

Оригинал статьи “Generative Design: Advice From Algorithms” на английском языке опубликован на сайте: www.digitaleng.news

Генеративное проектирование: алгоритмы дают советы

Kenneth Wong

©2018, Digital Engineering magazine

Системы CAD – особенно параметрические – предлагают эффективный подход для построения 3D-геометрии. Поэтому они идеально подходят для конструкторов, которым необходимо воплотить свои концепции, будь то деталь автомобиля или корпуса смартфона, в виде подробной трехмерной модели. Примеры таких систем: SOLIDWORKS и CATIA от Dassault Systèmes, Autodesk Inventor, Solid Edge от Siemens PLM Software, Creo Parametric от PTC.

В противоположность этому подходу были разработаны программные средства оптимизации и генеративного проектирования, позволяющие инженерам исследовать и оценивать диапазон возможных вариантов конструкции, опираясь на комбинацию проверенных временем принципов и алгоритмов FEA (Finite Element Analysis – анализ методом конечных элементов). Например, Project DreamCatcher от Autodesk, solidThinking Inspire от Altair, Element от nTopology, Generates от Frustum. Некоторым образом, они противоположны традиционным CAD-системам. Некоторые из них включают ограниченный набор геометрических конструкторских инструментов, но в основном они функционируют как движки, генерирующие формы; при этом иногда предлагается такая неортодоксальная

геометрия, которую пользователи, возможно, и вообразить не могли.

В последние несколько лет, в результате введения в CAD-системы элементов оптимизации топологии и генеративного проектирования, границы между параметрическим моделированием и генеративным проектированием начали размываться. Экспериментальная технология из Project DreamCatcher теперь является частью Netfabb – программного обеспечения компании Autodesk, заточенного под аддитивное производство. Кроме того, компания представила генератор формы Shape Generator в CAD-системе Autodesk Inventor 2016, Release 2. Новая функция изучения топологии (Topology Study) дебютирует в релизе SOLIDWORKS 2018. Подобный функционал значительно меняет способ использования инженерами систем CAD.

Выступая в этом году на конференции Additive Aerospace 2018 в Лос-Анджелесе, Franck Mouriaux, генеральный менеджер RUAG Schweiz AG по авиакосмическим проектам, отметил: “Инженеры не были натасканы на формулирование проблем. Они были приучены искать решения”.

Но, как оказалось, [правильное] формулирование проблем – ключ к созданию хорошей геометрии.

Расскажите мне о своих проблемах

Несомненно, инженеры могут выразить конкретные проблемы создания конструкции естественным языком. Например: если я перепроектирую кронштейн, удерживающий топливный бак ракеты, то он станет меньше на 5÷7%, но будет ли это крепление надежным при движении ракеты с определенной скоростью?

Совсем другое дело – сформулировать эту проблему в терминах, которые могут послужить основой для расчетов: потребуется указать зоны, где допускается удаление материала; зоны, которые нельзя менять по соображениям безопасности и эстетики; предполагаемые нагрузки на кронштейн во время эксплуатации; направления действия сил; тип вибраций, которые, вероятно, возникнут, и т.д.

Умение выражать проблему через набор параметров можно найти у пользователей CAE-систем. Но научиться этому может оказаться очень сложным делом для людей, специализирующихся на CAD.

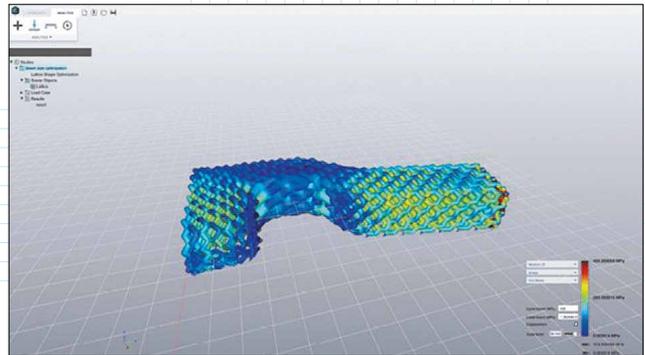
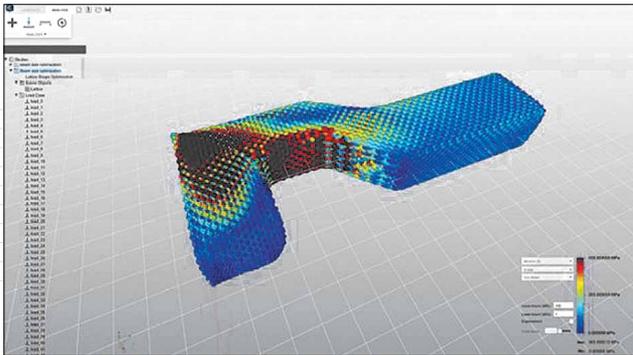
“Особенно трудно это для инженеров-механиков начального уровня”, – отмечает Jesse Coors-Blankenship, генеральный директор Frustum. – “Но тем, кто уже использует инструменты конечно-элементного анализа (FEA) и вычислительной гидродинамики (CFD), начать работу со средствами генеративного

