

Информационно-советующая система для измерения сложных поверхностей деталей космической техники на координатно-измерительных машинах

*Ф.В. Гречников,
зав. каф., д.т.н., чл.-корр. РАН,
И.П. Попов,
проф., д.т.н.,
Самарский университет, г. Самара,
О.В. Захаров,
проф., д.т.н., zov20@mail.ru,
СГТУ им. Ю.А. Гагарина, г. Саратов*

Разработана информационно-советующая система для решения слабо формализованных задач при координатных измерениях: 1) выбор схемы установки изделия для возможности измерения всех базовых и функциональных поверхностей; 2) определение схемы расположения контрольных точек на поверхностях; 3) оптимизация числа контрольных точек; 4) оптимизация траектории перемещения датчика касания по контрольным точкам. Первая задача решается на основе модульного принципа кодирования поверхностей и экспертной системы принятия решений. Вторая задача решается на основе статистического моделирования случайных и систематических погрешностей измерения в зависимости от схемы расположения. Третья задача построена на параметрической оптимизации по критериям точности и производительности измерений. Четвертая задача базируется на обобщении известной задачи коммивояжера для пространственного случая.

An information and advisory system has been developed for solving weakly formalized tasks in coordinate measurements: 1) selecting articles setting circuits to provide a measure of all base and functional surfaces; 2) the definition of schemes for the placement of control points on surfaces; 3) optimization of the number of control points; 4) optimization of the trajectory of movement of the touch sensor along control points. The first problem is solved on the basis of the modular principle of coding surfaces and an expert decision-making system. The second problem is solved on the basis of statistical modeling of random and systematic measurement errors, depending on the placement. The third task is based on parametric optimization according to the criteria of measurement accuracy and performance. The fourth problem is based on a generalization of the well-known traveling salesman problem for the spatial case.

В настоящее время измерение геометрических характеристик изделий все чаще выполняют с применением координатно-измерительных машин (КИМ). Это позволяет измерить с высокой точностью (до 0,5-1,5 мкм) не только размеры, но и форму, ориентацию месторасположение, биение поверхностей на изделии согласно ГОСТ Р 53442-2015. Однако определение геометрических характеристик поверхности по измеренным координатам осуществляется косвенным методом. В результате неопределенность измерения возрастает до 5-10 мкм, а иногда и более. В процессе обработки данных измерения приходится решать целый комплекс взаимосвязанных задач: компенсация радиуса щупа датчика касания, исключение погрешностей базирования, определение размеров и параметров поверхности, исключение грубых ошибок, фильтрация сигнала и некоторые другие [1-9]. Улучшить работу алгоритмов обработки данных можно за счет выбора стратегии измерения [8]. В этом случае достигается компромисс между приемлемой погрешностью измерения и требуемой производительностью. Однако большую часть таких задач можно отнести к слабо формализованным и поэтому выполняемым на основе опыта программистов и операторов КИМ, т.е. существующим в виде различных приемов измерения. Указанные моменты существенно усложняются при измерении сложных поверхностей, состоящих из многоэлементных профилей с изменяющейся кривизной, содержащих периодические элементы, труднодоступные участки для измерения [2, 5].

Поэтому разработана информационно-советующая система, включающая решение следующих слабо формализованных задач:

1. схемы установки изделия для возможности измерения всех базовых и функциональных поверхностей без или с минимальным числом переустановок;
2. рациональной схемы расположения контрольных точек на поверхности данного типа с учетом размеров и точности изготовления;
3. оптимального количества контрольных точек из условий обеспечения точности и производительности измерения;
4. субоптимальной траектории перемещения датчика касания по контрольным точкам для одной и многих поверхностей на изделии.

Все указанные задачи решаются на этапе подготовки к процессу измерения на КИМ. Поэтому информационно-советующая система представляет собой отдельную программу, которая используется совместно или независимо от основного программного обеспечения КИМ. Приведенные задачи взаимосвязаны и должны решаться с единых методических позиций. Выбор схемы установки изделия на стол КИМ или в приспособление в дальнейшем определит возможность и удобство измерения как базовых, так и измеряемых поверхностей. Необходимо стремиться к глобальному контролю изделия при одной установке. Схема расположения контрольных точек должна учитывать форму поверхности, возможности КИМ, требования к точности и производительности. Правильный выбор схемы в дальнейшем позволит наилучшим образом минимизировать число контрольных точек и последовательность их обхода датчиком касания. Задача сбора контрольных точек с поверхности (нахождения оптимальной траектории перемещения датчика касания по контрольным точкам для одной и многих поверхностей на изделии) является завершающей и опирается на все остальные.

