

УДК 519:24:62-50

© Н.Д. Кошевой, Е.М. Костенко, А.С. Чуйко

ОПТИМИЗАЦИЯ КОМБИНАТОРНЫХ ПЛАНОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для повышения эффективности экспериментальных исследований рассмотрены алгоритмические и программные средства оптимизации комбинаторных планов экспериментов. Проведено сравнение оптимальных планов получаемых программным обеспечением с использованием метода ветвей и границ и метода последовательного приближения. На основании полученных результатов были даны рекомендации по применению программ оптимизации комбинаторных.

Для підвищення ефективності експериментальних досліджень розглянуті алгоритмічні і програмні засоби оптимізації комбінаторних планів експерименту. Проведено порівняння оптимальних планів отриманих за допомогою програмного забезпечення з використанням методу гілок та меж і методу послідовного наближення. На основі отриманих результатів були дані рекомендації по використанню програм оптимізації комбінаторних планів.

To increase the effectiveness of experimental studies examined the algorithmic and software tools of combinatorial optimization designs of experiments. A comparison of optimal designs obtained by the software using branch and bound method and the method of successive approximation. Recommendations were made on the application of combinatorial optimization programs using obtained results.

Постановка проблемы. При решении задач исследования различных технологических процессов и систем возникает проблема получения математических моделей указанных объектов. Для этого зачастую целесообразно использование методов планирования эксперимента, которые позволяют сформировать план его проведения. Однако, по мере роста сложности исследуемых процессов и приборов значительно возрастают затраты на проведение экспериментов. Поэтому при исследовании дорогостоящих или длительных процессов целесообразно оптимизировать план эксперимента.

Анализ последних исследований и публикаций. Для решения этой задачи было разработано алгоритмическое и программное обеспечение, основанное на использовании метода ветвей и границ [1] и метода последовательного приближения [2]. Так в работе [3] разработан алгоритм оптимизации планов проведения эксперимента, основанный на использовании метода ветвей и границ. При этом в качестве критериев оптимизации применялись критерий минимальной стоимости реализации эксперимента и наименьшей длительности его проведения

$$S_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j} \rightarrow \min, \quad (1)$$

или

$$t_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где $S_{i,j}$ – стоимость установки i -го фактора в j -ом опыте; $t_{i,j}$ – время установки i -го фактора в j -ом опыте; k – количество факторов; n – количество опытов.

Кроме того, данный метод был применен в работе [4] для двухпараметрической оптимизации планов экспериментов. Оптимизация плана эксперимента осуществляется по стоимостным или временным затратам на реализацию эксперимента с ограничением на длительность или стоимость его проведения соответственно

$$S_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k S_{i,j} \rightarrow \min \text{ при } t_0 \leq t_{\text{огр.}}, \quad (3)$$

или

$$t_0 = \sum_{j=2}^n \sum_{i=1}^k t_{i,j} \rightarrow \min \text{ при } S_0 \leq S_{\text{огр.}}, \quad (4)$$

где t_0 - суммарное время проведения эксперимента; $t_{\text{огр.}}$ - ограничение на суммарное время проведения эксперимента; $S_{\text{огр.}}$ - ограничение на суммарную стоимость проведения эксперимента.

Также метод ветвей и границ был применен для двухпараметрической оптимизации планов эксперимента [5], где в качестве критерия оптимизации использовалась формула

$$\sum \frac{S_{i \rightarrow j} \cdot K_1}{N_1} + \sum \frac{t_{i \rightarrow j} \cdot K_2}{N_2} \rightarrow \min, \quad (5)$$

где K_1, K_2 – весовые коэффициенты для стоимостного и временного параметра оптимизации соответственно; N_1, N_2 – нормирующие значения для стоимостного и временного параметра оптимизации соответственно; $t_{i \rightarrow j}$ – время перехода из i -го эксперимента в j -ый; $S_{i \rightarrow j}$ – время перехода из i -го эксперимента в j -ый.

Нормирующие значения определяются следующим образом

$$\begin{aligned} N_1 &= \max \{S_{1 \rightarrow 2}, S_{1 \rightarrow 3}, \dots, S_{2 \rightarrow 1}, S_{2 \rightarrow 3}, \dots, S_{i \rightarrow j}, \dots, S_{n-1 \rightarrow n}, V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_n\}; \\ N_2 &= \max \{t_{1 \rightarrow 2}, t_{1 \rightarrow 3}, \dots, t_{2 \rightarrow 1}, t_{2 \rightarrow 3}, \dots, t_{i \rightarrow j}, \dots, t_{n-1 \rightarrow n}, T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_n\}. \end{aligned} \quad (6)$$

В этой работе указано, что весовые коэффициенты K_1, K_2 позволяют варьировать значимость соответствующего параметра оптимизации: чем выше значение весового коэффициента, тем выше значимость соответствующего параметра оптимизации.

