

УДК 004.8:004.93:519.863

Кластерно - ориентированный подход к оптимизации проектных решений в системах автоматизированного проектирования

Малашин Иван Павлович

Тынченко Вадим Сергеевич (научный руководитель)

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Рассмотрена проблема внедрения кластерно-ориентированного подхода для оптимизации проектных решений в системах автоматизированного проектирования. Метод сочетает генетические алгоритмы с динамической корректировкой границ поискового пространства на основе кластерного анализа. Это позволяет исключить «неперспективные» зоны и сфокусироваться на областях с высокой плотностью эффективных решений, ускоряя сходимость и снижая вычислительные затраты. Подход особенно полезен для многомодальных задач, где традиционные методы часто застревают в локальных экстремумах.

Ключевые слова: кластерная оптимизация, генетические алгоритмы, динамические границы поиска, адаптивное проектирование, CAD/CAE-системы

Введение. Современные системы автоматизированного проектирования (CAD/CAE) сталкиваются с необходимостью оптимизации сложных инженерных решений в условиях многомерных пространств параметров. Традиционные методы, такие как генетические алгоритмы (ГА), часто работают с фиксированными границами поиска, что приводит к неэффективному исследованию малоперспективных областей, замедлению сходимости и увеличению вычислительных затрат. Ключевым преимуществом подхода является его универсальность: он применим как для унимодальных, так и для многомодальных ландшафтов целевых функций, где классические алгоритмы могут застревать в локальных экстремумах. Внедрение метода в промышленные CAD/CAE/PDM-системы способствует сокращению времени проектирования, снижению затрат на прототипирование и повышению качества конечных изделий. Дальнейшие исследования направлены на автоматизацию выбора параметров кластеризации и адаптивное определение корректировок границ поиска, что позволит повысить гибкость и эффективность метода для широкого круга инженерных задач.

Теоретические аспекты оптимизации. В современных инженерных задачах оптимизация проектных решений сталкивается с необходимостью эффективного исследования многомерного пространства параметров, чтобы одновременно удовлетворить технические требования, экономические ограничения и производственные особенности. В классических реализациях генетических алгоритмов (ГА) область определения каждой проектной переменной x_i задается фиксированным интервалом $[x_i^l, x_i^h]$, который остается

неизменным на всем протяжении эволюции популяции. Хотя такой подход прост в реализации, он часто приводит к избыточному исследованию явно «неперспективных» участков пространства, замедлению сходимости и, как следствие, увеличению вычислительных ресурсов [1, 2].

Для решения этой задачи предлагается интегрированный метод, сочетающий кластеризацию решений и динамическую корректировку границ поискового пространства на каждом шаге ГА. В начале каждого поколения g формируется популяция из M индивидов Ind_m^g , каждый из которых описывается вектором проектных переменных $\vec{x} = (x_1, \dots, x_n)$. После оценки функции пригодности $F(\text{Ind}_m^g)$ для всех индивидов проводится кластерный анализ, например с использованием алгоритма DBScan, K-Means или MeanShift. Цель кластеризации — выделить в пространстве параметров области с концентрированным расположением успешных (высокопригодных) решений и, напротив, участки, где индивиды демонстрируют низкую эффективность [3].

Полученные K кластеров позволяют локально определить минимальные гиперпрямоугольники $D_{\vec{x}}^{g,k} = (D_{x_1}^{g,k}, \dots, D_{x_n}^{g,k})$, покрывающие решения соответствующего кластера. Для каждого такого гиперпрямоугольника вычисляем экстремальные значения границ по каждой переменной — нижнюю $x_i^{g,k,l}$ и верхнюю $x_i^{g,k,h}$ — и корректируем их с помощью небольших смещений $\Delta_i^{g,k,l}$ и $\Delta_i^{g,k,h}$, что позволяет либо расширить, либо сузить область поиска вокруг обнаруженных «горячих» зон. Таким образом, итоговая область поиска для поколения g получается объединением скорректированных кластерных областей:

$$D_{x_i}^g = \bigcup_{k=1}^K [x_i^{g,k,l} + \Delta_i^{g,k,l}, x_i^{g,k,h} + \Delta_i^{g,k,h}].$$

