

## 噪音處理

# 嘗試以專家系統進行隔音牆減音設計 及應變分析之範例探討

邱銘杰\*

## 摘要

『專家系統』在各領域的應用已蓬勃發展，作者嘗試將『專家系統』的概念應用於『隔音牆減音設計與應變分析』上，希望能有效縮減隔音牆設計所需的時間。

本『專家系統』整合了音場繞射計算(Sound Diffraction Calculation)與應變之有限元素法(F.E.M.)分析之技術，藉由人機的交談，使用者可(1)輸入資料(包括隔音牆尺寸、音源音量與座標、受音點坐標及風壓值等)；(2)選用隔音材料；(3)設定音量設計值；(4)選用分割元素之數目。『專家系統』將顯示減音設計的成果，並提示是否符合設計要求，若不符合設計要求時，使用者可重新輸入隔音牆的尺寸，再重新計算受音點音量，最後，再進行風壓應變之分析。

### 【關鍵字】

1. 專家系統(EXPERT SYSTEM)
2. 有限元素法(FINITE ELEMENT METHOD)
3. 音場繞射計算(SOUND DIFFRACTION CALCULATION)

---

\*中鼎工程股份有限公司

本『專家系統』具有(1)專家知識資料庫；(2)有限元素節點之自動排序功能；(3)有限元素之數目限制功能；(4)有限元素節點之變位資料輸出功能；(5)音場繞射計算功能；(6)設計成果判別功能；(7)重新輸入及計算功能；(8)繪圖輸入檔資料轉換功能；與(9)多重輸出格式功能；與(10)後段隔音牆之受風壓後形變繪圖功能。

本文將(1)簡述音場繞射(Sound Diffraction)與有限元素應力分析(F.E.M.)技術的數學模式；(2)簡示本『專家系統』的交談界面流程；(3)說明本『專家系統』的功能特性；(4)舉一範例以進行『專家系統』的隔音牆減音設計與應變分析。作者藉由此『專家系統』在隔音牆設計上的應用範例，說明『專家系統』應用在整合噪音與應變問題上的可行性，並希望能提供有志者在『專家系統』應用上的另類思維。

## 一、前　　言

在 1984 年 Dr.Weiss 與 Dr.Kulikowski 對『專家系統』下個定義，即是『依專家思考推理方式所發展的電腦程式，能解決那些專家才能解決的複雜問題，且其結果與專家所解的相同』，依上述之說法，『專家系統』是一個具有專家思考推理能力的電腦程式，目前發展專家系統的電腦語言可分成三類，即(1)人工智慧語言；(2)傳統語言；與(3)骨架(shell)系統，就傳統語言而言，雖然其在符號搜尋處理以及知識的表達上較薄弱，且撰寫的系統規模較小而耗時，但由於操作較快速，且傳統語言(如 C 語言、FORTRAN 語言等)又較為程式設計者所熟悉，所以有許多的小型專家系統，是以傳統語言所開發出來的。

作者嘗試建立一具有判斷能力的『專家系統』以進行隔音牆減音設計與應變分析，由於引用的數學計算繁瑣，故擬採用傳統語言(福傳語言)撰寫本『專家系統』。

相關室內吸音設計之『專家系統』之說明，則詳述於後續之章節內。

## 二、專家系統使用之數學模式簡介

相關專家系統的數學模式簡介如下：

### 2.1 音場繞射計算

相關隔音牆繞射的參數說明與座標表示，如附圖 2 所示，經加置隔音牆後的受

## 42 嘗試以專家系統進行隔音牆減音設計及應變分析之範例探討

音點音量表示如下：

$$Lp = 10 \log \left[ \sum_{j=1}^8 10^{\frac{Lp_j}{10}} \right]$$

$$Lp_j = Lw_j + 10 \log \left( \frac{Q}{4\pi r^2} \right) - IL_j$$

其中  $Lp$ ：受音點之綜合音壓位準

$Lp_j$ ：受音點之第  $j$  個頻率的音壓位準

$Lw_j$ ：噪音源第  $j$  個頻率的音能位準

$r$ ：噪音源與受音點之直線距離

$Q$ ：受音點之方向性

$IL_j$ ：隔音牆在第  $j$  個頻率下的音介入損失值

$$\text{又 } IL_j = 10 \log \left\{ \sum_{i=1}^3 \lambda_i \left[ \frac{1}{3\lambda_i + 20\delta_i} \right] \right\}$$

