工程电磁场与波

Engineering Electromagnetics

任课教师：　李玉玲

Email：　liyl@zju.edu.cn

课件下载邮箱：

用户名：**eem_ee@163.com**

密码：**eem135**

学习《工程电磁场与波》需要具备的基础知识

大学物理——电磁学部分

大学数学——微积分、矢量分析和场论、

常微分方程、偏微分方程和特殊函数等；

各类坐标系

电路原理

课程概述

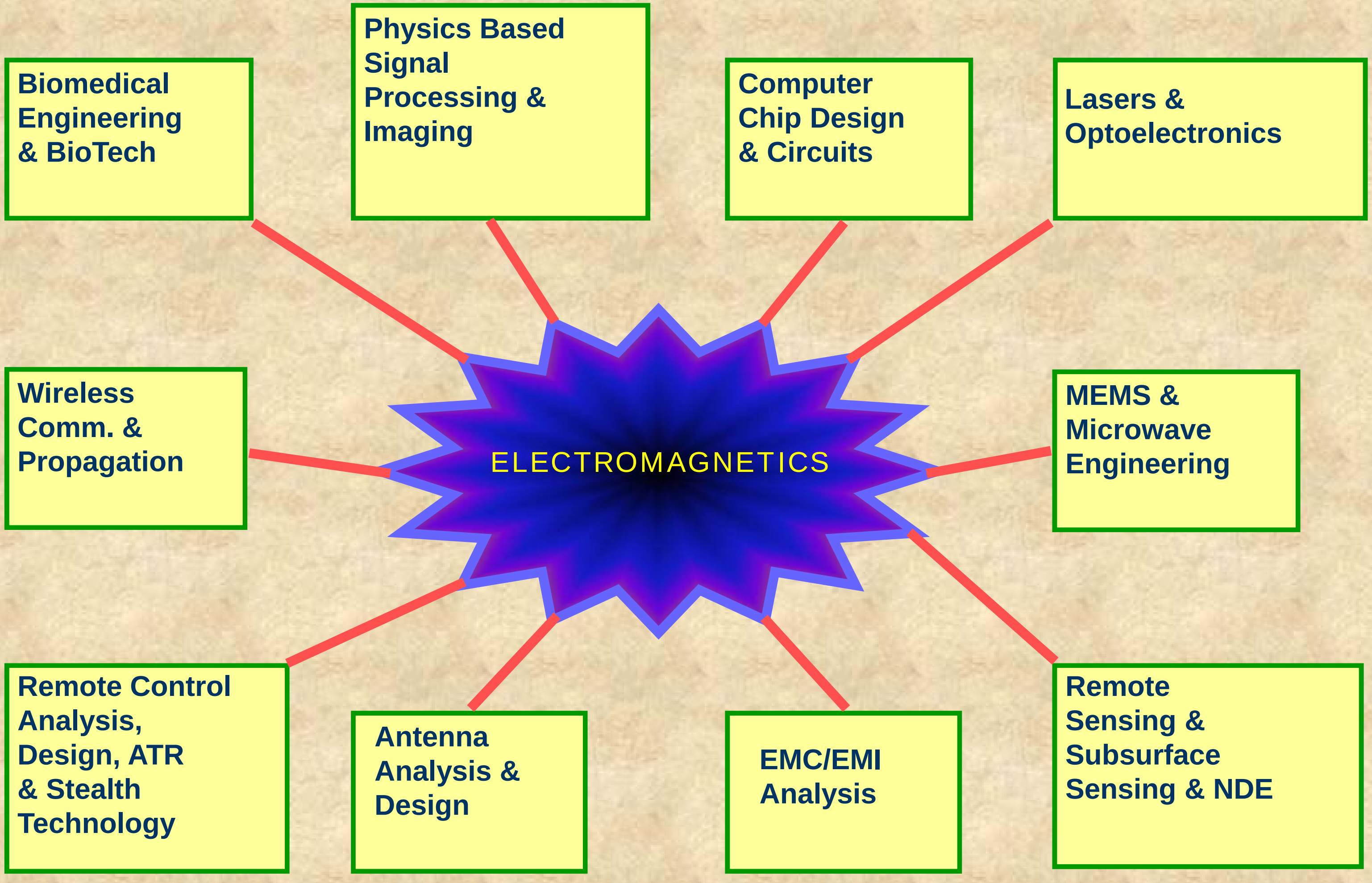
一、电磁场理论及应用

电磁场理论：是在物理电磁学的基础上，进一步研究电磁现象和电磁过程的基本规律和分析计算方法。

电磁场是电工、电子和信息技术学科的理论基础，在军事、医疗、天文等领域也有重要的应用。

电磁场是理解近代科技成果必不可少的知识本源

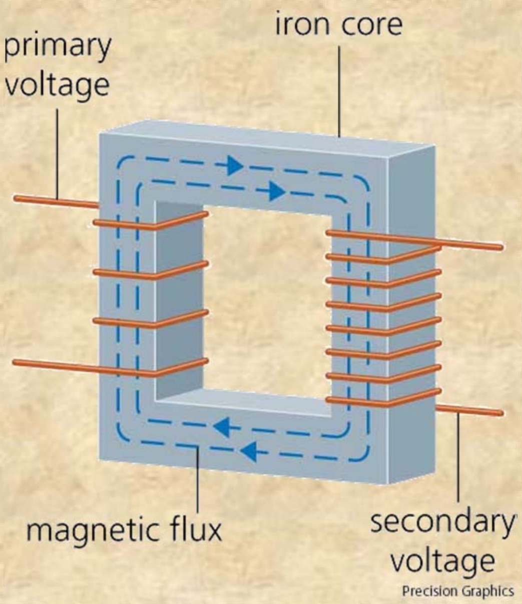
电磁场是理解近代科技成果必不可少的知识本源



MEMS:微电子机械系统（Micro-electromechanical Systems）

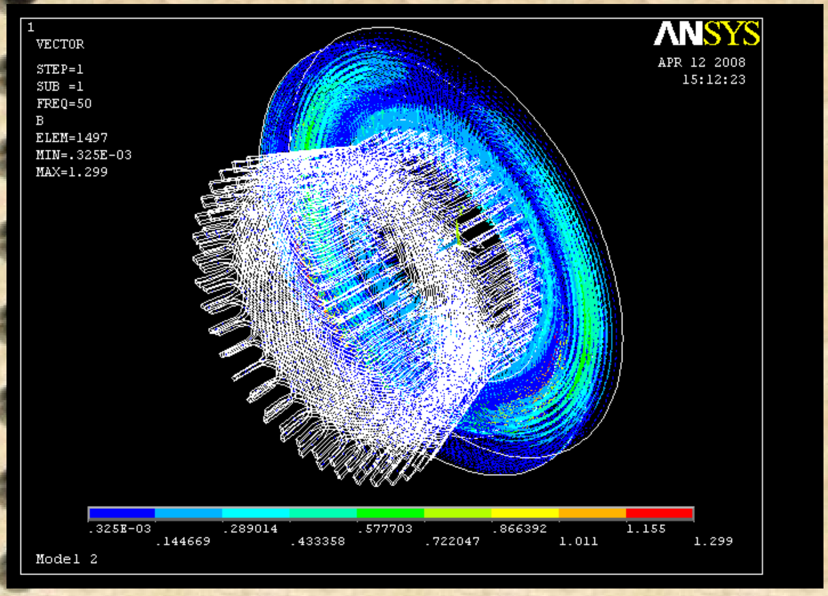
NDE: Non-Destructive Evaluation:无损检测评估,包括射线检测,超声检测,渗透检测,磁粉检测等。

