

Применение метода табу-поиска для оптимизации композиционных планов второго порядка

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

Разработаны метод и программа для оптимизации композиционных планов второго порядка, которые используют при построении квадратичных математических моделей исследуемых объектов. Показана эффективность в сравнении с методом последовательного приближения и методом ветвей и границ.

Ключевые слова: оптимальный план, табу-поиск, оптимизация, планирование эксперимента, стоимость, выигрыш.

Постановка задачи. Экспериментальные методы исследования широко применяют для оптимизации производственных процессов. Одной из главных целей эксперимента является получение максимального количества информации о влиянии исследуемых факторов на производственный процесс, при этом проводя наименьшее число опытов. Далее строится математическая модель исследуемого объекта. При этом получить эти модели необходимо при минимальных стоимостных и временных затратах. Особенно это важно при исследовании длительных и дорогостоящих процессов.

1. Цель статьи. Разработка метода и программного обеспечения для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма табу-поиска и проведение сравнительного анализа разработанного метода с методами ветвей и границ и последовательного приближения.

2. Анализ последних исследований и публикаций. Известно применение методов ветвей и границ [1] и последовательного приближения для оптимизации композиционных планов второго порядка, которые используют при построении квадратичных математических моделей исследуемых объектов, в том числе процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами [2]. Поэтому целесообразно выполнить оптимизацию моделирования процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами методом табу-поиска и провести сравнительный анализ результатов с методом ветвей и границ и последовательного приближения.

3. Основные материалы исследования. Разработан метод и программное обеспечение для оптимизации композиционных планов второго порядка с использованием алгоритма табу-поиска. В работе [3] для выявления влияния характеристик термических режимов обработки на механические свойства обрабатываемого материала строили математическую модель процесса термической обработки пористого материала. В качестве показателей процесса, характеризующих поведение материала при деформации и разрушении от действия внешних нагрузок, были взяты модуль упругости Y_1 и прочность материала Y_2 . В качестве факторов, характеризующих термический режим обработки, были взяты температура термического процесса X_1 , время термического воздействия X_2 , влажность материала X_3 и пористость материала X_4 .

Исходный план ортогонального центрального композиционного планирования (ОЦКП), в соответствии с которым проводили исследование, приведен в табл.1.

Оптимизацию планов многофакторного эксперимента осуществляли с использованием следующих критериев:

1. Суммарная стоимость проведения эксперимента

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

где n – количество опытов;

k – количество факторов;

$S_{i,j}$ – стоимость установки i -го фактора в j -м опыте.

2. Суммарное время проведения эксперимента

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

где $t_{i,j}$ – время установки i -го фактора в j -м опыте.

Таблица 1

Исходный и оптимальные планы ОЦКП

Исходный план					Оптимальный план 1					Оптимальный план 2				
Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов				Номер опыта	Обозначение факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4		X_1	X_2	X_3	X_4
1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1	1	+1	+1	+1	+1
2	-1	+1	+1	+1	2	-1	+1	+1	+1	5	+1	+1	-1	+1
3	+1	-1	+1	+1	6	-1	+1	-1	+1	2	-1	+1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1	8	-1	-1	-1	+1	6	-1	+1	-1	+1
5	+1	+1	-1	+1	7	+1	-1	-1	+1	4	-1	-1	+1	+1
6	-1	+1	-1	+1	5	+1	+1	-1	+1	8	-1	-1	-1	+1
7	+1	-1	-1	+1	4	-1	-1	+1	+1	3	+1	-1	+1	+1
8	-1	-1	-1	+1	3	+1	-1	+1	+1	7	+1	-1	-1	+1
9	+1	+1	+1	-1	17	- α	0	0	0	17	- α	0	0	0
10	-1	+1	+1	-1	24	0	0	0	+ α	23	0	0	0	- α
11	+1	-1	+1	-1	23	0	0	0	- α	24	0	0	0	+ α
12	-1	-1	+1	-1	25	0	0	0	0	20	0	+ α	0	0
13	+1	+1	-1	-1	20	0	+ α	0	0	11	+1	-1	+1	-1
14	-1	+1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1	12	-1	-1	+1	-1
15	+1	-1	-1	-1	18	+ α	0	0	0	15	+1	-1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1	11	+1	-1	+1	-1	16	-1	-1	-1	-1
17	- α	0	0	0	12	-1	-1	+1	-1	22	0	0	+ α	0
18	+ α	0	0	0	9	+1	+1	+1	-1	21	0	0	- α	0
19	0	- α	0	0	19	0	- α	0	0	25	0	0	0	0
20	0	+ α	0	0	22	0	0	+ α	0	19	0	- α	0	0
21	0	0	- α	0	21	0	0	- α	0	18	+ α	0	0	0
22	0	0	+ α	0	10	-1	+1	+1	-1	9	+1	+1	+1	-1
23	0	0	0	- α	15	+1	-1	-1	-1	14	-1	+1	-1	-1
24	0	0	0	+ α	16	-1	-1	-1	-1	13	+1	+1	-1	-1
25	0	0	0	0	13	+1	+1	-1	-1	10	-1	+1	+1	-1

Стоимости и время изменений значений уровней факторов приведены в табл.2. Стоимость реализации эксперимента по исходному плану составляет $S_{исх}=3025$ усл.ед., а время – $t_{исх}=97561$ с.

