

## 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 朱 然

科学的基本活动  
就是探索和制定模型。

——阿雷  
(法国科学方法论学者)

# 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

模型是一个广义的概念.有一类称为物质模型,它采用缩小与放大几何尺寸的办法,是制作得跟原型相似的一种实体模型(如飞机模型、大桥模型等),这是以研究原型的功能、结构性能为目的的;另一类称为理想模型,它是根据人们的抽象思维和想象力,采用理想化和纯粹化的办法,所创造的能再现原型的本质联系和内在特性的一种简化模型.后者是在物理学研究中常用的模型.物理学中的规律就是通过对理想化的物理模型的研究得出来的.本书所指的就是这一类模型.

本书中选取物理学中若干著名的、也是中学生较为熟悉和易于理解的物理模型,通过剖析它们在科学认识中的作用及它们的建立和发展、演化过程,展示物理模型所包含的丰富内涵及其重要的科学地位.同时,结合物理模型与中学物理教学实际的联系,阐述了物理模型的教学功能和在分析、解决具体物理问题时的应用.

希望广大读者能从本书中获得对物理模型的较为全面的认识,并能自觉地运用物理模型指导物理学习,提高研究和解决物理问题的能力.更希望能在开拓未知世界的过程中,通过高度抽象的创造性思维,提出新的模型,揭示未知世界的规律,认识未知世界的真相.

作 者

1992年春于苏州烟雾楼

# 目 录

序言

引言

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 一、几种典型的物理模型              | ( 1 ) |
| 1.天体运行模型                 | ( 1 ) |
| 2.理想气体模型                 | (10)  |
| 3.金属导电模型                 | (15)  |
| 4.原子结构模型                 | (19)  |
| 二、物理模型在科学认识中的作用          | (27)  |
| 1.简化和纯化事物原型              | (27)  |
| 2.解释事物或现象原因              | (28)  |
| 3.建立或证明物理理论              | (33)  |
| 4.指出方向和作出预见              | (39)  |
| 三、物理模型的建立和发展             | (41)  |
| 1.物理模型需要以客观实在为原型         | (41)  |
| 2.经验材料、实验事实和背景理论是物理模型的基础 | (42)  |
| 3.抽象、假设和类比是建立物理模型的基本方法   | (48)  |
| 4.物理模型需在实践中不断发展与进化       | (56)  |
| 四、中学物理教学中常见的四类模型         | (71)  |
| 1.对象模型                   | (71)  |

|                              |              |
|------------------------------|--------------|
| 2. 条件模型 .....                | (76)         |
| 3. 过程模型 .....                | (85)         |
| 4. 数学模型 .....                | (89)         |
| <b>五、物理模型在中学物理中的应用 .....</b> | <b>(98)</b>  |
| 1. 物理模型对学习和应用物理知识的指导作用 ..... | (98)         |
| 2. 物理模型在中学物理解题中的应用 .....     | (104)        |
| <b>结束语 .....</b>             | <b>(162)</b> |
| <b>主要参考资料 .....</b>          | <b>(163)</b> |



# 一、几种典型的物理模型

模型是理论知识的一种初级形式.做理论研究时,通常都要从“造模型”入手,利用抽象、理想化、简化和类比等方法,把反映研究对象的本质特征抽象出来,构成一个概念或实物的体系,即形成模型.理论的研究实际上就是对模型的研究.综观物理学发展的历史,可以说就是不断提出物理模型,并且是新的模型不断完善旧模型或者代替旧模型的历史.

下面,我们从物理学发展史上的几个片断,初步了解和认识几种典型的物理模型.

## 1. 天体运行模型

清晨,太阳从地平线上冉冉升起,傍晚,太阳落下,明月高挂,天空布满群星.宇宙间的日月星辰究竟是怎样运动的?人们很早就对这个问题发生了兴趣,并尝试着作出种种安排.历史上流传下来对人们影响最大的先后有过两种模型.

### (1) 托勒密的九重天模型

**柏拉图的任务** 最早尝试说明天体运动规律的,相传是公元前 4 世纪古希腊的柏拉图(Plato, 前 417—前 347).他在一篇讲话中指出:“天上的星体代表着永恒的、神圣的、不变的存在,因此它们肯定沿最完美的轨道以最完善的方式运动,最

完善的运动是匀速圆周运动,因此它们一定是围绕着地球做匀速圆周运动的。”

但是,实际观察到的少数天体,它们的轨道看起来并不是圆周运动,而且也不是匀速的,甚至有时是逆行的.图1就是观察到的



图1 火星相对于恒星的位置

一次火星在天球的背景上运行的逆行情况,从9月1日到11月1日记录的位置可以看出,这段时间内火星向原来的反方向运动.

对此,柏拉图认为,这些不规则运动必定是一些完整的匀速圆周运动按某种方式组合的结果.于是,他向他的学生提出了如下的任务:如何通过圆周运动的组合,说明观察到的太阳、月亮以及行星的运动.

托勒密的回答

在柏拉图以后近两千年的天文学的发展,基本上是按照这个指导思想进行的,而把他这样的思想发展到顶峰的是古希腊亚历山大的数学家、天文学家托勒密(C. Ptolemaeus, 约90—168),大约在公元150年,他完成了《伟大论》一书,集古代天文学之大成,提出了历史上著名的“托勒密地心说”,排列了日月行星距离地球的顺序,创造了所谓宇宙“九重天模型”,他认为宇宙由九个运动着的同心晶莹球壳组成,最低的一重天是月亮天,其次是水星天和金星天,太阳居于第四重天球上,从

第五重天到第七重天依次是火星天、木星天和土星天,第八重天是恒星天,全部恒星像宝石一样镶在这层天界上,在恒星天之上,还有一重最高天,即“原动天”,那里是神灵居住的天堂.各重天都绕地球转动,地球坐落在宇宙中心,远离诸天,岿然不动(图 2).

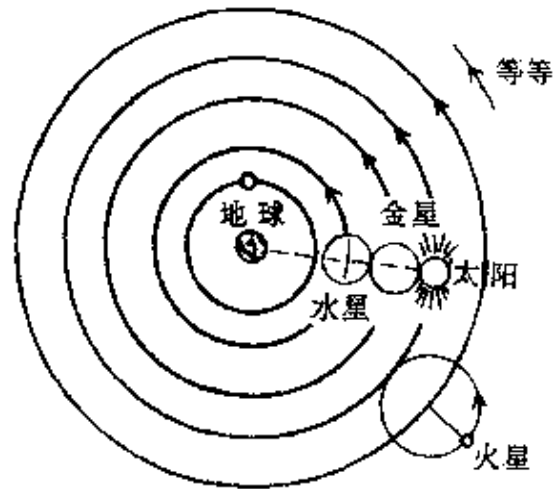


图 2 托勒密的九重天模型

为了回答柏拉图提出的问题,托勒密设想行星在天球上运动时,是在较小的圆周上做匀速运动,这个圆周叫本轮,本轮的中心在围绕地球的大圆上做匀速运动,这个大圆叫均轮,如图 3 所示\*。

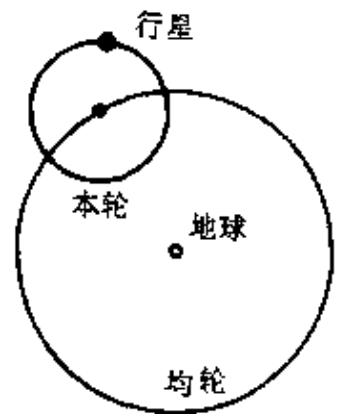


图 3 均轮与本轮

当行星绕本轮转到离地球最近的位置如图 4 中 A 时,相对于均轮上的运动,行星是向后运动的.如果行星在本轮上的速度比本轮中心在均轮上的速度大,在地球上看到的行星运动就是逆行的了(图 4).

接着,托勒密又对当时人们看到的太阳周年运动夏半年慢些、冬半年快些的现象,即行星在轨道上运动速度的不均匀性作了解释.托勒密设想行星沿均轮的圆周轨道中心不在地球上,而在地球外某一点 C,如图 5 所示.行星在圆周上运

\* “本轮—均轮”运动模型是柏加阿波罗尼阿斯(Apollonius of Perga,约前 247—约前 205)首先提出的。

动是均匀的,但在地球上看来就不是均匀的了.这时行星的轨道称为偏心轮.

为了使理论和实际的观测符合得更好,后来托勒密对他的模型又作了修正:行星的运动在圆心  $C$  看来也不是均匀的,而在  $C'$  点看来才是均匀的. $C'$  点和地球相对于圆心  $C$  是对称的,如图 6 所示.这样的圆形轨道叫偏心等距轮.

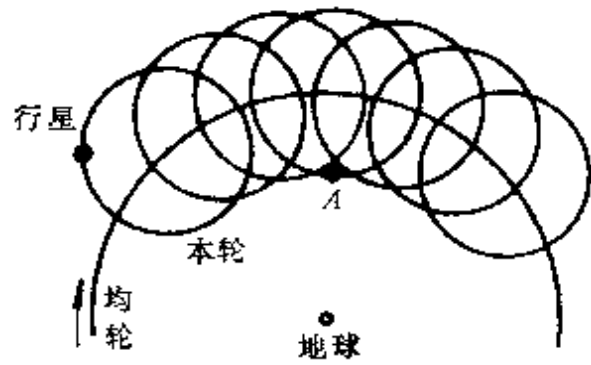


图 4 对逆行的解释

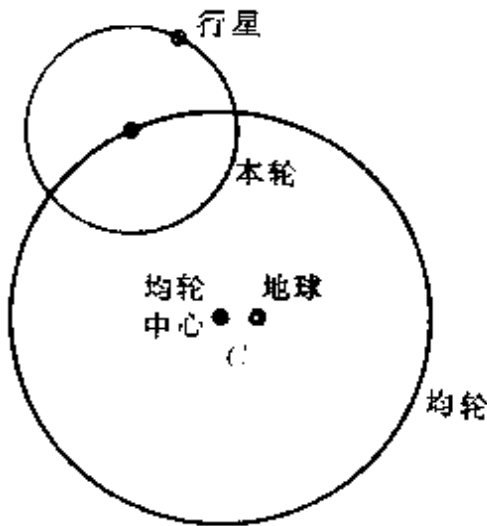


图 5 偏心轮

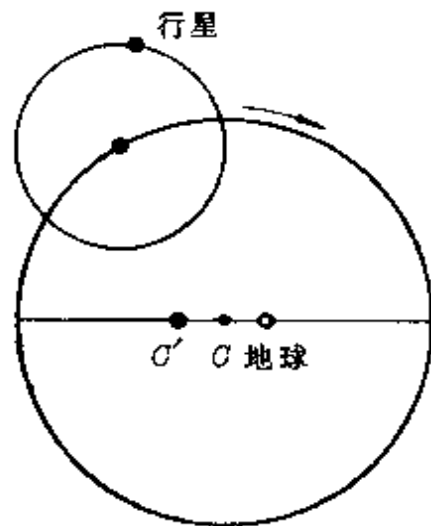


图 6 偏心等距轮

托勒密根据他的运动模型,经过严密的数学计算,巧妙地选取各个本轮和均轮大小的比例、平面的交角及运动的速度,可以预言行星的位置、日食和月食的发生,而且在相当长时期内,他的预言和实测的位置相差仅在  $2^\circ$  以内,这在当时已是相当好的结果了.由于托勒密的模型也迎合了人们的心愿,即人类是生活在一个稳定不动的坚实的地球上而处于宇宙的中心,因而使世人很容易接受.

托勒密自己也傲慢地猛烈抨击公元前 270 年古希腊阿里斯塔恰斯 (Aristarchus of Samos, 约前 315—前 230) 最早提出的“地动说”：“有些哲学家曾提出一种他们认为很可信服的体系……认为天穹不动, 而是地球在自西向东自转……这是滑稽可笑的。”\*

### 教皇的 花招

值得一提的是托勒密虽然在他的模型里也构造了供奉神灵栖息的最高天, 但作为科学理论提出来时与宗教并无共同之处, 因此开始也为教会所不容. 天体的运行竟然可由凡夫俗子来“预报”, 这是高傲的教会无法容忍的大逆不道! 所以在很长一段时期内曾被打入禁书之列. 直到 1231 年, 当时的一个颇有心计的教皇格里高利九世巧妙地改换了过去一味高压的大棒政策, 让神学家们对托勒密的著作进行改头换面的改造, 加进圣经的内容, 使它与教义并行不悖, 从此使托勒密学说变成了束缚人类进步思想的桎梏, 直到 1546 年哥白尼的太阳系模型向它提出了挑战.

## (2) 哥白尼的太阳系模型

哥白尼 (N. Copernicus, 1473—1543) 是波兰杰出的天文学家和数学家, 早年他仔细地研究了托勒密的地心模型, 认为托勒密的偏心等距轮违背了柏拉图的匀速圆周运动的原则. 于是, 从 1506 年起, 他开始探索天体运动的更合理的安排. 1543 年, 哥白尼在生命弥留之际, 见到了他的终生研究结晶——《天体运行论》一书. 在书中他完整地提出了日心体系, 即太阳系模型.

\* 阿里斯塔恰斯认为: 地球一方面每天自西向东自转一圈, 另一方面又每年绕太阳公转一圈; 其它行星也都绕太阳公转. 这种先进的思想远远超过了当时的生产水平, 根本无法作出论证, 所以被湮灭了.

## 太阳系模型

哥白尼是从驳斥托勒密的理论开始新的思考的。哥白尼认为：托勒密的那些圆运动之间的互相组合完全是任意的，它们不是原先假想的匀速运动。哥白尼尤其反对托勒密理论中的某些个别的假定（如偏心），它们破坏了所希望的运动的匀速性质。他写道：

“了解到这些不足之处以后，我常常想，能不能找到某种更加合理的组合圆的方法，由它可以把那些显而易见的不均衡现象推导出来；而且在这种圆组合中，全部运动都是围绕一个确定的中心的匀速运动……”

哥白尼从古代一些哲学家曾假定“地球是动的”见解中受到启发，也开始考虑地球的运动。他说：

“……虽然这种看法似乎很荒唐，但前人既可随意想象圆运动来解释星空现象，那么我更可以尝试一下，是否假定地球有某种运动能比假定天球旋转得更好的解释。”

“于是，从地球运动的假定出发，经过长期的、反复的观测，我终于发现，如果其它行星的运动同地球运动联系起来考虑，并按每一行星的轨道比例来作计算，那么，不仅会得出各种观测现象，而且一切星体轨道天球之大小与顺序以及天穹本身，就全部有机地联系在一起了，以至不能变动任何一部分而不在众星和宇宙中引起混乱。”

在哥白尼的太阳系模型中，太阳是宇宙的中心，所有天体（包括地球及当时已知的五颗行星）都绕太阳运转。它们在宇宙中的位置按照离太阳的距离从近到远的排列依次是水星、金星、地球、火星、木星、土星，在土星外遥远的天球上是恒星，如图7所示。

哥白尼用非常美妙的语言写下一段文字，那简直是一首散文诗，在非人文学科的科学论文中是罕见的。他这样写道：

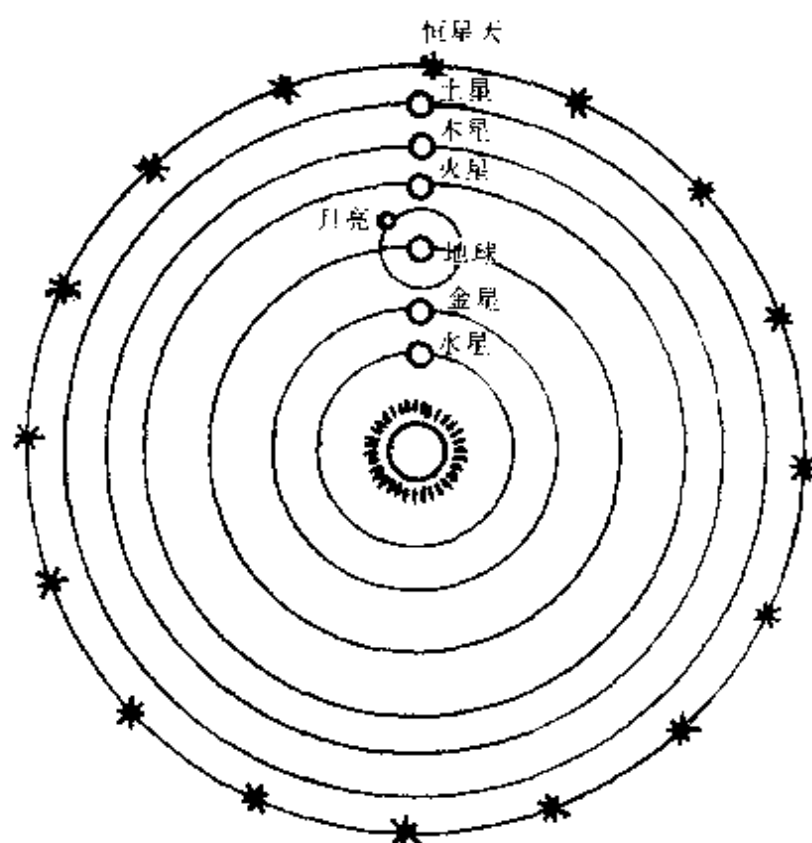


图 7 哥白尼模型

“中央就是太阳.在这华美的殿堂里,为了能同时照亮一切,我们还能把这个发光体放到更好的位置上吗?太阳堪称为宇宙之灯,宇宙之头脑,宇宙之主宰……于是,太阳坐在王位上统率着围绕它旋转的行星家族,地球有一个侍从——月亮.正如亚里士多德在《博物志》中所说,当地球从太阳那里受孕和怀胎,以便每年生育一次的时候,月亮是地球最亲的亲人.”

哥白尼认为:“……这样,我们就发现在这样有秩序的安排下,宇宙里有一种奇妙的对称性,轨道的大小与运动都有一定的谐和关系.这样的情况是用别的方法达不到的.”

哥白尼根据观测资料,运用他的模型,不仅算出了各个行星绕太阳运行的周期,而且在历史上第一次算出了各个行星到太阳的距离,从而第一次给出了宇宙的大小尺寸.

哥白尼的计算结果和现代的数据很接近,如下表所示:

各行星绕日运行的周期和离日距离

(以地日距离为单位)

| 行星 | 绕太阳运行的周期 |          | 到太阳的距离 |      |
|----|----------|----------|--------|------|
|    | 哥白尼值     | 现代值      | 哥白尼值   | 现代值  |
| 土星 | 29.5 年   | 29.46 年  | 9.2    | 9.54 |
| 木星 | 11.8 年   | 11.86 年  | 5.2    | 5.20 |
| 火星 | 687 天    | 686.98 天 | 1.52   | 1.52 |
| 地球 | 365 天    | 365 天    | 1.00   | 1.00 |
| 金星 | 224 天    | 224.70 天 | 0.72   | 0.72 |
| 水星 | 88 天     | 87.9 天   | 0.38   | 0.39 |

同时,哥白尼认为:由于地球到太阳的距离远远小于地球到恒星的距离,所以在地球上看起来恒星像镶嵌在天球上静止不动一样.在地球上看到太阳从东方升起、西方落下的视运动,是由于地球在绕太阳公转的同时也绕着自己的轴线自西向东自转的结果;在地球上看到行星的逆行,并不是行星本身运动引起的,也是由于地球在运动着的缘故.

哥白尼用他的太阳系模型,很成功地解释了天体的运动,并且也能编制出行星运行表.在预言行星的位置上,差不多与托勒密的结果同样精确,即也与实测位置相差 $2^{\circ}$ .

**两种模型  
的比较**

哥白尼太阳系模型与托勒密九重天模型,都是在柏拉图的天体运动的思想支配下,把匀速圆周运动看做最完美最谐和的运动,都主张采用均轮一本轮的组合说明宇宙的结构,但哥白尼模型具有明显的优点:

(1)哥白尼模型有着内在的简单性

采用托勒密模型时,为了说明天体的运动特征,天文学家用了80多个圆解释太阳和当时发现的五个行星(水、金、火、土、木)的



运动,一连串的宝塔谁都会感到头晕目眩!据说,连卡提斯拉国王阿尔劳斯十世也曾发出不满的牢骚:“假如上帝当初创世时向我请教的话,系统就不会那么复杂了。”哥白尼认为,托勒密模型“不是忽略了一些必不可少的细节,就是塞进了毫不相干的东西”。而在哥白尼太阳系模型里,已可以减少到34个圆,因而提供了用圆周和匀速运动解释天体运动的最简单的方案,使得天文学上的测算也更加容易。

## (2)哥白尼模型有着内在的谐和性

哥白尼把每个行星轨道的大小、运动的速率和排列顺序关联起来,形成一个紧密有序的整体,并且把这个中心给予了太阳——最大、最亮的光和热的使者,使宇宙显示出一种令人赞叹的对称性。

虽然哥白尼的太阳系模型如此简明、和谐,也比较精确,但在当时相信哥白尼的人还是非常少的,究其原因,从科学上说,除了有些现象它还不能圆满地解释外,更重要的是,由于它只给出了众星的运动情况的描述,而运动的描述总是相对的,以什么为参照系都是可以的,哥白尼以太阳为参照系和托勒密以地球为参照系,实际上并无正确和错误之分,而只有方便或简单与否之别。正如英国杰出的哲学家培根(F. Bacon, 1561—1626)\*在17世纪初所说的那样:“显而易见,一个认为地球是运动的,一个坚持旧的结构,两者几乎同样和无差别地为现象所支持。”这就是说,在描述行星的运动上,哥白尼并没有能完全战胜托勒密。相反,由于哥白尼的模型与教义相悖,一度曾被斥之为异端邪说。

---

\* 弗·培根提出了名言“知识就是力量”。

### 恩格斯 的评价

尽管如此,哥白尼这种大胆地并且相当有根据地(特别是有数学的论证)对受教会支持的托勒密体系提出挑战,在科学史上是立下了不朽的功绩的.恩格斯评价道:“以他的理论来向自然事物方面的教会权威挑战,从此自然科学便开始从神学中解放出来.”哥白尼极大地推动了欧洲文艺复兴时代思想解放的浪潮.从科学上说,哥白尼的太阳系模型为研究行星运动开辟了一条新的途径.这条途径使得人们不仅有可能比较详细地进一步研究行星运动的“运动学”问题,而且还能比较顺利地研究行星运动的“动力学”问题——寻找支配行星运动的原因.正是哥白尼学说直接启发了德国的开普勒(J. Kepler, 1571—1630)发现行星运动的真实规律,进而为牛顿(I. Newton, 1642—1727)引力理论的完成奠定了基础.

## 2. 理想气体模型

### 大气压 的存在

理想气体模型是在对气体性质的研究中提出来的.而对气体性质的研究,实际上是长期以来关于“是否存在真空”这场争论的继续.

古希腊伟大的思想家亚里士多德(Aristotle, 前 384—前 322)认为真空是不可能存在的,即所说“自然界憎恶真空”.直到 17 世纪中叶,人们仍以此来解释水泵抽水等有关现象.把水泵的活塞提起时,如果水不跟着上升的话,就会形成真空.而自然界是厌恶真空的,因此水就被抽上来了.伽利略(G. Galilei, 意大利, 1564—1642)也认为自然界憎恶真空,只是他认为这种憎恶有一个限度.

1643 年,伽利略的学生托里拆利(E. Torricelli, 意大利, 1608—1647)为了完成老师的委托,研究抽水机对抽水高度的限制,做了著名的托里拆利实验,提出了气压的概念,否定了从亚里士多德流

传下来已近两千年的“自然界憎恶真空”的错误观点,为定量研究气体性质打开了大门.

1646年法国的帕斯卡(B. Pascal, 1623—1662)重复了托里拆利实验,再次证实了空气有重量(现改称重力).他把真空和大气压问题结合起来,进一步认识了大气压的产生.

与此同时,德国马德堡市市长格里凯(O. V. Guericke, 1602—1686)也对真空问题具有极大兴趣,于1654年做了在科学史上传为美谈的“马德堡半球”实验,令人叹为观止地证实了大气压的存在(图8).

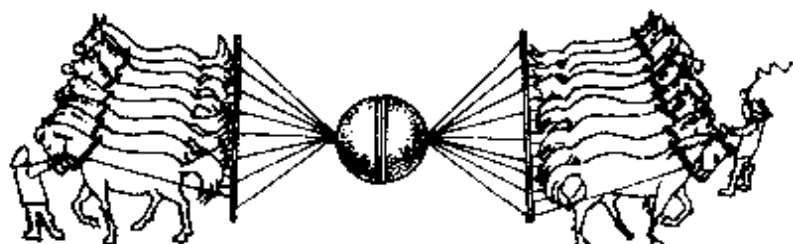


图8 马德堡半球实验

三条实验定律

马德堡半球实验和格里凯神奇的抽气泵激起了英国物理学家玻意耳(R. Boyle, 1627—1691)浓厚的兴趣,他把从家里得到的大笔钱财用于购买贵重的科学仪器,并鼓励他的助手去设计更好的抽气机.后来他利用年轻的助手胡克(R. Hooke, 英国, 1635—1703)发明的抽气机,做了一系列关于空气压力的实验,于1662年证实了对气体性质的下述假设:

压强  $\times$  体积 = 恒量.

这是历史上除运动现象之外的第一个被发现的定量的自然规律.\*

\* 据玻意耳说,这个假设是汤雷(R. Townley)提出来的,他自己的工作是对这个假设给出实验验证.

1676年,杰出的法国物理学家马略特(E. Mariotte, 1620—1684)也独立地从实验中得到相同的结论.他比玻意耳更明确地意识到这一发现所揭示的是一个重要定律.后人称上述关系为玻意耳定律(即  $p - V$  定律).

在发现气体的  $p - V$  定律后 100 多年,温标和测温方法已逐步完善.1802年,法国化学家和物理学家盖·吕萨克(Gay Lussac, 1778—1850)首先仔细地测定了不同气体在压强不变时的热膨胀,得到的热膨胀系数均为 0.00375 或  $1/266.6^*$ ,从而建立了关于空气的定压热膨胀定律,称为盖·吕萨克定律(即  $V - T$  定律).后来又发现,早在 1787年,法国人查理(Charles, 1746—1823)已经先提出了气体的压强随温度升高而增大的定律,后来被称为查理定律(即  $p - T$  定律)\*\*.

这三条定律都是从实验中总结出来的,统称为气体的三条实验定律.

在 17 世纪和 18 世纪是很难达到“高压”和“低温”的.当时对许多不同气体做的实验,都很好符合这三条实验定律.譬如,在 1 大气压下,空气、氢气、一氧化碳、二氧化碳四种气体的体积都是 1 升,它们的  $pV$  值都为 1 大气压·升.当压强增为 2 大气压时,其体积虽然并不恰好为  $\frac{1}{2}$  升,但其  $pV$  值还是很接近于 1 大气压·升,如下页表所示:

\* 后来进一步确定为  $1/273$ .故盖·吕萨克定律表为  $p_t = p_0 \left( 1 + \frac{t}{273} \right)$ ,引入绝对温

标后可表为  $\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$ .

\*\* 查理也发现了气体膨胀定律,但当时并未发表.盖·吕萨克在发表自己发现气体膨胀定律的论文中提到了查理的工作.

不同气体在 2 大气压时的  $pV$  值

|      |                |         |         |                 |
|------|----------------|---------|---------|-----------------|
| 气体   | H <sub>2</sub> | 空气      | CO      | CO <sub>2</sub> |
| $pV$ | 1.00026        | 0.99977 | 0.99974 | 0.99720         |

于是,人们普遍认为一切实际气体都能遵守这三条气体实验定律.但后来人们逐渐发现实际情况并非如此.

偏差与  
原因

1852 年,法国科学家雷诺首先发现,玻意耳定律在压强很高时有偏差.如下表所示.

由下表中数据可知,压强增大时,玻意耳定律与实验结果的偏差越来越大.当压强增至 1000 大气压时,误差达到 72%.

氢气在 0°C 时不同压强下的  $pV$  值

| 压强 $p$ (大气压) | 体积 $V$ (升) | $pV$ 值(大气压·升) |
|--------------|------------|---------------|
| 1            | 1          | 1             |
| 100          | 0.01069    | 1.0690        |
| 200          | 0.00569    | 1.1380        |
| 500          | 0.002713   | 1.3565        |
| 1000         | 0.00172    | 1.7200        |

为什么在高压下实际气体不遵守玻意耳定律呢? 因为实际气体的体积应该包括两部分,一部分是分子本身的体积,另一部分是分子间空隙的体积.可以被压缩的仅是分子间空隙的体积,分子本身的体积不可压缩.当压强不太高时,分子本身的体积占总体积的比例很小.假设分子为球形,半径的数量级取为  $10^{-10}$  米,则一个分子的体积

$$V_1 = \frac{1}{6} \pi D^3 = \frac{1}{6} \pi (2 \times 10^{-10})^3 \text{ 米}^3 \approx 4 \times 10^{-24} \text{ 厘米}^3.$$

1 摩分子的总体积为

$$V_0 = N_0 V_1 = 6.023 \times 10^{23} \times 4 \times 10^{-24} \text{ 厘米}^3 \\ \approx 2.4 \text{ 厘米}^3.$$

因为在标准状况下 1 摩气体占有的体积为 22.4 升 = 22400 厘米<sup>3</sup>, 其中分子本身的体积仅占万分之一, 此时分子间的距离也较大, 所以可忽略分子本身体积和分子间相互作用力, 认为气体的体积完全可以压缩. 这样就能符合玻意耳定律.

但当气体的压强足够大时, 如压强增为 1000 大气压, 这时 1 摩气体的体积按玻意耳定律的计算被压缩到 22.4 厘米<sup>3</sup> 的一个小空间内, 其中分子本身的体积将占其  $\frac{1}{10}$ , 就不能再被忽略了. 同时, 分子间的距离也较近, 相互作用力也有了明显的影响, 所以客观表现就不遵守玻意耳定律了.

而当温度很低时, 许多气体都被液化, 气体已不复存在, 自然谈不上遵守气体定律了.

理想气体模型

气体的三条实验定律毕竟在一定程度上反映了气体的共同特性, 揭示了各种气体宏观状态之间的内在规律性, 而且这三条实验定律在解决通常情况下有关气体的一些实际问题时确也起了十分重要的作用. 因此, 为了能概括各种气体的共同特性和研究上的方便, 就有必要建立一个关于气体的简化模型, 规定它在任何温度和任何压强下都能遵守气体的实验定律. 实际气体的这种理想化的模型称为理想气体.

上面指的是对理想气体的宏观要求. 从微观上说, 就是指忽略分子体积和分子间相互作用力, 把分子看成是弹性质点的气体. 1856 年, 德国著名物理学家克里尼希 (A. K. Krönig, 1822—1879) 把分子看成弹性小球, 它们除碰撞以外, 没有相互作用力, 并且做匀

速直线运动. 克里尼希利用这样的模型, 计算了气体的压强, 得出了与玻意耳定律和盖·吕萨克定律等价的压强公式, 以后又经过克劳修斯(R. J. E. Clausius, 德国, 1822—1888)的发展, 理想气体模型的微观结构被正式确定下来.

理想气体模型有着很重要的实际意义, 不仅可根据其微观结构圆满地解释气体实验定律, 而且在计算精度要求不很高时, 许多实际气体在相当宽的温度和压强范围内都具有理想气体的行为特点——如空气、氧、氮、二氧化碳等气体在室温(300K左右)和几十大气压下仍可视为理想气体——给处理和研究气体问题带来极大的方便.

### 3. 金属导电模型

**导电理论的依据** 法拉第(M. Faraday, 英国, 1791—1867)于1831年发现电磁感应现象及其规律, 以后, 麦克斯韦(J. C. Maxwell, 英国, 1831—1879)在法拉第基础上最终完成了电磁场理论, 并取得了辉煌的成果, 已开创了电的时代. 但在相当长时期内, 人们对电究竟是什么? 物体是如何导电的? 像这样一些目前中学生都已知道的问题并不是很清楚的. 19世纪末叶, 物理学界中的一位大师开尔文勋爵(L. Kelvin)\* 仍旧写道:“电是一种连续的、均匀的液体.”直到1897年英国物理学家汤姆生(J. J. Thomson, 1856—1940)通过对阴极射线的研究, 测出了阴极射线的电荷和质量的比值 $\left(\frac{e}{m}\right)$ , 并通过跟电解过程中测定的氢离子

\* 原名威廉·汤姆生(William Thomson, 1824—1907), 是英国著名物理学家. 他提出建立绝对温标, 由于装设大西洋海底电缆成功, 于1892年被封为开尔文勋爵.

的相应数值作比较后,汤姆生断言:阴极射线是由质量比离子小得多、带有负电的粒子所组成,以后就称这些带负电的粒子为电子。这是人类所认识的第一个基本粒子,电子的发现为导电模型的建立提供了重要的依据,推动了导电理论的发展。

**德  
鲁  
德  
类  
比**

1900年,德鲁德(P. K. L. Drude, 德国, 1863—1906)根据阿伏加德罗常数对金属的自由电子浓度作了估算:一段质量为  $m$  千克、摩尔质量为  $M$  千克/摩的金属导线中包含的原子数为

$$N = \frac{m}{M} N_0,$$

每单位体积中的金属原子数(原子密度)为

$$n = \frac{N}{V} = \frac{\frac{m}{M} N_0}{\frac{m}{\rho}} = \frac{\rho}{M} N_0.$$

式中  $N_0 = 6.023 \times 10^{23} \text{摩}^{-1}$ , 为阿伏加德罗常数,  $\rho$  为该金属的密度。

以铜为例,  $M = 64 \times 10^{-3}$  千克/摩,  $\rho = 8.9 \times 10^3$  千克/米<sup>3</sup>, 假定每个铜原子能提供一个自由电子, 得铜导线中自由电子的密度为

$$\begin{aligned} n &= \frac{\rho}{M} N_0 = \frac{8.9 \times 10^3}{64 \times 10^{-3}} \times 6.023 \times 10^{23} \text{千克/米}^3 \\ &\approx 8.4 \times 10^{28} \text{千克/米}^3. \end{aligned}$$

这个数值与标准状况下理想气体的分子密度( $2.7 \times 10^{25}$  千克/米<sup>3</sup>)相近, 德鲁德就以此为依据, 通过类比首次大胆地提出了金属导电的“自由电子气模型”。

德鲁德认为:金属依靠自由电子导电, 这些自由电子像气体一



样做着无规则的热运动,同样遵循玻尔兹曼统计分布<sup>\*</sup>.它们的热运动速度同样可由公式  $\bar{v}_{\text{热}} = \sqrt{\frac{3KT}{m}}$  得出,在常温 ( $T = 300\text{K}$ ) 时金属内自由电子热运动平均速率约为

$$\bar{v}_{\text{热}} = \sqrt{\frac{3KT}{m}} = \sqrt{\frac{3 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \text{ 米/秒}^2}{9.1 \times 10^{-31}}}$$

$$\approx 1.2 \times 10^5 \text{ 米/秒.}$$

当金属导线两端不加电压时,自由电子各向运动的机会均等,对于导体中任一截面来说,任何时刻从两侧穿过它的自由电荷都相等(图 9),它们的作用互相抵消,不会形成电流.加上电压后,金

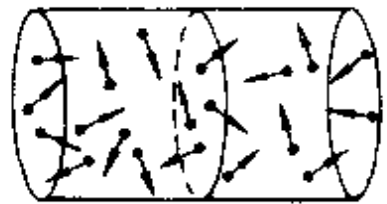


图 9

属导线内建立了电场,这些自由电子在恒定的电场力作用下穿行于金属离子间,不断地与离子磕磕碰碰,步履艰难地缓缓行进,最终形成一个稳定的定向移动的平均速度.这个情况很像是让一个小球沿着密布着许多钉子的木板往下滚一样,小球受到的重力是一个大小、方向不变的恒力,但是又不断地与钉子发生碰撞,于是小球并不做匀加速运动,而是以某一平均速度滚下(图 10).

三种  
速度

金属导电过程中存在着三种速度——自由电子定向移动的平均速度、自由电子无规则热运动的速度、电流传播速度.其中,自由电子定向移动的平均速度比它做无规

\* 玻尔兹曼(L. Boltzmann, 奥地利, 1844—1906)是对热学理论作出重要贡献的杰出物理学家.他在研究分子运动理论时得出了粒子按能量大小分布的规律,被称为玻尔兹曼分布.公式  $\bar{v}_{\text{热}} = \sqrt{\frac{3KT}{m}}$  中的  $K = 1.38 \times 10^{-23}$  焦/开,称为玻尔兹曼常数.

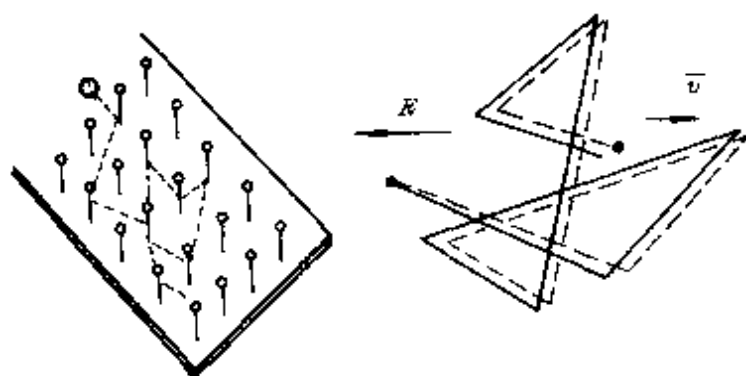


图 10

则热运动的速度数值小得多,比电流传播的速度(即电场传播速度)数值更小,平时我们开关合上,电灯就亮,就是电流传播速度极大的缘故。

加上电场后,金属导线中自由电子的运动情况犹如节日里一列浩浩荡荡游行队伍中一群载歌载舞的演员,指挥员一声口令,整个队伍都举步向前,跳舞的演员一面左右前后地穿跳,一面总要跟随着整个队伍沿确定的方向缓缓向前。这里:

口令传播速度(声速)~ 电场(或电流)传播速度;

演员向各处穿跳的速度~ 自由电子无规则热运动的速度;

整个队伍缓缓前进的速度~ 自由电子定向移动的速度。

这就是说,金属导电是依靠金属中自由电子在无规则热运动基础上叠加一个定向移动完成的。

**定向移动  
速度计算**

根据德鲁德的自由电子气模型可以推知:自由电子定向移动的平均速度与导线中的电流强度、导线的横截面积以及自由电子的密度有关。设导线横截面积为  $S$ , 电流强度为  $I$ , 自由电子定向移动的平均速度为  $\bar{v}$ , 由图 11 可知, 在时间  $t$  内, 只有以截面  $S$  为底、长  $l = vt$  的一个柱体内所包含的自由电子能通过该截面, 它们的数量为  $n\bar{v}tS$  ( $n$  为自由

电子的密度). 设电子电量为  $e$ , 则电流强度

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{n \bar{v} t S e}{t} = n \bar{v} S e,$$

或  $\bar{v} = \frac{I}{n S e}.$

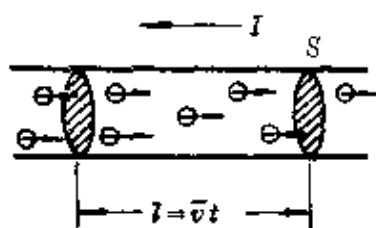


图 11

上式表明, 通电导线中自由电子定向移动的平均速度与电流强度成正比, 与导线横截面积和导线中自由电子的密度成反比. 所以一段截面不均匀的导线中通以稳恒电流时(图 12), 自由电子通过不同截面处的平均速度与截面大小成反比, 即

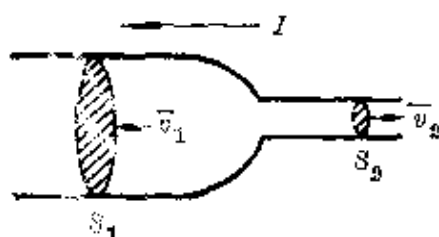


图 12

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

德鲁德利用自由电子气模型还对欧姆定律作出了微观解释, 导出了电阻率公式, 从而建立了金属导电的经典理论.

#### 4. 原子结构模型

关于物质的结构, 我们祖先大约在公元前 11 世纪(商周之际)就曾提出过“五行说”, 认为宇宙万物由水、火、木、金、土五种元素组成. 西方古希腊哲学家德谟克利特(Democritus of Abdera, 前 460—前 370)提出了朴素的原子论, 认为宇宙万物都是由大量不可分割的微小物质颗粒所组成. 这种物质微粒称为原子(希腊文 atomos, 为不可分割之意). 不论是“五行说”还是朴素的原子论, 都只具有思辨的性质, 缺乏科学的根基. 1808 年英国物理学家、化学家道尔顿(J. Dalton, 1766—1844)系统地提出科学原子论. 他用当量

定律、定组成定律、气体分压定律提供的证据,首次雄辩地证实了原子的存在,并进行了原子量的计算,从而开创了人类真正认识原子的通途.不过道尔顿也认为原子是不可分割的最小微粒.直到19世纪末,物理学上相继出现的奇迹般的三大发现,才开始动摇原子不可分的传统观点,揭开了探索原子结构的序幕.

世纪之交  
三大发现

首先是X射线的发现.1895年,德国物理学家伦琴(W. K. Röntgen, 1845—1923)在对阴极射线\*的研究中发现,从对着阴极的电极(称对阴极)中会发射一种沿直线传播、不带电、穿透力极强的射线(图13).伦琴确信这是一种人所未知的新射线,取名为“X射线”.X射线的发现使人们开始意识到原子也有复杂的结构.

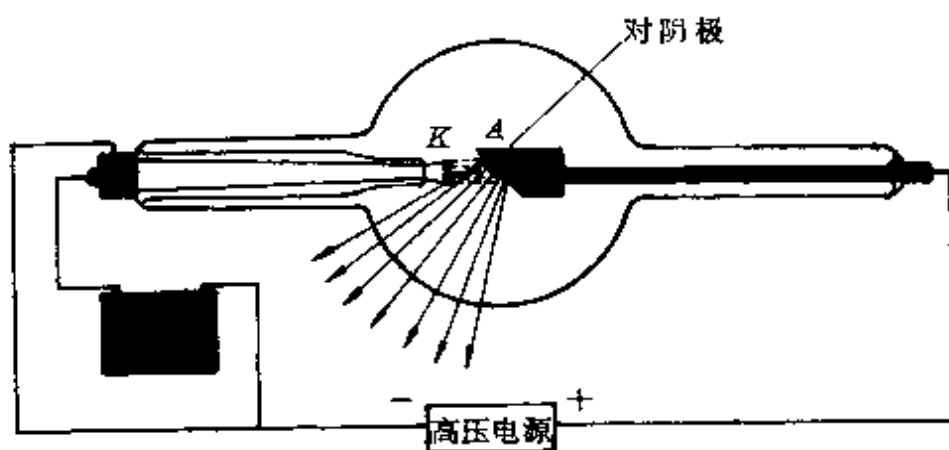


图13 伦琴射线

次年(1896年),法国物理学家贝克勒尔(H. A. Becquerel, 1852—1908)在对铀盐(硫酸铀酰钾)荧光作用的研究中,发现铀盐能发射一种射线,它能使底片感光、使气体电离.贝克勒尔确信这是从铀元素中产生的射线.

\* 阴极射线是普吕克(J. Plucker, 德国, 1801—1868)在研究真空放电现象时于1858年首先发现的.