В статье [6] приведен алгоритм однофакторной оптимизации планов проведения экспериментов, использующий метод последовательного приближения. Оптимизация проводилась с использованием критериев 1 и 2.

На основе метода последовательного приближения также был разработан алгоритм [7] двухпараметрической оптимизации композиционных планов, использующий критерий (5).

Цель статьи: провести сравнительный анализ существующих методов оптимизации планов эксперимента и дать рекомендации по их применению.

Основные результаты исследований. В работе [3] для исследования полупроводникового терморегулятора (задача 1) с использованием алгоритма, реализующего оптимизацию методом ветвей и границ, получен оптимальный по стоимости план ротатбельного центрального композиционного планирования (РЦКП).

Кроме того, для этой задачи в работе [4] был получен ряд оптимальных по стоимости планов с ограничением на время реализации эксперимента. С использованием программы, реализующей оптимизацию планов экспериментов методом последовательного приближения, синтезирован оптимальный по стоимости план РЦКП (табл. 1).

Таблица 1

Оптимальные планы (Задача 1 и 2)

Оптимальный план (Задача 1)					Оптимальный план (Задача 2)		
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов	
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₁	X ₂
1	-1	-1	-1	-1	5	- α	0
2	+1	-1	-1	-1	10	0	0
3	-1	+1	-1	-1	11	0	0
4	+1	+1	-1	-1	13	0	0
5	-1	-1	+1	-1	12	0	0
6	+1	-1	+1	-1	9	0	0
7	-1	+1	+1	-1	6	+ α	0
8	+1	+1	+1	-1	3	+1	-1
9	-1	-1	-1	+1	1	-1	-1
10	+1	-1	-1	+1	7	0	- α
11	-1	+1	-1	+1			
12	+1	+1	-1	+1			
13	-1	-1	+1	+1			
14	+1	-1	+1	+1			
15	-1	+1	+1	+1			
16	+1	+1	+1	+1			
17	- α	0	0	0			
18	+ α	0	0	0			
19	0	- α	0	0			
20	0	+ α	0	0			
21	0	0	- α	0			
22	0	0	+ α	0			
23	0	0	0	- α			
24	0	0	0	+ α			
25	0	0	0	0			
26	0	0	0	0			
27	0	0	0	0			
28	0	0	0	0			
29	0	0	0	0			
30	0	0	0	0			
31	0	0	0	0			

В таблице 2 приведен сравнительный анализ полученных результатов оптимизации плана РЦКП различными алгоритмами.

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 1)

Метод	Метод ветвей и границ				Метод последовательного приближения
	План 1	План 2	План 3	План 4	
Результат, усл. ед.	134,9	135,2	136,3	226,9	135,7
Время реализации эксперимента	1161	1061,8	991,7	899	1001,7
Ограничение по времени, мин.	–	1100	1000	900	–
Выигрыш	4,20	4,19	4,15	2,5	4,17
Время решения, с	7	7	7	7	меньше 1
Объем памяти ЭВМ, МБ	140	145	145	145	14

Также в работе [3] проведена оптимизация исследования процесса травления кристаллов в производстве полупроводниковых приборов (задача 2). В результате был получен оптимальный по стоимости план проведения эксперимента. Кроме того оптимизация этого исследования была проведена с использованием алгоритма последовательного приближения. Полученный план приведен в таблице 1. Сравнительный анализ полученных результатов приведен в таблице 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 2 и 3)

Метод	Метод последовательного приближения (задача 2)	Метод ветвей и границ (задача 2)	Метод последовательного приближения (задача 3)	Метод ветвей и границ (задача 3)
Результат	46,7	46,7	8556,2	8556,2
Выигрыш	3,06	3,06	1,73	1,73
Время решения, с	меньше 1	меньше 1	меньше 1	8
Объем памяти ЭВМ, МБ	13,3	40,4	16,6	156

В работе [8] был синтезирован оптимальный по времени реализации план исследования работы оператора на пульте управления сложной радиоэлектрон-

ной системы (задача 3). Синтез проводился с использованием алгоритма, реализующего метод ветвей и границ. Аналогично был получен оптимальный план с использованием алгоритма, основанного на методе последовательного приближения (таблица 4).

