

兩種型式水中用的壓電水晶機電轉換器*

何壽安 周帥先

(中國科學院應用物理研究所)

提 要

我們設計了並製造了兩種不同型式的水中用水晶機電轉換器：(i) 鑲嵌型，(ii) 疊片型；尤其注意於水晶片的膠合、振動體的支持等問題，其目的在於減少轉換器在無負荷時的等值電阻 r 。測得一個面積為 609 平方毫米其支持點完全自由的鑲嵌型轉換器的 r 為 60 k Ω ；又測得另一個面積為 256 平方毫米四塊水晶疊片型轉換器的 r 為 15 k Ω 。再後討論了兩種型式轉換器的優缺點，顯見得疊片型的優於鑲嵌型的很多，並進一步考慮了可能改進之點。

一. 引 言

在水中發射強烈的有方向性的超聲頻波時，所用的機電轉換器，最普通的就是用磁致伸縮材料和壓電晶體製成。由於這兩種材料性質上的不同，故各有優缺點。

磁致伸縮的機電轉換器，其特點是在於它具有低阻抗^[1]。因此要得到足夠的輸出功率，並不需要高電壓的高頻率電源來激發它。不過由於磁性材料不可避免的渦流損失是與振動頻率平方成正比的，故在較高頻率下要得到很高的效率是比較困難的。曾經有人做過頻率為 100 kc 波柱張角為 10° 的有方向性的磁致伸縮超聲頻波機電轉換器，但是它的效率却僅有百分之五十^[2]。

壓電晶體的機電轉換器的損失，包括介質中損失和振動時晶體內部所引起的損失，都是很小的數值。只要我們能安裝適當就能得到很高的效率。然而壓電晶體——尤其水晶——一般性質是屬於高阻抗的。要得到夠大的功率輸出就要

*1954 年 6 月 8 日收到。

用高電壓。人工晶體，例如酒石酸鉀鈉、磷酸二氫銨^[3,4,8]，尤其近年來鈦酸鋇壓電燒瓷^[3,4]的研究成功，可以補救這一方面的缺點。用這幾種壓電晶體做的轉換器，其性質和設計^[5]等等都是相類似的。所以研究水晶的機電轉換器還是具有一定的意義。

我們將在下文中敘述我們曾用壓電水晶材料做成的兩種不同型式的水中機電轉換器，並用實驗比較其效率的結果。

二. 轉換器的等值電阻

利用超聲頻波的反射作河道縱深測量或海底深度測量時所用的頻率並不需要太高，一般在 20 至 100 kc 之間。

一個機電轉換器的效率的高低首先表現在它的無負荷電阻上（等值電阻）。在這點上可作概括的說明如下：

一般振動的轉換器，它的性質可以用一個等值電路來表示^[6]。圖 1a 表示轉換器無負荷時的等值電路（亦即幾乎是在空氣中振動時的等值電路）；這裏 r 就是振動體內部及支持點等在振動時的機械損失的標幟稱為等值電阻。而當轉換器有負荷時（即振動體表面與傳聲介質接觸而發射出振動波時），等值電路就成為如圖 1b 所示的；這時它的等值電阻變為 $r + R$ ，其中 R 代表傳音介質對轉換器的負荷。 R 之值，一般說來，主要決定於壓電晶體的常數、振動面積、傳音介質的性質。由此得知，要提高效率首先必須使 r 之值儘量變小。

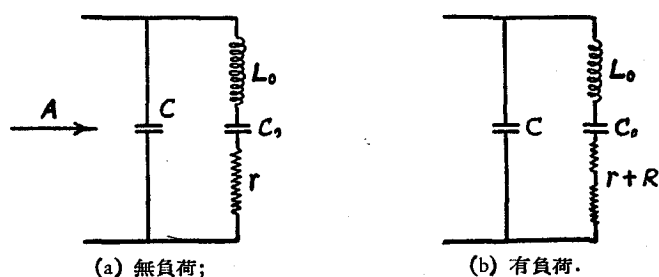


圖 1. 轉換器的等值電路。

爲了要測定等值電阻 r 之值，首先看一看等值線路的導納 A 是怎樣變化的。先假定電容 C 之值很小，則

$$\vec{A} = \frac{1}{r} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}}{r} \right)^2}} / -\tan^{-1} \left(\frac{\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}}{r} \right).$$

