

УДК 519.71

Ю.А. ДОЛГОВ, Л.Я. КОЗАК, О.В. ШЕСТОПАЛ

Приднестровский государственный университет им. Т.Г.Шевченко, Тирасполь, Рыбница, Приднестровье, Молдова

СХЕМА МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПЛАВКИ СТАЛИ

Предложена схема получения математической (статистической) модели технологического процесса плавки стали, пригодная для любого металлургического процесса и производства. Схема состоит из двух этапов: получения слабокоррелированной матрицы (таблицы) технологических факторов и получения вектор-столбца выходной функции – обобщенного показателя качества продукции, основанного на ряде частных показателей качества с учетом их весовых коэффициентов. Объединение результатов расчетов по обоим этапам в одну матрицу, пригодную для моделирования по пассивным данным, происходит построчно в соответствии с номером плавки.

Ключевые слова: *плавка стали, исходная таблица данных, корреляционные плеяды, матрица факторов, частные и обобщенные показатели качества, весовые коэффициенты.*

Введение

Прежде чем строить автоматизированную систему управления любым технологическим процессом (ТП), необходимо иметь его математическую модель. Как правило, такая модель в производственных условиях может основываться только на результатах многократных контрольных измерений выходного показателя качества однородной продукции и сопутствующих ему факторов, например, режимов технологических операций, т.е. на пассивном эксперименте. Результатом пассивного эксперимента является таблица, строки которой представляют собой конкретное числовое значение целевой функции (выходного показателя) при конкретном числовом наборе факторов, а столбцы – числовые значения каждого фактора в отдельности. Задача извлечения из такой таблицы скрытой информации для построения модели наталкивается на ряд трудностей, которые обусловлены следующими обстоятельствами.

Во-первых, никакого искусственного изменения факторов ТП в цеховых условиях нет, а имеет место лишь естественное производственное варьирование в пределах допуска на фактор, т.е. сравнительно малое. Это означает, что изменение целевой функции может быть также небольшим, и, чтобы отличить его от шумовых флюктуаций, необходимо иметь достаточно длинную таблицу, в которой возможный эффект воздействия конкретного фактора на целевую функцию проявился бы в полной мере.

Во-вторых, при составлении первоначального списка факторов у исследователя нет информации о конкретном влиянии каждого фактора на целевую функцию. Поэтому часть факторов уйдет в шум экс-

перимента.

В-третьих, в первоначальном списке факторы могут быть сильно коррелированы между собой. Естественно, что такая пара (или группа, плеяда) должна быть разбита и для дальнейшей работы оставлен только один фактор.

Дополнительной трудностью, присущей металлургическим производствам, является формирование целевой функции – выходного показателя качества, – которая представляет собой сложный комплекс химических и физических величин, в то время как она должна быть представлена одним числом. В статье предлагается схема (алгоритм расчета) для получения статистической модели ТП плавки стали, которая опробована на материалах Молдавского металлургического завода (г. Рыбница, Приднестровье, Молдова).

1. Построение таблицы слабокоррелированных факторов

Исходная таблица данных представляет собой матрицу размером $N \times M$, где $N=120$ плавков стали с полным описанием ТП процесса одной плавки, а $M=239$ – факторы, т.е. состав шихты, режимы технологического оборудования, время протекания операций и т.п., всего 28680 чисел (табл. 1), которая представляет собой сверх насыщенный план, так как $N < M$. Из исходной таблицы данных были удалены все неварьируемые факторы. По каждому оставшемуся фактору были построены гистограммы, с помощью которых были отсеяны одномерные грубые промахи. Для каждой пары фактор-выходная величина были построены таблицы двумерного распределения, какие используются в методе Чебышева [1], с помощью которых были отсеяны дву-

мерные грубые промахи, в результате в таблице осталось 112 строк и 230 столбцов.

Дальнейший анализ исходной таблицы данных с целью сокращения количества столбцов и превращения ее из сверхнасыщенного в обычный план велась методом корреляционных плеяд, подробная техника расчетов которых изложена в работах [2, 3].

