

мальных затратах получать значительный экономический эффект — повысить производительность чистовой обработки, снизить износ инструмента, повысить чистоту обработанной поверхности и качество обработки. Помимо этого, применение демпферов позволяет упростить технологическую оснастку, открыть зону обработки, снизить негативное влияние коробления на точность изготовления. Являясь универсальным средством предотвращения вибраций, демпферы позволяют упростить технологическую подготовку автоматизированного производства маложестких деталей сложной формы.

Список литературы

1. Воронов С.А., Киселев И.А. Комплексная математическая модель динамики пространственного фрезерования по-

датливых сложнопрофильных деталей // Проблемы механики современных машин: сб. ст. 5-ой международной НТК. Улан-Удэ. ВСГУТУ. 2012. С. 89-92.

2. Altintas Y. Modeling approaches and software for predicting the performance of milling operations at MAL UBS // Machining Science and Technology. 2000. 4/3. с. 445-478.
3. Балашов С. М., Губанов Г.А. Система из пневматического демпфера с вакуумным закреплением для предотвращения вибраций деталей малой жесткости при фрезеровании // Материалы XXVI научно-технической конференции по аэродинамике в посёлке им. Володарского. — Жуковский: ЦАГИ, 2015. — С. 99.
4. Болсуновский, С.А., Вермель В.Д., Губанов Г.А., Качарова И.Н., Чернышев Л.Л. Подбор режима фрезерной обработки лопатки аэродинамической модели компрессора ГТД//Полет. 2012.— № 6. С. 37-42.

*Губанов Глеб Анатольевич — канд. техн. наук, младший научный сотрудник,
Вермель Владимир Дмитриевич — д-р техн. наук, начальник научно-технического центра
научно-производственного комплекса,
Деев Константин Александрович — ведущий инженер ФГУП ЦАГИ.
Контактный телефон (495) 556-45-72.
E-mail: glebgubanov@mail.ru*

ПРОГРАММНАЯ КОРРЕКЦИЯ ОБЪЕМНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МНОГОКООРДИНАТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЛАЗЕРНЫХ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В.И. Телешевский, В.А. Соколов (МГУ «СТАНКИН»)

Рассмотрен метод коррекции геометрических погрешностей многокоординатного оборудования (станков, КИМ и приборов) с программным управлением с применением Калмановской концепции «Наблюдения и управления». Для наблюдения за многокоординатной системой используется многофункциональная лазерная информационно-измерительная система (ПИИС), способная измерить разнообразные пространственные функции машины. На основе измерения определенного числа пространственных функций выстраивается карта систематических погрешностей в рабочем пространстве машины (> 10000 точек за 40 с). Предложен новый метод формирования стратегии коррекции по распределению погрешностей в рабочем пространстве машины и на его основе разрабатывается постпроцессор управляющих программ, обеспечивающий минимальные объемные погрешности во всем рабочем пространстве. Приводятся экспериментальные результаты на примере коррекции объемной точности трехкоординатных станков с ЧПУ высоких классов точности.

Ключевые слова: многокоординатные системы, объемная точность, наблюдение, управление, лазерные измерения.

Многокоординатные системы с программно-управляемым перемещением узлов и механизмов лежат в основе современного машиностроения. К ним относится как технологическое оборудование, обеспечивающее формообразование изделий (станки, функционирующие на различных физических принципах), так и измерительные системы (координатно-измерительные машины и приборы), осуществляющие измерение и контроль производимых изделий сложной формы [1].

Современное машиностроение характеризуется рядом принципиально новых тенденций, определяющих его развитие, среди которых интеграция измерительных и технологических операций в едином технологическом процессе. При этом также необходимо отметить вектор на: существенное повышение производительности и точности обработки изделий; постоянное повышение требований к точности изготовления и, как следствие, измерения деталей ма-

шиностроения; все более широкое распространение деталей со сложными геометрическими формами [2]. В связи с этим возрастают требования не только к точности позиционирования отдельных рабочих органов технологического и измерительного оборудования, но и к объемной точности машины в целом, то есть способности точно воспроизводить сложные трехмерные поверхности измерительным наконечником или режущей кромкой инструмента. Количественно объемная точность характеризуется объемной погрешностью [1] — вектором между номинальным (заданным программно) и действительным положением рабочей точки (измерительного наконечника либо режущей кромки инструмента) в произвольной точке рабочего пространства машины.

