第9卷 第1期 空间科学学报 Vol.9, No. 1
1989 年 1 月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Jan., 1989

地面双臂式电场仪

李 艳 庄洪春 丁建刚 何渝晖
（中国科学院空间科学与应用研究中心，北京）

摘 要

本文描述了一种地面双臂式电场仪的原理、结构和性能，分析了典型记录数据所代表的大气电状态；提出了等分频率的概念；从典型测量数据中分析计算出了特征阻抗值。根据与转轮式电场仪的联测记录的分析，本文提出了区分局地电状态波动和来自高空的电状态波动的影响的方法.

一、引 言

关于太阳活动对地球上的一些现象，如气象、地震等的制约或影响的问题，近年来受到越来越多的关注. 迄今为止，人们已经提出了很多太阳活动影响气象、地震的途径. 归纳起来，有通过磁场、动量、质量、电过程、波动、光化学和输运等途径. 其中，通过电过程的途径是当前较为重要的一种. 国内外学者，从电的角度研究日地耦合已取得了不少进展. 对电状态的探测也日益完善.

本文所介绍的地面双臂式电场仪所测得的典型结果中包含有来自空间的传导电流和由空间电场变化而产生的感应电流. 将它与转轮式电场仪联测，可以得到大气电场、大气电导率及传导电流等数据. 这样，既可了解地面电场又可研究来自高层的大气电流，从而了解大气电状态与太阳活动的关系. 本文将详细介绍地面双臂电场仪的原理、结构和线路，并以典型实验资料为例进行了分析.

二、双臂电场仪结构

本仪器的传感器由两个金属球壳支撑在绝缘杆两端组成. 支撑杆中央安装传感器线路盒. 球直径为 120.0mm，两球心之间的距离为 1.500m. 电场仪传感器的探头线路放在线路盒中，用屏蔽电缆线与室内的电源滤波和偏置电路以及记录仪连接. 探头线路的前级 CA3240 集成片是对称双边运放 I/V 转换线路. 第二级 LF356 是电压放大. 设 r_{0i}, C_{0i} 是第一级单边运放本身的输入电阻和输入电容；反馈电阻是 R_F；反馈电容是 C_F；它们折合到输入端的值分别为 R'_F 和 C'_F. R_F 数值为 $1.0 \times 10^{10}\Omega$，$C_F = 70$pF，故

本文于 1987 年 9 月 2 日收到.

$$R'_F = \frac{R_F}{1+A}, \tag{1}$$

$$C'_F = (1+A)C_F. \tag{2}$$

式中 A 为运放的开环增益，约 10^5，于是 $R'_F \approx 1.0 \times 10^5\Omega$，$C'_F \approx 7\mu F$。查表知 $r_{0i} \approx 1.5 \times 10^{12}\Omega$；$C_{0i} \approx 4pF$。所以 $R'_F \ll r_{0i}$，$C'_F \gg C_{0i}$。由于第一级单边运放的等效线路中，r_{0i}，C_{0i}，R'_F 和 C'_F 都并联在输入端，于是在考虑输入阻抗和容抗时仅计及 R'_F 和 C'_F 就足够了。也就是说，线路的输入阻抗为 $R_i \approx 1.0 \times 10^5\Omega$，输入容抗为 $C_i \approx 7.0\mu F$，输入端时间常数为 $\tau = R_iC_i \approx 1s$。这对于本电场仪配用的慢记录仪是完全足够了。若慢记录仪的走纸速度是每小时 20cm，而笔迹线粗为 0.5mm，$\frac{200}{0.5} = 400$ 条/小时，即每条线 9s，所以慢记录仪只能分辨 9s 周期的波动，更快的信号就要使记录画成一片。故线路输入端时间常数 1s 已足足有余。事实上，在实际记录时使输出端的时间常数还要更长，所以另外加了 RC 滤波。这里有一点要加以注意，即对于输入阻抗的前述分析，只在放大器正常工作时才如此。当因信号过强，使放大器一旦达到饱和时，深度的负反馈就失去了作用。开环增益也失去了作用。使 R_F 和 C_F 不能反映到输入端来。这时输入阻抗就等于 $r_{0i} = 1.5 \times 10^{12}\Omega$ 和 $C_{0i} = 4pF$，时间常数为 6 秒。有些型号的片子 $T_{0i} \approx 10^{15}\Omega$，则时间常数长达 1 刻钟。这将会引起记录的误差。