其中  $\delta_1 = [(r1 + r2) - (r3 + r4)]$

$\delta_2 = [(r5 + r6) - (r3 + r4)]$

$\delta_3 = [(r7 + r8) - (r3 + r4)]$

$\lambda_j$ ：第  $j$  個頻率之對應音波波長

## 2.2 應力之有限元素法(F.E.M.)分析

薄平版彎曲之控制方程式如下：

$D\nabla^4 w = q$  其中  $D$ ：平版的抗撓剛度(flexural rigidity)

$$= \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

$E$ ：楊氏模數

$H$ ：平版厚度

$\nu$ ：泊松比

以能量導論推導薄平版之應變能如下：

$$U = \frac{1}{2} D \iint \left\{ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)^2 - 2(1-\nu) \left[ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right]^2 \right\} dx dy$$

以矩形元素為基本切割元素，其形狀函數可表示如下：

$$w = [N][w]$$

$$[w] = [(w, \theta_x, \theta_y, \theta_{xy})_i]^{T i=1,2,3,4}$$

$$[N] = [N_j]_{j=1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16}$$

$$N_1 = P_1 \cdot Q_1 \quad N_2 = P_2 \cdot Q_1 \quad N_3 = P_1 \cdot Q_2 \quad N_4 = P_2 \cdot Q_2$$

$$N_5 = P_1 \cdot Q_3 \quad N_6 = P_2 \cdot Q_3 \quad N_7 = P_1 \cdot Q_4 \quad N_8 = P_2 \cdot Q_4$$

$$N_9 = P_3 \cdot Q_3 \quad N_{10} = P_4 \cdot Q_3 \quad N_{11} = P_3 \cdot Q_4 \quad N_{12} = P_4 \cdot Q_4$$

$$N_{13} = P_3 \cdot Q_1 \quad N_{14} = P_4 \cdot Q_1 \quad N_{15} = P_3 \cdot Q_2 \quad N_{16} = P_4 \cdot Q_2$$

其中  $P_1 = \left(\frac{1}{a^3}\right)(a^3 - 3ax^2 + 2x^3) \quad Q_1 = \left(\frac{1}{b^3}\right)(b^3 - 3by^2 + 2y^3)$

$$P_2 = \left(\frac{1}{a^2}\right)(a^2x - 2ax^2 + x^3) \quad Q_2 = \left(\frac{1}{b^2}\right)(b^2y - 2by^2 + y^3)$$

$$P_3 = \left(\frac{1}{a^3}\right)(3ax^2 - 2x^3) \quad Q_3 = \left(\frac{1}{b^3}\right)(3by^2 - 2y^3)$$

$$P_4 = \left(\frac{1}{a^2}\right)(x^3 - ax^2) \quad Q_4 = \left(\frac{1}{b^2}\right)(y^3 - by^2)$$

以有限元素離散法推導，元素的勁度矩陣可表示如下：

#### 44 嘗試以專家系統進行隔音牆減音設計及應變分析之範例探討

$$\begin{aligned}
 KM_{ij} &= D \int \left\{ \frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 N_j}{\partial x^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 N_i}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 N_j}{\partial y^2} + \nu \cdot \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 N_j}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 N_i}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 N_j}{\partial y^2} + 2(1-\nu) \cdot \frac{\partial^2 N_i}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 N_j}{\partial x \partial y} \right\}_{i=1,16; j=1,16} \\
 &= \int \int [B]^T [D] [B] dx dy \\
 [B] &= [A][N] \\
 [A] &= D \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial^2}{x^2} \\ \frac{\partial^2}{y^2} \\ \frac{\partial^2}{xy} \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

