

全国中小学教师继续教育

专业必修课程教材

高中物理专题分析

运动学

YUNDONGXUE 教育部师范教育司组织编写

人民教育出版社

高中物理专题分析丛书

运 动 学

教育部师范教育司组织编写

人民教育出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高中物理专题分析: 运动学/教育部师范司组织编写—北京:
人民教育出版社, 1999

ISBN 7-107-13241-5

I. 高…

I. ①陈…②人…

Ⅲ. ①物理课-高中-教学参考资料②运动学-高中-教学参考
资料

IV. G633.73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (1999) 第 35748 号

人民教育出版社出版发行

(北京沙滩后街 55 号 邮编: 100009)

北京联华印刷厂印装 全国新华书店经销

1999 年 8 月第 1 版 1999 年 8 月第 1 次印刷

开本: 880 毫米×1230 毫米 1/32 印张: 2.875

字数: 66 千字 印数: 1~10 000 册

定价: 5.90 元

著作权所有·请勿擅用本书制作各类出版物·违者必究
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 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,在课程体系中,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. 运动学是力学的基础	(1)
2. 运动学与时空观	(2)
3. 用矢量语言描述物体的运动	(4)
4. 本书内容	(5)
二、速度	(8)
1. 平均速度的意义	(8)
2. 准确理解速度定义 $v = \frac{dr}{dt}$	(11)
3. 速度-时间图象	(14)
4. 位置-时间图象	(18)
三、加速度	(22)
1. 加速度学习困难的原因	(22)
2. 怎样理解加速度	(24)
3. 匀变速运动公式	(29)
4. 矢量投影的双重正负号	(34)
四、运动的分解、合成	(39)
1. 关于运动独立性原理的辨析	(39)
2. 运动分解合成法的两种应用	(48)
3. 运动合成与相对运动	(64)
五、物体在约束条件下的速度	(70)
1. 问题的提出	(70)
2. 一个典型题的分析	(71)
3. 应用	(77)

1. 运动学是力学的基础

(1) 力学是研究物体机械运动规律的学科。机械运动是指物体空间位置的变动,它是物质各种运动形式中最简单、最基本的一种,在热运动、电磁运动、微观世界的运动、化学变化、生命现象、天体运动……中都包含有机械运动。力学的概念、规律,特别是它的研究方法和物理思想,对其他运动形式的研究具有重大的意义。在中学物理课中,我们只要注意到参考系、速度、质量、力、动量、能量、功等概念和牛顿运动定律、万有引力定律、动量守恒定律、动能定理、机械能守恒定律等规律,以及时空观、物理模型、数学工具(矢量、图象、变化率)等在热学、电学、光学、原子物理学中的应用,就会对此有所体会。

研究某种运动形式的规律,首先要解决描述这种运动形式的问题,即对它进行唯象的研究,然后再进一步研究它运动的原因、规律。从历史上看,人们对机械运动的研究也是先从机械运动的描述开始。运动学就是说明用什么物理概念、物理量去描述物体机械运动的状态,用什么方程去说明物体的运动状况。动力学则进一步研究物体做各种运动的原因、规律,从而可以解决控制物体运动的问题。

实际物体(固体、液体、气体等)的机械运动是多种多样的,要详尽地描述它们的机械运动状态是十分繁杂的。我们把实际物体看成质点系,因此,研究质点的运动是最简单、最基本的,它是研究实际物体运动的基础。另一方面,当物体做平动时,我们把物体看成质点,了解这个质点的运动也就了解了整个物体的运动。

中学力学教学主要研究质点的运动，本书也只限于讨论质点运动的几个问题。

(2) 虽然我们一般把力学分为运动学和动力学两大部分进行学习、研究，但应该理解运动学和动力学是紧密联系的，不要把它们截然割裂开来。

我们应该理解运动学是动力学的基础。质点的位置、速度、加速度及其对时间的变化关系，如：匀变速直线运动公式，抛体运动公式，匀速圆周运动公式等，都是我们在研究动力学问题时常常要用到的。

从动力学角度看运动学概念、规律能加深理解。如：加速度是力产生的，它建立了运动学和动力学的联系；抛体运动是质点在恒力作用下的加速度恒定的曲线运动；简谐运动是质点在线性回复力作用下的运动等。又如：从动力学角度能判定运动独立性原理不存在，分运动的独立性是有条件的。

当然，在实际问题中，有的问题纯粹是运动学问题。如：绳的一端拴住小船，另一端在岸上用恒定速率收绳，分析小船沿水面运动的速度如何变化；半径为 R 的车轮沿直轨道向前匀速滚动，求车轮上一点的运动；在一些机械和机构中，常需要研究某些部分的运动情况（梁昆森编《力学》上册（修订版）P. 28 牛头刨床的滑枕运动分析），这也只是运动学问题。

