

行政院所屬各機關因公出國人員出國報告書
(出國類別：開會)

出席「2010 年第 14 屆國際低頻噪音
與振動會議」案出國報告書

服務機關：行政院環境保護署

姓名職稱：林志純技佐

派赴國家：丹麥

出國時間：99 年 6 月 7 日至 99 年 6 月 13 日

報告日期：99 年 8 月 25 日

出席「2010 年第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」案

■ 摘要

近年來生活環境快速變化，高速鐵路的通車營運、捷運網絡的完善、快速道路的連貫、再生能源的生產、住商綜合大樓的興建…等盡皆使得民眾生活更加便利舒適，但其實這些設施中也隱藏著許多的低頻噪音發生源。在低頻噪音的管制上，我國可謂領先世界其他國家，已逐步針對民眾陳情頻繁的各項低頻噪音進行管制，包括：工廠（場）、娛樂場所、營業場所、營建工程及其他經主管機關公告之場所及設施。低頻噪音管制實施迄今，低頻噪音陳情案件明顯銳減，顯見將低頻噪音納入管制的方向是正確的。

本次前往丹麥奧爾堡參加「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」，會議議題涵蓋所有有關低頻噪音和振動其影響和控制，共有來自世界各國代表共計 39 篇論文於此會議發表。於本屆國際低頻噪音與振動會議中，針對我國之低頻噪音、振動及其管制，本署提出一篇論文發表，引起與會之各國代表對於我國將低頻噪音納入管制進行討論，討論重點包括：管制值之研擬、施行之程序及管制後之成效…等。在國外論文發表部份，包括：低頻噪音之新測量方法、風效應對低頻噪音測量之影響、隧道出口微壓波噪音減降、大型冷卻塔風扇罩振動之控制、樓板走動振動影響之舒適度評估與衡量、風力發電機低頻噪音對人與動物的影響及低頻噪音對人體的影響等之研究成果與建議，未來可作為我國施政上及法規擬定、修正之參考。

目次

壹、目的

貳、行程

參、過程

肆、心得及建議

伍、附件

附件一 於 2010 年「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」發表之論文—「我國低頻噪音控制的研究和經驗」—The Study and experience of low frequency noise control of the Republic of China (Taiwan)

附件二 「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」簡報資料

壹、目的

近年來生活環境快速變化，高速鐵路的通車營運、捷運網絡的完善、快速道路的連貫、再生能源的生產、住商綜合大樓的興建…等盡皆使得民眾生活更加便利舒適，但其實這些設施中也隱藏著許多的低頻噪音發生源，例如：交通運輸系統的車輛、隧道口、伸縮縫、軌道、橋樑等，再生能源生產設施的風力發電機組，住商綜合大樓的冷卻水塔、抽水機、冷氣機、洗衣機、冰藏設備等，工業區的壓縮機、送風機、鍋爐、輸送帶、引擎、汽車等。隨著民眾環保意識的提高，對於寧靜生活環境的要求也相對提昇，同時亦重視起噪音的相關問題，隨之而來的噪音陳情案件也有逐年升高的趨勢，其中即包含低頻噪音案件。

在低頻噪音的管制上，我國可謂領先世界其他國家，已逐步針對民眾陳情頻繁的各項低頻噪音進行管制，包括：工廠（場）、娛樂場所、營業場所、營建工程及其他經主管機關公告之場所及設施。低頻噪音管制實施迄今，低頻噪音陳情案件明顯銳減，顯見將低頻噪音納入管制的方向是正確的。

為能全面將各項設施之低頻噪音列入管制，有效解決低頻噪音的擾人問題，本署亦進行了不同主題之相關研究及噪音量測工作，如陸上運輸系統(隧道口、伸縮縫、軌道、橋樑等)低頻噪音管制、各類開放設施及場所(如風力發電設施、纜車、變電所等) 低頻噪音管制等，期藉由研究結果及量測數據分析，使得低頻噪音管制相關法規更加完備。

本次前往丹麥奧爾堡參加「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」，主要希望能瞭解國外對於各式低頻噪音振動之控制技術、量測方法、管制規範、影響層面之研究成果及建議事項，吸收國外經驗，做為完善我國低頻噪音控制及管制相關法規之參考。

貳、行程

活動日期	活動地點	活動內容
99年6月7日(星期一)	台北至荷蘭阿姆斯特丹	啓程
99年6月8日(星期二)	荷蘭阿姆斯特丹 至丹麥哥本哈根	轉機
99年6月8日(星期二)	丹麥哥本哈根 至丹麥奧爾堡	轉機及抵達會議地點
99年6月9日(星期三)	丹麥奧爾堡	參加2010年「第14屆國際低頻噪音與振動會議」
99年6月10日(星期四)	丹麥奧爾堡	參加2010年「第14屆國際低頻噪音與振動會議」
99年6月11日(星期五)	丹麥奧爾堡	參加2010年「第14屆國際低頻噪音與振動會議」
99年6月12日(星期六)	丹麥奧爾堡 至丹麥哥本哈根	轉機
99年6月12日(星期六)	丹麥哥本哈根 至荷蘭阿姆斯特丹	轉機
99年6月13日(星期日)	荷蘭阿姆斯特丹至台北	返程

參、過程：參加 2010 年「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」

- 一、「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」會議議題涵蓋所有有關低頻噪音和振動其影響和控制，包括：次聲源、低頻噪音和振動量測和分析 / 風力發電機噪音對人與動物的影響 / 低頻噪音和振動的相互作用 / 低頻噪音存在的問題及解決方案 / 控制低頻噪音和振動的被動與主動的方法 / 低頻噪音和振動技術應用 / 低頻率噪音和振動的法規和準則等項目與層面，共有來自世界各國代表共計 39 篇論文於此會議發表。
- 二、於本屆國際低頻噪音與振動會議中，針對我國之低頻噪音、振動及其管制，本署提出一篇論文發表—The Study and experience of low frequency noise control of the Republic of China (Taiwan)，引起與會之各國代表對於我國將低頻噪音納入管制進行討論，討論重點包括：管制值之研擬、施行之程序及管制後之成效…等，論文全文及簡報資料收錄於附件中。
- 三、聽取相關論文之發表，瞭解國外對於各式低頻噪音振動之控制技術、量測方法、管制規範、影響層面之研究成果及建議事項，包括：低頻噪音之新測量方法、風效應對低頻噪音測量之影響、隧道出口微壓波噪音減降、大型冷卻塔風扇罩振動之控制、樓板走動振動影響之舒適度評估與衡量、風力發電機低頻噪音對人與動物的影響及低頻噪音對人體的影響；此部份之研究成果與建議，未來可作為我國施政上及法規擬定、修正之參考。



會議剪影

四、2010 年「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」與本署相關之議題包括：
國際低頻噪音與振動會議」與本署相關之議題

(一) 99 年 6 月 9 日星期三

序號	時間	論題	論文
1	09 : 40	LFN Measurements 低頻噪音量測	Wind Effect on Low Frequency Sound Pressure Measurement - Part 2: Results of Wind Tunnel Experiments 風效應對低頻噪音測量之影響(2)：風洞實驗結果
2	10 : 00	LFN Measurements 低頻噪音量測	The Study and experience of low frequency noise control of the Republic of China (Taiwan) 低頻噪音、振動及其管制
3	11 : 00	LFN Measurements 低頻噪音量測	New measurement method of low frequency noise in rooms 室內低頻噪音之新測量方法
4	11 : 20	LFN Measurements 低頻噪音量測	Model for predicting the annoyance risk from external low frequency noise inside a building 戶外低頻噪音苦惱風險之預測模式
5	11 : 40	LFN Measurements 低頻噪音量測	Sound insulation of dwellings at low frequencies 低頻噪音下住宅之隔音
6	13 : 00	Effect of noise 噪音的影響	Determining the effects of low frequency noise on humans 低頻噪音對人體影響之測定
7	13 : 20	Effect of noise 噪音的影響	Psychological Influence from Fluctuant Low Frequency Bandwidth Sound 低頻帶波動噪音對心理的影響
8	13 : 40	Effect of noise 噪音的影響	Family with wind turbines in close proximity to home: follow-up of the case presented in 2007 風力發電機運作對附近住宅之影響：2007 年提報個案後續報告
9	14 : 00	Effect of noise 噪音的影響	Low Frequency Noise – Strain on the Brain 低頻噪音對人腦造成的負擔

(二) 99 年 6 月 10 日星期四

序號	時間	論題	論文
10	09 : 00	Control 控制	Controlling the Flow Induced Vibration of Fan Casing on the Large Cooling Tower 氣流誘發大型冷卻塔風扇罩振動之控制
11	09 : 40	Control 控制	Optimization of Train Nose Shape for Reducing Micropressure Wave Radiated from Tunnel Exit 隧道出口微壓波噪音減降之理想車頭形狀

(三) 99年6月11日星期五

序號	時間	論題	論文
12	09:20	Vibration 振動	Building Vibration Serviceability Due to Human Activities 人類活動對建築物振動舒適度之影響
13	09:40	Vibration 振動	Building Floor Vibration Assessment and Evaluation Due to Walking Excitations 走動造成建築物樓板振動之評估與衡量
14	11:20	Windturbine noise 風力發電機噪音	Low Frequency Noise Monitoring of a Wind Turbine 風力發電機低頻噪音之監控
15	11:40	Windturbine noise 風力發電機噪音	An analysis of low frequency noise from large wind turbines 大型風力發電機之低頻噪音分析

五、會議內容

(一) 99年6月9日星期三 09:40—風效應對低頻噪音測量之影響(2)： 風洞實驗結果(Wind Effect on Low Frequency Sound Pressure Measurement - Part 2: Results of Wind Tunnel Experiments)

量化作用於麥克風之風噪音，是戶外噪音測量與評估之最重要課題之一。在第13屆國際低頻噪音及振動防制年會上(東京)，本文研究人員已報告了利用風洞實驗探索風效應對低頻噪音測量影響之部分實驗結果。

本文著重於低頻噪音之探討，譬如高架道路產生之音輻射或水壩發出的洩洪聲。一般我們在戶外測量低頻噪音時，必須區別真實輻射音作用於麥克風上所產生的風噪音；然而，目前有關風噪音量化評估的研究非常少；因此，本文研究人員試圖利用風洞實驗來評估低頻風噪音。

風噪音可分為兩種：一種是迎面風流之壓力湍流所產生的噪音，另一種是風流與麥克風(含防風球)之間的互動微擾所產生的噪音。前者通常隨自然風產生，後者則由取決於風速和幾何關係之互動所造成，即使風流平穩亦可能產生這種風噪音。

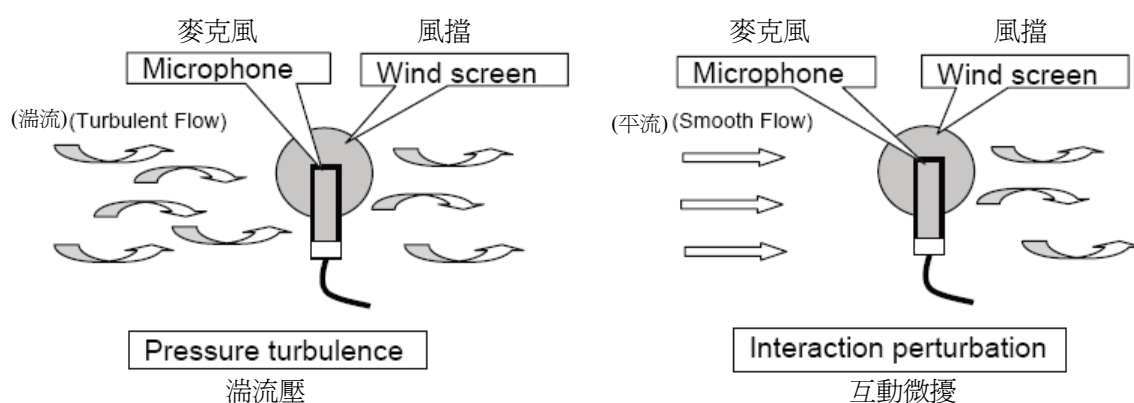


圖 1. 風噪音之定義

以下圖形顯示東京市區某個區域之湍流強度和陣風係數的實例。

$$Iu = \sigma_u / U \quad \sigma_u : \text{rms value of fluctuating wind velocity} \quad Gu = (U + u_{\max}) / U$$

$$U : \text{mean value of wind velocity}$$

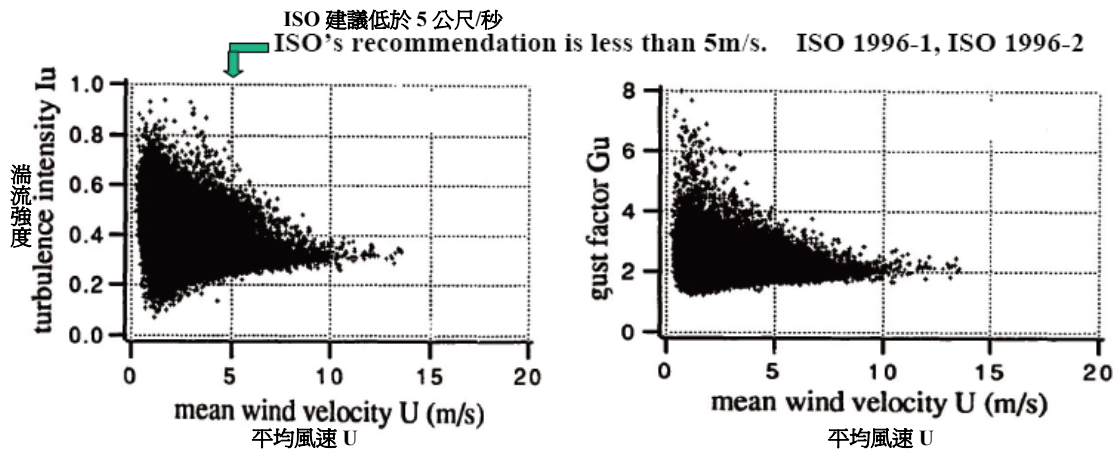


圖 2. 平均風速與湍流強度之間的關係 圖 3. 平均風速與陣風係數強度之間的關係

在以上兩圖中，當平均風速下降時，自然風中的湍流強度和陣風係數同時上升。因此，很重要的一點是，在戶外測量低頻噪音時，必須特別注意湍流強度。在本文中，研究人員試圖運用風洞實驗的結果，利用低頻聲壓計來評估風噪音。在風洞實驗中，平均風速和湍流強度均在妥善控制下，維持與一般風洞實驗的參數一致。在這次實驗中，研究人員利用防風球取得評估麥克風誘發風噪音的新數據。特別的是，研究人員利用裝在模型麥克風上的壓力傳感器，直接測量了作用於麥克風上的湍流壓。此外，研究人員針對各種風速和湍流強度，觀察了防風球上的壓力場；這些風速及湍流強度參數均在妥善控制下，維持與一般風洞實驗計畫之參數一致。因此，研究人員提出迎面風湍流的風效應(麥克風裝在防風球上)。雖然研究人員的實驗結果僅限於每秒 5 公尺(5m/s)的風速，但研究人員的風噪音評估方法，適用於在較高風速下修正戶外低頻噪音之測量。

本文研究人員運用風洞實驗，提出有關風效應對麥克風影響之實驗結果，根據實驗結果提出以下結論：

- 兩種風噪音評估結果可被視為實驗值回歸法：一種是頻譜域，另一種是 1/3 八音度頻帶分析。然而，這些結果都有其限制，它們只適用於現行的低頻聲壓計，因為聲壓計和防風球的反應特徵不同。
- 目前的方法為低頻風噪音測量之評估提供一種解決方案，因為在自然風中測量戶外噪音，存在著不確定因素。
- 雖然防風球在某種程度上可降低作用於麥克風的風噪音，但當迎面風流中的湍流和平均風速均較高時，低頻風效應也越大。

(二) 99 年 6 月 9 日星期三 10:00—低頻噪音、振動及其管制(The Study and experience of low frequency noise control of the Republic of China (Taiwan))

