

МЕТОДИКА НА ОСНОВЕ ИМПУЛЬСНЫХ ВИХРЕВЫХ ТОКОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© 2021 г. Ли Кайюй^{1,2}, Цю Пэнчэн¹, Ван Пин^{1,2}, Лу Цзысян¹, Чжан Чжэнда¹

¹Колледж автоматики, Нанкинский университет авионавигации и астронавтики, Нанкин, 211100

²Ведущая лаборатория Министерства промышленности и информационных технологий по неразрушающему контролю и мониторингу на объектах высокоскоростного транспорта

*E-mail: 1826581388@qq.com

Поступила в редакцию 31.08.2020; после доработки 30.10.2020

Принята к публикации 06.11.2020

В современной сталелитейной промышленности определение механических свойств ферромагнитных материалов основывается на разрушающих методах контроля, что значительно увеличивает стоимость производства. В данной статье предлагается метод оценки механических свойств ферромагнитных материалов, основанный на методах импульсных вихревых токов (ИВТ). Во-первых, стандартные характеристики сигнала ИВТ, такие как пики дифференциального сигнала и спектральные амплитуды, применяются для количественной оценки механических свойств. Во-вторых, метод, основанный на разложении на эмпирические моды и преобразовании Гильберта—Хуанга, используется для выделения маргинального спектрального пика и маргинальной спектральной энергии в качестве новых характеристик. Наконец, представлен алгоритм нейронной сети с обратным распространением (НОР) для количественной оценки параметров механических свойств. Результаты показывают, что сочетание как стандартных, так и новых функций подходит для оценки механических свойств. Метод обладает высокой точностью количественной оценки механических параметров.

Ключевые слова: импульсные вихревые токи, условный предел текучести, нейронная сеть с ОР, многопараметровость.

DOI: 10.31857/S0130308221020081

1. ВВЕДЕНИЕ

Ферромагнитные материалы (такие как сталь) широко используются на железной дороге, в авиакосмической промышленности и строительстве. Их механические свойства напрямую влияют на безопасность большого количества основного оборудования. В современной сталелитейной промышленности нельзя игнорировать метод неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов. Поскольку сигнал импульсного вихревого тока (ИВТ) содержит широкий спектр, который очень чувствителен к проводимости и проницаемости материала, методы ИВТ широко используются для обнаружения дефектов, определения толщины и обнаружения напряжений [1—3]. Тем не менее по-прежнему существует проблема расширения методов ИВТ для контроля механических свойств ферромагнитных материалов.

Что касается определения механических свойств, разрушающие испытания (такие как испытание на растяжение) по-прежнему являются основными методами, что значительно увеличит стоимость производства и приводит к большому количеству отходов производства. Более того, их нельзя встроить в производственную линию. Прогнозирование механических свойств, основанное на химическом анализе и микроструктурных наблюдениях, может служить ориентиром для процесса производства, но не стало точным методом контроля механических свойств [4—6]. В последние годы для проведения неразрушающего контроля механических свойств ферромагнитных материалов использовались различные электромагнитные методы [7—9]. Немецкий институт Fraunhofer IZFP предложил метод ЗМА для испытания механических свойств [10—12]. Метод ЗМА сочетает в себе метод Баркгаузена, метод вихревых токов и измерение дифференциальной магнитной проницаемости, то есть 41 электромагнитный параметр, со ступенчатой регрессией механических свойств (условный предел текучести и прочность при растяжении). ЗМА, хоть и относительно продуманная методика, имеет несколько недостатков. Он дорогой, а также приводит к взаимным помехам нескольких электромагнитных сигналов. Кроме того, требуется много времени на калибровку датчика. Liu Xicheng предложил метод измерения твердости поверхности, растягивающего напряжения и глубины дефекта, в котором комбинируются измерения шумов Баркгаузена, тангенциального магнитного поля и петель гистерезиса [13]. He Cunfu предложил метод оценки механических свойств среднеуглеродистой стали. Используя в исследовании точеч-

