
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 624.042: 629.5.024

В.И. Сутырин

МЕТОДОЛОГИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Российский государственный университет им. И. Канта

Представленная работа посвящена методологическим вопросам, связанным с разработкой программных средств расчетного проектирования (инженерного анализа) корпусных конструкций. За рубежом программные комплексы подобного назначения относят к категории САЕ (Computer Aided Engineering). В отечественном справочнике по системному анализу аналогичные программные средства представлены как «системы интегрированной информационной поддержки принятия решений и обеспечения жизненного цикла конструкций». Широкое распространение в литературных источниках получил также термин «подсистема инженерного анализа».

Ключевые слова: программная система, вычислительные средства, адаптивный анализ, корпуса судов, системный анализ, САЕ- комплекс, эффективность МКЭ

Современный САЕ- комплекс [1, 2] представляет собой сложную программную систему. Он должен учитывать специфику анализируемого объекта, обладать высокой эффективностью и ориентироваться на применение самых современных (в последние годы - мультипроцессорных) вычислительных средств. Их активное совершенствование обуславливает необходимость адаптивного анализа всей предметной области, пересмотра с новых позиций объединяемых ею фактов, проблематики, задач, онтологии, моделей и прикладных методик.

Проблемы, связанные с расчетным проектированием корпусов судов, можно отнести к категории слабоструктурированных (качественных) проблем. Поэтому для построения САЕ- комплекса, отвечающего всем современным требованиям, необходимо обращаться к теории систем и системного анализа, методологическим аспектом которой выступает комплексное исследование (изучение) объекта как единого целого - так называемый системный подход.

Как показал анализ автора, большинство существующих САЕ- комплексов как подсистем, предназначенных для инженерного анализа корпусов судов в рамках процесса автоматизированного проектирования, ориентировано на применение конечно-элементной вычислительной процедуры. МКЭ реализует основные этапы системного подхода к расчетным исследованиям, поскольку предполагает разбиение сложной системы на элементы, определение их свойств, объединение элементов, согласно модельным представлениям, расчет разрешающей системы уравнений, фрагментарное вычленение элементов и конкретизацию выходных характеристик. Однако, стремясь к целостности анализа системы корпуса, разработчики выстраивают глобальную систему уравнений большого порядка. Нарастает тупиковая ситуация: возрастающий порядок систем разрешающих уравнений модели судна становится

серьезным сдерживающим фактором к применению многовариантных, пошагово- итерационных и иных вычислительных процедур, составляющих алгоритмическую основу методов оптимизации, расчета устойчивости, пластических деформаций и др. Трудности многократно возрастают в расчетах корпусов со случайными нагрузками и характеристиками материала. Поэтому усилия многих исследователей направлены на повышение эффективности МКЭ. Методы подконструкций [3], суперэлементов [4], модуль-элементов [5] и редуцированных элементов [6] представляют собой варианты решения существующих проблем вычислительного характера.

По мнению автора, эффективные подходы к формированию программных средств САЕ-класса следует искать на пути объединения междисциплинарных решений. Так, надежную алгоритмическую основу комплекса могут обеспечить современные методы матричной алгебры [7] с поддержкой распараллеливания операций современными компиляторами, ориентированными на мультипроцессорные вычисления [8]. Существенного повышения эффективности расчетных исследований корпусных конструкций следует ожидать от переосмотра (с новых технологических позиций) классических методов строительной механики. Далее предлагаются базовые концептуальные подходы к построению САЕ-комплекса, объединенные автором в методе фронтальной конденсации и апробированные при расчетном анализе корпусов судов и плавучих сооружений.

Понижение размерности задачи и построение преобразованных расчетных схем

Формирование матрицы жесткости (массы) модели конструкции корпуса представляет собой подпроцесс наложения связей между многочисленными его элементами (создание структуры). Связи целесообразно обобщить в подструктурах, объединяющих контурные (-o-) и расчетные (-●-) узлы приведения различного назначения [9, 10] (см. табл. 1).

