

УДК 629.735.33

И.П. БОЙЧУК

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЧИСЛЕННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АЭРОГАЗОДИНАМИКИ

Предложен подход к графическому представлению вычислительных данных. Представлена технология построения линий тока в вычислительной аэрогазодинамике. Эта технология позволяет упорядочить рассмотрение трудно обозримого бесконечного многообразия векторов скорости, заполняющих часть пространства, занятую движущейся сплошной средой. Технология основана на стандартном математическом аппарате механики сплошных сред и дифференциальной геометрии. Дано применение к исследованию траекторного полета аэродинамического летательного аппарата. Показано, что непрерывная визуализация физических полей наряду с построением линий тока является неотъемлемым средством обработки результатов вычислительного эксперимента.

Ключевые слова: вычислительная аэрогазодинамика, визуализация решений, построение линий тока.

Введение

Прогресс в области информационных технологий, главным образом в связи с постоянным наращиванием производительности ЭВМ, обуславливает повышение роли значимости опережающего вычислительного аэрогазодинамического эксперимента в процессе проектирования летательных аппаратов (ЛА) и двигателей. В свою очередь, частичная замена натурального эксперимента численным неизбежно сопряжена со значительным усложнением задач внешнего и внутреннего обтекания за счет внедрения нестационарных пространственных моделей, заданных в контрольных объемах со сложной геометрией. Феноменологический анализ результатов решения подобных задач невозможен без проведения параллельно с численным расчетом процесса непрерывной визуализации.

Задачи вычислительной аэрогазодинамики предъявляют принципиально новые требования к роли визуализации в задачах вычислительной аэродинамики. Визуализация становится не только иллюстративным средством, но полноправным инструментом познания. Ее основными функциями являются [1]: качественный анализ численного решения, контроль процесса расчета численного решения, интеграция с САПР для возможности расчета сложной геометрии.

1. Постановка задачи

Рассматривается нестационарное движение аэродинамического ЛА (рис. 1) с бесклапанным пульсирующим воздушно-реактивным двигателем (ПуВРД) в вязкой сжимаемой среде. Математиче-

ское описание модели свободнолетающего ЛА основывается на консервативной форме записи системы уравнений пространственного течения среды в декартовых координатах, состоящей из уравнений законов сохранения массы, импульса и энергии. Для решения системы уравнений выбирается регулярная декартова сетка с гексаэдральными ячейками. Переменная топология геометрической области решения задается импортированной из среды проектирования твердотельной маской (рис. 2). Для обеспечения адекватного отображения направляющих свойств поверхностей ЛА на прямоугольной сетке использован метод отображения направляющих свойств твердотельных границ [2]. Для решения эволюционной задачи используется конечно-разностный метод, реализованный на регулярной временной сетке [2, 3]. В результате решения получены поля скорости, давления и температуры во всей области течения.

2. Визуализация физических полей

Неотъемлемой частью разработанной технологии численных исследований являются средства визуализации результатов, представляющие собой специальную (т.е. адаптированную к условиям физического оригинала) графическую оболочку анимационного сопровождения вычислительного эксперимента в реальном масштабе времени. Визуализация физических полей осуществляется путем отображения их актуальных состояний в виде цветowych карт сечений расчетной области [4]. На рис. 3 представлены поля скорости, температуры и концентрации продуктов сгорания в момент окончания сгорания топлива в двигателе.



