ТЕПЛОФИКАЦИЯ И ТЕПЛОВЫЕ СЕТИ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ АЛГОРИТМА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ЭВОЛЮЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ СЕТЕЙ¹

© 2024 r. Bingwen Zhao^{a, b}, Ruxue Yan^{b, *}, Yu Jin^c, Hanyu Zheng^b

^aKeyi College of Zhejiang Sci-Tech University, Shaoxing, 312369 China ^bCollege of Architectural Engineering of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018 China ^cShanghai Linxiang Environmental Protection Corporation, Shanghai, 200232 China *e-mail: 1305128799@qq.com Поступила в редакцию 10.03.2023 г. После доработки 06.06.2023 г. Принята к публикации 27.06.2023 г.

Система централизованного теплоснабжения (СШТ) – важный вид обеспечения теплом жителей северных городов Китая. В последнее время она становится все более масштабной, а структура трубопроводной сети – все более сложной. Постепенно возникает проблема гидравлического дисбаланса трубопроводной сети, для решения которой необходимо создать точную и идеальную гидравлическую модель теплосети, которая могла бы облегчить процесс эксплуатации системы. Решить проблему гидравлической разбалансировки системы отопления можно с помощью имитационного моделирования. Однако с увеличением времени эксплуатации теплосети становится сложнее оценить реальные коэффициенты гидравлического сопротивления в трубопроводах, что является одной из главных причин низкой точности имитационной модели системы отопления. Чтобы преодолеть эту трудность, в настоящей работе предлагается использовать модель идентификации коэффициентов гидравлического сопротивления, основанную на алгоритме дифференциальной эволюции (differential evolution algorithm – DEA). С помощью теории графов, сетевых матриц и закона сохранения массы была построена гидравлическая модель тепловой сети, а для ее решения применен метод узлового давления. После детального анализа существующих алгоритмов для нахождения коэффициентов сопротивления трубопровода был выбран метод дифференциальной эволюции. Полученная модель была протестирована на реальном промышленном объекте – тепловой сети г. Кайфэн (Китай) (далее СЦТ Кайфэн). В результате относительные погрешности определения идентифицированных коэффициентов гидравлического сопротивления составили не более 10%, при этом погрешность 98% идентифицированных значений не превысила 5%.

Ключевые слова: централизованное теплоснабжение, алгоритм дифференциальной эволюции, идентификация коэффициента сопротивления, гидравлическая модель трубопровода, оптимизационное проектирование

DOI: 10.56304/S0040363624060067

Проведение исследований гидравлического состояния тепловой сети весьма важно для правильного регулирования работы тепловой сети и ее оптимизации. Вопрос о том, как устранить гидравлическую разбалансировку тепловой сети, всегда интересовал ученых [1, 2], и потому методам определения коэффициентов сопротивления трубопроводов уделялось повышенное внимание [3]. Гидравлическое сопротивление участка трубы теплосети – это гидравлические потери, которые возникают при движении жидкости по водопроводящим каналам. Они бывают двух видов: потери по длине канала и локальные (местные) потери [4]. Гидравлические потери зависят от коррозии труб, их засорения, образования накипи и других факторов эксплуатации трубопроводной сети и существенно отклоняются от первоначального расчетного (нормативного) показателя. Следовательно, гидравлическая модель трубопроводной сети, в которой используются нормативные значения коэффициентов сопротивления труб, отличается от реальной трубопроводной сети, поэтому стратегия управления, построенная на основе данной модели, часто не позволяет достичь ожидаемого эффекта на практике. Чтобы решить проблему поиска фактических коэффи-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда научных исследований Департамента образования провинции Чжэцзян (Y202147916) и Чжэцзянского научно-технического университета (YY20210015-J).

циентов гидравлического сопротивления, в настоящей статье в качестве реального рабочего примера теплосети рассматривается одна из территориальных теплосетей системы централизованного теплоснабжения г. Кайфэн. Для выбранной теплосети строится оптимизационная модель определения коэффициентов сопротивления трубопроводов СТЦ на основе алгоритма дифференциальной эволюции.

Алгоритмы идентификации коэффициентов сопротивления трубопроводов могут быть двух типов: классические и интеллектуальные алгоритмы оптимизации. Первые нацелены на поиск коэффициентов сопротивления трубопроводов традиционными математическими методами расчета, такими как алгоритм Гаусса – Ньютона [5], статистический метод Байеса [6], обобщенная обратная матрица [7] и т.д. Авторы [6], используя статистические методы Байеса, предложили новый метод определения гидравлических коэффициентов сопротивления, который позволяет идентифицировать коэффициенты на основе данных, полученных при мониторинге рабочих параметров трубопроводной сети. В [8] коэффициенты сопротивления были вычислены с помощью системы алгебраических уравнений, для решения которой необходимо знать фактические давление и расход теплоносителя в теплосети. Для нахождения коэффициентов сопротивления нефтепровода в [9] был выбран метод теплогидравлического расчета с применением данных, взятых из системы контроля и мониторинга. Авторы [10] рассмотрели процесс идентификации коэффициентов сопротивления транспортного трубопровода как задачу оптимального управления параметрами и для ее решения адаптировали численные методы.

