

强电场探空仪及雷雨云电场探测结果的分析*

袁 箴 蒋本汤 任丽新 周诗健 郑达洲

(中国科学院地球物理研究所)

提 要

用尖端导线作感应元件,用调频—调幅体制传递讯息,制成了雷雨云中的电场探空仪。频率调制器由一只 2Π 1Π 管组成,另一只 2Π 1Π 管组成发射频率为 85 兆赫的发射机。地面接收设备采用了一定的抗干扰电路,能消除非当顶闪电引起的干扰。使用该仪器进行了五次探测(结果见图 9),并对探测结果作了初步分析。

一、引 言

由于雷电活动与生产实践的密切相关及其在整个大气电学中的重要地位,引起了人们广泛的注意。探测雷雨云中的电结构将直接为航空提供有用的资料,进一步也有助于雷电的预报和控制。迄今为止,不同工作者所提出的大气里的主要起电机,不下十几种,要判别是非或是提出新的看法也需要有观测资料作根据。关于雷雨云中电要素的探测资料至今仍然很少,比较系统的探测还是 1940 年 Simpson 所作的工作^[1],但 Simpson 的资料相当粗糙,只能给出定性的结果。

作者试制了电场探空仪,并在大气里进行了观测。本文的目的就是阐述试制的电场探空仪的工作原理、仪器结构及其用于雷雨云探测中所得的一些结果。

二、仪器的结构

我们采用了具有一定抗干扰能力的调频—调幅遥测系统,其方框图如图 1a, b。



图 1a 电场探空仪方框图



图 1b 地面接收设备方框图

电场探空仪的具体线路如图 2。利用顶端尖锐的长导线在强电场中发生尖端放电的现象,作为感应原理,由实验研究得出放电电流 i 与场强 E 的关系为^[2]:

$$i_{(\text{微安})} = 2.4 \times 10^{-5} L_{(\text{米})} E (E - E_k)_{(\text{伏/厘米})} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1.5} \cos^2 \theta \quad (1)$$

$$E_k = \frac{50}{L}$$

* 本文于 1965 年 2 月 8 日收到。

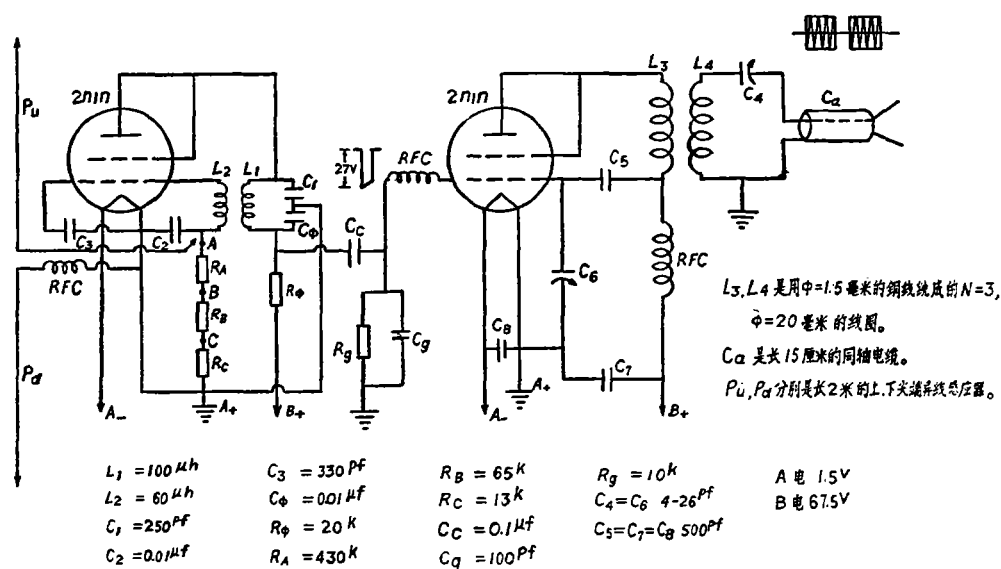


图 2 电场探空仪线路图

式中 L 是导线全长; p_0 是地面气压; p 是探测高度的气压; θ 是导线与垂直方向的夹角。图 3 是 (1) 式在特定条件 $L = 4$ 米, $p = p_0$, $\theta = 0$ 下的计算结果。当外场强 E 一定时, 则有一尖端放电电流 i 流过 p_u, p_d 中部的串联电阻 (如 p_u 接 A 点, 见图 2) $R_A + R_B + R_C$, 产生某一压降 E_g , 用 E_g 去调制间歇振荡器 (调制器)。间歇振荡周期为:

$$T = RC_2 \ln \frac{|u_C| \pm |E_g|}{|E_{g0}|}, \quad (2)$$

式中 u_C 是无电场调制讯号输入时电容 C_2 上所充的电压峰值, E_{g0} 是截止偏压, E_g 为负压时绝对值前取正号。当 E_g 不大时, 间歇振荡频率 f 和 E_g 近乎直线关系, 如图 4 所示。