令
$$\frac{\omega L_0 - \frac{1}{\omega C_0}}{r} = \tan \theta,$$

則
$$\vec{A} = \frac{1}{r} \cos \theta / -\theta.$$

由此可知 $\vec{A}$ 是隨頻率而改變的，而且 $\vec{A}$ 的頂端軌跡是個圓周，其直徑等於 $\frac{1}{r}$ （如圖 2 所示）。

實際上 C 是有一定數值的，因此導納的圖形並非像圖 2 那樣，而是像圖 3 中實線所示的軌跡。不過，當無負荷時，若仍將它看作一個圓，也不致引起多大的誤差；這圓的直徑實際上也等於 $\frac{1}{r}$ 。

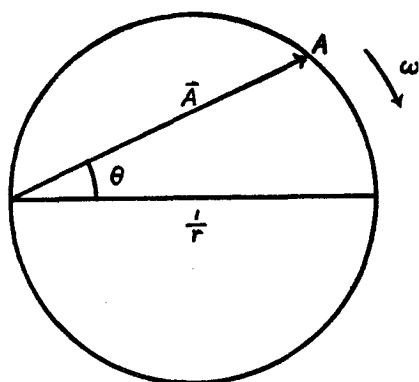


圖 2. 轉換器的導納 A 隨 ω 而改變。

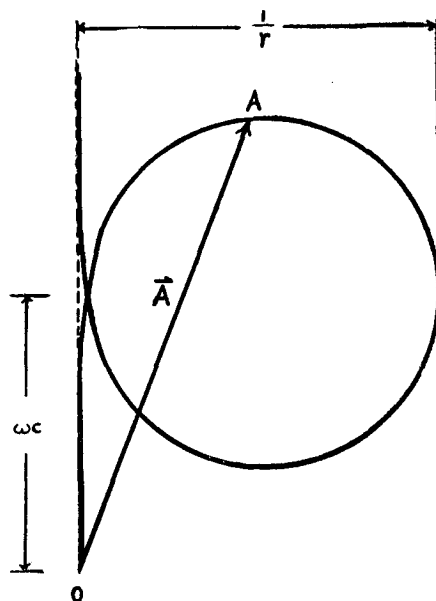


圖 3. 實際轉換器的導納 A 與 ω 的關係。

因此，當我們改變加於轉換器的高頻率振盪器的頻率時，我們就得到最大導納 $A_{\max}$ 及最小導納 $A_{\min}$ ，而且

$$|A_{\max} - A_{\min}| \approx \frac{1}{r}.$$

測定 r 所用的方法如圖 4 所示。所用的振盪器是一個頻率可變的振盪器，而且其輸出電壓是維持恆定的。圖中的 100Ω 電阻連同 0—1.5v 的真空管伏特計作為高頻率毫安培計。

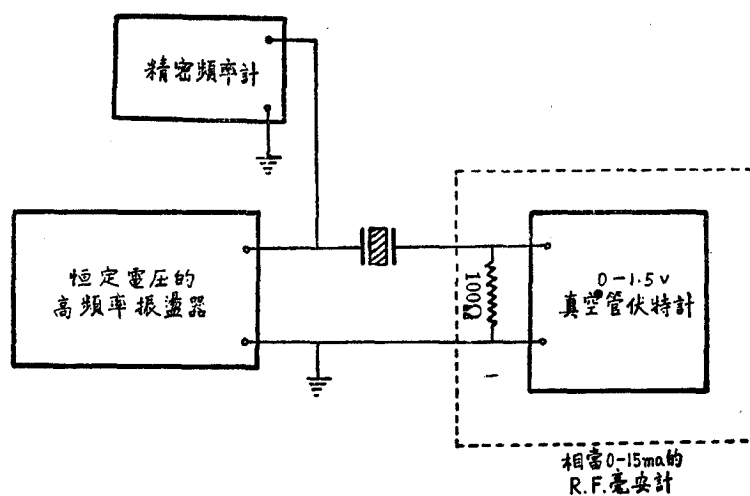


圖 4. 測量 r 值之儀器裝置。

設：輸出電壓為 V ；調變頻率時最大電流為 $i_{\max}$ ，所相當的頻率為 $f_{\max}$ ；調變頻率時最小的電流為 $i_{\min}$ ，相當的頻率為 $f_{\min}$ 。則轉換器的一切常數，如 L_0 , C_0 , r , C , Q ，及共振頻率 f_0 均可求得。它們的近似關係如下^[6]：

