

高等学校教学用书

电声与广播工程

原编者：北京邮电学院电声与广播教研组

审校者：邮电学院电声与广播教材选编组



人民邮电出版社

高等学校教学用书

电 声 与 广 播 工 程

原編者：北京邮电学院电声与广播教研組

审校者：邮电学院电声与广播教材选編組

人 民 邮 电 出 版 社

1962

内 容 提 要

本書分两大部分。第一部分是电声器件，共分四章：电声器件的基本物理基础，传声器，扬声器和磁记录。第二部分是广播系统，共分五章：广播系统的质量指标，室内声学，扩音系统，广播设备和有线广播网。

本書可供高等院校無線电系通信与广播专业作为教学用書使用，也可供一般無線电通信广播技术人員及無線电爱好者参考之用。

原編者：北京

审校者：邮电学院电声与广播教研室 组

出版者：人 民 邮 电 出 版 社

北京东四 6 条 13 号

北京市書刊出版業營業許可証出字第〇四八号)

印刷者：北 京 市 印 刷 一 厂

发 行 所 华 北 店

定价：(10) 元

緒 論

广播是现代化的强有力的宣传教育工具。在社会主义国家里，广播和电视是为无产阶级的政治、为宣传党的方针政策、为生产建设、为丰富广大人民文化生活而服务的。广播设备及收听工具是达到以上要求的物质基础。掌握广播设备及收听工具的使用、维护、设计、制造技术是通信、广播技术工作者的首要任务。

广播的技术过程又可分为两方面：（一）准备和输送节目，（二）将节目传输到广大的听众或观众中去。按广播节目的性质来分，有声音广播和电视广播两大类，但是在电视广播中的伴音也是属于声音广播的。本课程的任务是讲述有关声音广播方面的主要技术问题。

声音广播节目有很多种，如演讲、音乐、戏剧和新闻报告等。准备和输送节目的过程是将声音振动转换成电的信号。广播节目在特殊设计的播音室内演出。由传声器将声音转变成电信号，经过放大设备将电信号放大，然后直接或通过发射设备送到听众处。为了保证节目输送的质量，在送到听众处之前，应有监测和调整广播信号的设备 and 措施。

广播节目传输到广大听众的方式有无线电广播和有綫广播两种。在无线电广播中，前述的广播信号送到发射中心中去，在发射机中经过调制的过程，将无线电频率的信号由天綫以电磁波的形式传播出去。在听众处用接收机将电磁波信号还原成声音。在无线电广播发展的初期，所有的发射中心都是调幅的。现在又广泛地发展着调频的超高频广播，这种系统有更好的声音质量。因而对广播技术的要求也更高。

有綫广播是将声音节目的电信号直接由导綫传输到听众处，在听众处的设备就比较简单（主要是扬声器），同时也可能得到高质量的声音。这种系统在工农业建设和国防上都有重要意义。目前有綫广播大多同时只能有一种节目。这是它的缺点。从经济的观点来

看，有線广播中造价最貴的是綫路网。因此如何利用其他綫路，如電話綫或電力綫作为广播綫路是一个很有实际意义的問題。目前在这方面已有很多发展。

广播技术中的一个特殊部門是广场、剧院和厅堂等的扩音。随着国家建設的发展，許多大建筑物的建造，扩音的技术問題逐漸普遍和受到更多的注意。

由上面簡短的說明可知，广播的技术問題包括声音的和电的两方面。有关声音和声电能量轉換的問題是属于声学或电声学的范畴，主要包括用来作电声轉換的电声器件、录音技术、播音室的声学处理和扩音技术等方面。它对于广播技术的发展和质量的提高有直接关系。随着社会主义建設的发展和人民文化生活不断的提高，对广播质量的要求也愈来愈高了。現在实际使用的广播系統絕大多數是单通道的。为了进一步提高声音广播的质量，使听众听到的声音更逼真自然，目前已經开始发展有几个通道的立体声广播系統和立体声录音、扩音系統。

