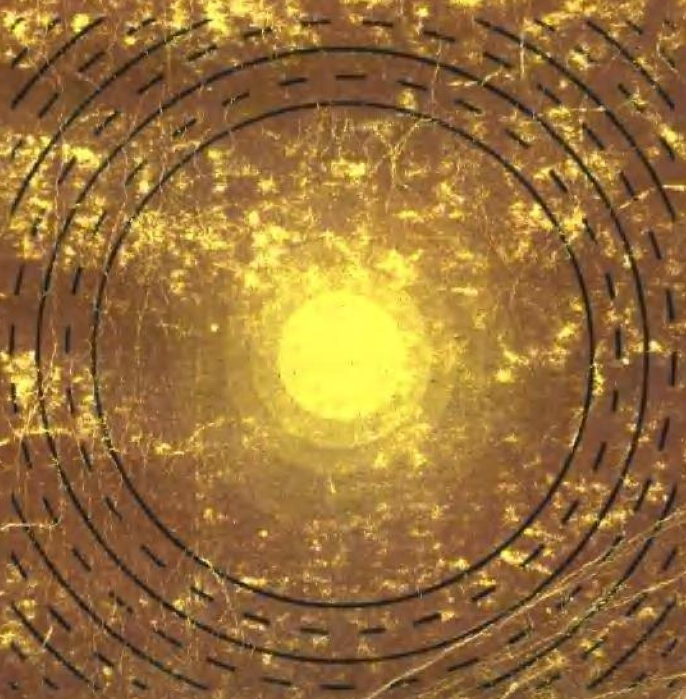
声学基础 上

SHENGXUE
JICHU



上海科学技术出版社

声 学 基 础

上 册

杜功焕 朱哲民 龚秀芬 编著

上海科学技术出版社

声 学 基 础

上 册

杜功焕 朱哲民 龚秀芬 编著

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 江苏省如皋印刷厂印刷

开本787×1092 1/32 印张7.875 字数172,000

1981年3月第1版 1981年3月第1次印刷

印数 1—8.000

书号: 13119·901 定价:(科四) 0.74元

序

七十年代初美国曾出版过一部由好些物理学家共同撰写的"物理学展望"，其中有一段是从不同的方面把物理学各个分支进行对比，结论认为声学具有最大的"外在性"——也就是渗透到其他分支以至别的科技领域的部分最多，形成了若干新兴的边缘分支；对应用科学、技术、国防、文化生活以及社会等方面影响的潜力最大．可是声学又被评为研究得最不成熟的分支．我基本上同意这些评论．

声学的确具备着现代科学的各门学科相互交叉，从而形成边缘学科的特点，人们对许多声学问题还只是停留在感性认识的阶段．随着时代的进步，科技的发展，声学不断地开辟着新的科学上的生长点．毫无疑义，声学有着蓬勃的生命力和广阔的前景．

物理学已习惯地划分为宏观的经典物理和微观的近代物理．自上世纪末以来，近代物理学发展的主流是向物质结构的更深层次去进行探索．但是人类对物质世界的认识总是后浪推前浪，科学的"前沿"不可能是孤立的．研究"基本粒子"的人可以不懂声学，但是费米在讲授他自己的β衰变理论时却应用了当年瑞利对封闭空间声传播模式的概念；最近物理学家研究氦II第三声却发现和"夸克"有了联系；固体物理学家正在自觉或不自觉地从事声学方面的问题．这种例子很多．声学既是跨层次又是跨学科的．

在如此广阔的领域中要编写一本无所不包的声学专著，

显然是不可能的．在50年代初期本人曾开过《声学基础》课程，就感到以声学基本问题为线索的课本很少，一般是过于偏重于某一方面，而其基础即分散在其他课本中．事过廿多年，国外也出过一些这类的书，不是过窄就是宽到象蜻蜓点水式的百科全书，国内更是个有无问题．

本书作者累积多年来担任这门课的经验，博采众长而不落窠臼，有一定的特点．至于侧重点“作者说明”中已交代得清楚．学者在掌握本书以后，可以举一反三，而作者也拟在这书的基础上，撰写续编．本书问世后必将对声学的教学和科学研究起着一定的作用，这是可以拭目以待的．

魏荣爵　于南京大学声学研究所

编 者 说 明

本书是以多年来在南京大学物理系声学专业开设的"声学基础"课作为基础编写成的，希望对于其他从事声学方面研究工作的科技人员也有参考价值.

