Зеленцов Дмитрий Гегемонович
Zelentsov Dmytriy Gegemonovitch
Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет»
профессор, заведующий кафедрой
Professor, Head of Department
05.23.17 «Строительная механика»
E-Mail: dmyt_zel@mail.ru

Короткая Лариса Ивановна
Korotka Larysa Ivanovna
Государственное высшее учебное заведение «Украинский государственный химико-технологический университет»
Ассистент/assistant
05.23.17 «Строительная механика»
E-Mail: korliv@hotmail.com

Овчинников Илья Игоревич
Ovchinnikov Igor Georgievich
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Доцент/docent
E-Mail: bridgeart@mail.ru

Нейронные сети как средство модификации метода скользящего допуска при решении задач оптимизации корродирующих конструкций

Neural networks as a means of modifying the the sliding method of admission in solving optimization problems of the corroding structures

Аннотация: Предложен новый подход к решению задач оптимизации корродирующих конструкций, основанный на адаптации метода скользящего допуска. В качестве критерия скользящего допуска принимается предельно допустимая погрешность вычисления функций ограничений, которая обеспечивается обученной нейронной сетью.

The Abstract: A new approach to solving optimization problems corroding structures based on the adaptation of the method of rolling admission. As a criterion for moving the tolerance shall be the maximum permissible error of calculation functions of restrictions, which provides trained neural network

Ключевые слова: Метод скользящего допуска, нейронная сеть, коррозирующие конструкции, оптимизация

Keywords: The sliding method of admission, neural networks

***

1. Введение

При моделировании поведения сложных объектов и их оптимального проектирования могут быть использованы различные методы нелинейного программирования (НЛП).

Оптимизация возможна при помощи многих стратегий, начиная с весьма сложных аналитических и численных математических процедур и кончая разумным применением элементарной математики [1, 2]. Существует множество эффективных алгоритмов нелинейного программирования, которые отличаются друг от друга различными критериями: надёжности; скорости решения; времени подготовки задачи для решения; точностью решения и пр.

К указанным сложным объектам и нелинейным системам относятся и металлические конструкции, которые эксплуатируются в условиях агрессивного воздействия окружающей среды. Моделирование поведения этих систем трудно поддаётся математической или количественной формализации, а известные традиционные подходы (детерминированный и вероятностный) позволяют решать указанные задачи в ущерб физике процесса.

2. Постановка задачи оптимизации

В качестве примера рассмотрим шарнирно-стержневую статически неопределимую систему (ферму), функционирующую в агрессивной среде (АС).

Требуется найти геометрические характеристики сечений, элементов конструкции (стержней) таким образом, чтобы в начальный момент времени объём системы был наименьшим и в течение времени t^* (заданного срока эксплуатации), она сохраняла несущую способность, то есть удовлетворяла условиям прочности и устойчивости. При этом не имеет значения, каким образом конструкция выйдет из строя, главное, чтобы при этом она сохраняла несущую способность в течение заданного времени t^*.

Постановка задачи оптимизации коррозирующей конструкции в общем виде может быть записана:

$$V\left(\bar{x}\right) \to \min$$

$$\begin{cases} g_1: & [\sigma] - \sigma_i\left(\bar{x}, t^*\right) \geq \varepsilon^*; & i = \overline{1, N} \\ g_2: & \sigma_j^*\left(\bar{x}, t^*\right) - \sigma_j\left(\bar{x}, t^*\right) \geq \varepsilon^*; & j \in J \\ g_3: & x_k \in \left[x_k^-; x_k^+\right]; & k = \overline{1, K} \end{cases} . \tag{1}$$

Здесь $V\left(\bar{x}\right)$ – искомый оптимальный объём конструкции; $\bar{x}$ – вектор варьируемых параметров; g_1 – ограничения по прочности; g_2 – ограничения по устойчивости; g_3 – конструктивные ограничения; $\boldsymbol{N}$ – количество элементов в системе; $\boldsymbol{J}$ – множество элементов, работающих на сжатие; $\boldsymbol{K}$ – количество варьируемых параметров; t^* – заданная долговечность, ε^* - предельно допустимая погрешность решения задачи.

Общая схема решения задачи оптимизации представлена на рис.1.

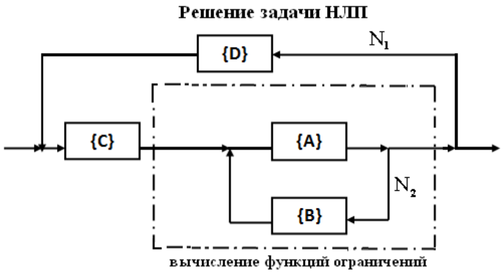

***Рис. 1.** Схема решения задачи оптимизации*

Здесь модуль $\{C\}$ – вычисление целевой функции; модуль $\{A\}$ – решение задачи напряжённо-деформированного состояния (НДС) методом конечных элементов (МКЭ); модуль $\{B\}$ – численное решение системы дифференциальных уравнений (СДУ); модуль $\{D\}$ – решение задачи НЛП. Вычисление функций ограничений предполагает совместную реализацию блоков $\{A\}$ и $\{B\}$.

