

全国中小学教师继续教育
专业必修课教材

高中物理专题分析丛书

振动和波动

ZHENDONG HE BODONG 教育部师范教育司组织编写
田清钧 编著

人民教育出版社

高中物理专题分析丛书

振动和波动

人民教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

振动和波动/教育部师范教育司组织编写. —北京: 人民教育出版社, 2002

(高中物理专题分析丛书)

ISBN 7-107-14724-2

I. 振...

II. 教...

III. 物理课—高中—教学参考资料

IV. G633.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 015746 号

人民教育出版社出版发行

(北京沙滩后街 55 号 邮编: 100009)

网址: <http://www.pep.com.cn>

北京四季青印刷厂印装 全国新华书店经销

2004 年 3 月第 1 版 2004 年 3 月第 1 次印刷

开本: 890 毫米×1 240 毫米 1/32 印张: 3.625

字数: 100 千字 印数: 0 001~3 000 册

定价: 6.20 元

高中物理专题分析丛书编委会

主 编 陈熙谋

副 主 编 周誉蔼

编 委 (汉语拼音为序)

陈熙谋 北京大学

洪安生 北京市海淀区教师进修学校

缪钟英 四川联合大学

彭前程 人民教育出版社

施桂芬 上海教育出版社

王天谥 北京市东城区教育教学研究中心

张大昌 人民教育出版社

周誉蔼 北京十五中

本册作者 田清钧 天津师范大学

本册审稿 赵凯华 北京大学

张三慧 清华大学

方 妍 清华大学附属中学

如发现印、装质量问题，影响阅读，请与出版社联系调换。

(联系地址：北京市方庄小区芳城园三区 13 号楼 邮编：100078)

前 言

全面推进素质教育，是当前我国现代化建设的一项紧迫任务，是我国教育事业的一场深刻变革，是教育思想和人材培养模式的重大进步。实施面向 21 世纪中小学教师继续教育工程，提高教师的素质，是全面推进素质教育的根本措施。

实施中小学教师继续教育，课程教材建设是关键。当务之急是设计一系列适合中小学各学科教师继续教育急需的示范性课程，编写一批基础性教材。

我司根据教育部《中小学教师继续教育课程教材建设方案》的统一规划，参考《中小学教师继续教育课程开发指南》，以中学物理教师继续教育课程教材建设引路，在调查研究和总结经验的基础上，首先设计急需的示范性课程，编制课程标准，经专家审定后，作为编写教材的依据。我们在设计示范性课程及课程标准时，遵循了以下原则：1. 从教师可持续发展和终生学习的战略高度，在课程体系，加强反映现代科学技术的发展和应用的课程，加强中学物理专题研究的课程。2. 把教育理论和教师教育实践经验的总结与教育实践活动的改进密切结合。用现代教育观念和理论方法，优秀课堂教学范例，从理论和实践的结合上，总结教学经验，提高教师教学能力，推动教育改革，落实素质教育。3. 适应教师培训模式改革的需要，有利于培养教师的创造精神和主观能动性。4. 注意有效，即实效性。有限，即适量性。有别，即层次性。有序，即科学合理的系统性。兼顾整体性与个体性，科学性、先进性与针对性相统一，灵活性与统一性相结合。

根据专家审定的中学物理教师继续教育示范性课程和课程标

准，编写 9 种基础性教材：《初中物理专题分析》、《高中物理专题分析》、《初中物理教学设计》、《高中物理教学设计》、《中学物理与现代科技》、《物理学发展中的创新思维选例》、《中学物理实验教学与自制教具》、《中学教师物理教育研究方法》、《中学活动课指导》。这些教材从今年秋季开始陆续出版。中小学教师继续教育语文、数学，中学教师继续教育英语、化学、生物，小学教师继续教育自然、社会等 7 个学科 2~3 种急需的示范性课程以及课程标准的设计已经启动，相应的教材将于明年底出版。同时我们还从全国推荐的中小学教师继续教育教材中，组织专家评审筛选一批优秀教材和教学参考书。上述这些教材和新编的基础性教材将向全国教师进修院校、教师培训基地、中小学教师推荐，供开设中小学教师继续教育相关课程时选用。根据继续教育的需要，我们还将继续设计开发新的课程和教材。

中小学教师继续教育教材建设是一项系统工程，尚处在起步阶段，缺乏足够的经验，肯定存在许多问题。各地在使用教材过程中有什么问题和意见，请及时告诉我们，以便改进工作，把课程教材建设提高到一个新水平。

