

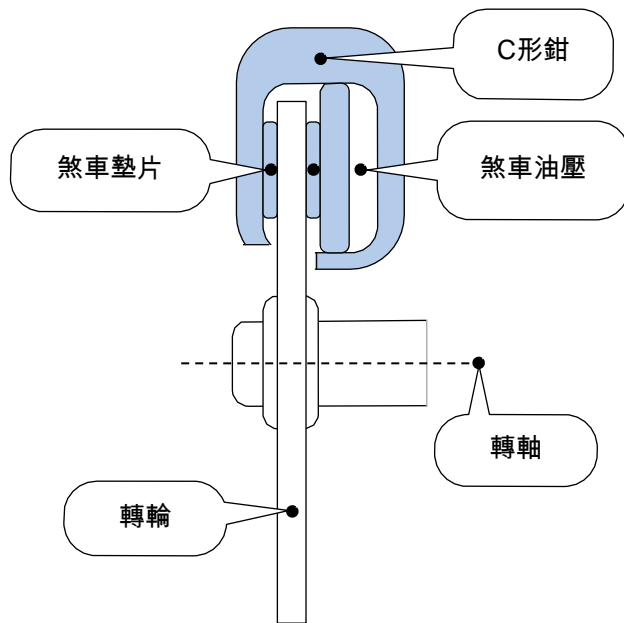
第1.3節 實例：煞車組件設計

Design of a Brake Assembly

- 1.3-1 問題描述 (Problem Description)
- 1.3-2 品質特性及理想機能 (Quality Characteristics and Ideal Function)
- 1.3-3 信號因子 (Signal Factors)
- 1.3-4 控制因子 (Control Factors)
- 1.3-5 干擾因子 (Noise Factors)
- 1.3-6 實驗直交表 (Orthogonal Array)
- 1.3-7 實驗數據與S/N比計算 (Raw Data and S/N Ratios)
- 1.3-8 因子反應分析 (Factor Response Analysis)
- 1.3-9 設計最佳化 (Design Optimization)
- 1.3-10 確認 (Confirmation)
- 1.3-11 設計改善前後的比較 (Comparison)

1.3-1 問題描述 (Problem Description)

- 日本一家汽車零組件廠為了改善一煞車組件的品質，著手進行此煞車組件的重新設計工作。
- 駕駛者施加一力量在煞車踏板上後，引起煞車油壓 (brake fluid pressure) 上升並帶動了C形鉗 (caliper) ，使得煞車墊片 (pad) 對著轉輪 (rotor) 接觸並施壓。
- 煞車墊片與轉輪的磨擦產生了煞車力矩 (braking torque) 。



問題描述

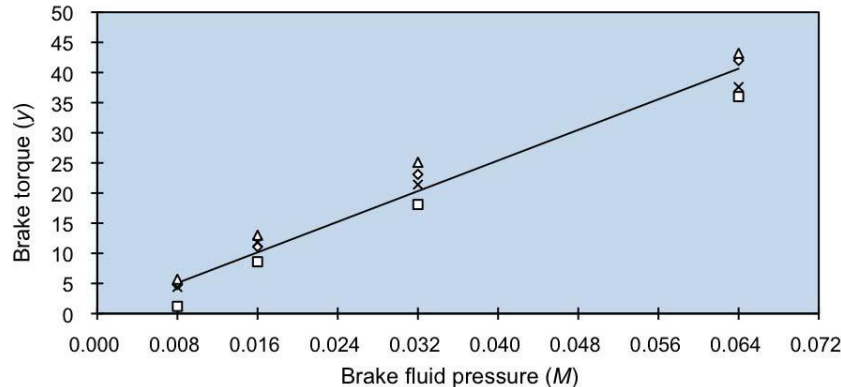


- 系統輸入的總能量必須等於系統輸出的總能量，亦即煞車油壓的能量轉換成煞車力矩、熱、及聲音。
- 磨擦熱及聲音代表能量的浪費，煞車力矩才是有用的部份：
磨擦熱及聲音必須越小越好，而煞車力矩必須越大越好。
- 煞車系統的機械效率 (efficiency) 可以用下式表示：

$$\beta = \frac{y}{M} \quad (1.3-1式)$$

問題描述

- 從機械效率的觀點， β 應該是越大越好。
- 另一方面，從操控性的觀點， β 事實上也代表煞車系統的靈敏度 (sensitivity) 。
- 從靈敏度的觀點， β 不只是越大越好 (越靈敏) ，而且要求要穩定：亦即不讓使用者感覺到有時候煞車很「銳利」，有時候卻很「遲鈍」。