在广播技术发展的过程中，磁录音設備和录音技术起着重大的作用。現在又在磁录音技术的基础上发展出电视信号的磁記錄技术（磁性录象技术），可以預料在不久的将来电视信号的磁記錄对电视广播的发展也将产生重大的影响。此外，磁記錄技术目前在其他科学领域中也有广泛的应用。

和广播系統中电的設備相比較，电声器件的质量还不够完善，是影响整个广播系統质量指标的重要因素。电声器件如传声器和揚声器是整个广播技术过程中开始的和最終的設備，对它們应有严格的要求。因此改善电声器件的质量和正确地使用电声器件是广播技术中重要的任务。

本課程的目的是讲授声音广播技术中声頻部分的基本知識。全課程分为两大部分。第一部分是电声器件，包括传声器、揚声器和磁录音技术，主要是說明这些电声器件的工作原理和特性。在第一章里讲述电声学中必要的基础理論知識。作为研究电声器件的基

础。因为受课程时间的限制，这部分的内容并不包括所有的电声器件，只选择目前在广播中最重要而应用最广泛的几种电声器件作重点讲授。本课程的第二部分是广播系统，包括广播质量指标、室内声学、扩音系统、广播设备和有线广播网。其中室内声学主要讲播音室，扩音系统主要讲声场和电声反馈的问题，广播设备主要讲声频通路和计算，有线广播网主要讲两节线路网的计算。这部分除了有必要的原理说明外，还讲述了设计广播系统的必要知识。

在学习本课程时，要求具备一些专业的基础知识，如无线电基础，电子管放大器等。

序 言

本书是邮电高等学校无线电系通信与广播专业中电声与广播工程课程的教学用书。书中内容符合该课程的1960年的教学大纲。

本书原稿系北京邮电学院无线电系电声与广播教研组在1961年编写的讲义。讲义是在1960年教学改革的基础上修订的。讲义修订的过程中，参考了苏联莫斯科电信学院同课程的教科书（В. В. Фурдуев. Акустические Основы Вещания, Связьиздат, 1960 Г），本书的部分材料是直接从此书中选取的。

参加原稿编写的，有北京邮电学院教师陈通、刘泽民和刘孙刚等同志。

参加审校的教材选编组成员有：北京邮电学院教师陈通、刘泽民；武汉邮电学院教师程丰宇；南京邮电学院教师鲍亦骥。在审校过程中对原稿做了补充和修改。

参加本书绘图、缮写等工作的还有北京邮电学院工程画教研组和无线电系的部分同学。参加校对的有北京邮电工业学校的部分同学。

由于经验不足，审编时间短促等原因，本书内容难免有不够妥当和错误的地方。希望读者特别是使用本书的教师和同学们，积极提出批评和改进意见，以便今后修改和提高。

1961年10月

目 录

序言

緒論

第一部分 电声器件

第一章 电声器件的基本物理基础	1
§ 1-1 声波的基本知識	1
§ 1-2 机电类比法的基础	7
附录 声波的基本方程式的推导	18
第二章 傳声器	20
§ 2-1 引言	20
§ 2-2 传声器的技术特性	21
§ 2-3 声波接收器	22
§ 2-4 电动传声器	28
§ 2-5 电容式传声器	35
§ 2-6 复合传声器	41
§ 2-7 传声器的选择与运用	45
第三章 揚声器	47
§ 3-1 引言	47
§ 3-2 揚声器的技术特性	48
§ 3-3 活塞式輻射器	50
§ 3-4 直射式电动揚声器	60
§ 3-5 改善直射式电动揚声器质量的方法	69
§ 3-6 号筒式輻射器	78
§ 3-7 号筒式电动揚声器	85
§ 3-8 双頻带揚声器	89
第四章 磁記錄	93
§ 4-1 引言	93
§ 4-2 磁录音机的簡單介紹	95

