

《宁夏回族自治区教育厅中小学教辅材料评议推荐目录》
推荐教辅图书
经人民教育出版社授权

配人教版[®]



宁夏专版

精讲精练

JINGJIANGJINGLIAN

高中物理
学生用书

选修 3-2
(沪科)

《精讲精练》编写组 编



黄河出版传媒集团
宁夏人民教育出版社

宁夏回族自治区教育厅中小学教辅材料评议推荐图书

宁夏专版

精讲精练

JINGJIANGJINGLIAN

高中物理
学生用书

选修 3-2
(沪科)

《精讲精练》编写组 编



黄河出版传媒集团
宁夏人民教育出版社

前言

Preface

专家名师倾情锤炼的学习攻略经典——
精讲精练 宁夏专版 高中物理选修3-2(沪科)

独到体例设计 精彩纷呈!

铸金字品牌·圆学子梦想



独家人文特色 敬请关注!

讲练结合,科学分册——基础理论紧贴教材,活页测试增强技能。讲测科学分开,珠联璧合,浑然天成。

人文关怀,无处不在——依据栏目特色,特别添加温馨提示,激发兴趣,导学知识。

合作互动,巧设平台——在不同的栏目中穿插设置“想一想”“判一判”“互动探究”等探究问题,提供师生互动、生生互动平台,合作学习,展现主体意识,发挥个性特长。

Contents/目录

课堂导学案

▶ 第1章 电磁感应与现代生活 001

- 1.1 电磁感应——划时代的发现 · 1
- 1.2 探究感应电流的方向 · 5
- 1.3 探究感应电动势的大小 · 9
- 1.4 电磁感应的案例分析 · 13
- 1.5 自感现象与日光灯 · 17
- 1.6 涡流现象与电磁灶 · 21

阶段复习课 · 24

▶ 第2章 交变电流与发电机 027

- 2.1 怎样产生交变电流
- 2.2 怎样描述交变电流 · 27
- 2.3 探究电阻、电感和电容的作用 · 33

▶ 第3章 电能的输送与变压器 037

- 3.1 高压输电原理 · 37
- 3.2 变压器为什么能改变电压
- 3.3 电能的开发与利用 · 40

阶段复习课 · 45

▶ 第4章 传感器与现代社会 048

- 4.1 传感器的原理 · 48
- 4.2 探究热敏电阻的温度特性曲线 · 51
- 4.3 用传感器做实验 (略)
- 4.4 信息时代离不开传感器 · 53

阶段复习课 · 58

坚守 品质华光熠熠 始终如一

超越 创新孜孜不倦 矢志不渝



精讲精练 宁夏专版 高中物理选修3-2 (沪科)

Contents/目录

检测训练套题

巩固提能卷 (P61~P92)(活页试卷)
检测评估卷

答案解析

(P93~P116)(单独成册)

荟萃疑难突破技巧

聚焦高效学习策略

一 深化理解

- 磁通量及其变化量的分析 · 2
- 楞次定律的理解和应用 · 5
- 对法拉第电磁感应定律的理解 · 10
- 对自感现象的理解 · 18
- 对通电自感和断电自感的理解 · 19
- 交变电流的变化规律 · 28
- 交变电流有效值的理解和计算 · 29
- 输电线路上的电压损失和功率损失 · 37
- 传感器的工作原理及分类 · 49

一 拓展提升

- 感应电流是否产生的判断 · 3
- 楞次定律与能量守恒 · 7
- 电磁感应中的能量问题 · 13
- 电磁感应中的力学问题 · 14

- 交变电流的图像及应用 · 30
- 电容器对交变电流的作用 · 35
- 高压交流输电的电路分析 · 38
- 理想变压器的基本关系及其制约关系 · 42
- 变压器电路的动态分析 · 43

一 技能突破

- 涉及磁通量正负问题的分析方法 · 3
- 应用楞次定律判断导体运动问题的技巧 · 7
- 电磁感应图像问题的解决方法 · 15
- 涡流现象中的能量转化问题的分析方法 · 23
- 计算电阻上产生热量与通过电量的技巧 · 31
- 处理电阻、电容、电感导电特性的技巧 · 36
- 输电问题中找准对应物理量的技巧 · 39
- 变压器问题的分析技巧 · 43
- 传感器问题中的电路动态分析技巧 · 57



课堂导学案

第1章 电磁感应与现代生活

1.1 电磁感应——划时代的发现

目标定位

1. 知道什么是电磁感应现象,理解感应电流产生的条件。
2. 通过实验,探究产生感应电流的条件,养成探究物理规律的良好习惯,提高自身的科学素养。
3. 通过对电磁感应现象发现历程的学习,体会人类探索自然规律的科学态度和科学精神。

核心提示

重点:用实验的方法探索磁生电现象及磁生电产生的条件。
难点:根据磁通量的变化来判断是否产生感应电流。

预习·基础知识

主干精梳理 基础全掌握 >>>

基础知识是形成学科能力的源头,本栏目根据课标要求,精准梳理,清晰呈现主要知识及内在关系。关键处合理挖空、易错处及时提醒,多策并举,夯实基础,请动手填一填吧!

一、电磁感应的探索历程

事件、意义 过程	事件	意义
电生磁	1820年,丹麦____ ____发现 电流磁效应	拉开了研究电与磁相互关系的序幕
磁生电	菲涅耳、安培、 ____、 ____等致力于磁生电的研究	科学探索是曲折的,真理追求是执着的
	1831年,英国____ ____发现了 电磁感应现象	揭示了电和磁的内在联系,引领人类进入电气时代

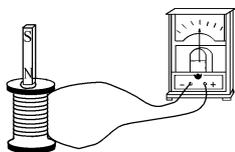
想一想

很多科学家为什么在磁生电的研究中没有成功?

二、探究感应电流产生的条件

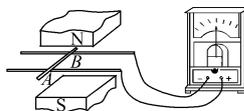
实验探究

探究1(如图所示)。



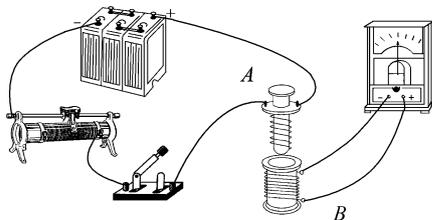
实验操作	有无电流产生	实验探究结论
将磁铁插入螺线管时		将磁铁插入或拔出螺线管时,通过螺线管闭合回路的磁通量_____, 有感应电流产生
磁铁静止在螺线管中时		
将磁铁拔出螺线管时		

探究2(如图所示)。



实验操作	有无电流产生	实验探究结论
导体AB与磁场相对静止		导体AB切割磁感线,通过闭合回路的磁通量_____, 有感应电流产生
导体AB平行于磁感线运动(与导轨不分离)		
导体AB做切割磁感线运动(与导轨不分离)		

探究3(如图所示)螺线管A放在螺线管B内。



实验操作	有无电流产生	实验探究结论
闭合开关的瞬间		导体和磁场间并没有发生相对运动,当螺线管A中的电流发生变化时,螺线管B所处的磁场_____,从而引起了穿过螺线管B的_____发生变化,螺线管B所在的闭合回路中有感应电流产生
闭合开关,A中电流稳定后,滑动变阻器电阻变大		
闭合开关,A中电流稳定后,滑动变阻器电阻不变		
闭合开关,A中电流稳定后,滑动变阻器电阻变小		
断开开关的瞬间		

想一想?

