

高中物理竞赛教学路径构建

——以“科里奥利力与科里奥利加速度”为例

雷靖娴 顾国锋

(广西师范大学物理科学与技术学院 广西 桂林 541004)

(收稿日期:2021-03-25)

摘要:探讨科里奥利力和科里奥利加速度的相关内容,使学生深度理解两者的区别和联系,展示了使学生理解物理内涵,培养学生的物理思维,落实物理核心素养的教学设计核心理念。

关键词:科里奥利力 科里奥利加速度 理解性学习

许多自然现象与物理的知识息息相关,比如地球自转所产生的影响,包括贸易风、轨道的磨损、河岸的冲刷等高中地理问题都能根据物理学中有关科里奥利力的理论知识进行解释^[1]。科里奥利力是旋转参照系中特有的惯性力形式,是非惯性系动力学中的重要物理概念。科里奥利力在实际生活中的现象较为常见,其数学表达也不算太复杂,但它的物理思想(尤其是产生原因的细节)却令很多学生不能理解。通过文献调研发现,科里奥利力和科里奥利加速度的方向问题也是许多教师探讨的问题,如文献[2]等。在现有的竞赛教辅书中,对科里奥利加速度与科里奥利力的关系未做详细说明,多数学生对有关科里奥利力的方向问题并未真正理解,导致学生解决相关竞赛题时,感到十分吃力。第35届全国中学生物理竞赛复赛第五题考查了对科里奥利力的理解,通过学生的反馈来看,学生毫无思路,无法下笔。由此可见,为了完成教师设置的教学目标,使学生理解性学习,高中物理竞赛教学应该作适当的调整。

1 学情分析

高中物理竞赛学习是学生在高中物理学有余力的基础上,对更高难度的物理知识进一步挑战,增强物理学科能力的方式之一。但是,许多竞赛生对物理学习仍有一些误解,体现在他们认为物理就是物理符号、物理公式和物理习题的集合,学物理就是导公式、背公式与套公式,由此可见,他们对公式背后的

物理世界未做深入学习。尽管这些学生是高中阶段物理学习中的佼佼者,但他们对物理现象的想象力与批判性思维能力较弱。教师对他们的教学,要适当降低数学推导难度,多联系生活实际,加强物理思想的交流。科里奥利力的概念对多数学生而言不算新鲜,因为在中学地理课中学习了地转偏向力的概念,但他们多数不知道在地球表面运动的物体受到的地转偏向力就是科里奥利力。

2 教学目标

- (1)理解科里奥利力的概念及其产生的原因;
- (2)掌握在具体情境下判断科里奥利力方向的方法;
- (3)熟悉科里奥利加速度及科里奥利力的推导过程;
- (4)通过用科里奥利力解释地球表面的一些物理现象,培养学生的空间想象力。

3 教学思路

因科里奥利力的概念比较抽象,不易理解。本课宜让学生先看一段乌干达赤道线附近科里奥利力实验视频,增加学生们对这个问题的兴趣,使其有感性认识。然后,通过简单的转盘情景,导出科里奥利加速度,让学生理解科里奥利加速度以及科里奥利力产生的原因,掌握判断两者方向的方法。接着,通过一系列具体的物理情景,讲解各种情况下的科里奥利

作者简介:雷靖娴(1997-),女,在读硕士研究生,研究方向为物理教学论。

指导教师:顾国锋(1964-),男,硕士,教授,研究方向为物理课程与教学论、统计物理学与复杂系统。

力的具体体现及其产生原因. 最后, 通过交流与讨论, 加深学生对这一物理概念以及就此引申出来的物理规律的理解.

4 教学设计

4.1 新课引入 激趣设疑

播放一段乌干达赤道线附近科里奥利力实验视频, 视频中, 分别演示了在北半球(离赤道线 10 m), 在南半球(离赤道线 10 m)和赤道线上的水在漏盘中漏动时, 水的旋转方向. 学生看到视频中的奇特现象, 表示感到十分惊讶, 激发学生的学习兴趣, 引发学生的疑问, 为接下来的课堂做好铺垫.