Обобщенные массивы данных обладают исключительной информативностью, поскольку они заменяют в расчете влияние исключенных фрагментов расчетной модели конструкции. Высокая степень обобщения расчетных параметров обеспечивает построение эффективных преобразованных расчетных схем (ПРС). По существу, речь идет о глубоком редуцировании системы и получении в итоге функциональных страт объекта, обеспечивающих простоту описания, полноту и целостность расчетного исследования. Важнейшими требованиями к алгебраической процедуре преобразования расчетной схемы становятся требования унификации расчетного алгоритма и минимизации расчетного времени, что достигается применением следующих матрично-векторных равенств [10]:

$$\|R_{np}\| = \|R_{ss}\| + \|R_{sn}\| \cdot \|L\|; \quad (1)$$

$$\|M_{np}\| = \|M_{ss}\| + \|Q\| + \|Q\|^T + \|G\| \cdot \|G\|^T, \quad (2)$$

где

$$\|Q\| = \|L\|^T \cdot \|M_{ns}\|; \|G\| = \|L\|^T \cdot \|M_{nn}\|^{1/2};$$

$$\{P_{np}\} = \|L\|^T \cdot \{P_n\}; \quad (3)$$

$$\|L\| = -\|R_{nn}\|^{-1} \cdot \|R_{ns}\|;$$

s - узлы приведения; n - исключаемые узлы системы; $\|R_{np}\|$ и $\|M_{np}\|$ – матрицы обобщенных коэффициентов жесткости и массы узлов приведения; $\{P_{np}\}$ - вектор внешних нагрузок, приведенных к сохраняемым узлам s ; $\|R_{sn}\|$ и $\|M_{ns}\|$ - блок – матрицы взаимного влияния; T - признак транспонирования.

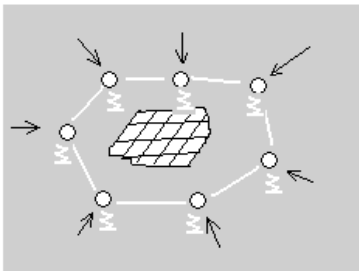
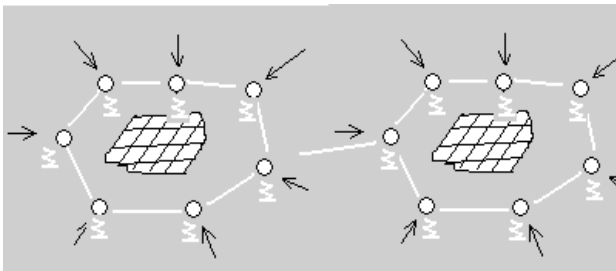
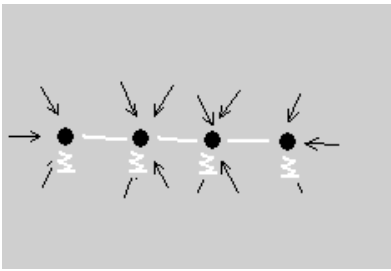
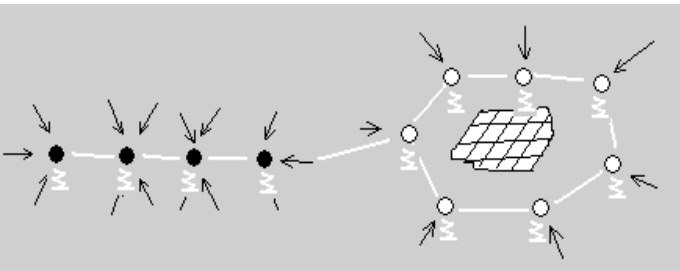
Если исходная матрица масс конструкции диагональная, то получаем упрощенное равенство:

$$\|M_{np}\| = \|M_{ss}\| + \|G\| \cdot \|G\|^T. \quad (4)$$

При построчном редуцировании блок- матрицы $\|M_m\|$ и $\|R_m\|$ становятся коэффициентами, что исключает операции их обращения и возведения в дробную степень.

Таблица 1

Подструктуры узлов приведения конструкции корпуса и характер решаемых прикладных задач

 <p>Анализ концентраций напряжений, локальных упруго- пластических деформаций, прочности, устойчивости и колебаний фрагментов корпуса с учетом обобщенных граничных условий</p>	 <p>То же с учетом взаимного влияния фрагментов (подструктур)</p>
 <p>Анализ собственных частот и форм колебаний и устойчивости корпусной конструкции</p>	 <p>Взаимосвязь общей и местной вибрации. Организация кратчайшего взаимодействия между сосредоточенными силами, областями контроля НДС или потери устойчивости конструкции (построение передаточных функций)</p>

Применение рекуррентных (вихревых) вычислительных процедур

Существенным моментом редукиции должен стать отказ от совокупно формирования матриц жесткости и массы судна в целом. Связи элементов системы корпуса целесообразно обобщать путем поэтапной структуризации и понижения размерности задачи. Рациональным, по мнению автора, решением здесь является комбинированное применение (сочетание) алгебраических преобразований (1)-(3) и фронтального метода решения системы уравнений (рис. 1).

