

應用反應曲面法與基因演算法 於船體結構構件斷面尺寸之最佳化設計

何文獻[†] 蔡進聰^{**} 林清煌^{***} 周至宏^{****}

* 高雄醫學大學 醫療資訊管理學系

** 國立屏東教育大學 資訊科學系

*** 中國造船公司 設計處

**** 國立高雄第一科技大學 系統資訊與控制研究所

關鍵詞：反應曲面法、基因演算法、田口方法、最佳化設計、擋浪牆

摘 要

本文提出一最佳化設計的程序，可解決船體結構構件斷面尺寸最佳化設計的問題。首先，應用田口方法找出對品質特性具顯著影響的因子，作為預測的數學模型的變數；接著，使用反應曲面法建立此數學模型；最後，藉由基因演算法搜尋最佳解，可得到船體結構構件斷面尺寸最佳設計值。本文中並以貨櫃船之擋浪牆結構構件斷面尺寸設計為例，在結構受到負荷後的合成應力、正剪應力和負剪應力的三個限制條件之下，使結構重量最小為設計目標，應用所提出之最佳化設計程序的設計結果，可得到結構重量為16,503 kg，比現有設計的結構重量18,098 kg減少了8.81%，得到令人滿意的結果。

前 言

船體結構為一龐大且複雜之結構體，在傳統設計上大多依靠經驗或法規，經過多次反覆分析及修改來設計船體結構構件斷面尺寸，直到滿足所有的設計需求後，才決定可行的構件斷面尺寸，這樣的設計流程，常是設計時程無法縮短的主要原因，而且所得到的設計結果也只是滿足設計需求之成品，並非是最佳設計的結果。近年來，造船工業為了降低生產成本，縮短建造時程，以提昇市場競爭力，船體結構構件斷面尺寸最佳化設計的研究，也是目前造船工業研究發展的重點。

船體結構構件斷面尺寸最佳化設計問題，通常以結構斷面尺寸，例如：厚度、截面積等為設計參數，位移、應力等為限制條件，並以尋求結構最小重量為目標。而在進行構件斷面尺寸最佳化設計時，如果能藉由設計參數分別來表示設計目標以及限制條件的數學模型，就可以透過最佳化的方法來求解。

在建構設計參數與反應特性之間的數學模型方面，以實驗設計方法和統計分析為主的反應曲面法(response surface method, RSM)，是一經常使用的工具

[1,2]。陳明宏[3]曾利用反應曲面法之迴歸分析模式，建構系統的品質特性與相關參數間的數學模式，並藉由綜合性評估指標之建立，提出一套解決動態系統最佳化的方法。

另一方面，在最佳化的演算法方面，近年來，基因演算法(genetic algorithm, GA)發展快速且極具潛力[4]。其主要是仿生物體「物競天擇」的生存競爭原則，基因以選擇(selection)、交配(crossover)及突變(mutation)三大演化過程，以多點隨機的方式搜尋出一組近似於全域最佳解，在船體結構設計方面的應用也有相關文獻的研究。郭信川和王鴻鈞[5]主要利用基因演算法中，選擇、交配、突變等運算，提出一種基因演算法來求解結構最佳化設計，並探討有否使用菁英策略對搜尋結果和收斂情形的影響。吳劍國和徐昌文[6]以基因演算法應用於船舶結構混合變量優化問題，考慮結構在剪應力、彎曲應力、穩定性及撓度等限制下，利用基因演算法在不同的族群大小、突變機率及懲罰係數等影響因素下，對箱型艙口蓋之箱型樑輕量化設計，及油輪的槽型橫隔艙壁結構之輕量化設計。但以反應曲面法建構船體結構的數學模型，並以基因演算法來求取最佳設計的研究，目前並沒有相關的文獻。

[†] 責任作者(whho@kmu.edu.tw)

因此，本文提出一最佳化設計的程序，如圖1所示，可應用於船體結構構件斷面尺寸的最佳化設計。為驗證所提出之方法的可行性，本文以貨櫃船之擋浪牆(water breaker)的結構構件斷面尺寸設計為實例，進一步指定問題之設計目標和限制條件，並選取設計參數和設定設計參數範圍。首先，應用田口方法(Taguchi method)規劃直交表實驗計畫[7-9]，透過有限元素分析軟體ANSYS[10,11]，進行結構有限元素分析(finite element analysis, FEA)，以獲得結構受到外力負荷時的合成應力、正剪應力和負剪應力值，以此三個應力值做為限制條件，使結構重量最小為設計目標，再依據田口方法直交表實驗配置下實驗所得之結果，經由變異數分析(analysis of variance, ANOVA)找出影響結構構件斷面尺寸設計的顯著因子；接著，透過反應曲面法，將此顯著因子，做為預測之數學模型的變數，建立設計目標與限制條件的數學模型，而不顯著因子選擇對結構重量品質特性望小最有利的水準，可以減少數學模型的變數數量，進一步縮短基因演算法的電腦運算執行時間；最後，再利用基因演算法進行最佳化搜尋，求得最佳設計的解，其中基因演算法的最佳演算參數也以田口方法來獲得。由於所提出的最佳化設計的程序引用了田口實驗計劃法，可事先篩選出對設計目標的顯著因子和不顯著因子，故可減少反應曲面法實驗配置的實驗次數，以及縮短基因演算法的電腦運算執行時間。因此，所提出之整合田口方法、反應曲面法、以及基因演算法的最佳化設計程序，可在所設定之設計參數的範圍內，快速地搜尋到結構構件斷面尺寸之最佳設計值。

擋浪牆結構構件斷面尺寸最佳設計之問題描述

貨櫃船擁有較高的船速，在惡劣的海況下航行，極容易產生海水上浪的情況。為減少貨櫃直接受到海水衝擊的機會，貨櫃船的船艙段不僅設有艙艙甲板，更建立一擋浪牆的結構，藉以保護貨櫃以及甲板上的設備。擋浪牆的設計是以板、樑為結構構件的組合體，直立於船艙甲板上，一般以格子板的佈置方式，對於現場安裝階段的施工與油漆的修補工作量較為有利。

考慮船舶航行大海中承受海浪之衝擊下，船廠在設計擋浪牆結構時，會依據船體結構設計分析檢驗要項基準，將結構應力分析資料送審船級協會，以作為審圖的依據。根據船級協會的規定，送審的應力分析資料須包含合成應力(von Mises stress)、正剪應力(positive shear stress)及負剪應力(negative shear stress)。因此，船廠會藉由有限元素分析的軟體，模擬結構承受

