

ВИРТУАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ИССЛЕДОВАНИЯ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Ф.Ф. Спиридонов, А.М. Фирсов, В.В. Смирнов
Бийский технологический институт, г.Бийск

Аннотация. Рассмотрены вопросы создания образовательной модели (виртуальной лаборатории) исследования процесса теплопереноса в технологических системах механической обработки. Описана структура разработанного вычислительного комплекса. Реализация системы на ПЭВМ обеспечивается на основе применения численных методов решения системы дифференциальных уравнений, выражающих обобщенный закон сохранения энергии. Для быстрого и наглядного получения результатов решения произведено интегрирование разработанных вычислительных средств с системой программирования и системой интерактивной графики пакета Maple V. Использование виртуальной лаборатории в учебном процессе иллюстрируется решением конкретных технологических задач, возникающих при управлении процессом резания конструкционных материалов.

В настоящее время при обсуждении проблем образования все чаще говорится о том, что высокую квалификацию специалиста формируют не только теоретические знания и сведения декларативного характера, но и практические навыки, в том числе владение современными технологиями и методами решения практических задач. Однако получить практические знания становится все сложнее ввиду объективных экономических причин. Частичное решение данной проблемы состоит в моделировании различных процессов на ПЭВМ и получение студентами практических навыков на моделях.

В публикациях [1-3] рассмотрены вопросы разработки алгоритмов и программ, которые позволяют производить исследования ряда важных технологических проблем. Речь идет о численных методах, позволяющих получать быстрое решение задач теплопереноса в областях со сложной конфигурацией границы. Ниже обсуждаются перспективы применения разработанного комплекса вычислительных программ к моделированию температурного состояния зоны резания при обработке конструкционных материалов.

Система уравнений, описывающая, в общем случае, тепловое взаимодействие элементов рассматриваемой технологической системы механической обработки при установившемся процессе, выражает обобщенный закон сохранения энергии и включает [4]:

- пространственное уравнение теплопроводности

$$\operatorname{div}(\lambda(T) \cdot \operatorname{grad} T) + Q = 0; \quad (1)$$

- граничные условия на поверхностях, контактирующих с окружающей средой

$$-\lambda(T) \cdot (\partial T / \partial n) = \alpha(T) \cdot (T - T_0); \quad (2)$$

- граничные условия на поверхностях контакта корпуса резца с резцедержателем

$$T = T_p; \quad (3)$$

- граничные условия для остальных поверхностей

$$\lambda(T) \cdot (\partial T / \partial n) = Q. \quad (4)$$

В уравнениях (1)-(4) приняты следующие обозначения: T - текущая температура, T_0 – температура окружающей среды, $\lambda(T)$ - коэффициент теплопроводности, $\alpha(T)$ – коэффициент теплообмена с окружающей средой, Q - мощность источников тепловыделения, \mathbf{n} - вектор нормали к поверхности.

Задача теплопереноса в области сложной формы может быть сформулирована не только в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных, но и в виде интегральных соотношений, в частности с помощью интеграла взвешенной невязки [5]. Последняя формулировка задачи (интегральная) позволяет выявить некоторые общие свойства температурных полей, и, наряду с классическими методами строго аналитического решения, построить эффективные алгоритмы приближенного аналитического и численного решения [4-8]. Эти алгоритмы и формируют основу виртуальной лаборатории моделирования теплопереноса в технологических процессах механического производства.

Однако для нормального функционирования вычислительной системы наличия одного лишь алгоритма еще недостаточно, достаточно развитыми должны быть и сервисные функции, т.к. они значительно сокращают время получения данных и оценки результатов в ходе моделирования. Поэтому практический расчет температурного состояния исследуемой системы включает три этапа:

- подготовка исходной базы данных (БД) для расчета (описание геометрии, физических характеристик, генерация сеточного разбиения) - модуль ввода исходных данных (препроцессор);
- расчет с помощью того или иного численного метода и получение БД числовых результатов - модуль вычислений (процессор);
- визуализацию и интерпретацию результатов моделирования, получение на выходе готового рабочего документа - модулем вывода результатов (постпроцессор).

Модуль ввода в разработанном программном комплексе предназначен для ввода и подготовки исходной информации, необходимой для численного решения задачи о распределении температуры в области со сложной конфигурацией границы. Модуль ввода осуществляет следующие основные функции:

- описание геометрии объекта;
- дискретизация области определения;
- указание физического поведения областей и границ.

Операция указания параметров областей и границ для задач теплообмена позволяет уточнить физическое поведение исследуемого объекта: описать физические характеристики материалов элементов исследуемой системы, источники тепла, граничные условия, начальные условия для (нестационарных задач).

Сформированная база исходных данных может быть записана в обычный текстовый файл (либо в файл табличного процессора) для последующей передачи вычисляющей программе, либо непосредственно использована модулем вычислений, следующим за модулем ввода.

