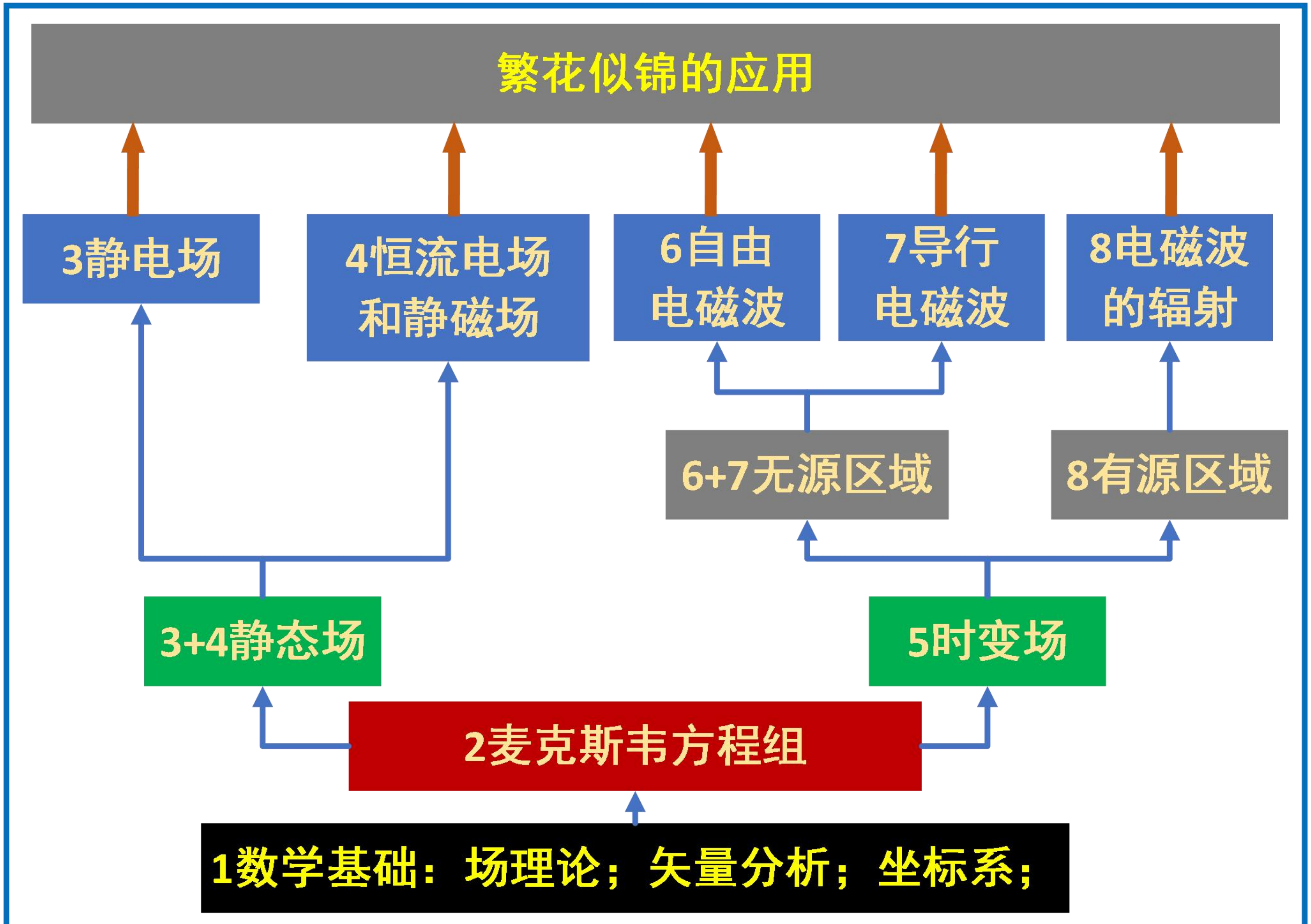
电磁场与电磁波

复习课：　电磁场与电磁波

李顺礼
lishunli621@seu.edu.cn

本课程的主要内容–有机整体



电磁场与电磁波的概念

基本概念

- 电荷---物质的基本性质；场—分布在空间中的物理量；
- 电场；磁场；电磁场；
- 电磁波：时变电磁场；
- 电磁场具有能量；
- 电磁波的时空特性：幅度，波阻抗，极化，频率，波数，模式；
- 电磁波的辐射（波源），电磁波的导行（有线）和传播（无线）；
- 电磁波的传播：
- 电磁波的导行：
- 电磁波的谐振：
- 电磁波的辐射：

电磁场与电磁波课程的内容

电磁场与电磁波课程的内容

- 基本假设：线性连续空间；带电粒子；电荷守恒定律；能量守恒定律；
- 自然定律：库伦定律；安培定律；法拉第电磁感应定律；
- 核心内容：麦克斯韦方程组；
- 研究对象：电磁波与媒质的相互作用；
- 研究方法：在各种边界条件下求解麦克斯韦方程组；

  （1）第三章：静态情况下的求解；

  （2）第六章：动态无限大情况下的无源区求解；

  （3）第七章：动态有限大情况下的无源区求解；

  （4）第八章：动态无限大情况下的有源区求解；
- 研究目的：理解电磁场的运行规律；

电磁场与电磁波课程内容的重点

复习建议：按照章节结合课件通读教材+做几个题目来帮助理解；

每一章给出的应掌握知识与计算都需要熟练，课件中课后范例都需要掌握；

基础概念和方程都是会考查的；

考试事项：

简答题-填空题-单选题-综合题

先写公式后带入数值计算，步骤计分，切记！

假设数据不容易计算，则先公式运算最后代入数值；

看清题目后作答；注意区分题目条件和小问条件；

每一问都有分值，所以每一问都作答；后面的题目不一定难；

尽量详细作答；

尽可能的回答，相关的公式是得分点；

违反考试规定的行为没必要！

内容-附录矢量分析

- 教材附录；课件第1章：简单重点运算；
- 直角坐标系下的分量形式；
- 矢量叉乘：传播方向和场量，坡印廷矢量和场量；
- 梯度、散度和旋度；
- 求矢量场的源分布：求解矢量场的散度和旋度；
- 考卷前面会提供一些必要的公式，这个要特别注意；

课后范例

例 1 已知 $\vec{R}(x,y,z)=\vec{a}_x x+\vec{a}_y y+\vec{a}_z z$，$R=|\vec{R}|$，求 $\nabla\cdot\vec{R}$ 和 $\nabla\times\vec{R}$ 。

解： 在直角坐标系中：

$$\nabla\cdot\vec{R}=\frac{\partial x}{\partial x}+\frac{\partial y}{\partial y}+\frac{\partial z}{\partial z}=3$$

$$\nabla\times\vec{R}=\begin{vmatrix}\vec{a}_x & \vec{a}_y & \vec{a}_z\\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z}\\ x & y & z\end{vmatrix}=0$$

~~在球坐标系中~~：$\vec{R}(x,y,z)=\vec{a}_x x+\vec{a}_y y+\vec{a}_z z=\vec{a}_r r$，$r=\sqrt{x^2+y^2+z^2}$

$$\nabla\cdot\vec{R}=\nabla\cdot(\vec{a}_r r)=\frac{1}{r^2}\frac{\partial(r^2R_r)}{\partial r}=\frac{1}{r^2}\frac{\partial(r^2r)}{\partial r}=3$$

$$\nabla\times\vec{R}=\nabla\times(\vec{a}_r r)=\frac{1}{r^2\sin\theta}\begin{vmatrix}\vec{a}_r & r\vec{a}_\theta & r\sin\theta\vec{a}_\varphi\\ \dfrac{\partial}{\partial r} & \dfrac{\partial}{\partial\theta} & \dfrac{\partial}{\partial\varphi}\\ R_r & rR_\theta & r\sin\theta R_\varphi\end{vmatrix}=0$$

内容-第1章和第5章

- 教材第1章和第5章；课件第2章和第5章：麦克斯韦方程及相关物理概念；
- 教材第一章和第五章所有章节都要求；
- 1、在国际单位制的单位（所有物理量的单位）
- 1、电流的概念：电流密度的定义；传导电流、运流电流、位移电流和全电流；面电流的线密度。
- 2、真空与媒质中、积分形式的Maxwell方程与电流连续性方程（共两组十个方程，真空中不存在与媒质的相互作用）
- 3、真空与媒质中、微分形式的Maxwell方程与电流连续性方程（共两组十个方程，真空中不存在与媒质的相互作用）-各种形式的麦克斯韦方程组都要掌握！瞬时或复数，积分或微分；
- 4、利用Maxwell旋度方程和电流连续性方程推导Maxwell散度方程。
- 5、媒质的三个本构方程。
- 1、写出电磁场的边界条件（分理想导体、非理想导体两种情况），两种情况下分界面单位矢量的方向。（解题时如果没有特别说明，两理想介质分界面上自由电荷认为是零）-各种情况的边界条件都要掌握！媒质和源；
- 2、时变场与静态场的边界条件是否不同。
- 1、写出积分和微分形式的坡印亭定理，并解释方程中各项的物理意义；
- 2、电场、磁场能量密度，极化损耗、磁损耗功率密度公式及适用条件。

内容-第1章和第5章

- 教材第1章和第5章；课件第2章和第5章：麦克斯韦方程及相关物理概念；
- 教材第一章和第五章所有章节都要求；
- 应掌握知识与计算：
- 1、 Maxwell方程与电流连续性方程：会写出积分与微分形式、瞬时与复矢量形式的Maxwell方程与电流连续性方程（共四组二十个方程）；从旋度方程导出散度方程；写出电磁场的边界条件（理想导体、除去理想导体的情况、恒流电场及恒流磁场情况，用场量/矢量位/标量位表示）。
- 2、 电磁场的能量关系：写出电场、磁场能量密度公式；写出坡印亭定理的积分形式（瞬时形式）并解释方程中各项的物理意义；知道瞬时坡印亭矢量表示式及物理意义（功率流密度）、复数坡印亭矢量的定义以及它与瞬时坡印亭矢量一个周期内的平均值之间的关系；（瞬时坡印廷矢量，复数坡印廷矢量，瞬时坡印廷矢量的时间平均值）
- 3、 电磁场的位函数：写出用位函数表示电场、磁场（时变场与静态场两种情况）；写出洛仑兹规范和库仑规范。
- 4、 波动方程：写出并会推导电场、磁场、标量电位和矢量磁位的波动方程（瞬时与复矢量两种形式；包括齐次与非齐次、时变与静态，即亥姆霍兹方程、达朗贝尔方程、泊松方程、拉普拉斯方程）；
- 基本技术：瞬时表示式与复数表示式变换，电磁互算；

内容-第5章

- **电磁互算：基于麦克斯韦方程组，这种电磁互算方法是普适的；**

$$\left.\begin{aligned}\nabla\times\dot{\vec{H}}&=j\omega\dot{\varepsilon}\dot{\vec{E}}\\ \nabla\times\dot{\vec{E}}&=-j\omega\dot{\mu}\dot{\vec{H}}\end{aligned}\right\}\Rightarrow\begin{cases}\dot{\vec{E}}=\dfrac{1}{j\omega\dot{\varepsilon}}\nabla\times\dot{\vec{H}}\\ \dot{\vec{H}}=\dfrac{1}{-j\omega\dot{\mu}}\nabla\times\dot{\vec{E}}\end{cases}$$

- **瞬时形式和复数形式互换：关键是在两种形式中每一个参数找到自己的位置，虚数单位j一定跟着时间变量项，也就是相位项；写为标准形式后再进行处理---适合任何计算过程；**

$$\vec{E}(\vec{r},t)=\vec{e}_x E_x(\vec{r})\cos(\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi_x)+\vec{e}_y E_y(\vec{r})\cos(\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi_y)+\vec{e}_z E_z(\vec{r})\cos(\omega t-\vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi_z)$$

$$\dot{\vec{E}}(\vec{r})=\vec{e}_x E_x(\vec{r})e^{-j(\vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi_x)}+\vec{e}_y E_y(\vec{r})e^{-j(\vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi_y)}+\vec{e}_z E_z(\vec{r})e^{-j(\vec{k}\cdot\vec{r}+\varphi_z)}$$

电磁场矢量的标准形式是关键！

课后范例

例 1　将下列场矢量的瞬时值形式写为复数形式

(1) $\vec{E}(\vec{r},t)=\vec{E}(z,t)=\vec{a}_x E_{xm}\cos\left(\omega t-kz+\varphi_x\right)+\vec{a}_y E_{ym}\sin\left(\omega t-kz+\varphi_y\right)$

(2) $\vec{H}(\vec{r},t)=\vec{H}(x,z,t)=\vec{a}_x H_0 k\left(\frac{a}{\pi}\right)\sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)\sin\left(kz-\omega t\right)+\vec{a}_y H_0\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)\cos\left(kz-\omega t\right)$

