

Снижение погрешности статистического метода оценки параметров дефектов в магнитной дефектоскопии

Слесарев Д.А., Барат В.А., Чобану П.М.

Метод магнитных полей рассеяния (MFL) находит сегодня широкое применение при дефектоскопии различных трубопроводов, стальных нефтяных и газовых резервуаров, сосудов высокого давления и прочего оборудования. Это связано с тем, что данный метод сочетает высокую информативность и высокую производительность. При этом он обеспечивает возможность решения обратной задачи и, таким образом, не только обнаружение дефектов, но и определение размеров обнаруженных дефектов.

Метод магнитных полей рассеяния используется в первую очередь для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности металла стенки изделия (трубы, резервуара). Традиционная классификация таких дефектов приведена на диаграмме рис. 1 [1] и включает в себя такие типы дефектов, как точечная потеря металла или язва (питтинговая коррозия), трещина, риска, сплошная (общая) потеря металла (сплошная коррозия).



Рис. 1. Классификация дефектов нарушения сплошности металла

Различные дефекты имеют, вообще говоря, разную природу происхождения и представляют различную опасность. Например, риска является следствием искусственного повреждения поверхности и представляет особую опасность вследствие наличия концентраторов механических напряжений. Поэтому задача дефектоскопии

состоит с одной стороны в определении типа дефекта, с другой стороны – в оценке его размеров.

Обычная схема обработки диагностических данных предполагает классификацию дефекта, как предварительный шаг для выбора модели расчета его параметров, затем собственно расчет параметров дефекта [2]. Модель может выражаться в виде некоторой математической связи параметров сигнала с параметрами дефекта. Восстановление параметров дефекта по параметрам его поля рассеяния является обратной задачей. Для решения обратной задачи в классической постановке необходимо установить аналитическую зависимость между измеренными значениями магнитной индукции и оцениваемыми параметрами дефекта. Однако известные в настоящее время аналитические зависимости, моделирующие дефект сплошности, как «магнитный диполь», или конденсатор с «магнитным» зарядом, применимы лишь для описания магнитного поля рассеивания искусственных дефектов.

В отличие от аналитической модели конечно-элементное моделирование позволяет учесть особенности формы реального дефекта, а также несовершенства намагничивающей и измерительной системы, влияющие на результат магнитного контроля. Однако из-за большого количества оцениваемых параметров и вариации влияющих величин (толщины объекта, зазора, размеров дефектов) численная диагностическая модель становится сложной и громоздкой. Для получения приемлемой точности оценки параметров дефектов необходимо рассчитать сотни тысяч моделей. В результате, вместо аналитического выражения в качестве диагностической модели мы получаем базу данных магнитных сигналов, соответствующих различным дефектам. Одним из способов обобщить и формализовать численную модель является использование систем регрессионных уравнений.

На рис. 2 приведено распределение осевой составляющей B_z магнитного поля рассеяния над дефектов типа точечной потери металла длиной 8 мм, шириной 8 мм, глубиной 3,2 мм, находящегося в однородном внешнем магнитном поле. По распределению поля в области дефекта рассчитываются численные характеристики MFL-сигнала – $\{f_i\}$, называемые признаками сигнала. Рассчитанные значения признаков сигнала подставляют в систему регрессионных уравнений для оценки параметров дефекта $\{d_i\}$, вызвавшего данный MFL-сигнал [3]:

$$d_i = \beta_{0i} + \beta_{1i} f_1 + \dots + \beta_{pi} f_p \quad (1)$$

β_{ki} – коэффициенты регрессионного уравнения.

Коэффициенты регрессионного уравнения рассчитываются по обучающей выборке, представляющей множество дефектов заданного класса с различным значением их

параметров – длиной, глубиной, шириной. При расчете коэффициентов используется критерий минимизации среднеквадратичной ошибки параметров дефекта.

