

文章编号: 1009-6248(2002) 03-0126-05

关于地球磁场极性反转机制的思索^{*}

杨合群

(西安地质矿产研究所, 陕西 西安 710054)

摘 要: 地球磁场极性在地质历史中发生过相当频繁的倒转。作者将地球内部划分为岩石圈—软流圈—中圈—液圈—固核等 5 个动力学圈层, 认为中圈与固核间可异步旋转; 地球偶极磁场由中圈与固核异步旋转时所驱动的液圈中的封闭涡流与银河系磁场作用产生; 该偶极子场极性由地球所通过的银道面上侧或下侧磁场方向及液圈涡流的方向共同决定, 二者之一反向, 极性发生倒转。

关键词: 中圈—固核异步旋转; 地磁极性反转

中图分类号: P318. 2⁺ 1 **文献标识码:** A

地磁场在地质历史中变化的一个重要特点是它的极性发生过相当频繁的倒转, 磁化岩石记录了这种现象, 有关的资料在许多文献中都有介绍。但是, 关于地球磁场极性反转的机制虽经许多学者的努力, 至今却仍是一个尚未解决的问题。在地磁学理论取得更大的突破之前, 不可能透彻地阐明这一机制。本文仅是试图利用已有的理论乃至假说作出合乎逻辑的推理, 旨在抛砖引玉。

1 地球内部的动力学圈层

我们的讨论建立在地球内部圈层结构模式的基础上。传统的划分法是根据地震波速变化最明显的两个界面(莫霍面和古登堡面)将地球内部分为 3 大圈, 即地壳、地幔和地核。后来又陆续分出了第二级及第三级圈层, 并分别给以代号 A(A₁、A₂)、B(B₁、B₂)、C(C₁、C₂)、D(D₁、D₂)、E、F 和 G。然而, 对全球大地构造理论和地磁学理论而言, 需要的却是以上述第三级圈层为基础, 将地球内部归并为 5 个动力学圈层: 岩石圈(A₁ + A₂ + B₁); 软流圈(B₂); 中圈(C₁ + C₂ + D₁ + D₂); 液圈(E); 固核(F + G)。

软流圈对应上地幔中地震波传播的低速带。在该带地震波发生强烈衰减, 横波传播速度

收稿日期: 2001-01-05; 修回日期: 2001-01-09

作者简介: 杨合群(1953-), 男, 山西闻喜人。1982 年毕业于北京大学地球化学专业, 研究员。

编者按: 该文由作者 1985 年 8 月 26 日投于本刊, 由于审稿原因, 未能及时刊发。后曾刊于《研究生论坛》(西安地质学院研究生会主办, 1987 年第 1 期)。近年, 有关核—幔差异运动的假说风靡地学界, 为了系统地介绍作者关于地球中圈与固核间可异步旋转并由此引发地磁场极性反转的学术思想, 今特刊发杨合群研究员论文, 以飨读者。

在该带中明显降低。物理实验表明,在晶态和液态混合物中地震波衰减较快,因此,软流圈应是部分熔融状态,由于刚度较低,当它受到即使很小的剪切力的作用就会很快发生变形,只要有微小的应力就能引起物质的缓慢流动,从而岩石圈板块能够在软流圈上运动。

液圈对应地球外核,纵波速度急速降低,横波不能通过,刚性模量为零,物质必然呈液态。与此呈明显对比的是地球内核,纵波和横波都可通过,物质呈固态。二者间过渡层可测到速度不大的横波,说明液态向固态过渡。为了简便起见,将过渡层与内核一起统称固核。由于液圈的隔离,使中圈与固核不能组成统一的刚体,从而两者之间可以产生异步转动。虽二者皆自西向东旋转,但旋转速率可以不同。将软流圈和液圈分别独立为一级圈层,是因为它们在地学理论中具有特殊的意义。

2 中圈与固核间的异步旋转

地球中圈与固核间的异步旋转主要起因于内部物质的重新分布。在地心坐标系内看地球运动,地球是在绕定轴旋转。当地球所受合力矩等于零或极微小可以忽略时,有

$$I\omega = \text{恒量}$$

式中 I 和 ω 分别为地球绕定轴自转的转动惯量和角速度。

当中圈及其以上的圈层与固核分别考虑,前者为一扁圆形的旋转椭球壳,设其转动惯量和角速度分别为 I_{A-D} 和 ω_{A-D} ; 后者为一扁圆形的旋转椭球体,设其转动惯量和角速度分别为 I_{F-G} 和 ω_{F-G} 。

