

地球电场与地球磁场的形成机理

邹润莉

(长沙环境保护职业技术学院,长沙 410004)

摘要 为探讨地球磁场的形成机理,应用经典电磁理论以微分的思维方式建立起三种自激发电机模型,用球形自激发电机模型简明地描述地球磁场的形成和分布;从分析地轴参考系中相对于自转地球静止的电荷间洛仑兹力的特点以及地球上的电荷在地球电场和地球磁场作用下的漂移规律,阐述中心磁场的形成及反转机理;分析电荷相对于地球的漂移以阐述偏磁场的形成.理论分析表明:地球上每一点的磁场都可以看成是由该点的几个分磁场叠加而成;地球具有自身的电场;地球电场与地球磁场同时产生、同时变化,且都源自于地球的自转和地球上正负电荷的非对等分布.

关键词 形成机理,地球电场,地球磁场,自激发电机模型,地轴参考系

中图分类号 P318,P535

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2008)04-1071-14

Formation mechanisms of the electric field and magnetic field of the Earth

ZOU Run-li

(Changsha Environmental Protection Vocational College, Changsha 410004, China)

Abstract To explore the formation mechanisms of the earth's magnetic field, three types of the models of self-evoking generator are set up with the classic electromagnetism theory and the differential analyzing method. The model of spherical self-evoking generator is used to illustrate the formation and distribution of the earth's magnetic field. The formation and reverse turn mechanisms of the central magnetic field are clarified through analyzing the characteristics of Lorenzo force in the earth's axis reference system among the charges of the earth which are motionless relative to the self-rotating earth, and with the drifting law of electric charges under the action of the earth electric field and the earth magnetic field. The formation mechanism of the deflecting magnetic field is also illustrated by the drift of electric charges relative to the self-rotating earth. It is claimed that the magnetic field at every point of the earth can be regarded as the overlaying of its several sub-magnetic fields. The earth has its own electric field. The earth electric field and the earth magnetic field are generated and change at the same time, and originate from the self-rotation of the earth and the nonequivalent distribution of the earth's positive and negative charges.

Keywords formation mechanism, earth electric field, earth magnetic field, model of self-evoking generator, earth's axis reference system

0 引言

磁性是地球的基本属性之一,人类早就认识了地球的磁性.自从人类认识了地球的磁性以后,就希望能探秘地球磁性的形成原因.为解释地磁的成因,人们提出了多种假说,至今仍在继续探索和研究.本文应用经典电磁理论定性地分析了地轴参考系中地

球上电荷间洛仑兹力的特点和电荷的运动规律,并据此阐述了地球磁场的形成机理;同时说明了地球不仅具有自身的磁场,而且具有自身的电场,地球电场和地球磁场是不可分割的统一体.本文的结论可为人们进一步认识和研究地球上所发生的有关自然现象提供一种基础的理论解释.

收稿日期 2008-01-10; **修回日期** 2008-03-20.

作者简介 邹润莉,女,1955年,湖南祁东人,副教授,主要从事物理、电工电子学基础的教学及有关科研工作.
(E-mail: zou_runli@yahoo.com.cn)

1 中心磁场

地球电场和地球磁场源自于地球的自转和地球上正负电荷的非对等分布. 地球自转带动地球上的静电荷(相对于在不停地自转的地球静止的电荷)相对于地轴做匀速圆周运动就产生磁场. 本文在地轴参考系中(即选地轴作为参考系), 视地球为真空中的理想均质固体导体球, 分析地球电场和地球磁场的形成机理. 地球磁场按场源电荷的运动形式分类可分为主磁场和偏磁场, 按场源电荷的汇集点在地球上所处的位置分类可分为中心磁场和极地磁场. 地球上任意一点的磁场都是由该点的主磁场和偏磁场叠加而成; 主磁场又是由中心磁场和极地磁场叠加而成. 在本文中我们先讨论占地球磁场主导地位的中心磁场.

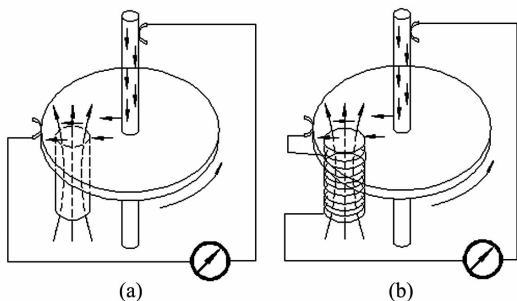


图 1 瓦特·埃尔萨塞和爱德华·布拉德的自发电机假说
Fig.1 Walter elasser and edward bullard's hypothesis of self-evoking generator

人们为了解释地球磁场的起源成因提出了多种假说. 其中瓦特·埃尔萨塞(Walter Elasser)和爱德华·布拉德(Edward Bullard)的假说构思深刻: 设想转动图 1(a)中的铜盘切割磁棒的磁感应线, 根据法拉第电磁感应定律, 图 1(a)中简单的圆盘发电机就产生电流; 若将此发电机产生的电流通过一个金属线圈, 并用此金属线圈取代图 1(a)中的磁铁棒, 只要铜盘保持旋转, “自发电机”就继续产生电流, 并继续存在磁场, 如图 1(b)所示. 他们二人据此提出在地核中存在一台图 1(b)所示的自发电机^[1]以产生地球自身的磁场. 但因为并没有说明自发电机的运转原理, 人们难以相信在地核里有图 1(b)中所画的旋转圆盘, 所以这一假说未能得到公认. 笔者从理论分析中发现, 地球磁场正是由类似于瓦特·埃尔萨塞(Walter Elasser)和爱德华·布拉德(Edward Bullard)二人提出的地球自发电机产生

的. 现论述如下

1.1 自发电机模型

自发电机模型有一维模型、二维模型和三维模型三种.

一维自发电机模型如图 2 所示. 在磁感应强度为 B_0 的匀强磁场中, 一段长度为 L 的导体棒 OA 在垂直磁场的平面内绕端点 O 以角速度 ω 匀速转动, 根据法拉第电磁感应定律, 导体棒 OA 切割磁感应线产生的感应电动势为

$$E = \int_0^L (v \times B_0) \cdot dl = - \int_0^L B_0 \omega l dl = - \frac{1}{2} B_0 \omega L^2, \tag{1}$$

式(1)中的负号表示导体棒每一小段的 $v \times B_0$ 的方向都是由棒的 A 端指向 O 端, 与 dl 的方向相反, 感应电动势的方向由 A 端指向 O 端. 洛仑兹力的作用使得导体棒的 O 端累积正电荷, A 端累积负电荷, O 点电势比 A 点电势高.

累积在 A 端的负电荷随着导体棒绕端点 O 的匀速转动而做匀速圆周运动就产生磁场.

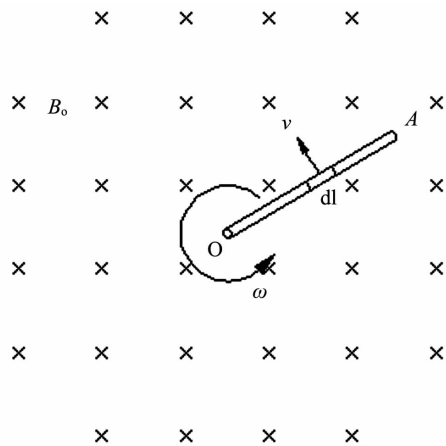


图 2 在匀强磁场中匀速转动的导体棒产生感应电动势
Fig.2 Induced electromotive force of the rotating conductor stub of rotation at even speed in the even-power magnetic field

若将图 2 中的导体棒换成导体圆盘就成为二维自发电机模型, 如图 3(a)所示. 导体圆盘在垂直磁场 B_0 的平面内以角速度 ω 绕与圆盘垂直的中心轴 O_1O_2 匀速转动, 则圆盘上任意一条半径 OA 都象图 2 中的导体棒 OA 一样切割磁感应线产生电动势, 导致圆盘圆心附近累积正电荷, 圆盘周边累积负电荷, 圆心 O 点的电势比圆盘周边的电势高. 累积

的正负电荷产生电场.同时,累积在圆盘周边的负电荷随着圆盘的转动而相对于中心轴 O_1O_2 作匀速圆周运动,形成与圆盘转动方向相反的圆电流 I 又产生磁场,其磁感应强度 B 的方向与圆电流 I 的方向之间的关系遵守右手螺旋定则,如图 3(b)所示.

