

文章编号: 1001-0920(2015)07-1245-06

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2014.0364

基于灰色准指数律的灰色生成速率关联模型的构建及应用

李雪梅, 党耀国, 王俊杰

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 211106)

摘要: 现有灰色关联模型都是直接考察原始数据, 没有考虑需要经过数据处理才能显现的规律. 对此, 构建基于灰色准指数律的生成速率关联分析模型. 首先, 对原始数据进行累加灰色生成, 构造生成速率序列, 进而用生成速率序列的接近性表征原序列的动态变化趋势的相似性; 然后, 对生成速率关联分析模型的性质进行研究; 最后, 将所构建的关联度模型应用于全国交通拥堵度相关因素的识别, 结果验证了所提出模型的实用性和有效性.

关键词: 灰色关联度; 灰色生成; 变化趋势; 生成速率; 交通拥堵度

中图分类号: N94

文献标志码: A

Grey generation rate relational analysis model based on grey exponential law and its application

LI Xue-mei, DANG Yao-guo, WANG Jun-jie

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China.

Correspondent: LI Xue-mei, E-mail: xuemeili85@163.com)

Abstract: The existing grey relational analysis examines the geometric similarity or proximity of data directly or after dimensionless without considering other kinds of law. Therefore, the grey generation rate relational analysis model based on the grey exponential law is proposed. Firstly, the original data is accumulated, and the generation rate is established. The dynamic change trend similarity of the original time series is characterized by the proximity of generation rate sequence. Then, qualities of the grey generation rate relational analysis model are researched. Finally, factors which affect traffic congestion degree in China are researched by using the proposed grey generation rate relational analysis model. This application is presented to illustrate the effectiveness and practicality of the proposed model.

Keywords: grey relational analysis; grey generation; dynamic tendency; generation rate; traffic congestion degree

0 引言

灰色关联分析根据曲线的相似性或接近性计算关联度, 用于判断代表事物特征的序列间关联程度的大小. 从目前研究领域看, 对灰色关联分析的研究可以分为以下几个方面: 1) 对现有关联度模型进行改进与拓展^[1-2]. 2) 将研究对象由实数序列拓展到面板数据^[3]. 3) 对灰色关联度的性质进行研究, 如对仿射变换一致性^[4]、相似性和接近性^[5]等性质进行相应的研究和比较. 灰色关联分析对数据分布规律和数量无特殊要求, 且计算简便, 在各种领域的理论研究和实践中都具有广泛的应用. 4) 灰色关联模型被用于聚类^[6]、决策^[7-8]和评价^[9]等理论方法. 5) 在实际应用

中, 灰色关联模型在区域经济^[10]、品牌管理^[11]、软件效果评估^[12]、能源经济^[13]、岩体表征^[14]和分布式多目标航迹^[15]等经济社会与工程实际问题的研究中也得到了广泛应用. 6) 对灰色关联模型的研究进行述评. 文献[16]对现有关联度模型的研究进展进行了梳理; 文献[17]将1996~2011年ISI数据库中的300多种期刊的灰色关联相关文献进行了统计分析. 近些年灰色关联模型的应用研究呈明显上升趋势.

从对现有关联模型研究的总结中可以看出, 现有的关联度模型都是直接考察原始数据的几何相似性或接近性, 或者无量纲化后进行计算. 灰色系统理论认为, 客观系统必然存在某种内在规律. 灰色累加生

收稿日期: 2014-03-17; 修回日期: 2014-05-22.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71371098, 71071077); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(NC2012001); 江苏高校哲学社会科学重点研究基地重大项目(2012JDXM005); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0174); 南京航空航天大学博士学位论文创新与创优基金项目(BCXJ12-11).

作者简介: 李雪梅(1985—), 女, 博士生, 从事灰色系统理论与应用的研究; 党耀国(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色系统理论与应用等研究.