同理，元素的質量矩陣表示如下：

$$\begin{aligned}
 MM_{ij} &= \rho h \int \int N_i N_j dxdy_{i=1,16; j=1,16} \\
 &= \int \int [N]^T [N] dx dy
 \end{aligned}$$

最後，依系統之平衡方程式  $[\mathbf{KM}][\mathbf{r}] = [\mathbf{F}]$

解得系統之有效自由度節點的平衡變位組  $[\mathbf{r}]$  ( $\mathbf{r}$  等效於  $w$ )

其中， $[\mathbf{F}]$  為隔音牆版之受風力值 ( $\mathbf{F}$  等效於  $q$ )

### 三、專家系統的交談界面流程

相關專家系統在『隔音牆減音設計與應變分析』的交談界面流程如附圖 1：

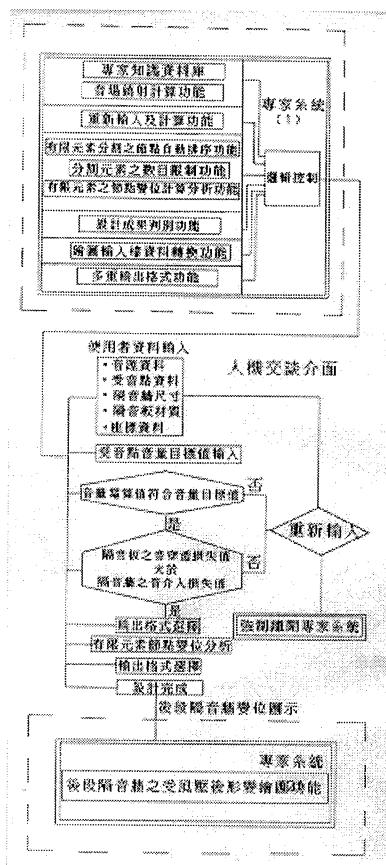


圖 1 專家系統在「隔音牆減音設計與應變分析」的交談界面流程

## 四、專家系統之功能

#### 4.1 專家知識資料庫

本專家系統內建有隔音材料資料庫，此資料庫可持久累積並且自由的擴充，資料庫內建的項目如下述：

### (1) 隔音板音穿透损失值

(2)隔音板楊氏模數值

(3)隔音板包松比

#### 4.2 有限元素節點之自動排序功能

本專家系統能進行有限元素節點之自動排序，可大量縮短使用者在進行有限元素分析時之前置資料處理、自由度分析與建檔等的時間。

#### 4.3 有限元素之數目限制功能

由於本專家系統在個人用電腦的 DOS 操作環境下，其可使用之記憶體容量有限，以目前之狀況而言，僅適宜作 6 個元素的切割，為避免程式執行錯誤，故系統內建有元素切割數目的限制功能。

#### 4.4 有限元素節點之變位資料輸出功能

本專家系統能進行有限元素節點之變位分析，並將各節點之變位資料輸出至檔案。

#### 4.5 音場繞射計算功能

本專家系統可作繁雜的音場繞射計算，能提供同專家一樣的音場分析功能。

#### 4.6 設計成果判別功能

本專家系統可依音場計算之結果，與原音量設計值作比較，以評定此種吸音設計是否能滿足設計目標，同時，系統將檢視所選用隔音板的音穿透損失值，是否有大於隔音牆之音介入損失值，若是，則本音場之繞射計算即算完成，若否，將再進行隔音板之材質選用與隔音牆之尺寸設計。

#### 4.7 重新輸入及計算功能

當減音設計不能滿足設計目標時，則本系統將再重新進行隔音板之材質選用與隔音牆之尺寸設計。

#### 4.8 繪圖輸入檔資料轉換功能

本專家系統可將有限元素節點之變位分析結果，轉換成後段專家繪圖系統之輸入檔格式，並將此轉換後的節點座標以檔案方式輸出。

#### 4.9 多重輸出格式功能

使用者在完成本專家系統的隔音牆減音設計及隔音板有限元素應變分析後，可以選擇特定的資料輸出格式，由系統將指定的設計成果格式列印至指定的資料檔

上。

#### 4.10 後段隔音牆之受風壓後形變之繪圖功能

在完成本系統的節點之變位分析與繪圖輸入檔資料轉換後，使用者可進行後段專家繪圖系統之三維隔音牆形變圖示，以了解受風壓下，此隔音牆板(以一段支撐鋼構間的隔音板作分析)的變形程度。

