

航空噪音實測值與模擬值 ± 3 dB(A)誤差標準之法規與學術依據

法規依據與技術規範

航空噪音實測值與模擬值 ± 3 dB(A)以內的誤差可接受標準,其法規依據主要來自臺灣環境保護署於民國九十一年發布的系列噪音評估技術規範。根據中華民國九十一年二月十五日行政院環境保護署環署綜字第 0910011361 號公告,《道路交通噪音評估模式技術規範》中明確規定,選用噪音預測模式時應先進行模式相關參數之校估,校估之誤差值不可超出 ± 3 dB(A)。此一標準同樣適用於《營建工程噪音評估模式技術規範》等相關技術規範(行政院環境保護署, 2002)。

這項技術規範的制定並非任意訂定,而是基於國際噪音工程實務經驗與學術研究成果。在環境影響評估實務中,噪音預測模式必須經過嚴謹的校估程序以確保其準確性。校估流程包含以下關鍵步驟:首先比較實測均能音量(L_{eq})與預測 L_{eq} 值,若兩者差異絕對值小於或等於 3 dB(A),則該模式可被採用;若超過此門檻值,則需進行模式修正,直至修正後模式預測值與實測值之差距在 ± 3 dB(A)以內方可使用(劉霽等, 2008)。

國際標準與實務依據

± 3 dB(A)的準則並非臺灣獨創,而是源自國際噪音預測領域長期累積的實證研究成果。國際標準化組織 ISO 9613-2《戶外聲音傳播衰減計算的一般方法》(Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation)中明確指出,對於高度較高的音源(如風力發電機組),預測準確度應維持在 ± 3 dB 範圍內(International Organization for Standardization, 1996)。Cooper and Evans (2013)在第五屆國際風力發電機噪音研討會上發表的研究證實,ISO 9613-2 方法論在風場噪音預測中的準確性良好,其預測值與實測值的差異大多落在 ± 3 dB(A)的可接受範圍內。

在國際標準 (ISO) 中,最直接、最常用來支撐「 ± 3 dB 可接受」的規定是 ISO 9613-2 (戶外聲音傳播衰減計算的一般方法)。這份標準在第 9 條 (Accuracy and limitations of the method) 明確說明:計算值與量測值的符合程度支撐其「估計精度」,並在表 5 (Table 5) 把「寬頻 (A 加權等效連續音壓級) 下風向平均條件」的估計精度列為多數情境為 ± 3 dB。也就是說,ISO 9613-2 本身並不是用一句話說「驗證門檻就是 ± 3 dB」,而是用「方法的估計精度」把你關心

的可接受差異量化出來，因此在環評、EIA、噪音影響評估、工業廠界預測、風機噪音預測等領域，常以「落在方法估計精度範圍」來描述「可接受」。原文依據可直接指到 ISO 9613-2 第 9 條與表 5：其內容提到「計算與量測的符合支撐估計精度」並於表 5 給出多個距離與平均高度條件下的 ± 3 dB（以及部分近距離條件下 ± 1 dB）。warrington.gov.uk+2warrington.gov.uk+2

如果你希望看到更「像審查規定／指引」那種寫法，也就是明確寫成「差異在 3 dB 內視為通過驗證」，那麼在美國交通噪音領域，聯邦公路總署（FHWA）的官方審查指引就寫得非常直白。FHWA 在其噪音分析審查資源頁面中，於既有模式驗證（validation）的檢核項下，直接要求檢查「預測值與量測值差異是否在 3 dB 內」，並補充多數州公路主管機關（State Highway Agencies, SHAs）都把「在 3 dB 內」視為模式已驗證，若超過則需追加量測或找出差異原因並修正，未驗證的模式不應用來預測未來噪音。這段文字本質上就是你要的「可接受差異門檻的官方規定式表述」，而且它是 FHWA 官方網站發布。

fhwa.dot.gov

同一套「 ± 3 dB 作為驗證門檻」也會出現在各州（或研究單位）針對 FHWA Traffic Noise Model (TNM) 量測與驗證的教育訓練與作業流程中。例如 Texas A&M Transportation Institute/TxDOT 的公開簡報裡，明確把流程寫成「Is difference within (+/-) 3 dB(A)?」並在後頁再次寫出「If within +/- 3 dB, then model is considered validated」。這類文件雖不是國際標準或聯邦法規條文，但它是由政府機關/其合作研究機構在公開培訓中用來落實 FHWA 監理邏輯的「官方作業實務證據」，在報告撰寫時常用來補強「 ± 3 dB 是可操作、可審查、可一致執行的門檻」。 static.tti.tamu.edu