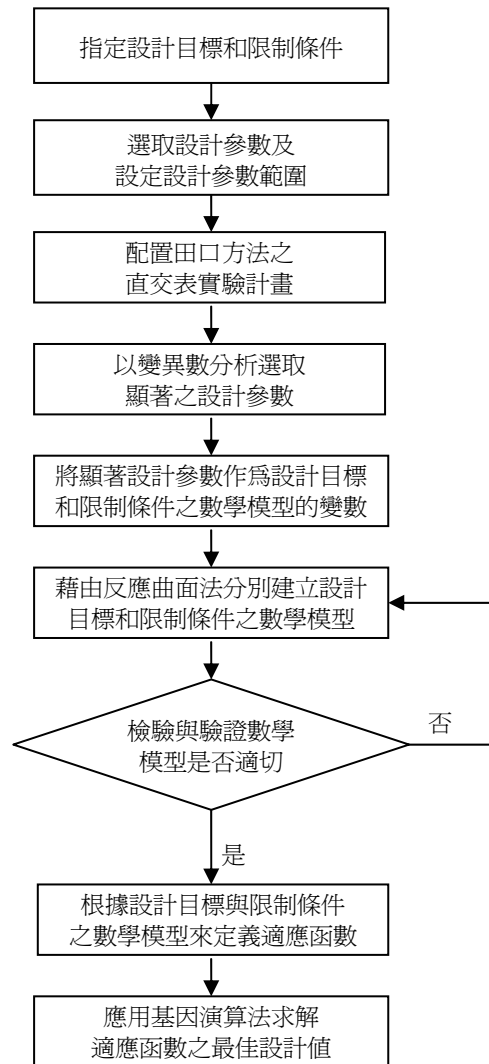


圖1 船體結構構件斷面尺寸最佳化設計之流程圖

外力負荷的情況，分析計算擋浪牆的結構強度，其中剪應力在有限元素分析軟體模擬時，會有正剪應力及負剪應力的產生。因此，本文所考量之最佳設計的標準，是上述之應力值不可超出船級協會檢驗標準的限制條件之下，使結構體的重量最小為設計目標，其中合成應力(σ)為正應力(normal stress)與剪應力所構成[12]，其檢驗標準為 $\sigma \leq 216.12 \text{ N/mm}^2$ ，以及正剪應力(τ)和負剪應力($-\tau$)檢驗標準為 $|\tau| \leq 97.515 \text{ N/mm}^2$ 。

現有擋浪牆之設計幾何外型如圖2所示，主要的設計參數有縱垂樑深度(A)、樑面板板厚(B)、縱垂樑板厚(C)、前牆下板板厚(D)、前牆上板板厚(E)、基座橫骨材板厚(F)、及基座縱骨材板厚(G)等7個設計參數。

田口方法之實驗設計與結果分析

本章首先將敘述如何應用有限元素分析軟體ANSYS，建構擋浪牆結構之有限元素模型，藉以獲得

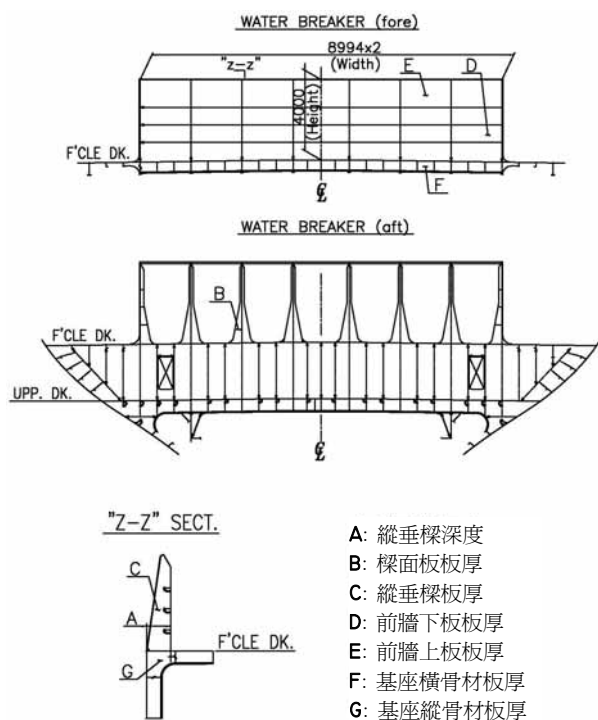


圖2 擋浪牆結構設計圖

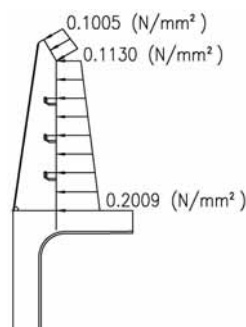


圖3 擋浪牆結構之外力負荷圖

受到外力負荷後的結構應力值；接著說明如何應用田口方法規劃實驗計畫，可獲得實驗結果；然後針對實驗結果做變異數分析；最後以變異數分析的結論，來獲得顯著因子作為擋浪牆結構之數學模型的變數。

1. 有限元素模型建立

為獲得受到外力負荷後的結構應力值，應用有限元素分析軟體ANSYS，建立擋浪牆結構的有限元素模型，其設定要項如下：

(1) 元素選取與模型建立方式

擋浪牆之結構以板、樑為主的結構組合體，故選用SHELL63元素和BEAM4元素來分析。實體模型建立採用由下向上(bottom up)方式直接在ANSYS軟體上建立。

(2) 材質選用

擋浪牆所應用的材料為船用壓延鋼材，具有彈性、均質及等向性等特徵。材質特性有降伏應力(σ_y)

表1 田口方法實驗之各設計參數所分成的水準

設計參數	水準		
	1	2	3
A：縱垂樑的深度 (mm)	900	1000	1100
B：樑面板板厚 (mm)	18	21	24
C：縱垂樑板厚 (mm)	12	15	18
D：前牆下板板厚 (mm)	13	15	17
E：前牆上板板厚 (mm)	10	12	14
F：基座橫骨材板厚 (mm)	10	12	14
G：基座縱骨材板厚 (mm)	18	21	24

為235 N/mm²，楊氏彈性模數(E)為206000 N/mm²，蒲松比(ν)為0.3和密度(ρ)為7.85 ton/m³。

(3) 負荷條件

擋浪牆的負荷除了結構體本身之自重考量外，還需考慮擋浪牆坐落於船艙甲板上，航行時需承受海水上浪直接衝擊的海水壓力。依勞氏驗船協會的要求，該擋浪牆從底部到頂部所承受的外力負荷為20 ton/m²到10 ton/m²的均佈壓力，如圖3所示。

(4) 邊界條件的設定

為確實瞭解整個擋浪牆的應力變化情形，因此邊界條件的選定由擋浪牆向下延伸到主甲板，往前到次一桁架(frame)，往外到另一樑(girder)作為邊界，並設定六自由度均為固定。因擋浪牆結構體與外力負載為左右對稱，因此，選定中心線為對稱面。