### 五、專家系統之範例說明

#### 5.1 問題說明

有一工廠甲，其有抽水泵設備一組置於廠界處，由於抽水泵之噪音很大，影響鄰近之住家，故擬在抽水泵與住家之間設置一道隔音牆，由於抽水泵全天運轉且住家隸屬噪音管制第三類區，故受音點處(住家)之音量控制將以 55 分貝(A 加權)為目標。

相關噪音源與受音點的座標表示如圖 2 所示，另相關每一段支撐鋼構間的隔音板，其有限元素之切割與節點自由度之設定如圖 3 所示。

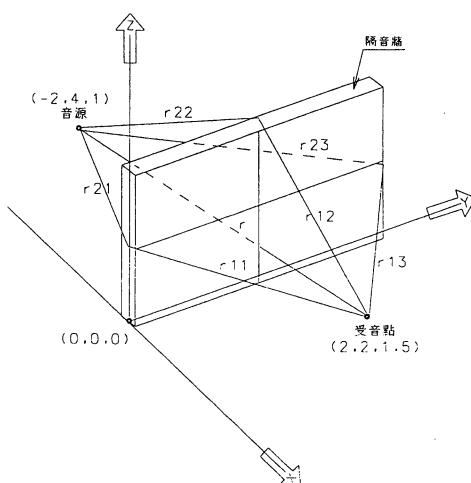


圖 2 相關噪音源與受音點的座標表示

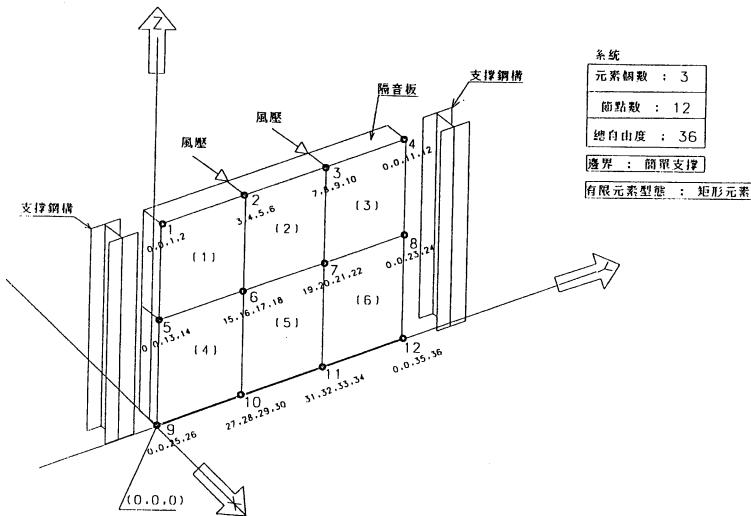


圖 3 有限元素之切割與節點自由度之設定

## 5.2 隔音牆減音設計及應變分析

相關本專家系統的隔音牆減音設計及應變分析，其電腦交談之流程摘要，簡列如下：

A.前段隔音牆減音設計及應變分析專家系統

■ expert

\*\*\*\*\*

\* 歡迎進入隔音牆減音設計及應變分析之專家系統 \*

\* ( 請壓任意鍵以啟動系統 ) \*

\*\*\*\*\*

輸入 : 任意鍵

[1]隔音板 Type A

[2]隔音板 Type B

[3]隔音板 Type C

[4]離開專家系統

請選擇隔音板材質[1][2][3] 或 離開[4]

輸入 : 1

請輸入隔音牆之長度(公分,小數點下 1 位)

輸入 : 400.0

請輸入隔音牆之厚度(公分,小數點下 1 位)

輸入 : 5.0

請輸入隔音牆之高度(公分,小數點下 1 位)

輸入 : 200.0

請輸入設備音源之 X 向座標(公尺,小數點下 1 位)

輸入 : -2.0

請輸入設備音源之 Y 向座標(公尺,小數點下 1 位)

