第5卷第1期 空军工程大学学报(自然科学版) Vol.5 No.1
2004年2月 JOURNAL OF AIR FORCE ENGINEERING UNIVERSITY(NATURAL SCIENCE EDITION) Feb.2004

基于灰色马尔柯夫模型的严重飞行事故频数预测

甘旭升， 端木京顺， 田井远
(空军工程大学 工程学院，陕西 西安 710038)

摘 要:根据严重飞行事故的发生频数具有趋势性和随机波动性特点,采用结合GM(1,1)模型与马尔柯夫预测技术的联合预测方法,进行严重飞行事故频数的趋势性分析和状态预测,结果表明:灰色马尔柯夫预测模型对严重飞行事故频数的预测结果更科学、更精确。并用灰色马尔柯预测模型,预测世界定期客运航班严重飞行事故频数,其相对误差小于灰色模型预测结果。

关键词:灰色模型;GM(1,1);马尔柯夫链;转移概率;严重飞行事故频数
中图分类号:V328 **文献标识码**:A **文章编号**:1009-3516(2004)01-0018-04

严重飞行事故频数的随机波动性大、预测难度高的特点,决定了寻找一种计算简便、精度高的预测模型是非常困难的。通常采用的指数平滑模型和自回归-移动平均模型计算复杂、预测精度低、对数据的要求比较苛刻,实际应用意义不大。关于定量预测飞行事故的资料国内外都比较少见,目前掌握的国外资料仅有美国前航空航天安全处主任R. W. Morgen的文章《美国空军1986年严重飞行事故预测》,所用的预测方法也仅停留于指数平滑处理上,其预测精度为小于20%;在国内,空军指挥学院的徐邦年教授于1987年开始用灰色模型来预测空军的严重飞行事故,进行飞行事故预测科学研究,但预测精度仍不理想,原因是GM(1.1)模型要求数据序列必须呈指数规律,而对随机波动性较大的数据序列的拟合较差.预测精度较低,一般可以用来预测对象发展变化的总趋势[1]。

1 严重飞行事故的灰色-马尔柯夫建模过程

1.1 建立GM(1,1)模型

产生严重飞行事故的部份因素,其规律性已被人们认识,而另一部分因素的规律性却难以表达,所以可认为严重飞行事故的产生系统是一个灰色系统。将严重飞行事故数作为灰色量,以一定的时间区间收集事故数据,产生灰色预测模型。

1.1.1 模型的选择

采用含有一个变量的一阶微分方程的GM(1.1)模型,用一次拟合参数估计法建立模型[2]。

1.1.2 数据处理

依据GM(1.1)模型,原始数列$X^{(0)}(i),i=1,2,3,\cdots,n$可表示为$X^{(0)}(1),X^{(0)}(2),X^{(0)}(3),\cdots X^{(0)}(i),X^{(0)}(n)$。对变换后的数据序列进行一次累加生成,得到新的数据列$X^{(1)}(1),X^{(1)}(2),\cdots X^{(1)}(i),X^{(1)}(n)$。其中,

$$X^{(1)}(j)=\sum_{i=1}^{j}X^{(0)}(i),j=1,2,\cdots n \tag{1}$$

1.1.3 建立一次估计响应函数

GM(1.1)模型的微分方程表示为

$$\mathrm{d}X^{(1)}/\mathrm{d}t+aX^{(1)}=u \tag{2}$$

收稿日期:2003-06-30
作者简介:甘旭升(1972-),男,黑龙江海伦人,硕士生,主要从事装备管理研究;
端木京顺(1956-),男,陕西泾阳人,教授,主要从事装备管理研究.

式中 a ,u 为待估参数,设 $\hat{a}$为待估参数向量,按最小二乘法得：

$$\hat{a}=(a,u)^{\mathrm{T}}=(\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B})^{-1}\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Y}_n \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{B}=\begin{vmatrix}-[X^{(1)}(1)+X^{(1)}(2)]/2 & 1\\ -[X^{(1)}(2)+X^{(1)}(3)]/2 & 1\\ & \vdots\\ -[X^{(1)}(n-1)+X^{(1)}(n)]/2 & 1\end{vmatrix}$,$\boldsymbol{Y}_n=[X^{(0)}(2)+X^{(0)}(3),\cdots X^{(0)}(i)+X^{(0)}(n)]^{\mathrm{T}}$。

