

注重物理方法教学 提升模型建构能力*

——以“微元法”应用为例

陈志胜

(福建省泉州第五中学 福建 泉州 362000)

(收稿日期:2022-08-26)

摘要:基于高考物理科考试内容改革实施路径中对物理学科考试5种关键能力要求,分析“微元法”在模型建构能力中的常用方法和在高中试题的考查方式,思考在教学过程中如何通过物理方法教学,促进学生模型建构能力等关键能力提升,发展科学思维素养.

关键词:物理方法;模型建构;微元法;科学思维

模型建构能力是物理学科的基本能力,是科学思维素养的基础组成^[1],也是高考物理学科必备的关键能力之一^[2].中学物理中常见的是理想模型和数学模型,如质点、点电荷、理想气体等对象模型,又如匀速直线运动、自由落体运动、太阳系行星运动等过程模型.模型思维是一种重要的科学思维,建模方法是科学研究的常用方法,模型建构所需的物理方法中,“微元法”是最基础的方法之一,通过对“微元法”在模型建构过程应用的深度学习,有利于学生更系统、全面地学习建模方法,培养物理认知能力^[3].本文以高中阶段考查“微元法”应用的试题为例,分析、思考如何在中学物理教学过程中,加强物理方法教学和训练,提升模型建构能力,发展科学思维素养.

1 “微元法”在物理模型建构中的应用

物理学研究的实际问题,往往是一个宏观的物体或复杂的运动过程,如变速运动的速度与位移、变力功、非质点的引力场、静电场等等,因此物理学研究过程引入了微积分对物理问题进行描述,通过将一个物体、一个复杂的短过程按时间或空间进行无限的细分,在一定条件下(如在足够短的时间或空间内),变速可转化为匀速,变力可以转化为恒力,曲线可以转化为直线,曲面可以转化为平面,这种将研究

对象“细分”取“极限”,进而分析“累积”作用效果,将复杂问题简化的方法就是微元法.很多物理概念的定义就是“微元法”的应用,如描述运动的“平均速度”“瞬时速度”和“加速度”,又如电学中的“电流”和磁感应强度定义中的“电流元”等等.中学阶段由于未引入高等数学的表达方式,对学生的理解能力、抽象概括能力要求高,成为学习和应用的难点,因此应该引导学生在学习过程中,加深对“微元法”中“细分”“累积”方法的理解,并对应用情境进行分类归纳、比较分析,提高解决问题的能力.

2 研究对象微元 —— 质量及电荷连续分布问题

【例1】(2021年福建普通高中学业水平选择性考试第4题)福建属于台风频发地区,各类户外设施建设都要考虑台风影响.已知10级台风的风速范围为 $24.5\text{ m/s} \sim 28.4\text{ m/s}$,16级台风的风速范围为 $51.0\text{ m/s} \sim 56.0\text{ m/s}$.若台风迎面垂直吹向一固定的交通标志牌,则16级台风对该交通标志牌的作用力大小约为10级台风的()

A. 2倍 B. 4倍 C. 8倍 D. 16倍

任务描述:试题以估算台风天气下交通标志牌所受台风作用力为情境,考查考生的模型建构能力,应用动量定理解决问题的推理论证能力.难点在于如何在连续流动的空气选取研究对象.解决的途

* 泉州市教育科学“十四五”规划(第一批)立项课题“基于核心素养的物理校本教辅开发和实施研究”的研究成果,课题编号:QG1451-249.

作者简介:陈志胜(1972-),男,正高级教师,研究方向为高中物理教学和高考研究.

径就是应用“微元法”，选取很短时间 Δt 时间内垂直撞击标志牌的空气为研究对象，如图 1 所示，设交通标志牌的面积为 S ，空气密度为 ρ ，风速为 v ，则 Δt 时间内垂直撞击标志牌的空气质量 $\Delta m = \rho S v \Delta t$ ，空气与标志牌作用后速度视为零，则由动量定理得

$$-F \Delta t = 0 - \Delta m v$$

解得

$$F = \rho S v^2$$

则可知选项 B 正确。

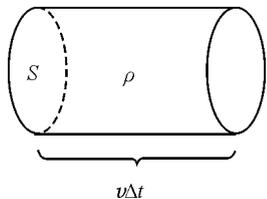


图 1 空气微元示意图

【例 2】如图 2 所示，一个半径为 R 的细圆环上均匀分布着电荷量为 Q 的正电荷， x 轴垂直于环面且过圆心 O ，求 x 轴上坐标为 x 的位置 P 的电场强度。

