

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 徐达林 王溢然
插 图 朱 然

一个正确陈述的反面是假的陈述，而一个深刻的真理的反面可能是另一条深刻的真理。

——玻尔

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,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

求异思维是指对某一研究对象通过多起点、多方位、多层次、多结局的思考和析,寻求解决问题的一种思维方法,它不落俗套,善于标新立异,是创造发明中的一个宝贵的要素。

我国著名数学家、教育家王梓坤教授在归纳总结了一些科学发现的思维过程后,曾精辟地指出:“不少伟大的划时代的科学发现,往往都不是按旧的思想体系,以一般的逻辑推理方法所获得的,需要的是出奇制胜的高招,特别是当我们工作以久,各种方法都一一试过而仍无希望时,更要打破常规,另创新路。”这里的“打破常规,另创新路”,就是对求异思维形式和方法的高度形象的概括。

在这本小册子中,我们先通过一些小故事,阐释求异思维的含义,介绍它的最基本最常见的一些形式。接着,以较翔实的若干史料,从科学发现、发明成功的思维线索中体会求异思维的力量。然后,结合中学物理教学实践,概述了教学中求异思维的表现。最后,对求异思维的教学功能及其在分析研究中学物理问题中的具体应用作了较详细的介绍。

希望读者通过本书的阅读,能有利于拓宽自己的思路,提高自己的思维素质。我们深信,在坚实的知识基础上,不断地坚定求异

目 录

序言

引言

一、什么叫求异思维	(1)
1. 从圆珠笔不漏油谈起 ——逆向思维	(1)
2. 人们是怎样走上自动扶梯的 ——转换角度	(4)
3. 国王与画家 ——克弱求异	(8)
4. 一个中学生的发现 ——反常求异	(11)
5. “空中帝国王冠”的发明 ——发散联想	(16)
二、求异思维在科学认识中的作用	(20)
1. 托里拆利实验	(20)
2. 爱迪生与留声机	(24)
3. 光谱分析法	(25)
4. 质子衰变	(30)
5. 一个经久不衰的实验	(33)
6. 从希罗玩具到瓦特蒸汽机	(39)

三、中学物理中几种典型的求异形式	(45)
1. 逆向思维	(45)
2. 转换角度	(52)
3. 发散联想	(64)
4. 反证归谬	(80)
四、求异对学习和运用物理知识的指导作用	(85)
1. 孕育批判的火种	(85)
2. 张开灵活的风帆	(90)
3. 探求深刻的底蕴	(95)
五、求异在研究和解决中学物理问题中的应用	(101)
1. 逆向探索	(101)
2. 一题多解	(121)
3. 一题多变	(139)
4. 实验研究	(152)
结束语	(173)
主要参考资料	(175)

一、什么叫求异思维

求异思维有很多形式和方法,广义地说,凡是与常规思路不同的过程都属求异的范畴。因此,求异可以通过逻辑推理的方法去标新立异,也可以通过直觉的顿悟独辟蹊径。其中,逆向、转换、克弱、发散等更是求异中典型而又独具特效的思维形式。用这些方法处理问题,不落俗套,能出奇制胜地得出结论,令人拍案称绝。它们在其他思维形式中的渗透和补充,能使思维力量更显神威。下面,我们先通过一些小故事,阐释求异思维的多种表现,初步领略一下求异思维的风采。

1. 从圆珠笔不漏油谈起

——逆向思维

圆珠笔是我们常用的书写工具,它小巧轻便,结构简单。然而,意想不到的,就在它显得十分简单的笔尖结构上却有着一段耐人寻味、对人颇有启发的发明史。

用很小的圆珠作笔尖的设想,可以追溯到1938年匈牙利人拉德依斯拉奥·J·拜罗的发明。拜罗圆珠笔专利中采用的是活塞式笔芯,虽然书写流利,但因为油墨经常外漏的缺点,使得这个曾一度风行世界的“拜罗笔”,在40年代几乎被消费者所抛弃。1945年,美国企业家米鲁多思·雷诺兹为回避拜罗的专利,搞出了靠重力输

送油墨的圆珠笔,并将其投入市场.但这种笔仍未解决油墨外漏的难题,所以也未受到消费者的青睐.于是,许多人都在研究如何解决圆珠笔的漏油问题.由于漏油的原因是很明白的——书写日久,笔珠因磨损而蹦出,油墨就随之外流了.因此,许多人都循着常规的思路,首先想到的是增强笔珠的耐磨性.依据这个思路,许多国家的圆珠笔厂商都投入力量开展笔珠耐磨性研究.人们试用耐磨性好的宝石和不锈钢做笔珠,但这又产生了新的问题,笔芯头部内侧与笔珠接触的部分被磨损,仍然会使笔珠蹦出,漏油问题照样得不到解决.

直到1950年,正当人们对解决漏油方法感到一筹莫展的时候,日本发明家中田滕三郎变换了以往从磨损角度研究的思路,产生出一个绝妙的构思.他想:既然圆珠笔写到2万字就会漏油而不得不抛弃,那么,控制圆珠笔中的油量,使之写到1.5万字左右时刚好用完,不就可以解决漏油问题了吗?基于这种想法,中田经过一系列试验,很快试制成功了不漏油的圆珠笔.以往困扰人们多年的圆珠笔漏油问题也就不复存在了.

常规思路是解决漏油的技术问题,而中田想到的是漏油的笔要被抛弃,那么就抛弃还未开始漏油的笔.中田的思路可以用图1作一个简要概括.

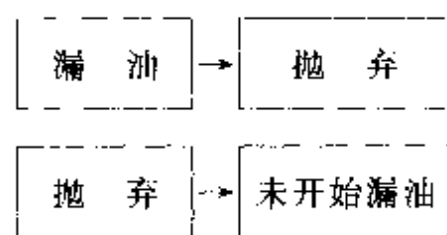


图1

中田的这种独到的发明思路和方法,说穿了很简单,可贵的是他能首先挣脱常规思维的桎梏,“反其道而行之”,并获得了成功.

日本发明学会会长丰泽丰雄曾赞叹道:真是一个绝妙的“逆向思维方法”.

所谓逆向思维,是指为达到目标,人们将通常思考问题的思路

反转过来,以背逆常规现象或常规解决问题的方法为前提,去寻找解决问题的新途径、新方法.这种思维的特点,往往不是针对方法而是直接针对目标的.

下面,请读者再看几则事例,以进一步了解逆向思维的一些具体表现形式和方法.

长毛的球

在日本,有一位热心于高尔夫球的业余爱好者滨里,可是家里没有一块可供练习打高尔夫球的草坪.怎么办呢?是种植一块草坪,还是买羊毛地毯来代替草坪?前者不是朝夕就可办成的,后者花费的代价也不低!有什么办法可以既能练球又少花钱呢?在滨里举棋不定的时候,他转而从打球的物理原理上考虑.滨里想:为什么打高尔夫球要在草坪上进行呢?这是因为草坪(或代用品地毯)具有给球施加摩擦力的作用.那么,如果把这种施加摩擦力的条件逆转,即通过把地毯上的毛安在球上,不就照样可以在一般地面上产生类似草坪的摩擦力,达到在草坪上进行训练的同样效果了吗?

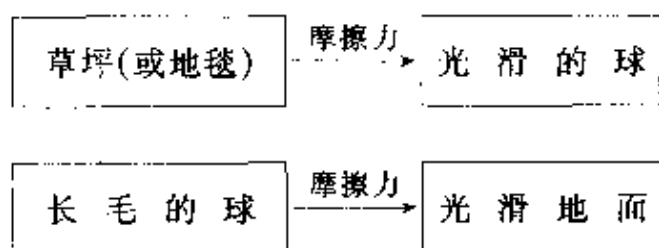


图 2

滨里把事物结构反转,即从已有事物的相反结构形式去设想解决问题的思路,也是逆向思维的一种方式.滨里的思路可以用图 2 表示.

无烟煎鱼器

通常的煎鱼锅和其他锅一样,都是把热源放在下边的.采用这种传统的方式加热,鱼体中析出的油脂下滴,接触到热锅后就会产生大量烟雾.日本夏普公司的

一位技术员为解决煎鱼锅冒烟的问题,调查并试用了已有的各种加热装置,发现都离不开把热源放在下边的传统方法,所以也未能找到可行的解决办法.于是他不得不重新审查自己原有的构思.他想:如果把热源和煎鱼锅颠倒一下位置,打破传统,采用上热源加热技术,这样鱼体中析出的鱼脂下滴,便不会直接与热源接触,因而,也就不会产生大量的烟雾.按照这个逆向思维的结论,他把电热源安装在煎鱼锅的盖子上,采用上热源加热方式,这样,他就发明了一种新型的无烟煎鱼器.

由上述几则事例可以发现,逆向思维与常规的处理方法之间的一般关系,可表示为如图 3:

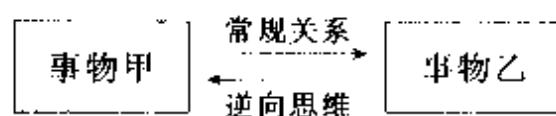


图 3

2. 人们是怎样走上自动扶梯的 ——转换角度

20 世纪初,英国首都伦敦地下铁道的站台入口处安装了世界上第一部电动扶梯.这本来是件极好的事情,乘客在上下楼梯时又省时间又省力气.可是出乎设计者的意料,人们对此发明的态度异常冷淡.电动扶梯开动之后,看热闹的人在入口处围了个里三层外三层,个个流露出惊奇和不信任的神情,只有几个胆量大的人上去试了一试.虽然试乘者都安然无恙地到达顶点,然而,一向以谨慎稳健著称的伦敦人依然对电动扶梯的可靠性持怀疑态度,很少有人再敢启足.一连数日,尽管电动楼梯始终开个不停,搭乘者却寥若晨星.员工们做了许多宣传,情况仍不见好转.最后还是管理处的一名工作人员想出了一个办法,才很快摆脱了窘境.他雇用一位

装着木制假腿的残疾人,让他在众目睽睽之下不停地乘电动扶梯上下,残疾人上下自如的表演,等于无声地向大家宣告:一条腿的人都安然无恙,两腿健全的人还担心什么呢!于是人们纷纷踏上电动扶梯,扶梯上挤满了乘客。

那个管理人员使用的方法,从思维方法的角度来说称为转换角度求异。

所谓转换角度求异,就是从原来的思维角度考虑问题不能解决时,转换一个角度,就可能很顺利地使问题得以解决。这也是人们常用的一种思维方法,实际使用中,有的问题只要转换一次角度就能解决,也有的问题需要转换两次、三次,甚至更多次才能解决,它的表现形式也是多方面的。

千代小姐的提案 在日本一个味精公司里曾发生过这样的事。一天,社长对全体工作人员下达了“成倍地增加味精销售量,不论什么意见都可以提,每人必须提一个以上的建议”的命令。于是,各个部门都忙开了,营业部门考虑改进柜台服务,宣传部门琢磨宣传广告的更新,生产部门打算增加品种,提高质量,大家提出了“销售奖励政策,设计引人注目的广告,改变瓶装的形状”等许多方案。然而,千代小姐却苦于拿不出什么建议来,她本想以“无论如何也想不出”为由而搪塞过关,但又想到这是社长的命令,并且言明不拘什么建议都可以,所以她觉得拿不出建议有些不合适,只能陷入冥思苦想之中。一天晚饭时,她想往菜上撒调味粉,由于调味粉受潮而撒不出来,千代不自觉地将筷子捅进袋口的窟窿里,用力一搅,把窟窿开大,于是调味粉立刻撒下不少。这时,千代豁然开朗,她立即回到公司,提出把味精瓶口扩大一倍的提案。最后审核的结果,千代的建议竟进入 15 件得奖提案之中,而且将此提案付诸实施后,销售额确实倍增。

增加销售量的方法很多,改进经营、提高质量、宣传广告、新颖包装等都是直接思维指导下的常规方法.而扩大瓶口窟窿却是从增加消费者的使用量这个角度来增加销售量的,这条思路与常规思路不在同一方向,它转换了一个角度,因此也就出奇制胜.由此可见,转换角度可以大大拓宽我们解决问题的思路.

**爱迪生
智测容积**

美国著名发明大王爱迪生(T. A. Edison, 1847—1931)一次在实验室检查工作时,让他的助手计算一个做电灯实验用的玻璃球壳的体积.助手首先画出了这个球体图,然后列出有关的方程式,经过一个小时的计算,才完成了一半运算.爱迪生这时微笑着对他说:“要是我,就把水倒进这玻璃球里,再把水倒进量杯,这样不就直接得出它的容积了吗!”爱迪生总是这样冲破传统观念,经常转换角度去思考和解决问题,



图 4 爱迪生与助手

所以,他有许许多多别出心裁的发明创造。

从死光
到雷达

自从 1887 年赫兹(H. R. Hertz, 德国, 1857—1894)用实验证实电磁波后,许多国家纷纷展开了研究,以后人们知道,某些波长很短的电磁波能损害人的肌体,于是,很自然地就对电磁波产生了一些似乎不无根据的设想,希望用它来消灭远处的敌人,甚至幻想用它来击伤或击毁远处敌人的装甲车和飞机,当时正值第二次世界大战前夕,不少人希望研制这种称为“死光”的武器。

1931 年,英国航空部授命建立由蒂泽德等三位科学家组成的委员会,开始这一课题的研究。1934 年,罗伯特·沃森·瓦特(1892—1973)在一次实验中发现荧光屏上出现了一连串明亮的光点,从光点和距离分析,它却不同于通常被电离层反射回来的无线电信号,经过仔细研究他终于弄清了,这些光点显示的是被实验室附近一座大楼所反射的无线电回波信号。这下,沃森·瓦特非常兴奋,他从自己的实验中认识到,要想依靠某种电磁波来击毁或击毙远处的飞机或机上的飞行员是不可能的,现在荧光屏上既然可以清楚地显示出被建筑物所反射的无线电信号,那么对于空中飞机等活动目标,应该也同样可以得到反映,这样不就可以利用无线电波早早地发现远处敌方的飞机了吗?

从希望击毁飞机转变到及早发现飞机,沃森·瓦特就这样转变了研究问题的方向,他沿着这个思路,在蒂泽德委员会的支持下,终于在 1935 年发明了探测飞机的第一个实用的雷达,这是 20 世纪 30 年代无线电技术上的重大突破。后来,J. T. 兰达尔等人把当时发明的磁控管谐振器原理结合起来进行研究,获得了雷达所需要的高输出功率的厘米波,于是雷达开始用于实践,并在第二次世界大战中发挥了极重要的作用。

有趣的是,雷达的英文缩写“RADAR”和俄文缩写“РАДАР”,其字母排列从左到右,或是从右到左都是相同的,似乎正象征着雷达不仅能发出无线电波,而且还能接收被目标反射回来的回波。

3. 国王与画家

——克弱求异

相传,从前有一个国王,只有一只好眼睛,一条好腿,另一只眼睛是瞎的,另一条腿是瘸的。有一天,他召来三个画家,命令他们给他画像。国王对画家说,画得好有奖,画得不好就要杀头。第一个画家把国王画得很像:国王有一只瞎眼,一条瘸腿。国王一看,气得直叫,说是有意出他的丑,于是把第一个画家杀了。第二个画家把国王画得很美,好眼好腿,精神饱满。国王一看,气得更厉害,说是画家讽刺了他,结果把第二个画家也杀掉了。第三个画家见前面两个画家都被杀掉了,便灵机一动,他画的国王是在山上打猎的姿态,国王神气活现地张弓搭箭,一只瞎眼闭着,一只好眼瞄准;一条瘸腿拖着撑在地上,一条好腿弓在旁边。画家真实地画了国王,却没暴露国王的弱点,还把国王的弱点转移了,所以国王很高兴,给了他很多赏钱。

在这个故事里,第一个画家完全暴露了国王的弱点。第二个画家完全掩盖了国王的弱点,失去了国王的真实性。第三个画家



图 5 聪明的画家笔下的国王

则通过闭眼、撑地,把国王的弱点恰到好处地转移了,第三个画家取得了成功.我们称第三个画家的方法是克弱转换求异.

所谓克弱转换求异,就是以寻觅事物的弱点作为新的研究和思维的起点,通过转换,将弱点加以弥补或克服.在弥补或克服弱点的过程中,常常会给人们以新的启发,帮助人们作出新的发现.

著名美籍华人物理学家李政道教授曾这样说过:“你们想要在研究工作中赶上、超过人家吗?你一定要摸清楚在别人的工作里,哪些地方是他们不懂的.看准了这一点,钻下去,一旦有新突破,就能超过人家,跑到前头去了.”李政道教授这里讲的“他们不懂的”,指的就是别人研究工作里的弱点和缺点,克服了这个弱点或缺点,或以此为突破口,也就有可能在某方面作出超越别人的成绩.

从古到今,在这方面有许多生动的事例.

毕昇的
活字印刷

活字印刷的发明,是中国人的骄傲.它就是针对着雕版印刷的弱点而创生的.

我国古代人读的书都是用手抄写的.到了五代(约公元907—960)才由冯道发明了雕版印刷.不过,用这种方法雕一本书不仅需要数年之久,而且倘若刻错一个字,就会前功尽弃,报废整块版子.宋朝时,平民毕昇看到这个弱点,下决心进行改革.从何着手呢?毕昇仔细地思考着,并寻找文章中的用文规律.他发现各种书中不少字都有重复性,其中的“之”、“乎”、“者”、“也”等字样特别多,因此琢磨着,如果能预先把这些字单独刻好,用时再拼在一起,不是同样可以构成一篇文章吗?于是他花费了一年多的时间,在木板上刻好了最常用的3000多个字.毕昇用这些字印刷文章,开始时很清楚,但印得较多时,木刻的笔划就变粗,字迹也模糊起来了.一年多的心血以失败而告终.不过,毕昇没有从这条路

上退却下来,他又一次地思考着木活字的弱点——大概是木头的纹理疏密不同,遇水后有伸胀性而产生变形的缘故。

于是,针对着木活字的弱点毕昇陷入了深思:怎样才能找到一种不吸水变形又能刻字材料?一天,毕昇思考中不自觉地念着:“不吸水,能刻字……”,他的妻子听到后指着瓦罐说:“这不就是不吸水的东西吗?”毕昇立即受到启发,抱着瓦罐仔细端详,以后他又亲自学习了煨烧的技术和土坯的配制,接着用了一个多月时间,刻成了5000多块泥活字坯,把泥坯经过煨烧,变成了不吸水、笔划清晰的泥活字,排版试印,一次就印了300多张,活字印刷终于成功了,它是我国古代的四大发明之一,欧洲直到1450年,德国人谷登堡在我国印刷术的影响下,发明了铅活字印刷,比毕昇的发明晚了400年。

鬼冢的 运动鞋

20世纪50年代,日本有个叫鬼冢喜八郎的人,预测体育运动一定会有大发展,决心跻身生产运动鞋这一行业,他想,要在运动鞋制造业中站住脚,一定要标新立异,研制出其他厂家没有的新型运动鞋,但从何处入手呢?鬼冢喜八郎认为,只要能抓住其中的某个弱点或缺点进行改革,就可能研制出新的产品来,为此,他首先选择一种篮球运动鞋进行研究,在对篮球运动员的调查中,他发现了“球鞋打滑”这一影响运动员球艺水平发挥的致命弱点,于是,他就以攻克球鞋打滑这一弱点为目标进行革新,究竟采用什么具体办法呢?他苦苦思索着,一次,他在吃鱿鱼时,从鱿鱼触足上长着一个一个吸盘而受到启发,提出了把运动鞋的底做成吸盘状的设想,就这样,鬼冢把原来的平底运动鞋改成凹底,利用凹底与地面有吸力的作用而有效地克服了运动鞋打滑的缺点,以此在与其他生产运动鞋的厂家的竞争中取得了胜利。

从鬼冢胜利的过程中可以看出,他能立足取胜的思想武器就是求异.其途径是先通过寻弱,再克弱转换,最后达到求异成功.

4. 一个中学生的发现 ——反常求异

坦桑尼亚的马干巴中学初三年级的学生姆潘巴,平时经常与同学们一起做冰淇淋吃,他们总是先把牛奶煮沸,加入糖,等冷却后放进冰箱的冷冻室冷冻.1963年的某一天,当姆潘巴做冰淇淋时,冰箱冷冻室内的空位已经所剩无几了,一位同学为了抢在他前面,竟把生牛奶放入糖后立即放进冰箱的冷冻室,姆潘巴只得急急忙忙把牛奶煮沸,放入糖,等不得冷却,立即把滚烫的牛奶倒入冰格,送入冰箱的冷冻室内.过了一个半小时后,姆潘巴发现他的热牛奶已经结成冰,而其他同学的冷牛奶还是很稠的液体,没有冻结,这个现象使姆潘巴惊愕不已!他去请教物理老师,为什么热牛奶先冻结?老师的回答是:“你一定弄错了,这样的事是不可能发生的.”

进了高中,他又去请教物理老师:“为什么热牛奶和冷牛奶同时放进冰箱,热牛奶先冻结?”可是,仍未得到满意的回答.

不久,一个极好的机会终于来到了,达累斯萨拉姆大学物理系主任奥斯玻恩博士访问该校,作完学术报告后回答同学的问题.姆潘巴鼓足勇气向他提出问题:“如果你取两个相似的容器,放入等容积的水,一个处于 35°C ,另一个处于 100°C ,把它们同时放进冰箱, 100°C 的水先结冰,为什么?”奥斯玻恩博士的回答是:“我不知道,不过我保证在我回到达累斯萨拉姆之后,亲自做一做这个实验.”后来,他和他的助手做了这个实验,证明姆潘巴说的现象是事实.

这就是初中学生姆潘巴发现的问题。

1969年,由姆潘巴和奥斯玻恩两人撰写的一篇文章,发表在英国《物理教师》杂志上,对上述问题作了第一次尝试性的解释。

后来许多人在这方面作了大量的研究,发现这个看来似乎简单的问题,实际上比我们的设想要复杂得多,它不但涉及到物理上的原因,而且还涉及到微生物作为结晶中心的生物作用问题。

现在,“姆潘巴问题”的谜尚未真正解开,对其作出全面定量的令人满意的结论,还有待进一步探索。如果读者有兴趣进行研究,说不定揭开这个历时20多年的奥秘的将是你*!

类似于姆潘巴的偶然发现,在科学研究和创造发明中是屡见不鲜的。这种反常现象,往往与人们现有的经验、熟悉的现象、常规的理论相悖。它的出现常会破坏原来理论系统或技术系统的稳定性,使之受到严峻的考验。因此,一些对经典观念过分眷恋的人,常会显得特别的迷茫、彷徨,甚至痛不欲生。在世纪交迭之际物理学天空出现的两朵乌云,曾使荷兰经典物理学大师洛仑兹(H. A. Lorentz, 1853—1928)叹息说:“在这样的年代,真理已经没有标准了,也不知道科学是什么了。我很悔恨,我没有在这些矛盾出现的5年前死去。”这种反常现象,又是科学技术实践中的一种特殊的珍贵的信息。放弃它,也许就错过一次难得的机会。真正的科学将士,应该以十倍的热情欢迎它,以百倍的勇气迎接它的挑战。在反常现象后面经常隐藏着喷薄而出的一轮红日。现在,我们撇开读者熟悉的迈克尔逊—莫雷实验的“零结果”和伦琴射线、天然放射现

* 有关姆潘巴问题的内容,转摘自束炳如主编、九年制义务教育试用教材《物理》第二册,上海科技出版社出版,1992年版。

象等这些重大的反常现象和偶然发现*，另外介绍几则通过对偶然发现、反常现象的深入求异得到的发现和发明的成果。

宇宙线的发现

用金箔验电器检验物体的带电情况，这是中学物理中常做的实验。科学家发现，用它也可以探测射线。因为放射线会使空气电离产生正离子和带负电的电子，它们能中和验电器上所带的电荷。因此，一个带电验电器放在放射性物质附近，原先张开的金箔会慢慢下垂，而且还可以从金箔下垂的快慢，定性比较射线的强弱。在 20 世纪初科学家曾广泛使用验电器研究放射现象。

1901 年，英国几位物理学家发现，一个验电器带了电，在周围并没有放射性物质的情况下，也会慢慢地自行放电。他们曾经尽量设法提高仪器的绝缘程度，还把它装在密封的铅盒内屏蔽起来，努力减少外界的影响，但验电器的漏电情况并未根本消除。一个小小的验电器，难倒了当时的许多大科学家。似乎只有靠近地面的整个大气层都处于微弱的电离状态中，才会产生这种反常现象。他们猜测这是由于散布在地壳中的微量天然放射性元素造成的。

为了检验这种猜测，1909 年瑞士物理学家高凯耳带了验电器乘坐气球升到高空去做了一次实验，结果又出现了一个与猜测“反常”的现象：从地面向上约 1000 米的高度内，空气的电离程度确实随着离开地面的高度增加而减少，但继续升高时，验电器放的电更多，表示电离程度更高。看来，认为验电器放电是由于地壳中微量放射元素的说法也是站不住脚的！

为了弄清事情的真相，许多科学家重复了高凯耳的实验。从 1911 年到 1919 年近 10 年时间内，奥地利物理学家海斯（V. F.

* 参见本丛书《猜想与假设》、《归纳与演绎》等册。

Hess, 1883—1964)和德国物理学家科尔霍斯等人,用气球升到更高的空中进行试验,结果发现,在 5000 米的高空,空气的电离程度比地面附近强 2 倍,在 9200 米高空,空气的电离程度竟比地面附近强 10 倍.显然,引起空气电离的射线不可能来自地下,而只能是源于“天外”.后来,进一步的研究证实,这种射线来源于整个宇宙空间,美国物理学家密立根(R. A. Millikan, 1868—1953)把它命名为“宇宙射线”(简称“宇宙线”).

宇宙射线是一种高能的粒子流,它随着离开地面高度的不同,有着极为复杂的分布.在进入地球大气层之前或大气顶部的射线,基本成分是质子、 α 粒子和一些重原子核,称为初级宇宙射线.初级宇宙射线在穿越大气层时又会产生新的射线束,称为次级宇宙射线,包含有高能电子、正电子和光子、介子等.实验室中带电验电器的漏电,原来是这些天外小客人光临的结果.

射电波的发现

1931 年,美国贝尔电话实验室的一个研究无线电通讯的工程师卡尔·杨斯基(K. Jansky, 1905—1950),正承担着研究无线电噪声起因的任务.一次,他转动一架 T 形回转天线,想了解一下无线电通讯中天线干扰的方向问题时,突然在接收机中收到一个出乎意料的干扰信号.这一反常的信号,杨斯基非但毫不厌恶,反而很感兴趣,决心查个水落石出.

开始,杨斯基认为这可能是人为的干扰,但经过 1 年多时间的连续跟踪接收,发现这个干扰信号的强度有周期性的变化.其变化周期恰等于地球相对于恒星的自转周期,即 23 小时 56 分零 4 秒.每当天线指向恒星中的人马星座时,这个干扰信号最强.

由此可见,这一信号决不会是人为的干扰,也不是来自地球或太阳,而是来自遥远的宇宙天体.

天体会发射无线电波,这是一个重大的发现.以前,人们只能依靠天文光学望远镜根据观察天体发出的光信号去研究天体,由于光辐射频段狭窄,强度衰减快(按温度的5次方衰减),对天体的研究受到很多的限制,进展艰难.因此,杨斯基这一惊人的发现,立即引起各国天文学家浓厚的兴趣,纷纷竞相投入研究,进一步证实了杨斯基的发现,并由此创立了一门新的边缘科学——射电天文学.

如今,天文学家可以借助天体发射(或反射)的无线电波进行对天体的研究,仿佛有了一双神奇的眼睛.图6就是现代射电天文望远镜的示意图.从遥远天体发射的无线电波(或从地面发射出无线电波,经天体反射后的回波),被射电望远镜巨大的抛物面天线接收后,经电子计算机处理,结果会很快被记录或显示出来.

利用天体发射的无线电波,不仅可以获得遥远天体表面的资料,还能探测其内部的信息.它的观测距离可达百亿光年,分辨能力可明辨位于300千米以外的头发丝粗细的尺度.近20年来,天文学家利用射电望远镜作出了许多新的发现,极大地推动了天文学的发展.发生在1994年7月的“太空之吻”——彗木相撞,由于碰撞点在木星背向地球的一侧,除了用光学望远镜观察离木星最

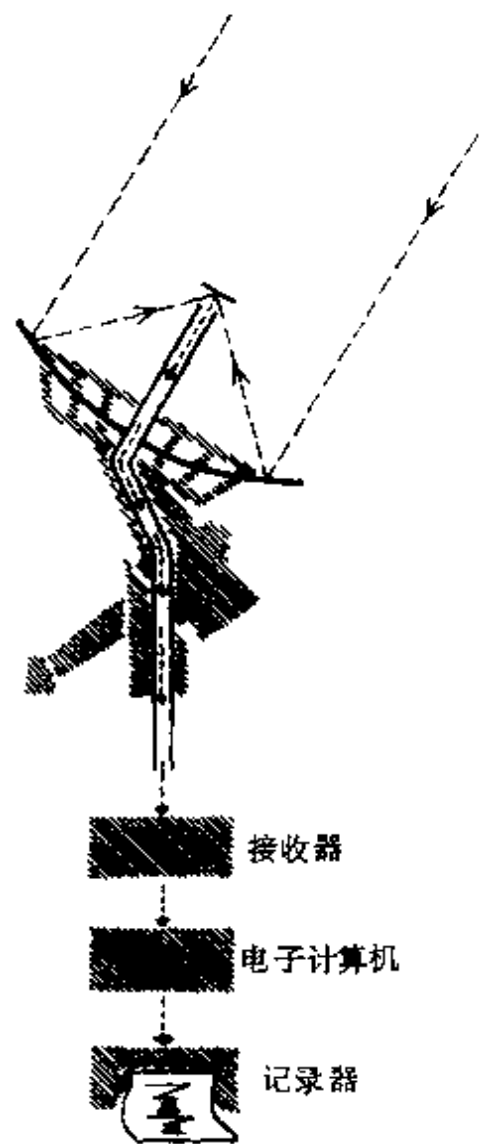


图6 射电望远镜示意图

近的卫星(木卫一)的亮度变化来推测碰撞情况外,另一个重要方法就是利用射电望远镜根据接收到的木星的射电波加以分析并作出判断的。

垃圾堆里 的发明

在第一次世界大战期间,著名金属专家哈里·布诺雷应邀调查解决枪筒的“锈斑”问题。在研究中,布诺雷所做的第一件事,就是下令用新型合金钢试验生产各种枪管,其中一种合金,他有意掺进了含量很高的铬。可是,用这种合金生产的第一只枪管,在进行第一次试验射击时就被炸得四分五裂,几个月的心血就这样白白葬送了,布诺雷十分痛心地捡起这些碎片,扔进了垃圾堆里。过了两个星期,布诺雷从垃圾堆旁边走过时,偶然发现,在一堆锈痕斑斑的烂铁堆里,有几块金属碎片在闪闪发光,他好奇地走近检起来一看,正是两个星期前自己扔掉的那支合金枪管的碎片。原来,由于枪筒在制造时掺入了高含量的金属铬,掺铬金属虽不能做枪筒,但它却不易生锈,这样,不是可以用掺铬合金来制作不锈的金属制品吗!布诺雷从这个偶然发现中经过求异探索,终于又从垃圾堆里捡回了自己的技术发明——不锈钢。

5.“空中帝国王冠”的发明

——发散联想

联想、扩展是创造发明的一个重要的思维要素,被发明家德福雷斯特(De Forest)誉为“空中帝国王冠”的真空三极管的发明,就是在真空二极管的基础上通过发散联想诞生的。

美国“发明大王”爱迪生在1883年确立了热电子发射的爱迪生效应:放在真空中加热的灯丝会发射电子,并且会单方向地向另一金属板流动。

根据爱迪生效应,英国科学家 J. A. 弗莱明(Fleming)于 1904 年发明了真空二极管.它是在抽成真空的玻璃泡内装入两个金属电极——阳极和阴极构成的.现在常用的二极管的阴极分为直热式和旁热式两种,其结构与符号如图 7 所示.

阴极发射的电子密集在阴极附近.如果阳极接电源正极,阴极接电源负极,电子就被吸向阳极,形成阳极电流[图 8(a)].反之,如果阳极接电源负极,阴极接电源正极,就不能形成电流[图 8(b)].二极管的这种单向导电特性,很快在检波、整流上得到了应用.

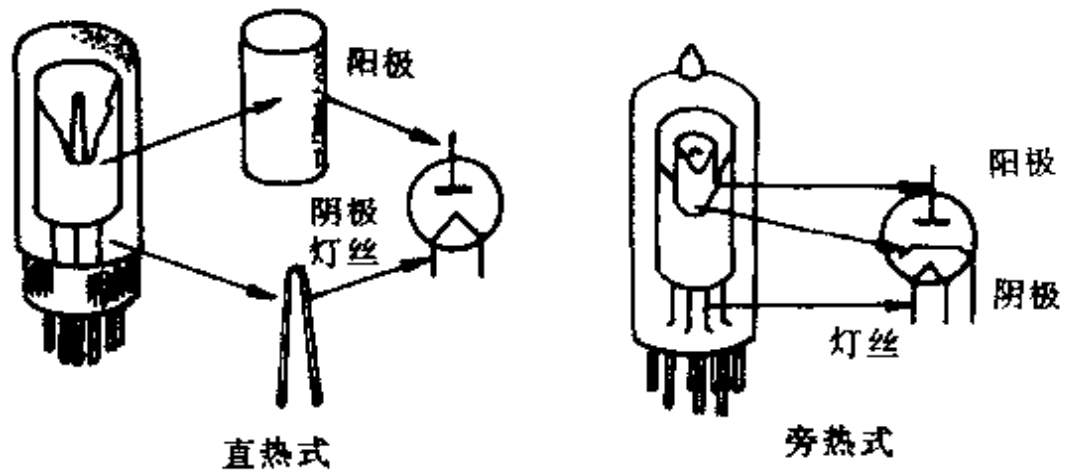


图 7 电子二极管的构造和符号

当时年轻的德福雷斯特也正在全力以赴地投入到改进检波器的研究之中.弗莱明发明二极管的消息传来,使他感到功亏一篑.不过,德福雷斯特并未灰心,他认识到二极管与过去的矿石检波器相比,确实是进步了,不过它只能检波,不能放大.那么,何不在弗莱明的基础上把战绩进一步扩大呢?于是,德福雷斯特就在二极管内的阴极和阳极之间装进一个网状的小电极——栅极(图 9),并对它的作用进行了试验.

德福雷斯特真幸运,看似很简单地加进这个小电极却产生了

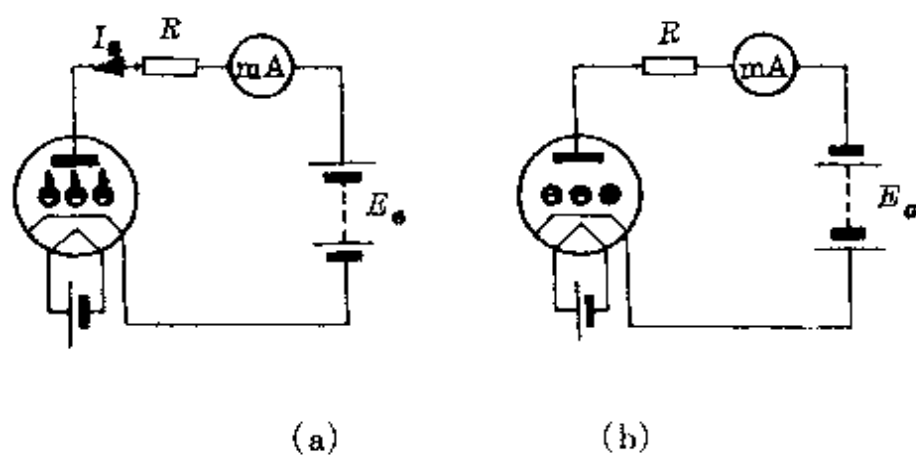


图 8

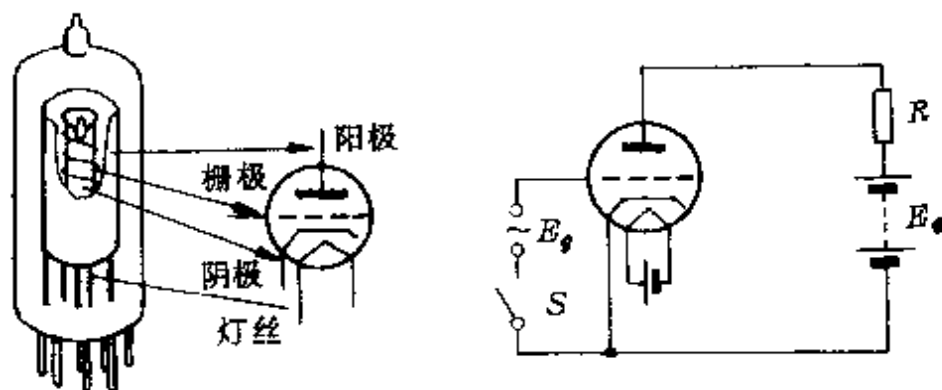


图 9 三极管的结构与控制作用

奇妙的作用.当在这栅极上施加一个不大的电信号时,就可以引起阳极电流较大的变化,意味着信号被放大了.这一发现非同小可,使电子管的性能发生了质的飞跃,在电子技术发展史上是一次革命性的转变,极大地推动了无线电技术的发展.以后,四极管、五极管、七极管、大功率管相继出现,形成了一个系列.美国著名物理学家、诺贝尔奖得主 I. I. 喇比(I. I. Rabi, 1898—)博士曾评价说,在电子管的发明中,特别是三极管“具有像空前的最大发明那样的影响”,它不愧为“空中帝国的王冠”.

不过,在德福雷斯特刚发明三极管时,却险被抓去坐牢.当时,由于他没钱进一步实验,就打算去说服几家大公司的老板资助.因

为他不修边幅,穿得破旧,前两家公司连大门也不让进,门房怀疑他是一个行为不轨的人.第三家公司的门房把他当做流浪汉,也不准他进去.德福雷斯特只好掏出三极管详细解释它的新结构、放大特性和应用前景,想打动门房那势利的心.不料,门房见他把一个玻璃泡说得神乎其神,反而产生疑心,以为他是个骗子,报告经理后被扭送到警察局.几天后,法院开庭审判.他在被告席上继续据理力争,宣传他这一发明的重要意义.他充满信心地说:“历史将证明,我发明了‘空中帝国王冠’.”最后他终于被宣判无罪释放.

二、求异思维在科学认识中的作用

科学的发现和发明是一种创新,她不仅要求科学家、发明家有非常丰富的实践基础和高度抽象的逻辑思维能力,还要求具备充分的勇气和胆识,既敢于闯入前人没有走过的地方,披荆斩棘;也敢于在前人已走过的地方,探索新路,或者在前人已十分熟悉的地方,改造修缮.科学家和发明家的目标只有一个:从无到有,变新变好.总之,都得区别于从前——无论是思想、观念、成果、产物.因此,科学家和发明家所刻意追求的就是变化、创新,换句话说,就是不断地求异.可以这么说,一旦科学家和发明家丧失了继续求异探索的活力,他们的创造性灵感也就枯竭了.

下面,我们选取若干与物理学关系密切的史料,从具体的科学研究工作中体会一下,创造发明中所渗透着的求异思维.

1. 托里拆利实验

伽利略的
遗 愿

17世纪,由于采矿业的发展,矿井开得越来越深,许多矿井为了排水,当时采用的都是古希腊早就使用的吸水泵(图10).不过对于水泵为什么能把水抽上来,抽水高度为什么不能超过34英尺(10.36米),像这样一些如今的初中学生都能解释清楚的问题,当时的人们是不明白的.人们沿袭着从亚里士多德(Aristotle,古希腊,前384—前322)那里流

传下来的说法,即所谓“自然界厌恶真空”(Nature abhors vacuum).也就是说,自然界会尽力去占领所有没有空气的空间.因此,当水泵的活塞上升时,水必然要跟着上升去占领这个空间,这样就不致出现没有空气的空间——真空.

1640年,曾有人就这个问题去请教意大利的物理学家伽利略(G. Galilei, 1564—1642).当时伽利略也认为是“自然界厌恶真空”.只是他认为这种惧怕真空是一种力,应该有一定的限度,且可以加以量度.他曾试图设计一个实验来量度这个力.可惜伽利略还没来得及进行这个实验便逝世了.

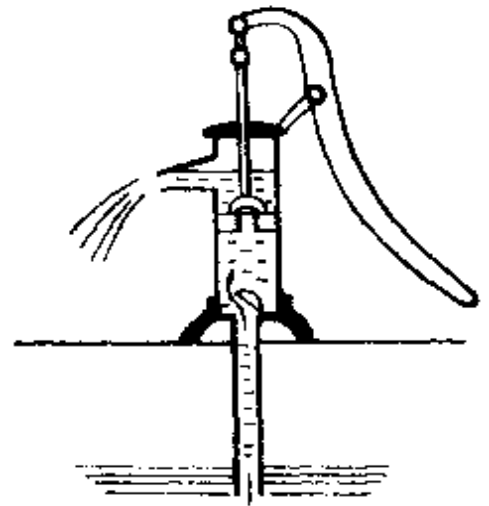


图 10 吸水泵

于是,伽利略的遗愿就历史性地落到他晚年的学生托里拆利(E. Torricelli, 意大利, 1608—1647)肩上.

**托里拆利
实 验**

难道水泵把水抽上来真是“自然界厌恶真空”的作用吗?为什么这种厌恶又有一个限度呢?托里拆利开始思考这一问题.他多么希望能有一根长长的、粗细均匀的管子来进行实验,并且最好是玻璃管子,以便看清楚活塞运动时水被吸上来的过程.然而,要制造这么一根长直玻璃管在当时简直是异想天开.托里拆利意识到此困难后,就把问题反过来考虑:如果水跟着活塞上升确是“自然界厌恶真空”,那么当将管子的一端封住,装满水后再倒过来,水就不应该降落,否则上部不就又形成真空了吗?如果水降落的话,也必然会有一个界限.但是,即使真的有了一根 10 多米长的玻璃管,要把它装满水,再倒过来,

像孙悟空使金箍棒一样,恐怕非得爬到比萨斜塔的顶上去不可,做起来也决非易事。

围绕这个问题,托里拆利进行了长时间的思索.他从伽利略认为这种惧怕是一种力的猜测中得到启发,既然这种力只能使水在10米多的高度上停下来,那么改用比水密度大的其他液体,必然只能使它停留在较低的地方.托里拆利曾用海水、蜂蜜进行试验,效果都不理想,后来他想到了用比水的密度大得多的水银做实验.

1643年,托里拆利用一根长约1.2米的玻璃管,灌满水银后,用手指堵住开口的一端,竖直倒立在水银槽里,松开手指后,看到水银柱开始下降,最后停留在比槽中水银面高出约76厘米的地方.水银柱上部的一段空间,托里拆利认为是真空,直到今天人们还把它称为“托里拆利真空”*。

托里拆利又在不同日子里多次重复这个实验,发现停留在玻璃管中的水银柱高度会有微小的变化.他幽默地写道:“自然界是不会像一个轻佻的姑娘,在不同的日子里有不同的惧怕。”风趣地批驳了亚里士多德的谬论**。



那么,究竟是什么力量托住玻璃管中这段水银柱呢?托里拆利坚定地说:“空气.在我们周围的空气压迫着水银的表面,其力量使水银柱停留在76厘米高度上.如果用其他液体,则液柱高度随着液体本身的密度而变化。”托里拆利在倒插有水银玻璃管的水银槽里加进一些水,然后把玻璃管慢慢向上提,当玻璃管口提高到水银和水的界面以上时,管内水

* 托里拆利真空中实际上还包含有水银的饱和蒸气压,只是这个压强很小,在20℃时仅约0.0012毫米汞柱,通常情况下可忽略不计。

** 托里拆利的这个实验写在1644年6月11日给朋友的信中.伽利略晚年的另一位学生维维尼安(Vincenzoviviani,意大利,1622—1703)也参与了此实验的研究。

银立即全部流出,同时水趁势进入管中,并充满全管(图 11).充分说明了他的判断.

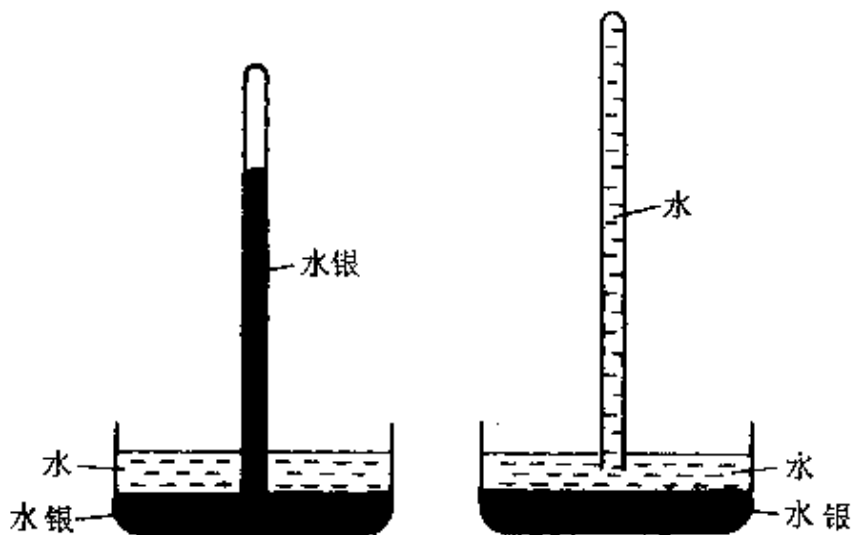
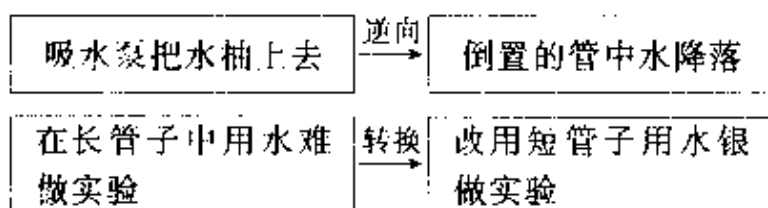


图 11

托里拆利实验使人们首次认识到大气压的作用,直接否定了“自然界厌恶真空”的传统错误观点,这是对中世纪教会哲学的一次大胆挑战,从而导致了人们对大气压、真空的深入研究.

求异的
成功

托里拆利完成的实验,在思维方法上也得益于求异的成功,实验的基本思路可以表示为:



这里一次逆向思维、一次转换角度,使他顺利地克服了困难,向人们展示了大气所蕴藏的力量.