Рис. 1. Объект исследования

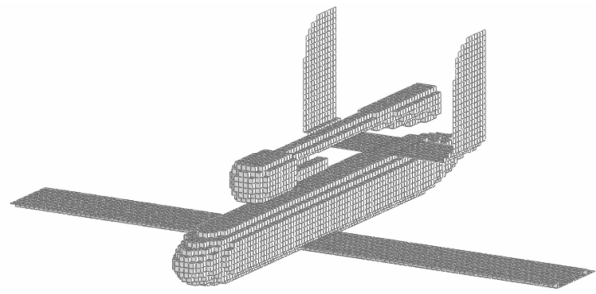


Рис. 2. Сеточное представление объекта исследования

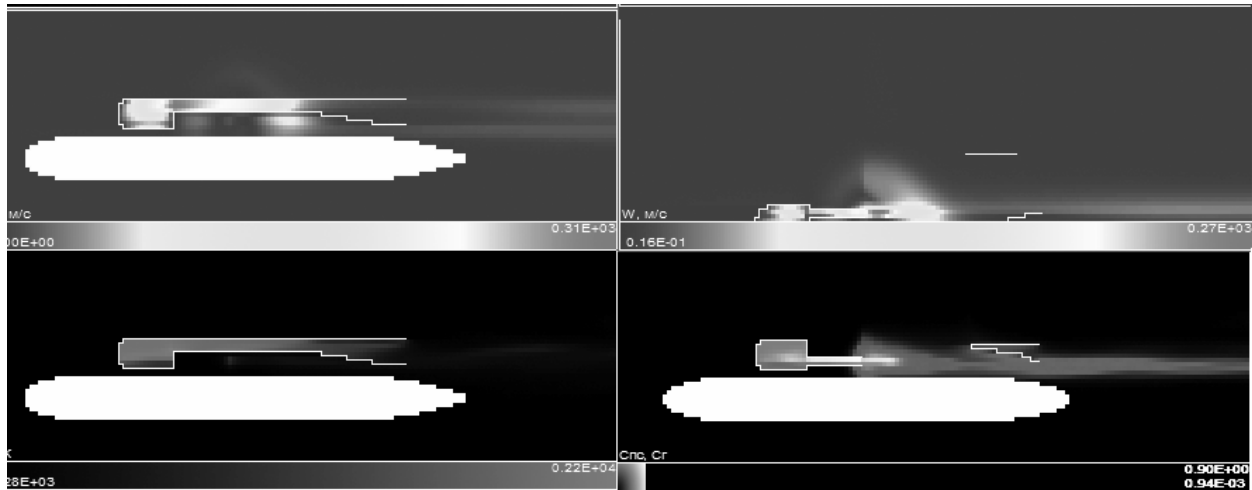


Рис. 3. Поля скорости (вверху), температуры и концентрации продуктов сгорания (внизу)

3. Технология построения линий тока

Поле скоростей представляет трудно обозримое бесконечное многообразие векторов скорости, заполняющих часть пространства, занятую движущейся сплошной средой. Чтобы сделать это многообразие более наглядным и упорядоченным нужно построить линии тока в поле скоростей.

Линии тока $\vec{r}(t)$ удовлетворяют уравнению

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V}(\vec{r}(t)), \quad (1)$$

где $\vec{r} = \vec{r}(t)$ - радиус-вектор, $\vec{V} = \vec{V}(\vec{r}(t))$ - скорость частиц. В уравнении (1) время t выступает как параметр. Кривая \vec{r} с точностью до членов второго порядка малости лежит в соприкасающейся плоскости, натянутой на вектора касательной $\vec{\tau}$ и главной нормали \vec{n} . Для векторов сопровождающего трехгранника $\vec{\tau}$, \vec{n} , \vec{b} справедливы формулы Серре – Френе:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{\tau}}{ds} &= K\vec{n}, \\ \frac{d\vec{n}}{ds} &= -K\vec{\tau} + T\vec{b}, \\ \frac{d\vec{b}}{ds} &= -T\vec{n}, \end{aligned} \quad (2)$$

где K - кривизна кривой, T - кручение, s - натуральный параметр. Кривизна и кручение кривой определяются следующими выражениями:

$$K^2 = \frac{\dot{\vec{r}}^2 \ddot{\vec{r}}^2 - (\dot{\vec{r}} \cdot \ddot{\vec{r}})^2}{(\dot{\vec{r}}^2)^3}, \quad T = \frac{1}{K^2} \frac{(\dot{\vec{r}} \times \ddot{\vec{r}} \cdot \ddot{\vec{r}})}{(\dot{\vec{r}}^2)^3}. \quad (3)$$

Исходя из основной теоремы теории кривых [2], если на отрезке $0 \leq s \leq a$ заданы две непрерывные функции $K(s) \geq 0$, $T(s)$, то с точностью до расположения в пространстве существует единственная кривая $L: \vec{r} = \vec{r}(s), 0 \leq s \leq a$ такая, что s представляет собой длину дуги, а кривизна и кручение кривой L равны соответственно $K(s)$ и $T(s)$.

Построение кривой L проводится следующим образом. Система (2) представляет собой девять обыкновенных дифференциальных уравнений для компонент векторов $\vec{\tau}$, \vec{n} , \vec{b} . Заданием сопровождающего трехгранника в точке $s=0$: $\vec{\tau}(0)$, $\vec{n}(0)$, $\vec{b}(0)$ решение системы $\vec{\tau}(s)$, $\vec{n}(s)$, $\vec{b}(s)$ определяется однозначно.

