

# 發明專利說明書

(本說明書格式、順序及粗體字，請勿任意更動，※記號部分請勿填寫)

※申請案號：P2132362

※申請日期：P2.11.1P ※IPC 分類：H04R 17/00

壹、發明名稱：(中文)

以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法

貳、申請人：(共 1 人)

姓名或名稱：(中文)

國立交通大學

代表人：(中文) 張俊彥

住居所或營業所地址：(中文)

新竹市大學路 1001 號

國籍：(中文) 中華民國

參、發明人：(共 2 人)

姓名：(中文)

1. 白明憲

2. 歐昆應

住居所地址：(中文)

1. 新竹市大學路 1001 號

2. 台中市北區進化路 330 號 3 樓之 5

國籍：(中文) 1-2. 中華民國

肆、聲明事項：

本案係符合專利法第二十條第一項  第一款但書或  第二款但書規定之期間，其日期為： 年 月 日。

◎本案申請前已向下列國家（地區）申請專利  主張國際優先權：  
【格式請依：受理國家（地區）；申請日；申請案號數 順序註記】

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.
- 5.

主張國內優先權（專利法第二十五條之一）：  
【格式請依：申請日；申請案號數 順序註記】

- 1.
- 2.

主張專利法第二十六條微生物：

國內微生物 【格式請依：寄存機構；日期；號碼 順序註記】

國外微生物 【格式請依：寄存國名；機構；日期；號碼 順序註記】

熟習該項技術者易於獲得，不須寄存。

### 伍、中文發明摘要：

一種以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法；主要係將密閉空間聲場等效成一個主要聲源以及均勻分布在聲場邊界上的虛擬次要聲源。虛擬次要聲源即是用來模擬聲場的反射以及混響的現象，最後根據這個假設所推導數學模式將符合波動方程式 (wave equation)。由這個關係式，利用最小平方法 (least-square procedure) 來求解反矩陣以得到每個虛擬聲源的強度。所算出來的一組虛擬聲源強度即代表一個特定的聲場所產生的混響效果。在模擬的過程中亦可以設定其聲場的幾何大小，以及與頻率相關的邊界條件如聲場邊界的吸音律。

### 陸、英文發明摘要：

柒、指定代表圖：

(一)本案指定代表圖為：圖七。

捌、本案若有化學式時，請揭示最能顯示發明特徵的化學式：

## 玖、發明說明：

### 【發明所屬之技術領域】

本發明係關於一種以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，特別是指一種音訊處理、3D 空間音效之產生技術；即將密閉空間聲場等效成一個主要聲源以及均勻分佈在聲場邊界上的虛擬次要聲源。後者即是用來模擬聲場的反射以及混響的現象。而且在模擬的過程中可以設定其聲場的幾何大小以及與頻率相關的邊界條件如聲場邊界的吸音率，而產生如演藝廳般的仿真效果。此外，人耳對於低頻訊號解析度較高，對高頻訊號解析度較低，加以考慮此因素後更可簡化整體音效合成的運算量。

### 【先前技術】

混響器的設計在 3D 環場音效中扮演極為重要的角色。人類對於聲場的感知取決於聲音在此特定空間的反射以及混響所形成的。如果不考慮混響的因素，當在使用耳機或者喇叭的時候，有如身歷其境的真實性或空間感將會消失，在 3D 環場音效的實現上也會大打折扣。過去用來產生混響的方法包括了：邊界元素法（BEM）、有限元素法（FEM）、射線軌跡追蹤法（ray tracing）、影像鏡射法（image method）。然而這些習知方法，於混響效果上則有如下缺點：

（一）計算方式比較繁瑣複雜，而且計算量大。

(二)無法提供較為人們所熟悉的環境設定參數。

(三)所製造的混響效果不自然。

而且，一旦混響時間(reverberation time)稍長的話，更會有以下的缺陷：

(一)初使的響應太過於離散，導致有粗音質(grainy sound quality)的現象。

(二)在後期混響(late reverberation)部分易產生不自然的抖音。

(三)混響時間長的時候，容易有金屬聲。

(四)回響密度(echo density)不足夠，且不會隨時間而增加。

由此可見，上述習用物品仍有諸多缺失，實非一良善之設計，而亟待加以改良。

本案發明人有鑑於上述習用的混響器之模擬方法所衍生的各項缺點，乃亟思加以改良創新，並經多年苦心孤詣潛心研究後，終於成功研發完成本件以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法。

#### 【發明內容】

本發明之本發明之主要目的，旨在提供一個運算量低且參數調整較人性化的混響器設計方法來實現讓聆聽者有如身歷其境的混響以及空間感。

本發明之次要目的，旨在提供一種欲模擬的空間大小、空間邊界的吸音率以及幾何形狀皆可任意改變，而且較自然的混響效果。

本發明之另一目的，旨在提供一種考慮人耳對於低頻訊號解析度較高，對高頻訊號解析度較低，而加以簡化整體音效合成的運算量之混響器設計方法。

可達成上述目的之以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，係利用係將密閉空間聲場等效成一個主要聲源以及均勻分布在聲場邊界上的虛擬次要聲源。虛擬次要聲源即是用來模擬聲場的反射以及混響的現象，最後根據這個假設所推導數學模式將符合波動方程式（wave equation）。由這個關係式，利用最小平方法（least-square procedure）來求解反矩陣以得到每個虛擬聲源的強度。所算出來的一組虛擬聲源強度即代表一個特定的聲場所產生的混響效果。