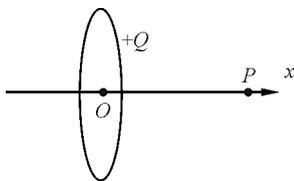


图 2 例 2 题图

任务描述：高中物理教材中只要求点电荷场强公式，对均匀带电细环则无法直接计算，因此必需建立一个合适的物理模型，利用点电荷场强公式进行求解。如图 3 所示，若将细圆环分成无数小段，则每一小段上的电荷 Δq 均为点电荷，由圆环的对称性可知，这些点电荷在 P 点场强沿 x 轴分量大小相等，方向相同，而在与 x 轴垂直平面上的分量合场强恰为零；因此 P 点场强可表示为

$$E = \sum k \frac{\Delta q}{R^2 + x^2} \cos \alpha$$

其中

$$\sum \Delta q = Q \quad \cos \alpha = \frac{x}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

化简即可得出结论。

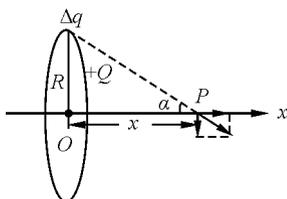


图 3 电荷微元场强示意图

教学思考：质量、电荷连续分布的问题情境，高中阶段常见的有均匀绳、杆、环和水流、空气流和电流等流体模型，主要讨论力与运动或能量转化问题，关键点就是研究对象的模型构建，方法是相似的，都可以选取很小时间或空间内的物体作为研究对象，采用先“细分”后“累积”的方法展开分析与讨论。这是研究对象模型建构的基础方法，也是高考中高频考点，如 2016 年高考理科综合卷全国 I 卷第 35(2) 题的喷泉情境，求解水柱对玩具底板的作用力问题，就是同样的分析思路。

3 时间微元——求解对时间的变化量和积累量

“微元法”在高中物理学习中的起点是速度、加速度定义和由速度-时间图像求解加速度和位移，学生均较熟悉，但如果对“时间微元”选取的情境、必要性和应用方法没有清晰理解，则迁移应用能力较弱，在新情境中无法灵活应用。

【例 3】(2020 年高考理综全国 I 卷第 17 题) 图 4(a) 所示的电路中， K 与 L 间接一智能电源，用以控制电容器 C 两端的电压 U_C 。如果 U_C 随时间 t 的变化如图 4(b) 所示，则下列描述电阻 R 两端电压 U_R 随时间 t 变化的图像中，正确的是()

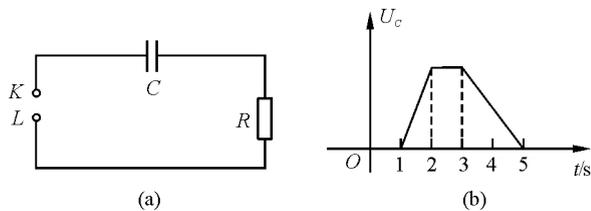
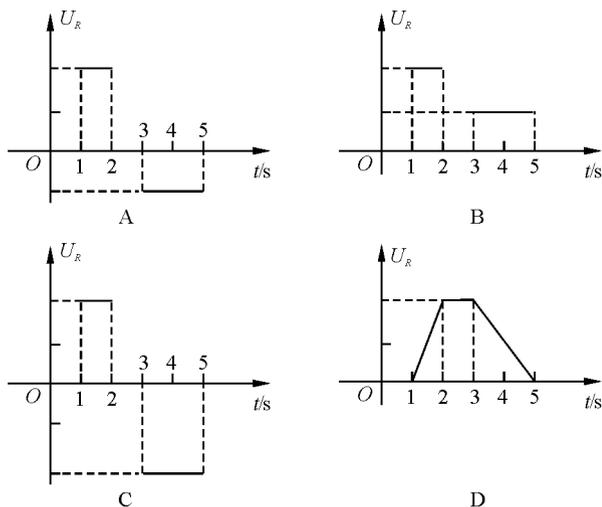


图 4 例 3 题图



D

任务描述: 试题以电容器充、放电为情境,通过电容器电压随时间变化图像,考查电容定义、电流定义和欧姆定律的理解与应用,由于电容器不遵循欧姆定律,突破点在于选取“时间微元” Δt ,根据电流定义和电容定义可知,电路中电流

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{C\Delta U_C}{\Delta t} = Ck$$

