

电感器自感系数测量的实验教学设计

杜啸宇 潘志民

(南京外国语学校物理组, 江苏 南京 210008)

摘 要 电感器是能够把电能转化为磁能而存储起来的电路元件, 自感系数是它的重要参数。本实验教学中先类比常用的测量电容的方法对电感进行了测量, 进一步自主设计测量方法进行探索, 发现随着实验条件的变化, 测量结果的变化幅度都很大。学生们提出了一些猜想并进行研究, 发现实验中使用的电阻箱自身也存在电感这一容易被忽视的因素。在此基础上经过测量推出了电阻箱的自感修正表作为本实验教学的探究成果。

关键词 电感测量; 电阻箱自感; 电阻箱自感修正表

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.11.20.01

EXPERIMENTAL TEACHING DESIGN FOR MEASURING THE INDUCTANCE OF INDUCTORS

DU Xiaoyu PAN Zhimin

(Physics Group, Nanjing Foreign Language School, Nanjing, Jiangsu 210008)

Abstract Inductors are circuit components that can convert electrical energy into magnetic energy and store it. The self-inductance coefficient is an important parameter of inductors. In this experimental teaching, the inductance was first measured by analogy with the commonly used method for measuring capacitance. Further exploration was carried out by designing measurement methods independently. It was found that the measurement results changed significantly with the variation of experimental conditions. Students put forward some hypotheses and conducted research. They discovered that the resistor box used in the experiment also has inductance, which is an easily overlooked factor. Based on this, the self-inductance correction table of the resistor box was measured and proposed as the research result of this experimental teaching.

Key words inductance measurement; self-inductance of the resistor box; self-inductance correction table of the resistor box

在新课改的要求下, 高中物理实验教学的重要性更加凸显, 且更提倡以学生为主体, 教师为主导的实验探究学习。本文以物理培优课程中的一次探究实验的教学设计为例展开。同学们先在老

师的引导下, 学习测量电容的基本方法, 而后举一反三, 继续探究电感的测量方法, 过程中对系统误差进行分析, 并且一同设计减小误差的实验方案。此次探究很好地培养了高中生理论结合实践应用

收稿日期: 2025-11-20; 修回日期: 2025-12-17; 出版日期: 2026-03-30

基金项目: 教育部高等学校大学物理教学指导委员会大中物理教育衔接工作委员会教学研究课题(立项编号: WX202223)。

通信作者: 潘志民, njwxpzm@139.com。

引文格式: 杜啸宇, 潘志民. 电感器自感系数测量的实验教学设计[J]. 物理与工程, 2026, 36(2): 270-275, 279.

Cite this article: DU X Y, PAN Z M. Experimental teaching design for measuring the inductance of inductors[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(2): 270-275, 279. (in Chinese)

的能力,提升了物理实验素养,践行了新课改下的教学理念。本文从电感的基本原理出发,阐述整个实验教学探究过程并进行总结。如图 1 所示。



图 1 学生测量交流元件值

1 实验预习——电感的基本原理

1.1 电感

电感是闭合回路的一种属性,即当通过闭合回路的电流改变时,会出现感应电动势来抵抗电流的改变,这种现象也称为自感现象。自感电动势的表达式为 $\epsilon = -L \frac{di}{dt}$, 其中, ϵ 是电动势, L 是自感系数, i 是电流, t 是时间。

术语“电感”是 1886 年由奥利弗·赫维赛德命名。通常自感是以字母“ L ”标记,这可能是为了纪念物理学家海因里希·楞次的贡献^[1]。最原始的电感器是 1831 年英国 M. 法拉第用以发现电磁感应现象的铁芯线圈^[2]。19 世纪中期,电感器在电报、电话等装置中得到实际应用。1887 年德国的 H. R. 赫兹、1890 年美国的 N. 特斯拉在实验中所用的电感器都是非常著名的,分别称为赫兹线圈和特斯拉线圈。如今人们利用电感的特性,制造了扼流圈、变压器、继电器等。另外,电感器在电路中还经常和电容器一起工作,构成 LC 滤波器、LC 振荡器等。

