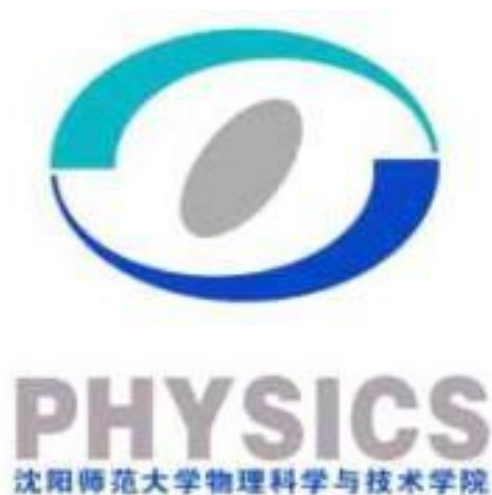


课程教案



课程名称 电磁学

课程代码 08200080

学时学分 72 学 时/4 学 分

授课年级 2022 级 物理学（师范）专业

授课教师 毋 妍 妍

授课单位 物 理 科 学 与 技 术 学 院

2022 年 8 月

课程基本信息

课程名称	电磁学		课程编号	08200080	
课程性质	专业必修课		学 分	4 学分	
授课对象	物理学专业				
开课院系	物理科学与技术学院			教研室主任：陈秀艳	教学院长：李柳
教师信息	主讲教师：毋妍妍			考核方式：闭卷笔试、平时考核相结合	
课时信息	上课周数：15 周	周学时：5 学时	学 时：72 学时	实验学时：0 学时	
教材	梁灿彬. 电磁学. （第四版）.高等教育出版社				
参考教材 与资料	教 材： [1].姚启钧.《电磁学》（第三版）[M].北京:高等教育出版社,2008. [2].赵凯华.《电磁学》（第四版）[M].北京:高等教育出版社,2018. 参考资源： [1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org) [3] 电磁学_西安交通大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)				
课程衔接	预修课程：力学，高等数学 后续课程：数学物理方法，电动力学				
学情分析	<p>本课程是面向我校物理学专业本科一年级学生开放的一门专业必修课。物理学专业学生有较好的物理基础，且大部分学生对课程表现出浓厚的兴趣。电磁学内容较为抽象，难以理解，尤其是在数学模型与物理现象之间的联系上缺乏直观理解。且电磁学中涉及大量的数学工具（如微积分、线性代数等），一些学生的数学基础较薄弱，难以有效应用这些工具解决物理问题。</p> <p>根据学情分析和毕业要求，教学将加强概念理解、适当穿插数学工具的应用教学，以期能帮助学生更好地掌握电磁学的核心内容，为未来的学习打下坚实的基础。</p>				
课程目标	<p>《电磁学》为本科物理学专业的专业必修课，定位为专业基础课。通过本课程的学习，学生在获得相应学分的同时，将达成以下课程目标：</p> <p>课程目标 1： 了解电磁学基本理论在生产生活和前沿科技中的广泛应用，拓展科学视野，激发学生爱国情怀，培养科学研究精神，发展学生文献查阅能力、自主学习能力、创新思维能力和创新创业意识。通过电磁学理论在三峡水利等国家重大工程中的应用，培养学生认识我们国家制度的优越性。</p> <p>课程目标 2： 理解静电场的基本基本规律，掌握有导体时的静电场和有电介质时的静电场基本概念和基本规律，具有分析和解决静电场问题的能力。能运用静电场的概念、定</p>				

	<p>理、定律和基尔霍夫定律分析和计算恒定电流和电路中的电势、电压和电流等物理量。掌握毕奥-萨伐尔定律和安培环路定理，会分析计算带电粒子在磁场中运动和通电导体在磁场中的受力。掌握电磁感应定律，会计算动生电动势和感生电动势。理解麦克斯韦方程组，会用波动方程计算电磁波的传播。</p> <p>课程目标 3：理解静电场的基本概念、定理和定律。能运用基尔霍夫定律分析和计算恒定电流和电路中的电势、电压和电流等物理量。理解法拉第电磁感应定律和楞次定律。理解麦克斯韦方程组。扩展相应的中学物理知识，能够独立解决中学物理电磁学相关问题，能用更高的物理观点理解中学物理电磁学内容，认识要想教好中学物理，必须学好大学物理，为今后从事中学物理教学工作打下坚实的基础。</p> <p>课程目标 4：了解《电磁学》的发展历史。熟悉电磁学中研究物理概念、定理、定律的一般方法，掌握用电磁学的概念、定理和定律解决具体问题。培养严密的逻辑思维能力、分析和处理实际问题的能力，初步培养用高等数学知识解决电磁学问题的能力。通过电磁场、恒定电流、恒定电路和电磁感应基本定理和定律的应用，动手实验，使学生初步体验团队合作交流，建立进行良好沟通交流的意识，培养团队协作精神。</p>				
考核方式	<p>总评成绩=过程性考核成绩(占总成绩的 40%)+ 期末笔试试卷成绩(占总成绩的 60%)</p> <p>过程性考核构成：课堂参与(占总成绩的 10%)+ 阶段测验(占总成绩的 12%)+ 作业成绩(占总成绩的 18%)</p> <p>注：课堂参与：课堂提问及表现各占总成绩的 5%；</p> <p>作业成绩：每学期 2 项作业，作业 1 占总成绩的 12%，作业 2 占总成绩的 6%，共占总成绩的 18%。</p>				
章次	内容	支撑课程目标	总课时	理论课时	实践课时
第一章	静电场的基本规律	课程目标 1、2、3、4	10	10	0
第二章	有导体时的静电场	课程目标 1、2、3、4	8	8	0
第三章	静电场中的电介质	课程目标 1、2	10	10	0
第四章	恒定电流和电路	课程目标 1、2、3、4	10	10	0
第五章	恒定电流的磁场	课程目标 1、2、3、4	10	10	0
第六章	电磁感应与暂态过程	课程目标 1、2、3、4	14	14	0
第七章	磁介质	课程目标 1、2	6	6	0
第八章	时变电磁场和电磁波	课程目标 1、2、3、4	4	4	0

《电磁学课程》教案

授课课题	第 1 讲 § 1.1 电荷 § 1.2 库仑定律
教学目标	<p>知识目标： 1.了解电荷的基本性质及其存在形式； 2. 掌握库仑定律和叠加原理。</p> <p>能力目标： 1.能够观察日常生活中与电荷相关的现象（如摩擦起电、静电吸引）并进行准确描述； 2. 能够利用库仑定律进行计算，解决电荷间相互作用力的相关问题，并能够合理解释计算结果； 3. 能够对库仑定律的适用范围进行讨论。</p> <p>素养目标： 1.通过静电现象中的“因果联系”和自然规律，培养学生的辩证思维能力，引导学生认识到自然现象的背后蕴含着科学原理，从而养成严谨的科学态度。 2.通过库仑定律的学习，培养学生逻辑推理能力和解决复杂问题的能力。</p>
教学重难点	<p>教学重点： 1.了解电荷及其相互作用的基本属性； 2. 掌握库仑定律、电荷的单位和叠加原理。</p> <p>教学难点： 1.理解电荷量子化和守恒定律，四种基本相互作用介绍； 2.理解库仑定律的矢量形式，叠加原理。</p>
教学方法	讲授法、讨论法
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台
教学时数	2 学时
教 学 过 程	
教学内容	
教学活动	
<p>课程总体介绍</p> <p>向同学们介绍电磁学的学习内容，即电荷及运动电荷产生电场和磁场的规律；电磁场对电荷及运动电荷的作用；电场和磁场的相互联系；电磁场对物质的各种效应。</p> <p>一、新课导入</p> <p>回顾中学学习的静电现象知识，并回答以下问题：</p> <p>（1）为什么我们在拿掉毛衣时经常会听到静电的声音？</p> <p>（2）为什么塑料袋、气球等物体会因为摩擦而吸引到头发或者小纸屑呢？</p> <p>（3）摩擦起电的实质是什么？</p>	
<p>介绍课程研究对象、主要内容及重难点。</p> <p>问题法导入新课</p>	

二、新课讲解

1. 电荷

(1) 电荷的种类及相互作用

种类：正电荷、负电荷

作用：同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引

(一般地说：使物体带电就是使它获得多余的电子或从它取出一些电子)

法国人，王家花园管家，**杜菲**发现相互排斥作用物带同种电，相互吸引物带不同种电，提出玻璃电、树脂电（琥珀上产生的），改进了吉尔伯特的验电器，成为现在所用的样子

美国人**富兰克林**利用刚从欧洲船载邮来的莱顿瓶做实验，提出了**正电**、**负电**的概念，电荷守恒定律。

正电——丝绸摩擦过的玻璃棒上带正电

负电——毛皮摩擦过的橡胶棒上带负电

风筝实验证实了闪电式放电现象，天电地电是一样的。

制成了避雷针。



荷兰莱顿大学**马森布罗克**和他的助手发现了盛水的玻璃瓶能储电，法国人**诺莱特**制成了莱顿瓶。
法国人**诺莱特**在欧洲各处做静电实验，700修道士，300米距离，全跳起来；

(2) 电荷守恒定律

一个系统，如果没有净电荷出入其边界，则其正、负电荷的电量的代数和将保持不变

英国人，**汤姆逊**发现**电子**的存在，精确测量了**电子的核质比**，并确定是唯一的；预言了**原子的枣糕模型**。

英国人，**卢瑟福**利用 α 粒子轰击金属箔实验，确定了**原子的有核模型**。



美国人**密立根**利用**油滴实验**精确测量得到了**电子的电荷量**。

(2) 电荷量子化

在自然界中所观察到的电荷均为基本电荷 e 的整数倍。这也是自然界中的一条基本规律，表明电荷是量子化的。直到现在还没有足够的实验来否定这个规律。

2. 库仑定律

(1) **点电荷**：带电体本身线度比它到其他带电体间的距离小得多时，带电体的大小和形状可忽略不计，这个带电体称为点电荷。（如同质点一样，是假想模型）

说明：（1）“点电荷”是理想化模型；

介绍人类早期对电现象的认识

讲述历史上一些重大发现的具体过程，例如汤姆逊发现电子、卢瑟福确定原子的有核模型等，引入思政点：静电现象中的“因果联系”和自然规律，培养学生的辩证思维能力，从而养成严谨的科学态度。

强调带电体能否看作是点电荷必须根据具体情况来决定

(2) 连续带电体可以看作是点电荷的集合

1785 年，法国人库仑通过实验（扭秤实验）提出了第一个电学定律——库仑定律。

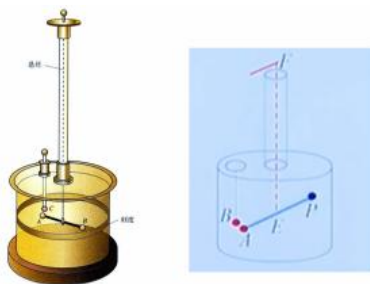


图 1-2 库仑扭秤

(2) 库仑定律内容

真空中两点电荷之间的相互作用力大小与他们电量乘积成正比，与他们之间距离成反比，方向在他们连线上，同性相斥、异性相吸。这叫做库仑定律。



图 1-3 用库仑定律矢量形式判断两个点电荷间静电力的方向

$$\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_{12} \quad \vec{e}_{12} \text{ 是单位矢量} \quad (1.2.1)$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad \epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ (C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^2\text{)} \quad \text{真空介电常数}$$

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21} \quad (1.2.2)$$

说明：（1）库仑定律是静电学的基本规律；

（2）适用宏观与微观系统；

（3）原子结构、分析结构、固体结构等化学作用中，静电学占主要成分；

（4）可以应用于连续带电体的作用问题。

例 1 如图，电子与质子之间的距离约为 $5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ ，求它们之间的万有引力和静电力。

解：

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{4\pi \times 8.85 \times 10^{-12} \times (5.3 \times 10^{-11})^2} = 8.23 \times 10^{-8} \text{ N}$$

$$F_G = G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 9.11 \times 10^{-31}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} = 3.64 \times 10^{-47} \text{ N}$$

3. 静电力的叠加原理

重点讲解库仑定律的内容和矢量表达式，使用条件及受力方向的判断。

教师示范，学习练习

提出思考：如果有两个以上的点电荷，电荷之间的作用力

(1) 电荷系

$$\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_{i0}^2} \vec{e}_{i0} \quad (1.2.3)$$

(3) 电荷连续分布

$$\vec{F} = \int d\vec{F} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q dQ}{r^2} \vec{e}_r \quad (1.2.4)$$

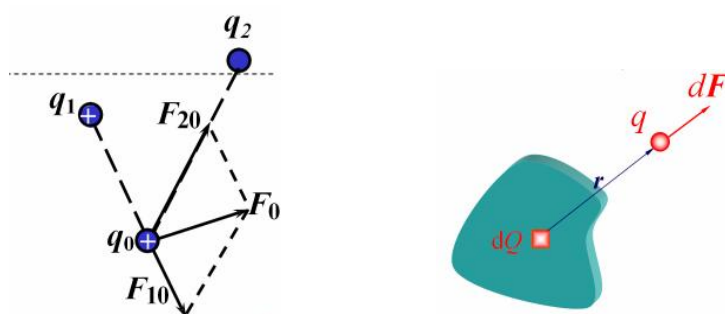


图 1-4 点电荷系间静电力的方向 图 1-5 连续带电体的静电力计算

例 2 如图所示 $AC = r_1 = 1.2m$, $BC = r_2 = 0.5m$, 电荷的分布 $q_1 = 1.5 \times 10^{-3}C$, $q_2 = -0.5 \times 10^{-3}C$, $q_3 = 0.2 \times 10^{-3}C$, 试求作用在电荷 q_3 上的合力。

解：

q_1 和 q_3 之间的力是斥力, q_2 和 q_3 之间的力是引力。两个力的大小分别为:

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_3}{r_1^2} = 1.875 \times 10^3 N$$

$$F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2 q_3}{r_2^2} = 3.6 \times 10^3 N$$

合力的大小为 $F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2} = 4.06N$

合力方向如图所示

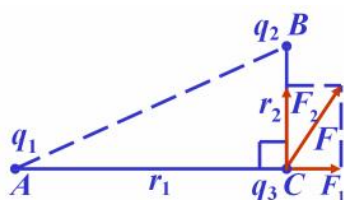


图 1-6 点电荷 q_1 和 q_2 对 q_3 的静电力

例 3 正电荷 q 分布在半径为 R 的圆环上, 计算在圆环的轴线上任意一点 p 处点

该怎么计算?

通过提示, 引导学生得出静电力叠加原理。

学生练习

提醒学生公式和符号书写要规范

电荷 q_0 所受作用力。

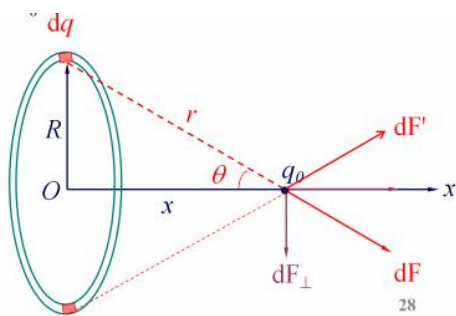


图 1-7 均匀带电圆环轴线上一点 p 处点电荷 q_0 所受作用力

解：（解题思路）

建立坐标， x 方向、与 x 轴垂直的面（ \perp ）

由对称性分析可知：

$$d\vec{F}_{\perp} = -d\vec{F}'_{\perp}$$

$$F = \int dF_x = \int dF \cos \theta = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 dq}{r^2} \frac{x}{r}$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q x}{r^3}$$

$$r = \sqrt{x^2 + R^2}$$

$$\vec{F} = \frac{q_0 q}{4\pi\epsilon_0} \frac{x}{(x^2 + R^2)^{3/2}} \vec{i}$$

三、作业与思考

1. 思考题：为什么库仑定律只适用于点电荷？如果我们考虑形状复杂的电荷分布，如何处理这个问题？

2. 课后作业：1.2.2 1.2.3

四、课堂小结

1. 点电荷需要满足的条件
2. 库仑定律的矢量表达式
3. 求解静电力的方法：点电荷静电力和静电力叠加原理

五、板书设计

教师提问：圆环能否看成点电荷？这时，库仑定律还适用吗？遇到这类问题该怎么处理？

启发学生利用数学微积分知识思考讨论

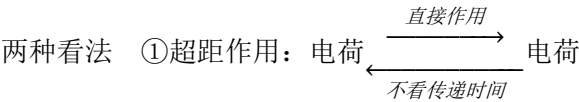
教师通过分析题中信息，引导学生应用微积分解题。

板书推演过程，加深学生对库仑定律的认识。

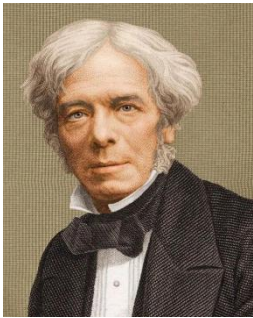
<div style="background-color: #4F7942; color: white; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">1.1 电荷</p> <p>一、点电荷：条件</p> <p style="text-align: center;">1.2 库仑定律</p> <p>一、库仑定律</p> <p>公式： $\vec{F}_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \vec{e}_{12}$</p> <p>二、静电力的叠加原理</p> <p>(1) 点电荷系： $\vec{F} = \sum_i \vec{F}_i = \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_0 q_i}{r_{i0}^2} \vec{e}_{i0}$</p> <p>(2) 带电体： $\vec{F} = \int d\vec{F} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q dQ}{r^2} \vec{e}_r$</p> </div>	
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
形成性评价	通过作业批改、学生提问等方式收集学生的学习反馈，了解他们对库仑定律的理解程度和应用能力。
课后反思	
<p>教学效果：</p> <ol style="list-style-type: none"> 1.学生能够正确理解电荷的基本性质（如电荷的两种类型：正电荷和负电荷）； 2.学生能够掌握电荷守恒定律，并能应用于简单的电学问题； 3.多数学生能够理解库仑定律的基本概念和矢量表达式，计算电荷系受力时较为熟练。 <p>存在问题：</p> <p>静电力的叠加原理分电荷系和电荷连续分布的带电体两种情况，前者学生在初中阶段已有知识基础，计算较为熟练。但后者需要用到数学微积分知识，且对微元概念比较陌生，理解和计算上还是有一定的难度；</p> <p>改进措施：</p> <p>课前提醒学生预习新知识和预备的数学知识；课上设计多样化的练习题，特别是应用静电力叠加原理的计算题，并及时给予反馈，帮助学生巩固理解；课后提供多样化教学资源，帮助学生在课后深入学习。</p>	

授课课题	第 2 讲 § 1.3 电场 电场强度	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解电场强度定义，掌握电场强度的计算方法；</p> <p>2. 掌握连续电荷分布电场强度的计算。</p> <p>能力目标: 1.理解什么是电场，能够描述电场的性质；</p> <p>2. 能够理解电场强度的定义和物理意义；</p> <p>3. 能够使用公式计算电场中某点的电场强度。</p> <p>素养目标: 1.能够设计简单的实验验证电场强度的相关理论，培养动手能力与科学探究精神。</p> <p>2. 运用电场强度叠加原理，计算多个电荷产生的电场强度，培养系统思考和综合分析能力。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.理解电场强度的定义，场强叠加原理；</p> <p>2. 求解电荷连续分布带电体电场强度的基本方法。</p> <p>教学难点: 电荷连续分布带电体电场强度的求解；</p>	
教学方法	讲授法、讨论法	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>库仑定律给出了两个静止电荷间的相互作用力，那么这种作用是通过什么途径发生的？</p> <p>电荷间的相互作用力到底是通过什么途径发生的，自古以来就存在两种作用的争论：超距作用和近距作用。其中，超距作用认为一个电荷对另一电荷的作用是以无限大的速度在两电荷间直接传递，与存在于两电荷之间的物质无关。与超距不同，近距作用的相互作用力仅发生在较小的距离内有效。那么，同学们认为电荷间的相互作用是超距作用还是近距作用？</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 静电场</p> <p>（1）电荷间的作用</p>		<p>以提问法导入新课</p>

电荷间作用原有不同看法，在很长的时间内，人们认为带电体之间是超距作用，即二者直接作用，发生作用也不用时间传递。即



到了上世纪，法拉第提出新的观点，认为在带电体周围存在着电场，其他带电体受到的电力是电场给予的，即②场观点：电荷→场→电荷，近代物理学证明后者是正确的。



M.法拉第

(2) 静电场的主要表现

电场力：放到电场中的电荷要受到电场力。
 电场力作功：电荷在电场中移动时，电场力要作功。

2. 电场强度

从静电场的力的表现出发，利用**试验电荷**来引出电场强度概念来描述电场的性质。
 引入的试验电荷需满足以下要求：

- A. 几何线度足够小
- B. 电荷量足够小

为了叙述方便，在接下来的讨论中均使用正电荷作试验电荷。试验电荷 q_0 （点电荷且 $|q_0|$ 很小），放入A点，它受的电场力为 \vec{F} ，试验发现，将 q_0 加倍。则受的电场力也增加为相同的倍数，即

实验电荷： $q_0 \quad 2q_0 \quad 3q_0 \quad nq_0$ ，受力： $\vec{F} \quad 2\vec{F} \quad 3\vec{F} \quad n\vec{F}$

可见，这些比值都为 $\frac{\vec{F}}{q_0}$ ，该比值与试验电荷无关，仅与A点电场性质有关，因此，

可以用 $\frac{\vec{F}}{q_0}$ 来描述电场的性质，

定义
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \tag{1.3.1}$$

为电荷 q 的电场在A点处的电场强度，单位：牛/库仑。在电场某点处，场强的大小等于单位正电荷在该点所受的电场力的大小，场强的方向与该单位正电荷在该点处所受电场力的方向相同。

引入课程思政：
 树立正确的科学观和方法论

提问：为了使测量精确，引入的试验电荷应该满足什么条件？

引导学生从不影响原有电场分布的角度出发思考问题

加强对电场强度定义的理解

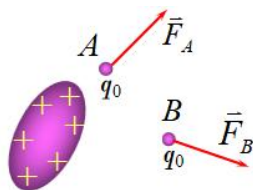


图 1-8 带电体在 A、B 两点对试验电荷的静电力

3. 点电荷与点电荷系的场强

(1) 点电荷的场强

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq_0}{r^2} \vec{e}_r \quad (1.3.2)$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{e}_r \quad (1.3.3)$$

场强与场点距离的关系图如下图所示：

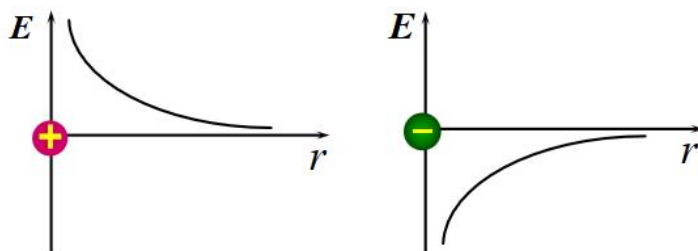


图 1-9 点电荷的电场曲线

(2) 点电荷系的场强

试验电荷放在点电荷系 q_1, q_2, \dots, q_n 所产生电场中的 A 点，实验表明 q_0 在 A 处受的电场力 \vec{F} 是各个点电荷各自对 q_0 作用力 $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$ 的矢量和，即：

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

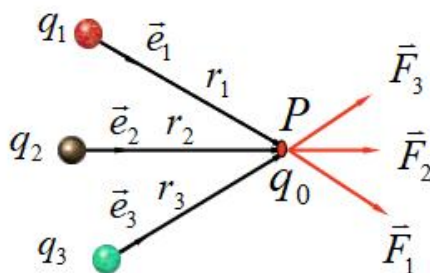


图 1-10 点电荷系在场点 P 激发的电场强度

强调矢量加法（分解分量、逐个计算）的概念，后续通过具体实例进行练习

按场强定义：

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} = \frac{\vec{F}_1}{q_0} + \frac{\vec{F}_2}{q_0} + \cdots + \frac{\vec{F}_n}{q_0} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \cdots + \vec{E}_n \quad (1.3.4)$$

上式表明，点电荷系电场中任一点处的总场强等于各个点电荷单独存在时在该点产生的场强矢量和，这称为场强叠加原理。

(3) 连续分布带电体的场强

把连续带电体分成无限多个电荷元 dq ， dq 看成点电荷，可有： dq 产生场强为

$$d\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{e}_r$$

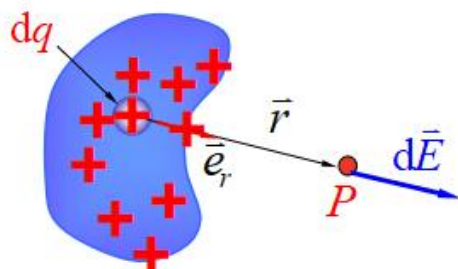


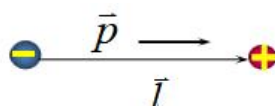
图 1-11 电荷连续分布于空间区域时电场强度的计算

总场强

$$\vec{E} = \int d\vec{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{e}_r \quad (1.3.5)$$

4. 点电荷与点电荷系的场强

(1) 求电偶极子中垂线上的电场



解：

有两个大小相等的点电荷 $+q$ 和 $-q$ ，当两者之间的距离比考察的场点到它们的距离小得多时，此系统称为电偶极子。电偶极距 $\vec{p} = q\vec{l}$

$$E_- = E_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r^2 + l^2/4)}$$

$$E = 2E_+ \cos \alpha$$

$$\cos \alpha = \frac{l/2}{(r^2 + l^2/4)^{1/2}}$$

学生对连续分布带电体的场强计算方法比较陌生，这部分着重讲解。

将问题分解为简单步骤，让学生逐步掌握电场强度的计算和电场的叠加原理

$$E = 2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(r^2 + l^2/4)} \times \frac{l/2}{(r^2 + l^2/4)^{1/2}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ql}{(r^2 + l^2/4)^{3/2}}$$

$$\vec{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p}}{(r^2 + l^2/4)^{3/2}}$$

$$\text{若 } r \gg l, \vec{E} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\vec{p}}{r^3}$$

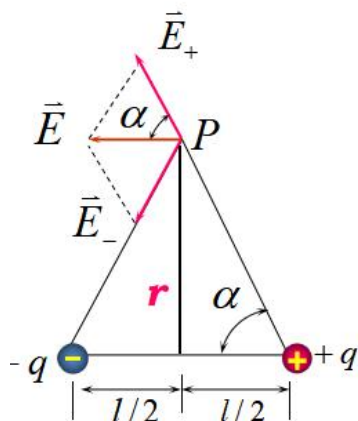


图 1-12 电偶极子在中垂线上 P 点的电场强度

练习 求电偶极子延长线上一点的电场强度

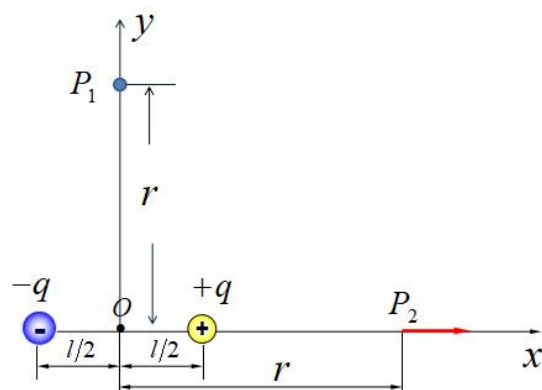


图 1-13 电偶极子在延长线上 P 点的电场强度

解：

如图建立坐标系

$$\vec{E}_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x - l/2)^2} \vec{i}$$

学生练习

提示：(1) 建立坐标系；
(2) 场强叠加原理

$$\vec{E}_- = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{(x+l/2)^2} \vec{i}$$

$$\vec{E} = \vec{E}_+ + \vec{E}_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{2xl}{(x^2 - l^2/4)^2} \right] \vec{i}$$

$$x \gg r_0$$

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2lq}{x^3} \vec{i} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2\vec{p}}{x^3}$$

教师板书推
演讲解

(2) 求一均匀带电直线在 P 点的电场强度

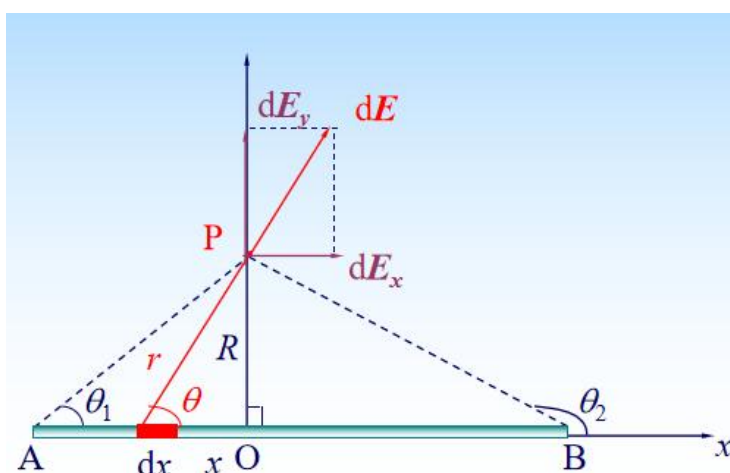


图 1-14 均匀带电直线在 P 点激发的电场强度

学生在运用
微积分解题
的思想还不
够深刻，逐
步分解公式
推导，让学
生清晰掌握
各个概念间
的逻辑关系。

解：

取线元 dx ，该微元 dx 所带电量 $dq = \lambda dl$ ，在 P 点产生的场强为

$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \quad \text{方向如图所示}$$

如图所示建立直角坐标系，将 $d\vec{E}$ 投影在坐标轴上

$$dE_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \cos \theta \quad dE_y = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{\lambda dl}{r^2} \sin \theta$$

式中 r 、 x 、 θ 都是变量，需要进行积分变换代换，由图可知：

$$-x = R \tan \theta \quad dx = R \csc^2 \theta d\theta$$

$$\sin \theta = \frac{R}{r}$$

$$\text{由此可得: } dE_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 R} \cos \theta d\theta \quad dE_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 R} \sin \theta d\theta$$

将以上两个式子对整个带电细棒积分

$$E_x = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 R} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 R} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$$

$$E_y = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 R} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0 R} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

$$\vec{E} = E_x \vec{i} + E_y \vec{j}$$

讨论极限情况:

当直线长度趋于无穷, 则 $\theta_1 \rightarrow 0$, $\theta_2 \rightarrow \pi$

$$E_x = 0$$

$$E_y = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 R}$$

上式表示无限长均匀带电直线的场强, 场强方向垂直于带电直导线, 场强分布具有轴对称性。

三、作业与思考

1. 思考题: 电场强度的方向如何确定? 如果在一个电场中放置一个负电荷, 其受力方向与电场强度方向有什么关系?

2. 课后作业: 1.3.6、1.3.8

四、课堂小结

空间各点的场强完全决定于电荷的分布情况, 如果给定电荷的分布, 原则上就能算出任一点的场强。计算的方法是利用点电荷在周围激发场强的表达式和场强叠加原理。

场强的计算步骤:

1. 先任选取电荷元 dq , 写出 dq 在待求点处场强的矢量式;
2. 适当选取坐标系, 将场强分别投影到坐标轴上, 然后进行积分, 最后求总场强。
3. 电荷分布具有对称性, 则根据对称性分析, 有的分量可推知其值为零, 只需求出余下分量就行。

推导出无限长均匀带电直线的场强, 要求学生理解并记住结论。

五、板书设计 <div style="background-color: #4f81bd; color: white; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p style="text-align: center;">1.3 电场 电场强度</p> <p>一、电场</p> <p>二、电场强度</p> <p>三、点电荷与点电荷系的场强</p> <p>点电荷电场强度：$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{e}_r$</p> <p>连续带电体电场强度：$\vec{E} = \int d\vec{E} = \int \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{dq}{r^2} \vec{e}_r$</p> </div>	
参考资料	[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)
形成性评价	通过作业批改、学生提问等方式收集学生的学习反馈，了解到学生对微积分的思想掌握不熟练，特别是对于连续带电体求解场强时的矢量叠加后积分问题的解决存在困难。
课后反思	
教学效果： <ol style="list-style-type: none"> 1.学生能够正确理解电场的定义和基本性质，如电场的源头（电荷）和电场的方向、大小； 2.大部分学生能够准确理解电场强度的定义及其物理意义； 3.多数同学能够完成点电荷系电场强度的计算。 存在问题： <p>对电场强度公式的推导和理解可能停留在表面，难以深入掌握其物理意义；在复杂情境下（如多个电荷系统或连续均匀带电体），学生对电场强度的计算存在较大困难。另外。学生对微积分公式掌握的不够熟练。</p> 改进措施： <ol style="list-style-type: none"> 1.对电场强度的概念进行更为细致的讲解。在计算电场强度时，通过逐步分解公式推导，让学生清晰掌握各个概念间的逻辑关系。提供更多不同情景下的练习题，帮助学生提升对复杂情景的理解和应用能力； 2.鼓励学生利用课外资源（如视频、在线课程等）进行自主学习，增强对电场强度的运用能力。 3.在学习群中分享电磁学课程所需的微积分公式，供学生参考。 	

授课课题	第 3 讲 § 1.4 高斯定理(1) § 1.5 电场线	
教学目标	知识目标: 1.理解电场线的性质，电通量概念的理解和正负的判断；； 2. 理解高斯定理的物理意义，公式中各个符号的含义； 3. 理解高斯定理如何反应电场和电荷之间的关系。	
	能力目标: 1.电场线如何表示电场的方向和强度； 2. 对于多个点电荷或连续分布带电体周围激发的电场，理解闭合曲面上 E 的本质内涵及表达式中正负电荷的表示；	
	素养目标: 1.通过本节课学习，特别是定理的验证过程，培养学生逻辑思维能力、科学严谨的学习习惯； 2. 能够运用逻辑推理，从已知条件出发，通过高斯定理解决问题，使学生在抽象思维能力、分析问题与解决问题的能力方面受到初步训练。	
教学重难点	教学重点: 理解电通量和高斯定理，掌握应用高斯定理求电场强度的方法理解电场强度的定义，场强叠加原理。 教学难点: 掌握用高斯定理求电场强度的方法。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
一、新课导入 电场是电荷周围的一种物理场，它对其他电荷产生作用。可以通过电场强度来描述电场的大小和方向。复习电场强度的定义，即单位正电荷在电场中所受的力。 提出问题：“如果电场是一种看不见的力场，我们如何表示它的方向和强度呢？”		以复习法和提问法导入新课
二、新课讲解 一. 电场线 电场线是为了形象地描绘电场而引进的，它是空间的一组曲线。 电场线的定义： （1）曲线上每一点切线方向为该点电场方向； （2）通过垂直于电场方向单位面积电场线数为该点电场强度的大小。（即曲线分布稠密的地方电场强度大，曲线分布稀疏的地方电场强度小）		

$$E = \frac{\Delta N}{\Delta S_{\perp}} \quad \therefore \Delta N = E \cdot \Delta S_{\perp} \quad (1.4.1)$$

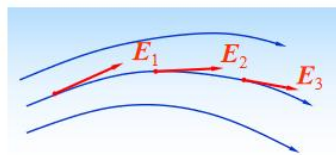


图 1-15 用电场线表示电场

1. 典型电场的电场线分布图

(1) 正点电荷与负点电荷的电场线

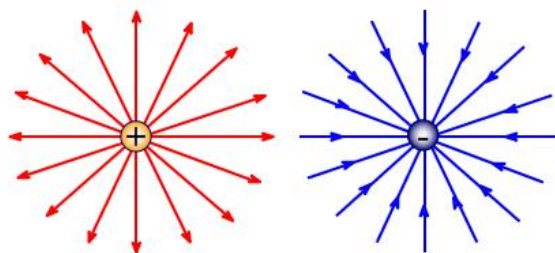


图 1-16 正负点电荷的场

(2) 一对等量正点电荷的电场线

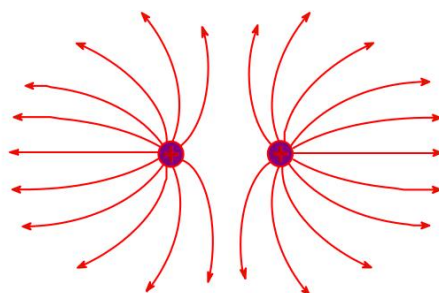


图 1-17 两个等值同号点电荷的场

(3) 一对等量异号点电荷的电场线

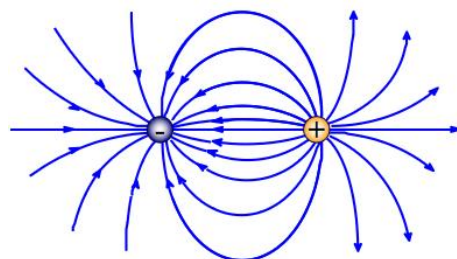


图 1-18 两个等值异号点电荷的场

(4) 带电平行板电容器的电场线

引导学生根据电场线的定义绘制单一电荷（正电荷、负电荷）及一对电荷（正负电荷）周围的电场线

提出问题：（1）电场线能够是闭合曲线？（2）空间中两条电场线在没有电荷的地方可以相交吗？

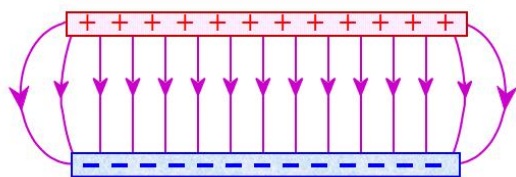


图 1-19 平行板电容器的场

得出电场线的性质，并强调其重要性。

2. 性质

- (1) 不闭合、不中断、起自正电荷，止于负电荷。
- (2) 两条电场线在没有电荷的地方不会相交。

注意: 电场线是人们为了形象地表示出电场的强弱和方向而引入的，它不是电场中实际存在的线，更不要认为电力线是电荷在电场中的运动轨迹，这是因为电力线的切线方向是电荷受力的方向不是运动速度的方向。

3. 电场强度通量—电通量

定义：通过电场中某一面的电力线数叫做通过该面的电场强度通量，用 Φ_e 表示。

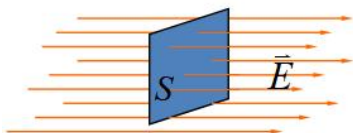
$$E \propto \frac{d\phi_e}{dS_{\perp}} \quad d\phi_e = E dS_{\perp}$$

下面分几种情况讨论。

4. 电通量的计算

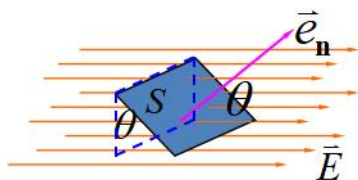
- (1) 匀强电场，E 垂直与平面

$$\Phi_e = ES$$



- (2) 匀强电场，E 与平面有夹角

$$\Phi_e = ES \cos \theta = \vec{E} \cdot \vec{S}$$



- (3) 非均匀电场强度，曲面 S 的电通量

分析：如图所示，在 S 上取面元 dS，dS 可看成平面，dS 上 \vec{E} 可视为均匀，设 \vec{n} 为 dS 单位法向量，dS 与该处 \vec{E} 夹角 θ ，则通过 dS 电场强度通量为：

$$d\Phi_e = E \cos \theta dS = \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (1.4.2)$$

那么通过有限大曲面 S 的电通量:

$$\Phi_e = \int_S d\Phi_e = \int_S E \cos \theta dS = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (1.4.3)$$

(4) 通过任意闭合曲面 S 的电通量

$$\Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S E \cos \theta dS \quad (1.4.4)$$

注意: 通常取面元外法向为正。闭合曲面穿出为正, 穿入为负。

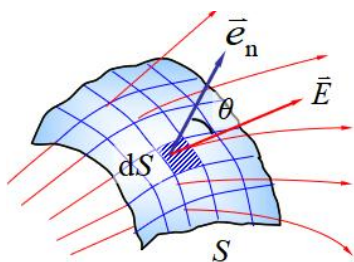


图 1-20 计算不闭合曲面的通量

二. 高斯定理



高斯
(C.F. Gauss)
1777-1855
数学家
物理学家
天文学家

高斯定理可以用来解决什么问题?