Хотя классические алгоритмы оптимизации хорошо изучены и усовершенствованы, на практике существует большое число сложных систем с сильной неопределенностью и нелинейностью, которые плохо решаются с помощью классических методов.

Задача определения коэффициентов гидравлического сопротивления представляет собой обратную задачу гидравлического расчета, при решении которой по заданным значениям расхода и давления в каждом узле может быть получен реальный коэффициент сопротивления любого отрезка трубопровода. Для этого необходимо выполнить идентификацию системы уравнений, состоящей из уравнений неразрывности и энергии [11].

Прокладку тепловых сетей осуществляют как надземно, так и подземно. В последнем случае бо́льшая часть трубопроводной сети проходит глубоко под землей, поэтому снимать данные, измеряя рабочие параметры потоков в узлах и трубах, невозможно или неудобно. Даже при наличии подвесных надземных трубопроводов для крупной СЦТ нецелесообразно измерять рабочие параметры в трубах и узлах всей сети. Как правило, в инженерной практике только ТЭЦ и тепловые пункты оборудованы приборами контроля расхода и давления теплоносителя, тогда как на ответвлениях подающих и обратных магистральных трубопроводов такие средства контроля обычно не установлены. Это приводит к тому, что данных, полученных путем реального измерения, недостаточно для определения гидравлических коэффициентов сопротивления: неизвестных переменных больше, чем число уравнений в исходной системе [8], поэтому уравнения имеют бесконечно много решений и задача идентификации коэффициентов сопротивления становится неопределенной. Таким образом, в настоящее время основным способом разрешения сложившейся ситуации становится преобразование недетерминированной задачи определения коэффициентов сопротивления трубопровода в переопределенную задачу с помощью интеллектуальных алгоритмов идентификации. Эти алгоритмы включают в себя генетические алгоритмы [8, 11–14], алгоритмы оптимизации роем частиц [15], DEA и др.

Для расчета коэффициентов сопротивления трубопроводов автор [11] выбрал генетический алгоритм оптимизации. Результаты исследования показали, что погрешность идентификации находилась в пределах допустимого эксплуатационного диапазона. В [12] для решения уравнений идентификации коэффициентов сопротивления водопроводной сети – уравнений неразрывности и сохранения энергии – применяли генетический алгоритм. В [16] были предложены два критерия для идентификации гидравлических сопротивлений систем водяного отопления, на которых основывался алгоритм эволюционного поиска для решения задач идентификации. Более того, авторы [16] показали, что определение этих сопротивлений в процессе эксплуатации систем отопления — важный этап управления теплосетью.

В [17] алгоритм эволюционного поиска, для построения которого выбирали легкодоступные исходные параметры системы отопления, применялся для идентификации параметров, которые трудно было получить во время эксплуатации системы. Таким образом обеспечивался полный мониторинг системы отопления в режиме реального времени.

Автор [4] в соответствии с особенностями идентификации коэффициентов сопротивления и существующими проблемами генетического алгоритма предложил перекрестный генетический алгоритм с тремя родителями (three-parents cross genetic algorithm), основанный на вспомогательных особях. Улучшенный алгоритм был проверен

на задаче идентификации коэффициентов сопротивления трубы для определения показателя успешности поиска, оценки оптимального решения и т.д. И хотя имеются примеры успешного практического применения генетических алгоритмов и алгоритмов роя частиц для определения коэффициентов сопротивления, у этих алгоритмов есть такие недостатки, как отсутствие гарантии получения оптимального решения и низкая скорость сходимости.

Алгоритм дифференциальной эволюции был впервые предложен в 1995 г. [18]. Основная идея эволюционных стратегий заключается в создании популяции решений и их последующем улучшении с помощью операторов мутации, скрещивания (кроссовера) и селекции (отбора), аналогичных тем, которые используются в процессе естественной эволюции. Алгоритм дифференциальной эволюции снижает сложность генетических операций благодаря принятию стратегии конкурентного отбора "один к одному" (появление наследников не увеличивает популяцию, один наследник сравнивается с одним родителем), простой операции мутации и понятного алгоритма скрешивания [19]. Кроме того, поскольку DEA может динамически отслеживать текущую ситуацию при нахождении оптимума и своевременно корректировать стратегию поиска, значит он обладает сильной глобальной сходимостью и надежностью. Этот алгоритм не попадает в локальный оптимум и имеет меньше неопределенных параметров [20]. Кроме того, традиционные методы математического программирования не предназначены для решения сложных задач многомерной оптимизации, которые могут быть эффективно решены с помощью DEA. Поэтому в данной статье для поиска коэффициентов гидравлического сопротивления теплосети выбирается именно DEA.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Централизованное теплоснабжение г. Кайфэн, расположенного на севере Китая, осуществляется по закрытой системе подачи водного теплоносителя от тепловых электростанций, являющихся основным источником тепла. Фактическая площадь этой системы с 234 тепловыми пунктами равна 11099400.62 м². Отопительный период с круглосуточным непрерывным обогревом помещений стартует 15 ноября и заканчивается 15 марта следующего года. Расчетные температура и давление воды в подающем/обратном трубопроводе первичной сети СЦТ Кайфэн составляют 120/60°С и 1.6/0.3 МПа, а расчетный расход воды равен 8100 т/ч. Для удобства управления вся система отопления разделена на три зоны обогрева: А, В и С (рис. 1), соответствующие западной, центральной (средней) и восточной частям трубопроводной СШТ.