Таблица 4

Оптимальный планы (Задача 3 и 5)

Оптимальный план (Задача 3)						Оптимальный план (Задача 5)					
Номер опыта	Обозначение факторов					Номер опыта	Обозначение факторов				
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅ =X ₁ X ₂ X ₃ X ₄		X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
24	0	0	0	+a	0	4	-1	-1	+1	+1	+1
23	0	0	0	-a	0	8	+1	0	+1	+1	+1
19	0	-a	0	0	0	13	+1	-1	+1	+1	-1
20	0	+a	0	0	0	10	-1	0	+1	+1	-1
21	0	0	-a	0	0	1	-1	-1	+1	-1	-1
22	0	0	+a	0	0	11	+1	0	+1	-1	-1
28	0	0	0	0	0	5	+1	+1	+1	-1	-1
29	0	0	0	0	0	7	-1	+1	+1	-1	+1
31	0	0	0	0	0	14	+1	-1	+1	-1	+1
32	0	0	0	0	0	12	-1	-1	-1	-1	+1
27	0	0	0	0	0	15	+1	-1	-1	+1	+1
30	0	0	0	0	0	17	-1	-1	-1	+1	-1
17	-a	0	0	0	0	2	-1	-1	-1	+1	-1
18	+a	0	0	0	0	9	+1	-1	-1	-1	-1
26	0	0	0	0	+a	6	-1	+1	-1	-1	-1
25	0	0	0	0	-a	16	+1	+1	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	-1	3	-1	+1	-1	+1	+1
15	+1	-1	-1	-1	-1	18	+1	+1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1	-1						
12	-1	-1	+1	-1	-1						
10	-1	+1	+1	-1	+1						
11	+1	-1	+1	-1	+1						
13	+1	+1	-1	-1	+1						
16	-1	-1	-1	-1	+1						
6	-1	+1	-1	+1	+1						
7	+1	-1	-1	+1	+1						
1	+1	+1	+1	+1	+1						
4	-1	-1	+1	+1	+1						
2	-1	+1	+1	+1	-1						
3	+1	-1	+1	+1	-1						
5	+1	+1	-1	+1	-1						
8	-1	-1	-1	+1	-1						

В работе [7] была проведена оптимизация моделирования процесса получения пористых материалов (задача 4) с использованием программного обеспечения основанного на использовании метода ветвей и границ и метода последовательного приближения. Оптимизация проводилась с использованием критериев 1, 2 и 5 (с различными весовыми коэффициентами). Полученные результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 2)

Критерий оптимизации	Метод ветвей и границ		Метод последовательного приближения	
	B_s	B_i	B_s	B_i
Формула (1)	5,47	7,33	5,47	7,24
Формула (2)	3,54	12,58	3,54	12,34
Формула (5) при $K_1=1, K_2=1$	4,36	11,79	4,29	12
Формула (5) при $K_1=2, K_2=1$	5,46	7,33	5,46	7,17
Формула (5) при $K_1=1, K_2=2$	4,29	12,23	4,35	11,37

В работе [6] были получены оптимальные по стоимости реализации планы проведения экспериментов по исследованию технологического процесса получения попкорна (задача 5). Планы были получены с использованием методов последовательного приближения и метода ветвей и границ. В работе [5] для этого же исследования были синтезированы оптимальный по критерию (5) план эксперимента, а также оптимальный по стоимости план с ограничением на время реализации эксперимента. Кроме того, с использованием программы, реализующей оптимизацию планов экспериментов методом последовательного приближения, синтезирован оптимальный по критерию (5) план эксперимента (табл. 4).

В таблице 6 приведен сравнительный анализ полученных результатов оптимизации плана эксперимента различными алгоритмами.

Таблица 6

Сравнительный анализ результатов оптимизации (Задача 5)

Метод	Метод ветвей и границ			Метод последовательного приближения	
	План 1	План 2	План 3	План 1	План 2
Результат, усл. ед.	20,6	24,65	30,81	21,36	33,45
Время реализации эксперимент	70	60	38	78	42
Ограничение по времени, мин.	–	60	–	–	–
K1	–	–	1	–	1
K2	–	–	1	–	1
Выигрыш по стоимости	3,48	2,91	2,33	3,36	2,14
Выигрыш по времени	1,37	1,6	2,53	1,23	2,28
Время решения, с	2	2	2	меньше 1	меньше 1
Объем памяти ЭВМ, МБ	150	156	156	13,5	14,5

Выводы. Применение алгоритмов оптимизации планов экспериментов, основанных на методе ветвей и границ и методе последовательного приближения, позволяет значительно сократить затраты на проведение экспериментов, а также снизить длительность их проведение. Из таблиц 2, 3, 5, 6 видно, что алгоритм, основанный на методе ветвей и границ, позволяет получать несколько большие выигрыши, однако при этом требует существенно больших объемов памяти ЭВМ, а также времени на решение. Кроме того, результаты полученные в работах [4, 5, 7] показывают возможность применения метода ветвей и границ и метода последовательного приближения для двухпараметрической оптимизации планов проведения экспериментов. На основании полученных результатов можно дать следующие рекомендации по оптимизации планов проведения экспериментов.