2. 爱迪生与留声机

爱迪生的
最大发明

美国的发明大王爱迪生(T. A. Edison, 1847—1931)一生拥有多达 1093 种发明专利,如白炽灯、电影放映机、碳粒话筒等都是他的重要发明.不过这些发明,前人多少已有些技术基础,是爱迪生作出了重大改进.然而留声机的发明却不同,在爱迪生以前人类发展的历史长河中,没有人考虑过要“把音响贮存起来”.因此,留声机的发明称得上是爱迪生的一项最大发明.

玛丽的
绵羊

说起这项发明,也是在一个偶然事件启发下获得成功的.当时爱迪生正好 30 岁,正从事电报的研究,尤其热衷于研究自动收发报机.据说他在圆纸板上用刻纹把电文记录下来,圆纸板一转,刻纹就使得小划针上下移动,划针又连动着电磁开关,这样就能自动拍发电报了.

在试验中,爱迪生偶然发现,快速转动圆纸板时,划针发出的音响会有变化,好像是圆纸板上的刻纹使划针振动发出了音响.

也许发明家的伟大就在于此.爱迪生马上捕捉住了这偶然闪现的思绪的火花,并直觉地作了联想:如果事先按人发出的声音记录下刻纹,再让划针沿刻纹运动、上下振动,不就可以再现出声音了吗?

于是,爱迪生就反复钻研.他使敷盖着锡箔的圆筒沿水平方向旋转,把装在振动膜上的划针压在圆筒上,对着振动膜大声讲话,这样划针就在锡箔上刻出刻纹.在圆筒旋转过程中,划针相对于圆筒一点一点地横向移动.爱迪生不停地试验了五天五夜,终于把留声机做出来了.

爱迪生兴奋地对着振动膜尽情高唱儿童歌曲“玛丽的绵羊”,

划针徐徐地在大圆筒的锡箔上划上刻纹，录制出了人类历史上第一张唱片。当把划针放回圆筒上原来位置，再次转动圆筒时，空中就响起了与爱迪生一模一样的声音。爱迪生又喜又惊，在他奇迹般的一生中，“他从没有那样大吃一惊过”。

逆向的
启发

爱迪生发明留声机的伟大业绩，在思维方法上，也是他成功地运用逆向思维的结果：

声音带动划针振动同时刻录出振动的痕迹

↓ 逆向

划针沿着振动痕迹移动能还原振动，进而还原成声音

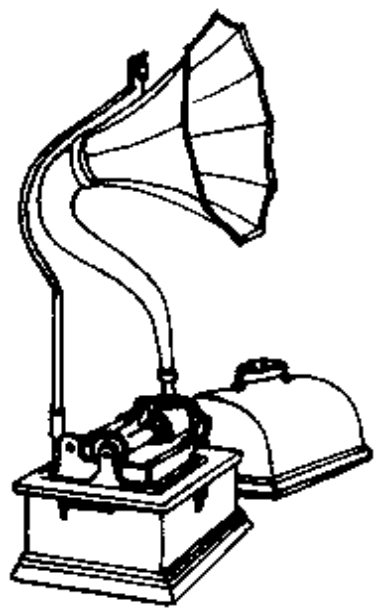


图 12 早期的留声机

爱迪生在逆向思维的启发下，找到了还原声音的钥匙，终于打开了录音世界的大门。

3. 光谱分析法

1994年7月间，举世瞩目的大事是苏梅克—列维9号(sh9)彗星与木星的相撞。这次千年难遇的相撞，不仅提醒人们警惕天外来客与地球之吻引起的灾难，还可从彗木相撞中得到关于彗星和木星的多种信息。其中，根据木星光谱变化探测木星内部结构，就是光谱分析法的一个重要应用。

光谱分析法是德国化学家本生(R. W. Bunsen, 1811—1899)和物理学家基尔霍夫(G. R. Kirchhoff, 1824—1887)在100多年前创建

的.如今回顾一下创建中的思维过程,可以看到,求异思维的光彩多处闪烁.

孔德断言 早在 18 世纪以前,人们就已经知道物质是由元素构成的,并知道了一些常见的元素.一些科学家和哲学家还从地球上的元素想到太阳的组成、宇宙中其他天体的组成.但是太阳离地球有 1 亿 5 千万千米(1.5×10^8 千米),表面的温度高达 6000°C ,谁也无法飞到这么远的太阳上去取一些物质回来分析.其他更远的恒星的组成似乎更难有办法了.所以,在 1825 年,有一位法国哲学家孔德(Auguste Comte, 1798—1857)曾武断地说:“恒星的化学组成是人类绝不能得到的知识.”

然而,就在孔德死后不到 3 年的时间,他的断言就被两位德国科学家的智慧粉碎了.

火焰的颜色 1854 年,德国化学家本生在研究已有的煤气灯的原理和弱点后,发明了一种能方便地调节火焰大小和温度的新式煤气灯,这就是如今化学实验室中还常用的本生灯.

本生灯点燃得最好的时候,温度能达到 2300°C ,火焰几乎没有颜色.有时候灯没有调节好,火焰会缩到灯管里去,铜制的灯管烧红后,火焰就变成了蓝绿色.在火焰上弯玻璃管时,玻璃管烧红后,火焰又变成了黄色.这些许多人司空见惯的现象,却引起了本生的注意,启发他研究物质性质与它燃烧时火焰颜色的关系.

本生用白金镊子夹了一粒普通的食盐放到火焰中烧,火焰立刻变成亮黄色,同时闻到呛人的因高温食盐(NaCl)中分解出的氯气的气味.但是火焰变黄究竟是氯的作用还是钠的作用呢?于是本生又用其他含钠的化合物反复进行实验,结果都能使火焰变黄.后来,本生把金属钠放在火焰中烧,火焰也立刻变成亮黄色,这样

就确证了使火焰变黄是钠的作用。

这一结果使本生极为兴奋,他的思想也立即像明灯一样光芒四射,迅速发散联想:如果其他金属能使火焰变成不同的颜色,那么只要找出它们一一对应的关系,岂不就有了一种简单而有效的新的分析方法了吗?

本生继续实验,他发现:钾和钾的化合物使火焰变紫;钡是绿色火焰;钙是砖红色火焰;锶是亮红色火焰……看来,不同的金属火焰的颜色确是不同的。然而,进一步的实验中却出现了问题——钠盐溶液出现的是黄色火焰,混有钾盐的钠盐溶液和混有锂盐的钠盐溶液出现的也都是黄色火焰。他企图用各种不同颜色的玻璃片来观察区分,可是效果很不理想。本生在探索中陷入了困境。



本生有个搞物理的朋友,叫基尔霍夫,他们俩常在一起散步、聊天。1859年初秋的一个傍晚,本生跟基尔霍夫一起散步时详细讲述了自己的实验和遇到的困难。基尔霍夫沉思了好一会儿后,对本生说,应当换一个方法试试。从物理学的角度来看,可以不去观察火焰的颜色,而应该去观察火焰的光谱。

基尔霍夫在本生的实验室里装配了世界上第一台“分光镜”。他在一个雪茄烟盒内糊上了一层黑纸,把一块石英三棱镜安装在烟盒中间,在对着三棱镜的两个面的位置上,将烟盒开了两个洞,一个洞装上被锯成两截的直筒望远镜的目镜那半截(现在被称为夫琅和费窥管),另一个洞装上望远镜的物镜那半截,并在朝外的筒口上覆盖一个有细缝的圆铁片(现在被称为平行光管)。基尔霍夫先让太阳光射在平行光管的细缝上,在窥管中,他看到清晰的太阳光谱,表明分光镜工作正常。然后,他拉上黑窗帘,本生点着了煤气灯,基尔霍夫把平行光管对准了煤气灯的火焰,经过他们的反复

实验和观察,奇迹出现了。

所有钠盐都产生两条靠近的黄线。

所有锂盐都产生一条明亮的红线和一条较暗的橙线。

所有铍盐都产生一条明亮的蓝线和几条红线、橙线和黄线。

总之,每一种元素都产生几条特有的谱线,这些谱线都有它们自己固定的位置。这样,他们终于找到了一种新的分析方法——光谱分析法。光谱分析法非常灵敏,非常准确。后来,他们在查绘已知元素的光谱实验中还发现了两种新元素铷和铯。

从明线
到暗线

在他们取得巨大的胜利之后,基尔霍夫又从他们观察的明线反过去想到夫琅和费黑线(暗线)。

早在本生和基尔霍夫的实验以前,德国物理学家夫琅和费(J. V. Fraunhofer, 1787—1826)在测定玻璃对特殊颜色的折射率时,偶然在油灯和牛脂灯光中,发现了精细的、明亮的橙黄色双线,这就是后来的钠线。后来他换用其他含钠的物质试验,总会在同一位置上出现这两条明亮的双线。夫琅和费又试图在太阳光谱中找到那两条黄线,结果这两条钠双线没有找到,却发现了大量的强弱不同的黑线(后人称为夫琅和费线)。他给那些最清楚的黑线用A、B、C、D、E等字母编了号,但他没有给出明确的解释。虽然后来经人仔细辨认,钠的亮双线和太阳光谱中的D黑线的位置是严格相符的,认为夫琅和费暗线的产生可能是某种光被太阳大气吸收的缘故,不过对这一解释并没有明确的结论。

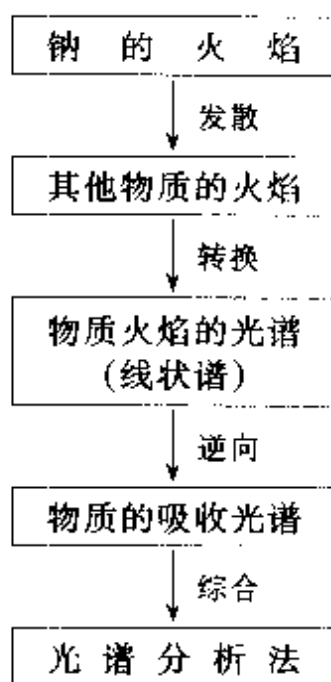
基尔霍夫起初猜测可能是太阳上缺少钠。为此,他让太阳光穿过本生灯的火焰进入分光镜,并在火焰上烧起钠来,希望让钠的亮黄色正好填补太阳光谱中的D黑线。结果,出乎意料,从分光镜中看到太阳光谱中的两条D黑线(D_1 、 D_2)非但没有亮起来,反而变得更加黑了。

基尔霍夫仔细考虑后,又从原先的猜测上反了个向——莫不是太阳上含有钠,它的两条亮黄线被什么遮挡住而成 D 黑线了呢?基尔霍夫根据他以往用温度很高的氢氧焰烧石灰时,石灰会发出耀眼的白光,并形成连续谱的经验,决定用石灰光代替太阳光做试验.他在石灰光和分光镜中间放上本生灯,烧起钠盐.预料中的事情发生了,在石灰光原来的连续谱中出现了两条黑线,并且正好与太阳光谱中的 D 黑线位置相同.换上另一种盐试试,又在连续谱的其他地方出现了新的黑线.它们的位置总和那种盐的亮线的位置一样.

基尔霍夫恍然大悟,原来太阳上不是没有钠,而是有钠.由于太阳中心的温度极高,形成的光谱本应是连续的,但当高温的太阳光通过太阳外围温度较低的太阳大气时,在这外围大气中有什么元素,就会把连续谱中相应的谱线吸收掉,从而形成一系列黑线.这正像本生灯中的钠蒸气能使石灰光的连续谱中出现两条黑线一样.基尔霍夫成功地解释了夫琅和费线的成因,从而建立了物质的线状谱与它的吸收光谱之间的一一对应关系.这样,只要把太阳光谱中夫琅和费黑线的位置与已知元素的谱线(明线)对照一下,就能知道太阳大气的成分.用同样的方法,也可分析其他遥远的恒星的化学成分.

成功之路的
思维线索

1859年10月20日,基尔霍夫向柏林科学院报告了他的发现.从此,完整的光谱分析法成了物理学家、化学家、天文学家进行分析研究的有力手段.总结一下这条成功之路上几个阶段的基本思维线索,我们可以概括地表示如下:



求异思维引导着本生和基尔霍夫一步步跨上新的台阶,如今我们回顾这段历史,仿佛仍能听见在他们身后留下的一串脚步声.

4. 质子衰变

格拉肖的
预言

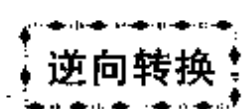
许多基本粒子都是不稳定的,寿命极短.如 μ 子的寿命数量级为 10^{-6} 秒, π 介子的寿命数量级仅在 $10^{-17} \sim 10^{-8}$ 秒之间,中子的寿命也只有 915.8 秒.但自从 1919 年英国物理学家卢瑟福(E. Rutherford, 1871—1937)发现质子以来,迄今 70 多年的一段时期内,人们在各种实验中从未观察到过质子发生衰变的现象.因此,物理学家普遍认为质子是一种稳定的粒子,不会发生衰变.

20 世纪 60 年代,美国物理学家格拉肖(S. L. Glashaw, 1932—)、温伯格(S. Weinberg, 1933—)和巴基斯坦物理学家萨拉姆(A. Salam, 1926—),根据当时对粒子间存在的四种相互作用

用的认识*, 分别独立地提出了把弱相互作用和电磁相互作用统一起来的理论, 称为弱—电统一理论. 1978年, 他们的理论被实验所证实, 他们也因此共同分享了 1979 年度诺贝尔物理奖.

弱—电统一理论的成功, 极大地鼓舞着人们建立强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用统一起来的理论, 称为大统一理论. 目前已提出多种大统一模型.

根据大统一理论, 格拉肖有一惊人的预言, 质子是不稳定的, 它可以衰变成正电子(或反中微子)和介子, 只是它的寿命极长, 理论推算平均为 $10^{29} \sim 10^{33}$ 年.



格拉肖的预言如同在平静的池塘中投下一块小小的石子, 立即在世界物理学界中激起阵阵涟漪. 如果质子的衰变被证实, 必将使物理学又大大前进一步.

然而, 质子像长生不老的寿星, 寿命太长了(图 13). 我们生活的宇宙年龄从目前推测也只有 10^{10} 年, 更何况在人生的短暂时间内, 是绝对不可能观测到质子的衰变的.

那么, 怎样才能进行对质子衰变的实验观测呢? 物理学家巧妙地从问题的反方向去思考:

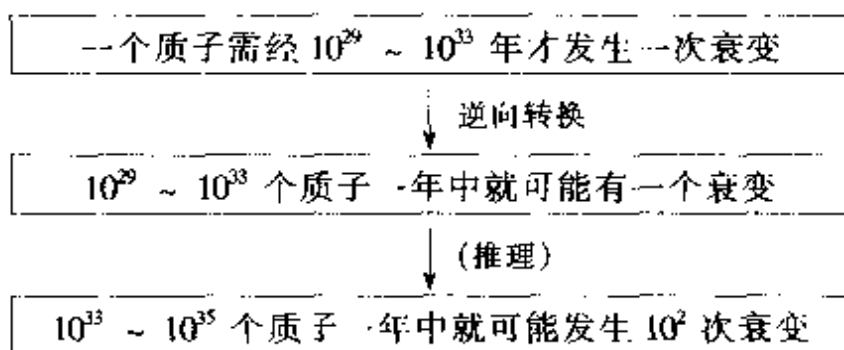
* 四种相互作用的比较

四种相互作用	引力作用	弱相互作用	电磁相互作用	强相互作用
作用力程	∞	$\ll 10^{-14}$ cm	∞	$10^{-13} \sim 10^{-14}$ cm
举 例	天体间	β 衰变	原子结合	核 力
强度(自然单位)	10^{-39}	10^{-5}	10^{-2}	$10^0 \sim 10^1$
被作用粒子	一切物体	强子、轻子	带电粒子	强 子
被交换粒子	引力子?	中间玻色子	光 子	介 子



悟空：喂，老头儿，我可以瞬息万变，你呢？
 质子：猴头，你的亿万代孙也难见我容颜衰老！

图 13 质子衰变要经 $10^{29} \sim 10^{33}$ 年



这也就是说，可以采用大数量的物质进行观测试验。这样，就把原来无法实现的测时间概率的问题巧妙地转换成一个可以处理的测空间概率的问题。这无疑是一次逆向转换的成功。

实验探索

根据逆向转换的方法，美国物理学家率先付诸实践。他们在俄亥俄州的一个 600 米深的莫顿盐矿进行试验：先将矿井壁用合成橡胶衬里，在壁上装有 2000 支光电倍增管，并灌入 10000 吨异常纯化的过滤水（1 吨水中约有 10^{29} 个质子）。假使质子发生衰变，则可探测到衰变时的闪光。第一次试验经过 80 天仍未观测到闪光，意味着质子寿命的下限可达 $6.5 \times$

10^{31} 年.

后来,在欧洲的勃朗峰隧道中,在印度 Kolar 金矿的废矿井中,也都进行了类似的试验*.据说,两年来共发现 6 个被认为是质子衰变的事例.按此推算,质子的平均寿命约为 7×10^{30} 年.不过,不少物理学家很难否定目前观测到的质子衰变完全不是中微子造成的,这样的话,质子的寿命就更长了.

由于质子衰变实验的意义重大,因此,虽然实验费用昂贵,目前不少国家仍在争相试验,人们拭目以待,希望在不久的将来作出明确的判断.

5. 一个经久不衰的实验

物理学史上的许多著名实验,可以说都是经过物理学家独具匠心的构思设计、巧夺天工的精心制作才完成的.为了突破前人的思维模式或借鉴于失败的不完善的实验,后人必须有足够的勇气提出不同于前人的观点,设计出更完美的实验.有时为了一个实验,甚至吸引着几代人为之辛勤努力.光速的测定就是这样一个很典型的事例,一个又一个新的方案,充分显示着几百年来各国物理学家刻意创新、求异的功力.



对于光的传播,历史上许多科学家都认为是瞬息可达,不需要时间的.如发现行星运动规律的开普勒(J. Kepler, 德国, 1571—1630)、创立解析几何的笛卡儿(R. Descartes, 法国, 1596—1650)等都有这样的看法.最先冲破传统观念,认为光也是以有限的速度传播的,是意大利物理学家伽利略.1607年他曾首先做了测定光速的一次实验.

* 把实验安排在地下(如报废的矿井或很深的山洞),是为了避免宇宙线的干扰.

伽利略和他的助手各拿一盏有遮光板的灯,站在两个相距几英里的小山头上.伽利略首先打开遮光板,让光线射向助手,助手一见到伽利略的灯光,立刻打开自己的那块遮光板,让光线射向伽利略.伽利略曾经设想,如果光速是有限的,那么从他打开遮光板起,到看见从助手那里发回的光,应该有一个传播时间.这个道理完全正确,在实验中他们也测到了一个时间间隔.可是,当他们站在更远的两个山头上重做这个实验时,却发现测得的时间间隔并没有增大,说明这个实验无法取得预期的结果.原来,光的速度实在太大了,伽利略他们测得的那个时间间隔,只不过是看到光线后打开遮光板时,本身的反应时间与动作时间之和.

伽利略的实验失败了,不过,由此指示着人们:必须利用大距离和解决精细时间的测量.以后,人们正是沿着这个方向不断努力,才取得一次次成功的.

罗默
首获成功

利用天体的大距离测定光速,首获成功的是丹麦天文学家罗默(O. Roemer, 1644—1710).他观察到木星的卫星也会像月球一样发生卫星食——当卫星、木星、太阳在一直线上,卫星位于木星阴影区域的现象.木星的卫星绕木星公转一周要消失在木星的影内一次(即发生一次卫星食),二次消失所经历的时间即该卫星绕木星公转的周期.罗默发现,木星卫星的公转周期不是恒定不变的.当地球背离木星运行(如图 14 中从 a 到 b)时,观察到的卫星的公转周期略长;当地球接近木星运行(如图 14 中从 b' 到 a')时,观察到的卫星的公转周期略短.罗默认为,从地球上观察木星卫星公转周期之所以有变化,乃是因为地球在接近木星和远离木星时,从木星发出的光到达地球所走的路程不同,由于光速是有限的,因而产生了时间差.

设木卫食的周期为 T_0 ,当地球从 a 到 b 时,观测到的周期 T

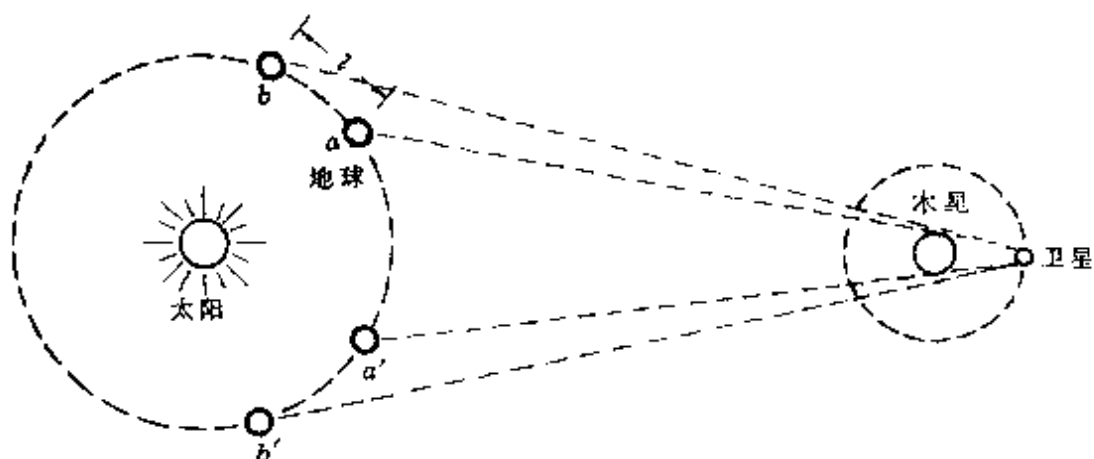


图 14 罗默的卫星食法

比 T_0 大,令

$$T' = T_0 + \Delta t.$$

因为 T' 比地球绕日运动的周期小得多(木卫食的平均周期约 1.75 天),可以认为地球在 T' 时间内沿光线方向多走了 l .若已知地球的轨道速度为 v ,则 $l = vT_0$,所以

$$T' = T_0 + \frac{l}{c} = T_0 + \frac{v}{c} T_0.$$

反之,当地球从 b' 到 a' 时,观测到的木星食周期比 T_0 短,可表示为

$$T'' = T_0 - \frac{l}{c} = T_0 - \frac{v}{c} T_0.$$

联立两式得

$$c = \frac{T' + T''}{T' - T''} v.$$

罗默于 1676 年测得的光速为 215000 千米/秒.这个数值虽然与目前的公认值相比并不精确,但毕竟得出了光速是一个有限值的结果,在物理学史上同样称得上是一个重大的贡献.

布拉得雷
光行差法

同样借助于天体间的大距离,英国天文学家布拉得雷(J. Bradleg, 1692—1762)从恒星的光行差现象测出了光速.如图 15 所示,从遥远的恒星射向地球的微弱星光类似于垂直下落的雨滴,当我们向前奔跑时,它好像倾斜着向我们飞来,因此,望远镜的镜筒就会由于自身被地球带着运动必须向前倾斜一个角度 α ,所以观察到的恒星的位置应在原来的 S 方向而在 S' 方向, α 的角度由光速 c 与地球公转速度 v 决定,即

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{v \Delta t}{c \Delta t} = \frac{v}{c}.$$

这个现象称为恒星的光行差现象.

图 15

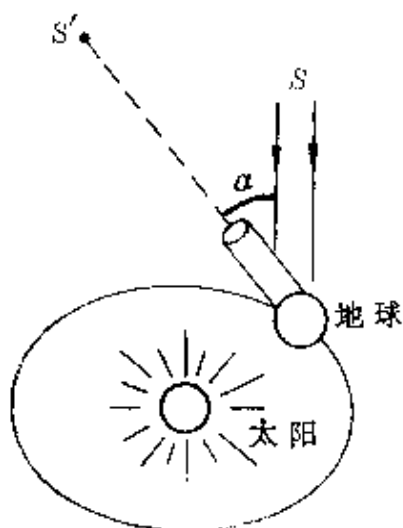
布拉得雷据此在 1727 年测得的光速 $c = 301000$ 千米/秒,它与现在的公认值 c 很接近.

斐索
齿轮法

如何把测光速的实验从天上搬回地面?法国著名物理学家阿拉果(D. F. J. Arago, 1786—1853)的学生斐索(A. H. Fizeau, 法国, 1819—1896)冲破传统束缚,大胆探索,用旋转的齿轮解决了精细时间的测量,于 1849 年获得成功.

实验装置如图 16 所示.从点光源 S 发出的光束,经透镜 L 后,由涂有薄银层的玻璃片 M 反射而焦集在齿轮 A (A 可绕 OO' 轴旋转)的边缘 T 点.当 A 不转时,光通过齿轮的空隙后先由透镜 L_1 形成平行光束,再由透镜 L_2 焦集在平面镜 M_1 上,由 M_1 反射的光逆着原入射光路到达玻璃片 M ,一部分仍反射到 S 点,另一部分可通过 M 和目镜 E 被观察者看到.

当齿轮高速旋转时,从 M_1 反射回来的光如能正好通过齿隙,



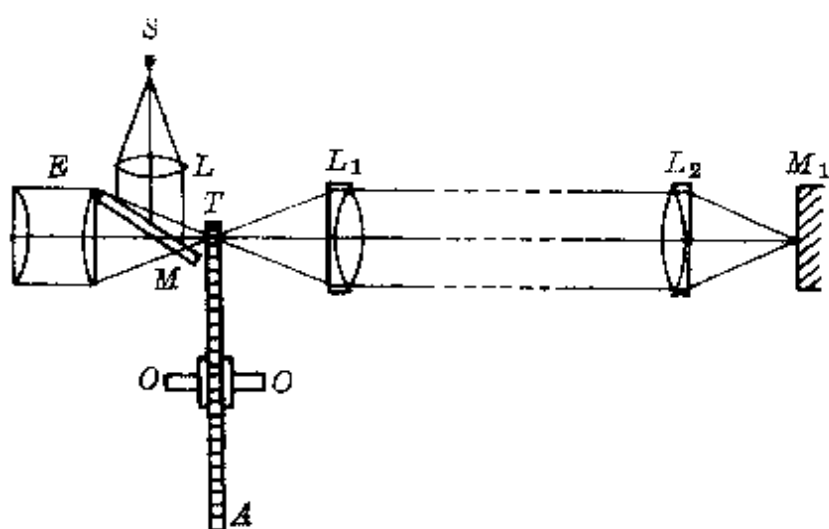


图 16 斐索的齿轮法

观察者可以看到光.如转速加倍,反射回来的光碰到轮齿上,观察者看不见光,当转速增加到 3 倍时,又可看见光了.假如 A 共有 n 个齿,目镜中第一次发现黑暗时对应的转速是 r 次/秒,因每个齿或齿隙的宽度是 A 的周长的 $\frac{1}{2n}$,转过每个齿的时间 $\Delta t = \frac{1}{2nr}$.在 Δt 时间内光往返一次所经过的距离是 $2L$ (L 是 T 与 M_1 的间距),由此得光速

$$c = \frac{2L}{\Delta t} = 4nrL.$$

斐索在实验中取的 $L = 7000$ 米,测得的光速 $c = 315000$ 千米/秒.后来有人重复斐索的实验,取 $L = 23$ 千米,测得的光速 $c = 299875 \pm 50$ 千米/秒.这个结果已非常接近现代的公认值了.

·····
· 连绵 300 年 ·
 ·····

斐索实验的意义不仅是首次在地面上成功地测得了光速,还在于他的构思给予后人以很好的启示.以后,许多物理学家又从不同的角度,创造性地采用了不同的方法,设计出许多各具特色的实验,继续着光速的测定.其中,有影响的实验如下表所示.

光速测量法一览表

年代	主持人	方法	对象*	结果(千米/秒)
1851	傅科	旋转平面镜法	群速	298000 ± 5000
1933	迈克耳逊	旋转棱镜法	群速	299774 ± 2
1941	安德森	克尔盒调制法	群速	299776 ± 6
1950	埃森	谐振腔法	相速	299792.5 ± 1
1951	贝格斯特兰	光电测距法	群速	299793.1 ± 0.3
1956	艾奇	光电测距法	群速	299792.2 ± 0.1
1957	韦德莱	雷达测距法	群速	299792.6 ± 1.2
1958	弗罗默	微波干涉仪	相速	299792.5 ± 0.1
1964	兰克等三人	光谱法	相速	299792.8 ± 0.4
1966	卡洛路斯 赫姆伯格	声调制法	群速	299792.47 ± 0.15
1972	贝依等	氮-氛激光	相速	299792.462 ± 0.018
1972	贝艾德	二氧化碳激光	相速	299792.460 ± 0.006
1973	美国国家标准局	测定氮-氛激光 谱线的频率和波 长	相速	299792.457 ± 0.0011
1974	美国国立物理实 验室	测定二氧化碳激 光谱线的频率和 波长	相速	299792.4590 ± 0.0008

* 按波动理论,光速可分为相速度和群速度.严格的单色平面波以一定的位相向前传播的速度称为位相速度(简称相速度),可用波长和频率来计算.通常用折射率法测出的介质中的光速是相速度.实际的光波是由无限多个不同频率、不同振幅的单色正弦波或余弦波叠加而成的形式不同的脉动,当组成脉动的各单色平面波都以同一相速度传播时,脉动的形式不变,整个脉动也以一定的速度传播.脉动传播的速度称为群速度.对吸收系数很小的介质,群速度就是能量的传播速度,大多数方法测出的都是群速度.

如果从罗默测定光速的时间算起,前后持续了 300 余年,直到 1983 年召开的第 17 届国际计量大会通过的米定义为:“米是光在真空中在 $1/299792458$ 秒的时间间隔内行程的长度。”这样,真空中光速的数值已成为定义值,它的不确定度为零,不需再进行任何测量了,从而结束了这场 300 余年测量光速的历史。

6. 从希罗玩具到瓦特蒸汽机

有不少人至今还天真地认为,瓦特小时候看见水蒸气把壶盖顶起来,诱发他后来发明了蒸汽机,这只能作为一个美丽的传说。实际上,人们从想到利用蒸气作动力到实用的蒸汽机的发明,是一个漫长的历史过程。在这个过程中,有许多人经过持之以恒的钻研都作出了贡献,整个发明过程就像其他许多发明一样,为了避开他人的专利权,为了努力克服前人设计中的弱点,经历着一个不断的求异、完善的过程。

希罗玩具 利用蒸气作动力的想法由来已久,公元前 120 年希腊著名的天文技术家希罗(Hero)发明的“eolipile”玩具,就是最早的反冲式蒸气涡轮机(图 17)。只是当时社会生产力低下,还不需要这种“超前”的动力源。

巴本蒸汽机 历史发展到 17 世纪,当科学家认识到大气压的作用后,必然又会产生使用气体压力做功的设想。

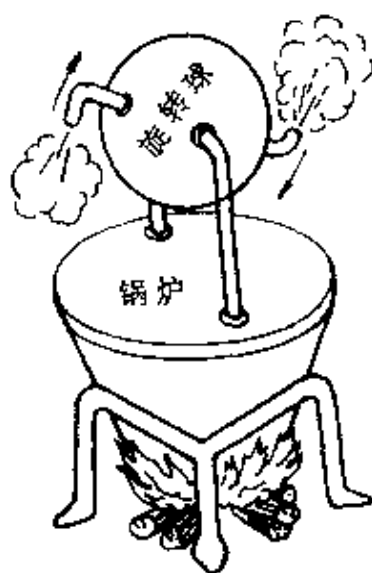


图 17 希罗的蒸汽动力“玩具”

荷兰著名物理学家惠更斯(C.

Huygens, 1629—1695)的助手尼·巴本(D. Papin, 法国, 1647—1712)

首次提出用水蒸气冷却产生真空,从而利用大气压力推动真空发动机的原理,并提出了具体的方法:先加热气缸形成蒸气,使它推动带重物的活塞上升,然后将气缸从中取出,用冷水冷凝蒸气,产生真空,再由大气压力作用将活塞压下,如此从气缸外边反复加热和冷却,活塞便可不断往返运动带动重物做功(图 18).

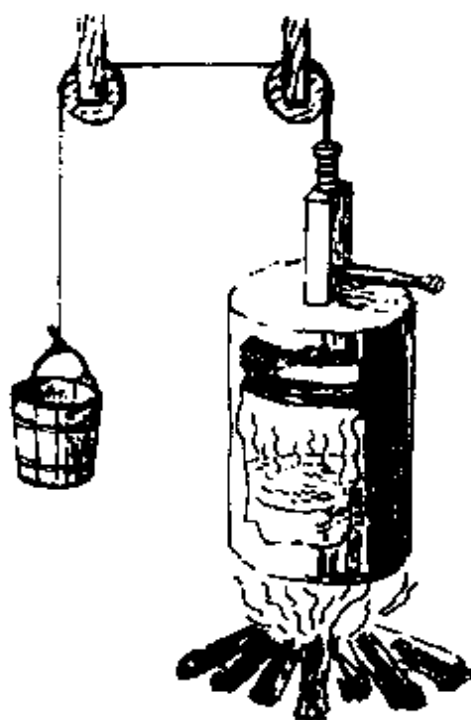


图 18 巴本蒸汽机

1708 年,巴本写信给皇家学会书记,请求拨款 15 英镑,做这个“值得考虑的实验”.可是书记回答说学会不贷款,除非事先保证成功.

巴本的蒸汽机方案不幸就此夭折了,然而他提出的气缸和活塞的结构,在工程技术上称得上是个划时代的发明*.

萨勿里
蒸汽机

1698 年,英国皇家工程队的军事工程师萨勿里设计和制造了第一部蒸汽抽水机(图 19).其工作原理如下:

从锅炉①输出的蒸气通过两个进气阀⑥、⑦,轮流进入左、右两个气缸②、③.若现在关闭气阀⑦,并用冷水箱⑤洒水冷凝,气缸②内压强骤降,井中的水即可沿着进水管④上升,并顶开单向阀门⑩,压到气缸②内,而气缸③内已被吸上的水,依靠来自锅炉的蒸

* 巴本还跟玻意耳(R. Boyle, 英国, 1627—1691)合作发明了设置有安全阀的高压锅.

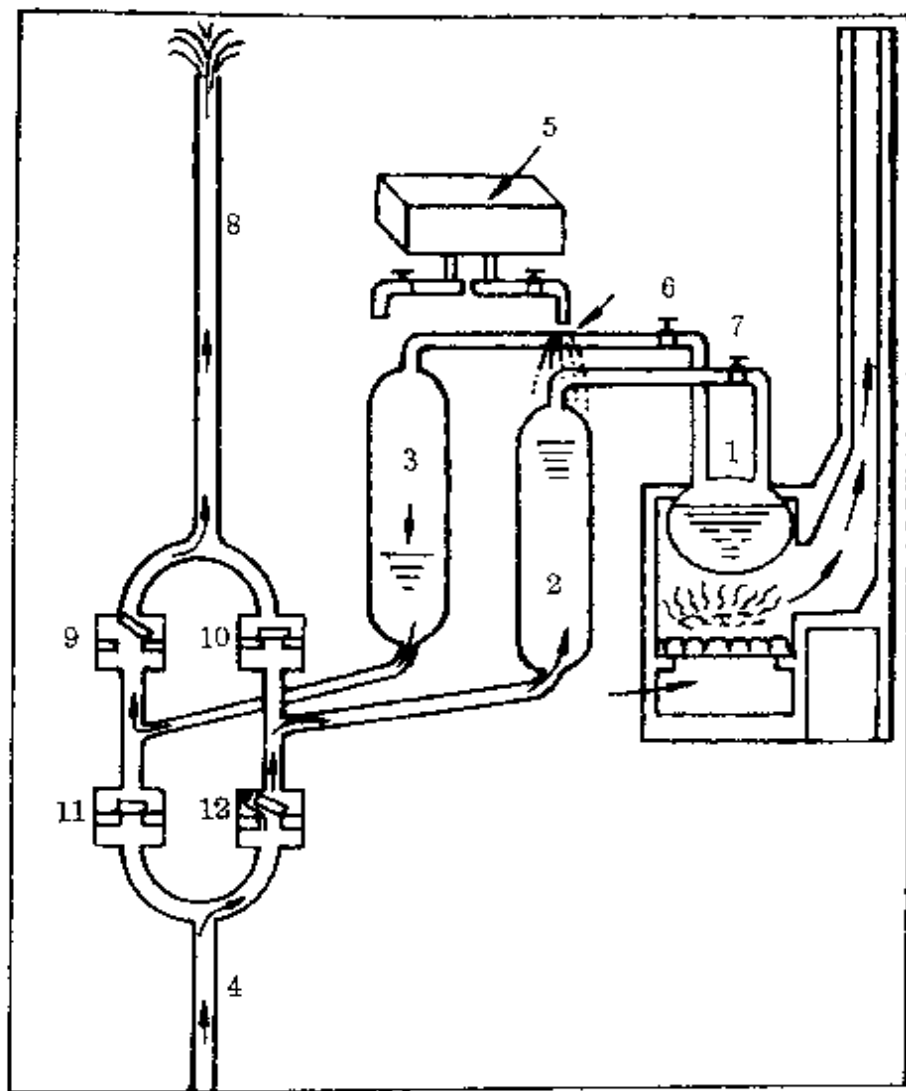


图 19 萨勿里蒸汽机

1. 锅炉 2. 右气缸 3. 左气缸 4. 进水管 5. 冷水箱

6. 7. 进气阀 8. 排水管 9. 10. 11. 12. 单向阀门

气通过气阀⑥使它压开单向阀门⑨,通过排水管排出.两个气缸交替循环工作,就可以不断地利用蒸气的膨胀和冷凝完成抽水工作.

萨勿里的蒸汽机依据的是巴本提出的设想——使热蒸气冷凝降压,形成真空.他改用了两个气缸,可以交替作吸水、排水之用,功率也较大,在矿井中排水相当几百匹马力.应该说比巴本的设想有了很大的改进.但使用仍不便,而且全套设备需安装在井下,锅

炉中产生的是高压蒸气(约 10 个大气压),顶盖又无安全阀,有爆炸隐患,热效率也较低.

钮可门
蒸汽机

1711 年,英国技工钮可门(T. Newcomen)经过几年的努力,改进了萨勿里蒸汽机,制成一部大气蒸汽机(图 20).其工作原理如下:

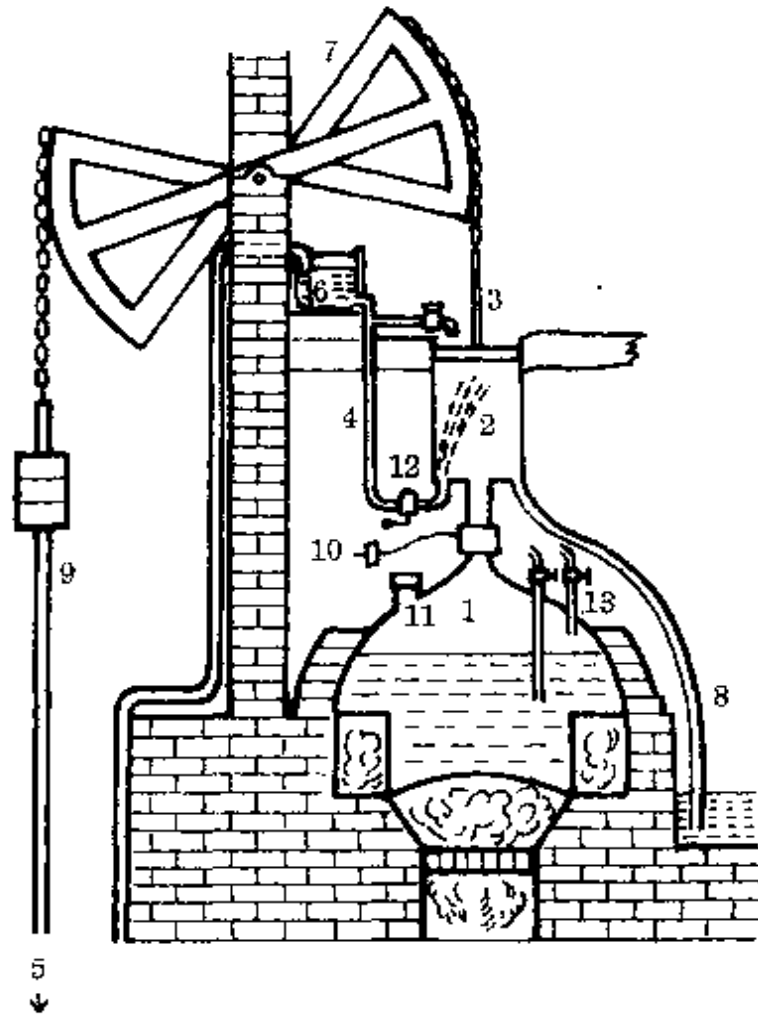


图 20 钮可门蒸汽机

- 1. 锅炉 2. 气缸 3. 活塞 4. 喷水管 5. 水泵 6. 水箱
- 7. 摇杆 8. 排水管 9. 水泵杆 10. 供气开关
- 11. 安全阀 12. 冷水开关 13. 观察水位的畅门

从锅炉①提供的蒸气,经供气阀⑩进入气缸②,推动活塞③上升,到达上止点时,关闭气阀⑩,打开冷水开关⑫,气缸里的蒸气由

于射入冷水冷凝形成部分真空,在大气压力作用下活塞下降,通过摇杆⑦带动水泵杆⑨进行抽水。

最初设计中,冷水开关和供气开关都是手动的,一个冲程开关一次。据说,被钮可门指派去操作手动气门和冷水开关的一个小孩叫洪佛里·蒲特,他将两个开关用一根杆子(后来称为推杆)与摇杆连接捆绑起来,当供气开关关闭时,能自行把冷水开关打开。在这个基础上,以后发明了气阀自动器。

钮可门机比萨勿里机又有了很大的改进,主要体现在:

(1)萨勿里机直接利用蒸气的压力排水,蒸气的冷却降压吸水,像一个蒸汽泵。钮可门机虽然也沿用了冷凝高温蒸气产生局部真空的办法,但加进了活塞、摇杆,带动水泵杆上下抽水,已名符其实地是一部将热能转变为机械能的原动机。

(2)钮可门机中使用的是低压蒸气,锅炉压强为 1 大气压(故称大气蒸汽机),且在顶盖上设置有安全阀,比较安全。

(3)钮可门机只向汽缸中的膨胀蒸气稍加些水,气缸本身不会冷却,因而热效率比萨勿里机有所提高。以每马力小时耗煤量比较,萨勿里机为 30 磅(1700 年指数),钮可门机仅 20 磅(1720 年指数)。

(4)钮可门机可以放在矿井上面,操作较方便。

所以,钮可门机很快传遍英国,并推销到国外,它在矿井中使用长达 70—80 年,直到被瓦特蒸汽机所代替。



钮可门机的一个严重缺点是仍需要对气缸不停地局部冷却,损失热量很大,热效率仍然很低,以每马力小时耗煤 20 磅计,热效率不到 1%。此外,它只能产生直线运动,限制了更广泛的使用。

瓦特(J. Watt, 英国, 1736—1819)针对这些缺点,经过多年的努力,作了许多关键性的改进,终于在 1774 年试制成功了新的蒸汽

机. 瓦特对蒸汽机的主要贡献是:

(1) 发明了分离冷凝器. 瓦特改变过去冷却气缸的方法, 为了使气缸“经常保持如同进来的蒸气那样热”, 利用阀门把做过功的废气排入冷凝器内冷却后排出. 这就是著名的分离冷凝器的发明.

(2) 发明了曲轴连杆装置, 使活塞的往复直线运动变为圆周运动, 便于带动各种工具工作.

(3) 发明了气缸套(即将气缸四周包以不传热的材料), 保持气缸的高温.

(4) 发明了飞球调速器(离心调速器), 可以保持飞轮转动的稳定.

(5) 将原来蒸气从一面进入气缸(单动式)改为轮流从两边进入气缸(双动式), 因此后来称为往复蒸汽机.

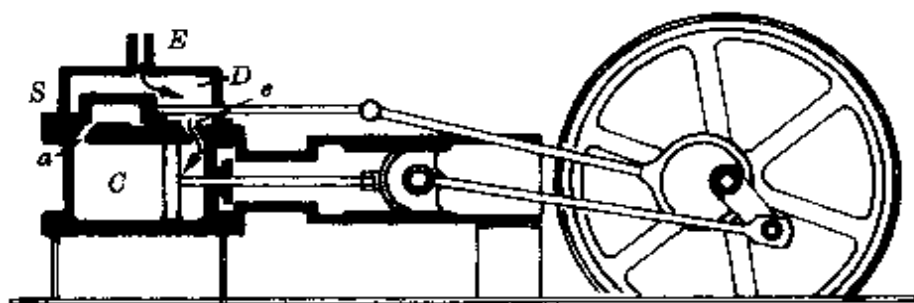


图 21 现代的蒸汽机

瓦特蒸汽机与现在使用的蒸汽机已基本相同(图 21). 他的这些发明与改进, 是蒸汽机发展史上具有决定意义的一大步, 使热效率大为提高(每马力小时耗煤仅约 8 磅). 由于它转速平稳, 普适性好, 因此很快被广泛使用, 宣告了蒸汽时代的到来, 成为从 18 世纪中叶起, 工业用来摇撼旧世界基础的三个伟大杠杆之一*.

* 恩格斯说:“分工, 水力, 特别是蒸气力的利用, 机器的应用, 这就是从 18 世纪中叶起工业用来摇撼旧世界基础的三个伟大的杠杆.”(《马克思恩格斯全集》第 2 卷 P200)

三、中学物理中几种典型的求异形式

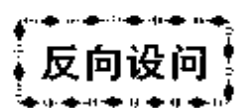
中学物理中的求异思维与创造发现中的求异思维并没有本质的区别,其基本形式也相同.为了更贴近中学教学实际和适应广大读者的阅读习惯,我们把它表述得更简明、更直接一些,并且尽量用中学物理内容中的具体问题去加以阐释.

1. 逆向思维

当代最负盛名的科学哲学家卡尔·波普尔(K. P. Popper, 英籍奥地利,1902—)曾说过:“逆向思维是思维活动中的一个重要方面.”逆向思维不仅在科学史上有过辉煌的记录,在中学物理教学中的表现也相当活跃,大体上可归纳为这样几个主要方面.

(1) 反过来想

这是逆向思维最通俗的解释,有时也被用作逆向思维的简单释义.教学中的反向设问和公式变形就是“反过来想”最基本的两种形式,它可以作为逆向思维的入门阶梯.



