

doi:10.19920/j.cnki.jmsc.2024.10.005

基于幂指数的智能缓冲算子及其应用研究^①

曾波¹, 尹凤凤^{1,3}, 余乐安^{2*}, 刘思峰³, Jianzhou Wang⁴, 白云¹

(1. 重庆工商大学管理科学与工程学院, 重庆 400067; 2. 四川大学商学院, 成都 610064;
3. 南京航空航天大学经济与管理学院, 南京 211106; 4. 澳门科技大学系统工程研究所,
中国澳门 999078)

摘要: 缓冲算子为解决系统冲击扰动预测陷阱问题提供了一种重要手段. 当前缓冲算子存在公式种类繁杂、强弱算子不兼容、缓冲强度难以“低粒度”控制等缺陷. 为此, 文章首先对各类缓冲算子结构进行综合分析, 然后结合“新信息优先”原理并引入幂指数构造了一种新结构智能缓冲算子, 最后推导并证明了幂指数极性与缓冲算子类型的关系, 研究了幂指数大小对缓冲强度的影响, 结果表明新算子能实现强弱缓冲算子的完全兼容及缓冲强度的自由调节. 文章通过对多种典型序列缓冲特征的数据分析, 验证了新算子的智能性与缓冲结果的合理性, 较好解决了系统冲击扰动预测陷阱问题. 本研究对发展和丰富缓冲算子理论具有重要意义.

关键词: 智能缓冲算子; 幂指数; 缓冲类型; 缓冲强度; 系统预测陷阱

中图分类号: N945.24 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2024)10-0068-20

0 引言

当系统受到外界干扰时, 系统行为数据已不能客观反映系统未来发展趋势. 此时即使系统模型具有很高的模拟精度, 其预测结果也可能与实际情况大相径庭, 此即所谓“预测陷阱”问题^[1,2]. 产生预测陷阱问题的症结并不在于模型性能本身是否优劣, 而在于系统受到冲击扰动影响而导致建模数据不能客观反映系统未来变化规律. 比如, 重庆直辖后 GDP 高速增长, 其 2010 年 GDP 增速更是高达 17.1%. 假如以重庆直辖后高增速的 GDP 为原始数据去建模并预测重庆 2050 年 GDP, 其结果显然严重偏高并与实际情况存在巨大偏差. 这是因为重庆 GDP 的高增速是建立在低基数及若干政策红利基础之上, 随着重庆 GDP 的快速增加及政策红利边际效应的递减, 其未来

GDP 很难维持直辖之初的高速发展态势. 因此, 用高增速模型去预测和描述增速减缓后的重庆 GDP 未来趋势, 必然导致预测结果与实际情况相去甚远. 准确预测是科学决策的前提和基础^[3-5]. 预测陷阱问题的产生, 严重影响了决策方案的合理性与有效性. 我国页岩气产量预测就曾遭遇“预测陷阱”. 我国页岩气开发起步晚但发展迅速, 页岩气产量从 2012 年 0.25 亿 m³ 增加至 2014 年的 13 亿 m³, 年均增速高达 2550%. 据此, 国家能源局预测 2020 年我国页岩气产量 600 亿 m³ ~ 1 000 亿 m³. 然而, 2020 年我国页岩气实际产量仅 200.4 亿 m³^[6], 预测结果远高于实际产量. 为此, 我国十三五期间不得不大量进口天然气以确保其供需平衡^[7]. 类似地, 美国对世界大豆产量的宏观预测也曾遭遇过严重的预测陷阱问题, 并对美国农业及世界大豆价格带来重要影响.

① 收稿日期: 2022-10-09; 修订日期: 2024-06-06.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72071023; 72271036); 国家自然科学基金资助重点项目(72331007); 重庆市教委资助科学技术研究重大项目(KJZD-M202300801); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2023NSCQ-MSX0365; CSTB2023NSCQ-MSX0380); 重庆市研究生导师团队资助建设项目(yds223006).

通讯作者: 余乐安(1976—), 男, 湖南常德人, 博士, 教授, 博士生导师. Email: yulean@amss.ac.cn

由于预测模型良好的拟合性能,导致预测陷阱问题存在较大隐蔽性. 实际上模型模拟精度好并不能确保其预测性能优. 因为建模原始数据只能反映系统阶段性的历史状态,这个状态与系统未来的发展趋势可能存在偏差. 长期以来,人们一般通过对模型的定量预测结果进行修正来解决预测陷阱问题. 例如,李新豫等人通过模型正演识别储层特征等技术手段有效解决了川中地区须二段气藏富集区地震预测中存在的预测陷阱问题^[8]. 但此方法专业性强、操作难度较大、推广价值小. 为解决预测陷阱问题,刘思峰教授提出了缓冲算子技术,这本质上是一种从 n 维空间 R_n^+ 到 n 维空间 R_n^+ 一一映射的数据变换方法^[9],主要目的是弱化冲击扰动对系统行为数据的影响,以还原系统真实变化规律. 按照缓冲类型,缓冲算子分为强化缓冲算子和弱化缓冲算子. 前者用于强化原始序列变化趋势,后者则恰好相反. 缓冲算子的提出和发展主要经历了三个阶段.

第一阶段是缓冲算子的提出. 缓冲算子概念的提出及缓冲算子公理体系的构建,明确了缓冲算子的形式、作用及构造规则,为缓冲算子的发展和规模化应用奠定了基础. 刘思峰教授为解决冲击扰动系统预测陷阱问题,1997 年首次提出缓冲算子及其公理体系,研究了缓冲算子基本形式和性质^[10],在此基础上构造了若干适用于不同数据类型的强化及弱化缓冲算子^[11]. 王正新等认为缓冲算子对序列数据特征的改造应以不破坏其单调性为前提,据此提出了缓冲算子之单调性不变公理,对缓冲算子公理体系进行完善^[12]. 第二阶段是缓冲算子的适应性拓展. 研究人员从不同角度、方法和实际问题出发,构造了大量新型实用缓冲算子^[13-17],研究了如何控制缓冲算子的作用强度^[18-22]. 如基于新信息优先的强/弱化缓冲算子^[23-27]、多变量弱化缓冲算子^[28]、正实数阶弱化缓冲算子^[29]、分数阶强/弱化缓冲算子^[30-33]、幂平均弱化缓冲算子^[34,35]、调和变权强/弱化缓冲算子^[36]、平滑变权缓冲算子^[37]、全信息变权缓冲算子^[38-40]、季节性全信息变权缓冲算子^[41]等. 第三阶段是缓冲算子的整合与统一. 自缓冲算子概念被提出之后,数以十计甚至百计的缓冲算子被大量构造和应用. 这虽然丰富了缓冲算子表现形式,但同时也造成了缓冲算子的低水平重复与互

不兼容. 为此,魏勇教授对强化和弱化缓冲算子的兼容性与泛化能力进行了深入研究,提出了含幂指数的新型缓冲算子,揭示了缓冲算子之间的内在联系及强化缓冲算子与弱化缓冲算子的对应关系,实现了强化及弱化缓冲算子在形式上的统一^[42]. 王正新^[43]对全信息变权缓冲算子进行拓展研究,构造了含权重 λ 及幂指数 γ 的全信息变权缓冲算子,该算子通过 λ 调节缓冲强度,通过 γ 来控制算子的缓冲类型,通过调整参数 λ 及 γ 的大小能实现对不同序列精准缓冲,较好解决冲击扰动系统在建模预测过程中出现的定量预测结果与定性分析结论相悖的问题^[44],对丰富缓冲算子方法体系具有积极意义.

综上,缓冲算子作为一种解决系统冲击扰动预测陷阱问题的重要方法,目前已得到大规模应用,并在该过程中产生了大量新型缓冲算子. 然而,传统缓冲算子难以实现强化与弱化缓冲功能的集成与统一,且其缓冲强度无法低粒度调节,而高阶缓冲算子计算量又太大. 全信息变权缓冲算子同时包括可变参数 λ 和 γ ,这一方面增加了缓冲算子的复杂性与使用简便性,而更重要的是参数 λ 和 γ 的大小都能影响算子对序列的缓冲强度,因此参数 λ 和 γ 存在功能重叠或功能定义不清晰的问题;另外,由于权重因子 λ 以指数形式参与整个缓冲过程,这直接导致缓冲结果对 λ 大小极其敏感. 因此,全信息缓冲算子不便于被大规模推广与使用. 为此,本文在对各类缓冲算子结构进行深入分析基础上,构造了一个仅含一个可变参数的新型智能缓冲算子,其具有如下特点.

1) 新型智能缓冲算子(IBO)通过幂指数 γ 的极性(正、负、零)来控制缓冲算子类型(强化、弱化、恒等). 具体地,当 $\gamma > 0$ 时, IBO 为强化缓冲算子;当 $\gamma < 0$ 时, IBO 为弱化缓冲算子;当 $\gamma = 0$ 时, IBO 为恒等算子,即 IBO 对序列不做任何变换.

2) 新型智能缓冲算子(IBO)通过幂指数 $|\gamma|$ 大小来控制缓冲算子对序列的缓冲强度. 具体地,无论序列 X 为何种类型(增长、衰减、振荡), $|\gamma|$ 越大, IBO 对序列 X 的缓冲强度就越大;反之, $|\gamma|$ 越小,则 IBO 对序列 X 的缓冲强度就越小.

3) 新型智能缓冲算子(IBO) 计算过程中, 新信息权重大于老信息, 表明其遵守“新信息优先”原理; IBO 作用前后, 不改变原始序列的数据类型(增长、衰减、振荡) 及序列中数据的相对大小关系, 表明其遵守“单调性不变”公理.

本研究提出的智能缓冲算子, 在理论上具有原创性, 在方法上具有先进性, 在应用上具有简便性. 上述特性对基于数据驱动的时间序列预测模型, 具有重要应用价值. 全文主要研究内容及其逻辑结构如图1所示.

