

声 工 原 理

上 册

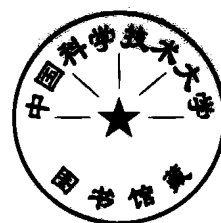
伊 藤 毅 著

科 学 出 版 社

声 工 原 理

上 册

伊 藤 毅 著
馬 智 远 等 譯
郑 愈 校



科 学 出 版 社

1 9 6 3

伊 藤 毅
音響工学原論(上卷)

午来丈助

内 容 簡 介

本书系著者编写的声学工程教科书上册,内容着重在振动与声波现象的分析,运用现代物理学方法,系统地论述理论声学,以作为声学工程的基础。

全书分为四章:第一章叙述振动现象的理论分析方法及其物理意义。第二章研究发声体的振动。对弦、膜、弹性体棒及环等的振动进行理论分析。第三章论述声波的理论分析方法及其性质,是理论声学的基础。第四章论述具有多种边界条件的声场的基本性质与分析方法,可作为读者在学习波动现象时的参考。

本书可供高等院校物理、电信及有关专业学生作教学参考,亦可供声学技术科学工作者和工程技术人员阅读。

声 工 原 理 (上册)

伊 藤 毅 著
馬 智 远 等 译
郑 愈 校

*

科学出版社出版 (北京朝阳门大街117号)

北京市书刊出版业营业许可登记证字第061号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总经售

*

1963年11月第一版	书号:2857 字数:388,000
1963年11月第一次印刷	开本:787×1092 1/18
(京)0001—2,600	印张:19 1/3 插图:2

定价:2.90元

緒 言

本书主要是为了在新制大学中专攻电訊工程的学生而編写的声学工程教科书。現代声学工程的主要内容包括电声学理論及电声机械,室内声学,声的收听与超声波工程等,想充分学得这些問題,首先需要知道作为理論声学在历史上所展开的振动,波动及作为物理現象的声波的性質。根据这种必要性,作为声学工程的第一編介紹了理論声学(声学物理)。

第一編論述的理論声学大部分虽属于古典声学,但作为現代波动力学和量子力学发源的基础,在历史上是重要的,对于有志于工程者作为常識是需要熟悉的知識。在这里以理解理論振动現象和波动現象的基本性質为第一个目标,其次用近代物理学所慣用的技术方法来体会“如何将現象数式化,从解該式的結果如何理解現象”这一方法为目标。这种技术方法对于想要解决新問題的技术工作者是最重要的,是以往电工学的技术教育所缺乏的部分。

在第一章中論述振动現象的理論研究方法,同时介紹其基本性質。这是理解以后的波动現象的基础知識,同时也作为理解发声体的振动理論和电路的交流現象理論等的基础,是十分重要的,而且在历史上也有其深远的意义。这一章以充分地理解振动方程式的处理方法及其性質作为重点。

第二章是在发声体振动的标题下,就絃的振动,膜的振动,弹性体棒的振动,环的振动与板的振动等,闡述其理論的研究方法,并兼述其性質。但是,在此部分因为开始出现波动現象,为了能够充分理解波动現象,故給予各种各样的說明。特别是熟悉波动方程式所具有的各种性質,对处理声波,电磁波与波动力学等的技术工作者是重要的問題。因此,为了解說波动現象与波动方程式的基本性質,花費了相当多的篇幅。

絃的振动是理解一元波动的良好实例,膜的振动是二元的波动現象。为了获得传播弹性体中的弹性波动知識,在棒的振动一节中,先簡單說明弹性理論,然后叙述弹性波,最后就棒的弯曲振动,环的振动与板的振动等闡述其基本性質。

第三章叙述声波的理論研究方法及其性質。这一部分是理論声学的基本部分,首先使讀者認識在空气中传播的弹性縱波是声波,其次就單純的平面声波明确其基本性質后,再根据流体理論从流体运动方程式导出声波的一般公式,明确有关球面波

2218-03
声場的基本性質。这一部分是想要理解波动传播現象的讀者必須熟讀并应完全理解的問題。

第四章討論具有各种边界条件的声場的基本性質，同时并叙述这些問題的处理方法。这一章所討論的內容的任何一項作为实际問題来看都是經常发生的重要現象，理解这些現象及其处理方法对于声学工程技术工作者是必要的。但是声的波动現象表現出不少的复杂情形，因而必須注意的是应用現代理論的技术方法不能解決的問題为数还是很多。此外，第四章論述的各种技术方法通常对于专攻波动現象的讀者可資参考的地方也很多。