§ 4-3 磁录音的基本物理过程	96
§ 4-4 直流偏磁录音	99
§ 4-5 超音频偏磁法录音	101
§ 4-6 放音过程	107
§ 4-7 录音和放音过程中的损失	108
§ 4-8 录音放音综合信号频率特性的校正	114
§ 4-9 磁带录音机的结构	115
§ 4-10 磁录音机的一些质量指标	119
§ 4-11 磁录象简述	120

第二部分 广播系统

第五章 广播质量指标	128
------------	-----

§ 5-1 听觉的可听频率范围与动态范围	128
§ 5-2 声音的响度及其等响曲线	129
§ 5-3 广播传输的质量标准	131

第六章 室内声学	135
----------	-----

§ 6-1 混响	135
§ 6-2 混响时间的计算	140
§ 6-3 混响信号的清晰度	144
§ 6-4 隔音	145
§ 6-5 吸音材料及吸音结构	147
§ 6-6 播音室的设计	153
§ 6-7 电视播送室声学设计特点	162
§ 6-8 人工混响器	164
§ 6-9 传声器的拾音问题	167

第七章 扩音系统	172
----------	-----

§ 7-1 技术要求和分类	172
§ 7-2 室外扩音的声场	174
§ 7-3 室内扩音的声场	182
§ 7-4 电声反馈及扩音放大量的极限	185
§ 7-5 立体声扩音系统	190

§ 7-6 扩音系统举例	192
附录 声柱方向性的计算	195
第八章 广播设备	196
§ 8-1 广播设备概述	196
§ 8-2 混合设备	200
§ 8-3 交换系统	209
§ 8-4 隔离假线及线路变压器	214
§ 8-5 信号系统	216
§ 8-6 电平图	218
第九章 有线广播网	221
§ 9-1 引言	221
§ 9-2 有线广播网的构成系统	221
§ 9-3 用户点设备	222
§ 9-4 质量指标	227
§ 9-5 广播线路的计算	228
§ 9-6 初步设计	241
§ 9-7 频率畸变的校正	244
§ 9-8 利用载波传送有线广播节目	247
§ 9-9 远程供电	249
§ 9-10 利用低压电力线路传送有线广播	250
参考书目	252

第一部分 电声器件

第一章 电声器件的基本物理基础

§ 1-1 声波的基本知識

为了今后更好地理解有关电声器件方面的问题，我們先简单介绍一下声波的基本知識和声波的一些基本参量的定义。

I. 声波的基本性質

我們知道声波在媒质（空气）中的传播是纵波的形式，即疏密波。声波存在的空間范围称为声場。声場中媒质的物理状态，或更准确地說由于声場存在而引起媒质物理状态的变化，可以用声压、媒质质点的振动速度和媒质密度三个基本参量來說明。它們都是位置和时间函数的：

(1) 声压(P): 它表示媒质中总的瞬时压力值和平均压力值(媒质中不存在声場)間的差值，单位为达因/厘米²，或称微巴(巴是指一个大气压力的单位)。在压缩相位时，声压为正；在膨胀相位时，声压为負。

(2) 振动速度(v): 它表示声波在媒质中传播时，媒质质点振动速度的瞬时值，单位为厘米/秒。当媒质质点在沿声波传播的方向运动时，振动速度取为正；相反方向运动时，取为負。

(3) 媒质密度(ρ): 它表示声波在媒质中传播时媒质密度的瞬时值。媒质中压力的变化与媒质的压缩和膨胀有关，因此当声波在媒质中传播时，媒质的密度就有变化。

以上三个基本参量是互相有关的。在小振幅的情况下，也就是一般声波的情况下，它們間的关系是綫性的。这个关系可以用下列

三个方程式表示 (詳細推导見本章附录)。

$$-\frac{\partial p}{\partial r} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t} \quad (1-1)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = C_0^2 \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (1-2)$$

$$S \frac{\partial \rho}{\partial t} = -\rho_0 \frac{\partial (Sv)}{\partial r} \quad (1-3)$$

