

# 聲波成像攝影機的洩漏率量化 (LRQ) 方法

**Toros Senan,**  
PhD. 聲波研究工程師

## 簡介

許多應用都需要洩漏偵測。其中較知名的應用，包括用於許多應用的壓縮空氣系統，其中尤以製造廠最為常見。

## ii900/ii910 運作方式的重點複習

ii900/ii910 採用 64 個以特定陣列模式排列的麥克風。在陣列中央可見到一個攝影機，用於對現場設備進行成像。本裝置使用複雜演算法產生音源的圖譜或影像，然後將所生成的聲波圖譜覆蓋到影像上。取決於音源相對於 ii900/ii910 可視範圍的位置，每個麥克風接收聲波的時間略有不同。可以根據麥克風之間的時間差來找出音源位置：如果聲音來自裝置右側，則陣列右側的麥克風收音時間會略早於左側麥克風。ii900/ii910 會在螢幕右側顯示該聲音的影像。

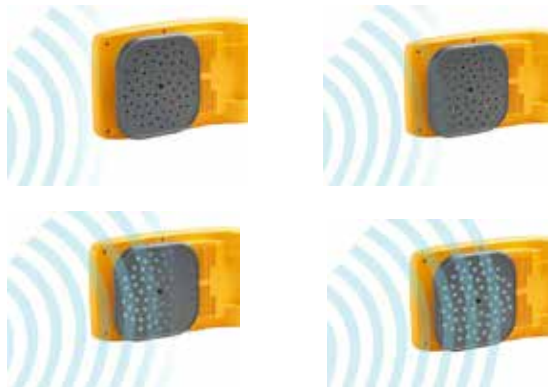
## ii900/ii910 如何偵測洩漏？

當加壓系統發生滲漏時，溢出的氣體（空氣）分子將造成擾流，進而導致壓力和流速迅速改變。這些變化可能會以聲波形式傳播。ii900/ii910 可以偵測這些聲波的位置和強度。

外洩至環境的壓縮空氣會在可聽頻率及超音波頻率範圍內產生寬頻雜訊 (Eret and Meskell, 2012; Holstein et al., 2016)。在工業壓縮空氣系統中，窄頻（約 40 kHz 上下）超音波感測器是用於定位洩漏的常用工具。然而，使用窄頻超音波感測器會使操作受限。

洩漏處與測量裝置和測量角度之間的距離是決定超音波感測器能否發揮功效的關鍵因素：首先，高頻率聲音會透過大氣吸收而快速衰減（請參閱 Wolstencroft and Neale, 2008）。

第二，壓縮空氣洩漏所產生的聲壓等級會因測量角度而異 (Wolstencroft and Neale, 2008)。此外，眾所皆知，噪音環境會降低窄頻超音波感測器的效能 (Eret and Meskell, 2012)。使用同時能以可聽頻率和超音波頻率範圍運作的寬頻感測器，讓使用者得以彌補上述限制。在此頻率範圍內提供靈活彈性，可提升洩漏偵測系統的耐用性。例如，從圖 1 中可以看出，系統壓力為 6 Bar 的情況下，壓縮空氣從開孔外洩會產生寬頻雜訊。圖 1 顯示，測量到最大聲壓等級的頻率區域位於可聽範圍內。相反地，在 35 – 45 kHz 頻率範圍中測量的聲壓等級（圖 1 中的紅色虛線）明顯低於頻譜的其他部分。



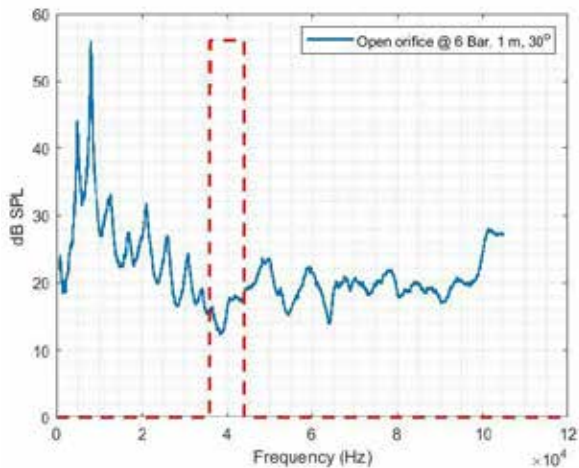


圖 1：壓縮空氣通過開孔 (1/4 吋) 洩漏。使用 ii910 在離洩漏來源 1 公尺處進行測量，測量角度為 30 度。藍線表示平滑化的頻譜，紅色虛線表示約 40 kHz 的頻率區域。

