

## МНОГОКРИТЕРИАЛЬНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОГО МОНТАЖА

Э.И.Ткачев, С.К.Корниенко

Рассматриваются вопросы многокритериальной оптимизации процесса проектирования печатного монтажа. Показывается влияние отдельных этапов проектирования на качество изделия в целом. Производится оценка качественных и количественных характеристик объекта проектирования. Приводится обоснование целевых функций автоматизированного проектирования. Рассматриваются вопросы организации трассировки печатных соединений.

Розглядаються питання багатокритеріальної оптимізації процесу проектування друкованого монтажу. Показується вплив окремих етапів проектування на якість виробу в цілому. Робиться оцінка якісних та кількісних характеристик об'єкту проектування. Наводиться обґрунтування цільових функцій автоматизованого проектування. Розглядаються питання організації трасування друкованих з'єднань.

Questions of multicriteria optimizing printed montage designing process are examined. Separate stages of designing influence on quality of manufacture as a whole is shown. Evaluation of designing object qualitative and quantitative references is made. Computer aided design purpose functions basis is given. Questions of printed connections routing organization are examined.

Задача проектирования печатного монтажа традиционно считается одной из наиболее сложных и решается путем последовательного выполнения этапов компоновки, размещения и трассировки. Выполнение этих этапов в едином цикле проектирования невозможно. Причиной этого является большая размерность задачи, связанная с необходимостью учета большого количества всевозможных критериев и ограничений, а также различный характер алгоритмов, реализующих указанные этапы. Если компоновка и размещение выполняются с помощью последовательных и итерационных алгоритмов, то синтез топологии печатного монтажа представлен, как правило, алгоритмами последовательного типа.

Опыт последних лет проектирования радиоэлектронных средств с использованием САПР показывает необходимость обобщения накопленных знаний в вопросах качественных характеристик проектируемых устройств, а также показателей качества решения отдельных задач в общем цикле конструкторского проектирования.

Показатели качества решения задач проектирования будем рассматривать в двух аспектах:

- обобщенные показатели оценки качества решенной задачи и возможность их использования для сравнительной оценки проектирования объектов различной сложности одним или различными методами;
- частные показатели качества решения отдельных этапов решаемой задачи с учетом конкретных ограничений конструктивно-технологического характера реального проектирования.

Рассмотрим пути решения задачи многокритериальной оптимизации на отдельных этапах процесса проектирования печатного монтажа. При автоматизированном проектировании на каждом шаге итерации вычисляется целевая функция, являющаяся математическим аналогом показателя качества (или их совокупности). При этом из множества возможных выбирается вариант, имеющий оптимальное значение целевой функции при заданных ограничениях.

Поскольку при проектировании печатного монтажа необходимо учитывать множество критериев, зачастую противоречивых, эта задача относится к классу задач многокритериальной оптимизации, или задач оптимизации по комплексу показателей качества.

Если оптимизация по одному из критериев не приводит к ухудшению других показателей качества, то такие критерии будем называть согласованными. Например, при проектировании цифровых устройств необходимо добиться максимального значения их импульсной помехоустойчивости (первый критерий оптимизации). Задачей реального проектирования является минимизация самого длинного проводника (второй критерий оптимизации). Данные два критерия являются согласованными, так как уменьшение длины проводника приводит к уменьшению числа пересечений проводников, расположенных на разных сторонах печатного узла (уменьшение емкостных наводок). С другой стороны, при этом снижается вероятность близко расположенных и параллельно идущих длинных проводников (уменьшение индуктивной наводки). В целом уменьшение длины проводников приводит к уменьшению взаимных электромагнитных наводок, снижению вероятности ложных переключений (сбоев) цифровых устройств, а в итоге - к увеличению импульсной помехоустойчивости этих устройств.

Приведенный пример указывает на то, что многокритериальная оптимизация по согласованным критериям не требует поиска главного показателя качества на любом этапе решения задачи проектирования. То есть оптимизация топологии (взаимное расположение проводников) и некоторого геометрического параметра (максимальной длины проводника)

согласованно приводит к оптимизации другого критерия (импульсной помехоустойчивости), максимум которого необходимо получить.

Если оптимизация по одному критерию многокритериальной оптимизации не дает однозначной оптимизации по другим критериям, то такие критерии являются несогласованными. В таких случаях можно использовать различные стратегии решения задачи:

- решать задачи оптимизации по каждому критерию отдельно, а затем методом частичных уступок найти решение, в котором каждый критерий находился бы в заданном интервале допустимых значений [1];
- решать общую задачу оптимизации по всем критериям одновременно, используя весовые коэффициенты различных критериев оптимизации, полученные методами экспертных оценок для каждого конкретного этапа проектирования.

