

РАЗРАБОТКА КОНТРОЛЬНОЙ КАРТЫ, ОСНОВАННОЙ НА ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ НЕСТАБИЛЬНОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Барменков Е.Ю., Богданов А.В., Одинокоев С.А.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», 121552, г. Москва, Оршанская ул., 3, e-mail: uks@mati.ru

Статья посвящена разработке контрольной карты, которая позволит производить продукцию в статистически управляемых условиях, учитывая частую переналадку оборудования. Данная задача актуальна для многих предприятий машиностроительной отрасли в связи со стремлением изготавливать продукцию с максимально быстрым откликом на требования потребителей к характеристикам продукции без ущерба для качества. Для построения контрольной карты находится функция, выражающая зависимость выходных параметров технологического процесса от входных данных; эта функция задается в виде полинома второй степени входных параметров. Использование более высокой степени полинома не даёт значительного прироста точности. Нахождение же коэффициентов полинома осуществляется с помощью решения обратной задачи методом итерационной регуляризации, позволяющего получить функцию, обеспечивающую минимальное отклонение от уже имеющихся данных измерения результатов технологического процесса.

Ключевые слова: контрольная карта, управление качеством, процесс, система менеджмента качества.

DEVELOPMENT OF THE UNSTABLE PROCESS' NUMERICAL SIMULATION BASED CONTROL CHART

Barmenkov E.U., Bogdanov A.V., Odinokov S.A.

"MATI" — Russian State Technological University, 121552, Moscow, Russia, Orshanskaya st., 3, e-mail: uks@mati.ru

The article is devoted to the development of the control card, which will produce a statistically controlled conditions, given the constant readjustment of the equipment. This problem is relevant for many machine-building enterprises in connection with the desire to produce products with a quick response to customer requirements to the characteristics of products without sacrificing quality. To construct a control chart is a function expressing the dependence of the outputprocess parameters on the input data, this function is defined as a polynomial of degree two of input parameters. Using a higher degree of the polynomial does not give a significant increase inaccuracy. Finding polynomial coefficients by means of solving the inverse problem by the method of iterative regularization, which allows a function that ensures a minimum deviation from the existing data measuring the results of the process.

Key words: control chart, quality management, process quality management system.

Современное машиностроительное производство предъявляет широкий спектр требований к качеству используемых материалов и полуфабрикатов. Например, для деталей из жаропрочных сплавов важны параметры металлографической структуры, прочностные характеристики, показатели пластичности. Они отличаются высокой стоимостью, и технологические процессы их изготовления характеризуются значительной трудоемкостью, поэтому высокие отходы в брак могут серьезно повлиять на стоимость готовых изделий. Необходимо получение продукции с заданными, и главное, стабильными свойствами, и существующие технологии в металлургии и машиностроении дают возможность решения подобной задачи для традиционных материалов. Однако последние инновационные разработки получения новых перспективных материалов, в частности дающие возможность

проводить высокоскоростную кристаллизацию и позволяющие формировать материалы со специальными свойствами, часто отличаются непредсказуемостью результатов на выходе процесса, остаются по своей сути экспериментальными, что сказывается на их низкой эффективности и невозможности широкого применения. Это в полной мере относится к методу высокоскоростного затвердевания расплава (ВЗР), предназначенного для создания широкого спектра перспективных материалов, прежде всего микрокристаллических волокон и порошков. Данная продукция будет использоваться при создании кристаллизаторов, волокон тугоплавких и химически активных материалов, электропроводных и экранирующих материалов и т.д. Также перспективно производство высокотемпературных припоев на основе меди, заменяющих дорогостоящие серебросодержащие припои, и получение магнитных материалов.

Известно, что формирование продукции с заданными свойствами возможно только в условиях стабильности технологического процесса. Для этого необходимо оценивать состояние процессов, выявлять отклонения от установленных требований, устранять возможности появления повторных отклонений или дефектов за счет своевременной разработки и реализации корректирующих воздействий и обеспечивать предупреждение потенциальных несоответствий в производстве. Причиной низкого качества формируемого материала часто является собственная изменчивость процесса ВЗР, обусловленная наличием многочисленных специфических воздействующих факторов, связанных с гидродинамическими и тепловыми процессами и имеющих место при экстракции продукции из расплава. Необходимо применять методы минимизации изменчивости многофакторного процесса на основе статистического подхода по управлению качеством и, прежде всего реализации предупреждающих действий.

Проведение предупреждающих действий часто ограничивается только анализом процессов на наличие трендов. Подобная задача решается использованием временных рядов и, в лучшем случае, построением контрольных карт Шухарта. Этого совершенно недостаточно для сложной системы, реализация которой требует оценки большого количества параметров, и это, в свою очередь, приводит к значительному росту трудоемкости и увеличению затрат на контрольные операции. Кроме того, остается проблема прогнозирования качества волокна и процесса высокоскоростного затвердевания на стадии проектирования.

