

云 滴 电 谱 仪*

赵燕曾 謝威光 陈錫明
(中国科学院地球物理研究所) (中国科学技术大学)

提 要

本文介绍一种结构简单的云滴电谱仪的设计、制作和检验。曾用这仪器试测了自来水喷碎时所成雾滴的电谱,对测量结果作了初步分析。

一、引 言

云中质点的荷电对于质点的生长、相变、变形、破碎以及云中电场的形成、闪电的发生等有密切关系。云中质点的荷电谱的测量对于云雾物理、大气电学的研究都是很需要的。

云滴电荷一般都用密立根法测量,其基本原理是利用带电质点在电场中的偏转来测定它的荷质比。偏转程度的测法有两种:一是直接拍摄云滴在电场中的运动轨迹;一是使云滴沉淀于取样片上,测量它在样片上的位置。测出荷质比后,只要知道云滴的大小,就可以求出电荷量。

Twomey^[1], Соловьёв^[2], Phillips 和 Kinzer^[3], Петров^[4]按第一种方法设计了云滴电谱仪。这类仪器的基本优点是个别云滴的电荷在一定范围内能测量得较准确,但测量很费时间,测量范围也受限制。例如 Соловьёв 的仪器在 30—35 分钟内只能测约一百个云滴。Сергиева^[5]则用第二种方法,制成另一种云滴电谱仪,取样速率高,能在两分钟内取得上万个云滴,结构也比较简单,缺点是荷质比很小的“中性”云滴测不到,而且在仪器进口的静电过滤器中很容易产生火花放电,引起人工污染。

考虑到测量目的在于了解云滴荷电的统计分布,从统计的需要出发,取样速率高、可测范围广更为重要。因此我们按第二种方法的基本原理,设计制作了一个结构很简单的云滴电谱仪。

二、测量原理

在水平均匀电场作用下达达到平衡后,以 Stokes 末速度在静稳空气中下落的云滴,它的运动轨迹可以下式表示:

$$x - x_0 = \frac{e}{m} \cdot \frac{E}{g} (y - y_0),$$

或
$$\frac{e}{m} = \frac{g}{E} \cdot \frac{x - x_0}{y - y_0}. \quad (1)$$

其中 e 和 m 分别是云滴的电荷和质量, E 是电场强度, g 是重力加速度, x 轴沿水平电场

* 本文 1963 年 9 月 30 日收到。

方向, y 轴沿重力场方向, x_0, y_0 是云滴的初始位置。

在固定的电场强度下,只要知道 $x - x_0$ 及 $y - y_0$,就可以求出云滴的荷质比。根据这一原理,我們所设计的电谱仪基本上就是一个平板电容器。仪器外形是一个长方形小盒,盒子两侧安有一对平行板电极,盒子顶部中央开了一道平行于电极的狭缝,底部则放取样片(仪器示意图见图1)。令极板间的距离为 $2l$,所加电压为 V ,上下底的距离为 h ,云滴在取样板上的位置与样板中心线的距离为 x ,则当云滴的张弛时间 $\tau \ll \frac{h}{v_y}$ 时(在我們的仪器中,直径 $d < 100\mu$ 的云滴是满足上述条件的),可以认为云滴在工作场内以末速度运动。于是,根据(1)式,

$$\frac{e}{m} = \frac{2lg}{v} \cdot \frac{x}{h}, \quad (2)$$

或

$$e = \frac{2lg}{v} \frac{x}{h} m = \frac{\pi}{3} \frac{lg}{v} \frac{d^3}{h} x. \quad (3)$$

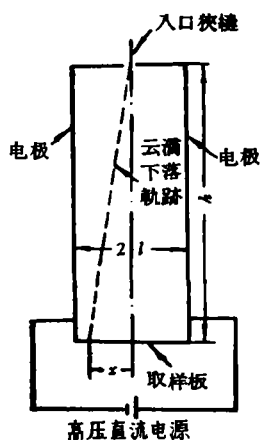


图1 云滴电谱仪示意图

三、仪器的设计

在仪器设计中提出了以下要求: 1. 工作部分的电场是均匀的; 2. 仪器内部空气要静稳; 3. 在三分钟内可取得云滴一千个以上; 4. 仪器内不允许出现气体放电, 潮湿环境下仍保持良好的绝缘性能; 5. 尽量减小滴在盒内下落时的蒸发; 6. 不加电压时, 云滴在取样板上的自由沉降区域的中心线要与取样板中心线重合。

