TELECOMMUNICATIONS

Ежемесячный научно-технический, информационно-аналитический и учебно-методический журнал

BA BEC L



УДК 608.2

САПР рентгеновских микротомографов

В.И. СЫРЯМКИН, д-р техн. наук, Е.Н. БОГОМОЛОВ, В.В. БРАЗОВСКИЙ, канд. техн. наук, В.А. БОРОДИН, А.Ш. БУРЕЕВ, Г.С. ГЛУШКОВ, А.В. ВАСИЛЬЕВ

Национальный исследовательский Томский государственный университет

E-mail: vborodin@yandex.ru

Рассматривается система автоматизированного проектирования рентгеновских микротомографов — приборов для исследования структуры и построения трехмерных изображений исследуемых органических и неорганических объектов на основе теневых проекций.

Ключевые слова: томография, дефектоскопия, диагностика, рентгеновский микротомограф, рентгенооптическая система, мехатронная система, система автоматизированного проектирования.

в ажным фактором создания рентгеновских микротомографов (РМТ) является разработка системы автоматизированного проектирования (САПР).

Системы автоматизированного проектирования находят широкое применение во многих областях науки, техники и производства, где используются сложные технические системы и их элементы: автоматические линии для изготовления деталей и узлов машин, гибкие автоматизированные производственные системы, транспортные устройства, роботыманипуляторы. К таким сложным системам относятся и РМТ.

Проектирование — это процесс составления описания, необходимого для создания в заданных условиях еще несушествуюшего объекта, на основе начального описания (технического задания), преобразования первичного описания, оптимизации заданных характеристик объекта и алгоритма его функционирования, коррекции начального описания и последовательного представления описаний на различных языках, разработка (изготовление и исследование) макета системы и подготовка производства [3, 4].

Предлагается схема САПР РМТ, изображенная на рис. 1. Схема представляет собой итерационный процесс. Проектирование РМТ — это совокупность задач синтеза (выбор структуры и численных значений параметров разрабатываемых систем) и анализа (исследования синтезированной системы). Этап синтеза может повторяться, если результаты анализа будут отрицательными. В случае удовлетворительного результата итерационного процесса на данном этапе детализации процесс проектирования переходит на следующий уровень проектирования.

На каждом уровне проектирования составляется модель РМТ, воплощенная в форме, отличной от действительной. Модели могут быть представлены в виде абстрактных математических формул (аналитическое моделирование), алгоритмов, позволяющих имитировать функционирование РМТ на ЭВМ (машинное моделирование), копий или макетов (физическое моделирование).

Процесс проектирования можно условно разделить на три этапа [4]: верхний, нижний и промежуточный. На первом (верхнем) этапе проектирования РМТ модель прибора представляется в виде содержательной модели, которая может описываться на естественном языке, поясняться схемами, эскизами, рисунками, чертежами, таблицами, графиками. Таким образом, содержательная модель представляется на одном из «входных» язы-

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ № 5. 2012



ков САПР РМТ. При этом техническое задание необходимо формализовать — привести к характеристикам, параметрам и выражениям, понятным САПР РМТ.

Второй уровень проектирования называют уровнем уточнения и параметризации модели. Этот уровень проектирования называют также уровнем синтеза математической модели, представляющей собой совокупность математических объектов (чисел, переменных, векторов, множеств и т.п.) и отношений между ними, адекватно отражающих свойства системы с позиции разработчика. Поскольку среди вариантов структуры ищется наилучший, то такую задачу синтеза называют структурной оптимизацией, а расчет параметров, оптимальных с позиции некоторого критерия при заданной структуре РМТ, называют параметрической оптимизацией.

Если информативность содержательной модели окажется недостаточной для построения математической модели, то следует вернуться на первый уровень проектирования и декомпозировать содержательную модель по подсистемам проектируемого РМТ. При выборе содержательной модели и структурном синтезе РМТ следует использовать функционально-стоимостный анализ, являюшийся комплексным методом, позволяющим спроектировать оптимальный вариант структуры изделия. Синтез математической модели можно производить известными методами, используемыми в САПР. Второй этап проектирования РМТ заканчивается составлением технического задания для следующего этапа проектирования.

Третий (нижний) уровень проектирования должен содержать разработку прибора и заканчиваться этапом подготовки производства. В случае необходимости техническое задание на разработку макета может корректироваться по результатам его испытания. На этом этапе проектирования могут использоваться известные подсистемы САПР блоков РМТ.