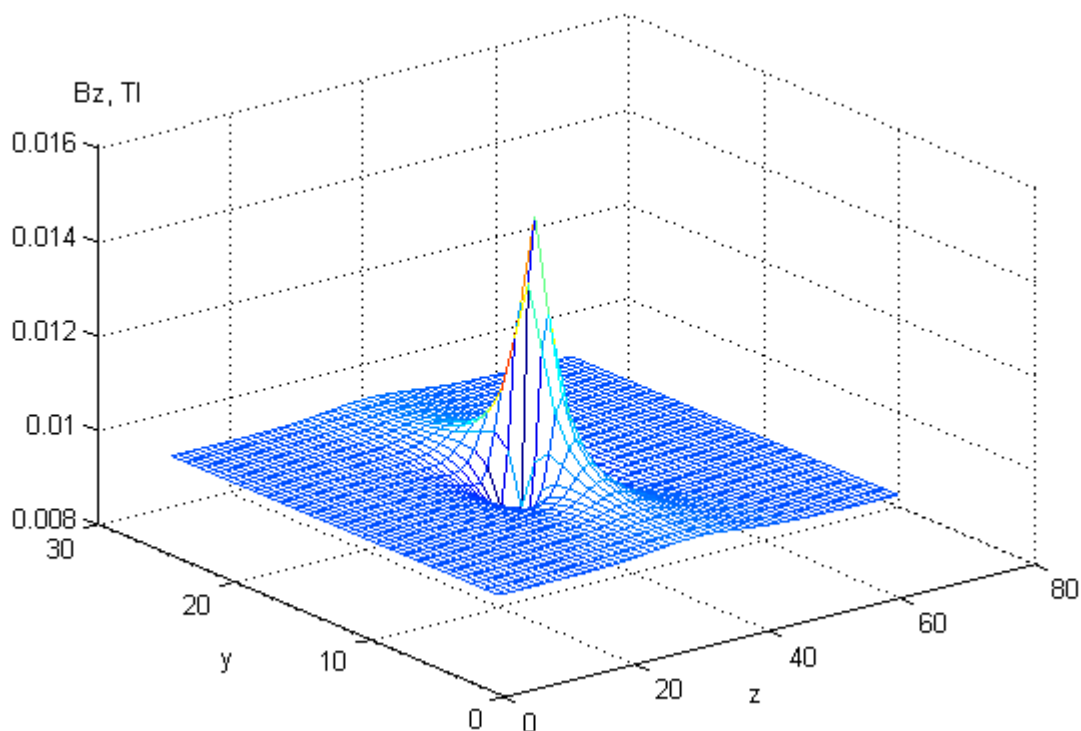


Рис. 2. Магнитное поле рассеяния над дефектом типа точечной потери металла

Однако линейная регрессия дает хороший результат лишь в той области, где зависимость между параметрами дефекта и участвующими в регрессионной модели параметрами сигнала допускает линейризацию с приемлемой погрешностью. Недостатком такого подхода к расчету параметров дефектов является неоднозначность классификации дефектов по MFL-сигналу. Восстановление параметров дефекта по MFL-сигналу является обратной задачей магнитостатики, которая в некотором диапазоне значений параметров не имеет устойчивого решения. Это выражается в том, что можно подобрать пару дефектов различного типа, различающихся также глубиной и длиной, поле рассеяния которых (MFL-сигнал) будет практически совпадать. На рис. 3 приведено сравнение распределение B_z для потери металла глубиной 3,2 мм и длиной стороны 8 мм (синий график) и риски глубиной 2,4 мм и длиной по оси z – 8 мм и длиной по оси y – 12 мм (красный график). Дефекты различаются углом наклона стенок. Эти сигналы совпадают с точностью до 5 % даже в отсутствии помехи. В реальных измерительных данных присутствует помеха, как в виде широкополосного шума, так и виде наложения сигнала от конструктивных элементов и локальных особенностей трубопроводов, что еще более осложняет задачу оценки параметров дефектов. Это приводит к тому, что на практике ошибка классификации дефекта типа «риска» доходит до 20%-25%. В результате

даже при малой погрешности определения параметров дефекта этого типа при использовании правильной расчетной модели среднестатистическая погрешность оказывается достаточно высокой. В частности, типовая величина среднеквадратического отклонения (СКО) погрешности рассчитанного значения глубины дефекта при использовании метода регрессионных уравнений составляет $0,07T - 0,08T$, где T – толщина стенки трубы. При доверительной вероятности $0,9$ диапазон погрешности оценки глубины дефекта – $0,12T - 0,13T$. Однако при ошибочной классификации и расчете дефекта типа «риска» по модели дефекта «общая потеря металла» СКО погрешности оценки глубины составляет больше $0,2T$. С учетом вероятности ошибочной классификации при достоверности 0.9 для выборки из 100 дефектов (типичный объем тестовой выборки) диапазон погрешности оценки глубины становится $0,2T$, что более чем в полтора раза превышает ожидаемую погрешность оценки.