解：

(1) $$\vec{E}(z,t)=\vec{a}_x E_{xm}\cos\left(\omega t-kz+\varphi_x\right)+\vec{a}_y E_{ym}\cos\left(\omega t-kz+\varphi_y-\frac{\pi}{2}\right)$$

$$=\mathrm{Re}\left[\vec{a}_x E_{xm}e^{j\left(\omega t-kz+\varphi_x\right)}+\vec{a}_y E_{ym}e^{j\left(\omega t-kz+\varphi_y-\frac{\pi}{2}\right)}\right]$$

$$\boxed{\dot{\vec{E}}_m(z)=\vec{a}_x E_{xm}e^{j\left(-kz+\varphi_x\right)}+\vec{a}_y E_{ym}e^{j\left(-kz+\varphi_y-\frac{\pi}{2}\right)}=\left(\vec{a}_x E_{xm}e^{j\varphi_x}-\vec{a}_y jE_{ym}e^{j\varphi_y}\right)e^{-jkz}}$$

(2) $$\vec{H}(x,z,t)=\vec{a}_x H_0 k\left(\frac{a}{\pi}\right)\sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)\cos\left(\omega t-kz+\frac{\pi}{2}\right)+\vec{a}_y H_0\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)\cos\left(\omega t-kz\right)$$

$$\vec{H}_m(x,z)=\left[\vec{a}_x jH_0 k\left(\frac{a}{\pi}\right)\sin\left(\frac{\pi x}{a}\right)+\vec{a}_y H_0\cos\left(\frac{\pi x}{a}\right)\right]e^{-jkz}$$

课后范例

例 2　已知电场强度复矢量如下，写出电场强度的瞬时值

$$\dot{\vec{E}}_m(z)=\vec{a}_x jE_{xm}\cos\left(k_z z\right)$$

$$\vec{E}(z,t)=\mathrm{Re}\left[\vec{a}_x jE_{xm}\cos\left(k_z z\right)e^{j\omega t}\right]=\mathrm{Re}\left[\vec{a}_x E_{xm}\cos\left(k_z z\right)e^{j\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)}\right]$$

解:

$$=\vec{a}_x E_{xm}\cos\left(k_z z\right)\cos\left(\omega t+\frac{\pi}{2}\right)=-\vec{a}_x E_{xm}\cos\left(k_z z\right)\sin\omega t$$ ---- 常规解法！

常规方法要求能够看出是驻波解；

也可以写为两个行波叠加的形式；　$$\frac{e^{-jkz}+e^{+jkz}}{2}=\cos kz$$

（1）我们整本书采用Re和cos的形式；
（2）几个特殊值：e（j0）=1； e（jπ）=1 ； e（j0.5π）=j ； e（-j0.5π）=-j;
（3）瞬时形式和复数形式：形式决定波，每个参数在形式中的位置；
（4）瞬时形式的相位项，有时间和空间变量的才是相位项；
（5）写为瞬时形式时，初相位一定要放到相位项中；
（6）形式上：各归各位是关键；

课后范例

例 3 在无源的自由空间，已知电磁场的电场强度矢量

$$\dot{\vec{E}}(z)=\vec{a}_y E_0 e^{-jkz} \qquad V/m$$

求：(1) 磁场强度复矢量 $\dot{\vec{H}}(z)$；(2) 瞬时坡印亭矢量 $\vec{S}$ ；(3)平均坡印亭矢量 $\vec{S}_{av}$

解：

(1) $\nabla\times\dot{\vec{E}}=-j\omega\mu_0\dot{\vec{H}}$

$$\dot{\vec{H}}(z)=-\frac{1}{j\omega\mu_0}\nabla\times\dot{\vec{E}}=-\frac{1}{j\omega\mu_0}\vec{a}_z\frac{\partial}{\partial z}\times\vec{a}_y E_0 e^{-jkz}=-\vec{a}_x\frac{kE_0}{\omega\mu_0}e^{-jkz}$$

(2) $\vec{E}(z,t)=\mathrm{Re}\left[\dot{\vec{E}}(z)e^{j\omega t}\right]=\vec{a}_y E_0\cos(\omega t-kz)$

$$\vec{H}(z,t)=\mathrm{Re}\left[\dot{\vec{H}}(z)e^{j\omega t}\right]=-\vec{a}_x\frac{kE_0}{\omega\mu_0}\cos(\omega t-kz)$$

$$\vec{S}(t)=\vec{E}\times\vec{H}=\left[\vec{a}_y E_0\cos(\omega t-kz)\right]\times\left[-\vec{a}_x\frac{kE_0}{\omega\mu_0}\cos(\omega t-kz)\right]$$

$$=\vec{a}_z\frac{kE_0{}^2}{\omega\mu_0}\cos^2(\omega t-kz)$$

课后范例

解：

$$(3)\qquad \vec{S}_{av} = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{2}\dot{\vec{E}}\times\dot{\vec{H}}^{*}\right] = \mathrm{Re}\left[\frac{1}{2}\left(\vec{a}_y E_0 e^{-jkz}\right)\times\left(-\vec{a}_x\frac{kE_0}{\omega\mu_0}e^{-jkz}\right)^{*}\right]$$

$$= \mathrm{Re}\left[\frac{1}{2}\vec{a}_z\frac{kE_0^{\ 2}}{\omega\mu_0}\right] = \vec{a}_z\frac{kE_0^{\ 2}}{2\omega\mu_0}$$

$$\text{或}\quad \vec{S}_{av} = \frac{2\pi}{\omega}\int_0^{\omega/2\pi}\vec{S}dt = \frac{2\pi}{\omega}\int_0^{\omega/2\pi}\left[\vec{a}_z\frac{kE_0^{\ 2}}{\omega\mu_0}\cos^2\left(\omega t - kz\right)\right]dt = \vec{a}_z\frac{kE_0^{\ 2}}{2\,\omega\mu_0}$$

（1）平均坡印廷矢量一定沿着净功率传输的方向；
（2）本题目中如果场有z方向的分量，在求平均坡印廷矢量的时候可以直接舍去，但瞬时坡印廷矢量计算中不可舍去传播方向的分量；

第1章-课后作业

- 1.4、 电场的高斯定理；
- 1.5、 电场的高斯定理；
- 1.6、叠加原理；无电荷=正电荷的场+负电荷的场；电场的高斯定理；

第5章-课后作业

- 5.1、麦克斯韦方程组的独立方程：两个旋度方程（磁通连续性原理包含在法拉第电磁感应定律中）+电场高斯定理或电荷守恒定律；
- 5.3、书中给出的计算方法；电流与磁场的计算关系；电磁互算；
- 5.6、5.8和5.7、注意5.6和5.8是单列行波，5.7是合成波（欧拉公式），电磁互算方法可以不同；坡印廷矢量计算的时候区分瞬时还是复数；

内容-第6章

- 第6章 平面电磁波：平面波向不同媒质分界面的斜入射
- 第6章所有章节；
- 应掌握知识与计算：
- 3、 平面电磁波：均匀平面波的定义；均匀平面波电场、磁场及波传播方向三者之间关系，电场磁场之间幅度相位的关系，波速、波数k（传播常数与衰减常数）和波阻抗与媒质参数及频率的关系（包括无耗媒质和导电媒质（良导体与不良导体定义）情况），无耗及有耗（导电媒质）电磁波的传播特性，什么是色散（媒质色散与波导色散），趋肤效应、趋肤深度、表面电阻的意义与计算；极化概念与极化类型旋向的判定，极化的分解；平面波波矢量的概念，任意方向传播的平面波的一般表示式，复矢量表示式与瞬时表示式的相互转化，正弦电磁场和正弦平面波的麦克斯韦方程（复数形式）；由电场磁场互求的方法及公式，由场量求表面电流与电荷、求功率流密度与表面吸收功率；由场量表示式求解电磁波参数（传播方向、媒质参数、场分量）；水平极化和垂直极化电磁波任意角度入射到介质或者金属分界面时，入射角及透射角的计算、电场磁场反射透射系数的计算、分界面两侧的电磁波表示式（垂直入射和斜入射情况）；全反射条件及全反射角计算、全透射条件及布鲁斯特角的计算。理想导体表面斜入射合成波的特性；

- 电磁互算，k（提取、分解、坐标关系，与频率波长关系），极化判断（圆极化和椭圆极化要有旋向）；

内容-第6章

- **电磁互算：适用范围非常重要，合成波直接用普适方法，或者合成波分解为单列波叠加的形式，不同单列波的传播方向不同，计算中需要各自的传播方向；**

$$\left.\begin{aligned}\nabla\times\dot{\vec{H}} &= j\omega\dot{\varepsilon}\dot{\vec{E}}\\ \nabla\times\dot{\vec{E}} &= -j\omega\dot{\mu}\dot{\vec{H}}\end{aligned}\right\}\Rightarrow \text{普适方法}\begin{cases}\dot{\vec{E}} = \dfrac{1}{j\omega\dot{\varepsilon}}\nabla\times\dot{\vec{H}}\\ \dot{\vec{H}} = \dfrac{1}{-j\omega\dot{\mu}}\nabla\times\dot{\vec{E}}\end{cases}$$

$$\begin{matrix}\text{单列行波}\\ \text{TEM波}\end{matrix}\begin{cases}\vec{E} = Z\cdot\vec{H}\times\vec{a}_k\\ \vec{H} = \dfrac{1}{Z}\cdot\vec{a}_k\times\vec{E}\end{cases}$$

- **k（提取、分解、坐标关系，与频率波长关系）**
- **单列行波k是显式的；**
- **驻波k要用欧拉公式换算出来；**
- **斜入射-非坐标轴传播方向表示为波矢量形式；**
- **传播矢量与坐标系的几何关系和图示表示；**

$$\frac{e^{-kz}+e^{+kz}}{2}=\cos kz\text{--行波驻波的形式表示}$$

$$\vec{k}=k\vec{k}_0=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\vec{k}_0=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\frac{\vec{E}\times\vec{H}}{\left|\vec{E}\times\vec{H}\right|}=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\frac{\vec{E}\times\vec{H}}{\left|\vec{E}\right|\left|\vec{H}\right|}$$

$$=k_x\vec{e}_x+k_y\vec{e}_y+k_z\vec{e}_z$$

- **极化判断（圆极化椭圆要有旋向）；**
- **相位差是0或π？（是-线极化；否-继续）-等幅？（否-椭圆极化+旋向；是-继续）-相位差是0.5π？（否-椭圆极化+旋向；是-圆极化+旋向）**

课后范例

例1： 在**理想介质**（$\mu=\mu_0,\varepsilon=\varepsilon_r\varepsilon_0$）中沿$y$ 方向传播的均匀平面波 电场强度为$=120\pi\cos(10^9 t-5y)\vec{a}_z\ \text{V/m}$ ，求(1)相对介电常数；(2)传播速度；(3)本征阻抗；(4)波长；(5)磁场强度； (6)电场强度和磁场强度的复数表示形式；(7)波的平均功率密度。

解 (1)相对介电常数

由电场 $\vec{E}$ 强度的表达式可知： $\omega=10^9\ \text{rad/s},\quad k=5\ \text{rad/m}$

$$k=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}=\omega\sqrt{\mu_0\varepsilon_0\varepsilon_\mathrm{r}} \longrightarrow \varepsilon_\mathrm{r}=\frac{25\times10^{-18}}{\mu_0\varepsilon_0}=25\times10^{-18}\times(3\times10^8)^2=2.25$$

(2)传播速度为

$$v_\mathrm{p}=\frac{\omega}{k}=\frac{10^9}{5}\text{m/s}=2\times10^8\quad \text{m/s}$$

(3)本征阻抗为

$$Z=\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_\mathrm{r}\varepsilon_0}}=\frac{120\pi}{\sqrt{2.25}}\Omega=251.33\quad\Omega$$

(4)波长为

$$\lambda=\frac{2\pi}{k}=\frac{2\pi}{5}\text{m}=1.257\quad \text{m}$$

课后范例

(5)根据均匀平面波的电场、磁场和传播方向满足右手螺旋法则的规律，及电场强度和磁场强度的关系，可得

$$\vec{H}=\vec{a}_y\times\frac{1}{Z}\vec{E}=1.5\cos(10^9t-5y)\vec{a}_x\quad \text{A/m}$$

(6)电场强度和磁场强度的复数形式为

$$\vec{E}=120\pi\cos(10^9t-5y)\vec{a}_z\quad \text{V/m}\longrightarrow \dot{\vec{E}}=120\pi \mathrm{e}^{-\mathrm{j}5y}\vec{a}_z\quad \text{V/m}$$

$$\vec{H}=1.5\cos(10^9t-5y)\vec{a}_x\quad \text{A/m}\longrightarrow \dot{\vec{H}}=1.5e^{-\mathrm{j}5y}\vec{a}_x\quad \text{A/m}$$

