

地球磁尾的电场模式

张天辉 徐荣栏 李 磊

(中国科学院空间科学和应用研究中心 北京 100080)

摘 要

地球磁层中的电场是磁层等离子体运动的主要驱动力。目前常用的磁层电场为均匀晨昏电场和投影电场。本文假定磁力线为电场的等位线, 地球电离层电场看做磁层电场沿磁力线在电离层的投影。利用 Tsyganenko 磁场模式 (T89), 沿磁力线把电离层电场投影到磁尾, 得到了一个新的磁层电场模式。文中对偶极磁场和 T89 磁场模式下的投影场作了比较, 说明本模式突破了偶极磁场的局限, 在磁层有更大的适用范围

关键词 极区电场—磁尾电场

1 引言

实验观测表明, 地球磁尾存在大尺度的日向等离子体对流。这种对流是地球磁尾中最基本的物理过程, 它把磁尾中的带电粒子输运到地球附近。和这种大尺度对流对应, 磁尾存在一个大尺度的对流电场。该对流电场是在太阳风与磁层的相互作用下形成的。在太阳风中的能量和粒子向磁尾输运以及磁尾的等离子体进入近地区域的过程中, 该对流电场起着关键性的作用。

目前常见的磁尾电场有两种, 均匀晨昏电场和投影电场。均匀晨昏电场假定磁尾电场为晨昏向的均匀电场。因为带电粒子在电场和磁场的共同作用下的漂移速度为: $\mathbf{V} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / B^2$ 。由漂移速度可以反推电场: $\mathbf{E} = -\mathbf{V} \times \mathbf{B}$ 。所以和地球磁尾等离子体日向对流对应的电场为一个晨昏向的电场。均匀晨昏电场是最简单的电场模式。它的优点是简单, 而且在定性讨论中远磁尾大尺度等离子体日向对流时 (如 Ashour-Abdalla^[1]) 是一种很有效的电场模式。但在近地区域, 均匀晨昏电场是不适用, 更多的则是用 Volland^[2] 电场模式, 如 Chen^[3]。

在磁层大部分区域, 介质为无碰撞的等离子体, 沿磁力线的电导率近似为无穷。所以磁力线也可以看做电场的等位线, 电离层的电场看做是磁层电场沿磁力线在电离层的映射场。在知道电离层电场的情况下, 可以把电离层电场沿磁力线投影到磁层, 得到磁层的电场模式, 这种电场模式就是投影电场。最常用的投影电场是 Volland^[2] 模式, 该电场模式形式简单, 有解析形式, 很实用。但受偶极磁场模式本身的限制, 该模式只能在近地区域使用, Chen^[3] 在讨论磁暴期间环电流变化时使用的就是这种模式。

上面讨论的两种常用电场各有其特点。同时也各自有自身的局限和适用范围。所以, 通常情况下, 中远磁尾和近地区域都是分开来讨论的。

2001-01-18 收到原稿, 2002-05-09 收到修定稿

最近, Peromian^[4] 在 Heppner 和 Maynard 极区电场模式的基础上, 用 T89(Tsyganenko^[5]) 磁场模式下的投影电场来讨论磁尾粒子的运动. 粒子运动过程中, 每一步的电场强度都由邻近六个空间点沿磁力线投影得到的空间电位来计算. 由于 T89 磁场模式本身适用范围比较大, 所以这种投影电场模式有很大的适用范围, 但没有解析形式. 而且作者采用的算法对计算机的要求很高, 不便于普遍使用.

我们的目的是以 Tsyganenko 的磁层磁场模式和 Volland^[2] 极区的电场模式为基础, 用投影的方法得到磁尾各点的电场数据, 利用这些电场数据分析磁尾投影电场的特点. 并以此为基础, 发展一个半经验的磁层对流电场模式. 该电场模式要比均匀晨昏电场更接近实际电场.