成可以实现灰色过程的白化,使原本看似没有规律的原始数据中蕴含的积分特征或规律显现出来^[18].累加生成是凸显数据内在规律的有效方法,是灰色预测模型构建的基础^[18-20].现实中可视为广义能量系统的系统有很多,而能量的积累与释放过程一般具有指数规律,因此灰色累加生成的灰色准指数规律具有广泛的适应性.

由于研究中所用数据很多需要经过数据变换后方能显示真实规律,本文考虑能量的累积与释放过程的指数规律,构建基于灰色准指数律的生成速率关联分析模型.首先对原始数据进行累加生成,然后对生成的准指数序列进行拟合,从而用拟合曲线在各时刻处切线斜率与均值的比值来构造生成速率序列,用生成速率序列的接近性来表征原序列的动态变化趋势的相似性.由于原始数据有关联关系的序列进行累加生成后也具有准指数规律,所构建的关联度模型不仅适用于原始数据直接有关联关系的序列,也适用于具有累积效应,需要累加才能显现规律再进行关联分析的序列.本文所构建的关联分析模型将拓展对序列进行关联分析的思路,挖掘数据更多的规律,也将扩展灰色关联分析模型的应用范围.

1 基于灰色准指数律的生成速率关联模型的构建

定义 1^[18] 设

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

为原始序列, D 为序列算子, 有

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

其中

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i), \quad k = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

则称 D 为 $X^{(0)}$ 的一阶累加生成算子, $X^{(1)}$ 为 $X^{(0)}$ 的一阶累加生成序列.

定义 2^[18] 若序列 X 的光滑比为

$$\rho(k) = x(k) / \sum_{i=1}^{k-1} x(i), \quad k = 1, 2, \dots, n,$$

且满足如下条件, 则称序列 X 为准光滑序列:

- 1) $\rho(k+1)/\rho(k) < 1, k = 2, 3, \dots, n-1$;
- 2) $\rho(k) \in [0, \varepsilon], k = 3, 4, \dots, n$;
- 3) $\varepsilon < 0.5$.

定义 3^[18] 对序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, 令 $\sigma(k) = x(k)/x(k-1)$. 若对于 $\forall k, \sigma(k) \in [a, b]$, 有 $b-a = \delta$, 则当 $\delta < 0.5$ 时, 称序列 X 具有准指数规律.

定理 1^[18] 若 $X^{(0)}$ 为非负准光滑序列, 则 $X^{(0)}$ 的一次累加生成序列 $X^{(1)}$ 满足准指数规律.

1.1 累加生成序列的曲线拟合

设原始非负序列为

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

由定理 1 可知其一阶累加生成序列 $X^{(1)}$ 具有准指数规律, 因而可用准指数曲线进行拟合. 运用 GM(1,1) 模型的思想 and 建模方法, 对原始数据的累加生成序列进行曲线拟合, 可得到拟合方程.

利用 GM(1,1) 模型的白化方程

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

的解拟合累加生成序列的准指数曲线, 可得拟合曲线方程为

$$\hat{x}^{(1)}(t) = ce^{-at} + b/a. \quad (2)$$

其中

$$c = x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}, \quad (a, b)^T = (B^T B)^{-1} B^T Y;$$

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2}(x^{(1)}(k-1) + x^{(1)}(k)), \quad k = 2, 3, \dots, n;$$

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

1.2 基于灰色准指数律的生成速率关联模型的构造

由 $X^{(1)}$ 拟合曲线方程和斜率含义可知拟合曲线 t 时刻的切线斜率为

$$h(t) = \frac{d\hat{x}^{(1)}(t)}{dt} = -ace^{-at}. \quad (4)$$

闭区间 $[1, n]$ 内 $X^{(1)}$ 拟合函数的均值为

$$\begin{aligned} \bar{X}^{(1)} &= \frac{1}{n-1} \int_1^n \hat{x}^{(1)}(t) dt = \\ &= \frac{1}{n-1} \int_1^n \left(ce^{-at} + \frac{b}{a} \right) dt = \\ &= \frac{c}{(n-1)a} (e^{-a} - e^{-an}) + \frac{b}{a}. \end{aligned} \quad (5)$$

定义 4 设 $t \in [a, b]$, 称

$$s(t) = h(t)/\bar{X}^{(1)} \quad (6)$$

为 $X^{(0)}$ 在 t 时刻的生成速率.