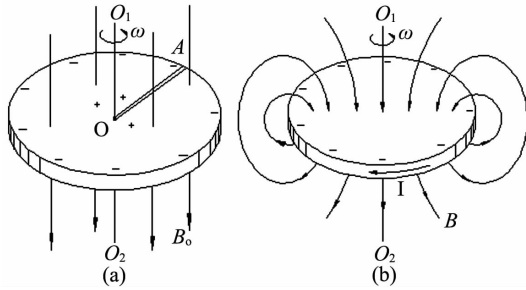


图 3 圆盘自激发电机模型

- a. 在匀强磁场中匀速转动的导体圆盘产生的感应电动势;
- b. 在匀强磁场中匀速转动的导体圆盘产生的磁场

Fig. 3 The model of circular self-evoking generator

- a. Induced electromotive force of the rotating conductor circular disk at even speed in the even-power magnetic field;
- b. Induced magnetic field of the rotating conductor circular disk at even speed in the even-power magnetic field

由静磁场理论可知,圆电流的磁场为稳恒磁场,即图 3(b)中的圆电流 I 产生的磁场相对于圆盘的转轴 O_1O_2 是静止的.若撤除外磁场 B_0 ,只要圆盘继续匀速转动,圆盘将切割圆电流磁场的磁感应线而产生电动势,使圆心处的电势仍然比圆周边的电势高,圆盘周边仍然有负电荷累积,圆电流 I 及其磁场依然存在.

可见,一个绕垂直于圆平面的中心轴匀速转动的导体圆盘,一旦受到与圆平面相交的外磁场的初始激励,就能永久地保持自身已经产生的电场和磁场.

用三维自激发电机模型可以简明地描述地球电场和地球磁场的形成与分布.

1.2 负电荷中心磁场

中心磁场包括正电荷中心磁场和负电荷中心磁场,下文将对负电荷中心磁场进行讨论.

人类已经知道地球磁场在地表外的分布象偶极子磁场.地球正向期磁场在地表外的磁感应线从地理南极发出,回到地理北极.参考磁感应线为闭合曲线的性质,假定在地球内部磁感应线从地理北极到地理南极,与地表外的磁感应线形成闭合曲线,如图 4 所示,并假定地球磁场相对于地轴静止.选地轴为

参考系,地球就成为在磁场中绕地轴 O_1O_2 以角速度 ω 匀速转动的导体球了.

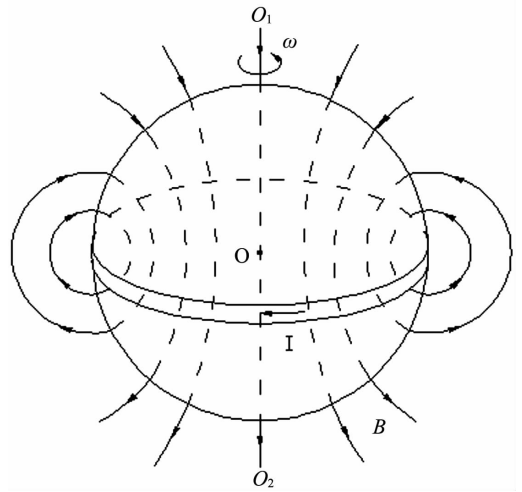


图 4 地球磁场磁感应线的假定分布

Fig. 4 The assumed distribution of magnetic induction lines of the earth magnetic field

设地球为均匀导体球,球心为 O ,球半径为 R_0 ,地球内部的磁场为匀强磁场,磁感应强度为 B .用垂直于地轴的平面截切地球,将地球分割成无穷多个薄圆盘,则每个圆盘都是一个图 3 所示的二维自激发电机.

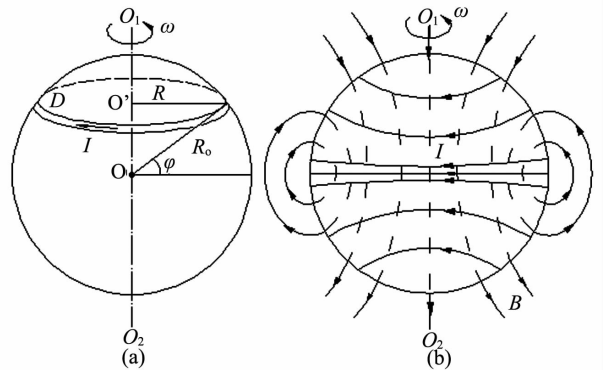


图 5 球形自激发电机模型

- a. 圆盘自激发电机并联构成球形自激发电机;
- b. 球形自激发电机产生的磁场

Fig. 5 The model of spherical self-evoking Generator

- a. The spherical self-evoking generator formed by parallel connection of circular disk self-evoking generator;
- b. Induced magnetic field of the spherical self-evoking generator

现随机取其中一个圆盘 D ,设该圆盘的半径为 R ,圆心为 O' ,纬度角为 φ ,如图 5(a)所示.由式(1)

知,该圆盘任意一条半径随地球自转切割磁感应线产生的感应电动势为

$$E = -\frac{1}{2}\omega BR^2 = -\frac{1}{2}\omega BR_0^2 \cos^2\varphi, \quad (2)$$

式中 $R = R_0 \cos\varphi$ (见图 5(a)), ω 为地球自转角速度. 圆心到圆盘周边沿的电势差为

$$U = -E = \frac{1}{2}\omega BR_0^2 \cos^2\varphi. \quad (3)$$

地球象由无穷多个圆盘自发电机并联而成的球形自发电机——地轴为正极,地表为负极,这就是三维自发电机模型——球形自发电机模型,如图 5(a)所示. 由式(3)知,在赤道平面, $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$, 地心到赤道的电势差最大,等于 $\frac{1}{2}\omega BR_0^2$, 地心电势最高,累积的正电荷最多,赤道电势最低,累积的负电荷最多;在地理南北两极, $\varphi = \frac{\pi}{2}$, $\cos\varphi = 0$, 地轴与地面交于极点,地轴与地面的电势差等于零;在纬度角为 φ 的圆盘上,地轴到地表的电势差等于 $\frac{1}{2}\omega BR_0^2 \cos^2\varphi$. 由此可见,地球上不同高度或不同纬度的各点的电势都不相同;地表负电荷随地球自转而形成的纬圆电流 I 在赤道最强,从赤道两侧沿经线向地理南北两极方向逐渐减弱.

密集在地表(主要在赤道附近)的负电荷随地球自转而相对于地轴做匀速圆周运动所产生的磁场占地球磁场的主导地位,称之为负电荷中心磁场. 由静磁场理论可知,负电荷中心磁场相对于地轴静止,其磁感应线的空间分布关于地轴和赤道平面对称,类似于偶极子磁场,如图 5(b)所示

由上述推论和图 5(b)可知,图 4 中关于地球磁场的假定成立.

1.3 负电荷中心磁场的形成机理

图 3 所示的圆盘自发电机模型需要受到与圆盘相交的磁场的初始激励,才能产生并保持自己的磁场. 而这种激励地球自发电机模型的初始磁场就来源于地球自转和地球上的正负电荷的非对等分布.

地球是个含有自由电荷的复杂系统,受多种内力和外力的作用. 每种作用的时空分布不同,各种作用相互影响、互相制约,使地球在不同的时空处于不同的状态. 在地球可能呈现的各种状态中,应该存在正负电荷分布不对等的状态. 一旦地球上的正负电荷分布不对等,地球电场和地球磁场就同时产生了. 其中赤道附近地区带电产生的电场和磁场最容易发展形成全球性电场和磁场.

地球磁场源起于地球的自转和地球上电荷的不对等分布,促使全球性磁场形成和变化的动力主要是洛仑兹力. 下面简要分析地轴参考系中地球上的静电荷间的洛仑兹力的特点.

1.3.1 地轴参考系中地球上静电荷间洛仑兹力特点

由静磁场理论得知,以速度 v_1 运动的点电荷 q_1 在真空中距 q_1 为 r_0 的某点 P 产生的磁感应强度为

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 v_1 \times r_0}{r_0^3}, \quad (4)$$

式中 r_0 是从点电荷 q_1 指向场点 P 的矢量. B 、 v_1 、 r_0 三者的方向遵守矢积的右手螺旋定则. 由公式(4)可知,在其他条件不变时,P 点磁感应强度的大小与场源电荷的电荷量和运动速率的乘积成正比. 在 P 点以速度 v_2 运动的点电荷 q_2 受到的洛仑兹力

$$f = q_2 v_2 \times B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_1 q_2 v_2 \times (v_1 \times r_0)}{r_0^3}, \quad (5)$$

f 的方向为矢积 $v_2 \times B$ 的方向,即双重矢积 $v_2 \times (v_1 \times r_0)$ 的方向. 由公式(5)可知,在其他条件一定时,洛仑兹力的大小与两点电荷运动速率的乘积成正比.

在地轴参考系中,地球上静电荷因随地球自转而做匀速圆周运动. 用垂直于地轴的平面在地球上随机截取一个薄圆盘,分析该圆盘上的任一点电荷 Q 产生的磁场对圆盘上其他电荷的洛仑兹力的特点.