在亞洲，台灣是世界上人口最稠密的地區，2009 年之人口密度約 638.82 人/km²，相對於丹麥(2009 年之人口密度約為 126 人/km²)高出很多；在如此有限的土地利用和人口密度如此高之情形下，混合土地的使用就非常常見，如娛樂、商業和辦公室常混合設於住商混合大樓中，而這種商業及娛樂活動往往都會產生噪音，對居住環境而言，即產生重大的不利影響。此外，於居家環境周邊林立的冷卻塔、排風扇及空調等，皆為低頻噪音的來源，這也是民眾重複陳情的重點。另一方面，在快速擴張的城市和人口大量增長的情形下，想在工地附近建立一個緩衝區，以減少營建工程噪音的影響，這是相當困難的。

自 1983 年開始，台灣的中央主管機關行政院環境保護署（EPA）即頒布噪音管制法(最近一次修正於 2008 年)；並於 EPA 之空氣品質保護及噪音管制處中設立噪音管制科，指派專人負責噪音管理業務。噪音管制法主要根據不同類別的噪音管制區和時間區間，規範從廠房或場所、娛樂場所、商業場所、營建工程、廣播設施和其他場所、工程或設施等所產生的噪音，不得超過相關之噪音管制標準。此外，亦根據噪音管制法，訂定了相關施行細則、辦法、檢測方法及罰則等。

在過去 20 年來生活環境的變化中，民眾的環保意識越來越高，對於生活中的寧靜環境要求也提高，同時亦重視起噪音的相關問題，隨之而來的噪音陳情案件也有逐年升高的趨勢。為此，本署即嘗試由各種途徑試圖降低民眾之噪音陳情，包括：24 小時陳情處理專線的設立、噪音源的改善及防制指導、傳播途徑的防制及檢討修訂相關法規標準等；同時，本署進行了不同主題之相關研究及噪音量測工作，期藉由研究結果及量測數據分析，使得噪音管制相關法規更加完善，降低民眾之噪音陳情，還給民眾一個寧靜的生活環境。

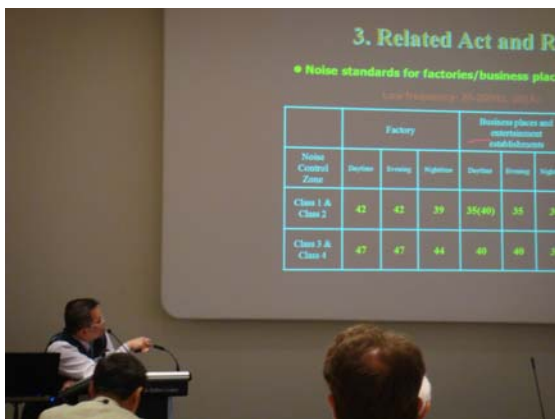


圖 4. 會議過程及討論

(三) 99 年 6 月 9 日星期三 11:00—室內低頻噪音之新測量方法(New measurement method of low frequency noise in rooms)

本研究針對各種室外噪音源所造成室內低頻噪音(LFN)之測量方法，進行了檢討。最簡單的測量方法僅指定一個測量點，進行一次 1 小時的長時間測量。這種測量法未考慮室內模式，因而導致錯誤的計算結果。比較進步的方法強調角落位置，導致高估居住者所在位置之聲壓位準(SPL)的現象。而在過去相關文獻中，並沒有發現既簡單又以居住者為導向的測量方法。本研究之目的在於發展一種可測量各種室內空間(如住宅或工業控制室)之 LFN 的簡單且可重複之新方法。建議之方法係根據在五個室內空間中從事廣泛空間 SPL 測量而發展的，利用有限元素建模來補充空間 SPL 差異分析。本研究對所建議之方法有詳細描述，並充分探討其優缺點，而此一方法包括兩種選項：持續性噪音和間歇性噪音。前者運用起來非常快速，也最常被應用；後者包含一次長時間測量，當觀察到或預期有時間差異時，便常採用這種方法。在多數狀況下，持續性噪音方法便足以確定是否已超過限值。這種方法著重於居住者的所在位置，但也測量最高 SPL。

- 測量方法

- 方法 1 – 持續性噪音方法(短時間測量)

- ◇ 範圍—此方法在設計上是為應用於音源持續產生噪音，和測量人員與居住者對於噪音之持續性看法一致的情況。此方法包含一系列如下文所述之固定位置測量。

- ◇ 測量—測量在 A、B 和 C 三種位置上進行，並利用線性加權在 20 – 10 000 Hz 1/3 八度音頻帶中執行。在測量之前，時間加權、當量測量次數、頻率加權、和與目標值相關的頻帶，均經過檢查，並對此方法做了相對應的調整，以便與目標值做比較。

- ✓ A. – 室內中點平均測量值。此一測量為在房間中點至少 1 m³ 的空間體積中，以掃描方式進行測量。此一測量與根據 ISO 10052 和 ISO 140- 5 進行之建築聲學測量一致，測量時間持續 30 秒，麥克風距離室內地面不得少於 1 公尺。

- ✓ B. – 在居住者位置測量。由居住者指出 1 – 5 個感受到噪音苦惱的位置，如果居住者沒有指出這些位置，則由測量人員根據傢俱或裝置(椅子、床舖和桌子等)之正常使用情形，選擇測量位置。然而，測量位置始終以居住者所指出者

為優先。測量時間持續 30 秒，測量點的高度最好為 0.60 公尺、1.20 公尺或 1.55 公尺(除非居住者另有意見)，測量點與室內地面的距離不應少於 30 公分。麥克風最好在一個假想的 0.3 x 0.3 x 0.3 公尺的體積空間中掃描，而非在固定點上測量，以便將正常的頭部活動範圍納入考量。測量點應在室內格局圖中標示出來，以利反覆測量。

- ✓ C. – 角落位置測量。這些額外的測量點被用來檢查所牽動之室內模式為何，以及室內何處的 SPL 最高。然而，這些測量是選擇性的，其結果不會被用來與目標值做比較。這些測量是在距離角落 10 公分之 3-D 角落的固定點上進行(不必掃描)，角落位置的選擇應以可代表聲傳播方向為原則(3-D 室內模式)。測量位置應該選在明顯聲源之對立面，如果噪音是由戶外傳入室內，或經由工業大廳與控制室之間的鑲嵌玻璃傳入，測量位置便不應選在外牆上(見圖 5)。
- ✧ 至少應在兩個測量點上重複測量，以確保噪音的時間性差異可以被忽略，以及這種短時間測量方法可以得出可靠的結果。
- ✧ 如果連續測量的結果之間的差異“ $L_{Aeq,30s}$ ”大於 3 dBA，便應考慮採用長時間測量(方法 2)。
- ✧ 與目標值之比較—A 和 B 的測量結果，均被用來與相關的目標值做比較，目標值可能存在於國家文件、建築合約或其他文件中。

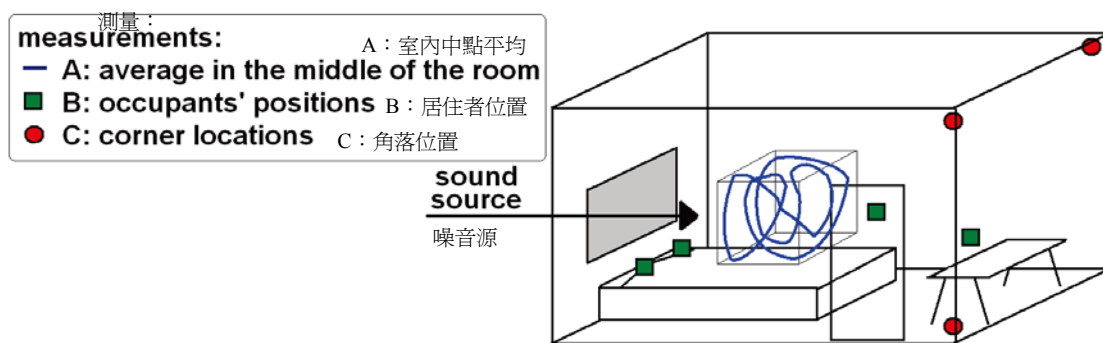


圖 5. 一個假想空間中的測量位置

- 方法 2 – 間歇性噪音方法(長時間測量)
 - ✧ 範圍—這種方法在設計上適合用於噪音源的聲功率隨著時間改變的狀況，此一方法主要是為用於住宅而設計的。測量人員到達時，噪音源可能是關著的，或者聲壓位準(SPL)隨著時間而改變；因此，在這種情況下，採用方法 1 無法得出可重複的結果，譬如連續測量之間的差異大於 3 dB。此一方法也適合用於 LFN 噪音源之存在與否模糊不清的情況。
 - ✧ 方法 2 包含一次長時間測量和一份居住者問卷。方法 2 應該用於問題個案，譬如空間使用者強烈感受到噪音苦惱，或噪音的特徵和起因不明的狀況。
 - ✧ 測量—首先執行方法 1 測量。如果有需要，進行居住者問卷之後，再將一個噪音記錄器留在一個居住者感受到噪音苦惱的位置至少 24 小時。室內必須空著，門也必須關閉。在整個測量期間，最好用膠帶將房間密封起來。
 - ✧ 運用快速時間加權，分析整個噪音記錄之聲壓位準(SPL)和 1/3 八度音頻帶。注意從錄音中觀察並聽取最高線性 SPL，以確定噪音的確來自問題聲源，而非來自其他聲源(如卡車經過的噪音)。透過繪製隨著時間的 $L_{p,fast}$ 曲線圖，可以觀察出噪音之間歇性，無論其特徵為波動性或開關性皆然。
 - ✧ 與目標值之比較—SPL 被用來與目標值做比較。間歇性噪音和聲調(+5 dB)的處罰，均根據 Moorhouse et al. 適用。
- 個案研究之測量方法應用
 - 在個案 4 的室內所執行之測量，被用來解說測量方法之應用。測量空間是一個開一扇窗戶的小臥室，其中設有一張床和幾件傢俱。預期中的噪音源是附近一個持續在操作的蒸汽鍋爐，噪音源距離臥室約 350 公尺，住宅的外牆面對蒸汽鍋爐。測量係根據方法 1 進行，所選擇之典型臥室使用代表性測量點分別為：近門處(高度 1.55 公尺)、房間中心處(高度 1.55 公尺)和床上(高度 0.60 公尺)。測量點距離牆壁至少 0.5 公尺，臥室之格局顯示於圖 6。測量人員也在住宅外面距離外牆 2 公尺處進行了測量，測得之 SPLs 和芬蘭目標值均顯示於圖 7。
 - 測量結果清楚顯示，在四個由居住者指定的位置上，有三個位置的測量值在 50 Hz 頻率上超過目標值 10 dB；然

而，在臥室中央處的測量值，卻未明顯超過目標值。我們必須找出主要在 50 Hz 釋放噪音的噪音源，並設計噪音減降措施，以便達到目標值。角落位置(C)的 SPL 測量值，顯示比居住者指定位置(B)的 SPL 測量值略高，但它們未被用來與目標值做比較，以避免產生誤解。

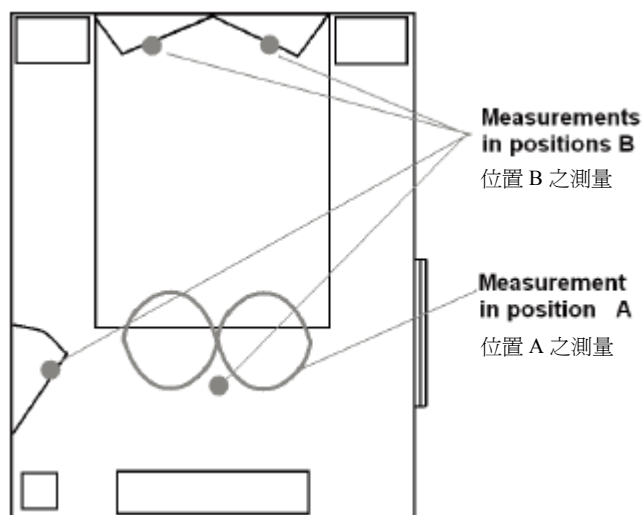


圖 6. 個案 4 之室內格局和測量點

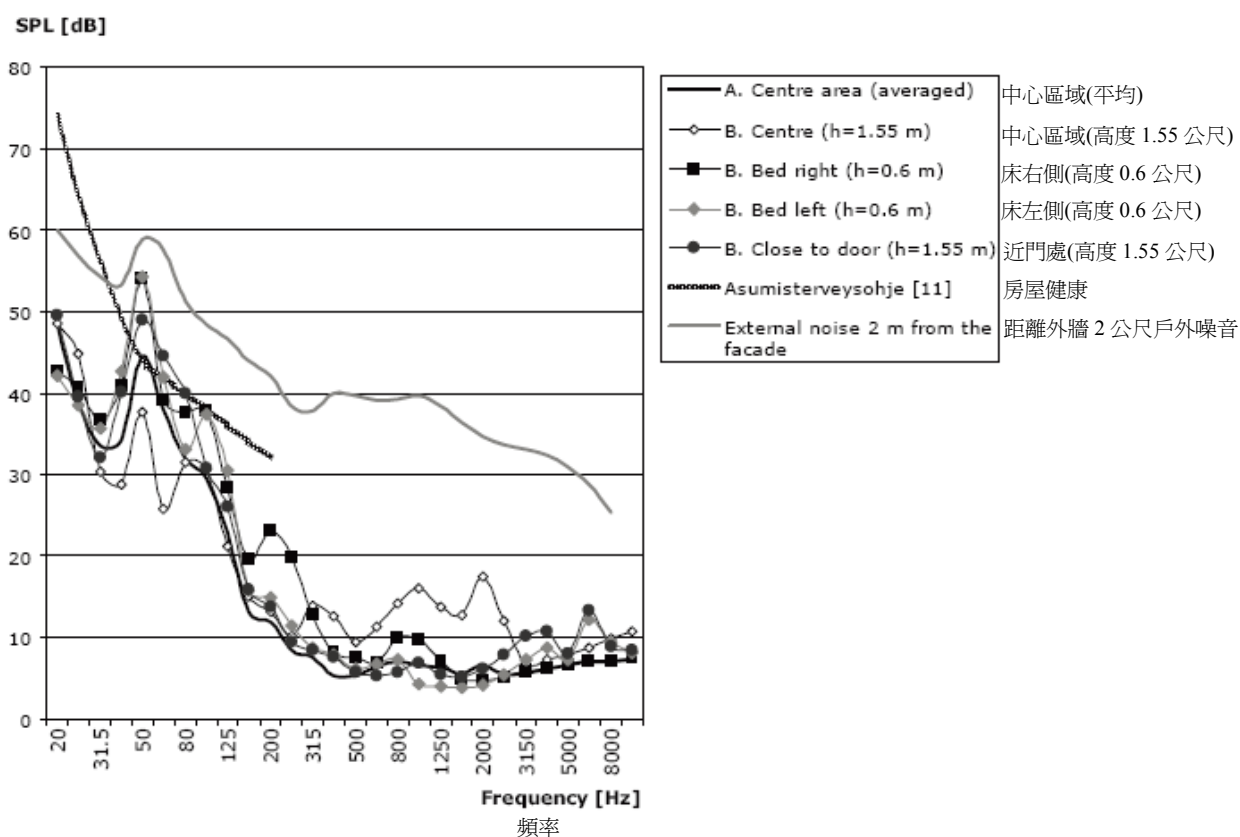


圖 7. 測得之 SPLs 與目標值之比較

(四) 99 年 6 月 9 日星期三 11:20—戶外低頻噪音苦惱風險之預測模式
(Model for predicting the annoyance risk from external low frequency noise inside a building)

在歐洲國家中，已經出現對低頻噪音(LFN)測量方法及結果解讀方法之一致性規定的需求。在本研究中，LFN 被定義為頻率在 200 Hz 以下的噪音。研究調查指出，當 LFN 的聲壓位準(SPL)超過聽覺門檻時，LFN 便會對某些個人造成苦惱，苦惱是最常被抱怨的 LFN 感知影響。苦惱之定義為個人或團體所認知或相信任何媒介或狀況，所造成足以為他們帶來不利影響之不舒服感覺。無論頻率如何，特定噪音所造成之苦惱程度很難精準地預測和評估。相同的噪音在不同因素下所引發的反應可能非常不同，這些因素包括文化、暴露當時的活動、對噪音源的態度、個人對噪音的敏感度、噪音源之可控制性、及其他個別的差異因素。從表面看來，苦惱的影響似乎不完全與超過聽覺門檻的噪音量有關；有時候，輕柔而低沈的噪音可能引發抱怨，而較高音量的噪音卻未必引起抱怨。因此，有學者建議，當 LFN 可被聽見時(音量超過聽覺門檻)，可將 LFN 視為潛在惱人噪音。