$$f_0 \cong \sqrt{f_{\max} \cdot f_{\min}};$$

$$Q \cong \frac{f_0}{f_{\max} - f_{\min}};$$

$$C_0 \cong Q \cdot \frac{r}{\omega_0} = Q \cdot \frac{r}{2\pi f_0};$$

$$L_0 \cong \frac{V}{i_{\max} - i_{\min}};$$

$$r \cong \frac{1}{\omega_0^2 L_0};$$

$$C \cong \frac{1}{V \omega_0} \sqrt{i_{\max} i_{\min}}.$$

機電轉換器的性質，除開以等值電阻表示其優劣以外，還要看其振動面的振動花紋。最理想的振動面的振動方式是要求面上各點作同相的振動。要是振動方式是如此理想的話，則振動面的運動就好像活塞一樣。

要試驗振動面的振動情況，可以用一種輕而細的粉（我們用松花粉），經烘乾以後，均勻地洒在振動面上。當轉換器處於振動狀態下（即處於共振狀態下），粉因振動面的振動而跳動，而且繼續不斷地往波節的地方集中，而形成了振動的花紋。從這種花紋的形狀，可以大致看出轉換器所發射的聲能分佈的情況。

三．鑲嵌型的機電轉換器

第一個應用壓電晶體的機電轉換器來偵察水下情形的是法國科學家郎之萬。他爲了得到頻率適用於水中的超聲波，所用的機電轉換器就如下文中所述的鑲嵌型機電轉換器。

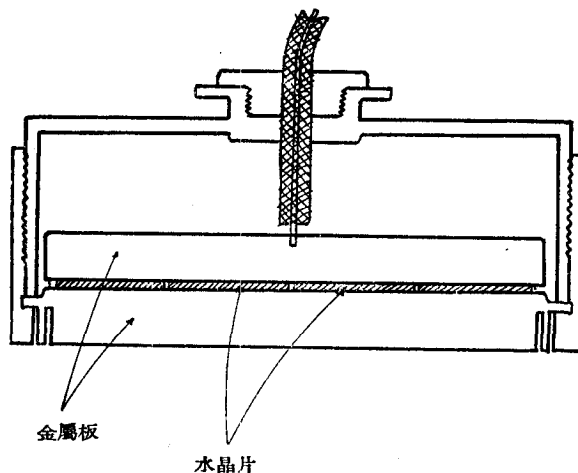


圖 5．鑲嵌型轉換器的裝置。

這種機電轉換器的構造是在兩塊金屬板的中間膠入許多同樣厚的 X 切割的水晶片，這樣整個組合就猶如一整塊厚水晶片。構造如圖 5。

在這構造中影響轉換器效率的因素包括：膠水晶片所用膠的品質問題、振動體的支撐問題，最後，振動面的花紋也是很重要的問題。

1. 膠的品質問題：關於膠的品質對轉換器效率所起的影響，可由下面一些數據看出：

所 用 的 膠	測 量 的 情 況	所測得的等值電阻(無負荷時) γ
Dekhotinsky (hard)	加熱膠合後不等完全冷卻即行 測量其無負荷等值電阻	γ 很大, 即無顯著的 $i_{\max}$ 與 $i_{\min}$ 分別
同 上	加熱膠合後經較長時間冷卻後 (約一小時)才進行測量	$\gamma \approx 200 \text{ k}\Omega - 230 \text{ k}\Omega$
綠色(光學工業) 瀝青(上用的一種膠)	加熱膠合後不等完全冷卻即行 測量其無負荷等值電阻	γ 很大, 無顯著的 $i_{\max}$ 與 $i_{\min}$ 分別
同 上	加熱膠合後經較長時間冷卻後 才進行測量	$\gamma \approx 45 \text{ k}\Omega - 80 \text{ k}\Omega$

以上數據是得自一直徑為 2.8 cm 的水晶片(固有頻率為 3 Mc), 夾在鋁板中組合的頻率為 81 kc, 其構造如圖 6, 而且是當周圍邊沿並未膠在支持體上時的情況。