1.2 电感量

电感量也称自感系数,是表示电感器产生自感能力的一个物理量。电感器电感量的大小,主要取决于线圈的大小、几何形状、匝(圈)数等。在国际单位制中,电感量的基本单位是亨利(简称

亨),用字母“ H ”表示。常用的单位还有毫亨(mH)和微亨(μH)。通常,线圈圈数越多、绕制的线圈越密集,电感量就越大。若存在磁介质,电感还与磁介质的性质有关(若磁介质是铁磁质,则电感与线圈中的电流有关)^[3]。

2 实验设计——电感自感系数的测量

电感在许多电路中的精度要求都较高,它的测量方法却很少被提及。而电容的测量则有比较完善的方法,笔者团队决定先采用类比的思路拟订一个测量电感的方案,毕竟电容和电感有很强的可类比性。借助李萨如图是一种方便的测量电容的方法^[4],运用示波器,电阻箱等仪器,该方法被广泛运用于大学基础物理实验,如电学黑盒子等。

2.1 基础理论部分——李萨如图

同一平面内两个相互垂直的简谐振动叠加,如果两个振动的频率成简单的整数比,这样就能合成一个稳定、封闭的图形,这就是李萨如图形。特别地,当两者频率一样时,就会形成椭圆^[5](如图 2),这是李萨如图的一种特殊情况。

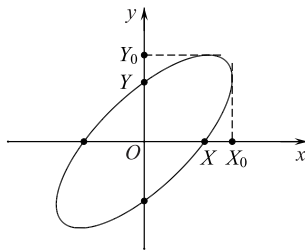


图 2 李萨如图示例

2.2 经典实验方案——电容的测量

按图 3 连接电路,示波器两个通道分别测量电阻两端的电压和信号发生器总电压。

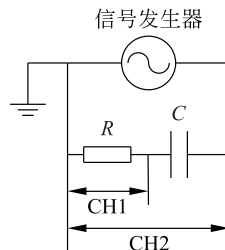


图 3 测量电容实验电路

由于电阻和电容串联,两者电流相同,而电容

的电压相位落后电流 $\frac{\pi}{2}$, 故电容的电压相位落后电阻的电压相位 $\frac{\pi}{2}$, 它们矢量叠加等于总电压 (即信号发生器电压), 三者关系如图 4。所以示波器两个通道输入的电压信号 (电阻电压和总电压) 会有一个相位差 φ 。这时将示波器调至 X-Y 挡, 即 X 方向显示通道 1 的电压, Y 方向显示通道 2 的电压, 都是随时间变化的三角函数, 两者叠加是一个斜椭圆 (如图 5)。

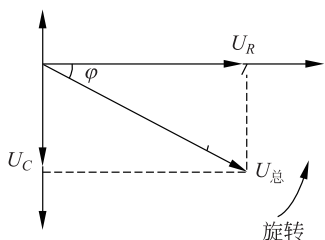


图 4 测量电容实验电压矢量关系

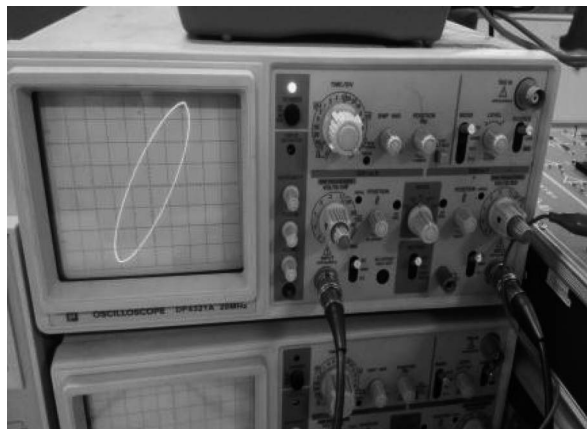


图 5 示波器屏幕上出现斜椭圆

在图 2 中, 从椭圆与两坐标轴的交点以及它在两个方向上的幅值, 可以读到四个数据, 其中 X 轴上的两个读数物理意义如下: $X: U_R \cdot \sin\varphi$; $X_0: U_R$ 。所以有

$$\sin\varphi = \frac{X}{X_0} = \frac{2X}{2X_0} \quad (\text{读 } 2X \text{ 与 } 2X_0 \text{ 是为了减小}$$