Терминология оптимизации

Генеративное проектирование, алгоритмическое проектирование и оптимизация топологии – общие термины, которые используются для описания возможностей программ, позволяющих конструкторам искать лучшие (оптимальные) формы для их проектов, используя такие исходные данные, как нагрузки, давление, масса, а также подбор материалов.

Термин “оптимизация топологии” относится к исследованию форм, структур и твердотельной геометрии. Обычно этот термин ассоциируется с уменьшением веса изделий в автомобилестроении и авиакосмической отрасли, когда инженеры ищут способы убрать материал, не преступая требований по надежности конструкции. Например, авиастроители могут облегчить шасси на 5÷7%, сохранив прежнюю несущую способность.

В свою очередь, термины “генеративное проектирование”, “вычислительное проектирование” и “алгоритмическое проектирование” могут использоваться в гораздо более широком контексте, включая бионические проекты, управляемые генетическими алгоритмами, и прочее.



Программное обеспечение *Element* компании *nTopology* осуществляет оптимизацию сложных структур под управлением FEA. (Иллюстрации любезно предоставлены компанией *nTopology*)

проектирования намного проще. Безусловно, они могут быстрее освоить их, поскольку понимают, как применять близкие к реальности технические ограничения. Более того, мы видим будущее более мультидисциплинарным, с параллельным ведением инженерного анализа. Это привносит коллективные знания команды уже в фазу замысла и может помочь снять часть ноши с инженера-механика, чтобы четко определить проблему и создать решение по такой новой методологии”.

Компания *Frustum* характеризует свое программное обеспечение **Generate** как средство “функционального генеративного проектирования”. Согласно заявлению компании, это ПО позволяет вам “выйти за границы традиционного CAD-моделирования и поставить себе на службу мощь аддитивного производства и облака”.

“Следует ли для лучшего решения конкретной конструкционной проблемы использовать элементы *hex8* на этапе генерации сетки, или же для тестирования достаточно элементов второго порядка?” – задает риторический вопрос **Bradley Rothenberg**, соучредитель и генеральный директор *nTopology*. – “Обычный CAD-пользователь, не имеющий опыта симуляции, может и не суметь ответить на эти вопросы”.

По их собственным словам, учредители *nTopology* – это решительно настроенная группа инженеров, намеренных разработать конструкторское ПО следующего поколения.

“Наша уникальная комбинация генеративных, ручных и основанных на CAE конструкторских инструментов позволяет инженерам создавать детали, в которые интегрированы функциональные требования”, – сообщается на домашней странице компании.

Как правило, запросы генеративного проектирования – это не вопросы, требующие ответа да/нет (сломается или нет?), а вопросы типа “с учетом заданных условий, каким будет лучший вариант конструкции кронштейна для надежного крепления топливного бака?” Когда вы добавляете дополнительные ограничения или параметры (например, допустимый диапазон массы кронштейна, предпочтительный материал и пр.), то варианты конструкции изменятся.

“У нас под капотом – физика”, – поясняет г-н *Rothenberg*. – “Поэтому, если вы не выбрали тип сетки (*mesh*) или тесселяцию, программа и сама знает, как использовать лучшие стандартные типы сеток для решения проблемы. Но если вы эксперт и хотите

управлять выбором, то такая возможность тоже предоставляется”.

Г-н *Blankenship* из *Frustum* согласен с тем, что доступность для пользователей с разным уровнем опыта, является ключевым моментом.

