

ЗАДАЧИ И ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО РЕМОДЕЛИРОВАНИЯ

П.В. Сараев

Липецкий государственный технический университет

Россия, 398600, Липецк, Московская ул., 30

E-mail: psaraev@yandex.ru

Ключевые слова: математическое ремоделирование, машинное обучение

Аннотация: Работа посвящена описанию концепции и направлений развития математического ремоделирования. Данная концепция подразумевает построение моделей на основе уже существующих, но представленных в ином математическом базисе. Ремоделирование позволяет в максимальной степени использовать исходные модели, формируя в процессе трансформации моделей обучающее множество данных требуемого объема в ходе активного эксперимента с имеющимися моделями. В работе рассматриваются проблемы разработки и исследования комплекса алгоритмов, программного обеспечения, алгоритмов построения моделей с максимальным использованием имеющихся математических или имитационных моделей процессов, на основе математического ремоделирования.

1. Введение

На текущий момент существуют различные направления исследований, связанных с моделированием, оптимизацией и управлением сложными многоэтапными (многостадийными) производственными процессами.

Одним из них является оптимизация управления технологическими процессами с использованием архивов и баз знаний на использовании виртуальных анализаторов [1]. Данный подход заключается в адаптивной перестройке моделей нижнего уровня (отдельных агрегатов) на основе уже имеющихся знаний об объекте и информации о его функционировании в реальном режиме времени. Это позволяет подстраиваться под реальный процесс. Он позволяет выбирать оптимальное управление в онлайн-режиме, но не подходит к оптимальному планированию технологии производства на длительные периоды времени и не рассматривает возможное изменение технологических маршрутов производства.

Широкое распространение или методы построения моделей технологических процессов на основе больших объемов ретроспективных данных об их функционировании (Big Data). Функционирование моделей, построенных с использованием данного подхода, заключается в определении на основе значений входных параметров для отдельных этапов технологического процесса наиболее близких значений в архивной информации, и выдачи соответствующего выхода. Этот подход не учитывает физические принципы протекания процессов. Поэтому

успешных примеров применения к производственным процессам не так много. Большинство успешных реализаций относится к финансовой сфере и сфере продаж. Среди лидеров-разработчиков данного подхода следует выделить Yandex Data Factory, который в 2018 году ушел с рынка больших данных.

Предлагаемый в работе инструмент ремоделирования по своей идее близок к построению суррогатных моделей [2], который заключается в замене точной физической модели (более точно, математической модели, построенной на основе глубокого понимания физических процессов, протекаемых в моделируемой системе), на вычисление которой требуется существенное время, на менее точную, но быстро вычисляемую суррогатную модель. Переход к суррогатной модели позволяет значительно эффективнее решать оптимизационные задачи. Используемый метод, называемый методологией поверхности отклика (Response Surface Methodology), также предназначен для конструирования аппроксимаций по множеству вычислений в различных точках, для чего используются идеи планирования экспериментов [3–8]. Подход на основе ремоделирования рассматривался в [9], к нему близок и подход к сочленению моделей подсистем, который сформировался в ко-симулирование [10].

2. Задача математического ремоделирования

2.1. Понятие и принципы ремоделирования

Математическим ремоделированием назовем подход на основе перехода к формальным аналитическим (в частности, нейросетевым или нейроструктурным в более общем случае) моделям. Термин «ремоделирование» («remodelling») может быть переведен либо как «замещающее» (от «replacing»), либо как «повторное» («repeating») моделирование. Его сутью является трансформация, перевод математической или имитационной модели из одной формы в другую. Это может рассматриваться как аппроксимация имеющейся модели другой.

В качестве начальной информации выступают уже построенные модели. В частности, к задаче ремоделирования можно отнести задачу построения разностной схемы для дифференциальных уравнений или их систем. Существуют и другие подходы к ремоделированию. При этой обычно используется предположение, что исходные модели позволяют формировать пары вход-выходных значений. В таком случае исходные модели могут рассматриваться как объекты для активного эксперимента. Применение подхода математического ремоделирования имеет смысл, когда имеются математические модели разных классов, а необходим их анализ с единых позиций. В таком случае переход к единому ремоделирующему классу и дальнейшее объединение всех моделей в одну глобальную модель позволяет в дальнейшем решать задачи оптимизации и стратегического управления.

Идея данного подхода была предложена в работе [11]. Там описана целесообразность и практическая полезность использования линейных по факторам и входным переменным моделей, которые обычно используются в теории планирования экспериментов. Это, по сути, простейший ремоделирующий класс моделей.

