



从培养物理核心素养的角度 谈一类变压器习题的改进

陈思澹

(宁波市效实中学 浙江 宁波 315012)

(收稿日期:2021-11-26)

摘要:对于原线圈含阻的变压器题目,电压和电流的相位问题已有广泛讨论.从人教版新教材的一道课后习题出发,将这类问题的争议点及共识点进行简要总结,提出另一角度的证明方法;之后重点着眼于这类争议性问题出现在新教材及高考真题中是否符合物理核心素养的育人观念展开讨论,并结合课程目标提出改进意见.

关键词:变压器 相位问题 核心素养

1 问题的提出

在人教版新版教材《物理(选择性必修二)》第三章“交变电流”的单元课后练习中,出现了这样一道题目(B组第3题):

【例1】如图1所示,理想变压器原、副线圈的匝数比为3:1,在原、副线圈的回路中分别接有阻值相同的电阻,原线圈一侧接在电压为220 V的正弦交流电源上,求:

- (1) 副线圈回路中电阻两端的电压;
- (2) 原、副线圈回路中电阻消耗的功率之比.

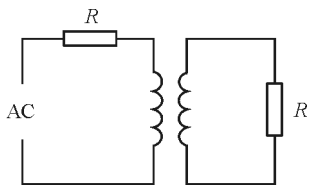


图1 新教材“交变电流”单元课后练习B组第3题

参考解答:

- (1) 副线圈电流

$$I_2 = \frac{U_2}{R}$$

原线圈电流

$$I_1 = \frac{1}{3} I_2 = \frac{U_2}{3R}$$

与原线圈串联的电阻分压

$$U_R = I_1 R = \frac{U_2}{3}$$

由变压器原、副线圈电压与匝数比关系得原线圈分压为

$$U_1 = 3U_2$$

根据原线圈回路电路规律

$$U_1 + U_R = 220 \text{ V}$$

解得副线圈电压 $U_2 = 66 \text{ V}$, 即副线圈回路中电阻两端的电压 $U = 66 \text{ V}$.

- (2) 原线圈回路中电阻功率

$$P_1 = I_1^2 R$$

副线圈回路中电阻功率

$$P_2 = I_2^2 R$$

结合(1)中结论,原、副线圈回路中电阻消耗的功率之比

$$k = \frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{9}$$

这是一道变压器原线圈含阻的题目,教师们感到困惑的问题有:

- (1) 电感线圈会如何影响交变电流电压和电流的相位;
- (2) 电源与电感的电压峰值是否会存在不同步

的情况;

(3) 如何利用基本电路定律建立方程组, 求解原线圈回路中电阻和电感的分压配比;

(4) 参考解答中的电路规律与直流电形式无异, 如此简单处理是否符合实际?

2 同类问题的整合与分析

关于变压器原线圈含阻类习题, 不仅在平时的练习中经常遇到, 近年在高考中也多次出现, 例如2015年全国高考新课标卷 I 理综第16题和2016年全国卷 I 理综第16题, 类似的题设在2020年全国卷 III 理综第20题中也有所体现.

【例2】(2015年高考全国卷理综试题新课标卷 I 第16题) 一理想变压器原、副线圈的匝数比为3:1, 在原、副线圈的回路中分别接有阻值相同的电阻, 原线圈一侧接在电压为220 V的正弦交流电源上, 如图2所示. 设副线圈回路中电阻两端的电压为 U , 原、副线圈回路中电阻消耗的功率的比值为 k , 则()

- A. $U = 66 \text{ V}, k = \frac{1}{9}$
 B. $U = 22 \text{ V}, k = \frac{1}{9}$
 C. $U = 66 \text{ V}, k = \frac{1}{3}$
 D. $U = 22 \text{ V}, k = \frac{1}{3}$

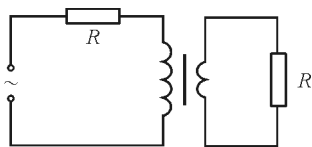


图2 2015年高考全国卷试题新课标卷 I 第16题

【例3】(2016年高考全国卷 I 理综试题第16题) 一含有理想变压器的电路如图3所示, 图中电阻 R_1, R_2, R_3 的阻值分别为 $3 \Omega, 1 \Omega, 4 \Omega$, A 为理想交流电流表, U 为正弦交流电压源, 输出电压的有效值恒定. 当开关S断开时, 电流表的示数为 I ; 当S闭合时, 电流表的示数为 $4I$. 该变压器原、副线圈匝数比为()