В настоящее время с использованием интеллектуальной платформы управления СЦТ Кайфэн может осуществляться дистанционное регулирование каждого теплового пункта и ТЭС в сети теплотрасс, в том числе сбор данных о системе трубопроводов, мониторинг рабочего процесса, прогнозирование нагрузки на отопление и другие функции. Однако проблема гидравлической разбалансировки все еще характерна для данной системы теплоснабжения. Именно поэтому с помощью интеллектуального управления СЦТ Кайфэн были получены данные о работе трубопроводной



Рис. 1. Районы А, В, С системы централизованного теплоснабжения г. Кайфэн

сети в отопительный сезон 2020/2021 г. (с 15 ноября по 15 марта), а также была собрана другая базовая информация (например, о способе прокладки труб, их направлении, внутреннем диаметре и длине, высоте размещения над уровнем моря и т.д.). Эти данные были обработаны с использованием DEA для определения коэффициентов гидравлического сопротивления каждого трубопровода, что необходимо для последующего регулирования гидравлического баланса трубопроводной сети СЦТ.

ПОСТРОЕНИЕ ИДЕНТИФИКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ

Сеть отопительных трубопроводов представляет собой крупномасштабную и сложную систему. Изучать ее напрямую очень трудно и непрактично, поэтому систему следует упростить и "преобразовать" в модель, с помощью которой будет удобно проводить анализ данных. Такой процесс называется построением модели теплопроводной сети.

Гидравлическая модель трубопроводной системы

Предполагается, что тепловая сеть имеет b сегментов труб и n + 1 узлов. В соответствии с законами сохранения массы и энергии и теорией графов [21, 22], ее гидравлическую модель можно представить следующим образом:

$$\begin{cases} \mathbf{A}\mathbf{G} = \mathbf{Q}; \\ \mathbf{A}^{\mathsf{T}}\mathbf{P} = \mathbf{H}; \\ \mathbf{H} = \mathbf{S}|\mathbf{G}|\mathbf{G} + \mathbf{Z} - \mathbf{D}\mathbf{H}, \end{cases}$$
(1)

где $\mathbf{A} = \left(a_{ij}\right)_{n \times b}$ – базовая корреляционная матрица порядка $[n \times b]; \mathbf{G} = (g_j)_{b \times 1}$ — матрица потока в трубопроводе порядка $[b \times 1]; g_j - поток j$ -го канала; $\mathbf{Q} = (q_i)_{n \ge 1}$ – матрица потока, исходящего из узла (node outgoing flow matrix), порядка $[n \times 1]$; q_i — исходящий поток из *i*-го узла; \mathbf{A}^{T} — транспонированная базовая корреляционная матрица **A**; $\mathbf{P} = (p_i)_{n \times 1}$ – вектор-столбец порядка $[n \times 1]$ относительного значения напора в узле; *p_i* – напор в *i*-м узле относительно опорного узла; $\mathbf{H} = (h_j)_{h \times 1}$ – матрица разности давлений на обоих концах трубы порядка $[b \times 1]; h_j$ – разность давлений между двумя концами *j*-го сегмента канала; S – диагональная матрица коэффициентов сопротивления порядка $[b \times b]; |\mathbf{G}|$ – диагональная матрица абсолютного значения расхода по трубопроводу порядка $[b \times b]; \mathbf{Z}$ – вектор-столбец

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 6 2024

разности напора воды в двух конечных точках трубопровода порядка $[b \times 1]$; **DH** — вектор-столбец значений напора насосов порядка $[b \times 1]$.

В системе уравнений (1) расход в трубе g_j и давление в узле p_i неизвестны, т.е. неизвестны и параметры G и P, в отличие от напоров насосов, давления и расходов, связанных с тепловыми станциями и пунктами. Значения последних можно получить из отчетов об испытаниях оборудования, по показаниям манометров, расходомеров и других измерительных приборов.

В настоящее время для моделирования гидродинамических процессов в сетях трубопроводов обычно применяют метод сеточного или узлового анализа (loop method and node analysis method). Оба метода имеют свои преимущества и недостатки. В данной статье для решения системы дифференциальных уравнений, относящихся к гидравлической модели теплосети, используется метод узлового анализа.