ный электромагнитный датчик, автор делает вывод о том, что основная амплитуда линейно связана с твердостью образца [14]. Большинство существующих методов неразрушающего контроля механических свойств должны включать в себя различные электромагнитные методы и часто используют методы одночастотных вихревых токов вместо популярных методов ИВТ. По сравнению с одночастотным вихретоковым сигналом, сигнал ИВТ может выделять больше характеристик. Следовательно, существует большая перспектива использовать методы ИВТ для контроля механических свойств ферромагнитных материалов [15—17]. В данной работе предлагается метод оценки механических свойств ферромагнитных материалов на основе ИВТ. Во-первых, для приблизительной оценки механических свойств применяются традиционные характеристики сигнала ИВТ. Затем разложение на эмпирические моды (РЭМ) и преобразование Гильберта—Хуанга (ПГХ) объединяются для анализа сигнала ИВТ. Мы извлекаем новые характеристики на основе АРЭМ—ПГХ, а затем анализируем и сравниваем эффективность новых и старых характеристик. Наконец, алгоритм НОР используется для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов. Эффективно достигается количественная оценка трех механических свойств (условный предел текучести, прочность при растяжении и удлинение).

2. МЕТОД

2.1. Принцип метода ИВТ

Сигнал ИВТ определяется по напряженностью магнитного поля и по распределению магнитного поля возле зонда, поэтому такие факторы, как амплитуда и частота сигнала возбуждения, проводимость и проницаемость исследуемого образца, различные типы дефекта и расстояние отрыва, влияющие на магнитное поле, будут влиять на сигнал ИВТ [18,19]. Если мы будем управлять частью влияющих факторов и оставлять их постоянными, можно выявить определенные параметры. Механические свойства ферромагнитных материалов в основном определяются микроструктурой, а изменения микроструктуры влияют на такие электромагнитные свойства, как проводимость и проницаемость материала [20], а затем влияют на сигнал ИВТ. Следовательно, управляя амплитудой, частотой, отрывом зонда и другими факторами, влияющими на сигнал, можно проанализировать взаимосвязь между сигналом ИВТ и механическими свойствами ферромагнитных материалов. Исходя из достаточного количества данных выборки, можно создать модель алгоритма нейронной сети, которая принимает сигнал ИВТ на вход, а на выход подавать механические свойства контролируемого образца.

2.2. Традиционные характеристики ИВТ-сигналов

В настоящее время существующие исследования по анализу ИВТ-сигналов проводятся в основном с двух точек зрения — во временной области и в частотной области [21—23]. Анализ во временной области в основном нацелен на определении изменения формы кривой отклика. Анализ в частотной области обычно основан на преобразовании Фурье. Традиционные характеристики, извлекаемые из сигнала ИВТ, включают как характеристики временной области, так и характеристики частотной области: пиковое напряжение, время пика и спектральная амплитуда. Эти характеристики отражают внутреннюю информацию об исследуемом образце, которая имеет высокую корреляцию с электромагнитными свойствами, такими как электрическая проводимость и магнитная проницаемость. В этой статье мы выбрали некоторые традиционные характеристики, которые более чувствительны к внутренним различиям контролируемых образцов. Традиционные характеристики временной области, определяемые в нашем эксперименте, включают пик дифференциального сигнала (PV_d), пик первой производной (PV_i) и единый период интеграции (F_g). Традиционные характеристики частотной области включают основную гармонику ω_1 , третью гармонику ω_3 и пик спектральной плотности мощности $P_{\max}$.

2.3. Характеристики ИВТ-сигналов, определяемые по АРЭМ—ПГХ

Большинство существующих методов анализа, включая методы анализа во временной и частотной областях, основаны на предположении о стационарности сигнала. Поскольку сигнал ИВТ является нестационарным сигналом, использование только традиционных характеристик повлияет на точность анализа. Поэтому в этой статье метод анализа в частотно-временной области, который подходит для анализа нелинейных и нестационарных сигналов с возможностью

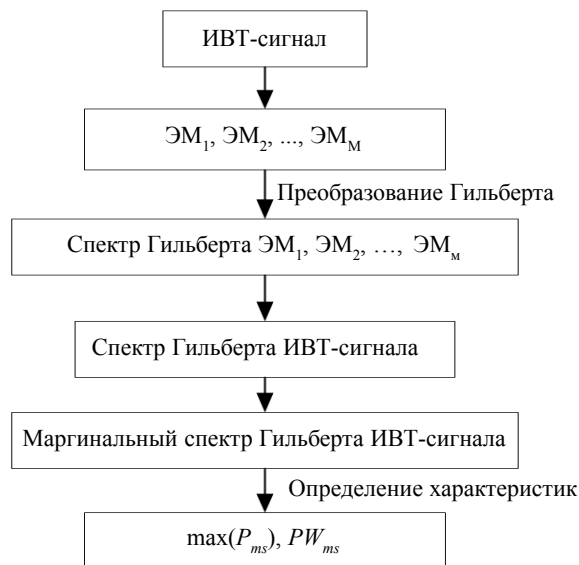


Рис. 1. Алгоритм метода АРЭМ—ПГХ.

