

高等学校教学用书

大学物理问题讨论集

王燕生 编著

东北工学院出版社

内 容 提 要

本书以现行工科物理《基本要求》为基准，深入浅出地讨论了 50 个物理学问题，着重于深入理解物理学的基本概念和基本规律，也适当地介绍了这些概念和规律的现代应用。

本书主要适用于理工科院校大学生，对大、中学校的物理教师也有一定的参考价值。

大学物理问题讨论集

王燕生 编著

东北工学院出版社出版发行 东北工学院印刷厂印刷
(沈阳·南湖) (辽新出许字 89084 号)

开本：787×1092 1/32 印张：7.125 字数：160 千字
1990 年 12 月第 1 版 1990 年 12 月第 1 次印刷
印数：1~5 000 册

责任编辑：张生业 朱玉瑗 责任校对：张德喜
封面设计：唐敏智

ISBN 7-81006-240-9/O·15 定价：1.60 元

前 言

在教学过程中，一些学生，特别是那些优秀学生往往不满足于教材的内容，而提出一些超出教材范围的问题。为了回答这些问题，我陆续给他们编写了一些课外阅读材料，在逐渐积累这些材料的基础上写成了这本书。

学生们提的问题天南海北，编写成书当然要进行一番选择，标准就是目前的工科物理《基本要求》，有些问题虽不直接属于《基本要求》，但对理解《基本要求》有益处的，也选入本书。

本书各篇短文基本是相对独立的，并按力学、分子物理、热力学、电磁学、波动光学和近代物理的顺序编排。阅读每一部分的时间，最好选在学完物理学的相应部分后。本书侧重于讨论物理学的基本概念和基本规律，以及它们之间的内在联系，也适当介绍这些概念和规律在现代的应用。

物理学的基本概念和基本规律是在分析具体物理问题过程中逐步建立和掌握的，其重要步骤是对所研究的物理过程建立一个清晰的图象。在这里，形象思维和抽象思维起着同样重要的作用，虽然这两者表面上看来似乎是矛盾的，但实际上两者相辅相成。形象思维中，各种各样的图形有助于建立直观概念，而数学可以培养抽象思维的能力。

书中“电力线概念的应用”“热力学过程吸热、放热的判别”“衍射中的矢量图法”“狭义相对论的图解法”等篇，集中说明了图形在分析物理问题中的作用。其他各篇短

文也充分利用了这一特点。通过细心观察每一幅图，在读者的头脑中就会建立起图形与物理过程的直接联系。

“从麦克斯威方程预言电磁波的存在”“半波损失”“磁力悬浮”“是磁力作功，还是电源作功”等篇，则说明数学在分析物理问题中的威力。经过耐心读懂每一个数学方程式和表达式，你就会逐渐习惯用数学的语言理解物理世界。这样，当看到一个数学方程式或表达式时，你就会明白它所包含的物理内容。同样，在看到某个物理过程时，也能知道用什么样的方程式去描写它。

本书选题和讨论问题的方式也想使其对初次担任物理课的大、中学校青年教师有一定的帮助，当然更希望能引起他们的兴趣，共同为提高物理教学水平而努力。

李金堂教授对本书进行了全面认真的审查，并提出许多宝贵意见，在此深表感谢。

由于本人水平有限，本书内容涉及广泛，特别是用初等方法处理某些较难的问题更没有经验，因此缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

王燕生

1987年12月

目 录

一	运动叠加原理和相对运动	(1)
二	为什么不用引入 $d^3\mathbf{r}/dt^3$	(5)
三	一道物理习题的启发	(9)
四	摩擦力及其利弊	(13)
五	船行八面风	(19)
六	离心分离和洗血	(23)
七	机械能守恒定律的适用条件	(27)
八	如何定义惯性参照系	(30)
九	恢复系数	(32)
十	经典力学中的一个“佯谬”	(37)
十一	荡秋千的力学原理	(41)
十二	银河系的形状与动量矩守恒定律	(44)
十三	弹性势能和振动势能	(49)
十四	半波损失	(53)
十五	多普勒效应和大爆炸宇宙论	(60)
十六	宇宙临界密度	(65)
十七	反射波的多普勒效应	(69)
十八	气体分子速率分布函数的推导	(72)
十九	最可几动能	(75)
二十	分子平均碰撞频数	(80)
二十一	热力学过程吸热、放热的判别	(82)
二十二	多方过程与热容量	(88)

