

中華民國第四十八屆中小學科學展覽會
作品說明書

國小組 自然科

第二名

081516

一聲未平，一聲又「響」

學校名稱：國立花蓮教育大學附設實驗國民小學

作者：	指導老師：
小六 曾德昕	李偲華
小六 張力元	游時銘
小六 葉如約	
小六 黃若茵	
小六 蔡長霖	
小六 林詩偉	

關鍵詞： 響度、殘響、活動中心

摘 要

本研究是從五年級下學期自然與生活科技領域中的有關「聲音」的單元出發，從聲音的要素中，找出影響同學為什麼聽不清楚老師在新落成活動中心裡的說話內容，發現原來是「殘響」惹的禍！透過分貝計的響度測量讓我們了解活動中心在裝設隔音板後，殘響時間降低了，而且我們的確覺得聲音聽起來更清晰。最後，透過各種嘗試，我們利用氣球皮、雷射光筆、太陽能板等材料，終於研發出一組能更精確、省時、省力測量出殘響時間的「殘響時間測量儀」。我們利用一整年的假日、放學後、晚上等時間完成有關「殘響」的研究，發現原來聲音是這麼的奧妙、有趣，我們付出再多的辛苦也值得。

壹、研究動機

期待已久的新活動中心終於落成了！今天是始業式，我們帶著好奇的心情進入活動中心，映入眼簾的是全新的場地，兼具籃球場、羽球場、集合活動等功能，連觀眾席至少都有兩百個座位，真是令人雀躍。

當同學們還沉浸於新穎又美好的活動中心時，校長站上講台、拿起麥克風致詞：「各位同學……」同學在台下一片嘩然：「什麼？」「校長在說些什麼？」除了前面四個字以外，我們什麼都聽不見，聲音都糊成一團了！怎麼會這樣呢？

曾在五年級下學期的自然課本上對「聲音」有初步的認識，可是造成聲音混亂的原因是什麼呢？我們決定著手進行更深入的研究。

貳、研究目的

- 一、探討造成活動中心聲音聽不清楚的主要原因。
- 二、研發測量殘響的創意設計。

參、研究子題

- 一、了解聲音是怎麼產生及傳播的？
- 二、聲音的要素有哪些？有哪些儀器可用來測量聲音呢？
- 三、不同的地點，聲源播放前、播放中及停止後的響度變化有何不同？
- 四、活動中心裡，不同的方向與距離其聲源停止後的響度變化有何不同？
- 五、活動中心裝設吸音板後，不同的方向與距離其聲源停止後的響度變化有何不同？
- 六、如何研發測量「殘響時間」的便利新儀器？
- 七、利用研發工具測量不同的地點，聲源停止後的殘響秒數變化有何不同？

肆、研究設備及器材

- 一、材料：太陽能板、氣球皮、鐵架、紙箱、電容式麥克風、塑膠水管、鐵罐、小鼓、培養皿、國歌音樂、水、平底燒瓶、鈴鐺、L型玻璃管、橡皮塞、橡皮管、酒精燈、三腳架、陶瓷纖維網、捲尺、電池座、電線、鱷魚夾、木頭、水管固定釘、螺絲、螺帽、燈泡、角鐵、電池、鉛錫。
- 二、工具：電腦、電腦喇叭、手提式音響、數位相機、攝影機、分貝計、三用電錶、雷射筆、馬錶、電腦軟體 Ulead VideoStudio 10、板手、鋸子、鐵鎚、鉗槍。

伍、研究過程

一、問題一：了解聲音是怎麼產生及傳播的？

(一) 研究方法：

利用網路、圖書館等管道找尋相關資料，研讀有關「聲音」的書籍，並以小實驗證明書中的理論。

(二) 研究結果：

1. 由於物體的振動才能產生聲音：

我們可以從生活中的各種體驗來感覺聲源的振動情形。例如：說話或唱歌時，手輕按喉頭周圍，感覺聲帶在振動。因震動而發聲的物體就叫做「聲源」。

【小實驗】

拿一面鼓，在鼓面上放置一裝水的培養皿，把鼓敲響，可以看見水在培養皿中跳動，再用手用力壓住鼓面，鼓面不振動了，水停止跳動，聲音也消失了（如圖 1-1）。

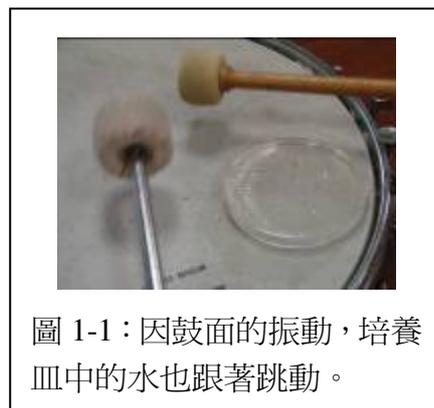


圖 1-1：因鼓面的振動，培養皿中的水也跟著跳動。

2. 聲波需要空氣等介質來傳播：

亞里士多德認為聲音不但可以在空氣中傳播，而且可在液體和固體中傳播，但不能在真空中傳播。三百多年前，德國科學家葛利克做過一個實驗：把鐘放在一個接有抽氣機的玻璃罩裡，然後把罩裡的空氣慢慢抽出來，這時鐘錶的滴答聲逐漸減弱，最後幾乎聽不到聲音；葛利克又慢慢地將空氣放進罩裡去，鐘錶的滴答聲又逐漸加強起來。

【小實驗】

- 將 L 型玻璃管一端穿過橡皮塞，再將橡皮塞塞住平底燒瓶的瓶口，玻璃管下端用橡皮筋固定一個鈴鐺，另一端套上一個橡皮管。
- 先在燒瓶內放入少量的水，置於三角架上用酒精燈加熱。
- 等瓶內的水沸騰數分鐘後，將橡皮管用夾子夾住。待燒瓶冷卻後，瓶內即形成部分真空（如圖 1-2）。
- 此時把燒瓶移近耳旁搖晃，幾乎聽不到聲音，但若拆下橡皮管上的夾子，使空氣流入瓶內，則可清楚地聽見鈴鐺的聲音。



圖 1-2：使用酒精燈讓燒瓶內的水沸騰。

二、問題二：聲音的要素有哪些？有哪些儀器可用來測量聲音呢？

（一）研究方法：

利用網路、圖書館等管道找尋相關資料，研讀有關「聲音」的書籍，並以小實驗證明書中的理論。

（二）研究結果：

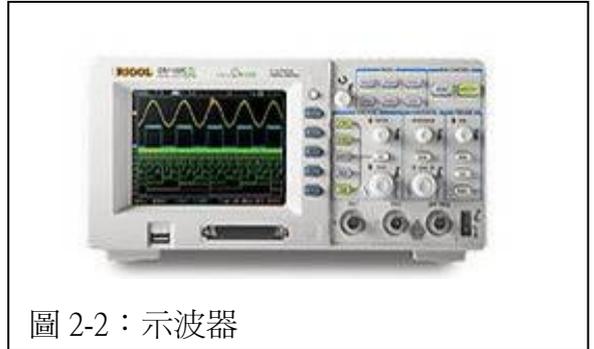
聲音的組成有三要素，分別為響度、音調、音色，分別說明如下：

1. 響度

- （1）聲音的強弱稱為「響度」，通常以「分貝」(dB)來表示響度的大小。例如說悄悄話的響度約 20 分貝，平常的談話聲約 60 分貝，噴射機的引擎聲約 110 分貝。
- （2）聲音以「波」的形式傳遞，響度愈大則聲波振幅愈大。例如用力敲打鼓面，鼓面上的綠豆會跳動的較高，便可產生較大振幅的聲波，反之小力敲打鼓面，則鼓面上的綠豆跳動較低，聲波振幅較小。

（3）測量響度的儀器：

- A. 響度大小可用「分貝計」(或稱噪音計) (如圖 2-1) 測得分貝值。
- B. 振幅大小之比較可由「示波器」(如圖 2-2) 之螢幕直接觀察。



2. 音調

- （1）聲音的高低稱為「音調」。鋼琴上不同的按鍵可彈出不同音調的聲音。
- （2）快速振動產生的聲音，稱為「高音」；緩慢振動產生的聲音，稱為「低音」。聲音的音調由發音體的振動頻率決定，頻率愈高則音調愈高。「頻率」是振動的物體一秒鐘內完成全振動的次數，單位叫做赫茲 (Hz)。例如一般樂器所發出的聲音頻率約為 20-4000Hz 之間；人類發出的聲音頻率約為 80-1000Hz 之間；人類耳朵的聽覺範圍約在 20-20000Hz 之間；狗的聽覺範圍約在 15-50000Hz 之間。
- （3）發音體的質量、厚薄、長短、鬆緊……等因素都會影響發音的頻率。輕、薄、短、緊則振動快，頻率大且音調高。反之，重、厚、長、鬆則振動慢、頻率小且音調低。
- （4）測量頻率的儀器：頻率大小可由「示波器」或「頻譜分析儀」計算得知。

3. 音色

- （1）不同的發音體產生不同的波形，而形成不同的音色。
- （2）測量音色波形的儀器：由「示波器」可觀察不同發生體的聲波形狀。



選用「分貝計」進行實驗設計的理由

透過資料的搜集與閱讀，我們了解測量聲音的工具具有「分貝計」和「示波器」，雖然「示波器」的功能較多，可以觀察聲音的響度、波形外，還可以測量聲音的頻率，但經考量儀器的價格（一台示波器約 3-4 萬），我們決定以學校現有的資源-分貝計，測量在不同場地中播放音樂前、中、後時的聲音響度變化。

三、問題三：不同的地點，聲源播放前、播放中及停止後的響度變化有何不同？

(一) 研究方法：

1. 選擇本校**戶外場所**中的童心廣場（如圖 3-1）、操場（如圖 3-2）、川堂（如圖 3-3）及**室內場所**中的涵育樓音樂廳（如圖 3-4）、自然教室（如圖 3-5）、活動中心（如圖 3-6）等地進行實驗。



圖 3-1：本校童心廣場



圖 3-2：本校操場



圖 3-3：本校川堂



圖 3-4：本校涵育樓音樂廳



圖 3-5：本校自然教室



圖 3-6：本校活動中心

2. 選擇中午午休、放學後或週休二日晚上等校園內較為安靜的時間進行實驗，以減少人為的噪音干擾。
3. 將音響(聲源)朝上放在椅子上，放置於各地點的正中心，將用鐵架固定好的分貝計與馬錶放在另一張椅子上，聲源與分貝計相距 1 公尺，如圖 3-7。



4.等周圍雜音減少，分貝達到基礎值（取得環境音量的分貝值）。

5.將攝影機對準馬錶和分貝計開始拍攝，馬錶開始計時，如圖 3-8 和圖 3-9。



6.當馬錶約跳至 10 秒時，由音響開始播放出國歌音樂(音響音量調至 40 刻度)「三民主義，吾黨」，馬錶約 20 秒時國歌停止，35 秒時攝影機停止拍攝。

7.將實驗地點移至本校童心廣場、操場、川堂、涵育樓音樂廳、自然教室、活動中心，並重複實驗步驟 3~6，各實施 3 次實驗。

8.將所錄製的影像檔利用電腦軟體 Ulead VideoStudio 10 一一找出精確的分貝計響度變化情形及其秒數（如圖 3-10~圖 3-11），計算各場地 3 次實驗中響度變化及其所對應的秒數之平均值，並將資料繪製成 Excel 圖表。

