

Высокопроизводительный программный комплекс POLARA для определения аэродинамических характеристик профилей

В.С. Морева, И.К. Марчевский

Численное определение аэродинамических характеристик различных профилей предполагает решение серий однотипных задач по моделированию обтекания каждого профиля потоком среды при различных углах атаки. Разработанный программный комплекс позволяет оптимизировать использование имеющихся у расчетчика вычислительных ресурсов путем автоматизации процесса проведения расчетов. Использование многопроцессорных вычислительных систем позволяет существенно сократить временные затраты на проведение расчета.

1. Введение

Определение аэродинамических характеристик тел является важной прикладной задачей, актуальной при проектировании конструкций, подверженных действию потока среды. В ряде случаев исследуемые тела имеют большое удлинение, и их обтекание можно приближенно считать плоскопараллельным, сводя пространственную задачу о моделировании трехмерного течения к плоской задаче об обтекании профиля.

Во многих математических моделях учет воздействия набегающего потока на обтекаемое тело приближенно осуществляется при помощи безразмерных стационарных аэродинамических коэффициентов C_{xa} , C_{ya} и C_m (коэффициенты лобового сопротивления, подъемной силы и аэродинамического момента соответственно), а аэродинамические нагрузки вычисляются по формулам

$$X_a = \frac{1}{2} C_{xa} \rho V_\infty^2 b, \quad Y_a = \frac{1}{2} C_{ya} \rho V_\infty^2 b, \quad M = \frac{1}{2} C_m \rho V_\infty^2 b^2,$$

где ρ — плотность среды, V_∞ — скорость набегающего потока, b — характерный размер профиля. При этом предполагается, что сами аэродинамические коэффициенты зависят лишь от положения профиля в потоке — от его угла атаки, который может меняться при движении профиля.

Таким образом, для решения задачи о динамике профиля в потоке требуется знание зависимостей аэродинамических коэффициентов от угла атаки. Для получения значений C_{xa} , C_{ya} , C_m при фиксированном угле атаки требуется решить нестационарную задачу о моделировании обтекания неподвижного профиля, установленного под данным углом, дождаться установления течения, а затем осреднить полученные нестационарные нагрузки по большому промежутку времени. Расчеты обтекания для разных углов атаки осуществляются независимо друг от друга; при этом для получения достаточно точных зависимостей может потребоваться значительное число расчетов.

Скорость решения задачи становится особенно важной при решении задач проектирования конструкций, когда требуется провести анализ большого количества возможных вариантов, а также на этапе планирования экспериментов. Целью настоящей работы является оптимизация использования имеющихся вычислительных ресурсов и автоматизация процесса проведения расчетов. Для достижения поставленной цели разработан программный комплекс, использующий алгоритмы параллельных вычислений.

2. Метод вихревых элементов

Одним из методов численного моделирования нестационарного обтекания профиля является метод вихревых элементов, с помощью которого можно получить результаты с приемлемой точностью при сравнительно низких затратах вычислительных ресурсов. Метод

вихревых элементов широко применяется для моделирования течений несжимаемых сред и определения аэродинамических нагрузок, действующих на профили, помещенные в поток [1–4]. Метод вихревых элементов относится к классу бессеточных лагранжевых методов и основан на моделировании эволюции завихренности. В данной работе используется модификация метода вихревых элементов, позволяющая моделировать течения вязкой несжимаемой среды [1].

Движение среды описывается уравнениями неразрывности и Навье-Стокса [5]

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0, \quad \mathbf{r} \in S, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = \nu \Delta \mathbf{V} - \nabla \left(\frac{p}{\rho} \right), \quad \mathbf{r} \in S, \quad (2)$$

где $\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = V_x \mathbf{i} + V_y \mathbf{j}$ — скорость среды, $p(\mathbf{r}, t)$ — давление, $\rho = \text{const}$ — плотность среды, ν — коэффициент кинематической вязкости, S — область, занятая жидкостью (область течения), ∇ — оператор Гамильтона, Δ — оператор Лапласа.

Граничные условия на бесконечности имеют вид

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) \rightarrow \mathbf{V}_\infty, \quad p(\mathbf{r}, t) \rightarrow p_\infty, \quad |\mathbf{r}| \rightarrow \infty; \quad (3)$$

на профилях выполняется условие прилипания

$$\mathbf{V}(\mathbf{r}, t) = 0, \quad \mathbf{r} \in K. \quad (4)$$

Задача (1)–(2) с граничными условиями (3)–(4) дополняется начальным условием: скорость жидкости в начальный момент времени считается известной.