上述三种探究过程中,产生感应电流时,有什么共性?

三、感应电流产生的条件

- (1)只要穿过_____导体回路的_____发生变化,_____导体回路中就有感应电流产生。
- (2) $\Delta\Phi$ 与 Φ 意义不同,大小没有必然的联系。感应电流的产生与 Φ 无关,只取决于 Φ 的_____,即与_____有关。

判一判

- (1)闭合线圈和磁场发生相对运动,一定能产生感应电流。 ()
- (2)闭合线圈做切割磁感线运动,一定能产生感应电流。 ()
- (3)穿过闭合线圈的磁通量发生变化,一定能产生感应电流。 ()

归纳·核心要点

互动助探究 要点速突破 >>>

核心要点是提升学科素养的关键。本栏目突破核心要点,讲练结合,提醒认知误区,点拨规律技巧,循序渐进,培养主动思考意识,提升自主探究能力,请进入探究空间一显身手吧!

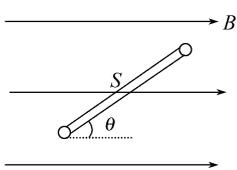
磁通量及其变化量的分析

深理解

1. 匀强磁场中磁通量的计算

(1) B 与 S 垂直时: $\Phi=BS$, B 为匀强磁场的磁感应强度, S 为线圈的面积。

(2) B 与 S 不垂直时: $\Phi=BS_{\perp}$, S_{\perp} 为线圈在垂直磁场方向上的投影面积,在应用时可将 S 投影到与 B 垂直的方向上或者将 B 分解为垂直于 S 和平行于 S 的两个分量,则 $\Phi=B_{\perp}S$,如图所示, $\Phi=BS\sin\theta$ 。

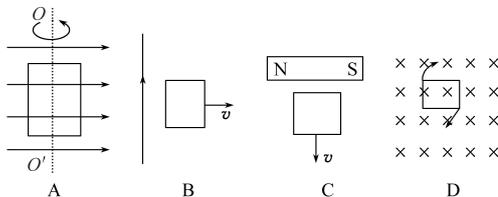


2. 非匀强磁场中磁通量的分析

条形磁铁、通电导线周围的磁场都是非匀强磁场,通常只对穿过线圈的磁通量进行定性分析,分析时应兼顾磁场强弱、线圈面积和磁场与线圈的夹角等因素,并可充分利用磁感线来判断,即磁通量的大小对应穿过线圈的磁感线的条数,穿过线圈的磁感线的条数变化,则说明磁通量变化。

特别提醒! 磁通量与线圈的匝数无关,也就是磁通量的大小不受线圈匝数的影响。同理,磁通量的变化 $\Delta\Phi=\Phi_2-\Phi_1$ 也不受线圈匝数的影响。所以,用公式求 Φ 、 $\Delta\Phi$ 时,不用去考虑线圈匝数 n 。

【典例1】闭合线圈按如图所示的方式在磁场中运动,则穿过闭合线圈的磁通量发生变化的是 ()



【思路点拨】解答本题要先明确磁感线的分布情况,然后根据线圈与磁场不同位置(或状态)确定磁通量的大小变化情况。

【规范解答】A图中,图示状态 $\Phi=0$,转到 90° 过程中 Φ 增大,因此磁通量发生变化;B图中离直导线越远磁场越弱,磁感线越稀,所以当线圈远离导线时,线圈中磁通量不断变小;C图中条形磁铁周围的磁感线空间分布与线圈平面平行,在图示



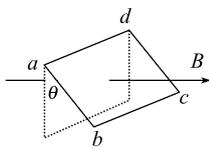
位置,线圈中的磁通量为零,在向下移动过程中,线圈的磁通量一直为零,磁通量不变;D图中,随着线圈的转动, B 与 S 都不变, B 又垂直于 S ,所以 $\Phi=BS$ 始终不变。故正确选项为A、B。

答案:A、B

【总结提升】引起磁通量变化的三种情况

- (1)磁感应强度 B 发生变化。
- (2)线圈的面积 S 发生变化。
- (3)磁感应强度 B 和线圈的面积 S 的夹角发生变化。

【变式训练】一磁感应强度为 B 的匀强磁场方向水平向右,一面积为 S 的矩形线圈 $abcd$ 如图所示放置,平面 $abcd$ 与竖直方向成 θ 角。将 $abcd$ 绕 ad 轴转 180° 角,则穿过线圈平面的磁通量的变化量为



- ()
- A. 0 B. $2BS$ C. $2BS\cos\theta$ D. $2BS\sin\theta$

拓展提升

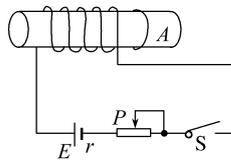
感应电流是否产生的判断

- (1)明确电路是否为闭合电路。
- (2)判断穿过回路的磁通量是否发生变化。穿过闭合电路的磁通量发生变化,大致有以下几种情况:
 - ①磁感应强度 B 不变,线圈面积 S 发生变化。
 - ②线圈面积 S 不变,磁感应强度 B 发生变化。
 - ③磁感应强度 B 和线圈面积 S 同时发生变化,此时可由 $\Delta\Phi=\Phi_1-\Phi_0$ 计算并判断磁通量是否变化。
 - ④线圈面积 S 不变,磁感应强度 B 也不变,但二者之间夹角发生变化,如线圈在磁场中转动时。

【特别提醒】磁感线的条数可用来形象地表示一个回路的磁通量大小,所以判断穿过闭合电路的磁通量是否变化时,可充分利用穿过闭合电路的磁感线的条数是否变化来判断某过程中磁通量是否变化。

【典例2】如图所示,绕在铁心上的线圈与电源、滑动变阻器和电键组成闭合回路,在铁心的右端套有一个表面绝缘的铜环A,下列各种情况中铜环A中有感应电流的是 ()

- 线圈中通以恒定的电流
- 通电过程中,使变阻器的滑片 P 做匀速移动
- 通电过程中,使变阻器的滑片 P 做加速移动
- 将电键突然断开的瞬间



【思路点拨】解答本题可按以下思路分析:



【规范解答】线圈中通以恒定的电流,铜环A中磁通量不变,铜环A中没有感应电流,A错;变阻器的滑片 P 做匀速、加速移动时,线圈中电流变化,铜环A中磁通量发生变化,铜环A中有感应电流,B、C对;将电键突然断开的瞬间,线圈中电流变为零,铜环A中磁通量发生变化,铜环A中有感应电流,D对。

答案:B、C、D

【总结提升】感应电流产生条件的两点理解

- (1)在闭合回路中是否产生感应电流,取决于穿过回路磁通量是否发生变化,而不是取决于回路有无磁通量。
- (2)闭合回路的部分导体做切割磁感线运动是引起回路磁通量变化的具体形式之一。但闭合回路的部分导体做切割磁感线运动时,不一定总会引起闭合回路的磁通量变化。

【变式训练】(2014·新课标全国卷I)在法拉第时代,下列验证“由磁产生电”设想的实验中,能观察到感应电流的是 ()

- 将绕在磁铁上的线圈与电流表组成一闭合回路,然后观察电流表的变化
- 在一通电线圈旁放置一连有电流表的闭合线圈,然后观察电流表的变化
- 将一房间内的线圈两端与相邻房间的电流表连接,往线圈中插入条形磁铁后,再到相邻房间去观察电流表的变化
- 绕在同一铁环上的两个线圈,分别接电源和电流表,在给线圈通电或断电的瞬间,观察电流表的变化

【温馨提示】本部分内容是该章的基本知识,是后面学习楞次定律和法拉第电磁感应定律的基础,经常有物理学史的考查,也有判断感应电流是否产生的考查。

积累·解题技能

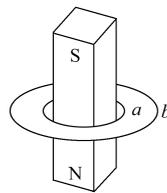
盘点真妙计 点拨思路宽

掌握解题技能是提升成绩的有效途径,本栏目探寻知识内涵,积累解题技巧,剖析疑难知识,分析常见模型,提升应考能力! 获取高分,关键在此,请认真揣摩体会!

涉及磁通量正负问题的分析方法

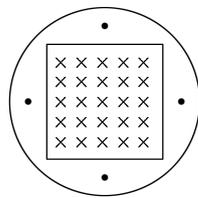
- (1)磁通量是标量,但有正负之分。磁通量的正负不代表大小,只反映磁通量是怎么穿过某一平面的。若规定向里穿过某一平面的磁通量为正,则向外为负,尤其在计算磁通量变化时更应注意。
- (2)若穿过某一平面的磁感线既有穿出又有穿进时,则穿过该平面的合磁通量为净磁感线的条数,即有效磁通量。

【案例展示】如图所示, a 、 b 是两个同平面、同心放置的金属圆环,条形磁铁穿过圆环且与两环平面垂直,则通过两圆环的磁通量 Φ_a 、 Φ_b



- ()
- A. $\Phi_a > \Phi_b$ B. $\Phi_a < \Phi_b$
C. $\Phi_a = \Phi_b$ D. 无法比较

【规范解答】条形磁铁磁场的磁感线的分布特点是:①磁铁内外磁感线的条数相同。②磁铁内外磁感线的方向相反。③磁铁外部磁感线的分布是两端密、中间疏。两个同心放置的同平面的金属圆环与磁铁垂直且磁铁在中央时,通过其中的磁感线的俯视图如图所示,穿过圆环的磁通量 $\Phi=\Phi_{\text{进}}-\Phi_{\text{出}}$,由于两圆环面积 $S_a<S_b$,两圆环的 $\Phi_{\text{进}}$ 相同,而 $\Phi_{\text{出}a}<\Phi_{\text{出}b}$,所以穿过两圆环的有效磁通量 $\Phi_a>\Phi_b$,故A正确。



答案:A

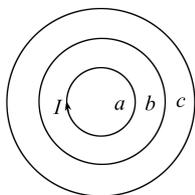
【易错分析】本题易错选B。其原因是机械地根据 $\Phi=BS$ 进行判断,没有分析条形磁铁磁感线的分布特点和不清楚穿过圆环的磁通量为有效磁通量。

检测·学业达标

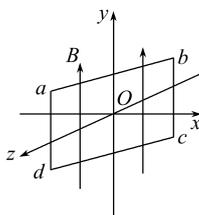
检测知不足 强化筑根基 >>>

- 在物理学史上,奥斯特首先发现电流周围存在磁场。随后,物理学家提出“磁生电”的设想。很多科学家为证实这种设想进行了大量研究。1831年发现电磁感应现象的物理学家是 ()
A. 牛顿 B. 伽利略 C. 法拉第 D. 焦耳
- 一个闭合线圈中没有感应电流产生,由此可以得出 ()
A. 线圈所在处可能有磁场
B. 穿过线圈平面的磁通量一定没有变化
C. 线圈所在处的磁场一定没有变化
D. 线圈所在处一定没有磁场

- 如图所示, a 、 b 、 c 三个闭合线圈放在同一平面内,当线圈 a 中有电流 I 通过时,它们的磁通量分别为 Φ_a 、 Φ_b 、 Φ_c ,下列说法中正确的是 ()
A. $\Phi_a<\Phi_b<\Phi_c$
B. $\Phi_a>\Phi_b>\Phi_c$
C. $\Phi_a<\Phi_c<\Phi_b$
D. $\Phi_a>\Phi_c>\Phi_b$



- 关于磁通量,下列说法中正确的是 ()
A. 磁通量不仅有大小,而且有方向,所以是矢量
B. 磁通量越大,磁感应强度越大
C. 通过某一面的磁通量为零,该处磁感应强度不一定为零
D. 磁通量就是磁感应强度
- 在如图所示的直角坐标系中,矩形导线框的两个对称轴在 y 轴和 z 轴上,匀强磁场方向与 y 轴平行,当线框分别绕 x 、 y 、 z 轴旋转时,哪种情况线框中有感应电流?