Далее, задав начальную точку кривой $\vec{r}(0)$, получаем $\vec{r}(s)$:

$$\vec{r}(s) = \vec{r}(0) + \int_0^s \vec{\tau}(s) ds. \quad (4)$$

Построение линий тока происходит следующим образом (рис. 4).

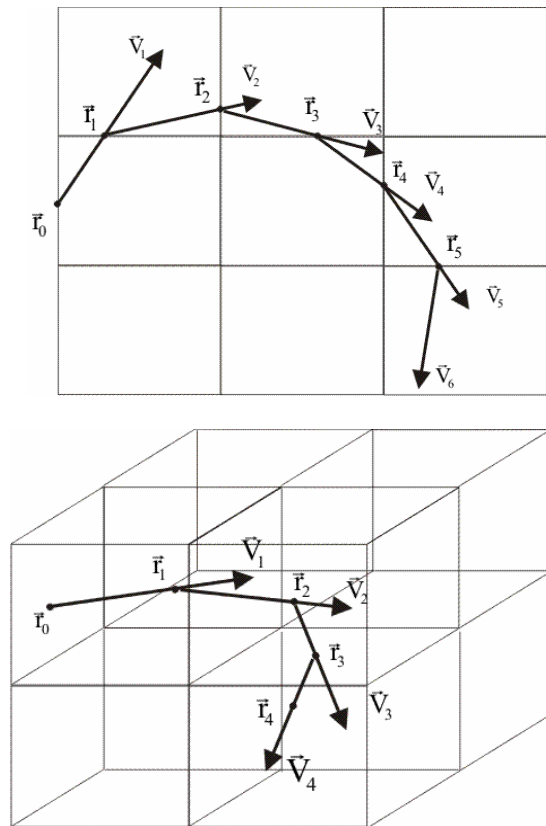


Рис. 4. Построение линий тока

1. Вначале задается начальная точка $\vec{r}_i(0)$ и вычисляется ее скорость. При этом определяется, в какой ячейке находится точка, все ребра и грани ячейки.

2. Далее через заданную точку в направлении вектора скорости строится прямая и ищется пересечение этой прямой с гранью соседней ячейкой. Определяется скорость этой точки.

3. В результате многократного повторения данной операции получаем последовательность векторов $\{\vec{r}_i\}, i = \overline{0, N}$, задающих дискретное описание кривой линии. Скорость в этих точках нам известна.

4. Далее по формулам (3) находим кривизну $\{K_i\}$ и кручение $\{T_i\}$ кривой в каждой точке. При этом при вычислении учитываем, что $\dot{\vec{r}}_i = \vec{V}_i$, а производные высших порядков $\ddot{\vec{r}}_i, \ddot{\vec{r}}_i$ вычисляем односторонними конечными разностями.

5. Решая систему (2), находим компоненты векторов естественного трехгранника $\{\vec{\tau}_i\}, \{\vec{n}_i\}, \{\vec{b}_i\}$.

6. Строим линию тока согласно (4).

Для построения кривой нужно решить $9 \cdot N$ обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка.

Для сокращения числа вычислений нужно заметить, что вектор касательной $\vec{\tau} = \vec{V} / |\vec{V}|$.

Пример построения линий тока показан на рис. 5.

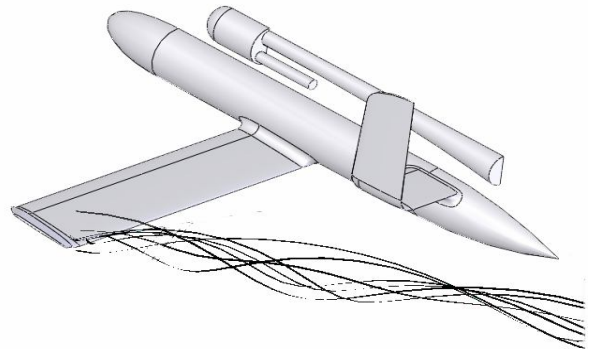


Рис. 5. Концевые вихри

На рис. 6 представлены линии тока в плоскости симметрии беспилотного летательного аппарата (БЛА) в момент начала реверсивного тока в расширяющейся части сопла ПуВРД.