#### 【實施方式】

茲為便於 貴審查委員能更進一步對本發明之構造、使用及其特徵有更深一層，明確、詳實的認識與瞭解，茲舉出較佳之實施例，配合圖式詳細說明如下：

邊界聲源表示法主要奠基於邊界層位能理論，但是卻免除 HIE（Helmholtz integral equation）法之需建立於已知表面壓力和表面速率條件下。簡易的邊界層表面壓力可表示

為：

$$p(x) = \int_S \sigma(x_0) G(x, x_0) dS(x_0) \quad (1),$$

方程式(1)中， $G$ 為自由空間格林函數 (free space Green's function)，即  $G(r) = \frac{A}{r} e^{-jkr}$  其中  $r$  為散射距離， $A$  表聲源振幅。

$\sigma$  用以表示邊界層上的未知強度之磁單極子，偏微方程式(1)

可得  $\sigma$  穿越邊界的速率：

$$\frac{\partial p}{\partial n}(x) = \alpha \sigma(x) + \int_S \sigma(x_0) \frac{\partial G}{\partial n}(x, x_0) dS(x_0) \quad (2),$$

可運用數值分析，如邊界元素法 (BEM; boundary element method)，即可以逼近方程式(1)和(2)成：

$$p(x) \approx \sum_{m=1}^M \sigma(x_m) G(x, x_m) S_m = \sum_{m=1}^M [\sigma(x_m) S_m] G(x, x_m) = \sum_{m=1}^M Q_m G(x, x_m) \quad (3),$$

$$\frac{\partial p}{\partial n}(x) = \alpha \sigma(x) + \sum_{m=1}^M Q_m \frac{\partial G}{\partial n}(x, x_m) \quad (4),$$

由上式可發覺，當  $M$  趨近於無限時， $S_m$  會趨近零。這也可引證密閉聲場可用一位於自由聲場中的主聲源和一組無窮數目的虛擬聲源加以置換。先假設此主聲源為一點聲源，即可重寫方程式(3)和(4)成；

$$p(x) = G_p(x, x_p) + \sum_{m=1}^M Q_m G(x, x_m) \quad (5),$$

$$\frac{\partial p}{\partial n}(x) = \frac{\partial G_p}{\partial n}(x, x_p) + \sum_{m=1}^M Q_m \frac{\partial G}{\partial n}(x, x_m) \quad (6),$$

方程式(5)(6)中下角代號  $p$  與  $m$  分別代表主聲源和虛擬聲源。 $M$  則表虛擬聲源的數目， $x$  為位置向量， $Q_m$  表示極趨近



真實狀況時未知聲源強度。由於虛構聲源表面遠離邊界，是用來計算壓力梯度，所以將式(4)中  $\alpha\sigma(x)$  改寫成式(6)的模式會更清楚。再進一步假設邊界只可反射，則需滿足

$$\frac{\partial p(x)}{\partial n} = -jk\beta(\omega)p(x) \quad (7)。$$

其中， $k$  表波數  $k = \frac{\omega}{c}$ ， $c$  為聲速， $\beta(\omega)$  表標準特殊聲學導納。

方程式(5)(6)(7)皆可改寫成矩陣，即

$$\begin{aligned} p &= G_p + Gq \\ p_n &= G_{np} + G_nq \\ p_n &= -jk\beta(\omega)I_N p \end{aligned} \quad (8)。$$

其中， $I_N$  為單位矩陣， $N$  為場點數。又導納  $\beta(\omega)$  為

$$\beta(\omega) = \frac{\rho_0 c}{z} = \chi + j\eta \quad (9)，$$

這裡  $z$  為特殊聲學阻抗，即

$$z(\omega) = \frac{\rho_0 c}{\chi + j\eta} = r_n(\omega) + jx_n(\omega) \quad (10)，$$

此處  $r$  和  $x$  分別是特殊聲學阻抗和電抗，也同於邊界的入射聲波吸附係數算式，即

$$\alpha(\omega) = \frac{4\rho_0 c r_n(\omega)}{(r_n(\omega) + \rho_0 c)^2 + x_n(\omega)^2} \quad (11)；$$

$\eta$  和  $x_n(\omega)$  約等於零，這也引證了我們一開始以吸附率為主要假設是合理的，因此

$$z(\omega) = \frac{-[2\alpha(\omega) - 4]\rho_0 c / \alpha(\omega) + \sqrt{\{[2\alpha(\omega) - 4]\rho_0 c / \alpha(\omega)\}^2 - 4(\rho_0 c)^2}}{2} \quad (12)；$$

再把式(12)代入式(9)來給定對應的  $\beta(\omega)$ 。則未知聲源強度

$q(\omega)$  可由聯立式(8)求解而得，即

$$[G_n + jk\beta(\omega)I_N G]q(\omega) = -[G_{np} + jk\beta(\omega)I_N G_p] \quad (13)。$$

通常，虛擬反矩陣步驟是接續的必要步驟，因為式(13)常是非矩形的不理想狀況。其詳細步驟如下：

令  $\mathbf{A} = [G_n + jk\beta(\omega)I_N G]$ ，其矩陣大小為  $a \times b$ ，根據矩陣的形狀

有下列三種情形：

1.  $a = b$ :

此為方陣，其反矩陣可直接計算之。

2.  $a < b$  (underdetermined)

此為扁寬矩陣，其反矩陣為 minimum norm solution，求解公式如下：

$$\mathbf{A}^+ = \mathbf{A}^H (\mathbf{A}\mathbf{A}^H)^{-1}$$

其中 '+' 代表虛擬反矩陣，'H' 代表共扼轉置矩陣。

3.  $a > b$  (overdetermined)