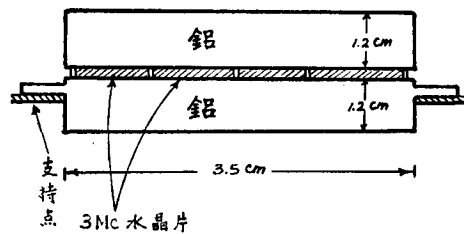


圖 6. 鑲嵌型轉換器振動部分的支持點。

由這些數據可以看出, 未經長時間冷卻的膠對機電轉換器的效率有很大影響。又從兩種不同的膠——一種是 Dekhotinsky, 另一種是綠色瀝青——的比較, 知道膠的品質是很有關係的。在一定的室溫下, 綠色瀝青的受範性較 Dekhotinsky 低, 表現的效率也較好。

2. 支撐問題: 圖 6 中轉換器的中部有凸出的邊, 它是作為按置該轉換器於適當地方之用。因為它是接近中部, 當轉換器作純粹縱向振動時, 按理這地方應該是一個波節; 支於該處應該不發生什麼影響, 但是實驗結果却並非如此, 它是:

當邊沿是自由時	等值電阻 $r \approx 60 \text{ k}\Omega$
當邊沿被膠在支持物上	等值電阻 r 很大，無顯著 $i_{\max}$, $i_{\min}$

邊沿的被膠着與否對等值電阻的影響很大，以致我們不能不懷疑這邊沿處是否是波節。這一點經實驗證明肯定了我們的懷疑。我們的實驗是這樣進行的：用小音叉（我們用小鋼鑷子來代替）將其尖頂觸此邊上各處，就可以聽到很強的吱吱聲。

3. 振動面振動花紋：在直徑為 12 cm，厚為 12 mm 的二塊鉛板中間膠入長寬各為 2 cm 的 X 切割水晶片 16 塊，組合的振動頻率約為 80 kc。這振動面的振動花紋如圖 7 所示。圖 7 的照片中有三圈比較明顯的花紋。這表示在這些地方振動面是不動的，或是僅作很小位移的振動。

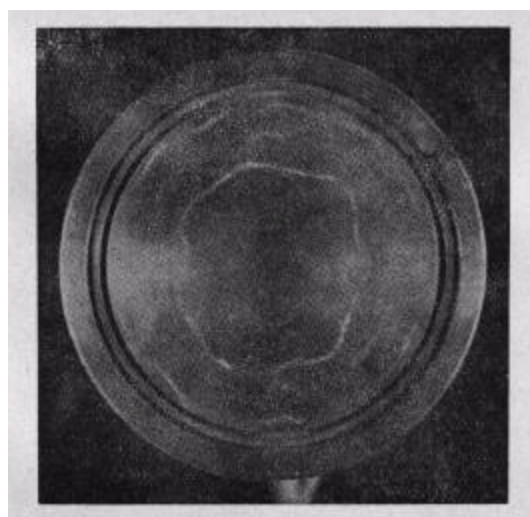


圖 7. 鑲嵌型轉換器振動時表面所起的花紋。

花紋表明我們所作的這種轉換器的振動方式很不好。因為它告訴我們當振動面某些部分向前時，而另外一些部分却向後縮，彼此相差 180° 的相角。如果這轉換器在水中振動時，則在遠處所引起的振動強度可能因這樣互相抵消的結果而削弱很多。

所以造成這樣振動花紋的確實原因還未找出。我們猜想：可能是由於在固體內某一處的振動會引起幾種振動波同時產生。當各點受水晶激動而又同時引

起多種振動波時,這些振動波在固體金屬中傳播的結果就造成了表面上一處向前一處向後的振動方式,並形成某些不動的區域。

四. 疊片型的轉換器

由鑲嵌型的轉換器所表現的情形,我們作出了上述的猜測。如果我們作出一種轉換器,它的各點的振動彼此互相獨立,而沒有什麼機械上的交互作用,則可能在表示損耗的等值電阻上及振動面振動花紋上有所改進。為此,我們採用這樣的結構,即將長向振動的水晶片疊在一起,如圖 10 所示。在此情況下,影響振動性能的就有這樣幾個因素: 1) 水晶片的切割, 2) 疊合與支持的方法, 3) 絕緣質(同時也是傳聲介質)問題。

1. 水晶片的切割: 爲了得到比較單純的長向振動,水晶片的切割方式必須有一定。正 X 切割是不合適的,因爲由實驗看出它的振動波節與水晶片長軸成一定角度,振動時松花粉集中的情況如圖 8a 所示。

