

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ УПРАВЛЯЮЩИХ ПРОГРАММ В АВТОМАТИЗИРОВАННОМ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

П.П. Переверзев

MODELLING AND OPTIMIZATION OF OPERATING PROGRAMS IN THE AUTOMATED MACHINE-BUILDING MANUFACTURE

P.P. Pereverzev

На примере операций круглого шлифования с поперечной подачей, выполняемых на металлорежущих станках с автоматическим циклом обработки и управлением от прибора активного контроля, приведено краткое описание методики расчета оптимальных управляющих программ. Оптимизация параметров цикла шлифования выполнена методом динамического программирования.

Ключевые слова: автоматический цикл, шлифование, управляющая программа, оптимизация, динамическое программирование.

On an example of operations of round grinding with the cross-section giving, carried out on metal-cutting machine tools with an automatic operation cycle and management from the device of active control, the short description of a design procedure of optimum operating programs is resulted. Optimization of loop variables of grinding is executed by a method of dynamic programming.

Keywords: automatic cycle, the grinding, the operating program, optimization, dynamic programming.

Современное машиностроительное производство широко использует шлифовальные станки с программным управлением (ПУ) и числовым программным управлением (ЧПУ) не только на операциях круглого шлифования с врезной, продольной, угловой подачей, но и на операциях плоского и бесцентрового шлифования. Обработка деталей на таких станках производится по автоматическому циклу, который задается с пульта управления (для станков с ПУ) или управляющей программой (для станков с ЧПУ). В течение цикла шлифования прибор активного контроля (ПАК) непрерывно измеряет обрабатываемую поверхность и по мере достижения требуемых размеров, по командам задающего устройства автоматически изменяет программную скорость подачи S_n через электропривод и механизм привода подачи. Таким образом, ПАК производит ступенчатое переключение программной скорости подачи S_n в зависимости от оставшейся части припуска.

Из-за наличия упругих перемещений в технологической системе и инерционности перемещающихся масс (шлифовальной бабки с кругом) фактическая скорость подачи S_f не равна программной скорости подачи S_n . При ступенчатом переключении S_n значение S_f асимптотически приближается к S_n по экспоненциальному закону.

Требования по качеству шлифуемой поверхности (точность, шероховатость, бесприжоговость) обеспечиваются изменением силы резания, которая функционально зависит от фактической скорости подачи S_f . В свою очередь, изменение S_f осуществляется на станке через ступенчатое управление программной скоростью подачи S_n . Поэтому установление численной связи между ними (с учетом динамики переходных процессов) является одной из главных задач разработки управляющих программ.

Для круглошлифовальных станков с программным управлением технолог на основе чертежа детали и заготовки, паспортных данных станка и системы управления должен назначить следую-

щие параметры цикла шлифования: количество ступеней цикла Z_{\max} в зависимости от конструкции ПАК; части припуска на диаметр P_z , снимаемого на каждой ступени цикла; программную скорость подачи S_{pz} на каждой ступени цикла. Кроме того, назначаются следующие параметры режима обработки: частота вращения заготовки, окружная скорость вращения круга и характеристика круга по справочникам режимов резания (если она заранее не задана): размеры круга, марка абразивного материала, зернистость, твердость, структура, вид связки. Принципиально существует множество вариантов сочетаний параметров режимов резания, обеспечивающих заданное качество обрабатываемой поверхности. Каждый из этих вариантов характеризуется своими значениями технико-экономических показателей. Исходя из требований обеспечения максимальной производительности необходимо назначить такой цикл шлифования, при котором выполняются требования по качеству обработки за минимальное время цикла.

Выбор функции цели при оптимизации любого процесса зависит от критерия оптимальности, принятого в качестве показателя, характеризующего эффективность данного процесса. Применительно к операции шлифования выбор критерия оптимальности обуславливается целью, которая тем или иным приближением достигается на данной операции.