教育部师范教育司

一九九九年六月二十四日

主编的话

唐代著名的文学家、教育家韩愈在他著名的教育论著《师说》中指出，教师的基本任务有三：传道、授业、解惑。按照今天的理解，传道包含了传授做人的道理和治学研究的方法，授业就是讲解有关的专业知识，解惑就是解答学习中遇到的问题，这三者构成了当今实施素质教育的基本要素。

一个有责任感的教师在备课中总是不断地思考和研究传道、授业和解惑三者的统一，不断思考和研究如何才能使学生更好地理解 and 掌握教学内容，领悟治学研究的方法，从而迸发出创新的火花。这种思考和研究永无止境，而且也正是在这种思考和研究中，教师得到磨练而更加干练和成熟。

呈现在读者面前的这套《初中物理专题分析》和《高中物理专题分析》丛书，是教育部师范司下达任务，人民教育出版社组织有经验教师撰写的中学物理教师继续教育教材的一种。作者们搜集了中学物理教学中可能出现的问题，有些是教师教学进一步深入可能会遇到的问题，有些则可能是学生进一步思考提出的问题，把它们组织起来，以更高层次的观点、近代物理的观点审视和给以分析。这不仅可以成为广大中学教师备课的好帮手，而且作为一种范例，它也是引导广大教师深入开展教学研究，并通过教学研究提高自身素养的好途径。

需要指出，《专题分析》只是就教学中可能遇到的问题作了分析，对于教师如何正确理解提供了说明，这并不是说要求教师原封不动地把这些专题分析搬到课堂教学中去给学生讲授。须知课堂讲授应根据教学大纲（或课程标准）的要求进行，随意改变教学大纲

(或课程标准)的要求,增加教学的深度和难度,从而增加学生的负担都是不适宜的和不可取的.诚然,《专题分析》中有些专题及其分析适于渗透在课堂教学中给学生讲解,有些适于对学生作个别解答,有些则适于组织学生课外学习探寻正确答案.这里存在一个掌握分寸的问题.

我们希望这套《专题分析》丛书能够切实解决广大中学教师教学中遇到的问题,并受到欢迎.

目 录

一、概述	1
1. 振动和波动是普遍存在的物理运动形式	1
2. 简谐运动和简谐波的基础地位	3
3. 振动和波动涉及多方面力学知识	5
二、从能量转换观点看振动的多样性	9
1. 何谓振动	9
2. 振动的分类	10
三、简谐运动的描述	17
1. 关于简谐运动的定义	17
2. 简谐运动是围绕平衡位置进行的	18
3. 简谐运动的初相位、振幅取决于两个初值	23
4. 从动力学方程确定固有频率	25
四、从能量观点判断简谐运动	29
1. 机械能守恒, 而且势能是振动变量的正值二次函数, 才能导致简谐运动	29
2. 满足 $\ddot{\xi}^2 + b\xi^2 = c$ 导致 ξ 代表简谐运动	31
五、简谐性位移策动, 也能引起共振	39
1. 以简谐性的位移和力的方式进行激励的等效性	39
2. 受迫振动的频率为何仅由激励决定	41
六、受迫振动中可能有混沌	46
1. 什么是混沌	46
2. 描述混沌的有关概念	48
3. 受迫振动中的混沌源于非线性	53

七、自激振动和参数振动	58
1. 何为自激振动	58
2. 何为参数振动	63
八、波动——扰动的传播	65
1. 相对性原理要求以行波宗量表示传播	65
2. 振动曲线和波形曲线	67
九、波动方程和波速	71
1. 波速如何确定	71
2. 色散与群速	76
3. 能量及压强的传播	83
十、界面两侧的波阻不同导致波的反射	88
十一、驻波传播能量吗	93
1. 固定端反射	93
2. 自由端反射	95
十二、多普勒效应	96
1. 机械波的多普勒效应与击波	96
2. 光波的多普勒效应	101

1. 振动和波动是普遍存在的物理运动形式

人类生活在运动的世界里，机械运动是最直观的物理运动形式，它描述物体的位置、取向如何随着时间的推移而变化。研究机械运动的基础物理内容，构成经典力学。在机械运动中，除了物体发生平动和转动之外，还有常见的运动就是振动和波动了。人类生活中，到处都是振动的例子。人们乘车、船以及飞机会感到振动；工厂中大型机械运转时，机器甚至厂房会振动；农民在耕种时，农具会振动；甚至地球本身也在不时地因地壳运动而振动着。广义而言，人体内心脏的跳动、肺脏的呼吸等也在一定意义上属于振动。振动并不限制在机械运动范围之内，电流和电压在交流电路中围绕着一一定的数值往复变化，也是一种振动。振动现象，比比皆是。

