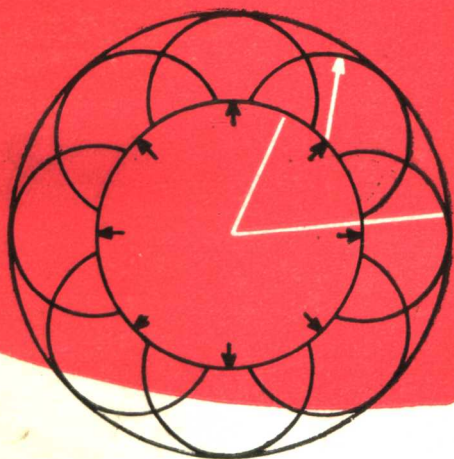


机械振动和机械波

中学物理辅导员丛书



试验所

13.1

1

王学斌 著

科学普及出版社

中学物理辅导员丛书

机械振动和机械波

王学斌 著

科学普及出版社

内 容 提 要

本丛书系参照教育部制定的全日制中学物理教学大纲，按教材分册编写。本书对应高中物理课本中机械振动和机械波一章。作者对简谐振动作了精辟的分析，讲述了它的重要应用。对于课本中的重点、难点及容易混淆的概念，都作了详细而准确地介绍。书中还配有经过精选的习题，便于读者加深对所学内容的理解。本书文字精炼，读者花时间不多，却可收到加深理解，提高学习效益之利。

本书作者是北京市特级中学物理教师，书中包含着作者几十年教学经验的结晶，可供高中学生、自学青年及中学物理教师阅读。

中学物理辅导员丛书

机械振动和机械波

王学斌 著

责任编辑：朱桂兰

封面设计：王序德

*

科学普及出版社出版(北京海淀区白石桥路32号)
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售
保定市满城华兴印刷厂印刷

*

开本：787×1092毫米1/32 印张：3¹/₄ 字数：67千字

1986年4月第1版 1986年4月第1次印刷

印数：1—3, 500册 定价：0.56元

统一书号：13051·1274 本社书号：0816

前 言

多年以来，我国教育界、中学教师和中学同学们都深切感到，当前出版物中，真正适合中学生阅读的课外读物，特别是结合各门文化课教学的课外读物，为数实在太少。这种情况对于中学生生动活泼地学好文化课，巩固、加深正课所学的基本知识，培养自学能力，扩大知识眼界和提高学习兴趣，都很不利。

本书就是根据这种需要而组织编写的。它的编写目的是为了帮助中学生深入理解物理学的基本概念和规律，更好地掌握物理学的基础知识和基本实验技能，有效地进行逻辑思维和抽象思维锻炼，加强分析问题和解决问题的能力，使他们能够更好地运用中学物理教材进行学习，扎扎实实学好物理课，以利于提高中学物理课的教学质量。

本书参照教育部制定的全日制中学物理教学大纲，按照全国高级中学物理教材，分册编写。初中讲授过的而高中教材不再重讲的基础知识，如流体力学、热学、几何光学等内容，也另行分册编写辅导材料。

本书力求做到以下几点要求：

(一)内容密切结合中学现用统编教材，但又不是教材的简单重复。对教材中的重点和难点着重进行辅导；对容易混淆的概念和重点内容，必要时采取正误对比的方法加以讲解。在现行教材内容的基础上，适当地扩大、加深学生的知识领域。此外，还配合教材中有关章节，讲述一些物理学研究方法和物理学发展历史中的重大事例，并注意做到理论联系实际。

(二)在有关物理实验的内容方面，注意培养中学生观察自然现象和实验工作的能力。在实验分册中，除对教材规定的学生实验进行辅导外，还适当介绍一些教材中没有介绍的实验方法，以及读者利用简单器材可以自己在课外做的简单实验。

(三)本丛书的体例，每一章一般分成三部分：第一部分是“本章内容摘要”，第二部分是“重点、难点问题的讲解”，第三部分是“复习思考问题和练习题”。根据教材各章内容的特点，必要时还叙述一些科学史知识、物理实验知识以及其他需要补充的知识。