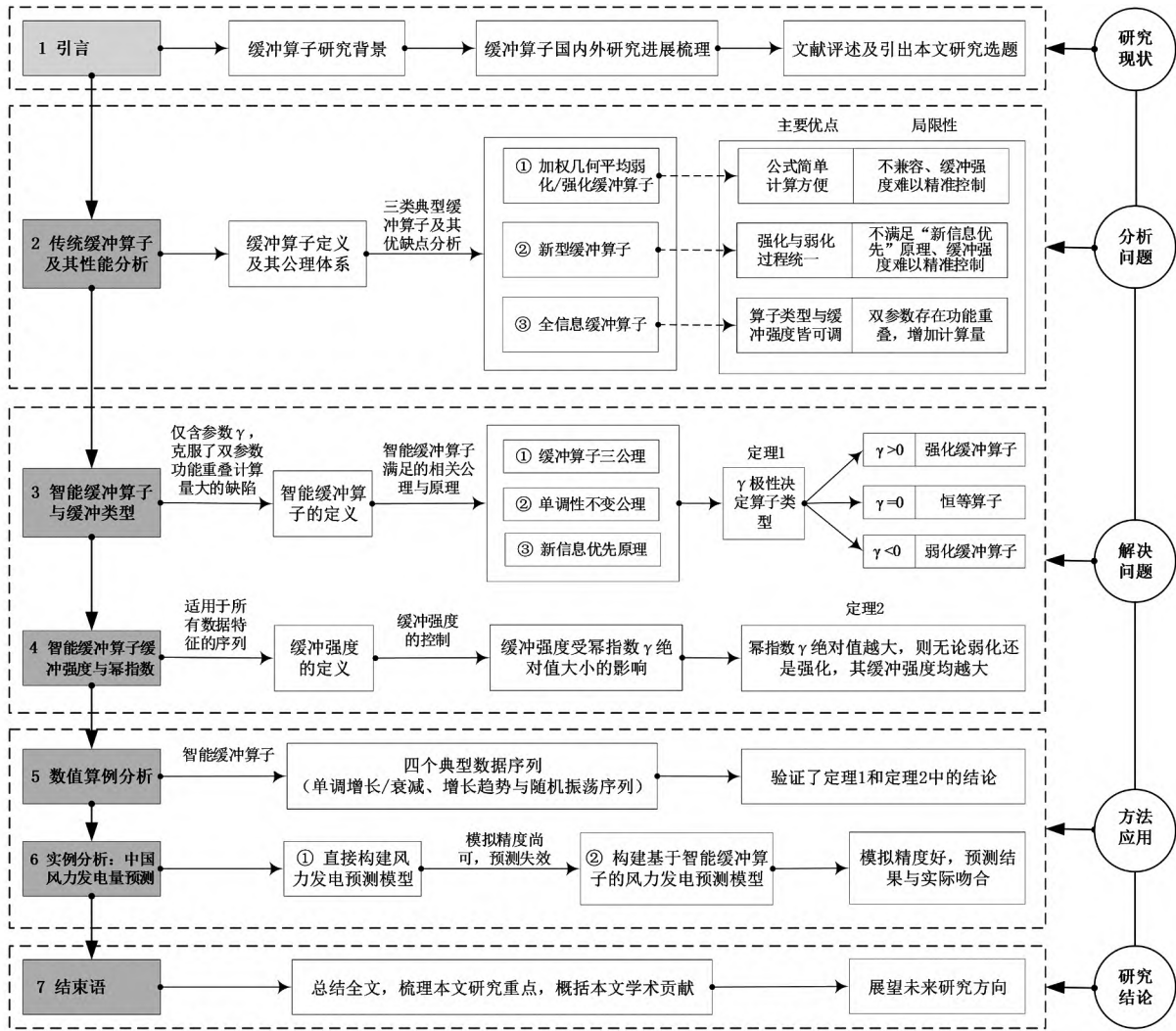


图1 文章研究内容及其逻辑结构

Fig. 1 The research content of the paper and its logical structure

1 传统缓冲算子及其性能分析

灰色缓冲算子实际上是一种将系统未来发展状态的定性分析结果作用于建模原始序列并改变其趋势特征的一种数学变换方法, 是连接和沟通系统定性分析结论与建模原始序列量化修正结果的桥梁. 通过缓冲算子强化或弱化原始序列发展趋势, 以客观反映系统未来演变规律, 从而避免

建模时完全依赖原始数据的不足. 本小节首先介绍缓冲算子的相关概念, 然后对当前主流缓冲算子结构及其特性进行分析.

定义 1^[1] 设原始数据序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, $k, k' \in \{2, 3, \dots, n\}$,

1) 当 $x(k) - x(k - 1) > 0$ 时, 称 X 为单调增长序列;

2) 当 $x(k) - x(k - 1) < 0$ 时, 称 X 为单调衰减序列;

3) 当 $x(k) - x(k-1) < 0, x(k') - x(k'-1) > 0$ 时, 称 X 为随机振荡序列. 设

$$M = \max\{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}, m = \min\{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}.$$

则称 $A = M - m$ 为序列 X 的振幅.

传统文献中通常仅对随机振荡序列定义振幅. 实际上单调增长序列或单调衰减序列亦可理解为两类特殊的振荡序列, 故本文也一并对其振幅概念进行统一定义.

定义 2^[1] 设 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 为数据序列, D 为作用于 X 的算子, X 经 D 作用所得序列记为 $XD = (x(1)d, x(2)d, \dots, x(n)d)$, 则称 D 为序列算子, XD 为一阶算子作用序列.

所谓算子, 实际上就是一种数学计算方法或数据变换规则, 通常用符号 D 表示. 基于某算子 D 对序列 X 中的每个数据进行计算, 并将计算结果组成一条等长的新序列 XD , 该过程称为 XD 的

“生成”. XD 表示算子 D 作用于序列 X ($X \leftarrow D$), 而非 $X \cdot D$.

定义 3^[1] 定义 2 中, 若序列算子 D 满足缓冲算子三公理^[10], 则称 D 为缓冲算子.

定义 4^[1] 设 X 为数据序列, D 为作用于 X 的缓冲算子, 当 X 分别为单调增长序列、单调衰减序列或随机振荡序列时,

1) 若缓冲序列 XD 比原始序列 X 的增长速度 (或衰减速度) 减缓或振幅减小, 则称算子 D 为弱化缓冲算子;

2) 若缓冲序列 XD 比原始序列 X 的增长速度 (或衰减速度) 加快或振幅增大, 则称算子 D 为强化缓冲算子.

自 1997 年刘思峰教授提出缓冲算子理论以来, 研究人员从实际问题出发, 构造了大量缓冲算子. 本小节对国内外相关文献进行梳理, 选择在结构上具有代表性的强化/弱化缓冲算子进行分析, 如表 1 所示.

表 1 几类具有代表性强化/弱化缓冲算子及其基本形式

Table 1 Several types of representative strengthening/weakening buffer operators and their basic forms

缓冲算子名称	基本形式	参考文献
加权几何平均强化缓冲算子	$x(k)d = (x(k))^2 / \left[\prod_{i=k}^n x(i)^{\omega_i} \right]^{1/\sum_{i=k}^n \omega_i}$	[11]
加权几何平均弱化缓冲算子	$x(k)d = \left[\prod_{i=k}^n x(i)^{\omega_i} \right]^{1/\sum_{i=k}^n \omega_i}$	[11]
新型缓冲算子	$x(k)d = x(k) \left[\frac{x(k) / \frac{1}{n} \sum_{i=k}^n \omega_i x(i)}{\sum_{i=k}^n \omega_i} \right]^\gamma$	[42]
全信息缓冲算子	$x(k)d = x(k) \left[\frac{(1 - \lambda^{n-k+1})x(k)}{(1 - \lambda) \sum_{i=0}^{n-k} \lambda^i x(n-i)} \right]^\gamma$	[43]

文献[11]提出的加权几何平均强化/弱化缓冲算子, 其作为经典强/弱化缓冲算子的代表, 具有公式简单计算方便等优点. 其最大缺陷是强化\弱化缓冲算子计算公式完全独立互不兼容, 且当一阶缓冲强度不够时需要序列进行二阶或高阶缓冲处理, 计算过程复杂且缓冲强度难以精确控制. 另外, 序列中数据元素权重的确定具有较强主观性.

文献[42]中提出的新型缓冲算子, 通过幂指数 γ 来实现对算子缓冲类型的控制, 解决了强化及弱化缓冲算子的统一性问题, 具有较大创新性. 不足之处是该算子不满足“新信息优先”原理^[45], 其缓冲强度需要对序列进行二阶或高阶缓冲

处理, 难以实现精确控制, 计算过程复杂, 在小数据背景下元素权重的确定具有较大主观性和随意性.

文献[43]提出的全信息缓冲算子是对文献[38]的重大改进. 该算子满足“新信息优先”原理, 其通过幂指数 γ 来实现对算子缓冲类型的控制, 通过权重因子 λ 来调节算子的缓冲强度. 但是该算子存在以下问题: 1) 参数 λ 以指数形式参与整个缓冲过程, 这直接导致缓冲结果对 λ 大小极其敏感; 2) 尽管引入 λ 的目的是调节缓冲算子对原始序列的缓冲强度, 但幂指数 γ 的大小也对算子的缓冲强度带来较大影响, 因此参数 λ 和 γ 存在功能重叠或功能定义不清晰的问题.

综上,本研究为解决当前缓冲算子结构兼容性差及参数设计不合理等缺陷,通过对现有各类缓冲算子结构与性能进行深入分析,构造了基于幂指数的新型智能缓冲算子.

2 智能缓冲算子与缓冲类型

本小节构造了一个仅含一个可变参数的新

$$\begin{aligned}
 x(k)d &= x(k) \left\{ \frac{\left[\frac{1}{n-k+1} + \frac{1}{n-k+2} + \dots + \frac{1}{2(n-k)+1} \right] x(k)}{\frac{1}{n-k+1}x(n) + \frac{1}{n-k+2}x(n-1) + \dots + \frac{1}{2(n-k)+1}x(k)} \right\}^\gamma \\
 &= x(k) \left[\frac{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(k)}{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-k+1)} \right]^\gamma; k = 1, 2, \dots, n \tag{1}
 \end{aligned}$$

则称 D 为基于幂指数的智能缓冲算子 (IBO, Intelligent buffer operator), 称 XD 为 X 的基于幂指数的智能缓冲序列.

基于幂指数的智能缓冲算子严格满足缓冲算子三公理^[10]和“新信息优先”原理^[45].

1) $k = n \Rightarrow x(n)d = x(n)$, 表明原始数据序列最后一个元素 $x(n)$ 不受算子 D 的影响, 算子作用前后其始终保持不变 (缓冲算子之不动点公理);

2) $x(k)d$ 的大小受 $x(k), x(k+1), \dots, x(n)$ 的影响, 表明序列 X 中的元素是计算 $x(k)d$ 的基础和依据 (缓冲算子之信息依据公理);

3) 式(1)中 k 取值范围是 $1 \sim n$ 之间的整数, 说明新序列 XD 中的每个元素均通过式(1)计算得到 (缓冲算子之解析表达公理);

4) 智能缓冲算子通过数据 $x(k), x(k+1), \dots, x(n)$ 来实现对 $x(k)$ 的缓冲, 并得新数据 $x(k)d$. 根据式(1)可以看出, $x(n)$ 的权重系数 $\frac{1}{n-k+1}$ 最大, 而 $x(k)$ 的权重系数 $\frac{1}{2(n-k)+1}$ 最小. 这说明数据越新, 其在计算 $x(k)d$ 过程中的作用就越大 (“新信息优先”原理).

下面对定义 5 中幂指数 γ 与缓冲算子类型 (强化、弱化、恒等) 间的关系进行讨论.

定理 1 智能缓冲算子如定义 5 所述, 则当 X 是单调增长序列、单调衰减序列或随机振荡序列时,

1) 若 $\gamma > 0$, 则 IBO 为强化缓冲算子;

型智能缓冲算子. 该算子严格满足缓冲算子三公理和“新信息优先”原理, 弥补了当前缓冲算子参数功能重叠的缺陷, 实现了仅通过幂指数 γ 的极性 (正、负、零) 即可控制缓冲算子类型 (强化、弱化、恒等) 的目标. 该新型智能缓冲算子的定义如下.

定义 5 设原始序列 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$, 令 $XD = (x(1)d, x(2)d, \dots, x(n)d)$, 其中

2) 若 $\gamma < 0$, 则 IBO 为弱化缓冲算子;

3) 若 $\gamma = 0$, 则 IBO 为恒等算子, 即 $X = XD$.

证明 1) 当 $\gamma > 0$ 时, 对序列 X 分三种情况进行证明 IBO 为强化缓冲算子.

① 当 X 是单调增长序列时, 根据定义 5 可知,

$$x(k)d = x(k) \left[\frac{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(k)}{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-k+1)} \right]^\gamma$$

因 X 是单调增长序列, 故 $x(k) < x(k+1) < \dots < x(n)$, 则

$$0 < \frac{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(k)}{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-k+1)} < 1$$

因 $\gamma > 0$, 可推得

$$\begin{aligned}
 x(k)d &= x(k) \left[\frac{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(k)}{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-k+1)} \right]^\gamma \\
 &< x(k)
 \end{aligned}$$

因此, 当 $\gamma > 0$ 时, $x(k)d < x(k)$. 即 IBO 使得 $x(k)d$ 变小, 而 $x(n)d$ 不变, 可知缓冲新序列 XD 的增速变大 (相对于原始序列 X 的增速而言), 故此时 IBO 为强化缓冲算子.