式中: p 、 v 和 ρ 分别是声压、振动速度和媒质密度; ρ_0 是媒质静态密度 (无声波时); C_0 是声波传播的速度; r 是沿声波传播方向的距离; S 是在距离为 r 处波前面的面积。

由上面三个基本方程式, 可以得出以声压表示的声波传播的方程式:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = C_0^2 \left[\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{\partial r} \cdot \frac{\partial (\ln S)}{\partial r} \right] \quad (1-4)$$

在具体条件下, 由声波方程式可确定声压 p , 然后再由式 1-1 到式 1-3 求出其他两个参量。实用上, 我們常用声压和振动速度两个基本参量来说明声场的性质。下面具体讨论两种基本的声波传播形式。

在平面波的情况下, 波前面的面积 S 是不变的, 例如在細管中声波的传播。因此波动方程式变为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = C_0^2 \frac{\partial^2 p}{\partial r^2}$$

在簡諧振动和沿 r 方向传播的行波情况下, 方程式的解为

$$p = p_m e^{j(\omega t - kr)} \quad (1-5)$$

式中: p_m 是声压的振幅; k 是波数。波数与声速 C_0 和簡諧振动的角频率 ω 有下列关系:

$$k = \frac{\omega}{C_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$$

式中: λ 是声波波长。

由式 1-1 可求出媒质质点的振动速度

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int -p_m j k e^{j(\omega t - kr)} dt$$

$$= \frac{1}{C_0 \rho_0} p_m e^{j(\omega t - kr)} = \frac{p}{C_0 \rho_0} \quad (1-6)$$

由上述讨论中可知，在平面波中， p 和 v 的振幅均不随距离变化。 p 和 v 作同相变化，且成正比关系：

$$p = \rho_0 C_0 v \quad (1-7)$$

$\rho_0 C_0$ 值仅与媒质的物理特性有关，称为波阻抗率。它表示在简谐振动的情况下，声压与振动速度间的关系。对空气讲，在温度为 20°C 和额定平均压力（760 毫米水银柱高，差不多是 10^6 微巴）时， $\rho_0 = 1.2 \times 10^{-3}$ 克/厘米³； $C_0 = 3.43 \times 10^4$ 厘米/秒； $\rho_0 C_0 = 41.5$ 克/厘米²·秒。

在球面波的情况下，例如，在无限空间中有一球体，其半径在平均值 r_0 附近以微量 dr 作简谐变化。这个脉动球体就产生球面波。波前面是球面 $S = 4\pi r^2$ ，这时波动方程式成为：

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = C_0^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial p}{\partial r} \cdot \frac{2}{r} \right) \quad (1-8)$$

式 1-8 经变化后，可写成

$$\frac{\partial^2 (rp)}{\partial t^2} = C_0^2 \frac{\partial^2 (rp)}{\partial r^2} \quad (1-9)$$

在简谐振动的情况下，上式的解是：

$$p = \frac{A}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1-10)$$

常数 A 可由在脉动球表面上的声压振幅 p_{cm} 来表示，即在 $r = r_0$ 时， p 的振幅为 p_{0m} ，所以 $A = r_0 p_{0m}$ 。式 1-10 最后可写成：

$$p = \frac{r_0 p_{0m}}{r} e^{j(\omega t - kr)} \quad (1-11)$$

这时，声压振幅与距离 r 成反比变化。

根据式 1-1，媒质的振动速度是

$$v = -\frac{1}{\rho_0} \int \left[-jk \frac{r_0 p_{0m}}{r} e^{j(\omega t - kr)} - \frac{r_0 p_{0m}}{r} e^{j(\omega t - kr)} \right] dt$$

$$= p \frac{kr - j}{C_0 \rho_0 kr} \quad (1-12)$$

由上式可見，声压和振动速度也不是同相变化了，它們間的关系是

$$\frac{p}{v} = \rho_0 C_0 (r' + jx') \quad (1-13)$$

式中： $r' = \frac{(kr)^2}{1 + (kr)^2}$ ； $x' = \frac{kr}{1 + (kr)^2}$ 。

式 1-13 中 r' 及 x' 是无因次系数，与频率和声源到观察点的距离有关。声压和振动速度間的相角 φ ，由下式确定

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{x'}{r'} = \frac{1}{kr} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\lambda}{r} \quad (1-14)$$