1839 德国人 **高斯** (Carl Friedrich Gauss) 提出了电通量的高斯定理, 用以描绘电场的性质, 说明电场是由点源激发的。

高斯 提出 **基本量** (1832) 和 **量纲** (1835)、**势理论与高斯定理** (1839), 发明 **有线电报** (1833), 建立 **高斯光学** (1840), 提出电磁相互作用以有限速度传播 (1845)。在地磁研究、天文学与大地测量学等领域都有卓越贡献。**高斯** 在代数、超几何级数、复变函数、概率统计、微分几何等领域颇有贡献, 被誉为 “**数学王子**”。

内容: 在真空中, 通过任一闭合曲面的电通量等于该曲面所包围的所有电荷的代数和的 $1/\epsilon_0$ 倍。

$$\Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.4.5)$$

思考: (1) 高斯面上的 \vec{E} 与哪些电荷有关?

(2) 哪些电荷对闭合曲面 S 的 Φ_e 有贡献?

1. 验证高斯定理

(1) 点电荷在球形高斯面的圆心处

掌握电通量正负的判断

介绍科学家高斯的成就, 激发学生的探索精神和奉献精神。

提出问题: 如何验证高斯定理的正确性?

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

$$\Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \oint_S \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dS \quad (1.4.6)$$

$$\Phi_e = \frac{q}{\epsilon_0}$$

(2) 点电荷在任意闭合曲面内

$$\text{通过 } S_1, S_2 \text{ 的电通量均为: } \Phi_e = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.4.7)$$

$$\text{所以通过 } S \text{ 的电通量为: } \Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad (1.4.8)$$

得出结论: Φ_e 与曲面的形状和 q 的位置无关, 只与闭合曲面包围的电荷电量 q 有关。

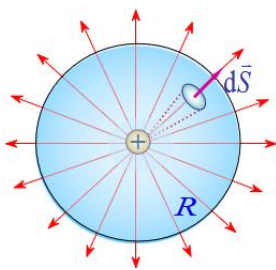


图 1-21 以点电荷为中心的球面的 E 通量

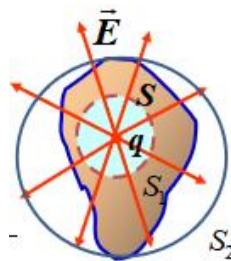


图 1-22 包围点电荷任意闭合面 S 的 E 通量

(3) 点电荷在闭合曲面以外

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$$

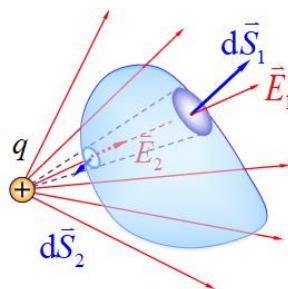


图 1-23 不包围 q 的闭合面的 E 通量为零

(4) 任意闭合曲面 S 包围多个电荷

点电荷系的电场:

$$\begin{aligned} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \oint_S \vec{E}_1 \cdot d\vec{S} + \oint_S \vec{E}_2 \cdot d\vec{S} + \cdots + \oint_S \vec{E}_n \cdot d\vec{S} \\ &= \Phi_{e1} + \Phi_{e2} + \cdots + \Phi_{en} \end{aligned}$$

点电荷在 S 外: $\Phi_{ei} = 0$

师生互动共同推导高斯定理的数学表达式, 掌握从特殊到一般的科学研究方法

提问: 孤立正点电荷在闭合曲面外面, 此时定理还成立吗?

引入思政: 通过定理的验证过程, 培养学生认真学习的态度、科学严谨的学习习惯。

让学生对前面的推导结果进一步延伸, 加深对新内容的印象, 即闭合球面以外的孤立点电荷对 E 通量没有贡献。

点电荷在 S 内: $\Phi_{ei} = \frac{1}{\epsilon_0} q_i$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$$

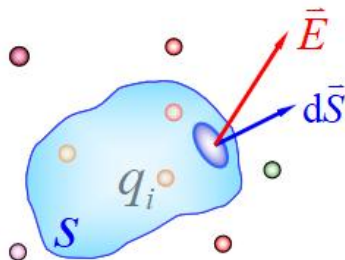


图 1-24 n 个点电荷的场中闭合曲面的 E 通量

总结高斯定理的
内涵，再次巩固
新知识

2. 高斯定理的内涵

- (1) 静电场是有源场;
- (2) 电通量和电荷的关系;
- (3) E 通量和电场强度 E : 电通量仅由面内的电荷决定的, 而场强 E 为所有电荷 (包括闭合面外的电荷) 的总场强。

三、作业与思考

1. 思考题: 电场强度的方向如何确定? 如果在一个电场中放置一个负电荷, 其受力方向与电场强度方向有什么关系?

2. 课后作业: 1.4.1 1.4.2 1.4.6 1.4.7

四、课堂小结

高斯定理总结:

1. 高斯面上的电场强度为所有内外电荷的总电场强度;
2. 高斯面为封闭曲面;
3. 穿进高斯面的电场强度通量为负, 穿出为正;
4. 仅高斯面内的电荷对高斯面的电场强度通量有贡献;
5. 静电场是有源场。

五、板书设计

1.4 高斯定理	
一、电通量： $\Phi_e = \int d\Phi_e = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$	
二、高斯定理： $\Phi_e = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i$	
1.5 电场线	
一、电场线的性质	
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
教学效果： <p>大多数学生能够理解电通量的基本概念，即穿过某个面（或曲面）的电场线的数量。学生能够在均匀电场中计算电通量，尤其是简单的平面或对称形状。能够将电通量的概念应用到一些基本的物理问题中，例如球形对称电荷分布。学生能够理解高斯定理的推导过程。</p>	
存在问题： <p>学生对面积矢量和夹角的理解不够清晰，在非均匀电场或复杂形状中计算电通量时，部分学生可能会感到困惑。学生初次接触高斯定理，对“通量”、“闭合面”等概念理解不够深入，对定理的理解还停留在公式表面。</p>	
改进措施： <p>在课后给予学生更多的数学工具支持，在今后定理应用中进行分布推导，逐步引导学生理解每一步的物理意义和数学过程。</p>	

授课课题	第 4 讲 § 1.4 高斯定理的应用(2)	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解理解高斯定理的基本概念;</p> <p>2. 掌握高斯定理的适用条件和范围;</p> <p>3. 理解高斯定理如何反应电场和电荷之间的关系;</p> <p>4. 掌握高斯定理的应用。</p> <p>能力目标: 1.能将三维空间电荷分布转化为闭合曲面通量计算;</p> <p>2. 掌握柱坐标、球坐标系下的对称性分析技巧。</p> <p>素养目标: 1.形成"源-场"相互作用的物理世界观;</p> <p>2. 能够运用逻辑推理,从已知条件出发,通过高斯定理解决问题,使学生在抽象思维能力、分析问题与解决问题的能力方面得到训练。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.理解电通量和高斯定理, 掌握应用高斯定理求电场强度的方法理解电场强度的定义, 场强叠加原理。</p> <p>教学难点: 掌握用高斯定理求电场强度的方法。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>回顾电通量和高斯定理的表达形式。</p> <p>提出问题：“高斯定理可以用来解决什么问题？”</p> <p>二、新课讲解</p> <p>在电荷分布已知时，虽然原则上可由库仑定律和叠加原理求得各点的电场强度，但计算往往比较复杂。本节将举例说明，当电荷分布具有某种对称性时，电场的计算可以由于应用高斯定理而大为简化。</p> <p>下面介绍应用高斯定理计算几种简单而又有对称性的场强方法。可以看到，应用高斯定理求场强比前面介绍的方法更为简单。</p> <p>例 1: 电荷均匀分布于一个无限大平面上，其面密度为σ，求其激发的静电场的电场强度。</p>		<p>以复习法和提问法导入新课</p> <p>通过典型例题加深对定理的理解和</p>

应用

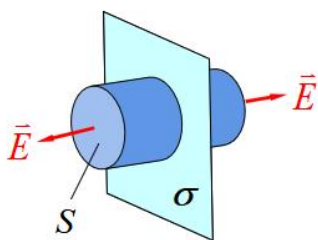


图 1-25 用高斯定理求均匀无限大平面的电场

解：在场中任取一点，由电荷分布的对称性可知 \vec{E} 与带电面垂直。如图选取高斯面，则

$$2ES = \frac{\sigma S}{\epsilon_0} \quad (1.4.9)$$

写成矢量形式，

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \vec{e}_n \quad (1.4.10)$$

例 2：电荷 q 均匀分布于半径为 R 的球面上，求球内外静电场的电场强度。

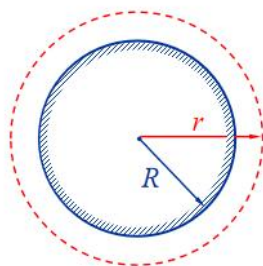


图 1-26 用高斯定理求均匀带电球面的电场

解：在球外任取一点 P ，过 P 点作与带电球面同心的球面 S （见图 1-26）。从电荷分布的球对称性出发，可以证明面上各点电场强度大小相等，方向沿径向，故 S 面的 E 通量

由电荷分布的对称性可知 \vec{E} 与带电面垂直。如图选取高斯面，则

$$\phi = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 4\pi r^2 E \quad (1.4.11)$$

(1) 球面外某点的场强

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 4\pi r^2 E = \frac{q}{\epsilon_0}$$

板书推演

要求学生记住均匀带电球面外任一点的场强结论

$$\vec{E} = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \vec{e}_r \quad (1.4.12)$$

(2) 球面内某点的场强

$$\oint_s \vec{E} \cdot d\vec{S} = 4\pi r^2 E = 0$$

$$E = 0 \quad (1.4.13)$$

例 3: 电荷 q 均匀分布于半径为 R 的球体上, 求球内外静电场的电场强度。

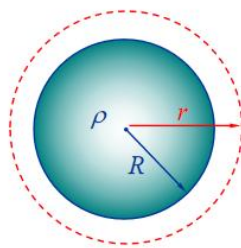


图 1-27 用高斯定理求均匀带电球体的电场

解: 仿照例 2 可知球外电场仍由 (1.4.12) 表示, 球内电场则为

$$\vec{E} = \frac{qr}{4\pi\epsilon_0 R^3} \vec{e}_r \quad (1.4.14)$$

上面, 我们应用高斯定理求出了几种带电体产生的场强, 从这几个例子看出, 用高斯定理求场强是比较简单的。但是, 我们应该明确, 虽然高斯定理是普遍成立的, 但是任何带电体产生的场强 不是都能由它计算出, 因为这样的计算是有条件的, 它要求电场分布具有一定的对称性, 在具有某种对称性时, 才能选高斯面, 从而很方便的计算出值。

三、课堂小结

- 1.高斯定理的公式;
- 2.高斯定理应用的条件;
- 3.应用高斯定理求解电场分布的解题步骤。

四、作业与思考

课后作业: 1.4.1 1.4.2 1.4.6 1.4.7

五、板书设计

解析题中已知条件, 从对称性分析, 引导学生参照上题进行解题

要求学生推导并记住结论

教师小结
布置作业

1.4 高斯定理

一、电通量： $\Phi_e = \int d\Phi_e = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$

二、高斯定理： $\Phi_e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$

三、解题要点

1. 选择合适的高斯面

2. 计算 $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$

3. 计算 $\sum q_{\text{int}}$

4. 由 $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_{\text{int}}$ 求 E

参考资料

[1] <https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194>

[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)

课后反思

教学效果:

大多数学生能够正确构建球对称场（点电荷、均匀带电球壳）的高斯面。掌握无限大平面电荷的场强推导方法。另外，高斯定理依赖于多重积分、向量场和偏微分的知识。学生在这些基础知识上有欠缺，导致他们在理解和应用高斯定理时出现困难。

存在问题:

学生对面积矢量和夹角的理解不够清晰；学生容易混淆“闭合曲面通量”与“空间各点场强”的对应关系；少数同学认为“闭合面内无电荷则面上场强必为零”。

改进措施:

在课后给予学生更多的数学工具支持，逐步引导学生理解每一步的物理意义和数学过程；可采用分段教学法，将高斯定理分为多个小部分讲解，使其更加易于消化。

授课课题	第 5 讲 § 1.6 电势及其梯度（电势）	
教学目标	<p>知识目标： 1.理解电势的概念； 2. 理解电场与电势的关系； 3. 掌握电势的计算方法。</p> <p>能力目标： 1.能够运用电势的公式进行简单计算，包括点电荷产生的电势和多个电荷的叠加； 2. 学会通过电势的变化分析电场的性质，能够解决相关物理问题。</p> <p>素养目标： 提高学生的逻辑思维能力，能够清晰表达自己的思考过程和解决方案。</p>	
教学重难点	<p>教学重点： 1.电势的定义与物理意义； 2.电势的计算方法。</p> <p>教学难点： 1.电场与电势的关系； 2 电势的计算方法。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>回顾电场和场强，以及场强的求解方法。此前，以静电场力的表现引入了场强这一物理量来描述静电场。这一节，将从静电场力作功的表现来阐述电势这一物理量来描述静电场的性质。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>力学中引进了保守力和非保守力的概念。保守力的特征是其功只与始末二位置有关，而与路径无关。前面学过的保守力有重力、弹性力、万有引力等。在保守力场中可以引进势能的概念，并且保守力的功。</p> <p>1. 静电场的环路定理</p> <p>（1）点电荷做功</p> <p>点电荷 Q 置于 O 点，实验电荷 q 由 a 点运动到 b 点。在 c 处， q 在位移 $d\vec{r}$ 内，静电力 \vec{F} 对 q 的功为：</p>		<p>以复习法导入新课</p>

$$dA = \vec{F} \cdot d\vec{l} = q\vec{E} \cdot d\vec{l} = qEdl \cos \theta = qE dr$$

$$\begin{aligned} A &= \int_{r_1}^{r_2} dA = \int_{r_1}^{r_2} qE dr \\ &= \int_{r_1}^{r_2} q \cdot \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr \\ &= \frac{qQ}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \end{aligned} \quad (1.6.1)$$

可见： W 仅与 q_0 的始末二位置有关，而与过程无关。这是静电场的一个重要性质，称为有势性。

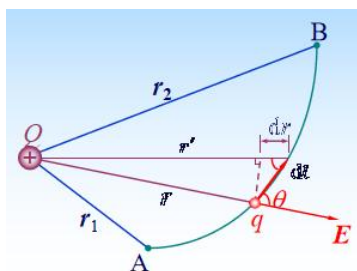


图 1-31 电荷运动时电场力做功的计算

(2) 静电场的环路定理

下面来推导在静电场中，将实验电荷沿闭合路径移动一周时，静电场力做的功：

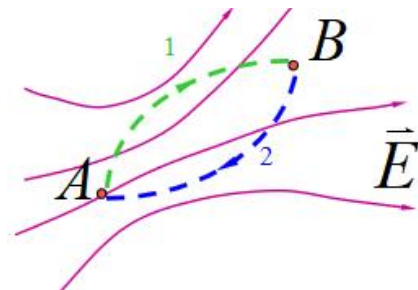


图 1-32 闭合曲线上 A、B 两点把 L 分成两部分

在 L 上任取两点 A 和 B 把 L 分成两部分，有

$$\begin{aligned} A_{ab} &= \oint_L q\vec{E} \cdot d\vec{l} = q \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} \\ A &= \int_{(L1)}^b q\vec{E} \cdot d\vec{l} + \int_{(L2)}^a q\vec{E} \cdot d\vec{l} \\ &= \int_{(L1)}^b q\vec{E} \cdot d\vec{l} - \int_{(L2)}^a q\vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \\ \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} &= 0 \end{aligned} \quad (1.6.2)$$

可见，静电场沿任一闭合曲线的环流为零，这称为静电场的环路定理，是静电场

强调结论

引导学生推导出

点电荷系情况

<p>中与高斯定理并列的一个重要定理。</p> <p>物理内涵：</p> <p>(1) 静电场做功与路径无关，是保守场；</p> <p>(2) 静电场环路定理反映了点电荷电场的径向性、球对称性和可叠加性；</p> <p>(3) 静电场环路定理适用范围广；</p> <p>(4) 微分形式：$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = \iint (\nabla \times \vec{E}) \cdot d\vec{S} = 0$ 静电场是无旋场</p> <p>2. 电势和电势差</p> <p>(1) 电势</p> <p>利用静电场的有势性可以引入电势的概念。在场中任取一点 P_0（称为参考点）。设单位正电荷从场中一点 P 移动到 P_0，则不论路径如何，场力的功都有同一数值。它只与 P 和 P_0 有关。则 P 点电势</p> $V \equiv \frac{W}{q} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (1.6.3)$ <p>说明： (1) 电势是相对量，电势能是标量，有“正”、“负”之分；</p> <p>(2) 参考点一般选取∞远，还可根据需要选择任何点；选 $b \rightarrow \infty$，有</p> $V_a = \int_a^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} \quad (1.6.4)$ <p>结论： 电场中某一点 a 的电势等于单位正电荷从该点移到电势为零处（即电势能为零处）静电力对它做的功。A 点电势等于把单位正电荷从该点移到电势为零点电场力做的功。</p> <p>说明：</p> <p>(1) V_a 为标量，可正、负或 0。单位：V</p> <p>(2) 电势的零点（电势能零点）任选。在理论上对有限带电体通常取无穷远处电势=0，在实用上通常取地球为电势零点。一方面因为地球是一个很大的导体，它本身的电势比较稳定，适宜于作为电势零点，另一方面任何其他地方都可以方便地将带电体与地球比较，以确定电势。</p> <p>(3) 电势与电势能是两个不同概念，电势是电场具有的性质，而电势能是电场中电荷与电场组成的系统所共有的，若电场中不引进电荷也就无电势能，但是各点电势还是存在的。</p> <p>(4) 场强的方向即为电势的降落方向。</p> <p>(2) 电势差</p> <p>电场中任意两点电势之差，称为他们的电势差。</p>	<p>理解并记住结论</p>
---	-----------------------

$$V_a - V_b = \int_a^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} - \int_b^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

$$\boxed{V_a - V_b = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{r}} \quad (1.6.5)$$

结论： a、b 二点电势差等于单位正电荷从 a → b 静电力做的功。

电场力对 q_0 做功与电势差的关系：

$$A_{ab} = q_0(V_a - V_b) = -q_0\Delta V \quad (1.6.6)$$

3. 电势的计算

(1) 点电荷电势

$$V_a = \int_a^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_a^\infty \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^3} \vec{r} \cdot d\vec{r}$$

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1.6.7)$$

(2) 电势的叠加原理

设有点电荷 q_1, q_2, \dots, q_n ，则在任一场点的电势有

$$\begin{aligned} V_a &= \int_a^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_a^\infty (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n) \cdot d\vec{r} \\ &= \int_a^\infty \vec{E}_1 \cdot d\vec{r} + \int_a^\infty \vec{E}_2 \cdot d\vec{r} + \dots + \int_a^\infty \vec{E}_n \cdot d\vec{r} \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r_1} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_2} + \dots + \frac{q_n}{4\pi\epsilon_0 r_n} \end{aligned}$$

$$\boxed{V_a = \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{4\pi\epsilon_0 r_i}} \quad (1.6.8)$$

结论： 点电荷系中某点电势等于各个点电荷单独存在时产生电势的代数和，此结论为静电场中的电势叠加原理。

(3) 连续带电体电势

设连续带电体由无穷多个电荷元组成，每个电荷元视为点电荷， dq 在 a 处产生电

势为： $dV_a = \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r}$ ，整个带电体在 a 处产生的电势为：

$$V_a = \int dV_a = \int \frac{dq}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (1.6.9)$$

例 1： 求均匀带电圆盘轴线上的电势。已知圆盘的半径为 R ，电荷面密度为 σ ，参

强调电势差与电势零点无关

考点在无限远。

解：因参考点在无限远且电荷作面分布，故可用式（1.6.9）计算。用极坐标把圆平面分成许多面元。面元的面积 $dS = rd\varphi dr$ ，电荷为 $dq = \sigma dS = \sigma rd\varphi dr$ ，它在轴线一点 P 贡献的电势为

$$dV = \frac{\sigma rd\varphi dr}{4\pi\epsilon_0\sqrt{r^2 + z^2}}$$

其中 z 为 P 与圆盘的距离。整个圆盘在 P 点贡献的电势为

$$V = \iint \frac{\sigma rd\varphi dr}{4\pi\epsilon_0\sqrt{r^2 + z^2}} = \frac{\sigma}{4\pi\epsilon_0} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R \frac{rdr}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} (\sqrt{R^2 + z^2} - z)$$

4. 等势面

静电场中电势相等的点组成的曲面称为等势面。

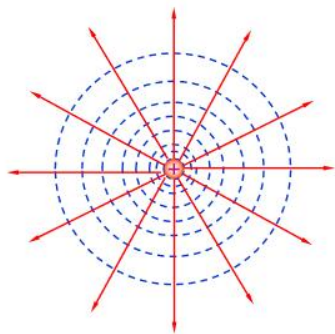


图 1-33 孤立点电荷的场

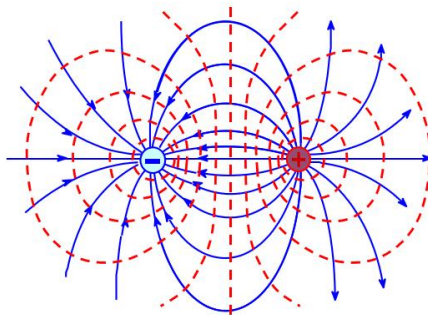


图 1-34 两个等值异号点电荷的场

5. 电势与电场强度的微分关系

由电势与电场强度的积分形式可以导出它们的微分关系。在场中取一点 P_1 ，过 P_1 作等势面 S_1 及其法向，在法线上取与 P_1 极近的点 P_2 ，过 P_2 做等势面 S_2 。规定 S_1 及 S_2 面的法向单位矢量自 P_1 指向 P_2 。由（1.6.5）有

$$V_1 - V_2 = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \vec{e}_n \cdot d\vec{l} = \int_{P_1}^{P_2} E_n \cdot dl$$

$$\vec{E} = -\frac{\partial V}{\partial n} \vec{e}_n = -\nabla V \quad (1.6.10)$$

三、课堂小结

求电势的方法：

(1) 电势叠加原理解 $V_p = \int dV_p$;

(2) $V_p = \int_x^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r}$

使用微元法，运

用电势叠加原理

进行求解

教师提醒学生过

程书写要规范，

标清楚矢量符号

<p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：1.6.3 1.6.4 1.6.5</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #6b8e23; color: white; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;">1.6 电势 电势差</p> <p>一、静电场力的功</p> <p>二、静电场的环路定理</p> <p>三、电势和电势差</p> <p>四、电势的计算</p> </div>	
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果：</p> <p>大多数学生生大多数学生能够理解电势的基本概念，并能在课堂练习中正确应用相关公式。</p> <p>存在问题：</p> <p>部分学生对电势的概念仍存在理解模糊的情况，需要在未来的课程中加强强调。</p> <p>改进措施：</p> <p>在未来的教学中，增加更多的实际案例和实验，帮助学生更好地理解电势的应用。鼓励学生在课前自学，课堂上进行讨论和问题解决，以提高学生的自主学习能力。</p>	

授课课题	第 6 讲 § 2.1 静电场中的导体	
教学目标	知识目标：1.认识静电感应，知道感应起电的原理和感应电荷正负的判定； 2.理解导体的静电平衡条件。 能力目标：1.能够分析导体系统在静电平衡时的电荷分布； 2.能够根据导体电荷分布求出电场的分布。 素养目标：理解静电屏蔽现象及其应用。通过概念建立、规律的得出培养学生认真严谨的科学态度和探究创造的心理品质。	
教学重难点	教学重点：1.导体的静电平衡条件； 2.导体在静电平衡时的电荷分布，并由电荷分布给出电场的分布义。 教学难点：依据静电平衡条件，给出达到静电平衡的不同几何形状的导体感应电荷的分布系。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>飞机被雷电击中后安全降落的案例介绍。创设情境，提出问题，让同学们思考其中的影响因素，带着问题学习新课。</p> <div></div> <p>二、新课讲解</p> <p>1.金属导体</p> <p>金属导体的原子外层电子受原子核的束缚比较弱，由于热运动而在金属原子实构成的晶格内做热运动，而成为自由电子。当有电场作用时，自由电子会发生定向运动。</p> <p>2.静电感应 导体的静电平衡条件</p> <p>(1) 静电感应</p>		<p>案例法导入 新课</p>

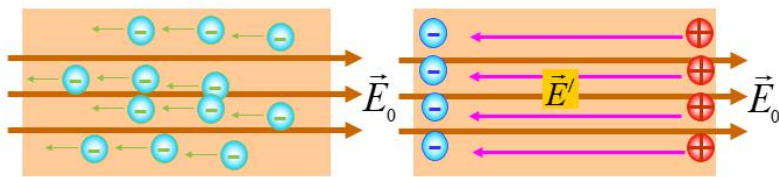


图 2-1 静电感应

提问：把金属导体放入电场中，导体上会出现什么现象？

画图阐述：在电场中的导体沿着电场强度方向两端会出现等量异号电荷的现象叫做静电感应。

(2) 导体静电平衡条件

提问：（1）电子的聚集会出现怎样的结果？

（2）电子是否会永远这样定向运动下去？

（3）最终会出现什么结果？

当导体内部和表面无自由电荷定向运动时，导体处于静电平衡状态。

静电平衡条件

（1）导体内任意一点的电场强度都等于零；

（2）导体表面任意一点场强方向垂直于表面。

3. 导体静电平衡时的性质

（1）电势分布——处于静电平衡的导体是等势体，其表面是等势面

证明：由电位差定义式 $U_{AB} = \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{l}$ 出发，因为导体内 $\vec{E} = 0$ 故 $U_{AB} = U_A - U_B = 0$ 即得 $U_A = U_B$ 。

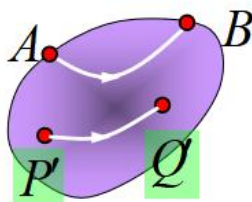


图 2-2 导体表面的电势分布

（2）电荷分布——导体内部无净电荷，电荷只分布在导体的表面

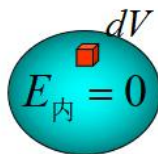


图 2-2 导体表面的电荷分布

证明：在导体内，任取体积元 dV ，

教师通过问题引导：从描述静电场性质的两个物理量出发研究静电平衡条件

设疑：导体上的电荷如何分布？

引导学生思考运用高斯定理分析问题，并请学生发表想法。

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 = \frac{\sum_i q_i}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon_0} \int_V \rho dV = 0$$

∵ 体积元任取，

∴ 导体所带电荷只能存在于表面。

(3) 电场强度分布——导体表面附近的场强方向与表面垂直，大小与导体表面的电荷面密度成正比

证明：

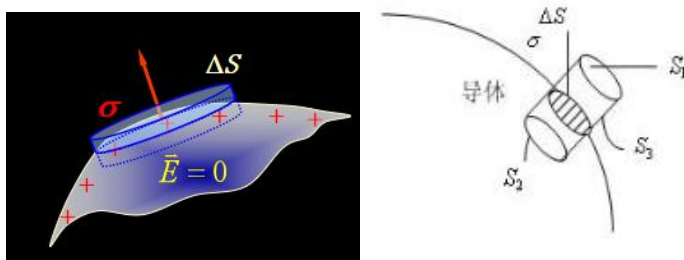


图 2-3 导体表面附近的电场强度

设在导体表面上某面积元 ΔS （很小）上，电荷分布如图所示，过 ΔS 边界作一闭合柱面，S 上下底 S_1 、 S_2 均与 ΔS 平行，S 侧面 S_3 与 ΔS 垂直，柱面的高很小，即 S_1 与 S_2 非常接近 ΔS ，此柱面并且是关于 ΔS 对称的。S 作为高斯面，高斯定理为

$$\begin{aligned} \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} &= \frac{1}{\epsilon_0} \sum_S q \\ \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} &= \int_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_{S_2} \vec{E} \cdot d\vec{s} + \int_{S_3} \vec{E} \cdot d\vec{s} = \int_{S_1} \vec{E} \cdot d\vec{s} \\ \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{S_p} q &= \frac{1}{\epsilon_0} \sigma \Delta S \\ E \Delta S &= \frac{1}{\epsilon_0} \sigma \Delta S \\ E &= \frac{\sigma}{\epsilon_0} \end{aligned} \quad (2.1.1)$$

注意与无限大带电平面的区别

$$\left(E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \right)$$

(4) 导体表面曲率对电荷分布影响

根据实验，一个形状不规则的导体带电后，在表面上曲率越大的地方场强越强。由上面讲到的结果知，E 大的地方， σ 必大，所以曲率大的地方电荷面密度大。

(5) 尖端放电

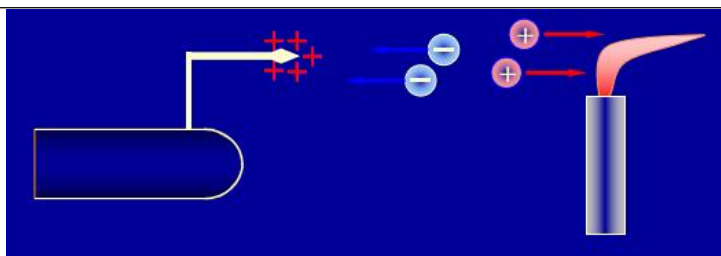


图 2-4 尖体导体的电荷分布

应用：在高压设备中,为了防止因尖端放电而引起的危险和漏电造成的损失,具有高电压的零部件的表面必须做得十分光滑并尽可能做成球面；利用尖端放电使建筑物避免“雷击”。

4. 导体静电平衡问题的讨论方法

例 1. 如图所示带电系统:A 点电荷, B 中性导体

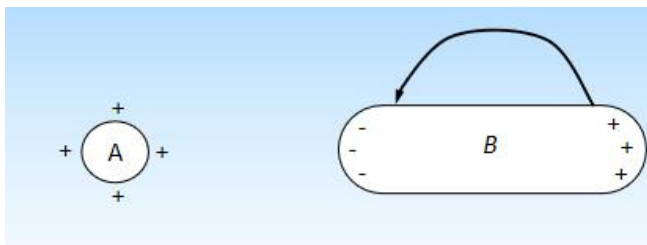


图 2-5 例 1 用图

(1) 电场线能不能由导体 B 的一端正电荷发出而终止于另一端的负电荷？
(2) 带正电的导体 A 接近不带电的导体 B, 则在 B 上离 A 的远端必有电场线发出而终止于无穷远。为什么？

(3) B 左端的感生负电荷绝对值 q' 小于或等于施感电荷 q 。

(4) 不带电导体 B 右端接地, B 上不存在正电荷

例 2: 在无限大带电平面的电场中(面电荷密度为 σ), 平行放置一无限大金属平板, 求金属板两面电荷面密度。

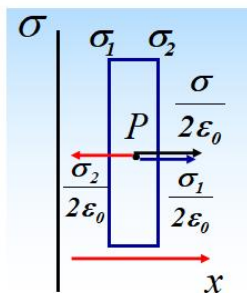


图 2-5 例 2 用图

解：设金属板面电荷密度为 σ_1 和 σ_2 , 由对称性和电量守恒

$$\sigma_1 = -\sigma_2$$

导体内任一点场强为零, 则

提示学生从电场线的性质思考

导体静电平衡时的性质

$\frac{\sigma}{2\varepsilon_0} + \frac{\sigma_1}{2\varepsilon_0} - \frac{\sigma_2}{2\varepsilon_0} = 0$ <p>最后解得：</p> $\sigma_1 = -\frac{1}{2}\sigma, \quad \sigma_2 = \frac{1}{2}\sigma$ <p>三、课堂小结</p> <p>1. 静电平衡条件：</p> <p>（1）导体内任意一点的电场强度都等于零；</p> <p>（2）导体表面任意一点场强方向垂直于表面。</p> <p>2. 导体静电平衡时的性质</p> <p>（1）导体是等势体，其表面是等势面；</p> <p>（2）导体是等势体，其表面是等势面；</p> <p>（3）导体表面附近的场强方向与表面垂直，大小与导体表面的电荷面密度成正比；</p> <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：2.1.3</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4f81bd; color: white; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">2.1 静电场中的导体</p> <p>一、静电平衡</p> <p>二、静电平衡时导体电荷的分布</p> <p>三、应用</p> </div>	课堂小结 布置作业
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果：</p> <p>学生对导体在静电场中的基本特性（如电场强度为零、表面电荷分布等）的理解普遍较好，能较准确地回答相关问题和进行简单的计算。学生能够运用高斯定律分析导体周围的电场。</p> <p>存在问题：</p> <p>部分学生对高斯定理的运用还不够熟练，需要在未来的课程中加强强调。</p> <p>改进措施：</p> <p>加强概念理解，应用举例；提供额外的资源和习题，以帮助学生巩固和扩展所学知识。</p>	

授课课题	第 7 讲 § 2.2 封闭金属壳内外的静电场	
教学目标	<p>知识目标： 1.理解导体壳在静电平衡时的电荷分布规律。</p> <p>2.掌握封闭金属壳内外静电场的分布特点</p> <p>能力目标： 1.能用高斯定理分析壳内外场强的分布；</p> <p>2. 理解静电屏蔽的原理及应用。</p> <p>素养目标： 激发对物理现象本质的探究兴趣；培养学生科学的研究方法和严谨认真的学习态度。</p>	
教学重难点	<p>教学重点： 1.理解金属壳内电场由壳内电荷和内壁形状决定。</p> <p>2.理解壳外电场由壳外和外壁电荷决定；</p> <p>教学难点： 1.了解静电屏蔽效应。</p> <p>2.壳内电荷位置变化不影响壳外电场系；</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>回忆静电感应现象和静电平衡条件，静电平衡时导体电荷的分布。当导体发生静电感应达到静电平衡后，空间的电场场强和电势是怎样的？这是本节课将要解决的问题。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>在计算有导体存在时的静电场分布时，首先根据：</p> <p>（1）静电平衡时导体内部场强为零；</p> <p>（2）电荷守恒定律、确定导体上电荷新的分布量；</p> <p>（3）然后由新的电荷分布求电场的分布。</p> <p>1. 壳内空间电场</p> <p>分两类情况：一类空腔内无带电体，另一类空腔内有带电体，它们的静电性质有所不同。</p>		<p>以复习法和提问法导入新课</p> <p>教师板书</p>

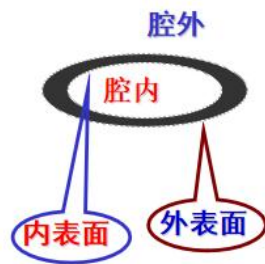


图 2-6 导体空腔

明确要分析和解决的问题

要讨论的问题是：

- (1) 腔内、外表面电荷分布特征
- (2) 腔内、腔外空间电场特征

(1) 空腔内无带电体（内外表面的分布）

采用反证法

如图所示，导体电荷为 Q ，在其内作一高斯面 S ，高斯定理为：
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{S_{\text{内}}} q$$

\therefore 导体静电平衡时其内 $\vec{E} = 0$

$\therefore \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = 0$ ，即 $\sum_{S_{\text{内}}} q = 0$ 。

\therefore S 面是任意的，空腔内无其它电荷，静电平衡时，导体内又无净电荷

\therefore 空腔内表面上的净电荷为 0。

结论：在静电平衡状态下，导体空腔各点场强为零，空腔内表面上处处电荷为零，电荷只能分布在外表面上。

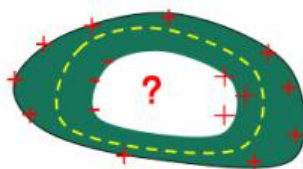


图 2-7 壳内电场强度为零的证明

(2) 空腔内有带电体（内外表面的分布）

在导体壳内、外表面之间作一 Gauss 面，得到

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\sum q_i = 0$$

但是，在空腔内表面上能否出现符号相反的电荷，我们设想，假如有在这种可能，如图所示，在 A 点附近出现 $+q$ ， B 点附近出现 $-q$ ，这样在腔内就分布始于正电荷上终于负电荷的电力线，由此可知 $U_A > U_B$ ，但静电平衡时，导体为等势体，即 $U_A = U_B$ ，因此，假设不成立。

结论：空腔内有电荷 $+q$ 时，空腔内表面有感应电荷 $-q$ ，外表面有感应电荷 $+q$ 。

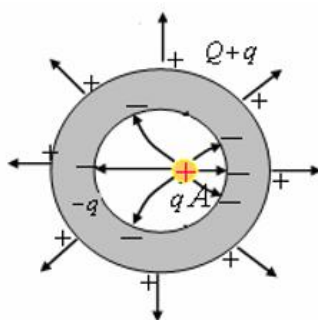


图 2-8 金属壳外的电场

2. 壳外空间的电场

(1) 若腔外无带电体，空腔接地。

结论：腔外空间不存在电场；腔外壁不可能电荷。

(2) 腔外有带电体，空腔不接地

结论：腔外可以有电场，腔的外壁可以有电荷。

(3) 腔外有带电体，空腔接地

结论：外部空间可以有电场；腔的外壁仍然可以有电荷。在导体壳接地时，壳外电场由壳外电荷决定，与壳内电荷无关。

综上所述，封闭导体壳（不论接地与否）内部电场不受壳外电荷的影响，这称为外屏蔽；接地封闭导体外部电场不受壳内电荷的影响，称之全屏蔽。

(4) 静电屏蔽

由于空腔中的场强处处为零，放在空腔中的物体，就不会受到外电场的影响，所以空心金属球体对于放在它的空腔内的物体有保护作用，使物体不受外电场影响。

3. 有导体存在的静电场场强与电势的计算

在计算有导体存在时的静电场分布时，首先根据：

- (1) 静电平衡时导体内部场强为零；
- (2) 电荷守恒定律、确定导体上电荷新的分布量；
- (3) 然后由新的电荷分布求电场的分布。

例1：已知 R_1, R_2, R_3 , 带电球体电荷量为 q , 球壳带电 Q 求：(1) 各表面电荷分布，区间 E 场强分布，球心的电势 V 。(2) 如用导线连接 A 、 B ，再作球心的电势计算。

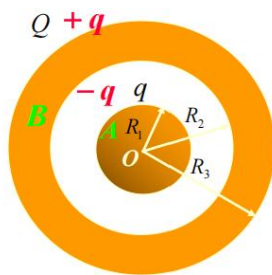


图 2-9 例 1 用图

解:

$$E = \begin{cases} 0 & r < R_1 \quad R_2 < r < R_3 \\ \frac{q}{4\pi\epsilon_0 r^2} & R_1 < r < R_2 \\ \frac{Q+q}{4\pi\epsilon_0 r^2} & r > R_3 \end{cases}$$

$$\begin{aligned} U_o &= \int_0^\infty \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_0^{R_1} E dr + \int_{R_1}^{R_2} E dr + \int_{R_2}^{R_3} E dr + \int_{R_3}^\infty E dr \\ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q+Q}{R_3} \end{aligned}$$

三、课堂小结

1. 电荷分布

- (1) 壳内无电荷: 电荷在外表面
- (2) 壳内有电荷+Q: 内表面-Q, 外表面+Q

2. 场强分布

- (1) 壳内场强: 由内部电荷决定 (外部不影响)
- (2) 壳外场强: 由外表面电荷决定

3. 静电屏蔽

- (1) 不接地: 屏蔽外电场
- (2) 接地: 屏蔽内外电场

四、作业与思考

课后作业: 2.2.1 2.2.3 2.2.5

五、板书设计

2.2 封闭金属壳内外的静电场	
一、空腔壳内外的电荷部分	
二、静电屏蔽	
三、有导体存在的静电场场强与电势的计算	
参考资料	[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)
课后反思	
教学效果： <p>大多数学生能够理解封闭金属壳内部电场为零的概念，并能应用高斯定律解释该现象。一些学生在课堂提问环节展现了较强的分析能力和批判性思维，能够提出深入的问题。</p>	
存在问题： <p>少数学生在数学推导过程中表现出一定困难，尤其是在微分方程和积分计算方面。尽管学生对理论部分理解较好，但在将理论应用于实际问题时，仍显得有些吃力。</p>	
改进措施： <p>针对数学基础薄弱的学生，可以开设课外辅导班或增加在线资源，帮助他们巩固微积分等相关数学知识。通过即时反馈工具（如课堂投票系统、在线测验等）及时了解学生的理解情况，并根据反馈调整教学策略。</p>	

