

SCREENING DEI PARAMETRI DI PROCESSO IN PRESENZA DI INTERAZIONI

Mark J. Anderson
Mark@StatEase.com

Patrick J. Whitcomb
Pat@StatEase.com

Stat-Ease, Inc. - Minneapolis, MN 55413 Minneapolis, MN 55413 . - www.StatEase.com

Traduzione a cura di:

Maria Pia D'Ambrosio
pia.dambrosio@sixsigmain.it
www.sixsigmain.it

Marco Calderisi
calderisi@chemiometria.it
www.chemiometria.it

Sommario

In questo articolo si descrive una nuova tipologia di disegno fattoriale frazionato a due livelli, pensato appositamente per effettuare lo screening dei parametri di processo. Questo tipo di disegno è denominato "Min Res IV" in quanto richiede un numero minimo di prove (combinazioni delle variabili sperimentali) per evidenziare gli effetti principali, risolvendoli dalle interazioni tra due fattori (risoluzione IV). In questa trattazione sono richiamati e descritti gli approcci tradizionali per lo screening: i disegni fattoriali frazionati standard e i disegni di Plackett-Burman (disegni che hanno una risoluzione non completa e richiedono un numero ridotto di prove) e sono confrontati con i disegni Min Res IV. Per fornire un elemento di realismo, tali sperimentazioni sono state applicate allo studio di una ipotetica apparecchiatura gestita da un sistema a controllo numerico (CNC) ed è stata valutata la capacità di ciascun tipo di disegno di identificare gli effetti principali e le interazioni tra due fattori (2fi).

L'obiettivo finale è quello di fornire strumenti statistici che permettano di fare significativi passi in avanti nel miglioramento dell'efficienza del processo e della qualità del prodotto, con un numero di prove, e quindi con un costo in termini sia economici che di tempo, ridotto.

Introduzione

L'approccio sperimentale tradizionale (OFAT) prevede che sia variato un solo fattore per volta. Tale approccio impedisce del tutto l'identificazione delle interazioni tra i fattori che invece sono altamente probabili, soprattutto nei processi produttivi industriali (Box, 1990). Per questa ragione, al fine di ottenere dei significativi miglioramenti del processo produttivo e/o del prodotto, è necessario impiegare un approccio multivariato, facendo uso dei metodi statistici denominati "Disegno sperimentale" (DOE). La strategia sperimentale generale è descritta nel diagramma di flusso riportato in figura 1.

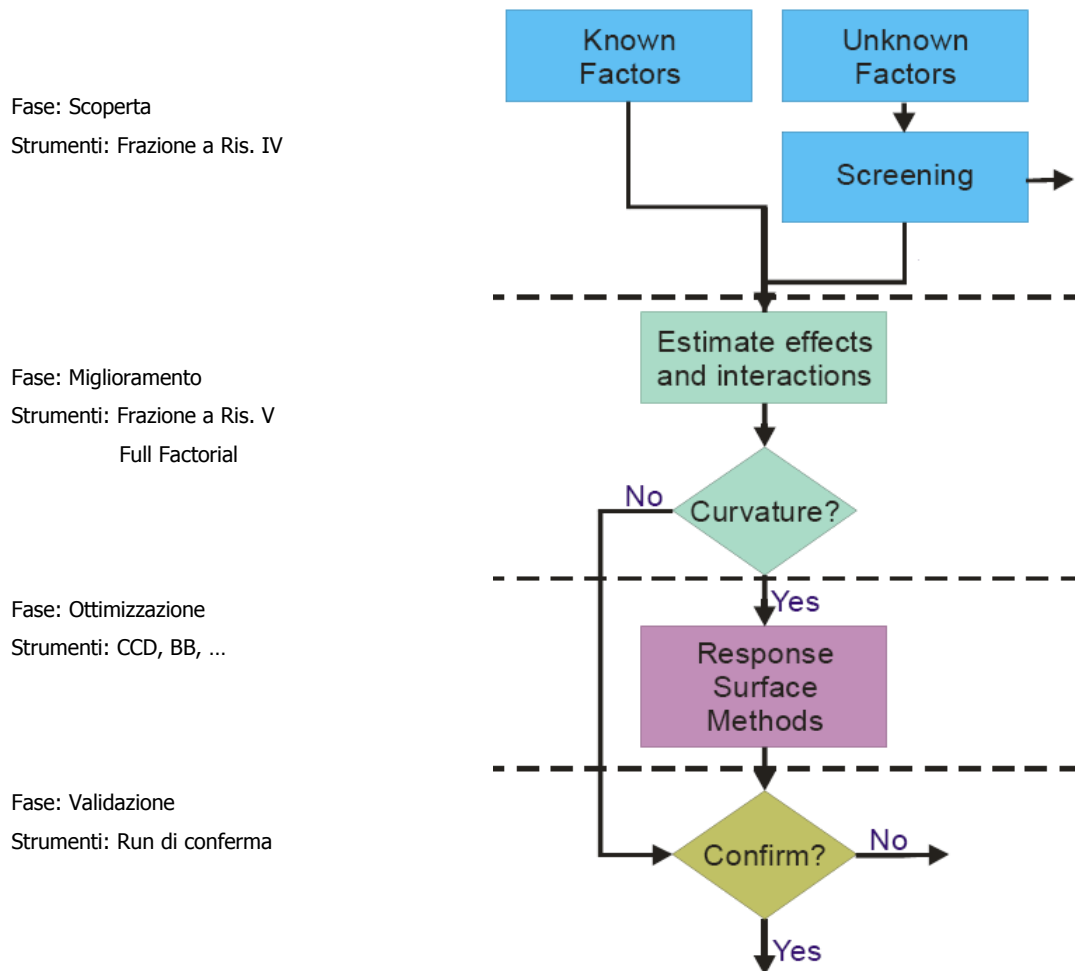


Figura 1: Strategia della Sperimentazione

Tale percorso si può suddividere in 4 parti:

