【武器装备】

基于灰色模型的某型装备可靠性相关参数预估

王军延,张远新,王宝和

(91550 部队,辽宁 大连 116023)

摘要:某型装备的无故障时间和故障间隔时间是系统重要的可靠性参数,装备的此类数据样本较少,而无故障时间基本服从指数分布,采用灰色模型建模比较合适。在对原始可靠性数据应用动态数据更新的方法进行重新构建的基础上,建立了基于动态数据更新的无故障时间和故障间隔时间预估模型。通过比较不同模型精度检验方法的评价结果,验证了该方法具备较高的预估精度,对模型更具实际应用意义的模型外推精度预估分析表明,该方法具有一定的应用价值。

关键词:灰色模型;无故障时间;故障时间;预估分析

中图分类号:TJ7 **文献标识码**:A **文章编号**:1006 - 0707(2011)02 - 0008 - 04

Pre-evaluation of Reliability Parameter of Certain Equipment with Gray Model

WANG Jun-yan, ZHANG Yuan-xin, WANG Bao-he

(Unit 91550 of PLA, Dalian 116023, China)

Abstract: The failure and running time of certain equipment are important reliability parameter of the system. Since the data in the field is less, and the time between failures is subject to exponential distribution, therefore it is suitable for modeling by gray model. Based on reconstruction on the method of dynamic data update of original reliability, it was built to the pre-evaluation model of fault-free time and fault interval time on the basis of dynamic data update. By means of comparing the pre-evaluation result of precision test method for different method, it verified that the method owned higher estimate precision. It shows to the estimate analysis of model extrapolating precision that it has better applicable value in the relative field.

Key words: gray model; running time; fault time; pre-evaluation

装备系统的可靠性是装备的重要战技指标,对装备全寿命周期费用有着很大的影响,可靠性的高低决定了装备执行各类任务的能力,对于完成定型的装备,准确的预计其无故障时间和故障时间,将有益于装备保障资源的配比、经费使用的科学性和针对性,对装备完成作战、演练任务具有重要的意义。但装备系统的可靠性数据通常样本量较小,使得模型构建难度很大。邓聚龙教授于 1982 年发表论文“The Control Problems of Grey Systems”后,灰色系统理论得到迅速发展,它以小样本、贫信息不确定性系统为研究对象,实现对系统运行、演化规律的正确描述[1-2]。在比较典型的应用中,文献[3]中利用分等时段序列法改进负荷灰色预测模型,并利用实际负荷数据建模,对于城市电网进行中长期负荷预测取得了较好的效果;文献[4]中采用灰色新陈代谢 GM(1,1)模型方法,去掉因时间推移而使信息意义降低的老信息,使模型更能接近实际,预测结果可实现滑坡治理的动态管理;文献[5]中采用灰色模型对武器研制的全寿命周期费用进行了初步的预测分析;文献[5]中对故障间隔时间进行了灰色预测研究。目前已灰色理论已应用于粮食产量预测、用电量预测、气象预测、病虫害预测等多个领域的系统分析、预测和建模应用。在装设备的全寿命周期费用估计、维修保障、故障间隔时间预测等方面也有应用。对于某型装备而言,无故障时间和故障时间是相互关联的指标,对完成任务的可靠度影响重要,对这两类参数进行改进的灰色建模,完成装备的无故障时间、故障时间的预测,可以科学的指导部队使用装备中的维护保养、经费使用等,以提高部队完成各类任务的能力。

收稿日期:2010 - 12 - 02

作者简介:王军延(1970—),男,硕士,高级工程师,主要从事武器装备总体试验研究。

1 灰色建模方法

1.1 灰色建模概述

灰色建模是根据系统已知的数据来建立模型,并对系统未来的发展趋势进行预测,是通过寻找数据本身规律实现预测的方法。灰色模型与传统方法之比较如表1所示,具有如下优点:

1)灰色建模需要数据少。只根据实际状况,选择适当数量的数据即可,而不需大量的历史数据,甚至只用4个数据就可以建模,进行预测,还能得到精确的结果。

2)灰色模型(gray model; GM)建立在较深的数学基础上,但计算步骤不复杂。

3)一般情况下,灰色预测不须太多的关联因素,数据收集简便。

4)灰色建模既可用于短期,也可用于中长期预测。

5)灰色建模精准度高。在相同的少量样本数下,比其它方法的模型预测误差要小。

表1 灰色预测与传统方法的比较

	数学方法	最少数据	数据之类型
传统方法	简单指数型	5至10个	等间距
	Holts 指数	10至15个	同趋势
	Winter's 指数型	至少5个以上	同趋势且具规律性
	回归分析法	10至20个	同趋势且具规律性
	Causal 回归法	10个以上	可各种型态相混合
	Box Jekins 法	50个以上	等间距
灰色建模		4个	等间距及非等间距

