

Р. В. БЫРКА

Россия, г. С.-Петербург, ОАО «ЭлектроРадиоАвтоматика»
E-mail: era48@mail.ru

Дата поступления в редакцию
27.03 2006 г. — 22.01 2007 г.

Оппонент д. ф.-м. н. О. А. ПОДСВИРОВ
(СПГМТУ, г. С.-Петербург)

ЭВОЛЮЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КАК МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ РЭС

Предлагается метод решения задач синтеза формы и структуры конструктивных элементов и модулей для перспективных РЭС.

Снижение массы радиоэлектронных средств (РЭС) за счет более рационального использования материалов позволяет улучшить эксплуатационные характеристики и расширить область применения аппаратуры. Минимальную массу имеют, как правило, равнопрочные изделия. Конструирование таких изделий сводится к воспроизведению оптимальной формы, диктуемой условием равнопрочности. В качестве такого условия может рассматриваться, например, равенство запасов прочности каждого достаточно малого элемента объема материала несущей конструкции (НК).

При заданных механических воздействиях выбор оптимальной конфигурации элементов НК РЭС целесообразно выполнять на основе исследования напряженно-деформированного состояния с учетом действующих эксплуатационных нагрузок и конструктивно-технологических ограничений. Однако аналитические методы расчета позволяют определить напряженно-деформированное состояние элементов НК с удовлетворительной для практики точностью лишь для сравнительно немногих простейших случаев нагружения и простой конфигурации. Эффективность уменьшения чрезмерных запасов прочности как способа снижения массы РЭС зависит от соотношения массы расчетных и нерасчетных элементов НК.

Для реализации численных методов поиска конструктивной формы или конфигурации элементов и узлов, несущих заданную нагрузку, по результатам исследования напряженно-деформированного состояния разработаны алгоритмы, основанные на следующих положениях:

- поиск оптимальной конфигурации осуществляется путем целенаправленного многократного формирования границ области решения краевой задачи;

- каждое преобразование выполняется на расчетной модели и с физической точки зрения соответствует введению, удалению или перераспределению достаточно малых объемов материала конструктивной формы;

- нагрузка элементов объема материала в соответствии с выбранной гипотезой разрушения оцени-

вается, например, по главным нормальным или максимальным касательным напряжениям, энергии деформации или формоизменения и т. д.;

- оптимизация формы выполняется с целью выравнивания распределения нагрузки по объему материала. В качестве оптимальной рассматривается конструктивная форма, каждый элемент объема материала которой находится одинаково далеко от условий разрушения или несет нагрузку, достаточно близкую к средней нагрузке всех элементов объема.

На основе изложенных выше положений формализована задача моделирования эволюции или развития формы конструкции при заданных тепловых и механических воздействиях. Моделирование проводится при выборе некоторой исходной (начальной) формы, которая может быть как избыточной, так и недостаточной по объему используемого материала. Каждый шаг многошаговой процедуры преобразований включает автоматическое формирование системы разрешающих уравнений, расчет напряженно-деформированного состояния, исследование распределения нагрузки по объему материала, преобразование формы конструкции [1—4].

Задачи прикладного оптимального проектирования

Естественной целью проектирования является получение некоторого положительного эффекта при ограничениях на ресурсы и обеспечении необходимых условий работы исполнителей. Моделирование традиционно рассматривается как этап проектирования, когда математические модели используются для оценки и анализа системы до ее воплощения в материале. Математическое моделирование предполагает количественное описание функций, которые должны выполнять система и любая требуемая подсистема. В частности, при проектировании НК РЭС по заданным эксплуатационным требованиям выбираются конфигурация и размеры частей, далее проводится математическое исследование конструкции, определяется ее реакция на требуемую нагрузку. Если поведение НК не является удовлетворительным, проводится изменение проекта, и конструкция подвергается повторному математическому исследованию. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не будет получен наилучший или удовлетворительный проект. Для получения лучшей НК необходимо иметь возможность исследовать все возможные варианты ее исполнения.