探究壓縮空氣洩漏聲音頻率特性的研究數量有限。在 Holstein 等人 (2016) 的研究中，他們提出壓縮空氣洩漏測量的頻譜，並搭配系統性增加的流率 (見圖 2, Holstein et al., 2016)。洩漏源頭是一個開放性的圓孔，並在離源頭 20 公分處進行測量。頻譜顯示，流率越大，50 kHz 以上的能量也會隨之增加。在實驗中測量到的最大流率中，頻譜顯示的峰值約為 80 kHz。

### 可影響洩漏偵測的因素

影響洩漏偵測的因素會在此章節中分別討論。請注意，此章節所說明的因素會相互影響，且應視為一大廣泛複雜現象中的單一要素。

#### 洩漏來源因素：

- 1. 系統壓力**  
一般而言，系統壓力越大，洩漏就越嚴重，導致聲音強度更高，更容易偵測。
- 2. 流率**  
如同壓力，系統流率越高，洩漏就越嚴重，導致在洩漏位置測量到的聲音強度越高。音效強度越高，讓聲音偵測更容易。

### 3. 開孔的大小和形狀

必須同時考慮開孔的大小和形狀。當我們考量到各種可能的氣體洩漏情況時，很快就會發現，要針對形狀和大小對洩漏偵測的影響提出準則，可說是一大挑戰。這份清單點出了一些可能的洩漏來源。清單中每個項目的開孔大小和形狀都不一樣  
空氣軟管和空氣軟管的接頭或聯結器

- 磨損斷接器或斷接器遺失 O 形環
- 過濾器、潤滑器和調節器 (若安裝不當)
- 開放式排洩口
- 開放式冷阱
- 排管滲漏或未修補不完全
- 有問題或品質低劣的螺紋密封劑，或未正確使用的螺紋密封劑
- 控制閥與關閉閥
- 磨損的密封件或墊圈
  - 老舊或維護不佳的氣動工具
  - 閒置或未使用的機器，或含進氣量的生產設備

氣體	方程式	Po [Kg/m <sup>3</sup> ]
乙炔	C <sup>2</sup> H <sup>2</sup>	1.173
空氣	-	1.2929
氨	NH <sup>3</sup>	0.7710
氫	A	1.7837
二氧化碳	CO <sup>2</sup>	1.977
一氧化碳	CO	1.250
氯	Cl <sup>2</sup>	3.214
乙烷 (10 °C)	C <sup>2</sup> H <sup>6</sup>	1.356
乙烯	C <sup>2</sup> H <sup>4</sup>	1.260
氦	He	0.1785
氫	H <sup>2</sup>	0.0899
硫化氫	H <sup>2</sup> S	1.539
甲烷	CH <sup>4</sup>	0.7168
氖	Ne	0.9003
一氧化氮 (10 °C)	NO	1.34
氮	N <sup>2</sup>	1.2506
一氧化二氮	N <sup>2</sup> O	1.977
氧	O <sup>2</sup>	1.429
丙烷	C <sup>3</sup> H <sup>8</sup>	2.9009
二氧化硫	SO <sup>2</sup>	2.927
水蒸氣 (100 °C)	H <sup>2</sup> O	0.598
六氟化硫**	SF <sup>6</sup>	6.17
冷媒 R134a***	CH <sup>2</sup> FCF <sup>3</sup>	14.433

表 1：氣體密度值列表。在 0°C 與 1ATM\* 之下的氣體密度，Po

\*化學和物理手冊，第 48 版

\*\*[https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur\\_hexafluoride](https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride)

\*\*\*[https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d\\_1682.html](https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d_1682.html)

## 流體特性

流體特性會影響逸散時所產生的聲音。

### 4. 密度

下表顯示在 0°C 和一個大氣壓力下，以 kg/m<sup>3</sup> 為單位的氣體密度。氣體密度會影響洩漏的聲音強度。舉例來說，氮的低密度就表示，相較於壓縮空氣，假設流率和壓力相同，其在洩漏位置所測得的聲壓等級就會較低。現場經驗證實，偵測氮氣洩漏並不容易。

