

群聊：电磁场2024



该二维码7天内(2月27日前)有效，重新进入将更新

电磁场基础

袁建生

电气新技术研究所

62781504, 13651234991, yuan@tsinghua.edu.cn

西主楼1区307

助教：尤宏森、于轩

教学目标（由目标可得学习方法）：

1. 在《场论》的基础上全面掌握电磁场理论体系。
2. 掌握描述电磁场的方程组，解此方程组不是重点。
不需解复杂问题、解题的目的是为了理解方程组。
3. 具备画出所有问题场图的能力。

电磁学--→电磁场--→电磁场数值计算 三门课的关系

- 电磁场课中大部分物理概念电磁学已学过、这里只是复习；
- 电磁场重点介绍电磁场各类复杂问题的数学描述：方程组；
- 解复杂问题的方程组是电磁场数值计算课程的任务。

电磁场课属于物理类还是数学类课程？ 物理+数学。

从对实际问题的物理表述到数学描述是科学的本质性发展。
很多大科学家的贡献都在这个层面。

场是一种特殊形式的物质。

在一个空间内每一点都存在物理量 A ，
便说该空间存在 A 场。

场就是物理量的空间分布。场或场分布用函数和数学表述。

你知道哪些场？

(停)车场、温度场、气压场、引力场、电场、磁场、电磁场

- 场的根本特性是空间分布特性
- 可以是标量场，也可以是矢量场。
- 时变性：场分布不但是空间的函数(随空间变化)，还可能是时间的函数(每点上的场量都随时间变化)。
- 事件联系性：一个事件与另事件通过场相联系或相互影响与作用。

我们要学的“电磁场”是一种场还是多种场？

Electromagnetic Field? or Electromagnetic Fields?

当然应该是复数。

因为至少要分为3类场（电、磁、电磁场）、6种问题：

静电场、电流场、恒定磁场（不讲磁铁的静磁场问题）、
时变电磁场、准静态场、电磁波。

如何学会电磁场（尽管它可能是大学中最难的课程）？

- 学习电磁场的首要任务是能定性分析场的分布从而画出场图。
- 会画场图电磁场知识就掌握了一半，不会画场图万事皆休！
- 对一道题会画场图就解了一半，不会画场图大半你不会解！
- 因此，画场图是关键。看到一个电磁场题，首先要想场图长什么样，脑子里形成场分布图，能画出电力线与磁力线等。
- 大部分场计算问题依赖于先画出场图（心中有图），否则无法解。
- 这些方法都依赖于场图：将问题简化成二维或一维的过程、利用不同媒质间交界面条件的问题、边值问题的边界条件设定、利用高斯定理解题、安培环路定律以及求感应电场的类安培环路定律解题。

上课与实验时间安排:

- 三个实验（时间另行通知），占掉两次讲课时间
（哪两次课不上另行通知）。
- 答疑：周一下午15:30-17:00，西主楼1区307；
可随时联系个别答疑
- 教材的每章结束后公布教材上的所有习题解答。

课程考核方法:

- 作业 20%、实验 10%、期末考试 70%，互动+5%
- 期末考试组成：基本概念论述简答题40分（80%来自课件的思考题和课上互动题）、类似作业的计算题60分。画场图会含在计算题中。
- 无期中考试。但给期中自测题。

本次课思考题(不需要交):

(名词解释是最重要的、最基础的基础知识)

- 1.** 什么是场?
- 2.** 什么是矢量、矢量函数、矢量场, 其表示方法为何?
- 3.** 常用的有几种坐标系? 各是如何构成的?
坐标面的形状为何(三坐标面相交确定一点)?
- 4.** 坐标系的用途为何? 为何要构建不同的坐标系?
- 5.** 两矢量的点积与叉积是什么含义?
- 6.** 什么样的场是二维平行平面场? 给出几个实例。
- 7.** 什么样的场是二维轴对称场? 给出几个实例。

场论 (Theory of Field)