振动、有的有利，有的有害。人们广泛地应用着有利的振动。日常生活中，人们须臾不可离开的各种计时装置利用着振动，通讯、电视以及发电等是电磁振动在不同领域中的具体体现。中学物理教科书上常举的共振筛、理发推以及播种机是机械振动的应用。振动的有害方面也不少。人们需要安静的工作环境时（如进行精密的天平测量时）周围街道上的车辆移动甚至都会成为一种干扰。在工厂的生产中，不利振动更是多见。例如大型化工厂的空气压缩机一般都安装在钢结构的厂房里。当卧式活塞空气压缩机运转时，活塞作水平方向的往复运动。活塞来回运动一次，机器和厂房构成的整个系统的质心也相应地在水平方向来回运动一次，这导致厂房自身的质心在水平方向作相应的往复运动。同样地，机器竖直方向的往复运动，也会导致与其固连的厂房相应的上下振动。如果厂房设

1

振动和波动

计得不合理，或者在合理设计的厂房内随便变更空气压缩机的转速，都有可能导致厂房的振动加剧，甚至发生受迫振动下的共振，使厂房形变过大发生损坏甚至坍塌。此外，还有有害的自激共振现象。风吹过烟囱或桥梁，在适当的风速和建筑物尺寸下，就会发生破坏性的自激共振。1953 年在美国有一只直径为 5 m、高约 90 m 的焊接烟囱，在风速约为 16 m/s 的强风持续吹动下，以每秒一次的固有频率发生自激共振。共振后不久，就使烟囱发生挠曲，并且在钢制烟囱上开了个大裂缝。对于有害的振动，根据其发生机理，可以加装特定的隔振装置或采取防振措施加以抑制或消除。

说到振动，就要谈到波。粗略地说，波就是振动的传播。实际上，人们能够感知振动的存在，总是离不开振动的某种传播过程。机械波是机械振动在弹性介质中的传播过程。人类最早研究和研究的波恐怕就是机械波中的声波了。无线电波、X 射线以及光是电磁振动的传播，不过这种传播已经不再需要借助任何介质来实现，它可以在真空中传播。都是振动的传播，声波和电磁波传播的机理不同，前者是弹性介质中质元受到因应变产生的应力的驱动，把介质中的局部形变（即振动）传播开来；而后者基于电磁感应现象，把电路中局部范围内的电或磁的振动散播开去。

波动的利用同样相当广泛。各种无线电通讯、光测量、音乐欣赏以及超声波诊断或探伤，比比皆是。不必要的波动干扰，例如空中杂散电波对于各种电子设备的影响，可以采用吸收或屏蔽的方法加以降低或消除。现代隐形飞机采用的隐形技术之一就是在飞机外附加一层特别材料，它对雷达波段的无线电波有强烈吸收作用而极少反射，从而使隐形飞机在接收雷达反射波的屏幕上图象变模糊，甚至消失。高级音乐厅的墙壁上或空中，往往设置足够面积的吸声板，用以控制乐声在空中的抑扬时间（交混回响时间），提高音响质量。

2. 简谐运动和简谐波的基础地位

尽管振动和波动的形式多种多样,现象纷杂繁复,都有着若干规律性.科学的分类,基于人们对事物本质的认识.随着人们对振动和波动的深入了解,也把它们分成许多类.其中简谐运动和平面简谐波便是最简单、最基础性的振动和波动.

在振动问题中,人们最早着力研究小幅度振动,并利用得出的微振动理论,认清了不少规则振动的规律.例如,对弹簧下悬重物的运动、小角度的单摆或物理摆的摆动以及广阔水面上漂浮物的上下振动等现象的动力学研究,可以得到相同形式的微分方程