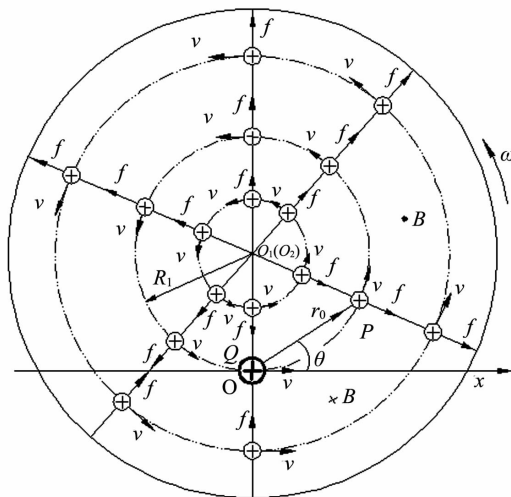


图 6 地轴参考系中地球上静电荷间的洛仑兹力
Fig. 6 Lorentz force among electrostatic charges of the earth in the earth's axis reference

如图 6 所示,设 Q 为正电荷, Q 随地球自转做匀速圆周运动的轨道半径为 R_1 , Q 在某一时刻的速度 v 的方向为 X 轴正方向,从场源电荷 Q 指向圆盘上任意一点 P 的矢量 r_0 与 X 轴正方向的夹角为 θ . 根据公式(4)由右手螺旋定则判知, Q 产生的磁感

应强度 B 的方向在圆盘上的 $0 < \theta < \pi$ 区间垂直纸面向外(图 6 中用 \cdot 表示),在圆盘上的 $-\pi < \theta < 0$ 区间垂直纸面向里(图 6 中用 \times 表示).根据公式(5)由右手螺旋定则判知,圆盘上其他电荷受磁场 B 的洛仑兹力有如下特点:

(1)在 $R \leq R_1$ 区域,正电荷所受洛仑兹力的方向都沿轨道半径指向离开圆心的方向;根据负电荷所受洛仑兹力的方向与正电荷所受洛仑兹力方向相反的规律可知,负电荷所受洛仑兹力的方向都沿轨道半径指向圆心.即在轨道半径为 R_1 的圆周上做匀速圆周运动的电荷,对在轨道半径为 $R \leq R_1$ 圆周上与其向同一方向做匀速圆周运动的电荷的洛仑兹力,总是使同种电荷向轨道半径增大的方向运动,使异种电荷向轨道半径减小的方向运动.

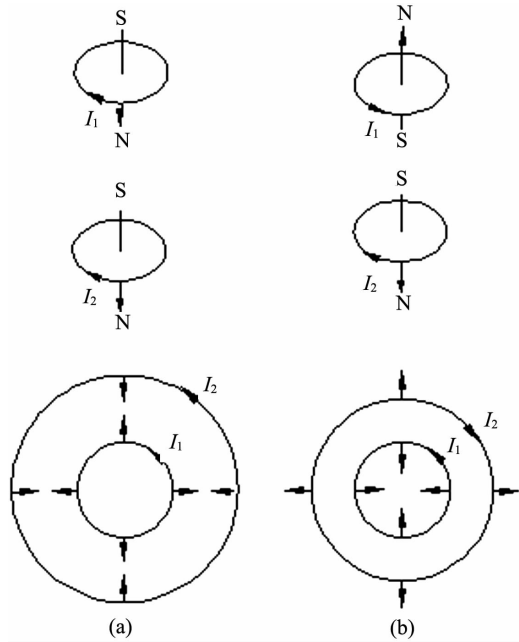


图 7 地轴参考系中地球上静电荷间的洛仑兹力特点的宏观表现

a. 同向圆电流相互吸引;b. 反向圆电流相互排斥

Fig. 7 The macroscopic show of the characteristics of Lorentz force among electrostatic charges of the earth in the earth's axis reference system

a. same circular current mutually attract;
b. reverse circular current mutually exclude

(2)与 Q 同向平行运动的正电荷所受的洛仑兹力的方向指向 Q ;同理可知,与 Q 同向平行运动的负电荷所受洛仑兹力的方向背离 Q .即同向平行运动电荷间的洛仑兹力为同种电荷互相吸引,异种电荷互相排斥.这一特点的宏观表现有:①两根平行直导线通以同向电流互相吸引,通以反向电流互相排

斥;②两个同向圆电流互相吸引,如图 7(a)所示,两个反向圆电流互相排斥,如图 7(b)所示.

不管电荷是否位于同一圆盘上,也不管场源电荷 Q 是正电荷还是负电荷,地轴参考系中地球上的静电荷间的洛仑兹力都有这种特点,我们可以用右手螺旋定则验证之.地球上的静电荷受到具有这种特点的洛仑兹力,使地球磁场的形成和变化隐含正反馈机制.

1.3.2 负电荷中心磁场的形成

现假设赤道附近某座山峰带有静电荷 $-Q$ (设 $-Q$ 为点电荷),在地轴参考系中, $-Q$ 随地球自转做匀速圆周运动在距 $-Q$ 为 r_0 处产生的磁感应强度

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{(-Q)v \times r_0}{r_0^3}, \tag{6}$$

式(6)中 v 为负电荷随地球自转做匀速圆周运动的线速度,其大小 $v = \omega R_0$, R_0 是地球的参考半径, ω 是地球的自转角速度.

用垂直于地轴的平面在赤道附近截取一个包含 $-Q$ 的薄圆盘,如图 8 所示,该圆盘上的所有静电荷都与 $-Q$ 一起随地球自转而以角速度 ω 向逆时针方向(从地理北极上空俯瞰)做匀速圆周运动,且都位于轨道半径 $R \leq R_0$ 区域.由右手螺旋定则判知, $-Q$ 产生的磁感应强度 B 在整个圆盘上的方向都是由北向南(图 8 中用 \times 表示),圆盘上除 $-Q$ 以外的其他负电荷所受的洛仑兹力的方向都沿轨道半径指向离开圆心的方向,正电荷所受的洛仑兹力的方向都沿轨道半径指向圆心.

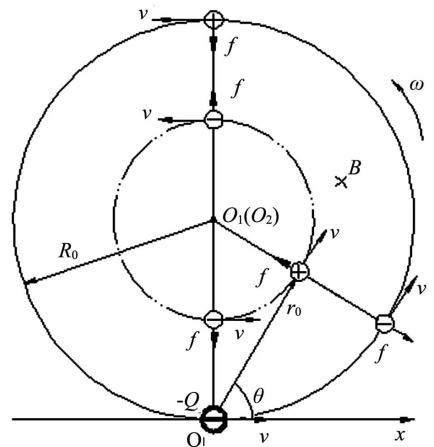


图 8 负电荷中心磁场的形成原理图

Fig. 8 The formation principle picture of negative charge's central magnetic field

在洛伦兹力的作用下,该圆盘上所有可以移动的负电荷都向远离圆心而靠近赤道的方向漂移,所有可以移动的正电荷都向远离赤道而靠近圆心的方向漂移.正负电荷的这种定向漂移导致赤道附近逐渐累积负电荷.由1.3.1分析的地轴参考系中地球上的静电荷间的洛伦兹力的特点得知, $-Q$ 及赤道附近会累积越来越多的负电荷而进入正反馈循环:

$$Q \uparrow \rightarrow B \uparrow \rightarrow f \uparrow \rightarrow v_p \uparrow \rightarrow Q \uparrow$$

即赤道附近增加的负电荷随地球自转做匀速圆周运动产生磁场,使 $-Q$ 原来较弱的磁场增强;增强了的磁场又施给正负电荷较大的洛伦兹力,使正负电荷漂移速率 v_p 进一步增大,从而使赤道附近累积的负电荷量以更快的速率增加.这种正反馈循环可导致 $-Q$ 最初产生的局部的较弱的磁场发展成为与当今地球磁场方向相同的正向期全球性磁场,并使其逐渐增强.

虽然作为初始场源电荷的 $-Q$ 可以进一步分割为无穷多个负点电荷的集合,每个负点电荷都受到相互排斥的库仑力作用而有相互离散的趋势,但与库仑力同时产生的洛伦兹力却在全球范围内增大可以移动的负电荷的轨道半径,减小可以移动的正电荷的轨道半径,以正反馈机制抑制库仑力的离散作用,促成场源电荷与足够多的同种电荷共同建立起全球性磁场.

由地轴参考系中地球上电荷间洛伦兹力的特性可知,除地轴外地球上任意一点带电都会产生磁场,且都可以发展成全球性磁场;由公式(4)可知,带电点离地轴越远(即带电点随地球自转绕地轴做匀速圆周运动的线速度越大),带电量越多,产生的磁场就越强,发展成全球性磁场就越容易.在带电量相等的条件下,赤道带电产生的磁场比地球上其它地方带电产生的磁场更容易发展成为全球性磁场.

地球电场与地球磁场同时产生,同时变化,是不可分割的统一体.

2 中心磁场的反转

地球上的正负电荷在地球电场和地球磁场的共同作用下,在随地球自转而相对于地轴做匀速圆周运动的同时,还在地球上相互交替地做离心漂移和向心漂移、扩张漂移和收缩漂移,赤道附近交替呈现带正电状态和带负电状态,导致地球电场与中心磁场发生周期性变化.

2.1 离心漂移和向心漂移

全球性电场和磁场形成后,地球上任一电荷 q

都同时受到地球电场和地球磁场的作用,在地轴参考系中的合力为

$$F = qE + qv \times B, \quad (7)$$

式中 v 为 q 随地球自转而绕地轴做匀速圆周运动的线速度,其大小为 $v = \omega r$, r 为电荷 q 到地轴的距离.地轴上的各点 $r = 0$,所以电荷在地轴上只受到地球电场的作用,地球磁场的作用力为零.