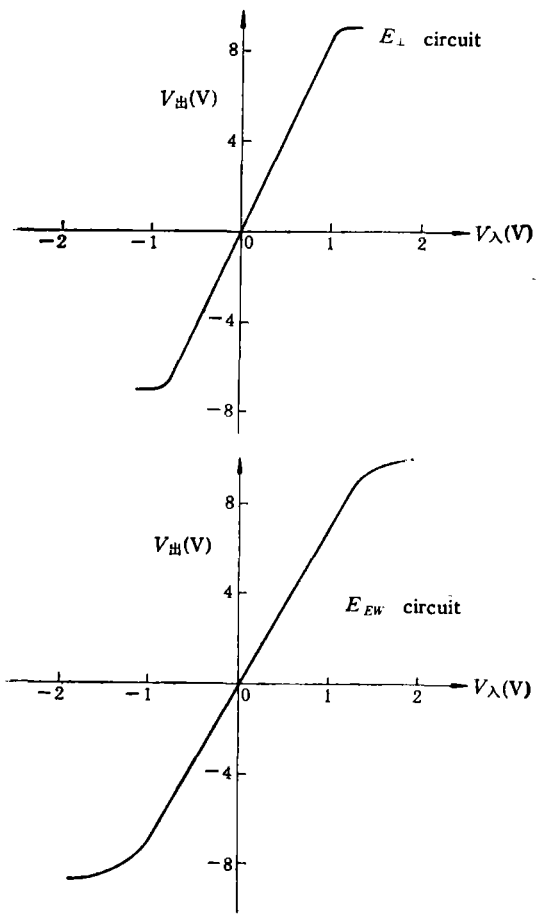


图 1 线路特性曲线

Fig. 1 Characteristic curve of the circuit

第一级输出端处 $V = -I_iR_F$，作为第二级的输入信号，第二级的比例电阻 $R_r = 10k\Omega$，反馈电阻 $R_F \approx 100k\Omega$，于是得到第二级电压放大倍数 $K = R_F/R_r = 10$ 倍。由前述时间常数为 1s 可见，整个放大器带宽为 1Hz，故为准直流放大器。

在实验室对仪器进行测试，得到其特性曲线如图 1 所示。横坐标是两输入端用直流信号源输入的直流电压值 $V_入$，根据信号源内阻可知，相应的输入电流 $I_入 = 1.2 \times 10^{-12}V_入$，其中 $V_入$ 用伏特为单位，而 $I_入$ 以安培为单位。纵坐标是输出电压值。线路的线性范围对不同线路略有不同，一般为 −7V — +9V的输出电压之间。在这一线性范围内放大倍数为 7—9 倍，对不同线路也略有不同。可见实际性能接近设计指标。

三、探 测 原 理

图 2 是双臂电场仪的探测原理的示意图，图中 R_a 和 C_a 是大气与球之间的特征电阻

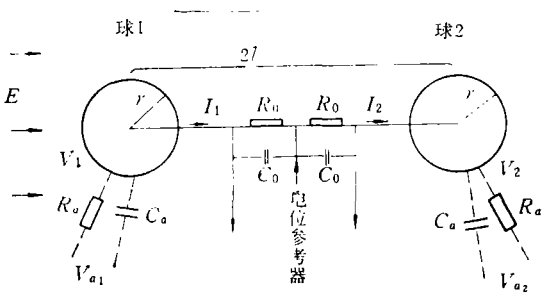


图 2　探测原理示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the detecting principle

和电容．R_0 和 C_0 是接收线路的输入阻抗和电容．在稳态情况下且假定两臂完全对称，则 $I_1 = I_2$，

$$I_1 = \frac{V_{a1} - V_1}{R_{a1}} = \frac{V_1}{R_0}, \tag{3}$$

所以

$$V_{a1} = V_1 + V_1 \cdot \frac{R_a}{R_0},$$

$$V_1 = V_{a1}\frac{R_0}{R_a + R_0}. \tag{4}$$

由前节分析可知，R_0 在 MΩ 量级，而 R_a 在 $10^{10}\Omega$ 以上．所以 $R_a > 10^4 \cdot R_0$，故 $V_1 < 10^{-4}V_{a1}$．一般，地面大气电场的量级为 100V/m．所以，若以中点为参考零电位，则 V_{a1} 为 100 伏量级，而 V_1 为小于 10mV 量级，与 V_{a1} 相比，完全可以忽略．故有

$$I_1 \approx \frac{V_{a1}}{R_a} \approx \frac{E \cdot l}{R_a} = k_1\sigma E = k_1 j_{\text{气传}} \tag{5}$$

这里 k_1 为与几何位置和尺寸有关的常因子，将由定标实验确定(见后面第五节)．由上分析可见，可以认为两球电位都等于零(即等于中心点大气电位)．但球所在位原空间电位 V_a 达 100V 量级．这种电状态，只有在球上积累有一定电荷才行．在图中所示的电场方向下，球 1 应带负电荷 $-Q$，而球 2 带正电荷 $+Q$．而球 1 的电位应等于球 1 处的原空间电位 V_{a1}，加上球 1 上所带电荷产生的电位，加上球 2 上所带电荷所产生的电位，即

$$V_1 = V_{a1} + \frac{-Q}{4\pi\varepsilon_0 r} + \frac{+Q}{4\pi\varepsilon_0 \cdot 2l} \approx 0. \tag{6}$$

故

$$El = V_{a1} = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{2l}\right),$$

$$Q = \frac{4\pi\varepsilon_0 lE}{\frac{1}{r} - \frac{1}{2l}}.$$

上述公式是实用单位制，r 为球半径等于 0.060m，l 是球到中心的距离为 0.750m，这也就是感应电荷，故

$$Q_{感} = k_2 E,$$

$$k_2 = \frac{4\pi\varepsilon_0 l}{\frac{1}{r} - \frac{1}{2l}}. \tag{7}$$

代入数值得 $k_2 = 5.21 \times 10^{-11}\text{m} \cdot \text{F}$.

