

УДК 539.3

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ ПЕРЕМЕННОЙ ПЛОТНОСТИ В ЗАДАЧАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© 2011 г.

А.В. Болдырев, В.А. Комаров

Самарский государственный аэрокосмический университет им. С.П. Королева

bolav@ssau.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Предлагается методика выбора силовой схемы и весового анализа конструкций с использованием специальной модели метода конечных элементов. Методика учитывает требования прочности, жесткости и устойчивости объектов, а также влияние их деформаций на аэродинамические нагрузки. Приводятся результаты решения ряда модельных и практических задач.

Ключевые слова: континуальная модель, достоверность, оптимизация распределения материала, интерпретация результатов.

Моделирование конструкций на ранних этапах проектирования

На стадии эскизного проектирования обычно неизвестны многие параметры топологии и размеров элементов конструкции, которые определяются в процессе ее дальнейшей проработки. В то же время на ранних этапах проектирования, например, летательных аппаратов для правильного задания нагрузок и решения ряда других вопросов – проектирования систем управления, секционирования механизации и т.п. – необходимо знание (прогнозирование) жесткостных и весовых характеристик конструкции. В этих условиях для обоснованного выбора силовой схемы с учетом разнообразных требований может быть использована гипотетическая упругая среда переменной плотности (континуальная модель), вписанная в геометрические ограничения разрабатываемого объекта [1].

Идея применения в процессе проектирования силовых конструкций материала с переменной по объему плотностью и жесткостью имеет отечественный приоритет [1, 2]. Эта идея использования пористого специфического материала с переменными прочностными и упругими свойствами появилась в исследованиях зарубежных ученых несколько позже [3, 4]. Континуальная модель потенциально содержит внутри заданных геометрических ограничений все мыслимые силовые схемы конструкции, которые могут быть образованы сгустками материала переменной плотности. Оптимизация распределения материала в континуальной модели позволяет опреде-

лить проект, которому соответствует рациональная с точки зрения передачи усилий силовая схема объекта.

Для оценки точности прогнозирования жесткостных и весовых характеристик конструкции, которые могут быть достигнуты в результате ее детальной проработки, предлагается следующая методика. Берется существующая конструкция, для которой имеется адекватная конечно-элементная модель, и выполняется расчет ее напряженно-деформированного состояния. Затем в геометрические ограничения конструкции вписывается трехмерная модель переменной плотности и производится оптимизация распределения плотностей ее элементов на те же внешние нагрузки, что и уже спроектированная конструкция. Далее сравниваются переменные состояния объекта и континуальной модели в идентичных случаях нагружения.

В качестве объектов исследования взяты крылья легкого маневренного и тяжелого транспортного самолетов, а также отсек фюзеляжа среднего магистрального самолета. Анализируются перемещения и напряжения, возникающие при нагружении конструкций. Данные, полученные на континуальных моделях, удовлетворительно согласуются с соответствующими параметрами тонкостенных моделей реальных объектов. При соблюдении рекомендаций, сформулированных в [5], погрешность результатов, полученных на континуальных моделях, в настоящей работе составила 3–5%, что свидетельствует о применимости модели переменной плотности на ранних стадиях проектирования конструкций.

Оптимизация распределения материала в континуальной модели

Рассматривается следующая оптимизационная задача. Минимизируется масса упругой среды при функциональных ограничениях на эквивалентные напряжения, обобщенные перемещения и критические усилия потери устойчивости. В качестве проектных переменных принимается плотность материала в трехмерных конечных элементах. При этом полагается, что модуль упругости и допускаемое напряжение материала связаны с плотностью линейной зависимостью.

В [6] предложен алгоритм решения этой задачи оптимизации. Движение в области поиска осуществляется на основе последовательного чередования «пробных» и «рабочих» шагов. На этапе «пробных» шагов определяются значения проектных переменных на основе линейных аппроксимаций функциональных ограничений. «Рабочий» шаг характерен тем, что для него выполняется анализ напряженно-деформированного состояния и устойчивости конструкции в полном объеме.

