УДК 531.7

В.П. КВАСНИКОВ[1], Ю.Б. ШЕВЧЕНКО[2], Б.Д. ШЕВЧЕНКО[2]

[1]***Национальный авиационный университет, Киев, Украина***
[2]***ООО «АРАМИС», Черкассы, Украина***

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО РОБОТА ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ СЛОЖНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

Рассмотрены особенности управления технологическим роботом лазерной сварки деталей сложной пространственной конфигурации. Синтезированы математические модели описания кинематических узлов робота и поглощения лазерного излучения при лазерной сварке.

лазерная сварка, технологический робот сварки, математическая модель робота сварки, прямая задача робототехники, поляризация, сварочная ванна, поглощение лазерного излучения

В современной промышленности большое распространение получает лазерная сварка [1], несмотря на большой объем сварки деталей простой конфигурации, в производстве все больше растет объем сварных конструкций со сложной траекторией сварного шва. Например, при сварке листовых заготовок из сталей различных марок и толщин для штамповки автомобильных корпусов [2]. В отечественной промышленности также возникают задачи сварки крупно-габаритных изделий из нержавеющих и углеродистых сталей без их термодеформации.

Цель автоматизации сварочных процессов – получение сварных соединений с требуемыми свойствами при наивысших технико-экономических показателях. Достигаемое в результате применения автоматизации исключение или сведение к минимуму количества недопустимых дефектов сварных швов снижает потери рабочего времени, энергетических и материальных ресурсов, связанные с исправлением брака. Все это сопровождается реальным повышением производительности труда, экономией трудовых ресурсов при изготовлении сварных конструкций и позволяет рассматривать автоматизацию сварочных процессов как важную составляющую комплексной автоматизации сварочного производства.

При автоматической лазерной сварке сложных пространственных конструкций одной из основных проблем является привязка системы координат детали к системе координат станка, а поскольку технология лазерной сварки требует высокой точности позиционирования инструмента, то требования к точности установки свариваемых деталей также высоки.

Эффективность автоматизации сварочных процессов во многом определяется точностью подготовки заготовок и их сборкой. Если при изготовлении деталей методами механической обработки (точении, фрезеровании и т.п.) заранее задают требуемые конечные размеры детали с необходимыми допусками и размеры заготовки не влияют на точность готовой детали, то при сварке изменить фактические размеры заготовок невозможно, так как они уже определены предыдущими технологическими (заготовительными) операциями и, следовательно, предопределяют все линии швов с их неточностями по направлению, зазору, превышению кромок и др. Однако из плохих заготовок нельзя сделать хороших сварных изделий, так как даже самые совершенные сварочные устройства не могут исправить все дефекты заготовок. Поэтому автоматизация сварочных процессов целесообразна и эффективна только при повышении точности заготовок и их сборки, что достигается механизацией и автоматизацией заготовительных и сборочных операций. Однако возможности заготовительного производства не беспредельны. Кроме того, неизбежны температурные деформации и перемещения свариваемых деталей вследствие неравномерности нагрева изделия при сварке. Все это приводит к отклонениям точности собранных заготовок за пределы, допустимые по условиям механизированной сварки. Применение автоматического управления сварочными процессами для предупреждения их нарушений под действием различных возмущений является одним из основных этапов создания систем комплексной автоматизации сварочного производства.

Конфигурация исполнительного механизма робота определяется m-мерным вектором обобщенных координат q. Зная q, можно определить положение и ориентацию отдельных звеньев механизма и рабочих органов. Задачи такого рода называются прямыми задачами о положении механизмов РТК.

Необходимость в решении прямой задачи в робототехнике возникает в связи с тем, что текущие положение и ориентация некоторых звеньев исполнительного механизма (например, сварочной головки) зачастую не могут быть определены путем прямых измерений. Вместо этого имеется возможность точно измерить относительные положения звеньев, например, с помощью позиционных датчиков обобщенных координат. По этим данным можно вычислить положение и ориентацию всех звеньев, в том числе и рабочих органов.

