

从 DIS 实验的改进与拓展 提高生物理学科核心素养

——以牛顿第二定律为例

郭强友 倪敏 杨阳 杜晓贺

(上海师范大学数理学院 上海 200234)

(收稿日期:2019-02-28)

摘要:当前牛顿第二定律的实验教学中对实验过程中的误差分析以及实验的研究改进提及的较少,为适应新修订的课程标准,结合物理学科核心素养,针对现阶段“牛顿第二定律”DIS 实验中存在的实验误差,从实验的改进与拓展两方面入手浅析培养学生物理学科核心素养的方法.并通过实验探究开阔学生的实验研究思路,提升实验技能与分析的能力.

关键词:物理学科 核心素养 实验教学 牛顿第二定律

核心素养是学科育人价值的集中体现,是学生通过学科学习而逐步形成的正确价值观念、必备品格和关键能力.物理学科核心素养主要包括“物理观念”“科学思维”“科学探究”“科学态度与责任”4个方面^[1].

物理学是基于观察与实验的一门学科,归根到底都必须通过实验手段进行最后的验证.在高中阶段物理实验的教和学都是极其重要的一部分.物理事实的表述、物理观念中的物理规律探索和物理概念的建立以及物理问题的解决都离不开实验.布鲁纳通过心理学实验得出,人们可以记住大约 10% 听到的东西,大约 30% 读到的东西,但是却能记住大约 80% 看到的東西.由此可见结合新课程标准的理念,通过物理实验教学来提高学生的物理学科核心素养是具有重要意义的.那么如何通过物理实验教学提高学生的核心素养,是我们每一位物理教育工作者都应该思考的问题.本文将以上教版中“牛顿第二定律”DIS 实验的改进和拓展为例,探索通过实验教学提高学生核心素养的有效方法.

1 根据新课程标准制定实验教学目标

“通过实验,探究物体运动的加速度与物体受力、物体质量的关系.理解牛顿运动定律,能用牛顿

运动定律解释生产生活中的有关现象、解决有关问题.通过实验认识超重和失重现象.”在新的课程标准中用了短短两句话总结了有关牛顿定律的相关学习任务.教师还需要结合教材仔细研读课标,进一步理解物理核心素养的相关内涵,并结合物理核心素养的 4 个方面制定相关的教学目标.以下部分笔者将结合物理核心素养的 4 个方面,对牛顿第二定律的 DIS 实验做浅显的分析.

1.1 物理观念

“牛顿第二定律”的内容是:物体加速度的大小 a 与物体所受的合外力 F 成正比,与物体的质量 M 成反比^[2].是 3 个物理量关系的定量分析,公式是

$$a = \frac{F}{M} \quad (1)$$

1.2 科学思维

在理想条件下, $a-F$ 图像与 $a-\frac{1}{M}$ 图像都是一条过原点的直线,但是由实验得到的图像与坐标轴有截距,这是因为实验过程中存在实验误差.学生通过分析实验数据,寻找实验误差来源的过程中,需要学生能够提出自己的观点和想法,并且能够针对自己得出的结论提出改进方案,设计相关的实验,并且能够进行操作论证.使学生在自己的科学探究实验

作者简介:郭强友(1994-),男,在读硕士研究生,研究方向为学科教学物理.

通讯作者:倪敏(1960-),女,副教授,硕士生导师,主要从事物理教育和物理实验研究.

过程中提高科学推理、质疑创新、科学论证的能力。

1.3 科学探究

科学探究的过程即在原实验的基础之上发现新的问题,并设计实验,探究解决问题的方法,在实验过程中,思考能否对本实验做相应的拓展。在验证牛顿第二定律的实验中,摩擦力是一个影响较大的因素。在实验过程中让学生思考摩擦力是如何影响实验的正确结论的,并思考讨论减小摩擦力对实验的影响的方法有哪些?同时可以引导学生将该实验进行拓展。比如能否利用本实验器材测量轨道的摩擦系数等。

1.4 科学态度与责任

在实验过程中让学生认识到牛顿第二定律的本质与其在科学、技术中的相关应用。通过改进实验减小误差,培养学生严谨认真、实事求是和探索创新的科学态度。但由于实验的误差不能完全消除,所得到的结论仍然带有猜想和推断的性质。只有根据这些结论推导出的新结果都与事实一致,这样的“结论”才能成为定律。让学生知道科学家前辈在根据有限的实验事实得出结论时,既需要谨慎的科学态度,也需要有相信自己的勇气。

