



中等專業學校教學用書

電 聲 學

В. К. 伊 奧 費 著

高 等 教 育 出 版 社



13.3210/v

统一书号 15010·448
定价 ¥ 0.90



电 声 学

B. K. 伊 奥 费 著
关 定 华 译
馮 秉 銓 校

高 等 教 育 出 版 社



本書系根据苏联国立电訊書籍出版社 (Государственное издательство литературы по вопросам связи и радио) 出版的伊奥費 (В. К. Иофе) 著“电声学” (Электродинамика) 1954 年版譯出。原書經苏联邮电部教育司审定为通訊中等技术学校教学参考書。

本書的內容包括声的物理性質, 听觉, 以及与声波發射、傳播和接收有关的物理过程的基本知識。本書研討各种不同系統的傳声器、揚声器以及录音和揚声設備的工作原理、結構和主要技术数据, 闡明空間声学的問題: 播音室裝备, 露天空間地方及大厅內的揚声。最后兩章涉及播音室及發声系統的計算方法, 并附有适当的例題。

本書由关定华同志譯出, 馮秉鈺教授校訂。

电 声 学

В. К. 伊奥費 著

关定华 譯

高等教育出版社出版 北京琉璃廠 170 号

(北京市書刊出版業營業許可証出字第 054 号)

京华印書局印刷 新华書店总經售

統一書号 15010·443 開本 850×1168 $1/32$ 印張 5 $11/16$ 字數 138,000 印數 0001—4,500
1957 年 5 月第 1 版 1957 年 5 月北京第 1 次印刷 定價 (10) 元 0.90

目 录

序	5
第一章 声学的基础知識和声的物理性質	7
1-1. 机械振动系統与机电类比	7
1-2. 机电換能器	15
1-3. 媒質中的振动与波	19
第二章 听觉	31
2-1. 純音的感觉	31
2-2. 复音的感觉	34
第三章 广播用傳声器	37
3-1. 傳声器的質量指标	37
3-2. 声的接收	40
3-3. 电动傳声器	45
3-4. 帶振傳声器	54
3-5. 复合傳声器	60
3-6. 电容傳声器	64
3-7. 晶体傳声器	67
3-8. 炭粒傳声器	72
第四章 揚声器与耳机	76
4-1. 揚声器的类别及其基本性質	76
4-2. 声的輻射	79
4-3. 紙盆揚声器	90
4-4. 喇叭揚声器	104
4-5. 揚声器的輸入阻抗	112
4-6. 耳机	114
第五章 录音和放音	118
5-1. 机械录音和放音	118
5-2. 光录音和放音	127
5-3. 磁性录音及放音	129
第六章 播音室	146
6-1. 播音室的混响時間与消音方法	146

6-2. 播音室的声絕緣	156
6-3. 播音室大小的決定	162
6-4. 播音室內傳聲器的安置	163
6-5. 各種用途不同的播音室, 播音室輔助房間, 播音室組。	164
6-6. 播音室的照明, 采暖及通風	165
6-7. 播音室計算的例子	167
第七章 揚聲	171
參考書刊	181

序

为了完成苏联共产党第十九次代表大会和苏联共产党中央九月全体會議在無線广播和無線电化方面提出的任务，要求广泛采用新的技术方法和設備，以提高广播的質量，并使之更有效率和更为經濟。

这里，广播綫路的电声环节有着决定性的意义。实际上，播放广播节目的質量首先决定于最初發声室（播音室，音乐厅等等）的声学特性，决定于电声設備（傳声器，录音和揚声的設備，揚声器）的指标以及收听广播节目的室內室外揚声方法。大家也都知道，任何一种广播系統的經濟性，首先决定于所用揚声器的灵敏度。这一情况在农村無線电化的条件下有着特殊的意义。

本書是通訊中等技术学校学生用的电声学教学参考書。

本書的內容包括声的物理性質，听觉，以及与声波發射、傳播和接收有关的物理过程的基本知識。書中研討各种不同系統的傳声器、揚声器，以及录音和揚声設備的工作原理、結構、和主要的技术数据；闡明下列空間声学問題：播音室的装备，露天空闊地方及大厅內的揚声。在第六、七章中涉及播音室及發声系統的計算方法，并附有适当的例题。

