

**МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И ПРОГРАММНАЯ
РЕАЛИЗАЦИЯ**

Москва
2022

1 Метод Ритца поиска приближенных обобщенных решений операторных уравнений

Метод Ритца – вариационный и проекционный метод, с помощью которого можно приближенно находить обобщенные решения операторных уравнений в гильбертовых пространствах. Далее мы еще поясним, что это такое. Этот метод появился на рубеже XIX–XX веков и первоначально применялся инженерами для решения задач механики твердого тела. Похожими методами являются метод Бубнова–Галёркина, Галёркина–Петрова. Далее приводится проекционная форма метода Ритца.

Рассмотрим следующее операторное уравнение:

$$\mathcal{A}u = f, \quad \mathcal{A} : H \rightarrow H, \quad (1)$$

где $f \in H$, а \mathcal{A} – некоторый оператор, действующий в гильбертовом пространстве H . Он имеет следующие свойства:

- Область его определения $D(\mathcal{A})$ плотна в H , т.е. $\overline{D(\mathcal{A})} = H$;
- \mathcal{A} – симметричный, т.е. $(\mathcal{A}u, v) = (u, \mathcal{A}v) \quad \forall u, v \in D(\mathcal{A})$;
- \mathcal{A} – положительно определённый, т.е. $\exists \gamma : (\mathcal{A}u, u) \geq \gamma^2 \|u\|^2 \quad \forall u \in D(\mathcal{A})$.

Пользуясь этими свойствами, на $D(\mathcal{A})$ можно ввести новое скалярное произведение $[u, v] = (\mathcal{A}u, v)$ и порождаемую им *энергетическую норму* $[u] = \sqrt{(\mathcal{A}u, u)}$, а с её помощью ввести специальное *энергетическое пространство* $H_{\mathcal{A}}$ – пополнение $D(\mathcal{A})$ по энергетической норме.

Введя энергетическое пространство, можно рассматривать так называемую *слабую постановку задачи*. Это понятие очень важно. Дело в том, что введение энергетического пространства, расширяющего область определения оператора \mathcal{A} , позволяет нам рассматривать более широкий круг задач, ослабив требования на гладкость в некоторых местах. Вспомните: при построении конечноразностных схем предполагается достаточная гладкость коэффициентов и решения. Теперь же эти требования несколько ослабляются.

Определение 1. $u \in H_{\mathcal{A}}$ называется *обобщённым решением задачи* (??), если

$$[u, v] = (f, v) \quad \forall v \in H_{\mathcal{A}}.$$

Теорема 1. *Обобщенное решение существует, единственно и ограничено по норме, а именно: $\forall f \in H \quad \exists! u \in H_{\mathcal{A}} : [u] \leq C \|f\|$.*

Не будем останавливаться на ее доказательстве, которое выполняется с помощью теоремы Рисса и свойств энергетической нормы.

Метод Ритца предлагает достаточно ясный способ поиска *приближенного* обобщенного решения. В энергетическом пространстве $H_{\mathcal{A}}$ выбирается система линейно независимых функций $\{\varphi_i\}_{i=1}^N$. Их линейная оболочка обозначается $H_{\mathcal{A}}^N$. Функции $\{\varphi_i\}_{i=1}^N$ должны обладать свойством *предельной плотности* в $H_{\mathcal{A}}$:

$$\forall v \in H_{\mathcal{A}} \quad \inf_{v_N \in H_{\mathcal{A}}^N} [v - v_N] \leq \varepsilon_N(v) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad N \rightarrow \infty \quad (2)$$

Иными словами, любой элемент из энергетического пространства $H_{\mathcal{A}}$ можно с любой заданной точностью приблизить линейной комбинацией базисных функций из $H_{\mathcal{A}}^N$, если выбрать достаточно большое N .