设计时首先考虑了仪器结构上一些重要尺寸的选择。综合各种因素, 我们选择了以下的尺寸: 平板电极——长宽均为 5 厘米; 极间距离——2 厘米; 狭缝宽度——0.2 厘米; 狭缝长度——1 厘米。取以上尺寸时, 根据理论计算, 工作部分电场基本上是均匀的, 只是在电极边缘有些畸变(见图2), 就平均效果而言, 误差在 3% 以下。缝的长宽取上述数值时, 按一般云滴浓度计算, 三分钟内可取云滴一千个左右。

图3是仪器的剖面图。仪器各部分除电极外都采用有机玻璃制成。电极1和2分别嵌在侧壁3和4上, 并由导线7与高压直流电源相接。电极表面涂有一层赛璐珞, 以防止电量发生。

云滴通过板6中间的长方孔和板5中央的狭缝进入仪器内, 并沉淀于取样板8上。取样板8可以从仪器底部的梯形槽9抽出或插入。

为了精确调节水平, 使云滴自由沉降区的中心线与取样板的中心线重合, 我们采取了以下方法: 在壁12上刻了一条与边缘平行的线15, 并在板6上靠近线15的地方悬挂一

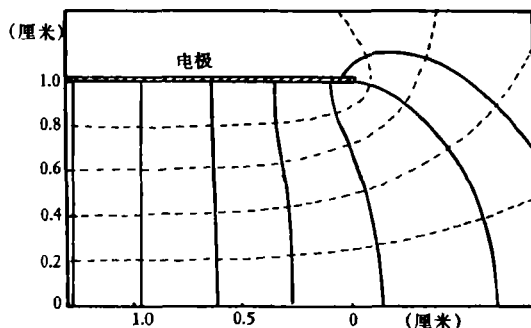


图2 平行板电极边缘附近电场的分布
(——电力线, ----等位线)

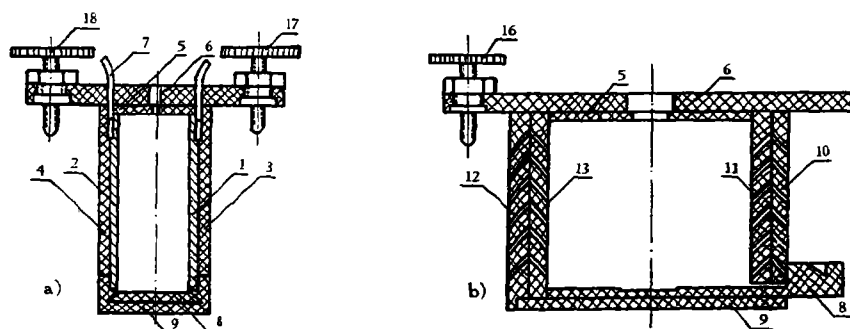


图3 云滴电谱仪剖面图

(1, 2——电极；3—6, 10—12——有机玻璃板；7——导线；8——取样板；9——底槽；16—18——水平调节螺钉)

根系有重锤的细线 14 (示意图见图 4)。借助板 6 上的三个螺钉 16, 17, 18 使细线 14 与 15 平行, 则仪器处于水平。实验表明这种装置比一般水准器要精确得多。

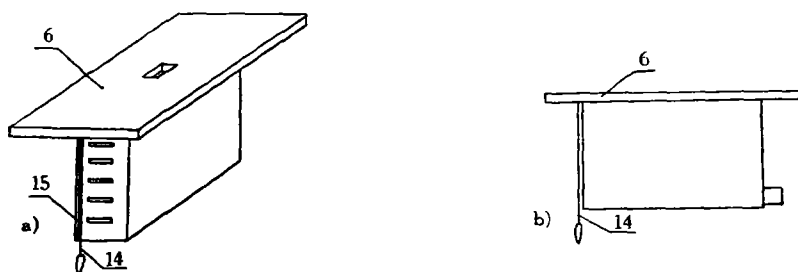


图4 水平调节装置示意图

四、仪器性能的检验

仪器加工装配好后, 我们着重检验了以下几方面的性能, 即: 云滴自由沉降区域的中心线与取样板中心线的偏离 (以下称中心线偏离), 云滴在仪器内下落时的蒸发, 云滴在仪器内的热弥散。