Наиболее остро задача синтеза стоит при обеспечении жесткости и прочности НК. Как правило, имеется возможность провести анализ НК, подверженных заданной нагрузке, получить значения напряжений, смещений и собственных частот. При этом может оказаться неясным, какую форму и структуру НК необходимо выбрать, какие пропорции должны быть установлены для наиболее эффективного использования материала при удовлетворении требований жесткости и прочности [5].

Традиционный подход к оптимальному проектированию предполагает наличие модели системы НК как неотъемлемой части описания проекта. Исходя из ограничений и требований к проекту выбирается конечное фиксированное число переменных проектирования $P=[p_1, \dots, p_k]^T$. При этом множество P в пространстве R^k , из которого выбираются переменные проектирования p , определяется как множество их допустимых значений. Выделяется переменная состояния $Q=[q_1, \dots, q_n]^T$, которая описывает состояние системы. Переменная состояния Q может однозначно определяться, например, из системы алгебраических уравнений, описывающих равновесие системы, или как решение задачи Коши, описывающей динамику системы, если выбрана переменная проектирования P . Причем выбор лучшего проекта из множества допустимых состоит в нахождении наибольшего или наименьшего значения некоторой функции переменной проектирования p из P . Такой подход предопределяет трактовку задач оптимального проектирования как задач минимизации критерия качества $\psi_0(P, Q)$ при фиксированной структуре проекта, представляемой множеством P .

Очевидны два принципиально различных метода решения задач оптимизации. Первый — основан на знании свойств выражений, задающих критерий качества и ограничения в точке экстремума. Второй, более распространенный, основан на исследовании локальных областей. Этот метод принято называть прямым методом. Задается начальное приближение для вектора переменных проектирования P_0 . Далее можно попытаться найти второй вектор P_1 , который лежит в области допустимых значений или близко от нее, таким образом, чтобы отвечающая этому вектору точка на поверхности, задаваемой критерием качества, лежала ближе к точке экстремума. Обычно имеется информация лишь о малой части поверхности, соответствующей критерию качества, что обусловлено локальными свойствами выполняемых математических операций. С использованием только этой локальной информации могут быть построены алгоритмы, обеспечивающие нахождение нового вектора P_1 , для которого движение на поверхности, задаваемой критерием качества, осуществляется к точке, лежащей ниже точки, отвечающей предыдущему приближению P_0 . Многочисленные методы оптимизации основаны на этой достаточно простой идее [6].

Задачи, в которых проектирование и функционирование системы описывается конечным числом переменных проектирования, определяются как конечномерные. Все изложенное относится к системам, проектирование которых сводится к отысканию ко-

нечного числа параметров или конечномерного вектора параметров. Эти векторы выбираются таким образом, чтобы система удовлетворяла заданным ограничениям и была оптимальна в некотором смысле. Математическую модель для класса задач оптимального проектирования, введенного выше, принято называть параметрическим оптимальным проектированием [7].

Многие практически значимые задачи снижения материалоемкости НК формулируются как задачи выбора формы, элементов, несущих определенную нагрузку. Известны решения задач нахождения распределения геометрических характеристик по определенному направлению, связанному с конфигурацией проектируемого элемента. Типичными, например, являются задачи отыскания распределений толщин для балок и пластин. Классическим примером является задача проектирования колонны минимальной массы. Здесь для определения формы проектируемого элемента требуется выбрать функции формы, отвечающие оптимальному проекту элемента НК. В этом случае необходимо решать задачи с граничными условиями и находить, например, распределение деформаций и напряжений в упругом теле.

Очевидно, что функция формы должна определиться из решения оптимизационной задачи. Кроме того, действительные значения минимизируемых величин определяются функциями, задающими указанные кривые. Поэтому рассматриваемые функции формы являются функционалами [8]. Формулировка оптимизационной задачи проектирования здесь отличается от изложенной выше: определить непрерывную функцию распределения материала $u(x)$ на отрезке $x^0 \leq x \leq x^1$ так, чтобы минимизировать функционал $\psi_0(u(x), q)$. В этом случае рассматриваются системы, которые описываются функциями, определенными в некоторой заданной области пространства. Математически эти задачи трактуются как бесконечномерные.