самоадаптации, используется при анализе сигналов ИВТ и определении характеристик. Основываясь на этом, метод ансамблевого разложения на эмпирические моды (АРЭМ) и метод преобразования Гильберта—Хуанга (ПГХ) объединяются для получения новой характеристики частотно-временной области сигнала ИВТ. Во-первых, сигнал ИВТ раскладывается с помощью АРЭМ. Затем спектр Гильберта и его сигнал ИВТ вычисляются в соответствии с эмпирической модой (ЭМ), полученной путем разложения. Наконец, новый ИВТ-параметр определяется путем анализа маргинального спектра Гильберта. Алгоритм метода АРЭМ—ПГХ показан на рис. 1.

(1) С помощью АРЭМ разложить ИВ-сигнал, чтобы получить ряд эмпирических мод $ЭМ_1, ЭМ_2, \dots, ЭМ_M$ и сумму остатков. Количество ЭМ определяется по формуле 1, где M — это количество ЭМ, а L — длина сигнала:

$$M = 2 \log(L) - 1. \quad (1)$$

(2) Провести преобразование Гильберта—Хуанга для каждой ЭМ, полученной при разложении в спектр Гильберта.

(3) Интегрируя спектр Гильберта каждой ЭМ, получить исходный сигнал, то есть спектр Гильберта ИВТ-сигнала, и затем проинтегрировать спектр Гильберта ИВТ-сигнала для получения маргинального спектра ИВТ-сигнала.

(4) Выделить пик и энергию маргинального спектра ИВТ-сигнала в качестве новых характеристик ($\max(P_{ms}), PW_{ms}$).

Новые параметры получают из маргинального спектра ИВТ-сигнала. Выделенные параметры представляют собой маргинальный спектральный пик ($\max(P_{ms})$) и маргинальную спектральную энергию (PW_{ms}). Маргинальный спектр интегрируется для получения энергии маргинального спектра. Маргинальный спектр Гильберта ИВТ-сигнала показывает изменение амплитуд сигнала с частотой по всей полосе частот, которая имеет большее разрешение, чем амплитудно-частотный спектр, полученный преобразованием Фурье.

И маргинальный спектральный пик, и маргинальная спектральная энергия тесно связаны с ИВТ-сигналом и подвержены влиянию со стороны внутреннего состояния вещества. Следовательно, маргинальный спектральный пик ($\max(P_{ms})$) и маргинальная спектральная энергия (PW_{ms}) ИВТ-сигнала определяются как новые характеристики ИВТ-сигнала временной и частотной области.

2.4. Количественная оценка механических свойств на основе ОР-нейросети

ОР-нейросеть — это сеть с прямой связью, состоящая из входного слоя, выходного слоя и одного или нескольких скрытых слоев. Типичная четырехуровневая модель ОР-нейронной сети показана на рис. 2.

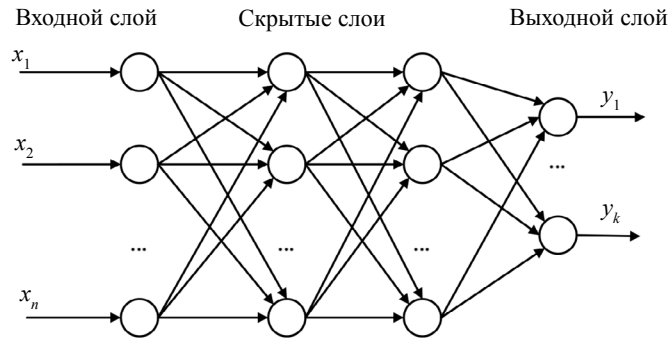


Рис. 2. Структура ОР-нейросети.

Основная особенность ОР-нейронной сети состоит в том, что сигнал распространяется вперед, а ошибка распространяется назад [24—25]. Основная идея всего алгоритма заключается в корректировке веса и порога сети путем вычисления ошибки между выходным слоем и ожидаемым значением, чтобы ошибка максимально соответствовала требованиям. В этой статье ОР-нейронная сеть используется для установления модели взаимосвязи между характеристиками сигнала ИВТ и параметрами механических свойств.