4.2 理论分析 建构新知

环节一: 通过具体情景引出科里奥利加速度及科里奥利力

【例 1】 对于科里奥利力的方向问题, 我们可以通过下面这一具体情景进行阐述^[3]. 如图 1 所示, 转盘在水平面内绕竖直轴 O 以角速度 ω 做匀速转动, 一只质量为 m 的质点相对于转盘以速度 u 沿转盘的半径方向做匀速直线运动. 求质点对地的加速度.

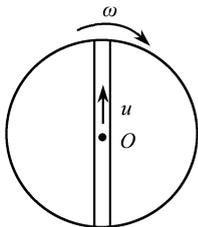


图 1 例 1 情景图

选坐标系如图 2 所示, 假设 $t=0$ 时, 质点在 A 处, 经过时间后, 质点到达 B' 处.

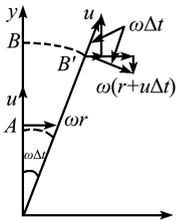


图 2 解答过程分析

质点在 A 处, x 方向和 y 方向的加速度分量分别为

$$a_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v'_x - v_x}{\Delta t}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\omega(r+u\Delta t)\cos(\omega\Delta t) + u\sin(\omega\Delta t) - \omega r}{\Delta t} = 2\omega u$$

$$a_y = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{v'_y - v_y}{\Delta t}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{-\omega(r+u\Delta t)\sin(\omega\Delta t) + u\cos(\omega\Delta t) - u}{\Delta t} = -\omega^2 r$$

很明显, 上述公式的 a_y 代表向心加速度, 它是由于圆盘上的点相对地面做匀速圆周运动(其速度方向不断改变)引起的, 其方向指向轴心. 而公式中的 a_x 为科里奥利加速度, 一方面, 是由于质点沿半径方向往外运动, 半径增大, 质点对地的速度增大引起的; 另一方面, 有于圆盘转动, 使得相对速度 u 对地的方向不断改变而引起的. 由于质点对圆盘的相对加速度为零, 因此, 质点对地的加速度就是牵连加速度.

$$F_y = -ma_y = m\omega^2 r$$

为惯性离心力

$$F_x = -ma_x = -2m\omega u$$

为科里奥利力.

科里奥利力是由于运动参考系转动以及质点对此转动参考系又有相对运动所导致的. 科里奥利力的方向永远垂直于相对速度 u 的方向. 当由于相对运动, 使质点远离转轴时, 质点对于固定参照系的速度增大, 科里奥利加速度沿转动方向, 而科里奥利力沿转动的反方向. 反过来, 当由于相对运动, 使质点靠近转轴时, 质点对于固定参照系的速度减小, 科里奥利加速度沿转动的反方向, 而科里奥利力沿转动的正方向.

环节二: 通过实际应用, 深入探讨科里奥利加速度及科里奥利力

(1) 在地球表面做水平运动质点的科里奥利加速度及科里奥利力

问题 1: 在北半球上某处的河流自北向南流动, 东西岸受冲刷程度如何?

因为河流自北向南流动, 那么河流的方向在惯性系 S 系中可观测到如图 3(a) 所示, 河流的轨迹是一条曲线, 由此可知河流受到河岸对它有一个指向凹侧的力, 因此加速度指向轨迹的凹侧, 此加速度为科里奥利加速度. 由牛顿第三定律可知, 河岸受到河流的反作用力, 因此西岸受冲刷甚于东岸. 在非惯性系 S' 系中观测到如图 3(b) 所示, 河流自北向南流动, 是一条直线, 河岸对河流有向东的力, 那么就应存在向西的惯性力与之平衡, 这个惯性力就是科里

奥力,这是非惯性系中能够观测到的,科里奥力与河岸受到水的作用力效果等同,在地理学科中,我们称之为地转偏向力.由这两个图可知,科里奥力和科里奥加速度方向相反.

