

基于 Hurst 指数的飞机完好率混沌时序数据时滞性分析

张云龙¹, 潘泉², 张洪才²

(1. 空军第一航空学院 基础部, 河南 信阳 464000; 2. 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要:通过研究 Hurst 指数随时间变化曲线的特性,提出了一种计算和判断混沌时间序列平均最大“记忆”长度(“平均循环周期”)的方法。并应用于对飞机完好率时间序列数据的时滞性实证分析,分析结果得到了有关专家的认可,为进一步的评价分析奠定了基础。

关键词:Hurst 指数;混沌时间序列;时滞性;平均循环周期

中图分类号: V37;TP301 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)01-0004-03

Hurst 指数是英国 H. E. Hurst 在 20 世纪中叶提出的一种判别时间序列是否对于时间有依赖的参数。他通过考察河流的泛滥和枯水期,发现这种时期往往持续几年。这就不同于以往理论上认为每年水流量是独立同分布的高斯变量,也不同于传统的马氏链的假设。在经验的基础上,他提出了用 Hurst 参数来分析这种时间序列的集群现象,并且给出了称为 R/S 的计算方法^[1]。在之后的几十年中,Hurst 指数在时间序列数据分析中得到了普遍的应用,但主要用于对经济数据和自然灾害数据的分析。Hurst 指数主要是作为判断数据混沌性的一个指标^[2-3],也有人^[2,4-7]根据其随时间变化的特点来研究混沌时间序列数据的预测问题。

1 Hurst 指数的相关性和分形特征及混沌时间序列数据的时滞性

Hurst 指数的取值通常在 0~1 之间,用 R/S 分析法计算出的 Hurst 指数往往比真实值偏大。通过 $C = 2^{(H-1)} - 1$ 可定义时间序列中现在对未来影响的一种相关性度量^[2]。

1) 当 $H = 0.5$ 时, $C = 0$, 标准布朗运动。表现马氏链特性,标志着时间序列是随机的和不相关的。

2) 当 $H \neq 0.5$ 时,分形布朗运动。时间序列就不是独立的,每个观测都带着在它之前发生的所有事件的“记忆”,这种记忆是长期的,理论上是永远延续的,近期事件的影响比远期的大,但残留影响总是存在的。当 $0 \leq H < 0.5$ 时, $C \in [-0.5, 0)$ 系统是反持久性(Antipersistent)的或遍历性的时间序列。它经常被称为是“均值回复”的。如果一个系统在前一个期间是向上走的,那么,它在下一个期间很可能向下走;反之亦然。这种反持久性行为的强度依赖于 H 距离零有多近,它越接近于零, C 就越趋近于 -0.5 , 即越负相关。

当 $0.5 \leq H < 1$ 时, $C \in (0, 1)$, 系统是一个持久性(Persistence)的或趋势增强的序列。如果序列在前一个期间是向上走的,那么,它在下一个期间将继续是向上走的,反之亦然。因此,一定范围的记录会持续相当长的时期,从而形成一个个大的循环。但是这些循环没有固定的周期,难以依靠过去的的数据预测未来的变化。此时,时间序列有混沌性。趋势增强行为的强度或持久性,随 H 接近于 1 或 $C = 1$, 而相关性变大。

3) 当 $H = 1$ 时,时间序列为一条直线。未来完全可以用现在进行预测。

显然,高 H 值比低 H 值显示更少的噪声、更强的持久性和更清楚的趋势,因而还意味着低风险。

文献[2]还将 $D = 2 - H$ 定义为一种分形维数,度量的是时间序列的参差不齐性。一条线的分形维是 $D = 1.0$; 一个几何平面的分形维的 $D = 2.0$; 而一个随机游动的累积变化的分形维则是 $D = 1.5$ 。数学分形可

收稿日期:2004-09-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60172037)

作者简介:张云龙(1966-),男,河南宁陵人,博士,主要从事质量控制、信息处理等方面的研究;

潘泉(1961-),男,上海人,教授,博士生导师,主要从事数据融合、小波分析等方面的研究;

