

浅谈地球磁场

金 仲 辉

(中国农业大学 北京 100094)

一些大学基础物理教材恒定磁场章节中,在提及地球磁场(简称地磁场)地表处的值约为 $0.5 \times 10^{-4} \text{T}$ 外,未作更多的介绍。本文将从物理教学观点出发,对地磁场作简明的介绍,以供教学参考。

一、地磁场强度、磁荷和磁偶极子场

地磁场满足麦克斯韦方程

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j}_0 + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \circ \quad (2)$$

在地表附近,大气的电导率 $\sigma = 0$,即大气可视为绝缘体,于是传导电流密度 $\mathbf{j}_0 = \sigma \mathbf{E} = 0$,又由于地磁场随时间变化比较缓慢,可视为似稳场,所以位移电流密度为 0,于是有

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0, \quad (3)$$

上式说明在上述近似条件下,地磁场是一个无旋场,可引入一个标量磁势 U ,使得

$$\mathbf{H} = -\nabla U, \quad (4)$$

因为 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$,且设空气磁导率 $\mu = \mu_0$,所以上式变为

$$\mathbf{B} = -\mu_0 \nabla U = -\mu_0 \left(\frac{\partial U}{\partial x} \mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y} \mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z} \mathbf{k} \right), \quad (5)$$

将上式代入(1)式,可得拉普拉斯方程

$$\nabla^2 U = 0 \quad (6)$$

由此可见,只要电导率和位移电流密度约等于 0,上式就成立,即在上述条件下,可引入磁荷的概念。

类似于静止点电荷在空间产生的电场强度分布,点磁荷 q_m 在空间产生的磁场强度为

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\mu_0} \frac{q_m}{r^2} \mathbf{r}$$

由 $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$,得点磁荷 q_m 在空间产生的磁感应强度为

$$\mathbf{B} = \frac{1}{4} \frac{q_m}{r^2} \mathbf{r}$$

同理,与点磁荷 q_m 相距 r 处的磁势为

$$U = \frac{1}{4\mu_0} \frac{q_m}{r} \quad (7)$$

磁偶极子是由一对等量异号点磁荷 $\pm q_m$ 组成的体系,如图 1 所示。它们之间的距离 l 远比到场点 P 的距离小。令 \mathbf{l} 代表 $-q_m$ 至 q_m 的位移矢量,则

磁偶极矩定义为

$\mathbf{P}_m = q_m \mathbf{l}$ 在距磁偶极子中心点 O 相当远的场点 P 的磁势为

$$U = \frac{1}{4\mu_0} \frac{\mathbf{P}_m \cdot \mathbf{r}}{r^3} \quad (8)$$

顺便提一句,磁偶极矩 \mathbf{P}_m 和磁矩 \mathbf{m} 之间的关系为

$$\mathbf{P}_m = \mu_0 \mathbf{m} \quad (9)$$

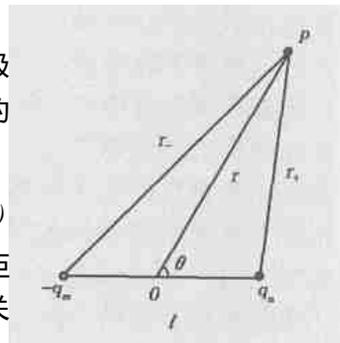


图 1 磁偶极子

二、地磁场的组成

从前面讨论可知,在较短一段时间内地磁场可视为是一个恒定场,或者说地磁场主要成分是由恒定场构成的。从一级近似来看,地磁场近似于一个置于地心的磁偶极子的磁场。这个磁偶极子 m_s 的延长线 $N_m S_m$ 称为磁轴,它和地轴 NS 斜交一个角度 θ_0 , θ_0

为 11.5° ,地心磁偶极子磁场的磁力线分布情况如图 2 所示。磁轴 $N_m S_m$ 在地面上的两个交点 N_m 和 S_m 分别称为地磁北极和地磁南极。地磁北极 N_m 与地理北极 N 相邻,地磁南极 S_m 与地理南极 S 相邻。

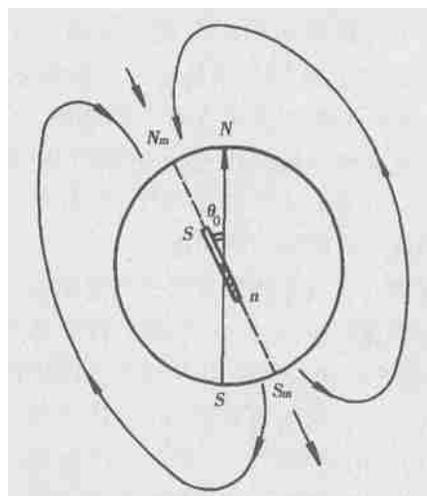


图 2 地心磁偶极子磁场

实际上地磁场是由多种不同来源的磁场叠加而成的。按它们的稳定性来区分,地磁场可分为两大部分,即主要来源于地球内部的恒定磁场 B_0 和主要来源于地球外部的变化磁场 B_t ,

$$\mathbf{B}_t = \mathbf{B}_t^0 + \mathbf{B}_t$$

变化磁场 B_t 起源于多种因素。一种是电离层中比较稳定的电流体系的周期性变化引起的各种周期性的平缓变化;另一种是太阳活动区喷射出的高速

等离子体流,这些带电粒子射向地球的运动过程中,被地磁场阻止在几个地球半径的距离以外,并且笼罩着地球,这时粒子流表面的带电粒子在地磁场的作用下将产生一个环形电流以及地球表面以上 1000km 磁层内或磁层边界等离子体不稳定性等引起的。

