始参数的收集就很有必要[2]。

灰色模型(GM)预测法就是典型的小样本预测模型,它已经被广泛地应用于各行各业。如何预测设备的可靠性原始参数对于预测设备事故、作出检修决策、提高电力系统可靠性具有重要意义。

为使预测结果更能反映实际情况,提高预测精度,本文在电力系统可靠性原始参数的预测中引入滚动预测法,并分析残差变化趋势进行残差修正。

1 灰色滚动预测原理及模型

灰色预测是指根据已知的或非确知的信息建立模型并向未来延伸的预测[3]。为获得可信结果,要求建模数据包括对象的全部信息。但灰色系统的灰性就是指信息的不完全性,尤其没有物理原型的本征性灰色系统更不可能掌握全部信息。灰色系统认为对于灰色量的研究,不是从寻找统计规律的角度通过大样本量进行,而是通过 GM 预测去寻找发现隐藏在杂乱无章的数据中的规律[4]。

收稿日期:2005-09-08;**修回日期:**2005-11-24
基金项目:国家自然科学基金重点项目(50337010)

电力系统中各种设备的可靠性参数影响因子很多,具有灰信息覆盖,因此其原始参数的变化可看作是灰色变量和灰色过程[5]。这种过程可以用 GM(1,1) 模型预测。由于 GM(1,1)模型的数据允许少至 4 个数据[3],因此具有 4 个以上数据的序列可通过滚动预测检验预测模型的精度。所谓滚动预测是指:用前面的数据建模,预测后一个数据,如此一步步地向前。预测值和实际值的残差反映预测模型的可信度。残差越小,则可信度越大。

设电力设备可靠性原始参数序列为 $x^{(0)}=\{x^{(0)}(i)\mid i=1,2,\cdots,N\}$,其中 $x^{(0)}(i)$ 为序列元素,N 为元素个数。对 $x^{(0)}$ 进行一次累加(1-AGO),可得序列:$x^{(1)}=\{x^{(1)}(i)\mid i=1,2,\cdots,N\}$。其中

$$x^{(1)}(i)=\sum_{k=1}^{i}x^{(0)}(k) \tag{1}$$

则$\{x^{(1)}(k)\}$的 GM(1,1)模型的白化形式的微分方程式为

$$\frac{\mathrm{d}x^{(1)}}{\mathrm{d}t}+ax^{(1)}=b \tag{2}$$

式中 a 为发展系数;b 为灰作用量。

a、b 可根据式(3)~(5)求出。

$$\boldsymbol{P}=\begin{bmatrix}a\\b\end{bmatrix}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}_n \tag{3}$$

式中 $\boldsymbol{P}$ 为参数 a、b 的列向量。

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}-z^{(1)}(2) & 1\\ -z^{(1)}(3) & 1\\ \vdots & \vdots\\ -z^{(1)}(n) & 1\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $z^{(1)}(k)$为 $x^{(1)}(k)$ 和 $x^{(1)}(k-1)$的均值。

$$\boldsymbol{y}_n=\begin{bmatrix}x^{(0)}(2)\\ x^{(0)}(3)\\ \vdots\\ x^{(0)}(4)\end{bmatrix} \tag{5}$$

把式(3)所得结果代入式(2)可得 GM(1,1)模型的响应函数为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1)=\left(x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right)e^{-ak}+\frac{b}{a} \tag{6}$$

$$\hat{x}^{(0)}(k+1)=(\hat{x}^{(1)}(k+1)-\hat{x}^{(1)}(k) \tag{7}$$

$k=1,2,\cdots,N$

令 $x^{(0)}(1,k)=\{x^{(0)}(i)\mid i=1,2,\cdots,k\}$,则

a. $x^{(0)}(1,k)$ 为 $x^{(0)}$ 的 k 维子列;

b. $x^{(0)}_{\mathrm{met}}=(x^{(0)}(1,4),x^{(0)}(2,4),\cdots,x^{(0)}(n-4,n-1))$ 为 4 维新陈代谢子列族;