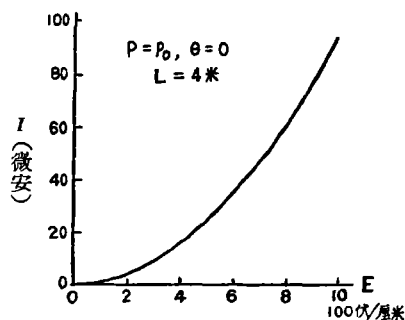
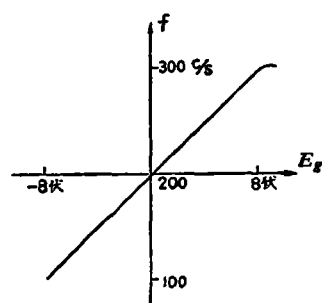


图 3 尖端放电电流与场强的关系

图 4 间歇振荡频率 f 与调制偏压 E_g 的关系

因为调制偏压 E_g 的动态范围为 ± 8 伏, 所以我们用改变串联电阻的方法来变化测量范围。一般地说: 采用全长 ($p_u + p_d$) 为 4 米的尖端导线, 当 $p = p_0$ 时上感应器 p_u 接 A 点时 ($R = R_A + R_B + R_C \doteq 500 K$), 所测最大场强 $E_{\max} = 500$ 伏/厘米; B 点 ($R = R_B + R_C = 78 K$), $E_{\max} = 1,000$ 伏/厘米; C 点 ($R = R_C = 13 K$) $E_{\max} = 2,500$ 伏/厘米。间

歇振荡器的中心频率为 200 c/s , 最大频偏 $\pm 100\text{ c/s}$, 输出的负脉冲幅度大于 20 伏, 脉冲空度约为 7。

C_c 的右半部是用 $2\Pi 1\Pi$ 管组成的电容回授式调栅振荡器, 振荡频率为 85 兆赫, 线路的特点是易于调整到最佳状态。从调制器送来的负脉冲加在栅极上, 其幅度足以使发射管截止, 因此发射出去的讯号是一系列重复频率被调制的射频脉冲, 调幅度达 100%。发射功率约 120 毫瓦。

采用水平放置的、 $1/4$ 波长的、互成 90° 的角形天线, 使发射场形无死区, 便于单站接收。采用十字形半波折合天线接收, 由于它具有圆极化特性, 特别适合于天上部分发射天线不时转动的情况。由于采用了这样的发射和接收天线, 就不至因讯号死区而造成丢失讯号的现象。

所用接收机在 $54\text{ MC}—108\text{ MC}$ 波段内的灵敏度约为 10 微伏。

抗干扰电路和解调器的方框图如图 5。

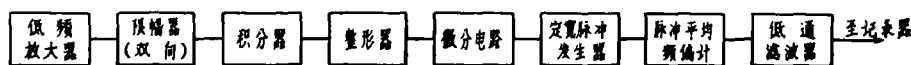


图 5 抗干扰电路和频率解调器方框图

经接收机幅度解调后的讯息, 带有各种干扰讯号, 经限幅和积分器后, 大部分干扰被消除, 然后经整形器把讯号变为宽度不一、高度相等的矩形波。这种抗干扰线路的实际效果尚好, 只要不是当顶闪电引起的干扰都能消除掉, 在讯噪比为 1.5:1 时就能保证接收。等高矩形波经微分后触发定宽脉冲发生器, 出来的是等高等宽的矩形脉冲, 由脉冲平均频率偏计把调频的脉冲还原为电场讯号, 经低通滤波器滤去高频成分, 送到指示器及记录器。