本书主要介绍一些传统性的声学基础方面的理论知识，其中包括声的辐射、传播、接收，以及对声学工作者应必备的关于振动学方面的基础. 书中的讨论着重于，目前大多数声学问题的基础"理想流体媒质中的小振幅声波"，但为了适应近年来声学研究的发展，在书中对非理想流体媒质、大振幅声波以及固体中的声传播特性等也作了简要的基础性介绍.

由于声学是一门既古老而又迅速发展着的学科，近年来它的应用已渗透到几乎所有重要的自然科学和工程技术领域，形成了一个又一个独特的崭新的分支学科，因此要在一本基础方面的书籍中涉及无所不包的声学问题是不可能的.

为了帮助读者掌握和运用书中所导得的重要理论公式，书中也涉及了一些实际问题，而这些问题中的大多数是偏重于音频声学范畴的，但是这并不是说本书只适用于作为音频声学的基础。

本书作为高等学校有关专业基础方面的参考书籍，在推理方面力求做到自成体系，以使具备理工科大学有关基础知识的读者阅读本书时，对一些重要的理论结果能接受，而无需再查阅大量参考读物.

为了使读者更好地理解和掌握书中所讨论的主要内容，

在书的前八章中提供了近200道习题. 在书的附录中还列有常用的一些声学常数表,以及常用的数学公式与图表,以便读者查阅.

无论在教学以及书的编写过程中，都曾得到魏荣爵教授的多方指导，本校声学研究所与声学教研室不少同志也曾提出不少宝贵意见,并进行了有益的讨论,在此深表谢意.

编　者

目　录

序
编者说明
第一章　质点振动学 ……………………………………1
§1-1　质点振动系统的概念 ……………………………2
§1-2　质点的自由振动 ……………………………………3
§1-2-1　自由振动方程　(4)　§1-2-2　自由振动一般规律　(4)　§1-2-3　自由振动的能量　(8)　§1-2-4　双弹簧串接与并接系统的振动　(9)　§1-2-5　弹簧质量对系统固有频率的影响　(11)　§1-2-6　振动问题的复数解　(13)
§1-3　质点的衰减振动……………………………………14
§1-3-1　衰减振动方程　(14)　§1-3-2　衰减振动的一般规律　(15)　§1-3-3　衰减振动的能量　(17)　§1-3-4　瞬态现象　(18)
§1-4　质点的强迫振动……………………………………19
§1-4-1　强迫振动方程　(19)　§1-4-2　强迫振动一般规律　(20)　§1-4-3　质点的稳态振动　(21)　§1-4-4　强迫振动的能量　(27)　§1-4-5　振动控制：电声器件的工作原理　(29)　§1-4-6　隔振原理　(35)　§1-4-7　拾振原理　(37)
§1-5　周期力的强迫振动…………………………………44
习题一 ……………………………………………………49
第二章　弹性体振动学……………………………………55
§2-1　弦的振动……………………………………………55
§2-1-1　弦的振动方程　(56)　§2-1-2　弦振动方程的一般解　(58)　§2-1-3　自由振动的一般规律——弦振动的驻波解　(60)　§2-1-4　弦振动的能量　(67)

