УДК 628.543.32

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ УПРУГИХ СИСТЕМ В ТЕХНИКЕ

Бохонский А.И., Фалалеев А.П., Круговой А.Н. *(СевНТУ, г.Севастополь, Украина)*
e-mail:a_falaleev@mail.ru

Аннотация. *В статье рассмотрены два типа задач оптимального управления упругим деформированием нежестких объектов: непрерывным деформируемым состоянием нежестких заготовок при автоматической токарной обработке; оптимальным переносным движением упругих систем.*

Ключевые слова: *нежесткая заготовка, деформируемое состояние, оптимальное движение.*

1.Введение

Оптимальное управление упругим деформированием нежестких объектов объединяет целую группу прикладных задач, использующих сходные принципы и алгоритмы решения. Оной из задач выбрана задача оптимального непрерывного деформирования нежестких заготовок при автоматической токарной обработке.

Деформации нежестких заготовок в процессе обработки – главная причина образования погрешностей формы и размеров детали. Одним из путей решения проблемы является применение процессов обработки с управляемым деформированием заготовок, в связи с чем разработка системы управления, позволяющей компенсировать деформации заготовки сложной конфигурации, является актуальной задачей [1]. Теоретический и практический интерес представляет разработка моделей управляемого деформирования и совершенствование САУ деформациями нежестких заготовок переменного сечения с использованием деформационных критериев качества и ограничений.

В исследованиях реализуется концепция управления деформированием заготовки по медленному движению (при изменении положения силы резания) и по быстрому движению (подавление колебаний, возникающих около медленно изменяющегося положения квазистатического равновесия заготовки).

Второй задачей оптимального управления рассмотрено управление оптимальным переносным движением упругих систем. Оптимальное перемещение объектов на роботизированном технологическом участке предполагает транспортирование объектов на РТУ телескопическим и антропоморфным абсолютно жесткими манипуляторами по заданной траектории [2]. Для нежестких объектов с сосредоточенными и распределенными массами использовались управления движением, которые обоснованы с привлечением теории моментов.

2. Создание оптимального управления деформированием

Задача управления деформированием (управление по медленному движению) состоит в следующем. Методами прикладной механики описано деформируемое состояние заготовки с учетом силы резания при ее медленном движении вдоль заготовки и подлежащих определению сосредоточенных силовых управляющих воздействий. Задан деформационный критерий качества (критерий оптимальности) и ограничения (в виде равенств) на деформируемое состояние.

Для нежесткой заготовки постоянного либо переменного сечения (закрепленной в патроне или в центрах – жестко или шарнирно) и медленно движущейся нагрузке (силе резания) находятся такие управляющие сосредоточенные силовые воздействия (управления в виде сил либо моментов), которые обеспечивают экстремум критерия качества с учетом ограничений .

В случае, например, управления по медленному движению для параболического изменения поперечного сечения нежесткой заготовки, управляющих воздействий в виде правого опорного момента $M_*(a)$ и силы $P_*(a)$, приложенной посредине заготовки, полная энергия в непрерывно управляемом деформируемом состоянии при произвольном положении P_y имеет вид

$$Э = \frac{1}{2}\int_0^l EI(x)[W''(x)]^2 dx + P_y W(a) - P_* W(l/2) + M_* W'(l) = \min, \qquad (1)$$

где E – модуль упругости; $I(x)$ – переменный осевой момент инерции поперечного сечения заготовки; $W(l/2)$ – перемещение в сечении с координатой $l/2$; $W''(x) \cong 1/\rho$ – кривизна изогнутой оси в сечении с координатой x. Выражение для $W(x)$, обеспечивающее минимум (1), взято в виде полинома, удовлетворяющего краевым условиям ($W(0) = 0, W(l) = 0$): $W(x) = \sum_{i=1}^{n} b_i x^i$. Коэффициенты b_i найдены после подстановки (2) в (1) и решения системы линейных алгебраических уравнений: $\partial Э/\partial b_i = 0$, ($i = 1 \ldots 5$).

3. Основные результаты управления деформированием

Созданы новые математические модели управления упругими перемещениями нежестких осесимметричных заготовок с различными законами изменения поперечного сечения по длине.