频偏计的脉动输出 I 和频率偏移的关系为:

$$I = K \frac{f - f_0}{f}, \quad (3)$$

式中 f_0 是中心频率, 等于 200 c/s (可调范围 $\pm 18\text{ c/s}$), K 为比例系数。当频偏不过大时,

I 和 f 呈线性关系, 如图 6 所示。图 5 的实际线路见图 7。

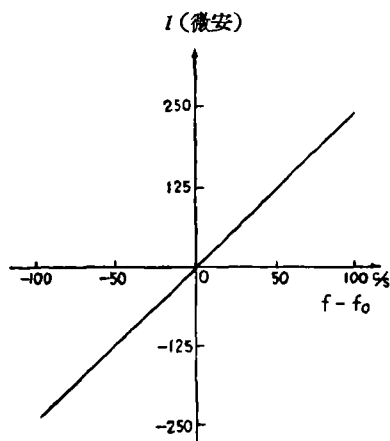


图 6 脉动输出 I 和频偏 $(f - f_0)$ 的关系

用电子电位计作记录器, 精度较高。在输出处接一反向开关, 正负电场都是从记录纸的一端开始, 这就把实际记录的幅度扩展了一倍。频偏 100 c/s , 满刻度 27 厘米, 记录纸移速 2 厘米/分。

下面我们讨论整个系统的误差: 感应元件误差 16%, 地面接收记录设备误差小于 2%, 还有一项误差来源是间歇振荡器基频 (200 c/s) 的漂移, 根据无电场时实际施放结果, 测得一小时内最大漂移为 -4 c/s , 经简单计算可得表 1。 E_0 为地面测得场强, E_p 为 500 毫巴测得场强。此表的意思是: 对 1,000 伏/厘米满档的探空仪, 在 500 毫巴上测得 $E_p \geq 250$ 伏/厘米时,

三、探测结果的初步分析

1. 资料来源

1964年8月该仪器在南京进行了初步的试放。试验初步说明仪器在雷雨云中工作是正常的,由于天气条件限制,只取得五次雷雨云电场探测资料。施放时仪器的悬挂次序

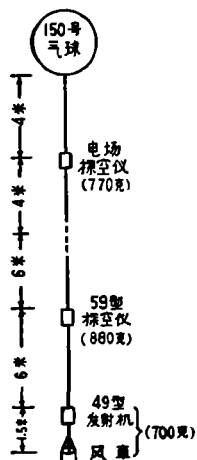


图8 电场、垂直气流、温、压、湿探空联合施放情况

如图8。59型探空仪测温、压、湿,49型发射机及风车用来测气球相对空气的升速 w_0 。仪器总重量约2.3公斤,全长22米,气球净举力约1.8公斤,升速约5—6米/秒。感应器用6厘米长的缝纫针焊在0.8毫米直径的漆包线上制成,施放时将其缠在浸腊的棉绳上,棉绳直接系在气球下,上尖端离球约2米远,可以避免气球造成畸变电场的影响,下尖端导线可以借下面仪器的重量而拉直。

2. 探测结果

因为是综合探测,所以电场资料有温、压、湿及垂直气流资料相配合,另外还有同时的雷达回波照片配合分析。

图9是五次探测的结果,为了更清晰地了解探测情况,我们将施放时的天气背景、雷雨发展情况及主要的探测结果列在表2内。

图9中的电场曲线经过一些平滑,实际探测结果如编号“9”中的折线所示。气球入云高度是目测气球入云,记下时间,再由时高曲线查出的,比较准确。而出云高度主要看相对湿度及温度的明显变化,有时也配合垂直气流及电场的资料来判定,不是很准确。影线区是气球遇到降水的区域,由地面降水记录及气球相对