两年后,法国物理学家皮埃尔·居里(Pierre Curie)夫妇经过艰苦卓绝的努力,又成功地提炼出钋和镭两种天然放射性元素.实验表明,天然放射性元素能自发地放射出 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 三种射线(图 14),最后变成没有放射性的铅.天然放射性现象的发现已严重动摇了原子不可再分的观念.

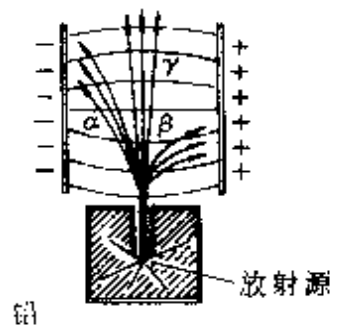


图 14

1897年,英国物理学家J.J.汤姆生发现了电子\*,彻底否定了原子不可分的神话.不久前人们刚刚确认氢原子是最轻的“宇宙之砖”,又立即被否定了,电子无疑是比原子更小的组成宇宙之砖.



到这时候,科学大门前摆着的任务已十分明确:揭开原子结构的秘密.既然原子中包含着带负电的电子,而整个原子又是电中性的,那么可以肯定原子中还有带正电的部分.因此,探索中的原子结构需要回答这些问题:原子内的正电荷和电子是怎样分布的?正负电荷如何相互作用?原子内究竟有多少电子?它的数目如何确定?怎样才能保持原子的稳定状态?如何解释元素的周期性和原子发光的线光谱?怎样解释放射性?

许多物理学家曾为此提出过不同的物理模型,其中以1904年由电子发现者J.J.汤姆生提出的模型最有影响.

汤姆生认为:原子好像一个带正电的“流体”球,集中了原子质量的绝大部分,带负电的电子作为点电荷有规则地镶嵌在球体某

\* 电子的名词是1896年爱尔兰物理学家斯托尼(C. T. Stoney, 1826-1911)提出的,当时只用来表示电荷的最小电量单位.有关电子发现的较详细情况参阅本丛书《猜想与假设》一书.

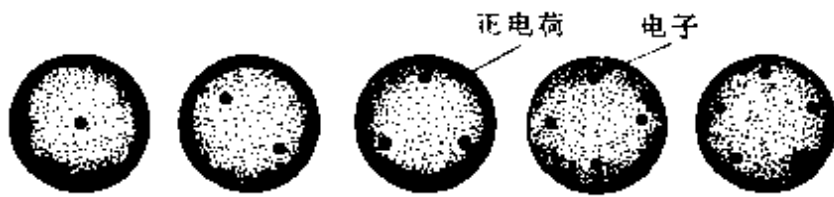


图 15 汤姆生原子模型

些固定位置上,就像夹在面包中的葡萄干,因此称为“面包夹葡萄干”模型(图 15).原子中的电子一方面受正电荷的吸引,另一方面又自相排斥,因而必然有一种状态可使电子平衡.这些电子必然组成环,并且六个以上的电子不能稳定在一个环上,数目更多就要组成两个以上的环.汤姆生借助梅厄(A. Mayer)提出的用磁棒吸引水面上竖直漂浮磁针(图 16),用模拟的实验方法证明自己模型的正确性.图 17 表示了用磁铁吸引漂在水面上数目不同的磁针所组成的图形——两个以上就会组成环,数目较多时就组成两个以上的环.

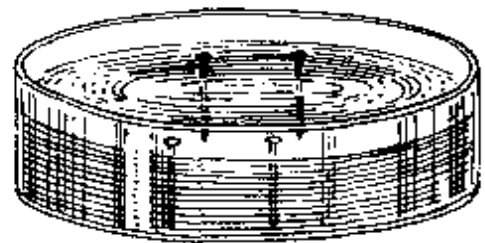
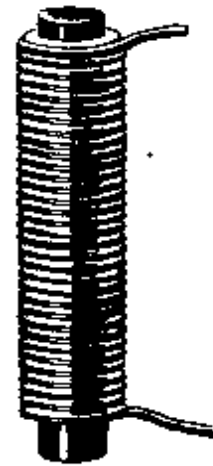


图 16 梅厄磁针实验

汤姆生认为:原子发光就是由于电子在它们的平衡位置附近振荡产生的.他根据这个模型还算出了原子光谱的一个特征频率.

在汤姆生模型中最重要的是原子内的电子数  $n$ .开始,他根据电子的荷质比( $e/m$ )数值,估算出一个氢原子应有约 2000 个电

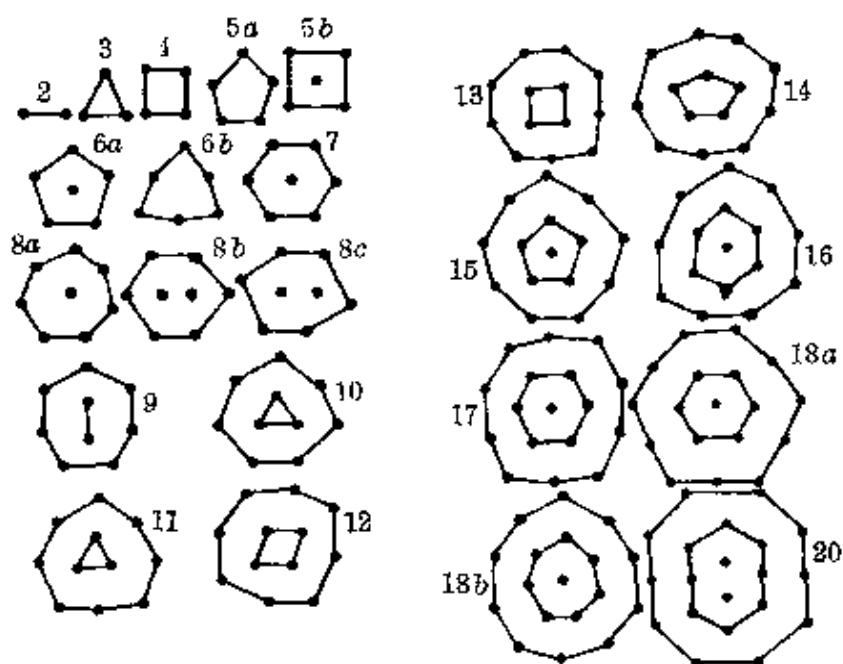


图 17 梅厄磁针分布图

子,后来汤姆生设计了 X 射线和  $\beta$  射线的散射实验,判定原子内电子数  $n$  与原子量  $A$  为同一数量级.这是汤姆生和他的学生对原子理论的一项重大贡献.

汤姆生模型不仅指出了原子内部是有结构的,打破了原子内部正负电荷互相对称的观念,而且由此导致了  $\alpha$  粒子大角度散射实验的成功,标志着原子科学新时代的开始.因此,人们称颂汤姆生是“一位最先打开通向基本粒子物理学大门的伟人”.

**$\alpha$  粒子  
散射实验**

卢瑟福(F. L. Rutherford, 1871—1937)是英国物理学家 J. J. 汤姆生的学生. 1897 年他首先发现  $\alpha$  射线和  $\beta$  射线. 后来,在研究射线对物质的作用时,于 1906 年首先发现  $\alpha$  射线通过极薄物质时会发生散射现象——射线在底片上形成的亮点会变得模糊. 根据汤姆生的散射理论,这是  $\alpha$  粒子进入物质时与电子发生多次碰撞的结果,并且角度越大,散射的几率越小,散射角为  $90^\circ$  时的几率仅为  $\frac{1}{10^{3500}}$ ,可以说已是绝对

不可能的了.卢瑟福为了验证根据汤姆生模型对大角度散射的解释,和他的助手盖革(H. Geiger, 德国, 1882—1947)和马斯顿(E. Marsden, 英国 1889—1945)反复进行 $\alpha$ 粒子散射实验.他们用 $\alpha$ 射线射向一片厚度仅为0.0004毫米的极薄的金箔时,从实验中发现,绝大部分的 $\alpha$ 粒子穿过这层足足有2000个金原子那么厚的金箔时,仍像几乎不受任何阻挡地能轻易越过这道金原子墙继续沿入射方向前进,但也出乎意料地发现,散射角大于 $90^\circ$ 的 $\alpha$ 粒子有很大的比例,约为 $\frac{1}{8000}$ ,比汤姆生计算的结果高得多,甚至还有个别 $\alpha$ 粒子能被反弹(图18).

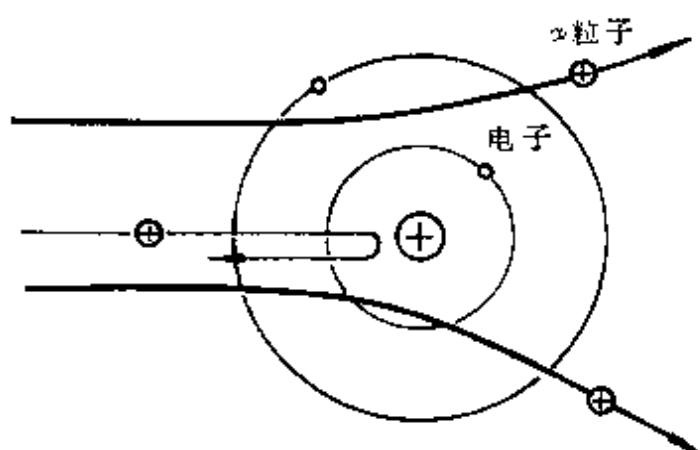


图 18  $\alpha$  粒子大角度散射

卢瑟福后来回忆说:“我记得,非常激动的盖革到我这里来,并对我说:‘我们好像得到了一些 $\alpha$ 粒子反向散射的情况……’这是我一生中最不可思议的事,就好像我们向卷烟纸射去一颗15英寸的炮弹,而它又反射回来还打中了我们一样的不可想象。”这个现象用汤姆生的实心带电球原子模型和带电粒子与电子发生多次碰撞的散射理论是无法解释的.



卢瑟福  
模型

为此,卢瑟福进行了苦苦的思索: $\alpha$  粒子就是氦原子核,根据汤姆生的“面包夹葡萄干”式的实心球原子模型, $\alpha$  粒子就像是掉落两颗葡萄干的一个小面包,用一群小面包去打一个大面包阵(金属子阵),尽管速度很大,很难想象绝大部分小面包能浩浩荡荡通行无阻.他经过计算,毅然抛弃了他十分尊敬和信任的恩师,当时在科学界具有很高权威的汤姆生的实心球模型,“吾爱吾师,吾尤爱真理”,于 1911 年提出了原子的有核模型(或称行星模型).

卢瑟福在论文中写道:“……经过思考,我认为反向散射必定是单次碰撞的结果,而当我作出计算时看到,除非采取一个原子的大部分质量集中在一个微小的核内的系统,是无法得到数量级的任何结果的,这就是我后来提出原子具有很小而质量很大的核心的想法.”

卢瑟福认为:一切原子都有一个核,它的半径小于  $10^{-12}$  厘米,原子核带正电,它的电荷是  $+Ze$  ( $Z$  为原子序数),原子的半径是  $10^{-8}$  厘米,电子的位置必须扩展到以核为中心、以  $10^{-8}$  厘米为半径的球内或球面上,为了维持平衡,电子必须像行星一样绕核旋转着.这就是卢瑟福的有核原子模型或行星模型的基本内容(图 19).

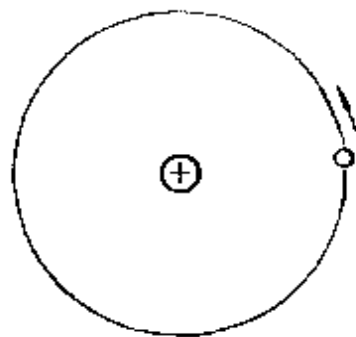


图 19

在卢瑟福的原子模型中,原子中的正电荷和几乎全部质量都集中在极小的核内.原子核在原子中所占的大小,就像一粒米悬挂在一个很大的体育馆中心一样,周围绝大部分是空荡荡的.这个图景着实有点不好接受,难怪一开始有人并不相信卢瑟福的模型.

卢瑟福终究胜利了.他以他的核式模型开创了核物理学的新

领域,被人们尊敬地称为“原子核物理之父”。

汤姆生也虚怀若谷,并不以学生的见解与自己不同而嫉贤妒能,并于 1919 年辞去著名的卡文迪许实验室主任的职务,提名卢瑟福继任,使这个科学中心后继有人。

## 二、物理模型在科学认识中的作用

建立物理模型是物理学中的一种十分重要的研究方法,它不仅在形成正确理论的过程中起着重要的作用,也渗透到对各种具体的物理问题的研究之中.它对物理学的发展和指导人们对物理现象、物理规律认识上的作用,大致可归纳为以下几个方面.

### 1. 简化和纯化事物原型

物理模型是一种理想化的形态,它最明显的特点是对原型(研究对象和物理过程等)已摒弃了各种次要因素的影响,作了极度的简化和纯化的处理,突出了决定事物状态、影响事物发展变化的本质联系,从而可以借助模型顺利地开展工作.

譬如,研究地球绕太阳公转的运动,由于地球与太阳的平均距离(约为  $1.496 \times 10^{11}$  米)比地球的半径(约为  $6.37 \times 10^6$  米)大得多,地球上各点相对太阳的运动可以看做相同,因此可以忽略地球的形状、大小,把地球简化为一个质点来处理,由此就可以较方便地找出地球绕太阳公转时的一些规律.

如果不建立这样一个理想化的物理模型,不仅地球绕太阳的运动复杂到难以研究,就是平常一个小球从地面上空不高处由静止下落的运动,也会变得无从下手.因为小球下落时,影响小球运

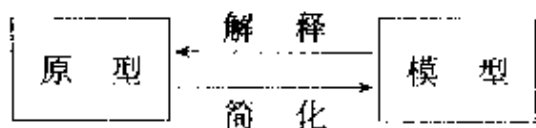
动的因素很多——首先是重力,根据万有引力公式  $F = G \frac{Mm}{r^2}$ ,它将随着小球下落过程中与地面距离的改变而变化;其次是小球所受的空气阻力,它与小球的形状、大小和下落速度有关,也将不断变化;其它诸如地球的自转、风速的影响,对铁质小球还会受到地球磁场的影响等等.如果要综合考虑这些因素后去找出小球下落运动的规律,那就变得十分困难,其实,有时也没有这个必要.为此,我们可以对这个小球下落的过程加以纯化——当小球在地面上空不高处下落时,可以认为重力恒定;当小球下落速度不大时,可以忽略空气阻力的作用;同时,也可不计地球的自转、风速、地磁场等非主流的影响等.经过这样的纯化后,这个小球的运动可以看做在均匀的重力场中只受重力的一种运动,我们称它为自由落体运动.所以,自由落体运动也是一种理想化的物理模型,伽利略正是运用这个落体模型找出它的运动规律来的.

牛顿在发现万有引力定律的过程中,从 1666 年到 1684 年 8 月,他的研究似乎没有实质性的进展,可能原因之一\*,就是当时牛顿还未能精确证明是否可以把月球、地球看做质量集中在中心的质点进行计算.可见,对事物原型的简化和纯化,抽象出物理模型是何等重要!

## 2. 解释事物或现象原因

物理模型和事物原型间基本的逻辑联系可表示为

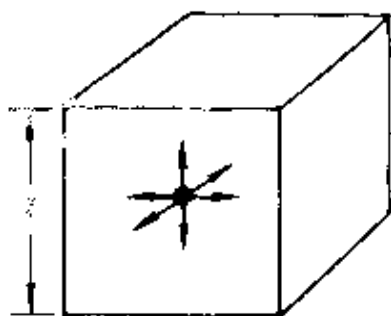
- 
- \* 另一些可能原因是牛顿当时所知道的地球半径的数值不精确,计算误差较大.此外,可能他当时正致力于微积分、光学等方面的研究.



即从原型出发对其简化和纯化后抽象出物理模型;反过来物理模型可为原型提供解释的演绎系统.我们从上面介绍的典型模型中选择两个模型为例作一说明.

### (1) 利用理想气体模型解释气体定律

设想一个边长为  $l$  的立方体容器,其中有  $n$  个气体分子.由于分子运动的完全无规则性,可以认为所有分子的  $\frac{1}{3}$  在前后器壁间做直线运动,

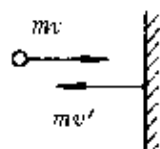


$\frac{1}{3}$  是在上下器壁间运动,  $\frac{1}{3}$  是在左右器壁间运动,如图 20 所示.

图 20

根据理想气体分子运动模型,每个分子都像一个小球,除分子间相互碰撞和与器壁碰撞外,分子间无任何相互作用.

设分子的质量为  $m$ ,当它以速度  $v$  垂直射向器壁与器壁发生弹性碰撞后,反射速度大小  $v' = v$  (图 21),这个分子的动量变化



$$\Delta p = mv' - (-mv) = 2mv,$$

图 21

器壁作用于这个分子的冲量为  $I' = \Delta p = 2mv$ .按牛顿第三定律,分子对器壁必施以同样大小的冲量

$$I = I' = 2mv.$$

这个分子由器壁反弹后飞向对面的器壁,然后再反弹回到原来的器壁时一共经历的时间(忽略与壁的碰撞时间)为

$$\Delta t = \frac{2l}{v},$$

因此,一个分子在这样两次连续碰撞的时间内,对器壁的平均作用力为

$$\Delta \bar{f} = \frac{I}{\Delta t} = \frac{2mv}{\frac{2l}{v}} = \frac{mv^2}{l}.$$

设不同分子以不同的速度  $v_1, v_2, \dots, v_{n'}, \dots$  运动,它们对一个器壁总的碰撞力为

$$\begin{aligned} f &= \Delta \bar{f}_1 + \Delta \bar{f}_2 + \dots + \Delta \bar{f}_{n'} \\ &= \frac{mv_1^2}{l} + \frac{mv_2^2}{l} + \dots + \frac{mv_{n'}^2}{l} \\ &= \frac{n'm}{l} \times \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_{n'}^2}{n'}. \end{aligned}$$

式中  $n' = \frac{1}{3}n$  是前后(或上下、左右)两壁间运动的分子数.

$$\text{令 } \bar{v}^2 = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_{n'}^2}{n'},$$

这是分子速率平方的平均值,称为方均根速率的平方,于是得

$$\bar{f} = \frac{1}{3} \times \frac{nm}{l} \bar{v}^2.$$

用  $l^2$  除上式左右两边,即得理想气体分子对器壁的压强公式

$$p = \frac{\bar{f}}{l^2} = \frac{1}{3} \cdot \frac{n}{l^3} m \bar{v}^2 = \frac{1}{3} n_0 m \bar{v}^2 = \frac{2}{3} n_0 \bar{w}.$$

式中  $n_0 = \frac{n}{l^3}$  是单位体积中的分子数,称为分子密度.  $\bar{w} = \frac{1}{2} m \bar{v}^2$

是分子的平均平动动能,它是一个仅由气体的温度决定的量\*.

如果气体的温度不变,则气体分子的平均平动动能不变,根据

\* 现行中学物理教材中简单地把温度说成是分子平均动能的标志.

气体的压强公式可知,气体的压强仅与分子密度成正比,一定量气体的体积压缩为原来的 $\frac{1}{2}$ 时,分子密度为原来的2倍,压强也为原来的2倍,这就是玻意耳定律的结果.如果气体的体积不变,一定质量气体的分子密度也不变,气体的压强随气体分子平均平动动能的增加而增大,即随温度升高而增大.这就是查理定律的结果.如果在升高气体温度、增大分子平均平动动能的同时适当地增加体积,即减少分子密度,就可保持气体的压强不变,这就是盖·吕萨克定律的结果.

这样,我们运用理想气体模型就可以从微观上对气体定律作出解释.

## (2) 利用金属导电模型解释欧姆定律和电阻定律

如图 22 所示,在一段长  $l$ 、截面积为  $S$  的导体两端加上电压  $U$  以后,在导体中建立了电场,电场强度  $E = \frac{U}{l}$ ,作用在自由电

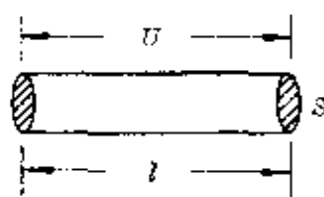


图 22

子上的电场力  $F = Ee$ . 设电子质量为  $m$ , 根据牛顿第二定律,得自由电子定向移动的加速度

$$a = \frac{F}{m} = \frac{Ee}{m} = \frac{e}{ml}U.$$

由于导体中的自由电子在运动过程中频繁地与金属正离子碰撞,自由电子定向移动的运动很快受到破坏,限制了定向移动速度的增加.并且,由于自由电子热运动的无规则性,在与金属正离子碰撞后向各个方向散射的机会相等,失去了碰撞前具有的定向移动的特性.因而可以认为,自由电子在与金属正离子两次碰撞之间做的是初速为零的匀加速运动.

设自由电子在两次碰撞之间的时间为  $\tau$ , 则碰前的末速度  $v_x = a\tau$ , 在两次碰撞过程中定向移动的平均速度

$$\bar{v} = \frac{1}{2} v_x = \frac{1}{2} a\tau = \frac{1}{2} \cdot \frac{eU}{m\tau} \tau.$$

把这个结果代入根据导电模型得到的电流强度表达式

$I = neS\bar{v}$  中去, 即得

$$I = neS \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{eU}{m\tau} \tau = \frac{e^2 nS\tau}{2ml} U.$$

对于一定的金属材料, 在一定的温度下,  $\tau$  是个确定的数据 (约为  $10^{-14} \sim 10^{-12}$  秒). 这就是说, 对一段确定的金属导体,  $\frac{e^2 nS\tau}{2ml}$  是个常数. 因此我们从上式可以得出结论: 导体中的电流强度  $I$  跟这段导体两端的电压  $U$  成正比. 这就是欧姆定律的结果.

把  $I-U$  关系式中的比例常数写成  $\frac{1}{R}$ , 即

$$\frac{1}{R} = \frac{e^2 nS\tau}{2ml} \quad \text{或} \quad R = \frac{2ml}{e^2 n\tau S}.$$

我们称  $R$  为导体的电阻. 由此可见, 金属导体的电阻  $R$  与它的长度  $l$  成正比, 与它的截面积  $S$  成反比, 并且与金属材料性质有关 ( $n, \tau$  都是与材料有关的量). 这正是电阻定律的结果. 所以导体的电阻率

$$\rho = \frac{2m}{e^2 n\tau}.$$

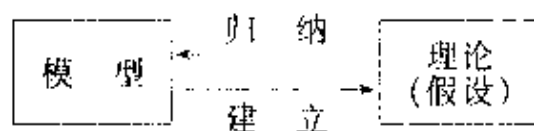
它完全由材料本身的特性决定, 与导体中是否通有电流以及电流的大小、方向均无关.

这样, 我们就从德鲁德的自由电子气模型出发, 从微观上对欧姆定律和电阻定律作了解释.



### 3. 建立或证明物理理论

物理模型和理论(假设)之间基本的逻辑联系可表示为



即从对模型的研究出发可建立(或证明)理论,从而认识事物中所蕴含的物理规律,得出符合事物实际的结果(近似结果);反过来,从理论(假设)出发,也可归纳出物理模型.如伽利略从教堂中吊灯的摆动中,抽象出单摆模型后,通过对单摆的研究,发现了单摆振动的等时性规律.后来,荷兰物理学家惠更斯(C. Huygens, 1629—1695)进一步提出了摆的数学理论,导出了单摆的运动定律,即周期公式

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

反过来,根据单摆的振动理论,对于如图 23 中双线摆的振动、小球在半径很大的圆弧形槽底附近的滚动、加速运动车厢(或电梯)中摆球的运动等,都可归纳为单摆模型进行演算.更一般地,从

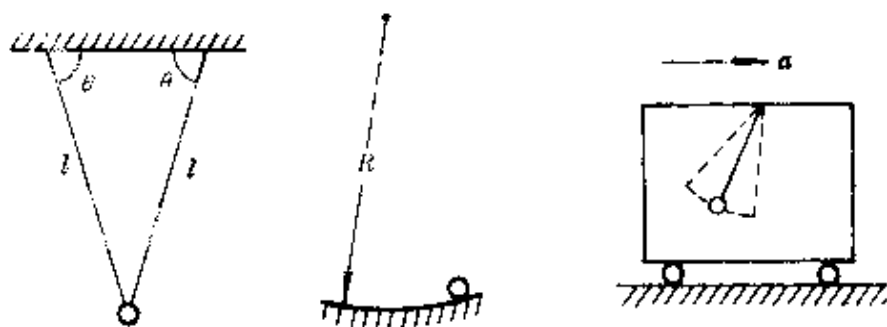


图 23

单摆模型建立的谐振动理论,可以研究大量的各种形式的实际振动问题——在回复力满足条件  $F = -kx$  时都可归纳为谐振动模

型.

为了进一步说明物理模型在建立(或证明)理论、认识事物规律性中的作用,下面我们再举两个典型的物理模型加以说明.

### (1)斯台文链

将一个物体放在斜面上,需要多大的力才能保持静止呢?对这样一个日前高中一年级学生已经熟知的静力学问题,当初人们是并不清楚的.1586年,斯台文(S. Stevin, 1548—1620)在他的著作《静力学原理》一书中,采用了一个理想模型对这个问题作了论证:他设想了一个底面水平、截面呈三角形的棱柱,在它的上面放一个由14颗相同的光滑的小球均匀串联起来的链圈,如图24所示.这一链圈只可能有两种状态:静止或运动.

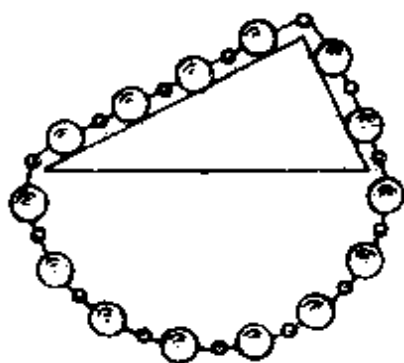


图 24

如果链圈运动,当一个小球向前刚好取代另一个小球的位置时,整个链圈在斜面上的伸展情况又恢复原状,于是,链圈还要继续沿刚才的方向运动下去,从而形成永恒的运动.斯台文认为,链圈的这种永恒运动是不可能的,也是和经验相违背的,因此他得出结论说:链圈只能静止在三角形的棱柱斜面上.

当链圈静止在斜面上时,水平底边下面的那8个小球对称地悬挂着,把它们去掉不会影响斜面上小球的平衡,此时在三棱柱的每一斜面上沿斜面向下作用

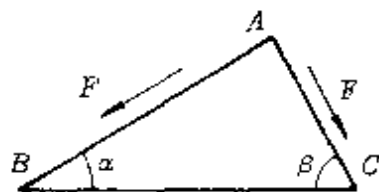


图 25

着的力应该是相同的,分别以  $F_1$ 、 $F_2$  表示沿  $AB$  面和  $AC$  面作用在每个小球上的力(图25),由两边小球的受力平衡知

$$F_1 \times AB \text{ 边上的小球数} \\ = F_2 \times AC \text{ 边上的小球数.}$$

因为在每一边上的小球数与其边长成正比,于是由上式可得

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{AC \text{ 边上小球数}}{AB \text{ 边上小球数}} = \frac{AC}{AB}.$$

上式表示在高度相同的斜面上,等重的物体所受的沿斜面方向的力与斜面的长度成反比.设  $AB$ 、 $AC$  两斜面的倾角为  $\alpha$ 、 $\beta$ ,用三角函数可将上式表示为

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}.$$

于是,斯台文得出了下述的斜面定律(图 26):处于高  $h$ 、长为  $l$  的光滑斜面上重为  $G$  的物体,能够被一个大小为  $F = \frac{h}{l}G$ 、方向和斜面平行向上的力所平衡.

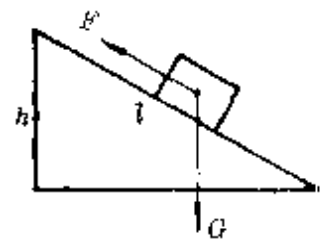


图 26

斯台文通过这个链圈模型(后人称为斯台文链)对非平行力的规律作了研究,发现了今天广为应用的力的合成与分解的平行四边形法则,对静力学的发展作出了很大的贡献.

## (2) 范德瓦尔斯气体模型

实际气体的性质与理想气体不完全相符,并不严格地遵从气体的实验定律,其原因有二:第一是分子的固有体积的存在,第二是分子间的相互作用力的性质比弹性球性质复杂得多.为了找出实际气体的状态参量( $p$ 、 $V$ 、 $T$ )之间的关系,荷兰物理学家范德瓦尔斯(J. D. Van der Waals, 1837—1923)仔细研究了这两种因素的影响,于 1873 年提出了范德瓦尔斯气体模型(或称范德瓦尔斯方程).

范德瓦尔斯认为,由于第一个原因——分子的固有体积的存在——表现在容器内气体分子的运动并不像质点那样自由,供给分子自由运动的空间要比容器的几何容积  $V$  小一些.不过,也不能认为容器的几何容积和全部分子体积之差就是分子运动的自由空间.

设有一个容积为  $V$  的立方形容器,其边长为  $V^{1/3}$ .令分子的直径为  $d$ ,则其体积为  $\frac{4}{3}\pi\left(\frac{d}{2}\right)^3$ .

当容器内只有一个分子时,这个分子可自由运动的实际空间为

$$(V^{1/3} - d)^3.$$

如图 27 所示.

当容器内有两个分子时,每个分子可自由运动的实际空间为

$$(V^{1/3} - d)^3 - \frac{4}{3}\pi d^3$$

式中  $\frac{4}{3}\pi d^3$  是当两个分子相碰时,第二个分子中心不能进入的那部分空间体积,如图 28 所示.

当容器内有  $N$  个分子时,由于每个分子与其它分子相碰时不能进入的空间互相重叠的结果,所以每个分子可自由运动的平均空间可认为是

$$\begin{aligned} V_f &= (V^{1/3} - d)^3 - \frac{N}{2} \cdot \frac{4}{3}\pi d^3 \\ &\approx V - N \cdot \frac{16}{3}\pi \left(\frac{d}{2}\right)^3. \end{aligned}$$

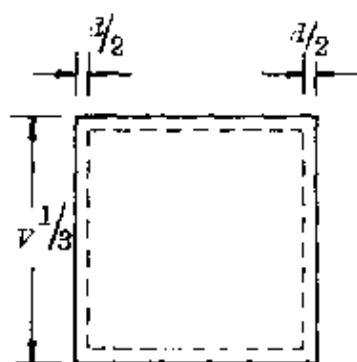


图 27

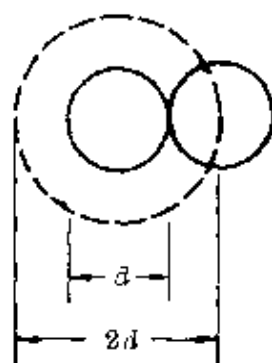


图 28

令  $V_0 = N \cdot \frac{4}{3} \pi \left( \frac{d}{2} \right)^3$ , 表示  $N$  个分子的固有体积, 又设  $b = 4V_0$ , 于是上式可写成

$$V_f = V - 4V_0 = V - b.$$

这也就是说, 考虑到分子本身的固有体积  $V_0$  后, 气体分子运动的空间(即气体的体积)应比容器的实际容积  $V$  小一些, 减小的体积等于所有分子固有体积的 4 倍, 因而应用气体的状态方程时应以  $(V - b)$  代替原来公式中的  $V$ . 对于 1 mol 气体的状态方程, 相对于不同物理模型的方程为

理想气体模型  $pV_0 = RT,$

范德瓦尔斯模型  $p(V_0 - b) = RT.$

对于第二个原因——分子间相互作用力的存在——分子间由于互相吸引, 气体所占的体积要比玻意耳定律得出的体积小一些, 相当于气体的压强要比理想气体时的压强更大一些. 增大的这部分压强称为气体的内压强, 用  $p_i$  表示.

分子的相互作用对位于容器中部和靠近器壁的分子的影响是不同的. 对位于容器中部的气体, 每一个气体分子都被它周围的其它分子包围, 平均地讲, 作用于这个分子上的吸引力互相抵消. 但在器壁附近, 气体分子只受与它相邻的气体

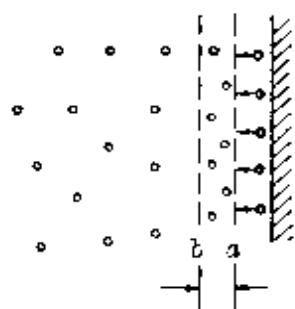


图 29

内分子的吸引, 即仅限于如图 29 中  $ab$  薄层内的分子的吸引. 这一层内的分子数目与分子密度  $n_0$  成正比. 此外, 由于与器壁相碰的分子数也与  $n_0$  成正比, 所以作用于器壁附近的分子上指向气体内部的吸引力与  $n_0^2$  成正比, 亦即与体积的平方成反比  $\left( n_0 = \frac{N}{V} \right)$ . 因

而气体分子的内压强  $p_i$  可表示为

$$p_i = \frac{a}{V^2},$$

气体对器壁所产生的真实的压强应为

$$p + p_i = p + \frac{a}{V^2}.$$

范德瓦尔斯根据他所设计的模型对理想气体模型作了修正后, 1 mol 气体的状态方程应表示为

$$\left(p + \frac{a}{V_0^2}\right)(V_0 - b) = RT.$$

这就是著名的范德瓦尔斯方程, 式中的修正数  $a$  与  $b$  跟气体的性质有关, 它们的具体数值由实验数据测定.

范德瓦尔斯方程比理想气体的状态方程更准确地描述了真实气体的性质. 下表列出的是  $0^\circ\text{C}$  时 1 升氮气的实验数据与按理想气体模型(克拉珀龙方程)及范德瓦尔斯模型(范德瓦尔斯方程)所得的数据的比较

| 压强 $p$<br>(大气压) | $pV$ 值<br>(大气压·升) | $\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b)$ 值<br>(大气压·升) |
|-----------------|-------------------|--|
| 1               | 1.0000            | 1.000  |
| 100             | 0.9941            | 1.000  |
| 200             | 1.0483            | 1.009  |
| 500             | 1.3900            | 1.014  |
| 1000            | 2.0685            | 0.983  |

由此可见, 根据理想气体模型得到的克拉珀龙方程以及其它实验定律, 仅适用于压强不太大的情况, 压强很大时, 必须对它作出修正, 换用范德瓦尔斯气体模型.

范德瓦尔斯也因这一出色的工作,获得了 1910 年度诺贝尔物理学奖。

#### 4. 指出方向和作出预见

由于在理想模型的抽象过程中排除了大量的次要因素的干扰,突出了事物原型(研究对象或物理过程等)的主要特征,因而研究时更便于发挥逻辑思维的力量,可以使得对理想模型的研究结果能够超越现有的条件,并由此指出进一步研究的方向或形成科学的预见。

如在固体物理学的理论研究中,常常以没有缺陷的理想晶体作为研究对象,后来,应用量子力学对这种理想晶体进行计算的结果表明,其强度比实际的金属材料的强度约大 1000 倍.这个结果启发人们,通常金属材料的强度之所以比理想晶体的计算结果弱得多,一定是因为实际材料中存在着许多缺陷的缘故.后来通过仔细研究,果然发现了金属结构的缺陷,也找到了减少这些缺陷、提高金属强度的方法。

通过对物理模型的研究作出科学预见的精彩实例是海王星的发现。

自 1781 年发现天王星后,通过不断地对它观测,1821 年法国学者布瓦尔德发现,根据不同时间的资料算出来的轨道都互不相同,要根据以前的观测资料预报天王星以后的位置总不成功.天王星的“出轨”现象,引起了许多天文学家的思考。

当时,德国著名数学家贝塞尔(F. W. Bessel, 1784—1846)在开普勒的行星轨道模型和牛顿引力理论的指导下,大胆提出存在另一颗行星的可能.他说:“我认为借助新行星揭开天王星秘密的一天终将到来,因为这个新行星的轨道可以根据它对天王星的作用

而计算出来。”

天王星的“出轨”现象同样引起法国青年、天文学家勒维烈(U. J. J. Leverier, 1811—1877)和英国剑桥大学学生亚当斯(J. C. Adams, 1819—1892)的浓厚兴趣。于是，一场默默的竞赛开始了。

勒维烈经常到巴黎天文台去查阅天王星观测资料，并与自己理论计算的结果对比。亚当斯也不断到剑桥大学天文台去，他还得到一份皇家格林威治天文台的资料，使他的理论计算能及时同观测值比较。

1845年9月，亚当斯把研究结果请剑桥大学天文系转给英国皇家天文台台长。可是，尊贵的台长对此表示怀疑，被搁置起来。一直到1846年7月29日才开始搜寻工作，但在这个搜寻工作中，又有两次把这颗新行星当做恒星轻易放过了。

1846年8月31日，勒维烈把最后的研究结果送到法国科学院(后转到德国柏林天文台)，9月18日他写信给德国天文学家伽勒(J. G. Galle, 1812—1910)，求援说：“请您把你们的望远镜指向黄经 $326^{\circ}$ 处宝瓶座内的黄道的一点上，您就将在此点约 $1^{\circ}$ 的区域内发现一个圆而明亮的新行星，它的亮度约近9等，……”在9月23日伽勒收到信的当天晚上，在勒维烈所指出的那个位置果然发现了原有星图上没有的一颗行星。9月25日伽勒复信给勒维烈：“先生，你给我们指出位置的新行星是真实存在的，……”这样，25年来笼罩在哥白尼—牛顿学说上空的最后一朵乌云在这次呼声中终于被驱散了。用笔和纸居然发现了肉眼看不见的行星，这件事立刻轰动了世界，终于使太阳系模型成为严密的科学理论。

两个默默的对峙谁胜谁负，一时难倒了裁判者。人们称他们两位都是海王星的发现者。



### 三、物理模型的建立和发展

物理模型虽然是一种通过科学抽象建立起来的理想化的形态,在现实中并不存在,但它也并不是完全虚构的,它的新旧更迭的变化也并不是任意编造的,物理模型的建立和发展有着深厚的客观基础.

#### 1. 物理模型需要以客观实在为原型

任何一个理想化的物理模型,都以一定的客观实际存在的事物或实际过程为原型.由于实际的事物和过程都是非常复杂的,它往往包含着多方面的特征和多种矛盾,受到多方面的因素牵制,但在一定场合和一定条件下,又必然有一种主要矛盾或主要的因素,由它们决定着事物的主要特征和过程的主要运动方式或趋势.因此,通过对原型的高度抽象和概括建立的理想化的物理模型与原型所不同的是:物理模型所反映的并不是客观事物(或过程)多样性的统一,也不是反映多方面的属性,而是反映了客观事物(或过程)的某种主要属性或主要运动方式,所以物理模型只是对原型的一种近似的反映.譬如:

托勒密的九重天模型或哥白尼的太阳系模型本身就是用来描绘客观存在的宇宙结构的,日月星辰的自然位置和它们的运动变化就是这两种模型的原型.显然,托勒密和哥白尼的模型都只是近

似地对天体运动作了描述。

理想气体模型完全是从实际存在的各种气体中抽象出来的一种宏观模型,根据玻意耳定律和查理定律的适用范围可知,一切气体在压强趋于零时都会变成理想气体,这就是说,理想气体模型反映的是实际气体在压强趋于零时的一种极限性质.由于有实际气体存在时,它的压强不可能为零,因此理想气体也只是实际气体的一种近似反映.

金属导电模型,它是金属导体中客观存在着的电子的运动为原型,通过对电子的运动过程作了一些理想化条件的规定,突出了电子的主要运动方式后提出来的.显然,它也只能产生于发现电子以后.

所以,任何物理模型都可找到它的原型.

## 2. 经验材料、实验事实和背景理论是物理模型的基础

理想化的物理模型是建立在经验材料和实验事实的基础上的,而且有一定的背景理论作指导.科学家以人们长期的经验积累和在科学实验中取得的大量素材为基础,并在一定的背景理论指导下,经过一系列的科学抽象、概括和逻辑论证,从而建立起相应的物理模型.这里,科学家丰富的想象力和创造精神以及坚持不懈的努力往往有着十分重要的作用.回顾一下前面介绍的卢瑟福有核模型的建立可以有更具体的体会.

### (1) 前人为卢瑟福积累了丰富的经验材料

在卢瑟福以前,对原子结构模型除汤姆生的“面包夹葡萄干”式模型外,还提出过多种不同的模型.

1. 1902年德国基根大学教授勒纳德(P. Lenard, 1862—1947)提出了“中性微粒模型”.他根据自己做过的阴极射线穿透金属箔

的实验,表明金属中的原子并非实心的,其中应有大量的空隙,因此他认为原子内的电子和相应的正电荷组成“中性微粒”,取名为“动力子”(dynamids),无数“动力子”漂浮于原子内部的空间。

II. 1904年日本的长冈半太郎(Hantaro Nagaoka, 1865—1950)提出了“土星模型”。长冈根据麦克斯韦的土星环理论推测原子的结构,认为原子是一个很重的正电荷,电子围绕着它按一定的间隔分布在周围。他还通过计算说明电子运动和光谱的关系。虽然长冈的理论很不完善,但他已提出了原子核的观念,为后来卢瑟福有核模型开辟了道路。

III. 1908年瑞士的里兹(W. Ritz, 1878—1909)提出了“磁原子模型”。他通过对原子光谱的研究,认为原子光谱线的频率决定于磁场的作用力,因此每个原子像一根小磁棒,它的磁性是由电子绕轴旋转形成的。

此外,早在1896年,洛仑兹(H. A. Lorentz, 荷兰, 1853—1928)提出的弹性束缚电子模型,1897年开尔文提出的包含电子的正电云模型等。

这些模型虽然并不成功,但都形象地启示人们的思考和想象,激发人们进一步去探索原子深层结构的奥秘,卢瑟福也正是由此踏上了成功之路。

## (2) 新的实验事实呼唤建立新的物理模型

卢瑟福的核式结构模型是应 $\alpha$ 粒子大角度散射实验的需要而建立的。

早在1906年,卢瑟福就注意到,用小孔校直了的 $\alpha$ 粒子束穿过空气时能在照相底版上留下轮廓十分清晰的光斑,如果在它经过的路径上放置一块厚度仅为20微米的云母片时,光斑就模糊了,这种模糊状态相当于有一部分 $\alpha$ 粒子偏转了大约 $2^\circ$ 。卢瑟福

本来都是用汤姆生的实心带电球原子模型和带电粒子散射理论来解释的,对于小角度散射矛盾还不明显,后来用金箔做实验时出现了大角度散射现象,表现出明显的矛盾.因为  $\alpha$  粒子的质量( $6.64 \times 10^{-27}$  千克)比电子质量( $9.1 \times 10^{-31}$  千克)大得多,约为电子质量的 7300 倍,它与电子相碰时,相当于一颗高速飞行的子弹撞到一粒尘埃,不会使  $\alpha$  粒子的速度方向有显著变化,使  $\alpha$  粒子发生偏转的只能是原子中正电荷的作用.