此為瘦長矩陣，其反矩陣為 least square solution，求解公式如下：

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^H \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^H$$

下一步驟，我們使用非均勻取樣圖示可進一步簡化和近似人類聽覺系統對不同頻率的解析度。本發明中，頻率反應函數取樣於空間指數模式，即根據  $\tilde{\omega}_i = \omega_0 e^{\alpha(\frac{2\pi}{P})i}$   $i = 1, \dots, P$ 。此處  $\omega_0$  和  $P$  分別為最小頻率和所求頻率分量的數目。必須選定參數  $\alpha$  以涵蓋所需求頻率空間。當得到  $q(\tilde{\omega}_i)$   $i = 1, \dots, P$  時，介於主聲源

和任意空間中特定接收點的樣本之非均勻頻率反應，即能使用方程式(5)來計算和應用線性內插來轉化成均勻頻率。脈衝反應並可藉著頻率反應的逆 FFT 來得到。在此舉個簡單的例子來說明內差轉換。非等間隔取點如下表所示：

頻率	1	2	4	8
對應值	10	20	40	80

接下來，經由內差公式將頻率為 3、5、6、7 的點求出，如下表：

頻率	1	2	3	4	5	6	7	8
對應值	10	20	30	40	50	60	70	80

如此一來便可得到等間隔分佈的點。

最後我們將本方法的流程條列如下：

1. 設定空間大小以及幾何形狀。
2. 決定四周牆壁的吸音率  $\alpha(\omega)$  並代入式(12)，再把式(12)代入式(9)來給定對應的  $\beta(\omega)$ 。
3. 決定分佈在密閉空間上的虛擬點聲源以及量測點的個數，以及非等間隔頻率分佈的點數。
4. 形成如式(8)之矩陣模式之後，代入式(13)並且利用虛擬反矩陣求解聲源強度  $q(\omega)$ 。
5. 利用聲源強度  $q(\omega)$  代入式(3)，即可計算出非等間隔之空間頻率響應。
6. 利用線性內差法，轉化成等間隔之頻率響應，再利用 IFFT

即可得到空間之脈衝響應。

接下來如圖一所示，係使用兩個幾何結構來檢驗本發明。一個為長方體密閉空間， $L1$ 、 $L2$ 、 $L3$  長度分別為 20 公尺，15 公尺和 10 公尺。另一則是模擬 Elmia Concert Hall 的聲場。此二者皆有相同的吸收率。其吸音率分佈如下所示：

surface	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1000 Hz	2000 Hz	4000 Hz
Rectangular room	0.239	0.201	0.185	0.175	0.175	0.172
Concert hall	0.241	0.204	0.18	0.174	0.178	0.176

此混響器預設參數為， $\omega_0 = 2\pi \times 10$ ， $P=512$ ， $a=1.2253$ ，和  $A=1.0$ 。安排 15 個參與者作女性嗓音演說和交響樂的聽力測試。此測試使用六個主顯項；包括 spaciousness，fullness，clarity，naturalness，liveness 和 warmth。劃分五個等級；1 代表 terrible，2 代表 poor，3 代表 fair，4 代表 good，5 代表 perfect。

圖二 A、B 與圖三 A、B 則分別表示長方體密閉空間和 Elmia Concert Hall 的響應。

此外，測量後綜合響應的 T60 分別是 0.908 和 0.274 秒。現存的方法只有在初期的部分對相關聲場複合動力作混成。然而，預備測試顯示缺乏後期的混響似乎並無在聲效上建立明顯的差異。這可能是緣由人類固有的聽力遮蔽效應 (mask effect)。而遮蔽效應至多在 200ms 內即會衰變。如圖

四 A 所示，實線為脈衝響應，虛線為遮蔽效應；圖四 B 則顯示 60000 帶濾波器截去 15000 帶濾波後的遮蔽效應。圖五 A 為女性嗓音演說的聲效量測結果，圖五 B 為交響樂的聲效量測結果，虛線為測到的響應，虛線為遮蔽效應，可看出這種幅度的濾波效減似乎並未明顯減弱臨場表現。

如圖六 A、B 與 C、D 所示，分別顯示了長方體密閉空間和 Elmia Concert Hall 的混響器之聽力測試結果，也證明本發明有效率的增進 spaciousness, fullness, liveness 和 warmth, 而不損害 clarity, naturalness。

圖七所示，則為本發明之流程示意圖。

上列詳細說明係針對本創作之一可行實施例之具體說明，惟該實施例並非用以此限定本發明實施之範圍，凡未脫離依本創作技藝精神所為之等效實施與變更，例如：等變化之等效性實施例，均應包含於本案之專利範圍中。

綜上所述，本案不但在形態上確屬創新，並能較習用物品增進上述多項功效，應已充分符合新穎性與進步性之法定發明要件，爰依法提出申請，懇請 貴局核准本件發明專利申請案，以勵創作，至感德便。