Основой метода является анализ корреляционной матрицы, которая представляет собой квадратную матрицу размером $M \times M$ (в нашем случае 230×230), главная диагональ которой заполнена единицами, а недиагональные элементы представляют собой меру тесноты линейной связи (коэффициент корреляции) между каждой парой факторов (табл. 2).

Таблица 1

Часть таблицы исходных данных

Номер плавки	SiAl				Крупка 0	MnC 17						
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄		X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁
1	206	0	206	9	111	206	5	204	6	209	10	204
2	206	6	206	13	106	207	6	204	7	206	6	208
3	205	6	205	14	148	205	9	205	5	207	7	103
4	206	10	34	12	110	209	6	208	8	207	7	209
5	208	6	208	9	122	204	6	206	6	208	0	208
6	207	7	207	9	121	206	7	209	6	206	5	205
7	208	7	208	9	125	206	6	206	6	209	5	207
8	207	5	207	9	111	204	6	212	6	209	6	207
9	206	6	206	0	61	207	9	207	16	103	20	0
10	208	6	208	5	70	207	0	206	0	207	0	0
11	209	13	0	0	129	206	10	207	8	208	0	70
12	212	7	212	10	109	204	12	206	0	203	14	85

Таблица 2

Часть корреляционной матрицы

	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀
X ₁	1	0.128	0.296	0.178	0.089	-0.023	-0.041	-0.083	-0.007	0.002
X ₂	0.128	1	0.151	0.165	-0.145	0.012	-0.002	0.011	0.265	0.001
X ₃	0.296	0.152	1	0.555	0.044	-0.063	0.022	0.021	0.063	0.022
X ₄	0.173	0.165	0.555	1	0.063	-0.031	-0.036	0.051	0.226	0.053
X ₅	0.089	-0.146	0.044	0.063	1	0.075	-0.055	-0.034	-0.115	0.254
X ₆	-0.023	0.013	-0.063	-0.031	0.075	1	0.097	0.306	0.103	0.204
X ₇	-0.041	-0.002	0.022	-0.036	-0.055	0.097	1	0.042	0.045	0.033
X ₈	-0.083	0.011	0.021	0.050	-0.034	0.306	0.042	1	0.295	-0.049
X ₉	-0.008	0.265	0.063	0.226	-0.115	0.103	0.045	0.295	1	0.299
X ₁₀	0.002	0.002	0.022	0.053	0.254	0.204	0.033	-0.049	0.299	1

Корреляционную матрицу удобно представить на рисунке в виде графа, вершинами которого являются факторы, а ребрами – максимальные связи. Выбрав некоторое пороговое значение, например $|r_{ij}| = 0,5$, можно отделить по этому признаку плеяды друг от друга.

Внутри каждой плеяды связь между факторами признается сильной, а между плеядами – слабой. Это означает, что если из каждой плеяды выбрать по одному представителю, то новое общее количество факторов, сокращенное до количества плеяд (в нашем случае их было 88), будет нести об исследуемом объекте практически ту же информацию, что и раньше. При этом факторы новой таблицы данных будут слабо коррелированы между собой, что является одним из главных условий перехода к математическому моделированию.

2. Построение выходного показателя

Качество стали оценивается целым комплексом физико-химических показателей, которые находятся в сложной зависимости друг с другом. Между тем для математического моделирования требуется найти некоторый единый универсальный показатель качества произведенной продукции.

Выходом из положения является аналитическая методика расчета обобщенной целевой функции (обобщенного показателя качества), разработанная Е.С. Харрингтоном и усовершенствованная Э.М. Менчером [4]. Расчет ведется в два этапа.

На первом этапе определяются единичные значения функций d_i ($i=1,2,\dots,m$) для любого количества откликов, каждый из которых должен представлять непрерывную монотонную функцию.

