

ОБ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

С. А. РОДИОНОВ

Рассматривается автоматизация проектирования оптических систем как важное направление в оптическом приборостроении, определяется понятие системы автоматизированного проектирования (САПР) и рассматриваются основные проблемы разработки САПР.

В оптическом приборостроении автоматизация проектирования наиболее интенсивно развивается применительно к оптическим системам приборов. Это объясняется, с одной стороны, определяющей ролью оптической системы, — основного функционального блока оптического прибора, с другой — особенностью самого процесса проектирования оптических систем, требующего большого объема трудоемких вычислений. Таким образом, применение средств вычислительной техники при проектировании оптических систем наиболее естественно и эффективно. Уже в 1944 году одна из первых ЭВМ использовалась для расчетов оптических систем, а с 50-х годов все ведущие проектные организации систематически применяют ЭВМ для этих целей.

До 70-х годов применение ЭВМ в оптике характеризовалось наличием отдельных, не связанных между собой программ, обеспечивающих решение некоторых традиционных и наиболее трудоемких задач расчета оптических систем. Общие тенденции научно-технического прогресса, связанные с повышением требований к характеристикам проектируемых приборов и производительности труда проектировщиков, появлением новых поколений ЭВМ, развитием методов системного анализа т. д., привели в настоящее время автоматизацию проектирования оптических систем на качественно новый уровень, основанный на создании и широком использовании систем автоматизированного проектирования (САПР). Опыт разработки и эксплуатации САПР в области оптики показывает, что, несмотря на большие затраты, связанные с созданием САПР (до несколько сотен человеко-лет), они довольно быстро окупаются благодаря резкому повышению производительности труда конструкторов и качества проектов. Достижение таких результатов, однако, возможно только на основе системного подхода к созданию САПР, учитывающего все возможности современной вычислительной техники и математики и обеспечивающего оптимальное разделение функций между ЭВМ и конструктором.

Основные характерные черты, принципиально отличающие САПР от прежних способов использования вычислительной техники при проектировании оптических систем и обеспечивающие ее высокую эффективность, можно свести к следующим:

— идеологическое единство, т. е. единая теоретическая база на всех уровнях и этапах проектирования;

- полнота круга решаемых задач, охватывающего все операции при проектировании, контроле и юстировке оптических систем;
- оптимальное разделение функций между конструктором и ЭВМ;
- автоматизация внутренних функций, т. е. автоматический обмен информацией между отдельными модулями, автоматический вызов и настройка необходимых программ и т. д.;
- организация личных архивов конструкторов и банка общесистемных данных, исключающая для конструктора необходимость работы с большими массивами данных;
- диалоговый (интерактивный) режим работы с одновременным доступом к САПР многих конструкторов (мультидоступом);
- универсальный и машинно-независимый входной язык, удобная и наглядная форма обмена информацией между конструктором и системой;
- модульная структура, обеспечивающая возможность модификации и развития САПР.

Основу САПР составляет техническое, теоретическое и программное обеспечение. Эти составляющие в равной степени определяют эффективность системы, причем практика показывает, что даже при наличии мощной технической базы разработка системы, отвечающей всем требованиям, является сложной научно-технической проблемой.

Сложность разработки теоретической базы, обеспечивающей идеологическое единство, полноту круга решаемых задач, оптимальность разделения функций, объясняется невозможностью решения проблемы путем простого перевода на «машинный язык» традиционных методов и приемов проектирования, ориентированных на творческий, эвристический характер работы человека. Необходима разработка формализованной теории проектирования и функционирования оптических систем, их математических моделей как объектов автоматизированного проектирования, методов обработки этих моделей, ориентированных на машинную, численную обработку и использующих в максимальной мере возможности современной прикладной математики. Разработанные математические модели и методы должны отвечать трудно совместимым требованиям адекватности (точности), универсальности, экономичности и простоты.

Сложность разработки программного обеспечения заключалась в решении таких задач, как обеспечение диалогового взаимодействия ЭВМ со многими конструкторами, организация личных архивов и банка данных, автоматизация внутренних функций, создание универсального входного языка, а также эффективная реализация математических методов обработки моделей оптических систем в процессе проектирования при ограниченных ресурсах ЭВМ.

