



以科研能力培养为导向的大学物理课堂设计*

——以“相对运动”的教学设计为例

李品钧

(湛江幼儿师范专科学校信息科学系 广东 湛江 524037)

(收稿日期:2022-05-16)

摘要:以“相对运动”教学设计为例,阐述如何通过调动学生的归纳思维、形象思维和发散思维来构建有深度、有广度且有趣味性的优质物理课堂,有效衔接学生从中学物理向大学物理的过渡,从而实现学生科学素养和科研能力的提高.教学实践表明,利用“相对运动”的概念来解释弹弓效应是一个绝佳的思维训练选题,不仅对高中和大学普通物理的衔接教学起到很好的参考作用,经深化和拓展以后还可以用于解释冲浪中的加速机制、光和声波的多普勒效应、磁力弹弓、宇宙射线的加速机制等等.

关键词:相对运动;归纳思维;形象思维;发散思维;弹弓效应

对于大学物理初学者而言,从高中物理过渡到大学物理,因其科研能力培养的指向变得更加明显,对学生的归纳思维、形象思维、发散思维提出了几乎是阶跃式的要求.如何让学生从“温故”到“知新”再进一步到“创新”,是大学物理教学最重要的任务之一.完成这一任务需要教师具有“以旧引新”“以小见大”的指引功夫,其支撑点有二:循序渐进的教学手

段和渊博的物理学知识.

下面以“江中竹排”这一问题为例展开论述,对相对运动的基本概念进行介绍和延伸(课程结构按图1所示的思路展开),通过调动学生的归纳思维、形象思维和发散思维,对基本概念在深度、广度和趣味性等方面进行拓展,实现学生科学素质的提高.

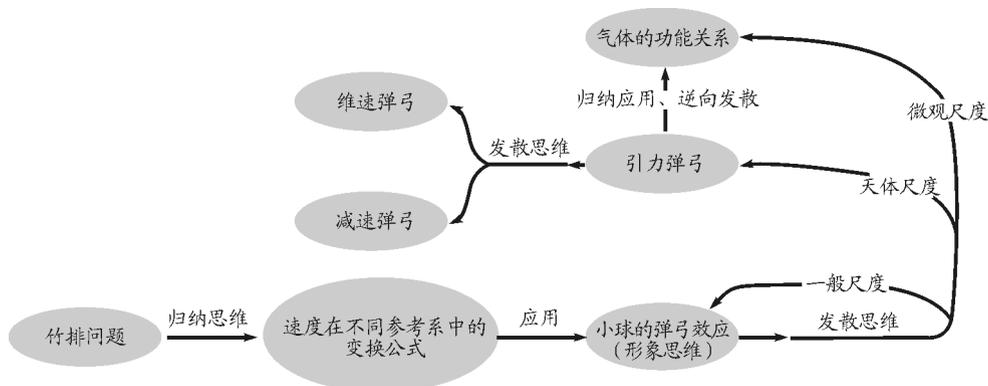


图1 相对运动教学设计思路

1 引入问题 引导学生归纳概括 抽取问题实质

“小小竹排江中游,巍巍青山两岸走……”这句

极富画面感和动态感的歌词非常形象地道出了以不同景物作为参照系所带来的不同物理情景的主观判断,以至于被中学物理教材选用为辅助理解素材.由

* 湛江市非资助科技攻关专题,项目编号:2020B01086;2020年度广东省普通高校特色创新项目,项目编号:2020KTSCX351.

作者简介:李品钧(1979-),男,讲师,主要从事大学物理的教学与科研工作.

竹排问题可知,选用的参考系不同,对物体的运动状态就会得到完全不同的判断.竹排上的人认为自己不动而青山在动(因为他选择了竹排作为参考系),岸上的人认为青山不动而竹排在游(因为他选用了江岸作为参考系),相对于不同的参考系,物体的运动状态(速度)就不同,因而就有了相对速度的概念.接下来很自然的问题是:同一物体在不同参考系中的速度之间有什么联系?下面假设人在竹排上行走,如果用 $v_{人排}$ 表示人相对竹排的运动速度, $v_{排岸}$ 表示竹排相对江岸的运动速度,那么人相对于江岸的速度满足如下叠加关系

$$v_{人岸} = v_{人排} + v_{排岸} \quad (1)$$

可以对此式进行归纳和推广成为下面的形式

$$v_{an} = v_{a1} + v_{12} + v_{23} + \cdots + v_{(n-1)n} \quad (2)$$

其中的 v_{an} 表示物体 a 相对物体 n 的速度,其余以此类推.特别要注意的是,等式右边各项的下标排列规律:前一项下标中的末位与后一项下标中的首位要相同,否则等式不成立.举个特例,上述竹排上的人身上有一只昆虫以相对人的速度 $v_{虫人}$ 在爬行.那么可知,虫子相对于江岸的运动速度为

$$v_{虫岸} = v_{虫人} + v_{人排} + v_{排岸} \quad (3)$$

上述归纳公式形式简单,在具体的解题应用中体现出较大的便利性.

