

АЛГЕБРАИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПОРОЖДАЮЩЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Ковалёв С.П.

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,

Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная д.65

kovalyov@sibnet.ru

Аннотация: Предложены методы порождающего проектирования крупномасштабных технических систем на основе аппарата теории категорий, предназначенные для автоматического поиска оптимальных конфигураций проектируемых систем.

Ключевые слова: порождающее проектирование, энергетическая система, пространство проектирования, теория категорий, дискретно-событийное имитационное моделирование.

Введение

Назначение порождающего проектирования (generative design) состоит в том, чтобы, следуя парадигме четвертой промышленной революции (Industrie 4.0), передать компьютеру выработку и реализацию эффективных проектных и технологических решений, а не только их документирование и верификацию, как в системах САПР и PLM образца начала XXI века. Цикл порождающего проектирования включает автоматическое преобразование требований к изделию в задачу многокритериальной оптимизации, выбор наилучшего варианта решения этой задачи и последующее его воплощение при помощи средств автоматического производства. Такой подход был успешно апробирован в проектировании отдельных деталей высоконагруженных конструкций изделий машиностроения, с применением топологической оптимизации и трехмерной печати [1].

Однако для крупномасштабных систем проектирование на уровне деталей неактуально: здесь компьютер должен порождать и выбирать варианты архитектуры системы, топологии, состава и характеристик оборудования, режимов, алгоритмов управления. Такие варианты характеризуются не только числовыми, но и дискретными нечисловыми параметрами – структурными схемами, записями из базы данных оборудования, циклограммами алгоритмов. В совокупности параметры определяют пространство проектирования (design space), которое должно автоматически формироваться исходя из требований многочисленных заинтересованных сторон. Поиск (суб-, парето-)оптимальных вариантов в таком пространстве очень сложен, и взрывным образом усложняется с ростом масштаба системы [2]. Поэтому здесь нужны новые поисковые алгоритмы, с опорой на методы компьютерной алгебры. Теоретическая основа широкого класса таких методов представлена в настоящем докладе.

1 Пример цикла порождающего проектирования

Рассмотрим гипотетический цикл порождающего проектирования на примере энергетической системы [3]. Требования к энергосистемам, в том числе целевые функции для оптимизационных задач, согласно стандарту ГОСТ Р ИСО 50001:2012 «Системы энергетического менеджмента. Требования и руководство по применению», формируются в цикле энергетического менеджмента (стадия *Inspire*). Далее динамически формируется пространство проектирования из возможных конфигураций энергосистемы, представленных цифровыми структурными схемами (стадия *Generate*). Анализ конфигураций на предмет соответствия требованиям и степени оптимальности (стадия *Explore*) производится при помощи алгоритмов поисковой оптимизации, которые отбирают конфигурации-кандидаты и передают их в специализированные инструменты моделирования и анализа энергосистем, такие как PowerFactory (Германия), RTDS (Канада), EnergyCS (Россия). Наилучшая конфигурация энергосистемы передается на строительство (стадия *Fabricate*), где из нее извлекаются команды для мобильных монтажных роботов и уставки для устройств управления.

Сквозное прохождение такого цикла для крупной энергосистемы требует очень много ресурсов. Поэтому рассматриваются упрощенные постановки задач, например комплектация гибридной системы энергоснабжения, состоящей из солнечных панелей, ветровых турбин, аккумуляторов и традиционного генератора на углеводородном топливе. Представление конфигурации такой системы сводится к числовому: выбирается по одной марке оборудования каждого вида, так что координатами в пространстве проектирования служат количества единиц каждого вида оборудования и числовые установочные параметры. Целевыми функциями служат годовая стоимость системы, вероятность потери питания и объем вредных (углеродных) выбросов. Эта многокритериальная оптимизационная задача может быть решена при помощи генетического алгоритма PCEA-g [4].

2 Теоретико-категорный подход к порождающему проектированию

В компьютере системные единицы представляются формализованными моделями различных видов: цифровыми образами геометрических фигур и тел, численными аппроксимациями дифференциальных уравнений, оснащенными графами, базами данных и т. д. При этом, как свидетельствуют стандарты системной инженерии, для анализа структуры систем и организации сборки необходимо знать не столько внутреннее устройство моделей, сколько ассортимент их возможностей соединяться с другими моделями в целях формирования моделей составных единиц. Иными словами, модели рассматриваются как «черные ящики» с известным поведением по отношению к другим моделям, и объединяются в графические структурные схемы сложных систем.

