фикации присоединила подобные точки к существующим классам, в результате чего им было поставлено в соответствие все типовые характеристики соответствующего класса, которые естественно сильно отличаются от индивидуальных показателей этих точек.

Отсюда следует, что в подобных ситуациях необходимо такого типа точки рассматривать либо в качестве отдельных классов, либо проводить в этих районах интерполяцию, увеличивая тем самым плотность точек.

Заключение

Таким образом, предлагаемый в работе подход анализа многомерных временных рядов позволяет обеспечивать необходимую (наперед заданную) точность при аппроксимации временных рядов концентрации $CO2$. Разбив всю поверхность Земли на несколько сотен регионов, мы тем самым сокращаем необходимый объем вычислений в случае сетки 2.5°x2.5°, по крайней мере на 2 порядка.

Разбиение на районы выделяет области с близким поведением исследуемых функций, что дает возможность корректно проводить процедуру интерполяции в любой точке поверхности Земли. Метод дает наглядное представление о поведении концентрации. Он универсален, для его применения не нужны априорные знания о природе исследуемого поля, характере его поведения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Maksyutov S. Atmospheric CO2 simulations with a high resolution model and synoptic scale variability of CO2 column / S. Maksyutov, R. Onishi, M. Naja, A. Yaremchuk, P.K. Patra, G. Inoue // CGER-I058-2007, v.14, 2007. – pp. 49-54
2. Состояние и комплексный мониторинг природной среды и климата. Пределы изменений – М.: Наука, 2001. – 242 С.
3. Айвазян С.А. Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / С.А. Айвазян, В.М. Бухштабер, И.С. Енюков, Л.Д. Мешалкин – М.: Финансы и статистика, 1989. – 607 с.
4. Мандель И. Д. Кластерный анализ. — М.: Финансы и Статистика, 1988. – 432 С.

*д.т.н., профессор **Катаев М.Ю.** – профессор каф АСУ ТУСУР, kataev.m@sibmail.com, 8(3822) 70-15-36*

УДК 517.9, 533.6.011

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

С.В.Тимченко

Рассматривается параллельный генетический алгоритм для решения задач многокритериальной оптимизации. При его помощи решена задача определения параметров траектории входа тела в атмосферу Земли, минимизирующих величину интегрального конвективного теплового потока в точке торможения затупленного тела при одновременной минимизации толщины теплозащитного покрытия. В качестве исходной математической модели для расчета теплового потока используются уравнения тонкого вязкого ударного слоя с учетом неравновесного характера протекания химических реакций, многокомпонентной диффузии и сопряженного характера теплообмена на поверхности тела.

Ключевые слова: генетический алгоритм, многокритериальная оптимизация, вязкий ударный слой, равновесная температура, параллельный алгоритм

Введение

При решении большого числа практических задач приходится сталкиваться с необходимостью нахождения решений, удовлетворяющих нескольким, зачастую конфликтующим между собой, критериям. В связи с этим, решение задачи заключается не в нахождении какого-то одного решения, а в отыскании некоторого множества решений, каждое их которых будет превосходить другие хотя бы по одному критерию. Такие решения, как правило, называются оптимальными по Парето. Необходимость отыскания целого множества решений чрезвычайно усложняет задачу оптимизации и делает практически непригодными большинство классических методов оптимизации. Задача усложняется еще и тем, что надо не только найти решения, максимально близкие к истинному множеству (или фронту) Парето, но и обеспечить максимально возможное различие между такими решениями (т.е. охватить возможно большую часть этого фронта).

Принципы многокритериальной оптимизации существенно отличаются от обычной оптимизации. Во втором случае (один критерий) целью решения задачи является нахождение глобального оптимального решения, дающего оптимальное значение для одной целевой функции. В случае нескольких критериев мы имеем соответственно несколько целевых функций, каждая из которых может иметь оптимальное значение при своем собственном наборе значений независимых переменных. Если оптимальные решения для различных целевых функций существенно различны, то невозможно говорить об оптимальном решении всей задачи в целом. В этом случае мы получаем множество оптимальных решений, ни одно из которых не является оптимальным по сравнению с другими во всех смыслах (т.е. по все критериям). Это множество называют множеством решений оптимальных по Парето. Проиллюстрируем сущность многокритериальной задачи на гипотетическом примере, состоящем в удовлетворении двух критериев оптимальности - цена и качество некоторого изделия (рис.1).