將理論声学作为統一的体系而編写的讀物，在我国*还很少見。本书是将振动与声的振动現象在一貫的理論体系下进行解析，將其結果写成便于应用的形式。但是，考虑到与后述电声学的联系，采用 M. K. S 单位制作为标准单位；为了提供与以往所用的 C. G. S 单位制換算方便起見，附有換算表。至于誤排与錯誤已尽可能地加以訂正，不过我想还未能訂正完善，而且由于著者学識浅薄的关系，不完备与笔誤之处在所难免。如果能从本书讀者获得对这些方面的意見或指正，著者衷心表示感謝。

編輯本书时，曾多方面参考瑞利，藍姆，莫尔斯，克藍达尔，斯勒特与斯特拉頓諸氏的著作，故在此志名以申謝意。同时，早稻田大学理工学院电信学科的同学們对本书所用的图表等的計算帮助很大，所以一并写出表示感謝。本书的得以出版是受到从故恩师黑川兼三郎博士开始以及早大电信学科教研室各位的帮助很大；再者，由于電暈社的极大的好意与努力。在此一并表明謝意。

著 者

1955 年 4 月 1 日

- LORD RAYLEIGH: "Theory of Sound" I, II.
Sir H. LAMB: "Dynamical Theory of Sound" 1931.
P. M. MORSE: "Vibration and Sound" 1936.
I. B. CRANDALL: "Theory of Vibration System and Sound" 1926.
J. C. SLATER: "Introduction to the Theoretical Physics" 1933.
J. A. STRATTON: "Electromagnetic Theory" 1941.

* (譯者注)指日本，下同。

符 号 表

A	电流单位安培的简写。	H	韓克尔函数 $H_n^{(1)}(z)$: p. 239.
<i>A</i>	点的位置, 任意常数(积分常数).	h	球面韓克尔函数 $h_n^{(1)}(z)$: p. 250.
	点声源强度: p. 205.	<i>l</i>	无
<i>a</i>	振子长度. 圆半径. 矩形边长.	<i>i</i>	虚数单位 $\sqrt{-1}$.
	慣性系数: p. 33, 38.		单位矢量 i_x, i_y, i_z .
	弹性体内纵波的传播速度: p. 136.	J	貝塞尔函数 $J_n(x)$.
<i>da</i>	微小面积: p. 184.	<i>l</i>	开口部分的速度位: p. 289.
B	声强级单位貝的简写.	<i>i</i>	球面貝塞尔函数 $i_n(z)$: p. 244.
<i>B</i>	点的位置, 任意常数(积分常数).	K	劲度. 应力的大小.
	双声源强度: p. 209.	K	绝对温度单位开耳芬的简写.
<i>b</i>	矩形边长. 距离等.	<i>K</i>	应力的矢量表示: p. 124.
	消耗系数: p. 36.	kg	质量单位公斤的简写.
	横波的传播速度: p. 136.	<i>k</i>	阻尼系数: p. 13.
C	任意常数. 任意振幅.		波长常数(相位常数). 本征值: p. 65,
<i>c</i>	波动传播速度.		66.
	稳定系数: p. 33.	<i>k</i>	相位常数的矢量表示: p. 251.
	c_p 定压比热. c_v 定容比热: p. 152.	L	长度.
D	任意常数.		拉格朗日函数: p. 47.
<i>d</i>	微分符号.		衰减至 $\frac{1}{e}$ 的距离: p. 301.
dB	声强级单位分貝.	<i>l</i>	长度. 对 x 轴的方向余弦: p. 124.
E	总能量: p. 37 ($\bar{E}$ 是其对时间的平均值).	M	质量, 力偶.
	楊氏弹性模量: p. 129.	m	长度单位米的简写.
<i>e</i>	自然对数的底: $e = 2.71828182846$.	<i>m</i>	质量. 对 y 轴的方向余弦: p. 124.
	椭圆的离心率: p. 268.		本征值: p. 140.
F	力的大小. 任意函数 $F(x)$.	N	諾埃曼函数 $N_n(z)$.
<i>F</i>	第一类椭圆积分: p. 268.		力的单位牛頓的简写.
<i>f</i>	任意函数. 强迫項.	<i>n</i>	对 z 轴的方向余弦: p. 124.
G	声源分布函数: p. 217.	<i>n</i>	球面諾埃曼函数 $n_n(z)$: p. 244.
	孔隙的传导率: p. 297.	<i>n</i>	面的法綫: p. 124.
<i>g</i>	质量单位克的简写.	O	点的位置, 原点.
<i>g</i>	重力加速度.	P	勒让特函数 $P_n(x)$: p. 243.
	声源分布函数: p. 217.		$P_n^m(x)$: p. 246.