#### 【圖式簡單說明】

圖一為位於封閉長方體密閉空間邊界的虛擬聲源分布示意圖；

圖二 A 為長方體密閉空間的頻率響應量測結果；

圖二 B 為長方體密閉空間的脈衝響應量測結果；

圖三 A 為 Elmia Concert Hall 的頻率響應量測結果；

圖三 B 為 Elmia Concert Hall 的脈衝響應量測結果；

圖四 A 為 Elmia Concert Hall 的脈衝響應量測結果；

圖四 B 為 Elmia Concert Hall 截去延遲效應脈衝後脈衝  
響應量測結果；

圖五 A 為女性嗓音演說的聲效量測結果；

圖五 B 為交響樂的聲效量測結果；

圖六 A 長方體密閉空間的女性嗓音演說之混響器聽力  
測試結果比較；

圖六 B 長方體密閉空間的交響樂之混響器聽力測試結果  
比較；

圖六 C Elmia Concert Hall 的女性嗓音演說之混響器聽  
力測試結果比較；

圖六 D Elmia Concert Hall 的交響樂之混響器聽力測試  
結果比較；

圖七為本發明之流程示意圖。

### 拾、申請專利範圍：

1. 一種以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，其係包括以下之步驟；

步驟一：將密閉空間聲場等效成一個主要聲源以及均勻分布在聲場邊界上的虛擬次要聲源；

步驟二：設定聲場參數及邊界虛擬聲源強度；

步驟三：導入波動方程式；

步驟四：求解反矩陣；

步驟五：得到每個虛擬聲源的強度；

步驟六：將虛擬次要聲源用來模擬聲場的反射以及混響的現象。

2. 如申請專利範圍第 1 項所述之以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，可將該方法寫入一模擬運算晶片之內部程式，以得到較自然的混響效果。

3. 如申請專利範圍第 1 項所述之以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，其中步驟二，可以設定聲場的幾何大小，以及與頻率相關的邊界條件。

4. 如申請專利範圍第 3 項所述之以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，其中該頻率相關的邊界條件，可包含聲場邊界的吸音率。

5. 如申請專利範圍第 1 項所述之以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，其中步驟四，係使用最小平方法求解。
6. 如申請專利範圍第 1 項所述之以邊界聲源表示法為基礎之空間音效混成方法，其中步驟五，可濾除部分人耳解析度較低之高頻訊號。