Наиболее удобными для постановки и решения оптимизационных задач являются модели и составленные из них структурные схемы, записанные с математическим уровнем строгости. Подходящий для такой записи универсальный аппарат развит в рамках теории категорий – раздела высшей алгебры, который «начинается с наблюдения, что многие свойства математических систем можно представить просто и единообразно посредством диаграмм» [5]. Обозначим через \mathcal{C} категорию, объектами которой служат все модели некоторого заданного вида, а морфизмами – описания действий, связанных со сборкой систем, на языке таких моделей [6]. Ясно, что \mathcal{C} действительно является категорией, поскольку в ней имеется композиция морфизмов (последовательное выполнение действий) и тождественные морфизмы (холостое «ничего неделание» с произвольной моделью). Структурные схемы систем представляются диаграммами в \mathcal{C} . Теория категорий позволяет вычислить по такой схеме модель системы как целого – это так называемый копредел (colimit) диаграммы.

Существует естественный способ конструирования морфизмов между диаграммами в \mathcal{C} , из морфизмов категории \mathcal{C} и гомоморфизмов графов, задающих форму диаграмм (уплощающая конструкция Гротендика). Этот способ определяет эндифунктор \mathbf{D} в «категории всех категорий» \mathbf{CAT} , который сопоставляет категории \mathcal{C} категорию диаграмм $\mathbf{D}(\mathcal{C})$. Более того, функтор \mathbf{D} индуцирует 2-монаду в \mathbf{CAT} , известную как метамодель системного моделирования, поскольку в ней «закодированы» все применяемые в нем категорные конструкции [6].

В цикле порождающего проектирования систем требования к ним переводятся на язык записи моделей, составляющих категорию \mathcal{C} . В результате пространство проектирования приобретает вид подкатегории в $\mathbf{D}(\mathcal{C})$, которую мы обозначим через \mathcal{CS} . На ее объектах действуют целевые функции, путем вычисления которых ищутся оптимальные структурные схемы. Обозначим через \mathcal{Q} частично упорядоченное множество – область значений некоторой целевой функции. Хорошо известно [5], что \mathcal{Q} может быть представлена категорией, в которой объектами являются в точности все элементы множества \mathcal{Q} , а морфизмы индуцированы порядком (т.е. из объекта x в объект y имеется ровно один морфизм, если $x \leq y$, и ни одного морфизма в противном случае). Особо интересна ситуация, когда целевая функция выступает функцией объектов функтора с кообластью \mathcal{Q} , действующего на подходящей нетривиальной подкатегории в \mathcal{CS} или в двойственной категории \mathcal{CS}^{op} . В этом случае можно применить оптимизационные алгоритмы типа градиентного спуска, выполняющие навигацию вдоль морфизмов этой подкатегории, производя расчет пути методами компьютерной алгебры.

3 Примеры категорных методов порождающего проектирования

Ярким примером применения аппарата теории категорий в моделировании систем служит дискретно-событийное имитационное моделирование. Здесь модель имеет вид сценария – фрагмента предполагаемой истории поведения системы, представленного потоком дискретных событий различных видов. Описания действий по сборке сценариев поведения сложных систем отражают вклад сценариев поведения составляющих. Так, сценарий работы предприятия составляется из сценариев работы единиц оборудования, связанных друг с другом в рамках технологического процесса [7]. Формально сценарий – это множество событий, частично упорядоченное причинно-следственными зависимостями и размеченное видами событий, а действия по сборке сценариев задаются отображениями, сохраняющими порядок и разметку [8]. Все сценарии и действия образуют категорию \mathbf{Pomset} , (ко)пределы в которой описывают приемы сборки имитационных моделей систем – как обычную модульную компоновку, так и аспектное связывание (weaving) [9].