② 当 X 是单调衰减序列时, 此时 IBO 为强化缓冲算子, 证明思路同①.

③ 当 X 是随机振荡序列时, 令

$$x(p) = \max \{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$$

$$x(q) = \min \{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$$

则 X 的振幅 $A = x(p) - x(q)$;根据定义 5 可计算

$$XD = (x(1)d, x(2)d, \dots, x(n)d) , \text{令}$$

$$x(j)d = \max \{x(k)d \mid k = 1, 2, \dots, n\}$$

$$x(l)d = \min \{x(k)d \mid k = 1, 2, \dots, n\}$$

则 XD 的振幅 $A^* = x(j)d - x(l)d$;根据定义 5 可知,

$$x(j)d = x(j) \left[\frac{\sum_{m=n-j+1}^{2(n-j)+1} \frac{1}{m} x(j)}{\sum_{m=n-j+1}^{2(n-j)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-j+1)} \right]^\gamma$$

式中,满足 $x(j)d$ 为序列 XD 最大值的条件是 $x(j) = x(p)$,即原始序列 X 和新序列 XD 取得最大值为同一点(j 和 p 重合). 因为 $x(p)$ 是序列 X 的最大值,故

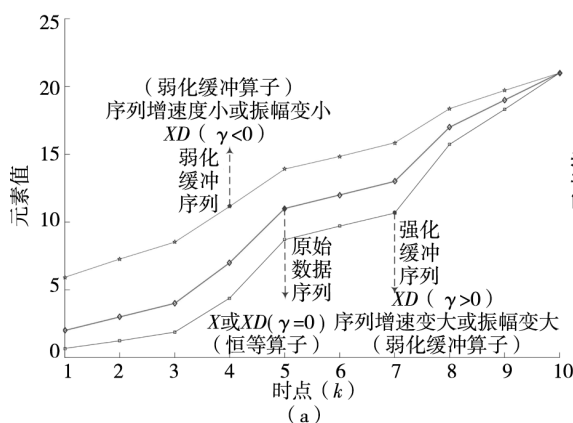
$$\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-p+1)} > 1$$

可推导得

$$x(j)d = x(p) \left[\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-p+1)} \right]^\gamma \geq x(p)$$

类似地,可推导得

$$x(l)d = x(q) \left[\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-q+1)} \right]^\gamma$$



$$\leq x(q)$$

显然

$$A^* = x(j)d - x(l)d$$

$$= x(p)d - x(q)d > x(p) - x(q) = A$$

即当 $\gamma > 0$ 时,可知缓冲新序列 XD 的振幅变大,故此时 IBO 为强化缓冲算子.

2) 当 $\gamma < 0$ 时,对序列 X 分三种情况进行证明 IBO 为弱化缓冲算子. 证明思路同(a).

3) 当 $\gamma = 0$ 时, IBO 为恒等算子,对原始数据序列不做任何处理,恒成立. 证毕.

从证明过程可知,若 $x(p)$ 是原始数据序列 X 的最大值,则 $x(p)d$ 亦为其缓冲新序列 XD 的最大值. 进一步推导可发现,当 $\gamma > 0$ 时 IBO 不会改变原始序列 X 中各个数据的相对大小关系,而只是改变原始序列 X 增长趋势的陡峭程度或振幅大小. 该结论表明,当 $\gamma > 0$ 时 IBO 除满足缓冲算子三公理之外,还满足“单调性不变公理”^[12].

另外,当前各类缓冲算子均对随机振荡序列的强化或弱化影响进行了研究,其证明过程均认为 $x(p) = \max \{x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n\} \Rightarrow x(p)d = \max \{x(k)d \mid k = 1, 2, \dots, n\}$,这值得商榷. 因为 $x(p)$ 是原始序列 X 的最大值,并不能严格推导出其缓冲序列 XD 也在 p 点取得最大值. 因此,对缓冲序列 XD 的极值点应重新计算,而非默认序列 X 及 XD 均在 p 点最大.

智能缓冲算子对序列 X 的缓冲效果如图 2 所示.

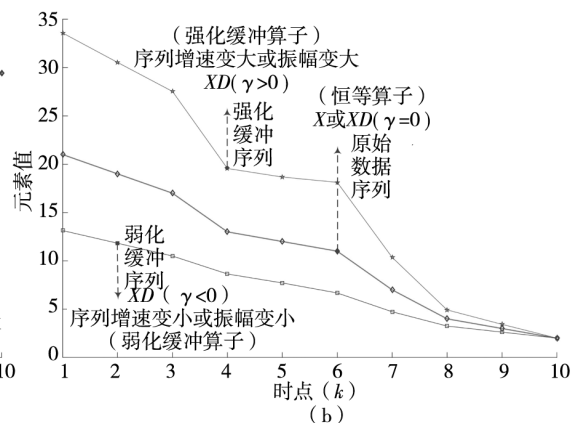


图 2 IBO 对单增序列及衰减序列的缓冲效果

Fig. 2 The buffering effect of IBO on monotonically growing sequences and attenuation sequences

图 2(A) 是智能缓冲算子对单调增长序列的缓冲处理效果. 当幂指数 $\gamma > 0$ 时,缓冲新序列

XD 增速变大或振幅变大,此算子为强化缓冲算子;反之,当幂指数 $\gamma < 0$ 时,缓冲新序列 XD 增速

变小或振幅变小,此算子为弱化缓冲算子.

图 2(B)是智能缓冲算子对单调衰减序列的缓冲处理效果.当幂指数 $\gamma > 0$ 时,缓冲新序列 XD 增速变大或振幅变大,此算子为强化缓冲算子;反之,当幂指数 $\gamma < 0$ 时,缓冲新序列 XD 增速变小或振幅变小,此算子为弱化缓冲算子.

由图 2 可知,当幂指数 $\gamma = 0$ 时,智能缓冲算子无论对单调增长序列或是单调衰减序列均不做任何处理,即 $X = XD$.

根据定理 1 可知,IBO 的智能性体现在无论 X 是单调增长序列、单调衰减序列或是随机振荡序列,式(1)既可作为强化缓冲算子也可作为弱化缓冲算子.缓冲算子的类型(强化或弱化)由幂指数 γ 的极性(正、负)来决定,而缓冲算子的作用强度则由 γ 的大小决定.下面通过定理来研究缓冲算子作用强度与幂指数 γ 之间的关系.

3 智能缓冲算子缓冲强度与幂指数

缓冲算子用来调节数据序列变化趋势(增

速、减速、振荡)的强弱,而缓冲强度则是一种用来对缓冲算子的缓冲程度进行量化的数学指标.传统缓冲算子可能需对原始数据序列进行多次缓冲处理以实现合理调节其序列变化趋势之目的,相应的缓冲算子称为一阶缓冲算子,二阶缓冲算子, ..., 高阶缓冲算子.对原始序列多次缓冲处理存在两个缺陷,一是缓冲强度无法低粒度调节,可能遇到一阶缓冲算子作用强度不够而二阶缓冲算子作用强度又太大的问题,二是重复的缓冲过程增大了计算工作量并将占用更大的计算机内存空间.

智能缓冲算子的缓冲强度可通过幂指数 $\gamma(\gamma \in \mathbb{R})$ 进行“无级变速”.IBO 对原始数据序列的缓冲处理一次完成,故不存在多次重复缓冲处理过程.下面分析幂指数 γ 的大小与 IBO 缓冲强度之间的变化关系.

定义 6 设原始数据序列 X 及其 IBO 缓冲序列 XD 分别为 $X = (x(1), x(2), \dots, x(n))$ 及 $XD = (x(1)d, x(2)d, \dots, x(n)d)$, A 及 A^* 分别为序列 X 及 XD 的振幅,则称

$$\vartheta = \frac{|(\max_k x(k)d - \min_k x(k)d) - (\max_k x(k) - \min_k x(k))|}{\max_k x(k) - \min_k x(k)} = \frac{|A^* - A|}{A} \tag{2}$$

为 IBO 对序列 X 的缓冲强度.

式(2)中定义的缓冲强度,主要通过计算序列缓冲前后振幅的变化大小来进行测度.显然,缓冲序列振幅 A^* 变化越大,表明序列受到缓冲算子的作用强度就越大, ϑ 就越大;反之 J 越小.传统缓冲强度通过计算缓冲序列数据的平均变化率来测度,不仅计算量大且对随机振荡序列受到的缓冲强度难以有效计算.

定理 2 智能缓冲算子如定义 5 所述,原始数据序列 X 基于 IBO 幂指数 γ_1 和 γ_2 的缓冲序列分别记为 XD_1 及 XD_2 ,其缓冲强度分别记为 ϑ_1 及 ϑ_2 ,则当 $|\gamma_1| \geq |\gamma_2|$ 且 $\gamma_1 \cdot \gamma_2 > 0$ 时, $\vartheta_1 > \vartheta_2$.

证明 分三种情况对定理 2 进行证明.

1) 当 X 为单调增长序列时,

设序列 X 和序列 XD 的振幅分别为 A_1 和 A_1^* ,因 X 为单调增长序列,故根据定义 1 可知,

$$A_1^* = x(n)d - x(1)d = x(n) - x(1) \left[\frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n-m)} \right]^{\gamma_1}$$

根据定义 6 可知,

$$\vartheta_1 = \frac{|A_1^* - A_1|}{A_1} = \frac{x(1)}{x(n) - x(1)} \left| 1 - \left[\frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n-m)} \right]^{\gamma_1} \right|$$

类似地,

$$\vartheta_2 = \frac{x(1)}{x(n) - x(1)} \left| 1 - \left[\frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n - m)} \right]^{\gamma_2} \right| \quad 0 < \frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n - m)} < 1$$

由于 X 为单调增长序列, 故

$$\frac{x(1)}{x(n) - x(1)} > 0,$$

因为 $|\gamma_1| \geq |\gamma_2|$ 且 $\gamma_1 \cdot \gamma_2 > 0$, 下面分两种情况进行讨论

① 当 $\gamma_1 > \gamma_2 > 0$ 时, 根据幂函数的性质得,

$$0 < \left[\frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n - m)} \right]^{\gamma_1} < \left[\frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n - m)} \right]^{\gamma_2} < 1$$

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{x(1)}{x(n) - x(1)} \left\{ \left[\frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n - m)} \right]^{\gamma_2} - \left[\frac{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(1)}{\sum_{m=n}^{2n-1} \frac{1}{m} x(2n - m)} \right]^{\gamma_1} \right\} > 0$$

故当 $\gamma_1 > \gamma_2 > 0$ 时,

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 > 0 \Rightarrow \vartheta_1 > \vartheta_2$$

② 当 $\gamma_1 < \gamma_2 < 0$ 时, 证明思路同上.

2) 当 X 为单调衰减序列时, 证明思路同 1).