2 基于物理学科核心素养的实验改进

对实验进行改进与拓展首先需要从理论上分析实验,先从理论上找到可能产生误差的原因,以及当前的牛顿第二定律DIS实验教学的弊端。

2.1 现行“牛顿第二定律实验”教学的弊端

在本实验中产生实验误差的原因有很多,本次改进分别从摩擦力、钩码质量 m 与小车的质量 M 的比值大小选取范围两方面寻求改进方法。要达到顺利完成实验测量的目的,实验过程中,实验操作必须规范。本实验主要的注意事项有:

(1) 实验中要保证力学轨道足够光滑且水平放置。

(2) 要调整定滑轮的高度,使拉小车的细线与力学轨道平行。

(3) 用运动传感器测量时,不要超出其测量范围,进行图线拟合时,由于靠近定滑轮端有强磁铁作用,不要选取靠近此端的实验数据进行拟合分析。

(4) 悬挂钩码的重力不要太大^[3]。

实验得到的 $a-F$ 图像与 $a-\frac{1}{M}$ 图像与坐标轴存在截距,是因为实验过程中存在的实验误差造成的。

但在应试教育的背景下教师不会花时间详细给学生分析实验误差的来源,更没有用实验验证误差的影响因素。大多数的教师只是直接告诉学生误差是由轨道摩擦引起的,例如以下题目所示:

【例题】保持小车质量不变,改变砂和砂桶重量,该同学根据实验数据作出了加速度 a 与合力 F 图线如图1所示,该图线不通过原点,明显超出偶然误差范围,其主要原因是_____。

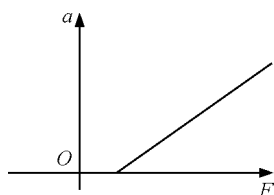


图1 $a-F$ 图像

调查发现很多学生能够正确填写出答案:其主要原因是小车与轨道之间存在摩擦力。但是在询问学生为什么小车与轨道之间存在的摩擦力会使图像不通过原点时,学生的回答大多数都是说老师上课就是这样讲的。这种靠死记硬背让学生掌握知识的方法已经成为现阶段我国高中物理教学的惯用方法。这样的教育模式使得学生只会做题,但是对结论的来源一无所知,这是违背新课程改革的理念的。

2.2 牛顿第二定律误差的理论分析

对该实验中出现的误差,教师不应该置之不理,应该基于这个事实证据引导学生得出不同的观点和结论。最后从两个方面分析:

(1) 近似地认为导轨与小车之间的摩擦力被完全平衡;

(2) 近似地认为小车受到的拉力就是回形针的重力。

下面对这两个近似条件做详细分析。

对近似条件(1)进行分析,要减小导轨与小车之间的摩擦力,我们可以采用气垫导轨。但是,气垫导轨在中学物理实验教学中并没有普及,而且使用气垫导轨会降低实验的难度,不利于提高学生的实

验操作技能.因此,本实验仍选择使用力学导轨.采用增大斜轨倾角的方法来平衡摩擦力,这样就可以利用小车的重力沿斜面的分力来平衡摩擦力.

受力分析如图2所示,当小车做匀速直线运动时, $G_x=f$,平衡了摩擦力.实验结论:当斜面倾角为 0.191° 时,小车通过两次光电门的时间最接近,并且由位移传感器测量出来的加速度最接近于零.

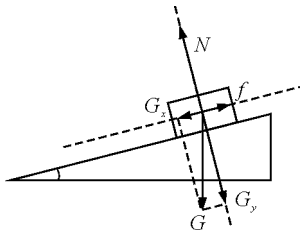


图2 受力分析图

对近似条件(2)进行分析,在实际实验操作中,拉力不仅作用在小车上,还作用在滑轮与小车的车轮上,而滑轮与车轮存在转动惯量,实验中不应该忽略.

实验装置示意图如图3所示.