读数的相对误差和图形左右偏移的误差)

继而通过三角函数知识可以求出 $\tan\varphi$ 。再由 $\tan\varphi = \frac{U_c}{U_R} = \frac{Z_c}{Z_R} = \frac{1}{2\pi f \cdot C \cdot R}$, 于是只要读出信号发生器交流电的频率和串联电阻的大小, 代入即可求出电容值。

2.3 实验探究——电感测量

1) 类比学习——李萨如图法类比电容测电感

由于交流电路中电阻和电容的相位差的存在, 可以用李萨如图法测量电容。类比测电容的方法, 在图 3 电路中将电容换成电感器, 对电感进行测量 (如图 6)。图 7 为测量电感的电压矢量关系, 类比可得电感器的自感系数

$$\sin\varphi = \frac{X}{X_0} = \frac{2X}{2X_0}$$

$$\tan\varphi = \frac{U_L}{U_R} = \frac{Z_L}{Z_R} = \frac{2\pi f \cdot L}{R}$$

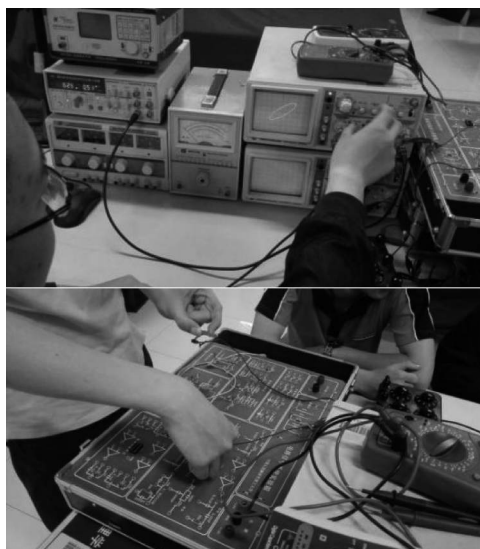


图 6 李萨如图法测电感场景

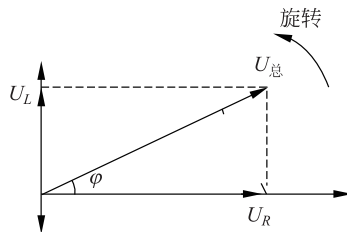


图 7 测量电感实验电压矢量关系

通过改变串联电阻 (电阻箱) 的阻值多次测量, 发现测出的自感系数方差较大, 虽然元件标记值精度有限, 但这样的结果 (方差较大) 还是说明该方法测量电感误差很大, 测出的值并不可靠。实验过程中对多个不同的电感进行了测量并记录数据如表 1 (本文数据表格以其中一个作为代表), 它们的特性十分相似。同学们猜想应该是电感器自身有不可忽略的内阻, 导致这样的测量方法存在系统误差。

表1 李萨如图法测电感实验数据(电感元件:标记值

 $L_{\text{标}}=4\text{mH})$

	电阻 箱电 阻/ Ω	电流 频率/ kHz	电压 幅值/ V	X 轴 振幅/ 格	X 轴 截距/ 格	$L_{\text{测}} /$ mH
1	50	1.597	1.11	45.0	26.9	3.713
2	100	2.000	2.21	29.9	14.2	4.294
3	500	11.92	2.21	41.1	22.5	4.367
4	1000	16.36	2.34	47.5	19.9	4.491
5	2000	30.91	2.02	44.9	20.2	5.189
6	4000	45.57	1.85	45.0	17.6	5.937