拾壹、圖式：

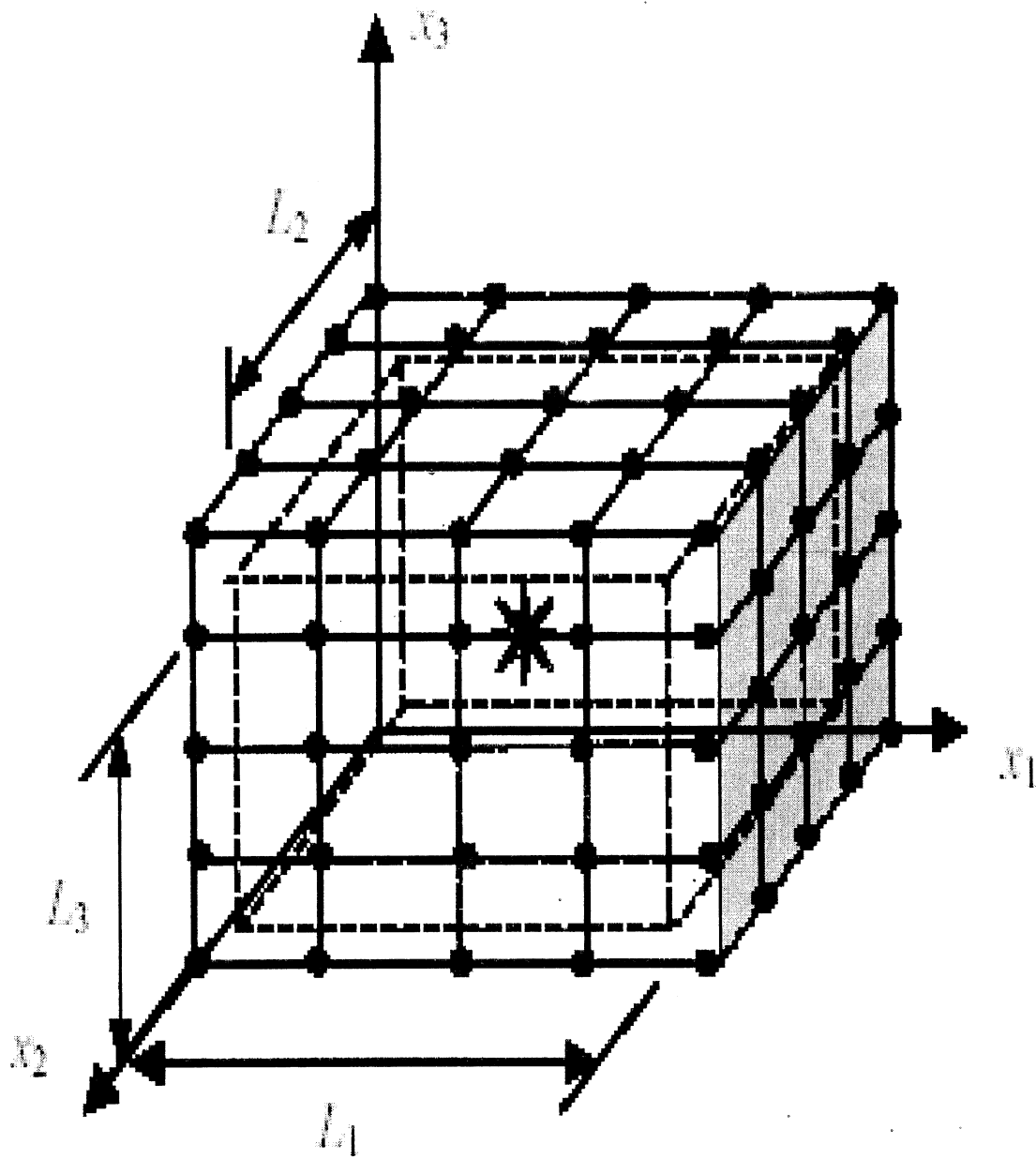


圖 一

拾壹、圖式：

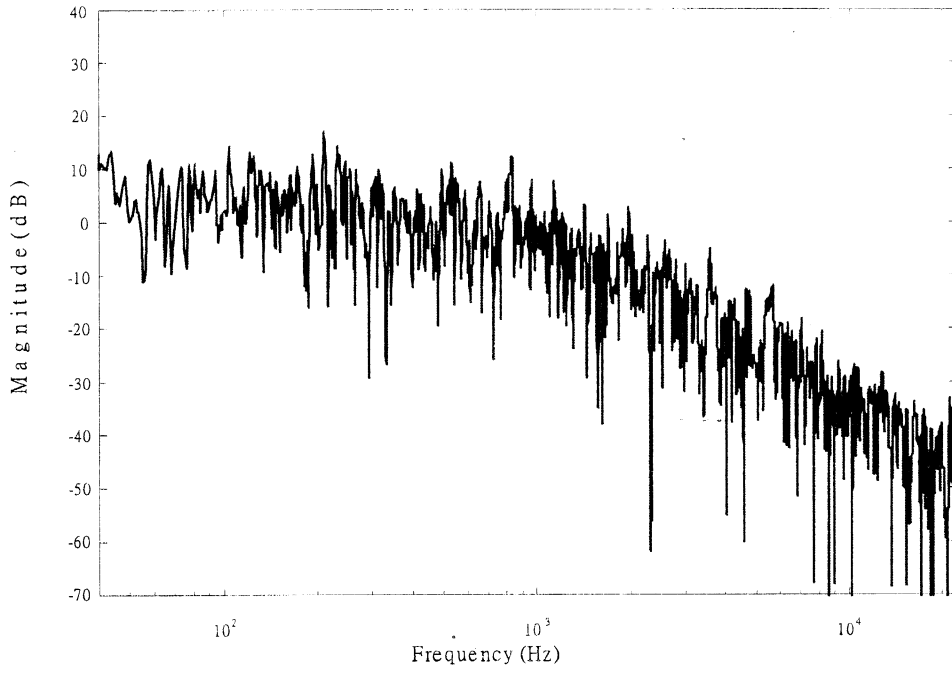


圖 二 A

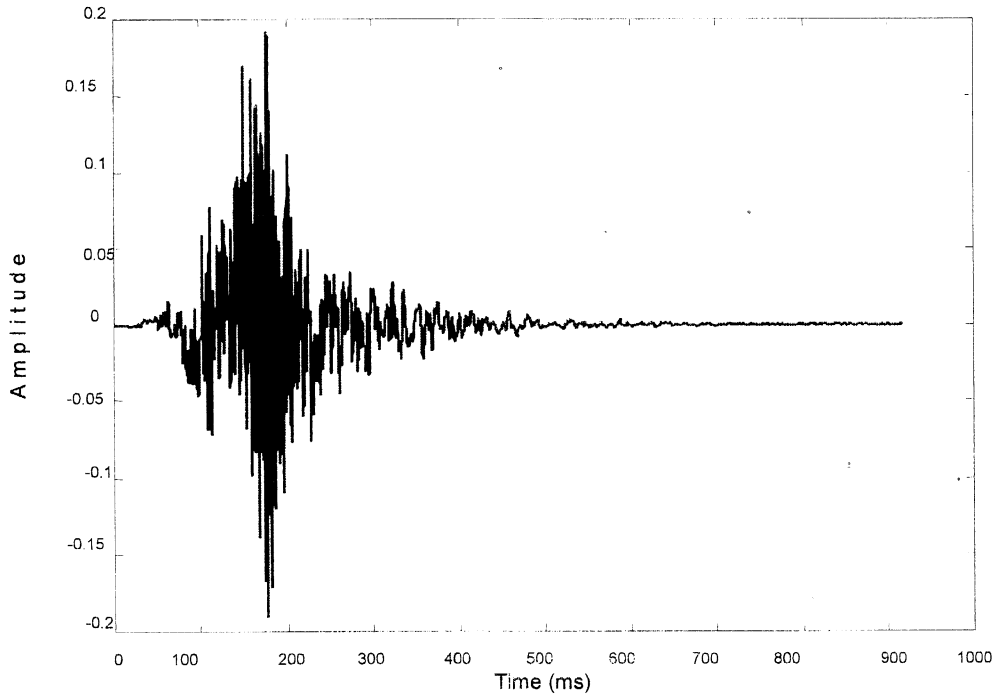


圖 二 B

拾壹、圖式：