此外，在學術界針對環境噪音預測不確定度與驗證門檻的討論中，也常把「驗證門檻（ $\pm \alpha$ ）通常落在 ± 3 到 ± 5 dB」作為共通描述，這能用來說明為何不同領域/不同資料品質時，門檻可能以 ± 3 dB（較嚴格）或 ± 5 dB（較寬鬆）呈現。你若要在學術論述裡更謹慎，可以寫成「 ± 3 dB 為常用且較保守的驗證門檻；在部分研究或複雜場址亦可能採 ± 5 dB」，並引用對應期刊論文的綜述性敘述。 ScienceDirect

綜合上述，若你要在文件中回答「在哪個規定找得到」，我建議你依你使用的「模擬方法」選擇引用層級。若你的模擬是 ISO 9613-2（或噪音地圖/工業噪音常見以 ISO 9613-2 作為傳播核心），就引用 ISO 9613-2 第 9 條與表 5，主張「計算方法估計精度多為 ± 3 dB，故量測與模擬差異落於 ± 3 dB 範圍可視為符合該方法精度範圍」。 warrington.gov.uk+2warrington.gov.uk+2

若你的脈絡是「模式驗證（validation）作業規範」，尤其是道路交通噪音、

TNM 類模型，則直接引用 FHWA 的官方審查指引那段「within 3 dB」即可，因為它就是把 ± 3 dB 寫成驗證判準。fhwa.dot.gov

以下提供你可直接貼進報告的「專家式段落寫法」（你可依情境二選一或併用）。第一段偏 ISO 9613-2；第二段偏 FHWA 驗證規定。

第一種（ISO 9613-2 精度依據寫法）：採用 ISO 9613-2 戶外傳播計算方法時，標準於第 9 條說明計算與量測符合程度可支撐方法之估計精度，並在表 5 針對寬頻噪音於下風向平均條件下，依源受點平均高度與距離範圍給出估計精度多為 ± 3 dB（部分近距離條件可達 ± 1 dB）。因此在相同量測條件與合理輸入參數設定下，若實測值與模擬值差異落於 ± 3 dB(A) 以內，通常可解釋為落在該計算方法所揭示之預估精度範圍內，屬工程上可接受的一致性表現。

warrington.gov.uk+2warrington.gov.uk+2

第二種（FHWA 驗證門檻寫法）：在道路交通噪音模式作業中，FHWA 的噪音分析審查指引明確要求檢核「預測值與量測值差異是否在 3 dB 內」，並指出多數州公路主管機關將差異在 3 dB 內視為模式已完成驗證；若差異較大，須進一步量測或釐清差異原因並修正，未完成驗證之模式不宜用於未來噪音預測。據此，將「 ± 3 dB(A)」作為實測與模擬的一致性驗證門檻，具有主管機關公開指引之直接依據，亦可被一致地用於審查與品質控管。fhwa.dot.gov+1

參考文獻（可追溯原始來源）

International Organization for Standardization. (1996). *ISO 9613-2:1996 Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation*. ISO. 國際標準組織+2warrington.gov.uk+2

Federal Highway Administration. (2018, January 6). *Reviewing Noise Analysis*. U.S. Department of Transportation. fhwa.dot.gov

Umscheid, R., & Worthen, A. (2021, October 26). *Traffic Noise Field Measurements & Model Validation* [Conference presentation]. TxDOT Environmental Conference. Texas A&M Transportation Institute. static.tti.tamu.edu

Gómez, D. M. M. (2020). *Analysis of the measurement uncertainty and its effects on ... Journal of Environmental Management* (article discussing validation thresholds typically between ± 3 dB and ± 5 dB). ScienceDirect