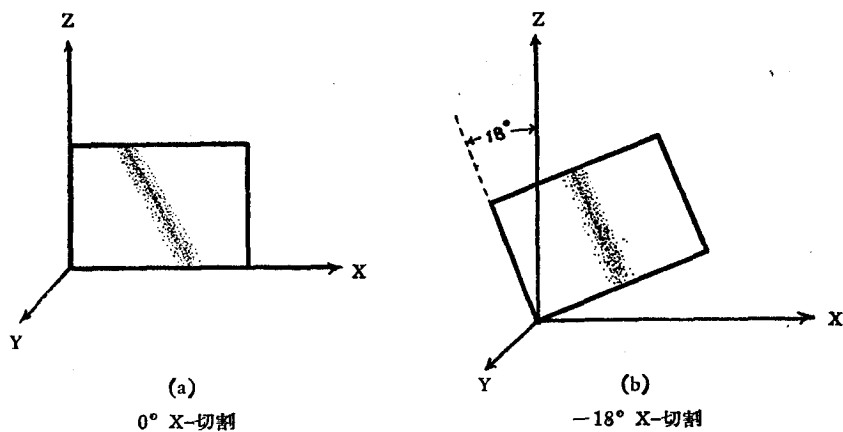


圖 8. 兩種 X-切割所示振動時波節之不同地位。

-18° 的 X 切割(對右旋水晶而言)振動時松花粉集中情形如圖 8b 所示^[2]。這是我們所希望的振動方式。

2. 支持的方式對等值電阻的影響: 以單塊 -18° X 切割的水晶片作試驗所得結果如下:

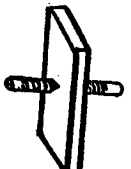
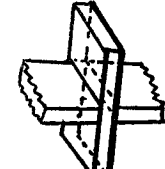
支持方式		
等值電阻	$r \approx 12 \text{ k}\Omega$	$r > 120 \text{ k}\Omega$

圖 9. 支持方式對等值電阻的影響。

由此,支持點必須儘可能靠近波節,支持點的面積儘可能要小。因此我們採取如圖 10 所示的疊合支持的方法:將四塊相同的 -18°X 切割的水晶片壓在一起。其振動頻率為 121 kc , 振動面積為 $16 \times 16 \text{ mm}^2$ 。測得無負荷時等值電阻 $r \approx 15 \text{ k}\Omega$ 。

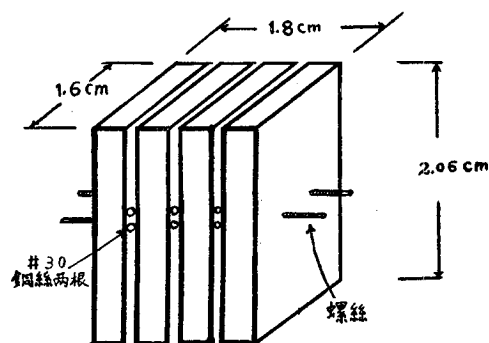


圖 10. 疊片型轉換器的支持方法。

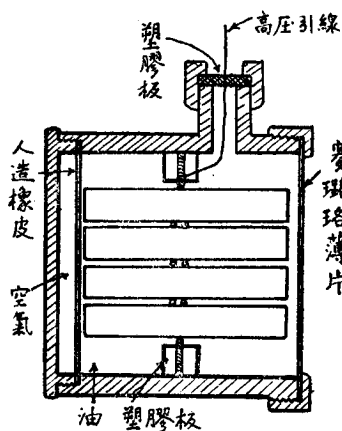


圖 11. 疊片型轉換器的裝置。

3. 傳聲介質對發射聲能的影響:疊片型的轉換器因為不能與水直接接觸,所以必須裝在不漏水的盒子內,盒中盛絕緣的油料。由於聲波必須通過此油方能進入水中,故油的性質對發射聲波的強弱亦有相當的影響。圖 11 就是這種疊片式機電轉換器的實際裝置。

比較用不同油料時的發射性能,所採用的方法是這樣:將同一機電轉換器內先後灌以不同的油——我們用的變壓器油與蓖麻油——作為發射的機電轉換器放在水槽的一端,而在另一端置一接收的轉換器,經電子線路放大以後的接收訊號就顯示在陰極射線示波器上;若發射的頻率不變,並且各設備位置不變,則當