1.2 灰色建模方法

在对装备的可靠性参数进行分析中,采用GM(1,1)模型[1-2]对装备的无故障时间和故障时间的发展趋势进行推算。

假设$x^{(0)}$为原始数列,如下所示

$$x^{(0)}=(x^{(0)}(1),x^{(0)}(2),\cdots,x^{(0)}(n)) \tag{1}$$

进行预测时,首先须判断给定的数据序列,是否具备建立预测模型的条件,必须使级比$\sigma^{(0)}(k)$落于区间(0.135, 7.389)

$$\sigma^{(0)}(k)=\frac{x^{(0)}(k-1)}{x^{(0)}(k)} \tag{2}$$

灰色系统建模时,先对原始数列做一次累加生成(accumulated generating operation, AGO),弱化原数列的随机性,使数列呈递增特性

$$x^{(1)}=(x^{(1)}(1),x^{(1)}(2),\cdots,x^{(1)}(n))=\left(\sum_{k=1}^{1}x^{(0)}(k),\sum_{k=1}^{2}x^{(0)}(k),\cdots,\sum_{k=1}^{n}x^{(0)}(k)\right) \tag{3}$$

由$x^{(1)}$数列具指数特性,建立微分方程

$$\frac{dx^{(1)}}{dt}+ax^{(1)}=u \tag{4}$$

以差分代替微分,微分方程可以转化

$$\begin{bmatrix} x^{(0)}(2)\\ x^{(0)}(3)\\ \cdot\\ \cdot\\ \cdot\\ x^{(0)}(n)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix} -\frac{1}{2}x^{(1)}(1)+x^{(1)}(2) & 1\\ -\frac{1}{2}x^{(1)}(2)+x^{(1)}(3) & 1\\ \vdots & \vdots\\ -\frac{1}{2}x^{(1)}(n-1)+x^{(1)}(n) & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix} a\\ b\end{bmatrix} \tag{5}$$

记$Y=XB$,由最小二乘法,得方程组(5)的解

$$B=(a,b)^T=(X^TX)^{-1}X^TY \tag{6}$$

将求得的a、b代入微分方程,得微分方程的解:

$$x^{(1)}(k+1)=(x^{(0)}(1)-\frac{u}{a})e^{-ak}+\frac{u}{a},\quad k=1,2,\cdots,n \tag{7}$$

其中$x^{(1)}(1)=x^{(0)}(1)$,并将(7)所得到的数列做一次累减生成(inversed-accumulated generating operation, IAGO),可求得还原后的预测值

$$\hat{x}^{(0)}(k)=\left[x^{(0)}(1)-\frac{b}{a}\right]e^{-a(k-1)}(1-e^{a}) \tag{8}$$

令$k=1,2,\cdots,n$,得还原数列为

$$\hat{x}^{(0)}=(\hat{x}^{(0)}(1),\hat{x}^{(0)}(2),\cdots,\hat{x}^{(0)}(n))$$

1.3 模型精度的检验

1.3.1 残差检验

经过上述生成与建模之后,为分析预测模型的有效性,使用残差检验法进行残差检验,以了解预测值和实际值间之残差[6]

$$\alpha=\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\frac{x^{(0)}(k)-\hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \tag{9}$$

若α平均精度大于0.01,则代表此模式之预测效能良好。灰色预测残差精度等级如表2。

1.3.2 均方差比值

$$C=\frac{S_2}{S_1}$$

其中:S_1为原始数据的方差;S_2为预估数据偏差的方差。

1.3.3 小误差概率p检验[6]

$$p=P\{|q(k)-\overline{q(k)}|<0.674\,5S_1\}$$

各类误差检验方法评价指标[7-10]如表2。

表2 灰色预测残差精度等级表

精度等级	α	ε	C	p
一级	0.01	0.90	0.35	0.95
二级	0.05	0.80	0.5	0.80
三级	0.10	0.70	0.65	0.70
四级	0.20	0.60	0.80	0.60