我们可以用汤姆生模型对  $\alpha$  粒子的偏角作一估算:

设原子的半径为  $R$ , 电量  $Q_z = Ze$ , 均匀分布于整个原子内. 当  $\alpha$  粒子在原子外时, 因整个原子呈电中性而不受力. 当  $\alpha$  粒子进入原子内与中心相距为  $r$  时, 仅受到半径为  $r$  的这部分球体内电荷的作用(图 30), 这部分球体的电量为

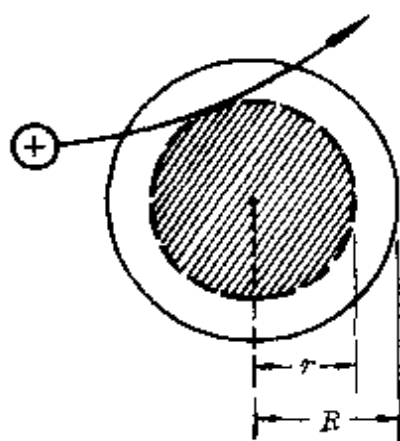


图 30

$$Q_r = \frac{Q_z}{\frac{4}{3}\pi R^3} \cdot \frac{4}{3}\pi r^3$$

$$= \frac{r^3}{R^3} Q_z,$$

由库仑定律得相互斥力

$$F = k \frac{Q_r q_\alpha}{r^2} = k \frac{Q_z q_\alpha}{R^3} r.$$

即与离开中心的距离  $r$  成正比.

设  $\alpha$  粒子的入射动量为  $mv_0$ , 受到原子中正电荷的冲量作用后出射动量为  $mv$ , 引起的动量变化为  $\Delta mv$  (图 31). 显然, 当正电荷的斥力冲量方向(即  $\Delta mv$  的方向)垂直入射动量  $mv_0$  的方向时,

使  $\alpha$  粒子发生偏转的角  $\theta$  最大. 由图 31 知

$$\theta = \text{tg}^{-1} \frac{\Delta mv}{mv_0} = \text{tg}^{-1} \frac{Ft}{mv_0}$$

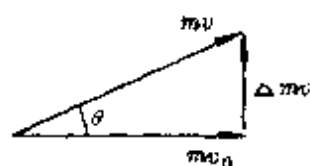


图 31

因为  $\alpha$  粒子射向原子时可能受到的最大斥力为

$$F_m = k \frac{Q_z q_\alpha}{R^3} R = k \frac{Q_z q_\alpha}{R^2},$$

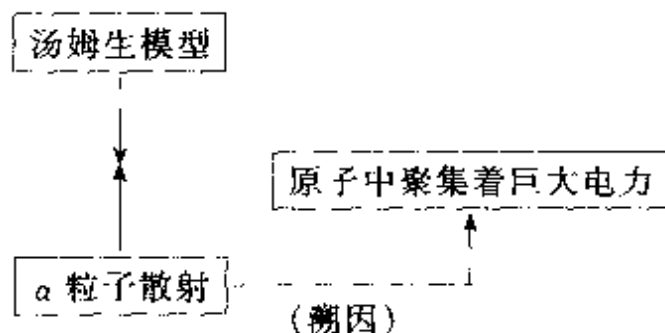
$\alpha$  粒子穿越原子时可能的最长时间为

$$t_m = \frac{2R}{v_0},$$

将  $F_m$  和  $t_m$  代入偏角  $\theta$  的表达式即可估算得最大偏角

$$\theta_m = \text{tg}^{-1} \frac{k \frac{Q_z q_\alpha}{R^2} \cdot \frac{2R}{v_0}}{mv_0} = \text{tg}^{-1} \frac{2kQ_z q_\alpha}{Rmv_0^2}.$$

取  $\alpha$  粒子的入射速度  $v_0 = 1 \times 10^7$  米/秒, 原子半径  $R = 10^{-10}$  米, 金原子的正电量  $Q_z = Ze = 79 \times 1.6 \times 10^{-19}$  库,  $\alpha$  粒子的电量  $q_\alpha = 2e = 3.2 \times 10^{-19}$  库, 质量  $m = 6.64 \times 10^{-27}$  千克, 代入计算得  $\alpha$  粒子可能发生的最大偏角仅为  $\theta_m = 4'$ , 与实验中发现大于  $90^\circ$  的散射角的结果相差甚远.



这一新的实验事实与旧模型的尖锐矛盾, 召唤卢瑟福去建立新的原子模型, 并通过溯因法判断出原子中存在着巨大的电力, 从

而形成新模型的萌芽。

### (3)背景理论知识对新模型有密切的逻辑联系

任何模型的产生都离不开一定的背景理论。

当时,卢瑟福面临着大量关于放射性元素,能辐射出各种各样的射线的实验,尤其是卢瑟福和索第(F. Soddy, 英国, 1877—1956)共同进行的科学实验,成功地从铀分离出一种新物质钍—X。他们发现这种钍—X放射性的衰变丝毫不受改变物理条件或加进其它化学物质的影响。此外,他们还发现,因受镭或钍射线的作用而被暂时活化的非放射性物质也能放出 $\gamma$ 射线,所有这些材料不仅表明原子中有巨大的电力,而且是有内部结构的。

另一个重要的背景知识就是人们已知的电子的质量只有氢原子的 $\frac{1}{1840}$ ,总带一份负电荷。再加上元素周期律的知识,人们完全可以归纳出这样的结论:原子是有复杂结构的,可以由一种形式转化为另一种形式;电子很可能是表明化学性质周期变化的原子结构的共同单位。

卢瑟福根据 $\alpha$ 粒子散射实验得出的关于原子中聚集着巨大电力的结论,再加上其它一些背景知识就可以作出在原子中存在一个体积很小、质量很大的核的判断。于是,卢瑟福的下一个目标就是需设计实验来完善还不十分清晰的模型构想。

### (4)通过实验和数学方法完善模型

卢瑟福的助手盖革设计出一种可用来计算出镭放射出 $\alpha$ 粒子的方法,这就是盖革计数器。

盖革计数器的基本结构如图 32 所示。在一个玻璃管内有一个导电的圆筒(或在管壁上涂一层导电薄膜)做阴极,一根通过圆筒轴心的金属丝做阳极。管内装入惰性气体和少量的乙醇气或溴气。在两极上加上约 800 ~ 1500

伏的直流电压. 当有射线粒子飞进管内时, 管内气体电离, 产生的电子在电场作用下向阳极加速运动. 电子在运动中能量越来越大, 达到一定值时, 会使气体分子发生电离, 再产生电子. 于是经过一段很短时间, 就会产生大量电子, 这些电子到达阳极, 正离子到达阴极, 就使计数管发生一次短暂的放电, 从而得到一次脉冲电流.

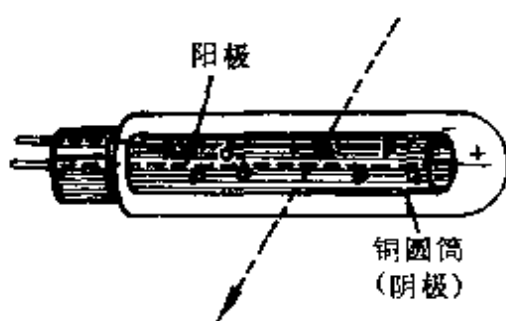


图 32 盖革计数管

他们结合数学方法利用盖革计数器算出在千分之一克的镭里, 每秒能发射出 136,000 个  $\alpha$  粒子. 这样, 不仅使对  $\alpha$  粒子的散射问题有可能进入定量的研究, 也意味着, 从卢瑟福 1897 年发现  $\alpha$  射线以来, 人们首次能在实验室里观察到单个  $\alpha$  粒子即单个原子(氦原子)的行踪.

1909 年卢瑟福的助手盖革和马斯登发表了他们对  $\alpha$  粒子散射的测量结果: “三组测量表示, 在这些条件下, 8000 个粒子中有一个要反射回来.” 卢瑟福认为这只能是单次碰撞的结果, 才形成有核模型的构想.

为了检验这种有核模型的真实性和与库仑定律的一致性, 应从库仑定律导出数学式, 算出  $\alpha$  粒子在离排斥中心不同距离处通过时产生偏转的多少. 卢瑟福在一位年轻的数学家福勒帮助下导出了散射公式, 它与盖革用闪烁计数器测得的散射曲线非常符合. 盖革和马斯登在论文里写道: “我们完全证实了卢瑟福教授的理论.” 这样, 原子核的真实性被确证了.

由此可见, 一个模型的完善和确立, 决不是一蹴而就的, 它往往需要在背景知识与实验之间经历多次的反复, 最后才能被确证下来. 其中, 除了依靠科学家敏锐的观察、丰富的想象和宏博的理

论知识外,还必须敢于冲破传统理论束缚的勇气和一丝不苟、刻苦工作的精神.如在用闪烁法直接记数时,观测十分辛苦,整个实验过程都要守在暗室里,眼睛通过显微镜紧紧盯住硫化锌荧光屏,一个一个地统计闪烁数,在实验过程中需记下 100,000 次以上的闪烁.可以想象,这是件多么艰巨的工作,充分显示了前人科学研究成果的来之不易.

### 3. 抽象、假设和类比是建立物理模型的基本方法

物理模型是高级思维活动的产物,脱胎于事物原型的高度抽象与概括.

假设、类比是建立物理模型的基本的思维方法.譬如,杠杆模型就是从许多生活、生产工具中抽象出来的.

我国远在春秋战国时期的古书中已有使用桔槔从井水打水的记载(图 33).这就是一种杠杆.在由墨翟(约前 480—约前 420)创立的墨家所著的《墨经》中对它的平衡条件已作出了很全面的分析.可以说,我国古代祖先比古希腊阿基米德早 200 多年发现了杠杆原理.



图 33

在西方,古希腊阿基米德 (Archimedes of Syracuse, 约前 287—前 213) 把生活、生产中应用杠杆得来的一些经验知识归纳成几条“不证自明的公理”:



(1)在无重量的杆的两端离支点相等的距离处挂上相等的重量,它们将平衡;

(2)在无重量的杆的两端离支点相等的距离处挂上不相等的重量,重的一端将下倾;

(3)在无重量的杆的两端离支点不相等的距离上挂上相等的重量,距离远的一端将下倾;

(4)一个重物的作用可以用几个均匀分布的重物的作用来代替,只要重心的位置保持不变.相反,几个均匀分布的重物可以用一个悬挂在它们的重心处的重物来代替;

(5)相似图形的重心以相似的方式分布.

从这些公理出发,阿基米德运用几何学的方法,通过严密的逻辑证明,得出了杠杆平衡原理:两重物平衡时,所处的距离(即离开支点的距离)与它们的重量成反比.

这个原理的发现及其应用,当时曾引起了轰动.至今还流传下来这样的传说——阿基米德曾对叙拉古的希罗王(King, Hiero, 前 269—前 216 在位)宣称:“给我一个稳固的支点,我就能把地球挪动.”

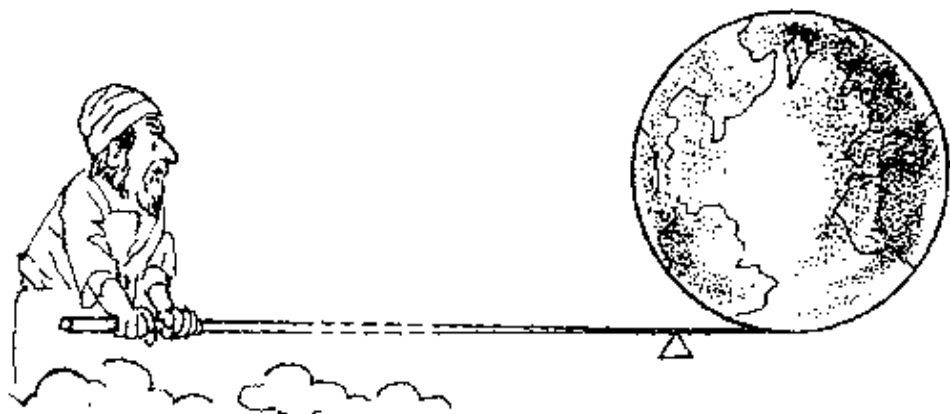


图 34 阿基米德撬动地球

在阿基米德所归纳的公理中已使用了“无重量”这样的理想条

件,并得出这个理想条件下的杠杆平衡条件,可以说已形成了杠杆模型的雏型.只是当时生产力低下,物理学还只处于早期的哲学思辨和零星研究阶段时,思维的层次尚未达到(也无需达到)这么高的境界.

以后,随着生产的发展,制造了更多更复杂的机械(机器),如较简单的滑轮、轮轴、抽水唧筒、杆秤(天平)以及起重机等(图35).并且,随着静力学理论的发展,研究水平的提高,人们注意到许多物体(包括上述一些简单和复杂的机械)的平衡状态都可以抽象为满足一定条件下绕某一固定轴(或点)的转动,于是从大量具体的物体(包括各种工具和机械)中抽象出杠杆模型.

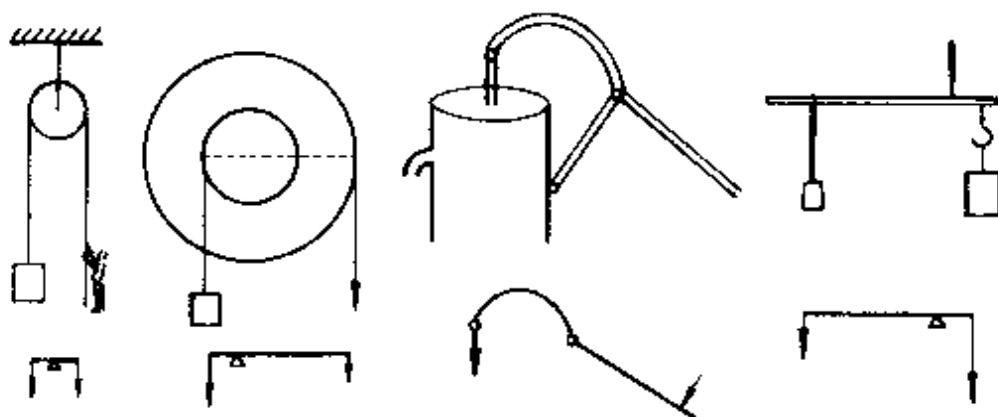


图 35

所以,现在我们说的“杠杆模型”,已脱胎于具体的一根绕固定轴(或支点)转动的硬棒,它已不再具有原型的细节特征,但却可概括着众多原型的共性:能绕固定轴(或支点)转动,或可以看成绕某一根假想的轴转动,并且已不限于只受到一个动力和一个阻力的简单情况.它的平衡条件也已从初中物理归纳的“动力×动力臂=阻力×阻力臂”,上升到“使杠杆绕顺时针向转动的所有力矩之和等于使杠杆绕逆时针向转动的所有力矩之和”,用公式表示为

$$\sum M_{顺} = \sum M_{逆}.$$

利用这个杠杆模型,既可以研究像吸水唧筒、滑轮、轮轴、杆秤以及人体某部分肌肉骨骼的杠杆作用(图36),也可以研究像塔式起重机、一般物体的转动平衡问题和计算均匀分布的不规则形状的重心位置等较为复杂的问题.

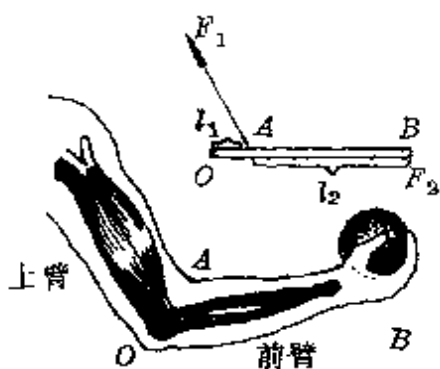


图 36 二头肌的杠杆模型

如图 37 所示的起重机,计算最大起重时可看成绕右门脚为轴转动的临界平衡杠杆(计算最大配重时则看成绕左门脚为轴转动的临界平衡杠杆);图 38 中把小球滚上台阶,可看成绕球与台阶接触处为轴转动的平衡杠杆.

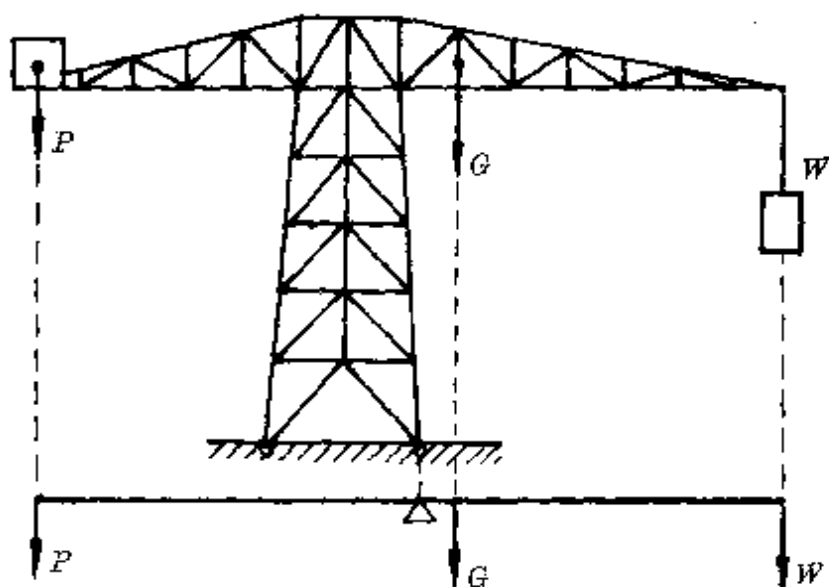


图 37

重时则看成绕左门脚为轴转动的临界平衡杠杆);图 38 中把小球滚上台阶,可看成绕球与台阶接触处为轴转动的平衡杠杆.

图 39 中,在一个半径为  $R$  的均质圆球中挖去一个半径  $r = \frac{R}{2}$  的球穴后,计算剩余部分的重心位置时,可设想在对称位置再挖去一个小球 II,挖去两个小球后的剩余部分 I 的重心在原球心  $O_1$ ,因此,计算挖去一个球穴后的重心位置就转化为一个找寻杠杆平

衡支点的问题(图 39 下).式中

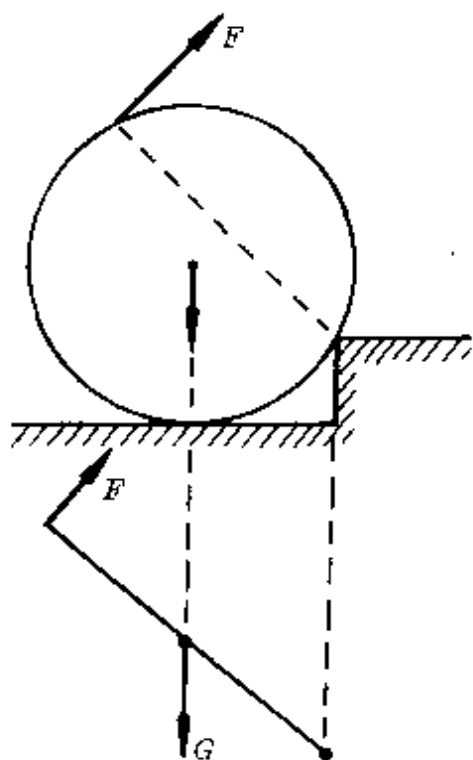


图 38

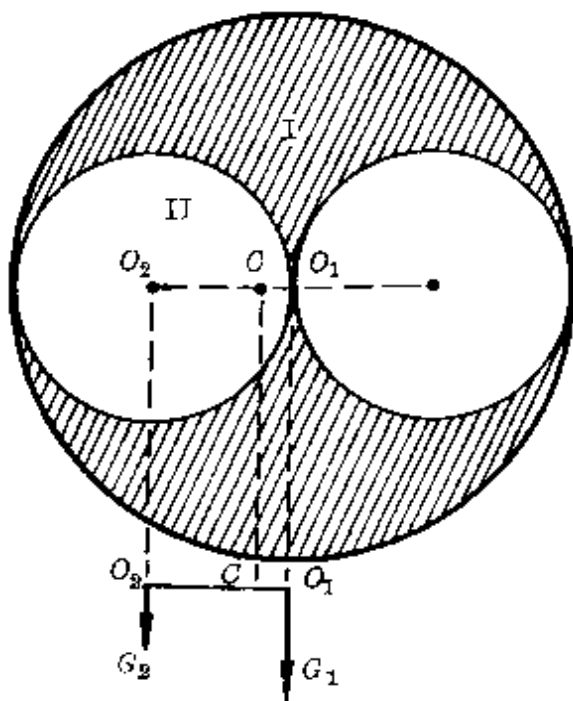


图 39

$$G_1 = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho - 2 \times \frac{4}{3} \pi \left( \frac{R}{2} \right)^3 \rho = \frac{3}{4} \times \frac{4}{3} \pi R^3 \rho,$$

$$G_2 = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{R}{2} \right)^3 \rho = \frac{1}{8} \times \frac{4}{3} \pi R^3 \rho.$$

由杠杆平衡条件

$$G_1 \times CO_1 = G_2 \times CO_2 = G_2 \left( \frac{R}{2} - CO_1 \right),$$

即得重心 C 离原球心距离为

$$CO_1 = \frac{G_2 R}{2(G_1 + G_2)} = \frac{1}{14} R.$$

由此可见, 杠杆模型的建立完全是在具体原型基础上通过抽象思维的结晶.

物理模型的建立也常依赖于假设. 除了在对具体原型抽象过

程中需要忽略某些次要的、非本质的因素(如不计杠杆重力等)外,常常因为某些事物原型的真相比较隐蔽或人们还不清楚时,就完全是由假设建立物理模型的.譬如关于天体运行结构,无论是托勒密的九重天模型还是哥白尼的太阳系模型,都是依据假说形成的一种模型,也完全可以称为假设.从这个意义上说,假设与物理模型之间没有不可逾越的鸿沟.

还有一些物理模型是从类比或比较中受到启发而提出来的.如前面介绍的德鲁德通过自由电子的运动与气体分子的运动相类比,提出金属导电模型;卢瑟福在 $\alpha$ 粒子散射实验基础上通过与太阳系模型类比,提出原子核式结构模型.在热学发展史上,还有一个通过类比提出的极为著名的模型——卡诺理想循环.

19世纪初以来,蒸汽机得到广泛的应用.然而人们还只知道怎样制造蒸汽机和使用蒸汽机,对蒸汽机的理论了解不多.当时的热机工程界热烈讨论着这样几个问题:如何提高热机的效率?热机效率是否有一个极限值?用什么样的工作物质最理想?一些工程师由于缺乏理论的指导,只能采用盲目试验的办法,曾采用过空气、二氧化碳,甚至采用酒精代替蒸汽,试图找到一种最佳工作物质,能有效地提高热机的效率.

为此,法国青年工程师卡诺(S. Carnot, 1796—1832)给自己提出了一个任务:“从足够普遍的观点”去研究“由热得到的运动”.

图 40 是蒸汽机气缸示意图.从锅炉送来的高温蒸汽从气阀 A 进入气缸左边,推动活塞向右移动,把右边已做过功的废气排出.以后,高温蒸汽从气阀 B 进入气缸右边,推动活塞向左移动,再把左边已做过功的废气排出.这里的高温蒸汽(由锅炉产生)和低温大气(冷凝器)相当于两个温度不同的热库,活塞工作时每次必须把废气排出才能完成往复循环.



高温热源接触而吸热的过程可看做是一个温度为  $T_1$  的等温变化过程；同样，工作物质和低温热源接触的放热过程可看做是温度为  $T_2$  的等温过程。因为只和两个热源发生热交换，所以当工作物质和热源分开的过程必然是绝热过程。可见，这个热机的循环过程应该是由两个等温过程和两个绝热过程组成，在  $p - V$  图上可表示如图 42 所示。它的效率仅取决于热源的温差，即

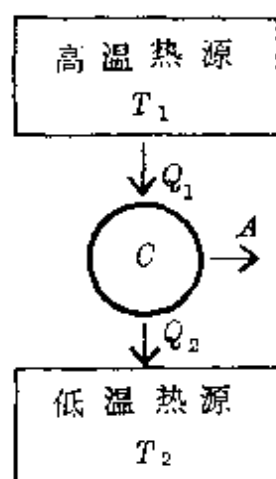


图 41

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

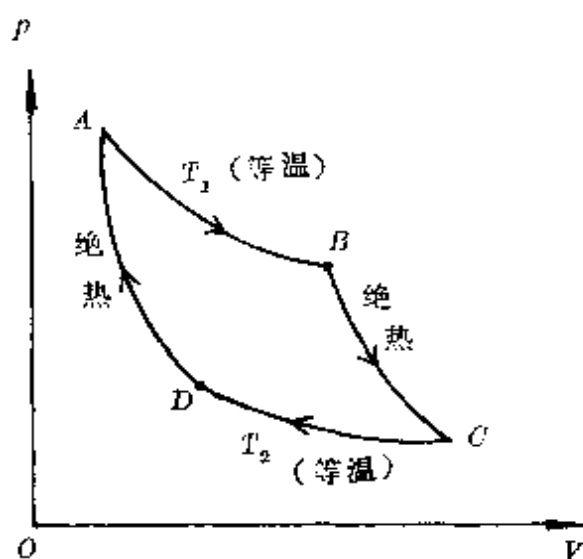


图 42

遵循这个理想工作循环的热机称为卡诺热机，它是一种理想化的热机模型，一切实际热机的热效率都低于卡诺热机的效率，卡

\* 卡诺循环的  $p - V$  图是克拉珀龙 (B. P. E. Claplyron, 法国, 1799—1864) 在 1834 年重新研究卡诺理论时所表示的。卡诺理想热机的效率的正确证明是克劳修斯 (R. J. E. Clausius, 德国, 1822—1888) 于 1850 年完成的。

诺热机的热效率是热机的最高极限。

卡诺在这一研究工作中出色地运用了理想模型的方法,建立了卡诺热机和卡诺循环,对热机的发展起了很大的推动作用。在实践上,他的研究为提高热效率指明了方向——应该尽量提高发热器的温度,降低冷凝器的温度,且与工作物质无关;在理论上,他的理论包含了热力学第二定律的基本内容——从单一热源吸热使之完全变为有用功而不产生其它影响是不可能的\*。

恩格斯评价说:“他研究了蒸汽机,分析了它……他撇开了这些对主要过程无关重要的次要情况而设计了一部理想的蒸汽机(或煤气机)。的确,这样一部机器就像几何学上的线或面一样是决不可能制造出来的,但是它按照自己的方式起了像这些数学抽象所起的同样的作用;它表现纯粹的、独立的、真正的过程。”

#### 4. 物理模型需在实践中不断发展与进化

理想化的物理模型是一个历史范畴,它往往受到一定的科学技术条件和人们当时的认识水平的限制,只是在某种范围内和一定程度上对客观事物或客观过程抽象的结果。因此,物理模型的合理性是相对的。随着科学试验和观察手段的不断更新,新的实验事实的不断发现,以及经验材料的积累和科学理论的发展,在原来的实验事实基础上,根据原来的理论建立起来的旧模型会逐渐暴露出它的局限性,这就要求人们根据新的实验事实或日益丰富的经验材料和新的科学理论,抽象出更新的理想模型。

---

\* 从单一热源吸热而不向冷凝器放热的热机并不违背能量守恒定律,但同样是不可能的,因此称它为第二类永动机。热力学第二定律也可说成是:第二类永动机是不可能的。



新建立的物理模型往往有这样的特点,它包含着旧模型合理的内涵,克服它的局限性,更接近于客观实在,能更准确地反映客观事物的本质.

我们从哥白尼模型到开普勒模型、从卢瑟福模型到玻尔模型的发展中,可以清楚地认识到这一点.

### (1)从哥白尼模型到开普勒模型

哥白尼模型实际上并没有摆脱柏拉图关于圆周运动是最完美运动的思想,并且仍旧采用了托勒密的“均轮一本轮”组合运动模型,因此他无法发现行星运动的规律.

八分之差  
的启发

开普勒(J. Kepler, 1571—1630)是德国天文学家,1600年受聘到布拉格天文台当了著名丹麦天文学家第谷·布拉赫(Tycho Brahe, 1546—1601)的助手.翌年,第谷逝世后把毕生的观察记录——大约750颗星体的有关资料和图表(其中包括详尽的关于火星运动的全部记录)都留给了开普勒.探索天体运行奥秘的“接力棒”,就这样从第谷手中传给了开普勒.当开普勒根据老师留下的资料,试着用托勒密—哥白尼的运动组合模型说明火星轨道的细节时,他拼凑了70次,所观测的位置与第谷的观测记录仅相差 $8'$ ,应该说已是十分成功了.

但开普勒深信老师亲自制作的仪器和观测误差是很小的,绝不会超过 $2'$ .开普勒认为这 $8'$ 之差意味着用托勒密—哥白尼的“本轮—均轮”组合运动模型不可能得到与实测数据相符的结果.开普勒坚定地指出:“单这 $8'$ 就已经为改造全部天文学铺平了道路.”后来的事实确也如此,开普勒在这 $8'$ 的基础上,对哥白尼模型进行了根本性的改造和进一步的完善.

为了解决这 $8'$ 之差,开普勒大胆地抛开了束缚人们头脑两千年之久的天体做“匀速圆周运动”的观念,决心根据第谷的观测结

果,找出行星轨道的形状和大小.

**开普勒巧  
测轨道**

开普勒首先面临的难题是:用什么方法去测定行星(包括地球)运动的“真实”轨道,如同观测者能从“天外”看行星绕太阳运动一样?开普勒经过思索,想出了一条“动中取静”的妙计.他依照大地测量工作中确定基线的方法,认识到要测定地球(在其轨道上)与太阳的距离,同样要以某一恒星作为定点,以便与太阳构成基线.但开普勒并没有去找这样的恒星,却利用了同时对太阳和火星进行观测的巧妙办法去测定地球的轨道.具体的测法是:从太阳、地球、火星处于一条直线的时刻开始描绘,经过一个火星年(687天),火星又回到同一位置,相对于恒星天球可以分别绘出从太阳和火星到地球的视线,它们的交点就是地球在其轨道上的新的位置(图43).经过若干组每隔一个火星年的观测数据的处理,就可确定下地球的轨道形状.开

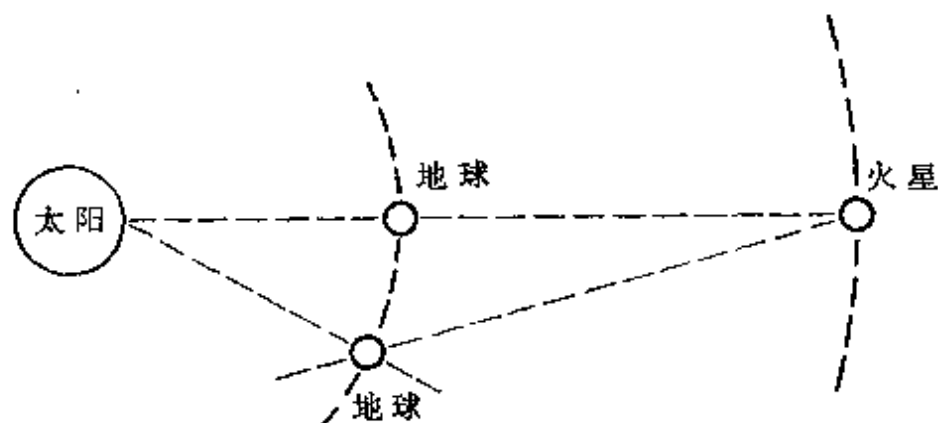


图 43

普勒发现地球的轨道几乎是一个圆周,太阳稍稍偏离圆心.然后,开普勒再次利用了每隔一个火星年的观测数据,确定火星的轨道.因为每经过一个火星年,火星总在同一位置,而地球却处在自己轨道上的两个不同的位置.从这两个位置绘出的指向火星的视线的交点必是火星轨道上的一点.利用若干组这样的数据,就可以确定

下火星的若干位置,从而获得火星的轨道曲线。

**行星运动三定律** 开普勒立即看出,火星的轨道是一种“卵形线”。通过大量的复杂计算,开普勒终于发现这个曲线就是古希腊人早已研究过的椭圆;采用同样的方法,他又发现每个行星都沿椭圆轨道运动,太阳就在这些椭圆的一个焦点上。开普勒写道:“如梦方醒一样,一盏新灯照亮了我的心头,如果把太阳放在卵形线的一个焦点上时,第谷的观察是那样地令人满意。”由此,他得出了轨道定律,即开普勒行星运动第一定律——所有行星分别在大小不同的椭圆轨道上运动,太阳位于这些椭圆的焦点上。

进而,开普勒根据地球的运动轨道和每天对太阳视位置的记录,确定了地球在轨道上的位置和沿轨道的运动速率。开普勒发现,地球和火星在离太阳近时(近日点处)运动得快,而在离太阳远时(远日点处)运动得慢。通过计算得出,地球到太阳的连线在相等时间内扫过的面积都是相同的,后来通过对火星的计算,同样发现火星与太阳的连线在相等时间内扫过的面积相同(图 44)。由于这

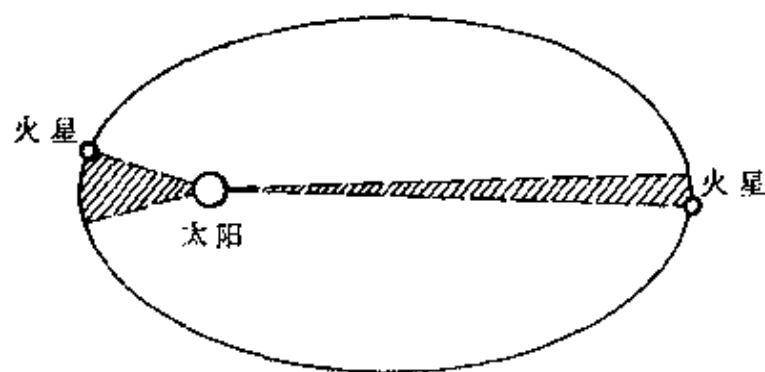


图 44

个关系是如此美妙和简单,所以开普勒虽然仅仅计算了地球和火星的运动,但他坚信这个关系无论对于哪个行星和轨道上的哪个

部分都是正确的,由此得出了面积定律,即开普勒行星运动第二定律——在同样的时间内,行星与太阳的连线在其轨道平面上所扫过的面积相等。

有趣的是开普勒轨道定律的发现也撞上了一个好的机遇:在当时已知的六颗行星中,除水星外(因观测记录太少,开普勒当时未研究),各行星的轨道偏心率\*都很小,如下表所列,其中只有火星轨道的偏心率较大,而开普勒恰好选中火星进行研究,因而使他得以有可能察觉出是椭圆,开普勒曾说:“惟有火星才使我看透天文学的秘密,否则这个秘密永远不会揭晓。”

各行星的偏心率

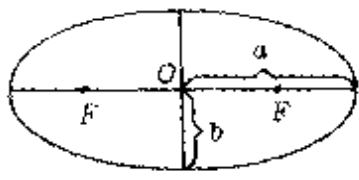
| 行星 | 偏心率 $e$ | 短轴与长轴之比( $b/a$ ) | 图 例  |
|----|---------|------------------|--|
| 水星 | 0.206   | 0.9785           |  <p>The diagram shows an ellipse with a horizontal major axis and a vertical minor axis. The center is labeled 'O'. The semi-major axis is labeled 'a' and the semi-minor axis is labeled 'b'. Two foci are labeled 'F' on the major axis.</p> |
| 金星 | 0.007   | ~ 1.0000         |  |
| 地球 | 0.017   | 0.9999           |  |
| 火星 | 0.093   | 0.9957           |  |
| 木星 | 0.048   | 0.9988           |  |
| 土星 | 0.056   | 0.9984           |  |

图 45

开普勒于 1609 年出版的《新天文学》一书中发表了上述两个定律,但开普勒并不满足,他坚信各个行星的运动周期和轨道大小应该是“和谐”的,它们之间必然存在着某种确定的联系,只有在找出各个行星的这种统一关系后,才能够构成一个太阳系的整体模型,从而体现出宇宙的和谐与一致,开普勒怀着这种信念,忍受贫困、疾病和其它不幸的折磨,长年累月地考察了许多因素的可能的组合。

\* 偏心率反映了椭圆的扁平程度,  $e = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2}$ , 偏心率大,椭圆越扁,圆的偏心率为零。

当时开普勒并不知道行星和太阳之间的实际距离,他以地球作为比较的标准.取日地平均距离作为距离的单位,以地球绕太阳运动的周期为时间的单位,反复耐心地进行各种运算,经过九年的努力,终于发现了各行星运动的周期与行星离太阳距离之间的关系.

| 行星名称 | 公转周期<br>( $T$ ) | 太阳距离<br>( $R$ ) | 周期平方<br>( $T^2$ ) | 距离立方<br>( $R^3$ ) |
|------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|
| 水星   | 0.241           | 0.387           | 0.058             | 0.058             |
| 金星   | 0.615           | 0.723           | 0.378             | 0.378             |
| 地球   | 1.000           | 1.000           | 1.000             | 1.000             |
| 火星   | 1.881           | 1.524           | 3.54              | 3.54              |
| 木星   | 11.862          | 5.203           | 140.7             | 140.85            |
| 土星   | 29.457          | 9.539           | 867.7             | 867.98            |

1619年,开普勒发表了行星运动的周期定律,即开普勒行星运动第三定律——各个行星绕太阳公转的周期的平方与它们到太阳的平均距离的立方成正比.用公式表示为

$$\frac{T_1^2}{R_1^3} = \frac{T_2^2}{R_2^3} = \dots \text{或} \quad \frac{T^2}{R^3} = \text{恒量}.$$

开普勒在发现这一定律时情不自禁地写道:“……(这正是)我16年以前就强烈希望要探求的东西.我就是为这个而同第谷合作……现在我终于揭示了它的真相.认识到这一真理,这是超出我的最美好的期望.”

开普勒克服了因天花病造成的视力减退与双手致残的巨大障碍,克服了因宣传哥白尼学说而两次遭到的政治迫害以及不得不背井离乡的困境,为天文事业奋斗一生,终于获得了成功.

开普勒行星运动三定律全面解决了行星体系的运行问题,比起托勒密—哥白尼模型,他的定律(或称开普勒模型)更为优美和简明.开普勒以哥白尼模型为基础,作了重大的修正和补充,因此

能更准确地反映了太阳系中各行星的运动规律.他利用第谷的数据和自己发现的定律编制了一套天文表,使用了一个世纪以上,直到用更为精确的望远镜的观测代替第谷的观测为止.开普勒也是用数学公式表达物理定律最早获得成功的人之一,从他的时代开始,数学方程就成为表达物理定律的基本方式.

## (2)从卢瑟福模型到玻尔模型

卢瑟福的原子模型虽然成功地解释了  $\alpha$  粒子散射实验,但与经典物理学理论是根本矛盾的.首先,根据经典电磁理论,电子绕核旋转,它会向外发射电磁波,能量会逐渐减小,因而电子绕核旋转的频率也将逐渐改变,这样,它向外辐射的光谱应是连续谱,这与实验中观察到原子的线状谱是互相矛盾的.其次,由于原子能量的逐渐减小,电子绕核运动的半径也将逐渐减小而很快落到核上.计算表明,原子的“寿命”仅  $10^{-12}$  秒的时间,这又与原子是一个稳定系统的事实根本矛盾.这些矛盾的存在,不仅表明这一模型还不完善,而且又一次预示着,对原子世界需要有一种不同于经典物理学的新的理论.对这一问题首先作出划时代贡献的是玻尔.

玻尔(N. Bohr, 1885—1962)是丹麦物理学家.1911年秋,玻尔赴英国剑桥大学卡文迪许实验室,在 J. J. 汤姆生指导下从事原子物理的实验和理论研究.1912年4月赴曼彻斯特,在卢瑟福的实验室工作.他既坚信卢瑟福有核模型是符合客观事实的,也清楚这一模型的困难.1912年6月,玻尔离开卢瑟福实验室后完全转入到对原子模型的研究上.



玻尔是从对氢光谱的研究上发现端倪的.如图 46 是从氢气放电时用摄谱仪摄得的氢原子在可见光区域和近紫外区域的特征谱线.

瑞士的巴耳末(J. J. Balmer, 1825—1898)根据氢光谱谱线的波

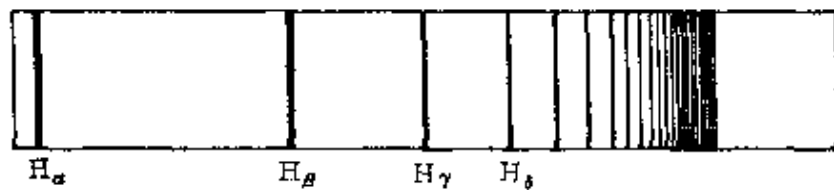


图 46 氢原子的特征谱线

长分布,在 1884 年就找出了一个经验公式

$$\lambda = B \frac{n^2}{n^2 - 4}, \quad (n = 3, 4, 5, 6)$$

由这一公式所表述的谱线称为巴耳末线系.后来瑞典的光谱学家里德伯(J. Rydberg, 1854—1919)改用波数(波长的倒数)表示:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{4}{B} \left( \frac{n^2 - 4}{4n^2} \right) = R \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad (n = 3, 4, 5, 6)$$

$R = 1.097373177 \times 10^7$ /米,称里德伯常数.此后,1908 年在红外区域又发现了氢光谱的帕邢线系.

1908 年,里兹提出了“并合原理”,即氢原子的任意一条谱线的波数可以表示成两个光谱项之差.可得到一个广义巴耳末公式

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right).$$

式中  $n_1$  取固定的正整数, $n_2$  取所有满足  $n_2 \geq n_1 + 1$  的正整数.

当  $n_1 = 1, n_2 \geq 2$  时,就得到赖曼线系;

当  $n_1 = 2, n_2 \geq 3$  时,就得到巴耳末线系;

当  $n_1 = 3, n_2 \geq 4$  时,就得到帕邢线系.

巴耳末公式所揭示的氢原子光谱线是以一定自然数的阶梯呈规律性的递增分布,给玻尔以很大的启发.他以原子只能发出有特定频率的光谱线这一事实出发,把卢瑟福、普朗克的思想结合起来,创造性地将量子观点引入到原子结构理论中去,在 1913 年接连发表了三篇被称为“伟大的三部曲”的不朽的论文,建立了玻尔

原子理论(或称玻尔模型)。

玻尔  
模型

玻尔模型中有两个著名的假设:定态假设和频率假设.玻尔说:“第一个假设是考虑了原子的普遍稳定性,第二个假设主要考虑了存在有线光谱.”这两个假设可以通俗地表示为三点:

I.原子只能处于一系列不连续的能量状态,在这些状态中,原子是稳定的,电子虽然环绕原子做加速运动,但并不辐射能量,这些状态称为“定态”。

II.原子在两个定态间可跃迁.原子从一种定态(设能量为  $E_2$ )跃迁到另一种定态(设能量为  $E_1$ )时,需要辐射(或吸收)一定频率的光子,所辐射(或吸收)的光子能量由这两种定态的能量差决定,即

$$h\nu = E_2 - E_1 = \Delta E.$$

其对应的波长为

$$\lambda = \frac{ch}{E_2 - E_1} = \frac{ch}{\Delta E}.$$

III.原子的不同能量状态对应着电子的不同运动轨道.由于原子的能量状态是不连续的,因此电子绕核运动的可能轨道也是不连续的,其半径满足条件

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}.$$

$n = 1, 2, 3, \dots$ 称为量子数, $h$ 为普朗克常量.这个条件称为轨道量子化.

