



伽利略的诸多灵感来自对单摆的研究

田川

(重庆市第八中学校 重庆 400030)

(收稿日期:2018-07-15)

摘要:爱因斯坦在评价伽利略的成就时说:“伽利略的发现以及他所应用的科学的推理方法,是人类思想史上最伟大的成就之一,而且标志着物理学的真正开端。”伽利略一生中最有影响力的著作有两部,分别是1632年出版的《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》和1638年出版的《关于两门新科学的对话》。在这两部著作中,笔者发现伽利略在研究单摆的过程中萌生了许多灵感,这些灵感导致了接下来的许多重要发现。现在笔者将这些发现整理如下。

关键词:伽利略灵感 单摆 自由落体 斜面实验

伽利略真算得上是一个传奇人物,光是出生与离世就很巧。

伽利略于1564年(大明嘉靖四十三年)2月15日生于意大利比萨,三天后伟大的文艺复兴的艺术家米开朗基罗去世,这一巧合被科学史学家调侃为:“文艺复兴从艺术向科学的过渡”^[1]。

1642年(大明崇祯十五年,离明亡还有两年)注定也是不平凡的一年,这年冬天伽利略离世,几天后一个遗腹子出生,这个婴儿就是大名鼎鼎的牛顿。

提及到伽利略的出版物非常多,但是系统分析他的思考方式的文章却并不多见,本文从单摆给伽利略带来的启发的角度呈现“伽利略是怎么想的”,这就是写作本文的目的。

故事还得从基督徒的必修课——去教堂礼拜开始说起。

还在大学学医的伽利略在一次礼拜中开小差,心不在焉地望着天花板上摆动的蜡烛架子,它的摆动幅度越来越小,最终停下来。伽利略寻思着:“既然每次摆动的幅度越来越小,那么每次摆动的时间会不会越来越短呢”。作为医学生的伽利略用自己的脉搏作为计时器,测量结果让他感到惊讶:“尽管每次摆动的幅度越来越小,但每次摆动的时间却总是一

样的”。

回到家中,他用各种不同长度的绳子绑了不同重量的石头做实验,结果表明:“长度一定时,不管绑的是重石头还是轻石头,摆动周期都相同”。这就是单摆的等时性。

当时他正在学医,就根据这个发现设计了一种脉搏仪,用标准的单摆测量患者的脉搏,这是他对医学的最后一次贡献。最初因为研究单摆而带来的成功感能够让伽利略兴奋到什么样的程度我们无法揣度,但对单摆的研究改变了他的志向,他改变了在大学中的学习科目,开始研究数学和自然哲学,从此走上了科学家的道路^[2]。从他留下的书信与著作中可以看到单摆是他科学发现中的灵感源泉。

1 因两个轻重摆球下摆的同步联想到两个轻重物下落的不同步

摆球的下摆是重力造成的,如图1所示,不管轻重的石头,在同样的高度能够同步的下摆,那么两个质量不同的物体“会不会”也同步下落呢。如果是这样的话,两个一轻一重的铁球从同样高释放就会同时落地。

然而这时的灵光一现与已有的亚里士多德的观

点相左. 认知冲突产生的强烈好奇心催生了伽利略彻底研究自由落体的决心.

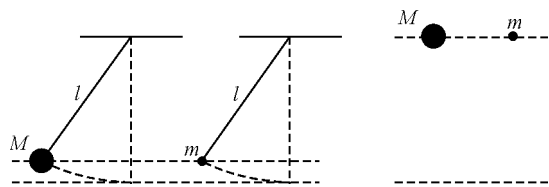


图1 由两个轻重摆球下摆的同步联想到两个轻重物下落的同步

2 由单摆的等时性发现等时圆现象

两个具有相同摆长的单摆具有相同的周期. 而这一周期与摆的摆动幅度无关. 如图 2(a) 所示, 将摆球从 O 点拉至 B 点释放, 球从 B 点摆回 O 点用时间为 t , 那么将摆球从 O 点拉至 A 点后释放, 球从 A 点摆回 O 点的时间也为 t .