1. 中心线的偏离

中心线的偏离来自于两方面, 一是加工和装配时的误差, 一是水平调节的误差。前者是系统误差, 可以订正, 后者是偶然误差。中心线偏离的显微镜下测量结果见表 1。偏离的数学平均值是 -0.03 毫米 (系统误差, 可以略去不计), 而均方根值是 0.13 毫米。后者产生的原因有二: (1) 水平调节的误差; (2) 标尺的读数误差 (有 ± 0.1 毫米)。因此实际上水平调节的误差要小于 0.13 毫米。

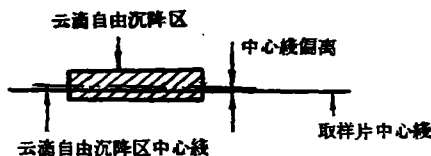


图 5

表 1

序号	自由沉降区域 (毫米)	自由沉降区 中心(毫米)	取样板中心 (毫米)	中心线偏离 (毫米)	序号	自由沉降区域 (毫米)	自由沉降区 中心(毫米)	取样板中心 (毫米)	中心线偏离 (毫米)
1	13.0—15.0	14.0	13.9	+0.1	9	11.5—13.7	12.6	12.5	+0.1
2	14.0—16.0	15.0	15.0	0.0	10	10.3—12.4	11.35	11.5	-0.15
3	10.8—12.9	11.85	10.8	+0.05	11	9.4—11.5	10.45	10.7	-0.25
4	10.9—13.1	12.0	12.0	0.0	12	9.8—12.1	10.95	11.0	-0.05
5	9.9—12.0	10.95	10.9	+0.05	13	11.0—13.2	12.1	12.1	0.0
6	9.7—11.9	10.8	10.8	0.0	14	10.9—13.2	12.05	12.2	-0.15
7	9.7—11.9	10.8	11.0	-0.2	15	9.8—12.0	10.9	10.8	+0.1
8	12.1—14.3	13.2	13.2	0.0					

2. 云滴在仪器内下落时的蒸发

为避免蒸发,测量前我们向仪器内通入潮湿空气,待温度平衡后再开始取样。对这种措施的效果我们作了检验:在电谱仪取样的同时,在另一个带有狭缝的小盒内也放入取样片取样,样片位置就在狭缝下方一两毫米处(见图6)。所得雾滴积分分布谱见图7。由图可见,电谱仪内云滴的蒸发很小。如果在野外条件下,估计蒸发影响更可以忽略。

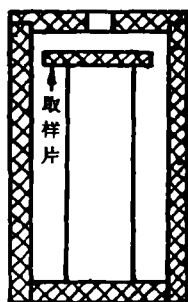


图 6

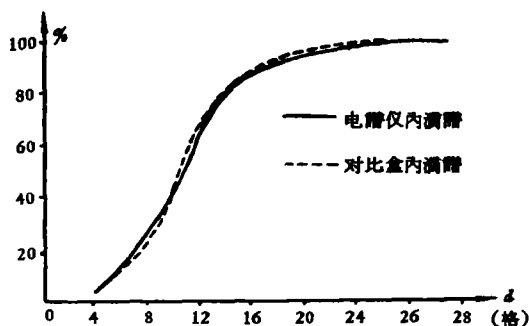


图 7

3. 云滴在仪器内的热弥散

仪器内部温度的不均匀会给测量带来严重影响。首先,如果仪器下部温度稍高于顶部,就会引起热对流。此外,水平温度梯度也会使云滴发生水平方向的热致迁移。在实验中我们发现,仪器百叶窗封闭时云滴自由沉降区的最小宽度要比不封闭时大0.2毫米,这可能是由于百叶窗封闭后仪器两对侧壁热传导性能不一样,从而产生水平温度梯度所致。

为了消除温度影响,我们采取了以下措施:盛油的容器和电谱仪经常一起放在云室中;取样板涂油后要经过一段“平衡时间”才开始取样;在电谱仪下方放置冰块,使仪器内部产生稳定的温度层结。