课时提能演练(一)

一课一练,日积月累,厉兵秣马,稳固提能

拓展·课外视野

采撷他山石 博览知奥义 >>>

法拉第与最原始的发电机

1831年8月29日,对法拉第来说是个终生难忘的日子。他用软铁焊接成圆环,铁环的外径是15.2 cm,厚2.2 cm,环的半边上绕3个线圈,连起来就成为1个大线圈,分开就是3个小线圈,每个线圈用7.3 m长的铜线绕成,再用棉线将导线隔开,包上棉布,使导线之间、导线与铁环之间都绝缘,环的另一边用18.3 m长的相同的铜导线、以相同的方法和同样的方向绕在上面,做成另一线圈。两个线圈的两端各相隔1.3 cm左右。后一线圈连在0.9 m远的电流计上。当法拉第将大线圈接上电池时,电流计的指针突然偏转。但是,指针晃动一下就停止了。当他打算把电池拆掉时,指针又偏转了,可是偏转的方向相反。

法拉第继续进行实验,他把电流计从后一线圈上拆下,接到

大线圈的一个线圈上,把大线圈的另外两个线圈接上电池,这时指针的偏转大多了;法拉第又把电池的两极对调,发现电流计指针反向偏转;他又多加几节电池,重复上面实验,指针偏转更大……法拉第并不满足于这些实验取得的成就,他坚信磁能够转化为电。几星期后,他抛开电池,在一个纸做的空心圆筒上,用67 m长的铜线分层绕了8个线圈,再连成1个大线圈,并把它接到电流计上。当一块条形磁铁插进空心圆筒时,电流计指针摆动,“转磁为电”的理想终于实现了。

1831年10月28日,法拉第将一铜盘放在永久磁铁的两磁极之间,从铜盘的轴心和边缘引出两根导线,转动铜盘时,两根导线上产生稳恒电流。这就是最原始的发电机。它的重大意义是不言而喻的,发电机的发明使人类从蒸汽机时代进入电气时代。



1.2 探究感应电流的方向

目标定位

1. 通过实验探究归纳出判断感应电流方向的规律——楞次定律。
2. 正确理解楞次定律的内容及其本质。
3. 能够熟练运用楞次定律和右手定则判断感应电流的方向。

核心提示

- 重点:** 1. 通过探究实验总结楞次定律。
2. 利用右手定则和楞次定律判断感应电流的方向。
- 难点:** 利用右手定则和楞次定律判断感应电流的方向。

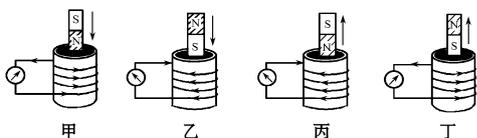
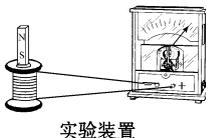
预习·基础知识

主干精梳理 基础全掌握 >>>

一、探究感应电流的方向

1. 实验探究

将螺线管与电流计组成闭合回路,分别将条形磁铁的N极、S极插入、抽出线圈,如图所示,记录感应电流方向。



2. 实验记录

图号	磁场方向	感应电流方向(俯视)	感应电流的磁场方向	归纳总结
甲		逆时针		感应电流的磁场_____磁通量的增加
乙		顺时针		
丙		顺时针		感应电流的磁场_____磁通量的减少
丁		逆时针		

3. 实验结论

- (1) 当穿过线圈的磁通量增加时,感应电流的磁场与原磁场的方向_____。
- (2) 当穿过线圈的磁通量减少时,感应电流的磁场与原磁场的方向_____。

想一想

探究感应电流方向的方法步骤是什么?

二、楞次定律

感应电流的磁场总要_____引起感应电流的_____的变化。

判一判

- (1) 由楞次定律知,感应电流的磁场一定与引起感应电流的磁场方向相反。()
- (2) 电路不闭合,穿过回路的磁通量变化时,也会产生“阻碍”作用。()
- (3) 感应电流的磁场一定阻碍引起感应电流的磁场的磁通量的变化。()

三、右手定则

1. 内容

伸开右手,使拇指跟其余四指_____,并且都跟手掌在一个平面内。让_____垂直从手心进入,拇指指向导体运动的方向,其余四指所指的方向就是_____的方向。

2. 适用情况

适用于闭合电路部分导体_____磁感线产生感应电流的情况。

想一想 如何选择右手定则和楞次定律?

归纳·核心要点

互动助探究 要点速突破 >>>

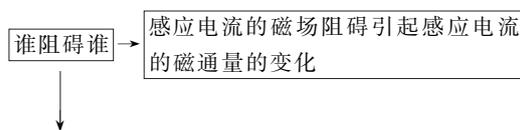
楞次定律的理解和应用

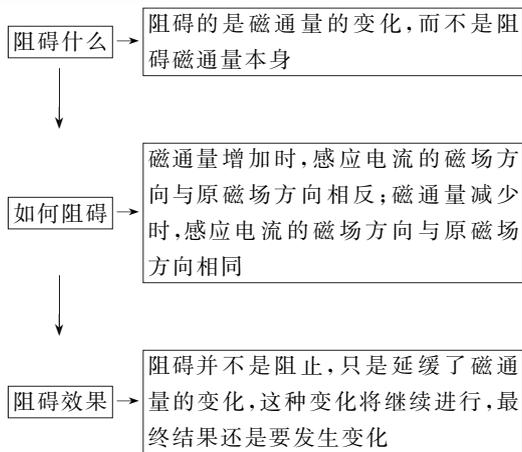
深理解

1. 因果关系

闭合导体回路中磁通量的变化是因,产生感应电流是果;原因产生结果,结果又反过来影响原因。

2. “阻碍”的理解





3. 楞次定律的另一种等价表述

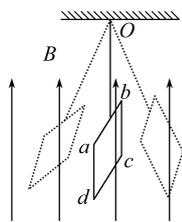
感应电流的效果总是阻碍引起感应电流的原因。

4. 四种常见“效果”的表现

- (1)阻碍原磁通量的变化(增反减同)。
- (2)阻碍导体的相对运动(来拒去留)。
- (3)通过改变线圈面积来“反抗”变化(增缩减扩)。
- (4)阻碍原电流的变化(自感现象将在后面学习到)。

特别提醒!“阻碍”并不意味着“相反”。在理解楞次定律时,有些同学错误地把“阻碍”作用认为感应电流产生磁场的方向与原磁场方向相反,事实上,它们可能同向,也可能反向,需根据磁通量的变化情况判断。

【典例 1】如图所示,在磁感应强度大小为 B 、方向竖直向上的匀强磁场中,有一质量为 m 、阻值为 R 的闭合矩形金属线框 $abcd$ 用绝缘轻质细杆悬挂在 O 点,并可绕 O 点摆动。金属线框从右侧某一位置由静止开始释放,在摆动到左侧最高点的过程中,细杆和金属线框平面始终处于同一平面,且垂直纸面。则线框中感应电流的方向是 ()



- $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$
- $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow d$
- 先是 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow d$, 后是 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$
- 先是 $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d \rightarrow a$, 后是 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow d$

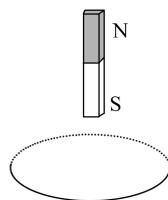
【思路点拨】解答本题应注意两个关键点:

- 关键点**
- (1)穿过线圈的磁通量在不同阶段的变化情况不同;
 - (2)前后两个过程磁感线分别从正、反面穿入线框。

【规范解答】线框从右侧开始由静止释放,穿过线框平面的磁通量逐渐减少,由楞次定律可得感应电流的磁场方向与原磁场方向相同,根据安培定则,感应电流的方向为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow d$;过 O 点后线框继续向左摆动过程中,磁感线从反面穿入线框,穿过线框平面的磁通量逐渐增大,由楞次定律可得感应电流的磁场方向与原磁场方向相反,由安培定则可知感应电流的方向仍为 $d \rightarrow c \rightarrow b \rightarrow a \rightarrow d$,故 B 选项正确。