Тогда и приближенное обобщенное решение u будем искать в $H_{\mathcal{A}}^N$. Вопрос заключается в поиске коэффициентов $\{a_i\}_{i=1}^N$ разложения по базисным функциям. Для этого вычислим невязку, которую дает приближенное решение u_N , и потребуем ее ортогональности по отношению к $H_{\mathcal{A}}^N$:

$$\mathcal{A}u_N - f \perp H_{\mathcal{A}}^N, \quad (3)$$

что равнозначно ортогональности по отношению к каждой из базисных функций

$$\mathcal{A}u_N - f \perp \varphi_1, \dots, \varphi_N. \quad (4)$$

Запишем же эти условия в виде системы уравнений

$$\begin{cases} (\mathcal{A}u_N - f, \varphi_1) = 0, \\ \dots \\ (\mathcal{A}u_N - f, \varphi_N) = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Эту систему можно представить в виде

$$\begin{cases} (\mathcal{A}u_N, \varphi_1) = (f, \varphi_1), \\ \dots \\ (\mathcal{A}u_N, \varphi_N) = (f, \varphi_N). \end{cases} \quad (6)$$

или

$$\begin{cases} [u_N, \varphi_1] = (f, \varphi_1), \\ \dots \\ [u_N, \varphi_N] = (f, \varphi_N). \end{cases} \quad (7)$$

Вспомним теперь, что $u_N = \sum_{i=1}^N a_i \varphi_i$, откуда

$$\begin{cases} a_1[\varphi_1, \varphi_1] + \dots + a_N[\varphi_N, \varphi_1] = (f, \varphi_1), \\ \dots \\ a_1[\varphi_1, \varphi_N] + \dots + a_N[\varphi_N, \varphi_N] = (f, \varphi_N). \end{cases} \quad (8)$$

Видно, что эта система является линейной системой относительно коэффициентов $\{a_i\}$:

$$Aa = b, \quad (9)$$

где $A_{ij} = [\varphi_i, \varphi_j]$, а $b_i = (f, \varphi_i)$. Матрица A называется *матрицей жесткости*.

Лемма 1. $A = A^T > 0$.

Доказательство мы также опустим, он техническое и достаточно простое.

Результатом всех проделанных действий является

Теорема 2. Пусть u – обобщенное решение (см. опр. ??) задачи (??), а u_N – приближенное обобщенное решение, являющееся линейной комбинацией предельно плотных базисных функций $\{\varphi_i\}$, а коэффициенты разложения определяются из линейной системы (??). Тогда

1. Приближенное обобщенное решение u_N существует и единственно, при этом $[u_N] \leq C_1 \|f\|$;
2. $\|u - u_N\| \leq C_2 \varepsilon_N(u) \rightarrow 0$ при $N \rightarrow \infty$.

Доказательство. По лемме ?? решение системы (??) существует и единственно, значит, таково и приближенное обобщенное решение, определяемое полученными коэффициентами разложения.

$[u_N]^2 = [u_N, u_N] = (f, u_N) \leq \|f\| \cdot \|u_N\| \leq \|f\| \cdot [u_N]/\gamma$, отсюда $C_1 = 1/\gamma$.

Из способа поиска коэффициентов $\{a_i\}$ имеем $[u_N, \varphi_i] = 0 \quad \forall i$. В то же время, поскольку u – обобщенное решение, то согласно его определению ??, $[u, \varphi_i] = 0 \quad \forall i$ тоже. Отсюда $[u - u_N, \varphi_i] = 0 \quad \forall i$, то есть ошибка приближенного решения ортогональна всем базисным функциям, следовательно, и любой их линейной комбинации. Выберем такую комбинацию $v_N = \sum_{i=1}^N b_i \varphi_i$ и имеем $[u - u_N, u_N - v_N] = 0$.

Далее запишем $[u - u_N]^2 = [u - u_N, u - u_N] = [u - u_N, u - u_N + v_N - v_N] = [u - u_N, u - v_N] - [u - u_N, v_N] = [u - u_N, u - v_N] \leq [u - u_N][u - v_N]$.

Отсюда $[u - u_N] \leq [u - v_N] \quad \forall v_N \in H_{\mathcal{A}}^N$.