在某些狀況下，戶外噪音中可能包含低頻噪音(LFN)，其音量已達到應該運用計算方法測定其苦惱風險的程度。惟要想精確預測外牆將戶外 LFN 隔絕於室內居住者所在位置之隔音效果非常困難，因為有兩個主要的技術問題：聲壓位準(SPL)在室內之大量空間差異，和實驗室測試之聲衰減指數結果的高度不確定性；不同的論文作者甚至提出相互矛盾的室內 LFN 測量方法，各國所訂定的室內 LFN 目標值不一樣(見圖 8)，對於測量結果的解讀也有爭議。此外，各個實驗室根據 ISO 140-3 測量 100 Hz 以下聲衰減指數 R 的差異也很大；因此，在實際音學諮詢過程中，決定建築物外牆之隔音要求時，通常都會忽略 100 Hz 以下的頻率不計。

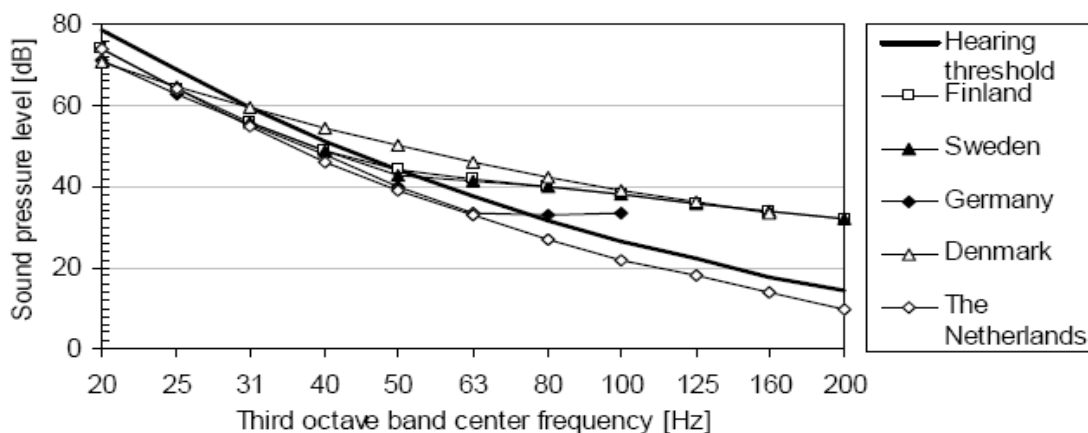


圖 8. 某些歐洲國家所訂定之最高可容許 LFN 目標值。
在芬蘭，目標值關係到 1 小時當量 SPL， $L_p, L_{eq,1h}$

道路交通噪音(典型的戶外噪音源)可能造成嚴重的室內噪音問題；如果已知車輛數及車速，便可利用既有模型預測道路交通噪音之 A-加權噪音當量。這些模型可能包含氣象、幾何學、地形、和影響聲傳播之障礙物等因素，可惜的是，這些模型並未將 LFN 正確地納入考量。此外，輸入變數之高度不確定性也可能妨礙預測之精確性；因此，預測結果應該透過與測量之交通噪音量的比較來驗證。然而，測量交通噪音通常極為費時，因為交通噪音的變化取決於多項因素，包括車輛型式、交通流量、測量時間、背景噪音和測量地點。已有研究報告提出針對未來更詳盡道路交通噪音之預測模型，這個模型也將 LFN 納入考量，但預測仍具有高度不確定性，因為輸入參數太多樣。因此，未經現場測量之交通噪音量驗證的預測，其實是無價值的。

要評估 LFN 抱怨的風險，必須能夠預測室內之 SPL 的範圍。此一範圍應包括測量之不確定性和 SPL 因室內駐波而產生之變化。如果預測之 SPL 超過目標值，則表示明顯存在噪音問題。然而，在某些狀況下，儘管 A-加權 SPL 並未超過所規定之目標值，但由於 LFN 惱人，仍然會出現噪音抱怨。本研究之目的在於提出一套可預測戶外聲源造成室內 SPL 之預期範圍的工程模型，這套利用道路交通噪音做示範的模型可被用於風險評估。

本研究的預測事先假定以下輸入數據：外牆前面的 SPL、外牆之聲衰減指數 R、和房間之吸聲面積。此模型之新穎之處在於有將輸入數據之不確定性納入考量。這套模型預測平均室內 SPL，及不同的不確定性來源可能對其造成之變化；此外，其得出之結果很容易檢驗，也使得我們可以對 LFN 所造成的苦惱進行客觀的風險評估。這套模型包含 20 – 5000 Hz 之 1/3 八音度頻帶，這套模型係利用道路交通噪音排放做示範。

(五) 99 年 6 月 9 日星期三 11：40—低頻噪音下住宅之隔音(Sound insulation of dwellings at low frequencies)

在丹麥能源署所主持的「大型風力發電機之低頻噪音」研究計畫下，一個由 DELTA 公司管理團隊指揮的研究小組，針對典型丹麥式住宅，進行了一系列低頻隔音測量(室內與室外之音量差)；而這些測量值配合風力發電機之噪音排放測量值和噪音傳播計算值，被用來評估風力發電機所產生之低頻噪音對鄰近住宅之可能衝擊。

隔音測量值係利用不同的測量方法取得，其中一種是利用“3D 測量法”在距離房間 3-D 角(牆壁與天花板或地板接合處)之最短可能距離(0,01 – 0,02 公尺)的四個位置進行室內噪音測量。測量發

現，低頻範圍中頻率較高的一端，在 3-D 角上的噪音量，比距離 3-D 角稍遠區域的噪音量高出約 10 dB。另一種測量方法是在房間內居住者平常的活動位置，進行室內噪音測量。

「大型風力發電機之低頻噪音」研究計畫之隔音測量值係在五棟住宅內的九個房間中(五個起居室和四個較小房間(典型的臥室))測得，所選擇的五棟住宅代表農村地區暴露於風力發電機噪音的典型住宅；其中一棟住宅為傳統農家，其餘四棟則為現代化寓所；其中某些寓所設有大型景觀窗，有些則設有類似典型夏季別墅的小型外牆結構。

在距離住宅一定距離處(至少 5 公尺)，設置一個大型擴音器，該擴音器以約 45° 的聲入射角，發出寬頻粉紅噪音，其頻率範圍限制在 250 Hz 以下。擴音器噪音並經過均等化，以補償擴音器之特性，並於室外及室內噪音測量同時進行；室外測量時，麥克風直接置於外牆上，室內測量則是在每個房間中的多個位置進行；之後再關閉擴音器，在相同的位置測量背景噪音。所有測量結果均針對背景噪音做了修正，當擴音器的信號高於背景噪音 6 dB 以下時，噪音修正只有 1.3 dB，如此可能導致室內噪音的高估，進而造成室內/外噪音差異(隔音)的低估，通常僅在 8 – 10 Hz 頻帶範圍內，會以這種方式進行噪音修正，但有時在 12.5 Hz 上，也會做噪音修正。如果擴音器開/關之間的噪音差異未達 1.3 dB，結果便被放棄。在非常接近外牆處測得之室外噪音量被減去 6 dB，以表示入射聲的音量。

隔音便是以室內/外音量的差異來表示，即室外入射聲的音量與室內 3 – 4 個位置之平均音量的差異(每個測得之室內音量均依前述方法做過背景噪音修正)，此一做法的用意並非為了正常化或修正所測量房間的聲學條件。

考慮不同評估方法的需求，研究小組在每個房間中採取多個室內測量位置；除了前所建議的距離房間 3-D 角最短可能距離的四個位置以外，研究小組另外選了五個位置，以利其他評估方法之測量，譬如依照國際標準外牆隔音測量法和丹麥政府所建議之低頻噪音測量法；其中兩個位置接近房間的角落(0.5 – 1 公尺)，另外三個位置則是選在具代表性的居住者活動空間。

根據所建議之測量程序，三個測量位置(包括靠近房間角落的位置)的平均音量，即代表房間內的噪音量；五個測量位置可以九種不同的方式加以安排，以符合此一建議；其中三種方式利用兩個角落位置，但僅利用一個距離牆壁比較遠的位置。

在以下圖 9 和圖 10 中，所有結果都是兩個房間的測量結果。如圖所示，標示為“LFM1”至“LFM3”的曲線，利用兩個接近角落

的位置，而標示為“LFM4”到“LFM9”的曲線，則利用一個接近角落的位置和兩個選在代表性區域中的位置；“3D”測量則是四個麥克風置於與房間角落最短可能距離位置的測量。

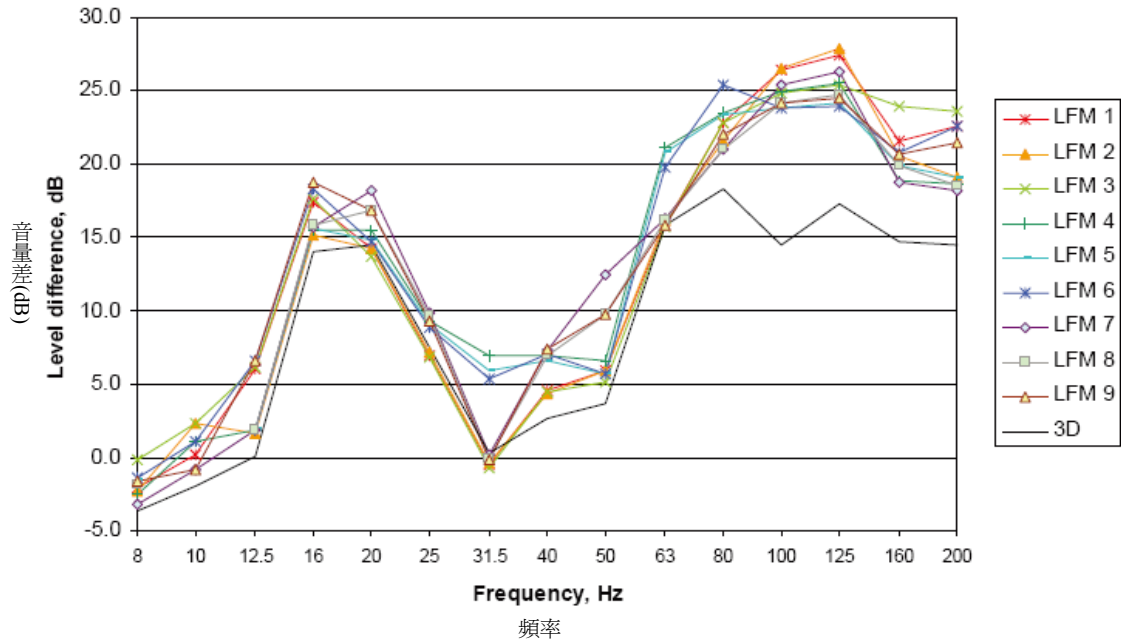


圖 9. 從一間起居室(“Værløse – stue”)測量音量差之 10 種不同結果

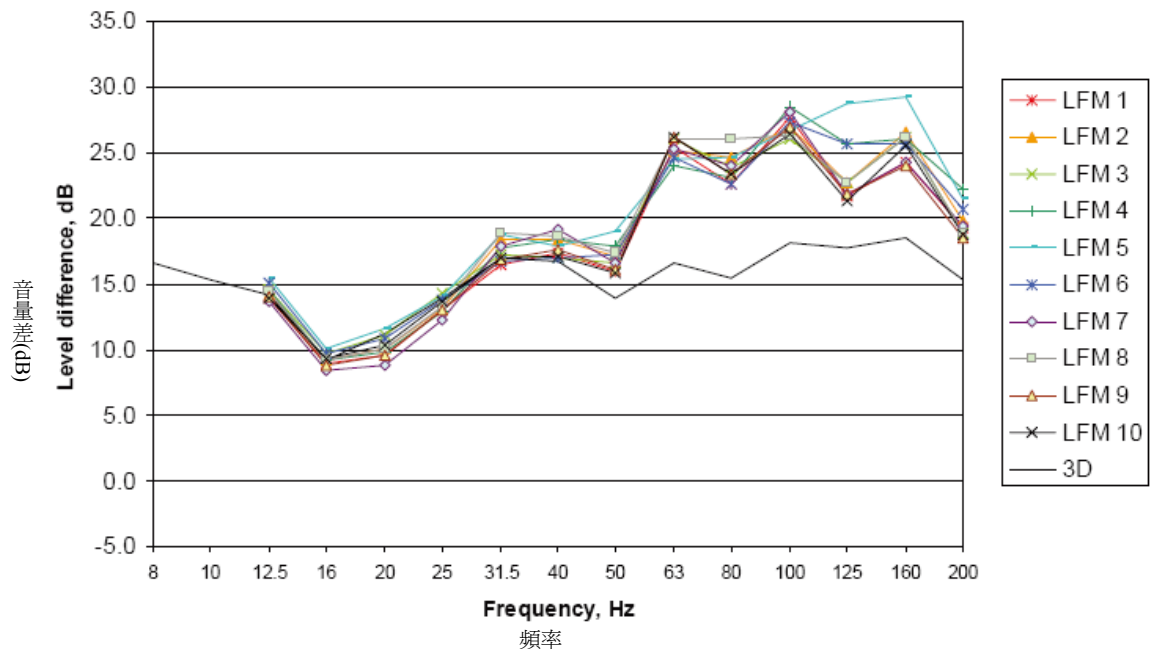


圖 10. 從一個房間(“Tulstrup værelse”)測量音量差之 11 種不同結果。標示為“LFM10”的音量差曲線是僅利用接近角落的兩個位置所測得。

如圖所示，所有測量結果在最低頻處(約 50 Hz)大致上是相同的。在較高頻處，利用 3-D 角測量的音量差，顯然比其他位置所測得的音量差低得多。這是因為在“3D 位置”測得的平均音量通常為 5 – 7 dB，偶爾高至 10 dB，比其他位置測得的平均音量都來得高。另一方面，三個測量位置九種不同安排之測量結果，在整個頻率範圍內，相互間均顯示相當一致。利用兩個接近角落之麥克風位置和一個距離牆壁較遠位置測得的三個不同平均音量(LFM 1 – LFM 3)，與其他位置安排之測量結果沒有任何顯著偏離。

根據原始報告，不太可能在測得的低頻音量差與住宅之建築物聲學條件(尤其是外牆的型式和窗戶的型式及大小)之間，做出具有關聯性的結論。具有輕型外牆結構和大型窗戶之住宅的測量結果，與具有小型窗戶之大型住宅的測量結果，並沒有顯著的偏離。因此，研究小組選擇將這些住宅一律視為典型的丹麥住宅，並對這些所有的數據進行統計學上的分析。

在目前的關聯中，從每個住宅測得之三個不同平均音量差均被計算出來：一個是“3D 測量程序”、一個是利用兩個接近角落位置和一個補充位置之測量程序之一(LFM 1)、最後一個是利用一個接近角落位置和兩個居住者典型活動位置之測量程序之一(LFM 5)；這三個測量程序之平均音量差顯示於圖 11，從圖中可以明顯看出，在 63 Hz 以上頻帶，利用“3D 位置”測得之音量差，比其他兩種測量程序測得之音量差低 5 – 10 dB。利用 LFM 1 和 LFM5 測量程序之測量結果則非常接近(相差通常在 1 dB 以內)，只有在 31.5 – 50 Hz 頻率範圍間，兩者相差達到 3 dB。其可能的原因是，在這個頻率範圍內，接近角落的音量比房間內其他位置的音量來得高，因此，利用兩個接近角落位置的 LFM 1 程序所測得的音量，略高於僅利用一個接近角落之程序的測得音量。