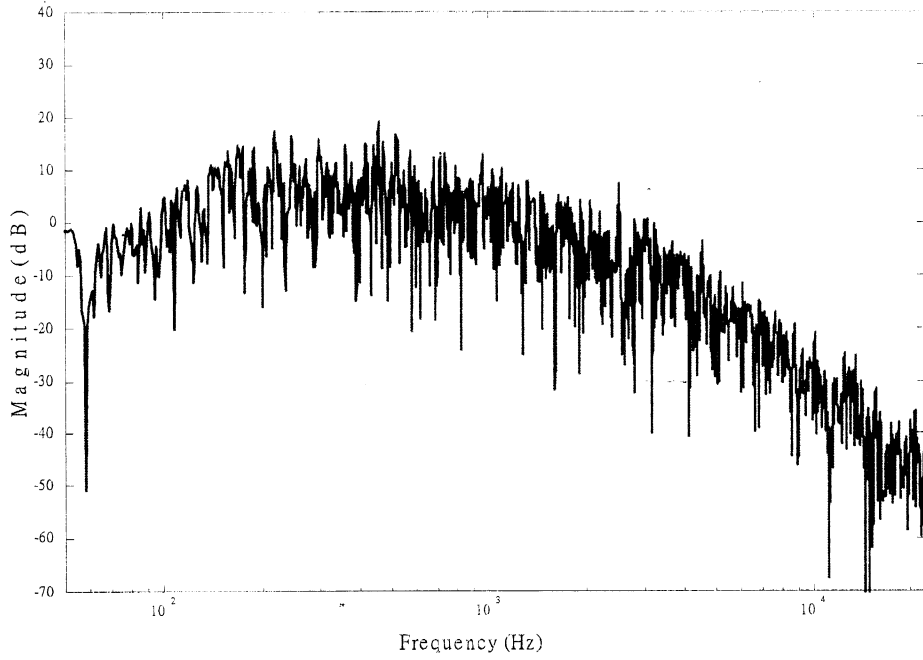


圖 三 A

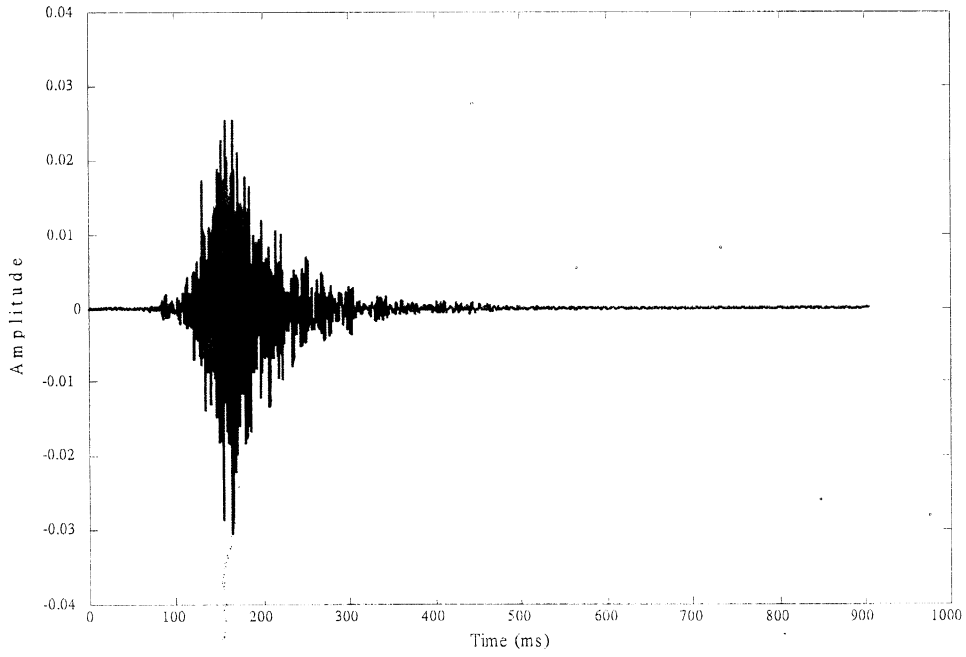


圖 三 B

拾壹、圖式：

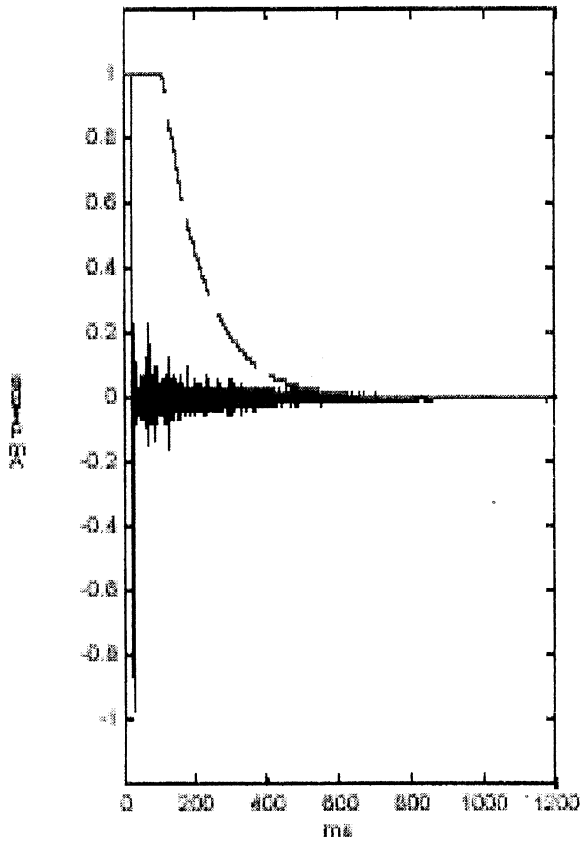


圖 四 A

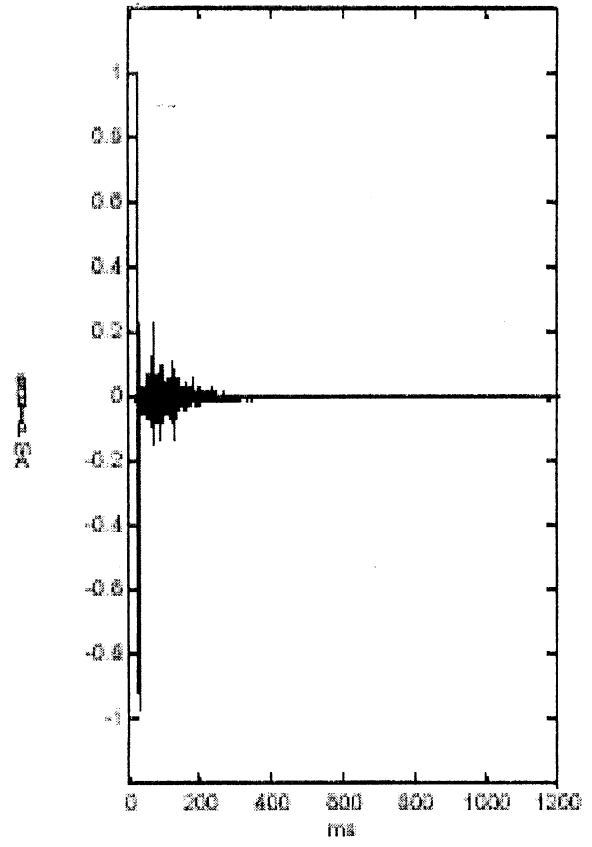


