РАЗДЕЛ 2. ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ И МАТЕРИАЛЫ

Разработка программного обеспечения для расчета пространственной размерной цепи

к.т.н. доц. Анкин А.В., Кузьминский Д.Л.
МГТУ «МАМИ»
(495) 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. В статье рассматривается разработанный программный комплекс, позволяющий выполнить моделирование конструкции в программе «Solid Works» и рассчитать пространственные размерные цепи. Функциональные возможности программного комплекса проиллюстрированы на конкретных примерах.

Ключевые слова: пространственные размерные цепи; пространственная точность; конечные элементы; программное обеспечение; моделирование; расчеты; повышение точности обработки.

Работа выполнена в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг. по теме: «Определение пространственной точности металлорежущих станков и разработка методов ее обеспечения» (Госконтракт 16.740.11.0439) и «Разработка средств обеспечения жизненного цикла технологических систем и инструмента для процессов энергосберегающей комбинированной обработки в автомобилестроении и машиностроении» (Госконтракт № П-2485).

Как известно, на сегодняшний день ни одна программа не позволяет произвести расчет пространственной размерной цепи. В то же время без применения ЭВМ произвести такие расчеты становится затруднительным. Для решения этой задачи был разработан программный комплекс РПРЦ (расчет пространственной размерной цепи). Данный комплекс построен по модульному принципу: модули позволяют охватить весь процесс проектирования и работы оборудования - от чертежа, расчета и моделирования проектируемого оборудования до контроля его выходных параметров в процессе производства. Структура данного комплекса представлена на рисунке 1.

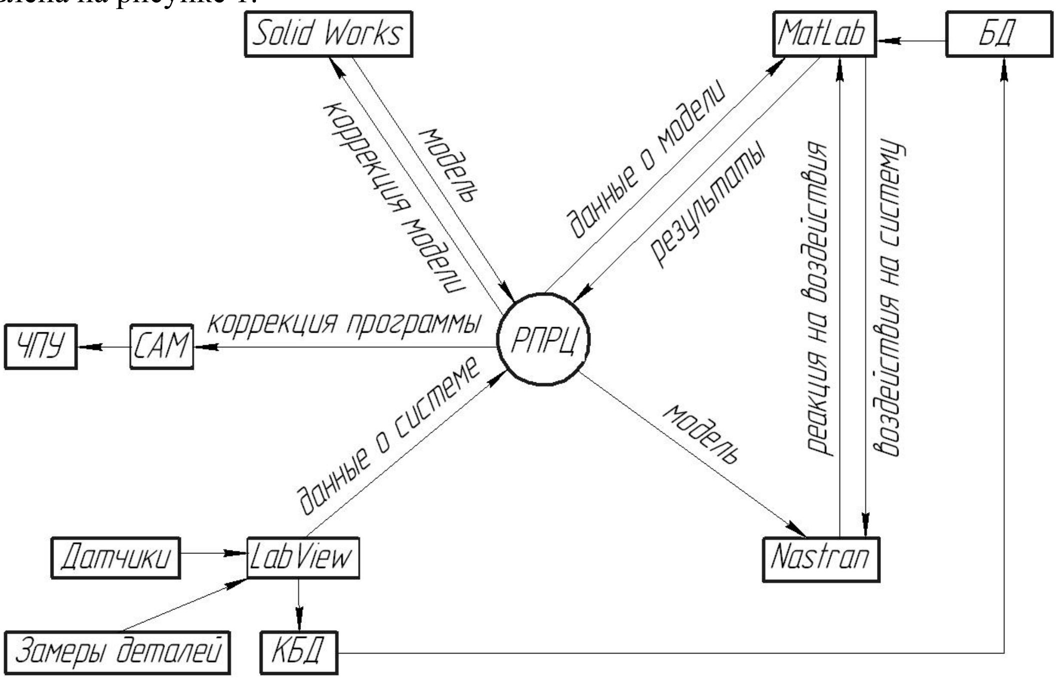

Рисунок 1 - Структурная схема РПРЦ

Из структурной схемы РПРЦ видно, что изначально модель будущей конструкции проектируется в программе Solid Works. Затем полученная модель передается через РПРЦ в расчетную программу Nastran, где с помощью виртуального эксперимента происходит решение всех контактных и кинематических задач. Для проведения расчета данные о воздействии на систему Nastran получает из программы MatLab.