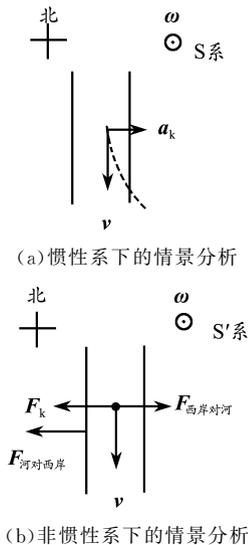


图 3

问题 2:假设在北半球某地,质点做水平运动,请分别从东、西、南和北 4 个方向讨论其科里奥加速度和科里奥力.设质点的质量为 m ,速度为 u ,

表 1 问题 2 的解答过程

运动方向	向东运动	向西运动
计算过程	$\frac{(\omega_e R \cos \theta + u)^2}{R \cos \theta} = \frac{u^2}{R \cos \theta} + \omega_e^2 R \cos \theta + a_k$ $a_k = \frac{(\omega_e R \cos \theta + u)^2}{R \cos \theta} - \frac{u^2}{R \cos \theta} - \omega_e^2 R \cos \theta = 2\omega_k u$	$\frac{(\omega_e R \cos \theta - u)^2}{R \cos \theta} = \frac{u^2}{R \cos \theta} + \omega_e^2 R \cos \theta + a_k$ $a_k = \frac{(\omega_e R \cos \theta - u)^2}{R \cos \theta} - \frac{u^2}{R \cos \theta} - \omega_e^2 R \cos \theta = -2\omega_k u$
质点对静止参照系的加速度(绝对加速度)	$\frac{(\omega_e R \cos \theta + u)^2}{R \cos \theta}$	$\frac{(\omega_e R \cos \theta - u)^2}{R \cos \theta}$
质点对旋转参照系的加速度(相对加速度)	$\frac{u^2}{R \cos \theta}$	$\frac{u^2}{R \cos \theta}$
旋转参照系对静止参照系的向心加速度(牵连加速度)	$\omega_e^2 R \cos \theta$	$\omega_e^2 R \cos \theta$
质点对静止参照系的加速度(科里奥加速度)	$2\omega_k u$	$-2\omega_k u$
结论	科里奥加速度方向与向心加速度方向相同,即指向地轴,实际上其水平分量向左,所以其科里奥力的水平分量向右	科里奥加速度方向与向心加速度方向相反,即离开地轴,实际上其水平分量也向左,所以其科里奥力的水平分量也向右

(2)在地球表面做竖直运动质点的科里奥加速度及科里奥力

问题 3:在赤道上自由下落的物体,以地球为参考系,如何解释落体偏东的现象?若物体在足够长

地球自转角速度为 ω_e ,地球半径为 R ,地轴与竖直方向夹角为 θ .

部分解答过程如表 1 所示,质点向南和北运动的情况由学生自行推导,培养学生举一反三的能力,锻炼学生的逻辑推理能力,使学生在具体应用中分析问题,发现问题,进一步理解科里奥力及科里奥加速度.并引导学生归纳总结在北半球表面,质点做水平运动时,其受到的科里奥力的水平分量总是向右的.

至此,学生对科里奥力有了一定程度的理解,接着向学生指明课堂开头中视频的现象,北半球表面做水平运动的二维自由质点,由于在运动过程中受到向右的科里奥力作用,质点做顺时针的曲线运动,此时其做曲线运动所需的偏心力就是科里奥力.反过来,在南半球表面,质点做水平运动时,其受到的科里奥力的水平分量总是向左的.因此,在南半球表面做水平运动的二维自由质点,由于在运动过程中受到向左的科里奥力作用,质点做逆时针的曲线运动,此时其做曲线运动所需的偏心力就是科里奥力.

的竖直细管内下落又会看到什么现象?