到達接收轉換器的聲能越強時，陰極射線示波器的指示越高。試驗設備如圖 12 所示。

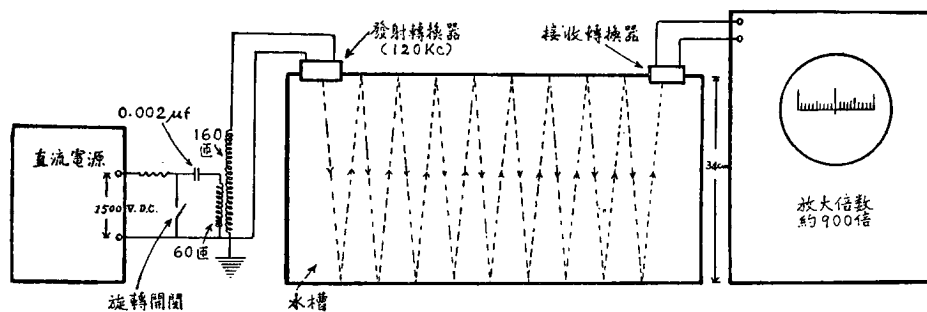


圖 12. 試驗轉換器在水中傳播聲能的設備佈置。

圖 13 表示用兩種油所得的結果。用蓖麻油時所發的聲波經過 21 次水底、水面的來回反射後到達接收器處的強度（即行經 14.4 m 後的聲強度）仍足以使指示器（放大僅 900 倍）上顯示出相當高的脈衝波；而用變壓器油時，指示的脈衝波高則比前者的高度低得多。

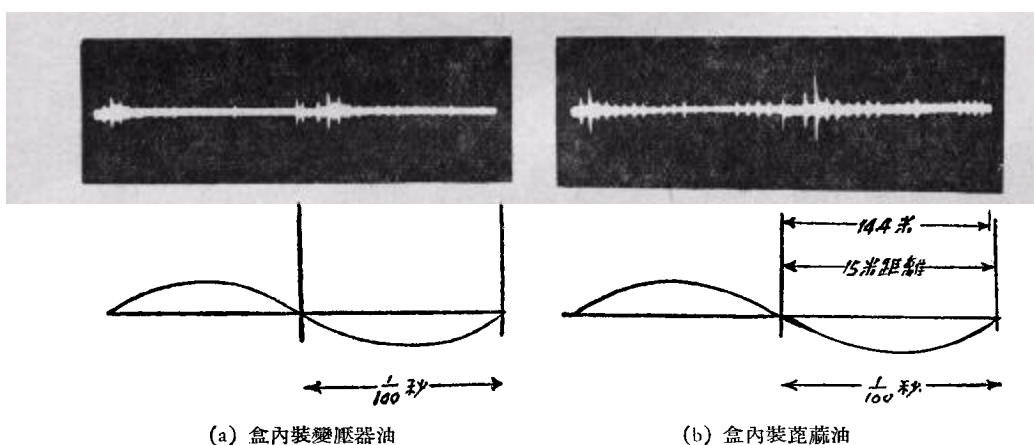


圖 13. 示波儀上所得傳播超聲頻波的訊號。

五. 兩種轉換器的比較

將第一種的如圖 5 所示的大型轉換器（其直徑為 12 cm）作如圖 11 的實驗，結果所指示的接收訊號微弱到幾乎看不清楚。我們猜想，其所以這樣弱，可能就是振動面的各點沒有像活塞那樣作同相的振動所致。這樣的大面積，按理它的

等值電阻該相當小才對，可是所測的結果却不是這樣，而是很大的。如果能改進上述的兩點毛病，這種裝置是有其優點，既簡單又省水晶材料。

第二種疊片型的轉換器，其等值電阻確比第一種小得很多，而且由試驗所得結果，可以在 14 m 遠的地方接收到所發的訊號，雖然我們僅用 900 倍的放大器，同時接收的轉換器的固有頻率也與發射的不全同。再則，我們的試驗是在一個不大的水槽中進行，經過 21 次上下的反射（也就是 20 次是水面的，21 次是槽底的），在反射過程中當然也損失了一部分的能量。如果在放大器的放大率上，在發射試驗的環境上，在接收轉換器的固有頻率上，再加以改進，同樣的轉換器的發射有效距離將會更長些。