2 选取模式

假定整个磁层等离子体的电导率无穷大, 磁力线是电场的等位线. 我们把电离层电场, 沿磁场磁力线投影到磁层各个位置, 得到磁层各点的电位分布.

在计算磁层磁尾的电场分布时, 磁层的磁场模式很多, 这里我们采用的是 Tsyganenko^[5] 的半经验磁场模式 (T89). 它是目前比较好的一个磁场模式, 适用于包括磁尾区的整个磁层. 以此为基础的投影电场也可在整个磁尾使用.

同样电离层的电场模式也有很多经验和半经验的模式, 如 Volland^[2], Heppner^{[6],[7]}, Heelis^[8], Sojka^[9] 和 Hairston^[10]. 作为起步工作, 我们以电场主要特点为目标, 不想关注太多的细节. Volland 的极区电场模式是一种比较简单的解析模式, 概括了电离层对流电场的主要特点. 此外 Volland 模式在晨昏两侧是对称的, 这一点和 T89 磁场模式一致. 该模式形式比较简单, 便于我们把握电场的主要特点. 所以选用它作为我们的电离层的电场模式.

在 Volland 模式的基础上, 我们参考了其他几种模式, 考虑磁暴期间电场的变化, 采用了 Heelis^[8] 文中的经验关系:

$$\theta_{pc} = 15.0 + 0.3 \cdot Kp, \quad (1a)$$

$$\Phi_{pc}(Kp) = 10.0 + 6.4 \cdot Kp. \quad (1b)$$

其中, θ_{pc} 是极盖的半径, 单位 ($^{\circ}$), $2\Phi_{pc}$ 给出极区总电压降.

3 投影电场

卫星观测的数据表明 Heppner^{[6],[7]}, 电离层极区极盖的大小和极区对流电场晨昏两侧的总电位降在磁暴期间是变化的, 在数值上和 Kp 指数有一定的关联. 关系式 (1) 是在观测数据上得到的一种经验关系. 在下面的讨论中, 我们取 $Kp = 4$. 由经验公式 (1), 此时极盖的半径为 $16.2^{\circ} \approx 16.0^{\circ}$. 总的电位降 72 kV. 由于 Volland 电场在磁层坐标系中 (X_{sm}, Y_{sm}, Z_{sm}) 具有对称性, 即 $-\Phi(Y) = \Phi(-Y)$, 图 1 中我们只给出 Volland 极区电场的昏侧电位分布. 其中 SS' 标出了子午面的位置, 同时该线也是 Volland 电场在极区的 0

值等位线. 图 1(a) 中的实线是电场的等位线, 虚线为电离层的纬度线. Volland 的极区电场在极盖区内是均匀的晨昏电场, 所以图 1 中极盖区内 (纬度 $74^\circ\text{--}90^\circ$) 的等位线是一组等距离的平行线 (平行于轴 X_{sm}), 相邻等位线间的电位差为 5 kV. 在极盖区外, Volland 电场开始衰减, 并在晨昏两侧形成两个涡旋. 由图 1(a) 发现, Volland 极区电场存在的主要区域为 60° 以上的高纬度地区.

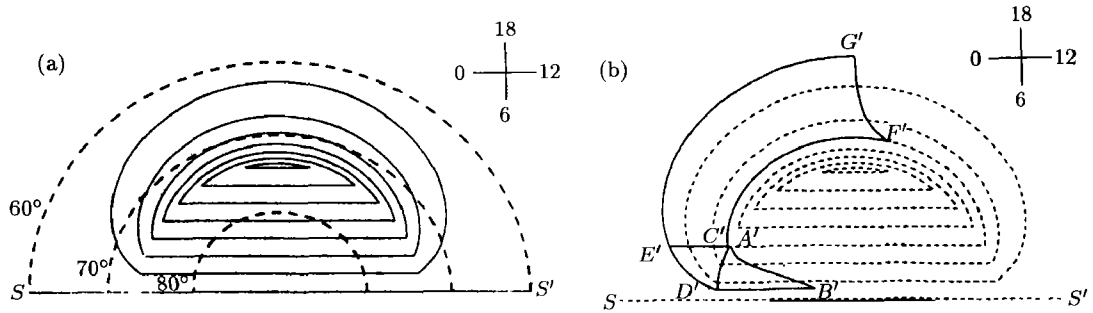


图 1 $Kp = 4$ 时极区 Volland 电场的电位分布

Fig.1 The equipotential lines of the convection field when $Kp = 4$ in the polar region at ionospheric heights

