

刍论“参考系”

徐正海

(当涂第一中学 安徽 马鞍山 243100)

(收稿日期:2017-08-16)

摘要:通过“地面参考系”的应用举例,从中引出科学的“质心参考系”,并进一步提出“太阳参考系”,让人们厘清一些本不该“似是而非”的物理问题本质.

关键词:参考系 系统 质心 能量 动量 相对论

物理学家海森堡曾说“自然科学并不是自然本身,它是人类和自然关系的一部分”.换言之,自然科学的使命就是,人类要想方设法用其语言或工具,来解读那位永远也不开口说话的上帝神.在中学物理的力学体系中,关于那个“牵一发动全身”的参考系,以及与之相关的能量、动量等话题,倘若要较起真来,也确是饶有趣味.

“参考系”是运动描述的平台,它既可实实在在(如地面),也可是人为造设(如坐标系).在牛顿时代,牛顿运动三大定律的创立是在地面实验室里完成的,因而“地面”成了中学物理中唯我独尊的(惯性)参考系;但是,也是在同一时代,由牛顿万有引

力定律处理的“双星系统”,它所衍生出来的“质心”(即指物质系统上被认为质量集中于此的一个假想点),反而成为一个更加优越的惯性系.

众所周知,在一个封闭不受外界影响的系统内,它的质心位置是固定的.这样一来,用质心来描述运动的优势就毋庸置疑了.可事实上,由于人们长年累月生活在地面,习惯性思考往往会让人一头雾水.请赏析两例.

【例1】一个小孩站在船头,按如图1(a)、(b)所示的两种情况,用同样大小的力拉绳,经过相同的时间 t (船未相碰),小孩所做的功分别为 W_1, W_2 ,在时刻 t 小孩拉绳的瞬时功率分别为 P_1, P_2 ,则它们的大

看视频“环太湖国际自行车公路赛”,结合学生实际体验,请学生谈变速自行车如何实现变速.在此基础上,讨论汽车发动机功率的问题,学生更容易接受.

创设实际情境,反映汽车性能的重要指标之一的“汽车百公里加速时间”.引导学生对汽车运动过程进行分析,得出恒定功率启动的规律,启发学生思考恒加速度启动的过程思考.通过学生对自行车变速的体验,理解机动车功率的问题,实现难点的突破.

教学中做到“有的、有类、有法、有序、有节”.新课教学,切忌一步到位,要让学生从感性到理性去掌握一个概念和规律,然后以学生的实际体验,在实际情景中加以运用,加深对概念和规律的理解.

本文以功率教学为例浅谈实施有效课堂教学时

的一些做法,即通过把握目标意识、对象意识和策略意识提高课堂的教学效率、提高教学质量.笔者只是在新高考改革背景下,为了提高课堂教学效率而抛砖引玉,同仁一定会有更高的见解和主张,希望大家共同探讨,促进新高考改革顺利进行.不当之处,敬请指正.

参考文献

- 1 梁旭著.认知物理教学研究.杭州:浙江教育出版社,2011.7
- 2 阎金铎,田世昆著.中学物理教学概论.北京:高等教育出版社,1990.8
- 3 卢尚建著.高中物理课堂有效教学研究.兰州:甘肃教育出版社,2013.9
- 4 李争平等著.中学新课标资源库·物理卷.北京:北京工业大学出版社,2004.2
- 5 陈琦等著.教育心理学.北京:高等教育出版社,2005.8

小关系正确的是()

- A. $W_1 < W_2, P_1 < P_2$
 B. $W_1 < W_2, P_1 = P_2$
 C. $W_1 = W_2, P_1 < P_2$
 D. $W_1 = W_2, P_1 = P_2$

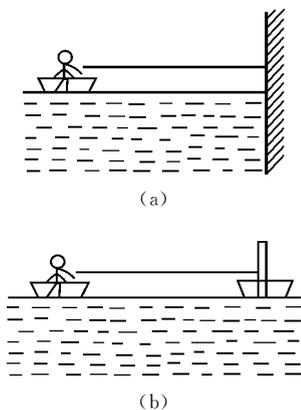


图1 例1题图

解析: 流行解读,小孩所做的功,在图1(a)中是指对自身(包括所站的船)做的功,在图1(b)中除对自身(包括所站的船)做功之外,还对另外一只小船做功.由于两种情况下人对自身(包括所站的船)所做的功相等,而在图1(b)中人对另外的一只小船多做了一部分功,因此 $W_1 < W_2$; 又由