2) 探究系统误差的来源——考虑电感内阻修正电感测量

用万用表的欧姆档测量了该电感的内阻,达到了 4.8Ω ,在电阻箱接入阻值不太大的情况下确实是一个不可忽略的量。

类比求电容的方法,在忽略电感内阻时可以求得电感的值,但此值有系统误差。结合交流电矢量解法作出矢量图(图8),图中的 U_r 表示电感内阻的分压幅值。因为所有元件均是串联关系,所以电压幅值和它们的感抗或阻抗均成正比。实际电路中有分压的部分应该包括电阻箱电阻、电感内阻,以及实际纯电感的分压,这些分压按照彼此相位关系可以画出此矢量图。而当忽略电感内阻只考虑电阻箱阻值时,通过纯电感的电压超前串联的电阻 $\frac{\pi}{2}$,以及实验测得总电压和电阻的相位差 φ ,之前通过类比求电容的解法,可以通过直角三角形几何关系由下式计算得到 $L_{\text{测}}$ 为

$$\tan\varphi = \frac{2\pi f L_{\text{测}}}{R}$$

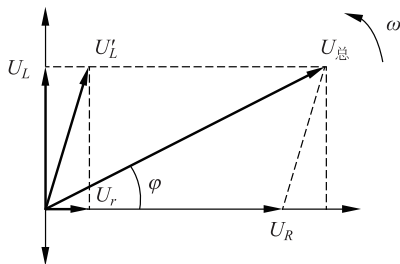


图8 考虑电感内阻修正电压矢量关系

但实际上总电压还有电感内阻的部分,即总电压矢量应该为“电阻箱电阻分压+电感内阻分压”矢量与“纯电感分压”矢量的矢量和,所以正确

的公式应该写做

$$\tan\varphi = \frac{2\pi f L_{\text{修正}}}{R + R_L}$$

其中, R_L 为电感内阻。

因此笔者引入一项修正: $L_{\text{修正}} = L_{\text{测}} \times \frac{R + R_L}{R}$,

修正结果数据如表2所示。

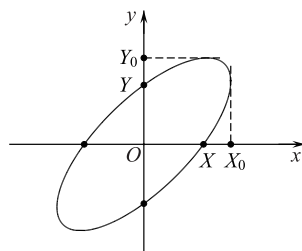
表2 考虑电感内阻修正后的电感数据

	电阻箱电阻/ Ω	$L_{\text{测}} / \text{mH}$	$L_{\text{修正}} / \text{mH}$
1	50	3.713	4.069
2	100	4.294	4.500
3	500	4.367	4.408
4	1000	4.491	4.512
5	2000	5.189	5.201
6	4000	5.937	5.944

发现对于电阻箱阻值不太大的情形,电感的内阻在总电阻中占比较大的比例,修正理论上是很重要的,实际修正后数据也比较科学。而当 R 较大时,理论上应该会“压制”电感的内阻,也就是说测量值应该更精确才对,但从上表数据看出,无论修正前后,只要串联电阻较大,测出的电感都会偏大很多。这样的“误差”从何而来?退一步想,如果没有万用表,又该如何面对电感内阻这一问题呢?或者说能不能采取一种不需要考虑电感内阻的方法,看看测量结果是不是依旧如此:串联电阻较大,测出的电感会偏大。

3) 创新实验方案设计——回避电感内阻修正测量

重新回头研究李萨如图的性质,发现 Y 轴的数据尚未用到,再思考一下 Y 轴示数的意义,如图9所示。

图9 李萨如图法测电感 Y 轴示数的意义

$$X: U_{R\text{max}} \cdot \sin\varphi \quad X_0: U_{R\text{max}} \quad Y: U_{\text{MAX}} \cdot \sin\varphi = U_{L\text{max}} \quad Y_0: U_{\text{MAX}}$$

显然,涉及电感内阻的项是 $\sin\varphi, U_{\text{MAX}}$,但神奇的是,两者相乘正是 $U_{L\text{max}}$,又不涉及电感内阻

了。所以,可以使用的参数是 $X_0:U_{Rmax}$ 及 $Y:U_{MAX} \cdot \sin\varphi = U_{Lmax}$ 。两者相除, $\frac{X_0}{Y} = \frac{R}{\omega \cdot L} = \frac{R}{2\pi fL}$ 。需要说明的是,这里的 R 就是电阻箱的阻值。这种方法不同于测电容的方法,是笔者为了回避电感内阻而想到的计算思路。基于该方法,继续进行计算和测量,实验数据如表 3 所示。