在教学中,教师很喜欢从问题的反面问学生,学生也常会同样地从问题的反面向教师质疑.这里的设问既可以直接把正面问题反过来,也可以从正面问题提出反面问题.譬如:

由已知两个共点力可以求出一个确定的合力	已知一个力是否可惟一地确定出它的两个分力
物体受恒力作用做匀加速运动	加速度恒定时物体是否一定受恒力作用
物体所受合外力为零时,速度是否一定为零	物体的运动速度为零时,所受的合外力是否一定为零
温度升高时物体的内能增大	物体的内能增大时它的温度是否一定升高
气体吸热时能对外做功	气体对外做功是否必须吸热
电场强度为零的地方,电势是否一定为零……	电势为零的地方,电场强度是否一定为零……

公式变形

这也属于“反过来想”的一个方面,许多中学生也都能运用自如,如果我们把直接用基本公式(定义式)的计算称为正问题的话,那么通过对基本公式的变形后求出其他相关量的计算就可称为反问题,这方面的例子几乎遍及中学物理的各个部分,如下页表所示。

应该认识到,物理公式的变形在许多情况下并不是一种纯粹的数学变换,它既有思维高度上的意义,还常常能通过公式的变形赋予新的物理意义。

譬如,根据安培力公式 $F = IlB\sin\theta$,反过来就得到磁感强度

$$B = \frac{F}{I\sin\theta} = \frac{F_{\perp}}{I}$$

已知质量(m)和体积(V)得密度 $\rho = \frac{m}{V}$	已知 m, ρ 得 $V = \frac{m}{\rho}$, 已知 V, ρ 得 $m = \rho V$
已知 v_0, v_t, t 得加速度 $a = \frac{v_t - v_0}{t}$	已知 v_0, a, t 得末速度 $v_t = v_0 + at$
已知 m, k 得振动周期 $T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$	已知 T, k 得质量 $m = \frac{T^2}{4\pi^2} k = \frac{k}{\omega^2}$
.....

(式中 F_{\perp} 表示当 $\theta = 90^\circ$ 时通电导线所受的安培力)从而可以给出磁感强度的一种定义方法*: 磁场内某处的磁感强度, 等于垂直磁场放置的电流元所受的磁场力与电流元的 Il 乘积的比值. 我们也就可以根据这种定义设计出测定磁感强度的方法.

(2) 逆向推理

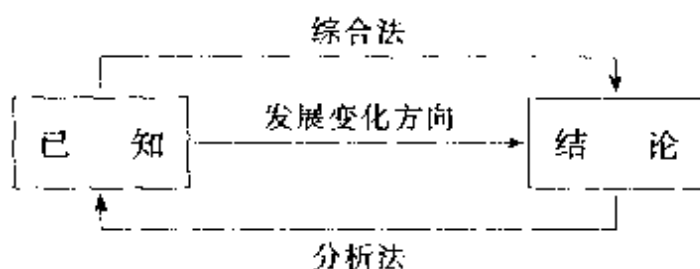
两种
基本思路

物理问题的分析, 有两种基本的思考方式:
一种是从已知量入手, 顺着物理过程的发展变化方向, 运用物理规律依次推理, 直到把待求量跟已知量的关系全部找出来为止. 这种方法称为综合法.

另一种是以待求量为入口, 逆着题中物理过程的发展变化方向, 首先找出直接回答题目所求的定律或公式, 在这些关系式中, 除了待求的未知量外, 还会包含着某些过渡性的未知量. 然后, 再根据这些过渡性未知量与题中已知条件的关系, 引用新的关系式, 逐步上溯, 直到把所有的未知量都能用已知量表示出来为止. 这种方法常称为分析法, 也是一种逻辑性很强的逆向思维方法.

* 磁感强度 B 通常有三种定义方法, 除了上述用安培力定义外, 还可根据洛仑兹力来定义或根据磁通来定义.

这两种分析推理过程可以表示如下：



**逆向推理
解 题**

下面,我们通过具体问题来说明逆向推理的应
用.

例题 1 两个质量均为 m 的小球 A 和 B . 球 A 用长为 l 的细线悬于 O 点,并使线呈水平状态. 球 B 放在半径为 R 的光滑圆弧轨道的最低处,并与球 A 处于同一竖直平面内. 当小球 A 从静止下落至最低处与球 B 发生弹性碰撞后,球 B 沿轨道滑出(图 22). 试求球 B 经过轨道上 D 点($\angle BO'D = \theta = 60^\circ$) 时对轨道的压力.

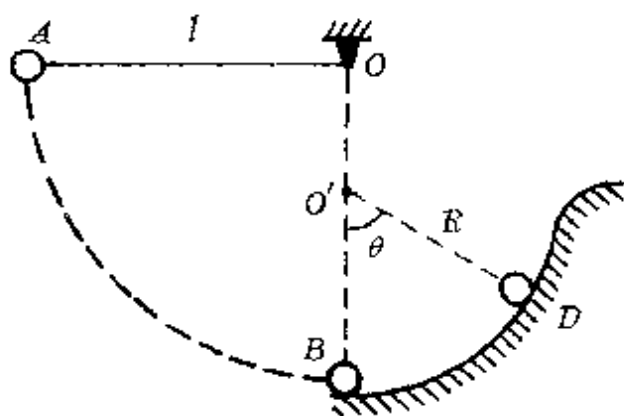
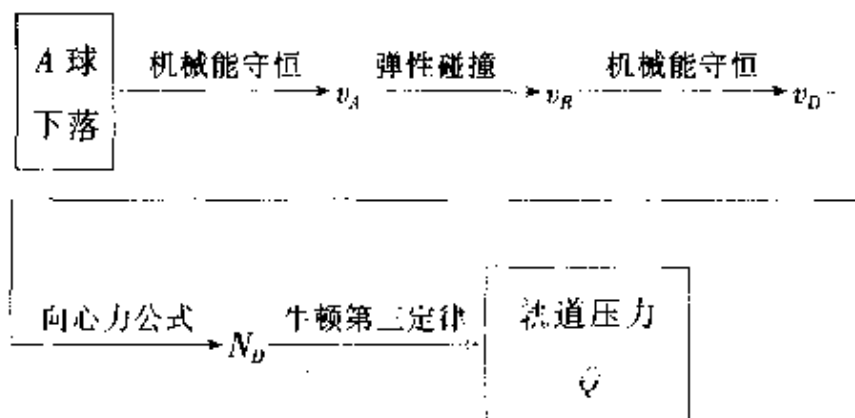


图 22

分析 整个物理过程可以分为三个阶段:(1) A 球下落;(2) 两球发生弹性碰撞;(3) B 球沿圆弧轨道滑行. 如果我们以物理过程的发展变化为线索,顺次推理,即用综合法求解,则解题的思维过程可表示如下:



我们也可反其道而行之,从待求量着手进行逆向推理(分析法),具体解法如下:

解答 为了求出 B 球滑至 D 点时对轨道的压力 Q,可先根据牛顿第三定律求出它的反作用力 N_D ,有关系式

$$Q = -N_D.$$

根据小球在 D 点的受力特点,由向心力公式得

$$N_D = mg \cos \theta + m \frac{v_D^2}{R},$$

式中 v_D 为过渡性未知量.

因小球在 B、D 过程中机械能守恒,则

$$\frac{1}{2} m v_D^2 + mgR(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2} m v_B^2,$$

从而建立过渡性未知量 v_D 与 v_B 的关系.

由 A、B 两球做弹性碰撞的条件知, B 球与 A 球碰后互换速度,得碰前 A 球速度

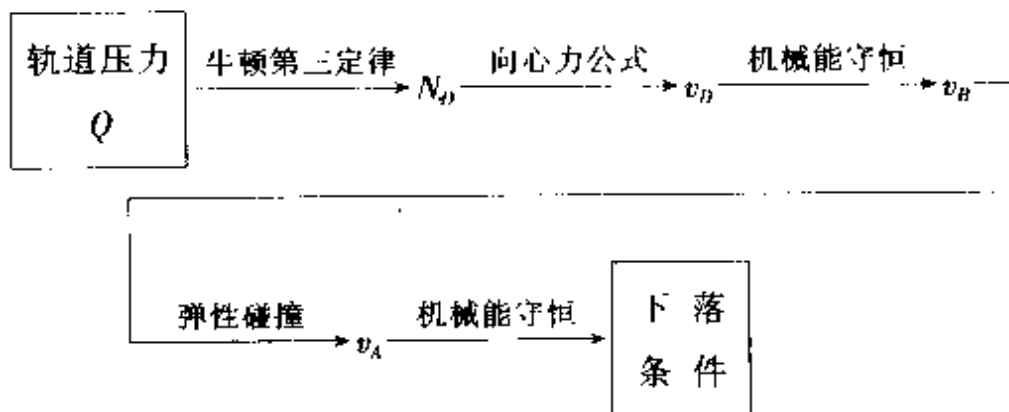
$$v_A = v_B.$$

式中过渡性未知量 v_A 可由 A 球下落时机械能守恒求出,即

$$v_A = \sqrt{2gl}.$$

至此,所有的未知量(包括待求量和过渡性未知量)都能用已

知量表示,联立各式即可求出 B 球运动至 D 处时对轨道的压力。
整个思路可表示如下:



例题 2 如图 23 装置所示,两光滑平行导轨相距 $l = 0.2$ 米,导轨上垂直放置一根导体棒 ab ,

左端串有两平行板电容器,其电容量 $C_1 = 4$ 微法, $C_2 = 6$ 微法,两板间距 $d = 0.72$ 毫米,垂直导轨平面向内的匀强磁场的磁感强度 $B = 1$ 特,试问:当导体棒 ab 向什么方向,以多大速度运动时,可使

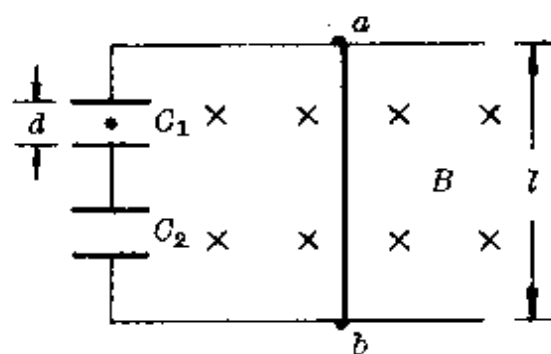
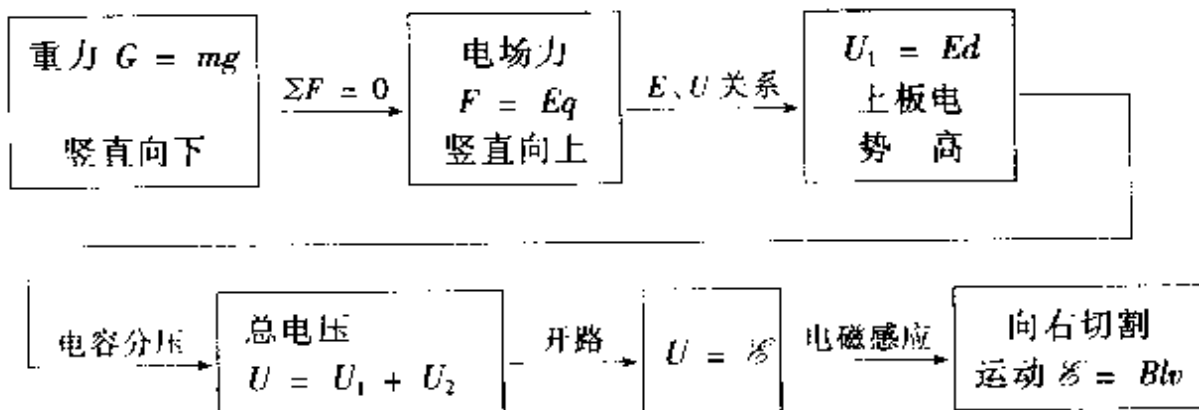


图 23

电容器 C_1 内质量 $m = 0.1$ 克,电量 $q = 10^{-6}$ 库的带负电的微粒悬浮在其中? 取 $g = 10$ 米/秒².

分析 从微粒悬浮的条件作逆向推理,整个思路可表示如下:



解答 由力平衡条件

$$mg = Eq = \frac{U_1}{d}q,$$

得电容器 C_1 上的电压为

$$U_1 = \frac{mgd}{q}.$$

根据串联电容分压规律 $U_1 : U_2 = C_2 : C_1$, 因此两串联电容器上的总电压

$$U = U_1 + U_2 = \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) U_1 = \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) \frac{mgd}{q}.$$

因电容器使电路处于开路状态, 两端的总电压等于导体棒切割运动中产生的感应电动势, 即

$$U = \mathcal{E} = Blv,$$

所以导体棒 ab 向右做切割运动的速度大小为

$$\begin{aligned} v &= \frac{\mathcal{E}}{Bl} = \frac{U}{Bl} = \frac{mgd}{Blq} \left(1 + \frac{C_1}{C_2}\right) \\ &= \frac{0.1 \times 10^{-3} \times 10 \times 0.72 \times 10^{-3}}{1 \times 0.2 \times 10^{-6}} \left(1 + \frac{4}{6}\right) \text{米/秒} \\ &= 6 \text{米/秒}. \end{aligned}$$

(3) 时间反演

相对于前面两种较简单、较直接的逆向思维形式来说, 时间反演显得更为深奥一些.

时间反演就是把时间的流向倒转, 好像我们用摄像机把真实的生活过程记录下来后倒过来放映. 虽然日常生活的大多数现象并不能实现时间反演, 但在研究物理问题时却不失为一种重要的思维方法. 它属于对称性操作过程.

时间反演在中学物理中也并不鲜见, 譬如:

顺着时间流向	逆着时间流向
列车进站做匀减速滑行直到停止	列车从车站出发反向做匀加速运动
小球做竖直上抛运动	小球做反向的自由落体运动
斜上方抛出的小球从抛出点到最高点的斜抛运动	小球从运动轨迹的最高点做反向的平抛运动
.....

除了上述这些具有较明显特征的时间反演情况以外,实际上前面逆向推理中具有时间过程性的问题(如例题 1),也相当于时间反演.

通过时间反演的这种逆向思维操作,常会使得对问题的处理变得较为简单或容易找到解题的入口*.

2. 转换角度

达·芬奇(Leonardo da Vinci,意大利,1452—1519)画蛋的故事至今还常常被人津津乐道.据说,达·芬奇从小爱好绘画,他的父亲把他送到意大利的名城佛罗伦萨,拜名画家佛罗基奥(Vouochio,1435—1488)为师.老师不是先教他创作什么作品,而是要他从画蛋入手.达·芬奇画了十几天,有些不耐烦了,老师对他说:不要以为画蛋容易.要知道,一千个蛋当中从来没有两个是形状完全相同的;即使是同一个蛋,只要变换一个角度去看,形状也就不同了.比方说,把头抬高一点看,或者把眼睛放低一点看,这个蛋的椭圆形轮廓就会有差异.达·芬奇领悟了这个道理,从此用心学习,经过长

* 有关时间反演的较详细讨论和具体应用,请读者参阅本丛书《对称》一册.

期艰苦的艺术实践,终于创作出许多不朽的名画,成为一代宗师。

一只蛋,从不同的角度观察可以画出不同的意境;一头肥猪,画出它的正面像,果然逼真,而画出这头猪的屁股,也许更会使人感到它肥胖得可爱(图 24)。



图 24 从不同角度画出的大肥猪

画画是这样,在物理学研究中,同样需要经常地转换角度——同一个研究对象,从不同的角度去考察,可以使认识更加深刻、丰满;同一个物理现象,用不同角度的实验去进行验证,才能辨别出它的真伪;同一个物理问题,从不同角度用不同的规律去阐释、演解,只有得出一致的结果才正确无疑。

广义地说,转换角度是求异思维最普遍的形式,前面介绍的逆向思维,可以作为它的一个特例。

在中学物理教学中,转换角度求异的表现形式丰富多彩,譬如:

物体处于平衡状态时,既可以从合力等于零($\sum F = 0$)的条件去分析;也可以从合力矩等于零($\sum M = 0$)的条件去求解。

一个简单的刹车滑行问题,分别可以从牛顿第二定律结合运动学公式、动量定律、动能定律等几种不同角度出发讨论。

对理想气体的性质,既要讨论其宏观规律(如气体的三条实验定律、理想气体状态方程等),又要深入研究其微观机理(如压强的微观解释、气体分子的速度分布等)。

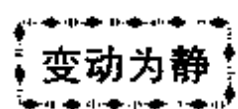
计算核反应的结合能,既可以从反应前后质量亏损出发,也可以从各核子的平均结合能考虑。

.....

这些,都可以属于转换角度的范畴.在中学物理中,较典型的体现可以概括为以下几方面(有一部分作为一题多解并入下节内容中).

(1) 变换参照物

任何物体的运动都是相对于某个选定的参照物而言的.变换参照物就是选择不同的立足点、从不同的角度去研究、分析问题.一般说,同一个运动物体从不同的参照物所作出的观察结果是不同的.巧妙地选择参照物,常可简化对运动的研究.



如果甲、乙两个物体对丙(如地球)的运动速度大小和方向都相同,那么选择其中一个物体(如甲)做参照物时,另一个物体(如乙)相对于它(甲)就处于静止状态.通过作了这样的变动为静的转换后,有时会把一个复杂问题变得十分简单.

例题 1 一人划船逆流而上,行至某桥孔时,从船上掉下一木瓢,直到航行至上游某处时,他才发现木瓢掉下,于是立即返航寻找,他返航后经过 5 分钟才追上木瓢,发觉木瓢已顺水下漂距桥孔有 600 米远.若渔船对静水的速度保持不变,则河水的流速是多少?

分析 以河岸为参照物时,可以这样求解:设船在静水中的速度为 v_1 ,水的流速为 v_2 ,船经时间 t_1 上行至离桥孔 s_1 处才发现失落木瓢,此时木瓢已顺水漂离桥孔 s_2 ,则

$$s_1 = (v_1 - v_2)t_1, \quad s_2 = v_2 t_1.$$

设从开始返航到追上木瓢的时间为 t_2 ,渔船的航程为 s_3 ,这段时间内木瓢又顺水下漂的距离为 s_4 ,则

$$s_3 = (v_1 + v_2)t_2, \quad s_4 = v_2 t_2.$$

这几个距离的关系如图 25 所示,由此可知

$$s_3 = s_1 + s_2 + s_4,$$

即 $(v_1 + v_2)t_2 = (v_1 - v_2)t_1 + v_2 t_1 + v_2 t_2,$

得 $t_2 = t_1.$

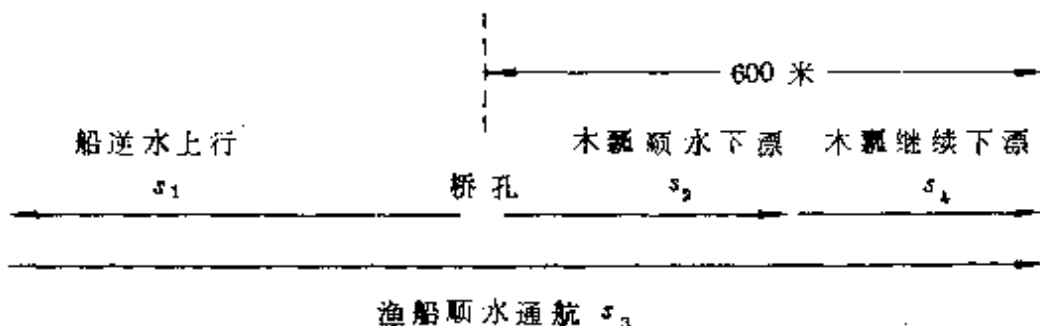


图 25

这就是说,渔船返航追到木瓢的时间,正好等于渔船从桥孔上行到开始返航的时间,在渔船运动时间($t_1 + t_2$)内,木瓢顺水下漂的距离共为 $s_2 + s_4 = 600$ 米,所以河水的流速为

$$v_2 = \frac{s_2 + s_4}{t_1 + t_2} = \frac{600}{300 + 300} \text{ 米/秒} = 1 \text{ 米/秒}.$$

上面的解题过程较为繁复,如果我们改用河水作参照物,求解会方便得多.

解答 因为船与木瓢都在水中,都要随河水漂流,因此,渔船跟木瓢之间的相对速率不论是逆流而上还是顺流而下都保持不变.当以水作参照物时,相当于在静水中木瓢不动,渔船以一定的速率(对静水的船速)离开木瓢,然后再以同样的速率返航靠近木瓢.所以,木瓢落水到渔船开始返航的时间 t_1 必等于渔船返航追到木瓢的时间 t_2 .也就是说,木瓢从落水到被渔船追上所经历的时间为 $(t_1 + t_2) = 2 \times 5 \text{ 分钟} = 10 \text{ 分钟} = 600 \text{ 秒}$,于是立即可得水速

$$v_2 = \frac{600}{600} \text{米/秒} = 1 \text{米/秒}.$$

例题 2 一列货车以 $v_1 = 28.8$ 千米/时的速度在平直铁路上运行. 由于调度事故, 在大雾中后面相距 $s_0 = 600$ 米处有一列快车正以 $v_2 = 72$ 千米/时的速度在同一铁轨上驶来, 快车司机发现后立即紧急制动, 为了不使两车相撞, 快车的制动加速度至少多大? 设货车速度不变.

分析 设快车从紧急制动到两车相遇时, 快车和货车对地的位移和速度分别为 $s_{\text{快}}、v_{\text{快}}$ 和 $s_{\text{货}}、v_{\text{货}}$. 两车不致相撞时, 必须同时满足位移条件 ($s_{\text{快}} \leq s_{\text{货}} + s_0$) 和速度条件 ($v_{\text{快}} \leq v_{\text{货}}$). 设快车制动后的加速度大小为 a_2 , 由上述两条件得

$$v_2 t - \frac{1}{2} a_2 t^2 \leq v_1 t + s_0,$$

$$v_2 - a_2 t \leq v_1.$$

当制动加速度最小时, 这两个不等式就可改为等式, 联立即可得出

$$a_{2\min} = \frac{(v_2 - v_1)^2}{2s_0} = \frac{(20 - 8)^2}{2 \times 600} \text{米/秒}^2 = 0.12 \text{米/秒}^2.$$

上面的计算是以地面为参照物, 两者做着不同的运动, 需通过联立方程求解. 如果转换一个角度去研究这个问题, 求解过程可以变得更为简捷.

解答 以货车为参照物时, 快车制动后相对于它以初速 $v_0 = v_2 - v_1$ 、加速度 a_2 驶来, 经位移 s_0 后的末速 $v_t = 0$ (即与货车相对静止). 于是立即可由公式 $v_t^2 - v_0^2 = 2as$ 得快车制动加速度的最小值为

$$a_{2\min} = \frac{(v_2 - v_1)^2}{2s_0} = 0.12 \text{米/秒}^2.$$

变速换成
匀 速

若两个(或几个)不同的运动物体,都含有相同的分运动,那么彼此以自身为参照物观察对方的运动时,一定条件下就能把原来对地的变速运动转换成相对的匀速运动.

例题 3 如图 26 所示, A 、 B 两棒长均为 $l = 1$ 米, A 的下端和 B 的上端相距 $s = 20$ 米. 若 A 自由下落的同时, B 以初速 $v_0 = 40$ 米/秒竖直上抛, 求两棒从开始相遇到分离(相当“擦肩而过”)的时间.

分析 以地面为参照物时, A 、 B 两棒分别做着不同的运动. 从相遇时刻起, A 棒向下做初速不为零的匀加速运动, B 棒向上做匀减速运动, 在“擦肩而过”的时间 Δt 内两者位移之和为 $2l$. 即

$$v_A \Delta t + \frac{1}{2} g \Delta t^2 + \left(v_B \Delta t - \frac{1}{2} g \Delta t^2 \right) = 2l,$$

式中 $v_A = gt$, $v_B = v_0 - gt$. 这里的 t 就是从开始运动到相遇的时间, 可由下式得出:

$$\frac{1}{2} gt^2 + \left(v_0 t - \frac{1}{2} gt^2 \right) = s.$$

这样的解法显然较麻烦, 还常会误认为从相遇开始 A 棒仍做自由落体而造成错误. 为此, 同样可变换一个角度, 改为以 A 棒为参照物.

解答 由于竖直上抛运动是一个竖直向上的匀速直线运动和自由落体的合运动, 当以 A 棒为参照物时, B 棒相对 A 做着以 v_0 为初速的匀速直线运动. 于是, 立即可求出“擦肩而过”的时间为

$$\Delta t = \frac{2l}{v_0} = \frac{2 \times 1}{40} \text{秒} = 0.05 \text{秒}.$$



图 26

(2) 变换参数

描述一个物体的运动,可以选用不同的参数.譬如,为了反映一个做匀速圆周运动物体运动的快慢,既可以用转速或周期表示,也可以用线速度或角速度表示.一个物体做平面运动,既可以用直角坐标系中的两个参数 x 、 y 去确定它的位置,也可以用极坐标中的矢径 r 和角度 θ 去确定它的位置,两者的关系(图 27)为

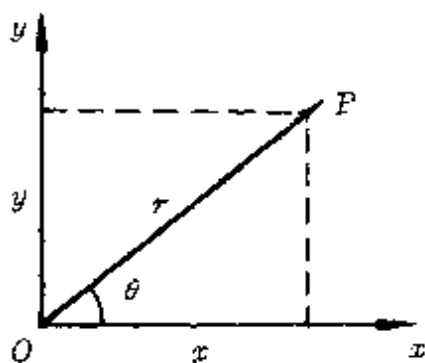


图 27

$$x = r\cos\theta, \quad y = r\sin\theta.$$

灵活选用(或变换)不同的参数,也是转换角度考虑问题的一个方面,在中学物理中应用得相当普遍.

非线性关系
线性化

物理实验中常采用变换参数法使非线性化关系线性化,以便把原来不易描绘或不易看出关系的曲线图象转换成直线图象.

例如,在验证牛顿第二定律的实验中,外力一定时,根据运动物体的质量与加速度的一组数据(下页表 1),取横坐标表示质量 m ,纵坐标表示加速度 a ,画出的图象是一条曲线(图 28).我们很难从这个图象得出 a 与 m 间有什么定量关系.如果注意到图象中显示出一个量增大,另一个量减小的情况,猜测其间可能存在着反比关系,我们可以变换一下参数,改用 $\frac{1}{m}$ 与 a 的一组数据(表 2),

作出 $a - \frac{1}{m}$ 图象(图 29).结果得到一条通过原点的倾斜直线,

表 1

m (千克)	a (米/秒 ²)
0.300	1.20
0.400	0.92
0.500	0.81
0.600	0.71
0.700	0.62

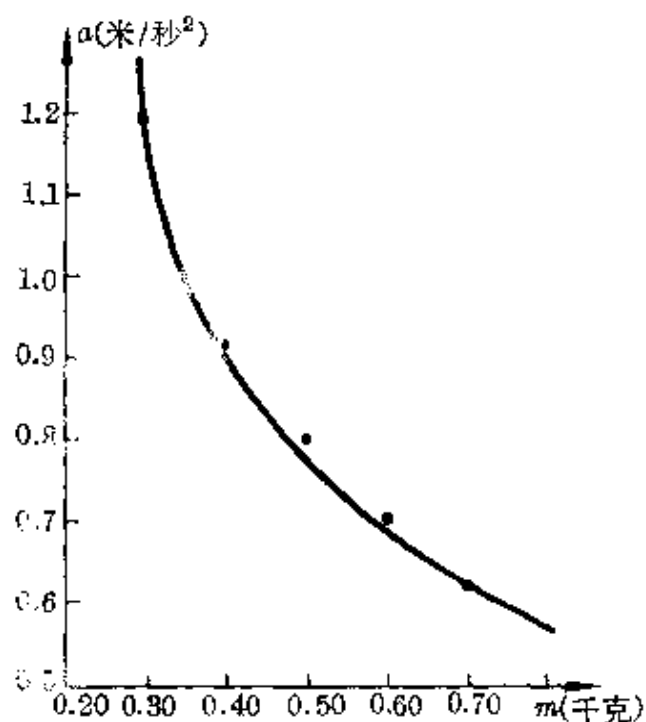


图 28 $a-m$ 图象

表明在外力一定时,物体的加速度与其质量成反比.

表 2

$1/m$ (千克 ⁻¹)	a (米/秒 ²)
3.33	1.20
2.50	0.92
2.00	0.81
1.67	0.71
1.43	0.62

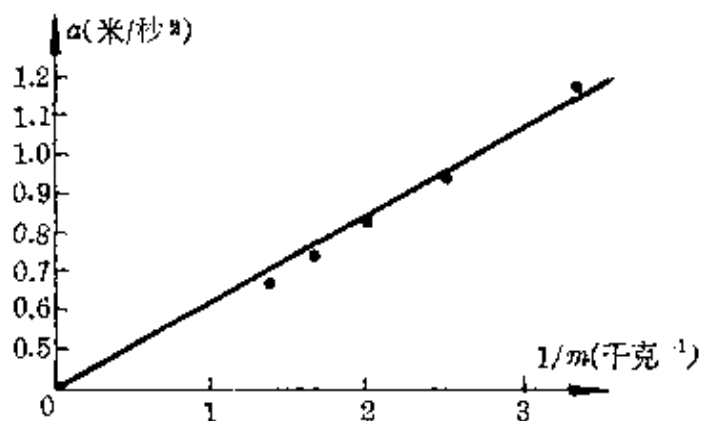


图 29 $a - \frac{1}{m}$ 图象

同样,在用单摆测定重力加速度的实验中,由周期公式

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

$$\text{得 } T^2 = 4\pi^2 \frac{l}{g} = cl, \quad \left(c = \frac{4\pi^2}{g} \right)$$

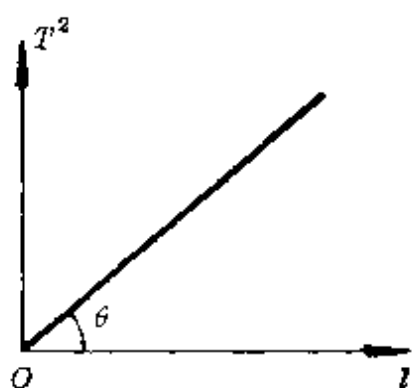


图 30 单摆的摆长与 T^2 的关系

这就是说,重力加速度一定时,单摆周期的平方与摆长成正比.因此若变换参数,以 T^2 为纵轴, l 为横轴,在 $T^2 - l$ 直角坐标系内画出的图象是一条过原点的倾斜直线(图 30),其斜率

$$k = \text{tg}\theta = \frac{4\pi^2}{g}.$$

所以,实验中也可以改变摆长,测出周期,通过画出 $T^2 - l$ 图象去确定重力加速度.

类似的应用很多,例如:

在验证玻意耳定律时,把原来的参数(p 、 V)变换成新的参数(p 、 $\frac{1}{V}$)后,在 $p - \frac{1}{V}$ 直角坐标平面内画出的就是一条斜直线;

在研究透镜成像时,把原来成像公式 $\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}$ 中的参数(u 、 v)变换成新的参数($x = \frac{1}{u}$ 、 $y = \frac{1}{v}$)后,则在 $x - y$ 直角坐标平面内画出的也是一条直线.

简化与引申

通过变换参数(或定义一些新的物理量),常能简化物理公式或对物理公式赋予新的意义.例如:

在薄透镜成像规律的研究中,常用的是高斯公式,即

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}.$$

如果我们对参数作一变换,如图 31 所示,令

$$u = x + f, v = x' + f.$$

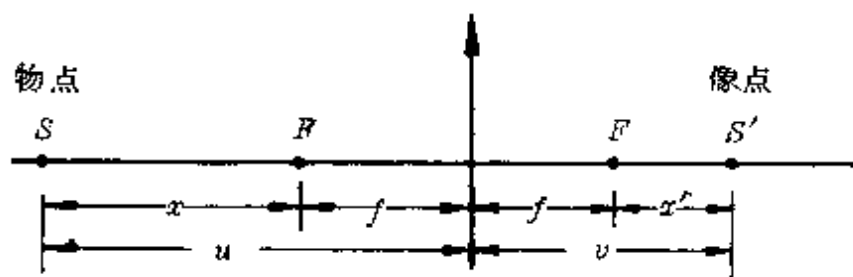


图 31

把它们代入高斯形式的透镜公式中,即

$$\frac{1}{x+f} + \frac{1}{x'+f} = \frac{1}{f},$$

化简整理得

$$xx' = f^2.$$

这就是薄透镜公式的牛顿形式,在已知透镜焦距时,可以更方便地从物点位置找出像点位置,如下表所示.

x	0	f	$2f$	$3f$...	nf	∞
x'	∞	f	$f/2$	$f/3$...	f/n	0

上述的牛顿公式,就是一个以 x 、 x' 为变量的双曲线方程,我们很容易画出它的图象,如图 32 所示.从这个图象上可以看出:

当物距 $u > 2f$ 时,物距的很大变化只能引起像距的微小变化;

当物距 $f < u < 2f$ 时,物距的微小变化,却可以引起像距的很大变化;

当物距 $u < f$ 时,像距是负的,说明是虚像.

当物距从 $u > 0$ 逐渐向 $u = f$ 靠拢时,物距的微小变化同样会引起像距很大的变化.

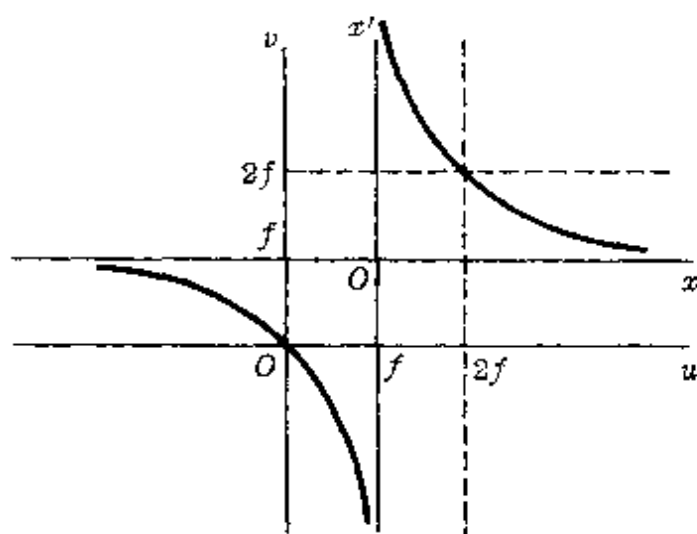


图 32

从牛顿公式画出的这个图像,可以更直观地了解像距随物距变化的趋势。

通过变换参数,对物理公式引发出新的意义,最著名的例子当推瑞典光谱学家里德伯(J. Rydberg, 1854—1919)对巴耳末公式的变换了。

1884年,巴耳末(J. J. Balmer, 瑞士, 1825—1898)根据氢光谱谱线的波长分布,找出了一个波长的经验公式

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

后来,里德伯把上述公式中的波长用其倒数(称为波数)表示,得

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

这样一个变换,把氢光谱中巴耳末线系的波数表示成两项之差,光谱分布的分立性立即被显现出来了,玻尔(N. Bohr, 丹麦, 1885—1962)正是在巴耳末公式的启发下,创造性地提出了新的原子理论。

解题应用

变换参数在中学物理解题中同样很有意义。

例题 如图 33 所示电路, $R_1 = 3000$ 欧, 电压表

V_A 的内阻 $R_A = 6000$ 欧, V_B 的内阻 $R_B = 3000$ 欧. 已知 S_1 断开, S_2 接 A 时, 电压表 V_A 的示数是 $U_A = 4$ 伏; S_1 合上, S_2 接 A 时, 电压表 V_A 的示数是 $U_A' = 8$ 伏; S_1 合上, S_2 接 B 时, 电压表 V_B 的示数是 $U_B = 7.5$ 伏, 求电阻 R_2 的值.

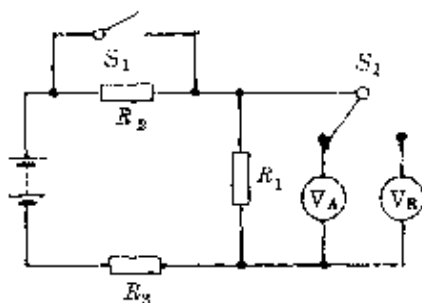


图 33

分析与解答 S_2 接 A、B 时, R_1 分别与电压表 A、B 的内阻并联, 其值分别为

$$R_1 // R_A = \frac{R_1 R_A}{R_1 + R_A} = \frac{3000 \times 6000}{3000 + 6000} \text{ 欧} = 2000 \text{ 欧},$$

$$R_1 // R_B = \frac{R_1 R_B}{R_1 + R_B} = \frac{3000 \times 3000}{3000 + 3000} \text{ 欧} = 1500 \text{ 欧}.$$

设电源电动势为 \mathcal{E} , 内阻为 r , 则

S_1 闭合, S_2 接 A 时, 由闭合电路欧姆定律得

$$\mathcal{E} = U_A' + \frac{U_A'}{R_1 // R_A} (R_3 + r) = 8 + \frac{8}{2000} (R_3 + r). \quad (1)$$

S_1 闭合, S_2 接 B 时, 同理得

$$\mathcal{E} = 7.5 + \frac{7.5}{1500} (R_3 + r). \quad (2)$$

S_1 断开, S_2 接 A 时, 得

$$\mathcal{E} = 4 + \frac{4}{2000} (R_2 + R_3 + r). \quad (3)$$

在①—③这三个独立方程中, 包含着四个未知数 \mathcal{E} 、 r 、 R_2 、

R_3 , 通常无法求解. 我们注意到每个方程中都含有 $(R_3 + r)$ 这一项, 如果作一参数变换, 令 $R_3 + r = R$, 这样就变成只有三个未知数 (ξ, R_2, R) . 因此, 用上述三个方程就可联立得解: $R_2 = 2500$ 欧.

(3) 等效变换

这是从效果相同得出的变换, 如物理学中的合力与分力、合速度与分速度、等效摆长、等效电容(总电容)、等效电阻(总电阻)、等效电源、等效电路、组合透镜以及一些平均量、有效值概念等. 这种变换不拘一格、形式多样, 仅是针对研究问题的需要, 从某种效果出发引入的, 并不意味着两者的各个方面或自始至终都等效. 有关这方面的详细阐释和具体应用, 读者可参阅本丛书《等效》一册.

3. 发散联想

有一个古老的传说: 国王为了评判他的三个王子的智慧, 给三个王子同样的不多的钱, 要求他们去买到尽可能多的装满一个房

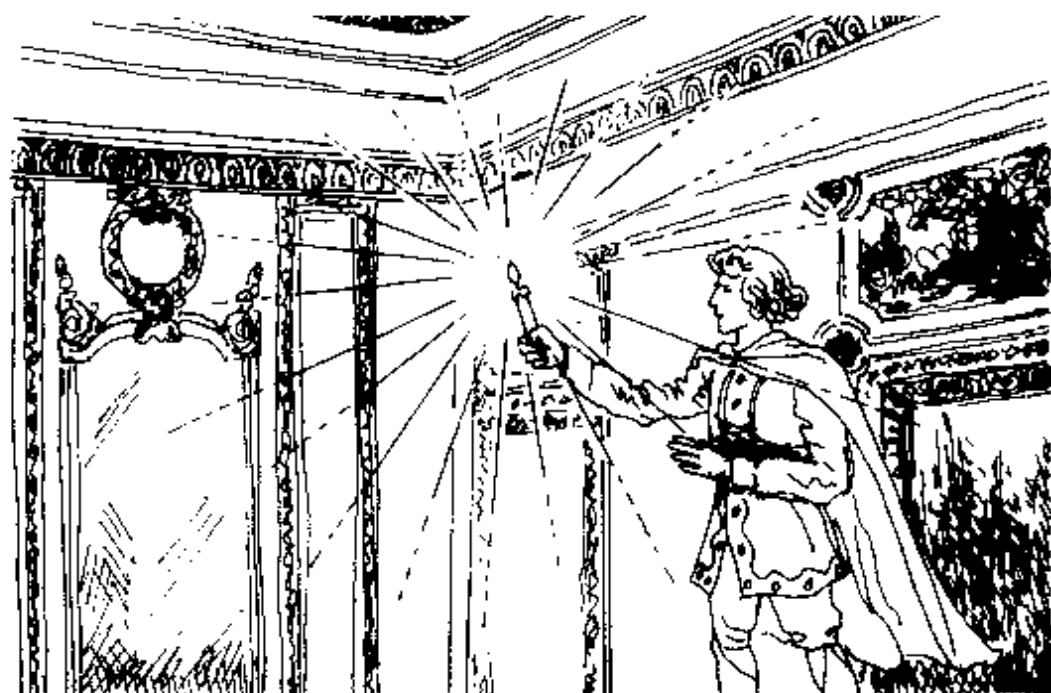


图 34 三王子的蜡烛

间的东西.几天后,国王去检查了,大王子买来了一大堆木柴,只堆放在房间的一个角落,国王摇了摇头;二王子买来了许多桶水,倒在地上只有浅浅的一层,国王皱了皱眉;三王子只买了一只蜡烛,他点燃蜡烛照亮了房间的每个角落,国王满意地笑了.

三王子的成功就在于他能够不落俗套,不拘一格,这就是一种发散性思维.

变通性
独特性

发散思维的一个显著特点,是思维的变通性和独特性.它不受常规束缚,善于从不同角度思考,勇于采用与众不同、前人不同的方法,独具卓识.故事中的三王子意识到只用很少的钱买实物去堆满房间是困难的,巧妙地改用烛光代替实物,充分显示了他变通之灵活,构思之独特.

在中学物理中,无论是实验或演算(解题),也非常需要这种变通性和独特性.下面我们通过具体问题加以说明.

例题 1 实验室里提供下列器材:磁钢(质量 m 已知)、铜螺帽、细铜线、支架、铁板、有机玻璃垫块(厚 5.0×10^{-3} 米).设计一个实验,测出磁钢底部离铁板 5.0×10^{-3} 米时,磁钢与铁板相互吸引的磁力的近似值.

分析与解答 要求测定磁钢底部离铁板 5.0×10^{-3} 米时的磁力,可以用细铜线将磁钢吊在铁板上方 5.0×10^{-3} 米处(可借助有机玻璃垫板).由于没有测力计,无法直接测量,必须变通地采用其他办法.

因磁钢吸引铁板,铁板也以同样大小的力吸引磁钢,对悬挂的磁钢相当于地球对它的重力增加了.设这时的重力加速度为 g_m 、磁力为 F_m ,则

$$mg + F_m = mg_m,$$

即

$$F_m = m(g_m - g). \quad \textcircled{1}$$

可见,只要设法测出此时的等效重力加速度 g_m ,也就可算出相互作用的磁力了.

为此,可使吊起的磁钢在铁板上方做小振幅的振动.根据单摆的周期公式,对应于重力加速度 g_m 的振动周期

$$T_m = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g_m}},$$

则
$$g_m = \frac{4\pi^2 l}{T_m^2}. \quad (2)$$

如果能测出摆长 l 、振动周期 T_m ,也就可算出等效重力加速度 g_m 的值了.可是实验室中没有提供米尺和秒表,于是,要又一次地采用变通办法.

用细铜线吊起铜螺帽构成一个普通单摆,设法使两摆长度相同,对普通单摆,由

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

则
$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}. \quad (3)$$

将②、③两式相比,得

$$g_m = \left(\frac{T}{T_m}\right)^2 g. \quad (4)$$

这样,对 g_m 的测量转换成对两摆周期的测量,也就可避开没有米尺测摆长 l 的困难了.

为了不用秒表测量周期,也许会很自然地想到用自己的脉搏.不过实验中规定必须用它所提供的器材,于是得再一次地作变通考虑.

如果我们使两摆从平衡位置的同-方同时开始摆动,因 $g_m >$

g , 故 $T_m < T$, 很快两摆就不再同步. 当普通摆摆动 n 个周期使两摆再次同步时, 磁单摆摆动的次数应为 $(n+1)$. 由

$$nT = (n+1)T_m.$$

得
$$\frac{T}{T_m} = \frac{n+1}{n}. \quad (5)$$

这样就可又一次摆脱没有秒表的困难, 只需数出摆动的次数.

联立①、④、⑤三式, 即可得出磁力近似值的表达式

$$F_m = m(g_m - g) = m \left[\left(\frac{n+1}{n} \right)^2 - 1 \right] g.$$

例题 2 用一根细线悬挂一个小球, 将细线拉至水平位置使线刚好伸直, 无初速地释放小球, 试问: 当细线与竖直方向间的夹角 θ 多大时, 小球的竖直分速度最大?

分析与解答 设当小球摆至细线与竖直方向间夹角为 θ 时, 小球的竖直分速度 v_y 最大, 常规方法由机械能守恒和速度的分解可得

$$v_y = v \cos(90^\circ - \theta) = v \sin \theta = \sqrt{2gl \cos \theta} \sin \theta.$$

然后作三角变换, 求出极值条件, 这样的解法数学处理上较为麻烦.

一个学生很有创见地想出了一个独特的方法. 根据力的独立作用原理, 小球摆动中的竖直加速度由重力与线中弹力的竖直分力产生, 即

$$a_y = \frac{mg - T \cos \theta}{m}.$$

当 $mg > T \cos \theta$ 时, $a_y > 0$, 小球的竖直分速度将增大, 直到 mg

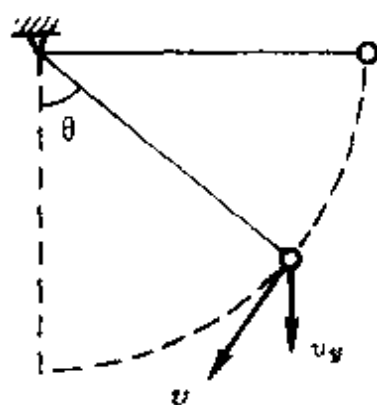


图 35

= $T \cos \theta$ 时为止. 所以竖直分速度达最大的力学条件是

$$mg = T \cos \theta.$$

结合圆运动特性和机械能守恒, 即

$$T - mg \cos \theta = m \frac{v^2}{l},$$

$$\frac{1}{2} mv^2 = mgl \cos \theta.$$

联立三式, 即可解出极值条件

$$\theta = \cos^{-1} \frac{\sqrt{3}}{3}.$$

上述两个问题, 如果缺乏思维的独特性和变通性, 囿于常规的框架内, 是很难顺利解决的.