Положение рабочего органа r робота со степенями свободы m однозначно определяется по заданной конфигурации манипулятора с помощью уравнения кинематики вида:

$$\Phi(q) = r\,. \qquad (1)$$

Рассмотрим особенности решения прямой задачи для сварочных роботов. В роли обобщенных координат q_j, $j = 1, \ldots, m$ манипулятора обычно выступают углы между звеньями или длины звеньев c. Поэтому вектор обобщенных координат у манипулятора с вращательными и поступательными кинематическими парами имеет компоненты:

$$q_j = \begin{cases} \varphi_j - \textit{для вращательной пары}; \\ c_j - \textit{для поступательной пары}. \end{cases}$$

Тип кинематической схемы манипулятора задается m-мерным вектором δ с компонентами:

$$\delta_j = \begin{cases} 1, \; \textit{если} \quad q_j = c_j; \\ 2, \; \textit{если} \quad q_j = \varphi_j. \end{cases}$$

По вектору обобщенных координат q однозначно определяется положение и ориентация всех звеньев манипулятора. Свяжем с j-м звеном правую ортогональную локальную систему координат с началом в точке r_j и ортами e_1^j, e_2^j, e_3^j, причем r_j расположим на кинематической оси $(j-1)$-го и j-го звеньев, а орт e_3^j направим по этой оси. Будем считать, что система координат стойки манипулятора совпадает с абсолютной неподвижной системой координат, т.е.

$$r_0 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad e_1 = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad e_2 = \begin{vmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{vmatrix}; \quad e_3 = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{vmatrix}.$$

Каждому звену манипулятора поставим в соответствие матрицу размерности 3×4 следующего вида:

$$K_j = \left| r_j, e_1^i, e_2^i, e_3^i \right|, \; j = 1, \ldots, m \qquad (2)$$

Геометрический смысл матрицы K_j ясен из ее структуры: первый столбец характеризует положение j-го звена в абсолютной системе координат $0d_1d_2d_3$ (точнее, положение начала j-й локальной системы координат, связанной с j-м звеном), а три остальных – ориентацию j-го звена. Очевидно, что матрица K_j однозначно определяет положение j-го звена манипулятора в рабочем пространстве, поэтому матрица (2) называется *матрицей кинематических характеристик манипулятора.*

Выразим элементы матрицы кинематических характеристик через обобщенные координаты механизма. Это позволит по единой формуле экономно вычислять положение и ориентацию всех звеньев манипулятора непосредственно по его обобщенным координатам.

Введем для краткости записи следующую операцию произведения 3×4-матриц:

$$K_i = (r_i, E_i); \; K_j = (r_j, E_j);$$

$$K_i K_J = (r_i + E_i r_j, E_i E_j),$$

а также 3×4-матрицы преобразований

$$p_j(q)=\begin{cases} A_j\otimes\begin{matrix}0 & 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1 & 0\\ c_j & 0 & 0 & 1\end{matrix} & \text{при } \delta_j=1;\\ A_j\otimes\begin{matrix}0 & \cos\varphi_j - & \sin\varphi_j & 0\\ 0 & \sin\varphi_j & \cos\varphi_j & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1\end{matrix} & \text{при } \delta_j=2.\end{cases}$$

Здесь $A_j - 3\times 4$ -матрицы вида

$$A_j=(E^{i-1})^T(r^i-r^{i-1}E^i); \tag{3}$$

T – символ транспонирования матрицы (3) формируются заранее в исходном положении манипулятора, т.е. при $q = 0$.

При этих обозначениях матрицы кинематических характеристик определяются рекуррентными формулами

$$K_j(q)=K_{j-1}(q)\otimes p_j(q)\,.$$

Выберем на j-м звене некоторую точку r_*^i.Обозначим через d_*^i Вектор координат этой точки в локальной системе координат $r_j e_1^i e_2^i e_3^i$. Тогда положение точки r_*^i определяется формулой

$$r_*^i=K_j(q)\begin{pmatrix}1\\ d^i\end{pmatrix}. \tag{4}$$

На практике часто требуется знать положение некоторой характеристической точки r_* на захвате манипулятора. Оно однозначно определяется уровнем кинематики (1), где