Parte 1. Screening : si utilizzano disegni di screening per separare i reali fattori significativi da tutti gli altri, mantenendo le variabili che quindi hanno un effetto sulla risposta;

Parte 2. Miglioramento : segue dall'analisi approfondita dei fattori selezionati;

Parte 3. Ottimizzazione : generazione di una superficie di risposta e spostamento delle condizioni di processo nella posizione ottimale;

Parte 4. Validazione : esecuzione di prove di verifica per controllare che il modello abbia fornito una predizione accurata delle condizioni operative ottimali per tutte le risposte di interesse e che il processo si possa considerare "robusto" una volta sottoposto alle condizioni operative nominali.

Questo articolo riguarda la prima parte dello schema precedente, ovvero la fase di screening. I disegni fattoriali frazionati a risoluzione IV sono disegni sufficientemente semplici ma anche estremamente potenti. Condurre bene questa fase permette di porsi nelle condizioni di partenza migliori per sviluppare una eventuale ottimizzazione successiva mediante i metodi di "response surface" (RSM), quali ad esempio il "Central Composite Design" (CCD) ed il Box-Behnken (BB).

I disegni fattoriali a due livelli sono tra i migliori strumenti per effettuare uno screening. Se eseguita in modo appropriato tale sperimentazione può rivelare quali sono i fattori effettivamente importanti che influenzano significativamente il processo studiato. Per risparmiare prove costose, gli sperimentatori ricorrono ad una riduzione del numero complessivo di tutte le possibili prove da effettuare. In qualunque modo avvenga tale riduzione si ha una inevitabile diminuzione della capacità del progetto sperimentale di isolare ed evidenziare in modo opportuno tutti i possibili effetti, soprattutto quelli dovuti ad interazioni. Portando tutto ciò ad un punto estremo è possibile frazionare il proprio progetto sperimentale fino alla saturazione, (ovvero all'esecuzione di un numero di prove minime per poter avere qualcosa di sensato) ad esempio valutando sette fattori con otto prove. Spesso però si trascura il fatto che in tali disegni saturati, gli effetti principali sono confusi con le interazione tra due fattori. Si ottiene quindi una risoluzione III solo in termini statistici, in termini reali si può rischiare di condurre sperimentazioni poco efficaci. Disegni con risoluzione III possono dare buoni risultati ma è un po' come prendere a calci un computer per farlo funzionare: magari riparte, ma non si può di certo capire come mai abbia smesso di funzionare.

I disegni con risoluzione IV, grazie alla loro capacità di rivelare più chiaramente gli effetti principali, funzionano molto meglio di quelli a risoluzione III. In questo caso le interazioni tra due fattori rimarranno confuse le une con le altre, ma sarà sempre possibile risolverle in un secondo momento aggiungendo altri punti sperimentali (Anderson and Whitcomb, 2001).

Le due opzioni più note relativamente ai disegni fattoriali su due livelli sono:

- 1) i disegni standard " 2^{k-p} ", dove k è il numero di fattori e p indica il frazionamento;
- 2) i disegni di Plackett-Burman.

Lo schema di tali disegni ridotti può essere trovato in molti testi sul Disegno Sperimentale, (ad esempio Anderson and Whitcomb, 2000). Questi utili disegni standard su due livelli, consentono di scegliere tra 4, 8, 16, 32 o più prove: il numero di prove aumenta con il quadrato del numero di livelli esaminati (in questo caso 2).

La seconda opzione indicata sopra, Plackett-Burman (1946), riguarda disegni su due livelli eseguiti con un numero di prove che aumenta per multipli di 4, ovviamente il disegno adatto prevede un numero di prove che deve essere superiore al numero di fattori da esaminare. I disegni con 12, 20, 24 e 28 prove sono particolarmente interessanti perché consentono di "tappare i buchi" dati dai disegni fattoriali tradizionali, nel senso che forniscono soluzioni sperimentali che si inseriscono, come numero di prove, tra quelle permesse dai disegni fattoriali ridotti. Sfortunatamente questi particolari disegni hanno una struttura delle possibili confusioni degli effetti alquanto complessa. Ad esempio, lo studio di 11 fattori con 12 prove, comporta che gli effetti principali siano parzialmente confusi con 45 interazioni a due fattori, ottenendo quindi una risoluzione III.

L'unica possibilità sarebbe di lavorare con sistemi che non presentano interazioni, ma è ben difficile trovare un tale sistema ed è altresì rischioso fare tali assunzioni se non si è sicuri di come stanno le cose. Di certo, si può diminuire il numero di fattori reali da studiare, ma la struttura degli alias potrebbe comunque non risultare sufficientemente leggibile.