其中 $k = \frac{\Delta U_C}{\Delta t}$ 为 U_C 随时间 t 的变化图线的斜率,而电阻 R 两端电压 $U_R = IR$,根据图 4(b) 中数据计算,可知选项 A 正确。

【例 4】(2013 年高考理综全国新课标 I 卷第 25 题) 如图 5 所示,两条平行导轨所在平面与水平地面的夹角为 θ ,间距为 L . 导轨上端接有一平行板电容器,电容为 C . 导轨处于匀强磁场中,磁感应强度大小为 B ,方向垂直于导轨平面. 在导轨上放置一质量为 m 的金属棒,棒可沿导轨下滑,且在下滑过程中保持与导轨垂直并良好接触. 已知金属棒与导轨之间的动摩擦因数为 μ ,重力加速度大小为 g . 忽略所有电阻. 让金属棒从导轨上端由静止开始下滑,求:

- (1) 电容器极板上积累的电荷量与金属棒速度大小的关系;
- (2) 金属棒的速度大小随时间变化的关系.

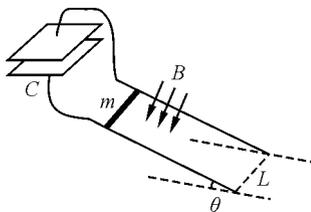


图 5 例 4 题图

任务描述: 试题设置金属棒切割磁感线产生感应电动势并给电容器充电的问题情境,求解电容器电荷量变化与金属棒运动速度大小的关系以及速度大小随时间变化的关系. 试题同时考查多个“时间微元”应用情境,综合难度高. 首先要根据理想化条件——忽略所有电阻,把每一个“时间微元”内的电容器充电过程视为瞬时完成,则电容器两端电压等于金属棒产生的感应电动势,电容器极板积累的电荷量 $Q = CBLv$;而在分析速度变化时,则应选取任意一个“时间微元” Δt ,分析金属棒受力,根据牛顿第二定律有

$$mg \sin \theta - \mu mg \cos \theta - F = ma$$

安培力 $F = iLB$,在“时间微元”内电流 $i = \frac{\Delta Q}{\Delta t}$,又加速度 $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$,计算可得

$$a = \frac{m(\sin \theta - \mu \cos \theta)}{m + B^2 L^2 C} g$$

金属棒做初速度为零的匀加速直线运动,再由 $v = at$ 解出结果.

教学思考: 以上两个例子充分体现基础性和应用性的考查要求,不仅考查基本概念、规律的理解,更注重对学生模型建构能力和应用基本方法推理论证能力的考查. 教学过程要注重创设学习科学思维方法最基础的应用情境,引导学生理解,通过“细分”选取时间微元,分析随时间变化的物理量的变化量、积累量的特点和物理意义是分析问题的重要途径,并在新的学习内容中逐步强化,进一步具备在不同情境中的迁移应用的能力,促进科学思维素养的提升. 又如由冲量定义 $I = Ft$,可知变力的 $I-t$ 图线的斜率 $k = \frac{\Delta I}{\Delta t}$ 的物理意义就是力 F , $F-t$ 图像中曲线与一段时间 t 所围的面积则表示力的总冲量等等.

4 空间微元——求解对空间变化量和积累量

“空间微元”的选取则是分析物理量随空间变化时的基本方法,如分析变力做功、功和能量变化关系等情境,试题在对基本方法、模型建构能力考查的同时,往往也增加了综合性和应用性.

【例 5】小物块在竖直向上的拉力 F 作用下从静止开始向上运动,其速度 v 随位移 s 变化的图像($v-s$ 图像)如图 6 所示,运动过程空气阻力不计,则在小物块运动过程中,下列判断正确的是()

- 小物块做匀加速直线运动
- 拉力 F 逐渐变大
- 任意相等位移内拉力的冲量相同
- 速度增加量相同时,小物块重力势能的增加量相同

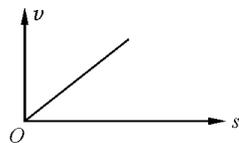


图 6 例 5 题图

任务描述: 试题以物体在外力作用下沿竖直方向向上运动为情境,考查考生通过 $v-s$ 图像获取信息

和应用基本力学规律分析问题的能力. 难点在于确定小物块的运动变化特点, 可选取任意足够小的“空间微元” Δs , 由图 6 图像中速度与位移成正比得, 斜率 $k = \frac{\Delta v}{\Delta s}$, 又在“空间微元”内 $\Delta s = v\Delta t$, 则加速度

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = kv$$

即小物块的加速度与速度成正比, 然后根据小物块受力, 结合 $v-s$ 图(图 6), 运用牛顿第二定律、动量定理、重力做功和重力势能变化关系可判定选项 B、D 正确.