内容摘要部分，力求简明扼要，突出一章的核心内容，反映全章各部分之间的相互关系，以及本章与前后篇章之间的联系。

“重点、难点问题解答”部分，要求讲清楚教材中的重点、难点问题，并适当地讲解一些有关知识。

“复习思考题和练习题”部分，力求每个题目都有明确的教学目的，着重题目的内容质量，而不是单纯地追求数量，注意理论联系实际，不选偏题和难度极大的难题。

例题的讲解尽量贯彻启发学生思维，培养思维能力的原则；要讲清楚解题的思路，避免单纯地教给学生死方法的做法。

我们希望：这套丛书能对于中学同学学习物理课起到一定的辅导员作用；对于教师的教学起到一定的助手作用。

本丛书的内容和编写方法倘有不当之处，请读者不吝提出宝贵意见。我们将参考读者的意见，于再版时进行修订和补充。

《中学物理辅导员丛书》编辑委员会

目 录

第一章 机械振动	1
一、机械振动.....	1
二、简谐振动的特点.....	2
三、简谐振动的方程.....	9
四、描述简谐振动的物理量.....	14
五、简谐振动的图象和矢量图.....	22
六、同一直线上简谐振动的合成.....	28
七、简谐振动中能量的转化.....	35
八、受迫振动 共振.....	40
习题.....	43
第二章 机械波	57
一、振动在媒质里的传播——机械波.....	57
二、波长、频率和波速之间的关系.....	59
三、波的图象.....	63
四、平面简谐波的波动方程.....	68
五、波的反射和折射.....	74
六、波的干涉和衍射.....	79
七、驻波.....	83
八、声音的共鸣.....	88
习题.....	90

第一章 机械振动

一、机械振动

1. 什么叫做机械振动?

自然界所有物质都在不断地进行着各种形式的运动。其中，机械运动是各种运动形式中最简单的运动形式。机械运动，如果按加速度来划分，有加速度为零的匀速直线运动；有加速度的大小和方向都不改变的匀变速运动；还有加速度的大小和方向都改变的非匀变速运动。机械振动就是一种非匀变速运动，因此，它是机械运动中比较复杂的运动形式。

机械振动是一种很普遍的运动形式。物体在一定位置附近做周期性的往复运动，叫做机械振动。例如，钟摆的来回摆动，气缸里活塞的往复运动，机器开动时各部分的微小运动，以及一切声源的运动等等都是机械振动。

2. 研究机械振动有什么重要性?

机械振动的理论很重要，它是学习和研究其它形式振动的基础。在很多物理现象中，描述这些物理过程的物理量，往往在某一值附近来回重复地变化。例如，在电磁振荡中，电场和磁场的周期性变化，从广泛意义上说，也属于振动。虽然和机械振动有着本质的不同，但在很多方面有着共同点。所以机械振动的理论是学习和研究其它形式振动的基础。

机械振动的理论还是学习和研究波动的基础。一切波动

都是某种振动的传播过程。机械波是机械振动在弹性媒质中的传播过程；电磁波是电磁振荡在空间的传播过程。

由于机械振动和机械波的很多规律都适用于其它的振动和其它的波，因此它是学习和研究波动光学、交流电和无线电等的重要基础，在生产技术中也有着广泛的应用。

二、简谐振动的特点

1. 简谐振动有何特点？试以弹簧振子为例，说明简谐振动的特点。

机械振动的形式很多，情况也比较复杂。简谐振动是一种最简单、最基本的机械振动，也是本章的重点内容。下面我们就以弹簧振子为例来说明简谐振动的特点。

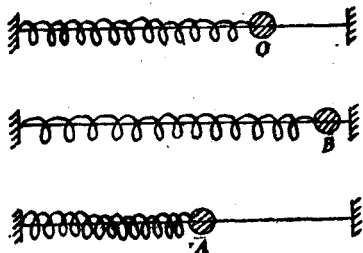


图 1-1

如图 1-1 所示，把一个和弹簧连在一起的小球穿在水平、光滑的杆上，弹簧左端固定在支架上，小球可以在杆上滑动，摩擦力和空气阻力可以忽略不计。弹簧的质量比小球的质量小得多，也可以忽略不