2. 田口方法之實驗步驟

本階段實驗係應用田口方法進行實驗，其步驟如下：

步驟1: 品質特性的選擇

首先，選定設計擋浪牆結構斷面尺寸之品質特性，為結構重量望小特性、合成應力望大特性、正剪應力望大特性、和負剪應力的絕對值望大特性。

步驟2: 實驗因子和水準的選擇

本實驗的7個設計參數為縱垂樑深度(A)、樑面板板厚(B)、縱垂樑板厚(C)、前牆下板板厚(D)、前牆上板板厚(E)、基座橫骨材板厚(F)、及基座縱骨材板厚(G)，其設計空間依據本文第三作者的設計經驗，分別設定如下：

$$\begin{aligned}
 900 &\leq A \leq 1100 \text{ (mm)}, \\
 18 &\leq B \leq 24 \text{ (mm)}, \\
 12 &\leq C \leq 18 \text{ (mm)}, \\
 13 &\leq D \leq 17 \text{ (mm)}, \\
 10 &\leq E \leq 14 \text{ (mm)}, \\
 10 &\leq F \leq 14 \text{ (mm)}, \\
 18 &\leq G \leq 24 \text{ (mm)}.
 \end{aligned}$$

和

為瞭解各設計參數對步驟1所述之品質特性的影響效果與趨勢，對各設計參數的水準選定為3水準，如表1所示。合計所有設計參數的自由度為14(設計參數的自由度為水準數減1[9]，7個的設計參數均為3水準，其自由度為2，合計自由度為14)，小於 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 直交表的自由度17(直交表的自由度為實驗次數減1[9]， $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 直交表的實驗次數為18次，其自由度為17)，因此選用 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 直交表實驗計畫作為實驗配置。

步驟3: 品質特性的信號雜音比(signal to noise, S/N比)計算

依表1的各設計參數所分成的水準及 $L_{18}(2^1 \times 3^7)$ 直交表的實驗配置，可得各品質特性的S/N比，如表2所示，表中 μ_1 表示結構重量望小特性S/N比， μ_2 表示合成應力望大特性S/N比， μ_3 表示正剪應力望大特性S/N比， μ_4 表示負剪應力的絕對值望大特性S/N比。

3. 變異數分析

將表2中各品質特性之各組實驗結果的S/N比來完成變異數分析，分別如表3~6所示。藉由表3~6可判斷那些設計參數對個別品質特性是顯著設計參數，然後綜合判斷的結果，可歸納出數學模型的變數。如何求得各品質特性的顯著設計參數，說明如下。

(1) 結構重量品質特性的顯著設計參數

由表3的結果得知，所有設計參數的自由度均為2，調和誤差的自由度為3，除了設計參數F外，各設計參數的變異比大於F統計檢定($F_{0.01}(2,3)=30.8[13]$)，亦即設計參數F為次要因子，其餘設計參數A、B、C、D、E、G皆為顯著因子。

(2) 合成應力品質特性的顯著設計參數

由表4的結果得知，所有設計參數的自由度均為2，調和誤差的自由度為13，除了設計參數A、G的變異比大於F統計檢定($F_{0.01}(2,13)=6.70[13]$)外，其餘設計參數B、C、D、E、F之變異比均小於統計檢定值6.70，亦即對合成應力的品質特性而言，因子A、G為顯著設計參數。

(3) 正剪應力品質特性的顯著設計參數

由表5的結果得知，所有設計參數的自由度均為2，調和誤差的自由度為11，除了設計參數A、B、G的變異比大於F統計檢定($F_{0.01}(2,11)=7.21[13]$)外，其餘設計參數C、D、E、F之變異比均小於統計檢定值7.21，亦即對正剪應力的品質特性而言，因子A、B、G為顯著設計參數。

(4) 負剪應力品質特性的顯著設計參數

由表6的結果得知，所有設計參數的自由度均為2，調和誤差的自由度為9，除了設計參數A、B、C的

表2 田口方法之 L_{18} 直交表實驗配置、實驗結果與S/N比

實驗號碼	A	B	C	D	E	F	G	結構重量 (kg)	S/N比 μ_1 (dB)	合成應力 (N/mm ²)	S/N比 μ_2 (dB)	正剪應力 (N/mm ²)	S/N比 μ_3 (dB)	負剪應力的絕對值 (N/mm ²)	S/N比 μ_4 (dB)
1	900	18	12	13	10	10	18	15981	-84.072	256.029	48.166	114.610	41.184	125.856	41.997
2	900	21	15	15	12	12	21	18303	-85.250	227.425	47.137	100.746	40.065	101.381	40.119
3	900	24	18	17	14	14	24	20625	-86.288	204.646	46.220	89.835	39.069	84.962	38.584
4	1000	18	12	15	12	14	24	18149	-85.177	201.276	46.076	85.585	38.648	110.092	40.835
5	1000	21	15	17	14	10	18	19310	-85.716	234.044	47.386	106.737	40.566	91.009	39.182
6	1000	24	18	13	10	12	21	18096	-85.152	208.678	46.390	92.573	39.330	76.613	37.686
7	1100	18	15	13	14	12	24	18960	-85.557	171.385	44.679	81.575	38.231	82.442	38.323
8	1100	21	18	15	10	14	18	18454	-85.322	214.511	46.629	104.123	40.351	77.842	37.824
9	1100	24	12	17	12	10	21	18792	-85.479	188.656	45.513	89.971	39.082	97.420	39.773
10	900	18	18	17	12	12	18	18771	-85.470	258.848	48.261	118.078	41.443	87.880	38.878
11	900	21	12	13	14	14	21	18172	-85.188	226.531	47.103	99.511	39.957	123.186	41.811
12	900	24	15	15	10	10	24	17966	-85.089	203.484	46.171	88.196	38.909	100.785	40.068
13	1000	18	15	17	10	14	21	18196	-85.200	208.996	46.403	95.424	39.593	90.934	39.175
14	1000	21	18	13	12	10	24	18662	-85.419	187.411	45.456	82.707	38.351	77.742	37.813
15	1000	24	12	15	14	12	18	18697	-85.435	233.155	47.353	105.055	40.428	108.941	40.744
16	1100	18	18	15	14	10	21	19591	-85.841	190.677	45.606	91.964	39.272	77.290	37.762
17	1100	21	12	17	10	12	24	18250	-85.225	176.599	44.940	81.089	38.179	98.157	39.838
18	1100	24	15	13	12	14	18	18365	-85.280	212.931	46.565	102.097	40.180	80.516	38.118

表3 結構重量品質特性的變異數分析

設計參數	水準1	水準2	水準3	變動	自由度	變異	純變動	變異比	貢獻度(%)
A	-85.226	-85.350	-85.451	0.152	2	0.0760	0.150	76.000	4.702
B	-85.219	-85.353	-85.454	0.166	2	0.0830	0.164	83.000	5.141
C	-85.096	-85.349	-85.582	0.708	2	0.3540	0.706	354.000	22.132
D	-85.111	-85.352	-85.563	0.613	2	0.3065	0.611	306.500	19.154
E	-85.010	-85.346	-85.269	1.311	2	0.6555	1.309	655.500	41.034
F	-85.269	-85.348	-85.409	0.059	2	0.0295	0.057	29.500	1.787
G	-85.216	-85.352	-85.459	0.179	2	0.0895	0.176	89.500	5.548
誤差				0.003	3				
調和誤差				0.003	3	0.0010	0.016		0.502
總和				3.190	17		3.190		100.00

