

落体运动的物理思维

——探索笛卡尔与伽利略的落体定律

刘建忠, 姚 珩

(闽南师范大学物理与信息工程学院, 福建 漳州 363000)

摘要: 运动是自然界中最常见的现象, 西方对运动的研究已经历两千多年, 起初人们用“作用”和“形式”来诠释运动, 笛卡尔和年轻时的伽利略也不例外。但当伽利略竭尽所能也无法得到满意的结果时, 他的思维开始转变, 他以物理学背后为简单和谐的数学结构作为所有运动学论证的假设和基础, 从此改变了长久以来物理学家研究自然的方法, 开创了全新的物理世界, 影响深远。

关键词: 伽利略; 落体运动; 加速度; 笛卡尔

纵观国内外物理教材, 无一例外都是从讨论自然界物体的运动开始。伽利略本人也说: 要从一个非常古老的课题, 开启一门崭新的科学; 而在自然界里, 或许没有比运动更古老的议题了。

国内已有许多著作对伽利略的落体运动进行了探讨, 本文将从不同的视角, 尤其是通过对比笛卡尔和伽利略研究落体运动的不同观点, 从中体会伽利略在对落体运动研究中的创见, 和影响至今的物理思维方法, 并呈现落体运动定律是如何逐步建立起来的。

一、运动学理论的背景

西方对物体运动的研究大致可分为三个时期:

- (1) 希腊时期的运动观;
- (2) 文艺复兴的冲力理论;
- (3) 科学革命时期的近代运动观。

1. 希腊时期的动力学

亚里士多德认为所有参与变化的物体都有其目的, 是一种朝向目标的过程。物体的位置变化称作运动, 重物会往下掉落, 是因为其朝向的目标是世界的中心——地心, 亚里士多德把这种运动称作“自然运动”。所有物体的自然运动都有其目的, 因为整个世界是一个层次分明, 排列有序的和諧整体。万物皆有其应有的位置, 自然运动是一种过程, 事物在其中形成, 实现并成就自己^[1]。

另一方面, 与“自然运动”相对的运动, 称为“受迫运动”, 如: 石头上抛, 它必须要借助外界对其向上投掷才能完成, 且“推动者”必须接触“接受者”才能将效果传导出去。但为何石头脱离投掷者后, 且

不再被接触, 却依然会继续运动? 亚氏认为这是因为空气介质的推动所造成的。他引入了“作用”(action) 概念, 来说明在受迫运动中空气介质所扮演的角色。作用是主事者和接受者之间的关系, 它可以潜在的影响接受者运动形式的实现; 作用的规律即是对主事者与接受者本质之间的描述性原理(如图1所示)。

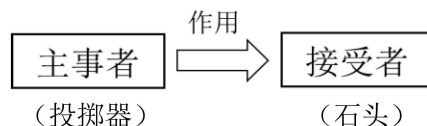


图1 亚里士多德受迫运动示意图

亚里士多德认为对变化的现象和经验的探讨首先要做分类, 如自然, 受迫, 线性, 圆形..., 接着还需引入重要的关键性质与抽象特征, 如作用, 性质, 形式, 主事者, 接受者...。自然哲学必须满足于其自身所具有的抽象特征, 要尝试去建立普遍性, 而非精确性。此种“作用观”与“形式论”的物理学统合了哲学、伦理学、生物学与天文学, 影响西方科学千年之久, 一直到伽利略时期。

2. 文艺复兴的冲力理论

亚里士多德的动力学, 尽管有其自身完善的理论与目标, 但却与生活经验有很大的冲突。例如, 可连续旋转的车轮真的是由空气介质所推动的吗? 空气介质到底是会促进, 还是会阻碍物体运动? 为了消除解释的困难与矛盾, 自六世纪的菲洛波斯开始, 到十四世纪的布里丹, 提出了冲力理论, 主张: 一旦抛体脱离推动者运动时, 最初推动者的作用,

作者简介: 刘建忠, 福建人, 物理学科教学硕士; 姚珩, 河南人, 教授, 博士。

可转移到抛体物里, 并继续以内在冲力 (impetus) 的形式推动抛体向前。

例如, 弓箭一旦离开了弓, 弓箭手的推动作用, 转移到箭柄内, 使箭携带冲力, 推动它继续运动。冲力是来自于弓所产生的作用的一种形式复制, 但一旦产生了冲力, 就可不再需要主事者, 它仅需要可产生作用的形式出现即可。也就是作用不再奠基在物体的性质上, 而是通过中间的“冲力形式”, 与主事者及接受物的天赋性质无关, 也不再涉及彼此之间的联系。

冲力理论颠覆了长久以来建立在物体固有性质上的作用观, 将作用与冲力形式连接起来, 把自然哲学家的重心从只关注物体的性质中转移出来, 开启了日后建立自然运动规律的契机(如图 2 所示)。