In questo lavoro saranno esaminate queste due tipologie tradizionali di disegno sperimentale, il fattoriale ridotto ed il PB, applicandole su di un caso test. Prima però sarà introdotta una nuova classe di disegni sperimentali, denominata "Min Res IV", che richiede solo $2k$ prove (con k pari al numero di fattori da studiare).

Una nuova tipologia di disegni per lo screening: minimum runs con risoluzione IV.

Il frazionamento dei disegni fattoriali standard è limitato alle potenze negative di 2 ($1/2, 1/4, 1/8, \dots$). È però possibile fare anche dei frazionamenti "irregolari", ovvero non più secondo una potenza di due, mantenendo comunque una alta risoluzione. L'esempio principale può essere il frazionamento per $3/4$ di un disegno fattoriale con 4 fattori, che produce fondamentalmente un disegno con

risoluzione V con solo 12 prove. Può essere creato partendo dalla struttura frazionata in modo standard ($1/4$) e quindi scegliendo altre due o più strutture analoghe. La matrice risultante stima tutti gli effetti principali e le interazioni tra due fattori che sono confuse solo con le interazioni tra tre o più fattori, rendendo così possibile una valida alternativa al corrispondente full factorial a 16 prove.

Impiegando il criterio statistico denominato "D-optimality", l'elenco di disegni sperimentali con un alta risoluzione e con frazionamento irregolare è stato di recente ampiamente ampliato (Oehlert and Whitcomb, 2002). Questi disegni contengono un eguale numero di settaggi alti e bassi per ciascun fattore, perciò sono indicati come "equireplicati". Offrono una risoluzione V ad un numero di prove minimo.

Fattori (k)	2^{k-p} Res IV	Min Res IV	2^{k-p} Res III	PB Res III
5	-	10	8 (1/4)	12
6	16 (1/4)	12	8 (1/8)	12
7	16 (1/8)	14	8 (1/16)	12
8	16 (1/16)	16	-	12
9	32 (1/16)	18	16 (1/16)	12
10	32 (1/32)	20	16 (1/32)	12

Tabella 1. Prove necessarie per effettuare disegni di screening, fino ad un massimo di 10 fattori.

In modo simile, una classe di disegni frazionati irregolari "equireplicati" può essere costruita in modo tale da avere risoluzione IV, rendendoli così molto utili per eseguire lo stadio di screening. Un esempio di un disegno "Min Res IV" sarà mostrato per la prima volta nella presente trattazione. (La procedura da seguire per creare altri disegni è riportata in appendice).

Come mostrato in tabella 1, i disegni "Min Res IV" richiedono un numero di prove comparabile con quello delle classiche alternative impiegate usualmente per lo screening dei fattori sperimentali.

La figura 2 mostra il layout dei disegni Min Res IV per 5 fattori. Si tratta di un subset di punti (indicati nei cerchi più grandi ed in grassetto) estratti da una lista di punti candidati creata partendo da un disegno fattoriale completo per 5 fattori su 2 livelli (2^5).

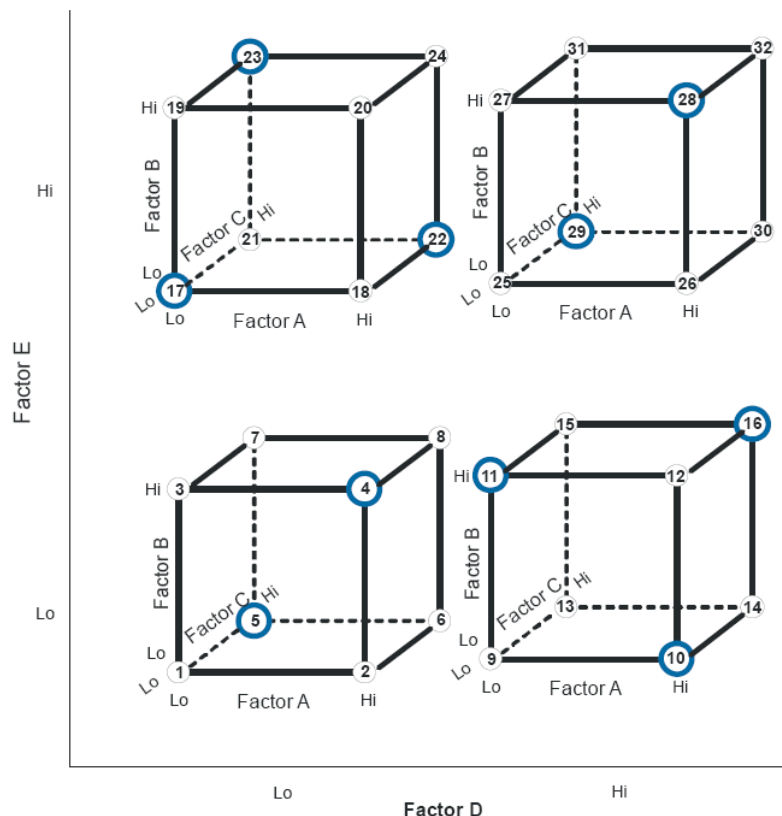


Figura 2. Geometria di un disegno Min Res IV per 5 fattori.