Введением вектора завихренности $\boldsymbol{\Omega}(\mathbf{r}, t) = \nabla \times \mathbf{V}(\mathbf{r}, t)$ уравнение (2) можно привести к виду

$$\frac{\partial \boldsymbol{\Omega}}{\partial t} + \nabla \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{U}) = 0,$$

где $\mathbf{U}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{V}(\mathbf{r}, t) + \mathbf{W}(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{W} = \nu \frac{(\nabla \times \boldsymbol{\Omega}) \times \boldsymbol{\Omega}}{|\boldsymbol{\Omega}|^2}$ — диффузионная скорость, вызванная влиянием вязкости [1].

В соответствии с методом вихревых элементов непрерывное распределение завихренности $\boldsymbol{\Omega}(\mathbf{r})$ моделируется набором из N вихревых элементов с известными интенсивностями. На каждом шаге по времени выполнение уравнения неразрывности (1) и граничного условия на бесконечности (3) происходит автоматически, граничное условие прилипания (4) обеспечивается генерацией новых вихревых элементов на границе профилей, а течение вязкой среды, описываемое уравнением (2), моделируется движением имеющихся вихревых элементов.

Для двумерных течений вязкой несжимаемой среды справедлив аналог теоремы Томсона [1]: завихренность внутри замкнутого контура будет сохраняться, если каждая точка этого контура движется со скоростью \mathbf{U} . Отсюда следует, что вихревые элементы, моделирующие завихренность, перемещаются в потоке по линиям поля \mathbf{U} . Тогда их движение описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений

$$\frac{d\mathbf{r}_i(t)}{dt} = \mathbf{V}(t, \mathbf{r}_i) + \mathbf{W}(t, \mathbf{r}_i), \quad i = 1, \dots, N. \quad (5)$$

Для интегрирования системы уравнений (5) используется метод Рунге-Кутты второго порядка точности [6]. Поле скоростей \mathbf{V} определяется положениями вихревых элементов и их интенсивностями по закону Био-Савара, поле скоростей \mathbf{W} вычисляется по формулам, приведенным в [1].

Аналог интеграла Коши-Лагранжа [1] позволяет вычислить давление в любой точке вихревого течения вязкой среды. Нагрузки, действующие на профили, находятся по распределению давления на поверхности и вязким напряжениям на поверхности.

В качестве критерия останова расчета в простейшем случае используется достижение заданного числа временных шагов. Более эффективным с точки зрения затрат машинного времени является анализ решения на каждом шаге и прекращение расчета, когда течение выйдет на стационарный или квазистационарный режим.

3. Программный комплекс Polara

Разработанный программный комплекс позволяет использовать возможности современных многопроцессорных вычислительных систем и осуществлять конвейерную обработку очереди задач — выполнять независимые расчеты обтекания данного профиля под различными углами атаки. Использование большого числа вычислительных ядер позволяет проводить несколько расчетов одновременно; по мере завершения отдельных расчетов и освобождения соответствующих ядер на них запускается расчет следующих задач.

Помимо этого при решении каждой задачи предусмотрена возможность распараллеливания наиболее трудоемких с вычислительной точки зрения этапов расчета.

Для организации межпроцессорного обмена данными и синхронизации работы различных ветвей программы, исполняемых на разных вычислительных ядрах, используется библиотека параллельных алгоритмов MPI [7]. Использование MPI позволяет создать переносимый код на языке C++, способный работать как на персональных ЭВМ, в том числе многоядерных, так и на ЭВМ, объединенных локальной сетью, а также на высокопроизводительных вычислительных кластерах [8].

3.1. Принцип работы комплекса Polara

Рассмотрим основные этапы алгоритма решения задачи об определении аэродинамических характеристик некоторого профиля в заданном интервале углов атаки. Для этого требуется решить серию из N_{task} задач, каждая из которых соответствует обтеканию профиля под определенным углом атаки. Пусть общее число процессоров, предназначенных для счета, равно N_{proc} , а для решения i -ой задачи требуется $n_{proc}^{(i)}$ процессоров (рис. 1).

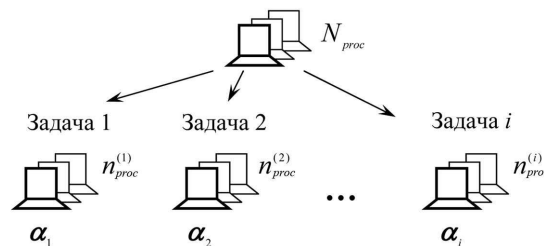


Рис. 1. Иллюстрация к распараллеливанию задач

Отметим, что число процессоров, требуемое для решения разных задач (для разных углов атаки) может быть различным и задается пользователем.

Опишем принцип решения данной серии задач с помощью разработанного программного комплекса.

Уровень 1

На этапе запуска расчета из N_{proc} процессоров выделяется головной процессор, на который загружаются список углов атаки α_i с указанием чисел $n_{proc}^{(i)}$ (т.е. очередь задач), общие параметры расчетной схемы, геометрия профиля и значение кванта времени t_{kvant} , необходимого для синхронизации расчетов. Головной процессор управляет ходом решения всей серии задач.