二十三	黑洞与热力学第二定律·····	(95)
二十四	关于“介质中的库仑定律”·····	(97)
二十五	电势零点的选择·····	(101)
二十六	电力线概念的应用·····	(104)
二十七	电容器放电时的能量变化·····	(110)
二十八	电场能与电势能·····	(115)
二十九	磁 力·····	(120)
三十	电磁泵和电磁船·····	(123)
三十一	安培环路定理的证明·····	(126)
三十二	是磁力做功，还是电源做功·····	(131)
三十三	磁力悬浮·····	(136)
三十四	趋肤效应的正确解释·····	(141)
三十五	电磁驱动·····	(144)
三十六	电磁感应中的功能关系·····	(147)
三十七	静电屏蔽、静磁屏蔽和电磁屏蔽·····	(153)
三十八	电磁场是统一的整体·····	(157)
三十九	从麦克斯威方程预言电磁波的存在·····	(163)
四十	薄膜的干涉域·····	(168)
四十一	相干长度和光源的单色性·····	(173)
四十二	光栅光谱的缺级现象·····	(177)
四十三	衍射中的矢量图法·····	(180)
四十四	全息照像原理·····	(188)
四十五	关于光速不变原理·····	(193)
四十六	狭义相对论的图解法·····	(196)
四十七	加速度与力的方向在什么情况下相同·····	(208)
四十八	角动量量子化条件的由来·····	(210)
四十九	为什么原子能够吸收同类原子发出的光·····	(214)
五十	波-粒二象性·····	(218)
	参考书目·····	(222)

一 运动叠加原理和相对运动

在力学部分，运动叠加原理是作为一个重点内容加以讲授的，并且通常以抛体运动为例，来说明这个原理的正确性及其应用。但是，在学完这个原理后，许多同学对类似这样的问题，如：“一辆汽车以速度 v 做匀速直线运动，半径为 R 的车轮边缘上一点 A ，在某一时刻与地面接触，问车轮滚过 $1/4$ 周时， A 点的切向加速度和法向加速度各是多少？”不是不会做，就是做错了。他们不知道如何下手，这说明他们没有掌握运动叠加原理。

经过分析，我们发现，学生在中学通过学习物理，他们对抛体运动很熟悉，处理抛体运动时，把它分解为水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀加速直线运动，已经习以为常，根本没有意识到这是根据运动叠加原理才可以这样分解或合成。所以以抛体运动为例讲解运动叠加原理，起不到深入理解该原理的作用。那么如何才能加深对叠加原理的理解呢？

其实，有一个很好的内容，那就是相对运动，因为相对运动本身就是运动叠加原理的应用。但许多书在处理相对运动时，都是另起炉灶，从不同参照系描写运动出发，讲述相对运动，没有与运动叠加原理挂勾。这样，就使得相对运动的内容显得较难，学生接受有困难，讲完了，他们也不十分明白。

现在我们看看，如果将相对运动与运动叠加原理联系起

来，情况将是怎样？为此，先讨论这两者之间的关系。

比如，一个人在一辆匀速前进的火车上，竖直上抛一个小球，以地面为参照系，小球的运动是怎样的呢？这显然是一个相对运动问题：小球相对火车做竖直上抛运动，而火车相对地面做匀速直线运动，所以小球相对地面做斜抛运动。但这个问题也可用运动叠加原理解决：小球参与了两个运动，水平方向的匀速直线运动和竖直方向的匀加速直线运动，结果也是一个斜抛运动（见图 1-1）。

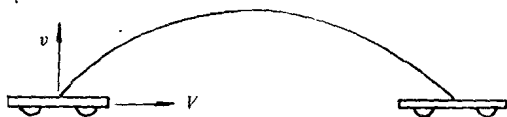


图 1-1 抛体运动的形成

再如，前面提到的车轮上一点 A 的运动，按照相对运动的观点，是 A 点相对轮心做匀速圆周运动，而轮心相对地面做匀速直线运动， A 点相对地面运动的轨迹是普通摆线。也可以看成是匀速率圆周运动和水平方向的匀速直线运动的叠加，其结果也是一普通摆线（见图 1-2）。