Как известно, при практической реализации методов НЛП значительная часть общего расчётного времени тратится на обеспечение строгого выполнения ограничений решаемой задачи. Алгоритм скользящего допуска позволяет улучшить значение целевой функции как за счёт информации, получаемой в допустимых точках пространства решений, так и за счёт информации, которую удаётся получить при прохождении через некоторые точки, лежащие вне допустимой области, но являющихся близкими к допустимым [3]. В процессе решения задачи интервалы, в пределах которых точки можно считать почти допустимыми, постепенно сокращаются, так что в пределе в системе ограничений задачи НЛП учитываются только допустимые точки.

3. Модифицированный метод скользящего допуска

Так как механические напряжения оказывают существенное влияние на скорость коррозионного процесса, в каждом узле временной сетки должна решаться задача НДС конструкции. Для корродирующих конструкций с произвольной геометрией, граничными условиями и условиями нагружения такое решение возможно только с использованием численных методов, например, МКЭ [4]. Очевидно, что при решении задачи оптимизации (рис.1), общее количество обращений к процедуре МКЭ составляет: $N_{сум} = N_1 \cdot N_2$.

Следовательно, для повышения эффективности вычислительного алгоритма необходимо минимизировать это число. С одной стороны, эффективность алгоритма может быть повышена путём минимизации обращений к процедуре МКЭ при вычислении функций ограничений. Этого можно добиться путём выбора рационального шага интегрирования при численном решении СДУ, описывающих коррозионный износ. С другой стороны, повысить эффективность можно за счёт использования модифицированного алгоритма метода скользящего допуска (МСД).

В этом случае условный экстремум целевой функции ищется как в допустимой области пространства решений, так и за её пределами, на некотором пространстве на некотором расстоянии от границы, которое сокращается в процессе поиска. В окрестности экстремума учитываются только допустимые точки.

Система ограничений задачи (1) может быть сведена к виду:

$$g = \varphi(s) - T(\bar{x}, t) \geq 0 , (2)$$

где $T = \dfrac{\left|t^* - t_{числ}(\Delta t)\right|}{t^*}$ – положительно определённый функционал над всем множеством постановки (1), представляющий собой относительную погрешность вычисления долговечности; $\varphi(s) = \varphi_0 / \mathrm{int}\left(a^s\right)$ – критерий скользящего допуска – убывающая функция количества итераций, имеющая тот же смысл, что и $T\left(\bar{x}, t^*\right)$; φ_0 – начальное значение погрешности; t^* – заданная долговечность; s – номер итерации; a – некоторая константа ($a < 1$).

Так как функции ограничений в данной задаче не являются дифференцируемыми во всём пространстве решений, то возможно использование методов нулевого порядка. В качестве внутреннего метода при решении задачи безусловной оптимизации на непрерывном множестве можно применить различные методы, в данной работе используется метод деформируемого многогранника.

Уменьшить количество обращений к процедуре МКЭ при решении задачи Коши можно за счёт рационального выбора параметров численных процедур, путём использования искусственных нейронных сетей.

Известно, что точность решения СДУ зависит от величины шага интегрирования. Так как геометрические параметры элементов системы изменяются в процессе решения в широких диапазонах, определяемых конструктивными ограничениями, то проблема выбора рационального шага интегрирования становится весьма актуальной. В работе [5] предложено использовать для решения этой проблемы нейронные сети (НС), обученные на различных значениях предельно допустимой погрешности вычисления. В этом случае величина шага интегрирования не является параметром алгоритма, а определяется в процессе его реализации на основании информации о начальных геометрических характеристиках сечений стержней, начальных напряжениях, скорости коррозии и, наконец, предельно допустимого значения погрешности.

Использование нескольких различных матриц синаптических весов, полученных для различных значений погрешности, позволяет добиться высокой эффективности алгоритма оптимизации. На начальных этапах решения задачи НЛП нет необходимости в высокой точности вычисления функций ограничений. В этом случае используется НС, обученная для относительно высокой погрешности, что позволит минимизировать количество обращений к процедуре МКЭ (рис.2). По мере приближения к точке экстремума требуется повысить точность вычисления функций ограничений, что достигается использованием новых матриц весов, таким образом, чтобы в окрестности экстремума обеспечить необходимую точность их вычисления.

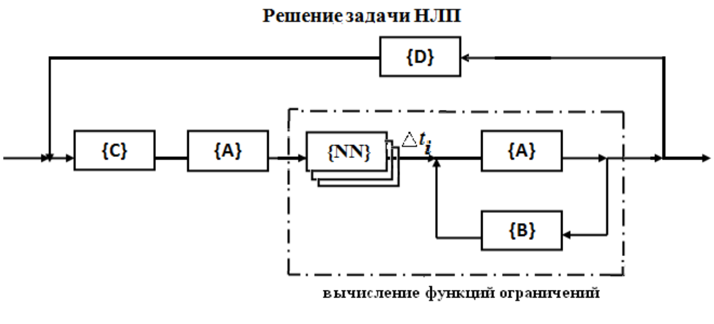

Рис. 2. *Схема решения задачи оптимизации с использованием НС*

Здесь модуль *{NN}* – определение параметров численных процедур для решения СДУ с помощью НС.