2　某型装备相关参数可靠性预估分析

2.1　某型装备无故障时间建模

某型装备在任务中统计的无故障时间统计依次为:167、321、468、616、763、903、1036、1275、1540、1909,单位为小时。

采用灰色 GM(1,1)模型进行无故障间隔时间预测主要意义不是建立已有数据的模型,而是应用其模型外推的准确性。保证数据区间外的预测精度一向是建模的难点。首先采用任务中统计的全部数据建立无故障时间的预测模型,其总体精度是满足要求的,但只有下一次故障发生时,才能够验证模型外推的精度。当采用部分数据按式(10)构造如下的数列,分别进行模型的建立,并分析新构建数据序列的模型精度,采用剩余数据分析每一序列的区间内、外的精度。可以检验改进方法的外推精度[4]。

原始数据为

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

构建序列为

$$x^{(1)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \cdots, x^{(0)}(m))$$
$$x^{(2)} = (x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \cdots, x^{(0)}(m+1))$$
$$\vdots$$
$$x^{(g)} = (x^{(0)}(g), x^{(0)}(g+1), \cdots, x^{(0)}(m-1+g)) \tag{10}$$

其中:g 为构建序列数;m 为每一构建序列的元素个数;n 为原始数列个数,且$(m+g) \leqslant n$。

$X1 = [167\quad 321\quad 468\quad 616\quad 763\quad 903\quad 1\,036]$;

$X2 = [321\quad 468\quad 616\quad 763\quad 903\quad 1\,036\quad 1\,275]$;

$X3 = [468\quad 616\quad 763\quad 903\quad 1\,036\quad 1\,275\quad 1\,540]$;

$X4 = [616\quad 763\quad 903\quad 1\,036\quad 1\,275\quad 1\,540\quad 1\,909]$;

$X = [167\quad 321\quad 468\quad 616\quad 763\quad 903\quad 1\,036\quad 1\,275\quad 1\,540\quad 1\,909]$。

这里从原始数据中按式(10)依次取 7 个数据进行模型建立,另外 3 个数据进行模型外推精度检验。由图 1 可以看出,采用全部原始数据所建立模型精度较好,而依据逐点更新的 X_1、X_2、X_3、X_4 序列随着数据逐渐更替,精度逐渐增高,反映了较早的历史数据对模型外推精度下降的影响。因此在对无故障时间进行预测分析过程中,对模型的构造应采用动态更新的过程构造数列,这样可以使得模型精度随着数据的不断更新,保证预估分析的精度。由原始序列偏差也可以看出,采用全部数据所建模型,在区间内精度较高,外推精度暂时无法验证。表 3 中列举了残差检验、均方差比值检验和小误差 p 检验的检验结果和模型外推几个点的相对误差。可以得出,随着数据的更新,序列 X1、X2、X3、X4 的均方差比值由 0.13 降至 0.05,按表 2 模型精度等级标准属一级,该精度属区间内的精度;而对于此数据各类模型精度检验方法中,残差检验比较严格,均方差比值次之,小误差 p 检验标准较低;外推精度 X2 序列的 $e(9)$、$e(10)$,X3 的 $e(10)$ 相对误差在 0.8% ~4.7%间变化,高于未进行更新的 X1 序列的预估精度。

2.2　某型装备故障时间建模

某型装备在任务中统计的故障时间统计依次为:4.05、3.78、3.12、2.95、2.45、2.67、2.23、2.00、2.13、1.80,单位为小时。按照 2.1 节中序列构建方法形成如下数据序列:

$X1 = [4.05\quad 3.78\quad 3.12\quad 2.95\quad 2.45\quad 2.67\quad 2.23]$;

$X2 = [3.78\quad 3.12\quad 2.95\quad 2.45\quad 2.67\quad 2.23\quad 2.00]$;

$X3 = [3.12\quad 2.95\quad 2.45\quad 2.67\quad 2.23\quad 2.00\quad 2.13]$;

$X4 = [2.95\quad 2.45\quad 2.67\quad 2.23\quad 2.00\quad 2.13\quad 1.80]$;

$X = [4.05\quad 3.78\quad 3.12\quad 2.95\quad 2.45\quad 2.67\quad 2.23\quad 2.00\quad 2.13\quad 1.80]$。

分别对 X_1、X_2、X_3、X_4、X 数据序列按 1.2 节方法进行建模,并求出每一序列的残差值。由图 2 曲线可以看出,由全部原始数据建立的模型精度较高,而构建的序列模型中,采用更新数据的 4 个数列区间内的精度变化趋势规律性部强,按表 2 的指标属二级以上的精度,外推精度 X2 序列的$e(9)$、$e(10)$,X3 的 $e(10)$ 相对误差在 3.0% ~10.9%间变化,与未进行更新的 X1 序列的预估精度基本相当,由此可见,就目前数据情况而言,数据更新的方法更适用无故障时间的预估,在故障间隔时间的预估上,差别不大。