P 点的位置, 张力.
 p 角频率, 分离常数, 压力.
 Q 勒让特函数 $Q_n^m(x)$: p. 246.
 Q 广义的外力: p. 35. 体积: p. 233, 282.
 q 广义坐标: p. 32. 切应力: p. 128.
 通量 q : p. 267.
 q' 空气的热传导率: p. 303.
 R 摩擦阻力: p. 11, 310.
 曲率半径: p. 46, 138, 150.
 气体常数: p. 161.
 反射系数: p. 174, 224.
 声阻密度: p. 211.
 径函数: $R(r)$, p. 111, 237, 244.
 r 极坐标: p. 107, 191, 242.
 F 截面的迴轉半径: p. 138.
 r 位移的矢量表示: p. 135.
 S 面积.
 s 位移: p. 38. 凝縮系数: p. 164.
 δS 微小长度.
 sec 時間单位秒的簡写.
 T 周期, 动能, 切应力.
 透射系数: p. 175, 224.
 t 時間坐标.
 U 振动速度: p. 228.
 风速: p. 319.
 移动速度: p. 325.
 u 速度的 x 分量: p. 182.
 u_{nm} 径位移: p. 149.
 貝塞尔函数的根: p. 112.
 V 位能, 位函数, 体积, 速度的大小.
 V 速度的矢量表示.
 v 速度的 y 分量: p. 182.
 角位移: p. 149.
 v_{ns} 球面貝塞尔函数的根: p. 278.
 W 能量消耗速度单位瓦特的簡写.
 W 能量消耗速度, 声功率.
 $\bar{W}$ 是其对時間的平均值.
 w 速度的 z 分量: p. 182.
 气体的工作量.
 声波的能流密度.

$\bar{w}$ 是其对時間的平均值.
 X x 的函数 $X(x)$, 应力的 x 分量, X_x , X_y , X_z .
 外力的大小: p. 230.
 声抗密度: p. 211.
 x 位移, 坐标.
 $\dot{x}$ $\frac{dx}{dt}$
 Y 外力的分布函数 $Y(x, t)$: p. 78.
 应力的 y 分量: p. 124.
 Y 球面調和函数 $Y(\theta, \varphi)$: p. 250.
 y 位移, 坐标.
 $\dot{y}$ $\frac{dy}{dt}$
 y' $\frac{dy}{dx}$
 Z 外力的分布函数: p. 115.
 应力的 z 分量: p. 124.
 ZA 声阻抗密度: p. 211, 312.
 ZM 机械阻抗: p. 312.
 z 位移, 坐标.
 z 球面貝塞尔函数的一般表示 $z_n(x)$: p. 246.
 α 相位角, 相位常数.
 加速度(其坐标分量是 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$): p. 183.
 β 衰減常数.
 Γ 归一因子: p. 116.
 γ 分离常数, 本征值.
 定压比热与定容比热之比: p. 162.
 欧勒常数 $\gamma = 1.781072$.
 Δ 行列式: p. 48.
 膨胀系数: p. 163.
 $\dot{\Delta}$ 体积应变速度 $\dot{\Delta} = \frac{d\Delta}{dt}$: p. 299.
 δ 微小量.
 δ_0 因壁面粘性影响而出現的层的厚度: p. 306.
 ϵ 应变: p. 121.
 $\dot{\epsilon}$ 应变速度: p. 299.
 ζ 位移.
 η 位移.

切应变: η 122.

$\dot{\eta}$ 切应变速率: p. 300.

Θ 函数 $\Theta(\theta)$: p. 242.

θ 角度. 球面坐标的角度坐标. 温度.

θ_0 全反射临界角: p. 177.

κ 体积弹性系数: p. 128.

Δ 与圆形膜的归一因子有关的常数 Δ_{nm} :
p. 114.

λ 任意常数, 波长.
拉密常数: p. 127.

λ' 粘性系数: p. 299.

μ 动量: p. 84.
拉密常数: p. 127.
刚性: p. 128.

μ' 粘性系数: p. 299.

Ξ 振幅: p. 275.

ξ 位移或位移的 x 分量.

$\dot{\xi}$ 振动速度.

Π 积的符号.

π 圆周率 3.14159265.

ρ 线性密度. 面积密度. 体积密度. 柱面
坐标的径坐标.

ρ_0 空气密度.

Σ 加法符号.

σ 泊松比: p. 129.
声波的阻力系数: p. 214, 303.

τ 衰变模量: p. 13, 37, 284, 287, 302.

ν 无

Υ 无

Φ 任意常数或函数.

ϕ 任意相位角. 初始分布函数 $\phi(x)$.
速度位.

φ 任意相位角.
极坐标的方位角坐标.