Примером несогласованных критериев многокритериальной оптимизации решения задачи является получение такого размещения конструктивных элементов (КЭ) на монтажно-коммутиационном пространстве (МКП), при котором:

- геометрия и длина проводников позволяют быстро и качественно решить задачу трассировки (топологический критерий оптимизации);
- взаимное расположение конструктивных элементов позволяет создать виброустойчивую конструкцию ПУ (механический критерий оптимизации);
- взаимное расположение теплонагруженных КЭ позволяет создать равномерное тепловое поле ПУ с допустимыми тепловыми характеристиками (тепловой критерий оптимизации).

Процесс размещения элементов является итерационным процессом, в ходе которого на каждом шаге необходимо решать две основные задачи: выбор элемента-претендента и выбор позиции отображения элемента на МКП.

Поскольку размещение является этапом, предшествующим трассировке, его необходимо выполнять так, чтобы, во-первых, удовлетворялись общие критерии проектирования, а во-вторых, создавались соответствующие условия для проведения последующей трассировки. Основным критерием размещения являются топологические параметры: геометрия и длина соединений. Улучшение этих параметров достигается, как известно, таким размещением элементов, при котором рядом располагаются наиболее связанные элементы.

Выбор элемента-претендента может производиться, например, по абсолютной или относительной связности с ранее размещенными элементами. Однако целевые функции, использующие эти критерии, страдают определенной нечувствительностью. Поэтому

предлагается для выбора элемента-претендента использовать интегральную функцию связности, учитывающую:

- относительную связность элементов;
- относительную мощность образов;
- относительный размер цепи.

Формализацию показателей качества будем осуществлять применительно к модели элементного комплекса  $Q = (X, E)$  [2].

Перед выполнением размещения все элементы необходимо отсортировать по интегральной функции связности:

$$F^Q(x_i) = K_\Gamma \cdot K_{CB} \cdot \sum K_{Ei} \quad (1)$$

где  $K_\Gamma$  - коэффициент относительной мощности образа элемента  $x_i \in X$  на множестве элементов сортировки для модели  $Q = (X, E)$ ;

$K_{CB}$  - коэффициент относительной связности образа элемента  $x_i \in X$  на множестве элементов сортировки для модели  $Q = (X, E)$ ;

$K_{Ei}$  - коэффициент относительного размера цепи  $E_i \subset E$  элемента  $x_i \in X$  на множестве элементов сортировки для модели  $Q = (X, E)$ .

В процессе размещения выбор элементов-претендентов осуществляется в соответствии с этим упорядоченным списком. Сортировка элементов по коэффициенту  $K_{Ei}$  позволяет не только повысить быстродействие алгоритма размещения, поскольку отпадает необходимость формирования на каждом шаге множества элементов-претендентов, но также учитывать помимо топологических параметров требования помехоустойчивости и теплового баланса. Учет последних требований достигается принудительным "разнесением" элементов в списке, что автоматически приводит к раздвижке элементов на коммутационном поле.

Этап выбора позиции отображения КЭ также позволяет кроме топологического показателя качества учитывать и другие параметры проектируемого печатного узла. Например, если известна проектная ситуация данного шага размещения, то возможно определение характеристики позиции отображения КЭ по механическим и тепловым показателям качества. Механический параметр позиции отображения элемента с учетом ранее размещенных элементов и способов крепления печатного узла характеризуется показателем жесткости этой позиции при внешних воздействиях: вибрациях, ударах и ускорениях.

Каждый из множества анализируемых элементов  $x_i$  имеет свои геометрические и массовые характеристики. В техническом задании на проектируемый печатный узел, как правило, задаются способы установки и крепления КЭ, что позволяет сделать расчет уровня частоты колебаний в месте установки КЭ как функцию, определяемую жесткостью позиции ( $K_g$  - коэффициент жесткости позиции) и массы элемента ( $K_m$  - коэффициент массы КЭ). Таким образом, механический показатель качества моделируется частотой вибраций в позиции отображения КЭ. Обобщенный вид целевой функции механического показателя качества имеет вид:

$$W_v = f(K_g, K_m), \quad (2)$$

где  $K_g$  - коэффициент учета геометрических размеров позиции отображения элемента

$$x_i \in X \text{ модели } Q = (X, E);$$

$K_m$  - коэффициент учета массо-габаритных характеристик отображения элемента

$$x_i \in X \text{ модели } Q = (X, E);$$

$W_v$  - круговая частота с размерностью рад/сек.

В таком виде целевая функция не может быть использована в обобщенном функционале цены назначения элемента  $x_i \in X$  в позицию  $p_j \in P$ , т.к. топологическая часть имеет безразмерный характер. Если заведомо известно, какая максимальная частота  $W_{max}$  будет воздействовать на проектируемый печатный узел, то механическая часть конструкции целевой функции цены назначения КЭ в позицию КП будет иметь следующий вид:

$$F(x_i^m) = \frac{W_v}{W_{max}}, \quad (3)$$

где  $W_{max}$  – максимально допустимая круговая частота, определенная техническим заданием на проектируемый печатный узел.