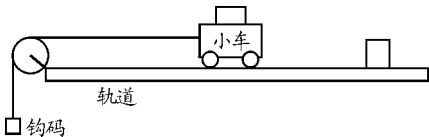


图3 牛顿第二定律实验装置图

将小车、小车的车轮、滑轮与钩码(实验过程中用回形针代替)等物体构成的系统看成一个整体^[4],由牛顿第二定律可得到

$$mg-f=(M+m)a+\frac{I\beta}{r}+4\frac{I'\beta'}{r'}\tag{2}$$

其中, M 与 m 分别是小车和回形针的质量, f 是小车受到的摩擦力, I 与 I' 分别是滑轮与车轮的转动惯量, r 与 r' 分别是滑轮与车轮的半径, β 与 β' 是滑轮与车轮的角加速度.

合外力的理论修正值是

$$F=Ma'=\frac{M(mg-f)}{M+m+\frac{1}{2}m_{\text{滑轮}}+2m_{\text{车轮}}}\tag{3}$$

当实验中平衡摩擦力、使用轻质滑轮和小车时,式(3)可以变为

$$F=\frac{mg}{1+\frac{m}{M}}\tag{4}$$

从式(4)可以看出,当回形针的质量远小于小车质量时,小车所受的合外力可以用回形针的重力替代.因此,选择合适质量的回形针来产生合外力,可以减小误差.

2.3 基于理论分析 改进实验

实验中在发现平衡摩擦力,并保证回形针质量远远小于小车质量后,实验误差还是很大.根据式(3)发现,小车与回形针的质量比例 $k=\frac{M}{m}$ 对于实验十分重要.选取320.9 g小车与不同质量的回形针进行实验,经数据处理得到相应数据如表1所示(表中挡光片宽度 $l_{\text{挡}}=0.02\text{ m}$).

表1 加速度理论值 a_0 与实际值 a 的比较

计算表格	t_1/s	t_2/s	t_{12}/s	M/kg	m/kg	k	$v_1=\frac{l_{\text{挡}}}{t_1}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$v_2=\frac{l_{\text{挡}}}{t_2}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$a=\frac{v_2-v_1}{t_{12}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$a_0/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$n=\frac{a_0-a}{a_0}$
1	0.020 514	0.014 240	0.261 96	0.320 9	0.064 2	4.998 4	0.974 9	1.404 5	1.639 9	1.961	0.163 7
2	0.020 752	0.014 950	0.269 70	0.320 9	0.053 4	6.009 4	0.963 8	1.337 8	1.386 7	1.631	0.149 8
3	0.027 214	0.017 354	0.332 45	0.320 9	0.045 6	7.037 3	0.734 9	1.152 5	1.256 1	1.391	0.097 0
4	0.028 058	0.018 264	0.346 61	0.320 9	0.040 0	8.022 5	0.712 8	1.095 1	1.103 0	1.222	0.097 4
5	0.024 178	0.017 520	0.319 42	0.320 9	0.035 4	9.065 0	0.827 2	1.141 6	0.984 3	1.081	0.089 5
6	0.025 184	0.018 322	0.331 90	0.320 9	0.032 1	9.996 9	0.794 2	1.091 6	0.896 1	0.980	0.085 6
7	0.031 014	0.020 650	0.386 90	0.320 9	0.029 0	11.065 5	0.644 9	0.968 5	0.836 4	0.886	0.056 0
8	0.029 536	0.020 658	0.380 42	0.320 9	0.026 0	12.342 3	0.677 1	0.968 1	0.764 9	0.794	0.036 6
9	0.029 930	0.021 082	0.386 82	0.320 9	0.024 7	12.991 9	0.668 2	0.948 7	0.725 1	0.754	0.038 3
10	0.031 106	0.021 844	0.401 82	0.320 9	0.023 0	13.952 2	0.643 0	0.915 6	0.678 4	0.702	0.033 6
11	0.034 132	0.023 202	0.431 98	0.320 9	0.021 4	14.995 3	0.586 0	0.862 0	0.638 9	0.654	0.023 1
12	0.035 832	0.024 110	0.449 15	0.320 9	0.020 2	15.886 1	0.558 2	0.829 5	0.604 0	0.617	0.021 1
13	0.036 148	0.024 736	0.454 95	0.320 9	0.018 7	17.160 4	0.553 3	0.808 5	0.560 9	0.571	0.017 7

