

УДК 621.926:34.16

Н.В. МОРКУН, канд техн. наук, доц.,
ГВУЗ «Криворожский национальный университет»

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДЕКОМПОЗИЦИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СТРУКТУР С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ НА ОСНОВЕ ИЕРАРХИЧЕСКОГО МЕТОДА ГЛАВНЫХ КОМПОНЕНТ I-NPСА

Изложены основные принципы формирования пространственно-временной модели нелинейных динамических объектов обогащительного производства на основе структуры с распределёнными параметрами.

Ключевые слова: моделирование, нелинейные динамические объекты, распределённые параметры, модель Гаммерштейна, декомпозиция.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Повышение качества моделирования и идентификации нелинейных динамических объектов обогащительного производства, представленных структурами с распределёнными параметрами, имеет определяющее значение для формирования эффективного автоматизированного управления технологическим процессом

Анализ исследований и публикаций. Структуры с распределёнными параметрами успешно используются для моделирования ODE процессов [1-4]. Часто применяется подход, основанный на представлении нелинейных объектов управления в виде модели Гаммерштейна [2]. В работе [3] предложено использовать модель DPS для линейной системы с распределёнными параметрами.

Для традиционной модели Гаммерштейна используются различные методы анализа. Например, известен алгоритм, основанный на оценке наименьших квадратов и сингулярном разложении (LSE-SVD), предложенный для систем Гаммерштейна-Винера [4]. Алгоритм основан на использовании базисных функций для представления линейной и нелинейной частей. При известных условиях этот алгоритм позволяет получить достаточно высокое качество моделирования. Однако, при наличии немоделируемой динамики он работает неудовлетворительно.

Цель исследований. Целью выполненной работы является решение задачи повышения качества математического описания нелинейных динамических объектов обогащительного производства на основе пространственно-временной декомпозиции модели Гаммерштейна с распределёнными параметрами.

Изложение материала и результаты. В работе [5] предложена компактная теория процессов обогащения полезных ископаемых, основанная на понятиях о фракционном составе минерального сырья и сепарационных характеристиках обогащительных аппаратов. Для количественной оценки минеральных продуктов вводятся понятия распределения минеральных частиц $\gamma(\xi)$ и полезных компонентов $\beta(\xi)$ по фракциям с различными физическими свойствами ξ , а для количественной оценки аппаратов и схем - сепарационные характеристики $\varepsilon(\xi)$, оценивающие извлечение ε узких минеральных фракций в продукты.

Для моделирования процесса формирования фракционных характеристик, например, распределения полезного компонента по фракциям крупности измельчённой руды, технологическими агрегатами обогащительного производства будем использовать структуру Гаммерштейна с распределёнными параметрами.

Структура распределённой системы Гаммерштейна показана на рис. 1. Система состоит из статического нелинейного элемента $N(\cdot): R^m \rightarrow R^m$, соединённого с распределённой линейной структурой с передаточной функцией $G(x, q)(1 \times m)$ [4]

$$y(x, t) = G(x, q)v(t), \quad (1)$$

где t - переменная времени; x - пространственная переменная, определенная на области Ω ; q - оператор сдвига.

Зависимость входа - выхода этой системы определяется выражением

$$y(x, t) = G(x, q)N(u(t)), \quad (2)$$

где $u(t) \in R^m$ - временной вход; $y(x, t) \in R$ - пространственно-временной выход.

Предположим, что передаточная функция $G(x, q)$ представлена посредством бесконечного число ортогональных пространственных базисных функций $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{\infty}$

$$G(x, q) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) G_i(q), \quad (3)$$

где $G_i(q) (1 \times m)$ - передаточная функция традиционной системы Гаммерштейна.

Тогда реальная распределённая система Гаммерштейна может быть получена на основе традиционной посредством пространственно-временной декомпозиции. Аналогичный подход может быть использован и для модели Винера.