В управлении по быстрому движению (с обратной связью) найдены коэффициенты усиления, обеспечивающие снижение уровня колебаний заготовки за минимальное время. В модели управления колебаниями в общем случае учитывается упругая система (нежесткая заготовка как колебательное звено), процессы резания и трения. Для определения значений коэффициентов ПИД - регулятора применялись методы синтеза оптимальных регуляторов. При использовании обратной связи существенно снижается влияние возмущений, повышается качество работы системы в переходном и установившемся режимах.

Впервые обоснована возможность реализации управляющих силовых воздействий в виде серии импульсов одного знака, обеспечивающих врезание инструмента с равным единице динамическим коэффициентом.

Экспериментальные исследования компенсации упругих перемещений заготовок подтвердили повышение точности обработанной поверхности на 3 квалитета при сокращении времени на обработку в 1,5 и более раз. Оптимальное силовое управление позволяет по сравнению с люнетом в 2 и более раз снизить упругое перемещение заготовки непосредственно по направлению P_y либо полностью устранить его.

3. Задача оптимального переносного движения упругих систем

Теоретическое обоснование оптимального переносного движения иллюстрируется на примере упругой системы с одной степенью свободы. Дифференциальное уравнение переносного движения

$$\frac{d^2S_e}{dt^2}=U_e,$$

где S_e – перемещение; U_e – управление. Краевые условия для переносного движения, отвечающие цели управления:

$$S_e(0)=0, \qquad \dot{S}_e(0)=0, \qquad \ddot{S}_e(0)=0;$$

$$S_e(T)=L, \qquad \dot{S}_e(T)=0, \qquad \ddot{S}_e(T)=0,$$

где T – общее время оптимального переносного движения.

Терминальное управление для перемещения упругой системы из исходного в конечное состояние абсолютного покоя

$$u_e(t)=\frac{2\pi L}{T^2}\sin^{2n_1-1}(\omega t/n), \qquad (2)$$

где L – расстояние, на которое перемещается упругая система; T – общее время движения; $T=2\pi/p$; $p=\omega/n$; n = 2, 3, 4, …; n_1 = 1, 2, 3, 4, …; ω – частота собственных колебаний. В частности при n_1 = 1 из (2) следует управление:

$$u_e(t)=Lp^2\sin pt/2\pi\ . \qquad (3)$$

После интегрирования (3) выражения для скорости и перемещения с учетом краевых условий ($s_e(0)=0$, $v_e(T)=0$, $s_e(T)=L_*$) принимают вид:

$$v_e(t)=-\frac{Lp}{2\pi}\cos pt+\frac{Lp}{2\pi}, \qquad s_e(t)=-\frac{L}{2\pi}\sin pt+\frac{Lpt}{2\pi}. \qquad (4)$$

Графики $u_e(t)$, $v_e(t)$, $s_e(t)$ изображены на рис. 1.

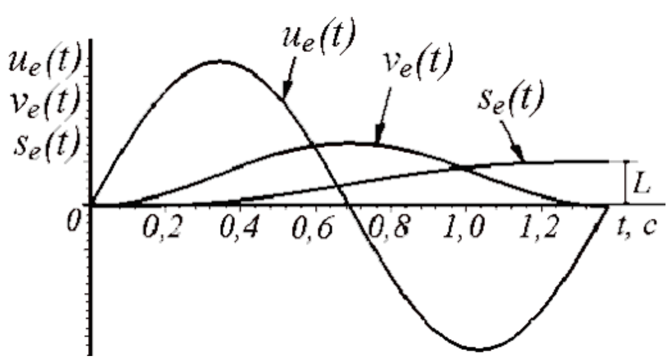

Рис. 1. Графики $s_e(t)$, $v_e(t)$ и $u_e(t)$ в переносном движении

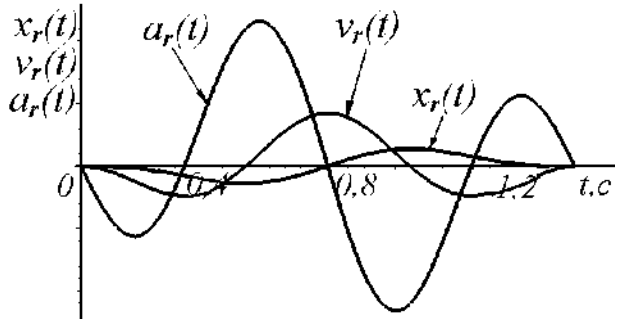

Рис. 2. Графики перемещения $x_r(t)$, скорости $v_r(t)$ и ускорения $a_r(t)$ в относительном движении

