

高等學校教學用書

聲 學 基 礎

Г. С. ГЕНЗЕЛЬ, А. М. ЗАЕЗДНЫЙ 著

馮 秉 鈺 區 奕 勤 譯

高等教育出版社

高等學校教學用書



聲 學 基 礎

Г. С. 金澤里, А. М. 札葉茲德尼著

馮 秉 鈺 區 奕 勤 譯

高等教育出版社

A decorative horizontal line consisting of a series of small, repeating geometric shapes.

本書係根據蘇聯海運出版社 (Издательство “Морской транспорт”) 出版的金澤里 (Г. С. Гензель) 及札葉茲德尼 (А. М. Заездный) 著 “聲學基礎” (Основы акустики) 1952 年版譯出。原書經蘇聯海上運輸部審定為高等航海學校無線電工程系教學參考書。

本書論述聲場的基本理論、聲波在空氣及海水中的傳播、各種輻射器及接收器的基本理論及構造，以及液聲測位的技術。本書可作為高等學校物理系及電訊系教學參考書。

本書由華南工學院馮秉銓、區奕勳合譯。

聲 學 基 礎

書號 297(總 275)

金澤里, 札葉茲德尼 著

馮秉銓 區奕勳 譯

高等教育出版社出版

北京琉璃廠一七〇號

(北京市書刊出版業營業許可證出字第〇五四號)

新華書店總經售

京華印書局印刷

北京南新街甲三七號

開本 850 X 1168 $1/32$ 印張 13 $1/4$ 字數 336,000

一九五五年三月北京第一版

印數 1—4,000

一九五五年三月北京第一次印刷

定價 2.00 元

序 言

各式聲學設備常應用於海洋船舶上，這些設備是用作爲在和海岸聯繫的系統中，船與船之間，以及船舶內部的聯繫上的航行工具。作爲保證航行安全的重要工具的液聲航行儀，其應用得到了特殊的發展。爲了很好地研究聲學設備的原理和儀器的構造，聲學基本定律的知識是必需的。

由上述可見，把“液電聲學”這門課程列入高等航海學校無線電工程系的教學計劃中是很自然的。這門課程的內容是研究聲學的理論基礎，這些理論基礎是在船舶及海岸上裝置的聲學儀器所常用到的。

液聲學研討有關於聲波在水介質中的輻射、傳播和接收等問題。液聲設備的聲學元件的計算，是以機電換能器的一般理論及電聲學作爲根據。

同時敘述電聲學和液聲學的一般基礎是本教材的一個特點。利用系統地敘述上述計劃內的資料的辦法，我們擬成了一個在研究上和計算上完全相同的程序。這種做法是初次嘗試，但是已在教學實踐中受過考驗。

在極度壓縮的方式下企圖說明基本理論的材料，自然在某種程度上會使本書有別於用普通敘述方法寫成的書本。

由於教學計劃分量的限制，作者限於考慮僅以穩定過程爲基礎的課程的一切問題，而不可能敘述過渡過程。

本書假定高等航海學校的學生已熟習交流電的理論。

在著作本教材時，作者曾特別注意到解釋所考慮的過程的物理本質。這種敘述法在教學實踐中證明是有效效的。讀者深入了解所考慮的過程的物理本質，是今後研究任何一種聲學設備的構造和特性的牢

固基礎，也是今後在實際工作中對所遇到的事實能作精確的估計的基礎。

討論主要與無線電通訊(無線電廣播)有關的一些問題的各章，大體上是由 Г. С. 金澤里執筆；主要討論液聲工程的問題的各章，大體上是由 А. М. 札葉茲德尼執筆；討論的問題與電聲學及液聲學有同等關聯的各章，則由兩人合寫。至於全書的編校亦由兩人合作。

工程師 Л. И. 摩洛茲參加寫作緒論、第五和第七章，作者向他表示謝意。

作者認為是一種愉快的義務來向數理科學博士 А. В. 里姆斯基-科爾沙可夫教授表示謝意，在寫作本書過程中他給作者以許多極其重要的指示，並且精細地校閱手稿。

在列寧格勒高等航海學校無線電工程系的教學法委員會會議上討論本書手稿時，曾提出一些意見和希望，作者後來都考慮過了。其中工程科學碩士 В. В. 克拉奇諾的意見是最寶貴的，作者乘此機會向他表示衷心的感謝。