χ 初始分布函数: p. 194.

Ψ 任意函数.

ψ 初始分布函数 $\psi(x)$.
波动函数 $\psi_n(x)$.

Ω 阻单位欧姆的简写.

Ω 立体角.

ω 振动角速度. 本征值.

∇ 微分算符.

∇^2 微分算符.
自然对数, $\ln x = \log_e x$,
 $\ln x = \log_e 10 \cdot \log_{10} x = 2.30259 \log_{10} x$.

$\sin$ 圆函数 正弦.

$\cos$ 圆函数 余弦.

$\tan$ 圆函数 正切.

$\cot$ 圆函数 余切.

Sin 双曲线函数 正弦.

Cos 双曲线函数 余弦.

Tan 双曲线函数 正切.

Cot 双曲线函数 余切.

Im 复数的虚数部分.

Re 复数的实数部分.

MKS 单位制与 cgs 单位制的对照表

名 称	MKS $\rightarrow$ cgs	cgs $\rightarrow$ MKS	量 纲
长 度	1 米 = 10^3 厘米	1 厘米 = 10^{-3} 米	L
质 量	1 公斤 = 10^3 克	1 克 = 10^{-3} 公斤	M
时 间	1 秒 = 1 秒	1 秒 = 1 秒	T
体 积 密 度	1 公斤/米 ³ = 10^{-3} 克/厘米 ³	1 克/厘米 ³ = 10^3 公斤/米 ³	ML ⁻³
面 积 密 度	1 公斤/米 ² = 10^{-1} 克/厘米 ²	1 克/厘米 ² = 10 公斤/米 ²	ML ⁻²
线 性 密 度	1 公斤/米 = 10 克/厘米	1 克/厘米 = 10^{-1} 公斤/米	ML ⁻¹
力	1 牛顿 = 10^5 达因	1 达因 = 10^{-5} 牛顿	MLT ⁻²
应 力	1 牛顿/米 = 10^5 达因/厘米	1 达因/厘米 = 10^{-5} 牛顿/厘米	MT ⁻²
压 力	1 牛顿/米 ² = 10 达因/厘米 ²	1 达因/厘米 ² = 10^{-1} 牛顿/米 ²	ML ⁻¹ T ⁻²
	1 牛顿/米 ² = 10^{-1} 达因/厘米 ²	1 达因/厘米 ² = 10 牛顿/米 ²	ML ⁻¹ T ⁻²
能 量	1 焦耳 = 10^7 尔格	1 尔格 = 10^{-7} 焦耳	ML ² T ⁻²
能 流	1 瓦 = 10^7 尔格/秒	1 尔格/秒 = 10^{-7} 瓦	ML ² T ⁻³
能 流 密 度	1 瓦/米 ² = 10^3 (尔格/秒)/厘米 ²	1 (尔格/秒)/厘米 ² = 10^{-3} 瓦/米 ²	MT ⁻³
声 阻 抗	1 (MKS 声欧姆) = 10^3 (cgs 声欧姆)	1 (cgs 声欧姆) = 10^{-3} (MKS 声欧姆)	MT ⁻¹
声 欧 姆	1 (公斤/秒) = 10^3 (克/秒)	1 (克/秒) = 10^{-3} (公斤/秒)	MT ⁻¹
声阻抗密度	1 (MKS 声欧姆/米 ²) = 10^{-1} (cgs 声欧姆/厘米 ²)	1 (cgs 声欧姆/厘米 ²) = 10 (MKS 声欧姆/米 ²)	ML ⁻² T ⁻¹

空气的声波动阻力密度: $\rho_{oc} = 428$ (MKS 声欧姆/米²) = 42.8 (cgs 声欧姆/厘米²),

重力加速度: $g = 9.8$ (米/秒²) = 980 (厘米/秒²),

压力单位: 1 微巴 (Baryc) = 1 (达因/厘米²) = 10^{-1} (牛顿/米²) (cgs 单位),

1 巴 (Bar) = 10^6 (达因/厘米²) = 10^5 (牛顿/米²) (国际单位).