用过地轴的平面截切地球,由右手螺旋定则判断,赤道附近负电荷产生的磁场对地球上正负电荷的洛伦兹力如图9所示.在洛伦兹力作用下,除地轴外地球上所有可以自由移动的负电荷都向靠近赤道方向漂移,所有可以自由移动的正电荷都向远离赤道方向漂移.这正是本文1.3.1所分析的地轴参考系中地球上电荷间洛伦兹力特点的体现:密集在赤道附近的负电荷吸引同向平行运动的同种电荷——负电荷,排斥同向平行运动的异种电荷——正电荷,从而导致正负电荷漂移.

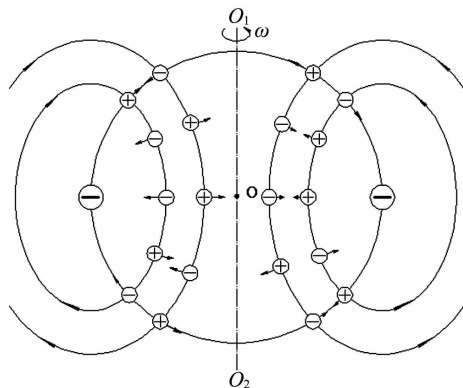


图9 赤道负电荷产生的中心磁场对地球上正负电荷的洛伦兹力

Fig. 9 Lorentz force of the central magnetic field produced by negative charge at the equator to the positive and negative electric charge of the earth

正负电荷的漂移又导致一系列连锁反应.一方面使赤道附近负电荷不断增多,电位不断降低,地轴附近正电荷不断增多,电位不断升高,导致地球电场和中心磁场单值增强.另一方面,正电荷在向远离赤道方向漂移途中形成正电荷密度大于负电荷密度(即带正电)区,该区域内同向平行运动的正电荷之间的洛伦兹力也是互相吸引,从而使正电荷在原来漂移的基础上又叠加一个向靠近赤道平面的漂移,合漂移方向变成指向地心附近,即正电荷做向心漂移.

正电荷的向心漂移使地心附近快速累积正电荷, 电位升高. 因地轴上的电荷所受洛仑兹力为零, 地心附近的正电荷在电场力作用下沿地轴向地理南北两极方向漂移, 又导致地理南北两极附近累积正电荷, 电位逐渐升高; 同时也导致地心附近的正电荷量减少. 但只要单位时间内漂移到地心附近的正电荷输入量大于沿地轴流向地理南北两极方向的正电荷输出量, 地心附近的正电荷总量就还将继续增加.

地心附近的正电荷随地球自转而相对于地轴做匀速圆周运动也产生磁场, 这种磁场称为正电荷中心磁场. 正电荷中心磁场也是地球磁场的主要组成部分, 其磁感应线的空间分布与负电荷中心磁场磁感应线的空间分布相似, 只是方向相反, 如图 10 所示(图中实线表示负电荷中心磁场的磁感应线, 虚线表示正电荷中心磁场的磁感应线, 下同).

区. 正负电荷中心磁场的这种对立统一关系预示地球磁场将发生周期性变化.

当地心附近的正电荷累积到一定程度, 以致正电荷中心磁场在区域 III 的磁感应强度大于负电荷中心磁场在区域 III 的磁感应强度时, 区域 III 的磁场反向, 由向南变为向北, 如图 11 所示.

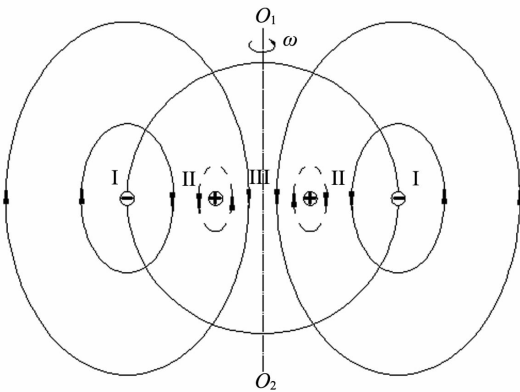


图 10 中心磁场磁感应线的空间分布
(实线表示负电荷中心磁场的磁感应线, 虚线表示正电荷中心磁场的磁感应线)

Fig. 10 Space distribution of central magnetic field's magnetic induction line

(Solid lines show the central magnetic fields magnetic induction lines of negative charge, and the broken lines show the positive charge's.)

由图 10 知, 正电荷中心磁场与负电荷中心磁场是一对对立统一的矛盾体. 根据二者对立统一的关系, 中心磁场大致可分为三个区域: 从地心附近正电荷区的边沿到赤道附近负电荷区的边沿之间的区域为区域 II, 该区域正负电荷中心磁场的方向基本上相同, 叠加后合磁场增强, 为二者相互依存的统一区; 地表外为区域 I, 地轴附近正电荷密集区为区域 III, 这两个区域的正负电荷中心磁场的方向基本上相反, 叠加后合磁场减弱, 为二者相互否定的对立

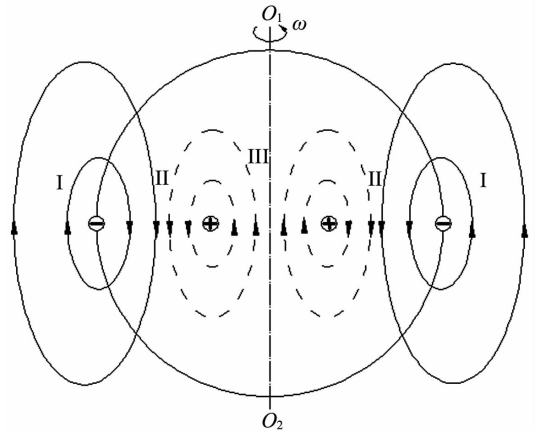


图 11 正电荷中心磁场增强导致区域 III 的磁场反向
Fig. 11 The strengthened central magnetic field produced by positive charge leads to the direction reverse of the magnetic field in area III

密集在地心附近的正电荷可以看成是无限多个正点电荷的集合, 每个点电荷都同时受到地球电场和地球磁场的作用. 电场力主要来自两方面, 一是地心附近正电荷相互之间的排斥力, 二是地表(主要是赤道附近)负电荷的吸引力. 当区域 III 的磁场反向时, 区域 III 正负电荷所受的洛仑兹力也反向. 可见, 在区域 III 的磁场反向后, 密集在地心附近的正电荷所受的电场力和洛仑兹力的作用效果都是使其离开地心, 正电荷从此由向心漂移转为离心漂移.

设地心附近正电荷密集区域的纬圆半径为 R_+ . 要使正电荷离心漂移能够继续进行, 就必须保证 $R \leq R_+$ 区域正电荷所受洛仑兹力的方向指向离开地心, 负电荷所受洛仑兹力的方向指向地心. 而要满足这一条件, 就必须保证正电荷中心磁场在区域 III 的磁感应强度比负电荷中心磁场在区域 III 的磁感应强度更强, 以使区域 III 的合磁场方向向北. 要满足正电荷中心磁场在区域 III 的磁感应强度比负电荷中心磁场在区域 III 的磁感应强度更强, 就必须要求 R_+ 圆周上有足够多的正电荷以产生足够强的正电荷中心磁场. 因此, 正电荷离心漂移只能是正电荷形成圆形向外共同行为.

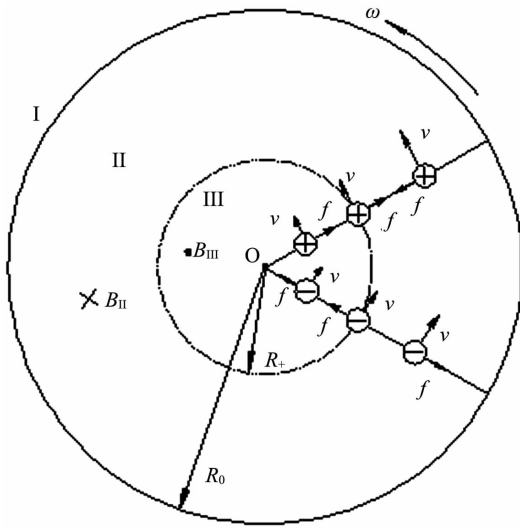


图 12 地心附近正电荷离心漂移原理图

Fig. 12 The principle of the centrifuging drifting of the positive charge around the earth's core