c. $x^{(0)}_{\mathrm{met}}$ 的 GM(1,1) 建模 $\mathrm{GM}(1,1)_{\Sigma}=(\mathrm{GM}(1,1)_4,\mathrm{GM}(1,1)_5,\cdots,\mathrm{GM}(1,1)_{n-1})$ 为滚动建模,由此算出的模型值 $\hat{x}^{(0)}(k+1)$ 为滚动预测值;

d. $q^{(0)}(k+1)=x^{(0)}(k+1)-\hat{x}^{(0)}(k+1)$ 为 $k+1$ 点的滚动残差。

2　残差修正

运用上述模型进行实际预测可靠性原始参数时会产生残差不规则波动现象,有时残差还会很大。这时就需要对数据进行修正,即对现有数据的残差建立 GM(1,1)模型,从而预测未来数据的残差,对未来数据的预测值进行修正。

建立 $q^{(0)}$ 的 GM(1,1)模型:

$$\frac{\mathrm{d}q^{(1)}}{\mathrm{d}t}+a'q^{(1)}=b' \tag{8}$$

式中　$q^{(1)}$ 为滚动残差原始序列的一次累加;a'、b' 为相应的发展系数和灰作用量。

计算步骤如式(3)~(5)所示,计算过程中的原始参数序列变为相应的滚动残差序列。则 GM(1,1)模型的响应函数为

$$\hat{q}^{(1)}(k+1)=\left(q^{(0)}(1)-\frac{b'}{a'}\right)e^{-ak}+\frac{b'}{a'} \tag{9}$$

$$\hat{q}^{(0)}(k+1)=\hat{q}^{(1)}(k+1)-\hat{q}^{(1)}(k) \tag{10}$$

由上式得出滚动残差预测值后,对原始参数序列的预测值进行补偿,即得:

$$\hat{x}^{(0)\prime}(k+1)=\hat{x}^{(0)}(k+1)+\hat{q}^{(0)}(k+1) \tag{11}$$

但通过计算发现,这样的修正和原始参数拟合得并不是很好。通过分析可知,有时残差的变化呈一定的规律性,如单调变化、周期变化等[6]。因此,在补偿以前,要分析残差变化趋势。当滚动残差出现单调序列,并满足 GM(1,1)模型建模要求时,在滚动残差序列中向取单调子序列 $y^{(0)}$,建立 GM(1,1)模型,然后用所得结果修正预测序列。为保证残差单调子序列元素为正,若有负数,要进行数据平移。$M=\min\{q^{(0)}(k)\}$,得新的单调序列 $y^{(0)\prime}$,$y^{(0)\prime}(k)=y^{(0)}(k)-M$。建立 $y^{(0)\prime}$ 的 GM(1,1)模型,步骤同式(8)~(10),得到预测值 $\hat{y}^{(0)\prime}(k)$。然后,还原得 $\hat{q}^{(0)}(k)=\hat{y}^{(0)\prime}(k)+M$,在此基础上补偿原始参数序列的预测值。

3　算例

某线路元件无故障运行时间的数据(单位为天(d),下同)为:538.5、491.5、468.5、446.5、425.6、405.7、387.5。假设可靠性原始参数序列为 $x^{(0)}=\{538.5,491.5,468.5,446.5,425.6,405.7,387.5\}$。建立原始数列 GM(1,1)模型,得 $\hat{x}^{(0)}(8)=353.24$。再建立滚动预测模型,由可靠性原始参数序列可得新陈代谢子列族为 $x_{\mathrm{met}}=\{x^{(0)}(j,i)\mid j=1,2,3,4;i=4,5,6,7\}$,即 $x^{(0)}(1,4)=\{538.5,491.5,468.5,446.5\}$;$x^{(0)}(2,5)=\{491.5,468.5,446.5,425.6\}$;$x^{(0)}(3,6)=\{468.5,446.5,425.6,405.7\}$;$x^{(0)}(4,7)=\{446.5,425.6,405.7,387.5\}$。根据式(2)~(5)分别建立各新陈代谢子列的 GM(1,1)模型,所得数据如表 1 所示。