MKS 合理化单位制的电磁单位

	MKS 单 位	非合理化的 cgs 电磁单位	量 纲
电 荷	1 库仑		Q
电 流	1 安培		QT ⁻¹
电 流 密 度	1 安培/米 ²		QT ⁻¹ L ⁻²
电 场 强 度	1 伏特		Q ⁻¹ ML ² T ⁻³
电 场 强 度	1 伏特/米		Q ⁻¹ MLT ⁻³
电 阻	1 欧姆		Q ⁻² ML ² T ⁻¹
电 容	1 法拉		Q ⁻² M ⁻¹ L ⁻² T ²
电 感	1 亨利		Q ⁻² ML ⁻²
电 导 率	1 漠/米		Q ² M ⁻¹ L ⁻² T
磁 势	1 安培-匝	$= 4\pi \times 10^{-1}$ 吉尔伯特	QT ⁻¹
磁 场 强 度	1 安培-匝/米	$= 4\pi \times 10^{-3}$ 奥斯特	QL ⁻¹ T ⁻¹
磁 通	1 韦伯 = 10^8 马克士威		Q ⁻¹ ML ² T ⁻¹
磁 通 密 度	1 韦伯/米 ² = 10^4 高斯		Q ⁻¹ MT ⁻¹
介 电 常 数	$\epsilon = \kappa_e \epsilon_0$ 法拉/米		Q ⁻² M ⁻¹ L ⁻² T ²
真 空 的 介 电 常 数	$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ 法拉/米		Q ⁻² M ⁻¹ L ⁻² T ²
物 质 的 相 对 介 电 常 数	κ_e		数 值
导 磁 系 数	$\mu = \kappa_m \mu_0$ 亨利/米		Q ⁻² ML
真 空 的 导 磁 系 数	$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ 亨利/米		Q ⁻² ML
物 质 的 相 对 导 磁 系 数	κ_m		数 值

目 录

第一編 理論声学

第一章 振动理論	1
1.1 振子的微小振动, 振动方程式	1
1.2 振子的受迫振动	6
1.3 进行衰减振动的振子	11
1.3.1 衰减振子的自由振动	11
1.3.2 衰减振子的受迫振动	15
1.4 具有多个自由度的振动系统的振动	25
1.4.1 两个质点悬挂在一根弦上的振动系统的自由振动	25
1.4.2 双重振子	27
1.4.3 悬挂三个质点的弦	30
1.5 具有一个自由度的振动系统的一般理論	32
1.5.1 自由振动	32
1.5.2 受迫振动	35
1.5.3 衰减振动系	36
1.6 具有多个自由度的系统的一般理論	38
1.6.1 多元系的运动方程式概論	38
1.6.2 多元系的自由振动	40
1.6.3 簡正振动方式, 本征值与能量	42
1.6.4 簡正方式的稳定性	45
1.6.5 受迫振动. 互易定理	48
1.6.6 耦合振动系统的基本性質	49
1.6.7 利薩如图形	52
第二章 发声体的振动	55
2.1 弦的振动	55
2.1.1 弦的运动方程式. 波动	55
2.1.2 两端固定弦的簡正振动方式. 泛音	62
2.1.3 具有摩擦损失的两端固定弦的自由振动	70
2.1.4 弦的受迫振动	72
2.1.5 以槌击弦的自由振动	80
2.1.6 带錘的弦的自由振动	85

2.1.7 懸掛的鎖鏈的振動·····	86
2.1.8 密度與張力變動的絃的振動·····	88
2.1.9 傅里葉定理·····	91
2.1.10 持續正弦波形的外力作用於絃的定態解·····	98
2.2 膜的振動·····	99
2.2.1 理想的膜和膜的振動·····	100
2.2.2 膜的运动方程式·····	100
2.2.3 矩形膜的簡正振動方式·····	102
2.2.4 圓形膜的簡正振動方式·····	107
2.2.5 膜的受迫振動·····	114
2.2.6 二元空間內的自由平面行波·····	117
2.3 棒的振動·····	120
2.3.1 彈性理論, 應變, 應力與彈性常數·····	120
2.3.2 棒的縱振動·····	131
2.3.3 彈性體內的平面波, 縱波, 橫波與表面波·····	134
2.3.4 棒的彎曲振動·····	137
2.3.5 棒振動的一般性質·····	147
2.3.6 棒的彎曲振動的应用·····	148
2.3.7 永久張力的影响·····	148
2.4 環的振動·····	149
2.5 板的彎曲振動·····	155
第三章 聲波·····	160
3.1 氣體的彈性·····	160
3.2 平面波·····	164
3.2.1 波動方程式·····	165
3.2.2 聲的传播速度·····	166
3.2.3 能量·····	167
3.2.4 反射·····	172
3.2.5 空氣柱的振動·····	178
3.3 流體理論·····	182
3.3.1 流體粒子的加速度·····	182
3.3.2 通量與散度·····	184
3.3.3 流体的运动方程式·····	185
3.3.4 速度位·····	187
3.3.5 環流·····	188
3.4 聲波的通式·····	190
3.4.1 平面波·····	191
3.4.2 對稱球面波·····	191
3.4.3 泊松-斯托克斯定理·····	198