授课课题	第 8 讲 § 2.3 电容器及其电容	
教学目标	<p>知识目标: 1.掌握电容器的电容定义，理解电容与电场、电荷量、极板面积和间距的关系。</p> <p>2.掌握平行板电容器电容公式的推导与应用</p> <p>能力目标: 掌握电容器的电容及其计算。</p> <p>素养目标: 通过电容器这一实际应用广泛的设备，引发学生对物理学和工程技术的兴趣，增强学生对物理学科的认同感和学习动力。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.电容器的工作原理和能量存储特性；</p> <p>2.各种类型的电容器（如平行板电容器、陶瓷电容器、铝电解电容器等）及其特点。</p> <p>教学难点: 电容器的电容及其计算。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>在日常生活中，我们经常使用各种电子设备，比如手机、电脑和家电等。这些设备的正常运行离不开电能的管理与存储，而电容器正是其中一个关键的元件。电容器在电路中充当储能器，能够在瞬间释放大量能量。因此，了解电容器及电容的基本概念，对于理解电路原理和现代电子技术至关重要。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 孤立导体的电容</p> <p>孤立导体：周围没有其他导体或者带电体的导体</p> <p>在真空中设有一半径为 R 的孤立的球形导体，它的电量为 q，那么它的电势为（取无限远处电势=0）</p> $U = \frac{q}{4\pi\epsilon_0 R} \tag{2.3.1}$ <p>对于给定的导体球，即 R 一定，到 q 变大时，U 也变大，q 变小时，U 也变小，但</p>		<p>导入新课</p> <p>引导学生得出电容仅与导体大小和形状等有关</p>

是 $\frac{q}{U} = 4\pi\epsilon_0 R$ 确不变，此结论虽然是对球形孤立导体而言的，但对一定形状的其他导体也是如此， $\frac{q}{U}$ 仅与导体大小和形状等有关，因而有下面定义。

定义：孤立导体的电量 q 与其电势 U 之比称为孤立导体电容，用 C 表示，记作：

$$C = \frac{q}{U} \quad (2.3.2)$$

$$\text{对于孤立导体球，其电容为 } C = \frac{q}{U} = \frac{q}{\frac{q}{4\pi\epsilon_0 R}} = 4\pi\epsilon_0 R$$

C 的单位为：F（法）， $1F=1C/1V$ 。在实用中 F 太大，常用 μF 或 pF ，他们之间换算关系： $1F = 10^6 \mu F = 10^{12} pF$ 。（电容与电量的存在与否无关）

2. 电容器

实际上，孤立的导体是不存在的，周围总会有别的导体，当有其他导体存在时，则必然因静电感应而改变原来的电场分布，当然影响导体电容。下面我们具体讨论电容器的电容。

(1) 电容器

两个带有等值而异号电荷的导体所组成的带电系统称为电容器。电容器可以储存电荷，以后将看到电容器也可以储存能量。

(2) 电容器电容

如图所示，两个导体 A 、 B 放在真空中，它们所带的电量分别为 $+q$ ， $-q$ ，如果 A 、 B 电势分别为 U_A 、 U_B ，那么 A 、 B 电势差为 $U_A - U_B$ ，电容器的电容定义为：

$$C = \frac{q}{U_A - U_B} \quad (2.3.3)$$

由上可知，如将 B 移至无限远处， $U_B=0$ 。所以，上式就是孤立导体的电容。所以，孤立导体的电势相当于孤立导体与无限远处导体之间的电势差。所以，孤立导体电容是 B

放在无限远处时 $C = \frac{q}{U_A - U_B}$ 的特例。导体 A 、 B 常称电容器的两个电极。

(3) 电容器的联接

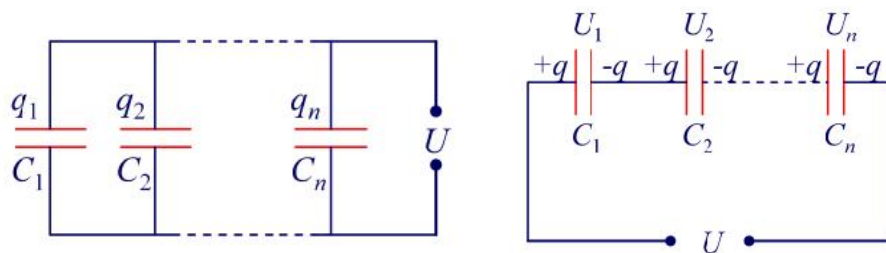


图 2-10 电容器的并联和串联

并联时，Q 等于每个电容器电荷之和： $Q = Q_1 + Q_2$ ，故并联总电容

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q_1}{U} + \frac{Q_2}{U} = C_1 + C_2 \quad (2.3.4)$$

串联时，流入电容器组的电荷 Q 全部进入第一个电容器的左板（设 A 端接电池正极），其右板因为感应而带-Q，于是第二个电容器左板带+Q，右板带-Q，故串联总电容

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{Q}{U_1 + U_2} = \frac{1}{\frac{U_1}{Q} + \frac{U_2}{Q}} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

或

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \quad (2.3.5)$$

3. 电容器的计算

简单讨论三种几何形状规则的带电导体组的电容计算问题

步骤：

- (1) 设两极板分别带电 $\pm Q$ ；
- (2) 求两极板间的电场强度 E
- (3) 求两极板间的电势差 U
- (4) 由 $C=Q/U$ 求 C

(1) 平行板电容器

设两导体板分别带电 $\pm Q$ ，则两带电平板间的电场强度：

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 S}$$

两带电平板间的电势差

教师讲授计算
电容器电容的
一般步骤，要求
学生掌握。

教师示范

$$U = Ed = \frac{Qd}{\varepsilon_0 S}$$

根据公式得出，平板电容器电容

$$C = \frac{Q}{U} = \varepsilon_0 \frac{S}{d} \quad (2.3.6)$$

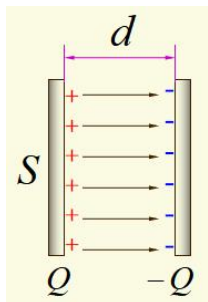


图 2-11 平行板电容器的电容计算

(2) 球形电容器的电容

球形电容器是由半径分别为 R_1 和 R_2 的两同心金属球壳所组成。

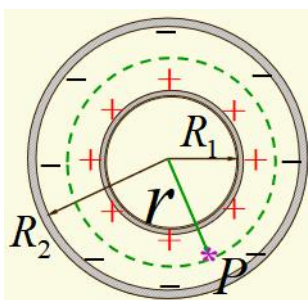


图 2-12 球形电容器的电容计算

解： 设内球带正电 ($+Q$)，外球带负电 ($-Q$) A、B 间任一点场强大小为：

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

$$\begin{aligned} U_A - U_B &= \int_{R_A}^{R_B} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_{R_A}^{R_B} E dr = \int_{R_A}^{R_B} \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2} dr \\ &= \frac{q}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) = \frac{q(R_B - R_A)}{4\pi\varepsilon_0 R_A R_B} \end{aligned}$$

$$C = \frac{q}{U_A - U_B} = \frac{q}{\frac{q(R_B - R_A)}{4\pi\varepsilon_0 R_A R_B}} = \frac{4\pi\varepsilon_0 R_A R_B}{R_B - R_A}$$

板书讲解

提出问题，引导学生根据一般步骤进行课堂练习

(3) 圆柱形电容器

圆柱形电容器是两个同轴柱面极板构成的，如图所示，设 A、B 半径为 R_A 、 R_B ，电荷为 $+q$ ， $-q$ ，除边缘外，电荷均匀分布在内外两圆柱面上，单位长柱面带电量 $\lambda = \frac{q}{l}$ ， l 是柱高。由高斯定理知，A、B 内任一点 P 处 \vec{E} 的大小为

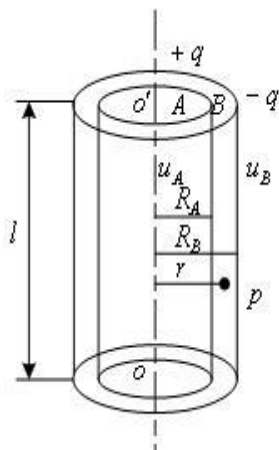


图 2-13 球形电容器的电容计算

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r}$$

$$U_A - U_B = \int_{R_A}^{R_B} \vec{E} \cdot d\vec{r} = \int_{R_A}^{R_B} E dr = \int_{R_A}^{R_B} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_B}{R_A},$$

$$C = \frac{q}{U_A - U_B} = \frac{q}{\frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{R_B}{R_A}} = \frac{2\pi\epsilon_0 l}{\ln \frac{R_B}{R_A}}.$$

三、课堂小结

电容器电容计算的一般步骤

- (1) 设两极板分别带电 $\pm Q$;
- (2) 求两极板间的电场强度 E
- (3) 求两极板间的电势差 U
- (4) 由 $C=Q/U$ 求 C

四、作业与思考

课后作业：2.3.4

学生课堂练习

课堂小结
布置作业

五、板书设计 <div style="background-color: #6b8e23; color: white; padding: 10px; text-align: center;"> 2.3 电容器及其电容 一、孤立导体 二、电容 三、电容器的电容计算 </div>	
参考资料	[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)
课后反思	
教学效果： 大部分同学对电容器的基本概念和相关公式有了较好的理解。通过小测验和课堂讨论，大家能够清楚地解释电容器的工作原理。 存在问题： 学生对于电容器的能量存储等深层次概念理解不够深入。 改进措施： 使用多媒体教学：运用动画演示电容器的充放电过程、能量存储等，使抽象概念更加直观和易于理解。	

授课课题	第 9 讲 § 2.5 带点体系的静电能	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解带点体系中各点电荷之间的相互作用能量; 2.了解静电能的定义以及计算带点体系静电能的方法。</p> <p>能力目标: 1.理解静电能的表达式; 2.掌握点电荷体系中静电能的计算公式,能够通过公式计算多个点电荷体系的静电能;</p> <p>素养目标: 1.引导学生通过建立适当的物理模型(如点电荷模型)来分析带点体系的静电能,帮助学生理解如何将复杂的物理现象转化为数学问题进行求解。在学习过程中; 2.通过推导、计算和验证培养学生的科学思维方法,激发学生对科学方法的尊重与应用。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.理解带点体系中各点电荷之间的相互作用能量; 2.理解带电体系的静电能,学会计算带电导体组的静电能。</p> <p>教学难点: 掌握电容器的静电能计算。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>回顾电势的定义及求解方法。场强和电势均是描述电场的物理量,接下来讲解这两个物理量之间有没有联系。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 带电体系的静电能</p> <p>(1) 定义静电能为零的状态</p> <p>设想带电体系中的电荷可以无限分割为许多小单元,最初认为它们分散在彼此相距很远的位置上,规定这种状态下系统的静电能为零。</p> <p>静电势能(静电能):系统各部分分散在无穷远位置聚集成现有带电体系统时,外界抵抗静电力所作的功。包括各带电体之间的相互作用能和每个带电体的自能。相互作用能 $W_{互}$:把每一个带电体看作一个不可分割的整体,将各个带电体从无限远移到</p>		<p>以复习法导入新课</p>

现在的位置，外力抵抗静电力所作的功，等于它们之间的相互作用能；自能 $W_{\text{自}}$ ：把每一个带电体上的各部分电荷从无限分散的状态聚集成现在的状态，外力抵抗静电力所作的功，等于这个带电体的自能。相互作用能和自能统称静电能，无本质区别。计算时无非是考虑这个体系是如何构成的（松散的或者紧密的）。

（2）静电能

带电体系的静电能为把各部分电荷从无限分散的状态集聚成现有带电体系时，外力克服静电力所做的功转化而来。

$$W = -A \quad (\text{静电力做功}) \quad (2.5.1)$$

2. 两个点电荷体系的静电能

如下图所示两个点电荷体系，他们之间的相距为 r ，分别在 A 和 B 两个位置上。如何计算他们之间的静电能。我们按照之前的设想，约定 q_1 、 q_2 处于相距无穷远的静电状态时静电能为零。



图 2-14 两点电荷体系的静电能计算（1）

（1）先移动 q_1 到 P_1 点——外力不做功

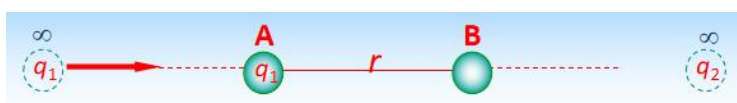


图 2-15 两点电荷体系的静电能计算（2）

（2）再移动 q_2 到 P_2 点

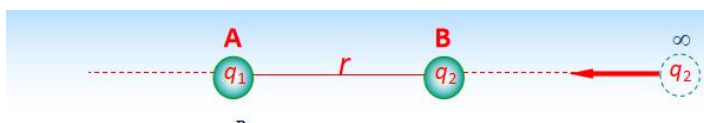


图 2-16 两点电荷体系的静电能计算（3）

$$W_{12} = -q_2 \int_{\infty}^B \vec{E}_1 \cdot d\vec{l} = q_2 \int_B^{\infty} \vec{E}_1 \cdot d\vec{l} = q_2 V_{12} \quad (2.5.2)$$

式中， V_{12} 为电荷 q_1 产生的电场在图中 B 点的电位。交换移动次序可得：

$$W_{21} = -q_1 \int_{\infty}^A \vec{E}_2 \cdot d\vec{l} = q_1 \int_A^{\infty} \vec{E}_2 \cdot d\vec{l} = q_1 V_{21} \quad (2.5.3)$$

$$q_2 V_{12} = q_1 V_{21} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} \quad (2.5.4)$$

故移动过程对计算结果没有影响。整理可得两个点电荷体系的静电能为：

强调相互作用能和自能统称静电能，但无本质区别

提问：我们如何计算两个点电荷体系的静电能？

$$W_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} = \frac{1}{2} (q_2 V_{12} + q_1 V_{21}) \quad (2.5.5)$$

结论:两个点电荷组成的系统的相互作用能（电势能）等于每个电荷在另外的电荷所产生的电场中的电势能的代数和的一半。

3. 三个点电荷体系的静电能

把三个点电荷逐个从相应位置移至无穷远，计算静电力所做的功。分析过程：

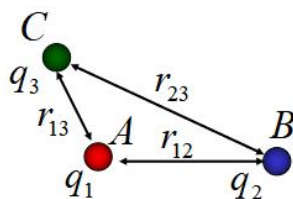


图 2-17 三个点电荷体系的静电能计算

(1) 把 q_1 移动至 A 点，外力做功 $W_1 = 0$

(2) 把 q_2 移动至 B 点，外力做功 $W_2 = q_2 \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} = q_2 V_{12}$

(3) 把 q_3 移动至 C 点，外力做功

$$W_3 = q_3 \left(\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{13}} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{23}} \right) = q_3 V_{13} + q_3 V_{23}$$

$$W = W_1 + W_2 + W_3$$

$$= q_2 \frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{12}} + q_3 \left(\frac{q_1}{4\pi\epsilon_0 r_{13}} + \frac{q_2}{4\pi\epsilon_0 r_{23}} \right)$$

改写成对称的形式为：

$$\begin{aligned} W_e &= q_2 V_{12} + q_3 (V_{13} + V_{23}) \\ &= \frac{1}{2} [q_1 (V_{21} + V_{31}) + q_2 (V_{12} + V_{32}) + q_3 (V_{13} + V_{23})] \end{aligned} \quad (2.5.6)$$

4. 连续带电体的静电能

连续带电体可看作是点电荷（电荷元）的集合，电荷元用 Δq_i 表示。

$$W_e = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i V_i$$

教师讲解

假设先移动 q_2 到 P_2 点，引导学生推导出相同的结论。

$$W_e = \lim_{\Delta q \rightarrow 0} \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \Delta q_i V_i = \frac{1}{2} \int V dq \quad (2.5.7)$$

例1: 一均匀带电球体, 半径为R, 带电量为Q。求这一带电系统的静电能。

解:

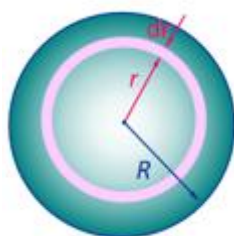


图 2-18 例 1 用图

$$V = V(r) = \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 R} \left(3 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (r \leq R)$$

$$\begin{aligned} W &= \frac{1}{2} \int V dq = \frac{1}{2} \int_0^R V(r) \rho \cdot 4\pi r^2 dr \\ &= \frac{1}{2} \int_0^R \frac{Q}{8\pi\epsilon_0 R} \left(3 - \frac{r^2}{R^2}\right) \frac{3Q}{4\pi R^2} \cdot 4\pi r^2 dr = \frac{3Q^2}{20\pi\epsilon_0 R} \end{aligned}$$

课堂小结
布置作业

三、课堂小结

两个点电荷组成的系统的相互作用能（电势能）等于每个电荷在另外的电荷所产生的电场中的电势能的代数和的一半。

四、作业与思考

课后作业: 2.5.1

五、板书设计

2.5 带电体系的静电能

- 一、带电体系的静电能
- 二、两个点电荷体系的静电能
- 三、三个点电荷体系的静电能
- 四、连续带电体的静电能

参考资料

- [1] <https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194>
- [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)

课后反思

教学效果：

大部分学生能够清晰地理解带点体系中的静电能概念，并掌握了静电能的计算方法，能够正确描述点电荷之间相互作用能量的物理意义。

存在问题：

尽管大部分学生能够完成静电能的计算，但一些学生在推导过程中对数学公式的理解不够深入，尤其是如何通过电场和电势来计算静电能的部分，仍存在一定困难。另外，学生在理解带点体系静电能的物理模型时，存在抽象性较强的问题。部分学生对于电荷间相互作用的物理意义缺乏直观理解，难以将理论与实际物理现象联系起来。

改进措施：

针对数学推导部分，课后可以提供更多的数学基础辅导，尤其是积分技巧和电场、电势计算的基本方法。可以通过小组讨论或在线辅导的形式，帮助学生逐步理清推导思路。在课堂上通过逐步示范推导过程，确保每个细节都讲解到位，避免学生忽略推导过程中的关键步骤。课外，提供更多物理模型的直观展示资源，帮助学生更好地理解电荷分布、静电场和电势的空间关系。

授课课题	第 10 讲 § 3.2 偶极子 § 3.3 电介质的极化	
教学目标	<p>知识目标: 1.了解偶极子及其产生的静电场，了解偶极子在外电场中所受的力矩；</p> <p>2. 理解电介质的定义，掌握电介质极化的概念以及分子极化的物理机制；</p> <p>3. 理解极化强度及其与电场强度的关系；</p> <p>能力目标: 1.能够计算偶极子在电场中的静电能；</p> <p>2. 能够解释电介质在外电场作用下的极化现象。</p> <p>素养目标: 通过偶极子和电介质的学习，引发学生对电学现象的兴趣，帮助他们看到物理理论与实际生活（如材料、电容器等）的紧密联系，增强学习动机。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.了解偶极子及其产生的静电场，了解偶极子在外电场中所受的力矩；</p> <p>2.了解电介质的极化，理解极化强度及其与电场强度的关系。</p> <p>教学难点: 1.计算偶极子激发的静电场；</p> <p>2.理解极化强度与电场强度的关系。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>电介质是存在于静电场中的一种物质，它们能够在电场的作用下发生极化现象，从而改变电场的分布。电介质的存在对于静电场的性质和行为具有重要的影响。了解电介质的特性和行为，对于深入研究和应用静电场具有重要意义。</p> <p>提问学生是否了解电介质在静电场中的作用，引导学生思考电介质与导体在电场中表现的区别。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>电介质是由电中性分子构成的，是绝缘体。其原因是：电介质的原子对其电子的约束力较强，使得外层价电子处于束缚状态，不易挣脱所属的原子。因此，在电介质内部几乎没有自由电子，所以，电介质不能导电。</p> <p>分子由带负电的电子和带正电的原子核组成。在远比分子线度为大的距离处，分子中全部负电荷的影响可等效一个负电荷，其位置为分子的“负电重心”，同理分子的全部正电荷也有相应的正电重心。分子的正负电中心一般不重合，这样一对距离极近异号等值的正负电荷称为分子的等效电偶极子。</p>		<p>以复习法和提问法导入新课</p> <p>通过多媒体展示电容器插入电介质后电压变化的实验现象，激发学生对电介质极化现象的好奇</p>

1. 电偶极子

定义：两个相距很近而且等值异号的点电荷组成的带电系统——电偶极子。

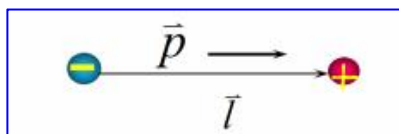


图 3.1 电偶极子

电偶极子的电偶极矩：

$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (3.2.1)$$

电偶极矩是矢量，方向由负电荷沿偶极子轴线指向正电荷

二、电偶极子激发的电场

1. 延长线上的场强

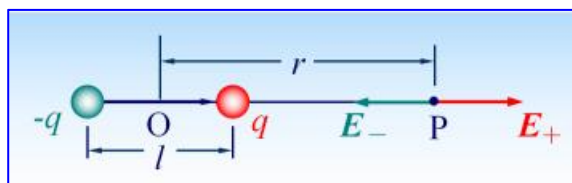


图 3.2 电偶极子的电场分布

$$\begin{aligned} E_+ &= \frac{q}{4\pi\epsilon_0(r-l/2)^2} & E_- &= \frac{-q}{4\pi\epsilon_0(r+l/2)^2} \\ E_P &= E_+ + E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{2rl}{r^4} \frac{1}{(1-l^2/4r^2)^2} \\ &\approx \frac{2ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{p}{2\pi\epsilon_0 r^3} \end{aligned} \quad (3.2.2)$$

2. 中轴线上的场强

$$\begin{aligned} E_+ &= E_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0(r^2 + l^2/4)^2} \\ E_P &= 2E_+ \cos\theta \\ &= \frac{ql}{4\pi\epsilon_0(r^2 + l^2/4)^{3/2}} \\ &\approx \frac{ql}{4\pi\epsilon_0 r^3} = \frac{p}{4\pi\epsilon_0 r^3} \end{aligned} \quad (3.2.3)$$

3. 电偶极子电场中任意一点的电势

$$\begin{cases} U_+ = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_+} \\ U_- = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_-} \end{cases}$$

心。

讲解电偶极子的定义、电偶极矩的概念及计算公式，强调电偶极矩的矢量性。

详细推导电偶极子在轴线和垂直平分线上的场强分布，引导学生理解场强的叠加原理在电偶极子场强计算中的应用。

$$U = U_+ + U_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r_- - r_+}{r_+ r_-}$$

$$\therefore r_- - r_+ \approx r_0 \cos \theta \quad (3.2.4)$$

$$r_+ r_- \approx r^2$$

$$U = U_+ + U_- = \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r_- - r_+}{r_+ r_-}$$

$$\approx \frac{q}{4\pi\epsilon_0} \frac{r_0 \cos \theta}{r^2}$$

$$= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p \cos \theta}{r^2}$$

$$(3.2.4)$$

$$\begin{cases} \theta = 0 & U \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^2} \\ \theta = \pi & U \approx -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{p}{r^2} \\ \theta = \frac{\pi}{2} & U = 0 \end{cases}$$

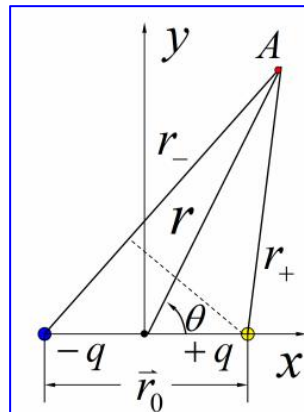


图 3.3 电偶极子电场中任意一点的电势

4. 偶极子在外场所受的力矩

偶极子在外电场中所受到的影响。所谓外场，是指除组成偶极子的电荷以外的所有电荷激发的电场

先讨论均匀外电场的情形。这时组成偶极子的两个点电荷受到的电场力等值反向，整个偶极子(作为一个系统)受到的合外力为零。

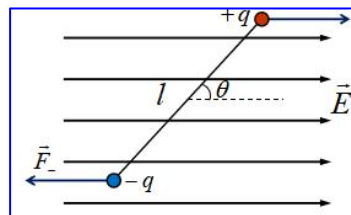


图 3.4 偶极子在外场所受的力矩

$$\begin{cases} \vec{F}_+ = q\vec{E} \\ \vec{F}_- = -q\vec{E} \end{cases} \quad \vec{F}_{\text{合}} = 0 \quad (3.2.5)$$

但是，只要这两个力的作用线不重合，偶极子将受到一个力偶矩，矢量形式为：

$$M = Fl\sin\theta \quad (3.2.6)$$

其大小为

$$M = Fl\sin\theta \quad (3.2.7)$$

其中 r 是偶极子两个点电荷连线的长度， θ 是是连线(从 $-q$ 指向 $+q$)与场强 E 的夹角， F 是每个点电荷所受电场力的大小。因为 $F = qE$ ，所以力偶矩的方向垂直于纸面向外。则力偶

$$\begin{aligned} M &= M_+ + M_- \\ &= \frac{1}{2}qlE\sin\theta + \frac{1}{2}qlE\sin\theta \\ &= qlE\sin\theta \end{aligned} \quad (3.2.8)$$

最后写成矢量形式：

$$\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E} \quad (3.2.9)$$

3.2 电介质的极化

1. 电极化

实验表明，充电后的电容器去掉电源，再插入某种电介质（如：玻璃，硬橡胶等），则极板间电压减小了。由 $U = Ed$ 知， E 减小了。 E 是如何减少的呢？从平板电容场强公式 $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$ 知， E 的减小，意味着电介质与极板的接触处的电荷面密度 σ 减小了。但是，极板上的电荷 q_0 没变，即电荷面密度 σ_0 没变，这种改变只能是电介质上的两个表面出现了如图所示的正、负电荷 $\pm q'$ 。电介质在外电场 \vec{E}_0 作用下，其表面出现净电荷的现象称为电介质的电极化。电极化时电介质表面处出现的净电荷称为极化电荷（束缚电荷）， q_0 称为自由电荷。可见，电荷面密度 $\sigma = \sigma_0$ （自由电荷面密度） $-\sigma'$ （极化电荷面密度），即减小了。（ \because 束缚电荷受到限制， \therefore 束缚电荷量比自由电荷少的多，故 σ' 比 σ_0 少的多。） $\therefore E$ 减小。另外，可从图看出， $\pm q'$ 产生的场强 \vec{E}' 与 $\pm q_0$ 产生的场强 \vec{E}_0 相反，所以它的场强为 $E = E_0 - E'$ ，即减小了，这也可以解释实验结果。

2. 电极化的微观机理

通过动画演示偶极子在外电场中的受力和转动情况，帮助学生理解力矩的产生及计算方法。

(1) 电介质分类 (2 类)

无极分子电介质：无外电场时，分子正负电荷中心重合（如 $\text{H}_2, \text{He}, \text{CH}_4$ 等）。有

极分子电介质：即使无外电场时，分子的正负电荷中心也不重合（如： $\text{HCl}, \text{NH}_3, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}$ 等）。分子正负电荷中心不重合时相当于一电偶极子。

2. 电极化微观机理

(1) 无极分子的电极化

无极分子在没有受到外电场作用时，它的正负电荷的中心是重合的，因而没有电偶极矩，如图 a 所示，但当外电场存在时，它的正负电荷的中心发生相对位移，形成一个电偶极子，其偶极矩 p 方向沿外电场 \vec{E}_0 方向，如图 b 所示。对一块介质整体来说，由于电介质中每一个分子都成为电偶极子，所以，它们在电介质中排列如图，在电介质内部，相邻电偶极子正负电荷相互靠近，因而对于均匀电介质来说，其内部仍是电中性的，但在和外电场垂直的两个端面上就不同了。由于电偶极子的负端朝向电介质一面，正端朝向另一面，所以电介质的一面出现负电荷，一面出现正电荷，显然这种正负电荷是不能分离的，故为**束缚电荷**。

结论：无极分子的电极化是由于分子的正负电荷的中心在外电场的作用下发生相对位移的结果，这种电极化称为位移电极化。

(2) 有极分子的电极化

有极分子本身就相当于一个电偶极子，在没有外电场时，由于分子做不规则热运动，这些分子偶极子的排列是杂乱无章的，如图 d 所示，所以电介质内部呈电中性。当有外电场时，每一个分子都受到一个电力矩作用，如图所示，这个力矩要使分子偶极子转到外电场方向，只是由于分子的热运动，各分子偶极子不能完全转到外电场的方向，只是部分地转到外电场的方向，即所有分子偶极子不是很整齐地沿着外电场 \vec{E}_0 方向排列起来，如图 f 所示。但随着外电场 \vec{E}_0 的增强，排列整齐的程度要增大。无论排列整齐的程度如何，在垂直外电场的两个端面上都产生了束缚电荷。

结论：有极分子的电极化是由于分子偶极子在外电场的作用下发生转向的结果，故这种电极化称为转向电极化。

说明：在静电场中，两种电介质电极化的微观机理显然不同，但是宏观结果即在电介质中出现束缚电荷的效果时确是一样的，故在宏观讨论中不必区分它们。

结合实例，讲解电介质的极化现象和极化强度的概念，引导学生分析极化强度与电场强度的关系。

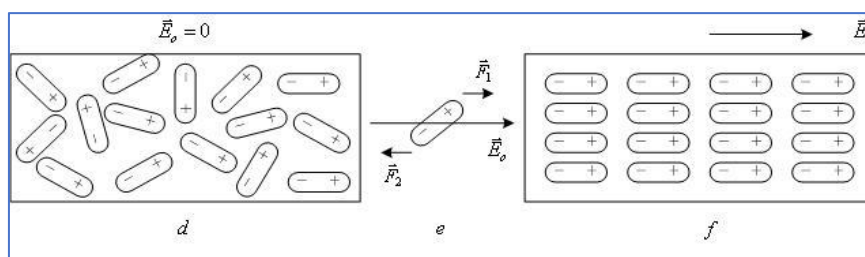


图 3.5 电介质在电场中的极化现象

四、作业与思考

课后作业：3.2.3

五、板书设计

3.2 偶极子

- 一、电偶极子
- 二、电偶极子激发的电场
- 三、电偶极子在外场所受的力矩

3.3 电介质的极化

- 一、电介质的极化
- 二、电极化的微观机理

总结电偶极子的性质、场强计算公式以及偶极子在外场中的受力和能量变化。强调电介质极化的实质和极化强度的意义。

布置课后作业，要求学生计算一些简单电偶极子系统的场强和电势能。

参考资料

- [1] <https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194>
- [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)

课后反思

教学效果：

学生对偶极子和电介质的极化的基本概念理解较为清晰，能够准确地解释偶极矩、电场中偶极子的行为，以及电介质极化的原理。

存在问题：

部分学生在理解电介质极化的微观过程时存在一定困难，尤其是如何从分子水平解释电介质极化现象，部分学生对分子极化的理解不够透彻，未能很好地将宏观现象与微观机制结合起来。

改进措施：

针对学生在理解电介质极化的微观机制时存在的困难，可以通过引入更形象的示意图、模型、动画等方式帮助学生建立直观的理解。

授课课题	第 11 讲 § 3.4 极化电荷	
教学目标	<p>知识目标： 1.掌握极化电荷的定义；</p> <p>2. 了解极化电荷与自由电荷的区别，并理解极化电荷如何影响电场的分布；</p> <p>3. 能够理解极化电荷与电场强度、极化强度之间的定量关系。</p> <p>能力目标： 1.能够通过已知电场强度和介质的极化强度，计算出电介质表面的极化电荷密度；</p> <p>2.能够在不同的电场分布下，判断极化电荷的分布情况，分析电场和极化电荷之间的关系。</p> <p>素养目标： 通过讨论电介质在实际应用中的影响，鼓励学生运用电介质知识进行创新，理解科学研究的意义和对社会进步的推动作用。</p>	
教学重难点	<p>教学重点： 理解极化电荷体密度和面密度同极化强度的关系；</p> <p>教学难点： 理解两种介质分界面上极化电荷面密度同极化强度的关系；</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>上节课介绍了电介质的极化，与导体不同之处是，电介质内基本上没有可以移动的自由电子，但是不影响组成电介质的原子分子中的电荷受电场的作用而发生局部的小范围的运动，重点研究介质的是在电场作用下达到平衡后的性质。</p> <p>电介质极化，其产生的一切宏观效果都是通过极化电荷体现的。在垂直与外场的两个表面上，会出现极化电荷。而这个极化电荷会建立极化电场，从而削弱电介质内部的电场强度。极化电荷是由于电介质极化所产生的，因此极化强度与极化电荷之间必定存在某种关系。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 极化电荷体密度、面密度与极化强度的关系</p> <p>本节讨论极化电荷密度与极化强度的关系。为了便于说明问题，我们以位移极化为模型。设想极化是，每个分子的正电中心相对于负电中心有个位移 l。用 q 表示表示正负电荷的数量，则分子电矩为：</p>		<p>以复习法导入新课</p> <p>回顾上节课电介质极化的内容，提问学生极化电荷是如何产生的。</p> <p>通过多媒体展示极化电</p>

$$\vec{p} = q\vec{l} \quad (3.4.1)$$

设单位体积内有 n 个分子，根据定义，极化强度矢量为：

$$\vec{P} = n\vec{p} = nq\vec{l} \quad (3.4.2)$$

(1) ρ' 与 \vec{P} 的关系

在介质中取一任意形状的体积 ΔV ， ΔV 的边界为 S ，下面求 ΔV 内的极化电荷量 q' 。若 ΔV 在趋于物理无限小，则 $q' / \Delta V$ 就是该点的极化电荷体密度。

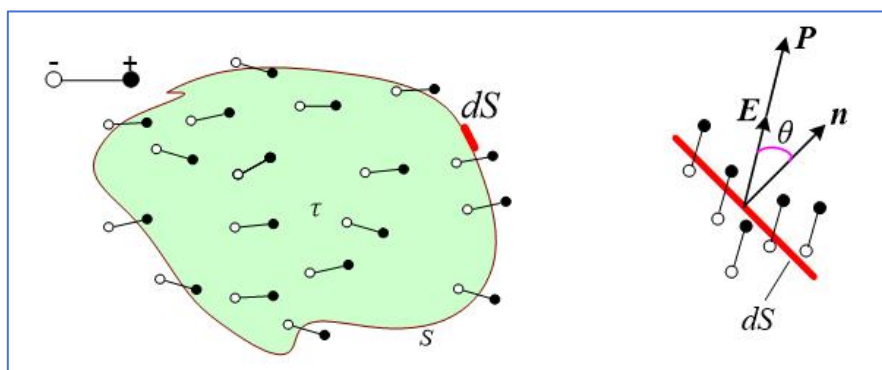


图 3.6 电介质的极化与表面电荷

分析：被 ΔV 的边界 S 截为两段的偶极子对极化电荷有贡献，在 S 上取一个小面元 dS ，其上 \vec{P} 与该点 \vec{E} 相同，设介质中单位体积内的分子数为 n ，则夹层的体积为

$$l|\cos \theta|dS \quad (3.4.3)$$

中心在夹层内的偶极子数（分子数）为

$$nl|\cos \theta|dS \quad (3.4.4)$$

所贡献的电荷量为

$$dq' = -qnl \cos \theta dS \quad (3.4.5)$$

写成矢量形式

$$dq' = -nql \cos \theta dS = -P \cos \theta dS = -\vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (3.4.6)$$

对 S 积分得到 ΔV 的极化电荷总量

$$q' = \oint_S dq' = -\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (3.4.7)$$

当 ΔV 很小时，得到该点的极化电荷体密度为

$$\rho' = \frac{q'}{\Delta V} = \frac{-\oint_S \vec{P} \cdot d\vec{S}}{\Delta V} \quad (3.4.8)$$

(2) 极化电荷面密度与极化强度的关系

荷在电介质表面的分布情况，引导学生思考极化电荷对电场分布的影响。

讲解极化电荷的定义和分类，强调极化电荷与自由电荷的区别。

详细推导极化电荷体密度和面密度与极化强度的关系，引导学生理解公式的物理意义。

在电介质的表面上， θ 为锐角的地方将出现一层正极化电荷， θ 为钝角的地方则出现一层负极化电荷。

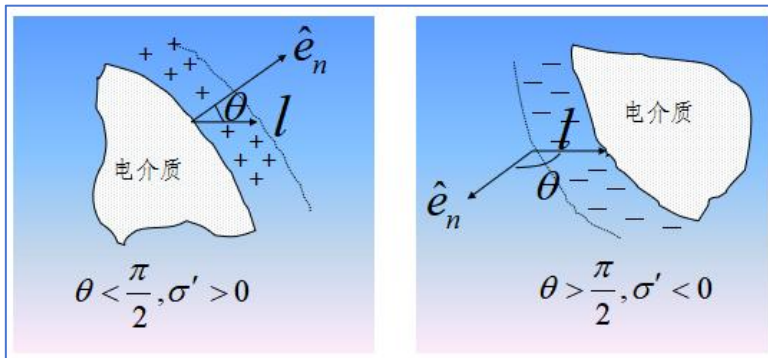


图 3.7 电介质表面束缚电荷的分布

故面元 ds 上的极化电荷为:

$$dq' = \vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (3.4.9)$$

从而极化电荷面密度为:

$$\sigma' = \frac{dq'}{dS} = \vec{P} \cos \theta = \vec{P} \cdot \vec{e}_n \quad (3.4.10)$$

三、课堂小结

1. 面元 ds 上的极化电荷为:

$$dq' = \vec{P} \cdot d\vec{S} \quad (3.4.16)$$

2. 极化电荷面密度为:

$$\sigma' = \frac{dq'}{dS} = \vec{P} \cos \theta = \vec{P} \cdot \vec{e}_n \quad (3.4.17)$$

四、作业与思考

课后作业: 3.4.5

五、板书设计

3.4 极化电荷

一、极化电荷

面元 ds 上的极化电荷为: $dq' = \vec{P} \cdot d\vec{S}$

二、极化电荷面密度与极化强度的关系

极化电荷面密度为: $\sigma' = \frac{dq'}{dS} = \vec{P} \cos \theta = \vec{P} \cdot \vec{e}_n$

通过例题讲解，帮助学生掌握极化电荷密度的计算方法。

总结极化电荷的定义、分类以及与极化强度的关系。

布置课后作业，要求学生计算一些电介质中的极化电荷密度。

参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果:</p> <p>学生基本掌握了极化电荷体密度和面密度同极化强度的关系。能够进行简单的计算和推导。</p> <p>存在问题:</p> <p>部分学生在进行极化电荷密度的计算时, 存在公式使用不熟练的问题。</p> <p>改进措施:</p> <p>在课堂上安排更多的推导和计算练习, 分层次进行练习, 帮助学生从基础到复杂逐步掌握公式的使用和推导方法。</p>	

授课课题	第 12 讲 § 3.5 有介质时的高斯定理	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解电位移物理量。</p> <p>2. 掌握电位移、电场强度和极化强度之间的关系。</p> <p>3. 掌握有介质时的高斯定理及其应用</p> <p>能力目标: 1.能够运用有介质时的高斯定理, 通过选择适当的高斯面, 计算电场分布;</p> <p>2. 能够在不同介质和电荷分布情况下, 合理使用高斯定理进行简化计算。</p> <p>素养目标: 在学习过程中培养严谨的科学思维方式, 注重从理论到实践、从定性到定量的全面理解。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 有介质时的高斯定理及其应用。</p> <p>教学难点: 有介质时的高斯定理的应用, 求介质表面极化电荷的面密度。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>电介质放在电场中时, 受电场的作用而极化, 会在介质表面产生的极化电荷。那么产生的极化电荷反过来如何影响电场的分布?</p> <div><div><div>$\oint \vec{P} \cdot d\vec{S} = -\sum_{int} q'$$\sigma' = (\vec{P}_2 - \vec{P}_1) \cdot \hat{n}$$\vec{E}_0 \rightarrow \vec{P}$$\vec{P} = \chi \epsilon_0 \vec{E}$</div><div>$(\sigma', q')$$\vec{E}'$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}'$</div><div>库伦定律</div><div>叠加原理</div></div></div> <p>图 3.8 电介质极化与束缚电荷的关系</p> <p>在第一章中我们学习了真空中的高斯定理。当有电介质存在时, 高斯定理是否还成立? 如果成立的话, 公式又有什么变化?</p> <p>二、新课讲解</p>		<p>以复习法和提问法导入新课导入:</p> <p>提问学生在真空中高斯定理的内容和应用条件, 引导学生思考有介质时高斯定理的变化。</p> <p>通过多媒体展示有介质时电场线的</p>

