

古地磁学在地磁场起源研究中的应用

朱日祥

(中国科学院地球物理研究所, 北京 100101)

刘椿

(中国科学院地质研究所, 北京 100029)

林緬

(中国科学院力学研究所, 北京 100083)

提 要

地磁场起源及其倒转是地球科学的难题之一。究其原因一方面是由于无法直接观测地球内部发生的物理过程, 另一方面是由于缺乏理论与实验相结合的综合研究。本文以磁流体力学为基础, 将古地磁学与 $\alpha\omega$ 发电机理论结合在一起进行分析和研究。得出了如下新观点: (1)洛仑兹力在地核发电过程起负反馈作用; (2)较差旋转控制着地磁场西向漂移; (3) α 作用使地磁极偏离地球自转轴。

关键词: 地核发电机理论 地磁极性倒转 古地磁学

一、地核发电机理论

Frenkel提出, 地核内金属物质在磁场中作涡旋运动时, 通过感应方式产生电流。反过来, 这种感应电流所形成的磁场就是连续不断的再生场⁽¹⁾, 故称这一理论为发电机理论。一般而言, 电磁场和导电流体之间是彼此耦合的, 电磁流体的运动遵循物质的质量守恒、动量守恒和能量守恒关系⁽²⁾。由于导电流体和电磁场之间的相互制约, 产生了许多新的运动特征, 因此电磁流体力学实质上比经典流体力学或经典电动力学要复杂得多。电磁流体力学包括用麦克斯韦方程组描述的电磁场运动规律和用流体力学方程组描述连续介质运动规律; 对于地核内的电磁流体力学过程, 其位移电流 \vec{D} 可以忽略, 这时电磁流体力学过程就可用磁流体力学近似处理; 电磁能量及动量仅需考虑磁场 \vec{H} 。因此, 由麦克斯韦方程组和电磁状态方程导出的磁场方程可构成完备方程, 即

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j} = \sigma \vec{E} + \sigma (\vec{V} \times \vec{B}) \quad (1)$$

式中 \vec{j} 、 σ 、 \vec{E} 、 \vec{V} 和 \vec{B} 分别为电流密度、电导率、电场强度、流体运动速度和磁感应强度。对上式两边取旋度可得

$$\frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{1}{\sigma \mu_0} \nabla^2 \vec{H} + \nabla \times (\vec{V} \times \vec{H}) \quad (2)$$

式中 μ_0 为真空磁导率;右边第一项为自由衰减项,估计衰减常数约为 1.5×10^4 年^[3];右边第二项反应速度场与磁场的相互作用,即二者耦合,这主要是由于洛仑兹力的存在。根据平均场电动力学,取 $\bar{\mathbf{H}}_0$ 和 $\bar{\mathbf{v}}_0$ 为磁场和速度场的平均量,由(2)式可得

$$\frac{\partial \bar{\mathbf{H}}_0}{\partial t} = \nabla \times (\bar{\mathbf{v}}_0 \times \bar{\mathbf{H}}_0) + \nabla \times (\alpha \bar{\mathbf{H}}_0) - \nabla \times (\beta \nabla \times \bar{\mathbf{H}}_0) + \eta_m \nabla^2 \bar{\mathbf{v}}_0 \quad (3)$$

式中 α 为赝标量, β 为纯标量, η_m 为等效粘性系数;右端第二项和第三项为小尺度运动对大尺度位形的贡献。 $\nabla \times (\alpha \bar{\mathbf{H}})$ 给出湍流扩散项。

为了同古地磁结果进行比较和分析,可将平均场分解为环向场($\bar{\mathbf{H}}_T, \bar{\mathbf{v}}_T$)与极向场($\bar{\mathbf{H}}_P, \bar{\mathbf{v}}_P$)之和,这时可将(3)式分解为