3) 当 X 为随机振荡序列时, 令

$$x(p) = \max \{ x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n \};$$

$$x(q) = \min \{ x(k) \mid k = 1, 2, \dots, n \}$$

设序列 X 和序列 XD 的振幅分别为 A_3 和

A_3^* , 因 X 为随机振荡序列, 故根据定义 1 可知,

$$\vartheta_1 = \frac{|A_3^* - A_3|}{A_3}$$

$$= \frac{1}{x(p) - x(q)} \left| x(p) \left[\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n - m - p + 1)} \right]^{\gamma_1} - x(q) \left[\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n - m - q + 1)} \right]^{\gamma_1} \right|$$

类似地,

$$\vartheta_2 = \frac{|A_3^* - A_3|}{A_3}$$

$$= \frac{1}{x(p) - x(q)} \left| x(p) \left[\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n - m - p + 1)} \right]^{\gamma_2} - x(q) \left[\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n - m - q + 1)} \right]^{\gamma_2} \right|$$

由于 $x(p)$ 和 $x(q)$ 分别代表序列最大值和最小值, 故

$$\frac{1}{x(p) - x(q)} > 0,$$

$$A_3^* = x(p)d - x(q)d$$

$$= x(p) \left[\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n - m - p + 1)} \right]^{\gamma_1} -$$

$$x(q) \left[\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n - m - q + 1)} \right]^{\gamma_1}$$

根据定义 6 可知,

$$\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n - m - p + 1)} > 1,$$

$$0 < \frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-q+1)} < 1$$

因为 $|\gamma_1| \geq |\gamma_2|$ 且 $\gamma_1 \cdot \gamma_2 > 0$, 下面分两种情况进行讨论

①当 $\gamma_1 > \gamma_2 > 0$ 时, 由幂函数性质可得,

$$\left[\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-p+1)} \right]^{\gamma_1} >$$

$$\left[\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-p+1)} \right]^{\gamma_2} > 1,$$

$$0 < \left[\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-q+1)} \right]^{\gamma_1} <$$

$$\left[\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-q+1)} \right]^{\gamma_2} < 1$$

则

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{1}{x(p) - x(q)} \left\{ x(p) \left[\left(\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-p+1)} \right)^{\gamma_1} - \left(\frac{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(p)}{\sum_{m=n-p+1}^{2(n-p)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-p+1)} \right)^{\gamma_2} \right] - x(q) \left[\left(\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-q+1)} \right)^{\gamma_1} - \left(\frac{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(q)}{\sum_{m=n-q+1}^{2(n-q)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-q+1)} \right)^{\gamma_2} \right] \right\} > 0$$

故当 $\gamma_1 > \gamma_2 > 0$ 时,

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 > 0 \Rightarrow \vartheta_1 > \vartheta_2$$

②当 $\gamma_1 < \gamma_2 < 0$ 时, 证明思路同上.

证明完毕. 定理2表明, 无论 X 为何种类型数据序列(增长、衰减、振荡), 也不管 IBO 是弱化缓冲算子 ($\gamma < 0$) 还是强化缓冲算子 ($\gamma > 0$), 均可得出幂指数绝对值 $|\gamma|$ 越大, 则缓冲强度 ϑ 越大的结论. 因此, 可通过 $|\gamma|$ 大小来实现对 IBO 缓冲强度的精准控制.

理论上幂指数 γ 可在全体实数域范围内取任何值, 但实际应用中 γ 值不能太大或太小. 比如单调增长序列, 当 IBO 是弱化缓冲算子时, 若 γ 太小 (即 $|\gamma|$ 太大) 将导致 $x(1)d > x(n)$, 从而破坏了原始序列的单调增长特征; 类似地, 对单调衰减序列, 当 IBO 是强化缓冲算子时, 若 γ 太大将导致 $x(1)d < x(n)$, 则原始序列的单调衰减特征就遭到了破坏. 因此, 幂指数 γ 的最大或最小值应以不改变原始数据序列的数据特征为基本前提.

幂指数 γ 是智能缓冲算子中的一个重要参数, 通常可通过如下步骤确定其具体取值. 第一,

根据原始数据序列 X 的实际情况, 判断应对其进行弱化缓冲处理还是强化缓冲处理, 据此确定幂指数 γ 的正负; 第二, 分析系统当前状态及未来可能趋势, 确定原始数据序列 X 缓冲强度的取值范围; 第三, 对缓冲序列 XD 进行建模, 并结合系统发展趋势对建模结果合理性进行分析, 据此对幂指数 γ 的大小进行修正和优化.

另外, 幂指数 γ 的大小也可通过智能优化算法来确定, 通过设置模型预测精度最小为目标函数来反推缓冲序列 XD , 据此确定幂指数 γ 的大小. 需要特别指出, 缓冲算子的作用并不是为了提高模型模拟精度, 而是还原原始序列的“本来面目”, 所计算得到的缓冲序列是否合理需要通过模型的预测精度 (而非模拟精度) 来进行检验.

4 数值算例分析

智能缓冲算子兼具强化缓冲和弱化缓冲的双重功能, 同时通过调节幂指数大小可实现对序列缓冲强度的精准控制. 本小节通过四个典型数据序列来对定理1和定理2中的结论进行验证, 并

进一步对缓冲数据进行分析.

设单调增长序列 X_1 、单调衰减序列 X_2 、增长趋势序列(伴随局部振荡) X_3 及随机振荡序列 X_4 , 分别如下所示,

$$X_1 = (x_1(1), x_1(2), \dots, x_1(10)) \\ = (2, 3, 4, 7, 11, 12, 13, 17, 19, 21)$$

$$X_2 = (x_2(1), x_2(2), \dots, x_2(10)) \\ = (21, 19, 17, 13, 12, 11, 7, 4, 3, 2)$$

$$X_3 = (x_3(1), x_3(2), \dots, x_3(10)) \\ = (2, 3, 4, 7, 12, 11, 13, 19, 17, 21)$$

$$X_4 = (x_4(1), x_4(2), \dots, x_4(10)) \\ = (17, 11, 4, 2, 19, 13, 12, 7, 3, 21)$$

当幂指数 $\gamma = \{-1, -0.8, -0.6, -0.4, -0.2, 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0\}$ 时, 根据定义 5 分别计算序列 X_1 、 X_2 、 X_3 及 X_4 的 IBO 缓冲序列 X_1D 、 X_2D 、 X_3D 及 X_4D .

首先, 根据定义 5 编制了实现 IBO 计算的

MATLAB 程序; 然后, 将序列 X_1 、 X_2 、 X_3 及 X_4 中的数据分别输入 MATLAB 程序并运行; 第三, 将运行 MATLAB 后的计算结果分别输入表 2 ~ 表 5; 最后, 为更直观对比各类 IBO 的缓冲序列数据, 本小节编制了能同时绘制多条折线的 MATLAB 程序, 以同步快速绘制各缓冲序列数据的散点折线对比图.

表 2 ~ 表 5 中, 各序列对应的散点折线图, 如图 3 ~ 图 5 所示. 图 4 中, X_4 的智能缓冲序列散点折线图难以清晰描述智能弱化缓冲序列和强化缓冲序列间的对比关系, 现对其进行分解并得图 5, 如下所示.

为了直观清晰地描述 IBO 幂指数 γ 与缓冲强度 ϑ 之间的变化关系, 根据表 2 ~ 表 5 中的数据, 分别以幂指数 γ 与缓冲强度 ϑ 为横轴和纵轴, 绘制缓冲序列 $X_1D \sim X_4D$ 的 $\gamma - \vartheta$ 关系图, 如图 6 和图 7 所示.

表 2 单调增长序列 X_1 的智能缓冲序列 X_1D

Table 2 Intelligent buffer sequence X_1D of monotonically growing sequence X_1

幂指数 γ	缓冲序列 X_1D	缓冲强度 ϑ
$\gamma = -1.0$	12.214, 13.114, 14.104, 15.216, 16.270, 17.104, 18.091, 19.340, 20.200, 21.000	$\vartheta = 0.537$
$\gamma = -0.8$	8.505, 9.763, 10.962, 13.028, 15.045, 15.934, 16.934, 18.848, 19.954, 21.000	$\vartheta = 0.342$
$\gamma = -0.6$	5.923, 7.269, 8.520, 11.154, 13.912, 14.843, 15.851, 18.368, 19.711, 21.000	$\vartheta = 0.206$
$\gamma = -0.4$	4.124, 5.412, 6.622, 9.550, 12.865, 13.828, 14.837, 17.900, 19.471, 21.000	$\vartheta = 0.112$
$\gamma = -0.2$	2.872, 4.029, 5.147, 8.176, 11.896, 12.880, 13.888, 17.444, 19.234, 21.000	$\vartheta = 0.046$
$\gamma = 0.0$	2.000, 3.000, 4.000, 7.000, 11.000, 12.000, 13.000, 17.000, 19.000, 21.000	$\vartheta = 0.000$
$\gamma = 0.2$	1.393, 2.234, 3.109, 5.993, 10.172, 11.179, 12.169, 16.567, 18.769, 21.000	$\vartheta = 0.032$
$\gamma = 0.4$	0.970, 1.663, 2.416, 5.131, 9.406, 10.414, 11.390, 16.145, 18.540, 21.000	$\vartheta = 0.054$
$\gamma = 0.6$	0.675, 1.238, 1.878, 4.393, 8.697, 9.701, 10.662, 15.734, 18.314, 21.000	$\vartheta = 0.070$
$\gamma = 0.8$	0.470, 0.922, 1.460, 3.761, 8.043, 9.037, 9.980, 15.333, 18.092, 21.000	$\vartheta = 0.081$
$\gamma = 1.0$	0.327, 0.686, 1.134, 3.22, 7.437, 8.419, 9.342, 14.943, 17.871, 21.000	$\vartheta = 0.088$

表 3 单调衰减序列 X_2 的智能缓冲序列 X_2D

Table 3 Intelligent buffer sequence X_2D of monotone attenuated sequence X_2

幂指数 γ	缓冲序列 X_2D	缓冲强度 ϑ
$\gamma = -1.0$	9.605, 8.618, 7.612, 6.581, 5.744, 4.786, 3.643, 2.83, 2.4, 2	$\vartheta = 0.600$
$\gamma = -0.8$	11.231, 10.094, 8.939, 7.541, 6.656, 5.653, 4.151, 3.033, 2.51, 2	$\vartheta = 0.514$
$\gamma = -0.6$	13.133, 11.823, 10.497, 8.641, 7.712, 6.676, 4.73, 3.25, 2.624, 2	$\vartheta = 0.414$
$\gamma = -0.4$	15.358, 13.849, 12.327, 9.901, 8.937, 7.885, 5.39, 3.483, 2.744, 2	$\vartheta = 0.297$
$\gamma = -0.2$	17.959, 16.221, 14.476, 11.345, 10.356, 9.313, 6.143, 3.732, 2.869, 2	$\vartheta = 0.160$
$\gamma = 0.0$	21.000, 19.000, 17.000, 13.000, 12.000, 11.000, 7.000, 4.000, 3.000, 2.000	$\vartheta = 0.000$
$\gamma = 0.2$	24.557, 22.255, 19.964, 14.896, 13.905, 12.992, 7.977, 4.287, 3.137, 2	$\vartheta = 0.187$
$\gamma = 0.4$	28.715, 26.068, 23.444, 17.069, 16.113, 15.345, 9.09, 4.594, 3.28, 2	$\vartheta = 0.406$
$\gamma = 0.6$	33.579, 30.533, 27.531, 19.558, 18.671, 18.123, 10.359, 4.923, 3.43, 2	$\vartheta = 0.662$
$\gamma = 0.8$	39.265, 35.764, 32.331, 22.411, 21.635, 21.405, 11.804, 5.276, 3.586, 2	$\vartheta = 0.961$
$\gamma = 1.0$	45.915, 41.891, 37.968, 25.679, 25.07, 25.282, 13.452, 5.654, 3.75, 2	$\vartheta = 1.311$

表4 增长趋势序列(伴随局部振荡) X_3 的智能缓冲序列 X_3D

Table 4 Intelligent buffering sequence X_3D of growing trend sequence (with local oscillations) X_3