Da notare che questo disegno permette di avere un numero uguale di prove sia al livello alto che al livello basso di ciascuna variabile (equireplicazione). Per esempio, guardando il fattore 3, ci sono 5 punti selezionati nei due cubi in basso e nei 2 in alto, quindi tale fattore è "equireplicato".

Il disegno con 10 punti illustrato in figura 2 confonde ciascun effetto principale solo con le interazioni a 3 fattori, ottenendo così una risoluzione di ordine IV. Produce inoltre delle stime delle interazioni tra due fattori, ma queste sono confuse tra loro, quindi, come indicato precedentemente, ulteriori esperimenti sarebbero necessari qualora una di queste interazioni risultasse significativa.

Analisi della performance di diversi disegni di screening in presenza di interazioni tra due fattori.

Analizziamo come i disegni di screening sopra esposti identificano gli effetti principali e le interazioni tra due fattori. Consideriamo, ad esempio, ad una ipotetica macchina che funziona a controllo numerico (CNC). (Nota: i dati sperimentali derivano da una simulazione generata per creare un caso sperimentale ad-hoc, perciò ogni somiglianza con casi reali è puramente casuale).

Supponiamo di avere un problema con le quote dimensionali relative alla macchina a controllo numerico. Da esperienze pregresse sappiamo che alcuni dei 7 fattori sotto elencati sono probabilmente importanti:

- A. Spostamento sull'asse X
- B. Spostamento sull'asse Y
- C. Spostamento sull'asse Z
- D. Velocità dell'asse
- E. Tool vendor
- F. Velocità di alimentazione
- G. Altezza dell'attrezzo di fissaggio

Relativamente alla possibilità di predire una risposta basandosi su di un disegno sperimentale, Gorge Box disse che "solo Dio conosce il modello" e che "tutti i modelli sono sbagliati, ma qualcuno è utile" (Box, 1976). In questo caso però siamo noi i creatori di un modello predittivo per le quote dimensionali, e quindi lo conosciamo bene. Tale modello include gli effetti principali dei 4 fattori (A, C, D e G) e due interazioni (AG and CD).

$$\text{Quota} = 20 - 0.5A + 2.5C + 1D + 1.5G + 2.0AG - 1.5CD$$

Prepariamo questo modello simulato impiegando Design Expert ® (Helseth, 2000), ignorando gli altri effetti (ovvero ponendo i relativi coefficienti pari a zero) e senza inserire un errore sperimentale (zero standard deviation). In questo modo l'eventuale fallimento nell'evidenziare gli effetti, sarà dovuto esclusivamente alla risoluzione del disegno e non all'errore random.

Inizialmente proviamo il disegno fattoriale frazionato su due livelli che consente di analizzare 7 fattori con 8 prove (2^{7-4}). Questo è un disegno saturo di risoluzione III: offre quindi la possibilità di studiare un massimo numero di fattori con un numero minimo di prove sperimentali. Ovviamente tutto ciò ha un prezzo: ciascun effetto principale infatti è confuso con le molte interazioni tra due fattori. In figura 3 sono evidenziati gli effetti dei fattori considerati mediante un grafico detto "half-normal probability plot", che è un modo per visualizzare in modo semplice ed efficace gli i fattori e le loro interazioni significative. Gli effetti significativi infatti si dispongono sul lato destro del grafico.

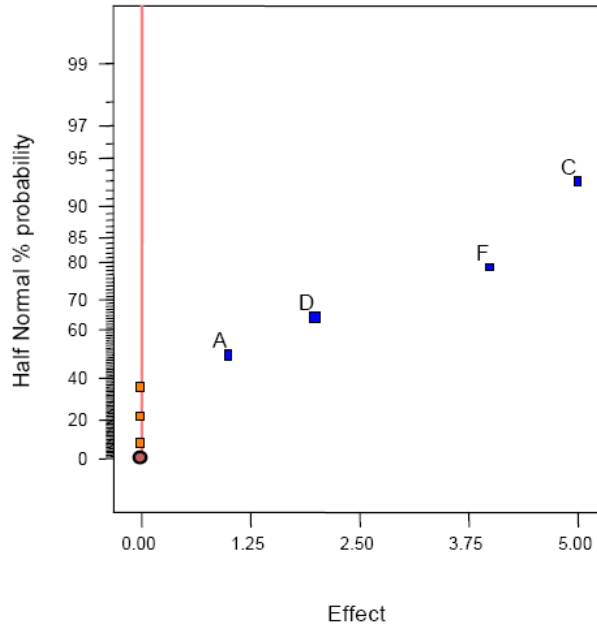


Figura 3. Half-normal probability plot degli effetti per il disegno 2^{7-4} con risoluzione III.

Notare che gli effetti non significativi si allineano sullo zero, proprio perché in questa sperimentazione non c'è errore sperimentale.

Conoscendo il modello vero e le confusioni dalla matrice delle prove, possiamo comporre i coefficienti osservati, che per un disegno su due livelli sono semplicemente pari alla metà degli effetti calcolati. Infatti, si può notare che il coefficiente del fattore A ha un valore assoluto pari a 0.5, mentre quello riportato nel grafico ha un valore di 1.0.