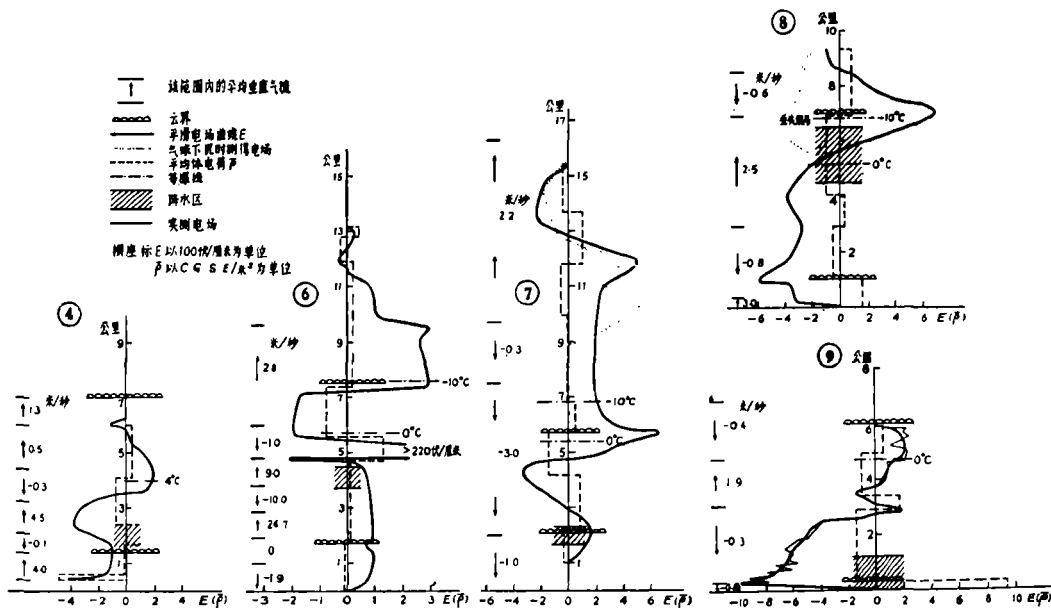


图9 5次雷雨云电场探测结果

表 2 五次探测的天气背景及主要结果

探 测 编 号	4	6	7	8	9
施放时间	8 月 11 日 17:05	8 月 16 日 13:58	8 月 16 日 14:54	8 月 18 日 12:35	8 月 19 日 09:36
天气背景	小系统控制的天气	在太平洋上台风外围, 有一偏东南和偏东北气流的倒槽, 南京处在此区后部的偏东北气流中	同“6”号	仍是“6”号形势, 但南京处于槽前的偏 SE 气流中	东海面上有一台风, 南京处于台风外围东北气流控制下
雷雨情况	球进入发展成熟的 Cb	发展成熟近消散, 球进入东北方 Cb 的南部边缘	球进入正在发展的 Cb	球进入正在发展的 Cb	球进入头顶偏东南的雷雨活动强烈的 Cb 中
入云高度(米)	1400	1700	2100	1000	300
出云高度(米)	7000	7500	5700	7000	6000
测得最大场强 $E_{\max}$ (伏/厘米)	-410	-320	650	-700	-1000
单位气柱总电荷 (10^5 C.G.S.E./米 ²)	-13.6	5.08	-5.8	1.0	-7.2
气柱平均体电荷 (C. G. S. E./米 ³)	-0.24	0.038	-0.037	0.011	-0.122
云中电荷中心分布(自上而下)	+ - +	- +	- +	- + -	+ - + -
ρ_i 出现最多的尺度(米)	50—100 (54%)	0—100 (50%)	200—400 (48%)	0—200 (59%)	0—100 (52%)
ρ_i 出现最多的数值 (C. G. S. E./米 ³)	0—1 (57%)	0—1 (55%)	0—1 (44%)	0—1 (48%)	0—1 (34%)

空气升速 w_0 的变化(当 w_0 在某一间隔里小于正常升速很多时, 只能是气球沾水所造成的)来确定, 较可靠。但有时缺乏 w_0 及地面降水的记录, 所以云中降水区可能没有完全标出。探测曲线左边的箭头表示该范围内的平均垂直气流, 该平均范围以垂直气流相差不大而定。粗实线是电场随高度分布的曲线, 对实测情况稍稍作了些平滑, 实测情况如探测“9”号中的细折线。

五次探测时都有雷电活动, 而以探测“8”, “9”号的雷电活动较强烈, 探测“4”, “6”号较弱。五次探测都有一定的天气背景, 探测“4”号在大天气图上无反映, 而在江苏的小天气图上 ($115-123^\circ\text{E}$, $28-36^\circ\text{N}$) 有低涡发展, 低涡在南京北部, 雷雨与此低涡有关, 属于小系统控制的雷雨。气球施放后, 即遇下沉气流和强烈降水, 在 0 到 2 公里之间, 反复振荡了两次, 最后(施放 33 分后)才一直上升, 此时雷雨已趋消散。图 9 中绘出的是最后上升过程所测的情况。探测“6”—“9”号都与大天气系统有关, 详细情况见表 2。探测“6”号中采用了 8 米长的尖端导线, 其余情况都为 4 米。

为了分析雷雨云中的电结构, 我们假定: 1) 高为 ΔZ_i 的单位气柱内电荷处于动态平衡, 2) 在 ΔZ_i 的范围内水平场强的梯度很小。

这时, 就可用一维泊桑方程来计算体电荷分布。图 9 中断线所画的直方图表示该高

度间隔单位气柱内的平均体电荷 $\bar{\rho}$, 用

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i}{n} = \frac{1}{Z_2 - Z_1} \sum_{i=1}^{Z_2} \frac{\Delta E_i}{4\pi \Delta Z_i} \quad (4)$$