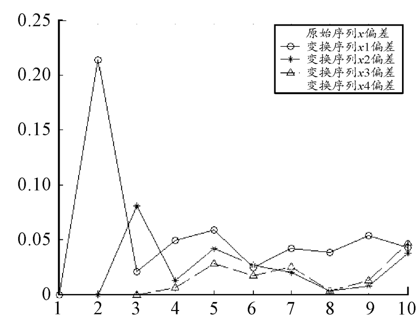

图 1　无故障时间构建数据与原始数据的偏差比较

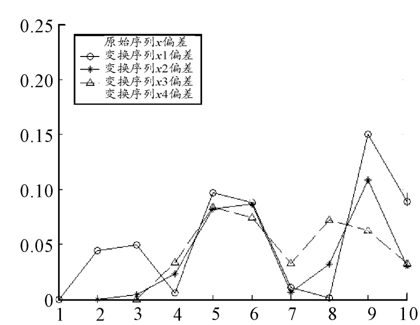

图 2　故障时间构建数据与原始数据的偏差比较

表 3 无故障时间模型精度及区间外的预估精度

	S1	S2	C	α	p	e(8)	e(9)	e(10)
X1	313.8	40.9	0.13	0.06	1	0.038	0.054	0.043
X2	331.7	24.2	0.07	0.03	1	–	0.008	0.037
X3	374.6	16.6	0.04	0.01	1	–	–	0.047
X4	456.9	24.8	0.05	0.02	1	–	–	–
X	552.3	35.6	0.06	0.05	1	–	–	–

表 4 故障时间模型精度及区间外的预估精度

	S1	S2	C	α	p	e(8)	e(9)	e(10)
X1	0.1606	0.0908	0.25	0.04	1	0.001	0.150	0.089
X2	0.1485	0.0628	0.22	0.03	1	–	0.109	0.030
X3	0.1529	0.0958	0.35	0.05	1	–	–	0.033
X4	0.1494	0.0999	0.36	0.05	1	–	–	–
X	0.1999	0.1032	0.21	0.05	1	–	–	–

3 结束语

应用灰色模型 G(1,1),是在不能够得到完整信息情况下的一种便捷、适用范围广的建模方法。新型装备的无故障时间和故障间隔时间可以看作是在一定范围内变化的灰色变量,通过建立全部数据与动态数据更新的 GM (1,1) 模型,得到相应参数的预估值。采用动态数据更新建立的模型在无故障时间预估上具有较好的模型外推精度,而故障间隔时间的预估上优势不明显,这可能与故障间隔时间取决于维修水平、保障人员熟练程度和环境条件有关,数据离散度较大有关。准确地预估装备的无故障时间和故障间隔时间,可以以科学指导装备管理部门在装备使用与维护过程中的经费投入、备件保障、人员配比和管理模式等,提高了预防性维修的针对性、科学性。

参考文献:

[1] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中工学院出版社,1987:13-30.

[2] Deng J. The Control Problems of Grey Systems [J]. Systems & Control Letters,1982,1(5):288-294.

[3] 汪惟源. 基于灰色模型的中长期电力负荷预测[J]. 微计算机信息,2009,25(11):200-201.

[4] 王朝阳,许强,范宣梅,等. 灰色新陈代谢 GM(1,1) 模型在滑坡变形预测中的应用[J]. 水文地质工程地质,2009(2):108-111.

[5] 汤长俊,潘玉田,胡会芳,等. GM(1,1)模型预测火炮研制费用的应用[J]. 火力指挥与控制,2009,34(9):136-138.

[6] Ke Hongfa, Chen Yongguang. An interpolation technique based on grey relational theory[J]. The Journal of Grey System,2006,18(1):79 - 83.

[7] Ke Hongfa, Chen Yongguang, Liu Yi. Data processing of small samples based on grey distance information approach [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2007,18(2):281-289.

[8] 崔亚君,祝华远,于建立. 基于灰色系统理论的某型航空装备灾变故障时间预测[J]. 装备制造技术,2008(9):55-56.

[9] 李小燕. 基于灰色理论的电力负荷预测[D]. 武汉:华中科技大学,2007:23-25.

[10] 高鸣,唐双喜,徐廷学,等. 基于灰色理论的导弹装备故障间隔时间预测[J]. 海军航空工程学院学报,2008,23(3):343-345.

(责任编辑 周江川)