表 1　滚动预测数值

Tab.1 Values of rolling prediction

原始数列/d	滚动预测值/d	滚动残差/d	相对残差/%
538.5	538.50	0	0
491.5	491.42	0.08	0.0163
468.5	468.39	0.11	0.0235
446.5	446.44	0.06	0.0134
425.6	425.51	0.09	0.0211
405.7	405.57	0.13	0.0320
387.5	387.27	0.23	0.0594

从表 1 可以看出,滚动残差值从 $q^{(0)}(4)$ 开始呈单调增。因此,以 $q^{(0)}(4)$ 开始,取滚动残差 GM(1,1)建模序列为 $q^{(0)}=\{0.06,0.09,0.13,0.23\}$。由计算可得建模序列预测值为 $\hat{q}^{(0)}=\{0.06,0.0808,0.1319,0.2153\}$,并预测得 $\hat{q}^{(0)}(8)=0.3514$。然后,将滚动残差预测值作为残差修正值对滚动预测值作修正,如表 2 所示。得 $x^{(0)}(8)$ 的最终预测值为 $\hat{x}^{(0)\prime}(8)=353.5914$。

表 3 所示为最终残差。

表 2　数据还原

Tab.2 Data restoration　　d

原始数列	滚动预测值	残差修正值	还原值
446.5	446.44	0.0600	446.5000
425.6	425.51	0.0808	425.5908
405.7	405.57	0.1319	405.7019
387.5	387.27	0.2153	387.4853

表 3　模型精度检验

Tab.3 Check of the model accuracy

原始数列/d	还原值/d	残差/d	相对误差/%
446.5	446.5000	0	0
425.6	425.5908	0.0092	0.00216
405.7	405.7019	−0.0019	0.00047
387.5	387.4853	0.0147	0.00379

令 $\overline{\varepsilon}_1$ 为残差 q' 序列绝对值的平均值,$\overline{\varepsilon}_2$ 为相对误差 r 序列的平均值,S_1 为 q' 的标准差,S_2 为 r 的标准差。即

$$\overline{\varepsilon}_1=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left|q'(k)\right|,\quad S_1=\left[\sum_{k=1}^{n}(q'(k)-\overline{\varepsilon}_1)^2/(n-1)\right]^{1/2}$$

$$\overline{\varepsilon}_2=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}r(k),\quad S_2=\left[\sum_{k=1}^{n}(r(k)-\overline{\varepsilon}_2)^2/(n-1)\right]^{1/2}$$

计算得:$\overline{\varepsilon}_1=0.00645$,$S_1=0.00789$,$\overline{\varepsilon}_2=0.001605$,$S_2=0.001727$。

下面进行模型误差的显著性检验。由于残差序列为小样本，根据数理统计理论，应该采用 t 检验[7]，即对假设

$$H_0:\quad \overline{\varepsilon}_1=0;\quad \overline{\varepsilon}_2=0$$

进行检验。

设

$$N_1=\frac{\overline{\varepsilon}_1}{S_1/\sqrt{n}}\sim t(n-1)$$

$$N_2=\frac{\overline{\varepsilon}_2}{S_2/\sqrt{n}}\sim t(n-1)$$

由计算得：$N_1=1.635$，$N_2=1.859$

给定显著性水平 $\alpha=0.01$，则 $t_{1-\alpha/2}(n-1)=5.8409$。由此可得：$N_1<t_{1-\alpha/2}(n-1)$，$N_2<t_{1-\alpha/2}(n-1)$，因此接受假设 H_0，即模型误差和零没有显著性差异，并且模型精度达到Ⅱ级，模型精度为优。

4 结论

本文在进行可靠性原始参数残差检验时充分运用灰系统的小样本特点，用灰预测的最少数据个数引入滚动预测，减少计算量并体现数据的新陈代谢。并通过对残差变化趋势的分析，建立残差单调区间预测模型，对残差进行修正，使预测更精确。

通过假设检验法对模型精度的检验说明，用滚动预测和残差修正相结合的方法对可靠性原始参数的预测具有较高的精度，能够满足实际工程需要。

该方法适用于多种分布类型可靠性原始数据的预测。残差的修正方法只局限于残差数列服从一定的单调性，若正负波动可用正弦等方法修正残差。

参考文献：

[1] 任震，黄雯莹，冉立. 高压直流输电系统可靠性评估[M]. 北京：中国电力出版社，1996.