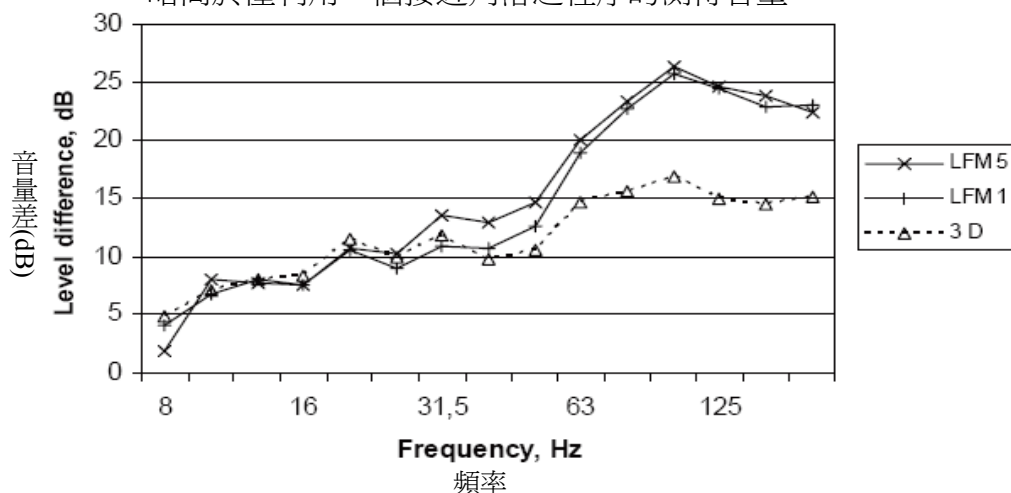


圖 11. 全部九個房間之平均音量差比較 – 分別利用測量程序“3D”、“LFM 1”和“LFM 5”

研究小組發現，當採用可比較之測量程序時，近來和稍早在外牆測得之低頻音量差相當一致。因此，在未來的研究中，有可能合併運用兩次調查所測得之平均音量差。

然而，這些數據與文獻中最可靠的數據卻不甚一致，造成此一現象的原因，前文已有說明和討論。為了便於比較，以下比較中的數據均已減去 6 dB 加以修正；在 63 Hz 以上的頻率範圍中，利用“3D 位置”測得之音量差，較利用丹麥環保署所建議位置測得之音量差低 5 – 10 dB。

兩項丹麥計畫測得之數據均經過統計學處理，預期 80 – 90% 典型丹麥住宅均可能超過之音量差($\Delta L\sigma$)已經測定，這些音量差顯示於表 1。在圖 12 中，這些數據和根據荷蘭調查結果計算得出之相對應數據($\Delta L\sigma$) (均經過 -6 dB 修正)，以及根據丹麥法定命令有關高速渡船低頻噪音計算程序得出之 1/1 八音度頻帶數據，均顯示於圖中，以利比較。如圖所示，無論丹麥或是荷蘭的原始數據(經 -6 dB 修正)，均與新建立的 $\Delta L\sigma$ 相當。

表 1. 預期 80 – 90% 典型丹麥住宅均可能超過之音量差(dB)

頻率 Hz	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200
$\Delta L\sigma$	2,4	1,2	3,2	2,1	3,6	4,6	6,7	7,6	10,3	14,2	17,5	18,4	17,5	18,6	22,4

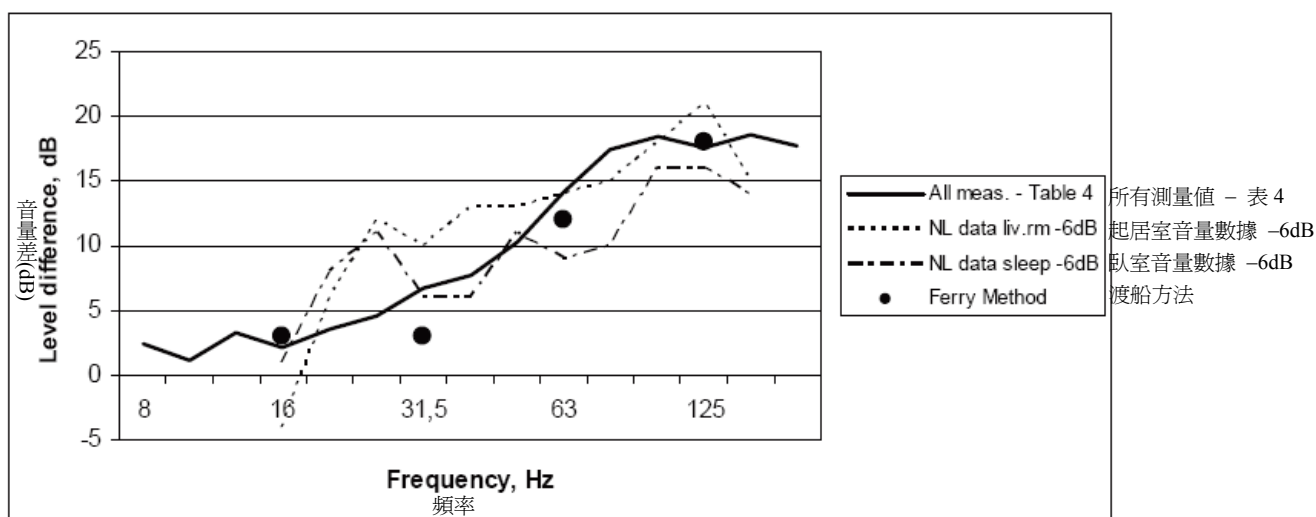


圖 12. 預期可能被兩項丹麥計畫測得之 80 - 90 % 數據($\Delta L\sigma$)超過之音量差。為了便於比較，根據荷蘭調查結果計算得出之類似數據($\Delta L\sigma$) (均經過 -6 dB 修正)，和根據所建議之丹麥高速渡船低頻噪音計算程序得出之 1/1 八音度頻帶數據，均顯示於圖中。

假如可以測量或計算出住宅外部的噪音量，則低頻環境中住宅的隔音數據，可被應用於評估戶外噪音源的低頻噪音。低頻噪音的評估是以室內噪音量為基礎，如果噪音純粹為空傳噪音，此一方法將非常有效。如果噪音是來自船舶、飛機或風力發電機，這種狀況便是可預期的。由於 80 – 90% 的丹麥住宅均預期具有較高的隔音效果，因此這些數據代表典型的丹麥式住宅，並表示出低頻部分的隔音狀況。計算室內低頻噪音時之不確定性，取決於實際現場(主要為房屋之類型及特徵)與兩項丹麥計畫所調查住宅之間條件的一致性。

某些工業噪音源也會產生振動，而在鄰近這些噪音源的住宅中，振動可能傳遞至建築物的某些部分，並產生可聽見的結構傳遞噪音。不平坦路面上的鐵路交通和道路交通，也經常產生足以造成結構傳遞噪音的振動。如果室內噪音的主要來源可能是結構傳遞噪音，那麼以戶外噪音做為室內噪音計算基礎的方法，將得出錯誤的結果。在這種情況下，室內噪音可能被大幅低估。

(六) 99 年 6 月 9 日星期三 13:00—低頻噪音對人體影響之測定

(Determining the effects of low frequency noise on humans)

為舒解商用機場跑道之擁塞，美國國家航太總署(NASA)正在發展一種大型民用傾轉螺旋槳飛機(LCTR)。LCTR 新概念中的螺旋槳是傳統螺旋槳飛機螺旋槳的兩倍(詳如圖 13 所示)，這些設計預期將產生較高的低頻噪音，其螺旋槳葉片風切基頻範圍為 9~12 Hz；而此一頻帶遠低於大多數現役螺旋槳飛機，也比美國聯邦航空局(FAA)為噪音檢定所訂定之公制最低頻帶低得多。

本研究主要探討預期噪音及振動暴露與低頻噪音(5~50 Hz)對人體影響之間的關係，研究計畫包括一系列實驗室實驗，針對重型螺旋槳飛機運作所造成之低頻噪音，探討其對機組人員、商業乘客及住宅社區之影響，期能建立劑量-反應關係，本研究的整體序列圖 14 所示。



圖 13. 大型民用傾轉螺旋槳飛機之設計概念

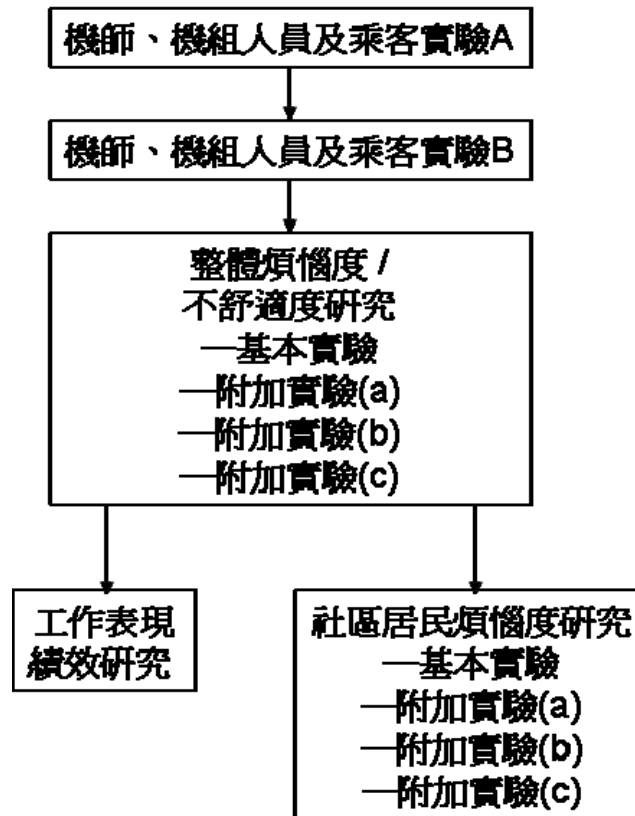


圖 14. 研究流程

此一重型螺旋槳飛機所產生低頻噪音之衝擊，將由觀點及考量差異很大的族群人士來體驗，譬如，生活於航道下方的一般大眾(住宅社區)、機組人員、商業乘客(民航應用)和部隊(軍事運輸應用)。生活於航道下方的一般大眾(住宅社區)暴露於此等噪音下，具有苦惱和睡眠干擾的心理效應；機組人員暴露於此等噪音下，其所造成的生理效應，隨著時間可能演變為工作表現下降，進而涉及安全性及人為因素的顧慮；“不愉快的”搭乘經驗可能成為航空運輸產品是否具商業可行性之最重要乘客考量；而如果該型飛機被用做軍用部隊運輸機，可能衍生出更值得重視的問題。在飛機設計階段，所有可能的噪音暴露情況都必須納入考量，以使得內部及外部衝擊減至最小。

實驗 A 係為一個藉由不同強度和頻率的聲音刺激，來評估一個敏感的主觀煩惱度反應測試；在測試過程中，使用 11 點的數值規模【從 0（標記“不是”）到 10（標有“極”）】來說明每個聲音刺激對受測者所造成的煩惱度。

實驗 B 將提供個人受到各式低頻的聲音和振動組合所得有關煩擾、不適的初始數據，以及將說明這兩者之間的互動刺激是否有顯著影響。在測試過程中，每個測試組合將使用單獨的數值尺

度，提供說明受測者結合煩惱 /不適及不舒服的震動的煩惱度，這項試驗測試將有助於確定整體的煩惱度/不適度測試是否需要包括振動刺激。

整體煩惱度/不適度的研究目的是為了瞭解在螺旋槳低頻的諧波和噪音/振動聯合暴露下，有關乘客和機組人員煩惱度/不適度的劑量反應關係；本實驗研究旨在收集低頻聲音和振動實驗條件下(測試設備)，個人主觀心理反應的基本資料及數據，以確認中村和 Tokita(1981年)所建議低頻噪音的感覺閾值為煩人的，而這些受測者皆為自願的。

工作表現績效研究的目的是為了瞭解在螺旋槳飛機中工作的機師及機組人員，其在長期暴露於低頻聲音和振動變化下的工作表現。

社區居民煩惱度的研究旨在瞭解居住於飛機航道下方，暴露於螺旋槳所產生的低頻聲音與處於室內的居民煩惱度其相關劑量反應關係；這個實驗研究旨在收集在低頻聲音的實驗條件下(測試設備)，個人主觀心理反應的基本資料。

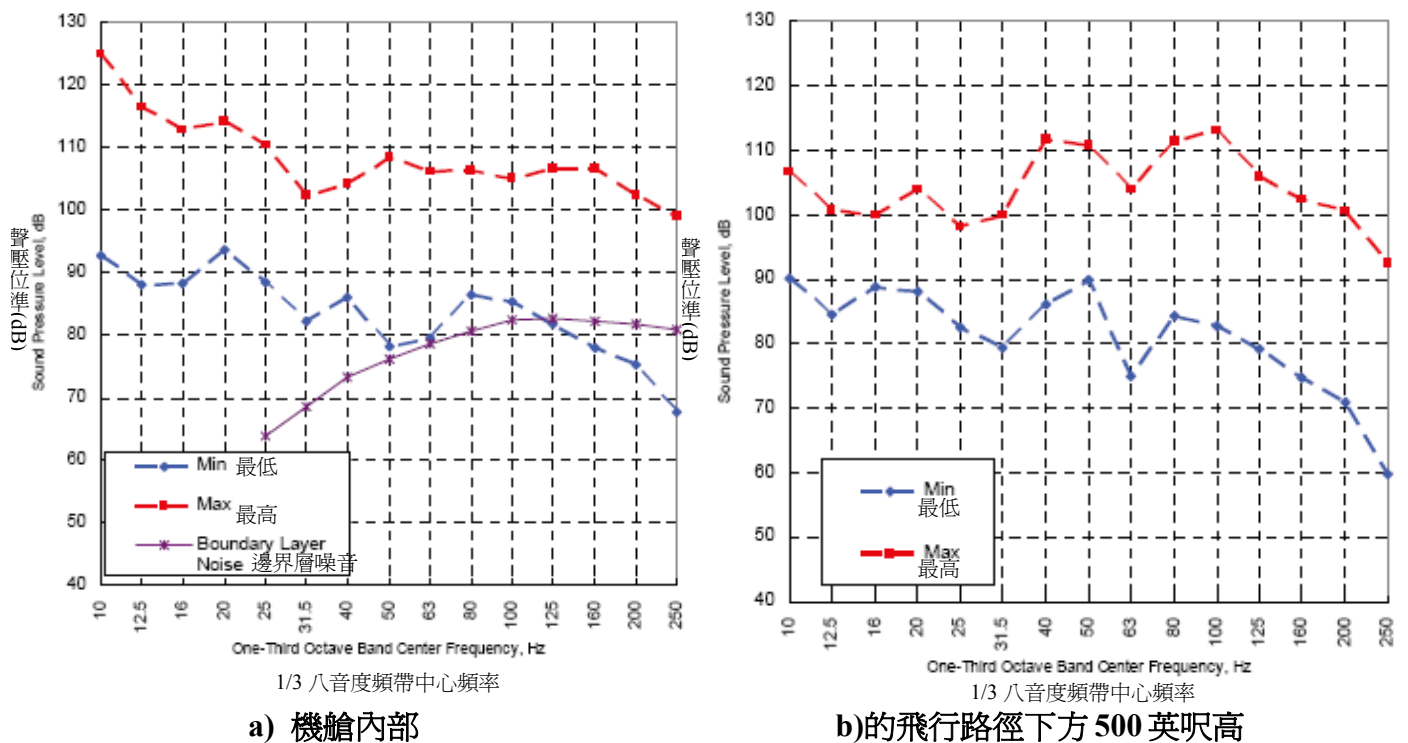
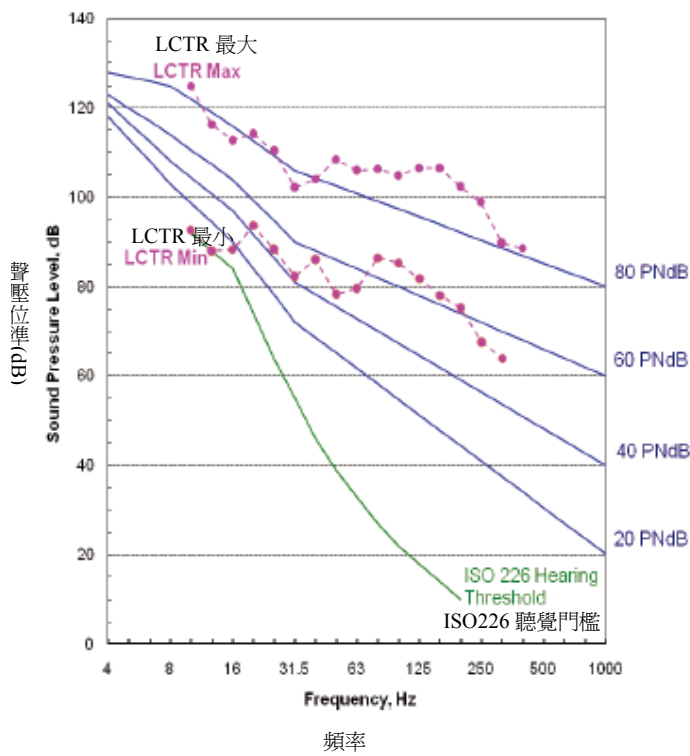
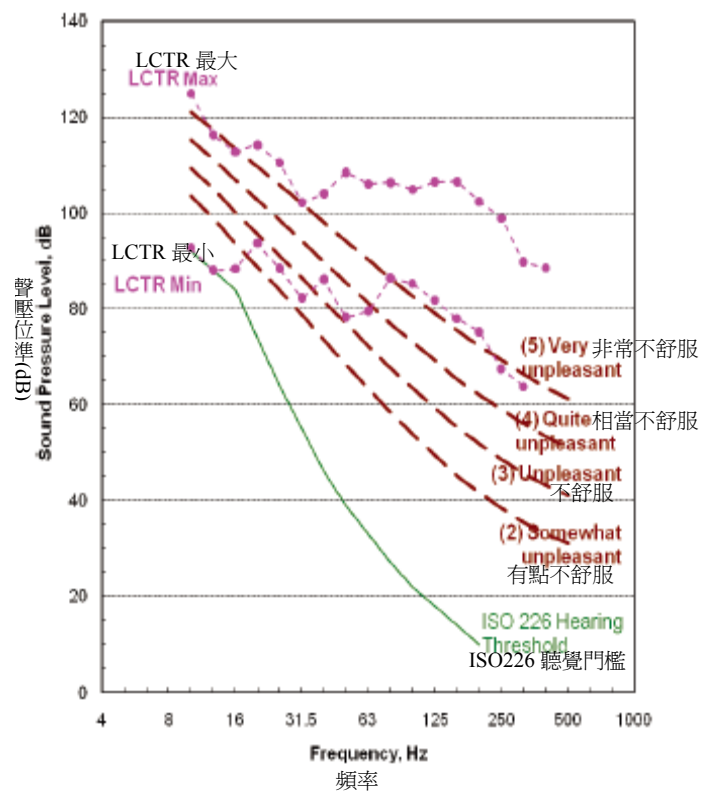