Далее все требуемые параметры рассылаются по остальным процессорам; t_{kvant} — вре-

мя, через которое происходит контроль загрузки процессоров и обновление очереди задач: если в каких-то из запущенных задач выполнен критерий останова, то вместо них запускается расчет следующих задач.

Уровень 2

Следующий этап осуществляется циклически, пока не будут решены все задачи из очереди. Перед запуском каждой последующей задачи анализируется состояние очереди и число свободных процессоров. Для вновь запускаемых задач формируются подгруппы из $n_{proc}^{(i)}$ процессоров, в каждой подгруппе выделяется головной процессор, который управляет ходом моделирования обтекания профиля на данном угле атаки и обеспечивает необходимые пересылки информации внутри своей подгруппы.

Головные процессоры всех подгрупп обмениваются данными с “глобальным” головным процессором, передавая ему информацию о необходимости продолжения расчета данной задачи в течение следующего кванта времени или выполнении критерия останова счета.

Уровень 3

На данном уровне выполняется непосредственное решение i -ой задачи. На каждом временном шаге производится расчет движения вихревых элементов, генерация завихренности, вычисление мгновенных значений аэродинамических нагрузок, как указано выше. Расчет повторяется до тех пор, пока не закончится квант времени t_{kvant} или выполнится критерий останова.

3.2. Оценка трудоемкости отдельных операций алгоритма

Различные операции алгоритма расчета обтекания профиля методом вихревых элементов имеют существенно отличающиеся трудоемкости. Для их оценки была проведена серия тестовых расчетов, в которых моделировалось обтекание профиля под различными углами атаки на одном вычислительном ядре, т.е. без применения параллельных алгоритмов. Диаграмма на рис. 2 показывает, что наибольшие временные затраты (90 %) приходятся на операцию вычисления скоростей вихревых элементов. Около 6 % от общего времени расчета занимает вычисление аэродинамических нагрузок, и 3 % времени уходит на реструктуризацию вихревой пелены. Остальные операции алгоритма являются существенно менее трудоемкими и занимают около 1 % машинного времени. Отметим, что весь расчет занял около 975 секунд машинного времени.

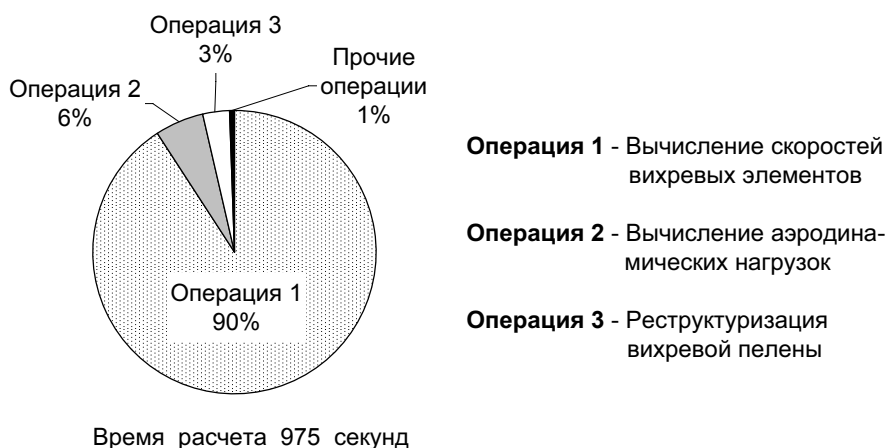


Рис. 2. Трудоемкости различных операций при расчете на одном ядре

Для указанных трех основных операций алгоритма метода вихревых элементов разработаны параллельные алгоритмы, которые позволяют значительно повысить скорость выполнения каждого расчета, если его выполнять параллельно на нескольких вычислительных ядрах. Результаты тестовых расчетов показывают (рис. 3), что при увеличении

числа процессоров доля операции вычисления скоростей вихрей снижается, оставаясь, тем не менее, доминирующей. Доля операции вычисления нагрузок остается практически неизменной, а доля реструктуризации вихревой пелены возрастает. Также растет доля прочих операций, исполняемых последовательно на головном процессоре.