从地理北极上空俯瞰,地心附近正电荷离心漂移原理如图 12 所示. 在 $R \leq R_+$ 区域 III, 磁感应强度 B_{III} 指向北(图 12 中用 \cdot 表示), 由右手螺旋定则判知, 正电荷所受的洛仑兹力沿轨道半径指向离开地心的方向, 正电荷做离心漂移. 在 $R_+ < R \leq R_0$ 区域 II, 磁感应强度 B_{II} 向南(图 12 中用 \times 表示), 由右手螺旋定则判知, 正电荷所受洛仑兹力的方向沿轨道半径指向地心, 正电荷做向心漂移. 负电荷所受洛仑兹力的方向与正电荷的相反, 区域 III 的负电荷作向心漂移, 区域 II 的负电荷做离心漂移. II、III 相邻两区域的同种电荷向相反的方向漂移: 正电荷向 R_+ 圆周汇集, 负电荷远离 R_+ 圆周而去, 使得 R_+ 圆周上的正电荷密度增大, 离心漂移进入正反馈循环, 即 R_+ 圆周上的正电荷密度增大, 导致正电荷中心磁场增强: 区域 III 向北的磁场增强, 区域 II 向南的磁场增强; 增强了的磁场又施加给电荷更大的洛仑兹力, 进而导致区域 III 正电荷离心漂移速度增大、负电荷向心漂移速度增大; 区域 II 的正电荷向心漂移速度增大、负电荷离心漂移速度增大. 这两方面因素都导致 R_+ 圆周上的正电荷密度进一步增大. 从宏观上看, 密集在 R_+ 圆周上的正电荷吸引同向平行运动的正电荷, 排斥同向平行运动的负电荷, 使得 R_+ 圆周上的正电荷密度快速增大; R_+ 圆周上正电荷密度持续增大导致 R_+ 圆周增大, 即形成正电荷离心漂移. 这正是地轴参考系中地球上电荷间洛仑兹力的作用效果. 但 R_+ 圆周增大又直接导致 R_+ 圆周上的正电荷密度减小. 可见, 密集在地心附近的正电荷的离心

漂移迟早要发生, 但又受到诸多因素的影响和制约. 当正电荷离心漂移进行到正电荷中心磁场能够影响地表磁场时, 地表中心磁场的磁感应强度开始单值减小. 地表最早出现中心磁场反向的地方应该是地理南北两极附近, 如图 13 所示.

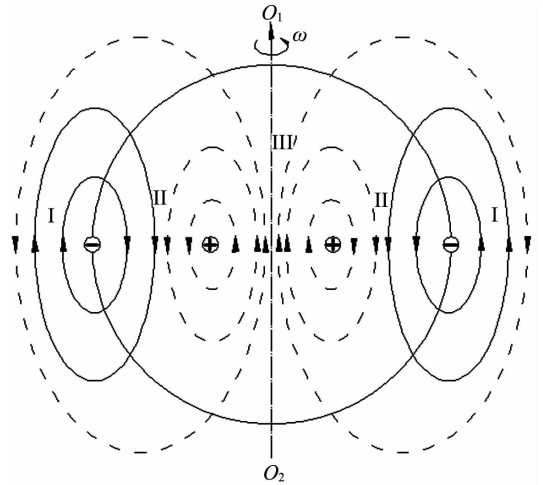


图 13 正电荷中心磁场增强导致地理南北两极附近地表磁场反向

Fig. 13 The strengthened centre magnetic field produced by positive charge leads to the direction reverse of the earth's surface magnetic field near the two geographical poles

当正电荷离心漂移到赤道附近时, 因赤道附近负电荷密度很大, R_+ 的微小增大都会导致 R_+ 圆周上的正电荷密度大幅度减小. 但在 $R < R_+$ 广大区域内可以自由移动的正电荷都做离心漂移, 源源不断向 R_+ 圆周汇集, 可以保证 R_+ 圆周上有足够多的正电荷, 产生足够强的正电荷中心磁场, 满足正电荷继续做离心漂移的条件. 正电荷可以将赤道附近的负电荷逐层分割, 挤向内圆, 直到将 R_+ 圆周扩大到最大圆——赤道.

由右手螺旋定则判知, 密集在赤道附近的正电荷随地球自转相对于地轴做匀速圆周运动所产生的磁场与赤道原负电荷产生的磁场方向相反. 至此中心磁场完成一次反转, 由正向期变为反向期. 与此同时, 地球电场也完成一次反转.

此后, 赤道上的正电荷因随地球自转绕地轴做匀速圆周运动而以洛仑兹力吸引同向平行运动的正电荷, 排斥同向平行运动的负电荷, 经历反向期地球电场和中心磁场的单值递增、地心附近汇集大量负电荷形成负电荷中心磁场、进而形成负电荷离心漂

移等过程;当负电荷中心磁场发展到能够影响地表磁场时,反向期地表中心磁场开始单值递减;当负电荷离心漂移到达赤道时,中心磁场和地球电场又完成一次反转,重新回到正向期。

伴随地球的自转,正负电荷在地球上交替做向心漂移和离心漂移。一种电荷由向心漂移转为离心漂移,另一种电荷就由离心漂移转为向心漂移。新一轮离心漂移孕育当前磁场的衰减,并导致当前磁场最终被与其方向相反的磁场所替代;新一轮向心漂移则孕育当前磁场的新生,如图 14 所示。从地心沿赤道半径向外,正负电荷中心磁场相互交错,赤道附近被正负电荷交替占领,即赤道附近交替呈现一种电荷密度显著大于另一种电荷密度的状态,导致地球中心磁场和地球电场的周期性反转。

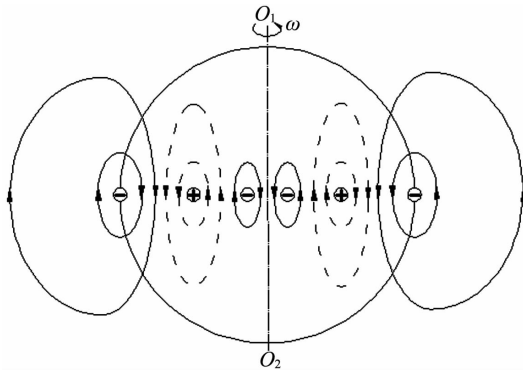


图 14 正负电荷中心磁场相互交错

Fig. 14 The central magnetic field of positive and negative electric charges intervene mutually

2.2 扩张漂移和收缩漂移

由 2.1 的分析可知,在地球磁场正向期,正电荷做向心漂移使地心附近汇集大量正电荷,电位升高,地心和地轴上的正电荷在电场力作用下源源不断地流向地理南北两极。而在地表,北半球上的正电荷所受洛仑兹力的方向向北,南半球上的正电荷所受洛仑兹力的方向向南。在洛仑兹力作用下,北半球地表上的正电荷向北漂移,南半球地表上的正电荷向南漂移,如图 9 所示。正电荷沿地轴和经线源源不断地向地理南北两极汇集,随后又到哪里去呢? 它们可能的去路有三条:一是向空中放电,这可能是形成极光的原因之一。在视地球为理想均质固体导体球的条件下,南北半球上电势的分布关于赤道平面对称,极光也应该是在关于赤道平面对称的地理南北两极附近同时出现,这一点与人们观察到的极光现象基本上相符合。二是当地理南北两极的电位升高到一

定程度,以致地表电荷受到的电场力大于洛仑兹力时,就沿经线向赤道方向漂移。三是下文要详细分析的扩张漂移。

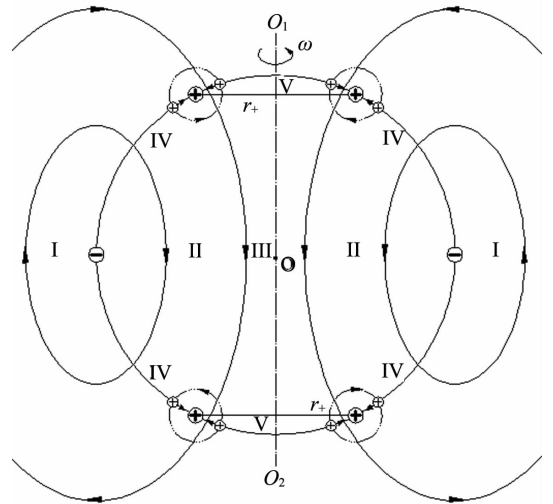


图 15 地理南北两极附近正电荷扩张漂移原理图

(三点划线圆表示正电荷极地磁场的磁感应线)

Fig. 15 The principle of expanding and drifting of the positive charge near the geographical north and south poles (The three-point-line circles show the magnetic field's magnetic induction lines of the positive charge on the earth's surface near the geographical north and south poles)

用过地轴的平面截切地球,如图 15 所示,设地理南北两极附近的正电荷汇集在距地轴 $r \leq r_+$ 近地表的区域 V 内。汇集在极地的电荷随地球自转而相对于地轴做匀速圆周运动也产生磁场,这种磁场称为极地磁场。根据右手螺旋定则判定,在 $r_+ < r < R_0$ 的近地表区域 IV,正电荷极地磁场(图 15 中用三点划线圆表示)的方向与负电荷中心磁场的方向基本上相同,二者叠加形成的合磁场增强;而在 $r \leq r_+$ 的近地表区域 V,正电荷极地磁场的方向与负电荷中心磁场的方向基本上相反,二者叠加后,合磁场减弱。当极地汇集的正电荷足够多,以致正电荷极地磁场在区域 V 的磁感应强度比负电荷中心磁场在区域 V 的磁感应强度还大时,区域 V 的磁场反向,正负电荷所受的洛仑兹力也反向。此时汇集在区域 V 的正电荷所受的电场力和洛仑兹力都是促使其离开极地,向半径增大的赤道方向做扩张漂移。而区域 IV 的正电荷仍然向两极方向漂移。负电荷的漂移方向与正电荷的漂移方向相反:区域 IV 的负电荷向赤道方向漂移;区域 V 的负电荷向地理南北两极方向做收

缩漂移. 收缩漂移到极点的负电荷又可在电场力作用下沿地轴向地心方向漂移. 地表附近Ⅳ、Ⅴ相邻两区域的同种电荷向相反的方向漂移: 正电荷向 r_+ 圆周汇集, 负电荷离 r_+ 圆周而去, 使 r_+ 圆周上的正电荷密度不断增大. 可见, 汇集在地理南北两极附近正电荷的扩张漂移与汇集在地心附近正电荷的离心漂移一样, 也含有正反馈机制. 不同的是地心附近的正电荷量相对较多, 且居中, 产生的磁场可以影响全球的磁场; 地理南北两极附近的正电荷量相对较少, 产生的磁场主要影响地表附近尤其是高纬度地表附近的磁场.