Модуль вычислений температурного распределения в области сложной формы получает на входе геометрическое описание сетки, физические характеристики и граничные условия, формирует и решает итоговую систему алгебраических уравнений. На выходе он выдает значения искомых величин (температур, температурных градиентов и т.п.) в каждом узле сетки. Основу вычислительного модуля составляют использованные при его проектировании расчетные алгоритмы. В частном случае таковым является алгоритм метода конечных элементов [9], который состоит из следующих четырех этапов.

1) Выделение конечных элементов (разбиение заданной области на конечные элементы).

2) Определение аппроксимирующих функций для каждого элемента, которыми, обычно, оказываются полиномы.

3) Объединение конечных элементов в ансамбль. На этом этапе полученные уравнения, относящиеся к отдельным элементам, объединяются в систему, которая является моделью искомой непрерывной функции.

4) Определение неизвестных узловых значений функции. Эта процедура является наиболее сложной в МКЭ. Для ее реализации разработано несколько алгоритмов [10]. Один из них основан на минимизации функционала, связанного с физическим смыслом решаемой задачи.

Так, в специальной литературе (см., например, [9]) показано, что решение уравнения теплопроводности (1) в двумерной постановке с граничными условиями (2)-(4) эквивалентно отысканию минимума функционала

$$\chi = \int_V \frac{1}{2} \left(\lambda_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - 2Q \cdot T \right) dV + \int_S \left(qT + \frac{1}{2} \alpha (T - T_0)^2 \right) dS, \quad (5)$$

где λ_{xx} , λ_{yy} , λ_{zz} - коэффициенты теплопроводности в направлениях x , y , z ; Q - источник тепла внутри тела, который считается положительным, если тепло подводится к телу; q - поток тепла, который считается положительным, если тепло теряется телом.

Минимизация χ требует выполнения соотношения $\partial\chi/\partial T=0$.

Окончательная система уравнений, которая получается в результате выполнения оптимизации [9] имеет вид:

$$\partial\chi/\partial\{T\} = \sum_{e=1}^N ([\mathbf{k}^{(e)}] \cdot \{T\} + \{f^{(e)}\}) = 0, \quad (6)$$

или

$$[\mathbf{K}]\{\mathbf{T}\}=\{\mathbf{F}\}, \quad (7)$$

где $[\mathbf{K}] = \sum_{e=1}^N [\mathbf{k}^{(e)}]$ - сумма матриц теплопроводности элементов; $\{\mathbf{F}\} = - \sum_{e=1}^N \{\mathbf{f}^{(e)}\}$ - сумма векторов нагрузки элементов.

Матрица теплопроводности отдельного элемента имеет вид:

$$[\mathbf{k}^{(e)}] = \int_{V^{(e)}} [\mathbf{B}^{(e)}]^T [\mathbf{D}^{(e)}] [\mathbf{B}^{(e)}] dV + \int_{S_1^{(e)}} \alpha [\mathbf{N}^{(e)}]^T dS, \quad (8)$$

где $[\mathbf{N}^{(e)}]$ - матрица функций формы; $[\mathbf{B}^{(e)}]$ - матрица градиентов функций формы; $[\mathbf{D}^{(e)}]$ - матрица свойств материала; S_1 - поверхность конвективного теплообмена.

Вектор нагрузки элемента определяется формулой:

$$[\mathbf{f}^{(e)}] = - \int_{V^{(e)}} Q [\mathbf{N}^{(e)}]^T dV + \int_{S_2^{(e)}} q [\mathbf{N}^{(e)}]^T dS + \int_{S_2^{(e)}} \alpha T_0 [\mathbf{N}^{(e)}]^T dS, \quad (9)$$

где величины Q , q , T_0 и α имеют заданные числовые значения; S_2 - поверхность с заданным тепловым потоком. Объединение границ S_1 и S_2 образуют полную границу области определения.

Решение системы (7) относительно набора неизвестных узловых значений позволяет получить информацию о поле температур в элементе технологической системы.

Полученное на выходе модуля вычислений решение зачастую не может непосредственно использоваться, т.к. масса необработанной численной информации оказывается слишком велика для восприятия пользователем.

Модуль вывода осуществляет следующие функции:

- извлекает значащую информацию;
- представляет значащую информацию в графической форме для облегчения ее восприятия и интерпретации (в виде графика поверхности, кривых изменения температуры, карты изотерм и т.д.).
- поставляет необходимую числовую и графическую информацию в указанный текстовый документ (например, файл текстового редактора Word или табличного процессора Excel).

Таким образом, для пользователя данной системы вся сложность заключается в овладении навыками управления базами данных и текстовым редактором, либо табличным процессором. Этого уровня вполне достаточно, чтобы использовать данную структуру для решения собственных задач и получать при этом на выходе готовый документ в удобной для пользователя форме.