电磁场是理解近代科技成果必不可少的知识本源

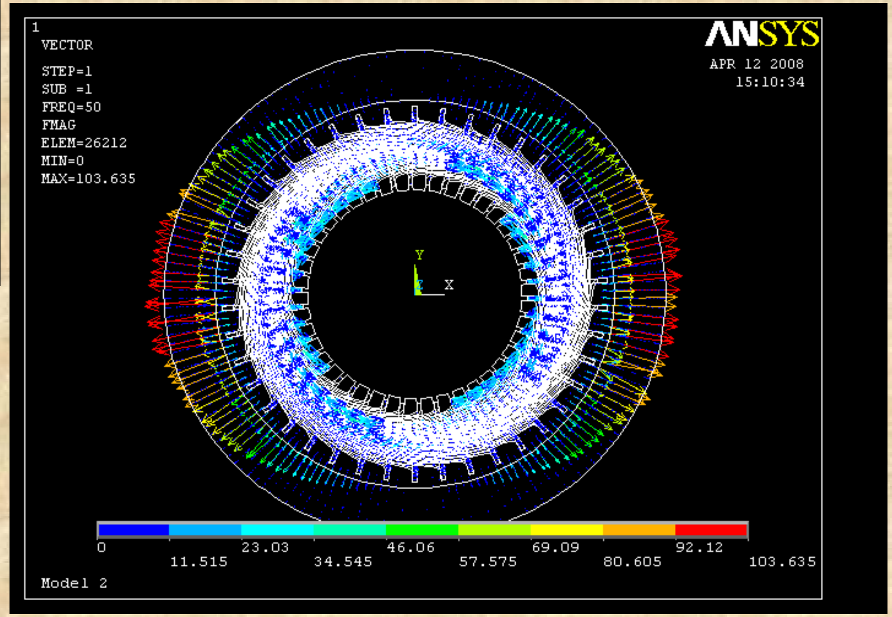


电力系统及其装置的设计、制造（优化）、运行技术

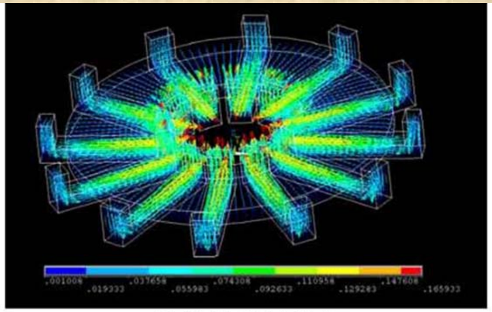
电磁场是理解近代科技成果必不可少的知识本源



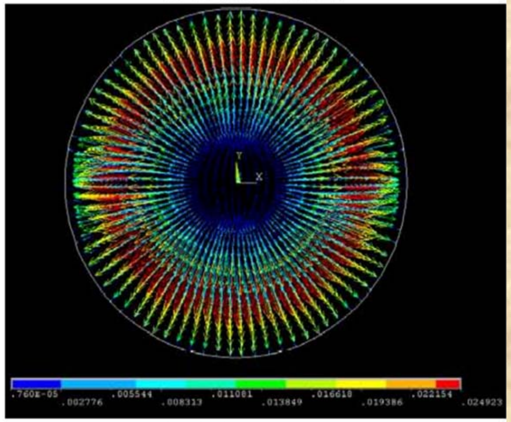
大型汽轮发电机的端部涡流场、温度场和力场的分析和计算



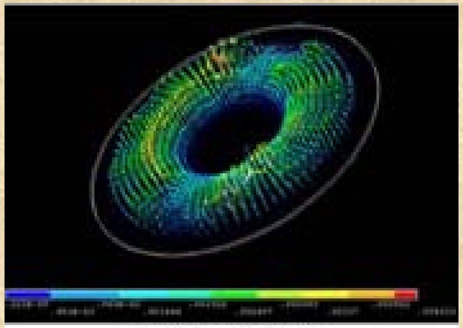
电磁场是理解近代科技成果必不可少的知识本源



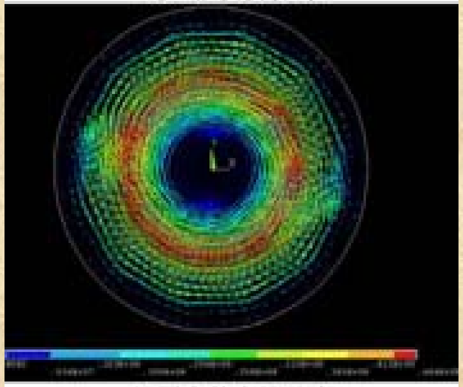
计算的磁场分布



计算的磁场分布



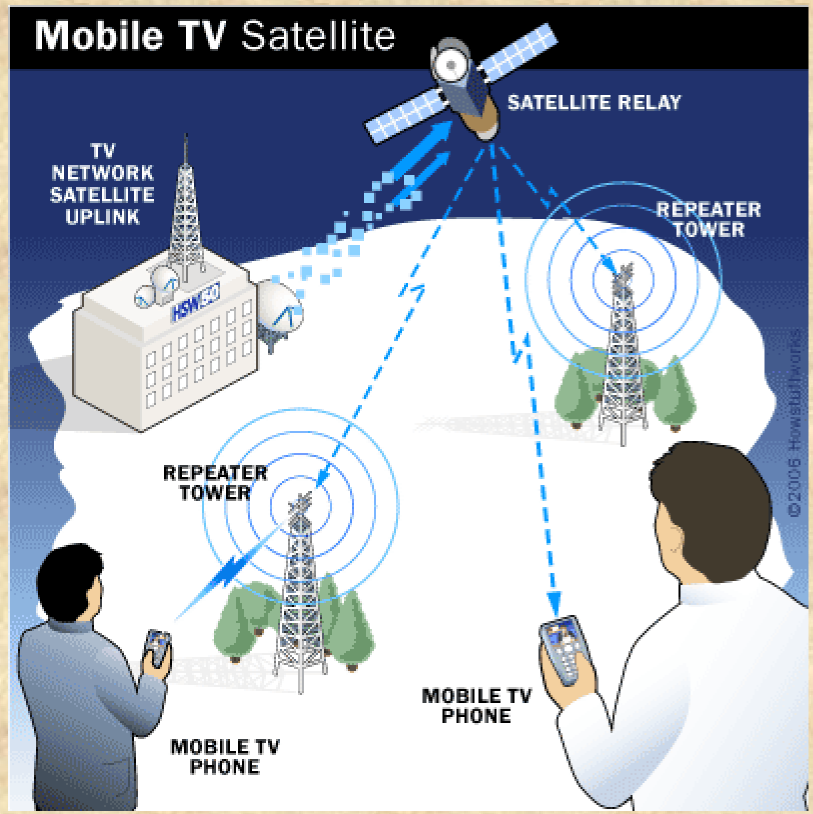
电磁炉受力分布



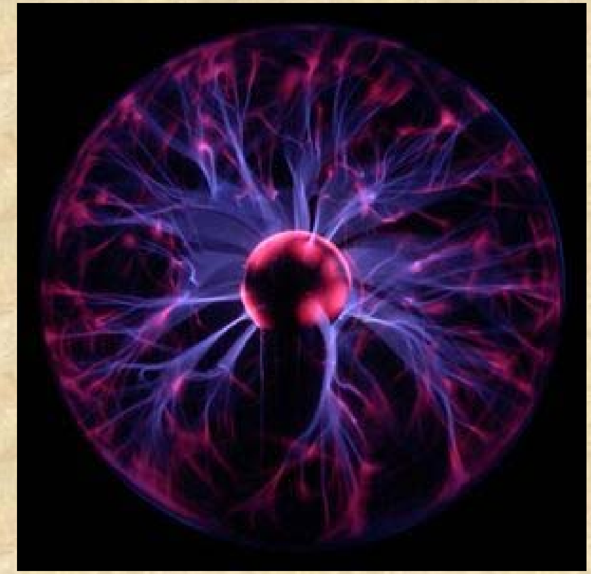
线圈中的电流分布

电磁炉涡流场、温度场分析、计算/设计

电磁场是理解近代科技成果必不可少的知识本源



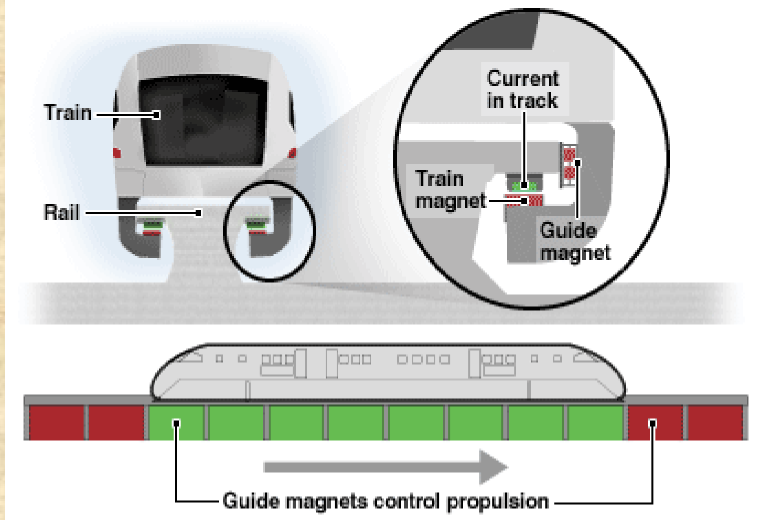
无线通讯

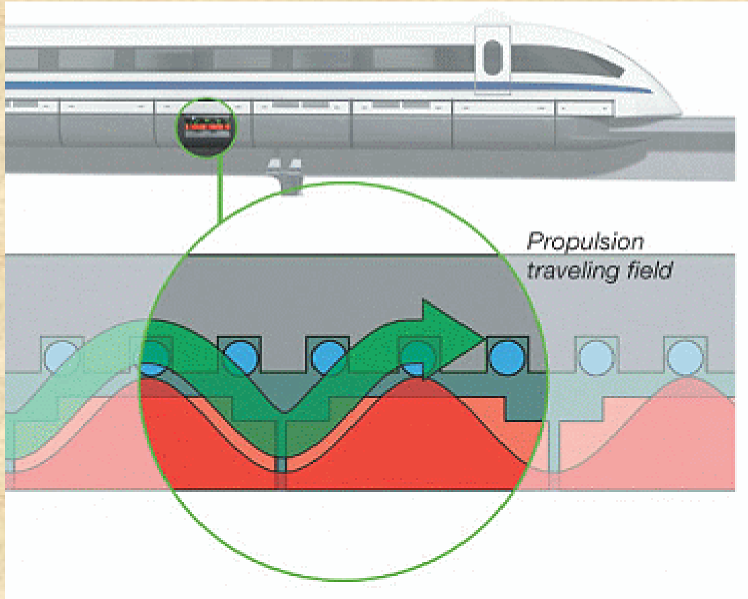


医学成像

新的科学技术成果更离不开电磁理论

磁悬浮



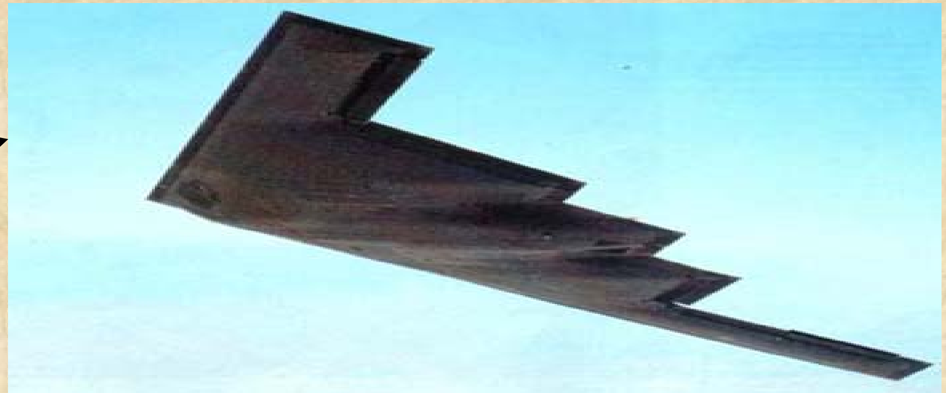


新的科学技术成果更离不开电磁理论

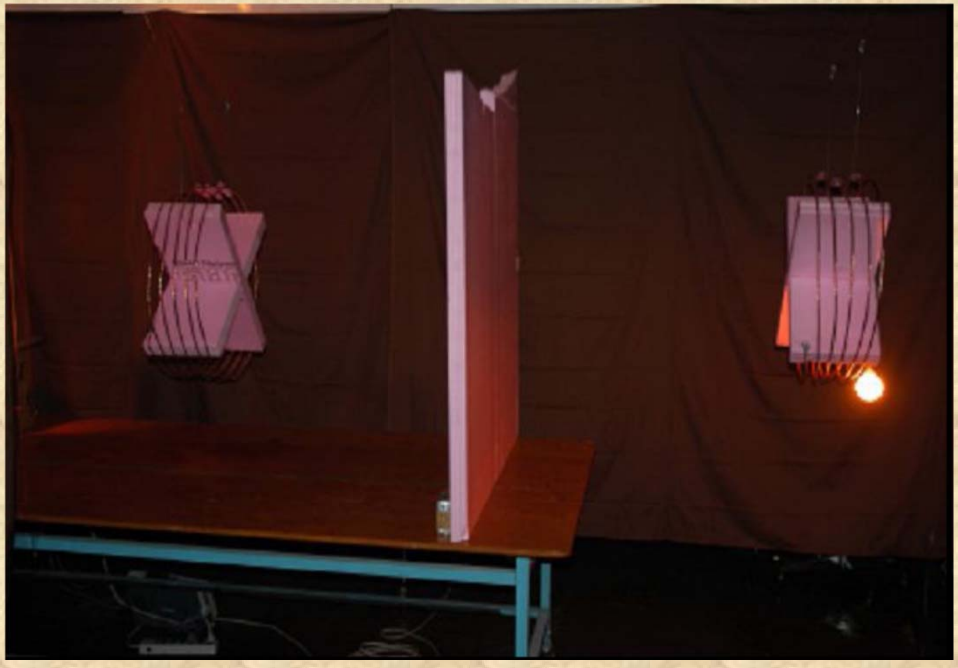
隐形轰炸机 B2

关键技术研究点：