Целевая функция и настройка частной функции пригодности

Задача оптимизационного проектирования заключается в поиске оптимального метода решения предложенной задачи, а критерий оценки оптимальной схемы должен быть таким, чтобы наилучшим образом отражать цель проектирования. Целевая функция — это математическая функция, с помощью которой цели выражаются в виде проектных переменных. В данной работе такой функцией идентификационной модели является матрица коэффициентов сопротивления трубопровода **S**. Самый простой и быстрый способ оценить точность выходного значения модели — использовать метод наименьших квадратов, стандартной формой которого является

$$R(\hat{\theta}) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} \varepsilon^{2}(k) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} [y(k) - y_{m}(k)]^{2}, \quad (2)$$

где $\hat{\theta}$ — оценки идентифицируемых параметров; N — общее количество различных состояний, используемых для проверки модели; $\varepsilon(k)$ — отклонение между k-м выходным состоянием системы и выходным значением модели; y(k) — выходное значение системы в k-м состоянии; $y_m(k)$ — выходное значение модели в k-м состоянии.

Однако, поскольку фактические коэффициенты сопротивления трубопроводной сети неизвестны, для оценки целевой функции модели **S** необходима частная функция соответствия F(s)(или частная функция пригодности). В данной статье F(s) задается как разница между измеренными значениями расхода и давления на тепловых пунктах и значениями, рассчитанными с помощью идентификационной модели:

$$F(s) = \sum_{l=1}^{c} \left[\sum_{n=1}^{a} \delta_n \left(p_n^1 - p_n^2 \right)^k + \sum_{m=1}^{b} \xi_m \left(G_m^1 - G_m^2 \right)^k \right], (3)$$

где *с* – количество рабочих периодов эксплуатации, используемых в модели идентификации; *l* – текущее значение рабочего периода; *a* – количество узлов измерения давления; δ_n – весовой коэффициент для давления в узле *n*; p_n^1 – давление в узле *n*, рассчитанное с помощью модели, Па; p_n^2 – реальное (измеренное) давление в узле *n*, Па; k = 1 или 2 – параметр, используемый для вычисления абсолютного или квадратичного отклонения соответственно; *b* – количество сегментов труб с известным (измеренным) расходом теплоносителя; ξ_m – весовой коэффициент расхода в сегменте трубы *m*; G_m^1 – расчетное значение расхода на участке трубы *m*, кг/с; G_m^2 – фактический (измеренный) расход теплоносителя на участке трубы *m*, кг/с.

Весовые коэффициенты давления δ_n и расхода ξ_m являются обратными величинами для абсолютного или квадратичного отклонения между фактическими и расчетными значениями давления и расхода соответственно. Оптимизация этих двух параметров с помощью итерационных вычислений позволит достичь оптимального значения целевой функции. Начальные значения этих параметров могут быть установлены в зависимости от точности измерений и важности различных точек измерения. Разумный выбор весовых коэффициентов может повысить точность целевой функции, отражающей разницу между измеренными и вычисленными значениями, и улучшить результат поиска оптимальных параметров идентификационной модели.

Установка ограничений DEA

Принцип работы алгоритма дифференциальной эволюции заключается в нахождении оптимального значения целевой функции в заранее заданной области параметров. Следовательно, необходимо обозначить область существования модели. Хотя расчетные значения коэффициентов сопротивления трубопроводной сети определены всегда с некоторой погрешностью из-за особенностей конструкции сети, коррозии трубопроводов и вследствие других подобных причин, можно принять значения этих коэффициентов в качестве эталонных, разработать верхний и нижний пределы возможных ограничений выходных значений модели *S* и составить соотношение

$$cS_d \le S \le dS_d,\tag{4}$$

где c, d — верхняя и нижняя границы коэффициентов сопротивления (значения c и d определяются исходя из фактических условий эксплуатации в зависимости от степени коррозии труб и времени работы участка теплосети); S_d — расчетное значение коэффициента сопротивления трубопроводной сети, которое было изначально определено при проектировании; S — вычисленное значение коэффициента сопротивления.

Кроме того, установленные значения коэффициентов сопротивления должны удовлетворять условиям сохранения массы и энергии. Однако эти условия входят в гидравлическую модель трубопроводной сети (1) и поэтому здесь не рассматриваются.

Блок-схема алгоритма поиска коэффициентов сопротивления труб в теплосети с помощью DEA показана на рис. 2. Для правильной идентификации модели необходимо определить управляющие параметры и частную функцию соответствия (пригодности) F(s) и на их основе создать популяцию. Главными управляющими параметрами являются размер популяции М, параметр скрещивания (вероятность скрещивания) *CR*, коэффициент мутации (сила мутации) *F* и максимальный порядковый номер итерации G. Промежуточная популяция генерируется в результате мутаций и скрещивания. Затем наступает операция отбора: оценивается функция пригодности в исходной и созданной популяциях и по правилам отбора генерируется новая популяция. Когда условие завершения выполнено, алгоритм заканчивает работу и выводит результат. В противном случае алгоритм продолжает лействовать.

