

# 国家雷电监测网的建设与技术分析

许小峰

(中国气象局, 北京 100081)

**[摘要]** 雷电是一种对自然环境和社会经济都会造成很大影响的自然现象。对其进行有效的监测、预测和研究具有十分重要的社会、经济与科学价值。目前我国在雷电监测、预测和研究方面还比较薄弱,特别是在监测领域,与发达国家有较大差距。文章对雷电产生的原因及影响做了介绍,对国内外目前的探测技术及发展方向进行了分析,提出了国家雷电监测网建设应注意的问题和建议。

**[关键词]** 雷电监测;技术分析;系统建设

**[中图分类号]** P446; P457.9 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)05-0007-07

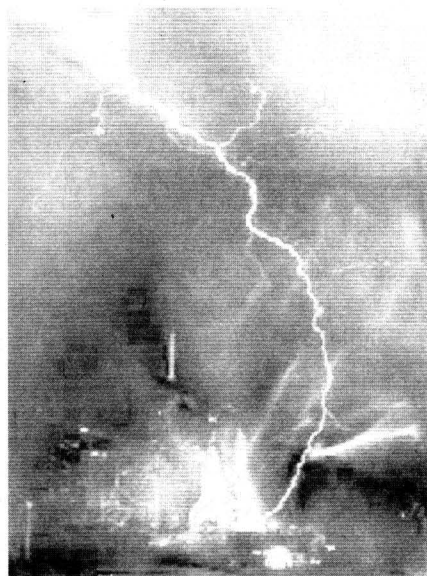
## 1 引言

雷电是一种能引起严重灾害的自然现象。随着人类社会经济的发展,因雷电而引发的灾害也越来越严重。雷电发生时,还会引起大气物理结构和化学成分的一系列变化,这种变化对自然环境和人类生活会产生直接或间接的影响。同时,雷电的出现与其他天气现象也有着密切的关系,特别是经常与造成严重灾害的中小尺度天气系统伴随发生。因此,雷电会造成极大的灾害,威胁人类生命财产的安全。常遭受雷电影响的领域包括建筑、电网、通讯、林业、交通、军事设施等,尤其对现在广泛使用的微电子、信息网络、无线通信设备,遭受雷击并造成重大损失的可能性愈来愈大。雷电造成的灾害每年都要发生多起,常会引起严重后果。1989年8月12日,山东黄岛油库遭雷击发生火灾,使100多家企业停产、海产养殖场被毁、海水被大面积污染,造成19人丧生,直接和间接经济损失数以亿计<sup>[1]</sup>。雷电也是造成航空、航天意外事故的重要因素(见图1及封面)。自从人类开展航天活动以来,已发生过多起雷击航天器事故。1969年美国登月计划的APOLLO-11发射后不到1 min即遭雷击2次,导致自动驾驶系统失灵,一些传感器停止工作,如不是宇航员果断采取措施,后果将

是灾难性的<sup>[2]</sup>。飞机因遭受雷击而发生的事故也时有发生。雷击每年都要造成成千上万的人身伤亡。美国有较精确的统计,平均每年有100多人死于雷击,500多人受伤,与龙卷和飓风共同造成的伤亡人数相近,经济损失在20亿美元以上<sup>[2]</sup>。在我国,据不完全统计,2000年雷电灾害造成人员伤亡事件800多起,直接经济损失达千万元的有3起,百万元以上的19起,平均每年死于雷击的估计达千人,受伤人数是此数的3倍以上,直接和间接经济损失也达几十亿元<sup>[1]</sup>。因此建立有效的全国雷电监测网将会对防灾减灾工作起到重要作用。

雷电是发生在自然大气中的瞬间放电过程,并同时伴有声、光的出现。一次放电过程一般持续时间为0.1~1.0 s。其中可能包括几次大电流脉冲过程,被称作闪击。人们见到的雷电一般产自雷雨云中,在天空中呈现一种多分叉的形状,长达几千米到几十千米<sup>[3]</sup>。雷电产生的原因是由于雷暴云中强烈的上升和下沉气流的对流运动,使云中随机分布的正负电荷呈现有序排列的结构,在云中形成许多正电荷区和负电荷区。当雷暴云中部分区域积累了足够强的正(负)电荷,使得空间或地面某处的电场强度达到了击穿大气的值,就会产生雷击。