- 特殊结构设计；
- 机身表面 吸附涂层设计。



新的科学技术成果更离不开电磁理论



无线电能传输

60W/2m

http://www.witricity.com/

二、电磁场与电路原理课程的区别与联系

二者都是研究电磁现象的基本规律及其分析计算方法。

电路原理研究的是“大尺度”、某一“对象”整体的变化规律；

电磁场研究的主要是点的时、空变化规律；如**E(x,y,z,t)**

电路方法把电磁现象和过程约束在一维“电流通路中”，不能精确揭示/解释典型的电磁现象，如电磁波，无线能量传输等

目前已经发展到纳米电磁学"**Nanomagnetics** "

需要从更微观的角度研究电磁现象

二、电磁场与电路原理课程的区别与联系

电路分析问题：

实际的电工、电子技术装置 $\xrightarrow{\text{理想化假设}}$ 电路模型(一种具体的物理模型)

电路模型：

- 理想电路元件(R、L、C)及其组合
- 理想电压、电流源(e, i)

$\xrightarrow[\text{以 } u, i \text{ 为基本物理量}]{\text{分析问题}}$ 给定激励(e, i)求响应(u, i)

电磁场分析问题：

实际电磁装置中的电磁现象和过程 $\xrightarrow{\text{理想化假设}}$ 电磁场的物理模型

电磁场的物理模型：

- 连续媒质的场空间(ϵ、μ、γ 及其相应的几何结构)
- 理想化的场源(q, i)

$\xrightarrow[\text{以 } E\text{、}B\text{、}D\text{、}H \text{ 为基本物理量(场量)}]{\text{分析问题}}$ 给定源量(q, i)求场分布(E、B、D、H)