В основу решения первой задачи положены известные положения технологии машиностроения и модульный принцип. Для этого по данным геометрической модели кодируются поверхности и размерные связи между ними по ряду параметров (тип, точность, размер, координатные связи, назначение в узле и т.д.). Выбираются наиболее точные, протяженные и простые поверхности в качестве базовых. Определяются возможные варианты схем установки и закрепления изделия, обеспечивающих измерение заданных геометрических параметров поверхностей. Затем с привлечением экспертных оценок по одному или нескольким критериям (в первую очередь, производительность контроля) принимаются решения. Данная задача опирается на разработанную классификацию изделий со сложными поверхностями с позиции возможностей их измерения и включает определение показателей, их ранжирование и объединение в группы с помощью кластерного анализа. При этом используется иерархический подход, согласно которому узел представляется в виде совокупности деталей и функциональных связей между ними, деталь – в виде совокупности поверхностей с координатными связями между ними. Сами поверхности разделены на базовые, измеряемые и свободные. Базовые поверхности используют для виртуального базирования (математического выравнивания) детали – определения подвижной системы координат математической модели детали в неподвижной системе координат КИМ. Изменяемые поверхности условно разделены на элементарные (плоскость, цилиндр, сфера, конус, тор) и сложные. Последние в свою очередь делятся на одноэлементные (тела вращения, кинематические тела, оболочки, однозаходные винтовые поверхности) и многоэлементные (лопатки, крыльчатки, многозаходные винтовые поверхности, зубчатые изделия). Измерение происходит путем считывания координат точек контактным методом касания. Все остальные параметры являются расчетными (размер, форма, ориентация, месторасположение, биение). Форма элементарных поверхностей описана такими параметрами, как прямолинейность, плоскостность, круглость, цилиндричность. Ориентация определяется параметрами: параллельность, перпендикулярность, наклон. Месторасположение задается параметрами: позиционирование, концентричность, соосность, симметричность. У сложных поверхностей основными параметрами будут форма заданного профиля или поверхности. Число расчетных параметров у сложных многоэлементных поверхностей может достигать 20, например, для зубчатых изделий.

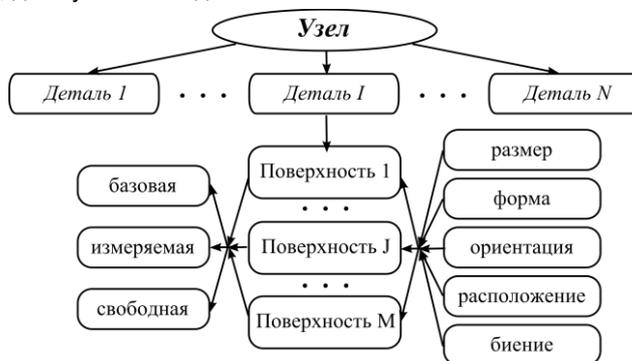


рис. 1 Иерархическая схема координатных связей при измерении

Для решения второй задачи выполнен анализ известных схем расположения контрольных точек для элементарных поверхностей и винтовых, зубчатых и аэродинамических поверхностей. Проведены исследования по минимизации числа измеряемых точек на поверхностях и оптимизации последовательности их обхода датчиком касания. Однако многообразии изделий, поверхностей и особенно методов их изготовления требуют более обширных исследований. Решение задач базируется на статистическом моделировании и задаче коммивояжера. На основе измерения различных типов поверхностей были определены законы распределения составляющих погрешности формы. Статистическое моделирование систематической и случайной составляющих погрешности для различных вариантов расположения контрольных точек на поверхности позволило сформулировать рекомендации. Показано, что при неравномерном расположении число контрольных точек может быть уменьшено в 2-2,5 раза при увеличении погрешности на 5-10%.

Третья задача решена на основе численного моделирования и параметрической оптимизации. За основу были взяты наиболее рациональные схемы расположения контрольных точек, полученные в третьей задаче. В качестве критерия, по которому сформирована целевая функция, выступала производительность в виде собственно числа контрольных точек. Погрешность измерения учитывалась в качестве ограничений задачи. Таким образом решалась нелинейная задача условной параметрической оптимизации.