和平面波相比較，可以知道：这相角是由于在球面波中声压振幅随距离增加而减小所引起的。当距离远时 ($r \gg \lambda$)， p 与 v 間的相角小 ($\varphi \leq 9^\circ$)。这时它們間的关系可以足够准确地采用式 1-7。

从式 1-13 中很容易求出在簡諧振动的球面波声場中，声压振幅 p_m 和振动速度振幅 v_m 間的关系：

$$\frac{p_m}{v_m} = \rho_0 C_0 \sqrt{r'^2 + x'^2} = \rho_0 C_0 \cos \varphi \quad (1-15)$$

II. 声場中的能量关系

声波传播的过程与能量的轉移相联系，在声波的行波中能量由烏莫夫向量确定

$$\vec{U} = p \vec{v} \quad (1-16)$$

烏莫夫向量式 1-16 显然是时间的函数，乘积 $p \vec{v}$ 在时间上的平均值实用上具有重要的意义，称为声强 J ；单位为尔格/厘米²秒。声强是在单位时间内通过单位面积（垂直于声波传播方向）的平均声能量。

$$\vec{J} = \frac{1}{T} \int_0^T p \vec{v} dt \quad (1-17)$$

在一般情况下, 当简谐振动时,

$$p = p_m \sin \omega t, \quad v = v_m \sin (\omega t - \varphi)$$

根据式 1-17, 我们可以确定在振动周期 $T \left(= \frac{2\pi}{\omega} \right)$ 内, p, v 的平均值

$$\begin{aligned} J &= p_m v_m \left[\frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \sin \omega t \sin (\omega t - \varphi) dt \right] \\ &= \frac{p_m v_m}{2} \cos \varphi \end{aligned} \quad (1-18)$$

对球面波讲, 应用式 1-15 得:

$$J = \frac{1}{2} \frac{p_m^2}{\rho_0 C_0} = \frac{1}{2} v_m^2 \rho_0 C_0 \cos \varphi \quad (1-19a)$$

以声压来确定声强是最方便的。首先是由于测量声压比测量振动速度简单和方便得多, 其次是并不需要知道相角 φ 值。如果从声压振幅值 p_m 过渡到声压有效值 p_{eff} , 那么

$$J = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 C_0} \quad (1-19b)$$

此式不仅适用于简谐情况, 同时对其他任何的稳态声学过程也都适用。

除声强外, 声能的平均 (时间上) 密度, 也就是包含在单位体积中的能量, 也用来说明声场的能量特性, 它的单位为尔格/厘米³。根据烏莫夫定理, 在声波的行波中, 体积能量密度为

$$\varepsilon = \frac{J}{C_0} = \frac{p_{\text{eff}}^2}{\rho_0 C_0^2} \quad (1-20)$$

应当指出, 声强的概念仅对行波才有意义, 而声能密度的概念也适用于驻波的声场 (在空间能量不转移) 以及其他情况, 例如在密闭房间中声波在各墙面、天花板等上反射后, 彼此加在一起有着不同的各种运动方向的情况。