Следует еще раз отметить, что по результатам каждого уровня проектирования могут корректироваться (уточняться) технические задания на данный этап либо общее — на разработку РМТ (если это допустимо). После испытания макета и создания опытного образца проводится коррекция (исправление и дополнение) библиотек этапов. На рис. 1 это воздействие показано пунктирной линией.

Если произведен выбор содержательной модели, осуществлена структурная и параметрическая оптимизация РМТ, то следует установить основные параметры РМТ и разработать методику расчета зрительной системы [1]. Ниже приводится пример проектирования РМТ.

Приведем основные зависимости рентгеновской компьютерной томографии [4].

Рассмотрим связь зарегистрированной детектором интенсивности излучения *I* с линейным коэффициентом поглощения µ среды объекта. Эта связь имеет вид интегрального уравнения:

$$I(x) = I_0 \exp\left[-\int_{l} \mu(x,l) dl\right],$$

где I_0 — интенсивность падающего пучка; dl — элемент пути поглощения вдоль луча, соответствующего направлению сканирования. Измерения повторяются для нескольких направлений сканирования относительно объекта.

Компьютерные томографы создают цифровое изображение путем измерения интенсивности рентгеновских лучей, прошедших через тело во время вращения исследуемого объекта относительно рентгеновской трубки. Коэффициент поглощения веерного пучка рентгеновских лучей в объекте измеряется с помощью набора из нескольких сот - нескольких тысяч рентгеновских детекторов (обычно твердокристаллических). Детекторы собирают информацию в каждой из проекций, которая затем оцифровывается и анализируется компьютером. На основе полученных данных компьютер реконструирует поперечное компьютерно-томографическое изображение. Это изображение имеет целый ряд преимуществ, включая возможность его реконструкции в нужной проекции, а также высокую способность к передаче низкоконтрастных объектов, которая у метода с использованием компьютерных томографов значительно выше, чем у других методов построения рентгеновского изображения.

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ № 5. 2012

Полученные с помощью компьютерной томографии снимки отображают анатомическую структуру объекта в данном сечении с разрешением по плотности лучше 1%.

Задача отыскания распределения физической величины (например, коэффициента линейного ослабления) g(x) была в общем виде решена И. Радоном в 1917 г.

Рис. 2 поясняет результаты инверсии Радона в двумерном случае. Пусть L — луч, пересекающий объект, s — измеряемое вдоль него расстояние, O — начало системы координат, j — угол между базисной линией OM, лежащей в выбранной плоскости, и перпендикуляром, опущенным из O на L, p — кратчайшее расстояние от O до L, n — орт, определяемый тем же углом j. В этих обозначениях можно записать

$$\int_{L} g(r) ds = f(p,n) , \qquad (1)$$

где двумерный вектор r, повернутый относительно OM на угол q, характеризует положение на плоскости той точки, в которой отыскивается распределение g по проекциям f(p,n). Как показано Радоном,

$$g(r) = \frac{\nabla^2}{2\pi^2} \int_0^{\pi} d\phi \int_{-\infty}^{+\infty} f(p,n) \ln |p-rn| dp. \quad (2)$$

В настоящее время разработано большое количество эффективных алгоритмов, позволяющих на быстродействующих компьюте-



Рис. 2. К определению смысла переменных, используемых в формулах (1) и (2) рах получать томограммы по проекциям f(p,n) и реализованных на коммерческих компьютерных томографах.

Ослабление интенсивности пучка однородных рентгеновских лучей вследствие поглощения и рассеяния показано на рис. 3.

Если пропустить узкий параллельный пучок однородных рентгеновских лучей, т.е. обладающих одной длиной волны λ , через слой какого-нибудь вещества толщиной D, то по мере прохождения лучей в этот слой интенсивность пучка будет уменьшаться вследствие поглощения и рассеяния.

Пусть I_X — интенсивность пучка лучей, проходящих через элементарный слой толщиной dx, отстоящий от поверхности поглощающего тела на x сантиметров, тогда уменьшение интенсивности dI_X внутри этого слоя будет пропорционально интенсивности пучка I_X , входящего в этот элементарный слой, и толщине этого слоя dx:

$$-dI_{\chi} = \mu \cdot I_{\lambda} dx ,$$

где µ — коэффициент пропорциональности, называемый линейным коэффициентом ослабления, который зависит от длины волны и рода поглощающего вещества.

Обобщенная схема рентгеновского микротомографа (PM) представлена на рис. 4.