$$\ddot{\xi} + \omega^2 \xi = 0,$$

并把它称为 ξ 随时间作简谐运动的定义.随着科学研究的深入,人们又认识到还有许多其它形式的振动.例如,从能量转化与守恒的观点出发,认识了阻尼振动、受迫振动,它们与简谐运动既有区别,又有联系.到 20 世纪 30 年代,对机械振动的研究开始由线性系统向非线性系统发展.所谓非线性系统,是指该系统的动力学方程中有非线性项.例如自激振动、参数振动都属于非线性振动.特别是近 30 年对于非线性系统的研究,揭示了许多以前未曾认识的事物,如混沌现象.本来人们一直以为,由确定性规律制约的振动系统,未来的情况总是可以准确预言而不存在任何随机性结论.例如,牛顿运动定律是个二阶常微分方程,它的解可以通过两个初始条件完全确定.现在认识到,如果有非线性项出现在依照牛顿定律确定的方程里,尽管方程中没有任何随机因素,也可能会表现出方程解的不确定现象,人们称之为混沌现象.这使得人们对于规则振动的含义以及牛顿定律本身有了更深刻的认识.此外,人们还认识到,自然界和工程中还存在着另一类振动——随机振动,它是真正的不规律振动,不同于混沌性振动.随机振动本身遵守的动力学

方程中就含有随机项,例如,海浪对舰船的冲击、路面起伏不平引起的汽车颠簸以及地震激励对建筑物的影响等,都作为随机性激励出现在振动系统的动力学方程之中. 尽管这些新型振动与简谐运动全然不同,都仍然可以借助描述简谐运动的一些概念,来进行一些特定的分析,这主要得益于数学上著名的傅里叶定理. 例如,频率的概念标志着信号变化的快慢. 信号如果含有高频成份,就说明它有很快的变化;如果还有些低频成份,就意味着其中仍有慢变的内容. 对于周期性振动,可以利用傅里叶级数把它分解成频率分立的简谐运动的叠加,这充分体现了简谐运动的基础地位. 对于非周期性振动,则可以傅里叶积分进行分析. 如对随机振动,则可以通过自相关函数的傅里叶变换引入频率而得到频域信息.

4 涉及波动过程的研究,同样适用傅里叶展开定理,只不过变成了多重傅里叶展开,其中平面简谐波起着与简谐运动同样的基础作用.

在 20 世纪两项最伟大的物理成就,相对论和量子力学中,波的概念有着基础性地位. 广义相对论,作为一种与狭义相对论相协调的一种最为成功的引力论,预言自然界会有引力波存在. 引力波是强度极弱的横波. 探测引力波是件极其困难的事情,例如,探测装置应能测量出 1 m 长的铝棒在引力波作用下发生的 10^{-18} m 的形变,此形变仅相当于铝原子核直径的千分之一,更不用说这种微弱的引力波信号还必然淹没在诸如热噪声等背景之中. 尽管目前尚缺乏证实引力波存在的直接证据,若干印证引力波存在的间接证据已经取得. 近代物理中的另一重大成就是量子力学的建立. 在量子力学中,用所谓波函数描述粒子分布的概率,波函数的传播,对应着粒子分布概率的运动. 不过,这种用波函数描述的所谓物质波或德·布洛意波的波动过程,已经不再是某种物质振动的传播,它只是描述微观粒子行为中非粒子性侧面的手段.

此外,在非线性系统中,除了可能存在混沌现象之外,还可能

有非线性波动. 波动的非线性机制和色散项的综合作用, 可以呈现行进中的单个脉冲即所谓孤波, 相碰后仍不变形的孤波称为孤子. 20 世纪 60 年代以来, 关于孤子的研究有了巨大进展. 孤子解普遍存在于粒子物理、等离子体物理、超导理论以及非线性光学等许多学科之中, 它也被利用在光纤通讯等现代技术领域里. 可以说, 关于机械振动和机械波的知识, 仍然是进一步认识物理世界的必要基础.

3. 振动和波动涉及多方面力学知识

在多数经典力学的教材中, 振动和波动通常放在最后的章节进行讲授, 有的教材甚至把这部分内容推迟到学习电磁波或光学之前再行介绍. 这样安排的原因之一, 恐怕是这部分知识的学习需要用到牛顿力学知识的诸多方面, 如动量定理和动能定理等. 这两种运动过程本身具有一定程度的复杂性和实用性, 因而也使学生感到难以掌握.

