

中学物理思维方法丛书

ZHONGXUEWULISIWEIFANGFACONGSHU

等效

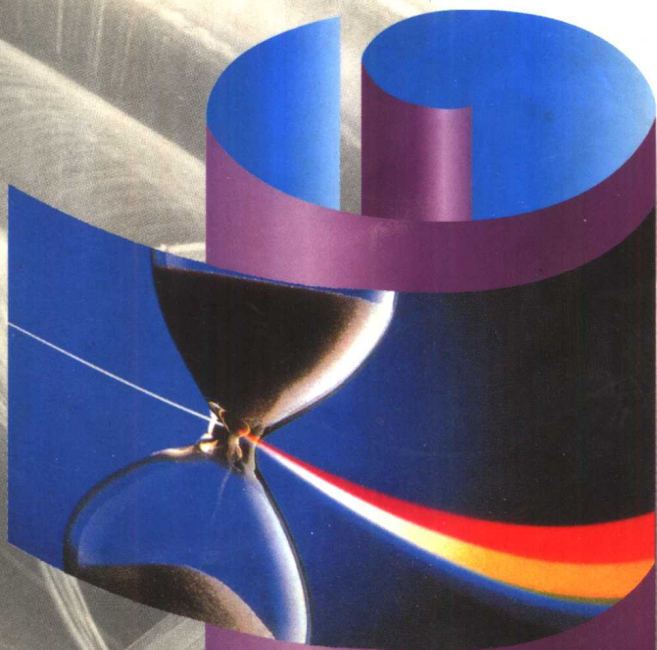
王溢然

DENGXIAO

WANGYIRAN

DAXIANGCHUBANSHE

大象出版社



中 学 物 理 思 维 方 法 丛 书

等 效

王溢然

大象出版社

图书在版编目(CIP)数据

中学物理思维方法丛书:等效/王溢然,束炳如主编;王溢然编著. - 郑州:大象出版社,1999

ISBN 7-5347-1698-5

I. 中… II. ①王… ②束… ③王… III. 物理课-思维方法-中学 IV. G634.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 25886 号

责任编辑 谢 凯	责任校对 郭一凡
大象出版社出版(郑州市农业路 73 号 邮政编码 450002)	
新华书店经销	河南第一新华印刷厂印刷
开本 850 × 1168 1/32	印张 4.75 字数 100 千字
1999 年 9 月第 2 版	1999 年 9 月第 1 次印刷
印数 1—4 000 册	定 价 5.65 元

若发现印、装质量问题,影响阅读,请与承印厂联系调换。

印厂地址 郑州市经五路 12 号

邮政编码 450002

电话 (0371)5957860—351

中学物理思维方法丛书

顾 问 周培源 于光远
序 言 阎金铎
主 编 王溢然 束炳如
编 委 (按姓氏笔划为序)
 王明秋 王溢然 刘宗贤
 束炳如 岳燕宁 谢 凯
本册作者 王溢然
插 图 陆正言

逻辑简单的东西,当然不一定就是物理上真实的东西。但是,物理上真实的东西一定是逻辑上简单的东西,也就是说,它在基础上具有统一性。

——爱因斯坦

序 言

在中学物理教学过程中,学生获取知识的同时,要重视从科学宝库中汲取思维营养,加强科学思维方法的训练。

思维方法是一个很大的范畴,有抽象思维、形象思维、直觉思维等。以抽象思维而言,又有众多的方法,在逻辑学中都有较严格的定义。对于以广大中学生为主的读者群,就思维科学意义上按照严格定义的方式去介绍这众多的思维方法,显然是没有必要的,也是不会收到成效的。由王溢然、束炳如同志主编的这套丛书,不追求思维科学意义上的完整,仅选取了在物理科学中最有影响、中学物理教学中最为常见的这些思维方法(包括研究方法)为对象,在较为宽泛的意义上展开,立意新颖,构思巧妙。全套丛书共 13 册,各册彼此独立,都以某一二类思维方法为主线,在物理学史的恢宏长卷中,撷取若干生动典型的事例,先把读者引入到饶有兴趣的科学氛围中,向读者展示这种思维方法对人类在认识客观规律上的作用。然后,围绕这种思维方法,就其在中学物理教学中的