РМ состоит из следующих блоков: источник излучения (рентгеновская трубка), приемник излучения (рентгеновский детектор на ПЗС-матрице), мехатронная система (позиционирование по осям *X*, *Y*, *Z*), рабочий



Рис. 3. Поглощение и рассеяние рентгеновского излучения в веществе

стол (рабочая зона), корпус с высоковольтным источником питания, блок управления 1, блок управления 2, управляющее устройство (микроконтроллер или ПК-клиент), программное обеспечение для восстановления 2D- и 3D-изображений, программное обеспечение для диагностики материалов.

РМТ работает следующим образом.

Метод рентгеновской томографии пространственной микроструктуры и морфометрии материалов, живых объектов или тканей не требует подготовки образцов и изготовления тонких срезов с последующим совмещением. Сканирование объектов исследования позволяет получить полные сведения о внутренней пространственной микроструктуре образца с микронным и субмикронным пространственным разрешением, сохраняя структуру образца или жизнь подопытного животного.

Трехмерное изображение образца строится на основе полученных при просвечивании рентгеновским лучом теневых проекций, которые преобразуются в цифровые изображения.

В системах спиральных компьютерных томографов сканирование и получение изображения происходят следующим образом. Рентгеновская трубка в режиме излучения обходит исследуемый участок тела по дуге 360°, останавливаясь через каждые 3° этой дуги и делая продольное перемещение. На одной оси с рентгеновским излучателем закреплены детекторы — кристаллы йодистого натрия, преобразующие ионизирующее излучение в световое [2]. Последнее попадает на фотоэлектронные умножители, превращающие эту видимую часть в электрические сигналы. Электрические сигналы подвергаются усилению, а затем преобразованию в цифры, которые вводят в ЭВМ. Рентгеновский луч, пройдя через среду поглощения, ослабляется пропорционально плотности тканей, встречающихся на его пути, и несет информацию о степени его ослабления в каждом положении сканирования.

Рентгеновский микротомограф имеет следующие основные характеристики:

 количество разрешающих элементов детектора;

2) потребляемая мощность электропитания;

3) диапазон восстановления значения поглощения;

4) диапазон зондирующего излучения (монохроматического и тормозного).

Технические характеристики источника рентгеновского излучения:

1) максимальное выходное напряжение с постоянным потенциалом;



ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ № 5. 2012

2) максимальный выходной ток;

3) максимальная выходная мощность;

4) выходное напряжение и его шаг;

5) количество знаков выбранного напряжения на дисплее;

6) количество знаков действующего напряжения на дисплее;

 точность установки выходного напряжения;

8) стабильность выходного напряжения при заданных колебаниях напряжения питающей сети;

9) выходной ток;

10) количество знаков для отображения на дисплее выбранного тока;

11) количество знаков для отображения на дисплее действующего тока;

12) точность установки тока;

 стабильность тока при заданных колебаниях напряжения питающей сети;

14) параметры электрической сети: количество фаз, напряжение, частота;

15) мощность потребления электроэнергии;

 максимальный ток потребления электроэнергии.

Технические характеристики рентгенооптических элементов: возможность получения рентгеновского увеличения (масштаб);

2) размер поля зрения, не менее;

3) рабочий диапазон длин волн.

Технические характеристики механических узлов для позиционирования исследуемого образца:

1) количество степеней свободы;

2) точность позиционирования образца.

Архитектурная блок-схема программного обеспечения для интеллектуальной нейросетевой системы анализа внутренней микроструктуры объектов (ИНСАВМО) представлена на рис. 5.

В состав ИНСАВМО входят:

 модуль хранения и обработки базы данных (БД), включающий в себя непосредственно базу данных и блок подготовки данных;

• интерфейс пользователя, включающий цифровую модель микроструктуры объекта, инструментарий для выбора класса задач и таблицу параметров обработки томограмм;

• блок расчета комплексного показателя и блок принятия решений;

• блоки предварительной обработки и подготовки данных, параметров нейронной сети (HC), формирования HC, обучения и функ-



Рис. 5. Архитектурная блок-схема программного обеспечения для интеллектуальной нейросетевой системы анализа внутренней микроструктуры объектов (ИНСАВМО)

ционирования HC и блок интерпретации результатов.

Работа с ИНСАВМО включает в себя:

• выбор класса задач анализа оператором (распознавание образов, анализ структуры на однородность, качественный анализ на аномальное изменение свойств объекта);

 формирование таблицы параметров изображения построчно по каждому пикселю и подготовку обучающей и тестируемой выборки на основе эталонных изображений;

• создание нейросети (выбор топологии, инициализация карты синапсов);

 обучение нейросети с сегментацией изображения в скрытом слое для определения и классификации характеристик исследуемого объекта;

• тестирование нейросети;

 предъявление нейросети контрольных примеров, расчет комплексного показателя, интерпретацию результатов ЛПР.