表4 合成應力品質特性的變異數分析

設計參數	水準1	水準2	水準3	變動	自由度	變異	純變動	變異比	貢獻度(%)
A	47.176	46.510	45.655	6.974	2	3.4870	6.9232	137.367	40.423
B	46.532	46.442	46.369	0.080	2				
C	46.525	46.390	46.427	0.058	2				
D	46.393	46.495	46.454	0.032	2				
E	46.450	46.501	46.393	0.036	2				
F	46.383	46.460	46.499	0.042	2				
G	47.393	46.358	45.590	9.823	2	4.9115	9.7722	193.483	57.057
誤差				0.082	3				
調和誤差				0.330	13	0.0254	0.4315		2.520
總和				17.127	17		17.127		100.00

表5 正剪應力品質特性的變異數分析

設計參數	水準1	水準2	水準3	變動	自由度	變異	純變動	變異比	貢獻度(%)
A	40.105	39.486	39.216	2.490	2	1.2450	2.4753	169.074	15.148
B	39.729	39.578	39.500	0.163	2	0.0815	0.1483	11.068	0.907
C	39.580	39.591	39.636	0.006	2				
D	39.539	39.612	39.655	0.042	2				
E	39.591	39.628	39.587	0.006	2				
F	39.561	39.613	39.633	0.017	2				
G	40.692	39.550	38.565	13.607	2	6.8035	13.5923	923.932	83.179
誤差				0.010	3				
調和誤差				0.081	11	0.0074	0.1251		0.766
總和				16.341	17		16.340		100.00

表6 負剪應力品質特性的變異數分析

設計參數	水準1	水準2	水準3	變動	自由度	變異	純變動	變異比	貢獻度(%)
A	40.243	39.239	38.606	8.173	2	4.0865	8.1274	179.407	25.274
B	39.495	39.431	39.162	0.375	2	0.1875	0.3294	8.232	1.025
C	40.833	39.164	38.091	22.908	2	11.454	22.8624	502.859	71.096
D	39.291	39.559	39.238	0.354	2	0.1770	0.3084	7.771	0.959
E	39.431	39.256	39.401	0.106	2				
F	39.433	39.265	39.391	0.092	2				
G	39.457	39.388	39.244	0.142	2				
誤差				0.007	3				
調和誤差				0.205	9	0.0228	0.5292		1.646
總和				32.157	17		32.157		100.00

變異比大於F統計檢定($F_{0.01}(2,9)=8.02[13]$)外，其餘設計參數D、E、F、G之變異比均小於統計檢定值8.02，亦即對負剪應力的品質特性而言，設計參數A、B、C為顯著設計參數。

4. 顯著設計參數的選擇

由於合成應力、正剪應力和負剪應力品質特性是設計擋浪牆結構構件斷面尺寸之數學模型的限制條件，綜合的結果，選定設計參數A、B、C、G為顯著設計參數，並作為數學模型的變數。因結構重量品質特性為望小，故次要設計參數D、E、F選定最低水準，分別為13 mm、10 mm、10 mm，對於結構重量品質特性望小最有利。

反應曲面法於數學模型之建立

本章將藉由反應曲面法來建立結構重量、合成應力、正剪應力、及負剪應力的數學模型。

1. 反應曲面法的實驗步驟

應用反應曲面法於建構數學模型的實驗步驟如下。

步驟1：選擇反應特性

再次選定擋浪牆的結構重量、合成應力、正剪應力和負剪應力作為實驗觀察之反應特性。

步驟2：選擇輸入因子

經由田口方法的實驗結果與分析後，選定設計參數A、B、C、G作為輸入因子，也就是數學模型的變數，分別為 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ，其設計空間與設計參數A、B、C、G相同，分別如下

$$900 \leq X_1 \leq 1100 \text{ (mm)},$$

$$18 \leq X_2 \leq 24 \text{ (mm)},$$

$$12 \leq X_3 \leq 18 \text{ (mm)},$$

$$\text{和} \quad 18 \leq X_4 \leq 24 \text{ (mm)}。$$

步驟3：實驗配置之選擇

就建立二階的反應曲面模式而言，以二水準實驗加上中心點的實驗設計使用的實驗次數較少也較單純。因此，本實驗運用Design-Expert軟體以中央合成法(central composite design, CCD)列出實驗矩陣[2]。

步驟4：執行實驗

執行所訂定之實驗矩陣，以取得實驗數據。

步驟5：迴歸分析模型檢驗

實驗數據經由迴歸分析所得的反應曲面模式，是否能適切的反應實驗數據的適切程度，可利用變異數分析、檢定係數 R^2 及殘差圖來檢驗，確認反應曲面的適切性。

2. 反應曲面法之數學模型分析

利用此四個輸入因子 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 作為反應曲面法的實驗因子，其因子水準劃分如表7所示。根據中

央合成設計的方法，劃分成兩個區集，為因子區集與軸區集。因子部份的區集包含了16個因子點、4個中心點，軸區集包含了8個軸點、2個中心點，共可配置成30組的實驗設計組數，其實驗配置與結果，如表8所示。透過Design-Expert軟體的模型分析結果，結構重量、合成應力、正剪應力和負剪應力之模型分析皆選擇二階模式。

選定分析模式後，透過統計檢定，剔除不顯著之因子，同時以殘差圖檢驗調配否得當，多次調配後可分別得以四個輸入因子為變數的結構重量、合成應力、正剪應力和負剪應力的數學模型之簡約模式(reduced model)如下。

(1) 結構重量反應曲面迴歸方程式 $f(X_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 如下。

$$f(X_i) = 11660.81944 - 0.78674X_1 + 82.35648X_2 + 49.02315X_3 + 46.93056X_4 + 3.125 \times 10^{-3}X_1X_2 + 0.12313X_1X_3 + 0.040625X_1X_4 + 9.16667 \times 10^{-5}X_1^2; \quad (1)$$

(2) 合成應力反應曲面迴歸方程式 $U(X_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 如下。

$$U(X_i) = 859.29347 - 0.29915X_1 - 0.3848X_2 + 1.99526X_3 - 31.24131X_4 + 6.19688 \times 10^{-3}X_1X_3 - 0.42859X_3X_4 + 0.73456X_4^2; \quad (2)$$

(3) 正剪應力反應曲面迴歸方程式 $V(X_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 如下。

$$V(X_i) = 606.55735 - 0.58552X_1 - 0.55896X_2 + 0.46423X_3 - 14.35808X_4 - 2.8791 \times 10^{-4}X_1X_3 + 3.31958 \times 10^{-3}X_1X_4 + 0.011292X_2X_4 + 2.3565 \times 10^{-4}X_1^2 + 0.16267X_4^2; \quad (3)$$