三、学习电磁场的方法

- 深入理解、建立正确的物理概念；
- 掌握常用的各种分析、计算方法；
- 认真听讲和思考，预习、复习，认真作业；
- 勤于总结归纳。

课程教材：

工程电磁场原理（第二版）， 倪光正 主编
高等教育出版社

参考教材：

1.《工程电磁场导论》冯慈璋、马西奎,高等教育出版社

2. Kenneth R. Demarest—Engineering Electromagnetics

3. William H. Hayt Jr.—Engineering Electromagnetics

四、期末考核

期末考试（**70%**）

平时（出席+作业）**+**实验 **= (30%)**

其中： 平时**20**分，实验 **10**分

每周交一次作业，时间为周五上课时间。

电磁场课程主要内容

电磁场的数学物理基础

静态电磁场I：静电场

静态电磁场II：恒定电流的电场和磁场

准静态电磁场

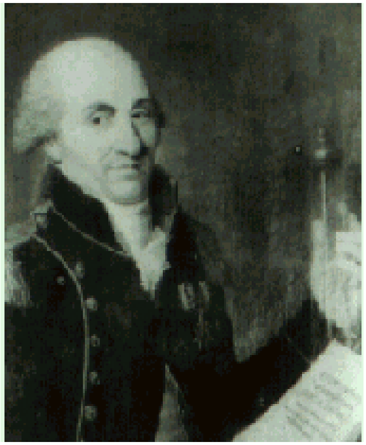
动态电磁场与电磁波

电磁理论的发展过程

电磁学的发展过程包括了电场、磁场的性质以及电、磁场相互关系的建立：

- 1729年，格雷研究了电的传导现象，发现了导体与绝缘体的区别，同时也发现了静电感应现象。
- 1785年，法国物理学家库仑用扭秤测量了电荷之间的作用力——库仑定律。

$$\vec{F} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{e}_r$$



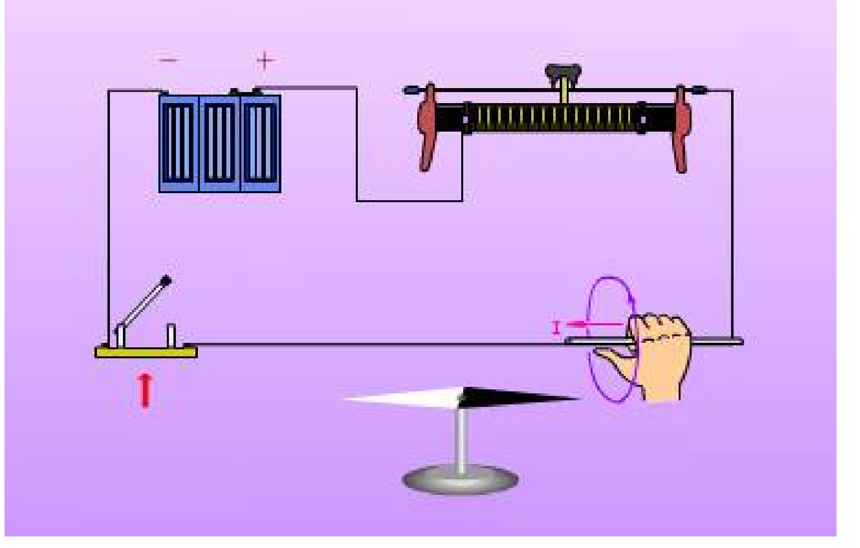
库仑

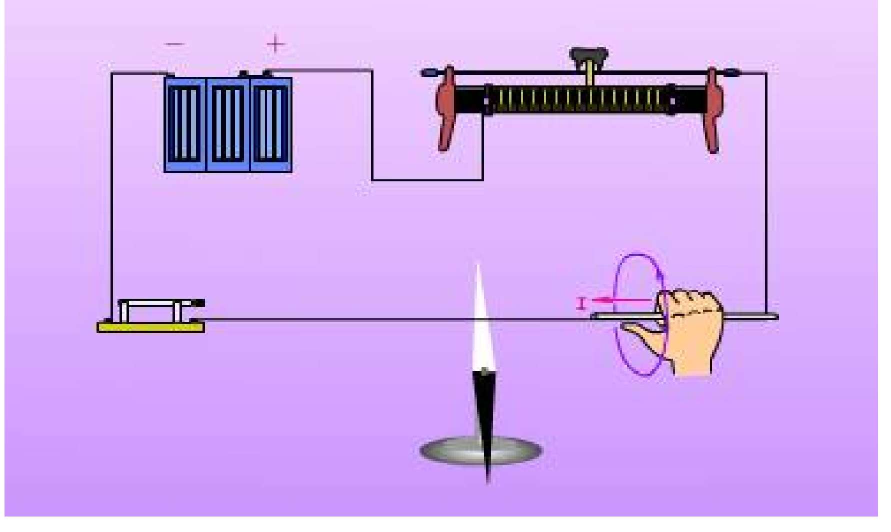
从牛顿的万有引力规律得到启发，用类比的方法得到了电荷相互作用力与距离的平反成反比的规律。

鲁宾逊、卡文迪许也得到过结论，但未发表。

Hans Christian Oersted
(1770–1851)

- **1820**年，丹麦物理学家奥斯特发现电流磁效应。通有电流的导线，可以在其周围产生磁场。

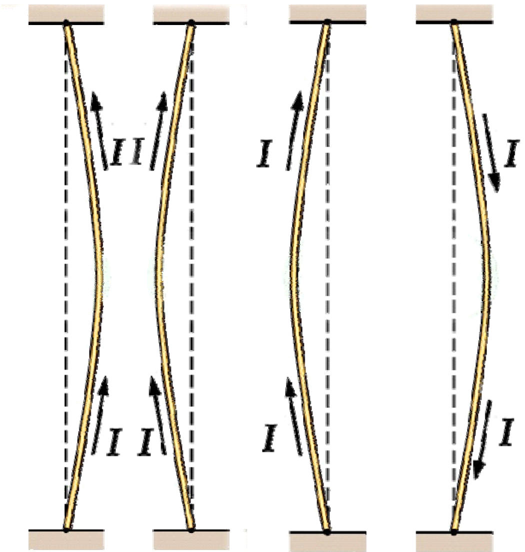




当电流通过导线时，引起导线近旁的磁针偏转。

- 1820年12月，法国物理学家安培确定载流导线在磁场中受磁场力作用的安培定律

安培(Ampére，1775—1836)是法国物理学家、数学家



载流直导线相互作用

- 法国科学家毕奥和萨伐尔通过实验得到了电流产生的磁场计算公式。

- **1822**年，安培载流导线与其产生的磁场之间的关系——安培环路定理

$$\oint_L \vec{H} \cdot d\vec{l} = I = \int_S \vec{J}_c \cdot d\vec{s}$$

- **1835**年，德国物理学家高斯定理是电磁学的重要定理。

$$\oint_S \vec{\boldsymbol{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\boldsymbol{S}} = \frac{q}{\varepsilon}$$

➢ **1831**年，英国物理学家法拉第提出电磁感应定律，并且提出了力线和场的概念（确定感应电流方向的楞次定律）.

Michael Faraday (1791–1867)

$$e = -\frac{\mathrm{d}\psi}{\mathrm{d}t}$$

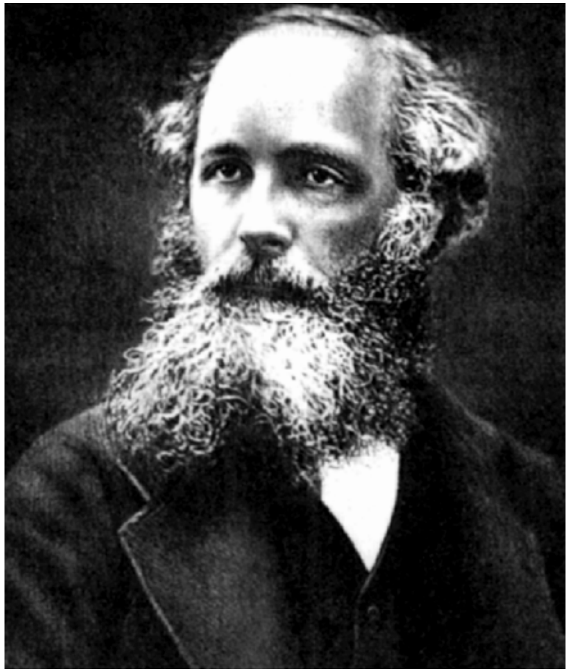
法拉第电磁感应定律的重要意义：

一方面，依据电磁感应的原理，人们制造出了发电机，电能的大规模生产和远距离输送成为可能；

另一方面，电磁感应现象在电工技术、电子技术以及电磁测量等方面都有广泛的应用。

人类社会从此迈进了电气化时代。

- **1865**年，英国物理学家麦克斯韦提出“位移电流”和“涡旋电场”假说——麦克斯韦方程组。预言电磁波的存在



麦克斯韦

在**1999**年，英国广播公司（**BBC**）评选出的**1000**年来最伟大的**10**位思想家中麦克斯韦与马克思、爱因斯坦、牛顿等人一起榜上有名，他排名第九。后由英国杂志《物理世界》在**100**位著名物理学家中选出的**10**位最伟大者中，麦克斯韦紧跟爱因斯坦和牛顿排名第三。