“Мы очень усердно работали над тем, чтобы облегчить начальный момент использования *Generate*, насколько это возможно”, – говорит он. – “Трудно сказать заранее, что смогут или не смогут понять пользователи. Но одно ясно: после нескольких демонстраций на практических примерах свет в конце туннеля загорается, и они радуются, когда быстро начинают выполнять итерации генеративного дизайна”.

Сплав параметрического и генеративного моделирования

“Процесс конструирования всегда был генеративным. Просто компьютеры раньше не были частью этого генеративного процесса”, – считает г-н *Rothenberg*. Более того, сравнение CAD-программ с программами генеративного проектирования может оказаться столь же непродуктивным, как и сравнение яблок с апельсинами, так как “они делают разные вещи”.

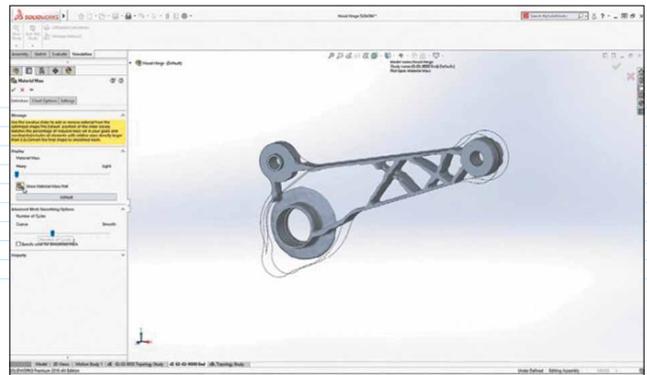
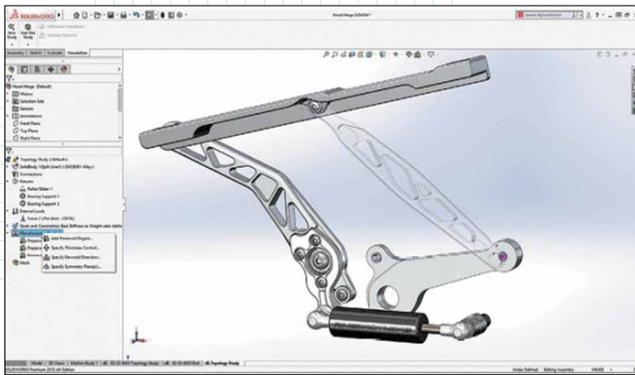
Компания *nTopology* предлагает **Element Free** – инструмент для генерации пространственной решетки, а также **Element Pro** – более мощную версию, включающую средства редактирования геометрии и анализа.

“Наше программное обеспечение больше похоже на обычный CAD-пакет, чем на другие инструменты генеративного проектирования”, – говорит г-н *Rothenberg*. – “Но оно поддерживает и

CAD-проектирование, и генеративное проектирование”.

“*Frustum Generate* дополняет функционал CAD”, – отмечает, в свою очередь, г-н *Blankenship*. – “В принципе, CAD-интероперабельность вполне достаточная, чтобы вы могли запускать генеративное проектирование”.

Новая функция оптимизации топологии в *SOLIDWORKS* базируется на возможностях решателей для прочностных и гидродинамических задач из комплекта *TOSCA*, который является частью портфеля решений для симуляции *Dassault Systèmes* – родительской компании *SOLIDWORKS*. Историю создания *TOSCA* можно проследить, начиная с *FE-Design*, немецкого разработчика программного обеспечения, приобретенного компанией *Dassault Systèmes* в 2013 году.



В версии SOLIDWORKS 2018 дебютирует Topology Study на базе решателей TOSCA. При оптимизации этот инструмент учитывает производственные ограничения. (Иллюстрации любезно предоставлены компанией SOLIDWORKS)

“В системе **SOLIDWORKS** оптимизация была всегда, но она управлялась размерами”, – говорит **Kishore Boyalakuntla**, вице-президент компании **SOLIDWORKS**. – “В версии [**SOLIDWORKS 2018**] мы впервые ввели оптимизацию топологии. Здесь система, основываясь на заданных условиях, сама снимает материал с базовой геометрии, которую вы предоставили, и предлагает вам органичную, оптимальную форму”.