4. Численная иллюстрация

В качестве объекта исследований рассматривалась 5-ти элементная статически неопределимая ферма (рис. 3).

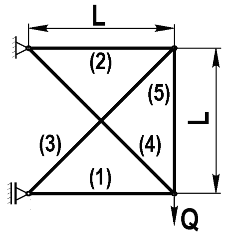

Рис. 3. *Расчётная схема модельной конструкции*

Задача решалась при следующих исходных данных: $L = 110\,см$; $R_i \in [1{,}5; 5]\,см$; $r_i = [0{,}5 \cdot R;\ 0{,}9 \cdot R]\,см$; $v_0 \in [0{,}08;\ 0{,}12]\,см/год$; $Q = 50\,кН$; $[\sigma] = 240\ МПа$; $i = \overline{1{,}5}$. Данные, подтверждающие эффективность этого метода, для заданной долговечности $t^* = 5\,лет$ приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Результаты решения оптимизационной задачи с
постоянным шагом интегрирования

Δt, лет	$N_{ит}$	$V_{\min}$, $см^3$	$t_{ист}$, лет	ε
0,10	22219	3193	4,67	6,7%
0,05	43996	3216	4,85	3,1%
0,01	218041	3331	5,14	2,8%

Таблица 2

Результаты решения оптимизационной задачи
с использованием НС

$\varepsilon^*_{пред}$	$N_{ит}$	$V_{\min}$, с	$t_{ист}$, лет	$\varepsilon_{ист}$
≤ 3%	1632	3222	4,86	2,7%
≤ 6%	899	3201	4,74	5,2%
≤ 10%	508	3106	4,55	8,9%

Таким образом, помимо проблемы повышения эффективности алгоритма одновременно решается проблема оценки точности получаемого результата. В таблице 3 приведены результаты, полученные с использованием адаптированного метода скользящего допуска. В этом случае были использованы три матрицы синаптических весов, полученных для допустимых значений погрешности 3, 6 и 10%. Переход к новым матрицам происходил при выполнении определённого количества операций редукции метода деформируемого многогранника (в этом случае из традиционного алгоритма были исключены операции растяжения и сжатия многогранника) (рис.4). Общее количество операций редукции определялось требуемой точностью нахождения локального экстремума:

$$s = \mathrm{int}\left(\frac{\ln\left(\delta_0 / \delta_n\right)}{\ln\eta} + 1\right), \tag{3}$$

где $\delta_0 -$ начальная длина ребра многогранника; $\delta_n -$ конечная длина, определяющая точность нахождения локального экстремума; $\eta -$ коэффициент редукции (для данного примера $\eta = 0{,}75$). Общее количество операций редукции было равно 14.

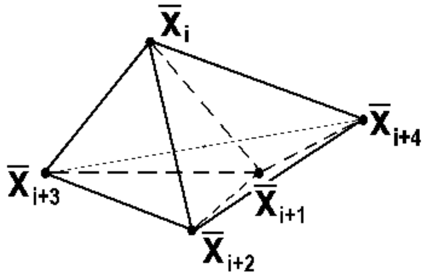

Рис. 4. *Симплекс-многогранник*

На первых s_1 шагах использовались матрицы весов, обеспечивающие точность решения СДУ не более 10%, а на s_2, s_3 и s_4 шагах соответственно не более - 6, 3 и 0,5%.

Таблица 3 Результаты решения задачи с

использованием адаптированного алгоритма МСД

N_{um}	$V_{\min}$, $см^3$	t_{ucm}, лет	ε_{ucm}
1048	3156	4,98	0,4%

5. Выводы

Для получения оценки точности вычисления функций ограничений в оптимальном проекте использовалось эталонное решение. Оно было получено путём последовательного уменьшения шага интегрирования Δt до достижения асимптотически точного решения. Оценки погрешностей решений, полученных с помощью метода скользящего допуска, подтвердили обоснованность предложенного алгоритма.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинников И.И., Занин А.А. Постановка задачи оптимального проектирования тонкостенных конструкций с учетом коррозионного износа// Новые идеи нового века – 2011 : материалы Одиннадцатой международной научной конференции ИАС ТОГУ = The new Ideas of New Century 2011 : The Eleven International Scientific Conference Proceedings of IACE PNU : в 2 т. / Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. – Т. 2. –385 с. С 48-51/

2. Овчинников И.И., Бочкарев А.В., Занин А.А. Оптимальное проектирование круглых гибких пластин в условиях коррозионного износа// Строительная механика и расчет сооружений. 2012. .№3. с. 61-67

3. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование [Текст]: пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 534 с.

4. Зеленцов, Д.Г. Расчёт конструкций с изменяющейся геометрией в агрессивных средах. Стержневые системы. [Текст] / Д.Г. Зеленцов. – Днепропетровск: УГХТУ, 2002. – 168 с.

5. Короткая, Л.И. Использование нейронных сетей при численном решении некоторых систем дифференциальных уравнений [Текст] / Л.И. Короткая // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – №3/4 (51). С. 24-27.