2 设置趣味演示实验 调动学生形象思维分析问题

教师于课堂上选择适当位置,双手抱住一个篮球和一个乒乓球,让乒乓球紧贴在篮球的顶端,提示学生注意观察,接着释放两球.

现象:两球同步降落,着地以后反弹,发现两球反弹之后,篮球的反弹高度比初始高度明显降低,但乒乓球的反弹速度大大增加,甚至以较大的速度撞到了教室天花板,学生对此表现出极大的兴趣.此时教师可以引导学生对问题作如下的分析.

如图2所示,将大、小球体系的着地反弹过程进行分解.为便于叙述,我们将大球用大写字母 A 表示,小球用 B 表示,教室用 C 表示.在图2(a)中,大球着地后开始反弹,由于碰撞总需要一定的时间传递,所以小球的反弹必然在大球反弹之后.于是大球反弹之后的瞬间,小球仍以原速降落.此时假想我们

(观察者)就静止在教室里,观察到的现象是:大球以着地前瞬间速率 v 反弹,即

$$v_{AC} = v$$

而小球仍以速率 v 下降(即将与大球碰撞)即

$$v_{BC} = -v$$

这时,假想我们缩小为一个“蚁人”进入大球中但未与大球接触[因而不会影响体系的运动状态,见图2(b)].由于我们身处大球之中,感官上必然选择大球作为参考系,此时我们观察到的小球速度实际上就是小球相对于大球的运动速度,利用前面总结出来的公式,可得这个速度为

$$v_{BA} = v_{BC} + v_{CA}$$

式中 v_{CA} 是教室相对大球的运动速度,现选择竖直向上为正方向,则

$$v_{CA} = -v_{AC} = -v$$

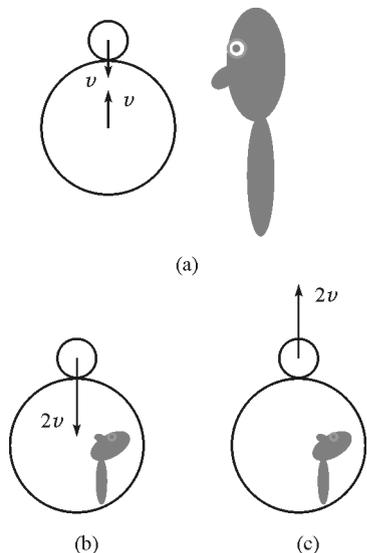
同时可得

$$v_{BA} = -v + (-v) = -2v$$

瞬间的碰撞之后(碰撞时间不计),小球反弹[见图2(c)],设碰撞为弹性碰撞,则在大球参考系内的小球反弹速度为 $v'_{BA} = 2v$ (加一撇表示碰撞后的物理量,下同).现在再把我们的身体变为正常大小回到教室参考系中[图2(d)],仍然由前面总结出来的公式,可知小球相对教室的运动速度为

$$v'_{BC} = v'_{BA} + v'_{AC} = 2v + v = 3v$$

动能正比于速度的平方,由此可见小球在碰撞之后动能是碰撞之前的9倍,反弹高度大大增加也就不奇怪了.



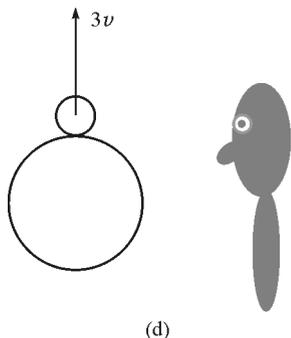


图2 小球的弹弓效应

3 调动学生归纳思维 对问题进行抽象提炼

教师引导学生调动抽象思维对上述现象进行归纳总结:

- (1) 两体碰撞(相互作用)问题.
- (2) 质量悬殊.
- (3) 相互作用力为保守力.

