

Técnica robotizada de producción: Tecnología de agrupamiento

Tercera Parte

Una vez agrupadas las tareas y las poblaciones es posible emplear poderosas técnicas matemáticas en el planeamiento del proceso.

Ing. Marisa R. De Giusti *

Resumen

Este es el tercero de una serie de cinco artículos donde se describen las actividades de estudio realizadas hasta el momento en el tema "Técnicas para la automatización de la producción", dentro de los objetivos del Programa Institucional de Robótica (PIR) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata.

Dentro de dicho tema, esta serie se dedica a la disciplina denominada "Tecnología de agrupamiento", TA (Group Technology), de gran interés para los casos de producción de partes en lotes pequeños y medianos.

Introducción

Este artículo formula y ejemplifica de modo muy simplificado las siguientes seis modalidades de resolución propuestas para la formulación matricial del problema de TA:

1. Análisis del flujo de producción (PFA).
2. Método de los coeficientes similares (SLCA).
3. Algoritmos basados en la selección (SSBA).
4. Algoritmos de energía vincular (BEA).
5. Métodos basados en funciones de costo.
6. Algoritmos de identificación de agrupamientos (clusters).

En el segundo artículo de esta serie (ver Revista Telegráfica-Electrónica N° 912, noviembre 1989) se ha expuesto brevemente la formulación matricial del problema de TA, mostrando la construcción de una matriz de incidencia parte-máquina, cuyas columnas representan a las partes a manufacturar y las filas las máquinas utilizadas (1) o no (0) para las mismas. El agrupamiento de piezas con similitudes de maquinado y de máquinas que trabajan sobre las mismas piezas permite visualizar las "familias de partes" y los "grupos o celdas de máquinas", respectivamente.

En este artículo se exponen los métodos disponibles para llegar a estos agrupamientos de un modo sistemático.

Análisis del flujo de producción (PFA)

El análisis del flujo de producción (PFA: Production Flow Analysis) es un método para identificar las familias de partes y los agrupamientos asociados de máquinas-herramientas, y no utiliza ni un sistema de clasificación y codificación ni los dibujos de las partes para identificar a las familias.

El análisis del flujo de producción estudia las rutas de trabajo de las distintas partes producidas en una empresa, y su idea básica es agrupar aquellas piezas con enrutamientos de trabajo idénticos o similares. Estos grupos pueden ser utilizados posteriormente para formar celdas de máquinas lógicas en un arreglo de tecnología de grupo.

Procedimiento en PFA [2]

El procedimiento en el análisis PFA puede organizarse en los siguientes pasos:

- 1) Definir la población de partes en estudio (número y variedad). Una vez que el tamaño de la muestra queda definido, los datos necesarios son: el número de parte y la secuencia de operaciones (o enrutamiento) para cada parte, datos que pueden obtenerse a partir de las hojas de ruta.

Ciertas informaciones adicionales tales como tamaño del lote, tiempo promedio de ejecución y producción anual pueden ser útiles para el diseño de celdas de máquinas con la capacidad de producción deseada.

- 2) Selección de los procesos de encaminamiento: consiste en acomodar las partes en grupos de acuerdo a la similitud de sus procesos de enrutamiento (cuando existe un gran número de partes en estudio, el único camino práctico es codificar los datos del paso 1 en una computadora); por ejemplo, en la Fig. 12 el código asociado a cada pieza contiene su número de parte y una secuencia de números en código que identifican a máquinas o procesos particulares en su ruta; estos números en código son establecidos de antemano, y en la secuencia mostrada en la Fig. 12 son: 01, 04, 10, 19 y 23. En este caso una posible asignación de códigos de maquinado podría ser la mostrada en la Tabla III.

Una vez codificadas las partes, debe utilizarse un proceso de clasificación para identificar los denominados "paquetes" (packs): un "paquete" es un conjunto de partes con procesos de encaminamiento idénticos, donde algunos de ellos pueden contener un solo elemento y donde cada "pa-

Número de parte	Códigos de la secuencia de maquinado	Otros datos (Tamaño lote, etc.)
1 5 7 8 4	01 04 10 19 23	

Fig. 12 — Formato posible de los datos en PFA.