幂指数 γ	缓冲序列 X_3D	缓冲强度 ϑ
$\gamma = -1.0$	12.207, 13.106, 14.095, 15.206, 16.258, 16.955, 18.091, 19.340, 20.200, 21.000	$\vartheta = 0.537$
$\gamma = -0.8$	8.502, 9.759, 10.956, 13.021, 15.300, 15.550, 16.934, 18.848, 19.954, 21.000	$\vartheta = 0.342$
$\gamma = -0.6$	5.921, 7.267, 8.517, 11.149, 14.398, 14.261, 15.851, 18.368, 19.711, 21.000	$\vartheta = 0.206$
$\gamma = -0.4$	4.124, 5.411, 6.620, 9.547, 13.550, 13.078, 14.837, 17.900, 19.471, 21.000	$\vartheta = 0.112$
$\gamma = -0.2$	2.872, 4.029, 5.146, 8.175, 12.751, 11.994, 13.888, 17.444, 19.234, 21.000	$\vartheta = 0.046$
$\gamma = 0.0$	2.000, 3.000, 4.000, 7.000, 12.000, 11.000, 13.000, 17.000, 19.000, 21.000	$\vartheta = 0.000$
$\gamma = 0.2$	1.393, 2.234, 3.109, 5.994, 11.293, 10.088, 12.169, 16.567, 18.769, 21.000	$\vartheta = 0.032$
$\gamma = 0.4$	0.970, 1.663, 2.417, 5.133, 10.627, 9.252, 11.390, 16.145, 18.540, 21.000	$\vartheta = 0.054$
$\gamma = 0.6$	0.676, 1.239, 1.879, 4.395, 10.001, 8.485, 10.662, 15.734, 18.314, 21.000	$\vartheta = 0.070$
$\gamma = 0.8$	0.470, 0.922, 1.460, 3.763, 9.412, 7.781, 9.980, 15.333, 18.092, 21.000	$\vartheta = 0.081$
$\gamma = 1.0$	0.328, 0.687, 1.135, 3.222, 8.857, 7.136, 9.342, 14.943, 17.871, 21.000	$\vartheta = 0.088$

表5 随机振荡序列 X_4 的智能缓冲序列 X_4D

Table 5 Intelligent buffer sequence X_4D of random oscillation sequence X_4

幂指数 γ	缓冲序列 X_4D	缓冲强度 (ϑ)
$\gamma = -1.0$	11.047, 10.610, 10.620, 11.329, 12.442, 11.593, 11.495, 11.681, 13.800, 21.000	$\vartheta = 0.453$
$\gamma = -0.8$	12.042, 10.687, 8.736, 8.009, 13.541, 11.862, 11.595, 10.544, 10.170, 21.000	$\vartheta = 0.316$
$\gamma = -0.6$	13.126, 10.764, 7.186, 5.661, 14.738, 12.137, 11.695, 9.518, 7.495, 21.000	$\vartheta = 0.193$
$\gamma = -0.4$	14.308, 10.842, 5.911, 4.002, 16.040, 12.418, 11.796, 8.591, 5.524, 21.000	$\vartheta = 0.105$
$\gamma = -0.2$	15.596, 10.921, 4.863, 2.829, 17.457, 12.706, 11.897, 7.755, 4.071, 21.000	$\vartheta = 0.044$
$\gamma = 0.0$	17.000, 11.000, 4.000, 2.000, 19.000, 13.000, 12.000, 7.000, 3.000, 21.000	$\vartheta = 0.000$
$\gamma = 0.2$	18.530, 11.080, 3.290, 1.414, 20.679, 13.301, 12.104, 6.319, 2.211, 21.000	$\vartheta = 0.031$
$\gamma = 0.4$	20.199, 11.160, 2.707, 0.999, 22.506, 13.609, 12.208, 5.704, 1.629, 21.000	$\vartheta = 0.132$
$\gamma = 0.6$	22.017, 11.241, 2.226, 0.707, 24.495, 13.925, 12.313, 5.148, 1.201, 21.000	$\vartheta = 0.252$
$\gamma = 0.8$	23.999, 11.322, 1.831, 0.499, 26.659, 14.247, 12.420, 4.647, 0.885, 21.000	$\vartheta = 0.377$
$\gamma = 1.0$	26.160, 11.404, 1.507, 0.353, 29.014, 14.577, 12.527, 4.195, 0.652, 21.000	$\vartheta = 0.508$

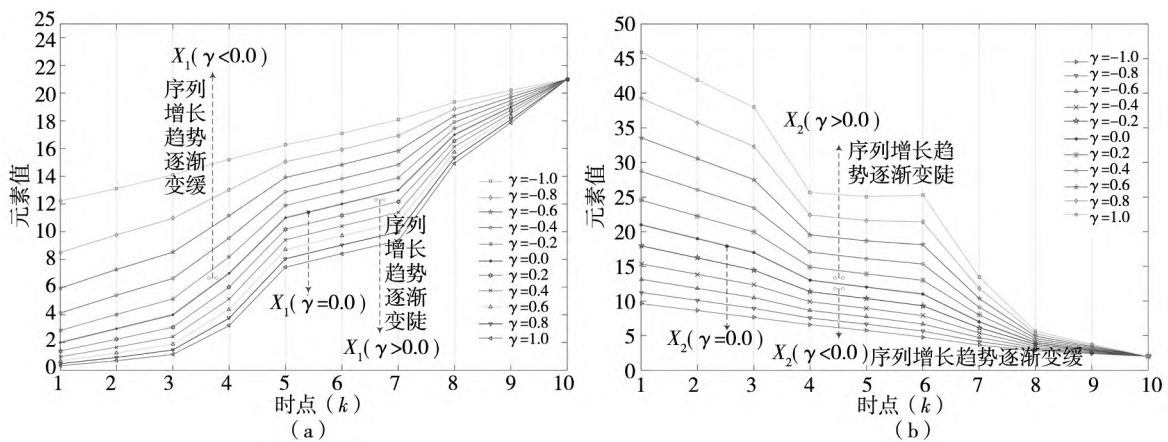


图3 序列 X_1 - X_2 的智能缓冲序列

Fig. 3 The intelligent buffering sequences of sequences X_1 - X_2

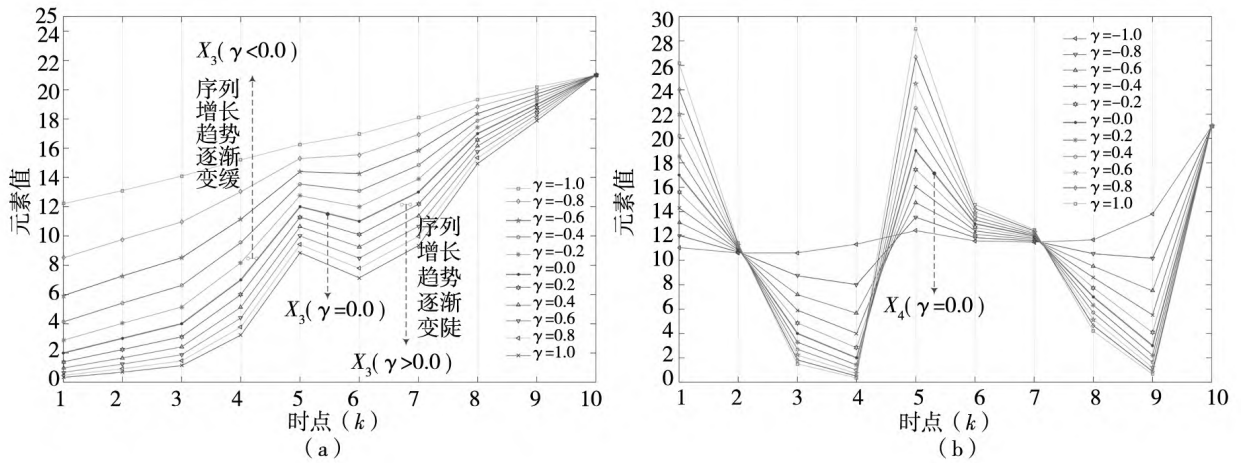


图 4 序列 X_3 - X_4 的智能缓冲序列

Fig. 4 The intelligent buffering sequences of sequences X_3 - X_4

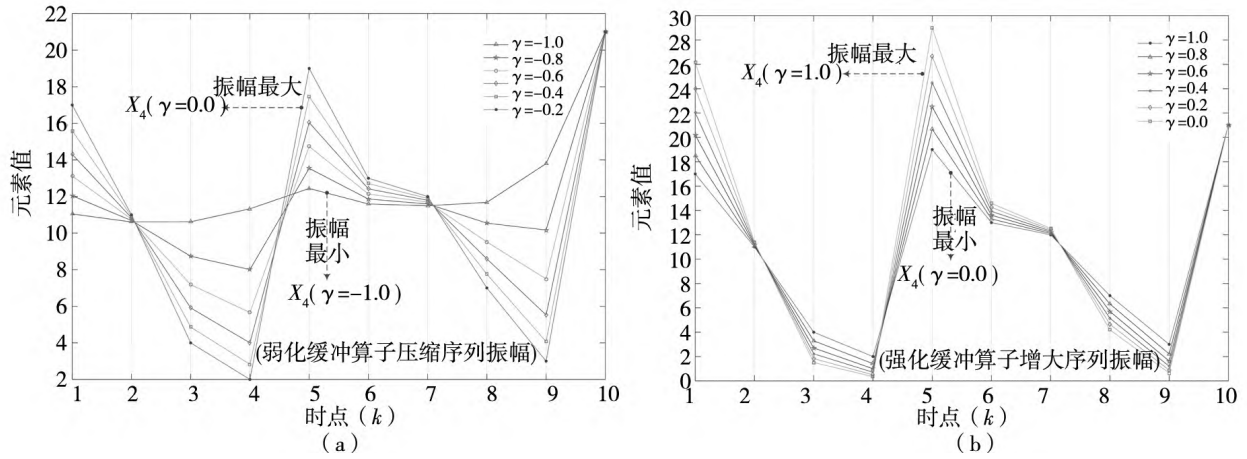


图 5 智能缓冲算子对随机振荡序列 X_4 振幅的压缩和放大效应

Fig. 5 The compression and amplification effects on the amplitude of random oscillatory sequence X_4 by IBO