Для технологии ВЗР показателями качества получаемого волокна являются, как правило, размерные характеристики: предельный диаметр и максимальная дуга волокна. При представлении каждой из этих характеристик в виде полинома, зависящего от выбранных значимыми входных параметров, возможно проведение анализа теоретического разброса

результатов технологического процесса и его улучшение на основе применения модифицированной контрольной карты.

В основе метода управления лежит определение зависимости выходных параметров технологического процесса от входных. Для этого рассматриваем контрольные границы для каждой партии в виде суммы и разности функций медианы и разброса $m \pm 3\sigma$. Введем функционал (нормированную квадратичную разность между экспериментальными и теоретическими данными) следующим образом для обеих функций (медианы m и разброса 3σ соответственно) [1]:

$$J_b = \frac{1}{2} \frac{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{L_k} \gamma_k [\tilde{b}(x_k) - b^{\text{exp}}(x_i)]^2}{\sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^{L_k} \gamma_k [b^{\text{exp}}(x_i)]^2}, \quad (1)$$

$$J_b^\sigma = \frac{1}{2} \frac{\sum_{k=1}^M \gamma_k [\tilde{\sigma}_b(x_k) - \sigma^{\text{exp}}(x_k)]^2}{\sum_{k=1}^M \gamma_k [\sigma^{\text{exp}}(x_k)]^2}, \quad (2)$$

где: γ_k – весовые коэффициенты, отвечающие точности измерения данных при каждом из производств, M – номер рассматриваемого технологического процесса, а L_k – количество измерений в каждом из процессов;

b^{exp} и \tilde{b} – экспериментальные и теоретические данные по параметру b ;

σ^{exp} и $\tilde{\sigma}$ – рассчитанное по результатам технологического процесса и теоретического значения σ ;

J_b – функционал для среднего значения параметра b – максимальной дуги;

J_b^σ – функционал для разброса значения параметра b .

Аналогичные функционалы применяются для прочих параметров, независимо от количества. Отметим, что формулы (1) и (2) имеют разную форму, так как значение разброса 3σ есть константа для каждого измеренного технологического процесса.

Помимо этого, применяем результирующий функционал $J = \sum_i \varepsilon_i \cdot J_i \rightarrow \min$ (3), где J_i и ε_i соответственно функционал параметра и степень его важности в итоговом качестве процесса.

Таким образом, необходимо решить обратную задачу и найти функции $\tilde{b}(x_k)$ и $\tilde{\sigma}_b(x_k)$, при которых достигается минимум функционалов (1) и (2). Описанные выше функционалы

рассчитываются заново всякий раз при получении новых данных очередного технологического процесса.

Численный алгоритм решения обратной задачи состоит в параметрическом разложении неизвестных функций. Разложим искомые функции по некоторому базису[1]:

$$\begin{aligned}\tilde{b}(x) &= \sum_{j=1}^{M_b} \tilde{b}_j \cdot \varphi_j(x) \\ \tilde{\sigma}_b(x) &= \sum_{j=1}^{N_b} \tilde{\sigma}_j^b \cdot \varphi_j(x),\end{aligned}\quad (4)$$

где $\varphi_j = \{1, \rho, \rho^2, \rho^3, \dots\}$ – полиномы, M_b – степень разложения функции медианы параметра b , N_b – степень разложения функции разброса.

Таким образом, решение обратной задачи сводится к нахождению вектора неизвестных параметров из условия минимизации функционалов (1) и (2).

$$\bar{F} = \{\tilde{b}_j, j = \overline{1, M_b}, \sigma_j^b, j = \overline{1, N_b}\} \quad (5)$$

Используется метод итерационной регуляризации для решения обратной задачи, который состоит из следующих шагов:

1. Выбираем начальный вектор искомых параметров $F^s, s = 1$. Для всех итераций, кроме первой, начальным вектором является результирующий вектор предыдущей итерации. Для первой итерации для простоты используется линейное приближение (считаем коэффициенты при квадратичных членах равными нулю), находимое также численно, путём анализа данных результатов всех имеющихся технологических процессов.

2. Вычисляем градиент функционала невязки (1) или (2) ∇J^s и вектор глубины спуска h^s .

3. Находим новое приближение вычисляемых параметров из соотношения

$$F^{s+1} = F^s + h^s \nabla J^s. \quad (6)$$

Этот итерационный процесс позволяет найти минимум функционала (1) и (2), что даёт решение обратной задачи, т.е. разложений функций. При решении обратных задач с помощью изложенного выше метода искомые функции разлагались по базису из трёх полиномов, что даёт достаточную точность:

$$\begin{aligned}\tilde{b}(x) &= \tilde{b}_0 + \tilde{b}_1 \cdot x + \tilde{b}_2 \cdot x^2 \\ \tilde{\sigma}_b(x) &= \tilde{\sigma}_0^b + \tilde{\sigma}_1^b \cdot x + \tilde{\sigma}_2^b \cdot x^2\end{aligned}\quad (7)$$

Таким образом, для решения обратной задачи необходимо найти шесть членов разложения. При получении данных нового производственного процесса вся последовательность действий повторяется.