作者並在此向數理科學碩士 И. Г. 盧沙可夫講師和工程科學碩士 В. И. 邱林講師致誠懇的謝意，他們在本書準備出版的過程中，給予很多有益的意見。

一切批評的意見將為作者懷着謝忱和注意而接受。

Г. 金澤里，А. 札葉茲德尼。

標誌符號一覽表

- A —各種輔助量
 a —各種線量的大小
 B —磁感應強度
 b —各種線量的大小
 C_0 —聲速
 C —機械順從性
 c —電容
 D —機械彈性
 d —直徑
 ϑ —水的含鹽量
 e —電壓, 自然對數的底
 F —機械力
 f —振動頻率
 G —指向性因數
 Φ —磁通勢
 g —電導
 H —磁場強度
 h —高度, 厚度
 I —柱函數符號
 J —聲強度, 轉變慣量
 i —電流強度
 $j = \sqrt{-1}$
 k —波數

- L —電感
 l —長度
 M —扭轉矩
 M —機電耦合係數
 m —質量
 N —濃度係數
 n —變換係數, 線匝數, 折射指數
 P —電功率
 p —聲壓
 Q —發聲的表面面積
 q —電量
 R —機械阻
 $\mathfrak{R}$ —磁阻
 r —電阻和距離(矢徑)
 S —波陣面的面積
 T —振動週期
 T° —絕對溫度
 t —時間
 t° —溫度
 U —電壓
 V —體積
 v —振動速度
 W —聲音的或機械的功率
 w —聲能密度
 X —電抗
 x —機械振動系統的位移
 Y —導納

- Z —電阻抗
 $\mathcal{Z}$ —機械阻抗
 α —折射係數
 β —反射係數
 γ —通用氣體常數, 電阻率
 δ —喇叭筒的擴張指數和衰減係數
 ε —彈性模數
 η —效率, 輸出係數, 靈敏度
 θ —聲線的入射角
 κ —介電常數
 M —分子量
 λ —波長
 μ —黏滯係數
 ν —換能器特性常數
 ξ —介質質點的振動位移
 Π —壓電常數
 $\pi = 3.1415\cdots$
 ρ —密度
 σ —泊松係數, 隔聲性係數。
 τ —時間
 Φ —磁通量
 φ —相角
 χ —介質的導熱率
 Ψ —磁致伸縮常數
 ψ —定壓熱容量與定容熱容量之比
 Ω —立體角
 ω —角頻率

Γ —用對數單位表示的量

i —梯度

$\mathcal{E}$ —脈衝能量

e —橢圓的偏心率

目 錄

序言

緒論	1
----------	---

第一章 機械振動系統	7
------------------	---

§ 1. 總論	7
§ 2. 具有一個自由度的機械振動系統	12
§ 3. 具有一個自由度的系統的振動過程	16
§ 4. 機械阻抗	20
§ 5. 具有一個自由度的自由振動系統	23
§ 6. 力的諧振(串聯諧振)	24
§ 7. 機電類比	26
§ 8. 速度諧振(並聯諧振)	29
§ 9. 由質量、彈性和純阻控制的系統	35
§ 10. 複雜的機械振動系統的等效電路組成方法	38
§ 11. 具有均勻分佈常數的機械振動系統	40
§ 12. 在具有分佈常數的機械系統中波的基本形式	50
§ 13. 具有不均勻分佈常數的系統	51
§ 14. 機械的四極網絡及濾波器	55

第二章 聲場的基本定律	62
-------------------	----

§ 1. 表徵聲場的一些基本量	62
§ 2. 運動方程式	64
§ 3. 物態方程式	66
§ 4. 連續性方程式	68
§ 5. 聲波傳播的方程式	70
§ 6. 聲功率和聲強度	71
§ 7. 聲的平面波	73
§ 8. 聲的球面波	79
§ 9. 聲波在無限長喇叭中的傳播	84