- A. 2 B. 3
 C. 4 D. 5

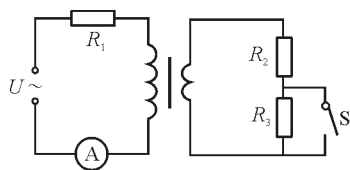


图3 2016年高考全国卷 I 理综试题第16题

【例4】(2020年高考全国卷 III 理综试题第20题) 在图4(a)所示的交流电路中, 电源电压的有效值为220 V, 理想变压器原、副线圈的匝数比为10:1, R_1, R_2, R_3 均为固定电阻, $R_2 = 10 \Omega, R_3 = 20 \Omega$, 各电表均为理想电表. 已知电阻 R_2 中电流 i_2 随时间 t 变化的正弦曲线图如图4(b)所示, 下列说法正确的是()

- A. 所用交流电的频率为50 Hz
 B. 电压表的示数为100 V
 C. 电流表的示数为1.0 A
 D. 变压器传输的电功率为15.0 W

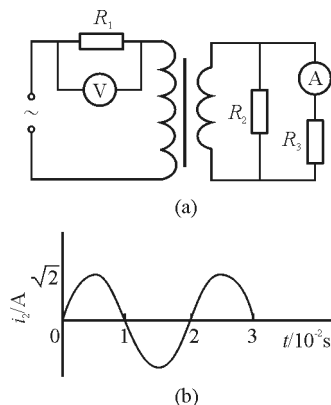


图4 2020年高考全国卷 III 理综试题第20题

针对变压器原线圈中含阻的问题, 集中争议在于是否需考虑 RL 电路中电压和电流的相位差对原线圈电路电压分配的影响, 简而言之, 即原线圈与电源的电压是否同相. 文献[1]和[2]中, 作者认为这类问题的多种解法值得商榷; 文献[3~7]中, 作者通过各种方式证明了此类问题科学性的满足条件.

结合电磁学、电工学的知识, 基本就题设的科学性达成了共识, 变压器的原线圈与电源电压无相位差. 具体理论推导本文不加赘述, 仅对文献中的分析

过程进行综述总结,如表1所示.

表1 对文献的总结

分析过程	内容
模型对比	两类模型: (1) 独立的 RL 电路. (2) 变压器原、副线圈连接的 RL 电路(包含空载、仅电阻负载、含电感电容的负载等多种情形)
理论推导	利用矢量法分别求出两类模型原、副线圈电压和电流的相位关系
点明两类模型存在的关键差异	(1) 第二类模型中,副线圈中因增加了负载,出现的交变电流会产生交变磁通,反之影响原线圈的电流,原、副线圈最终会达到一个稳态. (2) 基于理想变压器空载电流(励磁电流)趋于零的前提
结论与推论	(1) 当副线圈负载为纯电阻时,原线圈与电源电压同相位. (2) 当负载不为纯电阻时,则原线圈的电压与电流有相位差
研究结果	根据题设的条件,虽在原线圈电路中加入了电阻,但副线圈电路均为纯电阻负载,因此适用原线圈与电源电压同相位的结论

以上证明需要严谨的推导和大学课程知识储备,为便于高中学生理解,笔者从能量守恒的角度提出一个简要的定量说明.

首先需简要补充说明大学阶段电工学中的基本知识^[8,9].

对于电阻、电感与电容元件串联的交流电路,阻抗的辐角

$$\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R}$$

即电流与电压之间的相位差. 阻抗模

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L + X_C)^2}$$

有功功率

$$P = UI \cos \varphi$$

无功功率

$$Q = UI \sin \varphi$$

视在功率

$$S = UI$$

功率三角形、阻抗三角形、电压三角形可以如图5所示,三者模的值的差异实质上与交流电的相位直接相关.

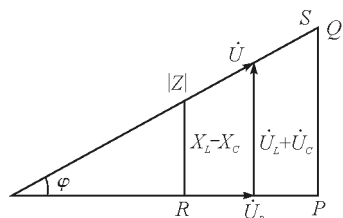


图5 功率、阻抗、电压三角形

根据理想变压器的特点,既不消耗能量,也不储存能量(属于高中知识,由理想变压器无磁损、无铜损、无铁损的条件得),在任一时刻进入理想变压器中的功率等于零,即从原线圈进入理想变压器的功率,全部传输到副线圈的负载中. 如果负载为纯电阻,图5中的 Q 应趋于零,因此可认为原线圈中视在功率与有功功率相等,即原线圈中的电压与电流不存在相位差. 但如果负载中含电感、电容器等元件,由于这类元件的储能特性,整个输电回路的电能传输过程中无功功率不再为零,因而原线圈中的电压与电流不再同相.