Для бесконечномерных задач переменная состояния q определяется краевой задачей при заданной переменной проектирования $u(x)$. Данный класс задач принято относить к задачам оптимального проектирования систем с распределенными параметрами. Выделим два отличающихся типа переменных системы. В первом случае проект системы будет определен, как только определится вектор параметров проектирования P . Во втором случае проект определяется функцией $u(x)$ распределения материала. В каждом случае переменные состояния Q представляют собой отклик системы на приложенную нагрузку.

В принципе уравнения состояния можно разрешить относительно переменных проектирования и подставить результат в ограничения. Но зачастую даже в простой задаче подобное преобразование непрактично, в реальных задачах большой размерности оно практически неосуществимо [9].

Краткий обзор концепций и методов прикладного оптимального проектирования позволяет сделать следующие выводы.

Для выбранного проекта в настоящее время не существует методики автоматической оптимизации, ко-

торая могла бы давать решение любой поступившей задачи. Однако существует возможность регулярного подхода к решению задач синтеза и оптимизации проекта. Этот подход, возможно, приведет к оптимальному решению, если материальные и временные затраты на его реализацию окажутся в допустимых разумных пределах.

Анализ функции фактически означает неформализованный синтез структуры проектируемого изделия, что, в свою очередь, позволяет задать вектор переменных проектирования P и переменных состояния Q . При этом не гарантируется существование номинального или приемлемого и, тем более, оптимального решения. Зачастую необходимо выполнять процедуру повторного синтеза с последующей параметрической оптимизацией до получения приемлемого решения. Повторный синтез структуры предполагает изменение вида и числа компонентов вектора переменных проектирования P и вектора переменных состояния Q , что может привести к необходимости модификации или изменения метода параметрической оптимизации.

Предлагаемые методы проектирования систем с распределенными параметрами обеспечивают возможность оптимизации выбранных и установленных конструктивных форм. Определение переменной проектирования $u(x)$ соответствует изменению распределения материала и приводит к вычислению топологически подобных конструкций. С математической точки зрения метод соответствует изменению границ области по результатам решения краевой задачи. Причем граница, подлежащая вычислению, устанавливается проектировщиком до решения задачи оптимального проектирования. Следовательно, и в данном случае задача оптимального проектирования решается для фиксированной структуры проекта.

Автоматическое проектирование совершенных изделий возможно на основе формализации задачи синтеза проекта, т. е. вычисления вида и числа компонентов вектора P конечномерных задач проектирования и формирования границ, устанавливаемых функцией распределения материала $u(x)$ для бесконечномерных. В этом случае возможна реализация процедур синтеза оптимальных конструктивных форм и структур с последующей параметрической оптимизацией, процедур изменения вида и числа компонентов вектора P , исключения и введения границ $u(x)$, для которых определены функции распределения материала.

Эволюционное моделирование

Решение проблемы синтеза формы и структуры конструкций может быть сопоставлено с моделированием поведения некоторого «разумного организма», решающего задачу прогнозирования. Решение подобных задач может быть основано на методе эволюционного моделирования, являющегося одним из направлений создания искусственного интеллекта [10, 11].

Эволюция состоит в усовершенствовании алгоритма (например, управления процессом проектирования) или модели (например, проектируемого объекта). Эволюция основана на порождении «модели по-

томка» и ее сопоставлении с «моделью родителя». Если имеет место улучшение состояния, изменение закрепляется — «потомок» выживает и переходит в категорию «родителя». Процесс заканчивается вырождением, когда «потомки» повторяют «родителей» или когда при заданных условиях дальнейшее развитие невозможно. В частном случае применения эволюционного моделирования при проектировании конкретных изделий генерация каждого последующего варианта модели осуществляется как путем целенаправленного усовершенствования, так и путем изменения структуры существующего варианта. Таким образом, предполагается возможность формального построения модели проектируемого объекта и ее формального многократного преобразования. Решение задачи синтеза с этой точки зрения рассматривается как моделирование поведения проектировщика, последовательно прорабатывающего различные варианты проектируемого изделия.