简而言之就是:在两个质量悬殊物体的弹性碰撞过程中,小质量物体在碰撞之后可以获得相当可观的速度(动能)增量.物理学家把这种现象形象地称之为“弹弓效应”^[1],由于其加速作用的奇特性(不需要人为做功或燃烧燃料),引起了人们极大的兴趣,也成为物理教学工作常常讨论的话题^[2-4].

4 运用发散思维 注重实际应用 激发学生的科学探索热情

4.1 引力弹弓的加速原理简析

教师提出设问:能否利用弹弓效应在相关的工程之中对物体加速从而节省能源?然后引导学生进行对照分析:在航天飞行中,飞船掠过某行星时,完全满足第3节所述的3个条件.

- (1) 飞船掠过行星可以看作是一次无接触的碰撞.
- (2) 飞行器与行星的质量相差悬殊(悬殊程度甚至远远超过乒乓球和篮球之间的质量差).
- (3) 飞行器与行星之间的作用力是万有引力,万有引力是保守力.

既然3个条件完全满足,那么前面所设问题的答案就当然是肯定的.在航天领域,人们管这种加速方式为“引力弹弓”或“引力推进”.航天史上的“旅行者号(1和2)”“伽利略号”“卡西尼-惠更斯号”等航天飞行器都用到了引力弹弓的加速机制.从普通

尺度两体问题的加速作用到航天领域中的飞船加速应用,这种天马行空般的想象力以及从猜想到理论计算再到工程上的实际应用,使得物理学这一门自然科学能够像一门艺术一样给人们以极妙的美感,而精通这门艺术的“艺术家”们正是那些顶尖的物理学家以及工程师们.前面提到的“旅行者1、2”号姊妹宇宙飞船堪称这些艺术品中的绝美之作,它们巧妙地利用了据说要175年才能出现一次的4颗外行星(木星、土星、天王星和海王星)的“行星连珠”现象,逐次地利用弹弓原理进行加速,向着太阳系的外围进发.1989年,旅行者2号成为首次越过天王星的航天飞船.2012年,旅行者1号越过了星际空间边界,同年,旅行者2号则已位于太阳系的外围^[5].

旅行者号具体的轨迹和速度计算是一项浩大而复杂的工程,为了能向具有中学物理基础的学生介绍这一工作,我们必须将模型简化.这部分工作分以下几步进行.

(1) 选定研究对象与过程,以图3中1986年1月24日旅行者2号飞越天王星为素材,适当简化作为例题以供教学训练.

(2) 提示学生利用网络资源获取素材,从百度百科或NASA官网上可以查到(本文引用的是百度百科的数据),天王星的质量为 8.6810×10^{25} kg(取自百度百科“天王星”条目^[6]),而旅行者号飞船的质量为721.9 kg(取自百度百科“旅行者号”条目^[7]).前者质量为后者质量的1 023倍.满足前面第3节总结的特征(2).

(3) 从百度百科“天王星”条目^[6]查得天王星的绕日公转速度为24 607 km/h,折合约7 000 m/s.从1992年出版的较为权威的百科全书^[8]查得旅行者2号飞离太阳系的平均速度约为14.9 km/s(被加速几次之后的数值).作为例题,我们将旅行者2号的入射速率取为10 000 m/s.从图3我们可以看到,由于天王星的引力偏转作用,旅行者2号越过天王星以后,飞行轨迹与天王星的公转方向的夹角变小了.仍然出于只是作为例题训练的考量,入射角和出射角我们不取实际值,大约估计之后分别取 60° 和 45° .基于上面的设定之后,组织学生分组讨论或独立求解飞船的出射速度和速度增量,验证弹弓效应的加速作用.随后,教师给出如下的分析指引.