§ 2-2　棒的振动……………………………………………………69
§ 2-2-1　棒的纵振动方程　(70)　§ 2-2-2　棒的纵振动一般规律　(71)　§ 2-2-3　棒的横振动方程　(78)　§ 2-2-4　棒的横振动边界条件　(82)　§ 2-2-5　棒的横振动一般规律　(83)
§ 2-3　膜的振动……………………………………………………90
§ 2-3-1　膜的振动方程　(90)　§ 2-3-2　圆膜对称振动的一般解　(92)　§ 2-3-3　圆膜对称自由振动的一般规律　(94)　§ 2-3-4　圆膜振动的等效集中参数　(96)　§ 2-3-5　圆膜的强迫振动　(98)
§ 2-4　板的振动……………………………………………………103
§ 2-4-1　板的振动方程　(104)　§ 2-4-2　周界钳定圆形板对称振动的一般规律　(105)　§ 2-4-3　圆板振动的等效集中参数　(108)
习题二……………………………………………………………110
第三章　电-力-声类比……………………………………………112
§ 3-1　电路中的基本概念…………………………………………113
§ 3-2　力学元件与基本力学振动系统……………………………117
§ 3-3　声学元件与基本声振的系统………………………………123
§ 3-4　电-力-声线路类比…………………………………………127
§ 3-4-1　电路图的分析　(130)　§ 3-4-2　力学系统的类比线路图　(130)　§ 3-4-3　声学系统的类比线路图　(136)　§ 3-4-4　阻抗型和导纳型类比线路图的互相转换　(143)　§ 3-4-5　变量器　(144)
§ 3-5　电-力-声类比线路应用举例…………………………………147
习题三……………………………………………………………160
第四章　声波的基本性质…………………………………………165
§ 4-1　概述…………………………………………………………165
§ 4-2　声压的基本概念……………………………………………167
§ 4-3　理想流体媒质中的声波方程………………………………169
§ 4-3-1　理想流体媒质的三个基本方程　(170)　§ 4-3-2　小振幅声波一维波动方程　(175)　§ 4-3-3　三维声波方程　(178)

§ 4-3-4 速度势 (180)
§ 4-4 特殊形式的声波方程 ……182
§ 4-5 平面声波的基本性质 ……185
§ 4-5-1 波动方程的解 (185) § 4-5-2 声波传播速度 (189)
§ 4-5-3 声阻抗率与媒质特性阻抗 (192)
§ 4-6 声场中的能量关系 ……193
§ 4-6-1 声能量与声能量密度 (193) § 4-6-2 声功率与声强 (196)
§ 4-7 声压级与声强级 ……197
§ 4-8 响度级与等响曲线 ……199
§ 4-9 从平面声波的基本关系检验线性化条件 ……202
§ 4-10 声波的反射、折射与透射 ……204
§ 4-10-1 声学边界条件 (204) § 4-10-2 平面声波垂直入射时的反射和透射 (205) § 4-10-3 平面声波斜入射时的反射与折射 (210) § 4-10-4 声波通过中间层的情况 (219)
§ 4-11 隔声的基本规律 ……224
§ 4-11-1 单层墙的隔声 (225) § 4-11-2 双层墙的隔声 (226)
§ 4-12 声波的干涉 ……230
§ 4-12-1 迭加原理 (231) § 4-12-2 驻波 (232) § 4-12-3 声波的相干性 (233) § 4-12-4 具有无规位相的声波的迭加 (235)
习题四 ……238

第一章　质点振动学

振动学是研究“声学”的基础.因为不仅从广义看来，声学现象实质上就是传声媒质（气体、液体、固体等）质点所产生的一系列力学振动过程的表现，而且声波的发生（无论是自然产生或人工获得）基本上也来源于物体的振动．当有一阵风吹来时，人们就会听到树叶运动而发出“沙沙”的响声．当人们在欣赏一支交响乐队演奏时，就会发现乐队的演奏者都在各自忙碌而又紧张地操作着自己的乐器，有的在使劲地用锤子击鼓，有的在缓缓地用弓拉动小提琴的弦．他们的动作似乎是杂乱无章，然而人们所听到的那种优美的音乐，却正是这些乐器上的振动物体“杂乱无章”运动的总效果．既然声是从物体振动而来，因而从物体的振动规律自然也可以预知声的一些规律．例如，由扬声器发出的声音的强弱及其频率与扬声器的纸盆振动幅度及其频率有关．一个声学工作者免不了要使用或者研制一些电声器件（例如扬声器与传声器等），而这些器件的大多数都具有一个（或多个）振动系统，如扬声器的纸盆与传声器的音膜等．可以发现，这些振动系统的特性，对控制电声器件的声学性能往往会起着关键作用．由此可见，振动学的基础知识对声学工作者是多么必需．

当然振动学所研究的范围是非常广泛的，本书的讨论自然不能包罗万象，这里所介绍的主要为与声学问题联系比较密切的一些力学振动的基础知识．这一章主要讨论质点的振

动，下一章将讨论一些简单形状弹性体(如弦、棒、膜、板等)的振动.