В рамках четвертой задачи нами предлагается оптимизировать маршрут перемещения датчика касания на основе обобщенной пространственной задачи коммивояжера. Однако при измерении требуется адаптация известной постановки задачи коммивояжера с учетом следующих особенностей. Во-первых, полный маршрут складывается из отдельных перемещений датчика касания по сложным траекториям, которые требуют предварительного расчета. Во-вторых, с увеличением числа точек измерения более нескольких десятков время расчета маршрута значительно увеличивается и может превысить собственно время измерения. Особую сложность для практической реализации представляет именно последнее обстоятельство. Решить задачу можно точными методами (например, методом ветвей и границ) или приближенными методами (эвристическими, например, муравьиной колонии). Известно, что время оптимизации для точных методов представляет собой экспоненциальную функцию, а для метода муравьиной колонии является полиномиальной функцией. Вместе с тем применение стандартного алгоритма муравьиной колонии не всегда дает желаемый результат по точности и производительности, так как не учитывает специфики процесса измерений. Поэтому нами предложен модифицированный адаптивный метод муравьиной колонии для определения оптимального маршрута. Он имеет два отличия от известного: 1) вводится условный критерий сходимости для прерывания поиска маршрута при достижении заданной точности решения, 2) после каждой итерации усиливаются лучшие решения и ослабляются худшие решения. Разработаны математические модели для определения стоимости маршрутов для простых поверхностей и сформулирована методика для сложных поверхностей. Предлагается решение эвристическими методами по критериям точности и производительности.

Рассмотрены приближенные методы решения задачи коммивояжера и использован метод муравьиной колонии. Показано, что его точность близка к методу ветвей и границ при уменьшении времени расчета в 3-15 раз.

Методическое обеспечение для решения слабо формализованных задач измерения изделий со сложными поверхностями на координатно-измерительных машинах выполнено в виде информационно-советующей системы. Сформирована база данных с применением экспертных оценок специалистов ряда предприятий г. Саратова, Волгограда, Самары. Данная система может использоваться дополнительно к основному методическому и программному обеспечению КИМ.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10204)

Литература

1. Кононогов С.А. Концепция обеспечения единства координатных измерений геометрических параметров поверхностей сложной формы / С.А. Кононогов, В.Г. Лысенко, С.Ю. Золотаревский // Приборы. 2008. № 3. С. 1-13.
2. Болотов М.А. Повышение точности оценки отклонения расположения в координатных измерениях профилей лопаток компрессора и турбины газотурбинного двигателя / М.А. Болотов, В.А. Печенин, Н.В. Рузанов // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королёва (национального исследовательского университета). 2014. № 5-3. С. 202-211.
3. Управление авиационно-транспортными системами на основе причинно-следственных деревьев событий / Г.В. Новожилов, А.Ф. Резчиков, М.С. Неймарк, Л.Г. Цесарский, В.А. Кушников, А.С. Богомоллов, Л.Ю. Филимонюк, К.И. Шоломов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2015. № 6. С. 13-17.
4. Яковишин А.С. Алгоритм измерения плоскостности / А.С. Яковишин, О.В. Захаров // Современные проблемы теории машин. 2018. № 6. С. 35-38.
5. Гречников Ф.В. Итерационный метод коррекции радиуса сферического щупа мобильных координатно-измерительных машин при контроле поверхностей вращения / Ф.В. Гречников, А.Ф. Резчиков, О.В. Захаров // Измерительная техника. 2018. № 4. С. 21-24.
6. Сурков И.В. Координатные измерения линейно-угловых параметров зубчатых колес / И.В. Сурков, М.В. Мягкова // Оборудование и инструмент, 2007, № 6. С. 2-6.
7. Технологические основы контроля на координатно-измерительных машинах / Б.С. Бражкин, Н.И. Исаев, А.А. Кудинов, В.С. Миротворский. М.: Издательство «Миттель Пресс», 2014. 203 с
8. Flack D. Measurement good practice guide: CMM measurement strategies. Elseiver, 2001. 87 p.
9. Slavenko M. Stojadinovic, Vidosav D. Majstorovic, Numan M. Durakbasa, Tatjana V. Sibaliija. Ants colony optimization of a measuring path of prismatic parts on a CMM. Metrol. Meas. Syst., 2016, Vol. XXIII, pp. 119-132.