Основные этапы создания нейронной сети заключаются в следующем.

(1) Определить входные и выходные данные модели ОР-нейронной сети.

Выборки делятся на обучающую выборку и тестовую выборку. К каждому сигналу добавляются данные, которые представляет собой истинное значение механических свойств, соответствующих испытываемому образцу. Таким образом, каждый сигнал включает в себя три дополнительных параметра (условный предел текучести, прочность при растяжении и удлинение) и последовательность характеристик сигнала ИВТ. Входными данными модели являются наборы последовательностей характеристик сигнала ИВТ образца, как показано в формуле 2, где $k_1, k_2, \dots, k_n$ представляют собой различные характеристики сигнала ИВТ. Выходные данные модели включают истинные значения механических свойств контролируемой детали, как показано в формуле 3.

$$X_i = [k_1, k_2, \dots, k_n]; \quad (2)$$

$$X_0 = [R_p, 0,2, R_m, A]. \quad (3)$$

(2) Разработать структуру и параметры модели ОР-нейронной сети.

Для повышения точности количественной оценки и скорости сходимости функции выбрана ОР-нейронная сеть с двумя скрытыми слоями, которая включает в себя входной слой, два скрытых слоя и выходной слой. Поскольку входными данными модели являются характеристики сигнала ИВТ, а выходными данными — три параметра механических свойств, количество узлов входного слоя устанавливается равным количеству характеристик, а количество узлов выходного слоя устанавливается равным трем.

(3) Выполнить обучение ОР-нейронной сети для получения модели нейросети.

Последовательность характеристик обучающей выборки принимается в качестве входных данных модели ОР-нейронной сети, а данные, упомянутые выше, принимается в качестве выходных данных модели. Обучение модели ОР-нейронной сети и веса с пороговыми значениями оптимизируются в соответствии с глобальной ошибкой каждой итерации. После длительного обучения, наконец, получается модель нейронной сети ВР, которая удовлетворяет требованиям к ошибкам.

Чтобы оценить достоверность установленной модели ОР-нейронной сети для количественной оценки механических свойств, в наш эксперимент была введена средняя относительная погрешность δ_{ave} . Различные контролируемые образцы имеют разные результаты оценки и относительные погрешности. Средняя относительная погрешность δ_{ave} отражает средний уровень относительной погрешности результатов оценивания всех протестированных выборок. Это выражается следующим образом:

$$\delta_i = \frac{|\hat{x}_i - x_i|}{x_i} \times 100\%; \quad (4)$$

$$\delta_{ave} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i, \quad (5)$$

где δ_i — относительная погрешность результата определения параметра образца; $\hat{x}_i$ — рассчитываемое значение; x_i — реальное значение; n — общее количество контролируемых образцов.

3. ОБРАЗЦЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

3.1. Образцы

В этом эксперименте в качестве стандартных образцов для испытаний была выбрана партия пластин из низколегированной стали, изготовленная «Nanjing Iron and Steel Group» по индивидуальному заказу. Использовали десять пластин одинаковой формы, размера, толщины, но с разными механическими свойствами. Параметры механических свойств каждого испытуемого образца показаны в табл. 1. Эти стандартные образцы пронумерованы от 1 до 10 и не имеют поверхностных или внутренних повреждений. Условный предел текучести (R_p 0,2), прочность при растяжении (R_m) и относительное удлинение (A) — три важных параметра механических свойств для оценки качества ферромагнитных объектов. В данной статье в основном оцениваются эти три механических свойства.

Таблица 1

Механические свойства образцов

Номер образца	R_p 0,2, МПа	R_m , МПа	A , %
1	163	286	46,40
2	182	304	46,10
3	257	370	39,40
4	277	376	38,10
5	318	385	35,70
6	254	356	42,10
7	383	457	31,80
8	471	599	23,20
9	397	645	26,20
10	486	815	11,60

3.2. Экспериментальная установка

Как показано на рис. 3, система детектирования ИВТ состоит из преобразователя, генератора сигналов возбуждения, усилителя мощности, источника питания постоянного тока, контролируе-



Рис. 3. Установка ИВТ-контроля.