“法拉第和麦克斯韦在电磁场方面的工作引起一场最伟大的革命”

——爱因斯坦

“一个民族要想站在科学的高峰，就一刻也不能没有理论思维。”

——恩格斯

麦克斯韦方程组

$$\oint_l \vec{H} \bullet d\vec{l} = \int_S \vec{J}_c \bullet d\vec{s} + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \bullet d\vec{s} + \int_S \rho\vec{v} \bullet d\vec{s}$$

$$\nabla \times \vec{H} = \left.\begin{matrix} \vec{J}_c \\ \vec{J}_V \end{matrix}\right\} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

$$\oint_l \vec{E} \bullet d\vec{l} = -\int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \bullet d\vec{s}$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

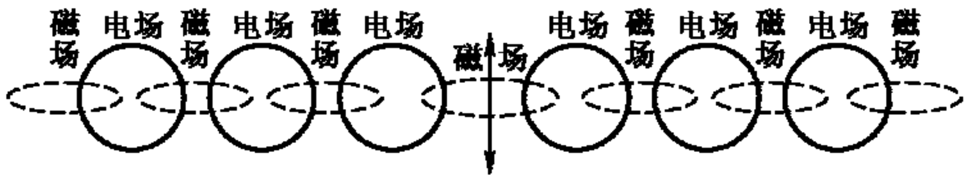
$$\oint_S \vec{B} \bullet d\vec{s} = 0$$

$$\nabla \bullet \vec{B} = 0$$

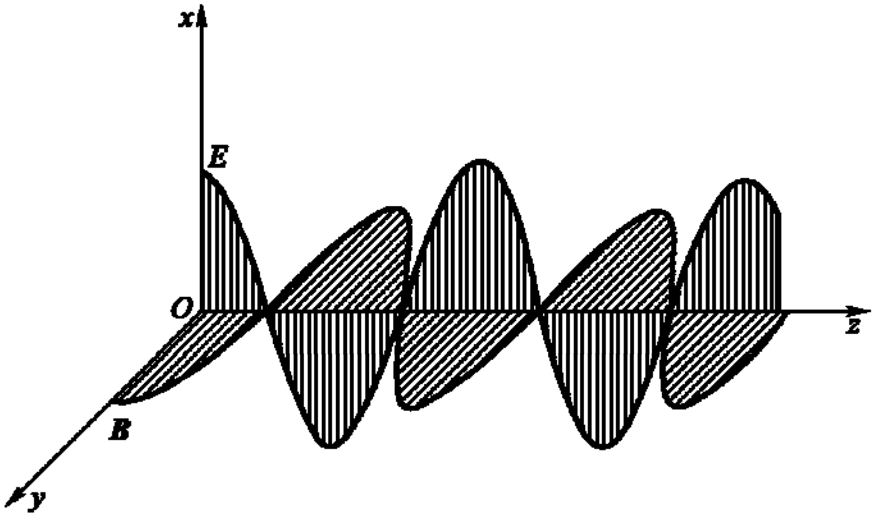
$$\oint_S \vec{D} \bullet d\vec{s} = \sum q = \int_V \rho dv$$

$$\nabla \bullet \vec{D} = \rho$$

由麦克斯韦方程组出发，根据交变的电场（或磁场）可在周围产生交变磁场（或电场），预言了电磁波。 他认为这种交变电磁场可不断由振源向远处传播开来，电磁振荡在空间的传播就形成了电磁波。



(a) 电磁波的形成和传播



(b) 沿 z 方向传播的简谐平面电磁波，在 x 和 y 方向振动的 y 电场和磁场是同相的

- **1886**年，德国物理学家赫兹证明了电磁波的存在并以光速传播。并证明了电磁波有类似光的特性（反射、折射、衍射、偏振等）。从此麦克斯韦方程组才被世人公认。

第1章　电磁场的数学物理基础

1.1 电磁场的基本物理量

一、电磁场的源量与场量（激励，响应）

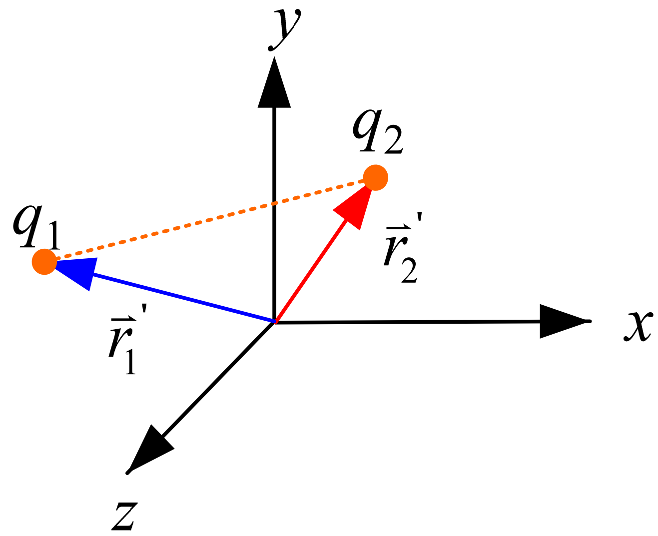
源量： 电荷、电流

场量： 电场强度$\boldsymbol{E}$、磁感应强度$\boldsymbol{B}$、媒质的电磁性能参数

源量—— 静态电荷的4种分布形式

■ 点电荷

点电荷 $q(\vec{r}')$ $\vec{r}'$ ——源点的位矢量



■ 电荷体密度

$$\rho(\vec{r}') = \lim_{\Delta V' \to 0} \frac{\Delta q(\vec{r}')}{\Delta V'} = \frac{\mathrm{d}q(\vec{r}')}{\mathrm{d}V'} \quad \mathrm{C/m^3}$$

■ 电荷面密度

$$\sigma(\vec{r}') = \lim_{\Delta S' \to 0} \frac{\Delta q(\vec{r}')}{\Delta S'} = \frac{\mathrm{d}q(\vec{r}')}{\mathrm{d}S'} \quad \mathrm{C/m^2}$$

■ 电荷线密度

$$\tau(\vec{r}') = \lim_{\Delta l' \to 0} \frac{\Delta q(\vec{r}')}{\Delta l'} = \frac{\mathrm{d}q(\vec{r}')}{\mathrm{d}l'} \quad \mathrm{C/m}$$

元电荷：$dq = \rho dV = \sigma dS = \tau dl$

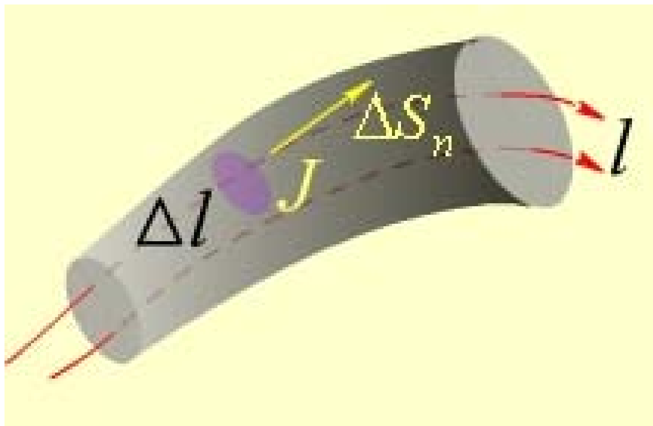
源量——电流和电流密度

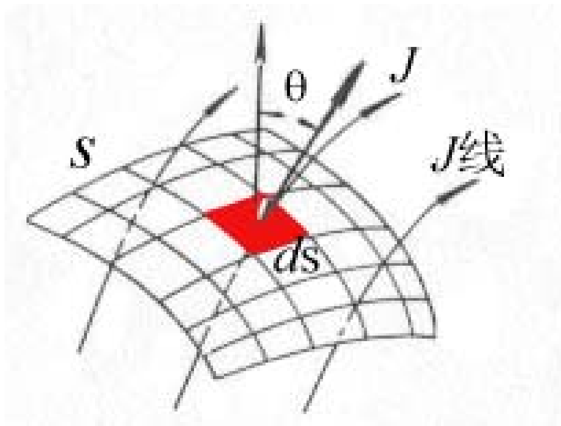
电流 $i = \dfrac{\mathrm{d}q}{\mathrm{d}t}$ A=C/s