圖 四 B

拾壹、圖式：

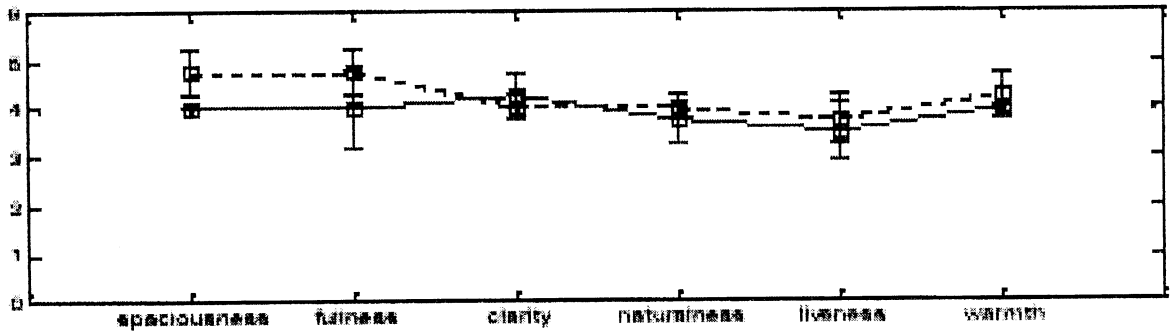


圖 五 A

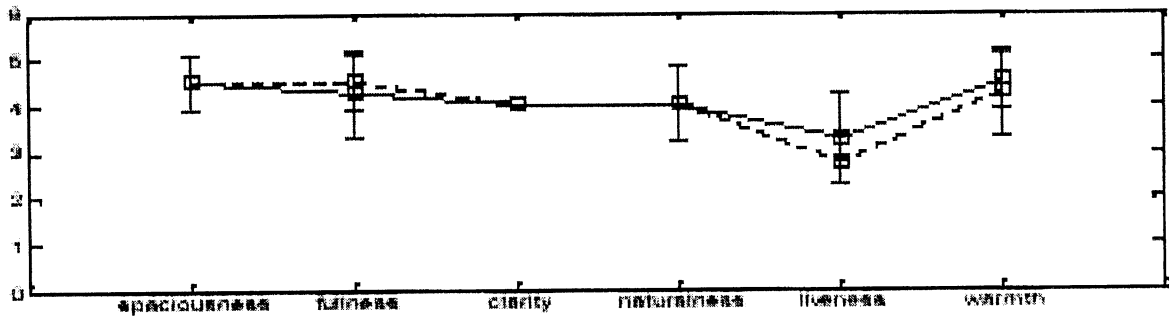
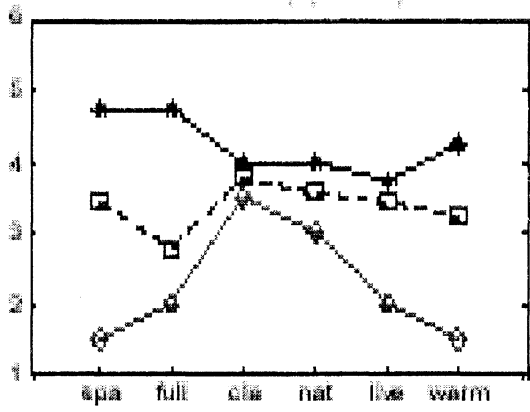
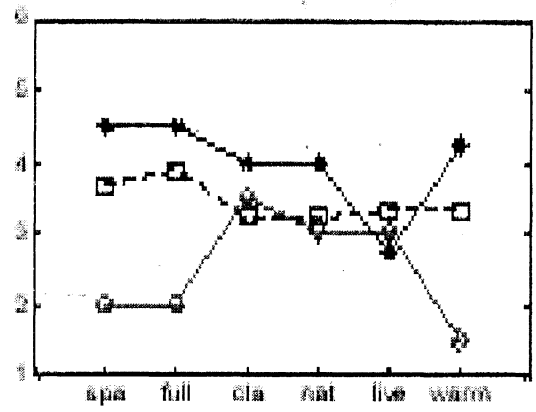