III. 声平

在声学技术中用声压、声强和声能密度, 一般不是采用绝对单

位来估计，而是采用相对对数单位（分贝）。用对数单位测得的值称为声平（级）。声音的声平表示为

$$N = 10 \lg \frac{J}{J_0} \text{ 分贝} \quad (1-21a)$$

式中： J_0 —相当于某一选择为零声平时的声强，根据国际协议，其值选择为 $J_0 = 10^{-9}$ 尔格/厘米²秒。它差不多相当于人耳听觉最灵敏的频率区域——阈限的强度。根据式 1-19 b，声平还可以表示成：

$$N = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \lg \frac{p}{p_0} \text{ 分贝} \quad (1-21b)$$

式中： p 是声信号的有效压力；

$p_0 = \sqrt{\rho C_0 J_0} \approx 2 \times 10^{-4}$ 微巴，相当于声强 J_0 的有效压力。

最后声能密度级为

$$N = 10 \lg \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \text{ 分贝} \quad (1-21c)$$

式中： $\epsilon_0 = \frac{J_0}{C_0} \approx 3 \times 10^{-14}$ 尔格/厘米³。

反映声学过程电信号的电平也用对数单位（分贝）来估计。广播信号功率的功率电平，我们是采用相对于功率 P_0 ($= 10^{-3}$ 瓦 = 1 毫瓦) 来计量的。

功率电平为：

$$N = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{ 分贝} \quad (1-22)$$

N 称为绝对电平。

因为 $P = \frac{U^2}{Z} = I^2 Z$ (式中： U 和 I 是电压和电流的有效值； Z 是发出功率 P 的阻抗)，所以

$$N = 10 \lg \frac{U^2}{P_0 Z} = 20 \lg \frac{U}{U_0} \quad (1-23a)$$

式中： $U_0 = \sqrt{P_0 Z}$ 。

$$\text{同理} \quad N = 10 \lg \frac{I^2 Z}{P_0} = 20 \lg \frac{I}{I_0} \quad (1-23b)$$

$$\text{式中: } I_0 = \sqrt{\frac{P_0}{Z}}.$$

当 $Z=600$ 欧时, 根据以上关系, 得 U_0 等于 0.775 伏, I_0 等于 1.27 毫安。

最后我们来讨论一下, 如何确定两个相关信号或者信号与杂音相加所得的复杂信号的声平。设两个不相关的信号相加, 它们的声平分别为 N_1 与 N_2 。根据式 1—22, 这些信号的功率各等于: $P_1 = P_0 10^{0.1N_1}$; $P_2 = P_0 10^{0.1N_2}$ 。

在不相关性的情况下, 信号功率相加, 这样合成信号的功率为 $P = P_1 + P_2 = P_0 (10^{0.1N_1} + 10^{0.1N_2})$, 它的声平等于

$$\begin{aligned} N &= 10 \lg \frac{P}{P_0} = 10 \lg (10^{0.1N_1} + 10^{0.1N_2}) \\ &= 10 \lg \{ 10^{0.1N_1} [1 + 10^{0.1(N_2 - N_1)}] \} \\ &= N_1 + 10 \lg (1 + 10^{0.1\Delta N}) \end{aligned} \quad (1-24)$$

式中: $\Delta N = N_2 - N_1$ ——相加信号的声平差。

如此便可算出合成信号的声平。如果两信号的声平相等 $N_1 = N_2$, 那么根据计算, $N = N_1 + 3$ 分贝。根据计算, 当 $\Delta N > 10$ 分贝时, $N = N_2$; 当 $\Delta N < 10$ 分贝时, $N = N_1$ 。

§ 1-2 机电类比法的基础

在研究电声器件时, 我们会遇到各种类型的机械和声学振动系统。为了分析和计算它们, 在声学技术中广泛地采用所谓机电类比的方法。这种方法是依据描述电振荡系统和机械振动系统形式上的类比。这种方法的基本概念很早就被人们指出过, 但是深入的研究和使它适应工程技术上的要求还是不久以前的事 (20 年代和 30 年代)。由于高质量新型电声器件的研制, 促使人们在复杂的机械振动系统中借用交流电路的理论 (首先是复数阻抗方法) 来进行分析和计算, 以免除微分方程式方法的复杂性。