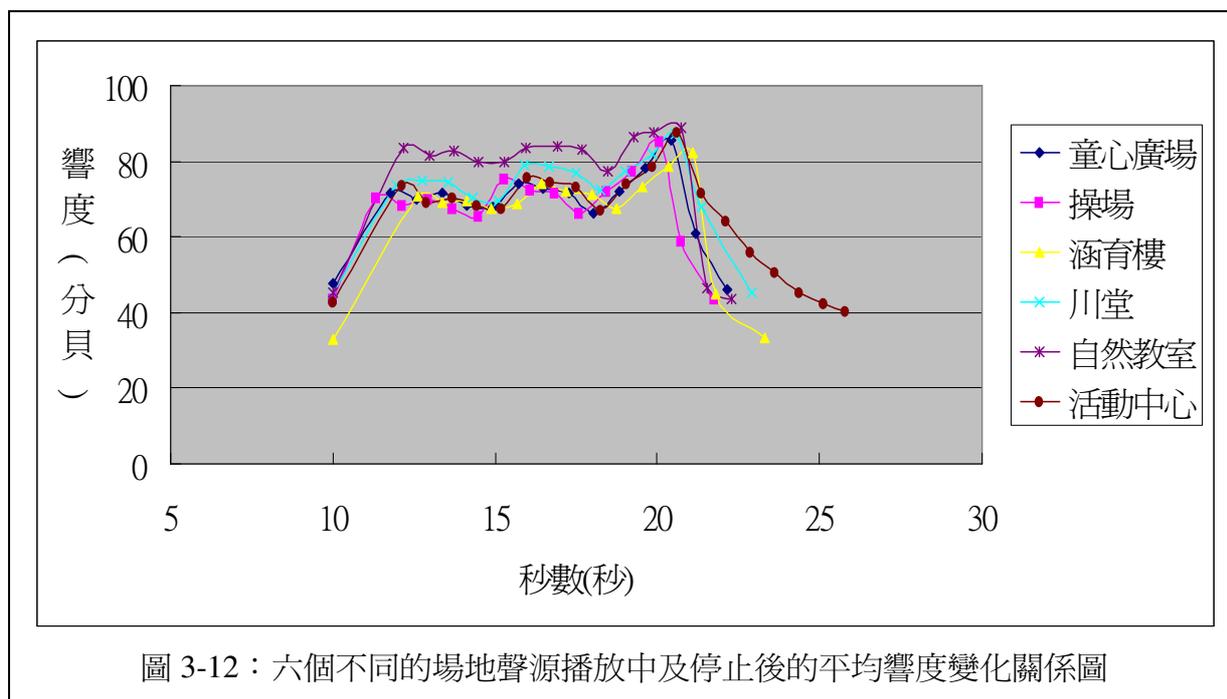


(二) 研究結果：(各場地 3 次測量時的測量數據如實驗原始記錄，以下僅呈現 3 次測量的平均值)

表 3-1：六個不同的場地聲源播放前、播放中及停止後的平均響度變化一覽表

類別	戶外場地						室內場地					
場地	童心廣場		操場		川堂		涵育樓音樂廳		自然教室		活動中心	
場地規格	橢圓型廣場 長 16 m 寬 22 m		200m 跑道 操場的東、西方各有一排建築物		長 6 m 寬 14 m 高 2 m		長 23m 寬 12m 高 3.5m		長 12m 寬 8m 高 3m		長 40.2m 寬 30.6m 高 15m	
場地用途	開放空間		學生活動用		開放空間 公告欄		音樂廳		學生上課用		學生集會用	
環境音量(分貝)	47.73		43.77		45.23		33.0		45.07		42.97	
	秒數(s)	響度(分貝)	秒數(s)	響度(分貝)	秒數(s)	響度(分貝)	秒數(s)	響度(分貝)	秒數(s)	響度(分貝)	秒數(s)	響度(分貝)
聲源開始	11.80	71.7	11.34	70.23	11.97	73.5	12.61	70.8	12.16	83.4	12.13	73.8
播放音樂	12.58	70.1	12.15	68.4	12.76	75.0	13.37	69.1	12.99	81.3	12.89	69.1
	13.36	71.6	12.94	70.0	13.57	74.6	14.13	69.7	13.73	82.9	13.69	70.2
	14.12	68.5	13.71	67.3	14.32	70.4	14.90	67.5	14.49	79.7	14.45	68.3
	14.92	67.9	14.49	65.6	15.10	69.7	15.70	68.6	15.30	79.7	15.19	67.3
	15.74	74.2	15.28	75.2	15.92	78.9	16.45	74.1	15.94	83.6	15.98	75.8
	16.47	72.7	16.09	72.3	16.64	78.4	17.21	72.2	16.92	84.1	16.71	74.5
	17.27	71.7	16.84	71.8	17.49	76.8	18.00	71.3	17.68	83.2	17.52	73.4
	18.05	66.2	17.60	66.3	18.25	72.4	18.75	67.3	18.46	77.2	18.26	67.1
	18.83	71.9	18.42	72.0	19.01	77.4	19.55	73.3	19.28	86.4	19.04	74.2
	19.63	78.2	19.22	77.5	19.84	81.9	20.32	78.6	19.89	87.6	19.85	78.4
	20.41	85.4	20.05	85.1	20.58	87.4	21.11	82.1	20.75	88.7	20.62	87.6
聲源結束後	21.16	60.9	20.74	58.8	21.37	67.8	21.78	44.9	21.52	46.4	21.37	71.4
回復環境音量	22.17	46.1	21.76	43.5	22.90	45.1	23.30	33.3	22.28	43.8	25.14	42.2
殘響秒數	1.76		1.71		2.32		2.19		1.53		4.52	

註：「殘響秒數」為 **回復環境音量時**的秒數 減掉 **聲源結束時**的秒數



(三) 研究發現：

- 1.由圖 3-12 的曲線可看出聲源（國歌音樂）播放中，各場地的響度變化曲線大致相同。
- 2.我們原先用人為觀察馬錶的方式以為聲源(國歌音樂)播放約 10 秒的時間，但經由電腦軟體 Ulead VideoStudio 10 找出精確的每一次分貝計響度變化及其所對應到的秒數時，發現我們所播放的聲源(國歌音樂)較精確的時間秒數平均為 8.59 秒。計算方式如下表 3-2 所示：

表 3-2：六場地聲源播放起迄平均時間一覽表

場 地	童心廣場	操場	川堂	涵育樓音樂廳	自然教室	活動中心
聲源開始時間(秒)	11.80	11.34	11.97	12.61	12.16	12.13
聲源結束時間(秒)	20.41	20.05	20.58	21.11	20.75	20.62
聲源播放時間(秒)	8.61	8.71	8.61	8.5	8.59	8.49
平均播放時間(秒)	8.59					

- 3.經由所記錄的秒數及聲源的響度變化中得知每一次的分貝計最快反應時間約 0.7 秒。
- 4.在自然教室播放國歌時，分貝計所取得的響度皆比其他場地來得高。
- 5.播放國歌約 10 秒後，我們即中斷音響的音量，各場地的分貝計數值並沒有立即回覆至原先的環境音量的分貝值。這種聲源停止後，聲音仍持續未止的現象，即是「回響」，而回響是因聲波碰到障礙物反射回來造成的。因此，我們將聲源中斷後至分貝計回復到原先環境音量的分貝值間的秒數，稱為「殘響時間」。

- 6.六場地中，殘響時間由多至少依序是：活動中心>川堂>涵育樓音樂廳>童心廣場>操場>自然教室。活動中心的殘響時間最高為 4.52 秒，自然教室的殘響時間最低為 1.53 秒。
- 7.聲源停止約 0.7 秒後，經由分貝計所取得的響度由高至低分別為：活動中心>川堂>童心廣場>操場>自然教室>涵育樓音樂廳，其中活動中心的響度最高，為 71.4 分貝，涵育樓音樂廳的響度最低，為 44.9 分貝。如此可證明，聲源停止後，活動中心裡還殘留響度最大的回音。
- 8.在涵育樓音樂廳所取得的環境音量是六場地中最低的，為 33.0 分貝，我們推測是因涵育樓音樂廳為演奏場地所需，而裝有吸音設備，使得能隔絕較多的室外噪音。而在涵育樓音樂廳播放國歌完畢後的 0.7 秒，也是六場地中響度下降最快的。
- 9.戶外場地中，以川堂的殘響最多，為 2.32 秒，推測是因其川堂有兩面相距 6 公尺牆壁的特殊環境所導致。
- 10.室內場地中，以活動中心的殘響最大，為 4.52 秒。換句話說，活動中心裡的殘響如此之長，老師在活動中心演講時，仍在牆壁和屋頂之間彈來彈去的前一個音會把老師口中講出的新的音給蓋掉了，因此，我們很難聽清楚台上老師在說什麼。



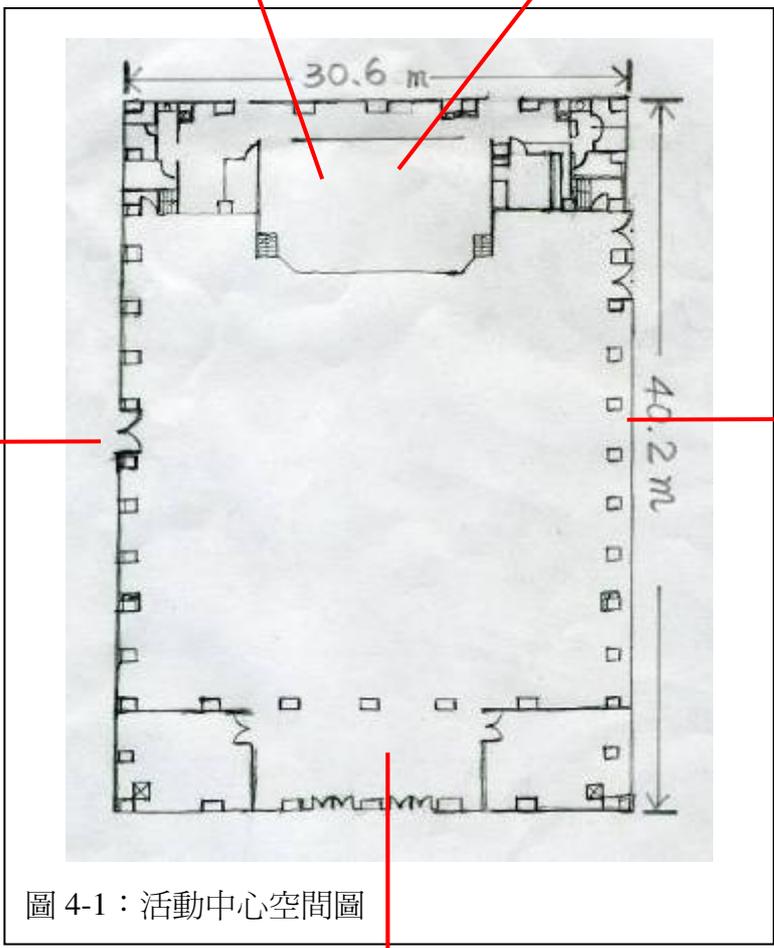
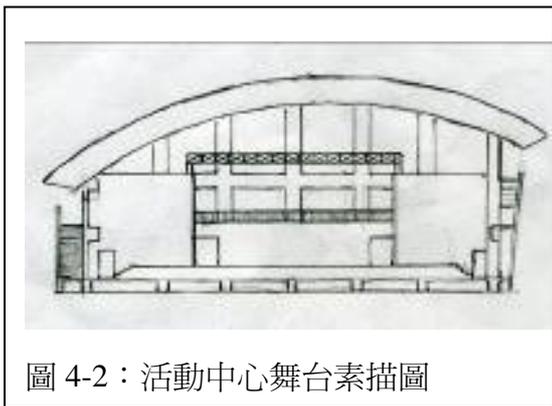
活動中心裡，坐在不同位置的同學，所聽到的聲音都一樣混淆不清嗎？

由實驗三，我們已知當聲源在活動中心的正中央，距離聲源 1m 處的平均殘響時間為 4.52 秒，但我們想繼續探究，當同學齊聚在活動中心集合聽演時，不同位置的殘響時間都一樣嗎？因此，我們有了實驗四的設計。