(7)媒质中的平均功率密度是

$$\vec{S}_{\mathrm{av}}=\frac{1}{2}\mathrm{Re}[\dot{\vec{E}}\times\dot{\vec{H}}^*]\longleftarrow \dot{\vec{H}}^*=1.5e^{\mathrm{j}5y}\vec{a}_x\quad \text{A/m}$$

$$\vec{S}_{\mathrm{av}}=\frac{1}{2}\times120\pi\times1.5[\vec{a}_z\times\vec{a}_x]=282.75\vec{a}_y\quad \text{W/m}^2$$

波的形式里含着各个参数：
波的频率，波速，波长，波数，波矢量，相位，幅度，阻抗，矢量方向，功率流；媒质的特性；

课后范例

$\dot{E}=\vec{e}_x 2\cos kz\ (V/m)$求磁场表达式

$$\cancel{\dot{\vec{H}}=\vec{a}_y\times\frac{1}{Z}\dot{\vec{E}}}$$

$$\dot{\vec{E}}=\vec{e}_x 2\cos kz \xrightarrow{\text{欧拉公式}} \dot{\vec{E}}=\vec{e}_x(e^{-kz}+e^{+kz}) \to \vec{H}=\vec{e}_z\times\frac{1}{Z}\vec{e}_x e^{-kz}+(-\vec{e}_z)\times\frac{1}{Z}\vec{e}_x e^{kz}$$

$$\dot{\vec{H}}=\frac{1}{-j\omega\dot{\mu}}\nabla\times\dot{\vec{E}}$$ √

电磁场矢量的标准形式是关键！

波的形式里含着各个参数：
波的频率，波速，波长，波数，波矢量，相位，幅度，阻抗，矢量方向，功率流；媒质的特性；

课后范例

例3： 判断下面均匀平面波的极化形式：

(1) $\vec{E}(z,t)=\vec{a}_x E_m \sin\left(\omega t-kz-\dfrac{\pi}{4}\right)+\vec{a}_y E_m \cos\left(\omega t-kz+\dfrac{\pi}{4}\right)$

(2) $\boxed{\dot{\vec{E}}(z)=\vec{a}_x jE_m e^{jkz}-\vec{a}_y E_m e^{jkz}}$

(3) $\vec{E}(z,t)=\vec{a}_x E_m \cos(\omega t-kz)+\vec{a}_y E_m \sin\left(\omega t-kz+\dfrac{\pi}{4}\right)$

解 (1) 由于：

$$E_x(z,t)=E_m \sin\left(\omega t-kz-\frac{\pi}{4}\right)=E_m \cos\left(\omega t-kz-\frac{3\pi}{4}\right)$$

$$\varphi_x-\varphi_y=-\pi$$

此为线极化，合成波电场与x轴夹角为：

$$\theta=\arctan\left(\frac{E_y}{E_x}\right)=\arctan(-1)=-\frac{\pi}{4}$$

课后范例

$$\boxed{\dot{\vec{E}}(z)=\vec{a}_x jE_m e^{jkz}-\vec{a}_y E_m e^{jkz}}$$

解 (2) 由于：

$$E_x(z,t)=\mathrm{Re}\left[jE_m e^{jkz}e^{j\omega t}\right]=-E_m\sin(\omega t+kz)=E_m\cos\left(\omega t+kz+\frac{\pi}{2}\right)$$

$$E_y(z,t)=\mathrm{Re}\left[-E_m e^{jkz}e^{j\omega t}\right]=-E_m\cos(\omega t+kz)=E_m\cos(\omega t+kz+\pi)$$

$$\varphi_x-\varphi_y=-\frac{\pi}{2}$$

按照波的物理过程来判断，方法自然而且不需记忆

此波传播方向为-z轴方向，为右旋圆极化波。

(3) 由于：

$$E_y(z,t)=E_m\sin\left(\omega t-kz+\frac{\pi}{4}\right)=E_m\cos\left(\omega t-kz-\frac{\pi}{4}\right)$$

$$\varphi_x-\varphi_y=\frac{\pi}{4}$$

此波传播方向为+z轴方向，为右旋椭圆极化波。

课后范例

例5: 一右旋圆极化波垂直入射到z=0的理想导体表面上，

其电场强度的复数形式为：$\dot{\vec{E}}_i(z) = (\vec{a}_x - j\vec{a}_y) E_{i0} e^{-j\beta z}$，

(1) 确定反射波的极化；

(2) 写出总电场强度的瞬时表达式；

(3) 求板上的感应电流密度

1、有没有同学没有看?
2、看了之后，不会的时候有没有翻书回听课程?
3、会做题后有没有再思考这个题目说了一个什么事情?
4、这个事情告诉我们什么道理?

解： (1) 设反射波电场强度复数形式为：

$$\dot{\vec{E}}_r(z) = (\vec{a}_x E_{rx} + \vec{a}_y E_{ry}) e^{j\beta z}$$

1、旋向与矢量系数互推?
2、物理图景能不能判断旋向?
3、所求出的结果，有无思考意义?

根据理想导体表面的边界条件 在z=0时有：

$$\left[\dot{\vec{E}}_r(z) + \dot{\vec{E}}_i(z)\right]_{z=0} = 0 \Rightarrow \dot{\vec{E}}_r(z) = (-\vec{a}_x + \vec{a}_y j) E_{i0} e^{j\beta z}$$

此为 $-\vec{a}_z$ 方向传播的左旋圆极化波

课后范例

(2) z<0的区域，总的电场强度的瞬时表达式为：

$$\vec{E}_1(z,t)=\mathrm{Re}\left\{\left[\dot{\vec{E}}_i(z)+\dot{\vec{E}}_r(z)\right]e^{j\omega t}\right\}$$

$$=\mathrm{Re}\left\{\left[\left(\vec{a}_x-\vec{a}_y j\right)E_{i0}e^{-j\beta z}+\left(-\vec{a}_x+\vec{a}_y j\right)E_{i0}e^{j\beta z}\right]e^{j\omega t}\right\}$$

$$=\mathrm{Re}\left\{\left[\left(-\vec{a}_x+\vec{a}_y j\right)j2\sin\beta z\right]E_{i0}e^{j\omega t}\right\}$$

$$=2E_{i0}\sin\beta z\left(\vec{a}_x\sin\omega t-\vec{a}_y\cos\omega t\right)$$

(3) 总的磁场强度为：

$$\dot{\vec{H}}_1=\dot{\vec{H}}_i+\dot{\vec{H}}_r$$

$$=\left(\underline{\vec{a}_z}\times\left(\vec{a}_x-\vec{a}_y j\right)e^{-j\beta z}+\underline{\left(-\vec{a}_z\right)}\times\left(-\vec{a}_x+\vec{a}_y j\right)e^{j\beta z}\right)\frac{\dot{E}_{i0}}{\dot{Z}}$$

$$=\left(\left(\vec{a}_y+\vec{a}_x j\right)\left(e^{-j\beta z}+e^{j\beta z}\right)\right)\frac{\dot{E}_{i0}}{\dot{Z}}=\left(\vec{a}_y+\vec{a}_x j\right)\frac{2\dot{E}_{i0}}{\dot{Z}}\cos\beta z$$

课后范例

$$\dot{\vec{H}}_1 = \left(\vec{a}_y + \vec{a}_x j\right)\frac{2\dot{E}_{i0}}{\dot{Z}}\cos\beta z$$

由理想导体边界条件有:

$$\dot{\vec{J}}_S = \vec{n}\times\dot{\vec{H}}_1\Big|_{z=0}$$

$$= \left(-\vec{a}_z\right)\times\left(\vec{a}_y + \vec{a}_x j\right)\frac{2\dot{E}_{i0}}{\dot{Z}}$$

$$= \left(\vec{a}_x - \vec{a}_y j\right)\frac{2\dot{E}_{i0}}{\dot{Z}}$$

课后范例

例 6： 一已知空气中平面波为TE波,其电场强度为

$$\vec{E}=\left(\vec{a}_x+E_{y0}\vec{a}_y\right)e^{-j2.3\left(-0.6x+0.8y-j0.6z\right)}\ \mathrm{V/m}$$

求：(1) 此波是否为均匀平面波；

(2) 电场的中的参数E_{y0}

$$\vec{k}=k\vec{k}_0=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\vec{k}_0=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\frac{\vec{E}\times\vec{H}}{\left|\vec{E}\times\vec{H}\right|}=\omega\sqrt{\mu\varepsilon}\frac{\vec{E}\times\vec{H}}{\left|\vec{E}\right|\left|\vec{H}\right|}$$

$$=k_x\vec{e}_x+k_y\vec{e}_y+k_z\vec{e}_z$$

解：(1) 由电场强度可知，

$$\vec{E}=\left(\vec{a}_x+E_{y0}\vec{a}_y\right)e^{-1.38z}e^{-j2.3\left(-0.6x+0.8y\right)}\ \mathrm{V/m}$$

此平面波的传播方向在xoy平面内，等相位面平行于z轴，而场强振幅与z有关，因此，此波是非均匀平面波。

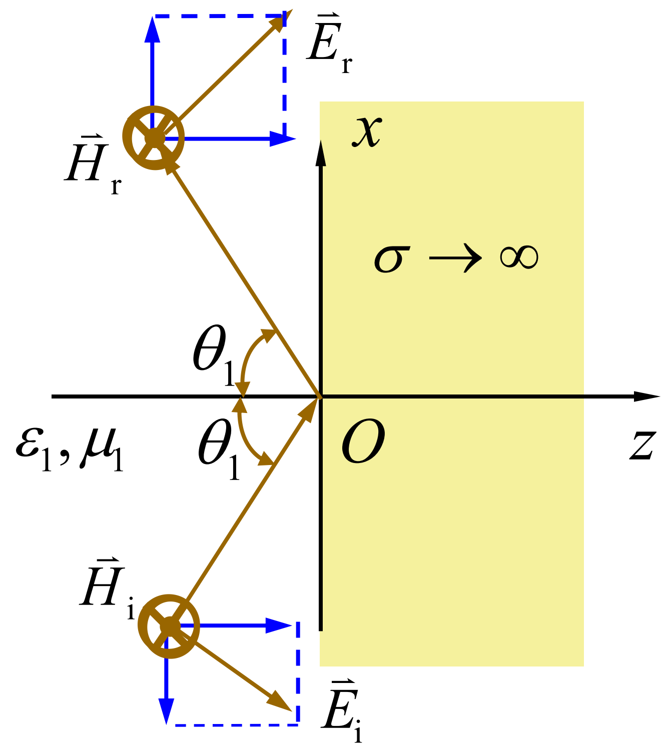
(2) 此波为TE波，因此，

$$\vec{k}\cdot\vec{E}=0\Rightarrow-0.6+0.8E_{y0}=0\Rightarrow E_{y0}=0.75$$

波矢量与坐标系的几何图示；判断是TE，TM和TEM波；

课后范例

例 9： 一已知空气中磁场强度为 $\dot{\vec{H}}_i = -\vec{a}_y e^{-j\sqrt{2}\pi(x+z)}$ A/m 的均匀平面波，向位于z=0处的理想导体斜入射。求：(1) 入射角；(2) 入射波电场；(3) 反射波电场和磁场；(4) 导体表面上的感应电流密度和电荷密度。



解：坐标系如图

(1) 由题意可知：$k_{ix} = k_{iz} = \sqrt{2}\pi$

所以：

$$\vec{k}_i = \vec{a}_x k_{ix} + \vec{a}_z k_{iz} = \left(\vec{a}_x + \vec{a}_z\right)\sqrt{2}\pi$$

$$k = \left|\vec{k}_i\right| = 2\pi$$

入射角为：

$$\theta_i = \arctan\frac{k_{ix}}{k_{iz}} = \frac{\pi}{4}$$

课后范例

(2) 入射波电场为：

$$\dot{\vec{E}}_i = -\frac{Z}{k_i}\dot{\vec{k}}_i \times \dot{\vec{H}}_i = \left(-\vec{a}_x + \vec{a}_z\right)\frac{120\pi}{\sqrt{2}}e^{-j\sqrt{2}\pi(x+z)}$$

(3) 反射波矢量为：

$$\vec{k}_r = \vec{a}_x k_{ix} - \vec{a}_z k_{iz} = \left(\vec{a}_x - \vec{a}_z\right)\sqrt{2}\pi$$

反射波电场和磁场为：

$$\dot{\vec{H}}_r = -\vec{a}_y e^{-j\sqrt{2}\pi(x-z)}$$

$$\dot{\vec{E}}_r = -\frac{Z}{k_r}\dot{\vec{k}}_r \times \dot{\vec{H}}_r = \left(\vec{a}_x + \vec{a}_z\right)\frac{120\pi}{\sqrt{2}}e^{-j\sqrt{2}\pi(x-z)}$$