再进一步扩展,远距离输电问题的部分题型也可被归类为原线圈含阻问题,即在考虑降压变压器的原、副线圈制约关系及输电回路的电压分配关系时,本质也属于此类问题. 而远距离输电问题向来是一个重要的考查点,一般来说也是将用户端负载作纯电阻处理,例如下题中就明确考查了输电线上等效应电阻与降压变压器原线圈电阻、升压变压器副线圈电阻的电压关系.

【例5】(2020年7月浙江卷第11题)如图6所示,某小型水电站发电机的输出功率 $P = 100 \text{ kW}$,发电机的电压 $U_1 = 250 \text{ V}$,经变压器升压后向远处输电,输电线总电阻 $R_{\text{线}} = 8 \Omega$,在用户端用降压变压器把电压降为 $U_4 = 220 \text{ V}$. 已知输电线上损失的功率 $P_{\text{线}} = 5 \text{ kW}$,假设两个变压器均是理想变压器,下

列说法正确的是()

- A. 发电机输出的电流 $I_1 = 40 \text{ A}$
 B. 输电线上的电流 $I_{\text{线}} = 625 \text{ A}$
 C. 降压变压器的匝数比 $n_3 : n_4 = 190 : 11$
 D. 用户得到的电流 $I_4 = 455 \text{ A}$

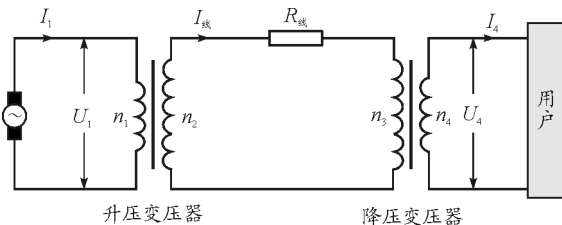


图6 2020年7月浙江卷第11题

从科学性角度来讲,当满足变压器副线圈负载为纯电阻的条件时,原线圈串接电阻后,电流与电压并无相位差,很多学生按照直流电路来处理电压分配并无不妥。但在物理核心素养发展的课程目标的构建和新教材推行的现下,这类问题在教材中出现,其导向性是否合理,有待讨论;同时作为高考题,其区分度和效度也值得探讨。

3 从培养核心素养角度出发的思考

关于这类题目的争议原因,可以总结为高中与大学物理知识体系的差异。因高中阶段学生尚未学习电感、电容影响交变电压、电流相位的知识,如果没有另外说明,从发展规律而言,学生很自然地会利用直流电的电路规律来求解,而正好因为这类题目在理想化情况下相位因素不影响结果,所以学生的求解会碰巧使得计算结果正确。但笔者认为,从物理核心素养的培养角度而言,教材中安排此类习题似有不妥,理由如下。

(1) 此类问题虽可帮助学生巩固变压器的基本构造和工作原理,但实则不利于绝大多数学生形成完整的交变电流的物理观念。新教材在“交变电流”这一章节并未专门有针对“相位”的教学,而其作为交流与直流电对比的一个明显差异性概念,在学生形成交变电流概念时是不可被忽视的,教师在授课时也或多或少会提及,但在本题的电路基本规律应用过程中,没有体现交流与直流电的重大差异。

同时,从能量观的角度,交流与直流电在功率

的计算方法上亦存在差异,若在其他情境中用直流电的结论解决交流电的功率问题,也可能出现不匹配的情况(原因在于交流电有功功率和无功功率之分,而直流电则没有)。虽然前文已说明能量角度是一个证明思路,但对高中生而言已属于拓展内容了。

(2) 从科学思维的角度^[10],此题意在考查学生理想模型构建的能力,电路的模型构建看似没有问题,但对于没有相关的电磁学知识储备的学生而言,他们构建的模型是不完整且不严谨的,自然也无法基于此完成进一步的科学探究与推理的环节(即无法从理论上探究交流电相位关系且证明此题不体现相位差影响,更不可能有机会参与定量的实验探究),所以此类问题科学思维的训练维度较为单一,题目的可替代性较强。

(3) 最重要的一点,绝大部分学生在解决这类问题的过程当中,虽然得到了正确的答案,在考试中获得了分数,但本质上可认为他们是用了一个不完全相符的模型(直流电模型),得到了个结论恰好一致的答案,于是便不会再继续深究,这一点在学生科学态度与责任的培养上亦是欠妥,会陷入“为做题而练习”的导向。

(4) 基于前面3点的分析,学生面对这个问题可以分为4类:

