

海军重点建设教材

# 大学物理实验 下册

University Physics Experiments

主 编 陈 聪  
副主编 王建中 蒋治国 樊 洋

高等教育出版社

海军重点建设教材

# 大学物理实验

Daxue Wuli Shiyan

(下册)

主编 陈 聪

副主编 王建中 蒋治国 樊 洋

高等教育出版社·北京

## 内容提要

本书根据教育部高等学校物理学与天文学教学指导委员会编制的《理工科大学物理实验课程教学基本要求》(2010年版)和中央军委训练管理部院校局下发的《军队院校教学大纲》(2017年版)编写而成,并得到了海军教材重点建设立项的支持。

本书体系采用模块化设计,分上、下两册。本册为下册,主要介绍了20个综合型实验和12个研究型实验,实验内容层次化展开,在必做实验内容之外设置了一定量的选做实验内容,以满足因材施教的教学要求。每个实验后都设有相关的思考题,以激发学生探索自然奥秘的热情和学习物理课程的兴趣。实验项目的选择贴近军事工程应用,强化了数字化测量和计算机技术在物理实验教学中的应用,适当引入了光电、传感、激光等现代物理技术。本书还包含大量的实验教学信息资源,通过扫描书中二维码即可获得相关实验的教学视频及课件,有利于学生的自主学习和自主实验。

本书可作为理工科学校非物理学类专业“大学物理实验”课程的教材,可为物理实验类课程教学提供教辅资源,也可为其他相关专业实验课程提供方法指导和技术支持,还可供相关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验.下册 / 陈聪主编.--北京:高等教育出版社,2018.10  
ISBN 978-7-04-050634-1

I. ①大… II. ①陈… III. ①物理学-实验-高等学校-教材 IV. ①O4-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 215980 号

策划编辑 程福平 责任编辑 程福平 封面设计 张志 版式设计 王艳红  
插图绘制 于博 责任校对 胡美萍 责任印制 韩刚

出版发行 高等教育出版社  
社址 北京市西城区德外大街4号  
邮政编码 100120  
印刷 天津文林印务有限公司  
开本 787mm×1092mm 1/16  
印张 29.5  
字数 720千字  
购书热线 010-58581118  
咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>  
<http://www.hep.com.cn>  
网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>  
<http://www.hepmall.com>  
<http://www.hepmall.cn>  
版 次 2018年10月第1版  
印 次 2018年10月第1次印刷  
定 价 54.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 50634-00

# 大学物理实验 下册

主编 陈 聪

- 1 计算机访问<http://abook.hep.com.cn/1251752>, 或手机扫描二维码、下载并安装 Abook 应用。
- 2 注册并登录, 进入“我的课程”。
- 3 输入封底数字课程账号(20位密码, 刮开涂层可见), 或通过 Abook 应用扫描封底数字课程账号二维码, 完成课程绑定。
- 4 单击“进入课程”按钮, 开始本数字课程的学习。



课程绑定后一年为数字课程使用有效期。受硬件限制, 部分内容无法在手机端显示, 请按提示通过计算机访问学习。

如有使用问题, 请发邮件至 [abook@hep.com.cn](mailto:abook@hep.com.cn)。



<http://abook.hep.com.cn/1251752>

# 目 录

## 第一篇 综合型实验

实验 1	音叉受迫振动与共振实验 .....	2
实验 2	电阻应变片特性测量及电子秤设计 .....	14
实验 3	温度传感器特性研究 .....	27
实验 4	红外物理特性测量及应用 .....	40
实验 5	超声声速测量 .....	54
实验 6	单缝衍射 .....	73
实验 7	光的等厚干涉——牛顿环 .....	82
实验 8	光栅衍射法测光波长 .....	91
实验 9	迈克耳孙干涉仪的调整和使用 .....	101
实验 10	白光再现全息照相 .....	112
实验 11	虚拟仪器的使用 .....	123
实验 12	非线性电路的伏安特性及混沌 .....	140
实验 13	虚拟示波法测绘铁磁材料的磁化曲线 .....	151
实验 14	亥姆霍兹线圈磁场分布研究 .....	163
实验 15	磁阻效应 .....	171
实验 16	密立根油滴实验 .....	184
实验 17	弗兰克 - 赫兹实验 .....	194
实验 18	光电效应和普朗克常量的测定 .....	204
实验 19	塞曼效应 .....	224
实验 20	核磁共振 .....	244

## 第二篇 研究型实验

实验 1	电磁炮原理实验 .....	268
实验 2	太阳能电池特性及应用 .....	280
实验 3	超声定位和形貌成像 .....	299
实验 4	热辐射与红外扫描成像 .....	314
实验 5	双光栅测微弱振动 .....	330
实验 6	磁阻传感器特性及其应用 .....	340
实验 7	微波的光学性质及其布拉格衍射 .....	357
实验 8	超声悬浮 .....	371
实验 9	几何光学综合实验 .....	382



## 第一篇 综合型实验

本篇精选了 20 项综合型实验项目。所选实验内容涉及物理知识面较广,综合性较强,具有多个学科融合、多种技术交叉的特点,着重培养学生综合知识的应用能力,以提高学生分析问题、解决问题的能力。

实验 1 音叉受迫振动与共振实验

实验 2 电阻应变片特性测量及电子秤设计

实验 3 温度传感器特性研究

实验 4 红外物理特性测量及应用

实验 5 超声声速测量

实验 6 单缝衍射

实验 7 光的等厚干涉——牛顿环

实验 8 光栅衍射法测光波长

实验 9 迈克耳孙干涉仪的调整和使用

实验 10 白光再现全息照相

实验 11 虚拟仪器的使用

实验 12 非线性电路的伏安特性及混沌

实验 13 虚拟示波法测绘铁磁材料的磁化曲线

实验 14 亥姆霍兹线圈磁场分布研究

实验 15 磁阻效应

实验 16 密立根油滴实验

实验 17 弗兰克-赫兹实验

实验 18 光电效应和普朗克常量的测定

实验 19 塞曼效应

实验 20 核磁共振

# 实验 1 音叉受迫振动与共振实验



PPT:音叉受迫振动与共振实验

振动是自然界中最常见的运动形式之一。振动系统在周期性外力的作用下所发生的振动称为受迫振动,这个周期性的外力称为驱动力。例如扬声器纸盆、耳机中的膜片等,都受到外来驱动力的持续作用,其振动频率都与驱动力的频率有关而与其自身的固有频率无关。但物体作受迫振动时的振幅不仅和驱动力的大小有关,还与驱动力的频率以及物体自身的固有频率有关。作受迫振动的物体一边克服阻力做功,输出能量,一边从驱动力做功中输入能量。当输入能量等于输出能量时,系统达到动态平衡,而作等幅振动。当周期性驱动力的频率和物体的固有频率相等时,振幅达到最大,即产生共振。

受迫振动与共振现象在日常生活、工程技术和科学研究中极为普遍,在建筑、机械等工程中,经常需要避免共振现象,以保证工程质量。1940年,美国全长860米的塔科马大桥<sup>[1]</sup>,就是因为大风引起共振而被摧毁的。而在一些石油化工企业中,常利用振动式传感器,对液体密度和液位高度进行实地检测。而这些传感器都是基于共振原理设计的。

音叉(tuning fork)是呈“Y”形的钢质或铝合金发声器,其两臂对称、振动相反,而中心杆处于振动的节点位置,合外力为零而不振动,因此将它固定在音叉固定架上是不会引起振动衰减的<sup>[2]</sup>。音叉是一个典型的振动系统,因其质量和叉臂长短、粗细不同而在振动时发出不同频率的纯音。音叉广泛应用于多个行业,如用于产生标准的“纯音”、鉴别耳聋的性质、用于检测液位的传感器、用于检测液体密度的传感器以及计时等。

本实验利用电磁激振线圈的电磁力激振音叉,并用压电换能片检测音叉振动的幅度,通过测量音叉系统受迫振动的振幅与驱动力频率之间的关系,来研究受迫振动与共振现象及相关规律。

## 【实验目的】

1. 在小阻尼情况下,研究音叉振动系统在周期性外力作用下振幅与驱动力频率的关系,测量并绘制共振曲线,求出共振频率和振动的锐度;
2. 测量音叉共振频率与对称双臂质量的关系曲线,找出音叉共振频率与附在音叉双臂一定位置上相同物块质量的关系公式;
3. 通过测量共振频率的方法,测量一对附在音叉固定位置上物块的未知质量;
4. 在给音叉增加阻尼力情况下,测绘音叉的共振曲线,求出共振频率和振动锐度,并与小阻尼情况进行对比。

## 【实验原理】

### 一、简谐振动与阻尼振动

1. 无阻尼时的简谐振动

许多振动系统如弹簧振子的振动、单摆的振动、扭摆的振动等,在振幅较小而且在空气阻尼可以忽视的情况下,都可作简谐振动处理,即此类振动的位移满足简谐振动方程

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1-1-1)$$

该式的解为

$$x = A \cos(\omega_0 t + \varphi) \quad (1-1-2)$$

式中,  $A$  为系统振动振幅,  $\omega_0$  为系统振动的固有角频率,  $\varphi$  为初相位,  $x$  为任意  $t$  时刻的位移。

对弹簧振子,其固有角频率  $\omega_0 = [k/(m+m_0)]^{1/2}$ ,  $k$  为弹簧的劲度系数,  $m$  为振子的质量,  $m_0$  为弹簧的等效质量。弹簧振子的周期  $T_0$  满足

$$T_0^2 = \frac{4\pi^2}{k} (m+m_0) = \frac{4\pi^2}{k} m' \quad (1-1-3)$$

其中,  $m' = m+m_0$ , 为振动系统的有效质量。

系统振动频率为  $f_0$ , 有

$$\omega_0 = 2\pi/T_0 = 2\pi f_0 \quad (1-1-4)$$

## 2. 阻尼较小时的阻尼振动

但实际的振动系统存在各种阻尼因素,因此式(1-1-1)左边应增加阻尼项。在小阻尼情况下,阻尼与速度成正比,可表示为  $-\zeta \frac{dx}{dt}$ , 式中  $\zeta$  是与阻力相关的比例系数,其值取决于振动物体的形状、大小和周围介质等的性质。则相应的振动方程为

$$m' \frac{d^2x}{dt^2} + \zeta \frac{dx}{dt} + kx = 0$$

式中  $\omega_0$  对应于无阻尼时的系统振动的固有角频率。令  $\zeta/m' = 2\beta$ ,  $\beta$  称为阻尼系数。即

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0 \quad (1-1-5)$$

当阻尼较小时,式(1-1-5)的解为

$$x = A e^{-\beta t} \cos(\omega t + \varphi) \quad (1-1-6)$$

式中  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ 。

由公式(1-1-6)可知,如果  $\beta=0$ , 则认为是无阻尼的运动,这时  $x = A \cos(\omega t + \varphi)$ , 系统作简谐振动。

在有阻尼的情况下,  $\beta \neq 0$ , 即此振动是一种衰减运动。从  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$  可知,相邻两次振动位移最大之间的时间间隔为

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} > T_0 \quad (1-1-7)$$

显然,与无阻尼的周期  $T_0$  相比,周期变大了。

## 二、受迫振动与共振

阻尼振动的振幅随时间会衰减,最后会停止振动。为了使振动持续下去,外界必须给系统一

个周期性变化的力(一般采用的是随时间作正弦函数或余弦函数变化的力),使其因阻尼而损失的能量得到不断的补充。振动系统在周期性的外力作用下所发生的振动称为受迫振动,这个周期性的外力称为驱动力。实际生活中发生的许多振动都属于受迫振动。例如声波的周期性压力使耳膜产生的受迫振动;电磁波的周期性电磁场使天线上电荷受力从而产生的受迫振动等。

假设驱动力有简单的形式  $F = F_0 \cos \omega' t$ ,  $\omega'$  为驱动力的角频率,  $F_0$  为驱动力的幅度。此时,振动系统处在驱动力、阻力和线性回复力三者的共同作用下,其动力学方程为

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + 2\beta \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = \frac{F_0}{m'} \cos \omega' t \quad (1-1-8)$$

在阻尼较小时,式(1-1-8)的解为

$$x = Ae^{-\beta t} \cos(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi) + A' \cos(\omega' t + \varphi') \quad (1-1-9)$$

显然上述解包括两项,第一项为瞬态振动,由于阻尼存在,振动开始后振幅不断衰减,最后较快地衰减为零;而后一项为稳态振动的解,即

$$x = A' \cos(\omega' t + \varphi') \quad (1-1-10)$$

应该指出,上式虽然与自由简谐振动时(即在无驱动力和阻力下的振动)的运动方程形式相同,但实质已不同。首先其中角频率  $\omega'$  并非是系统的固有角频率  $\omega_0$ ,而是驱动力的角频率;其次  $A'$  和  $\varphi'$  不决定于系统的初始状态,而是依赖于系统的性质、阻尼的大小和驱动力的特征。事实上,只要将式(1-1-10)代入方程(1-1-8),就可计算出

$$A' = \frac{F_0}{m' \sqrt{(\omega_0^2 - \omega'^2)^2 + 4\beta^2 \omega'^2}} \quad (1-1-11)$$

$$\tan \varphi' = \frac{2\beta \omega'}{\omega'^2 - \omega_0^2} \quad (1-1-12)$$

在不同阻尼系数  $\beta$  时,受迫振动振幅  $A'$  和驱动力频率  $\omega'$  之间的关系曲线如图 1-1-1 所示。在稳态时,振动物体的速度为

$$v = \frac{dx}{dt} = v_{\max} \cos\left(\omega' t + \varphi' + \frac{\pi}{2}\right) \quad (1-1-13)$$

其中

$$\begin{aligned} v_{\max} &= \frac{F_0 \omega'}{m' \sqrt{(\omega_0^2 - \omega'^2)^2 + 4\beta^2 \omega'^2}} \\ &= \frac{F_0}{\sqrt{\left(\omega' m' - \frac{k}{\omega'}\right)^2 + 4m'^2 \beta^2}} \end{aligned} \quad (1-1-14)$$

同样可以画出振动速度的幅值  $v_{\max}$  与驱动力频率  $\omega'$  之间的关系曲线,如图 1-1-2 所示。

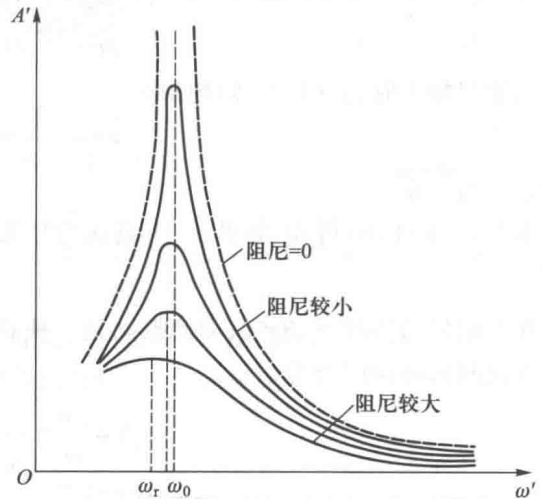


图 1-1-1 不同阻尼时振幅  $A'$  与驱动力频率  $\omega'$  的关系曲线

### 三、共振

在驱动力幅值  $F_0$  固定的情况下,应有怎样的驱动角频率  $\omega'$  才可使系统发生强烈振动? 这是个有实际意义的问题。下面分别从振动速度和振动位移两方面进行分析。

#### 1. 速度共振

从相位上看,振动速度与驱动力之间有相位差  $\varphi' + \pi/2$ , 一般地说,外力方向与物体运动方向并不相同,有时两者同向,有时两者反向。同向时驱动力做正功,向系统输入能量;反向时驱动力做负功,系统输出能量。输入功率的大小可由  $F \cdot v$  计算。设想在振动系统固有频率、阻尼大小、驱动力幅值  $F_0$  均固定的情况下,仅改变驱动力的频率  $\omega'$ ,则由式(1-1-14)不难得知,如果满足  $\omega' = \omega_0$ ,则系统振动的速度幅值  $v_{\max}$  就达到最大值  $v_y$ 。

此时有

$$\omega' = \omega_0 = \sqrt{k/m'}, v_y = \frac{F_0}{2m'\beta}, \text{这时 } \tan \varphi' \rightarrow -\infty, \varphi' = -\pi/2 \quad (1-1-15)$$

由此可见,当驱动力的频率等于系统的固有频率时,驱动力将与系统振动速度始终保持同相,于是驱动力在整个周期内对系统做正功,始终给系统提供能量,从而使系统振动速度能获得最大的幅值。这一现象称为速度共振。如图 1-1-2 所示,在不同阻尼情况下,系统达到速度共振的频率均为  $\omega_0$ ,同时阻尼  $\beta$  越小,  $v_{\max} - \omega'$  关系曲线的极值越大。

可引入锐度来描述曲线陡峭程度,其值为

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega'_2 - \omega'_1} = \frac{f_0}{f'_2 - f'_1} \quad (1-1-16)$$

$Q$  又称为品质因数。其中,  $\omega'_1$ 、 $\omega'_2$  表示半功率点对应的角频率,即为  $v_{\max}$  下降到最大值  $v_y$  的 0.707 倍时对应的角频率值。式中  $f_0$ 、 $f'_1$ 、 $f'_2$  为  $\omega_0$ 、 $\omega'_1$ 、 $\omega'_2$  对应的频率,如图 1-1-3 所示。

图 1-1-3 又称为受迫振动时速度的共振曲线。

#### 2. 位移共振

驱动力的频率  $\omega'$  为何值时才能使系统受迫振动的振幅  $A'$  有最大值呢?

对式(1-1-11)求导并令其一阶导为零,即可求得  $A'$  的极大值及对应的  $\omega'$  值为

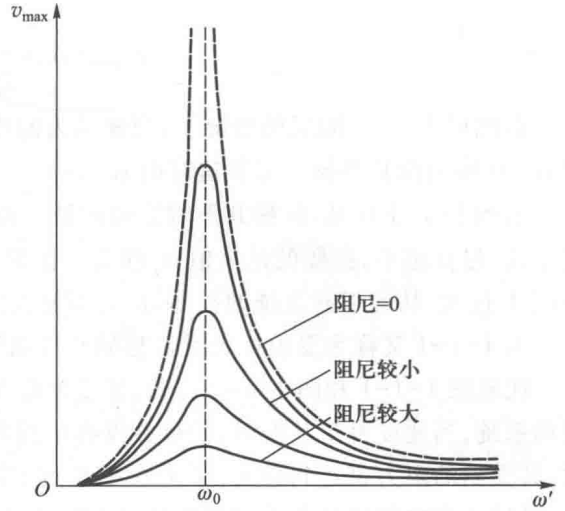


图 1-1-2 速度幅值  $v_{\max}$  与驱动力频率  $\omega'$  的关系曲线

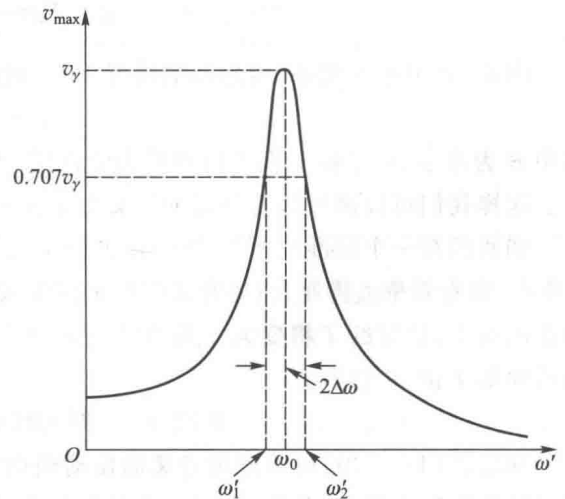


图 1-1-3 曲线的锐度

$$\omega' = \omega_y = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} \quad (1-1-17)$$

振幅最大值为

$$A'_{\max} = A_y = \frac{F_0}{2\beta m' \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} \quad (1-1-18)$$

由此可知,在有阻尼的情况下,当驱动力的角频率  $\omega' = \omega_y$  时,系统受迫振动的振幅  $A'$  有最大值  $A_y$ ,这称为位移共振。显然这时的  $\omega_y < \omega_0$ 。

由图 1-1-1 可见,位移共振时振幅的最大值  $A_y$  与阻尼  $\beta$  有关。阻尼越大,振幅的最大值  $A_y$  越小;阻尼  $\beta$  越小,振幅的最大值  $A_y$  越大。在很多场合,由于阻尼  $\beta$  很小,发生共振时位移共振幅值  $A_y$  过大,从而引起系统的损坏,这是需要我们十分重视的。

图 1-1-1 又称为受迫振动时位移的共振曲线。

比较图 1-1-1 和图 1-1-2 可知,速度共振曲线和位移共振曲线不完全相同。对于有阻尼的振动系统,当速度发生共振时,位移并没有达到共振。其原因在于,当系统在平衡点有最大速度时,其受到的阻力也达到最大,于是在平衡点上的最大动能并没有能全部转变为回转点上的势能,以致速度幅值的最大并不对应位移振幅的最大。这就是位移共振与速度共振并不发生在同一条件下的原因。显然,如果阻尼很小,两种共振的条件将趋于一致。

同样可以用锐度来描述位移共振曲线的陡峭程度。

#### 四、可调频率音叉的振动周期

一个可调频率音叉一旦起振,它将在某一基频振动而无谐频振动。音叉的两臂是对称的,以至两臂的振动是完全反向的,从而在任一瞬时,中心杆都受到等值反向的作用力。中心杆的净受力为零而不振动,从而紧紧握住它是不会引起振动衰减的。同样的道理音叉的两臂不能同向运动,因为同向运动将对中心杆产生作用力,这个力将使振动很快衰减掉。

由式(1-1-3)可知,弹簧振子振动的固有周期

$$T_0^2 = \frac{4\pi^2}{k} m'$$

因此,在阻尼  $\beta$  很小、可忽略的情况下,一般的振动系统,如音叉,其固有周期满足

$$T^2 = Bm' \quad (1-1-19)$$

其中  $B$  为常量,它依赖于音叉材料的力学性质、大小及形状, $m'$  为音叉振动臂的有效质量。

这样我们可以通过改变质量  $m'$ ,来改变音叉振动的固有频率及固有周期。

如我们在一个标准基频为 256 Hz 的音叉的两臂上对称等距开孔,可以知道这时的固有周期  $T$  变小,固有频率  $f_0$  将变大;如音叉臂原来的等效质量为  $m'$ ,现将两个相同质量的物块  $m_x$  对称地加在两臂上,这时的  $T$  将变大, $f_0$  将变小。研究表明,对于这种对称加载相同质量物块的音叉,其振动周期  $T$  由下式给出

$$T^2 = B(m' + m_x) \quad (1-1-20)$$

利用式(1-1-20)可由测量音叉的振动周期来测量未知质量,并可以制成各种音叉传感器,如液体密度传感器、液位传感器等,通过测量音叉的振动频率的变化可求得音叉管内液体密度或液位高度。这类音叉传感器在石油化工等领域的实时测量和监控中发挥着重要作用。

## 【实验仪器】

受迫振动与共振实验仪<sup>[3]</sup>、示波器<sup>[4]</sup>、配对质量块、电子天平(共用)。

## 【实验内容】

### 一、必做实验内容

1. 音叉臂空载、空气阻尼很小的情况下测绘音叉的位移共振关系曲线

(1) 用连接线将信号发生器的“起振信号输出”端与音叉共振平台上的“起振信号输入”相连。若想用示波器观察起振信号的波形,可以将音叉共振平台上的“起振信号波形”与示波器相连。

(2) 用连接线将音叉共振平台上的一个“共振信号输出”与信号发生器的“共振信号测量”相连,另一“共振信号输出”用于连接示波器观察音叉的共振信号波形。接通信号发生器的电源,使仪器预热 15 分钟。

(3) 由低到高缓慢调节信号发生器的起振信号频率(驱动力频率),仔细观察交流数字电压表的读数,当交流电压表读数达最大值时,记录音叉共振时的频率,这样可以粗略找出音叉的共振频率。

注意:起振信号频率调节有“频率调节(粗)”和“频率调节(细)”两个电位器,实验时若起始频率偏离共振频率较大时用粗调,接近共振点时用细调。

(4) 将信号发生器的频率调至低于共振频率约 5 Hz,然后由低到高缓慢调节频率微调旋钮,记录不同频率所对应的交流数字电压示数,也就是音叉在不同频率的驱动力作用下受迫振动的振幅。

注意:要求在共振点 $\pm 5$  Hz 范围内测量,总共测 26 个数据,在共振频率附近多测几点。将起振信号频率  $f$  及相应的交流数字电压表的读数(正比于振幅  $A$ )记录入表 1-1-1 中。

表 1-1-1 空气阻尼很小时振幅  $A$  和驱动力频率  $f$  的关系

$f/\text{Hz}$												
$A/\text{V}$												
$f/\text{Hz}$												
$A/\text{V}$												

(5) 绘制小阻尼状态下音叉位移的  $A-f$  曲线(共振关系曲线),找出音叉的共振频率  $f_0$ ,并求出两个半功率点  $f_1$  和  $f_2$ ,计算共振曲线的锐度。

2. 通过测量音叉的共振频率测量未知质量

(1) 在电子天平上称出(6 对质量块中任选 5 对)不同质量块对的质量值,记录入表 1-1-2 中。

(2) 将不同质量块对分别加到音叉双臂指定的位置上,并将螺丝旋紧。用必做实验内容 1 中的方法测出对称加相同质量物块以后音叉的共振频率,并记录入表 1-1-2 中。

表 1-1-2 共振频率  $f$  与双臂质量  $m$  的关系

	1	2	3	4	5	6(待测质量)
$m/g$						
$f_0/Hz$						
$T^2/10^{-5} s^2$						

(3) 利用测得的结果,在坐标纸上作质量  $m$  与周期平方  $T^2$  的关系曲线,并求出直线方程。或者利用 Excel 软件拟合出  $m$  与  $T^2$  的直线方程。

(4) 用一对未知质量的物块  $m_x$  替代已知质量物块,测出音叉的共振频率  $f_x$ ,根据上面拟合的关系式,计算该物块的质量  $m_x$ 。并用电子天平称出  $m_x$ ,作为其标准值。将测量值与标准值进行比较,计算出测量误差。

## 二、选做实验内容

1. 在音叉单臂上增加质量块,测量音叉的  $A-f$  曲线

在音叉一臂上(靠近激振驱动线圈)加装质量块,用电磁力驱动音叉,测量并绘制  $A-f$  曲线,测出共振频率,计算音叉的锐度,并和对称加装质量块时音叉的  $A-f$  曲线进行对比。

2. 测量音叉受迫振动与驱动力之间的相位差与驱动力频率  $\omega'$  之间的关系

由式(1-1-12)可知,音叉受迫振动与驱动力之间的相位差为

$$\Delta\varphi' = \frac{2\beta\omega'}{\omega'^2 - \omega_0^2} \quad (1-1-21)$$

改变驱动力频率  $\omega'$ ,用示波器观测激振线圈的输入信号和压电换能片的输出信号,测量它们的相位关系,验证式(1-1-21)。

3. 通过测量音叉的共振频率来测量液体密度

将装置做适当改造,让音叉在液体中振动,测量音叉的共振频率,寻找共振频率和液体密度的关系。

4. 在音叉臂空载、空气阻尼很小的情况下测绘音叉的速度共振关系曲线

将本实验装置中用于测量音叉振动振幅的压电陶瓷片换成接收线圈,靠近音叉臂放置,即可感应出音叉臂振动的速度信号。

由于感应电流的大小取决于音叉振动的速度,速度越快,磁场变化越快,产生的电流越大,从而使测得的电压值越大。所以,音叉振动时,接收线圈输出的电压值对应于音叉振动的速度幅值。

在不同的驱动力频率时测出相应的输出电压,即可获得音叉受迫振动的速度共振曲线。

5. 测量音叉在空气中振动时的阻尼系数  $\beta$

一般来说,测定音叉受迫振动时的阻尼系数的方法有以下两种:

(1)  $\ln A-t$  法。

在无驱动力作用的情况下,测定音叉阻尼振动的振幅随时间衰减的关系。

然后由  $\ln A = \ln A_0 - \beta t$ ,可得出阻尼系数  $\beta$ 。

## (2) 共振曲线法。

测量不同驱动力频率时的  $v_y$ , 描绘出音叉的速度共振曲线, 测量出该曲线的品质因数  $Q$ , 进而由关系式  $Q = \omega_0 / 2\beta$ , 计算阻尼系数  $\beta$ 。

### 【注意事项】

1. 电磁激振线圈和压电陶瓷片外面均有保护罩防护, 使用者不可以将保护罩拆去或用工具伸入保护罩, 以免损坏引线。
2. 注意每次加不同质量砝码时的位置一定要固定。
3. 实验中所测量的共振曲线是在驱动力恒定的条件下进行的, 要保持信号发生器的输出幅度不变。
4. 信号源的输出不要短路, 以防止烧坏仪器。
5. 适当调节幅度调节旋钮, 使信号发生器输出电压不宜过大, 以避免共振时因输出振幅过大而超出数字电压表量程, 或造成音叉响度过大, 给人耳带来不适。
6. 请勿随意用工具将固定螺丝拧松, 以避免电磁线圈引线断裂。

### 【思考题】

1. 本实验中是如何给音叉施加周期性驱动力的? 音叉振动的幅度又是如何测出来的?
2. 实验中驱动力的频率为 200 Hz 时, 音叉臂的振动频率为多少?
3. 实验中在音叉臂上加质量块时, 为什么每次加的位置要固定, 而且要对称加上成对质量块? 不固定会带来什么样的结果? 只给音叉的一个臂加上质量块, 音叉发音会有什么变化?
4. 根据所完成的实验内容, 在驱动力幅度不变的情况下, 如果希望振动系统的共振幅度降低, 可采取什么措施? 这个结论有何实际价值?
5. 你有哪些办法可以使一个标准基频为 256 Hz 的音叉的频率变大?
6. 本实验重复测量时, 每次的实验结果可能不完全一致, 原因是什么?
7. 利用音叉自行设计一个液位计, 并画出测量原理图。
8. 将振动着的音叉旋转, 如图 1-1-8 所示, 会听到时强时弱的声音变化。试一试, 并运用所学的知识对现象加以解释。
9. 举例说明共振现象在实际生活中的应用。

### 【附录】

#### [1] 舞动的格蒂——塔科马海峡大桥

最早的塔科马海峡大桥位于美国华盛顿州的塔科马海峡, 是一座主跨 853.40 m 的悬索桥, 桥梁长度 1 810.56 m, 桥宽 11.90 m, 两边有钢材焊接成的 H 形梁, 梁高为 1.30 m, 桥下通航净高 59.40 m。1940 年 7 月 1 日通车, 四个月, 1940 年 11 月 7 日戏剧性地被海风摧毁。这一幕正好被一支摄影队拍摄了下来, 该桥因此声名大噪。当年科技水准不像今天这样发达, 走到哪里都可以随手拍照摄影, 所以当年偶然拍到的影像对于今天来说十分珍贵, 尤其是对于那些研究桥梁结构风振的技术人员来说, 更是难得的第一手资料。

塔科马海峡大桥在施工期间就险情频出, 大桥的振动与位移不时地使建桥人员感到晕眩, 只是当时没有人能有像今天这样对于空气动力学及风振的认识。大桥竣工通车后, 这种由于位移振动而导致的摇摆变得更加厉害了。但当时这种特别的景致竟吸引了不少喜欢猎奇的美国人, 不远万里驾车到此一游, 体验汽车驶过摇摇晃

晃的桥梁时的滋味。在随后的几个月里,桥梁在风的作用下,振动幅度竟达 1.50 m,使得驾驶员有时会看不见在它前面行驶的汽车。

1940 年 11 月 7 日上午,塔科马海峡大桥的倒塌(图 1-1-4)显得非常突然。上午十点半左右,一直在风中漂浮的桥梁突然停止振动,不一会梁体疯狂地扭转振动起来。30 分钟后第一块桥面板开始坠入海中,接着两块左右长的桥面板开始断开,振动停止了几分钟后,又发生新的振动,将残留的桥面板全部掀到海里。

事后,人们对这种狭长的桥梁设计找不出可以指责的地方,认为桥梁具有一定的承载能力就足以安全了,其实不然。那时人们对于悬索桥的空气动力学特性知之甚少,这场灾难在当时来说是属于不可预测的,或称不可抗拒的。但是,塔科马海峡大桥的坍塌事故还是引起了工程技术人员的关注,它的经验与教训对以后的大桥设计产生了很大的影响,也正是从这个事件开始了现代桥梁的风洞研究与试验。

在今天看来,塔科马海峡大桥坍塌那天,海上的风并不是很大,事故的真正原因就是梁体刚度不足,在风振的作用下桥梁屈曲失稳。桥梁在风的作用下产生了上下振动,振幅不断增大并伴随着梁体的扭曲,吊索拉断,加大了吊索间的跨度,使梁体支撑不均,直至使梁体破坏。

风是怎样作用在桥上的呢?为什么均匀的风,会使桥产生脉冲式的振动,然后变为扭转振动呢?

研究的结果表明,是桥上垂直方向的桥面板引起了桥的振动,它对风的阻力很大,风被挡之后,大量的气流便从桥面板的上方经过然后压向桥面。吹过的气流因不断地被挤压而使速度增加,所以在桥面板的上方和下方压力降低。如果风总是从桥梁横向的正前方吹来,则上下方的压力降低会互相抵消,不会产生太大的影响。但是,如果风的方向不停地变换的话,压力就会不断地变化。这一压力差作用在整个桥面上,并因挡风的竖直结构板后所产生的涡流而得到加强,结果桥就开始形成波浪式振动,过大的振动又拉断了桥梁结构,最终使桥梁坍塌。幽默的美国人后来在谈起塔科马海峡大桥时诙谐地称之为舞动的格蒂(Galloping Gertie)。

从 20 世纪 40 年代后期开始,围绕塔科马海峡大桥风毁事故的原因,后人进行了大量的分析与试验研究。当时有两种观点。一种观点认为塔科马大桥的振动与机翼的颤振类同,是一种风致扭转发散振动;另一种观点认为塔科马大桥的主梁是 H 型断面,存在明显的涡流脱落,因此是一种涡激共振。两种观点互相争论,直到 1969 年,斯坎伦(R.Scanlan)提出了钝体断面的分离流颤振理论,成功地解释了塔科马大桥的风毁机理,并由此奠定了桥梁颤振分析的理论基础。

塔科马海峡大桥 1950 年重建,直到现在仍然在承担着繁忙的交通运输功能,当地的居民戏称它为“强健的格蒂”(图 1-1-5)。

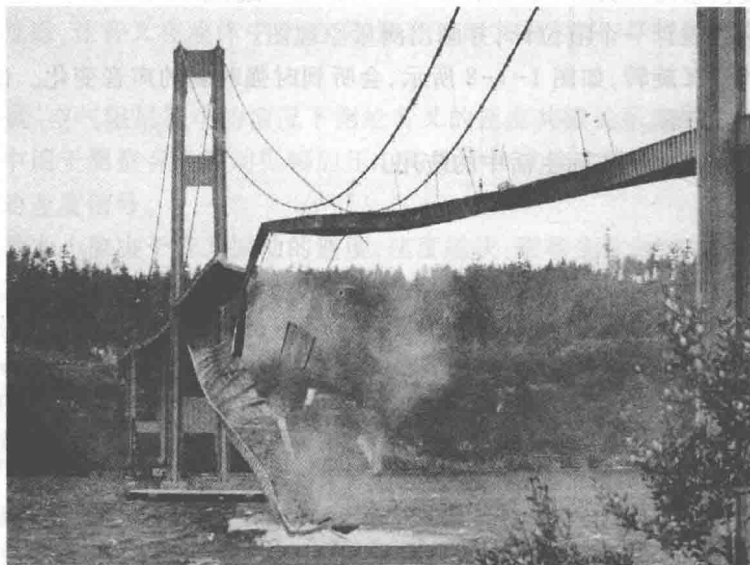


图 1-1-4 1940 年 11 月 7 日上午在风的作用下坍塌的塔科马海峡大桥

## [2] 音叉

1711年,英国宫廷小号手约翰·朔尔(J.Shore)发明了音叉。他是一个鲁特琴手,鲁特琴非常难以调音,朔尔发明音叉来给鲁特琴调音。音叉实物如图1-1-6所示。



图 1-1-5 新修的塔科马海峡大桥(右边)

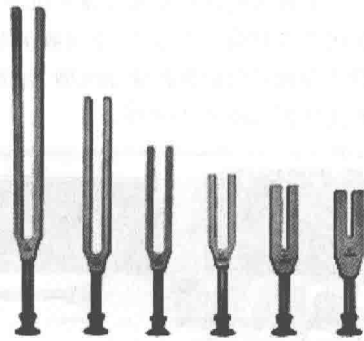


图 1-1-6 音叉实物

音叉是一个可作横向振动的弯形杆,杆的中部有一叉柄。一个好的音叉,两个叉股(音叉的两臂)的质量是均匀且相等的,音叉的重心位置在叉柄的纵轴(音叉的中心杆)上。

用橡皮锤敲击一个叉股后,振动在U形杆上传播,在两端反射并叠加,最终某个频率的振动在弯形杆上形成驻波,这个频率就是音叉的基频。不能形成驻波的那些频率的振动则很快衰减。由于音叉的形状及对称性,导致叉股的两端点是波腹,且由于音叉内部张力的作用,两个叉股总是向相反的方向运动,即振动的相位总是相反,如图1-1-7所示。这就使得中心杆与叉股的连接处成为波节,因此也就没有振动传播到叉柄上。故手持振动着的音叉叉柄,却感觉不到音叉的振动。

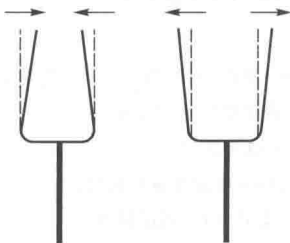


图 1-1-7 音叉的振动

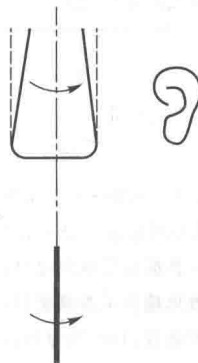


图 1-1-8 音叉旋转带来时强时弱的声音变化