(4) 負剪應力反應曲面迴歸方程式 $W(X_i)$ ($i=1, 2, 3, 4$) 如下。

$$W(X_i) = -768.69523 + 0.583X_1 + 4.23256X_2 + 30.33146X_3 + 2.64827X_4 - 5.67708 \times 10^{-4}X_1X_2 - 0.012536X_1X_3 + 3.77083 \times 10^{-5}X_1X_4 - 0.033382X_2X_3 - 2.02083 \times 10^{-3}X_2X_4 - 4.25694 \times 10^{-3}X_3X_4 - 1.4663 \times 10^{-4}X_1^2 - 0.067311X_2^2 - 0.40126X_3^2 - 0.0592X_4^2。 \quad (4)$$

表7 反應曲面法實驗之各輸入因子所分成的水準

因 子	水 準		
	-1	0	+1
X_1 : 縱垂樑的深度 (mm)	900	1000	1100
X_2 : 樑面板板厚 (mm)	18	21	24
X_3 : 縱垂樑板厚 (mm)	12	15	18
X_4 : 基座縱骨材板厚 (mm)	18	21	24

表8 反應曲面法之實驗配置與實驗結果

實驗號碼	因子				反應特性			
	X_1	X_2	X_3	X_4	結構重量	合成應力	正剪應力	負剪應力
1	-1	-1	-1	-1	15981	256.029	114.610	-125.856
2	+1	-1	-1	-1	16313	212.381	102.879	-100.786
3	-1	+1	-1	-1	16492	255.677	112.456	-123.688
4	+1	+1	-1	-1	16828	211.713	100.986	-98.204
5	-1	-1	+1	-1	16940	258.13	115.988	-88.772
6	+1	-1	+1	-1	17420	214.436	103.831	-77.556
7	-1	+1	+1	-1	17451	257.677	113.562	-86.735
8	+1	+1	+1	-1	17935	213.650	101.744	-77.326
9	-1	-1	-1	+1	16482	229.560	88.573	-125.225
10	+1	-1	-1	+1	16863	182.101	80.810	-100.041
11	-1	+1	-1	+1	16993	220.691	86.840	-123.179
12	+1	+1	-1	+1	17378	173.911	79.286	-97.562
13	-1	-1	+1	+1	17441	204.440	89.871	-88.250
14	+1	-1	+1	+1	17970	172.400	81.770	-77.088
15	-1	+1	+1	+1	17952	204.072	87.894	-86.267
16	+1	+1	+1	+1	18484	171.727	80.07	-76.870
17	-1	0	0	0	16966	226.931	99.548	-102.302
18	+1	0	0	0	17399	189.735	90.069	-81.802
19	0	-1	0	0	16925	207.962	93.546	-92.275
20	0	+1	0	0	17438	207.542	91.661	-90.108
21	0	0	-1	0	16665	206.693	91.826	-110.488
22	0	0	+1	0	17698	208.578	93.057	-77.906
23	0	0	0	-1	16919	234.223	105.618	-91.417
24	0	0	0	+1	17444	186.804	82.214	-90.820
25	0	0	0	0	17182	207.718	92.495	-91.094
26	0	0	0	0	17182	207.718	92.495	-91.094
27	0	0	0	0	17182	207.718	92.495	-91.094
28	0	0	0	0	17182	207.718	92.495	-91.094
29	0	0	0	0	17182	207.718	92.495	-91.094
30	0	0	0	0	17182	207.718	92.495	-91.094

3. 數學模型之檢驗與驗證

數學模型適當性檢驗是數學模型形成過程的一個重要部分，其目的在於保證所求得之數學模型能與真實系統近似。檢驗的做法如下。

(1) 數學模型之檢驗

藉由Design-Expert 軟體畫出反應特性的殘差散佈圖，分別如圖4~7所示。各殘差分配呈現並無結構性之現象，亦即配適之數學模型是合適的。

(2) 數學模型之驗證

為確認數學模型之正確性，隨機採取9組變數值試驗，如表9所示，並透過有限元素分析軟體ANSYS的實驗驗證，其結果與數學模型運算值作一比較，如表10所示。由表10可得知，結構重量數學模型的誤差平均值為0.0014%，合成應力數學模型的誤差平均值為0.9733%，正剪應力數學模型的誤差平均值為0.1214%，負剪應力數學模型的誤差平均值為0.7996%。亦即，所得之數學模型能適切的表示實驗的反應特性。

表9 驗證數學模型之變數值

	X_1	X_2	X_3	X_4
1	900	23.0	14.0	22.0
2	900	20.0	16.0	21.5
3	900	19.0	13.0	19.5
4	1000	22.0	15.5	19.0
5	1000	20.5	17.5	19.5
6	1000	22.5	14.5	22.5
7	1100	19.5	14.5	23.5
8	1100	21.5	16.5	20.0
9	1100	18.5	13.0	18.5

基因演算法於最佳化設計

本章首先根據目標函數與限制條件來設定合適的適應函數，再透過田口方法找出基因演算法之最佳的演算參數水準組合。最後，利用此最佳演算參數水準組合，來執行基因演算法，搜尋使適應函數值最小化的構件斷面尺寸組合。

