

магнитных тест-фильтров как средство контроля ферропримесей // Законодательная и прикладная метрология, 2010, №3, с.26-27,35-39.

5. Сандуляк А.В., Сандуляк А.А., Саккани Ч. Особенности модели поглощающего экрана магнитного фильтра // Тяжелое машиностроение, 2004, №10, с.18-23.
6. Сандуляк А.В. Магнитно-фильтрационная очистка жидкостей и газов. М.:Химия, 1988,133с.

Особенности измерений геометрических параметров на малых областях

к.т.н. проф. Суслин В.П., к.т.н. доц. Джунковский А.В, к.т.н. доц. Макаров А.И.
МГТУ «МАМИ»
(495) 223-05-23, доб. 1392

В статье показана эффективность применения метода регуляризации для решения плохо обусловленных задач измерения геометрических объектов на малых областях.

Ключевые слова: координатно-измерительная машина, КИМ, плохо обусловленные задачи, регуляризация.

При геометрических измерениях машиностроительных деталей встречаются ситуации, когда геометрический объект входит в конструкцию не целиком, а лишь своей частью, например в виде сегмента цилиндра. Если эта часть составляет небольшую долю от полного объекта, то при контроле с помощью координатно-измерительных машин его параметры будут получены с большими ошибками. Метрологам известно, что не следует измерять на координатно-измерительных машинах дуги окружностей, меньшие 90 градусов – ошибки измерений будут слишком велики.

Большие ошибки параметров при измерении малых сегментов вызваны плохой обусловленностью измерительных задач. В публикациях [7,8] показано, что числа обусловленности матриц систем уравнений для определения параметров малых дуг окружностей и малых сегментов сфер достигают порядков 10⁸ - 10¹⁰, из-за чего ошибки определения радиусов и координат центральных точек становятся недопустимыми.

Задача определения параметров геометрических объектов по результатам измерений обычно решается методом наименьших квадратов:

$$F(a) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 \rightarrow \min \quad (1)$$

где: $a = a_0, a_1, \dots, a_m$ - параметры геометрического объекта;

$\delta_i = |P'_i - P_i|$, $i=1, 2, \dots, n$ - отклонения измеренных точек;

$P'_i = (X_i, Y_i, Z_i)$ - измеренная на объекте точка;

$P_i = (X'_i, Y'_i, Z'_i)$ - точка на геометрическом объекте, соответствующая измеренной.

При измерении окружности функция $F(a)$ имеет вид:

$$F(R, a, b) = \sum_{i=1}^n \delta_i^2 = \sum_{i=1}^n \left[(x_i - a)^2 + (y_i - b)^2 - R^2 \right]^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где: a, b – координаты центра;

R – радиус окружности;

x_i, y_i – координаты измеренных точек.

Вероятно, при плохой обусловленности задачи функция (2) теряет выпуклость в окрестности точки минимума, вследствие чего решение получается неоднозначным, чувствительным к небольшим ошибкам исходных данных. Для подтверждения этого предположения проведены расчеты функции в условиях хорошей и плохой обусловленности измерительных задач. В качестве модельных данных использованы 9 точек окружности с номинальными параметрами $a = b = 0$, $R = 50$ мм, возмущенные случайными ошибками с нормальным законом распределения и $\sigma = 0.001$.