<p>从上节看到，当电介质受外电场 \vec{E}_0 作用而电极化时，电介质出现极化电荷，产生的极化电荷反过来影响电场的分布，而变化的电场又使极化情况发生变化。如此互相影响，最后达到平衡。平衡时，介质内的电场是外电场 \vec{E}_0 与极化电荷产生电场 \vec{E}' 的叠加，即</p> $\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' \quad (3.5.1)$ <p>大小： $E = E_0 - E'$。 (3.5.2)</p> <p>若求空间的电场分布，必须同时知道自由电荷和极化电荷的分布。而极化电荷取决于极化强度 \vec{P}，而极化强度 \vec{P} 又取决于中电场 \vec{E}。这似乎形成计算上的循环。为了克服这一困难，可以引入新的矢量场来表示。根据真空中的高斯定理，通过闭合曲面 S 的电场强度通量为给面所包围的电荷除以 q_0，即</p> $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{S_{p_i}} q \quad (3.5.3)$ <p>此处， $\sum_{S_{p_i}} q$ 应理解为闭合面内一切正、负电荷的代数和，在无电介质存在时， $\frac{1}{\epsilon_0} \sum_{S_{p_i}} q = \frac{1}{\epsilon_0} q$；在有介质存在时，$S$ 内既有自由电荷，又有极化电荷，$\sum_{S_{p_i}} q$ 应是 S 内一切自由电荷与极化电荷的代数和，即</p> $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{S_{p_i}} q = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_{S_{p_i}} (q_0 + q') \quad (3.5.4)$ <p>q_0、q' 分别表示自由电荷和极化电荷。实际上，q' 难以测量和计算，故应设法消除之。</p> <p>根据第四节的结果 $q' = -\oint \vec{P} \cdot d\vec{S}$ (3.5.5)</p> <p>则有 $\oint_s (\epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}) \cdot d\vec{s} = q_0$ (3.5.6)</p> <p>引入一个辅助性的矢量——电位移矢量，令 $\vec{D} \equiv \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ (3.5.7)</p> <p>\vec{D} 称为电位移矢量（注意此式只适用于各向同性电介质，而对各向同性的均匀电介质，ϵ 为一常数）。</p> <p>1、有介质时的高斯定理</p> <p>高斯定理为：</p>	<p>分布情况，激发学生对有介质时高斯定理的学习兴趣。</p> <p>新课讲解：</p> <p>讲解电位移矢量的定义和物理意义，引导学生理解电位移矢量与电场强度、极化强度的关系。</p> <p>详细推导有介质时的高斯定理，强调定理的适用范围和条件。</p>
---	--

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum_{S_{\text{内}}} q_0 \quad (3.5.8)$$

说明：

(1) 上式为电介质中的高斯定理，它是普遍成立的。

(2) \vec{D} 是辅助量，无真正的物理意义。算出 \vec{D} 后，可求 $\vec{E} (= \frac{\vec{D}}{\epsilon})$ 。

(3) 如同引进电力线一样，为描述方便，可引进电位移线，并规定电位移线的切线方向即为 \vec{D} 的方向，电位移线的密度（通过与电位移线垂直的单位面积上的电位移线条数）等于该处 \vec{D} 的大小。所以，通过任一曲面上电位移线条数为 $\int_S \vec{D} \cdot d\vec{s}$ ，称此为通过 S 的电位移通量；对闭合曲面，此通量为 $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s}$ 。可见有介质存在时，高斯定理

陈述为：电场中通过某一闭合曲面的电位移通量等于该闭合曲面内包围的自由电荷的代数和。

(4) 电位移线与电力线有着区别：电位移线总是始于正的自由电荷，止于负的自由电荷（可从定理看出）；而电力线是可始于一切正电荷和止于一切负电荷（即包括极化电荷）。如：平行板电容器情况（不计边缘效应）。

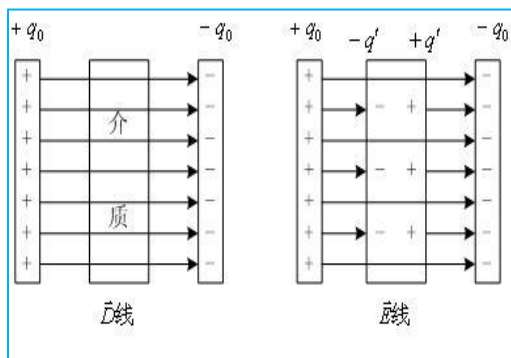


图 3.9 电介质对电场线的影响

2. 有电介质存在时的高斯定理的应用

例 1：平行板电容器中充满各向同性电介质，电极化率为 χ ，极板所带电荷密度为 σ_0 。求电介质中的场强 E 和电容 C 。

解：

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum q_0$$

$$\because \vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} = \epsilon_0 (1 + \chi) \vec{E}$$

通过例题讲解，帮助学生掌握有介质时高斯定理的应用方法。

<p>三、课堂小结</p> <p>高斯定理为：</p> $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum_{S_{\text{内}}} q_0$ <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：3.5.3 3.5.5</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4f81bd; color: white; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p style="text-align: center;">3.5 有电介质时的高斯定理</p> <p>一、有电介质时的高斯定理</p> $\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum_{S_{\text{内}}} q_0$ <p>二、有电介质时的高斯定理的应用</p> </div>	<p>总结有介质时的高斯定理的内容和应用条件。</p> <p>布置课后作业，要求学生运用有介质时的高斯定理计算一些电介质中的电场分布。</p>
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
<p>课后反思</p>	
<p>教学效果：</p> <p>大部分学生对高斯定理和有电介质时的高斯定理的基本概念有了较为清晰的理解，能够区分在真空和有介质情况下的高斯定理形式。学生基本掌握了电位移场与电场强度、极化强度之间的关系，能够理解并应用公式进行简单的计算。</p> <p>存在问题：</p> <p>部分学生在理解电位移场的物理意义以及其与电场强度、极化强度之间的关系时存在一定困难，尤其是在推导和应用公式时，容易出现理解上的混淆。</p> <p>改进措施：</p> <p>通过更多的图示、动画和模型，帮助学生在微观层面上理解电位移场的物理意义及其与电场强度、极化强度之间的关系。引入在线讨论平台，让学生在课后进行问题讨论和交流，增强学习互动性。</p>	

授课课题	第 13 讲 § 3.6 有介质时的静电场方程	
教学目标	知识目标：1.理解有电介质时的静电场方程； 2.了解电位移和电场强度的边界关系。 能力目标：学会使用介电常数和电位移场的方程描述静电场。 素养目标：学生应通过对静电场方程的学习，培养清晰的物理思维方式，能够从宏观和微观层面理解电场的分布和介质的作用。	
教学重难点	教学重点：理解有介质时的静电场方程。 教学难点：了解电位移和电场强度的边界关系。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>电位移矢量 \mathbf{D} 只是一个辅助物理量，真正描述电场的物理量仍是电场强度 \mathbf{E}。引出 \mathbf{D} 的好处是可以绕开极化电荷把静电场规律表述出来，同时也为求解电场带来方便，不过只适用于有对称性的静电场问题。对于一般的静电场问题，只靠高斯定理是不能完全确定静电场的解，还必须考虑另一条基本定理——环路定理。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1、静电场方程</p> <p>不管是自由电荷产生的外电场，还是极化电荷产生的退极化场，它们都是保守场，均满足环路定理，即</p> $\oint_L \vec{E}_0 \cdot d\vec{l} = 0 \quad , \oint_L \vec{E}' \cdot d\vec{l} = 0$ $\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}')$ <p style="text-align: right;">(3.6.1)</p> <p>为了要确定 \vec{D}、\vec{E} 两个矢量，还需附加条件这叫电介质的性能方程。如果已知自由电荷在空间的分布，电介质在空间的分布以及每种电介质的介电常数，原则上可由以下式子确定场中的 \vec{D}、\vec{E}。</p>		<p>复习法导入新课：回顾有介质时的高斯定理，提问学生如何描述静电场中场与源的关系。</p> <p>讲解有介质时的静电场方程，包括高斯定理和环路定理，强调方程的物理意义和适用范围。</p>

无介质时

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\varepsilon_0} \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}') \quad (3.6.2)$$

有介质时

$$\oint_L \vec{D} \cdot d\vec{S} = q \quad \vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (3.6.3)$$

2、边值关系

(1) D 的法向分量连续

$$\bar{D}_{1n} = \bar{D}_{2n} \quad (3.6.4)$$

(2) E 的法向分量

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{E_1}{E_2} \quad (3.6.5)$$

(3) E 的切向分量连续

$$E_{2t} = E_{1t} \quad (3.6.6)$$

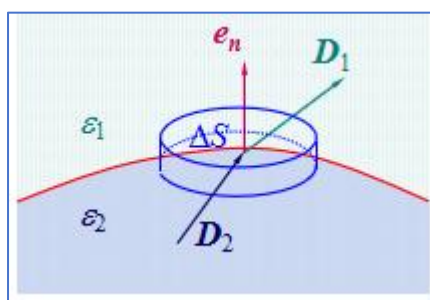


图 3.19 电位移矢量在介质分界面的连续性条件

详细推导电位移和电场强度的边界关系，引导学生理解边界条件在求解静电场问题中的作用。

强调电位移和电场强度的边界关系的重要性。

布置课后作业，要求学生运用静电场方程求解一些简单的静电场问题。

三、课堂小结

1. 介质时的静电场方程的内容。
2. 介质时的静电场方程的应用条件。

三、作业与思考

课后作业 3.6.1 (1)

五、板书设计

3.6 有介质时的静电场方程

一、静电场方程

无介质时

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}')$$

有介质时

$$\oint_L \vec{D} \cdot d\vec{S} = q \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

二、边值关系

D 的法向分量连续

$$\vec{D}_{1n} = \vec{D}_{2n}$$

E 的法向分量

$$\frac{E_{2n}}{E_{1n}} = \frac{E_1}{E_2}$$

E 的切向分量连续

$$E_{2t} = E_{1t}$$

参考资料

[1] <https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194>

[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)

课后反思

教学效果:

学生基本理解静电场方程，能够正确描述静电场方程的物理意义、了解电位移和电场强度的边界关系。

存在问题:

部分学生在推导和应用静电场方程时遇到了困难，特别是在有介质的情况下，公式的应用和变换需要较强的数学推理能力。一些学生在分析电场与介质之间的关系时，存在一定的混淆。

改进措施:

调整教学节奏：根据学生的反馈，调整教学内容的深度和节奏，确保学生在掌握基础知识后再进入更复杂的内容。

授课课题	第 14 讲 § 3.7 电场的能量	
教学目标	<p>知识目标: 1.掌握电场能量密度的定义及其公式; 2.了解电位移场 \mathbf{D} 和电场强度 \mathbf{E} 之间的关系。</p> <p>能力目标: 1.使用电场能量密度公式计算电场的能量分布,尤其是在电荷分布已知的情况下; 2.能将高斯定理与电场能量的公式结合,计算特定对称电荷分布(例如点电荷、均匀电荷分布等)中的电场能量。</p> <p>素养目标: 通过对电场能量的学习,培养学生理解不同物理量之间内在联系的能力,特别是电场强度、位移场和能量密度之间的关系。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 理解静电场能量密度;</p> <p>教学难点: 计算总的静电场能量</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>问题: "大家是否注意过电容器、手机电池等电子产品中电能的储存? 电容器能够储存电场能量,那么你们知道,电场中的能量是怎么产生的吗? 它和我们平时接触到的电能有什么区别? "</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1、带电电容器的能量</p> <p>一个电中性的物体,周围没有电场,当把电中性物体的正、负电荷分开时,外力作了功,这时该物体周围建立了电场。所以,通过外力做功可以把其它形式能量转变为电能,贮藏在电场中。今以带电电容器为例进行讨论。</p> <p>如图所示, 设 t 时刻, 两极板上电荷分别为$+q(t)$和$-q(t)$, A、B 间电势差为:</p> $U_A(t)-U_B(t)=\frac{q(t)}{C} \qquad (3.7.1)$		<p>以提问法导入新课</p> <p>讲解电场能量密度的定义和计算公式,引导学生理解电场能量密度的物理意义。</p>

再把电量 dq 从 B 移到 A，外力做的功为

$$dW = (U_A - U_B) dq = \frac{q(t)}{C} dq. \quad (3.7.2)$$

当 A、B 上电量达到 +Q 和 -Q 时，外力做的总功为：

$$W = \int dW = \int_0^Q \frac{q(t)}{C} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C (U_A - U_B)^2 = \frac{1}{2} Q (U_A - U_B) \quad (3.7.3)$$

∴ 外力功全部转化为带电电容器贮藏的电能 W_e ，

∴ 电容器储存的电能为：

$$W_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C (U_A - U_B)^2 = \frac{1}{2} Q (U_A - U_B) \quad (3.7.4)$$

2、电场的能量

$$\therefore \begin{cases} U_A - U_B = Ed \\ C = \frac{\epsilon S}{d} \end{cases} \quad (3.7.5)$$

$$\therefore W_e = \frac{1}{2} \frac{\epsilon S}{d} E^2 d^2 = \frac{1}{2} \epsilon E^2 Sd = \frac{1}{2} \epsilon E^2 V (V = Sd : \text{电容器体积}) \quad (3.7.6)$$

由上可知，平行板电容器能量与 E, V, ϵ 有关。

因为场强为匀强电场， W_e 应均匀分布，故单位体积内能量，即能量密度为

$$w_e = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} DE \quad (3.7.7)$$

$$\boxed{w_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2 = \frac{1}{2} DE} \quad (3.7.8)$$

说明：（1）①适用于任何电容器；②适用于任何电场。

（2）对任一带电系统整个电场能量为

$$W_e = \int_V w_e dV = \int_V \left(\frac{1}{2} DE \right) dV = \int_V \frac{1}{2} \epsilon E^2 dV. \quad (3.7.9)$$

能量存在是由于电荷的存在，电荷是能量的携带者，但能量是存在于电场中，电场是能量的携带者。在静电场中能量究竟是电荷的携带的还是电场携带的，是无法判断的。因为在静电场中，电场和电荷是不可分割地联系在一起的，有电场必有电荷，

详细推导电场能量的计算方法，包括积分公式和微分公式，强调能量的分布性和累积性。

<p>有电荷必有电场，而且电场与电荷之间有一一对应关系，因而无法判断能量是属于电场还是属于电荷。但是，在电磁波情形下就不同了，电磁波是变化的电磁场的传播过程，变化的电场可以离开电荷而独立存在，没有电荷也可以有电场，而且场的能量能够以电磁波的形式传播，这一事实证实了能量是属于电场的，而不是属于电荷的。</p> <p>三、课堂小结</p> <p>1. 电容器储存的电能为：</p> $W_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C(U_A - U_B)^2 = \frac{1}{2} Q(U_A - U_B)$ <p>2. 能量密度</p> $w_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} DE$ <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：3.7.1 3.7.2</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4f7942; color: white; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">3.6 电场的能量</p> <p>一、电场的能量</p> <p>电容器储存的电能为：</p> $W_e = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C} = \frac{1}{2} C(U_A - U_B)^2 = \frac{1}{2} Q(U_A - U_B)$ <p>二、电场能的能量密度</p> $w_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 = \frac{1}{2} DE$ </div>	<p>课堂小结：总结电场能量密度的定义和计算公式。</p> <p style="text-align: center; margin-top: 100px;">布置作业</p>
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
<p>课后反思</p>	
<p>教学效果：</p> <p>通过课堂互动和引导式问题，学生逐渐理解了电场能量的与电场强度、电位移场和介质的关系，尤</p>	

其是在有介质的情况下，学生能够意识到电场能量在不同介质中的表现差异。大部分学生能够理解电场能量的概念，并能熟练运用电场能量密度公式进行计算。

存在问题：

在积分求解电场总能量时，部分学生在数学推导和积分计算上仍显得较为生疏，尤其是对复杂电场分布下电场能量的计算有一定的困难。在涉及电位移场和电场强度之间关系时，学生在理解电介质对电场能量存储影响的方面还有待加强。

改进措施：

在下次授课时，应更为深入地讲解电场能量密度的物理背景，并通过具体的例子帮助学生理解。例如，可以引入一些工程实际问题，如电容器充放电过程、电子设备中的电场能量管理等，让学生更加直观地理解电场能量如何在不同系统中存储和转化。

对于较为复杂的概念和计算步骤，鼓励学生课后通过小组合作、讨论解决疑问，同时利用在线资源、课外书籍等进行扩展学习，增强自学能力。

授课课题	第 15 讲 § 4.1 恒定电流 § 4.2 直流电路	
教学目标	<p>知识目标： 1.理解电流的定义； 2.理解电流密度与导体中的电流分布关系，电流的连续性方程。</p> <p>能力目标： 1.熟练应用基尔霍夫电流定律； 2.学会应用电路分析的方法，如串联和并联电路的分配规则，利用基尔霍夫定律和欧姆定律简化电路分析过程。</p> <p>素养目标： 通过逐步分析复杂电路问题，培养学生的系统思维能力，使他们能够在面对更复杂的电路时有条不紊地找到解决方法。</p>	
教学重难点	<p>教学重点： 1.理解电流的连续性方程； 2.理解直流电路重要性质。</p> <p>教学难点： 1 理解电流的连续性方程； 2 掌握基尔霍夫第一定律。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>问题情境：通过生活中的实际现象引入问题。例如，为什么家里的电灯能够一直亮着？电流是如何在电路中保持恒定的？</p> <p>实际应用：讨论智能手机充电的过程，引出电流恒定的条件及其在实际应用中的重要性。</p> <p>启发性问题：如果一个电路中有多种电阻材料，电流会如何分布？什么条件下电流可以保持恒定？</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 电流 电流密度矢量</p> <p>静电场中的导体处于静电平衡时，其内部的场强为零，内部没有电荷作定向的宏观运动。如果把导体接在电源的两极上，则导体内任意两点之间将维持恒定的电势差，在导体内维持一个电场，导体内的电荷在电场力的作用下作宏观的定向运动，形成电流。形成电流的条件：</p>		<p>以提问法导入新课</p> <p>讲解电流的定义，强调电流的方向规定为正电荷定向运动的方向。</p>

(1) 导体中有载流子（电子、空穴、离子）；

(2) 导体中有电场存在或导体两端有电势差。

电流的方向（标量）规定：正电荷定向运动的方向为电流的方向

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (4.1.1)$$

在导体中，电流的方向总是沿着电场方向，从高电势处指向低电势处。导体中所选的截面不同则电流强度就不同，电流强度反映截面总体情况，不能反映截面上各点情况。无法描写不同空间电流分布情况，故引入电流密度。

$$J = \frac{dI}{dS_{\perp}} \quad (4.1.2)$$

方向和大小：数值上等于通过导体中某点附近单位垂直截面的电流；

其方向与电流方向相同

$$dI = j \cos \theta dS = \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (4.1.3)$$

$$I = \int_s j \cos \theta dS = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{S} \quad (4.1.4)$$

通过一个曲面的电流强度 I 就是电流密度矢量 J 对该曲面的通量。 J 是一个空间矢量函数，是细致描述电流分布情况的物理量。对于一个曲面而言， I 相同但 J 可以不同。为形象描写电流分布，可以引入“电流线”的概念

2. 电流线表述电场

(1) 电流线上某点的切向与该点的 J 方向一致；

(2) 电流线的密度等于

$$dN = dI \quad (4.1.5)$$

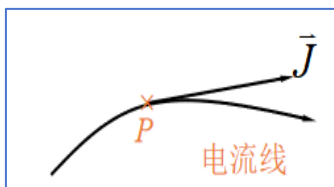


图 4.1 电流线与电流密度矢量

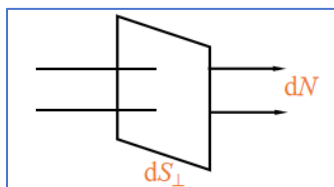


图 4.2 电流线与电流密度矢量

3. 电流的连续性方程 恒定条件

通过某一封闭曲面的电流密度的通量为:

$$I = \oint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} \quad (4.1.6)$$

根据电荷守恒定律，单位时间内从封闭曲面流出的电量（即电流）应等于该封闭曲面内电荷 q 的减少率，即

解 电 流 密 度矢量的概念，包括其方向和大小的定义，以及通过一个曲面的电流强度与电流密度矢量的关系。

推 导 电 流 的 连 续 性 方程，结合电荷守恒定律，解释恒定电流的条件。

$$\oint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{dq}{dt} \quad (4.1.7)$$

此式即为电流的连续性方程。

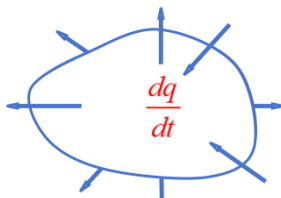


图 4.3 电荷流动与电流示意图

恒定电流条件：导体内各处电流密度不随时间变化的电流称为稳恒电流。

$$\frac{dq}{dt} = 0 \quad (4.1.8)$$

物理意义：流进、流出的 I 相等。可知电荷分布 (ρ 、 σ) 不随时间变化。但并不意味没有电流。电荷向前运动但原来的被后继的电荷补上。任一闭合面流出、流进的电量相等。电流线连续地穿过闭合曲面所包围的导体部分。因此恒定电流的电流线不可能在任何地方中断，永远是闭合曲线。

不随时间变化的电荷分布产生的不随时间变化的电场。与稳恒电流相伴的电场，该电场类似于静电场，具有静电场的性质。

稳恒电场不同于静电场：

(1) 这种电场不是静止的电荷产生的，而是在有电荷定向运动的情况下、由稳定分布的电荷产生的。

(2) 维持这种电场需要能量（提供能量的装置称为电源）。

(3) 在静电平衡条件下,导体内部场强为零,导体外部表面附近的场强垂直于导体的表面。在流有稳恒电流的电路中,导体内部的场强不为零,由它直接推动电荷运动形成电流。

稳恒电场与静电场类似：

同样满足高斯定理与环路定理。静电场中的电势、电压等概念都可应用于稳恒电场。

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (4.1.9)$$

$$U = V_1 - V_2 = \int_{P_1}^{P_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} \quad (4.1.10)$$

$$\oiint_s \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q \quad (4.1.11)$$

4.2 直流电路

1. 电路的基本概念

讲解直流电路的基本概念，包括电路、元件、支路和节点的定义。

强调直流电路中同一支路的各个截面有相同的电流，以及基尔霍夫第一定律的内容和应用。

电路：用导线把电源、用电器以及中间环节连接起来的电流通路；

元件：电路中每一个组成部分；

支路：每一个分支。

节点：三条（及以上）支路的联结点。

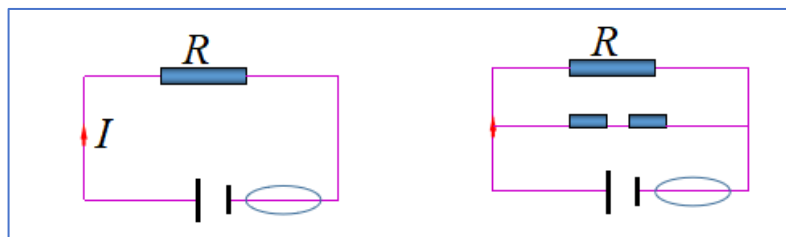


图 4.4 含电阻与电源的简单电路对比

1. 直流电路

定义：载有恒定电流的电路叫恒定电流电路或直流电路

(1) 直流电路中同一支路的各个截面有相同的电流 I 。

∴ 稳恒条件：

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (4.2.1)$$

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = \iint_{s_1} \vec{J}_1 \cdot d\vec{s} + \iint_{s_2} \vec{J}_2 \cdot d\vec{s} = -I_1 + I_2 = 0 \quad (4.2.2)$$

$$I_1 = I_2 \quad (4.2.3)$$

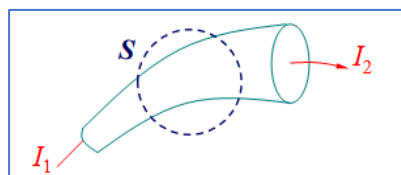


图 4.5 闭合曲面中的电流分

(2) 流进直流电路任一节点的电流等于从该节点流出的电流。(称为基尔霍夫第一定律)

规定从节点流出： $I > 0$ ，流入节点： $I < 0$

$$\oint_S \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0 \rightarrow \sum_i I_i = 0 \quad (4.2.4)$$

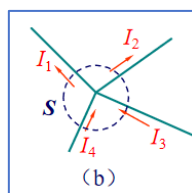


图 4.6 闭合曲面中的电流分布与守恒

课堂小结：

总结电流的定义、电流密度矢量的概念以及电流的连续性方程。

强调直流电路中电流的特点和基尔霍夫第一定律的重要性。

三、课堂小结

<p>电流的连续性方程：</p> $\oint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{dq}{dt} \quad (4.1.7)$ <p>基尔霍夫第一定律：</p> $\sum_i I_i = 0 \quad (4.2.5)$ <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业： 判断下列说法是否正确，并说明理由。</p> <ul style="list-style-type: none"> (1) 沿着电流线的方向，电位必降低 (2) 不含源支路中电流必从高电位到低电位 (3) 含源支路中电流必从低电位到高电位 <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4f81bd; color: white; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">4.1 恒定电流</p> <p>一、电流</p> <p>二、电流密度</p> <p>二、电流的连续性方程与恒定电流条件</p> $\oint_s \vec{J} \cdot d\vec{s} = -\frac{dq}{dt}$ <p style="text-align: center;">4.2 直流电路</p> <p>一、电路</p> <p>二、直流电路</p> </div>	<p>布置课后作业</p> <p>提出思考题，如在不同截面的导体中，电流强度和电流密度如何变化等。</p>
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
<p>课后反思</p>	
<p>教学效果：</p> <p>大部分学生能够理解恒定电流的基本概念，并掌握电流、电压、电阻的关系。基本掌握了直流电路中串联和并联电路的特点及其计算方法，能够运用基尔霍夫定律分析简单的电路问题</p> <p>存在问题：</p> <p>部分学生对电流密度和导电性之间的关系理解不够深入，容易混淆电流强度和电流密度的概念。</p>	

改进措施：

在讲解恒定电流和直流电路时，更加注重概念的深入讲解和实例分析，帮助学生从根本上理解这些概念和原理。

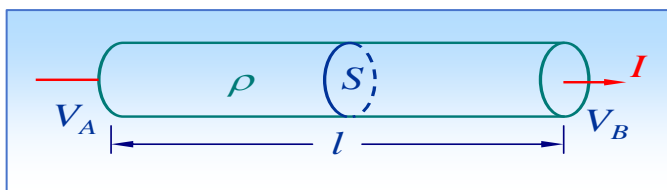
授课课题	第 16 讲 § 4.3 欧姆定律和焦耳定律	
教学目标	<p>知识目标： 1.理解欧姆定律及其微分形式； 2.理解电流的功、功率和焦耳定律。</p> <p>能力目标： 1.学会通过欧姆定律计算电阻、电流和电压； 3. 掌握电流的功、功率和焦耳定律。</p> <p>素养目标： 通过实际问题和案例分析，帮助学生认识到欧姆定律和焦耳定律在生活和生产中的广泛应用，激发他们将理论知识运用于实际问题解决的兴趣。</p>	
教学重难点	<p>教学重点： 掌握欧姆定律及其微分形式，理解电流的功、功率和焦耳定律。</p> <p>教学难点： 理解微分形式的欧姆定律。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>启发性问题：如果一个电路中有多种电阻材料，电流会如何分布？什么条件下电流可以保持恒定？</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 欧姆定律 电阻</p> <p>实验总结：通过一段金属的电流强度 I 与加在金属两端的电压成正比。比例系数 R 反应了导体对电流的阻碍程度。电阻的倒数称为电导，表示电流导通的能力，记为 G 单位：西门子 S。</p> $G = \frac{1}{R}, \quad \therefore I = GU \tag{4.3.1}$ <div></div>		<p>提问法导入新课</p> <p>新课讲解：</p> <p>讲解欧姆定律的内容，包括其公式</p>

图 4.7 电流与电势差的关系

2. 电阻率：

$$R = \rho \frac{l}{S} = \frac{l}{\gamma S} \quad (4.3.2)$$

ρ 为材料的电阻率，单位 Ωm

γ 电导率，单位 $\frac{1}{\Omega\text{m}}$

电阻率（电导率）不但与材料的种类有关，而且还和温度有关，一般金属在温度不太低时：

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \quad (4.3.3)$$

对于不均匀导体：

$$R = \int \rho \frac{dl}{S} = \int \frac{dl}{\gamma S} \quad (4.3.4)$$

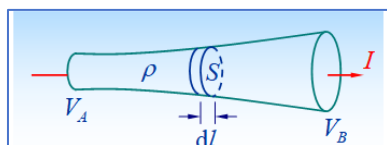


图 4.8 电流、电压和电阻率的示意图

3. 欧姆定律的微分形式

$$I = \frac{U}{R} \quad U = IR \quad (4.3.5)$$

$$dI = \frac{dU}{R} \quad (4.3.6)$$

$$JdS = \frac{EdldS}{\rho dl} \quad (4.3.7)$$

$$J = \frac{1}{\rho} E = \gamma E \quad (4.3.8)$$

4. 电功率 焦耳定律

(1) 焦耳定律

电流 J 通过导体时放出的热量 Q 与电流 I 的平方、导体电阻 R 及通电时间 t 成正比。

和物理意义，强调电阻是导体对电流的阻碍程度。

介绍电阻率和电导率的概念，以及它们与材料种类和温度的关系。

推导欧姆定律的微分形式，解释其在不均匀导体中的应用。

$$Q = I^2 R t \quad (4.3.9)$$

(2)电功率

$$P = UI \quad (4.3.10)$$

5. 金属导电的经典微观解释

金属导电的宏观规律是由它的微观导电机制决定的。电子热运动不形成宏观电流，电子热运动平均速度 \bar{v} 为 0，电场作用下电子的“定向漂移”形成宏观电流，电场作用下电子的“定向漂移”形成宏观电流。

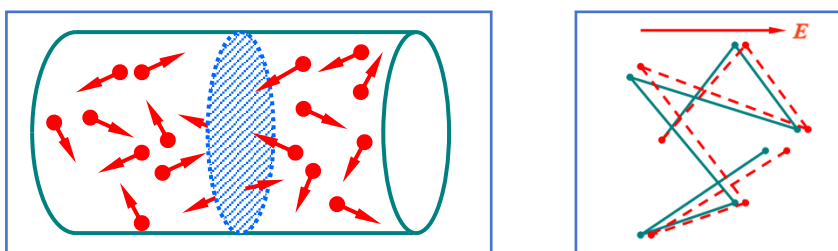


图 4.9 电子热运动示意图

(1) 金属导电的经典电子论

有关金属的第一个理想模型：1900 年特鲁德提出：把气体分子运动论用于金属，提出了经典的金属自由电子气体模型。金属自由电子气体模型：晶格（离子实）变化可以忽略，价电子可以脱出成为独立、自由的电子。

金属自由电子气体模型假定：除了电子与晶格碰撞一瞬间以外，忽略电子与晶格之间的相互作用，即“自由电子近似”，忽略电子与电子之间的相互作用，即所谓的“独立电子近似”，电子与离子实的碰撞是随机的瞬间事件，碰撞会突然改变电子速度（包括大小和方向），在相继两次碰撞间，电子做直线运动，遵从牛顿定律；同时碰撞还会使电子达到热平衡，碰撞后的电子速度方向是随机的，金属中自由电子的运动和单原子的理想气体非常相似。

质量 m ，所带电量为 $-e$ 自由电子受恒定电场作用而获得的定向加速度 a

$$\vec{a} = \frac{-e\vec{E}}{m} \quad (4.3.11)$$

假定电子与晶格点阵只要碰撞一次，它所获得的定向速度就消失，接着又重新开始作定向初速度为零的加速运动——自由程 λ

设电子在两次碰撞之间的平均飞行时间为 τ ，则在第二次碰撞之前电子获得的定向速度为

$$\vec{u}_t = a\tau = \frac{-e\vec{E}}{m}\tau \quad (4.3.12)$$

N 电子在电场作用的定向平均速度

$\bar{\vec{u}} = \frac{0 + \vec{u}_f}{2} = -\frac{e\vec{E}}{2m}\bar{\tau} \quad (4.3.13)$ <p>N 由于热运动平均速率 \bar{v} 远大于定向定向运动平均速率</p> $\bar{\tau} = \frac{1}{f} = \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} \quad (4.3.14)$	
<p>N 最终得到</p> $\bar{\vec{u}} = -\frac{e}{2m} \frac{\bar{\lambda}}{\bar{v}} \vec{E} \quad (4.3.15)$ <p>一个自由程内速度与加速度方向一致，解释了 \vec{u} 与 E 处处方向一致。</p>	<p>总结欧姆定律的内容和应用，强调电阻率和电导率的概念。</p>
<h3>三、课堂小结</h3> <p>欧姆定律的微分形式</p> $J = \frac{1}{\rho} E = \gamma E$	<p>强调电功率和焦耳定律的重要性，以及导体的导电机理。</p>
<h3>四、作业与思考</h3> <p>课后作业：4.3.1 4.3.2 4.3.4</p> <h3>五、板书设计</h3>	
<div style="background-color: #4f7942; color: white; padding: 10px;"> <p style="text-align: center;">4.3 欧姆定律和焦耳定律</p> <p>一、欧姆定律 电阻</p> <p>二、欧姆定律的微分形式</p> $J = \frac{1}{\rho} E = \gamma E$ <p>三、导体的导电机理</p> <p>四、电流的热效应</p> </div>	
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
<p style="text-align: center;">课后反思</p>	

教学效果：

通过实际问题的讲解和互动，学生对电流、电压和电阻的关系有了更直观的理解。课堂讨论和例题讲解环节中，学生提问积极，参与度较高。

存在问题：

部分学生对导体的导电机理理解还不够透彻。

改进措施：

通过实际案例和情境问题，让学生在真实情境中理解导体的导电机理。

授课课题	第 17 讲 § 4.4 电源和电动势	
教学目标	<p>知识目标: 1.了解非静电力做功; 2.理解电源和电动势的概念。</p> <p>能力目标: 1.掌握闭合电路和一段含源电路的欧姆定律及其应用; 2.了解电动势和电压的不同之处及其在电路中的表现; 3.掌握电动势、电压和内阻的关系,能够区分开路电压和端电压。</p> <p>素养目标: 通过了解不同类型电源的原理和应用,增强学生的环保意识,认识到节约能源和使用清洁能源的重要性。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 掌握闭合电路和一段含源电路的欧姆定律及其应用。</p> <p>教学难点: 掌握一段含源电路的欧姆定律。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>从生活中常见的电源设备入手,比如干电池、汽车电池、充电宝等,向学生提出问题:“这些电源是如何让设备运作的?”通过这些问题引导学生思考电源背后的原理。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 非静电力</p> <p>要求在电源内电路中存在一种能反抗静电力、并把正电荷由负极低电势处推向正极高电势处的非静电力 $F_{\text{非}}$</p> $\vec{E}_{\text{非}} = \frac{\vec{F}_{\text{非}}}{q} \text{(非静电力的电场)} \quad (4.4.1)$ $\vec{J} = \gamma(\vec{E}_{\text{非}} + \vec{E}) \quad (4.4.2)$		<p>新课导入</p> <p>通过多媒体展示电源的工作原理,引出非静电力和电动势的概念。</p>

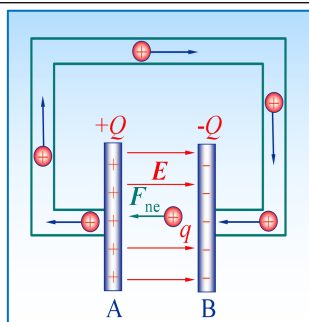


图 4.19 导体棒间的电磁相互作用

2. 电动势，一段含源电路的欧姆定律

电动势的定义：把单位正电荷从负极通过电源内部移到正极时，非静电力所作的功。

$$\varepsilon = \int_{- \text{内部}}^{+} \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l} \quad (4.4.3)$$

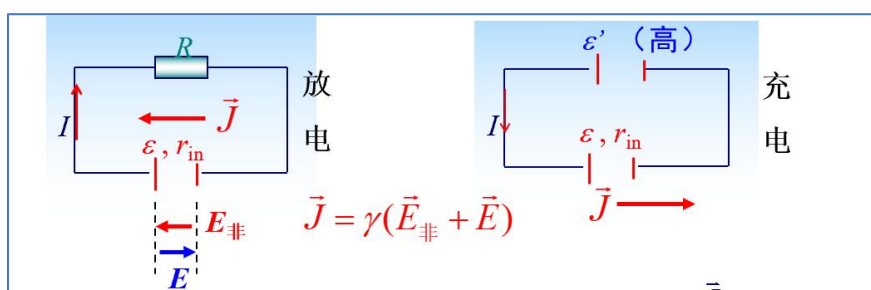


图 4.20 电容器充放电过程中的电流与电场示意图

闭合回路的电动势：把单位正电荷绕闭合回路一周，非静电力所做的功

$$\varepsilon = \oint_L \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l} \quad (4.4.4)$$

电动势与电势差的异同

相同点：单位相同

开路时路端电压(电势差)等于电源电动势

不相同点：电势差是保守场场强的线积分，与路径无关

电动势是非保守场场强的线积分，与路径有关

3. 电源的路端电压和内阻

路端电压：

$$\begin{aligned} U &= U_+ - U_- = \int_+^- \vec{E} \cdot d\vec{l} = \int_+^- (-\vec{E}_{\text{非}} + \frac{\vec{J}}{\gamma}) \cdot d\vec{l} \\ &= -\int_+^- \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l} + \int_+^- \frac{\vec{J}}{\gamma} \cdot d\vec{l} = \int_-^+ \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l} - \int_-^+ \rho J dl \cos \theta \\ &= \varepsilon \mp Ir \end{aligned} \quad (4.4.5)$$

J 与积分方向一致为放电： $U = \varepsilon - Ir$

J 与积分方向相反为充电： $U = \varepsilon + Ir$

新课讲解：

讲解非静电力的定义和作用，强调其在电源内部的重要性。

推导电动势的定义，解释电动势与电势差的区别和联系。

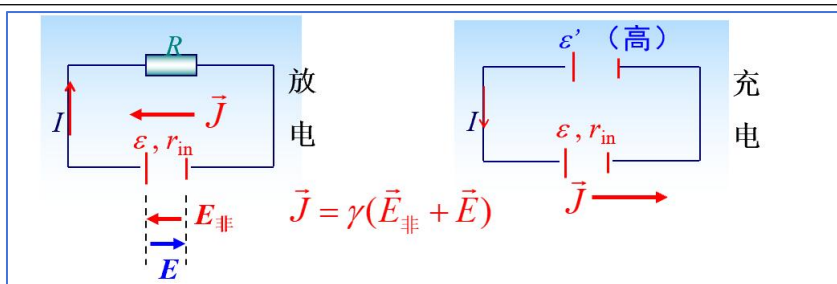


图 4.21 电容器充放电过程中的电流与电场示意图

路端电压的定义：正负极之间的电压，等于把单位正电荷从正极通过电源内部移到负极时静电力所作的功

理想电源：内阻 $r = 0$

特点： $U = \varepsilon$

即：无论充放电、电流大小

电源提供的路端电压恒定

实际电源：内阻 $r \neq 0$ ，等效于理想电源和电阻串联

$$r \ll R, I = \frac{\varepsilon}{R} \Rightarrow \text{恒压源, } I \text{ 与 } r \text{ 无关}$$

$$r \gg R, I = \frac{\varepsilon}{r} \Rightarrow \text{恒压源}$$

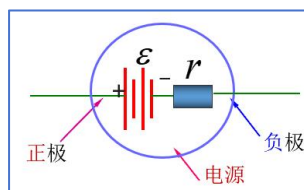


图 4.22 电源示意图

三、课堂小结

电动势的定义：把单位正电荷从负极通过电源内部移到正极时，非静电力所作的功。

$$\varepsilon = \int_{- \text{内部}}^{+} \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l} \quad (4.4.6)$$