Функциональная схема программного обеспечения (ПО) РМТ представлена на рис. 6, где показаны связи между различными функциональными блоками программного обеспечения.

Для управления ПО используются интерфейсы пользователя и администратора, каждый из которых предназначен для решения определенного класса задач.

Через интерфейс пользователя осуществляется работа в штатном режиме программы, предусматривающем непосредственный доступ к модулям управления процессом реконструкции, выбора и редактирования параметров модели и аналитическому модулю. Все три модуля в процессе работы используют модуль хранения данных. Также используют модуль хранения данных. Также используются модули 3D-реконструкции объекта на основе теневых проекций, модуль работы с 3D-моделью микроструктуры для виртуального перемещения, модуль экспорта в различные форматы. Из интерфейса пользователя также имеется ограниченный доступ к модулю работы с устройством (без возможности настройки).

С помощью интерфейса администратора обеспечивается доступ к модулю настройки дополнительных параметров модели, модулю настройки параметров реконструкции объекта и первоначальной калибровки и полный доступ к модулю работы с устройством.

При выборе конструктивных параметров РМТ может быть использована следующая методика, применение которой не зависит от области дальнейшего применения РМТ.

1. Выбрать тип РМТ в соответствии с техническим заданием.

2. Определить допустимые погрешности рентгенооптической системы.

3. Выбрать приемник (рентгеновский детектор) и источник (рентгеновская трубка) излучения, исходя из требований по точности, разрешению, цветовым и яркостным характеристикам восстановленного изображения, используя выражения (1) и (2).

4. Рассчитать потребляемую мощность и максимальный потребляемый ток для составляющих РМТ.

5. Определить компоновку составляющих РМТ, спроектировать корпус и рассчитать параметры высоковольтного источника питания.

6. Определить допустимые погрешности позиционирования Δx , Δy , Δz при заданных требованиях по точности и разрешению восстановленного изображения в соответствии с требованиями технического задания.

7. Определить требуемое быстродействие системы в соответствии с требованиями технического задания, выбрать платформу для реализации программного обеспечения для восстановления 2D- и 3D-изображений.

8. Определить требуемые мощность и объем памяти управляющего устройства мехатронной системы.

9. Разработать конструкцию мехатронной части РМТ, исходя из требований к габаритам и массе исследуемых объектов.

10. Определить требования к системе амортизации РМТ (система защиты от вибрации).

11. Сформулировать требования для программного обеспечения по восстановлению 2D- и 3D-изображений в соответствии с выбранной платформой и требованиями технического задания.

12. Разработать обобщенную схему программного обеспечения (ПО) для восстанов-



Рис. 6. Функциональная схема программного обеспечения (ПО) РМТ

ления 2D- и 3D-изображений, определить наиболее ресурсоемкие операции.

13. Рассчитать требуемое быстродействие для различных частей ПО.

14. Спроектировать и реализовать программное обеспечение для восстановления 2D- и 3D-изображений.

15. Разработать метрологическое обеспечение РМТ.

В соответствии с вышеуказанной методикой проводится разработка рентгеновского микротомографа и системы автоматизированного проектирования РМТ.

В статье рассмотрены основные вопросы разработки САПР рентгеновских микротомографов, предложена схема САПР РМТ, состоящая из трех уровней. Также приведены основные зависимости рентгеновской компьютерной томографии, обобщенная схема рентгеновского микротомографа, описан метод рентгеновской томографии пространственной микроструктуры и морфометрии материалов; показаны основные характеристики РМТ, источника рентгеновского излучения, рентгенооптических элементов и механических узлов системы позиционирования исследуемого образца; показаны архитектурная блок-схема и функциональная схема программного обеспечения для интеллектуальной нейросетевой системы анализа внутренней микроструктуры объектов, рассмотрена методика выбора конструктивных параметров РМТ.

Работа выполнена по ФЦП РФ, Г/К № 16.523.11.3009.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бубенчиков М.А., Газиева Е.Э., Гафуров А.О. и др. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий. Томск: Изд-во Томского университета, 2010. 366 с.
- 2. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. Т. 1 / В.Е. Панин, В.Е. Егорушкин, П.В. Макаров и др. Новосибирск: Наука, 1995. 298 с.
- Системы технического зрения: Справочник / под ред. В.И. Сырямкина и В.С. Титова. Томск: МГП «РАС-КО», 1992. 367 с.
- 4. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. 2-е изд. / Норенков И.П. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с.