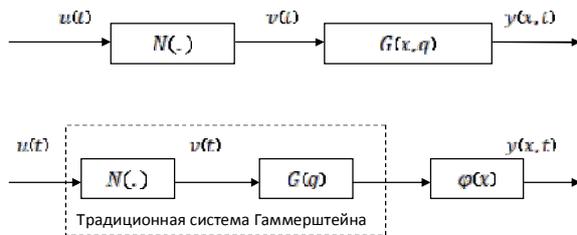


Рис. 1. Структура модели Гаммерштейна с распределёнными параметрами

Будем полагать, что распределённая система Гаммерштейна управляется m управляющими воздействиями $u(t)$ с определенным пространственным распределением, а выход измеряется в N пространственно локализованных точках x_1, \dots, x_N . Для точного моделирования и управления структурой с распределёнными параметрами бесконечной размерности необходимо бесконечное число управляющих воздействий и датчиков по всему пространству. В реальных условиях может использоваться ограниченное число управляющих воздействий и датчиков, которое зависит от сложности процесса, желательной точности моделирования и управления, физических, стоимостных факторов и т.д. Задача моделирования состоит в том, чтобы идентифицировать нелинейную пространственно-временную модель усечённой размерности из данных входа $\{u(t)\}_{i=1}^t$ и выхода $\{y(x, t)\}_{i,j=1}^{N,t}$, определяемых на временном интервале L .

Как показано на рис. 2 процедура моделирования содержит две стадии [6].

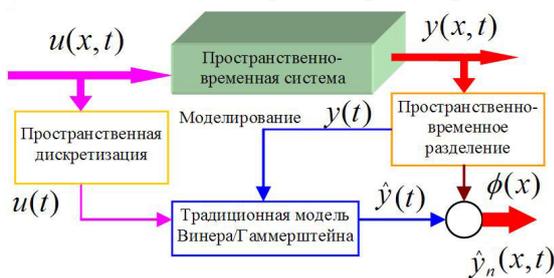


Рис. 2. Декомпозиция распределённой системы Гаммерштейна на основе метода PCA

Первая стадия включает пространственно-временную декомпозицию на основе метода главных компонент PCA, а на второй производится идентификация традиционной модели Гаммерштейна (включая структуру и параметры). Используя пространственно-временной синтез, такая модель позволяет восстановить пространственно-временную динамику всей системы. Допустим, что осуществляется однородная выборка во времени и пространстве выхода процесса $\{e(x, t)\}_{i=1, j=1}^{N, L}$. С использованием ряда Фурье пространственно-временная переменная $y(x, t)$ может быть представлена бесконечным числом ортонормированных пространственных базисных функций

$$y(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \varphi_i(x) y_i(t). \quad (4)$$

Поскольку пространственные базисные функции ортонормированы, т.е.

$$(\varphi_i(x), \varphi_j(x)) = \int (\varphi_i(x) \varphi_j(x) dx) = 0 (i \neq j), \text{ or } 1 (i = j), \quad (5)$$

временные коэффициенты могут быть вычислены следующим образом [4,6]

$$y_i(t) = (\varphi_i(x) y(x, t)), i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Практически это приводит к усечению размерности

$$y_n(x, t) = \sum_{i=1}^n \varphi_i(x) y_i(t), \quad (7)$$

где $y_n(x, t)$ обозначает аппроксимацию n -го порядка. Таким образом, усечение конечного порядка $G(x, q)$ дает

$$G_n(x, q) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varphi_i(x) G_j(q). \quad (8)$$

Главная проблема использования пространственно-временной декомпозиции на основе метода главных компонент заключается в определении наиболее характерной пространственной структуры $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{N,L}$ из данных пространственно-временного выхода $\{y(x,t)\}_{i=1,j=1}^{N,L}$. Нахождение типичной $\{\varphi_i(x)\}_{i=1}^{N,L}$ может быть выполнено посредством минимизации следующей целевой функции [6]

$$\min_{\varphi_i(x)} \langle \|y(x,t) - y_n(x,t)\|^2 \rangle, \quad (9)$$

где $(\varphi_i, \varphi_i) = 1, \varphi_i \in L^2(\Omega), i = 1, \dots, n$

Ортонормированное ограничение $(\varphi_i, \varphi_i) = 1$ наложено для того, чтобы функция $\varphi_i(x)$ была единственной.