Для случая возрастания качества с возрастанием числовых значений соответствующего отклика предложены 3 типа зависимостей (типы 1,2,3), а для случая убывания качества с возрастанием числовых значений предложены еще 3 типа (типы 4,5,6). Для всех трех типов возрастающих кривых определяющим является правильное назначение начала "b" и конца "c" физического значения отклика Y , т.е. должно соблюдаться условие

$$d = \begin{cases} 0, & \text{если } Y < b \\ d, & \text{если } b \leq Y \leq c \\ 1, & \text{если } Y > c \end{cases} \quad (1)$$

Для всех трех типов убывающих кривых определяющим является правильное назначение начала "e" и конца "f" физического значения отклика Y , т.е. должно соблюдаться условие

$$d = \begin{cases} 1, & \text{если } Y < e \\ d, & \text{если } e \leq Y \leq f \\ 0, & \text{если } Y > f \end{cases} \quad (2)$$

Поясним сказанное на условном примере. Пусть выходной показатель качества состоит из четырех компонентов C, Mn, Si, S, которые непосредственно влияют на марку стали.

Исследования показали, что гистограмма распределения углерода, взятого по всем 112 плавкам, носит практически симметричный характер, а качество стали возрастает с ростом углерода в пределах допуска (кривая типа 1); гистограмма распределения марганца носит резко асимметричный характер, а качество стали возрастает с ростом марганца в пределах допуска (кривая типа 2); гистограмма кремния носит асимметричный характер, а качество стали убывает с ростом кремния в пределах допуска (кривая типа 5); гистограмма серы носит симметричный характер, а качество стали убывает с ростом серы в пределах допуска (кривая типа 4).

Определив конкретные значения d_{ij} ($j = \overline{1, N} = 112$) для каждой плавки, можно получить для нее обобщенную функцию качества плавки

$$D = \sum_{i=1}^m \alpha_i \sqrt{\prod_{i=1}^m d_i^{\alpha_i}}, \quad (3)$$

где $0,4 \leq \alpha_i \leq 1$ – веса частных показателей качества d_i , полученных экспертным методом весовых коэффициентов важности [3]; m – число частных показателей (в нашем случае $m=4$).

Объединив матрицу факторов, полученную после выбора представителей из каждой плеяды (в нашем случае 112×88) с вектор-столбцом D_j , получим таблицу, пригодную для извлечения из нее скрытой информации в виде математической модели.

3. Построение модели

Извлечение скрытой информации из таблицы пассивных данных такого большого объема возможно только с помощью модифицированного метода случайного баланса (ММСБ) [3]. Особенностью метода является перевод факторов из числовых значений в кодированные по принципу: все $X_{ij} \leq \bar{X}_i - Z \cdot S_i$ относятся к коду $x_{ij} = -1$; все $X_{ij} \geq \bar{X}_i + Z \cdot S_i$ относятся к коду $x_{ij} = +1$; остальные X_{ij} кодируются как 0. Здесь безразмерный коэффициент Z подбирается в диапазоне $Z=0,25-0,50$.

Тогда таблица факторов превращается в план эксперимента, согласно которому по известным формулам, учитывающим гетероскедастичность исходных данных, получим несколько моделей

$$\hat{D} = 0.636 - 0.048x_2 - 0.034x_{33} - 0.018x_{41} - 0.032x_{56} + 0.023x_{64} + 0.018x_{65} - 0.031x_2x_{41} \quad (4)$$

$$\hat{D} = 0.631 + 0.039x_9 + 0.019x_{18} - 0.040x_{43} - 0.014x_{50} - 0.037x_{43}x_{50} \quad (5)$$

$$\hat{D} = 0.615 + 0.099x_9 - 0.059x_{55} + 0.044x_{76} + 0.036x_{81} - 0.075x_9x_{81} \quad (6)$$

На практике ограничиваются 3-5 моделями, полученными из сочетаний факторов, имеющих первый или второй ранг в своих плеядах, а затем из них выбирают одну наилучшую, у которой получилась максимальная информационная емкость, минимальная дисперсия адекватности и минимальное число членов регрессии. В нашем случае это модель (5).

В модели (5) задействовано всего 4 фактора и одно парное взаимодействие, остальные 84 фактора находятся на оптимальном для данного процесса уровне и поэтому пренебрежимо мало влияют на выходную величину, находясь в пределах своих допусков.