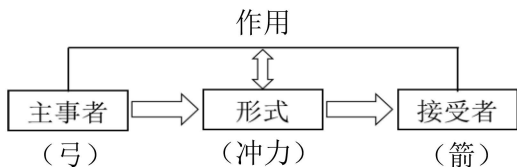


图 2 冲力理论示意图

二、笛卡尔对落体运动的主张

科学革命时期的笛卡尔继承了冲力理论并开创了机械论, 进一步对冲力理论进行转变, 他认为自然运动的发生, 是来自于物体内部的冲力, 而非来自于物体的性质与重量。且此种自然倾向的内在于, 会促使物体作匀速直线运动。他应用这种观点来解释长期以来科学家所重视的落体运动上, 1629 年笛卡尔提出这样一个观点: 落体在空间中的每处都受到冲力的作用, 在空中停留处愈多, 受到累积的冲力也愈大^[2]。如图 3 所示, 一个重物, 由 A 点处开始下落, 经过中间点 B, 最后到达终点 C, 将起点 A 至终点 C 的运动过程均匀成约 40 段, 图中以 1, 2, ..., 10 标示, 在空间中的每个瞬间点, 都会受到竖直向下且强度均匀的冲力的影响, 笛卡尔用延伸到终点线段的长度来表示空间上每一个瞬间点所受冲力的强度^[2]。

故由 A 到 B 所累积冲力大小, 可用冲力线所围成的面积来表示, 也可看作是从 A 到 B 的平均速率。因为由 B 到 C 仍然积累着由 A 到 B 的冲力, 而从图 3 中可以看出四边形 BEDC 的面积正好是三角形 ABE 的三倍, 因此物体通过 BC 要快于通过 AB, 从面积比可以看出由 A 到 B 所花费的时间是由 B 到 C 所花费时间的三倍, 因

$$t_{AB}:t_{BC} = \frac{S}{v_{AB}} : \frac{S}{v_{BC}} = \frac{S}{1} : \frac{S}{3} = 3:1$$

即通过 AC 所花时间为四个时间单位。另外, 通过 AC 的距离正好是通过 AB 距离的两倍, 由此

可以推出花费十二个时间单位通过的距离是花费九个时间单位通过的距离的两倍(如图 3)。

对比今天正确的落体定律可以看出, 虽然笛卡尔的分析有误, 却已经非常接近正确结果了, 这可以由现在的自由落体规律: $S \propto t^2$, 得知

$$S_{AC}:S_{AB} = 2:1 = t_{AC}^2:t_{AB}^2$$

$$\Rightarrow t_{AC} = \sqrt{2} \text{秒} \approx 1.414 \text{秒} (\text{若 } t_{AB} = 1 \text{秒})$$

即通过两个单位距离 AC 所需时间为 1.414 秒, 而笛卡尔所计算出的 $4/3=1.333$ 秒(图 3), 与此正确值比较相差不到 6%。

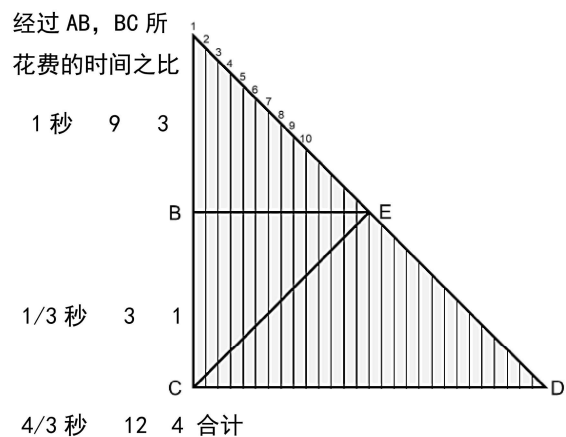


图 3 笛卡尔落体运动示意图

上述笛卡尔探讨落体运动的方法, 虽说与正确结果相当接近, 但是却对物理学的发展引起重大的影响。在他提出此方法前约 40 年, 比萨大学的一位年轻教师伽利略, 已着手建立冲力与落体运动间的合适理论。他一生对运动学的研究, 可以说反映了他那个时代物理学的主流观点与核心问题。

三、伽利略对落体运动最初的思维——结合冲力与阿基米得静力学

伽利略于 1590 年写下的《论运动》一书是力学史上非常关键的知识迁移案例: (1) 首先他将阿基米得液体静力学的方法拓展到自然运动中去, 用来探讨落体速度与介质的关系; (2) 重新评估冲力理论, 试图解释受迫运动及其对应速度^[3]。

