

Член-корреспондент АН СССР В. В. КАФАРОВ, В. Л. ПЕРОВ,
В. И. МЕШАЛКИН, А. Н. КАЛМЫКОВ

МЕТОД СИНТЕЗА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ХТС НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПОВ ДЕКОМПОЗИЦИИ И ОБУЧЕНИЯ

Предлагается декомпозиционно-эвристический метод синтеза однородных функциональных подсистем ХТС, которые состоят из элементов одного типа (например, тепловые подсистемы, подсистемы многокомпонентной ректификации, многокомпонентной экстракции и т. д.). Постановка задачи синтеза однородной функциональной подсистемы ХТС имеет следующий вид ⁽¹⁾: при заданном типе элементов подсистемы необходимо определить топологию технологических связей между этими элементами и выбрать такие параметры элементов, которые обеспечивают оптимальность показателя эффективности функционирования подсистемы или целевой функции — Ψ .

В основу предлагаемого метода синтеза положено использование наборов эвристических правил предпочтения для выбора стратегии декомпозиции исходной задачи синтеза и создание алгоритма обучения оптимальной стратегии декомпозиции с использованием принципов обучения ⁽²⁾. Для выбора множества переменных декомпозиции используем следующее эвристическое правило. На каждом уровне декомпозиции исходной задачи синтеза подзадачи синтеза выбираем таким образом, чтобы по крайней мере для одной из них можно было найти решение в виде некоторого технологического аппарата (например, теплообменника).

Наборы эвристических правил предпочтения для выбора стратегии декомпозиции при синтезе конкретных подсистем могут быть получены путем анализа опыта проектировщиков — технологов по разработке технологических схем ХТС. Рассмотрим, например, эвристики, которые могут быть использованы при синтезе тепловых подсистем. Из имеющегося множества R вариантов теплообмена между потоками:

1. Выбрать вариант теплообмена между потоками i и j , для которых

$$t_i^n = \max_k t_k^n, \quad k=1, \dots, N;$$

и

$$t_j^n = \max_l t_l^n, \quad l=1, \dots, M,$$

где i — горячий поток ($i=1, \dots, N$); j — холодный поток ($j=1, \dots, M$); $t_{(ij)}^n$ — начальная температура потока $i(j)$;

2. Выбрать вариант теплообмена, который обеспечивает Q_{ij} такое, что

$$Q_{ij} = \max_r Q_{(ij)r}, \quad r=1, \dots, R,$$

где Q_{ij} — количество рекуперированного тепла в результате операции теплообмена между потоками i и j .

3. Выбрать такой вариант теплообмена, чтобы получаемые результирующие потоки удовлетворяли следующему условию (считая, что Ψ является приведенными затратами):

$$\Pi_{рез}^n = \min_r \Pi_{резr}^n, \quad r=1, \dots, R,$$

где $\Pi_{рез}^{\pi}$ — величина приведенных затрат на изменение теплосодержания потоков, получившихся в результате операции теплообмена, с помощью дополнительных тепло- и хладоагентов для достижения заданных конечных температур.

4. Выбрать вариант теплообмена, исходя из условия:

$$\Pi_{ij}^{\pi} = \max_r \Pi_{(ij)r}^{\pi}, \quad r=1, \dots, R,$$

где Π_{ij}^{π} — величина приведенных затрат на изменение теплосодержания i -го и j -го потоков за счет использования дополнительных тепло- и хладоагентов для достижения заданных конечных температур.

5. Выбрать вариант теплообмена произвольно.

Каждое эвристическое правило предпочтения или эвристику из определенного, заранее составленного набора оценивают с помощью весового коэффициента v . В общем случае для множества I эвристических правил вероятность выбора i -го правила ($i \in I$) для определения стратегии синтеза на j -ом уровне декомпозиции p_{ij} равна:

$$p_{ij} = v_{ij} / \sum_{h=1}^q v_{hj}, \quad (1)$$

где v_{ij} — весовой коэффициент i -ой эвристики на j -ом уровне декомпозиции; $q = |I|$ — мощность множества эвристических правил на j -ом уровне декомпозиции.

Выбор эвристик из множества I на каждом этапе синтеза осуществляют по методу Монте-Карло⁽³⁾.

На каждом этапе декомпозиционно-эвристического метода синтеза подразумевается одновременное осуществление двух стадий: 1) стадии логического синтеза типовой подсистемы методом декомпозиции и 2) стадии обучения выбору оптимальной стратегии декомпозиции с использованием алгоритма обучения. Процесс логического синтеза подсистемы состоит из серии попыток синтеза методом декомпозиции. В результате каждой попытки синтеза получают вариант технологической топологии подсистемы, характеризующийся определенным значением Ψ .