§1-1 质点振动系统的概念

所谓质点振动系统，就是假定构成振动系统的物体如质量块、弹簧等，不论其几何大小如何，都可以看成是一个物理性质集中的系统. 对于这种系统，质量块的质量认为是集中在一点的，而整个弹簧的弹性是均匀的，即认为弹性也集中在一点上. 这就是说，构成整个振动系统的质量块与弹簧，它们的运动状态都是均匀的. 这种振动系统也称之为集中参数系统. 虽然上面所述的系统是理想化的，然而在一定的条件下，它可以被看成是实际系统的近似模型. 而且在上述的假定下，数学处理可以大大简化，而研究所得的振动规律的图象又比较清晰和直观，因而对这种质点振动系统的研究显得十分重要.

实际物体总具有一定的几何大小，并且物体的各部分振动状态往往是不可能处处相同的. 例如取一有限大小的弹性物体，对其一端进行敲击，那么首先在物体的该端表面发生形变，然后逐渐传播开来. 这种形变从始端到末端的传播需要一定时间，而不能瞬时到达. 这意味着，物体上各个位置的振动状态，在某一瞬间是各不相同的. 但是如果形变从物体的始端到末端的传播所需的时间，与物体中形变或振动周期(振动一次所需的时间)相比短得多，或者物体的线度与物体中振动传播波长(振动一次所传播的距离)小得多，那么这一物体的各部分振动状态就可以看成近似均匀，而这一振动系统就可以近似地看作质点振动系统. 这里还要强调一下，一种振

动物体能否作为质点系统来对待，并不决定它的“绝对”几何尺寸，而要看它的线度与物体中振动传播波长的相对比值而定．例如常见的8英寸扬声器，其纸盆的有效直径约有18厘米．但是当振动频率为每秒1千次时，从纸盆顶部到边缘的距离还不到纸盆中振动传播波长的五分之一．因此在此扬声器的工作频率低于每秒1千次时，把纸盆（盆面等效为质量，边缘折环等效为弹簧）作为质点振动系统来对待，不会引起很大的误差．再例如有一个厚度仅有半厘米的压电石英振子，在进行厚度方向的纵振动．假定它的振动频率为每秒1百万次，这时与其对应的波长约为半厘米，与物体的线度相接近，因此这一石英振子虽小，但就不能把它当作质点振动系统来对待．

§1-2 质点的自由振动

设有一可作为质点，其质量为 M_M 的坚硬物体系于弹性系数或劲度系数为 K_M 的弹簧上，构成一简单的振动系统，简称单振子，如图1-2-1所示．假定在没有外力扰动时，质量的重力与弹簧的弹力相平衡，系统处于相对静止状态．取质量 M_M 的静止位置（或称平衡位置）为坐标原点，设有一外力突然在 x 方向拉（或推）动 M_M，使弹簧产生伸长（或压缩），随即就释放．此后质量 M_M 就在弹簧的弹力作用下，在平衡位置附近作往返的运动，即发生振动．如果假定外力仅在初始时刻起作用，而后就去掉了，在这种情况下质点所作的

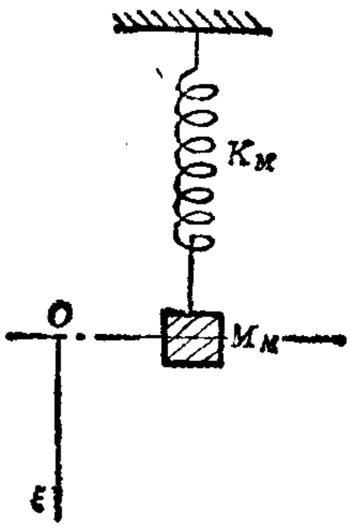


图 1-2-1

振动称为自由振动.