Объемная точность многокоординатных систем в решающей степени определяется технологией их изготовления и сборки. Однако в метрологии совершенствуется другой метод повышения объемной

Кто берется давать наставления, должен считать себя искуснее тех, кому он их дает: малейшая его погрешность заслуживает порицания.

Рене Декарт

точности, основанный на измерении геометрических погрешностей станка или координатно-измерительных машин (КИМ) с последующей их автоматической компенсацией [1, 2].

Повышению объемной точности способствует совершенствование систем программного управления процессами формообразования и измерения и существенный прогресс в области измерения параметров геометрической точности [3–4]. В настоящее время такие измерения осуществляются многофункциональными лазерными информационно-измерительными системами (ЛИИС). Последние посредством смены отдельных компонентов интерференционной схемы позволяют измерять не только перемещения, но и отклонения от прямолинейности вдоль осей, отклонения от перпендикулярности, угловые отклонения и другие функции геометрических погрешностей в широком диапазоне перемещений (до нескольких десятков метров), бесконтактно, с высокой точностью (до 0,001 мкм), на высокой скорости перемещения рабочих органов (до нескольких м/с). Это позволяет охватить все типоразмеры и все классы точности современного оборудования, включая высшие [3–5]. Совершенствование процессов управления системами и повышение эффективности средств измерения и контроля геометрических параметров открывают принципиально новые возможности для повышения объемной точности многокоординатных систем посредством электронной компенсации погрешностей. Суть этих возможностей базируется на калмановской концепции дуальности процессов управления и наблюдения, разрабатываемых в системной динамике сложных управляемых систем [6].

Повышение объемной точности многокоординатных систем

Во ФГБОУ ВПО МГТУ «СТАНКИН» данная концепция развивается применительно к программно-управляемым многокоординатным технологическим и измерительным системам [7–9]. Рассматривается единство процессов наблюдения и управления. При этом наблюдение рассматривается не в общепринятом в метрологии значении «снятия отсчета», а в смысле процесса системной динамики.

Информационный поток в технологическом процессе имеет две стороны [1, 2, 7–10]: одну, связанную с организацией воздействия на технологическую систему — процесс управления, и вторую — наблюдение, целью которого является построение модели состояния объекта на основе измерения разнообразных

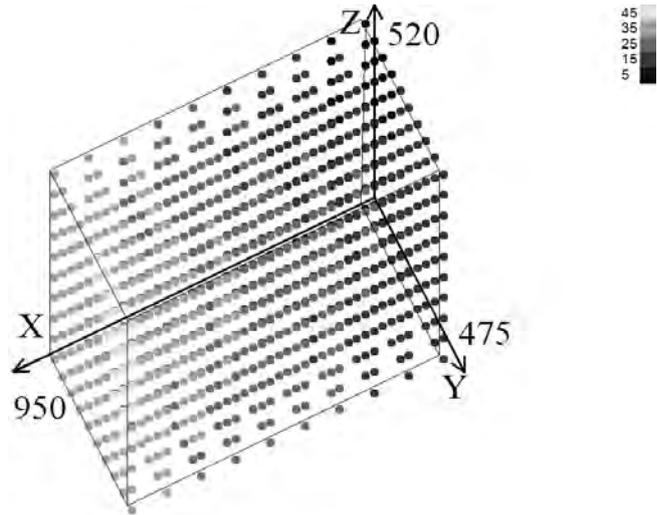


Рис. 1. Распределение объёмной погрешности в рабочем пространстве машины. Цветовая шкала в мкм

пространственных функций погрешности, перечень которых приведен в [1]. В работах [1–5] было показано, что для построения модели состояния в виде карты распределения геометрических погрешностей системы в ее рабочем пространстве необходимо провести измерение большого числа пространственных функций. Так, например, для трехкоординатной системы это число достигает 21 ед., для пятикоординатной системы — > 30 ед. [3–4], для систем с большим числом координат это число возрастает еще значительнее. Однако при наличии высокопроизводительной многофункциональной ЛИИС увеличивающийся объем наблюдения вполне можно реализовать для восстановления модели состояния за разумное время. Таким образом, открывается возможность увеличить объем наблюдения, получить более полную и информационно насыщенную модель состояния и на ее основе осуществить эффективную стратегию коррекции объемной погрешности.