$$P = \frac{W}{t}$$

得

$$P_1 < P_2$$

笔者认为,此题非同小可,严究起来,图1(a)中,人和船(m_1)与地球(M)构建了一个相互作用系统,其质心无限接近地心,故从地心看,应有动量守恒 $m_1 v_1 - Mv = 0$,式中 v_1, v 为 t 时刻“人和船”及地球的速度,依照人力做功转化“体能”为机械能守恒思想有

$$W_1 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} M v^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \left(1 + \frac{m_1}{M} \right)$$

又因为 $m_1 \ll M$, 则

$$W_1 \approx \frac{1}{2} m_1 v_1^2$$

图1(b)中,“人和船”与另一船(m_2)也构成一个两体系统,忽略水面阻力,这样地球成为旁观者,于是选择地面为参考系,同理

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = 0$$

则人力做功为

$$W_2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \left(1 + \frac{m_1}{m_2} \right)$$

由于 m_1, m_2 相当,故 $W_1 < W_2$ 及 $P_1 < P_2$.

眼尖的读者肯定会发现,本例中,图1(a),质心虽无限接近地心,但它不是地球身上的一个点,这是其一;其二,图1(b)中,在绳的方向,船与地球没有相互作用,这样地面成为一个参考台面,其实两参考系还存在着差别.同时,笔者还有意回避了地球的自转问题;否则,“眉毛”与“胡子”根本无法一把抓得起来.

不过,在“燃料消耗”的物理“链接”一文^[1]中,笔者曾讨论了赤道处向东或向西发射近地圆轨道卫星,需要考虑地球的自转,尽管地心参考系得出的燃料消耗多于地面参考系,但两者相差非常小,可以忽略.

放眼望去,一切非地面运动的宇宙航行,万有引力是航天器运动的主宰(虽然发动机也有短时的“助推”与“刹车”).这种情形下,地面参考系应该销声匿迹,简单讲,人造地球卫星的圆周运动的观察,是在地心(地心相当于质心)处,而不是在地面上;行星运动的参考系也应该是太阳.又因为太阳质量几乎占太阳系总质量的98%,故在整个太阳系中,太阳参考系的规格、级别都为最高.

可话又说回来,地面人觉得地球自转角速度太小,有时可以忽略,这就又使得“地面”与“地心”参考系又划起了等号.比如求解宇宙速度.

【例2】求地球航天器 m 的第三宇宙速度?

解析: 第三宇宙速度指的是航天器从地球起飞脱离太阳系的最低飞行初速度 v_3 .

方法一:用太阳参考系

数据汇总:日地距离 $r_0 = 1.51 \times 10^{11}$ m,地球半径 $R = 6.4 \times 10^6$ m,地球质量 $M_1 = 6 \times 10^{24}$ kg,太阳质量 $M_2 = 2 \times 10^{30}$ kg,地球相对太阳的运动速度 $u =$

$$\sqrt{\frac{GM_2}{r_0}} = 30 \text{ km/s.}$$

考虑到地球绕太阳在小于 5° 圆弧内可似为直线(约长达 $328R$),太阳的引力短时间内不改变地球与航天器的总动量,并记航天器刚飞离地球时,地球速度为 v_1 ;当航天器与地球足够远(在 $328R$ 之内)时,航天器速度为 v ,地球速度为 v_1' .