可以看到采用了新的方法后,测量结果比之前要精确一些,可以说电感内阻的存在确实不能忽略。但依然可以看到,电感的测量值随串联的电阻值增大而增大,这样的单向增长可以认为是一种系统误差。它的来源暂时是个谜。带着疑问,团队决定改用电谐振的方法测量电感的自感系数。

4) 经典实验进一步探究系统误差——用电谐振方法测电感

由电阻、电感、电容串联而成的 RLC 电路在周期性交变电源的激励下,将产生受迫形式的交流振荡,其振荡幅度随交变电源频率的改变而变化,当信号源的频率 f 满足 $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 时,电路总阻抗最小,回路电流最大,总电压和电阻两端电压相位差 $\varphi=0$,即电路谐振^[6]。将示波器两个通道一个测电阻两端电压,另一个测总电压,使用 $X-Y$ 模式观察李萨如图,调节频率至图形变成一条线段,即为谐振频率。

重新连接电路,使用一个标准电阻,并将电阻箱的阻值分别调为 10Ω 、 100Ω 、 1000Ω 、 5000Ω 、 10000Ω 和 20000Ω ,调整信号发生器的频率使得示波器的图像形成一条直线段(如图 10),并记录输出频率计算得出待测电感。实验数据如表 4 所示。

测量过程中发现,计算得到的数值与标记值依然相差较大,而且电感大小随着电阻的增大而增大。这是什么原因呢? 值得继续深入研究。

2.4 实验反思与进一步修正——两个猜想

几种不同测量方法下的实验结果是相似的,

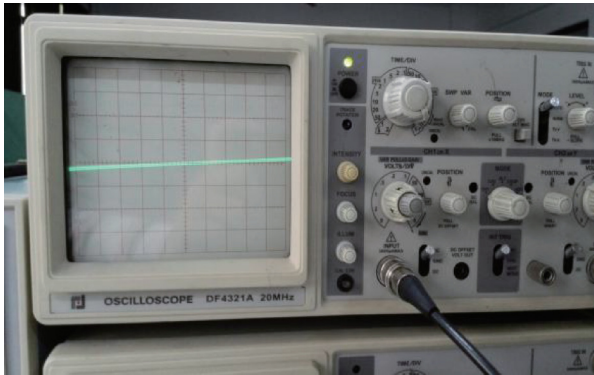


图 10 电谐振法测量电感

表 4 电感 1(标记值 $L=4mH$)

电阻 R/Ω	谐振频 率 $f/$ kHz	计算得 电感/ mH	电压 U/V	电容 $C/\mu F$	电感 标记值/ mH
1 10	17.39	3.807	2.25	0.220	4
2 100	16.44	4.260			
3 1000	16.36	4.302			
4 5000	15.28	4.931			
5 10000	13.85	6.002			
6 20000	12.58	7.275			

这说明,所测得电感随电阻箱接入阻值的增大而增大绝非偶然现象。对此,团队提出两点猜想:

(1) 电阻变化导致了电流幅值的变化,类比灯丝电阻随电流的变化而变化,电感器电感也随电流幅值的变化而变化。

(2) 电阻箱存在电感,其值随阻值的变化而变化。

对于猜想(1),在前述谐振实验的基础上采用控制电流不变的方法来检验,即增大电阻箱电阻的同时,同步调整信号源的电压幅值,使电压幅值除以电阻箱电阻(即谐振时回路中电流)不变,再次实验后,测得电感值仍随电阻箱接入电阻增大而增大。

表 3 电感 1(标记值 $L_{标}=4mH$,内阻 $R_{内}=4.8\Omega$)

电阻箱电阻/ Ω	电流频率/kHz	电压幅值/V	X 轴振幅/格	X 轴截距/格	Y 轴振幅/格	Y 轴截距/格	$L_{测}/mH$
1 100	2.424	0.26	29.2	15.2	37.6	18.9	4.249
2 500	11.35	0.22	31.9	16.5	39.4	19.5	4.289
3 1000	20.27	0.42	32.9	15.9	37.9	18.1	4.319
4 2000	35.12	0.42	37.0	18.6	38.5	18.7	4.581