Примем за критерий оптимальности время автоматического цикла шлифования $\tau_{ц}$. Тогда функцию цели θ выразим в следующем виде:

$$\theta = \tau_{ц} \rightarrow \min.$$

Целевая функция сводит задачу оптимизации цикла шлифования к задаче оптимизации по быстродействию. Задача оптимизации цикла в этом случае формулируется следующим образом: найти такое сочетание управляющих параметров цикла обработки, при котором обрабатываемая поверхность заготовки переходит из исходного состояния в конечное за минимальное время. Другими словами, необходимо найти сочетание параметров цикла (количество ступеней Z_{\max} , программные скорости подачи $S_{п1}$, $S_{п2}$, $S_{пz\max}$, снимаемые части припуска P_1 , P_2 , ..., $P_{Z\max}$), гарантирующих требуемое качество обработки при заданных технологических условиях обработки, за минимальное время $\tau_{ц}$.

Нахождение минимума целевой функции в процессе оптимизации цикла шлифования производится при обязательном учете основных технологических ограничений, связанных:

- с требуемой точностью и другими показателями качества: шероховатостью и бесприжоговостью обрабатываемой поверхности детали (согласно чертежу детали);
- исходной точностью заготовки и колебанием припуска;
- эксплуатационными свойствами шлифовального круга (неосыпаемостью, стойкостью круга или интенсивностью затупления зерен круга);
- конструктивными параметрами станка и числом имеющихся команд ПАК (диапазоны режимных параметров, максимальное количество ступеней цикла, жесткость).

Особенности методики оптимизации цикла шлифования методом динамического программирования заключаются в следующем [1]. Начальным состоянием процесса является обрабатываемая поверхность заготовки, а конечным – обработанная поверхность детали. Промежуточным состоянием процесса будет промежуточное состояние обрабатываемой поверхности в процессе шлифования, в ходе которого происходит преобразование обрабатываемой поверхности заготовки в обработанную (в соответствии с заданными чертежными требованиями) поверхность готовой детали, т. е. переход от начального состояния процесса к конечному [2]. Поэтому применительно к процессу шлифования промежуточное состояние процесса характеризуется не только оптимальным временем его достижения (как при оптимизации маршрута), но и формируемыми величинами радиусов обрабатываемой поверхности (определяющими текущую погрешность обработки); параметрами качества поверхностного слоя обрабатываемой поверхности (глубиной прижога, шероховатостью и др.), составляющими силы резания, программной и фактической скоростями подачи [3].

Соответственно, в начальном состоянии (являющемся начальным условием процесса шлифования) обрабатываемая поверхность характеризуется величинами радиусов заготовки, имеющей исходное биение. В конечном состоянии обработанная поверхность характеризуется: численными значениями, полученными в результате шлифования по оптимальному циклу шлифования с минимальным временем достижения конечного состояния, необходимого для преобразования поверхности заготовки в поверхность детали с заданными чертежными требованиями; фактиче-

скими подачами, скоростями фактических подач и силами резания, равными их численным значениям в конце цикла.

В связи с тем, что управление циклом шлифования ведется путем переключения программной скорости подачи в зависимости от оставшейся части припуска, то оптимизацию этих режимных параметров будем производить в координатах «программная скорость подачи – припуск». Поскольку метод динамического программирования относится к методам дискретной оптимизации, то он требует дискретизации управляющих параметров, чтобы оптимизация цикла производилась на координатной сетке, полученной после дискретизации шкал.

Для этого разобьем шкалу программной скорости подачи на $M - 1$ дискрет (M – количество программных скоростей подач станка) в диапазоне

$$S_{\Pi}^{\min} \leq S_{\Pi m} \leq S_{\Pi}^{\max},$$

где m – текущий номер программной скорости подачи, при $1 \leq m \leq M$; $S_{\Pi m}$ – величина m -го уровня программной скорости подачи; S_{Π}^{\min} , S_{Π}^{\max} – соответственно минимальная и максимальная величины программной скорости подачи на станке.

Аналогично разобьем шкалу припусков на $(N - 1)$ дискрет (N – максимальный номер дискреты припуска, при котором величина оставшейся части припуска равна нулю) в диапазоне

$$\Pi_{\max} \geq \Pi_n \geq 0,$$

где n – номер текущего уровня дискреты припуска (при $n = 0$ величина оставшейся части припуска равна Π_{\max} , а при $n = N$ – равна нулю); Π_n – величина оставшейся части припуска на n -й дискрете припуска.