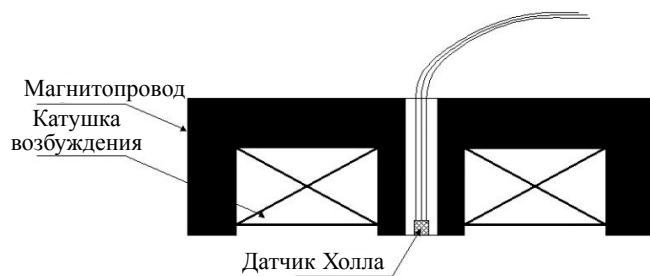


Рис. 4. Конструкция ИВТ-преобразователя.



Рис. 5. Внешний вид преобразователя.

мой детали, платы сбора данных, устройства трехмерного позиционирования и компьютера промышленного применения. Преобразователь состоит из трех частей: катушки возбуждения, магнитного датчика и магнитопровода. Конструкция преобразователя показана на рис. 4 и 5. Возбуждающий сигнал подается на катушку возбуждения после усиления на усилителе мощности. Конструкция катушки возбуждения напрямую влияет на чувствительность преобразователя. В процессе проектирования установки были протестированы и сопоставлены несколько наборов катушек возбуждения с разными диаметрами проводов и количеством витков, и в итоге была выбрана лучшая. Параметры выбранной катушки возбуждения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры катушки возбуждения

Параметр	Значение
Диаметр эмалированного провода	0.27 мм
Внутренний диаметр катушки	5 мм
Внешний диаметр катушки	8 мм
Высота катушки	7 мм
Число витков	400
Сопротивление	40 Ом
Индуктивность	48 мГн

В эксперименте выбранный возбуждающий сигнал представляет собой меандр с амплитудой 8 В, частотой 20 Гц и скважностью 50 %. Выходная мощность составляет около 2,2 Вт, частота дискретизации — 20 кГц, интервал дискретизации — 1 с.

В соответствии с схемой эксперимента каждая из отобранных десяти стальных пластин была подвергнута 20 измерениям в разных местах пластины (за исключением краев), было получено в общей сложности 200 комплектов сигналов. 20 сигналов от каждой стальной пластины были разделены на 19 обучающих наборов сигналов и один тестовый набор. Итого, всего было 190 обучающих наборов и 10 тестовых наборов.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ

4.1. Анализ достоверности и сравнение характеристик ИВТ-сигналов

Как описано в разделах 2.2 и 2.3, каждый сигнал содержит шесть традиционных характеристик и две новых. Поэтому мы обучили 3 нейросети, первая из них в качестве входных данных использовала 6 традиционных характеристик, вторая — 2 новые, а третья — и те, и те, т.е. 8 параметров суммарно. ОР-нейронные сети были обучены с помощью 190 наборов обучающих выборок, затем они были использованы для тестирования 10 тестовых наборов и прогнозирования трех параметров механических свойств стальных листов: условного предела текучести $R_p 0,2$, прочности при растяжении R_m и удлинения A . Средняя относительная погрешность определения параметров механических свойств приведены в табл. 3.

Таблица 3

Средняя относительная погрешность определения параметров механических свойств при использовании различных характеристик

Входные данные модели	Средняя относительная ошибка δ_{ave} , %		
	R_p 0,2	R_m	A
Шесть традиционных характеристик	6,82	3,42	5,40
Две новых характеристики	5,70	3,22	2,51
Традиционные и новые характеристики	3,85	2,06	2,33

Следующие экспериментальные результаты можно получить из табл. 3.

(1) Когда в качестве входных данных использовались новые характеристики, средняя относительная ошибка для трех параметров была меньше, чем у традиционных характеристик, используемых в качестве входных данных.

(2) Когда в качестве входных данных использовались традиционные и новые характеристики вместе, результат контроля был наилучшим.

Результат эксперимента показывает, что для количественной оценки механических свойств две новые характеристики лучше шести традиционных функций, поскольку мы считаем, что новая характеристика содержит информацию о времени и частоте сигнала, что может точно отражать подробную информацию об ИВТ-сигнале. У традиционных характеристик нет этого преимущества, поэтому новые характеристики лучше для оценки. Когда традиционные характеристики объединяются с новыми характеристиками в качестве входных данных ОР-нейронной сети, средняя относительная ошибка для трех параметров механических свойств является наименьшей. Это связано с тем, что сочетание традиционных и новых характеристик является наиболее универсальным, так как, в таком случае, могут компенсироваться недостатки использования традиционных или только новых характеристик.

Поскольку сочетание традиционных и новых характеристик в качестве входных данных дает наилучшую оценку механических свойств, при обучении ОР-нейронной сети, которое выполняется ниже, использовались эти характеристики в совокупности.