Модели ММСБ, играя чрезвычайно важную роль в отсеивании незначимых факторов и вычислении весов значимых факторов, тем не менее, не очень пригодны для употребления в реальных цеховых условиях, так как значимые факторы представлены в виде кодов, что затрудняет их понимание для практических работников. Гораздо удобнее иметь факторы в именованных величинах, для чего выделенные значимые факторы необходимо обработать с помощью другого метода – метода наименьших квадратов с предварительной ортогонализацией факторов (МНКО) [3], однако это тема уже следующей статьи.

Заключення

1. Впервые предложена и реализована схема математического моделирования такого сложного ТП, как плавка стали (или любого другого металла).

2. Особенностью схемы является формирование целевой функции – выходного показателя качества продукции, в качестве которой предлагается взять обобщенную функцию качества Харрингтона-Менчера, основанную на частных функциях качества физико-химических показателях продукции с учетом их весовых коэффициентов.

3. Расчет модели проводится в несколько этапов, на каждом из которых проводится отсеивание: грубых промахов, тесно коррелированных факторов, незначимых факторов.

4. Схему расчета модели можно остановить на этапе ММСБ, однако при желании получить более

удобные для производства формы можно продолжить расчеты по МНКО, что составит тему следующей статьи.

Литература

1. Митропольский А.К. *Техника статистических вычислений*; 2-е изд., перераб. и доп. / А.К. Митропольский. – М.: Наука, 1971. – 576 с.

2. Дружинин Г.В. *Методы оценки и прогнозирования качества* / Г.В. Дружинин. – М.: Радио и связь, 1982. – 160 с.

3. Долгов Ю.А. *Статистическое моделирование* / Ю.А. Долгов. – Тирасполь: РИО ПГУ, 2002. – 280 с.

4. Менчер Э.М. *Обобщенная функция полезности* // В кн. “Радионуклиды и ионизирующие излучения в исследованиях по виноградарству” / Э.М. Менчер. – Кишинев: Штиинца, 1993. – С. 104-118.

Поступила в редакцию 11.01.2010

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.А. Скобцов, Донецкий Национальный технический университет, Украина.

СХЕМА МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ СТАЛІ

Ю.О. Долгов, Л.Я. Козак, О.В. Шестопал

Пропонується схема отримання математичної (статистичної) моделі технологічного процесу плавлення сталі є придатною для любого металургійного процесу виробництва. Схема складається з двох етапів: отримання слабкорельованої матриці (таблиці) технологічних факторів і отримання вектор-стовпця вихідної функції узагальненого показника якості продукції, заснованого на ряді часткових показників якості з урахуванням їх вагомих коефіцієнтів. Об'єднання результатів розрахунку за обидва етапи в одну матрицю, яка придатна для моделювання за пасивними даними, відбувається построчно згідно з номером плавлення.

Ключові слова: плавлення сталі, вихідна таблиця даних, кореляційні плеяди, матриця факторів, часткові і узагальнені показники якості, вагові коефіцієнти.

SCHEME OF MATHEMATICAL MODELLING OF STEEL FOUNDING TECHNOLOGICAL PROCESS

Y.A. Dolgov, L.Y. Cossack, O.V. Shestopal

It is offered a scheme for receipt a mathematical (statistical) model of steel founding technological process, suitable for any metallurgical process and manufacture. The scheme is consisted of two stages: receipt of feebly correlative technological factor matrix (table) and receipt of output function vector-column-denerized production quality index, which based on some particular quality with their weighty coefficients. Unification of both stages calculation results on one matrix suitable for passive data modeling is taken place for every line according to founding number.

Keywords: steel founding, first data table, correlation pleiads, factor matrix, particular and denerized quality index, weighty coefficients.

Долгов Юрий Александрович – член-корреспондент РАЕН, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой информационных технологий и автоматизированного управления производственными процессами (ИТУ), ПГУ им. Т.Г.Шевченко, Тирасполь, Приднестровье, Молдова, e-mail: dolgov@spsu.ru.

Козак Людмила Ярославна – ст. преподаватель Рыбницкого филиала ПГУ, Рыбница, Приднестровье, Молдова, e-mail: ludmila_1978@rambler.ru.

Шестопал Оксана Викторовна – ст. преподаватель Рыбницкого филиала ПГУ, Рыбница, Приднестровье, Молдова, e-mail: ludmila_1978@rambler.ru.