由图 13 可知, 在区域Ⅱ, 负电荷中心磁场和正电荷中心磁场的方向基本上向南, 只有正电荷极地磁场的方向偏向北, 三者叠加后的合磁场方向仍然基本上向南. 在区域Ⅱ, 仍然是正电荷做向心漂移,

负电荷做离心漂移. 因此, 极地正电荷扩张漂移导致地表附近磁场反向有两种可能.

一种可能是密集在 r_+ 圆周上的正电荷还未扩张到赤道, 就被赤道附近高密度负电荷带所中和, 进而在区域Ⅱ的磁场作用下离开赤道附近, 转为向心漂移. 这种情况仅导致高纬度地表附近的磁场在扩张漂移期反向, 随后又回到原来的方向.

另一种可能是地理南北两极附近密集在 r_+ 圆周上的正电荷扩张漂移到赤道附近后, 由于洛仑兹力的作用使南北两股正电荷互相吸引冲上了赤道, 中和了赤道附近的负电荷, 使负电荷中心磁场消失, 如图 16(a) 所示, 甚至建立起了一定的赤道正电荷磁场, 如图 16(b) 所示. 这两种情况占地球磁场主导地位的都是正电荷中心磁场, 地表外的中心磁场反向了.

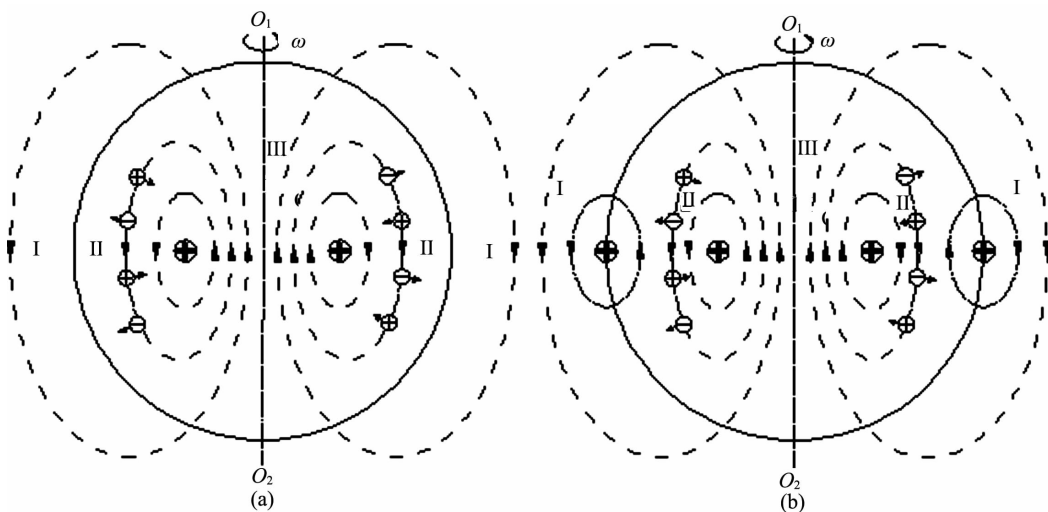


图 16 正电荷扩张漂移导致地表磁场反向

a. 扩张漂移导致负电荷中心磁场消失; b. 扩张漂移建立的赤道正电荷磁场

Fig. 16 The reversed direction of the earth's surface magnetic field produced by the expanding and drifting of positive charge

a. expanding drifting leads to the central magnetic field of negative charge disappearing;
b. magnetic field of equator positive charge produced by expanding drifting

然而这种反向持续的时间可能不会很长. 因为一方面做扩张漂移的正电荷的对立面——做收缩漂移的负电荷, 到达地理南北两极后, 可以流向地心, 不能建立起负电荷极地磁场以增强正电荷极地磁场; 另一方面, 由于区域Ⅱ的负电荷向靠近赤道方向漂移, 正电荷向远离赤道方向漂移, 经过一定的时间, 赤道附近又重新累积负电荷; 当累积的负电荷足够多, 以致负电荷中心磁场在区域Ⅰ的磁感应强度比正电荷中心磁场在区域Ⅰ的磁感应强度还大时,

地表中心磁场又重新回到原来的方向, 如图 13 所示.

由此可见, 汇集在地理南北两极附近的正(负)电荷的扩张漂移可以导致地球表层及上空的局部或全部磁场反向, 但反向持续的时间远比累积在地心附近的正(负)电荷的离心漂移导致地球磁场反向持续的时间短. 这一点还可以从地轴参考系中地球上电荷间洛仑兹力的作用效果得到解释: 当地理南北两极附近的正电荷累积到一定程度时, 洛仑兹力的

作用使其吸引同向平行运动的正电荷,增大轨道半径,导致扩张漂移;当扩张漂移到赤道附近时,负电荷的中和作用导致洛仑兹力减弱或消失,使扩张漂移的正电荷变得势单力薄;是正在做离心漂移的正电荷的吸引力和赤道负电荷的排斥力,使扩张漂移的正电荷陆续离开赤道附近,从而结束对地表磁场的影响。

到目前为止,人类对地球磁场的了解主要还局限在地球表层和上空.古地磁学研究发现,在正向期和反向期主要地磁幕内又叠加有所谓地磁事件的短暂地磁场反向^[2].累积在地理南北两极附近的正(负)电荷的扩张漂移可能是地磁事件的成因.在地磁正向期,负电荷占领赤道附近,汇集在极地的正电荷可能做扩张漂移导致地磁事件;在地磁反向期,正电荷占领赤道附近,汇集在极地的负电荷可能做扩张漂移导致地磁事件。

3 偏磁场

中心磁场和极地磁场都是由相对于地球静止的电荷随地球自转而在地轴参考系中做匀速圆周运动所产生的,其磁轴与地轴重合,磁感应线的空间分布关于地轴对称、相对于地轴静止、没有磁偏.由中心磁场和极地磁场叠加而成的地球主磁场 B_0 .也应该没有磁偏,然而人们观测到的地磁却存在磁偏.磁偏是怎样形成的呢?

3.1 偏磁场的形成

地球上的电荷除随地球自转相对于地轴做匀速圆周运动外,还受到地球电场和地球磁场的作用力而在地球上漂移,如离心漂移和向心漂移,地表电荷沿经线漂移,地轴上的电荷沿地轴漂移等等.因为电荷运动就产生磁场,电荷在地球上的漂移运动就产生了地球的偏磁场.在地轴附近及地表附近都存在较强的偏磁场.下面仅分析偏磁场对地表外地球磁场的影响。

3.2 偏磁场对地表外地球磁场的影响

地球上任意一点的磁场都是由该点的主磁场与偏磁场相叠加而成。

3.2.1 偏磁场对南北半球地表外地球磁场的影响

在地球磁场正向期,负电荷以赤道为中心(即赤道附近负电荷密度显著大于正电荷密度)占据地表.如果地表电荷所受的洛仑兹力大于电场力,正电荷沿经线向地理南北两极方向漂移,负电荷沿经线向赤道方向漂移,形成地表电流 i_1 .由右手螺旋定则判定 i_1 产生的偏磁场 B_{P1} 如图 17(a)所示:北半球

地表外的 B_{P1} 向东,南半球地表外的 B_{P1} 向西;与向北的主磁场 B_0 叠加后,北半球地表外的磁场 B 变为向北偏东,如图 18(a)所示;南半球地表外的磁场 B 变为向北偏西,如图 18(b)所示。

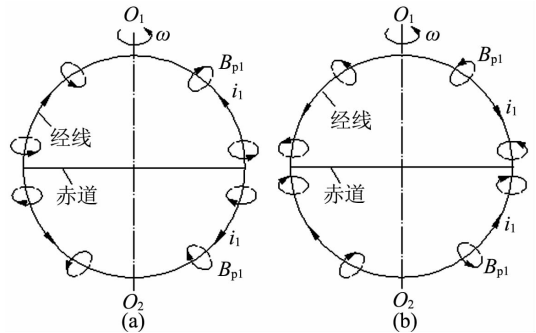


图 17 南北半球地表附近的偏磁场

Fig. 17 The deflected magnetic field around the earth surface of the north and south hemisphere

