

ИНТЕРАКТИВНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ*

И. Н. Статников¹, Г. И. Фирсов²

*Отделы: «Вибрационная биомеханика» (1),
«Механика машин и управление машинами» (2), firsovgi@mail.ru;
ФГБУН «Институт машиноведения им. А. А. Благоднарова РАН», г. Москва*

Ключевые слова: многокритериальное проектирование; планирование имитационных экспериментов; планирование многоуровневых экспериментов; эвристические методы оптимизации.

Аннотация: Рассмотрено применение метода планирования многоуровневых экспериментов, зарекомендовавшего себя положительно по критерию рационального проведения вычислительных экспериментов, для анализа и синтеза многопараметрических и многокритериальных задач проектирования.

Сложность задач проектирования современных технических устройств, представляющих собой большой комплекс различных механизмов, напрямую зависит от их функционального назначения. Несмотря на разнообразие проектируемых устройств, выделим основные компоненты, определяющие реализацию цели проекта:

- а) максимальное удовлетворение (обеспечение) заданного качества устройства;
- б) минимизация стоимости разработок и изготовления устройства;
- в) гарантирование минимальных расходов по эксплуатации разрабатываемого устройства;
- г) безопасность человека и минимизация ущерба окружающей среде.

Одновременное положительное решение по всем перечисленным компонентам функции цели любого технического устройства приводит к возникновению ситуаций, где ответственность за выбор того или иного варианта будет всегда принадлежать лицу, принимающему решение (ЛПР). Рассматривая разнообразие современных средств и методов в области принятия решений, можно оценить насколько они облегчат ЛПР осуществить выбор одного или нескольких вариантов проектируемого устройства.

Рассмотрим вопросы, связанные с реализацией технического устройства по первой из перечисленных компонент – максимальному удовлетворению требуемого качества устройства. Рассматриваемая компонента практически всегда сама, в свою очередь, является многокомпонентной (в дальнейшем будем говорить – многокритериальной). Многокритериальность обусловлена тем, что к проектируемому устройству, предназначенному для выполнения одной или несколь-

* По материалам доклада на конференции ММТТ-27 (см. Вестник ТГТУ, т. 20, № 4).

ких технологических операций, всегда предъявляется комплекс таких технических требований, как точность, быстродействие, габариты, надежность и т. д. Реализация такого комплекса требований (локальных критериев качества) на основе выбора вектора параметров $\vec{\alpha}$ устройства связана почти всегда с тем же кругом проблем, который возникает при одновременном учете всех четырех компонент. Использование ЭВМ в рассматриваемом случае для выбора варианта или вариантов устройства с заданным качеством на основе планируемых имитационных экспериментов значительно упрощает процесс принятия решений. При этом весь процесс принятия решения строится как диалог ЛПП с ЭВМ, то есть как интерактивный процесс выбора вариантов устройства по компоненте α , который может быть организован не на основе слепого перебора вариантов, а с использованием набора эвристических процедур, в частности, путем использования в диалоговых процедурах метода планируемого поиска (ПЛП-поиска), достаточно просто реализуемого на ЭВМ.

Метод ПЛП-поиска [1, 2], благодаря одновременной реализации в нем идеи дискретного квазиравномерного по вероятности зондирования J -мерного пространства варьируемых параметров α_j ($j = 1, \dots, J$) и методологии планируемого математического эксперимента, показал достаточно высокую эффективность в решении задач целенаправленного выбора вариантов динамических систем. Сочетание таких идей в алгоритме ПЛП-поиска позволило, с одной стороны, осуществить глобальный квазиравномерный просмотр заданной области варьируемых параметров, с другой – применить многие формальные оценки из математической статистики.