计。小球在 O 点位置时，所受重力和杆的支持力平衡，弹簧没有发生形变，因而对小球没有弹力作用， O 点就是小球的平衡位置。如果用手把小球拉到 B 后再放开，小球就要通过平衡位置 O 沿杆左右振动。在振动过程中，重力和支持力总是平衡的，只有弹簧的弹力对小球的振动起作用。

小球为什么会振动呢?我们把它的振动过程,以平衡位置 O 作为位移的起点,分为四个阶段进行说明。

(1) 小球由 B 到 O ;

小球在位置 B 时,位移 (x) 方向向右 ($O \rightarrow B$), 位移最大。这时所受弹力 (F) 方向向左, 弹力也最大。手放开后, 小球在向左的弹力作用下, 由静止开始向左运动, 它的加速度和速度的方向都向左, 小球作变加速运动。由 B 到 O , 根据胡克定律, 弹力逐渐减小, 加速度逐渐减小, 速度逐渐增大。到达 O 点时, 弹力和加速度为零, 小球速度最大 (见下表第一行)。

(2) 小球由 O 到 A ;

小球在平衡位置时, 位移 (x) 等于零, 弹力 (F) 也等于零, 但它的速度却最大, 它将继续向左运动。弹簧将被压缩而产生向右的弹力。因为弹力以及弹力产生的加速度都向右, 阻碍小球向左运动, 所以小球作变减速运动。由 O 到 A , 弹力逐渐增大, 加速度逐渐增大, 速度逐渐减小。到达 A 点时, 弹力和加速度都为最大, 速度减为零 (见下表第二行)。

序号	小球位置	位移 (x)		弹力 (F)		加速度 (a)		速度 (v)	
		方向	大小	方向	大小	方向	大小	方向	大小
1	$O \leftarrow B$	向右	减小	向左	减小	向左	减小	向左	增大
2	$A \leftarrow O$	向左	增大	向右	增大	向右	增大	向左	减小
3	$A \rightarrow O$	向左	减小	向右	减小	向右	减小	向右	增大
4	$O \rightarrow B$	向右	增大	向左	增大	向左	增大	向右	减小

小球由A到O，并由O到B的振动情况，分析从略（见表中第三、四行）。

这样，小球完成了一次全振动，以后它将重复上述的过程。这种振动系统，叫做弹簧振子。

由表中可以看出，弹力（ F ）随位移（ x ）的增减而增减，它们的方向总是相反的。根据胡克定律，在弹性限度内，弹力跟弹簧的伸长或压缩成正比。因此，弹力（ F ）和位移（ x ）的关系，可用下式表示：

$$F = -kx \quad (1)$$

式中 k 是一个恒量，对于弹簧振子来说，就等于弹簧的倔强系数。式中负号表示 F 与 x 方向相反。

在上述振动过程中，振动物体自始至终受到一个指向平衡位置的力作用。振动物体所以离开平衡位置还能沿原路返回，正是因为受到指向平衡位置的力的作用。总能使物体回到平衡位置的力叫做回复力。

用 m 代表振子的质量，用 a 代表振子的加速度，根据牛顿第二定律 $F = ma$ 可以得到

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{k}{m}x \quad (2)$$

式中， k 和 m 都是不变的，所以它们的比值也是一个恒量。

弹簧振子的振动是简谐振动的一个典型例子。

上面公式（1）表明简谐振动的产生条件，公式（2）表明简谐振动的特点。

物体在跟位移成正比的，并且总是指向平衡位置的力的作用下的振动，就是简谐振动。在简谐振动中，物体的加速度总是跟位移的大小成正比，加速度的方向总是跟位移的方向相反。

2. 什么叫做单摆？试说明单摆的振动也是一种简谐振动。

如图1-2所示，一根不会伸长的细线，上端固定，下端拴一个小球。线的质量跟小球的质量比较起来可以略去不计，小球直径跟线的长度比较起来也是小得很多的。当细线处于竖直位置时，小球在位置O，此时作用在小球上的合外力为零，位置O即为平衡位置。摩擦力和空气阻力忽略不计，若把小球从平衡位置略微移开，然后放手，任其运动，那么小球就在平衡位置附近来回往复运动。这种振动系统叫做单摆。小球叫做摆锤，细线叫做摆线。