连动性
跨越性

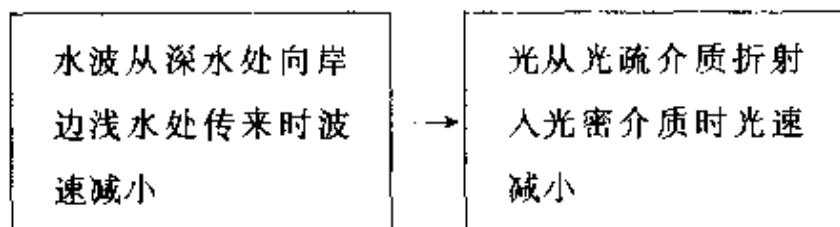
发散思维的另一个显著特点是思维的连动性和跨越性. 它能自如地“由此思彼”, 并且常能出乎意料地跨越不同事物的界限, 把表面上风马牛不相及的事物巧妙地联系在一起. 物理学巨人牛顿(I. Newton, 英国, 1642—1727)跨越了空间, 把地面上物体的运动与天体的运动联系起来. 麦克斯韦(J. C. Maxwell, 英国, 1831—1879)把看不见的电磁波与看得见的光结合在一起. 德国物理学家劳厄(M. V. Laue, 1879—1960)在晶体与X射线间架起了桥梁, 做出了著名的一箭双雕的实验. 德布罗意(L. de Broglie, 法国, 1892—1986)从光的波粒二象性联想到微观粒子的波动性, 进而提出物质波的新观点. 爱因斯坦(A. Einstein, 德国, 1879—1955)从青年时代起心中就充满了探索自然界统一性的乐趣, 认为“那是一种壮丽的感觉”, 因此, 他在取得创立狭义相对论和广义相对论的划时代成就后, 又开拓了对统一场论这一崭新

方向的研究,并几乎耗费了他后半生的全部心血*,物理学家在研究工作中所体现出来的思维的连动性和跨越性随处可见。

发散思维的这一特点,在中学物理中具体体现在两方面。一是分析、研究问题时的纵向深入——从特殊到一般;二是建立各知识点的横向联系——知识的迁移和扩散。下面我们也通过对具体问题的研究阐释发散思维这一特点的体现。

例题 1 试解释在浅海滩边,不论海中的波浪向什么方向传播,当到达岸边时总是沿着大约垂直于岸的方向传来(提示:波在浅水中传播时,水越浅波速越小)。

分析与解答 题直接论证,不仅缺乏感性认识,也缺乏数学工具,因此是极为困难的。为了能从中学数理知识上予以解释,我们可以根据水波在浅水中的传播特性把它与光在不同介质中的传播作一类比联想:



因此,如果一束光在折射率不断递增的介质中传播时,其折射线将逐渐靠拢法线,即越来越趋向于垂直介质界面的方向,如图 36(a)所示。

同理可知,水波从深水处向浅水处传播时,不论原来水波的方向如何,总会变得越来越沿着垂直河岸的方向传播。

* 在爱因斯坦时代,人们仅知道电磁场和引力场,尚未发现弱力场和强力场,要实现统一场论——尽管爱因斯坦倡导的仅是统一电磁场和引力场(称几何统一场论)——确是有很困难,不过爱因斯坦的卓绝创见表明他的思想远远超越了同时代人,今后爱因斯坦的思想必将以新的形式得以实现。

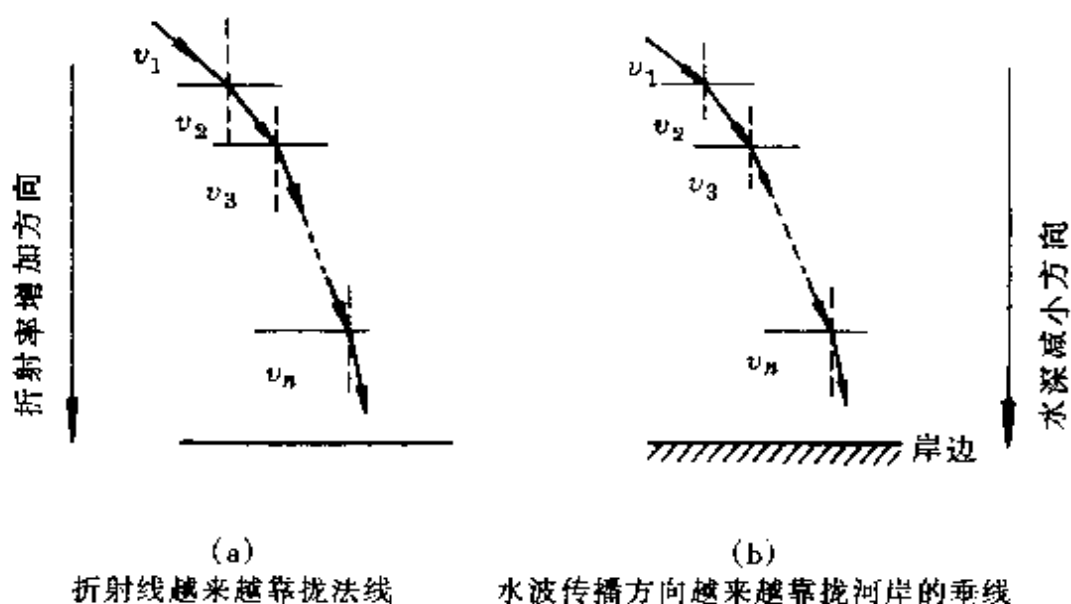


图 36

把水波的传播与光的传播联系起来,这种知识迁移正是发散思维的连动性和跨越性的表现.我们正是依靠这一联系,才能轻松自如地解释水波在浅水滩中靠岸时的传播特点.否则,几乎一筹莫展.

例题 2 真空中 A 、 B 两点与场源点电荷 Q 在一直线上, AB 相距 $d = 12$ 厘米,已知 A 、 B 两点的场强大小之比 $\frac{E_A}{E_B} = 4$,试求场源电荷 Q 的位置.

解答 设场源电荷的位置 P 点离 A 点距离是 r_1 ,离 B 点距离是 r_2 .由 $E_A = 4E_B$,即

$$k \frac{Q}{r_1^2} = 4k \frac{Q}{r_2^2},$$

得 $r_2 = 2r_1$. ①

因 A 、 B 、 P 三点在一直线上且满足条件 $r_2 = 2r_1$ 时有两种可能,分别如图 37(a)与(b)所示.

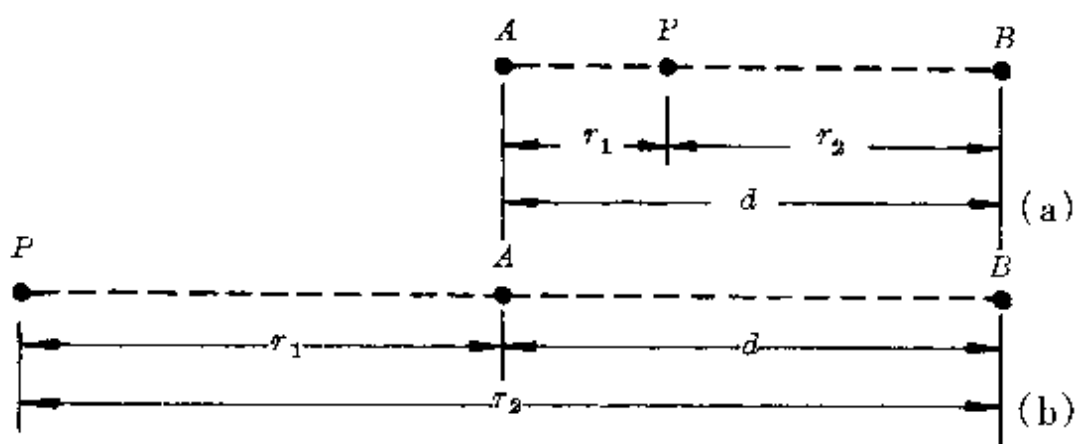


图 37

对情况(b), 由

$$r_1 + r_2 = d, \quad (2)$$

联立①、②两式得

$$r_1 = \frac{d}{3} = 4 \text{ 厘米}, r_2 = 2r_1 = 8 \text{ 厘米}.$$

对情况(a), 由

$$r_2 - r_1 = d, \quad (3)$$

联立①、③两式得

$$r_1 = d = 12 \text{ 厘米}, r_2 = 2d = 24 \text{ 厘米}.$$

发散 题中 A 、 B 两点限制在与场源电荷一直线上, 注意到有两种可能情况, 已是一种浅层次的发散. 如果我们把题中条件放宽一些, 就可以由此找出更一般的关系.

(1) A 、 B 、 P 三点在同一水平面内, 但不一定在同一直线上.

如图 38 所示, 以 A 为原点、 AB 为 x 轴建立直角坐标系, 设 Q 所在 P 点的坐标为 (x, y) .

$$\text{因为 } r_1^2 = x^2 + y^2,$$

$$r_2^2 = (d - x)^2 + y^2,$$

又 $r_2 = 2r_1$,

整理后可得

$$\left(x + \frac{d}{3}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{2}{3}d\right)^2.$$

这是一个圆方程, 圆心坐标为 $\left(-\frac{d}{3}, 0\right)$, 即 $(-4 \text{ 厘米}, 0)$, 半

径 $R = \frac{2}{3}d = 8 \text{ 厘米}$.

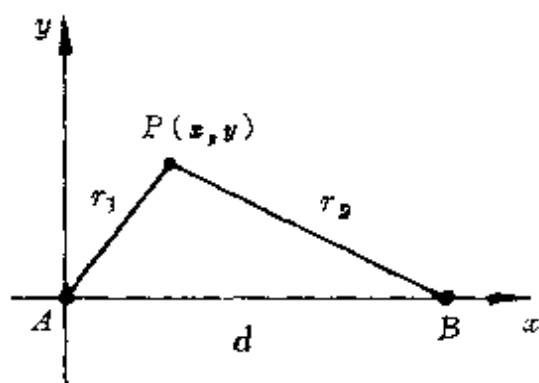


图 38

所以, 当 A 、 B 、 P 三点在同一平面上时, 满足 $E_A = 4E_B$ 的场源电荷, 可以在以 A 为原点、 AB 为 x 轴的坐标面内的一个圆周上变动.

这样, 我们就把场源电荷从原来限制在两个确定的“静态位置”扩散到可在一个圆周上的一系列“动态位置”. 显然, 这个结果应该包含着前面 A 、 B 、 P 三点在一直线上的情况. 由 P 的轨迹方程和 AB 直线方程, 即

$$\left(x + \frac{d}{3}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{2}{3}d\right)^2,$$

$$y = 0,$$

联立即得

$$x_1 = \frac{1}{3}d, \quad x_2 = -d.$$

这就是前面的结果.

(2) A 、 B 、 P 三点既不在同一直线上, 又不在同一个平面内.

如图 39 所示, 以 A 为原点、 AB 为 x 轴建立空间直角坐标系, 设 Q 所在 P 点的坐标为 (x, y, z) .

因为 $r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2$,

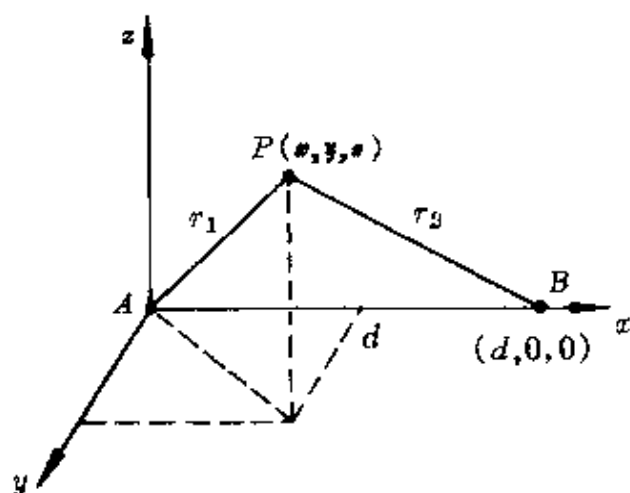


图 39

$$r_2^2 = (d-x)^2 + y^2 + z^2.$$

又 $r_2 = 2r_1,$

三式联立后整理得

$$\left(x + \frac{d}{3}\right)^2 + y^2 + z^2 = \left(\frac{2}{3}d\right)^2.$$

这是一个球方程,球心在 $\left(-\frac{d}{3}, 0, 0\right)$,半径 $R = \frac{2}{3}d$.也就是说,当 A, B, P 处于三度空间中时,满足 $E_A = 4E_B$ 的场源电荷的点的轨迹是一个球.显然,这个结果更为普遍,它包含着前面两种情况.即

当 $z = 0$ 时,转化为圆方程

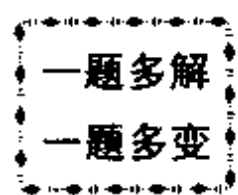
$$\left(x + \frac{d}{3}\right)^2 + y^2 = \left(\frac{2}{3}d\right)^2;$$

当 $y = z = 0$ 时,就得到一直线上的结果

$$\left(x + \frac{d}{3}\right)^2 = \left(\frac{2}{3}d\right)^2 \Rightarrow x = \frac{d}{3} \text{ 或 } x = -d.$$

这样,仿佛使我们从原来局限于一直线上的单向思维“立体

化”起来了,像烛光一样地辐射到整个空间.



中学物理中引人入胜的一题多解和一题多变,可以认为是生动、浅显、全面地体现了发散思维的特点.

一题多解主要有两条途径.一是运用同一物理规律作不同角度的思考;二是运用不同物理规律从不同角度去思考.

一题多变就是在原题的基础上,作多角度、多方向、多层次的变化、引申、扩展.它们与原题不仅有着物理内涵上的密切关联,而且“衔接”应该十分自然、平滑,使人有豁然开朗、美景数不胜数之感.

这两方面在中学物理中都有着丰富的实例.

例题 如图 40 所示,质量为 m 的物体 A 以速度 v_0 在平台上运动,滑到与平台等高、质量为 M 的静止小车 B 上.小车 B 放在光滑水平地面上,物体 A 与 B 之间动摩擦

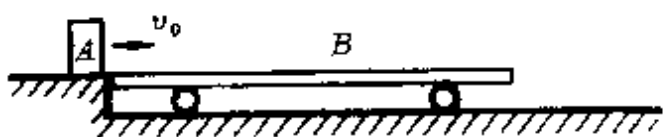


图 40

摩擦因数为 μ . 不计 A 的体积,为使 A 在小车 B 上不致滑出,试问小车 B 的长度 l 至少为多少?

分析 A 滑上 B 后, A 受到 B 的摩擦力做匀减速运动,速度逐渐减小; B 受到 A 的摩擦力做匀加速运动,速度逐渐增大. 如 A 滑到 B 的最右端时,两者刚好速度相同,处于相对静止状态, A 就不致从 B 上滑出. 设 A 、 B 相对静止时的共同速度为 v , 由于 A 、 B 相互作用中水平方向不受外力,动量守恒. 由

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

得
$$v = \frac{mv_0}{m + M}.$$

设在这个过程中小车 B 的位移为 s_B , 物体 A 的位移为 s_A , 则 $s_A = s_B + l$ (图 41). 为求解车长 l , 可以有多种方法.

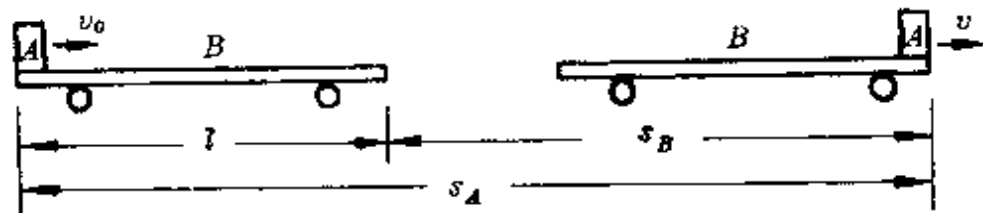


图 41

解法(1) 用牛顿第二定律结合运动学公式:

$$\text{对物体 } A \quad -\mu mg = ma_A, \quad \text{得} \quad a_A = -\mu g.$$

$$\text{对小车 } B \quad \mu mg = Ma_B, \quad \text{得} \quad a_B = \frac{\mu mg}{M}.$$

两者相对静止时, 满足条件

$$v^2 - v_0^2 = 2a_A(s_B + l), \quad \text{得} \quad s_B + l = \frac{v^2 - v_0^2}{2a_A}.$$

$$v^2 = 2a_B s_B, \quad \text{得} \quad s_B = \frac{v^2}{2a_B}.$$

联立四式得

$$\begin{aligned} l &= \frac{v^2 - v_0^2}{2a_A} - \frac{v^2}{2a_B} = \frac{\left(\frac{mv_0}{m+M}\right)^2 - v_0^2}{2 \cdot (-\mu g)} - \frac{\left(\frac{mv_0}{m+M}\right)^2}{2 \cdot \mu \frac{m}{M} g} \\ &= \frac{Mv_0^2}{2\mu(m+M)g}. \end{aligned}$$

解法(2) 用动能定理:

$$\text{对物体 } A \quad -\mu mg(s_B + l) = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2.$$

$$\text{对小车 } B \quad \mu mgs_B = \frac{1}{2}Mv^2 - 0.$$

两式相加并代入前面的 v 值,得

$$-\mu mgl = \frac{1}{2}(m+M)v^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = -\frac{M}{m+M} \cdot \frac{1}{2}mv_0^2,$$

$$\text{所以 } l = \frac{Mv_0^2}{2\mu(m+M)g}.$$

解法(3) 用动量定理:设从 A 滑上小车 B ,到两者相对静止的时间为 t ,则

$$\text{对物体 } A \quad -\mu mgt = mv - mv_0.$$

$$\text{对小车 } B \quad \mu mgt = Mv - 0, \quad \text{得 } t = \frac{Mv}{\mu mg}.$$

$$\text{小车位移 } s_B = \bar{v}_B t = \frac{v}{2} \cdot \frac{Mv}{\mu mg} = \frac{Mv^2}{2\mu mg}.$$

$$\text{物体位移 } s_A = \bar{v}_A t = \frac{v_0 + v}{2} \cdot \frac{Mv}{\mu mg} = \frac{Mv_0 v + Mv^2}{2\mu mg}.$$

$$\text{所以 } l = s_A - s_B = \frac{Mv_0 v}{2\mu mg} = \frac{Mv_0^2}{2\mu(m+M)g}.$$

解法(4) 运用 $v-t$ 图线:

作出物体 A 与小车 B 的 $v-t$ 图(图 42).小车的长 l 数值上等于图中划有斜线的三角形面积.

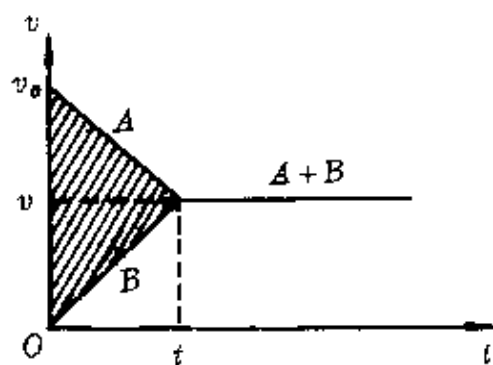


图 42

$$\text{所以 } l = \frac{1}{2}v_0 t$$

$$= \frac{1}{2}v_0 \cdot \frac{Mv}{\mu mg}$$

$$= \frac{Mv_0^2}{2\mu(m+M)g}.$$

说明 这是一个很典型的一题多解问题.上面分别应用了力

和运动关系的三条线索*及运动图象求解,几乎综合了力学的基本内容.通过一题多解,对知识的变通应用和沟通各部分知识的联系很有作用,这正是一种发散思维的反映.

利用这个题目,还可作许多变化.

变化(1) 已知小车 B 的长度为 l 时,求物体 A 的速度最大为多少时才不致从小车上滑出?

这相当于把原题作逆向变换,所求结果为

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{2\mu(M+m)gl}{M}}.$$

变化(2) 已知小车 B 的长度为 l 时,求物体 A 的速度应为多大,恰能使它停留在小车的中央?

由上面的解答可知,当物体 A 的初速 $v_0 = v_{\max}$ 时,正好滑至小车右端停下,要求物体 A 停在小车的中央,可设想换成一辆长 $l' = \frac{l}{2}$ 的小车 B' ,则停在小车 B' 右端时应满足同样的最大速度条件,即

$$v'_{\max} = \sqrt{\frac{2\mu(M+m)gl'}{M}} = \sqrt{\frac{\mu(M+m)gl}{M}}.$$

懂得了这个道理,可以自由变换成停在车上离右端 $\frac{l}{n}$ 处的任何地方时对物体 A 的速度要求了,也容易找出要求停留在车上什么范围内的速度区间了.例如,当物体 A 的初速满足条件

* 力和运动关系的三条基本线索如下:

力 $\left\{ \begin{array}{l} \text{力的瞬时作用规律——牛顿第二定律} \\ \text{力在位移过程中的积累规律——动能定理} \\ \text{力在时间过程中的积累规律——动量定理} \end{array} \right\}$ 运动

$$\sqrt{\frac{2\mu(M+m)gl}{M}} \geq v_0 \geq \sqrt{\frac{\mu(M+m)gl}{M}}$$

时,物体 A 一定停留在小车的右半部分.

变化(3) 如果把小车 B 分成相同的两节 B_1 、 B_2 ,如图 43 所

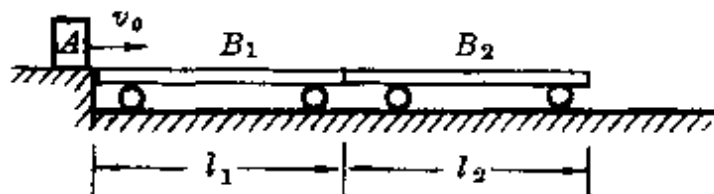


图 43

示.每一节车长 $l_1 = l_2 = \frac{l}{2}$,质量 $M_1 = M_2 = \frac{M}{2}$.那么当已知 A 滑上的初速 v_0 时,为使 A 不滑离小车,车长应为多少?

表面上看,似乎与原题没有什么区别,实质它与原题是不同的.原题中, B 车作为一个整体, A 滑上后 B 车各部分的速度相同.分成两节后, A 滑上后在 B_1 上运动时, A 对 B_1 车面的摩擦力推动 B_1 、 B_2 两节一起运动,此时两节车仍相当于一辆车;当 A 离开 B_1 滑上 B_2 后, A 对 B_2 车面的摩擦力驱使 B_2 部分加速,而 B_1 则保持 A 滑离时的速度匀速运动,此时两节车速不同,将会分离,不能再作为一个整体了.

设 A 滑离 B_1 时的速度为 v_0' ,此时 B_1 、 B_2 的共同速度为 v_1 , A 滑上 B_2 与之相对静止时的速度为 v ,如图 44 所示.

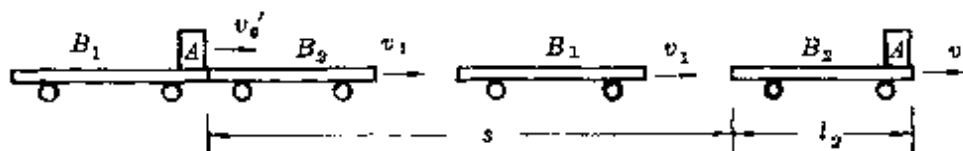


图 44

从 A 滑上 B_1 至 A 滑离 B_1 、最后 A 与 B_2 相对静止的整个过程中, $(A + B_1 + B_2)$ 的整个系统水平方向动量守恒, 则

$$mw_0 = mw_0' + (M_1 + M_2)v_1 = M_1v_1 + (m + M_2)v.$$

从 B_1 、 B_2 分离至 A 、 B_2 相对静止时, 转化成 A 以 v_0' 滑上以 v_1 的速度同向运动的小车 B_2 的问题. 若采用原题解法中用动能定理, 则

$$\text{对物体 } A \quad \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mw_0'^2 = -\mu mg(s + l_2),$$

$$\text{对小车 } B_2 \quad \frac{1}{2}M_2v^2 - \frac{1}{2}M_2v_1^2 = \mu mgs.$$

联立上述诸式, 即可得解.

变化(4) 如果在小车 B 的左端装有一段带光滑曲面的导槽 B' , 已知 B' 的质量为 M' , 当物体 A 从离开车面高 h 处的槽顶端处由静止下滑时, 为不使 A 滑出小车 B , 小车 B 的长度

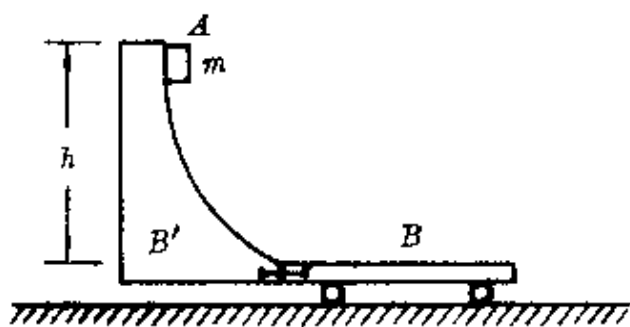


图 45

l 至少为多少? A 与 B 之间的动摩擦因数仍为 μ (图 45).

如果简单地认为此时相当于物体 A 以速度 $v_0 = \sqrt{2gh}$ 滑上静止小车 B , 那就错了. 因为 A 下滑过程中与 $(B' + B)$ 这一整体相互作用, 由水平方向动量守恒, A 滑上 B 时的初速度 $v_0 \neq \sqrt{2gh}$, 且此时小车 B 也不再静止, 而具有与 A 反向的速度, 所以不能简单地照搬原来的结论.

设 A 滑上 B 时的初速为 v_0 , 此时 $(B + B')$ 的共同速度为 u_0 , 则由水平方向动量守恒和机械能守恒知

$$0 = mv_0 + (M + M')u_0,$$

$$mgh = \frac{1}{2}mv_0^2 + \frac{1}{2}(M + M')u_0^2.$$

联立得

$$v_0 = -\sqrt{\frac{2(M + M')}{M + M' + m}gh},$$

$$u_0 = \sqrt{\frac{2m^2gh}{(M + M')(M + M' + m)}}.$$

两者速度方向相反.因此, A 滑上小车 B 时相当于 A 以 v_0 滑上以速度 u_0 反向运动的小车 B' (质量为 $M + M'$) 上, 如图 46 所示. 显然, 难度又有了提高.



图 46

前面的这几次变化中, 仍保持地面光滑这一限制条件, 因此, 当物体滑上小车后的相互作用中, 系统

水平方向的动量守恒. 如果把条件放宽, 设车与地面间不光滑, 那么又可以作出其他的变化. 这些, 留待读者作进一步研究.

4. 反证归谬

反证 (Reductio ad absurdum) 在数学上用得较早和较多, 在古希腊亚历山大学派的创始人欧几里德 (Euclid, 约前 330—前 257) 的光辉巨著《几何原本》中提出了第 5 公设后*, 历史上有许多数学家曾用反证法企图证明它可证或不可证, 最后并引出非欧几何. 1993 年世界十大科技新闻之一, 就是英国数学家安德鲁·怀尔斯

* 第 5 公设的内容是: 如果一直线和两直线相交, 所构成的两个同侧内角和小于两直角, 那么把这两直线延长, 它们必在两内角一侧相交.

用反证法证明费马大定律完全可以成立*。

一般程式

从思维方法的意义上来讲,反证法就是一种特定的逆向思维方法,也由于这个缘故,本书中专列一小节,通常,反证的基本程式(或步骤)是这样的:

(1)反设——根据原命题提出它的逆命题,假设原命题成立(或正确),则其逆命题也成立(或正确)。

(2)归谬——从假设的逆命题出发,运用已知的定律、公式进行推理,论证逆命题非真,也就是说,设法证明逆命题的不成立(或不正确),归谬的含义也在于此,这是反证法中的一个核心环节,有时,根据它在反证法中所居的地位,也把反证法叫做归谬法。

(3)结论——肯定原命题成立(或正确)。

若以 A 表示原命题, B 表示其逆命题,上述步骤可表示成两种等价的逻辑证明形式:

若 A , 则 B .	若非 A , 则 B .
非 B .	非 B .
所以, 非 A .	所以, A .

解题应用

反证法并不为数学所独有,它作为一种科学的思维方法,在自然科学的许多学科和社会科学中都有应用,同样,在中学物理中也有丰富的实例。

例题 1 如图 47 所示,一光滑小球放在水平桌面上,一部分与倾斜挡板相接触,小球静止时,则挡板与球之间一定无弹力作

* 费马大定律也叫费马猜想,是费马(P. Fermat, 1601-1665)死后后人在其手稿中发现的,用现代术语表示“不可能有满足 $x^n + y^n = z^n$, $xyz \neq 0$, $n > 2$ 的整数 x, y, z, n 存在”。

用.

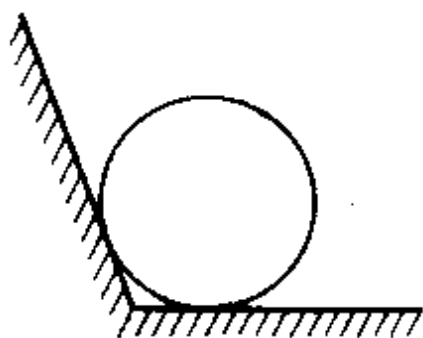


图 47

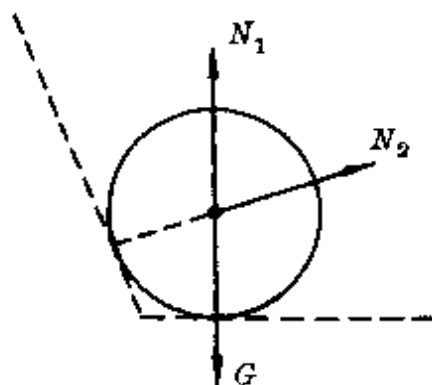


图 48

分析与解答 为了证明倾斜挡板不会对球产生弹力,可先提出它的逆命题——假设对球能产生弹力,设为 N_2 ,其方向垂直挡板斜向上指向球心,如图 48 所示.

这样,小球共受到三个力:重力 G 、水平面的弹力 N_1 、挡板弹力 N_2 .其中 N_2 的水平分力将驱使小球向右加速运动,小球无法在光滑水平桌面上保持平衡,即与题设条件相矛盾(归谬).

所以,倾斜挡板会对球产生弹力的逆命题不成立,即挡板与球之间无弹力作用.

例题 2 如图 49 所示,叠放着的 P 、 Q 两物体一起沿粗糙斜面下滑,则 P 与 Q 之间必存在静摩擦力.

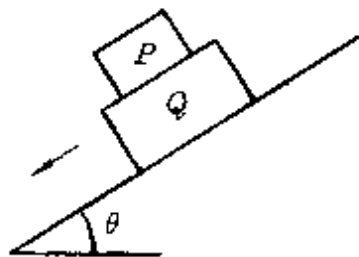


图 49

分析与解答 为了证明题中结论,可先提出它的逆命题——假设 P 、 Q 间不存在摩擦力.

根据这个逆命题可知,物体 P 相当于沿光滑斜面下滑,它的加速度应为

$$a_p = g \sin \theta.$$

由物体 Q 的受力分析可知,它沿斜面下滑的加速度

$$a_Q = \frac{m_Q g \sin\theta - \mu(m_P + m_Q)g \cos\theta}{m_Q}$$

$$= g \sin\theta - \frac{m_P + m_Q}{m_Q} \mu g \cos\theta.$$

因为 $a_Q < a_P$,则两物体必有相对滑动,无法一起沿斜面下滑,它与题中条件相悖(归谬).可见, P 、 Q 之间不可能不存在摩擦力.所以, P 、 Q 两物体能沿粗糙斜面一起下滑时,它们之间必存在静摩擦力.

例题 3 在电场中的导体达到静电平衡时,导体内部一定不存在净电荷,导体表面的场强一定与表面处处垂直.

分析与解答 对于前面一个结论,可先假设导体内部存在净电荷(提出逆命题).则无论这种净电荷为正电荷或负电荷,它周围必形成电场,可画出电场线(图 50),表示导体内部的场强不等于零.由上述逆命题得到的这个结论,与导体在电场中达到静电平衡时导体内部的场强等于零的基本特征相矛盾(归谬).可见,上述逆命题不正确,也就是说导体达到静电平衡时,导体内部不存在净电荷.



图 50

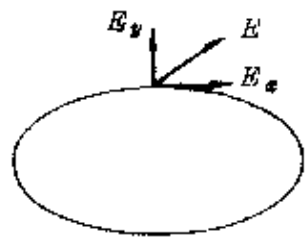


图 51

对于后一个结论,可假设导体表面的场强与表面不垂直(提出逆命题).把导体表面的场强沿着导体表面的切线方向和垂直导体

表面的法线方向分解成 E_x 、 E_y 两个分量(图 51), 其中分量 E_x 使导体表面的电荷受到沿着表面的力, 会驱使电荷沿表面移动(E_y 分量对电荷沿表面的移动不起作用), 从而破坏达到静电平衡的题设条件(归谬), 所以, 导体达静电平衡时, 导体表面的场强一定与表面处处垂直.

例题 4 试证: 不存在电场线是平行直线的非匀强电场.

分析与解答 为了证明上述结论, 可先提出它的逆命题——假设存在电场线是平行直线的非匀强电场, 如图 52 所示, 表示空间各处场强方向处处相同、场强大小从左至右逐渐递减的一个非匀强电场.

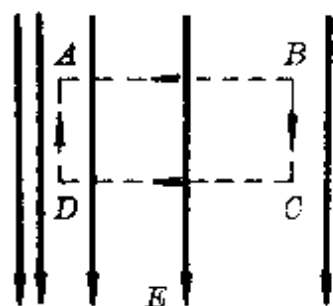


图 52

设想在这个电场中, 沿闭合路径 $ABCDA$ 移动一个电荷, 则在 AB 、 CD 两段, 电场力与位移垂直, 电场力不对电荷做功, 即 $W_{AB} = W_{CD} = 0$. 在 BC 、 DA 两段, 电场力一次做正功, 一次做负功(移动正电荷时 $W_{BC} > 0$, $W_{DA} < 0$). 由于 BC 段的场强弱, AD 段的场强强, 电场力在这两段上做功大小不等, 即 $W_{BC} \neq W_{DA}$. 因此, 这个电荷沿闭合路径 $ABCDA$ 移动一周时电场力做功不等于零, 这与静电场的基本性质——电场力做功与路径无关、沿闭合路径一周电场力做功为零——相矛盾(归谬), 所以, 前面的逆命题不成立, 也就是说, 电场线是平行直线的非匀强电场是不存在的.

四、求异对学习和运用物理知识的指导作用

求异思维,有时也常被人称为发散思维.它的精髓就是不受常规束缚,竭力寻求变异.它可以不受现代知识的局限,不受传统知识和方法的束缚,能多方法、多角度、多层次地提出问题、分析问题和解决问题.求异思维是创造性思维的核心.美国著名心理学家吉尔福特说:“正是在发散思维中,我们看到了创造性思维的最明显的标志.”

求异思维对学习和运用物理知识的指导作用,集中体现在它有助于培养和发展良好的思维素质,即思维的批判性、思维的灵活性、思维的深刻性等教学功能方面.

1. 孕育批判的火种

对传统的理论不盲从,对权威的著作(思想、言论)不迷信,不人云亦云,勇于从被捧为金科玉律的规律中发现异端,揭示矛盾,从而提出新的见解,这就是思维的批判性.

近代科学的奠基人之一的笛卡儿(R. Descartes, 法国, 1596—1650),他的科学方法的出发点就是怀疑精神.他曾这样说过:“要追求真理,我们必须把一生中所有事物都来怀疑一次.”我国著名地质学家李四光生前也有一句名言:“不怀疑,不能见真理.”

如果我们沿着前辈物理学家的足迹,回顾一下物理学的发展

之路,到处可以发现由思维的批判性所引燃的火种是如何蔓延成熊熊大火,并在火光中诞生新的理论的。

伽利略的 起点

伽利略奠定近代实验科学的基础,就是从怀疑亚里士多德的观点开始的。当时,人们都把亚里士多德的字句当成永世不能怀疑的至高无上的真理,伽利略却不同。他在读比萨大学时就指出,亚里士多德生活在 2000 年之前,后来的世界已发生了很大的变化;亚里士多德一生中并没有离开过地中海流域,现在人们已能够环球航行;亚里士多德只了解世界上的一个角落,因此他不可能永远正确,不犯错误。伽利略还能批判地吸收亚里士多德的观点。他说:“……老实说,我赞成看亚里士多德的著作,并精心进行研究。我只是责备那些使自己完全沦为亚里士多德奴隶的人。”正是由于伽利略具有这种科学的批判精神,促使他认真研究了落体运动,完成了斜面实验,纠正了人们对力和运动关系的错误观点,热情捍卫和宣传哥白尼(W. Koppernigk, 波兰, 1473—1543)的学说,开创了实验研究的先风,成为物理学的一代宗师。

霍耳的成功

批判性是科学研究中十分可贵的因素,如果缺乏这种思维的批判性,往往会失去许多宝贵的机遇。例如,关于“霍耳效应”的发现就是一个很耐人寻味的事例。

19 世纪 70 年代末,英国物理学家麦克斯韦(J. C. Maxwell 1831—1879)完成了物理学史上第二次大综合,无疑地被尊为电磁研究方面的权威。英国一位物理学家希望做一个实验,研究磁铁对电流的作用。不过,当他看到权威麦克斯韦在《电磁学》一书中所说的“在导线中流动的电流本身完全不受附近磁场或其他电流的影响”这句话后,立即被权威的结论吓回去了,轻易地放弃了他所萌发的这一个十分有价值的想法。然而,远在大洋彼岸的美国青年霍

耳(E. H. Hall, 1855—1938)却“初生牛犊不怕虎”,面对着权威的著作,对同一课题提出了挑战.这时霍耳年仅 24 岁,是约翰·普霍金斯大学罗兰(H. Rowland, 美国, 1848—1901)教授的研究生,他在罗兰教授指导下,决心用实验探索一下磁场对导体中电流的影响.

当时,还没有发现电子,对金属导体的导电机制是不清楚的.霍耳设想,如果固定在导体中的电流本身被磁场吸引,由于电流被拉向导线的一侧,因而电阻会增大.霍耳做了许多次试验.他先是在磁场中放进一个通以电流的银制扁平螺线;后来改为在磁场中放进一个通以电流的金属圆盘.这些实验中均未发现有电阻增大的现象.后来他改用薄金箔代替,现象出现了.如图 53 所示,当放在磁场

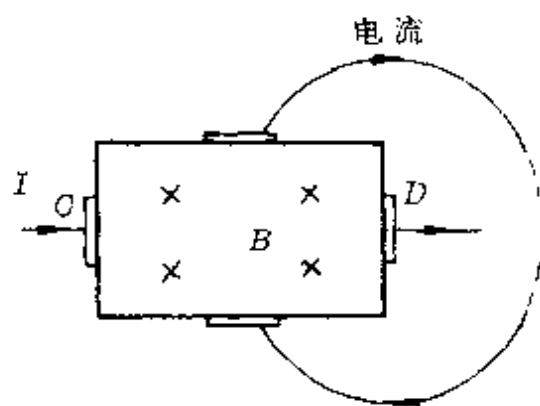


图 53 霍尔实验示意图

中(方向垂直磁场)的金箔通以从左向右的电流时,在垂直电流方向的金箔两侧会出现电势差,因而能形成电流.

这一实验现象,后来被人们称为霍耳效应.著名英国物理学家开尔文(L. Kelvin, 1824—1907)曾给予霍耳高度的评价,认为霍耳的发现,简直可以和法拉第(M. Faraday, 英国, 1791—1867)的发现相比拟.

霍耳的成功在于他不迷信权威,勇于从权威的著作中找寻疑点*,深入探究.这无疑是他所具有的思维批判性的一次胜利.

* 当时,瑞典物理学家爱德朗在一篇文章中说:“磁铁作用在固态导体中的电流上,恰如作用在自由运动的导体上一样.”这个说法正与麦克斯韦相反.

可贵的
闪光点

思维的批判性在学习中有着极为重要的意义.可以这么说,在任何新知识面前,都需要和应该进行一番批判性的思考.因此,学习中产生的每一个疑团,都是一个可贵的闪光点,只有设法不断地消除(或解开)疑团,才能心悦诚服地愉快地接受新的知识,牢固地烙在自己的脑海中.这方面,在中学物理教学中是不乏先例的.

例如,学习牛顿第三定律时,对两个具体物体间的作用与反作用较容易理解,关于液体对其中物体的浮力的反作用,由于不易觉察它的存在,一些学生常不那么信服,以致在分析具体问题时往往漏掉浮力的反作用.解开这个疑团的办法可以用实验验证.如图54所示,在托盘秤上放半杯水,其视重为 W_1 .另用弹簧秤吊起一铁块,其示重为 W_2 .然后,把弹簧秤吊起的铁块浸入水中,可以看到:弹簧秤的示重减小为 W'_2 .而托盘秤上的示重增大为 W'_1 ,并且在误差允许的范围内, $W_2 - W'_2 = W'_1 - W_1$.这就是说,对弹簧秤所减少的拉力恰等于对托盘秤所增加的压力,这正是浮力的作用与反作用的结果.学生信服了,知识也巩固了.

又如,一些学生观看过气功师的表演:一位气功师仰卧在钉有许多大铁钉的木板上,身上再压上一块大石头,旁边的助手抡起大锤猛击石头,石块被打碎,气功师却安然无恙.许多学生兴高采烈地拍手叫好,又暗暗称奇甚至窃窃私语,认为其中有诈.其实,气功师的表演完全是真实的,当然,抡锤的助手的配合也很重要.这里,既是气功师确有本领——能仰卧在钉板上不被刺伤、能顶起大石块的千斤之重,也借助了物理学上的原理.

根据动量定理

$$F\Delta t = \Delta mv \text{ 或 } F\Delta t = m\Delta v,$$

当 m 一定,力的作用时间 Δt 极短时,即使作用力 F 很大,力

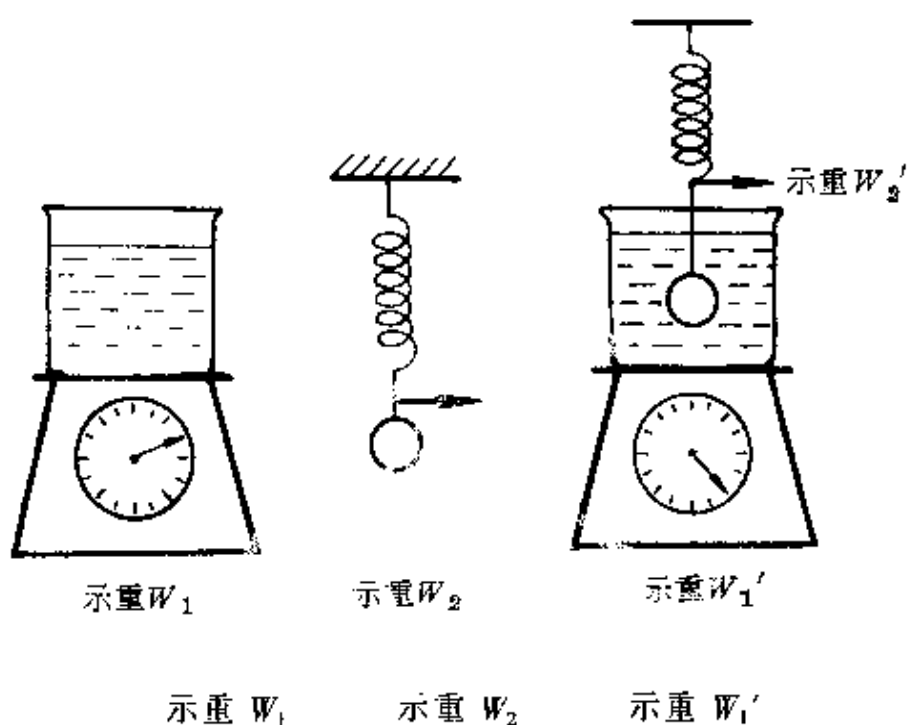


图 54

的冲量($F\Delta t$)仍然很小,由此引起的物体的动量变化(或速度变化)也很小,物体在冲量作用的时间内发生的位移极小.如果物体的质量 m 足够大时,物体的速度变化 Δv 几乎等于零,物体不会产生可觉察的位移,对支持体也就不会产生附加的压力.这就是说,在气功师有足够的功力顶起石板时,石板越重(m 越大),锤击时的附加压力越小,仿佛没有敲击石板一样.

为了进一步消除疑团,大家还可以做一次模拟表演:伸开手掌放在台上,在手掌上叠起一堆瓦片(为避免不平整而被压痛,可在手掌上下垫以毛巾),然后用另一只手抡起锤子,猛击瓦片(接触瓦片的时间要尽量短).可以发现,瓦片被击碎了,手掌的感觉却与瓦片没有被锤击时几乎一样.同样道理,在手掌可支持的情况下,叠的瓦片越多,锤击时对手掌的附加压力越小.相反,如果你只在手掌上放一小块瓦片,抡起锤子猛击瓦片时,可能会把手掌都砸烂了——连气功师也不敢做在胸口放一块小石子让助手用铁锤猛击的

试验,奉劝你千万别去冒险!

产生怀疑,继而用实验或理论分析消除或解开疑问,循环往复,对知识的理解就会更加透彻深入了.在中学物理教学中,我们时常可以品尝到由思维的批判性——产生怀疑而结出的甜果.

2. 张开灵活的风帆

思维能迅速地、自然地、从一类对象转变到另一类对象,甚至内容相距很远的另一类对象的能力,称为思维的灵活性.它是发散性思维的一个重要标志.

贝尔纳和
鲁梅斯

现代科学学的奠基人、英国著名物理学家贝尔纳(J. D. Bernal, 1901—1971)是一位很有代表性的人物.贝尔纳的思维极为灵活,兴趣广泛,涉猎了科学研究的许多部门.他在金属结晶学、分子生物学等多方面都有过重大的贡献.他常常能敏锐地提出一个问题、抛出一个思想,在自己涉足一番后,就留给别人去完成最后的成果.贝尔纳的同事和学生都坚信,按照贝尔纳的创造天赋,他可能不止获一次诺贝尔奖.虽然这一天始终未来到,可全世界有许多原始思想源于贝尔纳论文的成果.

