

國立交通大學
精密與自動化工程碩士專班

應用數值分析
期末報告

題 目：焊接樑之最佳成本設計

組 別：第四組

指導教授：陳申岳 博士

姓 名：薛欽鐸 (9569501)、黃子澤 (9569502)

楊少卿 (9569503)、廖佳鴻 (9569510)

張志群 (9569513)、黃于修 (9569521)

江富隆 (9569529)

2007.06.26

目 錄

一、任務分工	2
二、問題背景描述	3
三、專案目標	4
四、非線性問題公式化	6
五、專案流程說明.....	11
六、結果與討論.....	12
七、SmartDO 與 MATLAB 結果輸出說明	18
八、參考文獻.....	23

附錄 A、SmartDO 程式檔

附錄 B、MATLAB 程式檔

一、任務分工

成員	執行內容描述
薛欽鐸	1. 專案構想 4. 公式推導 2. 資料收集 5. SmartDO 程式撰寫 3. 題目定義 6. MATLAB 程式撰寫
黃子澤	1. 資料收集 2. 題目定義 3. SmartDO 程式撰寫 4. 系統平面、立體圖繪製
楊少卿	1. 資料收集 2. 題目定義 3. SmartDO 程式撰寫
廖佳鴻	1. 資料收集 2. 題目定義 3. SmartDO 程式撰寫 4. 數據圖表製作
張志群	1. 資料收集 2. 題目定義 3. SmartDO 程式撰寫
黃于修	1. 資料收集 2. 題目定義 3. 資料整理 4. 報告彙整
江富隆	1. 資料收集 2. 題目定義 3. MATLAB 程式撰寫

二、問題背景描述

熔接是目前無論建築工程或機械工程領域使用相當廣泛，熔接主要用於中型或大型機件之製造，如鏈輪、槽輪、曲柄、連桿、推桿，構架、外殼及支架等。

熔接之主要優點為取代鉚接（大型之鉚釘並不實用），相較鍛造及鑄造則易於成型，且費用較低廉，在整體結構設計上，可降低材料用量與重量，一般構件在過負荷下，熔接結構常較鑄造件安全可靠，因為，熔接件僅產生變形，而脆性之鑄件材卻可能產生破裂。

因此，本專題將利用 SmartDO 套裝軟體在設定相關限制條件下，去求解此系統之最佳成本，另外，結合 MATLAB 內之最佳化工具作兩者比較，探討兩者方法在搜尋收斂及最佳數值之差異之研究。

三、專案目標

如下圖，假設一機械加工廠，考量承製一受固定負載之支架 A 設計，考量成本、可靠及易製性，且由於該工廠已有現成熔接生產線，因此，決定以熔接方式設計，但考量成本之節省，針對材料及重量加以考量，假設所需之夾治具與設備費是現成，因此，除此上述費用不計之外，設計出一成本最佳化之支架。

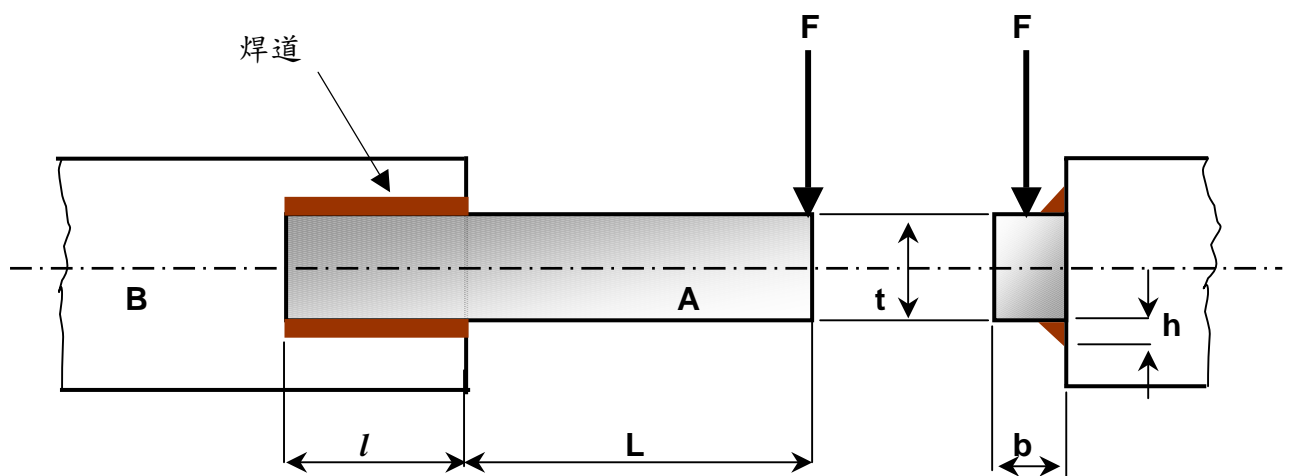


圖 1、系統架構圖

3.1 系統參數定義：

- (1) 自由端受力 $F = 26.67 \text{ kN}$
- (2) 支架懸臂長度 $L = 355.6 \text{ mm}$
- (3) 選用之支架材料：1010 鋼材
 - (a) 查表 1010 鋼楊氏係數 (Young's modulus) $E = 206.84 \text{ kN/mm}^2$
 - (b) 查表 1010 鋼容許熔接設計剪力 $\tau_d = 0.0937 \text{ kN/mm}^2$
 - (c) 查表 1010 鋼容許設計正應力 $\sigma_d = 0.2068 \text{ kN/mm}^2$

(d) 查表 1010 鋼剛性係數 $G = 82.737 \text{ kN/mm}^2$

(4) 自由端點允許撓曲量 $\delta_{free} = 6.35 \text{ mm}$

3.2 成本參數定義：

(1) 設備費 C_e (夾治具、熔接機)：現成物品，不考量。

(2) 熔接材料費 $C_s = 6.41 \times 10^{-6} \text{ US/mm}^3 \times V_s$ (焊料體積)

(3) 1010 鋼材料費 $C_m = 2.93 \times 10^{-6} \text{ US/mm}^3 \times V_m$ (樑棒體積)

(4) 熔接機人工費 C_h (含操作及維護費) = 10 US/hr

假設熔接機器效率為 6 分鐘/mm^3 ：

$$\begin{aligned} C_h &= 10 \times \frac{1}{60} \text{ (hr/min)} \times 6 \text{ (min/mm}^3\text{)} \\ &= 6.1 \times 10^{-5} \text{ US/mm}^3 \times V_s \end{aligned}$$

其中，焊料體積 $V_s = 2 \times \left(\frac{1}{2} \times h^2 \times l\right) = h^2 \times l$

樑棒體積 $V_m = t \times b \times (L+l)$

3.3 熔接工程之最佳成本定義：

目標函數： $F(x) = C_s + C_m + C_h$

$$\therefore F(x) = [(6.41 \times 10^{-6} + 6.1 \times 10^{-5}) h^2 \times l] + [2.93 \times 10^{-6} (t \times b(L+l))]]$$