白化形式微分方程的解为

$$\hat{X}^{(1)}(t+1)=(X^{(1)}(0)-u/a)e^{-at}+u/a \tag{4}$$

1.1.4　还原生成

式(4)乃是变换后数据序列预测值的累加而成,应将其还原成变换后的数据序列预测值即

$$\hat{X}^{(0)}(1)=X^{(0)}(1)$$

$$\hat{X}^{(1)}(t+1)=[X^{(0)}(1)-u/a]\cdot(-1e^{a})\cdot e^{-at}] \tag{5}$$

令：

$$\hat{y}(t)=\hat{X}^{(0)}(t+1) \tag{6}$$

则 $\hat{y}(t)$ 即为 t 时刻按 GM(1,1)模型所求得原始数据的趋势值。它反映了系统总的变化趋势。

1.2　预测结果的马尔柯夫精确化

1.2.1　状态的界定

所谓状态是指航空业年发生严重飞行事故数的程度,严重飞行事故数的年度变化过程是一个随机的呈上升或下降趋势的非平稳随机过程,不同年度状态的边界和内涵应是变化的,为此应考虑一个具有适应性的状态划分准则,这个准则应与发生严重飞行事故数的基本时序变化趋势一致。因此,对于严重飞行事故数年度变化符合 n 阶马尔柯夫非平稳随机序列 $\hat{y}(t)$,其状态划分准则以相对值为好,$E_i\in[\otimes_{1i},\otimes_{2i}]$ 。E_i 表示第 i 种状态;$\otimes_{1i}$、$\otimes_{2i}$即灰元,分别表示第 i 种状态的上下界[3]。

相对值的计算方法是以实际值除以趋势值再乘以 100%。

在划分状态时,要根据实际情况划分不同的区间个数。一般来说,原始数据较少时,划分区间宜少,以便增多各状态间的转移次数,从而更加客观地反映各状态间的转移规律,原始数据较多时,区间也不妨划分多一些,以便从资料中挖掘更多的信息,提高预测精度。

1.2.2　转移矩阵的构造

由状态 E_i经过 k 步转移到达状态 E_j的次数记为 $n_{ij}(k)$,状态 E_i出现的次数记为 ,则由状态 E_i经 k 步转移到状态 E_j的转移概率为[4]

$$\boldsymbol{P}_{ij}(k)=n_{ij}(k)/n_i \tag{7}$$

得 $m\times m$ 阶的状态转移概率矩阵

$$\boldsymbol{P}(k)=\begin{vmatrix}P_{11k} & P_{12k} & \cdots & P_{1mk}\\ P_{21k} & P_{22k} & P_{11k}\cdots & P_{2mk}\\ \vdots & & & \\ P_{m1k} & P_{m2k} & \cdots & P_{mmk}\end{vmatrix} \tag{8}$$

状态转移概率矩阵 $\boldsymbol{P}(k)$ 反映系统各状态之间的转移规律,通过观察 $\boldsymbol{P}(k)$ 预测未来的状态的转向。确定转移概率矩阵 $\boldsymbol{P}(k)$ 和初始状态 E_i 后,马尔柯夫链就可以确定。

1.2.3　编制预测表

选取离预测年份最近的 m 个年份(m 为状态个数),按离预测年的远近,转移步数分别定为 1,2,⋯ , m。在转移步数所对应的转移矩阵中,取起始状态所对应的行向量,即为各状态出现的概率,对各概率求和,其最大的转移步数所对应的状态即为系统随机值的预测转向状态。

1.2.4　预测值的计算

决定了系统未来的状态转移后,也就确定了预测值的相对值的变动区间[$\otimes_{1i}$,$\otimes_{2i}$] ,因此,预测值的变

动区间范围在$\otimes_{1i}\cdot\hat{y}(t)\sim\otimes_{2i}\cdot\hat{y}(t)$之间,可以用区间中位数作为未来时刻预测值的相对值,则预测值为

$$\hat{y}'(t)=\frac{1}{2}(\otimes_{1i}+\otimes_{2i})\cdot\hat{y}(t) \tag{9}$$

2 应用实例

表1以1981年到1996年定期客运航班所发生的严重飞行事故频数为例(注:本表不包括俄罗斯/独联体国家,数据资料来源于国际民航组织)。

表1 1981~1996年世界定期客运航班严重死亡事故数

年份	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
事故数	22	26	30	16	22	18	24	26	27	22	25	25	32	24	22	22

2.1 建立GM(1,1)模型

令$X^{(0)}=\{22,26,30,16,22,18,24,26,27,22,25,25,32,24,22,22\}$

由最小二乘法可得到响应方程:$\hat{X}^{(0)}(t+1)=[X^{(0)}(1)-u/a]\cdot(-1e^{a})\cdot e^{-at}=23.42e^{3.347\times10^{-3}t}$。

由此可利用公式求出各年的趋势值,并取1981年的趋势值为23.42,得表2数据。

表2 1981~1994年严重死亡事故数各年趋势值

年份	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
$X^{(0)}$	22	26	30	16	22	18	24	26	27	22	25	25	32	24	22	22
$\hat{X}^{(0)}$	23.42	23.50	23.58	23.66	23.74	23.82	23.90	23.98	24.06	24.14	24.22	24.30	24.38	24.46	24.54	24.63

由表2可知,世界定期客运航班严重死亡事故数总的趋势是上升的(原因是受航运量增加、新航线的开辟、仍有一定量的归式涡浆客机在运营所致),但具体各数据间却是时增时减的(主要是受人为因素、新设备的引进等因素的影响),使各年度死亡事故数的相对值所处的状态不同,在这种情况下,仅用GM(1,1)模型预测是不合理的,宜用灰色马可尔柯夫预测模型进行处理。