当大气电场 E 随时间有变化时，

$$i_{感} = \frac{\mathrm{d}\theta_{感}}{\mathrm{d}t} = k_2 \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}. \tag{8}$$

同时，式(5)所给出的 I_1 仍然存在．所测得的总电流 $i = i_{传} + i_{感}$．$i_{传}$ 即式(5)中的 I_1．

当 σ 为常数不变时，$i_{传} \propto E$．又因为 $i_{感}$ 永远正比于 $\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t}$．所以，当 E 的时间变化率不大时，就会有 $i_{传} \gg i_{感}$．而当 E 的时间变化率很大时，就会有 $i_{感} \gg i_{传}$．在前一种情况下，i 将与 E 同相位地波动，而在后一种情况下，i 的波动将落后 E90°．真实大气中，σ 会变．若电场变化完全是由电导率变化造成的，则 $i_{传}$ 会保持不变，但 $i_{感}$ 总会存在．这样，合成的 i 曲线的波动与 E 曲线的波动将存在相位差 $\alpha < 90°$.

上述分析中，参考电位是两球中点，但一般线路的零电位是接地的．这样原大气电位分布在探头处将受到很大的畸变．为了减少这种畸变，我们试用了光电隔离线路，但效果不大．最后为减化线路，又把光电隔离部分去掉了．

四、观测记录分析

为了对探测记录进行分析，首先应对被探测对象，即大气中的电状态有个了解．本仪器是测量大气电场和电流．大气中测得的电流具有五种成分．除了 $i_{感}$ 和 $i_{传}$ 之外，还有沉降电流 $i_{沉}$，对流电流 $i_{对}$ 以及尖端放电电流 $i_{尖}$．$i_{沉}$ 是由于大气中带电大粒子如雨滴、尘埃等沉降到接收面上造成的．由于这种大粒子质量较重，其运动主要不取决于电场，因此并不服从欧姆定律．$i_{对}$ 是因风带动空间电荷对流产生的．$i_{尖}$ 是由于在大气电场作用下，从地面、草、树、建筑等尖端向大气释放带电粒子而造成的．这五种电场成分中，第一种 $i_{传}$ 是我们感兴趣的主要研究对象，$i_{感}$ 是不可避免的．而后面三种电流成分，本文不感兴趣，并且也是可以识别，从而尽量避免的．为避免 $i_{沉}$ 的影响，不用雨天及能见度差空气中尘埃多的时期的资料．$i_{对}$ 的转点是记录曲线上呈现为较高频率的来回摆动，是比较容易辨认的．可以用滑动平均，或在信号输出端加上深度滤波的办法滤掉部分对流电流的影响．另外，选用风较小的时期的资料，而且分析数据，主要着眼于准静态电流上．$i_{尖}$ 只是在离尖端较近，尤其是在大气电场较强时，如雷暴雨前较为严重，所以把“双臂”挂在离地面 5 米的高度，而“平板”则放在平坦、光洁的屋顶上，避开了尖端，而且挂的高度也不太高，以免