计算, ΔZ_i 按实际探测的折线来取, 每改变一个斜率就得一个 ρ_i 。由于实际情况很复杂, 计算只能提供定性的结果。

3. 讨论

根据图 9 的探测结果, 经初步分析后, 可以看出以下几点。

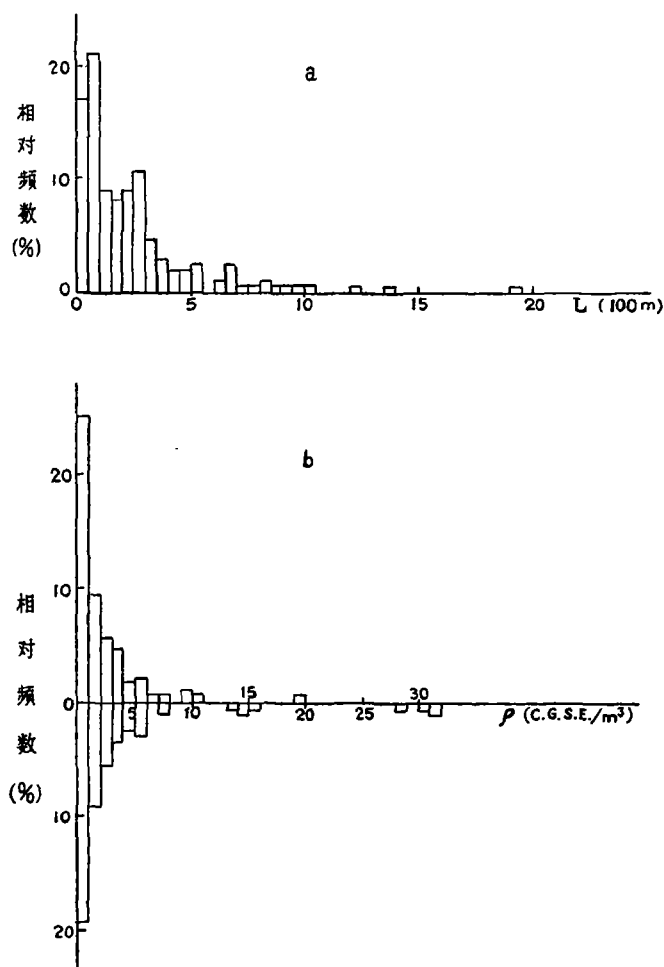
1) 五次探测的云基本上都是暖云, 云中所有电荷中心都在 $\geq -10^\circ\text{C}$ 的高度, 有的(探测“4”号)甚至全在 $\geq 0^\circ\text{C}$ 的高度, 看来相变起电不起主要作用, 可认为属于暖云起电的范畴, 这说明了暖云中完全可以形成雷电。

2) 云底外的体电荷与云底内的体电荷反号。由原始记录也可明显看出, 气球一入云后场强变化就反向, 每次探测都有这种现象。云下这块相反符号的电荷区可能是在强电场作用下, 地面尖端放电所形成的, 它对云底的电荷起了屏蔽作用。云底这块电荷区大多伴有降水和下沉气流, 下沉气流很可能是雨滴拖带所造成, 因此云底这块电荷区可能是水滴形成的。气球出云后, 体电荷也变号(探测“6”—“8”号)这可能是云顶电荷区的吸引所形成的。

3) 探测“8”, “9”号雷电活动较强, 当顶闪电频繁, 而云底是负电荷区, 这与多数闪电向地面输送负电荷相符。对探测“8”, “9”号而言, 在云中、下部电荷区的分布及垂直气流的配合上, 都比较符合 Vonnegut 的对流起电模式^[3], 上升气流处有正电荷区, 下沉气流处是负电荷区, 但在云顶部的负电荷区, 及它与气流的配合上, 对流起电模式都无法解释。而在探测“4”, “6”, “7”号中更有不少与对流起电矛盾的地方。这些都说明气流与电荷区的关系没有 Vonnegut 想象的那样简单, 而要复杂得多。探测“4”号的电荷区分布很符合于 Simpson 的模式^[1], 但所在高度的温度相差很多, 远非 Simpson 所说的由于强上升气流中冰晶的相互碰撞所形成。探测“6”, “7”号的结果, 比较符合雨滴破碎起电机理^[4], 云底存在着水滴带电形成的正电荷区。这两次结果是对相隔一小时的两块不同的雷雨云探测得到的, 但电结构很相似。虽然只凭五次探测不能全面地说明问题, 但也可看出雷雨云中的电结构是多种多样的: 有正极化、负极化, 还有多电荷中心。这与宏观、微观的各种因子有关, 不能用一种机制、一种模式来解释。