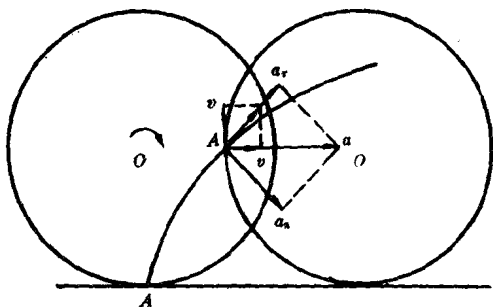


图 1-2 摆线运动的形成

现在我们用运动叠加原理求解上述问题，从图 1-2 可以看到，车轮转过 $1/4$ 周时， A 点的速度与水平方向的夹角为 45° 。由于水平方向是匀速运动，所以匀速率圆周运动的向心加速度 v^2/R 就是它的总加速度，这时它的方向为水平向右，故 A 点的切向加速度和法向加速度分别为

$$a_{\tau} = \frac{v^2}{R} \cos 45^\circ$$

$$a_n = \frac{v^2}{R} \sin 45^\circ$$

我们看到，从不同参照系看来是相对运动的问题，以同一参照系看来，就是运动叠加问题。而且从上面的例子看到，直接用叠加原理解决相对运动问题更直观、更简便。实际上，从不同参照系得到的相对运动的所有结论，都是应用运动叠加原理的结果。

下面我们把上述结论，在较普遍的情况下，用公式表示出来。

如果 A 物体对 B 物体的位移、速度、加速度，分别用 $s_{A \rightarrow B}$ ， $v_{A \rightarrow B}$ ， $a_{A \rightarrow B}$ 表示，而 B 物体对 C 物体的位移、速度、加速度用 $s_{B \rightarrow C}$ ， $v_{B \rightarrow C}$ ， $a_{B \rightarrow C}$ 表示。那么 A 物体相对 C 物体的位移、速度、加速度按照运动叠加原理，就是 A 对 B 的运动与 B 对 C 的运动的叠加，即

$$s_{A \rightarrow C} = s_{A \rightarrow B} + s_{B \rightarrow C}$$

$$v_{A \rightarrow C} = v_{A \rightarrow B} + v_{B \rightarrow C}$$

$$a_{A \rightarrow C} = a_{A \rightarrow B} + a_{B \rightarrow C}$$

或者，更简单明确地用矢量图表示（见图 1-3）。

综上所述，用运动叠加原理去理解相对运动，不但可以加深对运动叠加原理的理解，而且也可使表面上看起来比较

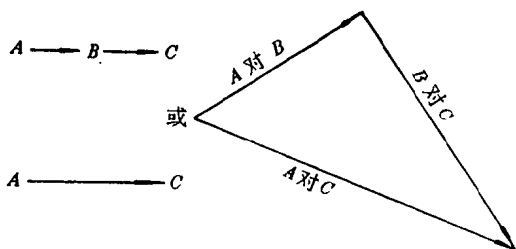


图 1-3 相对运动和运动叠加的关系

难懂的相对运动，变得比较容易接受。

二 为什么不用引入 $d^3\mathbf{r}/dt^3$

在运动学中，用位移描写物体位置的变化。物体位置变化有快有慢，因此引入速度的概念，它是位移对时间的变化率—— $d\mathbf{r}/dt$ ，用以描写物体运动的快慢和方向。物体速度一般也随时间变化，因此又引入加速度的概念，它是速度对时间的变化率—— $d\mathbf{v}/dt$ （或 $d^2\mathbf{r}/dt^2$ ），用以描写物体速度变化的快慢和方向的变化。在引入速度和加速度这两个物理量以后，运动学就到此停止了，没有继续引入加速度对时间的变化率或位移对时间更高阶的微商。初学者自然要问，为什么不再引入与加速度随时间的变化率相当的物理量呢？或者更一般的问题：为什么不引入位移对时间的更高阶微商呢？是加速度不随时间变化吗？当然不是。在一般情况下，加速度还真的随时间变化，在日常生活和自然界中，加速度是常量的运动还是少数的，例如简谐振动，其位移对时间的任意阶微商都不等于零，引入位移对时间的高阶微商，在数学上也完全没有困难。那么为什么不那样做呢？实际上，在运动学的范围内，上述问题是得不到很好解释的，这个问题只有在动力学中才能彻底解决。

物体机械运动的基本规律是牛顿三定律，而牛顿三定律中最主要的、最基本的是牛顿第二定律。牛顿第二定律告诉我们，物体产生加速度的原因是它受到其他物体的作用力，作用在物体上的合外力等于物体质量和加速度的乘积，即

$$\Sigma f = m\mathbf{a} = m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2}$$

这个定律找到了作用在物体上的外力与物体加速度之间的关系。有了它，原则上，物体的机械运动就全部解决了，因此，只需要位移对时间的二阶微商就够了，不需要引入位移对时间的更高阶微商。