四、非線性問題 (NLP) 公式化

4.1 未知數定義：

- (1) 支架截面積高度尺寸 t
- (2) 支架截面積寬度尺寸 b
- (3) 焊道長度 l
- (4) 填角焊之腳長尺寸 h

4.2 限制條件定義：

- (1) 合成剪應力 $\tau(x)$ 需小於或等於容許設計剪力 τ_d ；

$$\tau(x) \leq 0.0937$$

- (2) 樑內最大正應力 $\sigma(x)$ 需小於或等於容許設計剪力 σ_d ；

$$\sigma(x) \leq 0.2068$$

- (3) 自由端點之撓曲量 $\delta(x)_{free}$ 需小於或等於 6.35mm；

$$\delta(x)_{free} \leq 6.35$$

- (4) 填角焊腳長之邊長尺寸 h 至少需 3.175 mm；

$$h \geq 3.175$$

- (5) 焊道長度 l 需大於或等於 0；

$$l \geq 0$$

- (6) 支架截面積高度 t 需大於或等於 0；

$$t \geq 0$$

(7) 支架截面積寬度尺寸 b 需大於填角焊腳長尺寸 h ；

$$b \geq h$$

(8) 自由端受力 F 需小於或等於挫曲荷重 $P(x)_{buckling}$ ；

$$P(x)_{buckling} \geq F$$

(9) 填角焊腳長 h 、焊道長度 l 、支架截面積高度 t 及寬度 b 之下邊界分別如下：

$$3.175\text{mm} \quad 2.54\text{mm} \quad 2.54\text{mm} \quad 2.54\text{mm}$$

(10) 填角焊腳長 h 、焊道長度 l 、支架截面積高度 t 及寬度 b 之上邊界分別如下：

$$254\text{mm} \quad 254\text{mm} \quad 254\text{mm} \quad 254\text{mm}$$

4.3 公式推導：

考量一懸臂焊接樑自由端受力作用下，共計有固定端合成剪應力、彎曲應力、撓曲、焊接處應力等效應，以下將針對前述幾種作公式化解析：

(1) 慣性矩公式： $I = \frac{bh^3}{12}$ \therefore 支架A截面積慣性矩為： $I_A = \frac{b \times t^3}{12}$

(2) 焊接應力：

承受偏心負荷之熔接件，焊道除承受直接剪力負荷外，同時亦會承受力矩剪應力負荷之作用，由於焊道喉部尚有最大剪應力產生，故只分析喉部處之剪應力。

(a) 直接剪應力：

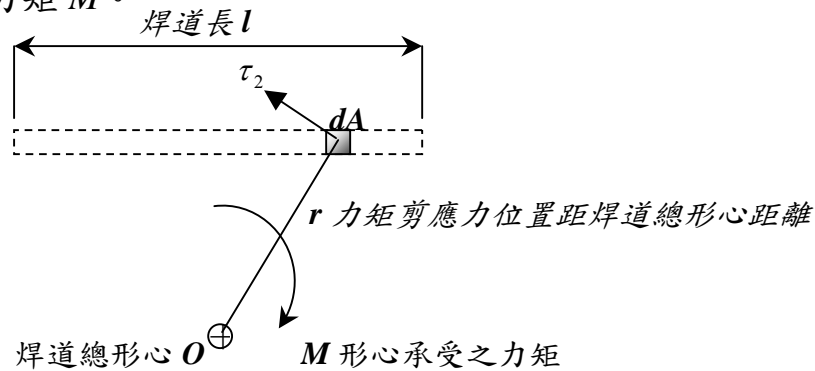
$$\tau_1 = \frac{F}{\sum A_i} = \frac{F}{\sum (0.707 \times h_i \times l_i)} \quad (i = 1 \sim n)$$
$$\tau_1 = \frac{F}{2(0.707 \times h \times l)} = \frac{F}{\sqrt{2} \times h \times l}$$

(b) 力矩剪應力：下圖 O 為整體熔接面積之行心， τ_2 為作用於微小面積熔接面

積 dA 上之力矩剪應力， τ_2 之方向與位置半徑 r 成垂直，平衡原理中，在

dA 上由剪應力 τ_2 所生之微小力矩對全部熔接面積積分後，所得力矩和應

等於外加力矩 M 。



$$\therefore M = \int \tau_2 dA = \int \frac{\tau_2}{r} r^2 dA = \frac{\tau_2}{r} \int r^2 dA = \frac{\tau_2 \times J}{r} \quad \therefore \tau_2 = \frac{M \times r}{J}$$

其中， J 為焊道群之極慣性矩：

$$J = J_0 + A \times r^2 \quad \left\{ \begin{array}{l} J_0 : \text{各別焊道對本身形心之極慣性矩} \\ A : \text{各別焊道之焊喉面積} \\ r : \text{各別焊道形心至焊道總形心距離} \end{array} \right.$$

$$\therefore J_0 = I_x + I_y = \frac{1}{12} (0.707 \times h) l^3 + \frac{1}{12} (0.707 \times h)^3 l$$

$$\approx \frac{1}{12} (0.707 \times h) l^3 = \frac{1}{12} A \times l^2 (\because A = 0.707 \times h \times l)$$

$$\therefore J = J_0 + A \times r^2 = \frac{1}{12} \times A \times l^2 + A \times r^2 = A \left(\frac{l^2}{12} + r^2 \right) = 2 \left\{ 0.707 \times h \times l \left[\frac{l^2}{12} + \left(\frac{h+t}{2} \right)^2 \right] \right\}$$

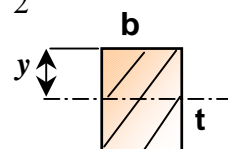
$$\text{又 } r = \left[\frac{l^2}{4} + \left(\frac{h+t}{2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{故其合成剪應力 } \tau_{(x)} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + 2\tau_1\tau_2 \cos \theta} \quad \left(\text{其中 } \cos \theta = \frac{l}{2r} \right)$$

(3) 彎曲力矩公式： $M = P \times L$

(a) 支架固定端最大彎矩 $M = F \times L$

(b) 承受彎矩後之彎應力 $\sigma = \frac{My}{I} = \frac{Mt}{2I}$ ($y = \frac{1}{2}t$ 離中性軸最遠之處)



$$= \frac{6F \times L}{b \times t^2}$$

(4) 撓曲公式： $K = \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI}$

(a) 固定端點條件 $y(0) = 0, \frac{dy}{dx} = 0$

$$\int_0^x y'' dx = \int_0^x \frac{-M}{EI} dx, \quad y'(x) - y'(0) = \int_0^x \frac{F(L-x)}{EI} dx = \frac{F(Lx - \frac{x^2}{2})}{EI} \Big|_0^x$$

$$y'(x) - y'(0) = \frac{F}{EI} (Lx - \frac{x^2}{2}) ; \quad y'(x) = \frac{F}{EI} (Lx - \frac{x^2}{2})$$

再對 $y'(x)$ 進行積分

$$\int_0^x y' dx = \int_0^x \frac{F}{EI} (Lx - \frac{x^2}{2}) dx, \quad y(x) - y(0) = \frac{F}{EI} (L \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{6}) \Big|_0^x$$

$$\therefore y(x) = \frac{F}{EI} (\frac{Lx^2}{2} - \frac{x^3}{6})$$

(b) 對於自由端點之撓曲：當 $x = L$ 時

$$\therefore \delta(x) = \delta(L) = \frac{F}{EI} (\frac{L^3}{2} - \frac{L^3}{6}) = \frac{F}{EI} (\frac{2L^3}{6}) = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{4F \times L^3}{E \times t^3 \times b}$$

(5) 懸臂樑之挫曲荷重 P_{cr} ：參考 *G.V.Reklaitis, A.Ravindran, K.M.Ragsdell [1]* 中，

針對窄方形棒之挫曲荷重最佳近似值如下：

$$P_{cr}(x) = \frac{4.013 \sqrt{E \times I \times C}}{L^2} \left[1 - \frac{a}{L} \sqrt{\frac{E \times I}{C}} \right]$$

其中， E ：材料楊氏係數 (*Young's modulus*)