能级  
公式

氢原子的各个定态的能量值,叫做它的能级.各个能级的能量都包括电子绕核运动的动能和电子跟核相互作用的电势能两部分之和.



设电子绕核运动的轨道半径为  $r$ 、电子的质量和电量分别为  $m$ 、 $e$ ，由核对电子的库仑力作为电子绕核运动的向心力，即

$$k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r}.$$

得电子绕核的动能

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \left( \frac{ke^2}{mr} \right) = \frac{ke^2}{2r}.$$

又由点电荷电势公式(参本节末推导)得电子的电势能

$$E_p = -\frac{ke^2}{r}.$$

因此，电子处于轨道半径  $r$  时氢原子的总能量(能级值)为

$$E = E_k + E_p = \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r}.$$

又从玻尔模型中轨道量子化的条件  $mvr = n \frac{h}{2\pi}$  和向心力公式可知：

$$m \sqrt{\frac{ke^2}{mr}} r = n \frac{h}{2\pi}.$$

由此即可得出电子绕核运动的轨道半径

$$r = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 mke^2},$$

把它代入上面能级值的表达式得各能级的能量为

$$E = -\frac{ke^2}{2 \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 mke^2}} = -\frac{2\pi^2 k^2 e^4 m}{n^2 h^2}$$

在正常状态下，原子处于最低能级( $n=1$ )，这时电子在离核最近的轨道上运动，这种状态叫“基态”。给物体加热或受光照射时，原子能够从相互碰撞或从入射光子中吸收一定的能量，从基态

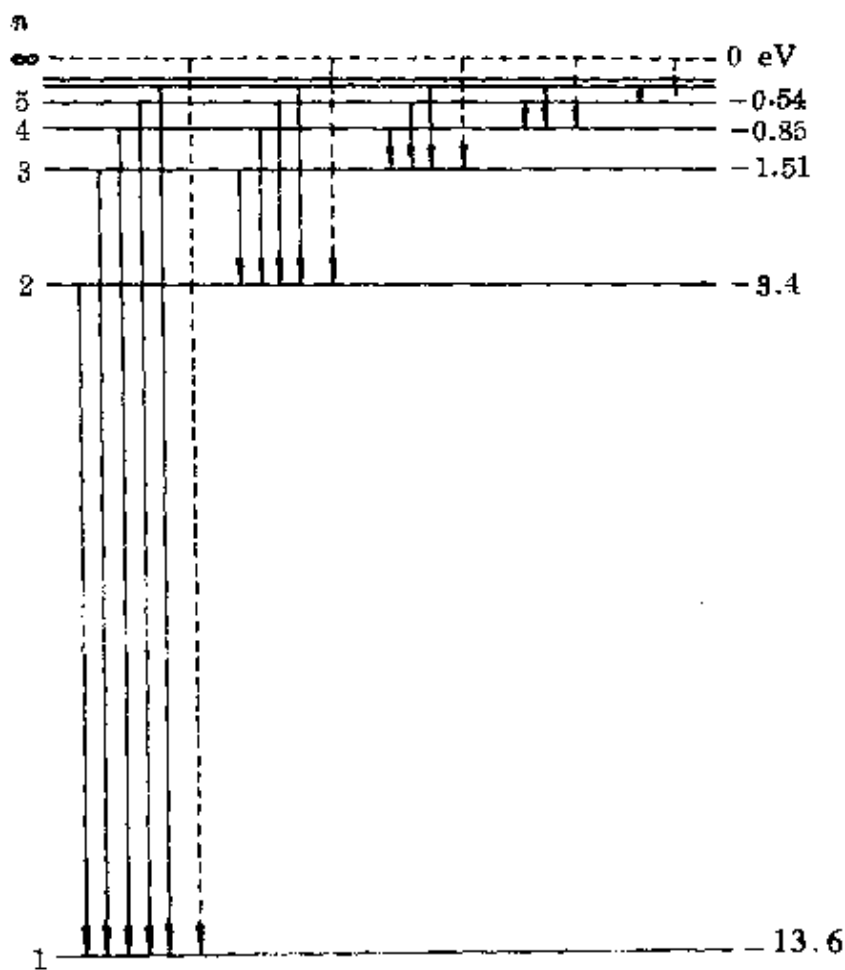


图 47 能级图

跃迁到较高能级 ( $n > 1$ ), 电子在这些轨道上运动时原子所处的状态, 称为“激发态”. 根据上面两个公式可以算出电子的不同轨道半径和对应的能级值:

| 量子数 $n$                           | 1     | 2    | 3     | 4     | 5     |
|-----------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|
| 半径 $r (\times 10^{-10} \text{米})$ | 0.53  | 2.12 | 4.77  | 8.48  | 13.25 |
| 能级值(电子伏特)                         | -13.6 | -3.4 | -1.51 | -0.85 | -0.54 |

习惯上常把氢原子的各个能级表示如图 47 的能级图.

成功  
与局限

利用玻尔模型可以成功地解释氢光谱: 氢光谱的产生是原子从高能级向低能级跃迁的结果, 原子从不同的高能级向同一低能级跃迁时产生的光谱属于同一

谱线系,其波长由公式  $\lambda = \frac{ch}{\Delta E}$  决定.如巴耳末线系分别是由  $n = 3, 4, 5, 6 \cdots$  等高能级向  $n = 2$  这一能级跃迁时产生的.在可见光区域内的四条谱线的波长依次为

$$\lambda_{\alpha} = \frac{ch}{E_3 - E_2}, \quad \lambda_{\beta} = \frac{ch}{E_4 - E_2},$$

$$\lambda_{\gamma} = \frac{ch}{E_5 - E_2}, \quad \lambda_{\epsilon} = \frac{ch}{E_6 - E_2}.$$

计算结果与实验测定相当符合.

玻尔还预言了存在氢原子的其它谱线系.果然,于1914年在紫外区发现了氢光谱的赖曼线系;1922年和1924年又先后发现了远红外区的布喇开线系和逢德线系.氢原子光谱各线系的产生都跟玻尔理论符合得很好.氢原子的各线系也可用轨道图表示,如图48所示.

根据玻尔理论还可给出里德伯常数:对巴耳末线系

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\Delta E}{ch} = \frac{-E_1}{ch} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right),$$

代入基态的能级值

$$E_1 = -\frac{2\pi^2 k^2 e^4 m}{h^2},$$

$$\text{则} \quad \frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 k^2 e^4 m}{ch^3} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right).$$

得里德伯常数

$$R = \frac{2\pi^2 k^2 e^4 m}{ch^3} = 1.097373 \times 10^7 \text{ 米}^{-1}.$$

它与实验结果符合得很好.

由于玻尔理论观点新颖,与经典物理理论不同,当初不少物理学家难以接受.对玻尔硬是“命令”电子的行为,有些物理学家认为

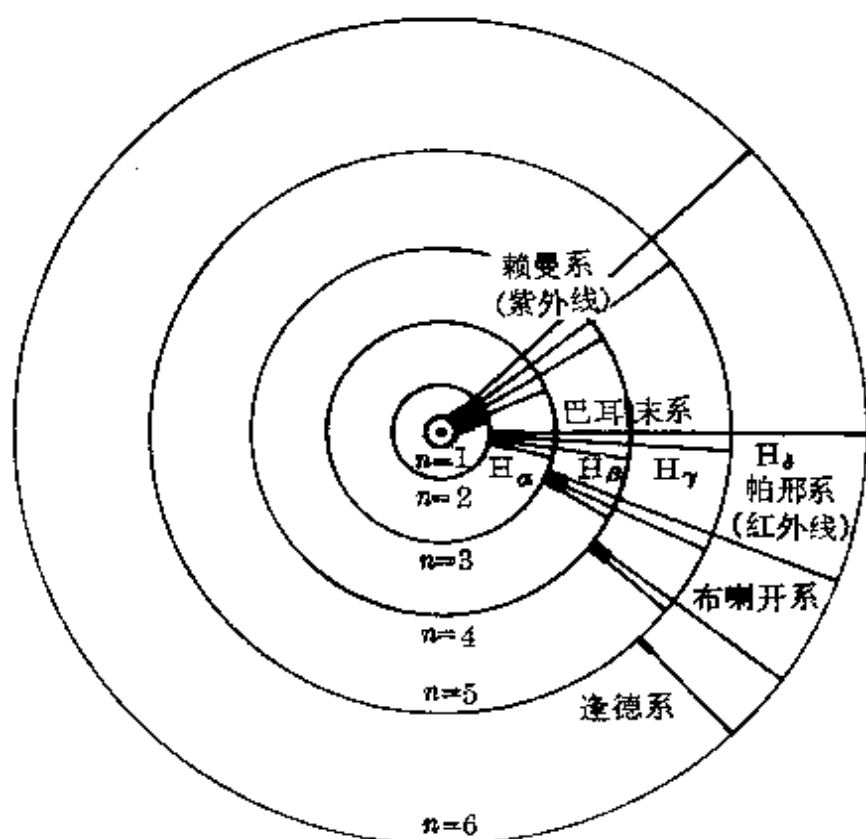


图 48 氢原子轨道图

是对经典物理学的“亵渎和疯狂”，有些物理学家很不以为然，认为这不是在搞物理，这不过是一块“无知的遮羞布”。不过就在玻尔理论提出后的第二年（1914年），玻尔的能级理论就被德国物理学家弗兰克—赫兹（James Franck 1882—1964；Gustav Hertz 1887—1975）从实验上验证了原子分立能态的存在，为玻尔理论提供了有力的证据\*。

苏联的著名理论物理学家福克在一首自由体诗中赞颂玻尔：

您的丰功伟绩无穷无尽，  
谁也无法诋毁，  
谁说您的理论狂乱暗晦？

\* 弗兰克—赫兹实验可参阅本丛书《图示与图像》一册。

是您宣布了这一伟大理论，  
我们绝不允许他人诽谤捣鬼！

玻尔理论的成功是由于引入了量子观点，但由于历史条件的局限，玻尔并没有从根本上脱离经典物理学的理论框架，因此用玻尔理论解释比较复杂的原子时遇到了困难，其失败之处在于它保留了过多的经典物理观点，有人称玻尔模型是“普朗克的量子观点与经典力学的混合”。但是，正由于这一“混合”，开始打破了经典物理一统天下的局面，开创了揭开微观世界基本特征的前景，为建立描述微观世界运动规律的量子力学理论体系奠定了基础。

物理模型的  
不断进化

从哥白尼模型到开普勒模型、从卢瑟福模型到玻尔模型等新旧模型的更迭，说明物理模型在实践中是逐步发展进化的。实际上，各种物理模型都不是凝固不变的。范德瓦尔斯气体模型虽然较理想气体模型更接近实际气体，但它与理想气体模型的区别也只是近似程度的不同。实践和理论的发展促使物理学家从气体微观结构和宏观理论两方面作进一步的修正。其中根据“理想气体是实际气体在压强趋于零时的极限性质”这一宏观推论进行修正的代表性方程是“昂尼斯方程”，将实际气体的状态方程表示成压强  $p$  的级数形式

$$pV = A + Bp + Cp^2 + Dp^3 + \dots$$

式中  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ … 分别为一系列系数，当  $p \rightarrow 0$  时上式就化为理想气体的状态方程，即

$$pV = A = RT.$$

又如金属导电模型，德鲁德用牛顿力学的方法去剖析微观客体——电子的行为，必然是十分粗糙的。事实上，铜的自由电子密度比标准状况下理想气体的密度高 3000 倍，并且它们都带电，强大的库仑力迫使它们会与离子频繁相碰，所以“自由电子气”模型

并不能真实地反映电子的导电运动.随着量子论的诞生,著名物理学家索末菲(A. J. W. Sommerfeld, 1868 ~ 1951)和美籍瑞士人布洛赫(F. Bloch, 1905— )等运用量子论提出“费米气”模型,并通过实验证明,对大多数元素和简单化合物,“费米气”模型已取得显著成功.不过对于非晶体,“费米气”模型也无法提供简明答案,又有待进一步发掘新的理论模型.

物理模型是人类认识未知世界的成果的结晶,必然受实践的制约,又必须在实践中发展和经受考验.针对层出不穷的新的科学发现中涌现的问题,人们可以采用不同的方法,创造各种不同的模型,然后通过实验进行筛选和修正,使模型从不完善走向完善.

## 四、中学物理教学中常见的四类模型

物理模型是一个理想化的形态,从不同的角度研究可以有不同的区分方法,并且也没有严格的定论.为了便于理解和应用,根据中学物理教学的特点及模型的主要教学功能,我们把它分为以下四类.

### 1. 对象模型

用来代替由具体物质组成的、代表研究对象的实体系统,我们称它为对象模型(也可称为概念模型).这一类模型在中学物理中最为常见,如力学中有质点、刚体、杠杆、轻质弹簧、单摆、弹簧振子、弹性体、塑性体、理想流体、行星运动太阳系模型等;热学中有弹性球分子模型、理想气体、绝热物质、绝对黑体、理想热机等;电学中有点电荷、试验电荷、理想导体、绝缘体、理想电表、纯电阻、纯电感、纯电容、无限长直导线、无限大平行带电板、无限长螺线管、理想变压器、理想二极管等;光学、原子物理中有光线、薄透镜、波粒二象性模型、原子模型等.

这种模型的建立(设计思想)主要基于以下两种情况:

一种情况是为了突出客观实体的主要矛盾或本质因素,采用了剪叶去枝的方法,摒弃了一些次要的非本质的因素,使研究客体简化和纯化后,从客观实体中直接抽象出来的,它的目的是为了简

化对问题的研究.如研究一列火车的加速运动时,就完全可以不必考虑运动中车轮的转动、车厢在弹簧上的上下振动和晃动等非主要因素;研究一个小灯的电功率时,就可以不必考虑灯丝的分布电容、分布电感等效应,把它简化为一个纯电阻处理.上面的大部分物理模型都是在这种思想指导下建立起来的.

另一种情况是为了解释某些行为和特性建立起来的模型.如为了解释  $\alpha$  粒子散射实验现象,提出原子的“核式结构模型”;为了解释光在干涉、衍射中表现的波动性和光电效应中表现的粒子性,提出了“波粒二象性模型”等.这一类模型可以称为理论模型,是科学家丰富想象力的结晶,在科学上有着极为重要的地位,往往是作为理论的初级形式出现的.

同一个客观物体在不同场合可以抽象成不同的对象模型.如研究地球绕太阳的运动规律时,把太阳抽象为质点模型;研究能量转换过程时,把太阳抽象为质点系模型;研究太阳在地面上的照度时,把太阳抽象为点光源模型等.

由于对象模型的建立有它特定的背景或条件,因此实际问题中对具体研究对象能否抽象成某个模型或抽象成什么模型也不能一概而论,应根据对问题的研究方向和要求确定.

**例 1** 在竖直墙上用细线悬挂两个均质小球(图 49).平衡时,图 49(a)中的悬线通过球心,图 49(b)中的悬线不通过球心,试分析两者的受力情况并画出受力图.

**解答** 把图 49(a)中的小球抽象为质点,它受到三个力:重力  $m_1g$ 、悬线拉力  $T_1$ 、墙壁弹力  $N_1$ ,其受力图如图 50(a)所示.

把图 49(b)中的小球抽象为一个刚体,它受到四个力作用:重力  $m_2g$ 、悬线拉力  $T_2$ 、墙壁弹力  $N_2$ 、墙壁静摩擦力  $f$ ,画出的受力图如图 50(b)所示.



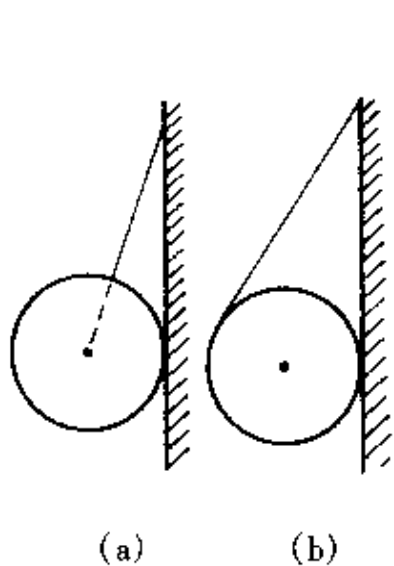


图 49

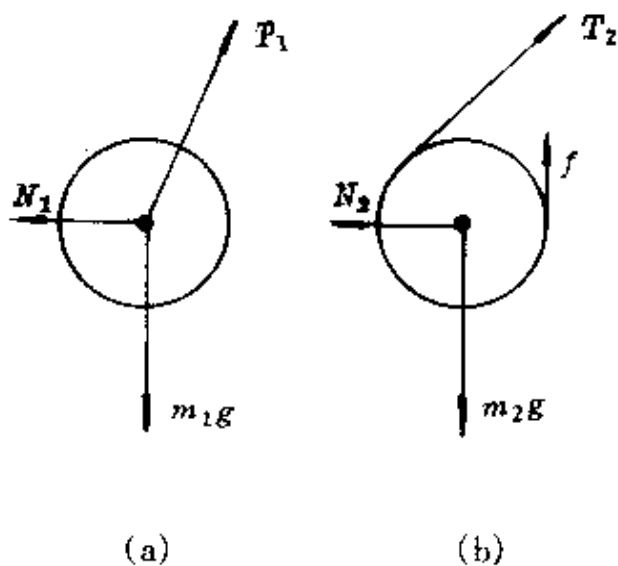


图 50

为什么同样用绳子靠墙悬挂一个小球,两者需要抽象成不同的物理模型呢?这是由它们不同的条件决定的。

因为是均质小球,重力必通过球心.图 49(a)中悬线通过球心,平衡时它只能沿  $T_1$ 、 $m_1g$  两者的合力方向挤压墙壁,墙壁产生的弹力必通过球心.可见图 49(a)中的小球是一个共点力系统,无须考虑它的转动,应该抽象为质点.图 49(b)中悬线不通过球心,小球不仅挤压墙壁,在悬线拉力  $T_2$  的作用下还有使小球顺时针向转动的趋势,而墙壁对球的弹力仍通过球心.显然,仅在  $m_2g$ 、 $T_2$ 、 $N_2$  这样三个力作用下小球是无法平衡的,为了阻止小球顺时针方向的转动趋势,墙壁必然会产生一个沿墙壁向上的摩擦力(虽然题中并未直接说明墙的摩擦情况).这样,才能保证对小球的合力矩为零,否则小球不会平衡.因此,图 49(b)中的小球不是一个共点力系统,而是一个平面力系(各个力作用在同一平面内),必须考虑转动效应,所以应该抽象为刚体。

有时,即使是同一个客体,在一个问题的几种不同情况下也需要抽象成不同的对象模型。

**例 2** 有一个质量为  $m$  的均质长方体木块,底面边长为  $a$ ,高为  $b$ ,放在斜面上.它与斜面间的动摩擦因数为  $\mu$  (图 51).当斜面倾角  $\theta$  由很小逐渐增大时,什么情况下木块沿斜面下滑? 什么情况下木块会翻倒?

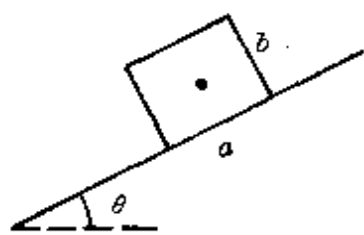


图 51

**解答** 这个木块放在斜面上时共受到三个力的作用:重力  $mg$ 、斜面支持力  $N$ 、斜面摩擦力  $f$ .如果只考虑木块沿斜面的滑行,可以把木块抽象为一个质点,木块所受三个力都可画在它的重心上,如图 52 所示.

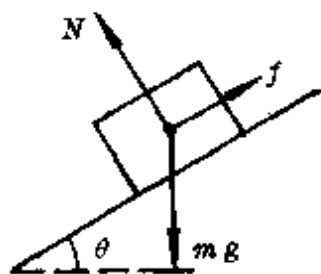


图 52

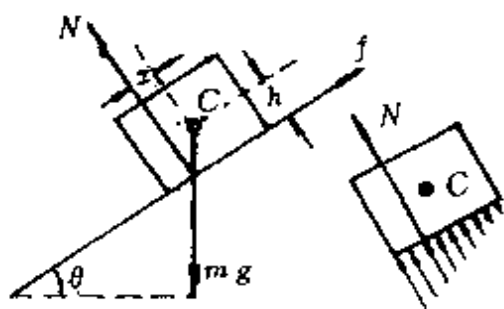


图 53

实际情况中,木块所受的摩擦力发生在它与斜面的接触面上,方向沿斜面向上.木块放在斜面上时又有前倾的趋势,势必造成前部(靠近斜面底端)稍稍压紧斜面,后部稍稍“放松”,斜面对木块各部分的支持力大小不同,各部分支持力的合力  $N$  不再通过木块重心,而稍稍前移,如图 53 所示.这样,才能保证摩擦力  $f$  和支持力  $N$  对重心  $C$  的合力矩为零.因此,实际情况下的木块不再是一个共点力系统,而是一个平面力系,所以不能抽象为质点,必须抽象为一个刚体.

设斜面支持力  $N$  的作用点前移  $x$ ,重心离斜面高  $h$ ,由平衡条

件知

$$mg \sin \theta - f = 0,$$

$$mg \cos \theta - N = 0,$$

$$Nx - fh = 0.$$

联立三式得

$$x = \frac{f}{N}h = h \operatorname{tg} \theta.$$

抬高斜面时,重力的分力  $mg \sin \theta$  和摩擦力  $f$  都会增大,但  $f$  有一个极限值,即

$$f_m = \mu_0 N.$$

式中  $\mu_0$  称静摩擦因数.

同时,斜面支持力作用点的前移距离  $x$ ,也受到木块几何尺寸的限制,它的极限值为  $x_m = \frac{a}{2}$ .

因此,在抬高斜面的过程中,若  $f$  先达到极限值  $f_m$  而  $x$  未达到极限值  $x_m$ ,则物体将沿斜面下滑;若  $x$  先达到极限值  $x_m$  而  $f$  未达到极限值  $f_m$ ,则物体将以木块前边缘为棱边逆时针方向翻倒.

由此可见,对质点和刚体这两个对象模型而言,抽象的依据决定于对物体的受力情况和运动情况的分析.当物体受到共点力系作用时或物体做平动时,可抽象成一个质点模型,当物体受到平面力系作用时,物体发生转动或有转动趋势时,应该抽象为刚体.

对于其它对象模型,同样需注意各自的背景条件.譬如在通常的电压电流测量中,都可把电压表、电流表看做理想电表,不必考虑其内电阻;在研究透镜的成像特性时,通常不必考虑因透镜厚度

所产生的“球面像差”和“色差”现象\*，可抽象为薄透镜等。

## 2. 条件模型

把研究对象所处的外部条件理想化，排除外部条件中干扰研究对象运动变化的次要因素，突出外部条件的本质特征或最主要的方面，从而建立的物理模型称为条件模型。如物体沿水平面运动时所受摩擦力对运动的影响不起主要作用，或需要假想一种没有摩擦力的环境，引入光滑平面的模型。其它如不可伸长、不计质量的绳子，轻质杠杆，只受重力作用或不计重力作用，均匀介质，匀强电场和匀强磁场等。

引入条件模型主要是为了简化对问题的研究。譬如，研究在地面上空不高处无初速下落的物体的运动，把局部空间看成一个重力强度为  $g$  的均匀重力场；不同物体下落时受到恒定的重力作用，运动情况就比较简单。

设两物体的质量分别为  $m_1$ 、 $m_2$ ，所受阻力的分别为  $f_1$ 、 $f_2$ （图 54），它们的运动方程为（取竖直向下为正方向）

$$m_1 g - f_1 = m_1 a_1,$$

$$m_2 g - f_2 = m_2 a_2,$$

即 
$$a_1 = g - \frac{f_1}{m_1},$$

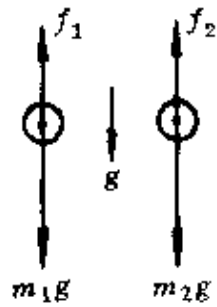


图 54

\* 球面像差和色差：因透镜厚度影响，主轴上一物点发出的光束经球面折射后不再交于一点的现象，叫球面像差（简称球差）。因透镜对不同颜色的光折射率不同，不同颜色的光所成的像的位置和大小不同，这种现象叫色差。

$$a_2 = g - \frac{f_2}{m_2}.$$

阻力恒定时,这两个物体都做着  $a < g$  的匀加速运动.

如果不计阻力,  $a_1 = a_2$ , 表示任何物体在真空中都以相同的加速度下落.

如果考虑阻力,当速度不太大时物体所受阻力与物体的形状和正面面积等有关.对于两个同样大小、不同质量的铁球和木球(设  $m_1 > m_2$ ),它们在空气中下落时,空气阻力可认为相同,由上面的计算结果知  $a_1 > a_2$ .表示质量大的物体下落的加速度大,因此铁球比木球落得快.这也正是常识所告诉我们的.

上面的两个结论都可用实验加以验证:如图 55,在玻璃管内放一枚小钱和一根羽毛,管内有空气时,管子倒转时小钱先落到管底发出“当”的一声,羽毛还飘在管中.用抽气机抽出管内空气,管子倒转时,小钱和羽毛都同时落到管底,这个实验称为钱毛管实验.

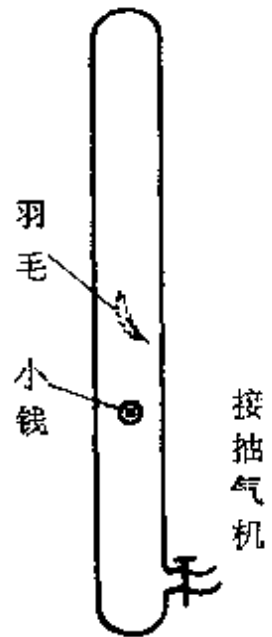


图 55

通过把地面上方空间抽象成一个均匀的重力场模型,对落体运动作出的结论完全符合实验结果和我们的生活经验,说明这一模型是非常合理的和有效的.如果不建立这样一个条件模型,对落体运动的理论分析将会使人眼花缭乱,困难得难以下手,也很难让人明白从理论得出的符合实验的结果.

又如,研究带电粒子射入平行板电场中的运动,通常可不考虑板的边缘效应,把两板间的电场抽象为匀强电场(图 56).有时,即使两板上加的是一个交变电压,在一定条件下,也可把它看成是恒

定电压,依然可给入射电子设置一个匀强电场的运动环境.

例 1 在真空中速度为  $v = 6.4 \times 10^7$  米/秒的电子束连续地射入两平行板之间(图 57).极板长度  $l = 8.0$

$\times 10^{-2}$ 米,间距  $d = 5.0 \times 10^{-3}$ 米.两极板不带电时,电子束将沿两极板之间的中线通过.在两极板上加一 50 赫的交变电压  $u = U_0 \sin \omega t$ ,如果所加电压的最大值  $U_0$  超过某一值  $U_c$  时,将开始出现以下现象:电子束有时能通过两极板;有间断不能通过.

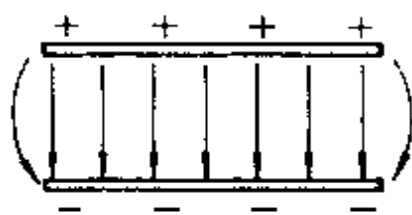


图 56

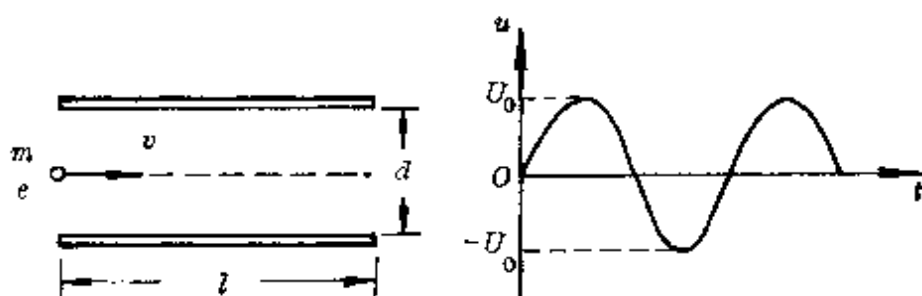


图 57

(1)求  $U_c$  的大小;

(2)求  $U_0$  为何值时才能使通过的时间  $(\Delta t)_{\text{通}}$  跟间断的时间  $(\Delta t)_{\text{断}}$  之比为

$$(\Delta t)_{\text{通}} : (\Delta t)_{\text{断}} = 2 : 1.$$

分析 两板上加以交变电压后,板间形成一个时刻变化的电场,变化周期  $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50}$ 秒 = 0.02 秒.电子通过两板的时间(不加电场时)

$$\Delta t = \frac{l}{v} = \frac{8.0 \times 10^{-2}}{6.4 \times 10^7} \text{秒} = 0.125 \times 10^{-8} \text{秒}.$$

由于  $\Delta t \ll T$ , 因此可以认为在电子穿过平行板的过程中, 板间是一个大小、方向不变的匀强电场, 电子在这个过程中做的是匀加速运动.

**解答** (1) 设电压为  $U_c$  时电子恰打在板的边缘, 即电子的偏距  $y = \frac{d}{2}$ , 由

$$y = \frac{d}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{U_c e}{dm} \cdot \left( \frac{l}{v} \right)^2,$$

得

$$\begin{aligned} U_c &= \frac{d^2 m v^2}{e l^2} \\ &= \frac{(5.0 \times 10^{-3})^2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times (6.4 \times 10^7)^2}{1.6 \times 10^{-19} \times (8.0 \times 10^{-2})^2} \text{ 伏} \\ &= 91 \text{ 伏}. \end{aligned}$$

(2) 由上面的计算知, 当所加交变电压瞬时值大于  $U_c$  时, 电子束就不能通过平行板; 当电压瞬时值小于  $U_c$  时电子束才可以

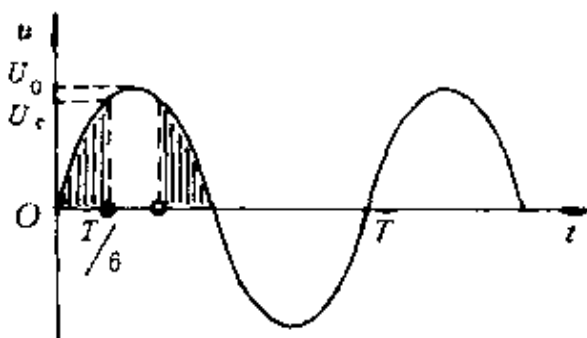


图 58

通过平行板. 相应的通过和间断时间如图 58 所示. 当  $(\Delta t)_{\text{通}} : (\Delta t)_{\text{断}} = 2:1$  时, 表示在半个周期内, 仅在第一个  $\frac{T}{6}$  和第三个  $\frac{T}{6}$  时间内能通过 (如图中划线区域), 由

$$U_c = U_0 \sin 60^\circ,$$

得 
$$U_0 = \frac{U_c}{\sin 60^\circ} \approx 105 \text{ 伏}.$$

如果我们不给电子设置这样一个匀强电场的外部环境,这个问题的处理会变得十分困难,在实际情况下也无必要.

把外部条件抽象成一定的物理模型,往往仅局限于某一个范围内,不能任意地无限延扩.如把地面上空抽象成一个均匀的重力场,只能在离地面不太高的范围内;对磁体(或通电导线)周围空间的磁场和电荷周围空间的电场,也只能在满足一定条件下在某个局部区域才可抽象成一个匀强磁场或匀强电场的模型.一些学生把这种均匀场的范围任意延扩,使用中就会发生错误.

**例 2** 沿着地球表面飞行和离地高  $h = R$  (地球半径)处飞行的两颗人造地球卫星的环绕速度之比为

- A. 1:2;            B. 2:1;  
C.  $1:\sqrt{2}$ ;        D.  $\sqrt{2}:1$ .

**解答** 人造地球卫星的向心力等于它所受到的重力.设卫星沿地表飞行和在  $h$  高空飞行时的速度分别为  $v_0$ 、 $v_h$ ,

$$\begin{aligned} \text{由} \quad mg &= m \frac{v_0^2}{R}, \\ mg &= m \frac{v_h^2}{r} = m \frac{v_h^2}{R+h} = m \frac{v_h^2}{2R}, \end{aligned}$$

得

$$\frac{v_0}{v_h} = \frac{\sqrt{Rg}}{\sqrt{2Rg}} = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

因此正确答案为 C.

**分析** 上面的选择是错误的.因为在地表和高空的重力加速



度不同,不能再抽象成一个均匀重力场模型.当不计地球自转影响时,由万有引力公式,有

$$G \frac{Mm}{R^2} = mg_0, G \frac{Mm}{(R+h)^2} = mg_h.$$

得 
$$\frac{g_0}{g_h} = \frac{(R+h)^2}{R^2} = \frac{4R^2}{R^2} = 4.$$

代入上面的算式

$$\frac{v_0}{v_h} = \frac{\sqrt{Rg_0}}{\sqrt{2Rg_h}} = \frac{\sqrt{Rg_0}}{\sqrt{\frac{1}{2}Rg_0}} = \sqrt{2}.$$

所以正确答案应该是 D.

**例 3** 如图 59 所示,在蹄形磁铁的一支上套一个矩形线框  $abcd$ . 当线框稍稍向右平移时,关于线框内是否会产生感应电流的问题,甲、乙两位学生根据电磁感应现象的两种说法各执一词,展开了热烈的争论:

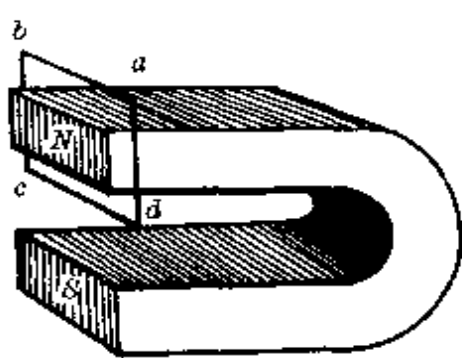


图 59

甲:因为两磁极间是一个匀强磁场,磁感线和框面平行,线框右移时,穿过线框的磁通不变,框内不会产生感应电流;

乙:线框右移时, $cd$  边切割磁感线,按右手定则,线框中会产生沿  $d-c-b-a-d$  方向流动的感应电流.

请你对这两位学生的说法作出评价.

**解答** 乙的说法是正确的.甲的错误就在于他对两极间的匀强磁场作了任意的延扩.

实际上,一个蹄形磁体只有在两极间极小区域内才是匀强磁

场,周围其它地方仍是非匀强磁场.线框稍稍右移时,只有  $cd$  边处在匀强磁场中,其余部分均处于非匀强磁场中,如图 60 所示.

由于磁感线是闭合曲线,穿过线框的磁通不仅有磁体外部的磁感线,还有磁体内部的磁感线.考虑了磁场的不均匀性和磁体内、外穿过线框的磁感线后可以看到,线框右移时,从右向左穿过线框的总磁通在增加,根据楞次定律可知,线框中会产生从  $d$  端流入、 $a$  端流出的感应电流,即沿着  $d-c-b-a-d$  方向流动.可见电磁感应的两种说法完全一致.

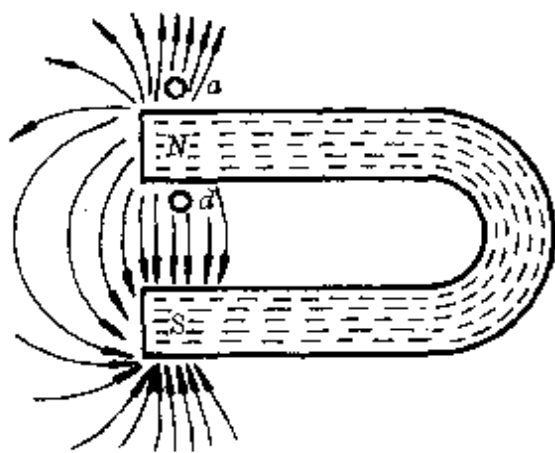


图 60

必须注意,实际问题中,对外部条件抽象成怎样的物理模型,完全服从于对问题研究的需要,不能一概而论.

譬如,通常情况下,研究光在空气介质中成像情况时(如照相机、望远镜等),都把空气抽象成一种均匀介质.然而在解释海市蜃楼现象时,就不能抽象成为一种均匀介质,海市蜃楼现象正是由于空气的不均匀性造成的.

海市蜃楼是一种由光的折射造成的虚幻景象.常出现在炎热无风的天气.由于空气是热的不良导体,沿竖直方向出现温度的垂直分布时,空气的密度和折射率也形成垂直分布.

从海面向上,空气层温度逐渐升高,空气的密度和折射率逐渐减小.从远处海面上一物体(如一根桅杆)发出的光经空气下层到上层逐次反射时,每次都从折射率大的空气层射向折射率小的空气层,相当于从一种光密介质射向另一种光疏介质,折射角逐渐加

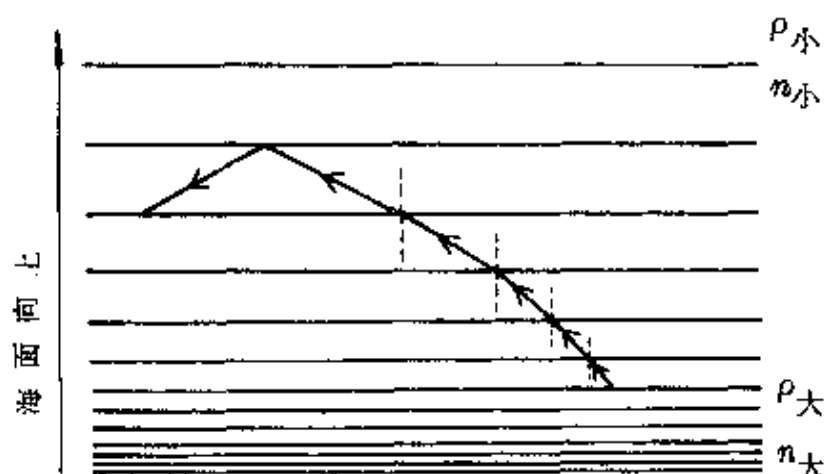


图 61 海面上空空气的密度和折射率的分布

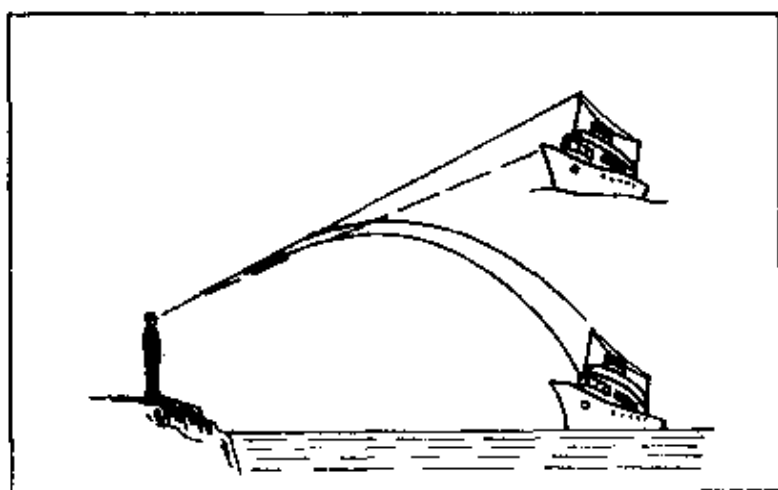


图 62 海市蜃楼

大,光线逐渐弯曲,当光线在某一层空气层上的入射角增大到大于该层的临界角时将发生全反射,光线重又从这一层逐渐折回海面(图 62)。站在海边的人接受到这束反射光,就会幸运地从天空中看到行驶于海面的船——船的正立的虚像(图 62)。出现在海边的这种虚幻景象称为“海市”,又叫“上现蜃景”。

在沙漠里情况恰好相反,从沙漠向上温度逐渐降低,空气的密度和折射率逐渐增大,从远处景物发出的光由折射率较大的空气层射向折射率较小的空气层时,折射角逐渐增大,至某一层时满足

全反射条件,光线重又从下向上折射(图 63).在沙漠里的人接受

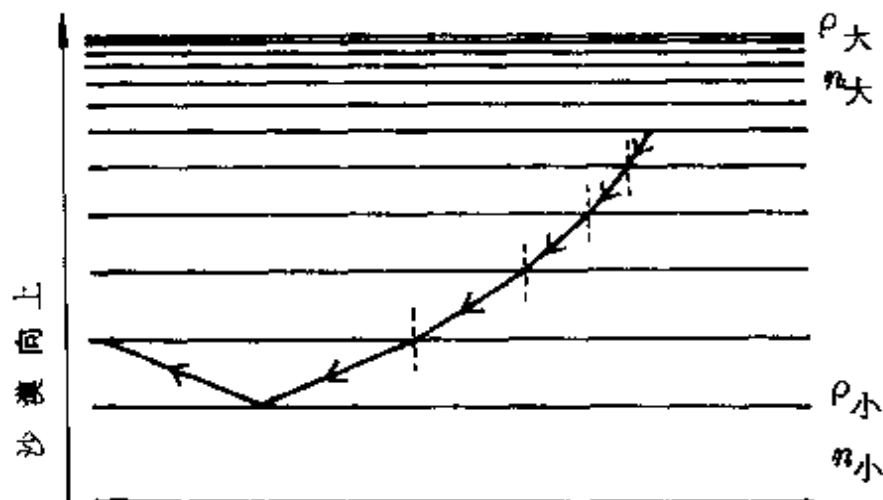


图 63 沙漠上空空气的密度和折射率的分布

到这束光线后,就会感到它像是从一面镜子上反射出来的,形成远处物体倒立的虚像.出现在沙漠里的这种虚幻景象称为“蜃楼”,又称“下现蜃景”,如图 64 所示.

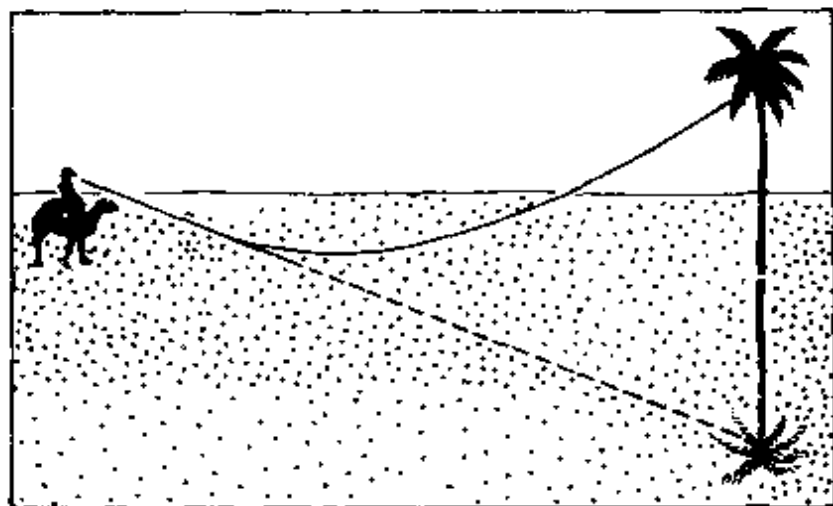


图 64 沙漠中的蜃景

由此可见,外部条件本来是客观的,一般不会因研究对象的运动变化发生很大的变化(不考虑场的激发和叠加作用),但为了研究问题时的方便,能否把外部条件抽象成一定的物理模型以及抽

象成怎样的物理模型,完全取决于问题的需要.