Возьмем теперь \inf по всем $v_N \in H_{\mathcal{A}}^N$ и учтем, что $[u - u_N]$ не изменится, а правую часть можно преобразовать по свойству предельной плотности (??), получим

$[u - u_N] \leq \inf_{v_N \in H_{\mathcal{A}}^N} [u - v_N] \leq \varepsilon_N(u) \rightarrow 0 \quad \text{при} \quad N \rightarrow \infty$; далее вспомним, что $\|u - u_N\| \leq [u - u_N]/\gamma$, отсюда $C_2 = 1/\gamma$. \square

ИТОГ

Для задачи (??) введено понятие обобщённого решения (опр. ??), предложен способ его поиска в виде линейной комбинации некоторых базисных функций $\{\phi_i\}$. Чтобы получить это приближенное решение, надо найти коэффициенты разложения по базисным функциям, решив линейную систему (??). Такое приближенное решение существует, единственно и сходится к обобщенному при увеличении числа базисных функций.

2 Метод Ритца в применении к краевой задаче для стационарного уравнения диффузии

В качестве примера рассмотрим краевую задачу для стационарного уравнения диффузии с однородными (нулевыми) граничными условиями Дирихле:

$$\begin{cases} -\nabla \cdot (\mathbb{D} \nabla C) = f & \text{в } \Omega, \\ C|_{\partial\Omega} = 0. \end{cases} \quad (10)$$

В этой задаче оператор \mathcal{A} имеет вид

$$\mathcal{A} = -\nabla \cdot (\mathbb{D} \nabla \cdot) : L_2(\Omega) \rightarrow L_2(\Omega), \quad (11)$$

т.е. $H \equiv L_2(\Omega)$ и область определения

$$D(\mathcal{A}) = \{u \in C^2(\overline{\Omega}) : u|_{\partial\Omega} = 0\} \subset H. \quad (12)$$

Можно показать, что \mathcal{A} – симметричный и положительно определенный (используя неравенство Пуанкаре–Стеклова).

Энергетическим пространством $H_{\mathcal{A}}$ является соболевское пространство $W_2^1(\Omega)$, и обобщенное решение ищется именно в нем. Это пространство значительно шире пространства $C^2(\overline{\Omega})$.

3 Кусочные функции и метод конечных элементов

Вопросом, определяющим практическую применимость метода Ритца, является выбор базисных функций $\{\varphi_i\}$. Первичная практика применения метода Ритца распространялась

на области простой формы и такие базисные функции, как тригонометрические. В таком случае матрица A в линейной системе (??) является плотной.

В какой-то момент (см., например, работу Р. Куранта «Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations» 1943 года) стало понятно, что если в качестве $\{\varphi_i\}$ использовать функции, не равные нулю лишь в некоторой малой области, то в матрице A большая часть элементов будет нулевыми. В качестве таких функций можно использовать кусочно-полиномиальные функции.

В большинстве случаев кусочные функции удовлетворяют следующему соотношению:

$$\varphi_i(x_j) = \delta_{ij}, \quad (13)$$

где x_j – координаты j -го узла, а φ_i – базисная функция, соответствующая j -му узлу.

3.1 Кусочно-линейные функции в одномерном случае

В одномерном случае базисные кусочно-линейные функции имеют вид, приведенный на рисунке ???. В этом случае отрезок разбит узлами, которые на оси Ox обозначены как 0, 1, 2, 3. Приведены базисные функции $\varphi_0, \dots, \varphi_3$.

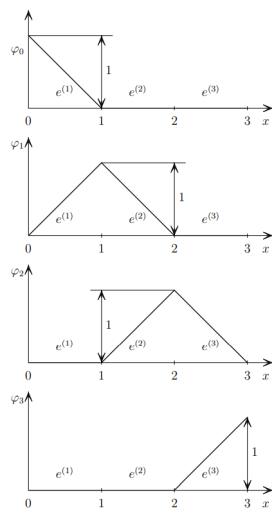


Рис. 1: Кусочно-линейные базисные функции на одномерной сетке

Для таких функций матрица A в системе (??) является трехдиагональной. Трехдиагональная она потому, что для некоторого i число $[\varphi_i, \varphi_j]$ не равно нулю только для $j = i - 1, i, i + 1$. Можно проверить, что итоговая трехдиагональная матрица практически совпадает с матрицей, которую дает метод конечных разностей.