Для моделирования эволюции необходимо выбрать вид математического представления проектируемого объекта, претерпевающего изменения. Предполагая решение задачи синтеза формы конструкций по заданным воздействиям, например, тепловым или механическим, целесообразно отчасти воспользоваться для математического представления объекта моделью клеточного автомата [12].

Клеточные автоматы являются дискретными динамическими системами. Их поведение полностью определяется в терминах локальных зависимостей, как и большого класса непрерывных динамических систем, определенных уравнениями в частных производных. В этом смысле клеточные автоматы являются дискретными аналогами физического понятия поля. Пространство представлено сеткой, каждая ячейка или клетка которого характеризуется заданным набором данных. Законы существования выражаются определенным набором соотношений, позволяющих для каждой клетки на каждом шаге вычислить ее новое состояние по состоянию ее близких соседей. Законы системы в данном случае являются локальными и всюду одинаковыми. Клеточные автоматы находят применение для моделирования различных физических процессов, таких как диффузии, теплопередачи, течения жидкостей и газов и т. д. Отметим методологическую ценность идеи выбора некоторой области с предопределенными свойствами, обеспечивающими моделирование развития структуры или процесса.

Однако клеточные автоматы являются весьма специализированными параллельными вычислительными устройствами, для которых, например, число возможных состояний каждой клетки регулярного клеточного поля конечно, в связи с чем они фактически не позволяют моделировать физические процессы при сложных граничных условиях. Необходимо построение модели развивающейся структуры или конструктивной формы. Модель должна обеспечивать представление развития или многократного преобразования исследуемого объекта.

Обычно математическая модель представляется в виде системы уравнений, описывающих состояние

объекта. В частности, состояние материала НК может быть представлено описанием в виде уравнений в частных производных. В качестве примера можно привести задачи исследования напряженно-деформированного состояния конструкций при заданных механических воздействиях, исследования температурных режимов, режимов электростатики и магнитостатики. Численные методы решения уравнений в частных производных получили широкое распространение и интенсивно развиваются в рамках систем автоматизированного проектирования (см., например, [3, 4]).

Однако распространенные методы решения задач, описываемых уравнениями математической физики, предполагают выбор фиксированной области решения или области определения искомой функции и, следовательно, обеспечивают решение задачи анализа или исследования заданной конструктивной формы. При этом не обеспечивается возможность оперативного изменения и разделения областей решения различной физической природы НК [13]. В этом случае получаются результаты частного решения, которые могут составлять основу для исследования НК как сложной системы при незадаваемых ограничениях на модули высшего уровня иерархии. Определение лучшей структуры и лучших значений параметров возможно при многократном исследовании решений, каждое из которых требует соответствующего выбора переменных проектирования и структуры проекта НК как сложной системы в целом. Следовательно, решение задачи поиска или вычисления оптимальной конструктивной формы проектируемого изделия предполагает необходимость исследования большого числа вариантов его возможного исполнения и соответственно многократного решения краевых задач, отличающихся конфигурацией области решения, начальными и граничными условиями.

Предполагая возможность автоматического синтеза структуры конструкций, необходимо обеспечить формальное решение задач композиции и декомпозиции конструктивных форм, что соответствует как объединению, так и разделению областей решения краевых задач [14]. При этом решение задач вычисления или синтеза формы НК по заданным эксплуатационным воздействиям на основе методов эволюционного моделирования возможно при автоматическом формировании разрешающих уравнений, вычислении искомой функции, исследовании решения и, возможно, преобразовании области решения.