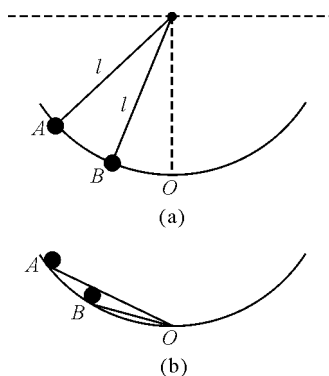


图2 由单摆的等时性猜测小球沿 AO 板与沿 BO 板滑到 O 点的时间会不会相等

接下来, 伽利略进行了一个有趣的思考: 如果将 AO, BO 用(光滑的)平板连接, 如图 2(b) 所示, 让小球分别从 A, B 滚至 O 点, 那么谁先到 O 点呢?

以上猜想成为了伽利略研究等时圆的动机. 在他的著作里, 伽利略写道: “院士(伽利略在书中自称院士)曾清楚地说明, 下落的时间沿着所有的弦都是相同的, 不管它们所对应的弧是怎样的, 对于 180° 的弧, 即沿着直径自由下落. 以及对 $100^\circ, 60^\circ, 10^\circ, 2^\circ$ 的弧都是一样的. 当然这些弧都终止在圆与水平面相切的最低点^[3].”

如图 3 所示, ad, bd, cd 是竖直面内 3 根固定的光滑细杆, a, b, c, d 位于同一圆周上, a 点为圆周的最高点, d 点为最低点. 每根杆上都放着一个球, 3

个小球分别从 a, b, c 处释放(初速度为零), 用 t_1, t_2, t_3 依次表示小球到达 d 所用的时间, 求证: $t_1 = t_2 = t_3$.

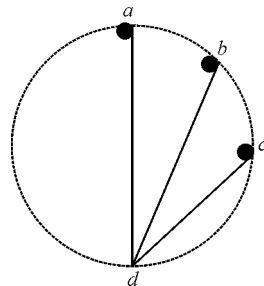


图3 3 个小球同时到 d 点

伽利略在他的著作中证明了 $t_1 = t_2 = t_3$, 但他的证明方法比较复杂. 为了便于读者理解, 接下来我们采用牛顿运动定律来证明伽利略的猜想. 对小球, 受重力和支持力, 将重力沿杆的方向和垂直杆的方向正交分解, 根据牛顿第二定律得小球做初速度为零的匀加速直线运动的加速度为 $a = g \sin \theta$ (θ 为杆与水平方向的夹角), 小球的位移 $s = 2R \sin \theta$, 所以

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 2R \sin \theta}{g \sin \theta}} = \sqrt{\frac{4R}{g}}$$

可以看出 t 与 θ 无关, 即

$$t_1 = t_2 = t_3$$

3 由单摆下摆与上摆的等高性感知到“能量”守恒

没有证据表明伽利略认识到了能量的概念. 然而在伽利略的著作中不难嗅出关于能量守恒的味道: “一个重物从一个高度下落到地面而获得的动量(伽利略书中的动量的定义是重量与速度的乘积^[4], 并不是现代意义上的动量)非常可能是把它带到那个高度所需要的动量.”

将上面这句话中的动量改换成动能的话, 不就是能量守恒了吗? 但关键是伽利略为何会产生以上的想法呢?

伽利略在著作中接着写道: “如同在一个相当重的摆上所清楚看到的, 当把它由铅垂(即竖直方向)拉倒 50° 或 60° 时, 它会精确地获得足以把它带到一个相等的高度的速度和力^[5].”

显然伽利略所谓的“速度和力”的表述不够准

确,实际上伽利略想要表达的就是现在我们所说的能量.