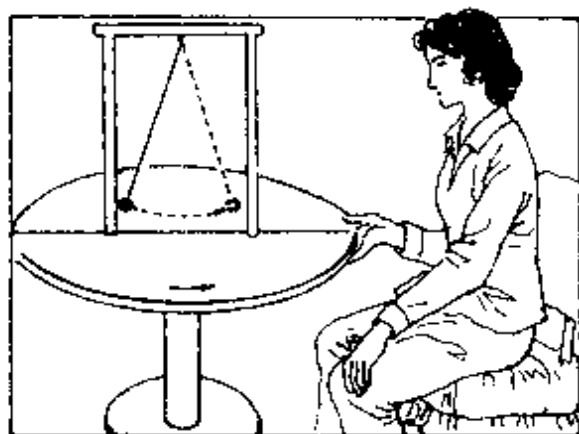
另一类很有代表性的人物,就是富有传奇色彩的鲁梅斯(A. L. Loomis, 美国, 1887—1958).他是一位银行家,白天活跃于华尔街从事金融事务,夜晚及星期天则埋头于自己的物理实验室.他在纽约图克塞多公园建有华丽的私人实验室,不惜重金购置许多一流的仪器设备,并常邀请许多著名物理学家去聚会.他在那里从事着超声波、雷达、对时间的精确测定等方面的研究;也从事着有关生物学、脑电波等方面的研究.他对劳伦斯(E. Lawrence, 美国, 1901—1958)当年筹建 184 英寸(1 英寸 = 25.4 毫米)大型回旋加速器给

予很大的支持,也参与制造原子弹的曼哈顿工程的组织管理;他既能周旋于美国当时的军政要人之间,也常慷慨资助许多物理学朋友*。鲁梅斯是 20 世纪颇有影响的物理学家之一。在二次大战末期,劳伦斯关于鲁梅斯对雷达研究的贡献时说:“我完全相信,如果没有鲁梅斯,雷达将会发展得非常缓慢。”

看到了地球自转 思维的灵活性常具体地反映在处理问题时表现得思路开阔、妙思泉涌。凡大有作为的人,除了在专业知识上有很深的造诣外,其共性都是思维灵活,反应敏捷。不能想像,一个思想呆滞的人会在某个领域有创造性的建树。

法国物理学家傅科(J. L. Foucault, 1819—1868)用摆证明地球的自转,就是思维灵活性指导下所设计的一个十分有趣和生动的实验。

19 世纪中叶,物理学家面前摆着一个难题:如何用地面上的实验证明地球的自转。乍一听来,似乎不可能实现,因为地面上的任何物体都随着地球做同样的转动。年轻的傅科通过对摆的研究,发现摆有一个奇妙的特性:在没有外界干扰时,保持振动面不变。如图 55 所

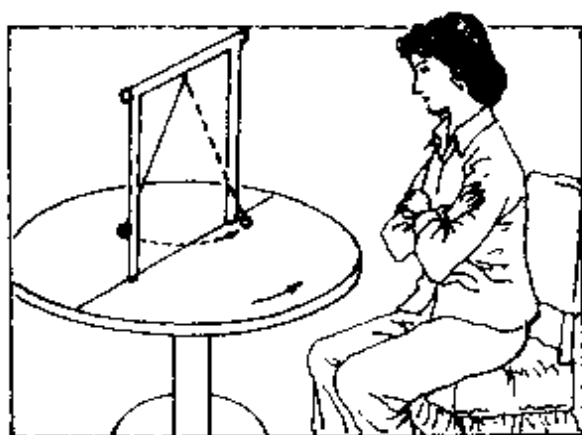


转动桌面

图 55

* 有一件趣事:在 40 年代美国经济大萧条时期,凡向《物理学评论》提供文章者,都会收到一个按页计费清单和一张便条,申明编辑和他的机构无力付款,有关费用将由一位匿名的美国物理界朋友支付。后来得知他就是鲁梅斯。

示,在一个转台上安置一个单摆.开始时,使摆的振动面与摆架平面一致.待桌面旋转一个角度后,虽然摆架也跟着桌面旋转了,摆的振动面对观察者来说却没有发生变化,但它相对于摆架来说,反方向转过了同样的角度,如图 56 所示.



转后,摆动的方向不变

图 56

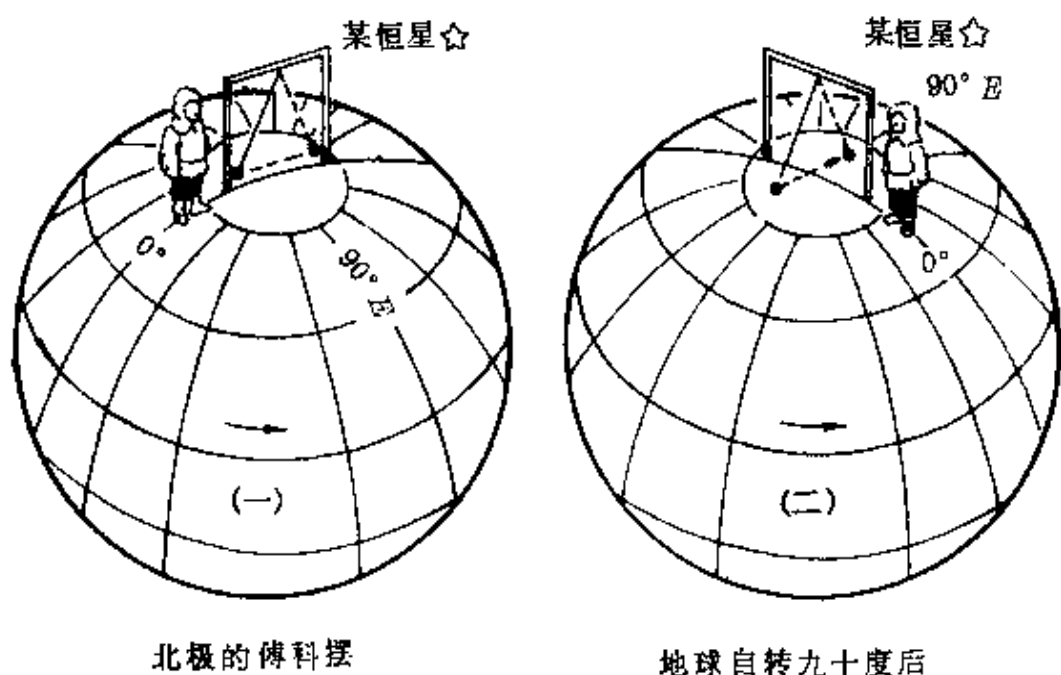
傅科根据摆的这个特性,立即敏感地想到:如在地球的北极安置一个单摆,开始时使它的振动方向对着某颗恒星.当地球自西向东自转 90° 后,单摆的振动方向仍对着这个恒星,然而相对于摆架来说,却反方向转过了 90° (图 57). 这样,站在地面上的观察者只需根据单摆的振动面对摆架相对位置的改变,就可判知地球的转动了.放在地球上其他地方的单摆,当然也有类似的效应.

1851 年,傅科在巴黎的一个大教堂里,悬挂了一个摆长 67 米、摆球质量达 28 千克的巨摆.在摆球的下方安装一根金属针,伸向放在下面的沙盘里,以便划出摆动的痕迹.众人看着巨摆从容地改变着方向,仿佛直接看到了地球的自转一样.傅科的实验使人们心悦诚服地认识了地球的自转.以后,人们把这样的摆称为傅科摆.

在我国北京天文馆里,有一个长 10 米的傅科摆.由于北京的地理纬度 $\varphi \approx 40^\circ$, 因此,北京的傅科摆每小时转过的角度

$$\theta = 15^\circ \sin \varphi \approx 9.6^\circ.$$

(式中 15° 是北极的傅科摆每小时转过的角度) 约每隔 37 小时多,摆动面顺时针向旋转一周.如果你有机会去北京天文馆,只要静候半小时,就能领略到地球自转的奥妙了.



北极的傅科摆

地球自转九十度后

图 57

小居里夫妇
痛失三次
诺贝尔奖

思维的灵活性还表现在能及时抛弃某些错误的假设,迅速拨正航向的优良素质上,许多科学家由于所处时代的局限性、背景各异或长期从事某项研究和某种理论的影响,也会形成思维定势,有时甚至会很遗憾地成为他们原来非常灵活的思路上的绊脚石,妨碍他们作出重大的发现、取得巨大的成功,在物理学史上最让人扼腕的可说是小居里夫妇痛失三次获诺贝尔奖的机遇了。

小居里夫妇就是弗雷德里克·约里奥(J. F. Joliot, 法国, 1900—1958)和伊丽芙·居里(I. Curie, 法国, 1897—1956),他们是著名放射学家居里夫人的女婿和女儿,他们非常聪明、努力,在从事放射性的研究中因发现人工放射性的重大成果,荣获 1935 年度诺贝尔化学奖,然而他们却也因囿于陈见,一时打不开思路而失去三次伟大的发现——他们曾首先在云室中观察到正电子的径迹,却把它理解为一个反向运动的电子而使安德森(C. D. Anderson, 美国,

1905—)因发现正电子荣获 1936 年诺贝尔物理奖;他们用 α 射线轰击铍,发现来自铍的射线能从石蜡中打出质子,却继续沿着波特(W. W. G. Bothe, 德国, 1891—1957)的错误思路,认为从铍发出的是一种具有新作用的 γ 射线,后来使查德威克(J. Chadwick, 英国, 1891—1971)因发现中子荣获 1935 年诺贝尔物理奖;他们与萨维奇(Savitch, 南斯拉夫)合作,用中子轰击铀核,发现一种比铀轻、化学性质与稀土族相似的物质,已认识到费米(E. Fermi, 美籍意大利, 1901—1954)并没有发现超铀元素,却缺乏作出铀核分裂的大胆设想,而使哈恩(O. Hahn, 德国, 1879—1968)因首先发现铀裂变而荣获 1944 年诺贝尔化学奖*。

著名哲学家凯特林说过一段很中肯的话:“摆脱陈旧规则 and 解决这一问题本身一样费劲。”从小居里夫妇引出的教训最能让我们坚信,这是千真万确的。

条条大道
通罗马

思维的灵活性也表现在处理实际问题时,能主动、大胆地寻找各种可能的道路。爱因斯坦说得好:“在科学上,每一条道路都应该走一走,即使发现一条走不通的道路,也是对科学的一大贡献。”反映在中学物理教学中,要激励自己多作各种可能的设想。当一条思路碰壁时,应立即换用另一条思路;一种方法行不通时,应迅速改用另一种方法。许多具体问题的解决,往往不是惟一的。“条条大道通罗马。”通过从不同角度、不同途径得到的方法,可以使我们更加全面、深入地理解物理原理,可以从对多种方法的比较中选出最佳方案。久而久之,自己的思维就会变得越来越灵活了。有关中学物理中的实

* 小居里夫妇痛失这三次伟大发现较详细的情况,读者可参阅本丛书《猜想与假设》、《对称》两册。

例,读者可参阅第5节的内容.

3. 探求深刻的底蕴

不满足于既成的经验、已取得的成果,锲而不舍,不断地扩大收获,深究下去,直达问题的本源,这就是思维的深刻性.

许多物理现象不断得到充实、完善,许多科学真理不断得到发展、更新,正是依赖于科学家们思维的深刻性加上持之以恒的努力所结出的硕果.

开普勒的四次探索 开普勒(J. Kepler, 德国, 1571—1630)对天体运动规律的四次探索,就是一个物理学家思维深刻性的典型实例.

开普勒是哥白尼学说的拥护者,但是他觉得哥白尼学说似乎还没有充分揭示出宇宙的数的和谐性.

1596年,他出版了第一部著作《宇宙的神秘》,提出了一个用五个正多面体来说明当时已知的六个行星运行轨道的模型.可是后来他发现这个模型是人为的,年轻的开普勒所作的第一次探索失败了.不过,他追求宇宙的数的和谐性的信念并未动摇.

1600年,开普勒与第谷在布拉格见面,并成了第谷的助手.开普勒在整理第谷(Tycho Brache, 丹麦, 1546—1601)的观测资料时,发现无论是托勒密模型、还是哥白尼模型都不能跟第谷长期的实际观测很好吻合.于是他就开始了揭开行星运动之谜的第二次探索,踏上了以征服战神马尔斯(即火星)为突破口的征途,一次次演算,结果都不理想,他风趣地描绘着:“留在天球上的诡计多端的敌人,出乎意料地扯断我用方程构成的锁链,从表格的监牢里冲了出去.”“在一次次的战斗中,它使我的由物理因素构成的军队受到损失,挣断了束缚,逃向自由去了.”即使达到最好的相差8弧分

(0.133度)的误差,开普勒也并未感到满足.从一次次的失败中,开普勒终于抛弃了旧模型中认为行星沿正圆轨道做着匀速运动这个沿袭几千年的传统观念,于是就在1609年首先发现了行星运动的第一定律和第二定律.他高兴地说:“敌人到底被我关在运行表的监牢里了.”

不过,开普勒并没有陶醉于已取得的胜利.他觉得行星的运动还有秘密未被发现.于是,开普勒又在已开垦的土地上辛勤耕耘,开始了他的第三次探索.又经过了9年的苦战,开普勒终于发现了行星运动的数的和谐性,找出了行星运动的第三定律.至此,行星的运动规律才被全面、清楚地揭示出来,开普勒真不愧为“宇宙的立法者”.

那么,行星是依靠怎样的一种力维系着它的周期运动呢?开普勒马不停蹄地又在进行着第四次探索了.他像吉尔伯特(W. Gilbert,英国,1540—1603)一样作过磁力的设想,也提出过重力的猜想等.虽然开普勒的第四次探索没有成功,他也因积劳过度、贫病交加,只活了59岁就过早地去世了,然而他研究问题时所表现出来的思维的深刻性、对科学真理的执著追求将永远激励着后人.

**霍耳效应
老树开花** 深刻的思维往往能浇灌貌似枯萎的老树,使它重新萌发新枝并开出绚丽花朵,最典型的事例恐怕要数量子霍耳效应的发现了.

自从1879年发现霍耳效应后,许多物理学家围绕这一现象作

了多方面的深入开掘,很快又发现了四个伴生现象*。至此,对有关霍耳效应的问题,普遍认为已彻底解决,似乎已不可能再对它作出惊人之举了。

然而,100年后,德国物理学家冯·克利青(Klaus Von Klitzing, 1943—)通过对这一古老的发现作了更深层次的研究后,出乎意料地向人们展示了老树开出鲜花的奇妙景象。

冯·克利青把金属—氧化物—半导体场效应晶体管(MosFET)放到强磁场和深低温下,发现了 MosFET 管的霍耳电阻按照

$$R_H = \frac{h}{ie^2} (i = 1, 2, 3, \dots, \text{正整数})$$

呈现量子化的分布规律,并且它不以材料性质、器件的尺寸而转移,完全是由基本物理常数 h (普朗克常量)和 e (电子电量)确定的量,有着极高的精确性和重复性,因此,克利青发现的这一效应(称量子霍耳效应)不仅对二维电子系统的研究有着重要的意义,

* 霍耳效应的四个伴生现象是:

①范廷好森(Ettinghausen)效应:由于自由电子速度的不一致,将使大于和小于平均速度的电子聚集在不同的地方,引起温差电动势。

②能斯脱(Nernst)效应:引线与金属薄片接触处(图 58 中 e, d 两处)由于电阻不同,电流通过时产生不同的焦耳热,引起温差电动势。

③里纪-勒杜克(Righi-Leduc)效应:由能斯脱效应产生的电流也会引起附加电动势。

④不等位电势差:当金属薄片通以电流时,薄片垂直电流方向的各个截面的电势逐渐降低,若霍耳电势的引出线 ab 的位置不对称(图 58),也会引起附加电势差。

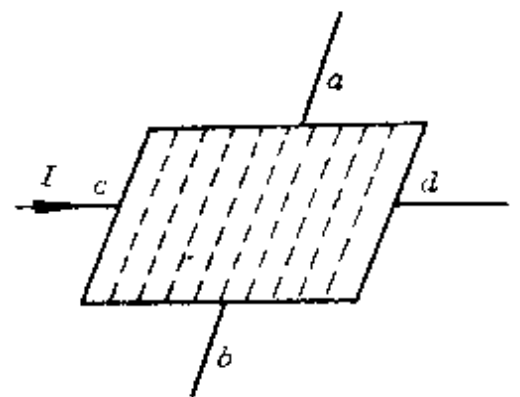


图 58

而且可以此取得电阻的实用参考基准.1986年国际计量委员会下属的电学咨询委员会第17届会议决定,从1990年1月1日起,以量子霍尔效应所取得的霍尔电阻 $R_H = \frac{h}{2e^2}$ 代表欧姆的国家参考标准,从此世界各国都有了统一的国家电阻标准.冯·克利青也因这一重大贡献荣获1985年度诺贝尔物理学奖.这也完全是冯·克利青超人的思维深刻性的巨大成功*.

冰冻三尺非
一日之寒

思维的深刻性源于坚实的知识基础和丰富的
实践经历,决不是一蹴而就的.著名美国科学史家
和科学哲学家库恩(T.S.Kuhn,1922—)说过:
“看一张气泡室照片,学生看到的是混乱而曲折的线条,物理学家
看到的是熟悉的亚核事件的记录.只有有了许多次这样的视觉印
象之后,学生才成为科学家世界的一个居民……”

思维的深刻性在中学教学阶段的突出表现是善于思考,能迅速抓住事物的本质特征.

据说,我国著名数学家苏步青教授年少时,有人曾考问他一道智力题:甲、乙两人相距100米相对而行,他们的速度分别为3米/秒、2米/秒.有条小狗,以速度8米/秒同时往返于甲、乙两人之间.那么当甲、乙两人相遇时,小狗一共跑了多少米?苏步青脱口而出:160米.

少年苏步青所以能这样快地得出正确的答案,在于他从小狗与甲、乙两人的运动中,能抓住运动的等时性这一隐藏着深刻内涵,充分显示了苏步青的才华.

* 霍尔电阻变化曲线的阶梯性,在1978年已有多起文献记载,可是并没有引起人们的重视,只有冯·克利青敏锐地意识到它的意义并作了不懈的努力.

思维的深刻性与思维的灵活性一样,也依赖于人的能动性的培养和训练,中学学习阶段,正是一个黄金契机,肯思考,勤思考,不满足于表面的结论,有寻根究底的强烈欲望,就会使自己的思维逐渐深化而进入善于思考的境界,解决具体问题时也就容易深刻地洞察其中所蕴含的奥秘,迅速找到入口,这里,努力寻找机遇,不断注意积累,认真总结经验是一个很有成效的方法.

在中学物理教学中,有许多问题可吸引我们去深入地分析、思考,譬如:

对于图 59 中的双线摆,它在垂直于纸面的方向来回做小振幅振动的周期,大多数学生都能回答,它等效于一个摆长 $l' = l \sin \alpha$ 的单摆,因此

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

在写出这个周期算式时,如果你能主动地探求其中的原因,说明你的认识已超越表面的结论,迈出了可喜的第一步,如果你能继续用实验或理论分析,验证这个结果(附注),说明你的认识已进入较深刻的境界.

思维的深刻性正是这样从学生时代起步的!

附注:双线摆振动周期的证明

画出图 59 中双线摆的立体图,如图 60 所示.

振动中摆球受到三个力的作用:重力 mg , 两悬线张力 T_1 、 T_2 (由对称性知 $T_1 = T_2$). 把重力 mg 分解成 G' 和 F , 其中 $F = mg \sin \theta$ 就是使摆球振动的回复力. 当摆角 θ 很小时,由

$$\sin \theta \approx \theta = \frac{\widehat{CO'}}{l \sin \alpha} \approx \frac{CO'}{l \sin \alpha} = \frac{x}{l \sin \alpha},$$

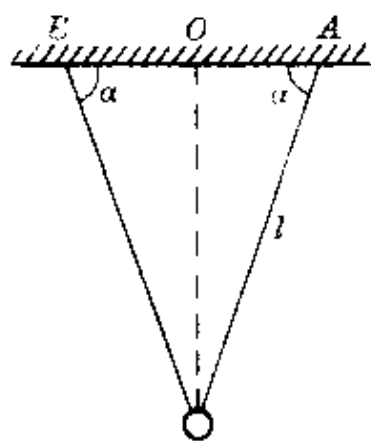


图 59

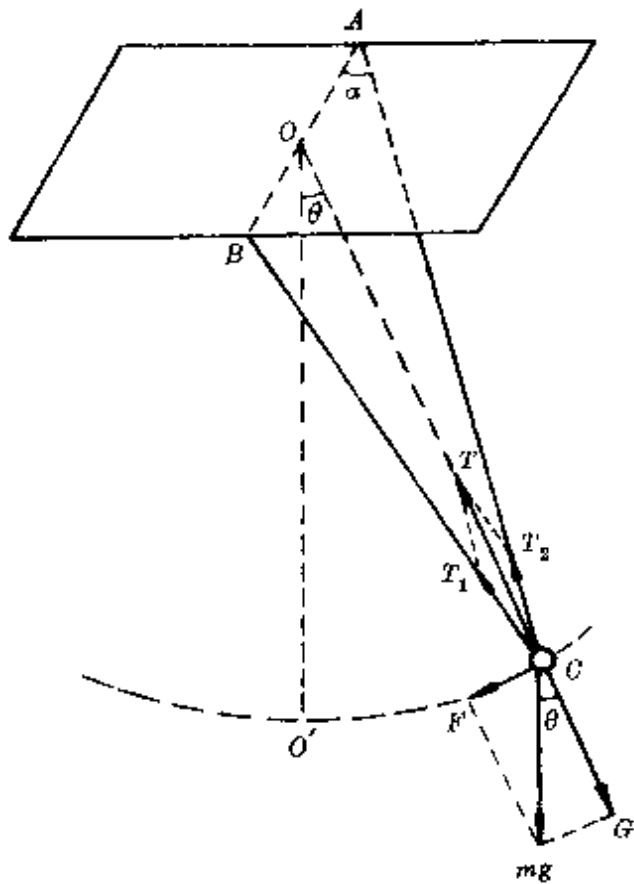


图 60

因此回复力

$$F = mg \sin \theta = \frac{mg}{l \sin \alpha} x = kx.$$

考虑到 F 与 x 的反向关系, 上式可表示为

$$F = -kx.$$

由此可见, 双线摆的小振幅振动, 也是简谐运动, 所以它的振动周期为

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{\frac{mg}{l \sin \alpha}}} = 2\pi \sqrt{\frac{l \sin \alpha}{g}}.$$

也就是说, 它等效于摆长 $l' = l \sin \alpha$ 的一个单摆.

五、求异在研究和解决中学物理问题中的应用

中学物理中,有相当多的问题,从常规的直接思考或逻辑推理往往不易解决,需要作一些灵活的变通,来寻觅解题的途径或扩大解题的收获.这类问题,给我们的思维提供了自由驰骋的天地,也正是锻炼求异思维极好的机会.为便于阅读,根据求异思维在中学物理中最为常用、影响最大的逆向、转换、发散等表现形式,就解题和实验研究中的应用分别阐述.

1. 逆向探索

逆向思维在中学物理解题中应用得相当普遍,涉及各个方面.下面,选择若干较为典型的问题,通过与常规解法的比较或思路分析,进一步领会这种思维方法的特点.

例题 1 一颗水平飞行的子弹,恰好能依次穿过固定竖立着的三块木板.假设子弹在木板中所受阻力恒定,且每块木板对子弹的阻力和子弹穿越每块木板的时间都相同.不计子弹在两板之间的飞行时间,则三块木板的厚度之比是多少?

常规解法 因子弹在木板中运动时受到的阻力恒定,所以子弹做匀减速运动.由题意知,它穿过第 3 块木板后的速度刚好为零,且每块板的厚度必然逐渐减小(图 61).设子弹原来的速度为 v_0 ,穿越每块板后的速度分别为 v_1 、 v_2 、 v_3 ($v_3 = 0$),由

$$0 - v_0^2 = 2(-a)(d_1 + d_2 + d_3),$$

得子弹在木板中的加速度

$$a = \frac{v_0^2}{2(d_1 + d_2 + d_3)}.$$

设子弹在板中穿越的总时间为 t , 则

$$\begin{aligned} t &= \frac{d_1 + d_2 + d_3}{v} \\ &= \frac{2(d_1 + d_2 + d_3)}{v_0}. \end{aligned}$$

穿过每块木板后的速度分别为

$$\begin{aligned} v_1 &= v_0 - at_1 = v_0 - a\left(\frac{t}{3}\right) = v_0 - \frac{v_0^2}{2(d_1 + d_2 + d_3)} \cdot \frac{2(d_1 + d_2 + d_3)}{3v_0} \\ &= \frac{2}{3}v_0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} v_2 &= v_0 - at_2 = v_0 - a\left(\frac{2}{3}t\right) = v_0 - \frac{v_0^2}{2(d_1 + d_2 + d_3)} \cdot \frac{4(d_1 + d_2 + d_3)}{3v_0} \\ &= \frac{1}{3}v_0, \end{aligned}$$

$$v_3 = v_0 - at = 0.$$

所以, 每块木块的厚度依次为

$$d_1 = \frac{v_0 + v_1}{2} \cdot \frac{t}{3} = \frac{5}{6}v_0 \cdot \frac{t}{3},$$

$$d_2 = \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot \frac{t}{3} = \frac{1}{2}v_0 \times \frac{t}{3} = \frac{3}{6}v_0 \cdot \frac{t}{3},$$

$$d_3 = \frac{v_2 + v_3}{2} \cdot \frac{t}{3} = \frac{1}{6}v_0 \cdot \frac{t}{3}.$$

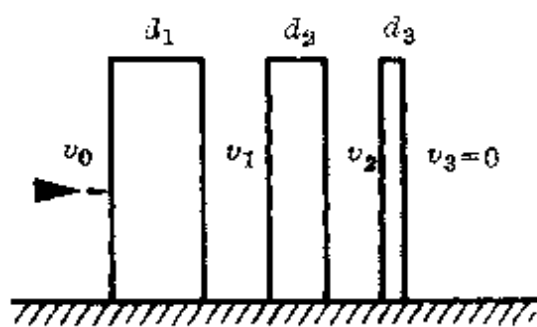


图 61

它们的厚度之比

$$d_1 : d_2 : d_3 = 5 : 3 : 1.$$

逆向思考 从第3块木板右边逆着时间流向观察时,子弹在木板中从右向左做着初速为零的匀加速运动,木板的厚度之比就等于从 $t=0$ 开始子弹在连续相等时间内通过的位移之比,即

$$d_3 : d_2 : d_1 = s_1 : s_2 : s_3 = 1 : 3 : 5.$$

所以,子弹依次通过的三木板厚度之比为

$$d_1 : d_2 : d_3 = 5 : 3 : 1.$$

如果本题改为竖立着 n 块木板,子弹水平穿入时刚好能通过且在每板内所受阻力和运动时间相同,根据同样道理很容易判知这 n 块木板的厚度之比为

$$d_1 : d_2 : d_3 : \cdots : d_{n-1} : d_n = (2n-1) : (2n-3) : \cdots : 5 : 3 : 1.$$

它比常规的把子弹作为匀减速运动来研究简单得多.

例题2 一个小球做竖直上抛运动,测得它在达到最高点前的1秒内上升高度是它上升最大高度的 $1/5$,求小球上升的最大高度.取 $g = 10$ 米/秒².

常规解法 设上抛初速度为 v_0 ,上升到最大高度的时间为 t ,上升高度为 h .根据题意画出示意图(图62),由匀减速运动公式知

$$\frac{4}{5}h = v_0(t-1) - \frac{1}{2}g(t-1)^2,$$

$$h = v_0 t - \frac{1}{2}gt^2,$$

$$t = \frac{v_0}{g}.$$

联立解得 $h = 25$ 米.

逆向思考 小球从下向上做匀减速运动,逆着时间流向观察

时,就转变成一个自由落体运动.它在最初 1 秒内下落的距离等于上升过程中最后 1 秒内上升的距离,即

$$h' = \frac{1}{2}gt^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 1^2 \text{ 米} = 5 \text{ 米},$$

所以小球上抛时能达到的最大高度为

$$h = 5h' = 25 \text{ 米}.$$

原来从匀减速运动求解时,虽然列式并不困难,但实际运算较为繁复,采用逆向反演后就变得十分轻松.

例题 3 质量为 m_1 、 m_2 的两木板中间连接着一个劲度系数为 k 的轻弹簧,静止于水平桌面上.在 m_1 上加以多大的压力 F ,方能在突然撤去 F 后上板起跳时恰把下板提起(图 63)?

常规解法 未加压力 F 时,弹簧在上板重力作用下的压缩量为

$$x_1 = \frac{m_1 g}{k}. \quad \textcircled{1}$$

加压力 F 后,弹簧相对于原长的压缩量

$$x_2 = \frac{m_1 g + F}{k}. \quad \textcircled{2}$$

撤去压力 F 后,要求下板恰能提起,表示地面的支持力为零.此时的弹簧相当于上端固定,下端悬挂一质量 m_2 的物体,因此它的伸长量为

$$x_3 = \frac{m_2 g}{k}. \quad \textcircled{3}$$

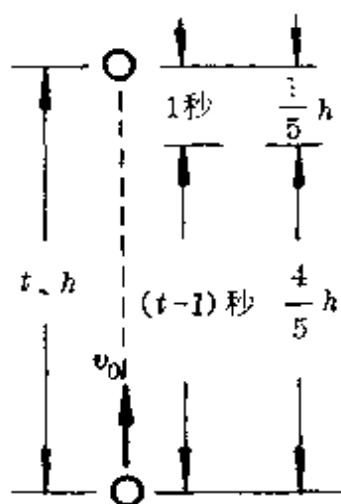


图 62

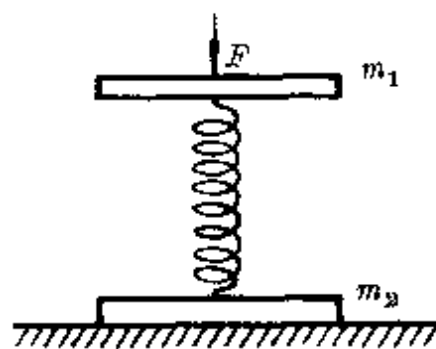


图 63

这个伸长量也等于上板超过弹簧原长的长度。

弹簧从被压缩状态变到伸长状态过程中,只有重力和弹力做功,机械能守恒.以弹簧原长时上端为重力势能的零位置,则

$$\frac{1}{2} kx_2^2 - m_1 gx_2 = \frac{1}{2} kx_3^2 + m_2 gx_3. \quad (4)$$

联立上述各式即得所需压力为

$$F = (m_1 + m_2)g.$$

逆向思考 因为上板跳起恰把下板提高地面时弹簧的形变量(伸长量)等于用力提起两板时弹簧的形变量,而弹簧在受到同样大小的拉力和压力时形变量大小相同,所以反过来看需加的压力应为

$$F = (m_1 + m_2)g.$$

例题 4 如图 64 所示电路中, $\mathcal{E} = 6$ 伏, $r = 1$ 欧, 一根均匀的电阻丝, 总电阻 $R = 300$ 欧, 长 $l = 20$ 厘米. 电容器的电容量 $C = \frac{1}{36} \times 10^{-5}$ 法, G 为灵敏电流计. 当滑动头 P 从电阻丝最上端 M 以 $v = 36$ 厘米/秒匀速下滑时, 电流计的示数为多少?

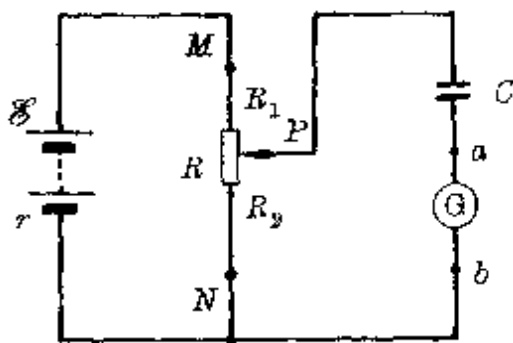


图 64

常规解法 滑动头 P 从电阻丝最上端 M 下移时, 对电容器的充电电压逐渐减小, 电容器的带电量也逐渐减小, 电容器处于放电状态, 通过电流计 G 的电流方向从 b 到 a .

当滑动头在最上端 M 时, 电容器的充电电压和电量分别为

$$U_0 = \frac{R}{r+R} \mathcal{E}, \quad Q_0 = CU_0 = \frac{CR}{r+R} \mathcal{E}.$$

设经时间 t 后滑动头移到某位置, 电阻丝被分成阻值为 R_1 、

R_2 的两部分. 这两部分的阻值与电阻丝的长度成正比, 故

$$R_1 = \frac{R}{l}vt, R_2 = R - R_1 = R\left(1 - \frac{vt}{l}\right).$$

电容器的充电电压等于下部 R_2 上的电压, 即

$$U_t = \frac{R_2}{r+R} \mathcal{E} = \frac{R \mathcal{E}}{r+R} \left(1 - \frac{v}{l}t\right).$$

电容器的带电量仅由电容量和电压决定, 故

$$Q_t = CU_t = \frac{CR \mathcal{E}}{r+R} \left(1 - \frac{v}{l}t\right).$$

通过电流计 G 的电流强度决定于电容器极板上的放电速率, 即

$$I_t = \frac{\Delta Q_t}{\Delta t} = \frac{Q_0 - Q_t}{t} = \frac{CR \mathcal{E}}{r+R} \cdot \frac{v}{l}.$$

可见, 放电电流强度恒定, 其值为

$$\begin{aligned} I &= \frac{\frac{1}{36} \times 10^{-6} \times 300 \times 6}{1+300} \times \frac{36}{20} \text{安} \approx 0.3 \times 10^{-5} \text{安} \\ &= 3 \text{ 微安}. \end{aligned}$$

逆向思考 由 R_2 的表达式可知, 当滑动头 P 从上向下匀速移动时, 下部电阻将均匀减小, 因此电容器两端电压与极板上的电量也必均匀减小. 反之, 当滑动头 P 从最下端 N 匀速向上滑动时, 电容器两端电压与极板上的电量势必均匀增加, 且电容器的充电速率(每秒钟极板上增加的电量)必与放电速率相等. 也就是说, 当滑动头从 N 向 M 匀速上滑时通过电流计 G 的电流大小必与滑动头从 M 向 N 匀速下滑时相同, 只是电流方向相反. 于是, 我们就可

* 对熟悉微分运算的读者, 可直接由 $\frac{dQ_t}{dt}$ 得出.

以通过计算充电电流找出放电电流。

当滑动头从下向上滑动经时间 t 后, 电容器两端的电压和电量分别为

$$U_i' = \frac{R'_2}{r+R} \mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}}{r+R} \cdot \frac{R}{l} vt,$$

$$Q_i' = CU_i' = \frac{CR'_2}{r+R} \cdot \frac{v}{l} t.$$

$$\text{所以 } I' = \frac{\Delta Q_i'}{\Delta t} = \frac{Q_i' - 0}{t} = \frac{CR'_2}{r+R} \cdot \frac{v}{l}.$$

其结果与上面解出的相同。

逆向不逆 应该认识到, 所谓逆向思维是相对于原先的、寻常的思维路线而言的, 一旦把它作为一种重要的研究方法, 也就无所谓“逆向”可言。实际上, 有许多物理问题(如光路控制、黑盒问题等)本该遵循这样的思维路线, 根据已知的效果作反方向的推测, 甚至还有一些问题, 采用顺向的寻常思维极难求解或无法求解, 这种情况下逆向思维几乎成了惟一的研究手段, 更无所谓“逆向”的意义了。不过, 从相对于顺向的、寻常的思维意义上, 我们还是把它作为逆向思维看待。所以下面的问题中我们不再先以常规解法作铺垫比较, 而在分析的基础上直接从所谓的逆向思维求解得出结果。

例题 5 如图 65(a) 所示, 轻质杆 AC 、 BC 用三个光滑的铰链互相铰接着并铰接于墙上, 已知 AC 长 $l = 1$ 米, $\alpha = 30^\circ$ 。一个质量为 m 的物体从 A 点由静止起沿 AC 杆无摩擦地滑下。试问在物体下滑过程中, BC 杆对 AC 杆的作用力如何变化?

分析与解答 物体下滑时, 对杆的压力垂直杆向下。当以 A 处作为假想的转动轴时, 物体对杆的压力形成的使 AC 杆逆时针向转的力矩, 一定被 BC 杆对 AC 杆作用力形成的使 AC 杆顺时针

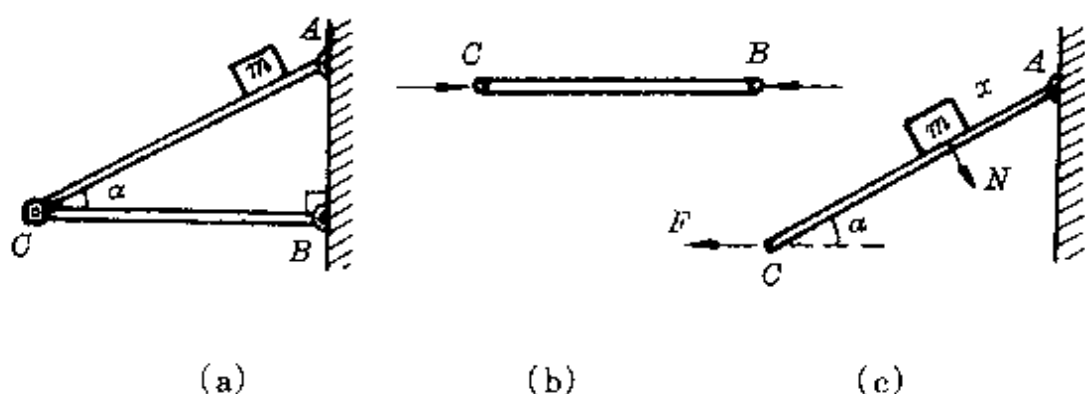


图 65

向的力矩平衡. 只要写出 AC 杆以 A 为轴的力矩平衡方程, 根据物体的下滑运动, 就可以求出 BC 杆对 AC 杆的作用力. 困难在于 BC 杆对 AC 杆的作用力方向不明确.

为此, 我们可以作个逆向转换——先找出 AC 杆对 BC 杆的作用力方向. 由于 BC 是轻杆, 它只有 B 、 C 两端受力(称二力杆件), 所以 B 、 C 两端对杆的作用力方向必定沿着杆子, 如图 65(b) 所示. 根据牛顿第三定律, BC 杆对 C 端的作用力方向一定沿 BC 杆向左, 如图 65(c) 所示.

设物体经时间 t 沿 AC 杆下滑距离为 x , 则

$$x = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} g \sin \alpha t^2.$$

物体对杆的压力 $N = mg \cos \alpha$. 所以力矩平衡方程为

$$Nx = Fl \sin \alpha,$$

即

$$mg \cos \alpha \cdot \frac{1}{2} g \sin \alpha t^2 = Fl \sin \alpha.$$

由此得 BC 杆对 AC 杆的作用力 F 与下滑时间 t 的关系为

$$F = \frac{mg^2 \cos \alpha}{2l} \cdot t^2.$$

例题 6 一列横波在 x 轴上传播着. 在 $t_1 = 0$ 和 $t_2 = 0.005$ 秒的波形图线如图 66 所示. 已知波速 $v = 6000$ 米/秒, 周期 $T < (t_2 - t_1)$, 试求波的传播方向.

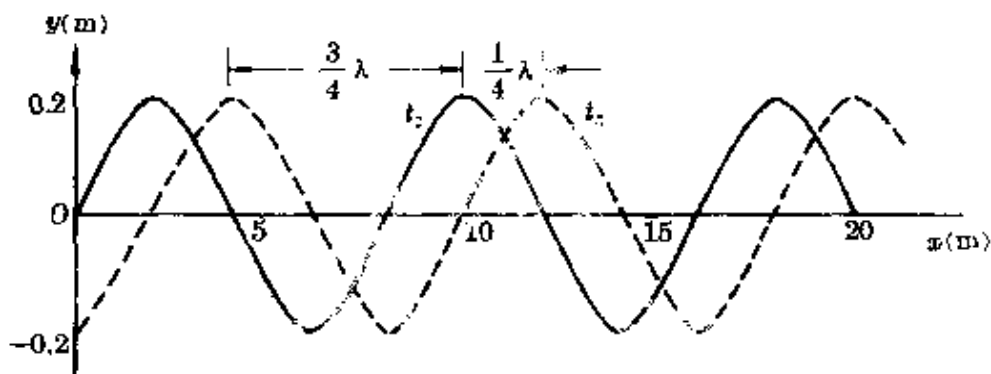


图 66

分析与解答 波传播时, 每经过一个周期, 波向着传播方向推进一个波长的距离. 当已知波速和传播方向时, 用平移法很容易画出经 Δt 时间后的波形. 题中情况却相反, 它需要根据两个不同时刻的波形作逆向推理去确定传播方向.

由图 66 的波形图可知, 这列横波的波长 $\lambda = 8$ 米. 它在 $\Delta t = t_2 - t_1 = 0.005$ 秒内传播的距离

$$\Delta x = v\Delta t = 6000 \times 0.005 \text{ 米} = 30 \text{ 米} = 3 \frac{3}{4} \lambda.$$

根据波传播时波形的重复性, 波向前推进整数倍波长的距离时波形不变, 因此波推进 $3 \frac{3}{4} \lambda$ 后的波形应该和推进 $\frac{3}{4} \lambda$ 的波形相同. 比较图 66 中 t_1 、 t_2 两时刻的波峰间距, 可知波应该从右向左传播才符合上述条件.

例题 7 一个电量为 q 的点电荷与一根长为 l 的不带电导体棒 AB 放置在同一直线上, 点电荷距棒左端 A 为 R , 如图 67 所示. 试求当达到静电平衡后, 棒上感应电荷在棒内中点 C 处产生的场

强.

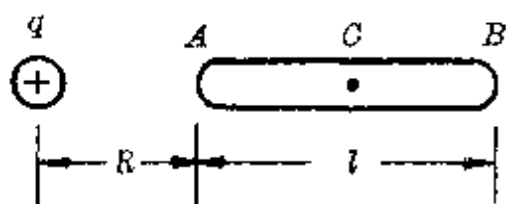


图 67

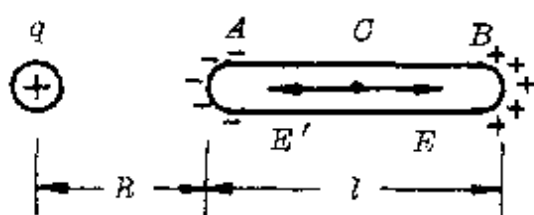


图 68

分析与解答 根据静电感应, 导体棒的 A 端带负电荷、 B 端带正电荷. 棒上感应电荷在中点 C 的场强 E' 的方向很容易判知, 必定沿着棒向左指向点电荷 q . 然而, 感应电荷的场强大小却无法从感应电荷直接求出——因为感应电荷在导体棒上的分布极为复杂.

由于在电场中的导体达到静电平衡时, 由电荷 q 和棒上感应电荷在导体内部共同产生的合场强为零, 因此, 棒上感应电荷在中点 C 处的场强必与电荷 q 在 C 处的场强等值反向, 即 $E' = -E$, 如图 68 所示. 于是, 我们就可以通过计算 q 在 C 点的场强, 反过来推出感应电荷在 C 点的场强, 显然, 这也是一种逆向思维.

因为点电荷 q 在 C 点的场强大小为

$$E = k \frac{q}{(R + l/2)^2},$$

所以棒上感应电荷在 C 点的场强大小

$$E' = | - E | = k \frac{q}{(R + l/2)^2}.$$

明白了这个道理, 利用逆向思维, 我们可以很方便地求出棒上感应电荷在棒内任一处的场强.

例题 8 如图 69 所示电路, 每个电阻的阻值均为 1 欧, 若在 A 、 B 间加上 $U = 17$ 伏的恒定电压, 则通过电阻 R_0 的电流强度为

多少?

分析与解答 常规方法的演算顺序是:

依次从右向左简化电路,算出

总电阻 R_{AB} $\xrightarrow{\text{欧姆定律}}$ 总电流 I_{AB}

$\xrightarrow{\text{从左向右通过三次分流}}$ I_8 . 这样演算的整个解题过程很繁复.

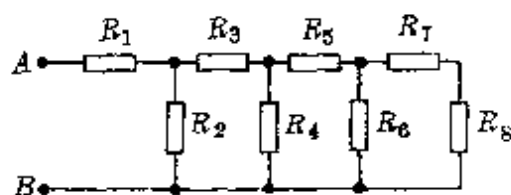


图 69

比较方便的办法是逆向推算——先假设通过 R_8 的电流 $I'_{R_8} = 1$ 安, 并从右向左推出 AB 间应加的电压; 然后根据 $I \propto U$ 的关系, 得出当 AB 间电压为 $U = 17$ 伏时通过 R_8 的电流. 具体推算过程如下:

$$\begin{aligned}
 I'_{R_8} = 1 \text{ 安} &\xrightarrow{U_{R_6} = 2 \text{ 伏}} I_{R_6} = 2 \text{ 安} \xrightarrow{U_{R_5} = 5 \text{ 伏}} I_{R_5} = 3 \text{ 安} \xrightarrow{U_{R_4} = 5 \text{ 伏}} I_{R_4} = 5 \\
 \text{安} &\xrightarrow{U_{R_3} = 13 \text{ 伏}} I_{R_3} = 8 \text{ 安} \xrightarrow{U_{R_2} = 13 \text{ 伏}} I_{R_2} = 13 \text{ 安} \xrightarrow{U_{R_1} = 21 \text{ 伏}} I_{R_1} = 21 \text{ 安} \\
 U'_{AB} &= 34 \text{ 伏.}
 \end{aligned}$$

这就是说, 只有当 AB 间加上 34 伏电压时, 流过 R_8 的电流恰等于 1 安, 所以当 AB 间加上 17 伏电压时流过 R_8 的电流只有 0.5 安.

例题 9 图 70 所示盒子里有四个阻值都是 6 欧的电阻, 盒外有四个接线柱 A 、 B 、 C 、 D . 分别测得 $R_{AB} = 6$ 欧, $R_{AC} = R_{AD} = 10$ 欧, $R_{BC} = R_{BD} = R_{CD} = 4$ 欧. 试画出盒子里四个电阻的连接电路图.

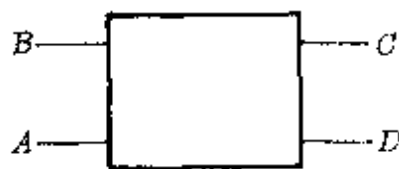


图 70

分析与解答 黑盒问题需根据测量结果作逆向推测去确定盒内的结果.

因盒内每个电阻都是 $R = 6$ 欧, 而测量结果有 10 欧和 4 欧, 可见四个电阻必定是混联.

注意到 $4 \text{ 欧} = \frac{2}{3} \times 6 \text{ 欧}$, 恰为两个电阻串联后与另一个电阻并联的总电阻, 如图 71 所示. 其中 1、2, 1、3, 2、3 任两点电阻均为 4 欧, 因此可初步确定它们分别为 B 、 C 、 D 三接点. 因 $4 \text{ 欧} + 6 \text{ 欧} = 10 \text{ 欧}$, 所以只需在上述电路的适当位置接入一个 6 欧电阻即可满足需要, 画出的电路如图 72 所示.