§ 10. 柱面波	92
第三章 聲波在實際條件下的傳播	98
§ 1. 聲速	98
§ 2. 聲波的干涉和繞射	100
§ 3. 聲波的反射和折射	105
§ 4. 聲能量的直散射和曲散射	118
§ 5. 在自由介質中聲音的吸收和輻射器的作用距離	125
§ 6. 交混回響	138
§ 7. 聲音透過隔膜的穿入	145
§ 8. 當聲源和觀測者有相對運動時振動頻率的變化效應	149
第四章 聲振動的輻射器和接收器	161
§ 1. 機械振動系統的等效圖的構成(計入介質阻抗)	161
§ 2. 活塞形的輻射器	164
§ 3. 輻射器的指向性	178
§ 4. 指向輻射器所輻射的功率	181
§ 5. 有限尺寸的輻射喇叭	183
§ 6. 聲振動的接收器	187
§ 7. 接收喇叭	193
第五章 聲振動的聽覺和換能器的基本品質特性	200
§ 1. 表徵聲振動過程的一些物理量及其聽覺	200
§ 2. 在頻率和聲強度方面的聽覺區域	203
§ 3. 聽覺的基本定律	205
§ 4. 聽覺的特性	210
§ 5. 對語音和樂音的電聲傳播的要求	213
§ 6. 換能器的靈敏度	217
§ 7. 頻率特性	218
§ 8. 振幅特性	221
第六章 機電換能器	228
§ 1. 作為四極網絡的換能器	228
§ 2. 電動式系統的換能	237
§ 3. 電磁式系統的換能	238

§ 4. 壓電系統的換能	243
§ 5. 磁致伸縮系統的換能	250
第七章 電聲和液聲儀器的構造及其運用特性	260
§ 1. 機電換能器的輸出	260
§ 2. 電動式系統的儀器	262
§ 3. 電磁式系統的儀器	285
§ 4. 壓電系統的儀器	292
§ 5. 磁致伸縮系統的儀器	298
§ 6. 炭粒傳聲器	299
第八章 流體測位的一些基本關係	305
§ 1. 概論	305
§ 2. 流體測位儀的基本方程式	306
§ 3. 聲振動的頻率、重複脈衝的頻率和脈衝的寬度	312
§ 4. 測量的準確性和流體測位儀的可容許的本領	317
§ 5. 以接收器組探向	324
§ 6. 液聲站的通頻帶	331
第九章 輪船的液聲站	350
§ 1. 液聲站的分類	350
§ 2. 液聲站的基本元件	352
§ 3. 液聲站的線路	362
§ 4. 船上液聲儀器的裝置	368
第十章 傳聲及發訊	378
§ 1. 傳聲及發訊的一般問題	378
§ 2. 房間的傳聲	382
§ 3. 開闊空間的傳聲	384
§ 4. 聲音發訊儀器	390
文獻	400
中俄人名對照表	401
俄中人名對照表	402
名詞索引	403

緒 論

聲學——關於聲音，及其輻射、傳播和感受的學說——是緊密地與其他自然科學聯繫着而發展的，首先就是力學，因為聲音按其本性來說，是機械振動的過程。

週期振動的科學研究對聲學的發展有過特殊意義。研究擺的振動定律是從伽利略、惠更斯、牛頓等開始，而且約略從那時起絃與風琴管中空氣的振動，也就是和聲音現象有關的各種週期振動已被研究過了。

在十八世紀的中葉，振動的經典理論的數學分析基礎已建立起來。在這裏應首先提及彼得堡科學院院士 Л. 尤列的功績。尤列在工作中首先推出了弦振動的微分方程式，並指出此微分方程的解答及其研究的分析方法。尤列的這些和其他的許多基本工作，又奠定了聲波傳播方程式的推導的基礎。

在振動的線性理論探討中，流體力學的發展及近代工程聲學的創造的偉大功績是屬於蘇聯學者的。

因為對於聲學的發展具有首要意義的基本工作為數很多，因此即使簡單地列舉也是不可能的；我們以後僅指出一些具有創造性的研究。

在振動理論範疇內的經典著作是屬於院士 А. Н. 克雷洛夫的。他的關於船舶振動理論的著作（發表於十九世紀末），曾首先給出自由振動和受迫振動的廣泛的一系列的研究，而自由振動和受迫振動在各種不同的工程領域中都有實際的應用，其中當然包括工程聲學在內。