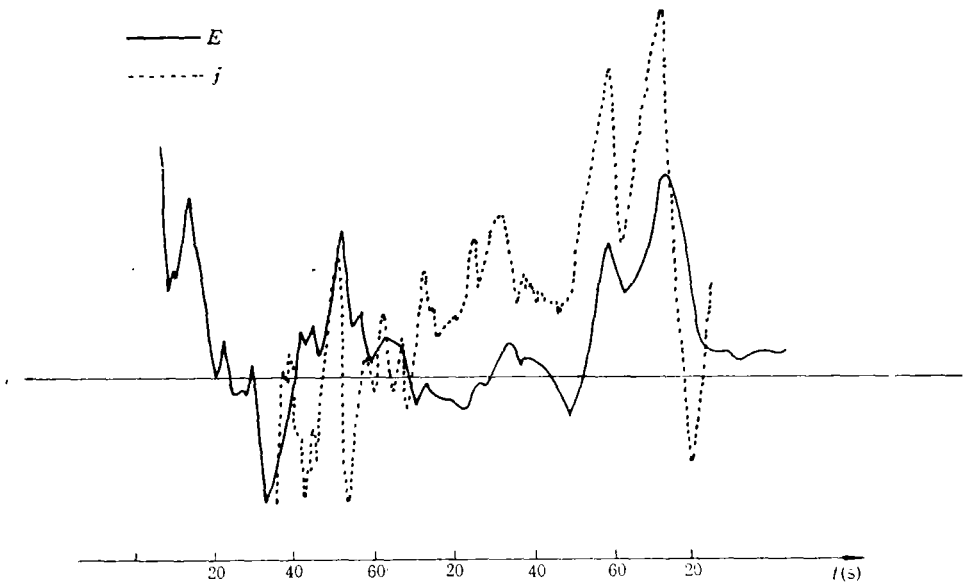


图 3　1986 年 10 月 17 日的观测记录 1 号时段

Fig. 3　Recording on Oct. 17, 1986 No.1

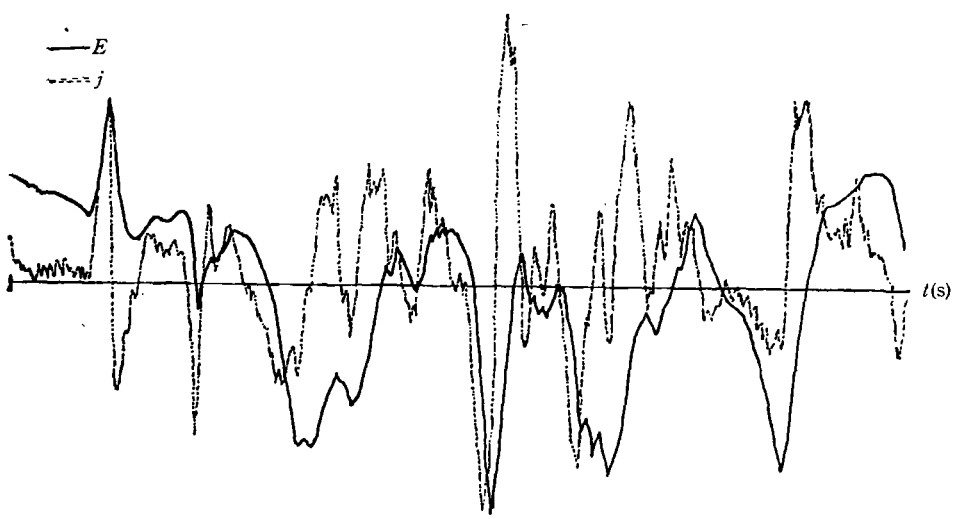


图 4　同日观测记录的 4 号时段

Fig. 4　Recording on the same day, No. 4

"双臂"自身造成了尖端. 而且我们所用的资料，大气电场并不特别高，不用雷暴前的大电场数据. 因此 $j_{尖}$ 是不会造成严重影响的. 总之，在本文所用数据中，可以不考虑后三种电流，而只考虑 $j_{传}$ 和 $j_{感}$.

图 3 是 1986 年 10 月 17 日在清华园观测点得到的观测记录中的 1 号时段. 图中实线是转轮式大气电场仪测得的大气电场，虚线是用本文所述仪器测得的大气电流. 可以