ВАЛИДАЦИЯ МОДЕЛИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Опираясь на материал предыдущего раздела, полученное математическое представление модели идентификации коэффициентов сопротивления трубопроводной сети можно записать в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} \min F(s) = \sum_{T}^{NT} \left[\sum_{n=1}^{NP} \delta_n \left(PM_n - PC_n \right)^k + \right] \\ + \sum_{m=1}^{NG} \xi_m \left(GM_m - GC_m \right)^k \\ c_1 S \leq S \leq d_1 S; \\ \mathbf{A}^T \mathbf{P} = \mathbf{H}; \\ \mathbf{H} = \mathbf{S} |\mathbf{G}| \mathbf{G} + \mathbf{Z} - \mathbf{DH}. \end{cases}$$
(5)

В системе (5) отражено условие поиска минимума функции пригодности F(s) на заданном массиве исходных данных.



Рис. 2. Блок-схема алгоритма идентификации

В секторе С системы централизованного теплоснабжения г. Кайфэн трубы неоднократно ремонтировали и дополняли новыми участками, поэтому такой параметр, как срок службы труб, имеет большой разброс значений и, следовательно, хорошую репрезентативность. Поэтому, чтобы проверить надежность модели идентификации коэффициентов сопротивления тепловой сети, предложенной в данной статье, в качестве рабочего примера была принята зона обогрева С СЦТ Кайфэн. Эта зона содержит 58 тепловых пунктов, 1 тепловую станцию, 108 участков трубопроводов и 111 узлов. Система теплоснабжения в секторе C – водяная двухтрубная, каждый участок трубопровода состоит из подающей и обратной магистралей. В рамках настоящей публикации идентификация коэффициентов сопротивления выполняется только для подающих трубопроводов, т.е. количество идентифицированных ото-

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 6 2024

пительных труб равно 108. Можно представить зону обогрева C в виде схемы трубопроводной сети, включающей в себя сегменты труб и узлы. На рис. 3 показана схема такой сети в зоне обогрева C с указанием взаимного расположения тепловых станций и пунктов. Схема трубопроводной сети имеет 57 круглых точек и одну треугольную. Они обозначают тепловые пункты и ТЭС с приборами измерения давления и расхода теплоносителя.

Формулы для расчета коэффициентов сопротивления

Каждая труба и узел в зоне нагрева *С* были последовательно пронумерованы. В табл. 1 приведены основные конструктивные параметры некоторых труб системы отопления.



Рис. 3. Принципиальная схема распределения трубопроводов в зоне *С*. *1* – ТЭС; *2* – тепловые пункты; *3* – трубопроводы

Таблица 1. Основные конструктивные параметры тепловой сети зоны С

Номер трубы	Начальная точка	Конечная точка Номинальный диаметр <i>D</i> _{ном} , мм		Длина трубы, м	
G1	n1	n2	1200	7824	
G2	n2	n3	600	243	
G3	n3	n4	200	87	
G4	n3	n5	600	694	
G5	n5	n6	150	126	
G6	n5	n7	600	1948	
G7	n7	n8	500	1219	
G8	n8	n9	250	275	
G9	n9	n10	250	51	
G10	n9	n11	250	45	
G11	n8	n12	400	303	
G12	n12	n13	200	767	
G13	n12	n14	400	675	
G14	n14	n15	150	168	
G15	n14	n16	200	349	
G16	n7	n17	600	5510	
G17	n17	n18	250	186	
G18	n18	n19	150	123	
G19	n18	n20	150	851	
G20	n17	n21	300	77	

Для расчета начальных значений коэффициентов гидравлического сопротивления труб используется соотношение

$$S = 6.88 \times 10^{-3} \frac{K^{0.25} L}{d^{5.25} \rho} (1 + \alpha),$$
 (6)

где K — эквивалентная абсолютная шероховатость внутренней стенки трубы, м; L, d — длина и внутренний диаметр трубы, м; ρ — плотность теплоносителя (воды), кг/м³; α — отношение местного сопротивления к сопротивлению трения.

Значение *К* принимается равным эталонному расчетному значению 0.5×10^{-3} м, приведенному в [23]. Необходимо учитывать, что в нормативные документы всегда закладывают определенный запас прочности, поэтому эталонное значение *К* является завышенным. Кроме того, согласно некоторым исследованиям, фактическая эквивалентная абсолютная шероховатость труб хорошо отлаженной теплосети обычно составляет менее 0.5×10^{-3} м. По этим причинам значение *К* в рамках настоящей статье выбрано равным 0.4×10^{-3} м.

В реальном процессе эксплуатации СЦТ Кайфэн тепловые пункты должны обеспечивать теплом потребителей с разными запросами по температуре и давлению. Например, существует разделение теплосетей на верхние и нижние зоны высотных зданий, бывают также системы обогрева в виде теплых полов или радиаторного отопления. Поэтому если на каких-то тепловых пунктах одновременно работают несколько групп тепловых установок, то с таких тепловых пунктов в процессе отслеживания давления и расхода теплоносителя в тепловой сети получают несколько групп данных. В этом случае фактический коэффициент сопротивления теплового пункта не может быть рассчитан просто с помощью (6). С учетом того факта, что разные запросы потребителей обеспечиваются на отдельном тепловом пункте посредством переключения оборудования и регулируются работой локальной автоматики, предложено следующее соотношение для расчета эквивалентного коэффициента сопротивления теплового пункта в случае, когда на одном тепловом пункте имеются несколько теплообменников и несколько наборов данных [11]:

$$S = \frac{\Delta \overline{p}}{\left(\sum G_i\right)^2},\tag{7}$$

где $\Delta \overline{p}$ – средняя наблюдаемая разница давлений, Па; $\sum G_i$ – суммарный расход теплоносителя через тепловой пункт, т/ч.

