

ПЕРЕДАЧА РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ В КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МАШИНАХ

Рассмотрены вопросы передачи размера единицы длины при сохранении точности определения основных физических величин, а также точности первичных эталонов и входящих в их состав интерферометров в области прецизионного машиностроения.

Важной отличительной чертой указанных средств является воспроизведение единицы длины и передача ее размера в особых условиях, определяемых спецификой криволинейной формы поверхности, а также спецификой выделения шероховатости из общей совокупности неровностей. Использование современных интерферометров позволяет осуществлять передачу размера единицы длины, определенной через фундаментальную физическую константу - скорость света, в измерительные системы промышленности с максимальной точностью. Различные типы измеряемых поверхностей и пространственные масштабы их геометрических параметров требуют и разные специфические средства воспроизведения, хранения единицы длины и передачи ее размера в особых условиях измерений. Их совокупность составляет эталонную базу координатных измерений в прецизионном машиностроении.

При измерении формы и параметров поверхности применяют следующие СИ: кругломеры (отклонения от круглости), эвольвентомеры (отклонения от эвольвентности), плоскомеры (отклонения от плоскостности) и т. д. В конструкции этих координатных средств заложен принцип сравнения реальной контролируемой поверхности с эталонной, имеющей форму номинальной. Отклонение формы контролируемой поверхности от эталонной количественно оценивают по расстоянию от точек реальной поверхности до эталонной по нормали к ней.

Таким образом, непременным требованием к специализированным координатным СИ отклонений формы является наличие эталонной координатной поверхности. При этом недостаточно измерять просто расстояния между двумя точками указанных поверхностей. Необходимо задавать и сохранять в процессе измерений форму эталонной поверхности, т. е. задавать криволинейную систему координат, имеющую в качестве координатной поверхности эталонную (номинальную) форму. Передавать размер единицы длины при измерении отклонения формы реальной поверхности необходимо по нормали к эталонной поверхности, поэтому прямая передача размера единицы длины от первичного эталона невозможна без существенной потери точности. Именно по этой причине для разных типов номинальной формы поверхностей необходимы и существуют свои независимые, отличающиеся в приборном и методическом отношении виды измерений и системы воспроизведения и передачи размеров единицы длины в области измерений отклонения от круглости, плоскостности, эвольвентности и шероховатости.

В таких измерительных системах требуется кроме размера единицы длины передавать форму координатной поверхности. Это можно сделать с помощью эталонных мер номинальной формы (плоской, сферической и т. д.). Таким образом, единственной функцией эталонных мер является задание и сохранение с необходимой точностью вспомогательной координатной поверхности.

Практическая реализация единицы длины осуществляется с помощью интерферометров с определенной длиной волны. Наиболее точный способ передачи размера единицы длины координатным СИ - интерференционный метод. Несмотря на то, что для измерения отклонения формы и шероховатости поверхности существует множество разновидностей этого метода, суть обработки интерференционной измерительной

информации можно продемонстрировать на примере конкретного интерферометра Тваймана-Грина, используемого для контроля формы поверхностей (рис. 1).

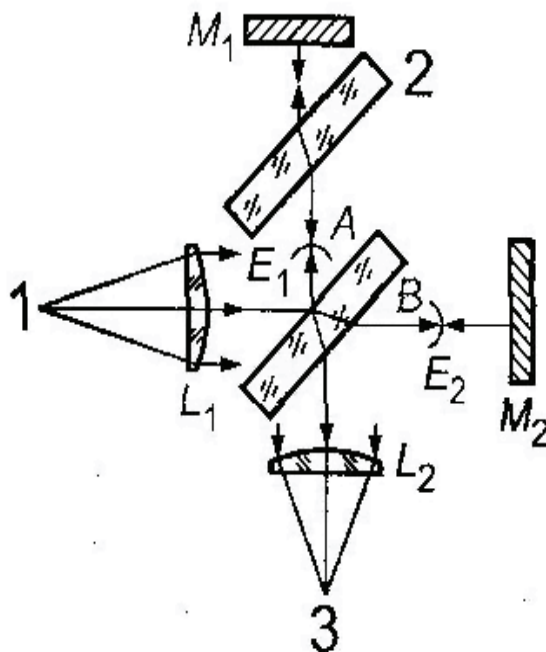


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра Тваймана-Грина для контроля формы оптических поверхностей: 1-источник света; 2- компенсатор; 3- фотоприемник

Оптическая система интерферометра проектирует волновой фронт E_1 , сформированный из лазерного пучка, на эталонную координатную поверхность M_2 номинальной формы. Одновременно плоскопараллельная пластина проектирует волновой фронт E_2 , отраженный от контролируемой поверхности M_1 , имеющей одинаковую с эталонной номинальную форму, но с отклонениями $\varphi_2(x, y)$. Фотоприемник 3 регистрирует распределение интенсивностей, представляющее интерферограмму взаимодействия волновых фронтов E_1, E_2 .

Интенсивность света - усредненное во времени количество энергии, пересекающее единицу площади, перпендикулярную направлению потока энергии, в единицу времени. На основании решения уравнений Максвелла (для электрического поля в виде плоской волны) интенсивность определяется как

$$I = (c/4\pi)\sqrt{\varepsilon/\mu}E^2 = (c/4\pi)\sqrt{\mu/\varepsilon}H^2,$$

где для света, распространяющегося в одной и той же среде со скоростью c , $\langle E^2 \rangle$ можно считать мерой интенсивности.