这是一门数学课；可视为电磁场中用到的主要数学知识

场论是场的理论或场的数学知识，
介绍场与场源的关系的数学表述、场的特性的数学表述，
目的是给出描述场的数学方程组。

要点：

- 自然界中有两种源：标量源与矢量源；
- 标量源产生的场与源之间的关系满足散度关系；
- 矢量源产生的场与源之间的关系满足旋度关系。

计算函数的散度与旋度并不重要，

重要的是理解其引进的目的和作用：描述场与源的关系

- 场的散度与旋度形成的偏微分方程组是描述场的数学模型。
- 给定具体场问题的边界条件的微分方程组称为场的边值问题，
是描述具体场问题的数学模型。

为何先学数学知识：场论？（麦克斯韦给出电磁场方程时还没有场论）
电磁学的历史发展过程为：

- （1）先由实验发现现象；
 - （2）然后得到简单的场和源的关系式或定量描述；
如表述点电荷的电场的库仑定律和电流与磁场的毕奥-萨伐尔定律；
 - （3）之后再发展到高斯通量定理和环路定理的场的积分与其内总源的关系，但它们不完备，因只是描述矢量场的两个方程中的一个；
 - （4）最后再发展到散度与旋度表述的关系，表述空间点上的场与源的关系及场的特性，形成完备的描述场的微分方程组和边值问题。
- 场的定量描述之逐步发展和完善得益于数学的发展。

现在已经有了采用很好的数学工具或场论来表述电磁场的完备的方程组，那我们就应该基于这样完备的、高级的表述形式来学习、认识和分析场。

不应再“重走一遍”历史过程，不用先认识和学习那些不完备的简单的表述形式。而是直接学习和掌握描述场的普遍规律的方程。

物理电磁学在回顾历史，电磁场课试图立足现代为了将来（应用）。

第1章 场及其表述方法

作业：第1章后的问答题 c、d

1.1 场的定义

- 如果在空间中的每一点上都存在一个物理量，就称在这个空间存在该物理量的场。
- 场分为标量场与矢量场、
分别用以空间坐标变量的标量函数与矢量函数表示。
- 产生场的源也分为两类：标量源与矢量
- 对于不同分布特性的场，采用合适的坐标系表述和分析可能会使问题得到大大简化，如三维空间分布的问题可能会变成一个平面求解的问题，或变为一条直线上求解的问题；
- 相反，若选用的坐标系不合适，则可能会使简单问题复杂化。