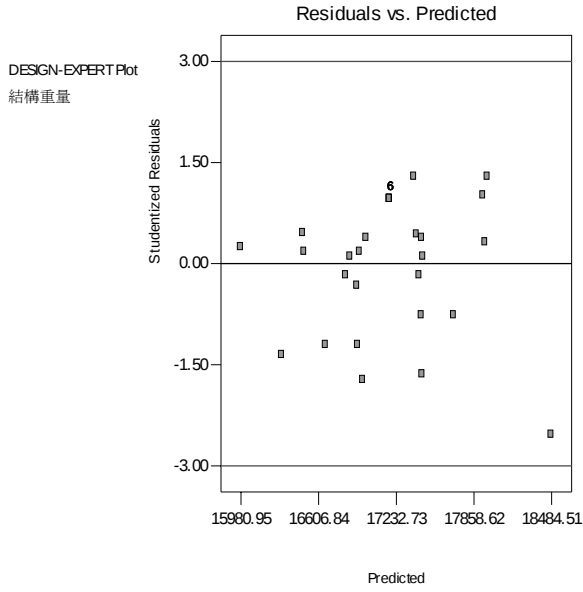


圖4 結構重量的殘差散佈圖

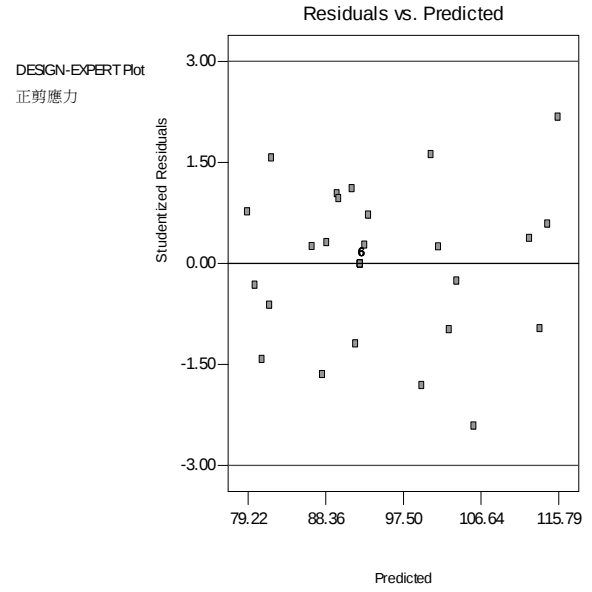


圖6 正剪應力的殘差散佈圖

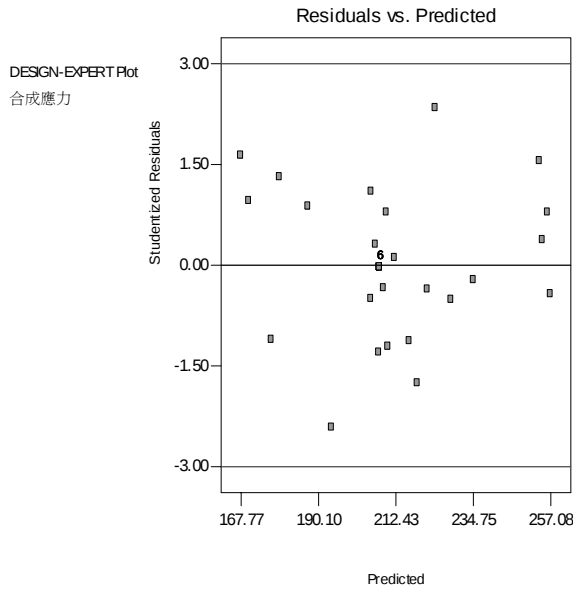


圖5 合成應力的殘差散佈圖

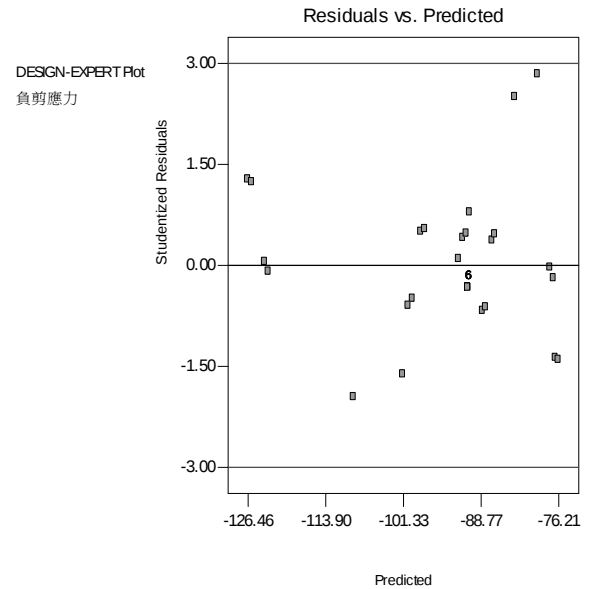


圖7 負剪應力的殘差散佈圖

1. 適應函數的選定

本文基因演算法中適應函數設定採用動態懲罰函數法[14]，其適應函數 $F(X_i)$ 可表示如下

$$F(X_i) = f(X_i) + P(X_i, \alpha, \beta, \gamma, k) \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (5)$$

其中， $f(X_i)$ 為原目標函數(如式(1)所示)，

$$P(X_i, \alpha, \beta, \gamma_j, k) = C_p k^\alpha \sum_{j=1}^3 \gamma_j [\max[0, g_j(X_i)]]^\beta + k C_0, \quad (6)$$

在此，

$$g_1(X_i) = \frac{U(X_i) - U_0}{U_0}, \quad (7a)$$

$$g_2(X_i) = \frac{V(X_i) - V_0}{V_0}, \quad (7b)$$

$$g_3(X_i) = \frac{W_0 - W(X_i)}{W_0}, \quad (7c)$$

其中， $U(X_i)$ 為合成應力之數學模式(如式(2)所示)， $V(X_i)$ 為正剪應力之數學模式(如式(3)所示)， $W(X_i)$ 為負剪應力之數學模式(如式(4)所示)， U_0 為合成應力之限制值($U_0 = 216.12 \text{ N/mm}^2$)， V_0 為正剪應力之限制值($V_0 = 97.515 \text{ N/mm}^2$)， W_0 為負剪應力之限制值($W_0 = -97.515 \text{ N/mm}^2$)， $\alpha = 2$ ， $\beta = 2$ ， k 為演算代數， C_p 為懲罰值， $C_p = 1$ ， C_0 也是懲罰值，當有一反應值未能滿足限制條件時 $C_0 = 0.02$ ，當反應值完全滿足限制條件時 $C_0 = 0$ ，其目的在確保最佳化產生時，所有反應值皆能滿足限制條件，以及 γ_i 為懲罰係數，參數的變化對不同限制條件的影響程度不同，因此對於各限制條件產生的

表10 數學模型之運算值與實驗之驗證值比較

	結構 重量 運算值	結構 重量 驗證值	誤差 (%)	合成 應力 運算值	合成 應力 驗證值	誤差 (%)	正剪 應力 運算值	正剪 應力 驗證值	誤差 (%)	負剪 應力 運算值	負剪 應力 驗證值	誤差 (%)
1	17960.5	17060	0.003	223.435	218.058	2.466	94.777	94.676	0.107	-107.462	-107.940	0.443
2	17082.9	17083	<0.001	223.949	222.994	0.428	98.153	98.020	0.136	-95.907	-96.992	1.118
3	16351.3	16351	0.002	242.652	240.394	0.939	106.827	106.647	0.169	-116.809	-116.807	0.002
4	17178.3	17178	0.002	224.028	224.719	0.308	100.836	100.636	0.198	-88.668	-88.419	0.282
5	17438.1	17438	0.001	219.472	220.910	0.651	99.433	99.283	0.151	-81.318	-80.128	1.485
6	17355.3	17355	0.002	199.386	196.440	1.499	86.369	86.545	0.203	-93.110	-93.135	0.027
7	17407.1	17407	0.001	175.944	174.022	1.105	82.266	82.249	0.021	-85.861	-84.548	1.553
8	17626.9	17627	<0.001	194.914	197.250	1.185	93.831	93.862	0.033	-78.660	-77.125	1.991
9	16586.5	16586	0.003	208.026	208.400	0.179	100.666	100.591	0.075	-94.117	-93.848	0.287
	平均誤差		0.0014	平均誤差		0.9733	平均誤差		0.1214	平均誤差		0.7996