И. А. 伍莫夫所創立能量運動學說對聲學的發展發生了很好的

影響；他首先指出，振動的能量可以用波從空間中某一點帶到另一點，而且對於每一種形式的能量都可以引用能量流及其運動速度的概念。伍莫夫的創見對於聲學發展的重大影響，證實於下列事實，這就是，近代聲學中所採用以描述聲場的各個基本量的定義，都是以伍莫夫所首先創立的能量運動原理為基礎。

在上一世紀的八十年代，俄羅斯傑出的物理學家 И. И. 列別捷夫開始在實驗室裏對聲學的領域進行系統性的研究；他建立了不依賴於振動的物理性質的振動定律的普遍性，奠定了聲壓理論的基礎，獲得了那個時候最短的聲波，並做成了聲學測量用的第一個儀器（測量聲壓用的儀器、測量聲音傳播速度用的儀器、將聲振動映射到幕上用的儀器——後一種儀器是近代錄音器的雛形）。就研究的深度上說，列別捷夫的工作，其實驗安排的創造性和細緻性當然是第一流的。

本世紀的初葉由於 И. И. 拉扎列夫的工作，生理聲學的基礎建立起來了。И. И. 卡司切琳所作的關於聲波在不均勻介質中傳播的範疇內的研究也是屬於同一時期，這些研究是創造在實在介質中聲音傳播理論的基礎。

俄羅斯學者在理論方面和實驗方面的研究對於與聲音有關的學說後來的發展有過極其重要的意義。然而，技術資料的缺乏，和僅限於在音樂和短途電話通訊中的極其少量的聲學實際應用，並未能促進這個物理學的領域作迅速的發展。

聲學發展的轉機隨着傑出的俄羅斯學者 А. С. 波波夫發明無線電而來了。

無線電通訊利用了電磁振盪——這是振動過程極其重要的實際應用，它揭開了工程史的新紀元——這樣便提出了一系列重要的科學問題；這些問題的解決促使振動理論發展成一個獨立的科學領域，並在電聲學及其他工程部門中得到廣泛的應用。

偉大的十月革命使科學技術的進步有了空前未有的可能性；在這

以後無線電在俄羅斯才開始作真正的發展。蘇維埃政權成立的頭一年已經開始產生電子管。蘇維埃的工程師和學者因之在技術上獲得了放大電振盪和產生聲頻電流的不受限制的可能性。

在1921年，蘇聯一些無線電專家在喀山作了第一次有線電廣播實驗。B. И. 列寧知道這個消息後，即指示在莫斯科和彼得堡組織大規模的廣播，在那裏不久就出現了第一批強力揚聲器。

有着作為億萬勞動羣衆的共產主義教育工具的意義的無線電廣播，是受到蘇維埃國家的創始人B. И. 列寧和И. В. 斯大林的崇高估價的；它的發展在聲學領域中按其深度來說引起了重大的變革。

無線電工學的發展曾經向聲學提出了一些很高的要求，這些要求是關於聲音肖真的複製和產生強大聲功率的問題的。另一方面在處理聲學問題中，電子工程學的發展提供了聲頻能量的強大源泉以及利用電學方法來作一切可能的聲學測量和研究的可能性。

如此，與無線電工學在利用電子管為基礎而發展的同時，聲學隨之迅速發展。

在電子管的發明後不多的幾年當中，所有聲學的實驗方法都完全改觀了。電學測量方法在聲學中的運用以及無線電廣播的發達，都要求創立一個新的技術部門——電聲學。

化聲能為電能(或化電能為聲能)的各式各樣的換能器，其構造和理論的探討通常都屬於“電聲學”問題的範圍。

隨着電聲換能器理論的發展，較為完善的各式電聲儀器也創造出來了。前面曾述及的И. И. 列別捷夫的工作(在此種工作中建立了不依賴於振動的物理性質的振動定律的普遍性)，經過了蘇維埃學者的勞動已得到進一步的發展。這個在本世紀二十年代中即已開始發現的理論思潮，對以後聲學的發展發生非常收益的影響。應用了電工學中熟知的分析方法，即可成功地解決了工程聲學中的許多最重要的問題。應用所謂機電類比的方法，即可將有關機械振動的問題“翻譯”成電工