- 這個M-y圖顯示煞車的靈敏度不穩定，容易受到干擾因子的影響。
- 理想的實驗數據值應該落在一直線上，如此才是一個穩定的煞車系統。
- β 值也有提高的空間。

1.3-2 品質特性及理想機能

- 本例中，品質特性是煞車力矩。
- 理想的煞車組件是：煞車力矩（ y ）和煞車油壓（ M ）之間形成一直線關係

$$y = \beta \times M \quad (1.3-2\text{式})$$

- 當品質特性的理想值隨著某一因子而改變時，我們稱之為動態的品質特性。
- 1.3-2式是一通過原點的直線，所以稱為「原點直線型」的理想機能。

1.3-3 信號因子 (Signal Factors)

- 煞車油壓並非是一個設計參數，工程師是無法控制的。
- 煞車油壓是系統使用者（駕駛者）可以自行改變的因子，是一種系統的輸入值，這種因子稱之為「信號因子」。
- 在動態特性中，品質特性的理想值是隨著信號因子而改變的。
- 信號因子之變動水準範圍通常考慮使用者可能輸入的最大範圍：

$M = \text{煞車油壓 (單位 : kg/mm}^2 \text{)}$

$M1 = 0.008, M2 = 0.016, M3 = 0.032, M4 = 0.064$

1.3-4 控制因子 (Control Factors)

表1.3-1 煞車組件設計的控制因子及水準表

因子	說明	Level 1	Level 2	Level 3
A	墊片材料 (pad material)	Type-1	Type-2	
B	墊片形狀 (pad shape)	Shape-1	Shape-2	Shape-3
C	墊片曲線 (pad curve profile)	Type-1	Type-2	Type-3
D	墊片添加物 (pad additive)	Low	Medium	High
E	轉輪材料 (rotor material)	Gray	Cast	Steel
F	墊片漸縮 (pad taper)	Low	Medium	High
G	漸縮厚度 (tapering thickness)	Low	Medium	High
H	轉輪結構 (rotor structure)	Type-1	Type-2	Type-3

註：陰影部份為原設計值

1.3-5 干擾因子 (Noise Factors)

- 影響品質特性的因子，有些是無法控制的，譬如周遭的溫度、濕度等。
- 這些不可控制或不願意去控制的因子統稱為干擾因子；干擾因子是使得品質特性產生變異的因子。
- 煞車組件設計的目標是：煞車力矩與煞車油壓間維持線性關係。
- 亦即，選擇設計參數，使得煞車力矩因為干擾因子的影響而偏離直線的程度減至最小。
- 換句話說，使得這個煞車組件對這些干擾因子是足夠穩健的。
- 在田口方法中，「高品質」的意義是強調產品或製程的穩健性，亦即，品質特性受干擾因子的影響很小，所以田口方法又稱為「穩健品質設計法」。

干擾因子

- 造成煞車力矩變異的主要干擾因子是：煞車墊片的溫度、周遭的濕度、煞車墊片的磨耗程度。
- 如果煞車力矩對這些主要的干擾因子夠穩健，則此設計必定對其它次要的干擾因子也夠穩健。
- 煞車力矩有降低的傾向：在高溫（煞車頻繁）、潮濕（下雨天）、高磨耗（舊的煞車墊片）的條件下。
- 煞車力矩有升高的傾向：在低溫（煞車較不頻繁）、乾燥（晴天）、低磨耗（新的煞車墊片）的條件下。
- 這些資訊使得3個主要的干擾因子可以進一步複合成單一的干擾因子N。
- 工程師具體地定出實驗用的兩個水準如下：