Процесс обучения выбору оптимальной стратегии декомпозиции позволяет за счет обработки текущей информации о результатах предыдущих попыток синтеза достичь цели обучения, т. е. восполнить недостаток начальной априорной информации об оптимальных значениях весовых коэффициентов используемых эвристик. Цель обучения можно представить в виде экстремума некоторого функционала вектора-критерия достижения цели обучения⁽²⁾

$$J(\bar{V}) = \int_{\Psi} D(\Psi, \bar{V})(\Psi) d\Psi = M_{\Psi} \{D(\Psi, \bar{V})\}, \quad (3)$$

где $D(\Psi, \bar{V})$ — некоторая заранее заданная выпуклая функция; Ψ — критерий эффективности, численное значение которого является случайной величиной с плотностью распределения, равной $w(\Psi)$; $\bar{V} = \{v_1, v_2, \dots, v_s\}$ — вектор весовых коэффициентов правил предпочтения для s -уровневой декомпозиции исходной задачи синтеза, причем $v_j \in \bar{V}_j$, $j=1, \dots, s$; M_{Ψ} — математическое ожидание.

При недостатке априорной информации, т. е. при отсутствии $w(\Psi)$, уравнение, определяющее $\bar{V} = \bar{V}^*$, при котором $J(\bar{V})$ достигает экстремума, имеет вид

$$M_{\Psi} \{ \text{grad } D(\Psi, \bar{V}) \} = 0, \quad (3)$$

где градиент

$$\text{grad}_{\bar{V}} D(\Psi, \bar{V}) = \left\{ \frac{\partial D(\Psi, \bar{V})}{\partial v_1}; \dots; \frac{\partial D(\Psi, \bar{V})}{\partial v_s} \right\} \quad (4)$$

случаен. Задача состоит в том, чтобы, пользуясь реализациями случайного градиента, определить \bar{V}^* , удовлетворяющее условию (3). Так как в рассматриваемом случае поступление реализаций Ψ является дискретным по времени, то для решения задачи обучения применим дискретный алгоритм обучения (2)

$$\bar{V}_n = \bar{V}_{n-1} - [A_n] \cdot \underset{\bar{V}}{\text{grad}} D(\Psi_n, \bar{V}_{n-1}) \quad \text{при} \quad \bar{V}_{n=0} = \bar{V}_0, \quad (5)$$

где $[A_n]$ — квадратная диагональная матрица порядка s , где $s = f(n)$ — число уровней декомпозиции исходной задачи на n -ой попытке синтеза.

Элементы матрицы $[A_n]$ определяют следующим образом:

$$a_{ij} = \begin{cases} \Delta v & \text{при } i=j, \\ 0 & \text{при } i \neq j. \end{cases} \quad (6)$$

Величина Δv в общем случае может меняться в процессе решения задачи синтеза.

Вектор $\bar{V}_n = \{v_{1n}, \dots, v_{sn}\}$ на каждой n -ой попытке синтеза составляют из весовых коэффициентов правил предпочтения, которые были выбраны для определения стратегии декомпозиции на этой попытке синтеза. На данном этапе разработки методов обучения для решения задач синтеза ХТС аналитический вид функции $D(\Psi, \bar{V})$ неизвестен. Поэтому, считая $\text{opt } \Psi = \min_{\bar{V}} \Psi$, зададим $\underset{\bar{V}}{\text{grad}} D(\Psi, \bar{V})$ в виде:

$$\underset{\bar{V}}{\text{grad}} D(\Psi, \bar{V}) = \begin{cases} -1, & \text{если } \Psi_n < \Psi', \\ +1, & \text{если } \Psi_n \geq \Psi', \end{cases} \quad (7)$$

где $\Psi' = \min_l \Psi_l, l=1, \dots, n-1$.

Допущение (7) не позволяет использовать условие (3) как критерий завершения процесса обучения оптимальной стратегии декомпозиции исходной задачи синтеза и, следовательно, процесса синтеза функциональной подсистемы. Поэтому оптимальной технологической топологией G^* синтезируемой тепловой подсистемы будем называть такую топологию, для которой имеет место:

$$Z = (\exists \Psi(G^*)) [\Psi(G^*) \leq \Psi(G_i)], \quad i=1, \dots, y, \quad (8)$$

где $y = |Y|$ — мощность конечного множества попыток синтеза Y .