四、作业与思考

课后作业：4.4.2 4.4.5 4.4.7

四、板书设计

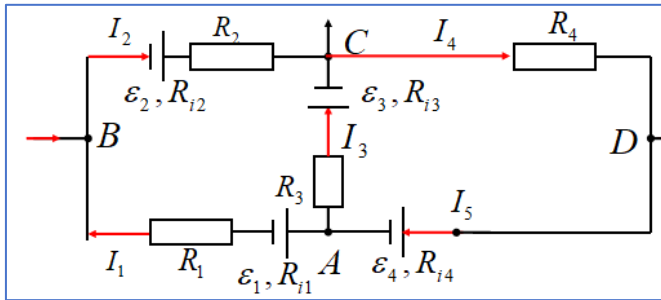
讲解电源的路端电压和内阻，强调电动势、电压和内阻的关系。

总结非静电力、电动势、电源的路端电压和内阻的概念。

强调闭合电路和一段含源电路的欧姆定律的应用。

布置课后作业，要求学生计算一些含源电路中的电流和电压。

<div style="text-align: center;">4.4 电源和电动势</div> <p>一、非静电力</p> <p>二、电动势</p> <p>把单位正电荷从负极通过电源内部移到正极时，非静电力所作的功。</p> $\varepsilon = \int_{- \text{内部}}^{+} \vec{E}_{\text{非}} \cdot d\vec{l}$ <p>三、电源的路段电压和内阻</p> <p>四、电源的充放电功率</p> <p>五、闭合回路的电流强度和输出功率</p> <p>六、电动势的测量</p>	
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果：</p> <p>大部分学生能够掌握电动势、电源及内阻等基本概念，并理解电动势与电压的区别。通过对电源类型的介绍，学生能初步了解不同电源的工作原理。</p> <p>存在问题：</p> <p>学习电动势的推导和应用时，学生可能会表现出较好的公式记忆能力，但对公式的物理意义和推导过程的深入理解可能还不足。</p> <p>改进措施：</p> <p>在讲解电动势、电压、电源的基础概念时，可以通过类比、动画演示、互动问答等多种方式帮助学生加深理解。例如，利用生活中常见的电池和电源设备进行现场演示，让学生更加直观地理解电动势的作用。</p>	

授课课题	第 18 讲 § 4.5 基尔霍夫方程组	
教学目标	知识目标: 1.理解基尔霍夫电流定律 (KCL) 和基尔霍夫电压定律 (KVL) 的基本概念; 2.掌握基尔霍夫方程组及其应用。 能力目标: 1.学会应用基尔霍夫定律分析复杂电路中的电流和电压关系; 2.能够建立并求解基尔霍夫方程组, 解决多支路电路中的电流和电压问题。 素养目标: 通过学习基尔霍夫定律和电路分析方法, 培养学生严谨的科学思维和求实态度。	
教学重难点	教学重点: 掌握基尔霍夫方程组及其应用, 学会用基尔霍夫方程组解题。 教学难点: 理解基尔霍夫第二方程组。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>复习中学串并联的电流电压特点和基尔霍夫第一定律。提出问题: 如何分析复杂电路中的电流和电压?</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 复杂电路</p> <p>定义: 一个复杂电路是多个电源和多个电阻的复杂联接, 且不能归结为简单电路。</p> <div></div> <p>图 4.22 复杂电路</p> <p>2. 基尔霍夫方程组</p>		<p>提 问 法 导 入 新 课</p> <p>复 习 中 学 串 并 联 的 电 流 电 压 特 点 和 基 尔 霍 夫 第 一 定 律, 提 问 学 生 如 何 分 析 复 杂 电 路 中 的 电 流 和 电 压。</p>

(1) 基尔霍夫第一定律-----又称节点电流定律

根据电流恒定条件:

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = 0 \quad (4.5.1)$$

在任一节点处, 流向节点的电流和流出节点的电流的代数和为零:

$$\sum (\pm I_i) = 0 \quad (4.5.2)$$

说明: “±”号: 流出取“+”, 流入取“-”

节点方程的独立性: 如果电路中共有 n 个节点, 则只有 n-1 个节点电流方程是独立的。

例 1:

$$-I_3 - I_1 + I_2 = 0 \quad (4.5.2)$$

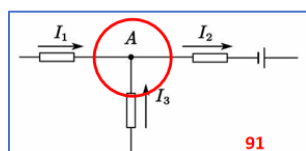


图 4.23 例 1 用图

在求解复杂电路问题前, 各支路电流往往未知, 列方程时首先假设一电流方向, 求解之后, 如得到某支路 $I > 0$, 说明电流方向与假设方向相同; 若 $I < 0$, 则相反。

(2) 基尔霍夫第二定律-又称回路电压降方程组

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0 \quad (4.5.3)$$

即, 沿回路环绕一周时, 电势降落的代数和为零。

$$\sum \pm I_i R_i + \sum \pm \mathcal{E}_i = 0 \quad (4.5.4)$$

规定: 电势从高到低的电势降落为“+”; 电势从低到高的电势降落为“-”

例 2:

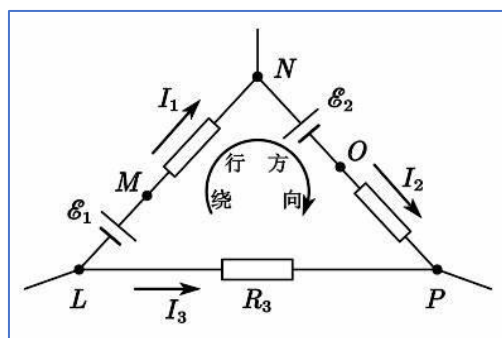


图 4.23 例 2 用图

讲解基尔霍夫第一定律, 强调节点电流定律的内容和应用。

推导基尔霍夫第二定律, 解释回路电压降方程组的物理意义。

$$-\varepsilon_1 + I_1 R_1 + \varepsilon_2 + I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0 \quad (4.5.5)$$

3. 基尔霍夫定律的应用-复杂电路的计算

例 3 如图, 已知 $\varepsilon_2 = 2V$, $\varepsilon_1 = 4V$, $\varepsilon_3 = 6V$, $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 4\Omega$,

$R_3 = 3\Omega$, 各电源的内阻均可忽略, 求各支路的电流。

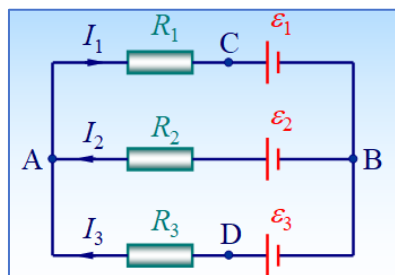


图 4.24

解:

$$\begin{cases} -I_2 - I_3 + I_1 = 0 \\ -\varepsilon_2 + \varepsilon_1 + I_1 R_1 + I_2 R_2 = 0 \\ -\varepsilon_2 + \varepsilon_3 + I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0 \end{cases}$$

$$I_1 = \frac{(R_2 + R_3)\varepsilon_1 - R_3\varepsilon_2 - R_2\varepsilon_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} = -\frac{1}{13}(A)$$

$$I_2 = \frac{R_3\varepsilon_1 - (R_1 + R_3)\varepsilon_2 + R_1\varepsilon_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} = \frac{7}{13}(A)$$

$$I_3 = \frac{R_2\varepsilon_1 + R_1\varepsilon_2 - (R_1 + R_2)\varepsilon_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_3 R_1} = -\frac{8}{13}(A)$$

三、课堂小结

基尔霍夫方程组

(1) 基尔霍夫第一定律: $\sum(\pm I_i) = 0$

(2) 基尔霍夫第二定律: $\sum \pm I_i R_i + \sum \pm \varepsilon_i = 0$

四、作业与思考

课后作业: 4.5.1 4.5.3 4.5.5 4.5.7

五、板书设计

通过例题讲解, 帮助学生掌握基尔霍夫方程组的应用, 解决多支路电路中的电流和电压问题。

强调基尔霍夫方程组在复杂电路分析中的重要性。

总结基尔霍夫第一定律和第二定律的内容和应用。

一、基尔霍夫第一定律			
$\sum(\pm I_i)=0$			
二、基尔霍夫第二定律			
$\sum \pm I_i R_i + \sum \pm \varepsilon_i = 0$			
参考资料	[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)		
课后反思			
教学效果： <p>学生基本掌握了基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL）的基本概念，能够正确运用这些定律分析简单电路中的电流和电压关系。</p>			
存在问题： <p>大部分学生能够建立并求解基尔霍夫方程组，解决多支路电路中的电流和电压问题。但在复杂电路分析中，部分学生还存在一定困难，需要进一步巩固练习。</p>			
改进措施： <p>在教学中进一步加强理论与实践的结合，通过更多的实际案例和习题练习，帮助学生加深对基尔霍夫定律的理解和应用。</p>			

授课课题	第19讲 § 4.6 接触电动势与温差电现象 § 4.7 液体导电和气体导电	
教学目标	知识目标: 1.理解接触电动势的概念及其产生的原因。 2.了解温差电现象的基本原理及应用; 3.理解液体导电和气体导电的基本概念,掌握它们的工作原理及应用。 能力目标: 1.能够解释温差电现象的实际应用,如热电偶和温差发电等; 2.理解液体导电和气体导电在工业和日常生活中的应用。 素养目标: 通过讲解接触电动势和温差电现象的原理,引导学生认识科学技术在社会发展中的重要作用,激发他们对科技进步的关注和思考。	
教学重难点	教学重点: 1.了解接触电势差与温差电现象及其应用; 2.了解液体导电和气体导电。 教学难点: 1 了解接触电势差和温差电现象产生的原理; 2 了解辉光放电管发光原理。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
一、新课导入 通过生活中的实例引入,如热电偶的应用,问学生是否知道什么是接触电动势。 提出问题:在不同金属接触时,为什么会产生电压?		新课导入 通过生活中的实例,如热电偶的应用,提问学生是否知道什么是接触电动势。

定义：温差电现象是指在两端有温度差的导体中，电子和空穴的浓度分布不均导致的电动势。

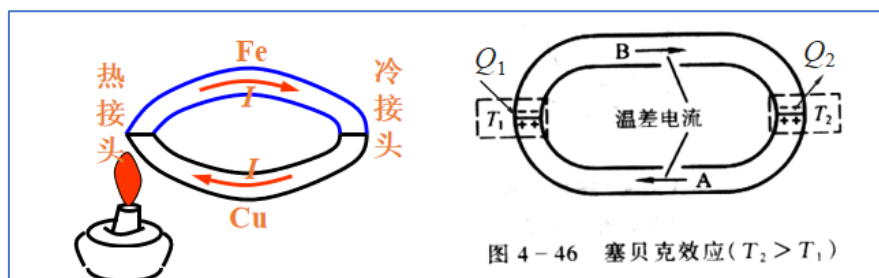


图 4.26 塞贝克效应

应用：热电偶的工作原理，应用于温度测量。

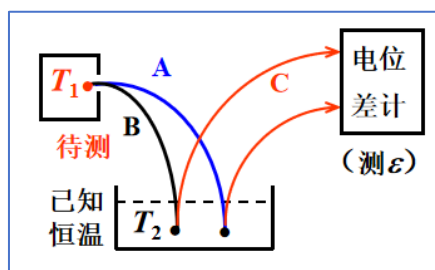


图 4.27 热电偶的工作原理

3. 液体导电与气体导电

液体导电主要是由于离子在液体中移动形成电流。液体中的电流：正、负离子在电场力作用下定向移动的结果。离子平均定向速度与所加电场力成正比,该平均定向速度又称为它们所对应的迁移速度 u_+ 与 u_- 。一般二者不等。

气体在常温常压下是绝缘体。如果由于某种外加因素使气体的电中性分子或原子分离成正负离子和电子（发生电离），气体就变成导体。在电离的气体中加入电场，正离子和电子在热运动的基础上产生定向运动形成电流。当电场很大，电子动能增大，当它们与中性原子碰撞时，可将原子外层电子拉出，这种现象叫碰撞电离，结果增加了气体中的正离子和电子，新的电子又去撞击中性原子，使气体中正离子和电子数不断增加。从而增加气体的导电性。在碰撞电离的情况下，气体导电规律不会满足欧姆定律。

催离子剂：促使气体电离的外加因素叫催离子剂（宇宙射线、放射性元素的射线、高温、强电场）。

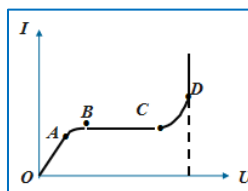


图 4.28 气体导电的伏安特性曲线

三、作业与思考

课后作业 下列各量中那些是点函数？

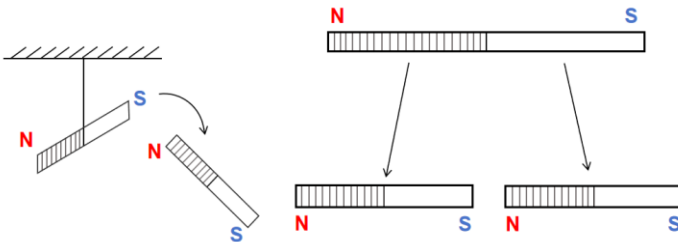
- (1) 电压
- (2) 电流强度

应用。

讲解液体导电和气体导电的基本概念，强调液体中的电流是由离子的定向移动形成的。

课堂小结：
总结接触电动势和温差电现象的定义、产生原因和应用。
强调液体导电和气体导电的基本概念和工作原理。

<p>(3) 电流密度 (4) 电动势 (5) 电阻 (6) 电导 (7) 电导率 (8) 电阻率 (9) 电功率</p> <p>四、板书设计</p> <div style="background-color: #4f81bd; color: white; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;">4.6 接触电动势与温差电现象</p> <p>一、脱出功与热电子发射</p> <p>二、接触电势差与温差电动势</p> <p style="text-align: center;">4.7 液体导电和气体导电</p> <p>一、液体导电</p> <p>二、气体导电</p> </div>	
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
<p>课后反思</p>	
<p>教学效果:</p> <p>大部分学生能够清楚描述接触电动势和温差电现象的基本概念。学生能够解释金属间温差如何导致电动势的产生,并能举例说明在实际生活中的应用,如热电偶;学生能够理解液体和气体导电的基本概念,能够区分电解质和非电解质,了解气体电离的过程。</p> <p>存在问题:</p> <p>部分学生在理解电解过程时遇到了一些困难。</p> <p>改进措施:</p> <p>结合新能源汽车中的热电发电技术、温差电传感器的应用等,帮助学生将知识与实际应用相结合,增加学习动力。</p>	

授课课题	第20讲 § 5.1 磁现象及其与电现象的联系	
	§ 5.2 毕奥-萨伐尔定律	
教学目标	<p>知识目标： 1.了解安培定律以及相关实验。</p> <p>2.了解毕奥-萨伐尔定律的物理意义，能够描述电流产生的磁场与电流元之间的关系；</p> <p>能力目标： 1.学会使用毕奥-萨伐尔定律求解简单几何配置电流所产生的磁场（如直线电流、圆形电流、螺线管等）；</p> <p>2.能够结合对称性简化计算过程，分析复杂电流分布产生的磁场。</p> <p>素养目标： 激发学生对电磁学现象的好奇心和探索欲，鼓励学生通过实验和理论计算不断验证物理定律。</p>	
教学重难点	<p>教学重点： 1.了解基本磁现象，理解磁感应强度概念；</p> <p>2.掌握毕奥—萨伐尔定律及其应用。</p> <p>教学难点： 1 理解磁感应强度概念；</p> <p>2 用毕奥-萨伐尔定律计算不同载流导线产生的磁场。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	3 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>奥斯特实验表明电流产生磁场，如何定量计算任意形状电流的磁场？</p> <div></div> <p>图 5.1 磁铁间的相互作用</p> <p>(1)同名磁极相互排斥、异名磁极相互吸引。</p> <p>(2)将一磁棒分为两段，N、S 极并不能相互分离，不存在磁单极。磁极处存在磁荷。</p>		<p>提 问 法 导 入</p> <p>新课：提问学生是否知道奥斯特实验，引导学生思考电流与磁场的关系。</p> <p>提出启发性</p>

二、新课讲解

1. 毕奥萨伐尔定律

(1) 电荷元在空间产生的磁场

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \theta}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \times \vec{e}_r}{r^2} \quad (5.2.1)$$

(2) 毕奥-萨伐尔定律应用--几种常见电流的磁场

例 1: 载流直导线的磁场

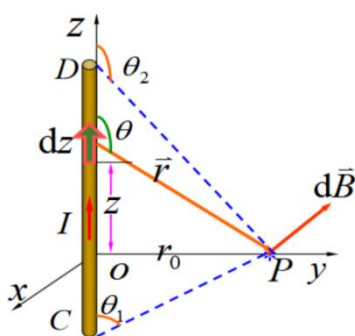


图 5.2 载流直导线的磁场

解:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idz \sin \theta}{r^2}$$

$$B = \int dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_C^D \frac{Idz \sin \theta}{r^2} \quad (5.2.2)$$

$$z = -r_0 \cot \theta, r = r_0 / \sin \theta, dz = r_0 d\theta / \sin^2 \theta$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2)$$

讨论:

a. 无限长载流长直导线的磁场: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r_0} \quad (5.2.3)$

b. 半无限长载流长直导线的磁场: $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi r_0} \quad (5.2.4)$

c. 载流长直导线延长线上的磁场: $B = 0 \quad (5.2.5)$

例 2: 圆电流轴线上磁场的分布: 真空中, 半径为 R 的载流导线, 通有电流 I, 称圆电流。求其轴线上一点 P 的磁感强度的方向和大小。

问题, 如为什么同名磁极相互排斥、异名磁极相互吸引等。

师生互动共同推导几种常见电流的磁场, 掌握从

特殊到一般的科学研究方法。

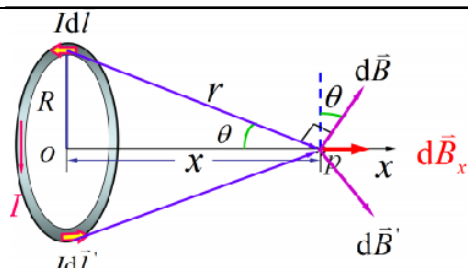


图 5.3 圆电流轴线上的磁场

解:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2}$$

$$dB_x = dB \sin \theta = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sin \theta \frac{dl}{r^2}$$

统一积分变量

$$\sin \alpha = \frac{R}{r}, r = \sqrt{R^2 + x^2}$$

$$\begin{aligned} B &= \int_L dB_x = \int_L \frac{\mu_0 I}{4\pi} \sin \theta \frac{dl}{r^2} = \int_L \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} dl = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} \times 2\pi R \\ &= \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}, \text{ 方向沿轴线向右。} \end{aligned}$$

例 3. 载流直螺线管内部的磁场: 如图所示, 有一长为 l , 半径为 R 的载流密绕直螺线管, 螺线管的总匝数为 N , 通有电流 I . 设把螺线管放在真空中, 求管内轴线上一点处的磁感强度。

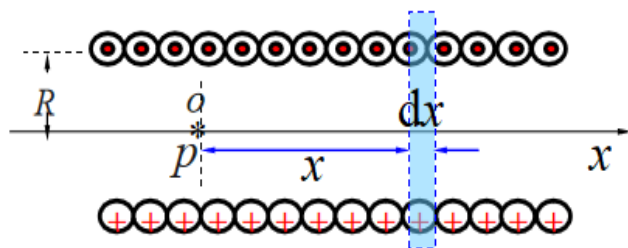


图 5.4 载流直螺线管内部的磁场

解:

$$\begin{aligned} B &= -\frac{\mu_0 n I}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \frac{R^3 \csc^2 \beta d\beta}{R^3 \csc^3 \beta} \\ &= -\frac{\mu_0 n I}{2} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \sin \beta d\beta \\ &= \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1) \end{aligned}$$

式中 β_1 和 β_2 分别表示 P 点到螺线管两端的连线与轴之间的夹角.

讨论: $\mathbf{B} = \frac{\mu_0 n \mathbf{I}}{2} (\cos \beta_2 - \cos \beta_1)$

(1) 无限长的螺线管 $\beta_1 = \pi, \beta_2 = 0 \quad B = \mu_0 n I$ (5.2.6)

(2) 半限长的螺线管 $\beta_1 = \frac{\pi}{2}, \beta_2 = 0 \quad B = \frac{1}{2} \mu_0 n I$ (5.2.7)

管轴线上磁场长直密绕螺线:

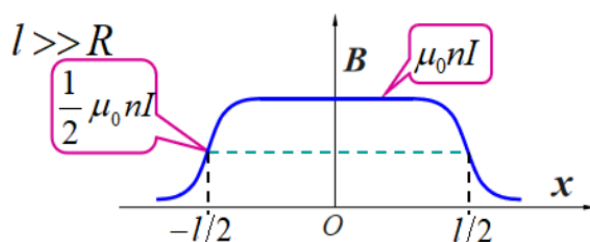


图 5.5 长直密绕螺线管轴线上的磁场

密绕载流长直螺线管内轴线中部附近的磁场完全可以视作均匀磁场。

三、课堂小结

毕奥-萨伐尔定律

1. 电流元在空间产生的磁场: $d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2}$

2. 一段载有稳恒电流的导线所产生的磁场为: $B = \int_L dB = \int_L \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \vec{e}_r}{r^2}$

3. 常见电流的磁场

(1) 无限长载流长直导线的磁场: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$

(2) 圆电流轴线上磁场的分布: $B = \frac{\mu_0}{2} \frac{R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$

(3) 无限长载流直螺线管内部的磁场: $B = \mu_0 n I$

四、作业与思考

课堂小结:

总结磁现象的基本概念和毕奥-萨伐尔定律

强调磁感应强度的重要性。

作业与思考

课后作业：5.2.1 5.2.3 5.2.10		
五、板书设计		
<div><div>5.1 磁现象及其与电现象的联系</div><div>一、磁现象</div><div>二、磁感应强度</div><div>5.2 毕奥-萨伐尔定律</div><div>一、毕奥—萨伐尔定律</div><div>二、不同载流导线产生的磁场</div></div>		
参考资料	<div>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</div> <div>[2]电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</div>	
课后反思		
教学效果： <div>通过对比库仑定律（点电荷电场）与毕奥-萨伐尔定律（电流元磁场），学生快速理解“场源叠加”的核心思想，明确两者在矢量性与叠加原理上的共性与差异。在推导无限长直导线的磁场时，通过“对称性分析→分量分解→标量积分”三步法，逐步引导学生将矢量积分简化为标量运算，减轻数学压力，多数学生能独立完成类似问题。</div>		
存在问题： <div>部分学生对叉乘运算和矢量叠加的理解仍停留在形式化层面，面对非对称电流分布（如有限长导线）时，难以独立建立积分表达式。学生在分析圆环电流轴线上磁场时，虽能理解分量抵消的结论，但无法自主提炼“对称性简化”的通用方法，迁移能力不足。</div>		
改进措施： <div>在下次课前布置“矢量叉乘与积分”的预习任务，结合物理场景（如电流元磁场方向）编写微课视频，帮助学生理解数学符号的物理意义。</div>		

授课课题	第 21 讲 § 5.3 磁场的高斯定理	
教学目标	<p>知识目标: 1.掌握磁场高斯定理的数学表达式及物理意义，理解“磁场是无源场”的本质；</p> <p>2.能解释磁感线闭合性与磁通量零的关系，辨析电场与磁场高斯定理的差异。</p> <p>能力目标: 1.能计算简单磁场中穿过闭合曲面的磁通量，并利用对称性选择合适的高斯面；</p> <p>2. 通过实验观察磁感线分布，验证磁场高斯定理，培养科学推理与实证能力。</p> <p>素养目标: 形成“对称性分析”的物理思维，体会数学工具（曲面积分）在物理规律描述中的作用。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 理解磁通量和磁场的高斯定理。</p> <p>教学难点: 理解磁场是有旋无源场。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	1 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>展示电场高斯定理，提问：“若将电场换为磁场，闭合曲面的磁通量是否仍与场源相关？”</p> <p>实验演示：用铁屑法观察条形磁铁和载流线圈的磁感线分布，引导学生总结磁感线的闭合性特征。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 磁感应线（B 线）</p> <p>规定（定义）：</p> <p>（1）曲线上任意一点切线方向与该点 B 方向一致；</p> <p>（2）垂直通过某点附近单位面积的 B 线等于该点的大小，$B = \frac{\Delta N}{\Delta S}$</p>		<p>提 问 法 导 入 新 课</p> <p>回 顾 电 场 高 斯 定 理，提 问 学 生 闭 合 曲 面 的 磁 通 量 与 场 源 的 关 系。</p>

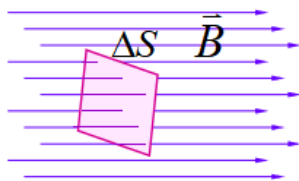


图 5.6 磁感应线

2. 磁感应线特性：

- (1) 磁力线是环绕电流的闭合曲线，磁场是涡旋场。
- (2) 任何两条磁力线在空间不相交。
- (3) 磁力线的环绕方向与电流方向之间遵守右螺旋法则。

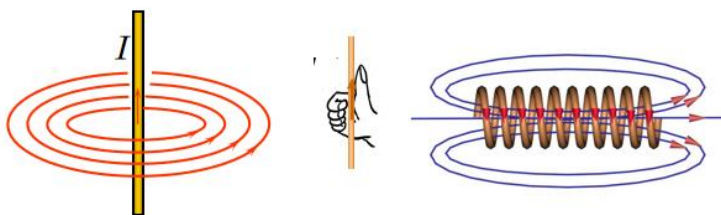


图 5.7 右手定则

3. 磁通量

(1) 定义：穿过磁场中某一曲面的磁力线总数，称为穿过该曲面的磁通量，用符号 Φ 表示。

$$\Phi_m = \iint B \cdot dS \quad (5.3.1)$$

单位：韦伯 (Wb), $1\text{Wb}=1\text{T}\cdot\text{m}^2$ 。

对于闭合曲面，一般规定外法线为正，所以穿出曲面的磁通量为正，进入曲面的磁通量为负。

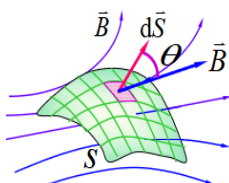


图 5.7 曲面 S 的磁通

1) 一般情况

$$\Phi = \iint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (5.3.2)$$

2) 均匀磁场中，通过曲面面积的电通量

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = \vec{B} \cdot \vec{e}_n S \quad \Phi = BS \cos \theta = BS_{\perp} \quad (5.3.3)$$

感应线的定义和特性，包括磁力线的闭合性和不相交性。

强调磁感线的闭合性和

例 1: 如图, 载流长直导线的电流为 I , 试求通过矩形面积的磁通量。

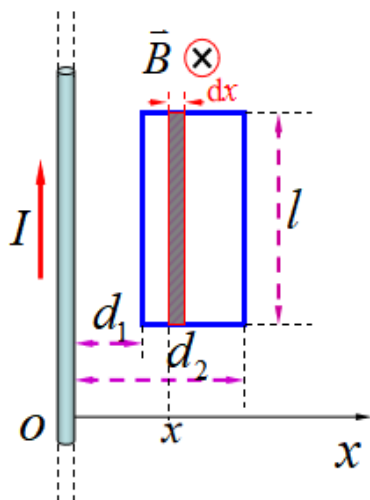


图 5.8 例 1 用图

解:

无限长直导线产生的磁场: $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$

通过 dx 的磁通量为: $d\Phi = BdS = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} l dx$

$$\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \int_{d_1}^{d_2} \frac{dx}{x}$$

$$\Phi = \frac{\mu_0 I l}{2\pi} \ln \frac{d_2}{d_1}$$

4. 磁场的高斯定理

由于磁力线是无头无尾的闭合曲线, 所以穿过任意闭合曲面的总磁通量必为零。

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (5.3.2)$$

说明: (1) 磁力线是无头无尾的闭合曲线;

(2) 磁场是无源场。

三、课堂小结

磁场的高斯定理

1. 定理表达式: $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

2. 物理意义: 磁场是无源场 (磁感线闭合, 无磁单极子)

3. 磁通量的计算: 对称性优先

磁场无源性的特点。

学生计算一些闭合曲面的磁通量。

<p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：5.3.2</p> <p>二、板书设计</p> <div style="background-color: #6b8e23; color: white; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">§ 5.3 磁场的高斯定理</p> <p>一、磁感应线</p> <p>二、磁通量</p> <p>三、磁场的高斯定理</p> </div>	
<p style="text-align: center;">参考资料</p> <p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>	
<p style="text-align: center;">课后反思</p> <p>教学效果：</p> <p>90%的学生能准确写出磁场高斯定理的数学表达式，80%的学生能辨析其与电场高斯定理的核心差异（磁场无源性）。通过“磁单极子”讨论，学生表现出对科学前沿的兴趣，但将磁场高斯定理迁移到实际问题（如电磁屏蔽设计）的能力较弱。</p> <p>存在问题：</p> <p>部分学生误认为“穿过闭合曲面的磁通量为零，说明曲面上每点的磁感应强度为零”。归因于教学中未充分强调磁通量是矢量的净通量，缺乏反例分析。</p> <p>改进措施：</p> <p>在课堂练习中加入“匀强磁场中半球面磁通量计算”，通过结果 $\Phi_B=0$ 但 $B \neq 0$ 的反例，破解“磁通量为零即场强为零”的误区。</p>	

授课课题	第 22 讲 § 5.4 磁场的安培环路定理	
教学目标	知识目标：1.理解安培环路定理的物理内涵； 2.掌握典型对称磁场的计算。 能力目标：能针对不同电流分布（轴对称、平面对称）选择合适安培环路，简化磁场计算。 素养目标：通过对比“静电场环路定理”与磁场环路定理，体会场的有旋性与保守性的差异，形成辩证物理观。	
教学重难点	教学重点：掌握安培环路定理及其应用。 教学难点：用安培环路定理计算不同电流分布产生的磁场。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>通过提问引导学生回顾之前学过的磁场和电流之间的关系。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 安培环路定理的表述</p> <p>在真空中的稳恒电流磁场中，磁感应强度 \mathbf{B} 沿任一闭合回路 L 的线积分，等于穿过以 L 为周界所围面积的电流的代数和的 μ_0 倍</p> $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_i \tag{5.4.1}$ <p>\mathbf{B} 的环流不为零，说明磁场是非保守场。</p> <p>电流的代数和正负号的规定：回路积分方向与电流方向成右手螺旋为正</p> <p>以左图为例</p>		<p>提 问 法 新 课 导 入</p> <p>通 过 多 媒 体 展 示 一 些 对 称 性 的 电 流 分 布，引</p>

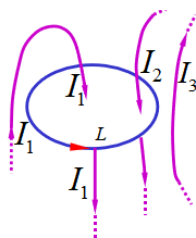


图 5.9 闭曲线的环流

2. 安培环路定理的证明

(1) 在垂直于导线的平面上任取一包围电流的闭合曲线 L

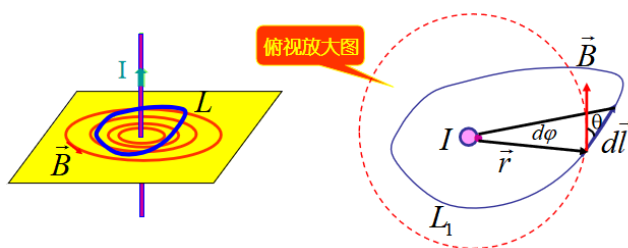


图 5.10 闭曲线绕导线

$$\text{无限长直导线产生的磁场: } B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (5.4.1)$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint_L B \cos \theta dl = \oint B r d\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi = \mu_0 I \quad (5.4.2)$$

可见，线积分与回路包围的电流有关，与回路的形状无关。

(2) 当回路不包围电流时用同样方法可以证明， B 在该回路上的线积分为零。

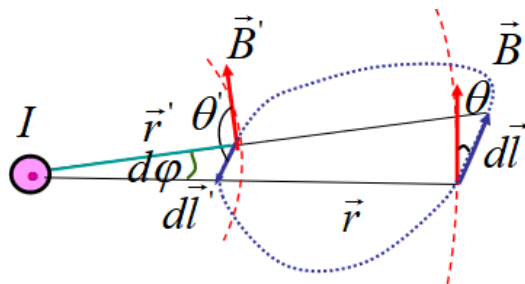


图 5.11 闭曲线不绕导线

$$\vec{B} \cdot d\vec{l} = B |d\vec{l}| \cos \theta = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} r d\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\varphi$$

$$\vec{B}' \cdot d\vec{l}' = B' |d\vec{l}'| \cos \theta' = -\frac{\mu_0 I}{2\pi} d\varphi$$

$$\therefore \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$

3. 正确理解安培环路定律应注意的三点：

出安培环路定理。

讲解安培环路定理的物理意义和数学表达式，强调磁场是非保守场。

推导安培环路定理，并分析电流与磁场的关系。

(1) 安培环流定律只是说 \mathbf{B} 的线积分值只与穿过回路的电流有关，而回路上各点的 \mathbf{B} 值则与所有在场电流有关。

(2) 如果没有电流穿过某积分回路，只能说在该回路上 \mathbf{B} 的线积分为零，而回路上各点的 \mathbf{B} 值不一定为零。

(3) 安培环路定理说明磁场是非保守场，不能引入磁势。

4. 安培环路定理的应用

利用安培环流定理可以求某些具有特殊对称性的电流分布的磁场。解题要点：

(1) 首先要分析磁场分布的对称性；

(2) 选择一个合适的积分回路或者使某一段积分线上 \mathbf{B} 为常数，或者使某一段积分线路上 \mathbf{B} 处处与 $d\mathbf{l}$ 平行；

(3) 利用 $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0$ 求 \mathbf{B}

例 1：无限长载流圆柱体半径为 R ，电流 I 均匀地分布在导体的横截面上，求内外磁场的分布。

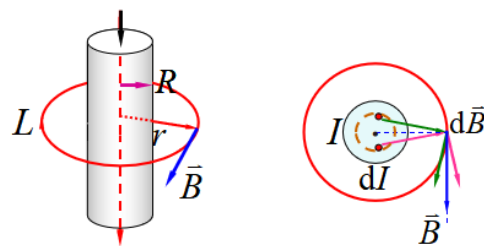


图 5.28 例 1 用图

解：

对称性分析：场源电流对中心轴线分布对称，因此，其产生的磁场对柱体中心轴线也有对称性，磁力线是一组分布在垂直于轴线的平面上并以轴线为中心的同心圆。与圆柱轴线等距离处的磁感应强度 \mathbf{B} 的大小相等，方向与电流构成右手螺旋关系。

(1) $r > R$

$$\begin{aligned} \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \oint_L B dl = B \oint_L dl = 2\pi r B \\ 2\pi r B &= \mu_0 I \\ B &= \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \end{aligned} \quad (5.4.2)$$

上式说明，“无限长”载流圆柱体外的磁场与“无限长”载流直导线产生的磁场相同。

(2) $r < R$ 圆柱体内任一点 Q 的磁场

讲解安培环路定理的应用，包括无限长载流圆柱体磁场的计算。

强调安培环路定理的适用条件和注意事项。

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = 2\pi r B = \mu_0 \frac{I}{\pi R^2} \pi r^2 \quad (5.4.3)$$

$$B = \frac{\mu_0 I r}{2\pi R^2} \quad (r < R)$$

三、课堂小结

今天我们学习了安培环路定理，它是电磁学中一个非常重要的定理，帮助我们理解电流如何产生磁场以及如何通过简单的数学方法计算磁场强度。安培环路定理表明，沿着闭合回路积分磁场强度，得到的结果与该回路所包围的总电流成正比。我们通过选择合适的安培环路来简化磁场的计算。特别是在对称性较强的情况（例如无限长直导线、电流环等），安培环路定理可以让我们快速得到磁场的表达式。在今后的学习中，希望大家能够继续深入思考并不断练习，巩固今天所学的内容

四、作业与思考

课后作业：5.4.1、5.4.2、5.4.3

五、板书设计

5.4 安培环路定理

一、表达式

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I_i = \mu_0 (-I_1 - I_2)$$

课堂小结：
总结安培环路定理的内容和应用。

强调电
流与磁场之间的关系。

布置课
后作业，要求学生运用安培环路定理计算一些对称性电流的磁场。

参考资料

- [1] <https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194>
[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)

课后反思

教学效果：

大部分学生能够理解安培环路定理的基本内容和数学表达式，并能在简单的对称性问题中应用该定理计算磁场。

存在问题：

在课堂练习中，部分学生对定理的应用仍存在困难。

改进措施：

增加对个别学生的指导，确保所有学生都能跟上教学进度。提供更多的练习题和课后辅导资源，供学生在课后进一步学习和巩固。

授课课题	第 23 讲 § 5.5 带电粒子在磁场中的运动	
教学目标	知识目标：了解洛伦兹力的基本概念及其表达式。 能力目标：掌握带电粒子在磁场中的圆周运动，理解磁场如何导致带电粒子沿着圆轨道运动，并能推导出运动的相关公式，如周期、半径等。 素养目标：鼓励学生通过实验和思考，主动探索粒子在磁场中运动的规律，培养科学研究的兴趣。	
教学重难点	教学重点：理解洛伦兹力和带电粒子在磁场中的运动，了解霍尔效应。 教学难点：了解回旋加速器工作原理。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>通过一个简单的例子引导学生思考——带电粒子在磁场中为什么会做圆周运动？磁场如何影响粒子的运动？</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 洛伦兹力</p> <p>(1) 表达式：$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}$ (5.5.1)</p> <p>(2) 大小：$F_m = qvB \sin \theta$ (5.5.2)</p> <p>方向：右手判断（注意电荷的正负）</p> <p>2. 带电粒子在匀强磁场中的运动</p> <p>(1) 带电粒子以初速，平行于 B 进入磁场</p> $\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} = 0$ <p>此时带电粒子在磁场中仍然作匀速直线运动</p> <p>(2) 粒子速度与磁场方向垂直</p> <p>带电粒子在垂直于 B 的平面内作匀速圆周运动，即有 $\frac{mv^2}{R} = qvB$ (5.5.3)</p>		<p>提问法导入新课</p> <p>提问学生对洛伦兹力的认识，引导学生思考带电粒子在磁场中的运动。</p> <p>通过多媒体展示带电粒</p>

$$\text{回转半径 } R = \frac{mv}{qB} \quad R \propto v_0 \quad (5.5.4)$$

$$\text{回转周期 } T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (5.5.5)$$

$$\text{回转频率 } f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (5.5.6)$$

(3) 粒子速度 v 与 B 斜交

$$\begin{cases} v_{\perp} = v \sin \theta \\ v_{\parallel} = v \cos \theta \end{cases} \quad \text{沿螺旋线轨道运动}$$

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin \theta}{qB} \quad (5.5.7)$$

$$h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m}{qB} v \cos \theta \quad (5.5.8)$$