功能和表现,以及其在具体问题中的应用作了较为深入、全面的开掘,使读者能从物理学史和中学物理教学现实两方面较宽广的视野中,逐步领悟到众多思维方法的真谛。

这套丛书既不同于那些浩繁的物理学史典籍,也有别于那些艰深的科学研究方法论的专著,但却兼容了历史和方法、照顾了普及与提高、联系了中学教学实际、突出了对中学物理教学的指导作用和具体应用。文笔生动、图文并茂,称得上是一套融史料性、科学性、实用性、趣味性于一体的优秀课外读物。无论对广大中学生(包括中等文化程度的读者)还是中学物理教师、教学研究人员以及师范院校物理专业的大学生,都不无裨益。

科学研究是一项艰巨的创造性劳动。任何科学发现和科学理论都是在一定的背景下,经过科学家精心的实验观测、复杂的思维活动后的产物。在攀登道路上充满着坎坷和危机,并不是一帆风顺、一蹴而就的。科学家常常需及时地(有时甚至是痛苦地)调整自己的思维航向,才能顺利抵达成功的彼岸。因此,任何一项科学新发现、一种科学新理论的诞生中,决不会仅是某种单一思维活动的结果。这也就决定了丛书各册在史料的选用上必然存在的某些重复和交叉。这是一个不足之处,但反过来却可转化为使读者的思维层次“多元化”的一个优点。不过,作为整套丛书来说,如果在史料的选用上搭配得更精细一些、思维活动的开掘上更为深刻一些,将会使全书更

臻完美。

我把这套丛书介绍给读者,一方面希望引起广大中学生的兴趣,能从前辈科学家思维活动轨迹中汲取智慧,活化自己的灵感,开发潜在的智能;另一方面希望中学物理教师在此基础上继续开展对学生思维方法训练的研究,致力于提高学生的素质,以适应新时期的需要。

我也真诚地希望这套丛书能成为图书百花园中一朵惹人喜爱的花朵。

阎金铎

1992年10月

引 言

等效变换是物理学中常用的一种思维方法.中学物理中的合力与分力、运动的合成与分解、总电阻和总电容等都是在等效思想支配下引进的概念.等效变换在物理上的最辉煌成果,就是以此为前提创建的相对论.

本书从爱因斯坦等效变换的物理基础开始,进而概括了中学物理中常见的几类等效变换方法,指出了等效变换的运用原则,最后就等效变换在中学物理教学中的功能及其具体应用作了较详细的阐述.

希望广大读者从阅读本书中,能加深对等效变换的认识,并能自觉地运用等效变换方法去分析、研究物理问题.

作 者

1993年夏于姑苏九百居

目 录

序言

引言

一、等效原理	(1)
1. 惯性质量与引力质量	(1)
2. 质量等价实验	(4)
3. 爱因斯坦的理想实验	(8)
4. 等效原理	(11)
二、中学物理中常见的等效变换	(16)
1. 组合等效法	(16)
2. 叠加等效法	(22)
3. 整体等效法	(25)
4. 运动等效法	(30)
5. 过程等效法	(33)
三、运用等效方法的基本原则	(35)
1. 惟一的要求——保持效果相同	(35)
2. 变换的基础——明确物理实质	(44)
3. 检验的依据——物理规律的一致性	(50)
四、等效方法在中学物理中的应用	(56)
1. 等效方法对学习和运用物理知识的指导作用	(56)
2. 等效方法在中学物理解题中的应用	(71)
结束语	(136)
主要参考资料	(137)

一、等效原理

据说,有一次爱因斯坦(A. Einstein, 德国, 1878—1955)遇到了著名喜剧大师卓别林. 爱因斯坦说:“卓别林先生,您真伟大,您演的电影全世界人人都能看懂.”卓别林幽默地回答说:“爱因斯坦先生,您也很伟大,您的相对论全世界几乎没有几个人能够弄懂.”