### 5. 黏度

氣體黏度會影響洩漏位置的聲壓等級。不過，其影響將小於密度的影響。

### 6. 環境溫度

我們必須同時考量洩漏來源和路徑中的環境溫度。對於洩漏來源，環境溫度會影響密度和黏度。這兩個因素都會改變洩漏位置的聲壓等級。當環境溫度增加時，分子動能也會增加，導致洩漏位置的聲音強度增加。

### 7. 環境壓力

環境壓力對氣體密度有直接影響。降低環境壓力會導致密度降低，進而降低洩漏位置的聲音強度。

### 8. 從洩漏位置到攝影機的距離

測量距離會影響測得的聲壓等級。當聲音從來源朝四面八方傳播時，強度會隨著距離減弱。

### 9. 環境溫度

環境溫度的變化會改變氣體密度和黏度。這兩者同時會影響聲音通過媒介時的速度。當溫度增加時，聲音的行進速度也會加快。環境溫度變化是影響大氣吸收聲波能的一項機制。在低頻率與短距離的情況下，溫度對於大氣吸收的影響微乎其微 (Harris, 1966)。然而，對於極高頻率與長距離的情況，聲壓等級則有明顯下降 (Vladišauskas and Jakevičius, 2004)。

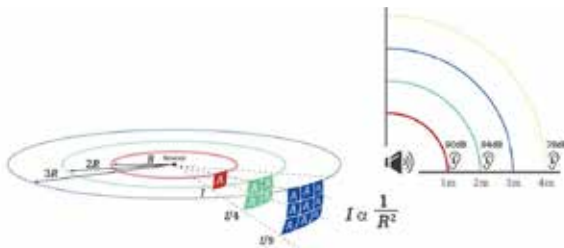
### 10. 濕度

因大氣吸收而影響聲壓等級的第二個機制為濕度。與環境溫度的影響一樣，在正常情況下，濕度對聲壓等級的影響可以忽略不計 (Harris, 1966)。在極高頻率與高濕度的情況下，影響則是非常明顯 (Vladišauskas and Jakevičius, 2004)。

### 11. 環境壓力

在理想的氣體近似的情況下，環境壓力不會影響聲壓等級，因為空氣密度和氣壓對聲音速度有類似但相反的影響。這兩個因素會遭到抵銷。因此，洩漏位置與測量位置的聲壓等級之間不會因為環境壓力而有差異。

## Path factors and atmospheric effects



將音源和自由聲場測量位置之間的距離加倍可減少 6 dB 的音效強度。

## ii900/ii910 可測量哪些洩漏屬性？

ii900/ii910 會顯示洩漏類型，並根據聲音輸入預估洩漏流率。為了開發洩漏類型分類與流率預測演算法，設計並進行了一系列實驗室實驗。

## ii900/ii910 的洩漏類型分類

ii900 和 ii910 會根據於洩漏位置擷取到的聲音洩漏資料來進行分類：軟管、開放式、快速連接與螺紋耦合。四種分類 (即四種洩漏類型) 均安裝於壓縮空氣管路系統末端，並在半無響室進行聲波測量。實驗設定的兩個範例請見圖 3 和圖 4 在實驗中構成四個洩漏條件的接頭如圖 5 所示。

1. **軟管**：軟管是具有彈性的管子，可輕鬆進行管子連接。然而，比起金屬管和黃銅管，它是相對敏感的材料。因此，連接空氣壓縮機和氣動裝置的軟管，很容易形成特定的切口與孔洞。狹長的軟管切口洩漏用於擷取軟管洩漏的聲波資料，以進行分類和流率預測 (圖 3 和圖 5a)。
2. **開放式**：開口端管或開孔是科學研究中最常見的洩漏類型 (參考資料)。當壓縮空氣系統的管路/管線部分未緊閉時就會發生這種情形。在 ii900 的整個開發階段中，分類和流率預測實驗即使用開口端管 (圖 4 和圖 5b)。
3. **快速連接**：快速連接接頭，又稱為快速斷接器或快拆耦合，可以讓連接更輕鬆快速。快速連接接頭需要可朝單一方向滑動，並能以相反方向抗拉的傾角。常見的情況是，一個或多個這些內側傾斜受到損壞，壓縮空氣會透過快速連接接頭洩漏出去。空氣會散佈於接頭周圍，而壓縮空氣外洩的方向會因不同的變形有所差異。在開發 ii900/ii910 分類和流率預測演算法期間，使用變形的快速連接接頭進行聲波測量 (圖 5c)。
4. **螺紋耦合**：在壓縮空氣系統的端點上使用螺紋端蓋相當常見。考量必須滑入端管的螺紋數量，必須小心放置螺紋端蓋並正確調整。有時候工程師可能未鎖緊這些末端部分。此外，螺紋端蓋在使用多次後也會變形。在這些情況下，壓縮空氣通過端蓋洩漏，對系統效率有不良影響。實驗中使用鬆動的螺紋端蓋作為洩漏來源 (圖 5d)。