2.2 相对值的确定

利用GM(1,1)得各年度死亡事故数的趋势值后。再利用实际值除以趋势值,即得表3各年度相对值。

表3 各年度相对值

年份	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
$X^{(0)}/\hat{X}^{(0)}$ %	94	111	127	68	93	76	100	108	112	91	103	103	131	98	90	89

2.3 状态划分

依据表3中实际值与趋势值的关系,结合世界定期客运航班严重死亡事故的实际情况,对其进行状态划分,见表4。各年度的状态也随之确定,见表5。

表4 状态划分

状态	编号	实际值占趋势比(%)
强下降年	1	67~80
强下降年	2	80~96
强上升年	3	96~114
强上升年	4	114~136

表5 各年度状态表

年份	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
状态	2	3	4	1	2	1	3	3	3	2	3	3	4	3	2	2

2.4 构造转移概率矩阵

根据式(7)和式(8),得各步转移概率矩阵为

$$\boldsymbol{P}(1)=\begin{bmatrix}0 & 1/2 & 1/2 & 0\\ 1/4 & 1/4 & 1/2 & 0\\ 0 & 2/7 & 3/7 & 2/7\\ 1/2 & 0 & 1/2 & 0\end{bmatrix} \qquad \boldsymbol{P}(2)=\begin{bmatrix}1/2 & 0 & 1/2 & 0\\ 0 & 0 & 2/3 & 1/3\\ 1/7 & 2/7 & 3/7 & 1/7\\ 0 & 1 & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$P(3)=\begin{bmatrix}0 & 0 & 1 & 0\\ 1/3 & 0 & 1/3 & 1/3\\ 0 & 1/2 & 1/2 & 0\\ 1/2 & 1/2 & 0 & 0\end{bmatrix}\qquad P(4)=\begin{bmatrix}0 & 1/2 & 1/2 & 0\\ 0 & 1/3 & 2/3 & 0\\ 1/6 & 1/3 & 1/3 & 1/6\\ 0 & 0 & 1 & 0\end{bmatrix}$$

2.5 编制预测表

由于状态划分为 4，所以选择离预测年份(1997 年)最近的 4 个年份来编制预测表，见表 6。

表 6　1997 年灰色马可尔柯夫预测表

起始年	起始状态	转移步数	状态 1	状态 2	状态 3	状态 4
1996	2	1	1/4	1/4	1/2	0
1995	2	2	0	0	2/3	1/3
1994	3	3	0	1/2	1/2	0
1993	4	4	0	0	1	0
合计			1/4	3/4	8/3	1/3

由表 6 可以看出，合计栏中以状态“3”的概率“8/3”最大，故预测 1997 年世界定期客运航班严重死亡事故数最有可能处于弱上升状态，由 GM(1,1)模型预测 1997 年趋势值为 24.71，则由式(9)得：

$$\hat{y}'(t)=\frac{1}{2}\times(0.96+1.14)\times 24.71=25.95 \tag{10}$$

因此，1997 年世界定期客运航班严重死亡事故数灰色－马尔柯夫预测值应为 25.95(约为 26 起)，变动区间为[23.72，28.17]，而 1997 年实际统计数据为 26 起[国际民航组织统计]，预测结果令人满意。

表 7 给出了几个年份的灰色马尔柯夫预测与 GM(1,1)预测的对比结果。

表 7　两种预测方法的比较

年度	实际值	实际状态	GM(1,1) 预测值	GM(1,1) 相对误差(%)	灰色－马尔柯夫预测 状态	灰色－马尔柯夫预测 预测值	灰色－马尔柯夫预测 相对误差(%)
1991	25	3	24.22	3.1	3	325.43	-1.7
1992	25	3	24.30	2.8	3	25.52	-2.1
1993	32	4	24.38	23.8	3	25.68	19.7
1994	24	3	24.46	-1.9	3	25.68	-7.0
1995	22	2	24.54	-11.5	2	21.60	1.8
1996	22	2	24.63	-12.0	2	21.67	1.5

由表 7 可见，从总体看，灰色－马尔柯夫预测比 GM(1,1)预测精度有很大提高，若预测步数选择合理，还可提高其预测精度。

3 结束语

灰色马尔柯夫预测模型，综合了灰色 GM(1,1)模型和马尔柯夫链预测模型两种方法的长处，兼顾了趋势值和相对值两方面因素对预测结果的影响，是一种更加准确、实用的飞行事故预测方法。一般它需要较多的历史数据，历史数据越多，预测精度越高。实际应用中，状态数目的确定和状态具体划分形成，以及预测步数的确定都将对预测结果的准确性产生影响。

参考文献：

[1] 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社. 1988·100－120.

[2] 邓聚龙. 灰色预测与决策[M]. 武汉:华中理工大学出版社. 1986:7－9.

[3] 张　斌,宿其连,金　敏等. 森林病虫害的灰色马尔柯夫预测[J]. 吉林林学院学报. 1996(2):116－120.

[4] 朱孔来. 应用马尔柯夫链预测粮食产量[J]. 农业系统科学与综合研究. 1990,(1):50－52.

(编辑:姚树峰)

(下转第 34 页)