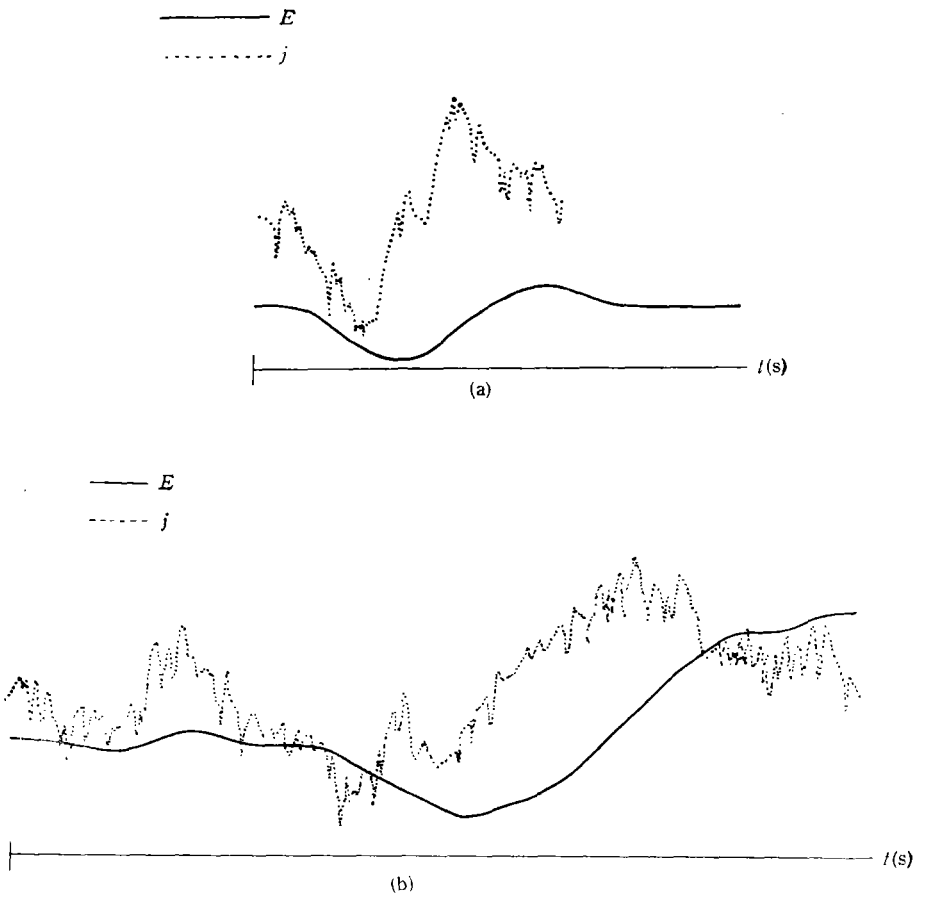


图 5 同日 6 号时段的观测记录

Fig. 5 Recording on the same day No.6

看出，两曲线波动的相位几乎一致，这说明这段时间测得的电流主要是传导电流成分．但是最后，在 2 分 15 秒钟以后，因电场的下降速率很大，使 j 中包含了很大的 $j_{感}$ 成份．图 4 是同日 4 号时段的记录曲线．这一段时间记录到的电流 j 主要是感应电流，至少是有明显的感应电流成分，因为两条曲线的尖峰明显地错开．

图 5 是同日 6 号时段的测量记录．电场曲线的波动周期长得多，更应该是传导电流为主．但图中 j 曲线的波动相位约落后 E 曲线 90°，表明是感应电流为主． 之所以如此的原因，只说明 E 的变化是由于电导率 σ 变化而产生的，并且使 $j_{传}$ 不变，即 $\Delta E/E = -\Delta\sigma/\sigma$，使 $j_{传} = \sigma E$ 不变．这说明电状态 σ、E 和 j 等的变化是由局地 σ 改变造成的．比较可以认为，像图 3 时段的 j 和 E 的变化是由于来自高空的大气电流 $j_{传}$ 造成的．

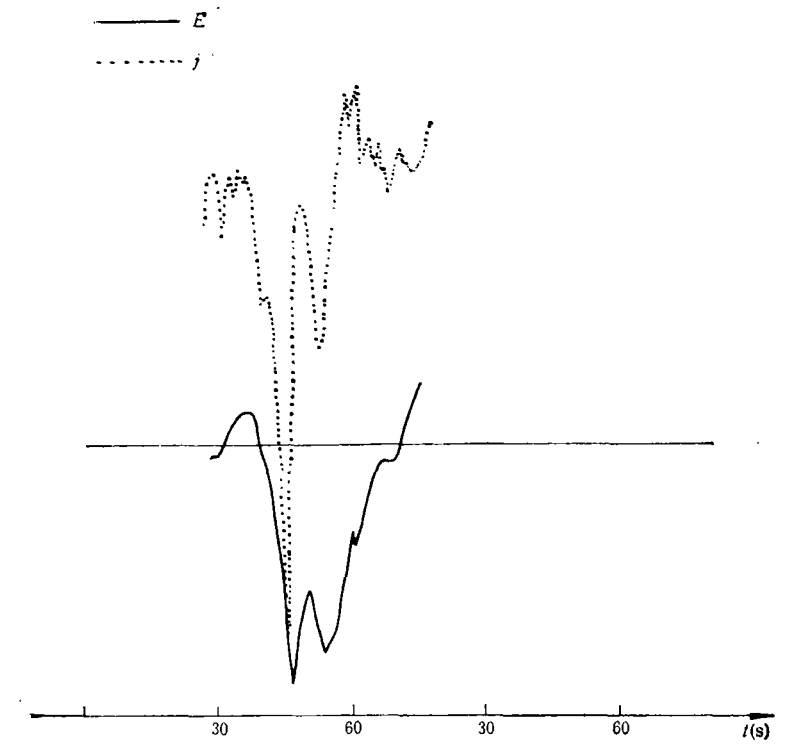
若 σ 不变，可以从记录曲线看出 $j_{传}$ 和 $j_{感}$ 的相对大小．先从理论上作分析．设：