1. При исследовании дорогостоящих или длительных процессов целесообразно проводить оптимизацию, используя алгоритмы, основанные на методах ветвей и границ и последовательного приближения, с применением критериев 1 или 2 соответственно. При этом метод ветвей и границ позволяет получать большие выигрыши, однако затрачивает при этом значительно больше оперативной памяти компьютера и времени на оптимизацию.

2. В случаях, когда существует ограничение на стоимость или длительность проведения эксперимента, целесообразно применять алгоритм, основанный на методе ветвей и границ, с использованием критериев 4 и 3 соответственно. Алгоритма, основанного на методе последовательного приближения, для этого случая не разработано.

3. В случае, когда важно и время, и стоимость реализации эксперимента целесообразно применять оптимизации с использованием критерия 5. При этом весовые коэффициенты позволяют варьировать значимостью соответствующих параметров оптимизации. Оптимизацию можно проводить как с использованием метода ветвей и границ, так и с использованием метода последовательного приближения.

Дальнейшие исследования будут направлены на развитие алгоритмического и программного обеспечения оптимизации планов экспериментов.

Список литературы

1. Филлипс Д., Гарсиа-Диас А. Методы анализа сетей: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
2. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Метод последовательного приближения для решения задачи коммивояжера // Математичне моделювання. – 2012. – №1. – С. 58-61.
3. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2010. – Вип.25. – С. 95-101.
4. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Применение метода ветвей и границ для двухпараметрической оптимизации композиционных планов второго порядка// Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету імені Тараса Шевченка. – К.: ВІКНУ, 2011. – Вип. 32. – С. 124-131.
5. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Оптимальне планування експерименту при дослідженні технологічного процесу приготування попкорна в мікрохвильовій печі // Харчова промисловість. – 2011.

6. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Применение методов ветвей и границ и последовательного приближения для оптимизации моделирования процесса получения пористых материалов // Оптимизация производственных процессов. – 2011, Вып. 13, – С. 69-74.
7. Кошевой Н.Д., Костенко Е.М., Чуйко А. С. Алгоритм оптимизации композиционных планов второго порядка методом ветвей и границ // Математичне моделювання. – 2010. – №2(23). – С. 14-18.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Мещеряковим Л.І.
Надійшла до редакції 11.11.13*

УДК 622.73: 004.67:004.9

© Л.И. Мещеряков, В.А. Новодранова, А.В. Прядко

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АНАЛИЗА ДАННЫХ АКУСТИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА СТРУЙНОГО ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ

Проведений аналіз особливостей струменевого подрібнення. Показана можливість застосування акустоемісійного методу для аналізу процесу струменевого подрібнення. Запропонована система аналізу даних акустичного моніторингу струменевого подрібнення.

Проведен анализ особенностей струйного измельчения. Показана возможность применения акустоэмиссионного метода для анализа процесса струйного измельчения. Предложена система анализа данных акустического мониторинга струйного измельчения.

The analysis is conducted of features of the stream growing shallow. Possibility is shown of application of akustoemissionnogo method for the analysis of process of the stream growing shallow. The system is offered of data analysis of the acoustic monitoring of the stream growing shallow.

Перспективним апаратом для здійснення тонкого помолу і одночасного обогачення матеріалів являється пневмоструйна протиточна мельниця. Реалізує в ній спосіб високоскоростного самоизмельчения матеріалів дозволяє підвищити не тільки дисперсність отримуваного продукту, але і удільну продуктивність измельчителя, його енергонапруженність і к.п.д.

Крім того, з'являється можливість реально використовувати переваги високоскоростного вибіркового измельчения багатокомпонентних сумішей матеріалу з отриманням продуктів з заданими властивостями і, що немаловажно, хімічно чистих від шкідливих домішок. Процеси струйного измельчения використовують для підготовки мінерального сиров'язу в горній, хімічній, будівельній промисловості, в виробництві скла, пластмас, порошкової металургії, кераміки, вибухових речовин, твердих палив, лікарської продукції і інших видів тонкодисперсних матеріалів. Такі мельниці мають ще цілий ряд переваг по порівнянню з іншими мельницями струйного типу: простота конструкції; відносно невисокий витрати енергоносія через малу кількість робочих сопел; можливість роботи мельниці в замкнутому циклі.