I ：懸臂樑截面積慣性矩

L ：懸臂長

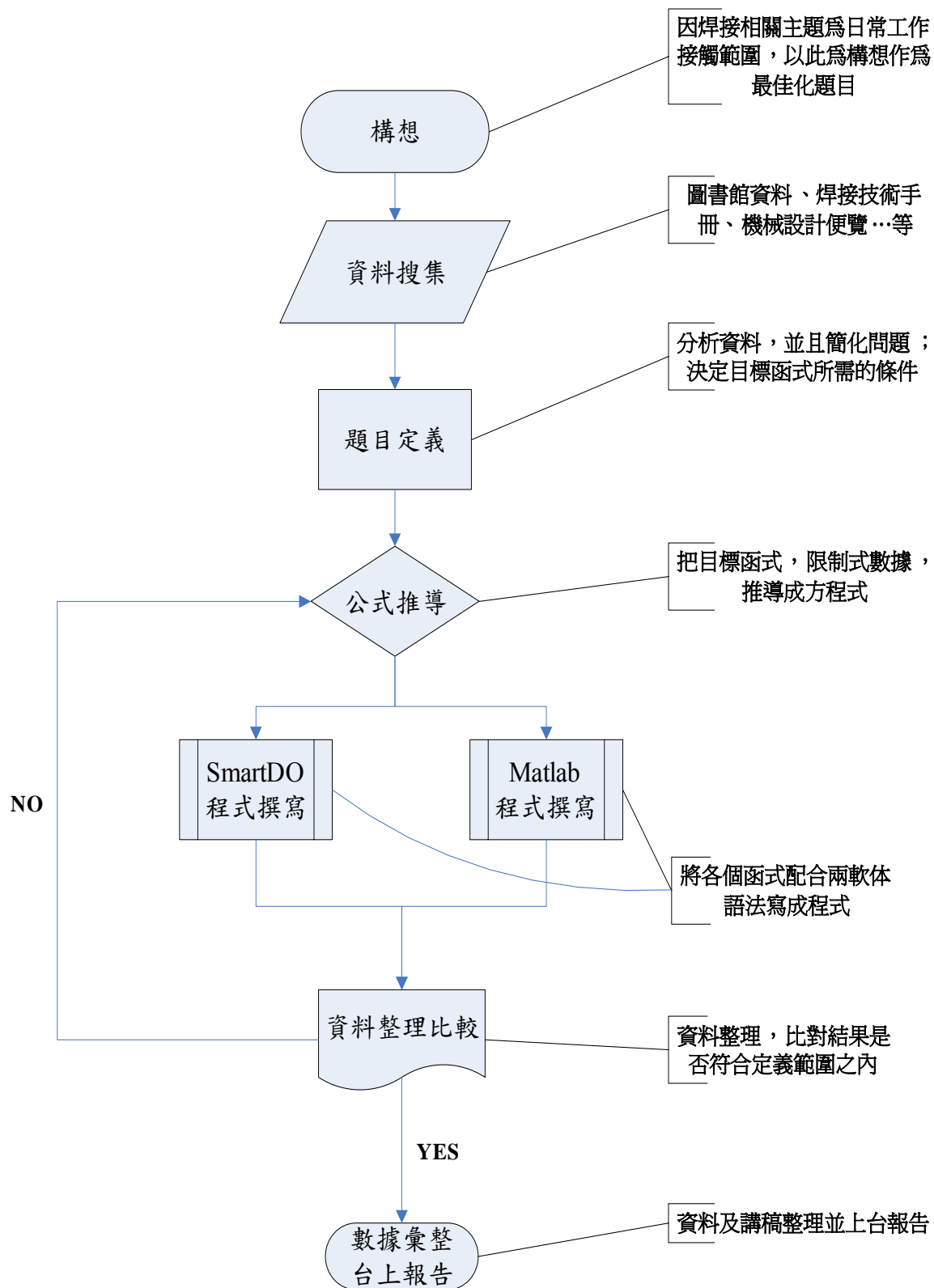
C ：扭力剛度 (*Torsional rigidity*)，其中

$$C = G \text{ (剛性係數 Modulus of rigidity)} \times J \text{ (極慣性矩)}$$

$$= G \times b \times t^3$$

a : 形心至作用力面垂直之距離, $a = \frac{t}{2}$

五、專案流程說明



六、結果與討論

6.1. SmartDO 運算結果：如圖 2、表 1 所示。

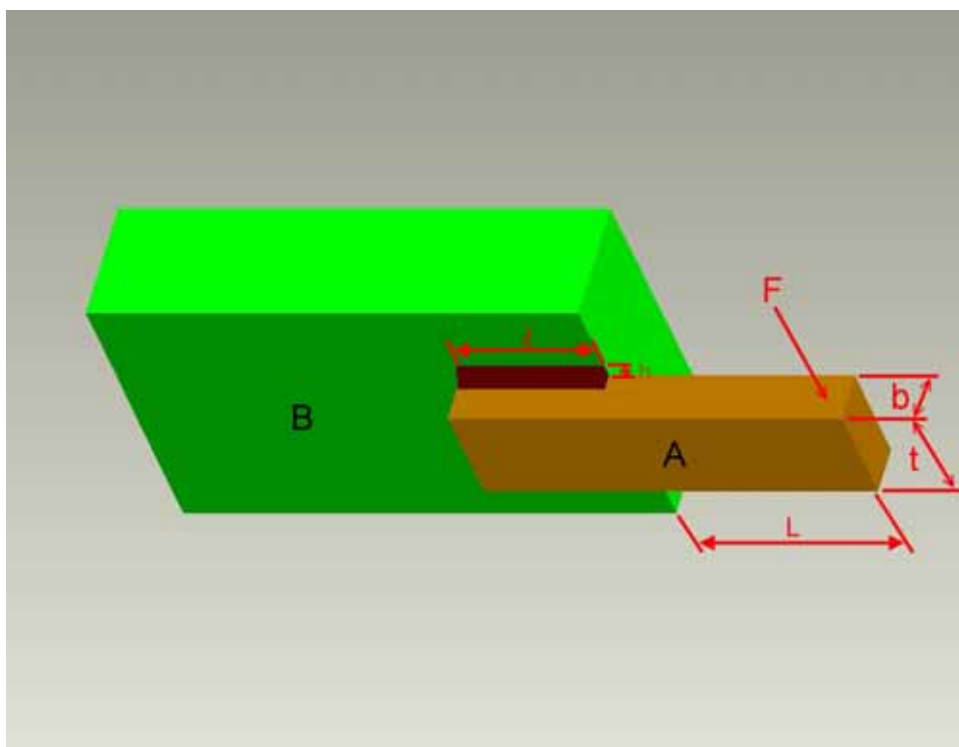


圖 2、SmartDO 設計結果

表 1、SmartDO 運算結果

RCFDM	填角焊腳長	焊道長度	支架高度	支架寬度	OBJ Function	Cycle
	h (mm)	l (mm)	t (mm)	b (mm)	Cost (US\$)	
1	4.77	103.00	242.00	4.77	\$1.71	30
15	4.78	102.00	240.00	4.78	\$1.70	44
16	4.78	103.00	240.00	4.78	\$1.70	42

(1) 3 種 solver 之計算結果，其 Objective function 求最小成本求得皆\$1.70，題目設

定之 4 個變數計算結果亦幾近完全相同，因此，依此結果可判定此題目變數的

關係式非線性化程度並不高；smartdo_idflt 設為 15 與 16 時較設定為 1 高約 1.3

倍次數，就三種設定結果，可選擇 RCFDM=15 之結果較佳。

(2) 原始/最終設計 3D 圖與變數邊界設定：

(a) 變數上/下邊界 (Upper bound / Lower bound)：

	填角焊腳長	焊道長度	支架高度	支架寬度
	h (mm)	l (mm)	t (mm)	b (mm)
上邊界	254	254.00	254.00	254.00
下邊界	3.175	2.54	2.54	2.54