电声学的問題是“無線电通訊及广播”專業的学生所学的“無線电广播”課程中主要部分之一，也是“無線电化”專業的学生所学的“电声学及無線电轉播站”課程中主要部分之一。

在上述兩種情况下电声学部分都是在第五学期学的，这时学生在数学、物理学及电工学方面已有了完整的准备。同时，在第五学期無線电原理課程还刚刚开始，因此学生对振蕩方面的問題还没有足够的知識。

因此,在本書中材料的敘述考慮到學生在數學,物理學和電工學方面已有準備,同時也考慮到必需講解有關振蕩的基本知識(波長、振蕩的傳播速度、駐波等概念)。

最後必需指出:在敘述有關傳聲器及揚聲器電聲指標的問題時,著者所根據的是現行的全蘇標準, № 40133 “傳聲器和揚聲器聲學測試方法”。

但現在又擬定了新的國家標準來代替全蘇標準 № 40133, 其中的名詞與全蘇標準 № 40133 不同。以後使用本書時對這點應加以注意。

對本書的各種意見請寄: 莫斯科中心區, 清池林蔭道二號
電訊書籍出版社 (Москва-центр, Чистопрудный бульвар, 2, Связьиздат)。

第一章 声学的基础知識和 声的物理性質

1.1. 机械振动系統与机电类比

人耳对声的感觉是空气質点振动所造成的。声的振动不仅能經空气傳播，而且也能經固体傳播。但是在極大多数情况下声音是經空气傳到人耳的(人的語言，乐器的声音，揚声器傳来的声音等)。

要使空气質点能产生声振动，就必須用某种方法使質点本身振动起来，或者按声学中習用的說法，把它“激动”起来。如揚声器的紙盆，提琴的弦等等都可以作为这种“激动物”或者叫作声源。所有这些情况下都是由于固体(紙盆，弦)的振动使空气質点發生振动。因此研究声的現象應該由研究这些固体的振动开始。

参与振动的固体或几个固体的总和称为机械振动系統。

讓我們来研究一个簡單的机械振动系統(圖 1.1)，其中有質量 m ，固定在彈性为 s 的彈簧 c 上。質量处于粘性媒質中，媒質产生的摩擦阻为 r 。如果將彈簧的一端由平衡位置拉开 x 距离，彈簧就有一个要縮短的力。显然，彈簧拉得越長，或彈簧的彈性越大，这力量就越大。因此彈簧使被拉开一端恢复平衡位置的回复力 F ，等于乘积 xs ，其中 x 是彈簧端点被拉开的距离， s 是彈簧的彈性系数。

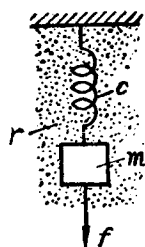


圖 1.1 簡單机械
振动系統。

而 s 等于
$$s = \frac{F_s}{x} \quad (1.1)$$

因此,某一彈簧如果被拉開一個單位長度(1 厘米),要縮短的力也是一個單位(1 達因),這彈簧的彈性就稱為彈性的單位。因此,如果知道一個彈簧的彈性是 10000 達因/厘米,這就是說,彈簧被拉長一厘米時,向回縮短的力是 10000 達因。

彈簧的性質也可以用彈性系數的倒數來表示。這個量叫做柔順性系數,用字母 c 代表:

$$c = \frac{1}{s} \quad (1.2)$$

因之,
$$c = \frac{x}{F_s} \quad (1.3)$$

例中所舉彈性為 10000 達因/厘米的彈簧,其柔順性為 1/10000 厘米/達因。這就是說,當作用於彈簧的力為 1 達因時,彈簧伸長 1/10000 厘米。顯然,彈簧的彈性和柔順性兩種特性能夠同樣地表現彈簧的性質。

現在來確定摩擦阻。物體移動時產生摩擦力,阻礙物體的主要運動。當物體在粘性媒質中運動時,摩擦力 F_r 與物體運動速度 x' 及某一系數 r 成正比。 r 表明產生摩擦的媒質的性質,通常稱為摩擦阻。應該指出,不僅當物體在粘性媒質中運動時會產生摩擦阻,就是由於內摩擦,例如彈簧伸長或縮短,其材料內部質點互相摩擦,也會產生摩擦阻。

摩擦阻是所謂力阻的一種特殊情況。具有力阻的機械系統,其特點就是在這系統中總會發生由機械能變為他種能量的不可逆過程。如果系統的全部力阻都是摩擦阻的話,機械能就轉化為熱能。