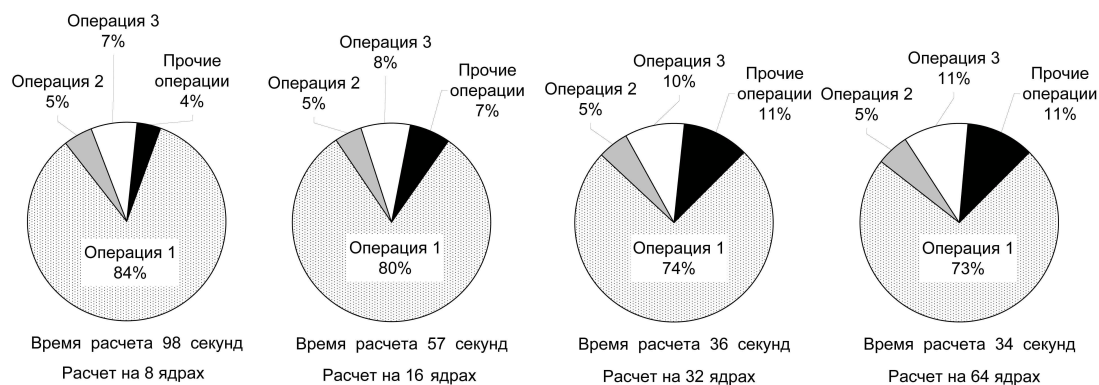


Рис. 3. Трудоемкости различных операций при расчете на 8, 16, 32, 64 ядрах

Зависимость времени счета и ускорения при решении одной задачи моделирования обтекания от числа используемых процессоров представлена в таблице 1. Все расчеты проводились на высокопроизводительном кластере МВС-100к МСЦ РАН.

Таблица 1. Время счета и ускорение при решении одной задачи

Число ядер	1	8	16	32	64
Время счета, с	975	98	57	36	34
Ускорение, раз	1,0	9,9	17,3	27,5	28,6

Отметим, что ускорение является практически линейным вплоть до 32 процессоров, при большем числе процессоров эффективность распараллеливания резко снижается.

Таким образом, реализованные параллельные алгоритмы моделирования обтекания профиля позволяют добиться значительного повышения производительности и снизить временные затраты на решение каждой задачи обтекания.

3.3. Оценка производительности программного комплекса при решении серии задач

При решении серии задач по моделированию обтекания профиля на различных углах атаки временные затраты на решение отдельных задач могут отличаться в несколько раз, поэтому конвейерная обработка очереди задач позволяет оптимизировать загрузку вычислительных ядер. Это достигается за счет “асинхронности” запуска расчетов для разных углов атаки — каждый следующий расчет запускается как только освободится необходимое для него число ядер.

В качестве тестового примера рассмотрена серия из 91 задачи при использовании 1–64 вычислительных ядер. За эталон принято время решения всей серии на одном ядре, которое составило около 12,5 часов. В таблице 2 представлены значения ускорения расчета, полученные в двух режимах работы программы: без внутреннего распараллеливания (1 ядро на каждую задачу) и с распараллеливанием (2 ядра на задачу).

Большая эффективность достигается в случае применения внутреннего распараллеливания, что объясняется оптимизацией загрузки вычислительных ядер.

Таблица 2. Ускорение при решении серии задач

Число ядер	1	2	4	8	16	24	32	40	48	56	64
Ускорение, раз (1 ядро / расчет)	1,00	1,93	3,76	7,21	14,04	20,53	27,22	31,65	39,43	45,01	47,33
Ускорение, раз (2 ядра / расчет)	—	1,92	3,74	7,37	14,30	20,87	28,28	34,63	41,28	46,64	53,79

4. Выводы

Для задачи о моделировании обтекания профиля потоком вязкой несжимаемой среды и вычислении аэродинамических нагрузок, действующих на него, разработан параллельный программный комплекс, позволяющий автоматизировать процесс решения серии задач. Предусмотрена возможность распараллеливания наиболее трудоемких с вычислительной точки зрения этапов решения каждой задачи. Представлены оценки трудоемкости отдельных этапов алгоритма, а также производительности программного комплекса при решении серии задач, показывающие высокую эффективность и масштабируемость разработанного программного комплекса.

Авторы благодарят Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН за возможность использования высокопроизводительного кластера МВС-100К.

Литература

1. Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок. — М.: Изд-во МГУ, 2006. — 184 с.
2. Трехмерное отрывное обтекание тел произвольной формы / Под ред. С.М. Белоцерковского. — М.: ЦАГИ, 2000. — 265 с.
3. Morgenthal G. Aerodynamic Analysis of Structures Using High-resolution Vortex Particle Methods: PhD thesis. — Cambridge: University of Cambridge, Department of Engineering, 2002. — 209 p.
4. Cottet G.-H., Koumoutsakos P. Vortex methods: theory and practice // Cambridge University Press, 2000.
5. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. — М.: Дрофа, 2003. — 840 с.
6. Марчевский И.К., Морева В.С. Численное моделирование обтекания системы профилей методом вихревых элементов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Естественные науки. — 2010. — № 1. — С. 12-20.
7. Гергель В.П. Теория и практика параллельных вычислений.— М.: Бином, 2007.— 424 с.
8. Левин В.К. Отечественные суперкомпьютеры семейства МВС: [<http://parallel.ru/mvs/levin.html>], 14.12.2009.