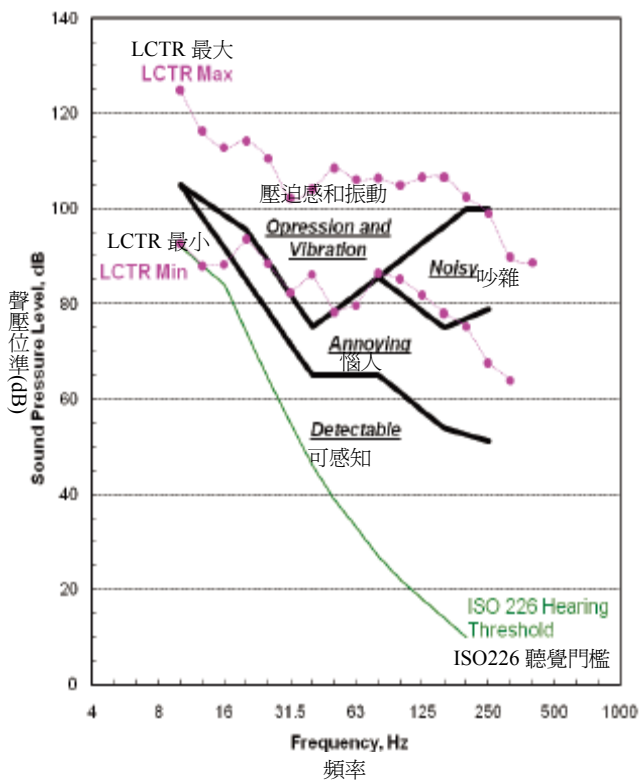
圖 15. 估計之最小及最大 LCTR 噪音量



a)



b)



c)

圖 16. LCTR 內部預估音量(圓點虛線)與以下三條評估線之比較：a) 等干擾線(Møller, 1987)；b) 不愉快程度(Inukai et al., 2000)；c) 感知門檻(Nakamura and Tokita, 1981；如 Fidell et al., 2000 所述)

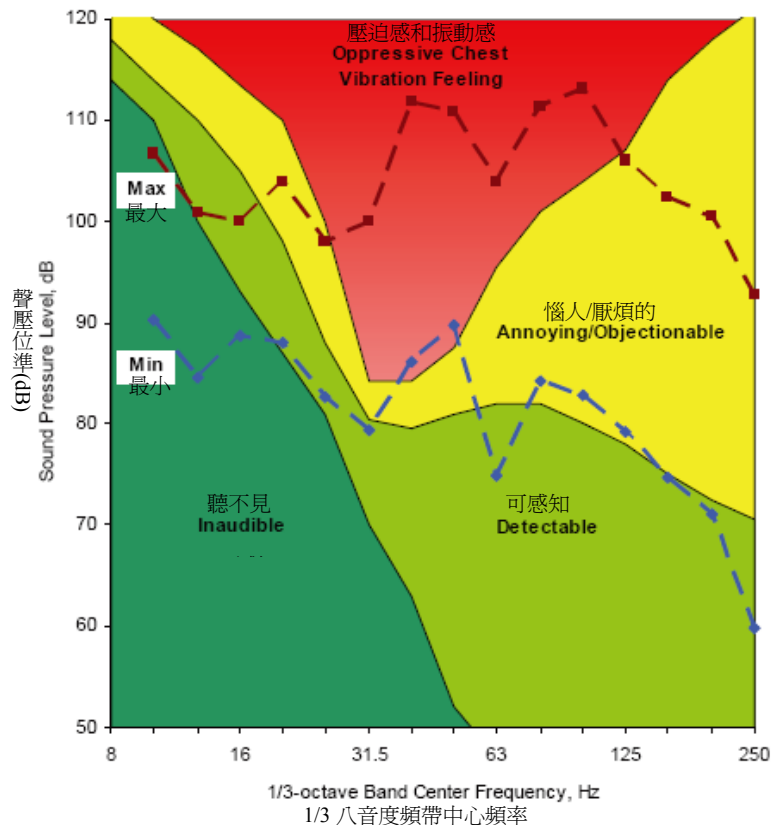


圖 17. 航道下方 500 呎住宅之估計 LCTR 噪音量與預期之室內對室外噪音反應之比較(Sutherland et al. 1983, Sharp et al. 2006)。

由新型重型螺旋槳飛機之噪音特徵評估顯示，這類型飛機所產生之低頻噪音和振動，可能對機組人員、乘客及航道下方之居民，引發壓迫性振動感和高度苦惱。然而，學界對這些複雜的人體效應並未充分瞭解，因此需要進一步研究。

本研究根據對既有研究之廣泛檢討，提出一項未來之研究計畫，以探討人體對暴露於 5~50 Hz 頻帶內之低頻及振動，可能產生之心理和行為反應優先；此外，並建議一系列實驗室實驗，以建立在預期重型螺旋槳飛機噪音衝擊下，有關乘客苦惱/不適、機組人員工作表現、及社區苦惱之可靠劑量-反應關係。

本研究所建議之研究計畫將根據既有或專為本計畫建構之實驗設施的特定屬性、實驗對象之可利用性、及各相關研究之其他特色，提供一個架構，以從事進一步發展和細節研究。本計畫之研究結果可望增進學界在心理及行為聲學領域之科學知識，並有助於未來重型旋翼機運作之環境及職場噪音評估。

(七) 99 年 6 月 9 日星期三 13:20—低頻帶波動噪音對心理的影響

(Psychological Influence from Fluctuant Low Frequency Bandwidth Sound)

風力發電機和高速列車進出隧道等狀況所造成的低頻噪音(LFN)，在日本已經成為社會問題。在現場所記錄之噪音包括 LFN、諧波噪音和波動噪音。雖然許多受害者抱怨的只是 LFN，而非較高頻率的噪音，但在某些狀況下，LFN 的音量並未超過門檻音量。因此，本研究懷疑許多受害者將諧波噪音或波動噪音一律歸類為“LFN”。因此，本研究不願輕易反駁受害者對 LFN 的抱怨，因為很可能他們抱怨的真正致因並非 LFN，而是諧波噪音或拍打噪音。所以，本研究評估了穩定或拍打低頻帶噪音(包括諧波噪音)對人類的心理影響。本研究選擇 15 位聽力正常的大學生做為實驗對象，讓他們接受門檻音量、可容許音量、和心理反應測驗。

本研究針對實驗對象進行了噪音暴露實驗，在實驗中，本研究以原始波動性低頻帶噪音，做為實驗對象之暴露噪音，並評估這些噪音對他們心理反應的影響。暴露噪音包含穩定性噪音和以單頻正弦波及三角波(包含諧波)為基礎之 0.5 秒、1.0 秒、2.0 秒和 5.0 秒周期波動性噪音；噪音量高於門檻音量+0dB、+5dB 和 +10dB；噪音暴露時間為 90 秒，其實驗結果如下：

- 三角形波(包括諧波噪音)的門檻音量較低，且達到門檻時的不舒服感較高。當一個人專注於某件事時，便會不自覺地接受三角形波，直到達到相對較高的音量。當周期為 5 秒時，波動噪音的影響較大，周期為 2 秒時，其影響則較小。
- 諧波噪音和快速波動噪音(周期為 0.5 秒或 1 秒)，在低音量時會對心理反應造成影響。另一方面，隨著音量的升高，其影響減小。
- 如果噪音量接近門檻，我們必須注意諧波噪音或波動的存在。

(八) 99 年 6 月 9 日星期三 13:40—風力發電機運作對附近住宅之影響：

2007 年提報個案後續報告(Family with wind turbines in close proximity to home: follow-up of the case presented in 2007)

在 2007 年法國里昂的「第二屆國際風力渦輪機噪音會議」上，已發表一篇有關「風力發電機運作對附近住宅之影響」，本文報告為此一個案之後續發展。R 氏農場暴露於附近(距離 300-700 公尺)四座風力渦輪機(WT)所產生之低頻噪音(LFN)下，經研究觀察已證明開始出現類似振動音響病(VAD)之低頻噪音(<500 Hz)誘發病變。

屋主 R 先生的妻子和兩名子女已搬離，而 R 先生必須留在原處照料純種盧西塔尼西馬(Lusitanian)和為鬥牛場訓練及飼養的公牛；個案中，除了 R 先生本身的健康持續惡化外，他的財務狀況也因為一歲幼馬出現的症狀而發生嚴重問題。在 2000-2006 年間，R 先生的馬場繁殖飼養了 13 匹健康的純種盧西塔尼西馬，這些在 R 氏馬場出生飼養的小馬，在 2007 年以後發展出不對稱彎曲肢體畸形。個案中 R 氏農場週邊之風力渦輪機是從 2006 年 11 月開始運作的，而在這段期間，該地區沒有引進任何其他變化(建築施工或工業設施等)。

研究人員針對缺陷馬匹的腱子組織所做的化驗，顯示出低頻噪音誘發生物反應之典型特徵：膠原蛋白在無發炎情況下增生，導致血管壁變厚。



圖 18. R 先生住宅鳥瞰照片(左上方虛線方格內)。附近有四座風力渦輪機(橢圓圈內)



圖 19. 其中兩座風力渦輪機(箭頭所指處)距離 R 先生住宅分別約 322 公尺和 642 公尺。

圖 20 中顯示了從 R 先生住宅內測得之 LFN 實例(Alves-Pereira & Castelo Branco 2007)。

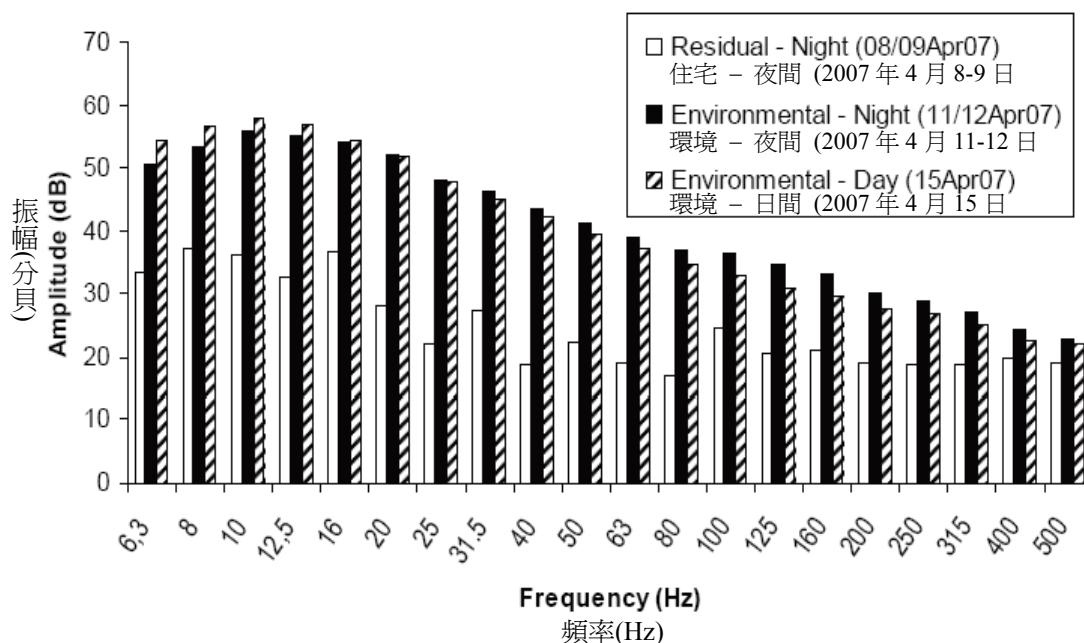


圖 20. 在相同風速條件下(5.4 Km/h)，從 R 先生住宅主臥室測得之住宅測定(無 WT 葉片運轉)及環境測定(有 WT 葉片運轉)1/3 八音度頻帶室內低頻噪音(ILFN)(線性分貝)比較圖。

導致馬匹前肢深末梢屈肌腱錯位的原因固然很多，但 R 氏農場 2007 年以前出生的 13 匹幼馬中，沒有任何一匹發展出馬匹彎曲性肢變形症(EFLD)；而 2007 年以後在 R 氏農場出生並飼養的 3 匹幼馬，全部都罹患 EFLD。此外，R 先生向著名的純種盧西塔尼西馬育種業者 Herdade das Silveiras 購買的幼馬，出生才 15 天便被送到 R 氏農場，幾個月後便開始出現 EFLD 的徵兆(個案 2)。以上種種意味著在 2007 年以前 R 氏農場裡並未存在造成 EFLD 的病因，它們是 2007 年以後才開始造成 EFLD 的。現階段在 R 氏農場中另有三匹 2010 年出生的幼馬，由於還太小，目前尚未顯現任何可見的 EFLD 徵兆；另有三匹牝馬目前正在懷孕。

個案 1 之馬匹在動過手術之後，繼續留在戶外的牧場；個案 2 之馬匹則未曾在戶外牧場活動。R 氏農場有一個封閉式的騎馬場，毗連著馬棚區，而個案 2 之馬匹便單獨在這個封閉的空間中活動。後來，個案 1 未處理的肢體也罹患了 EFLD，個案 2 則沒有。如此看來，留在封閉空間，對於 EFLD 的發生似乎有一定的影響。

馬匹前肢 EFLD 的不對稱發展，在多數 EFLD 形式中均很常

見。造成此一現象的最可能原因是，馬匹在經歷某種程度的疼痛或不適時，施加於前肢的負荷略為不均。這種左右不對稱的現象，與 EFLD 的嚴重程度有關，因為在大多數後天罹患的 EFLD 病例中，EFLD 的發生都是左右對稱的(Auer and Stick 2006)。馬匹前肢的其他疾病，也可能先發生在一邊前肢，稍後才影響另一邊前肢(譬如舟狀骨病)。