课后范例

(4) 合成波的电场和磁场为：

$$\dot{\vec{E}}_1=\dot{\vec{E}}_i+\dot{\vec{E}}_r=\left(-\vec{a}_x+\vec{a}_z\right)60\sqrt{2}\pi e^{-j\sqrt{2}\pi(x+z)}+\left(\vec{a}_x+\vec{a}_z\right)60\sqrt{2}\pi e^{-j\sqrt{2}\pi(x-z)}$$

$$=\left[\vec{a}_x\left(-e^{-j\sqrt{2}\pi z}+e^{j\sqrt{2}\pi z}\right)+\vec{a}_z\left(e^{-j\sqrt{2}\pi z}+e^{j\sqrt{2}\pi z}\right)\right]60\sqrt{2}\pi e^{-j\sqrt{2}\pi x}$$

$$=\left[\vec{a}_x\sin\left(\sqrt{2}\pi z\right)+\vec{a}_z\cos\left(\sqrt{2}\pi z\right)\right]120\sqrt{2}\pi e^{-j\sqrt{2}\pi x}$$

$$\dot{\vec{H}}_1=\dot{\vec{H}}_i+\dot{\vec{H}}_r=-\vec{a}_y\left(e^{-j\sqrt{2}\pi z}+e^{j\sqrt{2}\pi z}\right)e^{-j\sqrt{2}\pi x}$$

$$=-\vec{a}_y 2\cos\left(\sqrt{2}\pi z\right)e^{-j\sqrt{2}\pi x}$$

(5) 导体表面上的感应电流密度和电荷密度为：

$$\dot{\vec{J}}_s=\vec{n}\times\dot{\vec{H}}_1\Big|_{z=0}=\left(-\vec{a}_z\right)\times\left(-\vec{a}_y\right)2e^{-j\sqrt{2}\pi x}=-\vec{a}_x 2e^{-j\sqrt{2}\pi x}$$

$$\rho_s=\vec{n}\cdot\dot{\vec{E}}_1\Big|_{z=0}=\left(-\vec{a}_z\right)\cdot\vec{a}_z 120\sqrt{2}\pi e^{-j\sqrt{2}\pi x}=-120\sqrt{2}\pi e^{-j\sqrt{2}\pi x}$$

课后范例

题21 一均匀平面电磁波在无耗媒质（$4\varepsilon_0, \mu_0$）中传播，已知其电场强度矢量的表达式为：

$\vec{E}=\left[3\vec{a}_x + A\vec{a}_y - 5j\vec{a}_z\right]e^{-j4\pi(4x+3y+Cz)}$ V/m ，其中A和C为待定实系数。

注意介电常数和相对介电常数的概念；
计算中的数据，不一定需要写为小数形式；

1．求待定系数A和C。

2．求此电磁波的传播方向 和传播常数 。

3．求此电磁波的工作频率和在此无耗媒质中的波长。

4．请给出其磁场的瞬时表达式。

5．求此电磁波的极化状态，若为圆极化或椭圆极化，请指出其旋向。

单列行波 TEM波：$\vec{a}_k \cdot \dot{\vec{E}} = \vec{k} \cdot \dot{\vec{E}} = 0$

注意复矢量中的虚部也要参与运算，因为复矢量中的虚部也是复振幅的组成部分；

由题意得：
波矢方向和电场强度矢量所在平面垂直
相对介电常数为4

- （1）

初始时刻的电场强度矢量为：$\overrightarrow{E_0} = 3\overrightarrow{a_x} + A\overrightarrow{a_y} - 5j\overrightarrow{a_z}$

波矢量$\vec{k} = 2\pi(8\overrightarrow{a_x} + 6\overrightarrow{a_y} - 2C\overrightarrow{a_z})$

两者垂直：$\vec{k} \cdot \overrightarrow{E_0} = 0$

解得：$A =- 4, C = 0$

- （2）

由上一问有：$\vec{E} = \left(3\overrightarrow{a_x} - 4\overrightarrow{a_y} - 5j\overrightarrow{a_z}\right)e^{-j4\pi(4x+3y)}$

传播方向即为波矢方向，将波矢单位化得到：$\overrightarrow{k_0} = \frac{4}{5}\overrightarrow{a_x} + \frac{3}{5}\overrightarrow{a_y}$

传播常数$k = 20\pi$

- (3)

由上一问有：$\vec{E} = (3\vec{a_x} - 4\vec{a_y} - 5j\vec{a_z})e^{-j4\pi(4x+3y)}$

传播方向即为波矢方向，将波矢单位化得到：$\vec{k_0} = \frac{4}{5}\vec{a_x} + \frac{3}{5}\vec{a_y}$

传播常数$k = 20\pi$

- (4)

磁场表达式为：$\vec{H} = \frac{1}{Z}\vec{k_0} \times \vec{E}$

Z为该媒质中的波阻抗：$Z = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \cdot Z_0$，$Z_0$为空气中波阻抗

磁场瞬时表达式需要增加$e^{j\omega t}$因子，并写为实数，

带入数值有：

$$\vec{H} = \frac{-(3\vec{a_x} - 4\vec{a_y})\sin(\pi(6 \times 10^9 t - 16x + 12y)) - 5\vec{a_z}\cos(\pi(6 \times 10^9 t - 16x + 12y))}{60\pi} \ A/m$$

■ (5)

初始时刻的电场强度矢量为：$\overrightarrow{E_0} = 3\overrightarrow{a_x} - 4\overrightarrow{a_y} - 5j\overrightarrow{a_z}$

因为：$\left(\left(3\overrightarrow{a_x} - 4\overrightarrow{a_y}\right) \times -5\overrightarrow{a_z}\right)$与$\overrightarrow{k_0}$同向

且$\left|3\overrightarrow{a_x} - 4\overrightarrow{a_y}\right| = |-5\overrightarrow{a_z}|$，故为右旋圆极化波

课后范例

TEM波：$\vec{k}\cdot\dot{\vec{E}}=\vec{k}\cdot\dot{\vec{H}}=0$

TE波：$\vec{k}\cdot\dot{\vec{E}}=0$ 且 $\vec{k}\cdot\dot{\vec{H}}\neq 0$

TM波：$\vec{k}\cdot\dot{\vec{H}}=0$ 且 $\vec{k}\cdot\dot{\vec{E}}\neq 0$

注意复矢量中的虚部也要参与运算，因为复矢量中的虚部也是复振幅的组成部分；

课后范例

例：均匀平面波自空气（ε_0）向理想介质（$4\varepsilon_0$）分界面（z=0）斜入射，入射波磁场强度为 $\dot{\vec{H}} = \left(\sqrt{3}\vec{a}_x + \vec{a}_z\right)e^{j\left(2x-2\sqrt{3}z\right)}$ A/m

（1）求角频率，空气中波长和入射波的波矢量；

（2）在z＜0的空间内是空气还是理想介质？；

（3）在直角坐标系中画出媒质分界面和入射波波矢量；

（4）求出理想介质中的波长；

（5）求出入射角和折射角（透射角）；

（6）求出入射波电场强度的瞬时表达式，并说明这是平行还是垂直极化波；

（7）求出折射波电场强度的复数表达式；

（8）求出分界面上单位面积进入理想介质的平均功率；

标准形式：

$$\dot{\vec{H}} = 2\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\vec{a}_x + \frac{1}{2}\vec{a}_z\right)e^{-j\left(-2x+2\sqrt{3}z\right)} \quad \text{A/m}$$

由题意得：
波矢方向和电场强度矢量所在平面垂直
相对介电常数为4

- （1）

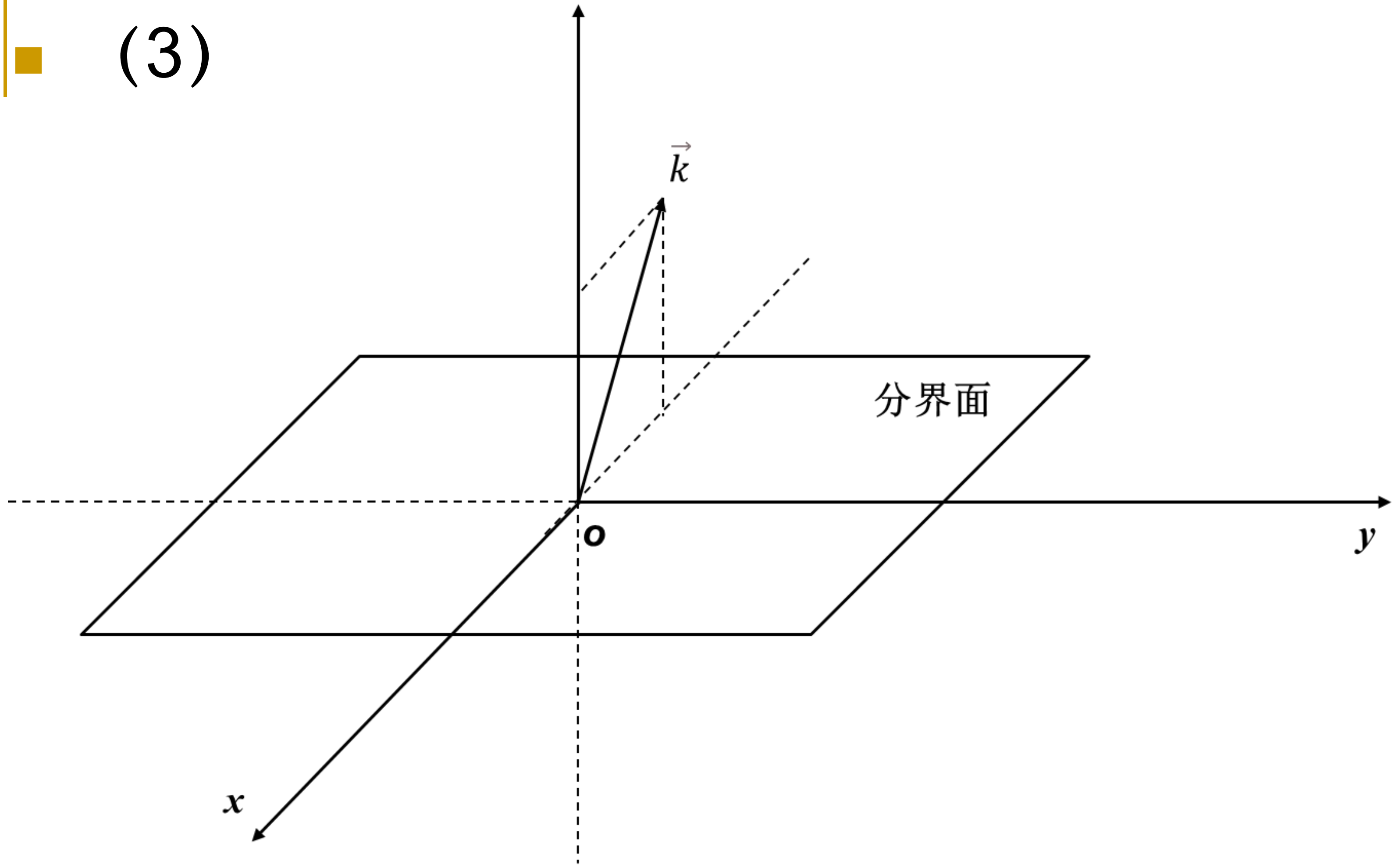
波矢量$\overrightarrow{k} = -(2\overrightarrow{a_x} - 2\sqrt{3}\overrightarrow{a_z})$

波长$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{\pi}{2}\ m$

- （2）

波矢在z方向的分量为正，则该电磁波在z轴方向正向传播。
因此z<0空间内为空气

- (3)



- (4)

介质中波长：$\lambda_1 = \dfrac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon_r}} = \dfrac{\pi}{4}\ m$

- (5)

入射角：$\theta_i = 30^0$

且：$n_1 = 2n_0$，$n_0 \sin\theta_i = n_1 \sin\theta_t$

透射角：$\theta_t = arc\sin\frac{1}{4}$

- (6)

入射波电场强度有如下关系：$\dot{\vec{E}} = Z_0\dot{\vec{H}} \times \vec{k_0}$

传播方向为：$\vec{k_0} = -\frac{1}{2}\vec{a_x} + \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{a_z}$

有：$\dot{\vec{E}} = 240\pi\vec{a_y}e^{-j(-2x+2\sqrt{3}z)}\ A/m$

其瞬时值为：$\vec{E} = 240\pi\vec{a_y}\cos\left(1.2 \times 10^9 t + 2x - 2\sqrt{3}z\right)\ V/m$

垂直于入射面（xoz平面），为垂直极化波

- (7)

折射率：$R_{\perp} = \dfrac{\dfrac{2Z_1}{\cos\theta_t}}{\dfrac{Z_1}{\cos\theta_t} + \dfrac{Z_0}{\cos\theta_i}}$，

式中Z_1为介质中波阻抗，Z_0为空气中波阻抗

折射波：$\vec{\dot{E}_t} = R_{\perp} \cdot \left|\vec{\dot{E}_1}\right| \cdot \vec{a_y} e^{-j(\vec{k_2}\cdot\vec{r})}$

- (8)

折射波的复数坡印廷矢量为：$\vec{\dot{S}} = \frac{1}{2}\vec{\dot{E}} \times \vec{\dot{H}}^*$

其功率流密度的平均值为：$\overrightarrow{s_{av}} = Re\left[\frac{1}{2}\dot{E} \times \vec{\dot{H}}\right]$