Далее более подробно коснемся этих и других проблем.

Формальная модель процесса автоматизированного проектирования. Основным компонентом теоретического обеспечения автоматизированного проектирования оптических систем является формальная модель процесса

проектирования, содержащая типовые проектные процедуры и удовлетворяющая сформулированным выше требованиям адекватности, универсальности, экономичности и простоты. При построении модели все проектные процедуры необходимо оценивать по степени эвристичности или детерминированности, объектно-ориентированности или объектно-инвариантности, а также сравнительной трудоемкости. Такой анализ позволяет в наибольшей степени обеспечить оптимальность разделения функций, а именно возложить на ЭВМ выполнение всех детерминированных процедур и, в первую очередь, наиболее трудоемких, сохранив за конструктором оценку ситуаций, принятие решений, выдачу заданий и выполнение других эвристических процедур, результат которых зависит от опыта, знаний, способностей и других качеств, присущих человеческому интеллекту, которые гораздо эффективнее выполняются человеком, чем ЭВМ.

При проектировании оптических систем можно выделить три детерминированных процедуры: СИНТЕЗ, АНАЛИЗ и ОПТИМИЗАЦИЮ, эвристические процедуры ЗАДАНИЕ НА СИНТЕЗ, ЗАДАНИЕ НА АНАЛИЗ и ЗАДАНИЕ НА ОПТИМИЗАЦИЮ и эвристические процедуры оценки результатов синтеза, анализа и оптимизации и принятия решений о дальнейшем ходе процесса.

Процедура СИНТЕЗ включает в себя любые детерминированные методы генерирования первоначальных значений конструктивных параметров оптической системы по заданным характеристикам. Как известно, операцию синтеза можно разделить на два уровня — структурный и параметрический синтез. Структурный синтез, в результате которого определяется количество и вид компонентов, составляющих оптическую систему, как показывают исследования, является в настоящее время весьма эвристической операцией и поэтому должен быть отнесен к процедуре, выполняемой конструктором — к ЗАДАНИЮ НА СИНТЕЗ. В процессе параметрического синтеза, собственно и составляющего содержание процедуры СИНТЕЗ определяются конкретные числовые значения конструктивных параметров уже заданной структуры

Процедура АНАЛИЗ (или прямая задача, в отличие от синтеза) объединяет любые методы определения характеристик оптических систем по известным значениям конструктивных параметров. Для получения наибольшей модульности и экономичности рационально разделить процедуру АНАЛИЗА на несколько уровней и подуровней, в соответствии со степенью сложности и полноты анализа. Такое разделение позволяет существенно сократить непроизводительные затраты ресурсов ЭВМ за счет возможности начинать анализ с низших, наименее трудоемких и, при получении отрицательных результатов, принимать решение о дальнейших действиях, не выполняя более сложного и трудоемкого анализа.

Процедура ОПТИМИЗАЦИИ включает в себя процесс направленного изменения конструктивных параметров с целью достижения наилучшего качества оптической системы. Эта процедура необходима, поскольку методы параметрического синтеза в большинстве случаев являются весьма приближенными и эмпирическими, они способны дать только начальное весьма

грубое приближение для значений конструктивных параметров. Только оптимизация позволяет получить окончательную конструкцию, в наибольшей степени удовлетворяющую техническому заданию.

Из указанных процедур может быть построена достаточно простая адекватная и универсальная модель процесса проектирования оптических систем, представляющая собой итерационную последовательность чередующихся эвристических и детерминированных процедур. Смысловое содержание эвристических процедур ЗАДАНИЕ НА СИНТЕЗ, ЗАДАНИЕ НА АНАЛИЗ и ЗАДАНИЕ НА ОПТИМИЗАЦИЮ, выполняемых конструктором, состоит в выборе математической модели оптической системы, метода и уровня ее обработки. Формально эти процедуры сводятся к выдаче конструктором задания ЭВМ с использованием входного языка САПР. Детерминированные процедуры СИНТЕЗ, АНАЛИЗ и ОПТИМИЗАЦИЯ выполняются ЭВМ без вмешательства конструктора, в соответствии с принятым заданием. По окончании этих процедур конструктор оценивает результаты и принимает решение о дальнейших действиях, причем, как показывает опыт, необходимы неоднократные возвраты к повторению уже выполненных процедур с пересмотренным заданием на их выполнение (синтез другого типа оптической системы, анализ на более полном уровне, оптимизация с измененным критерием качества и т. п.). Проектирование заканчивается после того, как результаты анализа на всех уровнях показывают соответствие проектируемой системы требованиям технического задания.