1. 体电流密度 $\vec{J}$ (电流密度)

$$\vec{J} = \lim_{\Delta S_n \to 0} \frac{\Delta i}{\Delta S_n} \vec{\mathrm{e}}_{\mathrm{n}} = \frac{di}{dS_n} \vec{\mathrm{e}}_{\mathrm{n}} \qquad (\mathrm{A/m^2})$$

电流 $I = \int_S \vec{J} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$





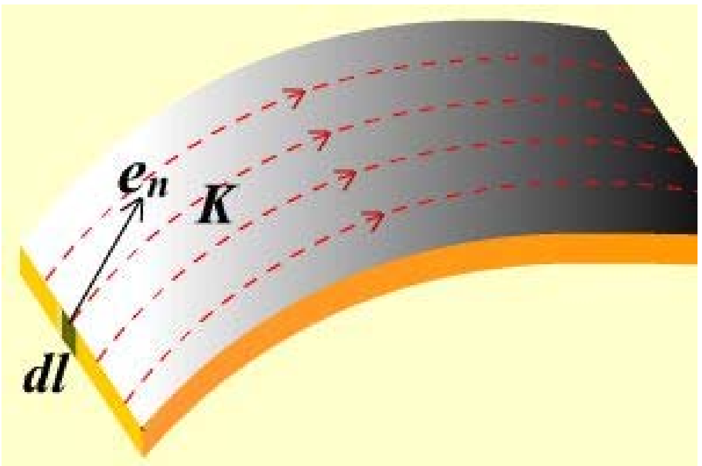
电流的计算

2．面电流密度 $\vec{K}$

$$\vec{K} = \lim_{\Delta l \to 0} \frac{\Delta I}{\Delta l} \vec{e}_n = \frac{dI}{dl} \vec{e}_n \qquad \text{(A/m)}$$

电流 $$I = \int_l \vec{K} \cdot \mathrm{d}\vec{l}$$

$\boldsymbol{e}_{\mathrm{n}}$ 与通过 dl曲面相切的单位矢量。



3. 元电流的概念

当按体电荷ρ 分布的电荷以速度*v* 匀速运动形成的电流：

体电流密度： $\vec{J} = \rho\vec{v}$ $(\mathrm{A/m^2})$

当按面电荷σ分布的电荷以速度*v* 匀速运动形成的电流：

面电流密度： $\vec{K} = \sigma\vec{v}$ $(\mathrm{A/m})$

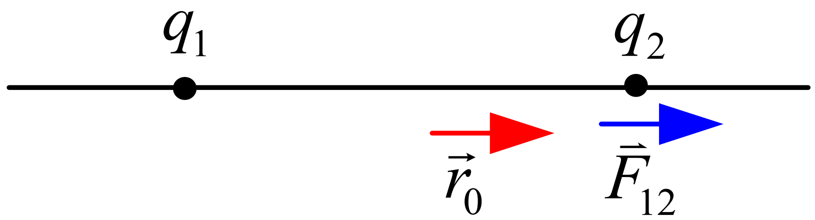
线电荷τ 分布的电荷以速度*v* 匀速运动形成的电流：

线电流： $I = \tau v$ (A)

元电流： $Id\vec{l} = \vec{K}dS = \vec{J}dV = dq\vec{v}$ $(\mathrm{A \times m})$

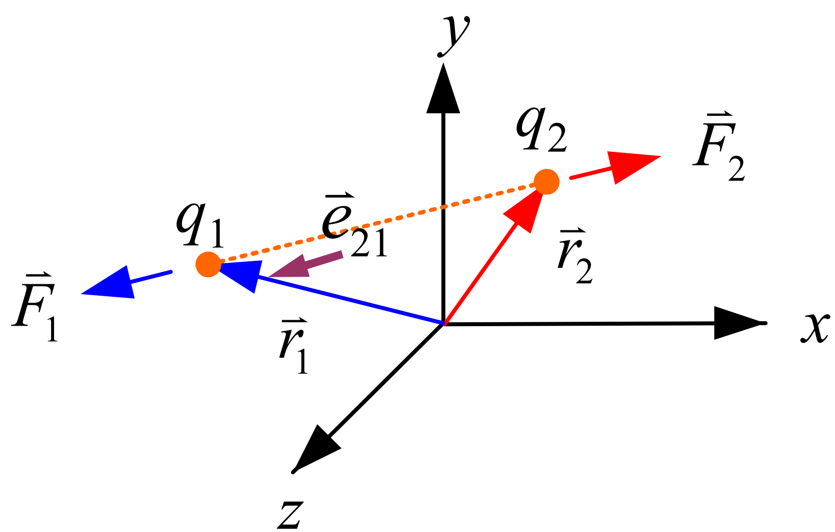
场量——电场强度 E

- 库仑定律
  - 真空中两个点电荷q_1和q_2。则q_1作用于q_2 上的电场力为



$$\vec{F}_{12} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q_1 q_2}{r^2}\vec{r}_0$$

$$\vec{F}_1 = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0}\frac{1}{(\vec{r}_1 - \vec{r}_2)^2}\vec{e}_{21}$$



同号相斥，异号相吸

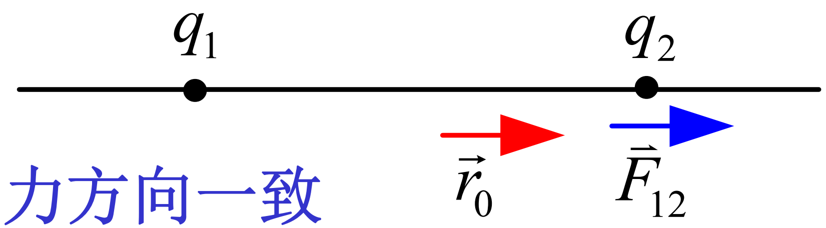
场量——电场强度 E

■ 定义

当电荷q_2足够小，不至于影响被研究的电场，则

$$\vec{E}(\vec{r}) = \lim_{q_2 \to 0} \frac{\vec{F}_{12}(\vec{r})}{q_2} \quad \mathrm{N/C} \quad \mathrm{V/m}$$

注意：



- 方向：与该点正电荷受力方向一致
- 大小等于单位电荷在该点受到的电场力
- 单位：**N/C（V/m）**

已知某点电场强度***E***，元电荷***dq***受力***df*** 为

$$d\vec{f} = dq\vec{E}$$

交变的电流空间内存在电场→ $\vec{E}(\vec{r}, t)$

场量——磁感应强度（磁通密度B）

■ 定义

由运动电荷（或电流）在磁场中受到磁场的作用力而定义的基本场矢量— 磁感应强度

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \longrightarrow \mathrm{d}\vec{F} = \mathrm{d}q\left(\vec{v} \times \vec{B}\right)$$

洛仑兹力

$$B = \frac{\mathrm{d}F_{\max}}{\mathrm{d}qv} \quad \mathrm{T,\ Wb/m}$$

当**B**的方向与运动电荷速度**v**方向相互垂直时，**B**的数量关系。

安培定律

$$\mathrm{d}\vec{F} = I\left(\mathrm{d}\vec{l} \times \vec{B}\right) \longrightarrow B = \frac{\left(\mathrm{d}F\right)_{\max}}{I\mathrm{d}l} \quad \mathrm{T,\ \ Wb/m}$$