Основные характеристики станка HAAS VF3

Рабочие перемещения по осям X, Y, Z, мм..... 1016, 508, 635
 Точность позиционирования суппорта, мм.....±0,0050
 Повторяемость позиционирования суппорта, мм.....±0,0025

Для составления модели состояния технологической или измерительной системы используется множество методов и подходов, среди которых метод Денавита-Хартенберга, метод описания кинематики твердого тела, кинематики множества твердых тел, методы матричной симуляции. В отдельных статьях рассматриваются не только систематические, но и случайные характеристики точности оборудования. Для построения модели состояния в виде карты распределения геометрических погрешностей машин с горизонталь-

ным столом, реализующим перемещение по осям X и Y, и вертикальной осью Z авторами использован метод описания кинематики твердого тела [1].

В качестве объекта наблюдения и управления был выбран вертикально-фрезерный обрабатывающий центр с тремя управляемыми координатами — станок модели VF3 фирмы HAAS (США). Координатные оси оснащены датчиками линейных перемещений, передающими информацию о перемещении рабочих органов в систему ЧПУ станка.

В [1] приведена методика измерения геометрических погрешностей многокоординатных систем, соответствующая ГОСТ 27843-2006. Согласно этим требованиям, необходимо обеспечить «перебег» рабочих органов станка между прямым и обратным ходом рабочего органа для компенсации люфтов, а также выбрать одинаковое число контрольных позиций для каждой контролируемой оси, но ≥ 5 позиций на каждую ось. Учитывая эти требования и ограниченное время доступности исследуемого станка, для измерений были выбраны следующие позиции рабочих органов вдоль координатных осей с целью определения точностных характеристик станка:

- ось X: 50...950 мм с шагом 100 мм — 10 точек;
- ось Y: 25...475 мм с шагом 50 мм — 10 точек;
- ось Z: 25...520 мм с шагом 55 мм — 10 точек.

Для проведения измерений написаны программы для системы ЧПУ станка, обеспечивающие перемещение рабочих органов станка в указанные выше положения и остановку для завершения переходных процессов перед снятием отсчета. Результат построения модели состояния станка — карты погрешностей — представлен на рис. 1.

В процессе работы со станком выяснилось, что система ЧПУ станка закрыта и непосредственное введение поправок в нее без надлежащего уровня доступа невозможно. В этих условиях для управления точностью авторами было выработано альтернативное решение, основанное на методе коррекции погрешностей, который сводится к изменению координат, в которые система приводов машины выводит измерительный наконечник или режущую кромку инструмента. Данный метод позволяет путем простого смещения начала координат на заранее определенную величину скомпенсировать аддитивную и большую часть накопленной мультипликативной погрешности по каждой из координатных осей в некоторой (достаточно большой) зоне рабочего пространства.

Метод коррекции погрешностей

Выберем произвольные точки рабочего пространства (рис. 2): точку A с координатами (l, m, p) и точку B с координатами (r, s, t) . Вектора погрешности в точках A и B определяются значениями $\Delta x_{(l,m,p)}, \Delta y_{(l,m,p)}, \Delta z_{(l,m,p)}$ и $\Delta x_{(r,s,t)}, \Delta y_{(r,s,t)}, \Delta z_{(r,s,t)}$ соответственно. Выражения для определения $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ приведены в формулах (2–4) в [9]. Если вычесть из значений погрешностей во всех исследуемых точках значения погрешности в точке A