Интерференционная картина на выходе интерферометра представляет собой результат суперпозиции двух монохроматических волн:

$$\text{эталонной } E_1 = E_1(x, y) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + y^2}{2r_1}\right)\right\} \text{ и}$$

$$\text{исследуемой } E_2 = E_2(x, y) \exp\left\{-i \frac{2\pi}{\lambda} \left(\frac{x^2 + y^2}{2r_2}\right) + \varphi_2(x, y)\right\}.$$

В векторном виде интерференционную картину представим суммой $E = E_1 + E_2$, следовательно, $E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2$.

В скалярном виде уравнение интерференции имеет вид

$$I_{(x,y)} = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos 2\pi[\varphi_2(x, y)] \quad (1)$$

где $I_1 \sim |E_1^2|$; $I_2 \sim |E_2^2|$; λ - длина волны монохроматического источника света; x, y — декартовы координаты выходного зрачка; $r_1 r_2$ - радиусы эталонной и исследуемой сфер взаимодействующих волновых фронтов;

$\varphi_2(x, y)$ - функция аберрации исследуемого волнового фронта (отклонение от номинальной формы исследуемой поверхности).

Таким образом, искомой функцией (отклонением формы) является $\varphi_2(x, y)$, которую можно найти из (1) при известном, зарегистрированном фотоприемником, значении интенсивности $I_{(x, y)}$.

Интерференционная картина волновых фронтов, отраженных от эталонной и контролируемой поверхностей, регистрируется в виде интерферограммы. Затем по ней определяют координаты центров интерференционных полос, являющихся энергетическими максимумами или минимумами интенсивности. Согласно принципу интерференции в координатах максимумов интенсивности на интерферограмме разность хода волновых фронтов равна целому числу длин волн. Таким образом, по оси, ортогональной плоскости интерферограммы, отсчитывают отклонения формы контролируемого волнового фронта от референтного (в длинах волн). К этим отклонениям аддитивно добавляют параметры настройки интерферометра: наклон эталонного волнового фронта по отношению к контролируемому и его дефокусировку, представляющие неопределенности измерений систематического характера. В дополнение к этому могут учитываться аберрации волновых фронтов оптической системы, также представляющие неопределенности измерений систематического характера, в случае, если ими нельзя пренебречь по сравнению с отклонением формы контролируемой поверхности. Поскольку и параметры настройки интерферометра, и указанные аберрации являются детерминированными функциями, представляемыми аналитически, их можно выявить и устранить математическими методами. То, что осталось после вычитания, и есть отклонение формы контролируемого волнового фронта от референтного на заданной системе координат.

Описанный выше метод называется амплитудным интерференционным методом координатного измерения отклонения формы.

Суть амплитудно-фазового метода состоит в следующем. При отсутствии шума выходной сигнал из гетеродинного интерферометра переменного тока можно записать как:

$$i_{(x,y)} = i_{\max} [1 + \gamma \sin(\omega t + \Phi_{(x,y)})], \quad (2)$$

где γ - видимость полосы; ω - частота модуляции; Φ - измеряемая фаза.

Далее выполняют деление периода синусоидального сигнала (например, на четыре сегмента) и подсчитывают количество фотонов, обнаруженных для каждого сегмента. Пусть P - количество фотоэлектронов, обнаруженных за один период T , $P = i / e$ или

$$P = \int_{-T/8}^{T/2} idt / e + \int_{T/8}^{3T/8} idt / e + \int_{3T/8}^{5T/8} idt / e + \int_{5T/8}^{TT/8} idt / e = A + B + C + D \quad (3)$$

где e - заряд электрона.

При подстановке (2) в (3) получаем

$$A = P\left(\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{2\gamma}}{2\pi} \sin \Phi_{(x,y)}\right); \quad B = P\left(\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{2\gamma}}{2\pi} \cos \Phi_{(x,y)}\right);$$
$$C = P\left(\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{2\gamma}}{2\pi} \sin \Phi_{(x,y)}\right); \quad D = P\left(\frac{1}{4} + \frac{\sqrt{2\gamma}}{2\pi} \cos \Phi_{(x,y)}\right);$$

Отсюда отклонение формы волнового фронта определяется согласно выражению

$$\Phi_{(x,y)} = \operatorname{arctg}\left(\frac{A-C}{B-D}\right).$$

Амплитудно-фазовым методом можно определять отклонения формы в общем случае по n сегментам.

Существуют также другие методы получения первичной измерительной информации о волновом фронте, представляющем интерференцию референтного и контролируемого фронтов. При определенных условиях точность этих методов может быть существенно выше, чем у амплитудного метода. Однако «координатный аспект», заключающийся в измерении на заданной системе координат точек величин, являющихся функциями координат контролируемой формы рельефа и его геометрических параметров, остается для всех указанных методов аналогичным.

Выводы

Поскольку интерференционный метод - это лишь способ реализации измерения отклонения формы, то для него остается в силе указанная ранее специфика координатных измерений по сравнению с традиционными линейными измерениями. Она заключается в необходимости задания и поддержания в процессе измерения координатной (референтной) поверхности, по нормали к которой измеряют отклонения формы контролируемой поверхности.

Список литературы

1. Кононогов С.А. Эталонная база прецизионного машиностроения// Метрология журн. 2009. №3.С.7-23.
2. Исаев А.Б. Обработка результатов измерений линейным интеративно- взвешенным алгоритмом конъюгентного анализа при метрологической аттестации средств измерения// Метрология журн. 1989. №3. С.31-42.
3. Богатыренко К.И. О коррекции инструментальных погрешностей двухкоординатных сканирующих АЦП перемещений// Метрология журн. 1989. №12. С14-18.
4. Гапшис А.А. Координатные измерительные машины и их применение/ А.А. Гапшис, А.Ю. Каспарайтис, М.Б. Модестов.-М.:Машиностроение, 1989-328 с.
5. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология: Учебник для вузов.- М.: Изд-во стандартов, 1991.- 492 с.,ил.