图2为雷雨云中发生闪电的几个不同阶段。图2a为雷雨云发生的初始阶段,云中产生对流,云



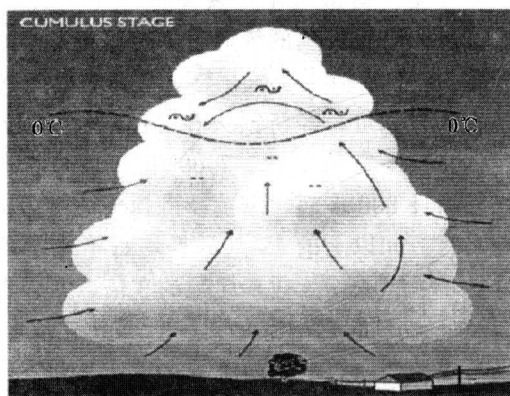
a. 肯尼迪航天中心遭雷击的情形



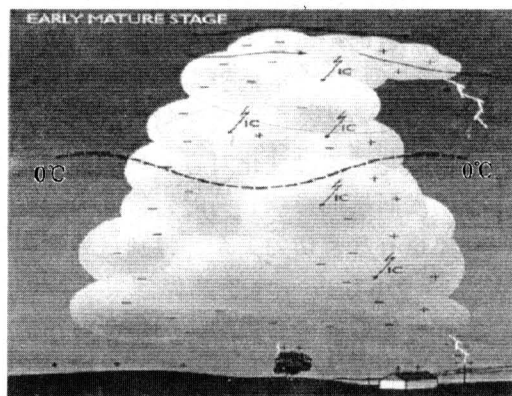
b. 1977年10月13日广州吉山化工仓遭雷击爆炸, 烧毁库房3座, 直接经济损失70万元

图 1 雷电灾害实例

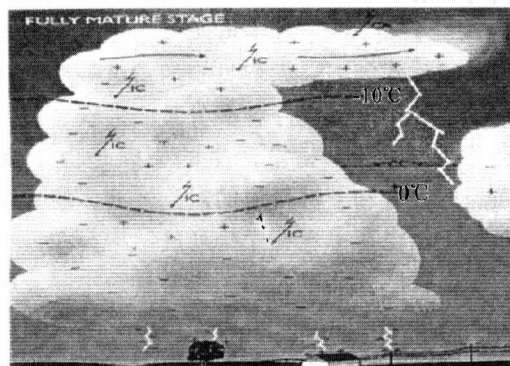
Fig.1 Examples of lightning disaster



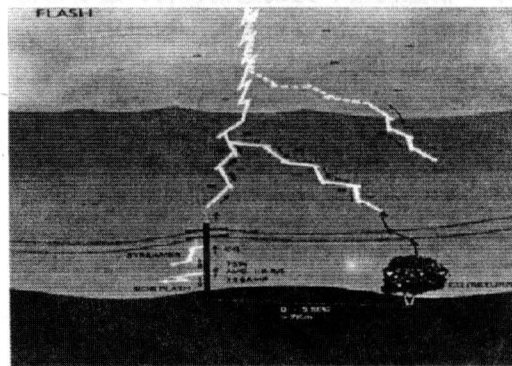
a. 初始阶段



b. 发展阶段



c. 产生云内闪和云地闪阶段



d. 强烈雷击

图 2 雷电形成不同阶段示意图

Fig.2 Lightning development in different stages

顶已高于 0℃ 层，并有冰晶出现；图 2b 为通过对流发展，积云顶达到更高的层次，云内正负电荷已开始呈有序排列，并开始有云内闪和云地闪发生；图 2c 云中对流已发展更为强烈，云顶已高于 -10℃ 层，正负电荷分布区域更加集中，云内闪和云地闪明显增多，并伴有云间闪发生；图 2d 为随着对流进一步发展，构成云地间产生强电场，从而发生强烈的雷击现象。

闪电可分为云闪和地闪。云闪包括云内闪 (intracloud)、云间闪 (intercloud) 和云-空气闪 (cloud-air)，是指发生在云内或云间正负电荷间的放电过程。云闪放电的同时会辐射出大量高频脉冲，这些脉冲为人们对云闪的定位提供了帮助。地闪是指发生在云体与地面之间的对地放电过程。对地闪的峰值电流可达到几万到十几万安培，对地面物体会造成很大威胁。地闪还可分为负地闪放电和正地闪放电。负地闪是指将云中负电荷输送到地面的放电过程，占地闪的大多数，一次负地闪放电可将几十库仑的负极性云电荷带到地面；正地闪是将云内的正电荷带到地面<sup>[3]</sup>，发生频数一般较负地闪低，但由于其峰值电流和所中和的电荷量较负地闪大得多，因此从雷电防护角度更应引起重视。闪电过程产生的电磁辐射具有很宽的频谱，可从 LF 频段几十千赫扩展到 L 频段 10 GHz。