Разработанный декомпозиционно-эвристический алгоритм синтеза включает в себя следующие операции:

1. Ввести исходные данные для решения задачи синтеза функциональной подсистемы.
2. Определить величины $p_i, i=1, \dots, g; j=1, \dots, s$.
3. С помощью генератора случайных чисел выбрать эвристику.
4. Осуществить этап декомпозиции исходной задачи синтеза.
5. Операции 3 и 4 повторять до тех пор, пока не будет синтезирована вся подсистема.
6. Определить величину Ψ для синтезированного варианта подсистемы.
7. Если $\Psi < \Psi'$, то перейти к операции 8, в противном случае — к операции 9.
8. Запомнить синтезированный вариант технологической топологии; $\Psi \rightarrow \Psi'$.
9. Реализовать алгоритм обучения выбору оптимальной стратегии декомпозиции.
10. Операции 1—9 повторять до тех пор, пока не будет проведено достаточное число попыток синтеза.

Предложенный декомпозиционно-эвристический метод синтеза одноуровневых функциональных подсистем ХТС является принципиально новым.

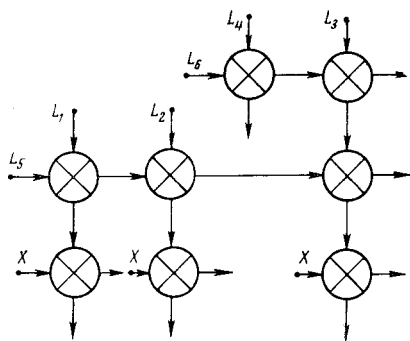


Рис. 1

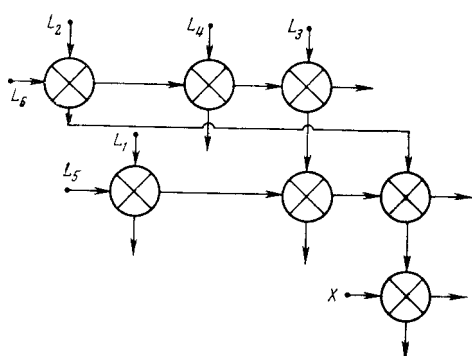


Рис. 2

Рис. 1. Операторная схема исходного проектного варианта тепловой подсистемы. L_i ($i=1, \dots, 4$) — холодные технологические потоки; L_j ($j=5, 6$) — горячие технологические потоки; X — охлаждающая вода

Рис. 2. Операторная схема оптимального варианта тепловой подсистемы

Впервые для решения задачи синтеза ХТС разработан обучающийся алгоритм, позволяющий автоматизировать процесс обучения выбору оптимальной стратегии декомпозиции исходной задачи синтеза.

С помощью предложенного метода был проведен синтез тепловой подсистемы некоторой ХТС, исходный проектный вариант которой показан на рис. 1. Для осуществления декомпозиции исходной задачи синтеза применялась топологическая матрица $[B_n]$, которая в конце каждой попытки синтеза определяла собой один из вариантов технологической топологии тепловой подсистемы. Топологическая матрица $[B_n]$, соответствующая оптимальному варианту искомой технологической топологии, имеет вид

$$[B_n] = [b_{(n)ij}] = \begin{matrix} & L_1 & L_2 & L_3 & L_4 & H \\ L_5 & \begin{bmatrix} 3 & 6 & 5 & 0 & 0 \end{bmatrix} \\ L_6 & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 4 & 2 & 0 \end{bmatrix} \\ X & \begin{bmatrix} 0 & 7 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix},$$

$b_{(n)ij}=h$ — номеру этапа декомпозиции исходной задачи синтеза, на котором был выбран вариант теплообмена между исходными потоками i и j (или потоками, получившимися из этих исходных потоков в результате предыдущих операций теплообмена), где $i=1, \dots, 5$ — номера горячих исходных потоков, включая операцию нагрева в трубчатой печи; $j=1, \dots, 3$ — номера холодных истоков, включая X — охлаждающую воду.

Операторная схема оптимального, синтезированного варианта подсистемы показана на рис. 2. Оптимальный вариант тепловой подсистемы позволяет повысить степень рекуперации тепла в ХТС на 7% по сравнению с исходным проектным вариантом.

Московский химико-технологический институт
им. Д. И. Менделеева

Поступило
24 VI 1974

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ В. В. Кафаров, В. Л. Перов, В. П. Мешалкин, Принципы математического моделирования химико-технологических систем, М., 1974. ² Я. З. Цыпкин, Автоматика и телемеханика, № 4, 55 (1970). ³ С. М. Ермаков, Метод Монте-Карло и смежные вопросы, «Наука», 1971.