(b) 原始設計 3D 圖：

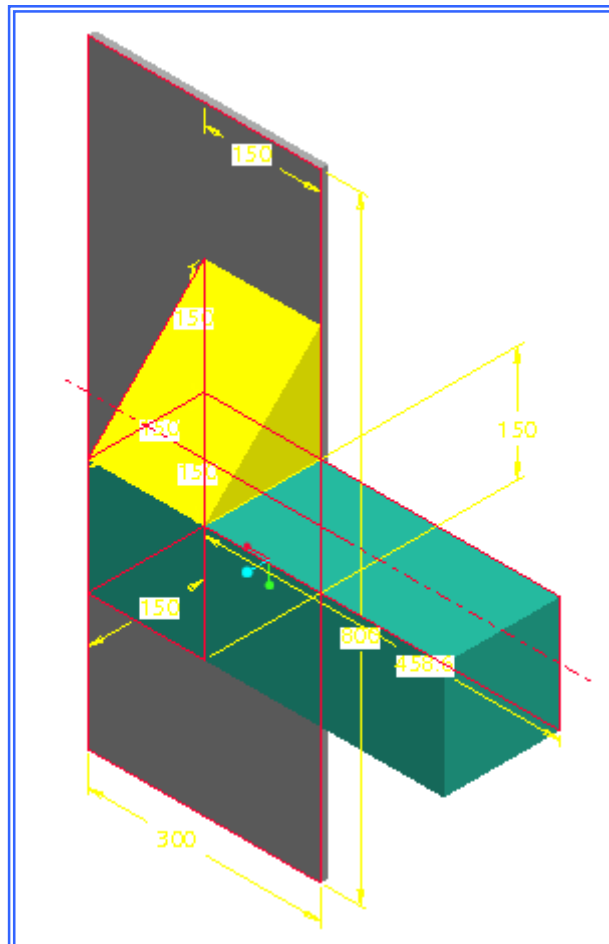


圖 3、原始設計圖

(c) 最終設計 3D 圖：

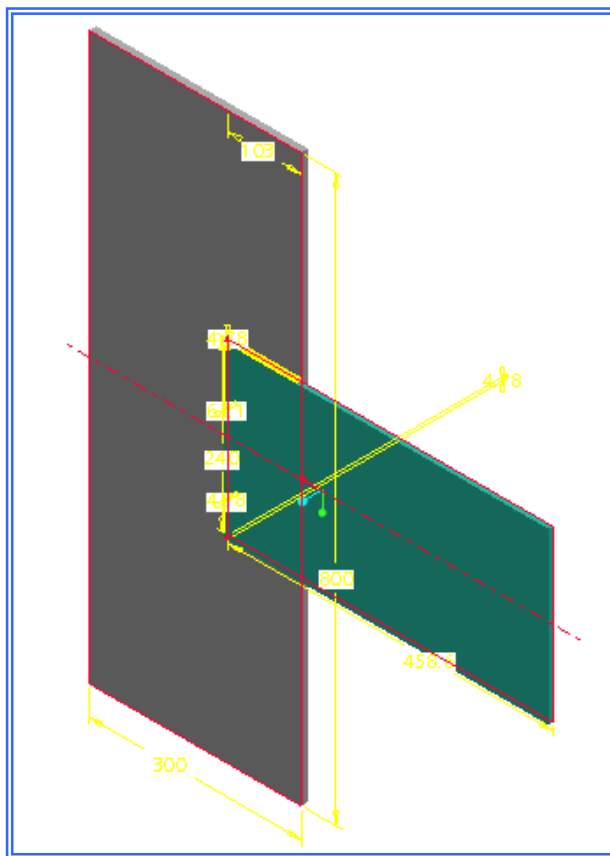
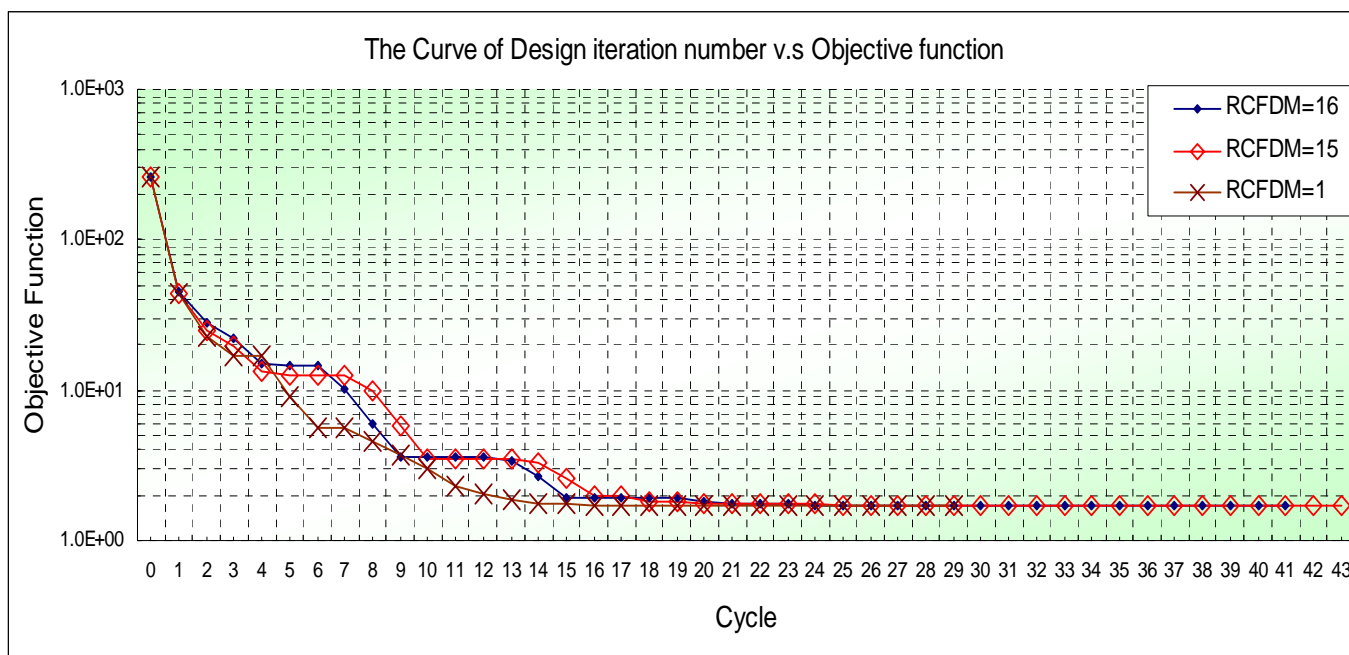
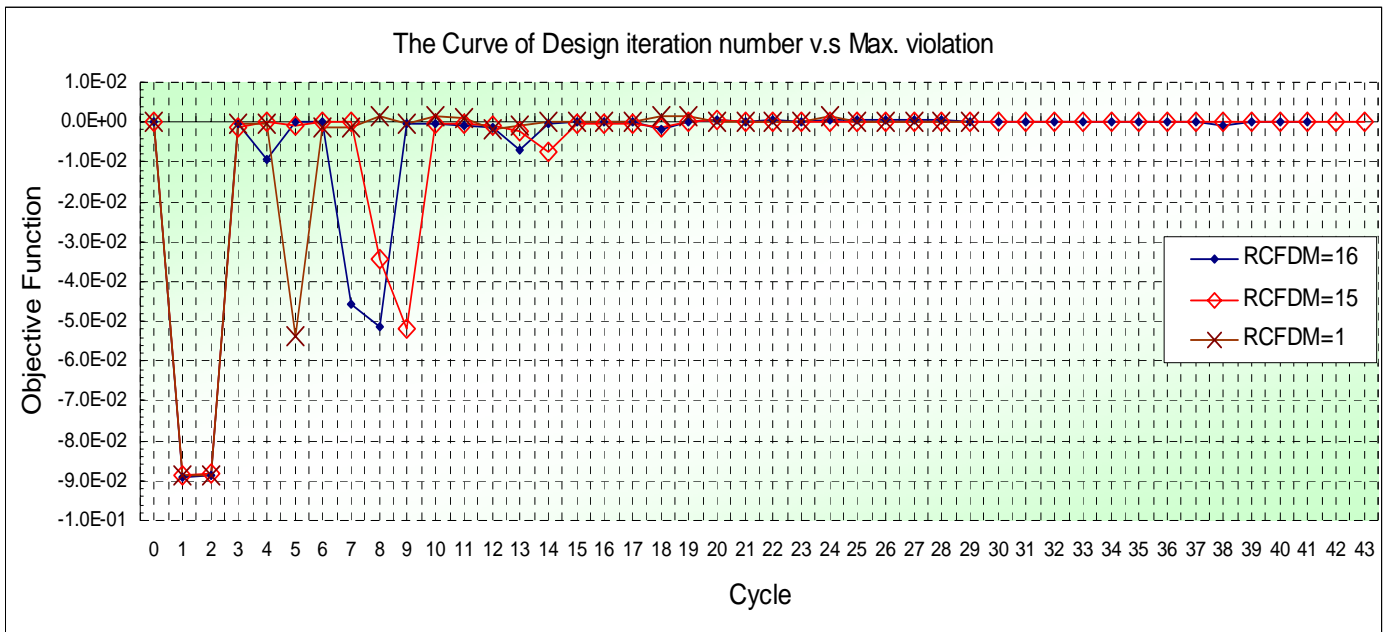