## 2 雷电监测的意义

雷电同其他一些灾害性天气现象一样，对人类活动和大自然都会产生重大影响。人类对雷电的监测和记录已有很长的时间。我国目前在气象部门设立的 2 000 多个气象台站都有近几十年来雷电的观测记录，但这些记录都缺少定量化，基本上是靠耳闻目睹，仅能间断地记录下雷电发生的时间和方位。20 世纪 70 年代以来，自动准确地探测雷电的技术开始迅速发展，能用于准确定位的雷电定位仪器逐渐成熟。气象、部队、电力等部门都先后建立了一些局部区域的自动雷电监测网。目前，无论从技术上还是经济上，国家已具备了建立大范围雷电监测网的可能，气象部门已将这一系统的建设纳入发展计划。雷电监测网的建立将发挥重要作用。

### 2.1 在天气气候监测和预报中的应用

雷电与中尺度对流天气系统的发生密不可分。从这一角度看，雷电的强弱又可成为雷暴云对流强度的指示器，并可通过监测雷电系统的移动对未来

天气的变化和影响区域做出预报，特别是利用三维闪电定位系统，可以获取和分析对流云中的三维结构，较清晰地指示强对流的发展。另外，通过进一步分析正负地闪的变化，还可预测雷暴云未来可能发生的变化，负闪的增加预示着风暴可能会继续发展<sup>[4]</sup>。雷电的发生与降水强度也有较好的相关性。在美国中部地区，一个地闪可对应  $10^8$  kg 的降水。在中国，也有类似的工作，如甘肃地区平均雨强  $R$  与对应时段内地闪次数  $F$  之间存在定量关系： $R = 1.692 \ln F - 0.273$ 。人们还在人工引雷试验过程中观察了大气电场和降水的变化，发现了降雨增加和滴谱增宽的现象，这可能为人工增雨开辟一条新的途径。如能将雷电信息与雷达、卫星一起使用，相互补充，则会取得更佳的监测和分析效果<sup>[4]</sup>。

在气候研究中，影响气温变化的重要温室气体之一水汽一直受到人们的关注。水汽在气候变化中是否也在发生显著变化，并未得到明确回答。而在对雷电的研究中发现雷电发生的频数与气候变化和水汽变化有很好的对应关系。因此，全球闪电活动的变化有可能会成为全球气候变化的指标之一<sup>[4]</sup>。

### 2.2 对大气物理化学成分变化的监测分析

雷电的发生对大气化学成分和大气电磁场环境会产生重要影响。如在大气中发生闪电时可使大气中的氮变成氮氧化物  $\text{NO}_x$ ，成为植物可吸收的化合物。这变化不但对大气化学发生影响，还可能对气候生物圈变化起作用。闪电还可生成臭氧，这对于臭氧层在不断被破坏的大气也许在一定程度上能有所补偿。在正常情况下，大气中存在静电场。晴天电场强度矢量  $E$  通常与地面垂直，并指向地面，构成由电离层指向大气的电场。在大气电学研究中规定这种指向地面的电场为正电场。一般将没有大气扰动和云系晴空状态的大气电场称作当地的大气参考电场。大气电场强度随空间有较大变化。一般低纬度比高纬度小，高层比低层小，空气较清洁的乡村比城市小。电离层与地表的电位差在 150~600 kV 间变动。在这种电场结构下，晴空时正电荷将不断流入地表。这种状况如维持下去，地球的负电荷不断被中和，大气电场将会消失。而事实上，晴空大气电场的维持一般是较稳定的。这说明在大气中存在着使电场维持平衡的机制。根据观测和统计分析，发现大气电场的变化是受到雷暴活动控制的。全球每一瞬间会有 1 500~2 000 个雷暴发