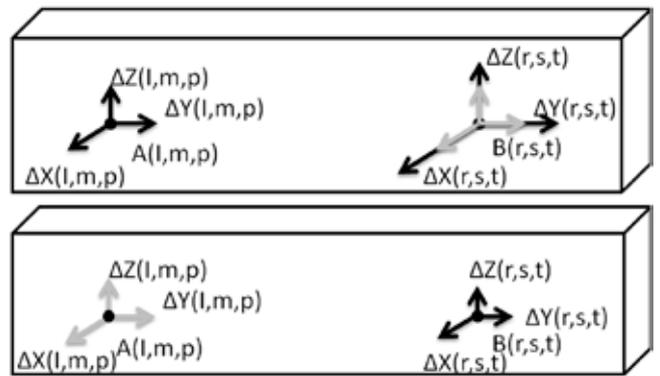


Рис. 2. Иллюстрация метода коррекции погрешностей. Черным цветом показаны вектора, соответствующие погрешностям в точках, отличных от A, серым цветом – вектора погрешности в точке A, которые вычитаются из соответствующих векторов погрешностей всех точек

(например, сместив начало системы координат станка), то значения погрешностей в точке A обнулятся, то есть $\Delta x_{(l,m,p)} = 0, \Delta y_{(l,m,p)} = 0, \Delta z_{(l,m,p)} = 0$, а значения погрешностей в точке B примут вид:

$$\Delta x_{(r,s,t)}^{ck} = \Delta x_{(r,s,t)} - \Delta x_{(l,m,p)}, \tag{1}$$

$$\Delta y_{(r,s,t)}^{ck} = \Delta y_{(r,s,t)} - \Delta y_{(l,m,p)}, \tag{2}$$

$$\Delta z_{(r,s,t)}^{ck} = \Delta z_{(r,s,t)} - \Delta z_{(l,m,p)}. \tag{3}$$

Таким образом, модули погрешности в точках A и B имеют вид:

$$\Delta A = 0; \tag{4}$$

$$\Delta B = \sqrt{(\Delta x_{(r,s,t)}^{ck})^2 + (\Delta y_{(r,s,t)}^{ck})^2 + (\Delta z_{(r,s,t)}^{ck})^2}. \tag{5}$$

Перебирая все выбранные точки рабочего пространства и последовательно их обнуляя, найдем такую точку, для которой сумма модулей скорректированных погрешностей минимальна:

$$\sum_i \Delta F_i \rightarrow \min, \tag{6}$$

где $i=1,.. N$; N — число измеренных точек в рабочем пространстве; F — произвольная точка в пространстве.

Для реализации метода коррекции необходимо выполнить следующую последовательность действий.

1. В разработанное ПО загружаются результаты лазерных измерений погрешности;

2. По приведенному в [1] математическому аппарату разработанное ПО производит расчет координатных составляющих вектора полной геометрической погрешности для всех исследуемых точек рабочего пространства.

3. Начало координат в системе координат станка смещается по всем координатным осям на величину погрешностей по соответствующим осям, рассчитанным для некоторой k -й точки рабочего пространства. Такое смещение позволяет полностью скомпенсировать объемную погрешность в заданной точке.

Заключение

Предложенный метод коррекции сводится к оптимальному поиску «нулевой точки» рабочего пространства, учитывающей геометрические объемные погрешности данной конкретной машины и обладающей тем свойством, что объемные погрешности машины минимальны в наибольшем объеме рабочего пространства.

Данная работа финансировалась Министерством образования и науки РФ в рамках государственного задания на выполнение научных исследований (НИР № 1883). Работы проведены на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН» при финансовой поддержке государства в лице Минобрнауки РФ. Соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004.