3. 应用电场和磁场控制带电粒子的实例

(1) 磁聚焦

如图是电子射线磁聚焦装置的示意图.图中 K 是发射电子的阴极, G 是控制极, A 是阳极, 它们组成电子枪; CC' 是产生匀强磁场的螺线管。

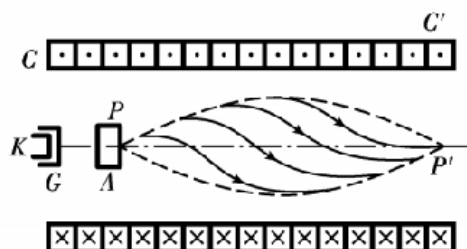


图 5.29 磁聚焦示意图

磁聚焦: 从一点射入磁场的带电粒子经过一个螺距后, 它们又聚到一点, 之后继续向前传播。

应用: 电子光学, 电子显微镜等。

(2) 回旋加速器

1932 年劳伦斯研制第一台回旋加速器的 D 型室。此加速器可将质子和氘核加速到 1 MeV 的能量, 为此 1939 年劳伦斯获诺贝尔物理学奖。

频率与半径无关

$$f = \frac{qB}{2\pi m} \quad (5.5.9)$$

到半圆盒边缘时

子在磁场中的运动轨迹, 引出洛伦兹力。

讲解洛伦兹力的表达式和大小, 强调方向的判断方法。

推导带电粒子在匀强磁场中的运动规律, 包括圆周运动和螺旋线运动。

讲解带电粒子在非均匀磁场中的运动, 以及磁场对粒子运动的影响。

通过实例分析, 帮助学生理解带电粒子在磁场中

$$v = \frac{qBR_0}{m}$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (5.5.10)$$

$$E_k = \frac{q^2B^2R_0^2}{2m}$$

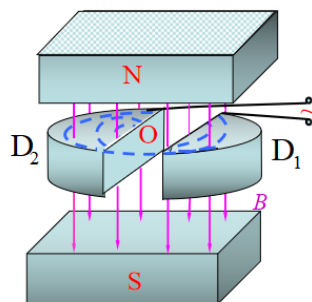


图 5.30 回旋加速器原理图

(3) 荷（电荷）质（质量）比的测量

荷（电荷）质（质量）比的测量主要有两种方法：汤姆逊法，磁聚焦法。

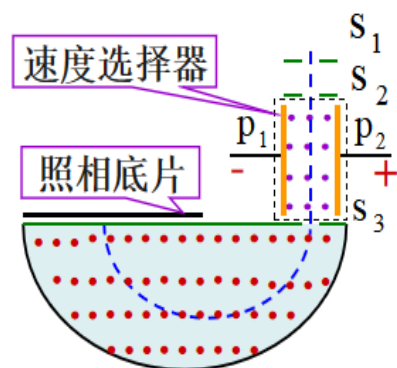


图 5.31 质谱仪示意图

汤姆逊法测量电子的荷质比。在速度选择器中，带电量为 q 的离子受电场力 $f_e = qE$ ，同时受磁场力 $f_m = qvB'$ ，两力方向相反。只有当离子的速度满足 $qE = qvB'$ 或 $v = \frac{E}{B'}$ 时离子才有可能穿过 P_1 和 P_2 两板间的狭缝，而从 S_3 射出。离子自 S_0 后离子进入匀强磁场 B ，作匀速圆周运动。设半径为 R ，则

$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$

$$\text{荷质比: } \frac{q}{m} = \frac{E}{RBB'} \quad (5.5.11)$$

的运动规律。

总结洛伦兹力的表达式和带电粒子在磁场中的运动规律。

强调磁场对带电粒子运动的影响。

4. 霍尔效应

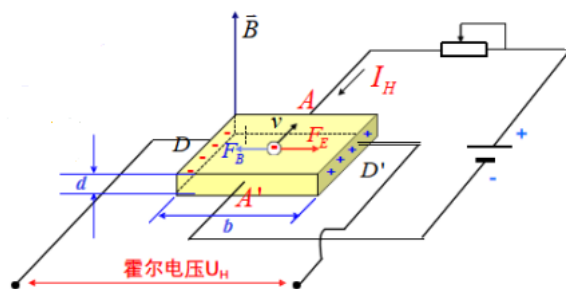


图 5.32 霍尔效应原理图

洛伦磁力: $F_B = qvB$

电场力: $F_E = qE_H = q \frac{U_H}{b}$

达到稳定状态时: $F_B = F_E$

工作电流: $I_H = nvSq = nqvbd$

霍尔电压: $U_H = \frac{1}{nqd} I_H B = K_H \frac{I_H B}{d}$

说明: 在半导体中霍尔效应比金属中显著

(1) 用霍尔电势差正负可判断半导体得到类型

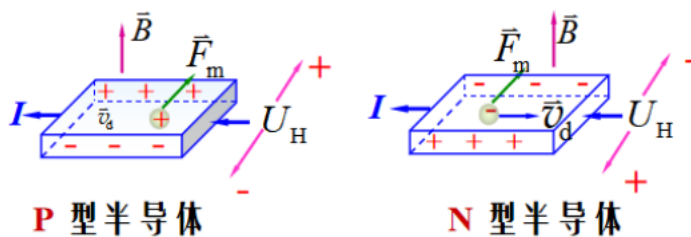


图 5.33 半导体类型判断

(2) 测量磁场: 由霍尔电压测出磁场

$$U_H = \frac{IB}{nqb} \quad B = \frac{nqbU_H}{I}$$

三、作业与思考

课后作业: 5.5.4

四、板书设计

布置课后作业, 要求学生计算一些带电粒子在磁场中的运动轨迹。

提出思考题, 如何利用磁场来控制带电粒子的运动等。

5.5 带电粒子在磁场中的运动		
一、洛伦兹力		
二、带电粒子在匀强磁场中的运动		
三、回旋加速器		
四、霍尔效应		
参考资料	[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)	
课后反思		
教学效果： <p>在讲解洛伦兹力和带电粒子在磁场中的圆周运动时，通过详细的公式推导和直观的示意图帮助学生理解了磁力如何作用于带电粒子，尤其是粒子速度的方向变化。学生对基本概念和公式的掌握较为扎实。</p>		
存在问题： <p>在讲解带电粒子在非均匀磁场中的三维运动时，部分学生对运动轨迹的理解存在困难，尤其是在在磁场和速度向量的分解方面。</p>		
改进措施： <p>下次讲解带电粒子在非均匀磁场中的运动时，可以通过更具体的示例和动画模拟来帮助学生理解。同时，更多地分步骤进行公式推导，逐步深入，让学生能够轻松跟上思路。</p>		

授课课题	第 24 讲 § 5.6、磁场对载流导线的作用	
教学目标	知识目标：理解磁场对载流导线的作用原理，掌握相关的公式和定律。 能力目标：能够通过计算应用安培力公式，解决简单的计算问题； 素养目标：学会通过实际问题引导学生思考，提升学生的逻辑推理和问题分析能力。	
教学重难点	教学重点：理解安培力和磁场对载流导体的作用。 教学难点：理解载流线圈在均匀外磁场中的安培力矩。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>回顾上一节课内容——洛伦兹力与带电粒子在磁场中的运动，引入新课主题：“今天我们将学习磁场对载流导线的作用。”提出问题：“如果一根导线中有电流流过，并且这根导线置于磁场中，会发生什么？”引导学生思考并激发他们对安培力的好奇心。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 安培力公式</p> <p>一段电流元 Idl 在磁场中所受的力 dF，其大小与电流元 Idl 成正比，与电流元所在处的磁感应强度 B 成正比，与电流元 Idl 和 B 的夹角的正弦成正比，即</p> $d\vec{F} = Id\vec{l} \times \vec{B} \tag{5.6.1}$  <p>图 5.39 磁场 B 中载流导线的一个电流元</p> <p>大小： $dF = BIdl \sin \alpha$</p> <p>方向：右手螺旋法则</p>		<p>新课导入</p> <p>复习带电粒子在磁场中的运动，提问学生对安培力的认识。</p> <p>通过多媒体展示磁场对载流导线的作用，引出安培力。</p>

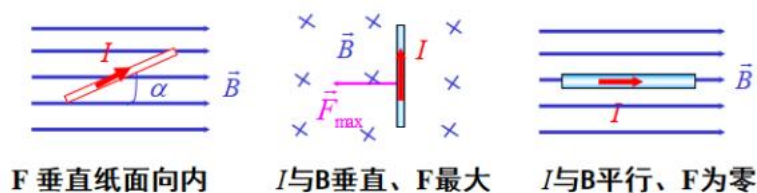


图 5.40 电流与磁场不同角度所受安培力的方向

安培定律的积分形式： $\vec{F} = \int_L I d\vec{l} \times \vec{B}$

这是矢量积分。一般情况下把他们分解到不同方向上，求每一方向的分力，最后在求总的合力。如

$$\begin{aligned} F_x &= \int_l dF_x & F_y &= \int_l dF_y & F_z &= \int_l dF_z \\ \vec{F} &= F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k} \end{aligned} \quad (5.6.2)$$

例 1：半径为 R 的半圆形导线通有电流 I ，处在与导线平面垂直的匀强磁场 B 中，求导线所受的合力。

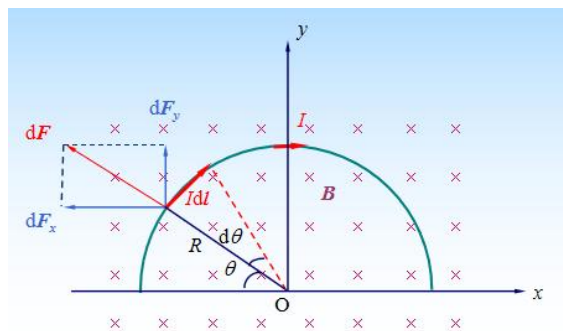


图 5.41 例 1 用图

解：

$$\begin{aligned} dF &= B I dl \sin \alpha = B I dl \\ dF_x &= dF \cos \theta = B I dl \cos \theta = B I R \cos \theta d\theta \\ dF_y &= dF \sin \theta = B I dl \sin \theta = B I R \sin \theta d\theta \\ F_x &= \int_0^\pi B I R \cos \theta d\theta = 0 \\ F_y &= \int_0^\pi B I R \sin \theta d\theta = 2 B I R \end{aligned}$$

2. 载流导线间相互作用力的计算

计算载流导线之间相互作用力的主要步骤

- (1) 求出一载流导线在另一载流导线处产生的磁场（电流产生的磁场计算方法）；
- (2) 利用安培定律求出另一载流导线所受安培力。（电流在磁场中受到安培力计算方法）

讲解安培力的表达式和大小，强调方向的判断方法。

推导载流导线在磁场中的受力情况，并给出实例分析。

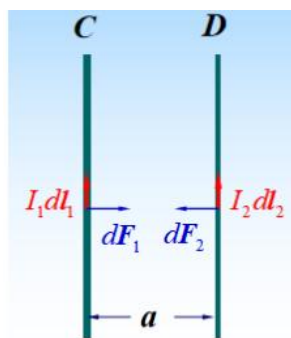


图 5.42 载流导线间相互作用力的计算

解: $\because B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}$

则 D 上的电流元 $I_2 dl_2$ 受 C 的电流磁场 B_1 的作用力 dF_2 垂直于导线 D, 方向 dF_2 指向 C。

大小为
$$dF_2 = B_1 I_2 dl_2 \cdot \sin 90^\circ = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} dl_2$$

导线上单位长度受力大小为:
$$\frac{dF_2}{dl_2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (5.6.3)$$

3. 磁场对载流线圈的作用

(1) 载流线圈在均匀磁场中的安培力矩

如图: 均匀磁场中有一矩形载流线圈 abcd。线圈所在平面有两个可能法向, 我们以 e_n 代表与电流成右手关系的那个法向的单位矢量。先讨论矩形线圈。

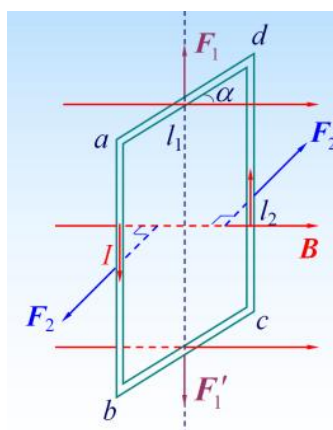


图 5.43 磁场对载流线圈的作用

其中 l_1 和 l_2 分别是 1、2 边的长度, S 是矩形面积。注意到矢量 $\vec{e}_n \times \vec{B}$ 也竖直向下, 便可写成矢量等式

$$\vec{M} = IS \vec{e}_n \times \vec{B} \quad (5.6.4)$$

讲解载流线圈在均匀外磁场中的安培力矩, 以及磁场对载流导线的功。

定义：平面载流线圈的磁矩 $\vec{p}_m = IS\vec{e}_n$		(5.6.5)	课堂小结
$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$		(5.6.6)	
线圈的磁矩：	$\vec{p}_m = NIS\vec{e}_n$	(5.6.7)	布置课后作业，要求学生计算一些载流导线在磁场中的受力情况。
三、课堂小结			
1.安培力的表达式和磁场对载流导线的作用规律。 2.强调磁场对载流导线的功和安培力矩的重要性。			
四、作业与思考			
课后作业：5.6.4、5.6.6、5.6.9			
五、板书设计			
<div>5.6 磁场对载流导线的作用 一、安培力的定义与公式 二、安培力的方向—右手定则 三、载流导线间相互作用力的计算 四、磁力的功</div>			
参考资料	[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)		
课后反思			
教学效果： 大部分学生已经掌握了安培力的计算公式，并能够利用右手定则判断安培力的方向。通过课堂练习和实验，学生对磁场对载流导线的作用有了较为清晰的理解。			
存在问题： 尽管大多数学生能够正确应用安培力公式，但在解决实际问题时，有些学生对于夹角 θ 的理解仍有些模糊。部分学生忽视了磁场与电流之间的角度关系，导致计算错误。以后在教学时，可以通过更多的实例帮助学生明确这一点。			
改进措施： 虽然课堂上进行了适当的计算练习，但有些学生的计算能力仍然需要提高。在课后作业中，应该增加更多针对力的计算和方向判断的题目，帮助学生不断巩固和深化对公式的理解与应用。			

授课课题	第 25 讲 § 6.1 电磁感应定律 6.2 楞次定律	
教学目标	<p>知识目标: 1.掌握电磁感应定律的内容。</p> <p>2.掌握感应电动势的计算方法。</p> <p>能力目标: 1.学生能通过定量分析，运用法拉第定律来解决实际问题，如计算感应电动势大小、判断感应电流的方向等；</p> <p>2. 学生能够理解感应电流方向的判断方法，并能够通过楞次定律判断感应电流的方向。</p> <p>素养目标: 通过电磁感应的实验和应用实例，激发学生对电磁学的兴趣，培养他们对自然界规律的探索精神。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.了解电磁感应现象，理解法拉第电磁感应定律；</p> <p>2.理解楞次定律的两种表述，理解考虑了楞次定律的法拉第定律表达式。</p> <p>教学难点: 1 理解磁生电的条件；</p> <p>2 掌握感应电动势方向的判定方法。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	3学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>提问学生：“你们是否注意到身边的电动机和发电机是如何工作的？它们为什么能产生电流？”</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1831 年实验物理学家法拉第从实验中发现，当通过任一闭合导体回路所包围面积的磁通量发生变化时，回路中就会产生电流，这种现象叫电磁感应现象，产生的电流叫感应电流。回路中有电流的原因是电路中有电动势，直接由电磁感应得到的电动势叫感应电动势。法拉第全面总结了磁通量的变化与感应电动势之间的关系而得出：不论任何原因使通过回路面积的磁通量发生变化时，回路中产生的感应电动势与磁通量对时间的变化率成正比，这就是法拉第电磁感应定律。</p> <p>1. 法拉第电磁感应定律</p>		<p>以问题法导入新课</p>

(1) 电磁感应的典型现象

电磁感应现象可用图 6-1 的实验演示.图(a)中 1 是永磁铁,2 是线圈,3 是演示电流计.线圈通过电流计形成闭合电路.当磁铁插入线圈时,电流计指针偏转;磁铁在线圈内不动时,指针不动;拔出磁铁时,指针反向偏转.这个实验说明当闭合线圈的磁通随时间变化时的确会出现感应电流.以载有恒定电流的细长线圈代替磁铁重做上述实验[图(b)],也能得到类似结果,可见关键不在于磁场由什么激发,而在于穿过线圈的磁通是否随时间有所变化。

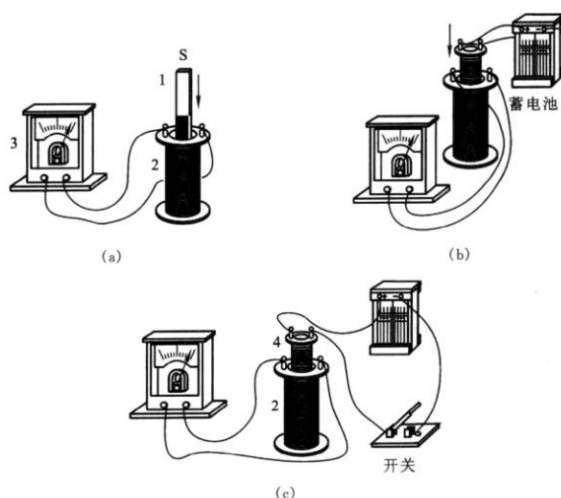


图 6-1 电磁感应演示实验

2. 法拉第电磁感应定律

当通过闭合回路的磁通量发生变化时,回路中产生的感应电动势与穿过回路的磁通量对时间的变化率成正比:

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1.1)$$

说明:

(1) $\frac{d\Phi}{dt}$ 的变化率决定感应电动势;

(2) 多匝回路: $\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}$

(3) 若闭合回路的电阻为 R , 感应电流为 $I_i = \frac{\sum \varepsilon}{\sum R}$

3. 楞次定律

(1) 楞次定律的第一种表述:

感应电流的磁通总是力图阻碍引起感应电流的磁通的变化。

讲述电磁感应的迪阿尼性能光现象,通过生动的动画,让学生深刻了解到电磁感应原理,激发学生的学习兴趣。

通过多个实验,培养学生的科学思维,提升学生的逻辑思维。

这是楞次定律的第一种表述形式.按照这个定律,感应电流必定采取这样个方向,使得它所激发的磁通对引起感应的那个磁通变化起阻碍作用。就是说当引起感应的磁通增加时,感应电流的磁通与该磁通方向相反(阻碍它的增加);当引起感应的磁通减小时,感应电流的磁通与该磁通方向相同(阻碍它的减小)。例如在图 6-2 中,当磁铁插入线圈时,线圈的磁通增加,按照楞次定律,感应电流激发的磁通应与原磁通反向[图 6-2(a)中虚线].再根据右手螺旋法则,可知感应电流的方向如图导线中的箭头所示.反之,当磁铁拔出时,穿过线圈的磁通在减小,感应电流方向如图 6-2(b)所示。

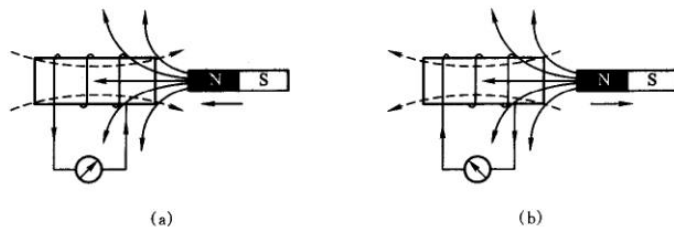


图 6-2 楞次定律图示

(2) 考虑了楞次定律的法拉第电磁感应定律的表达式

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (6.1.2)$$

- ① “-”号表示感应电流总的效果总是反抗引起感应电流的原因-楞次定律。
- ② “ Φ ”是通过回路的磁通量, $d\varphi$ 代表的意义? 与 $d\varphi = Bds$ 有何区别?

(3) 感应电动势方向的判断:

- ①确定导体回路 L 的绕行正方向: 约定回路中磁力线方向与 L 成右手螺旋关系时, 磁通量为正;
- ②根据磁通量变化率的正负来确定感应电动势的方向。

三、课堂小结

法拉第全面总结了磁通量的变化与感应电动势之间的关系而得出: 不论任何原因使通过回路面积的磁通量发生变化时, 回路中产生的感应电动势与磁通量对时间的变化率成正比, 这就是法拉第电磁感应定律, 其表达式为

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt}$$

式中负号表明感应电动势的方向和磁通量变化率之间的关系, 是楞次定律的数学表示, 判断时先任取一个回路方向(绕行方向), 并按右螺旋法则定出回路法线 \mathbf{n} 的方向; 再定磁通量的正负, 与 \mathbf{n} 同向为正, 异向为负; 最后由 $d\Phi/dt$ 的正负确定 ε 的正负, 显然用

结合板书对知识点进行讲解, 与学生互动, 一提问的方式, 检验学生的预习情况, 激发学生的学习兴趣。

通过生动的图画, 让学生深刻掌握用楞次定律判断感应电流方向的方法。

<p>这种方法确定感应电动势的方向很复杂，因此在实际解算中，常常是利用楞次定律来判断电动势的方向，而利用法拉第电磁感应定律仅求电动势的大小。</p> <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：6.2.1 6.2.3</p> <p>五、板书设计</p> <div><div>6.1 电磁感应定律</div><div>一、电磁感应现象</div><div>二、法拉第电磁感应定律</div><div>6.2 楞次定律</div><div>一、楞次定律</div></div>		<p>课堂小结</p> <p>布置作业</p>
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>	
<p>课后反思</p>		
<p>教学效果：</p> <p>通过课堂的互动和实验演示，学生对电磁感应和楞次定律的理解较为深入。</p> <p>存在问题：</p> <p>部分学生在判断电流方向和感应电动势的计算上仍存在困难，尤其是在处理复杂情境时。</p> <p>改进措施：</p> <p>在后续教学中增加更多的例题和实践环节，帮助学生逐步提高。</p>		

授课课题	第 26 讲 § 6.3 动生电动势	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解动生电动势的概念及其产生原理; 2.掌握动生电动势的计算公式及其应用。</p> <p>能力目标: 学会计算动生电动势;</p> <p>素养目标: 通过实验和实例,帮助学生理解动生电动势的产生过程和规律,培养学生的实际操作能力与问题解决能力。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.动生电动势的定义与产生原理; 2.动生电动势公式的推导与应用。</p> <p>教学难点: 掌握动生电动势的计算方法。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>当回路面积变化而磁场不随时间变化时产生的电动势如何计算?</p> <p>提问:“你们是否知道发电机是如何工作的?当导体在磁场中运动时,为什么会产生电动势?”</p> <p>二、新课讲解</p> <p>法拉第定律说明,只要闭合电路的磁通有变化就有感应电动势,不问这种变化起于什么原因.事实上,磁通是磁场 B 对某一曲面的通量,磁通变化的原因无非下列三种;</p> <p>(1) B 不随时间变化(恒定磁场)而闭合电路的整体或局部在运动,这样产生的感应电动势叫做动生电动势;(2) B 随时间变化而闭合电路的任一部分都不动,这样产生的感应电动势叫做感生电动势;(3) B 随时间变化且闭合电路也有运动,这时的感应电动势是动生电动势和感生电动势的叠加。</p> <p>1. 动生电动势与洛伦兹力</p> <p>(1) 动生电动势</p> <p>如图 6-3,设图中导线 PQ 以速度 v 向右平移,它里面的电子也就随之向右运动,由于线框处在外加磁场中,向右运动的电子要受到磁场的洛伦兹力,它促使自由电子向下</p>		<p>以问题法导入新课</p> <p>提问:动生电动势的非静电力来源。检验学生的预习效果。</p>

运动, 闭合线框便出现逆时针方向的电流, 这就是感应电流。产生这个电流的电动势存在于 PQ 段中(动生电动势)。即运动着的 PQ 段可看成一个电源, 其非静电力就是磁洛伦兹力。下面从洛伦兹力公式出发推导拉第定律的结论一致。

$$\varepsilon_i = \int_{(b)}^{(a)} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} \quad (6.3.1)$$

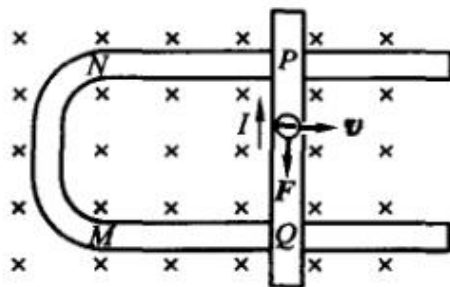


图 6-3 PQ 在磁场中运动引起动生电动势

2. 动生电动势的计算

求动生电动势的一般步骤:

- (1) 规定一积分路线的方向, 即 $d\vec{l}$ 方向。
- (2) 任取 $d\vec{l}$ 线元, 考察该处 $\vec{v} \times \vec{B}$ 方向, 以及 $(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$ 的正负。
- (3) 利用 $\varepsilon_i = \int_{(b)}^{(a)} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l}$ 计算电动势

例 1: 在磁场中旋转的导体棒。如图 6-4 所示, 在匀强磁场 B 中, 长为 L 的金属棒 ab 绕其一端 a 在垂直于 B 的平面内顺时针转动, 角速度为 ω 。求金属棒上的动生电动势。

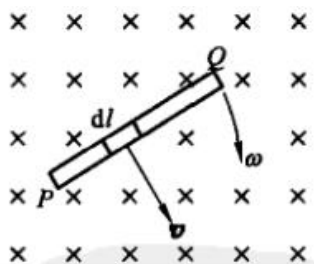


图 6-4 例 1 用图

解:

因 PQ 上任一元段 $d\vec{l}$ 的 \vec{v} 与 \vec{B} 垂直且 $\vec{v} \times \vec{B}$ 与 $d\vec{l}$ 同向, 故

$$(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = vBdl = \omega Bldl$$

$$E_{PQ} = \int_P^Q \omega Bldl = \omega B \int_P^Q ldl = \frac{1}{2} \omega BL^2$$

引导学生思考, 并总结求解动生电动势的一般步骤。

说明动生电动势由 P 向 Q，它使导线出现电荷积累(靠近 Q 的一侧为正)，直至它们建立的电场对导线中电子的作用力与洛伦兹力抵消为止。这时，PQ 相当于一个处于开路状态的电源，Q 为正极，P 为负极。

3. 交流发电机

发电机是动生电动势的应用实例，图 6-5 是交流发电机的模型。在永磁铁的两极间有近似均匀的磁场 B，线框 K 在磁场中以匀角速。作转动, 其动生电动势不难由洛伦兹力公式或法拉第定律求得设 $t=0$ 时线框平面与 B 线垂直，则动生电动势为 $\varepsilon = BS\omega \sin \theta$ ，其中 S 是线框的面积(推导留作练习)。这是一个随时间作正弦变化(或称简谐变化)的交变电动势通过两个金属滑环(分别焊于线框的两根引出线上)和两个炭质电刷接通演示电流表，指针便左右摆动，说明出现交变电流。当然，这只是发电机的模型，真实的交流发电机无论在构造还是原理方面都还比这个模型复杂。

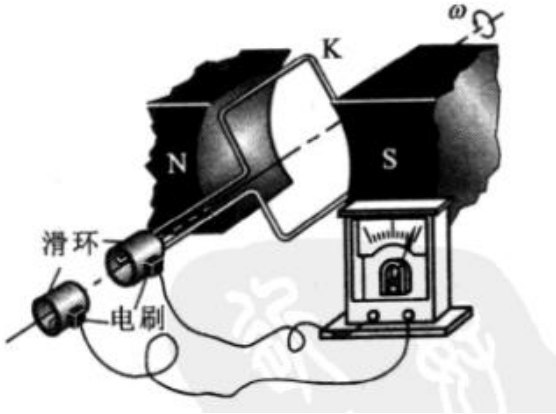


图 6-5 交流发电机模型

三、课堂小结

1. 动生电动势产生的原因
2. 求解动生电动势的一般步骤
3. 交流发电机

四、作业与思考

课后作业：6.3.1 6.3.5

五、板书设计

6.3 动生电动势

一、动生电动势的产生机制

二、动生电动势的计算

课堂小结
布置作业

参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果：</p> <p>教学内容循序渐进，从动生电动势的定义到公式推导，再到实际应用，帮助学生逐步建立起对动生电动势的完整认识。</p> <p>存在问题：</p> <p>尽管大多数学生能够掌握基本公式，但在公式应用的深度上，尤其是在涉及运动方向和速度变化时，部分学生存在理解偏差。例如，如何处理运动方向不垂直于磁场方向的情况，学生仍有困惑。</p> <p>改进措施：</p> <p>针对基础较弱的学生，可以通过课后辅导和更多的基础性练习，帮助他们夯实磁场相关的基础知识。</p>	

[illegible]

静电场是保守场 $\oint_L \vec{E}_{\text{静}} \cdot d\vec{l} = 0$

感生电场是非保守场 $\oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi}{dt} \neq 0$

静电场由电荷产生：感生电场是由变化的磁场产生。

2. 感生电场的计算

例 1: 如图所示，有一局限在半径为 R 的圆柱体内沿圆柱轴线方向的匀强磁场，磁感应强度随时间的变化率为 dB/dt 。

(1) 求离圆柱轴线距离为 r 的 P 点的感生电场强度。

(2) 在该磁场中引进一如图所示的直导线 ab ，求导线内的感生电动势。

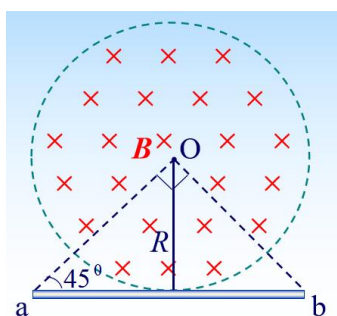


图 6-6 例 1 用图

解：

$$\oint \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = \oint \vec{E}_\varphi \cdot d\vec{l} = 2\pi r E_\varphi$$

$$\Phi = \begin{cases} \pi r^2 B & r \leq R \\ \pi R^2 B & r \geq R \end{cases}$$

$$\oint \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

$$\vec{E}_i = \vec{E}_\varphi = \begin{cases} -\frac{r}{2} \frac{dB}{dt} & r \leq R \\ -\frac{R^2}{2r} \frac{dB}{dt} & r \geq R \end{cases}$$

$$d\varepsilon = \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = E_i dl \cos\theta = \frac{R^2}{2r} \frac{dB}{dt} \cos\theta dl$$

$$r = R / \cos\theta, \quad dl = d(R \tan\theta) = R \sec^2\theta d\theta$$

$$d\varepsilon = \frac{R^2}{2} \frac{dB}{dt} d\theta$$

教师总结，感生电动势的计算步骤，并让学生进行练习。

教师板书进行详细推导

$$\varepsilon_{ab} = \int_{-\pi/4}^{\pi/4} \frac{R^2}{2} \frac{dB}{dt} d\theta = \frac{1}{4} \pi R^2 \frac{dB}{dt}$$

例 2: 如图所示，有一局限在半径为 R 的圆柱体内沿圆柱轴线方向的匀强磁场，磁感应强度大小随时间的变化率为 dB/dt 。试求：（1）圆柱体内外的感生电场强度；（2）闭曲线 L_1 和 L_2 导线内的感生电动势，其中同心圆 L_1 的半径为 R_1 ，同心圆弧 MQ 和 NP 的半径分别为 R_2 和 R_3 ；（3） L_2 环内 M 和 N 以及点 P 和 Q 电势是否相等。

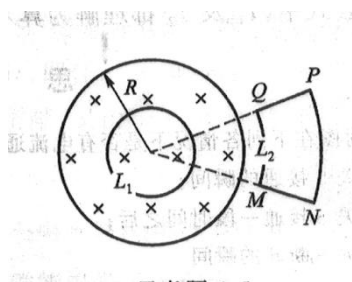


图 6-7 例 2 用图

解：

$$(1) \oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = 2\pi r E_i$$

$$\Phi = \begin{cases} -\pi r^2 B & (r \leq R) \\ -\pi R^2 B & (r > R) \end{cases}$$

由 $\oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt}$ 得：

$$E_i = \begin{cases} \frac{r}{2} \frac{dB}{dt} & (r \leq R) \\ \frac{R^2}{2r} \frac{dB}{dt} & (r > R) \end{cases}$$

（2）求 L_1 和 L_2 导线内的感生电动势，

穿过 L_1 的磁通为：

$$\Phi_1 = -\pi R_1^2 B$$

$$\varepsilon_1 = -\frac{d\Phi}{dt} = \pi R_1^2 \frac{dB}{dt}$$

穿过 L_2 的磁通为：

$$\Phi_2 = 0$$

$$\varepsilon_2 = 0$$

（3） L_2 环内 M 、 N 电势相等； P 、 Q 电势相等。

<p>三、课堂小结</p> <p>1.感生电动势产生的条件及方向判断。 2.感生电场与静电场的区别。</p> <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：6.4.1 6.4.2</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #6b8e23; color: white; padding: 10px; margin-top: 10px;"> <p style="text-align: center;">6.4 感生电动势与感生电场</p> <p>一、感生电动势</p> <p>二、感生电场的性质</p> </div>	
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果：</p> <p>在讲解法拉第电磁感应定律和感生电场的关系时，我充分运用了图示和公式，帮助学生在理解定律的同时，也能看到公式背后的物理意义。</p> <p>存在问题：</p> <p>感生电场的概念比较抽象，学生在理解其物理意义时遇到了一些困难，特别是在感生电场与静电场的区别方面。虽然我通过图示进行了解释，但部分学生仍然没有完全掌握感生电场的非保守性以及其与静电场的根本区别。</p> <p>改进措施：</p> <p>在未来的教学中，适当压缩部分内容的讲解，将更多时间集中于学生理解较为困难的知识点，尤其是感生电场的应用和物理意义。</p>	

授课课题	第 28 讲 § 6.5 自感 § 6.6 互感	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解自感和互感的定义及其物理意义。</p> <p>2.理解自感与互感的实际应用，如变压器、感应加热等</p> <p>能力目标: 1.掌握计算自感系数的方法；</p> <p>2.掌握计算互感系数的方法。</p> <p>素养目标: 激发学生对电磁学的兴趣，尤其是对自感和互感在实际中的应用。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.了解自感现象，理解自感系数定义和计算方法。</p> <p>2.了解互感现象，理解互感系数定义和计算方法；</p> <p>教学难点: 1 自感系数的计算；</p> <p>2 互感系数的计算。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>通过生活中的实例（如变压器、感应加热设备等）引导学生思考自感与互感的应用，提出问题：“变压器如何通过电流的变化来实现电压的转换？”，逐步过渡到理论讲解。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 自感现象</p> <p>电流流过线圈时，其磁场给线圈自身提供磁通。如果这电流随时间而变，磁通就随时间而变，线圈便出现感生电动势。这种由自身电流变化引起的电磁感应现象叫做自感现象，自感现象中的感生电动势叫做自感电动势。</p> <p>2. 自感</p> <p>不同线圈产生自感现象的能力不同。考虑一个 N 匝线圈。如果线圈是密绕的，则每匝可近似看成一条闭合曲线，因此可谈及它的磁通。设线圈电流激发的穿过每匝的磁通相等(记作Φ，叫做每匝磁通)，则由法拉第定律可知每匝的感生电动势为$-d\Phi/dt$，整个线圈的自感电动势为</p>		<p>问 题 法 导 入</p> <p>新课，通过生活中的实例，引导学生思考，自感与互感的应用，培养学生的逻辑思维。从而引出新科的讲解。</p>

$$E_{\text{自}} = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (6.5.1)$$

若线圈有 N 匝，磁通匝数为 $\Psi = N\phi$ 。由毕萨定律知， $B \propto I$ ，而 $\phi \propto B$ 所以 $\phi \propto I$ ，设 L 为回路的自感系数，简称自感，则

$$L = \Psi / I \quad (6.5.2)$$

这里需要注意，无铁磁质时，自感仅与线圈形状、磁介质及 N 有关。把 (6.5.2) 代入 (6.5.1) 得

$$E_{\text{自}} = -L \frac{dI}{dt} \quad (6.5.3)$$

例 1: 如图的长直密绕螺线管，已知 I, S, N, μ 求其自感 L (忽略边缘效应)

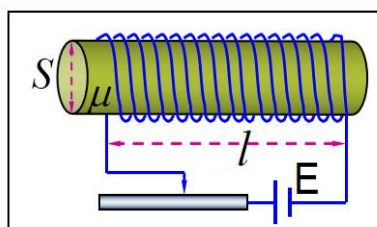


图 6-8 例 1 用图

解:

$$B = \mu H = \mu n I$$

$$\psi = N\Phi = NBS$$

$$\therefore L = \mu n^2 V$$

3. 互感现象及互感

两个相互靠近的线圈，当一个线圈中的电流变化时，它所产生的变化的磁场会在另一个线圈中产生感应电动势，这种现象叫互感，这种感应电动势叫互感电动势。互感现象是一种常见的电磁感应现象，它不仅发生于绕在同一铁芯上的两个线圈，而且可以发生于任何两个相互靠近的电路之间。

当两个线圈的电流可以互相提供磁通时，就说它们之间存在互感耦合(简称存在互感)。为了加强互感耦合,通常采用两个多匝线圈而且绕在同一筒子上(图 6-9)。筒子可以是空心的，也可以插入铁心。若以 Φ_1 表示线圈 1 中每匝的磁通(包括由 I_1 及 I_2 提供的), 则

教师向学生讲解自感系数的定义及其相关表达式，学生认真记忆。

学生练习

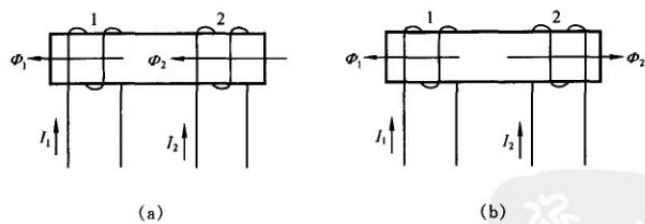


图 6-9 两线圈绕在一个筒子上

$$\Phi_l = \Phi_{1l} \pm \Phi_{2l} \quad (6.6.1)$$

式中正、负号分别适用于图 6-29 的(a)和(b)。线圈 1 中每匝的感生电动势为 $-d\Phi_l/dt$ ，设它共有 N_1 匝，则其总电动势。

$$\varepsilon_l = -N_l \frac{d\Phi_l}{dt} = -\frac{d(N_l\Phi_l)}{dt} = -\left[\frac{d(N_l\Phi_{1l})}{dt} \pm \frac{d(N_l\Phi_{2l})}{dt} \right]. \quad (6.6.2)$$

$$\text{令} \quad \Psi_{1l} \equiv N_l\Phi_{1l}, \quad \Psi_{2l} \equiv N_l\Phi_{2l} \quad (6.6.3)$$

$$\text{则} \quad \Psi_l \equiv N_l\Phi_l = \Psi_{1l} \pm \Psi_{2l} \quad (6.6.4)$$

$$\varepsilon_l = -\left(\frac{d\Psi_{1l}}{dt} \pm \frac{d\Psi_{2l}}{dt} \right) = -\frac{d\Psi_l}{dt} = -\left(L_l \frac{dI_l}{dt} \pm M_{2l} \frac{dI_2}{dt} \right) \quad (6.6.5)$$

(1) 互感线圈的串联

顺接情况：

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= -\left(L_1 \frac{dI}{dt} + M \frac{dI}{dt} \right) = -(L_1 + M) \frac{dI}{dt} \\ \varepsilon_2 &= -\left(L_2 \frac{dI}{dt} + M \frac{dI}{dt} \right) = -(L_2 + M) \frac{dI}{dt} \end{aligned}$$

因串联总电动势等于每个线圈电动势之和，故

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -(L_1 + L_2 + 2M) \frac{dI}{dt} \quad (6.6.6)$$

上式说明两个线圈的串联等效于一个自感线圈，其自感为

$$L = L_1 + L_2 + 2M \quad (6.6.7)$$

可见，顺接而成的等效线圈的自感大于两个线圈自感之和。

逆接情况：

$$\begin{aligned} E_1 &= -\left(L_1 \frac{dI}{dt} - M \frac{dI}{dt} \right) = -(L_1 - M) \frac{dI}{dt} \\ E_2 &= -\left(L_2 \frac{dI}{dt} - M \frac{dI}{dt} \right) = -(L_2 - M) \frac{dI}{dt} \end{aligned}$$