2. 运动学与时空观

(1) 我们通过自己的生活经验，对周围世界的观察，最容易接受的时空观是牛顿的绝对时空观（它体现在伽利略变换中）。一般人容易认为空间是容纳各种物体的容器，物体可以在空间中运动，空间与物质的分布和运动没有关系；时间均匀流逝，与物质无关；空

间、时间脱离物质而独立存在，总是一成不变的。我们认为长度是绝对的，存在某种理想的直尺，在所有参考系中它的长度不变。我们认为时间是绝对的，存在某种理想的时钟，对所有参考系显示相同的时间。

时间、空间的本质不仅是物理学的基本问题，也是深刻的哲学问题，不断有人对它们进行研究。20世纪初，爱因斯坦揭露了同时性的相对性，用相对性原理和光速不变原理两个基本假设，建立了狭义相对论的时空观，明确指出时间和空间都与物质的运动有关，时间和空间是相互联系的，应统一为四维时空。爱因斯坦又进一步在广义相对论中揭露了时空与物质是相互作用的，物质的分布及其运动使周围的时空发生弯曲，而弯曲的时空又反过来影响物质的运动。可以认为，广义相对论的基本思想是：物质决定了时空的弯曲，而时空又决定了物质的运动。

相对论的时空观与我们习惯接受的经典时空观是格格不入的，初学物理的人难以接受。一般说，我们只能通过自己的经验和积累的知识去认识新事物。我们周围各种物体的运动、变化都是低速情形， $v \ll c$ ，它们基本上都可以用经典的绝对时空观去解释。换句话说，经典的时空观对我们生活和活动的广大领域是适用的，在中学物理的教学中，我们仍然以经典的时空观进行教学，但应该在适当的地方指出它的局限性，介绍现代时空观的一些常识。

(2) 质点的机械运动表现为质点的位置随时间变化。质点的位置是相对于一定的参考系说的，参考系是指选来作为研究物体运动依据的一个三维的、不变形的物体（刚体）或一组物体为参考体，并在参考体上选取不共面的三条相交线作为标架，再加上与参考体固连的时钟。即参考系包括参考体、标架和时钟，习惯上我们把参考体简称为参考系。为了定量地描述物体的运动，我们在参考系上还要建立坐标系，直角坐标和极坐标是最常用的两种坐标形式。

从运动学角度看，参考系可以任意选取。对一个具体的运动学

问题,我们一般从方便出发选取参考系以简化物体运动的研究.古代研究天体的运动时,很自然以地球为参考系.托勒密的“地心说”用本轮、均轮解释行星的运动.哥白尼用“日心说”解释行星的运动时,也要用本轮和均轮.从运动学角度看,“地心说”和“日心说”都可以同样好地描述行星的运动.但从研究行星运动的动力学原因的角度看,“日心说”开通了走向真理的道路.开普勒在“日心说”的基础上,把行星的圆周运动改变为椭圆运动从而扔掉了本轮、均轮的说法,开普勒并在观测的基础上建立了行星运动三定律,作出了重要的贡献.牛顿进一步揭露了开普勒三定律的奥秘,建立了万有引力定律、概括出“万有引力”概念.我们应该注意,从运动学看所有的参考系都是平权的,选用参考系时只考虑分析问题是否简便.从动力学看参考系区分为惯性参考系和非惯性参考系⁴两类,牛顿定律等动力学规律只对惯性参考系成立,对不同的非惯性参考系要应用牛顿定律需引入相应的惯性力修正.

3. 用矢量语言描述物体的运动

我们在研究自然现象的规律时,除了使用日常语言(自然语言)外,还要使用科学语言.这是因为我们日常使用的语言虽然丰富多彩、能生动地表达我们的思想、感情、具有许多复杂的功能,但这种语言有时多义、语法复杂,不能引起无歧义的惟一理解,因而不利于科学研究.我国古代数学曾在世界上处于先进行列,后来落后了的一个重要原因是没有创造出一套合理的、统一的符号体系(数学语言),不能将问题形式化、普遍化.我们应该重视科学语言的学习和使用.