采取上述措施后,在不加电场时,我们可以得到界线分明的云滴自由沉降区。实验结果全部列于表2。表中有星号的五次都是在百叶窗封闭时做的(百叶窗不封闭时,电谱仪外围加圆罩,以防止雾滴溜入)。

表 2

序号	平衡时间 (分)	自由沉降区宽度 (毫米)	序号	平衡时间 (分)	自由沉降区宽度 (毫米)
*1	35	2.4	11	15	2.2
*2	26	2.4	12	10	2.2
*3	20	2.3	13	—	2.2
*4	15	2.4	14	15	2.2
*5	60	2.4	15	15	2.1
6	10	2.0	16	15	2.3
7	15	2.0	17	15	2.2
8	15	2.1	18	15	2.2
9	15	2.2	19	20	2.3
10	—	2.1	20	15	2.2

由表 2 可见,即使在最好的情况下,云滴自由沉降区仍比狭缝宽,即云滴在下落过程中仍有弥散。原因可能很复杂。一方面温度影响可能还未完全消除,另外,云滴的初始水平速度、云滴对空气的拖带以及静电弥散等可能也起一些作用。

除以上三项外,我们还对仪器的绝缘性能进行了检验。在干燥情况下,两极加 7000 伏直流高压,泄漏电流 $<10^{-10}$ 安培;在云室中放置长时间,仪器上板有积水时,泄漏电流不超过 30 微安。通常只需要加 1200 伏电压即可,所以泄漏电流更小,在正常使用情况下,仪器内未观察到火花放电和电量放电。

五、样片的读数

按测量原理,取样之后我们将测量云滴与取样片中心线的距离 x 及其直径 d , 以便得到云滴荷质比 $\frac{e}{m}$ 和直径 d 的密度分布。谱是用直方图来表示的。至于直方图的时间间隔取多大,对我们的仪器来说,由于狭缝的有限宽度和云滴的弥散都对荷质比谱起了平滑化作用,因此在测量云滴的水平位置时,就没有必要把时间间隔取得比狭缝宽度还小。我们所取的时间间隔是 2 毫米,当电压加 1200 伏时,相应的荷质比间隔是 20 静电单位/克,量程是 ± 100 静电单位/克。

在室内实验中,由于雾滴直径多在 10μ 以上,而且为了减少读数时间以避免滴在油中的蒸发,我们用 8×10 倍的显微镜测云滴直径,测微尺每分格是 10μ 。若到野外观测,滴谱间隔必须取得更细,这时应采取防蒸发措施。采用直接在显微镜下读数而不用照相方法,是因为每一样片需照两百张以上,胶卷耗资大;况且照相所需时间也将近半小时,已无助于减少蒸发。

六、电谱测量的误差

逐个测量云滴电荷的目的在于求出电荷谱,而不是了解个别标定云滴的电荷,因此讨论测量误差时,也只限于电谱的误差(以下讨论中,电谱的误差是指直方图上的误差)。

给荷质比谱的测量带来误差的因素有几方面:

1. 云滴自由沉降区中心线与取样板中心线的偏离会使整个谱发生平移。

2. 按(5)式确定取样板上每 2 毫米間隔所对应的荷質比間隔时也将出現誤差,其数值是:

$$\left[\frac{\Delta \left(\frac{e}{m} \right)}{\frac{e}{m}} \right]^2 \approx \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\Delta X}{X} \right)^2 + \left(\frac{\delta E}{E_0} \right)^2. \quad (7)$$

其中 $\frac{\delta E}{E_0}$ 是电場不均匀所引起的誤差, $E_0 = \frac{V}{2l}$. 由于加工装配精度較高,极間距离和极板长度的誤差 $\frac{\Delta l}{l}$ 、 $\frac{\Delta h}{h}$ (在 0.2% 以下) 都略去不計.

根据所用电表,估計上述誤差 $< 10\%$; 若用更精确的电表,則可以 $< 5\%$. 这一誤差会引起荷質比間隔的伸縮,从而使譜发生变形.

3. 狭縫的有限寬度和云滴的弥散对譜起了平滑的作用.