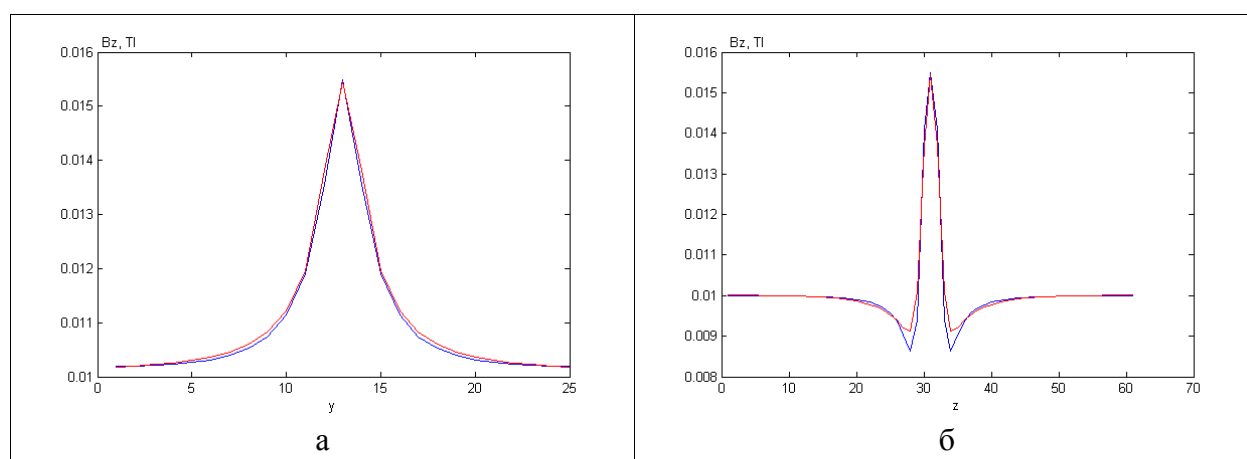


Рис. 3. Сравнение профиля поля рассеяния точечной потери металла и риски

Альтернативный подход к оценке параметров дефектов заключается в том, что параметры модели, в нашем случае – коэффициенты регрессионных уравнений $\{\beta_{ki}\}$, выбираются по критерию минимизации максимальной ошибки оценки параметров на некоторой комбинации классов или подклассе дефектов:

$$\min_{G_k} \{ \max \delta d \}, \quad (2)$$

здесь δd обозначает ошибку оценки параметра, а G_k – подкласс дефектов. Этот подкласс дефектов определяется своими геометрическими размерами, например, соотношением азимутальной и осевой протяженностей дефектов [4]. В таком случае формулируется задача определения диапазона размеров дефекта таким образом, чтобы выполнить условие (2). Как правило, выбирается одна обобщенная характеристика дефекта, которая используется в качестве варьируемой при определении границ подкласса G_k . В нашем случае такой характеристикой может служить отношение протяженности сигнала от дефекта по осям y и z .

Для проверки данного подхода к оценке параметров дефектов типа нарушения сплошности металла стенки трубы был проведен анализ на численных моделях дефектов, различавшихся глубиной, осевым и азимутальным размерами. Были сформированы выборки с различным осевым и азимутальным размером дефектов, также различающиеся углом наклона стенок, и рассчитаны коэффициент регрессии (1) для этих выборок (общий объем выборок составил около 1500 моделей). На рисунке 4 показаны зависимости коэффициентов регрессии глубины дефекта и амплитуды осевой составляющей от отношения сторон дефекта a для разной осевой длины дефекта l (T – толщина стенки).