答案:B

【变式训练】(2014·海南高考)如图,在一水平、固定的闭合导体圆环上方,有一条形磁铁(N极朝上,S极朝下)由静止开始下落,磁铁从圆环中穿过且不与圆环接触。关于圆环中感应电流的方向(从上向下看),下列说法正确的是 ()



- 总是顺时针
- 总是逆时针
- 先顺时针后逆时针
- 先逆时针后顺时针

楞次定律、右手定则

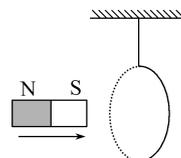
拓展

楞次定律与右手定则的区别及联系。

规律		楞次定律	右手定则
比较内容	研究对象	整个闭合回路	闭合回路的一部分,即做切割磁感线运动的导体
	适用范围	各种电磁感应现象	只适用于导体在磁场中做切割磁感线运动的情况
	应用	用于磁感应强度 B 随时间变化而产生的电磁感应现象较方便	用于导体切割磁感线产生的电磁感应现象较方便
联系		右手定则是楞次定律的特例	

特别提醒!判断感应电流方向时可根据具体情况选取楞次定律或右手定则。

【典例 2】如图所示,当磁铁突然向铜环运动时,铜环的运动情况是 ()



- 向右运动
- 向左运动
- 静止不动
- 不能判定

【思路点拨】解答该题时应注意以下三点:

- 关键点**
- (1)根据楞次定律判断感应电流的方向。
 - (2)运用左手定则判断所受安培力方向。
 - (3)也可根据楞次定律的阻碍效果得出结论。

【规范解答】解法一:电流元受力分析法。

如图所示,当磁铁向环运动时,穿过铜环的磁通量增加,由楞次定律判断出铜环的感应电流的磁场方向与原磁场的方向相反,即向右,根据安培定则可判断出感应电流方向,从左侧看为顺时针方向,把铜环的电流等效为多段直线电流元,取上、下两小段电流元进行研究,由左手定则判断出两段电流元的受力,由此可判断整个铜环所受合力向右。故 A 选项正确。

解法二:阻碍相对运动法。

产生磁场的物体与闭合线圈之间的相互作用力可概括为四个字“来拒去留”。磁铁向右运动时,铜环产生的感应电流总是阻碍磁铁与导体间的相对运动,则磁铁和铜环间有排斥作用。

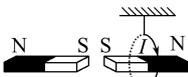


故 A 正确。

解法三：等效法。

如图所示

磁铁向右运动，使铜环产生的感应电流可等效为条形磁铁，而两磁铁有排斥作用。故 A 正确。

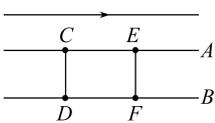


【总结提升】电磁感应现象中导体运动问题的分析方法

- (1) 确定所研究的闭合电路；
- (2) 明确闭合电路所包围的区域磁场的方向及磁场的变化情况；
- (3) 确定穿过闭合电路的磁通量的变化或导体是否切割磁感线；
- (4) 根据楞次定律或右手定则判定感应电流的方向；
- (5) 根据左手定则或“来拒去留”“增反减扩”等判断导体所受安培力及运动的方向。

【变式训练】位于载流长直导线近旁

的两根平行铁轨 A 和 B，与长直导线平行且在同一水平面上，在铁轨 A、B 上套有两段可以自由滑动的导体 CD 和 EF，如图所示，若用力使导体 EF 向右运动，则导体 CD 将 ()



- A. 保持不动 B. 向右运动
C. 向左运动 D. 先向右运动，后向左运动

楞次定律与能量守恒

拓展提升

1. 电磁感应中的能量转化

可以从以下三方面理解：

- (1) 电磁感应现象中，感应电流的能量(电能)不能无中生有，只能从其他形式的能量转化过来，外力克服磁场力做功，正是这个转化的量度。
- (2) 当条形磁铁靠近线圈时，线圈中感应电流产生的磁场对条形磁铁产生斥力，阻碍条形磁铁的靠近，必须有外力克服这个斥力做功，它才能移近线圈。
- (3) 当条形磁铁离开线圈时，感应电流产生的磁场对磁铁产生引力，阻碍条形磁铁的离开；必须有外力克服引力做功它才能远离线圈。

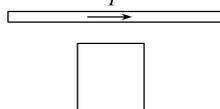
2. 电磁感应中的能量守恒

“阻碍”的结果，是实现了其他形式的能向电能的转化，如果没有“阻碍”，将违背能量守恒定律，可以得出总能量增加的错误结论。所以楞次定律体现了在电磁感应现象中能的转化与守恒，能量守恒定律也要求感应电流的方向服从楞次定律。

【特别提醒】(1) 电磁感应过程中克服安培力做功，是将其他形式的能转化成电能的过程；

(2) 楞次定律就是电磁感应中能量守恒定律的反映。

【典例 3】如图所示，固定的水平长直导线中通有电流 I ，矩形线框与导线在同一竖直平面内，且一边与导线平行，线框由静止释放，在下落过程中 ()



- A. 穿过线框的磁通量保持不变
B. 线框中感应电流方向保持不变
C. 线框所受安培力的合力为零
D. 线框的机械能不断增大

【思路点拨】解答本题时注意理解以下三点：

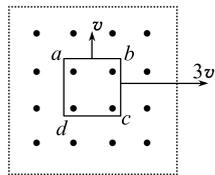
关键点

- (1) 通电直导线磁场的分布特点。
- (2) 线圈下落过程中磁通量的变化情况。
- (3) 线圈下落过程中的受力特点。

【规范解答】线框下落过程中距离直导线越来越远，磁场越来越弱，但磁场方向不变，所以磁通量越来越小，根据楞次定律可知感应电流的方向不变，A 错、B 对。线框左边和右边所受安培力总是大小相等，方向相反，但上下两边磁场强弱不同，安培力大小不同，合力不为零，C 错。下落过程中机械能越来越小，D 错。

答案：B

【变式训练】如图所示，垂直纸面的正方形匀强磁场区域内，有一位于纸面的、电阻均匀的正方形导体框 $abcd$ ，现将导体框分别朝两个方向以 v 、 $3v$ 速度匀速拉出磁场，不计导体框重力的影响，则导体框从两个方向移出磁场的两过程中 ()