定义 5 若 $s_0(k) = h_0(k)/\bar{X}_0^{(1)}$, $s_i(k) = h_i(k)/\bar{X}_i^{(1)}$ 为 $X_0^{(0)}$ 与 $X_i^{(0)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 在 k 时刻的生成速率, 则 $S_0 = (s_0(1), s_0(2), \dots, s_0(n))$ 为系统特征序列 X_0 的生成速率序列, $S_i = (s_i(1), s_i(2), \dots, s_i(n))$ 为系统行为序列 X_i ($i = 1, 2, \dots, m$) 的生成速率序列. 其中

$$h_0(k) = -a_0 c_0 e^{-a_0 k},$$

$$h_i(k) = -a_i c_i e^{-a_i k},$$

$$k = 1, 2, \dots, n;$$

$$\begin{aligned} \bar{X}_0^{(1)} &= \frac{c_0}{(n-1)a_0}(e^{-a_0} - e^{-a_0n}) + \frac{b_0}{a_0}, \\ \bar{X}_0^{(1)} &= \frac{c_i}{(n-1)a_i}(e^{-a_i} - e^{-a_in}) + \frac{b_i}{a_i}, \\ & i = 1, 2, \dots, m. \end{aligned}$$

斜率是直线倾斜程度的量度, $X^{(1)}$ 拟合曲线 t 时刻的切线斜率是 $X^{(1)}$ 在 t 时刻的导数值, 即 $X^{(1)}$ 在 t 时刻变化的速度, 但没有消除数量级的影响, 再除以均值构造生成速率便达到了消除数量级的作用. 用生成速率的接近程度可有效表示生成序列变化速度的相似性, 生成速率越接近, 原序列关联度越大.

定义 6 设系统特征序列为

$$X_0^{(0)} = (x_0^{(0)}(1), x_0^{(0)}(2), \dots, x_0^{(0)}(n)),$$

系统行为序列为

$$\begin{aligned} X_i^{(0)} &= (x_i^{(0)}(1), x_i^{(0)}(2), \dots, x_i^{(0)}(n)), \\ & i = 1, 2, \dots, m, \end{aligned}$$

称

$$\begin{aligned} \xi_i(k) &= \frac{|s_0(k)|}{|s_0(k)| + |s_0(k) - s_i(k)|}, \\ & i = 1, 2, \dots, m \end{aligned} \quad (7)$$

为 $X_0^{(0)}$ 与 $X_i^{(0)}$ 在 k 时刻的灰色生成速率关联系数.

$|s_0(k) - s_i(k)|$ 体现了 $X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(0)}$ 在 k 时刻生成速率的接近程度. 从式 (7) 可以看出, k 时刻 $X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(0)}$ 的生成速率越接近, $|s_0(k) - s_i(k)|$ 越趋于 0, $X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(0)}$ 在此时段间的关联系数就越大、越趋于 1, 反之越小, 这符合构造灰色关联度模型的基本思想.

定义 7 设系统特征序列为

$$X_0 = (x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(n)),$$

系统行为序列为

$$X_i = (x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)), \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

称

$$\zeta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

为 $X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(i)}$ 的灰色生成速率关联度.

灰色生成速率关联系数反映了两序列在某一时刻生成速率的接近程度, 而灰色生成速率关联度是表示在整个区间上灰色生成速率的关联系数的均值.

由生成速率关联系数和生成速率关联度的定义可知, 生成速率关联度的值仅由 $X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(0)}$ 确定, 且不受系统其他序列的影响. 因此, 灰色生成速率关联度 ζ_i 满足唯一性和干扰因素独立性.