Таким образом, оптимизация режимных параметров производится в координатах $S_{\Pi m} - \Pi_n$ на образовавшейся (после разбивки шкал на дискреты) координатной сетке.

На координатной сетке $S_{\Pi m} - \Pi_n$ дополнительно проведены оси m и n , показывающие соответственно номер дискретного значения программной скорости подачи и припуска.

Каждое пересечение координатной сетки однозначно определяется координатами $[n, m]$, которые в дальнейшем будем называть координатами состояния процесса шлифования. Номер n -го уровня припуска аналогичен уровню станции в рассмотренном выше примере оптимизации маршрута, а номер m -й программной скорости подачи соответствует номеру станции на уровне n .

Поскольку оптимизация цикла ведется по минимальному времени обработки, то из всех параметров состояния процесса шлифования на координатной сетке будем показывать только оптимальное время достижения $T_{n,m}$ этого состояния, подразумевая при этом, что состояние процесса шлифования характеризуется также текущими размерами обрабатываемой поверхности, скоростью подачи, силой резания и др.

Для того чтобы перейти в состояние $[n, m]$ с предыдущего уровня припуска $(n - 1)$ из $\{m\}$ -го номера программной скорости подачи (т. е. из состояния $[n - 1, \{m\}]$ в состояние $[n, m]$), необходимо сделать ход. Под термином «сделать ход» в дальнейшем будем понимать, что производится моделирование съема дискреты припуска $(\Pi_{n-1} - \Pi_n)$ при m -м номере программной скорости подачи $S_{\Pi m}$. При моделировании процесса шлифования производится расчет текущих значений фактической подачи и ее скорости, текущих радиусов обрабатываемой поверхности, силы резания и времени съема дискреты припуска. Таким образом, в конце хода известны все необходимые характеристики процесса шлифования: время съема дискреты припуска, значения радиусов поверхности, скорости подачи и сила резания.

Время, необходимое для съема дискреты припуска $(\Pi_{n-1} - \Pi_n)$, называется временем хода (аналогично времени хода между станциями в рассмотренном выше примере оптимизации маршрута) и обозначается $\tau_{n,m}^{n-1,\{m\}}$, где нижние индексы n и m означают координаты состояния $[n, m]$, куда произведен ход, а верхние индексы $\{m\}$ -й – номер программной скорости подачи на предыдущем $(n - 1)$ -м уровне дискреты припуска, откуда произведен ход.

Согласно принципу оптимальности из нескольких возможных ходов в состояние $[n, m]$ требуется выбрать один, оптимальный ход, обеспечивающий минимальное время цикла.

Оптимальным считается один из возможных ходов, обеспечивающий минимальное время $T_{n,m}$ достижения состояния $[n, m]$, определяемое как сумма времени $T_{n-1,\{m\}}$ (т. е. времени дости-

жения состояния $[n-1, \{m\}]$ на предыдущем уровне припуска, откуда произведен ход) и времени хода $\tau_{n,m}^{n-1,\{m\}}$ (из состояния $[n-1, \{m\}]$ в состояние $[n, m]$), т. е.

$$T_{n,m} = \min_{\{m\}} \left\{ T_{n-1,\{m\}} + \tau_{n,m}^{n-1,\{m\}} \right\} \quad (1)$$

при $T_{0,0} = 0$ $m = 1, \dots, M$; $n = 1, \dots, N$, где $T_{0,0}$ – время начала обработки.

Из всех возможных ходов с временем $\tau_{n,m}^{n-1,\{m\}}$ при минимизации времени $T_{n,m}$ выбираются только допустимые ходы. Применительно к задаче оптимизации цикла шлифования допустимость хода означает, что после совершения данного хода существуют такие режимы резания (в нашем случае сочетания программных скоростей подачи и снимаемых частей припуска), при которых будут гарантированно выполнены ограничения. Однако численные значения ограничений, заданных чертежом детали (точность, неприжоговость, шероховатость обработанной поверхности), можно проверять только в конце цикла, хотя они действуют на протяжении всего цикла.

Другие ограничения (по осыпаемости, мощности привода, допустимым диапазонам и др.) известны и проверяются на протяжении всего цикла.