续表 1

计算 表格	t_1/s	t_2/s	t_{12}/s	M/kg	m/kg	k	$v_1 = \frac{l_{挡}}{t_1}/$ $(m \cdot s^{-1})$	$v_2 = \frac{l_{挡}}{t_2}/$ $(m \cdot s^{-1})$	$a = \frac{v_2 - v_1}{t_{12}}/$ $(m \cdot s^{-2})$	$a_0/$ $(m \cdot s^{-2})$	$n = \frac{a_0 - a}{a_0}$
14	0.036 276	0.025 012	0.460 28	0.320 9	0.017 8	18.028 1	0.551 3	0.799 6	0.539 5	0.544	0.008 3
15	0.037 920	0.025 836	0.477 29	0.320 9	0.016 9	18.988 2	0.527 4	0.773 5	0.515 6	0.516	0.000 8
16	0.039 738	0.026 546	0.490 21	0.320 9	0.015 9	20.182 4	0.503 3	0.753 4	0.510 2	0.486	0.049 8

从表 1 的数据中我们可以得到,当 $\frac{M}{m}$ 达到 11 ~ 19 倍时,加速度的理论值与实际值相接近. 所以不是比值越大,实验效果越好,当两者的质量之比越大时,小车的速度越慢,轨道表面效应的影响会增加,使得误差增大,所以,质量比例 k 有一最佳比值. 根据实际实验数据和理论分析的不同得出牛顿第二定律减少误差的关键,在分析和实验过程充分培养学生的物理学科核心素养. 在实验过程让学生充分感受到实验对物理学习的重要性.

综合上面的分析,让学生根据事实证据与科学推理提出验证牛顿第二定律实验有效控制误差的方法并进行实验准备:

- (1)摩擦力的平衡. 在轨道的 15.5 cm 处垫上高为 0.52 cm 的 A4 纸.
- (2)控制回形针的质量 m 与小车的的质量 M 之间的关系,使得 $\frac{M}{m}$ 在 11 ~ 19 倍之间,为了使实验更加精确,选取 19 倍左右.
- (3)使用光电门传感器测量小车的加速度,挡光片宽度 0.02 m,然后采用控制变量法验证牛顿第二定律实验.

根据改进后再次进行实验,下面是实验的数据处理与结论.

当拉力 $F_0=0.097\ 4\ N$ 不变时,可得表 2 数据与图 4.

表 2 合外力不变,加速度数据处理表

$a/(m \cdot s^{-2})$	$\frac{1}{M}/kg^{-1}$
0.493 1	4.643 5
0.481 4	4.504 5
0.465 4	4.310 3
0.445 1	4.128 8
0.427 4	3.983 5
0.417 1	3.813 9

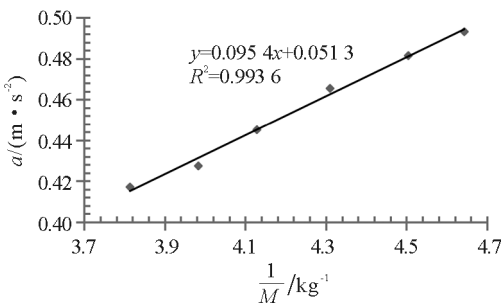


图 4 改进实验后的 $a-\frac{1}{M}$ 图像

当小车质量 $M=342.8\ g$ 不变时,可得表 3 数据与图 5.

表 3 小车质量不变,加速度数据处理表

F/N	$a/(m \cdot s^{-2})$
0.165 6	0.501 3
0.175 4	0.526 7
0.184 2	0.554 4
0.194 1	0.580 1
0.202 9	0.603 4

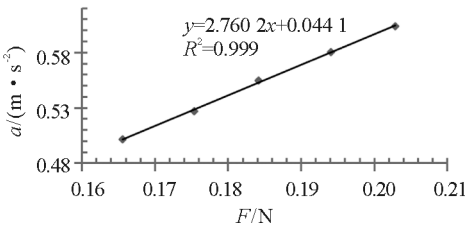


图 5 改进实验后的 $a-F$ 图像

由图像分别得到 $F=0.094\ 6\ N$; $\frac{1}{M}=2.762\ 1\ kg^{-1}$,得到误差分别为: $\eta=2.8\%$ 与 $\eta=5.6\%$,在 10% 以内. 因此,上述方法改进实验后效果较好.

改进后的实验误差明显变小,让学生思考减小误差的方法并且师生共同经过实验得出结论,让学生对实验进行改进,多次经历科学探究的过程,提高了学生的科学探究能力.