* Miembro de la Carrera de Investigador de la CIC de la Pcia. de Buenos Aires - Integrante del CeTAD, FI, UNLP.

TABLA III

Ejemplo de asignación de códigos de maquinado

Proceso	Código
Corta	01
Torneado	02
Torneado CNC	03
Agujereado	04
Fresado	05
Roecado	06
Taladrado	07
Rectificado de superficie	08
Rectificado cilindro exterior	09
Rectificado cilindro interior	10
Rectificado excéntrico	11
Estampado	12
Punzonado	13
Soldado	14
Desbarbado	15
Cepillado	16
Limpieza	17
Pintura	18
Pulido	19
Lustrado	20
Acabado	21
Ensamblado	22
Inspección	23
Empaquetado	24

quete" tiene asignado un número o letra para su identificación.

- 3) Carta PFA: Es la muestra gráfica de los procesos usados para cada "paquete" (Fig. 13).
- 4) Análisis: Este es el paso más difícil, ya que deben identificarse a partir del gráfico los grupos similares, reordenando los datos de la carta PFA original dentro de un nuevo patrón que coloque juntos aquellos "paquetes" con rutas similares (Fig. 14). Casi irremediamente, y como residuo de este ordenamiento quedarán "paquetes" sin agrupar, los que deberán ser analizados para determinar si otra secuencia de procesos puede llegar a ubicarlos en alguno de los grupos; en caso contrario estas partes deberán seguir siendo manufacturadas en un lineamiento convencional de planta orientada al proceso.

Dado que el análisis del flujo de producción utiliza más datos de manufactura que datos de diseño para identificar las familias de partes pueden ocurrir ciertos problemas:

- Partes cuyas geometrías básicas son diferentes, pueden sin embargo utilizar procesos de encaminado idénticos o muy parecidos.
- Partes cuyas geometrías son similares, pueden sin embargo utilizar procesos de encaminado bastante diferentes.

Estas características desventajosas de PFA derivan de la circunstancia de que los datos usados para este análisis se obtienen de las hojas de ruta de producción existentes, donde las secuencias de procesos han sido diseñadas en distintos momentos y por distintas personas. Por lo tanto, las rutas pueden contener pasos de procesamiento que no sean óptimos, o que resulten inconsistentes.

Método de los coeficientes de similitud (SLCA) [2]

Los problemas que plantea el empleo de PFA han llevado a los encargados de planificar la producción al empleo de un método denominado SLCA (método de los coeficientes de similitud).

Un coeficiente de similitud S_{ij} , entre dos máquinas i y j se define por:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n d_1(a_{ik}, a_{jk})}{\sum_{k=1}^n d_2(a_{ik}, a_{jk})}$$

siendo:

n : número total de partes.

$d_1(a_{ik}, a_{jk})$: {1 si $a_{ik} = a_{jk} = 1$; 0 en todo otro caso}

y

$d_2(a_{ik}, a_{jk})$: {0 si $a_{ik} = a_{jk} = 0$; 1 en todo otro caso}

Donde k es una dada parte e i y j son dos máquinas. Se observa así que este coeficiente mide el porcentaje de veces que dos máquinas procesan la misma parte.

Para resolver TA usando SLCA hay que sacar los coeficientes de similitud para todos los posibles pares de máquinas, y luego las celdas de máquinas se generan en base a un valor de umbral de los coeficientes.

Por ejemplo, para ilustrar el procedimiento SLCA considérese la siguiente matriz:

Número de parte					Número de máquina	
1	2	3	4	5		
1	1	0	0	1	1	CM-1
1	1	0	0	0	2	
0	0	1	1	1	3	CM-2
0	0	1	1	0	4	

Se calculan los SLCA:

$$S_{12} = S_{34} = 0,75 ; S_{13} = 0,25 ; S_{23} = S_{14} = S_{24} = 0$$

Y se genera con ellos la Fig. 15.