Алгоритм [6] реализован на языке Visual Basic for Applications в среде прикладного программного интерфейса МКЭ-системы NASTRAN.

Для испытания работоспособности алгоритма и программного обеспечения проведено исследование на специально подобранных тестовых задачах, показавшее удовлетворительную сходимость алгоритма. Для практических целей оказалось достаточно 10–30 «рабочих» шагов алгоритма.

Проектирование авиационных конструкций

Анализ распределения материала и основных путей передачи сил в теоретически оптимальной континуальной конструкции [6] позволяет: разрабатывать варианты рациональных силовых схем [1]; определять распределение нагрузок с учетом деформаций [7]; прогнозировать массу конструкции на основе подхода [8] с учетом статической аэроупругости [9], а также широкого спектра функциональных ограничений и конструктивно-технологических требований.

Рассматриваются задачи проектирования стреловидных крыльев, несущих поверхностей малого удлинения, в том числе круглого в плане крыла, фюзеляжей в зоне больших вырезов.

При проектировании стреловидного крыла удалось выявить дополнительные элементы и места их расположения [10], позволяющие уменьшить угол закручивания концевой сечения крыла на 32% при увеличении массы полнонапряжен-

ной конструкции на 2%.

Сравнительный анализ теоретически оптимальных крыльев малого удлинения одинаковой площади и различной формы в плане показал, что масса круглого крыла на 12 и 17% меньше массы соответственно треугольного и трапециевидного крыльев при создании несущими поверхностями заданной подъемной силы в дозвуковом полете летательного аппарата [11].

Исследования на континуальной модели отсека фюзеляжа с прямоугольным вырезом позволили выявить новое техническое решение, для которого теоретически необходимая масса материала для компенсации выреза на 14% меньше, чем для традиционного варианта силовой схемы.

Предлагаемая методика позволяет на ранних этапах проектирования выявлять существенные резервы снижения массы конструкций и находить новые технические решения.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научно и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Список литературы

1. Комаров В.А. Проектирование силовых схем авиационных конструкций // Актуальные проблемы авиационной науки и техники. М.: Машиностроение, 1984. С. 114–129.
2. Комаров А.А. Основы проектирования силовых конструкций. Куйбышев: Куйбышевск. книж. изд-во, 1965. 82 с.
3. Bendsoe M.P., Kikuchi N. Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. 1988. V. 71. P. 197–224.
4. Eschenauer H.A., Olhoff N. Topology optimization of continuum structures: A review // Appl. Mech. Rev. 2001. V. 54, No 4. P. 331–389.
5. Комаров В.А., Лаптева М.Ю. Прогнозирование деформаций крыльев // Полет. 2011. №2.
6. Болдырев А.В. Развитие технологии проектирования авиационных конструкций на основе модели переменной плотности // Полет. 2009. №11. С. 23–28.
7. Болдырев А.В., Комаров В.А., Лаптева М.Ю., Попович К.Ф. Учет статической аэроупругости на ранних стадиях проектирования // Полет. 2008. №1. С. 34–39.
8. Комаров В.А. Весовой анализ авиационных конструкций: теоретические основы // Полет. 2000. №1. С. 31–39.
9. Болдырев А.В., Комаров В.А. Структурная оптимизация несущих поверхностей с учетом статической аэроупругости // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. №2. С. 3–6.
10. Болдырев А.В. Структурная модификация тонкостенных конструкций с учетом требований жесткости // Проблемы прочности и пластичности. 2008.

Вып. 70. С. 175–183.

традиционной конфигурации // Полет. 2009. №10.

11. Болдырев А.В. Весовой анализ крыльев не- С. 57–60.

USING THE VARIABLE DENSITY MODEL IN 3D STRUCTURAL DESIGN PROBLEMS

A.V. Boldyrev, V.A. Komarov

A method for structural layout design and weight estimation based on a special finite element model is proposed. The method accounts for the requirements of strength, stiffness and stability requirements and also the effect of structural deformations on aerodynamic loads. Results for a number of test and realistic design problems are presented.

Keywords: ground structure, validity, optimization, material distribution, results interpretation.