$$E = E_0 \sin(\omega t), \tag{9}$$

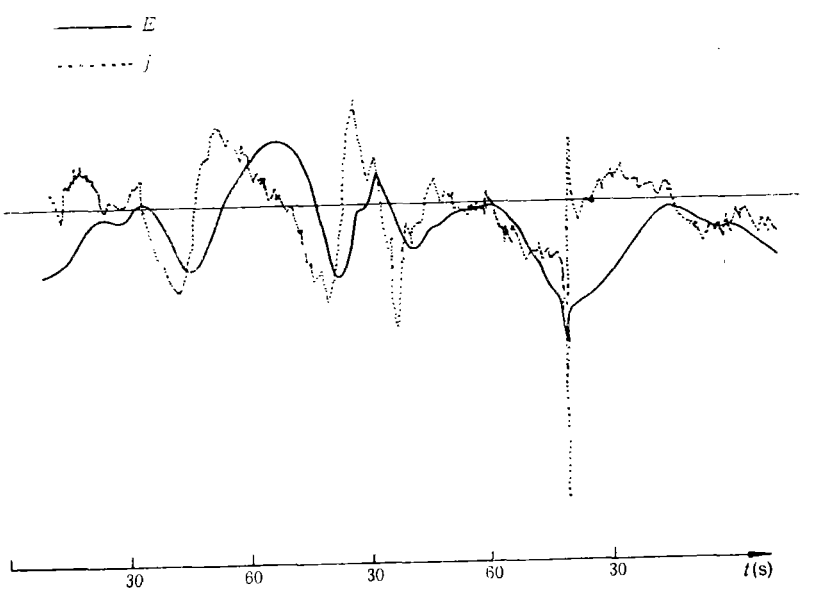
则

$$j_{感} = k_2 E_0 \omega \cos(\omega t),$$

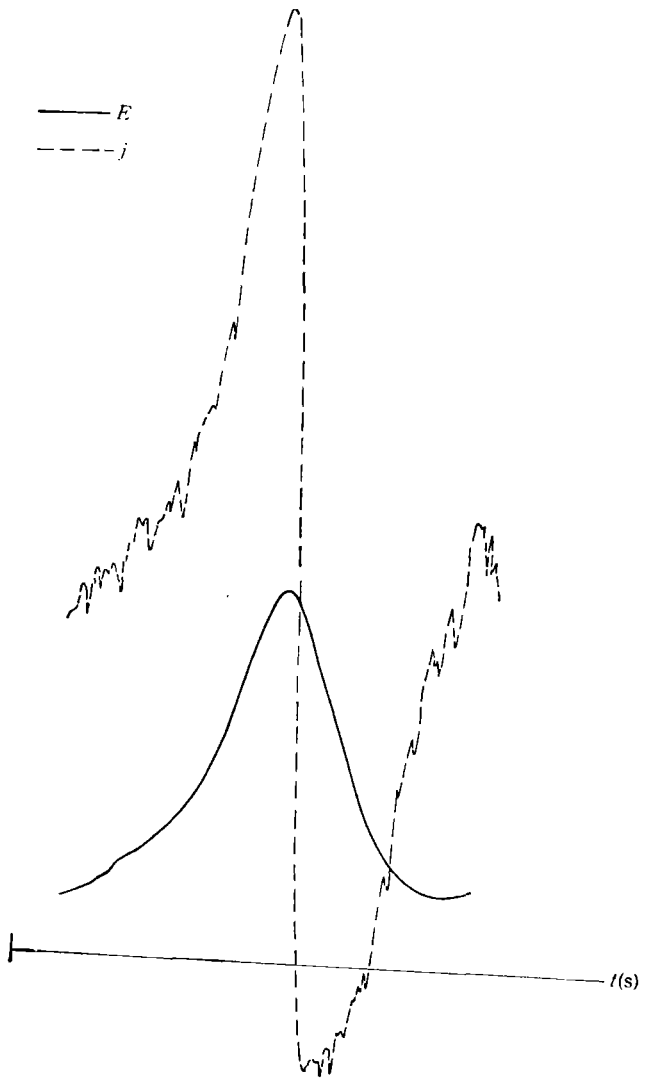
$$j_{传} = k_1 \sigma E_0 \sin(\omega t),$$
$$j = j_{传} + j_{感}.$$



(a)



(b)



(c)

图 6 几例记录，从中可以看出等分频率的离散性

Fig. 6 Several sample recordings showing the divergence of the equinoctial frequency

代入上式

$$j = E_0 k \sin(\omega t + \alpha), \tag{10}$$

其中

$$\cos\alpha = \frac{k_1\sigma}{k}, \tag{11}$$

$$\sin\alpha = \frac{k_2\omega}{k}, \tag{12}$$

$$k^2 = (k_1\sigma)^2 + (k_2\omega)^2. \tag{13}$$

由式(11)和(12)可知，当 $j_{感}:j_{传}=1$ 时，$\sin\alpha/\cos\alpha=1$，即 $\alpha=45°$。比较式(19)和(10)可知，当总电流曲线与电场曲线相位错开 45° 时，总电流中传导电流和感应电流各占

一半．若把 $i_{传}=i_{感}$ 时的频率叫做等分频率的话，比等分频率高的波动信号主反应了 $i_{感}$，其随时间积分就是大气电场 E 的增量 ΔE．而比等分频率低的波动，主要成分是 $i_{传}$．所以等分频率应是用本电场仪测量中的重要特性参量之一．这一参量不易在实验室中测到．由式(11)和(12)可知，等分频率有

$$\omega_{等}=\frac{k_1}{k_2}\sigma. \tag{14}$$

可见等分频率 $\omega_{等}$ 不仅取决于仪器特性 k_1 和 k_2 而且与探测点大气电导率成正比．在试测期间的记录中，我们考虑了所有处于等分频率的状况，看到等分频率的数值比较分散，从 0.628rad/s（相当于周期为 10s）到 0.1122rad/s（相当于周期为 56s）都有．几个例子见图 6 所示，等分频率值的分散性，说明测点上电导率值的变化很剧烈，从而产生 $i_{感}$ 且有波动，但是 $J_{传}$ 可以不变或波动小得多．图 5 就是表示这种情况．