С помощью прикладной программы, реализующей метод табу-поиска, оптимизируем исходный план проведения эксперимента по критерию минимальной стоимости проведения эксперимента(формула(1)). В результате был получен оптимальный по стоимости реализации план эксперимента, представленный в табл.1 (оптимальный план 1). Стоимость реализации эксперимента по этому плану составляет $S_{опт,1}=551$ усл. ед., а время – $t_{опт,1}=12686$ с. Таким образом, выигрыш в стоимости реализации эксперимента составляет $V_{S1}=5,49$ по сравнению с исходным планом, а во времени – $V_{t1}= 7,69$.

Аналогично проведем оптимизацию исходного плана методом табу-поиска по критерию минимального времени реализации эксперимента (формула (2)). Полученный план проведения эксперимента представлен в табл. 1(оптимальный план 2). Время реализации эксперимента по этому плану составляет - $t_{опт,2}=7724$ с, а стоимость - $S_{опт,2}=730,6$ усл. ед. Таким образом, во времени реализации эксперимента составляет $V_{t2}= 4,14$ по сравнению с исходным планом, а в стоимости - $V_{S2}=2,63$.

Таблица 2

Стоимости и время изменений значений уровней факторов

Стоимости изменений уровней факторов, усл.ед.	Обозначение факторов				Время изменений уровней факторов, с	Обозначение факторов			
	X1	X2	X3	X4		X1	X2	X3	X4
из «-α» в «-1»	40	10	2	3	из «-α» в «-1»	720	1	60	60
из «-α» в «0»	14 0	30	7	2, 5	из «-α» в «0»	2520	3	210	60
из «-α» в «+1»	24 0	50	12	2	из «-α» в «+1»	4320	5	360	60
из «-α» в «+α»	28 0	58	14	1, 8	из «-α» в «+α»	5040	5,8	420	60
из «-1» в «-α»	20	2	6	4, 2	из «-1» в «-α»	1440	0,2	120	60
из «-1» в «0»	10 0	30	5	2, 5	из «-1» в «0»	1800	3	150	60
из «-1» в «+1»	20 0	50	10	2	из «-1» в «+1»	3600	5	300	60
из «-1» в «+α»	24 0	58	12	1, 8	из «-1» в «+α»	4320	5,8	360	60
из «0» в «-α»	70	2	21	4, 2	из «0» в «-α»	5040	0,2	420	60
из «0» в «-1»	50	10	15	3	из «0» в «-1»	3600	1	300	60
из «0» в «+1»	10 0	50	5	2	из «0» в «+1»	1800	5	150	60
из «0» в «+α»	14 0	58	7	1, 8	из «0» в «+α»	2520	5,8	210	60
из «+1» в «-α»	12 0	2	36	4, 2	из «+1» в «-α»	8640	0,2	720	60
из «+1» в «-1»	10 0	10	30	3	из «+1» в «-1»	7200	1	600	60

из «+1» в «0»	50	30	15	2, 5	из «+1» в «0»	3600	3	150	60
из «+1» в «+α»	40	58	2	1, 8	из «+1» в «+α»	720	5,8	60	60
из «+α» в «-α»	14 0	2	42	4, 2	из «+α» в «-α»	10080	0,2	840	60
из «+α» в «-1»	12 0	10	36	3	из «+α» в «-1»	8640	1	720	60
из «+α» в «0»	70	30	21	2, 5	из «+α» в «0»	5040	3	420	60
из «+α» в «+1»	20	50	6	2	из «+α» в «+1»	1440	5	120	60

Сравнение результатов, полученных методом табу-поиска, методом ветвей и границ и методом последовательного приближения приведено в табл.3.

Таблица 3

Сравнительный анализ результатов оптимизации

Критерий оптимизации	Метод табу-поиска		Метод ветвей и границ		Метод последовательного приближения	
	B_s	B_t	B_s	B_t	B_s	B_t
Формула (1)	5,49	7,69	5,47	7,33	5,47	7,24
Формула (2)	4,14	12,63	3,54	12,58	3,54	12,34

Таким образом, метод табу-поиска позволяет получить выигрыши большие, чем при использовании метода ветвей и границ или последовательного приближения. Однако, он обладает гораздо более низкими показателями (время решения 0,53 с) быстродействия по сравнению с методом последовательного приближения (время решения близко к 0 с). Объем памяти требуемой для работы программы, реализующей метод табу-поиска, при решении рассмотренных задач составляет 38 Мб. Объем памяти ЭВМ, необходимый для работы программы, реализующей метод ветвей и границ – 147 Мб, а последовательного приближения – 10 Мб. Таким образом, метод табу-поиска требует немного большего объема памяти ЭВМ и имеет несколько большее время решения задачи по сравнению с методом последовательного приближения. Однако, как видно из табл. 3, он позволяет получать большие выигрыши в стоимости и времени реализации эксперимента.