Здесь по оси абсцисс откладывается условная цена некоторого изделия, а по оси ординат – величина, обратная его качеству. На этом рисунке точка А представляет решение, близкое к оптимальному по цене, но совершенно неудовлетворительное по качеству. Наоборот, точка В представляет собой изделие высокого качества, но и одновременно очень дорогое. Существуют также точки (такие, как точка D), принадлежащие фронту Парето, каждая из которых, превосходя какую либо точку из этого фронта по одному критерию, обязательно уступает ей по другому.

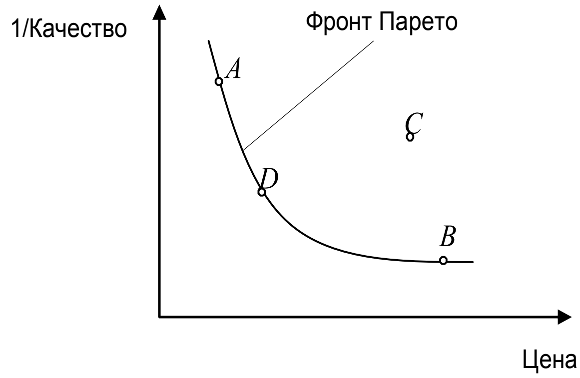

Рисунок 1 Фронт Парето

Рассмотрим теперь точку, не являющуюся оптимальной по Парето (например, точку С). Эта точка, превосходя точку А по критерию качества, не является оптимальной по Парето, т.к. существуют решения (например, точка D), превосходящие эту точку по обоим критериям.

Для многокритериальной проблемы (пусть f_i- целевые функции, *i=1,2,..,M, M>1*) для любых двух точек в пространстве поиска существуют две возможности - доминирует одно решение над другим или нет. Говорят, что решение $x^{(1)}$ доминирует над решением $x^{(2)}$, если выполняются два условия

1. Решение $x^{(1)}$ не хуже решения $x^{(2)}$, т.е. для всех целевых функций $\forall i. f_i(x^{(1)}) \le f_i(x^{(2)})$ (в случае задачи минимизации).
2. Решение $x^{(1)}$ строго лучше решения $x^{(2)}$ хотя бы для одной функции, т.е. $\exists i. f_i(x^{(1)}) < f_i(x^{(2)})$

Таким образом, множество оптимальных по Парето решений Р определяется таким образом, что в пространстве поиска нет решений доминирующих над решениями из множества Р.

Постановка задачи

Рассмотрим задачу определения параметров траектории входа тела в атмосферу Земли, минимизирующих величину интегрального конвективного теплового потока в точке торможения затупленного тела при одновременной минимизации толщины теплозащитного покрытия. В качестве исходной математической модели для расчета теплового потока используются уравнения тонкого (гиперзвукового) вязкого ударного слоя с учетом неравновесного характера протекания химических реакций, многокомпонентной диффузии и сопряженного характера теплообмена на поверхности тела [1-3].

Задача оптимизации формулируется следующим образом: в пространстве непрерывных функций *V(t)* и *H(t)* (где *V(t)* и *H(t)* - соответственно скорость и высота полета в зависимости от времени) пару функций *V(t)* и *H(t)* таких, чтобы достигался минимум функционала

$$Q(V,H,t_m) = \int_0^{t_m} q_w(H(t),V(t),R^*,k,...)dt$$

при минимально возможной толщине теплозащитного покрытия. Здесь подынтегральная функция $q_w(H(t),V(t),R^*,k,...)$ представляет собой тепловой поток в критическую точку тела, который определяется из численного решения сопряженной задачи при помощи метода [9]. Искомые функции *V(t)* и *H(t)* ищутся в классе линий Безье *m*-го порядка.