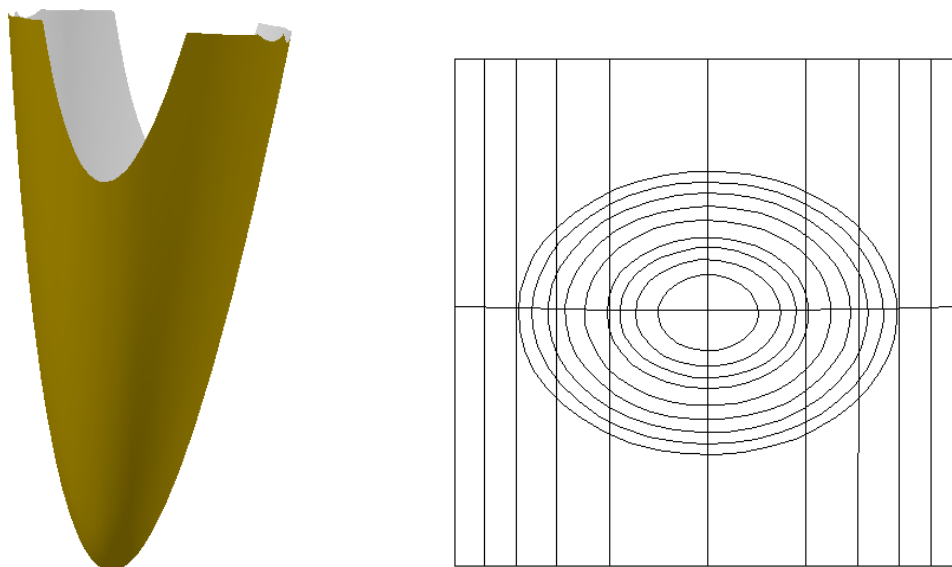


Рисунок 1 - Функция минимизации для полуокружности

На рисунке 1 представлены график функции (2) в зависимости от параметров a и R при $b=0$ и линии уровня этой функции для дуги окружности 180 градусов. Функция имеет четко выраженный минимум, ее линии уровня имеют вид полных эллипсов без существенного наклона осей к осям системы координат. Минимизация функции с такими свойствами не представляет затруднений, процесс сходится с высокой скоростью и точностью к точке минимума из любого начального приближения. Это свойство и характеризует хорошо обусловленную задачу.

На рисунке 2 показаны графики функции для дуги окружности 6 градусов.

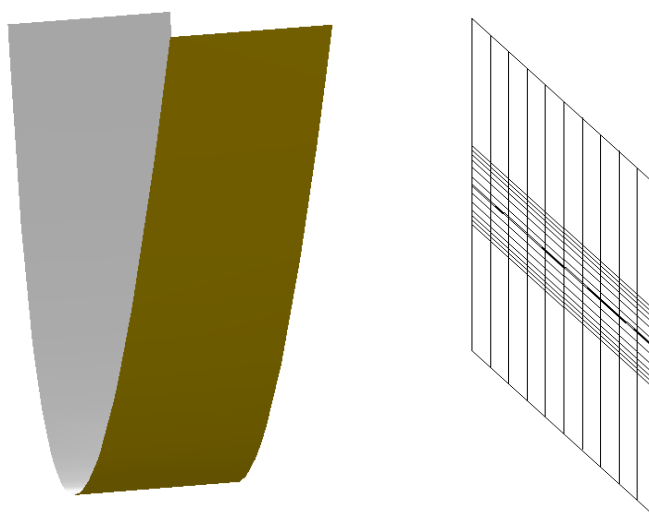


Рисунок 2 - Функция минимизации для сектора 6 градусов

В отличие от предыдущей функции данная имеет вид оврага с крутыми склонами и почти горизонтальным дном. Линии уровня представляют собой почти параллельные прямые. Минимизация такой функции дает неоднозначные результаты. Решение зависит от на-

чального приближения. Из заданной начальной точки процесс минимизации быстро приводит к точке на дне “оврага”, в которой никакое направление не дает уменьшение функции. То есть любая из точек в большой области на дне “оврага” соответствует критерию минимума функции и может быть принята в качестве решения. Неоднозначность решения – один из признаков плохо обусловленной задачи. И никакой метод минимизации не может дать в этой ситуации надежный и точный результат.

Если практическая необходимость измерений на малых областях имеет место, то метрологические службы должны использовать специальные приемы и средства измерений, чтобы осуществить контроль. Например, для измерений малых дуг окружностей находят применение следующие способы.

1) Задание центральной точки.