教师通过板书讲解互感电动势的表达式。

详细推导互感线圈串联的自感

$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 = -(L_1 + L_2 - 2M) \frac{dI}{dt} \quad (6.6.8)$ <p>其等效自感为</p> $L = L_1 + L_2 - 2M \quad (6.6.7)$ <p>三、课堂小结</p> <p>1.自感和互感现象产生的条件和区别。 2.自感和互感电动势。</p> <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：6.5.1 6.6.1</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4f81bd; color: white; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">6.5 自感</p> <p>一、自感现象</p> <p>二、自感系数与自感电动势</p> <p style="text-align: center;">6.6 互感</p> <p>一、互感现象</p> <p>二、互感系数与互感电动势</p> </div>	课堂小结 布置作业
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果：</p> <p>从自感的基本概念入手，讲解了自感的物理意义、公式推导等内容，然后过渡到互感的相关知识。这样的讲解逻辑使学生能够逐步接受新的知识，尤其是在公式的推导和应用上，层次分明。</p> <p>存在问题：</p> <p>自感与互感的物理意义对部分学生来说仍然较为抽象，尤其是在理解自感的反向电动势和互感的磁场耦合效应时，学生存在一定的理解障碍。</p> <p>改进措施：</p> <p>对于自感和互感的教学，可以通过更丰富的图示和模型来帮助学生形象化这些抽象的概念。</p>	

授课课题	第 29 讲 § 6.8 RL 电路的暂态过程	
	§ 6.9 RC 电路的暂态过程	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解 RL 电路中电流随时间变化的规律,掌握时间常数的定义及其物理意义。</p> <p>2.理解 RC 电路中电流和电压随时间变化的规律,掌握时间常数的定义及其物理意义。</p> <p>能力目标: 1.能够通过定量分析 RL 和 RC 电路,运用电路分析技巧解出电流和电压随时间变化的公式;</p> <p>2.对比 RL 和 RC 电路的暂态过程,学生能够理解不同电路元件对电路响应的影响。</p> <p>素养目标: 通过案例分析,激发学生对电路暂态过程的兴趣,培养学生探索电路行为的热情。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.了解暂态过程,了解 RL 电路与直流电源的接通和已通电 RL 电路的短接电路中电流随时间的变化;</p> <p>2.了解 RC 电路与直流电源的接通和已通电 RL 电路的短接电路中电流随时间的变化。</p> <p>教学难点: 1.RL 电路的暂态过程中电流随时间的变化;</p> <p>2.RC 电路的暂态过程中电流随时间的变化。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>首先可以从学生日常接触的电子设备引入,例如:音响、调光开关、电动机等,询问学生如何理解设备中的电流变化以及为什么它们需要一定时间才能稳定工作。提出问题:大家有没有注意到,当我们关闭电源时,电器是立刻停止工作,还是有一定的延迟?</p> <p>回顾欧姆定律和基尔霍夫定律,作为暂态过程的基础知识,引导学生思考这些定律如何帮助我们理解电路中的电流和电压变化。</p>		<p>以复习法和提问法导入新课。</p>

二、新课讲解

1. RL 电路与直流电流的接通

以图 6-10 为例讨论。把开关接通的时刻选作 $t=0$ ，我们来找出这一时刻以后电流随时间的变化规律，即求出从 $t=0$ 开始的函数 $i(t)$ 。为此，先要列出 $t=0$ 以后 $i(t)$ 所服从的微分方程。线圈在电流变化时相当于一个电源，它提供自感电动势。选自感电动势及 i 的正方向如图 6-10 箭头所示，则

$$\begin{cases} L \frac{di}{dt} + iR = \varepsilon \\ i|_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (6.8.1)$$

这是关于未知函数 $i(t)$ 的一个微分方程，可用分离变量法求解，积分得

$$i = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right) = \frac{\varepsilon}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (6.8.2)$$

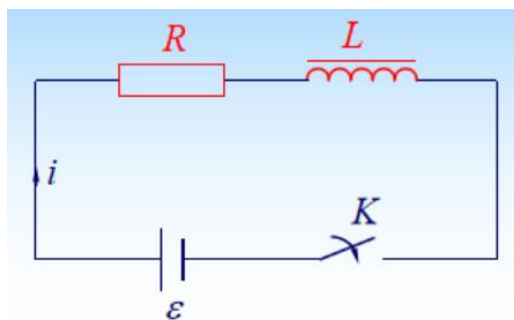


图 6-10 RL 电路与直流电流的接通

这就是电流 i 在开关接通后 ($t>0$) 的变化规律。注意到 $t<0$ 时 $i=0$ ，可画出随 t 的变化曲线，如图 6-11 所示。

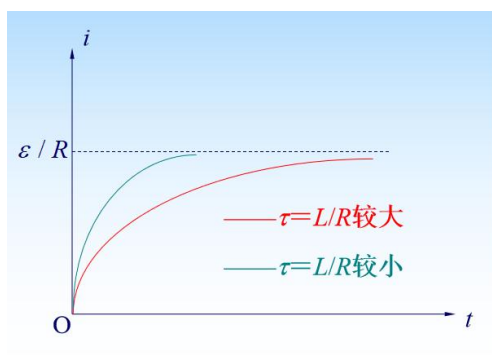


图 6-11 RL 电路与直流电流接通后的暂态电流

2. 已接通 RL 电路的短接

设图 6-12 中开关未接通时电路处于稳态，我们来讨论由于开关的接通在 RL 支路中

新课讲解：通过电路图以及曲线，向学生介绍 RL 电路与直流电流的接通。

所引起的暂态过程。开关接通后，整个电路被开关所在的短路线 DC 分为两个互不影响的回路:ABCD 和 DCFGD，我们只关心前者。选 i 及 e 的正方向如图箭头所示，则

$$\varepsilon = -L \frac{di}{dt} \tag{6.8.3}$$

把基尔霍夫第二定律用于回路 ABCDA，有

$$e_{\text{自}} = iR \tag{6.8.4}$$

其通解为

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \tag{6.8.5}$$

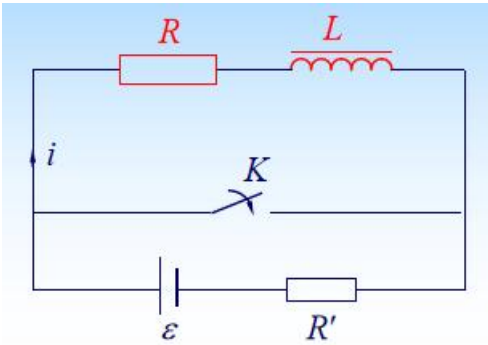


图 6-12 RL 电路的短接

这便是 RL 电路被短接后的暂态电流表达式。 $i(t)$ 的函数曲线如图 6-13 所示。

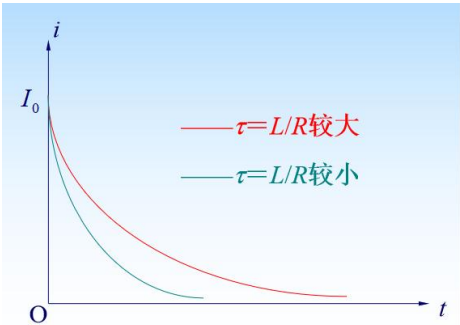


图 6-13 RL 电路短接后的暂态电流

3. RC 电路与直流电路的接通

RC 电路的暂态过程就是电容器通过电阻的充电或放电过程，在电子电路(特别是脉冲、数字电路)中经常遇到。讨论这种过程时，可着重求出电容电压随时间的变化规律 $u_c(t)$ 。知道 $u_c(t)$ 后，其他物理量不难一一求得。

设图 6-14 的开关位于接点 1 时电路处于稳态(并且已知电容电压为零)，我们讨论开关改掷于接点 2 后电容电压随时间的变化规律。以 u_c 及 u_R 分别代表电容和电阻上的电压，其正方向如图所示。开关掷于接点 2 后，有

通过电路图以及变化曲线，向学生讲解已接通的RL电路的短接和RL带你路的暂态过程。

用类比的思维引导学生通过电路图分析RC电路的暂态过程。

$$u_R + u_C = \varepsilon$$

以 i 代表 RC 电路的电流(正方向如图所示), 则 $u_R = iR$, 故

$$iR + u_C = \varepsilon \quad (6.8.6)$$

为使上式成为只含 u_C 的方程, 应设法找到 i 与 u_C 的关系。 i 是单位时间内自左向右流进电容器左板的电荷, 即

$$i = \frac{dq}{dt}$$

$$q = Cu_C$$

代入 (6.8.6) 解得

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = \varepsilon \quad (6.8.7)$$

由分离变量法得其通解为

$$u_C(t) = \varepsilon(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (6.8.8)$$

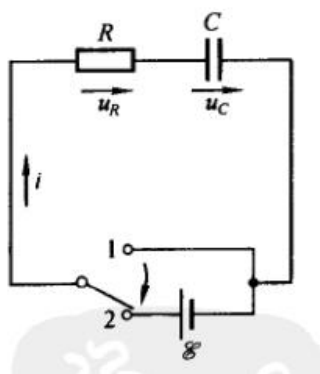


图 6-14 电容器通过电阻的充电和放电

4. 已充电 RC 电路的短接

设图 6-14 的电路在开关位于接点 2 时处于稳态, 我们来讨论开关改掷于接点 1 后的 $u_C(t)$ 。类比上节分析方法, 可以得到

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0 \quad (6.8.9)$$

其通解为

$$u_C(t) = \varepsilon e^{-\frac{t}{RC}} \quad (6.8.10)$$

三、课堂小结

1. RL 电路的暂态过程的分析思路。
2. RC 电路的暂态过程的分析思路。

给学生留课后作业, 巩固知识点。

<p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：6.8.3 6.9.4</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4f7942; color: white; padding: 10px; margin: 10px 0;"> <p style="text-align: center;">6.8 RL 电路的暂态过程</p> <p>一、基本概念</p> <p>二、时间常数，电流随时间的变化</p> <p style="text-align: center;">6.9 RC 电路的暂态过程</p> <p>一、基本概念</p> <p>二、时间常数，电流和电压随时间的变化</p> </div>	
参考资料	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
课后反思	
<p>教学效果：</p> <p>学生普遍能理解时间常数的物理意义，并能通过公式推导出电流和电压随时间变化的表达式。</p> <p>存在问题：</p> <p>部分学生在解微分方程的过程中存在困难，需要进一步加强引导和练习。</p> <p>改进措施：</p> <p>在讲解 RL 和 RC 电路的暂态过程时，可以更多地借助图示和仿真软件，帮助学生更直观地理解电流和电压的变化。</p>	

授课课题	第 30 讲 § 6.7 涡电流 6.10 RCL 电路的暂态过程	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解涡电流产生的原因。</p> <p>2.理解 RCL 电路中电流随时间变化的规律，掌握时间常数的定义及其物理意义。</p> <p>能力目标: 1.能够举例说明涡电流在现实生活中的应用，如电磁制动、金属探测等；</p> <p>2.能够通过定量分析 RCL 电路，运用电路分析技巧解出电流和电压随时间变化的公式。</p> <p>素养目标: 通过案例分析，激发学生对涡电流和电路暂态过程的兴趣，培养学生探索电路行为的热情。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 1.了解涡电流热效应的应用和危害，了解涡流磁效应的应用——电磁阻尼和趋肤效应；</p> <p>2.了解暂态过程，了解 RL 电路与直流电源的接通和已通电 RL 电路的短接电路中电流随时间的变化。</p> <p>教学难点: 1.了解趋肤效；</p> <p>2.RL 电路的暂态过程中电流随时间的变化。</p>	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>二、新课导入</p> <p>通过生活中的实例（如变压器、感应加热设备等）引导学生思考自感与互感的应用，提出问题：“变压器如何通过电流的变化来实现电压的转换？”，逐步过渡到理论讲解。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 涡电流的应用和危害</p> <p>当整块金属内部的电子受到某种非静电力时，金属内部就会出现电流。电磁感应情况下的磁洛伦兹力或感生电场力就是这种非静电力的常见例子，由这两种力在整块金属内部引起的感应电流叫做涡电流(简称涡流)，其流动情况可用电流密度 J 描述。由于多数金属的电阻率很小，因此不大的非静电力往往可以激起强大的涡流。图 6-15 表</p>		<p>问 题 法 导 入 新 课，通过生活中的实例，引导学生思考，涡电流的应用，培养学生的逻辑思维。从而引出新科的讲解。</p>

示一个铁心线圈通过交变电流时在铁心内部激起的涡流,它是由变化磁场激发的感生电场引起的。



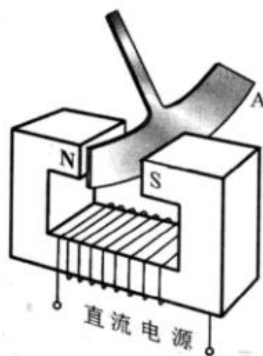
6-15 铁心中的涡电流 6-16 高频感应炉

涡流与普通电流一样要放出焦耳热,利用涡流的热效应进行加热的方法叫做感应加热。冶炼金属用的高频感应炉就是感应加热的一个重要例子,图 6-16 是感应炉的示意图。当线圈通入高频交变电流时,坩中的被冶炼金属内出现强大的涡流,它所产生的热量可使金属很快熔化,这种冶炼方法的最大优点之一就是冶炼所需的热量直接来自被炼金属本身,因此可达极高的温度并有快速和高效的特点。此外,这种冶炼方法易于控制温度,并能避免有害杂质混入被炼金属中,因此适于冶炼特种合金和特种钢等,近年来流行的电磁灶则是交变电流在金属锅底引起的涡流的热效应的应用例子。

但涡流的热效应对于变压器和电机的运行极为不利。首先,它会导致铁心温度升高,从而危及线圈绝缘材料的寿命,严重时甚至可使绝缘材料当即烧毁。其次涡流发热要损耗额外的能量(叫做涡流损耗),使变压器和电机的效率降低。

2. 涡流磁效应的应用-电磁阻尼

如图 6-17, A 是一块可在电磁铁两极间摆动的铜板(傅科摆)。电磁铁未通电时, A 要摆动多次才停;电磁铁一旦通电, A 很快就停下。这种现象叫做电磁阻尼。



6-17 傅科摆

应用: 电气机车的电磁制动器、电学测量仪表。

3. 趋肤效应

一段均匀的柱状导体通过直流电流时,电流密度在导体横截面上是均匀分布的。然而,交变电流通过导体时就不这么简单。由于交变电流激发的交变磁场会在导体内部引起涡流,电流密度在导体横截面上不再均匀分布,而是越靠近导体表面处电流密度越大。这种交变电流倾向于集中在导体表面的效应叫做趋肤效应。

4. 已充电 RCL 电路的短接

设 RLC 电路的电容事先被充电至电压 U , 我们来研究开关接通后的暂态过程。

教师向学生讲解涡流的定义和特点。

先讨论 $R=0$ 的理想情况。

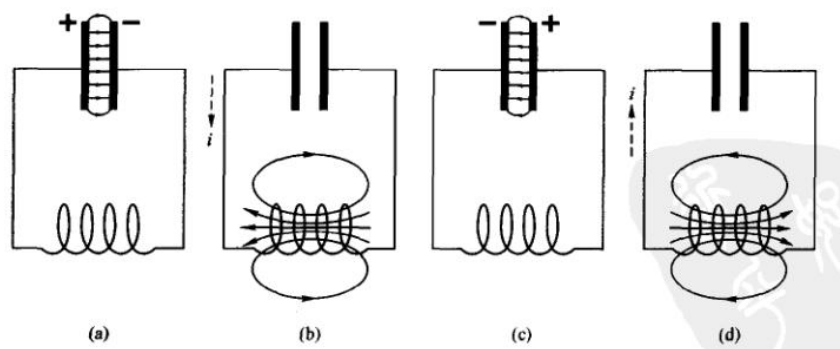
(1) 开关接通前, 电容内储有电场能量 $CU^2/2$, 线圈内没有磁场能量(因无电流), 如图 6-18(a)所示。

(2) 开关接通后, 电容通过线圈放电, 这伴随着两个结果: 其一, 由于放电, 电容所储能量逐渐减小; 其二, 放电电流通过线圈, 使线圈磁能逐渐增加。当电容电压下降为零时, 其电能也下降为零, 由能量守恒定律可知这时线圈磁能最大, 并等于电容放电前的电能[图 6-18(b)]。

(3) 但是过程至此不会完结。由于线圈电流不能突变, 它将继续从电容左板经线圈流入电容右板。这是对电容的反充电过程, 亦即线圈磁能逐渐转化为电容电能的过程, 直至线圈磁能为零(电流为零), 电容电能最大(反方向电压最大), 如图 6-18(c)所示。

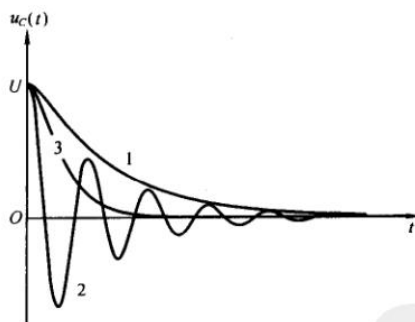
(4) 之后, 电容反方向放电, 再次出现电能转化为磁能的过程, 直至磁能最大, 电能为零[图 6-18(d)]。

由于线圈电流不能突变, 它必然要对电容重新充电, 直至电能最大, 磁能为零, 电路重新回到图 6-18(a)的状态。至此, 电路状态完成了一个周期的变化。此后, 电路将周而复始地重复上述变化过程这种现象叫做 LC 电路的自由振荡。



6-18 RCL 电路的自由振荡

如图 6-19, 实际的机械振荡系统总存在阻力, 即存在能量的损耗故振幅必然逐渐减小, 最终为零, 这就是阻尼振动, 与此对应, 实际电路总有电阻, 而电阻在电流流过时总有能量损耗, 因此一个周期结束时的电能必小于开始时的电能, 如此逐渐减小。



6-19 已充电 RCL 电路的 (2) 阻尼振荡

三、课堂小结

1. 总结涡电流的应用和危害, 以及如何预防;
2. 总结 RCL 电路的暂态过程。

RCL 过程的数学关系较复杂, 只做定性讨论。

教师通过板书画图让学生理解阻尼振荡。

<div>四、作业与思考</div> <div>课后作业：1.查阅资料，了解涡电流在现代科技中的应用； 2.课下进行实际的 RCL 电路实验，测量电路的暂态响应。</div> <div>五、板书设计</div> <div><div>6.8 涡电流</div><div>一、涡电流的定义</div><div>二、涡电流的应用和危害</div><div>6.10 RCL 电路的暂态过程</div><div>一、已充电 RCL 电路的短接</div></div>		<div>课堂小结</div> <div>布置作业</div>
<div>参考资料</div>	<div>[3] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</div> <div>[4] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</div>	
<div>课后反思</div>		
<div>教学效果：</div> <div>大部分学生能够理解 RCL 电路的暂态过程，能够用基本的电路理论解释电流和电压随时间的变化。</div> <div>存在问题：</div> <div>涡电流和 RCL 电路的暂态过程对部分学生来说仍然较为抽象，尤其是在理解阻尼振荡时，学生存在一定的理解障碍。</div> <div>改进措施：</div> <div>可以通过更丰富的图示和模型以及课下实验来帮助学生形象化这些抽象的概念。</div>		

授课课题	第 31 讲 § 6.11 磁能	
教学目标	知识目标: 1.理解磁场中存在磁能的概念; 2.理解磁能的表达式,并能够推导磁场中的磁能密度公式。 能力目标: 掌握利用公式计算磁能密度和总磁能的方法。 素养目标: 激发学生对磁场能量的兴趣,培养学生对物理学中能量转化的认识。	
教学重难点	教学重点: 理解自感线圈和互感线圈的磁能。 教学难点: 互感磁能表达式的推到过程。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	1 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>为什么我们能使用电磁铁?它与我们生活中的哪些科技产品有关? 回顾 RL 电路的定解条件及回路方程。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 自感线圈的磁能</p> <p>以图 6-20 为例讨论,当开关接通并达到稳态后,电路的电流为</p> $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ <p>这时电源在单位时间内所做的功为</p> $\mathcal{E}I = I^2R$ <p>上式反映一个简单的功能关系:在单位时间内,电源的功完全转化为电阻所消耗的焦耳热。但若考虑开关接通后的暂态过程,问题就不这么简单,因为这时的电路方程为</p> $\mathcal{E}idt = i^2Rdt + Lidi \tag{6.11.1}$ <p>上式说明,电源在 dt 时间内的功除转变为电阻所消耗的焦耳热外还剩下一部分。这一部分功显然与磁场的建立有关。开关接通前,线圈电流为零,内部没有磁场。开关</p>		<p>新课导入,提问学生:为什么我们能使用电磁铁》与生活中的那些科技产品有关?从而引入新课。</p>

接通后，随着电流的增大，线圈内部磁场在加强。磁场与电场一样是有能量的，要使磁场增强就要消耗某种形式的能量来变为磁场的能量。式(6.11.1)右边第二项正是电源能量中在 dt 时间内转化为磁场能量的那一部分。当电流达到稳态值时，线圈内的磁能 W (下标 m 代表“磁”)为

$$W_m = \int_0^I L i di = \frac{1}{2} L I^2 \quad (6.11.2)$$

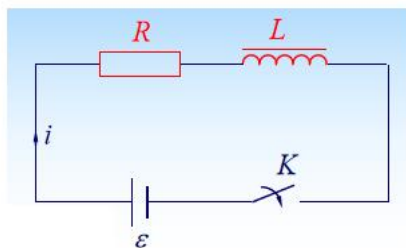


图 6-20 RL 电路与直流电流的接通

2. 互感线圈的磁能

我们来计算图 6-21 中两个有互感耦合的线圈在稳态时的磁能。首先令开关 S ，接通(S 仍断开)并计算 i 从零增至 I_1 时电源所做的附加功。由于这个过程中 $i_2=0$ ，线圈 1 没有来自线圈 2 的互感电动势，电源的附加功就是克服自感电动势的功，由上小节可知其值为

$$W_{m1} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 \quad (6.11.3)$$

另外

$$W_{m2} = L_2 \int_0^{I_2} i_2 di_2 = \frac{1}{2} L_2 I_2^2 \quad (6.11.4)$$

$$W_{m3} = \int_0^{I_2} M_{21} I_1 di_2 = M_{21} I_1 \int_0^{I_2} di_2 = M_{21} I_1 I_2 \quad (6.11.5)$$

可得两个线圈在稳态时的总磁能

$$W_m = W_{m1} + W_{m2} + W_{m3} = \frac{1}{2} L_1 I_1^2 + \frac{1}{2} L_2 I_2^2 + M_{21} I_1 I_2 \quad (6.11.6)$$

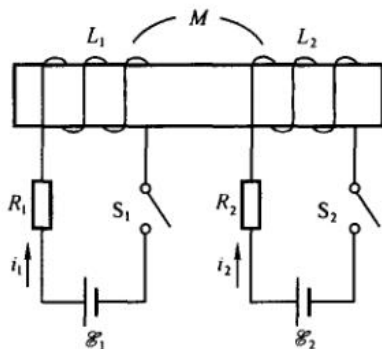


图 6-21 互感线圈磁能的计算

通过生动的图像以及红绿线条清晰地向学生展示了电路地连接。

教师通过提问的方式板书推演出自感线圈和互感线圈的磁能。

<p>三、课堂小结</p> <p>1.自感线圈磁能的推导。 2.互感线圈磁能的推导。</p> <p>四、作业与思考</p> <p>课后作业：6.11.1 6.11.3</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4F81BD; color: white; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p style="text-align: center;">6.11 磁能</p> <p>一、自感线圈的磁能</p> <p>二、互感线圈的磁能</p> </div>	<p>课堂小结 布置作业</p>
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
<p>课后反思</p>	
<p>教学效果： 学生对磁能的概念和计算有了较好的理解，能掌握磁能密度公式及其应用。</p> <p>存在问题： 学生对于磁场中能量的物理意义有了初步理解，但在实际问题的解答中，还需要进一步练习。</p> <p>改进措施： 在讲解推导过程时，可以通过更多的图示和详细的步骤，帮助学生理清思路，特别是数学推导的部分，避免过于抽象。</p>	

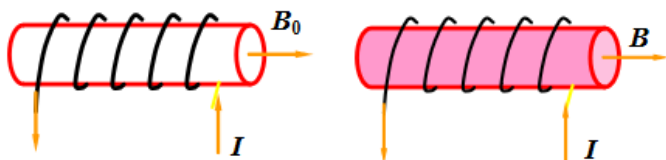
授课课题	第 32 讲 § 7.1 磁介质存在时静磁场的基本规律	
教学目标	<p>知识目标: 1.理解磁介质的基本概念及其在静磁场中的作用;</p> <p>2.掌握磁场在磁介质中的基本规律, 包括磁感应强度 B、磁场强度 H、磁化强度 M 之间的关系。</p> <p>能力目标: 1.能够运用磁场的基本规律, 结合磁介质的性质, 解决相关物理问题;</p> <p>2.能够分析并计算在不同磁介质中的磁场分布。</p> <p>素养目标: 激发学生对磁介质和静磁场之间关系的兴趣, 培养学生在解决实际问题中应用物理理论的能力。</p>	
教学重难点	<p>教学重点: 掌握有磁介质时的环路定理。</p> <p>教学难点: 理解磁化电流与磁化强度的关系。</p>	
教学方法	讲授法、启发式、问题教学法	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教学过程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>从学生已知的磁场基本规律出发, 引入静磁场与磁介质的关系。通过提问引导学生思考: 磁场在不同材料中是如何变化的? 什么因素影响了磁场的强弱?</p> <p>回忆在第三章讲过, 放置于电场中的介质会极化, 描述介质极化的物理量时极化强度, 描述介质中电场的物理量用电位移矢量。对于磁介质的描述与电解质十分相似, 分别引入磁化、磁化强度、磁场强度等概念, 进而得出有介质的磁环路定理。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 磁介质的磁化</p> <p>(1) 磁介质对磁场的影响</p> <p>实验探究:</p> <div></div>		<p>提问法导入新课: 由已知推未知, 将前后知识进行类比, 便于学生接受新知。</p>

图 7-1 长直密绕螺线管

内部无磁介质时:

$$B_0 = \mu_0 nI \quad (7.1.1)$$

内部有磁介质时:

$$B = \mu_r B_0 = \mu_0 \mu_r nI \quad (7.1.2)$$

μ_r 磁介质的相对磁导率, 大小与磁介质种类有关。

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (7.1.3)$$

磁介质的磁导率, 单位:亨利/米

(2) 磁介质的分类

①顺磁质 $\mu_r > 1$ $B > B_0$

如: 锰、铬、铂、氮

②抗磁质 $\mu_r < 1$ $B < B_0$

如: 水银、铜、硫、氢、金、银

③铁磁质 $\mu_r \gg 1$ $B \gg B_0$

如: 铁、钴、镍、铁氧体

(3) 磁介质的磁化--分子电流观点

安培认为, 由于电子的运动, 每个磁介质分子(或原子)相当于一个环形电流, 叫分子电流。分子电流的磁矩叫分子磁矩。

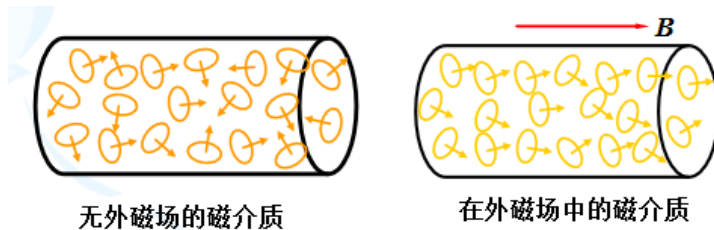


图 7-2 磁化后分子电流的规则排列

无外磁场: 分子磁矩方向杂乱无章, 互相抵消, 对外不显磁性;

有外磁场时, 分子磁矩将大致转向外磁场方向, 出现宏观电流和分子磁矩对应的小圆电流在磁介质内部相互抵消, 在磁介质表面方向相同, 总效果相当于介质表面有一层电流流过。这种电流称为束缚电流, 也叫磁化电流。

磁介质中的磁感应强度

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' \quad (7.1.4)$$

提问; 有没有同学能简单讲述一下高中学过的安培分子电流假说?

引入思政: 引导同学明白, 学习是一个循序渐进的过程。

其中 \vec{B} 为磁介质中的总磁化强度， \vec{B}_0 为传到电流产生的磁化强度， \vec{B}' 为磁化电流产生的附加磁感强度。

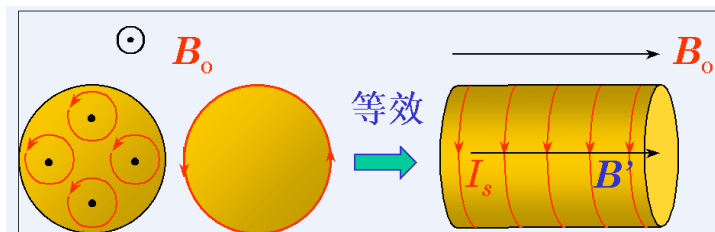


图 7-3 规则排列分子电流的宏观表现

2. 磁化强度

(1) 磁化强度 M

每个分子环流磁矩

$$\vec{p}_{mi} = I\vec{S} \quad (7.1.5)$$

单位体积内分子磁矩的矢量和称作磁介质的磁化强度

$$\vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_{mi}}{\Delta V} \quad (7.1.6)$$

单位：A/m

说明：(1) 均匀磁化， $M = \text{const}$ ，为常量

$$(2) \vec{M} = \frac{\sum \vec{p}_{mi}}{\Delta V} = n\vec{p}_{mi} = nI\vec{S}$$

$$(3) \text{真空 } \vec{M} = 0$$

$$(4) \text{各向同性的非铁磁质 } \vec{M} = g\vec{B}$$

2. 磁化强度的环路定理

(1) 磁介质中磁化电流与磁化强度的普遍关系

设想在介质内取任意宏观曲面 S ，其周界为 L ，考虑穿过此曲面的磁化电流。

如图所示，只有周界 L 穿过分子环流平面的分子环流，对磁化电流有贡献。

若单位体积内的分子数为 n ，则与 $d\vec{l}$ 套连的总分子电流为小斜柱体内的分子电流总和。即

$$dI' = n(\pi a^2 \cdot d\vec{l} \cdot \cos\theta)I_m = M \cdot d\vec{l} \cdot \cos\theta = \vec{M} \cdot d\vec{l} \quad (7.1.7)$$

加强对磁化强度定义的理解，提示学生注意说明中(4)的适用条件。

教师板书进行详细推导

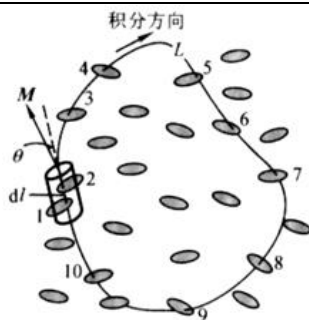


图 7-4 曲面 S 的磁化电流的计算.闭曲线 L 是曲面 S 的边线, S 未画出

整个曲面的磁化电流强度为

$$I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l} \quad (7.1.8)$$

(2) 面磁化电流

当电荷集中于两种介质界面附近一个薄层内运动, 而且场点距离薄层的距离远大于层的厚度时, 可以近似地认为电流只在一个几何面上流动, 这种电流叫面电流。

面电流密度定义:

$$\alpha' = \frac{dI'}{dl} \quad (7.1.9)$$

磁介质磁化电流密度的两个重要结论:

(1) 磁化电流密度 \vec{j} 由磁化强度 \vec{M} 决定, 均匀磁化介质中 $\vec{j} = 0$:

(2) 两种磁介质界面上磁化电流密度 $\alpha' = (\vec{M}_2 - \vec{M}_1) \times \vec{e}_n \quad (7.1.10)$

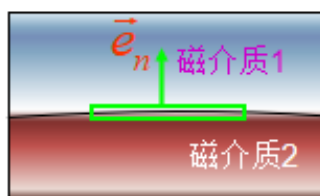
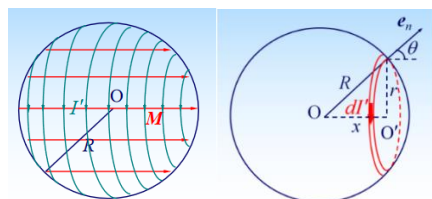


图 7-5 证明式 7.1.10 所用的窄矩形

(3) 例题讲解

例 1 一均匀磁化的球体, 半径为 R, 磁化强度为 M, 求磁化电流在球心产生的磁感应强度 B。



解:

式 (7.1.10) 为本节重点, 即求解两种磁介质界面上磁化电流密度。提示学生注意法向 \vec{e}_n 的方向为 2 到 1。

学生练习, 检测课堂学习效果

$$\alpha' = M_t = M \sin \theta$$

$$dB = \frac{\mu_0}{2} \frac{r^2 dI'}{(x^2 + r^2)^{\frac{3}{2}}}$$

$$r = R \sin \theta, x = R \cos \theta$$

$$dI' = \alpha' R d\theta = MR \sin \theta d\theta$$

$$dB = \frac{1}{2} \mu_0 M \sin^3 \theta d\theta$$

$$B = \frac{1}{2} \mu_0 M \int_0^\pi \sin^3 \theta d\theta = \frac{2}{3} \mu_0 M$$

3. 磁场强度 H，有磁介质时的环路定理

(1) 有磁介质时的环路定理

真空中的安培环路定理 $\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$

当磁场中存在磁介质时，电流为传导电流和磁化电流的代数和，上式仍然成立。

则有

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_0 + I') \quad (7.1.11)$$

因为 $I' = \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}$ 代入上式

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_0 + \oint_L \vec{M} \cdot d\vec{l}) \quad (7.1.12)$$

$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \right) \cdot d\vec{l} = I_0 \quad (7.1.13)$$

$$\text{令 } \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad (7.1.14)$$

$$\text{故 } \oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_0 \quad (7.1.15)$$

此公式为有磁介质时的安培环路定理， I_0 为传导电流的代数和。

注意：

(1) 磁场强度的环流只与回路内的传导电流有关。

(2) 有介质的环路定理只是普通表达式，由此式可得真空中的环路定理。

(2) 磁场强度 H

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad (7.1.16)$$

在各向同性的非铁磁质中

强调：磁场强度的环流只与回路内的传导电流有关。

本节难点：
用磁介质中的安培环路定理求磁场强度

$$\vec{M} = g\vec{B} \quad (7.1.17)$$

代入定义式中

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - g\vec{B} = \left(\frac{1}{\mu_0} - g\right)\vec{B} \quad (7.1.18)$$

令 $\mu = \left(\frac{1}{\mu_0} - g\right) = \frac{\mu_0}{1 - g\mu_0}$ 为磁介质的磁导率

则

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \text{ 或 } \vec{B} = \mu\vec{H} \quad (7.1.19)$$

上式为磁介质的性能方程。

相对磁导率为

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} = \frac{\mu_0}{1 - g\mu_0} \quad (7.1.20)$$

有介质存在时求恒定电流的磁场分布的步骤

(1) 根据 $\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_0$ 求出 \vec{H} 的分布:

(2) 再由 $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu}$ 求出 \vec{B} 。

例题讲解:

例 2 一半径为 R_1 的无限长圆柱形指导线, 外面包一层半径为 R_2 , 相对磁导率为 μ_r 的圆柱形磁介质。通过导线的电流为 I (均匀流过)。求:

(1) 磁介质内、外磁场强度和磁感应强度的分布;

(2) 磁介质内、外表面的磁化电流线密度。

解: (1)

$$\Sigma I_{0\text{int}} = \begin{cases} \frac{Ir^2}{R_1^2} & (r < R_1) \\ I & (r > R_1) \end{cases}$$

$$H = \begin{cases} \frac{Ir}{2\pi R_1^2} & (r < R_1) \\ \frac{I}{2\pi r} & (r > R_1) \end{cases}$$

教师提醒学生过程书写要规范, 标清楚矢量符号。

利用例题说明磁化电流线密度的求法, 加深学生对知识点的

$$B = \mu_0 \mu_r H = \begin{cases} \frac{\mu_0 I r}{2\pi R_1^2} & (r < R_1) \\ \frac{\mu_0 \mu_r I}{2\pi r} & (R_1 < r < R_2) \\ \frac{\mu_0 I}{2\pi r} & (r > R_2) \end{cases}$$

(2) 为求内外表面的磁化电流密度 α' ，需要先求出各区域的磁化强度 \vec{M}

在导线内， $\vec{M}_1 = 0$

$$\text{在磁介质内: } \vec{M}_2 = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H} = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi r} \vec{e}_\varphi$$

内表面:

$$\alpha'_1 = (\vec{M}_2 - \vec{M}_1) \times \vec{e}_{21} = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R_1} \vec{e}_\varphi \times \vec{e}_{21} = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R_1} \vec{e}_\varphi \times (-\vec{e}_r) = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R_1} \vec{k}$$

在磁介质外有: $\vec{M} = 0$

外表面:

$$\alpha'_2 = (\vec{M}_2 - \vec{M}_1) \times \vec{e}_{21} = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R_1} \vec{e}_\varphi \times \vec{e}_{21} = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R_1} \vec{e}_\varphi \times \vec{e}_r = \frac{(\mu_r - 1)I}{2\pi R_1} (-\vec{k})$$

规定三个单位矢量之间的右手关系为: $\vec{e}_r \times \vec{e}_\varphi = \vec{k}$

三、课堂小结

静磁场与静电场方程的对比

静 电 场 方 程	对任意闭合曲线	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$
	对任意闭合曲面	$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = q_0$
	各向同性电介质性能方程	$\vec{E} = \frac{\vec{D}}{\varepsilon}$
静 磁 场 方 程	对任意闭合曲线	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$
	对任意闭合曲面	$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_0$
	各向同性磁介质性能方程	$\vec{B} = \mu \vec{H}$

理解。

通过对比加深学生对新知的印象，避免混淆。

以表格的形式展示本节内容，启发学生在学习要养成逻辑性，将知识进行分类，进行横向对比和纵向类比，才能清晰知识

<p>四、作业与思考</p> <p>1.思考题：阅读相关资料并思考：分子电流观点和磁荷观点有什么异同？</p> <p>2.课后作业：7.1.5 7.1.7</p> <p>五、板书设计</p> <div style="background-color: #4f81bd; color: white; padding: 10px; margin-top: 20px;"> <p>7.1 磁介质存在时静磁场的基本规律</p> <p>一、磁介质的基本概念</p> <p>二、磁场在磁介质的分布</p> <p>三、磁场强度与磁化强度之间的关系</p> </div>	<p>与知识之间的联系。</p> <p>布置作业</p>
<p>参考资料</p>	<p>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</p> <p>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</p>
<p style="text-align: center;">课后反思</p>	
<p>教学效果：</p> <p>学生对磁介质在静磁场中的作用有了较清晰的理解，能够掌握基本公式和概念，尤其是 B、H 和 M 之间的关系。</p> <p>存在问题：</p> <p>多数学生对公式推导过程没有太大问题，但对磁化强度 M 的物理意义理解较为抽象，部分学生对磁化强度与磁场的关系感到困惑。</p> <p>改进措施：</p> <p>可以通过更多的图示和物理实验来直观展示磁介质的磁化过程，帮助学生理解磁化强度的物理意义。增加更多关于磁场在不同介质中的分布规律的实际问题 and 案例分析，让学生更好地理解这些规律在现实世界中的应用。</p>	

授课课题	第 33 讲 § 7.2 顺磁质与抗磁质 § 7.3 铁磁性与铁磁质	
教学目标	知识目标：1.理解顺磁质和抗磁质的基本特性及其在外加磁场中的表现； 2.掌握铁磁性和铁磁质的基本概念，理解磁畴理论及其在铁磁材料中的应用。 能力目标：1.能够分析和解释顺磁质、抗磁质和铁磁质在外加磁场中的行为； 2.能够运用磁性材料的基本理论，解决实际问题，尤其是在材料科学和磁学中的应用问题。 素养目标：强调科学技术对社会的贡献：让学生认识到顺磁质和抗磁质在现代科技中的实际应用，增强科学技术与社会发展的关联意识。	
教学重难点	教学重点：1.了解顺磁质与抗磁质特性； 2.了解铁磁质的磁化性能和铁磁质的分类和应用；了解铁磁性的起因。 教学难点：1.抗磁性的理论解释； 2.理解磁滞回线。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式、问题教学法	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教学过程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>提问引导学生思考：为什么有些材料在磁场中被强烈吸引，而有些则几乎不受影响？引出顺磁质、抗磁质和铁磁质的概念。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 分子磁矩</p> <p>一个分子中所有电子的轨道磁矩和自旋磁矩的和：</p> $\overline{p}_m = \sum_i (\overline{p}_{Li} + \overline{p}_{si}) \tag{7.2.1}$ <p>顺磁质： $\overline{p}_m \neq 0$ 固有磁矩</p> <p>抗磁质： $\overline{p}_m = 0$</p>		<p>使学生带着问题进入课堂，有目的地听课。</p> <p>图 7-6 符合右手螺旋</p>