- A. 导体框中产生的感应电流方向相同
B. 导体框中产生的焦耳热相同
C. 导体框 ad 边两端电势差相同
D. 通过导体框截面的电荷量相同

【温馨提示】本节内容是分析电磁感应问题的基础知识，也是核心知识；在考试中既有单独考查的试题，也有与法拉第电磁感应定律结合的综合题目，应该掌握对这类题目的分析方法。

积累·解题技能

盘点真妙计 点拨思路宽

应用楞次定律判断导体运动问题的技巧

在电磁感应中判断导体的运动常有以下两种方法：

(1) 程序法。

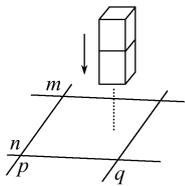
首先根据楞次定律判断出感应电流的方向；然后根据感应电流处原磁场分布情况，运用左手定则判断出导体所受的安培力方向，最终确定导体的运动情况。

(2) 楞次定律广泛含义法。

感应电流的效果总是要反抗产生感应电流的原因，表现为：

- ① 阻碍导体的相对运动(来拒去留)。
 - ② 通过改变线圈面积来“反抗”(扩大或缩小)。
- 两种方法中，后一种要灵活快速准确。

【案例展示】如图所示，光滑固定导轨 m 、 n 水平放置，两根导体棒 p 、 q 平行放于导轨上，形成一个闭合回路。当一条形磁铁从高处下落接近回路时 ()



- A. p, q 将互相靠拢 B. p, q 将互相远离
C. 磁铁的加速度仍为 g D. 磁铁的加速度小于 g

【规范解答】方法一:假设磁铁的下端为 N 极,穿过回路的磁通量增加,根据楞次定律可判断出感应电流的磁场方向向上,根据安培定则可判断出回路中感应电流的方向为逆时针方向。再根据左手定则可判断 p, q 所受的安培力的方向,安培力使 p, q 相互靠拢。由于回路所受的安培力的合力向下,根据牛顿第三定律知,磁铁将受到向上的反作用力,从而加速度

小于 g 。若磁铁的下端为 S 极,根据类似的分析可以得出相同的结果,所以 A、D 选项正确。

方法二:根据楞次定律的另一表述——感应电流的效果总是要反抗产生感应电流的原因,本题中的“原因”是回路中的磁通量增加,归根结底是磁铁靠近回路,“效果”便是阻碍磁通量的增加和磁铁的靠近,所以 p, q 将相互靠近且磁铁的加速度小于 g 。故选项 A、D 正确。

答案:A、D

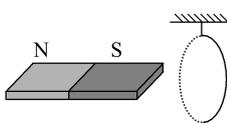
【名师点评】本例列出了判断感应电流受力及其导体运动方向的方法,并从多个角度深刻理解楞次定律中阻碍的含义。虽然方法不同,但本质都是楞次定律,只有领会其精髓,才能运用它进行正确的判断。深刻理解楞次定律中“阻碍”的含义是快速分析该类问题的前提。

检测·学业达标

检测知不足 强化筑根基 >>>

1. 关于决定感应电流方向的因素,以下说法中正确的是 ()
A. 回路所包围的引起感应电流的磁场的方向
B. 回路外磁场的方向
C. 回路所包围的磁通量的大小
D. 回路所包围的磁通量的变化情况

2. 如图所示,当条形磁铁做下列运动时,线圈中的感应电流方向应是(从左向右看) ()

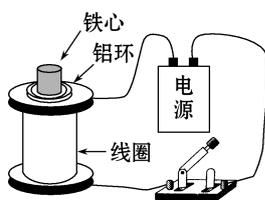


- A. 磁铁靠近线圈时,电流方向是逆时针的
B. 磁铁远离线圈时,电流方向是顺时针的
C. 磁铁向上平动时,电流方向是逆时针的
D. 磁铁向上平动时,电流方向是顺时针的

3. 关于楞次定律,下列说法中正确的是 ()
A. 感应电流的磁场总是阻碍原磁场的增强
B. 感应电流的磁场总是阻碍原磁场的减弱

- C. 感应电流的磁场总是阻碍原磁场的变化
D. 感应电流的磁场总是阻碍原磁通量的变化

4. 绕有线圈的铁心直立在水平桌面上,铁心上套着一个铝环,线圈与电源、电键相连,如图所示。线圈上端与电源正极相连,闭合电键的瞬间,铝环向上跳起。则下列说法中正确的是 ()



- A. 若保持电键闭合,则铝环不断升高
B. 若保持电键闭合,则铝环停留在某一高度
C. 若保持电键闭合,则铝环跳起到某一高度后将回落
D. 如果电源的正、负极对调,观察到的现象不变

课时提能演练(二)

一课一练,日积月累,厉兵秣马,稳固提能

拓展·课外视野

采撷他山石 博览知奥义 >>>

楞次简介

楞次,俄国物理学家。1804年2月24日生于德尔帕特(今爱沙尼亚共和国的塔尔都)。1820年入德尔帕特大学;在大学二年级时由校长推荐参加1823~1826年“企业号”单桅炮舰的全球考察旅行;他设计了海水测深仪等仪器并卓越地完成了海上物理考察,1834年起当选为科学院院士;1836~1865年任彼得堡大学教授,1840年任数理系主任,1863年任校长。其间还在海军和师范学院任教。1865年2月10日在罗马逝世。

楞次从青年时代就开始研究电磁感应现象。1831年法拉第发现了电磁感应现象后,当时已有许多便于记忆的“左手定则”“右手定则”“右手螺旋法则”等经验性规则,但是并没有给出确定感生电流方向的一般法则。1833年楞次在总结了安培的电动力

学与法拉第的电磁感应现象后,发现了确定感生电流方向的定律——楞次定律。这一结果于1834年在《物理学和化学年鉴》上发表。楞次定律说明电磁现象也遵循能量守恒定律。

1842年楞次独立于焦耳并更为精确地建立了电流与其所产生的热量的关系,后被称为焦耳定律或焦耳——楞次定律。他还研究并定量地比较了不同金属的电阻率及电阻率与温度间的关系。

在电工技术、地球物理与电化学方面他也做了大量工作。

1845年在他的倡导与协助下成立了俄国地理学会。

作为一名优秀教师,他还培养出了一批著名的俄国物理学家。



1.3 探究感应电动势的大小

目标定位

1. 知道感应电动势的概念。
2. 理解和掌握确定感应电动势大小的一般规律——法拉第电磁感应定律。并能够运用法拉第电磁感应定律定量计算感应电动势的大小。
3. 能够运用 $E=Blv$ 或 $E=Blv\sin\theta$ 计算导体切割磁感线时的感应电动势。
4. 知道感生电动势和动生电动势。

核心提示

- 重点:** 1. 计算感应电动势的大小。
2. 分析、区别平均感应电动势、瞬时感应电动势。
- 难点:** 1. 区别磁通量、磁通量的变化量、磁通量的变化率。
2. 右手定则与左手定则的应用与区别。