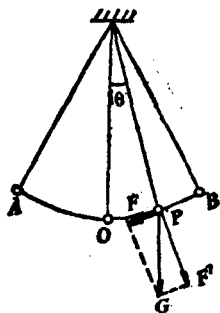


图 1-2

在摆动过程中，摆锤所受重力 $G = mg$ 沿圆弧切线方向的分力 $F = mgsin\theta$ ，就是摆锤振动的回复力。

摆锤从B向O运动过程中，由于摆角 θ 逐渐减小， F 也随着逐渐减小，可是它的方向是跟运动的方向相同，所以速度逐渐增大。到达平衡位置O时， F 虽然等于零，但摆锤已经具有一定的速度，所以它将继续向左运动。在越过平衡位置以后，由于 F 的方向和运动方向相反，成为运动的阻力。摆锤离开平衡位置越远，阻碍它运动的力 F 就越大，结果使摆球减速到达另一最高位置A。然后摆锤又由A向右运动，与上述情况类似。

当 θ 很小时（ 5° 以下），圆弧可以近似地看成直线，分力 F 可以近似地看作沿这条直线作用，OP就是摆锤离开平

衡位置的位移 (x), 设摆长为 L , 因为 $\sin\theta \approx \theta \approx \frac{x}{L}$, 所以

$$F = -\frac{mg}{L}x \quad (3)$$

式中负号表示力 F 跟位移 x 方向相反。

根据牛顿第二定律, 摆球运动的加速度

$$a = \frac{F}{m} = -\frac{g}{L}x \quad (4)$$

式中 L 是不变的量, 在一定地点, g 也是一个恒量。可见, 在摆角很小的情形下, 单摆振动的加速度总是跟对平衡位置的位移成正比, 而方向总是跟位移方向相反。这正是简谐振动的特点, 所以在摆角很小时, 单摆的振动也是一种简谐振动。

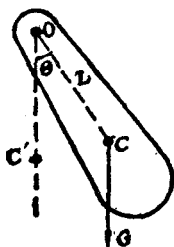


图 1-3

3. 钟摆的振动是不是简谐振动?

前面讲的单摆, 是实际的摆的理想化。实际的摆(如钟摆)叫做复摆。

如图 1-3 所示, 任何一个能在重力作用下绕水平转轴在竖直面内作小角摆动的物体叫做复摆。图中 O 表示复摆的转轴, C 表示复摆的重心, 重心到转轴的距离为 L , 摆的重量为 $G = mg$ 。

在平衡位置时, 重心在通过转轴的竖直线上。摩擦力和空气阻力忽略不计, 若把摆的重心从平衡位置略微移开, 然后放手, 那么复摆将绕轴左右摆动。

设复摆在运动过程中的某一时刻, 离开平衡位置的角位移为 θ , 并规定在平衡位置右方时 θ 为正, 左方时为负。这时重力对转轴的力矩为 $M = mgL\sin\theta$ 。在摆动不大的情形下 $\sin\theta \approx \theta$, 所以力矩可写作

$$M = -mgL\theta \quad (5)$$

式中， m 、 g 、 L 都是恒量，所以 M 与 θ 成正比，负号表示 M 与 θ 符号相反，即重力的力矩总是力图使复摆摆向平衡位置。

可以证明（证明从略），复摆运动的角加速度与角位移成正比，而角加速度的方向与角位移方向相反。因此，在摆角不大情形下，复摆的振动也是一种简谐振动。

注一，角位移是描述物体转动时位置变化的物理量。绕固定转轴转动的物体在某一时间内的角位移，可用任一垂直于转轴的直线，在这段时间内转过的角度 θ 来表示。

注二，角加速度是描述角速度变化快慢的物理量。物体角速度的变化和所用时间的比值，叫做这段时间内的平均角加速度。如果这一时间很短（趋近于零），这一比值就叫做即时角加速度，简称角加速度。