圖 4、SmartDO 設計結果

(3) Design iteration number 與 Objective function 曲線：



(4) Design iteration number 與 Max. violation 曲線：



(5) 經由 MATLAB 和 SmartDo 的運算數據比較後，可以發現成本已大幅下降 71 %，MATLAB 為 \$2.38 而 SmartDo \$1.70，已經符合本組要求和期望，本組希望在尺寸(t、b、l、h)最小的情況下，且符合其限制條件，價錢能夠減低，所以 SmartDo 的數據顯示比較能夠達到要求。

(6) 未來發展與應用：在應用數值方法這門課，本組選擇了焊接的最佳化，以最佳化來瞭解數值分析的優點，在本組題目中，本組限制了焊接的寬度、焊接的位置等等，而這些限制雖然侷限了此應用的範圍，但相對之下，較適合課堂中學習。在未來，本組的題目仍然有其他方向作為更深入的研究，如：

(a) 不定形狀的焊接最佳化：

本組題目限制了焊接的兩個主體，所以焊接的位置也 受到了限制，但在實際案例中，焊接物體形狀不定，所以需做更多的考量與分析，同時彈性變

大後，或許此焊接最佳化有商業化的價值。

(b) 精密焊接最佳化：

隨著科技的發展，許多產業的焊接技術也隨之提升，同時也衍生了許多的問題，以封裝產業或 PCB 產業而言，精密焊接已成為一門高深的技術，未來或許可透過最佳化來改善成本、應力等問題。

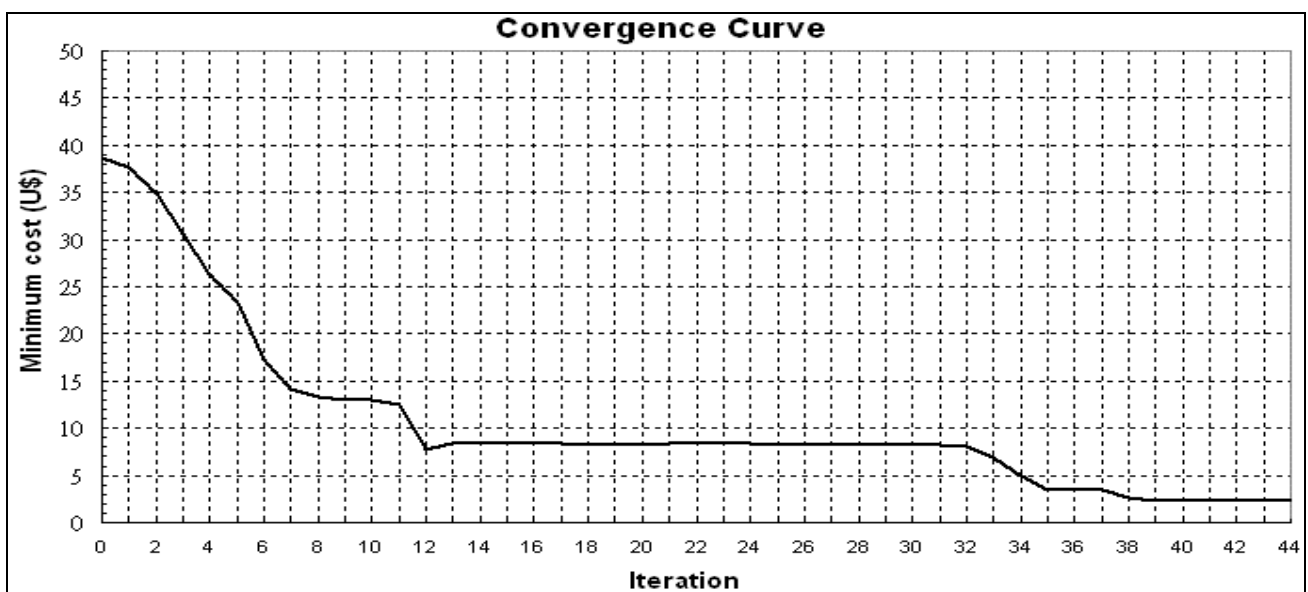
雖然本組的題目為探討應力與成本之間的關係，但若應用在其他層面，或許可改變限制，進而得到更高的經濟效益。

6.2 MATLAB 運算結果：如表 2 所示。

填角焊腳長	焊道長度	支架高度	支架寬度	OBJ Function	Cycle
h (mm)	l (mm)	t (mm)	b (mm)	Cost (US\$)	
6.21	158.04	210.57	6.21	\$2.37684	45