预习·基础知识

主干精梳理 基础全掌握 >>>

一、感应电动势

	感应电动势	感应电流
概念	中产生的电动势	中产生的电流
条件	磁通量有变化	磁通量有变化且_____
大小	与磁通量变化快慢有关	与磁通量变化快慢及回路的电阻有关
两者联系	感应电动势的产生与电路是否闭合、电路如何组成_____, _____比_____更能反映电磁感应现象的本质	

二、法拉第电磁感应定律

1. 内容

电路中感应电动势的大小与穿过这一电路的_____成正比。

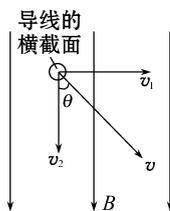
2. 表达式

对单匝线圈 $E=_____$, 对 n 匝线圈 $E=_____$ 。

3. 导线切割磁感线时的感应电动势

(1) 导线垂直切割磁感线时, $E=_____$, 此式常用来计算瞬时感应电动势的大小。

(2) 导线不垂直切割磁感线时, 即 v 与 B 有一夹角 θ , 如图所示. 此时可将导线的速度 v 向垂直于磁感线和平行于磁感线两个方向分解, 则分速度 $v_2=_____$ 不使导线切割磁感线, 使导线切割磁感线的分速度 $v_1=_____$, 从而使导线产生的感应电动势为 $E=_____ = _____$ 。



判一判

- (1) 在电磁感应现象中, 有感应电动势, 就一定有感应电流。 ()
- (2) 穿过某电路的磁通量变化量越大, 产生的感应电动势就越大。 ()
- (3) 闭合电路置于磁场中, 当磁感应强度很大时, 感应电动势可能为零; 当磁感应强度为零时, 感应电动势可能很大。 ()

归纳·核心要点

互动探究 要点速突破 >>>

磁通量、磁通量的变化量、磁通量的变化率的比较

对比分析

物理量	单位	物理意义	计算公式
磁通量 Φ	Wb	表示某时刻或某位置时穿过某一面积的磁感线条数的多少	$\Phi = B \cdot S_{\perp}$
磁通量的变化量 $\Delta\Phi$	Wb	表示在某一过程中穿过某一面积的磁通量变化的多少	$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1$
磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	Wb/s	表示穿过某一面积的磁通量变化的快慢	$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \begin{cases} B \cdot \frac{\Delta S}{\Delta t} \\ \frac{\Delta B}{\Delta t} \cdot S \end{cases}$

特别提醒! (1) Φ 、 $\Delta\Phi$ 、 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 均与线圈匝数无关。

(2) 磁通量和磁通量的变化率的大小没有直接关系, Φ 很大, $\Delta\Phi$ 、 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可能很小; $\Phi=0$ 时, $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可能不为零。

(3) 磁通量的变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 等于 $\Phi-t$ 图像上某点切线的斜率。

【典例 1】 与磁感应强度 $B=0.8 \text{ T}$ 垂直的线圈面积为 0.05 m^2 , 线圈绕有 50 匝, 线圈的磁通量是多少? 若在 0.5 s 内线圈位置转过 53° , 磁通量的平均变化率是多少? 线圈中平均感应电动势的大小是多少?

【思路点拨】 解答本题时可按以下思路分析:

$$\begin{matrix} \Phi_1 = BS \\ \Phi_2 = BS\cos\theta \end{matrix} \rightarrow \Delta\Phi = |\Phi_2 - \Phi_1| \rightarrow \text{由 } \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ 求变化率} \rightarrow$$

$$\text{由 } E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ 求 } E$$

【规范解答】 由 $\Phi=BS$ 得 $\Phi_1=BS=0.8 \times 0.05 \text{ Wb}=0.04 \text{ Wb}$
磁通量的变化量是由线圈有效面积的变化引起的,
 $\Phi_2=BS\cos\theta=0.8 \times 0.05 \times 0.6 \text{ Wb}=0.024 \text{ Wb}$
则 $\Delta\Phi=|\Phi_2-\Phi_1|=0.016 \text{ Wb}$

磁通量平均变化率 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=0.032 \text{ Wb/s}$

根据法拉第电磁感应定律得

平均感应电动势的大小 $E=n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}=1.6 \text{ V}$

答案: 0.04 Wb 0.032 Wb/s 1.6 V

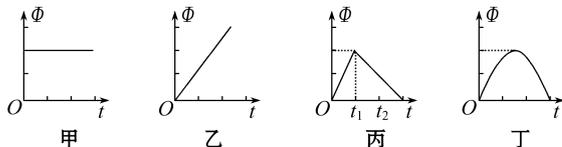
【总结提升】 计算 $\Delta\Phi$ 的三种方法

(1) 磁通量的变化是由面积变化引起的: $\Delta\Phi=B \cdot \Delta S$ 。

(2) 磁通量的变化是由磁场变化引起的: $\Delta\Phi=\Delta B \cdot S$ 。

(3) 磁通量的变化是由面积和磁感应强度间的角度变化引起的, 根据定义求: $\Delta\Phi=\Phi_{\text{末}}-\Phi_{\text{初}}$ 。

【变式训练】 图中甲~丁所示分别为穿过某一闭合回路的磁通量 Φ 随时间 t 变化的图像, 关于回路中产生的感应电动势的下列论述, 正确的是 ()



- A. 图甲中回路产生的感应电动势恒定不变
B. 图乙中回路产生的感应电动势一直在变大
C. 图丙中回路在 $0 \sim t_1$ 时间内产生的感应电动势小于在 $t_1 \sim t_2$ 时间内产生的感应电动势
D. 图丁中回路产生的感应电动势先变小再变大

对法拉第电磁感应定律的理解

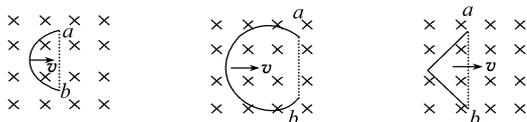
深化理解

1. $E=Blv$ 的“三性”

(1) 正交性: 该公式可看成法拉第电磁感应定律的一个推论, 除了磁场是匀强磁场外, 还需要 B 、 l 、 v 三个量方向相互垂直时, $E=Blv$; 如有不垂直的情况, 应通过正交分解取其垂直分量代入, 当有任意两个量的方向平行时, $E=0$ 。

(2) 瞬时效应性: 通常用来求导体运动速度为 v 时的瞬时电动势, 若 v 为平均速度, 则 E 为平均电动势。

(3) 有效性: 式中的 l 应理解为导体切割磁感线时的有效长度。如图所示, 导体切割磁感线的情况应取与 B 和 v 垂直的等效直线长度, 即等于 a 、 b 连线的长度。



2. 公式 $E=n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 与 $E=Blv\sin\theta$ 的区别与联系