4. 比较弹簧振子、单摆和复摆在振动中的回复力（或力矩），可否总起来说，凡是简谐振动都是在弹性力作用下产生的？

弹簧振子的回复力确实是弹性力，而在单摆或复摆的情形下振动物体所受的力（或力矩）虽不是弹性力，但它与位移（或角位移）间的关系，却与弹性力相同。我们将这种本质上是非弹性的，但就其对振动所起的作用来说，又与弹性力相似的力叫做准弹性力。因此，从受力角度看，以上三种振动都是相同的，它们都是在弹性力或准弹性力作用下引起的振动，统称为简谐振动。

【例题】 在一个竖直的轻弹簧的下面挂一个小球，弹簧伸长 ΔL 而停止。用外力把小球向下拉一点，外力取消后，小球是否将作简谐振动？

【解】 凡是简谐振动都是在弹性力或准弹性力作用下

引起的振动。首先应该分析小球的受力情况，只要能说明振动物体所受的作用力与位移成正比，而力的方向与位移方向相反，这个物体的振动就是简谐振动。

摩擦力和空气阻力忽略不计，弹簧下面挂上小球以后，小球受重力和弹力作用。重力向下，弹力向上。如图1-4①所示，当小球静止在平衡位置O点时，弹簧伸长 ΔL ，这时弹力大小为 $k\Delta L$ ，根据二力平衡条件

$$mg = k\Delta L \quad (1)$$

如图1-4②所示，当小球运动到O点下方任意的A点位置时，令位移OA为 x ，则弹力为 $k(\Delta L + x)$ ，小球所受合力向上，其大小为

$$F = k(\Delta L + x) - mg = k\Delta L + kx - mg \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式，则得

$$F = kx$$

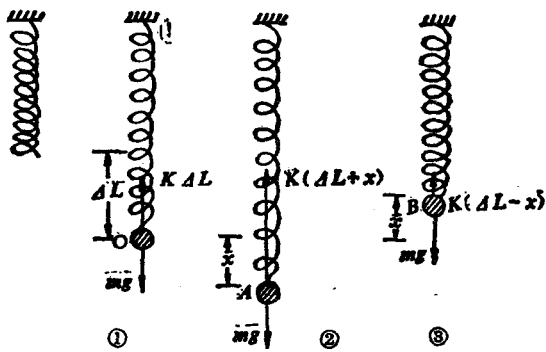


图 1-4

如图1-4③所示，当小球运动到O点上方任意的B点位置时，令位移为 x ，则弹力减小为 $k(\Delta L - x)$ ，小球所受合力

向下，其大小为

$$F = mg - k(\Delta L - x) = mg - k\Delta L + kx \quad (3)$$

将(1)式代入(3)式，则得

$$F = kx$$

当小球离开平衡位置 O 位移 x 向下时，所受合力 F 向上，当小球离开平衡位置 O 位移向上时，所受合力 F 向下。考虑方向，则

$$F = -kx$$

即小球所受合力 F 总是跟位移 x 方向相反，合力 F 的大小跟位移 x 的大小成正比，符合简谐振动的条件，因此，它作的是简谐振动。

三、简谐振动的方程

1. 什么叫做参考圆？如何通过实验来验证匀速圆周运动的投影是简谐振动？

可以自己动手通过下述实验来验证匀速圆周运动的投影是简谐振动。

在电唱机的转盘上，用一个竖直小柱来固定一个小球 M ， M 到转轴的距离不宜太大。用水平平行光线照射小球，使小球的影子落在和光线垂直立着的屏上，如图1-5所示。当电唱机转盘匀速转动时，小球的影子就在一条水平直线上来回振动。

现在，在光屏与小球之间，悬一个单摆，使摆锤运动的影子和转动小球的影子落到同一直线上。然后仔细调节单摆的摆长（同时上下调悬点位置，保持摆锤的高度不变），直到使屏上摆锤的影子在每一点都和小球的影子相重合。这就