$$\Phi(q)=K_m(q)\begin{vmatrix}1\\ d_*\end{vmatrix}.$$

Различные алгоритмы решения обратной задачи о положении манипулятора при $m\le 6$ описаны в работах [3 – 5]. Они решают уравнения (1) «в лоб». Это позволяет выделить в явном виде конечное число ветвей решения уравнения (1). В ряде случаев (например, при наличии препятствий в рабочей зоне) для увеличения маневренности манипулятора нужна определенная кинематическая избыточность. Это достигается увеличением степеней свободы манипулятора так, чтобы было $m > 6$. Появились даже гибкие манипуляторы типа «хобот», у которых $m > 10$, для таких манипуляторов с большой кинематической избыточностью нужны методы решения уравнений (1), ориентированные на использование ЭВМ.

Далее рассмотрим величину тепловложений в сварочную ванну в зависимости от поляризации излучения и пространственного угла падения лазерного луча.

Тепловой поток, вводимый в металл исходным лазерным пучком в точке $\{x_o, y_{0,} z_s(x_0, y_0)\}$ можно вычислить как

$$q_0=\frac{dP_0\left(W_0^{(p)}\cos^2\psi_0+W_0^{(s)}\sin^2\psi_0\right)}{(dS_0)}, \tag{5}$$

где $W_0^{(p,c)}[\vartheta_0(x_0,y_0),T(x_0,y_0)]$ – значения коэффициентов поглощения соответственно для p- и s-поляризации в указанной точке поверхности.

Отраженная элементарной площадкой dS_0 мощность излучения, падающего затем на площадку dS_1, есть

$$dP_1\equiv d\overline{P}_0=dP_0\begin{bmatrix}\left(1-W_0^{(p)}\right)\cos^2\psi_0\\ +\left(1-W_0^{(s)}\sin^2\psi_0\right)\end{bmatrix}.$$

Повторив приведенные рассуждения для последующих отражений, можно получить рекуррентную формулу для нахождения

$$dP_{m+1}=dP_m\left[\left(1-W_m^{(p)}\right)\cos^2\psi_m+\left(1-W_m^{(s)}\right)\sin^2{}_m\right],$$
$$m=0,1,2,\ldots,$$

где $W_m^{(p,s)}[\vartheta_m(x_0,y_0),T(x_m,y_m)]$ и $\psi_m(x_0,y_0)$ – значения коэффициентов поглощения и угла между плоскостью $m+1$ падения луча на поверхность парогазового канала и направлением вектора электрического поля падающего излучения.

Угол можно определить с помощью соотношения

$$\sin^2\psi_m=\frac{(D_m')^2}{E_m'},\ m=0,1,2,\ldots, \tag{6}$$

где

$$D_m'=A_m\left(E_m^{(p)}+E_m^{(s)}\right)_x+B_m\left(E_m^{(p)}+E_m^{(s)}\right)_y+$$
$$+C_m\left(E_m^{(p)}+E_m^{(s)}\right)_z;$$

$$E_m'=\left(E_m^{(p)}+E_m^{(s)}\right)_x^2+\left(E_m^{(p)}+E_m^{(s)}\right)_y^2+\left(E_m^{(p)}+E_m^{s}\right)_z^2,$$

где компоненты электрического поля

$E_m = E_m^{(p)} + E_m^{(s)}$ при $m+1$ падении луча на поверхность канала определяются из условий, что вектор $E_m^{(p)}$ лежит в плоскости падения и перпендикулярен падающему лучу, а $E_m^{(s)}$ перпендикулярен указанной плоскости:

$$\left(E_m^{(p)}\right)_x a_m + \left(E_m^{(p)}\right)_y b_m + \left(E_m^{(p)}\right)_z c_m = 0;$$

$$\left(E_m^{(p)}\right)_x A_m + \left(E_m^{(p)}\right)_y B_m + \left(E_m^{(p)}\right)_z C_m = 0;$$

$$\frac{A_m}{\left(E_m^{(s)}\right)_x} = \frac{B_m}{\left(E_m^{(s)}\right)_y} = \frac{C_m}{\left(E_m^{(s)}\right)_z},\ m = 0, 1, 2, \ldots,$$