Так как при размещении элемента необходимо искать позицию с минимальным значением  $F(x_i^m)$ , то в обобщенной целевой функции поиска оптимальной позиции размещения КЭ функционал (3) следует помещать в знаменатель целевой функции. Таким образом, конструкция обобщенной целевой функции по двум показателям качества имеет вид:

$$F_2^{Pj}(x_i) = \max \frac{F_{x_i}^{Pj}}{F(x_i^m)}, \quad (4)$$

где  $F_{x_i}^{Pj}$  - асимметрия характеристического ряда распределения лингвистических переменных, максимальное значение которой ищется на множестве

анализируемых позиций  $P_a$ ;

$F(x_1^m)$  - относительное значение частоты вибраций, минимум которой ищется на множестве анализируемых позиций  $P_a$ .

Тепловой показатель позиции отображения КЭ следует рассматривать в двух аспектах. С одной стороны, это теплонагруженность позиции, определяемая как совокупность суммарного теплового воздействия на позицию ранее размещенных элементов с учетом их расстояния от данной позиции и выделяемой ими тепловой мощности. С другой стороны, КЭ отображения  $x_i \in X_a$  имеет свои тепловые характеристики (выделяемую тепловую мощность, чувствительность к внешнему тепловому воздействию).

Тогда целевая функция теплового показателя качества имеет вид:

$$F(x_1^t) = (F_t^{P_j} + F_t^{X_i}), \text{ (град } C^0) \quad (5)$$

где  $F_t^{P_j} = \frac{\sum_{k=1}^{|X_p|} F_t^{X_k}}{d(x_1, x_k)}$  - теплонагруженность позиции от ранее размещенных элементов

$X_p$  с учетом их расстояния  $d(x_i, x_k)$  от позиции  $p_j \in P_a$  ( $P_a$  - множество анализируемых позиций) отображаемого элемента  $x_i \in X_a$  ( $X_a$  - множество анализируемых элементов);

$F_t^{X_i}, F_t^{X_k}$  - тепловая мощность рассеяния КЭ  $x_i \in X_a$  и  $x_k \in X_p$ .

Из технических условий на размещаемый КЭ известно максимально допустимое тепловое воздействие  $F_t^{X_{i\max}}$ , что позволяет также сделать безразмерной функцию (5), которая будет иметь вид:

$$F(x_1^t) = \frac{F_t^{P_j} + F_t^{X_i}}{F_t^{X_{i\max}}}. \quad (6)$$

Знаменатель формулы (6) является константой для рассматриваемого элемента отображения, а числитель - изменяющийся параметр, величина которого зависит от позиции отображения элемента  $p_j \in P_a$ . При размещении необходимо стремиться к уменьшению значения формулы (6), поэтому в обобщенную целевую функцию поиска позиции отображения элемента  $x_i \in X_a$  его следует использовать как сомножитель знаменателя

формулы (5). Тогда целевая функция поиска позиции по трем критериям оптимизации будет иметь вид:

$$F_3^{Pj}(x_i) = \max \frac{F_{x_i}^{Pj}}{F(x_i^m) * F(x_i^t)}. \quad (7)$$

Если механический или тепловой параметр являются нечувствительными на данном шаге размещения, то их следует принимать равными единице, что автоматически исключает их влияние на получаемое значение в формуле (7).

Таким образом, на этапе размещения элементов проводится оптимизация проектных решений по критериям помехоустойчивости, тепловым и механическим воздействиям. Однако, если оптимизация по последним двум параметрам носит окончательный характер, поскольку элементы-источники тепловых воздействий и элементы-приемники разнесены относительно друг друга по МКП, а элементы, критичные с точки зрения механики, размещены в "зонах безопасности", то вопросы помехоустойчивости требуют своего дальнейшего развития.

На заключительном этапе проектирования печатного монтажа, этапе трассировки, производится оптимизация как по топологическим критериям печатного монтажа (технологические параметры и ограничения), так и окончательная оптимизация по критерию помехоустойчивости. Это достигается рациональной организацией процесса трассировки [3,4]. При этом в рамках единого процесса топологического проектирования выделяются отдельные взаимосвязанные этапы, оптимизация выполнения которых позволяет оптимизировать итоговые проектные решения. С этой целью используются проектные процедуры динамического ранжирования и выбора оптимального маршрута проектирования.

Целью динамического ранжирования (ДР) является такое оптимальное упорядочивание цепей, при которой для каждой цепи обеспечиваются достаточные трассировочные ресурсы и, в то же время, сводится к минимуму уменьшение топологических ресурсов для последующих цепей.