$X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(0)}$ 的生成速率越接近, $|s_0(k) - s_i(k)|$ 越趋于 0, $X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(0)}$ 在此时段间的关联系数就越大, 越趋近于 1, 则 ζ_i 越大. 因此, 灰色生成速率关联度

ζ_i 满足接近性.

1.3 基于灰色准指数律的生成速率关联模型的步骤

Step 1: 对系统特征序列 X_0 进行定性分析, 确定系统行为序列 X_i ;

Step 2: 根据式 (1) 对特征序列和行为序列进行累加生成;

Step 3: 根据式 (2), (3) 求解累加生成序列的拟合曲线方程;

Step 4: 由拟合曲线方程和式 (4)~(6) 构建生成速率序列;

Step 5: 由生成速率序列和式 (7) 计算特征序列和各行为序列各时刻的生成速率关联系数;

Step 6: 由特征序列和各行为序列各时刻的生成速率关联系数及式 (8) 计算特征序列和各行为序列的生成速率关联度, 确定特征序列和各行为序列的关联序, 得到系统序列间生成速率关联程度大小的量化关系.

2 灰色生成速率关联度的性质

下面对灰色生成速率关联度满足的性质进行研究.

定理 2 灰色生成速率关联度 ζ_i 具有如下性质.

1) $0 < \zeta_i \leq 1$, 当且仅当对于 $\forall k \in \{1, 2, \dots, n\}$, 有 $s_0(k) = s_i(k)$ 成立时, $\zeta_i = 1$. 特别地, 若系统行为序列

$$X_i^{(0)} = (x_i^{(0)}(t_1), x_i^{(0)}(t_2), \dots, x_i^{(0)}(t_n))$$

满足 $x_i^{(0)}(t_k) = \theta x_0^{(0)}(t_k)$, $\theta = \text{const}$, $k = 1, 2, \dots, n$, 则 $\zeta_i = 1$,

2) 唯一性, 干扰因素独立性, 即对于确定的序列, ζ_i 值唯一确定, 且不受系统其他序列的影响.

证明 1) 若 $\zeta_i = 0 \Leftrightarrow |s_0(k)| = 0 \Leftrightarrow x_0^{(1)}(k) = r$, $\forall k \in \{1, 2, \dots, n\}$, 其中 $r = \text{const}$, 则有

$$\begin{aligned} x_0^{(0)}(k) &= x_0^{(1)}(k) - x_0^{(1)}(k-1) = r - r = 0, \\ & k = 2, 3, \dots, n. \end{aligned}$$

研究此序列的关联性没有意义, 因此 $\zeta_i \neq 0$.

又因为 $|s_0(k)| > 0, |s_0(k) - s_i(k)| \geq 0$, 所以有

$$0 < \frac{|s_0(k)|}{|s_0(k)| + |s_0(k) - s_i(k)|} \leq 1,$$

即 $0 < \xi_i(k) \leq 1$, 且 $0 < \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \leq 1$, 因此 $0 < \zeta_i \leq 1$. 当且仅当 $s_0(k) = s_i(k)$ 时, 有 $\xi_i(k) = 1$, 若 $\forall k \in \{1, 2, \dots, n\}$, 有 $s_0(k) = s_i(k)$, 则 $\zeta_i = 1$.

原始特征序列 $X_0^{(0)}$ 和原始行为特征序列 $X_i^{(0)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 在 k 时刻的生成速率为

$$s_0(k) = \frac{-a_0^2 \left(x_0^{(0)}(1) - \frac{b_0}{a_0} \right) (n-1) e^{-a_0 k}}{\left(x_0^{(0)}(1) - \frac{b_0}{a_0} \right) (e^{-a_0} - e^{-a_0 n}) + (n-1)b_0},$$

$$s_i(k) = \frac{-a_i^2 \left(x_i^{(0)}(1) - \frac{b_i}{a_i} \right) (n-1) e^{-a_i k}}{\left(x_i^{(0)}(1) - \frac{b_i}{a_i} \right) (e^{-a_i} - e^{-a_i n}) + (n-1)b_i},$$