Suponiendo un valor de umbral de los coeficientes de similitud $S_{ij} = 60\%$, las máquinas 1 y 2 con un 75% y las 3 y 4 con igual coeficiente constituyen las dos celdas de máquinas:

$$CM-1 = \{1, 2\}$$

$$CM-2 = \{3, 4\}$$

Códigos de maquinado	Códigos de identificación de paquetes																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
01	X	X	X	X	X		X				X	X	X	X		X	X			
02			X			X			X	X	X									
03	X		X				X											X	X	X
04				X								X								
05		X						X	X						X				X	
06									X										X	
07	X					X	X	X	X						X	X				
08						X		X												
09						X		X												
10	X		X	X				X			X	X							X	
11	X	X	X								X									
12			X				X							X	X					X
13		X					X												X	
14																				
15		X																	X	
16	X	X	X	X	X	X		X			X	X	X		X	X		X	X	X
17							X	X					X							X
18			X						X											
19			X					X		X	X	X	X	X	X	X				
20								X							X	X				
21											X	X			X					
22	X	X					X								X					
23	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				X	X					X
24	X		X					X							X					

Fig. 13 — Carta PFA (Simplificada).

Códigos de maquinado	Códigos de identificación de paquetes																			
	F	C	L	R	A	M	E	K	Q	G	P	B	J	S	H	N	T	D	O	I
01	X	X	X	X	X	X	X							X	X	X	X	X		
02	X	X	X											X						X
03				X	X									X	X		X	X		
04						X	X													
05							X		X	X				X						X
06							X							X						
07							X	X	X	X	X			X						X
08								X						X						
09								X						X						
10	X	X	X	X	X	X	X													X
11		X	X	X	X	X														
12														X	X	X	X	X		
13							X	X	X											
14																				
15														X	X					
16	X	X	X	X	X	X	X							X	X	X				
17														X	X	X				
18														X						X
19		X	X			X		X	X										X	X
20								X											X	X
21		X							X										X	X
22							X												X	X
23	X	X												X	X	X			X	X
24														X	X	X			X	X

Fig. 14 — Carta PFA reordenada indicando los posibles agrupamientos de máquinas.

Una de las desventajas de este método es que falla en el reconocimiento de los problemas resultantes de cuellos de botella que se producen cuando una pieza usa máquinas de más de una celda. El análisis de este problema (denominado "encadenado"), ha llevado a un nuevo algoritmo denominado de "agrupamiento por promedio de encadenado" (ALC).

El ALC define los coeficientes de similitud entre dos agrupamientos como un promedio de los coeficientes de similitud entre todos los miembros de dichos agrupamientos; como paso intermedio utiliza el número total de movimientos intercelulares $MIC_{i,j}$ entre dos celdas de máquinas $CM-i$ y $CM-j$, definido del siguiente modo:

$$MIC_{i,j} = \sum_{k=1}^n [d_3(v_{ik}, v_{jk})]$$

donde

$$v_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si } \sum_j a_{jk} \neq 0 \quad \forall j \in CM-i \\ 0 & \text{en todo otro caso} \end{cases}$$

Nota: $v_{ik} = 1$ significa que la parte k utiliza por lo menos una de las máquinas j de la celda i .

Y donde:

$$d_3(v_{ik}, v_{jk}) = \begin{cases} 1 & \text{si } v_{ik} = v_{jk} = 1 \\ 0 & \text{en todo otro caso} \end{cases}$$

La función de distancia $d(v_{ik}, v_{jk})$ vale 1 si y sólo si la parte involucrada requiere procesamiento en ambas celdas de máquinas i y j , por lo tanto esta parte (k en nuestro caso) es un "cuello de botella". Este problema puede ser resuelto removiendo la parte k de

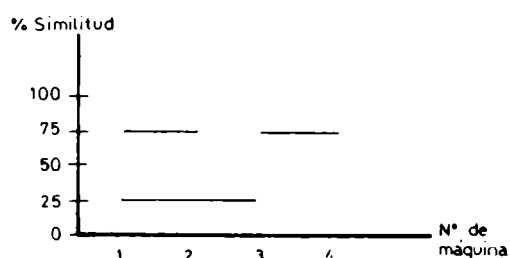


Fig. 15 — Árbol de coeficientes de similitud.

ambas celdas de máquinas o adicionando una máquina idéntica a cada celda de máquina.