平均功率：$\overline{P} = \frac{1}{2}\left|\dfrac{\vec{\dot{E}_t} \times \vec{\dot{E}_t}^*}{Z_1} \cdot \vec{a_z}\right|$

课后范例

练习2 空气中一平面波，其电场强度为：

$$\dot{\vec{E}} = \left[2j\vec{a}_x + 1.5j\vec{a}_z\right]e^{-j\pi(1.2x - j0.2y - 1.6z)}\ \ \text{V/m}$$

1．求此平面波的传播方向　　，相位常数 β；

2．求该平面波磁场的复数表达式；

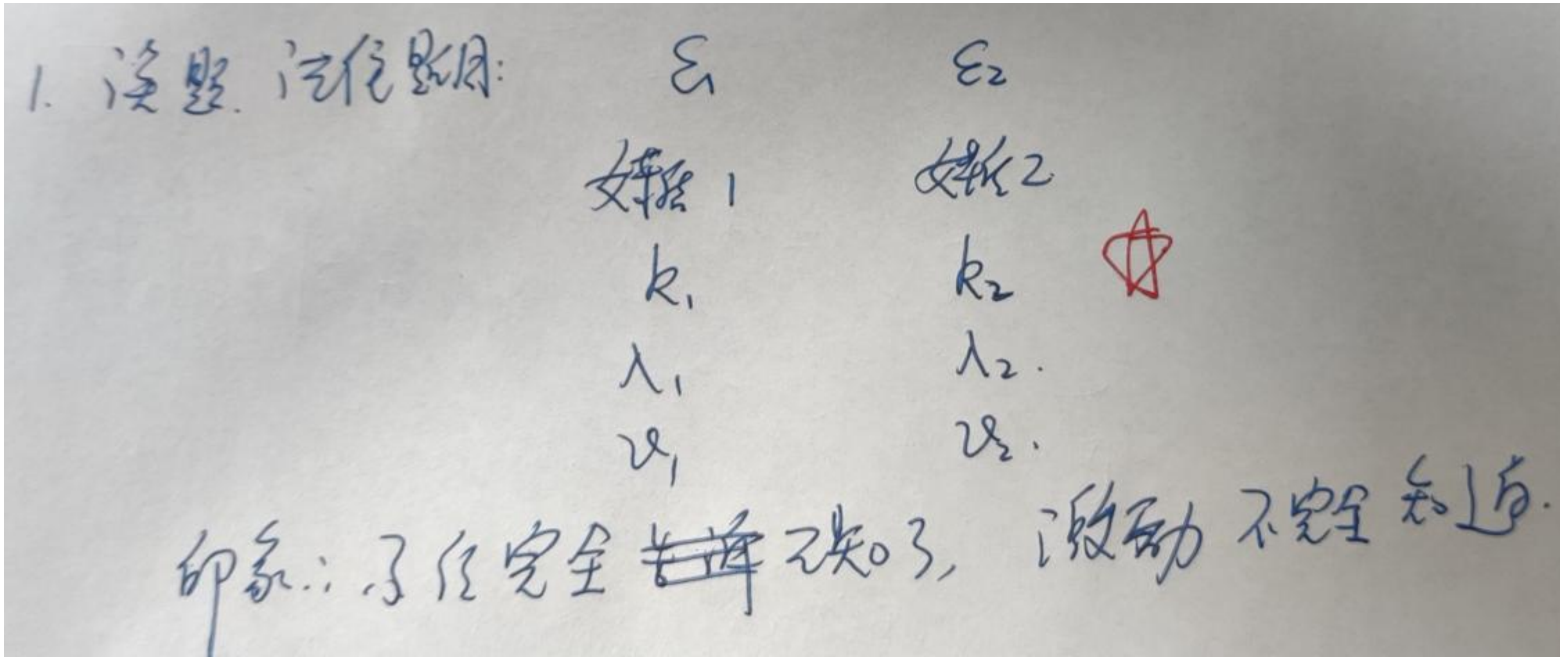
3．请问此平面波是否为TEM波？并给出理由。

4．求此平面波的极化特性。

课后范例

正弦均匀平面波自理想介质 I（$\varepsilon_1 = 4\varepsilon_0$， $\mu_1 = \mu_0$）向空气（$\varepsilon_2 = \varepsilon_0$， $\mu_2 = \mu_0$）斜入射，分界面为 $z = 0$ 平面，入射波的电场强度为：

$$\dot{E}_i = 12\pi\left(2\sqrt{3}\vec{a}_x + 3\vec{a}_y + B\vec{a}_z\right)e^{-j\pi\left(x-\sqrt{3}z\right)} \quad \text{V/m}$$



1. 读题. 记住数据: ε_1 ε_2

媒质1 媒质2

k_1 k_2

λ_1 λ_2.

v_1 v_2.

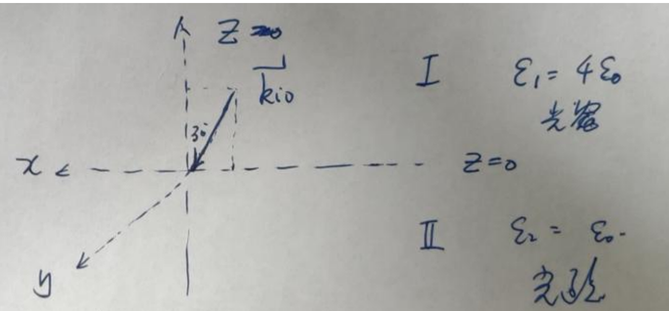
印象：了经完全 ~~忘掉~~ 记住了, 激动 不完全知道.

课后范例

正弦均匀平面波自理想介质 I（$\varepsilon_1 = 4\varepsilon_0$， $\mu_1 = \mu_0$）向空气（$\varepsilon_2 = \varepsilon_0$， $\mu_2 = \mu_0$）斜入射，分界面为 $z = 0$ 平面，入射波的电场强度为：

$$\dot{\vec{E}}_i = 12\pi\left(2\sqrt{3}\vec{a}_x + 3\vec{a}_y + B\vec{a}_z\right)e^{-j\pi\left(x-\sqrt{3}z\right)} \quad \text{V/m}$$

2. 画图：



$\vec{k}_i = \pi\vec{a}_x - \sqrt{3}\pi\vec{a}_z$

$\vec{k}_{io} = \frac{1}{2}\vec{a}_x - \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{a}_z$

$\vec{E}_i \cdot \vec{k}_i = 0 \Rightarrow B$ 的值. 此时波动完全知道了.

$\vec{E}_i = 12\pi\cdot(2\sqrt{3}\vec{a}_x + 3\vec{a}_y + B\vec{a}_z)e^{-j\pi(x-\sqrt{3}z)}$ 相[illegible].

课后范例

正弦均匀平面波自理想介质 I（$\varepsilon_1 = 4\varepsilon_0$， $\mu_1 = \mu_0$）向空气（$\varepsilon_2 = \varepsilon_0$， $\mu_2 = \mu_0$）斜入射，分界面为 $z = 0$ 平面，入射波的电场强度为：

$$\dot{E}_i = 12\pi\left(2\sqrt{3}\vec{a}_x + 3\vec{a}_y + B\vec{a}_z\right)e^{-j\pi\left(x-\sqrt{3}z\right)} \quad \text{V/m}$$

θ_i θ_t, $\vec{k}_i$. $\vec{k}_r$. $\vec{k}_t$

$R_\perp$. $T_\perp$. $R_\parallel$. $T_\parallel$.

$\vec{H}_i$. $\vec{E}_1$. $\vec{H}_2$. $\vec{E}_2$. $\vec{S}_{av}$.

第6章-课后作业

- 6.1、波数联系工作频率与媒质特性；电磁互算；
- 6.2、电磁互算；平均坡印廷矢量，知道是平面波后可以直接根据电场复振幅和波阻抗来计算，注意矢量的方向；
- 6.15、注意理想介质的概念，理想介质=非磁性无耗介质；
- 6.25、进入理想介质的功率流密度，是垂直于分界面的；沿着分界面方向的不是；
- 课后习题都是简单的形态；

第6章-课后作业

基本物理过程和基本运算

- 一般的波的表达式及其变形：行波驻波，传播方向；
- 斜入射---分解为垂直极化波和水平极化波—分别处理---矢量合成；
- 能够清楚波的传播方向，场矢量的方向，和坐标系的关系；

- 给定媒质和坐标系；
- 在一定入射场情况下的反射和透射现象，伴随着功率和极化的考察；

内容-第7章

- 第7章 导行电磁波：波导中模式分布及其特性参数
- 导波的一般分析方法与导波的模式，矩形波导中电磁波的传输特性及场分布、谐振电磁波的特性、矩形谐振腔的谐振特性；（第七章，1,2,3,4,7,8节。5,6,9,10节课程考核不要求）
- 应掌握知识与计算：
- 4、 导行电磁波：TEM/TM/TE/混合模的定义， TEM波的传输条件、截止频率与波长；波导中的本征关系表示式与各种k值的意义与计算式，矩形波导的截止特性、TM/TE传输模式与截止模式的特点及相应的波阻抗；不同媒质参数（ ）、各种模式（包括传输或截止模式）条件下截止波长、截止频率、相速、波导波长和波阻抗的计算，能够区分工作波长和波导波长；矩形波导TEmn和TMmn模式m和n的取值范围；波导主模、简并模的定义，TEm0模电场、磁场、表面电流分布的特点及图形表示（TE10模式）；矩形波导~~、圆形波导和同轴线~~的主模及其截止波长和截止频率；矩形谐振腔中谐振场TEmnp和TMmnp中m、n、p取值范围，主模高次模的定义，谐振场TE101模电场、磁场、表面电流分布的特点及图形表示，不同模式谐振频率的计算；影响波导衰减（损耗）的因素及如何减少波导的衰减；影响波导功率容量的因素；谐振器Q值的定义及物理意义；微波谐振器的特点（两点）；影响微波谐振器Q值的因素（尺寸及形状、模式、腔体材料及填充媒质、表面光滑）；--通常不要求计算；
- 5、 导行电磁波：写出纵向场分量表示横向场分量表示式；波阻抗的定义与TEM/TM/TE模的波阻抗表示式（包括TM/TE模波阻抗在教材262页5，6题形式）；

内容-第7章

- 第7章 导行电磁波：**波导中模式分布及其特性参数**
- 导波的一般分析方法与导波的模式，矩形波导中电磁波的传输特性及场分布、谐振电磁波的特性、矩形谐振腔的谐振特性；（第七章，1,2,3,4,7,8节。5,6,9,10节课程考核不要求）
- 应掌握知识与计算：
- 矩形波导中，TE模式，m和n不同时为零，TM模式，m和n都不能为零；
- 矩形腔体中，TE模式，m和n不同时为零且p不能为零；
- TM模式，m和n都不能为零，p可以为零；

课后范例

例2： 在截面尺寸为a×b=22.86×10.16mm²的矩形波导中，传输TE_{10}模，工作频率在10GHz

(1) 求其截止频率、导波波长及波阻抗。(2) 若波导的宽边尺寸增大一倍，上述参数如何变化？还能传输什么模式？(3) 若波导的窄边尺寸增大一倍，上述参数如何变化？还能传输什么模式？

波长，波导波长，截止波长；
工作频率，截止频率

解： (1) m=1，n=0：

截止波长为：

$$\lambda_{c10}=\frac{2\pi}{k_c}=\frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}=2a=2\times 22.86=45.72mm$$

截止频率为：

$$f_{cTE_{10}}=\frac{1}{2a\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}=\frac{3\times 10^8}{2\times 22.86\times 10^{-3}}=6.56\times 10^9 Hz$$

波导波长为：

$$\lambda_{gTE_{10}}=\frac{\lambda_0}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}=\frac{3\times 10^{-2}}{\sqrt{1-\left(\frac{6.56}{10}\right)^2}}=3.97\times 10^{-2}m$$

波阻抗为：

$$Z_{TE_{10}}=\frac{Z}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}=\frac{377}{\sqrt{1-\left(\frac{6.56}{10}\right)^2}}=499.3\,\Omega$$

课后范例

(2) 当a'=2a=45.72mm：

截止波长为：$$\lambda_{c10}=\frac{2\pi}{k_c}=\frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{a'}\right)^2}}=2a'=91.44mm$$

截止频率为：$$f_{cTE_{10}}=\frac{1}{2a'\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}=\frac{3\times10^8}{2\times45.72\times10^{-3}}=3.28\times10^9Hz$$

波导波长为：$$\lambda_{gTE_{10}}=\frac{\lambda_0}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}=\frac{3\times10^{-2}}{\sqrt{1-\left(\frac{3.28}{10}\right)^2}}=3.176\times10^{-2}m$$

波阻抗为：$$Z_{TE_{10}}=\frac{Z}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}=\frac{377}{\sqrt{1-\left(\frac{3.28}{10}\right)^2}}=399.2\Omega$$