在磁层坐标系内, 选择磁层顶内区域 $0 \geq X_{sm} \geq -90 \text{ Re}$ 作为我们投影电场的有效区域. 这里 Re 代表地球半径. 磁层顶的位置由 Sibek^[11] 的模式给出. 由于磁层内等离子体很稀薄, 因此沿磁力线的电导率很大, 在这种情况下, 我们可把磁力线看做是电场的等位线. 地球磁层顶内各点都通过磁力线和电离层相联. 所以磁层顶内每一点都可以沿磁力线在电离层内找到与之对应的等电位点. 在知道电离层电场的情况下, 我们可以沿等位线 (磁力线) 把电场拓展到整个磁层. 用这种方法得到的磁层电场就是我们所说的投影电场. 在具体计算磁层内点电位时, 我们从该点出发, 利用四阶龙格库达法, 沿 T89 模式的磁力线积分, 一直到电离层, 积分步长为 0.05 Re .

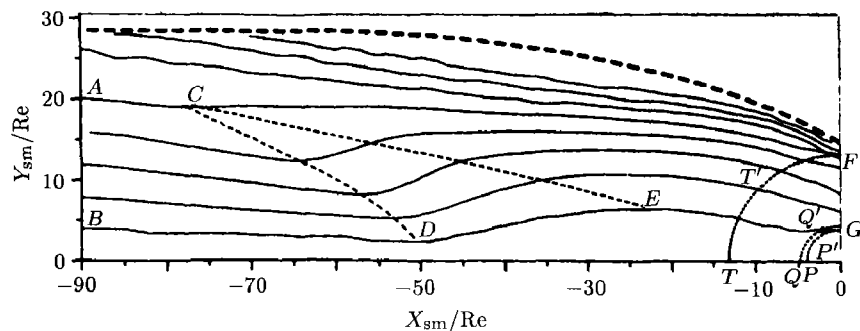


图 2 $Kp = 4$ 时, 由投影电场得到的赤道面上的电位分布

Fig.2 The equipotential lines mapped from polar region along the magnetic field line at equatorial plane when $Kp = 4$

根据 T89 磁场和 Volland 电场的对称性, 我们的投影电场具有对称性:

$$-\Phi(Y) = \Phi(-Y), \quad \Phi(Z) = \Phi(-Z).$$

所以我们只需要了解磁层顶内 $Z \geq 0, Y \geq 0$ 区域内的电场即可.

图 2 是我们得到的 $Z = 0$ 时磁尾赤道面上的电位分布. 图中的实线是电场的等位线, 上方的粗体虚线标出了磁层边界的位置.

图 3 是图 2 电场的矢量图. 因为 T89 模式的磁力线 (等位线) 在赤道面上是垂直于该平面的, 赤道面上的投影电场没有 Z 方向上的分量, 所以可以在二维 XY 平面上给出此时电场的矢量图. 图中矢量方向代表矢量起点处电场的方向. 矢量的大小代表了电场强度的相对强弱.