Considérese el siguiente ejemplo:

Número de parte					Número de máquina	
1	2	3	4	5		
1	1	0	0	1	1	CM-1
1	1	0	0	0	2	
0	0	1	1	1	3	CM-2
0	0	1	1	0	4	

$v_{1k} = (1, 1, 0, 0, 1)$ es la celda de máquinas CM-1

$v_{2k} = (0, 0, 1, 1, 1)$ es la celda de máquinas CM-2

esto surge:

$$d_3(v_{1k}, v_{2k}) = (0, 0, 0, 0, 1)$$

$$MIC_{1,2} = \sum_{k=1}^5 d(v_{1k}, v_{2k}) = 1$$

La única parte que requiere procesamiento en ambas celdas es la parte 5 cuya función da 1; por esta razón esta parte constituye un "cuello de botella".

Otro método de coeficientes de similitud es estudiado por De Witte [12], quien describe un algoritmo de agrupamiento empleando la idea que algunas máquinas pueden ser incluidas en más de una celda.

Este autor divide todas las máquinas disponibles en tres categorías:

- 1 - Máquinas primarias.
- 2 - Máquinas secundarias.
- 3 - Máquinas terciarias.

Y para analizar las relaciones entre estas máquinas utiliza tres coeficientes de similitud distintos:

- Coeficiente de similitud absoluto: $Sa(i, j)$
- Coeficiente de similitud mutua: $Sm(i, j)$
- Coeficiente de similitud simple: $Ss(i, j)$

El estudio de De Witte da el orden de uso de estos coeficientes, y de tal orden resulta una primera clasificación de acuerdo a $Sa(i, j)$, luego por $Sm(i, j)$ y finalmente por $Ss(i, j)$ para ubicar las máquinas no asignadas.

Algoritmos basados en la selección

El método de agrupamiento basado en la selección de filas y columnas de la matriz de incidencia parte-máquina ha sido estudiado por numerosos autores; King [13] desarrolló el método denominado ROC (Rank Order Clustering: Agrupamiento por orden de peso), que consta de los siguientes pasos:

- 1) A cada fila de la matriz de incidencia parte-máquina se le asigna un peso binario y se calcula su equivalente decimal.
- 2) Se seleccionan las filas de la matriz binaria en orden decreciente de los correspondientes pesos decimales.
- 3) Se repiten luego los pasos 1 y 2 para cada columna.
- 4) Se repiten los pasos 1, 2 y 3 hasta que la posición de cada elemento en cada fila y columna no cambie.

En la matriz final generada por el ROC los racimos o "clusters" se identifican visualmente.

Paso 1: Considérese el siguiente ejemplo:

Peso binario	1	2	3	4	5	Equivalente decimal
	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0	
1	0	1	0	1	1	11
2	1	0	1	0	0	20
3	0	1	0	1	0	10
4	1	0	1	0	0	20

Paso 2: El ordenamiento de filas en orden decreciente de sus pesos decimales da como resultado:

	1	2	3	4	5	
2	1	0	1	0	0	20
4	1	0	1	0	0	20
1	0	1	0	1	1	11
3	0	1	0	1	0	10

Paso 3: Se repiten los pasos 1 y 2 para cada columna.

En este caso las columnas 1 y 3 pesan 12; 2 y 4 pesan 3, y 5 pesa 2, con lo cual la matriz resultante es:

	1	3	2	4	5
2	1	1	0	0	0
4	1	1	0	0	0
1	0	0	1	1	1
3	0	0	1	1	0

Y en esta última matriz se visualizan 2 "clusters".

Otro algoritmo basado en el ordenamiento es el DCA (Direct Cluster Algorithm: Algoritmo de agrupamiento directo). El DCA se desarrolla según los siguientes pasos:

- 1) Se determina el número total de 1's en cada fila y columna de la matriz de incidencia parte-máquina.
- 2) Se elige cada fila en correspondencia con un orden creciente de 1's.
- 3) Se elige cada columna en correspondencia con un orden decreciente de 1's.
- 4) Se repiten los pasos 1, 2 y 3 hasta que la posición de cada elemento en cada fila y columna no varíe.