На основе полученных формул можно произвести решение ещё одной задачи (в данном случае простейшей, так как необходимо решить всего лишь квадратное уравнение), и на основе требуемых выходных параметров процесса вычислить необходимые входные параметры технологического процесса.

Отметим, что можно произвести соответствие описанного выше производственно-научного цикла и классического цикла Деминга – PDCA:

- 1) Plan – производим планирование, а именно описанный выше расчёт исходных параметров технологического процесса;
- 2) Do – проведение собственно процесса;
- 3) Check – сбор информации измерения данных, анализ отклонений;
- 4) Act – численный расчёт новых функций для технологического процесса, при необходимости можно повысить степени разложений функций, что повлечёт за собой повышение размерности вектора (6).

Таким образом, для каждой партии на основе описанного выше алгоритма мы получаем контрольные границы, в пределах которых должны лежать выходные показатели продукции, как изображено на рис. 1.

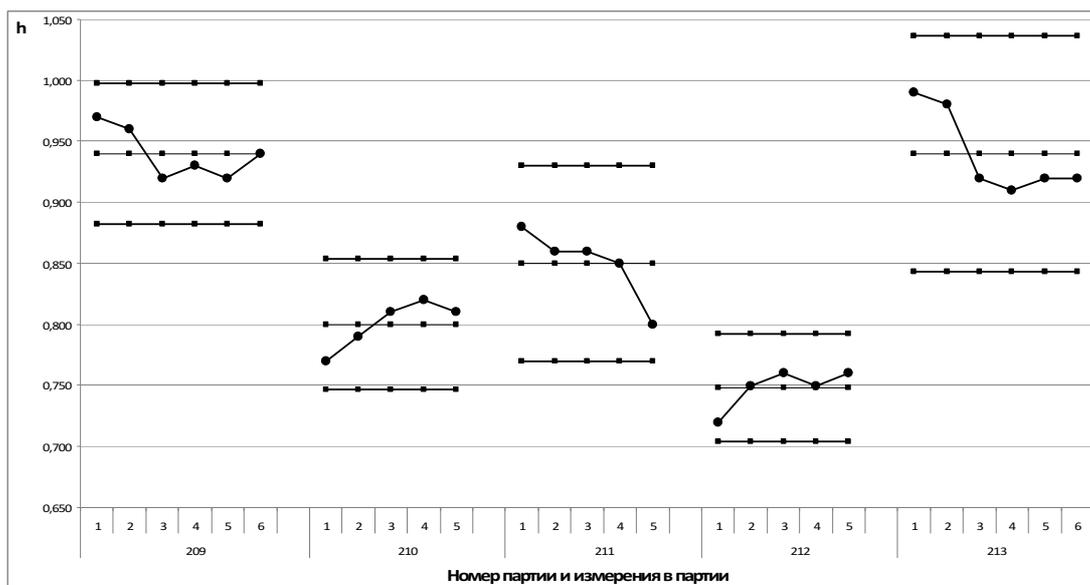


Рис. 1.

1. Алифанов О.М., Артюхов Е.А., Румянцев С.В. Экстремальные методы решения некорректных задач : учеб. для вузов. – М. : Наука, 1988. – С. 67-142.
2. Логанина В.И., Федосеев А.А., Христолюбов В.Г. Статистические методы управления качеством продукции : учеб. пособие. – М. : КДУ, 2008. – С. 59-106.
3. Митин Б.С. Очерки по физико-химии и материаловедению. – М. : СП ИНТЕРМЕТ ИНЖИНИРИНГ, 1998. – С. 139-248.
4. Семушкин М.А. Разработка методики статистического анализа и управления качеством технологического процесса высокоскоростного затвердевания расплава : дис. ... канд. техн. наук. – М., 2008. – С. 45-73.
5. Серов М.М., Ханин Д.Е., Кошкин К.Н. Моделирование технологии получения металлических волокон методом экстракции висящей капли расплава // Быстрозакаленные материалы и покрытия // Труды 9-й Всероссийской с международным участием науч.-техн. конф. (Москва, 30 ноября – 1 декабря 2010 г.). – М., 2010. – С. 14-19.

Рецензенты

Барабанова О.А., д.т.н., профессор кафедры «Неорганические порошковые, композиционные материалы и покрытия» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «МАТИ – Российский государственный технологический университет имени К.Э. Циолковского», г. Москва.

Помазанов В.В., д.т.н., профессор, генеральный директор Некоммерческого партнерства «Группа компаний «Реахим», г. Москва.