N1 = 360°F墊片溫度，潮濕的環境，及80%墊片磨耗 360°F = ? °C

N2 = 60°F墊片溫度，乾燥的環境，及10%墊片磨耗

干擾因子

- 此外，縱使煞車油壓是一個定值時，在整個煞車過程的時間中，所量測到的煞車力矩也會隨著時間而有些變異。
- 理想上，當煞車油壓維持不變時，煞車力矩也希望維持均勻不變。
- 換句話說，希望煞車力矩不隨著時間而有變異。
- 依此，工程師們考慮另一干擾因子 Q ，並定義其兩個水準如下：

$Q1 =$ 煞車過程所量測到的最大煞車力矩

$Q2 =$ 煞車過程所量測到的最小煞車力矩

1.3-6 實驗直交表 (Orthogonal Array)

表1.3-2 實驗記錄表

Exp.	A	B	C	D	E	F	G	H	M = 0.008		M = 0.016		M = 0.032		M = 0.064		
									N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	
									Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1
1	Type-1	Shape-1	Type-1	Low	Gray	Low	Low	Type-1									
2	Type-1	Shape-1	Type-2	Medium	Cast	Medium	Medium	Type-2									
3	Type-1	Shape-1	Type-3	High	Steel	High	High	Type-3									
4	Type-1	Shape-2	Type-1	Low	Cast	Medium	High	Type-3									
5	Type-1	Shape-2	Type-2	Medium	Steel	High	Low	Type-1									
6	Type-1	Shape-2	Type-3	High	Gray	Low	Medium	Type-2									
7	Type-1	Shape-3	Type-1	Medium	Gray	High	Medium	Type-3									
8	Type-1	Shape-3	Type-2	High	Cast	Low	High	Type-1									
9	Type-1	Shape-3	Type-3	Low	Steel	Medium	Low	Type-2									
10	Type-2	Shape-1	Type-1	High	Steel	Medium	Medium	Type-1									
11	Type-2	Shape-1	Type-2	Low	Gray	High	High	Type-2									
12	Type-2	Shape-1	Type-3	Medium	Cast	Low	Low	Type-3									
13	Type-2	Shape-2	Type-1	Medium	Steel	Low	High	Type-2									
14	Type-2	Shape-2	Type-2	High	Gray	Medium	Low	Type-3									
15	Type-2	Shape-2	Type-3	Low	Cast	High	Medium	Type-1									
16	Type-2	Shape-3	Type-1	High	Cast	High	Low	Type-2									
17	Type-2	Shape-3	Type-2	Low	Steel	Low	Medium	Type-3									
18	Type-2	Shape-3	Type-3	Medium	Gray	Medium	High	Type-1									

1.3-7 實驗數據與S/N比計算 (Raw Data and S/N Ratios)