有鑑於 R 氏農場附近架設 WT 之前及之後的馬匹彎曲畸形模式，研究小組針對 R 先生所飼養的 3 匹幼馬和購自其他育種業者的 1 匹幼馬，進行了韌帶組織切片化驗，化驗結果如下：

- 在 R 氏農場出生及飼養的 3 匹幼馬有血管壁增厚現象(個案 1、4、5)。
- 出生 15 天便被送至 R 氏農場的幼馬有血管壁增厚現象(個案 2)。
- 年齡與個案 2 相當但購自另一家育種業者的幼馬，無血管壁增厚現象。

這些在無發炎情況下之形態變化現象，與過去 30 年來在解剖、切片材料(取自 LFN 暴露馬匹)和組織碎片(取自 LFN 暴露實驗動物)中的觀察一致(Alves-Pereira & Castelo Branco 2007)。這種特定型態的組織重組現象(tissue reorganization)，是低頻噪音誘發反應的典型特徵。

從 2000 年至今，R 氏農場所在地區的唯一重大改變就只有風力渦輪機架設。過去 10 年以來，R 氏農場鄰近地區沒有引進任何油管、大型工業廠房、公路、鐵路、交通樞紐或採礦等活動。事實上，該地區已被正式規劃為農業區。在如此情況下，懷疑 LFN 在此一形態 EFLD 之肇因中扮演一定角色，應屬合情合理。

(九) 99 年 6 月 9 日星期三 14:00—低頻噪音對人腦造成的負擔(Low Frequency Noise – Strain on the Brain)

低頻噪音(LFN)經常以多種但直接的方式，影響人們的心理健康，譬如，LFN 往往造成人們疲倦、焦躁和挫折，也會減弱人們的注意力和影響睡眠。許多研究報告均提供有關這些方面的觀察結果，如果噪音始終停留在 LFN 範圍且頻繁波動，LFN 將顯得更為惱人和具有壓迫感，這或許是瞭解為何有時低頻噪音會如此惱人的關鍵。

在 10 – 100 Hz 頻率範圍內之低頻噪音(LFN)可能為受害者帶來異常的苦惱和壓迫感，即使音量僅剛剛超過聽覺門檻亦然，這種特殊的衝擊似乎有著心理原因；因此，受害者經常報告遭受挫折、不易入睡和焦躁等苦惱。我們往往已經很難分辨，是這些心

理問題導致人們對 LFN 高度敏感，或者當初就是 LFN 造成了這些問題。一項針對 LFN 抱怨的廣泛研究顯示，在某些狀況下，所報告的感受與測量的 LFN 之間有著強烈的關聯性；但在其他狀況下，兩者之間只有很弱的關聯性；甚至在很少見的狀況下，根本測量不到 LFN。然而，研究報告中所提及的許多狀況，或自身經驗所得知的狀況，都有一些共同點：多數受害者都是住在相對安靜的區域，年長者多於年輕人，且婦女多於男士。為什麼會這樣呢？是巧合？還是條件下的必然？目前都很難說。然而，居住於安靜區域的特徵，可能有具體的背景。過去相關研究中提出了一種說法：遭受源自室內之 LFN 所苦的人們，情願開著窗戶睡覺，不在乎室外的交通噪音，或者正是希望藉由交通噪音來降低 LFN 所帶來的苦惱。Leventhall 的研究報告也提出同一方向的論點，根據該報告所引述的一項研究，斜率較陡的 LFN 所造成之惱人程度大於斜率較平的 LFN。此一觀察與以下事實不謀而合：有關 LFN 的規定為了確定關聯性，假設聲功率集中在低頻範圍內。在德國，此測量值即為 L_{Ceq} 與 L_{Aeq} 之間的差異，且此差異至少必須有 20 dB。平斜率無法產生這樣的數值，這點是正確的，但也有一個較高的頻率分量可以做到這點，但那可能是不正確的，因為兩者的情況無法比較。缺乏進一步有關 LFN 為何造成如此負面影響之實際致因的知識，我們很難找出可以充分定義 LFN 防護之正確測量方法。我們認為某些現行測量及噪音控制方法，最終很可能會面臨挑戰，因為某些測量導致在低頻範圍內之問題轉移，也有一些噪音防護方法本身便會產生 LFN。

本研究的假設是，根據不同斜率 LFN 造成之不同程度苦惱，即可瞭解 LFN 特別影響之關鍵所在。在第一部分，本研究進行聽覺測驗，將刺激源納入不同斜率的 LFN。在第二部分，某些刺激源被用做一個聽覺模型的輸入，該聽覺模型模仿聽神經纖維的作用過程，其中棘波時機顯示出明顯不同的反應：在陡斜率刺激下，可觀察到某種同步性。現在問題來了：何種影響與腦作用過程具有同步性？同步性在癲癇研究中扮演著重要角色。第三部分則針對平行性，做了說明和討論。此一平行性不但在同步現象中有觀察到，在受害者所報告的相關症狀中，也有觀察到此一現象，這些症狀包括焦慮、睡眠障礙、注意力不集中、和記憶力衰退。

研究結果顯示，聲功率集中在 100 Hz 以下之陡斜率 LFN，所造成之壓迫感大於不具備這些特徵之 LFN。其原因為透過模擬所觀察到的某種同步性，此一同步性可能干擾腦作用過程。因此，LFN 可能直接危及心理健康。然而，想要瞭解生理機能與心理影響之間的關聯性，還需要更多進一步的研究。

本研究還建議思考一個問題：某些措施、測量方法和噪音防制方法，其所產生的 LFN 是否反而超過其所要防制的 LFN。譬如，A-加權導致問題轉移至較低頻，且某些防護措施將正常噪音轉變為 LFN。正確的認知也有助於對 LFN 受害者的問題有更深刻的理解。

(十) 99 年 6 月 10 日星期四 09:00—**氣流誘發大型冷卻塔風扇罩振動之控制**(Controlling the Flow Induced Vibration of Fan Casing on the Large Cooling Tower)

冷卻塔係被用來冷卻循環水，各式各樣的熱機具和機器設備都藉由循環水來降低溫度(Mise 2008)，如單式冷卻塔被用於冷氣空調設備，以便控制建築物內的空調狀況。熱水滴暴露於冷卻塔風扇產生之氣流風，熱水因此而散熱並獲得冷卻。冷卻塔風扇罩的直徑從 1 公尺到 5 公尺不等，實際大小視風扇本身之性能而定(Shinwa 2009)。譬如，安裝於製造工廠的大型冷卻塔的性能要求，便比建築物內空調系統的冷卻塔來得高。製造工廠的散熱量通常比辦公大樓或商業大樓的散熱量多得多，用於這些用途的大型冷卻塔是由許多併排安裝的單件冷卻塔所組成(Shinwa 2009)，相同尺寸及設計的冷卻塔經常被組合成為大型冷卻塔。因此，一旦單件冷卻塔發生問題，整組大型冷卻塔都會出現類似問題。本文對大型冷卻塔之低頻振動問題及其對策，有清楚的描述。

一家化學工廠的大型冷卻塔在試車期間，發現冷卻塔上方的電動馬達軸承罩有明顯振動現象。廠方擔心，此一單純的振動問題可能牽動轉動軸壞損，並對廠房周邊環境造成低頻噪音和地表振動問題。研究人員針對現場噪音及振動進行了限制性測量，並對大型冷卻塔之振動模式做了數值分析，以釐清問題之詳細機制。而研究人員並在評估問題之機制後，執行了預防振動的對策。

該冷卻塔上方的馬達係透過一根長型驅動軸帶動冷卻風扇，該風扇是一個軸流式風扇，其直徑為 5 公尺。當轉速為特定條件，且振動未達到其他轉動條件之極限時，振動之主頻率為 17.5 Hz。此一振動問題的機制已經非常清楚：

- 振動主頻率與冷卻風扇之葉片通過頻率相同，並與風扇罩之圓周自然振動模式的頻率一致。
- 風扇葉片尾流之周期性速度波動，牽動風扇罩自然振動。又由於馬達基座與風扇罩底部相連，因此馬達基座連同驅動軸均受到風扇罩振動的牽動。
- 研究人員改善了風扇罩的強度，以便控制自然振動。改善方法為將風扇罩之頂環上的兩根橫跨管連接起來，振動的明顯

程度便降低了。

- 發展輕型和強固型風扇罩之永久性對策，將是研究人員未來的研究主題。

(十一) 99 年 6 月 10 日星期四 09:40—**隧道出口微壓波噪音減降之理想車頭形狀(Optimization of Train Nose Shape for Reducing Micropressure Wave Radiated from Tunnel Exit)**

高速列車進入隧道時所產生之壓縮波，經過在隧道中的傳播而抵達隧道出口時，會在隧道出口產生一股微壓波，而改善車頭形狀是降低微壓波的方法之一。此外，對於較長的混凝土隧道，需要在隧道入口處安裝防護罩，以便降低微壓波；隧道入口防護罩之減降微壓波效果，可利用 Howe et al 研究中所設計並證實有效之速算法加以評估。在本文中便運用該速算法和一種基因演算法，測定了車頭形狀截面面積之理想縱向面積；而車頭形狀優化之效果，已藉由縮尺模型實驗獲得證實。

當列車頭進入隧道時，會產生一股壓縮波，這股壓縮波會藉由傳導穿過隧道。當壓縮波抵達隧道另一端的出口時，會有一股微壓波，從隧道出口輻射至周圍區域；微壓波產生一種爆破聲，並振得隧道出口附近房屋的窗櫺或百葉窗嘎嘎作響。微壓波是一種非常低頻壓力波，壓縮波和微壓波的主頻率低於 10 Hz，相當於以 300 km/h 的列車速度除以 10 公尺的隧道直徑，所得出的數值。

高速列車進入隧道時所產生之壓縮波的實質特徵，主要決定於壓縮波之波峰剖面形狀。波峰剖面則決定於列車頭和隧道入口的形狀。微壓波的振幅隨著壓縮波峰的斜面而增加，並大致隨著列車速度的三次冪 U 而變化。

關於列車頭形狀之數值優化，首次由 Iida et al 做了有系統的研究，他們運用計算流體力學(CFD)，計算出列車進入隧道時所產生的壓縮波，並採取一種非線性優化方法，做為列車頭形狀優化的演算法。之後，學界又發表多項有關不同壓縮波計算方法及優化演算法的研究；然而，這些研究均未將隧道入口防護罩的影響納入考量。今天許多新幹線的隧道都裝有隧道入口防護罩，以做為減降微壓波的防護措施；雖然某些刊物報導過考量隧道入口防護罩影響之列車頭形狀優化研究，但報告中並未明白檢視隧道入口開窗式防護罩的影響，也未就實驗結果進行比較。此外，在大多數論文中，隧道中的壓縮波都是運用數值模擬方法 CFD 計算的；然而，由於隧道之複雜幾何性(如隧道入口開窗式防護罩)，即使利用最高性能的電腦，仍然需要相當長的計算時間。因此，我們不能說，CFD 適合用於設計過程，因為在設計過程中，需要針

對許多不同的列車頭形狀反覆計算。

Howe et al.發展出一種以聲學理論為基礎的分析方法，可以快速求出列車進入隧道時所產生之壓縮波，這套方法已透過一系列實驗的比較獲得證實。在下文中，我們將以"BUHOOD"來稱這套分析方法，"BUHOOD"是計算程式的名稱，在 BUHOOD 中，隧道入口開窗式防護罩的影響可被納入考量。運用 BUHOOD 求得之壓縮波，對以下現象的影響均已做了適當考量：(a)防護罩-隧道接合處，及隨後因多次反射而暫時陷於防護罩內之波能；(b)防護罩窗所形成之空氣噴射現象；(c)列車及隧道壁之摩擦阻力。利用一台先進的桌上型電腦執行 BUHOOD，只需要幾秒鐘時間。

在本文中，BUHOOD 搭配一種基因演算法，被用做一種優化程序，以便在適當考量隧道入口防護罩影響的前提下，評估列車頭形狀之可行性。Howe 結合 BUHOOD 和基因演算法，為橢圓形列車頭形狀，執行了開窗式防護罩之優化計算，我們將針對兩種不同的軸對稱隧道入口防護罩進行探討。其中一種防護罩的圓形截面面積比隧道本身的截面面積大，防護罩牆上也沒有開窗，我們稱之為“放大截面面積無開窗式防護罩”。另一種防護罩的截面面積與隧道的截面面積同大，且防護罩壁上有一個矩形窗，我們稱之為“同截面面積開單窗式防護罩”。防護罩的長度 l_h 和防護罩口與窗戶之間的距離 $|x_1|$ ，被假設為相對較短。即 $l_h/R=3$ 和 $|x_1|/R=3$ ，其中 R 是圓柱形隧道的內部半徑，我們假設列車是在雙軌隧道中行駛，我們採取這些條件進行實驗，目的就是要證實此一分析。

我們所從事之計算，目的是為了在考量隧道入口防護罩之影響的前提下，找出降低微壓波之理想列車頭形狀。微壓波的強度與壓縮波峰的壓力梯度呈正比，我們研究了“放大截面面積無開窗式防護罩”和“同截面面積開單窗式防護罩”，我們利用兩個設計變數來表示列車頭的形狀，這兩個設計變數修飾旋轉拋物面的基部形狀，而基因演算法被用來搭配 BUHOOD 進行優化計算。上述討論之計算結果，得出以下結論：

- 只需適當修改列車頭的長度，數值計算結果便與實際結果非常一致。
- 列車頭長度之修改，在優化前或優化後實施均可。
- 當列車頭長度短於防護罩的長度時，理想的列車頭形狀與是否有防護罩的關係不大。但如果列車頭長度大於防護罩長度，則必須考慮防護罩的影響。
- 有防護罩與無防護罩之優化結果之間，存在著 5 – 9% 的最大壓力梯度差異。

我們將“放大截面面積無開窗式防護罩”和“同截面面積開單窗式防護罩”之研究視為一個開始。未來還需要針對“同截面面積開多窗式防護罩”和“放大截面面積開窗式防護罩”，做進一步的研究。

(十二) 99年6月11日星期五 09:20—人類活動對建築物振動舒適度之影響(Building Vibration Serviceability Due to Human Activities)

近年來，商業大樓中使用者日常活動(如走動)所造成之樓板振動，已成為一項舒適度顧慮。為了避免這類問題，設計師必須能夠預測在建築物基本功能典型活動下之樓板反應。為了設計不易受這種惱人振動影響的樓板，或修正存在這類問題之既有樓板，結構工程師必須能夠相當精確地預測建築結構之動態特性。為了達到此一目標，需要測量既有樓板之動態特性，以便更加瞭解如何從分析的角度來表現建築結構。這些動態特性包括樓板之自然頻率、模態阻尼和相對應之模式形狀。

過去 30 年來，模態試驗與分析已被廣泛用於測量及辨別各種機械系統之動態特性。近年來，此一方法也被用來鑑定各項土木結構之動態表現，包括以下結構之模態試驗：人行橋、建築物樓板和運動場。一些研究人員已針對建築物所產生振動之評估與衡量進行了研究，然而，由於這些問題非常複雜，且決定於許多因素，因此目前尚無一套成熟的方法。根據 ISO 10137 (2007)，人類對建築物振動之反應取決於多項參數，這些參數被分為直接影響參數和間接影響參數。直接影響參數包括頻率、強度、持續時間、振動方向、和振動事件或暴露振動之間隔；間接影響參數包括可聽音和次聲、視覺線索、人口類型、對振動之熟悉度、結構物外觀、對建築結構的信心、離地高度、振動事件警告、正在從事的活動、和對振動源的認識等。建築結構使用/居住者可接受之振動位準因多種因素而異，包括個人狀況(個人內在差異性)、環境或“氣氛”、個人對感受振動之期待、和文化差異。譬如，參加社交活動人士所能容忍的振動位準，勢必比參與商業會議人士來得大(ISO 10137 2007)。