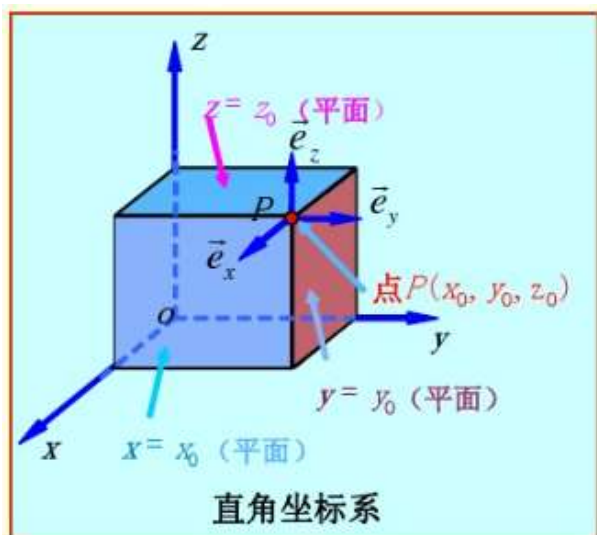
1.2 不同坐标系下场的表述

1.2.1 坐标系

直角、圆柱、球坐标系。

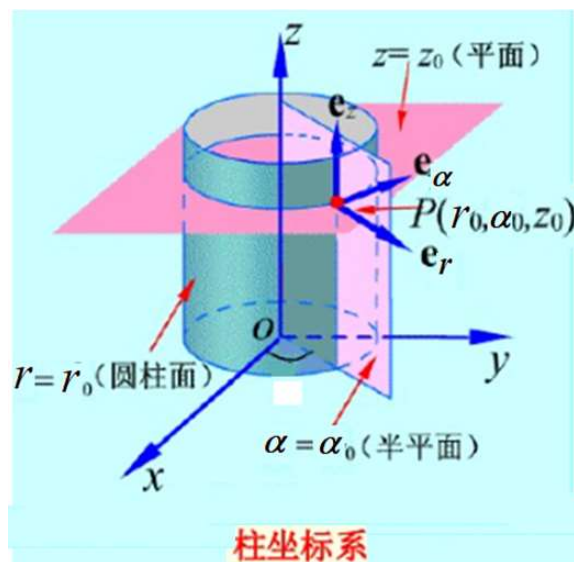
主要理解坐标变量、坐标面、面的法向、空间中一点的表述。

$$\mathbf{e}_x \times \mathbf{e}_y = \mathbf{e}_z$$



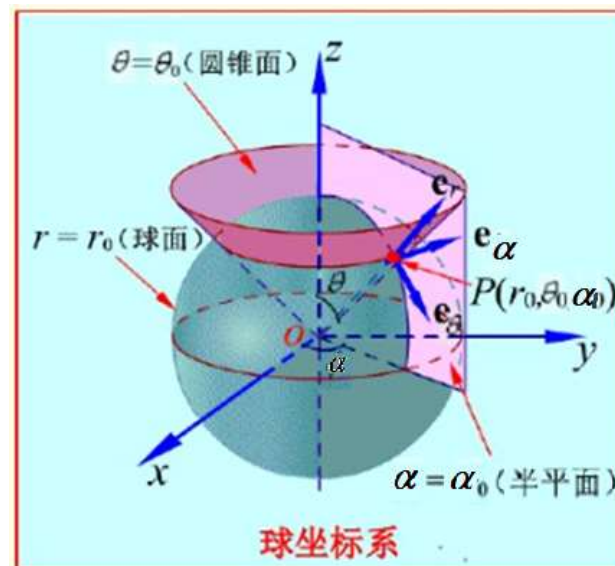
直角坐标系

$$\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_\alpha = \mathbf{e}_z \quad 0 \leq \alpha < 2\pi$$



柱坐标系

$$\mathbf{e}_r \times \mathbf{e}_\theta = \mathbf{e}_\alpha \quad \begin{matrix} 0 \leq \theta \leq \pi \\ 0 \leq \alpha < 2\pi \end{matrix}$$



球坐标系

坐标面:三个无限大平面
 x, y, z 等于常数的面

$r=r_0$ 对应圆柱面
 $\alpha=\alpha_0$ 对应半无限大面

$r=r_0$ 对应球面, $\theta=\theta_0$ 圆锥面,
 $\alpha=\alpha_0$ 半无限大面

空间点的定义:三个面的交点。 **坐标矢量的含义:**三个面的法向。

坐标矢量的特性:

直角坐标系:

固定 (平行)

各点上都相同

(为相同的自由矢量)

圆柱坐标系:

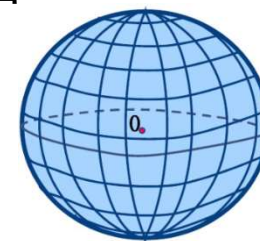
\mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_α 的方向均不“固定”
不同 α 下, 有不同 \mathbf{e}_r 、 \mathbf{e}_α 。

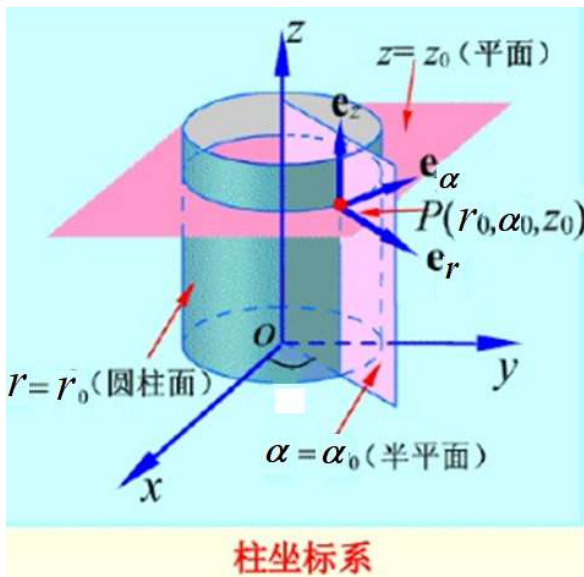
(为非相同的自由矢量)

球坐标系:

三矢量方向均不“固定”
各点有各点的三矢量

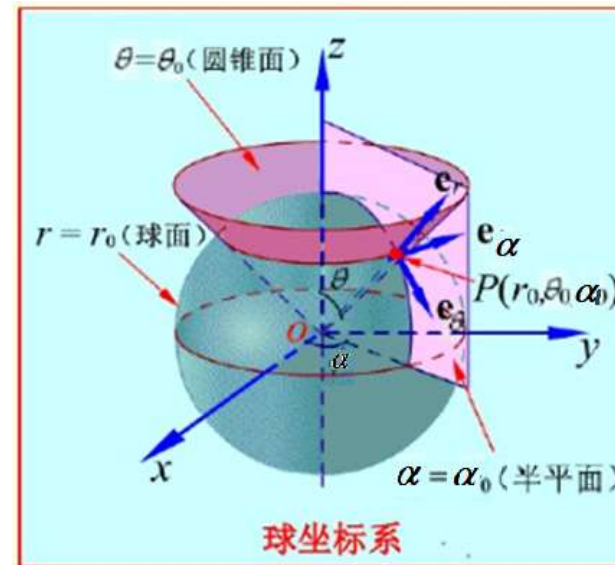
(为非相同的自由矢量)