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}_T}{\partial t} = \nabla \times (\bar{\mathbf{v}}_P \times \bar{\mathbf{H}}_T + \bar{\mathbf{v}}_T \times \bar{\mathbf{H}}_P) + \nabla \times \alpha \bar{\mathbf{H}}_P + (\eta_m + \beta) \nabla^2 \bar{\mathbf{H}}_T & (4a) \\ \frac{\partial \bar{\mathbf{H}}_P}{\partial t} = \nabla \times (\bar{\mathbf{v}}_P \times \bar{\mathbf{H}}_P) + \nabla \times \alpha \bar{\mathbf{H}}_T + (\eta_m + \beta) \nabla^2 \bar{\mathbf{H}}_P & (4b) \end{cases}$$

方程组(4)给出场的分布规律。由(4b)式可见,极向场主要受控于 α 效应;而(4a)式则说明环向场受控于 α 效应与 $\omega(\bar{\mathbf{v}}_T)$ 效应, α 与 ω 对 $\bar{\mathbf{H}}_T$ 的影响决定于比值 $\frac{\bar{\mathbf{v}}_T}{\alpha}$ 的大小。若 $\frac{\bar{\mathbf{v}}_T}{\alpha} \geq 1$,则 $\bar{\mathbf{H}}_T$ 主要受控于 ω ;反之,若 $\frac{\bar{\mathbf{v}}_T}{\alpha} \ll 1$,则 $\bar{\mathbf{H}}_T$ 主要受控于 α 。根据地核内流体运动特征,我们认为 $\frac{\bar{\mathbf{v}}_T}{\alpha} \geq 1$,所以环向场 $\bar{\mathbf{H}}_T$ 主要受控于 ω 。这样,由方程组(4)描述的运动过程称为 $\alpha\omega$ 发电机模式。发电过程可用图1表示。初始极向场 $\bar{\mathbf{H}}_{P0}$ 由回旋磁效应产生($H_{P0} = 10^{-11} H_{\text{现今}}$),图1的 ω_s 是地球自转角速度。而要使 $\alpha\omega$ 过程对 $\bar{\mathbf{H}}_{P0}$ 产生再生作用,地面上的观察者看来,地核必须向 ω_s 的反方向旋转,也就是说 $\alpha\omega$ 过程要求地核绕地轴旋转的速度比地幔的旋转速度低,

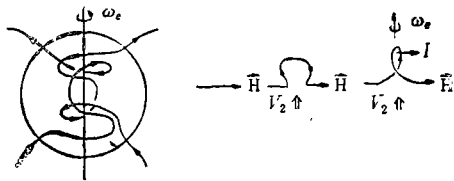


图1 $\alpha\omega$ 发电机过程简图

Fig.1 Scheme for $\alpha\omega$ dynamo theory.

二者转速之差保证了地磁场的再生过程得以维持,同时使地磁场产生了西向漂移。图1a表示较差旋转的导电流体使初始极向磁场转化为环向磁场;图1b则说明,由于流体上升运动将磁力线托起,再由于较差旋转使磁力线扭结;这时可形成与原来环向磁场方向平行的环向电流;这种由地核内小尺度湍流所产生的环向电流的叠加产生大尺度的极向磁场,加强了初始极向磁场。但上述理论分析仅说明了科里奥利力的作用,而看不清洛仑兹力的物理含义,下面将古地磁学与磁流体力学相结合探讨这一问题。

二、古地磁场与发电机理论

由上述可知,对于给定的速度场,从磁流体力学方程组得到的磁场强度有可能随时间而增加。但古地磁场强度数据则表明:地球偶极矩(VDM)在地质时期存在极值,作者认为,造成理论分析与古地磁测定结果的差异,是由于在理论计算过程中忽略了洛仑兹力的作用。实际上,洛仑兹力对地核内流体运动发电过程的影响可表述为:当磁场 $\bar{\mathbf{H}}$ 在 $\alpha\omega$ 效应作用下增加到一定程度时,洛仑兹力就对 $\bar{\mathbf{H}}$ 的继续增加起负反馈作用,而科里奥利力则是维持磁场再