I coefficienti sono stati indicati in modo arbitrario, si deve infatti tenere presente che gli effetti principali sono confusi con le interazioni tra due fattori, perciò ciò che abbiamo indicato come effetto F in realtà potrebbe anche essere l'interazione tra A e G. In genere però le interazioni sono meno probabili degli effetti principali, quindi abbiamo scelto di dare la precedenza a questi ultimi.

Quindi:

$$"A" = A = -0.5$$

$$"B" = 0$$

$$"C" = C = 2.5$$

$$"D" = D = 1.0$$

$$"E" = 0$$

$$"F" = AG = 2.0$$

$$"G" = G + CD = 1.5 - 1.5 = 0$$

Sfortunatamente la nostra assunzione che "F" fosse F è sbagliata, come infatti possiamo vedere dal modello reale, infatti è AG. Inoltre, e questo è ancor peggio, il vero effetto di CD cancella l'impatto del fattore G e quindi nessuno dei due è rivelato.

Questo caso illustra come un disegno con Risoluzione III può dare risultati errati in presenza di interazioni. E' ovviamente possibile riuscire a risolvere questo inconveniente assumendo che il nostro processo, prodotto o sistema abbia solamente effetti principali.

Purtroppo questa scelta è poco sicura a meno che non si abbia una notevole conoscenza del sistema in oggetto (in tal caso forse non sarebbe neppure necessario fare uno screening!).

In conclusione il disegno sperimentale 2^{7-4} con risoluzione III impiegato:

- 1) non identifica un effetto significativo, G
- 2) incorrettamente ne individua uno che invece non lo è, F.

Perciò questo tipo di approccio non è sicuramente il migliore per effettuare uno screening dato che, se esistono interazioni, da sicuramente una risposta errata.

Vediamo ora l'altro tipo di disegno sperimentale che si può usare per lo screening: i disegni di Plackett-Burman (PB). Lo sviluppo di questo disegno frazionato a due livelli è dovuto a degli statistici inglesi, che durante la seconda guerra mondiale svilupparono un piano sperimentale per testare le radio-spolette delle bombe. Si trattava di semplici apparecchi meccanici per i quali nessuna interazione era prevista. I disegni di PB divennero famosi per lo sviluppo industriale perché permettevano di studiare n-1 fattori con n esperimenti, per esempio 11 fattori in 12 prove. Inoltre, all'aumentare del numero di fattori, le prove aumentano di un fattore 4 anziché di una potenza di 2 (come i fattoriali), in questo modo possono offrire una maggiore flessibilità per agire in situazioni in cui si ha a che fare con limitazioni nelle risorse dedicabili alla sperimentazione. (Nota: i disegni di PB "geometrici", ovvero quando N è una potenza di 2, sono equivalenti ai 2^{k-p} fattoriali frazionati. In tali casi consigliamo di impiegare questi ultimi anziché i PB). Prima di entusiasmarci troppo per le possibilità operative offerte da un PB, consideriamo le interazioni per un effetto principale, ad esempio A, in un disegno per 7 fattori con 12 prove:

$$"A" = A - 0.333*BC + 0.333*BD + 0.333*BE - 0.333*BF - 0.333*BG - 0.333*CD - 0.333*CE + 0.333*CF - 0.333*CG - 0.333*DE - 0.333*DF - 0.333*DG + 0.333*EF + 0.333*EG - 0.333*FG$$

come si può vedere, ogni effetto principale è confuso con 15 interazioni a due fattori! Per questa semplice ragione vi suggeriamo di evitare i disegni di PB. Ciononostante proviamo sul nostro caso il PB con 12 prove. E' noto che quando il disegno non è saturato con i fattori sperimentali, è opportuno inserire dei fattori fittizi (dummy) per minimizzare il problema dovuto alle confusioni. (Il motivo per cui lo facciamo è puramente tecnico: gli effetti principali in un disegno di PB sono ortogonali tra loro, ma non con le interazioni tra due fattori, quindi, se la matrice non contiene dei fattori dummy i coefficienti delle interazioni possono diventare più grandi di uno). Questa è la nostra nuova lista di fattori:

- A - G: fattori reali sulla ipotetica macchina CNC
- H, J, K, L: fattori dummy

Notare che la lettera I non compare nella lista, questo perché essa rappresenta in genere la matrice identità, che per ragioni pratiche si può pensare come il simbolo matematico per l'intercetta del modello, generalmente calcolata dalla risposta media complessiva.

Key:

- A: x-Axis shift
- B: y-Axis shift
- C: z-Axis shift
- D: spindle speed
- E: tool vendor
- F: feed rate
- G: fixture height
- H: dummy
- J: dummy
- K: dummy
- L: dummy

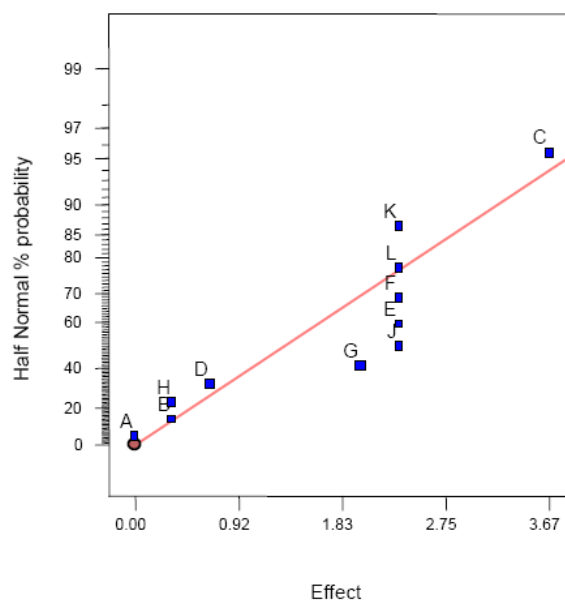


Figura 4. Half-normal probability plot degli effetti per il disegno Plackett-Burman.