Ввиду повсеместного применения сценарного имитационного моделирования, навигацию в пространствах проектирования, представленных подкатегориями в $\mathbf{D}(\mathbf{Pomset})$, можно рассматривать как алгебраический метод, пригодный для порождающего проектирования широкого класса социально-экономических и технических систем, в том числе и энергетических. Здесь «целевые функторы» порождаются функциями, количественно характеризующими поведение проектируемых

систем. Например, объем вредных выбросов гибридной системы электроснабжения можно выразить через количество событий соответствующего вида в составном сценарии ее функционирования, и задать функтором на двойственной к подкатегории в пространстве ее проектирования, все морфизмы которой содержат не больше таких событий в копределе кообласти, чем в копределе области.

В качестве более специального метода рассмотрим проектирование больших гетерогенных вычислительных сред облачного типа, в том числе включающих узлы с нестандартной нефоннеймановской архитектурой. Каждый узел среды представляется моделью вычислений – конечной алгеброй, состоящей из совокупности всех чисел, помещающихся в его память, и вычислительных примитивов над ними. Интеграция узла в среду заключается в кодировании чисел, поддерживаемых узлом, т. е. в сопоставлении им кодов чисел, поддерживаемых средой. Формально действиям по сборке отвечают отображения основных множеств алгебр, задающие правила кодирования так, что структура тех вычислительных операций, которые узел должен выполнять в составе среды, не разрушается. Все модели вычислений и все действия по их интеграции образуют категорию [10], конструкции в которой позволяют описывать и оптимизировать распределение ресурсов среды под выполнение расчетных алгоритмов. «Целевые функторы», минимизируемые в цикле порождающего проектирования, задают длительность расчета: сигнатурным операциям алгебр, отвечающих узлам среды, и связывающим их морфизмам сопоставляются оценки длительности [11].

Заключение

Аппарат теории категорий обладает большим потенциалом практического применения в условиях четвертой промышленной революции, в том числе для решения задач порождающего проектирования крупномасштабных технических систем. В настоящее время возможности применения предложенных теоретико-категорных методов исследуются на макете программного инструмента порождающего проектирования энергетических систем. В ходе развития инструмента до промышленного уровня готовности возникнет много новых задач для дальнейших исследований.

Литература

1. Kowalski J. CAD is a lie: generative design to the rescue. – Autodesk, 2016. – <https://www.autodesk.com/redshift/generative-design/>.
2. Новиков Д. А., Губко М. В. Методы оптимизации структуры иерархических систем // Управление развитием крупномасштабных систем. Вып. 2. – М.: ИПУ РАН, 2015. – С. 359–377.
3. Ковалёв С. П. Разработка технологии и программной платформы порождающего проектирования энергетических систем // Материалы одиннадцатой Международной конференции «Управление развитием крупномасштабных систем» (MLSD'2018). Т. I. – М.: ИПУ РАН, 2018. – С. 463–465.
4. Shi Z., Wang R., Zhang T. Multi-objective optimal design of hybrid renewable energy systems using preference-inspired coevolutionary approach // Solar Energy. 2015. Vol. 118. – P. 96–106.
5. Маклейн С. Категории для работающего математика / Пер. с англ. – М.: Физматлит, 2004. – 352 с.
6. Ковалёв С. П. Теория категорий как математическая прагматика модельно-ориентированной системной инженерии // Информатика и ее применения. 2018. Т. 12, Вып. 1. – С. 95–104.
7. Андрюшкевич С. К., Журавлев С. С., Золотухин Е. П., Ковалев С. П., Окольников В. В., Рудометов С. В. Разработка системы мониторинга с использованием имитационного моделирования // Проблемы информатики, 2010. № 4. – С. 65–75.
8. Pratt V. R. Modeling concurrency with partial orders // International Journal of Parallel Programming, 1986. Vol. 15. No. 1. – P. 33–71.
9. Андрюшкевич С. К., Ковалёв С. П. Динамическое связывание аспектов в крупномасштабных системах технологического управления // Вычислительные технологии. 2011. Т. 16, № 6. – С. 3–12.
10. Ковалёв С. П. Алгебраический подход к проектированию распределенных вычислительных систем // Сибирский журнал индустриальной математики. 2007. Т. 10, № 2. – С. 70–84.
11. Топорков В. В., Топоркова А. С. Оптимизация характеристик вычислительных процессов в масштабируемых ресурсах // Автоматика и телемеханика. 2002. № 7. – С. 149–157.