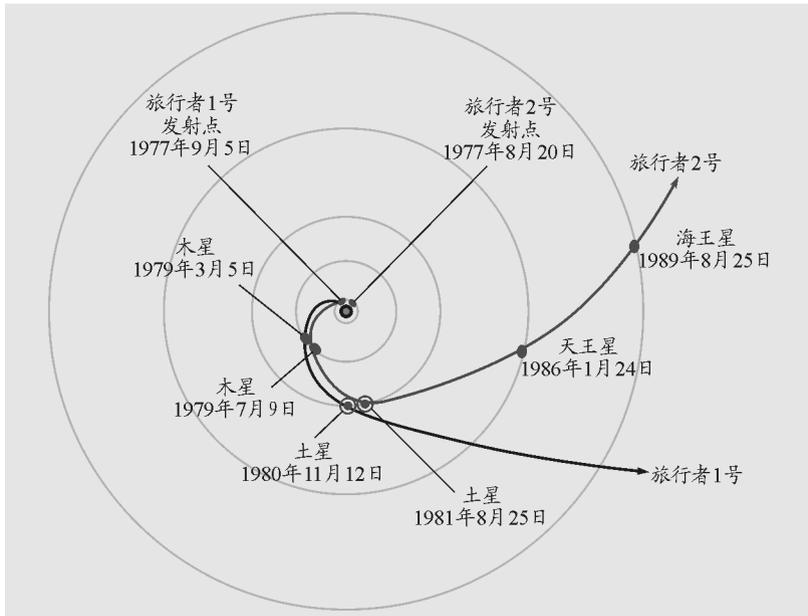


图3 旅行者号飞行轨迹(图片来源:参考文献[5])

首先,作出图4所示的速度矢量关系图,其中矢量 \vec{AO} 代表天王星在太阳中心参考系(下称日心系)内的公转速度 v_{us} ,在本问题中是一常量,在“碰撞”前后保持不变.矢量 \vec{AB} 代表“碰撞”前飞行器在日星系入射速度 v_{vs} ,矢量 \vec{OB} 代表“碰撞”前飞行器在天王星中心参考系(下称天心系)中的飞行速度 v_{vu} .矢量间满足我们前面第1节总结的速度变换公式,即

$$\mathbf{v}_{vs} = \mathbf{v}_{vu} + \mathbf{v}_{us} \quad (4)$$

或

$$\vec{AB} = \vec{AO} + \vec{OB}$$

按前面的设定, $\angle OAB = 60^\circ$.类似地,矢量 \vec{OC} 代表飞行器在天心系内的出射速度 v'_{vu} .由于万有引力是保守力,所以在天心系内,飞行器的能量守恒,于是其入射速率与出射速率相等,即 v_{vu} 和 v'_{vu} 的大小相等,反应在图像上,就是 $|\vec{OB}| = |\vec{OC}|$,或者说B点和C点将落在以O为圆心的一个圆上,圆的半径等于天心系内飞行器的入射速率或出射速率.仍然按照这套规则,矢量 \vec{AC} 显然代表的就是飞行器在日心系内的出射速度 v'_{vs} .根据前面的设定, $\angle OAC = 45^\circ$.从三角形的性质上我们很容易看出, $|\vec{AC}| > |\vec{AB}|$ 即 $|v'_{vs}| > |v_{vs}|$.所以,从日心系看来,飞行器被加速了.

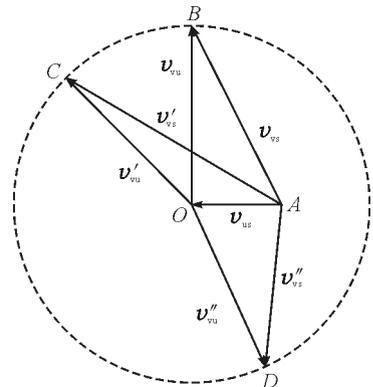


图4 入射前后飞行器在两个参考系中的速度矢量关系

在作出加速的初步判断以后,可以利用几何方法求解旅行者2号在日心系中的出射速度 v'_{vs} .由 $\triangle OAB$ 的余弦定理可得

$$|v'_{vu}| = |v_{vu}| =$$

$$\sqrt{|v_{vs}|^2 + |v_{us}|^2 - 2|v_{vs}||v_{us}|\cos\frac{\pi}{3}} \quad (5)$$

把 $|v_{vs}| = 10\,000\text{ m/s}$, $v_{us} = 7\,000\text{ m/s}$ 代入算得

$$|v_{vu}| = |v'_{vu}| = 8\,888\text{ m/s}$$

又由 $\triangle OAC$ 的余弦定理可得

$$|v'_{vs}|^2 + 7\,000^2 - 2 \times |v'_{vs}| \times 7\,000 \times \cos\frac{\pi}{4} = 8\,888^2 \quad (6)$$

由此可解得在日心系中旅行者2号的出射速率 $|v'_{vs}| \approx 12\,000\text{ m/s}$,相对入射速率增加了20%.