四、問題四：活動中心裡，不同的方向與距離其聲源播放中及停止後的響度變化有何不同？

(一) 研究方法：

- 1.將音響(聲源)朝上放在椅子上，放置於活動中心的正中心，活動中心的空間圖如圖 4-1~圖 4-6 所示。
- 2.將分貝計及馬錶分別用鐵架固定好，放在另一張椅子上。
- 3.將分貝計及馬錶分別置於聲源的前後左右 0m 處。
- 4.等周圍雜音減少，分貝達到基礎值(取得環境音量的分貝值)。
- 5.將攝影機分別對準馬錶和分貝計開始拍攝，馬錶開始計時。
- 6.當馬錶約跳至 10 秒時，由音響播放國歌(音響音量調至 40 刻度)，約至 20 秒時國歌停止，至 35 秒時停止拍攝。
- 7.再將分貝計及馬錶、攝影機移至距音源 1m、2m、3m……11m 處，重複步驟 4~6。每處皆實驗 3 次。
- 8.將所錄製的影像檔利用電腦軟體 Ulead VideoStudio 10 一一找出精確的分貝計響度變化情形及其秒數，計算距音源 0m、1m、2m、3m……11m 處各 3 次實驗中的響度變化及秒數之平均值，並將資料繪製成 Excel 圖表。



(二) 研究結果：(以下的數值僅以 3 次測量的平均值呈現，詳細數據如實驗原始記錄。)

表 4-1：聲源播放時，不同方向的各個距離與最大響度一覽表

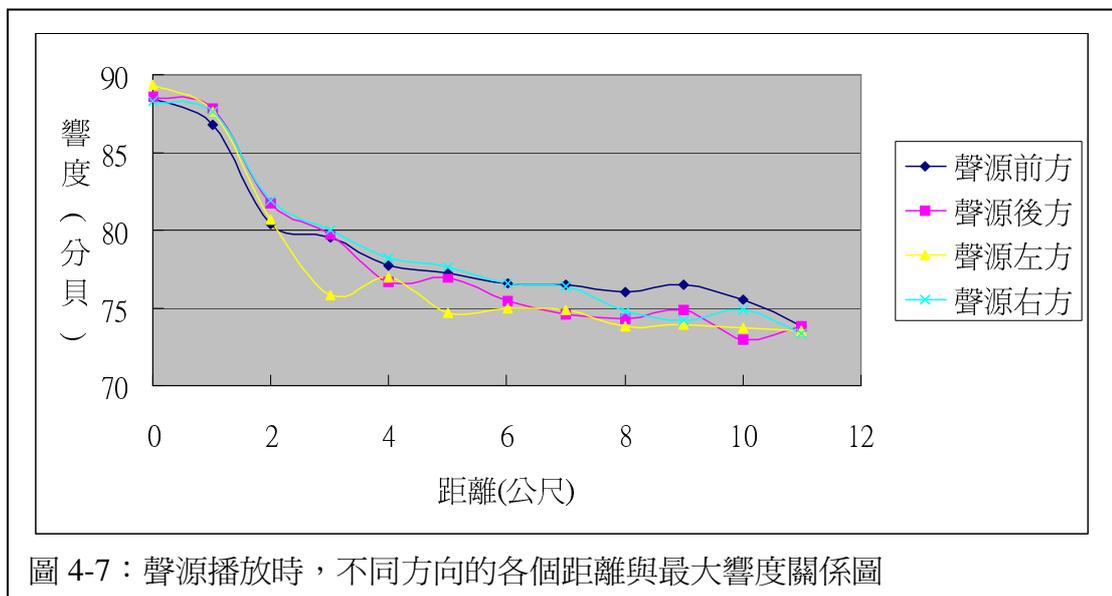
	0m	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m
前方	88.5	86.8	80.4	79.5	77.7	77.2	76.6	76.5	76.0	76.5	75.5	73.8
後方	88.6	87.8	81.7	79.7	76.7	77.0	75.4	74.6	74.3	74.9	73.0	73.8
左方	89.3	87.6	80.7	75.8	77.0	74.7	75.0	74.9	73.8	73.9	73.7	73.5
右方	88.3	87.6	81.9	80.0	78.2	77.6	76.6	76.4	74.8	74.2	74.9	73.3

表 4-2：聲源停止後，不同方向的各個距離與殘響秒數一覽表

	0m	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m
前方	4.85	4.57	4.86	4.57	4.74	4.74	4.27	4.52	4.56	4.46	4.62	4.54
後方	4.86	4.59	4.89	4.63	4.62	4.64	4.89	4.37	4.62	4.64	4.61	4.65
左方	4.56	4.88	4.88	4.61	4.86	4.34	4.38	4.65	4.59	4.35	4.63	4.61
右方	4.25	4.52	4.56	4.55	4.56	4.93	4.78	4.62	4.37	4.61	4.59	4.58

(三) 研究發現：

1.將「表 4-1：聲源播放時，不同方向的各個距離與最大響度一覽表」以繪製成 EXCEL 圖 4-7 後發現：



- (1) 由實驗記錄的詳細數據(如附件)得知，每一次聲源播放結束前的響度最大。
- (2) 當分貝計位於聲源前、後、左、右方 0~2 公尺處響度最大，介於約 80~89 分貝間；當分貝計位於聲源前、後、左、右方 3~11 公尺處響度大都介於約 73~79 分貝間。這樣的情形說明分貝計距離聲源越遠，分貝計所取得的響度越小。
- (3) 當分貝計距離聲源 3~11m 間的響度是以「波形」的方式衰退，大小不一定按距離的增加而變小。我們推測是因為聲音的回音所導致，因為聲源的回音會蓋過後來才發出的聲音。詳細比較如下：

- A.當分貝計位於聲源**前方**，響度由大至小依序是：
 $0m > 1m > 2m > 3m > 4m > 5m > 6m > 7m = 9m > 8m > 10m > 11m$
- B.當分貝計位於聲源**後方**，響度由大至小依序是：
 $0m > 1m > 2m > 3m > 5m > 4m > 6m > 9m > 7m > 8m > 11m > 10m$
- C.當分貝計位於聲源**左方** 0~11m 時，響度由大至小依序是：
 $0m > 1m > 2m > 4m > 3m > 6m > 7m > 5m > 9m > 8m > 10m > 11m$
- D.當分貝計位於聲源**右方** 0~11m 時，響度由大至小依序是：
 $0m > 1m > 2m > 3m > 4m > 5m > 6m > 7m > 10m > 8m > 9m > 11m$

2.將「表 4-2：聲源停止後，不同方向的各個距離與殘響秒數一覽表」繪製成 EXCEL 圖 4-8 後發現：

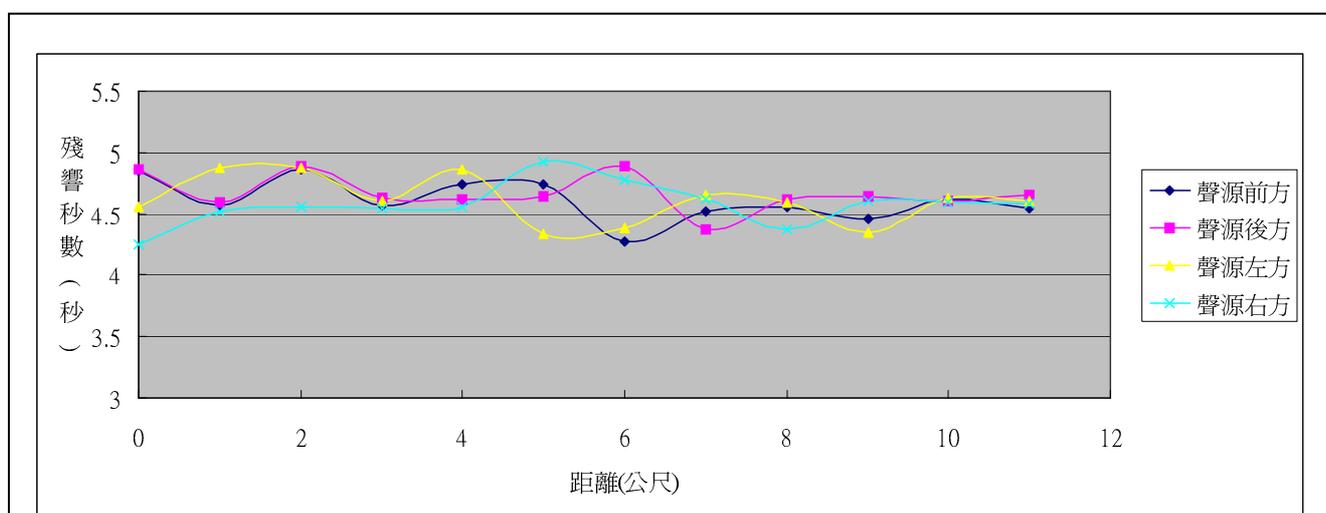


圖 4-8：聲源停止後，不同方向的各個距離與殘響秒數關係圖

- (1) 距離聲源前、後、左、右方 0~11m 處的殘響時間介於 4.25~4.86 秒間，所以不論在活動中心的哪一個位置，殘響時間都是相當的長，演講者前一個音的回音可能會蓋過演講者接下來說的下一個音，因此不論同學坐在活動中心裡的哪一個位置，總是很難聽清楚演講者在說什麼。
- (2) 從圖 4-8 中可看出聲源的前、後、左、右方的殘響時間與距離的關係圖呈現奇妙的「波形」，我們推測這和聲音以「波」的方式來傳遞時，聲音和聲音會彼此呈現相長或相消的情形有關，以致殘響時間和距離呈現「波形」關係。



什麼是導致我們在活動中心聽不清楚演講內容的真正原因？

經由實驗三、實驗四的研究，我們發現用來上課聽講的自然教室之平均殘響時間為 1.53 秒，而新完工集會之用的活動中心殘響時間長達 4.25~4.86 秒，兩場地的殘響時間差距 3 倍之多，再加上透過資料的搜尋及閱讀，發現陳湘允博士在新音響雜誌（2003 年七月號）中提到不同場地之殘響時間的建議值（如表 4-3），使我們更相信我們已經找到影響活動中心聲音混淆不清的真正原因了。

表 4-3：不同場地之殘響時間的建議值

殘響時間	場地特色	場地優缺點分析
8.5 秒	是一個很多反射的空間，因此加長了其殘響時間。	◎適合音樂戲劇的表演，不適合演講等用途。
5.5 秒		◎聲音會很混亂，會形成演講時發音不清楚。
3.5 秒		◎優點：聲音會很有質感，圓滑，音樂演奏者會很喜歡這樣的音響環境。 ◎缺點：不是一個好的演講環境。
1.5 秒~2.5 秒	是一個反射和吸音較為平衡的空間。	◎是一個準音樂廳的殘響時間，適合於演奏和演講等用途。
1 秒	是吸音較多的空間，縮短了殘響時間	◎優點：演講者發音清晰，是良好的教室或題演講堂。 ◎缺點：音樂不圓滑，無質感，不是理想的音樂演奏環境。
0.3 秒		◎音樂會變得很乏味，後座的聽眾更感覺不到低頻。
0 秒		◎沒有殘響效果，也沒有規則的反射。

【上表整理自 <http://www.ks-hifi.com/dr.chen/200308/chen0308.htm>】

陳湘允博士認為適合聽講環境的殘響時間為 1~2.5 秒間，適合音樂演奏環境的殘響時間為 1.5~3.5 秒間。而本校活動中心的殘響時間為 4.25~4.86 秒，是一個聲音反射較多的空間，不適合成為聽講的環境，因為聲音較混亂，會造成演講者的發音不清楚。由此，我們可以更確定我們在活動中心集合聆聽老師或專家演講時，總是聽不清楚演講者內容的主要原因是活動中心的殘響時間過長。為此，我們依據研究結果建議學校在活動中心裝設吸音設備，以改善殘響時間過長的問題。



活動中心裝設吸音板前、後的比較照片

學校聽取我們的建議，並經行政程序委由承包廠商透過專業儀器施測，發現施測出的殘響時間和我們的研究結果相似，經過工程人員的專業計算及 45 天裝設吸音板的施工時間，我們的活動中心已煥然一新，以下照片（如圖）呈現活動中心裝設吸音板前、後的比較：