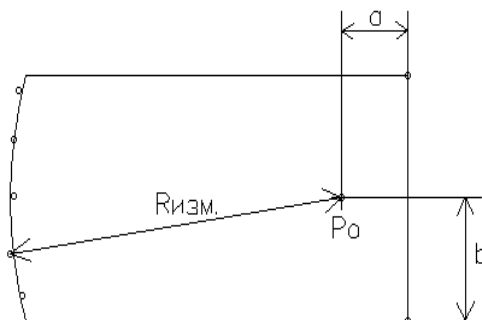


Рисунок 3 - Контроль с использованием центральной точки

Иногда из чертежа известно положение центральной точки дуги. В этом случае ее можно использовать для контроля радиуса. На рисунке 3 условно показан фрагмент детали, содержащий малую дугу. Относительно некоторых баз на чертеже имеются координаты a и b центральной точки P_0 дуги.

Средствами измерительной программы эта точка создается как измеренный объект. Затем проводится измерение нескольких точек дуги с помощью координатно-измерительной машины и для каждой из них определяется расстояние до центральной точки $R_{изм}$ и отклонение от номинального значения радиуса $\varepsilon_R = R_{изм} - R_{ном}$. По величинам отклонений принимается решение о правильности или неправильности исполнения малой дуги.

2) Измерение с помощью поворотного стола

Если положение центральной точки не определено на чертеже, то описанный выше метод контроля реализовать нельзя. В такой ситуации контроль дуги можно осуществить с помощью поворотного стола и индикаторной головки (рисунок 4).

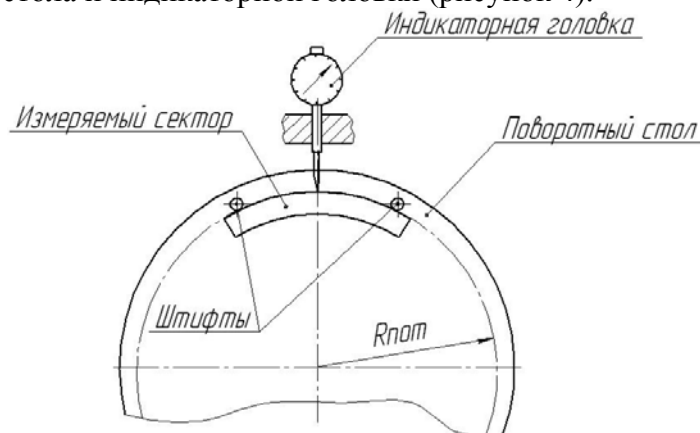


Рисунок 4 - Контроль кругового сектора на поворотном столе

На поворотном столе устанавливают два упорных штифта на расстоянии номинального радиуса дуги от центра стола. Круговой сектор дуги базируют по этим штифтам, а наконечник индикаторной головки вводят в контакт с цилиндрической поверхностью. Поворачивая

стол, по показаниям индикаторной головки судят об отклонении радиуса дуги от номинального значения.

Отметим, что настройка этого измерительного устройства достаточно трудоемка в части фиксации с высокой точностью упорных штифтов на расстоянии номинального радиуса от центра стола.

3) Контроль по математической модели

Математическая модель является эталоном геометрической формы детали. С помощью измерительной программы происходит сопоставление измеренных на детали точек с мат. моделью и определяются их отклонения от правильной геометрической формы. При таком контроле не будет получено измеренное значение радиуса дуги, результатом контроля будет диаграмма отклонений измеренных точек от математической модели. То есть фактически контролируется не радиус, а отклонение формы дуги. Поэтому требуется дополнительный метрологический анализ для того, чтобы сделать вывод о возможном отклонении радиуса.

Из приведенных практических способов контроля малых дуг видно, что во всех трех случаях были использованы номинальные значения параметров дуги: в первом – координаты центральной точки, во втором и в третьем также и номинальный радиус. Эти практические решения привели к мысли модифицировать функции (1) и (2) для метода наименьших квадратов так, чтобы в них учитывались не только отклонения измеренных точек, но и отклонения определяемых параметров от их номинальных значений. То есть дополнить плохо обусловленную задачу дополнительными данными априорного характера, в данном случае номинальными значениями параметров измеряемого объекта.