In figura 4 è riportato l'half-normal probability plot relativo a questo caso: sono evidenziati i fattori J, K e L. Questi però sono i fattori dummy, quindi qualcosa non ha funzionato. Il problema sono le confusioni, come mostrato nei dettagli seguenti sul calcolo degli effetti:

- "A" = $A - 0.333*CD = -0.5 - 0.333(-1.5) = 0$
- "B" = $-0.333*AG - 0.333*CD = -0.333*(2.0) - 0.333*(-1.5) = -0.167$
- "C" = $C - 0.333*AG = +2.5 - 0.333(2.0) = 1.833$
- "D" = $D - 0.333*AG = +1.0 - 0.333*(2.0) = 0.333$
- "E" = $+0.333*AG - 0.333*CD = +0.333*(2.0) - 0.333*(-1.5) = 1.167$
- "F" = $-0.333*AG + 0.333*CD = -0.333*(2.0) + 0.333*(-1.5) = -1.167$
- "G" = $G + 0.333*CD = +1.5 + 0.333*(-1.5) = 1.000$
- "H" = $-0.333*AG - 0.333*CD = -0.333*(2.0) - 0.333*(-1.5) = -0.167$
- "J" = $+0.333*AG - 0.333*CD = +0.333*(2.0) - 0.333*(-1.5) = 1.167$
- "K" = $-0.333*AG + 0.333*CD = -0.333*(2.0) + 0.333*(-1.5) = -1.167$
- "L" = $+0.333*AG - 0.333*CD = +0.333*(2.0) - 0.333*(-1.5) = 1.167$

Solo gli effetti con un valore più grande di quello assunto dai fattori dummy possono essere considerati significativi. In questo caso il fattore C è l'unico che è possibile identificare da tale disegno. A questo punto l'unica cosa che possiamo provare a fare è un fold over, aggiungendo ulteriori 12 prove a quelle già eseguite è possibile ottenere un disegno con risoluzione IV. In questo caso però, impiegando un fattoriale standard, con 16 prove si sarebbe ugualmente ottenuto un disegno con risoluzione IV, ovvero con otto prove in meno di quanto richiesto da un PB con fold over.

In conclusione da un PB applicato a questa situazione si ottiene che:

- 1) è possibile selezionare correttamente solo un effetto principale
- 2) vengono persi ben 3 effetti principali

E' consigliabile quindi di non usare un PB se si ha un forte sospetto che ci possano essere delle interazioni. Dovendo utilizzare un PB si deve tenere presente che più corse prevede meglio è, in quanto la dimensione dei coefficienti delle confusioni diminuisce all'aumentare del numero di prove effettuate. Inoltre, quando si ha un numero di fattori reali inferiore al numero di fattori necessari per saturare un PB, come nel caso studiato, è consigliabile di impiegare sempre dei fattori dummy.

Vediamo quindi come opera un fattoriale frazionato con risoluzione IV. Questa matrice sperimentale permette di stimare gli effetti principali non confondendoli con le interazioni a due fattori (per esempio: "A" = $A + BCE + CDG + DEF$), mentre le interazioni a due fattori sono confuse le une con le altre (ad esempio: "AB" = $AB + CE + FG$). Come si può vedere nell'"half-normal probability plot" relativo, vengono identificati tutti gli effetti principali (ricordare che il modello è una funzione di A, C, D, G e AG e CD), soddisfacendo in pieno il requisito primario di una prova di screening.

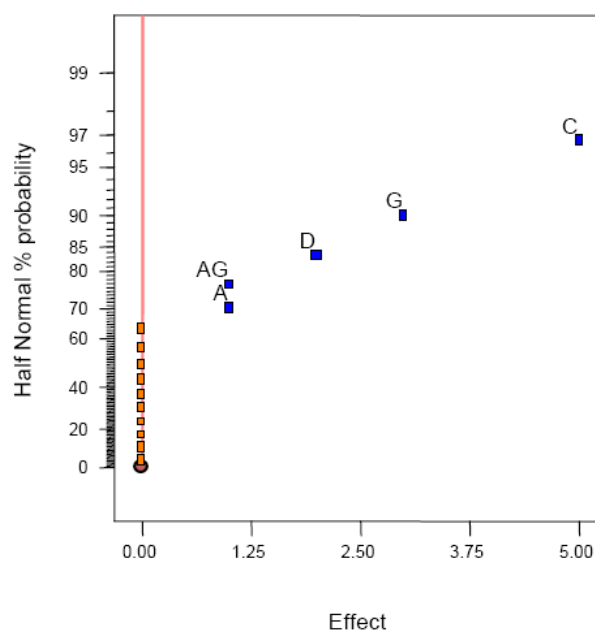


Figura 5: Half-normal probability plot degli effetti di un disegno Res IV 2^{k-p}

In presenza di interazioni tra due fattori solo i disegni di risoluzione IV (o superiore) possono assicurare una possibilità di screening accurata.