圖 4-9：裝設吸音板前的活動中心舞台



圖 4-10：裝設吸音板後的活動中心舞台



圖 4-11：裝設吸音板前的活動中心側邊



圖 4-12：裝設吸音板後的活動中心側邊



圖 4-13：裝設吸音板前的活動中心後面



圖 4-14：裝設吸音板後的活動中心後面

五、問題五：活動中心裝設吸音板後，不同的方向與距離其聲源停止後的響度變化有何不同？

(一) 研究方法：

在活動中心裝設吸音板後，我們再依據實驗四的實驗步驟 1~8 在活動中心重新施測。

(二) 研究結果：(以下的數值僅以 3 次測量的平均值呈現，詳細數據如實驗原始記錄。)

表 5-1 聲源播放時，不同方向的各個距離與最大響度一覽表

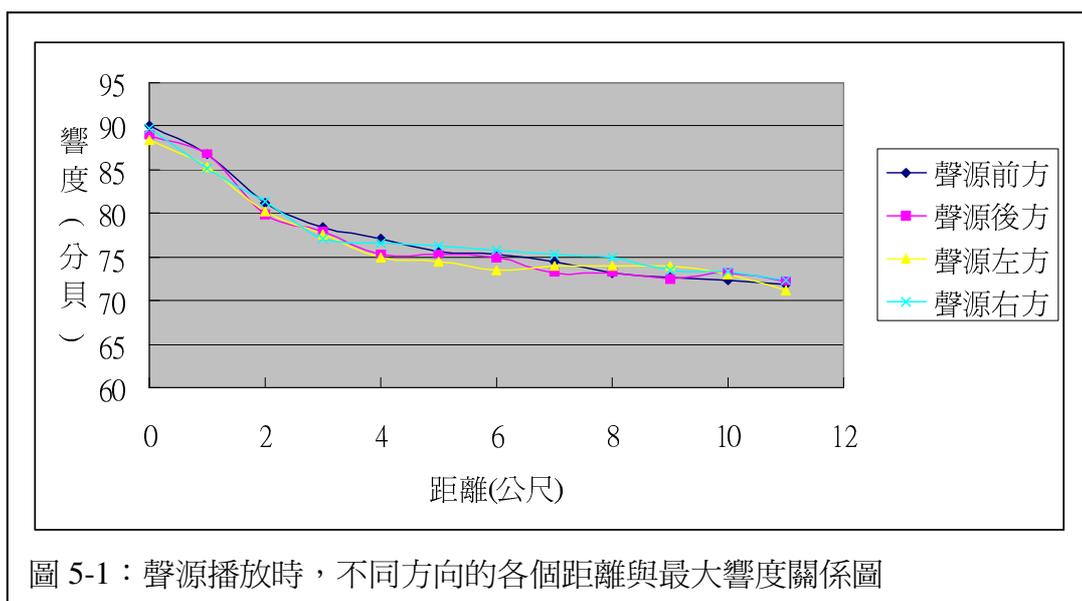
	0m	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m
前方	90.0	86.8	81.2	78.4	77.1	75.6	75.2	74.4	73.1	72.7	72.4	71.8
後方	88.9	86.8	79.9	77.9	75.3	75.3	75.0	73.2	73.2	72.5	73.1	72.1
左方	88.4	85.3	80.2	77.6	75.0	74.5	73.5	74.0	74.0	73.9	72.9	71.2
右方	89.7	85.1	81.4	77.1	76.6	76.3	75.8	75.3	74.9	73.4	73.3	72.3

表 5-2 聲源停止後，不同方向的各個距離與殘響秒數一覽表

	0m	1m	2m	3m	4m	5m	6m	7m	8m	9m	10m	11m
前方	2.72	2.45	2.23	2.73	2.39	2.22	2.74	2.47	2.46	2.72	2.72	2.73
後方	2.7	2.61	2.81	2.83	2.77	2.35	2.24	2.57	2.33	2.31	2.26	2.5
左方	2.82	2.27	2.59	2.82	2.31	2.20	2.23	2.55	2.29	2.06	2.28	2.25
右方	2.76	2.74	2.24	2.74	2.85	2.50	2.72	2.72	2.26	2.27	2.24	2.47

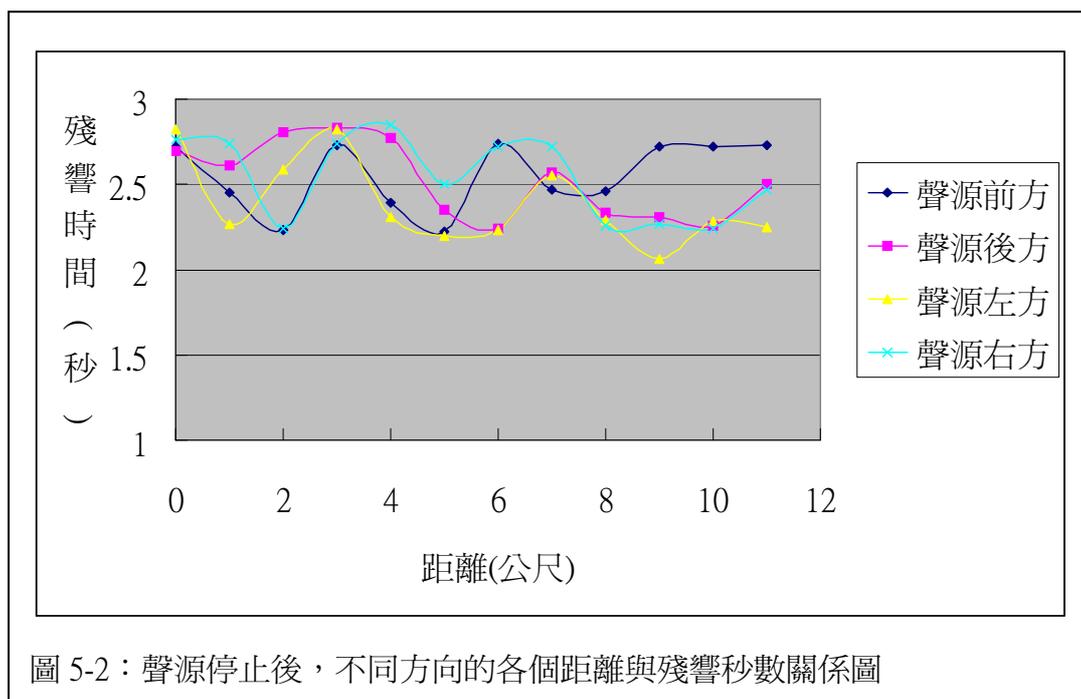
(三) 研究發現：

1. 將「表 5-1 聲源播放時，不同方向的各個距離與最大響度一覽表」以繪製成 EXCEL 圖 5-1 後發現：



- (1) 由實驗記錄的詳細數據(如附件)得知，每一次聲源播放結束前的響度依然最大。

- (2) 當分貝計位於聲源前、後、左、右方 0~2 公尺處響度最大，介於約 80~90 分貝間；當分貝計位於聲源前、後、左、右方 3~11 公尺處響度大都介於約 71~79 分貝間。和裝設吸音板前的數值差不多。
- (3) 當分貝計距離聲源 0~11m 間的響度比起裝設吸音板前的活動中心而言，呈現響度「平滑」衰退的現象。我們推測是因為活動中心裝設吸音板後，吸音板發揮吸收聲波的效果，而降低聲波的反彈。
2. 將「表 5-2 聲源停止後，不同方向的各個距離與殘響秒數一覽表」繪製成 EXCEL 圖 5-2 後發現：



- (1) 距離聲源前、後、左、右方 0~11m 處的殘響時間介於 2.20~2.83 秒間，比起裝設吸音板前的活動中心的殘響時間平均大約降低了 2.12 秒。說明吸音板的裝設大大降低了活動中心的殘響時間。
- (2) 從圖 5-2 中可看出聲源的前、後、左、右方的殘響時間與距離的關係圖呈現奇妙的「波形」，這和活動中心裝設吸音板前所得到的距離與殘響時間的關係圖形相似。



是否能設計出更方便測量殘響時間的儀器呢？

利用學校現有的分貝計可以測量出校園內不同場地的殘響時間，但是分貝計對於聲音過於敏感，施測時容易被外界的噪音(如車聲、談話聲)所干擾，因此我們常常為了解除這些外界噪音的干擾，不得不利用假日、晚上等時間到學校進行實驗，縱使已如此盡力，但還是常常在實驗過程中因突發的外界噪音而被迫中斷實驗重頭進行，非常傷腦筋。因此我們嘗試研發出一套測量殘響時間更為便捷的儀器，以解決我們的困擾。

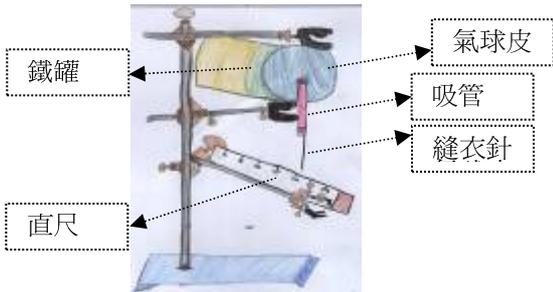
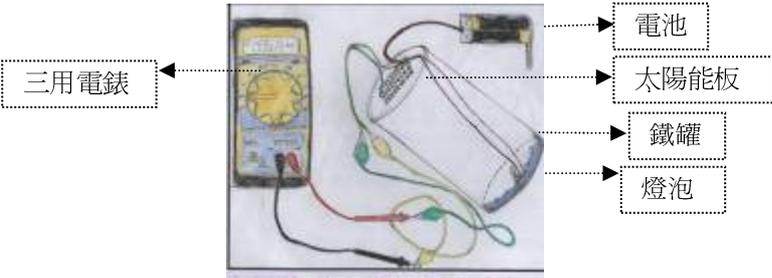
六、問題六：如何研發測量「殘響時間」的便利新儀器？

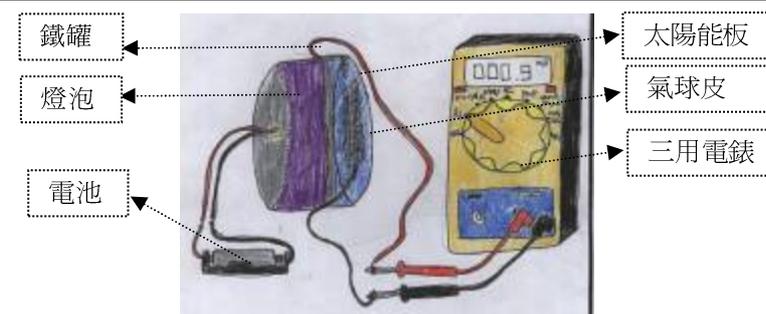
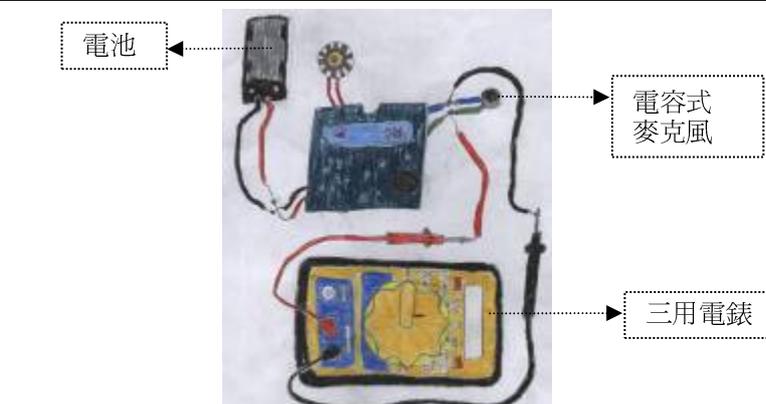
(一) 研究方法：我們掌握「物體振動會產生聲音，而產生聲音的同時，空氣也會跟著振動」的原理，用氣球皮、太陽能板、三用電錶、各種光源(如燈泡、雷射筆)等主要工具，利用各種組合，嘗試研發出測量「殘響時間」的便利新儀器。