由动量守恒定律

$$(M_1 + m)u = m(v_1 + v_3) + M_1 v_1 = mv + M_1 v'_1 \quad (1)$$

由能量守恒定律

$$\frac{1}{2}m(v_1 + v_3)^2 - \frac{GM_1 m}{R} + \frac{1}{2}M_1 v_1^2 = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}M_1 v_1'^2 \quad (2)$$

以及

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{GM_2 m}{r_0} = 0 \quad (3)$$

由式(1)知

$$u - v_1 = \frac{m}{M_1 + m}v_3$$

考虑到 $m \ll M_1$, 则

$$v_1 = u$$

并记 $v'_1 = u + \Delta u$, 因为 $\Delta u \ll u$, 因此改写(1)、(2)两式为

$$m(u + v_3) + M_1 u = mv + M_1(u + \Delta u) \quad (4)$$

$$\frac{1}{2}m(u + v_3)^2 - \frac{GM_1 m}{R} =$$

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{2}M_1(u + \Delta u)^2 - \frac{1}{2}M_1 u^2 = \frac{1}{2}mv^2 + M_1 u \Delta u \quad (5)$$

再将式(4)改为

$$M_1 u \Delta u = mu^2 + muv_3 - muv$$

和式(3)改为

$$v = \sqrt{2}u$$

一起代入式(5)得

$$\frac{1}{2}mv_3^2 - \frac{GM_1 m}{R} = \frac{1}{2}mu^2 (\sqrt{2} - 1)^2 \quad (6)$$

则

$$v_3 = \sqrt{\frac{2GM_1}{R} + (\sqrt{2} - 1)^2 u^2} = 16.7 \text{ km/s}$$

方法二:用地球参考系

航天器脱离地球引力后速度为 v' , 由能量守恒有

$$\frac{1}{2}mv_3^2 - \frac{GM_1 m}{R} = \frac{1}{2}mv'^2 \quad (7)$$

考虑到地球公转, 忽略其自转, 航天器相对太阳速度 $v = v' + u$, 再考虑航天器脱离太阳引力有

$$\frac{1}{2}m(v' + u)^2 - \frac{GM_2 m}{r_0} = 0 \quad (8)$$

合并式(7)、(8)得

$$v_3 = \sqrt{\frac{2GM_1}{R} + (\sqrt{2} - 1)^2 u^2} = 16.7 \text{ km/s}$$

爱钻牛角尖的同学课余时间经常会与笔者争论, 说涉及运动和能量、动量的诸多问题, 从来就没有写过一清二楚的式子, 过多的近似让人的思维纠结. 想想也是, 参考系从“地面”升格到“地心”再提升到“太阳”确实不是一件容易事, 相应地它更说明这些纠结来自太阳体系内的关联性. 譬如, 关于太阳、地球和月球系统引力的问题, 通过计算发现, 太阳对月球的引力却是地球对月球引力大小的两倍. 月球绕地球运行, 太阳的引力怎么会更大些呢? 原来, 在物质系统中, 质心才是惯性参考系, 由于太阳质量远远大于地球质量和月球质量, 故三体系统的质心在太阳附近, 于是乎在以太阳为惯性参考系时, 地球成了一个非惯性系, 巧合的是太阳对月球万有引力与月球在地球参考系中的惯性力相匹配. 当然, 月球绕太阳运行也是一个不争的事实. 倘若再突破太阳系来观察, 解决问题的复杂性还肯定会进一步加码.

“坐标系”作为参考系, 它往往要“贴”上一个物体的“初状态”, 并借“上帝之手”来固定. 这样在定量表达相互作用物体系统的能量、动量上会显现不同的相对性. 十分惊讶的是, 地球与物体相互作用时, 贴在地球作用前的坐标系里, 来描述作用前后地球动能的增量无限小; 而贴在相互作用前对地球运动的坐标系里, 来描述地球作用前后的动能增量又是不可忽略的量^[2].

从“参考系”说开去, 即便是麦克斯韦电磁方程组, 还是爱因斯坦狭义相对论, 坐标系就是物理学一个不可或缺的量化平台. 幸有宇宙精灵“光速”不变, 人类第一次将时空有效的联系到一起. 由此看来, 如果好好把握参考系, 我们还能从中进一步体察到宇宙世界方方面面的美.

参考文献

- 徐正海. “燃料消耗”的物理“链接”. 物理通报, 2017(3): 85
- 范小辉. 不同参考系里的能量差为什么不一样. 中学物理原创题集, 2009. 37 ~ 39