Задача решается при ограничениях на равновесную температуру поверхности $T_W(t)$,которая не должна превышать некоторого заданного значения $T_W^{\max}(t)$,и температуру внутренней поверхности оболочки $T_i\ (t)$ которая также не должна превышать некоторого заданного значения $T_i^{\max}(t)$

Очевидными являются требования на крайние точки искомых функций:

V(0) = V0, H(0)=H0; V(tm) = V, H(tm)=H*.*

Другие ограничения на область допустимых значений поставленной задачи могут быть получены из физического анализа задачи и являются следствиями системы уравнений динамики полета. В частности, необходимыми являются ограничение на максимально допустимую перегрузку и дополнительное ограничение на ускорение, смысл, которого в том, что торможение не может быть больше торможения, вызываемого максимальной силой сопротивления для данного тела на данной высоте.

$$\left|\dot{V}(t)\right| < ag \quad , \quad \left|\dot{V}(t)\right| < S^{*}\rho_{\infty}(t)V^{2}(t)/(2m)$$

Для учета ограничений на допустимые решения при реализации алгоритма поиска оптимального решения использовалась модифицированная целевая функция Q*:

$$Q^{*}=\begin{cases} q_1+q_2\left(\left|\dot{V}(t)\right|/g-a\right) & if\left|\dot{V}(t)\right|>ag \\ q_3+q_4\left(T_W^{\max}-T_W\right)/T_W^{\max} & if\,T_W>T_W^{\max} \\ q_5+q_6\left(T_i^{\max}-T_i\right)/T_i^{\max} & T_i>T_i^{\max} \\ q_7+q_8\left(\left|\dot{V}(t)\right|/g-A(t)/g\right) & if\left|\dot{V}(t)\right|>A(t) \\ Q & \end{cases}$$

Метод решения

Для решения поставленной задачи в данной работе предлагается многокритериальный асинхронный параллельный генетический алгоритм (МАПГА), являющийся развитием однокритериального алгоритма, предложенного в [2-5]. В его основе лежит ранжированная турнирная селекция, основанная на частичном упорядочивании точек в пространстве поиска. На первом этапе ранжирования (частичного упорядочивания) в текущей популяции выбираются точки, лежащие во фронте Парето, им присваивается нулевой ранг, после его они исключаются из рассмотрения. На втором этапе в оставшейся части популяции выбираются решения, для которых среди оставшихся особей нет доминирующих решений. Далее этим особям присваивается первый ранг и они также исключаются из рассмотрения. Процесс повторяется до исчерпания популяции. После этого в процессе селекции используются не значения целевых функций, а присвоенные особям ранги.

МАПГА состоит из следующих основных шагов.

- На основе случайного поиска на master-процессе определяется первоначальная популяция.
- Для вычисления целевой функции индивидуумы рассылаются slave-процессам.
- Промежуточная популяция инициализируется множеством наилучших по Парето решений из предыдущей популяции.
- Master-процесс принимает сообщения от готовых slave процессов и включает соответствующее решение в промежуточную популяцию.

Важно отметить, что вследствие асинхронности алгоритма потомки особей из *k*-ой генерации могут быть включены как уже в *k+1*-ую генерацию, так и в *k+m*-ую (*m*>1) генерацию, в зависимости от времени расчета целевой функции. После этого, если промежуточная популяция полностью сформирована, она подвергается ранжированию, копируется в текущую популяцию и, если не выполняется некоторый критерий завершения итерационного процесса, то алгоритм возобновляется, начиная с 3-го шага.

Если популяция сформирована еще не полностью, то из предыдущей популяции при помощи оператора селекции выбираются две новых родительских особи, которые подвергаются операторам скрещивания и мутации для производства новых пробных точек в пространстве поиска. При этом, как правило, используются оператор арифметического скрещивания [8] и оператор мутации с вероятностью пропорциональной расстоянию между родительскими особями [7].

Для вычисления целевой функции полученные индивидуумы посылаются свободным slave-процессам и алгоритм возобновляется, начиная с 4-го шага.

Ниже приводится краткий псевдокод описанного алгоритма.

```
t := 0
initpopulation P(t)  /* random or random
```

```
                    +initial solution(s)*/
Scatter P(t)       /* for evaluation */
while not done do
   P':= Pareto_set(P) /*Pareto elitism*/
   while size(P')  < size(P) do
      Recv_from_j (Pi, f(Pi))
      P' := P' + Pi
      Pi:= selectparents P(t)/*ranking
                    tournament selection */
      recombine Pi /*arithmetical
                      crossover*/
      mutate Pi  /*nonuniform+distance-
                     dependent mutation */
      Send_to_j(Pi) /* for evaluation */
   enddo
   P(t+1) := ranking P'(t)
   t := t + 1
enddo
```