На любом (*i*-м) этапе поузлового редуцирования обобщенные матрицы жесткости $\|C^{i}_{XY}\|$ и массы $\|M^{i}_{XY}\|$, а также нагрузки $\|D^{i}_{XY}\|$, характеризующие расширяющийся фронт узлов приведения, определяются в соответствии с обобщенными равенствами следующего вида [11]:

$$\begin{aligned} \|C^{i}_{XY}G^{i}_{XY}Q^{i}_{XY}D^{i}_{XY}\| &= \|R^{i}_{XY}00P^{i}_{Xf}\| - \\ &- \|R^{i}_{XN}\| \cdot \|R^{i}_{MN}\|^{-1} \|R^{i}_{NY}(B^{i}_{NY})^{1/2} B^{i}_{NY}P^{i}_{Nf}\|; \\ \|M^{i}_{XY}\| &= \|B^{i}_{XY}\| + \|Q^{i}_{XY}\| + \|Q^{i}_{XY}\|^T + \|G^{i}_{XY}\| \cdot \|G^{i}_{XY}\|^T; X = P, S; Y = P, S \end{aligned} \tag{5}$$

где $\|G^{i}_{XY}\|$ и $\|Q^{i}_{XY}\|$ - подматрицы промежуточных преобразований; *N*, *P* - обозначают ис-

ключаемые и сохраняемые степени свободы узлов конденсации; T - признак транспонирования; $\|R^i_{XY}\|, \|B^i_{XY}\|, \|P^i_{Xf}\|$ - подматрицы коэффициентов жесткости, массы и нагрузки исходных подструктур, получаемые путем поэлементного сложения соответствующих обобщенных коэффициентов предыдущего ($i-1$ -го) фронта и коэффициентов матриц указанного типа вновь вводимого фрагмента расчетной модели (помечены*).

$$\|R^i_{XY} B^i_{XY} P^i_{Xf}\| = \|C^{i-1}_{XY} M^{i-1}_{XY} D^{i-1}_{XY}\| + \|R^i_{XY} B^i_{XY} P^i_{Xf}\|^T; \quad (6)$$

$X = P, N; Y = P, N$; здесь S принадлежит P .

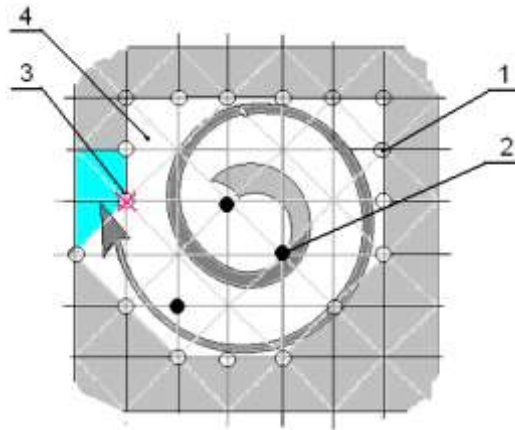


Рис. 1. Фронтальная (вихревая) схема узлового построения расчетной модели и исключения неизвестных систем:

1 – узлы фронта исключения; 2 – сохраняемые расчетные узлы; 3 – исключаемый узел, в котором фрагментарно стыкуются элементы модели; 4 – исключенная (обработанная) область системы

Можно сформулировать по крайней мере шесть существенных преимуществ фронтальной редукции: 1. Фронтальная схема позволяет удерживать в памяти компьютера лишь те коэффициенты, на которые непосредственно распространяется влияние исключаемых степеней свободы глобальной системы. Положительный эффект связывается здесь с независимостью объемов задействованной памяти от общего порядка решаемой системы. Расчет выполняется в основной памяти и не требует продолжительной по времени зонной обработки массивов коэффициентов. 2. В процессе фронтальной обработки появляется возможность сохранения шлейфа произвольно расположенных узлов приведения, составляющих подструктуры ПРС конструкции. Процесс редукции становится управляемым. 3. Достигается минимизация ширины ленты обрабатываемой блок-матрицы коэффициентов и соответственно минимизация общего времени анализа модели. 4. Фронтальная схема исключает построение глобальной модели и оптимизирует вычислительную процедуру редукции. 5. Указанная схема сравнительно легко и эффективно программируется, поскольку рабочие матрицы оказываются в расчете ограниченными по порядку, симметричными и плотно упакованными. 6. Фронтальная схема образует вихревую вычислительную процедуру, инвариантную по отношению к внешней (не пройденной) части модели. Появляется возможность мультифронтальной обработки системы с применением современных многопроцессорных вычислительных средств.

