

УДК 004.942

Обзор методов генеративного проектирования на основе топологической оптимизации

Михайлова Екатерина Алексеевна

ekmikhajlova@gmail.com

Волосатова Тамара Михайловна

tamaravol@gmail.com

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

В работе представлен теоретический обзор подхода к генерации конструкции на основе двухуровневой топологической оптимизации, включающей четыре основных этапа. На первом этапе пространство разбивается на конечные элементы, и формируется стартовая область проектирования. Второй этап включает грубую оптимизацию, выполняемую преимущественно с использованием стохастических методов, таких как генетические алгоритмы, для получения начального решения и общего представления о топологии конструкции. На третьем этапе проводится уточненная оптимизация с использованием метода твердого изотропного материала с пенализацией (SIMP), направленная на детализацию структуры. Завершающим этапом является интерполяция лучших решений для получения производственных форм, готовых к применению в реальных условиях.

Ключевые слова: САПР, генеративное проектирование, структурная оптимизация, топологическая оптимизация, SIMP-метод, BESO-метод, аддитивные технологии

Введение. В современных условиях стремительного развития технологий и возрастающей сложности конструкций процесс проектирования становится все более трудоемким. Высокий уровень конкуренции на рынке вынуждает компании ускорять процесс разработки и повышать качество продукции. Традиционные методы проектирования уже не способны удовлетворять новым требованиям. Появляется необходимость в разработке и внедрении новых методов и подходов. Автоматизация проектирования играет ключевую роль в повышении эффективности работы инженеров, освобождая их от рутинных операций и позволяя сосредоточиться на решении более сложных технических задач. Современные вычислительные мощности открывают возможности для автоматизации проектирования, делая ее не просто желательным, но и приоритетным направлением в инженерной практике [1]. Одним из таких современных методов автоматизации является генеративное проектирование [2].

Интеграция генеративного проектирования и методов топологической оптимизации [3] существенно сокращает время разработки конструкции по сравнению с традиционными методами [4]. Это позволяет разрабатывать эффективные решения, адаптированные под конкретные задачи, которые ранее были недоступны из-за высокой стоимости ручного проектирования. В отличие от традиционных методов проектирования, где инженер полагается

на интуицию, собственный опыт и стандартные подходы, генеративное проектирование исследует множество вариантов конструкции, учитывая различные ограничения и требования к конечному продукту.

В последние годы стремительно набирает популярность аддитивное производство [5, 6]. Раньше для изготовления сложных деталей часто использовались фрезеровка и токарная обработка на станках с ЧПУ, что ограничивало возможности проектирования из-за необходимости учитывать технологические ограничения [7]. Генеративные алгоритмы [8] часто приводят к созданию конструкций с тонкими элементами, внутренними полостями и многоуровневыми структурами, которые крайне сложно, а иногда и невозможно произвести с использованием ЧПУ-обработки. Однако аддитивная технология 3D-печати, литье и спекание решают эти задачи, послойно создавая детали с геометрией любой сложности. С развитием аддитивных технологий генеративное проектирование приобрело особую актуальность, позволив создавать уникальные легкие и прочные конструкции.

Генеративное проектирование является перспективным направлением, способным значительно повысить качество и эффективность процесса проектирования. Данная работа посвящена теоретическому описанию предложенного алгоритма генеративного проектирования, основанного на топологической оптимизации и эволюционных алгоритмах.

Постановка задачи генеративного проектирования. В 2017 году компания Autodesk сделала важный шаг в направлении автоматизации процесса принятия решений. Компания разработала программный модуль генеративного проектирования (Generative design), интегрированный в среду Fusion 360 [9]. Новый подход к проектированию предоставил инженерам и дизайнерам возможность создавать сложные легковесные, но при этом прочные конструкции.

В научных статьях, профессиональной литературе, технической документации и образовательных материалах часто можно встретить такие термины, как «генеративный дизайн», «порождающее проектирование» и «синтез форм». Все эти понятия объединяет общая идея автоматизированной генерации конструкций с использованием алгоритмов и вычислительных методов.

Генеративное проектирование имеет значительные преимущества перед топологической оптимизацией. Топологическая оптимизация представляет собой процесс итеративного удаления материала из исходной детали, ограничиваясь лишь рамками начальной конструкции. Результатом такого подхода является единственный вариант оптимального распределения материала. Генеративное проектирование, напротив, исследует все пространство проектирования, рассматривая широкий спектр возможных решений. На практике такой подход позволяет инженерам и дизайнерам выбирать наиболее подходящий вариант конструкции для решения конкретной задачи. Постановка задачи генеративного проектирования позволяет задавать область проектирования с произвольными геометрическими параметрами. Благодаря этому можно генерировать любые конструкции, в том числе объединять несколько

компонентов в одну цельную деталь (рис. 1). Помимо этого генеративное проектирование, в отличие от топологической оптимизации, не просто распределяет материал, а создает готовые к производству изделия.