В отличие от концепции суррогатных моделей [12] (также известного как метамоделирование [2]), в концепции ремоделирования увеличение скорости вычислений не является определяющим фактором, хотя этот фактор может

являться одной из причин ремоделирования. Отличительным моментом ремоделирования является необходимость перехода от нескольких разнотипных моментов к нескольким моделям одного класса. Таким образом, можно считать, что ремоделирование, по сути, является процессом построения совокупности суррогатных моделей одного класса.

Перевод одного класса моделей в другой называется трансформацией, которая осуществляется на основе алгоритма трансформации (преобразования) моделей. Разработка алгоритма трансформации является нетривиальной задачей, которая не для всех классов может быть решена. Актуальными вопросами будут точность ремоделирования (погрешность, возникающая при аппроксимации исходной модели новой) и время, затрачиваемое на построение ремоделирующей (замещающей) модели.

Такой подход может применяться в следующих ситуациях:

- при наличии нескольких математических моделей разных классов (например, дифференциальных уравнений, интегральных, регрессионных, логических и др.) для перехода к одному классу моделей;
- для перевода в форму, пригодной для решения требуемой задачи, в случае, когда непосредственное использование первоначальной модели для решения задачи невозможно.

К недостаткам такого подхода можно отнести:

- отход от «физического» понимания сущности моделируемого процесса при использовании в качестве ремоделирующего класса формально-аналитических моделей;
- дополнительную возможную потерю точности моделирования;
- временные затраты на процесс ремоделирования.

Концепция ремоделирования в своей основе описана в [13]. В [13] и в [14] математическое ремоделирование применялось для построения динамических систем с переменной структурой, в частности, для моделирования инерционного трансформатора крутящего момента, являющегося частью бесступенчатой трансмиссии автомобиля. В работе [14] также рассматривался пример применения данного подхода для оценки пропускной способности участка автотрассы как основы интеллектуальной транспортной сети. В качестве ремоделирующего класса рассматривались нейронные сети прямого распространения.

Важным приложением концепции математического ремоделирования стало рассмотрение задачи сквозного управления металлургическим процессом – от агломерационного производства до листопрокатного. Применение ремоделирования позволяет сформировать процесс получения конечной металлургической продукции, проходящей через последовательность металлургических переделов и множества агрегатов обработки, на основе моделей единого нейросетового класса. В конечном итоге это позволяет осуществлять сквозное управление технологическим процессом посредством учета преобразования химических элементов на всем процессе металлургического производства.

При решении задач ремоделирования в промышленности можно определить следующие принципы построения моделей производства:

- представление совокупности локальных моделей в виде сетевой структуры (в соответствии с картой технологических моделей);
- на нижнем уровне каждая модель представляет собой модель конкретного агрегата, перерабатывающая входы соответствующего технологического процесса и управляющие сигналы в выходы процесса;
- для всех моделей должны применяться единая структура (требования) представления входной, управляющей и выходной информации;
- каждая модель может базироваться на своем математическом аппарате (регрессионные модели, нейронные сети, продукционные модели, системы дифференциальных уравнений, их комбинации и т.д.).

2.2. Проблемы ремоделирования

Пусть $C_i, i = 1, \dots, p$, – классы моделей, в которых может быть представлена некоторая зависимость $f : X \rightarrow \mathbb{R}$, где X – пространство входных параметров. Обозначим через f^{C_i} модель некоторого объекта, представленного в классе C_i , и соответствующую ошибку модели (точность аппроксимации) через ε_i , рассчитанную, например, на основе некоторого тестового множества. Тогда алгоритм трансформации моделей T_{ij} из класса моделей C_i к классу моделей C_j приводит к появлению ошибки ε_{ij} , которая оценивает расхождение моделей f^{C_i} и f^{C_j} по некоторому критерию. Следует обратить внимание, что эта ошибка может быть рассчитана тем же или отличным способом от того, как рассчитывается ошибка ε_i . В результате трансформации модели ошибка ε_j , которая показывает степень адекватности модели в новом базисе f^{C_j} по отношению к моделируемому объекту, может быть как больше (как правило), так и меньше, чем ошибка ε_i .

Таким образом, первая проблема, которая возникает при использовании ремоделирования, заключается в выборе класса моделей f^{C_j} , к которому преобразуются исходные. Чаще всего в качестве этого класса используются модели нейросетевых архитектур. Это связано с их универсальными аппроксимационными способностями нейронных сетей, т.е. возможностью произвольно точного приближения любой непрерывной нелинейной функции.