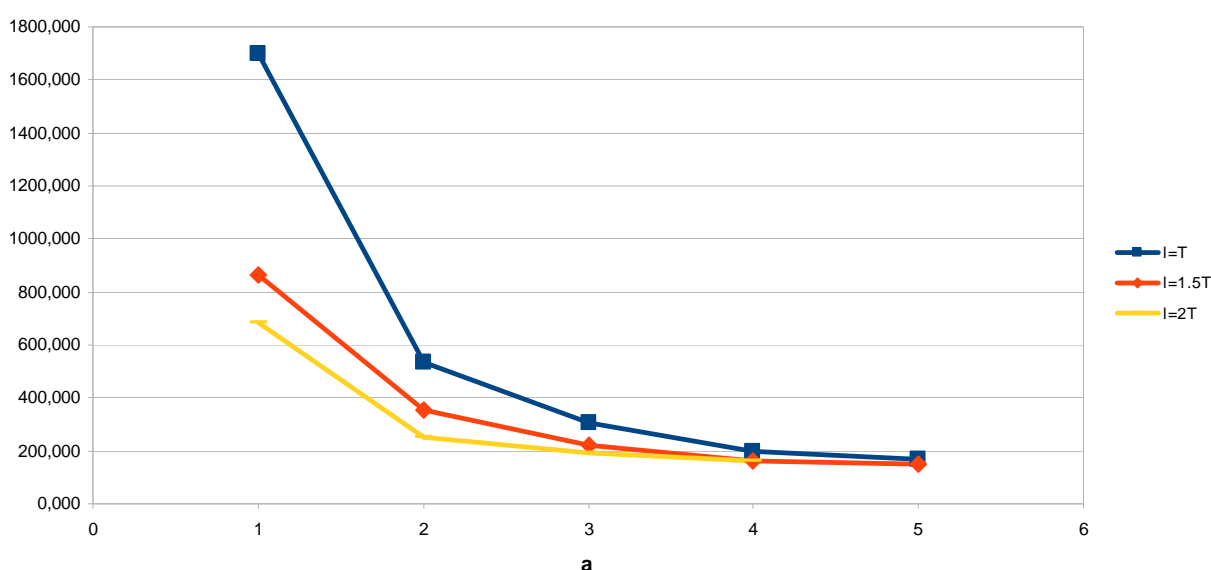


Рис. 4. Зависимость коэффициента регрессии β от отношения сторон дефекта a

Как видно из графика, можно выделить диапазон a , где значение коэффициента регрессии β сильно зависит от линейного размера l и слабо зависит от него. В диапазоне, где β слабо зависит от l и a , можно ожидать хорошей точности оценки глубины дефекта в соответствие с моделью (1). В диапазоне с выраженной зависимостью β от l необходимо использовать дополнительные параметры сигнала от дефекта для улучшения точности оценки, в частности, можно использовать другие составляющие магнитного поля рассеяния.

Идея разделения множества дефектов на подклассы по диапазонам значения параметра a может быть реализована с использованием отношения азимутальной протяженности области сигнала к осевой протяженности, определенным по заданному уровню, например, по уровню 0.7 от максимума. Это отношение имеет смысл эксцентриситета области сигнала – e . В отличие от параметра a параметр e может быть оценен по сигналу от дефекта и использован в процессе оценки размеров дефекта.

Для проверки описанного подхода была рассчитана выборка из примерно 1500 моделей дефектов с различными значениями линейных размеров, глубины и углом наклона стенок. Вся выборка была разбита на 3 подкласса в соответствии со значением параметра e : $e < 2,5$; $2,5 < e < 4,5$; $e > 4,5$. После расчета коэффициентов множественной линейной регрессии $\{\beta_{ki}\}$ была проведена оценка размеров дефекта по полученной регрессионной модели. Значения среднеквадратического отклонения ошибки оценки глубины дефектов в долях T приведено в таблице 1 (T – толщина стенки). Как следует из этой таблицы, регрессионное уравнение дает высокую точность оценки глубины дефектов первого ($e < 2,5$) и третьего ($e > 4,5$) подклассов. Наиболее проблемным является второй подкласс ($2,5 < e < 4,5$), СКО оценки которого оказывается равным $0,12T$. Этому подклассу соответствует часть дефектов типа «риска». Тем не менее при доверительной вероятности $0,9$ диапазон погрешности оценки глубины дефекта этого подкласса составляет $0,19T$, что меньше погрешности оценки глубины таких дефектов описанным выше традиционным методом. Для снижения погрешности оценки глубина дефекта следует наряду с осевой использовать также другие составляющие магнитного поля.

Таблица 1

	диапазон параметра	СКО ошибки, T
1.	$e < 2,5$	0,03
2.	$2,5 < e < 4,5$	0,12
3.	$e > 4,5$	0,08

В заключении можно отметить повышение точности оценки размеров дефектов, путем разбиение множества дефектов на подклассы в соответствии с принципом минимизации максимальной ошибки оценки выбранного параметра. Для реализации такого разбиения удобно использовать некоторый обобщенный геометрический параметр, например, эксцентриситет.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мойад Абдула. Последние достижения в технологии магнитной инспекции с высоким разрешением. / «Диагностика-99», Сочи, 1999
2. Слесарев Д.А., Васин Е.С., Степанов Н.О., Барат В.А., Шипяков М.Н. Идентификация и оценка параметров дефектов при магнитной внутритрубной диагностике дефектоскопом МДСкан. – Материалы XVII российской научно-технической конференции «Неразрушающий контроль и диагностика» - Екатеринбург, 2005, стр. 327.
3. Barat V., Lunin V., Seidel H.-U., Bock A. “Signal Processing of Magnetic flux Leakage Data Obtained from Pipeline Inspection”, 48th International Scientific Colloquium: Proceedings Ilmenau, Germany, 2003, pp.131-132
4. Slesarev D., Barart V. Statistical diagnostic model for defect parameters reconstruction in MFL nondestructive testing. (тезисы доклада) – Материалы 10-ой европейской конференции по неразрушающему контролю - Москва, 2010, стр. 50.