Сложное движение рассматривается на примере системы с одной степенью свободы. Абсолютное движение – по отношению к неподвижной системе координат – описывается векторным уравнением: $m\vec{a} = \vec{U}$, где $\vec{a} = \vec{u}_e + \vec{a}_r$; $\vec{a}_r$ – ускорение в относительном движении. В проекции на подвижную ось x_r, связанную с основанием упругого осциллятора, после преобразований дифференциальное уравнение относительного движения так:

$$\frac{d^2 x_r}{dt^2} + \omega^2 x_r = -u_e(t), \tag{5}$$

где $\omega^2 = c/m$; c – коэффициент жесткости; m – сосредоточенная масса; $u_e(t) = U/m$ – управление на единицу массы. Решение уравнения (4) и его производные (графики изображены на рис.2):

$$x_r(t) = \frac{Lp^3 \sin(\omega t)}{2\omega\pi(\omega^2 - p^2)} + \frac{Lp^2 \sin(pt)}{2\pi(p^2 - \omega^2)}; \qquad v_r(t) = \frac{Lp^3 \cos(\omega t)}{2\pi(\omega^2 - p^2)} + \frac{Lp^3 \cos(pt)}{2\pi(p^2 - \omega^2)};$$

$$a_r(t) = -\frac{1}{2}\frac{Lp^3 \omega \sin \omega t}{\pi\left(\omega^2 - p^2\right)} - \frac{1}{2}\frac{Lp^4 \sin pt}{\pi\left(p^2 - \omega^2\right)} \tag{6}$$

Из графиков (рис. 1, 2) следует, что в момент времени T достигается абсолютный покой.

Манипуляторы конечной жесткости (минимальной массы) обеспечивают снижение металлоемкости и энергозатрат; они могут применяться при производстве печатных плат, транспортировании и сборке как мелких объектов, так и крупногабаритных деталей малой массы и жесткости в земных условиях и в космическом пространстве. Актуальны исследования функционирования манипуляционных систем конечной жесткости, в том числе – оптимального управления движением манипуляторов на роботизированных технологических участках (РТУ).

При транспортировании за минимальное время нежестких деталей манипуляторами конечной жесткости возникают не только колебания манипуляторов, но и транспортируемых объектов. Актуальны исследования оптимальных управлений перемещением объектов манипуляторами с устранением их колебаний в конце движения (без потери точности позиционирования и производительности). Основные задачи в таком случае могут быть сформулированы следующим образом:

a) Оптимальное управление перемещением жесткого и нежесткого объектов жесткими манипуляторами; управление переносным движением манипуляторов конечной жесткости как систем с конечным числом степеней свободы.

b) Управление переносным движением (из состояния покоя) нежестких манипуляторов, обеспечивающее достижение требуемой переносной скорости объекта манипулирования с устранением колебаний в конечном состоянии; исследование поступательного и вращательного оптимального движения упругих манипуляторов с распределенными массами; оптимальное перемещение объекта из возмущенного состояния в конечное состояние абсолютного либо относительного покоя центра масс схвата с грузом.

c) Моделирование оптимизации транспортирования объектов по заданным и определяемым траекториям на технологическом участке с манипулятором.

3. Заключение

Исследовано управление перемещением объектов (по назначенным либо найденным траекториям) упругими манипуляторами с конечным числом степеней свободы с устранением относительного перемещения (колебаний) схвата в конечной точке при достижении заданной скорости переносного движения. Найдены оптимальные управления поступательным и вращательным движением нежесткого манипулятора как системы с распределенными параметрами, при которых колебания отсутствуют в конечный момент времени.

Методом Ритца решена изопериметрическая задача управления перемещением объекта в полярной системе координат с фиксированной точки на транспортер, лента которого движется с постоянной скоростью.