由上述可知,摩擦力可用下式表出

$$F_r = rx' \quad \text{或} \quad r = \frac{F_r}{x'} \quad (1.4)$$

因此,當物體以單位速度(1 厘米/秒)移動,且由力阻而產生的阻礙力也是一單位(1 達因)時,則這力阻就稱為力阻(摩擦阻)

單位。力阻的單位是克/秒 (因為達因的因次是: 1 達因等於 1 克厘米/秒²), 這單位有時叫作力歐姆或力歐, 理由我們在後面還要談到。如果系統中的摩擦阻給定為 100 力歐, 這就是說, 當物體以 1 厘米/秒的速度運動時, 阻礙力是 100 達因。

在沒有外力作用時所有的物體都企圖保持原來的靜止或等速直線運動的狀態。改變這種狀態時, 物體就用力抵抗, 這力稱為慣性力。慣性力等於質量 m 與加速度 x'' 的乘積。

現在我們再回來研究圖 1.1 中所畫的機械振動系統。設在質量為 m 的物體上加一個向下的力 F 。物體受這力作用後由平衡位置向下移動一距離 x 。這時, 在質量為 m 的物體上作用的力除外力 F 之外, 還有: 第一, 慣性力 mx'' ; 第二, 摩擦阻力 rx' ; 第三, 企圖使物體回到平衡位置的彈簧彈力。彈力之值等於 sx 或 $\frac{x}{c}$ 。顯然, 所加的外力 F 應與慣性力、摩擦力及彈力平衡, 因此可以寫為

$$mx'' + rx' + sx = F$$

或
$$mx'' + rx' + \frac{x}{c} = F, \quad (1.5)$$

其中 $x' = \frac{dx}{dt}$ 是物體的速度,

$x'' = \frac{dx'}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ 是物體的加速度。

方程式(1.5)可以寫為:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + sx = F$$

或
$$m \frac{d^2x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + \frac{1}{c} x = F. \quad (1.6)$$

所得到的微分方程式(1.6)與由電感 L 、電阻 R 及電容 C 串聯構成的交流電路方程式完全相似。實際上, 電壓方程式

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int i dt = e, \quad (1.7)$$

(其中 e 為外加於電路的電動勢, i 為電路中流過的電流) 可變為

下列方程式

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{q}{C} = e, \quad (1.8)$$

因为电流 i 是电荷 q 对时间的微分, 也就是

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

方程式(1.6)与(1.8)之间的相似性是很明显的。这反映两个系统中都有从一种能转换为另一种能的情况。实际上, 在(1.6)方程式所代表的机械系统中, 运动物体的动能转换为拉长了的弹簧的势能, 势能又再转回成动能。一部分能由于有摩擦转换为热。电路中有电流流过时产生的磁场的能转换为电场的能(电容器充电), 电场的能量又转回成磁场的能。一部分能在电阻上转换为热。

在这些方程式中, 质量、摩擦阻和柔顺性分别相当于电感、电阻与电容。应该说, 这种类似不仅是外部形式上的相似, 而是反映了上述各量(或叫作参数)之间物理上的相似。的确, 电路中的电感当电源闭合时阻止电流突然由零升到某一最终数值, 当电源切断时也阻止电流骤然下降到零。机械系统中的质量也是如此。在受力时物体的惯性阻止速度骤然增加, 也使物体不能一下就停住。

如上面所指出的, 由于有电阻存在, 一部分电流的能转换为热。在有摩擦存在时也有有一部分机械能转换为热。弹簧的柔顺性越大, 则加一定的力量后位移就越大。电容越大, 则加一定的电压后电容器上的电荷就越多。其次, 也很清楚, 电荷可以看成相当于位移, 而电流因此就相当于速度。电动势与机械力也是相对应的, 电动势是产生电流的原因, 而机械力则是物体运动的原因。既然方程式(1.8)的解为已知, 由于(1.6)和(1.8)两方程式的相似, 可以立刻得出方程式(1.6)的解。

在由方程式(1.7)或(1.8)决定工作状态的路径中加上一个按

正弦法則变化的电动势($e = E_m \sin \omega t$), 电流就等于

$$i = \frac{E_m \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}, \quad (1.9)$$

其中 φ 是电路中电流的相角, 可由下式求出

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}. \quad (1.10)$$

由于兩者相似, 加有按正弦变化的力($F = F_m \sin \omega t$)的簡單振
动系統中物体的振动速度可用下式表出:

$$x' = \frac{F_m \sin(\omega t - \varphi)}{\sqrt{r^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega c}\right)^2}}, \quad (1.11)$$