载流导体在磁场中受力来定义磁场。

场量——引出量

- 电位移矢量

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \qquad \mathrm{C/m^2}$$

- 磁场强度

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \qquad \mathrm{A/m}$$

二、媒质的电磁性能参数

反映媒质在电场作用下的导电性能——电导率 γ **(1/Ω·m=S/m)**

反映媒质在磁场作用下的磁化性能——磁导率 μ **(H/m)**

反映媒质在电场作用下的极化性能——介电常数 ε **(F/m)**

γ —— R $\quad\quad$ μ —— L $\quad\quad$ ε —— C

真空中，

$$\varepsilon_0 = 8.854\times10^{-12} \quad \text{F/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi\times10^{-7} \quad \text{H/m}$$

$$c = 3\times10^{8} \quad \text{m/s}$$ 电磁波传播速度等于光速

1.2 矢量分析

- 矢量代数复习
- 三度
  - 标量场的梯度
  - 矢量场的散度
  - 矢量场的旋度

1.2.1 矢量代数

1.标量与矢量

标量：只有大小，没有方向的物理量（温度，高度等）

矢量：既有大小，又有方向的物理量（力，磁场强度）

2. 矢量场与标量场

场是一个标量或一个矢量的位置函数，即每一时刻每个位置该物理量都有一个确定的值，则称在该空间中确定了该物理量的场。

例如，在直角坐标下：

$$\varphi\ (x,y,z)=\frac{5}{4\pi[(x-1)^2+(y+2)^2+z^2]}$$

标量场

物理量为标量

如温度场、电位场、高度场等；

$$\vec{A}(x,y,z)=2xy^2\vec{e}_x+x^2z\vec{e}_y+xyz\vec{e}_z$$

矢量场

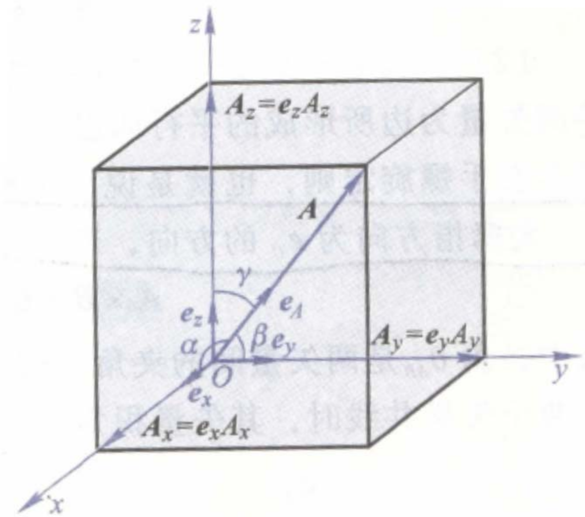
物理量为矢量

如流速场、电场、涡流场等。

3. 矢量的表示方式

矢量可表示为：

$$\vec{A}=\left|\vec{A}\right|\vec{e}_A=A_x\vec{e}_x+A_y\vec{e}_y+A_z\vec{e}_z$$



其中$\left|\vec{A}\right|$ 为其模值，表征矢量的大小；

$$\left|\vec{A}\right|=\sqrt{A_x^2+A_y^2+A_z^2}$$

$\vec{e}_A$ 为其单位矢量，表征矢量的方向；

$$\vec{e}_A=\frac{\vec{A}}{\left|\vec{A}\right|}=\vec{e}_x\frac{A_x}{\left|\vec{A}\right|}+\vec{e}_y\frac{A_y}{\left|\vec{A}\right|}+\vec{e}_z\frac{A_z}{\left|\vec{A}\right|}=\vec{e}_x\cos\alpha+\vec{e}_y\cos\beta+\vec{e}_z\cos\gamma$$

注：矢量书写时，印刷体为场量符号加粗，如 **D** 。教材上符号即为印刷体。手写矢量 $\vec{D}$

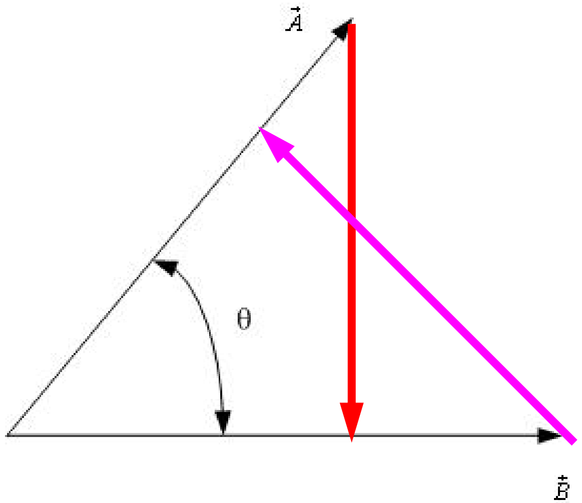
4. 矢量的运算

$$\vec{A}=\vec{e}_x A_x+\vec{e}_y A_y+\vec{e}_z A_z \qquad \vec{B}=\vec{e}_x B_x+\vec{e}_y B_y+\vec{e}_z B_z$$

则：

$$\vec{A}\pm\vec{B}=\vec{e}_x(A_x\pm B_x)+\vec{e}_y(A_y\pm B_y)+\vec{e}_z(A_z\pm B_z)$$

标量积(点乘) $\vec{A}\cdot\vec{B}=\left|\vec{A}\right|\left|\vec{B}\right|\cos\theta_{AB}=A_xB_x+A_yB_y+A_zB_z$



4. 矢量的运算

$$\vec{A}=\vec{e}_x A_x+\vec{e}_y A_y+\vec{e}_z A_z \qquad \vec{B}=\vec{e}_x B_x+\vec{e}_y B_y+\vec{e}_z B_z$$

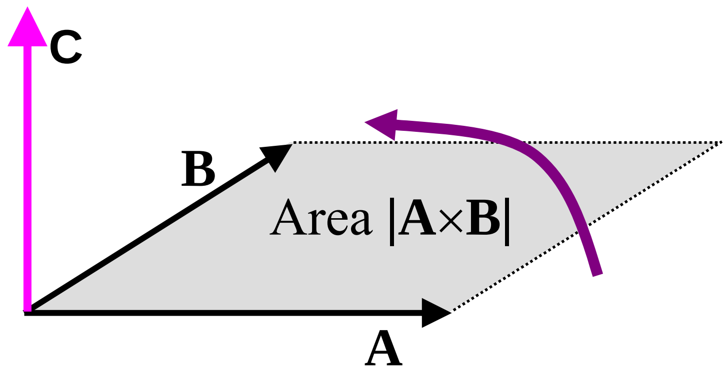
则：

$$\vec{A}\times\vec{B}=\begin{vmatrix}\vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z\\ A_x & A_y & A_z\\ B_x & B_y & B_z\end{vmatrix}$$