对于猜想(2),可以将电阻箱视为一个电感和一个电阻的串联,仍通过 RLC 串联谐振对其电感进行测量,具体做法是:移去原来电感,再串一个定值电阻,示波器两个通道一个测量定值电阻两端电压,另一个测量总电压,使用 $X-Y$ 模式观察李萨如图,调节频率至图形变成一条线段,即为谐振频率。实验数据如表 5 所示。

表 5 电阻箱电感的测量(用数字万用表测出选用电容 $C=0.0221\mu\text{F}$)

	电阻箱 阻值 R/Ω	谐振频 率 f/kHz	电阻箱 电感 $L_{\text{测}}/\text{mH}$
1	5000	38.66	0.7669
2	10000	28.12	1.4495
3	15000	23.34	2.1040
4	20000	20.03	2.8568
5	30000	15.89	4.5394
6	40000	13.77	6.0448
7	50000	12.40	7.4543

将上表数据绘制成 $L-R$ 图像如图 11 所示。

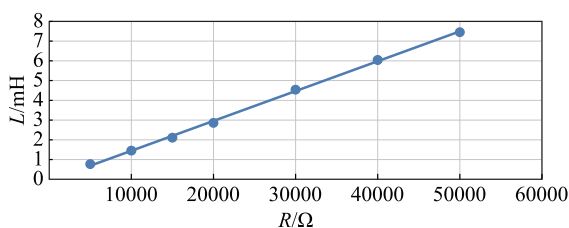


图 11 电阻箱自感系数与阻值的关系图

从图 11 可知实验用电阻箱的电感与其阻值的关系接近线性,线性拟合后得到其相关系数 $r=0.9995$,说明线性关系非常好。定义电阻器的电感与电阻之比 $P=\frac{L}{R}$,将上述数据代入计算得, $P_{\text{电阻箱}}=1.513\times 10^{-4}\text{mH}/\Omega$ 。由此可对之前测得的数据进行修正

$$L'=L-RP_{\text{电阻箱}}$$

其中, $P_{\text{电阻箱}}=1.513\times 10^{-4}\text{mH}/\Omega$ 已测出。

修正后数据如表 6 所示。

可以清楚地看到,将电阻箱自带的电感成分修正后,测得的电感的自感系数不再随着串联电阻的增加而显著增加,而是围绕测量值的平均值波动。

表 6 电感 1(标记值 $L=4\text{mH}$)

电阻 R/Ω	输出 频率 f/kHz	计算 得电 感/ mH	修正 后电 感/ mH	电压 U/V	电容 $C/\mu\text{F}$	电感 标记值/ mH
1	10	17.39	3.807	3.805		
2	100	16.44	4.260	4.245		
3	1000	16.36	4.302	4.151		
4	5000	15.28	4.931	4.175	2.25	0.220
5	10000	13.85	6.002	4.489		
6	20000	12.58	7.275	4.249		

经过了多种方法的探究、猜想和验证,总结得出以下结论。

(1) 电感有内阻,其大小在某些测量方法中是不能忽略的。

(2) 实验所使用的电阻箱,即一般实验室使用的电阻箱,由于其线圈式的结构,通交流电时会产生自感效应,使得测量电感时产生了误差,而且接入电阻值越大,误差越大。

(3) 由于电感和线圈匝数成正比,相同材料、相同结构的线圈其电阻也和匝数成正比,所以当对电阻箱的电阻和其电感进行拟合时得到比较好的线性关系是合理的。

3 结语

通过选取已有的实验教学方法对电感进行了测量并在此基础上创新设计,发现使用查阅到的方法和自行设计的方法,在改变实验条件的情况下测量值变化幅度均很大。学生们提出了一些猜想并进行验证,发现实验中使用的电阻箱自身也存在电感这一容易被忽视的现象。在此基础上尝试测量了一个电阻箱的“感阻比”并进一步推出了电阻箱的自感修正表或自感修正项,使得整个实验教学更加饱满。

参 考 文 献

- [1] MICHAEL W. DAVIDSON. Molecular expressions: Electricity and magnetism introduction: Inductance 1995—2008.
- [2] 人民教育出版社,课程教材研究所,物理课程教材开发中心. 普通高中教科书·物理(必修3)[M]. 北京:人民教育出版社,2020:114-116.