Модель развития формы НК может быть построена на основе определения области проектирования как области возможного формирования и решения краевых задач. Предполагается, что область проектирования охватывает область решения краевой задачи. Возможные преобразования могут приводить как к выделению нескольких отличных от исходной областей решения, так и к последующему объединению выделенных. При этом реализуется принцип композиции и декомпозиции, являющийся необходимым условием решения задач синтеза НК по заданным воздействиям и ограничениям. С математической точки зрения модель развития формы конструкции обеспе-

чивает многократное целенаправленное формирование границ области, определение искомой функции по результатам исследования решений краевых задач. С физической точки зрения модель развития предполагает многократное целенаправленное наращивание, удаление или перераспределение материала некоторой исходной формы или заготовки. Заготовка, как правило, примитивна по форме, может быть явно избыточной или недостаточной по объему используемого материала.

Преобразование или изменение формы конструкции с целью ее улучшения выполняется по результатам исследования поведения НК при заданных воздействиях, исследования распределения нагрузки по объему материала. В зависимости от предъявляемых эксплуатационных требований, технологических ограничений преобразование формы может осуществляться с целью снижения массы конструкции, обеспечения необходимой жесткости или прочности при заданном объеме используемого материала, предотвращения возможного разрушения или потери работоспособности. Величина нагрузки в локальной области оценивается путем сопоставления значения некоторой физической величины, например энергии деформации или энергии формоизменения, характеризующей состояние материала при заданных воздействиях, и предельно допустимого значения той же величины, полученного по результатам испытаний исследуемого материала. В общем случае при заданных внешних воздействиях нагрузка по объему материала распределена неравномерно. При этом преобразование формы целесообразно выполнять с целью выравнивания распределения нагрузки по объему материала.

Используя представление формы конструкции в виде совокупности взаимосвязанных «пустых» и «заполненных материалом» элементов объема, очевидно, ее можно преобразовать путем «введения материала» в «пустые» элементы объема, «удаления материала» из «заполненных» и перераспределения материала, т. е. «введения» материала, «удаленного» из «заполненных» элементов объема, в «пустые» элементы. В первом случае преобразование приводит к уменьшению массы конструкции, во втором — к ее увеличению. При перераспределении материала масса конструкции не изменяется.

Пусть выбрана прямоугольная область проектирования со сторонами l_1, l_2

$$G = (0 \leq x \leq l_1, 0 \leq y \leq l_2)$$

и прямоугольными элементами объема, размеры которых h_{xi}, h_{yj}, h_z определяются неравношаговой сеткой ω_h и толщиной пластины h_z . В этом случае

$$l_1 = \sum_{i=1}^N h_{xi}, l_2 = \sum_{j=1}^M h_{yj}.$$

В области проектирования имеем $D = \{d_1, \dots, d_{Ne}\}$, $Ne = NM$ элементов объема. Если $P = \{p_1, \dots, p_{Ne}\}$ — признаки наличия материала и $p_e \in \{0, 1\}$, можно выделить подмножества «пустых» R и «заполненных материалом» M элементов объема:

$$M=\{d_e/p_e=1\}; R=\{d_e/p_e=0\};$$

$$m(M)+m(R)=NM=N_e.$$

Изменение формы и (или) структуры конструкции на k -м шаге преобразования при «введении материала» соответствует перераспределению:

$$m(M_k) = m(M_{k-1}) + m(\bar{M}_{k-1});$$

$$m(R_k) = m(R_{k-1}) - m(\bar{R}_{k-1}).$$

Здесь $m(M_k)$, $m(R_k)$ и $m(M_{k-1})$, $m(R_{k-1})$ — число «заполненных материалом» и «пустых» элементов объема на шаге преобразования k и $k-1$, соответственно; $m(\bar{M}_{k-1})$ и $m(\bar{R}_{k-1})$ — число «пустых» элементов, «заполняемых материалом», и число «заполненных» элементов, материал из которых «удаляется» на шаге преобразования $k-1$.