$$=\vec{e}_x(A_yB_z-A_zB_y)+\vec{e}_y(A_zB_x-A_xB_z)+\vec{e}_z(A_xB_y-A_yB_x)$$

叉乘

$$\vec{A}\times\vec{B}=\vec{C}=(AB\sin\theta_{AB})\vec{e}_C$$



右手螺旋定则

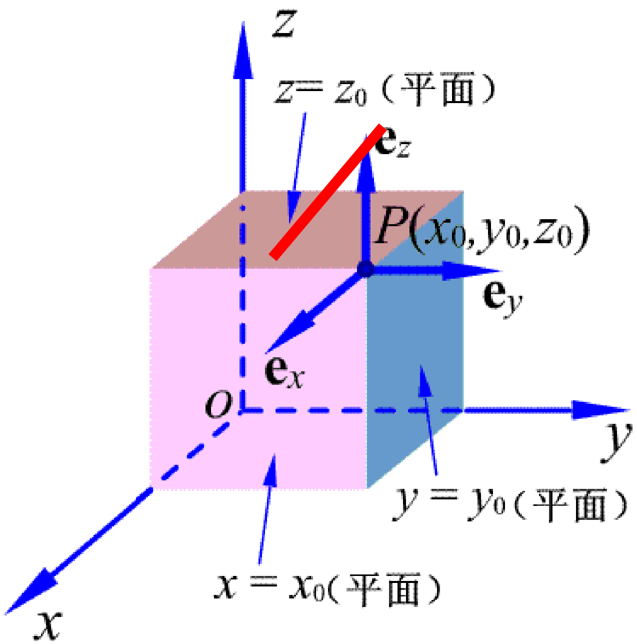
5、常用坐标系（附录一）

直角坐标系

基本变量： $x, \quad y, \quad z$

单位矢量： $\vec{e}_x, \quad \vec{e}_y, \quad \vec{e}_z$

位置矢量： $\vec{r} = \vec{e}_x x + \vec{e}_y y + \vec{e}_z z$



$dV = dxdydz \qquad d\vec{r} = dx\,\vec{e}_x + dy\vec{e}_y + dz\vec{e}_z$

$d\vec{S} = dydz\vec{e}_x + dxdz\vec{e}_y + dxdy\vec{e}_z$

圆柱坐标系

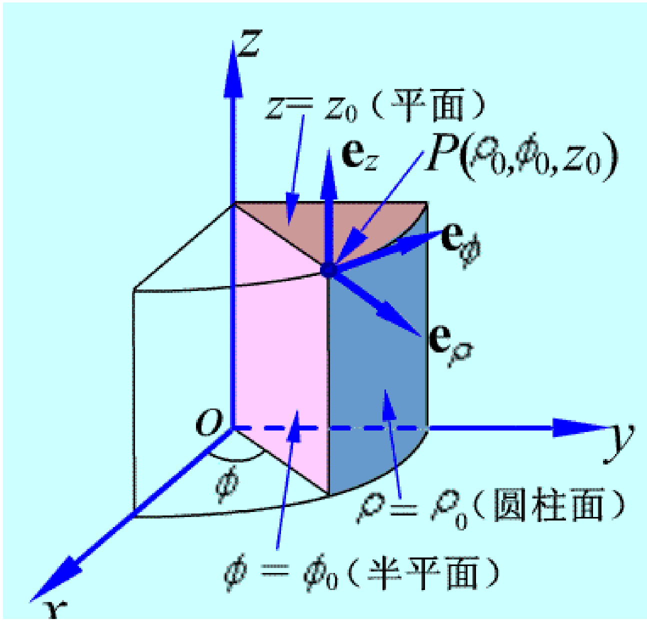
基本变量： ρ, φ, z

单位矢量： $\vec{e}_\rho$, $\vec{e}_\varphi$, $\vec{e}_z$

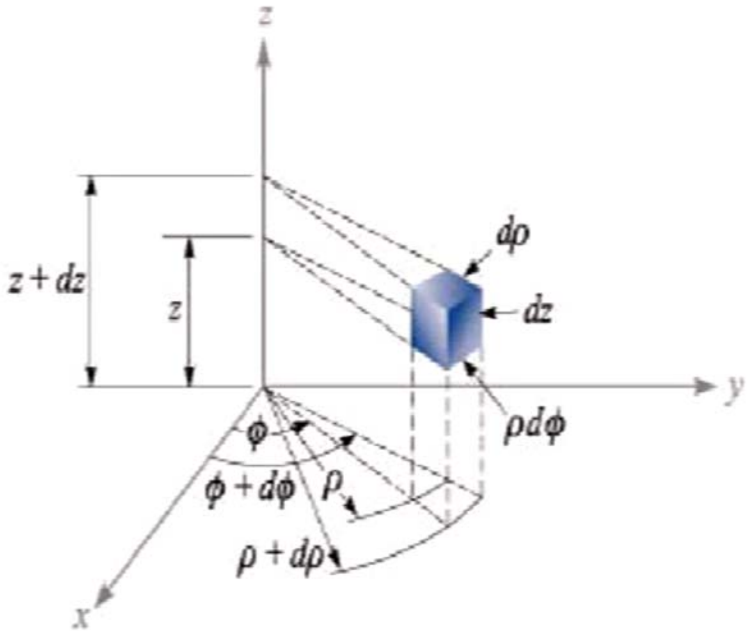
位置矢量： $\vec{r} = \vec{e}_\rho \rho + \vec{e}_z z$

$dV = \rho d\rho d\varphi dz$ $\qquad$ $d\vec{l} = dr\,\vec{e}_r + r\,d\varphi\vec{e}_\varphi + dz\vec{e}_z$

$$d\vec{S} = \rho d\varphi dz \vec{e}_\rho + d\rho dz \vec{e}_\varphi + \rho d\rho d\varphi \vec{e}_z$$



圆柱坐标线元表示法



球面坐标系

基本变量： $r,\ \theta,\ \varphi$

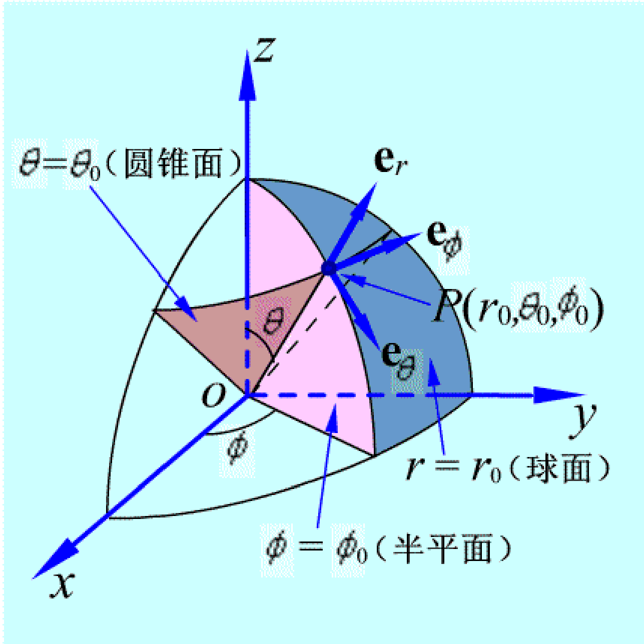
单位矢量： $\vec{e}_r,\ \vec{e}_\theta,\ \vec{e}_\varphi$

位置矢量： $\vec{r}=\vec{e}_r r_0$

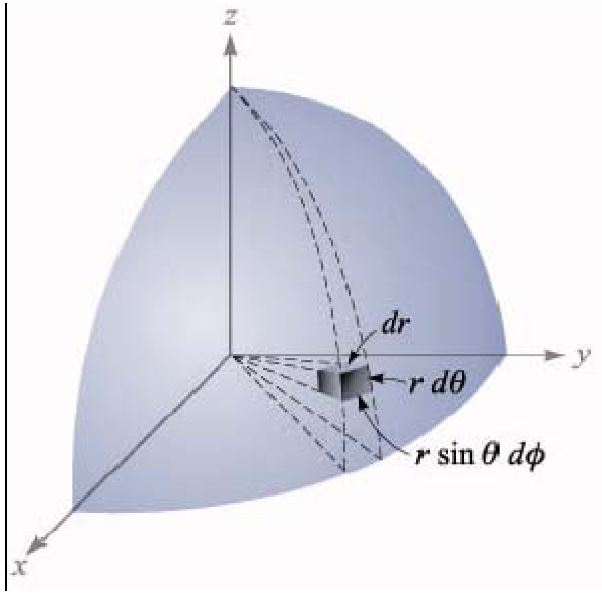
$$d\vec{l}=dr\,\vec{e}_r+r\,d\theta\,\vec{e}_\theta+r\sin\theta\,d\varphi\,\vec{e}_\varphi$$

$$dV=r^2\sin\theta\,dr d\theta\,d\varphi$$

$$d\vec{S}=r^2\sin\theta\,d\theta\,d\varphi\vec{e}_r+r\sin\theta\,dr\,d\varphi\vec{e}_\theta+r\,dr\,d\theta\vec{e}_\varphi$$



球坐标线元表示法



坐标变换

- 圆柱坐标系与直角坐标系间单位矢量变换关系

$$\vec{e}_r = \vec{e}_x \cos\varphi + \vec{e}_y \sin\varphi \quad \vec{e}_\varphi = -\vec{e}_x \sin\varphi + \vec{e}_y \cos\varphi \quad \vec{e}_z = \vec{e}_z$$

- 球面坐标系与直角坐标系间单位矢量变换关系

$$\vec{e}_r = \vec{e}_x \sin\theta\cos\varphi + \vec{e}_y \sin\theta\sin\varphi + \vec{e}_z \cos\theta \quad \vec{e}_\varphi = -\vec{e}_x \sin\varphi + \vec{e}_y \cos\varphi$$

$$\vec{e}_\theta = \vec{e}_x \cos\theta\cos\varphi + \vec{e}_y \cos\theta\sin\varphi - \vec{e}_z \sin\theta$$