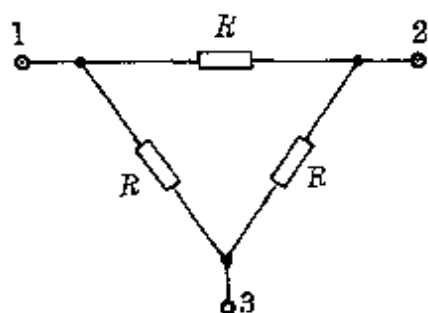


图 71

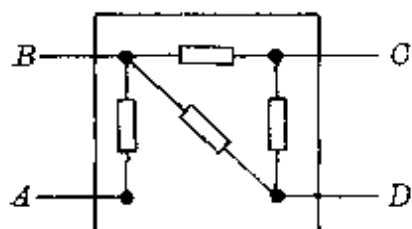
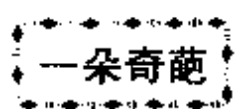


图 72



在逆向思维的应用中有一朵特别绚丽的奇葩, 这就是作为几何光学基本规律之一的**光路可逆原理**——当光线逆着反射光线或折射光线的方向入射时, 将会逆着原来的入射光线方向反射或折射. 许多光路控制和成像问题, 从入射方向作正面求解, 常会显得无从下手或者较为繁复, 采用光路可逆原理, “反面包抄”, 往往很容易取得成功. 鉴于光路可逆原理在研究几何光学问题中的重要地位, 下面, 我们列举较丰富的例题展示一下它在具体问题中的应用风采.

例题 10 如图 73 所示, 发光点 S 置于不透明障碍物 AB 的左侧, 障碍物竖立在水平地面上, 它的上方平行地面放置一较大的平面镜 M , 试用作图法确定障碍物 AB 右侧空间被光照射到的区域.

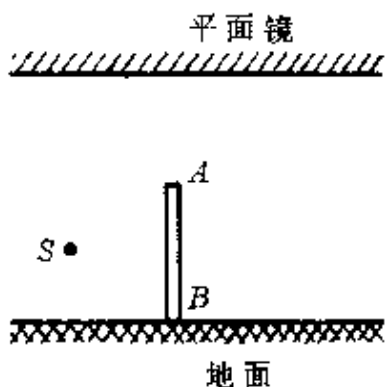


图 73

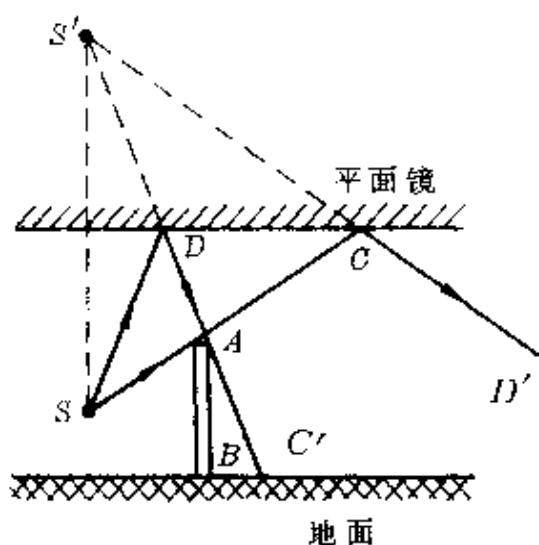


图 74

分析与解答 从发光点 S 确定地面上被照亮的最远处很容易,只需从 S 引出一条掠障碍物顶端 A 的光线 SAC ,画出它的反射线 CD' 即得.但要从发光点 S 直接画出被照亮的最近处较困难.为此,可根据光路可逆原理,先找出 S 在平面镜中的像点 S' ,连接 $S'A$,即得照亮最近处的反射线 DAD' ,对应的人射线 SD 也可确定了.所以,障碍物 AB 右方被照亮的区域位于反射光线 CD' 和 DC' 之间,如图 74 中 AC' 与 CD' 所围区域.

例题 11 如图 75 所示,凸透镜右方有一个小孔 D ,凸透镜左方垂直其主轴放有一标尺 AB ,试用作图法确定通过小孔 D 可以看到标尺的刻度范围.

分析与解答 人眼能看到物体,是由于从物体发出(或反射)的光能到达眼睛刺激视觉细胞的缘故.不过,这样去确定对标尺的观察范围很困难.比较方便的办法是根据光路可逆原理,把小孔(人眼位置)当成点光源,先由特殊光线作图法——从小孔分别发出一条平行主轴的光线和通过光心的光线,确定小孔 D 的像 D' .然后,通过小孔 D 发透镜 L 的两条边缘光,它们的折射线必通过

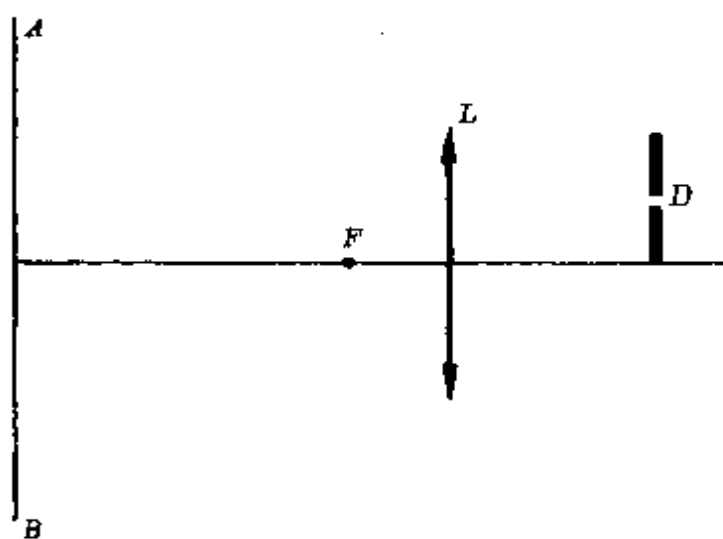


图 75

D' , 因此连接透镜两端和 D' 的两光线到达标尺的 P 、 Q 两处, 就是观察范围的两端点, 光路如图 76 所示.

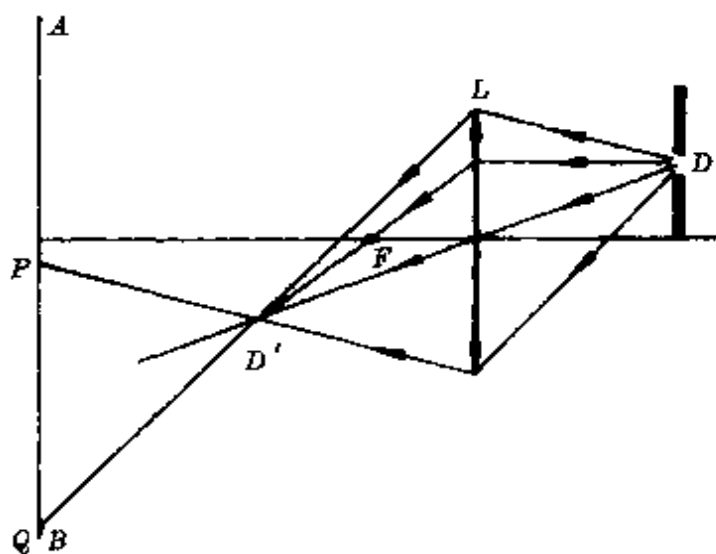


图 76

例题 12 在图 77 中, MN 为主光轴, S 为物点, S' 为像点, 分别作出光路图, 并确定焦点的位置, 标明透镜的种类.

分析与解答 本题的解答思路需根据透镜成像规律作逆向推理:

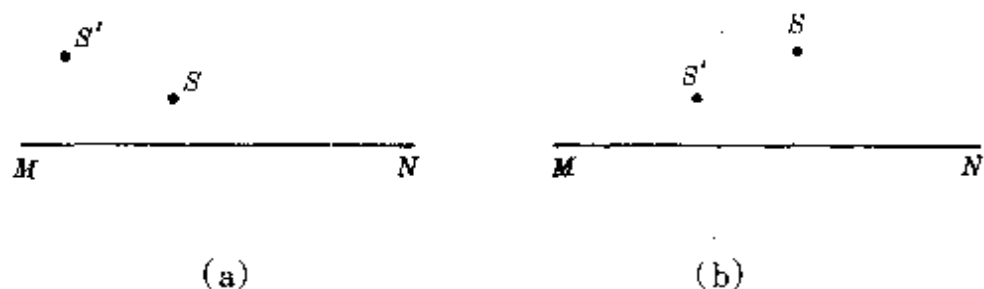


图 77

透镜成像中,物、像与光心必在一直线上,因此连结 SS' 并延长,它与主光轴 MN 的交点即光心 O .于是,透镜的位置可确定.

在图 77(a)中,生成的是位于物同侧的放大像,用的是凸透镜;在图 77(b)中,生成的是位于物同侧的缩小像,用的是凹透镜.

从物点 S 发平行主轴的光,在图(a)中折射线与主光轴的交点即焦点 F ;在图(b)中折射线的延长线与主光轴的交点即焦点 F .

光路图如图 78 中(a)、(b)所示.

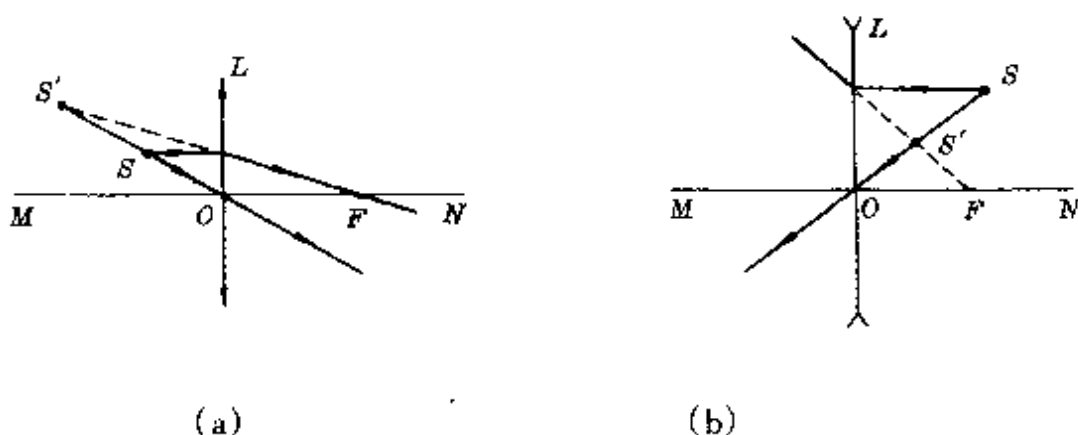


图 78

从图 77(b)画出图 78 中光路(b),属实物成虚像的情况,通常也较习惯从物点直接发光形成像(顺向思维).如果这里再作一次逆向思维——使光线仍是从左向右,可以画出如图 79 所示的光路,这就变成凸透镜对虚物(S)成实像(S')的情况.

例题 13 图 80 中 L_1 、 L_2 均为放在空气中的薄透镜, OO' 表示主轴,焦点未画出,也不明确是凸透镜还是凹透镜.试判断它们的

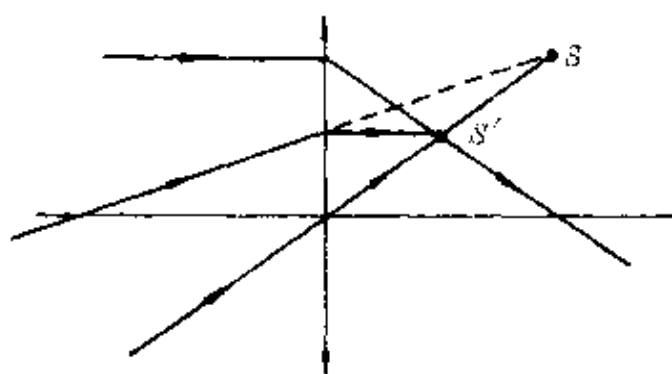


图 79

折射光线的画法是否正确(或近似正确)。

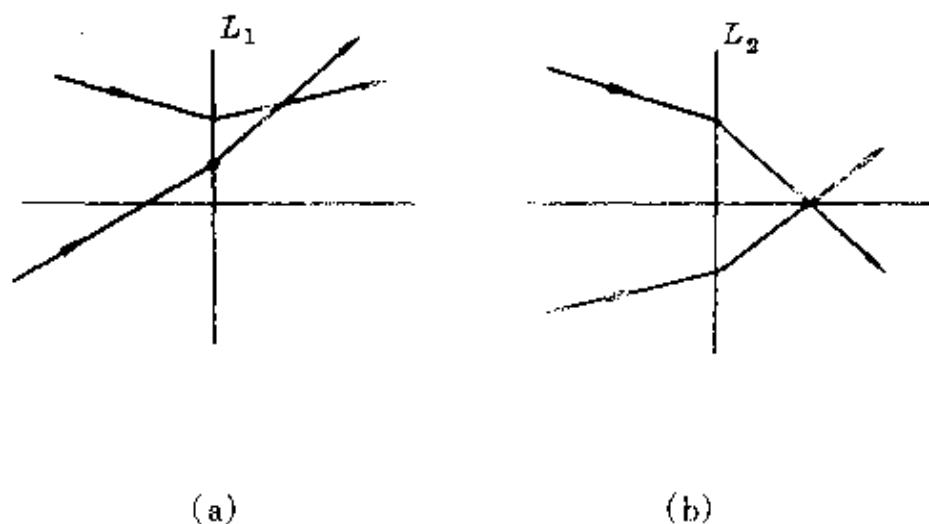


图 80

分析与解答 (a)、(b)两情况中,两条折射光线分别在透镜右侧相交.如果把交点 S' 看作物点,根据光路可逆原理,两条入射光线延长线的交点 S' 可以看成是 S 的像,如图 81 中(a)和(b)所示.

因为图 81(a)中形成的是正立、缩小的虚像,符合凹透镜成像的情况,所以图 80 中光路图(a)近似正确.在图 81(b)中形成的是正立放大的虚像,符合凸透镜成像的情况,图 80 中光路图(b)也近似正确.

例题 14 图 82 中 $A'B'$ 分别是物体通过凸透镜后成的实像和

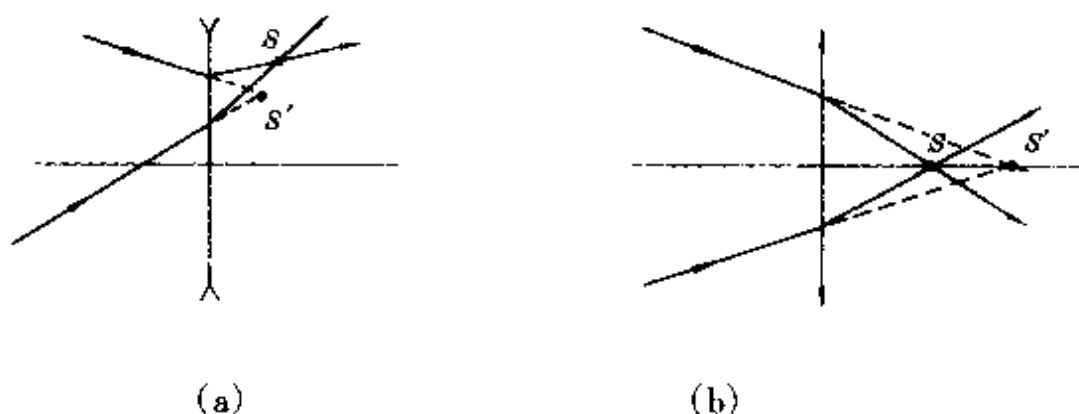


图 81

虚像,试用作图法确定物 AB .

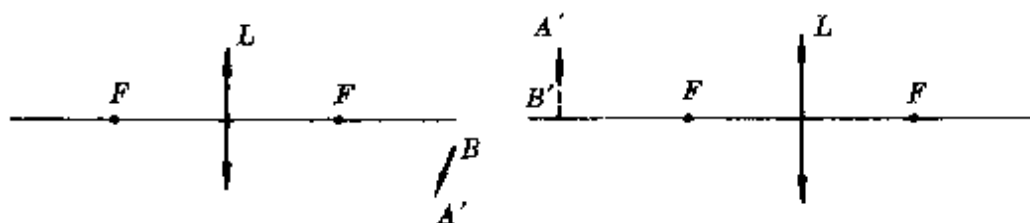


图 82

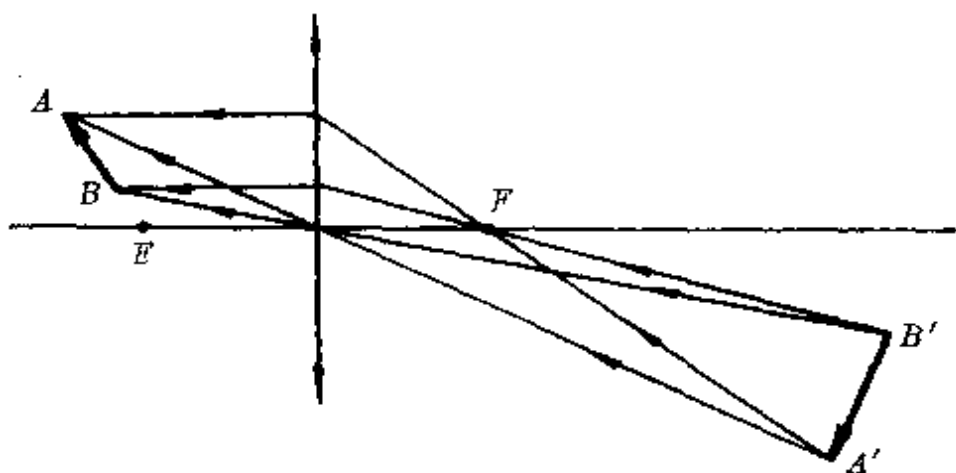
分析与解答 从像求物,是一个很明显的逆向问题,需要对特殊光线作图法“反其向而用之”。

图(a)的作法是:(1)连接 $A'O$ 并延长;(2)连接 $A'F$ 延长,过其与透镜的交点作主轴的平行线;(3)上述两线交点即物点 A ,同理可作出物点 B .实际成像光路将图 83 所示的光逆向即得。

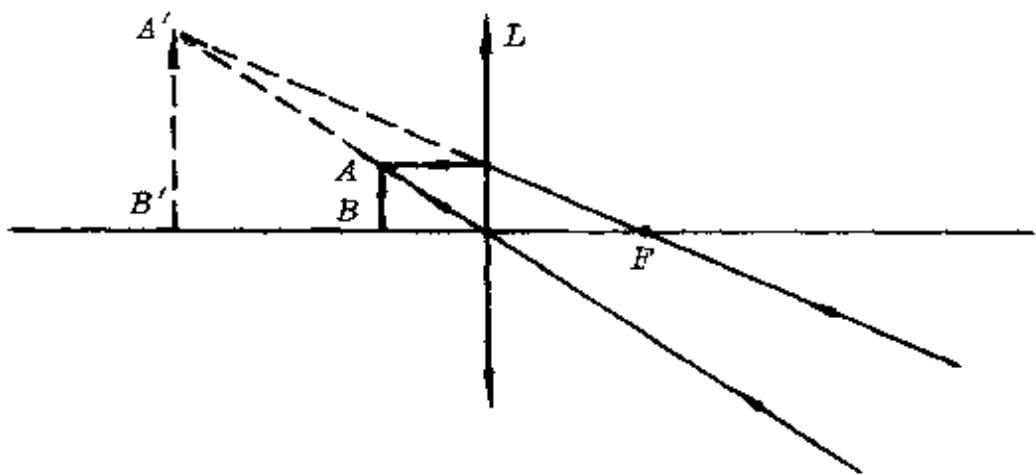
图(b)的作法是:(1)从透镜右方画出通过光心指向 A' 的直线;(2)从透镜右方通过焦点画出指向 A' 的直线,过它与透镜的交点作主轴的平行线;(3)上述两线在镜左方的交点即物点 A ,由此即可画出物 AB .实际成像光路将图 83 所示的光逆向即得。

例题 15 图 84 中 $A'B'$ 是物体经放大镜 L (凸透镜)所成的虚像,试用作图法确定能观察到完整像的区域。

分析与解答 观察区域(或称视场范围)由经透镜边缘的折射



(a)



(b)

图 83

光所决定.由于物体位置不明确,因此也必须运用光路可逆原理.首先找出物体的位置,然后通过物体发出的边缘光确定观察区域,如图 85 中画有斜线的区域.

比较方便的方法是通过虚像点 A' 、 B' 分别引连接透镜边缘的直线,它们在透镜右方以透镜为底的三角形区域即视场范围.

例题 16 一束光会聚于 D ,若在会聚点左侧 10 厘米处放上一个焦距 $f = 6$ 厘米的凸透镜,这束光会聚于何处(图 86)? 如把凸透

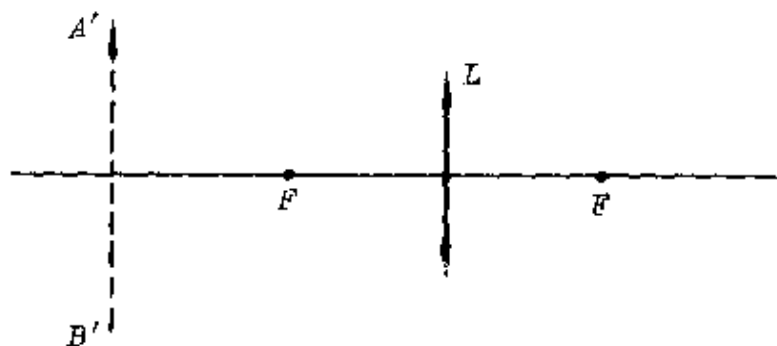


图 84

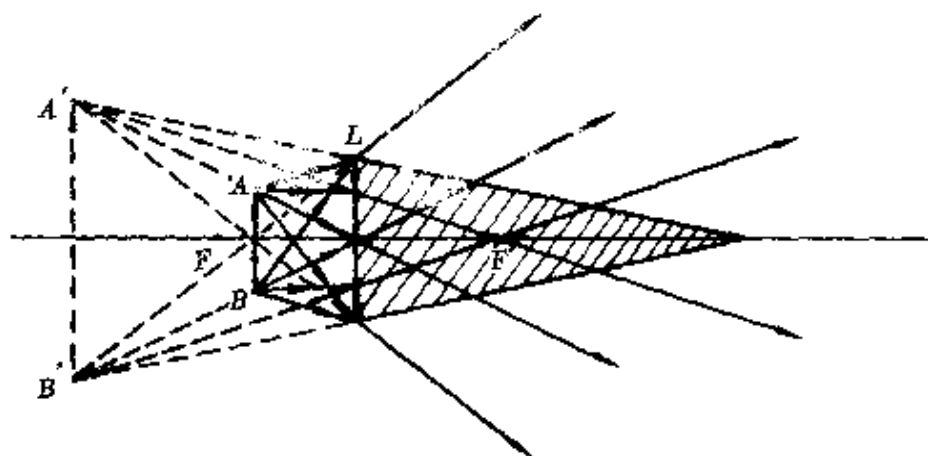


图 85

镜换成焦距为 6 厘米的凹透镜, 这束光会聚于何处?

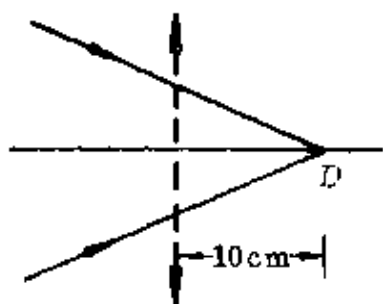


图 86

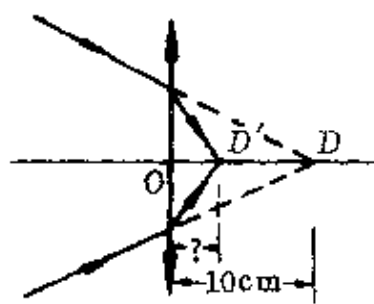


图 87

分析与解答 加上凸透镜后,使原来会聚的光“更加会聚”,即其会聚点向左移,设为 D' (图 87). 根据光路可逆原理,可以把会聚点 D' 作为一个点光源,它向左发射的光经透镜后成像于 D . 由 v

= -10 厘米, $f = 6$ 厘米, 代入透镜公式得物距

$$u = \frac{vf}{v-f} = \frac{(-10) \times 6}{-10-6} \text{ 厘米} = 3.75 \text{ 厘米}.$$

所以新的会聚点在原会聚点左方 6.25 厘米处.

当换成凹透镜时, 会聚点将向右移, 设为 D' (图 88). 同样可把 D' 作为光源, 它发出的光经凹透镜后成像于 D . 由透镜成像公式得

$$u = \frac{vf}{v-f} =$$

$$\frac{(-10) \times (-6)}{(-10) - (-6)} \text{ 厘米} = 15 \text{ 厘米}.$$

即会聚在原会聚点右方 5 厘米处.

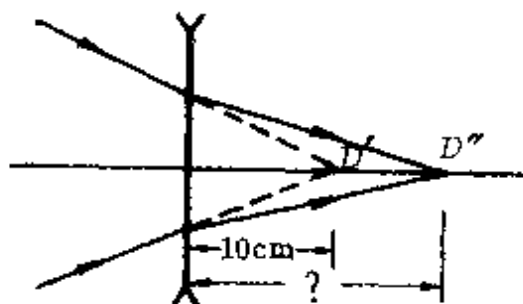


图 88

例题 17 用凸透镜使物体成像在光屏上, 若保持物体与屏的间距 L 不变 ($L > 4f$), 第一次得到的是像高为 a 的放大像, 把透镜向屏移动距离 d 后, 第二次得到的是像高为 b 的缩小像, 试求物体的高度 (图 89).

分析与解答 设物高为 h , 根据光路可逆原理, 当把像 $A_2 B_2$ 看作物时, AB 就是它的像. 因此, 前后两次的物距和像距间满足关系式:

$$u_1 = v_2, u_2 = v_1.$$

根据线放大率公式, 前后两次放大率分别为

$$m_1 = \frac{a}{h} = \frac{v_1}{u_1}, \quad m_2 = \frac{b}{h} = \frac{v_2}{u_2}.$$

因为 $m_1 m_2 = \frac{ab}{h^2} = \frac{v_1}{u_1} \cdot \frac{v_2}{u_2} = 1,$

所以 $h = \sqrt{ab}.$

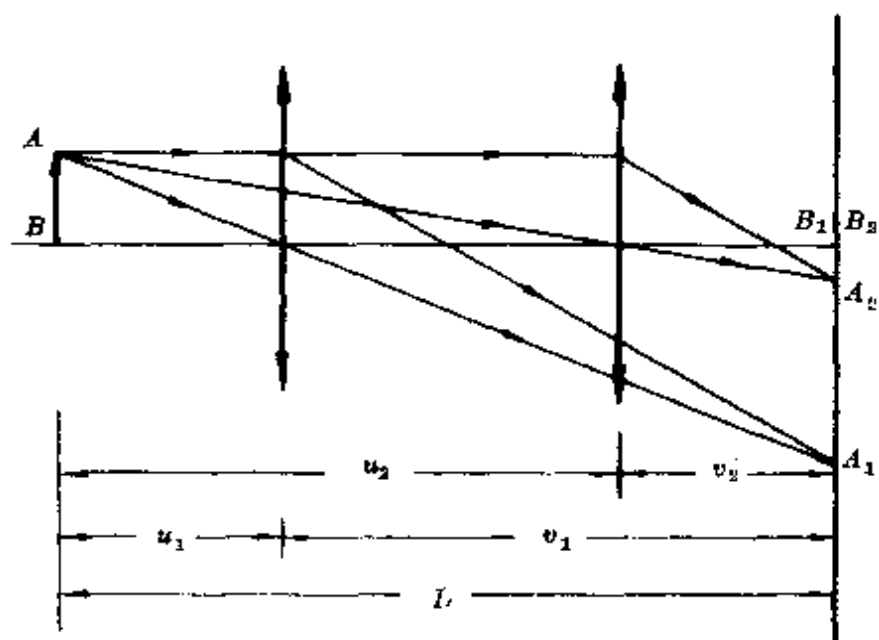


图 89

2. 一题多解

一题多解是一个十分诱人的内容,不过,希望读者不要仅关注解法的多少,而应把注意力集中在思维方法的开掘上.

例题 1 同一平面内作用在一点的三个力 $F_1 = 20$ 牛、 $F_2 = 30$ 牛、 $F_3 = 40$ 牛,互成 120° 角,如图 90 所示,试求它们合力的大小.

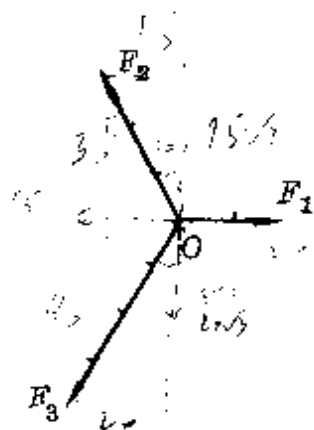


图 90

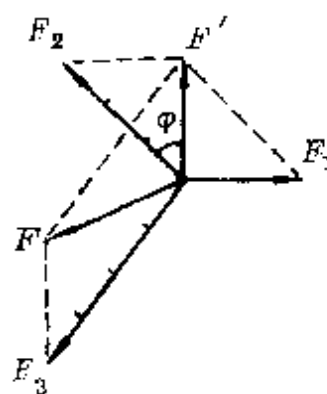


图 91

分析 求合力的基本方法是平行四边形法.对三个或三个以上的力,可依次合成(各力的次序可变换),也可以采用先分解后合成等方法.

解法(1) 依次先合成 F_1 、 F_2 得合力 F' ,再把 F' 和 F_3 合成得 F (图 91).则由

$$\begin{aligned} F' &= \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2\cos 120^\circ} \\ &= \sqrt{400 + 900 + 2 \times 20 \times 30\cos 120^\circ} \text{牛} \\ &= 10\sqrt{7} \text{牛}. \end{aligned}$$

设 F' 与 F_2 的夹角为 φ ,则

$$\cos \varphi = \frac{F_2^2 + F'^2 - F_1^2}{2F_2F'} = \frac{2}{7}\sqrt{7} = 0.76,$$

得 $\varphi \approx 40.5^\circ$.

所以 $F = \sqrt{F'^2 + F_3^2 + 2F'F_3\cos(120^\circ + 40.5^\circ)}$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{700 + 1600 + 800\sqrt{7}\cos 160.5^\circ} \text{牛} \\ &= 17.3 \text{牛}. \end{aligned}$$

这个方法由于角度 φ 的计算不方便,运算较繁复.

解法(2) 变换合成次序,先合成 F_1 、 F_3 得 F'' ,再把 F'' 与 F_2 合成得 F ,如图 92 所示.这里

$$\begin{aligned} F'' &= \sqrt{F_1^2 + F_3^2 + 2F_1F_3\cos 120^\circ} \\ &= \sqrt{400 + 1600 + 2 \times 20 \times 40\cos 120^\circ} \text{牛} \\ &= 20\sqrt{3} \text{牛}. \end{aligned}$$

由三角形边角特性,易知 F'' 与 F_3 的夹角 $\theta = 30^\circ$,所以合力

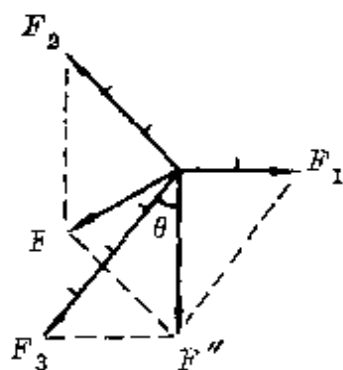


图 92

$$F = \sqrt{F''^2 + F_2^2 + 2F''F_2\cos(90^\circ + 30^\circ)}$$

$$= 10\sqrt{3}\text{牛} = 17.3\text{牛}.$$

解法(3) 用正交分解法,先把各力分解到两个互相正交的坐标轴上,求出各分力的合力,最后合成.若选取三个力的作用点 O 为坐标原点,建立直角坐标如图 93 所示,则

$$F_x = F_1 - F_2\cos 60^\circ - F_3\cos 60^\circ$$

$$= -15\text{牛},$$

负号表示方向指向 $-x$ 方向,即与 F_1 反向.

$$F_y = F_2\sin 60^\circ - F_3\sin 60^\circ = -5\sqrt{3}\text{牛},$$

其方向指向 $-y$ 方向.于是,原来 F_1 、 F_2 、 F_3 的三个力就转化为互相垂直的 F_x 、 F_y 两个力了,如图 94 所示.

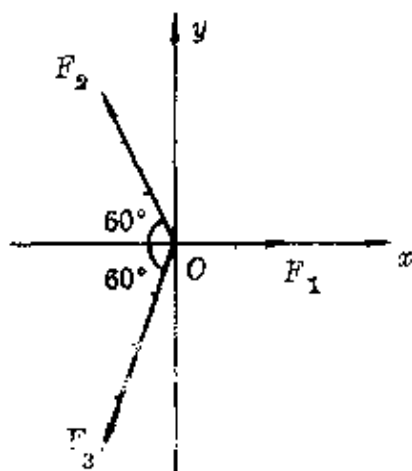


图 93

所以,合力

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = 10\sqrt{3}\text{牛} = 17.3\text{牛}.$$

解法(4) 把 F_2 分成 $F_2' = 20$ 牛、 $F_2'' = 10$ 牛的两个力, F_3 分成 $F_3' = 20$ 牛、 $F_3'' = 20$ 牛两个力.由于同一平面内三个相等的互成 120° 角的力的合力等于零,于是原来 F_1 、 F_2 、 F_3 三个力的合成,

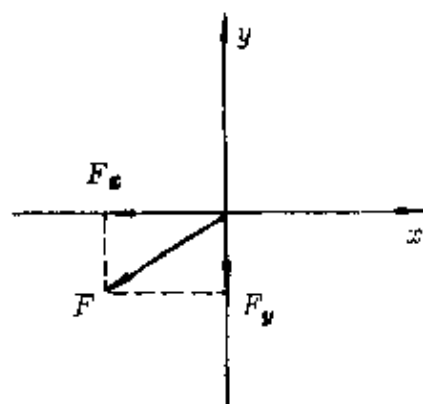


图 94

就可以转化为剩下的 F_2'' 和 F_3'' 两个力的合成,如图 95 所示.其合力为

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_2''^2 + F_3''^2 + 2F_2''F_3''\cos 120^\circ} \\ &= \sqrt{100 + 400 + 400\cos 120^\circ} \text{牛} \\ &= 10\sqrt{3} \text{牛} = 17.3 \text{牛}. \end{aligned}$$

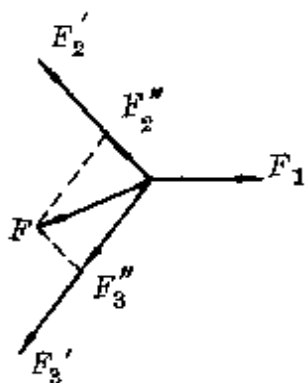


图 95

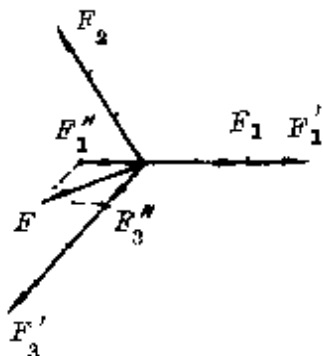


图 96

解法(5) 把 F_1 看成 $F_1' = 30$ 牛、 $F_1'' = 10$ 牛两个反向力的合力.把 F_3 看成 $F_3' = 30$ 牛、 $F_3'' = 10$ 牛两个同向力的合力.由于 F_1' 、 F_2 、 F_3' 的合力为零,所以原来 F_1 、 F_2 、 F_3 的合成就转化为 F_1'' 与 F_3'' 的合成,其夹角为 60° ,如图 96 所示.所以合力为

$$\begin{aligned} F &= \sqrt{F_1''^2 + F_3''^2 + 2F_1''F_3''\cos 60^\circ} \\ &= \sqrt{100 + 100 + 200\cos 60^\circ} \text{牛} \\ &= 10\sqrt{3} \text{牛} = 17.3 \text{牛}. \end{aligned}$$

解法(6) 用图示法.把 F_2 、 F_3 保持原方向平移,依次首尾相接,最后连接 F_1 始端和 F_3 末端的有向线段就代表合力,如图 97 所示.设 $F_1 = (30 - 10)$ 牛, $F_3 = (30 + 10)$ 牛,于是,与解法(5)同理得合力

$$F = 17.3 \text{牛}.$$

上述最后的三个解法,由于作了一些变换,计算简单得多.可见,同样一个平行四边形法则,由于适当地变换了思考角度,会收到很奇特的效果.

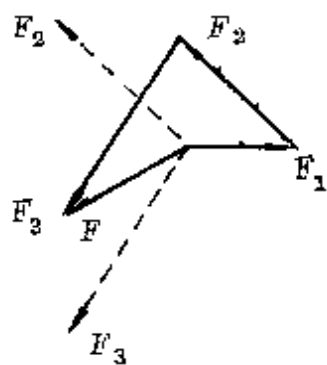


图 97

例题 2 试证在匀变速直线运动中,某段时间内的平均速度等于这段时间中点时刻的即时速度,即

$$v_n = \frac{s_n + s_{n+1}}{2T}.$$

分析 题中未说明初速是否为零,对所取时间的长短也未限定,因此需作普遍情况下的证明.

如图 98 所示,设质点以恒定的加速度 a 沿直线做匀加速运动.取途中经某处 A 点时的速度为初速 v_0 ,并从 A 点开始计时,选取任意两个连续的时间间隔,设这段时间中点的即时速度为 v_n ,末速度为 v_{n+1} ,对应这两个时间间隔质点的位移分别为 s_n 和 s_{n+1} .

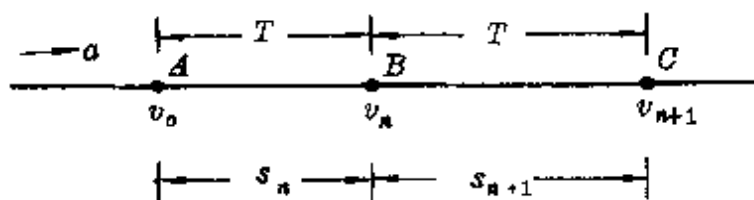


图 98

证法(1) 根据运动学公式

$$s_n = v_0 T + \frac{1}{2} a T^2,$$

$$s_{n+1} = (v_0 + aT) T + \frac{1}{2} a T^2.$$

因为 $s_n + s_{n+1} = 2(v_0 T + aT^2)$,

所以 $\frac{s_n + s_{n+1}}{2T} = v_0 + aT = v_n$.

证法(2) 根据平均速度的定义

$$\bar{v} = \frac{s_n + s_{n+1}}{2T} = \frac{v_0 \cdot 2T + \frac{1}{2} a(2T)^2}{2T} = v_0 + aT.$$

因为 $v_n = v_0 + aT$,

所以 $\frac{s_n + s_{n+1}}{2T} = v_n$.

证法(3) 根据运动学公式

$$v_{n+1}^2 - v_0^2 = 2a(s_n + s_{n+1}),$$

即 $(v_n + aT)^2 - (v_n - aT)^2 = 2a(s_n + s_{n+1})$

所以 $\frac{s_n + s_{n+1}}{2T} = v_n$.

证法(4) 根据运动学公式

$$\Delta s = s_{n+1} - s_n = aT^2,$$

所以 $s_n + s_{n+1} = 2s_n + aT^2$.

因为 $s_n = v_0 T + \frac{1}{2} aT^2 = T\left(v_0 + \frac{1}{2} aT\right)$
 $= T\left(v_0 + aT - \frac{1}{2} aT\right) = T\left(v_n - \frac{1}{2} aT\right),$

所以 $s_n + s_{n+1} = 2T\left(v_n - \frac{1}{2} aT\right) + aT^2 = 2Tv_n,$

即 $\frac{s_n + s_{n+1}}{2T} = v_n$.

证法(5) 画出 $v-t$ 图如图 99 所示. 在连续两段时间 T 的位移 $s_n + s_{n+1}$, 数值上等于上底为 v_0 、下底为 v_{n+1} 的梯形面积. 由于这条图线的斜率一定, 因此这个梯形的面积就等于以梯形的中线

(其值为 v_n) 为高、底为 $2T$ 的一个矩形的面积. 于是, 立即可得

$$s_n + s_{n+1} = v_n \cdot 2T,$$

即
$$\frac{s_n + s_{n+1}}{2T} = v_n.$$

例题 3 以初速 $v_0 = 200$ 米/秒、射角 $\theta = 30^\circ$ 发射一颗炮弹, 落入离水平地面深 $h = 50$ 米的一个凹坑中(图 100), 试求炮弹从发射到落地的时间和炮弹的水平射程. 取 $g = 10$ 米/秒².

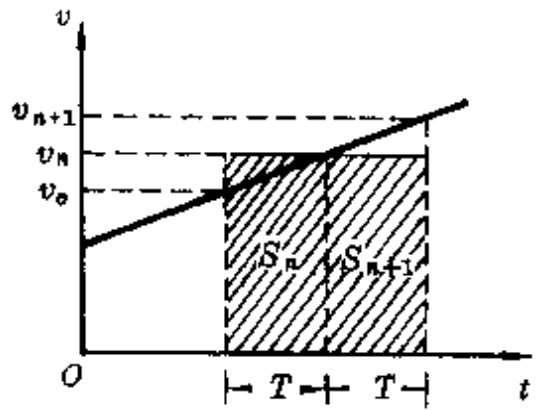


图 99

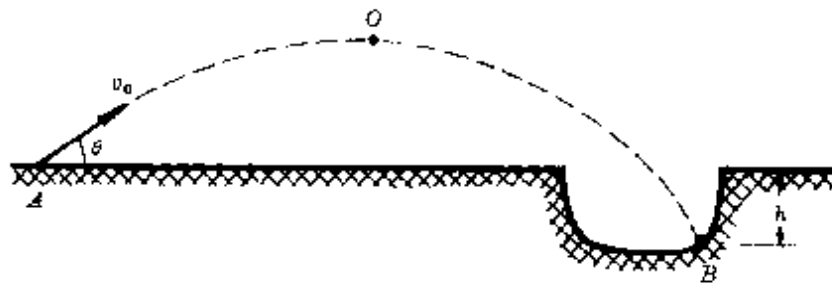


图 100

分析 由于炮弹的落地点与发射点不在同一水平面上, 因此不能直接代入斜抛运动的时间公式和射程公式, 必须根据运动性质另作设想.

解法(1) 从炮弹运动轨道的最高点 O 把炮弹的运动分成两部分: AO 段炮弹做斜抛运动, OB 段炮弹做平抛运动. 设前、后两段的运动时间分别为 t_1 和 t_2 , 炮弹的射高(即 AO 的竖直高度)为 H , 则

$$t_1 = \frac{v_0 \sin \theta}{g} = \frac{200 \sin 30^\circ}{10} \text{ 秒} = 10 \text{ 秒},$$

$$H = \frac{(v_0 \sin \theta)^2}{2g} = \frac{(200 \sin 30^\circ)^2}{2 \times 10} \text{ 米} = 500 \text{ 米},$$

$$t_2 = \sqrt{\frac{2(H+h)}{g}} = \sqrt{\frac{2(500+50)}{10}} \text{秒} = 10.5 \text{秒}.$$

所以炮弹从发射到落地的运动时间

$$t = t_1 + t_2 = 20.5 \text{秒}.$$

由于炮弹水平方向不受力,做匀速直线运动,故炮弹的水平射程为

$$X = v_0 \cos \theta t = 200 \cos 30^\circ \times 20.5 \text{米} = 3550.6 \text{米}.$$

解法(2) 设想没有凹坑,则炮弹落至与发射点同一水平面上的 A' 点(图 100 中未画出)的时间为

$$t' = 2 \frac{v_0 \sin \theta}{g} = 2 \times \frac{200 \sin 30^\circ}{10} \text{秒} = 20 \text{秒}.$$

炮弹从 A' 向坑底落下,做斜下抛运动,其竖直分速度大小 $v_y' = v_0 \sin \theta = 100 \text{米/秒}$. 于是由

$$h = v_0 \sin \theta t_2' + \frac{1}{2} g t_2'^2,$$

即 $50 = 100 t_2' + 5 t_2'^2,$

得合理解 $t_2' = 0.5 \text{秒}$.

所以,炮弹从 A 发射到落至坑底 B 的总时间和水平位移分别为

$$t = t_1' + t_2' = 20.5 \text{秒},$$

$$X = v_0 \cos \theta t = 3550.6 \text{米}.$$

解法(3) 从整个运动的竖直方向考虑,炮弹在恒定的重力作用下做匀减速运动,最后落至抛出点下方.当规定竖直向上的方向为正方向时,由

$$-h = v_0 \sin \theta t - \frac{1}{2} g t^2,$$

即
$$-50 = 200\sin 30^\circ t - \frac{1}{2} \times 10t^2,$$

立即可得运动时间的合理值为

$$t = 20.5 \text{ 秒}.$$

所以炮弹的射程

$$X = v_0 \cos \theta t = 3550.6 \text{ 米}.$$

例题 4 能否发射一颗周期为 80 分钟的人造地球卫星?

分析 人造地球卫星由地球对它的引力作为向心力,其最小半径等于地球半径,对应这最小半径有最短的运动周期和最大的环绕速度,因此可以作几方面的比较.

解法(1) 设周期 $T = 80 \text{ 分钟} = 4800 \text{ 秒}$ 的人造地球卫星的环绕半径为 R , 不计地球自转时, 由

$$G \frac{Mm}{R^2} = m \frac{4\pi^2 R}{T^2}, \quad G \frac{Mm}{R_0^2} = mg,$$

得
$$R = \sqrt[3]{\frac{GMT^2}{4\pi^2}} = \sqrt[3]{\frac{R_0^2 g T^2}{4\pi^2}}.$$

代入数据 $R_0 = 6.4 \times 10^6 \text{ 米}$, $g = 9.8 \text{ 米/秒}^2$, 计算得

$$R \approx 6.17 \times 10^6 \text{ 米} < R_0.$$

所以不可能发射周期为 80 分钟的卫星.