### 3. 过程模型

把具体物理过程纯粹化、理想化后所抽象出来的一种物理过程,称过程模型.

实际的物理过程一般都较复杂,如前面所说列车沿平直轨道运动时,其中还有车轮的转动、车厢的振动、左右晃动等各种不同的运动形态.对应各种不同的运动形态可以有不同的研究课题.在中学物理阶段,仅研究列车的整体平动特性时,就可以不考虑车轮的转动、车厢的振动和晃动,把列车的运动过程纯粹化、理想化,看做是一个质点(对象模型)做单一的某种运动,如匀速直线运动、匀加速直线运动、匀速圆周运动等.

按照伽利略对运动的分类,所谓“匀速直线运动”指的是“在任何相等的时间间隔内,通过同样距离”的一种运动.如果我们对沿直线轨迹运行的列车,测得每1秒内通过的距离是20米,是否表示这趟列车一定做匀速直线运动呢?严格地说还不能,因为这趟列车在0.5秒内、在0.1秒内、在0.01秒内、……在任何一段相等的时间间隔内通过的距离并不一定相等.我们的测定仅表示从每1秒来观察,该列车是做匀速直线运动.可见匀速直线运动实际上是一种理想化的运动过程.同样,匀加速直线运动,指的是在“任何相等的时间内速度的变化(增加或减少)都相等”的运动,也是一种理想化的运动过程.

此外,如弹性碰撞、完全非弹性碰撞、纯滚动的运动、简谐运动、等温过程、等压过程、等容过程、绝热过程、恒定电流等,都是以突出某一方面的主要特征,忽略一些次要过程后抽象出来的理想过程,都是一种过程模型.

建立过程模型的目的,也是为了简化对问题的研究,以便得出基本符合实际的结果.

例1 水平桌面上一块质量  $M = 10$  千克的木块,被一颗质量  $m = 10$  克、以水平速度飞行的子弹击中(子弹未穿出),两者一起沿桌面滑行  $s = 20$  厘米.已知木块与

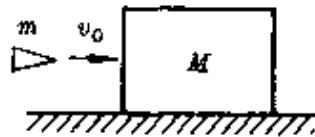


图 65

桌面间的动摩擦因数  $\mu = 0.2$ , 求子弹的入射速度  $v_0$ . 取  $g = 10$  米/秒<sup>2</sup>.

**解答** 子弹击中木块时,在水平方向除了子弹与木块间的相互作用外,还受到桌面摩擦力的作用.由于子弹击中木块的过程往往极快,子弹与木块间相互作用的冲量远大于桌面摩擦力的冲量,因此对这个击中过程,可以不考虑桌面摩擦力的作用,并把它看做是一个完全非弹性碰撞过程——就像子弹击中一块始终保持静止的木块,然后两者获得共同速度后一起滑行,对击中过程和滑行过程,由动量守恒定律和动能定理分别列式,有

$$mv_0 = (m + M)u,$$

$$-\mu(m + M)gs = 0 - \frac{1}{2}(m + M)u^2.$$

联立得

$$v_0 = \frac{m + M}{m} \sqrt{2\mu gs}$$

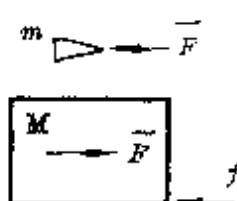
$$= \frac{10 \times 10^{-3} + 10}{10 \times 10^{-3}} \sqrt{2 \times 0.2 \times 10 \times 0.2} \text{ 米/秒}$$

$$= 895 \text{ 米/秒}.$$

**讨论** 对子弹击中木块的过程作这样的抽象是否合理? 我们可以对子弹的速度条件作一估算.

设子弹击中木块过程中两者间平均作用力为  $F$ , 桌面摩擦力

为  $f$ , 从子弹击中木块到两者相对静止的时间为  $\Delta t$ . 由子弹和木块的隔离体受力图(图 66), 用动量定理



对子弹  $-\bar{F}\Delta t = mw - mw_0,$

对木块  $(\bar{F} - f)\Delta t = Mv - 0,$

$$f = \mu(m + M)g.$$

图 66

联立得两者的共同速度

$$v = \frac{mw_0}{m + M} - \mu g \Delta t.$$

上式中右边第一项  $\frac{mw_0}{m + M}$  就是忽略摩擦力时子弹和木块的共同速度, 所以, 要求能忽略摩擦力的作用, 应满足条件

$$\frac{mw_0}{m + M} \gg \mu g \Delta t.$$

即  $v_0 \gg \mu \frac{m + M}{m} g \Delta t \approx \mu \frac{M}{m} g \Delta t.$

取题中数据  $m = 10$  克,  $M = 10$  千克,  $\mu = 0.2$ , 设  $\Delta t = 0.01$  秒,  $g = 10$  米/秒<sup>2</sup> 代入估算得

$$v_0 \gg 0.2 \times \frac{10}{10 \times 10^{-3}} \times 10 \times 0.01 \text{ 米/秒} = 20 \text{ 米/秒}.$$

也就是说, 只要求子弹速度远大于 20 米/秒, 就可对这击中过程中忽略桌面摩擦力作用了. 通常子弹的数量级为  $10^2$  米/秒, 都能满足要求.

另外, 许多实际的物理过程, 在运动变化的不同区段, 由于物理条件的不同, 常常可以抽象成不同的过程模型而分段研究.

**例 2** 图 67 为示波管原理示意图. 灯丝  $K$  加热后发射电子, 经阳极  $A$  加速沿中轴线射入两偏转板, 电子通过偏转板后打在荧

光屏上即能显示一个亮点. 设加速电压  $U_0$ , 偏转板长  $l$ , 间距  $d$ , 荧光屏离偏转板边缘  $L$ , 偏转板上加电压  $U$ . 求电子打在荧光屏上的位置偏离入射方向的距离.

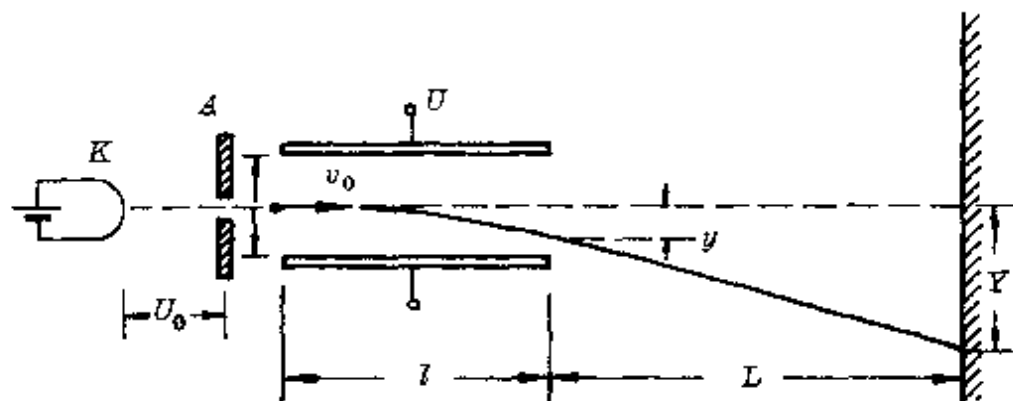


图 67

**解答** 电子从阴极发射到达荧光屏可以分成三个过程.

(1) 加速——匀加速直线运动模型

不计电子发射的初速度时, 由

$$eU_0 = \frac{1}{2} mv_0^2,$$

得电子被阳极加速后的速度

$$v_0 = \sqrt{\frac{2eU_0}{m}}.$$

(2) 偏转——平抛模型

电子进入偏转板后, 做着类似重力场中平抛物体的运动. 射出偏转板时的偏距

$$y_1 = \frac{1}{2} at_1^2 = \frac{1}{2} \frac{Ue}{dm} \left( \frac{l}{v_0} \right)^2.$$

(3) 惯性运动——匀速直线运动模型

电子离开偏转板后, 沿出射方向做匀速直线运动. 因为出射时的水平速度与竖直速度分别为



$$v_x = v_0, \quad v_y = at = \frac{Ue}{dm} \cdot \frac{l}{v_0},$$

所以电子打在荧光屏上的位置离开出射处的竖直距离

$$y_2 = v_y t_2 = \frac{Ue}{dm} \cdot \frac{l}{v_0} \cdot \frac{L}{v_0} = \frac{eULl}{dm(v_0)^2},$$

所以,电子打在荧光屏上的位置偏离入射方向的距离为

$$\begin{aligned} Y &= y_1 + y_2 = \frac{Ue}{2d\epsilon_0} \left( \frac{l}{v_0} \right)^2 + \frac{UelL}{dmv_0^2} \\ &= \frac{Uel}{dmv_0^2} \left( \frac{l}{2} + L \right) \\ &= \frac{lU}{2dU_0} \left( \frac{l}{2} + L \right). \end{aligned}$$

当  $l \ll L$  时,上式可表示为

$$Y = \frac{lL}{2dU_0} U = kU.$$

即与偏转板上所加电压  $U$  成正比.

#### 4. 数学模型

几乎所有的物理问题都可用数学方法描述:

一列火车沿平直轨道运动,在数学上可抽象为一个点沿坐标轴 ( $x$  轴) 的位置变动,并用坐标  $x$  表示它的位置[图 68(a)];一艘海轮在大海中航行或一架飞机在空中飞行,数学上可抽象为一个点在平面直角坐标内和空间直角坐标内的位置变动,可以用两个坐标  $x$ 、 $y$  或三个坐标  $x$ 、 $y$ 、 $z$  描述它的位置,如图 68(b)和图 68(c)所示.

用开关控制电灯,物理语言有两个状态:接通或断开.若把开关换成一个晶体二极管,它同样有两个状态:导通或截止.把它们用数学方法表示时,可以用 1、0 两个数字表示这两种状态(如

下表).

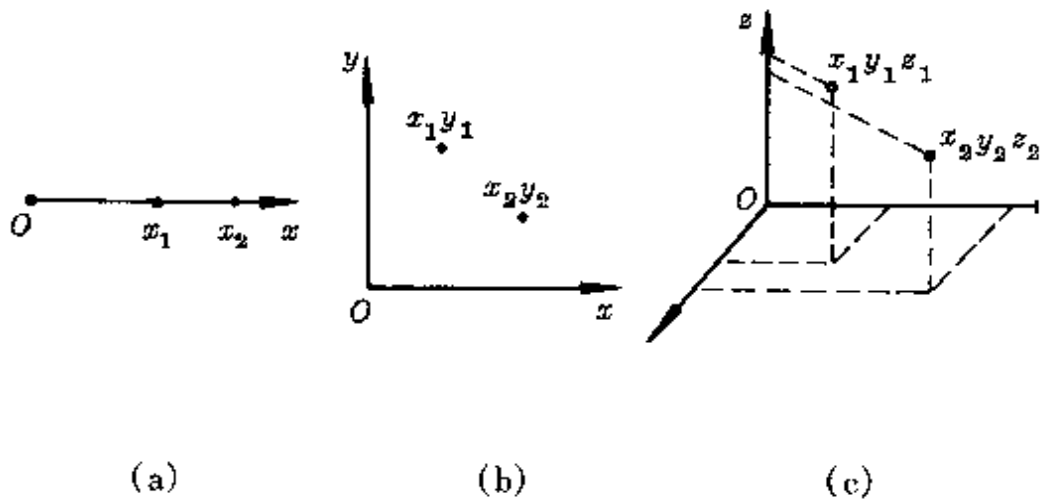
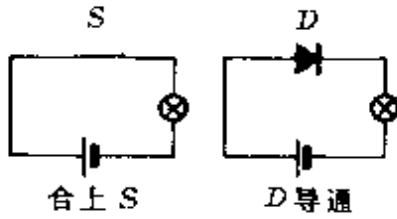
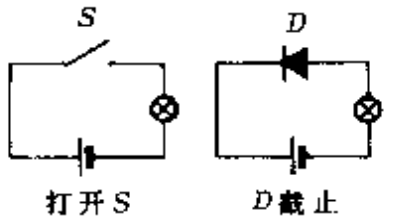


图 68

诸如此类,还有许多其它例子.

把物理学的研究对象、运动变化中的状态和经历的过程以及客观物理规律数学化,都可称为数学模型.像上面这样,建立一个坐标或引进两个数字(数学语言),都可称为是建立了一个数学模型.

| 物理状态  | 数学语言 |
|---|------|
|  <p style="text-align: center;">图 69</p> | 1    |
|  <p style="text-align: center;">图 70</p> | 0    |

建立数学模型的目的,可以更概括、更简洁、更普遍地描述不同事物的共同特性及其内在规律性,也便于进行定量计算。

物理学中有许多数学模型,除上面所说的以外,如矢量模型、平均值模型、无限小模型等,许多具体的物理计算和图象,实际上都可以联系着一定的数学模型,因此,数学模型在中学物理中有着极其广泛的作用。

例如,利用一个矢量模型,就可以统一物理中反映客观对象不同物理内容的所有矢量(如位移、速度、加速度、力、动量、冲量、电场强度、磁感强度等)的描述方法和特征;任何一个既有大小又有方向的物理量,都可用一根有向线段表示;它们的合成与分解都服从平行四边形法则,这么一来,运动的合成与分解(对应着位移、速度、加速度的合成与分解)、力的合成与分解、某段时间内动量的变化、两个点电荷的合电场强度、两根通电直导线的合磁感强度等,都概括为一个矢量的和、差问题:

(1)在一条流速为  $v_{\text{水}}$ 、宽为  $l$  的河中,一条小船以对水恒定的速度  $v_{\text{船}}$  划行,且  $v_{\text{船}} > v_{\text{水}}$ ,要求垂直河岸划行到正对岸,船头必须逆向上游,使船速  $v_{\text{船}}$  与流速  $v_{\text{水}}$  的合速度  $v$  垂直河岸,或可理解为小船逆着水流的速度分量抵消水速(图 71)。于是由

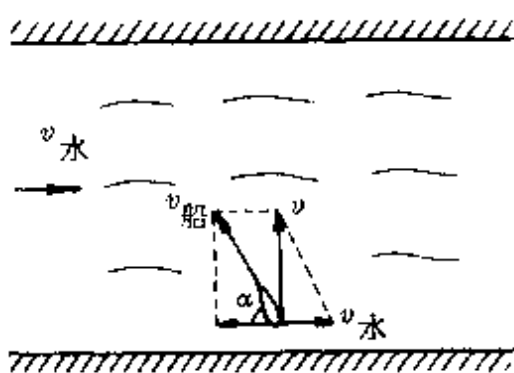


图 71

$$v_{\text{船}} \cos \alpha = v_{\text{水}},$$

得船头偏向上游的角度  $\alpha$  应满足条件

$$\cos \alpha = \frac{v_{\text{水}}}{v_{\text{船}}}, \quad \text{或} \quad \alpha = \cos^{-1} \frac{v_{\text{水}}}{v_{\text{船}}}.$$

(2)图 72 表示一个质量为  $m$ 、以速度  $v$  做匀速圆周运动的质点,它在两条互相垂直的直径两端位置  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  四点的动量用  $p_A$ 、 $p_B$ 、 $p_C$ 、 $p_D$  表示,其大小都为  $mv$ ,但方向不同.因此,要求从  $A$  点起经  $\frac{T}{4}$  ( $T$  为周期)、 $\frac{2}{4}T$ 、 $\frac{3}{4}T$  时间内的动量变化就转化为一个矢量差的问题

$$\text{即} \quad \Delta p_{BA} = p_B - p_A,$$

$$\Delta p_{CA} = p_C - p_A,$$

$$\Delta p_{DA} = p_D - p_A.$$

如图 72 所示.

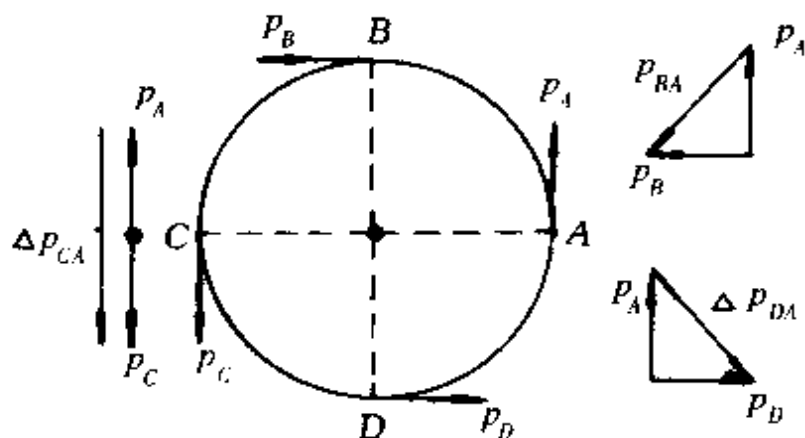


图 72

(3)真空中两个相距为  $2l$ 、电量均为  $q = 2 \times 10^{-8}$  库的点电荷,要求下列两情况时位于两者连线中垂线上、距两者均为  $2l$  的  $P$  点的电场强度:两点电荷都带正电和分别带正、负电荷.

由点电荷场强公式知,点电荷  $q_1$ 、 $q_2$  在  $P$  点的场强大小相等,均为

$$|E_1| = |E_2| = k \frac{q}{4l^2},$$

但它们在  $P$  点的场强方向不同:正电荷时  $P$  点的场强沿连线向

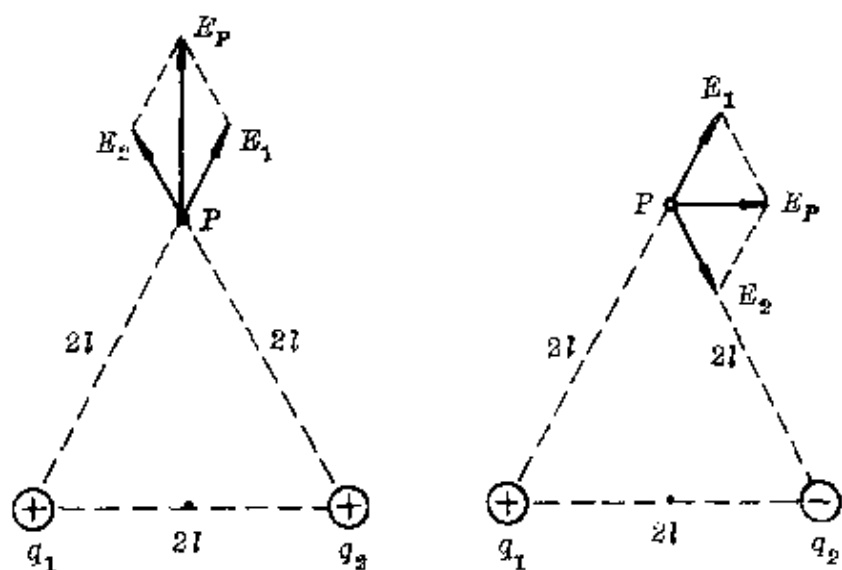


图 73

外,负电荷时  $P$  点的场强沿连线向内,用矢量合成的平行四边形法则得到不同情况下  $P$  点的合场强如图 73 所示.

当两点电荷均带正电时,  $P$  点的合场强大小

$$E_p = |E_1| \cos 30^\circ + |E_2| \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3} kq}{4l^2}.$$

当两点电荷分别为正、负电荷时,  $P$  点的合场强大小

$$E_p = |E_1| = |E_2| = \frac{kq}{4l^2}.$$

利用这一个矢量模型,还可以描述其它一些物理过程和简化有关的计算.例如:

(4) 悬挂在竖直轻弹簧上的小球做简谐运动的过程中,任何时刻的位移可以用一根长度等于振幅  $A$  的矢量、以同样周期做匀速圆周运动时在直径上的投影表示,即

$$y = A \cos \theta = A \cos \omega t.$$

式中  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  称为圆频率(即圆运动时的角速度),  $T$  为振动周期.

并由此很容易画出对应的振动图象(图 74).

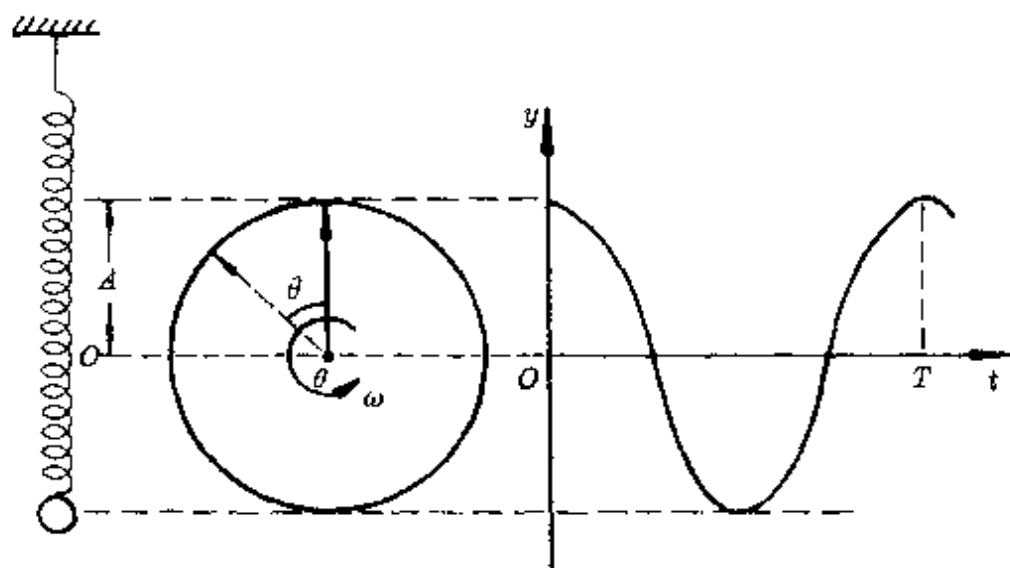


图 74

(5)三相交流电路中三相电压可以用三个互成  $120^\circ$  角的矢量表示. 如图 75 为三相交流发电机三组线圈( $Ax$ 、 $By$ 、 $Cz$ )和星形连接电路图.

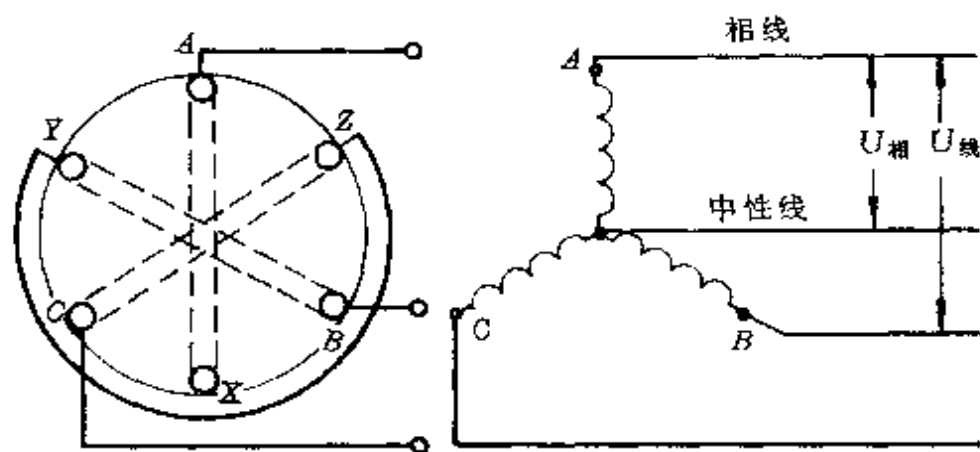


图 75

为了找出每相线圈的电压(相电压)和两根相线之间的电压(线电压)的关系,可以利用矢量模型转化为一个计算矢量差的问题.

如图 76 所示,用三个大小相等、互成  $120^\circ$  角的矢量  $U_{AO}$ 、 $U_{BO}$ 、 $U_{CO}$  分别代表三个线圈的相电压,其线电压

$$\begin{aligned} U_{AB} &= U_{AO} - U_{BO} \\ &= U_{AO} + (-U_{BO}). \end{aligned}$$

它的大小为

$$\begin{aligned} U_{AB} &= 2U_{AO} \cos 30^\circ \\ &= \sqrt{3}U_{AO}. \end{aligned}$$

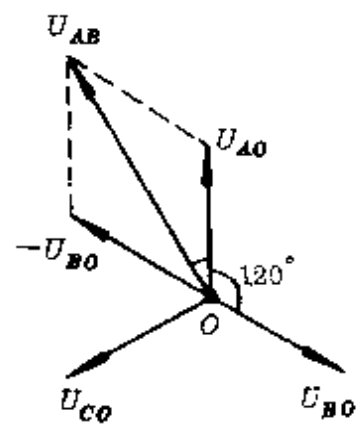


图 76

对于其它任何两根相线,都有同样的关系,于是我们得到结论:在三相交流电路星形连接时,线电压等于相电压的  $\sqrt{3}$  倍,即

$$U_{\text{线}} = \sqrt{3}U_{\text{相}}.$$

又如,利用平均值模型和无限小模型,可以通过把时间(或位移)分割的办法,转化为对许多小段时间(或位移)内不变量的累积,从而可算出它们累积作用的效果或可用某一个平均量代替.

(1) 推导初速不为零的匀变速运动的位移公式和平均速度

物体做匀速直线运动时的  $v-t$  图如图 77 所示.物体运动过程中在两个时刻之间的一段位移,数值上等于图线下方相应的一块面积,如图中阴影线所示.

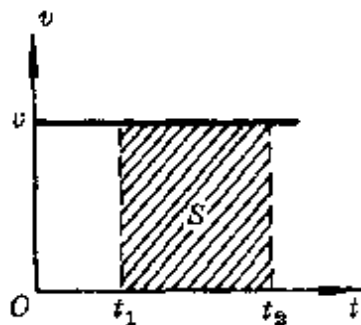


图 77

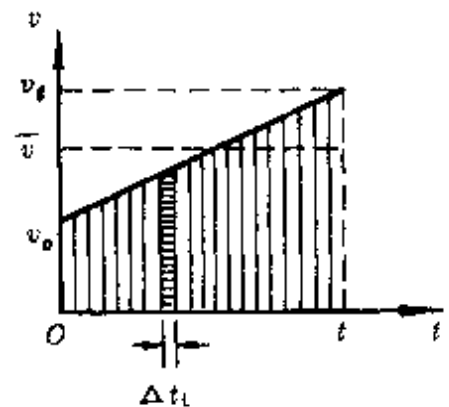


图 78

物体做匀变速直线运动时的  $v-t$  图是一条倾斜直线,如图 78 所示.把整个运动时间  $t$  分成许多极小的时间区段,

$$t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \cdots + \Delta t_i + \cdots + \Delta t_n.$$

当分得足够小的时候,每一小段内的运动可以看做是匀速运动,它所通过的位移等于图线下方对应于这一小段时间  $\Delta t_i$  的一块面积(如图中阴影部分).所以,在整个时间  $t$  内物体的位移

$$s = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 + \cdots + \Delta s_i + \cdots + \Delta s_n.$$

数值上就等于图线下方时间  $t$  内所对应的面积.这是一块梯形,于是得位移公式

$$\begin{aligned} s &= \frac{v_0 + v_t}{2} t = \frac{v_0 + v_0 + at}{2} t \\ &= v_0 t + \frac{1}{2} at^2. \end{aligned}$$

根据同样道理可知,它可以被一个以平均速度  $\bar{v}$  运动的匀速直线运动代替,这个平均速度的数值为初速与末速的算术平均值,即

$$\bar{v} = \frac{v_0 + v_t}{2}.$$

## (2) 推导拉伸与压缩弹簧时变力做功(或弹性势能)公式

弹簧在伸长、压缩形变中产生的弹力  $f$  与形变量(伸长或压缩的量)  $x$  成正比,即

$$f = kx.$$

因此,计算弹簧形变时弹力的功(或外力的功)就属于变力做功问题.

物体受恒力作用时,在位移  $x$  内恒力  $F$  的功,数值上等于  $F-x$  图线下方的一块面积[图 79(a)].根据弹力  $f$  与形变量  $x$  的



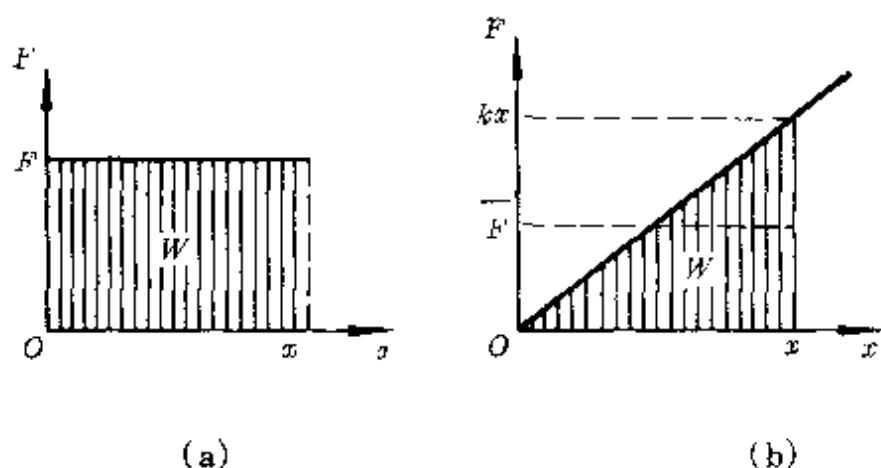


图 79

图象,采用把整个形变过程分成许多极小区段的办法,也可推知在发生形变  $x$  时弹力的功(或外力的功)数值上等于图线下方三角形的面积[图 79(b)],即

$$W = \frac{0 + kx}{2} x = \frac{1}{2} kx^2.$$

也可看成是以平均力  $F = \frac{1}{2} kx$  使弹簧发生形变  $x$  时做的功.

外力克服弹力使弹簧形变时做的功,转化为弹簧的弹性势能,因此,发生形变  $x$  的弹簧具有的弹性势能为

$$E_p = \frac{1}{2} kx^2.$$

上面我们根据处理中学物理问题的特点介绍了四类模型.实际上,同一个物理问题中,往往需要同时建立多个模型.譬如,对于研究对象先要建立一个对象模型,然后给它所处的外部环境和运动变化过程再确定相应的条件模型和过程模型,最后,常需借助数学模型作出有关的计算.所以,各种模型往往是综合运用的.

## 五、物理模型在中学物理中的应用

### 1. 物理模型对学习和应用物理知识的指导作用

研究物理问题有两条重要途径：一是实验，二是理论。在作理论分析时，往往需要从造模型着手。物理学中所总结出来的反映物质运动变化的客观规律，实质上都是物理模型的运动变化规律。

在中学物理教学中，我们同样是从实验和理论分析两种途径研究各种物理问题，也需要运用物理模型。可以说，每一个具体物理问题的解决过程中，都会自觉不自觉地选用相应的模型。所以，领会和掌握物理模型的思维方法，是非常重要的。请看下面的三个问题：

**问题 1** 据说，在某次国际物理学会议期间，有人向三位著名美国物理学家盖莫夫、奥本海默、布洛赫提出一个小问题：一条装满石头的船浮在池中水面上，如果将船中石头投入水里，池中水面高度会发生怎样的变化？

这三位物理学家由于漫不经心，把这个小问题都答错了。

如果你有幸作为中学生代表参加这次会议并在现场，对这个小问题将怎样研究呢？

途径是两条：做一个实验或根据浮体平衡理论分析。

如图 80 所示，用一个较大的烧杯盛半杯水——相当水池，水面上静浮一个放有小石子的小烧杯——相当小船，记下水面位置。

然后用镊子小心地把小石子放到大烧杯中,观察大烧杯中水面的变化.你将会发现,水面会下降一些.

从浮体平衡上也可得到同样的结果.

这里的实验方法,就是一个模型方法.它对原型作了简化处理,像是放大或缩小了尺寸的模型,具有物质模型的特点.通过对这种简化模型的实验和理论分析,就可以较容易地发现事物的真相.

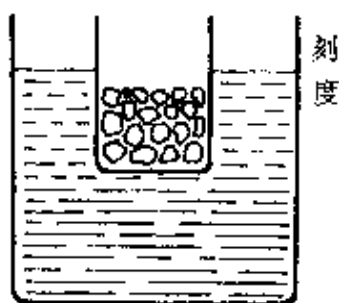


图 80

**问题 2** 某个学生听到一则“母子球”的描述:有质量相差较大的一大一小两个弹性球(母子球),把小球放在大球上面,让它们从  $h$  高处落到坚硬的地面上发生碰撞后,小球竟会反弹到  $9h$  的高度.

究竟有没有可能发生这样的事呢?

途径也是两条,除了实验验证外就是理论分析.

如图 81,设质量分别为  $M$ 、 $m$  的两球( $M \gg m$ ),从离地高  $h$  处自由下落.着地时两者向下的共同速度可认为相同,即

$$v_M = v_m = \sqrt{2gh}.$$

大球与地面相碰后,以原来同样大小的速度反弹,即反弹速度

$$v_M' = v_M = \sqrt{2gh}.$$

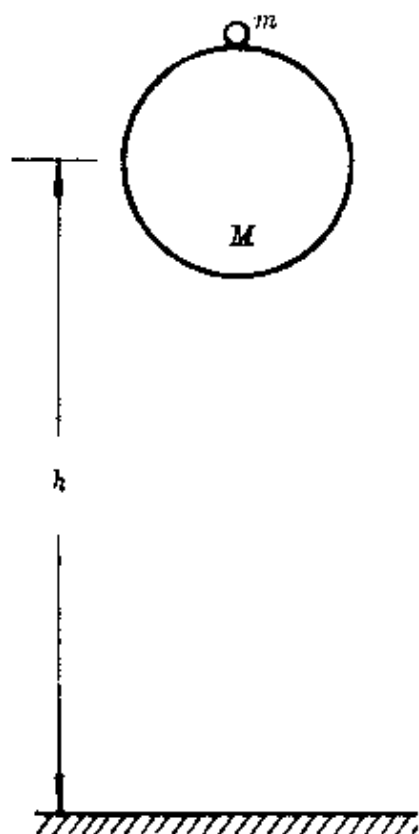


图 81

小球相对于大球下落的速度

$$\begin{aligned}v_{mM} &= v_m - (-v_M') \\ &= 2\sqrt{2gh}.\end{aligned}$$

接着,小球与大球相碰.当  $M \gg m$  时,小球可认为以原来同样大小的速度(即相对于大球的速度)反弹,故小球对大球的反弹速度

$$v'_{mM} = 2\sqrt{2gh},$$

则小球相对于地面的反弹速度

$$\begin{aligned}v_m' &= v'_{mM} + v_M' \\ &= 3\sqrt{2gh}.\end{aligned}$$

所以小球反弹高度

$$h_m = \frac{v_m'^2}{2g} = 9h.$$

由此可见,这位学生听到的母子球描述是合理的.

仔细考察一下这个理论分析过程(解题过程),可以看到,它都是建立在一定的物理模型基础上的.

首先,我们把两球都看做没有大小的质点,建立的是对象模型;把两球下落的空间看做是一个均匀的重力场,且不计空气阻力,即给予小球的运动环境建立一个理想化的条件模型;然后在运动过程中,把大球与地面的碰撞、小球与大球间的碰撞都简化为一个弹性碰撞过程,采用了过程模型;最后,通过计算并作了适当近似给出问题的解答,对应有一定的数学模型.

可以想象,如果我们不建立这么几个物理模型,这个问题是难以回答的.

**问题 3** 根据柴油机工作循环的热力学特征,对柴油机的结

构要求、工作状态提出你的合理建议。

这是一个有较高要求和实际意义的研究课题,同样可以采用建立物理模型的方法作出理论分析。

初中物理中已学过,柴油机的工作循环可以分为四个冲程——吸气冲程、压缩冲程、做功冲程(燃烧膨胀冲程)、排气冲程。把柴油机的气缸简化成一个物理模型(对象模型)后,这四个冲程活塞的运动和进气阀、排气阀的开闭状态如图 82 所示。

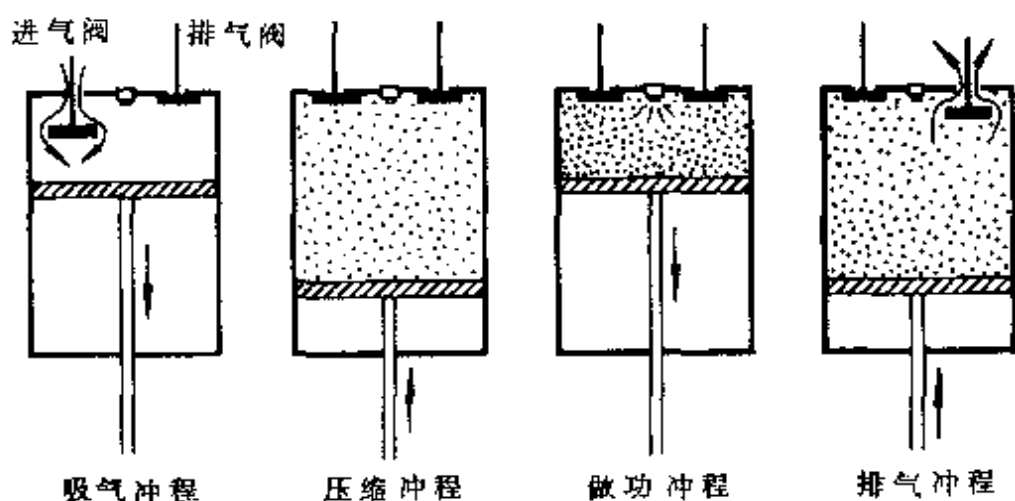


图 82 柴油机的四个冲程

(1)吸气冲程 活塞从上止点向下止点运动,进气部分容积逐渐增大,进气阀门开启,新鲜空气不断充满气缸.这个过程中气缸内的压强可近似看做和外界大气压相同,整个过程可视为等压过程.若吸气冲程终了时进入缸内的气体体积为  $V_1$ ,温度为  $T_1$ (略高于周围大气温度),压强为  $p_1$ (实际情况下由于进气管道产生的流动阻力,略低于外界大气压),由克拉珀龙方程得吸入新鲜空气质量为

$$m = \frac{p_1 V_1 M}{RT_1} \quad \text{①}$$

(2)压缩冲程 活塞由下止点急剧向上止点运动,两气阀都关闭,由于压缩过程进行得极快,气缸中气体来不及与外界进行热交换,可视为绝热过程.设绝热压缩终了时气体的状态参量为  $p_2$ 、 $V_2$ 、 $T_2$ ,由绝热方程\*得

$$p_2 = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^\nu p_1, \quad (2)$$

$$T_2 = \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\nu-1} T_1. \quad (3)$$

(3)做功冲程(燃烧膨胀冲程) 这一冲程可看成由等容过程、等压过程及绝热过程三个理想过程组成.

因为在压缩冲程终了前,喷油嘴已提前向气缸内喷入一定量的柴油,喷入的柴油遇到高温、高压气体立即同时猛烈燃烧,在很短时间内缸内气体压强急剧升高,而体积变化很小,形成等容燃烧过程,终了状态为  $p_3$ 、 $V_3$ 、 $T_3$ .

其后,活塞向下止点运动,体积增大,由于继续有燃料喷入燃烧,一段时间内可维持压强不变,形成等压膨胀过程,终了状态为  $p_4$ 、 $V_4$ 、 $T_4$ .

以后,由于喷油已结束,但气缸中压强仍很高,活塞继续迅速膨胀做功,可简化为一个绝热过程,终了状态为  $p_5$ 、 $V_5$ 、 $T_5$ .

(4)排气冲程 活塞由下止点向上止点运动,排出已做过功的废气,回到初始状态完成一个循环.

柴油机的工作循环可由图 83 表示.

\* 绝热方程:绝热过程中每两个参量之间存在关系: $p_1 V_1^\nu = p_2 V_2^\nu$ ;  $V_1^{-1} T_1 = V_2^{-1} T_2$ ;  $p_1^\nu V_1^{1-\nu} T_1^{-\nu} = p_2^\nu V_2^{1-\nu} T_2^{-\nu}$ .式中  $\nu$  称为绝热指数,在柴油机的理想绝热循环中,取  $\nu = 1.4$ .

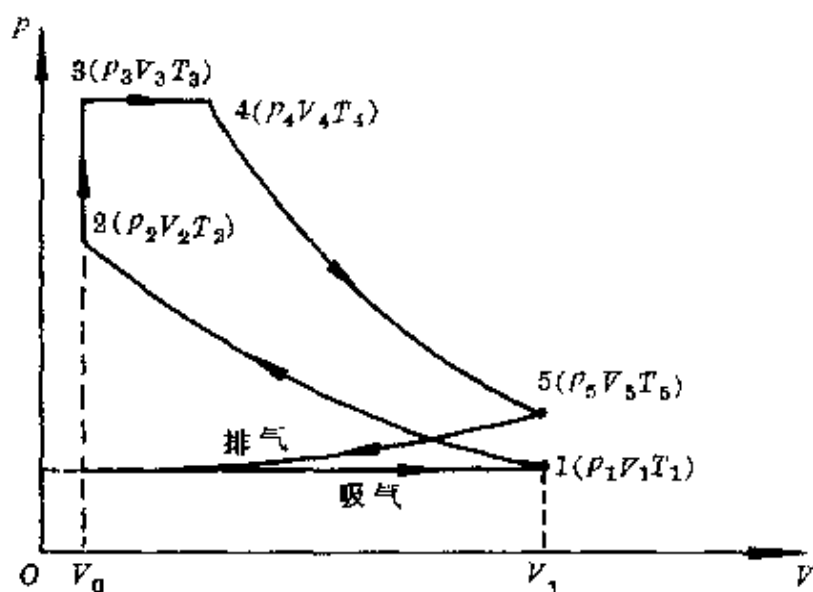


图 83 柴油机的工作循环

根据上面所建立的理想物理模型,可以对柴油机的结构要求、工作状况提出合理化建议如下:

(1) 为了提高进气量  $m$ , 有利柴油充分燃烧, 由方程①可知, 应尽可能减小进气管道和气阀的阻力(如进气管道尽可能光滑些, 进气阀做得比排气阀大些等), 以提高  $p_1$ . 有时还可采用增压技术, 把空气预先压缩后再吸人气缸, 更可提高  $p_1$ . 同时应适当增大缸径, 加大  $V_1$ .

(2) 由方程②、③可知, 压缩冲程终了的压强和温度, 都与压缩前、后的体积比  $\frac{V_1}{V_2}$  (称压缩比) 有关, 适当提高压缩比, 可提高压缩冲程终了的气体压强和温度.

(3) 压缩冲程终了前已开始喷油, 提前的时间(技术上以喷油开始时曲轴离开上止点的角度表示, 称提前角)要恰当. 因为喷油提前时间过早, 气缸中的压强和温度还不够高, 喷入的油不能立即燃烧. 待以后与继续喷入的油一起燃烧时, 压强上升得太快, 会影

响机器的机械负荷,使柴油机工作粗暴(俗称敲缸现象).反之,喷油提前时间过晚,有部分油来不及燃烧,只能在以后的膨胀中燃烧,造成废气温度  $T_3$  的升高,会降低效率.

通过对上面三个问题的处理,已充分显示了物理模型对学习、应用和探求物理知识的指导作用.可以这么说:科学研究需要物理模型,学习物理也离不开物理模型.

## 2. 物理模型在中学物理解题中的应用

物理模型与解决中学物理问题有何关系?怎样运用物理模型解决具体物理问题?在应用物理模型解题过程中要注意哪些方面?下面我们分几方面加以阐述.