輸入 : 4.0

請輸入設備音源之 Z 向座標(公尺,小數點下 1 位)

輸入 : 1.0

請輸入音源在 63HZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

請輸入音源在 125HZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

請輸入音源在 250HZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

請輸入音源在 500HZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

## 50 嘗試以專家系統進行隔音牆減音設計及應變分析之範例探討

請輸入音源在 1KHZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

請輸入音源在 2KHZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

請輸入音源在 4KHZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

請輸入音源在 8KHZ 之音能位準(dBA,小數點下 1 位)

輸入 : 80.0

請輸入受音點之 X 向座標(公尺,小數點下 1 位)

輸入 : 2.0

請輸入受音點之 Y 向座標(公尺,小數點下 1 位)

輸入 : 2.0

請輸入受音點之 Z 向座標(公尺,小數點下 1 位)

輸入 : 1.5

請輸入音量之設計目標值(,小數點下 1 位)

輸入 : 55.0

\*\*\*\*\*

\* 受音點繞射音場計算... \*

\*\*\*\*\*

\*\*\* 結果 \*\*\*

1.受音點處的音量 = 53.5 分貝(A 加權)符合音量設計值 [ 80.0 分貝 ] 以下之要求

2.選用隔音板之音穿透損失值(八音頻) > 隔音牆之音介入損失值(八音頻)

[1].記錄隔音牆音介入損失值 、 隔音板音穿透損失值 、 音量  
計算結果及隔音牆之材質與尺寸

[2]僅記錄隔音牆之材質與尺寸資料

[3]不記錄資料,直接離開專家系統

請選擇檔案寫入格式[1] [2] 或 離開[3]

輸入 : 1

\*\* 檔案 output1.DAT 寫入完成.. \*\*

\*\*\* 結束 \*\*\*

[1]計算風壓之隔音牆應變分析

[2]離開專家系統

請選擇隔音牆應變分析[1] 或 離開[2]

輸入 : 1

請輸入每一段支撐鋼構間的水平跨度(公分,小數點下 1 位)

輸入 : 100.0

請輸入有限元素在 X 向之分割個數(整數,不大於 3)

輸入 : 3

請輸入有限元素在 Y 向之分割個數(整數,不大於 2)

輸入 : 2

請輸入風壓值(牛頓/平方米,小數點下 1 位)

輸入 : 10000.0

[1].列印受風壓前之結點座標檔案至 output2.dat

[2].列印受風壓前之結點座標檔案至 output2.dat, 及列印受風壓後之結點座標檔案至 output3.dat

[3].不列印且離開專家系統

請選擇列印資料檔[1][2] 或 離開[3]

輸入 : 2

B.後段隔音牆之變位圖示專家系統

■draw

請輸入受風壓前之結點座標檔案名稱

輸入 : output2.dat

## 52 嘗試以專家系統進行隔音牆減音設計及應變分析之範例探討

請輸入受風壓後之結點座標檔案名稱

輸入 : output3.dat

相關本專家系統的隔音牆之變位圖示,請參閱附圖 4。

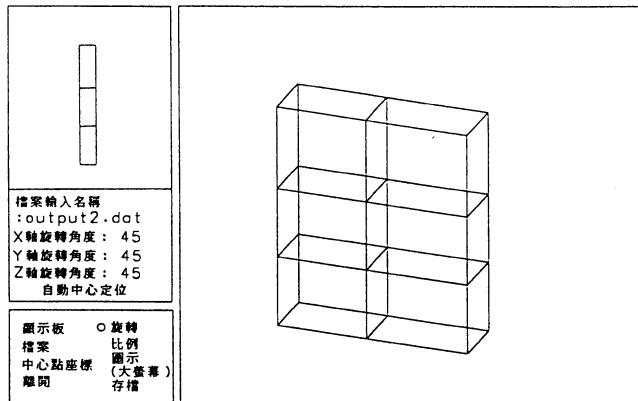


圖 4 專家系統的隔音牆之變位圖示(1/2) [受風力前]