圖 五 B

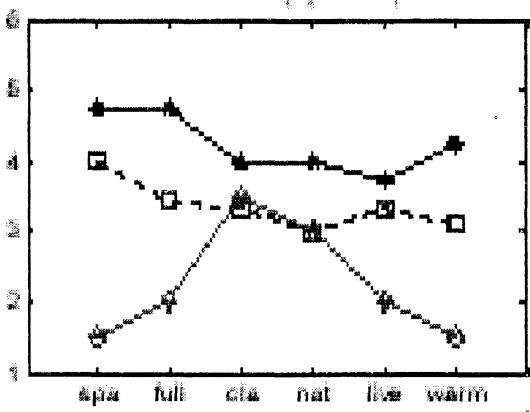
拾壹、圖式：



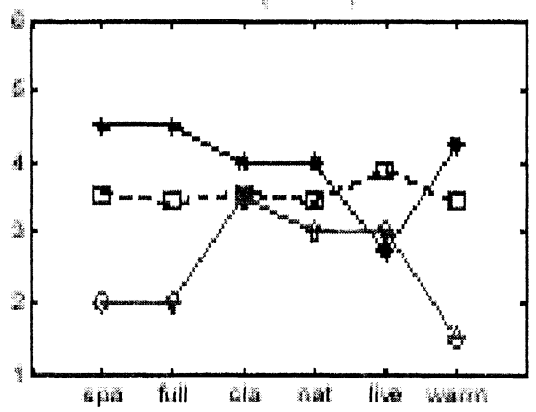
圖六 A



圖六 B

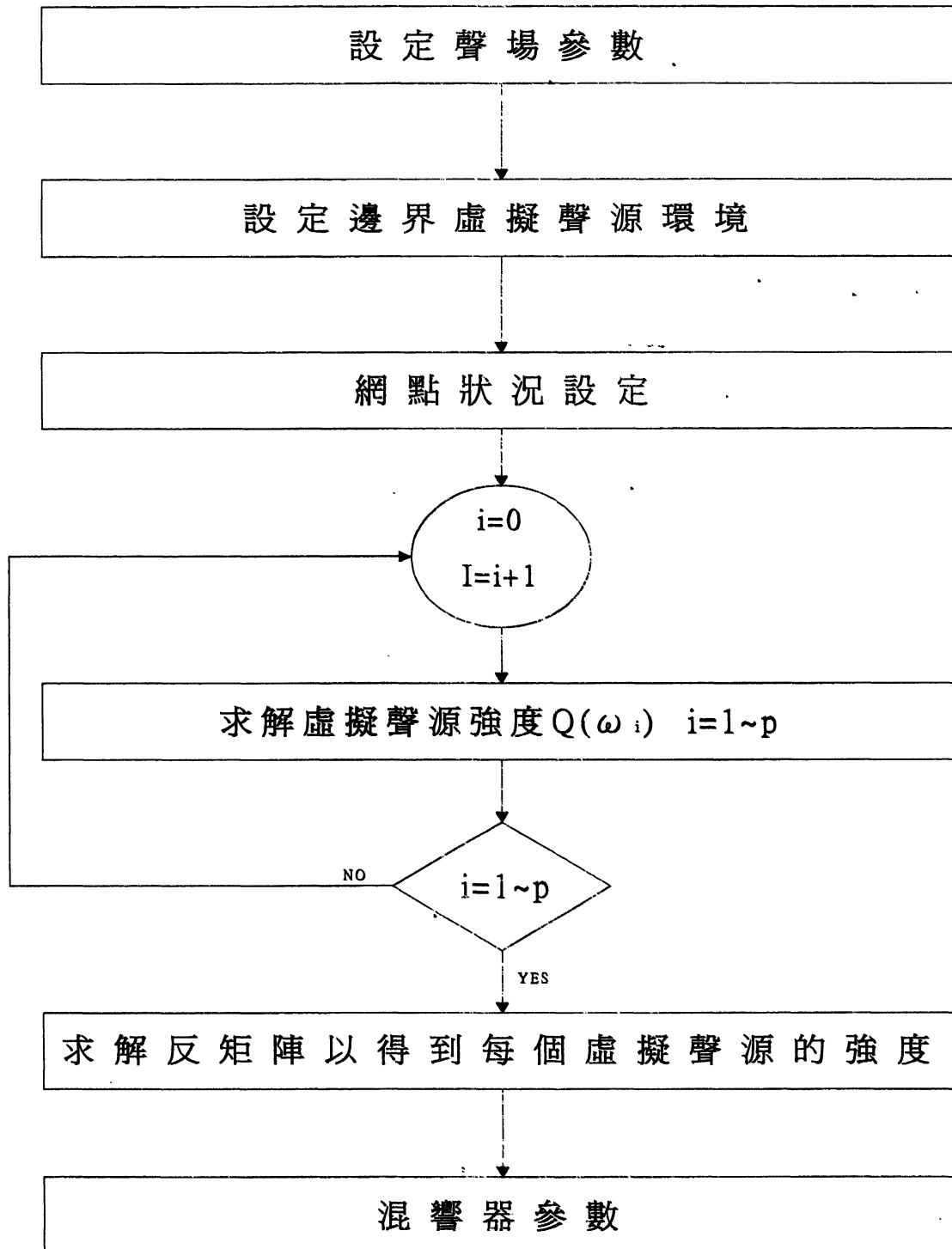


圖六 C



圖六 D

拾壹、圖式：



圖七 (代表圖)