Предложенный параллельный алгоритм для решения задач многокритериальной оптимизации использовался для решения описанной в пункте 2 задачи. На примере задачи определения параметров оптимальной траектории входа в атмосферу Земли, показано, что задача параметрического исследования может быть сведена к поиску фронта Парето в задаче многокритериальной оптимизации, в которой в качестве дополнительного критерия выступает варьируемый параметр задачи. Проведенные расчеты показали, что данный подход позволяет существенно сократить время решения задачи. При этом параллельность алгоритма позволяет не только эффективно использовать имеющиеся вычислительные мощности, но и предотвратить стягивание фронта Парето в точку. Некоторые результаты расчетов приведены на рис.2-3. (Кривые 1-3 на рис.3 соответствуют точкам 1-3 на рис.2).

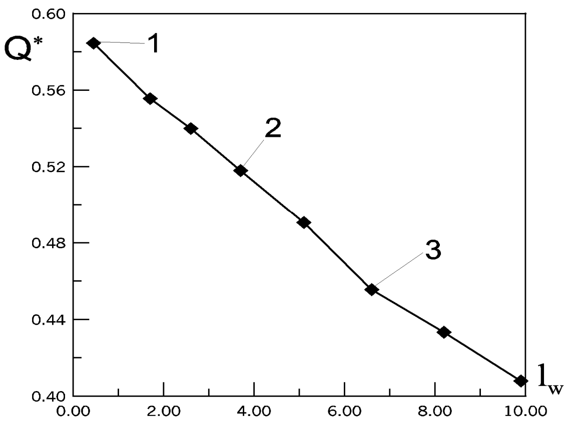

Рисунок 2 Фронт Парето

Заключение

Предложен параллельный генетический алгоритм для решения задач многокритериальной оптимизации. При его помощи решена задача определения параметров траектории входа в атмосферу Земли, минимизирующих величину интегрального конвективного теплового потока в точке торможения затупленного тела при одновременной минимизации толщины теплозащитного покрытия. Показано, что задача параметрического исследования может быть сведена к поиску фронта Парето в задаче многокритериальной оптимизации, в которой в качестве дополнительного критерия выступает варьируемый параметр задачи. Проведенные расчеты показали, что данный подход позволяет существенно сократить время решения задачи.

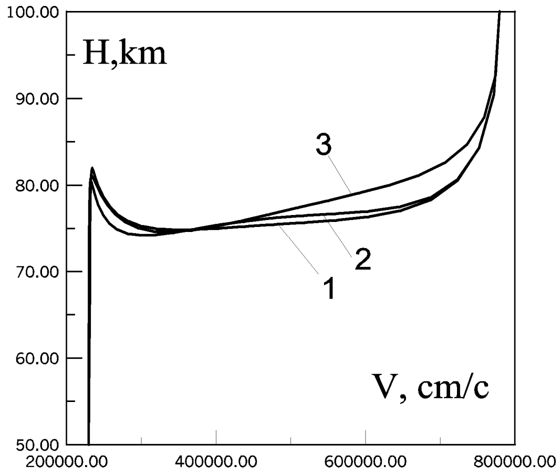

Рисунок 3 Оптимальные траектории

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Peigin S.V. Super- and hypersonic aerodynamics and heat transfer. / Peigin S.V., Tirskii G.A., Apshtein E.Z., Pilyugin N.N., Sevest'yanenko V.G. New-York. CRC Press. - 1993. - 352 p.
2. Казаков, В.Ю. Оптимизация траектории входа в атмосферу земли по интегральному тепловому потоку / Казаков В.Ю., Пейгин С.В., Тимченко С.В. // ЖПМТФ. – 2000. - Т.41,№4. - С. 112-121
3. Peigin S.V. Reentry Trajectory Optimization Using Genetic Algorithms / Peigin S.V., Desidery J.-A., Timchenko S.V. // Computitional Fluid Dynamics'2000. - Proc. of the Fifht European CFD Conference. - 2000. – 14 p.
4. Peigin S. Asynchrone Parallel Genetic Algorithm for Heat Flux Optimization Problem / Peigin S., Periaux J., Timchenko S. // In: Parallel Computational Fluid Dynamics. Development and Applications of Parallel Technology. Elsevier Science B.V. - 1999. - P.377-384
5. Peigin S. Application of a genetic algorithm to a heat flux optimization problem / Peigin S., Mantel B., Timchnenko S., Borodin A., Sefrioui M. // Surveys on Mathematics for Industry - Elsevier Science B.V. - 2000. -V. 9, №3. - P. 161-169