Инвариантные фронтальные процедуры как средство мультипроцессорных вычислений

Особенность предлагаемого подхода состоит в инициализации и контроле взаимодействия сразу нескольких вихревых фронтов исключения узловых перемещений, поддерживаемых собственными процессорами. Контроль сводится к фиксации попыток исключения любых узлов расчетной модели, входящих в любые другие смежные фронты. Указанные узлы в совокупности образуют в итоге сетку суперэлементов 2-го иерархического уровня, на

которой при необходимости назначаются новые центры исключения узлов и т.д. Таким образом, вычислительная процедура распространяется на несколько уровней и обеспечивает требуемое сокращение порядка исходной системы уравнений.

Важное преимущество предлагаемой схемы состоит в том, что при ее применении отпадает необходимость в предварительном описании границ многочисленных подструктур. Они формируются и обрабатываются автоматически [10]. При этом обеспечивается возможность перехода в расчете к многофункциональной подструктуре узлов конденсации, предварительно назначаемой специализированным графическим интерфейсом.

Генератор граничных условий как инструмент для получения новых знаний об объекте исследования

Объединение перечисленных ранее подходов позволяет сформировать специализированное многопользовательское программное средство для инженерного анализа корпусов судов, названное *генератором граничных условий* (ГГУ). Программа формирует граничные условия и ПРС, структурирует и сохраняет массивы обобщенных коэффициентов для последующего многовариантного исследования подблоков глобальной системы, например, в целях оптимизации.

Полный расчет судового корпуса весьма длителен. Определение оптимальных его параметров возможно сегодня лишь для заданных компоновочно- конструктивных схем фрагментов корпусной конструкции. Вопрос об оптимальности самих этих схем остается, как правило, нерешенным. Задача частично решается путем разработки ряда альтернативных вариантов. Оптимизационные решения по каждому из них позволяют выбрать наилучший вариант. Задача окончательного выбора в данном случае – более широкая и важная, чем определение оптимальных параметров для конкретной схемы. Ее успешное решение во многом зависит от инженерной изобретательности, опыта специалистов. Важная роль в решении указанной задачи принадлежит базовому методологическому подходу исследований и реализующему его инструментарию. Поэтому предлагаемая вычислительная система дополняется средствами расчетного проектирования, предназначенными для оптимизационного проектирования в рамках многочисленных компоновочно- конструктивных схем; эффективного коллективного взаимодействия субъектов и выбора окончательного проектного решения. Задачи управления вычислительными процессами сводятся здесь к выбору (для вариантного анализа) подструктур, к корректировке их граничных условий, с учетом ранее проведенной оптимизации (организация «петель обратной связи»), к обеспечению возможностей для применения в рамках ПРС различных расчетных подходов, методов формализованного и вербального описания.

Отказ от многократного анализа корпуса судна в целом при выборе расчетных блоков для многовариантного анализа становится возможным в результате применения методики встречного редуцирования (прогонки) системы корпуса с сохранением данных по ряду поперечных сечений конструкции во внешней памяти компьютера, в том числе на основе пространственных схем (траекторий, графов) встречного редуцирования [11, 12]. Так, в результате встречной пространственно ориентированной прогонки формируется база данных расчетных исследований, благодаря которой реализуется принцип от «общего к частному» - переход от разового расчета сложной конструкции к многократному выборочному расчету ее конструктивных блоков, имеющих произвольное расположение и размеры. В указанных вариантах расчетных исследований дополнительная функция ГГУ сводится к учету изменений, вносимых предыдущими решениями, к корректировке граничных условий (функция согласования решений). Учет взаимовлияния компонентов системы необходим в связи с тем, что корпусная конструкция (объект, система в целом) обнаруживает некие иные оптимальные характеристики, нежели составляющие ее блоки. Возникает потребность в учете взаимовлияния предельных состояний и в последовательном приближении оптимальных решений. Задача автоматизации операций по корректировке граничных условий фрагментов в услови-

ях выборочной оптимизации оказывается весьма сложной. Пересчет граничных условий должен выполняться по кратчайшему пути, что требует программного анализа уровня вносимых корректировок [9]. Обновленные граничные условия дают возможности сделать следующее уточнение оптимальных решений и т.д.

Используемый концептуальный подход позволяет реализовать эффективный графический интерфейс для назначения подсистем узлов приведения путем привязки курсора к узлам («Snap to Node»), а также -СП-технологии (технологии «светового пятна»), которая сводится к «высвечиванию» на экране компьютера фрагментов расчетной модели конструкции при помощи светового пятна, управляемого манипулятором. Элементы (узлы), попавшие в область пятна, интерпретируются как расчетные и по завершении анализа раскрашиваются по уровням напряжений. В результате возникает динамичный, информационно насыщенный визуальный образ моделируемой реальности, корректируемый в реальном режиме времени и способствующий творческому мышлению проектировщика.