显然以上几个因素引起的誤差大小都和譜形有关. 我們假定云滴荷質比譜是正态分布(这和实际情况是近似的),計算了譜的誤差. 当荷質比譜是正态分布时,滴在取样板上的分布也是正态的. 对于均方差等于 0.3 厘米的正态分布,由于中心綫偏离所引起的誤差不超过 1.5%,由于荷質比間隔伸縮而带来的誤差不超过 9.3%,狭縫寬度对譜的平滑化誤差不超过 1.5%,云滴弥散的平滑化誤差不超过 0.3%. 由于以上几种誤差是彼此独立的,按均方誤差計算,荷質比譜总的誤差不超过 9.5%. 当云滴在取样板上分布的均方差愈大时,上述誤差愈小.

七、室內实验的某些結果及其初步分析

为了試用这一仪器,我們在实验室內測量了自来水噴碎时所成雾滴的电譜. 雾滴用接地的噴枪噴出,直径多在 10μ 以上(我們只測 $\geq 5\mu$ 的滴). 实验中各种条件严格保持相同,使所得結果达到稳定. 每次取样的滴数約 3000 个左右(只測量其中的一半). 碎滴的荷質比譜及正負滴的滴譜见图 8 及图 9.

由图 8 可見,荷質比譜的对称中心是在正区;正滴个数远大于負滴,約为負滴的两倍. 对各种大小的滴來說,都是正滴多于負滴,而且直径愈大,正滴所占比例愈多.

表 3

直 径 (μ)	平 均 电 荷($e.s.u.$)		$\frac{n_+}{n_-}$	$\frac{n_+\bar{e}_+}{n_-\bar{e}_-}$
	$\bar{e}_+$	$\bar{e}_-$		
5—10	6.5×10^{-9}	4.8×10^{-9}	1.4	1.9
10—20	5.0×10^{-8}	3.6×10^{-8}	2.5	3.5
20—30	1.6×10^{-7}	1.2×10^{-7}	3.4	4.8
30—40	3.3×10^{-7}	(3.1×10^{-7})	4.6	(4.8)
40—50	6.5×10^{-7}	5.0×10^{-7}	8.1	11
50—60	1.1×10^{-6}	9.0×10^{-7}	12	14
60—70	1.5×10^{-6}	1.5×10^{-6}	19	19
70—80	2.4×10^{-6}	—	—	—

注 括弧内数值不可靠.