Новая функция, названная **Topology Study**, предоставляет возможность выбрать метод изготовления детали – аддитивный или субтрактивный.

“Отталкиваясь от этого, **SOLIDWORKS** удаляет материалы очень по-разному для каждого подхода”, – поясняет г-н **Boyalakuntla**. – “Оптимизированная геометрия является моделью **SOLIDWORKS**, поэтому вы можете использовать знакомые **CAD**-инструменты для детализации геометрии на финальном этапе”.

Встроенные ограничения для предотвращения неудачных решений

Mark Cichy, директор по расчетам и исследованиям компании **Dialog**, занимающейся проектированием зданий, различает генеративное и вычислительное проектирование.

“При генеративном проектировании вы используете компьютер как советчика в поиске правильной конструкции. При вычислительном проектировании вы можете разработать базовую схему ограничений, которая позволяет вам объединить тяжелые наборы данных, концепции и факторы пригодности, чтобы управлять проектированием”, – поясняет он.

Г-н **Cichy** считает, что хорошая расчетная модель должна включать в себя правила для минимизации неудачных конструктивных решений.

“Предположим, у вас необычная форма элемента облицовки здания, и вы хотите исследовать способ встроить его в бетон с наполнителями из титана или стекловолокна. Вы можете внести поведение этих материалов в вычислительную модель, и система будет знать, какая максимальная и минимальная кривизна допустимы”, – говорит г-н **Cichy**.

Инженеры-конструкторы с меньшей квалификацией в области расчетов могут предпочесть средства генеративного проектирования со встроенными правилами,

которые автоматически исключают те формы, которые нельзя изготовить или построить. С другой стороны, г-н **Cichy** предпочитает открытую систему, которую инженеры или архитекторы могут использовать для самостоятельного построения концептуальной схемы ограничений, чтобы уменьшить количество вариантов, соответствующих критериям производства или строительства.

Довольно часто бывает так, что математически оптимальный вариант – геометрия с армированием, позволяющая выдержать ожидаемые нагрузки на различные участки – оказывается непрактичным для изготовления в связи с большими затратами или ограничениями доступных производственных методов. Сегодня технологии аддитивного производства (*Additive manufacturing, AM*) позволяют получать с помощью 3D-принтеров весьма сложные геометрические формы, которые нельзя изготовить путем механообработки; тем не менее, даже в этом случае есть определенные правила относительно геометрии, которую возможно напечатать.

“Многие топологически оптимизированные структуры имеют тонкие стенки и сложную геометрию с большим количеством нависающих элементов, что может стать проблемой даже для **AM**”, – говорит **Timothy W. Simpson**, завкафедрой аддитивного производства и проектирования в Университете штата Пенсильвания. – “Некоторые новые инструменты генеративного проектирования это учитывают, но большинство – нет; инженеры тоже не привыкли искать компромиссные варианты в процессе проектирования. До появления **AM** мы даже не знали, что такие компромиссы могут существовать, не говоря уже о том, чтобы учитывать это в нашем программном обеспечении и инструментах проектирования!”

Правила осуществимости изготовления являются составной частью генеративных формул в некоторых программах генеративного проектирования, но в других – нет. Если нет, то инженерам-конструкторам придется взаимодействовать с инженерами-технологами и инженерами-строителями, чтобы учесть техническую реализуемость в настройках генерации. В противном случае повышается вероятность, что диапазон решений, которые предлагает система, будет включать и проблемные геометрические элементы.

Слишком хорошо, чтобы быть реальностью

Математика имеет дело с абстракциями, а реальность полна неопределенности и неожиданных изменений. Это делает генеративное проектирование чем-то парадоксальным.

“Полученное [конструкционное] решение может быть идеальным для проблемы, которую вы описали, но оно может оказаться неидеальным для проблемы реальной”, – говорит г-н *Rothenberg*. – “Вы указали давление [в топливном баке ракеты] при нагрузках, которые могли вообразить, но в реальности могут возникнуть эффекты расплескивания с брызгами, о которых вы и не думали или не знаете, как их дефинировать. Так что алгоритм оптимизации не возьмет это в расчет”.

“Полученное конструкционное решение может быть идеальным для проблемы, которую вы описали, но оно может оказаться неидеальным для проблемы реальной”.