При использовании метода PCA важно выделить задачи чистого приведения размерности от применений, где идентификация и выделение единственных и значащих компонент имеют главный интерес. В первом случае формируется только подпространство с высокой описательной способностью. Отдельные компоненты, которые формируют это подпространство, рассматриваются соответствующим алгоритмом одинаково без какого-либо специфического порядка или дифференциального взвешивания. Это относится и к нелинейному PCA, выполняемому стандартной автоассоциативной нейронной сетью, которая осуществляет симметричный тип обучения и поэтому обозначается как s-NLPCA [7,8].

В отличие от него иерархический нелинейный PCA (h-NLPCA), который предложен Scholz и Vigarío, формирует не только оптимальное нелинейное подпространство, заполненное компонентами, но также выстраивает нелинейные компоненты в таком же иерархическом порядке как и линейные компоненты в стандартном PCA [7].

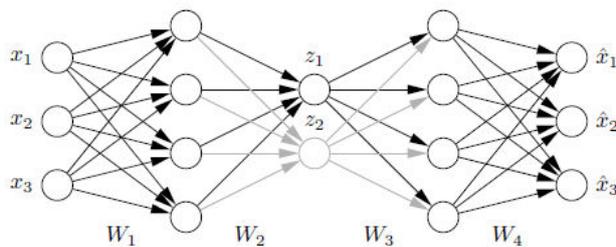


Рис. 3. Структура иерархического NLPCA (h-NLPCA)

В этом случае стандартная автоассоциативная сеть иерархически расширена, к целым 3-4-2-4-3 сетям добавлена ещё 3-4-1-4-3 подсеть. У составляющего слоя в середине есть одна или две единицы, которые представляют первые и вторые компоненты, соответственно. Ошибка E_i подсети с одним компонентом и ошибка полной сети с двумя компонентами оцениваются на каждой итерации. Веса сети затем адаптируются относительно полной иерархической ошибки

$$E_h = E_1 + E_{1,2} \quad (10)$$

Сформированная структура обладает двумя важными свойствами: масштабируемостью и стабильностью. Масштабируемость означает, что первые n компонент обеспечивают максимальную дисперсию, которая может быть покрыта n -размерным подпространством. Стабильность означает, что i -й компонент n -компонентного решения идентичен i -у компоненту m -компонентного решения.

Иерархический порядок по существу приводит к некоррелированным компонентам. Это означает, что метод h-NLPCA в состоянии удалить комплексные нелинейные корреляции между компонентами, что позволяет получить полезные и значащие компоненты. Дополнительно масштабируя нелинейные некоррелированные компоненты к единичной дисперсии, можно получить комплексное нелинейное преобразование [7]. Так как такое преобразование удаляет нелинейность в анализируемых данных, применяемые в последующем методы могут быть линейными. Это особенно важно, например, для метода независимых главных компонент ICA, который таким образом может быть использован для решения нелинейных задач.

В работе [7] предлагается сформировать иерархию непосредственно в интеграле вероятности ошибки. E_1 и $E_{1,2}$ - квадратичные ошибки реконструкции, когда используются только первая или и первая, и вторая компоненты, соответственно. При реализации h-NLPCA необходимо добиться не только небольшой $E_{1,2}$ (как в s-NLPCA), но также и небольшой E_1 . Это может быть сделано, минимизируя иерархическую ошибку E_h .

Для нахождения оптимальных весов сети для минимальной ошибки в h-NLPCA, так же как в стандартном симметричном подходе, используется алгоритм сопряженных градиентов [7].

На каждой итерации ошибки E_1 и $E_{1,2}$ должны быть вычислены отдельно. В стандарте s-NLPCA это выполняется сетью или с одним или с двумя единицами в составляющем слое. Здесь, одна сеть - подсеть другого, как показано на рис. 3. Градиент ∇E_h является суммой отдельных градиентов

$$\nabla E_h = \nabla E_{h1} + \nabla E_{h1,2}. \quad (11)$$

Если вес w_i не существует в подсети, $\partial E_1 / \partial w_i$ - принимается равным нулю.

Иерархическая функция ошибки (10) может быть легко расширена на k компонент ($k \leq d$)

$$E_h = E_1 + E_{1,2} + E_{1,2,3} + \dots + E_{1,2,3,\dots,k} \quad (12)$$

Иерархическое условие для E_h может тогда интерпретироваться следующим образом: определяется k - мерное подпространство минимальной среднеквадратической ошибки (MSE) при ограничении, что $(k-1)$ -мерное подпространство имеет также минимальный MSE. Таким образом, все $1, \dots, k$ размерные подпространства должны иметь минимальный MSE, т.е. каждое подпространство представляет данные его размерности лучше всего.