此时：$$\lambda_{c20}=\frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{a'}\right)^2}}=a'=45.72mm \qquad \lambda_{c30}=\frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{3\pi}{a'}\right)^2}}=\frac{2}{3}a'=30.48mm$$

由于λ=30mm，此时能传输的模式为：TE_{10}，TE_{20}，TE_{30}

课后范例

(3) 当b'=2b=20.32mm：

截止波长为：
$$\lambda_{c10}=\frac{2\pi}{k_{c10}}=\frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2}}=2a=45.72mm$$

截止频率为：
$$f_{cTE_{10}}=\frac{1}{2a\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}}=\frac{3\times10^8}{2\times22.86\times10^{-3}}=6.56\times10^9 Hz$$

波导波长为：
$$\lambda_{gTE_{10}}=\frac{\lambda_0}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}=\frac{3\times10^{-2}}{\sqrt{1-\left(\frac{6.56}{10}\right)^2}}=3.97\times10^{-2}m$$

波阻抗为：
$$Z_{TE_{10}}=\frac{Z}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}}=\frac{377}{\sqrt{1-\left(\frac{6.56}{10}\right)^2}}=499.3\Omega$$

此时：
$$\lambda_{c11}=\frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2+\left(\frac{\pi}{b'}\right)^2}}=30.4mm$$

由于λ=30mm，此时能传输的模式为：TE_{10}，TE_{01}，TE_{11}，TM_{11}

补充思考：

接上题：

（4）在垂直于矩形波导传输方向放置一理想导体平板，形成22.86 mm×10.16 mm×22.86 mm的矩形谐振腔：

4.1确定该谐振腔的主模和对应的谐振频率，以及该谐振腔的品质因数Q

4.2请写出该模式下的电场分布和磁场分布表达式

4.3如何改变谐振腔的尺寸但不改变其主模谐振波长？这样调整对于高次模的谐振波长会造成怎样的影响

课后范例

例3: 求矩形谐振腔内TE_{101}模式(主模)的场分布，谐振频率，谐振波长和固有品质因数Q

解：由矩形波导中TE_{10}模的场分布式

$$\begin{cases}\dot{H}_z = \dot{H}_0\cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-jk_{z10}z}\\ \dot{H}_x = jk_{z10}\left(\frac{a}{\pi}\right)\dot{H}_0\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-jk_{z10}z}\\ \dot{E}_y = -j\omega\mu\left(\frac{a}{\pi}\right)\dot{H}_0\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)e^{-jk_{z10}z}\\ \dot{H}_y = \dot{E}_x = \dot{E}_z = 0\end{cases}$$

得矩形谐振腔内TE_{101}模式的场量为:

$$\begin{cases}\dot{H}_z = \left(\dot{H}_0^+e^{-jk_{z10}z} + \dot{H}_0^-e^{jk_{z10}z}\right)\cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\\ \dot{H}_x = jk_{z10}\left(\frac{a}{\pi}\right)\left(\dot{H}_0^+e^{-jk_{z10}z} - \dot{H}_0^-e^{jk_{z10}z}\right)\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\\ \dot{E}_y = -j\omega\mu\left(\frac{a}{\pi}\right)\left(\dot{H}_0^+e^{-jk_{z10}z} + \dot{H}_0^-e^{jk_{z10}z}\right)\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\\ \dot{H}_y = \dot{E}_x = \dot{E}_z = 0\end{cases}$$

由条件 $E_y\big|_{z=0} = 0$ (切向电场为0)

得 $\dot{H}_0^+ = -\dot{H}_0^-$

于是

$$H_0^+e^{-jk_{z10}z} + H_0^-e^{jk_{z10}z} = -2jH_0^+\sin\left(k_{z10}z\right)$$

$$H_0^+e^{-jk_{z10}z} - H_0^-e^{jk_{z10}z} = 2H_0^+\cos\left(k_{z10}z\right)$$

得

$$\dot{H}_z = -2j\dot{H}_0^+\cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(k_{z10}z\right)$$

$$\dot{H}_x = j2k_{z10}\left(\frac{a}{\pi}\right)\dot{H}_0^+\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\left(k_{z10}z\right)$$

$$\dot{E}_y = -2\omega\mu\left(\frac{a}{\pi}\right)\dot{H}_0^+\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(k_{z10}z\right)$$

$$\dot{H}_y = \dot{E}_x = \dot{E}_z = 0$$

课后范例

由条件 $E_y\big|_{z=d}=0$ 则 $k_{z10}d=\pi \Rightarrow k_{z10}=\dfrac{\pi}{d}$

于是有:

$$\dot{H}_z=-2j\dot{H}_0^+\cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{d}z\right)=\dot{H}_0\cos\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{d}z\right)$$

$$\dot{H}_x=j2\left(\frac{a}{d}\right)\dot{H}_0^+\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{d}z\right)=-\dot{H}_0\left(\frac{a}{d}\right)\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\cos\left(\frac{\pi}{d}z\right)$$

$$\dot{E}_y=-2\omega\mu\left(\frac{a}{\pi}\right)\dot{H}_0^+\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{d}z\right)=-j\omega\mu\dot{H}_0\left(\frac{a}{\pi}\right)\sin\left(\frac{\pi}{a}x\right)\sin\left(\frac{\pi}{d}z\right)$$

$$\dot{H}_y=\dot{E}_x=\dot{E}_z=0$$

相应的k为

$$k=k_{101}=\sqrt{\left(\frac{\pi}{a}\right)^2+\left(\frac{\pi}{d}\right)^2}$$

故谐振频率为

$$f_{101}=\frac{v}{2\pi}k_{101}=\frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}\sqrt{\left(\frac{1}{2a}\right)^2+\left(\frac{1}{2d}\right)^2}$$

谐振波长为

$$\lambda_{101}=\frac{v}{f_{101}}=\frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{2a}\right)^2+\left(\frac{1}{2d}\right)^2}}$$

第7章-课后作业

- 7.1、已知波导横截面尺寸求截止波长；已知波导横截面尺寸和填充媒质求截止频率；
- 7.2、截止波长只与横截面尺寸和模式指数有关，与填充介质无关；截止频率与横截面尺寸和模式指数有关，也与填充介质无关；---谐振腔中的谐振波长和谐振频率呢?
- 7.3、注意KHz，MHz，GHz和THz这些单位的意义；模式指数的取值范围；模式工作状态的判断；单模传输条件；
- 7.4、注意区分概念：频率（工作频率），截止频率，自由空间波长，介质中波长，截止波长，波导波长；
- 7.5和7.6、公式换算即可，这实际上是；
- 7.7、注意填充介质不同影响截止频率；
- 7.10、能够记住TE10模式的电场、磁场和电流分布，并会绘制场图；结合矩形波导TE10模式来记忆TE101模式；
- 7.11、振荡频率（谐振频率）和谐振波长；Q值的定义和物理意义；

- 几个容易误解的概念和说法：
- 纵向传播和横向模式；
- 在纵向上是不变的—纵向上是时变的，是传输；
- 模式存在性；模式的工作状态；
- 模式分量的相位关系：虚功率传输则电磁相差90，实功率传输则电磁同相或反相，复功率则电磁任意相位

第7章-课后作业

基本概念和基本运算

- 矩形波导横截面尺寸已知---------截止波长；
- 填充媒质已知-----------------------截止角频率，截止频率，截止波长；
- 工作频率已知或是可求------------工作波长，波导波长，波阻抗，相速度，模式工作状态可知，单模传输条件可知；
- 某个场模式分布已知或可求------电磁转化，场分布可知；

TEM波TE波TM波传输和谐振参数计算

给出场表达式，各个参数的计算，要对应，要系统，

内容-第8章

- 第8章 电磁波的辐射：**辐射的基本特性**
- 电磁波辐射的机理，非齐次波动方程的解，基本辐射元的电磁场（第八章，1,2,3节。后面章节课程考核不要求）
- 应掌握知识与计算：
- 了解非齐次波动方程的求解；
- 掌握元电辐射体的概念，元电辐射体的电磁场及其特性，近区，远区，方向性函数，方向性图，E面，H面，辐射电阻，辐射功率；

腾讯课堂回放

- 赵老师课堂的几个习题课：波导，斜入射，平面波，静态场的求解（场，电容电感电导）；
- 除了综合题目，简答填空选择的知识面覆盖会非常广，不要失了基础；

时变场+静态场

- **静态场部分占比小；**
- 基础知识点：简答，填空，选择；
- 综合题目：电场，磁场，电位，**结构电参数（电容电阻电感）的计算**；
- 计算方法：分布型解法或边值型解法；
- 分布型：场源是什么？源和场的关系是？媒质是什么（导体？介质？）？其本构关系是？
- 边值型问题：方程---通解---边界条件---定解；
- 对称的分布型问题和简单的边值型问题；

- 求解系统参数通常和是否有信号无关，但求解过程必然需要信号，因此，假设电荷密度，电量，电流密度，电流等是必要的；

内容-第2章-静电场和恒流电场

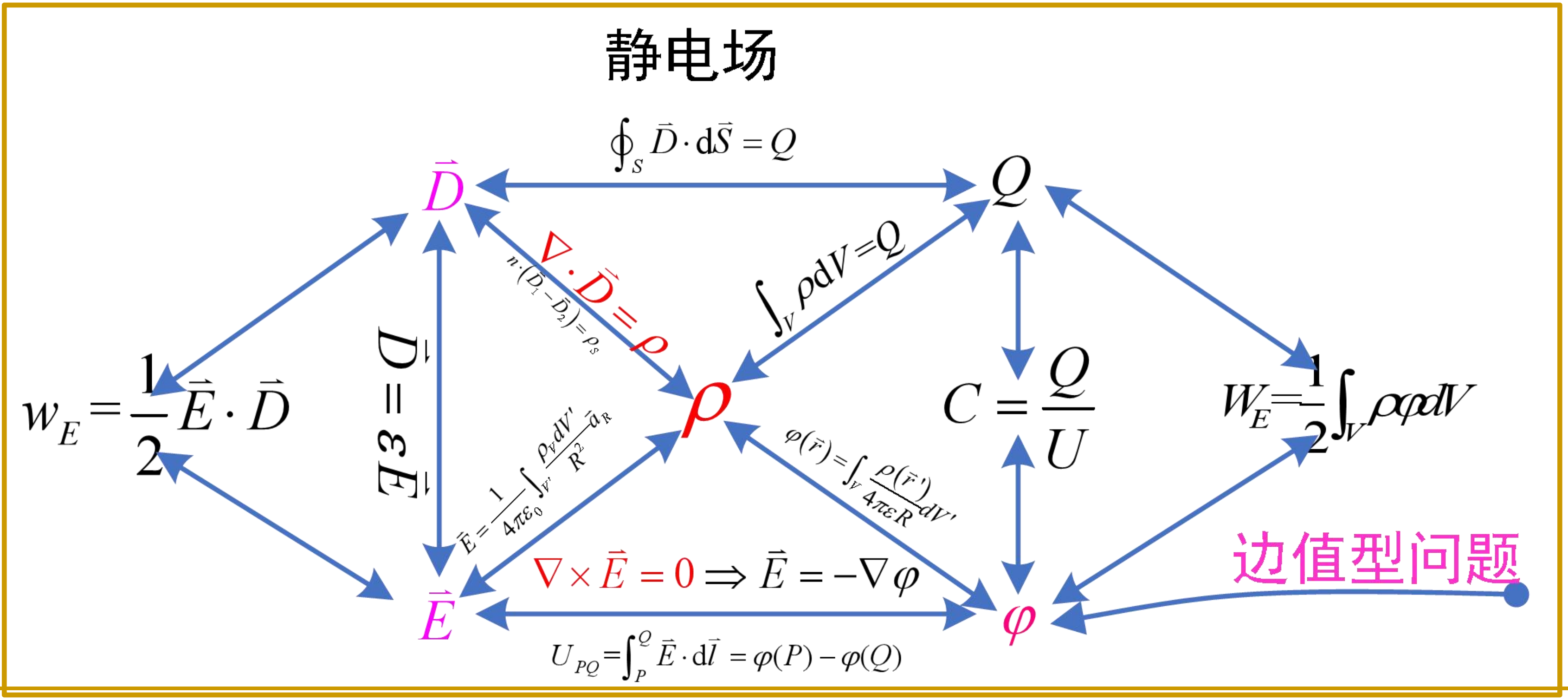
- 第2章 静电场：电场，电位，电容和电阻的计算
- 静电场；（第二章，2.1-2.6，部分电容不考；2.8-2.9，电导的计算）；
- 课件中的范例；
- 应掌握知识与计算：
- 1、积分与微分形式的静电场基本方程
- 2、用电位表示电场，用电场表示电位，电位参考点的电位为零。
- 3、体电荷、面电荷和线电荷的电位
- 4、电力线的切向方向就是该点电场的方向；电场的方向垂直于等位面；电力线的密度表示电场的大小；电力线始于正电荷（或无穷远）、终于负电荷（或无穷远）；静电场的电力线不闭合
- 5、点电荷的电位与距离成反比、电偶极子的电位与距离的平方成反比；点电荷的电场与距离平方成反比、电偶极子的电场与距离的立方成反比。
- 1、推导电位的泊松方程和拉普拉斯方程
- 2、写出静电场中电位的边界条件（分导体、非导体两种情况）；电位连续的边界条件与电场切向分量连续的边界条件等效。
- 3、静电场中导体的性质（自由电荷只分布在表面、导体是等位体、导体内部电场为零）