Whitcomb e Oehlert (ibid.) hanno indicato che il numero minimo di prove per un disegno con risoluzione IV è solo due volte il numero di fattori (prove = 2k). Ciò può quindi offrire un notevole risparmio di prove se paragoniamo questo tipo di disegno a quelli tradizionali 2^{k-p} con risoluzione IV. Un disegno fattoriale frazionato regolare infatti richiede 32 prove che si studino da 9 sino a 16 fattori. Per lo stesso range di fattori, i Min Res IV creati da Whitcomb e Oehlert richiedono invece da 18 a 32 prove, dipendentemente dal numero di fattori. Quindi, ad esempio, per nove fattori questo tipo di disegno consente un risparmio di ben 14 prove (32 – 18). Nel caso in cui si debba esaminare 16 fattori invece non si ha nessun vantaggio, in quanto sono comunque necessarie 32 prove.

Applicando il Min Res IV a sette fattori (la struttura del disegno sperimentale è mostrata in appendice) alla nostra ipotetica macchina CNC, otteniamo i risultati riportati in figura 6.

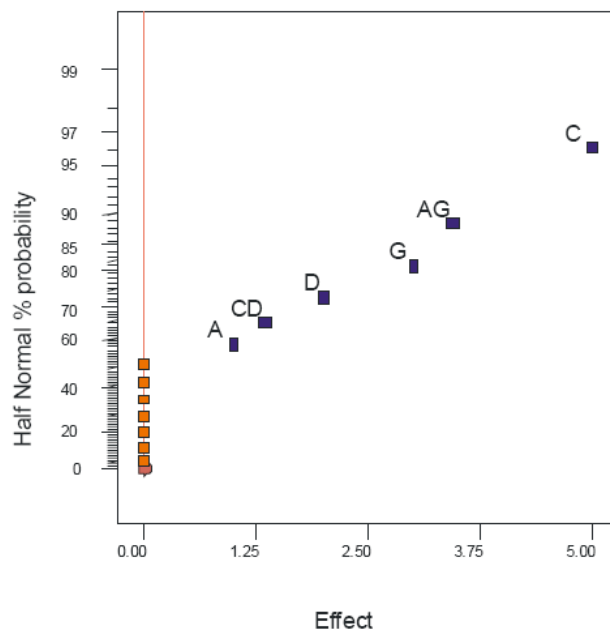


Figura 6. Half-normal probability plot degli effetti di un disegno Min Res IV

Il Min res IV ha selezionato correttamente tutti gli effetti principali, ciò è dovuto alla favorevole struttura delle confusioni. A titolo di esempio si riporta quella del fattore A:

$$\begin{aligned}
 \text{"A"} = & A + 0.333*ABC - 0.111*ABD + 0.556*ABE + 0.333*ABF + 0.556*ABG - 0.111*ACD + 0.111*ACE + 0.778*ACF + 0.333*ACG - \\
 & 0.111*ADE - 0.111*ADF - 0.111*ADG + 0.111*AEF + 0.556*AEG + 0.333*AFG + 0.667*BCD - 0.222*BCE + 0.222*BCF - 0.444*BCG + \\
 & 0.444*BDE + 0.667*BDF + 0.444*BDG - 0.222*BEF + 0.444*BEG - 0.444*BFG + 0.889*CDE + 0.222*CDF + 0.667*CDG - \\
 & 0.222*CEF - 0.222*CEG + 0.222*CFG + 0.889*DEF + 0.444*DEG + 0.667*DFG - 0.222*EFG
 \end{aligned}$$

Inoltre si vede che se le interazioni tra due fattori sono grandi abbastanza rispetto alle altre interazioni (e all'errore sperimentale) possono essere tranquillamente identificate. Ciò è dovuto ad un artefatto delle confusioni, come mostrato di seguito:

$$\begin{aligned}
 \text{"AB"} = & AB + 0.333*BC - 0.778*BD - 0.111*BE + 0.333*BF - 0.111*BG + 0.222*CD - 0.222*CE + 0.444*CF - 0.667*CG + 0.222*DE \\
 & + 0.222*DF + 0.222*DG - 0.222*EF + 0.889*EG - 0.667*FG
 \end{aligned}$$

In ogni caso è opportuno accettare le interazioni tra due fattori con la dovuta cautela: è sempre meglio approfondire lo studio per valutare tali interazioni con più sicurezza. Inoltre è bene utilizzare i disegni di screening esclusivamente per stabilire il punto di partenza più opportuno per effettuare disegni sperimentali più approfonditi (a più alta risoluzione) e non per scopi predittivi.

Conclusioni

Questo lavoro è dedicato alla fase di screening. In presenza di interazioni a due fattori, solo disegni con risoluzione IV (o superiore) possono assicurare dei risultati validi. Se vi è la necessità di eseguire un numero limitato di prove, in molti casi il disegno sperimentale Min Res IV può offrire una alternativa valida e conveniente rispetto ad un disegno fattoriale frazionato standard equivalente (2^{k-p}).