В работе [4] с применением методов планирования экспериментов выполнено исследование, моделирование и оптимизация обслуживания комплекса технических систем, которые представляют собой распределенные ЭВМ, а также режима работы оператора по обслуживанию этого комплекса. Недостатком этого исследования является то, что не учитывалось время, затрачиваемое на проведение эксперимента.

Для исследования режима технического обслуживания комплекса технических систем параметром оптимизации выбрано численное значение Y , отражающее длительность обслуживания одной системы. Необходимо найти условия работы оператора, при которых простои системы на обслуживание будут минимальными.

Доминирующими факторами, влияющими на этот показатель, были выбраны: X_1 – число систем, обслуживаемых оператором на протяжении рабочей смены; X_2 – среднее время обслуживания одной системы; X_3 – время подготовки к обслуживанию очередной системы, мин; X_4 – продолжительность рабочей смены, ч.

Исходный план ротабельного центрального композиционного планирования (РЦКП), в соответствии с которым проводили исследование, приведен в табл.4.

Таблица 4

Исходный и оптимальные планы ОЦКП

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

Проведем оптимизацию начального плана РЦКП по критерию суммарного времени реализации эксперимента. Временные изменения значений уровней факторов приведены в табл.5.

Таблица 5

Временные изменения значений уровней факторов

Временные изменения значений уровней факторов, ч	Обозначение факторов			
	X_1	X_2	X_3	X_4
из «-α» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «-α» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «-α» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
из «-α» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «-1» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «-1» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «-1» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
из «-1» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «0» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «0» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «0» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0
из «0» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «+1» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «+1» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «+1» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «+1» в «+α»	18,0	50,0	40,0	720,0
из «+α» в «-α»	60,0	10,0	0,0	240,0
из «+α» в «-1»	42,0	20,0	10,0	360,0
из «+α» в «0»	30,0	30,0	20,0	480,0
из «+α» в «+1»	24,0	40,0	30,0	600,0

Временные затраты на реализацию экспериментов составляют 3604 минуты для начального плана; 2134 минуты для оптимального плана полученного методом табу-поиска. При этом имеем выигрыш во временных затратах на реализацию эксперимента в 1,69 раза по сравнению с начальным планом. В то время как при использовании метода ветвей и границ выигрыш составлял 1,5 раза.

4. Выводы. Разработаны метод и программное обеспечение, реализующие оптимизацию композиционных планов второго порядка с применением алгоритма табу-поиска. Доказана работоспособность и эффективность при исследовании процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами и при исследовании процесса обслуживания комплекса технических систем.

Поиск оптимального или близкого к оптимальному плана, полученного этим методом, реализуется за меньшее время счёта, чем при методе ветвей и границ. Показано, что для оптимизации планов ОЦКП и РЦКП целесообразно использование алгоритма табу-поиска.

Список литературы

1. Кошевой, Н.Д. Применение метода ветвей и границ для оптимизации композиционных планов второго порядка [Текст] / Н.Д.Кошевой, Е.М.Костенко, А.С.Чуйко // 36. наук. пр. військ. ін.-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. – Вип.25. – К., 2010. – С. 95-101.

2. Кошевой Н.Д. Применение методов ветвей и границ и последовательного приближения для оптимизации моделирования процесса получения пористых материалов [Текст] / Н.Д.Кошевой, А.С.Чуйко, Е.М. Костенко // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр. Севастопольського нац. техн. ун-ту. - Вып. 13 – Севастополь, 2011. – С. 69-74.

3. Соколовская, Е.И. Моделирование процесса получения пористых материалов с оптимальными механическими свойствами [Текст] / Е. И. Соколовская // Математическое моделирование. – 2010. - №1(22). – С. 43-45.

4. Барабашук, В.И. Планирование эксперимента в технике [Текст] / В.И.Барабашук, Б.П. Крендер, В.И.Мирошниченко. – К.:Техника,1984. 200 с.

Застосування методу табу-пошуку для оптимізації композиційних планів другого порядку

Розроблено метод і програма для оптимізації композиційних планів другого порядку, які використовують при побудові квадратичних математичних моделей досліджуваних об'єктів. Показана ефективність в порівнянні з методом проб і помилок і методом гілок і меж.

Ключові слова: оптимальний план, табу пошук, оптимізація, планування експеримента, вартість, виграш.

Application of Tabu Search to Optimize Composite Designs of the Second Order

Develop methods and software to optimize composite designs in the second row, which are used in the construction of mathematical models of quadratic Inves-objects when the wind blows. The efficiency in comparison with the method of successive approximations, and the method of branches and borders.

Keywords: optimal plan, taboo search, optimization, planning experiments-ment, the cost of winning.

Сведения об авторах:

Кошевой Николай Дмитриевич - доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина.

Беляева Анна Андреевна - аспирант кафедры авиационных приборов и измерений, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина.