

(力 熱 部 分)

(二)

北京大学物理系普通物理教研室

1979.9.

库存

目 录

11-(1)	扭摆的受迫振动	1
11-(2)	弹簧振子的受迫振动	6
12-(1)	气垫上弹簧振子的简谐振动	10
12-(2)	弹簧振子的阻尼振动	18
12-(3)	斥力和吸力场中运动物体的能量转换与受力情况	16
12-(4)	科里奥利力实验	34
12-(5)	扭摆的阻尼振动	39
12-(6)	声速的测定	47
12-(7)	单摆的周期与振幅的关系	51
12-(8)	用火花法研究匀速直线运动与匀加速直线运动	59
12-(9)	用光电法研究匀速直线运动与匀加速直线运动	70
13	测定冰的溶解热	75
14-(1)	测定空气的密度	85
14-(2)	测定固体的线膨胀系数	95
15-(1)	用冷却法测定金属比热容	105
15-(2)	用冷却法测液体比热容	108
16-(1)	观测悬浮在空气中微粒的布朗运动	114
16-(2)	测定空气的定压热容量与定容热容量之比	123
16-(3)	用电热法测定热功当量	127
17	用稳态平板法测定不良导体的导热系数	133
18-(1)	用斯托克斯公式测液体的粘滞系数	137
18-(2)	用毛细管粘滞器测液体的粘滞系数	143
18-(3)	用转筒法测液体的粘滞系数	148
*19	用火花计时测定重力加速度	155

实验 11-(1) 扭摆的受迫振动

〔学习重点〕

1. 研究扭摆在正弦外力矩作用下振幅与驱动力矩频率之间的关系, 观察共振现象;

2. 观测不同阻尼情况下共振曲线的变化;

3. 合理分布观测点, 以获得共振曲线的总体图象。

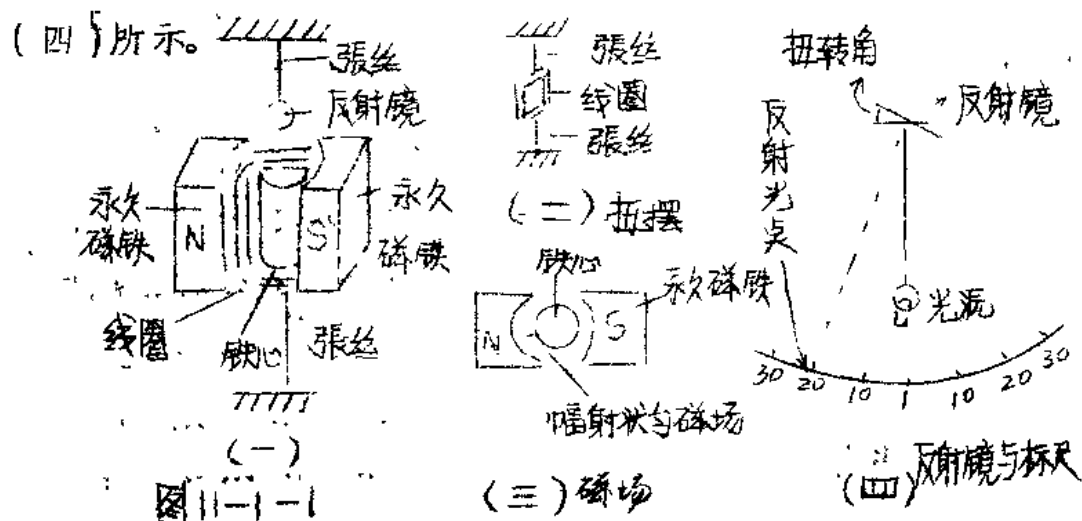
〔仪器用具〕

灵敏电流计 (作为扭摆)、超低频讯号发生器、(XFD-8 型) 电阻、双刀开关、停表等。

〔仪器描述和原理〕

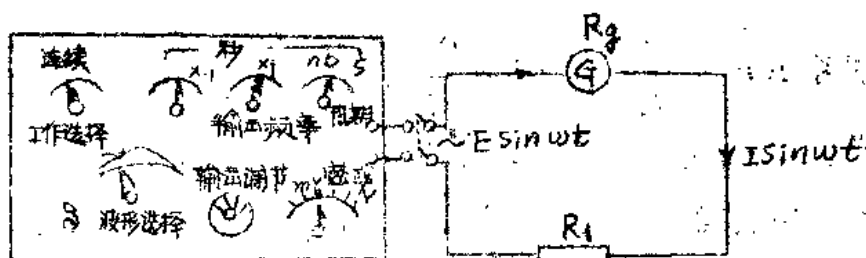
1. 扭摆

把灵敏电流计的张丝及线圈作为一个扭摆, 线圈中回铁心与环抱线圈的永久磁铁之间产生均匀的辐射状磁场, 使扭摆在一个辐射状匀强磁场中运动, 扭摆的扭转角度由线圈的偏转角度由固定在线圈上的小镜反射光点, 在标尺上读出, 如图 11-1-1 至 (四) 所示。



2. 策动力矩

利用灵敏电流计线圈受力矩与通过电流成正比的性质，把一个超低频讯号发生器接在电流计的两端，加上一个频率及幅值可调的正弦电压 $E \sin \omega t$ ，如图 11-1-2 所示。对于一定的负载电阻 R_1 ，相应有一定的正弦电流 $I \sin \omega t$ 通过电流计，于是线圈受到一个周期性的策动力矩（不考虑线圈电感）



超低频讯号发生器

图 11-1-2

$$M = BNSI \sin \omega t = BNS \frac{E}{R_1 + R_g + R_0} \sin \omega t \quad (11-1.1)$$

式中 B 的磁感应强度， N 、 S 是线圈的匝数及面积， R_0 是讯号发生器的输出电阻。于是对于一定的 E 及 R_1 ，就有一个幅值一定的正弦形策动力矩。

3. 阴尼力矩

线圈在运动过程中切割磁力线产生的感应电动势对线圈运动造成阻尼。阴尼力矩为

$$M_d = - \frac{(BNS)^2}{R_1 + R_g + R_0} \dot{\theta} = - P \dot{\theta} \quad (11-1.2)$$

$\dot{\theta}$ 是线圈的转动角速度。由此可见，改变 R_1 可改变阻尼状况。

4. 受迫振动

当摆在运动过程中, 除了受策动力矩 M , 阻尼力矩 M_d 外, 还受弹性恢复力矩 $M_1 = -D_0 \theta$ 作用。在这三个力矩作用下, 其运动方程为

$$J \ddot{\theta} + P \dot{\theta} + D_0 \theta = BNSI \sin \omega t$$

$$\text{或} \quad \ddot{\theta} + 2\beta \dot{\theta} + \omega_0^2 \theta = h \sin \omega t \quad (11-1.3)$$

式中 $2\beta = \frac{P}{J}$, $\omega_0^2 = \frac{D_0}{J}$, $h = \frac{BNSI}{J}$, J 是线圈的转动惯量, D_0 是扭转模量, $\ddot{\theta}$ 是角加速度, β 是阻尼系数, ω_0 是线圈在没有阻尼及策动力矩时的自由振动频率, $D = \frac{\beta}{\omega_0}$ 叫阻尼常数。 ω 是策动力的角频率, $\omega = \frac{2\pi}{T}$, T 是策动力的周期, h 是策动力矩的幅值。

当 $\beta^2 < \omega_0^2$, 即 $D < 1$ 时, 式 (11-1.3) 的解为

$$\theta = \theta_0 e^{-\beta t} \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2} t + \varphi_0') + H(\omega) \sin(\omega t - \varphi_0) \quad (11-1.4)$$

(11-1.4) 式中第一项是随时间衰减的, 叫暂态项。 θ_0 、 φ_0' 由起始条件决定, 当 t 足够大时, $e^{-\beta t} \approx 0$, 即受迫振动达到稳定时, 这项不起作用。第二项叫稳态项。当受迫振动达到稳定时

$$\theta = H(\omega) \sin(\omega t - \varphi_0) \quad (11-1.5)$$

其中

$$H(\omega) = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4D^2 \omega_0^2 \omega^2}} \quad (11-1.6)$$

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \frac{2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} = \tan^{-1} \frac{2D\omega_0\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (11-1.7)$$

(11-1.5) 式说明受迫振动的振幅 $H(\omega)$ 和它与策动力矩之间的周相差 φ_0 同系统固有状况、阻尼状况及策动力之间的关系。

参看图 11-1-3。

5. 共振

$$\text{由 (11-1.6) 式可得, 当 } \omega_{\text{共振}} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2} = \omega_0 \sqrt{1 - 2D^2} \quad (11-1.8)$$

时, $H(\omega)$ 有极大值, 这就是共振现象。

$$H_{\text{共振}} = \frac{h}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}} = \frac{g}{2D\omega_0^2\sqrt{1-D^2}} \quad (11-1.9)$$

由 (11-1.8)、(11-1.9) 式

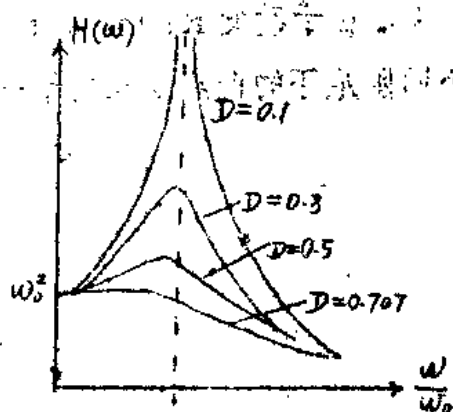
可见: $\omega_{\text{共振}}$ 、 $H_{\text{共振}}$ 随阻尼增

大而减小。本实验中, 要观测

$H(\omega)$ 随 ω 的变化, 找出共振点,

画出共振曲线的总体图象。并改

变阻尼观测共振曲线的变化情况。



〔实验内容和注意事项〕

1. 测定初摆 (电流计线圈)

的固有频率 ω_0 。

图 11-1-3

接通电流计灯光电源, 使标尺上出现光点, 将光点调到标尺正中。将电流计的电路打开 (即 $R_2 = \infty$), 设法让电流计线圈自由摆动, 用停表测其固有周期 T_0 , 则 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$

2. 观察共振现象, 测定受迫振动振幅与策动力频率的关系。

按图(11-1-2)连接线路及拨好各旋钮的位置, 接通电源, 取一定的 R_1 , 改变 ω , 找到共振点后, 适当调节输出电压, 使光点有最大偏转。然后保持输出不变, 改变 ω , 测出相应的 $H(\omega)$ 。

3. 改变 R_1 , 即改变阻尼, 重复实验。

注意灵敏电流计只允许通过微小电流, 不得随便加以较大电压试用。(当 ω 远离 ω_0 , 加外电压后光点偏离不大, 但实际电流可能超过量程)。

〔问题〕

1. 怎样安排观测点, 使既能得到共振曲线的总体图, 又不致数据点在某区域内过多或过少?

2. 每改变一次 ω 后, 能否立即测 $H(\omega)$?

3. 由于改变 R_1 时, 既改变了阻尼, 也改变了 h , 怎样保证不同阻尼下的曲线是相应于一个 h 下得到的?

实验 11-(2) 弹簧振子的受迫振动

学习重点:

1. 观测共振现象
2. 研究策动力、频率和受迫振动的关系
3. 研究阻尼、振子有效质量及振子所受弹性力对共振的影响

仪器用具:

受迫振动仪、停表、直流电源。

仪器描述和原理:

如图(1)所示 直流电机(4)安装在高度可调的、立柱(3)上。直流电机的转速可调电器操作箱(12)上的电压表指示,改变输入电压可调节电机转速(由50转/分至1500转/分)最高输入电压为12伏。直流电机轴上装有偏心轮(5)偏心轮的偏心率为2mm 4mm 6mm 8mm 10mm 选用不同的偏心轮,可观测不同的力幅对受迫振动的影响,偏心轮通过具有活动接头的连杆(6)带动上部弹簧(9),弹簧下端连接可改变质量的振子(11)可选用不同质量的振子进行实验观测具有不同质量的振子的受迫振动。振子(11)上装有横针(10)用来指示振子的位移量 通过横针(10)还可以把对称安装的阻尼器(8)和(14)的阻尼加到振子上,阻尼器所加阻尼可以改变,从而可以观测不同阻尼对受迫振动的影响。阻尼器(8)上装有标尺,用以测量振子的位移,振幅的大小。振子下面装有弹簧(3)下弹簧(13)和上弹簧(9)都可以更换,从而改变振动系统的特性,并改变策

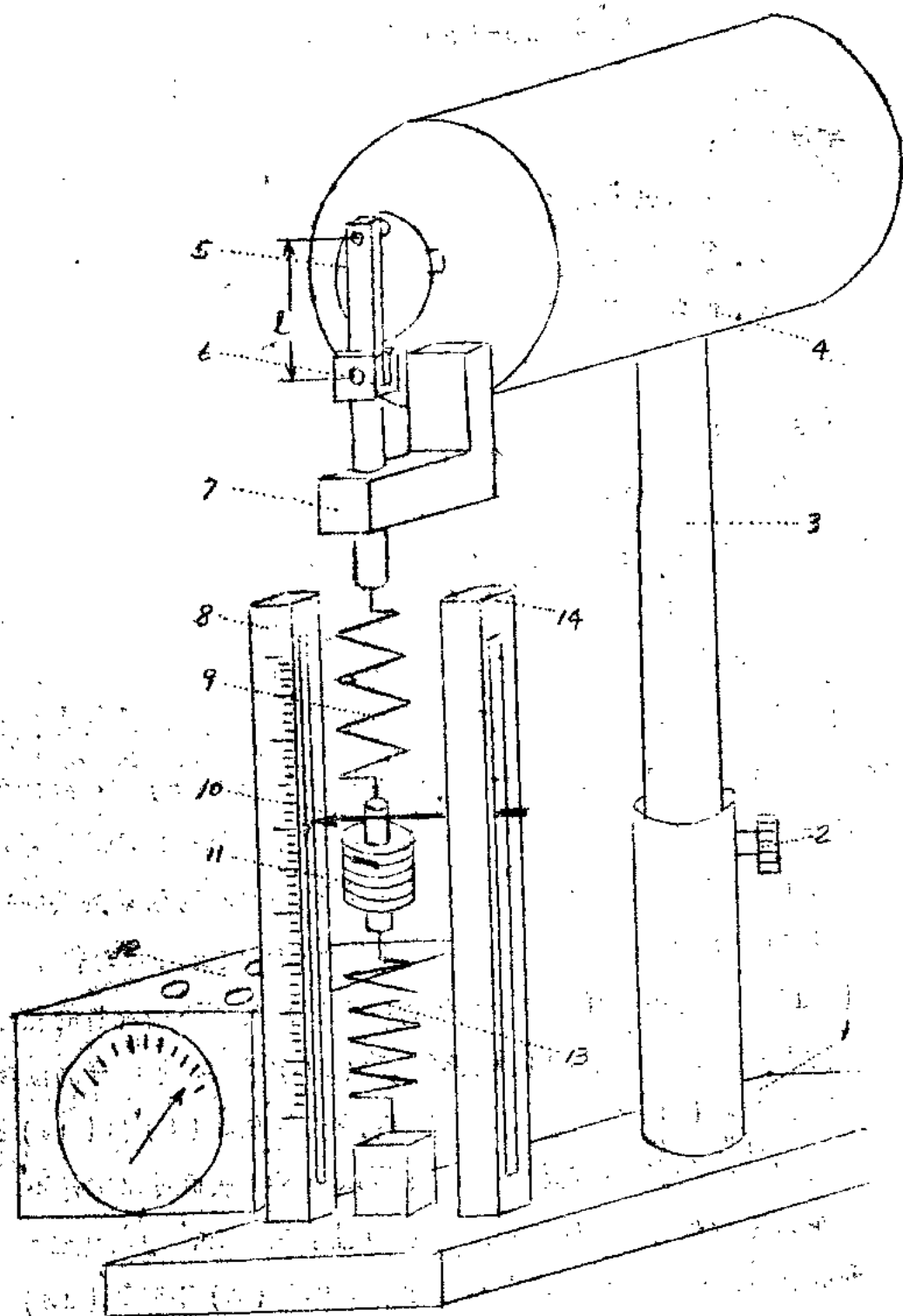


图1 受迫振动仪

动力的力幅，也可用改变立柱的高度的办法来调节弹簧的倔强系数。

电器操作箱把 0—15 伏连续可调的直流电加到直流电机上，从而使偏心轮所产生的策动力的频率在 50 周到 1500 周的范围

内连续可调
连杆上部长度 $l \gg p$ (p 为偏心轮的偏心率) 的情况下，可认为连杆下部按正弦曲线振动，因此连杆通过弹簧 (9) 作用在振子上的力为

$$-K_{\text{上}}(x - p \sin \omega t)$$

其中 $K_{\text{上}}$ 为上弹簧 (9) 的倔强系数

x 为振子的位移

ω 为偏心轮所加策动力的角频率

下端弹簧 (13) 作用在振子上的力为 $-K_{\text{下}}x$ 设阻力与速度 $\dot{x}$ 成正比则运动方程为

$$-(K_{\text{上}} + K_{\text{下}})x + PK_{\text{上}} \sin \omega t - \alpha \dot{x} = m \ddot{x} \quad (1)$$