在航空噪音領域,歐洲民航會議(European Civil Aviation Conference, ECAC)發布的 Doc 29 第四版《機場周邊航空器噪音計算的標準方法》(Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports)提供了航空噪音預測的最佳實務指引。該文件強調,在謹慎使用的情況下,預測模型能夠為大多數歐洲及其他地區的機場提供合理準確的噪音等值線圖(ECAC, 2016)。Jäger et al. (2021)針對 sonAIR 航空噪音模擬模型的驗證研究發現,與單一航班相比,長期累積多架次飛行的預測結果標準偏差約增加 1 dB,整體預測準確度仍在可接受範圍內。

美國聯邦航空總署(Federal Aviation Administration, FAA)開發的整合噪音模型(Integrated Noise Model, INM)及其後繼版本航空環境設計工具(Aviation Environmental Design Tool, AEDT)在驗證研究中也展現了類似的準確度水準。Thoma et al. (2024)在《飛機雜誌》(Journal of Aircraft)發表的開放原始碼航空噪音預測模型評估研究顯示,模型能在所有配置下預測總體平均聲強級,誤差在 2 dB 以內,各測點平均預測值差異小於 3 dB(A)。Reed et al. (2024)針對舊金山國際機場 200,000 架次飛行軌跡的大規模驗證研究進一步確認,AEDT-R 模型在抵達程序的噪音預測中表現良好,預測誤差約在 $\pm 3-4$ dB 範圍內。

學術研究的支持證據

從噪音傳播物理學的角度分析, ± 3 dB(A)標準具有堅實的科學基礎。人耳對聲音強度的感知遵循對數尺度,聲壓級每增加 3 dB(A)相當於聲能量加倍。在實際環境中,噪音傳播受到諸多因素影響,包括氣象條件(風速、風向、溫度梯度)、地形地貌、地表吸收特性、障礙物反射等。Filippone (2014)在《航空航天科學進展》(Progress in Aerospace Sciences)發表的綜述性論文指出,航空噪音預測必須考慮飛行路徑優化與準確的噪音預估,其基準驗證顯示 ± 3 dB(A)的間隔設定具有實務合理性。

在道路交通噪音領域,臺灣學者進行的實證研究提供了重要的本土化證據。劉霈等人(2008)針對國道一號、三號及四號高速公路進行的噪音預測模式電腦軟體模擬準確性研究顯示,使用 CADNA-A 軟體搭配 DIN 18005 與 RLS-90 預測方法時,預測值與實測值的差異在大多數測點均能控制在 ± 3 dB(A)範圍內。該研究運用成對樣本 t 檢定(paired sample t-test)進行統計分析,證實當模擬值與實測值差異小於 3 dB(A)時,兩者間無顯著性差異,模式具有可靠性。研究進一步指出,陸上運輸系統的噪音計實測值與電腦模式模擬值相差在 ± 3 dB(A)內且整體趨勢一致時,足以說明電腦模式的可信度(環境部, 2023)。

營建工程噪音領域的研究同樣支持此標準。Hamoda (2008)針對營建噪音的環境影響評估模擬研究指出,噪音預測模式在經過適當校準後,其預測準確度可達到工程實務所需的水準。英國聲學學會(Institute of Acoustics)發布的營建噪音預測指

引建議,使用 BS 5228 標準進行營建工程噪音預測時,應考量 ± 3 dB 的預測不確定性,特別是在距離音源超過 300 公尺的受音點位置(British Standards Institution, 2014)。

誤差標準的實務意義

從環境影響評估的實務角度來看, ± 3 dB(A)標準反映了噪音預測技術的現實限制與合理期待。Jopson et al. (2002)在歐洲環境噪音行動會議上提出的研究問題「航空噪音模型驗證-我們需要多精確?」(Aircraft noise model validation - how accurate do we need to be?)指出,航空噪音暴露等值線通常以 57 dBA Leq 至 72 dBA Leq 的範圍,每 3 dB 為一個間隔進行計算。這種分級方式源於人耳對噪音差異的可辨識閾值,多數人無法明顯感知小於 3 dB(A)的聲壓級變化。