内容-第2章-静电场和恒流电场

- 第2章 静电场：电场，电位，电荷分布，电场能，电容和电阻的计算
- 静电场；（第二章，2.1-2.6，部分电容不考；2.8-2.9，电导的计算）；
- 课件中的范例；
- 应掌握知识与计算：
- 1、电容储存电能、电容值与导体是否带电荷或电压无关，电容值仅仅与导体的形状、大小、相对位置和所处媒质的介电常数有关。
- 2、使用电荷密度和电位表示电场能量；使用电容和电压或电荷表示电容器中电场能量、并会用此方法计算电容。
- 1、恒定电流定义（恒定电流与均匀电流的区别）
- 2、非导电媒质（理想介质、导电媒质外）内和导电媒质内恒流电场的基本方程（微分和积分形式）
- 3、写出恒流电场中电位的边界条件（只有导电媒质间、导电媒质与理想介质之间两种情况，教科书59页第一种情况实际上就是60页第三种情况的不完全版）；电位连续的边界条件与电场切向分量连续的边界条件等效。
- 4、静电比拟法的应用区域（恒流电场是电源外的导电媒质、静电场是无电荷的媒质）与成立条件（恒流电场的电力线垂直于电极）；比拟的场量对应关系。
- 5、电导损耗电磁能量。

习题课

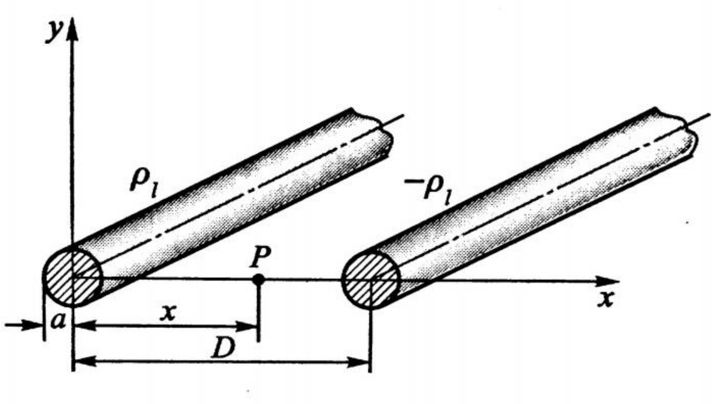
- 建立坐标系；
- 待求量是？关联量是？关系是？
- 分布型还是边值型？
- 分布型：一般分布？对称分布？
- 边值型：支配方程？边界条件？通解？定解？
- 电磁场与系统的相互作用
- 系统函数是系统电磁特性的反映
- 不同结构的场分布和能量
- 简单结构的电容，电导，电感
- 从简单到复杂…



习题课-双线传输线

其上的场分布如何?
如果场动起来，如何?
第七章-导行电磁波

例3.1.4： 平行双线传输线的结构如下图所示，导线的半径为a,两导线轴线距离为D，且D>>a,设周围介质为空气。试求传输线单位长度的电容。



解：设两导线单位长度带电量分别为 $+\rho_l$ 和 $-\rho_l$.由于D>>a,故可以近似地认为电荷分别均匀分布在两导线的表平面上。应用高斯定理和叠加原理，可得到两导线之间的平面上任意一点P的电场强度为

$$\vec{E}(x)=\vec{e}_x\frac{\rho_l}{2\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{x}+\frac{1}{D-x}\right)$$

两导线间的电位差为

$$U=\int_1^2\vec{E}\cdot d\vec{l}=\int_a^{D-a}\vec{E}(x)\cdot\vec{e}_x\,dx=\frac{\rho_l}{2\pi\varepsilon_0}\int_a^{D-a}\left(\frac{1}{x}-\frac{1}{D-x}\right)dx$$

$$=\frac{\rho_l}{\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D-a}{a}$$

平行双线传输线单位长度的电容为

$$C_1=\frac{\rho_l}{U}=\frac{\pi\varepsilon_0}{\ln[(D-a)/a]}\approx\frac{\pi\varepsilon_0}{\ln(D/a)}\quad F/m$$

$$\left.\begin{array}{l}\text{假定电荷分布}\rho\xrightarrow{\text{积分}}\text{电荷量}Q\\ \text{电荷分布}\rho\xrightarrow[\vec{E}\text{或}\varphi\text{的积分}]{\text{分布型问题}}\vec{E}\xrightarrow{\text{线积分}}\varphi\rightarrow U\end{array}\right\}\Rightarrow C=\frac{Q}{U}$$

习题课-双线传输线

无限长平行双导线传输线，设线间距离为 $2a$,两导线中分别通有相反方向的平行直线电流,求此双线传输线的矢量磁位 $\vec{A}$ 和磁感应强度 $\vec{B}$ 。

解： 利用上例结果及图 3.2.3,得

$$\text{电流密度}\,\vec{J} \xrightarrow[\vec{B}\text{或}\vec{A}\text{的积分}]{\text{分布型问题}} \vec{B}$$

$$\vec{A}=\vec{a}_z\frac{\mu I}{2\pi}\left[\ln\frac{R_0}{R_1}-\ln\frac{R_0}{R_2}\right]=\vec{a}_z\frac{\mu I}{2\pi}\ln\frac{R_2}{R_1}=\vec{a}_z\frac{\mu I}{4\pi}\ln\left[\frac{a^2+R^2+2a\cos\alpha}{a^2+R^2-2a\cos\alpha}\right]$$

$$\vec{B}=\nabla\times\vec{A}=\vec{a}_R\left(\frac{1}{R}\frac{\partial A_z}{\partial\alpha}-\frac{\partial A_\alpha}{\partial z}\right)+\vec{a}_\alpha\left(\frac{1}{R}\frac{\partial A_R}{\partial z}-\frac{\partial A_z}{\partial R}\right)+\vec{a}_z\left(\frac{1}{R}\frac{\partial(RA_\alpha)}{\partial R}-\frac{1}{R}\frac{\partial A_R}{\partial\alpha}\right)=\vec{a}_RB_R+\vec{a}_\alpha B_\alpha+\vec{a}_zB_z$$

$$B_R=\frac{1}{R}\frac{\partial A_z}{\partial\alpha}=-\frac{\mu Ia\left(a^2+R^2\right)\sin\alpha}{\pi R_1^2R_2^2}$$

$$B_\alpha=-\frac{\partial A_z}{\partial R}=\frac{\mu Ia\left(R^2-a^2\right)\cos\alpha}{\pi R_1^2R_2^2}$$

$$B_z=0$$

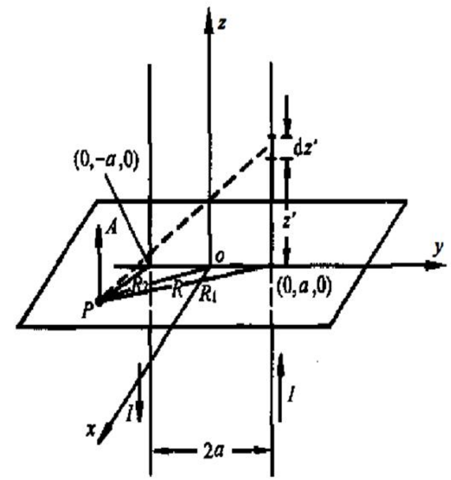


图 3.2.3 例 3.2.2 双导线传输线的矢量磁位

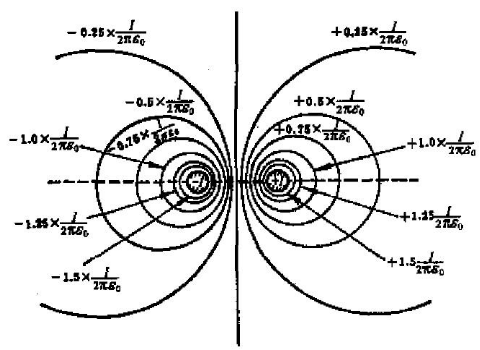


图 3.2.4 例 3.2.2 双导线传输线磁力线分布

习题课-双线传输线

【例3．4，1】设双线传输线导线半径为R，导线间距离D(D>>R)，空间媒质磁导率为 μ_0 。求每单位长度的外自感。

解：设导线电流为I,在两导线所成的平面上的磁感应强度由安培定律可求得

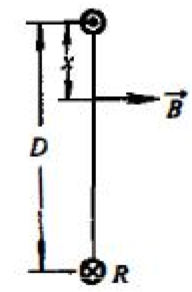


图 3.4.1 例3.4.1 双线传输线自感的计算

$$B=\frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\frac{1}{x}+\frac{1}{D-x}\right)$$

$\vec{B}$的方向与平面相垂直（如图3，4，1)。于是，单位长度上双线传输线交链的外磁链

$$\Psi_e=\int_R^{D-R}\frac{\mu_0 I}{2\pi}\left(\frac{1}{x}+\frac{1}{D-x}\right)dx=\frac{\mu_0 I}{2\pi}\left[\ln\frac{x}{D-x}\right]_R^{D-R}=\frac{\mu_0 I}{\pi}\ln\frac{D-R}{R}\approx\frac{\mu_0 I}{\pi}\ln\frac{D}{R}$$

故双线传输线单位长度的外自感为 $L_e=\dfrac{\Psi_e}{I}=\dfrac{\mu_0}{\pi}\ln\dfrac{D}{R}$

习题课-双线传输线

导线单位长度的内自感为 $L_{i0}=\dfrac{\mu}{8\pi}$

由上式可知，圆形导线的内自感与导线半径无关。
双线传输线如同时考虑其两根导线的内自感，则其单位长度自感为其外自感与内自感之和。即

$$L_0=L_{e0}+L_{i0}=\frac{\mu_0}{\pi}\ln(\frac{D}{R})+2\times\frac{\mu}{8\pi}=\frac{\mu_0}{\pi}\ln\frac{D}{R}+\frac{\mu}{4\pi}$$

$$\left.\begin{array}{r} \text{假定电流密度}\vec{J}\xrightarrow{\text{积分}}\text{电流}I \\ \text{电流密度}\vec{J}\xrightarrow[\vec{B}\text{或}\vec{A}\text{的积分}]{\text{分布型问题}}\vec{B}\xrightarrow{\text{面积分}}\psi \end{array}\right\}\Rightarrow L=\frac{\psi}{I}$$

例题（谢处方）

例3.1.5： 同轴线的内导体半径为a 外导体的内半径为b

内外导体间填充介电常数为ϵ的均匀电介质如图3.1.3所示。

试求同轴线单位长度的电容。

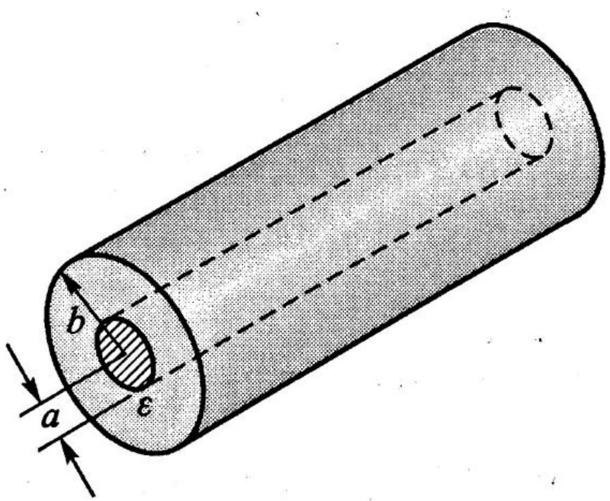


图 3.1.3　同轴线

- 求解系统参数通常和是否有信号无关，但求解过程必然需要信号，因此，假设电荷密度，电量，电流密度，电流等是必要的；
- 电容如何定义的？--电荷密度或电量；
- 电压表示为电荷的函数；
- 这是对称结构—高斯面；
- 分布型问题求解，通常情况应该有对称性；

例题（谢处方）

例3.1.5：

解：设同轴线的内、外导体单位长度带电量分别为 ρ_l 和 $-\rho_l$

应用高斯定理求得内外导体间任意点电场强度为

$$E(\rho)=\vec{e}_\rho \frac{\rho_l}{2\pi\varepsilon\rho}$$

内外导体间的电压为

$$U=\int_a^b E(\rho)\cdot\vec{e}_\rho d\rho=\frac{\rho_l}{2\pi\rho}\int_a^b \frac{1}{\rho}d\rho=\frac{\rho_l}{2\pi\varepsilon}\ln\frac{b}{a}$$