Поэтому комплекс целевой функции состоит из ограничений, которые необходимо контролировать:

- в конце цикла шлифования (точность, неприжоговость, шероховатость обработанной поверхности);

- в течение всего цикла шлифования (по осыпаемости, мощности привода, допустимым диапазонам и др.).

Отсюда следует, что ход будет считаться недопустимым, если после него невозможно выполнить ограничения, контролируемые как в конце, так и в течение всего цикла. Другими словами, после недопустимого хода нет таких режимов резания, при которых за время съема оставшейся части припуска можно выполнить все ограничения целевой функции.

Таким образом, ход считается допустимым, если в достигнутом состоянии $[n, m]$ после совершения данного хода выполняются все ограничения целевой функции. Для того чтобы определить, является ли данный ход допустимым, производится его проверка по всем ограничениям целевой функции.

В ходе моделирования производится расчет текущих значений радиусов обрабатываемой поверхности, фактической скорости подачи и других необходимых параметров. После окончания моделирования съема оставшейся части припуска по полученным конечным значениям радиусов обрабатываемой поверхности, фактической скорости подачи и другим параметрам состояния производится прямая проверка ограничений по точности, прижогу и шероховатости обрабатываемой поверхности. Если хотя бы одно из этих ограничений не выполняется, то ход считается недопустимым.

Таким образом, из всех возможных ходов выбираются только допустимые хода. Из совокупности допустимых ходов (т. е. ходов, обеспечивающих выполнение всех ограничений) выбирается только один самый оптимальный ход, удовлетворяющий выражению (1). Затем, согласно требованиям метода динамического программирования, производится запоминание номера программной скорости подачи, откуда произведен оптимальный ход, т. е. запоминается номер $\{m\}$ -й программной скорости подачи на предыдущем $(n - 1)$ -м уровне припуска, откуда произведен оптимальный ход. Запомненное значение уровня, откуда произведен оптимальный ход, фиксируется для каждого состояния $[n, m]$ и хранится в переменной m^* (аналогичен номеру в флажке при маршрутной оптимизации) во всех клетках на координатной сетке, т. е.

$$m^*(n, m) = m_{opt},$$

где m_{opt} – оптимальный номер программной скорости подачи из совокупности $\{m\}$ -х номеров на $(n - 1)$ -м уровне припуска в состояние $[n, m]$.

Подобная процедура оптимизации производится для каждого пересечения координатной сетки. Исключение составляют те пересечения, которые не имеют ни одного допустимого хода.

Процесс оптимизации начинается с выполнения совокупности прямых ходов на первой дискрете припуска. Затем производится переход из предыдущего $(n - 1)$ -го уровня припуска при m -й

программной скорости подачи в n -й уровень припуска. Каждый ход проверяется на допустимость по заданным ограничениям целевой функции. При достижении $[n, m]$ -го состояния процесса шлифования одним или несколькими допустимыми ходами производится выбор оптимального хода, обеспечивающего минимальное время $T_{n,m}$ достижения состояния $[n, m]$. Запоминаются координаты предыдущего состояния процесса $[n-1, \{m\}]$, переход с которого является оптимальным. После достижения последнего уровня припуска $n = N$ (а значит, конечного состояния процесса) на последнем уровне припуска координатной сетки возможно наличие нескольких клеток, расположенных на разных номерах m программных скоростей подач и имеющих различное время $T_{n,m}$. Это означает, что получение годной поверхности детали возможно при различных значениях фактической скорости подачи в конце цикла и соответствующих им программным скоростям подач, но за разное время обработки. Поэтому из всех имеющихся вариантов на последнем уровне припуска выбирается один, имеющий минимальное время $T_{N,m}$ достижения конечного состояния, которое и будет минимальным временем цикла $\tau_{ц}$:

$$\tau_{ц} = \min_m T_{N,m}.$$

Для фиксации оптимальной траектории управления циклом шлифования необходимо выполнить процедуру обратного хода, которая начинается из этого единственного конечного состояния, имеющего $\tau_{ц}$. По аналогии с процедурой обратного хода при оптимизации маршрута определяем предшествующее состояние процесса $T_{n-1,m}$, используя хранимые координаты предыдущего состояния процесса $m^*(n, m)$, идя от конечного уровня припуска к начальному, запоминая величины программных скоростей подач и припусков, по достижении которых производились переключения программных скоростей подач по командам прибора активного контроля.