• x •

3.4.4 点声源(呼吸球).....	200
3.4.5 双声源.....	200
3.5 单絃振动声波.....	201
3.5.1 复数形的引入.....	201
3.5.2 单絃振动声波.....	204
3.5.3 对称球面波.....	205
3.5.4 双声源辐射的声场.....	208
3.5.5 声阻抗.....	211
3.6 因能量损耗而衰减的声波.....	214
3.7 推求从声源来的辐射声场的基尔霍夫方法.....	217
第四章 有关声场的各种問題.....	219
4.1 反射与鏡象.....	219
4.1.1 平面波的反射与透射.....	219
4.1.2 对称球面波的完全反射, 鏡象原理.....	221
4.1.3 双声源辐射声波的完全反射.....	223
4.1.4 平坦边界面上的辐射声场.....	224
4.2 由固体振动产生的声场.....	227
4.2.1 非压缩性流体內固体球的振动.....	228
4.2.2 由球的振动所产生的声场.....	230
4.2.3 交变力局部的集中作用于媒质时所辐射的声场.....	232
4.2.4 由任意形状的固体振动所产生的声场.....	232
4.2.5 传递于气体的振动强度.....	234
4.2.6 从圆柱形声源辐射的声场的一般解法.....	236
4.2.7 球形声源辐射声场的一般解法.....	242
4.3 声波由障碍物所产生的散乱.....	252
4.3.1 由刚体障碍物所产生的散乱.....	252
4.3.2 由密度与弹性不同的障碍物所产生的散乱.....	256
4.3.3 圆柱体所生散乱声场的一般解法.....	260
4.3.4 由球产生的散乱声场的一般解法.....	263
4.4 从孔隙辐射出的声波.....	266
4.4.1 小孔隙附近的声场.....	266
4.4.2 大孔或障碍物产生的散乱声场.....	271
4.4.3 瑞利声盘.....	275
4.5 共鳴器与声管.....	276
4.5.1 矩形空腔的簡正振动方式.....	277
4.5.2 球形空腔的簡正振动方式.....	278
4.5.3 圆锥管內的声场.....	280
4.5.4 圆柱形空腔的簡正振动方式.....	280
4.5.5 共鳴器的本征振动.....	282

4.5.6	管的开口端的修正	284
4.5.7	由共鳴器外部声源所发生的受迫振动	288
4.5.8	由共鳴器内部声源所发生的受迫振动	294
4.5.9	有两个孔的共鳴器	297
4.5.10	耦合共鳴器	298
4.6	声波的衰减与吸收	299
4.6.1	粘滞	299
4.6.2	粘滞流体內的平面波	301
4.6.3	由空气的热传导与热輻射所产生的衰减	303
4.6.4	根据实测确定阻力系数与应用实例	303
4.6.5	在細管或狹間隙中的声波衰减	305
4.6.6	多层制动振动板对声波的吸收	312
4.7	有限振幅声波	315
4.8	风的影响。温度的影响	319
4.8.1	风的影响	319
4.8.2	温度的影响	320
4.8.3	在有温度梯度的层状大气中的声波通路	321
4.9	声源与收声点的移动。多普勒效应	324
問題		327

第一章 振动理論

欲求在理論上分析声的現象,有必要熟悉振動理論的概念。因此,在本书开始以一章的篇幅論述振動現象的分析方法及其基本性質。由于本章敘述的問題仅限于与音响現象有关的部分,所以想詳細了解振動理論的讀者可參閱其它專門書籍。此外,已精通振動理論的讀者可省略此章而依順序閱讀以后各章。

1.1 振子的微小振動,振動方程式

討論將質量 M (公斤)的質點懸掛在長度為 l (米)的輕¹⁾繩的一端,繩的另一端固定在一定點 O 的振子,設在鉛直平面內以其穩定平衡位置 A 為中心進行微小振動的情形。

在圖 1.1 中,設以 x (米)表示振子離開 OA 軸的位移,此時繩與 OA 所成的角為 θ (弧度),則作用在質點上的力是重力 Mg (牛頓)和繩的張力 P (牛頓)²⁾。

所謂微小振動,系指 θ 在 2° 至 3° 內的情形,如果以弧度測量角的大小,則

$$\frac{x}{l} = \sin \theta \doteq \theta \doteq \tan \theta, \cos \theta \doteq 1 \quad (1)$$