### (1) 一个合适的物理模型是一把解题的金钥匙

每一个具体物理问题所描述的物理现象或过程,都对应着一定的物理模型.解题时,首先要根据具体的物理现象或过程,把它还原成一定的物理模型,这是下一步能否正确求解的先决条件.能建立起一个合适的物理模型,就等于已揭开了掩盖现象或过程本质特征的面纱,仿佛已找到了一把解题的金钥匙.

**例 1** 一个质量为  $m$  的金属球上装有一根水平轻质杆,另一端用铰链与墙铰接于  $a$  点,球下面垫一木板,木板放在光滑的水平地面上,如图 84 所示.已知球与板之间的动摩擦因数为  $\mu$ ,下列说法中正确的是

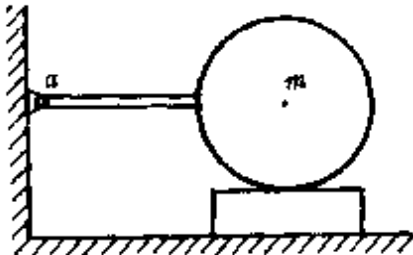


图 84

- A. 用水平力  $F$  将木板匀速向右拉出时,拉力  $F = \mu mg$ ;
- B. 用水平力  $F$  将木板匀速向右拉出时,拉力  $F < \mu mg$ ;
- C. 用水平力  $F$  将木板匀速向左拉出时,拉力  $F > \mu mg$ ;



D. 用水平力  $F$  将木板匀速向左拉出时, 拉力  $F < \mu mg$ .

分析 沿水平面匀速拉动木板时, 木板做平动, 板上各点运动情况相同, 整个木板可以看做一个质点. 无论是左拉或右拉, 所需拉力  $F$  等于球对板的摩擦力  $f$ , 即  $F = f$  (如图 85 下).

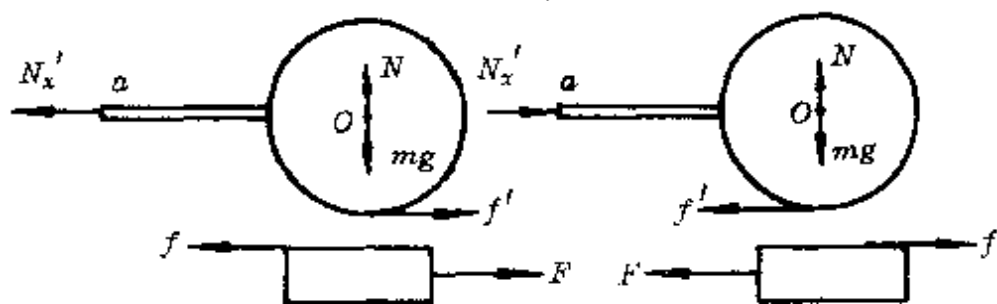


图 85

对小球和细杆来说, 在右拉和左拉两种情况下, 木板对球的摩擦力  $f'$  和铰链对杆的水平分力  $N_x'$  (另一个竖直分力  $N_y'$  图中未画出) 方向不同 (图 85 上). 两种情况下小球和连杆所受各力不共点, 因此, 对小球和细杆的整体不能作为质点, 应该看成是一个刚体, 是一个绕固定轴的平衡问题.

如果不清楚题中木板与小球、细杆系统对应着什么物理模型, 或错把小球、连杆系统作为质点模型, 常常会觉得难以下手或错选成

$$F = f = \mu N = \mu mg.$$

即错选成 A.

解答 根据上面所建立的物理模型, 很容易列出方程并由计算作出正确选择:

|    | 右 拉   | 左 拉   |
|----|---|---|
| 方程 | $F = f$ $M_a = f'R + N\bar{a}o - mg\bar{a}o = 0$ $f = f' = \mu N$ | $F = f$ $M_a = N\bar{a}o - mg\bar{a}o - f'R = 0$ $f = f' = \mu N$ |
| 结果 | $F = f = \frac{\mu mg}{1 + \frac{\mu R}{ao}} < \mu mg$            | $F = f = \frac{\mu mg}{1 - \frac{\mu R}{ao}} > \mu mg$            |
| 选项 | B   | C   |

例2 光滑水平面上有三个完全相同的小球排成一直线,2、3两球静止并靠在一起,1球以速度  $v_0$  入射(图86).碰撞中不损失机械能,则碰后三个小球的速度

A.  $v_1 = v_2 = v_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} v_0$ ;

B.  $v_1 = 0, v_2 = v_3 = \frac{1}{\sqrt{2}} v_0$ ;

C.  $v_1 = 0, v_2 = v_3 = \frac{1}{2} v_0$ ;

D.  $v_1 = -\frac{1}{3} v_0, v_2 = v_3 = \frac{2}{3} v_0$ ;

E.  $v_1 = v_2 = 0, v_3 = v_0$ .

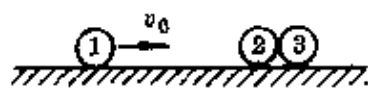


图 86

分析 如何看待这个碰撞过程,即建立怎样的物理模型,是正确解答题目的关键.最容易犯的错误是把2、3两球作为一个整体,小球1与这个整体相碰,由弹性碰撞规律得碰后小球1和2、3两球这一整体的速度分别为

$$v'_1 = \frac{m_1 - m_{2,3}}{m_1 + m_{2,3}} v_1 = \frac{m - 2m}{m + 2m} v_1 = -\frac{1}{3} v_1,$$

$$v'_{2,3} = \frac{2m_1}{m_1 + m_{2,3}} v_1 = \frac{2m}{m + 2m} v_1 = \frac{2}{3} v_1.$$

于是错选成 D.

实际上,两球靠在一起和两球是一个整体两者不相同.两个质量 50 千克的人靠在一起与一个质量 100 千克的人显然有差别.因为宏观上的靠在一起,实际上相互间有着微小的间距,因此这里的碰撞过程先是 1 与 2 碰,再是 2 与 3 碰.建立了这样一个过程模型后很容易求解.

**解答** 质量相同的运动小球与静止小球做弹性正碰后,两者互换速度.

1 与 2 碰后,  $v_1' = 0, v_2 = v_0$ ;

2 与 3 碰后,  $v_2' = 0, v_3 = v_0$ .

因此正确答案为 E.

从本题的解答可知,这里的小球 2 仅起了一个传递动量和能量的作用.把这个问题推广一下:若光滑水平面上并排放着许多相同质量的弹性小球(或并排悬挂着许多相同弹性小球),当另一个同样的小球与它们相碰时,中间的许多小球也只是起了“传递”作用,如图 87 所示.

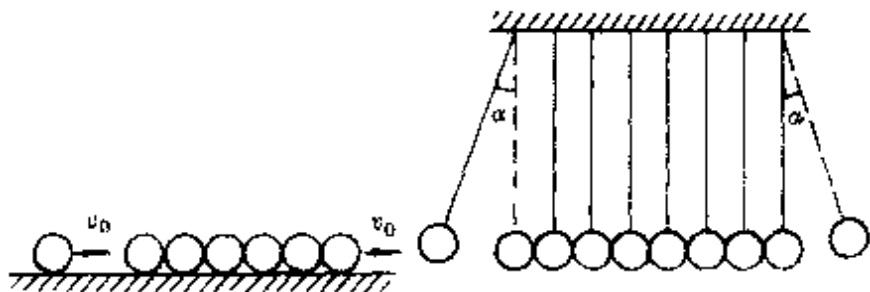


图 87

(2) 建立合适模型的关键是对物理状态和过程的分析

有些物理问题中的研究对象及其经历的过程比较明朗,很容

易辨认出它们所对应的物理模型,这种问题比较容易下手,但往往有不少物理问题(尤其是一些较复杂的问题),其研究对象及经历的过程比较隐蔽,不能一下子察觉或判定.为了建立一个合适的模型,就必须对题意认真分析.所谓审题,许多情况中实际上就是选择合适模型的过程.通过对研究对象的受力情况、状态特征以及运动变化过程的分析,区分各种因素的主次关系,结合物理规律,才能选择出一个合适的模型.

**例1** 水平传送带长  $l = 20$  米,以  $v = 2$  米/秒的速度做匀速运动.已知某物体与传送带间的动摩擦因数  $\mu = 0.1$ ,该物体从轻轻放到传送带的一端开始计时,到达另一端所需时间( $g = 10$  米/秒<sup>2</sup>)为

- A. 10 秒;      B.  $2\sqrt{10}$  秒;  
C. 11 秒;      D. 9 秒.

**分析** 木块刚放到传送带上时,它的水平速度为零,传送带相对于木块向前运动(即木块有落后于传送带运动的趋势),因此传送带对木块的摩擦力向前(指向传送带运动方向),使木块做匀加速运动.当木块加速到等于传送带的速度时,两者无相对滑动趋势,摩擦力消失,木块依惯性与传送带一起做匀速运动直至到达另一端.所以,木块从放上传送带至抵达另一端,先后对应着匀加速运动、匀速直线运动两个过程模型.

**解答** 传送带对木块的摩擦力  $f = \mu mg$ ,它使木块产生的加速度

$$a = \frac{f}{m} = \mu g = 0.1 \times 10 \text{ 米/秒}^2 = 1 \text{ 米/秒}^2.$$

木块达到传送带的速度  $v = 2$  米/秒,需时间

$$t_1 = \frac{v}{a} = \frac{2}{1} \text{ 秒} = 2 \text{ 秒}.$$

在这个匀加速运动过程中木块滑行距离

$$s_1 = \frac{1}{2} at_1^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 4 \text{ 米} = 2 \text{ 米}.$$

木块做惯性运动至另一端滑行距离

$$s_2 = l - s_1 = 20 \text{ 米} - 2 \text{ 米} = 18 \text{ 米}.$$

木块做惯性运动的时间

$$t_2 = \frac{s_2}{v} = \frac{18}{2} \text{ 秒} = 9 \text{ 秒}.$$

所以,木块从一端至另一端共需时间

$$t = t_1 + t_2 = 2 \text{ 秒} + 9 \text{ 秒} = 11 \text{ 秒}.$$

正确答案为 C.

一些学生常疏忽了前一段匀加速运动,以为木块一放上传送带就随带做匀速运动,于是由  $t = \frac{l}{v} = 10 \text{ 秒}$ ,错选成 A.也有些学

生错以为木块始终做匀加速运动,由  $t = \sqrt{\frac{2l}{a}} = 2\sqrt{10} \text{ 秒}$ ,误选为 B.

这都是由于没有对木块的受力情况、运动特征仔细分析所造成的.

**例 2** 在一艘竖直上升的宇宙飞船座舱内有一个水银气压计,当舱内温度为  $t_2 = 27.3^\circ\text{C}$  时,此气压计的水银柱高  $h_2 = 41.8$  厘米(此时飞船离地面不太高).已知飞船起飞前舱内温度  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ ,气压计的水银柱高  $h_1 = 76.0$  厘米.试求此时飞船的加速度.

**分析** 问题的目的是求飞船的加速度,但研究对象不是飞船.注意到飞船中有一个水银气压计,飞船向上加速时,水银柱高度的变化关联到飞船舱内的气体和管内一段水银柱.因此这里的研究对象是舱内气体和管内水银柱.由于飞船座舱都是密封的,飞船上升过程中,舱内气体做等容变化,而管内水银柱做匀加速运动.所以,题中涉及空气和水银柱两个对象,对应着两个不同的过程模型.

解答 对舱内气体,起飞前后的状态参量如下:

|    | 起飞前                             | 起飞后                               |
|----|---------------------------------|-----------------------------------|
| 温度 | $T_1 = t_1 + 273 = 273\text{K}$ | $T_2 = t_2 + 273 = 300.3\text{K}$ |
| 压强 | $p_1 = \rho gh_1$               | $p_2 = ?$                         |

根据查理定律得

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{300.3}{273} \times 13.6 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.76 \text{ 帕}$$

$$= 1.114 \times 10^5 \text{ 帕.}$$

对气压计管中水银柱,在舱内气体向上压力和管中水银柱重力的合力作用下,向上做匀加速运动(图 88).设管子截面积为  $S$ ,由牛顿第二定律得

$$p_2 S - h_2 S \rho g = h_2 S \rho a.$$

$$\therefore a = \frac{p_2 S}{h_2 S \rho} - g$$

$$= \left( \frac{1.114 \times 10^5}{41.8 \times 10^{-2} \times 13.6 \times 10^3} - 9.8 \right) \text{ 米/秒}^2$$

$$= 9.8 \text{ 米/秒}^2.$$

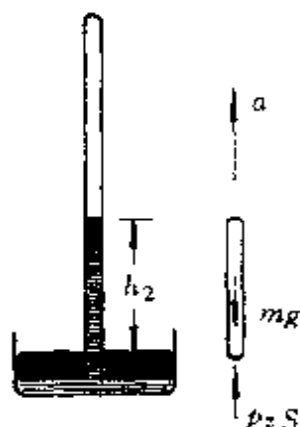


图 88

即飞船以  $9.8 \text{ 米/秒}^2$  的加速度向上飞行.

本题中的研究对象及其过程都比较隐蔽,必须通过仔细分析后才能确定所对应的模型.

### (3) 注意相似模型间的区别和不同模型的适用条件

在中学物理中,有许多物理模型的“外形”相似,实质不同,必须注意区分.

例如,绳和杆是常见的两种相似模型,它们的差别主要是:绳子只能施出拉力,拉力的方向必定沿着绳的方向;杆不仅能施出拉

力,也能施出推力,拉力和推力的方向不一定沿着杆子.由于它们的约束特性不同,因此在具体问题中的力学条件也不同.

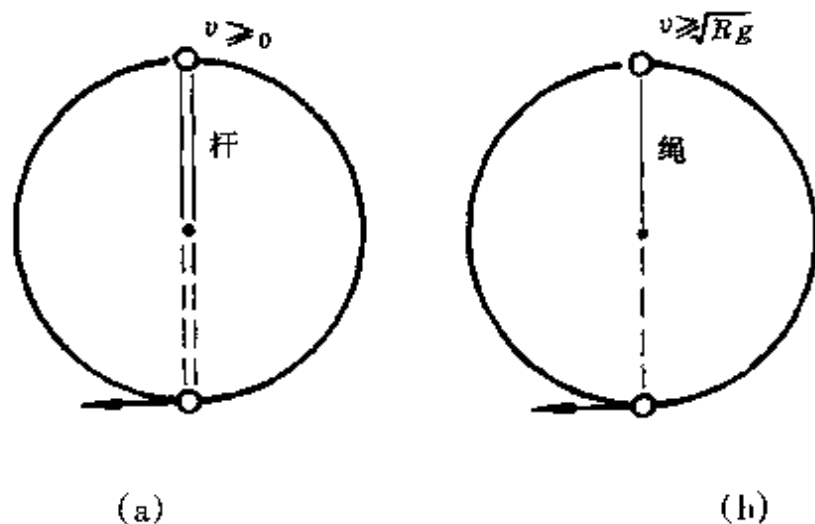


图 89

如图 89(a),小球被杆约束,运动至最高点时可依靠杆的推力平衡球的重力,因此最高点的速度条件

$$v \geq 0.$$

图 89(b)中小球被绳约束,运动至圆周最高点时的速度起码应满足条件

$$mg = m \frac{v^2}{R}.$$

得最高处的速度条件为

$$v \geq \sqrt{Rg}.$$

绳与弹簧也有相似之处,有时,由于绳子的形变情况不明确,常会使绳模型的处理造成困难.

**例 1** 用两根细绳  $AB$  和  $BC$  系住一个质量为  $m$  的小球,  $AB$  绳与竖直方向间夹角为  $\alpha$ ,  $BC$  绳水平(图 90).当把  $BC$  绳烧断的瞬间,关于  $AB$  绳中张力的

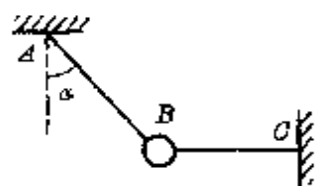


图 90

动情况,甲、乙两个学生展开了热烈的争论.

甲:小球原来受重力  $mg$ 、 $AB$  绳中张力  $T_1$ 、 $BC$  绳中张力  $T_2$ ,由平衡条件得

$$T_1 = \frac{mg}{\cos\alpha}, T_2 = mgtg\alpha,$$

$BC$  烧断时,  $T_2$  消失, 小球在  $T_1$ 、 $mg$  这两个力的合力  $F$  (方向沿水平向左, 大小等于  $mgtg\alpha$ ) 作用下具有水平向左的瞬时加速度

$$a = \frac{F}{m} = g\tg\alpha, \text{如图 91 所示.}$$

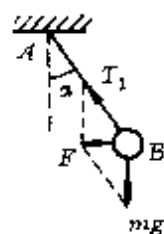


图 91

乙:  $BC$  烧断时, 小球在重力的垂直于  $AB$  方向的分力  $F = mgsin\alpha$  作用下摆动, 相当于一个从极端位置释放开始摆动的单摆, 由于小球的初速度等于零, 沿  $AB$  绳方向处于力平衡状态, 绳中张力

$$T_1 = mg\cos\alpha.$$

小球运动的瞬时加速度

$$a = \frac{F}{m} = g\sin\alpha, \text{如图 92 所示.}$$

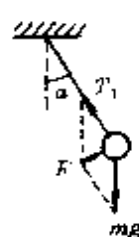


图 92

请你对这两个学生的观点作一评价.

评价 甲、乙两个学生的观点, 可以认为是对  $AB$  绳选用了不同的模型造成的.

甲认为  $AB$  是一根“弹性绳”, 相当于一根轻弹簧(图 93), 剪断的瞬间它保持原来的形变状态不变, 弹力  $T_1$  不变, 小球在  $T_1$ 、 $mg$  的合力  $F = mgtg\alpha$  作用下具有水平向左的瞬时加速度, 故  $a = g\tg\alpha$ .

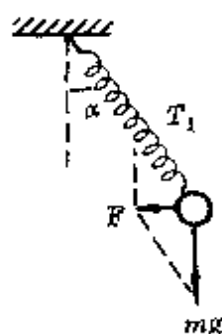


图 93

乙认为  $AB$  是一根“刚性绳”, 相当于一根轻质杆, 剪断的瞬间绳中张力发生了突变, 小球从静止状态突变为以悬点为中心的圆



弧运动,因此绳中张力  $T_1 = mg \cos \alpha$ , 球获得沿圆弧切线方向的加速度为  $a = g \sin \alpha$ .

可见,即使是同一个绳子,也可形成不同的模型,为避免混淆,今后在需要考虑保留形变特性的情况,改用轻弹簧较为妥当.

每个物理模型都有一定的适用条件,使用中应检查所抽象的物理模型与题设条件是否相符,否则往往会发生错误.

**例 2** 在一个半径为  $R$ 、质量为  $M$  的均质球体中紧靠边缘挖出一个半径  $r = \frac{R}{2}$  的球穴,求剩余部分对球穴一侧、离球心为  $d$  处的质点  $m$  的引力(图 94).

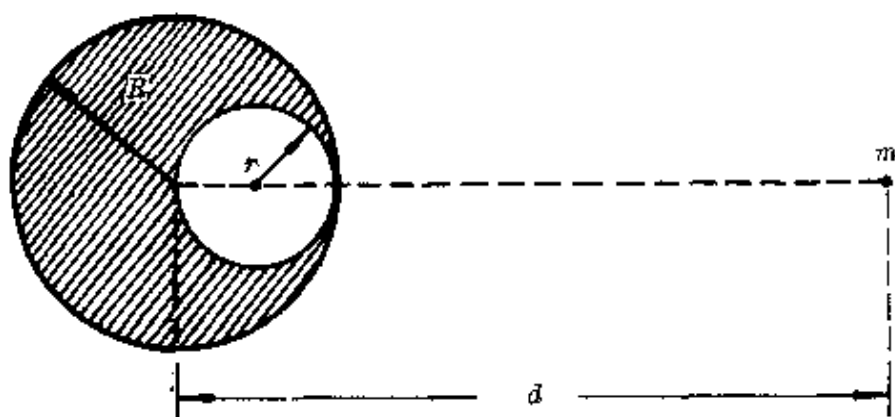


图 94

**解答** 设球体的密度为  $\rho$ , 挖出球穴后剩余部分的质量

$$\begin{aligned} M' &= \frac{4}{3} \pi (R^3 - r^3) \rho = \frac{4}{3} \pi \left( R^3 - \frac{R^3}{8} \right) \cdot \frac{M}{\frac{4}{3} \pi R^3} \\ &= \frac{7}{8} M. \end{aligned}$$

假设剩余部分的重心位置在  $O'$ , 离原球心  $O$  为  $x$  (图 95). 由力矩平衡条件知

$$\frac{7}{8} Mg \cdot x = \frac{1}{8} Mg \cdot r$$

$$= \frac{1}{8} Mg \cdot \frac{R}{2}.$$

$$\text{得 } x = \frac{1}{14} R.$$

假设把剩余部分的质量全部集中在  $O'$ , 并把它看做质点, 根据万有引力定律得对质点  $m$  的引力为

$$F = G \frac{M'm}{(d+x)^2} = G \frac{\frac{7}{8} Mm}{\left(d + \frac{1}{14} R\right)^2}$$

$$= \frac{343 GMm}{2(14d + R)^2}.$$

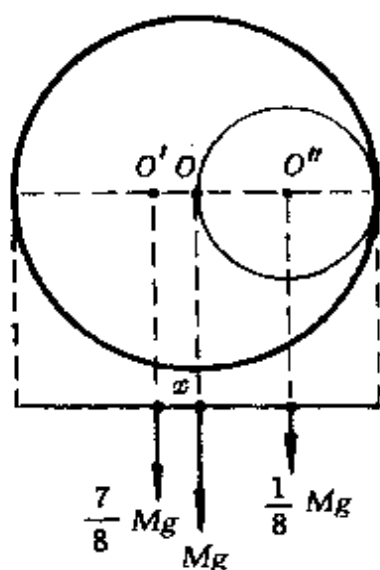


图 95

**分析** 上面的解答过程中, 剩余部分的质量及重心的计算完全正确, 但在引力计算中把剩余部分假设为一个质点却违背了物理原理. 因为挖出球穴的剩余部分不再是一个均质球体, 不能直接代入引力公式计算, 所以上面的解法是错误的. 正确的解法是把剩余部分对质点  $m$  的引力看成是完整的大球对  $m$  的引力与挖出的小球对  $m$  的引力之差, 即

$$F_{O'} = F_O - F_{O''} = G \frac{Mm}{d^2} - G \frac{\frac{1}{8} Mm}{(d-r)^2}$$

$$= GMm \frac{7d^2 - 8dR + 2R^2}{8d^2 \left(d - \frac{R}{2}\right)^2}.$$

#### (4) 分清物理模型与现实原型的差别

物理模型只反映了原型的本质特征或主要矛盾方面, 只能在一定程度上代替原型, 不能等同于原型. 如, 一列火车以  $v = 20$  米/秒的速度匀速通过一座长  $L = 200$  米的桥梁, 按质点运动模型

算出火车过桥时间  $t = \frac{L}{v} = 10$  秒, 实际上, 这仅是车的重心(或车上某一点)过桥的时间, 真正火车的过桥时间还必须考虑车身长度  $l$ , 即  $t = \frac{L+l}{v}$ . 如果在实际问题中, 疏忽了物理模型与现实原型之间的区别, 往往会导致错误.

**例题** 我国著名跳高运动员朱建华当年创造的跳高世界纪录是 2.39 米, 如果以同样的起跳速度上跳, 试估算朱建华在月球上能跳多高? 已知月球半径约等于地球半径的  $\frac{1}{3.8}$ , 月球质量约等于地球质量的  $\frac{1}{81}$ .

**解答** 根据万有引力, 质量为  $m$  的物体在地球和月球上的重力分别为

$$G_{\text{地}} = mg_{\text{地}} = G \frac{M_{\text{地}} m}{R_{\text{地}}^2},$$

$$G_{\text{月}} = mg_{\text{月}} = G \frac{M_{\text{月}} m}{R_{\text{月}}^2}.$$

两式相比, 得月球表面的“重力加速度”为

$$g_{\text{月}} = \frac{M_{\text{月}}}{M_{\text{地}}} \cdot \frac{R_{\text{地}}^2}{R_{\text{月}}^2} g_{\text{地}} = \frac{1}{81} \times \left(\frac{3.8}{1}\right)^2 g_{\text{地}}.$$

跳高运动可以看做是初速度为  $v_0$  的竖直上抛运动, 若两种情况下均以相同的初速度  $v_0$  上跳, 则在地球和月球上的跳过高度分别为

$$H_{\text{地}} = \frac{v_0^2}{2g_{\text{地}}}, \quad H_{\text{月}} = \frac{v_0^2}{2g_{\text{月}}}.$$

相比得

$$H_{月} = \frac{g_{地}}{g_{月}} H_{地} = \frac{81}{3.8^2} H_{地} = \frac{81}{3.8^2} \times 2.39 \text{ 米}$$

$$= 13 \text{ 米.}$$

即朱建华在月球上能跃过约 13 米的高度,相当于普通的 4 层楼的高度.

**分析** 许多学生解答这个问题时都如上面的解答一样,实际上,这种解法是不合理的.其中的错误,就是没有考虑物理模型与现实原型的差别,把质点的运动与现实物体的运动等同起来,正像前面所说的计算火车过桥时间没有考虑车身长度一样.

一个运动员能跳过的高度  $H$ ,应该是

$H =$  起跳时人体重心高度  $h_0 +$  重心升高到最高点的距离

$h_1 -$  最高点时人体重心超过横杆的高度  $h_2$ .

如图 96 所示.

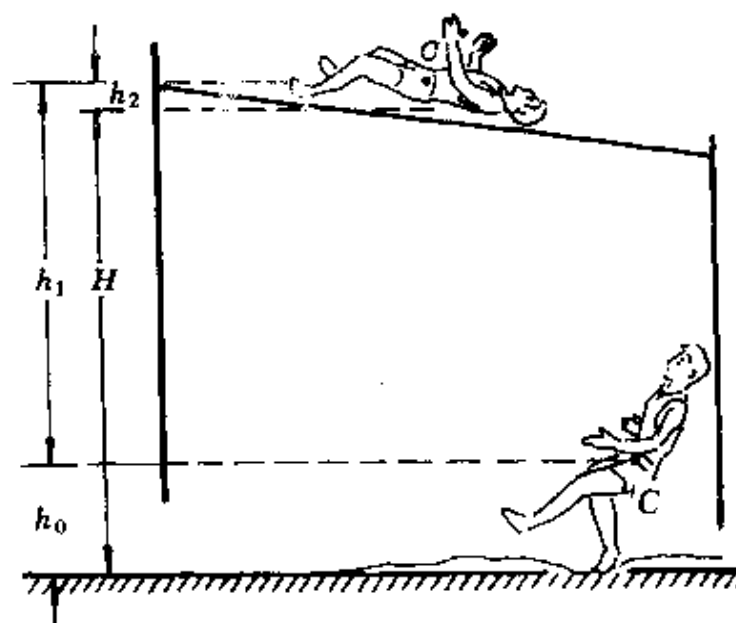


图 96 跳高中重心升高和横杆高度的关系

设朱建华身高取为 1.90 米,站立时人体重心约在身高的 0.618 倍处,即重心高度

$$h_0 = 0.618 \times 1.90 \text{ 米} = 1.17 \text{ 米}.$$

在地球上越过 2.39 横杆时,当忽略背越式跳高中重心离开横杆的高度  $h_2$  后,重心提高的高度实际上仅为

$$h_{地_1} = 2.39 \text{ 米} - 1.17 \text{ 米} = 1.22 \text{ 米}.$$

当朱建华在月球上以同样大小的初速度上跳时,重心提高的高度为

$$h_{月_1} = \frac{g_{地}}{g_{月}} h_{地_1} = \frac{81}{3.8^2} \times 1.22 \text{ 米} = 6.84 \text{ 米}.$$

所以,朱建华在月球上能跃过的高度约为

$$H_{月} = h_{月_1} + h_0 = 6.84 \text{ 米} + 1.17 \text{ 米} \approx 8 \text{ 米}.$$

**说明** 上面我们考虑了重心的高度,按题设条件两种情况中初速相同是作为计算依据的.实际上,更为合理的条件是应该以在地球和月球起跳时体力消耗相同,即从曲膝状态到伸直,使重心上升并以一定初速度跳离地面所做的功相同,即

$$W = mg_{地} \Delta h + \frac{1}{2} mv_{0地}^2 = mg_{月} \Delta h + \frac{1}{2} mv_{0月}^2.$$

式中  $\Delta h$  即从曲膝到伸直时重心上升高度.显然,起跳中消耗体力相同时,在月球和地球上的起跳初速是不同的,由于  $g_{地} > g_{月}$ ,因此  $v_{0月} > v_{0地}$ ,朱建华在月球上的跳过高度比上面算出的 8 米要大些.

### (5)应用物理模型解题举例

前面说过,各种物理模型的区分有时并不是很严格的.在处理具体物理问题时,又往往会交叉着多种模型.因此,对待物理模型,重要的不是作机械的分类,而是掌握模型的物理意义,学会对实际问题作合理的抽象,根据抽象出的模型正确运用相应的物理规律.

下面,我们选择中学物理中若干典型的物理模型,结合具体问题中的应用,希望能进一步体会模型对物理学习的指导意义.

**质点与刚体模型**

质点与刚体是两个最普遍的对象模型.当作用在研究对象上的各个力交汇于一点,物体做平动或处于平衡状态时,都可把整个物体抽象为一个质点;当作用在研究对象上的各个力不交汇于一点,物体绕轴运动或有绕轴运动的趋势时,应当把物体抽象成刚体.力学中的共点力平衡条件、匀变速运动规律、牛顿运动定律、万有引力公式等,都是仅适用于质点的规律.对于刚体,现行中学物理课本仅研究刚体绕轴转动的平衡条件( $\sum M = 0$ ).

**例 1** 在月球上能看到地球的某地方,以月球为参照系时,关于地球绕月球公转的下列说法中,正确的是

A.能观察到地球绕月球公转,周期为 27 日 7 时 43 分 11 秒

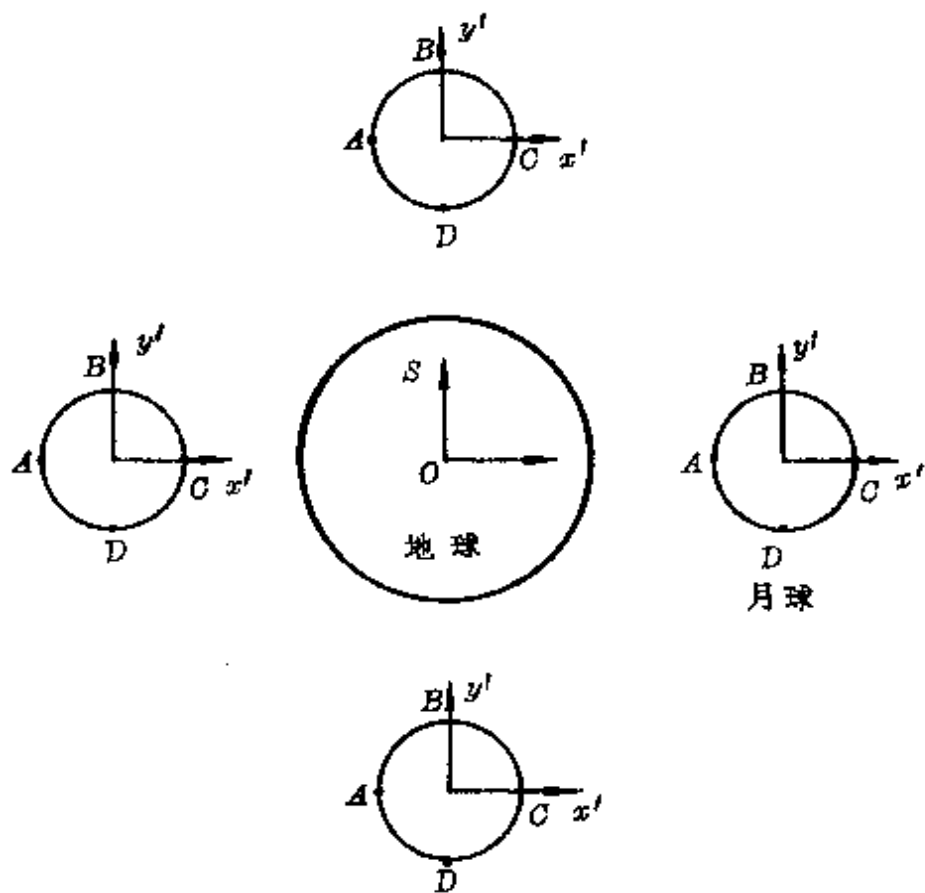


图 97 假定月球无自转

(即等于在地球上观察到月球的公转周期);

B. 能观察到地球绕月球公转, 周期为 24 小时;

C. 不能观察到地球绕月球的公转.

**分析** 先考虑观察者置身于地球上(即以地球为参照物), 并把月球抽象为一个质点模型(即假定月球无自转), 那么, 从地球上应该可以观察到月球的整个表面, 如图 97 所示.

实际上, 月球绕地球公转的同时还在自转, 由于月球自转的周期又与绕地球公转的周期相同, 角速度方向又一致, 从而使得月球始终以一面朝地球, 另一面背向地球, 如图 98 所示. 所以本题中需把月球抽象为刚体.

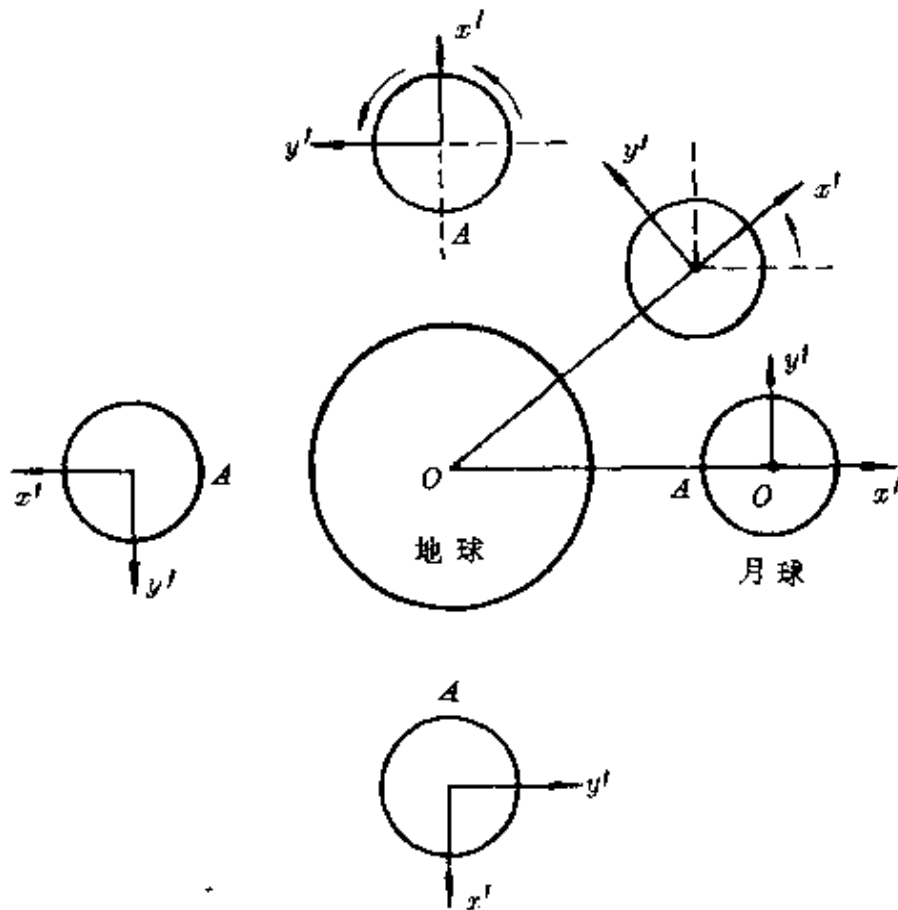


图 98 月球自转周期等于公转周期

**解答** 我们置身于月球去观察.如图 99 所示,由于地球与月球做同步转动,地球相对于月球转动系统保持相对静止,所以在月球上观察不到地球绕月球的公转.

正确答案为 C.

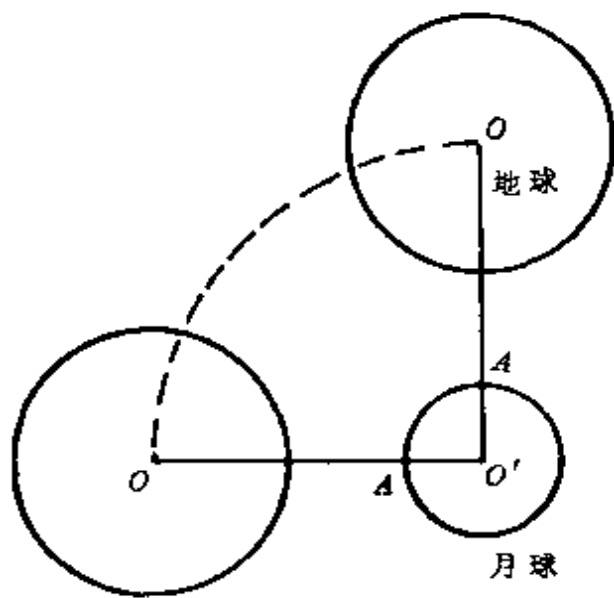


图 99 置身月球的观察

**例 2** 在倾角为  $\theta$  的斜面上,用细线拴着一个质量为  $m$  的均质小球,图 100(a)中细线与斜面平行并通过球心;图 100(b)中细线系于球的顶部与斜面成  $\theta$  角,试计算两种情况下球对斜面的压力?

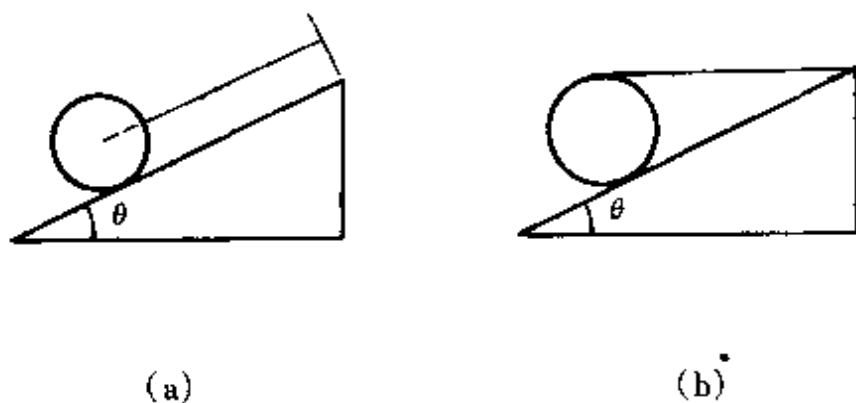


图 100

**分析** 图 100(a)中的小球,受到三个力作用:重力  $mg$ 、斜面



弹力  $N_a$ 、细线拉力  $T_a$ ，这三个力都作用于一点(球心)，如图 101 (a)所示。小球只能做平动或处于静止状态，应该把它抽象为一个质点。

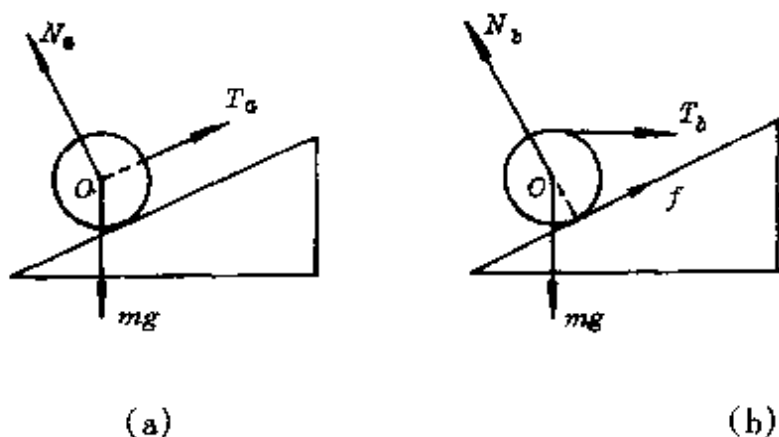


图 101

图 100(b)中的小球，由于细线的拉力  $T_b$  与球的重力  $mg$ 、斜面支持力  $N_b$  并不共点，它必然还受到一个沿斜面向上的摩擦力  $f$ ，共受到四个力作用，如图 101(b)所示。这是一个转动平衡问题，因此，必须把它抽象为一个刚体。

**解答** 对图 101(a)中小球，由共点力平衡条件得斜面支持力

$$N_a = mg \cos \theta.$$

小球对斜面的压力大小  $N_a' = mg \cos \theta$ 。

对图 101(b)中小球，由水平方向和竖直方向的力平衡条件得

$$T_b + f \cos \theta = N_b \sin \theta,$$

$$N_b \cos \theta + f \sin \theta = mg.$$

又由各力对球心  $O$  的力矩为零，得

$$T_b R = f R.$$

联立三式得斜面对球的支持力

$$N_b = mg.$$

小球对斜面的压力大小  $N_b' = mg$ 。

**说明** 对图 101(b)中小球,也可较方便地选取细绳的结点  $P$  为转动中心,由图 102 知

$$\sum M_p = mg \cdot \overline{PC} - N_b \cdot \overline{PD} = 0.$$

而  $\overline{PC} = \overline{PD}$ ,

$$\therefore N_b = mg.$$

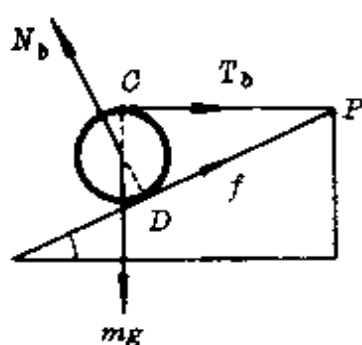


图 102

**例 3** 质量  $m = 2$  千克的小铁块静止于水平导轨  $AB$  的  $A$  端,导轨及支架  $ABCD$  形状及尺寸如图 103 所示,它只能绕通过支架  $D$  点的垂直于纸面的水平轴转动,其重心在图中  $O$  点,质量  $M = 4$  千克.现用一细线沿导轨拉铁块,拉力  $F = 12$  牛,铁块和导轨间的动摩擦因数  $\mu = 0.5$ .取  $g = 10$  米/秒<sup>2</sup>.从铁块运动时起,导轨(及支架)

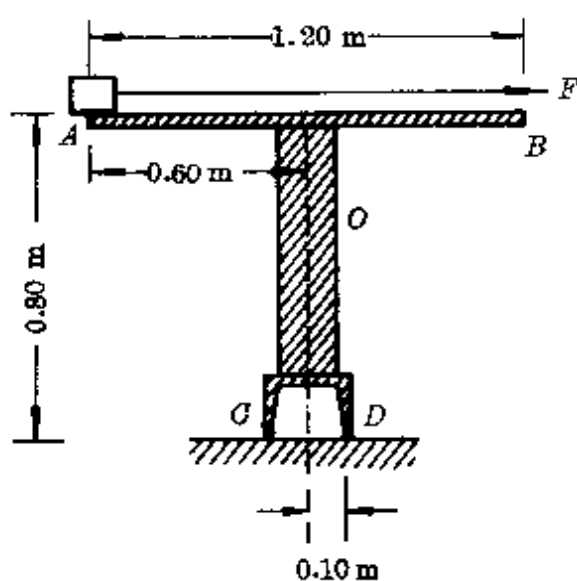


图 103

能保持静止的最长时间是多少? (1990 年全国高考物理试题)

**分析** 小铁块只能沿导轨做平动,应该抽象为一个质点.小铁块运动过程中,对导轨的压力和摩擦力都会构成使支架绕  $D$  轴转动的力矩,研究支架的平衡时,应该把它抽象为一个刚体.

**解答** 小铁块运动过程中受到四个力作用:重力  $mg$ 、拉力  $F$ 、导轨支持力  $N$ 、导轨摩擦力  $f$ .设它沿导轨的平动加速度为  $a$ ,由牛顿第二定律,有

$$F - f = ma.$$

又  $f = \mu N = \mu mg,$

$\therefore a = \frac{F - \mu mg}{m} = \frac{12 - 0.5 \times 2 \times 10}{2} \text{米/秒}^2 = 1 \text{米/秒}^2.$

设经时间  $t$  后,小铁块的位移为  $s$ ,此时导轨恰好绕  $D$  轴转动而处于临界平衡状态,意味着  $C$  端地面支持力为零,作用在导轨上共有四个力:重力  $Mg$ 、小铁块的压力  $N'$  ( $N' = N = mg$ )、小铁块的摩擦力  $f'$  ( $f' = f = \mu mg$ )、轴  $D$  处的作用力(图 104 中未画出).根据导轨绕  $D$  轴的力矩平衡条件

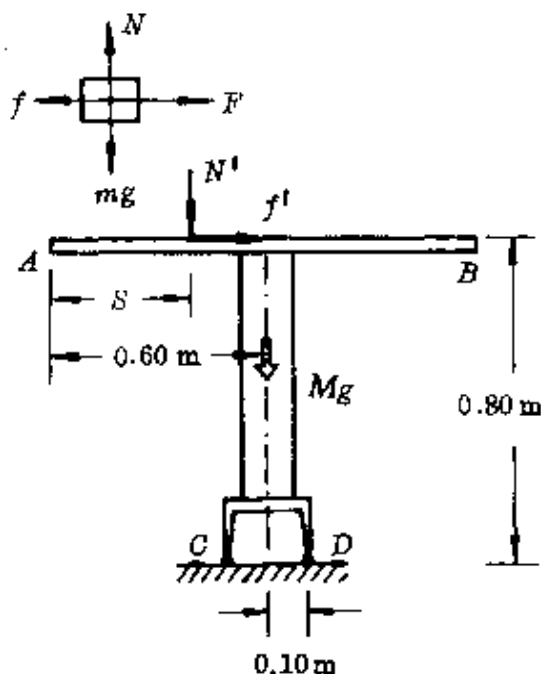


图 104

$$\begin{aligned} \sum M_D &= Mg \times 0.1 + N' (0.6 \\ &\quad + 0.1 - s) - f' \times 0.8 \\ &= 0, \end{aligned}$$

即  $40 \times 0.1 + 20(0.7 - s) = 10 \times 0.8.$

得  $s = 0.5 \text{米}.$

由运动学公式  $s = \frac{1}{2} at^2$ ,得支架能保持静止的最长时间为

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 0.5}{1}} \text{秒} = 1 \text{秒}.$$

**例 4** 一根长  $l$  的均质木杆,用长  $l_0$  的细线系于容器底,当在容器中缓缓注水,使直杆竖直浮起时,容器中的水深  $h$  至少为多少? 已知水的密度  $\rho_1 >$  直杆密度  $\rho_2$ (图 105).