生过程的动力。仅从上述简化的数学推导是无法解释VDM存在极值。可见，洛仑兹力对地核内流体的自发电过程和维持这个过程的稳定性起重要作用。

为了探讨地磁场的演化历史，对5百万年以来VDM数据作了统计分析，其结果表明： $\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ 不是轴对称的。过去，人们只知道轴对称运动不能维持轴对称场^[4]，并不了解地磁场随时间的变化也为非轴对称。我们认为， $\frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$ 的不对称性对任何形式的地核发电机模型都是极为重要的。

由近400年来地磁场方向观测结果和球谐分析可知，磁极位置在地球自转轴附近缓慢移动^[5]。为了研究这种移动的规律以及与地核发电机理论的内在联系，我们收集了国内外发表的5百万年以来的古地磁数据，并结合作者获得的晚新生代的28个虚地磁极(VGP)数据^[1]，分析了古地磁场方向的变化特征。首先以2000年(B.P.)为界，将5百万年以来的古方向数据分为两个时间段。对第一段取100年为时间窗口求平均VGP(图2)。2000年以来VGP的分布是以地球自转轴为中心，平均磁极位置为 $\lambda_a=88.7^\circ\text{N}$ ， $\varphi_a=1.6^\circ\text{E}$ ；即平均地磁场是轴向地心偶极子场。利用第二段的数据，可以将地磁场方向的变化追溯到5百万年前(图3)，其平均磁极位置为 $\lambda_a=87^\circ\text{N}$ ， $\varphi_a=215^\circ\text{E}$ 。与2000年以来的结果相似，平均地磁场仍为轴向地心偶极子场。结合地核发电机理论的 $\alpha\omega$ 效应可知，地球的较差旋转是自发电的主要机制。那么，由此产生的磁场也应与地球的自转相联系；另一方面，由于 α 效应的作用，又使地核发电机产生的磁场有偏离地球自转轴的效应，这就使得现今观察到的地磁极与地球自转轴成 11.5° 的夹角。

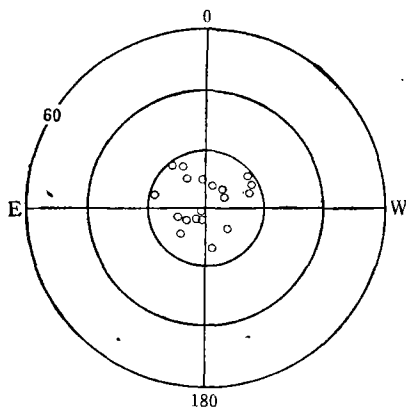


图2 两千年以来地磁极的分布

Fig.2 Distribution of geomagnetic pole for the last 2,000 years.

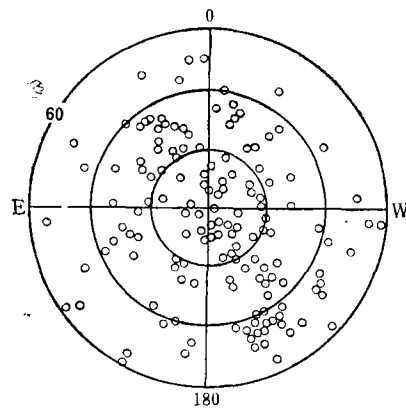


图3 5百万年以来地磁极的分布

Fig.3 Distribution of geomagnetic pole for the last 5 million years.