Основываясь на данных, собранных в процессе эксплуатации трубопроводной сети, проектных параметрах трубопроводной сети и расчетных значениях коэффициентов сопротивления

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 6 2024

труб и тепловых пунктов, и используя алгоритм дифференциальной эволюции, можно определить коэффициенты сопротивления, которые соответствуют фактическому состоянию трубопроводной сети.

Настройка параметров модели

Главными параметрами DEA являются коэффициент мутации (сила мутации) *F*, параметр скрещивания (вероятность скрещивания) *CR*, размер популяции *M* и порядковый номер максимальной итерации *G*.

1. Коэффициент мутации (сила мутации) F – важный параметр для контроля конвергенции и разнообразия популяции. Когда он уменьшается, разнообразие популяции сокращается и процесс эволюции может достичь локального экстремума, что приведет к преждевременной конвергенции популяции и ее вырождению. Однако, если Fвелик, появляется возможность выхода из локальных экстремумов, но скорость сходимости при этом снизится. Поэтому, согласно опыту компьютерных вычислений, значение F = 0.6обычно является оптимальным.

2. Параметр скрещивания (вероятность скрещивания) *CR* помогает контролировать степень вовлеченности родителя и потомка в скрещивание и регулировать возможности глобального и локального поиска. Чем меньше *CR*, тем менее разнообразна популяция и тем выше вероятность преждевременной конвергенции. Скорость сходимости увеличивается с ростом *CR*. Однако при больших значениях *CR* возмущение может превысить допустимый уровень разнообразия популяции, решение попадет на границу поиска, в результате чего скорость сходимости уменьшится. Значение *CR* обычно следует выбирать в диапазоне от 0.6 до 0.9 (в настоящей статье *CR* = 0.6).

Стоит отметить, что параметр скрещивания CR и коэффициент мутации F связаны один с другим. Чем больше CR, тем меньше должен быть параметр F – в этом случае скорость сходимости постепенно увеличивается. Однако одновременно с ростом значения CR повышается чувствительность сходимости к коэффициенту мутации F.

3. В общем случае размер популяции M находится в диапазоне от 5D до 10D (D – количество параметров, которые необходимо оценить) и не может быть меньше 4D: в противном случае возникнут трудности с выполнением операции мутации. Чем больше значение M, тем более разнообразна популяция и тем выше вероятность получить оптимальное решение, но при этом время вычисления увеличивается. В данной работе M = 20.

4. Обычно достижение максимального значения числа итераций *G* является условием завершения процесса эволюции. По мере увеличения *G* чем точнее становится приближение к оптимальному решению, тем больше времени занимает процесс расчета, поэтому необходимо подобрать максимальное число итераций *G* в соответствии с конкретной ситуацией. Как правило, значение *G* соответствует диапазону от 100 до 200 (в настоящей статье G = 200).

Анализ результатов

Коэффициенты гидравлического сопротивления, определенные описанным выше методом, приведены в табл. 2.

После сравнения результатов идентификации коэффициентов сопротивления со значениями,

рассчитанными по формуле (6), была построена статистическая диаграмма (рис. 4).

Чтобы подтвердить точность результатов идентификации и избежать ошибки валидации, связанной с возможными неточностями в исходных параметрах, из базы данных мониторинга параметров тепловой сети были сделаны три репрезентативные выборки, полученные при различных условиях работы теплосети: в начале (*I*), середине (*II*) и конце (*III*) сезонной эксплуатации.

Найденные коэффициенты сопротивления труб подставляли в модель гидравлического расчета, а значения давления и расхода теплоносителя в теплообменных пунктах вычисляли классическим методом. Затем полученные значения сопоставля-

	÷	-		-	-		
Номер трубы	Коэффициент сопротивления, Па/(т/ч) ²						
1	0.003689	28	0.073692	55	0.089378	82	0.020378
2	0.004346	29	3.792816	56	0.892681	83	0.012798
3	0.503278	30	0.013672	57	1.629742	84	33.328468
4	0.022345	31	1.035482	58	1.926731	85	0.005332
5	3.378645	32	0.015387	59	0.629631	86	3.438924
6	0.036478	33	0.218683	60	0.467539	87	0.018342
7	0.057383	34	18.286421	61	0.008237	88	7.723749
8	0.473292	35	0.085268	62	0.045726	89	0.012783
9	0.093792	36	8.032687	63	0.893668	90	12.346385
10	0.080367	37	0.782642	64	0.147836	91	0.014386
11	0.047632	38	1.002684	65	0.029632	92	0.853682
12	4.583028	39	0.271246	66	0.873467	93	58.389235
13	0.103784	40	1.602784	67	0.031729	94	3.238453
14	4.33682	41	0.943682	68	0.000472	95	0.014683
15	2.031785	42	0.573892	69	2.629731	96	0.527836
16	0.128968	43	0.682526	70	0.002578	97	1.027842
17	0.349862	44	0.217867	71	0.003247	98	2.468738
18	3.196843	45	0.528631	72	0.024671	99	0.013289
19	23.167523	46	2.297683	73	0.003375	100	0.032867
20	0.058673	47	0.047921	74	0.492792	101	4.189682
21	1.212468	48	1.572912	75	0.000287	102	0.024531
22	0.005317	49	1.539721	76	1.435721	103	0.084397
23	2.354721	50	19.326812	77	0.000321	104	0.063896
24	0.003416	51	0.138962	78	0.538926	105	1.537849
25	0.147867	52	1.237896	79	0.000831	106	0.173684
26	0.004731	53	0.092631	80	0.028937	107	1.532987
27	2.937107	54	0.326815	81	4.279153	108	0.592368
				1		1	