Вторая проблема, требующая решения, состоит в способе оценки ошибки ε_{ij} приближения новой модели к исходной. В более продвинутом случае целесообразно оценивать также ошибку ε_j , которая характеризует адекватность новой модели f^{C_j} . При решении этой проблемы важно обратить внимание на необходимость адекватного выбора нормы невязок и соответствующего алгоритма параметрической идентификации модели [15].

Третья проблема – способ формирования новой модели. Чаще всего в этом случае необходимо получение обучающего множества, которое генерируется на основе модели f^{C_i} , и далее используется для идентификации модели f^{C_j} . В данном случае необходимо решить вопросы объема генерируемого множества, диапазонов изменения входов модели, способ генерации значений для обучающего множества. Именно в данной части задача математического ремоделирования пересекается с методами формирования оптимального плана и активного эксперимента в теории планирования экспериментов. Эти идеи могут быть использованы в простейшем

(линейном) случае, т.е. при использовании линейных по параметрам математических моделей в качестве класса C_j .

3. Заключение

В представленной работе отмечены основные идеи математического ремоделирования, показана история данного направления, связи с другими подходами в математическом моделировании и управлении. Отмечены основные проблемы, возникающие в процессе ремоделирования.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-21-00474, <https://rscf.ru/project/24-21-00474/>.

Список литературы

1. Бахтадзе Н.Н., Лотоцкий В.А. Современные методы управления производственными процессами // Проблемы управления. 2009. № 3.1.
2. Burnaev E., Grihon S. Construction of the metamodels in support of stiffened panel optimization [Text] // Math. Methods in Reliability: Proc. Int. Conf. M.: CPI, 2009. P. 124–128.
3. Jansson T., Nilsson L., Redhe M. Using surrogate models and response surfaces in structural optimization — with application to crashworthiness design and sheet metal forming // Structural and Multidisciplinary Optimization. 2003. Vol. 25. Iss. 2. P. 129–140.
4. Couckuyt, I., Aernouts, J., Deschrijver, D. et al. Engineering with Computers. 2013. Vol. 29. Iss. 127.
5. Goel T., Haftka R.T., Shyy W. et al. Ensemble of surrogates // Structural and Multidisciplinary Optimization, 2007. Vol. 33, Iss. 3. P. 199–216.
6. Zhao D., Xue D. A multi-surrogate approximation method for metamodeling // Engineering with Computers. 2011. Vol. 27. P. 139–153.
7. Tenne Y., Armfield S.W. A framework for memetic optimization using variable global and local surrogate models // SoftComputing. 2009.- Vol. 13.- P. 781–793.
8. Chiba K., Obayashi S., Nakahashi K. High-fidelity multidisciplinary design optimization of aerostructural wing shape for regional jet // 23rd AIAA applied aerodynamics conference: Proceedings. 2005. Vol. 5080.
9. Li T., Su Y., Zhong B. Remodeling for fuzzy PID controller based on neural networks // Fuzzy Inf. and Eng.: Proc. Int. Conf. NY: ASC. 2011. P. 714–725.
10. Gomes C., Thule C., Broman D., Larsen P., Vangheluwe H. Co-simulation: state of the art // arXiv:1702.00686. Vol. 1. 47 p.
11. Блюмин С.Л., Барышев В.Г., Коцарь С.Л., Поляков Б.А. Применение несимметричного ортогонального планирования при исследовании процессов прокатки // Первая Всесоюзная научно-техническая конференция «Применение ЭВМ в металлургии». М.: МИСиС, 1973. С. 118–119.
12. Huang C., Radi B., Hani, A.E. Uncertainty analysis of deep drawing using surrogate model based probabilistic method // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2016. Vol. 86, Iss. 9. P. 3229–3240.
13. Blyumin S.L., Galkin A.V., Saraev P.V., Sysoev A.S. Study on remodeling approach quality of dynamic objects with variable structure // IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series. 2019. Vol. 1203. N 012061.
14. Saraev P., Blyumin S., Galkin A., Sysoev A. // Transportation Research Procedia. 2020. Vol. 45. P. 475–482.
15. Блюмин С.Л., Сараев П.В. Комбинации норм невязок и методы параметрической идентификации моделей // XII всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. ИПУ РАН. 2014. С. 2612–2618.