Basados en la salida final de los pasos expuestos deben reordenarse las matrices de modo de hacer visibles los "clusters".

Algoritmo de energía vincular

Mc Cormick [14] desarrolló el BEA (Bond-Energy-Algorithm: Algoritmo de energía vincular) que busca identificar grupos de variables y "clusters" que aparecen en arreglos complejos de datos; además, el algoritmo permite descubrir las asociaciones e interrelaciones de cada grupo con los restantes. Estas tareas se realizan permutando las filas y las columnas de un

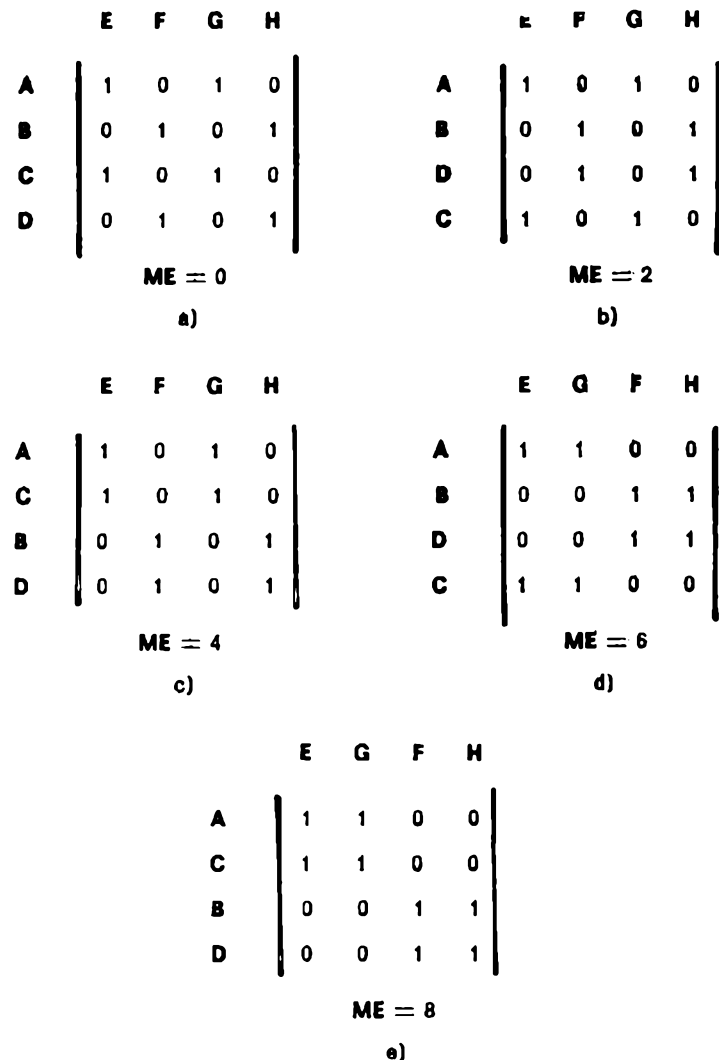


Fig. 16 — Relaciones entre la medida de efectividad (ME) y el grado de aglutinamiento de un arreglo.

arreglo de datos de modo tal de conseguir agrupar a los elementos mayores.

Las permutaciones de un arreglo que proveen el máximo de información pueden encontrarse por medio de una "medida de aglutinamiento" del arreglo de datos.

Medida de efectividad

La medida de efectividad (ME) utilizada en el algoritmo de energía vincular se desarrolló de modo tal que su valor calculado para un dado arreglo varía de acuerdo a cómo están ordenados los datos, esto es, un arreglo en que se han agrupado próximos entre sí los datos más pesados tiene un valor mayor de ME que otro arreglo idéntico, pero con una distribución más uniforme de los pesos.

En la Fig. 16 un mismo arreglo se muestra ordenado de diferentes maneras, y el correspondiente valor de ME puede observarse bajo cada matriz.

La ME de un arreglo A es la suma de los "vínculos fuertes" del arreglo, donde los vínculos fuertes entre dos elementos vecinos-contiguos se definen como su producto.