4.2 减速弹弓与维速弹弓

在中学物理阶段,我们按照传统的方法,习惯性地会将飞船在日心系中的速度称为绝对速度,将天王星中心在日心系内的速度(也就是天王星的公转速度)称为牵连速度,而将飞船在天心系中的速度称为相对速度.我们常将式(1)和式(4)概括性地陈述为:

$$\text{绝对速度} = \text{相对速度} + \text{牵连速度}$$

利用这个陈述,学生很容易通过图4搞懂弹弓效应的加速机制,通过认真观察图4我们可以总结出如下的规律:所谓的弹弓效应,就是在相互作用过程的前后,牵连速度不变,相对速度大小也不变,而它们之间的夹角由大变小(两者的方向更接近了),从而使得它们的矢量和(也就是绝对速度)的数值变大了^[2].这个规律概括出来以后,发散思维立即又可以派上用场了,有没有可能经过弹弓效应之后速率不变或反而减小的情况?当然有可能!

从上面概括的规律可知,如果飞船的出射方向与行星的公转方向之间的夹角大于入射方向与公转方向之间的夹角(这种情况下,飞行器绕行星飞了大半圈折回出射,见图4中物理量带两撇的情况,其中 $\angle OAD > \angle OAB$),那么从日心系看来,飞船的出射速率就会小于入射速率(即 $|\mathbf{v}_{vs}''| < |\mathbf{v}_{vs}|$),这时候引力弹弓就成了“减速弹弓”,减速弹弓在航天航空领域也大有可为,当我们发送一个探测器进入某个行星的引力范围时,如果不加以减速的话,由于保守力的性质,最终飞行器还会逃逸离开,这样探测器就没办法对行星绕行观测了.这种情况,如果该行星有卫星的话,我们就可以设定好探测器飞行方向与该卫星的公转方向的夹角,用该卫星对探测器起到减速的弹弓效应,使探测器减速从而被行星的引力捕获,继而实现绕星飞行.

至于“维速弹弓”,其实我们早已司空见惯.正如伽利略的杰出著作《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》中所述:

“……把你和一些朋友关在一条大船甲板下的主舱里,再让你们带上几只苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫……使船以任何速度前进,只要运动是匀速的,你会发现……蝴蝶和苍蝇会在舱内随便地到处飞行,它们也绝不会向船尾集中,并不因为它们可能长时间留在空中,脱离了船的运动,为赶上船的运动显出

累的样子……”

这里的匀速运动的船舱,就是能使苍蝇、蝴蝶和其他小飞虫维持速度而不自知的“维速弹弓”.常见的类似例子还有:在夏秋之交的黄昏时分,当我们漫步在草地上或者湖边的时候,总有一群类似蚊子的小飞虫在我们头顶上盘旋飞舞,这群小飞虫可以跟着我们的步伐飞行几公里而没有疲惫的样子,原理跟上面的情形也大致相同.

4.3 弹弓效应与气体的功能关系

我们知道,对于一个封闭气缸,如果施力推动活塞压缩气体,则气缸内的气体温度会上升,反之,如果任由气体对活塞施力而向外膨胀,则气体温度会下降.通常我们用功能原理说明这一现象.但是,如果运用“弹弓效应”来解释这个现象,却可以得到画面感极强的解说效果.这需要调动我们的发散思维和概括思维.首先是发散思维,我们前面介绍了“弹弓效应”的常规尺度和天体尺度的应用,那么,在微观尺度是不是也有它的用武之地?这是利用发散思维自然会考虑到的.其次,还需要进一步调动归纳思维对弹弓效应的加速机制进行抽象概括.

根据4.2中的归纳我们知道,如果两质量悬殊物体在保守力作用下相对速度(小质量物体在大质量物质心系内的速度)与牵连速度(大质量物体在实验室系内的速度)之间的夹角由大变小,那么相互作用结束之后小质量物体的绝对速度将变大,反之将变小.这时我们可以考虑两种碰撞过程:“迎头碰”和“追尾碰”.在迎头碰中,两物体碰撞之前的速度方向相反(夹角为 180°),碰撞以后速度方向相同(夹角为零),故小质量物体的速率将变大(如前面小球的弹弓效应演示实验).而在追尾碰中,情况却恰恰相反,所以碰撞之后小质量物体的绝对速率会变慢.