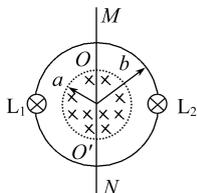
		$E=n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$	$E=Blv\sin\theta$
区别	研究对象	某个回路	回路中做切割磁感线运动的那部分导体
	研究内容	(1) 求的是 Δt 时间内的平均感应电动势, E 与某段时间或某个过程对应 (2) 当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时, E 为瞬时感应电动势	(1) 若 v 为瞬时速度, 公式求的是瞬时感应电动势 (2) 若 v 为平均速度, 公式求的是平均感应电动势 (3) 当 B 、 l 、 v 三者均不变时, 平均感应电动势与瞬时感应电动势相等
适用范围		对任何电路普遍适用	只适用于导体切割磁感线运动的情况
联系		(1) $E=Blv\sin\theta$ 可由 $E=n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 在一定条件下推导出来 (2) 整个回路的感应电动势为零时, 回路中某段导体的感应电动势不一定为零	



特别提醒! 用 $E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 求平均感应电动势方便些; 而用 $E=$

$Blv\sin\theta$ 求瞬时感应电动势方便些。

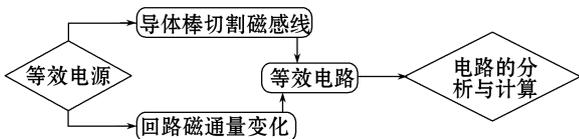
【典例 2】 如图所示, 半径为 a 的圆形区域内有匀强磁场, 磁感应强度 $B=0.2\text{ T}$, 磁场方向垂直纸面向里, 半径为 b 的金属圆环与磁场同心放置, 磁场与环面垂直, 其中 $a=0.4\text{ m}$, $b=0.6\text{ m}$ 。金属环上分别接有灯 L_1 、 L_2 , 两灯的电阻均为 $R=2\ \Omega$ 。一金属棒 MN 与金属环接触良好, 棒与环的电阻均不计。



(1) 若棒以 $v_0=5\text{ m/s}$ 的速率在环上向右匀速滑动, 求棒滑过圆环直径 OO' 的瞬间, MN 中的电动势和流过 L_1 的电流。

(2) 撤去中间的金属棒 MN , 将右面的半圆环 OL_2O' 以 OO' 为轴向上翻转 90° , 若此时开始磁场随时间均匀变化, 其变化率为 $\frac{\Delta B}{\Delta t}=(\frac{4}{\pi})\text{ T/s}$, 求磁场变化的过程中 L_1 的功率。

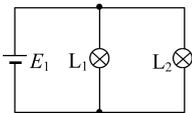
【思路点拨】 解答本题时可按以下思路分析:



【规范解答】 (1) 棒滑过圆环直径 OO' 的瞬间, MN 中的电动势

$$E_1 = B \times 2av_0 = 0.2 \times 0.8 \times 5\text{ V} = 0.8\text{ V}$$

等效电路如图所示,



流过灯 L_1 的电流

$$I_1 = \frac{E_1}{R} = \frac{0.8}{2}\text{ A} = 0.4\text{ A}.$$

(2) 撤去中间的金属棒 MN , 将右面的半圆环 OL_2O' 以 OO' 为轴向上翻转 90° , 半圆环 OL_1O' 产生的电动势相当于电源, 灯 L_2 为外电路, 等效电路如图, 感应电动势

$$E_2 = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{1}{2}\pi a^2 \frac{\Delta B}{\Delta t} = 0.32\text{ V}$$

$$L_1 \text{ 的功率 } P_1 = \frac{(\frac{1}{2}E_2)^2}{R} = 1.28 \times 10^{-2}\text{ W}$$

答案: (1) 0.8 V 0.4 A (2) $1.28 \times 10^{-2}\text{ W}$

【总结提升】 电磁感应中电路问题的分析方法

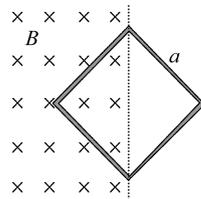
(1) 明确电路结构, 分清内、外电路。

(2) 根据产生感应电动势的方式计算感应电动势的大小, 如果是磁场或回路有效面积变化, 由 $E=n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 计算; 如果是导体切割磁感线, 由 $E=Blv$ 计算。

(3) 画出等效电路。

(4) 根据欧姆定律和串并联电路特点进行电路分析与计算。

【变式训练】 (2014·江苏高考) 如图所示, 一正方形线圈的匝数为 n , 边长为 a , 线圈平面与匀强磁场垂直, 且一半处在磁场中。在 Δt 时间内, 磁感应强度的方向不变, 大小由 B 均匀地增大到 $2B$ 。在此过程中, 线圈中产生的感应电动势为 ()



- A. $\frac{Ba^2}{2\Delta t}$ B. $\frac{nBa^2}{2\Delta t}$ C. $\frac{nBa^2}{\Delta t}$ D. $\frac{2nBa^2}{\Delta t}$

【温馨提示】 本节内容是电磁感应问题的核心知识; 是考试中必考的问题, 既有选择题又有计算题; 既可单独考查, 又可与前面的动力学知识、能量守恒知识、电路知识等结合起来综合考查。

积累·解题技能

盘点真妙计 点拨思路宽 >>>

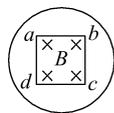
关于 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 应该注意的几个问题

(1) $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 与 Φ 、 $\Delta\Phi$ 没有直接关系, Φ 很大时, $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可能很小, 也可能很大; $\Phi=0$ 时, $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 可能最大。

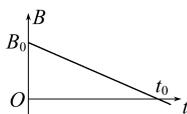
(2) $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ 与线圈匝数无关, 但感应电动势与匝数有关。

(3) $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S$ 中的 S 是指磁场区域的有效面积。

【案例展示】 半径为 r 、电阻为 R 的 n 匝圆形线圈在边长为 l 的正方形 $abcd$ 之外, 匀强磁场充满并垂直穿过该正方形区域, 如图甲所示。当磁场随时间的变化规律如图乙所示时, 则穿过圆形线圈磁通量的变化率为 _____, t_0 时刻线圈产生的感应电流为 _____。



甲



乙

【规范解答】 磁通量的变化率为 $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{\Delta B}{\Delta t} S = \frac{B_0}{t_0} l^2$; 根据法拉第

电磁感应定律得线圈中的感应电动势 $E = n \frac{\Delta B}{\Delta t} S = n \frac{B_0}{t_0} l^2$, 再

根据闭合电路欧姆定律得感应电流 $I = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t R} = n \frac{B_0 l^2}{t_0 R}$ 。

答案: $\frac{B_0}{t_0} l^2$ $n \frac{B_0 l^2}{t_0 R}$