解法(2) 设卫星离地面高 h , 由

$$G \frac{Mm}{(R_0 + h)^2} = m \frac{v^2}{R_0 + h},$$

得
$$v = \sqrt{\frac{GM}{R_0 + h}}.$$

当 $h = 0$, 即贴着地表飞行的卫星的环绕速度最大, 其值为

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{GM}{R_0}} = \sqrt{R_0 g} \approx 7.9 \times 10^3 \text{ 米/秒}.$$

周期为 $T = 4800$ 秒的卫星, 它的环绕速度为

$$v' = \frac{2\pi R_0}{T} = \frac{2 \times 3.14 \times 6.4 \times 10^6}{4800} \text{米/秒}$$
$$\approx 8.4 \times 10^3 \text{米/秒}.$$

由于 $v' > v_{\max}$, 显然是不合理的, 所以不可能发射 $T = 80$ 分钟的卫星.

解法(3) 同理, 由

$$G \frac{Mm}{(R_0 + h)^2} = m \frac{4\pi^2(R_0 + h)}{T^2},$$

得
$$T = 2\pi(R_0 + h)\sqrt{\frac{R_0 + h}{GM}}.$$

当 $h = 0$ 时, 即贴着地表飞行的卫星的周期最短, 其值为

$$T_{\min} = 2\pi R_0 \sqrt{\frac{R_0}{GM}} = 2\pi \sqrt{\frac{R_0}{g}} \approx 5075 \text{秒}.$$

由于 $T_{\min} = 5075 \text{秒} > 80 \text{分钟}$, 可见不可能发射这种卫星.

解法(4) 根据向心力公式

$$F_n = m \frac{4\pi^2(R_0 + h)}{T^2},$$

对于给定周期 T 的一个确定的卫星, 当 $h = 0$ 时所需向心力最小, 即

$$F_{n\min} = m \frac{4\pi^2 R_0}{T^2} = \frac{4\pi^2 \times 6.4 \times 10^6}{(4.8 \times 10^3)^2} m = 10.96m.$$

因为卫星沿地表($h = 0$)飞行时, 地球可以提供的向心力为

$$F_n' = G \frac{Mm}{R_0^2} = mg = 9.8m < F_{n\min},$$

可见, 无法发射 $T = 80$ 分钟的卫星.

例题 5 一辆质量 $m = 5 \times 10^3$ 千克的汽车, 以初速 $v_1 = 10$

米/秒开上斜坡,经 $s = 100$ 米后汽车升高 $h = 10$ 米,车速减为 $v_2 = 5$ 米/秒,假设运动中汽车受到的阻力 f 恒为车重的 5%,试求汽车的牵引力,取 $g = 10$ 米/秒².

分析 汽车上坡过程中,受到沿坡面向上的牵引力 F 、沿坡面向下的重力分力 $G_1 = mg \sin\alpha$ ($\sin\alpha = \frac{h}{s} = \frac{1}{10}$) 和阻力 $f = 5\% mg$. 在这些恒力共同作用下,汽车做匀减速运动(图 101). 为求牵引力,可以从牛顿第二定律、动能定理、功能原理等几方面考虑.

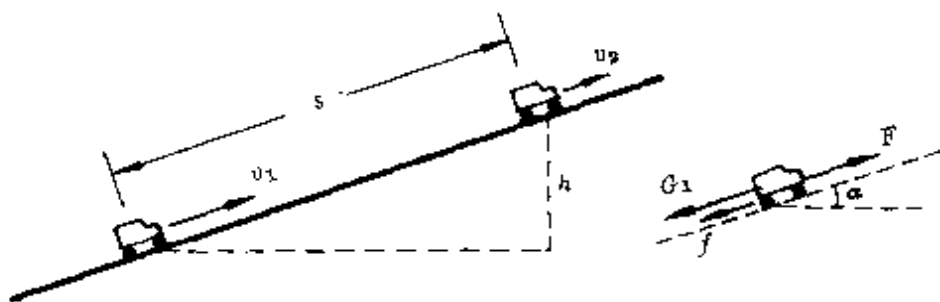


图 101

解法(1) 用牛顿第二定律结合运动学公式

因为 $v_2^2 - v_1^2 = 2as$,

所以 $a = \frac{v_2^2 - v_1^2}{2s} = \frac{25 - 100}{2 \times 100} \text{米/秒}^2 = -\frac{3}{8} \text{米/秒}^2$.

加速度为负,表示其方向沿斜面向下.

设汽车所受牵引力为 F ,取沿斜面向下的方向(即 a 的方向)为正方向,由牛顿第二定律

$$mgs\sin\alpha + f - F = ma,$$

所以 $F = mg \frac{h}{s} + 5\% mg - ma = m \left(g \frac{h}{s} + 5\% g - a \right)$

$$= 5 \times 10^3 \left(10 \times \frac{1}{10} + 0.05 \times 10 - \frac{3}{8} \right) \text{牛}$$

$$= 5625 \text{牛}.$$

注意:由于已规定 a 的方向为正方向,所以代入数据时, a 应以 $\frac{3}{8}$ 米/秒² 代入,而不能以 $-\frac{3}{8}$ 米/秒² 代入.

解法(2) 用动能定理——作用在汽车上所有外力的功等于汽车动能的增量.

因为
$$\Delta E_k = \frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2),$$

$$\sum W = F s - m g \sin \alpha \cdot s - 5\% m g s,$$

由
$$\sum W = \Delta E_k,$$

所以
$$F = \frac{\Delta E_k + m g s \sin \alpha + 5\% m g s}{s}$$

$$= \frac{\Delta E_k}{s} + m g \sin \alpha + 5\% m g$$

$$= \frac{m (v_2^2 - v_1^2)}{2s} + m g \frac{h}{s} + 5\% m g$$

$$= 5625 \text{牛}.$$

解法(3) 用功能原理——汽车在上坡过程中牵引力和阻力所做的总功等于汽车机械能的变化,即

$$(F - 5\% m g) s = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{1}{2} m (v_2^2 - v_1^2) + m g h$$

所以
$$F = \frac{m (v_2^2 - v_1^2)}{2s} + m g \frac{h}{s} + 5\% m g$$

$$= 5625 \text{牛}.$$

解法(4) 用动量定理——作用在汽车上合外力的冲量等于汽车动量的变化.以沿斜面向上为正方向时,则

$$(F - mgsin\alpha - 5\%mg)t = mv_2 - mv_1.$$

由于汽车做匀减速运动,因此其运动时间

$$t = \frac{s}{v} = \frac{s}{\frac{v_1 + v_2}{2}} = \frac{2s}{v_1 + v_2}.$$

联立两式,得

$$\begin{aligned} F &= \frac{m(v_2^2 - v_1^2)}{2s} + mgsin\alpha + 5\%mg \\ &= 5625 \text{ 牛}. \end{aligned}$$

例题 6 用销钉固定的活塞把水平放置的容器分隔成两部分,其体积之比为 $V_A : V_B = 2:1$,如图 102 所示.起初 A 中有温度为 127°C 、压强为 1.8×10^5 帕的空气, B 中有温度为 27°C 、压强为 1.2×10^5 帕的空气.拔出销钉后,活塞可以无摩擦地移动,但 A、B 两部分气体互不迁移.由于容器壁缓慢导热,最后两部分气体都变到室温 27°C .活塞也停在,求最后 A 中气体的压强.

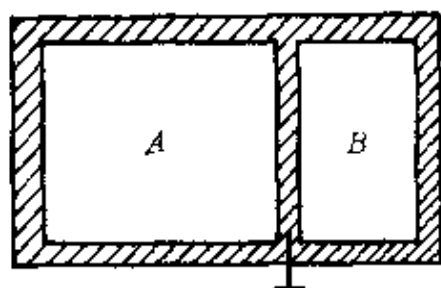


图 102

分析 A、B 两部分气体是独立的两个研究对象,它们的状态参量及相互联系如下表所示:

对象	初 态	终 态
A	$p_A = 1.8 \times 10^5 \text{ Pa},$ $T_A = 400\text{K}, V_A$	$p_A', T_A' = 300\text{K}, V_A'$
B	$p_B = 1.2 \times 10^5 \text{ Pa},$ $T_B = 300\text{K}, V_B$	$p_B', T_B' = 300\text{K}, V_B'$
联系	$V_A = 2V_B, V_A + V_B = V_A' + V_B'$ $p_A' = p_B' = p, T_A' = T_B' = T = 300\text{K}$	

解法(1) 分别写出 A、B 两部分气体的状态方程

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_A' V_A'}{T_A'} = \frac{p V_A}{T},$$

$$\frac{p_B V_B}{T_B} = \frac{p_B' V_B'}{T_B'} = \frac{p V_B}{T}.$$

又 $V_A + V_B = V_A' + V_B' = 3V_B.$

联立得 A 中气体的压强(也等于 B 中气体的压强)为

$$\begin{aligned} p &= \frac{T}{3} \left(\frac{2p_A}{T_A} + \frac{p_B}{T_B} \right) \\ &= \frac{300}{3} \left(\frac{2 \times 1.8 \times 10^5}{400} + \frac{1.2 \times 10^5}{300} \right) \text{帕} \\ &= 1.3 \times 10^5 \text{帕}. \end{aligned}$$

解法(2) 拔出销钉前,设想使 A 中气体充满整个容器,并使其温度降到 $T_A' = T = 300\text{K}$,由气态方程

$$\frac{p_A V_A}{T_A} = \frac{p_A' (V_A + V_B)}{T},$$

得此时 A 中气体单独充满容器的压强为

$$p_A' = \frac{TV_A}{T_A(V_A + V_B)} p_A = \frac{2T}{3} \cdot \frac{p_A}{T_A}.$$

同理,设想使 B 中气体保持 $T_B = 300\text{K}$ 也充满整个容器,则由玻意耳定律

$$p_B V_B = p_B' (V_A + V_B),$$

得 B 中气体单独充满容器的压强为

$$p_B' = \frac{V_B}{V_A + V_B} p_B = \frac{1}{3} p_B.$$

容器中后来的压强,等于 A、B 两部分气体单独存在时产生的压强之和(分压定律),即

$$\begin{aligned}
 p &= p_A' + p_B' = \frac{2T}{3} \cdot \frac{p_A}{T_A} + \frac{1}{3} p_B \\
 &= 1.3 \times 10^5 \text{ 帕.}
 \end{aligned}$$

解法(3) 因拔掉销钉前后 A、B 两部分气体的总质量和总体积不变,由克拉珀龙方程和质量守恒得

$$\frac{p_A V_A M}{RT_A} + \frac{p_B V_B M}{RT_B} = \frac{p_A' V_A' M}{RT_A'} + \frac{p_B' V_B' M}{RT_B'}$$

即
$$\frac{p_A V_A}{T_A} + \frac{p_B V_B}{T_B} = p \left(\frac{V_A'}{T_A'} + \frac{V_B'}{T_B'} \right)$$

又
$$V_A + V_B = V_A' + V_B' = 3V_B,$$

所以
$$p = \frac{T}{3} \left(\frac{2p_A}{T_A} + \frac{p_B}{T_B} \right) = 1.3 \times 10^5 \text{ 帕.}$$

气体状态变化的问题,除了这三种基本的方法外,往往还可作多种试想,有时能构成 5~6 种甚至更多种的解法,留给读者去自由发挥吧.

例题 7 如图 103 所示,一颗质量为 m 、电量为 q 的微粒,从两块相距为 d 、水平放置的平行板中某点由静止释放,落下高度 h 后,在平行板上加上一定的电压 U ,带电微粒经一定时间后速度变为零.若微粒通过的总位移为 H ,试问:两板间的电势差为多少?

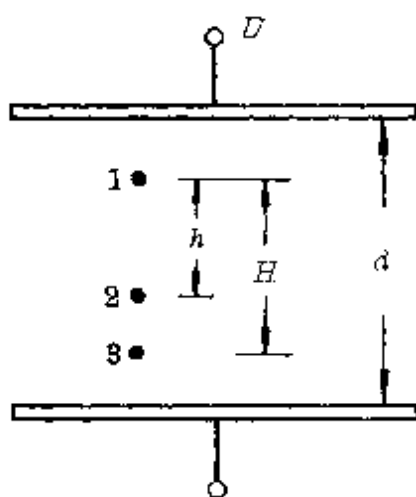


图 103

分析 由题意知,微粒从位置 1→2 的过程中,仅受重力作用,做匀加速运动;从位置 2→3 的过程中,除受重力外,还受到向上的电场力,做匀减速运动.考虑到微粒所受的电场力(或电势能)后,同样可以从力和运动的几条基本规律求解.

解法(1) 从微粒受力,用牛顿第二定律结合运动学公式求解.

$$1 \rightarrow 2 \text{ 时} \quad a_1 = g, \quad v_2 = \sqrt{2gh};$$

$$2 \rightarrow 3 \text{ 时} \quad mg - q \frac{U}{d} = ma_2,$$
$$v_3^2 - v_2^2 = 2a(H - h),$$
$$v_3 = 0.$$

联立各式得电势差

$$U = \frac{mgHd}{q(H - h)}.$$

解法(2) 从全过程(1→3)中作用在微粒上的力对它做的功和引起的动能变化,用动能定理

$$1 \rightarrow 3 \text{ 时} \quad \sum W = mgH - \frac{qU}{d}(H - h),$$
$$\Delta E_k = \frac{1}{2}mv_3^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 = 0.$$

$$\text{由} \quad mgH - \frac{qU}{d}(H - h) = 0,$$

得电势差

$$U = \frac{mgHd}{q(H - h)}.$$

解法(3) 从全过程中能的转化出发,微粒重力势能的减少完全消耗于克服电场力的功,可建立关系式

$$mgH = q \frac{U}{d}(H - h),$$

得电势差

$$U = \frac{mgHd}{q(H - h)}.$$

例题 8 一根质量 $m = 50$ 克的 π 形均质细导线, 其水平部分 ab 长 $l = 20$ 厘米, 处在垂直纸面向内、 $B = 0.2$ 特的匀强磁场中. 导线的两端分别浸入两个浅水银槽内, 两水银槽和电源、开关相连, 如图 104 所示. 当开关接通时, π 形导线会竖直向上跳起. 若测得跳起的高度 $h =$

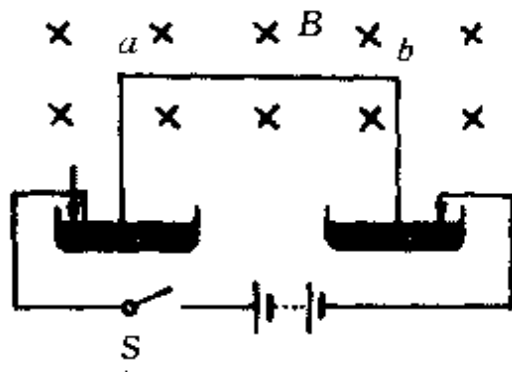


图 104

2.5 厘米, 试求通电瞬间通过导体截面的电量是多少? 取 $g = 10$ 米/秒², 在跳起瞬间, 导体所受重力可忽略.

分析 合上开关 S 时, π 形导线中水平部分的电流从 a 流向 b , 它受到向上的磁场力, 在这个磁场力冲量的作用力使导线跳起.

解法(1) 设通电时间为 Δt , 在这段时间内通过导体截面的电量为 q , 则平均电流 $I = \frac{q}{\Delta t}$. 通电时导体所受的磁场力(安培力)为

$$F = BI l = B \frac{q}{\Delta t} l.$$

导线竖直上跳的初速度为

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

由动量定理知

$$F \Delta t = \Delta m v,$$

即
$$B \frac{q}{\Delta t} l \cdot \Delta t = m v,$$

所以
$$q = \frac{m v}{B l} = \frac{m \sqrt{2gh}}{B l} = \frac{0.05 \times \sqrt{2 \times 10 \times 0.025}}{0.2 \times 0.2} \text{ 库}$$

$$= 0.88 \text{ 库}.$$

解法(2) 在合上开关时,由动量定理

$$F\Delta t = \Delta mv,$$

即 $B \frac{q}{\Delta t} l \cdot \Delta t = mv.$

上跳过程中, π 形导线仅受重力作用,机械能守恒,即

$$\frac{1}{2} mv^2 = mgh.$$

联立两式得

$$q = \frac{m \sqrt{2gh}}{Bl} = 0.88 \text{ 库}.$$

解法(3) 设导线两端插入水银部分长为 s ,通电过程中的平均电流为 I ,则在通电时间 Δt 内导线在恒定的安培力作用下做匀加速运动,因此,

$$s = \bar{v}\Delta t = \frac{v}{2}\Delta t.$$

安培力对导线做的功等于导线动能的变化,即

$$BIs = \frac{1}{2} mv^2.$$

导线上跳过程中机械能守恒,有关系式

$$\frac{1}{2} mv^2 = mgh.$$

联立三式即得

$$q = I\Delta t = \frac{m \sqrt{2gh}}{Bl} = 0.88 \text{ 库}.$$

解法(4) 导线跳离水银槽过程中因切割磁感线产生感应电动势,其平均值为

$$\mathcal{E}' = Bl\bar{v} = Bl \frac{v}{2}.$$

它的极性与外加电源电动势 \mathcal{E} 相反, 相当于在电路中接入一个具有反电动势的用电器.

导线跳离水银槽的过程中, 不计导线重力时, 电源提供的电能全部被这个具有反电势的“用电器”吸收, 并转化为它跳起时的初动能, 即

$$\mathcal{E}I\Delta t = \mathcal{E}'I\Delta t = \frac{1}{2}mv^2,$$

或
$$Bl \frac{v}{2} \cdot I\Delta t = \frac{1}{2}mv^2.$$

所以
$$q = I\Delta t = \frac{mv}{Bl} = \frac{m \sqrt{2gh}}{Bl} = 0.68 \text{ 库}.$$

3. 一题多变

一题多变犹如找矿探宝, 能从普通、平凡的地方开发出丰富的资源, 从而起到“解一题, 通一片”, “以少胜多”的效果. 下面, 我们选择不多的几个例题作为“引子”, 希望能使读者对如何进行一题多变有些启发.

例题 1 由四根等长的光滑玻璃管组成一个菱形框架, 如图 105 所示放置. 在竖直平面里, 且 $\alpha > \beta$, 两个相同的小球, 分别沿 ABC 和 ADC 由静止下滑至 C 的时间设为 t_1 和 t_2 , 则

- A. $t_1 > t_2$.
- B. $t_1 = t_2$.
- C. $t_1 < t_2$.
- D. 条件不足, 无法判断.

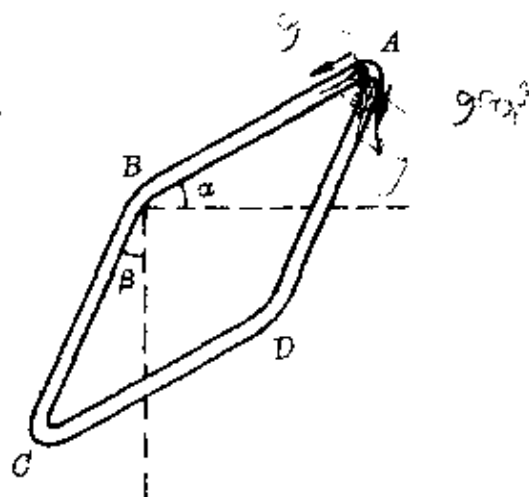


图 105

分析 本题如果从牛顿第二定律结合运动学公式通过计算判断,比较麻烦,较方便的是结合机械能守恒,利用平均速度作比较判断.

解答 因 AD 段较 AB 段陡直,根据机械能守恒, $v_D > v_B$. 两球到达 C 点的速度相同.可见,沿 ADC 段运动的小球,它在 AD 段上的平均速度大于 AB 段的平均速度,它在 DC 段上的平均速度大于 BC 段的平均速度.所以,沿 ADC 段运动的小球将先到 C 点.正确答案为 A .

变化 考察一下上题的特点,一是不受摩擦,机械能守恒;二是小球分别通过等长的距离.保持这个特点还可变化出其他问题:

(1)如图 106 所示,两相同的小球 A 、 B ,从竖立圆环水平直径的一端 M 分别以初速度 v_0 贴着圆环上、下内壁,运动到水平直径的另一端 N ,则所需时间长短如何?

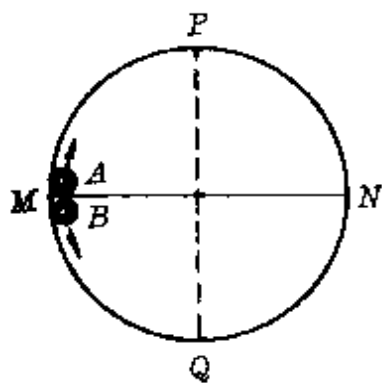


图 106

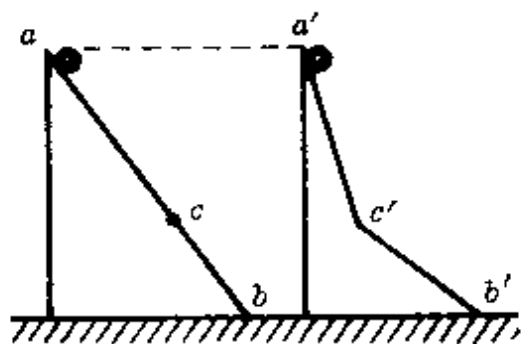


图 107

(2)如图 107 所示,两相同小球分别从等高的两个光滑斜面顶端由静止下滑,已知两斜面长 $ab = a'c' + c'b'$,比较哪一个小球先滑到底端?

(3)两相同的小球 A 和 B ,其中 A 以速度 v_0 沿光滑水平面运动, B 以速度 v_0 滑入一光滑凹槽(图 108),试比较 B 球在凹槽内的

运动时间和 A 球通过同样水平位移时间的长短。

在图 106 中, A 球沿上半圆到达顶点前做减速运动, B 球沿下半圆到达底端前做加速运动, 因此 $v_p < v_0$. 由机械能守恒, A 、 B 两球到达 N

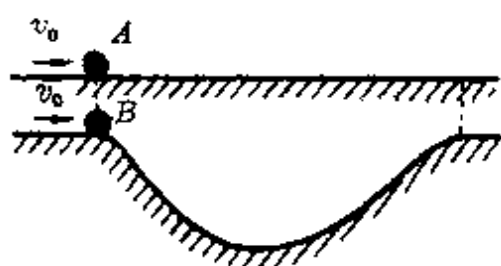


图 108

点的速度相同. 因此 A 球在 MP 段和 PN 段的平均速度分别比 B 球在 MQ 段和 QN 段的平均速度小, 两球通过的圆弧长度相同, 所以 A 球沿上半圆运动到 N 的时间较长.

在图 108 中, B 球到达底端前的下降过程中做加速运动, 以后在上升过程中做减速运动, 至水平面时又恢复为速度 v_0 (机械能守恒). B 球在凹槽内运动时水平速度的平均值大于 v_0 , 因此通过同样水平位移的时间较短.

在图 107 中, 可把 ab 斜面分成 ac 和 bc 两部分, 使得 $ac = a'c'$, $cb = c'b'$. 由于 $a'c'$ 斜面较陡, 下滑加速度大, 小球到达 c' 的速度比到达 c 的速度大 ($v^2 = 2as$). 由机械能守恒, 两球到达斜面底端 b 和 b' 的速度相同, 可见沿 $a'c'b'$ 斜面运动的平均速度较大, 它通过等长斜面的时间较短*.

例题 2 一根粗细均匀的细玻璃管, 内有一段长 h 的水银柱, 封闭着一定量的空气, 开口向下静止时, 空气柱长为 l . 当使它以加速度 a ($a < g$) 竖直向下做匀加速运动时 [图 109(a)], 则空气柱长度如何变化? 已知外界大气压为 p_0 , 水银的密度为 ρ , 设温度不变.

* 本题的几种情况也可通过图线比较, 请参阅本丛书《图示与图象》一册.

分析 这里有两个研究对象——水银和封闭的空气,在运动过程中它们遵循着不同的规律,应分别考虑.它们的联系是:空气柱与水银柱产生的压强之和应平衡大气压.

解答 设空气柱原来的压强为 p , 加速运动中空气柱的压强为 p' , 长度为 l' . 玻璃管的截面积为 S . 则对空气柱由玻意耳定律得

$$p l S = p' l' S. \quad (1)$$

加速运动中水银柱受到的力有重力 $mg = \rho S h g$ 、管内空气柱向下的压力 $p' S$ 、外界大气向上的压力 $p_0 S$, 如图 109(b) 所示. 根据牛顿第二定律得

$$p' S + \rho S h g - p_0 S = \rho S h a. \quad (2)$$

水银柱原来处于静止状态时,由力平衡条件知

$$p S + \rho S h g = p_0 S. \quad (3)$$

联立①—③三式,得空气柱长度

$$l' = \frac{p_0 - \rho g h}{p_0 - \rho(g - a)h} l < l.$$

表示空气柱长度会变短,即水银柱将向上移动.

如果只需定性判断空气柱长度的变化,可用等效原理——水银柱向下加速,相当于水银柱失重.由于水银柱产生的向下压强减小,封闭空气柱的压强必须增大,才能平衡外界大气压,当温度不变时,封闭空气柱的体积必然减小,即空气柱长度变短.

变化 这种加速运动中的气体状态变化问题,可作许多变化.其中的两个研究对象(水银柱和空气柱)遵循着不同的规律,解题

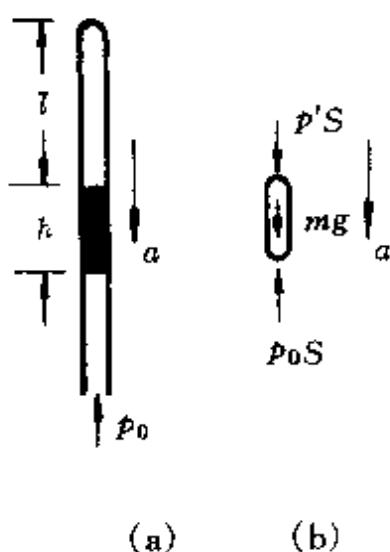


图 109

时,尤其需着力寻找出使水银柱做加速运动的力.

(1)如图 110 所示,一端封闭的 U 形管,两管中水银面高度差为 h ,当它竖直向下(或向上)以加速度 a ($a < g$) 做匀加速运动时,试判断空气柱长度的变化.

(2)在倾角为 α 的光滑斜面上,放一根一端封闭的玻璃管,内有一段长 h 的水银柱,当管子沿斜面匀加速下滑时,试判断封闭空气柱长度的变化(图 111).

(3)一辆小车沿水平路面匀加速滑行,小车上水平放置一根一端开口的玻璃管,管口有一段长 h 的水银柱,假设小车的运动非常平稳,则水银会不会从管口溢出(图 112)?

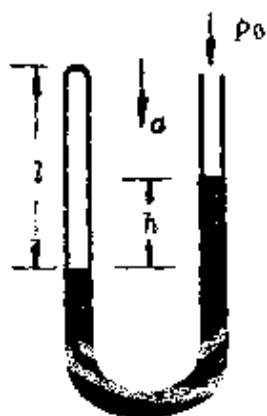


图 110

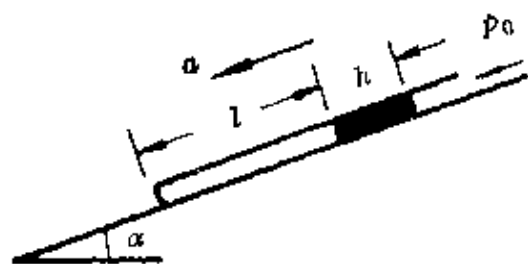


图 111

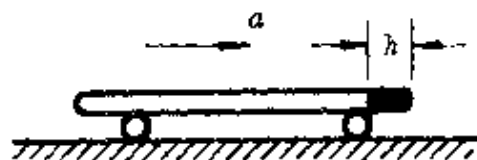


图 112

仅作定性比较时,对图 110 和图 111 的情况,仍可运用“等效”的方法:原来由外界大气压 p_0 与长 h 的一段水银柱产生的压强 (ρgh 或 $\rho gh \sin \alpha$), 共同平衡封闭气体的压强, 竖直向下和沿斜面向下加速运动时, 分别等效于在 $(g - a)$ 和 $(g - a \sin \alpha)$ 的重力场中, 水银部分失重, 它产生的压强减小, 大气压不变, 封闭气体的压强必减小, 因此空气柱会变长. 对图 112 的情况, 原来水银柱左右

两侧的压力平衡($pS = p_0S$),水平向右加速运动时,要求左侧空气对水银柱的压力增大,水银柱所受合外力水平向右,因此封闭端压强必须增大,即水银柱只会向左移压缩空气柱,所以不会从管口溢出.

这个问题还可以作较复杂的变化:

(4)一根粗细均匀、一端封闭的细玻璃管,内有一小段水银柱($h \ll l_0, h \ll l$),封闭着一定量的空气.今使玻璃管在光滑水平桌面上绕通过开端的竖直轴匀角速转动(图 113),问当转动角速度 ω 多大时能使空气柱长度变为原来的一半? 设温度不变,已知大气压为 p_0 ,水银密度为 ρ .

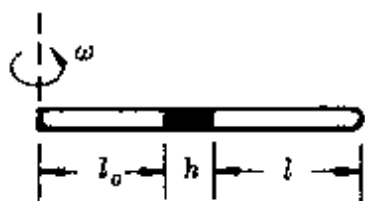


图 113

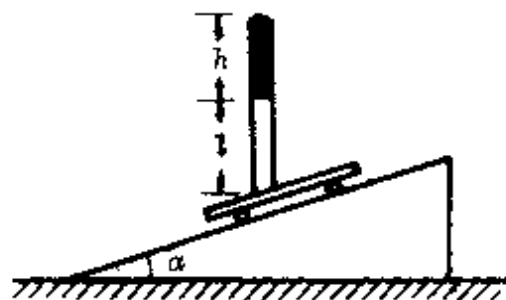


图 114

(5)如图 114 所示,一端封闭的直玻璃管,开口向上竖立在小车上.静止时,用一段长 $h = 20$ 厘米的水银柱封闭着一段长 $l = 20$ 厘米的空气柱,水银面恰与管口平齐.当小车沿倾角 $\alpha = 37^\circ$ 的斜面以 $a = 5$ 米/秒² 的加速度匀减速下滑时,那么空气柱长度变为多少? 设温度不变,已知大气压 $p_0 = 76$ 厘米汞柱,取 $g = 10$ 米/秒².

对图 113 的情况,玻璃管转动时由封闭气体与外界大气对水银柱的压力差提供水银柱所需的向心力.设玻璃管截面积为 S ,转动前后封闭气体的压强分别为 p_1, p_2 ,转动角速度为 ω .

对水银柱,由力平衡条件和向心力公式得

$$p_1 S = p_0 S,$$

$$p_2 S - p_0 S = \rho S h \omega^2 \left(l_0 + \frac{l}{2} \right).$$

对封闭气体,由玻意耳定律得

$$p_1 l S = p_2 \frac{l}{2} S.$$

联立三式即可得到角速度 ω .

在图 114 的情况中,小车匀减速向下,其加速度沿斜面向上,相当于水银超重,因此水银柱应下降,空气柱变短.

设小车下滑过程中空气柱长度变为 l' ,管截面积为 S ,则对空气柱变化前后的状态参量分别为

$$p_1 = (76 + 20) \text{厘米汞柱}; \quad V_1 = 20S;$$

$$p_2 = ? \quad V_2 = l'S.$$

对水银柱,其受力情况如图 115 所示.把沿斜面向上的加速度分解为水平、竖直两分量,则水银柱的运动方程为

$$\begin{aligned} p_2 S - mg - p_0 S \\ = m a \sin \alpha. \end{aligned}$$

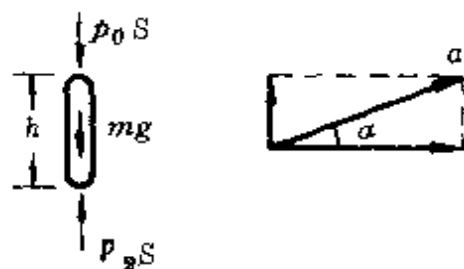


图 115

联合封闭气体所遵循的玻意耳定律,即可求出空气柱长度 l' .

结合转动的气体问题,还可演变成如图 116 和图 117 所示的情况等,解题的基本思路是一脉相承的.

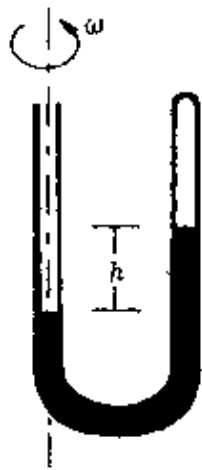


图 116

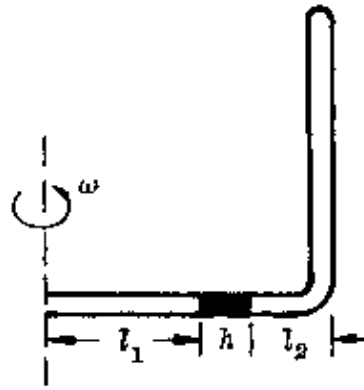


图 117

例题 3 在垂直于磁感强度 B 的匀强磁场 \times \times B \times \times 平面内, 有一根长 l 的导体棒 ab , 它以 a 为轴、以角速度 ω 匀速转动时, 如图 118 所示, ab 两端电势差为多少?

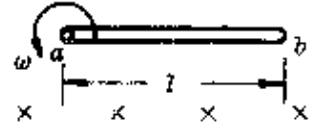


图 118

分析 棒转动时, 切割磁感线, 产生感应电动势. 由于棒处于开路状态, 它两端的电势差等于棒中电动势.

解答 棒转动时, 各处切割速度与离开转轴的距离成正比, 因此可等效成以棒中点速度做平动的切割运动, 棒中感应电动势的大小为

$$\mathcal{E} = Bl\bar{v} = Bl \cdot \frac{\omega l}{2} = \frac{1}{2} B\omega l^2.$$

它也等于棒两端的电势差, 即 $U_{ab} = \frac{1}{2} B\omega l^2$ (a 点电势比 b 点电势高).

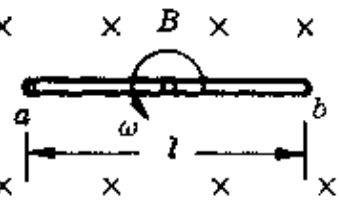


图 119

变化 如果改变转轴位置、棒的根数、磁场方向等, 就可以构成一组特性相似的问题:

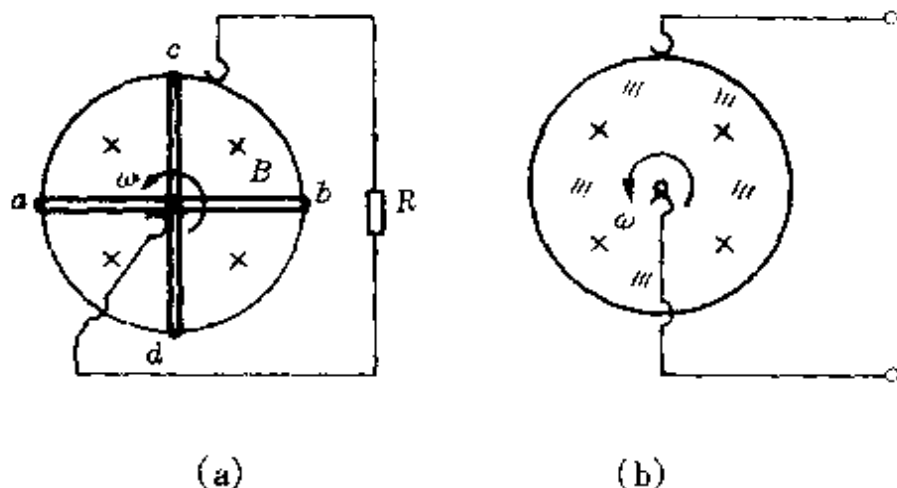


图 120

(1)以棒的中点 O 为轴匀角速转动(图 119).

此时每半根棒 (ao 、 bo) 产生大小相等的电动势, 因此 $U_{ao} = U_{bo} = \frac{1}{2} B\omega \left(\frac{l}{2}\right)^2$. 由于 a 、 b 两端等电势, 故 $U_{ab} = 0$.

如果用两根棒一起绕中心转动, 道理相同, 每半根棒相当于一个电源. 从中心和棒端用滑环引出, 就可对负载供电, 如图 120(a) 所示.

当用许多等长的棒绕它们的中心转动时, 就相当于一个圆盘 [120(b)], 这就是法拉第圆盘发电机.

(2)以棒延长线上某点 O' 为轴匀角速转动, 如图 121 所示, 设 $o'a = l_0$.

可以把 $o'b$ 设想成完整的一根棒, 其中 ao' 段和 bo' 段产生的感应电动势分别为

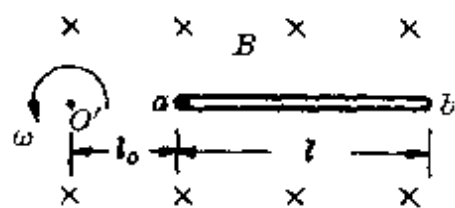


图 121

$$\mathcal{E}_{o'a} = \frac{1}{2} B\omega l_0^2, \quad \mathcal{E}_{o'b} = \frac{1}{2} B\omega (l_0 + l)^2,$$

所以, ab 两端电势差

$$U_{ab} = \mathcal{E}_{a'b} - \mathcal{E}_{a'a} = \frac{1}{2} B\omega [(l_0 + l)^2 - l_0^2].$$

(3)如图 122 所示, ab 棒绕固定点 a 在竖直向上的匀强磁场内做圆锥摆式的转动.

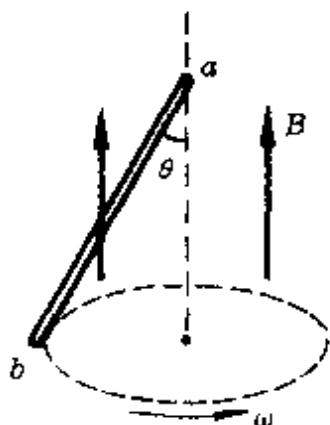


图 122

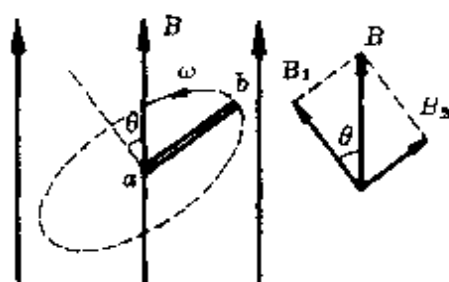


图 123

(4)如图 123 所示, 绕固定端 a 在竖直向上的匀强磁场内做倾斜的匀速圆周运动, 圆面法线与 B 之间的夹角为 θ .

对图 122 的情况, 有效切割长度等于锥底的圆半径, 即 $l' = l \sin \theta$, 所以棒中感应电动势

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} B\omega l'^2 = \frac{1}{2} B\omega l^2 \sin^2 \theta.$$

对图 123 的情况, 先把 B 沿圆面法线和半径方向分解成 B_1 、 B_2 , 其中 $B_1 = B \cos \theta$, $B_2 = B \sin \theta$. ab 棒转动时, 切割的是 B_1 的磁感线, 因此棒中感应电动势为

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} B_1 \omega l^2 = \frac{1}{2} B\omega l^2 \cos \theta.$$

例题 4 在磁感强度为 B 的匀强磁场中, 垂直磁场放置一个光滑导体框, 垂直两框边放有一根长 l 的导体棒 ab . 当在导体棒上施加一水平恒力 F 后, 试求棒运动中的最大速度(图 124). 假设导

体棒运动时,回路总电阻恒为 R 不变.

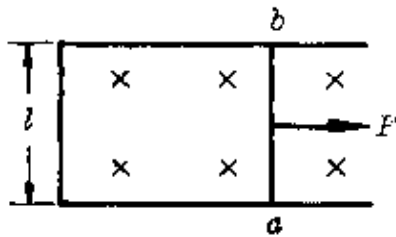


图 124

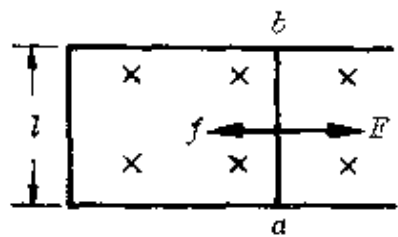


图 125

分析 棒右移时,切割磁感线产生感应电动势 \mathcal{E} . 由于电路闭合,在棒中形成从 a 向 b 的感应电流 I ,从而使棒受到一水平向左的安培力 f ,阻碍着导体棒的切割运动(图 125). 这里,互相制约的关系可表示如下:



因此,棒的运动方程为

$$F - f = ma,$$

即

$$F - B \frac{Blv}{R} l = ma.$$

可见,棒向右做着变加速运动. 随着运动速度 v 的增大,棒的加速度 a 逐渐减小,当 a 等于零时,速度达最大.

解答 由上述分析知,当 $F = f$ 时棒运动速度最大,其值为

$$v_{\max} = \frac{FR}{B^2 l^2}.$$

变化 对上述问题作些变化,可形成一组动态特性相同的问题:

(1) 框架竖直放置,磁感线垂直框面,导体棒沿框面无初速下滑,求导体棒下滑中的最大速度(图 126);

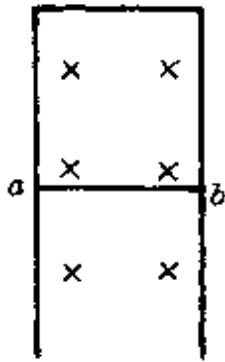


图 126

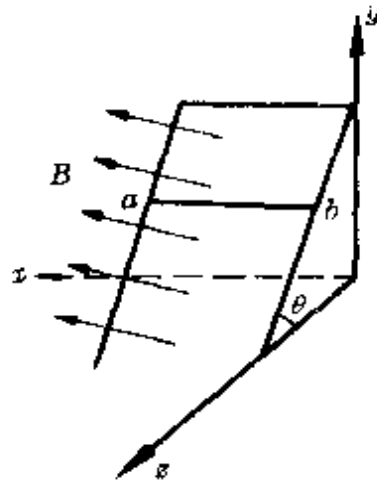


图 127

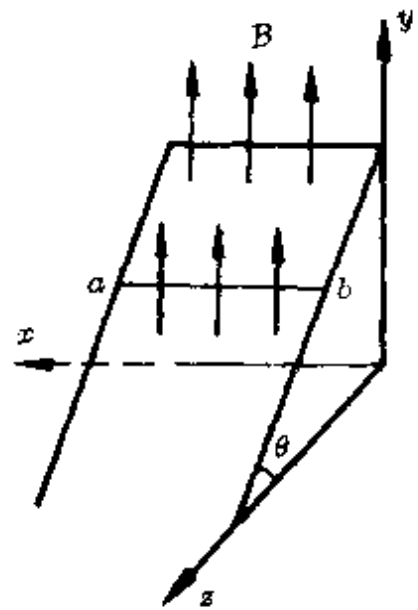


图 128

(2) 框架与水平面成 θ 角倾斜放置, 磁感线垂直框面向外, 导体棒沿框面无初速下滑, 求导体棒下滑中的最大速度(图 127);

(3) 框架与水平面成 θ 角倾斜放置, 磁感线竖直向上, 导体棒沿框面无初速下滑, 求导体棒下滑中的最大速度(图 128).

在图 126 中, 作用在导体棒上的恒力 $F = mg$; 在图 127 和图 128 中, 作用在导体棒上的恒力 $F = mg \sin \theta$.

在图 126 和图 127 中, 导体棒垂直切割磁感线(即切割速度 $v \perp B$); 在图 128 中, 可以把磁感强度 B 分解成垂直框面的 $B_1 = B \cos \theta$ 、沿着框面向上的 $B_2 = B \sin \theta$ (图 129), 导体棒垂直切割 B_1 .

在这三种情况下, 因切割运动产生感应电流, 使导体受到的安培力都起着阻碍切割运动的作用, 因此其动态特性同样可表示为

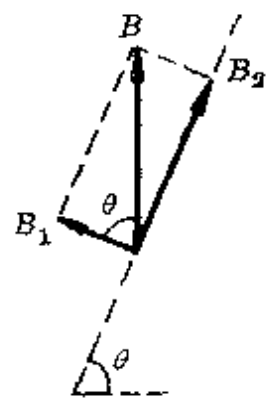
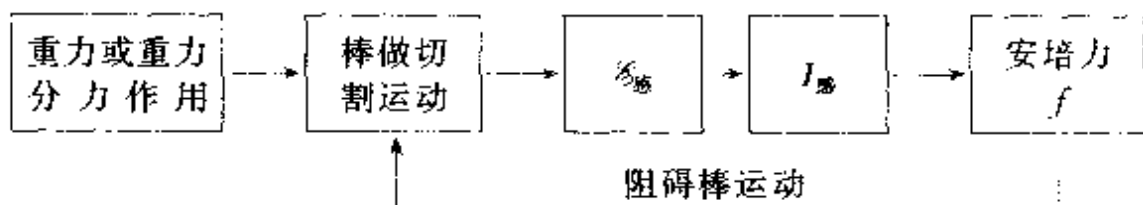


图 129



所以,对应这三种情况的最大速度,可分别从下列条件求得:

$$mg = B \frac{Blv}{R} l, \quad v_{\max} = \frac{mgR}{B^2 l^2};$$

$$mg \sin \theta = B \frac{Blv}{R} l, \quad v_{\max} = \frac{mgR \sin \theta}{B^2 l^2};$$

$$mg \sin \theta = B_1 \frac{B_1 l v}{R} l, \quad v_{\max} = \frac{mgR \sin \theta}{B_1^2 l^2} = \frac{mgR \sin \theta}{B^2 l^2 \cos^2 \theta}.$$

除了上面变化框面位置和磁场方向外,还可作进一步的变化.

如图 130 所示,把框架上端接到一螺线管的两端,假设螺线管截面积为 S ,共有 n 匝,内有从右向左逐渐均匀增强、分布均匀的磁场 B' ,则当导体棒无初速释放、仍能下滑时,导体棒的最大速度是多少? 整个回路的电阻 R 不变.