成立。因此,作為一次近似來講,繩的張力 P 永遠等於重力 Mg 是沒有關係的,即

$$P \doteq Mg \quad (\text{牛頓}). \quad (2)$$

在質點於時間 t 僅位移了 x 的情形中,欲將此質點拉回平衡點 A 的力永遠與位移 x 的方向相反,並以 $P \sin \theta$ 的大小作用在此質點上。這就是說,張力 P 的水平分量具有把振子拉回平衡位置的作用,其垂直分量永遠與重力平衡。因此,振子運動時的力的平衡為

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = -P \frac{x}{l} = -Mg \frac{x}{l} \quad (\text{牛頓}), \quad (3)$$

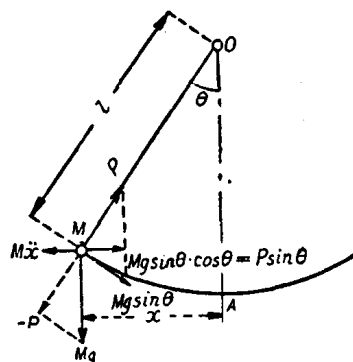


圖 1.1 振子的運動

1) 所謂輕的問題,系指繩的質量與質點的質量相比較可以忽略的程度。

2) g 是地球重力所產生的加速度 9.80 (米/秒²),但其正確值隨地點而不同。

或写成

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\frac{g}{l}x. \quad (4)$$

設

$$\frac{g}{l} = \omega^2, \quad (5)$$

則式(4)变为

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega^2x = 0 \quad (\text{振動方程式}) \quad (6)$$

的形式。式(6)形式的微分方程式称为**振動方程式**，其理由在于若 ω 为实数，則此方程式的解永远随經過的时间 t 能用振動形式表达出来。式(6)的**通解**¹⁾为

$$x = A \cos \omega t + B \sin \omega t. \quad (7)$$

因为式(7)满足式(6)，而且具有两个任意常数 A 和 B 的关系。式(7)又可写为

$$x = C \cos(\omega t - \varphi). \quad (8)$$

上式中的 C 与 φ 是任意常数，有

$$C = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad \varphi = \tan^{-1} \frac{B}{A}, \quad (9)$$

$$A = C \cos \varphi, \quad B = C \sin \varphi \quad (10)$$

的关系， C 称为位移的**振幅**²⁾， φ 称为**初相角**³⁾。

通解所包含的任意常数 A ， B 或 C ， φ 能由振子的出发点的条件，即由**初始条件**⁴⁾决定。这就意味着振子的运动，根据最初出发的方式，可以变为各种情况。例如，設靜止于 A 点的物体，在 $t=0$ 的瞬间以初速度 u_0 弹出，从此开始运动，这种情形的初始条件为

$$\text{当 } t=0 \text{ 时位移 } x=0, \quad \text{初速度 } \left[\frac{dx}{dt} \right]_{t=0} = u_0 \quad (\text{米/秒}), \quad (11)$$

此条件适用于式(7)时得

$$\begin{aligned} A &= 0, \\ \omega B &= u_0. \end{aligned} \quad (12)$$

因此，在 $t>0$ 时各时间的振子位移可用

$$x = \frac{u_0}{\omega} \sin \omega t \quad (\text{米}) \quad (13)$$

1) 二阶綫性微分方程式的通解 (general solution) 是先求出两个独立的解，然后分別乘以任意常数再相加而构成的。

2) amplitude.

3) initial phase angle.

4) initial condition.

表示。各时间的质点速度为

$$u = \frac{dx}{dt} = u_0 \cos \omega t \quad (\text{米/秒}), \quad (14)$$

以 t 为横轴将式(13)与(14)绘成如图 1.2 所示的图形。 u_0 是速度振幅¹⁾。

其次讨论开始将质点仅移动到 x ，然后突然放开的情形。设放开振子的瞬时 $t = 0$ ，质点在此时间的位移为 x_0 ，但初速度等于 0。因此，初始条件可写成

$$\begin{aligned} \text{当 } t = 0 \text{ 时, 初始位移} \\ x = x_0, \text{ 初速度 } \left[\frac{dx}{dt} \right]_{t=0} \\ = 0, \end{aligned} \quad (15)$$