听了这段精彩的对话后,人们也许会认为,相对论一定是建立在极其深奥复杂的基础上的.这样就猜错了.相对论的基本前提十分浅显.作为广义相对论前提的等效原理,完全是建立在中学生都熟知的一个实验基础上的——倘若不信,读下去就会明白.

1. 惯性质量与引力质量

 飞驰的列车急刹车后要滑行一段路程,站在车中的乘客当车突然启动时会后仰,而当车紧急制动时又会前倾,……这些司空见惯的现象告诉我们:任何物体都有一种保持它原来运动状态的特性.在物理学上,把物体保持原来运动状态的这种特性称为惯性.

惯性是有大小的.惯性的大小就用它保持原来运动状态的“能力的大小”来反映.这种“能力”只与物体的质量相关.质量大的物体,不容易改变原来的运动状态,在同一个力作用下产生的加速度小,表示它的惯性大.因此,我们可以用物体的质量来量度物体惯

性的大小,这样定义的质量称为惯性质量.这也就是牛顿第二定律公式中的质量.所以,物体惯性质量的大小可表示为

$$m_{\text{惯}} = \frac{F}{a}.$$

不论任何物体,如一块铁、一段木料、一杯水等,只要它们在相同外力作用下的加速度相同,就表示这块铁、这段木料、这杯水(包括杯子)的惯性质量相同,与它们的物质组成无关.

一般地说,比较两个物体惯性质量的大小,只需观察它们在相同外力作用下加速度的大小.由牛顿第二定律可知,物体的惯性质量与其加速度成反比,即

$$m_1 : m_2 = a_2 : a_1. (F \text{ 一定})$$

航天技术上曾用这个方法判定一艘沿轨道运行的飞船的质量——发射一艘已知质量(设为 m_0)的飞船,并测出它在一定推力下的加速度(设为 a_0),然后让这艘飞船保持原来的推力去推动未知质量(设为 m)的飞船一起加速运动,再测出两者共同的加速度(设为 a).于是由

$$m_0 : (m_0 + m) = a : a_0,$$

即得未知飞船的质量

$$m = \frac{a_0 - a}{a} m_0.$$



如果问你,会不会测定物体的质量?你一定会不假思索地回答:只需用一架天平,分别放上被称物体和砝码,当天平平衡时,砝码的质量就等于被称物体的质量.

现在进一步问你,为什么可以用砝码的质量表示被称物体的质量呢?假如这架天平的臂很长很长,它的一端在北京,另一端在广州,此时还能用砝码的质量表示被称物体的质量吗?

应该明白,用天平称量物体的质量,包含着一个重要的事实——在同一地方,任何物体自由落体的加速度相同,与物体的组成及轻重无关.如图1中天平两边放上砝码和被称物体后,两者受地球引力作用形成对秤盘的压力分别等于 $m_1 g_1$ 、 $m_2 g_2$ (不计地球自转影响),平衡时,

$$m_1 g_1 l_1 = m_2 g_2 l_2 .$$

当 $g_1 = g_2$ 、 $l_1 = l_2$ 时,得

$$m_1 = m_2 .$$

如果天平两端的重力加速度不同,也就没有上面的简单关系了.

这种测定质量的方法,实际上根据的是引力大小的关系,因此这样用天平称出的质量称为引力质量,用 $m_{引}$ 表示.它也就是牛顿万有引力定律公式中的质量.因此,引力质量可表示为

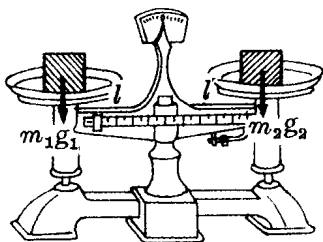


图1 天平的原理

$$m_{引} = \frac{F}{G \frac{M_{引}}{R^2}} ,$$

式中 $M_{引}$ 为地球的引力质量(下面简称为 M), R 为物体离地心的距离.



