ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.64:004.021

АЛГОРИТМЫ ОПТИМИЗАЦИИ МОДЕЛИ СЕТИ ТРАНСПОРТИРОВКИ БОЛЬШОЙ РАЗМЕРНОСТИ В ЗАДАЧАХ РАСЧЕТА ЗАПАСА ГАЗА

канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, Т.М. ГЛУХОВА
(Полоцкий государственный университет)

Современные потребности трубопроводной отрасли в первую очередь связаны с необходимостью оптимизации режимов транспортировки газа с точки зрения минимизации энергетических затрат. Важным компонентом данного вопроса является решение гидравлической и термической задачи по результатам математического моделирования. Представлены алгоритмы оптимизации модели сети транспортировки газа с целью уменьшения ее размерности в контексте разрабатываемых алгоритмов решения систем уравнений.

Ключевые слова: *стационарная модель, телеметрические данные, математическое моделирование, задачи транспортировки газа.*

Авторским коллективом, начиная с 2010 г., ведется работа по созданию эффективных методов расчета задачи транспортировки газа [3–5].

Постановка такой задачи была представлена системами нелинейных уравнений – математической моделью стационарного и неизотермического движения газа в системах газотранспортных обществ (ГТО) Республики Беларусь. Размерность системы зависит от масштаба моделируемого участка схемы и варьируется от фрагмента газотранспортной системы (ГТС) до масштаба газотранспортной системы Беларуси [3].

Однако разработанные итерационные алгоритмы расчета по-прежнему не позволяют говорить о возможности перехода к решению данных задач в рамках нестационарной модели. Продолжительность расчета полной схемы магистрального газопровода Республики Беларусь затрудняет его выполнения расчета в реальном времени.

С целью существенного повышения скорости сходимости алгоритмов расчета в данной работе нами предлагаются алгоритмы оптимизации модели, существенно сужающие пространство поиска решения системы нелинейных уравнений.

Формализация задачи оптимизации

Для представления информации о расчетной модели трубопроводной газотранспортной сети будем придерживаться объектно-ориентированной парадигмы в постановке Гради Буча [1].

Обращение к внутренней структуре вводимых сущностей изобразим используя оператор «.». Тогда обозначение вида $a.b$ будет обозначать обращение к свойству b элемента a.

Выделим классы концептуальных сущностей, описывающих элементы газотранспортной системы:

1. Узел $n = \{p_i\}$ – представление точечного элемента газотранспортной сети, хранящего данные p_i о давлении и температуре газа, характеристику узла (входной / выходной узел), и другие свойства.

2. Множество всех узлов $N = \{n_i\}$.

$l = \{n_1, n_2, p_1, p_2, \ldots\}$ – фрагмент трубопровода, включающий пару узлов n_1 и n_2, и свойства p_i фрагмента (длина, диаметр, толщина стенки, глубина залегания и др.).

3. Множество всех фрагментов трубопровода (далее линков) $L = \{l_k\}$

4. Множество линков, объединенных по тому свойству, что в них входит в качестве одной из вершин узел n, будем задавать так:

$$L(n) = \{l_i \mid l.n_1 = n \vee l.n_2 = n\}.$$

Для удобства дальнейших рассуждений введем также оператор, выделяющий множество узлов, содержащееся в линках $L(n)$ узла n:

$$Nl(n) = \{n_i \mid \exists\, l \in L(n), l.n_1 = n_i \vee l.n_2 = n_i\}.$$

Определим структуру данных для хранения модели в следующем виде:

$$LM = \{L(n_i) \mid \forall n_i \in N\}.$$

С точки зрения реализации в рамках объектно-ассоциативного языка программирования такая структура является ассоциативным контейнером типа хеш-таблицы или контейнера, основанного на построении дерева поиска, вычислительная сложность операций добавления, удаления, поиска элемента для любых типов ассоциативных контейнеров оценивается как $O(log\ n)$, где n – количество пар элементов в контейнере [2].

Фактически это определенное представление графа $G(N, L)$, иллюстрирующего газотранспортную сеть. Одной из особенностей задачи является то, что топология сети меняется в реальном времени. Изменение состояния задвижек приводит к перекоммутации сети. Меняются множества входных и выходных узлов, кроме того, существуют узлы, которые могут играть роль как входных, так и выходных узлов сети (например, узлы, представляющие входы в подземные хранилища газа).

Таким образом, можно выделить следующие особенности расчетной модели:

1) топология сети меняется в реальном времени;
2) меняются множества входных и выходных узлов;
3) присутствуют пограничные узлы, характер которых определяется расчетным путем.

Введем еще несколько удобных ассоциативных контейнеров, которые будем использовать в алгоритмах оптимизации модели.

Контейнер признака присутствия $F(n)$, который хранит соответствие объекту, помещенному в него, отвечает значению флага *true*/*false* или 1/0. Тогда запись вида $n \in F$ будем интерпретировать следующим образом: в ассоциативном контейнере признака F объекту n поставлено в соответствие значение флага, равное 1. Такая запись интуитивно понятна и удобна для использования в силу имеющейся аналогии с ассоциативными контейнерами языка программирования высокого уровня (C++, Java, C#).