Математические модели оптической системы как объекта автоматизированного проектирования. Эти модели составляют существенную часть всей системы. Поскольку в единой модели невозможно совместить свойства адекватности, универсальности, экономичности и простоты, необходимо рассматривать системы связанных между собой моделей, описывающих различные аспекты проектирования и функционирования оптической системы и соответствующие различным иерархическим уровням.

На верхнем уровне, где оптическая система рассматривается как один из функциональных блоков оптического прибора, используется внешняя функциональная модель, описывающая оптическую систему как преобразователь сигнала и ее взаимодействие с другими преобразователями, которые входят в оптический прибор. Основными характеристиками внешней функциональной модели являются передаточные, показывающие воздействие системы на преобразуемый сигнал, и присоединительные, необходимые для согласования ее с другими преобразователями. В частности, увеличение, светосила, оптическая передаточная функция (ОПФ) оптической системы являются ее передаточными характеристиками и описывают соответственно преобразование масштаба, энергии и структуры входного сигнала.

На следующем иерархическом уровне должна использоваться внутренняя функциональная модель, описывающая физические процессы, происходящие в оптической системе, т. е. формирование оптического изображения на основе преобразования электромагнитного поля. Сложность построения такой модели вызывается тем, что при расчете обычно используются две различных модели,

не отвечающие требованиям адекватности и универсальности: геометрическая модель, в которой основными характеристиками являются геометрические поперечные аберрации, и волновая модель, в которой основной характеристикой служит волновая аберрация. Для автоматизированного проектирования необходима единая универсальная модель, пригодная для любых оптических систем, в том числе для систем, работающих с лазерными пучками, содержащих голографические оптические элементы и т. п.

Моделью следующего уровня является конструкционная или структурная, описывающая оптическую систему как структуру, состоящую из конструктивных элементов. При проектировании оптических систем необходимыми элементами являются оптические среды, оптические поверхности, разделяющие эти среды, и диафрагмы, ограничивающие световые габариты. При разработке такой модели представляет проблему построение описания оптических материалов, содержащего небольшое количество параметров и хорошо аппроксимирующего дисперсию материалов в рабочем интервале длин волн. В связи с развитием крупногабаритной оптики, возникла необходимость удобного описания любых несферических поверхностей, в том числе и с технологическими деформациями произвольной формы. Необходимо также универсальное описание таких нетрадиционных элементов, как растровые, голографические, среды с переменным показателем преломления (граданы).

Особое место при автоматизированном проектировании занимает оптимизационная модель оптической системы. Она должна включать в себя такие понятия как параметры оптимизации, т. е. изменяющиеся в процессе оптимизации величины, однозначно определяющие конструкцию системы, оптимизируемые функции, зависящие от параметров оптимизации и определяющие качество системы, оценочную функцию, объединяющую все оптимизируемые функции в один критерий, ограничения, определяющие область существования системы в пространстве параметров и соотношения, связывающие оптимизируемые функции и ограничения с параметрами. Разработка оптимизационной модели позволяет разделить процесс оптимизации оптических систем на две принципиально различные процедуры и вывести специфику оптической системы из математического аппарата оптимизации. Таким образом, собственно процедура ОПТИМИЗАЦИИ может быть сделана полностью объектно-инвариантной и детерминированной, а составление или выбор оптимизационной модели — эвристическая и объектно-зависимая операция — может быть отнесена к процедуре ЗАДАНИЕ НА ОПТИМИЗАЦИЮ. Наиболее сложная проблема при построении оптимизационной модели заключается в совмещении требования адекватности, т. е. соответствия оценочной функции внешним критериям качества функционирования оптической системы как преобразователя сигнала с требованиями экономичности, т. е. небольшого количества операций, необходимых для вычисления оптимизируемых функций по значениям параметров и простоты, т. е. как можно более близкой к линейной зависимости функций от параметров.