**分析** 木杆处于竖直浮起时,它所受到的重力、线的拉力和水

的浮力在同一竖直线上,木杆已相当于一个质点,仅从这个最终状态是无法确定水深的.

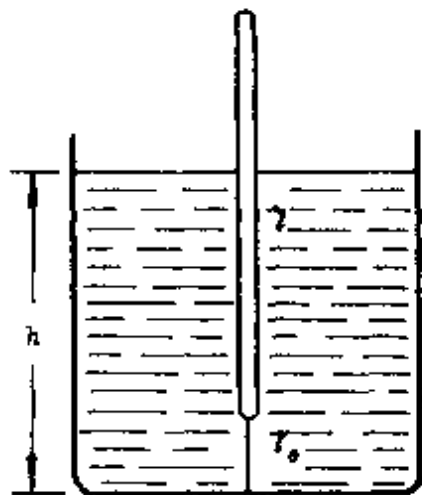


图 105

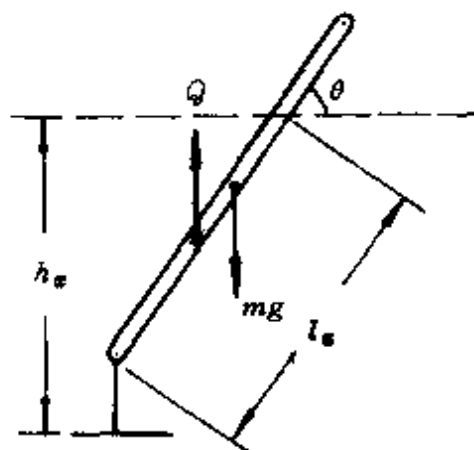


图 106

水深  $h < l_0$  时,细线松弛,木杆水平浮于水面(仅受重力和浮力两个力),也相当一个质点.

显然,为了使木杆竖直浮起,水深  $h$  必须大于  $l_0$ ,木杆必经历一个倾斜漂浮的过程(图 106).在这个倾斜位置上,木杆应抽象为一个刚体.

**解答** 设水深  $h_x$  时木杆浸没部分长  $l_x$ ,木杆对水面的倾角为  $\theta$ ,令木杆截面积为  $S$ ,则木杆的重力和所受浮力分别为

$$mg = lS\rho_2 g,$$

$$Q = l_x S\rho_1 g.$$

由木杆的重力和所受浮力对以下端为转轴的力矩平衡条件

$$Q \cdot \frac{l_x}{2} \cos\theta = mg \cdot \frac{l}{2} \cos\theta,$$

即 
$$l_x S\rho_1 g \cdot l_x = lS\rho_2 g \cdot l.$$

得 
$$l_x = \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} l.$$

木杆与水面间倾角  $\theta$  满足关系式

$$\sin\theta = \frac{h_x - l_0}{l_x}.$$

当木杆竖直浮起时,  $\theta = 90^\circ$ , 设此时水深为  $h$ , 则应该满足关系

$$h - l_0 = l_x.$$

把上面得到的  $l_x$  值代入, 即得木杆竖直浮起时的水深为

$$h = l_0 + l_x = l_0 + \sqrt{\frac{\rho_2}{\rho_1}} l.$$

**例 5** 在倾角为  $\theta$  的传送带上放置一块质量  $m$  的均质木块, 木块与传送带间静摩擦系数为  $\mu_0$ , 试讨论物体随传送带一起上行的条件(图 107).

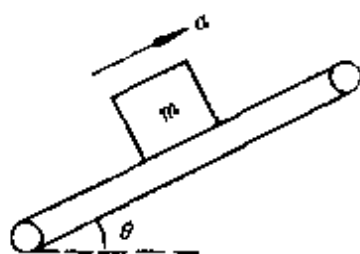


图 107

**分析** 物体随带匀加速上行时受到三个力: 重力  $mg$ , 带对木块的弹力  $N$  和摩擦力  $f$ . 其中重力总是作用在物体的重心上(均质木块的中心), 而弹力与摩擦力的作用位置则与对木块所抽象的物理模型有关:

把木块抽象为质点模型时, 弹力和摩擦力跟重力作用于同一点, 其受力图如图 108 所示.

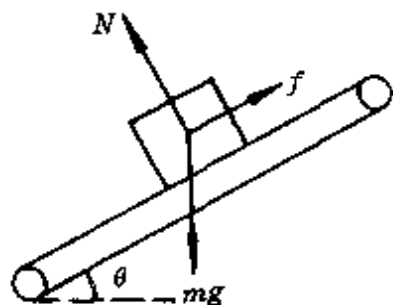


图 108

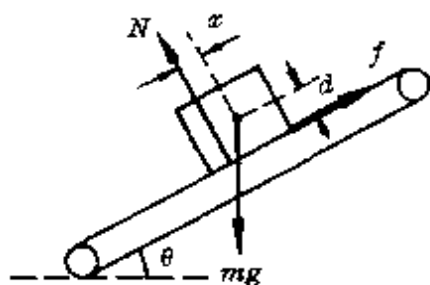


图 109

把木块抽象为刚体模型时, 由于物体在重力作用下有沿带下

滑的趋势,物体的下半部分较上半部分压紧传送带,造成带的支持力  $N$  不再通过物体的重心——设其作用位置从重心下移  $x$ . 传送带对物体的摩擦力  $f$  作用在与带相切的平面内,因此木块的受力图如图 109 所示,所以需分别用两种模型讨论.

**解答** (1)把木块作为质点模型处理

木块随带匀速上行时,根据图 108,由力平衡条件知

$$f - mg \sin \theta = 0.$$

又  $f \leq \mu_0 N = \mu_0 mg \cos \theta,$

即  $mg \sin \theta \leq \mu_0 mg \cos \theta.$

所以  $\mu_0 \geq \tan \theta,$  或  $\theta \leq \tan^{-1} \mu_0.$

即要求木块与传送带间静摩擦因数至少等于传送带倾角的正切值.

木块随带匀加速上行时,根据图 108,由牛顿第二定律知

$$f - mg \sin \theta = ma.$$

又  $f \leq \mu_0 mg \cos \theta,$

所以  $a \leq \mu_0 g \cos \theta - g \sin \theta.$

即物体随带加速上行时,加速度大小有一限值,其最大值为

$$a_m = \mu_0 g \cos \theta - g \sin \theta.$$

(2)把木块作为刚体模型处理

为简单起见,设放在传送带上的是均质长方体,底边长为  $l$ ,高为  $h$ .

木块随带匀速上行时,根据图 109,由力平衡条件和对重心的力矩平衡条件知

$$f - mg \sin \theta = 0,$$

$$N - mg \cos \theta = 0,$$

$$Nx - fd = 0.$$

式中  $d = \frac{h}{2}$  为重心离带高度. 联立三式得

$$x = \frac{f}{N}d = d \operatorname{tg} \theta.$$

可见传送带支持力偏离重心的距离  $x$  与重心高度  $d$ 、带的倾角  $\theta$  有关.

由于传送带对物体的摩擦力最大值为  $f_m = \mu_0 N = \mu_0 mg \cos \theta$ , 位移  $x$  也被物体的长度所限制, 其最大值  $x_m = \frac{l}{2}$ . 要求物体能随带一起匀速上行, 必须同时满足条件

$$x = d \operatorname{tg} \theta \leq \frac{l}{2},$$

$$f = mg \sin \theta \leq \mu_0 mg \cos \theta.$$

即

$$\operatorname{tg} \theta \leq \frac{l}{2d} = \frac{l}{h} \text{ 和 } \operatorname{tg} \theta \leq \mu_0.$$

所以, 物体能随带匀速上行时, 带的倾角有一限值, 它的大小完全受物体的几何尺寸和物体与带之间的摩擦因数所制约, 否则物体将下滑或向下翻倒.

木块随带匀加速上行时, 由牛顿第二定律和对重心的力矩平衡条件知

$$f - mg \sin \theta = ma,$$

$$N - mg \cos \theta = 0,$$

$$Nx - fd = 0.$$

联立得

$$x = \frac{f}{N}d = \frac{g \sin \theta + a}{g \cos \theta}d = \frac{g \sin \theta + a}{g \cos \theta} \cdot \frac{h}{2}.$$

要求木块随带加速运动必须同时满足条件

$$f = m(g \sin \theta + a) \leq \mu_0 mg \cos \theta,$$

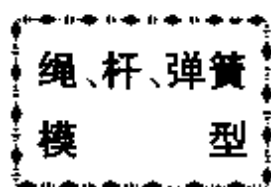
$$x = \frac{g \sin \theta + a}{g \cos \theta} \cdot \frac{h}{2} \leq \frac{l}{2}.$$

即

$$a \leq \mu_0 g \cos \theta - g \sin \theta,$$

$$a \leq \frac{l}{h} g \cos \theta - g \sin \theta.$$

所以,木块随带加速上行时,其加速度有一限值,它的大小受木块与带之间的摩擦因数、木块的几何尺寸及带的倾角所制约.



绳、杆及轻质弹簧也都是对象模型,它们的主要特性及其基本区别列表比较如下.

环与管子的情况,与绳及杆有着类似的特性,可作对照研究.

| 比较项目    | 绳           | 杆                    | 弹簧                  |
|---------|-------------|----------------------|---------------------|
| 形变情况    | 只能伸长        | 认为长度不变               | 既可伸长,也可压缩           |
| 施力与受力情况 | 只能受到拉力或施出拉力 | 不仅能受到或施出拉力,也能受到或施出压力 | 既能受到或施出拉力,也能受到或施出压力 |
| 力的方向    | 始终沿着绳子      | 不一定沿着杆子              | 沿着弹簧纵向              |
| 力的变化    | 可以发生突变(无记忆) | 可以发生突变(无记忆)          | 只能发生渐变(有记忆)         |

**例 1** 如图 110 所示,用一根细线把轻质摇把  $AOBC$  在  $O$  处吊起,摇把各部分的尺寸如图.若在  $A$  端用细线挂一重  $G = 200$  牛的物体,为使摇把保持如图示状态,且使所加的力最小,施力作用点应在哪里? 施力方向如何? 力的大小为多少?



**解答** 重物对  $A$  端的拉力有使摇把逆时针方向转动的趋势, 为了维持平衡, 又使作用力最小, 应形成一顺时针方向的力矩, 且使得力臂最大, 因此, 应在  $C$  点加一个垂直于  $CO$  方向斜向下的拉力. 由力矩平衡条件

$$G \cdot a = F \cdot 3a,$$

得 
$$F = \frac{1}{3} G.$$

**分析** 上面是一种很常见的错误解答, 究其原因, 就是疏忽了绳模型的特点. 因为绳子只能承受沿着绳子方向的拉力, 它也只能提供沿着绳子方向的拉力, 因此  $O$  端受力必须在竖直方向. 为使摇把保持在图中位置,  $C$  点所加外力应竖直向下, 其大小由

$$G \cdot a = F \cdot 2a,$$

得 
$$F = \frac{G}{2}.$$

若在  $C$  端加上垂直  $CO$  的拉力, 摇把在水平方向的合力不等于零, 不可能平衡在原来的位置上.

如把图 110 中的细绳  $OO'$  换成一根与顶板固定联结的细杆(图 111), 那么为了保持摇把平衡且使所加作用力最小, 则在  $C$  端施力方向应垂直  $CO$  斜向下.

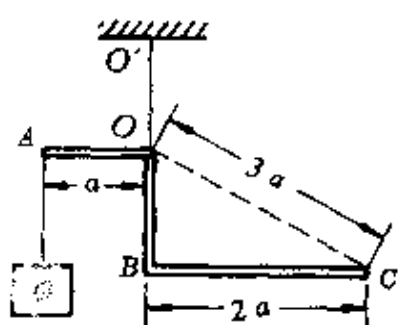


图 110

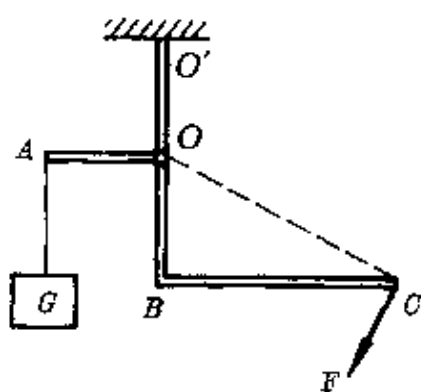


图 111

**例 2** 均质杆  $AB$  的质量为  $m$ ,  $A$  端铰接于竖直墙,  $B$  端用细绳  $BC$  挂起或用另一均质杆(质量为  $m'$ )  $BC'$  铰接, 使  $AB$  杆都成水

平状态,如图 112 所示.试确定两情况下  $AB$  杆的  $B$  端受力方向.

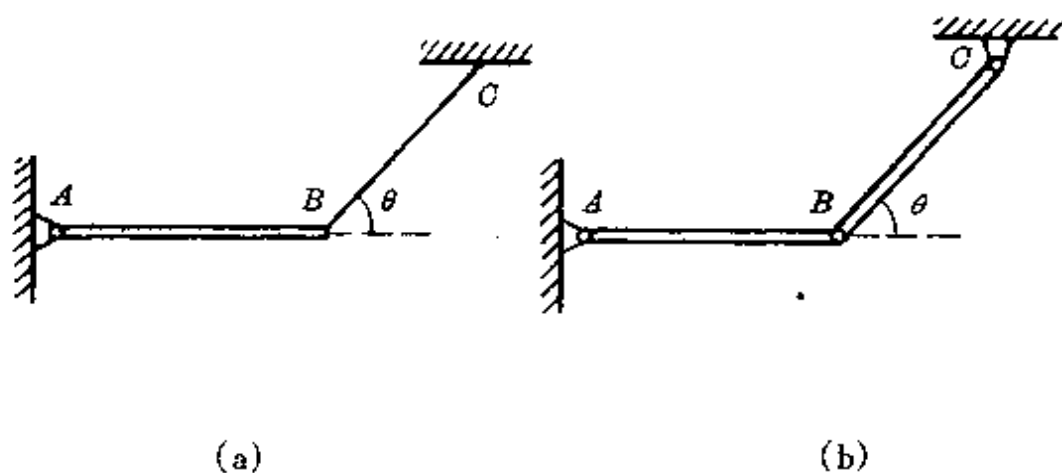


图 112

**解答** 图 112(a)中  $BC$  是绳,它只能施出拉力,且力的方向始终沿着绳子方向,所以对  $B$  端的拉力  $F$  沿  $BC$  绳斜向上,如图 113 所示.

图 112(b)中  $AB$ 、 $BC$  都是有质量的杆,两者间相互作用力方向不一定沿着某一杆子,应结合它们的平衡条件确定.

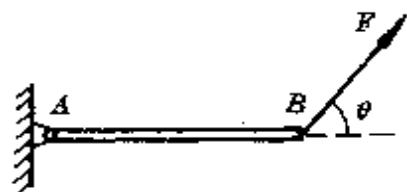


图 113

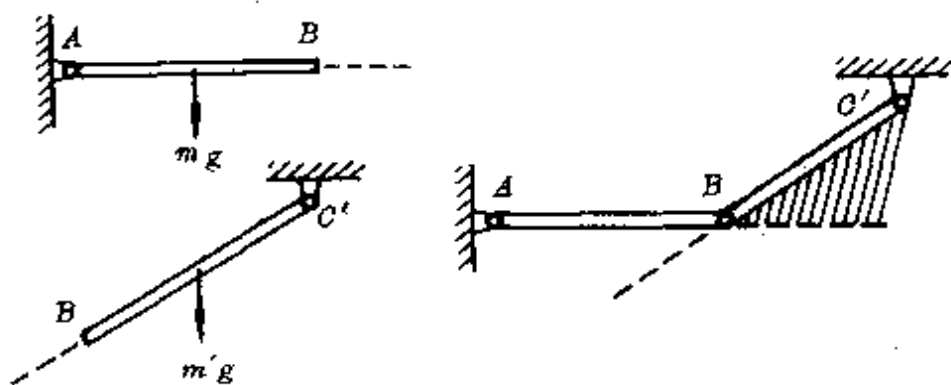


图 114

对杆  $AB$ ,由力矩平衡条件知, $BC'$  杆对它的作用力的方向必在  $AB$  水平线上方;

对杆  $BC'$ , 由力矩平衡条件知,  $AB$  杆对它的作用力的方向必在  $C'B$  斜直线之左方, 反过来,  $BC'$  对  $AB$  杆的作用力必在  $C'B$  斜直线之右方.

综合这两个结果可知,  $BC'$  杆对  $AB$  杆的作用力必在  $AB$  线之上方,  $C'B$  斜直线之右方, 即在图 114 中阴影线区域内.

**例 3** 小车上有一竖杆, 杆端  $A$  固定另一木杆  $AB$ , 两者间夹角为  $\theta$ , 在  $B$  端固定一个质量为  $m$  的均质小球(图 115). 当小车沿水平面向左以加速度  $a$  做匀加速运动时,  $AB$  杆对小球的作用力大小等于

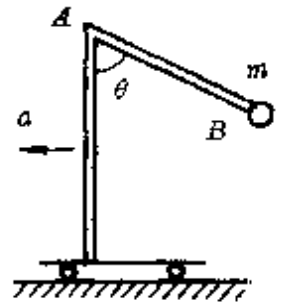


图 115

A.  $ma$ ;      B.  $mg/\cos\theta$ ;

C.  $m\sqrt{g^2 + a^2}$ .

**解答** 作用在小球上仅有两个力: 球的重力  $mg$ 、 $AB$  杆对球的作用力  $F$ . 把  $AB$  杆对球的作用力  $F$  沿竖直方向与水平方向分解成  $F_1$ 、 $F_2$  两分力(图 116). 其中, 分力  $F_1$  平衡球的重力,  $F_1 = mg$ ; 分力  $F_2$  使球产生水平向左的加速度,  $F_2 = ma$ . 因此,

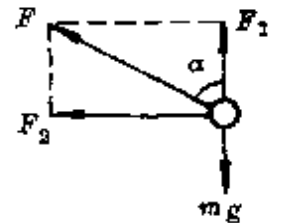


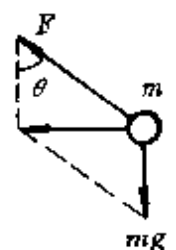
图 116

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = m\sqrt{g^2 + a^2}.$$

正确答案为 C.

必须注意: 此时力  $F$  与竖直方向的夹角  $\alpha$  由小车(球)的加速度大小决定, 即

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{F_2}{F_1} = \frac{a}{g}, \text{ 或 } \alpha = \operatorname{tg}^{-1} \frac{a}{g}.$$



它的大小与两杆间夹角  $\theta$  无关, 即力  $F$  并不一定沿着  $BA$  方向. 如果不注意杆件的受力特点, 把杆件  $AB$  与绳

图 117

模型混淆起来,认为  $B$  端对球的受力方向必沿着  $BA$  方向,画出图 117 的力矢量,得  $F = mg/\cos\theta$ ,这样就会误选 B.

**例 4** 用一根细线竖直悬挂一个质量为  $m_1$  的小球,球的下方固定一轻弹簧,另端挂着一个质量为  $m_2$  的小球(图 118).当细线被突然剪断的瞬间,两球下落的加速度分别为多少?

**解答** 开始时两球都处于平衡状态,作用在上面小球的力有:细线拉力  $T$ 、重力  $m_1g$ 、弹簧弹力  $T'$ .作用在下面小球的力有:重力  $m_2g$ 、弹簧弹力  $T'$ (图 119).由平衡条件得

$$T' = m_2g,$$

$$T = T' + m_1g = (m_1 + m_2)g.$$

细线突然被剪断时,线中张力由原来的  $T$  突变为零,而弹簧仍保持着原来的形变状态,即弹力  $T'$  还未变(有记忆特性).因此,细线剪断的瞬间,作用在下面的小球  $m_2$  上的两个力不变,仍处于平衡状态,故下面小球的加速度  $a_2 = 0$ .

上面的小球由于  $T = 0$  而向下加速,其加速度

$$a_1 = \frac{T' + m_1g}{m_1} = \frac{m_2 + m_1}{m_1}g > g.$$

所以,细线剪断的瞬间,由于线与弹簧的力学特性不同,上、下两球的运动状态也不同.

**例 5** 如图 120 所示,光滑细管  $AB$  的一部分是平直的,另一部分是处于竖直平面内的半径为  $R$  的半圆,圆管内半径  $r \ll R$ .一个质量为  $m$ 、半径比  $r$  略小的光滑小球以水平速度  $v_0$  从  $A$  端射入细管.

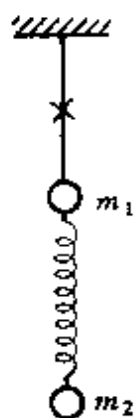


图 118

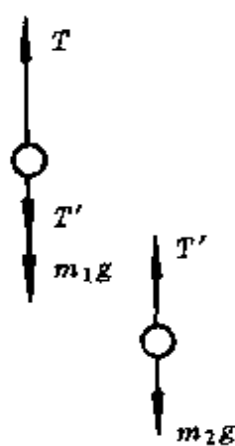


图 119

(1) 要使小球能从  $B$  端射出, 初速度  $v_0$  多大?

(2) 小球从  $B$  端射出的瞬间, 对管壁的压力有哪几种情况? 相应的初速度条件是什么?

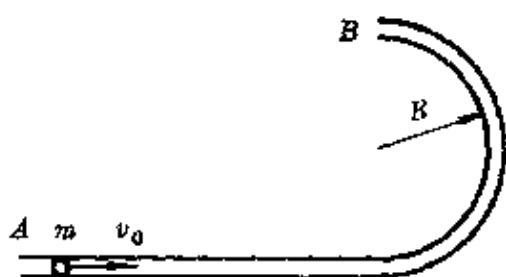


图 120

**解答** (1) 因为管的内壁两侧都能产生弹力, 所以小球位于最高处  $B$  的速度条件是  $v_B \geq 0$ . 当  $v_B = 0$  时, 由入射至最高处机械能守恒

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = 2mgR.$$

得  $v_0 = \sqrt{4Rg}$ .

要使小球能从  $B$  处射出,  $v_B > 0$ , 入射处的初速度  $v_0$  应满足条件

$$v_0 > \sqrt{4Rg}.$$

(2) 小球从管口  $B$  射出的瞬间, 对管壁的压力有三种典型情况:

①  $N_B = 0$ , 即刚好对两侧管壁都没有压力. 此时恰由球的重力作为小球运动至  $B$  处的向心力

$$mg = m \frac{v_B^2}{R},$$

又由机械能守恒

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = mg \cdot 2R + \frac{1}{2} m v_B^2,$$

联立两式得对应的人射速度

$$v_0 = \sqrt{5Rg}.$$

② 对内管壁产生压力. 若小球的入射速度满足条件

$$\sqrt{4Rg} < v_0 < \sqrt{5Rg},$$

此时小球能到达  $B$  端,但速度不够大( $v_B < \sqrt{Rg}$ ),小球的重力没有完全作为向心力,小球将压紧管的内壁(即向下压),管的内壁产生向上的弹力平衡小球的一部分重力.

③对外管壁产生压力.若小球的入射速度满足条件

$$v_0 > \sqrt{5Rg},$$

小球到达  $B$  端时速度过大( $v_B > \sqrt{Rg}$ ),小球的重力还不足以作为球的向心力,小球会甩向外侧,压紧管的外壁(即向上压).于是,管的外壁产生向下的压力补充球所需的向心力.



碰撞原指一个短暂的相互作用过程,它作为一个过程模型,也适用于较长时间的相互作用.

两物体相碰时如不受其它外力或相互间作用力甚大于其它外力,整个碰撞过程中任何一个瞬间,系统的总动量守恒.

如果碰撞前后,系统的动能没有损失,称为弹性碰撞.碰撞前后两物体的速度  $v_1$ 、 $v_2$ 、 $v_1'$ 、 $v_2'$  满足关系式

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2',$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1'^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2'^2.$$

如果碰后两物体粘合在一起运动,系统的动能损失最大,此时碰撞前后两物体的速度  $v_1$ 、 $v_2$  和  $u$ (共同速度)满足关系式

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = (m_1 + m_2) u,$$

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 > \frac{1}{2} (m_1 + m_2) u^2.$$

例1 在光滑水平桌面上放有一个质量  $M = 2$  千克、半径  $R = 0.4$  米的半圆形光滑木槽,一个质量  $m = 1$  千克的小球以水平速度  $v_0 = 2$  米/秒沿桌面冲向木槽(图 121),试求:

(1) 当小球从槽底部回出时, 小球和槽的速度;

(2) 要使小球恰能上升至槽的中点处, 小球的初速度  $v_0'$  为多少? 至槽的中点时小球和槽的速度各为多少?  $g = 10$  米/秒<sup>2</sup>.

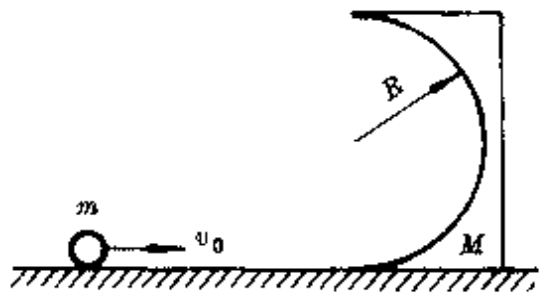


图 121

**分析** 小球冲向槽与槽相互作用时, 对小球和槽这一系统, 水平方向不受外力, 系统的动量守恒. 又由于球与槽均光滑, 小球沿槽上升和回落过程中系统的动能未损失. 所以, 小球和槽的相互作用过程可抽象为一个碰撞过程:

小球冲向槽, 相当于两弹性球接触和互相挤压阶段;

小球从槽底回出, 相当于两弹性球形变恢复和分离阶段.

同理, 小球恰上升至槽的中点处, 在这一瞬间, 球与槽保持相对静止, 两者具有共同的速度, 这个过程可抽象为一次完全非弹性碰撞.

**解答** (1) 设小球从槽底回出时, 球和槽的速度分别为  $v_1$ 、 $v_2$ . 由弹性碰撞过程中动量守恒和动能守恒, 得

$$mv_0 = mv_1 + Mv_2,$$

$$\frac{1}{2}mv_0^2 = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}Mv_2^2.$$

联立得

$$v_1 = \frac{m - M}{m + M}v_0 = \frac{1 - 2}{1 + 2} \times 2 \text{ 米/秒} = -\frac{2}{3} \text{ 米/秒}.$$

式中“-”号, 表示小球从槽底回出的速度方向与入射方向相反, 为水平向左.

$$v_2 = \frac{2m}{m + M}v_0 = \frac{2 \times 1}{1 + 2} \times 2 \text{ 米/秒} = \frac{4}{3} \text{ 米/秒}.$$

(2) 设小球恰上升到中点处时, 小球和槽的共同速度为  $u$ , 由

$$mv_0' = (m + M)u,$$

$$\frac{1}{2}mv_0'^2 = \frac{1}{2}(m + M)u^2 + mgR.$$

联立得

$$\begin{aligned} v_0' &= \sqrt{\frac{m + M}{M} \cdot 2Rg} = \sqrt{\frac{1 + 2}{2} \times 2 \times 0.4 \times 10} \text{米/秒} \\ &= 2\sqrt{3} \text{米/秒} \approx 3.4 \text{米/秒}, \end{aligned}$$

$$u = \frac{m}{m + M}v_0' = \frac{1}{1 + 2} \times 3.4 \text{米/秒} = 1.1 \text{米/秒}.$$

**例 2** 两块大小不同的圆形薄板(厚度不计), 质量分别为  $M$  和  $m$  ( $M = 2m$ ), 半径分别为  $R$  和  $r$ , 两板之间用一根长  $l = 0.4$  米的轻质绳相连结. 开始时, 两板水平叠放在支架  $C$  上方高  $h = 0.2$  米处[图 122(a)], 以后, 两板一起自由下落, 支架上有一个半径  $R'$  ( $r < R' < R$ ) 的圆孔, 两板中心与圆孔中心在同一条竖直线上. 大

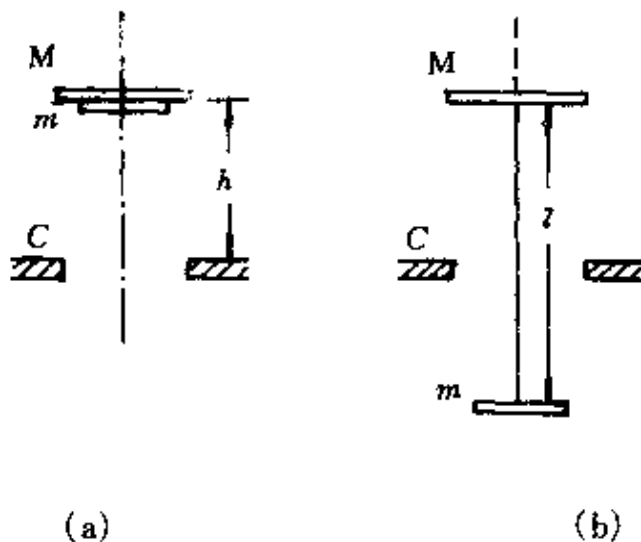


图 122

圆板碰到支架后跳起, 机械能无损失, 小圆板穿过圆孔, 两板分离. 试求当细绳绷紧的瞬间两板的速度[图 122(b)]. 取  $g = 10$  米/秒<sup>2</sup>.



**分析** 整个物理过程可分为几个阶段:

(1) 两板自由下落(此时两板作为一个整体可抽象为一个质点模型);

(2) 大圆板与支架  $C$  相碰无能量损失, 发生了一次弹性碰撞, 小圆板继续下落;

(3) 细绳绷紧瞬间, 两板通过绳的相互作用获得共同速度, 相当于发生一次完全非弹性碰撞.

**解答** 两板落至支架  $C$  时的速度

$$v_0 = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 0.2} \text{米/秒} = 2 \text{米/秒}.$$

大圆板与支架  $C$  碰后以  $v_0$  为初速度竖直跳起, 设至细绳绷紧前历时  $t_1$ , 绷紧前的速度为  $v_1$ , 上跳高度(离支架  $C$  的高度)为  $h_1$ , 则

$$v_1 = v_0 - gt_1, \quad \text{①}$$

$$v_1^2 = v_0^2 - 2gh_1. \quad \text{②}$$

小圆板穿过圆孔时的速度为  $v_0$ , 设落至细绳绷紧前历时  $t_2$ , 速度为  $v_2$ , 下落高度(离支架的高度)为  $h_2$ , 则

$$v_2 = v_0 + gt_2, \quad \text{③}$$

$$v_2^2 = v_0^2 + 2gh_2. \quad \text{④}$$

因  $t_1 = t_2$ ,  $h_1 + h_2 = l = 0.4$  米, 由①、③两式相加, 得

$$v_1 + v_2 = 2v_0 = 4 \text{米/秒}. \quad \text{⑤}$$

由④、②两式相减得

$$\begin{aligned} v_2^2 - v_1^2 &= 2gl = 2 \times 10 \times 0.4 (\text{米/秒})^2 \\ &= 8 (\text{米/秒})^2. \end{aligned} \quad \text{⑥}$$

联立⑤、⑥两式得细绳绷紧前两板速度大小分别为

$$v_1 = 1 \text{米/秒}, \quad v_2 = 3 \text{米/秒}.$$

它们的速度方向相反,  $v_1$  向上,  $v_2$  向下.

由于绳绷紧时间极短,重力冲量可忽略,绷紧过程中系统动量守恒.设两板共同速度为  $u$ ,取竖直向下为正方向,由

$$mv_2 - Mv_1 = (m + M)u,$$

得

$$u = \frac{mv_2 - Mv_1}{m + M} = \frac{m \times 3 - 2m \times 1}{m + 2m} \text{米/秒} = \frac{1}{3} \text{米/秒}.$$

表示该瞬间两板获得向下的共同速度.

**例 3** 真空中有一个很大的平行板电容器,接在电压  $U = 10^4$  伏的电源上,在高电势板附近置一  $\alpha$  粒子源,它每秒内能向另一极板的每平方厘米面积上垂直发射  $N = 10^{17}$  个粒子,粒子离开发射源时的速度为零,试求  $\alpha$  粒子在极板上产生的压强.已知  $\alpha$  粒子的电量  $q = 3.2 \times 10^{-19}$  库,质量  $m = 6.68 \times 10^{-27}$  千克.

**分析**  $\alpha$  粒子被加速后射向负极板,并被吸附在负极板上并不反弹,这个过程可看做完全非弹性碰撞,碰后  $\alpha$  粒子的速度立即降为零,从而对板产生一个冲量.单位时间内、单位面积上所受的总冲量就等于压强.

**解答** 由电场对  $\alpha$  粒子的加速作用

$$qU = \frac{1}{2}mv^2,$$

得  $\alpha$  粒子射至另一板的速度

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

每一个  $\alpha$  粒子与极板做一次完全非弹性碰撞,速度降为零时对板的冲量大小

$$I = mv.$$

根据压强的物理意义,得极板上因吸附  $\alpha$  粒子而形成的压强为

$$\begin{aligned}
 p &= \frac{NI}{St} = \frac{Nmv}{St} = \frac{N}{St} \sqrt{2qUm} \\
 &= \frac{10^{17}}{1 \times 10^{-4} \times 1} \sqrt{2 \times 3.2 \times 10^{-19} \times 10^4 \times 6.68 \times 10^{-27}} \text{ 帕} \\
 &= 6.52 \text{ 帕}.
 \end{aligned}$$

**例 4** 图 123 中所示为两根光滑的平行导轨,其水平部分处于一个磁感应强度为  $B$ 、竖直向上的匀强磁场中.在其水平部分垂直导轨放置一根质量为  $m_2$  的导体棒  $bb'$ .另外一根质量为  $m_1$  的导体棒  $aa'$  从导轨上高  $h$  处由静止下滑.如果两导体棒始终不接触,导轨的水平部分足够长且始终处于磁场内,则两导体棒最后的速度是多少?

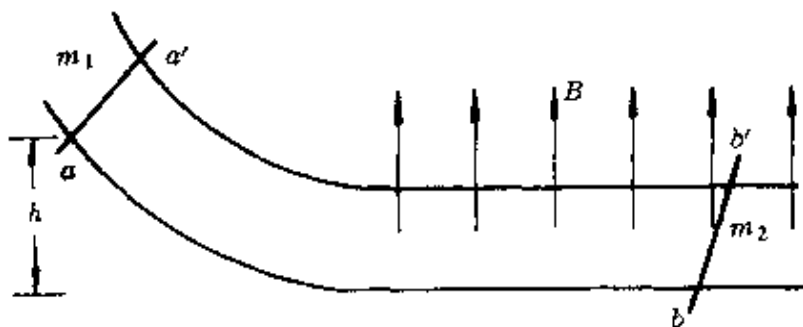


图 123

**分析** 导体棒  $aa'$  在斜轨上的下滑过程中只有重力做功,机械能守恒.滑至水平部分进入磁场,切割磁感线产生沿  $a'abb'a'$  的感应电流.于是,磁场对通电的两导体棒产生安培力  $F$ :对  $aa'$  的安培力水平向左,阻碍它的运动;对  $bb'$  的安培力水平向右,驱使它运动(图 124).这样,两者的相对速度逐渐减小,回路的面积也逐渐减小.最后,两棒达到相同的速度,回路面积不再变化,棒中不再有感应电动势,两棒依惯性运动.

根据以上分析可知,从  $aa'$  棒进入磁场起,两棒通过磁场发生相互作用,最后达到共同速度.这个过程可抽象成完全非弹性碰撞过程模型.

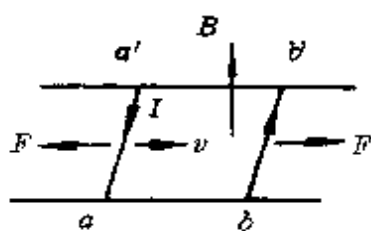


图 124

**解答**  $aa'$  棒滑进水平部分的磁场区域时,由机械能守恒定律得速度

$$v_a = \sqrt{2gh}.$$

根据上面分析建立的碰撞模型,由

$$m_1 v_a = (m_1 + m_2) u,$$

得最终共同速度

$$u = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_a = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \sqrt{2gh}.$$

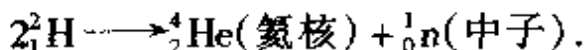
上面的解答十分简捷,完全是由于建立了正确的碰撞模型的原因.否则,这是一个非匀变速运动的问题,在中学阶段无法解答.

**例 5** 两个氘核对撞发生聚合反应,产生一个中子和一个氦核,已知氘核质量  $m_D = 2.0136u$ ,氦核质量  $m_{He} = 3.0150u$ ,中子质量  $m_n = 1.0087u$ ,反应前两氘核的动能均为  $E_{k0} = 0.35MeV$ ,  $1uc^2 = 931MeV$ .

(1)若反应中释放的结合能全部变为动能,反应后的氦核和中子的动能各多大?

(2)用反应中产生的氦核向静止的碳 12 核对心射去,当两核距离最近时,氦核和碳核的动能各多大?

**分析** 两个氘核的聚合反应为



核反应中可不计其它外力,动量守恒,按题意结合能全部转变为动能,因此,这次聚合反应相当于一次弹性碰撞.

反应中产生的氦核向静止的碳 12 核射去时,两者间的相互斥力使氦核减速,碳核加速,有一部分动能消耗于克服斥力做功,转化为电势能.当两核最接近时,两者速度相等,相当于发生一次完全非弹性碰撞.

建立了这样两个物理模型后,这个核反应问题就很容易求解了.

**解答** (1)核反应中的质量亏损

$$\begin{aligned}\Delta m &= 2m_D - (m_{\text{He}} + m_n) \\ &= 2 \times 2.0136\text{u} - (3.0150\text{u} + 1.0087\text{u}) \\ &= 0.0035\text{u}.\end{aligned}$$

核反应中释放的结合能

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 0.0035\text{u}c^2 = 3.26\text{MeV}.$$

由核反应前后动量守恒和能量守恒得

$$\begin{aligned}0 &= m_{\text{He}} v_{\text{He}} + m_n v_n. \\ 2E_{\text{kin}} + \Delta E &= \frac{1}{2} m_{\text{He}} v_{\text{He}}^2 + \frac{1}{2} m_n v_n^2.\end{aligned}$$

因为  $\frac{m_n}{m_{\text{He}}} = \frac{1}{3}$ , 所以反应后中子和氦核速度大小之比

$$\left| \frac{v_n}{v_{\text{He}}} \right| = \frac{m_{\text{He}}}{m_n} = 3.$$

代入能量关系式中

$$\begin{aligned}2E_{\text{kin}} + \Delta E &= \frac{1}{2} m_{\text{He}} v_{\text{He}}^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{3} m_{\text{He}} (3v_{\text{He}})^2 \\ &= 4E_{\text{kin}},\end{aligned}$$

即  $(2 \times 0.35 + 3.26)\text{MeV} = 4E_{\text{kin}}$ .

所以,氦核和中子的动能分别为

$$E_{\text{kHe}} = 0.99\text{MeV},$$

$$E_{kn} = 3E_{kHe} = 2.97\text{MeV}.$$

(2) 设最接近时氦核和碳核的共同速度为  $u$ , 由完全非弹性碰撞中动量守恒

$$m_{He} v_{He} = (m_{He} + m_C) u,$$

得 
$$u = \frac{m_{He}}{m_{He} + m_C} v_{He} = \frac{3}{3 + 12} v_{He} = \frac{1}{5} v_{He}.$$

此时两者的动能分别为

$$\begin{aligned} E'_{kHe} &= \frac{1}{2} m_{He} u^2 = \frac{1}{2} m_{He} \cdot \frac{1}{25} v_{He}^2 = \frac{1}{25} E_{kHe} \\ &\approx 0.04\text{MeV}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E_{kC} &= \frac{1}{2} m_C u^2 = \frac{1}{2} m_C \cdot \frac{m_{He} \cdot m_{He}}{(m_{He} + m_C)^2} v_{He}^2 \\ &= \frac{m_C m_{He}}{(m_{He} + m_C)^2} E_{kHe} = \frac{12 \times 3}{(3 + 12)^2} \times 0.99\text{MeV} \\ &= 0.16\text{MeV}. \end{aligned}$$

简谐运动模型

物体在一个大小与位移成正比、方向与位移相反的回弹力作用下的振动, 称为简谐运动. 物体做简谐运动时的回弹力 and 振动周期分别为

$$f = -kx, \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}.$$

式中  $m$  为振动物体的质量,  $k$  为比例系数.