(二) 研究結果：

1.我們將曾研發出的各式測量殘響時間的設計，區分為第一代~第五代，詳述如下表 6-1：

表 6-1：第一代~第五代測量「殘響時間」儀器的設計說明

代別	設計圖	完成品
第一代	 <p>鐵罐 直尺 氣球皮 吸管 縫衣針</p>	
	使用原理	優缺點分析
	<p>聲源的播放使氣球皮產生振動，進而帶動氣球皮上黏在吸管尖端的縫衣針左右晃動，縫衣針下面放置一把直尺，方便觀察縫衣針的晃動程度。待聲源停止後至縫衣針不再晃動時的秒數即為殘響時間。</p>	<p>◎優點：聲波振動時，可以感受到縫衣針的晃動。</p> <p>◎缺點：振動不明顯，約只有 0.5cm，難以測量。</p>
第二代	 <p>三用電錶 電池 太陽能板 鐵罐 燈泡</p>	
	使用原理	優缺點分析
	<p>1.聲源的播放使氣球皮產生振動，進而帶動黏在氣球皮上燈泡晃動。</p> <p>2.聲源播放前，燈泡會均勻地照射到太陽能板，連接太陽能板的三用電錶將顯示穩定的電壓；聲源播放中，燈泡會因聲波的振動而晃動，使得燈泡無法均勻地照射到太陽能板，導致三用電錶顯示出的電壓值會高低跳動。</p> <p>3.待聲源停止至三用電錶回復至穩定電壓值的時間即為殘響時間。</p>	<p>◎優點：聲波振動時，可以發現電壓值的高低跳動。</p> <p>◎缺點：</p> <p>1.燈泡光線的強弱影響太陽能板的接收。</p> <p>2.燈泡太大會太重，導致氣球皮難以因聲波而振動。</p> <p>3.燈泡太小光線較弱，導致太陽能板的電壓太小無法顯示氣球皮振動情形。</p>

第三代	設 計 圖	完 成 品
		
	使 用 原 理	優 缺 點 分 析
	<p>1. 第三代為改善第二代黏在氣球皮上的燈泡太重的缺點，便將燈泡和太陽能板的位置互調。</p> <p>2. 聲源的播放使氣球皮產生振動，進而帶動黏在氣球皮上太陽能板的晃動。</p> <p>3. 聲源播放前，太陽能板會均勻地接受到燈泡的光線，黏接太陽能板的三用電錶將顯示穩定的電壓；聲源播放中，太陽能板會因聲波的振動而晃動，使得太陽能板無法均勻地接收到燈泡的光線，導致三用電錶顯示出的電壓值會高低跳動。</p> <p>4. 待聲源停止後至三用電錶回復至穩定電壓值的時間即為殘響時間。</p>	<p>◎優點：</p> <p>聲波振動時，可以感受到電壓值的高低跳動。</p> <p>◎缺點：</p> <p>1. 太陽能板的重量會影響氣球皮的振動。</p> <p>2. 若改成較薄的太陽能板，導致太陽能板所得到的電壓太小無法顯示氣球皮的振動情形。</p>
第四代	設 計 圖	完 成 品
		
	使 用 原 理	優 缺 點 分 析
	<p>藉由電容式麥克風吸收外界環境的音量，測量麥克風本身的電壓變化。</p>	<p>◎優點：</p> <p>可以明確地感受到製造聲音可使三用電錶的電壓值跳動。</p> <p>◎缺點</p> <p>麥克風太敏感，三用電錶的電壓值不穩定，甚至連手的移動也會造成影響。</p>

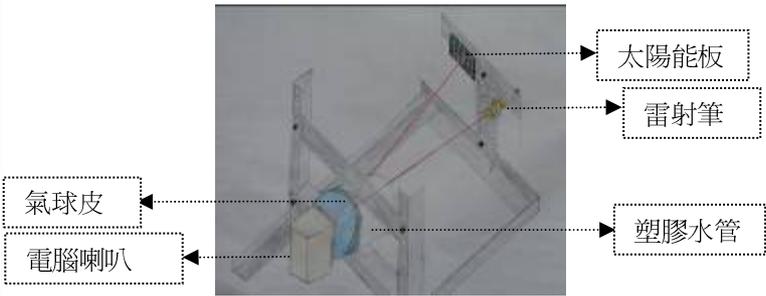
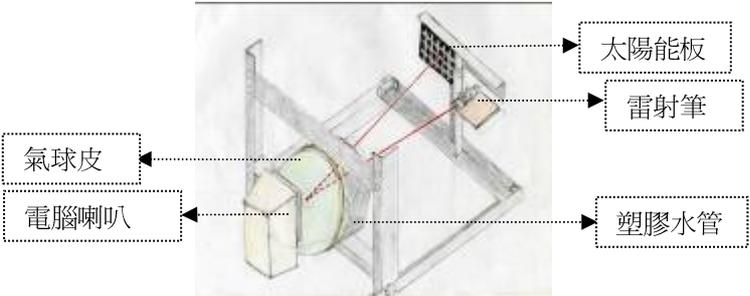
第五代	設 計 圖	完 成 品
	 <p>太陽能板 雷射筆 塑膠水管 電腦喇叭 氣球皮</p>	 <p>雷射筆</p>
	使 用 原 理	優 缺 點 分 析
	<p>1.聲源的播放使氣球皮產生振動，進而帶動黏在氣球皮上小鏡片的晃動。</p> <p>2.聲源播放前，雷射筆光源會射入氣球皮上的小鏡片，再反射聚焦至長 6cm、寬 3cm 的太陽能板上（如圖 6-1），連接太陽能板的三用電錶將顯示穩定的電壓；聲源播放中，聲波帶動氣球皮上小鏡片的振動，導致小鏡片所反射的雷射光源呈現不同形式的擴散現象，使得太陽能板接收到的雷射光源較分散，（如圖 6-2），導致三用電錶顯示出的電壓值會向下跳動。</p> <p>3.待聲源停止後至三用電錶回復至穩定電壓值的時間即為殘響時間。</p>	<p>◎優點 經由三用電錶跳動或穩定的電壓值可以明顯區別聲波振動的情形。</p> <p>◎缺點 1.太陽能板太小，以至於播放聲源帶動氣球皮振動時，小鏡片所反射的光源會擴散至太陽能板外面，導致無法讀取正確的電壓值。 2.雷射筆容易因重力下垂而改變位置，導致光源的反射路線不固定。</p>
第六代	設 計 圖	完 成 品
	 <p>太陽能板 雷射筆 塑膠水管 電腦喇叭 氣球皮</p>	
	使 用 原 理	優 缺 點 分 析
	<p>1.第六代為改善第五代太陽能板太小的缺點，於是便以長 10cm、寬 7.3cm 的太陽能板取代。</p> <p>2.使用木板及水管固定釘固定雷射筆。（如圖 6-3）</p> <p>3.聲源播放前，雷射筆光源會射入氣球皮上的小鏡片，再反射聚焦至太陽能板上（如圖 6-4），連接太陽能板的三用電錶將顯示穩定的電壓；聲源播放中，聲波帶動氣球皮上小鏡片的振動，使得太陽能板接收到雷射光源的面積較大（如圖 6-5），導致三用電錶顯示出的電壓值會往上跳動。待聲源停止後至三用電錶回復至穩定電壓值的時間即為殘響時間。</p>	<p>◎優點 經由三用電錶跳動或穩定的電壓值可以明顯區別強烈至微弱等不同層次的聲波振動情形。</p>



圖 6-1：聲源播放前，太陽能板接收小鏡片反射的雷射光源。

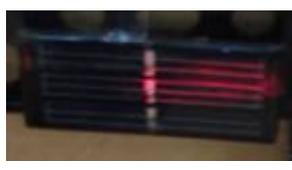


圖 6-2：聲源播放中，太陽能板接收小鏡片反射的雷射光源。



圖 6-3：以木板、水管固定夾固定雷射筆。



圖 6-4：聲源播放前，新太陽能板接收小鏡片反射的雷射光源。

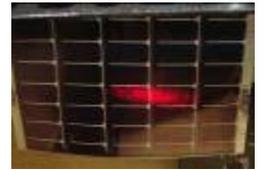


圖 6-5：聲源播放中，新太陽能板接收小鏡片反射的雷射光源。

2.第六代「殘響時間測量儀」詳細圖片如圖 6-6~圖 6-10：



圖 6-7：左端鐵架上安裝已套上氣球皮的水管。



圖 6-8：右端鐵架上安裝雷射光筆及太陽能板。

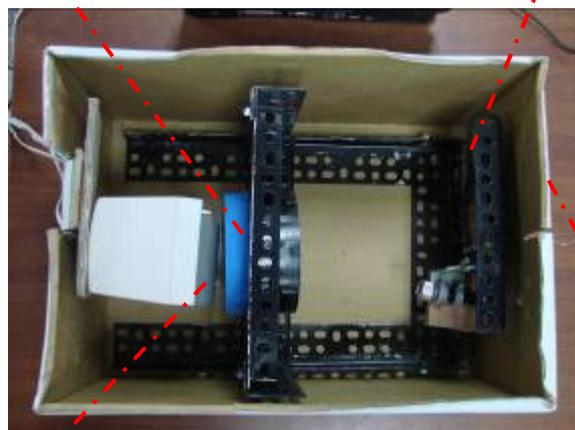


圖 6-6：第六代「殘響時間測量儀」。



圖 6-9：連結電腦的音響靠近氣球皮。



圖 6-10：將太陽能板利用電線連結三用電錶。

七、問題七：利用「殘響時間測量儀」測量不同的地點，聲源停止後的殘響秒數變化有何不同？

(一) 研究方法：

- 1.將水管一端套上氣球皮後用鐵架架於音響喇叭前方，在氣球皮上貼上一小片鏡子（邊緣及背面塗黑），並將音響喇叭連接電腦。
- 2.在鐵架的另一端，固定上雷射筆及太陽能板。調整雷射筆光源的射入角度，使雷射筆光源能射入小鏡子，再利用小鏡子反射雷射筆的光至太陽能板上。
- 3.將太陽能板用電線連接到三用電表，顯示出電壓(mV)，並將這些器材(除了三用電錶、電腦)放入一紙箱中，並且蓋上紙箱的蓋子，以避免外界自然光源干擾太陽能板光源的吸收。
- 4.將雷射筆照射太陽能板後，從三用電錶中顯示的電壓控制在 $70 \pm 10 \text{mV}$ 的範圍之內，減少誤差。
- 5.使用攝影機，將鏡頭對準三用電錶及馬錶，如圖 7-1，攝影機開始拍攝。



圖 7-1：將攝影機鏡頭對準三用電錶及馬錶

- 6.電腦開始播放實驗三在操場、川堂、童心廣場、涵育樓音樂廳、自然教室、裝設吸音板前的活動中心、裝設吸音板後的活動中心所錄製的實驗光碟片(光碟片裡包括每次 0~10 秒環境音量、11~20 秒國歌播放、21~30 秒聲音下降情形)，光碟片播放同一時間馬錶開始計時。
- 7.觀察電壓變化，當馬錶 30 秒時停止拍攝。使用測量殘響時間的第六代儀器進行實驗。

(二) 研究結果：

- 1.使用「殘響時間測量儀」測量七個場地的殘響時間之詳細數據如下表 7-1~表 7-21：

(1) 操場

表 7-1：第一次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	8.24	10.58	10.93	11.18	11.46	11.84	12.08	12.3	12.68	13.04	13.27	13.65	13.87
電壓(mv)	78	78.3	78.5	78.8	87.3	83.9	83.5	87.3	87.4	84.4	81.6	89.2	97.8
		聲源開始											
時間(秒)	14.24	14.59	14.84	15.08	15.36	15.68	15.99	16.29	16.58	16.97	17.18	17.87	18.08
電壓(mv)	87.1	82.1	81.6	81	80.4	79.8	79.5	79.3	79	78.7	78.6	84.3	91
時間(秒)	18.43	18.74	18.99	19.58	19.93	20.18	20.43						
電壓(mv)	84.3	81	80.5	79.2	78.4	78.1	78						
			聲源結束			振動停止							
殘響時間 1.19 秒 (20.18 秒 - 18.99 秒 = 1.19 秒)													