表 2、MATLAB 運算結果

(1) MATLAB 收斂曲線：



(2) 最終設計圖：

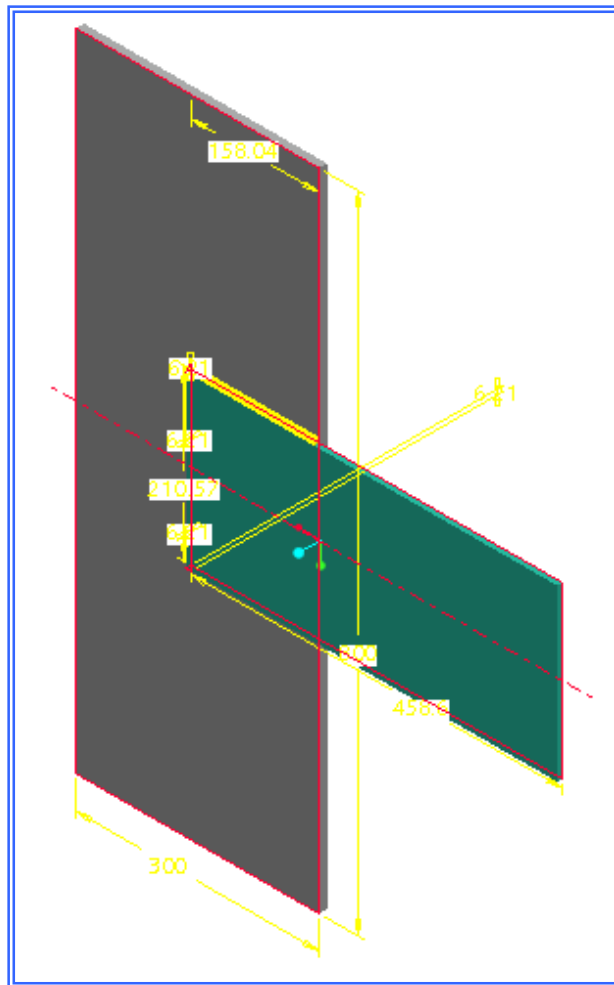


圖 5、MATLAB 設計結果

七、SmartDO 與 MATLAB 輸出結果說明

7.1 SmartDO 輸出結果說明：

(a) SmartDO 疊代歷程：

Cycle	X(1)	X(2)	X(3)	X(4)	Obj. Function	VMAX
0	1.50E+02	1.50E+02	1.50E+02	1.50E+02	2.61E+02	0.00E+00
1	2.49E+01	2.54E+02	1.49E+02	1.23E+02	4.35E+01	-8.87E-02
2	3.25E+01	2.02E+02	1.00E+02	6.41E+01	2.49E+01	-8.83E-02
3	3.18E+01	2.06E+02	8.29E+01	4.04E+01	1.95E+01	-1.53E-03
4	2.26E+01	2.47E+02	1.02E+02	2.63E+01	1.32E+01	9.71E-05
5	2.17E+01	2.54E+02	1.07E+02	2.43E+01	1.27E+01	-1.00E-03
6	2.17E+01	2.54E+02	1.13E+02	2.17E+01	1.24E+01	0.00E+00
7	2.17E+01	2.54E+02	1.13E+02	2.17E+01	1.24E+01	0.00E+00
8	1.66E+01	2.54E+02	1.15E+02	2.51E+01	9.83E+00	-3.46E-02
9	3.18E+00	2.53E+02	1.16E+02	2.70E+01	5.79E+00	-5.16E-02
10	3.26E+00	2.53E+02	1.48E+02	1.25E+01	3.49E+00	-2.85E-04
11	3.26E+00	2.53E+02	1.48E+02	1.25E+01	3.49E+00	-2.85E-04
12	3.18E+00	2.53E+02	1.48E+02	1.26E+01	3.49E+00	-7.65E-04
13	3.18E+00	2.52E+02	1.50E+02	1.23E+01	3.46E+00	-2.20E-03
14	3.18E+00	2.48E+02	1.63E+02	1.07E+01	3.26E+00	-7.43E-03
15	3.18E+00	2.35E+02	1.98E+02	7.04E+00	2.57E+00	-4.60E-04
16	3.18E+00	1.89E+02	2.40E+02	4.79E+00	1.96E+00	-2.44E-04
17	3.18E+00	1.89E+02	2.40E+02	4.79E+00	1.96E+00	-2.44E-04
18	3.18E+00	1.37E+02	2.45E+02	4.92E+00	1.84E+00	-1.09E-03
19	3.25E+00	1.37E+02	2.51E+02	4.73E+00	1.81E+00	-1.53E-05
20	4.21E+00	1.11E+02	2.48E+02	4.83E+00	1.77E+00	6.92E-04
21	4.27E+00	1.10E+02	2.51E+02	4.73E+00	1.75E+00	-1.67E-07
22	4.75E+00	1.01E+02	2.51E+02	4.75E+00	1.75E+00	1.17E-04
23	4.72E+00	1.02E+02	2.51E+02	4.73E+00	1.74E+00	2.04E-07
24	4.72E+00	1.02E+02	2.51E+02	4.73E+00	1.74E+00	2.04E-07
25	4.85E+00	1.02E+02	2.38E+02	4.87E+00	1.72E+00	6.47E-05
26	4.85E+00	1.02E+02	2.38E+02	4.85E+00	1.71E+00	0.00E+00
27	4.75E+00	1.04E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.71E+00	-2.51E-06
28	4.78E+00	1.04E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.71E+00	0.00E+00
29	4.78E+00	1.04E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.71E+00	0.00E+00
30	4.78E+00	1.04E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.71E+00	-1.38E-06
31	4.78E+00	1.04E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.71E+00	-1.38E-06
32	4.78E+00	1.04E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.71E+00	-1.38E-06
33	4.69E+00	1.04E+02	2.40E+02	4.79E+00	1.70E+00	-4.37E-06
34	4.69E+00	1.04E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	-4.61E-07

(下頁續)

35	4.78E+00	1.02E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	0.00E+00
36	4.78E+00	1.02E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	4.07E-05
37	4.78E+00	1.02E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	4.07E-05
38	4.78E+00	1.02E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	1.00E-06
39	4.78E+00	1.02E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	-8.41E-06
40	4.78E+00	1.02E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	1.66E-04
41	4.78E+00	1.02E+02	2.41E+02	4.78E+00	1.70E+00	6.03E-06
42	4.78E+00	1.02E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.70E+00	0.00E+00
43	4.78E+00	1.02E+02	2.40E+02	4.78E+00	1.70E+00	1.05E-05

(b) SmartDO 運算結果：

```

=====
=====
=== FINAL OPTIMIZATION INFORMATION ===
=====
=====

OBJ = 1.701563E+00

DESIGN VARIABLES (X-VECTOR)
 1) 4.78323E+00 1.02510E+02 2.40383E+02 4.78361E+00

CONSTRAINT VALUES (CNSTRN-VECTOR)
 1) -6.51339E-04 -9.39200E-04 -6.00097E+00 1.35043E-05 -3.82000E-04

THERE ARE 4 ACTIVE CONSTRAINTS
CONSTRAINT NUMBERS ARE
 1 2 4 5

THERE ARE 0 VIOLATED CONSTRAINTS
THERE ARE 0 ACTIVE SIDE CONSTRAINTS

TERMINATION CRITERION

NUMBER OF DESIGN CYCLES = 42

OBJECTIVE FUNCTION WAS EVALUATED 382 TIMES
CONSTRAINT FUNCTIONS WERE EVALUATED 382 TIMES

=== NUMERICAL GRAD USED FOR EITHER OBJ/CNSTRNT
OBJ/CNSTRNT FUNCTIONS WERE EVALUATED 104 TIMES
GRAD OF OBJ/CNSTRNT WAS CALCULATED 36 TIMES

=====

***** NORMAL TERMINATION

=====

```

7.2 MATLAB 運算結果說明：

(a) MATLAB 疊代歷程：

Iter	F-count	f(x)	max constraint	Line search steplength	Directional derivative	First-order optimality	Procedure
0	5	38.6243	91.12				Infeasible start point
1	10	37.6361	24.18	1	-0.957	23.8	
2	15	34.8628	3.885	1	-2.63	27.9	
3	20	30.6324	0.227	1	-3.91	22.6	
4	25	26.2678	0.06373	1	-3.96	8.27	
5	30	23.3224	0.009307	1	-2.74	0.86	
6	35	17.2432	-0.05508	1	-4.7	0.62	
7	41	14.1942	-0.03796	0.5	-4.17	0.42	
8	47	13.3074	-0.01982	0.5	-1.23	0.313	
9	53	13.0617	-0.008361	0.5	-0.403	0.218	
10	59	12.9542	-0.003972	0.5	-0.207	0.17	
11	64	12.5462	0.0001385	1	-0.404	0.145	
12	69	7.7269	0.04376	1	-3.85	0.907	
13	74	8.32068	0.004698	1	0.608	0.0639	
14	79	8.38152	7.141e-005	1	0.0611	0.0527	
15	84	8.35841	5.391e-006	1	-0.0232	0.0573	
16	89	8.35846	1.063e-010	1	5.45e-005	0.0671	Hessian modified twice
17	94	8.35236	1.311e-005	1	-0.0065	0.0697	Hessian modified
18	100	8.25638	0.001583	0.5	-0.255	0.0592	Hessian modified
19	105	8.29778	0.0002489	1	0.0355	0.0681	
20	110	8.30592	4.215e-006	1	0.00803	0.0651	
21	115	8.30605	3.652e-008	1	0.000136	0.065	Hessian modified
22	120	8.30604	1.295e-007	1	-1.31e-005	0.0651	Hessian modified
23	125	8.30602	2.503e-007	1	-2.59e-005	0.0651	Hessian modified
24	130	8.30596	7.37e-007	1	-7.76e-005	0.0653	Hessian modified
25	135	8.30579	1.843e-006	1	-0.000194	0.0654	Hessian modified
26	140	8.30536	4.905e-006	1	-0.000521	0.0657	Hessian modified
27	145	8.30421	1.274e-005	1	-0.00137	0.0662	Hessian modified
28	150	8.30109	3.354e-005	1	-0.00365	0.0671	Hessian modified
29	155	8.29253	8.892e-005	1	-0.00994	0.0685	
30	160	8.2679	0.0002435	1	-0.0283	0.0711	
31	165	8.19082	0.000725	1	-0.0889	0.105	
32	170	7.99231	0.0006561	1	-0.221	0.182	
33	175	6.97082	0.009168	1	-1.2	0.588	
34	180	4.93835	0.03395	1	-2.49	0.654	Hessian modified
35	185	3.49384	0.04264	1	-2.02	0.472	
36	190	3.69983	0.005646	1	0.198	0.112	
37	195	3.45355	0.002361	1	-0.274	0.139	