表11 基因演算法對數學模型執行1000世代之結果

	X_1	X_2	X_3	X_4	合成應力 預測值(σ)	正剪應力 預測值(τ)	負剪應力 預測值($-\tau$)	適應 函數值
1	1099.316	18.000	12.413	19.503	199.181	96.425	-97.496	16526.0
2	1097.802	18.012	12.445	19.314	201.050	97.228	-97.500	16512.9
3	1091.453	18.026	12.547	19.267	202.893	97.497	-97.511	16517.2
4	1099.902	18.001	12.401	19.506	199.021	96.406	-97.509	16525.2
5	1099.121	18.003	12.415	19.500	199.248	96.438	-97.502	16526.0
6	1098.486	18.095	12.435	19.247	201.414	97.477	-97.455	16513.3
7	1090.769	18.000	12.564	19.316	202.657	97.307	-97.481	16521.3
8	1095.849	18.009	12.472	19.500	199.997	96.467	-97.474	16531.1
9	1098.095	18.382	12.401	19.219	201.604	97.496	-97.501	16528.4
10	1096.923	18.003	12.469	19.251	201.781	97.509	-97.469	16509.2

合成應力檢驗標準： $\sigma \leq 216.12 \text{ N/mm}^2$

剪應力檢驗標準： $|\tau| \leq 97.515 \text{ N/mm}^2$

增設一係數調節之，設定為 $\gamma_1 = 1$ ， $\gamma_2 = 30$ ， $\gamma_3 = 250$ 。
式(5)是一具連續變數的非線性函數，在此應用基因演算法來搜尋式(5)的全域最佳解，可以得到比使用數學規劃法所求得之解更佳[15, 16]。

註：如果直接以全部7個因子之反應曲面罰函數型態的適應函數，使用基因演算法求最佳解，則需增加反應曲面法實驗配置的實驗次數，才能求得目標函數與限制條件的數學模型，不僅耗費有限元素分析軟體模擬實驗時間，而且適應函數的變數數量增加，不利於基因演算法求取最佳解。

為確認適應函數是否合適，首先，設定基因演算參數初始族群 P_0 為100、交配率 P_x 為0.6、突變率 P_M 為0.05、最大世代數 P_T 為1000，執行程式10次檢查三個應力值是否能滿足檢驗標準，並確認適應函數值是否一致，所得結果如表11所示。由表11中，合成應力、正剪應力及負剪應力之運算值均小於檢驗標準，而且

表12 基因演算法之演算參數所分成的水準

演算參數	水 準		
	1	2	3
$\tilde{A}$ ：初始族群	80	100	120
$\tilde{B}$ ：交配率	0.4	0.6	0.8
$\tilde{C}$ ：突變率	0.02	0.05	0.08
$\tilde{D}$ ：演算世代數	1000	3000	5000

最大的適應函數值(16531.1 kg)與最小適應值(16509.2 kg)相差僅21.9 kg，亦即，以式(5)的適應函數來求得最佳設計是合適。

2. 基因演算參數值最佳化

基因演算法之應用中，演算參數的設定對搜尋結果具有關鍵的因素。而演算參數的設定有字串的長度、初始族群之大小、交配率、突變率、演算世代數

表13 田口方法之 $L_9(3^4)$ 直交表實驗配置、實驗結果與S/N比

實驗編號	$\tilde{A}$	$\tilde{B}$	$\tilde{C}$	$\tilde{D}$	實驗值					平均值 $\bar{y}$	S/N 比 η
					y_1	y_2	y_3	y_4	y_5		
1	80	0.4	0.02	1000	16524	16537	16550	16514	16524	16529.8	-84.3654
2	80	0.6	0.05	3000	16510	16509	16528	16529	16510	16517.2	-84.3587
3	80	0.8	0.08	5000	16507	16524	16526	16503	16504	16512.8	-84.3564
4	100	0.4	0.05	5000	16505	16526	16505	16503	16510	16509.8	-84.3548
5	100	0.6	0.08	1000	16537	16534	16534	16516	16511	16526.4	-84.3636
6	100	0.8	0.02	3000	16508	16504	16503	16524	16526	16513.0	-84.3565
7	120	0.4	0.08	3000	16513	16504	16509	16514	16513	16510.6	-84.3553
8	120	0.6	0.02	5000	16525	16526	16509	16508	16504	16514.4	-84.3573
9	120	0.8	0.05	1000	16525	16510	16509	16526	16540	16522.0	-84.3613

表14 基因演算參數之回應表

水 準	演 算 參 數			
	$\tilde{A}$	$\tilde{B}$	$\tilde{C}$	$\tilde{D}$
1	-84.36017	-84.35848	-84.35971	-84.36339
2	-84.35831	-84.35985	-84.35827	-84.35683
3	-84.35792	-84.35806	-84.35841	-84.35617
Max-Min	0.00225	0.00179	0.00144	0.00722

表15 基因演算參數之確認實驗數據表

實驗數據			平均值 $\bar{z}$	確認實驗S/N比 $\tilde{\eta}$	最佳預估S/N比 η_{opt}
z_1	z_2	z_3			
16503	16515	16504	16507.3	-84.3535	-84.3553

表16 擋浪牆結構構件斷面尺寸之最佳設計尺寸與現有設計尺寸的比較表

設計參數	縱垂樑 深度	樑面板 板厚	縱垂樑 板厚	下前牆 板厚	上前牆 板厚	基座橫骨 材板厚	基座縱骨 材板厚	重量 (kg)
最佳設計尺寸(mm)	1100	18	12.413	13	10	10	19.244	16503
現有設計尺寸(mm)	1000	20	15	14	12	12	20	18098

等。本文就表7之變數的限定範圍中，編碼設定為12位元之字串長度，其他演算參數如初始族群 $P_0(\tilde{A})$ 、交配率 $P_X(\tilde{B})$ 、突變率 $P_M(\tilde{C})$ 、演算世代數 $P_T(\tilde{D})$ 等演算參數，可應用田口方法找出最佳演算參數水準組合。田口方法實驗選擇 $L_9(3^4)$ 直交表，來獲得最合適的演算參數的水準值，其演算參數水準的規劃如表12所示。

本文之目的在搜尋結構重量最輕化，也就是希望基因演算法的適應值愈小愈好，所以我們採用田口方法實驗的望小特性，其實驗結果的S/N比如表13所示。由表13的S/N比 η ，可求得回應表，如表14所示。由表14得知，最佳的演算參數水準組合為 $\tilde{A}_3\tilde{B}_3\tilde{C}_2\tilde{D}_3$ 。另從

表14中各演算參數之水準差異值(Max-Min)中選出大約一半的差異值較大的演算參數，作為最佳預估S/N比計算。因此，選出演算參數 $\tilde{A}_3$ 、 $\tilde{D}_3$ 來計算最佳預估S/N比 η_{opt} ，其計算如下：

$$\eta_{opt} = \bar{\eta} + (\eta_{\tilde{A}_3} - \bar{\eta}) + (\eta_{\tilde{D}_3} - \bar{\eta}), \quad (8)$$

其中， $\bar{\eta}$ 為表13中S/N比 η 的平均值， $\bar{\eta} = -84.3588$ dB， $\eta_{\tilde{A}_3}$ 和 $\eta_{\tilde{D}_3}$ 分別為表14中演算參數 $\tilde{A}$ 的水準3和演算參數 $\tilde{D}$ 的水準3，因此，由式(8)可得 $\eta_{opt} = -84.3553$ dB。