Таким образом решена задача оптимизации цикла шлифования при неограниченном количестве ступеней переключения программных скоростей подач. Оптимальная траектория может содержать любое количество ступеней, ограниченное только числом узлов координатной сетки, на которых возможно переключение. Например, при координатной сетке с дискретами 100×100 получится 100-ступенчатый цикл. С целью выполнения ограничения целевой функции по количеству допустимых ступеней цикла [4] (т. е. по количеству допустимых переключений, осуществляемых прибором активного контроля) состояние процесса будем определять не только координатами $[n, m]$, но и дополнительной координатой z – номером ступени цикла, т. е. состояние процесса будет характеризоваться на координатной сетке тремя координатами $[n, m, z]$ при допустимом диапазоне изменения ступеней цикла:

$$1 \leq z \leq Z_{\max},$$

где Z_{\max} – максимально допустимое конструкцией ПАК количество ступеней цикла.

Соответственно, время достижения состояния обозначим через $T_{n,m,z}$; время хода – $\tau_{n,m,z}^{n-1, \{m\}, z}$; $m^*(n, m, z)$ – запомненное значение уровня программной скорости подачи, откуда произведен оптимальный ход.

Процедура оптимизации аналогична той, которая описана выше. Из всех возможных ходов выбираются только допустимые по ограничениям целевой функции ходы, в том числе и ограничению по количеству допустимых ступеней цикла (или по количеству допустимых переключений программных скоростей подач). Из массива допустимых ходов выбирается только один самый оптимальный ход для каждой ступени z , удовлетворяющий принципу оптимальности. Для каждой ступени цикла при всех состояниях $[n, m, z]$ запоминаются оптимальные ходы.

Нахождение оптимальной траектории цикла производится с помощью процедуры обратного хода, являющейся обязательной составляющей метода динамического программирования.

Выводы

1. Разработана методика, позволяющая проводить оптимизацию управляющих параметров цикла шлифования на основе метода динамического программирования, который не требует построения заранее границ области допустимых ограничений и не чувствителен к свойствам (дифференцируемости и непрерывности) моделей управления и ограничений.

2. Каждый шаг вариантов расчета проверяется по четырем важнейшим ограничениям – точности, бесприжоговости, шероховатости и осыпаемости круга, обеспечивающим требуемое качество обработки, а также по основным механическим ограничениям технологической системы. Методика позволяет добавлять любые другие ограничения.

3. Разработанная методика оптимизации цикла шлифования дает возможность заменить полный перебор вариантов направленным перебором с отсечением недопустимых по ограничениям и неперспективных (большое время) ходов, что дает снижение количества вариантов с 1010 до 103 раз.

4. Методика оптимизации циклов может быть применена к любым видам механической обработки. Кроме того, при введении дополнительных координат возможна разработка комплексной системы оптимизации цикла и параметров режущего инструмента.

Литература

1. Беллман, Р. *Динамическое программирование* / Р. Беллман. – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 400 с.

2. Лурье, Г.Б. *Оптимизация цикла шлифования на основе адаптивного управления* / Г.Б. Лурье // *Машиностроитель*. – 1979. – № 3. – С. 12–14.

3. Михелькевич, В.Н. *Автоматическое управление шлифованием* / В.Н. Михелькевич. – М.: *Машиностроение*, 1975. – 304 с.

4. Переверзев, П.П. *Оптимизация автоматических циклов круглого врезного шлифования: дис. ... д-ра техн. наук* / П.П. Переверзев. – Челябинск, 1985. – 302 с.

Поступила в редакцию 6 марта 2012 г.

Переверзев Павел Петрович. Доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Технология машиностроения», Южно-Уральский государственный университет. Область научных интересов – моделирование и оптимизация операций механической обработки. E-mail: dtnppp@yandex.ru

Pavel P. Pereverzev. Doctor of science (engineering), an associate professor, professor of Engineering techniques department, South Ural state university. The area of scientific interests – modeling and optimization of operations of machining. E-mail: dtnppp@yandex.ru