振動評估通常是指人類感知/苦惱之嚴重程度的測定，某些參照文件將峰值加速度視為評估樓板振動的主要標準，如美國鋼結構學會設計準則-11(Murray, et al. 1997)和加拿大國家建築規範(NBCC 2005)。一般認為，峰值加速度是很好的振動感知門檻指標(Griffin 1990；ISO 2631-1 1997；和 BS 6841 1987)；然而，振動苦惱和不舒服多半都是根據測量加速度之 r.m.s.來評估。如果振動在本質上是持續而不變的，那麼 r.m.s.將是很適當的評估方式，但人

們活動所造成的振動，絕大多數都不是這樣的，人們活動造成的振動通常都很短暫。這種方式的主要問題在於，用來計算 r.m.s. 的振動持續時間，可能對結果造成很大的影響；此外，峰值加速度和 r.m.s. 不包含振動持續時間。這是很重要的一項缺點，因為建築物振動持續時間越長，越令人無法忍受，一般認為是很合乎邏輯的假設。

振動劑量值(VDV)於 1980 年代提出，其目的就是要克服這些困難。VDV 已被納入建築振動的評估標準中，其定義如下：

$$VDV = \left[\int_{t=0}^{t=T} a_w^4(t) dt \right]^{1/4}$$

其中 $a_w(t)$ 代表頻率加權加速度， T 代表一個人暴露於振動的時段。由於 T 是以秒計， $a_w(t)$ 是以 m/sec^2 計，因此 VDV 的單位是 $m/sec^{1.75}$ 。頻率加權加速度 $a_w(t)$ 是利用頻率加權函數求出，而頻率加權函數通常是以振動方向、居住者情形、和預期效果為基礎。頻率加權函數是當量感知/舒適度曲線的倒數，在人類對振動較為敏感的頻率範圍中，頻率加權函數值為 1.0。

各種不同標準所建議之頻率加權函數也不同，最常用的提供人類振動評估與衡量準則的標準，由國際標準組織(ISO)發行。ISO 2631-1 (1997) 針對人類暴露全身性振動之評估，做出一般性要求。這套標準分別針對有關感知/不舒服之垂直及橫向振動之評估，建議頻率加權函數 W_k 和 W_d 。ISO 2631-2 (2003) 包含人類暴露建築物 1-80 Hz 頻率範圍內之振動評估，並建議頻率加權函數 W_m (無視居住者情形)。這套標準的主要問題在於，它未提供任何有關振動評估標準之指導原則(這點與其前身標準很不同)。為了修正此一缺點，ISO 10137 (2007) 重新納入 ISO 2631-2 (1989) 中已經撤銷的有關重要工作區域、住宅、辦公室和工場之基本曲線及相乘因素的條文，這些基本曲線代表頻率加權函數 W_g 。

類似 ISO 2631-2 (2003)，英國標準 BS 6472-1 (2008) 也包含人類暴露建築物內振動之評估準則。這套標準分別採用 BS 6841 (1987) 之頻率加權函數 W_b 和 W_d ，做為垂直及橫向振動之函數。BS 6472-1 (2008) 建議採用 VDV 做為振動評估的唯一方法，並納入各種不同使用類型之可接受 VDV 限度，譬如住宅、辦公室和工場。英國鋼結構學會發行之設計準則(Smith, et al. 2007) 建議，根據 BS 6841 (1987) 採取頻率加權值，根據 BS 6472 (1992) 採取可接受 VDV 限度，用於人類活動所產生振動之評估與衡量。雖然 BS

6472-1 (2008)建議採取 W_b (而非 W_g)，用於垂直振動評估，但 Smith, et al. (2007)仍採取 W_g ，用於重要工作區域振動之頻率加權。這種方法似乎並不可行，因為 Griffin (2007)的研究顯示，當所評估的振動位準很低時(建築物中的振動通常如此)， W_b 是較為實際可行的加權函數。

雖然學界在此一領域已有許多進展，但仍有兩個重要參數有待進一步研究。首先，設計師需要以精確的反應計算，來定義結構之動態特性。其次，設計師必須能夠評估及衡量人類活動所產生之振動。本文利用一棟具有獨特建築/結構設計之辦公大樓結構做為個案研究，提出其動態行為之研究結果，包括各種現場試驗和測量步行振動之評估與衡量結果，來探討這兩個問題。本文提供在大樓建造之各個不同階段之走動實驗細節，並根據多項標準及設計準則探討並比較振動評估與衡量的程序。本研究也針對有關人類苦惱/不舒服振動評估之各項標準的規定，進行了比較。

本文針對易受樓板走動振動影響之建築結構的振動舒適度問題，進行了研究，並提出對完工建築結構實施之振動試驗的結果。本研究利用模態試驗之振動記錄，確定建築結構之動態參數。此外，本研究也檢討了有關人類活動振動感知/苦惱度之評估與衡量之各項現行標準與設計準則。利用本研究所蒐集之振動記錄，比較這些標準與設計準則中有關惱人樓板振動的規定，研究結果發現，多項標準和設計準則所建議採用之 VDV，比未加權峰值或加速度 r.m.s.更適合用於振動評估與衡量。此外，研究還發現，根據 ISO 2631-1 (1997)或 BS 6472-1 (2008)採用之頻率加權值最為恰當。

(十三) 99年6月11日星期五 09:40—走動造成建築物樓板振動之評估與衡量(Building Floor Vibration Assessment and Evaluation Due to Walking Excitations)

過去 20 年來，樓板振動之惱人程度，已成為一種舒適度問題。尤其是辦公室樓板，更容易受到此一問題的影響。主要是因為在當前“無紙”辦公室和開放空間格局的趨勢下，流行採用較輕的樓板系統和較少的隔間，因而造成走動時樓板加速度(floor acceleration)較高。雖然樓板運動通常不致於有安全上的顧慮，但它們仍會帶給居住者苦惱和不舒服，有時甚至造成建築物屋主與結構設計師之間的爭執。

目前有一些標準和設計準則，對於預防高振動之樓板設計做出相關規定。目前最常用的標準和設計準則包括：美國鋼結構學會(AISC)設計準則-11 (Murray, et al. 1997)；加拿大國家建築規範

(NBCC 2005)；英國鋼結構學會(UKSCI)設計準則(Smith et al. 2007)；英國標準 BS6841(1987)和 BS6472-1(2008)；國際標準組織 ISO2631-1 (1997)、ISO2631-2 (2003)和 ISO10137 (2007)。

人們活動對樓板結構舒適度影響之分析與設計，通常包含以下三大部分：

- 源自走動、慢跑、跳舞、有氧舞蹈等活動之強迫性激動(forcing excitations)的表現。
- 運用一般有限元素(FE)結構模型或其他近似建模技術(一般適用於在每個隔間角落設有支柱之簡單而普通的直線框架結構)之結構解析表現。
- 應用在 r.m.s.、峰值加速度或振動劑量值(VDV)方面之振動力或測量反應，和比較可接受之人類舒適性或感知限度時，從步驟 2 得出之計算結構反應的評估與衡量。

這些標準和設計準則，在人類可接受振動之評估與衡量方面的規定各不相同。

本文提出一系列建築物樓板走動實驗的結果，我們根據測量值分析，計算出共振頻率。又根據不同的常用標準與設計準則，透過一系列針對三個建築物樓板之走動實驗過程，評估及衡量人們對振動的反應，闡明對這些噪音源之建議。我們並根據測量結果之比較，針對不同標準與設計準則之規定，做出有關樓板振動舒適度問題的結論。

在運用一系列不同建造階段之三棟辦公大樓的樓板振動試驗，探討不同標準和設計準則中，有關人體振動舒適度之評估與衡量的規定，我們根據 0.03 m/sec^2 的峰值加權加速度，針對加權加速度之 r.m.s.計算，定義並計算出一個適用於所有測量走動振動記錄的時段 T' 。

結果顯示，根據時段 T' 計算出來的 VDV (VDV')非常接近利用整個測量塊計算的 VDV。波峰因素 CF' 通常低於 CF 。我們還發現，計算之 $a'w_{rms}$ 與加權加速度之最大瞬間 r.m.s.一致(或非常接近)。利用 $CF' < 4$ 、估計之 VDV' ($eVDV'$)、 T' 和 $a'w_{rms}$ ，可能得出的計算 $VDV \pm 10\%$ 以內的數值。

最後，我們根據各項標準和設計準則的要求，評估樓板之可接受度。我們發現，就樓板振動可接受度而言，根據 ISO10137 (2007)、Smith, et al. (2007)和 BS6472-1 (2008)的規定，可得出相同的結論。然而，當用於本研究所採用之樓板時，Murray, et al. (1997)和 NBCC (2005)所建議之可接受限度則比較穩當。

(十四) 99 年 6 月 11 日星期五 11:20—風力發電機低頻噪音之監控(Low Frequency Noise Monitoring of a Wind Turbine)

風力發電機(WT)運作所排放的噪音，升高人們對噪音的抱怨。有關 WT 之低頻噪音排放，學界已有許多論述。以文件記錄物理參數(如聲壓及其頻譜)，是一種相對較直接的方法。某些人感受到(或自覺感受到)WT 噪音的不良影響，其程度從苦惱到嚴重健康影響不等。然而，關於後者的健康影響，似乎尚無有力的證據支撐。

大多數聲學顧問偶爾都會碰到對噪音非常敏感的人，別人可能覺得沒什麼的噪音量，他們已經感到苦惱不堪了。惱人是侵犯性噪音的一種很微妙的特性，僅在衝擊點測量音壓位準(SPL)，只能判定噪音是否符合特定法規。對於噪音敏感人士來說，這樣的標準是絕對不能令人滿意的，對風力發電機操作員來說，這種標準也是不夠的。多數以符合度為基礎的噪音稽查，均測量以小時計的“A”加權 L_{eq} ；因此，WT 噪音的許多低頻噪音內容，都被排除在外。而事實上，WT 所排放之大多數聲能，都是發生在低頻範圍；噪音中包含寬頻帶、聲調和假聲調等成分。持續監控的結果顯示，後者的變化相當大。本文探討用於記錄一位噪音敏感者所感受之任何不良噪音衝擊的儀器裝備、測量程序和數據分析。

低功率產生階段所發出的可聽音，可能非常令人苦惱(雖然當地居民並未證實這點)。訪談 WT 服務技師和檢視數據後，我們做出結論認為，WT 葉片和發電機控制系統的某些參數沒有經過優化處理。重新設定控制軟體後，此一問題獲得解決，處理後狀況立即明顯改善。如圖 21 所示，可聽音已經降低，淨效應為整體 A-加權噪音量降低 3 dB。

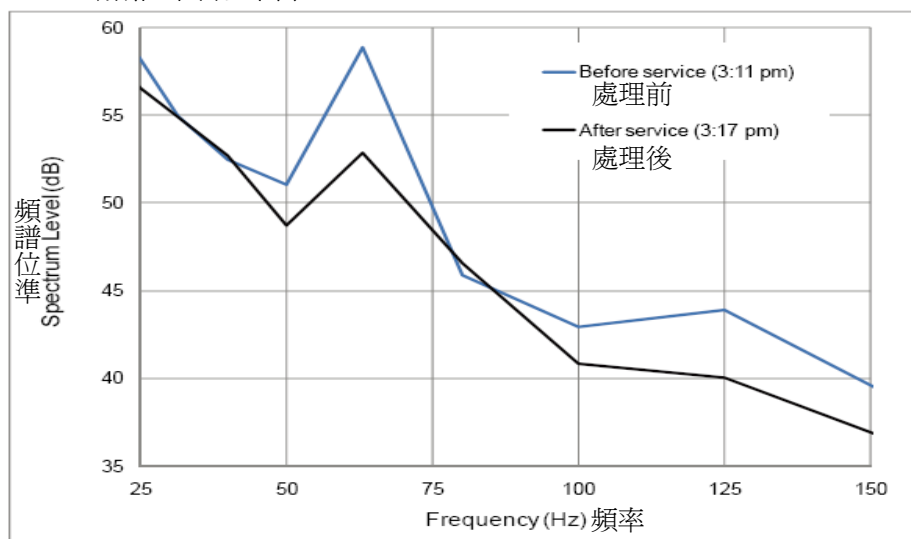


圖 21. WT 控制系統優化處理後，低頻噪音排放的改變

本文分析了 WT 所排放之低頻噪音的特性，做為一項噪音抱怨調查的一部分。研究人員進行了戶外及室內測量，以證明 WT 噪音侵入住宅的情形。當 WT 在額定產能(或接近額定產能)下作業時，WT 噪音與室內噪音之間沒有關聯性。發電機音調控制系統之某些反饋控制參數經過優化處理後，WT 產生低至中功率電力時發出的音調便被消除。WT 噪音之自動關聯，可被用來測量葉片-塔架干擾所產生之噪音。我們建議了量化調幅的方法，但由於可利用的數據有限，此一方法未經過驗證。

(十五) 99 年 6 月 11 日星期五 11:40—大型風力發電機之低頻噪音分析(An analysis of low frequency noise from large wind turbines)

隨著風力發電機的增大，人們的憂慮日益升高。因為人們擔心，風力發電機排放噪音的頻率會下降，而低頻和次聲噪音將會增加，進而達到為附近居民帶來嚴重苦惱的程度。我們在報紙上經常看到有關大型風力發電機發出輾轉的惱人噪音的報導，媒體還經常聲稱，這些噪音會傳得非常遠。然而，科學文獻中有關大型風力發電機所排放之次聲和低頻噪音的研究反而很有限。

在丹麥計畫中，丹麥環保署正式委任的聲學實驗室(Delta 顧問公司)將負責測量並記錄大型風力發電機的噪音，丹麥奧爾堡大學(Aalborg University)則負責在實驗室中進行聽覺測驗，以評估風力發電機噪音的惱人程度，並將之與其他常見噪音(如交通噪音)的惱人程度做比較。本研究將涵蓋整個噪音頻譜，但會特別強調低頻和次聲噪音。本研究將利用奧爾堡大學的特別低頻噪音暴露設備(Santillan et al., Pedersen)，並運用該校數十年來在低頻和次聲噪音領域的研究成果。可惜的是，奧爾堡大學尚未從事聽覺測驗，便不得不退出這項計畫，因為 Delta 公司無法(或不願)配合釐清某些有關聽覺測驗記錄之選擇與文件佐證的問題。奧爾堡大學也不可能取得所有既有記錄，而作者們認為這是賦予聽覺測驗記錄選擇正當性之根本原則。於是聽覺測驗沒有完成。因此，本文的探討僅涉及物理測量之分析與討論。

本文針對 48 座電功率介於 75 kW 和 3.6 MW 之間的發電機，進行噪音排放分析；研究人員測量了 4 座大型風力發電機的噪音狀況，至於其餘 44 座小型及大型風力發電機的噪音數據，則是收集而來；此外，研究人員還測量了 10 間標準起居室之低頻隔音效果。在本文中，丹麥計畫的數據被用來檢視排放聲功率與發電機尺寸之間的關聯性。研究人員分析並探討了噪音源頻譜，並特別對頻譜隨著發電機尺寸增加而朝向低頻的假說，進行了研究。研究人員還針對適當鄰近距離之戶外及室內頻譜，進行了分析和探

討。測量和數據收集均由 Delta 公司負責。

研究結果證實了頻譜隨著發電機尺寸的增加而朝向低頻的假說，大型發電機(2.3 – 3.6 MW)所排放的相對低頻噪音總量多於小型發電機(≤ 2 MW)。此一差異對於 63 – 250 Hz 頻率範圍之 1/3 八音度頻帶，具有統計學上的意義。此一差異也可被解釋為約 1/3 八音度頻譜的向下移動。我們為 10-MW 範圍內之發電機建議類似大小之進一步移動。

如果考量適當鄰近距離內之戶外 SPL，較高的低頻內容將變得更為顯著。這是由於空氣吸收對於較高頻噪音衰減的影響，遠多於其對較低頻噪音衰減的影響。即使是 A-加權噪音，相當部分的噪音均為低頻。幾座被研究的大型發電機中，最高的 1/3 八音度頻帶為 ≤ 250 Hz。因此，毫無疑問，頻譜中的低頻部分在鄰近範圍噪音中扮演著重要角色。

如果考量人類對次聲頻率的敏感度，發電機的確會排放次聲噪音(頻率低於 20 Hz 的噪音)，只是音量非常低。即使非常接近發電機，次聲噪音的 SPL 仍遠低於正常的聽覺門檻。因此，在我們所研究的發電機中(無論何種尺寸及結構)，次聲噪音均不被認為是個問題。