Успешность применения ПЛП-поиска обуславливается тем, что метод предназначен, в основном, для применения на предварительном этапе решения задачи, когда полученная информация позволяет принять решение об использовании других методов оптимизации (но значительно эффективнее) или об окончании решения (такое тоже возможно) [3, 4]. В основе метода положена рандомизация расположения в области $G(\vec{\alpha})$ векторов $\vec{\alpha}$, рассчитываемых по сеткам И. М. Соболя, которая оказывается возможной благодаря тому, что весь вычислительный эксперимент проводится сериями. В ПЛП-поиске можно варьировать одновременно значения параметров в количестве до 51 ($J = 51$). Для рандомизации (случайного смешения уровней варьируемых параметров α_{ijh}) дискретного обзора $G(\vec{\alpha})$ могут быть использованы многие существующие таблицы равномерно распределенных по вероятности целых чисел. Рандомизация состоит в том, что для каждой h -й серии экспериментов ($h = 1, \dots, H(i, j)$, где $H(i, j)$ – объем выборки из элементов Φ_{ijh} для одного критерия) вычисляется свой вектор случайных номеров строк $\vec{j} = (j_{1h}, j_{2h}, \dots, j_{\beta h})$ в таблице направляющих числителей по формуле

$$j_{\beta h} = [R \times q] + 1, \quad (1)$$

а значения α_{ij} в h -й серии рассчитываются с помощью линейного преобразования

$$\alpha_{ijh} = \alpha_j^* + q_{ihj_{\beta h}} \times \Delta\alpha_j,$$

где $\Delta\alpha_j = \alpha_j^{**} - \alpha_j^*$; α_j^{**} , α_j^* – верхние и нижние границы области $G(\vec{\alpha})$ соответственно; $\beta = 1, \dots, J$; R – любое целое число (в ПЛП-поиске $R = 51$); j – фиксированный номер варьируемого параметра; $i = 1, \dots, M(j)$ – номер уровня j -го

параметра в h -й серии; $M(j)$ – число уровней, на которое разбивается j -й параметр; в общем случае $j\beta h \neq j$ (в чем и состоит одна из целей рандомизации). С помощью критерия Романовского доказано, что числа $j\beta h$, вырабатываемые по формуле (1), оказываются совокупностью равномерно распределенных по вероятности целых чисел. Обратим внимание, что $M(j)$ и есть количество экспериментов, реализуемых в одной серии. Если $M(j) = M = \text{const}$ и $H(i, j) = H = \text{const}$, то параметры N_0 , M и H связаны простым соотношением

$$N_0 = M \times H, \quad (2)$$

где N_0 – общее число вычислительных экспериментов, при этом длина выборки из Φ_{ijh} в точности равна H . Но в общем случае, когда $M(j) = \text{var}$, то и $H(i, j) = \text{var}$, и тогда формула (2) для одного критерия примет вид

$$N_0 = \sum_{i=1}^{M(j)} H(i, j).$$

Для проведения однофакторного дисперсионного анализа по всем параметрам для каждого критерия производится сортировка результатов вычислений, полученных в точках матрицы планируемых экспериментов (МПЭ). В результате сортировки для одного критерия будет получено J матриц, состоящих из элементов Φ_{ijh} , а для K критериев – $J \times K$ матриц, состоящих из элементов Φ_{ijk} , где k – номер критерия. Данный анализ позволяет принять (или отвергнуть) с требуемой вероятностью $P = 1 - \alpha$, где α – заданный уровень значимости, следующую нулевую гипотезу: средние значения $\bar{\Phi}_{ijk}$ не существенно (случайно) отличаются от общего среднего значения k -го критерия $\bar{\Phi}_{0k}$. Если принят положительный ответ (гипотеза принята), то допускается на следующем этапе решения задачи несущественно влияющий параметр α_j не варьировать, а зафиксировать одно из его значений, например, $\alpha_j = \alpha_{ij}$ для такого i , где $\bar{\Phi}_{ijk}$ имеет наилучшее значение в смысле искомого экстремума.

Предложенная процедура формирования планов вычислительного эксперимента на основе ПЛП-поиска реализована с помощью математического пакета MATLAB [5].