Таблица 2. Результаты идентификации коэффициентов гидравлического сопротивления тепловой сети



Рис. 4. Статистическая диаграмма – распределение отклонений результатов идентификации коэффициентов сопротивления от расчетных значений



Рис. 5. Статистическая диаграмма – распределение отклонений по трем выборкам данных (I, II, III) о работе теплосети

ли с фактическими данными мониторинга. Абсолютное значение относительной погрешности вычисляли по формуле

$$\delta = \left(0.5 \left| \frac{p_1 - p_0}{p_0} \right| + 0.5 \left| \frac{q_1 - q_0}{q_0} \right| \right) \times 100\%, \tag{8}$$

где p_1 , p_0 — расчетное и истинное давление; q_1 , q_0 — расчетный и истинный расход теплоносителя.

Найденную погрешность можно считать погрешностью определения коэффициентов сопротивления теплосети с помощью DEA. Результаты оценки δ представлены на рис. 5.

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА № 6 2024

выводы

1. Алгоритм дифференциальной эволюции (DEA) позволяет найти среди множества приемлемых решений то, которое не противоречит данным фактических измерений. Результаты идентификации модели были проверены для трех различных условий эксплуатации теплосети. Как итог, относительная погрешность всех идентифицированных коэффициентов сопротивления трубопровода находилась в пределах 10%, причем для 98% идентифицированных значений она составляла менее 5%. При применении DEA для определения коэффициентов сопротивления теплосети были получены хорошие результаты, что полностью соответствует требованиям, предъявляемым к подобным расчетам.

2. Значения коэффициентов сопротивления трубопроводов получают путем обработки и анализа данных мониторинга работы теплообменных пунктов, тепловых станций и трубопроводной сети. Среднее время вычислений с помощью DEA не превышает 15 мин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Direct inversion algorithm for pipe resistance coefficient calibration of water distribution systems / K. Du, R. Ding, Z. Wang, Z. Song, B. Xu, M. Zhou, Y. Bai, J. Zhang // J. Water Resour. Planning Manage. 2018. V. 144. Is. 7.

https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000948

- 2. Kanning W., Calle E.O.F. Derivation of a representative piping resistance parameter based on random field modelling of erosion paths // Georisk: Assess. Manage. Risk Eng. Syst. Geohazards. 2013. V. 7. Is. 2. P. 99–109. https://doi.org/10.1080/17499518.2013.790735
- Merenkov A., Novitsky N., Sidler V. Direct and inverse problems of flow distribution in hydraulic // Soviet Technol. Rev. Sec. Energy Rev. 1994. Is. 7. Part 4. P. 33–95.
- Zhou X.Q. Resistance coefficient identification of heating network based on improved genetic algorithm: thesis for the degree of a master of technical sciences. Beijing University of Technology, 2020. https://doi.org/10.26935/d.cnki.gbjgu.2020.000413
- Pipe resistance coefficient identification of water distribution system based on prior information / G.H. Ren, K. Du, L. He, B.F. Xu, Y. Du // J. Civ. Environ. Eng. 2018. V. 40. Is. 2. P. 46–52.
- 6. **Resistance** characteristic identification and estimation of water networks based on bayesian method / Y. Liu, H. Jin, P. Luo, C.H. Zhan // Build. Sci. 2018. V. 34. Is. 8. P. 89–93.
 - https://doi.org/10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2018.08.14
- 7. Liu Y.X. Pipe friction parameters identification of heatsupply networks based on matrix theory: thesis for the degree of a doctor of technical sciences. Harbin Institute of Technology, 2011.
- 8. **Du Q.T.** Pipe friction parameters identification and the multiple hydraulic conditions analysis of heat-supply networks: thesis for the degree of a master of technical sciences. Harbin Institute of Technology, 2013.