學的语言；這種方法在解決聲學的實際問題中佔了一個很重要的地位。

1940年烏克蘭科學院通訊院士 A. A. 哈爾開維奇給出了電聲儀器的深入而嚴謹的理論綜合。

必須指出：基於壓電效應的應用的電聲換能器的理論是首先在蘇聯探討出來的。在這方面最初的工作是由 C. H. 爾謝夫金和 A. M. 雅科甫列夫在 1926 年完成的。H. H. 安得烈耶夫在 1928 年給出壓電晶體振動的一般理論，這是創造新型壓電系統的電聲換能器的基礎。

壓電效應和磁致伸縮效應的許多重要計算的關係和研究，見之於 M. F. 克里高里耶夫，Л. Я. 顧金，И. Г. 德列先，И. Г. 盧沙可夫，B. H. 邱林和其他蘇維埃學者的工作。

蘇聯的科學研究機關和聲學實驗室創造了各種品質優良的電聲儀器，滿足了無線電廣播和聲學測量技術的需要。

在上述蘇維埃科學和技術的成就的基礎上，最新式的電聲儀器研究成功了，也動手生產了。

許多與電聲傳遞技術及聲音複製技術的根本改革有關的工作都得過斯大林獎金。在斯大林獎金獲得者之中，有先進的蘇維埃學者及工程師 B. B. 富爾杜耶夫，A. A. 赫魯曉夫，И. M. 巴洛特尼可夫，B. B. 姆倫謝夫及其他人等；他們的工作使後來的人們能夠創造更好類型的電聲換能器。

電聲學在與工程聲學相近的其他領域內應用甚廣，其中首先應提到液聲學。

當研究聲音在水介質中傳播的定律，研究回聲測深儀，流體測位儀及其他在船舶上應用到的儀器的構成和計算時，要廣泛地應用到電聲學中所探討的原理。

聲波在水介質中傳播問題的科學研究是首先由蘇聯學者完成的，其中除了上面所提到那些人之外，B. C. 安那斯大謝維奇，Л. M. 布烈荷夫斯基，Л. Я. 羅森泊爾格，Ю. M. 蘇哈烈夫斯基也佔了很顯著的位置。

建築聲學是工程聲學的另一重要領域，它包括有關在露天場所中和在各種房屋中(例如音樂廳、劇院和播音室)創造可聞度的最佳條件的很多問題。

播音室的特殊裝置的必要性是聯系到這個問題，爲了使人耳能很好地接受到聲音，這便要求房屋適合某些特殊的聲學要求。如果傾聽語言時語言的清晰性是主要的要求，則欲藝術地傳遞樂音和歌聲時，又必須保持樂器的聲音和演唱者的嗓音的最細緻的音色。在房屋內部創造最佳的聲音吸收條件，是建築聲學的基本任務之一。

解決這個問題是靠正確地選用吸音的質料和房屋的形式。

除此之外，創造一種特殊的隔聲結構，以杜絕或減弱由於各種機械運轉而引起的外界雜聲的侵入建築物，也是建築聲學的任務。在設計各種文化教育建築物時(播音室、音樂廳、劇院)以及設計工業性質的建築物時(其中包括船舶在內)往往提出了減弱雜聲問題。

在露天廣場中裝置揚聲設備時，研究聲學的輻射定律自有其重大的意義。在此情形下，必須將揚聲器所發出的聲音僅僅散播於聽衆所在的地帶內，並在其範圍內，保證具有良好的和同樣的可聞度。

在建築聲學的領域中很多有價值的工作是屬於 C. H. 利夫西茨的。他提出了最佳交混回響的理論，這樣才能成功地解決劇院、音樂廳、播音室等建築物的聲學計算問題。

生理聲學對於聲學的發展來說有極其重要的意義。它的任務是研究決定對聲音振動的感覺的聽覺器官和發聲器官的聲學特性。這便造成了向電聲儀器提出許多技術上一定的要求的機會，聲音複製的質量就要看這些儀器的能否滿足這些要求而定。

近代化電聲儀器的創造，使我們能在這個部門中進行一系列深入的研究。

例如，決定了人類語言和樂器各種聲音的聲譜成分，就決定人耳對於聲振動的各種不同頻率的靈敏度。人耳的聲學特性的進一步研究，