要指出的是 $B_i \ll B_i^0$,最大的 B_i 也只占地磁场强度的 2% ~ 4%。因此恒定磁场是地磁场的主要部分,而这个恒定磁场可视为由地心磁偶极子产生的。

三、地心磁偶极子磁场和地球磁矩

由(8)式和(9)式,得地表附近一点 P 的磁势为

$$U = \frac{1}{4} \frac{m \cdot r}{r^3}$$

式中 m 为地球的磁矩。在球坐标系可写成:

$$U = \frac{1}{4} \frac{m_x \sin \theta \cos \lambda + m_y \sin \theta \sin \lambda + m_z \cos \theta}{r^2}$$

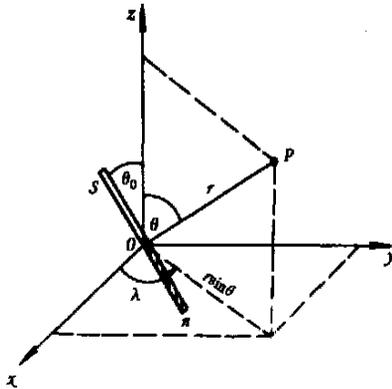


图3 磁偶极子和场点位置

从上式可以看出,若地球磁矩 m 的 3 个分量 m_x 、 m_y 、 m_z 为已知的话则地球上任一点的磁势即可求出:

$$U = \frac{R^3}{\mu_0} \frac{g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \sin \theta}{r^2} \quad (10)$$

式中 R 为地球半径, g_1^1 、 h_1^1 、 g_1^0 称为高斯系数,实际

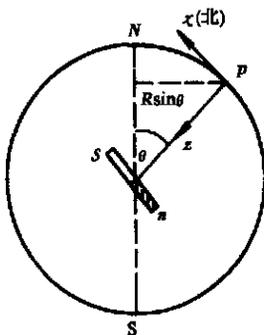


图4 地表 P 点地磁场三分量计算

上它们对应着地球磁矩 m 的三个分量(见图 3),在国际单位制中,高斯系数的单位为 $N \cdot A^{-1} \cdot m^{-1}$,即 T (特斯拉)。由上式可看出,只要知道 g_1^1 、 h_1^1 、 g_1^0 这 3 个系数,空间各点的磁势就可以惟一确定。

由(5)式、(10)式和如果选择地表上 P 点为直角坐标系的原点(见图 4), x 方向为指北方向, y 方向为指东方向, z 方向为向下方向,可得 P 点地磁场的 3 个分量为

$$\left. \begin{aligned} B_x &= -g_1^0 \sin \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \cos \theta \\ B_y &= g_1^1 \sin \lambda - h_1^1 \cos \lambda \\ B_z &= -2I g_1^0 \cos \theta + (g_1^1 \cos \lambda + h_1^1 \sin \lambda) \sin \theta \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

由上式可看出,只要 3 个系数 g_1^0 、 g_1^1 和 h_1^1 已知,地表上各点的地磁场磁感应强度就可确定;实际情况与此相反,是根据一定数量的地面观测值 B_x 、 B_y 、 B_z ,由数据处理的方法来确定 g_1^0 、 g_1^1 和 h_1^1 这 3 个系数。另外,可由这 3 个系数来确定地心磁偶极子 m 的极角 θ_0 和方位角 λ_0 。

$$\tan \theta_0 = \frac{\sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2}}{|g_1^0|}$$

$$\tan \lambda_0 = \frac{h_1^1}{g_1^1}$$

由高斯系数 g_1^0 、 g_1^1 和 h_1^1 可计算出地球的磁矩,即

$$m = \frac{4}{\mu_0} R^3 \sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 + (g_1^0)^2} \quad (12)$$

物理学中已证明,一个均匀磁化球体外部的磁场是和一个位于球心的磁偶极子的磁场等同的。因此,在考虑地心磁偶极子磁场时,也可将地球看成是一个均匀磁化的球体。这样一来,由磁化强度的定义(即单位体积的磁矩),可求出地球的平均磁化强度 M 值为

$$M = \frac{m}{V} = \frac{3}{\mu_0} \sqrt{(g_1^1)^2 + (h_1^1)^2 + (g_1^0)^2} \quad (13)$$