Методы модификации плохо обусловленных или некорректно поставленных задач путем их дополнения количественной или качественной информацией, так чтобы они были устойчивы к малым изменениям исходных данных, были предложены в 60-х годах академиком А.Н. Тихоновым и названы им методами регуляризации. В дальнейшем методы регуляризации были развиты их автором, его учениками и последователями как в теоретическом плане, так и в ряде приложений – компьютерной томографии, сейсмических исследованиях, распознавании изображений и других [1-4]. И лишь недавно сотрудниками лаборатории САПР МГТУ «МАМИ» было предложено использовать методы регуляризации для решения плохо обусловленных задач в геометрических измерениях [6, 7].

Для регуляризации рассматриваемых задач дополним функцию минимизации (1) дополнительными слагаемыми. Например, при измерении дуги окружности, если известно номинальное значение радиуса, функция минимизации будет иметь вид:

$$\Phi(R, a, b, w) = F(R, a, b) + w(R - R_{nom})^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где: w – коэффициент регуляризации.

Так как $F(R, a, b)$ выпуклая функция и $(R - R_{nom})^2$ сильно выпуклая функция, то при соответствующих значениях коэффициента регуляризации функция (3) будет иметь четко выраженную точку минимума, при этом решение задачи будет однозначным и слабо зависящим от небольших изменений исходных данных.

На рисунке 5 показана функция (3) для дуги окружности 6 градусов в зависимости от R и a при $b = 0$, $w = 1$ и ее линии уровня. Сопоставление функций на рисунках 2 и 5 показывает, что регуляризация позволила получить функцию минимизации с совершенно другими свойствами. Исчезла овражистость, линии уровня имеют эллиптический характер, что позволяет быстро, надежно и точно находить точку минимума.

Обработка измерений малых дуг окружностей на основе метода регуляризации реализована в измерительной программе ГеоАРМ в виде отдельного программного модуля. Это позволяет проводить серийные измерения дуг окружностей как в экспериментальном, так и в реальном режимах.

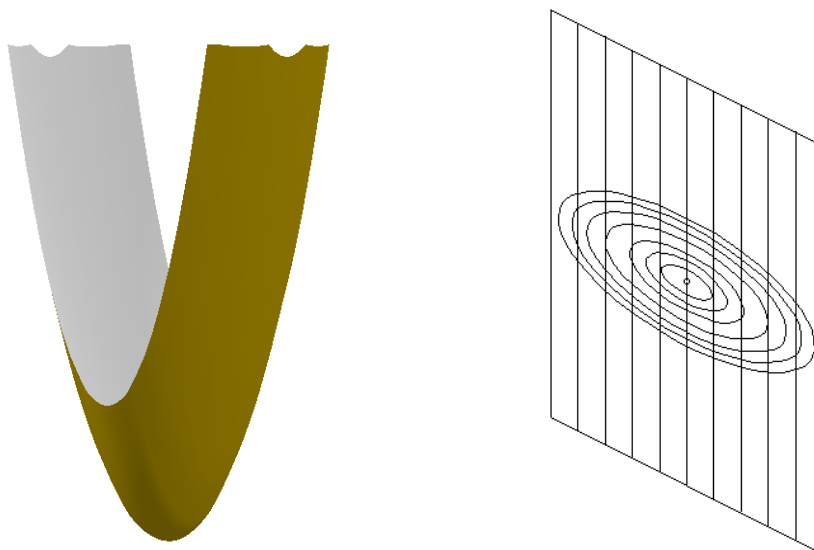


Рисунок 5 - Функция минимизации для сектора 6 градусов с регуляризацией

Приведем результаты реальных измерений, выполненных на координатно-измерительной машине. В качестве детали было использовано образцовое кольцо номинальным диаметром 27,000 мм. Размеры измеряемых секторов (примерно) и результаты измерений (ошибки радиуса и отклонения формы) приведены в таблице 1. Погрешность измерений КИМ не более ± 0.003 мм, а фактическое отклонение формы образцового кольца менее 0.001 мм. Полученные отклонения формы и ошибки определения радиуса дуг не превышают возможных ошибок измерений, поэтому результаты можно считать вполне достоверными.