I risultati conseguibili dipendono dalla tipologia degli effetti:

Scenario 1 - niente di significativo: è necessario quindi rivolgere la nostra attenzione altrove cercando altri fattori che influenzino la risposta;

Scenario 2 - solo gli effetti principali sono significativi: è possibile agire al fine di cercare le condizioni ottimali;

Scenario 3 – interazioni a due fattori sono significative: in questo caso è necessario risolvere gli effetti confusi eseguendo un "semi-fold" (vedi Anderson and Whitcomb, 2001)

Seguendo questa strategia è possibile avere una buona probabilità di ottenere risultati significativi riducendo i costi ed i tempi sperimentali.

Riferimenti

- Anderson, M. and P. Whitcomb. 2000. *DOE Simplified, Practical Tools for Experimentation*. Portland, Oregon: Productivity.
- Anderson, M. and P. Whitcomb. 2001. How to Save Runs, Yet Reveal Breakthrough Interactions, by Doing Only a Semifoldover on Medium-Resolution Screening Designs. *Proceedings of 55th Annual Quality Congress*. Milwaukee: American Society of Quality.
- Box, G.E.P. 1990. George's Column: Do Interactions Matter? *Quality Engineering*. Vol. 2, No. 3, p365.
- Box, G.E.P. 1976. Science and Statistics. *Journal of American Statistical Association*, 71, p791-799.
- Helseth, T. J., et al. 2004. *Design-Expert Software, Version 7* (pre-release). Minneapolis: Stat-Ease, Inc.
- Li, W and Jeff Wu. 1997. Columnwise-Pairwise Algorithms with Applications to the Construction of Supersaturated Designs. *Technometrics* 39, 1781-179.
- Oehlert, G. and P. Whitcomb. 2002. Small, Efficient, Equireplicated Resolution V Fractions of 2k Designs and their Application to Central Composite Designs. *Proceedings of 46th Fall Technical Conference*. American Society of Quality, Chemical and Process Industries Division and Statistic Division; American Statistical Association, Section on Physical and Engineering Sciences.

Appendice 1: schemi per disegni sperimentali Min Res IV per 5 e 7 fattori

Tabella 1

	A	B	C	D	E
1	-	+	+	-	+
2	-	-	-	-	+
3	-	-	+	+	+
4	-	-	+	-	-
5	+	-	+	-	+
6	+	+	+	+	-
7	+	+	-	+	+
8	+	-	-	+	-
9	-	+	-	+	-
10	+	+	-	-	-

Tabella 2

	A	B	C	D	E	F	G
1	-	-	-	+	+	-	+
2	-	-	+	+	-	+	-
3	-	+	-	+	+	-	-
4	+	-	+	-	+	-	-
5	-	+	+	-	+	+	+
6	-	+	-	+	-	+	+
7	+	-	-	-	+	+	-
8	+	+	+	-	-	+	-
9	+	+	-	-	+	-	+
10	+	-	+	-	-	+	+
11	+	+	+	+	+	+	+
12	+	-	-	+	-	-	-
13	-	+	+	+	-	-	+
14	-	-	-	-	-	-	-

Appendice 2: dettagli per la costruzione di disegno Min Res IV e loro proprietà

1. Il numero di prove sperimentali è pari a due volte il numero di fattori: $prove = 2k$
2. Utilizzare il criterio ristretto "D-optimal" per la ricerca di un disegno equireplicato, ovvero dove le prove al livello alto e basso di ciascuna variabile siano eseguite in ugual numero
3. Effettuare la selezione utilizzando l'algoritmo columnwise-pairwise (Li e Wu, 1997)

Alcune proprietà dei disegni Min Res IV:

1. Gli effetti principali non sono confusi con le interazioni a due fattori
2. Confusioni parziali sono presenti tra le interazioni tra due fattori e quelle a più fattori
3. Per alcuni disegni (non tutti) l'uso della regressione forward-stepwise può aiutare a trovare le interazioni significative tra due fattori a condizione che:
 - a) le interazioni non significative tra due fattori siano piccole rispetto a quelle significative
 - b) l'errore sperimentale sia piccolo rispetto alle interazioni significative
4. In alcuni casi l'intercetta è confusa con le interazioni tra due fattori. Per esempio, nel disegno Min Res IV per 7 fattori si ha:

$$\text{"Intercetta"} = \text{Intercetta} - 0.333 * BC + 0.333 * BD - 0.333 * BE - 0.333 * CD + 0.333 * CE - 0.333 * DE$$

Questo però non interferisce con lo scopo principale di questo tipo di disegni che è quello di funzionare come strumento di screening per separare i pochi effetti importanti dai tanti non significativi. Ovviamente una tale confusione può porre problemi in sede di predizione, quindi, come abbiamo detto precedentemente, in tal caso è opportuno eseguire uno studio più approfondito. E' meglio non usare mai i modelli ottenuti dai disegni di screening per scopi predittivi al di là di stabilire un buon punto di partenza per una sperimentazione più approfondita (con disegni a più alta risoluzione).

Nota:

I files di DX7 utilizzati in questo articolo sono a disposizione per eventuali approfondimenti operativi. Richiederli semplicemente via e-mail (sales@sixsigmain.it) unitamente alla copia demo di DX7.