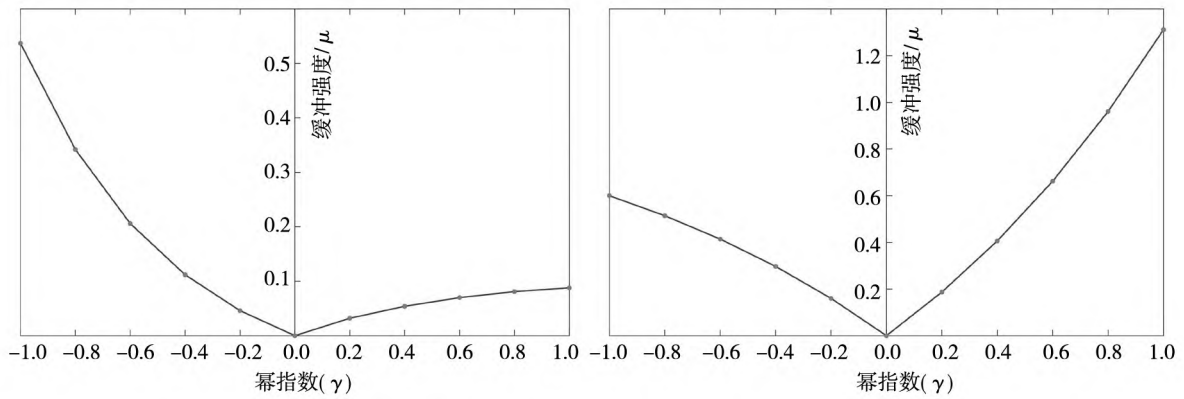


图 6 序列 X_1D - X_2D 的 γ - ϑ 关系

Fig. 6 The γ - ϑ relationship of sequences X_1D - X_2D

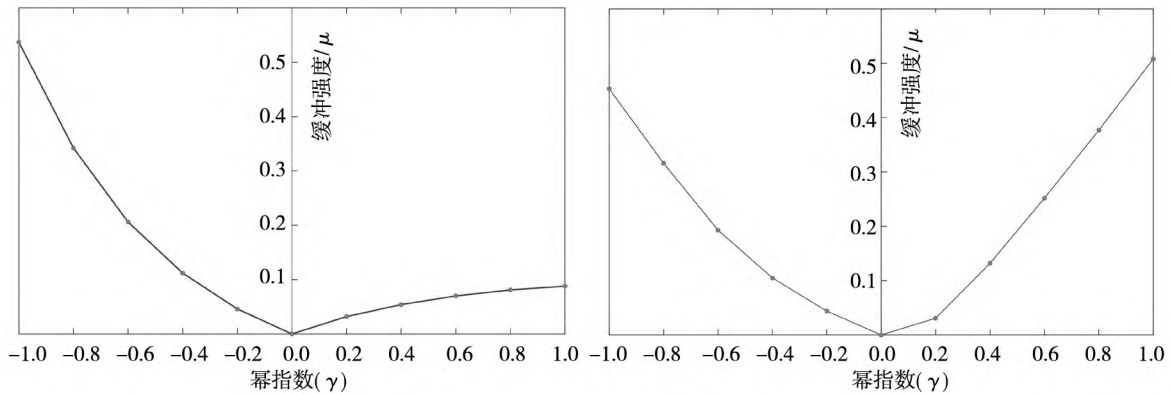


图7 序列 X_3D-X_4D 的 $\gamma-\theta$ 关系
 Fig. 7 The $\gamma-\theta$ relationship of sequences X_3D-X_4D

从图3~图7可知:1)无论原始数据序列为何种数据类型(增加、衰减、振荡),对同类缓冲算子而言,其幂指数绝对值越大对序列的缓冲强度就越大;2)对单调(或近似单调)增长序列,幂指数大小对弱化缓冲算子缓冲强度比强化缓冲算子缓冲强度更加敏感,故对单调(或近似单调)增长序列进行弱化缓冲处理的时候,幂指数不宜过大,反之不能取太小;3)对单调(或近似单调)衰减序列,幂指数大小对强化缓冲算子缓冲强度比弱化缓冲算子缓冲强度更加敏感,故对单调(或近似单调)衰减序列进行强化缓冲处理的时候,幂指数不宜过大,反之不能取太小;4)对随机振荡序列,幂指数与缓冲强度呈对称关系,表明在序列数据无明显变化趋势性特征时,幂指数对强化缓冲算子与弱化缓冲算子具有基本一致的敏感性,这符合随机振荡序列的数据特征。

5 实例分析:中国风力发电量预测

我国拥有1.8万km海岸线和众多内陆山系,可开发的近海和陆上风能资源总储量约10亿kW($10^8 \cdot kW$),风力资源十分丰富,这为我国开发和利用风力资源提供了重要基础.近十年来我国风电产业发展迅速,2020年风电装机容量已超过 $2.8 \times 10^8 \cdot kW$,居世界首位;发电量4664.7亿kW·h($10^8 \cdot kW \cdot h$),占全国总发电装机容量的12.79%.目前,风力发电已成为我国继煤电、水电后的第三大电源.因此,对我国未来风力发电量进行宏观预测,对合理布局我国电力生产结构具有重要价值,对保障我国电力供需平衡、促进我国经济可持续发展具有积极意义.我国2010年—2020年风力发电量如表6所示.

表6 我国2010年—2020年风力发电量($10^8 \cdot kW \cdot h$)

Table 6 Wind power generation in China from 2010 to 2020 (billion kilowatt hours)

年份	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
发电量	446.2	703.3	959.8	1412.0	1599.8	1857.7	2370.7	2972.3	3659.7	4060.3	4664.7

数据来源:国家统计局官网(<http://www.stats.gov.cn/tjsj/>)

根据表6,可知我国风力发电量逐年递增,数据序列呈现单调增长特征,但增速不同且样本量较小(仅11个数据).故本文选择适用于小数据建模的三参数白化型单变量灰色预测模型TWGM(1,1)来对我国风力发电量进行建模和预测.为了对模型性能进行综合评估,本研究将表6

中2010年—2018年的数据作为训练样本,用来建立TWGM(1,1)模型;将表6中剩余数据作为测试样本,用来检测TWGM(1,1)的预测性能.

根据表6数据及TWGM(1,1)建模过程,可估计^[46]模型参数 $\hat{p} = (a, b, c)^T$,

$$\hat{p} = (a, b, c)^T = (-0.19, 54.63, 533.12)^T$$

将其代入 TWGM(1,1) 模型时间响应函数, 可得我国风力发电量 TWGM(1,1) 模型,

$$\hat{x}^{(0)}(k) = (1 - e^a) \left[x^{(0)}(1) - \frac{b}{a} + \left(\frac{b}{a^2} - \frac{c}{a} \right) e^{-a(t-1)} + \frac{b}{a} \right] \quad (3)$$

当 $k = 2, 3, \dots, 9$ 时, 根据式(3)可计算我国风力发电量 2010 年—2018 年的模拟值及模拟误差, 当 $k = 10, 11$ 时, 可计算相应的预测值及预测误差, 结果如表 7 所示.

根据表 7 可知, TWGM(1,1) 的模拟平均误差 4.18%, 模型精度等级介于 I 级和 II 级之间, 表明

TWGM(1,1) 能较好模拟我国风力发电量的数据特征. 然而, TWGM(1,1) 的预测平均误差 11.93%, 其中最大预测相对误差 15.22%, 误差等级接近 IV 级, 模型近乎失效. 原始序列与模拟/预测序列的散点折线图, 如图 8 所示.

从表 7 及图 8 容易看出, TWGM(1,1) 的模拟性能好但预测精度不理想, 难以完成科学预测系统未来发展趋势与演变规律的目标. 造成模型失效的原因不在模型本身优劣, 而在于系统数据由于受到冲击扰动影响而“失真”. 为此, 本研究应用智能缓冲算子对原始序列进行处理, 以还原数据“本来面目”, 在此基础上构建新的 TWGM(1,1) 模型.

表 7 基于 TWGM(1,1) 模型我国风力发电量的模拟和预测值

Table 7 Simulation and prediction values of wind power generation in China based on the TWGM(1,1) model

项目名称	模拟区								项目名称	预测区	
年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	年份	2019	2020
序号 (k)	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5	k = 6	k = 7	k = 8	k = 9	序号 (k)	k = 10	k = 11
发电量 $X^{(0)}$	703.3	959.8	1 412.0	1 599.8	1 857.7	2 370.7	2 972.3	3 659.7	发电量 $X^{(0)}$	4 060.3	4 664.7
模拟值 $\hat{X}^{(0)}$	766.5	983.6	1 245.0	1 560.1	1 939.6	2 396.8	2 947.7	3 611.4	预测值 $\hat{X}^{(0)}$	4 411.1	5 374.5
相对误差 Δ_S	8.99%	2.48%	11.83%	2.48%	4.41%	1.10%	0.83%	1.32%	相对误差 Δ_F	8.64%	15.22%
平均误差 $\bar{\Delta}_S$	4.18%								平均误差 $\bar{\Delta}_F$	11.93%	

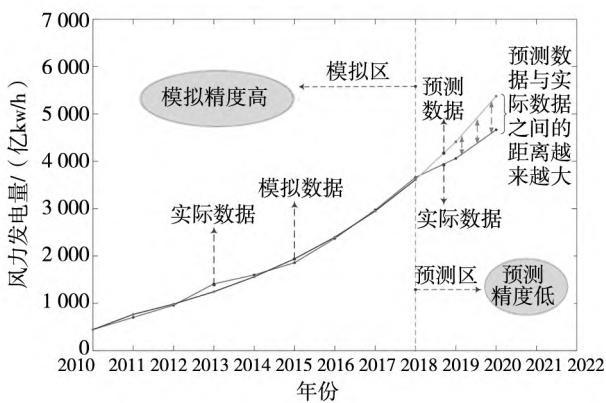


图 8 我国风力发电量模拟/预测数据与实际数据

Fig. 8 The simulation/prediction data and actual data of wind power generation in China

我国风电产业的快速发展是国家政策大力扶持的结果. 2009 年以前, 由于风电设备昂贵, 风电企业还本付息、设备折旧费用过高, 风电总体成本远高于火电, 导致风电投资收益差, 风电产业发展缓慢. 为此, 国家发改委发布了《关于完善风力发电上网电价政策的通知》, 从电价保证、风电全额收购、风电设备制造业发展所带来的成本降低等

多方面的政策支持, 促进了我国风电产业迅速发展. 2018 年, 国家能源局积极推进风电平价上网和竞争方式确定上网电价, 风电产业也在成熟过程中由政府扶持转向市场化竞争. 伴随国家风电产业相关利好政策的逐步取消, 风电产业增速明显变缓.

可见, 由于我国 2010 年—2018 年风电产业受到国家若干扶持政策的影响, 使得我国风力发电规模增长较快; 而 2019 年—2020 年由于国家风电产业利好政策逐步取消使得风力发电增速明显放缓. 显然, 用 2010 年—2018 年的数据去预测 2019 年—2020 年的未来, 由于两段序列数据背景不同且数据特征差异较大, 导致预测效果不理想. 因此, 在构建预测模型之前需先对 2010 年—2018 年的序列数据做预处理, 以剔除系统受到的国家政策扶持等非常态化因素的影响, 从而还原系统本来面目. 本研究所提出的智能缓冲算子为解决系统受到冲击扰动问题提供了一种良好的解决方案. 本小节以预测误差最小为目标函数, 以智能缓冲算子及 TWGM(1,1) 模型时间响应函数为约束条件, 对幂指数 γ 进行寻优.

$$\begin{aligned}
\min_{\gamma^*} \bar{\Delta}_F &= \frac{1}{2} \sum_{k=10}^{11} \frac{1}{x^{(0)}(k)} |\hat{x}^{(0)}(k)d - x^{(0)}(k)| \\
\text{s. t.} & \\
\left\{ \begin{aligned}
&\gamma < 0 \\
&x(k)d = x(k) \left[\frac{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(k)}{\sum_{m=n-k+1}^{2(n-k)+1} \frac{1}{m} x(2n-m-k+1)} \right]^\gamma \\
&\alpha = (1 - e^a) \left[x^{(0)}(1)d - \frac{b}{a} + \frac{b}{a^2} - \frac{c}{a} \right] \\
&\hat{x}^{(0)}(k)d = \alpha e^{-a(k-1)} + \frac{b}{a}
\end{aligned} \right. \quad (4)
\end{aligned}$$

利用智能寻优算法可得最优幂指数 $\gamma^* = -0.6124$. 根据定义 5 及式 (1), 此时智能缓冲新序列 $XD = (1\ 112.9, 1\ 389.5, 1\ 639.8, 1\ 992.9, 2\ 179.2, 2\ 417.9, 2\ 800.1, 3\ 218.5, 3\ 659.7)$, 构建序列 XD 的 TWGM(1,1) 模型, 其参数 $\hat{p} = (a, b, c)^T = (-0.1135, 44.9428, 1\ 153.9085)^T$, 将参数代入式 (3), 当 $k = 1, 2, \dots, 11$ 时可计算模拟及预测相关数据, 如表 8 所示. 根据表 8, 可绘制缓冲序列与模拟/预测序列的散点折线图, 如图 9 所示.