其中 φ 为力与速度間的相角, 可由下式求出

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\omega m - \frac{1}{\omega c}}{r}. \quad (1.12)$$

$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$ 是电阻抗, 以欧姆为單位, 与之相似
的

$$Z_m = \sqrt{r^2 + \left(\omega m - \frac{1}{\omega c}\right)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\omega m - \frac{s}{\omega}\right)^2} \quad (1.13)$$

称为力阻抗, 以力欧姆(力欧)为單位。

电路中的电抗 $\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ 是感抗 ωL 与容抗 $\frac{1}{\omega C}$ 之差, 与之相
应, 在机械系統中 $\omega m - \frac{1}{\omega c} = \omega m - \frac{s}{\omega}$ 称为力抗, 是慣抗 ωm (由
物体的慣性决定) 与彈抗 $\frac{1}{\omega c}$ 或 $\frac{s}{\omega}$ 之差。力抗也是以力欧为單位。

在声学中和在电工学中一样, 按正弦变化的量(力、位移、速

度、加速度等)通常都用其有效值来量度。有效值是振幅值的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 分之一。

現在来看一下正弦振动中位移、速度与加速度之間的关系。当物質質点按正弦法則振动时，質点对平衡位置的位移可用指数公式表示：

$$x = x_m e^{i\omega t}, \quad (1.14)$$

其中 x_m 是位移振幅。

因此，振动速度將等于

$$x' = \frac{dx}{dt} = i\omega x_m e^{i\omega t}, \quad (1.15)$$

而加速度則等于

$$x'' = \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{dx'}{dt} = -\omega^2 x_m e^{i\omega t} = -\omega^2 x. \quad (1.16)$$

这样，位移 x_m 、速度 x'_m 和加速度 x''_m 的振幅绝对值(有效值也一样)之間的关系为：

$$x''_m = \omega^2 x_m \text{ 或 } x''_m = \omega x'_m \quad (1.17)$$

和

$$x'_m = \omega x_m. \quad (1.18)$$

至于公式(1.15)中的 i 和公式(1.16)中的負号，則是說明速度的相位比位移超前 90° ，而加速度的相位比速度又超前 90° ，与位移間的相位差为 180° 。

由上列几个关系式可以得出这样一个結論：要想得到同样的振动速度振幅 x'_m ，在振动频率高时要求的位移小，而在频率低时要求的位移大。

研究一下电流的公式(1.9)及速度的公式(1.11)在不同频率的情况，可以看出，如果电抗与力抗等于零，則电流与速度就將最大。这現象在所謂諧振频率上發生。諧振频率在电路中等于

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.19)$$

在机械系統中等于

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{\sqrt{\frac{m}{s}}} = \sqrt{\frac{s}{m}}. \quad (1.20)$$

因此,机械系統的彈性越大,質量越小,也就是系統越輕而硬,則機械系統的諧振頻率就越高。反過來說,系統越重而軟,其固有頻率就越低。日常經驗都証明這一點。硬而輕的鋼條,夾在虎鉗之中,諧振頻率就高。大的質量放在軟的減振器上,例如汽車架在彈條上,諧振頻率就低。

不难看出,在諧振附近,系統的速度实际上由力阻(摩擦阻)決定,因為在這個範圍內力抗很小,與力阻比較起來可以忽略。如果系統中的力阻不大,則在諧振頻率以下的頻帶中,振動速度基本上由彈性決定,或更準確一些說是由彈抗 $\frac{s}{\omega}$ 決定,而在諧振頻率以上的頻帶中則由質量決定,或者更準確一些說是由慣抗 ωm 決定。

將力抗的公式加以變化:

$$\left(\omega m - \frac{s}{\omega}\right) = -\frac{s}{\omega} \left(1 - \frac{m}{s} \omega^2\right) = -\frac{s}{\omega} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \quad (1.21)$$

或
$$\left(\omega m - \frac{s}{\omega}\right) = \omega m \left(1 - \frac{s}{m} \frac{1}{\omega^2}\right) = \omega m \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right). \quad (1.22)$$

因此,在頻率比諧振頻率低很多的時候,即 $\frac{\omega}{\omega_0} \ll 1$ 時,力抗等于

$$\omega m - \frac{s}{\omega} = -\frac{s}{\omega} \left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_0^2}\right) \approx -\frac{s}{\omega}, \quad (1.23)$$