Кроме описанных, необходимо упомянуть и другие модели, необходимые при автоматизированном проектировании — статистическую модель, описывающую оптическую систему как объект изготовления, сборки и юстировки и включающую в себя описание случайных технологических погрешностей, информационно-поисковую модель и др.

Проблемы автоматизированного синтеза оптических систем. Синтез исходной конструкции оптической системы является ответственной и весьма трудной задачей. При неавтоматизированном проектировании обычно ограничивались поиском в архивах аналогов разрабатываемой системы, а синтез принципиально новых конструкций как крайне эвристическая операция был доступен немногим, наиболее опытным конструкторам.

В автоматизации синтеза можно выделить два направления. Первое из них связано с разработкой специализированных методов для каждого типа оптических систем. В настоящее время достаточно разработаны методы синтеза некоторых простых типов, таких, как двойной склеенный объектив, двухкомпонентная система. Известны методы автоматического синтеза различных типов зеркально-линзовых объективов. Второе, наиболее перспективное направление представляет собой разработку универсальных методов, основанных на синтезе оптических систем любой сложности из простых модулей с известными свойствами в соответствии с методикой проф. М. М. Русинова. Интересны также универсальные методы, использующие решение уравнений в области аберраций третьего порядка.

Методы, анализа оптических систем при автоматизированном проектировании. Процедура анализа при проектировании является одной из важнейших, от степени ее адекватности и полноты непосредственно зависит качество полученного проектного решения, необходимость макетирования, уровень технологичности конструкции. Трудоемкость процедуры анализа в значительной степени определяет и трудоемкость всего проектирования. Основные проблемы разработки методов анализа связаны с повышением их адекватности и экономичности. Как уже отмечалось, для уменьшения непроизводительных затрат процедура анализа разделяется на несколько уровней и подуровней. На низшем уровне производится определение характеристик внутренней функциональной модели по известным параметрам структурной модели (конструктивным параметрам). В свою очередь, этот уровень можно разделить на следующие подуровни:

- анализ в гауссовом приближении;
- анализ габаритов пучков;
- анализ в области аберраций третьего порядка;
- экспресс-анализ аберраций, т. е. вычисление аберраций небольшого количества действительных лучей, достаточного для начальной эвристической оценки качества коррекции;
- полный анализ аберраций, т. е. получение коэффициентов аппроксимирующего выражения, полностью описывающего аберрационную функцию;

– анализ пропускания по зрачку.

Математический аппарат анализа на этом уровне основан на геометрической оптике и значительную его часть представляет собой расчет хода лучей через оптическую систему. Основные проблемы связаны с разработкой универсальных, точных и экономичных методов расчета хода лучей в произвольных оптических системах, содержащих среды с переменным показателем преломления, растр, голографические оптические элементы, методов анализа габаритов пучков в сложных системах, методов глобальной полихроматической аппроксимации аберраций.

Второй уровень анализа заключается в определении внешних характеристик по известным внутренним характеристикам, полученным на предыдущем уровне. Основными определяемыми характеристиками являются функция рассеяния точки (ФРТ) и оптическая передаточная функция (ОПФ). Математический аппарат этого уровня основан на методах численного интегрирования и быстрого дискретного преобразования Фурье (БПФ). Можно выделить два основных подуровня этого анализа: экспресс-анализ, при котором определяются значения ФРТ или ОПФ в небольшом количестве точек, достаточном для эвристической оценки качества изображения, и полный анализ, в процессе которого определяются значения ФРТ или ОПФ в количестве, достаточном для моделирования изображений. Процедуры анализа этого уровня отличаются крайне высокой трудоемкостью, и основная проблема состоит в разработке более экономичных методов.

Следующий уровень анализа — моделирование построения изображения данной оптической системой совместно с другими функциональными блоками прибора, по известным внешним характеристикам, определенным на предыдущем уровне. Только на этом уровне можно получить окончательное суждение о качестве проектируемой системы.