表 7-2：第二次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	11.29	11.59	11.89	12.17	12.49	12.73	13.08	13.38	13.69	13.98	14.23	14.58	14.83
電壓(mv)	76.6	76.7	77.1	77.3	83.8	102.5	100.6	90	90.2	90.5	90.4	84.9	102
		聲源 開始											
時間(秒)	15.14	15.48	15.8	16.08	16.38	16.67	16.98	17.28	17.58	17.83	18.14	18.49	18.78
電壓(mv)	91.4	87.1	82.3	79.8	79.7	79.6	79.3	78.8	78.2	77.6	77.2	77	77.1
時間(秒)	19.08	19.38	19.69	19.98	20.23	20.58	20.83	21.14	21.48	21.8	25		
電壓(mv)	94.6	89.8	83.4	79.2	78.7	78.1	77.4	76.7	76.5	76.3	76.2		
					聲源 結束					振動 停止			
殘響時間 1.57 秒 (21.8 秒 - 20.23 秒 = 1.57 秒)													

表 7-3：第三次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	9.85	11.03	11.34	11.65	11.97	12.25	12.55	12.85	13.15	13.44	13.75	14.03	14.34
電壓(mv)	74.4	74.9	75.4	76.2	106	106.4	96.1	103.8	115.3	100	91.5	98.1	112.2
		聲源 開始											
時間(秒)	14.69	14.94	15.25	15.55	15.85	16.15	16.44	16.75	17.03	17.34	17.65	17.94	18.25
電壓(mv)	94.9	87.6	80.9	78.8	78.6	78.4	77.8	76.9	76.1	75.3	75	74.9	85
時間(秒)	18.55	18.85	19.15	19.44	19.75	20.03	20.34	20.65	20.91	21.25	21.55		
電壓(mv)	112.8	92	83.9	77.9	75.4	75.2	75	74.8	74.5	74.3	74.2		
					聲源 結束					振動 停止			
殘響時間 1.5 秒 (21.25 秒 - 19.75 秒 = 1.5 秒)													

(2) 川堂

表 7-4：第一次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.58	10.82	11.13	11.41	11.72	12.03	12.34	12.69	12.94	13.22	13.53	13.82	14.13
電壓(mv)	75.7	84.2	81.6	132.5	155.1	248.5	213.4	162.6	157.9	153.5	124.9	97.1	92.1
		聲源 開始											
時間(秒)	14.41	14.72	15.03	15.34	15.69	15.94	16.28	16.53	16.82	17.13	17.44	17.78	18.03
電壓(mv)	139.2	161	158.1	203.2	197.3	197.7	140.8	146.4	209.3	238.9	170.6	121.2	109.9
時間(秒)	18.34	18.63	18.94	19.28	19.53	19.88	20.18	20.44	20.72	21.03	21.34	21.69	21.94
電壓(mv)	104.2	156.6	141.2	109.9	88	79.7	76.4	76	75.6	75.1	74.5	74.3	74.2
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.16 秒 (21.69 秒 - 19.53 秒 = 2.16 秒)													

表 7-5：第二次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.64	11.23	11.55	11.83	12.14	12.49	12.7	13.02	13.39	13.64	13.99	14.2	14.52
電壓(mv)	70.7	72.9	75.3	75.1	78.8	176.7	170.3	150.2	128.6	148.2	121.5	93.8	84.6
		聲源 開始											
時間(秒)	14.83	15.14	15.49	15.7	16.02	16.39	16.64	16.93	17.2	17.52	17.83	18.14	18.43
電壓(mv)	110.3	144.8	134.9	161.7	189.9	150.7	134.6	99.4	153.2	214	183	117.8	92.6
時間(秒)	18.73	19.02	19.33	19.64	19.93	20.28	20.52	20.83	21.14	21.43	21.73	22.08	22.58
電壓(mv)	88.1	124	105.4	97.8	80.6	74.1	71.5	71.2	70.8	70.4	69.9	69.8	69.9
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.15 秒 (22.08 秒 - 19.93 秒 = 2.15 秒)													

表 7-6：第三次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.79	11.69	12.01	12.29	12.57	12.89	13.19	13.51	13.79	14.1	14.39	14.69	15.01
電壓(mv)	65.9	72.7	72.6	132.8	153.3	244.3	219.3	155.5	162.4	164.9	182.2	133.3	128.4
		聲源 開始											
時間(秒)	15.29	15.92	16.19	16.51	16.83	17.1	17.39	17.69	18.01	18.29	18.61	18.95	19.19
電壓(mv)	143.6	128.3	155.3	167.5	180.3	133.8	113.7	144.5	188.5	142.9	109.3	89.6	97.9
時間(秒)	19.51	19.79	20.1	20.39	20.69	21.01	21.29	21.61	21.92	22.19	22.51	23.1	
電壓(mv)	138.3	129.4	100.4	78.8	70.5	67.3	67	66.5	66	65.5	65.3	65.2	
				聲源 結束							振動 停止		
殘響時間 2.12 秒 (22.51 秒 - 20.39 秒 = 2.12 秒)													

(3) 童心廣場

表 7-7：第一次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.74	11.06	11.3	11.65	11.93	12.24	12.53	12.87	13.15	13.46	13.77	14.03	14.4
電壓(mv)	66.9	70.6	124.7	158.7	251.7	280.3	273.3	240.9	256.5	225.4	158.8	156.7	165.1
		聲源 開始											
時間(秒)	14.65	14.93	15.27	15.56	15.87	16.18	16.43	16.74	17.09	17.4	17.62	17.93	18.24
電壓(mv)	152.4	156.4	127.6	173.6	206.7	190.3	131.6	107.2	123.8	164.7	200.6	188.3	202.1
時間(秒)	18.58	18.84	19.15	19.43	19.74	20.03	20.36	20.68	20.93	21.24	21.5	21.87	22.12
電壓(mv)	268.6	239.6	177.7	116.6	85.1	73.2	68.6	66.7	66.6	66.3	66.1	65.8	65.7
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.13 秒 (21.87 秒 - 19.74 秒 = 2.13 秒)													

表 7-8：第二次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.2	11.49	11.73	12.02	12.33	12.61	12.93	13.23	13.52	13.8	14.08	14.43	14.7
電壓(mv)	62.2	65.9	96.6	115.4	192.2	232.7	221.6	180.3	192.8	176.3	141.5	112.4	132.3
		聲源 開始											
時間(秒)	15.02	15.33	15.61	15.93	16.23	16.52	16.8	17.11	17.43	17.7	18.02	18.33	18.64
電壓(mv)	115.2	126.8	103	131.4	158.5	154.8	107.2	90.2	99	121.8	126.7	126.8	119.1
時間(秒)	18.96	19.2	19.52	19.86	20.11	20.43	20.73	21.02	21.33	21.64	21.93	22.2	22.8
電壓(mv)	175.2	178.7	131.8	101.4	76.7	67.5	63.7	63.3	62.7	62.2	61.6	61.4	61.3
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.09 秒 (22.2 秒 - 20.11 秒 = 2.09 秒)													

表 7-9：第三次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.85	11.18	11.47	11.78	12.06	12.34	12.68	12.97	13.28	13.59	13.88	14.18	14.47
電壓(mv)	73.8	75.8	98.5	100.9	141.9	163.8	148.5	132.4	135	122.7	98.1	86.7	86.9
		聲源 開始											
時間(秒)	14.78	15.1	15.37	15.68	15.97	16.28	16.56	16.88	17.18	17.47	17.78	18.13	18.37
電壓(mv)	87	90.8	87.2	105.5	114.3	103.2	87.1	81.6	81.4	82.8	88.1	83.4	99.7
時間(秒)	18.65	18.97	19.28	19.56	19.88	20.18	20.44	20.78	21.03	21.34	21.68	22.0	22.25
電壓(mv)	133.1	120.2	100.5	84.9	76.6	73.5	73.1	72.7	72.1	71.5	71.2	71.0	70.9
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.12 秒 (22.0 秒 - 19.88 秒 = 2.12 秒)													

(4) 涵育樓音樂廳

表 7-10：第一次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	9.19	10.68	11.28	11.69	11.94	12.53	12.88	13.13	13.41	13.78	14.03	14.34	14.69
電壓(mv)	61.7	61.8	61.9	62.1	62.3	64.4	64.6	64.5	66	65.7	65	64.1	63.3
		聲源 開始											
時間(秒)	14.94	15.28	15.53	15.88	16.18	16.44	16.78	17.03	17.34	17.69	17.94	18.28	18.58
電壓(mv)	64.7	88.2	77.1	86.3	89	77.6	72.8	69.6	69.4	64.6	64.5	64	63.7
時間(秒)	18.88	19.18	19.44	19.68	19.99	20.34	20.69	20.94	21.28	21.58	21.78		
電壓(mv)	75.1	93.0	77.9	68.6	64.4	64	63.6	63.1	62.7	62.5	62.6		
		聲源 結束								振動 停止			
殘響時間 2.4 秒 (21.58 秒 - 19.18 秒 = 2.4 秒)													

表 7-11：第二次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	11.09	11.68	11.97	12.28	12.59	12.88	13.18	13.44	14.03	14.34	14.68	14.94	15.28
電壓(mv)	73	73.1	73.3	73.8	74.1	76.7	76.5	74.1	74	73.9	73.7	73.6	73.8
		聲源 開始											
時間(秒)	15.59	15.88	16.18	16.44	16.78	17.09	17.37	17.68	17.94	18.28	18.53	18.88	19.18
電壓(mv)	70.8	86.4	102.1	118.6	104.5	87.2	79.6	99.8	87.2	79.1	75.3	75.4	79
時間(秒)	19.44	19.78	20.03	20.34	20.68	20.94	21.28	21.53	21.88	22.18	22.44	23.68	
電壓(mv)	79.2	79.9	80.1	75.4	74.9	74.3	73.5	72.7	72.3	72.1	71.9	71.8	
				聲源 結束							振動 停止		
殘響時間 2.1 秒 (22.44 秒 - 20.34 秒 = 2.1 秒)													

表 7-12：第三次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.49	11.08	11.3	11.68	11.93	12.24	12.58	12.87	13.18	13.43	13.74	14.08	14.33
電壓(mv)	63.1	63.3	63.8	64.4	65.1	66	66.7	65.9	66.1	66.3	66.1	65.9	65.4
		聲源 開始											
時間(秒)	14.93	15.24	15.58	15.84	16.18	16.43	16.74	17.08	17.33	17.68	17.93	18.24	18.58
電壓(mv)	76.9	73.5	81	101.4	87.2	76	70.3	82.6	78.2	70.7	66.8	66.7	70.6
時間(秒)	18.84	19.18	19.43	19.74	20.08	20.33	20.68	20.93	21.24	21.58	21.84	22.18	
電壓(mv)	77.1	74.3	71.2	65.9	63.8	63.6	63.3	62.8	62.2	61.9	61.6	61.5	
				聲源 結束							振動 停止		
殘響時間 2.1 秒 (21.84 秒 - 19.74 秒 = 2.1 秒)													

(5) 自然教室

表 7-13：第一次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	9.88	11	11.34	11.63	11.94	12.28	12.53	12.88	13.13	13.41	13.68	14	14.28
電壓(mv)	78.6	113.8	201.3	227.9	240.8	255	279.5	223.9	268.4	243.8	255.9	217.7	264.4
		聲源 開始											
時間(秒)	14.63	14.94	15.28	15.58	15.78	16.19	16.41	16.68	17.03	17.34	17.69	17.94	18.18
電壓(mv)	230.8	236	188.6	182.4	197.1	233.3	210.2	166	140.8	143.7	182.9	199.8	191.3
時間(秒)	18.5	18.78	19.19	19.44	19.69	20.03	20.34	20.69	20.88	21.18	21.47	21.78	22.68
電壓(mv)	273	290.3	206	127.3	96.6	85.1	80.3	79.9	79.4	78.8	78.3	78.2	78.3
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.09 秒 (21.78 秒 - 19.69 秒 = 2.09 秒)													