и условий, связывающих составляющие электрического поля для падающего и отраженного излучения при соответствующем падении:

$$\left(E_{m+1}^{(p)}\right)^2 = \left(1 - W_m^{(p)}\right)\left(E_m^{(p)}\right)^2;$$

$$\left(E_{m+1}^{(s)}\right)^2 = \left(1 - W_m^{(s)}\right)\left(E_m^{(p)}\right)^2,\ m = 0, 1, 2, \ldots$$

в частности, для первого падения, используя (6), находим $\sin^2 \psi_0 = \left(A_0 \cos \psi_0 + B_0 \sin \varphi_0\right)^2$.

По аналогии с (5) тепловой поток $q_m\left[x_m(x_0, y_0), y_m(x_0, y_0), z_m(x_0, y_0)\right]$, вводимый в металл при $m+1$ падении на поверхность канала луча (x_0, y_0) исходного пучка, можно записать в виде

$$q_m = dP_m\left(W_m^{(p)}\right)\cos^2 \psi_m + W_m^{(s)} \sin^2 \psi_m)/(dS_m),$$
$$m = 0, 1, 2, \ldots$$

Здесь $dS_m(x_0, y_0) = -dS_m^{(x,y)} / \gamma_m\left(x_0, y_0\right)$, где $dS_m^{(x,y)}$ – площадь четырехугольника в плоскости xOy, вершины которого определяются координатами (x_m, y_m) точек пересечения лучей исходного пучка (x_0, y_0); $(x_0 + dx_0, y_0)$; $(x_0, y_0 + dy_0)$ и $(x_0 + dx_0, y_0 + dy_0)$ с поверхностью $z = z_s(x, y)$ при $m+1$ отражении.

Результирующее пространственное распределение теплового потока, вводимого в металл лазерным пучком, при учете многократных отражений излучения стенками парогазового канала может быть представлено в виде:

$$\delta'\left(x_0, y_0\right) = \delta\left[x - x_m\left(x_0, y_0\right)\right];$$

$$\delta''(x_0, y_0) = \delta\left[y - y_m(x_0, y_0)\right];$$

$$q\left[x, y, z_s(x, y)\right] = \sum_{m=0}^{\infty} \int \delta'\left(x_0, y_0\right)\delta''(x_0, y_0) q_m dx_0 dy_0$$

интегрирование ведется по области изменения координат лучей исходного лазерного пучка, падающих на поверхность канала. Проинтегрировав затем это выражение по всей поверхности $z = z_s(x, y)$, можно вычислить полную мощность $\overline{Q}$, поглощаемую металлом, а также интегральный коэффициент поглощения, определяемый как

$$\overline{W} = \overline{Q} / Q_0. \tag{7}$$

Таким образом, выражение (4) позволяет определить положение точки фокуса при известном положении органов движения входящих в состав робота, а выражение (7) величину вложений энергии лазерного излучения в сварочную ванну. Что делает возможным проведения анализа состояния сварочной ванны при случайных возмущениях в отдельных органах движения сварочного робота.

Литература

1. Коваленко В.С. Лазерная технология на новом этапе развития // Автоматическая сварка. – 2001. – № 12. – С. 4-11.
2. Shneider C., Prange W. Tailored blanks – ein Werkstoff fur neue Formen der Konstruktion // Thyssen Technishe Berichte. – 1992. – № 1. – P. 97-106.
3. Вукобратович М., Стокич Д. Синтез управления возмущенным движением автоматических манипуляторов // Машиностроение. – 1982. – № 1. – С. 9-14.
4. Динамика управления роботами / В.В. Козлов, В.П. Макарычев, А.В. Тимофеев; Под ред. Е.И. Юревича. – М.: Наука, 1984. – 328 с.
5. Попов Е.П., Верещагин А.Ф., Зенкекич С.Л. Манипуляционные роботы: Динамика и алгоритмы. – М.: Наука, 1978. – 400 с.

Поступила в редакцию 24.05.2007

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.