圖 3：以 30 度角測量軟管洩漏類型。

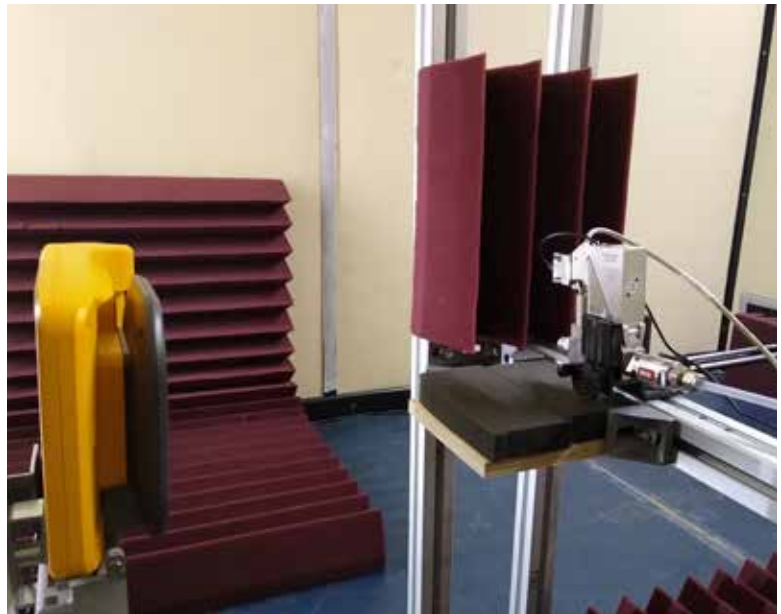


圖 4：以 90 度角的開口端洩漏測量實驗組裝。



圖 5：實驗期間調查的四種洩漏類型：軟管 (a)，開口端 (b)，快速連接 (c) 與螺紋耦合 (d)。



## 洩漏率量化指數

ii900/ii910 會根據擷取的聲波資料，提供洩漏位置的流率估計。流率演算法是根據在半無響室中進行的實驗室測量結果所設計。由於每種洩漏類型的聲波特性和不同，每種洩漏類型各有一個流率預測演算法。因此，流率預估演算法會在分類階段後運作。

接著，洩漏類型的預測流率會轉換為洩漏率量化 (LRQ) 指數。LRQ 的值在 0 到 10 之間。較高的 LRQ 值表示洩漏位置的流率較大，這可以視為維修建議。

## 結論

ii900/ii910 不但提供有效的頻率範圍，且為簡單易用的手持裝置解決方案，嘗試彌補洩漏偵測的困難並進行量化。LRQ 功能對於維護壓縮空氣系統的效率至關重要，而報告功能可改善維護工程師之間的溝通速度。

## 參考資料

Eret, P., & Meskell, C. (2012). Microphone arrays as a leakage detection tool in industrial compressed air systems. *Advances in Acoustics and Vibration*, 2012.

Harris, C. M. (1966). Absorption of sound in air versus humidity and temperature. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 40(1), 148-159.

Holstein, P., Barth, M., & Probst, C. (2016). Acoustic methods for leak detection and tightness testing. In *Proceedings, 19th World Conference on Non-Destructive Testing* (pp. 13-17).

Vladišauskas, A., & Jakevičius, L. (2004). Absorption of ultrasonic waves in air. *Ultragarsas*, 50(1), 46-49.

Wolstencroft, H., & Neale, J. (2008). Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound. *Proceedings of Acoustics (AAS'08)*.

**Fluke** 保持您的世界運作不懈。

### Fluke Corporation

PO Box 9090, Everett, WA 98206 U.S.A.

### For more information call:

In the U.S.A. (800) 443-5853

In Europe/M-East/Africa

+31 (0)40 267 5100

In Canada (800)-36-FLUKE

From other countries +1 (425) 446-5500

www.fluke.com.cn

©2020-2021 Fluke Corporation.

Specifications subject to change without notice.

06/2021 210581-twzh

**Modification of this document is not permitted without written permission from Fluke Corporation.**