基于上述分析，可以认为地核内的湍流对流元的形态及其振荡幅度确定地磁极性的倒转。而引起流体运动方式偏离正常状态的原因是地核内部某种突变使得内部的流动形态出现宏观上相对有序和核幔界面处的边界条件发生突变。与生物演化类似，地核内物质运动的演

1) 朱日祥, 1989, 晚新生代古地磁场强度的测定与极性倒转问题探讨, 博士论文。

化为“间歇式”的，而不是渐变过程。既然地核内部流体的运动状态决定地磁场的极性，那么，倒转的机制就应在地核内的流体运动中去寻找。为了便于计算，可引入环向矢势 \vec{A}_T ，并记 $\nabla \times \vec{A}_T = \vec{A}_P$ (式中 \vec{A}_P 为极向矢势)。根据平均场发电机模型可得

$$\frac{\partial \vec{A}_T}{\partial t} = \alpha \vec{H}_T + \eta_m \nabla^2 \vec{A}_T \quad (5)$$

由于环向磁场 \vec{H}_T 对流体的作用，使 \vec{A}_T 随着时间的变化可写为

$$\frac{\partial \vec{A}_T}{\partial t} = f(r, \theta, t) \vec{H}_T + \eta_m \nabla^2 \vec{A}_T \quad (6)$$

(6) 式为非齐次波动方程， $f(r, \theta, t)$ 为区域对流元幅度参量。根据流体运动的涨落性，可将 $f(r, \theta, t)$ 分解为 $g(r, \theta, t) + C\delta(r-r_0)\delta(t-t_0)$ ，其中 g 为似稳状态对流的平均效应； $\delta(r-r_0)$ 和 $\delta(t-t_0)$ 为时空delta函数， C 为流体中异常涨落运动所产生的电流与 α 效应所产生的环向电流幅度相近而方向相反时，地磁场的偶极分量就会消失。若这一异常涨落持续时间足够长，以致由它所产生的环向电流占主导地位，那么地磁极性就会发生倒转；相反，若这一异常涨落很快消失，地核内流体也就回到原来的似稳状态，那么，地磁极性就会出现一次游移。

根据以上分析，可以得出如下结论：

(1) 洛仑兹力对地核内发电过程起负反馈作用。

(2) 西向漂移是地核与地幔存在较差旋转的表现，或者说核幔之间的较差旋转决定着西向漂移。

(3) 5百万年以来，平均古地磁场是中心偶极子场，这是由 $\alpha\omega$ 效应所决定的，在任一“瞬时”，地磁极偏离地球自转轴是由于 α 效应的影响。

(1989年7月收到)

参 考 文 献

- [1] Parker, E.N., 1987, The application of inverse theory to seamount magnetism, Rev Geophys., V.25, pp.17-40.
- [2] 丁士章、朱白祥, 1986, 电动力学教学辅导, 山西人民出版社, 83-123页。
- [3] Merrill, R.T. et al., 1990, Paleomagnetism and the nature of the geodynamo, Science, V.248, No.4953, pp.345-350.
- [4] 杨诺夫斯基(刘洪学等译), 1982, 地磁学, 地质出版社, 160-220页。
- [5] Merrill, R.T. et al., 1983, The earth's magnetic field, Academic press Inc., London, pp.241-265.

APPLICATION OF PALEOMAGNETISM TO STUDY OF THE ORIGIN OF THE EARTH'S MAGNETIC FIELD

Zhu Ri-xiang

(Institute of Geophysics, Academia Sinica, Beijing 100101)

Liu Chun

(Institute of Geology, Academia Sinica, Beijing 100029)

Lin Mian

(Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing 100083)

Abstract

The origin and reversal of the Earth's magnetic field is still a puzzle in geophysics. There are two reasons for this, one is that the physical process in the Earth's core can not be observed directly, and another is that scarce studies were carried out in combining paleomagnetic data with magnetohydrodynamics. Based on paleomagnetism and $\alpha\omega$ dynamo theory, some new results are obtained in this paper: (1) Lorentz force results in negative feedback in the dynamo process in the Earth's core; (2) westward drift of the geomagnetic field is determined by the difference of rotation between the Earth's core and mantle; (3) α effect makes the geomagnetic dipole tilt at some angles with respect to the axis of rotation.

Key words: Magnetohydrodynamics. Geomagnetic polarity reversal.
Paleomagnetism