1) 缺乏基本模型构建能力,不能熟练分析基本电路,无法完成求解。

2) 知道变压器的原理,会分析电路,但没考虑到相位问题。

3) 接触过一定的大学先修知识,考虑到了交流电的相位问题,但不会证明,觉得可能和直流电情况不同。

4) 有扎实的大学先修知识基础,能够完整证明或论证。

从高考的要求和高考题的效度分析,应该能够对不同掌握程度的学生加以区分,尤其是以上4个层次的学生在物理核心素养能力方面有着明显差异,但这道题能够得分的却可能是2)、4)两类学生,2)类学生基于不严谨的思维前提获得了分数(当然

这个不能怪他们);3)类学生虽牢固掌握了高中知识且具备批判性思维,但极有可能因非考查内容的知识储备不足导致失分,但实际上他比1)、2)类学生的认知更为深刻;4)类学生虽能得分,却可能将更多时间花在证明非重点考查内容上.

因此,从培养物理核心素养的角度考虑,这类问题作为平日里电路的基本规律以及变压器的习题,是可以达到练习的目的的;但真正要全面而科学地分析这个问题,完成合理而充分的分析探究,对于高中生来说是要求过高而达不到的;且作为考题无法根据课程目标有效考查学生的物理核心素养.所以若是考虑到要编写入教材和正式考试中,或许可以有更优的选择.

4 浅谈改进思路

对于这类问题,从考查要点来看,主要为变压器的规律和电路综合分析两个考点;从考查的思维角度而言,需要学生具备逻辑分析能力和知识综合运用能力^[11,12].结合教材和课程标准,考虑高中生的思维水平和知识储备,从保持考查点不变、倡导科学严谨的态度,避免出现“误打误撞做对,多思多想犯错”的情况的角度出发,笔者提出以下几个改进方向供参考:

(1)将电路综合分析的考查重点置于副线圈回路,只要副线圈电路中是纯电阻负载,不论原线圈回路含阻情况如何,若只考查构建由将副线圈回路的电路模型,可以规避掉电路分析中的相位问题,科学性也没有问题.

(2)若设定原线圈含阻的前提,且必须要考查原线圈中的电路规律,则可以考虑电阻与原线圈并联的情况,因并联电压特点,通过电阻和原线圈的电压相等,例如下面这道参考习题.

【例6】如图7所示,定值电阻 R_1 和 R_2 分别连接在理想变压器原、副线圈上,且 $R_1 = 2R_2$,变压器原线圈接到输出电压恒定的交流电源上,如果电源的输出功率等于电阻 R_2 消耗功率的3倍,则变压器原、副线圈的匝数比 $\frac{n_1}{n_2}$ 为()

- A. 2 B. $\frac{1}{2}$
C. $\sqrt{2}$ D. $\frac{\sqrt{2}}{2}$

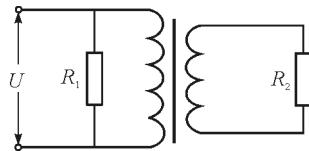


图7 参考习题

(3)上题的另一个思路,结合对能量观的核心素养要求,重点考查功率和能量问题,选取部分电路的功率,尤其是纯电阻负载,可以规避对交变电流问题中视在功率、有功功率、无功功率的考虑.可以考虑引入二极管在副线圈回路中,考查有效值、焦耳热、功率之间的联系,增加一点题目的变化性与难度,提升区分度.

参考文献

- 周军,周侃.哪一种解法正确[J].中学物理,2011,29(23):33~34
- 陈汉炎.变压器应用题的解法哪一种正确[J].湖南中学物理,2012,27(11):52~54
- 徐尉,谢圆圆.再谈“哪一种解法正确”[J].中学物理,2012,30(19):48~49
- 李铁.对理想变压器原、副线圈电流、电压相位关系的理论探讨[J].物理教学,2017,39(7):66~67,60
- 涂泓,方伟.理解原线圈电流与电压的相位关系[J].大学物理,2019,38(4):4~7
- 陈闰路,李刚.对一道变压器高考题的解法的商榷[J].中学物理教学参考,2021,50(8):44~46
- 陈泽安,阙志武.对变压器原线圈含阻问题的探讨[J].物理之友,2017,33(9):38~39
- 秦曾煌,姜三勇.电磁学[M].北京:高等教育出版社,2013.4
- 杨朋聚.浅谈交流电路中的欧姆定律和功率问题[J].理科考试研究,2020,27(9):37~41
- 丁红明.核心素养下“学为中心”的教学设计探讨——以“变压器”教学为例[J].物理教学,2019,41(8):14~17
- 黄多智.从理想变压器变压的本质说起[J].中学物理教学参考,2021,50(4):37~39
- 陈伟孟,张玉峰.“交变电流”单元教学设计[J].中学物理,2021,39(11):26~31