4 从在单摆的中垂线上“钉钉子”到产生斜面实验的构思

伽利略的理想斜面实验是物理学中十大经典实验之一.是物理学史上观察实验与科学推理相结合的典范,是对学生科学方法教育的典型素材,是牛顿第一定律的关键点^[6].

我们不禁要问,伽利略是如何构思这个实验的,他的灵感是什么.伽利略在他的著作中回答了这个问题.“设想这页纸就是一面垂直的墙,其上钉进一枚钉子;从钉子上以一根铅直细线 AB ,比方说 6 英尺长,悬挂 1 盎司的铅弹,在这面墙上画一条水平线 DC ,与铅直线 AB 成直角,而铅直线 AB 离墙大约有两尺宽,如图 4(a) 所示.

现在把线 AB 与所系的球移到 AC 的位置然后使其自由;首先观察到它沿着弧 CBD 下落,通过点 B ,然后沿着弧 BD 运动直到几乎达到水平线 CD ,稍有偏差是由于空气与弦的阻力造成的;由此我们可以正确地推断,球沿着弧 CB 下落,在到达点 B 时获得了一个动量,它刚好足以使球沿着一段类似的弧 BD 到达相同的高度.多次重复这个实验后,让我们先在墙上靠近垂线 AB 钉入一枚钉子,比方说在 E 或 F 处,要让它突出一些宽度,以便栓着子弹的线沿弧 CB 到达 B 时,可以碰着钉子 E 然后迫使它沿着以 E 为圆心的弧 BG 运动.因此我们能够看到,以前由点 B 开始沿着弧 BD 达到水平线 CD 的同一物体以同样的动量能够做些什么.现在,先生们,你们将会高兴地观察到这个球摆动到水平线上的点 G ,并且如果障碍安置在下方的点,比方说在点 F ,你们会看到相同的事情,绕着它球会描出弧 BI ,球总是准确地终止于 CD 线上^[7].”

根据单摆的等高摆动,伽利略联想到:如果一切接触面都是光滑的,如图 4(b) 所示.一个钢珠从斜面的某一高度 A 处静止滚下,由于受重力,没有阻力产生损耗,那么它必定到达另一斜面的同一高度 C ,

如果把斜面放平缓一些,也会出现同样的情况,如 D ,如果斜面变成水平面,则钢珠找不到同样的高度而会一直保持一种运动状态,永不停止运动下去^[8]……

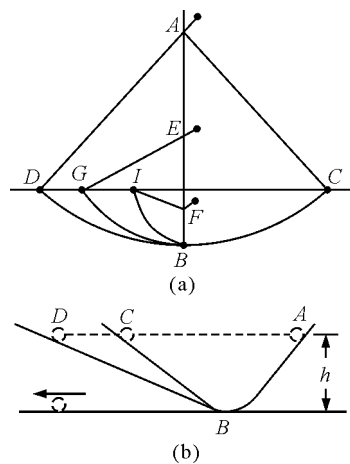


图 4 由单摆联想到斜面

从上面的分析不难看出伽利略通过对单摆的研究萌生了“两个铁球同时落地”、等时圆、守恒观念、斜面实验等一系列灵感.可见,伽利略正是通过单摆带来的启发,引领我们进入了那个激动人心的科学革命的岁月.

参考文献

- 1 江晓原,科学史十五讲.北京:北京大学出版社,2006. 170
- 2 张越,徐在新.物理拓展性课程 I.上海:华东师范大学出版社,2007. 70
- 3 伽利略,关于两门新科学的对话.北京:北京大学出版社,2006. 87
- 4 伽利略.关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话.上海:上海人民出版社,1974
- 5 伽利略.关于两门新科学的对话.北京:北京大学出版社,2006. 85
- 6 郑曼瑶.牛顿第一定律教学的创新设计.物理教学探讨, 2014(8):66
- 7 伽利略.关于两门新科学的对话.北京:北京大学出版社,2006. 157
- 8 张同恂,彭前程.物理第一册.北京:人民教育出版社, 2006. 43