质点所在的位置与转轴的距离越来越小,质点绕地轴转动的速度也越来越小,科里奥加速度沿着地球转动的反方向(向西),科里奥力沿地球转

动的方向(向东).但如果给这个自由下落的物体一个约束条件,即物体在足够长的竖直细管内下落,以地球为参考系,则物体沿直线运动.此时会发现在东西方向上,物体除受科里奥利力外,还必然存在一个力,这个力与科里奥利力大小相等,方向相反,并作用在同一直线上,使得合力为零,物体不会发生偏转.通过受力分析可知,物体还受到细管对物体的弹力.在地球这一转动参考系中,在轨道约束的情况

下,物体受到的科里奥利力和轨道对物体的弹力是一对平衡力,由于科里奥利力方向向东,那么细管对物体的弹力向西,反过来,物体对细管的弹力向东.

通过这个问题的思考,学生对地球表面做竖直运动的质点有了感性的认识,可以在教师的引导下,归纳出无论是否具有轨道的约束,只要以地球为参考系,质点做自由落体运动与竖直上抛运动的规律如表2所示.

表2 地球表面作竖直运动的质点运动规律

运动形式	质点所在的位置与转轴的距离	质点绕地轴旋转的速度	科里奥利加速度方向	科里奥利力方向
自由落体运动	逐渐变小	逐渐变小	沿地球转动的反方向(向西)	沿地球转动的方向(向东)
竖直上抛运动	逐渐变大	逐渐变大	沿地球转动的方向(向东)	沿地球转动的反方向(向西)

环节三:通过讨论与交流,促使学生理解学习,透彻思考科里奥利加速度及科里奥利力

科里奥利力和科里奥利加速度关系的问题会引起许多学生的疑惑,主要体现在下列几个问题中,基于上述的探讨,可就这些问题与学生一起交流,引导学生总结归纳,内化科里奥利力及科里奥利加速度.

(1)科里奥利加速度是科里奥利力产生的吗?如果不是,科里奥利力会产生什么后果?

(2)科里奥利力和科里奥利加速度的关系是什么?

(3)轨道固连,质点做直线运动,无偏向,科里奥利力和科里奥利加速度还存在吗?

(4)科里奥利力在地理学科称之为地转偏向力,物体沿着固连在转动参考系向轨道运动,运动方向并没有改变,为什么?

力是物体间的相互作用,力的动力学效果是使受力物体产生加速度,惯性力是力的概念在非惯性系中的推广,在非惯性系中,惯性力与相互作用力有相同的动力学效果,但是惯性力不是物体间的相互作用,没有施力物体,不遵循牛顿第三定律,不存在反作用力.物体在非惯性系中因具有相对加速度,为了使得牛顿第二定律仍能成立,就引入了虚拟的惯性力,因而体现在数学形式上也能“产生”加速度,但此加速度不是通过作用力产生的.科里奥利加速度在惯性系中由作用力产生,在非惯性系中由牵连运动和相对运动相互影响产生.并不是因为科里奥利力产生了科里奥利加速度,反而是因为科里奥利加速度引出了科里奥利力.只能说,科里奥利力和科里奥利加速度方向相反.对于在地球上运动的物体,在

地球上观察,相当于选取了非惯性参考系来研究运动的物体,此时,惯性力是可以感受到的.例如,若无轨道的刚性约束,则物体运动会发生偏转,从而导致相对加速度,使得物体发生偏转的力就是科里奥利力,若受到轨道的刚性约束,物体沿着固定轨道做直线运动,但仍受到科里奥利力的作用,只不过此时物体还受到了轨道的弹力作用,使得这两个力作为一对平衡力而相互抵消,这也就解释了轨道固连在转动参考系时,物体运动不会偏转的原因,此时,相对加速度为零.

5 教学总结与反思

物理教学的内容分为3方面:一是实验基础,二是物理思想,三是数学表达.三者相辅相承,缺一不可.本案例的教学实践表明,只要教师遵循物理教学规律,认真备课,对教学内容的3方面都认真琢磨,努力找到帮助学生理解物理问题的台阶,对于一些学生原来不理解的问题,经过积极引导以后,也是可以理解,从而取得较好教学效果的.