[2] 任震，万官泉，黄金凤，等. 电力系统可靠性原始参数的改进预测[J]. 电力系统自动化，2003，27(4)：37-40.
REN Zhen，WAN Guan-quan，HUANG Jin-feng，et al. Prediction of original reliability parameter of power systems by an improved grey model[J]. Automation of Electric Power Systems，2003，27(4)：37-40.

[3] 邓聚龙. 灰理论基础[M]. 武汉：华中科技大学出版社，2002.

[4] 邓聚龙. 灰色预测和决策[M]. 武汉：华中理工大学出版社，1986.

[5] 温鹏，万永华，汪同庆，等. 电力系统短期负荷离线预测研究[J]. 电力系统自动化，1998，22(10)：42-44.
WEN Peng，WAN Yong-hua，WANG Tong-qing，et al. Research on short term off-line load forecasting in power system[J]. Automation of Electric Power Systems，1998，22(10)：42-44.

[6] 熊振南. 周期性残差修正 GM(1,1)在海事直接经济损失预测中的应用[J]. 上海海运学院学报，2001，22(1)：67-70.
XIONG Zhen-nan. Applying the modifying of periodicity remnant difference of GM(1,1) to the forecast of the direct expense of maritime accident [J]. Journal of Shanghai Maritime University，2001，22(1)：67-70.

[7] 吕安林，张晶，赵树民. 灰色模型的精度及误差检验研究[J]. 华中科技大学学报，1998，26(1)：41-42.
LÜ An-lin，ZHANG Jing，ZHAO Shu-min. Accuracy and error test of grey model[J]. Journal of Huazhong Univ of Sci & Tech，1998，26(1)：41-42.

[8] 肖芳淳，张修碚. 灰色可靠性分析及其应用的研究[J]. 强度与环境，2001(1)：38-42.
XIAO Fang-chun，ZHANG Xiu-bei. Study for grey reliability analysis and its applications[J]. Structure & Environment Engineering，2001(1)：38-42.

[9] 赵洪海. 使用灰色 G(1,1)参差修正模型获得较高精度条件的探讨[J]. 攀枝花大学学报：自然科学版，1994，11(1)：10-17.
ZHAO Hong-hai. Inquiry into the condition for employing the grey GM(1,1) residual correction model to obtain higher class of accuracy[J]. Journal of Panzhihua University：Natural Science，1994，11(1)：10-17.

[10] 张大海，江世芳，史开泉. 灰色预测公式的理论缺陷及改进[J]. 系统工程理论与实践，2002，26(1)：140-142.
ZHANG Da-hai，JIANG Shi-fang，SHI Kai-quan. Theoretical defect of grey prediction fomula and its improvement[J]. System Engineering Theory and Practice，2002，26(1)：140-142.

(责任编辑：康鲁豫)

作者简介：

任　震(1938-)，男，江苏宜兴人，教授，博士研究生导师，从事高压直流输电、电力系统可靠性及电力系统谐波分析和治理等方面的研究；

吴敏栋(1980-)，男，江苏无锡人，硕士研究生，研究方向为高压直流输电可靠性(**E-mail**：wumindong@126.com)；

黄雯莹(1939-)，女，上海人，教授，主要研究方向为可靠性数学、小波分析等。

Rolling prediction and residual error revise of original reliability parameter of power system

REN Zhen，WU Min-dong，HUANG Wen-ying

(College of Electric Power，South China University of Technology，Guangzhou 510640，China)

Abstract：The power system reliability evaluation is based on original reliability parameters. Because of the lack of original reliability parameters，the grey theory with its special feature for the small sample book is applied. Using the rolling prediction，residual errors of the prediction for original reliability parameters are checked，considering the data metabolism and reducing the calculation at the same time. The changing rule of rolling residual errors is analyzed and the model of their monotone interval is set up to revise the residual error and compensate the original prediction. It makes predictions match the original data better. The example calculation and the model accuracy check show its comparatively high accuracy.

This project is supported by the Key Project of the National Natural Science Foundation of China (50337010).

Key words：reliability parameter；rolling prediction；residual error revise