由式(5)得

$$k_1\sigma=\frac{l}{R_a}, \tag{15}$$

再结合式(7)的 k_2 代入式(12)，可得到

$$\omega_{等}=\frac{\frac{1}{r}-\frac{1}{2l}}{4\pi\varepsilon_0 R_a}. \tag{16}$$

当 $2l\gg r$ 时

$$\omega_{等}\approx\frac{1}{4\pi\varepsilon_0 r R_a}=\frac{1}{CR_a}. \tag{17}$$

$\tau=CR_a$ 即为大气对孤立球充电的时间常数．而(16)式中增加的 $\frac{1}{2l}$ 项，是另一球的附加作用．所以式(16)表明：等分频率 $\omega_{等}$ 即是大气双臂中的金属球充电的共振频率．

若设各参数的数量级为 $R_a\sim(10^{11}—10^{13}\Omega)$；$r\sim 0.06$m，则 $C\sim 7\times10^{-12}$F，故 $\tau\sim$ (0.7—70s) 由式(17)知，周期 $T=\frac{2\pi}{\omega}\sim$ (4.2—420s)．由于 C 的估值较准，而 R_a 的估值最困难，故可以用观测记录反过来推求 R_a．由上可知，试测中观测到的 $T_{等}$ 为 10—56s，相对应的 $\omega_{等}$ 为 0.628—0.1122rad/s，代入式(16)中可得 $R_a\sim(2.29\times10^{11}—1.28\times10^{12})\Omega$．所观测到的最大 T 值大于 165 秒，这时 R_a 达到 $3.78\times10^{12}\Omega$．

五、标　定

由于本文所述双臂电场仪测量的是大气电流，因此很难在实验室用人造标准电场进行标定．例如，若用平行板电容器产生标准电场的办法来测，因为平板电容器中大气带电粒子很快被加上电压的两平行板吸附掉了，使得电导率大大降低，平板间大气传导电流比真实大气中小得多，小到测不出来．所以，只能在真实大气中设法测量．由上述分析可见，本电场仪虽然与转轮式大气电场仪进行了联测，但仍得不到大气电场或电流的绝对值，也就是得不到上文公式中的因子 k_1．

本文用一平板电流仪进行了标定．该平板电场仪的接收面是用两块双面印刷电路底版制成的，一块小的放在大的上面，平放在平面屋顶中央．小的尺寸为 428mm × 484mm，放在 470mm × 847.5mm 大的板中央．在迭起的两板中央打一个直径为 2mm 的孔，把单芯屏蔽线的中芯线从大板一面经孔穿过小板，焊接在小板上面的铜皮上作为大气电流的接收端．小板反面和大板两面的三层铜皮焊接在一起并焊接到屏蔽线外层屏蔽层上，最后再接到地线上．这样，大板就提供了一零电位面，使得小板上面铜皮所感受到的大气垂直电场不产生畸变，从而使气地电流的接收面等于实际面积，即 $428\text{mm} \times 484\text{mm} = 0.207\text{m}^2 = \frac{1}{4.83}\text{m}^2$．也就是说，接收到的电流值乘以 4.83 就等于每平方米的气地电流值．屏蔽线中芯线的电流信号直接引入室内接到型号为 HP4140B 的 PA 表上读出电流值．该表最高灵敏度为 10^{-15}A．试测期间无信号输入时仪器本身暗电流为 $2 \sim 3 \times 10^{-15}$A 量级．PA 表接入相同长度、放置在相似位置，但不接到接收面板上的对比用屏蔽线后，外噪声电流为 10^{-14}A 量级波动，而有用信号的读数都取在 10^{-13}A 以上，所以认为本标定实验的读数是真实有效的．

用实际大气来作标定应十分小心，从观测看到，标定用平板电流仪的记录曲线和被标定的本文所述的双臂电场仪的记录曲线一般情况的变化大趋势相似，但两者波动都很大，两者精细结构不同．这是因为两者的位置相距约 10 米，大气电流的空间分布不均匀，而且波动频率较高的成分中包含了较多的感应电流成分，两者有较大差别．所以应该选取低频部分，即只用两者的传导电流成分相比较而标定．最好使用两者波动都较小的气象条件下的记录．

在风沙较大、下雨、有雾露或大气混浊度较大时，有带电的大粒子沉降到平板电流仪接收面上而被记录成气地电流．但同时沉降到双臂的两球上时都不会被电场仪记录．所以这种情况下平板电流仪的记录值会比后者大得多．试测中记录到的大气电流有达 $2 \times 10^{-5}\text{A/m}^2$，而同时双臂电场仪记录只有 0.14V．显然不宜用这样的数据作标定．