4.2. Количественная оценка механических свойств на основе ОР-нейросети

Восемь характеристик используются в качестве входных данных модели, а три параметра механических свойств используются в качестве выходных данных. После 200-кратного обучения получается оптимальная структура модели с лучшей способностью к сходимости и способностью к обобщению. Коэффициент корреляции модели показан на рис. 6.

Чем ближе коэффициент корреляции R на рис. 6 к 1, тем лучше будет эффект аппроксимации модели нейронной сети на отношении ввода-вывода. Из рисунка видно, что коэффициент корреляции между результатом обучения и целевыми данными составляет 0,9999, коэффициент корреляции между результатом верификации и целевыми данными составляет 0,99026, коэффициент корреляции между результатом прогнозирования и целевыми данными 0,98437, а коэффициент корреляции обученной общей сетевой модели 0,99569. Результаты показывают, что расчетные значения модели хорошо коррелируют с фактическими результатами и могут использоваться для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов. Модель ОР-нейронной сети, полученная путем обучения, использовалась для количественной оценки параметров механических свойств тестируемых образцов. В табл. 4—6 приведены результаты количественной оценки условного предела текучести R_p 0,2, прочности при растяжении R_m и удлинения A испытанных образцов по отдельности.

Из табл. 4—6 видно, что относительная погрешность количественной оценки механических свойств испытуемого образца составляет менее 8 %. Общая точность выше, а максимальная средняя относительная погрешность условного предела текучести R_p 0,2, прочности при растяжении R_m и удлинения A составляет соответственно 7,85, 4,31 и 5,74 %. Это указывает на то, что модель ОР-нейронной сети может реализовать неразрушающую количественную оценку механических свойств ферромагнитных материалов, и это подтверждает возможность количественной оценки параметров механических свойств на основе метода ИВТ и эффективность восьми выбранных характеристик. Эксперименты показывают, что модель ОР-нейронной сети, основан-

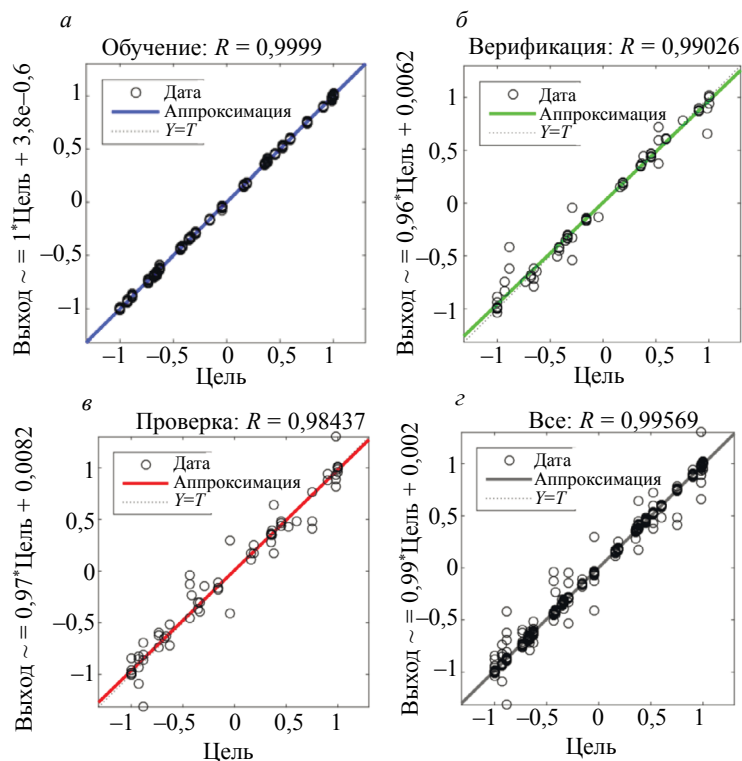


Рис. 6. Коэффициент корреляции модели ОР-нейросети.