6. Hoffmeister F. Genetic algorithms and evolution strategies: similarities and differences / Hoffmeister F., Back T. // Parallel Problem Solving from Nature - Proceedings of 1st Workshop, ed. par Schefel H.P. et Manner R. Dortmund, Germany, 1-3 October 1991. - P.455-469.
7. Sefioui M. Fast convergence thanks to diversity / Sefioui M., Periaux J., Ganascia J.-G. // Evolutionary Programming V. Proc. of the 5th Annual Conference on Evolutionary Programming. L.J.Fogel, P.J.Angeline and T.Back editors. -MIT Press, 1996. P.92-118
8. Michalewicz Z. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. / Michalewicz Z.- New York, Springer-Verlag, 1992, Artificial Intelligence. – 264 p.
9. Петухов И.В. Численный расчет двумерных течений в пограничном слое / Петухов И.В. // Численные методы решения дифференциальных и интегральных уравнений и квадратурные формулы. - М.: Наука, - 1964. - С.305-325.

Д.т.н., с.н.с. ***Тимченко С.В.*** *– зав.каф. прикладной математики и информатики ТУСУР (г.Томск), tsv@tcde.ru, (3822) 41-33-06*

УДК 519.876.5: 621.865.8

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБОТОВ-МАНИПУЛЯТОРОВ С УЧЕТОМ ВНЕШНЕЙ СРЕДЫ

А.Н. Горитов

Рассматриваются задачи, связанные с проблемой моделирования роботов-манипуляторов, функционирующих в сложной внешней среде. Движения строятся таким образом, чтобы избежать соударений звеньев манипулятора и не допустить столкновения с объектами внешней среды. Предложенный метод позволяет строить оптимальные траектории перемещения манипулятора по заданным критериям. Для более плавного перемещения манипулятора рассматривается алгоритм сглаживания табличных значений изменения обобщенных переменных манипулятора.

Ключевые слова: робототехника, мехатроника, моделирование, планирование траектории

1. Введение

При создании программного обеспечения для роботов-манипуляторов одной из задач является обеспечение функционирования роботов в средах с препятствиями. Это вызывает необходимость разработки алгоритмов и программ, позволяющих оперативно контролировать и учитывать ограничения внешней среды, при этом в качестве основных целей ставится задача избегать соударений звеньев роботов между собой и с объектами внешней среды. Моделирование функционирования робота-манипулятора при выполнении таких операций приводит к комплексу взаимосвязанных задач, таких как моделирование робота и его внешней среды, планирование траектории перемещения робота-манипулятора, определение точек соударения звеньев манипулятора, как между собой, так и с объектами внешней среды, синтез законов управления.

В настоящее время разработано большое количество комплексов программ, которые обладают широкими возможностями моделирования механизмов и механических систем. Среди них можно отметить такие комплексы программ, как Euler [1], UM (Универсальный механизм) [2], CATIA [3] и другие. В то же время в этих пакетах не решаются такие задачи, как планирование траектории перемещения схвата манипулятора, синтез законов управления приводами роботов-манипуляторов. Не смотря на то, что эти задачи уже неоднократно ранее рассматривались [4, 5], однако, в силу разнообразия используемых методов при их решении они далеко не исчерпаны. В данной работе предлагаются методы и алгоритмы учета влияний внешней среды при моделировании сложных робототехнических систем.

2. Постановка задачи

Пусть задан произвольный робот-манипулятор R и внешняя среда D. В начальный момент времени t_0 схват манипулятора находится в точке $M_0(x_0, y_0, z_0)$. Необходимо построить план траектории перемещения схвата манипулятора из точки M_0 в целевую точку $M_k(x_k, y_k, z_k)$ так, чтобы не допустить столкновений звеньев робота, как между собой, так и с объектами внешней среды. На основе построенного плана траектории синтезировать законы управления приводами, обеспечивающие безопасное функциониро-