(下頁續)

38	200	2.59272	0.02104	1	-1.04	0.204	Hessian modified
39	205	2.33725	0.008003	1	-0.372	0.428	Hessian modified
40	210	2.36832	0.0009814	1	0.0195	0.0351	
41	215	2.37858	0.0003054	1	0.0102	0.0133	
42	220	2.37678	0.0005289	1	-0.00182	0.00132	Hessian modified
43	225	2.37684	2.124e-008	1	5.87e-005	7.76e-006	Hessian modified
44	230	2.37684	0	1	2.95e-009	1.8e-008	Hessian modified

(b) MATLAB 運算結果：

Optimization terminated: first-order optimality measure less than options.TolFun and maximum constraint violation is less than options.TolCon.

Active inequalities (to within options.TolCon = 1e-006):

lower	upper	ineqlin	ineqnonlin
		1	1
			2
			4
			5

0.4003

26.6700

-----Final Result by MATLAB Optimization Tool-----

Min. cost = 2.37684 U\$

The Minimum Dimension h = 6.21 mm , l = 158.04 mm , b = 210.57 mm , t = 6.21 mm

-----End-----

7.3 SmartDO 與 MATLAB 結果驗算：如表 3 所示。

表 3、結果驗算

設計 參數 最佳化 方法	$\tau(x)$ ≤ 0.0937	$\sigma(x) \leq$ 0.2068	$\delta(x)_{free}$ ≤ 6.35	$h \geq$ 3.175	$l \geq 0$	$t \geq 0$	$b \geq h$	$P(x)_{buckling}$ \geq $F(26.67)$
SmartDO	0.0925	0.2012	0.3385	4.77	103.00	242.00	4.77	27.48
	0.0935	0.2058	0.3489	4.78	102.00	240.00	4.78	26.67
	0.0931	0.2059	0.3490	4.78	103.00	240.00	4.78	26.67
MATLAB	0.0937	0.2068	0.4003	6.21	158.04	210.57	6.21	27.42
設計 參數 最佳化 方法	$3.175 \leq h \leq 254$		$2.54 \leq l \leq 254$		$2.54 \leq t \leq 254$		$2.54 \leq b \leq 254$	
SmartDO	4.77		103.00		242.00		4.77	
	4.78		102.00		240.00		4.78	
	4.78		103.00		240.00		4.78	
MATLAB	6.21		158.04		210.57		6.21	

註：SmartDO 驗算結果由上至下分別包含 smartdo_idflt 參數設定=1、15 及 16。

八、參考文獻

- [1] G.V.Reklaitis, A.Ravindran, K.M.Ragsdell "Engineering Optimization – Method and Applications",1983.
- [2] Stephon P.Timoshenko, James M.Gere "Theory of Elastic Stability",1963.
- [3] 陳浩 "機械設計", 民 85。
- [4] ROY R. CRAIG, Jr, "Mechanics Of Materials 2/e", June 2002
- [5] Omer W. Blodgett, "Design Of Welded Structures" January 1990

附錄 A — SmartDO 程式碼

File Name : weldingopt.tcl

```
#=====
# Weldingopt.tcl 20070610 4th-section
# Entry File for weldingopt.tcl
#=====
# This model solve for
# find optimize variables : x(1) x(2) x(3) x(4)
# to minimize cost : OBJ=
((6.41e-6+6.1e-5)*pow($x1,2.0)*$x2)+((2.93e-6)*$x3*$x4*($Leg+$x2))
# subjected to : CNSTRN(1)= $Ts-$Tdg <= 0
# CNSTRN(2)= $St-$Sdg <= 0
# CNSTRN(3)= $dy-6.35 <= 0
# CNSTRN(4)= $Pg-$Pcr <= 0
# CNSTRN(5)= $x1-$x4 <= 0
#
#=====
# Input Files
#
#=====
# weldingopt_obj.tcl
# weldingopt_cns.tcl
# ===== Optimizer parameters=====
set smartdo_ioptmzr 1
set smartdo_idflt 16
# ===== Model parameters =====
set smartdo_ndv 4
set smartdo_ncnstrn 5
# ===== design variables=====
set smartdo_x(1) 150.0
set smartdo_xl(1) 3.175
set smartdo_xu(1) 254.0
set smartdo_x(2) 150.0
set smartdo_xl(2) 2.54
set smartdo_xu(2) 254.0
set smartdo_x(3) 150.0
set smartdo_xl(3) 2.54
set smartdo_xu(3) 254.0
set smartdo_x(4) 150.0
set smartdo_xl(4) 2.54
```

```
set smartdo_xu(4) 254.0
```

```
#
```

```
=====
```

```
# Link to objective and constraint function evaluation files
```

```
smartdo filobj weldingopt_obj.tcl
```

```
smartdo filcns weldingopt_cns.tcl
```

```
#
```