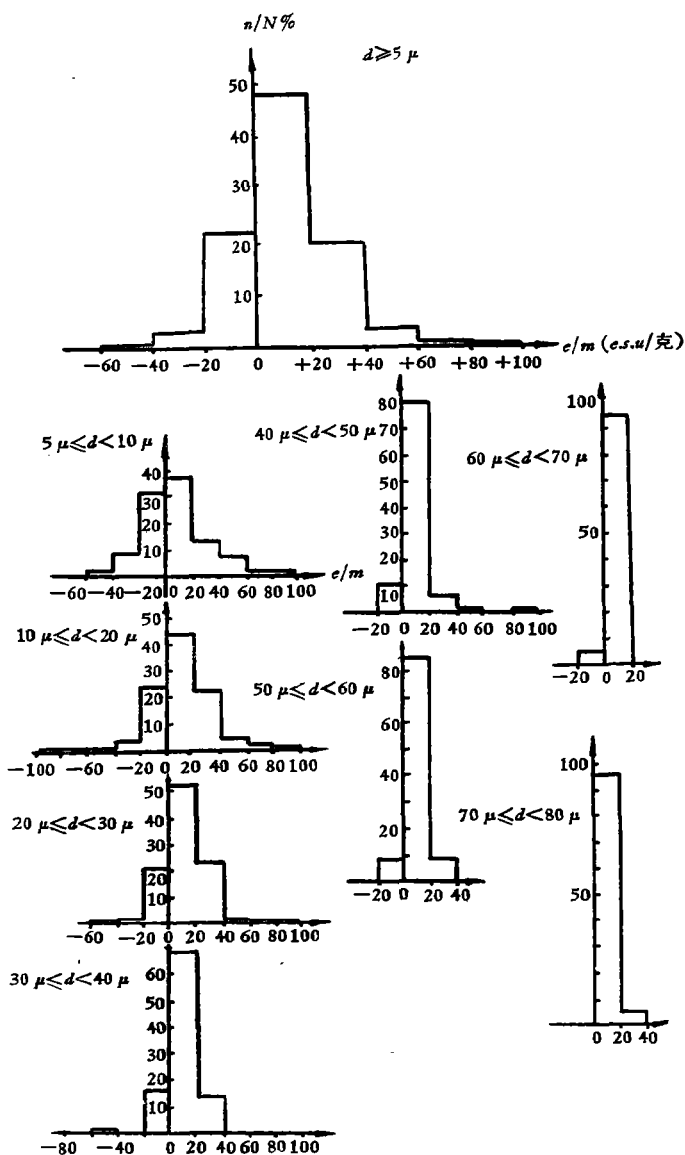


图8 碎滴荷质比谱

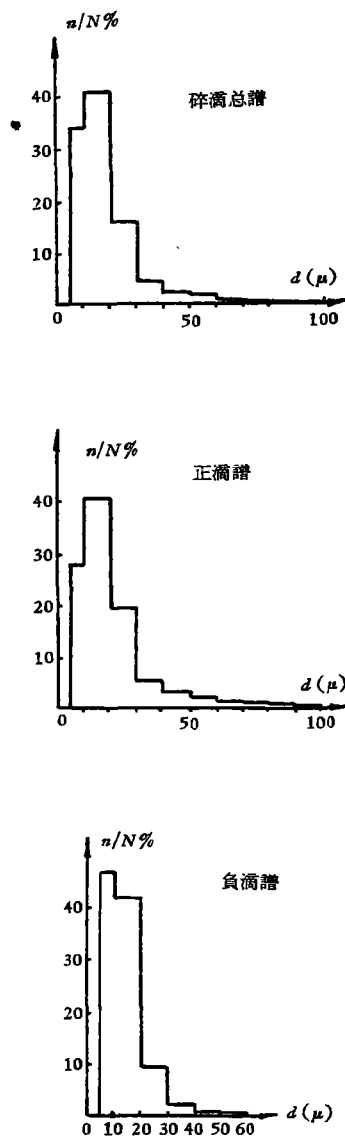


图9 碎滴滴谱

根据荷质比谱及滴的直径, 我们计算了碎滴的平均电荷, 结果见表3。由表3可见, 正电荷的平均值总是大于负电荷, 而且随着直径的增加, 总的正电荷与总的负电荷之比也迅速增大。由此可以断言, 在我们所测的滴谱范围内, 总电荷是正的, 即较大的碎滴总电荷为正。

我们还测了不同浓度氯化钠水溶液碎滴的电谱, 结果与上相仿。

八、结 束 语

这种云滴电谱仪结构很简单, 在较短时间内能取得足够数量的滴; 在正态分布下, 电

譜的測量誤差也不大。它的最大缺点是取样后必須立即讀数, 因此用这个仪器时实验周期較长。选择适当的取样物质可以克服这一缺点。这个仪器目前只能用在室内。要在野外使用, 还必須在取样、讀数、資料整理等問題上进行更多的工作。

致謝: 本文得到周秀驥同志的指导, 同时戎鑫山、唐炳南和欧阳勇等同志在仪器加工方面給予大力协助, 謹此致謝意。

参 考 文 献

- [1] Twomey, S., *Tellus*, **8** (1956), 445—452.
- [2] Соловьёв, В. А., *Труд. ГГО*, вып. 58 (120) (1956), 31—41.
- [3] Phillips, B and Kinzer, G., *J. of Meteor.* **15** (1958) 369—374.
- [4] Петров, Г. Д., *Изв. АН СССР, сер. геофиз.*, 1959, 1665—1669.
- [5] Сергиева, А. П., *Изв. АН СССР, сер. геофиз.*, 1958, 347—357.

AN INSTRUMENT FOR MEASURING ELECTRIC CHARGE DISTRIBUTION OF THE CLOUD DROPLETS

CHAO YEN-TSENG AND SHIH WAI-GUANG

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

CHEN SHI-MING

(*Chinese University of Science and
Technology*)

ABSTRACT

A newly designed, very simple instrument for measuring the distribution of electric charge on the cloud droplets is described. The applicability of this instrument has been demonstrated in laboratory, by measuring electric charge on sprayed droplets in the cloud chamber.