Рассматривая возможное усовершенствование расчетной модели, необходимо сформулировать цель оптимизации в первую очередь как уменьшение размерности задачи.

Для достижения данной цели можно предложить следующие упрощения расчетной модели, принципиально не влияющие на точность и качество решения:

1. Удаление близкорасположенных узлов (превращение их в один узел);
2. Объединение участков трубопровода с идентичными параметрами сечения, грунта и глубины залегания в грунте, идущих друг за другом, в один участок суммарной длины;
3. Исключения из расчета фрагментов-баллонов, т.е. таких фрагментов газотранспортной сети, в которых нет узлов, отмеченных как входные. Для баллонов характерно то, что температура газа в них опускается до температуры грунта и присутствует нестационарный процесс «разбора» запаса газа потребителями. При этом допустима упрощенная процедура расчета запаса газа по усредненному давлению его в баллоне.

Алгоритм упрощения модели газотранспортной системы за счет удаления близкорасположенных узлов

1. Для всех узлов n_i зададим пустые начальные множества групп близко распложенных узлов $Near(n_i) = \{\}$;
2. Для всех $l_k \in L$, длина которых меньше заданного порога l_{min};
3. Если $|L(l_k.p_1)| > 1$ и $|L(l_k.p_2)| > 1$ (т.е. узлы не являются концевыми узлами) и у узлов $l_k.p_1$ и $l_k.p_2$ нет датчиков давлений или расходов, то
4. $Near' = Near(l_k.p_1) \cup Near(l_k.p_2) \cup \{l_k.p_1\} \cup \{l_k.p_2\}$;
5. $\forall\ n \in Near'$ определим $Near(n) = Near'$;
6. Если не все l_k из множества L еще просмотрены, то переходим к следующему линку и переходим на пункт 3;
7. Сформируем уникальные группы близкорасположенных узлов во множестве групп G;
8. $\forall\ n \in N, G = G \cup Near(n\} \mid G \cap Near(n) = \varnothing$;
9. Для каждой уникальной группы близко расположенных узлов создадим главный узел и перенаправим линки, идущие от внешних узлов к узлам группы на главный узел, т.е.
   $\forall\ Near_i \in G$, создадим $main_i$
      $\forall\ n \in Near_i$
         $\forall\ l \in L(n)$, если второй узел n_x в данном линке, отличный от n, не принадлежит множеству близкорасположенных узлов $Near_i$, то создадим $link = l$ с заменой в нем узла n на $main_i$, а если у $main_i$ узла уже есть связь с внешним узлом n_x (длины этих линков, исходя из логики топологии газотранспортной сети, должны быть близки), то модифицировать этот линк так, чтобы он приобрел суммарный геометрический объем при усредненной длине;
10. Удалим из модели все исходные линки узлов из множества $Near_i$ и узлы данного множества, добавим мастер узел $main_i$ и линки, связанные с ним, в модель;

11. Если рассмотрены не все уникальные группы, то перейдем к пункту 9;
12. Выход.

Хотим обратить внимание на шаг 8 алгоритма:

$\forall\ n \in N, G = G \cup Near(n)\} \mid G \cap Near(n) = \varnothing.$

Предполагается, что для каждого узла модели сформирована группа близкорасположенных с ним узлов, т.е. для двух узлов, относящихся к одной группе, хранятся идентичные группы близкорасположенных узлов. Размерность данных для группы объемом M будет $M \times M$. Программная реализация проверки на вхождение такой группы во множество групп G будет довольна ресурсоемка. Поэтому предлагается следующая реализация данного шага алгоритма, сводящая вычислительную сложность такой проверки к $O(1)$, заключающаяся в использовании хеш-таблицы в качестве контейнера признака присутствия.

Введем контейнер признака присутствия $F_{exist} : R \rightarrow B$ (R – множество действительных чисел, B – пространство булевых значений {1, 0}). Для каждого элемента обеспечим наличие уникального идентификатора. И признаком идентификации уникальной группы будем рассматривать число, например, равное произведению уникальных идентификаторов объектов в группе.

Оператор вычисления идентификатора группы обозначим как $id(N)$.

Тогда, при условии, что сформированы множества $Near(n)$ для каждого узла, алгоритм выделения уникальных групп будет следующим:

1. $G = \{G_1, G_2, \ldots, G_k\}$ и положим $k = 1$;
2. $\forall\ n \in N$, если $F_{exist}(id(Near(n))) = 1$, то переход к следующему узлу, иначе, переход к шагу 3. Если все узлы пройдены, то переход к шагу 4;
3. $G_k = Near(n)$, $k = k + 1$, возврат к шагу 2;
4. Выход.

Алгоритм объединения участков трубопровода с идентичными параметрами сечения

1. Зададим множество групп объединяемых узлов G = {}
2. Для каждого узла, соединяющего два линка $\forall\ n \in N \mid |L(n)| = 2$, при условии идентичности параметров сечения этих линков, создадим новый линк, равный по длине суммарной длине объединяемых линков с узлами, отличными от n;
3. Добавим в модель новый линк;
4. Удалим из модели узел n и соединяемую им исходную пару линков;
5. Если еще существуют узлы, соединяющие 2 линка с идентичными параметрами сечения, то перейти на пункт 2;
6. Выход.