科学语言包括科学术语、符号、公式和图表,具有含义精确、形式简洁的特点.在科学技术的许多部门都有广泛应用的矢量语言,也

具有这些特点。在质点运动学中，我们用矢量表物理量的定义和物理量间的关系，具有内容准确、形式简洁、不依赖于坐标系选择的优点，这当然给我们研究问题、分析解决问题带来很大方便。作为高中物理教师，应该理解质点运动方程的矢量表形式，熟悉由具体问题的分析得到矢量方程以及选取适当的坐标系变为相应的标量方程求解的方法，本书对一些问题的分析求解就采用这种方法。

创造矢量语言不容易，学习、掌握矢量工具也有困难，对第一次接触矢量的高中学生就更困难。初学者很不习惯这种既有大小又有方向且遵从特殊运算法则的矢量，对矢量合成、分解的许多不同于标量的特点（平行四边形定则）感到奇怪、不好理解，这是自然的。教师应根据自己对矢量的理解、教学实践和学生实际情况想法逐步解决。

没有必要对初学者给出矢量的严格定义，因为这是困难的。说“有大小和方向的量叫矢量”，这不是矢量的定义，电流强度也有大小、方向但不是矢量。说“有大小、方向且满足平行四边形定则的量叫矢量”也不是矢量的严格定义。对初等物理，懂得用一定指向的线段表示矢量（矢量的几何表示），理解矢量的合成、分解满足平行四边形定则（矢量的结合规则），知道矢量可用3个分量表示（矢量的解析表示）已足够用了。矢量的严格定义要考虑用矢量表物理规律时，对同一参考系中的不同坐标系具有相同的矢量形式这一特性。一般说，矢量是用变换关系来定义的。（参看朱照宣等编《理论力学》上册 P. 201、下册 P. 194）

4. 本书内容

(1) 质点的机械运动表现为质点的位置随时间的变化，描述这种变化的函数关系式是

$$\mathbf{r} = \mathbf{r}(t) \quad (1.1)$$

其中 $\mathbf{r}$ 是位矢, t 是时间. 常用直角坐标的分量式表述为

$$\begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad (1.2)$$

式 (1.1) 或 (1.2) 是对质点运动的完整描述, 因为它不仅能使我们知道任一时刻 t 质点的位置 $\mathbf{r}$, 而且从方程消去时间 t 就得到质点运动的轨迹方程, 又能求出任意一段时间内的位移 $\Delta\mathbf{r}$, 还能方便地求出任一时刻质点的速度 $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$ 和加速度 $\mathbf{a} = \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$. 式 (1.1) 或 (1.2) 包含了质点运动的全部信息, 我们把它叫做质点的运动方程.

6 质点运动学的中心问题是求出质点的运动方程.

质点某一时刻的运动状态用位矢 $\mathbf{r}$ 和速度 $\mathbf{v}$ 描述, $\mathbf{r}$ 确定质点的位置, $\mathbf{v}$ 描述质点运动的快慢和运动方向. 加速度 $\mathbf{a}$ 是速度矢量的变化率, 是描述质点运动状态变化的物理量. 位矢 $\mathbf{r}$ 、速度 $\mathbf{v}$ 和加速度 $\mathbf{a}$ 是质点运动学中 3 个极为重要的物理量, 某一时刻的 $\mathbf{r}$ 、 $\mathbf{v}$ 、 $\mathbf{a}$ 是互相独立的.

求质点运动方程的运动学问题有:

已知质点的初始位置 $\mathbf{r}_0$ 和速度随时间变化的规律 $\mathbf{v} = \mathbf{v}(t)$, 求质点的运动方程可用积分求得 $\mathbf{r} = \mathbf{r}_0 + \int_0^t \mathbf{v} dt$, 求加速度可用导数求得 $\mathbf{a} = \frac{d\mathbf{v}}{dt}$;

已知质点的初始位置 $\mathbf{r}_0$ 和初始速度 $\mathbf{v}_0$ 及加速度随时间的变化规律 $\mathbf{a} = \mathbf{a}(t)$, 求速度可用积分得 $\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 + \int_0^t \mathbf{a} dt$, 对速度 $\mathbf{v}$ 积分可求得运动方程.

在质点运动学中还要研究质点做复杂运动的问题, 以及几个质

点的相对运动问题等.

(2) 本书首先分析、讨论速度概念, 说明速度是位矢对时间的变化率, 不是位移对时间的变化率. 说明如何理解速度的物理意义, 说明速度-时间图象和位置-时间图象的意义.

加速度是运动学中极为抽象的概念. 本书分析初学者学习加速度的困难原因, 从加速度的研究历史、加速度的定义、简单运动和复杂运动中的加速度等方面, 说明如何理解加速度的物理意义, 并说明加速度在运动学中的应用.

对复杂运动我们常采用运动分解合成法分析研究, 针对分运动独立性的一些错误看法, 本书分析和明确指出运动独立性原理不存在, 运动独立性原理与力的独立作用原理没有关联. 本书较全面地说明如何应用分运动研究合运动和如何应用合运动研究分运动.

