

УДК 629.7

**ГЕНЕТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ ВЕНТИЛЯТОРОВ И КОМПРЕССОРОВ
С УЧЕТОМ ИХ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ**

© 2011 г.

К.С. Пьянков, Н.И. Тилляева, М.Н. Топорков

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, Москва

kirill@ciam.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Разработан метод оптимизации вентиляторов и компрессоров на основе генетического алгоритма. Реализована технология автоматического построения высококачественных сеток для расчета газодинамических характеристик турбомашин, допускающих варьирование формы лопаток в требуемых для оптимизации пределах. Созданы программы газодинамического расчета пространственного вязкого течения и блок программ конечно-элементного анализа напряженно-деформированного состояния лопаток в нелинейной пространственной постановке, включающий определение динамических прочностных характеристик. Благодаря высокой степени адаптации и интеграции метода оптимизации с расчетными процедурами процесс автоматического профилирования лопатки вентилятора выполняется за короткое время при использовании небольших вычислительных ресурсов. Профилирование лопатки при таком подходе за время работы кластера из 16 одноядерных компьютеров около 4–6 суток позволяет получать образцы лопатки с характеристиками, близкими к профилируемым намного более трудоемкими традиционными методами.

Ключевые слова: оптимизация вентиляторов и компрессоров, генетический алгоритм, прочностные характеристики, конечно-элементный анализ.

На основе генетического алгоритма (ГА) оптимизации разработан программный комплекс для многокритериальной оптимизации вентиляторов и компрессоров с учетом их напряженно-деформированного состояния (НДС) и динамических прочностных характеристик.

Существующие многочисленные методы оптимизации, относящиеся к ГА (см., например, [1, 2]), основаны на организации эволюции исходной популяции оптимизируемых объектов по принципу «естественного отбора». В качестве механизмов эволюции используются три главных элемента: мутации, т.е. случайные изменения определяющих параметров; отбор наилучших особей (с наилучшими значениями целевых функций) и их скрещивание, т.е. образование новых объектов на основе линейных комбинаций существующих объектов. Выбор этих элементов, определяющий оптимальную стратегию эволюции, наряду с качеством расчетных модулей для оценки целевых функций определяет эффективность метода оптимизации. При этом для фиксированной степени детализации формы лопатки (количества переменных, описывающих ее форму) скорость сходимости алгоритма к оптимуму может различаться в 10–100 раз. Вызвано это как большим произволом в выборе родительских осо-

бей для скрещивания и мутаций, так и многообразием способов скрещивания и мутаций, а также весьма неопределенным диапазоном численных параметров, управляющих этими процессами. В разработанном программном комплексе реализованы стратегия и тактика оптимизации, позволяющие в полуавтоматическом режиме задавать управляющие параметры, обеспечивающие достаточно высокую скорость оптимизации.

К недостаткам ГА обычно относят большие потребные вычислительные ресурсы: типичное число обработанных особей в полном цикле оптимизации составляет около 10^5 . Однако в условиях стремительного наращивания вычислительных мощностей современных кластеров указанный недостаток компенсируется возможностью естественной и эффективной для ГА реализации технологии параллельных вычислений: полный расчет каждого объекта осуществляется на своем процессоре.

Основу газодинамического блока программного комплекса составляет программа пространственного вязкого расчета обтекания лопаточного венца. Течение описывается системой осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса (RANS), замкнутой моделью турбулентности v_t-90 [3]. Система разностных урав-

нений решается по неявной схеме метода Гаусса–Зейделя. Используется «распадная» расчетная схема [4–6], обеспечивающая второй порядок аппроксимации по пространству на гладких решениях. Для уменьшения общего потребного количества ячеек применяется турбулентный закон стенки.

Критически важным элементом программного комплекса является процедура автоматического построения качественных сеток для расчета газодинамических характеристик турбомашин, допускающих варьирование формы лопаток в требуемых для оптимизации пределах. В настоящем исследовании разработана технология построения сеток, обеспечивающая сочетание их высокого качества и робастности. Она основана на быстром алгоритме трансформации сеток при известной заранее топологии расчетной области и уникальной для каждого расчета геометрии объекта.

Расчет прочностных характеристик основан на технологии метода конечного элемента [7] с использованием двадцатиузлового шестигранного конечного элемента. Алгоритм рассчитан на работу с одноблочной структурированной сеткой. Для адекватного описания значительных и сложных по форме деформаций, характерных для лопаток вентиляторов современных двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД), программа дополнена механизмом, обеспечивающим описание геометрической нелинейности, возникающей вследствие значительных деформаций. Это приводит к необходимости выполнения итераций в

численных прочностных характеристиках лопаток, позволяющая находить заданное количество наибольших или наименьших собственных частот и соответствующих им форм колебаний лопатки. Указанная технология учитывает разреженность и ленточную форму матрицы жесткости, характеризующей систему линейных уравнений метода конечного элемента, что обеспечивает экономию памяти и повышение быстродействия соответствующих алгоритмов.