(下转第 279 页)

$$U = \frac{BdvRS}{RS + \rho d} \quad (7)$$

输出电压 U 与等离子体的流速 v 、电阻率 ρ 、磁感应强度 B 以及负载电阻 R 等因素密切相关。

3 结语

本文的讨论表明,产生电动势的本质是将其其他形式的能量转化为电能,而这种能量转化既可由外力做功实现(例如化学电池),也可直接来源于内能(例如本文讨论的磁流体发电)。

根据课程标准和教材内容的呈现,磁流体发电的内容只需要“了解”该应用;但这并不妨碍教师根据学生学情进行个性化指导,帮助他们正确理解磁流体发电的本质原理。从提升学科本体知识和学术素养来说,这也有助于教师加深和拓展对电动势概念的理解,更准确地掌握能量转化过程,从而改进相关内容的教学。

参 考 文 献

- [1] 中华人民共和国教育部制订. 普通高中物理课程标准(2017年版 2020 年修订)[M]. 北京:人民教育出版社,2020:28
MINISTRY OF EDUCATION OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA. General high school physics curriculum standards (2017 Edition Revised in 2020)[M]. Beijing: People's Education Press, 2020: 28. (in Chinese)
- [2] 普通高中教科书 物理选择性必修第二册[M]. 北京:人民教育出版社,2020:12.
People's Education Press. General High School Textbook Physics Selective Compulsory Volume II [M]. Beijing: People's Education Press, 2020: 12. (in Chinese)
- [3] 普通高中教科书 物理选择性必修第二册[M]. 北京:教育科学出版社,2021:24.
Education Science Press. General High School Textbook Physics Selective Compulsory Volume II [M]. Beijing: Education Science Press, 2021: 24. (in Chinese)
- [4] 普通高中教科书 物理选择性必修第二册[M]. 上海:上海科技教育出版社,2021:25.
Shanghai Scientific & Technological Education Press. General High School Textbook Physics Selective Compulsory Volume II [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Education Press, 2021: 25. (in Chinese)
- [5] 普通高中物理教学参考资料 选择性必修第二册[M]. 上海:上海科学技术出版社,2023:30-31.
Shanghai Science and Technology Press. General High School Physics Teaching Reference Materials Selective Compulsory Volume II [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2023: 30-31. (in Chinese)
- [6] 冀敏,蒋平. 带电导体体系的电场能量[J]. 物理与工程,2015, 25(3):34-37.
JI M, JIANG P. Electric field energy of charged conductor system[J]. Physics and Engineering, 2015, 25(3): 34-37. (in Chinese)
- [1] (上接第 275 页)
People's Education Press, Institute of Curriculum and Textbook Research, Physics Curriculum and Textbook Development Center. Ordinary High School Textbook; Physics (Compulsory 3) [M]. Beijing: People's Education Press, 2020: 114-116. (in Chinese)
- [3] 潘志民. 高中物理奥林匹克教程[M]. 江苏:江苏人民出版社,2017:194-196.
PAN Z M. High School Physics Olympiad Tutorial [M]. Jiangsu: Jiangsu People's Publishing House, 2017: 194-196. (in Chinese)
- [4] 胡小鹏,高文莉,万春华. 大学物理实验(理科、第一册)[M]. 南京:南京大学出版社,2012:132-135.
HU X P, GAO W L, WAN C H. University physics experiments (Science, Volume 1) [M]. Nanjing: Nanjing University Press, 2012: 132-135. (in Chinese)
- [5] 张三慧. 大学物理学(热学、光学、量子物理)[M]. 第三版. 北京:清华大学出版社,2009:133-134.
ZHANG S H. University physics (Thermal Physics, Optics, Quantum Physics) [M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 133-134. (in Chinese)
- [6] 潘志民. 高中物理奥林匹克教程[M]. 江苏:江苏人民出版社,2017:200-204.
PAN Z M. High School Physics Olympiad Tutorial [M]. Jiangsu: Jiangsu People's Publishing House, 2017: 200-204. (in Chinese)