§1-2-1 自由振动方程

分析图 1-2-1 可知,当质点 M_M 被拉离平衡位置时,弹簧 K_M 也有了伸长,这时在质点 M_M 上就受到弹簧的弹力 F_K 的作用. 我们假定质点离开平衡位置的位移 ξ 很小(即限于讨论微小振动),以致弹簧的伸长或收缩没有超出弹性限度范围,则按照虎克定律,弹力的大小同位移成正比,即它们成线性关系,并可表示成

$$F_K=-K_M\xi, \tag{1-2-1}$$

式中比例系数 K_M 就是上述的弹性系数. 有时也常用其倒数 C_M 来表示, $C_M=\frac{1}{K_M}$ 称为顺性系数,或称力顺. 式中出现的负号表示质点位移的方向与弹力的方向相反. 例如质点离开平衡位置向 x 正方向运动,它的位移为正,这时弹簧的弹力表现为对质点施加拉力,其方向指向 x 负方向. 质点受此弹力作用,将得到加速度,按照牛顿第二定律可得

$$M_M\frac{d^2\xi}{dt^2}=-K_M\xi, \tag{1-2-2}$$

或写成

$$M_M\frac{d^2\xi}{dt^2}+K_M\xi=0. \tag{1-2-3}$$

也可写成

$$\frac{d^2\xi}{dt^2}+\omega_0^2\xi=0, \tag{1-2-4}$$

其中 $\omega_0^2=\frac{K_M}{M_M}$ 是引入的一个参量,称为振动圆频率. 式(1-2-4)就是质点的自由振动方程.

§1-2-2 自由振动一般规律

要了解自由振动的一般规律,首先要对振动方程(1-2-4)

求解. 因为 ω_0^2 是正的实数，所以这一对时间 t 的齐次二阶常微分方程的一般解应是二个简谐函数的线性迭加，即

$$\xi = A\cos\omega_0 t + B\sin\omega_0 t, \tag{1-2-5}$$

式中 A、B 为两个待定常数，由运动的初始条件来定.

(1-2-5)式也可写成另一形式

$$\xi = \xi_A \cos(\omega_0 t - \varphi_0). \tag{1-2-6}$$

知道了位移也可求得振动速度

$$v = \frac{d\xi}{dt} = v_A \sin(\omega_0 t - \varphi_0 + \pi), \tag{1-2-7}$$

其中 $v_A = \omega_0 \xi_A$, ξ_A 与 φ_0 也为待定常数，它们与常数 A 与 B 之间有如下关系

$$\xi_A = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \varphi_0 = \tan^{-1}\frac{B}{A};$$

$$A = \xi_A \cos\varphi_0, \qquad B = \xi_A \sin\varphi_0.$$

它们都是取决于初始条件的待定常数，详细研究它们的关系，意义并不大. 这里提一下，以后遇到类似情形，就不再赘述了.

从(1-2-6)式可以看出位移 ξ 随时间 t 的变化规律呈余弦形. 随时间 t 作正弦或余弦规律的运动，一般称为简谐振动. 按(1-2-6)式可以作出位移 ξ 的随时间 t 的变化规律，如图 1-2-2 所示. 从图可以看出，ξ_A 为位移的最大值，称为位移振幅，φ_0 为振动起始时刻的初位相. 运动自 $t=0$ 开始，经过 $t=T$ 时间，又恢复到原来状态，这一时间 T 称为运动的周期，即每秒振动一次所需的时间，单位为秒，符号为 s. 它的倒数 $f=\frac{1}{T}$ 表示每秒的振动次数，称为振动的频率，其单位用赫芝表示，简称赫，符号为 Hz. 1 赫(Hz) = 1 秒$^{-1}$(s^{-1}).