柱坐标系

$r=r_0$ 对应圆柱面



球坐标系

$r=r_0$ 对应球面

$r=0$ 处坐标矢量的特殊情况（各坐标系一点处坐标矢量相互垂直。注意顺序）

对球坐标系，此时三坐标矢量可有多种定义方式。

若按 $\alpha=0$ 处定义 e_α ， $\theta=90^\circ$ 处定义 e_θ ，则退化为直角坐标系。

对柱坐标系，可按 $\alpha=0$ 处定义 e_α 。

对于具有轴对称特性的场才选择在圆柱坐标系下表示或分析；此时在对称轴上场只有 z 轴分量，无 r 与 α 分量，所以不用考虑在 $r=0$ 处坐标矢量 e_r 和 e_α 如何定义，因不需要这两个矢量。

同理，对于具有相对于一个点对称特性的场，才选择球坐标系；在 origin 处场一般为零，所以不用考虑在 $r=0$ 处坐标矢量如何定义。

1.2.2 一维和二维场模型

表述场的函数是几个空间变量的函数就称其为几维场。
原则上讲，所有物理模型与场都是三维问题或三维场。

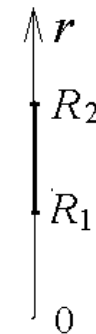
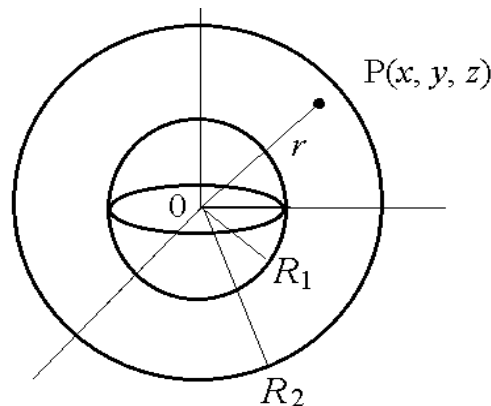
1) 一维场

两同心导体球壳电位问题，两球壳之间加有电压 U 。

等电位面为球面，与球坐标系 r 坐标面相同，因此若选球坐标系。电位不是变量 θ 和 α 的函数，仅为 r 的函数，形成一维场模型 $\varphi(r)$ 。电场强度的模 E 相等的面也是球面，故 E 也仅为 r 的函数；且其仅有 r 方向的分量，故有 $\mathbf{E}(r)=E_r(r)\mathbf{r}^0$ 。

若采用直角坐标系，电位便是三维函数 $\varphi(x, y, z)$ ，电场强度是具有三个分量的三维矢量函数 $\mathbf{E}(x, y, z)=E_x(x, y, z)\mathbf{i}+E_y(x, y, z)\mathbf{j}+E_z(x, y, z)\mathbf{k}$ ，