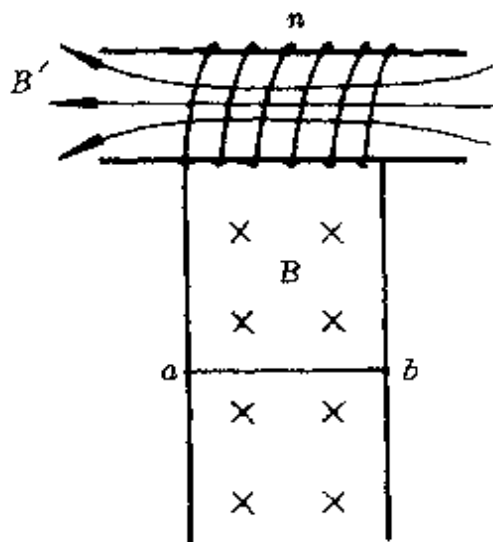


图 130

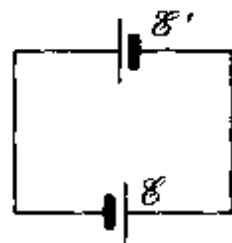


图 131

设 B_1 的变化率 $\frac{\Delta B_1}{\Delta t} = k$ (恒定), 根据法拉第电磁感应定律,

它产生的感应电动势

$$\mathcal{E}' = n \frac{\Delta \varphi}{\Delta t} = nS \frac{\Delta B_1}{\Delta t}.$$

它在导体棒中激起的电流方向从 a 流向 b , 使导体棒受到磁场 B 向上的安培力 f . 根据题意, $f < mg$, 棒仍然下落, 它切割磁场 B 同样会产生感应电动势 \mathcal{E} . 由两电动势的极性可知, \mathcal{E} 与 \mathcal{E}' 顺向串联 (图 131). 棒中电流由两者共同提供, 即

$$I = \frac{\mathcal{E}' + \mathcal{E}}{R}.$$

因此, 棒下落达最大速度时, 由

$$mg = BIl = B \frac{\mathcal{E}' + Blv_{\max}}{R} l,$$

得

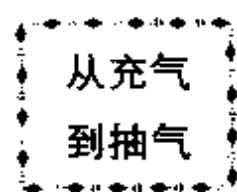
$$v_{\max} = \frac{mgR - B\mathcal{E}'l}{B^2 l^2}.$$

4. 实验研究

在中学物理实验教学中, 求异思维主要体现在逆向、转换、发散等方面.

(1) 逆向

将人们所习惯的顺向思维中的现象, 反方向表现出来, 常会使现象更加生动, 对人们的观感刺激更加强烈, 从而达到更好的效果.



对一个气球充气时能使它膨胀, 这是司空见惯的. 反之, 用抽气的方法也可使它膨胀. 如图 132 所示, 把气球口扎紧后放在瓶内, 然后用抽气机对瓶内抽气, 此时因球外空气压强减小, 气球也膨胀起来了.

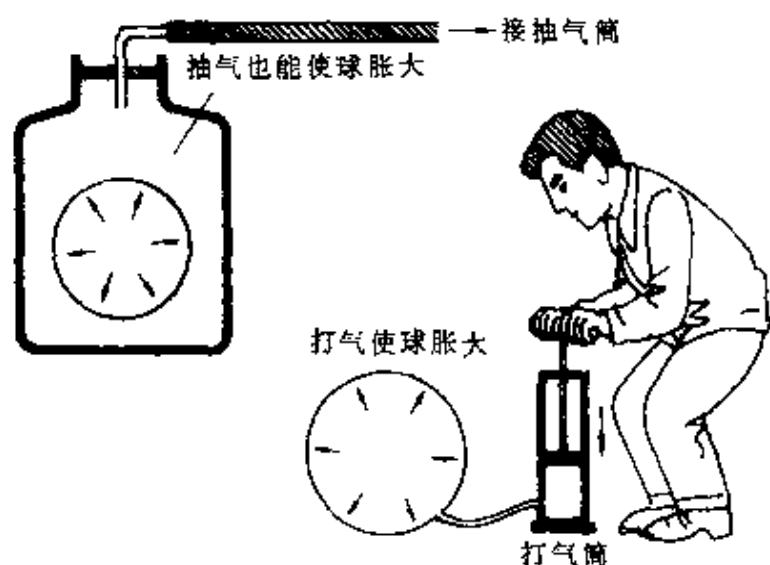


图 132

冷却沸腾

对“加热沸腾”反其道而行之，泼上一杯冷水，同样使水沸腾起来。这决不是魔术，而是中学物理中常用来演示沸点与压强关系的精彩实验。

如图 133 所示，先用酒精灯对烧瓶中的水加热至沸腾，然后移开酒精灯，迅速将瓶口塞住（瓶塞中事先插入一小段玻璃管，安上一段带有夹子的橡皮管）。再把烧瓶倒过来，在瓶底泼上冷水，立即可以看到，原已停止沸腾的水重新沸腾起来了。这是因为原来水面上方的水蒸气遇冷后迅速凝结成水，水面上方气的压强减小，于是就可以在较低的温度下沸腾。

为了证实水面上方的气压确比大气压小，可把瓶塞上接的橡皮管放在盛有红色水的盆内，打开夹子，立即可以看到美丽的喷泉现象（图 134）。

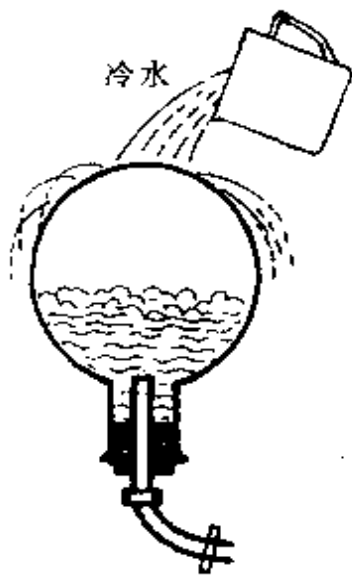


图 133 冷却沸腾

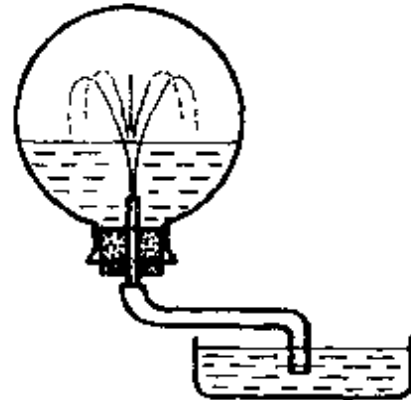


图 134 美丽的喷泉

大气压的作用

为了直观地说明留在托里拆利管中的水银柱是依靠大气压的作用“托住”的,我们也可以从问题的反面考虑——没有大气压的作用或大气压强减小时,托里拆利管中的水银柱应该无法留住或高度降低.据此,可设计一个如图 135 所示的实验.将托里拆利实验装置放在有机玻璃罩中,顶部用橡皮塞塞紧并把罩四周加以密封.开动抽气机后,可以看到,随着罩内空气被不断抽走,罩内空气压强减小,留在托里拆利管中的水银柱高度也逐渐降低,令人无可辩驳地信服了依靠大气压的作用“托住”水银柱的道理.

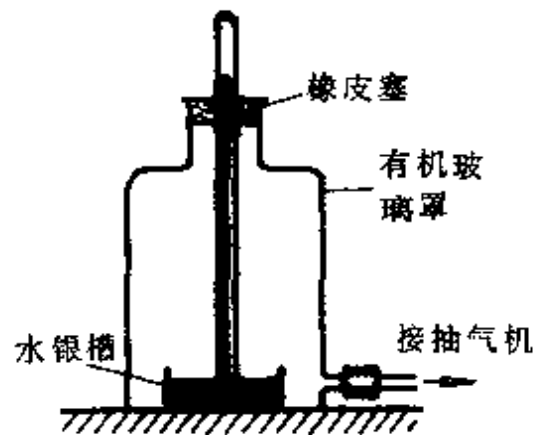


图 135

(2) 转换

实验设计中,常借助于力、热、电、光、机械等方法之间的相互

转换,把某些不容易直接测量(或显示)的量(或现象),用另一些容易直接测量(或显示)的量(或现象)来代替;或者,根据研究对象在一定条件下可以有相同的效果作间接的观察、测量.

譬如,把流逝的时间转换成指针周期性的振动;把对电压、电流的测量转换成对指针偏角的测量;在研究弹性碰撞中用从等高处抛出的两球的水平位移代替初速度等.

卡文迪许 实验

作为对牛顿万有引力理论的直接证明,卡文迪许(H. Cavendish, 英国, 1731—1810)测定万有引力常数的著名实验中,曾巧妙地作了三次转换:

由于两球的吸引力较小,卡文迪许借用 T 形架,增长了力臂,把对两球相互吸引力的测量转换为对旋转 T 形架的力矩的测量;

T 形架转动时扭转石英悬丝,根据力矩平衡原理,把对 T 形架的力矩的测量转换为对悬丝扭转角度的测量;

利用悬丝上固定的小平面镜,并适当增长了平面镜到标尺的光路,把对平面镜偏转角度(即悬丝扭转角度)的测量转换成光点在标尺上的位移的测量.

今天我们学习和重温卡文迪许的实验,不仅应关注对 G 值的测量结果,更应该体会其中的设计思想.

直线电流 磁场分布

在中学物理中,研究直线电流磁场的分布,也是巧妙地采用了测量转换的办法.实验装置与步骤如下:

在直导线 ab 近旁水平放置一枚小磁针,当导线中不通电时,小磁针指向地磁场水平分量 B_e 的方向.调整直导线的位置,使它与小磁针在同一个竖直平面内,如图 136 所示.

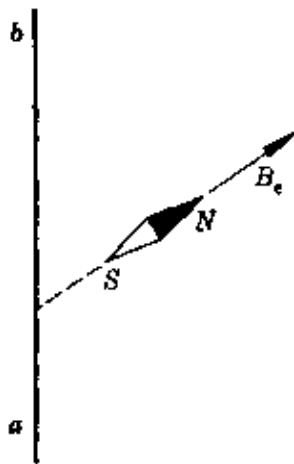


图 136

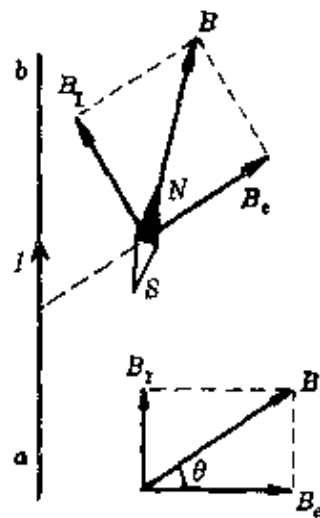


图 137

当直导线中通以从 a 到 b 的电流后,直导线周围产生的磁场 B_r 使小磁针偏转.此时小磁针 N 极指向着 B_e 与 B_r 的合磁场 B 的方向,如图 137 所示.由于 B_r 垂直 B_e ,所以

$$B_r = B_e \operatorname{tg} \theta.$$

由于在同一个地方,地磁场的水平场强 B_e 不变,因而对 B_r 的测量就转化为对 $\operatorname{tg} \theta$ (即 θ) 的测量.

实验中,先保持小磁针与直导线的距离 r 一定,改变导线中的电流强度,依次测出小磁针对应的偏角 θ ,算出 $\operatorname{tg} \theta$ (表 1).然后,保持导线中的电流 I 不变,改变小磁针离开导线的距离 r ,同样依次测出小磁针对应的偏角 θ ,算出 $\operatorname{tg} \theta$ (表 2).

表 1: r 一定

I (安)				
θ				
$\operatorname{tg} \theta$				

表 2: I 一定

r (米)				
θ				
$\operatorname{tg} \theta$				

综合上述两个结果,即可看出,在实验误差范围内,直线电流周围的磁感强度与导线中的电流强度成正比,与离开导线的距离

成反比,即

$$B \propto \frac{l}{r}.$$

(3) 发散

发散思维在中学物理实验中的体现,我们以运用多种实验方法为例作重点介绍.

例题 1 设计几个测定铁块与木板间动摩擦因数的实验,要求说明所需器材、简述实验方法、列出 μ 的表达式.

分析 由于在中学物理范围内,动摩擦因数与速度大小无关,因此只要使铁块与木板间形成相对运动——无论是匀速运动还是加速运动,都可根据力学条件求出动摩擦因数.

实验(1) 匀速运动方法

器材 弹簧秤、细线.

方法 ①将木板调成水平;②用弹簧秤测出小铁块的重力 G ;③用弹簧秤拉着小铁块沿水平木板做匀速运动,读出弹簧秤的拉力 F ,它的大小等于小铁块所受的摩擦力(图 138).

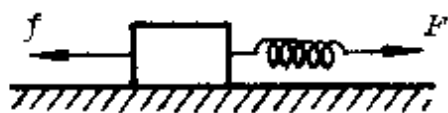


图 138

计算 根据摩擦力公式和力平衡条件得

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{F}{G}.$$

说明 保持铁块的匀速运动,更换实验器材,可改用以下的变通办法.

①改用轻弹簧、直尺,实验步骤是:用直尺量出弹簧的原长(设为 l_0);将小铁块竖直悬挂在轻弹簧下,测出弹簧的长度(设为 l_1);用弹簧拉着小铁块沿水平木板做匀速运动,测出弹簧的长度

(设为 l_2)；由胡克定律和力平衡条件得摩擦因数

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{F}{G} = \frac{l_2 - l_0}{l_1 - l_0}.$$

②只用一支直尺. 实验步骤是：将长木板的一端适当垫高，直到轻推小铁块恰能沿长木板匀速下滑；测出铁块下滑时的高度 h 和它滑到底端时的水平位移 s (图 139)；由 $f = mg \sin \alpha$ 、 $N = mg \cos \alpha$ 算出摩擦因数

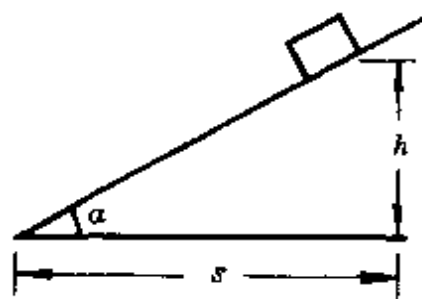


图 139

$$\mu = \frac{f}{N} = \frac{mg \sin \alpha}{mg \cos \alpha} = \tan \alpha = \frac{h}{s}.$$

实验(2) 加速运动方法

器材 直尺、秒表、量角器.

方法 将木板倾斜放置，使小铁块从静止起加速下滑，测出时间 t 内的位移 s (图 140).

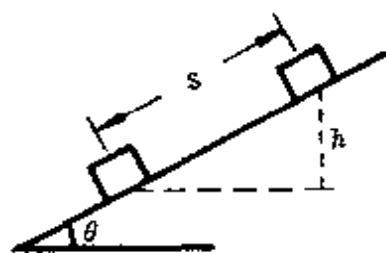


图 140

计算 设木板倾角为 θ ，由牛顿第二定律得下滑加速度为

$$a = \frac{mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta}{m} = g(\sin \theta - \mu \cos \theta).$$

设下滑 s 时的速度为 v ，则由运动学公式

$$v^2 = 2as = 2gs(\sin \theta - \mu \cos \theta),$$

即

$$\frac{v^2}{2g \cos \theta} = \tan \theta - \mu.$$

又由 $s = \bar{v}t = \frac{v}{2}t$ ，或 $v = \frac{2s}{t}$ ，代入上式得

$$\mu = \operatorname{tg}\theta - \frac{2s}{gt^2 \cos\theta}.$$

$$\text{式中 } \operatorname{tg}\theta = \frac{h}{\sqrt{s^2 - h^2}}, \quad \cos\theta = \frac{\sqrt{s^2 - h^2}}{s}.$$

说明 由上述表达式可知,不用量角器时,只需用直尺测出对应的高度差 h ,同样可算出 μ .在前面匀速运动的方法中,因为很难保证铁块严格地做匀速运动,误差较大,所以这个加速运动的方法较为优越.它是瑞士物理学家欧勒(L. Euler, 1707—1783)首先采用的方法.

例题 2 设计几个测定重力加速度的实验,要求说明所需器材、简述实验方法、列出 g 的表达式.

分析 原则上说,凡与重力加速度有关的物理规律都可直接或间接地用来测定 g 值.通常,主要从运动学、动力学和简谐运动这几方面着手.

实验(1) 滴水法

器材 分液漏斗、米尺、秒表.

方法 ①将分液漏斗竖直安放,管内盛一定量的水,调节阀门,使水从管口均匀滴落;②用米尺测出水滴下落高度 h ;③用秒表测出水从管口滴下到着地的时间间隔 T .

计算 根据自由落体公式得

$$g = \sqrt{\frac{2h}{T^2}}.$$

实验(2) 打点计时器法

器材 打点计时器、纸带、带夹子的重锤、刻度尺、电源(220V50Hz).

方法 ①把打点计时器竖直架稳,将纸带穿过打点计时器,下

端夹一重锤, 上端用手提起(图 141);
 ②开启打点器, 轻轻释放纸带, 让重锤带着纸带自由下落; ③取下纸带, 在纸带上选取点痕清晰的一段, 从某点 O 起量出每两点的间距, 设为 d_1 、 d_2 、 \dots (图 142).

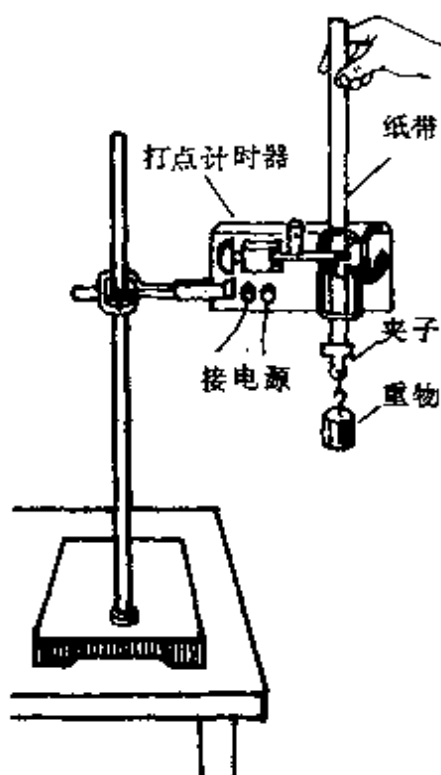


图 141

计算 由 $\Delta s = gT^2$, 算出重力加速度

$$g = \frac{\Delta s}{T^2}.$$

式中 $T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50}$ 秒,

$$\Delta s = d_2 - d_1 = d_3 - d_2 = \dots.$$

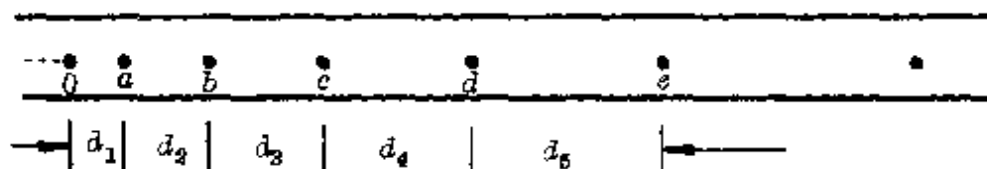


图 142

实验(3) 落体音叉法

器材 焊有细钢针的音叉(已知固有频率 f)、熏有烟煤的金属片、刻度尺.

方法 ①将熏有烟煤的金属片竖直悬挂, 调整夹持音叉的位置, 使音叉不振动时针尖刚好能水平地接触金属片, 如图 143(a) 所示; ②轻敲音叉, 使它振动, 同时烧断悬线, 使金属片自由下落; ③从金属板上选取针尖划痕清晰的一段, 从某点起量出各对应两点的间距 d_1 、 d_2 、 d_3 、 \dots , 如图 143(b) 所示.

计算 由 $\Delta s = gT^2 = \frac{g}{f^2}$ 得重力加速度

$$g = \Delta s f^2.$$

式中 $\Delta s = d_2 - d_1 = d_3 - d_2 = \dots$.

实验(4) 阿脱武德机法

器材 带有定滑轮的支架、两块等质量的物体 A 和 B 、一块质量较小的物体 C 、秒表、米尺、细绳.

方法 ①将细绳穿过定滑轮,两边挂上物体 A 和 B ;②把小物体 C 轻轻放在 A 上,测出开始运动后在时间 t 内下落的位移 h (图 144).

计算 设 A 、 B 的质量为 M , C 为 m ,运动的加速度为 a ,由牛顿第二定律和运动学公式:

$$(m + M)g - Mg = (m + 2M)a,$$

$$h = \frac{1}{2}at^2.$$

联立两式得

$$g = \frac{2h(m + 2M)}{mt^2}.$$

实验(5) 单摆周期公式法

器材 单摆、秒表、米尺、游标卡尺.

方法 ①将单摆竖直悬挂(注意上端固定);②用游标卡尺量出小球直径 D ,用米尺量出从悬点到摆球的线长 l_0 ;③使单摆做小振幅的摆动(偏角小于 5°),用秒表测出完成 n 次(如 30 次)全振动的时间 t .

计算 将摆长 $l = l_0 + \frac{D}{2}$,周期 $T = \frac{t}{n}$ 代入单摆周期公式,得

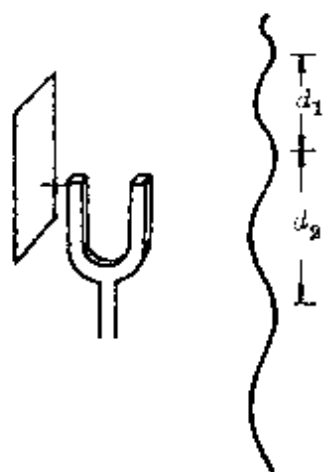


图 143

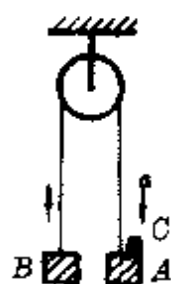


图 144

重力加速度

$$g = \frac{4\pi^2 \left(l_0 + \frac{D}{2} \right) n^2}{t^2}.$$

说明 上述几种方法,并不是中学物理中测定 g 值的全部方法.同时,实验测定都应反复做几次,最后取平均值作为测量结果.以下的各实验同样如此,不再分别说明.

例题 3 设计几个测定速度的实验.要求说明所需器材、简述实验方法和原理,列出 v 的表达式.

分析 由于题中未指明具体对象,因此可根据实际问题作不同的设计.

实验(1) 测定用手竖直向上抛出的小球的初速度

器材 小球、秒表(已知当地 g 值).

方法 将小球竖直上抛,用秒表测出小球从抛出到落回原处的时间 t .

计算 根据竖直上抛公式 $t = 2 \frac{v_0}{g}$,得抛出初速度

$$v_0 = \frac{1}{2} gt.$$

实验(2) 测定自由下落(或沿光滑斜面下滑)途中某处的即时速度

器材 打点计时器、重锤、铁架台(或砝码、斜面)等.

方法 将打点计时器竖直夹持在铁架台上,接通电源使计时器工作.然后放开纸带,让重锤拖着纸带自由下落(用斜面时,使砝码小盘拖着纸带沿斜面加速下滑).

计算 从某一点(如 O 点)开始,依次量出各计数点的间距 $s_1, s_2, s_3, s_4, \dots$ (图 145),则经过某处的速度分别为

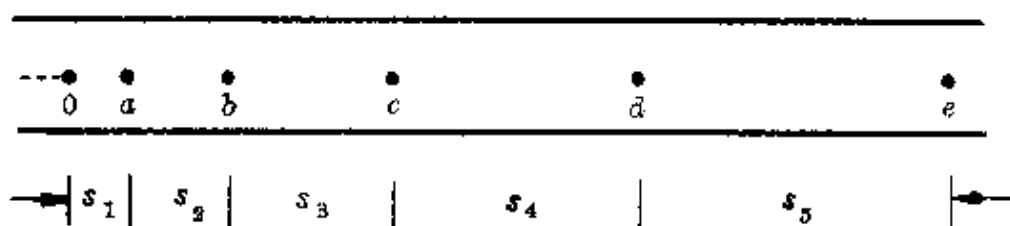


图 145

$$v_a = \frac{s_1 + s_2}{2T}, v_b = \frac{s_2 + s_3}{2T}, v_c = \frac{s_3 + s_4}{2T}, \dots,$$

式中 T 为两计数点的时间间隔。

实验(3) 测定平抛物体的初速度

器材 米尺。

方法 将一小物体(如粉笔头)放在桌边,用力将它沿水平方向弹出,量出桌高 h 和小物体落点的水平位移 s 。

计算 根据平抛运动的性质得

$$v_0 = \frac{s}{t} = \frac{s}{\sqrt{\frac{2h}{g}}} = s\sqrt{\frac{g}{2h}}.$$

实验(4) 测定弹簧枪中子弹出射的初速度

器材 弹簧枪、冲击摆等。

方法 将冲击摆的摆块竖直悬挂,并调整到使孔的中心线与枪口中心线在一直线上,测出了子弹和摆块质量、摆线长度及子弹射入摆块后摆动中的最大偏角(图 146)。

计算 根据子弹射入过程中动量守恒和摆动过程中机械能守恒得

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

$$\frac{1}{2}(m + M)v^2 = (m + M)gh.$$

$$h = l(1 - \cos\theta).$$

联立上述三式得

$$v_0 = \frac{m + M}{m} \sqrt{2gl(1 - \cos\theta)}.$$

例题 4 设计几个测定电阻的实验. 要求说明所需器材, 简述实验方法, 列出 R 的表达式.

分析 除用欧姆表作直接的粗略测定外, 较准确的需把被测电阻接入电路, 然后根据直流电路规律测出相应的量进行计算得出.

实验(1) 恒压电源法

器材 恒压电源一个、已知内阻的电压表一个、单刀双掷开关一个(或单刀单掷开关两个)、被测电阻(R_x)、导线.

方法 实验电路如图 147(a)或 147(b)所示.

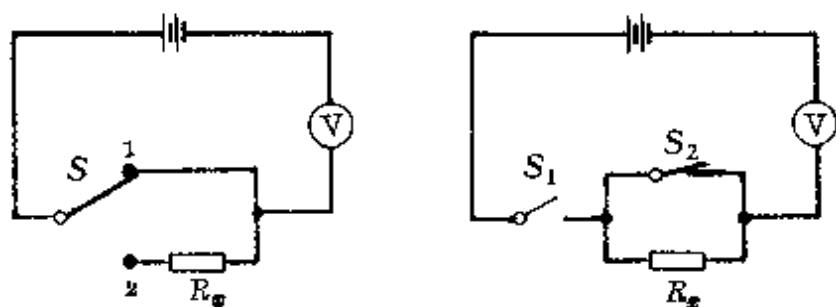


图 147

①把单刀双掷开关 S 倒向触点 1(或同时合上单刀单掷开关 S_1 、 S_2), 记下电压表示数 U_1 .

②把单刀双掷开关 S 倒向触点 2(或合上单刀单掷开关 S_1 , 打开 S_2), 记下电压表示数 U_2 , 即其内阻 R_0 上的电压降.

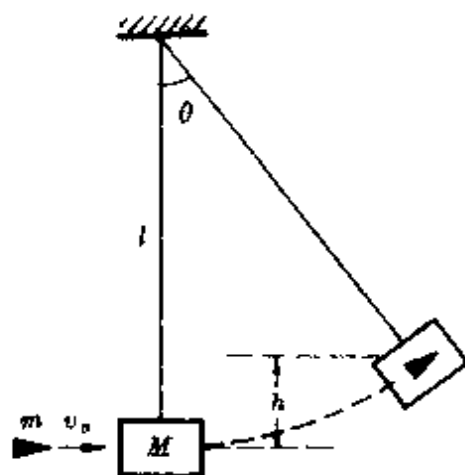


图 146

计算 因电源内阻不计,故 $\mathcal{E} = U_1$. 根据串联电路各部分电压与其电阻成正比的道理,得

$$R_x : R_v = (\mathcal{E} - U_2) : U_2 = (U_1 - U_2) : U_2.$$

所以被测电阻

$$R_x = \frac{U_1 - U_2}{U_2} R_v.$$

实验(2) 一个电流表(或电压表)法

器材 电流表(或电压表)一个、定值电阻(R_0)一个、单刀单掷开关一个、电源、滑动变阻器、被测电阻(R_x)、导线.

方法 用电流表时电路如图 148(a)所示,用电压表时电路如图 148(b)所示.

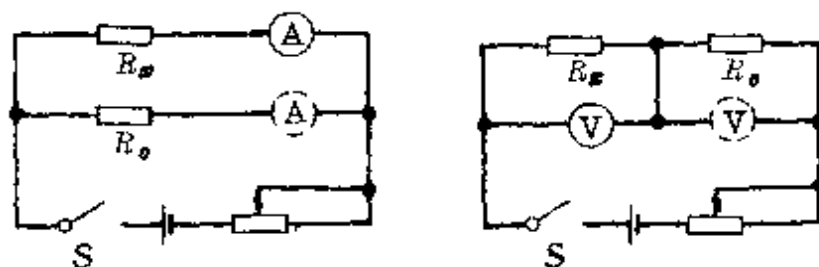


图 148

①把被测电阻 R_x 与标准电阻 R_0 并联(或串联)接入图 148(a) [或图 148(b)] 的电路中.

②用电流表(或电压表)分别测出通过被测电阻与标准电阻的电流(或被测电阻与标准电阻两端的电压),设为 I_x 与 I_0 (或 U_x 与 U_0).

计算 根据串、并联电路的特点分别可得

$$R_x = \frac{I_0}{I_x} R_0 \text{ 或 } R_x = \frac{U_x}{U_0} R_0.$$

误差 这种方法引起的误差,主要是由于电流表和电压表都

有一定的内阻.为尽量减少电表对测量的影响,用图 148(a)的电路适宜于测量比电流表内阻大得多的电阻;用图 148(b)的电路适宜于测量比电压表内阻小得多的电阻.

实验(3)伏安法

器材 一个电压表、一个电流表、电源、滑动变阻器、开关、被测电阻、导线.

方法 实验电路分别有电流表内接法[图 149(a)]和电流表外接法[图 149(b)].分别读出电流表和电压表的示数,设为 I 和 U .

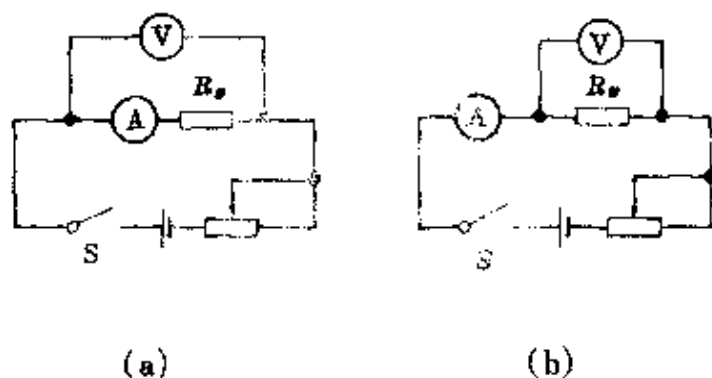


图 149

计算 根据欧姆定律得被测电阻

$$R_{\text{测}} = \frac{U}{I}.$$

误差 电流表内接时,电压表的示数是被测电阻与电流表两端的总电压,因此用两表示数算出的是被测电阻与电流表内阻的串联总电阻,即

$$R_{\text{测}} = \frac{U}{I} = R_x + R_A > R_x.$$

式中 R_x 为被测电阻的真实值, R_A 为电流表内阻.

电流表外接时,电流表的示数是被测电阻和电压表中的总电流.因此用两表示数算出的是被测电阻和电压表内阻(R_V)的并联

总电阻,即

$$R_{\text{总}} = \frac{U}{I} = R_x // R_V = \frac{R_x R_V}{R_x + R_V} < R_x.$$

实验(4) 惠斯登电桥法

器材 滑线电桥、电阻箱(R_0)、被测电阻(R_x)、滑动变阻器两个(R 、 R_1)、开关两个、导线等.

方法 实验电路如图 150 所示.

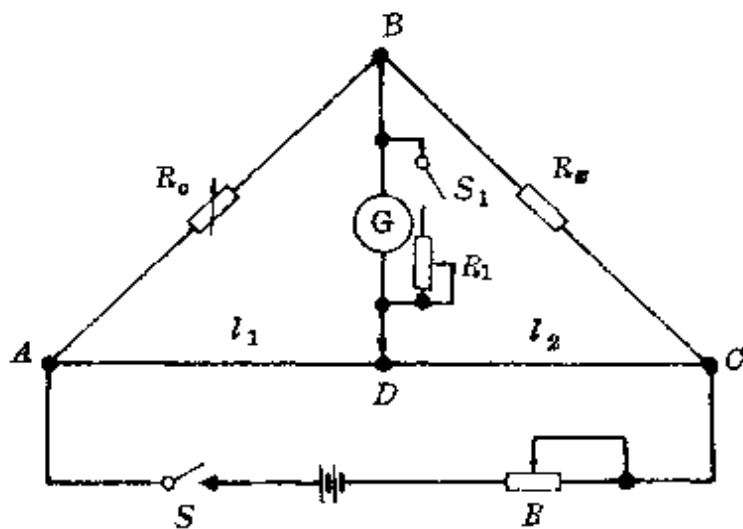


图 150

①按图 150 接线,把滑动变阻器 R 调至电阻最大处, R_1 调至小阻值处.

②根据被测电阻的估计值(事先用多用电表粗测),选择电阻箱 R_0 的阻值(与 R_x 估计值相近),移动滑动触头至电阻丝 AC 中点附近某一位置.

③合上 S 、 S_1 ,按下触头,观察检流计 G 的指针是否偏转.

④调节电阻箱 R_0 的阻值,并逐渐减小 R 的阻值,增大 R_1 的阻值至最后打开 S_1 ,直到按下触头时检流计 G 的指针不再偏转为止,表示电桥已处于平衡.

⑤ 读出电阻箱的阻值 R_0 , 量出 AD 、 DC 两段电阻丝的长度, 设为 l_1 、 l_2 .

计算 由电桥平衡条件

$$\frac{R_0}{R_x} = \frac{R_{AD}}{R_{DC}} = \frac{l_1}{l_2},$$

得
$$R_x = \frac{l_2}{l_1} R_0.$$

说明 上面介绍了测量电阻的四种方法, 实际上还可作其他方法的变通测量. 如只用一个电流表和定值电阻时, 也可分别接成图 151 中 (a)、(b)、(c) 三次电路或 (a)、(b)、(d) 三次电路.

设在电路 (a) 和 (b) 中电流表示数分别为 I_1 、 I_2 , 则

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R+r}, I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_x+r}.$$

设在电路 (c) 和 (d) 中电流表示数分别为 $I_{\#}$ 和 $I_{\#}$, 则

$$I_{\#} = \frac{\mathcal{E}}{R+R_x+r}, I_{\#} = \frac{\mathcal{E}}{\frac{RR_x}{R+R_x}+r}.$$

联立上述各式, 即得被测电阻

$$R_x = \frac{I_2(I_{\#} - I_1)}{I_1(I_{\#} - I_2)} R,$$

或
$$R_x = \sqrt{\frac{I_1(I_{\#} - I_2)}{I_2(I_{\#} - I_1)}} R.$$

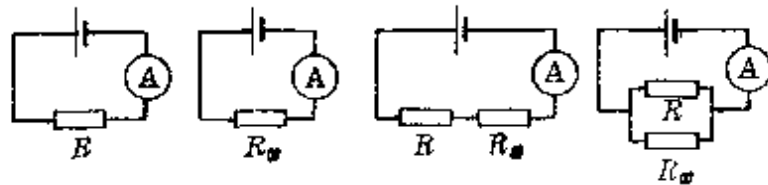


图 151

例题 5 设计几个测定凹透镜焦距的实验,要求说明所需器材,简述实验方法,列出 f 的表达式.

分析 由于凹透镜对光线有发散作用,只能成虚像,无法用光屏承接,所以只能利用光线通过凹透镜后在屏上的光斑或借助凸透镜等光学器件的作用进行测定.

实验(1) 光斑法

器材 凹透镜、光栏、光屏、光具座、平行光源、刻度尺.

方法 ①把光栏 D (或用一带圆孔的不透光纸片)、凹透镜 M 、光屏 N 从左到右依次竖立在光具座上,光栏紧靠凹透镜并把三者调成共轴;②使平行光(或用太阳光)平行凹透镜主轴入射,经凹透镜发散在屏上形成一圆形光斑,其光路如图 152 所示;③用刻度尺测出凹透镜的透光半径(即光栏圆孔半径) r 、光斑半径 R ,在光具座上读出凹透镜与光屏间距离 l .

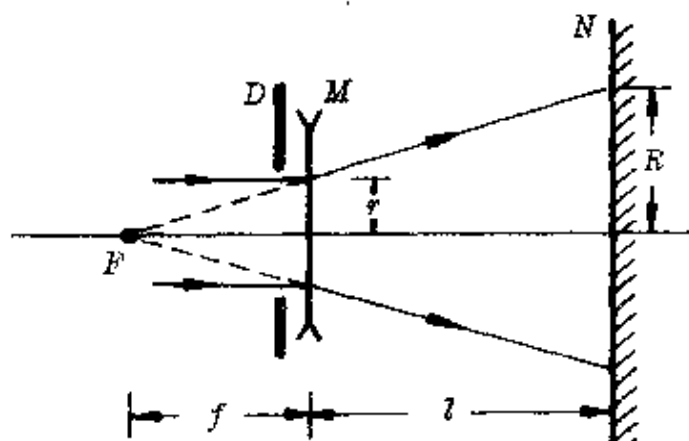


图 152

计算 根据相似三角形对应边成比例关系得

$$\frac{f}{f+l} = \frac{r}{R}.$$

所以凹透镜的焦距大小为

$$f = \frac{r}{R - r} l.$$

实验(2) 物距 - 像距法

器材 凹透镜、凸透镜、光屏、光具座、点光源.

方法 ①将点光源 S 、凸透镜 N 、凹透镜 M 和光屏从左到右依次竖立在光具座上,并调成共轴;②移去凹透镜,调节点光源和光屏离凸透镜的距离,在光屏上成清晰像 S_1 ,读出像距 v_1 ;③在凸透镜和光屏间插入凹透镜,向后移动光屏,使点光源 S 发出的光经凸透镜 N 、凹透镜 M 后重新在屏上形成清晰像 S_2 ,读出像距 v_2 .

计算 实验光路如图 153 所示.

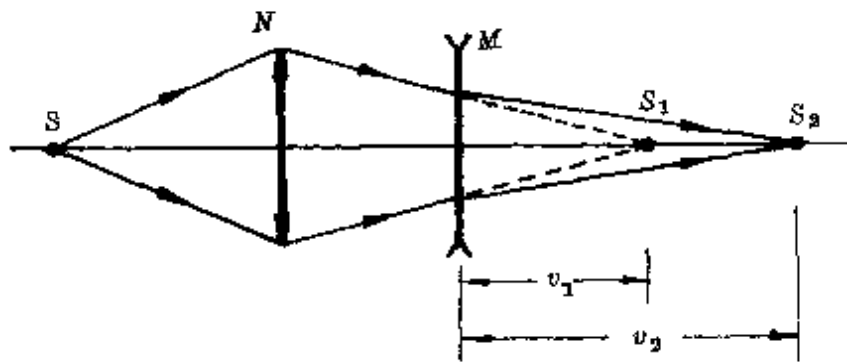


图 153

根据光路可逆原理, S_1 可看成是从“点光源” S_2 发出的光经凹透镜发散后在同侧形成的虚像. 对凹透镜而言, 物距 $u = v_2$ 、像距 $v = v_1$ (为负值), 代入凹透镜成像公式

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}, \text{ 即 } \frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} = \frac{1}{f},$$

得凹透镜的焦距为

$$f = -\frac{v_2 v_1}{v_2 - v_1}.$$

实验(3) 等效替代法

器材 凹透镜、凸透镜、光屏、光具座、平行光源、点光源。

方法 ①将凹透镜 M 、凸透镜 N 、光屏从左到右依次竖立在光具座上,并调成共轴;②用平行光照射凹透镜,调节 M 、 N 与光屏的距离,使平行光通过两透镜后会聚于光屏上 S' 处,读出两透镜间距 d ;③取走凹透镜,保持凸透镜和光屏的位置不变,将点光源 S 放在凸透镜的主轴上,调节 S 的位置,使点光源 S 通过凸透镜后也成像于 S' ,读出点光源与凸透镜之间的距离 L 。

计算 实验光路如图 154 所示。

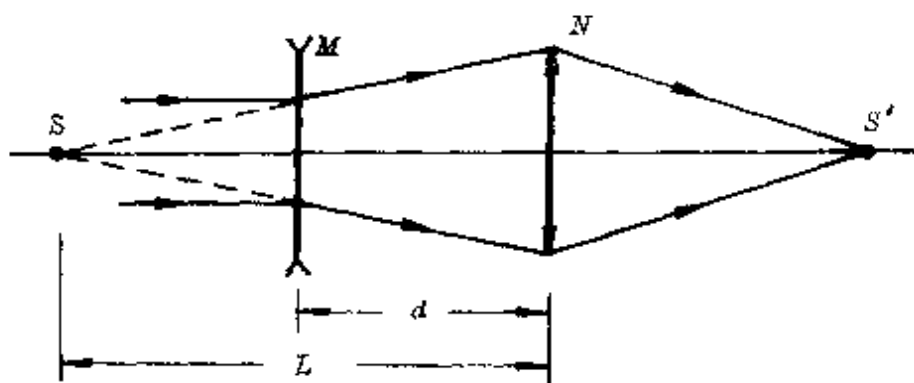


图 154

因为平行光经 M 、 N 后与点光源发出的光经 N 后都会聚于 S' ,表示两者等效,即点光源 S 在主轴上的位置恰与凹透镜的焦点重合,所以凹透镜的焦距大小为

$$f = L - d.$$

实验(4) 自准直法

器材 凹透镜、凸透镜、平面镜、点光源、光屏、光具座。

方法 ①将点光源 S 、凸透镜 N 、凹透镜 M 、平面镜 H 依次竖立在光具座上,并调成共轴;②取下凹透镜和平面镜,调节点光源和凸透镜离光屏的距离,使点光源经凸透镜后在屏上成清晰像 S' ,读出 S' 与凸透镜的距离 L ;③在凸透镜和光屏间插入凹透镜,

再在凹透镜右侧与光屏间插入平面镜, 移动两者位置, 使点光源 S 通过整个光学系统所成的像重合在 S 处, 读出 N 、 M 的间距 d .

计算 实验光路如图 155 所示.

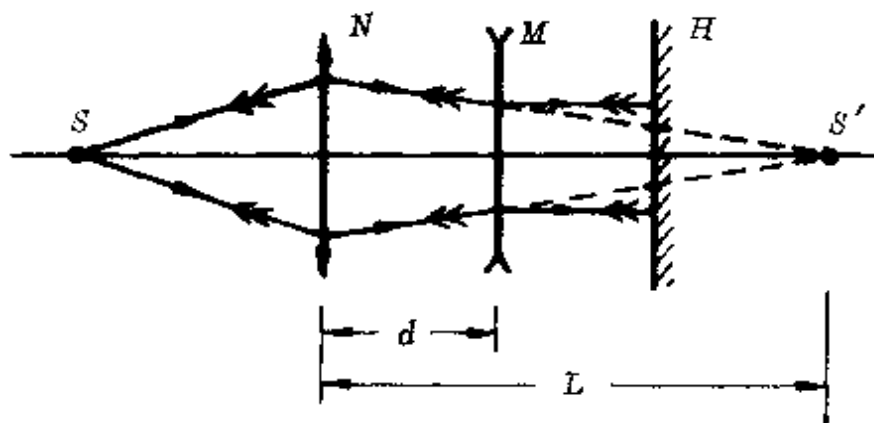


图 155

因为最后成像于 S , 表示从点光源发出的光依次经凸透镜—凹透镜—平面镜后, 必沿原路返回, 因此, 从凹透镜射至平面镜的光必垂直平面镜, 为一束平行光, 所以凹透镜的焦距大小为

$$f = L - d.$$

结 束 语

求异必须有胆有识。

有胆，即勇气也，能敢于藐视权威的观点，跳出习惯的束缚。

有识，即科学性，对所提出的见解、理论，有科学的依据、实践的基础。

求异的成功也离不开一个良好的氛围。当科学处于黑暗、愚昧、保守思想浓重的环境时，曾有多少科学勇士受到无情打击、迫害，又有多少真知灼见被视为“异端邪说”！

值得庆幸的是我们今天的年轻人正赶上一个空前的好时代，世界科技的迅猛发展、知识信息的激增，给年轻人天赋的、活跃的思维提供了一块无限宽广的求异的沃土。

通过阅读本书的内容，读者已经看到，求异思维是一种内涵丰富、外延广阔的思维形式。它除了自身所具有的发现性和创造性外，还可对其他思维形式起一种润滑和催化作用。它与其他思维形式的配合能更好地发挥强大的思维力量。

思维科学还是一门发展中的科学，对求异思维的形式和归属还有不少争议。本书中我们虽然作了一些分类，但绝不希望它们成为禁锢读者思维的桎梏。这不仅是因为我们对求异思维的真谛的认识还很肤浅，也是违背求异思维的本意的。

最后，借此机会，对阅读本书初稿提出宝贵意见的吴保让先生、倪汉彬教授、贾广善先生和刘国钧先生，对为本书初稿提供部

分素材的孙浩老师等表示衷心的感谢。

作者

1994年春夏二稿

于苏州九百居

主要参考资料

- [1]张永声主编《思维方法大全》，江苏科学技术出版社，1990年6月第1版。
- [2]张永声主编《思维学》，江苏科学技术出版社，1988年3月第1版。
- [3]王梓坤《科学发现纵横谈》，上海人民出版社，1978年第1版。
- [4]王海山《发明的艺术》，辽宁科学技术出版社，1986年第1版。
- [5]芮杏文、戚昌滋主编《实用创造学与方法论》，中国建筑工业出版社，1985年7月第1版。
- [6]林德宏著《科学思想史》，江苏科学技术出版社，1985年7月第1版。
- [7]张华夏、杨维增《自然科学发展史》，中山大学出版社，1985年9月第1版。
- [8][日]大森实著、林子元译《物理学史话》，河北人民出版社，1985年11月第1版。
- [9][日]大沼正则著、宋孚信等译《科学的历史》，求实出版社，1983年6月第1版。
- [10]日本国科学技术厅振兴局编著、三志国等编译《发明史话》，科学普及出版社，1987年11月第1版。

[11]解恩泽主编《科学蒙难集》，湖南科学技术出版社，1986年3月第1版。

[12][美]S.R.威尔特、M.裴利普编，魏凤文等译《现代物理学进展》，湖南教育出版社，1990年2月第1版。

[13]郭奕玲等编著《近代物理发展中的著名实验》，湖南教育出版社，1990年12月第1版。

[14]谭树杰、王华编著《物理学上的重大实验》，科学技术文献出版社，1987年2月第1版。

[15]袁运开主编《科学技术社会辞典》(STS辞典)，浙江教育出版社，1991年10月第1版。

[16]张维善《原子和原子核物理》，北京教育出版社，1987年11月第1版。

[17]李启斌著《天体是怎样演化的》，中国青年出版社，1979年4月第1版。

[18]任宝祥编著《来自天外的射线》，山东人民出版社，1979年7月第1版。