在一些运动学问题中, 合速度与分速度的区别常使学生感到困惑. 本书指出这是在一定约束条件下求物体速度的一些问题, 并且在分析比较几种解法后指出, 用“元位移法”分析解决问题较好. 我们还进一步说明速度分解合成与相对运动的速度合成(速度变换)是有本质区别的.

二 速 度

1. 平均速度的意义

(1) 在人们的日常经验中形成的速度概念实际是平均速率, 我们平常所说人的行走速度、跑的速度、汽车的速度、火车的速度等, 实际是指路程与通过这段路程所用时间的比. 物理学中所说的平均

速度定义是 $\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t}$, Δs 是 Δt 时间内物体的位移. 由此可知, 平均速

度是矢量, 一般说平均速度的大小不等于平均速率. 为了突出平均速度 $\bar{v}$ 与平均速率 $\bar{v}$ 的区别, 我们列举时间 Δt 比较长的一些例子,

如: 质点沿半径 $R=2\text{ m}$ 的圆周运动, 由 A 点出发经过 4 s 运动了半周到达 B 点, 再经过 6 s 回到 A 点. 前 4 s 的平均速率 $\bar{v} = \frac{\pi \cdot 2}{4} \text{ m/s}$

$= 1.57 \text{ m/s}$, 平均速度 $\bar{v}$ 的大小为 $\frac{4}{4} \text{ m/s} = 1 \text{ m/s}$. 方向由 A 指向 B .

10 s 内的 $\bar{v} = \frac{2\pi \cdot 2}{10} \text{ m/s} = 1.26 \text{ m/s}$, $\bar{v} = 0$. 对这样的例子, 有些

善于思考的学生会发问为什么要这样定义平均速度? 这样建立的平均速度有什么意义? 实在不好理解. 学生的看法不是没有道理的, 从这样的例子我们的确看不出引入平均速度的必要性.

应该明确, 引入平均速度的意义在于过渡到变速运动的瞬时速度. 平均速度 $\bar{v}$ 只是粗略地描述 Δt 时间内运动的快慢, 当 Δt 取得较小, 平均速度就较为精确地描述 Δt 内运动的快慢, Δt 越小, 它就更精确地描述 Δt 内运动的快慢, 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时它就精确地描述了 t 时刻运动的快慢. $\Delta t \rightarrow 0$ 时 $\bar{v}$ 的极限就定义为瞬时速度 $v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta r}{\Delta t}$. 可以看

出, 平均速度是作为精确定义瞬时速度的前提而引入的, 没有平均速度就无从定义瞬时速度. 然而平均速度只有当 Δt 很小时才有意义、它逼近瞬时速度.

瞬时速度 v 简称速度, 是描述质点运动状态的基本物理量, 无论是在运动学中还是在动力学中以及物理学的其他部分中都有重要作用. 为了更好地理解 v 引入 $\bar{v}$ 是必要的, v 是 $\bar{v}$ 在 $\Delta t \rightarrow 0$ 时的极限, 在实际应用所要求的精确度内, 只要 Δt 取得相应地小就可以认为 $\bar{v}$ 等于 v .

(2) 对质点做变速运动的一般情况, $v = v(t)$ 可能变化复杂, 一般说 v 不等于 t 时间初末时刻的速度 v_0 和 v_t 的平均值, 即 $v \neq \frac{v_0 + v_t}{2}$, 而且由于平均速度不仅与时刻 t 有关, 还与所选取的时间间隔有关, 因此它不可能预先得知, 只能在已知位移和选定时间间隔之后才能求得, 于是, 我们不能简单利用平均速度求得位移 s . 但是对质点做加速度恒定的直线运动或曲线运动的特殊情况, a 是恒矢量, 速度 $v = v_0 + at$

$$\therefore s = \int_0^t v dt = \int_0^t (v_0 + at) dt = v_0 t + \frac{1}{2} at^2$$

$$\therefore \bar{v} = \frac{s}{t} = v_0 + \frac{1}{2} at$$

$$\therefore \bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2} \quad (2.1)$$

$$\therefore s = \bar{v} t = \frac{v_0 + v_t}{2} t \quad (2.2)$$

即对加速度恒定的运动, t 、 s 、 v_0 、 v_t 、 $\bar{v}$ 间存在 (2.1)、(2.2) 式所表述的简单关系, 可以根据初速度和末速度求出平均速度, 并且根据平均速度求出时间 t 内的位移. 中学里的不少具体问题常常属于这种特殊情况.

【例 1】如图 2-1 所示, 质量为 M 的木块放在光滑水平面上, 一学