地球是一个物质密度不均匀的物体,从地表向地心,密度由小变大,地球内部质量的重新分布必然引起自身转动惯量的变化,转动惯量的变化则必然导致旋转速度的变化。

地质研究表明,地球内部质量的重新分布最经常、最大量地发生在上部圈层,下部圈层的变化相对比较缓慢。如,发生一场大规模地壳运动的时候,地球深部必然会受到一定影响,壳下部的酸性和基性岩质乃至地幔上部的超基性岩质,就会乘机活动,从裂隙中挤入地壳的上部,甚至喷出地壳而形成火山爆发。这样一来,埋藏在地下深处密度较大的物质,就部分地转移至地壳上部乃至地球表面,从而使地球上部圈层的转动惯量增大,自转速率减慢,地内固核由于液圈相隔,只能受微小的带动,发生很小的变化。随着地球自转速率减慢,地内任一物质的惯性离心力也减小,这样,地球就会由于重力作用而收缩,或地球上部物质由赤道向两极方向移动,使地球内部质量再次重新调整。这样,上部圈层的自转角速度又要变快了。由此可以推断,只要地内物质分布不是一成不变,就会使中圈与固核间的旋转角速度产生差异。

3 地球磁场的产生

地球中圈与固核的旋转角速度不一致时,出现异步转动,其结果导致液圈中形成许许多多封闭的涡流,这种涡流的法线方向基本一致。液态金属仍然是电的良导体,只要有小的初始磁场存在,运动着的良导体就会产生感应电流,这种电流将产生磁场 B_0 。在 B_0 作用下,铁、镍固核将发生磁化。

铁镍在常温下应为铁磁质,但地核内温度远远超过居里点(600~700 °C),于是铁磁质转变

为顺磁质,即不再有自发磁化产生磁畴的特性。然而,它们又不完全等同于普通的顺磁质。它们具有较多的未配对平行自旋电子。铁原子的 $3d$ 轨道有 6 个电子,除 2 个配对外,有 4 个平行自旋;镍原子的 $3d$ 轨道有 6 个电子,除 2 个配对外,有 2 个平行自旋。

原子中任一个电子,都同时参与两种运动,即环绕原子核的轨道运动和电子本身的自旋。这两种运动都能产生磁效应。把原子看作一个整体,原子中各个电子对外界所产生的磁效应的总和可用一个等效的圆电流表示,称为原子电流。这种原子电流具有一定的磁矩,称为原子磁矩,用符号 P_a 表示

在外磁场 B_0 作用下,原子中每个电子都受到洛仑兹力的作用,因而电子的运动状态将更加复杂。这时,每个电子除上述两种运动外,还要附加一个以外磁场方向为轴线的转动,称为电子进动。不论电子原来运动情况如何,如果面对着 B_0 的方向看,进动的转向总是反时针向的,电子的进动也相当于一个圆电流。因为电子带负电,这种等效圆电流的磁矩方向永远与 B_0 的方向相反。原子中各个电子因进动而产生的磁效应的总和,称为附加磁矩,用 ΔP_a 表示。

原子轨道上配对运行的两个电子,其自旋方向及绕核运行方向均互相相反。它们对原子磁矩的贡献正好相互抵消。但铁镍原子轨道上除配对运行的电子外,还有数个平行自旋电子,从而使它们的原子磁矩有一定的量值,而且要比附加磁矩大得多,以致附加磁矩可以略去不计。

在一般状态,由于原子磁矩排列的方向是无序的,对固核中任何一个体积元,各原子磁矩的矢量和 $\sum P_a = 0$, 对外界不显示磁效应。而在磁场 B_0 作用下,原子磁矩 P_a 的大小虽然不改变,但 P_a 的方向与 B_0 趋于一致。当然,由于热运动,原子磁矩的取向是不可能完全一致的。在给定温度下,按一定的统计规律分布着。固核经磁化产生比 B_0 强的磁场 B , 这就是地球偶极磁场。这个偶极磁场可由一个位于地心的偶极子 M 来等效,偶极子方向称为磁轴。

由于这样驱动的液圈涡流法线方向都与地球自转轴大体一致,因而偶极子场的磁轴与地球自转轴密切相伴。

地球不是一个密度均匀的圆球体,也不是一个关于自转轴质量分布非常对称的物体。因此,在其他天体的力场中,自转着的地球存在进动、章动。由于中圈及其以上圈层与固核不能组成统一的刚体,并且二者轴对称程度也不同,因此二者的进动和章动也不可能完全一致,这势必对液圈中封闭涡流的法线取向产生作用,从而使磁轴与地轴相伴生而不相重合。因此,有理由认为,地磁轴是被迫才与作为对称轴的地球自转轴保持相当小的角度的。

除了旋转效应外,液圈中温度的不均匀性也可以引起对流运动而产生若干局部涡流,每一个局部涡流产生的磁场,可用一个小偶极子 m_i 来等效。由于其产生与地球自转无关,各小偶极子的轴向不受地轴的控制,取向各异,它们的组合就构成了地球的非偶极磁场。文中讨论的地球磁场极性反转,指的是偶极磁场的极性。

4 极性反转的原因

从上述地球偶极子场的形成,可知其极性决定于两个方面:①初始磁场的方向;②由中圈与固核异步旋转所驱动的液圈中涡流的旋转方向。二者中任一反向,可使地球偶极子场极性反转;但二者同时反向,极性不变。