张洪才(1938-),男,江苏江阴人,教授,博士生导师,主要从事估计理论、系统工程等方面的研究。

以任意缩放,从无限小到无限大。然而,自然分形却是有限的,到了某一点就不能再缩放了。例如,动物肺的分支不会变成无限小。因而,现实中的分形时间序列有着长而有限的“记忆”,虽然这种“记忆”理论上是无限的但实际是有限的。对混沌时间序列的时滞性分析内容主要包括:考察数据对某些信息的“记忆”的长度和程度。本文仅讨论这种记忆的平均最大长度,我们称之为混沌时间序列数据的“平均循环周期”。

2 混沌时间序列平均循环周期的计算与判断

对于自然分形系统,设“记忆”周期为 n^* 。运用 n^* 以前的数据回归 Hurst 指数是有效的,让时间再发展下去,Hurst 指数将向 0.5 接近,意味着初始信息正消失殆尽,几乎没有留下什么可以度量的相关性,然而影响仍旧是存在的。我们可以按下面的 7 个步骤绘制 Hurst 指数随时间变化的曲线:

Step 1. 给定一组共 N 个混沌时间序列数据 $\{v_1, v_2, \dots, v_N\}$;

Step 2. 计算前 u 个 v 的均值 $\bar{v}_u = \frac{1}{u} \sum_{i=1}^u v_i, (u = 1, 2, \dots, N)$;

Step 3. 分别计算前 u 个 v 的累计离差 $X_{t,u} = \sum_{i=1}^t (v_i - \bar{v}_u), t = 1, 2, \dots, u$ 得 u 个 $X_{t,u}$, 即 $(X_{1,u}, \dots, X_{u,u})$;

Step 4. 计算: $R_u = \max(X_{t,u}) - \min X_{t,u}, t = 1, 2, \dots, u$ 和 $S_u = \sqrt{(u-1)^{-1} \sum_{i=1}^u (v_i - \bar{v}_u)^2}$;

Step 5. 重复 2 ~ 4 步,按 $y_u = \log(R_u/S_u)$ 和 $x_u = \log u$ 得到 N 组数据 $(x_u, y_u), u = 1, 2, \dots, N$;

Step 6. 设 $u \leq n \leq N$, 则运用 $(x_u, y_u), (u = n - k + 1, n - k + 2, \dots, n)$, k 为滑块宽度,作线性回归: $y = a + Hx$, 应用最小二乘得 H_n ;

Step 7. 作 (n, H_n) 平面图。

曲线通常会随时间的增加走向一个极大值点 H_n^* , 预示这种“记忆”的长度极限,然后再滑向 0.5, 预示这种“记忆”的衰退。我们把这个极大值点所对应的时间点称为“平均循环周期”,反映了混沌时间序列数据对过去信息的最大记忆长度的平均值。

3 算例

图 1 和图 2 列举了 2 种飞机完好率时间序列数据的 R/S 分析曲线和对应的 Hurst 指数随时间的变化曲线。表 1 和表 2 给出了一些单位和机型飞机完好率的平均循环周期。

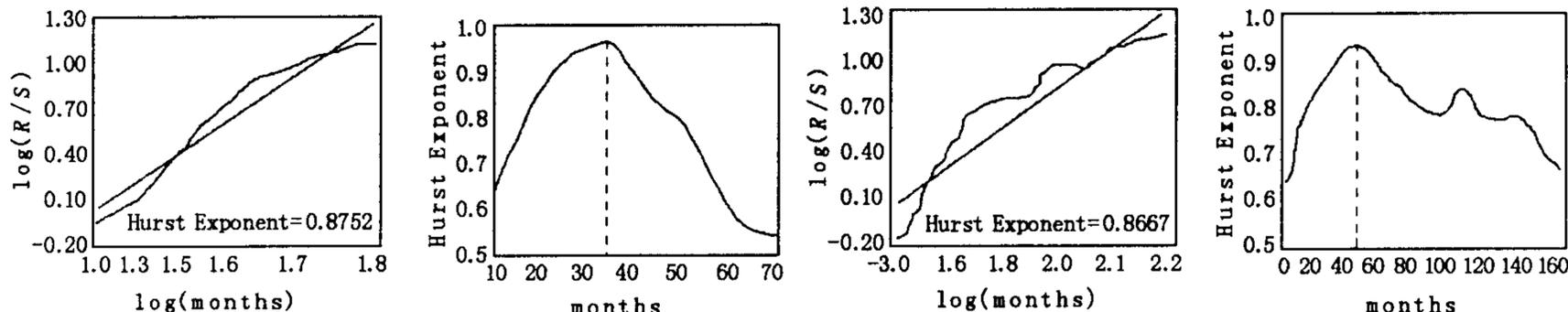


图 1 某型飞机完好率数据分析曲线

图 2 某单位飞机完好率数据分析曲线

表 1 部分部门的平均循环周期

单位编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
平均循环周期	35	26	25	32	42	15	33	44	24	17	25	33	21	40	23