4) 我们统计了雷雨云中体电荷数值 ρ 及其出现尺度 L 的相对频数分布, 结果见图 10a, b。由图中可以看出, 对于 L , 75% 情况都 ≤ 300 米; 对于 ρ , 74% 情况都 $\leq 3 \text{ C. G. S. E./米}^3$ 。取 $L = 300$ 米, $\rho = 3 \text{ C. G. S. E./米}^3$, 则 $\Delta E = 330$ 伏/厘米, 即在 300 米的尺度内 75% 情况的场强变化都 ≤ 330 伏/厘米。气球升速以 6 米/秒计, 则相当于每秒所测场强变化 6.6 伏/厘米。当然也有快于这种变化的, 探测“9”号中, 在 280 米的范围内, 场强由 0 变至 -1000 伏/厘米。

就五次探测总体而言, 正、负体电荷数值出现的频数大致相同(图 10b)。而在单次探测中, 某种符号会有些偏重, 但偏得很少, 这可由单位气柱内的平均体电荷(见表 2)很小而看出。这种现象说明雷雨云中强电场的形成是由于正负电荷的分离而来。

图 10 a) 体电荷出现尺度 L 的相对频数分布b) 体电荷数值 ρ 的相对频数分布[横坐标以上对正 ρ , 横坐标以下对负 ρ a), b) 统计总次数为 196 次]

体电荷出现的尺度 L 与它的数值 ρ 成反变, 要出现几十 C.G.S.E./米³ 的数值, 其尺度 L 都小于几十米, 以探测“9”号中所测 $\rho = 9.4$ C.G.S.E./米³, $L = 280$ 米为最大, 没有 L 更大, 而且数值超过 9.4 C.G.S.E./米³ 者。大范围内每厘米上千伏的场强也很难维持, 即使气球进入正在发展的雷雨云中, 一般也只测得 400—600 伏/厘米的场强, 这意味着雷雨云中电荷在小范围及瞬间分离得好些, 而在大范围内经常分离得不好。

由图 10a, b 可以看出, ρ 与 L 的起伏都很大, 谱很宽, 这也反映了云中电结构的起伏现象。由以上分析我们可以想象雷雨云中的电结构: 存在着一块一块的正负电荷区, 它们的垂直尺度 L (水平尺度可能更大些) 绝大部分 ≤ 300 米, 数值 ρ 绝大部分 ≤ 3 C.G.S.E./米³, 这些电荷区杂乱地分布着, 而在更大的范围内表现出较小的平均体电荷 $\bar{\rho}$ 。

以上仅是初步探测的结果, 除了需要进行大量的探测外, 还将进行多项电要素的综合

探测,为了解实际需要提供更多的观测资料。

本工作和陈仲文、周秀骥等同志进行了有益的讨论,曾佑思同志为本文绘制了全部插图一并在此致谢。

参 考 文 献

- [1] Simpson, G. C. and Robinson, G. D., *Proc. Roy. Soc.*, A 177 (1940), 281—329.
- [2] 任丽新等,地球物理学报, 14 (1965), 第1期.
- [3] Simpson, G. C., *Proc. Roy. Soc. A* 114 (1927), 376—401.
- [4] Vonnegut, B. and Moore, C. B., *J. Geophys. Res.* 67 (1962), 3909—3922.

THE STRONG ELECTRIC-FIELD-RADIOSONDE AND THE ANALYSIS OF THE RESULTS OBTAINED IN THUNDERCLOUDS

YUAN DJEN CHIANG PEN-TANG JEN LI-HSIN

CHOU SHIH-CHIEN AND CHENG TA-CHOU

(*Institute of Geophysics and Meteorology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The electric-field-radiosonde for thunderclouds is made. A long wire with points at both ends is employed as its inductor and a FM-AM telemetering system is used. The FM-AM system consists of two vacuum tubes 2Π1Π. One is used for frequency modulator and another for transmitter. The transmitting frequency is about 85 MHZ. An anti-interference circuit is employed in the receiving equipments, thus the interference caused by non-overhead lightning can be removed. The results of five soundings obtained in thunderclouds are given and analyzed primarily.