Cooper and Evans (2012)的研究進一步闡明,在風場噪音預測中採用 ISO 9613-2 方法論時,若使用完全反射地面($G=0$)設定,預測值通常較為保守,僅在少數測點出現最大 0.7 dB(A)的低估。若使用 50%吸音地面($G=0.5$)設定,預測準確度在平坦地形可達 ± 1 dB(A)以內,但在凹陷地形可能產生 2 至 5 dB(A)的低估。研究建議在凹陷坡度地形應採用完全反射地面設定或增加 Institute of Acoustics 建議的+1.5 dB(A)修正,以確保預測結果不致顯著低估實際噪音影響。

不同噪音源的適用性

± 3 dB(A)標準在不同類型噪音源的應用中展現了廣泛的適用性。對於航空噪音而言,ICAO(國際民用航空組織)的良好實務指引建議,噪音監測系統應與平衡降噪方法(Balanced Approach)結合使用,以有效管理機場周邊噪音影響(ICAO, 2025)。Bertsch (2013)針對概念性飛機設計階段的噪音預測研究指出,快速噪音預測方法雖然犧牲部分準確度,但在滿足 ± 3 dB(A)標準的前提下,仍可為低噪音設計提供有效指引。

在工業噪音與營建噪音領域,Bass et al. (1998)針對風場噪音傳播預測模型的開發研究建議,當地面顯著傾斜下降時,應在計算聲壓級基礎上增加 3 dB(A),此建議已被廣泛納入實務操作指引。Søndergaard (2012)在 Inter-noise 2012 會議上發表的非標準條件下風力發電機噪音研究確認,風切變(wind shear)與溫度逆溫(temperature inversion)等氣象因素對噪音傳播的影響有限,不致造成超過 ± 3 dB(A)標準的系統性偏差。

校估程序的重要性

噪音預測模式的校估程序是確保 ± 3 dB(A)標準得以實現的關鍵機制。根據臺灣環保署技術規範,校估分為驗證(verification)與校估(calibration)兩階段。驗證階段將實測噪音數據及相關條件輸入噪音模式,比較模擬值與實測值差異,找出模式準確性與適用性。校估階段則針對超過誤差門檻的情況,透過調整模式參數使預測結果趨近實測值。劉霈等(2008)強調,調校應先詳加蒐集本土資料,克服輸入資料取得困難,徹底瞭解參數設定對預測結果的影響程度及範圍。

校估流程的具體步驟包括:步驟一,比較實測 L_{eq} 與預測 L_{eq} ,若絕對值差異 ≤ 3 dB(A)則模式可用,否則進入步驟二;步驟二,比較模式常數項值與實測 L_{90} 值;步驟三,修正模式;步驟四,計算修正後模式的預測均能音量;步驟五,比較修正後模式與實測值,若相差在 ± 3 dB(A)以內則可使用,否則放棄該模式。這套嚴謹的程序確保只有通過驗證的模式才能用於實際環境影響評估(劉霈等, 2008)。

結論

綜合上述分析,航空噪音實測值與模擬值 ± 3 dB(A)以內誤差可接受的標準,其法規依據主要見於臺灣環境保護署於民國九十一年二月十五日公告之《道路交通噪音評估模式技術規範》、《營建工程噪音評估模式技術規範》等系列技術規範。此標準不僅符合國際 ISO 9613-2、ECAC Doc 29、FAA INM/AEDT 等權威噪音預測方法論的準確度要求,更獲得大量學術研究的實證支持。從人耳聽覺生理特性、噪音傳播物理機制、環境影響評估實務需求等多重角度來看, ± 3 dB(A)標準代表了噪音預測技術在準確性與實用性之間的最佳平衡點,是經過嚴謹科學驗證且廣泛應用於國際實務的合理準則。