從兩種型式的機電轉換器所測得的它們的等值電阻與面積的比較得出如下的結果：

鑲嵌型（自由時）		疊片型（裝好時）	
面積	609 mm ²		288 mm ²
等值電阻	60 k Ω		15 k Ω

可以看出面積較小的疊片型機電轉換器的無負荷時的等值電阻反而比面積較大的鑲嵌型轉換器小，這就斷然地說明了疊片型優於鑲嵌型。我們可以這樣假想，倘若把轉換器的振動面積加大，等值電阻應該成比例地減小。實驗告訴我們，疊片型轉換器的無負荷振動等值電阻雖因面積增大而減少，但不與面積的倒數成直綫比例，不過無論怎樣總是減少一些。如果把更多的如圖 11 成組的（四片水晶成一組），疊片型轉換器裝成一個大型的轉換器，無疑地將增大聲能的輸出，而並不因安裝而減低整個轉換器的效率。相反的，鑲嵌型的轉換器一經增大振動面積的安裝手續，等值電阻就大大增加，從而大大降低了轉換器的效率。這又是疊片型優於鑲嵌型的一點。因此，從等值電阻本身數值大小來看，從增大振動面積的安裝對效率所起的影響來看，疊片型的轉換器都比鑲嵌型為優越。

疊片型轉換器的本身尚需改進的地方很多，例如一面作為絕緣質，一面又作為傳聲介質用的油，因為限於現有條件僅作了兩種油的比較，更多的比較試驗可能會找出更合適的油料。其次就是油與水相隔所用的材料，這種材料的要求是這樣：其聲音阻抗須與水很近，而對超聲頻波的吸收又須很小。由於材料的限制，

我們暫時採用賽璐珞作這種隔開水與油的膜。所以這方面尚有改進的可能。

雖然由上述試驗的結果，疊片型的轉換器要比鑲嵌型的好，但是也有它的缺點。首先是裝置上很麻煩，因為我們實際上使用時振動面應不止這麼幾個平方厘米。若要振動面大，就必須用很多如圖 9 的組合，這樣在裝置上引起很不少的困難。其次所需水晶很多。比起鑲嵌型的要多得多了。這一點在經濟上是不大合算的。

最後，應該提出的，就是水晶在力學性質上是很好的壓電材料，可是由於它的壓電常數比較小，往往需要很高電壓的高頻率電源來激動它。過高電壓的要求不是一件方便的事。如果改用人工壓電材料，如磷酸二氫銨、酒石酸鉀鈉或壓電燒瓷等來製造機電轉換器，所得的效率一定能夠比用水晶來得大。

參 考 文 獻

- [1] Vigoureux, P., *Ultrasonics*, p.p. 17-25. Chapman and Hall Ltd., 1950.
- [2] Camp, L., Vincent, R., and Du Breuil, F., A 100kc underwater magnetostrictive transducer. *J. Acous. Soc. Am.*, **20** (1948), 611.
- [3] Mason, W. P., *Piezoelectric Crystal and Its Application to Ultrasonics*.
- [4] Richardson, *Ultrasonic Physics*, p. 28. Elsevier Publishing Company, 1952.
- [5] Fry, W. J., Taylor, J. M., and Hennis, B. W., *Design of Crystal Vibrating Systems*. Dover Publishing Inc., 1948.
- [6] Vigoureux, P., *Proc. Phys. Soc. Lond.*, **59** (1947), 19.
- [7] Heising, R. A., *Quartz Crystal for Electric Circuit*, p.p. 221-224. D. Van Norstrand Company Inc., 1947.
- [8] Keller, A. C., *Trans. A.I.E.E.* p.p. 1217-1230 **66** (1947).

TWO TYPES OF UNDER-WATER QUARTZ TRANSDUCERS

Ho SHOW-AN and CHOW SUEI-SHIEN

(Institute of Applied Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

Two types of under-water quartz transducers, namely, the mosaic type & the array type, were designed and manufactured, particularly paying attention to the points of cementing of crystals and supporting of vibrating bodies, with a view to reducing the equivalent resistance r of the transducers when they are unloaded. A transducer of the mosaic type with an area of 609 mm², unsupported, measured 60 k Ω for its r , while one of the array type with an area of 259 mm², 15 k Ω . Finally, discussions were made on the comparison of these two types of transducers with the conclusion that a transducer of the array type possesses more merits than that of the mosaic type. The ways for further improvements were considered.