表 8 基于 TWGM(1,1) 模型的缓冲序列 XD 的模拟和预测数据

Table 8 Simulation and prediction data of buffer sequence XD based on the TWGM(1,1) model

项目名称	模拟区								项目名称	预测区	
年份	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	年份	2019	2020
序号 (k)	$k = 2$	$k = 3$	$k = 4$	$k = 5$	$k = 6$	$k = 7$	$k = 8$	$k = 9$	序号 (k)	$k = 10$	$k = 11$
发电量 $X^{(0)}D$	1 389.5	1 639.8	1 992.9	2 179.2	2 417.9	2 800.1	3 218.5	3 659.7	发电量 $X^{(0)}$	4 060.3	4 664.7
模拟值 $\hat{X}^{(0)}D$	1 426.6	1 645.6	1 890.9	2 165.7	2 473.5	2 818.3	3 204.6	3 637.2	预测值 $\hat{X}^{(0)}$	4 121.8	4 664.7
相对误差 Δ_{SD}	2.67%	0.35%	5.12%	0.62%	2.30%	0.65%	0.43%	0.62%	相对误差 Δ_F	1.52%	0.00%
平均误差 $\bar{\Delta}_{SD}$	1.60%								平均误差 $\bar{\Delta}_F$	0.76%	

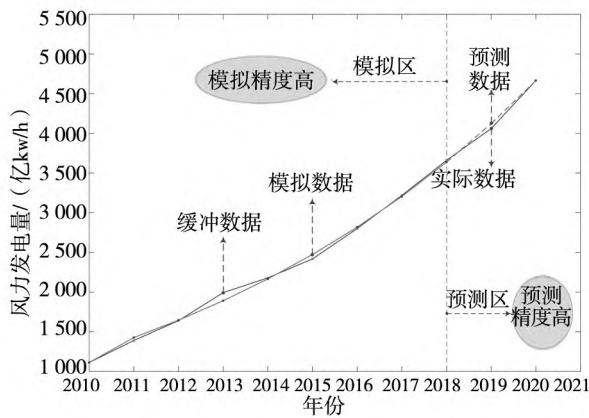


图 9 缓冲数据与模拟/预测数据

Fig. 9 The buffered data and simulation/prediction data

从表 8 和图 9 可以发现, 基于智能缓冲算子的 TWGM(1,1) 模型 (式 4) 预测误差仅为 0.76%, 而直接基于原始序列的 TWGM(1,1) 模型 (式 3) 的预测误差高达 11.93%. 这表明, 通过

本研究提出的智能缓冲算子对原始数据序列进行预处理, 可较好解决系统冲击扰动预测陷阱问题, 能有效改善模型的预测性能.

为进一步检验基于本研究提出的新型智能缓冲算子对系统冲击的抗干扰能力, 选择加权几何平均缓冲算子和全信息缓冲算子分别对原始数据序列进行缓冲处理, 采用相同的方式建立 TWGM(1,1) 模型, 计算其模拟和预测误差, 结果如表 9 所示. 根据表 9 绘制各缓冲序列与模拟/预测序列的散点折线图, 如图 10 所示.

从表 9 和图 10 可以发现, 基于加权几何平均缓冲算子和全信息缓冲算子所构建的 TWGM(1,1) 模型, 其预测误差分别为 1.77% 和 11.93%, 远高于本文所提出的智能缓冲算子所构建的 TWGM(1,1) 模型 (预测误差仅为 0.76%), 较好验证了该算子的有效性与实用性.

表 9 基于两种缓冲算子的 TWGM(1,1) 模型的模拟和预测数据

Table 9 Simulation and prediction data of the TWGM (1,1) model based on two buffer operators

算子类型	年份	模拟区								年份	预测区	
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018		2019	2020
加权几何 平均弱化 缓冲算子	(k)	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5	k = 6	k = 7	k = 8	k = 9	(k)	k = 10	k = 11
	$\bar{X}^{(0)}D$	2 164.0	2 321.5	2 347.6	2 571.4	2 742.3	3 253.7	3 306.9	3 659.7	$\bar{X}^{(0)}$	4 060.3	4 664.7
	$\hat{X}^{(0)}D$	2 136.5	2 269.6	2 424.5	2 604.7	2 814.3	3 058.3	3 342.1	3 672.3	$\hat{X}^{(0)}$	4 056.5	4 503.6
	Δ_{SD}	1.27%	2.24%	3.27%	1.29%	2.63%	6.01%	1.06%	0.34%	Δ_F	0.09%	3.45%
	$\bar{\Delta}_{SD}$	2.26%								$\bar{\Delta}_F$	1.77%	
全信息缓 冲算子	(k)	k = 2	k = 3	k = 4	k = 5	k = 6	k = 7	k = 8	k = 9	(k)	k = 10	k = 11
	$\bar{X}^{(0)}D$	703.3	959.8	1 412.0	1 599.8	1 857.7	2 370.7	2 972.3	3 659.7	$\bar{X}^{(0)}$	4 060.3	4 664.7
	$\hat{X}^{(0)}D$	766.5	983.6	1 245.0	1 560.1	1 939.6	2 396.8	2 947.7	3 611.4	$\hat{X}^{(0)}$	4 411.1	5 374.5
	Δ_{SD}	8.99%	2.48%	11.82%	2.48%	4.41%	1.10%	0.83%	1.32%	Δ_F	8.64%	15.22%
	$\bar{\Delta}_{SD}$	4.18%								$\bar{\Delta}_F$	11.93%	

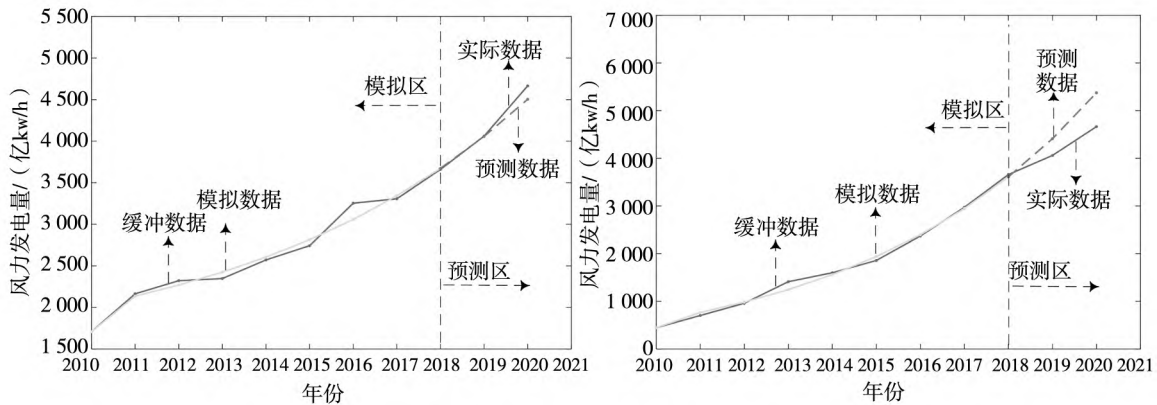


图 10 缓冲数据与模拟/预测数据

Fig. 10 The buffered data and simulation/prediction data

6 结束语

缓冲算子实际上是一种将系统未来发展趋势的定性分析结果作用到建模原始序列并对其进行数据变换的一种数据预处理方法,是连接和沟通关于系统未来发展的定性分析结论与系统历史数据的定量化修正之间的桥梁.通过缓冲算子强化或弱化原始序列的发展趋势,避免建模时完全依赖原始数据的不足,解决建模数据真实可靠且模型拟合性能优良情况下预测结果不理想这一“系统预测陷阱”问题.本研究的学术贡献概括为以下三个方面.

1) 所提出的智能缓冲算子实现了强化及弱化缓冲算子的完全兼容,解决了数以十计的强化及弱化缓冲算子计算公式的统一性问题.

2) 所提出的智能缓冲算子实现了对序列缓冲强度的精准控制,解决了传统一阶缓冲算子作用强度不够而二阶缓冲算子作用强度又太大的问

题,为冲击扰动不确定性系统的合理预测提供了理论与方法支撑.

3) 通过序列振幅对缓冲算子的缓冲强度进行了重新定义,解决了传统算子通过数据变化率来测度缓冲强度导致其计算过程过于复杂且适用性较差的问题.应用基于幂指数 γ 的新型智能缓冲算子对我国风力发电量进行宏观预测,使用粒子群算法对幂指数进行智能寻优,改善了预测结果科学性与合理性.

尽管缓冲算子的作用不是为了改善原始序列光滑性及提高模型模拟精度,但本研究提出的智能缓冲算子本质上改善了原始序列的光滑性 ($\gamma < 0$). 而序列光滑性的改善对提高模型建模性能具有积极意义.因此,如何继续完善智能缓冲算子相关内容,以及如何通过智能缓冲算子改变序列光滑性以构建高精度预测模型,是本团队下一步拟研究的主要内容.

参 考 文 献:

- [1] 刘思峰. 灰色系统理论及其应用(第九版)[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
Liu Sifeng. Grey System Theory and its Application (9th ed.)[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [2] 谢乃明. 灰色预测: 思想、方法与应用[J]. 南京航空航天大学学报(社会科学版), 2022, 24(4): 11–18.
Xie Naiming. Grey forecast: Mechanism, models and applications[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Social Sciences), 2022, 24(4): 11–18. (in Chinese)
- [3] 徐小峰, 余乐安, 林姿汝, 等. 基于特征融合的生鲜商品短期销量组合预测[J]. 管理科学学报, 2022, 25(12): 102–123.
Xu Xiaofeng, Yu Le'an, Lin Zirui, et al. Combination forecasting of short-term sales for fresh products based on feature fusion[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(12): 102–123. (in Chinese)
- [4] 张 科, 李心丹, 方 晓, 等. 股票网络论坛中的意见领袖: 慧眼识珠还是吸引眼球[J]. 管理科学学报, 2022, 25(9): 90–107.
Zhang Ke, Li Xindan, Fang Xiao, et al. Opinion leader at the online stock forum: Having the discerning eye or eye-catching[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(9): 90–107. (in Chinese)
- [5] 方匡南, 任 蕊, 朱建平, 等. 基于动态 SEIR 模型的传染性疾病预测和政策评估[J]. 管理科学学报, 2022, 25(10): 114–126.
Fang Kuangnan, Ren Rui, Zhu Jianping, et al. Prediction and policy assessment of infectious diseases transmission using dynamic SEIR model[J]. Journal of Management Sciences in China, 2022, 25(10): 114–126. (in Chinese)
- [6] 吴沅怡, 李 娟, 刘鸿渊, 等. 中国页岩气高效开发: 属性、理想类型与协同体系[J]. 资源开发与市场, 2022, 38(6): 657–663.
Wu Fengyi, Li Juan, Liu Hongyuan, et al. Efficient development of shale gas in China: Attributes, ideal types and collaborative systems[J]. Resource Development & Market, 2022, 38(6): 657–663. (in Chinese)
- [7] Liang T, Chai J, Zhang Y, et al. Refined analysis and prediction of natural gas consumption in China[J]. Journal of Management Science and Engineering, 2019, 4(2): 91–104.
- [8] 李新豫, 张 静, 包世海, 等. 川中地区须二段气藏地震预测陷阱分析及对策: 以龙女寺区块为例[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(1): 120–127.
Li Xinyu, Zhang Jing, Bao Shihai, et al. Analysis and countermeasures of seismic prediction traps for Xu-2 gas reservoir in central Sichuan Basin: A case study from Longnyusi block[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(1): 120–127. (in Chinese)
- [9] 党耀国, 王俊杰, 叶 璟. 灰色评价与预测建模技术研究[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
Dang Yaoguo, Wang Junjie, Ye Jing. Research on Grey Evaluation and Prediction Modelling Techniques[M]. Beijing: Science Press, 2022. (in Chinese)
- [10] Liu S, Yang Y, Forrest J. Grey Data Analysis: Methods, Models and Applications[M]. Singapore: Singapore, 2017.
- [11] 曾 波, 李树良, 孟 伟. 灰色预测理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
Zeng Bo, Li Shuliang, Meng Wei. Grey Prediction Theory and its Applications[M]. Beijing: Science Press, 2020. (in Chinese)
- [12] 王正新, 党耀国, 刘思峰. 变权缓冲算子及缓冲算子公理的补充[J]. 系统工程, 2009, 27(1): 113–117.
Wang Zhengxin, Dang Yaoguo, Liu Sifeng. Buffer operators with variable weights and the complement of axioms[J]. Systems Engineering, 2009, 27(1): 113–117. (in Chinese)
- [13] 江建明, 吴文泽, 张 涛. 一种新型对数弱化缓冲算子的构造及其应用[J]. 数学的实践与认识, 2020, 50(10): 56–63.
Jiang Jianming, Wu Wenze, Zhang Tao. Construction and application of a new logarithmic weakening buffer operators[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2020, 50(10): 56–63. (in Chinese)
- [14] Zeng B, Duan H, Bai Y, et al. Forecasting the output of shale gas in China using an unbiased grey model and weakening