当时伽利略虽仅是 26 岁的年轻学者, 但他这种首次结合流体静力学与冲力理论, 将阿基米得的数学方法充分应用到物理学上, 已反映出了一种创新意涵。在讨论物体下落运动时, 他推得: 物体通过流体介质的速度与物体和介质的密度差成正比。此时伽利略仍接受前人主张重物下落比轻物快的观点, 虽还无法得到正确结果, 然而他使用的论证方式与数学方法, 已与前人大相径庭。

在地球表面的重物, 伽利略认为它们都具有向下

坠落的性质,称为重性或重力(gravity,但非日后的万有引力),他并不主张物体下落速度会越来越快,因为在引用阿基米得静力学中,他已说明落体的速度主要与落体的密度有关,所以特定的物体(即密度)对应于特定的速度或重力,彼此都要对应相等,也就是没有加速运动。他认为平常我们看到物体下落得越来越快,只是相对较短的暂时现象,因为落体无法立即到达最后匀速的末速度,它需要逐渐地达成。他还以空中的雨滴为例,来说明落体最后总会以匀速下落,更觉得在高塔落下的物体会作加速而非匀速,那是因为下落的时间还不够长,不够久^[3]。

对落体运动的分析,伽利略使用并扩充了前人的冲力概念。当物体静止在空中时,是因我们的手提供了向上的支撑力或冲力储存在物体内部,抵消了物体的重力,释放物体后,储存在物体内部的冲力逐渐丧失,物体因而会从静止开始逐渐加速,直到将冲力用尽,此时仅有重力的作用,从此开始,物体将以匀速运动下去(如图4所示)。



为了要减缓自由下落物体的速度,伽利略设计了球体在斜面下滑的实验,来验证物体最终会以匀速下滑的观点。但他却发现物体是以正比于斜面垂直高度与斜面长度比值的加速度稳定地加速下滑。此发现严重地打击了他最初建立在“新阿基米得”运动学上的理想,这对年轻的伽利略是一个非常重要的教训。

但或许没有比此种尝试将阿基米得静力学的数学方法应用在运动学的探讨上,更具有启发意义了,甚至它最后的失败更代表了模糊与困惑的冲力概念是无法转化成清晰及明确的数学概念,在中世纪“冲力系统”与“数学方法”的选择上,伽利略最终放弃了冲力概念,一种全新的运动观念必须被形成与发展,这种新颖的想法与开创该归功于伽利略。

四. 范式转移——整个运动空间是均匀的数学空间

的确我们已经无法体会到伽利略当时所处的科学环境,那时物理学的目的是追求以作用、形式、性质来描述世界的变化。冲力是其中一个重要作用,当伽利略放弃冲力概念时,也意味着要彻底地改变运动的观念,不再追求运动是如何靠作用的发生,造成不同情况的运动。例如,文艺复兴的学者认为抛射运动因冲力的作用,可分成三个阶段,首先是

受到直线的冲力作用,会使物体作斜向上的受迫运动,中间是接近圆形的混合轨迹,代表冲力逐渐用尽,由垂直的重力慢慢接管,最后受到重力作用沿直线垂直加速下落。

伽利略开始完全放弃以“作用”观点来描述物体的运动,他认为物体在空间中的运动不因受任何形式、性质的作用,包括各种冲力和重力。也就是物体的运动不是在具有特殊性质的形式空间里,而是在均匀的几何空间里,并完全只由几何图形与数字来描述。亚里士多德认为数学太过抽象不够具体,人不能用不真实之物来描述物体真实的运动。伽利略却指出:不可用人为的性质与形式来描述自然的运动,我们要用大自然的语言来描述运动,而大自然所使用的语言是几何图形与数字。落体运动同样受制于数字定律,它是真实世界的科学——不是由纯粹形式所赋予的科学^[4]。

五. 在数学化空间中的运动遵循简单性

1636年伽利略在其著作《两门新科学的对话》里写道:“当我观察到一块静止的石头,从高处下落并不断获得与增加新的速度时,为什么我不应该相信这种增加是以一种简单的,且对每个人都显而易见的方式发生的?.....因此,在任何相等的时间间隔内,以相等的速度递增时,我们可以想象到一个运动在均匀且连续地加速”^[5]。“在自然加速运动的探索中,我仿佛被亲手带领去追随大自然本身的习性和方式,并只应用那些最平常、最简单、和最容易理解的方法在自然界中所有其他的程序里”^[5]。

伽利略坚信自然现象背后一定蕴含着简单的数学规律,因此,伽利略对落体现象提出了一个重要的假设:物体的下落速度与其下落的时间成正比,即 $v \propto t$,而不是与物体重量或下落距离成正比。也就是说,物体下落的过程是一种匀加速的过程。

为何伽利略会提出这样一种假设呢,原因只有一个,那就是这个假设“简单”。而为什么重物 and 轻物都遵循这样的规律,以及速度与时间成正比的动力学原因,伽利略认为这还不是当时的科学能够解释回答的问题。于是伽利略写下了匀加速度运动的第一规则:

定理 1: 从静止开始做匀加速度运动的物体,通过任意空间所需的时间,等于此物体以最大和最小速率平均值的匀速度运动,通过该空间所需的时间^[5]。

或者说,做匀加速度运动的物体通过的距离,等于以平均速度 \bar{v} 在相同的时间匀速通过的距离。若一物体由静止释放,它通过某段距(下接第30页)

铁制,一个是塑料做成,如图3。学生恍然大悟。第一组数据如图4,第二组数据如图5。

问题3:质量不同的两个动滑轮,你选择哪一个提升重物?