其中 α 为阻力系数。

m 是振子的有效质量

方程 (1) 可写为：

$$\ddot{x} + 2\beta \dot{x} + \omega_0^2 x = h \sin \omega t \quad (2)$$

其中 $2\beta = \frac{\alpha}{m}$ 称为阻尼常数

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{m}(K_{\text{上}} + K_{\text{下}})} \text{ 为固有振动频率。}$$

$$h = K_{\text{上}} P / m$$

常微分方程 (2) 的稳定状态的解为

$$x = A \sin(\omega t + \varphi)$$

其中

$$A = \frac{h}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\beta^2 \omega^2}} \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \frac{-2\beta\omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (4)$$

当策动力的元频率为 $\omega_r = \sqrt{\omega_0^2 - 2\beta^2}$ 时, A 有极大值即发生共振现象, ω_r 叫共振频率。此时共振的振幅

$$A_r = \frac{h}{2\beta\sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}}$$

A_r 和频率, 阻尼的关系如图(2)所示

实验内容:

1. 接通电源 系统即开始振动, 调节电器操作箱上调电压的旋钮, 可得到各种频率的策动力, 等振动稳定后, 测量振幅 A 和 ω , 找出共振点, 记录数据应不少于 10 组。作出

$A - \omega / \omega_0$ 曲线

2. 增减振子质量 重复以上操作, 作出两条 $A - \omega / \omega_0$ 曲线, 分析其对振动其他参量的影响

3. 改变弹簧的倔强系数 重复操作(1)并分析所得结果

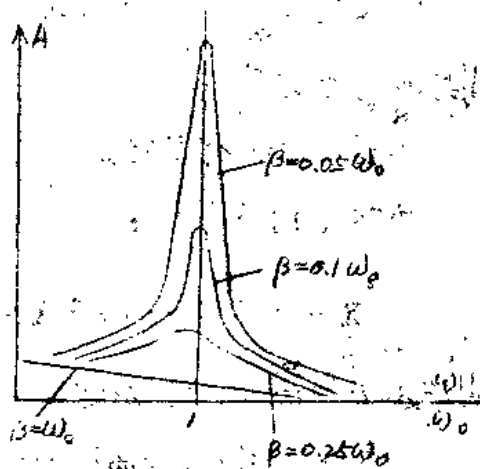


图 2

思考题

1. 振子显然受重力作用, 方程(1)没有考虑重力的作用会有什么影响?

2. 怎样测定固有振动频率 ω_0 ?

你能否利用现有仪器观测到共振频率和固有振动频率的区别

气轨上弹簧振子的简谐振动

〔学习重点〕

1. 弹簧振子的振动周期与系统参数的关系;
2. 简谐振动的运动学特征;
3. 简谐振动的能量。

〔仪器用具〕

气轨、弹簧、滑块、砝码、数字频率计、物理天平、米尺、等。

〔原 理〕

1. 弹簧振子的简谐运动方程

本实验中所用的弹簧振子是这样的：两个完全相同的、倔强系数为 K_1 的弹簧，如图 12-1-1 那样系住一个质量为 m_1 的物体，在光滑的水平面上作振动。A、B 两端是固定的。当 m_1 处于平衡位置时每个弹簧的伸长量为 x_0 。如果略去阻尼，则当 m_1

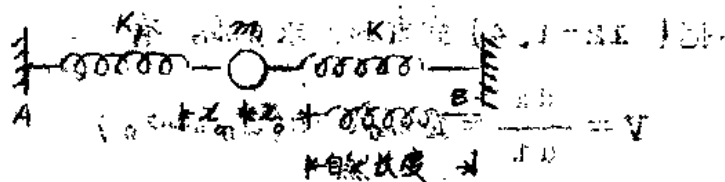


图 12-1-1

距平衡点位移为 x 时， m_1 只受弹性回复力 $-K_1(x+x_0)$ 与 $-K_1(x-x_0)$ 的作用，根据牛顿第二定律，其运动方程为：

$$-K_1(x+x_0) - K_1(x-x_0) = m\ddot{x} \quad (12-1.1)$$

$$\text{令 } K = 2K_1 \quad (12-1.2)$$

$$\text{则有 } -Kx = m\ddot{x} \quad (12-1.3)$$

方程 (12-1.3) 的解为

$$x = A \sin(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (12-1.4)$$

即物体作简谐振动。

$$\text{其中 } \omega_0 = \sqrt{\frac{K}{m}} \quad (12-1.5)$$

是振动系统的固有角频率。 $m = m_1 + m_0$ 是振动系统的有效质量， m_0 是弹簧的有效质量。 A 是振幅， φ_0 是初周相。 ω_0 由系统本身决定， A 和 φ_0 由起始条件决定。