Предложенные подходы апробированы нами при решении задач различной сложности [9,13-18]. Обоснования точности и сходимости предложенного алгоритма редукции получены при расчетах многочисленных тестовых задач. Рассматривались системы, состоящие из стержневых, пластинчатых и объемных конечных элементов, а также комбинированные системы. В расчетах варьировались графовые модели редукции, количество и расположение узлов приведения. Расчетные данные сопоставлены с результатами тензометрирования, полученными при испытаниях жестяных конструктивно-подобных моделей корпусов судов, а также в экспериментах с реальными судовыми перекрытиями в лабораторных условиях [13, 15, 18].

Библиографический список

1. **Кунву, Ли.** Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Ли Кунву. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
2. Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник / под ред. В.Н. Волковой, В.Н.Козлова.- М.: Высшая школа, 2004. – 616 с.
3. **Przemienitcki, J.S.** Matrix Analysis of Substructures // AIAA. V.1. N 1. S. 138-147.
4. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений / В.А. Постнов [и др.]. – Л.: Судостроение, 1979. – 287 с.
5. **Постнов, В.А.** Метод модуль-элементов в расчетах судовых конструкций / В.А. Постнов, Н.А. Тарануха. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
6. **Вороненок, Е.Я.** Метод редуцированных элементов для расчета конструкций / Е.Я. Вороненок, О.М. Палий, С.В. Сочинский. – Л.: Судостроение, 1990. – 224 с.
7. **Голуб, Дж.** Матричные вычисления: [пер. с англ.] / Дж. Голуб, Ван Лоун Ч. – М.: Мир, 1999.– 548 с.
8. **Воеводин, В.В.** Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.
9. **Сапожников, А.И.** Программный комплекс для вариантного прочностного анализа трехмерных систем "Парус" / А.И. Сапожников [и др.] // Проблемы численного моделирования и автоматизации проектирования инженерных конструкций: сб. научн. тр. / ЛИИЖТ. – Л., 1987. С. 19-28.
10. **Сутырин, В.И.** Возможности повышения эффективности метода конечных элементов при проектировании корпусных конструкций // Судостроение. 2003. №6. С. 9-13.
11. **Сутырин, В.И.** Метод приведения в практике расчетов корпусных конструкций // Судостроение. 2008. №4. С. 17-22.
12. **Сутырин, В.И.** Метод матричной прогонки как эффективное средство накопления базы данных прочностных расчетов // Тез. докл. на Всесоюзной НТК по проблемам обеспечения прочности транспортных судов и плавучих сооружений. Л.: Судостроение, 1986. С.84-86.
13. **Сутырин, В.И.** Численные методы решения прочностных задач судоремонта // Судостроение. 1988. №11. С. 29-34.
14. **Сутырин, В.И.** Исследование напряженно-деформированного состояния протяженного валопровода с деформируемым основанием // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №11. С. 29-34.

15. **Шапошников, В.М.** Расчетная конечно-элементная модель для оценки общего напряженного состояния корпуса судна с малой площадью ватерлинии / В.М. Шапошников, С.Ф. Дмитриев, В.И. Сутырин // Судостроительная промышленность. Сер.: Проектирование судов. 1989. Вып. 10. С. 64-69.
16. **Сутырин, В.И.** Расчет деталей машин по методу конечных элементов с применением рекуррентной схемы конденсации жесткостных параметров / В.И. Сутырин, Д.Г. Горянский // Известия вузов. Машиностроение. 1990. №1. С. 44-49.
17. **Сутырин, В.И.** Применение способа фронтальной конденсации в расчетах динамики судовых корпусных конструкций // Судостроение. 1996. №7. С. 10-14.
18. **Бураковский, Е.П.** Complex Analysis of Strength For Semi- Submersible Water Drilling Platform Structures / Е.П. Бураковский, В.П. Прохнич, В.И. Сутырин // Zeszyty naukowe NR10(82): EX-PLO-SHIP 2006.-Wyzsza Szkoła Morska. - Szczecin. 2006. P. 117-129.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

V.I. Sutyryn

METHODOLOGY OF THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHIP'S HULL CONSTRUCTIONS IN THEIR DESIGN

This work is devoted to methodological issues related to the development the software for ship's hull design. Abroad program packages such appointments were classified as CAE (Computer Aided Engineering). The Russian handbook on system analysis similar tools are presented as «a system of integrated information support for decision-making and life-cycle designs». Widespread in the literature was also the term «subsystem engineering analysis».

Key words: software system, computational tools, adaptive analysis, ship's hull, system analysis, CAE, effectiveness of the finite element method.