这样一个实际问题的抛出,学生就知道我们不得不引出一个新的物理量“机械效率”来表示机械性能的优劣。以具体任务为依托,了解概念建构的过程,让学生明白引入机械效率概念的意义,可以使使学生深刻理解,树立正确的物理观念。这样的教学处理,表面看是花了大量时间,但是能激起学生的求知欲,对新概念的理解、接纳、建立,有着事半功倍的效果。

问题4:以动滑轮为例,分析数据如何提高机械效率?

学生:

(1)有用功一定时减小额外功,如轻质滑轮,轻质绳子,减小机械间的摩擦(润滑剂);

(2)额外功一定时增大有用功,如拉起更重的

(上接第27页)离的平均速度与花费的时间成正比,即 $\bar{v} \propto t$,由此可推得,物体通过的距离与其所花时间的平方成正比: $S \propto t^2$ 。伽利略接着写下了可用实验检测的重要规律:

定理2:从静止开始以匀加速度运动的一物体,所通过空间的距离比等于所用时间的平方比^[5]。

于是伽利略把较难测出物体的瞬时速度转移到较易测出的下落距离,且此距离会与时间平方成正比。他的假设与实验现象完全吻合,伽利略接着写道:“只有在数学中才能找到必要的证明,这种力量让人充满惊奇与喜悦。了解为什么会如此的理由,远胜过重复的经验”^[5]。

六. 落体运动的原理可诠释与预测更多的现象

伽利略主张落体运动是匀加速度的发现不仅适用于垂直下落的物体,还可利用水平方向的匀速与垂直方向的匀加速彼此不互相干扰的运动独立性,来解释与预测水平及斜向抛射的运动现象。

正如爱因斯坦所言:科学最重要的目标是从最少数的假设或公理,借助合理的演绎,去涵盖最多可能的经验事实。伽利略这种发现现象背后的简单和谐的数学结构,放弃使用人为设定的特殊形式或性质,来描述变化的自然,征服了科学界,树立了全新的思想典范,奠定了之后物理学发展的基础。

七. 结语

物体等。

三、结语

机械效率与我们的生活息息相关,效率的概念已经广泛应用于生活、社会和科技,在实际生产生活中我们如何选择机械又如何改进机械的性能,有必要让学生去探究、去理解。通过本节课的学习,学生知道了在使用不同机械提升不同物体时,机械效率不同,知道了实际的机械效率不可能是100%,有了合理改进机械、提高效率的意识。

参考文献:

- [1]中华人民共和国教育部.义务教育物理课程标准(2011年版)[S].北京:北京师范大学出版社,2012:1-4.
- [2]姜建民.初中物理概念教学的优化策略思考[J].基础教育,2019(31):66-67.
- [3]刘炳昇.义务教育教科书(九年级上册)[M].南京:江苏凤凰科学技术出版社,2004:22-25.

伽利略晚年出版的《对话》与《讨论》两本着作是其思想的结晶,告诉了我们科学发现的历史,或更准确地说,是对自然所诉说语言的再发现。它们诠释了面对自然提问的态度和方法:在诉诸于观察前,借着形成公理、假设与其内涵演绎,建立起的科学实验理论。

为了要开启一门新科学,必须要重新审视千年以来,物体需靠彼此接触才能传递的作用概念,和后来冲力理论的形式观点。笛卡尔在运动学上未能放弃这些形式概念,伽利略则彻底抛开了前人的束缚,并且以物理学背后为和谐的数学结构来作为所有运动学论证的假设和基础。他对物理学此种清晰的思维与创新的观念,改变了物理学的面貌,从此开花结果,一日千里。

参考文献:

- [1]戴克斯特霍伊斯.张卜天译.世界图景的机械化[M].湖南:湖南科技出版社,2010.
- [2]亚历山大·柯瓦雷.李艳萍译.伽利略研究[M].北京:北京大学出版社,2008.
- [3]Galileo Galilei. On Motion and on Mechanics; comprising De motu(ca.1590)[M]. Madison:Univ. of Wisconsin Press,1960.
- [4]Alexandre Koyre. Galileo and Plato[J]. Journal of the History of Ideas,1943,4(4):400-428.
- [5]伽利略.武际可译.关于两门新科学的对话[M].北京:北京大学出版社,2020.