表1.3-3 實驗數據與S/N比

Exp.	M = 0.008				M = 0.016				M = 0.032				M = 0.064				β	S_d	S/N
	N1		N2		N1		N2		N1		N2		N1		N2				
	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2			
1	4.8	0.9	5.8	0.8	8.5	6.5	11.5	6.8	20.4	13.2	25.0	16.2	36.9	32.7	43.5	34.5	573	3.6	44.0
2	4.5	2.5	5.7	3.2	12.5	9.6	13.0	10.0	23.5	20.3	25.1	21.4	42.0	36.0	43.2	36.1	634	2.7	47.4
3	5.9	5.2	6.8	5.9	10.6	9.3	11.4	10.2	23.5	22.0	24.3	22.5	42.9	40.3	43.8	40.6	668	1.5	53.2
4	4.5	2.1	5.7	3.0	12.1	8.9	14.3	10.5	22.1	16.9	24.2	20.0	41.0	34.0	42.4	37.6	618	2.8	46.9
5	6.5	2.1	7.8	3.2	12.3	6.9	13.2	8.6	23.3	17.2	24.3	18.3	44.3	36.9	48.9	37.2	652	3.5	45.3
6	5.0	4.2	5.8	4.3	11.5	9.4	12.3	9.9	20.8	16.8	21.0	18.5	43.0	40.2	43.1	41.0	644	1.5	52.4
7	5.2	4.0	5.6	4.5	11.8	9.1	12.3	10.1	21.2	17.5	20.0	18.3	40.3	36.2	42.2	38.2	614	1.7	51.4
8	2.4	0.0	4.3	2.8	6.7	4.0	7.2	3.6	16.3	11.1	18.3	12.3	30.1	27.8	34.3	30.6	466	2.6	45.0
9	6.3	4.8	7.8	6.1	12.1	9.3	13.5	11.9	24.4	19.6	26.3	22.3	48.5	40.3	50.2	44.0	718	2.6	48.9
10	2.1	0.0	2.9	0.0	4.9	0.0	7.4	4.2	18.3	9.5	17.7	10.8	32.0	26.3	35.3	28.1	455	3.8	41.6
11	4.9	1.2	7.6	1.8	11.3	6.5	15.3	6.8	23.4	15.0	25.1	17.2	40.1	33.2	50.5	35.5	622	4.7	42.4
12	5.1	4.4	6.4	4.4	10.1	7.8	11.2	8.5	21.7	18.7	22.1	20.1	43.1	41.2	44.4	41.5	657	1.4	53.3
13	2.1	0.0	5.4	0.6	6.7	1.2	7.3	2.3	13.4	9.4	16.4	11.1	38.9	27.9	43.3	31.1	505	5.0	40.0
14	5.9	5.0	6.8	5.2	13.3	12.0	14.2	13.3	24.9	23.1	26.3	25.4	47.9	46.3	49.7	47.2	756	1.3	55.3
15	3.2	0.0	3.9	1.8	8.7	3.2	9.6	5.1	13.2	7.9	19.5	11.1	38.2	32.1	42.5	33.0	528	4.5	41.5
16	4.1	2.7	5.9	4.4	12.3	8.7	13.7	9.2	24.3	18.9	25.5	20.2	44.3	39.0	47.7	42.4	679	2.6	48.4
17	2.3	0.8	3.2	2.1	10.2	8.0	12.5	8.8	21.6	16.5	23.6	20.4	38.8	32.4	41.1	36.6	591	2.9	46.3
18	1.2	0.0	5.1	1.2	7.8	2.3	13.0	5.0	20.3	11.1	21.2	12.4	40.1	31.6	45.1	32.0	557	4.8	41.2

Average = 608

46.9

實驗數據與S/N比計算

- β 是這16個數據的迴歸直線的斜率：

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n M_i y_i}{\sum_{i=1}^n M_i^2} \quad (1.3-3式)$$

How to derive this equation?

- S_d 代表這16個資料點偏離迴歸直線的量，計算如下：

$$S_d = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \beta M_i)^2}{n-1}} \quad (1.3-4式)$$

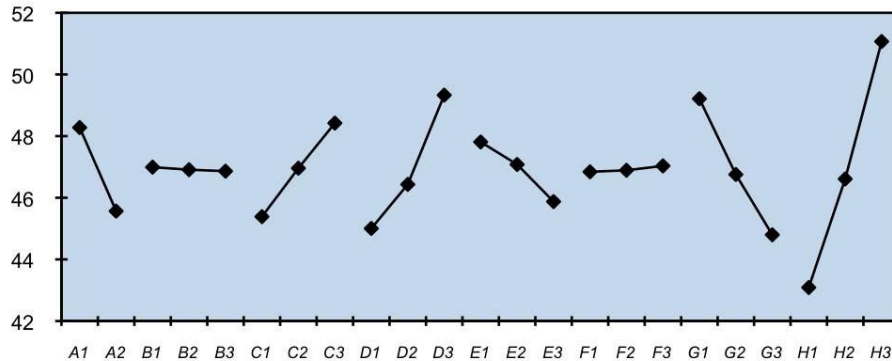
- S/N的計算如下：

$$S/N = -10 \log \frac{S_d^2}{\beta^2} \quad (1.3-5式)$$

1.3-8 因子反應分析 (Factor Response Analysis)