Таблица 4

Результаты количественной оценки условного предела текучести ($R_p 0,2$)

Номер образца	Расчетное значение, МПа	Фактическое значение, МПа	Относительная погрешность, %
1	168,92	163	3,63
2	187,54	182	3,04
3	243,55	257	5,23
4	257,53	277	7,03
5	293,11	318	7,83
6	273,93	254	7,85
7	378,69	383	1,13
8	463,96	471	1,49
9	397,86	397	0,22
10	491,04	486	1,04

Таблица 5

Результаты количественной оценки прочности при растяжении (R_m)

Номер образца	Расчетное значение, МПа	Фактическое значение, МПа	Относительная погрешность, %
1	288,78	286	0,97
2	308,63	304	1,52
3	354,85	370	4,09
4	359,80	376	4,31
5	374,73	385	2,67
6	363,75	356	2,18
7	452,61	457	0,96
8	615,24	599	2,71
9	652,13	645	1,11
10	814,67	815	0,04

Таблица 6

Результаты количественной оценки относительного удлинения (*A*)

Номер образца	Расчетное значение, %	Фактическое значение, %	Относительная погрешность, %
1	46,17	46,4	0,50
2	46,30	46,1	0,43
3	40,60	39,4	3,05
4	39,32	38,1	3,21
5	37,75	35,7	5,74
6	40,04	42,1	4,90
7	32,09	31,8	0,91
8	23,06	23,2	0,58
9	25,69	26,2	1,94
10	11,36	11,6	2,08

ная на характеристиках сигнала ИВТ, позволяет осуществлять неразрушающую количественную оценку механических свойств ферромагнитных материалов и достигать более высокой точности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАБОТЫ

В данной статье методы ИВТ применяются для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов. Во-первых, традиционные характеристики сигнала ИВТ применяются для количественной оценки механических свойств. Затем предлагается новый метод на основе АРЭМ—ПГХ для извлечения новых характеристик сигнала ИВТ и сравнивается эффективность новых и старых характеристик. Результат показывает, что предполагаемые результаты для новых характеристик лучше, чем для традиционных характеристик. Наконец, ОР-нейронная сеть используется для количественной оценки механических свойств ферромагнитных материалов с традиционными и новыми характеристиками, а также осуществляется количественная оценка трех механических свойств. Метод, предложенный в этой статье, не только отвечает требованиям точности промышленного производства с точки зрения погрешности, но также имеет преимущества неразрушающего контроля с большой практической ценностью, поскольку он позволяет избежать большого количества экспериментов на растяжение и снижает материальные потери.

Последующие эксперименты позволят расширить тип и количество образцов, увеличить размер выборки и построить более полную модель нейронной сети. Когда размер выборки станет достаточно большим, авторы попробуют использовать глубокую сеть доверия, сверточную нейронную сеть и другие алгоритмы при количественную оценку параметров механических свойств.

Работа частично поддержана Национальной программой развития и ключевых исследований «Разработка основных научных приборов и оборудования» (2017YFF0107304), Национальным планом развития и ключевых исследований «Производство материалов и производство лазеров» (2016YFB1100205), Программой разработки специальных научных приборов Министерства науки и технологии Китая (2016YFF0103702), Национальным фондом естественных наук Китая (61527803), Открытым фондом Нанкинского университета авиации и астронавтики (kfjj20180315), Открытым фондом ведущей лаборатории Министерства промышленности и информационных технологий «Неразрушающий контроль и технологии мониторинга на объектах высокоскоростного транспорта».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Desjardins D., Krause T. W., Clapham L. Transient eddy current method for the characterization of magnetic permeability and conductivity // NDT & E International. 2016. V. 80. P. 65—70.
2. Fan M., Cao B., Sunny A. I. et al. Pulsed eddy current thickness measurement using phase features immune to liftoff effect // NDT & E International. 2017. V. 86. P. 123—131.
3. Xu Z., Wu X., Li. et al. Assessment of wall thinning in insulated ferromagnetic pipes using the time-to-peak of differential pulsed eddy-current testing signals // Ndt & E International. 2012. V. 51. No. 10. P. 24—29.