Рассмотрим следующую задачу, решение которой связано с улучшением качества уже существующего устройства. Анализировался привод рабочей клетки широкополосного прокатного стана, динамические свойства которого определялись амплитудами колебаний, возникающих в передаточных элементах этого привода. При решении задачи использована математическая модель движения элементов привода в виде системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений десятого порядка, а также задан r -мерный гиперпараллелепипед значений конструктивных параметров, входящих в эти уравнения. Количественно свойства оценивались по значениям коэффициентов динамичности: $K_{д1}$ – в анкерных болтах крепления редуктора привода; $K_{д2}$ – на опоре колеса редуктора; $K_{д3}$ – на шпинделях; $K_{д4}$ – на муфте, соединяющей редуктор с шестеренной клетью; $K_{д5}$ – на муфте, соединяющей двигатель с редуктором. Необходимо было

Средние значения коэффициентов динамичности

Коэффициент динамичности	Исходная область		Выделенная область $\Delta_{pk} \neq 0$
	$\Delta_{pk} = 0$	$\Delta_{pk} \neq 0$	
$K_{д1}$	$4,57 \pm 2,65$	$7,69 \pm 3,19$	$3,36 \pm 1,19$
$K_{д2}$	$2,46 \pm 1,10$	$1,40 \pm 0,29$	$1,20 \pm 0,16$
$K_{д3}$	$1,31 \pm 0,20$	$1,24 \pm 0,11$	$1,11 \pm 0,03$
$K_{д4}$	$1,81 \pm 0,57$	$1,49 \pm 0,28$	$1,17 \pm 0,06$
$K_{д5}$	$2,01 \pm 0,68$	$1,96 \pm 0,88$	$1,27 \pm 0,22$

путем подбора оптимальных значений r параметров минимизировать величины всех указанных коэффициентов динамичности. Решение задачи проводилось с применением ПЛП-поиска, что позволило на предварительном этапе исследования указать область значений параметров, где одновременно минимизировались все $K_{дi}$ ($i = 1, 2, \dots, 5$). В таблице показаны средние значения всех $K_{дi}$ и их стандартные отклонения в исходной (при радиальном зазоре $\Delta_{pk} = 0$ и $\Delta_{pk} \neq 0$) и выделенной областях при $\Delta_{pk} \neq 0$.

Анализ результатов, приведенных в таблице, показывает, что в выделенной области удается одновременно минимизировать все $K_{дi}$. Следовательно в первом приближении можно полагать выбранные критерии качества неантагонистичными по влиянию на них варьируемых параметров. Значительное уменьшение стандартных отклонений в выделенной области означает и то, что эта область в первом приближении может рассматриваться как унимодальная по отношению ко всем критериям качества. Информация о неантагонистичном характере критериев качества, унимодальности выделенной области варьируемых параметров позволяет использовать в дальнейшем хорошо отработанные методы поиска экстремумов.

Список литературы

1. Статников, И. Н. ПЛП-поиск – эвристический метод решения задач математического программирования / И. Н. Статников, Е. В. Андреенков. – М. : Моск. гос. ун-т дизайна и технологии, 2006. – 140 с.
2. Статников, И. Н. Проблемы планирования вычислительного эксперимента при оптимизации и идентификации динамических систем / И. Н. Статников, Г. И. Фирсов // Математические методы в технике и технологиях. ММТТ-22 : сб. тр. XXII междунар. науч. конф., 26 – 29 мая 2009 г. : в 10 т. / под общ. ред. В. С. Балакирева ; Псков. гос. политехн. ин-т [и др.]. – Псков, 2009. – Т. 2, секция 2. – С. 35 – 39.
3. Статников, И. Н. Решение задач проектирования динамических систем интеллектуальным методом ПЛП-поиска / И. Н. Статников, Г. И. Фирсов // Вестн. Моск. финансово-юрид. университета. – 2012. – № 1. – С. 28 – 33.
4. Статников, И. Н. О некоторых возможностях ПЛП-поиска в решении задач моделирования и исследования динамических систем машин [Электронный ресурс] / И. Н. Статников, Г. И. Фирсов // Юж.-Сиб. науч. вестн. – 2012. – № 1. –

C. 92 – 96. – Режим доступа : <http://s-sibsb.ru/issues-of-the-journal.html?sobi2Task=sobi2Details&catid=15&sobi2Id=30> (дата обращения 12.10.2014).