最典型的两种简谐运动是弹簧振子和单摆, 它们的振动周期分别为

$$T_{\text{弹}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}},$$

(式中的  $k$  为弹簧的劲度系数)

$$T_{\text{摆}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

(式中的  $l$  为摆长)

简谐运动也是一个常见的过程模型. 只要物体偏离平衡位置后的回复力可表示为  $f = -kx$  形式, 这个物体一定做简谐运动, 可直接用周期公式计算运动时间.

**例 1** 在一个半径  $R$  很大的光滑圆弧形槽底部附近放一个小球  $A$ , 在底部正上方  $h$  处放一个小球  $B$  (图 125), 当小球  $B$  自由下落时同时释放小球  $A$ , 试问: 当高度  $h$  满足什么条件时可使两球在底部  $O$  处相遇?

**分析** 小球  $A$  释放后, 在重力沿槽面切线方向的分力  $F$  作用下向槽底运动. 由图 126 知, 这个力的大小

$$\begin{aligned} F &= mgsin\alpha \approx mg\alpha \\ &= mg \frac{\widehat{AO}}{R} \approx mg \frac{\overline{AO}}{R}. \end{aligned}$$

令  $AO = x$ ,  $\frac{mg}{R} = k$ , 并考虑到重力的切向分力  $F$  始终与小球偏离中心  $O$  的位移方向相反, 于是上式可写成

$$F = -kx.$$

可见小球  $A$  将沿圆槽以  $O$  为平衡位置做简谐运动, 小球  $B$  则做自由落体运动. 明确了这两个小球的运动过程所对应的模型后, 很容易求解.

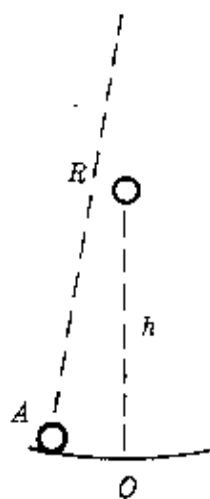


图 125

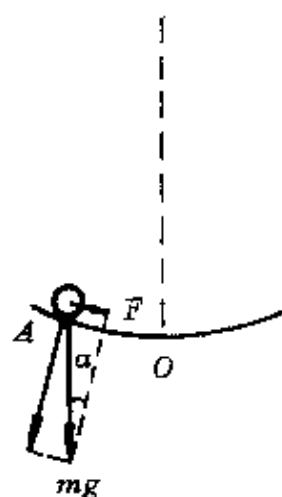


图 126

解答 小球  $B$  落至  $O$  点的时间

$$t_B = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

小球  $A$  做简谐运动的周期

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}}$$

即相当于一个摆长为  $R$  的单摆, 它经过  $O$  点的时间为

$$\begin{aligned} t_A &= \frac{1}{4}T + n \cdot \frac{T}{2} = \frac{1}{4} \times 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} + n \cdot \frac{1}{2} \times 2\pi\sqrt{\frac{R}{g}} \\ &= \left(\frac{\pi}{2} + n\pi\right)\sqrt{\frac{R}{g}} \end{aligned}$$

由题设条件要求,  $t_A = t_B$ , 即

$$\left(\frac{\pi}{2} + n\pi\right)\sqrt{\frac{R}{g}} = \sqrt{\frac{2h}{g}}$$

$$\therefore h = \left(\frac{1}{4} + n + n^2\right)\pi^2 \frac{R}{2} \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots)$$

**例 2** 如果把地球看成一个半径为  $R$ 、密度均匀的圆球体, 其质量为  $M$ , 并设想正对南、北极打一通道(图 127). 一个质量为  $m$  的小球在北极洞口无初速度地落入洞内, 试分析小球落入洞内后的运动, 算出小球运动至南极洞口的时间.

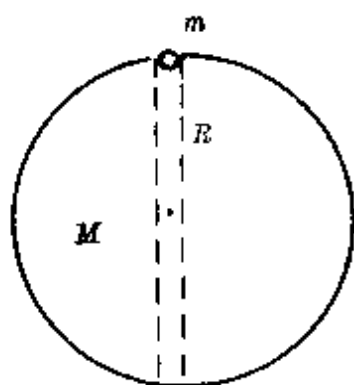


图 127

**分析** 设小球落入洞内经某段时间后位于距球心  $x$  处, 此时小球只受到半径为  $x$  的这部分球体的吸引(图 128), 其引力为

$$F_r = G \frac{M_x m}{x^2}$$



$$= G \frac{\frac{M}{\frac{4}{3}\pi R^3} \cdot \frac{4}{3}\pi x^3 \cdot m}{x^2} = GMm \frac{x}{R^3}.$$

它的方向始终指向球心,与小球离开球心的位移  $x$  方向相反.考虑到  $F_x$  与  $x$  的方向关系后,上式可写成

$$F_x = -GMm \frac{x}{R^3} = -kx.$$

式中  $k = \frac{GMm}{R^3}$  为一确定值.

这就是说,小球落进地洞后,在变化着的地球引力作用下将沿地洞做简谐运动.

**计算** 小球从北极洞口落至南极洞口的时间恰为半周期,即

$$t = \frac{1}{2} T = \frac{1}{2} \times 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}.$$

**说明** 这个小球在地洞内的运动周期

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}},$$

恰等于一颗沿地表飞行的人造地球卫星的运动周期,因为

$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{4\pi^2}{T^2} R,$$

故

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{R^3}{GM}}.$$

这是一个必然的结果,因为一个匀速圆周运动在直径方向的

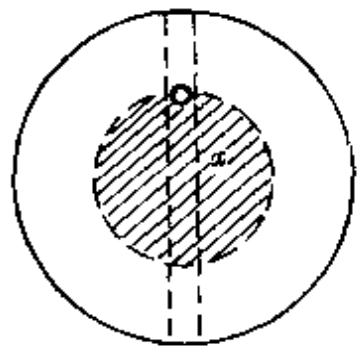


图 128

投影就是一个简谐运动\*。

**例 3** 一个气缸平卧在水平地面上,其活塞质量为  $m$ 、截面积为  $S$ 。已知外界大气压为  $p_0$ 。开始时活塞平衡在高缸底  $l$  的位置上(图 129)。现使活塞稍向外移  $\Delta x$  ( $\Delta x \ll l$ )。假定缸内气体温度不变,试分析活塞的运动并算出活塞第一次回到开始位置的时间。

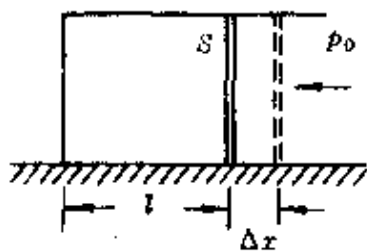


图 129

**分析** 由活塞原来的平衡条件知,缸内气体压强为  $p_0$ 。活塞外移,气缸容积增大,缸内气体压强减小(设为  $p$ )。释放后活塞上受到的合外力

$$F = p_0 S - pS = (p_0 - p)S.$$

由题意知,活塞外移过程中,缸内气体发生的是一个等温变化,根据玻意耳定律,有

$$p_0 lS = p(l + \Delta x)S.$$

即 
$$\frac{p_0}{p} = \frac{l + \Delta x}{l}, \quad \text{或} \quad \frac{p_0}{p_0 - p} = \frac{l + \Delta x}{\Delta x}.$$

则 
$$p_0 - p = \frac{\Delta x}{l + \Delta x} p_0 \approx \frac{\Delta x}{l} p_0.$$

代入活塞受力表达式,得

$$F = (p_0 - p)S = \frac{p_0 S}{l} \Delta x = k \Delta x.$$

式中  $k = \frac{p_0 S}{l}$  为一确定值。上式表示,活塞从平衡位置稍稍外移,释放后作用在活塞上的力与它偏离平衡位置的位移成正比,且其

\* 参阅本丛书《等效》一册。

方向指向平衡位置与位移方向相反. 于是, 这个作用力便可表示为

$$F = -k\Delta x.$$

这就是说, 活塞偏离平衡位置释放后将做简谐运动.

**计算** 活塞第一次回到平衡位置的时间等于  $\frac{1}{4}T$  ( $T$  为周期), 由简谐运动的周期公式得

$$t = \frac{1}{4}T = \frac{1}{4} \times 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{ml}{p_0 S}}.$$

**例 4** 在光滑绝缘水平桌面上相距  $2a$  的  $A$ 、 $B$  两点, 各固定一个电量均为  $Q$  的带正电荷的小球, 在  $A$ 、 $B$  连线的中点放一个可自由移动、带同种电荷的

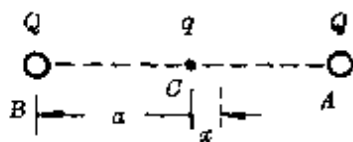


图 130

小球  $C$ , 其电量为  $q$ 、质量为  $m$ . 现使小球  $C$  沿  $AB$  连线稍向  $A$  移动一段距离  $x$  ( $x \ll a$ ), 然后轻轻释放, 试分析小球  $C$  的运动并算出它第一次回到中点的时间(图 130).

**分析** 小球  $C$  偏向  $A$  球时,  $A$  对  $C$  的斥力大于  $B$  对  $C$  的斥力, 小球  $C$  所受合力为

$$\begin{aligned} F &= k \frac{Qq}{(a-x)^2} - k \frac{Qq}{(a+x)^2} = \frac{4kQqa}{(a^2-x^2)^2} x \\ &\approx \frac{4kQq}{a^3} x. \end{aligned}$$

这个力的方向与小球  $C$  偏离平衡位置的位移  $x$  的方向相反, 始终指向平衡位置. 考虑到  $F$  与  $x$  的方向后, 上式可写成

$$F = -\frac{4kQq}{a^3} x = -k'x.$$

式中  $k' = \frac{4kQq}{a^3}$  为一确定值.

由此可见,释放后,  $C$  球将在  $A$ 、 $B$  两球合力作用下做简谐运动.

计算 小球  $C$  第一次回到平衡位置的时间等于  $\frac{T}{4}$ , 即

$$t = \frac{T}{4} = \frac{1}{4} \times 2\pi \sqrt{\frac{m}{k'}} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{ma^3}{4kQq}} = \frac{\pi a}{4} \sqrt{\frac{ma}{kQq}}$$

理想气体模型

理想气体是实际气体的简化模型. 通常状况下, 并不要求十分精确时, 各种实际气体都可抽象成理想气体, 它是一种很实用的对象模型.

例 1 在常温常压下, 温度相同的 16 克氧气和 1 克氢气, 它们的

- A. 分子速率相同;
- B. 分子的平均速率相同;
- C. 内能相同;
- D. 分子的平均动能相同.

解答 根据温度的定义——温度是物体内分子平均动能的量度, 由于氧分子和氢分子的质量不同, 它们的速率或平均速率不同, 但平均动能相同, A、B 错, D 正确.

因为常温常压下的氧气和氢气都可抽象成理想气体, 不考虑分子间相互作用, 即不计分子势能. 16 克氧和 1 克氢的摩尔数相同, 即包含的分子数相同, 其平均动能又相同, 所以它们的内能也相同, C 也正确.

本题正确答案是 C、D.

例 2 教室长 8 米、宽 6 米、高 4 米, 测得室温  $t = 27^\circ\text{C}$ , 压强  $p = 750$  毫米汞柱. 已知空气的摩尔质量  $M = 29 \times 10^{-3}$  千克/摩, 阿伏伽德罗常数  $N_0 = 6.02 \times 10^{23}$  摩<sup>-1</sup>, 试估算教室内共有多少个空

气分子.

**解答** 把教室里的空气简化为理想气体,并使它保持质量一定变化到压强  $p_0 = 760$  毫米汞柱、温度  $t_0 = 0^\circ\text{C}$  的标准状况.根据理想气体状态方程

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0},$$

得室内这些空气在标准状况下所占的体积

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{pT_0}{p_0 T} V = \frac{750}{760} \times \frac{273}{300} \times (8 \times 6 \times 4) \text{米}^3 \\ &= 172.43 \text{米}^3 \end{aligned}$$

这些空气的摩尔数为

$$n = \frac{V_0}{22.4 \times 10^{-3}} = \frac{172.42}{22.4 \times 10^{-3}} = 7697.32.$$

所以,教室内共有分子数为

$$\begin{aligned} N &= nN_0 = 7697.32 \times 6.02 \times 10^{23} \\ &= 4.634 \times 10^{27}. \end{aligned}$$

**例3** 图 131 是伽利略设计的世界上第一个温度计示意图.上部是一个球形容器,里面有一定量的空气,下部是一根细管,细管插入带色液体中.制作时,先给球形容器微微加热,跑出一些空气,插入液体中时,带色液体能上升到管内某一高度.试说明伽利略温度计的测温原理,并研究管内外液面高度差  $h$  与温度  $t$  的关系(设球形容器的容积甚大于细管容积).

**解答** 伽利略温度计是利用气体的热胀冷缩性质制成的.假定外界气压不变,环境温度升高

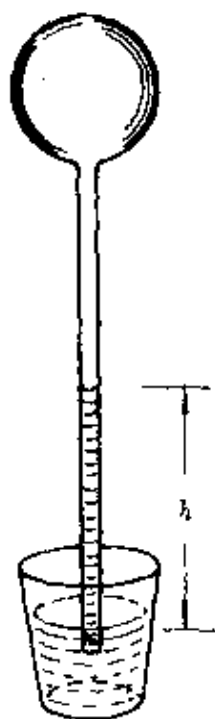


图 131

时,容器内气体的体积膨胀,细管内液柱高度减小;环境温度降低时,容器内气体的体积收缩,细管内液柱高度增加.因此,根据管内液柱的升降可判知气温的高低变化.

为了研究细管内液柱高度  $h$  与温度  $t$  的关系,可把容器内的空气抽象成理想气体,根据理想气体状态方程进行推导.

设球形容器的容积为  $V_0$ ,玻璃管内径为  $d$ ,长为  $h_0$ ,液体密度为  $\rho$ ,外界大气压为  $p_0$ .制作时为了使球形容器中跑出一些空气,加热的温度为  $t_0$ ,则此时管内气体的状态如下:

| 压 强   | 温 度         | 体 积                             |
|-------|-------------|---------------------------------|
| $p_0$ | $t_0 + 273$ | $V_0 + \frac{1}{4} \pi d^2 h_0$ |

把细管插入液体(设插入液体内部分与管长相比极小),令气温下降为  $t$  时,液体顺着细管上升,管内外液面高度差为  $h$ ,管内气体的状态变为:

| 压 强             | 温 度       | 体 积                                   |
|-----------------|-----------|---------------------------------------|
| $p_0 - \rho gh$ | $t + 273$ | $V_0 + \frac{1}{4} \pi d^2 (h_0 - h)$ |

由理想气体的状态方程得

$$\frac{p_0 \left( V_0 + \frac{1}{4} \pi d^2 h_0 \right)}{t_0 + 273} = \frac{(p_0 - \rho gh) \left[ V_0 + \frac{1}{4} \pi d^2 (h_0 - h) \right]}{t + 273}$$

考虑到伽利略温度计的球形容器的容积甚大于细管容积,即

$$V_0 \gg \frac{1}{4} \pi d^2 h_0,$$

因此上式可简化为

$$\frac{p_0 V_0}{t_0 + 273} = \frac{(p_0 - \rho g h) V_0}{t + 273}$$

得 
$$h = \frac{p_0(t_0 - t)}{(t_0 + 273)\rho g}$$

当外界大气压  $p_0$  不变时,细管内外液面高度差  $h$  与环境温度  $t$  之间的关系可表示为

$$h = a - bt.$$

式中 
$$a = \frac{p_0 t_0}{(t_0 + 273)\rho g}, \quad b = \frac{p_0}{(t_0 + 273)\rho g}$$

由此可见,  $h$  与  $t$  成线性关系,所以在外界气压一定时,伽利略温度计的刻度应该是均匀的.

**说明** 由于伽利略温度计内液柱高低会因大气压变化产生误判,所以这种温度计设计上很不完善,未能推广.

**例 4** 一个边长为  $a$  的正方形容器,顶盖  $D$  的质量不计,且可沿容器不漏气地无摩擦滑动.容器内充有一定量的氧气和水蒸气.当把容器沉入水温恒定的水池中,容器底离水面深  $h$  时,顶盖  $D$  向下压  $\frac{1}{3}a$ ,且容器内底部开始出现水珠;当容器下沉至  $2h$  深度时,顶盖  $D$  向下压

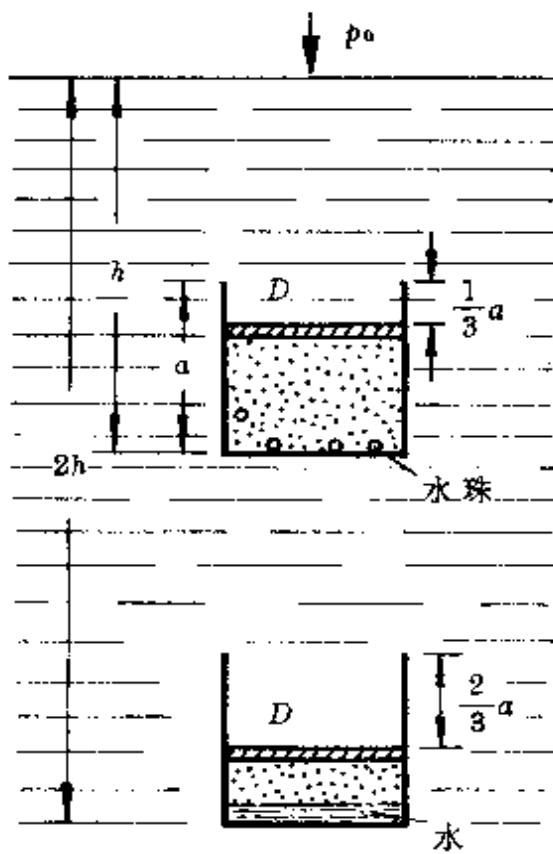


图 132

$\frac{2}{3}a$ , 容器底部出现少量水(图 132). 试求深度  $h$  为多少? 已知大气压为  $p_0$ .

**分析** 题中有三个研究对象: 顶盖、氧气和水蒸气, 需要把它们抽象成不同的物理模型.

顶盖  $D$  抽象成刚体模型, 在这个正方形容器从水面至  $h$  和  $2h$  深处, 顶盖处于力平衡状态, 内外两侧的压力(或压强)平衡.

容器内的氧气应抽象成理想气体模型, 容器从水面上向水中下沉过程中, 氧气的温度不变, 发生一个等温压缩变化, 遵循玻意耳定律.

容器内的水蒸气在没有出现水珠前是未饱和汽, 也可抽象成理想气体, 因此, 当容器从水面上向水中下沉至  $h$  处的过程中, 这些水蒸气也发生一个等温压缩变化, 同样遵循理想气体的玻意耳定律. 出现水珠后的继续压缩过程中, 容器内的这些水蒸气已处于饱和状态, 它的压强与体积无关, 温度不变时饱和汽压不变.

明确了题中三个研究对象所对应的模型后, 就可以较方便地列式求解.

**解答** 设容器在水面上、深  $h$  处、深  $2h$  处三个位置时, 容器内氧气的压强分别为  $p_{A1}$ 、 $p_{A2}$ 、 $p_{A3}$ , 容器内水蒸气的压强分别为  $p_{B1}$ 、 $p_{B2}$ 、 $p_{B3}$ , 其中  $p_{B2} = p_{B3}$  (水的饱和汽压).

在这三个位置时, 由顶盖  $D$  的压强平衡条件得

$$p_0 = p_{A1} + p_{B1}, \quad \text{①}$$

$$p_0 + \rho g \left( h - \frac{2}{3}a \right) = p_{A2} + p_{B2}, \quad \text{②}$$

$$p_0 + \rho g \left( 2h - \frac{1}{3}a \right) = p_{A3} + p_{B2}. \quad \text{③}$$

容器从水面下沉至这两个位置过程中, 经历的都是等温变化,



由理想气体的玻意耳定律知

$$p_{A1} \cdot a^3 = p_{A2} \cdot \frac{2}{3} a^3 = p_{A3} \cdot \frac{1}{3} a^3, \quad (4)$$

$$p_{B1} \cdot a^3 = p_{B2} \cdot \frac{2}{3} a^3. \quad (5)$$

把④、⑤两式代入前三式中, 联立解得

$$h = \frac{p_0}{2\rho g} + \frac{2}{3} a.$$

**例 5** 在一个带活塞的圆筒内有一套托里拆利装置, 细玻璃管内水银柱上方有氢气, 圆筒内有空气. 开始时细玻璃管内水银柱高 70 厘米, 筒内空气压强 100 厘米汞柱, 温度为  $0^\circ\text{C}$ . 然后进行以下步骤: 保持温度不变, 向上提升活塞, 直至水银柱高度降为 40 厘米, 筒内空气压强为 60 厘米汞柱; 保持变化后的体积不变, 提高温度到  $T_3$ , 玻璃管内水银柱高为 50 厘米; 保持刚才筒内的空气压强不变, 改变温度, 使管内水银柱高为 45 厘米. 求最后氢气的温度和压强.

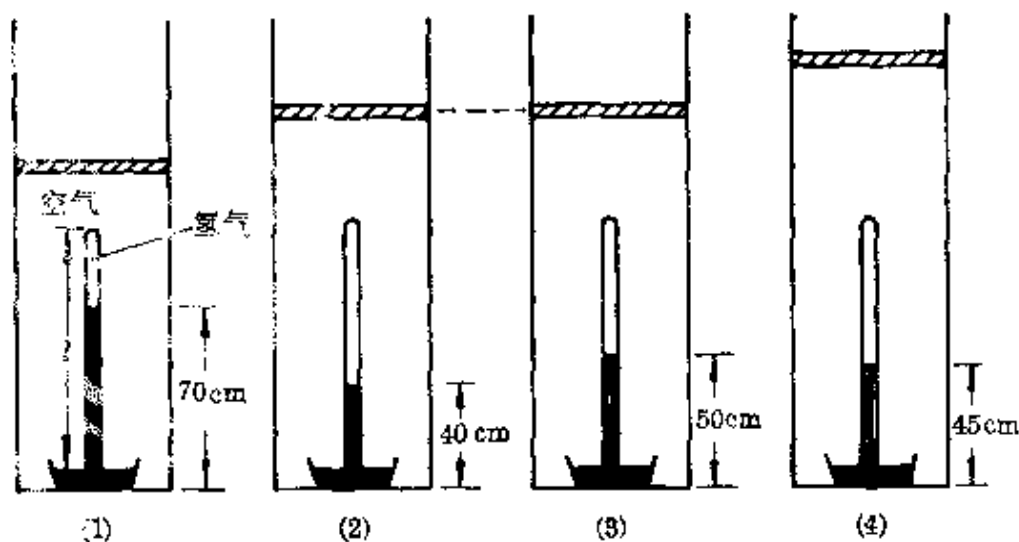


图 133

**分析** 这里有两个研究对象——圆筒内的空气和玻璃管内水银上方的氢气, 都需把它们简化为理想气体. 这两个研究对象经历的

状态变化比较复杂,既有理想的等值过程,又有三个状态参量( $T$ 、 $p$ 、 $V$ )同时变化的情况.两个研究对象的状态参量间又有一定的联系.因此,可先画出示意图(图 133),分别表出有关参量,然后分别应用相应规律.

| 状态参量 | 状态(1)       | 状态(2)       | 状态(3)             | 状态(4)             |
|------|-------------|-------------|-------------------|-------------------|
| 空气压强 | 100cmHg     | 60cmHg      | $p_{a3}$          | $p_{a4} = p_{a3}$ |
| 空气体积 | $V_{a1}$    | $V_{a2}$    | $V_{a3} = V_{a2}$ | $V_{a4}$          |
| 空气温度 | 273K        | 273K        | $T_3$             | $T_4$             |
| 氢温度  | 273K        | 273K        | $T_3$             | $T_4$             |
| 氢压强  | 30cmHg      | 20cmHg      | $p_{a3} - 50$     | $p_{a3} - 45$     |
| 氢体积  | $(l - 70)S$ | $(l - 40)S$ | $(l - 50)S$       | $(l - 45)S$       |

**解答** 以氢气为研究对象,(1)、(2)两状态是等温过程,由玻意耳定律

$$30 \times (l - 70)S = 20 \times (l - 40)S,$$

得玻管长  $l = 130$  厘米.

对(2)、(3)两状态,遵循理想气体状态方程

$$\frac{20 \times (130 - 40)S}{273} = \frac{(p_{a3} - 50) \times (130 - 50)S}{T_3} \quad \text{①}$$

对(3)、(4)两状态,同理由状态方程得

$$\begin{aligned} & \frac{(p_{a3} - 50) \times (130 - 50)S}{T_3} \\ &= \frac{(p_{a3} - 45) \times (130 - 45)S}{T_4} \end{aligned} \quad \text{②}$$

以空气为研究对象,在(2)、(3)两状态是等容变化,由查理定律得

$$\frac{60}{273} = \frac{p_{a3}}{T_3} \quad \text{③}$$

联立①~③三式得最后状态下氢气的温度和压强分别为

$$T_4 = 451\text{K},$$

$$p_{\text{H}_2} = (p_{a3} - 45)\text{cmHg} = 35\text{cmHg}.$$

**发电机与电动机模型**

发电机与电动机本身都是客观实体,从能的转换上说,发电机是把其它形式的能(如使导线运动的机械能、发生化学反应时的化学能等)转换成电能,可以对负载(用电器)提供电能的装置.电动机是把电能转换成机械能,并在运动过程中会产生反电动势,它是消耗电能的装置.在研究物理问题时,我们可以把具有类似于上述能的转换特性的装置(研究对象),归并为发电机模型和电动机模型,在电源与负载间的某些关系上,它们与发电机及电动机遵循同样的物理规律.

**例 1** 如图 134 所示,圆环  $a$  和圆环  $b$  的半径之比为 2:1,两环用同样粗细的同种金属线做成,连接两圆环的导线电阻不计.匀强磁场的磁感应强度变化率恒定,那么在圆环  $a$  与圆环  $b$  分别单独置于磁场中时, $M$ 、 $N$  两点间电势差大小之比为

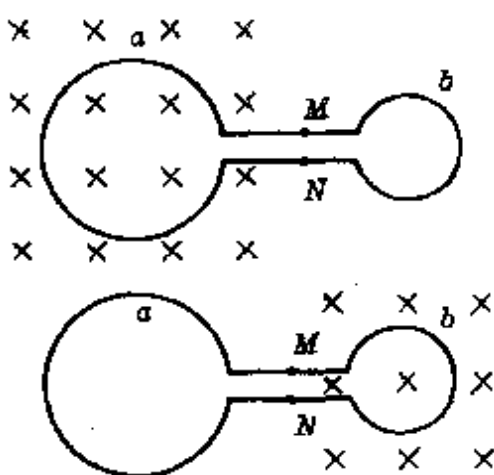


图 134

- A. 1:1;      B. 1:2;
- C. 2:1;      D. 4:1;
- E. 1:4.

**分析** 圆环  $a$  单独置于磁场中时,由于磁感应强度变化产生感应电动势,它作为电源向圆环  $b$  供电, $MN$  两点间电势差就是路端电压.同理,圆环  $b$  单独置于磁场中时也起电源作用向圆环  $a$  供电.

**解答** 设圆环  $a$ 、 $b$  的半径分别为  $r_a$ 、 $r_b$ ，圆环面积分别为  $S_a$ 、 $S_b$ ，电阻分别为  $R_a$ 、 $R_b$ 。当它们单独置于磁场中时，由于磁感强度变化产生的感应电动势分别为

$$\mathcal{E}_a = S_a \frac{\Delta B}{\Delta t}, \quad \mathcal{E}_b = S_b \frac{\Delta B}{\Delta t}.$$

由  $a$ 、 $b$  两环作为电源分别供电时， $M$ 、 $N$  间的电势差为

$$U_a = \frac{R_b}{R_a + R_b} \mathcal{E}_a, \quad U_b = \frac{R_a}{R_a + R_b} \mathcal{E}_b,$$

其比值

$$\frac{U_a}{U_b} = \frac{R_b \mathcal{E}_a}{R_a \mathcal{E}_b} = \frac{R_b S_a}{R_a S_b} = \frac{R_b r_a^2}{R_a r_b^2}.$$

因为同样粗细的同种金属丝，电阻之比与其长度（即与圆环半径）成正比  $\left(\frac{R_b}{R_a} = \frac{r_b}{r_a}\right)$ ，代入上式得

$$\frac{U_a}{U_b} = \frac{r_b \cdot r_a^2}{r_a \cdot r_b^2} = \frac{r_a}{r_b} = \frac{2}{1}.$$

所以正确答案为 C。

**例 2** 固定在匀强磁场中的正方形导线框  $abcd$ ，各边长为  $l$ ，其中  $ab$  是一段电阻为  $R$  的均匀电阻丝，其余三边均为电阻可忽略的铜线。磁场的磁感强度为  $B$ ，方向垂直纸面向里。现有一与  $ab$  段的材料、粗细、长度都相同的电阻丝  $PQ$  架在导线框上（图 135），以恒定速度  $v$  从  $ad$  滑向  $bc$ ，当  $PQ$  滑过  $\frac{1}{3}l$  的距离时，通过  $aP$  段电阻丝的

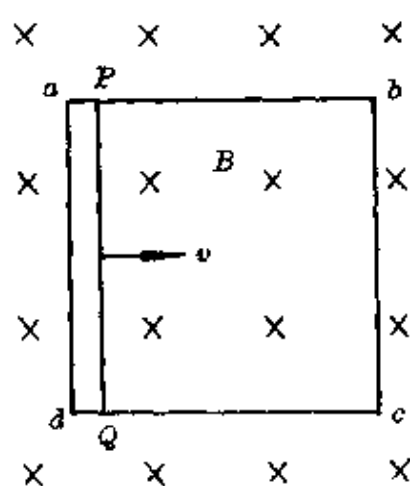


图 135

电流强度是多大？方向如何？（1990年全国高考试题）

**分析** 电阻丝  $PQ$  滑动时，切割磁感线产生感应电动势，相当于一个电源，由它对外电路供电。外电路由  $P_a$ 、 $P_b$  两部分电阻丝并联而成，因此原电路可简化为图 136 的电路。

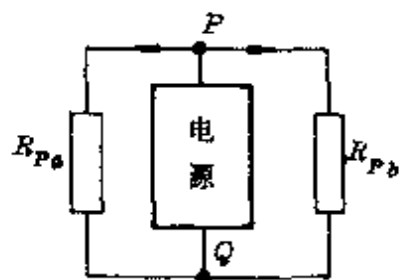


图 136

**解答**  $PQ$  右移时产生的感应电动势为

$$\mathcal{E} = Blv.$$

在  $PQ$  内的感应电流方向从  $Q$  指向  $P$ 。因此，由它对外电路供电时，通过  $aP$  段的电流方向从  $P$  流向  $a$ 。

当  $PQ$  从  $ad$  开始右移  $\frac{1}{3}$  时，外电路的总电阻

$$R_{\text{外}} = \frac{R_{Pa}R_{Pb}}{R_{Pa} + R_{Pb}} = \frac{\frac{1}{3}R \times \frac{2}{3}R}{\frac{1}{3}R + \frac{2}{3}R} = \frac{2}{9}R.$$

电源内阻  $r = R$ 。由闭合电路欧姆定律得总电流强度

$$I = \frac{\mathcal{E}}{\frac{2}{9}R + R} = \frac{9Blv}{11R}.$$

根据并联分流的道理得  $aP$  段中的电流强度为

$$I_{aP} = \frac{R_{Pb}}{R_{Pa} + R_{Pb}} I = \frac{\frac{2}{3}R}{\frac{1}{3}R + \frac{2}{3}R} \times \frac{9Blv}{11R} = \frac{6Blv}{11R}.$$

**例 3** 在磁感应强度  $B = 0.4$  特的匀强磁场中，垂直磁场放置一个半径  $r = 50$  厘米的圆导轨，上面放有两根互相垂直的金属棒，中心焊在一起，以角速度  $\omega = 10^3$  秒<sup>-1</sup> 绕中心轴逆时针方向匀速转

动,从导轨边缘和中心通过两电刷与  $R_z = 3.9$  欧的负载电阻及电表等相连(图 137). 已知每根金属棒的电阻  $R = 0.8$  欧,试求  $S$  打开和接通时两电表的示数.

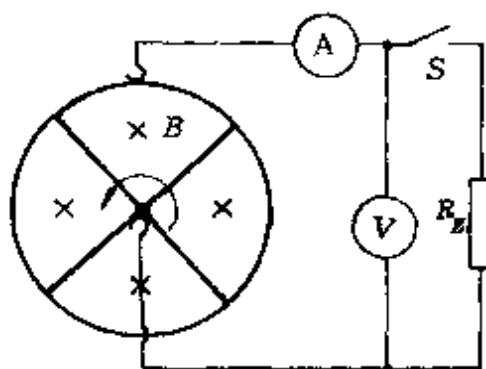


图 137

**分析** 金属棒旋转时切割磁感线,每半根棒都产生感应电动势,每半根棒都构成一个电源,棒中感应电流方向都从边缘指向中心,整个装置相当四个并联电池(图 138). 建立这样一个电源模型后就很容易求解.

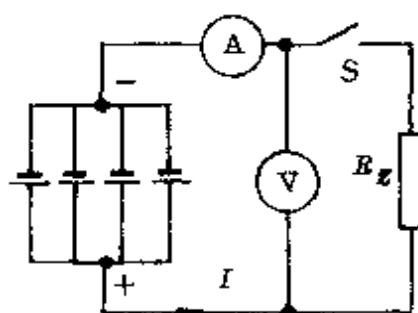


图 138

**解答** 每半根棒中产生的感应电动势

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= Bl\bar{v} = \frac{1}{2} Br^2 \omega = \frac{1}{2} \times 0.4 \\ &\quad \times 0.5^2 \times 10^3 \text{ 伏} \\ &= 50 \text{ 伏.} \end{aligned}$$

它等于并联电池组的总电动势,即  $\mathcal{E}_{\text{总}} = \mathcal{E} = 50$  伏.

每半根棒的电阻为  $\frac{1}{2} R = 0.4$  欧,四段棒构成的并联电池的内阻为

$$r_{\text{内}} = \frac{1}{4} \times 0.4 \text{ 欧} = 0.1 \text{ 欧.}$$

$S$  断开时,外电路开路,电流表示数为零,电压表指示的就是电源电动势,因此其示数为 50 伏.

$S$  接通时,由闭合电路欧姆定律得总电流强度和路端电压分

别为

$$I = \frac{\mathcal{E}_{\text{总}}}{R_z + r_{\text{内}}} = \frac{50}{3.9 + 0.1} \text{安} = 12.5 \text{安},$$

$$U = IR_z = 12.5 \times 3.9 \text{伏} = 48.75 \text{伏}.$$

因此电流表示数为 12.5 安,电压表示数 48.75 伏.

**例 4** 在磁感应强度  $B = 1.25$  特、竖直向下的匀强磁场中,水平放置两根平行导轨,轨距  $l = 40$  厘米,导轨两端与一个电池相连.电池电动势  $\mathcal{E} = 1.5$  伏,内阻不计.在导轨上垂直搁置一根金属棒  $ab$ ,其电阻  $R = 0.1$  欧.导轨和连接线的电阻不计.当合上电键  $S$  后,金属棒能以  $v = 2$  米/秒向右做匀速运动(图 139).试计算:

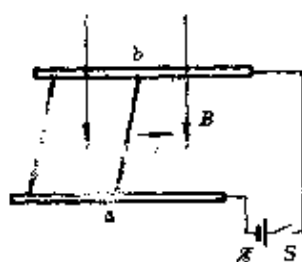


图 139

(1) 通过金属棒的电流强度;

(2) 金属棒右移  $d = 20$  厘米过程中,磁场力的功、棒中产生的热量和电源提供的电能.

**分析** 金属棒在磁场力作用下右移过程中,有部分电能转化成机械能,同时,棒因切割磁感线会产生感应电动势,其方向与电池电动势相反(称为反电动势),所以,棒的运动可抽象成电动机模型.

**解答** (1) 金属棒  $ab$  右移时产生的感应电动势

$$\mathcal{E}' = Blv = 1.25 \times 0.4 \times 2 \text{伏} = 1 \text{伏}.$$

电路中的电流由电池和棒这样两个电源反向串联共同提供,故通过棒的电流强度

$$I = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}'}{R} = \frac{1.5 - 1}{0.1} \text{安} = 5 \text{安}.$$

(2)作用在棒上的磁场力

$$F = BIl = 1.25 \times 5 \times 0.4 \text{ 牛} = 2.5 \text{ 牛},$$

在使棒右移  $d$  的过程中,磁场力的功

$$W_B = Fd = 2.5 \times 0.2 \text{ 焦} = 0.5 \text{ 焦}.$$

棒中产生的热量

$$Q = I^2 R t = I^2 R \frac{d}{v} = 5^2 \times 0.1 \times \frac{0.2}{2} \text{ 焦} = 0.25 \text{ 焦}.$$

在这段时间里电源提供的电能

$$W_E = I \mathcal{E} t = I \mathcal{E} \frac{d}{v} = 5 \times 1.5 \times \frac{0.2}{2} \text{ 焦} = 0.75 \text{ 焦}.$$

比较上述计算结果可知

$$W_E = W_B + Q.$$

即电源提供的电能,一部分用于使导线移动所需要做的功,即转化为机械能;另一部分转化为导线的内能,以焦耳热的形式释放出来.在这个过程中,完全符合能的转化和守恒定律.

**例 5** 一降压变压器,原、副线圈匝数比  $n_1 : n_2 = 20 : 1$ ,原线圈电阻  $r_1$  不计,副线圈电阻  $r_2 = 1$  欧,副线圈接入负载电阻  $R = 19$  欧(图 140).当原线圈接入交变电压  $u_1 = 220\sqrt{2}\sin 314t$  伏时,求副线圈上电压表的示数.

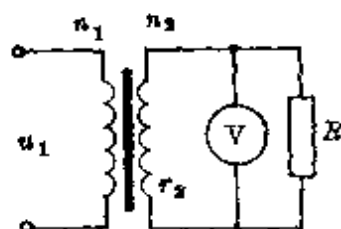


图 140

**分析** 变压器的原线圈接入交变电压后,在铁心中形成交变磁通.这个交变磁通通过原、副线圈时,原、副线圈中都会产生感应电动势——原线圈的感应电动势  $\mathcal{E}_1$  与外加电压反向,属于电动机模型;副线圈的感应电动势  $\mathcal{E}_2$  相当于电源电动势,由副线圈向负载供电,属发电机模型.



**解答** 根据法拉第电磁感应定律,  $\mathcal{E} = n \frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$ , 原、副线圈中磁通变化  $\frac{\Delta\varphi}{\Delta t}$  相同, 因此, 产生的感应电动势之比

$$\frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{n_1}{n_2}.$$

根据原、副线圈所对应的物理模型, 上式中

$$\mathcal{E}_1 = U_1 - I_1 r_1 = U_1,$$

$$\mathcal{E}_2 = U_2 + I_2 r_2.$$

式中  $U_1$ 、 $I_1$ 、 $r_1$  和  $U_2$ 、 $I_2$ 、 $r_2$  分别为原、副线圈的端电压、通过的电流强度和线圈电阻. 由题设条件得

$$\mathcal{E}_2 = \frac{n_2}{n_1} U_1 = \frac{1}{20} \times 220 \text{ 伏} = 11 \text{ 伏}.$$

根据全电路欧姆定律得通过副线圈的电流强度

$$I_2 = \frac{\mathcal{E}_2}{R + r_2} = \frac{11}{19 + 1} \text{ 安} = 0.55 \text{ 安}.$$

所以副线圈的端电压(即电压表示数)为

$$U_2 = \mathcal{E}_2 - I_2 r_2 = I_2 R = 0.55 \times 19 \text{ 伏} = 10.45 \text{ 伏}.$$

上面, 我们仅选取若干典型模型举例说明, 希望能加深对物理模型的认识. 实际上, 在中学物理解题训练中, 会遇到形形色色的多种模型, 解题时, 只有先把每个具体物理问题还原成一个正确的简化模型后, 才容易找到解题的入口, 确定应该遵循的规律.

## 结 束 语

酝酿这个总课题的时候,还是 1985 年春,多年来,结合教学实践,经过对众多材料的筛选、整理、加工、开掘,并融入了个人的一些体会,写成其中的这本小册子献给读者,希望能被喜欢,并能逐渐领会物理模型这一种重要的思维方法.也借此机会,感谢老一辈物理学家、物理教育家的巨大关怀和热情指导,感谢被引用的参考资料的原作者们.

模型方法已越来越被广泛应用到理论研究和工程技术的许多方面,建立理想模型对中学物理教学的指导作用也正在深入人心.如何在教学过程中有机地、较系统全面地渗透科学思维方法,还有许多工作可做,本书仅从一个方面作些探讨.希望能得到广大物理教学工作者、中学物理教师与读者们的指正.

作 者

1992 年定稿于苏州烟雾楼

## 主要参考资料

[1] 汝信等编《西方著名哲学家评传》(第二卷), 山东人民出版社, 1984年4月第1版.

[2] [波兰] 耶日·岑特科夫斯基著, 董福生译《哥白尼传》, 新华出版社, 1988年6月第1版.

[3] 陈衡编著《科学研究的方法论》, 科学出版社, 1982年5月第1版.

[4] 栾玉广编著《自然科学研究方法》, 中国科技大学出版社, 1986年9月第1版.

[5] 章士嵘《科学发现的逻辑》, 人民出版社, 1986年12月第1版.

[6] 周忠昌《科学研究的方法》, 福建人民出版社, 1983年版.

[7] 申先甲主编《物理学史教程》, 湖南教育出版社, 1987年1月第1版.

[8] [美] G. L. 特里格《20世纪物理学的重要实验》, 科学出版社, 1982年2月第1版.

[9] 谭树杰、王华《物理学上重大实验》, 科技文献出版社, 1987年2月第1版.

[10] 北京物理学会《物理学史专题讲座汇编》.

[11] [美] 库珀著, 杨基方等译《物理世界》, 海洋出版社, 1983

年6月第1版.

[12]郭奕玲等编著《近代物理发展中的著名实验》，科学出版社，1990年12月第1版.

[13]杨振宁著《基本粒子发展简史》，上海科技出版社，1963年版.

[14]福里斯、季莫列娃著，梁宝洪译《普通物理学》(第一卷)，高等教育出版社，1954年12月第1版.

[15]谢邦同主编《世界经典物理学简史》，辽宁教育出版社，1988年3月第1版.