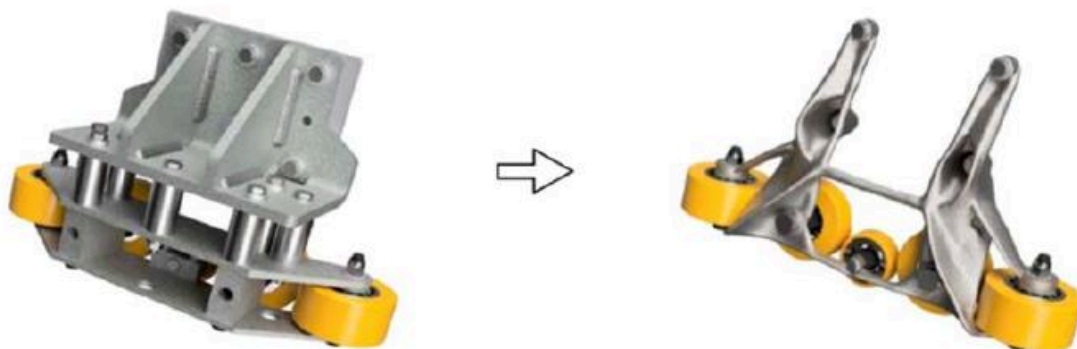


Рис. 1. Результат применения генеративного проектирования для оптимизации конструкции крепежного элемента

Одним из ключевых этапов постановки задачи генеративного проектирования является определение обязательных и запрещенных зон (рис. 2, а). Обязательные зоны, также называемые сохраняемая геометрия (Preserve Geometry), представляют собой области, которые необходимо включить в итоговую конструкцию. К таким зонам относятся крепежные элементы, узлы соединения и другая критически важная геометрия, обеспечивающая функциональность изделия. Запрещающие зоны (Obstacle Geometry) — это области, в которых материал не должен присутствовать. Это пространство может использоваться для размещения других деталей или для обеспечения легкого доступа к элементам конструкции в процессе сборки и эксплуатации. Грамотная постановка задачи обеспечивает генерацию оптимальной легковесной конструкции, удовлетворяющей заданным критериям и ограничениям (рис. 2, б).



Рис. 2. Задача генеративного проектирования:

а — задание обязательных и запрещающих зон в Fusion 360, красным цветом обозначены запрещающие зоны (Obstacle Geometry), зеленым — сохраняемая геометрия (Preserve Geometry);
б — результат применения генеративного проектирования в Fusion 360

Алгоритм генеративного проектирования на основе топологической оптимизации. Одним из возможных подходов к генерации конструкции является двухуровневая топологическая оптимизация, включающая четыре основных этапа.

На первом этапе алгоритма формируется начальная область проектирования, которая представляет собой выпуклую оболочку, включающую все обязательные зоны и исключая запрещающие. После этого пространство разбивается на конечные элементы (КЭ) для дальнейшего проведения топологической оптимизации.

На втором этапе проводится грубая оптимизация, в ходе которой определяются основные контуры итоговой конструкции. Грубая оптимизация направлена на выявление и удаление материала, который вносит наименьший вклад в прочность конструкции. Для достижения этой цели используется топологическая оптимизация с крупной детализацией, направленная на минимизацию комплаенса при заданных ограничениях по объему [10]

$$\min_{\rho} C(\rho) = \min_{\rho} \sum_{e \in \Omega} \rho_e^p u_e^T K_0 u_e \quad (1)$$

при условиях

$$0 < \rho_e < 1,$$

$$\sum_{e \in \Omega} \rho_e V_e \leq V_{target},$$

где C — комплаенс; u_e — деформации в узлах элемента e ; ρ_e — плотность элемента e ; Ω — область проектирования; K_0 — матрица жесткости конечного элемента при $\rho_e = 1$; V_e — объем элемента, V_{target} — допустимый объем конструкции.

Комплаенс — это величина, обратная жесткости конструкции, характеризующая ее податливость, способность деформироваться под действием приложенных нагрузок. Комплаенс можно представить как работу, которую совершают внешние силы при деформации конструкции [11]:

$$C(\rho) = F^T U,$$

где F — вектор внешних сил; U — вектор перемещений узлов конструкции.

На втором этапе алгоритма генеративного проектирования можно рассмотреть применение стохастических методов оптимизации [12]. Например, использовать комбинацию многопопуляционного генетического алгоритма (MPGA) и двусторонней эволюционной структурной оптимизации (BESO) [13]. В контексте данной задачи КЭ представляет собой отдельную особь в терминах генетического алгоритма. Хромосомы каждой особи кодируют вероятность включения КЭ в финальную конструкцию. Операторы скрещивания, мутаций и миграции добавляют элемент случайности, что позволяет избегать локальных минимумов и увеличивает вероятность приближения к глобальному оптимуму. Метод BESO используется в генетических опера-

торах для удаления и добавления материала на основе оценки чувствительности элементов (1).