4. Kolokolnikov S., Dubov A., Steklov O. Assessment of welded joints stress-strain state inhomogeneity before and after post weld heat treatment based on the metal magnetic memory method // *Welding in the World*. 2016. V. 60. No. 4. P. 1—8.
5. Dubov A. A., Kolokolnikov M. S. Assessment of the material state of oil and gas pipelines based on the metal magnetic memory method // *Welding in the World*. 2012. V. 56. No. 3/4. P. 11—19.
6. Dubov A., Dubov A., Kolokolnikov S. Application of the metal magnetic memory method for detection of defects at the initial stage of their development for prevention of failures of power engineering welded steel structures and steam turbine parts // *Welding in the World*. 2014. V. 58. No. 2. P. 225—236.
7. Ghanei S., Saheb Alam A., Kashefi M. Nondestructive characterization of microstructure and mechanical properties of intercritically annealed dual-phase steel by magnetic Barkhausennoise technique // *Materials Science & Engineering A*. 2014. V. 607. P. 253—260.
8. Dobmann G., Altpeter I., Kopp M. Nondestructive materials characterization of irradiated nuclear pressure-vessel steel samples by the use of micromagnetic techniques and in terms of mechanical properties // *Russ. J. Nondestr. Test*. 2006. V. 42. P. 272—277.
9. Altpeter Iris, Becker Raine, Dobmann Gerd, RolfKern, Theiner Werner, Yashan Andreij. Robust solutions of inverse problems in electromagnetic non-destructive evaluation // *Inverse Prob.* 2002. V.18. No. 6. P. 1907—21.
10. Dobmann G., Altpeter I., Wolter B. et al. Industrial applications of 3MA—micromagnetic multiparameter microstructure and stress analysis // *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XI)*. 2008. V. 31. P. 18—25.
11. Dobmann G., Kern R., Altpeter I. et al. Quantitative Hardening-Depth-Measurements Up to 4 mm by Means of Micro-Magnetic Microstructure Multiparameter Analysis (3MA) // *NDT & E International*. 1991. V. 24. No. 1. P. 44.
12. Stupakov A., Perevertov O., Zablotskii V. A system for controllable magnetic measurements of hysteresis and Barkhausen noise // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2016. V. 65. No. 5. P. 1087—1097.
13. Xiucheng L., Wanli S., Cunfu H. et al. Simultaneous quantitative prediction of tensile stress, surface hardness and case depth in medium carbon steel rods based on multifunctional magnetic testing techniques // *Measurement*. 2018. V. 128. P. 455—463.
14. He C., Huang Y., Liu X. et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT al. Evaluation of mechanical properties in medium carbon steel with a point mode electromagnetic sensor // *Sensors & Actuators A Physical*. 2018. V. 269. P. 126—136.
15. Gui Y.T., He Y., Adewale I. et al. Research on spectral response of pulsed eddy current and NDE applications // *Sensors & Actuators A Physical*. 2013. V. 189. No. 2. P. 313—320.
16. Cheng W. Pulsed Eddy Current Testing of Carbon Steel Pipes' Wall-thinning Through Insulation and Cladding // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2012. V. 31. No. 3. P. 215—224.
17. Angani C. S., Park D. G., Kim C. G. et al. The Pulsed Eddy Current Differential Probe to Detect a Thickness Variation in an Insulated Stainless Steel // *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2010. V. 29. No. 4. P. 248—252.
18. Huang C., Wu X., Xu Z. et al. Ferromagnetic material pulsed eddy current testing signal modeling by equivalent multiple-coil-coupling approach // *NDT&E International*. 2011. V. 44. No. 2. P. 163—168.
19. Alamin M., Tian G Y., Andrews A. et al. Principal component analysis of pulsed eddy current response from corrosion in mild steel // *IEEE Sensors Journal*. 2012. V. 12. No. 8. P. 2548—2553.
20. Dobmann G., Altpeter I., Wolter B. et al. Industrial applications of 3MA—micromagnetic multiparameter microstructure and stress analysis // *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XI)*. 2008. V. 31. P. 18—25.
21. Stott C. A., Underhill P R., Babbar V. K. et al. Pulsed Eddy Current Detection of Cracks in Multilayer Aluminum Lap Joints // *IEEE Sensors Journal*. 2015. V. 15. No. 2. P. 956—962.
22. He Y., Tian G., Zhang H. et al. Steel Corrosion Characterization Using Pulsed Eddy Current Systems // *IEEE Sensors Journal*. 2012. V. 12. No. 6. P. 2113—2120.
23. Chen T., Tian G Y., Sophian A. et al. Feature extraction and selection for defect classification of pulsed eddy current NDT // *NDT&E International*. 2008. V. 41. No. 6. P. 467—476.
24. Li HF, Li GY, Zhou M. An adaptive BP-network approach to short term load forecasting // *IEEE. DRPT*. 2004. P. 505—8.
25. Zhang J., Lu SL., He W.X., Wang Y.S. Diagnosis of rolling bearing vibration of BP neural network method // *Light Ind Mach*. 2007. V. 25. P. 90—2.