参考文献

- 董建勋,徐杰.高中地理学科中物理问题分阶段深度探究——以“地转偏向力”为例[J].物理教师,2016,37(8):56~58
- 郑金.有关科氏加速度的疑难问题探讨[J].物理教师,2020,41(11):67~68
- 沈晨.更高更妙的物理(第3版)[M].北京:浙江大学出版社,2010

(下转第90页)

$$F_{\tau} = mg \sin \theta - m(a_c \sin \theta + a_{\tau}) = 0$$

说明杆若受力一定沿杆方向.

本例中两个小球之间机械能传递依靠杆的径向弹力,不需要切向弹力,所以杆的弹力沿杆方向,球B机械能增加,球A机械能减小.

实例三:如图6所示,竖直放置长为 L 的轻杆,上端连着质量为 m 的小球A,杆的下端用铰链固接于水平面.置于同一水平面上的立方体B恰与A接触,立方体质量为 M .今有微小扰动,使杆向右倾倒,各处摩擦均不计,求A与B相互作用过程杆受力是否沿杆方向.

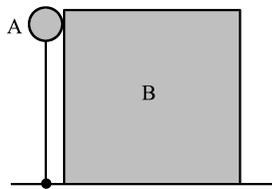


图6 实例三图

各符号设置如图7所示,杆转过 θ 角的过程,由A和B系统机械能守恒有

$$mgL(1 - \cos \theta) = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2}Mv_2^2 \quad (4)$$

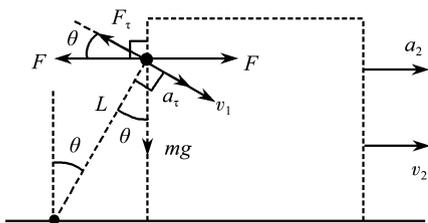


图7 实例三解题图

式(4)两边对时间求导,并设球角速度为 ω ,切向加速度为 a_{τ} ,有

$$mg\omega L \sin \theta = mv_1 a_{\tau} + Mv_2 a_2$$

易知

$$v_1 = \omega L$$

$$v_2 = v_1 \cos \theta$$

联立以上3式解得

$$mg \sin \theta = ma_{\tau} + Ma_2 \cos \theta$$

以B为研究对象,由牛顿第二定律有

$$F = Ma_2$$

由以上两式

$$mg \sin \theta = ma_{\tau} + F \cos \theta$$

选A为研究对象,切向由牛顿第二定律有

$$mg \sin \theta - F \cos \theta - F_{\tau} = ma_{\tau}$$

由以上两式解得 $F_{\tau} = 0$

说明杆若受力一定沿杆方向.

本例中小球与铰链之间没有机械能传递,所以杆的弹力沿杆方向.

总结:通过以上3个实例的分析不难发现,轻杆弹力方向本质上是实现杆两端物体的机械能传递,若没有机械能传递则弹力沿杆方向,若有传递时,可以通过径向力传递,也可以通过切向力传递.

参考文献

- 1 赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程 力学(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2004.174~186
- 2 肖长江,王晓磊,魏勇.基于Matlab的匀质摆杆所受转轴约束力分析[J].大学物理实验,2011,24(5):73~75
- 3 于志明.杆摆中横截面上的法向内力的力矩和功[J].连云港师范高等专科学校学报,2013,30(1):102~104

(上接第87页)

Constructing the Teaching Path of Physics Competition in Senior High School

—Taking Coriolis Force and Coriolis Acceleration as an Example

Lei Jingxian Gu Guofeng

(School of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004)

Abstract: The new Coriolis force and Coriolis acceleration related content, so that students deeply understand the differences and connections between the two. It shows the core idea of teaching design which makes students understand the connotation of physics, cultivates students' physical thinking and implements the core quality of physics.

Key words: Coriolis force; Coriolis acceleration; understanding learning