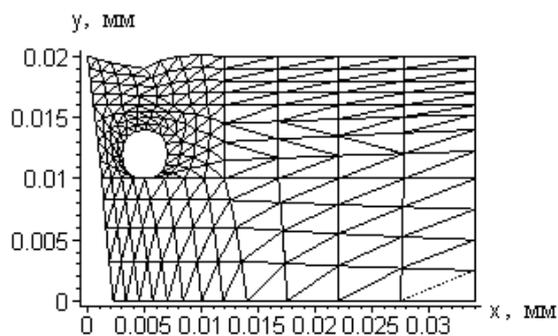


Рис.1

Применение разработанных программных средств можно проиллюстрировать целым рядом задач, возникающих при управлении процессом резания конструкционных материалов [11].

Так, на рис.1 приведен а конечно-элементная аппроксимация анализируемой области - сечение проходного резца с на-

пайной твердосплавной пластиной при наличии канала внутреннего охлаждения, на рис. 2 - картины изменения температурного поля при обработке стали 45 в зависимости от изменения расхода смазочно-охлаждающей жидкости (используемые технологические режимы: скорость резания - 3 м/с, глубина резания - 2 мм, подача - 0,2 мм/об, главный угол резца в плане - 45^0). Аналогично можно получить картины изменения температурных полей в зависимости от режимов резания и выбранной конструкции и геометрии режущего инструмента.

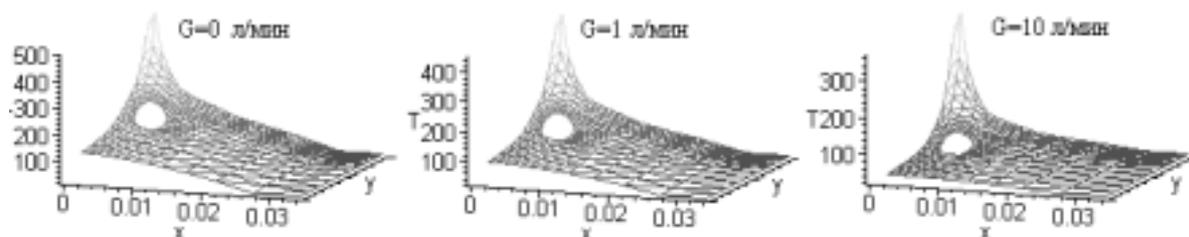


Рис.2

Достоверность расчета по разработанному вычислительному комплексу подтверждена путем сравнения получаемых результатов с известными аналитическими решениями и приведенными в литературе [11,12] данными численных расчетов и натуральных экспериментов.

Для наглядного и быстрого получения результатов решения вышеописанной задачи произведено интегрирование разработанных вычислительных средств с системой программирования и системой интерактивной графики пакета Maple V [13]. Реализация подобной технологии позволяет оператору в режиме интерактивной связи с ЭВМ методом проб и ошибок подобрать необходимые параметры режима резания, конструкцию и геометрию режущей части инструмента, требуемую температуру охлаждения (или нагрева) и др., ориентируясь на графическое или числовое представление результатов решения, и исходя из заданной оптимальной температуры резания [14]. Таким образом, в результате применения разработанных средств моделирования температурных полей реализуется решение параметрической задачи об управлении тепловым процессом при различных способах комбинирования в зоне резания механической и тепловой энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спиридонов Ф.Ф., Фирсов А.М., Смирнов В.В. Математическое моделирование процессов теплопереноса в квазитрехмерных областях сложной формы. //Прикладные аспекты совершенствования химических технологий и материалов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции. –Бийск: БТИ АлтГТУ, 1998, ч.2.
2. Спиридонов Ф.Ф., Фирсов А.М., Смирнов В.В. О решении задач стационарной теплопроводности в квазитрехмерных областях сложной формы. //Исследования по баллистике и смежным вопросам механики: Сб. статей. -Томск: Изд-во ТГУ, 1998, ч.2.
3. Спиридонов Ф.Ф., Фирсов А.М., Смирнов В.В. Быстрое моделирование температурных полей в объектах произвольной конфигурации. // МАК-99: Материалы второй краевой конференции по математике. -Барнаул: Изд-во АГУ, 1999.
4. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. -М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Бреббия К., Уокер С. Применение метода граничных элементов в технике. -М.: Мир, 1982.
6. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. -М.: Наука, 1989.
7. Марчук Г.И. Методы вычислительной математики. -М.: Наука, 1989.
8. Андерсон А., Таннехилл Дж., Плетчер Р. Вычислительная гидромеханика и теплообмен. В 2-х т. -М.: Мир, 1990.
9. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. -М.: Мир, 1979.
10. Сабоннадьер Ж.-К., Кулон Ж.-Л. Метод конечных элементов и САПР. -М.: Мир, 1989.
11. Резников А.Н., Резников Л.А. Тепловые процессы в технологических системах. -М.: Машиностроение, 1990.
12. Остафьев В.А. Расчет динамической прочности режущего инструмента. –М.: Машиностроение, 1979.
13. Дьяконов В.П. Математическая система Maple V R3/R4/R5. –М.: Солон, 1998.
14. Макаров А.Д. Оптимизация процессов резания. -М.: Машиностроение, 1976.