- Oil pipeline hydraulic resistance coefficient identification / T. Bekibayev, U. Zhapbasbayev, G. Ramazanova, D. Bossinov // Cogent Eng. 2021. V. 8. Is. 1. P. 1950303. https://doi.org/10.1080/23311916.2021.1950303
- Aida-Zade K.R., Kuliev S.Z. Hydraulic resistance coefficient identification in pipelines // Automation and Remote Control. 2016. V. 77. P. 1225–1239. https://doi.org/10.1134/S0005117916070092
- 11. **Wang J.D.** Pipe flow-resistance characteristic coefficient identification using genetic optimization: thesis for the degree of a master of technical sciences. Harbin Institute of Technology, 2015.
- Liu Y.X., Zou P.H., Ma Y.X. Identification of pipe resistance coefficients in water distribution system based on genetic algorithm // China Water & Wastewater. 2014. V. 30. Is. 23. P. 113–116.
- Identification of resistance coefficient of thermal network based on genetic algorithm / F.X. Zhang, L.X. Wu, H.B. Liang, Z.H. Ge // J. Eng. Therm. Energy Power. 2020. V. 35. Is. 1. P. 23–29.
- Song S., Wang S., He S. Optimized identification of resistance coefficient for heating pipe network based on genetic annealing hybrid algorithm // Shanxi Archit. 2017. V. 43. Is. 29. P. 127–128. https://doi.org/10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2017.29.071
- 15. **Zhao Q.** Modeling simulation and operational optimization control of smart city heating system: thesis for the degree of a doctor of technical sciences. Zhejiang University, 2017.
- 16. Иродов В.Ф., Чернойван А. А. Идентификация параметров водяных систем отопления в условиях эксплуатации как составная часть инвестиционного проекта // Строительство, материаловедение, машиностроение. 2016. Вып. 92. С. 62–66.
- Алгоритмы эволюционного поиска в задачах идентификации параметров водяных систем отопления / Д.Е. Богомолов, В.Ф. Иродов, О.А. Левкович, А.А. Чернойван // Строительство, материаловедение, машиностроение. 2017. Вып. 101. С. 54–59.
- Storn R., Price K. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces // J. Global Optim. 1995. V. 23. Is. 1.
- Li S., Zeng M. Research on dispatch of distributed generation systems based on improved differential evolution algorithm // J. Guangxi University (Natural Sci. Ed.). 2014. V. 39. Is. 5. P. 1034–1043. https://doi.org/10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2014.05.021
- Wang S., Zhi T.-S., Shi J.-Q. Application of self-adaptive differential evolution algorithm in speed control of gas turbine // Reneng Dongli Gongcheng /J. Eng. Therm. Energy Power. 2018. V. 33. Is. 10. P. 28–34. https://doi.org/10.16146/j.cnki.rndlgc.2018.10.005
- 21. **Chen Q.H.** Modeling and application analysis of hydraulic calculation for heat-supply network: thesis for the degree of a master of technical sciences. North China Electric Power University, 2017.
- Dynamic modeling of thermal conditions for hot-water district-heating networks / S. Zhou, M. Tian, Y. Zhao, M. Guo // J. Hydrodyn. Ser. B. 2014. V. 26. Is. 4. P. 531–537.

https://doi.org/10.1016/S1001-6058(14)60060-3

 Проектная документация по строительству городских теплосетей, изданная Министерством жилищного строительства и развития городов и сельских районов КНР. 2010 (СЈЈ 34-2010).

Application Research of Differential Evolution Algoritm in Resistance Coefficient Identification of Heating Pipeline

Bingwen Zhao^{a, b}, Ruxue Yan^{b, *}, Yu Jin^c, and Hanyu Zheng^b

^a Keyi College of Zhejiang Sci-Tech University, Shaoxing, 312369 China
^b College of Architectural Engineering of Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou, 310018 China
^c Shanghai Linxiang Environmental Protection Corporation, Shanghai, 200232 China
*e-mail: 1305128799@qq.com

Abstract—The district heating system is an important heating mode in the northern cities of China. In recent vears, the scale of the district heating system is expanding day by day, the pipe network structure is more and more complex. The problem of hydraulic imbalance of the pipe network is gradually emerging, therefore, it is urgent to establish an accurate and perfect hydraulic simulation model of heating network to assist operation management. Pipe network simulation modeling is one of the important prerequisites to solve the hydraulic imbalance problem of heating pipe network. However, with the increase of service time, the actual resistance coefficient of heating network becomes difficult to obtain, which is one of the key reasons for the low accuracy of pipe network simulation model. In order to overcome this difficulty, this paper proposes to use the resistance coefficient identification model based on the differential evolution algorithm (DEA) to identify the resistance coefficient of the heating pipe network. Based on graph theory, network matrix and the law of conservation of mass, the hydraulic model of the heating pipe network is built, and the nodal pressure method is used to solve the model. On the basis of comprehensive consideration of the mainstream intelligent algorithm, the differential evolution method is selected as the algorithm to identify the resistance coefficient of pipeline. In order to verify the identification effect, the feasibility of the model was verified by calculating the data of three different operating conditions of the practical engineering named "K district heating system". The results demonstrated that the relative errors of the identified resistance coefficients are all within 10%, and 98% of the identified values are less than 5%.

Keywords: district heating, differential evolution algorithm, identification of resistance coefficient, pipeline hydraulic model, optimization design