Однако не все кластеры одинаково полезны. Чтобы избежать фокусирования вычислительных ресурсов на «бессмысленных» зонах, вводим критерий эффективности каждого кластера. С одной стороны, сравнивается число индивидов N_k^g в кластере с его средним значением по всем кластерам $\bar{N}^g$. С другой стороны, вычисляется средняя пригодность кластера $\bar{F}_k^g$ и сопоставляется с общей средней пригодностью популяции $\bar{F}^g$. Кластер считается неэффективным и исключается из дальнейшего поиска, если одновременно выполняются два условия:

$$N_k^g < \bar{N}^g \quad \text{и} \quad \bar{F}_k^g < \bar{F}^g.$$

В этом случае для всех $i = 1, \dots, n$ устанавливается $D_{x_i}^{g,k} = \emptyset$, и кластер не участвует ни в генерации новых потомков, ни в корректировке границ для последующих поколений.

Практическая реализация и технологии. Практическая реализация данного метода начинается с инициализации исходного поискового про-

странства согласно техническому заданию проекта и генерации первых M индивидов. На каждой итерации ГА после операторов селекции, скрещивания и мутации популяции проводится кластеризация и динамическая корректировка областей. В результате границы поиска «смещаются» к областям, где наблюдается наибольшая плотность и качество решений, что ускоряет сходимость. Использование адаптивного механизма коррекции особенно эффективно в многомодальных ландшафтах целевой функции, где традиционные алгоритмы могут застревать в локальных экстремумах [4].

Внедрение описанного подхода в системы автоматизированного проектирования и управления производством (CAD/CAE/PDM) открывает возможность реализации сквозных рабочих процессов: от генерации проектных вариантов до наладки технологических операций и расчета стоимости производства. В промышленном контексте это означает более быстрый вывод новых продуктов на рынок, снижение затрат на прототипирование и повышение надежности готовых изделий.

Заключение. Предложенная методика представляет собой универсальную платформу для оптимизации широкого класса инженерных задач. Ключевыми направлениями дальнейших исследований могут стать разработка стратегий адаптивного выбора параметров кластеризации (число кластеров, минимальный размер, параметры ядра и расстояний) и автоматическое определение величин корректировки границ Δ_i на основе анализа темпов изменения пригодности. Такие усовершенствования позволят еще более гибко реагировать на специфику конкретной задачи и повысить общую эффективность процесса автоматизированного проектирования и производства.

Литература

- [1] Шумков Е.А., Карлов Д.Н. Скоростной метод обучения многослойного персептрона. *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*, 2011, № 65, с. 153–161.
- [2] Варламов О.О. Перспективы создания миварных систем управления для автономных интеллектуальных роботов. *Радиопромышленность*, 2015, № 3, с. 210–225.
- [3] Захарова Е.М., Минашина И.К. Обзор методов многомерной оптимизации. *Информационные процессы*, 2014, № 14 (3), с. 256–274.
- [4] Бондур В.Г. Современные подходы к обработке больших потоков гиперспектральной и многоспектральной аэрокосмической информации. *Исследование Земли из космоса*, 2014, № 1, с. 4–17.

Cluster-oriented approach to optimization of design solutions in computer-aided design systems

Malashin Ivan Pavlovich

Tynchenko Vadim Sergeevich (*scientific advisor*)

BMSTU, Moscow, Russia

The paper considers the problem of implementing a cluster-oriented approach for optimizing design solutions in automated design systems. The method combines genetic algorithms with dynamic adjustment of the search space boundaries based on cluster analysis. This allows excluding "unpromising" zones and focusing on areas with a high density of effective solutions, accelerating convergence and reducing computational costs. The approach is especially useful for multimodal problems, where traditional methods often get stuck in local extremes.

Keywords: cluster optimization, genetic algorithms, dynamic search boundaries, adaptive design, CAD/CAE systems