诚如前面所说,用“迎头碰”和“追尾碰”的观点可以解释前面提到的做功改变汽缸中气体温度的动态机制.施力压缩活塞时,活塞与内部气体分子之间发生的碰撞为“迎头碰”,这时气体分子的动能会增加,因而温度会升高;相反,当活塞被往外抽离时,气体分子由于扩散作用会追随活塞往外运动,因而发生的碰撞为“追尾碰”,这时气体分子的动能会减少,因而温度会降低^[9].

5 总结与拓展

本教学设计从竹排问题出发,引出相对速度的概念,应用归纳思维,得出了研究对象在不同参考系中的速度变换公式(实际上就是伽利略变换).在此基础上应用形象思维可以较为简易地解释小球的弹弓效应,随后以弹弓效应为核心,运用发散思维对几个有趣的问题展开了分析讨论.我们发现,简单的物理原理,只要教师积极调动学生的各种有效的思维方式,就可以使得课堂的深度、广度和趣味性得到保证.对于有一定基础的大学物理学习者,文中提到的几种思维方法仍有用武之地,可以用上面的原理来解释冲浪中的加速机制、光和声波的多普勒效应、磁力弹弓、宇宙射线的加速机制等等^[9].而弹弓效应的加速原理,除了用到本文中所提的伽利略变换以外,也可以用洛伦兹变换矩阵作用于四维动量而得到^[10],其法简洁而优美.另外还可以用经典力学中的哈密顿量与能量之间的关系得到^[11].

参考文献

- [1] G. 斯塔林克,王容.小球的弹弓效应[J].物理教学,1990(10):34.
- [2] 李品钧.弹弓效应原理简析[J].物理与工程,2015,25(3):44-47.
- [3] 于永建,侯新杰.电影《流浪地球》相关原始物理问题探讨[J].物理教学,2019,41(11):77-80,76.

- [4] 叶春.浅谈引力弹弓效应[J].物理教学,2016,38(11):14-16.
- [5] Ota Lutz. Then There Were Two: Voyager 2 Reaches Interstellar Space [EB/OL]. <https://www.jpl.nasa.gov/edu/news/2018/12/18/then-there-were-two-voyager-2-reaches-interstellar-space/>. 2018-12-18.
- [6] 百度百科.天王星(太阳系八大行星之一)[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E5%A4%A9%E7%8E%8B%E6%98%9F/21805?fr=aladdin>. 2022-06-01.
- [7] 百度百科.旅行者号探测器[EB/OL]. <https://baike.baidu.com/item/%E6%97%85%E8%A1%8C%E8%80%85%E5%8F%B7%E6%8E%A2%E6%B5%8B%E5%99%A8?fromtitle=%E6%97%85%E8%A1%8C%E8%80%85%E5%8F%B7&fromid=7131008>. 2021-12-14.
- [8] S. P. Parker. *McGraw - Hill Encyclopedia of Science and Technology* [M]. 7th ed. New York: McGraw - Hill, 1992:138 - 141. <https://hypertextbook.com/facts/1997/PatricePean.shtml>.
- [9] BARTLETT A. A., HORD C. W. The slingshot effect: explanation and analogies[J]. *The Physics Teacher*, 1985, 23(8):466.
- [10] DYKLA, J. J., CACIOPPO, R., & GANGOPADHYAYA, A. Gravitational slingshot[J]. *American Journal of Physics*, 2004, 72(5), 619 - 621.
- [11] EPSTEIN, KENNETH J. Shortcut to the Slingshot Effect [J]. *American Journal of Physics*, 2005, 73(4):362.

University Physics Classroom Design Guided by the Cultivation of Scientific Research Ability

——Taking the Instructional Design of “Relative Motion” as an Example

LI Pinjun

(Department of Information Science, Zhanjiang Preschool Education College, Zhanjiang, Guangdong 524037)

Abstract: Taking the teaching design of “relative motion” as an example, this paper expounds how to construct a deep, broad and interesting high-quality classroom teaching of physics by effectively mobilizing students’ inductive thinking, image thinking and divergent thinking, so as to improve students’ scientific literacy. Teaching practice shows that using the concept of “relative motion” to explain slingshot effect is an excellent topic for thinking training, which is not only a good reference for conventional problems in high school and college general physics teaching, it can also be used to explain the acceleration mechanism in surfing, the Doppler effect of light and sound waves, the acceleration mechanism of magnetic slingshot, cosmic rays and so on after deepening and expansion.

Key words: relative motion; inductive thinking; image thinking; divergent thinking; slingshot effect