将地球半径 $R = 6370\text{km}$ 和 1980 年测得的 3 个系数 $g_1^1 = -1957 \times 10^{-9} \text{T}$, $h_1^1 = 5606 \times 10^{-9} \text{T}$ 和 $g_1^0 = -29988 \times 10^{-9} \text{T}$ 代入(12)式和(13)式可求出

$$m = 7.91 \times 10^{22} \text{A} \cdot \text{m}^2, M = 7.30 \times 10 \text{A} \cdot \text{m}.$$

四、地磁场成因

人们对地磁场的成因作过各种各样的探讨,但由于它与地球演化、地球内部的能量和运动以及天体磁场来源密切关系而成为地球物理学重大理论难题之一,至今尚未有满意的结果。在众多的假设

走近纳米科技

武步宇 武步宙 史晓菲

(山东理工大学东校区 淄博 255012)

纳米科技于 20 世纪 70 年代兴起,进入 21 世纪越来越被大家耳熟。纳米科技在促进科技进步,提高社会文明程度,改善人类生存质量,更新对物质世界的认知及观念上扮演了举足轻重的角色。

纳米是长度单位。一纳米为一米的十亿分之一,如果你的拇指指甲盖宽 14 毫米,这个比例就相当于拇指指甲盖宽度与地球直径间的比例。纳米科技所接触、研究、开发的是 100 纳米~0.1 纳米范围内物质的性质和应用。一个分子或一个原子大小的数量级大致在 10 纳米。因此,纳米科技也可以说是在分子水平上观察、分析、研究物质的物理、化学性质并加以开发利用。100~0.1 纳米是介于微观与宏观之间的一个范围,现在称此范围为介观世界。

中,上世纪 40~50 年代发展起来的“发电机理论”,目前被认为是地磁场起源理论中最为合理的和有希望的一个。

地球由地壳、地幔和地核组成,而地核又由液态的外核和固态的内核构成。液态外核里的铁镍成分可能具有高导电性能,提供了由物质运动和磁场相互作用维持地磁场的有利因素。图 5 表示一单圆盘发电机,导电圆盘 A 在轴向外磁场 B_0 中以角速度绕轴旋转,电刷 B 与圆盘 A 的边缘相接触,并与环形回路相连接,回路的另一端由电刷 C 与轴相连接。导电圆盘在磁场中运动,将产生径向的动生电

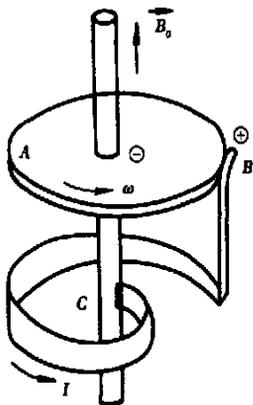


图 5 单圆盘发电机模型

尺寸在此范围内的物质由于具有大的比表面积、小尺寸效应、量子效应和宏观量子隧道效应等及至今尚不清楚的其他原因,使得这些纳米级物质的物理、化学性质突变,表现出非常奇特的性质。介观世界是一个人类目前尚不熟悉的世界,也是一个充满神奇魅力和机遇的世界。撩开介观世界的迷人面纱,不仅会创造更多明天的奇迹,恐怕掀起的还有认知和伦理上的一场革命。

纳米科技主要涵盖这样几方面的内容:纳米物理学,纳米化学,纳米力学,纳米材料学,纳米电子学,纳米生物学和纳米加工学等。纳米材料是纳米科技中极其重要的物质基础。纳米材料是指材料的几何尺寸达到纳米尺度并具有因理化性质突变而产生的特殊性能。根据纳米尺度在维度上的体现,纳米材料分为三种类型:三维空间尺寸在纳米数量级的,称零维基本单元或量子点,如纳米颗粒、原子团簇等;二维空间尺寸在纳米数量级的,称一维基本单

动势,于是有电流 I 在环形回路中流动。若环形回路方向选择适当,电流产生的磁场与外磁场 B_0 同方向,若圆盘旋转速度足够大,则磁场将不断增强,若旋转速度过小,则磁场将不断衰减。在稳定状态中,得到的场强维持一常量值。

现在要问,原始外磁场 B_0 来自何方?现在人们认为地球内部存在铁磁体,而铁磁体绕轴旋转可以产生一个弱磁场。根据理论计算,若铁磁体绕轴旋转频率为 n ,铁磁体沿其旋转轴方向磁化的磁化强度 M 为

$$M = 1.5 \times 10^{-3} n (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}),$$

对于地球, $n = \frac{1}{8.64} \times 10^{-4} (\text{s}^{-1})$, 则有

$$M = 1.78 \times 10^{-8} (\text{A} \cdot \text{m}^{-1}).$$

虽说这个数值比前述地球的平均磁化强度 $7.3 \times 10A \text{ m}$ 小很多,但它毕竟提供了在“发电机理论”中必不可少的原始外磁场。

后来又有学者提出双圆盘发电机模型来代替单圆盘发电机模型,它不仅说明有一个相对恒定的地磁场,且很好解释了地磁场的长期变化和地磁场方向反转的事实,增强了人们对发电机模型的信念,当然这种理论与地核内部可能的真实过程相差很远。