表 7-14：第二次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.95	11.25	11.55	11.85	12.14	12.48	12.73	13.05	13.35	13.64	13.95	14.25	14.55
電壓(mv)	71.1	110.4	166.4	189.3	202.7	193.8	215.1	224.8	218.1	224.1	218.9	199.8	187.8
		聲源 開始											
時間(秒)	14.85	15.14	15.45	15.73	16.05	16.35	16.64	16.95	17.25	17.55	17.85	18.14	18.45
電壓(mv)	195.9	214.8	186.6	178.9	170.6	176.1	166.1	135.3	109.8	97	109.9	139.8	158.8
時間(秒)	18.73	19.05	19.35	19.64	19.95	20.25	20.55	20.81	21.42	21.73	22.05	22.33	
電壓(mv)	210.8	223.8	171	128.1	93.3	79.1	73.6	71.6	71.2	70.9	70.6	70.5	
					聲源 結束						振動 停止		
殘響時間 2.1 秒 (22.05 秒 - 19.95 秒 = 2.1 秒)													

表 7-15：第三次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	11.51	11.83	12.1	12.38	12.63	12.95	13.25	13.57	13.88	14.19	14.48	14.78	15.13
電壓(mv)	66.1	131.8	178	189.1	189.5	177.5	203.3	202.9	202.7	202.9	198.7	184.3	169.3
		聲源 開始											
時間(秒)	15.39	15.69	15.98	16.28	16.6	16.88	17.16	17.51	17.78	18.07	18.37	18.69	19.01
電壓(mv)	197.9	213.5	199.2	189.9	195.6	188.4	174.3	136.7	104.8	102.8	134	163.8	184.5
時間(秒)	19.25	19.57	19.84	20.16	20.48	20.78	21.07	21.38	21.69	21.98	22.28	22.57	22.88
電壓(mv)	216.6	220.5	177.3	113.1	84.9	73	68.6	68.1	67.5	66.8	66	65.7	65.6
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.09 秒 (22.57 秒 - 20.48 秒 = 2.09 秒)													

(6) 裝設吸音板前的活動中心

表 7-16：第一次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	9.18	11.29	11.54	11.89	12.07	12.38	12.69	13.04	13.28	13.57	13.88	14.29	14.48
電壓(mv)	77.9	78	78.2	87.8	134.7	186.4	190	208.9	200.3	210.1	205.4	209.5	195.5
		聲源 開始											
時間(秒)	14.89	15.19	15.38	15.79	16	16.29	16.57	16.88	17.22	17.54	17.84	18.16	18.48
電壓(mv)	191.1	185.7	183.6	184.1	201.5	203.3	203.6	214.4	219	215.6	202.8	183	168.4
時間(秒)	19	19.28	19.6	19.88	20.19	20.51	20.83	21.13	21.38	21.79	22.04	22.29	22.6
電壓(mv)	173.7	219.6	238	219.2	150.9	119.5	101.5	111.9	114.2	101.6	86.8	80.8	78.4
				聲源 結束									
時間(秒)	22.88	23.29	23.54	23.89	24.1								
電壓(mv)	78.3	78.1	77.9	77.7	77.6								
				振動 停止									
殘響時間 4.01 秒 (23.89 秒 - 19.88 秒 = 4.01 秒)													

表 7-17：第二次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	9.74	10.93	11.24	11.59	11.84	12.18	12.43	12.74	13	13.33	13.68	13.93	14.24
電壓(mv)	76.8	76.9	81.2	87.9	142.8	170.9	187.3	202	186.5	211.5	197.1	201.6	198.6
		聲源 開始											
時間(秒)	14.59	14.81	15.18	15.43	15.74	16.09	16.3	16.68	16.93	17.24	17.58	17.81	18.08
電壓(mv)	196	194	196.7	202.9	212.3	209.9	214.8	221.5	225.3	220.1	209	190.4	182.4
時間(秒)	18.4	18.74	19.09	19.33	19.58	19.93	20.24	20.59	20.84	21.08	21.48	21.74	22.03
電壓(mv)	180	193	225	228.6	187.2	135.6	113.9	97.9	118.1	125.7	100.5	85.3	79.1
					聲源 結束								
時間(秒)	22.3	22.68	22.98	23.24	23.59	27.12							
電壓(mv)	76.9	76.7	76.5	76.2	75.9	75.8							
					振動 停止								
殘響時間 4.01 秒 (23.59 秒 - 19.58 秒 = 4.01 秒)													

表 7-18：第三次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	9.88	11.04	11.38	11.63	11.98	12.28	12.54	12.88	13.13	13.48	14.04	14.38	14.68
電壓(mv)	74.3	78	87.4	131.3	178.1	181.7	199.5	190.4	198.7	196.7	185	184.8	184.7
		聲源 開始											
時間(秒)	14.98	15.28	15.54	15.88	16.13	16.48	16.78	17.04	17.38	17.63	17.98	18.28	18.54
電壓(mv)	184.5	189.6	202.2	204.6	204.2	208.4	211.6	211.7	200.6	188.1	172.9	175.7	175.8
時間(秒)	18.88	19.13	19.48	19.78	20.04	20.38	20.63	20.98	21.28	21.57	21.88	22.13	22.48
電壓(mv)	212.2	222.7	211	161.8	139.2	134.3	139.6	133.5	110.5	87.6	78.5	75.1	74.8
				聲源 結束									
時間(秒)	22.75	23.07	23.38	23.69	23.98	28.48							
電壓(mv)	74.4	73.9	73.7	73.4	73.2	73.1							
					振動 停止								
殘響時間 4.2 秒 (23.98 秒 - 19.78 秒 = 4.2 秒)													

(7) 裝設吸音板後的活動中心

表 7-19：第一次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.98	11.3	11.57	11.88	12.19	12.48	12.78	13.04	13.38	13.63	13.98	14.29	14.54
電壓(mv)	72.9	73	73.2	73.8	96.3	94.1	99.2	107.2	106.8	106.1	90.3	80.7	80.8
		聲源 開始											
時間(秒)	14.88	15.13	15.38	15.78	16.04	16.38	16.63	16.98	17.28	17.54	17.88	18.13	18.48
電壓(mv)	109.9	122.1	161.4	190.2	187.6	165.2	144.2	156.6	191.3	151.2	110	92.5	94.6
時間(秒)	18.78	19.04	19.38	19.63	19.98	20.28	20.54	20.89	21.18	21.48	21.79	22.04	22.28
電壓(mv)	152.8	135.9	103.7	84.7	77.2	74.5	74.3	74	73.7	73.4	73.2	73	72.9
					聲源 結束								振動 停止
時間(秒)	23.89												
電壓(mv)	73												
殘響時間 2.3 秒 (22.28 秒 - 19.98 秒 = 2.3 秒)													

表 7-20：第二次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.38	11	11.28	11.68	11.88	12.19	12.54	12.89	13.18	13.38	13.78	14	14.28
電壓(mv)	67.9	68.1	68.3	68.5	92.2	87.7	102.8	94.6	126.5	111.6	93.9	81.3	73.5
		聲源 開始											
時間(秒)	14.54	14.88	15.19	15.48	15.88	16.18	16.39	16.79	17	17.28	17.68	17.88	18.29
電壓(mv)	84.8	112.1	125.1	169.9	180.9	176.9	150.1	133.1	156.2	164.7	125.6	92.9	85.5
時間(秒)	18.54	18.89	19	19.38	19.79	20	20.28	20.57	20.88	21.19	21.48	21.89	22.07
電壓(mv)	125.4	143.4	110.6	87.1	75.1	70.5	70.1	69.6	69	68.4	68.2	68	67.9
					聲源 結束							振動 停止	
殘響時間 2.1 秒 (22.89 秒 - 19.79 秒 = 2.1 秒)													

表 7-21：第三次實驗電壓變化其所對應的秒數關係

時間(秒)	10.03	11.53	11.88	12.09	12.37	12.68	12.99	13.34	13.69	13.97	14.28	14.58	14.78
電壓(mv)	65.9	66	66.2	66.4	71.1	88.1	99.4	91.2	119.6	106.1	98.3	82.9	72.9
		聲源 開始											
時間(秒)	15.13	15.44	15.78	16.03	16.28	16.68	16.94	17.28	17.47	17.88	18.19	18.37	18.69
電壓(mv)	76.5	106.4	112.5	152.8	172.6	177.2	144.7	126.8	141.8	176.4	136.1	98.4	84.3
時間(秒)	18.97	19.28	19.69	19.99	20.18	20.57	20.72	21.19	21.34	21.68	21.99	22.28	22.69
電壓(mv)	102.9	145	115.9	92.2	75.9	69.6	67.2	67	66.7	66.5	66.1	66	65.6
					聲源 結束								振動 停止
時間(秒)	22.88												
電壓(mv)	65.7												
殘響時間 2.51 秒 (22.69 秒 - 20.18 秒 = 2.51 秒)													

2.使用「殘響時間測量儀」測量七個場地的殘響時間結果整理如下表 7-22：

表 7-22：七個場地各 3 次實驗殘響時間一覽表

項目	場地名稱	殘響時間(秒)			
		實驗 1	實驗 2	實驗 3	平均
1	操場	1.19	1.57	1.50	1.42
2	川堂	2.16	2.15	2.12	2.14
3	童心廣場	2.13	2.09	2.12	2.11
4	涵育樓音樂廳	2.40	2.10	2.10	2.2
5	自然教室	2.09	2.10	2.09	2.09
6	活動中心(吸音前)	4.01	4.01	4.20	4.07
7	活動中心(吸音後)	2.30	2.10	2.51	2.30

(三) 研究發現：

- 1.將表繪製成 EXCEL 圖，可以清楚得知當播放聲源或當聲源停止後還有回音時，聲波會振動氣球皮，導致三用電錶的電壓值往上跳動。所以經由馬錶秒數及電壓值數據的判讀，可以很容易計算出殘響時間。