同轴线单位长度的电容为

$$C_1=\frac{\rho_l}{U}=\frac{2\pi\varepsilon}{\ln(b/a)} \qquad F/m$$

例题（谢处方）

例3.2.1：

同轴线的内导体半径为a，外导体的内半径为b，内外导体之间填充一种非理想介质(设其介电常数为ε，电导率为σ)。试计算同轴线单位长度的绝缘电阻。

解：方法之一：用恒定电场的基本关系式求解

假设同轴线的内外导体间加恒定电压 U_0 ，由于填充介质的$\sigma \neq 0$，介质中的漏电流沿径向从内导体流到外导体。另外，内外导体中有轴向电流，导体中存在很小的轴向电场E_z ，因而漏电介质中也存在切向电场，但$E_z \leq E_\rho$ ，故可忽略E_z 。介质中任一点处的漏电流密度为

$$\vec{J} = \vec{e}_\rho \frac{I}{2\pi\rho}$$

式中的I 是通过半径ρ为的单位长度同轴圆柱面的漏电流。电场强度为

$$\vec{E} = \frac{\vec{J}}{\sigma} = \vec{e}_\rho \frac{I}{2\pi\sigma\rho}$$

例题（谢处方）

例3.2.1：

而内外导体间的电压为

$$U_0 = \int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\rho} = \int_a^b \frac{I}{2\pi\sigma\rho} \cdot d\rho = \frac{I}{2\pi\sigma} \ln\frac{b}{a}$$

则得同轴线单位长度得绝缘电阻(漏电阻)为

$$R_1 = \frac{U_0}{I} = \frac{1}{2\pi\sigma} \ln\frac{b}{a} \qquad \Omega/m$$

方法二：用静电比拟法
由例题3.1.5得到同轴线单位长度的电容为

$$C_1 = \frac{2\pi\varepsilon}{\ln(b/a)} \qquad F/m$$

例题（谢处方）

例3.2.1：

因此，同轴线单位长度的漏电导为

$$G_1 = \frac{2\pi\sigma}{\ln(b/a)} \qquad S/m$$

则得绝缘电阻为

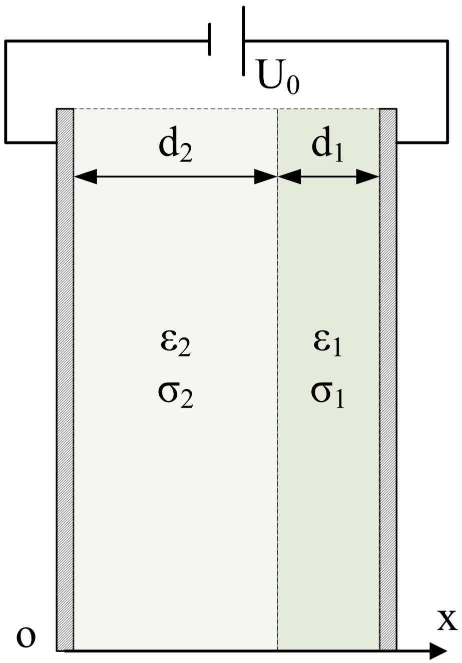
$$R_1 = \frac{1}{G_1} = \frac{1}{2\pi\sigma}\ln\frac{b}{a} \qquad \Omega/m$$

课后范例

- 边值型问题：方程---通解---边界条件---定解；
- 边值型问题肯定不会太难，简单的方程和通解；

例11： 极板面积为S的平行电容器上外加电压U_0，两极板间填充有两种有损耗电介质，其厚度、介电常数和电导率分别为：d_1、d_2、ε_1、ε_2和σ_1、σ_2。求：(1) 介质中的电流和电场分布；(2) 两种电介质上的电荷面密度；(3) 两极板间的电阻。（4）每个介质上的电压；

解：如图，这是个一维问题，媒质1和2中电位方程满足：$\dfrac{d^2\varphi_1}{dx^2}=0,\ \dfrac{d^2\varphi_2}{dx^2}=0$



媒质1和媒质2中的电位通解分别为：

$$\varphi_1(x)=A_1x+A_2;\quad \varphi_2(x)=B_1x+B_2$$

媒质1和媒质2中的电场分别为：

$$\vec{E}_1=-\vec{a}_x\frac{d\varphi_1}{dx}=-\vec{a}_xA_1;\quad \vec{E}_2=-\vec{a}_x\frac{d\varphi_2}{dx}=-\vec{a}_xB_1$$

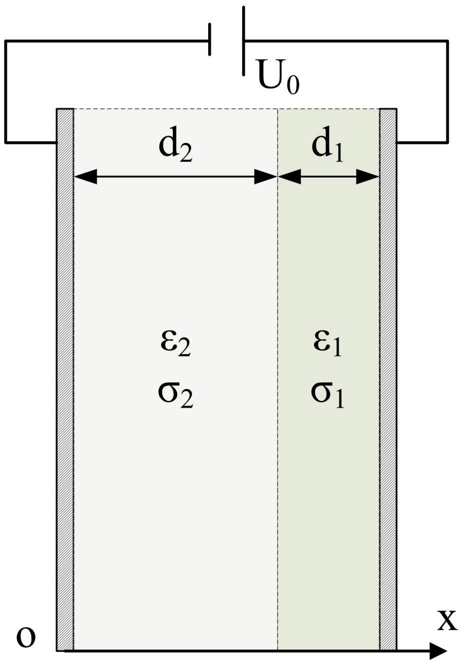
媒质1和媒质2中的电流密度分别为：

$$\vec{J}_1=\sigma_1\vec{E}_1=-\vec{a}_x\sigma_1A_1;\quad \vec{J}_2=\sigma_2\vec{E}_2=-\vec{a}_x\sigma_2B_1$$

课后范例

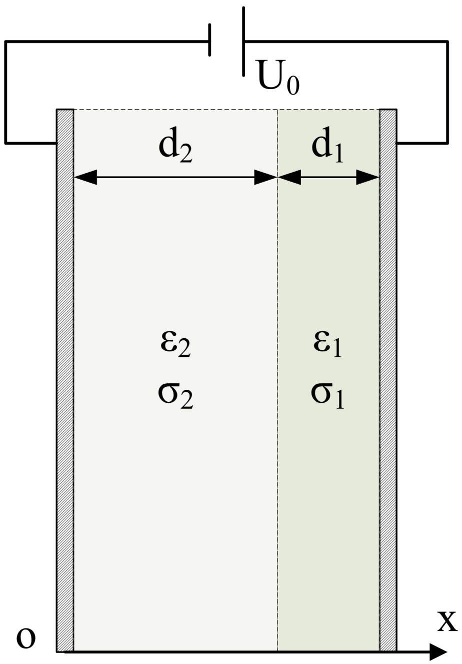
根据边界条件有:

$$\begin{cases} x = d_1 + d_2: \quad \varphi_1\left(x = d_1 + d_2\right) = A_1\left(d_1 + d_2\right) + A_2 = U_0 \\ x = 0: \quad \varphi_2\left(x = 0\right) = B_2 = 0 \\ x = d_2: \quad \varphi_1\left(x = d_2\right) = A_1 d_2 + A_2 = B_1 d_2 + B_2 = \varphi_2\left(x = d_2\right) \\ x = d_2: \quad J_1\left(x = d_2\right) = -\sigma_1 A_1 = -\sigma_2 B_1 = J_2\left(x = d_2\right) \end{cases}$$



$$\Rightarrow \begin{cases} A_1 = U_0 \dfrac{\sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}; \quad A_2 = U_0 \dfrac{\left(\sigma_1 - \sigma_2\right) d_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1} \\ B_1 = U_0 \dfrac{\sigma_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}; \quad B_2 = 0 \end{cases}$$

课后范例



(1) 损耗媒质内的电流和电场分别为:

$$I = J_1 S = J_2 S = \frac{\sigma_1 \sigma_2 U_0 S}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}$$

$$\vec{E}_1 = -\frac{\vec{a}_x U_0 \sigma_2}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}; \quad \vec{E}_2 = -\frac{\vec{a}_x U_0 \sigma_1}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1};$$

(2) 两损耗媒质交界面上的电荷面密度为:

$$\rho_s = D_{1n} - D_{2n} = \frac{U_0 \left(\varepsilon_2 \sigma_1 - \varepsilon_1 \sigma_2 \right)}{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}$$

(3) 极板间电阻R为:

$$R = \frac{U_0}{I} = \frac{\sigma_1 d_2 + \sigma_2 d_1}{\sigma_1 \sigma_2 S}$$

内容-第3章-静磁场

- 第3章 静磁场：磁场，电感的计算
- 静磁场；第三章，3.1-3.6，电感的计算；
- 课件中的范例；
- 应掌握知识与计算：
- 1、恒流磁场的基本方程（微分和积分形式）
- 2、用矢量磁位表示磁感应强度和磁场强度；推导矢量磁位的泊松方程和拉普拉斯方程；库仑规范；矢量磁位的边界条件；矢量磁位的边界条件与磁感应强度的边界条件等效。
- 3、用电流密度表示矢量磁位的积分公式。
- 1、电感存储磁能，电感值与回路或导线是否有电流无关，电感值仅仅与回路的形状、大小、圈数、相对位置和所处媒质的磁导率有关；自感分内自感和外自感，单位长度内自感公式；非磁性导体的内自感通常小，磁性导体的内自感比较大；
- 互感是互易的。
- 2、使用电感和电流表示电感中磁场能量、并会用此方法计算电感。
- 外自感的求解；
- 双线传输线，同轴传输线都是一个回路的电路；

内容-第4章-静态场的边值问题

- 第四章，4.1-4.2，4.3节中的无限大PEC平面的电荷与电流的镜像法；
- 课件中的范例；
- 应掌握知识与计算：
- 1、知道三类边值问题类型与名称，知道三类边值问题具有唯一解。
- 2、镜像法的等效区域（镜像源位于等效区域以外）与成立条件（两种情况的等效区的边界条件一样）；无限大理想导体平面外点电荷、线电荷和线电流的镜像源的位置、大小和符号。

- 1、场量只与一个坐标有关，直角、圆柱（径向和圆周角方向）和球（径向）三种坐标系一维情况下的泊松方程形式及通解，单一均匀媒质或两种均匀媒质。
- 2、细单导体（P38），细平行双导体（习题2.4、2.5、2.15，例题3.2.2、3.4.1、3.4.2、3.4.4）
- 同轴线（例2.2.2、2.4.2、2.5.1、2.8.1、2.9.2、3.3.1、3.4.3、3.5.1，习题2.7、2.12、2.17、3.2、3.4、3.6），最复杂双层媒质；
- 部分同轴线（习题2.16）；扇形（例2.9.1）；平板（例2.4.2、2.6.1，习题2.6、2.10、2.18）；
- 直线与矩形（习题3.5）、圆环（习题3.3）；小球（习题2.9、2.11）

内容-第4章-静态场的边值问题

- 第四章，4.1-4.2，4.3节中的PEC平面的电荷与电流的镜像法；
- 课件中的范例；课后作业4.1，在课件中已有；
- 应掌握知识与计算：

- 掌握对称性问题直接采用高斯定理和安培环路定理求解场的方法；
- 掌握利用电位方程求解的一般方法：
- 建立坐标系
- 写出该坐标系的电位方程：注意对称性，第七章前自变量只有一个
- 写出电位通解、电场、电位移矢量、电流密度
- 写出边界条件
- 求出特解：先利用零电位条件和导数条件
- 求电荷密度、电容、电导

最后提醒

复习建议：按照章节结合课件通读教材+做几个题目来帮助理解；

每一章给出的应掌握知识与计算都需要熟练，课件中课后范例都需要掌握；

基础概念和方程都是会考查的；

考试事项：

简答题-选择题-判断题（覆盖面非常广）-三个计算题

先写公式后带入数值计算，步骤计分，切记！

看清题目后作答；注意区分题目条件和小问条件；

每一问都有分值，所以每一问都作答；

尽量详细作答；不会的问题，也尽可能的回答；

违反考试规定的行为没必要！

客观仔细进行教学评价；

全校通选课：生活环境中的电磁辐射及防护；

电磁场与电磁波课程的延续及关系

课程的延续

- 一门基础课程，会延伸到该领域的方方面面；
- 电波传播（第六章延伸）、微波工程基础（第七章延伸）、天线技术（第八章延伸）、微波器件原理与芯片设计方法、通信电子线路、计算电磁学；

电磁场与电磁波课程的重要性

电磁场与电磁波课程

- 是电子科学的基础部分，是应用部分的源泉；
- 基础部分更加悠久，应用部分内容更加丰富；

考试中发现的问题

审题不清：

- 简答题：积分形式？微分形式？复数形式？瞬时形式？导电媒质？非磁性媒质？
- 选择题：下列错误的是？
- 综合题：画出电场、磁场线，电流分布？

考试中发现的问题

思路不清：

- 综合题：