Алгоритма поиска фрагментов-баллонов

1. Зададим множество групп связанных узлов $G = \{G_1, G_2, \ldots, G_k\}$ и положим $k = 1$;
2. Организуем выбор узла, который отсутствует в группах связанных узлов: $n \in N \mid n \notin G_i \forall G_i \in G$. Если такой узел отсутствует, то переходим к шагу 10. Для обработки найденного узла перейдем к шагу 3;
3. Ведем контейнеры флагов для обработки узла n:
   $F_{current}(n)$ – узлы связанной группы, достижимые из узла n, ассоциированы со значение флага равным 1,
   $F_{new}(n_i)$ – узлы связанной группы, достижимые от рассматриваемого узла n_i за 1 шаг (с длиной пути в 1), ассоциированы со значением флага равным 1;
5. $F_{current}(n) = 1$, $F_{new}(n_p) = \{\}$;
6. $\forall n \in F_{current}$;
7. $\forall n_p \in Nl(n)$, если $n_p \notin G_k$ и $n_p \notin F_{current}(n)$, то $F_{new}(n_p) = 1$;
8. Если $F_{new}(n_p)=\{\}$, то переходим к шагу 9;
9. $G_k = G_k \cup F_{current}$, $F_{current} = F_{new}$, $F_{new} = \{\}$ и перейти к шагу 5;
10. $G_k = G_k \cup F_{current}$, $k = k + 1$ и переходим к шагу 2;
11. Выход.

Данный алгоритм поиска изолированных связанных фрагментов сети еще не дает ответ на вопрос является ли найденный фрагмент баллоном. Для этого необходимо проанализировать состав групп и выявить группы, в состав которых не входят узлы, имеющие признак входных (выходы компрессорных станций, цехов, регуляторов, и др.).

Определение фрагмента сети в качестве баллона позволяет исключить его из расчетной модели и руководствоваться упрощенной процедурой расчета запаса газа.

Необходимо отметить, поскольку топология сети меняется в реальном времени, баллоны могут включать в себя произвольные подмножества узлов, то возможна ситуация, когда в баллоне отсутствуют узлы, оснащенные датчиками давления. Такая ситуация делает невозможным расчет запаса газа в баллоне и требует применения эвристик обработки ошибочных ситуаций для автоматического режима функционирования программного комплекса.

Заключение. Предложенные алгоритмы уменьшения размерности модели сети транспортировки газа нашли свое практическое применение в программном комплексе расчета запаса газа на магистральном газопроводе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Эффект от реализации предложенных алгоритмов привел более чем к двукратному уменьшению размерности модели и, соответственно, времени расчета до установленного порогового значения невязки. Вторым положительным моментом стало то, что значительно упростились процедуры поиска несоответствий и ошибок в телеметрических данных на стадии контроля качества исходной расчетной схемы и результата расчета.

ЛИТЕРАТУРА

1. Объектно-ориентированный анализ и проектирование с примерами приложений (UML 2). = Object-Oriented Analysis and Design with Applications / Гради Буч [и др.]. – Третье изд. – М. : Вильямс, 2010. – 720 с.
2. Ахо, А. Построение и анализ вычислительных алгоритмов / А. Ахо, Дж. Хопкрофт, Дж. Ульман. – М. : Мир, 1979. – 536 с.
3. Глухов, Д.О. Комбинированный алгоритм решения системы нелинейных уравнений газодинамической задачи для сетей транспортировки газа / Д.О. Глухов, А.Ф. Оськин, С.А. Авилкин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки. – 2011. – № 4. – С. 8–14.
4. Глухов, Д.О. Комбинированный алгоритм решения системы нелинейных уравнений газодинамической задачи для сетей транспортировки газа с использованием локальных эвристик / / Д.О. Глухов, С.А. Авилкин // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки. – 2011. – № 12 – С. 9–15.
5. Программный комплекс расчета запаса газа в газотранспортной системе ОАО «Газпром трансгаз Беларусь». Опыт эксплуатации / Д.О. Глухов [и др.] // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта : сб. тез. VIII междунар. науч.-техн. конф., г. Новополоцк, 25–28 нояб. 2014 г. / Полоц. гос. ун-т ; редкол. : В.К. Липский [и др.]. – Новополоцк, 2014. – С. 143–144.

Поступила 05.09.2016

OPTIMIZATION ALGORITHM MODEL OF THE NETWORK TRANSPORTING OF LARGE DIMENSION TO THE PROBLEM OF CALCULATING GAS RESERVES

D. GLUKHOV, T. GLUKHOVA

Modern needs of the pipeline industry are primarily concerned with the necessity of optimization transport regime in terms of minimizing energy costs. An important component of this task is to solve hydraulic and thermal as a result of mathematical modeling. In this paper, we propose algorithms optimization model of gas transportation network in order to reduce in the context of developed algorithms for solving systems of equations.

Keywords: *stationary model, telemetry data, mathematical modeling, gas transportation problems.*