Задача газодинамического оптимального профилирования и прочностного анализа решается совместно с учетом всех требуемых ограничений уже на начальных этапах оптимизации. Профилирование лопаток при таком подходе за время работы кластера из 16 одноядерных компьютеров около 4–6 суток позволяет получать образцы лопаток с характеристиками, близкими к профилируемым намного более трудоемкими традиционными методами.

Приведем пример оптимизации рабочего колеса вентилятора, предназначенного для использования на современном гражданском ТРДД. На рис. 1 представлены характеристики финальной популяции особей ГА в количестве 2000 штук, близкие к оптимальным. В области проектного режима со степенью повышения давления $\pi = 1.6$ получены лопатки РК, для которых значение КПД $\eta \approx 93\%$, максимальное значение модуля напряжения в НДС $\sigma_m \approx 40$ кг/мм², относительное радиальное удлинение исходной лопатки под действием внешних сил в НДС $\delta_{\text{tip}} \approx 0.11\%$.

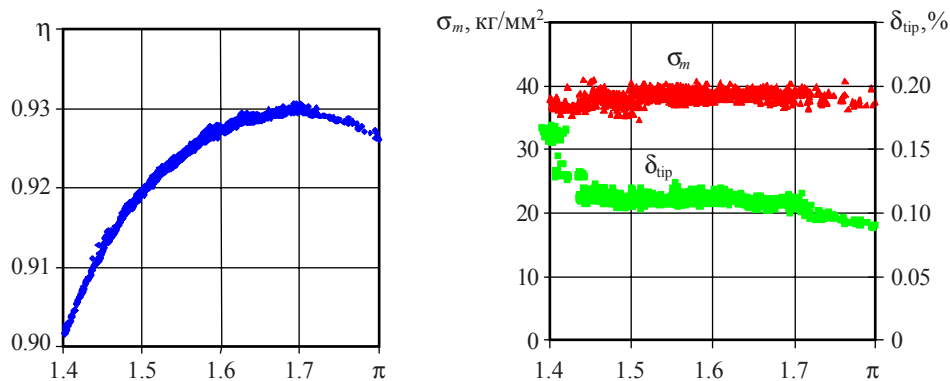


Рис. 1

ходе решения. На каждой итерации решается классическая, линеаризованная относительно текущего деформированного состояния система уравнений. Итерации повторяются, пока не достигается требуемая степень сходимости. В расчете НДС на данном этапе влиянием аэродинамических сил, действующих на поверхность лопатки, пренебрегается.

Реализована технология определения динами-

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-01-00178) и Аналитической ведомственной целевой программы развития научного потенциала высшей школы № 2.1.1/200.

Список литературы

1. Benini E., Tofollo A. Development of high performance airfoils for axial flow compressors using evolutionary computation // J. of Propuls. And Pow. 2002.

V. 18, No 3. P. 544–554.

2. Sasaki D., Obayashi S., Nakahashi K. Navier–Stokes optimization of supersonic wings with four objectives using evolutionary algorithm // J. of Aircraft, 2002, V.39, №4. P. 621–629.

3. Гуляев А.Н., Козлов В.Е., Секундов А.Н. К созданию универсальной однопараметрической модели для турбулентной вязкости // МЖГ. 1993. №4. С. 69–81.

4. Годунов С.К. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.

5. Колган В.П. Использование принципа минимальных значений производной к построению конечно-разностных схем для расчета разрывных решений газовой динамики // Уч. зап. ЦАГИ. 1972. Т. 3, №6. С. 68–77.

6. Тилляева Н.И. Обобщение модифицированной схемы С.К. Годунова на произвольные нерегулярные сетки // Уч. зап. ЦАГИ. 1986. Т. 17, № 2. С. 18–26.

7. Зенкевич О.К. Метод конечных элементов в технике / Пер. с англ. М: Мир, 1975. 541 с.

GENETIC OPTIMIZATION OF FANS AND COMPRESSORS, ACCOUNTING FOR THEIR STRESSED-STRAINED STATE

K.S. P'yankov, N.I. Tillyaeva, M.N. Toporkov

A method of the optimization of fans and compressors is developed on the basis of a genetic algorithm. For analyzing the gas-dynamic characteristics of turbo-machines, the technology of automatic design of high-quality grids is implemented admitting the variation of the blade shape in the limits required for optimization. The programs for the gas-dynamic calculation of spatial viscous flow and the block of programs for the finite-element analysis of the blade deflected mode in the nonlinear spatial statement, including the dynamic strength characteristics definition are developed. Due to a high degree of adaptation and integration of the optimization method with calculation procedures the process of automatic design of fan blades requires only a short time and small computing resources. Using this approach for designing a blade, a cluster of 16 one-nuclear computers can provide, after 4-6 working days, blade designs with the characteristics close to those obtained using much more labor-consuming traditional methods.

Keywords: fans and compressors optimization, genetic technique, strength characteristics, finite element analysis.