A partir de ello, la ME se define de la siguiente manera:

$$ME(A) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M$$

$$\left[\sum_{j=1}^N a_{i,j} (a_{i,j+1} + a_{i,j-1} + a_{i+1,j} + a_{i-1,j}) \right]$$

donde:

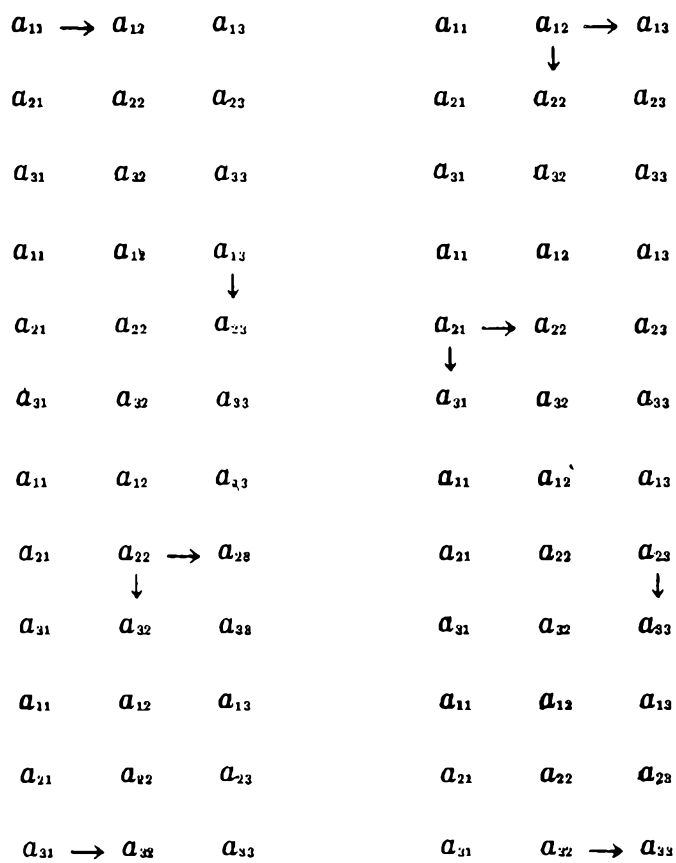
M: Número de filas.

N: Número de columnas.

(Continúa en la pág. 1344)

Técnica robotizada de ...

(de la pág. 1341)



En la realidad, a menudo una pieza está incluida en un plan de procesos que involucra a determinadas máquinas en un cierto "grado" pero también pertenece a otro u otros planes, y los límites de esta "pertenencia" o los grados de la misma resultan difusos; en este caso aparece toda una lógica de manejo algebraico y matricial de tales situaciones (lógica difusa o "Fuzzy") que adjudica pesos a la pertenencia, con lo cual la variación de K altera significativamente el valor de ME .

En la Fig. 17 se puede observar la interpretación gráfica de la medida ME , y las flechas indican los términos que interactúan entre sí (el número de elementos del arreglo ha sido elegido arbitrariamente).

(Continuará)

Fig. 17 — Interacciones a considerar en la ME. Se indican separadamente para no complicar la figura, que debe leerse de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo.

La discontinuidad causada por los límites de la matriz es resuelta presuponiendo que a un arreglo de $M \times N$ elementos se le adicionan dos filas (inicial y final) y dos columnas (a izquierda y derecha) con todos sus elementos en cero.

$$a_{0,j} = a_{M+1,j} = a_{i,0} = a_{i,N+1} = 0$$

La elección del producto simple de los elementos vecinos del arreglo y no el producto de alguna potencia K de ellos altera también significativamente el reordenamiento del arreglo.

Aplicado a la tecnología de agrupamiento (TA), esto lleva a la siguiente diferenciación:

Hay procesos de fabricación de características tales como el ejemplificado en la Fig. 16e), donde las columnas representan partes y las filas máquinas, por lo que los agrupamientos de partes y máquinas son excluyentes y binarios (0,1), y por ende el valor de K no altera en nada el agrupamiento.