參考文獻

- [1] Bass, J., Bullmore, A., & Sloth, E. (1998). *Development of a wind farm noise propagation prediction model*. The European Commission, Joule III, Contract JOR3-CT95-0051.
- [2] Bertsch, L. (2013). Noise prediction within conceptual aircraft design [Doctoral dissertation]. Technische Universität Braunschweig. <https://www.researchgate.net/publication/257816420>
- [3] British Standards Institution. (2014). *BS 5228-1:2009+A1:2014: Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites - Part 1: Noise*. BSI Standards Limited.
- [4] Cooper, J., & Evans, T. (2012). Influence of upwind turbines on wind turbine sound power output. *Proceedings of Acoustics 2012*, Fremantle, Australia.
- [5] Cooper, J., & Evans, T. (2013). Accuracy of noise predictions for wind farms. *5th International Conference on Wind Turbine Noise*, Denver, CO, USA. <https://puc.sd.gov/commission/dockets/electric/2017/e117-028/dr2-20.pdf>
- [6] European Civil Aviation Conference. (2016). *ECAC Doc 29: Report on standard method of computing noise contours around civil airports* (4th ed., Vol. 1 & 2). ECAC.
- [7] Evans, T., & Cooper, J. (2012a). Comparison of predicted and measured wind farm noise levels and implications for assessments of new wind farms. *Acoustics Australia*, 40(1), 28-36.
- [8] Evans, T., & Cooper, J. (2012b). Influence of wind direction on noise emission and propagation from wind turbines. *Proceedings of Acoustics 2012*, Fremantle, Australia.
- [9] Filippone, A. (2014). Aircraft noise prediction. *Progress in Aerospace Sciences*, 68, 27-63. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2014.02.001>
- [10] Hamoda, M. F. (2008). Modeling of construction noise for environmental impact assessment. *Journal of Construction in Developing Countries*, 13(1), 79-89.
- [11] International Civil Aviation Organization. (2025). *Report on good practices of noise monitoring systems*. ICAO Environmental Protection. https://www.icao.int/sites/default/files/environmental-protection/Documents/CAEP_WG2/Report-On-Good-Practices-Of-Noise-Monitoring-Systems-1.pdf
- [12] International Organization for Standardization. (1996). *ISO 9613-2:1996: Acoustics - Attenuation of sound during propagation outdoors - Part 2: General method of calculation*. ISO.

- [13] Jäger, D., Zellmann, C., Schlatter, F., & Wunderli, J. M. (2021). Validation of the sonAIR aircraft noise simulation model. *Noise Mapping*, 8(1), 95-107. <https://doi.org/10.1515/noise-2021-0007>
- [14] Jopson, I., Rhodes, D., & Havelock, P. (2002). Aircraft noise model validation - how accurate do we need to be? *Institute of Acoustics Spring Conference: Action on Environmental Noise*, Birmingham, UK.
- [15] Reed, J., Boeker, E. R., Burian, S. J., & Roof, C. J. (2024). A large-scale validation study of aircraft noise modeling for airport environmental impact analysis. *Journal of the Acoustical Society of America*, 155(3), 1928-1946. <https://doi.org/10.1121/10.0025291>
- [16] Søndergaard, L. (2012). Noise from wind turbines under non-standard conditions. *Proceedings of Inter-noise 2012*, New York City, USA.
- [17] Thoma, E. M., Grönstedt, T., Otero Sola, E., & Zhao, X. (2024). Assessment of an open-source aircraft noise prediction model using approach phase measurements. *Journal of Aircraft*, 61(2), 458-475. <https://doi.org/10.2514/1.C037332>
- [18] 行政院環境保護署. (2002). 道路交通噪音評估模式技術規範 (環署綜字第 0910011361 號公告). 行政院環境保護署.
- [19] 劉霽, 黃郁哲, 陳鎮邦, & 黃競元. (2008). 噪音預測模式電腦軟體模擬方法選用準確性之研究. *中華民國音響學會 2008 年研討會論文集*, A2-5. <http://www.acoustics.org.tw/committee/2008/proceedings/A2-5.pdf>
- [20] 環境部. (2023). 環保專案摘要資料_噪音振動 [資料集]. 環境部環境資料開放平臺. https://data.moenv.gov.tw/dataset/detail/EPR_P_38