$k = 1, 2, \dots, n.$

若 $x_i^{(0)}(t_k) = \theta x_0^{(0)}(t_k)$, 由文献[21]可知 $a_0 = a_i$, $b_i = \theta b_0$, $i = 1, 2, \dots, m$, 从而 $s_i(k) = s_0(k)$, 则

$$\xi_i(k) = \frac{|s_0(k)|}{|s_0(k)| + |s_0(k) - s_i(k)|} = \frac{|s_0(k)|}{|s_0(k)|} = 1,$$

所以有

$$\zeta_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_i(k) = 1.$$

2) 由生成速率关联系数和生成速率关联度的定义, 生成速率关联度的值唯一确定, 且不受系统其他序列的影响, 仅由 $X_0^{(0)}$ 和 $X_i^{(0)}$ 确定, 因此灰色生成速率关联度 ζ_i 满足唯一性和干扰因素独立性.

定理 3 无量纲处理不改变灰色生成速率关联度 ζ_i 的值. 设 $[a, b]$ 上的系统特征序列为

$$X_0^{(0)} = (x_0^{(0)}(t_1), x_0^{(0)}(t_2), \dots, x_0^{(0)}(t_n)),$$

系统行为序列为

$$X_i^{(0)} = (x_i^{(0)}(t_1), x_i^{(0)}(t_2), \dots, x_i^{(0)}(t_n)),$$

$i = 1, 2, \dots, m.$

若序列先进行初值化、均值化、倍数化、百分比化等无量纲化处理, 则再计算处理后序列的灰色生成速率关联系数和灰色生成速率关联度的值不变.

证明 若设原始特征序列 $X_0^{(0)}$ 和原始行为特征序列 $X_i^{(0)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 的累加生成序列即 $X_0^{(1)}$ 和 $X_i^{(1)}$ 的拟合曲线为

$$\hat{x}_0^{(1)}(t) = \left(x_0^{(0)}(1) - \frac{b_0}{a_0} \right) e^{-a_0 t} + \frac{b_0}{a_0},$$

$$\hat{x}_i^{(1)}(t) = \left(x_i^{(0)}(1) - \frac{b_i}{a_i} \right) e^{-a_i t} + \frac{b_i}{a_i},$$

则原始序列 k 时刻的生成速率为

$$s_0(k) = \frac{-a_0^2 \left(x_0^{(0)}(1) - \frac{b_0}{a_0} \right) (n-1) e^{-a_0 k}}{\left(x_0^{(0)}(1) - \frac{b_0}{a_0} \right) (e^{-a_0} - e^{-a_0 n}) + (n-1)b_0},$$

$$s_i(k) = \frac{-a_i^2 \left(x_i^{(0)}(1) - \frac{b_i}{a_i} \right) (n-1) e^{-a_i k}}{\left(x_i^{(0)}(1) - \frac{b_i}{a_i} \right) (e^{-a_i} - e^{-a_i n}) + (n-1)b_i},$$

$$k = 1, 2, \dots, n, \quad i = 1, 2, \dots, m.$$

设 $Y_0^{(0)} = \lambda X_0^{(0)}$, $Y_i^{(0)} = \beta_i X_i^{(0)}$, $i = 1, 2, \dots, m$, $Y_0^{(1)}$ 和 $Y_i^{(1)}$ ($i = 1, 2, \dots, m$) 分别为其累加生成序列, 且拟合曲线为

$$\hat{y}_0^{(1)}(t) = \left(y_0^{(0)}(1) - \frac{b'_0}{a'_0} \right) e^{-a'_0 t} + \frac{b'_0}{a'_0},$$

$$\hat{y}_i^{(1)}(t) = \left(y_i^{(0)}(1) - \frac{b'_i}{a'_i} \right) e^{-a'_i t} + \frac{b'_i}{a'_i},$$