MatLab, в свою очередь, получает исходные данные об оборудовании из РПРЦ, формирует возмущающие воздействия на оборудование и при помощи баз данных (БД) создает математическую расчетную модель пространственной размерной цепи. После передачи данных для расчета в Nastran и получения данных о реакции системы на воздействия, MatLab рассчитывает пространственную размерную цепь и передает данные в РПРЦ.

На основании математических вычислений производится определение допусков на составляющие звенья пространственной размерной цепи. На последнем этапе данные о допусках и пространственной размерной цепи из РПРЦ возвращаются в модель Solid Works. Таким образом, происходит в автоматическом режиме изменение полей допусков и размерных цепей деталей, участвующих в формировании точности замыкающих звеньев оборудования.

После производства оборудования и установки его на предприятии добавляются модули Lab View и CAM. Модуль Lab View при помощи датчиков контролирует работу оборудования и через РПРЦ передает данные о характеристиках оборудования в MatLab для виртуального анализа процесса обработки деталей. На основании результатов анализа РПРЦ вырабатывает рекомендации по коррекции управляющей программы обработки для передачи этих данных в модуль CAM. В модуле CAM происходит формирование скорректированной программы и передача ее в систему ЧПУ станка. Так же при помощи корреляции данных Lab View и замеров обработанных деталей формируются данные коррекции базы данных (КБД) размерных цепей. Все это способствует увеличению точности позиционирования рабочих органов оборудования как существующего, так и проектируемого (поскольку система передает корректирующее воздействие в Solid Works).

За счет того, что увеличивается точность позиционирования узлов оборудования, входящего в обрабатывающий комплекс, увеличивается и точность обработки деталей на данном комплексе.

Для расчетов отклонений нагрузок и, как следствие, допусков, использовалась математическая зависимость пространственной размерной цепи. Чаще всего получаемые на основе математического моделирования скалярные и векторные функции взаимосвязи являются нелинейными зависимостями. При этом нередко аналитические представления этих функций являются довольно сложными выражениями, которые трудно применить для вывода основных уравнений размерных цепей. Вследствие этого для использования функциональных зависимостей в качестве базы для вывода основных уравнений размерных цепей их выражения должны быть упрощены. Одним из способов такого упрощения является их приближение более простыми функциями и, в частности, их замена линейными аналогами. Для аппроксимации нелинейной функции взаимосвязи ее линейным аналогом необходимо воспользоваться формулой Тейлора. Данный метод аппроксимации в этом случае обладает рядом преимуществ по сравнению с другими подходами [4].

Линейная аппроксимация нелинейной векторной или скалярной функции векторного случайного аргумента состоит в замене исследуемой функции на ее линейный аналог, который в данном случае является линейным слагаемым $L(X)$ или $\overline{L}(\overline{X})$ в формуле Тейлора. Для скалярной функции случайного аргумента это позволит записать

$$\varphi(\overline{X}) \cong L(\overline{X}). \qquad (1)$$

Для векторной функции случайного аргумента данное утверждение позволяет предположить, что

$$\overline{\varphi}(\overline{X}) \cong \overline{L}(\overline{X}), \qquad (2)$$

$$Y = \varphi(\overline{X}), \tag{3}$$

$$\overline{Y} = \varphi(\overline{X}). \tag{4}$$

Формула Тейлора дает возможность представить исходную функцию в виде суммы, состоящей из многочлена Тейлора и остаточного члена. Применительно к нелинейной скалярной функции случайного векторного аргумента (3) формула Тейлора изображает исходную функцию как сумму линейного приближения $L(\overline{X})$ и нелинейного остаточного члена $R(\overline{X},\theta)$, т.е. в виде:

$$\varphi(\overline{X}) = L(\overline{X}) + R(\overline{X},\theta) = \varphi(\overline{X}_0) + d\varphi(\overline{X}_0) + R(\overline{X},\theta), \tag{5}$$

где: $R(\overline{X},\theta) = \dfrac{1}{2}\alpha^2\varphi(\overline{X},\theta), \qquad 0 \le \theta \le 1$.

Формула Тейлора для нелинейной векторной функции случайного векторного аргумента (4) состоит из линейного слагаемого $\overline{L}(\overline{X})$ и нелинейного остаточного члена $\overline{R}(\overline{X},\overline{\theta})$. В результате данную функцию можно представить в следующем виде:

$$\overline{\varphi}(\overline{X}) = \overline{L}(\overline{X}) + \overline{R}(\overline{X},\overline{\theta}) = \overline{\varphi}(\overline{X}_0) + d\overline{\varphi}(\overline{X}_0) + \overline{R}(\overline{X},\overline{\theta}), \tag{6}$$

где: $\overline{R}(\overline{X},\overline{\theta}) = \dfrac{1}{2}\alpha^2\overline{\varphi}(\overline{X},\overline{\theta}), \qquad \overline{\theta} = (\theta_j), \qquad 0 \le \theta_j \le 1, \quad j = \overline{1,m}$.