3 发散思维 拓展实验

为培养学生的批判性思维意识,可以让学生从不同角度思考问题,培养科学探究意识,增强学生学

习和研究物理的好奇心.在验证牛顿第二定律的实验中,摩擦力是一个影响较大的因素.结合DIS实验,可以将本实验进行拓展——测量车轮与轨道之间的滚动摩擦因数.本文将介绍通过牵引法来测量小车与轨道之间的滚动摩擦因数的实验过程^[5].本次实验的拓展可以培养学生基于牛顿第二定律相关实验进行科学推理,培养创造性见解的能力与品格.

实验装置图如图6所示^[6].

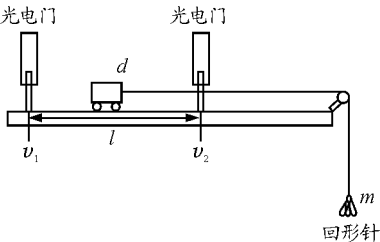


图6 测滚动摩擦因数实验装置图

根据之前的理论推导,对于整个系统,由牛顿第二定律有

$$mg - f = (M + m)a \tag{5}$$

由滚动与滑动摩擦力的计算公式

$$f = \mu Mg$$

将上述摩擦力代入式(5),并化简得到

$$\frac{m}{M}g - \frac{m}{M}a - a = \mu g \tag{6}$$

令 $x = \frac{m}{M}(g - a)$ $y = a$

化简得到 $y = x - \mu g \tag{7}$

只要得到截距 b ,就可以算出

$$\mu = \left| -\frac{b}{g} \right|$$

实验选取质量为 130.6 g 的小车与不同质量的回形针进行实验,经数据处理得到表4,并作出图7,

得到
$$\mu = \left| -\left(\frac{b}{g}\right) \right| = 0.004\,2$$

表4 牵引法测滚动摩擦因数数据

x	y
0.657 5	0.651 1
0.708 9	0.710 1
0.766 3	0.774 7
0.824 9	0.838 4
0.881 8	0.901 4
0.941 1	0.963 2
1.011 8	1.022 8

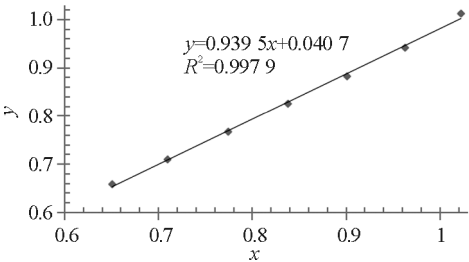


图7 牵引法的 y 与 x 关系图

由上述分析得:牵引法通过直线拟合处理数据,测量的结果较为准确,但是,此方法需要变形到一次函数的一般形式,对数学要求较高,因此,此方法不适合中学的实验教学.但是在教学中可以给学生提出,让感兴趣的学生可以自己去探究和验证,让学生深度理解牛顿第二定律相关原理的同时,熟练运用DIS相关实验器材和软件.

4 总结

DIS实验使学生从复杂繁琐的传统实验中解放出来,让学生关注物理的本质.在验证牛顿第二定律的实验中,平衡摩擦力与选择合适的拉力是本实验成功的关键.通过以上的实验改进,得到较好的实验条件,而正确选择拉力的大小应当由教师在课下进行测量与准备.完善本实验可以让学生更加容易理解与掌握牛顿第二定律.引导学生运用控制变量法研究拉力、质量、加速度3个物理量之间的关系,学会分析和处理实验数据的方法,提高科学探究能力,充分达到实验教学的目的,让学生形成物理观念,拓展物理思维,学会科学探究,树立科学态度与责任.

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).北京:人民教育出版社,2018.1~6

2 漆安慎,杜婵英.力学.北京:高等教育出版社,2012.66~67

3 陈皓晶.用DIS研究质量一定时加速度与力关系的教学探讨.物理教师,2013,34(5):43

4 王剑.分析和验证牛顿第二定律的实验系统误差.物理实验,2008(12):31~32

5 郭建廷.滚动摩擦力的产生机理及其计算.润滑与密封,1988(01):19~24

6 马丽娜,倪敏,韩唯伟,等.DIS验证恒力做功的动能定理及其改进.中学物理教学参考,2015(20):95~96