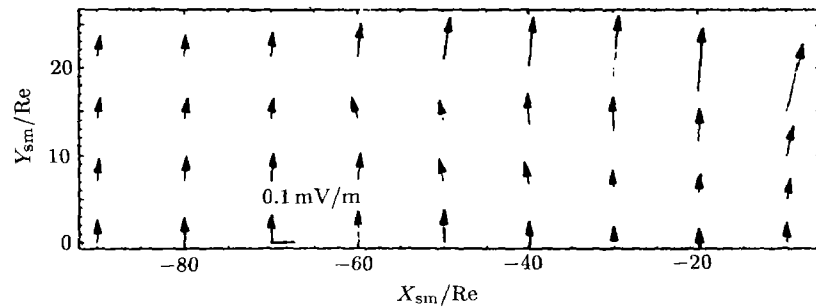


图 3 $Kp = 4$ 时, 磁尾赤道面上投影电场的矢量图

Fig.3 The electric field vector of electric field shown in Fig.2

根据电场的特点, 我们把图 2 中的等位线分成三个区域进行讨论. 图 2 中 X 轴所在位置同时也是电场的 0 值等位线. 相邻等位线间的电位差为 3 kV. 其中点 B 、 D 、 E 、 G 四点位于 -3 kV 的等位线上, A 、 C 、 F 三点位于 -15 kV 的等位线上. 其中 AB 所在的位置为 $X_{sm} = -90$ Re. FG 的位置为 $X_{sm} = 0$ Re.

区域 $ABDC$ 内的等位线可以近似看做是一组等距离平行于坐标轴 X_{sm} 的平行线, 这表明该区域内的电场是 Y (晨昏) 方向上的. 图 3 中的矢量图更清楚地表明了这一点: 在 $X_{sm} < -70$ Re 的磁尾区, 各点电场方向基本一致, 强弱变化是可忽略的, 可以看做均匀晨昏电场.

在近地 $CEGF$ 区域内, 等位线虽然不是一组和 X_{sm} 轴平行的等位线, 但给出的电场也主要为晨昏电场, 这一点在图 3 的矢量图中表现得很清楚. 当然, 和 $ABDC$ 区域内均匀晨昏电场相比, $CEGF$ 内电场强度的起伏比较明显: (1) 在靠近磁层边界的地方, 电场强度明显强于其他区域. (2) 在地球附近区域内电场最弱, 这一点在图 2 中坐标原点附近稀疏的等位线分布上反映得比较明显. 这两个特点, 我们将在下面的论述中作进一步讨论.

实际上图 2 中最特别的还是 CDE 区域. 该区域内的等位线在走向上和其他两个区域是完全不同的, 因此电场的非晨昏分量是不能忽略的. 为弄清这种结构的起源, 沿磁力线我们在电离层找到了与图 2 中各区域内电场对应的源场区.

图 1(b) 中的点 A' 、 B' 、 C' 、 D' 、 E' 、 F' 、 G' 分别是图 2 中 A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 F 、 G 各点沿磁力线在电离层的等电位投影点. 图 1(b) 中的虚线是电场的等位线. 相邻等位线间的电位差为 5 kV. A' 、 C' 很邻近, 但并不重合.

和图 2 中 $ABDC$ 对应的电离层源场区是 $A'B'D'C'$. $C'D'$ 此时正位于极盖边界上 (74° 纬度线), 而极盖边界是极区内均匀晨昏电场和极盖区外衰减电场的交接线. 图 2 中的 CD 也正是两种不同场区的交界. $A'B'D'C'$ 位于极盖区内, 即图 2 中 $ABDC$ 内的电场是极盖区的均匀晨昏电场的映射. 映射场基本上保持了源场的特点, 这种映射场和源场之间的一致性, 与地球磁层的磁力线结构相关.

地球磁场在太阳风的作用下, 磁力线在偶极磁场的基础上被拉伸变形. 此时地球磁力线在结构上主要发生了两种变化. (1) 所有磁力线都向夜间区延展. (2) 晨昏两侧的磁力线在被拉伸, 向夜间区延展的同时, 向子午面靠拢, 因此地球磁层在晨昏两侧的边界上要比子午面附近的磁力线密集. 而在子午面附近的磁力线这种压缩变形现象不明显.