$i = 1, 2, \dots, m.$

数据经过无量纲变换后序列 k 时刻的生成速率

为

$$s'_0(k) = \frac{-a'^2_0 \left(y_0^{(0)}(1) - \frac{b'_0}{a'_0} \right) (n-1) e^{-a'_0 k}}{\left(y_0^{(0)}(1) - \frac{b'_0}{a'_0} \right) (e^{-a'_0} - e^{-a'_0 n}) + (n-1)b'_0},$$

$$s'_i(k) = \frac{-a'^2_i \left(y_i^{(0)}(1) - \frac{b'_i}{a'_i} \right) (n-1) e^{-a'_i k}}{\left(y_i^{(0)}(1) - \frac{b'_i}{a'_i} \right) (e^{-a'_i} - e^{-a'_i n}) + (n-1)b'_i},$$

$k = 1, 2, \dots, n.$

由文献[21]可知, $a_0 = a'_0$, $a_i = a'_i$, $b'_0 = \lambda b_0$, $b'_i = \beta_i b_i$, $i = 1, 2, \dots, m$. 又因为 $y_0^{(0)}(1) = \lambda x_0^{(0)}(1)$, $y_i^{(0)}(1) = \beta_i x_i^{(0)}(1)$, 所以有 $s'_0(k) = s_0(k)$, $s'_i(k) = s_i(k)$, 从而有

$$\xi'_i(k) = \frac{|s'_0(k)|}{|s'_0(k)| + |s'_0(k) - s'_i(k)|} = \frac{|s_0(k)|}{|s_0(k)| + |s_0(k) - s_i(k)|} = \xi_i(k).$$

因此, 若序列先进行初值化、均值化、倍数化、百分比化等无量纲化处理, 则再计算处理后的序列的灰色生成速率关联系数的值不变, 从而灰色生成速率关联度的值也不变. □

由定理 3 可知, 灰色生成速率关联度不受非负序列限制, 也适用于负数序列.

3 实例分析

城市化进程的加快使城市空间不断扩大、人口大量积聚, 交通拥堵成为全世界各城市所面临的普遍问题. 由交通拥堵带来的交通事故、大气污染、噪声污染和资源短缺等问题, 越来越成为阻碍全球经济甚至威胁人类生存的主要问题, 也因此成为全世界政府普遍关注的焦点和学术研究的热点之一. 对交通拥堵度的关键因素进行识别有利于交通管理与拥堵的防治, 具有重要意义. 根据文献[22]对相关因素的

表1 我国交通拥堵度相关影响因素原始数据

年份	交通拥堵度 X_0 /(辆/千米)	新增人口 X_1 /万人	人均GDP增加 X_2 /元	新注册民用汽车 X_3 /辆	新建公路 X_4 /万千米	公路密度 X_5 /(千米/万人)
2007	8.025 79	681	3 669.757	6 079 209	12.67	27.41
2008	9.386 69	673	3 538.253	7 631 839	14.64	28.53
2009	11.849 6	648	1 899.816	12 459 452	13.07	29.22
2010	14.816 3	641	4 407.517	15 288 186	14.74	30.03
2011	17.842 4	644	5 182.742	16 242 474	9.82	30.62
2012	20.858 0	669	3 222.587	17 725 011	13.11	31.45

表2 交通拥堵度相关因素与交通拥堵度的生成速率关联度及关联序

参数	新增人口	人均GDP增加值	新注册民用汽车	新建公路	公路密度
关联度	0.497 181 2	0.607 309	0.833 408	0.342 921	0.537 174
排序	4	2	1	5	3

分析并通过专家咨询,确定新增人口、人均GDP增加值、新注册民用汽车、新建公路和公路密度,并将其作为系统行为因素.中国交通运输统计年鉴中用汽车保有量与公路可容纳汽车量的比值来度量交通拥堵度,本文采用数据更易准确获取的私人汽车保有量与全国公路里程的比值来度量,原始数据如表1所示.