从上面的讨论可知,惯性质量和引力质量是在不同的实验事实基础上,根据两条完全独立的物理定律定义出来的.它们反映着同一物体的两种不同的属性:惯性质量可以量度物体惯性的大小,引力质量可以量度物体与地球相互作用的大小.那么,对同一物体,用牛顿第二定律计算的质量 $m_{惯}$ 和用天平测出的质量 $m_{引}$ (或用万有引力定律算出的质量)之间有何关系呢?

根据万有引力定律,引力质量分别为 $m_{1引}$ 和 $m_{2引}$ 的两个物体,

在地面上同一处所受引力的大小分别等于

$$F_1 = G \frac{Mm_{1引}}{R^2}, F_2 = G \frac{Mm_{2引}}{R^2}.$$

在引力作用下,两物体产生的加速度设为 a_1, a_2 , 即

$$F_1 = m_{1惯} a_1, F_2 = m_{2惯} a_2.$$

或

$$G \frac{Mm_{1引}}{R^2} = m_{1惯} a_1, G \frac{Mm_{2引}}{R^2} = m_{2惯} a_2.$$

则

$$a_1 = G \frac{M}{R^2} \cdot \frac{m_{1引}}{m_{1惯}}, a_2 = G \frac{M}{R^2} \cdot \frac{m_{2引}}{m_{2惯}}.$$

由伽利略对落体实验的分析证明,同一地方不同物体的加速度都相同,即 $a_1 = a_2 = g$, 所以由上式可得

$$\frac{m_{1引}}{m_{2引}} = \frac{m_{1惯}}{m_{2惯}}.$$

推广到任何其他物体,可写成

$$\frac{m_{1引}}{m_{1惯}} = \frac{m_{2引}}{m_{2惯}} = \frac{m_{3引}}{m_{3惯}} = \dots.$$

由此可见,一切物体自由下落的加速度相同这一事实,意味着“任何物体的引力质量与它们的惯性质量成正比”这样一个深刻的含义.取适当的单位后,就可以认为两者相等,即

$$m_{引} = m_{惯}.$$

2. 质量等价实验



验证惯性质量与引力质量相等的最简单方法,可用中学物理中的“钱毛管”(又称为“牛顿管”)做的落体实验:如图 2 所示,在一根一端封闭的长约 120 厘米、外径

约6厘米的厚壁玻璃管中,装有金属片(小钱)、羽毛或软木块,另一端装有抽气嘴和阀门.打开活栓,管内充满空气时,将玻璃管急速倒转,金属片和羽毛因所受空气阻力不同,下落快慢不同,把管内抽空(低于20毫米汞柱),再急速倒转玻璃管时,就可以看到管内不同物体将同时下落.

因为在地面附近,物体的重力加速度为

$$g = \frac{F_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} = \frac{G \frac{Mm_{\text{引}}}{R^2}}{m_{\text{惯}}} = \frac{GM}{R^2} \cdot \frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}}.$$

如物体的引力质量与惯性质量成正比,可表示为

$$m_{\text{引}} = km_{\text{惯}},$$

代入上式,得重力加速度

$$g = \frac{kGM}{R^2}.$$

在地面上同一地方,它不随物体的材料、轻重而变化,钱毛管实验中不同轻重物体同时下落的事实,正证明了这一点,因而也就是间接证明了 $m_{\text{引}} = km_{\text{惯}}$ (或 $m_{\text{引}} = m_{\text{惯}}$).



牛顿实验 牛顿(I. Newton, 英国, 1642—1727)在提出运动定律和万有引力定律时,必然会碰到两种质量的意义问题.为此,他亲自做了实验——用不同材料做成单摆的摆锤,比较它们的振动周期,从而确定这两种质量的关系.

从振动理论得知,单摆做小振幅振动时,振动周期可表示为

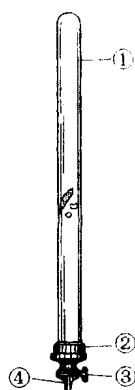


图 2 钱毛管

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \cdot \sqrt{\frac{m_{\text{惯}}}{m_{\text{引}}}}^* .$$

如果用不同材料做的摆锤,在摆长 l 相同时,测得的振动周期都相同,就表示 $\frac{m_{\text{惯}}}{m_{\text{引}}}$ 为一常数.