Точкой разложения $\overline{X} = \overline{X}_0$ в формуле Тейлора в общем случае может быть любая точка из области определения функции. С точки зрения решения задач, связанных с расчетами точности машин, такой точкой должна быть точка, определяющая наивысшее качество исследуемого объекта. Данное условие делает точку математического ожидания при применении формулы Тейлора точкой разложения, т.е. $\overline{X}_0 = M\overline{X}$. В результате осуществления центрирования случайных величин $\overline{X}$ погрешности координат $\Delta\overline{X} = \Delta X_i$, $i = \overline{1,n}$ отсчитываются от значений математического ожидания $M\overline{X} = MX_i$, $i = \overline{1,n}$ вектора $\overline{X}$ [4].

Определим значения первого и второго дифференциалов для скалярной и векторной функций в формулах (5) и (6). На основе функционального анализа или с помощью выполнения непосредственного дифференцирования векторных величин, что подробно описано в работе [4], можно установить структуру данных дифференциалов. Дифференциал первого порядка скалярной функции имеет следующий вид:

$$d\varphi(\overline{X}) = \overline{g}^T(\overline{X})d\overline{X}, \tag{7}$$

где: $\overline{g}(\overline{X})$ – вектор-столбец градиента скалярной функции, составленный из первых частных производных данной функции.

Дифференциал второго порядка скалярной функции можно представить следующим образом:

$$d^2\varphi(\overline{X}) = d\overline{X}^T H(\overline{X},\theta)d\overline{X}, \tag{8}$$

где: $H(\overline{X},\theta)$ – плоская (обычная) матрица Гессе скалярной функции, образованная из вторых частных производных данной функции.

Таким же образом можно получить дифференциал первого порядка векторной функции. Этот дифференциал имеет следующий вид:

$$d\overline{\varphi} = J(\overline{X})d(\overline{X}), \tag{9}$$

где: $J(\overline{X})$ – плоская (обычная) матрица Якобиана векторной функции, образованная из первых частных производных данной функции.

Дифференциал второго порядка можно изобразить следующим образом:

$$d^2\overline{\varphi} = d\overline{X}^T S(\overline{X},\overline{\theta}) d\overline{X}\,, \qquad (10)$$

где: $S(\overline{X},\overline{\theta})$ – пространственная матрица Соколова векторной функции, образованная из вторых частных производных данной функции.

После определения алгебраической структуры первого и второго дифференциалов в выражениях линейной аппроксимации скалярной и векторной функций взаимосвязи слагаемые в формуле Тейлора можно представить в векторно-матричном виде. В результате формулу Тейлора для приближения скалярной функции случайного векторного аргумента можно изобразить следующим образом:

$$Y = \varphi(M\overline{X}) + \overline{g}^T(M\overline{X})\Delta\overline{X} + 1/2\cdot\Delta\overline{X}^T H(\overline{X},\theta)\Delta\overline{X}\,, \qquad (11)$$

где: Y – случайная скалярная величина как значение скалярной функции;

$M\overline{X}$ – значение аргумента $\overline{X}$ (математическое ожидание случайного аргумента), в котором определяется линейное приближение функции;

$\Delta\overline{X} = \overline{X} - M\overline{X}$ – погрешность аргумента;

$(\overline{X},\theta) = M\overline{X} + \theta(\overline{X} - M\overline{X})$, $0 \le \theta \le 1$ 0 – значение аргумента, в котором определяется остаточный член приближения функции.

В результате линейное приближение скалярной функции взаимосвязи в векторно-матричном представлении имеет следующий вид:

$$Y = \varphi(M\overline{X}) + \overline{g}^T(M\overline{X})\Delta\overline{X}\,. \qquad (12)$$

Данное выражение можно представить в скалярных величинах. Оно имеет следующий вид:

$$Y \cong \varphi(M\overline{X}) + \sum_{j=1}^{n} g_i \Delta X_i\,, \qquad (13)$$

где: $g_i, \Delta X_i$ – координаты векторов градиента и погрешностей аргумента.