由于选取的行为因素中新增人口、新注册民用汽车和新建公路都具有累积效应,用基于灰色准指数律的生成速率关联度对交通拥堵度的相关因素进行识别,得到相关因素和交通拥堵度的关联度与关联序,如表2所示.

根据表2的计算结果,我国交通拥堵度相关的影响因素排名依次为新注册民用汽车、人均GDP增加值、公路密度、新增人口和新建公路,分别代表了需求因素、驱动因素、现状因素、人口因素和供应因素,结果与现实基本相符.新注册民用汽车对交通拥堵度的影响最大,新注册民用汽车越多,所需要的公路也就越多,交通拥堵度越大;其次为人均GDP增加值,这是交通拥堵的驱动因素,人均GDP增长,一方面会导致民用汽车增多,另一方面经济活跃对交通运输的需求也越旺盛;再次为公路密度与新增人口,其影响程度低于前两个因素;最后是新建公路,这是由于新建公路增多一定程度上会缓解交通拥堵,因此他们的关联度较低.同时可以发现,本实例中关联度的极值为0.490 487,分辨率也较高.由我国交通拥堵度相关影响因素排名的分析可知,本文所构建的生成速率关联模型是有效和实用的.

4 结 论

本文针对现有关联度模型存在的问题,考虑能量的累积过程中遵循的指数规律,以及灰色累加生成的灰色准指数律,构建了基于灰色准指数律的生成速率关联分析模型.用拟合曲线在各时刻处切线的斜率与均值的比值构造的生成速率序列的接近性来表征原

时间序列的动态变化趋势的相似性.同时也研究了生成速率关联分析模型的系列性质.最后,将所构建的关联度模型应用于全国交通拥堵度相关因素的识别,验证了本文模型的实用性和有效性.该关联度模型不仅适用于原始数据直接有关联关系的序列,也适用于具有累积效应需要累加才能显现规律再进行关联分析的序列.通过累加生成,可深度挖掘数据规律.由于累加生成准指数律具有广泛的适应性,基于灰色准指数律的灰色生成速率关联模型拓展了灰色关联模型的适用范围和应用领域.鉴于本文的思路,也可根据实际问题考察序列其他规律的关联关系.

参考文献(References)

- [1] 孙玉刚,党耀国.灰色T型关联度的改进[J].系统工程理论与实践,2008,28(4): 135-139.
(Sun Y G, Dang Y G. Improvement on grey T's correlation degree [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2008, 28(4): 135-139.)
- [2] 杜宏云,施红星,刘思峰,等.基于斜率判断的灰色周期关联度研究[J].中国管理科学,2010,18(1): 128-132.
(Du H Y, Shi H X, Liu S F, et al. Study on the model of grey periodic incidence judged on slope[J]. Chinese J of Management Science, 2010, 18(1): 128-132.)
- [3] 张可,刘思峰.灰色关联聚类在面板数据中的扩展及应用[J].系统工程理论与实践,2010,30(7): 1253-1259.
(Zhang K, Liu S F. Extended clusters of grey incidences for panel data and its application[J]. Systems Engineering - Theory & Practice, 2010, 30(7): 1253-1259.)
- [4] 崔杰,党耀国,刘思峰.几类关联分析模型的新性质[J].系统工程,2009,27(4): 65-70.
(Cui J, Dang Y G, Liu S F. Novel properties of some grey incidence analysis models[J]. Systems Engineering, 2009, 27(4): 65-70.)
- [5] 刘思峰,谢乃明,Forrest Jeffery.基于相似性和接近性视角的新型灰色关联分析模型[J].系统工程理论与实践,2010,30(5): 881-887.