Аналогично, «удаление материала» соответствует соотношениям

$$m(R_k) = m(R_{k-1}) + m(\bar{R}_{k-1});$$

$$m(M_k) = m(M_{k-1}) - m(\bar{M}_{k-1}).$$

При перераспределении материала на шаге преобразования $k-1$ материал «вводится» в $m(\bar{M}_{k-1})$ элементов объема и из $m(\bar{R}_{k-1})$ элементов «удаляется».

По объемам «вводимого» $m(\bar{M}_{k-1})$ и «удаляемого» $m(\bar{R}_{k-1})$ материала устанавливаются различные условия развития или совершенствования конструкций.

Вычисление формы конструкции по заданным воздействиям можно выполнить путем многократного целенаправленного преобразования некоторой исходной формы или заготовки. При вычислении формы путем многократного удаления материала выбирается избыточная по объему материала заготовка, при введении или наращивании — объем материала заготовки меньше объема материала НК. При перераспределении материала объемы материала заготовки и конечной формы конструкции равны. Если цель преобразования состоит в выравнивании распределения нагрузки по объему материала, то, очевидно, удалению подлежит материал, характеризующийся минимальной нагрузкой при заданных воздействиях. При преобразовании недостаточной по объему материала заготовки необходимо «вводить» материал в «пустые» элементы объема НК, прилегающие к граням граничных элементов, несущих максимальную нагрузку.

Предлагаемый метод представляет целесообразным для создания алгоритмов и программ синтеза формы и структуры конструктивных элементов и использования в качестве программного модуля систем автоматизированного проектирования несущих конструкций радиоэлектронных средств.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Хог Э., Чой К., Комков В. Анализ чувствительности при проектировании конструкций.— М.: Мир, 1988.
2. Кофанов Ю. Н. Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.
3. Тартаковский А. М. Математическое моделирование в конструировании РЭС.— Пенза: Пенз. гос. техн. ун-т, 1995.
4. Черненко В. Д. Моделирование процессов механико-прочностного проектирования конструкций радиоэлектронных средств.— СПб: Политехника, 2003.
5. Хог Э., Арора Я. Прикладное оптимальное проектирование. Механические системы и конструкции.— М.: Мир, 1983.
6. Баничук Н. В. Введение в оптимизацию конструкций.— М.: Наука, 1986.
7. Голубев А. В. Параметрический синтез многоуровневых конструкций радиоэлектронных средств.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 1998.
8. Черных К. Ф. Нелинейная теория упругости в машиностроительных расчетах.— Л.: Машиностроение, 1986.
9. Чернышев А. А. Теоретические основы конструирования и надежности радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1998.
10. Автоматизация поискового конструирования (искусственный интеллект в машинном проектировании) / А. И. Половинкин, Н. К. Бобков, Г. Я. Буш и др.— М.: Радио и связь, 1981.
11. Искусственный интеллект: применение в интегрированных производственных системах / Под ред. Э. Кьюсиака.— М.: Машиностроение, 1991.
12. Исследование операций. Т. 1, 2 / Под ред. Дж. Моудера, С. Элмаграби.— М.: Мир, 1981.
13. Шерин К. Ю. Синтез типоразмерных рядов базовых несущих конструкций радиоэлектронных средств АСУ.— СПб: СПб ГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2000.
14. Лутченков Л. С. Автоматизированное проектирование несущих конструкций радиоэлектронных средств.— М.: Радио и связь, 1991.

в портфеле редакции

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Особенности проектирования дискретных СВЧ-фазовращателей с переключаемыми каналами. (Украина, г. Львов)
- Современное состояние и основные тенденции развития волноводных излучателей на основе соединений A^3B^5 . (Узбекистан, г. Ташкент)



- Твердотельные датчики специализированных информационно-измерительных сетей. (Украина, г. Одесса)
- Проектирование реконфигурируемых систем на ПЛИС. (Украина, г. Киев)
- Программируемый блок управления для промышленного лазера. (Украина, г. Черновцы)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

в портфеле редакции