Список литературы

1. *Телешевский В.И., Соколов В.А.* Лазерная коррекция геометрических погрешностей многокоординатных систем с программным управлением // Измерительная техника. 2012. № 5. С. 33-37.
2. *Grigoriev S.N., Teleshevsky V.I., Sokolov V.A.* Volumetric Geometric Accuracy Improvement for Multi-Axis Systems Based on Laser Software Error Correction. International Conference on Competitive Manufacturing «COMA`13». 2013. Stellenbosch, South Africa. pp. 301-306.
3. *Schwenke H. e. a.* Geometric error management and compensation of machines – an update // Ann. CIRP. 2008. N 57. pp. 660-675.
4. *Петров П.С., Феофанов А.Н., Рыбаков А.В.* Создание базы знаний при разработке универсально-сборных приспособлений для станков с ЧПУ // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2016. № 1 (36). С. 17-20.
5. *Серков Н.А.* Точность многокоординатных машин с ЧПУ: Теоретические и экспериментальные основы. М.: Ленанд. 2015. 304 с.
6. *Воронов А.А.* Введение в динамику сложных управляемых систем. М.: Наука. 1985. 351 с.
7. *Пучков В.П., Схиртладзе А.Г., Эварт Т.Е., Прис Н.М.* Использование методов численного анализа для исследования точностных характеристик станков с ЧПУ // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2015. № 2 (33). С. 68-72.
8. *Телешевский В.И., Соколов В.А.* Лазерная измерительная информационная система для повышения точности многокоординатных станков с ЧПУ // Вестник МГТУ «Станкин». 2011. № 4. С. 8-10.
9. *Телешевский В.И., Григорьев С.Н., Андреев А.Г. и др.* К проблеме построения прецизионных станков для изготовления изделий с нанометровой точностью // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2015. № 3(34), С. 9-14.
10. *Телешевский В.И., Григорьев С.Н., Андреев А.Г. и др.* Метрологическая аттестация лазерных микроскопов на основе принципов модуляционной интерферометрии с управляемым фазовым сдвигом // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2015. № 3(34). С. 67-75.

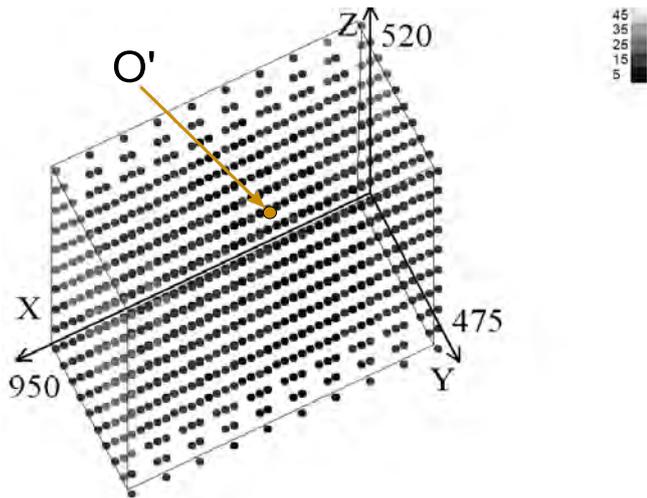


Рис. 3. Распределение объемной погрешности в рабочем пространстве машины после проведения коррекции. Цветовая шкала в мкм. Точка O' является оптимальным началом координат пространства, относительно которого сумма модулей погрешностей во всех точках минимальна

4. В результате шага 3 в остальных точках рабочего пространства координатные составляющие объемной погрешности изменяются на величину сдвига начала координат, что приводит к изменению распределения полной геометрической погрешности в рабочем пространстве машины, то есть как к уменьшению, так и к увеличению значения полной геометрической погрешности во всех точках рабочего пространства машины.

5. Шаги 3–4 повторяются для каждой i-й точки рабочего пространства. Результатом такого перебора является нахождение такой j-й точки, при внесении коррекции по которой суммарное значение модулей объемной погрешности для всех точек рабочего пространства минимально, согласно (6).

6. Условие (6) позволяет получить минимальную погрешность позиционирования в максимальной зоне рабочего пространства машины.

7. Начало координат в системе ЧПУ станка сдвигается на величину погрешности в j-й точке из пункта 7.

Пример коррекции погрешностей по такому методу представлен на рис. 3. Аналогично результатам, показанным в [1], было найдено оптимальное начало координат станка. Далее, посредством сдвига начала координат были введены коррекции погрешностей во всех точках рабочего пространства станка. После внесения коррекции были проведены повторные измерения 21 пространственной функции погрешности станка. Результаты измерения показали, что погрешности во всех точках станка отличаются от расчетных не более чем на 3%. При этом малые погрешности (< 5 мкм) заняли максимальную долю рабочего пространства машины — >80% пространства, по сравнению с 20% пространства до коррекции.

Телешевский Владимир Ильич — д-р техн. наук, проф. кафедры «Измерительные информационные системы и технологии», Соколов Владимир Александрович — аспирант ГОУ ВПО МГТУ «Станкин». Контактный телефон (495) 457-43-36 E-mail: VASokolov-stankin@yandex.ru