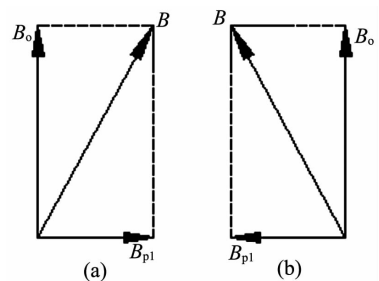


图 18 南北半球地表外的地球磁场

Fig. 18 The earth magnetic field above the earth's surface of north and south hemispheres

如果在地球磁场正向期出现地表电荷受到的电场力大于洛仑兹力,正电荷沿经线向赤道方向漂移,负电荷沿经线向地理南北两极方向漂移的情况,形成的电流 i_1 和产生的偏磁场 B_{P1} 则如图 17(b)所示,这时北半球地表外的 B_{P1} 向西,南半球地表外的 B_{P1} 向东. B_{P1} 与向北的主磁场 B_0 叠加后,北半球地表外的磁场 B 变为向北偏西,如图 18(b)所示;南半球地表外的磁场 B 变为向北偏东,如图 18(a)所示。

3.2.2 偏磁场对赤道地表外地球磁场的影响

赤道的偏磁场是由南北两半球的偏磁场相叠加而成.在视地球为均质固体导体球的条件下,南北两半球关于赤道平面对称,其偏磁场在赤道的磁感应强度大小相等,方向相反,如图 17(a)、(b)所示,叠加后合偏磁场的磁感应强度为零,赤道地表外只有向北的主磁场 B_0 ,没有偏磁场。

3.2.3 偏磁场对地理南北两极附近地表外地球磁场的影响

地理南北两极附近地表外的偏磁场也是由两个分偏磁场叠加而成,即由地表电荷沿经线漂移形成的偏磁场 B_{P1} 和地轴上的电荷沿地轴漂移形成的偏磁场 B_{P2} 相叠加而成.因 B_{P1} 、 B_{P2} 的大小各异,方向各自又存在两个相反的取向,所以地理南北两极附近地表外的磁场有多种情形,下面分析其中几种典型情况.

若地轴上的正电荷沿地轴向地理南北两极方向漂移形成电流 i_2 ,与此同时,地表正电荷沿经线向地理南北两极方向漂移形成电流 i_1 ,由右手螺旋定则判定,在地理北极附近地表外 B_{P1} 、 B_{P2} 的方向都向东,在地理南极附近地表外 B_{P1} 、 B_{P2} 的方向都向西,如图 19(a)所示.在地理北极附近地表外,两个向东的偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 与向下的主磁场 B_0 相叠加而成的磁场变为向下偏东,如图 20(a)所示.在地理南极附近地表外,两个向西的偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 与向上的主磁场 B_0 相叠加而成的磁场变为向上偏西,如图 20(b)所示.

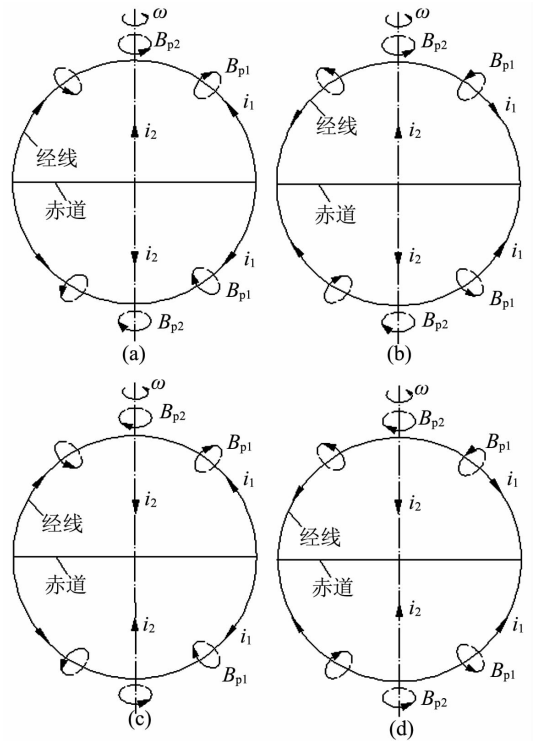


图 19 地理南北两极附近的偏磁场
Fig. 19 The deflected magnetic field near the geographical north and south poles

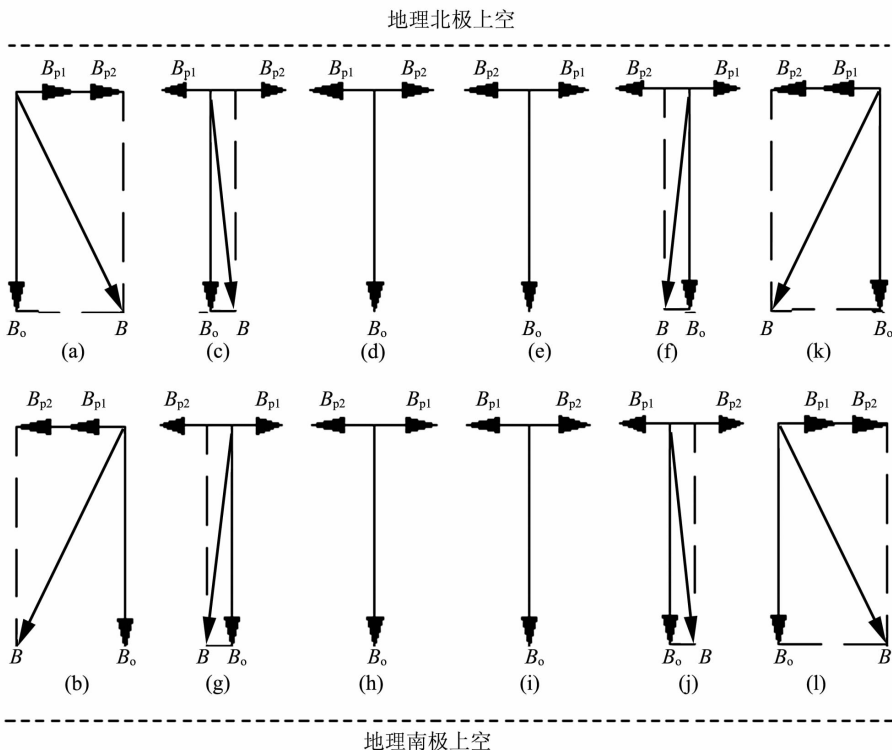


图 20 地理南北两极附近地表外的地球磁场
Fig. 20 The earth magnetic field near the earth's surface around the geographical north and south poles

同理可知,若地轴上的正电荷沿地轴向地理南北两极方向漂移形成电流 i_2 ,同时地表正电荷沿经线向赤道方向漂移形成电流 i_1 ,产生的偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 如图 19(b)所示;或地轴上的正电荷沿地轴向地心方向漂移形成电流 i_2 ,同时地表正电荷沿经线向地理南北两极方向漂移形成电流 i_1 ,产生的偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 如图 19(c)所示.这两种情况地理南北两极附近地表外两个分偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 的方向都彼此相反,在地理北极附近地表外与向下的主磁场 B_0 相叠加形成的磁场至少有如图 20(c)、(d)、(e)(f)所示的四种可能;在地理南极附近与向上的主磁场 B_0 相叠加形成的磁场至少有如图 20(g)、(h)、(i)(j)所示的四种可能.若地轴上的正电荷沿地轴向地心方向漂移形成电流 i_2 ,同时地表正电荷沿经线向赤道方向漂移形成电流 i_1 ,产生的偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 在地理北极附近地表外都向西,在地理南极附近地表外都向东,如图 19(d)所示.在地理北极附近地表外,两个向西的偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 与向下的主磁场 B_0 相叠加而成的磁场变为向下偏西,如图 20(k)所示.在地理南极附近地表外,两个向东的偏磁场 B_{P1} 、 B_{P2} 与向上的主磁场 B_0 相叠加而成的磁场变为向上偏东,如图 20(l)所示.

由图 17~20 可以得出:地表外的偏磁场由地表电荷的漂移和地轴电荷的漂移所决定.若地表和地轴上电荷的漂移运动遵守某种规律,则地表外的偏磁场也将按与之相对应的规律改变,这可能是人类已经了解的地磁场的磁偏角存在较长期漂移^[3]的成因.