系统的振动周期

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}} = 2\pi \sqrt{\frac{m_1 + m_0}{K}} \quad (12-1.6)$$

本实验中，通过改变 m_1 测出相应的 T ，来考察 T 与 m 的关系，并从而求出 K 和 m_0 。

2. 简谐振动的运动学特征

把 (12-1.4) 式对时间求微商，有

$$V = \frac{dx}{dt} = A \omega_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) \quad (12-1.7)$$

由 (12-1.4) 和 (12-1.7) 可见， m_1 的运动速变 V 随时间的变化关系也是一个简谐振动，其角频率为 ω_0 、振幅为 $A\omega_0$ ，而且 V 的周相比 x 超前 $\frac{\pi}{2}$ 。

由 (12-1.4) 与 (12-1.7), 消去 t , 有

$$V^2 = \omega_0^2 (A^2 - x^2) \quad (12-1.8)$$

(12-1.8) 式说明: 当 $x = A$ 时, $V = 0$; 当 $x = 0$ 时, $V = \pm \omega_0 A$, 这时 V 的数值最大, 即

$$V_{\max} = \omega_0 A \quad (12-1.9)$$

本实验中, 可以观测 x 和 V 随时间的变化规律及 x 、 V 之间的周相关系, 并检验 (12-1.8) 式。

从 (12-1.8) 及 (12-1.9) 式也可以求出 K 。

$$K = m\omega_0^2 = m \frac{V_{\max}^2}{A^2} \quad (12-1.10)$$

3. 简谐振动的能量

本实验中, 任何时刻系统的振动动能为

$$E_k = \frac{1}{2} m V^2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_0) V^2 \quad (12-1.11)$$

系统的弹性势能为两个弹簧的弹性势能之和 (以弹簧在自然长度时的势能为零), 即

$$\begin{aligned} E_p &= \frac{1}{2} K_1 (x+x_0)^2 + \frac{1}{2} K_2 (x+x_0)^2 \\ &= \frac{1}{2} K_1 (2x^2 + 2x_0^2) \\ &= \frac{1}{2} K x^2 + \frac{1}{2} K x_0^2 \end{aligned} \quad (12-1.12)$$

利用 (12-1.4)、(12-1.7)、(12-1.10), 有总机

械能

$$E = E_k + E_p = \frac{1}{2} m \omega_0^2 A^2 + \frac{1}{2} K x_0^2$$

$$E = \frac{1}{2} k A^2 + \frac{1}{2} k x_0^2 \quad (12-1.13)$$

是, A , x_0 均不随时间变化, (12-1.13) 式说明简谐振动系统的机械能守恒。本实验通过测定在不同位置 x 上滑块的运动速度 V , 从而求得 E_k 及 E_p , 观测它们之间的相互转换并验证机械能守恒。

〔仪器描述〕

在水平的气垫导轨上, 用两个相同的弹簧中间系一滑块作往返振动, 如图 12-1-2 所示。由于空气阻尼及其他能量损耗很小, 可以看作是简谐振动。滑块上装有挡光刀片, 是用来测振动周期及滑块的瞬时速度及运动时间的。关于气垫导轨的说明及光电计时的方法参看实验 7 有关部分。