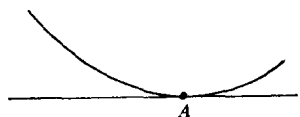
本来，这早已是人们深信不疑的真理了，然而由于生活、生产，以至自然界的某些现象，比如，人们的舒适感常常和加速度是否变化有关，加速度变化过大，会引起难受的感觉；洗衣服用恒力是不行的，必须用变化的力，多次揉搓才能洗干净；筛沙子也一样，需要振动，也就是说需要变化的力；再如，不管什么材料，反复扭折比施加恒力更容易断裂……，使人们产生了某些疑问。于是有人提出需要引入位移对时间的三阶微商—— d^3r/dt^3 ，并且给它起名为“急动度”（英文名称为 jerk），还把力对时间的变化率 dF/dt 当成一个基本物理量，并且声称这是“牛顿力学留下的小小空白”，要对惯性和相互作用等概念重新理解，还要引进对时间的三阶微分方程来描写机械运动等等。因此，这就不仅仅是引入一两个新物理量的问题，而似乎是整个经典力学的基础发生了动摇，这种动摇远比相对论的出现还要严重，相对论只是否定经典力学在高速领域内的适用性，而这个“急动度”却要改变描写机械运动的基本方程，不但如此，它还预示着整个物理学的危机，因为到目前为止，物理学，包括近代物理学的许多被人们公认的基本运动方程，如麦克斯威方程、薛定谔方程、狄拉克方程、克莱茵-高登方程等，都是不超过对时间的二阶微分方程。既然描写机械运动的经典运动方程是对时间的三阶微分方程，那么其他那些方程当然有必要重

新考虑了。

事情果然这么严重吗？否！

首先，描写机械运动的牛顿运动方程是对时间的二阶微分方程，因此只要两个初始条件——初始速度和初始位置，就可以唯一地确定物体的机械运动状态，如果必须引入急动度这一概念，那么运动方程就将是时间的三阶微分方程。我们知道，这时必须有 3 个初始条件，才能唯一确定一个运动，那么除了上述两个初始条件外，还必须知道物体的初始加速度。实际上到目前为止，不论对于恒力还是变力，作用力变化快还是变化慢，我们都没有发现必须知道物体的初始加速度才能确定物体的机械运动。

其次，有人认为速度和位置不能唯一确定物体的状态，他们举例说：一个物体以匀速直线运动状态经过某



运动状态只决定于位置和速度

一点 A （见右图）和沿着一条与 A 点相切的圆弧，且以同样的速率经过 A 点是两个不同的状态，因为前者没有加速度，后者有加速度。应该指出，到底状态是否相同，不是靠定义，而是靠对外界的效应来判定。当物体以同一速度运动到同一位置时，它的动量一定，动能一定，这样，它在传递动量和对外做功时，都具有完全相同的效果，与其有没有加速度，有多大加速度，根本无关，因此，速度和位置是可以唯一确定状态的。反之，如果认为加速度不同，状态就不同，那么加速度相同了，也还没有确定状态，因为还可以有不同的“加加速度”“加加加速度”……以致于我们根本无法表明物体的状态。

再次，描写物体机械运动的动量和动能，只包含速度，

不包含加速度，而包含动量的动量守恒定律和包含动能的机械能守恒定律和能量守恒定律是经过千百万次实践检验的真理，这些守恒定律只包含速度，不包含加速度，也说明运动方程是时间的二阶微分方程。反之，如果运动方程是对时间的三阶微分方程，那么它的一次积分就会出现新的守恒定律，在这种守恒定律中将出现包含加速度的项，这是我们从来没有见到的，我们相信，自然界也不存在这样的守恒定律。

最后，需要指出，由于作用力的具体形式不同而出现不同的效果，如本文前面提到的诸如筛沙子、洗衣服需要变化的作用力等等。不同形式的作用力必然会有不同的效果，甚至同是恒力，大小不同也有不同的效果。一个很小的力作用在物体上，物体几乎不发生什么变化，但力增大时，就可以压扁、压碎或压断物体，难道说也要引入新的基本概念，修改基本定律吗？上述各种现象，在牛顿运动定律的范围内，再加上目前我们对于物质结构、物体相互作用的特性等方面的知识，都可以得到很好的解释，所以牛顿力学没有留下空白，经典运动方程不需要修改。至于为了某些工程上的需要，把加速度对时间的变化率称为“急动度”或是什么别的名称，也未尝不可，但它只不过是一个新名称，就象随时间成正弦或余弦变化的力称为简谐力一样，不会影响经典力学的基础，不需要修改经典力学的基本方程。

三 一道物理习题的启发

想必你也听说过下面这道物理习题：在一个圆桶中盛有一些液体，使圆桶绕其对称的竖直轴旋转，问液面将呈什么形状？

为了回答这个问题，让我们考虑液面某处的一质点，其质量为 Δm ，它受两个力的作用：地球对它的吸引力 G ，其方向铅直向下；周围液体对它的作用力 F ，其方向垂直液面（见图