所以子午面附近的磁力线主要是沿 X 轴方向向磁尾延展, 这种延展变形在投影过程中对 Y 方向上的电场影响不大. 这就是为什么 $ABDC$ 区域内的投影电场能够保持电离层内晨昏电场特点的原因.

但位于晨昏两侧的磁力线在和太阳风作用的过程中除了沿 X 方向向磁尾延展外, 在 Y 方向上被压缩, 向子午面靠拢, 这种压缩的结果是磁力线在磁层边界变得密集, 电离层电场在被这些磁力线向磁尾投影的过程中除了被拉伸外, 在 Y 方向上电场被压缩. 所以我们在图 2 和图 3 中发现, 在晨昏两侧磁层边界上, 晨昏电场明显增强.

比较 $CEGF$ 和 $C'E'G'F'$, 发现投影电场和源场在电场结构上明显不同. 投影场主要表现为晨昏电场 (Y 方向), 而源场区则主要表现为 X 方向的电场. 造成这种转变的主要原因就是磁力线在 Y 轴方向上的压缩.

我们知道 Volland 电场在极盖区内是均匀晨昏电场, 极盖区外是衰减电场, 这两种电场在极盖边界处交接. 在极区, 均匀晨昏电场和衰减电场是两种形态很不相同的电场. 所以他们之间有一个过渡区. 区域 $C'D'E'$ 正处于这样一个过渡区的位置上, 在这样一个过渡区域内, 电场有晨昏电场的性质, 同时也有一些衰减电场的性质 (在夜间区主要表现为 X 方向上的电场), 它在赤道面上的投影电场保留了源场区这样一种过渡区域的特点.

最后我们比较一下 T89 模式和偶极磁场模式的区别. T89 磁场模式在近地区域的主要成分是偶极磁场, 所以在近地区域两种磁场模式的区别并不明显. 这一点在图 2 中我们可以看得很清楚: 图 2 中的虚线 PP' 是偶极磁场下, 60° 的纬度线在赤道面上的投影. 比较同一纬度线在 T89 磁场模式下的投影 (虚线 QQ'). 这两支虚线的位置很接近, 说明这两种模式在该区域差别不大. 虚线 TT' 是偶极磁场下 74° (此时的极盖边界) 在赤道面上的投影. 前面我们已经讨论过, 虚线 CD 在 T89 模式下是和极区的极盖边界对应的. 比较两种模式下极盖边界在赤道面上的投影, 我们发现, 两者的差别是明显的. 而 T89 模式是在实验观测的基础上得到的, 这表明, 在太阳风的作用下, 地球磁力线结构在中远磁尾是不能用偶极磁场模式来描述的.

通过以上比较我们发现, 在 T89 模式下, 磁尾的绝大部分地区通过磁力线与电离层 60° 以上的高纬度相连. 在高纬度区, 电离层的电场以对流电场为主. 对流电场在中低纬度很弱, 而中低纬度通过磁力线与地球附近几个地球半径内的区域相联, 所以由极区对流电场得到投影电场在近地区域很弱, 这一点也是我们前面提到投影电场特点之一.

在近地区域 T89 磁场蜕化为偶极磁场, 所以在近地区域, 偶极磁场模式中旋转电场的投影场是一个很好的磁场模式. 我们的目的是要得到一个适用于近地和中远磁尾的电

场模式. 这是我们以后的主要工作.

4 结果讨论

通过以上讨论, 我们发现, 远磁尾区域以晨昏电场为主. 但与均匀晨昏电场不同, 实际的晨昏电场不是一个均匀电场: (1) 在靠近磁层边界的地方, 电场最强, 可达到 0.3 mV/m . (2) 同时电场大小也随坐标 X_{sm} 变化. 在 $X_{\text{sm}} < -90 \text{ Re}$ 的远磁尾, 可看做均匀晨昏电场, 电场大小约为 0.10 mV/m . 在 $0 > X_{\text{sm}} > -50 \text{ Re}$ 的区域内, 从磁尾到近地区域, 晨昏电场逐渐增强.