На любом уровне можно рассматривать одновариантный анализ и поливариантный или анализ влияния параметров, в процессе которого определяются производные от характеристик по конструктивным параметрам. В настоящее время этот анализ выполняется по методу конечных разностей, для которого требуется, по меньшей мере, столько раз повторять одновариантный анализ с небольшими изменениями значений параметров, сколько параметров исследуется. В связи с этим анализ влияния параметров является одной из самых трудоемких процедур. Основная проблема заключается в разработке более экономичных и достаточно адекватных аналитических методов, не требующих многократного повторения одновариантного анализа.

Важным видом является технологический анализ, в процессе которого определяются допуски на технологические погрешности изготовления и сборки. Здесь проблема заключается в разработке методов, основанных на статистических законах распределения технологических ошибок, учитывающих трудоемкость реализации тех или иных допусков, возможность юстировки и комплектации при сборке, совместное влияние различных ошибок.

Проблемы оптимизации оптических систем. Несмотря на бурное развитие методов численной оптимизации, оптимизация оптических систем остается весьма сложной задачей из-за большого количества параметров оптимизации, доходящего до 100. Так как процесс оптимизации состоит из ряда повторяющихся шагов, на каждом из которых производится анализ влияния параметров, ясно, что трудоемкость оптимизации прямо пропорциональна количеству параметров. Очевидно также, что проблема снижения трудоемкости операции анализа влияния параметров непосредственно относится и к оптимизации. Остается проблемой эффективное использование в процессе оптимизации параметров оптических стекол, которые могут принимать только ограниченный дискретный набор значений, определяемый каталогом стекла. Первоочередной задачей остается повышение сходимости методов оптимизации, эффективный контроль конструктивных и технологических ограничений. И, наконец, до сих пор остается важнейшей проблемой разработка оптимизационной модели оптической системы, совмещающей в себе свойства адекватности, экономичности и простоты.

Некоторые проблемы разработки программного обеспечения автоматизированного проектирования оптических систем. Ранее программное обеспечение расчетов оптических систем почти целиком состояло из обрабатывающих программ, непосредственно реализующих численные методы, применяемые при проектировании. В САПР не менее половины всего программного обеспечения выполняет системные и сервисные функции. В связи с этим основной проблемой является разработка системной части программного обеспечения САПР, осуществляющей вызов и настройку необходимых модулей по заказу конструктора, взаимодействие с многими конструкторами в режиме диалога, организацию архивов и т. п. Как известно, аналогичные функции выполняет общесистемное программное обеспечение современных ЭВМ, так называемые операционные системы (ОС). Следует отметить, однако, что несмотря на большое сходство, задачи у ОС общего назначения и специализированных операционных систем для САПР различны:

первые предназначены для обслуживания программистов, а вторые — конструкторов, составляющих и выполняющих последовательности проектных процедур. Поэтому, как бы ни было развито общее системное обеспечение, оно не может заменить необходимости разработки специальных операционных систем для автоматизированного проектирования, работающих под управление ОС общего назначения и использующих все их возможности.

Самостоятельной и интересной проблемой является разработка входного языка, служащего для описания исходных данных и заказов и обладающего свойствами машинной независимости, универсальности, компактности, гибкости, простоты синтаксиса, надежности.

О технической базе автоматизированного проектирования оптических систем. Для реализации всех функциональных возможностей САПР оптических систем необходима мощная ЭВМ с быстродействием порядка 1 млн. операций в секунду и объемом оперативной памяти не менее 1024 К/байт, например, ЕС-1045, ЕС-1060. Кроме центральной ЭВМ, необходимо также

периферийное оборудование: дисплеи, чертежные автоматы. Такое оборудование окупает себя только при большом объеме работ, т. е. в крупных организациях. При небольшом объеме рационально использовать малые ЭВМ, например, СМ-4, которые могут обслужить до двух конструкторов, но с меньшим объемом функциональных возможностей и с меньшей скоростью. Наконец, для оперативного выполнения таких проектных процедур как анализ на уровне внутренней модели, весьма эффективно применение настольных ЭКВМ с программным управлением, например, типа «Электроника ДЗ-28».

Следует обратить внимание, что для выполнения операций, связанных с расчетом хода лучей через оптическую систему требуется относительная погрешность вычислений не хуже, чем 10^{-8} , а в некоторых случаях до 10^{-9} . В связи с этим на ЕС ЭВМ в соответствующих программных модулях должны использоваться команды и переменные удвоенной точности.