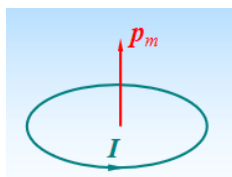


图 7-6 分子磁矩

2. 顺磁质的磁化

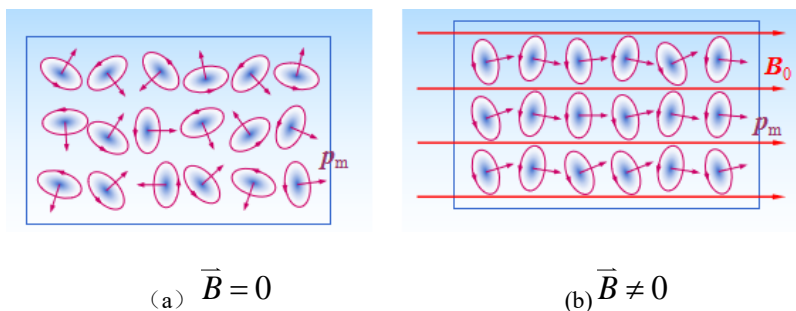


图 7-7 顺磁质的磁化

$\vec{B}_0 = 0$: 无规排列, $\sum \vec{p}_m = 0, \vec{B}_0 = 0$

$\vec{B}_0 \neq 0$: 趋向排列 (沿 \vec{B}_0 方向), $\sum \vec{p}_m \neq 0, \vec{B}_0 \neq 0, \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' (B > B_0)$

3. 抗磁质的磁化

$\vec{B}_0 = 0$: $\Delta \vec{p}_m = 0, \sum \vec{p}_m = 0, \vec{B}' = 0$

$\vec{B}_0 \neq 0$: $\Delta \vec{p}_m \neq 0, \sum \vec{p}_m \neq 0$ (与 \vec{B}_0 反向), $\vec{B}' \neq 0, \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}' (B < B_0)$

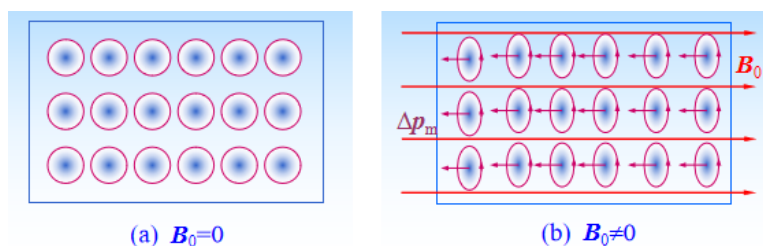


图 7-8 抗磁质的磁化

探究抗磁性的起因: 设外磁场是均匀的, 且垂直于电子绕核运动的轨道平面。

$$\text{分子电流运动周期 } T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0} \quad (7.2.2)$$

$$\text{分子电流 } I = \frac{e}{T_0} = \frac{e\omega_0}{2\pi} \quad (7.2.3)$$

通过前期线上学习布置分组任务, 小组讨论推导抗磁性的起因。

小组讨论后, 老师进行点评, 发现问题, 通过板书展示详细推导过程, 解决问题。

$$\text{分子磁矩 } \vec{p}_m = I\pi r^2 = \frac{e\omega_0}{2\pi} \pi r^2 \quad (7.2.4)$$

$$\text{电子带负电 } \vec{p}_{m0} = -\frac{er^2}{2} \omega_0 \quad (7.2.5)$$

$$\text{附加磁矩 } \Delta \vec{p}_m = -\frac{1}{2} er^2 \Delta \vec{\omega} \quad (7.2.6)$$

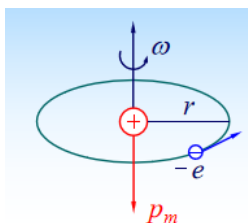


图 7-9 电子的轨道磁矩 \vec{p}_m

$$\text{上式联立计算得 } \Delta \vec{\omega} = \frac{e}{2m_e} \vec{B} \quad (7.2.7)$$

$$\text{则 } \Delta \vec{p}_m = -\frac{e^2 r^2}{4m_e} \vec{B} \quad (7.2.8)$$

(7.2.8)即为抗磁性的根源。

在外场作用下，分子产生附加磁矩如下图所示

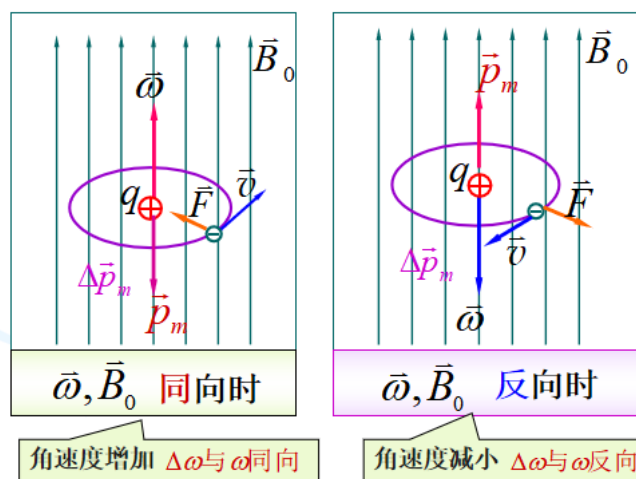


图 7-10 两种呈抗磁性的情况

4. 铁磁质的基本特性

铁、钴、镍和它们的一些合金、稀土族金属(在低温下)以及一些氧化物(如 CrO_2)等磁介质都称为铁磁质。共同特点:

(1)相对磁导率 $\mu \gg 1$;

教师提问：观察图 7-10，你发现了什么？

学生回答：两种情况角速度增量都与磁场同向。

磁介质中每个分子产生与外加磁场相反的附加磁矩，这是本节课的教学重点之一。

- (2) μ 随磁场的强弱发生变化;
- (3) 有明显的磁滞效应。

(1) 铁磁质的磁化性能

线圈中通入的电流 I 使铁磁质磁化，称为励磁电流。环中磁场：

$$H = \frac{NI}{2\pi r} \tag{7.3.1}$$

其中， N 为环上线圈的总匝数， r 为环的平均半径。环内的 B 可由冲击电流计测得。

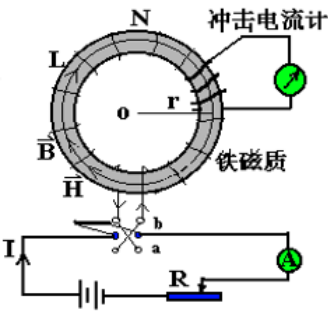


图 7-11 研究磁化规律的实验装置

改变电流 I ，测出多组 B 和 H 的值，由此绘出的 H - B （或 H - M ）关系曲线称为磁化曲线。

- O~A: M 、 B 随 H 近似线性增大;
- A~B: M 、 B 随 H 快速增大。

B~C: M 、 B 随 H 增大速度减缓，直至饱和。饱和时， $M = M_s$ 保持不变， B 随 H 线性增大。

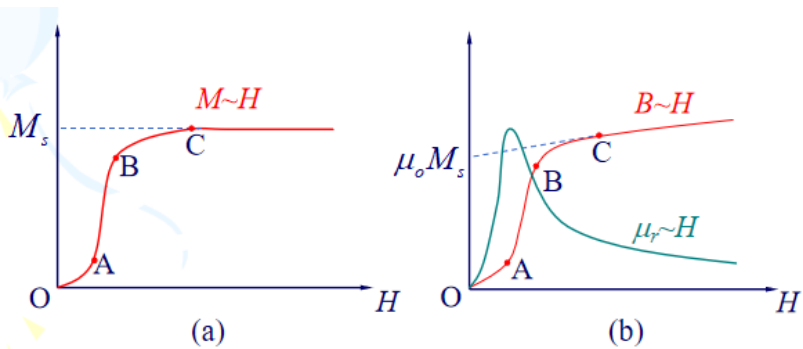


图 7-12 磁化曲线

(2) 磁滞回线

当外磁场由 $+H_m$ 逐渐减小时，磁感强度 B 并不沿起始曲线 OP 减小，而是沿 PQ 比较缓慢的减小，这种 B 的变化落后于 H 的变化的现象，叫做磁滞现象，简称磁滞。

通过列举不同铁磁材料在生活生产中的应用，体现物理与生活的密切联系。

由于磁滞，当磁场强度减小到零(即 $H = 0$)时，磁感强度 $B \neq 0$ ，而是仍有一定的数值 B_r ， B_r 叫做剩余磁感强度(剩磁)

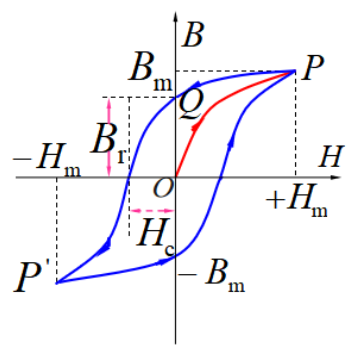
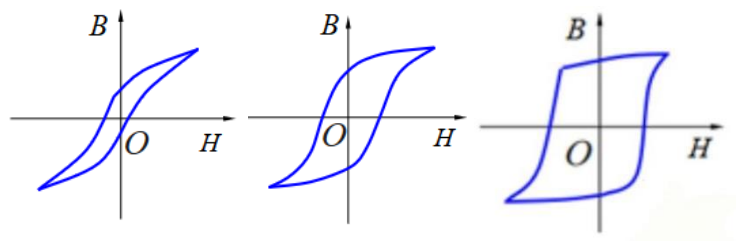


图 7-13 磁滞回线

实验表明，不同铁磁性物质的磁滞回线形状相差很大。



(a) 软磁材料 (b) 硬磁材料 (c) 矩磁铁氧化材料（非铁磁性材料）

图 7-14 不同物质磁滞回线

其中软磁材料主要应用于变压器、电机电感元件、继电器等核心；

硬磁材料用于制成永磁铁，在电表、扬声器、耳机和录音机等设备中提供强而稳定的磁场；

非铁磁材料中的矩磁铁氧体材料是计算机中记忆元件，电子技术中的天线和电感中的磁心。

（3）铁磁性的起因

铁磁质内存在着许多自发磁化的小区域，叫磁畴。磁畴的限度约为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 毫米，约包含 10^{15} 个原子。每个磁畴都具有一定的磁矩，有电子自旋磁矩自发取向一致产生，与电子的轨道运动无关。

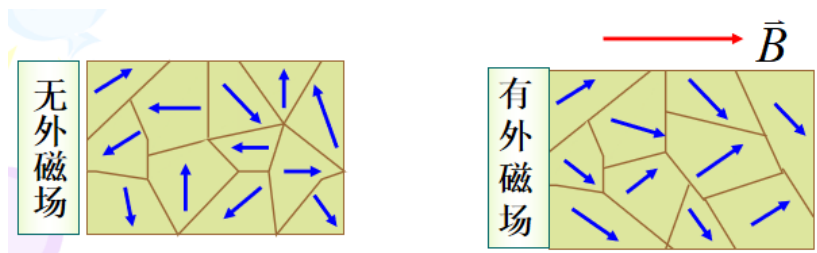


图 7-15 有无外磁场时的畴壁移动及磁矩取向

磁畴的转向是不可逆的。

三、作业与思考

1. 思考题：铁磁材料的磁化特性有哪些？磁滞现象具体指什么，它在铁磁材料反复磁化过程中是如何体现的？
2. 课后作业：7.6.3 7.6.4 7.6.5

四、课堂小结

1. 顺磁质和抗磁质的基本特性及其在外加磁场中的表现。
2. 磁畴理论及其在铁磁材料中的应用。

五、板书设计

7.2 顺磁质与抗磁质

1. 概念

2. 微观解释

7.3 铁磁性与铁磁质

一、概念

二、磁畴理论

三、磁滞现象

参考资料

- [1] <https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194>
- [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)

课后反思

教学效果：

学生基本理解了顺磁质、抗磁质和铁磁质的概念及其在磁场中的表现，能够区分这三类材料的特性。

存在问题：

学生对磁畴理论和磁滞现象的理解较为抽象，部分学生对磁化过程中的微观机制感到困惑。

改进措施：

可以通过更多的示意图和动画展示磁畴的变化过程，帮助学生理解磁畴理论和磁滞现象。增加关于磁性材料在现代科技中的应用案例，让学生更好地理解这些材料的重要性和应用前景。

授课课题	第 34 讲 § 7.4 磁路及其计算 § 7.5 磁场的能量	
教学目标	知识目标: 1.理解磁路的基本概念, 掌握磁路的基本定律和计算方法; 2.理解磁场能量的概念及其在不同场景中的计算。 能力目标: 1.能够分析和计算简单磁路中的磁通、磁阻等参数; 2.能够计算磁场的能量, 并理解其在实际应用中的意义。 素养目标: 培养学生对电磁学的兴趣, 增强其探索物理现象背后规律的能力。	
教学重难点	教学重点: 1.了解磁路、铁磁屏蔽, 理解磁路定律及其计算; 2.理解磁场的能量表达式。 教学难点: 1.磁阻的计算; 2.磁能密度公式的推导。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教学过程		
教学内容		教学活动
<p>一、新课导入</p> <p>提问引导学生思考: 电路中的电阻、电流和电压如何类比到磁路中的磁阻、磁通和磁动势? 引出磁路的概念和基本定律。</p> <p>在电磁学领域, 磁路定理是描述磁场在磁性材料中分布规律的重要原理。它与电路中的欧姆定律相对应, 揭示了磁动势、磁通量和磁阻之间的关系。磁路定理的应用广泛, 特别是在电机、变压器和其他铁磁元件的设计中至关重要。本课程将深入探讨磁路定理的基本概念、公式及其在实际工程中的应用。</p> <p>二、新课讲解</p> <p>1. 磁介质的边界条件</p> $\oint_s \vec{B} \cdot d\vec{S} = B_{1n} \Delta S - B_{2n} \Delta S = 0 \tag{7.4.1}$ $B_{2n} = B_{1n} \tag{7.4.2}$ $H_{1n} = \frac{B_{1n}}{\mu_1}, H_{2n} = \frac{B_{2n}}{\mu_2} \tag{7.4.3}$		<p>以提问法和类比法导入新课</p> <p>介绍磁路定理在电磁学领域的重要地位, 激发学生的探索精神。</p>

$$\frac{H_{2n}}{H_{1n}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (7.4.5)$$

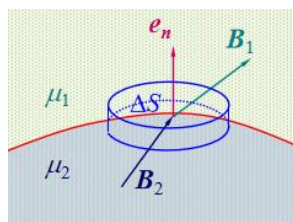


图 7-16 法向边界条件

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I_{0int} = 0 \rightarrow H_{2t} \Delta l - H_{1t} \Delta l = 0 \quad (7.4.6)$$

$$H_{2t} = H_{1t} \quad (7.4.7)$$

$$B_{1t} = \mu_1 H_{1t}, B_{2t} = \mu_2 H_{2t}, \rightarrow \frac{B_{2t}}{B_{1t}} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (7.4.8)$$

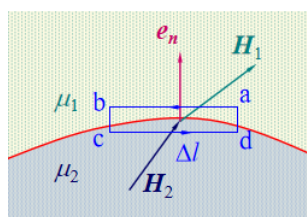


图 7-17 切向边界条件

2. 磁路定理

(1) 电路与磁路的相似性

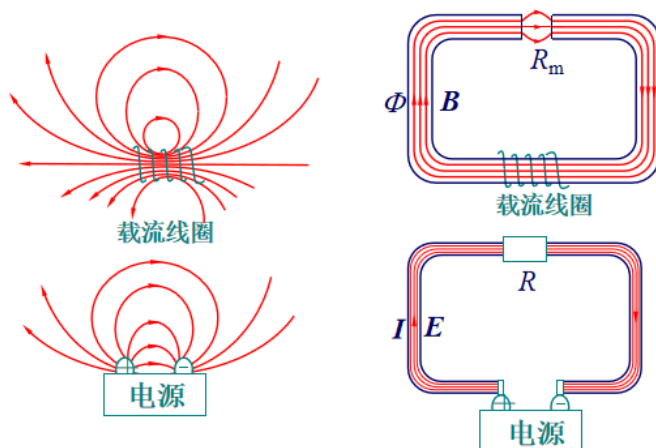


图 7-18 电路与磁路的类比

(2) 磁路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_L \frac{\vec{B}}{\mu} \cdot d\vec{l} = \Phi \oint_L \frac{1}{\mu} \frac{dl}{S} = NI \quad (7.4.9)$$

利用安培环路定理推导切向和法向的边界条件

教师绘制电源和载流线圈中电路和磁路的示意图，让学生讨论它们的相似性。

推导出磁路

$$\text{定义磁阻为 } R_m = \oint_L \frac{1}{\mu} \frac{dl}{S} \quad (7.4.10)$$

$$\text{磁动势为 } \varepsilon_m = NI \quad (7.4.11)$$

$$\text{则 } \Phi = \frac{\varepsilon_m}{R_m} \quad (7.4.12)$$

(7.4.12) 式即为磁路定理

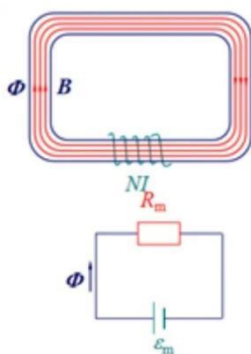


图 7-19 无分支闭合磁路

(3) 磁阻的串联

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_{L1} \vec{H}_1 \cdot d\vec{l} + \int_{L2} \vec{H}_2 \cdot d\vec{l} = \Phi \left(\int_{L1} \frac{1}{\mu_1} \frac{dl}{S_1} + \int_{L2} \frac{1}{\mu_2} \frac{dl}{S_2} \right) = NI \quad (7.4.13)$$

$$\text{令 } R_{m1} = \int_{L1} \frac{1}{\mu_1} \frac{dl}{S_1} \quad R_{m2} = \int_{L2} \frac{1}{\mu_2} \frac{dl}{S_2} \quad \varepsilon_m = NI \quad (7.4.14)$$

$$\text{则 } \Phi = \frac{\varepsilon_m}{R_{m1} + R_{m2}} \quad (7.4.15)$$

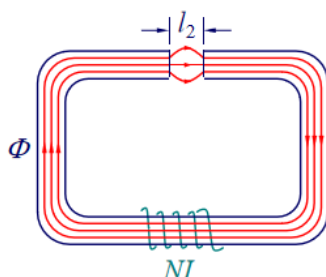


图 7-20 铁芯开一气隙——磁阻的串联

(4) 磁阻的并联

定理，要求学生理解并记住结论。

提出问题：多个磁阻串联或并联时，磁通量的表达式有什么变化？

师生互动共同推导在串联和并联时磁通量的表达式，掌握从特殊到一般的科学研究方法

$$\begin{cases} \oint_{L_1} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Phi R_{m\Phi} + \Phi_1 R_{m1} = \varepsilon_m = NI \\ \oint_{L_2} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \Phi R_{m\Phi} + \Phi_2 R_{m2} = \varepsilon_m = NI \\ \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 \end{cases} \quad \text{解得 } \Phi = \frac{\varepsilon_m}{R_{m\Phi} + \sum R_m} \quad (7.4.16)$$

其中 $\frac{1}{R_m} = \frac{1}{R_{m1}} + \frac{1}{R_{m2}} \quad (7.4.17)$

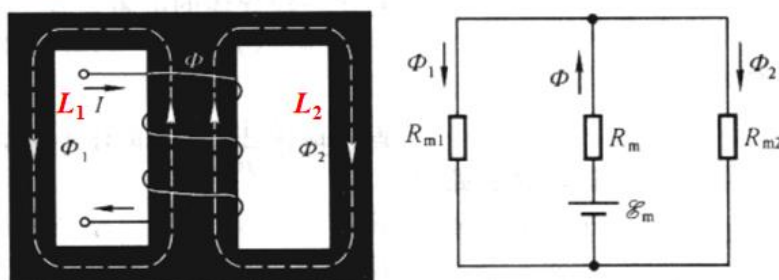


图 7-21 磁路的并联

例 1. 设环式线圈铁芯的平均长度 $l = 1\text{m}$ ，环式线圈的面积 $S = 3 \times 10^{-3}\text{m}^2$ ，总匝数 $N = 300$ ，铁芯的相对磁导率 $\mu_r = 2600$ ，欲在铁芯中激发 $3 \times 10^{-3}\text{Wb}$ 的磁通，试求线圈应通过的电流？

解： 磁路的总磁阻为：

$$R_m = \frac{l}{\mu S} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r S}$$

$$\varepsilon_m = \Phi R_m = \Phi \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} = NI$$

$$I = \Phi \frac{l}{\mu_0 \mu_r S} \frac{1}{N} = 1\text{A}$$

3. 磁场的能量

前述实验，当断开开关 K 时灯 A 还会亮，这能量从何而来？只能说明在电感线圈内有能量存在，这个能量是电流通过线圈时储存下的磁场能量，它的大小应等于电流从零增大到 I 时电源反抗自感电动势所作的功，即

$$A = \int_0^I -\varepsilon_i dt = \int_0^I L i dt = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7.5.1)$$

所以磁场的能量

$$W = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7.5.2)$$

对于密绕螺线管

$$L = \mu n^2 V \quad B = \mu n I \quad (7.5.3)$$

回顾均匀多个磁阻串联时磁通量的表达式

设疑：断开开关时灯还会亮，这能量从何而来？引导学生思考磁场的能量应如何计算

相关公式的详细推导见第六章 11 节。引入思政：温故而知新。

教师讲解
使用微元法进行求解

所以磁场能量

$$W = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} V \quad (7.5.4)$$

例 2. 无限长圆柱体导线内均匀流过强度为 I 的轴向电流，磁导率为 $\mu_r = 1$ ，试求单位长度内储存的磁能？

解： 由环路定理得磁场强度大小为

$$H = \frac{\pi r^2 I}{\pi R^2} \frac{1}{2\pi r} = \frac{rI}{2\pi R^2}$$

$$B = \mu_0 \mu_r H = \frac{\mu_0 \mu_r r I}{2\pi R^2}$$

$$\omega_m = \frac{1}{2} BH = \frac{\mu_0 \mu_r r^2 I^2}{8\pi^2 R^4}$$

则长度为 L 的体积元内储存的磁能为：

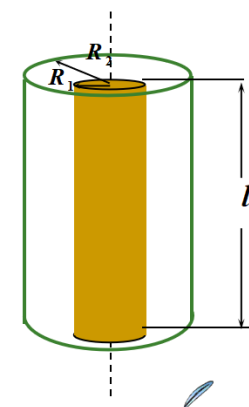
$$W_m(L) = \int \omega_m 2\pi r l dr = \int_0^R \frac{\mu_0 \mu_r r^2 I^2}{8\pi^2 R^4} 2\pi r l dr = \frac{\mu_0 \mu_r l I^2}{4\pi^2 R^4} \int_0^R r^3 dr = \frac{\mu_0 \mu_r l I^2}{16\pi}$$

$$W_m = \frac{\mu_0 \mu_r I^2}{16\pi}$$

例 3. 如图，同轴传输线内外半径分别为 R_1 和 R_2 ，厚度可忽略，筒间介质的相对磁导率为 μ_r ，电流为 I 从外筒流去，内筒流回。

(1) 筒间各点的磁能密度？

(2) 长度为 L 的同轴线上的磁能？



解： (1) 由环路定理得磁场强度大小为 $H = \frac{I}{2\pi r}$

$$B = \mu H = \mu_0 \mu_r \frac{I}{2\pi r}$$

学生练习。
知识点讲解、
例题讲解、学
生练习、教师
点拨形成学习
闭环。

$$\omega_m = \frac{1}{2}BH = \frac{\mu_0\mu_r I^2}{8\pi^2 r^2}$$

(2) 在半径为 r 的圆周体积元内磁能

$$dW_m = \omega_m(2\pi r dl)$$

$$W_m = \int dW_m = \int_{R_1}^{R_2} \omega_m(2\pi r l dr)$$

$$= \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu_0\mu_r I^2}{8\pi^2 r^2} 2\pi r l dr = \int_{R_1}^{R_2} \frac{\mu_0\mu_r I^2 l}{4\pi r} dr = \frac{\mu_0\mu_r I^2 l}{4\pi} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)$$

三、课堂小结

1. 磁介质的边界条件
2. 磁路定理
3. 磁场的能量

四、作业与思考

1. 思考题：电场强度的方向如何确定？如果在一个电场中放置一个负电荷，其受力方向与电场强度方向有什么关系？

2. 课后作业：7.5.2 7.5.3 7.6.3

五、板书设计

7.5 磁路及其计算

- 一、磁路、磁动势、磁通、磁阻的定义和单位
- 二、磁路定理

7.6 磁场的能量

- 一、磁场能量：存储在磁场中的能量
- 二、磁场能量的表达式和计算方法
- 三、磁场能量密度

课堂小结，布置作业

参考资料

[1] <https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194>

[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)

课后反思

教学效果：

学生基本理解了磁路的概念和计算方法，能够进行简单磁路的分析和计算。

存在问题：

学生对磁路中的磁通和磁阻计算较为熟悉，但对复杂磁路的分析和计算仍有一定困难。

改进措施：

可以通过更多的实际案例和实验，帮助学生理解复杂磁路的分析和计算方法。增加关于磁场能量在不同场景中的实例讲解和练习，帮助学生掌握磁场能量的计算和应用。

授课课题	第 35 讲 § 9.1 位移电流与麦克斯韦方程组 § 9.2 平面电磁波	
教学目标	知识目标：1.理解麦克斯韦方程组的形式及其在电磁波传播中的重要性； 2.掌握平面电磁波的基本性质和传播规律。 能力目标：1.能够根据麦克斯韦方程组分析电磁场的分布； 2.能够通过麦克斯韦方程组推导出平面电磁波的传播方程，并理解其物理意义。 素养目标：培养学生从理论到应用的思维能力，能够将麦克斯韦方程组的知识运用到实际电磁波问题的分析中。	
教学重难点	教学重点：1.理解位移电流概念和麦克斯韦方程组； 2.了解电磁波的波动方程和电磁波的传播特点。 教学难点：1.位移电流概念的引入； 2.波动方程的求解。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
<p>一、新课导入</p> <p>回顾静电场和静磁场方程，引出位移电流的概念，逐步引入麦克斯韦方程组。</p> <p>静电场</p> $\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0} = \frac{1}{\epsilon} \iiint \rho dV \tag{9.1.1}$ $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ <p>静磁场</p> $\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$ $\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum I = \mu_0 \iint \vec{J} \cdot d\vec{S} \tag{9.1.2}$		复习法导入 新课
<p>二、新课讲解</p> <p>麦克斯韦电磁场理论的基本内容就是电场和磁场的相互激发。一方面，在电场中不仅静电荷可以激发静电场，而且变化的磁场也可以激发出涡旋电场，即空间中变化的磁</p>		

场与电场同在。另一方面，在磁场中不仅传导电流可以激发磁场，而且位移电流(即变化的电场)也可以激发磁场，即空间中变化的电场与磁场同在。可见变化的电场和变化的磁场不是彼此孤立的，而是交织在一起互相激发的一个统一的电磁场整体。电磁波如何产生，如何传播？

1. 位移电流

恒定电流取环路 L ，对环路取两个任意曲面 S_1 、 S_2 ，穿过两个曲面的电流强度相对，由安培环路定理有

$$\begin{aligned}\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \sum I = \mu_0 \iint_{S_1} \vec{J} \cdot d\vec{S} \\ \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} &= \mu_0 \sum I = \mu_0 \iint_{S_2} \vec{J} \cdot d\vec{S}\end{aligned}\tag{9.1.3}$$

- (1) 稳恒电流条件满足连续性原理；
- (2) $\sum I$ 穿过以 L 为边界的任意曲面的传导电流。

但对于非稳恒电流又如何？以电容器充、放电过程为例，作环路 L ，对 L 也取两个曲面 S_1 和 S_2 。

对于 S_1 面：

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_{S_1} \vec{J} \cdot d\vec{S} = \mu_0 I_c \tag{9.1.4}$$

对于 S_2 面：

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_{S_2} \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0 \tag{9.1.5}$$

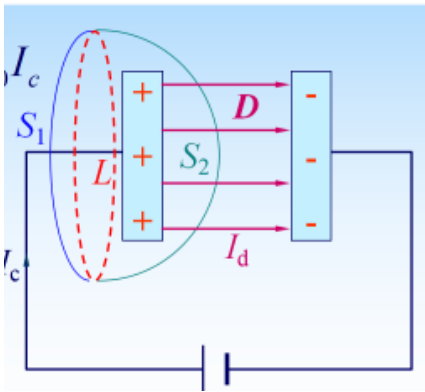


图 9-1 非稳恒电流

- (1) 非稳恒情况下传导电流不连续；
- (2) 在非稳恒电流的磁场中， H 的环流与闭合回路 L 为边界的曲面有关。

麦克斯韦发现并分析了这个矛盾后指出，矛盾的根源在于传导电流不连续。在图 9-1 取由 (S_1+S_2) 组成的闭合曲面 S ，对 S 写出电流的连续性方程

区分稳恒电流和非稳恒电流

$$\oint_s \vec{J} \cdot d\vec{S} = -\frac{dq}{dt} \neq 0 \quad (9.1.6)$$

此式说明：流进 S 的电流等于单位时间在极板 A 上增加的电荷量；反之，流出 S 的电流等于单位时间极板上减少的电荷量。

$$\begin{aligned} \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{q}{\epsilon_0} \\ \oint_s \vec{J} \cdot d\vec{S} &= -\frac{dq}{dt} \end{aligned} \quad (9.1.7)$$

联立 (9.1.7) 可得：

$$\oint \vec{J} \cdot d\vec{S} = -\frac{dq}{dt} = -\frac{d}{dt} \oint \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (9.1.8)$$

令： $\vec{J} = \vec{J}_c + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ 为全电流密度， $\vec{J}_d = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ 为位移电流密度，即可得

$$\oint_s \vec{J}_{\text{全}} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (9.1.9)$$

2. 全电流安培环路定理

传导电流和位移电流都能激发磁场，且

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 (I_c + I_d) = \mu_0 \iint_S (\vec{J}_c + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \cdot d\vec{S} \quad (9.1.10)$$

将全电流定理用于前面的电容电路，并注意对电容器极板间有对 S_1 有

$$I_{\text{全}} = \iint_{S_1} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} = \iint_{(S_1)} \vec{J} \cdot d\vec{S} = I_c \quad (9.1.11)$$

对 S_2 有

$$\begin{aligned} I_{\text{全}} &= \iint_{(S_2)} \left(\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \cdot d\vec{S} = \epsilon_0 \iint_{(S_2)} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \\ &= \frac{\partial \sigma_0}{\partial t} \cdot S = \frac{dq}{dt} = I_d \end{aligned} \quad (9.1.12)$$

3. 麦克斯韦方程组

详细讲解麦克斯韦方程组的推导过程

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$$

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

$$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \iint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}$$

(9.1.13)

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \iint_S (\vec{J}_c + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \cdot d\vec{S} \quad \text{或} \quad \oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \iint_S (\mu_0 \vec{J}_c + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) \cdot d\vec{S}$$

4. 平面电磁波波方程及性质

$$\begin{cases} \nabla^2 \vec{E} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \\ \nabla^2 \vec{B} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0 \end{cases} \quad (9.1.14)$$

波动方程平面波的性质（用到麦氏方程的微分形式）

(1) 电磁波的传播速度： $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \approx 3.0 \times 10^8 (m/s)$

(2) 电磁波是横波，电场、磁场、传播方向两两相互垂直，且满足右手螺旋法则。

(3) \vec{E} 和 \vec{B} 都随时间作周期性变化，而且相位相同；

(4) \vec{E} 和 \vec{B} 的大小满足： $B = \frac{E}{c} \quad \vec{B} = \frac{1}{c} \vec{e}_z \times \vec{E}$

三、课堂小结

位移电流

麦克斯韦方程组

波动方程平面波的性质

四、作业与思考

课后作业：9.1.1 9.1.2

五、板书设计

9.1 位移电流与麦克斯韦方程组

一、位移电流

二、麦克斯韦方程组

课堂小结
布置作业

9.2 平面电磁波			
一、波动方程平面波的性质			
参考资料	[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194 [2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)		
课后反思			
<p>教学效果：</p> <p>大多数学生对位移电流和麦克斯韦方程组有了基本的理解，能够掌握平面电磁波的传播特性。</p> <p>存在问题：</p> <p>平面电磁波的部分较为直观，但学生对于电磁波在不同介质中的传播特点和反射折射的理解还不够深入。</p> <p>改进措施：</p> <p>在讲解平面电磁波时，可以通过更多的实验演示和实际案例来帮助学生更好地理解电磁波的传播过程。</p>			

授课课题	第36讲 § 9.3 电磁场的能量密度和能流密度 § 9.4 电偶极辐射与赫兹实验	
教学目标	知识目标：1.理解电磁场的能量密度和能流密度的概念。 2.掌握电偶极辐射的基本原理，理解电偶极辐射的频谱特性 能力目标：能够根据电磁场的能量密度和能流密度公式进行相关计算，理解能量在电磁场中的分布和传输方式。 素养目标：激发学生对电磁场能量和辐射现象的兴趣，帮助学生了解电磁理论在技术中的实际应用。	
教学重难点	教学重点：1 理解电磁场的能量密度和能流密度概念； 2.了解电偶极辐射、赫兹实验和电磁波谱。 教学难点：1.求电磁场的坡印廷矢量； 2.了解偶极振子产生的电磁场。	
教学方法	讲授法、讨论法、启发式	
教学手段	多媒体教学、板书、超星平台	
教学时数	2 学时	
教 学 过 程		
教 学 内 容		教 学 活 动
一、新课导入 提问引导：我们通常如何理解电磁波的传播和能量传递？能量是如何在电磁场中分布的？引出能量密度和能流密度的概念。 二、新课讲解 1. 电磁波的能量密度 能量密度： $w=\frac{1}{2}\varepsilon E^2+\frac{1}{2}\mu H^2$ (9.3.1) 能流密度（Y 坡印廷矢量）：单位时间内流出单位面积的电场能量， $\vec{Y}=\frac{1}{\mu_0}\vec{E}\times\vec{B}$ 2. 电磁场能量守恒的表达式 $-\frac{d}{dt}\iiint_V wdV=\iiint_V \vec{J}\cdot\vec{E}dV+\oint_S \vec{Y}\cdot d\vec{S}$ (9.3.2)		提 问 法 导 入 新 课

3. 电磁波的辐射

(1) 产生电磁波的条件：高频振荡、开放电路

(2) 从 LC 振荡电路到电偶极振子

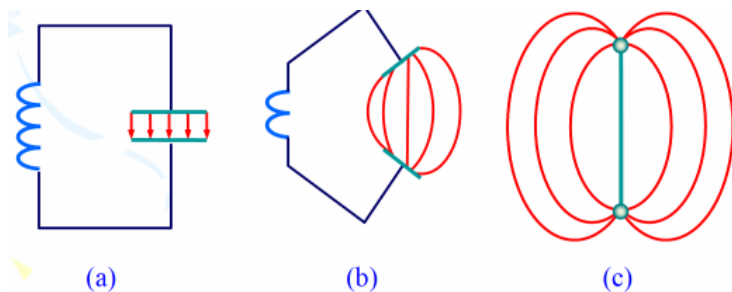


图 9-2 LC 振荡电路演变为电偶极振子

(3) 电偶极辐射

$$\begin{aligned} i &= I_m \sin \omega t \\ q &= -\frac{I_m}{\omega} \cos \omega t \quad (q|_{t=0} = \frac{I_m}{\omega}) \\ p &= ql = -\frac{I_m l}{\omega} \cos \omega t \end{aligned} \quad (9.3.3)$$

$$\begin{aligned} E_r &= (2G_2 \cos \theta) k^3 \left[\frac{1}{k^2 r^2} \sin \omega(t - \frac{r}{c}) - \frac{1}{k^3 r^3} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \right] \\ E_\theta &= (G_2 \sin \theta) k^3 \left[\frac{1}{kr} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) + \frac{1}{k^2 r^2} \sin \omega(t - \frac{r}{c}) - \frac{1}{k^3 r^3} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \right] \\ E_\phi &= 0 \end{aligned} \quad (9.3.4)$$

$$\begin{cases} B_r = 0 \\ B_\theta = 0 \\ B_\phi = (G_1 \sin \theta) k^2 \left[\frac{1}{kr} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) + \frac{1}{k^2 r^2} \sin \omega(t - \frac{r}{c}) \right] \end{cases} \quad (9.3.5)$$

$$\left(k = \frac{\omega}{c}, \quad G_1 = \frac{\mu_0 I_m l}{4\pi}, \quad G_2 = \frac{I_m l}{4\pi \epsilon_0 \omega} \right)$$

当 $kr \gg 1$ (远区)

$$\begin{cases} E_r = 0 \\ E_\theta = \frac{G_2 k^2 \sin \theta}{r} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \\ E_\phi = 0 \end{cases} \quad (9.3.6)$$

讲解电磁波辐射产生的条件

让学生了解电偶极辐射

$$\begin{cases} B_r = 0 \\ B_\theta = 0 \\ B_\varphi = \frac{G_1 k \sin \theta}{r} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \end{cases} \quad (9.3.7)$$

$$\begin{aligned} \vec{E} &= \frac{G_2 k^2 \sin \theta}{r} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \vec{e}_\theta \\ \vec{B} &= \frac{G_1 k \sin \theta}{r} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \vec{e}_\varphi \end{aligned} \quad (9.3.8)$$

结论：电偶极振子远区的 \vec{E} 和 \vec{B} 是同频率同相位的球面波。

当 $kr \ll 1$ （近区）

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{2G_2 \cos \theta}{r^3} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \approx \frac{p \cos \theta}{2\pi\epsilon_0 r^3} \\ E_\theta &= -\frac{G_2 \sin \theta}{r^3} \cos \omega(t - \frac{r}{c}) \approx \frac{p \sin \theta}{4\pi\epsilon_0 r^3} \\ E_\varphi &= 0 \end{aligned} \quad (9.3.9)$$

$$\vec{E} \approx \frac{P}{4\pi\epsilon_0 r^3} (2 \cos \theta \vec{e}_r + \sin \theta \vec{e}_\theta) \quad (9.3.10)$$

课堂小结
布置作业

三、课堂小结

电磁波能量密度是指单位体积内的电磁场能量。它是描述电磁波能量分布的一个重要物理量。在自由空间中，电磁波能量密度与电场强度和磁场强度有关，具体来说，它等于电场能量密度与磁场能量密度之和。

四、作业与思考

课后作业：9.3.1 9.3.2

五、板书设计

9.3 电磁场的能量密度和能流密度

一、电磁场的能量密度

二、电磁场的能流密度

9.4 电偶极辐射与赫兹实验

一、电偶极辐射

二、赫兹实验		
参考资料	<div>[1] https://mooc1.chaoxing.com/course-ans/ps/233374194</div> <div>[2] 电磁学_哈尔滨工业大学_中国大学 MOOC(慕课) (icourse163.org)</div>	
课后反思		
<div>教学效果：</div> <div>大多数学生对电磁场的能量密度和能流密度的理解较为深入，能够较好地掌握相关公式和计算方法。</div> <div>存在问题：</div> <div>学生普遍认为电磁场能量密度和能流密度的概念较为抽象，需要通过多次练习来熟悉公式和计算过程。</div> <div>改进措施：</div> <div>对于能量密度和能流密度的部分，考虑结合实际的实验和图示，帮助学生更加直观地理解这些概念，特别是如何计算和解释实际问题。</div>		