另外, 在前面的讨论中, 我们仅对磁尾赤道面上的电场作了分析, 实际的投影电场在赤道面以外的区域, 除 E_x 、 E_y 分量外, 还存在 E_z 分量. 再考虑到磁暴期间 Kp 指数会更大, 所以实际的投影电场要比 $0.1\text{--}0.3 \text{ mV/m}$ 大. Geotail^[12] 在远磁尾的初步观测结果为 $0.1\text{--}1.3 \text{ mV/m}$. 同时 Geotail 的观测表明, 磁尾电场的 E_x 、 E_y 、 E_z 分量都是存在的.

我们下一步的工作就是在此基础上, 提出一个半经验的电场模式, 把晨昏电场的变化用解析式归纳, 提供一个实用的电场模式.

参 考 文 献

- [1] Ashour-Abdalla M, Zelenyi L M, Peromian V, Richard R L. Consequences of magnetotail ion dynamics. *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**:14 891—14 916
- [2] Volland H. Models of global electric fields within the magnetosphere. *Ann. Geophys.*, 1975, **31**:154—174
- [3] Margaret W C, James L R, Joseph F F, Larry R L, Michael S. Simulation of ring current proton pitch angle distributions. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**:165—178
- [4] Peromian V, Ashour-Abdalla M. Population of the near-earth magnetotail from the auroral zone. *J. Geophys. Res.*, 1996, **101**:15 387—15 401
- [5] Tsyganenko N A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planet. Space Sci.*, 1989, **37**:5—20
- [6] Heppner J P. Empirical models of high-latitude electric fields. *J. Geophys. Res.*, 1977, **82**:1115—1125
- [7] Heppner J P, Maynard N C. Empirical high-latitude electric field models. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**:4467—4489
- [8] Heelis R A, Lowell J K, Spiro R W. A model of the high-latitude ionospheric convection pattern. *J. Geophys. Res.*, 1982, **87**:6339—6345
- [9] Sojka J J, Rasmussen C E, Schunk W. An interplanetary magnetic field dependent model of the ionospheric convection electric field. *J. Geophys. Res.*, 1986, **91**:11 281—11 290
- [10] Hairston M R, Heelis R A. Model of high-latitude ionospheric convection pattern during southward interplanetary magnetic field using DE-2 data. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**:2333—2343
- [11] Sibeck D G, Lopez R E, Roelof E C. Solar wind control of the magnetopause shape, location and motion. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**:5489—5495
- [12] Tsuruda K, Hayakawa H, Nakamura M, Okada T, Matsuoka A, Mozer F S, Schmidt R. Electric field measurements on the GEOTAIL satellite. *J. Geomag. Geoelec.*, 1994, **46**:693—711

THE CONVECTION ELECTRIC FIELD MODEL IN THE MAGNETOSPHERE

ZHANG Tianhui XU Ronglan LI Lei

(Center for Space Science and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

Abstract

Taking the magnetic field lines as the equipotential lines, the convection field in the polar region at the ionospheric heights can be mapped into the magnetosphere where the electric field play a key role in various physical phenomena. To do this, a convection electric field in polar region and a magnetic model of magnetosphere are needed. In this paper, Volland's convection electric field model in the polar region and Tsyganenko's magnetic field model (T89) are used. It's not surprising that the electric field mapped from polar region is not a uniform dawn-dusk field. The results indicate that only in the distant magnetotail, the convection electric field can be considered as uniform dawn-dusk electric field. While, in the other region, there is not only the dawn-dusk electric field (E_y) but also the E_x and E_z . There exist three different regions in the magnetotail whose convection electric field has different characters. These characters are discussed. Generally, the dawn-dusk electric field become stronger and stronger when going from the distant magnetotail to the region near the earth. On the other hand, the electric field is stronger near the dawn and dusk magnetopause boundary than in the mid-plane.

Key words Electric field model, Magnetosphere, Magnetic field model