5. Статников, И. Н. ПЛП-поиск и его реализация в среде MATLAB / И. Н. Статников, Г. И. Фирсов // Труды Второй Всероссийской научной конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» / Рос. акад. наук, Ин-т проблем управления им. В. А. Трапезникова, Компания SoftLine, The MathWorks, Inc. – М., 2004. – С. 398 – 411.

Interactive Structuring of Space Parameters when Designing Dynamic Systems

I. N. Statnikov¹, G. I. Firsov²

*Department of Vibrational Biomechanics (1),
Department of Mechanics and Control of Machines (2); firsovgi@mail.ru;
Institute of Machines Science named after A. A. Blagonravov
of the Russian Academy of Sciences, Moscow*

Keywords: heuristic methods of optimization; multi-criteria design; planning of multilevel experiments; planning the imitation experiments; PLP-search.

Abstract: The problem of efficient use of CAD, despite the ever-growing technical capabilities of computers, considerably depends on the use of mathematical methods of analysis and synthesis of the designed dynamic systems. The authors studied the application of the method of multi-level planning of experiments, which has proven worth for rational computational experiments, to solve the problems of analysis and synthesis of multi-parameter and multi-criteria design problems.

References

1. Statnikov I.N., Andreenkov E.V. *PLP-poisk – evristicheskii metod resheniya zadach matematicheskogo programmirovaniya* (PLP-search - heuristic methods for solving mathematical programming), Moscow: Moscow State University of Design and Technology, 2006, 140 p.

2. Statnikov I.N., Firsov G.I. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh. MMTT-22* (Mathematical methods in engineering and technology. MMTT-22), Proceedings of the 22nd International Conference, 26-29 May 2009, Pskov, 2009, vol. 2, section 2, pp. 35-39.

3. Statnikov I.N., Firsov G.I. *Vestnik Moskovskogo finansovo-yuridicheskogo universiteta*, 2012, no. 1, pp. 28-33.

4. Statnikov I.N., Firsov G.I. *South-Siberian scientific bulletin*, 2012, no. 1, pp. 92-96, available at: <http://s-sibsb.ru/issues-of-the-journal.html?sobi2Task=sobi2Details&catid=15&sobi2Id=30> (accessed 12 November 2014).

5. Statnikov I.N., Firsov G.I. *Trudy Vtoroi Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii «Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozhenii v srede MATLAB»* (Proceedings of the Second All-Russian Scientific Conference “Development of engineering and scientific applications in MATLAB”), Moscow, 2004, pp. 398-411.

Interaktive Strukturierung des Raumes der Parameter bei der Projektierung der dynamischen Systeme

Zusammenfassung: Es ist die Anwendung der Methode der Planung der Mehrebenenexperimente, die schon sich nach dem Kriterium der rationalen Durchführung der Rechenexperimente, für die Analyse und die Synthese der mehrparametrischen und vielkriterialen Aufgaben der Projektierung positive bewährt haben, betrachtet.

Structuration interactive de l'espace des paramètres lors de la conception des systèmes dynamiques

Résumé: Est examiné l'emploi de la méthode de la conception des expériences de multiples niveaux réputée positivement d'après le critère de la réalisation rationnelle des expériences informatifs pour l'analyse et la synthèse des problèmes multiparamétriques et multiobjectifs de la conception.

Авторы: *Статников Исаак Наумович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела «Вибрационная биомеханика»; *Фирсов Георгий Игоревич* – старший научный сотрудник отдела «Механика машин и управление машинами», ФГБУН «Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН», г. Москва.

Рецензент: *Немтинов Владимир Алексеевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Компьютерно-интегрированные системы в машиностроении», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».