Найдены управления движением объекта (в полярной системе координат), доставляющие экстремум (min) функционалу при известных уравнениях движения и краевых условиях, которые на правом конце обеспечивают попадание объекта на прямую (транспортер) с заданным модулем и направлением скорости, соответствующей скорости ленты транспортера.

Найдены оптимальные управления и создано математическое обеспечение для решения характерных задач транспортирования грузов манипуляторами малой жесткости. Результаты исследований рекомендуются для использования при проектировании геометрической конфигурации технологических участков с учетом назначенных траекторий перемещения объектов.

При использовании методов оптимального проектирования решены задачи минимизации массы телескопических и антропоморфных манипуляторов. Найдены компенсирующие воздействия, которые устраняют перемещения центра масс схвата, возникающие в связи с деформациями манипулятора при медленном изменении его геометрической конфигурации.

Исследованы колебания телескопической руки при различных законах оптимального поступательного переносного движения. Показано, что управление при согласовании времени движения с периодом первой моды колебаний и кратности собственных частот устраняет колебания (по всем модам) в точке позиционирования.

Найдено управление $u_e(t)$ переносным движением упругого объекта из исходного в конечное состояния абсолютного покоя, при котором выполняются моментные соотношения и движение реализуется за минимально возможное время T.

Оптимальное управление движением манипуляторов конечной жесткости с достижением заданной скорости схвата включает исследование управлений переносным движением упругих объектов с конечным числом степеней свободы, которые обеспечивают достижение заданной скорости объекта и отсутствие колебаний в относительном движении – за время движения колебания нежесткого объекта отсутствуют (динамический коэффициент равен единице).

Предложена суперпозиция управлений переносным движением упругого объекта, которые за минимальное время обеспечивают подавление свободных колебаний объекта, обусловленных начальным возмущением, и достижение состояния абсолютного либо относительного покоя в конце переносного движения.

Управления переносным движением манипулятора малой жесткости предполагают, что частота первого тона собственных колебаний руки постоянна. Если происходит выдвижение телескопической руки, то жесткость меняется, и, следовательно, изменяются частоты. Предложен вариант стабилизации жесткости телескопической руки при ее выдвижении за счет поворота элементов руки относительно продольной оси.

Существующие роботы-манипуляторы при малой массе переносимого полезного груза, как правило, достаточно массивны. Энергетические затраты, необходимые для операций транспортирования объектов жесткими и нежесткими манипуляторами, существенно отличаются. Даны рекомендации по применению результатов исследований при проектировании роботизированных технологических участков.

Список литературы: 1. Bokhonsky A.I. Control a deformation of unrigid details in turning: The monography/Vokhmianin AN.-Sevastopol: Publishing SevGTU,199. –240p.

2. Bokhonsky A.I. Portable movement optimum control of deformable objects: the theory and technical appendices / A.I. Bokhonsky, N.I. Varminskaya, M.I. Mozolevsky; Under gen. edit. A.I. Bokhonsky. – Sevastopol: SevNTU Publishing, 2007. – 296 p.

Надійшла до редколегії 20.05.2010 р.

USING OPTIMAL CONTROL THEORY FOR ELASTIC DEFORMATION IN TECHNICAL SYSTEMS

Bokhonsky A.I., Falaleev A.P., Krugovoy A.N. *(SevNTU, Sevastopol, Ukraine)*

Here we considered two types of problems of optimal control by elastic deformation of nonrigid objects: a continuous deformable state of nonrigid work-pieces during automatic turning processing and optimal relative motion of elastic systems.

Key words: *nonrigid work-part, deformable state, optimal motion.*

ЗАСТОСОВАННЯ ТЕОРІЇ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ПРИ ДЕФОРМУВАННІ УПРУГИХ СИСТЕМ В ТЕХНИЦІ

Бохонський А.І., Фалалеєв А.П., Круговой А.М. *(СевНТУ, Севастополь, Україна)*
e-mail:a_falaleev@mail.ru

В статті розглянути два типа задач оптимального керування пружним деформуванням нежорстких об'єктів: неперервним деформованим станом нежорстких заготівок при автоматичної токарної обробці; оптимальним переносним рухом пружних систем.

Ключові слова: *нежорстка заготівка, деформований стан, оптимальний рух.*