就振动而言, 判断一种振动过程是否是简谐运动, 必须用动力学方法进行分析, 列出牛顿力学方程, 辨认合力(矩)是否是线性恢复力(矩). 这种辨认通常是学习中的难点. 又如, 坐标原点的平移——静平衡位置的改变, 并不影响物体的加速度, 对于不熟悉加速度导数定义的中学生来讲, 这种结论也显得陌生, 更不用说如何正确地忽略高级小量, 判断微振动下是否符合简谐运动要求了. 此外, 必须应用两个初始条件来确定简谐运动的运动学方程, 对学生也是头一次见面. 余弦或正弦式振动并非都是简谐运动, 这一点也常被混淆, 它涉及对振动的全面认识和正确分类. 或许可以说, 理解了振动和波动, 是学生真正学会从动力学(微分)方程来认识一个系统力学性质的开始. 在近代物理中起重要作用的相位概念,

也是在振动和波动中应该学习的。因而，振动和波动知识的学习，在整个物理学学习过程中，起着承上启下的枢纽作用。

从难度上讲，解决有关振动的问题，对学生综合运用已学过物理知识的能力也有着相当的要求。以下两个时常引起学生疑惑的问题或许可以说明我们的想法。

〔例 1〕如果已知以下命题：同时参与两个正交方向上、振幅分别为 A 和 B 、频率相同的简谐运动的质点，其运动轨迹通常为一个长、短半轴分别为 A 、 B 的椭圆。现在欲知，是否任何一个椭圆轨道运动，都可以看成两个正交方向、同频率简谐运动的合成？

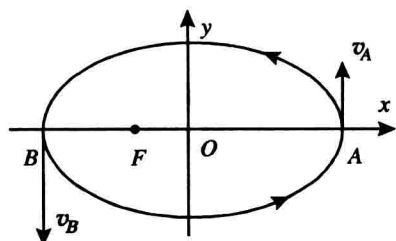


图 1-1

学生往往给出肯定的回答，而肯定性的回答是需要证明的。给不出证明时，往往把必要性与充分性混同起来。对这个问题的答案，应该是否定的。否定一个命题，只要举出一个反例就可以了。中学生知道椭圆运动的唯一例子，就是遵从开

普勒第一定律的行星轨道运动。行星运动以太阳为焦点，如图 1-1，并且还遵守开普勒第二定律。第二定律要求“太阳和行星的连线在相等的时间内扫过相等的面积，即

$$v_B |FB| = v_A |FA|.$$

既然 $|FA| \neq |FB|$ ，可知 $v_A \neq v_B$ ，所以行星在 y 方向两次通过 $y=0$ 位置的速度值并不相同，因而在 y 方向不可能视为单一频率的简谐运动。实际上，可以分解为两个正交方向简谐运动合成的椭圆运动，其力心应该在轨道中心 O 点，而不在焦点 F 处。这种问题显然要求学生具有力学知识的综合运用能力。

下面一个例题是一道中学生竞赛题。

〔例 2〕一列火车以惯性向前运动，爬上与水平面有 α 倾角的

平直小山坡，图 1-2. 当列车最后停住时，已有一半车厢爬上了山坡. 设列车长度为 l ，不计摩擦阻力，求列车爬上山坡总共需用多少时间.

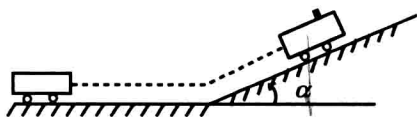


图 1-2

一般学生对此题会感到困难，因为这是一个变加速运动问题. 直接求时间，需用积分，并不容易. 如果先应用动量定理于短暂的时间

间隔 Δt 内，易于得出影响列车动量大小的外力冲量为

$$-\frac{x}{l}mg \sin \alpha \Delta t = m \Delta v, \quad (1.1)$$

其中 m 代表质量均匀分布的列车质量， x 为某时刻列车已爬上山坡部分的长度，上式可以改写成

$$\frac{\Delta v}{\Delta t} + \frac{g \sin \alpha}{l} x = 0.$$

只要令 $\Delta t \rightarrow 0$ ，上式就变成简谐运动的动力学方程的标准形式. 这说明，已爬上山坡的列车长度 x 随时间变化的规律与简谐运动相同， $x=0$ 相当于平衡位置. 列车从开始爬坡到完全停下来，相当于在简谐运动中的物体从平衡位置到最大位移，所以需用时间为固有振动周期的四分之一，即 $T/4$. 从上式看出，对应简谐运动的圆频率为

$$\omega = \sqrt{g \sin \alpha / l},$$

所以，所求时间为 $T/4 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{l}{g \sin \alpha}}$.

在这个问题中，“列车最后停住时，已有一半车厢爬上了山坡”的条件，容易使人误入歧途. 其实它的作用不过是保证列车在停止上行之前，沿斜坡方向所受合外力始终可表示为 $xmg \sin \alpha / l$ ，而这正好提供了简谐运动要求的正比于 x 的线性恢复力.