На каждом шаге трассировки из множества непротрассированных цепей (фрагментов цепей) формируется подмножество цепей  $E_k = \{e_i\}$ , предназначенное для трассировки на k-ом шаге. Целевая функция ДР (условие выбора i-ой цепи) описывается функционалом

$$F_i = \text{opt}(K_{\sum i}, Z_i, T_{ij}, P_{ij}), \quad (8)$$

где  $K_{\sum i}$  - комплексный показатель качества цепи;

$Z_i$  - средняя загруженность области трассировки i-ой цепи;

$T_{ij}$  - степень топологической несовместимости цепей;

$P_{ij}$  - коэффициент совместимости цепей по помехоустойчивости.

$$K_{\Sigma} = \sum_{m=1}^n \alpha_m K_m,$$

где  $K_m$  - частные показатели качества, учитывающие метрические параметры цепи;

$\alpha_m$  - весовые коэффициенты, определяемые степенью плотности монтажа  $K_{\text{ПМ}}$ .

$$K_{\text{ПМ}} = \frac{\sum_{j=1}^{K_{\text{сл}}} S_{\text{эф}j}}{L_{\Sigma}}$$

где  $K_{\text{сл}}$  - количество слоев печатного монтажа;

$L_{\Sigma}$  - ориентировочная суммарная длина цепей;

$S_{\text{эф}j}$  - подмножество свободных дискретов  $j$ -го слоя печатного узла.

$$Z_i = \frac{\sum_{p=1}^{|\text{D}_i|} P(A^p)}{|\text{D}_i|}$$

где  $P(A^p)$  - вероятность использования  $p$ -го дискрета;

$\text{D}_i$  - множество дискретов области трассировки  $i$ -ой цепи.

$$T_{ij} = \frac{|\text{D}_i \cap \text{D}_j|}{\min\{|\text{D}_i|, |\text{D}_j|\}},$$

где  $\text{D}_i, \text{D}_j$  - множества дискретов областей трассировки конфликтующих цепей.

Коэффициент  $P_{ij}$  определяет степень конфликтности цепей по критерию помехоустойчивости и может принимать значения в диапазоне (0...1). Это значение определяется на основе экспертных оценок и задается в техническом задании.

Условиями включения анализируемого соединения в формируемое подмножество  $E_k$  являются:

- минимум комплексного показателя качества  $K_{\Sigma}$ ;
- минимум перекрытия его другими цепями подмножества  $E_k$ ;
- максимум среднего значения загруженности области трассировки данной цепи;
- минимум коэффициента конфликтности цепей  $P_{ij}$ .



Таким образом, приоритет получают соединения, имеющие наименьшие трассировочные ресурсы и находящиеся на потенциально наиболее перегруженных участках МКП. После трассировки соединений подмножества  $E_K$  производится пересчет загрузки задействованных областей трассировки.

Динамическое ранжирование соединений позволяет повысить качество проектирования печатного монтажа за счет увеличения числа разведенных соединений, получения более простой конфигурации печатных проводников, более равномерной загрузки МКП, а также предварительного учета требований помехоустойчивости еще до этапа непосредственной трассировки соединений.

В процессе трассировки подмножества цепей  $E_K$  для каждой цепи (фрагмента цепи) производится анализ складывающейся проектной ситуации и из имеющейся библиотеки программ, реализующих различные алгоритмы трассировки, выбирается программа, реализующая наиболее эффективный для данной проектной ситуации алгоритм. При этом в процессе трассировки за счет параметрической адаптации производится окончательное решение вопроса оптимизации по критерию помехоустойчивости.

Таким образом, использование многокритериальной оптимизации в сквозном цикле проектирования печатного монтажа позволяет повысить эффективность процесса проектирования и качество получаемых проектных решений.

#### Перечень ссылок

- 1 Кофанов Ю.Н., Цилинский В.Я. Принципы управления проектированием изделий электронной техники// Машинное моделирование и обеспечение надежности электронных устройств : Тез. докл. науч.-техн. конф. – Бердянск, 1993. – С.6.
- 2 Руденко Т.А., Ткачев Э.И., Крищук В.Н. Дискретная математическая модель при решении задач многокритериальной оптимизации проектирования печатных узлов РЭС// Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР мікроелектроніки: Тези доповідей науково-технічної конференції. – Львів, 1997.- С.156.
- 3 Тарасов Ю.И., Корниенко С.К. Подсистема трассировки ИСАПР РЭС// Теория и практика обеспечения надежности и качества радиоэлектронных средств: Сборник научных трудов. - К.: УМК ВО, 1992. - С. 56-61.
- 4 Корниенко С.К., Крищук В.Н. Самоорганизация процесса трассировки в интегрированной САПР РЭА // САПР в машиностроении : Тез. докл. Всесоюз. науч.-техн.сем. - Ульяновск, 1991. - с.62.