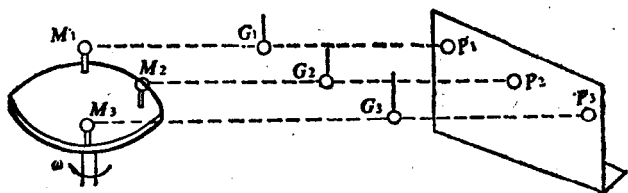


图 1-5

证明了匀速圆周运动的投影是简谐振动。

(实验参考数据：电唱机转速用33转/分，单摆摆长约为82厘米，小球到转轴的距离约为7厘米)。

既然匀速圆周运动的投影是简谐振动，那么，我们可以把任何一个实际的简谐振动设想为一个匀速圆周运动的投影，这个设想的圆周叫做参考圆。利用参考圆来研究简谐振动，是一种简便的方法。

2. 试利用参考圆，推导出简谐振动中位移和时间的关系，速度、加速度和时间的关系。

以前讲的，在匀变速运动中，由于加速度是恒量，物体运动规律比较简单。我们可以运用匀变速运动公式，求出物体在任一时刻的位置和速度。简谐振动却不那么简单。必须注意，匀变速运动公式不能在简谐振动中运用，因为简谐振动中的加速度是个变量。利用高等数学，可以从公式 $a = -\frac{k}{m}x$ 直接导出 x 、 v 、 a 跟时间 t 的关系式。我们这里将利用参考圆用简单的初等数学来导出这些关系式。

如图1-6，设质点 M 以匀角速度 ω 沿半径为 A 的圆周作逆时针转动。质点 M 在 Ox 轴上的投影点 p ，在 Ox 轴上作往复的运动。设在 $t = 0$ 时，质点 M 位于 M_0 。此时， OM_0 与 Ox 轴之间

的夹角为 ϕ_0 。在任意时刻 t ， OM 与 Ox 轴之间的夹角为 $\omega t + \phi_0$ 。这时， M 点在 Ox 轴上的投影点 P ，距离原点 O 的位移为

$$x = A \cos(\omega t + \phi_0) \quad (1)$$

此式表示 P 点在任意时刻的位移。注意，式中 x 代表 P 点离开振动中心 O 的距离。

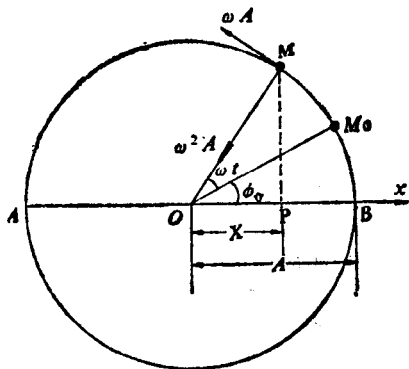


图 1-6

圆的半径为 A ，角速度为 ω ，根据匀速圆周运动的规律，质点 M 的线速度 (v_0) 和向心加速度 (a_0) 分别为 $v_0 = \omega A$ 和 $a_0 = \omega^2 A$ ，方向如图所示。

P 点的速度 (v) 和加速度 (a)，分别是 M 点的线速度 (v_0) 和向心加速度 (a_0) 在 Ox 轴上的投影，即

$$v = -\omega A \sin(\omega t + \phi_0) \quad (2)$$

$$a = -\omega^2 A \cos(\omega t + \phi_0) \quad (3)$$

把公式 (1) 代入公式 (3)，得

$$a = -\omega^2 x \quad (4)$$

式中 ω^2 是一个正的恒量，因此，(4) 式表明， P 点的加速度 a 总是跟位移 x 的大小成正比，负号表明它的方向跟位移方向相反。这正是简谐振动的特点，和前述弹簧振子等的特点完全一致。因此，公式 (1)、(2) 和 (3)，就是简谐振动的位移、速度、加速度跟时间的关系式。

【例题】 如图 1-1 所示弹簧振子的装置中， O 为位移