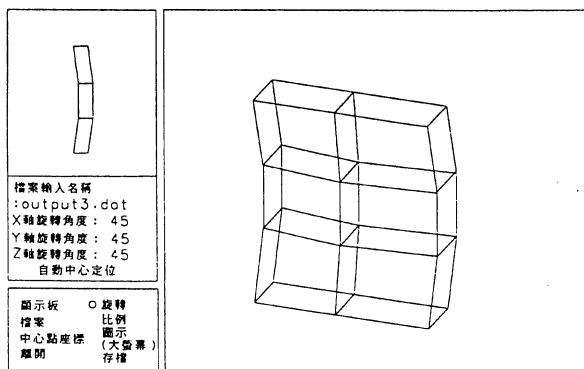


圖 4 專家系統的隔音牆之變位圖示(2/2) [受風力後]

### C. 隔音牆資料列印

■  
type output1.dat

---

\*\*\*\*\* 隔音牆之尺寸 \*\*\*\*\*

隔音板材質 : 隔音板 Type A

長度= 400.0 公分

高度= 200.0 公分

厚度= 5.0 公分

\*\*\*\*\* 音量分析資料 \*\*\*\*\*

#### A. 音量

Hz	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
PWL(dBA)	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0	80.0

#### B. 座標

噪音源: X= -2.0 M Y= 4.0M Z= 1.0M

受音點: X= 2.0 M Y= 2.0M Z= 1.5M

#### C. 音量目標 - 55 dBA

#### D. 隔音板音穿透損失值

Hz	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
S.T.L.(dB)	12.0	15.0	18.0	23.0	28.0	35.0	42.0	50.0

#### E. 隔音牆音介入損失值

Hz	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k
S.I.L.(dB)	8.7	11..3	14.2	17.1	20.1	23.1	26.1	29.1

F. 受音點音量(加置隔音牆後)= 53.5 dBA

---

## 七、結論

本文旨在建立一個『隔音牆減音設計與應變分析』的專家系統，並舉一範例說明系統的交談式設計流程，本專家系統整合了音場繞射計算、有限元素法分析及三維圖學分析等三項技術，希望在隔音牆減音設計階段，能同時進行隔音牆受風壓後的應變分析，並將隔音牆受風壓後的應變結果以三維圖學表示。

由於本系統主題所涵蓋的設計領域較廣(包括聲學、固體力學之有限元素分析及圖學)，所以第一版的專家系統尚留有許多設計的空間，例如在1).音場分析上，係考慮點音源之音場繞射計算，且不考慮隔音牆的吸音性；2).在有限元素應變分析上，係假設隔音牆為一線彈性的薄平板，並僅採用矩形元素作分析，未進行隔音板材之應力檢視，且未考慮地震力因子，另外，因在有限元素應變求解上，採用矩陣式解法，佔用較多記憶體空間，故元素切割的數目受到限制；及3).三維圖學分析上，未設置隱藏線功能。

作者希望能藉由此篇『隔音牆減音設計與應變分析』之專家系統，提供讀者在隔音牆減音設計上的另類思維與共鳴。

## 參考文獻

- 1.陳舜田等譯，有限元素法，科技圖書股份有限公司，pp249～286 & pp327～378，民國七十六年一月。
- 2.曾昭仁譯，應用有限元素分析，科技圖書股份有限公司，pp339～405，民國七十六年三月。
- 3.劉弘祥等譯，有限元素程式-在地工力學之應用，科技圖書股份有限公司，pp98～126 & pp354～403，民國七十六年六月。
- 4.J.D.IRWING & E.R.GRAF, INDUSTRIAL NOISE AND VIBRATION CONTROL, 虹橋,pp185～236，民國六十八年七月。

5. ASCE, WIND LOADING AND WIND-INDUCED STRUCTURAL RESPONSE, ASCE, pp1~p207, 1987。
6. 李更生譯, 交談式微電腦圖學, 松崗電腦圖書資料有限公司, pp98~126 & pp359~387, 民國七十五年二月。
7. A.C.UGURAL, STRESSES IN PLATES AND SHELLS, McGraw-Hill, pp15~pp16, 1981。