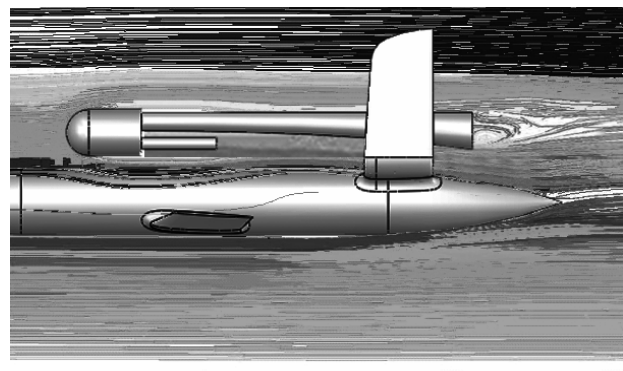


Рис. 6. Линии тока в плоскости симметрии аппарата

4. Анализ результатов

Наибольший интерес представляло исследование взаимодействия реактивной струи с аппаратом. Обращает на себя внимание пространственный характер взаимодействия реактивной струи, выходящей из сопла, и реверсированного потока из входных патрубков. Непрерывная пошаговая визуализация картины течения дала возможность проследить процессы образования вихрей. По окончании сгорания в расширяющейся части сопла и впускных патрубках устанавливается течение против полета. Создается интенсивная зона вихревых структур, в т.ч. и на поверхности фюзеляжа БЛА.

Заключение

Непрерывная пошаговая визуализация физических полей наряду с построением линий тока является неотъемлемым и необходимым средством обработки и анализа больших массивов числовой информации, получаемой в процессе вычислительного эксперимента.

Представленная технология визуализации наряду с опережающими численными исследованиями универсальна и область ее применимости не ограничивается приведенным примером.

Литература

1. Бондарев А.Е. *Функции визуализации в вычислительной аэрогазодинамике* / А.Е. Бондарев, Е.Н. Бондарев // *Полет*. – 2000. – № 10. – С. 53-60.

2. Амброжевич А.В. *Малоресурсный метод численного моделирования течений в геометрических областях сложной формы* / А.В. Амброжевич, И.П. Бойчук, С.Н. Ларьков, В.А. Серета // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 6/53. – С. 5-10.

3. Амброжевич А.В. *Численное моделирование теплофизических процессов в двигателестроении: учебное пособие* / А.В. Амброжевич. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2005. – 233 с.

4. Ларьков С.Н. *Метод отображения результатов численного моделирования задач механики сплошной среды* / С.Н. Ларьков // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2008. – № 4 / 51. – С. 87-91.

5. Бронштейн И.Н. *Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов* / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. – 544 с.

Поступила в редакцию 19.01.2011

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры аэрокосмической теплотехники А.В. Бастеев, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ЧИСЕЛЬНОГО РОЗВ'ЯЗКУ ЗАДАЧ АЕРОГАЗОДИНАМІКИ

І.П. Бойчук

Запропонований підхід до графічного подання обчислювальних даних. Представлена технологія побудови ліній току в обчислювальній аерогазодинаміці. Ця технологія що дозволяє упорядкувати розгляд нескінченної множини векторів швидкості, що займають частину простору, зайняту суцільним середовищем. Технологія була заснована на стандартному математичному апараті механіки суцільних середовищ і диференціальної геометрії. Було показано застосування до дослідження траєкторного польоту аеродинамічного літального апарату. Показано, що неперервна візуалізація фізичних полів наряду з побудовою ліній току являється невід'ємним засобом обробки чисельного експерименту.

Ключові слова обчислювальна аерогазодинаміка, візуалізація рішень, побудова ліній току.

VISUALIZATION OF NUMERICAL SOLUTION IN CFD

I.P. Boychuk

Is offered approach to graphic presentation of numerical data.. I presented technology of construction of path lines in CFD, allowing to put in order consideration of the field of vectors of speed in a continuous environment. Technology is based on the standard mathematical method of mechanics of continuous environments and differential geometry. Is shown application to research of trajectory flight of aerodynamic aircraft. It is shown, that continuous visualisation of physical fields along with , path lines is the integral means of processing of results of computing experiment.

Key words: CFD, visualization of solution, path lines.

Бойчук Игорь Петрович – ассистент кафедры теоретической механики и машиноведения факультета авиационных двигателей Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: igor_boichuk@mail.ru.