牛顿用空心容器作摆锤,里面放进质量精确相等的各种不同物质,如金、银、铅、玻璃、砂粒、食盐、木料、水和麦子等.他写道:“我做了两个一样的木盒,一个装满木材,另一个在摆动中心处挂上等量的金(尽可能准确).两个木盒用 11 英尺(1 英尺 = 30.48 厘米——注)长的同样的细线挂起来成为一对摆,它们的重量和形状完全一样,并同样地受到空气阻力.把两者挨着放,我观察到,它们长时间地以同一频率一起来回摆动.因此,金里的物质的量与木料里的物质的量之比同作用在全部金上的力与作用在全部木料上的力之比是相同的.”

牛顿的实验结果用数学式表示可写成

$$\frac{m_{\text{惯(金)}}}{m_{\text{惯(木)}}} = \frac{m_{\text{引(金)}}}{m_{\text{引(木)}}},$$

或

$$\frac{m_{\text{惯(金)}}}{m_{\text{引(金)}}} = \frac{m_{\text{惯(木)}}}{m_{\text{引(木)}}}.$$

表明两种质量之比是常数.当选用适当单位时,就可以使得 $m_{\text{惯}} = m_{\text{引}}$. 所以,牛顿在创建经典力学的理论体系时,就不再区分引力

* 单摆做小振幅振动时的运动微分方程为

$$m_{\text{惯}} l \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -G \frac{M m_{\text{引}}}{R^2} \theta,$$

式中 l 为摆长, θ 为摆角. 这个方程与中学物理中小球做简谐运动时的运动方程 $ma = -kx$ 相当.

质量和惯性质量了。

厄缶实验

无论是落体实验还是牛顿的单摆实验,测量的精确度都不高.据牛顿的记载,他的实验精度为千分之一*。后来,人们对牛顿的单摆方法作了改进,实验精度有了很大提高。

验证两种质量等价的更精确的实验,是匈牙利物理学家厄缶(Eötvös)在 1889 年用扭秤方法完成的。

厄缶实验的设计思想可用图 3 说明。我们知道,悬挂在地面上的物体,平衡时它受到三个力作用:(1)地球引力(重力) F_g , 指向地球中心;(2)悬线中张力 F_T , 方向沿着悬线;(3)因地球自转而受到的“惯性离心力” F_c , 方向垂直地球的自转轴向外**。这里, F_g 正比于物体的引力质量, F_c 正比于物体的惯性质量,它们的大小分别为

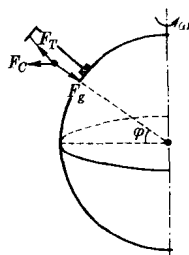


图 3 地面上物体的受力

$$F_g = m_{\text{引}} g,$$

$$F_c = m_{\text{惯}} \omega^2 R \cos \varphi. (\varphi \text{ 为所在处的纬度})$$

厄缶据此设计了一个扭秤,改用静态方法直接比较两个物体的引力质量和惯性质量.厄缶实验的原理图如图 4 所示。

用一根铂铱合金丝悬挂一根长 40 厘米的横杆,两端对称地固

* 如果我们引入参数 $\eta(A, B)$ 表示 A, B 两种质量的差异, 定义为

$$\eta(A, B) = \left[\left(\frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} \right)_A - \left(\frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} \right)_B \right] / \frac{1}{2} \left[\left(\frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} \right)_A + \left(\frac{m_{\text{引}}}{m_{\text{惯}}} \right)_B \right],$$

则对牛顿的实验而言, $\eta(A, B) \leq 1 \times 10^{-3}$ 。

** 这是在随地球一起转动的参照系内观察到的结果. 其中, 与 F_c 等值反向作用在物体上的力, 就是使物体随地球一起自转的向心力 $F_n = m\omega^2 R \cos \varphi$ 。