我們研究的幾座大型發電機所排放的低頻噪音中，夾雜一種或許是從齒輪箱傳出來的聲調噪音(tones)，這些聲調噪音導致相對應的 1/3 八音度頻帶達到高峰。聲調噪音處罰無法達到降低聲調噪音的目的，因為它們的區別度並未達到可開罰程度。即使排除掉 1/3 八音度頻帶的高峰，大型與小型發電機之間的頻譜差異，仍具有統計學上的意義。

聲功率(L_{WA})隨著電功率的增加而呈比例升高，其上升速率為電功率每增加一倍，聲功率上升近 3 dB，甚至非常可能超比例升高。在低頻部分(10 – 160 Hz)，聲功率上升的速度更快，且斜率差異在統計學上具有意義。1/3 八音度音頻帶譜之比較顯示，在 63 – 250 Hz 頻率範圍內，2 MW 以上渦輪機的相對噪音排放，高於較小型的渦輪機，此一觀察證實了頻帶譜之下移特徵。

即使發電機的廠牌與型式相同，類似大小之不同發電機所排放的噪音，仍可能有數分貝的差異。因此，將噪音分貝計算至分數是不可行的。若以為這樣便能支持發電機的架設，也是不切實際的。安全限度必須在規劃階段便納入考量，以確保實際架設的發電機，能夠符合噪音限度。在這方面其實有一套國際技術規格，只是經常都沒被應用。而在某些大氣狀況下(如溫度逆增)，噪音可能更加惱人(尤其是低頻噪音)，並且比正常情況下傳得更遠。關於這些現象及其發生原因，我們還需要更多的知識。

肆、心得與建議

一、心得

(一)「國際低頻噪音與振動會議」係為世界各國產官學界就低頻噪音振動進行交流之盛會，會議議題涵蓋所有有關低頻噪音振動及其影響和控制，本屆共有來自世界各國代表共計 39 篇論文於此會議發表。本次出席「第 14 屆國際低頻噪音與振動會議」，將我國低頻噪音納入管制進行說明，引起與會之各國代表的關注，會中並分享提供管制值之研擬、施行之程序及管制後之成效…等經驗。

(二)測量方法

低頻噪音量測過程中，最令人困擾的就是於室外量測時風的強弱以及於室內量測時量測位置之選擇。

如何量化作用於麥克風之風噪音，是戶外噪音測量與評估之最重要課題之一。一般我們在戶外測量低頻噪音時，必須區別真實輻射音作用於麥克風上所產生的風噪音；然而，目前有關風噪音量化評估的研究非常少。本次日本研究人員試圖運用風洞實驗的結果，利用低頻聲壓計來評估風噪音，其中研究人員所提出迎面風湍流的風效應(麥克風裝在防風球上)，以及其適用於在較高風速下修正戶外低頻噪音之測量的風噪音評估方法，值得我國參考。

而在對各種室外噪音源所造成室內低頻噪音之量測方法中，目前缺少既簡單而又以居住者為導向的測量方法。芬蘭研究人員發展出一種測量各種室內空間(如住宅或工業控制室)之低頻噪音的既簡單又可重複的新方法，此一方法包括兩種選項：持續性噪音和間歇性噪音。前者運用起來非常快速，也最常被應用；後者包含一次長時間測量，當觀察到或預期有時間差異時，便常採用這種方法。在多數狀況下，持續性噪音方法便足以確定是否已超過限值，重點是這種方法著重於居住者的所在位置，值得我國參考。

(三)樓板之走動振動影響

國內外已有研究人員針對建築物所產生振動之評估與衡量進行了研究，然而，由於這些問題非常複雜，且決定於許多因素，因此目前尚無一套成熟的方法。根據 ISO 10137 (2007)，人類對建築物振動之反應取決於多項參數，這些參數被分為直接影響參數和間接影響參數。直接影響參數包括頻率、強度、持續時間、振動方向、和振動事件或暴露振動之間隔；間接影響參數包括可聽音和次聲、視覺線索、人口類

型、對振動之熟悉度、結構物外觀、對建築結構的信心、離地高度、振動事件警告、正在從事的活動、和對振動源的認識等。建築結構使用/居住者可接受之振動位準因多種因素而異，包括個人狀況(個人內在差異性)、環境或“氣氛”、個人對感受振動之期待、和文化差異。譬如，參加社交活動人士所能容忍的振動位準，勢必比參與商業會議人士來得大(ISO 10137 2007)。雖然學界在此一領域已有許多進展，但仍有兩個重要參數有待進一步研究。首先，設計師需要以精確的反應計算，來定義結構之動態特性。其次，設計師必須能夠評估及衡量人類活動所產生之振動。

在本次會議中美國代表說明了其利用一棟具有獨特建築/結構設計之辦公大樓結構做為個案研究，提出其動態行為之研究結果，包括各種現場試驗和測量步行振動之評估與衡量結果，來探討前述兩個問題。論文中亦提供在大樓建造之各個不同階段之走動實驗細節，並根據多項標準及設計準則探討並比較振動評估與衡量的程序；也針對有關人類苦惱/不舒服振動評估之各項標準的規定，進行了比較。

此外，另一個美國研究團隊亦針對此問題，提出一系列建築物樓板走動實驗的結果，並根據測量值分析，計算出共振頻率；又根據不同的常用標準與設計準則，透過一系列針對三個建築物樓板之走動實驗過程，評估及衡量人們對振動的反應，再根據測量結果之比較，針對不同標準與設計準則之規定，做出有關樓板振動舒適度問題的結論

我國針對近鄰噪音部分，本署除評估陸續納入噪音管制法公告之不得從事行為外，並協調直轄市、縣(市)政府建立通報系統，能即時並有效處理；另規劃以帶狀式加強宣導民眾於夜間保持安靜，並協調地方政府要求轄境內社區管理委員會將常見之近鄰噪音，依公寓大廈管理條例相關規定，納入規約。而有關於近鄰噪音常見之樓上住戶跑跳聲、小孩吵鬧聲、鋼琴聲等透過樓板傳遞之噪音等，除了綠建築標準外，亦將協調營建主管機關研究並訂定未來供住宅使用之建築物空氣音隔音及樓板衝擊音之基本規範，使未來新建住宅用建築物有依循的標準，減少此類問題。

(四)風力發電機

在面對全球暖化的今日，如何避免全球暖化帶來最嚴重的影響，成為現今的重要課題之一，例如：利用可再生能源、提高能源使用效率等。相比傳統的化石燃料，可再生能源有

許多顯而易見的好處：不用擔心燃料枯竭的問題，及發電過程中不會產生溫室氣體和其他污染物等。

就風力發電來說，其減少二氧化碳排放、舒緩氣候變化是最重要好處。但是，風力發電機組之設置卻常為周邊居民所詬病，包括其對噪音、生理及心理之影響等，一直以來，讓世界各國是又愛又怕。伴隨著風力發電機組數量的增加及規模之擴大，民眾的憂慮日益升高；因為民眾擔心，風力發電機組排放噪音的頻率會下降，而低頻和次聲噪音將會增加，進而為附近居民帶來嚴重苦惱及不適。我們在報紙上經常看到有關大型風力發電機組發出「軋軋…」惱人噪音的報導，媒體還經常聲稱這些噪音會傳得非常遠，並且影響生理、心理層面極大；然而，科學文獻中有關大型風力發電機所排放之次聲和低頻噪音的研究反而很有限。

從另一個角度來看，大多數音學專家偶爾都會碰到對噪音非常敏感的人，別人可能覺得沒什麼的噪音量，他們已經感到苦惱不堪了。惱人是侵犯性噪音一種很微妙的特性，僅在衝擊點測量音壓位準，只能判定噪音是否符合特定法規。對於噪音敏感人士來說，這樣的標準似乎是不能令人滿意的。多數以符合度為基礎的噪音稽查，均測量以小時計的“A”加權 L_{eq} ；因此，風力發電機組噪音的許多低頻噪音內容，都被排除在外。而事實上，風力發電機組所排放之大多數音能，都是發生在低頻範圍。

在本次會議中，包括葡萄牙、加拿大及丹麥的研究團隊，都針對風力發電機組低頻噪音的影響發表研究成果。葡萄牙研究人員持續追蹤 R 氏農場暴露於附近四座風力發電機組所產生之低頻噪音下之影響，經研究觀察已證明開始出現類似振動音響病(VAD)之低頻噪音(<500 Hz)誘發病變。

加拿大研究人員分析了風力發電機組所排放之低頻噪音的特性，並進行了戶外及室內測量，以證明風力發電機組噪音侵入住宅的情形。研究發現，當風力發電機組在額定產能(或接近額定產能)下作業時，風力發電機組噪音與室內噪音之間沒有關聯性；而發電機音調控制系統之某些反饋控制參數經過優化處理後，風力發電機組產生低至中功率電力時發出的音調便被消除，其建議之量化調幅的方法，可為我國之參考。

丹麥研究人員針對 48 座電功率介於 75 kW 和 3.6 MW 之間的發電機，進行噪音排放分析，還測量了 10 間標準起居室之低頻隔音效果。其研究結果證實了頻譜隨著發電機尺寸的增加而朝向低頻的假說，大型發電機(2.3 – 3.6 MW)所排放的

相對低頻噪音總量多於小型發電機(≤ 2 MW)。如果考量適當鄰近距離內之戶外 SPL，較低的低頻內容將變得更為顯著。顯而易見頻譜中的低頻部分在鄰近範圍噪音中扮演著重要角色，這部份之研究結果，值得我國參酌。

(五)低頻噪音對人體的影響

低頻噪音經常以多種但直接的方式，影響人們的生理及心理健康，許多研究報告均提供有關這些方面的觀察結果；此外，雖然許多受害者抱怨的都是低頻噪音，而非較高頻率的噪音，但在某些狀況下，低頻噪音的音量並未超過管制音量，那這些令受害者感到困擾的真是低頻噪音嗎？是否有許多受害者將諧波噪音或波動噪音一律歸類為“低頻噪音”，但很可能他們抱怨的真正致因並非低頻噪音，而是諧波噪音或拍打噪音。此外，許多針對低頻噪音陳情的研究都顯示，在某些狀況下，所陳情人的感受與測量的低頻噪音之間有著強烈的關聯性；但在其他狀況下，兩者之間只有很弱的關聯性，甚至在很少見的狀況下，根本測量不到低頻噪音；如此，該如何對低頻噪音進行管理呢？

在本次會議中，包括日本、德國、芬蘭及美國的研究團隊，都針對低頻噪音對人體的影響發表研究成果。日本研究人員評估了穩定或拍打低頻帶噪音(包括諧波噪音)對人類的心理影響，其選擇 15 位聽力正常的大學生做為實驗對象，讓他們接受門檻音量、可容許音量、和心理反應測驗。結果許多實驗對象都表示，在門檻音量條件下，三角形波(包含諧波)比正弦波更令人不舒服。然而，隨著音量的增加，正弦波帶給人的不舒服感增加，終至大於三角形波。在時間波動噪音方面，波動周期為 5 秒時，三角形波帶給實驗對象的不舒服感降低，波動周期為 2 秒時，正弦波造成的不舒服感降低。此部份研究成果激發出不同之思維方向，可供施政管理之參考。

如果噪音始終停留在低頻噪音範圍，且為變動性噪音，則低頻噪音將顯得更為惱人和具有壓迫感，這或許是瞭解為何有時低頻噪音會如此惱人的關鍵。德國研究人員假設根據不同斜率低頻噪音所造成之不同程度的苦惱，來瞭解低頻噪音特別影響之關鍵所在。在第一部分，其進行聽覺測驗，將刺激源納入不同斜率的低頻噪音；在第二部分，某些刺激源被用做一個聽覺模型的輸入；第三部分則針對平行性，做了說明和討論。研究結果顯示，聲功率集中在 100 Hz 以下之陡

斜率低頻噪音，所造成之壓迫感大於不具備這些特徵之低頻噪音，其原因為透過模擬所觀察到的某種同步性，此一同步性可能干擾腦作用過程。因此，低頻噪音可能直接危及心理健康。德國研究人員還建議思考一個問題：某些措施、測量方法和噪音防制方法等，其所產生的低頻噪音是否反而超過其所要防制的低頻噪音。譬如，A-加權導致問題轉移至較低頻，且某些防護措施將正常噪音轉變為低頻噪音等，以上值得我國於進行研究時，深入思考。

芬蘭研究人員發展出一套以外牆前面的 SPL、外牆之音衰減指數 R、和房間之吸音面積為輸入數據之預測模型，此模型新穎之處在於有將輸入數據之不確定性納入考量。這套模型可預測平均室內 SPL，及不同的不確定性來源可能對其造成之變化；此外，其所得出之結果很容易檢驗。此套預測模型也可以對低頻噪音所造成的苦惱進行客觀的風險評估，可為我國參考。

美國研究人員針對重型螺旋槳飛機運作所造成之低頻噪音，藉由機組人員、商業乘客及航道下方住宅社區居民進行了一系列實驗室實驗，分析出低頻噪音(5~50 Hz)對人體影響之間的關係。由新型重型螺旋槳飛機之噪音特徵評估顯示，這類型飛機所產生之低頻噪音和振動，對機組人員、乘客及航道下方之居民可能引發壓迫性振動感和高度苦惱；然而，學界對這些複雜的人體效應並未充分瞭解，因此需要進一步研究。反觀我國地狹人稠，航空站多設立於人口稠密區，如何藉由航空器之噪音特徵、考量民眾感受度，對航空噪音防制區周邊推行更完善之規劃，是我國未來努力之方向。

二、建議

- (一)樓上住戶走動聲、小孩吵鬧聲、鋼琴聲…等為我國常見之近鄰噪音陳情類別，現階段本署採評估陸續納入公告不得從事行為、建立通報系統即時處理、以帶狀式加強宣導及協調依公寓大廈管理條例相關規定納入規約；建議未來持續努力協調營建主管機關研究並訂定未來供住宅使用之建築物空氣音隔音及樓板衝擊音之基本規範，從源頭進行管制，使未來新建住宅用建築物有依循的標準，減少此類陳情問題。
- (二)目前本署已著手進行高鐵隧道出口、高速公路伸縮縫之低頻噪音量測分析研究計畫，建議未來持續針對交通運輸系統之隧道出口及伸縮縫進行低頻噪音實測研究，以建立我國交通系統隧道出口

噪音理論模型，並研擬適合我國之交通運輸系統隧道出口及伸縮縫低頻噪音減輕對策與控制技術。

(三)由目前我國風力發電機組設施量測作業分析結果來看，現行執行噪音管制標準之工廠(場)標準之量測、環境噪音量測方法及低頻噪音量測標準等方法需進行檢討調整，以符合各環保局基層執行監測、稽查作業適用之陳情案件量測方法與風力發電機組噪音管制標準。

(四)目前我國訂有環境低頻噪音測量方法，本測量方法也適用於在室內測量固定性低頻(指 20 Hz 至 200 Hz)噪音發生源之噪音測量，其測量地點一般於陳情人所指定其居住生活之室內地點測定，為了解低頻噪音最大值可能之分布，得在房間內四個牆角(corners)亦謂反節點(antinode)，偵測共鳴峰值(resonant peaks)。根據芬蘭之研究結果指出，此一布點方式可能會有導致高估陳情者所在位置之音壓位準(SPL)的現象，建議參酌國內外相關研究成果，配合我國陳情案件之情況，精進我國之測量方法，以取得消彌陳情、落實被陳情者改善之雙贏空間。

(五)雖然許多陳情者抱怨的都是低頻噪音，而非較高頻率的噪音，但在某些狀況下，實際量測出之低頻噪音的音量並未超過管制音量，那這些令陳情者感到困擾的真是低頻噪音嗎？是否有許多受害者將諧波噪音或波動噪音一律歸類為“低頻噪音”，但很可能他們抱怨的真正致因並非低頻噪音，而是諧波噪音或波動噪音。建議可於噪音陳情案件研析鑑定、處理輔導計畫中，分析研究此類噪音陳情案件，並建立此類案件之數據及處理資料庫，分析陳情人感受及實測值間之關連性，以為低頻噪音管制之施政參考。