表 2 部分机型的平均循环周期

单位编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
平均循环周期	50	63	24	29	17	12	29	23	19	16	25

4 结论

通过研究 Hurst 指数随时间变化的曲线特性,给出了计算和判断混沌时间序列最大记忆时间的平均长度,即“平均循环周期”的方法。实证结果告诉我们:当前飞机完好率状况,既是当前完好率工作的绩效,也是历史各时期完好率工作的积累效应;要特别重视在近 3~4 年时间内,寻找对当前完好率绩效贡献较大的措施、事件和时间等因素,并注意从中获取有益的经验;在完好率工作中实施任何举措,不仅要考虑当前的工作效益,也要注重为未来着想,积极推进具有长远意义的创新和改革工作。

为验证这些结果的合理性,我们在一定范围内进行了调查研究,征求了意见。综合调研结果和专家意见,总的认为:由于人员的流动性、装备的更替性等特点,使飞机完好率工作具有一定的周期性。人员流动影响力最大的是领导集体的更替,根据现行干部制度,干部任期基本是 3 或 4 年,因此飞机完好率平均循环周期在 36~48 个日历月周围,是较合理的。根据这一认识,表 1 和表 2 中显示的计算结果,大部分是合理的,一些不符合这一特点的计算结果,部队专家也给予了比较合理的解释,如周期较短的(如部门 6、10 和机型 5、6 等),主要是因为装备、人员、维修条件等因素变化和更换较快引起的;周期较长的(如机型 2 等),主要是因为与完好率相关的各种因素相对稳定或收集的完好率数据序列不够长的原因。因此,在后续对发挥完好率数据在评价分析中的作用,以上计算结果将是确定数据历史时间跨度的主要依据,进而对制订其控制策略和计划具有重要的指导作用。

参考文献:

- [1] Mandelbrot B B. The Fractal Geometry of Nature[M]. New York: W H Freeman and Company, 1977.
- [2] 埃德加 E 彼得斯. 资本市场的混沌与秩序[M]. 王小东. 北京:经济科学出版社, 1999.
- [3] 叶中行, 杨利平. 上证指数的混沌特性分析[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(3): 129 - 132.
- [4] 郭德科. 地震频次的 Hurst 指数在地震预报中的应用[J]. 华北地震科学, 2002, 20(3): 44 - 50.
- [5] 李 强, 徐桂明. 江苏及邻区地震频次的 Hurst 指数分析[J]. 西北地震学报, 2002, 24(3): 247 - 250.
- [6] Ledesma S. Analysis and Synthesis of Self - similar Network Traffic[D]. Stevens Institute of Technology, 2000
- [7] Erramilli A, Narayan O, Willinger W. Experimental Queuing Analysis with Long - range Dependent Packet Traffic[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 1996, 4: 209 - 223.

(编辑:姚树峰)

A Method of Analyzing the Time Lag of the Chaotic Time Series Based on Hurst Exponent

ZHANG Yun - long¹, PAN Quan², ZHANG Hong - cai²

(1. Fundamental Department, the first Aeronautical Institute of Air Force, Xinyang, Henan 464000, China; 2. Automatic School, Northwest Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract: By studying the feature of the curve of the Hurst exponent changing with the time, a method of calculating and judging the average "memorial" range of the chaotic time series, the mean period, is presented in this paper. When the curve is drawn according to the 7 steps give in the paper, you may find that there will be a peak value on the curve. The time point corresponding to this peak should be the mean period of the time series. Some results of the aircraft intactness ratio data by using this method have been approved by the related experts and can surely be used for the ulterior evaluation of the data.

Key words: Hurst exponent; chaotic time series; time lag; mean period