将此条件代入式(7)，得

$$B = 0, \quad A = x_0. \quad (16)$$

因而在此情形的 $t > 0$ 的任意时间的位移和速度可以用

$$x = x_0 \cos \omega t, \quad u = -\omega x_0 \sin \omega t \quad (17)$$

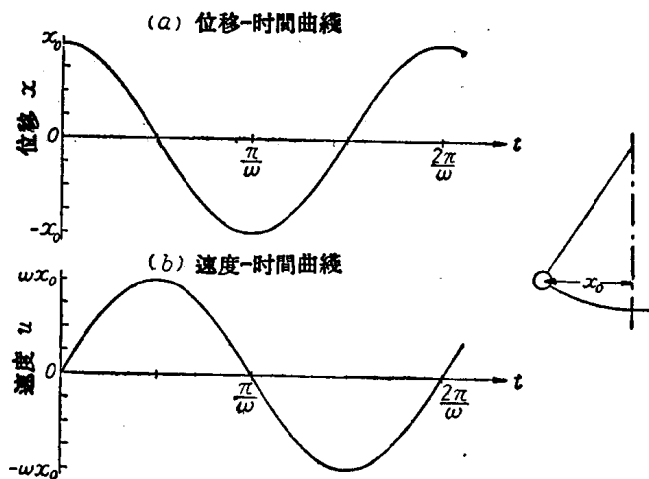


图 1.3 使振子仅位移 x_0 ，在 $t = 0$ 时间静静地放开时的振子运动

表示(图 1.3)。

其次解最普遍的情况，即同时给出了初始位移 x_0 和初速度 u_0 的情形。这就是说先使振子位移 x_0 ，然后以 u_0 速度突然放开的情形。这种情形的初始条件是

$$\begin{aligned} \text{当 } t = 0 \text{ 时, } x = x_0, \\ \left[\frac{dx}{dt} \right]_{t=0} = u_0, \end{aligned} \quad (18)$$

解变为

$$x = x_0 \cos \omega t + \frac{u_0}{\omega} \sin \omega t = \sqrt{x_0^2 + \left(\frac{u_0}{\omega} \right)^2} \cos \left\{ \omega t - \tan^{-1} \left(\frac{u_0}{\omega x_0} \right) \right\}. \quad (19)$$

1) velocity amplitude 振动速度的峰值。

这种情形依照 u_0 是正 (与 x_0 同方向) 或负 (与 x_0 反方向) 意义也不同, 图 1.4 表示 u_0 为正时的情形。

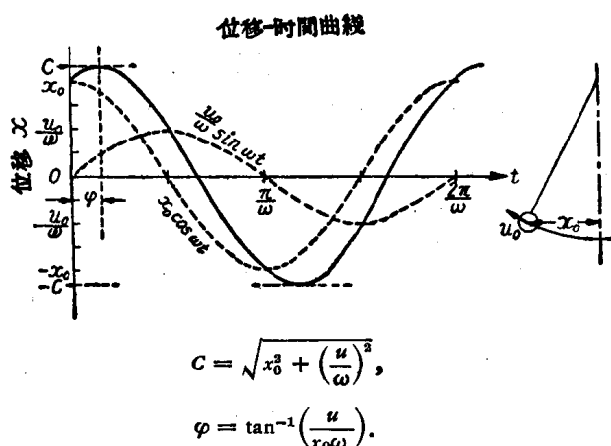


图 1.4 給了初位移 x_0 与初速度 u_0 时的振子运动

在这些情形中, 为了使解能正确地說明現象, 必須保持开始所假定的 $x/l \ll 1$. 因此, 位移的最大振幅应保持在

$$\begin{aligned} x_0/l &\ll 1, \\ u_0/(\omega l) &\ll 1 \end{aligned} \quad (20)$$

的范围内. 这样, 初位移和初速度有必要保持在

$$x_0 \ll l, \quad (21)$$

$$u_0 \ll \sqrt{gl} \quad (22)$$

的范围内.

其次, 討論振动周期¹⁾的問題. 所謂周期是指当质点振动时, 通过某一点进行一次往返后再向同一方向經過該点所需的時間. 例如, 从位移通过零点的時間求周期. 現在以向右的方向作为位移 x 的正方向, 假定在時間 t_1 通过 A 点, 在此時間 $x = 0$. 因此

$$\cos(\omega t_1 - \varphi) = 0. \quad (23)$$

其次, 以 t_2 表示质点再向右位移通过 A 点的時間, 这时仍为

$$\cos(\omega t_2 - \varphi) = 0. \quad (24)$$

但是, 当該变数每增加 2π 时, 三角函数重复同一数值. 因此, 往返一次所需時間的周期 T 为

$$\omega t_2 - \omega t_1 = 2\pi, \quad (25)$$

$$T = t_2 - t_1 = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad (\text{秒}). \quad (26)$$

从上式明确了周期仅决定于振子长度 l 与重力加速度 g , 与质量的大小无关. 此問題作为振子的等时性是伽利略 (Galileo) (1583) 发现的事实. 周期的倒数

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}} \quad (\text{周/秒}) \quad (27)$$

表示振子在一秒钟內的往返次数. 因此, ν 称为每秒的振动数²⁾, 以单位 (周/秒) 表示.

1) period of vibration.

2) frequency.