Таблица 1

Результаты измерения дуг образцового кольца

Сектор, град.	6	11	22	45	90
εR , мм	+0.0001	-0.0001	-0.0002	-0.0002	+0.0008
$\varepsilon Form$, мм	0.0005	0.0011	0.0008	0.0008	0.0017

Выводы

Таким образом, плохая обусловленность задач измерений на малых областях связана с тем, что функции минимизации теряют свойства сильной выпуклости, их линии уровня приобретают почти линейный вид, градиенты по определенным направлениям близки к нулю. При этом небольшие изменения исходных данных приводят к существенным отличиям в результатах.

Предложенная регуляризация измерительных задач улучшает свойства функций минимизации, повышает их выпуклость, ликвидирует овраги, благодаря чему получаются однозначные и точные решения.

Литература

1. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
2. Тихонов А.Н., Гончарский А.В., Степанов В.В, Ягола А.Г. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990.
3. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений. Санкт-П.: Специальная Литература, 1999. 239 с.
4. Воскобойников Ю. Е. Устойчивые алгоритмы решения обратных измерительных задач : монография / Ю. Е. Воскобойников ; Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин).

– Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2007. – 184 с.

5. Суслин В.П., Джунковский А.В., Шутер М.Г. Новый метод определения геометрических параметров объектов при измерениях на малых областях // Законодательная и прикладная метрология. 2008. №6. с.39-42.
6. Суслин В.П., Джунковский А.В. Применение метода регуляризации для решения плохо обусловленных задач координатных измерений // Измерительная техника. 2009. №7.
7. Суслин В.П., Джунковский А.В. Регуляризация плохо обусловленных задач в геометрических измерениях // Известия МГТУ «МАМИ». Научный рецензируемый журнал. М., МГТУ «МАМИ», №2(8), 2009, с.214-219.

Исследование свойства наноструктурированных вакуумных ионно-плазменных покрытий

к.т.н. доц. Шехтман С.Р., к.т.н. доц. Киреев Р.М.

Уфимский государственный авиационный технический университет
+73472730763

Аннотация. В работе рассматриваются результаты исследований свойств наноструктурированных покрытий. Приведены исследования электродного потенциала образцов с покрытиями, исследована коррозионная и релаксационная стойкость, проведены испытания на термоциклирование. Приведенные результаты исследования позволяют оценить преимущества наноструктурированных покрытий перед многослойными и однослойными покрытиями.

Ключевые слова: наноструктура, ионно-плазменная обработка, покрытия

Введение

Детали энергетических установок работают в условиях высоких и быстроменяющихся температур, агрессивных сред; одновременно материал деталей подвержен воздействию высоких статических и динамических напряжений, амплитуда и частота которых изменяются в широких пределах, частая и быстрая смена температуры (тепловой удар) приводит к возникновению дополнительных термических напряжений, кроме того они изготавливаются ажурными, пустотелыми и тонкостенными.

Современные требования к эксплуатационным свойствам поверхности деталей энергетических установок энергомашиностроения могут быть обеспечены осаждением на поверхности изделий различного вида защитных покрытий.

Вакуумные ионно-плазменные технологии характеризуются возможностью получения поверхностных слоев со специальными физико-механическими свойствами, практически полной универсальностью технологического процесса, высокой скоростью нанесения покрытий, высокой воспроизводимостью параметров на каждой операции и практически полной отсутствием экологических проблем, что делает их предпочтительными с точки зрения перспективности применения.

Наиболее перспективными среди них являются многослойные покрытия, в том числе многослойные ионно-плазменные покрытия, полученные конденсацией вещества в вакууме с одновременной дополнительной ионной бомбардировкой [1, 2]. Сложность разработки технологии нанесения защитных многослойных покрытий связана с недостаточной разработкой методов осаждения слоевых композиций.

Защитные покрытия позволяют не только получать новые свойства изделий энергетических установок за счет образования композиций, сочетающих высокую долговечность (износостойкость, специальные свойства и т.д.) с достаточной надежностью (трещиностойкость), но и повышать эксплуатационную стойкость деталей.

Особенностями вакуумного ионно-плазменного метода получения покрытий является