而在頻率比諧振頻率高很多的時候,即 $\frac{\omega}{\omega_0} \gg 1$ 時,

$$\omega m - \frac{s}{\omega} = \omega m \left(1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}\right) \approx \omega m. \quad (1.24)$$

在第一種情況下總阻抗由彈抗決定,在第二種情況下由慣抗決定。在諧振頻率附近的頻率中,力抗趨近於零,因而系統的總阻抗由其力阻決定。相應於這些不同的情況,我們說系統是由彈性控制,或由質量控制,或由力阻控制。

机械振动系统与电路的相似使得机械系统可以用与之相似的电路画出,用这种线路来作全部的計算与研究,然后再把得出的結果譯成机械量的語言。这种方法称为机电类比法,在电声学中使用很广。

上面分析过的簡單机械振动系统与电感、电容及电阻串联电路的类比是最簡單的情况。实际上会遇到复杂得多的系统与类比情况。如果机械系统不是由集总的質量、彈性和力阻構成,而是由分布参量構成,如振动着的弦、膜片、板、杆等等,振动物体的每一个小單元上都又有質量,又有彈性,又有摩擦,这时特別难找出类比来。

我們来看一看下面的例子。給出一机械系统(圖 1.2),包括質量 m_1 和質量 m_2 ,中間用柔順性为 c 的彈簧联接。質量 m_1 有力 F 作用于其上。

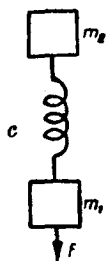


圖 1.2 机械振动系統。

既然力的电类比是电动势,在类比线路中力就用直接作用于質量 m_1 的电动势来表示。質量 m_1 之后是元件 c 及 m_2 ,这些元件可能是串联的也可能是并联的。

如果这二元件是串联的,則在柔順性 c 数值很小的时候,彈抗很大,因此电路中就没有电流。

这譯成机械語言就是說,虽然加上了力量,系統仍然不振动。但同时柔順性 c 的数值小就是說質量 m_1 及 m_2 是坚固地連接在一起,

好像是并成一个質量,这样無論如何都不会使系統中不發生振动。

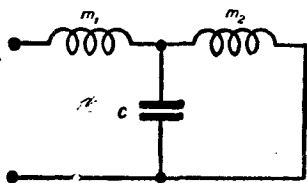


圖 1.3 机械振动系統的类比綫路。振动。反过來說,如果假設 c 的数值很大(很弱的彈簧,游絲),則小的彈抗在类比綫路圖中將 m_2 短

路，这时机械系统就不会振动。即使不用类比线路也可以同样得出这个结论。事实上，假如 m_2 与 m_1 用柔顺性很大（弹性很小）的弹簧相连接，则当力量作用于质量 m_1 时，质量 m_1 的振动实际上并不会传到质量 m_2 。这样给机械系统的参数以很大或很小的数值，我们就可以知道类比线路图（图 1.3）作得是否正确。

用类似的方法来推断，可以求出其他各种机械系统的类比线路图来。较复杂的机械系统及其类比线路见图 1.4，这图是 A. A. 哈尔开维奇作的。

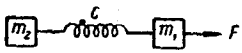
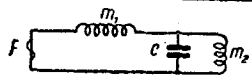
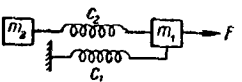
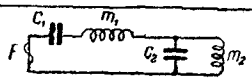
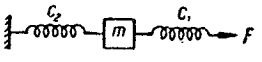
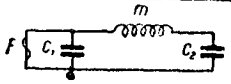
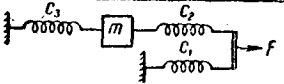
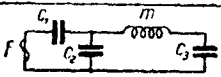
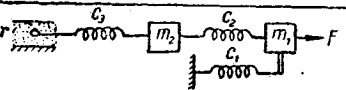
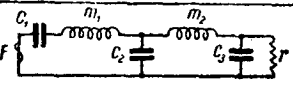
	机械系统	等效线路
1		
2		
3		
4		
5		

图 1.4 几种机械系统的类比线路图举例。

1.2. 机电换能器

在广播技术中使用的声学设备是把一种能转换为另一种能的变换器。例如，在扬声器接头上输入的电能中一部分被消耗，使导线变热，转化为热能，另一部分变成了扬声器可动系统与纸盆振动