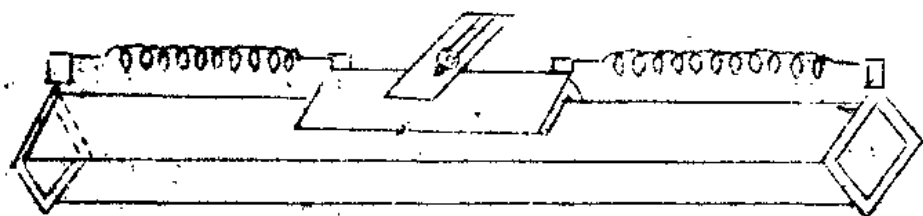


图 12-1-2

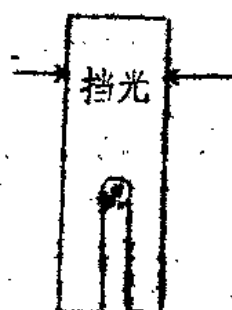
〔实验内容和数据处理〕

1. 测量滑块的振动周期

把光电门放在滑块的平衡位置, 使用平板形挡光片 (图 12-1-3)。将滑块拉至某一位置即选一定振幅, 放手让滑块振动, 测出它往返通过平衡位置的时间即振动的半周期。从左边通过平衡位置时开始计时测出的为左半周期 ($\frac{1}{2} T$) 左, 从右

面通过平衡位置时开始计时测出的为右半周期 ($\frac{1}{2}T$) 右 弹簧
振动周期

$$T = (\frac{1}{2}T)_{\text{左}} + (\frac{1}{2}T)_{\text{右}}$$



也可以这样测周期, 即当刀片第
一次挡光后, 将光电门移开, 待需结
束计时一个或几个周期刀片向同方向
运动时将光电门放回原来位置让刀
片再次挡光。改变振幅, 观测周期 T ,
说明测量结果。

图 12-1-3

2. 考察简谐振动周期 T 与 m 的关系, 并求 k 及 m

改变 m , 即在滑块上加砝码, 令 $m = m_1 + m_0, m_2 + m_0, m_3 + m_0, \dots$, 则根据 (12-1.6) 式, 有

$$T_1^2 = \frac{4\pi^2}{k} (m_1 + m_0)$$

$$T_2^2 = \frac{4\pi^2}{k} (m_2 + m_0)$$

(12-1.15)

$$\dots \dots \dots$$

$$T_i^2 = \frac{4\pi^2}{k} (m_i + m_0)$$

$$T_{i+1}^2 = \frac{4\pi^2}{k} (m_{i+1} + m_0)$$

$\dots \dots \dots$

(1) 用作图法处理数据:

以 T_i^2 作纵坐标, m_i 作横坐标, 作 $T^2 - m$ 图, 如果 T 与 m
的关系确如式 (12-1.6) 所示则 $T^2 - m$ 图 应为一直线。

其斜率为 $\frac{4\pi^2}{k}$ ，截距为 $\frac{4\pi^2}{k} m_0$ 。并由此可求出 k 及 m_0 。

(2) 用计算法处理数据：

将式 (14-2.15) 隔 i 项相减，有

$$\left. \begin{aligned} T_{i+1}^2 - T_i^2 &= \frac{4\pi^2}{k} (m_{i+1} - m_i), \quad k = \frac{4\pi^2 (m_{i+1} - m_i)}{T_{i+1}^2 - T_i^2} \\ T_{i+2}^2 - T_i^2 &= \frac{4\pi^2}{k} (m_{i+2} - m_i), \quad k = \frac{4\pi^2 (m_{i+2} - m_i)}{T_{i+2}^2 - T_i^2} \\ &\dots \dots \dots \end{aligned} \right\} \quad (14-2.16)$$

如果所得到的 k 的数值是一样的，（在测量误差范围之内），即说明式 (12-1.8) 中 T 与 m 的关系是成立的，并求出了 k 。

将由几组数据求得的 k 的平均值 $\bar{k}$ 代入 (12-1.15)，得

$$m_0 = \frac{\bar{k} T_i^2}{4\pi^2} - m_i \quad (12-1.17)$$

以 m_0 的平均值 $\bar{m}_0$ 作为弹簧的有效质量。

3. 测量滑块运动的瞬时速度 V ，考察 V 与 x 的关系

用带有平行槽的挡光片（图 12-1-4）测量 V 。固定振幅 A ，将光电门放在平衡位置处，测出 $V_{\max}$ 。并移动光电门的位置，测出不同 x 处的 V ， x 是滑块距平衡位置的距离。取 x 在平衡位置左右两边得到的 V 的平均值。 V 与 x 的关系应满足 (12-1.8) 式。检验的方法可采用

(1) 作图法

作 V^2-x^2 图，看它是不是一条直线。斜率是不是 $-\omega_0^2$ ，截距是不是 $\omega_0^2 A^2$ 。其中 $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ ， T 可以测出。