另外，为了提高标定的精度，不能使用两者数值都很小的记录．但也不能过大．若大到尖端放电阈值以上，则又要加上尖端放电电流的因素，使标定增加了更多的未知因素．

考虑了上述各种情况后，本文选用了下列标定数据，即当双臂电场仪输出 3.2V 时，平板电流仪记录为 $2.5 \times 10^{-11}\text{A/m}^2$．从线路测试特性曲线(图 3)上可知，输出 3.2V 所对应的输入电流为 $0.50\text{V} \times 1.2 \times 10^{-12}\text{A/V} = 0.60 \times 10^{-12}\text{A}$．这可作为(4)式中的 I_1 值，而 $j_{气传}$ 即为 $2.5 \times 10^{-11}\text{A/m}^2$，从而得到 $k_1 = \frac{0.60 \times 10^{-12}\text{A}}{2.5 \times 10^{-11}\text{A/m}^2} = 0.024\text{m}^2$．

六、结 语

本文对双臂电场仪作为较详细介绍和分析．说明了如本文所述的地面使用的双臂电场仪直接测量到的是电流而不是电场．所测得的电流包含大气传导电流和仪器感生电流两种成分．这两种电流成分的相对比例与大气电状态的变化快慢有关．

当传导电流与感应电流相等时，大气电状态的波动频率可称为等分频率．它也就是

大气对探臂球充电的时间常数的倒数．用本双臂电场仪记录曲线与转轮式电场仪记录曲线联合分析，可以得到这一等分频率的值．用典型实测资料得到等分频率的值分分散，从0.6 到 0.1rad/s 相差数倍．这说明测点的大气电导率变动很剧烈，电导率值从 2.44×10^{-11} 到 1.36×10^{-10}S/m 都有．

若已知探臂球的电容量，则可以从观测得到的等分频率值得到探臂球的特征阻抗．用实测资料获得的特征阻抗为 2×10^{11}—$4\times10^{12}\Omega$．这与理论估算值量级相同．

大气电状态中包含有三个参量 σ、j 和 E．它们之间有欧姆定律相联．所以还有二个独立参量．本文所述双臂电场仪测得的电流中包含着二种成分，把这两种独立参量联接在一起．因此光由此电场仪无法确定这两参量中任何一个，而必须配上另一种电场仪．例如像本文前述的转轮式电场仪．两者联合，可同时测得大气电流和大气电场，从而算出大气电导率．

大气电导率的变化能使得大气电场发生变化，从而使产生流并发生变化．这种因素为局地变化．若测点上空大气柱垂直电流有变化，则测点处的大气传导电流和大气电场都会随之发生变化．这种因素是来自上层的变化．从研究日地关系的角度，当然只要注意来自高层的变化，而对局地变化并不感兴趣，所以区分记录中哪些是来自高层的就很重要了．要做到这一点，单独使用转轮式电场仪或本文所述双臂电场仪都不能解决．但本文分析表明，这两种电场仪的联测是可以解决的．原因是两者联测，可以确定在记录期间电导率有无变化，这正是区分局地因素或来自上层因素的判剧．例如图 3 所给出的变化就是来自高层大气电流的变化．当然这种判别不适用测点附近出现的电源所造成的记录波动，如人的走近等情况．

作者衷心感谢罗福山、牟军、龚建村、沈春玲、张健、高铭以及梁尤献等同志的热情帮助与支持．衷心感谢兰州高原大气所的同志，特别是郭昌明和肖正常等同志热情提供转轮式电场仪进行联测．

参　考　文　献

[1] Fahleson, U. V., *Space Sci. Rev.*, Vol. **7**, p. 238, 1967.
[2] Mozer, F. S., Instrumentation for Measuring Electric Fields in Space, Proc. 1968 COSPAR Symposium, N. Holland Pub. Co., Amsterdam, 1969.
[3] Hays, P. B. and R. G. Roble, *J. Geophys. Res.*, Vol. **84**, p. 3291, 1979.
[4] Roble, R. G. and P. B. Hays, *J. Geophys. Res.*, Vol. **84**, p. 7247, 1979.
[5] 庄洪春和R. G. Roble, 中国科学 **A** 辑，第 7 期，第 667 页，1983.
[6] 庄洪春和 R. G. Roble, 中国科学 **A** 辑，第 10 期，第 932 页，1983.
[7] 庄洪春，空间科学学报，第**4**卷，第 205 页，1984.
[8] 庄洪春，中国科学 **A** 辑，第 1 期，第 88 页，1985.

The Ground-Based Double-Boom Electric Field Detector

Li Yan Zhuang Hong-chun Ding Jian-gang He Yu-hun

(Center for Space Science and Applied Research, Academia Sinica, Beijing)

Abstract

The principle, structure and property of a kind of ground-based double-boom electric field detector is described here. The atmospheric electric condition represented by the typical recording is analysed. The conception of equipatition of frequency is proposed. The characteristic resistance value is calculated through the analysis of the typical detected data. According to the analysis of the joint measurements with an electric field mill, a method is proposed to distinguish the fluctuation of the local electric condition and the influence from the upper atmospheric electric condition.