File Name : weldingopt_cns.tcl

```
#
=====
# Weldingopt_cns 20070610 4th-section
# =====
# tcl script file for constraint functions evaluation
#
=====
# Input Files & Description
#
=====
# Pg = Loading on free side
# Eg = Young's modules for 1010 steel
# Sdg = Max. allowable normal stress (Sigma_all)
# Tdg = Max. allowable shearing stress (incl. direct shearing stress & moment shearing stress)
# T1 = direct shearing stress
# T2 = Moment shearing stress
# Leg = Length of 1010 steel
# Gb = Modulus of rigidity for 1010 steel
# cs = Material cost for soldering (6.41e-6 US$/mm^3)
# cm = Material cost for 1010 steel (2.93e-6 US$/mm^3)
# Cg = Torsional rigidity for 1010 steel
# I = Moment of inertia
# dy = Deformation on free side
# Pcr = Max. allowable buckling force
# rc = The distance between the center of total and each of soldering area
# Mt = Bending moment
# J = Polar moment of inertia
#
=====
set x1 $smartdo_x(1)
set x2 $smartdo_x(2)
set x3 $smartdo_x(3)
set x4 $smartdo_x(4)
set Pg 26.67
set Eg 206.84
set Sdg 0.2068
set Tdg 0.0937
set Leg 355.6
```

```

set Gb      82.737
set Cg      [expr $Gb*$x3*pow($x4,3.0)]
set J       [expr 2.0*(0.707*$x1*$x2*(pow($x2,2.0)+pow(($x1+$x3)/2,2.0)))]
set I       [expr $x3*pow($x4,3.0)/12.0]
set dy      [expr 4.0*$Pg*pow($Leg,3.0)/($Eg*pow($x3,3.0)*$x4)]
set Pcr     [expr (4.013*pow($Eg*$I*$Cg,0.5)/pow($Leg,2.0)) * (1.0 - ( ($x3/(2.0*$Leg)) *
pow($Eg*$I/$Cg,0.5) ) ) ]
set rc      [expr pow(pow($x2,2.0)/4.0 + pow(($x1+$x3)/2.0,2.0),0.5)]
set Mt      [expr $Pg*$Leg]
set T1      [expr $Pg/(1.414*$x1*$x2)]
set T2      [expr $Mt*$rc/$J]
set Ts      [expr pow( ( pow($T1,2.0) + pow($T2,2.0) + 2.0*$T1*$T2*$x2/(2.0*$rc) ),0.5)]
set St      [expr ((6.0*$Pg*$Leg)/(pow($x3,2.0)*$x4))]
# ===== Constraint =====
set g1      [expr $Ts-$Tdg]
set g2      [expr $St-$Sdg]
set g3      [expr $dy-6.35]
set g4      [expr $Pg-$Pcr]
set g5      [expr $x1-$x4]
#
set smartdo_cnstrn(1) $g1
set smartdo_cnstrn(2) $g2
set smartdo_cnstrn(3) $g3
set smartdo_cnstrn(4) $g4
set smartdo_cnstrn(5) $g5
#

```

File Name : weldingopt_obj.tcl

```
#
=====
# weldingopt_obj 20070610 4th-section
#
=====
# tcl script file for objective function evaluation
#
=====
# Input Files & Description
#
=====
# Pg = Loading on free side
# Eg = Young's modules for 1010 steel
# Sdg = Max. allowable normal stress (Sigma_all)
# Tdg = Max. allowable shearing stress (incl. direct shearing stress & moment shearing stress)
# T1 = direct shearing stress
# T2 = Moment shearing stress
# Leg = Length of 1010 steel
# Gb = Modulus of rigidity for 1010 steel
# cs = Material cost for soldering (6.41e-6 US$/mm^3)
# cm = Material cost for 1010 steel (2.93e-6 US$/mm^3)
# Cg = Torsional rigidity for 1010 steel
# I = Moment of inertia
# dy = Deformation on free side
# Pcr = Max. allowable buckling force
# rc = The distance between the center of total and each of soldering area
# Mt = Bending moment
# J = Polar moment of inertia
#
=====
set x1 $smartdo_x(1)
set x2 $smartdo_x(2)
set x3 $smartdo_x(3)
set x4 $smartdo_x(4)
#
set Pg 26.67
set Eg 206.84
set Sdg 0.2068
```

set Tdg 0.0937

set Leg 355.6

set Gb 82.737

#

set smartdo_obj [expr ((6.41e-6+6.1e-5)*pow(\$x1,2.0)*\$x2)+((2.93e-6)*\$x3*\$x4*(\$Leg+\$x2))]

#

File Name : weldingopt_check.tcl

```
# =====  
# Weldingopt_check 20070610 4th-section  
#  
=====  
# tcl script file for checking the final calculated value  
#  
=====  
# Input Files & Description  
#=====  
set x1 $smartdo_x(1)  
set x2 $smartdo_x(2)  
set x3 $smartdo_x(3)  
set x4 $smartdo_x(4)  
#  
puts "      The checking values as below :      "  
puts "-----"  
puts "The value of final deformation on free-end = "  
puts $dy  
puts "The value of final buckling force = "  
puts $Pcr  
puts "The value of final shear stress = "  
puts $Ts  
puts "The value of final stress = "  
puts $St  
puts "-----"  
#
```


附錄 B — MATLAB 程式碼

```

%% _____Final-term report___main.m_section-4_____%%
clc
global Pg;
global Eg;
global Sdg;
global Tdg;
global Leg;
global cm;
global cs;
global Gb dy;
Pg = 26.67;
Eg = 206.84;
Sdg = 0.2068;
Tdg = 0.0937;
Leg = 355.6;
Gb =82.737;
cs = 6.41e-6;
cm = 2.93e-6;
%% Minimization function : X = fmincon(@myfun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@mycon,option)
A = [1 0 0 -1];
b = [0];
Aeq = [];
beq = [];
lb = [3.175 2.54 2.54 2.54];
ub = [254 254 254 254];
x0=lb + (ub-lb).*rand(1,length(lb));

option=optimset('Display','iter');
[X,fval]= fmincon(@ObjFun,x0,A,b,Aeq,beq,lb,ub,@mycon,option);

mincost = ObjFun(X);
y=dy;
Pcr=Pb;
disp(y);
disp(Pcr);

fprintf('\nMin. cost = %3.5f U$\n',mincost);
fprintf('\nThe Minimum Dimension h = %3.2f mm , l = %3.2f mm , t = %3.2f mm , b = %3.2f
mm\n',X(1),X(2),X(3),X(4));

```

%% _____Final-term report___mycon.m_section-4_____%%

```
function [c , ceq] = mycon(x)
global Pg;
global Eg;
global Sdg;
global Tdg;
global Leg;
global Gb dy Pb;
%Tp = Pg./(1.414.*x(1).*x(2));
%M = Pg.*(Leg+(x(2)./2));
%R = ((x(2).^2./4)+(((x(1)+x(3))./2)).^2).^0.5;
%J = 2.*((0.707.*x(1).*x(2)).*(x(2).^2./12)+((x(1)+x(3))./2).^2));
%Tpp = M.*R./J;
%l = (x(3)*x(4)^3)/12;
%alpha = (Gb*x(3)*x(4)^3)/3;
c(1) =
((Pg/(1.414*x(1)*x(2)))^2+2*(Pg/(1.414*x(1)*x(2)))*((Pg*(Leg+(x(2)/2)))*(((x(2)^2/4)+((x(1)+x(3))/2))^2)^0.5)/(2*((0.707*x(1)*x(2))*((x(2)^2/12)+((x(1)+x(3))/2)^2))))*(x(2)/(2*((x(2)^2/4)+((x(1)+x(3))/2))^2)^0.5))+(((Pg*(Leg+(x(2)/2)))*(((x(2)^2/4)+((x(1)+x(3))/2))^2)^0.5)/(2*((0.707*x(1)*x(2))*((x(2)^2/12)+((x(1)+x(3))/2)^2))))^2)^0.5 - Tdg;
c(2) = ((6*Pg*Leg)/(x(3)^2*x(4))) - Sdg;
c(3) = ((4*Pg*Leg^3)/(Eg*x(3)^3*x(4))) - 6.35;
dy=((4*Pg*Leg^3)/(Eg*x(3)^3*x(4)));
c(4) = Pg -
((4.013*(Eg*((x(3)*x(4)^3)/12)*((Gb*x(3)*x(4)^3)/3))^0.5)/Leg^2*(1-(x(3)/(2*Leg))*(Eg*((x(3)*x(4)^3)/12)/((Gb*x(3)*x(4)^3)/3))^0.5);
Pb=((4.013*(Eg*((x(3)*x(4)^3)/12)*((Gb*x(3)*x(4)^3)/3))^0.5)/Leg^2*(1-(x(3)/(2*Leg))*(Eg*((x(3)*x(4)^3)/12)/((Gb*x(3)*x(4)^3)/3))^0.5);
ceq = [];
```

%% _____Final-term report___ObjFun.m_section-4_____%%

```
function cost = ObjFun(x);
global Leg;
global cm;
global cs;
cost = ((6.1e-5)+cs).*x(1).^2.*x(2)+cm.*x(3).*x(4).*(Leg+x(2));
```