Аналогичным образом формулу Тейлора для векторной функции случайного аргумента можно представить в векторно-матричном виде следующим образом:

$$\overline{Y} = \overline{\varphi}(M\overline{X}) + J(M\overline{X})\Delta\overline{X} + 1/2\cdot\Delta\overline{X}^T S(\overline{X},\overline{\theta})\Delta\overline{X}\,, \qquad (14)$$

где: $\overline{Y}$ – случайная векторная величина как значение векторной функции;

$(\overline{X},\overline{\theta}) = \overline{X}_0 + \overline{\theta}(\overline{X} - \overline{X}_0)$, $\overline{\theta} = (\theta_j)$, $0 \le \theta_j \le 1$, $j = 1, m$ – значение аргумента, в котором определяется остаточный член приближения функции.

На основании этой формулы линейное приближение векторной функции взаимосвязи в векторно-матричном виде можно представить следующим образом:

$$\overline{Y} = \overline{\varphi}(M\overline{X}) + J(M\overline{X})\Delta\overline{X}\,. \qquad (15)$$

Данную зависимость можно выразить через скалярные величины и получить следующее выражение:

$$\overline{Y} \cong \overline{\varphi}(M\overline{X}) + \sum_{j=1}^{n} J_{ij}\Delta X_i\,,\ j = 1, m\,. \qquad (16)$$

Переход от скалярной и векторной функций взаимосвязи к их линейным аналогам осуществляется с определенной ошибкой. Ошибки аппроксимации данных функций можно оценить с помощью нелинейных слагаемых в формуле Тейлора, т.е. соответственно $R(\overline{X},\theta)$, $\overline{R}(\overline{X},\overline{\theta})$. Более подробно этот вопрос рассмотрен Карповым Л.И. и Соломатиным А.Г. [5].

Таким образом, изменение полей допусков и размерных цепей деталей, участвующих в формировании точности замыкающих звеньев оборудования, происходит в автоматическом режиме.

Литература

1. Михайлов В.А. Системный подход к модульному автоматизированному проектированию гибких производственных комплексов. М. Московский Автомеханический Институт. 1985г.
2. Михайлов В.А. Моделирование неоднородных технологических систем при композиционном проектировании. В сб. тезисов международного научного симпозиума, посвящённого 135-летию МГТУ МАМИ. Москва, МАМИ. 2000 г.
3. Проников А.С. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: Справочник-учебник. В 3-х т. Т. 1: Проектирование станков. М. Машиностроение. 1994 г.
4. Карепин П.А. Математические основы теории размерных цепей при технологическом и метрологическом обеспечении качества изделия. Монография. М.: Информагротех 1999\
5. Карпов Л.И. Соломатин А.Г. Теория и практика расчета размерных цепей. М.: МАДИ, 1984 г.

Анализ процесса образования погрешности обработки в технологической системе комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием нежестких деталей типа полый цилиндр

Ветрова Е.А.
МГТУ «МАМИ»
(495) 223-05-23, доб. 1327

Аннотация. На основании проведенного исследования установлено, что процесс формирования погрешности обработки нежестких деталей типа полый цилиндр зависит от погрешностей установки, погрешностей статической и динамической настройки технологической системы комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием.

Ключевые слова: *комбинированная обработка, погрешность обработки, устройство для КРДО, технологическая система, нежесткие детали типа полый цилиндр, точность детали.*

Как известно, многообразие применяемых методов обработки, их кинематические и динамические характеристики, а также особенности конструкций элементов технологических систем, реализующих данные методы, обеспечивают должное качество обработки деталей. В технологической системе комбинированной обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием (далее КРДО) точность обработки нежестких деталей типа полый цилиндр достигается введением детали в размерные и кинематические цепи устройства для КРДО и токарного станка посредством установки данной детали на базовых поверхностях переднего и заднего центров; статической настройкой взаимоположения конструкционных элементов устройства для КРДО; статической настройкой взаимоположения детали и рабочих элементов устройства для КРДО; реализацией процесса КРДО, обеспечивающего единство технологических баз [1].

В процессе обработки нежесткой детали типа полый цилиндр возникают погрешности, первоисточниками которых являются погрешности установки, погрешности статической настройки и погрешности динамической настройки технологической системы КРДО, то есть систематические и стохастические погрешности настройки [2, 3].

Погрешность размера обработанной детали – это векторная сумма погрешностей установки, погрешностей статической и динамической настройки, а также погрешностей непосредственно самой заготовки: эксцентриситета, концентричности и непостоянной толщины стенок заготовки. В рассматриваемом случае комбинированной режуще-деформирующей