表1.3-4 S/N比的因子反應表

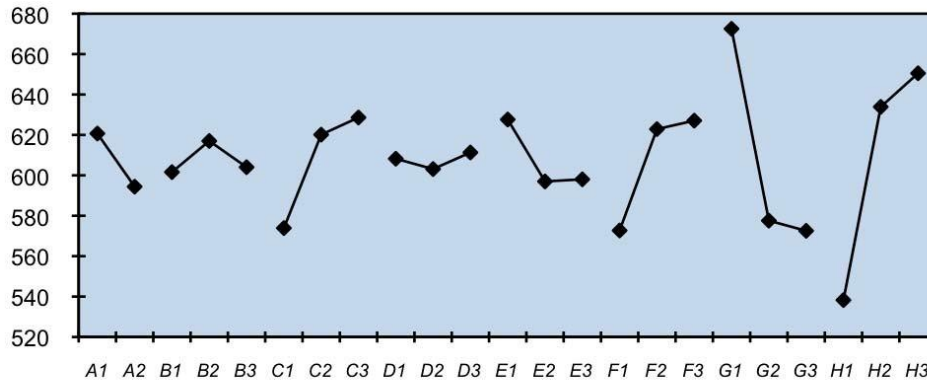
	A	B	C	D	E	F	G	H
Level 1	48.3	47.0	45.4	45.0	47.8	46.8	49.2	43.1
Level 2	45.6	46.9	47.0	46.4	47.1	46.9	46.8	46.6
Level 3		46.9	48.4	49.3	45.9	47.0	44.8	51.1
Range	2.7	0.1	3.0	4.3	1.9	0.2	4.4	8.0
Rank	5	8	4	3	6	7	2	1



因子反應分析

表1.3-5 β 的因子反應表

	A	B	C	D	E	F	G	H
Level 1	621	602	574	608	628	573	673	538
Level 2	594	617	620	603	597	623	578	634
Level 3		604	629	611	598	627	573	651
Range	26	15	55	8	31	54	100	112
Rank	6	7	3	8	5	4	2	1



1.3-9 設計最佳化 (Design Optimization)

- 最佳化的程序分成兩個步驟：先縮小變異，亦即最大化S/N比；再最大化煞車效率。
- 為了進行兩階段最佳化 (two-stage optimization) 的程序，我們先將控制因子分成3類。
- 目前我們還是以一半準則來判斷因子是否有影響力：

表1.3-6 控制因子的分類

因子類別	是否影響 S/N?	是否影響 β ?	控制因子	用途
1	Yes	Yes/No	A, C, D, G, H	用來縮小變異
2	No	Yes	E, F	用來調整靈敏性至最大值
3	No	No	B	用來降低成本

設計最佳化

- 先調整第1類因子 (A, C, D, G, H) 來最大化S/N比：

A1 B? C3 D3 E? F? G1 H3

- 接著調整第2類因子 (E及F) 來使煞車靈敏性達到最大值：

A1 B? C3 D3 E1 F3 G1 H3

- 最後調整第3類因子 (B) 來最小化成本：

A1 B1 C3 D3 E1 F3 G1 H3 (1.3-6式)

1.3-10 確認 (Confirmation)

➤ 預測

表1.3-7 新舊設計下的S/N及 β 預測值

Factor	Original Design			New Design		
	Level	Response		Level	Response	
		S/N	β		S/N	β
A	1	48.3		1	48.3	
B	2			1		
C	2	47.0	620	3	48.4	629
D	2	46.4		3	49.3	
E	2		597	1		628
F	2		623	3		627
G	2	46.8	578	1	49.2	673
H	2	46.6	634	3	51.1	651
Average		46.9	608		46.9	608
Predicted		47.3	621		58.6	776

➤ 確認實驗

表1.3-8 確認實驗數據

Exp.	A	B	C	D	E	F	G	H	M = 0.008		M = 0.016		M = 0.032		M = 0.064		β	S_d	S/N								
									N1		N2		N1		N2					N1		N2					
									Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2	Q1	Q2				Q1	Q2	Q1	Q2				
Original	1	2	2	2	2	2	2	2	4.8	1.2	5.7	4.4	11.1	8.6	13.0	11.8	23.1	18.1	25.1	21.4	42.0	36.0	43.2	37.6	635	2.7	47.6
New	1	1	3	3	1	3	1	3	5.3	4.6	5.8	5.4	12.2	10.1	13.2	11.9	24.6	23.1	25.0	24.3	49.3	47.1	50.1	48.2	758	1.0	57.4

Gain = 123 9.8

1.3-11 設計改善前後的比較 (Comparison)