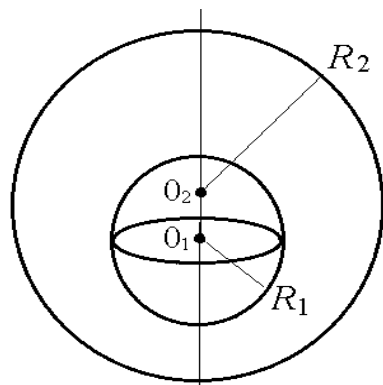
两同心导体球壳
电场问题



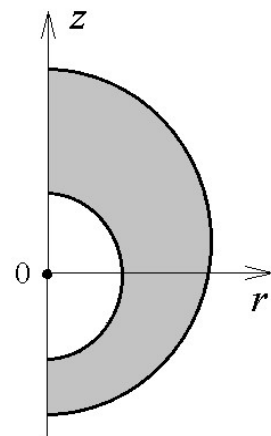
需求解的
一维场域模型

2) 二维轴对称场

两非同心导体球壳问题，球心距离为 d ，两球壳之间加电压 U



非同心导体球壳电位模型



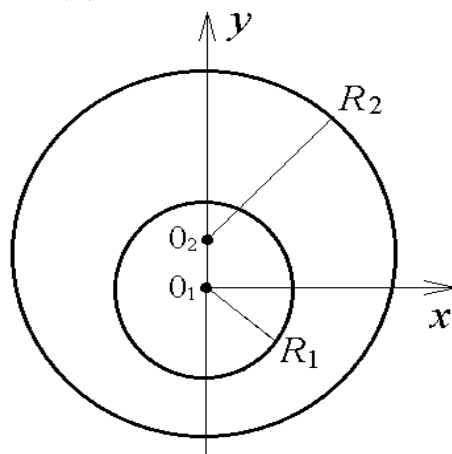
二维轴对称场域模型

电位和电场分布都关于两球心的连线（称为对称轴）对称，在以对称轴为边界的任何半无限大平面上场分布都相同。

选用圆柱坐标系，取 z 轴位于场的对称轴上，坐标原点任意。在该坐标系下，电位和电场强度分布仅为 r 和 z 的函数，不是变量 α 的函数，或不同的 α 限定的坐标面（半无限大子午面）上场分布都相同。形成二维轴对称场模型 $\varphi(r, z)$ 和 $\mathbf{E}(r, z) = E_r(r, z)\mathbf{r}^0 + E_z(r, z)\mathbf{k}$ 。

3) 二维平行平面场

两个非同轴长直圆柱导体壳的截面模型，设其在纸面的内外侧都很长，内外壳之间加有电压 U 。



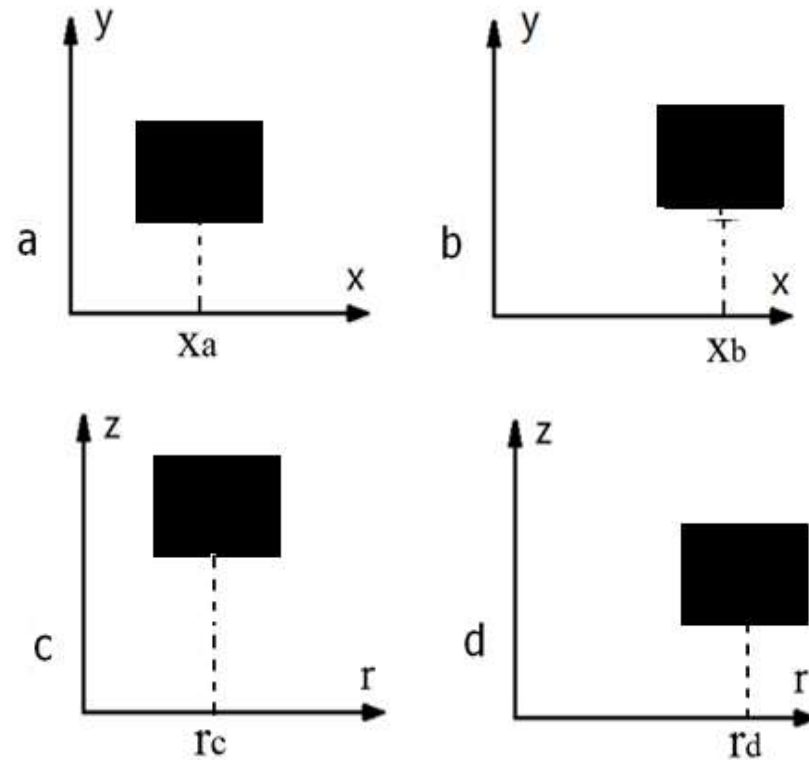
所有平行的横截面上的场分布相同，可以取出一个截面来分析，形成二维模型，称其为二维平行平面场模型。

对于二维平行平面场，一般是在平面上采用直角坐标系，形成以 x - y 坐标面，函数为 $\varphi(x, y)$ ，场不随 z 变量而变化。

对于二维平行平面场，还可采用极坐标系 r - α 。这里的 r - α 为圆柱坐标系的两个变量，形成与圆柱坐标系的 z 坐标无关的二维平行平面场模型。

两种二维场的比较

直角坐标系下二维平行平面模型:



圆柱坐标系下二维轴对称模型:

4个图分别表示什么样的
实际几何形状物体？

平行平面二维模型中 x - y 平面上的一线段代表什么形状？ 平面。

在 r - z 平面上的一线段代表： 一个圆环面、圆柱、圆台或圆锥面。

r - z 平面的左半平面是无效区域！ $r < 0$ 处不能绘制模型！

只需要分析一个子午面，
它是以 z 轴为边界的半无限大平面。自己思考可简化为平行平面、轴对称、一维的模型或场实例。