- (Liu S F, Xie N M, Forrest J. On new models of grey incidence analysis based on visual angle of similarity and nearness[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(5): 881-887.)
- [6] 郭昆, 张岐山. 基于灰关联分析的谱聚类[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(7): 1260-1265.
(Guo K, Zhang Q S. Spectral clustering based on grey relational analysis[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(7): 1260-1265.)
- [7] 王育红, 党耀国. 基于灰色关联系数和 D-S 证据理论的区间数投资决策方法[J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(11): 128-134.
(Wang Y H, Dang Y G. Method of grey fixed weight clustering comprehensive ex post evaluation based on D-S evidential theory[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2009, 29(11): 128-134.)
- [8] Wei G W. Gray relational analysis method for intuitionistic fuzzy multiple attribute decision making[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(9): 11671-11677.
- [9] Jung J H, Kwon W T. Optimization of EDM process for multiple performance characteristics using Taguchi method and grey relational analysis[J]. *J of Mechanical Science and Technology*, 2010, 24(5): 1083-1090.
- [10] 王英. 基于灰色关联理论的 FDI 和中国区域经济发展差距研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2010, 30(3): 426-430.
(Wang Y. Analysis of FDI and Chinese regional economic discrepancy using grey incidence theory[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2010, 30(3): 426-430.)
- [11] 卫海英, 张蕾, 梁彦明, 等. 多维互动对服务品牌资产的影响——基于灰关联分析的研究[J]. *管理科学学报*, 2011, 14(10): 43-53.
(Wei H Y, Zhang L, Liang Y M, et al. Research on the effect of multidimensional interaction on service brand equity-based gray relational analysis[J]. *J of Management Science in Chinese*, 2011, 14(10): 43-53.)
- [12] Huang S J, Chiu N H, Chen L W. Integration of the grey relational analysis with genetic algorithm for software effort estimation[J]. *European J of Operational Research*, 2008, 188(3): 898-909.
- [13] Yuan C Q, Liu S F, Fang Z G, et al. The relation between Chinese economic development and energy consumption in the different periods[J]. *Energy Policy*, 2010, 38(9): 5189-5198.
- [14] 谭春, 陈剑平, 阙金声, 等. 基于三维裂隙网络模拟和灰色理论的岩体表征单元体研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(6): 709-716.
(Tan C, Chen J P, Que J S, et al. Analysis of representative elementary volume for rock mass based on 3D fracture numerical network model and grey system theory[J]. *Shuli Xuebao*, 2012, 43(6): 709-716.)
- [15] 衣晓, 张怀巍, 曹昕莹, 等. 基于区间灰数的分布式多目标航迹关联算法[J]. *航空学报*, 2013, 34(2): 352-360.
(Yi X, Zhang H W, Cai X Y, et al. A track association algorithm for distributed multi-target system based on gray interval Numbers[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(2): 352-360.)
- [16] Liu S, Yang Y, Cao Y, et al. A summary on the research of GRA models[J]. *Grey Systems: Theory and Application*, 2013, 3(1): 7-15.
- [17] Yin M S. Fifteen years of grey system theory research: A historical review and bibliometric analysis[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(7): 2767-2775.
- [18] 刘思峰, 党耀国, 方志耕, 等. 灰色系统理论及其应用[M]. 第五版. 北京: 科学出版社, 2012: 23-40.
(Liu S F, Dang Y G, Fang Z G, et al. *Grey system theory and application*[M]. 5th ed. Beijing: Science press, 2012: 23-40.)
- [19] Benitez R, Paredes R, Lodewijks G, et al. Damp trend Grey Model forecasting method for airline industry[J]. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(12): 4915-4921.
- [20] Xie N M, Liu S F, Yang Y J, et al. On novel grey forecasting model based on non-homogeneous index sequence[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(7): 5059-5068.
- [21] 李希灿. 灰色系统 GM(1,1) 模型适用范围拓广[J]. *系统工程理论与实践*, 1999, 19(1): 98-102.
(Li X C. Widening of suitable limits of grey system GM(1,1) model [J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 1999, 19(1): 98-102.)
- [22] 赵胜川, 何南. 弹性系数法在公路诱增交通量预测中应用[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2011, 11(3): 1-7.
(Zhao S C, He N. Elasticity-based model applies in the forecasting of highway induced traffic[J]. *J of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2011, 11(3): 1-7.)

(责任编辑: 滕 蓉)