4.1 初始磁场的方向

使地球液圈中涡流产生感应电流的初始磁场,可能就是银河系磁场。

银河系磁场集中在银道面,并与旋臂相平行,强度较弱,仅为 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 高斯。银道面上集中了银河系最强的磁力线,大致与宇宙线强度最大地区的分布是一致的。银河系磁场在银道面上下的方向是相反的。这样,当太阳系围绕着银心运动,穿越不同的旋臂的不同部位时又在银道面的两侧作波状起伏的运动^[4],这些地区的磁场方向对地球磁场的极性产生影响,使极性发生变化。

4.2 液圈中涡流的方向

地球液圈中涡流的方向是由中圈与固核间的相对角速度决定的。从地球北极向下看,当中圈角速度大于固核的角速度时,涡流方向为逆时针向;当中圈角速度小于固核角速度时,涡流方向为顺时针方向。

为讨论方便,令中圈与固核间角速度差表示如下

$$\Delta\omega = \omega - \Omega = \omega - \Omega$$

则根据 $\Delta\omega$ 的正负及变化趋势可将固核与中圈间的异步转动划分出 4 种基本状态:

状态 : $\Delta\omega < 0, |\Delta\omega|$ 小

状态 : $\Delta\omega > 0, |\Delta\omega|$ 大

状态 : $\Delta\omega > 0, |\Delta\omega|$ 小

状态 : $\Delta\omega < 0, |\Delta\omega|$ 大。

此外有一种过渡状态 $\omega = 0$ 。各种状态间的相互转变关系示于图 1。

图 1 中任意两相邻的基本状态间可以相互转变,这种转变过程对地球磁场的影响有如下规律:

- (1) $|\Delta\omega|$ 增大时,偶极子场的强度增大; $|\Delta\omega|$ 减小时偶极子场的强度减弱。
- (2) $\Delta\omega = 0$ 时,偶极子场强度为零;经过 $\Delta\omega = 0$,极性反转。
- (3) $\Delta\omega > 0$ 时,地磁场显示西向漂移; $\Delta\omega < 0$ 时,地磁场则显示东向漂移。

据现代地磁场观测资料^[2,3],19 世纪初计算的磁矩为 8.5×10^{25} 高斯·厘米³,1965 年为 8.0×10^{25} 高斯·厘米³,130 年中减少了约 6%。同时非偶极磁场存在着西向漂移,漂移的速度为每年几分之一经度。由此推断,现代中圈与固核间的异步转动处于状态 ,即中圈比固核转速大,但这种差异在减小。

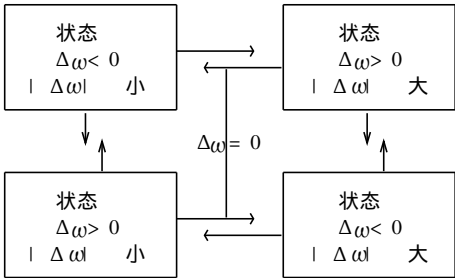


图 1 中圈与固核间异步旋转的四种状态相互转变示意图

Fig. 1 Schematic diagram for changing from one into another in four basic states of asynchronous rotation between mesosphere and solid nucleus

5 结 语

综上所述,笔者认为:地球偶极磁场由中圈与固核异步旋转时所驱动的液圈中的封闭涡流与银河系磁场作用产生;偶极子场的极性由地球所通过的银道面上侧或下侧磁场方向及液圈涡流的方向共同决定,二者之一反向,极性发生倒转。

参考文献:

- [1] 成都地质学院普通地质教研室. 动力地质学原理[M]. 北京:地质出版社, 1978.
- [2] 徐世浙. 古地磁学概论[M]. 北京:地震出版社, 1982.
- [3] J. A. 雅各布斯, R · D · 拉塞尔, J · T · 威尔逊. 物理学与地质学[M]. 北京:海洋出版社, 1974.
- [4] 徐道一, 杨正宗, 张勤文, 孙亦因. 天文地质学概论[M]. 北京:地质出版社, 1983.

Thinking about the mechanism of geomagnetic polarity reversal

Yang He-qun

(*Xian Institute of Geology and Mineral Resources, Xi'an 710054, China*)

Abstract: Geomagnetic polarity reversal was often happened in the geologic history. The author tries to probe its mechanism. In the paper, Earth's interior is divided into five dynamics layers: lithosphere, rheosphere, mesosphere, liquid sphere and solid nucleus. It is considered that the mesosphere and solid nucleus may asynchronously rotate, and this motion drives closed-vortexes in the liquid sphere. Earth magnetic dipole field originates from each other effect between Galaxy magnetic field and the closed-vortexes in Earth's liquid sphere. The geomagnetic polarity depends on the directions of Galaxy magnetic field and the closed-vortexes in the liquid sphere. While one of the two changes its direction, geomagnetic field changes its polarity.

Key words: asynchronous rotation between mesosphere and solid nucleus in the earth; geomagnetic polarity reversal