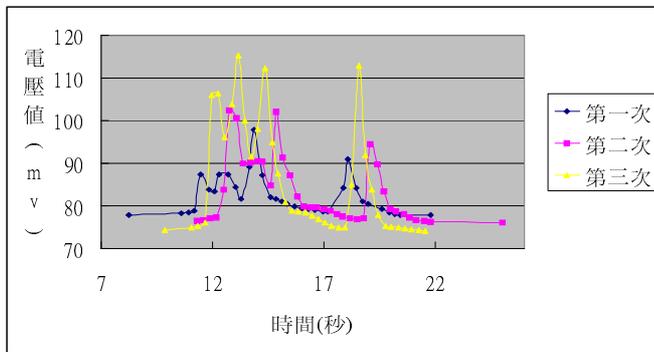


圖 7-2：操場實驗 3 次電壓變化及對應的秒數關係圖

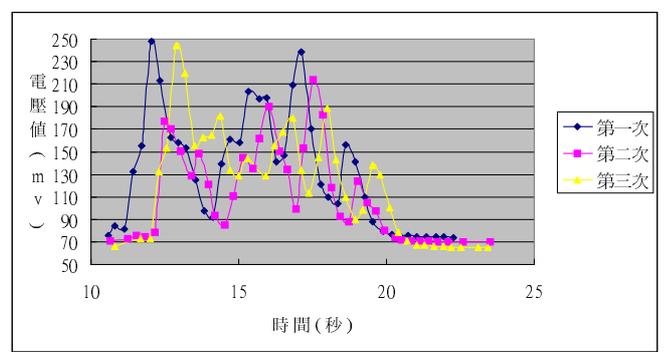


圖 7-3：川堂實驗 3 次電壓變化及對應的秒數關係圖

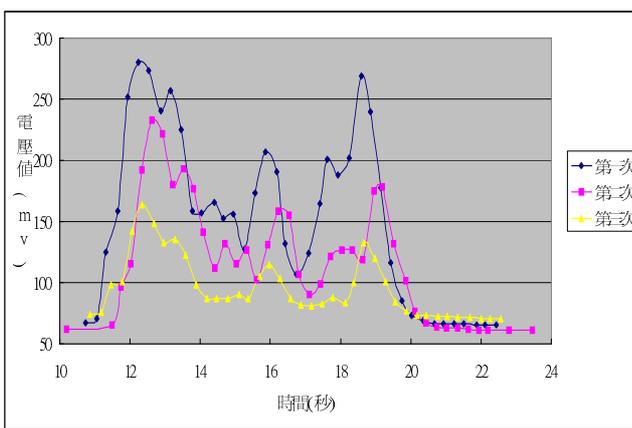


圖 7-4：童心廣場實驗 3 次電壓變化及對應的秒數關係圖。

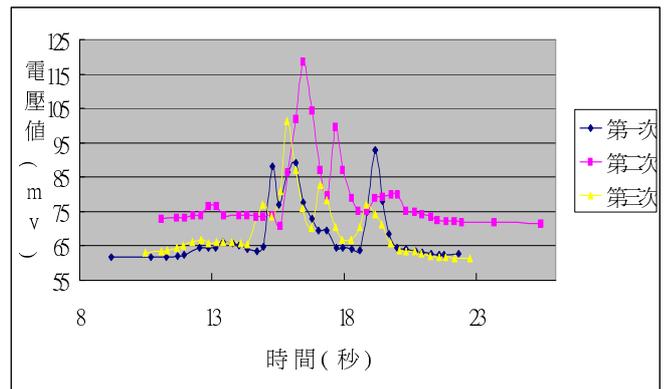


圖 7-5：涵育樓音樂廳實驗 3 次電壓變化及所對應的秒數關係圖。

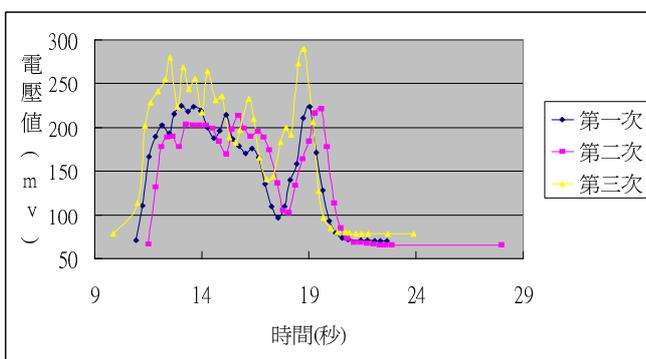


圖 7-6：自然教室實驗 3 次電壓變化及所對應的秒數關係圖。

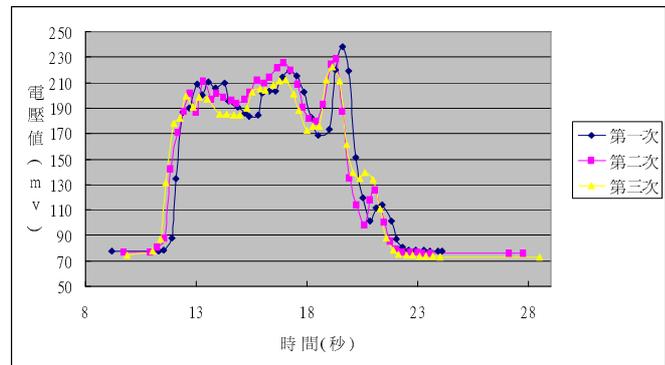


圖 7-7：裝設吸音板前的活動中心實驗 3 次電壓變化及所對應的秒數關係圖。

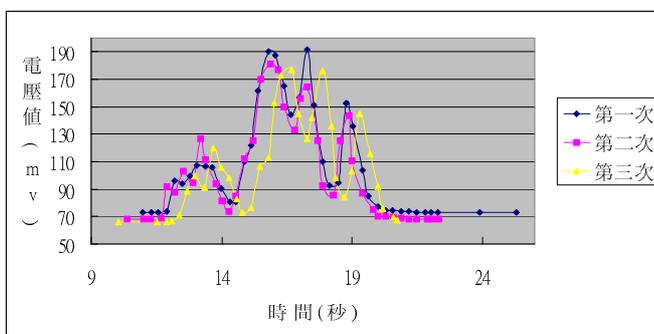


圖 7-8：裝設吸音板後的活動中心實驗 3 次電壓變化及所對應的秒數關係圖。

2.使用「殘響時間測量儀」測出七個場地的殘響時間由高至低排列依序是：裝設吸音板前的活動中心>裝設吸音板後的活動中心>涵育樓音樂廳>川堂>童心廣場>自然教室>操場。其中操場平均殘響時間最短，為 1.42 秒，無裝設吸音板的活動中心平均殘響時間最長，為 4.07 秒。

3.自然教室使用分貝計測量時最大響度最大，使用三用電錶測量時，自然教室在所有場地中也是電壓值最高的地點。

4.使用三用電錶量測殘響時間時，我們發現三用電錶的時間反應間隔約 0.3 秒，這比分貝計的反應時間 0.7 秒短，說明使用三用電錶會得到較為準確的結果。

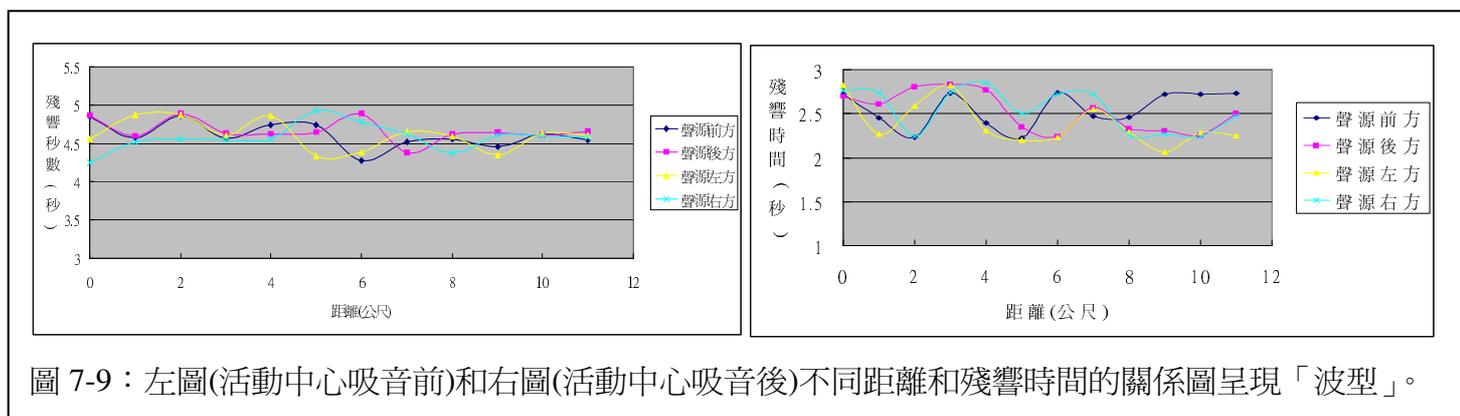
陸、結論

一、同學總是聽不清楚老師在活動中心的說話內容，原來是「殘響時間太長」惹的禍。

- 1.在實驗三中，我們使用分貝計在校園內六個不同的場地，分別測量在播放聲源前、中、後的響度變化，意外發現活動中心的殘響時間長達 4.25 秒~4.86 秒，比自然教室的殘響時間 1.53 秒約多了 3 倍。殘響時間過長，使得老師在活動中心說話時，仍在牆壁和屋頂之間彈來彈去的前一個音會把老師口中講出的新的音給蓋掉了，因此，我們才很難聽清楚台上老師在說什麼。
- 2.在實驗五中，我們在裝設吸音板後的活動中心，用分貝計重新測量播放聲源前、中、後的響度變化，發現此時活動中心因有吸音板吸收聲波的關係，使得殘響時間大大降為 2.20 秒~2.82 秒，和裝設吸音板前差距約 2.12 秒。而且我們和其他同學也真的感受到活動中心裝設吸音板後，我們比較能聽清楚老師的說話內容。

二、同一個空間裡，殘響時間不會因距離或位置的不同而有太大的變化。

- 1.實驗四、五中，我們使用分貝計測量活動中心裡距聲源 0~11m 間的殘響時間變化，發現裝設吸音板前活動中心的殘響時間為 4.25 秒~4.86 秒，裝設吸音板後活動中心的殘響時間為 2.20 秒~2.82 秒，兩場地的殘響時間並沒有因距離的增加而減少，因此不論同學坐在活動中心裡的哪一個位置，所受到聲音回響的影響幾乎都是一樣的。
- 2.實驗四、五中，可看出吸音前和吸音後的活動中心裡，在聲源的前、後、左、右方的殘響時間與距離的關係圖恰巧呈現奇妙的「波型」(如圖 7-9)，讓我們覺得很訝異。我們推測這是和聲音以「波」的方式來傳遞時，聲音和聲音會彼此呈現相長或相消的情形有關，以致殘響時間和距離呈現「波形」關係。



三、利用新研發的「殘響時間測量儀」能更省時、省力、精確地檢測出殘響時間。

- 1.雖然利用學校現有的分貝計能測量、計算出某場地的殘響時間，但在實驗六中，我們研發出的「殘響時間測量儀」，能更輕易地完成殘響時間的測量工作，以下表 7-23 是使用分貝計及第六代殘響時間測量儀測量殘響時間的優缺點分析：

表 7-23：使用「分貝計」或「殘響時間測量儀」測量殘響時間的優缺點分析

優缺點 工具類別	優 點	缺 點
分貝計	1. 學校裡現有的儀器。 2. 接收聲音響度相當敏感。 3. 攜帶方便。	1. 因接收聲音響度相當敏感，所以很容易受到外界環境噪音的影響，因此測量時為減少環境噪音干擾，常必須利用假日或晚上進行實驗。 2. 使用時，常為了等外界安靜了之後才能進行實驗，或是實驗進行中突然有外界噪音的干擾就必須重頭施測，為此耗費了許多的時間。 3. 每次響度變化的反應時間較長，平均為 0.7 秒。
殘響時間 測量儀	1. 不易受到外界環境噪音的干擾，所以隨時隨地都能進行實驗。 2. 當主要聲源播放前或主要聲源的回響停止時，能呈現穩定的電壓值，容易判讀殘響時間。 3. 每次響度變化的反應時間較短，平均為 0.3 秒，因此能測量出較為精準的殘響時間。	體積比分貝計大，較不易隨身攜帶。

2. 在實驗三、五、七中，我們將使用「分貝計」或「殘響時間測量儀」兩者測量出的殘響時間相比較，如表 7-24，發現使用兩種儀器所測量的數值相近。因此若使用我們所研發的「殘響時間測量儀」，不僅可以準確地量測出殘響時間，還更容易操作與判讀，既省時又方便。

表 7-24：不同場地使用「分貝計」或「第六代殘響時間測量儀」測量出的殘響時間一覽表

殘響時間 (秒) 儀器	場地 活動中心 吸音前	活動中心 吸音後	川堂	涵育樓 音樂廳	童心廣場	操場	自然教室
分貝計	4.52	2.27	2.32	2.19	1.76	1.71	1.53
殘響時間測量儀	4.07	2.30	2.14	2.20	2.11	1.42	2.09
差 距	-0.45	+0.03	-0.18	+0.01	+0.35	-0.29	+0.56

柒、參考資料

一、書籍資料

1. 自然科學圖解百科—能量與物理。台北縣：泛亞國際文化科技股份有限公司。民 95。
2. 艾那·弗拉佗。牛頓的蘋果。台北市：允晨文化實業股份有限公司。民 87。
3. 林達英。聲音的奧秘。嘉義市：明統圖書公司。民 78。
4. 約翰·范登。科學技術。香港：三聯書店（香港）有限公司。民 92。
5. 許夢虹。有趣的聲和光。台北市：昱泉國際股份有限公司。民 91。
6. 郭治。物理傳奇—美妙的聲。台北市：國際村文庫書店有限公司。民 90。
7. 湯國光。奇妙的聲音。台北市：華一書局有限公司。民 78。
8. 蕙蕙。物理萬象。新竹市：凡異出版社。民 90。

二、網路資料

陳博士講座—你知道室內殘響時間嗎？取自 <http://www.ks-hifi.com/dr.chen/200308/chen0308.htm>

【評語】 081516

- (1)針對薄膜震動，開發多種測量方式且有改良作品之強烈意圖。
- (2)整個團隊成員投入作品製作，專注力高。
- (3)記錄詳細，積極投入。
- (4)整體報告流利且演練順暢，表現優異。