4 结 论

4.1 地球电场和地球磁场源自于地球的自转和地球上正负电荷的非对等分布

地球自转带动地球上相对于地球静止的正负电荷在地轴参考系中沿同一方向作匀速圆周运动,由静磁场理论可知:若正负电荷分布对等,正负电荷产生的磁感应强度大小处处相等,方向处处相反,叠加后形成的合磁场的磁感应强度处处为零,此时地球处于既无地球电场也无地球磁场的状态;一旦正负电荷分布不对等,正负电荷产生的磁感应强度不满足大小处处相等的条件,叠加后的合磁场的磁感应强度不处处为零,此时地球电场和地球主磁场就同时产生了.地球主磁场的磁轴与地轴重合,磁感应线的空间分布关于地轴对称,且相对于地轴静止(相对于自西向东自转的地球自东向西旋转).地球上的电荷受地球电场和地球磁场的作用相对于地球漂移产

生偏磁场,偏磁场相对于地球静止,赤道平面偏磁场的磁感应强度为零,地球上任意一点的磁场由该点的主磁场和偏磁场叠加而成.除赤道平面外地球上任意一点的磁场都有磁倾和磁偏.

4.2 正负电荷在地球上持续循环漂移导致地球电场和地球磁场的周期性变化

地球磁场的周期性变化已被人类所了解,但地球电场的周期性变化还有待人类去进一步认识.

本文以地轴为参考系、视地球为真空中理想均质固体导体球而从理论上分析和描述地球电场和地球磁场.实际的地球电场和地球磁场远比本文所描述的要复杂,且多变.地球上发生的许多自然现象都直接或间接地与地球电场和地球磁场有关,并在一定程度上影响地球电场和地球磁场.

目前,人类已经了解到地电场和地磁场与多种因素相关.继重力、磁力勘探方法和技术取得长足发展^[4]后,人们又创造性研究岩性测深技术^[5,6],通过测量地电场以勘察地下金属矿、油气及地下水等资源^[7,8].随着高品位、易选矿床资源的日益枯竭,人们又研究地电场对裂隙岩块中流体(溶液、气体)作用特点,掌握浸矿溶浸液在岩块中的渗流、扩散、和浸润等规律^[9],认识矿层中气体的传输、吸附-解吸和溶解等规律^[10],促进原地浸出采矿技术的发展,以回收复杂、难处理的低品位矿产资源.人们高度关注并致力于研究地震与地电场^[11~13]、地磁场^[14~16]的变化关系,研究通过监测地电场、地磁场等地球电磁量的异常变化以实现地震预测预报^[17,18]的科学方法已取得一定进展.但从目前能够取得的资料来看,人们对地电场的认识还存在一定的局限性和片面性:通常把分布于地表的地电场划分为大地电场和自然电场两大部分,并认为大地电场是由地球外部的各种场源在地球表面感应产生的变化电场,自然电场是地下介质由于各种物理、化学作用在地表形成的较为稳定的电场^[19];杨庆锦等则根据电与磁的紧密相关性,从地球存在一相对稳定的磁偶极子磁场这一现象,推断地球也应该存在一相对稳定的电偶极子电场,但他们同时又认为氧化还原电位可能是地球电偶极子电场产生的机制^[6].可见,人们对地球自身所具有的与地球磁场同时产生、同时变化的地球电场还缺乏深入的了解和认识.对地电场的观测也主要是观测地电场的地表分量及其时空变化,岩性测深技术测量的地下电场的主要成份也只是反射电场和氧化还原电位电场^[6],关于地球自身电场的测量还缺乏相关的研究资料.

电磁力在地球系统运动过程中起着十分重要的作用. 深入认识地球电场和地球磁场, 研究地球系统电磁力作用规律, 对于人类在更深层次上认识和掌握地球系统运动规律, 了解自然, 减灾防灾, 具有十分重要的意义.

参 考 文 献 (References):

- [1] 普雷斯 F, 锡弗尔 R 著. 地球[M]. 高名修, 沈德富译. 北京: 科学出版社, 1986. 459~460.
Press F, Siever R. Earth[M]. Beijing: Science Press, 1986, 459~460.
- [2] 普雷斯 F, 锡弗尔 R 著. 地球[M]. 高名修, 沈德富译. 北京: 科学出版社, 1986. 464~465.
Press F, Siever R. Earth[M]. Beijing: Science Press, 1986, 464~465.
- [3] 刘本培, 蔡运龙主编. 地球科学导论[M]. 高等教育出版社, 2000. 74~75.
LIU Ben-pei, CAI Yun-long. An Introduction to Earth Science [M]. Higher Education Press, 2000. 74~75.
- [4] 冀连胜, 史付生. 重-磁力方法在石油勘探中的应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(03): 326~333.
Ji L S, Shi F S. Application results of gravitational and magnetic in oil exploration [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2001, 36(03): 326~333.
- [5] 杨凌, 杨庆锦. 磁力勘探与岩性测深理论基础的对比[J]. 物探与化探, 2007, 31(z1): 51~52.
Yang L, Yang Q J. A comparison of the theoretical basis between magnetic exploration and lithologic sounding [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(z1): 51~52.
- [6] 杨庆锦, 王招香. YW-III型大地电场岩性测深仪的理论基础及物性基础的探讨[J]. 地质与勘探, 2003, 39(z1): 103~106.
Yang Q J, Wang Z X. Theory and physical basis of YW-III electrotelluric field lithologic sounder [J]. Geology and Prospecting, 2003, 39, (z1): 103~106.
- [7] 杨庆锦, 王招香. YW-III型大地电场岩性测深仪的应用[J]. 地质与勘探, 2002, 38(z1): 29~31.
Yang Q J, Wang Z X. Applications of YW-III model electrotelluric field lithology sounder [J]. Geology and Prospecting, 2002, 38(z1): 29~31.
- [8] 杨德平, 刘鹏瑞. 临清地热勘查中的大地电场岩性测深与测井曲线对比研究[J]. 山东国土资源, 2006, 22(4): 37~41.
Yang D P, Liu P R. Contrast study between the method of telluric electricity field and logging curve in lithology sounding of geothermal exploration in Linqing city [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2006, 22(4): 37~41.
- [9] 左恒, 吴爱祥, 王贻明, 等. 地电场对裂隙岩块中溶浸液渗流特性影响的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 972~976.
Zuo H, Wu A X, Wang Y M, et al. Study on effect of geoelectric field on seepage properties of leaching solution in fractured rock block [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 972~976.
- [10] 邓小燕, 王通, 罗维斌. 地电场作用下矿层中气体渗流特性的实验研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(6): 33~36.
Deng X Y, Wang T, Luo W B. An experimental study on seepage properties of gas in ledge under the effect of geoelectric field [J]. Mining Research and Development, 2007, 27(6): 33~36.
- [11] 沈红会, 冯志生, 燕明芝, 等. 地电场震前变化的探讨[J]. 西北地震学报, 2006, 28(1): 74~77.
Shen H H, Feng Z S, Yan M Zi, et al. Approach on variation of geoelectric field before earthquakes [J]. Northwestern Seismological Journal, 2006, 28(1): 74~77.
- [12] 黄清华, 刘涛. 新岛台地电场的潮汐响应与地震[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1745~1754.
Huang Q H, Liu T. Earthquakes and tide response of geoelectric potential field at the Niijima station [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1745~1754.
- [13] 毛桐恩, 席继楼, 王燕琼, 等. 地震过程中的大地电场变化特征[J]. 地球物理学报, 1999, 42(4): 520~528.
Mao T E, Xi J L, Wang Y Q, et al. The variation characteristics of the telluric field in the process of earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 1999, 42(4): 520~528.
- [14] 陈伯舫. 用小波法研究台湾省两次 7.6 级大震前后仑坪台的地磁变化[J]. 地震地磁观测与研究, 2006, 2(01): 45~48.
Chen B F. Wavelet analysis results for the geomagnetic variations of the Lunping observatory before and after two strong earthquakes [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2006, 27(01): 45~48.
- [15] 李轶群, 陈化然, 田山. 地磁复转换函数在地震短临预测中的初步应用研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2007, 28, (4): 29~31.
Li Y Q, Chen H R, Tian S. Preliminary study on geomagnetic complex transfer function in earthquake short-term prediction and the application [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2007, 28, (4): 29~31.
- [16] 尚先旗, 马君钊, 王建国, 等. 数字地磁资料在地震预测中应用研究[J]. 防灾科技学院学报, 2006, 8(3): 34~36.
Shang X Q, Ma J Z, Wang J G, et al. A research on the application of the numerical geomagnetic data in earthquake forecast [J]. Journal of Institute of Disaster-prevention Science and Technology, 2006, 8(3): 34~36.
- [17] 王宣文. 地震预报探讨的设想[J]. 国际地震动态, 2002, 8: 14~16.
Wang D W. Ideas on exploration of earthquake predictions [J]. Recent Developments in World Seismology, 2002, 8: 14~16.
- [18] 丁鉴海. 地震电磁前兆研究进展[J]. 电波科学学报, 2006, 21(5): 791~801.
Ding J H. Seismo-electromagnetism precursor research progress [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2006, 21(5): 791~801.
- [19] 席继楼, 赵家骝, 王燕琼, 等. 地电场观测技术研究[J]. 地震, 2002, 22(2): 47~53.
XI J L, Zhao J L, Wang Y Q, et al. Research on observational technology of the geoelectric field [J]. Earthquake, 2002, 22(2): 47~53.