Иерархический нелинейный метод PCA был использован для пространственно-временной декомпозиции модели Гаммерштейна с распределёнными параметрами технологического комплекса, включающего мельницу, работающую в замкнутом цикле с классификатором, и магнитные сепараторы. На рис. 4 в качестве примера приведены результаты моделирования в пакете NLPCA-0.88 [8] зависимости процесса формирования распределения полезного компонента по классам крупности измельчённой руды на выходе магнитного сепаратора. Показаны первые три главные компоненты: PC 1 – содержание железа магнитного, PC 2 – гранулометрический состав, PC 3 – концентрация твёрдой фазы пульпы.

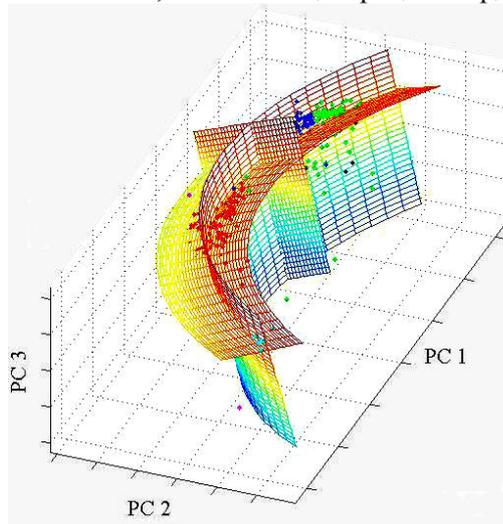


Рис. 4. Результаты моделирования

Выводы. Использование структуры Гаммерштейна с распределёнными параметрами для моделирования процессов формирования фракционных характеристик руды технологическими агрегатами обогатительного производства позволяет существенно повысить качество математического описания процесса обогащения. Иерархический нелинейный метод главных компонент h-NLPCA формирует не только оптимальное нелинейное подпространство, но также выстраивает нелинейные компоненты в таком же иерархическом порядке как и линейные компоненты в стандартном PCA. Иерархический порядок по существу приводит к некоррелированным компонентам, т.е. посредством h-NLPCA можно удалить комплексные нелинейные корреляции между компонентами.

Список литературы

1. Миркин Б. М. Декомпозиционно-координационная оптимизация динамических систем с адаптацией критерия. - Автомат. и телемех., 2001, № 7, 148–157.
2. Поркуян О.В. Керування нелінійними динамічними об'єктами збагачувальних виробництв на основі гібридних моделей Гаммерштейна / О.В. Поркуян: Автореф. дис докт. техн. наук. - Кривий Ріг, 2009. - 36 с.
3. Hulko, G. et al. (2003-2010). Distributed Parameter Systems Blockset for MATLAB&Simulink. Режим доступа: www.mathworks.com/products/connections/ - Third-Party Product of The MathWorks, Bratislava-Natick, Available from: www.dpscontrol.sk.
4. Chenkun Qi, Hai-Tao Zhang, Han-Xiong Li. A multi-channel spatio-temporal Hammerstein modeling approach for nonlinear distributed parameter processes. http://www.control.eng.cam.ac.uk/Homepage/papers/cued_control_1046.
5. Тихонов О.Н. Закономерности эффективного разделения минералов в процессах обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1984, 208 с.
6. Qi Chenkun. Modelling of nonlinear distributed parameter system for industrial thermal processes. <http://lbms03.cityu.edu.hk/theses/abt/phd-meem-b23750911a>
7. Matthias Scholz, Martin Fraunholz, Joachim Selbig. Nonlinear principal component analysis: neural network models and applications / Principal Manifolds for Data Visualization and Dimension Reduction // Edited by Alexander N. Gorban, Balázs Kégl, Donald C. Wunsch, Andrei Zinovyev. - Springer Berlin Heidelberg. - 2007. - p. 44-67.
8. MATLABR implementation of nonlinear PCA including the hierarchical, the circular, and the inverse model. <http://www.NLPCA.org/matlab.html>.

Рукопись поступила в редакцию 26.09.12

УДК 622.268