3.2 Кусочно-линейные функции на треугольниках

Такой подход можно расширить и на треугольники. Пример базисной функции для одного узла приведен на рисунке ??. Такая функция не равна 0 только в ячейках, которые окру-

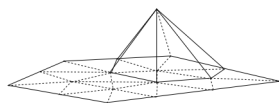


Рис. 2: Кусочно-линейная базисная функция на треугольной сетке

жают узел, которому она соответствует. В этих треугольниках она ведет себя линейно. Во всех остальных ячейках она нулевая.

Если рассмотреть некоторый треугольник с вершинами (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) и ввести на нем локальную нумерацию узлов, то базисные функции φ_1 , φ_2 , φ_3 этих узлов на данном треугольнике имеют вид

$$\varphi_1(x, y) = \frac{(x - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y - y_3)}{(x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3)} \quad (14)$$

$$\varphi_2(x, y) = \frac{(x - x_3)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y - y_3)}{(x_2 - x_3)(y_1 - y_3) - (x_1 - x_3)(y_2 - y_3)} \quad (15)$$

$$\varphi_3(x, y) = \frac{(x - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y - y_1)}{(x_3 - x_1)(y_2 - y_1) - (x_2 - x_1)(y_3 - y_1)} \quad (16)$$

3.2.1 Особенности сборки матрицы жесткости

Можно догадаться, что значение $[\varphi_i, \varphi_j]$ не равно 0 только в том случае, если узлы i и j являются вершинами одного треугольника.

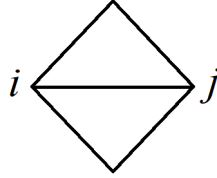


Рис. 3: Два узла i и j , чьи базисные функции одновременно не равны нулю на двух треугольниках

Заполнение матрицы жесткости A (??) можно проводить по-разному. Например, можно заполнять матрицу по строкам. Каждая строка соответствует одному узлу. В ходе заполнения строки для i -го узла нужно вычислять все ненулевые произведения $[\varphi_i, \varphi_j]$. Для соседних узлов i и j их базисные функции не равны нулю одновременно на двух треугольниках. Таким образом, для вычисления $[\varphi_i, \varphi_j]$ нужно будет обратиться к двум разным треугольникам, чтобы произвести интегрирование. Более того, в ходе заполнения строки для i -го узла к каждому из соседних треугольников придется обратиться 2 раза при вычислении функций для разных соседних узлов. Это все приводит к лишним вычислениям.

Поэтому сборку глобальной матрицы жесткости A выполняют по-другому. Запускается цикл по по ячейкам (треугольникам). На каждом треугольнике рассматриваются φ_1 , φ_2 , φ_3 (используется локальная для треугольника нумерация узлов). Далее для этих трех функций вычисляются все попарные скалярные произведения, записывающиеся в *локальную* матрицу жесткости. После чего локальная матрица встраивается в глобальную.

4 Практические задания

Эти упражнения готовят к основной цели – программированию настоящего МКЭ.

1. Освоить готовые функции в `src/main.cpp`: создание тегов и циклы по сеточным элементам, получение существующих на сетке тегов, вычисление диаметра сетки, подсчет C - и L_2 -норм разности сеточных функций, представленных ячейечными тегами, создание и решение линейных систем;

2. Имеется некоторая функция f . Она приближается на треугольной сетке функцией f_N – линейной комбинацией кусочно-линейных функций-«домиков», где каждая кусочно-линейная функция соответствует узлу сетки, а коэффициент при ней является значением приближаемой функции f в этом узле, т.е. $f_N = f(x_1)\phi_1(x) + \dots + f(x_N)\phi_N(x)$, где x – координаты в двумерном пространстве. Написать функцию, которая считает $\|f - f_N\|_C$, $\|f - f_N\|_{L_2}$. Подсказка: при подсчете L_2 -нормы нужно запустить цикл по ячейкам, и интегралы считать для каждой ячейки. Для интегрирования использовать квадратурную формулу из методички, стр. 39.
3. Построить последовательность измельчающихся треугольных сеток в единичном квадрате с помощью Gmsh. Пользуясь результатами предыдущего задания, приблизить на этих сетках функцию $f = \sin(\Pi x) * \sin(\Pi y)$. Нарисовать графики C - и L_2 -норм ошибки в зависимости от диаметра сетки. На графике оси сделать в логарифмической шкале.