- buffer operator[J]. *Energy*, 2018, 151: 238 – 249.
- [15] 王丽敏, 王庆丰, 刘晓慧. 中国“十四五”时期可再生能源发展预测分析[J]. *科技管理研究*, 2024, 44(5): 209 – 215.
- Wang Limin, Wang Qingfeng, Liu Xiaohui. Forecast of renewable energy development in China during the 14th Five-Year Plan period[J]. *Science and Technology Management Research*, 2024, 44(5): 209 – 215. (in Chinese)
- [16] 吴正朋, 刘思峰, 米传民, 等. 基于单调函数的若干实用强化缓冲算子的构造[J]. *系统工程*, 2009, 27(5): 124 – 126.
- Wu Zhengpeng, Liu Sifeng, Mi Chuanmin, et al. The construction of practical strengthening buffer operator based on the monotone function[J]. *Systems Engineering*, 2009, 27(5): 124 – 126. (in Chinese)
- [17] 刘解放, 刘思峰, 方志耕. 一类调节强度可变的弱化缓冲算子及其应用研究[J]. *中国管理科学*, 2016, 24(8): 172 – 176.
- Liu Jiefang, Liu Sifeng, Fang Zhigeng. A class of new weakening buffer operators whose adjustable intensity can be changed and their applications[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2016, 24(8): 172 – 176. (in Chinese)
- [18] 王德法, 刘镇瑜, 雒亿平, 等. 基于改进的变权缓冲灰色模型在沉降预测中的应用[J]. *科学技术与工程*, 2023, 23(13): 5677 – 5684.
- Wang Defa, Liu Zhenyu, Luo Yiping, et al. Application of improved variable weight buffer grey model in settlement prediction[J]. *Science Technology and Engineering*, 2023, 23(13): 5677 – 5684. (in Chinese)
- [19] Wang Y, Zhang Y, Nie R, et al. A novel fractional grey forecasting model with variable weighted buffer operator and its application in forecasting China's crude oil consumption[J]. *Petroleum*, 2022, 8(2): 139 – 157.
- [20] Li C, Yang Y, Liu S. A new method to mitigate data fluctuations for time series prediction[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2019, 65: 390 – 407.
- [21] 徐 宁, 秦邱皓, 王天宇, 等. 基于自适应调节的灰色滚动预测模型及对碳排放趋势预测[J]. *控制与决策*, 2023, 38(12): 3409 – 3417.
- Xu Ning, Qin Qiuhaohao, Wang Tianyu, et al. Grey rolling model based on self-adaptive adjustment and forecasting tendency of carbon emission[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(12): 3409 – 3417. (in Chinese)
- [22] Yan S, Su Q, Gong Z, et al. Online public opinion prediction based on rolling fractional grey model with new information priority[J]. *Information Fusion*, 2023, 91: 277 – 298.
- [23] 戴文战, 苏 永. 基于新信息优先的强化缓冲算子的构造及应用[J]. *自动化学报*, 2012, 38(8): 1329 – 1334.
- Dai Wenzhan, Su Yong. New strengthening buffer operators and their applications based on prior use of new information [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2012, 38(8): 1329 – 1334. (in Chinese)
- [24] 崔 杰, 党耀国. 基于一类新的强化缓冲算子的 GM(1,1) 预测精度研究[J]. *控制与决策*, 2009, 24(1): 44 – 48 + 54.
- Cui Jie, Dang Yaoguo. Research of precision of prediction of GM(1,1) based-on a kind of novel strengthening buffer operators[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(1): 44 – 48 + 54. (in Chinese).
- [25] 崔 杰, 党耀国, 刘思峰. 基于新弱化算子的 GM(1,1) 建模精度分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2009, 29(7): 132 – 138.
- Cui Jie, Dang Yaoguo, Liu Sifeng. Analysis on modeling accuracy of GM(1,1) based on new weakening operators[J]. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2009, 29(7): 132 – 138. (in Chinese)
- [26] Li Z, Hu X, Guo H, et al. A novel weighted average weakening buffer operator based fractional order accumulation seasonal grouping grey model for predicting the hydropower generation[J]. *Energy*, 2023, 277: 127568.
- [27] Zhou W, Ding B, Zhang Y, et al. The improved grey model by fusing exponential buffer operator and its application[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2017, 33(3): 1651 – 1663.
- [28] Wu L, Liu S, Yang Y. Multi-variable weakening buffer operator and its application[J]. *Information Sciences*, 2016, 339(C): 98 – 107.
- [29] Chen J, Wu Z. A positive real order weakening buffer operator and its applications in grey prediction model[J]. *Applied Soft Computing*, 2021, 99: 106922.

- [30] Wu L, Liu S, Yang Y. Using the fractional order method to generalize strengthening buffer operator and weakening buffer operator[J]. IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica, 2018, 5(6): 1074 – 1078.
- [31] Li C, Yang Y, Liu S. Comparative analysis of properties of weakening buffer operators in time series prediction models[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2019, 68: 257 – 285.
- [32] Chen Y, Zhang M, Lo K, et al. Forecasting the cumulative confirmed cases with the FGM and fractional-order buffer operator in different stages of COVID-19[J]. Journal of Mathematics, 2021, 2021: 6178629.
- [33] Gao X, Wu L. Using fractional order weakening buffer operator to forecast the main indices of online shopping in China [J]. Grey Systems: Theory and Application, 2019, 9(1): 128 – 140.
- [34] Tong M, Yan Z, Chao L. Research on a grey prediction model of population growth based on a logistic approach[J]. Discrete Dynamics in Nature and Society, 2020, 2020: 2416840.
- [35] Ma X, Wu W, Zhang Y. Improved GM(1,1) model based on Simpson formula and its applications[J]. Journal of Grey System, 2019, 31(4): 33 – 46.
- [36] 李雪梅, 党耀国, 王正新. 调和变权缓冲算子及其作用强度比较[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(11): 2486 – 2492.
Li Xuemei, Dang Yaoguo, Wang Zhengxin. Harmonic buffer operators with variable weights and effect strength comparison [J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2012, 32(11): 2486 – 2492. (in Chinese)
- [37] 徐 宁, 党耀国. 平滑变权缓冲算子构造及其性质[J]. 控制与决策, 2014, 29(7): 1262 – 1266.
Xu Ning, Dang Yaoguo. Construction of buffer operator with smooth variable weight and its property[J]. Control and Decision, 2014, 29(7): 1262 – 1266. (in Chinese)
- [38] 王正新. 全信息变权缓冲算子的构造及应用[J]. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(6): 1120 – 1128.
Wang Zhengxin. Construction and application of variable-weight buffer operators with perfect information[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2013, 47(6): 1120 – 1128. (in Chinese)
- [39] He L, Pei L, Yang Y. An optimised grey buffer operator for forecasting the production and sales of new energy vehicles in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 704: 135321.
- [40] Wang Z, He L, Zheng H. Forecasting the residential solar energy consumption of the United States[J]. Energy, 2019, 178: 610 – 623.
- [41] 何凌阳, 王正新. 季节性弱化缓冲算子的构造与应用[J]. 系统工程理论与实践, 2022, 42(1): 13 – 23.
He Lingyang, Wang Zhengxin. The construction and application of seasonal weakening buffer operator[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2022, 42(1): 13 – 23. (in Chinese)
- [42] 魏 勇, 孔新海. 几类强弱缓冲算子的构造方法及其内在联系[J]. 控制与决策, 2010, 25(2): 196 – 202.
Wei Yong, Kong Xinhai. Constructing methods of several kinds of strengthening and weakening buffer operators and their inner link[J]. Control and Decision, 2010, 25(2): 196 – 202. (in Chinese)
- [43] 王正新, 何凌阳. 全信息变权缓冲算子的拓展、优化及其应用[J]. 控制与决策, 2019, 34(10): 2213 – 2220.
Wang Zhengxin, He Lingyang. Extension, optimization and application of variable-weight buffer operators with perfect information[J]. Control and Decision, 2019, 34(10): 2213 – 2220. (in Chinese)
- [44] Ding S, Li R, Wu S. A novel composite forecasting framework by adaptive data preprocessing and optimized nonlinear grey Bernoulli model for new energy vehicles sales[J]. Communications in Nonlinear Science & Numerical Simulation, 2021, 99: 105847.
- [45] 吴利丰, 刘思峰, 姚立根. 缓冲算子是否新信息优先的判别方法[J]. 系统工程理论与实践, 2015, 35(4): 991 – 996.
Wu Lifeng, Liu Sifeng, Yao Ligen. Distinguishing method of buffer operators whether meet the principle of new information priority[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2015, 35(4): 991 – 996. (in Chinese)
- [46] 刘 莉, 郝显峰, 王玉东. 基于时变稳健加权最小二乘法的股市收益率预测[J]. 管理科学学报, 2024, 27(1): 141 – 158.
Liu Li, Hao Xianfeng, Wang Yudong. Forecasting stock returns: A time-varying robust weighted least squares approach [J]. Journal of Management Sciences in China, 2024, 27(1): 141 – 158. (in Chinese)

An intelligent buffer operator based on power exponent and its application

ZENG Bo¹, YIN Feng-feng^{1,3}, YU Le-an^{2*}, LIU Si-feng³, WANG Jian-zhou⁴, BAI Yun¹

1. School of Management Science and Engineering, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China;
2. Business School, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
3. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
4. Institute of Systems Engineering, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China

Abstract: Buffer operators are important means of addressing the prediction trap problems caused by impact disturbances in a system. The existing buffer operators have some defects, such as the wide variety of formulas, the incompatibility between strengthening and weakening operators, and the difficulty in “low granularity” control of buffer intensity. To solve the problem, first the structures of various types of buffer operators are comprehensively analyzed, and a new intelligent buffer operator with a power exponent is constructed based on the principle of “new information priority”. Then, the relationship between the polarity of power exponent and the type of buffer operators is deduced and proven, and the effect of the power exponent on buffer intensity is studied. The results show that the new operator can realize the full compatibility between strengthening and weakening buffer operators, as well as allow for the free adjustment of buffer intensity. The intelligence of the new operator and the rationality of its buffering results are verified by analyzing the data from several typical sequences with buffering characteristics, and the prediction trap problems caused by impact disturbances in a system are addressed. The research is of great significance to the development and enrichment of buffer operator theory.

Key words: intelligent buffer operator; power exponent; buffer type; buffer intensity; system prediction trap