Bradley Rothenberg,
генеральный директор *nTopology*

До того, как появление средств оптимизации позволило уменьшать массу изделий, инженеры обычно создавали детали с запасом прочности, чтобы учесть неподвижные нагрузки. Они делали их намного более прочными, чем необходимо – просто на всякий случай. Поскольку сегодня легковесность становится нормой, запас прочности теперь многими рассматривается как расточительная практика, инженерный грех. Но является ли проектирование деталей с едва достаточной прочностью хорошей идеей?

“Структуры оптимизированы для заданного набора нагрузок”, – предупреждает г-н *Simpson*. – “Поэтому, если при эксплуатации деталь подвергается нагрузкам, отличным от тех, которые ожидалось, повышается вероятность поломки из-за того, что в ходе оптимизации материал был удален. Тем не менее, инструменты генеративного проектирования могут дать инженерам новое понимание того, какой должна быть оптимальная структура, – это помогает им быть более креативными при проектировании”.

В настоящий момент г-н *Rothenberg* считает, что лучший подход – сначала дать экспертам настроить оптимизацию в виде серии шагов, а затем позволить менее опытным или совсем неопытным коллегам использовать это как руководство в рабочем процессе. Таково видение г-на *Rothenberg* и его команды *R&D (Research and Development – исследования и разработки)*. Они усердно работают, чтобы воплотить это видение в программном обеспечении *Element*. Данная стратегия аналогична использованию шаблонов для расширения использования инструментов *CAE* (подробнее см. “*Wanted: Simulation App Publishers*”, *Digital Engineering magazine, April 2017*).

Роли меняются

В ноябре прошлого года, во время своего основного выступления на конференции *Autodesk University (AU)* в Лас-Вегасе, *Andrew Anagnost*, генеральный

директор *Autodesk*, решил успокоить многих *CAD*-пользователей.

“Итак, что же это значит для вашей работы? Не переходим ли мы в мир беспилотных автомобилей и беспилотных *CAD*-систем?” – задал он риторический вопрос.

“Не переходим ли мы в мир беспилотных автомобилей и беспилотных *CAD*-систем?”

Andrew Anagnost,
генеральный директор *Autodesk*

Г-н *Cichy* говорит так: “Идет сдвиг в сторону такого рабочего процесса, где теснее интегрированы опыт и сам характер знаний. То есть, инженер, архитектор, дизайнер и др. могут тратить больше времени на разработку, и меньше на подготовку к разработке. Можно утверждать, что это гораздо лучшая позиция”.

Средства генеративного проектирования, обладающие возможностью выдавать на-гора конструкционные идеи с немислимой для людей скоростью, несомненно относятся к породе “беспилотных” *CAD*. Для многих ветеранов отрасли, обученных геометрической “лепке”, появление этих средств означает фундаментальное изменение природы их работы, и это неутешительная мысль.

“Когда я перестал заниматься архитектурой и перешел в строительство, я обнаружил, что существует множество конструкций, которые теоретически должны работать, но на самом деле не работают”, – говорит г-н *Cichy*. – “На строительной площадке есть обстоятельства, которые меняют проект. А изменение даже на миллиметр порождает каскадный эффект”.

Для того чтобы разработать хорошую расчетную модель или правильно настроить сценарий генерации конструкций, вам могут понадобиться дополнительные исходные данные от тех, у кого есть свой личный опыт – тех, кто уже вовлечен в преобразование цифровых идей в физические объекты.

“Ветераны обладают огромным опытом, чтобы рассказать вам, что работает, а что нет”, – отмечает г-н *Cichy*. – “Поэтому, если вы хотите построить расчетную модель со всеми важными переменными, то они – это именно те, кто может вам помочь”.

“Эта технология не заменяет инженеров-конструкторов, а увеличивает их возможности исследовать весь универсум решений”.

Steven Hooper,
директор *Autodesk* по стратегии производства

“При генеративном проектировании нет правильного ответа, но есть множество жизнеспособных альтернатив”, – сказал *Steven Hooper*, директор *Autodesk* по стратегии производства, в своём выступлении на конференции *Autodesk University*. – “Эта технология не заменяет инженеров-конструкторов, а увеличивает их возможности исследовать весь универсум решений”. 🗨