【例 6】(2019 年高考理综全国 I 卷第 21 题) 在星球 M 上将一轻弹簧竖直固定在水平桌面上, 把物体 P 轻放在弹簧上端, P 由静止向下运动, 物体的加速度 a 与弹簧的压缩量 x 间的关系如图 7 中实线所示. 在另一星球 N 上用完全相同的弹簧, 改用物体 Q 完成同样的过程, 其 $a-x$ 关系如图中虚线所示, 假设两星球均为质量均匀分布的球体. 已知星球 M 的半径是星球 N 的 3 倍, 则()

- A. M 与 N 的密度相等
B. Q 的质量是 P 的 3 倍
C. Q 下落过程中的最大动能是 P 的 4 倍
D. Q 下落过程中弹簧的最大压缩量是 P 的 4 倍

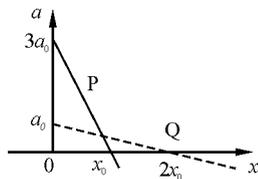


图 7 例 6 题图

任务描述: 试题以在不同天体表面竖直弹簧振子的简谐运动为情境, 重点考查考生的模型建构能力、通过图像获取信息的能力、知识迁移应用能力和推理论证能力. 根据牛顿第二定律可得物体压缩弹簧过程的加速度 $a = g - \frac{\kappa}{m}x$ (κ 为弹簧劲度系数), 因此 $a-x$ 图像的截距即星球表面的重力加速度 g , 结合万有引力定律可推知选项 A 正确; $a-x$ 图线的斜率

$$k' = -\frac{\kappa}{m} \propto \frac{1}{m}$$

根据图 7 中图像数据可知选项 B 错误; 当物体的加速度为零时动能最大, 将 $a-x$ 图转化为 $ma-x$ 图, 选取“空间微元”, 则每个微小面积 $ma \Delta x$ 就表示

相应微过程合外力做的功, 通过累积可得图像中 $ma-x$ 直线与坐标系所围面积就表示合外力做的功, 等于物块的动能变化量, 代入图中数据可推出选项 C 正确、选项 D 错误.

教学思考: 从以上考查“空间微元”应用的例子中可以看出, 在应用性提高的问题情境中, 对学生创新能力的要求也较高. “空间微元”也常用于电场性质的问题分析情境, 如在沿一维坐标 x 变化的电场中, 电势 φ 随坐标 x 变化的 $\varphi-x$ 图像上, 某点的斜率 $\frac{\Delta \varphi}{\Delta x}$ 表示的就是该位置的电场强度, 而场强 E 随坐标 x 变化的 $E-x$ 图像中, “空间微元”对应的面积 $E\Delta x$ 表示微电势差 $\Delta \varphi$, 累积量则是两个位置间的电势差 U .

可见, “微元法”的应用关键是通过“空间微元”或“时间微元”的选取, 分析物理量随时间或空间的变化量、变化快慢和积累量的物理意义, 就可以更清晰、准确地描述物理量性质或物理过程, 进而解决问题. 平时教学通过创设基于建模的实际问题情境, 有助于建模方法的学习, 促进学生建模思维的发展, 提升模型建构能力^[4].

综上所述, 物理学在发展的过程中, 形成了大量符合物理认知规律的有效方法, 如观察法、实验法、分类法、还原论法、主次法、类比法、转换法、控制变量法、理想模型法、数理逻辑方法等, 物理方法是应用物理知识解决实际问题的途径, 也是物理学科能力培养的重要基础, 物理学科学习不仅是知识的学习, 更应该是物理方法的学习. 在教学的过程中应该注重回归科学探索的基本过程, 根据教学内容和认知过程的不同阶段, 有意识地进行不同物理方法的教学和训练, 使学生在解决问题中学会应用、质疑和创新, 从而有效培养学生的物理认知能力, 发展科学思维, 提升物理学科核心素养^[3].

参考文献

- [1] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017版)[S]. 北京: 人民教育出版社, 2018: 1-6.
[2] 程力, 李勇. 基于高考评价体系的物理科考试内容改革实施路径[J]. 中国考试, 2019(12): 38-43.
[3] 穆良柱. 什么是物理及物理文化? [J]. 物理与工程, 2019, 29(1): 15-24.
[4] 廖伯琴. 普通高中物理课程标准(2017版)解读[M]. 北京: 高等教育出版社, 2018: 46-59.