На третьем этапе данного алгоритма проводится уточненная оптимизация, цель которой — дооптимизация решений, найденных на предыдущем шаге. Метод SIMP — один из немногих методов топологической оптимизации, обладающих доказанной сходимостью [14]. Это делает его наиболее обоснованным выбором для этапа уточненной оптимизации. Основная идея метода заключается в использовании непрерывных значений плотности $\rho_e \in (0,1)$ для каждого элемента проектируемой области. Для поиска минимума в методе SIMP используется градиентный метод. В результате проведения уточненной оптимизации формируется множество легковесных конструкций, удовлетворяющих заданным критериям и ограничениям.

На четвертом заключительном этапе осуществляется выбор Парето-оптимальных решений, расположенных на Парето-фронте — множестве решений, обеспечивающих оптимальный баланс между различными критериями [15]. Лицу, принимающему решение, предоставляется возможность выбрать вариант, который наилучшим образом соответствует требованиям конкретной задачи. После этого осуществляется интерполяция: ребристая конечно-элементная структура сглаживается с помощью сплайнов и поверхностей. В результате исходная топология приобретает технологически пригодные для производства формы.

Заключение. В данной работе представлен метод генеративного проектирования, включающий двухуровневую оптимизацию конструкций с использованием различных методов. Данное исследование носит преимущественно теоретический характер. Рассмотренные подходы к генеративному проектированию создают основу для их применения в реальных условиях. Дальнейшие исследования будут сосредоточены на реализации и практическом тестировании этих методов, что позволит подтвердить их эффективность и значимость для развития автоматизированного проектирования.

Список источников

- [1] Regenwetter L., Nobari A.H., Ahmed F. Deep Generative Models in Engineering Design: A Review. Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 2022. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.10863>
- [2] Aman B. Generative Design for Performance Enhancement. Weight Reduction, and its Industrial Implications. URL: <https://arxiv.org/pdf/2007.14138> (accessed December 6, 2024).
- [3] Bendsoe M.P., Sigmund O. Topology optimization: theory, methods and applications. Springer, 2003.
- [4] McClelland R. Generative Design and Digital Manufacturing: Using AI and robots to build lightweight instruments. NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 2023.
- [5] Подкопаев С.А., Демишкевич Э.Б. *Аддитивные технологии и прототипирование*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021.
- [6] Галиновский А.Л., Голубев Е.С., Коберник Н.В. *Аддитивные технологии в производстве изделий аэрокосмической техники*. Москва, Юрайт, 2024.

- [7] Евгеньев Г.Б., Хараджиев А.Х., Грошев А.В., Мальков С.А., Бурков В.А., Сергеев Н.В., Шильников П.С. *Программирование обработки на оборудовании с ЧПУ*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018.
- [8] Aage N., Andreassen E., Lazarov B.S., Sigmund O. Giga-voxel computational morphogenesis for structural design. *Nature*, 2017, vol. 550, pp. 84–86. <https://doi.org/10.1038/nature23911>
- [9] Autodesk. Fusion 360: Generative Design Overview. URL: <https://help.autodesk.com/view/fusion360/ENU/?contextId=GD-OVERVIEW> (accessed January 22, 2024).
- [10] Sandgren E., Jensen E., Welton J. Topological design of structural components using genetic optimization methods. Sensitivity analysis and optimization with numerical methods. *Proceeding of Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*, Dallas, TX, 1990, pp. 31–43.
- [11] Bendsøe M.P. Optimal shape design as a material distribution problem. *Structural Optimization*, 1989, vol. 1, pp. 193–202.
- [12] Карпенко А.П. *Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017, 446 с.
- [13] Liao J., Huang G., Chen X., Yu Z., Huang Q., Meng F. A hybrid method for fast and robust topology optimization. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 2012, no. 1, art. no. 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2012/1/012054>
- [14] Bendsøe M.P., Sigmund O. *Topology optimization: theory, methods and applications*. Springer, 2003.
- [15] Карпенко А.П., Митина Е.В., Семенихин А.С. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2012, № 4. EDN: PGRGWD

Review of generative design methods based on topology optimization

Mikhailova Ekaterina A.

ekmikhajlova@gmail.com

Volosatova Tamara M.

tamaravol@gmail.com

BMSTU, Moscow, Russia

This work provides a theoretical overview of a two-level topology optimization approach for generating structural designs, comprising four key stages. In the first stage, the design space is divided into finite elements, establishing the initial design domain. The second stage involves coarse optimization, primarily employing stochastic methods such as genetic algorithms, to derive an initial solution and outline the overall topology of the structure. The third stage focuses on refined optimization using the Solid Isotropic Material with Penalization method (SIMP), aiming to enhance structural detailing. The final stage entails interpolating the optimal solutions to generate manufacturable geometries, ready for real-world engineering applications.

Keywords: CAD, generative design, structural optimization, topological optimization, SIMP-method, BESO-method, additive technologies