最後，以最佳演算參數水準組合 $\tilde{A}_3\tilde{B}_3\tilde{C}_2\tilde{D}_3$ 進行3次驗證實驗，所得之結果如表15所示，可得驗證S/N比 $\tilde{\eta} = -84.3553$ dB與最佳預估S/N比 $\eta_{opt} = -84.3553$

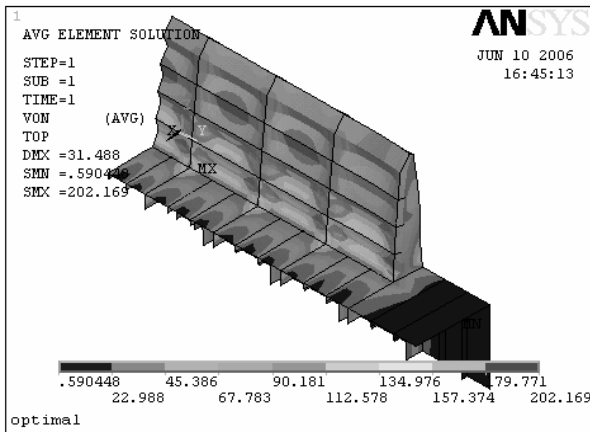


圖8 擋浪牆結構之最佳設計的合成應力圖

dB相當接近。因此，可確認所得之最佳演算參數水準組合 $\tilde{A}_3\tilde{B}_3\tilde{C}_2\tilde{D}_3$ ，即族群數120組、交配率0.8、突變率0.05及演算世代數5000代，來進行最佳化搜尋是確實有效的。

績效評估

應用式(5)的適應函數與所得之最佳的演算參數進行搜尋，可得最佳解(設計參數值)為 $X_1 = 1100 \text{ mm}$ 、 $X_2 = 18 \text{ mm}$ 、 $X_3 = 12.413 \text{ mm}$ 、 $X_4 = 19.244 \text{ mm}$ 、以及適應函數值(結構重量)為16503 kg，與現有設計之結構構件斷面尺寸的比較，如表16所示，可得結構重量減少8.81%，得到令人滿意的結果。以最佳設計參數值所得之合成應力圖，如圖8所示。

結 論

本文提出一最佳化設計的程序，可解決船體結構構件斷面尺寸最佳化設計的問題。首先，應用田口方法找出對品質特性具顯著影響的因子，作為預測數學模型的變數；接著，使用反應曲面法建立此預測數學模型；最後，應用基因演算法搜尋最佳解，可得到船體結構構件斷面尺寸最佳設計值。由所實驗之的貨櫃船擋水牆案例可得，所提出之最佳化設計的程序，可使結構重量減少8.81%。因此，所提出之最佳化設計的程序，可改善長久以來大多依靠經驗或法規，來設計船體結構構件斷面尺寸，並可縮短設計時程及降低成本。

致 謝

本文由國科會計畫NSC 94-2218-E-327-001和NSC 95-2218-E-037-001經費補助。

參考文獻

1. Myers, R.H. and D.C. Montgomery, *Response Surface Methodology Process and Product Optimization Using Designed Experiments*, John Wiley and Sons, New York, USA (1995).
2. 黎正中、陳源樹，*實驗設計與分析*，高立，台灣台北 (2005)。
3. 陳明宏，*多重品質特性在動態系統中之研究*，中原大學工業工程研究所碩士論文，台灣桃園 (1994)。
4. Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, USA (1989).
5. 郭信川、王鴻鈞，“遺傳演算法在最佳化設計問題之應用”，*中國造船暨輪機工程學刊*，第十七卷第一期，pp. 39-48 (1998)。
6. 吳劍國、徐昌文，“船舶結構混合變量優化的遺傳算法”，*中國造船*，第三十九卷第一期，pp. 57-65 (1998)。
7. Ross, P.J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw-Hill, New York, USA (1988).
8. Taguchi, G., S. Chowdhury and S. Taguchi, *Robust Engineering*, McGraw-Hill, New York, USA (2000).
9. 周至宏，*實驗設計與品質工程講義*，國立第一科技大學系統資訊與控制研究所，台灣高雄 (2006)。
10. 康淵、陳信吉，*ANSYS入門*，全華，台灣台北 (2002)。
11. 龔皇光、黃柏文、陳鴻雄，*ANSYS與電腦輔助工程分析*，全華，台灣台北(2002)。
12. 王栢村，*電腦輔助工程分析之實務與應用*，全華，台灣台北 (2001)。
13. 白賜清，*品質管制之統計方法*，中華民國品質管制學會，台灣台北 (1991)。
14. Gen, M. and R. Cheng, “A Survey of Penalty Techniques in Genetic Algorithms,” *Proc. of IEEE Conf. on Evolut. Comput.*, Nagoya, Japan, pp.804-809 (1996).
15. Chou, J.H., W.H. Liao and J.J. Li, “Application of Taguchi-Genetic Method to Design Optimal Grey-Fuzzy Controller of a Constant Turning Force Systems,” *Proc. 15th CSME Annual Conf.*, Tainan, Taiwan, pp. 31-38 (1998).
16. Tsai, J.T., T.K. Liu and J.H. Chou, “Hybrid Taguchi-Genetic Algorithm for Global Numerical Optimization,” *IEEE Trans. Evolut. Comput.*, Vol.8, pp.365-377 (2004).

OPTIMAL SECTION SCANTLING DESIGN FOR SHIP STRUCTURES USING RESPONSE SURFACE METHOD AND GENETIC ALGORITHM

W.H. Ho* J.T. Tsai** C.H. Lin*** and J.H. Chou****

* Department of Medical Information Management, Kaohsiung Medical University, Kaohsiung, Taiwan

** Department of Computer Science, National Pingtung University of Education, Pingtung, Taiwan

*** Design Division, China Shipbuilding Corporation, Kaohsiung, Taiwan

**** Institute of Systems Information and Control, National Kaohsiung First University of Science and Technology
Kaohsiung, Taiwan

Keywords: Response Surface Method, Genetic Algorithm, Taguchi Method, Optimal Design, Water Breaker

ABSTRACT

In this paper, we propose an integrative procedure for solving the optimal section scantling design problems of the ship structures. First, the Taguchi method is applied to find out the significant factors for the quality characteristics as the variables of the predicting mathematical model. Then, the response surface method (RSM) is used to construct the mathematical model. Finally, the genetic algorithm (GA) is adopted to search for the optimal solution for obtaining the optimal section scantlings of the ship structures. In this paper, we also demonstrate the optimal section scantling design of a water breaker structure for the container ship. In this example, under the constraints of the von Mises stress, the positive shear stress and the negative shear stress, the design objective is the minimum weight of the water breaker structure. According to the proposed procedure, we obtain the weight is 16503 kg which is less than the existing weight 18098 kg. The weight of the water breaker structure is, therefore, reduced 8.81%. So, we can get the satisfactory result by using the proposed integrative design procedure.

(Manuscript received Aug. 9, 2006,
Accepted for publication Feb. 9, 2007)