从(1-2-6)式可以指出，$\omega_0 T = 2\pi$，即 $\omega_0 = 2\pi f$. 因此 ω_0

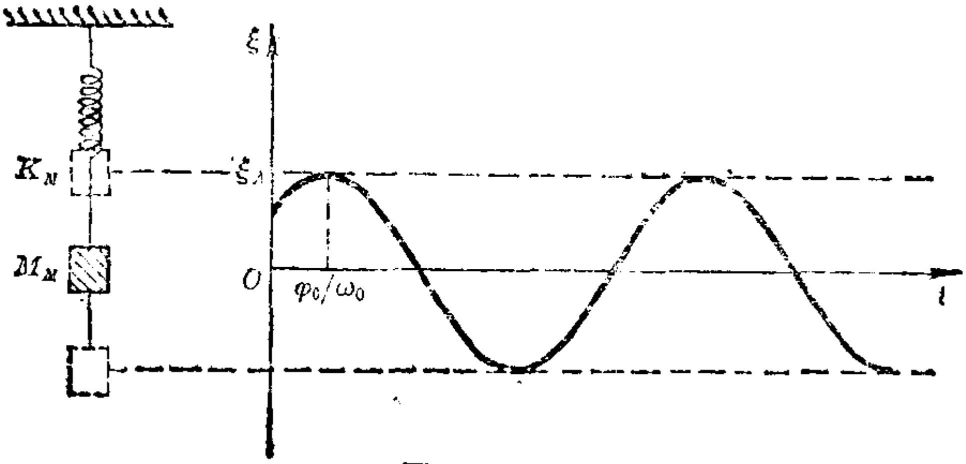


图 1-2-2

就等于 2π 秒钟的振动次数，称为振动的圆频率(或角频率)。因为已知 $\omega_0^2=\frac{K_M}{M_M}$，所以可以求得自由振动的频率公式为

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{K_M}{M_M}}, \tag{1-2-8}$$

或者用力顺 C_M 来表示

$$f_0=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{1}{M_M C_M}}. \tag{1-2-9}$$

(1-2-8)式表明，当质点作自由振动时，其振动频率是仅同系统的固有参量有关，而与振动初始条件无关的常数。这就是说只要系统的固有质量 M_M 和弹性系数 K_M 一定，其振动的频率也就决定了，而同系统是以多大的初始位移或者多大的初始速度开始运动没有关系，因而称这一振动频率为系统的固有频率。自由振动的这一特性，在我们日常工作中是常见的。例如，用小锤来敲击音叉，不管敲击的轻重如何，一定的音叉发出的声音的频率是一定的，敲得重或轻仅影响其振动幅度或由它发出声音的强弱。

从(1-2-8)式可以看到，一质点振动系统，质量 M_M 愈大或弹性系数 K_M 愈小，固有频率 f_0 就愈低，反之 M_M 愈小或 K_M 愈大，f_0 就愈高。这一规律颇有实际意义。例如，在以后

就会知道，一动圈扬声器振动系统的固有频率对于其低频声学性能有十分重要的影响．而如果需要降低其固有频率，原则上可按公式(1-2-8)的规律，采取两方面措施：(1)增加系统的质量，即增加音圈与纸盆的质量；(2)减小系统的弹性系数，即使纸盆边缘的折环部分更为柔顺．

上面已经指出，在描述质点自由振动的位移表示式中有两个待定常数 ξ_A 与 φ_0．它们决定于系统的起振条件．如果这两个常数一旦确定，那么这一系统的振动状态就可完全知道．例如，假定原来质点处于静止状态，在 $t=0$ 的那一瞬间，它得到了一速度 v_0，对于这种情况，我们可以写出如下初始条件：

$$\xi_{(t=0)}=0;$$

$$v=\left(\frac{d\xi}{dt}\right)_{(t=0)}=v_0.$$

将此条件代入(1-2-6)与(1-2-7)式，可定得 $\varphi_0=\frac{\pi}{2}$，$\xi_A=\frac{v_0}{\omega_0}$．由此可得，在 $t\geqslant 0$ 各个时刻，质点的位移与速度为

$$\xi=\xi_A\cos\left(\omega_0 t-\frac{\pi}{2}\right),$$

$$v=v_A\cos\omega_0 t,$$

其中 $\xi_A=\frac{v_0}{\omega_0}$ 为位移振幅，$v_A=v_0$ 为速度振幅．从此可以看到，在上述初始条件下，初始速度愈大，则往后的质点振动的位移或速度的振幅也愈大．并且振动时位移与速度位相差 $\frac{\pi}{2}$．例如，当 $t=0$ 时，位移为零，而速度却达到最大值 v_0；当 $t=\frac{T}{4}$ 时，位移达到最大值，而速度降为零．这里仅讨论了初始速度为 v_0 的初始条件，我们还可以讨论其他的初始条件，例如假