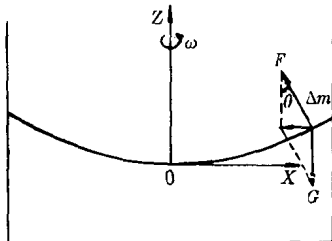


图 3-1 旋转液面的形状

3-1)。整个液面随着桶做圆周运动，每一质点当然也在做圆周运动，上述二力的合力便是促使此质点做圆周运动的向心力。

选取液面最低点为坐标原点，水平方向为 X 轴，铅直方向为 Z 轴， Δm 的坐标用 x, z 表示，另外，设液体旋转的角速度为 ω ，则有

$$F \sin \theta = \Delta m x \omega^2 \quad (1)$$

$$F \cos \theta = \Delta m g \quad (2)$$

(1) 式被 (2) 式除得

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{x \omega^2}{g}$$

从图 3-1 看出，液面曲线在质点 Δm 处的斜率正好也是

$\operatorname{tg} \theta$,

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{dz}{dx} \quad (3)$$

于是有

$$\frac{dz}{dx} = \frac{\omega^2}{g} x$$

积分上式，且取 $x=0$ 处， $z=0$ ，则有

$$z = \frac{1}{2} \cdot \frac{\omega^2}{g} x^2 \quad (4)$$

这正是抛物线方程，它绕 Z 轴旋转一周，便成为一个抛物面，也就是说，旋转的液面是一抛物面。如果把它写成标准形式，

$$x^2 = \frac{2g}{\omega^2} z \quad (5)$$

可以看出焦距为 $\frac{g}{2\omega^2}$ ，所以这种旋转液面的焦距唯一地决定于液体旋转的角速度。

上述结论引起天文学家的极大兴趣，因为天文学家为了观察更遥远的天体，需要建造越来越大的天文望远镜，但建造大口径望远镜是一件非常费时、费工且费钱的难事。比如美国帕洛玛山天文台的那架 200 in (约 5 m) 反射望远镜，光为磨制物镜就花了整整 7 年时间。再大，当然就更困难。而且过大的玻璃镜头容易受气温变化的影响而发生热畸变。苏联高加索山天文台的那台世界最大的反射望远镜，直径为 236 in (约 6 m) 就常因物镜热畸变而使观察工作受到影响。因此，是否建造更大的玻璃透镜的望远镜就成为有一个有争议的问题。

不久前，加拿大一位天文学家提出要建造口径为 100 ft（约 30 m）的大物镜，所用的原理就是上述这道习题的结论——旋转的液体表面是一个抛物面。图 3-2 是这种天文望远镜的示意图，在一个巨大的、边缘稍为翘起的圆盘上倒上水银，当圆盘缓慢旋转时，水银的表面便成为一个抛物面，只要旋转十分平稳，水银表面就是一个非常理想的抛物面，比研磨的玻璃镜头要精确得多。目前已经试制一架口径为 3 ft

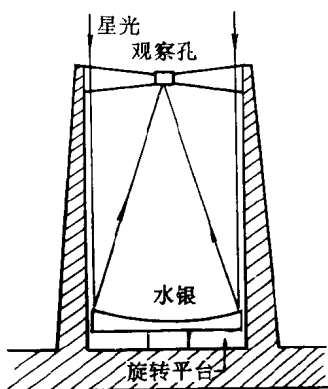


图 3-2 旋转水银面望远镜

（约 0.9 m）的这种类型的反射望远镜，此设想一旦成功，将是望远镜制造史上的重大发展，也是天文学发展中的一个飞跃。当然，这种望远镜也有缺点，它只能观察天顶上的天体，不能做任何角度的旋转。

更有趣的是，这一道习题所展示的物理现象，还启发人们去解释百慕大三角区之谜。大家也许听说过，在过去二三十年中，百慕大群岛周围的海域发生过几十起飞机失踪事件，几分钟前还与基地保持联系的飞机，几分钟后就无影无踪了。飞机失事的原因是什么？是雷雨？是飓风？但不管什么原因，总应该找到飞机和人员的残骸，但在这个地区失踪的飞机，却什么残骸也找不到。所以人们把这个地区称为百慕大魔鬼三角区（因为这块地方呈三角形）。最近有人提出，百慕大三角区之谜是太阳光和海水造成的。由于大西洋的暖流和暗礁，海水在这一地区极易形成环流，旋转海水表