生,而大部分雷暴云上部是正电荷中心,下部是负电荷中心。通过云地放电过程,向地面输送负电荷,为维持大气电场平衡起重要作用<sup>[3]</sup>。

### 3 国内外现状

#### 3.1 定位技术的发展

发现雷电并不难,探测雷电的关键是如何判定雷电发生的确切位置。从技术上看,目前主要的地基雷电定位系统都是测定雷电的电磁辐射脉冲。具体方式分述如下。

**3.1.1 磁定向法 (MDF)** 磁定向法源于无线电测向技术。通过利用一对呈正交的磁场线圈构成天线,测定地闪低频磁场脉冲的方位。为提高测量精度,采用了地闪典型波形识别及时间门限。这种技术在20世纪70年代后期取得较大突破,有力地推动了雷电定位技术的进展。原则上,有两个以上测站即可定位,而且单站亦可独立提供雷电方位信息,而强度信号可给出雷电的大致距离。其主要缺点是测站误差、天线安装误差或测站附近的地形地物等都会对雷电方位的测定产生较大影响。因此,单纯利用磁定向的技术近年来已不多见<sup>[5,6]</sup>。

**3.1.2 时间到达法 (TOA)** 20世纪80年代初,随着测时精度的提高,在美国发展了一种利用测量雷电到达不同测站的时差或绝对时间来进行定位的技术。其突出的优点是克服了MDF法固有的测量精度不够的弱点。但它需要设的测站较多,且对测时精度要求较高。鉴于MDF闪电定位系统定位误差较大,TOA法也有一些特殊的要求,后来的发展是把二者结合起来,形成时差测向混合闪电定位系统,并增加了GPS时间同步技术和数字波形处理技术(DSP),称作IMPACT技术<sup>[7]</sup>。

图3a为磁空间法示意图。从图3a中可以看出三个探头中的任意一点误差都会导致定位不准确,使三个测站视线不能交汇一点。实际闪击处可能位于三角形中任一点,因而探测精度难以提高。

图3b表示的是时间到达法探测原理,每个探头可以探测到闪电电磁波到达测站的时间,根据时间差,可以得到以探头 $s_1$ 和探头 $s_2$ 为焦点的双曲线,在双曲线上任意一点 $s_1$ 和 $s_2$ 的时间差均相等,即在此线上的任意点都有可能是闪电发生时的位置。同样, $s_1$ 和 $s_3$ , $s_2$ 和 $s_3$ 也可构成这样的双曲

线,三条曲线相交的位置被确定为实际闪电位置。

图3c是绝对时间到达法的示意图。以各探头位置为中心 $(x_i, y_i)$ ,以到达时间 $(t_i)$ 与实际闪电发生时间 $(t_A)$ 的时间差 $(t_i - t_A)$ 乘以光速 $c$ 算出的距离为半径,画出几个圆,其相互重叠的部分为闪电发生地 $(x_A, y_A)$ 。实际上,闪电发生的精确时间和地点肯定是未知的,需根据几个测站的数据设方程求解 $((x_A - x_i)^2 + (y_A - y_i)^2 = (t_i - t_A)^2 \cdot c^2)$ 。

图3d为绝对时间到达法与磁定向法相结合的示意图。两种方法结合定出的位置有更高的准确度。

**3.1.3 干涉法** 以上定位技术以获取甚低频VLF信号为主,进行二维定位,监测云地闪。目前国内生产的闪电定位系统基本上采用上述方法。为了测量云间闪的高频信号,有采用干涉法定位放电位置的方法,并于80年代在法国发展了一种被称为SAFIR的甚高频窄带干涉法雷电定位系统。它有可测定一次闪电的若干辐射源的时变过程的能力。原则上,它既可记录地闪,又可记录云闪,并可以提供三维空间定位,目前该技术已发展成熟,有了商用产品,并在欧洲、亚洲一些国家建网使用。图4是SAFIR系统原理示意图和实物图片。SAFIR系统主要也是利用方向定位原理。但不再使用简单的十字正交磁场天线,而是使用一个包括8个天线单元的天线组,布置在一个圆环上,在 $360^\circ$ 范围均匀分布,保持各天线单元相距 $45^\circ$ 。位于不同方向的闪电信号到达测站时会在不同天线单元产生一定的相位差。两组天线分别测量水平面和垂直面上的相位差,就可确定闪电位置的方位角和仰角,分辨出闪电的三维位置。理论上,设置两个测站就应可以定位,适当增加测站会取得更好的效果<sup>[8]</sup>。

**3.1.4 超高频脉冲时差法** 这是一种基于GPS同步的闪电三维TOA定位技术,目前习惯称为LDAR (lightning detection and ranging),它也能提供与SAFIR一样的三维定位功能<sup>[1,9]</sup>。

考虑到通过在地面上安装设备监测全球的雷电发生有很多局限性,人们开始探索通过卫星手段,在卫星上装载光学仪器或电磁辐射探测器会更有效地探测全球雷电活动。目前美国、日本等国已开始了这方面的试验。



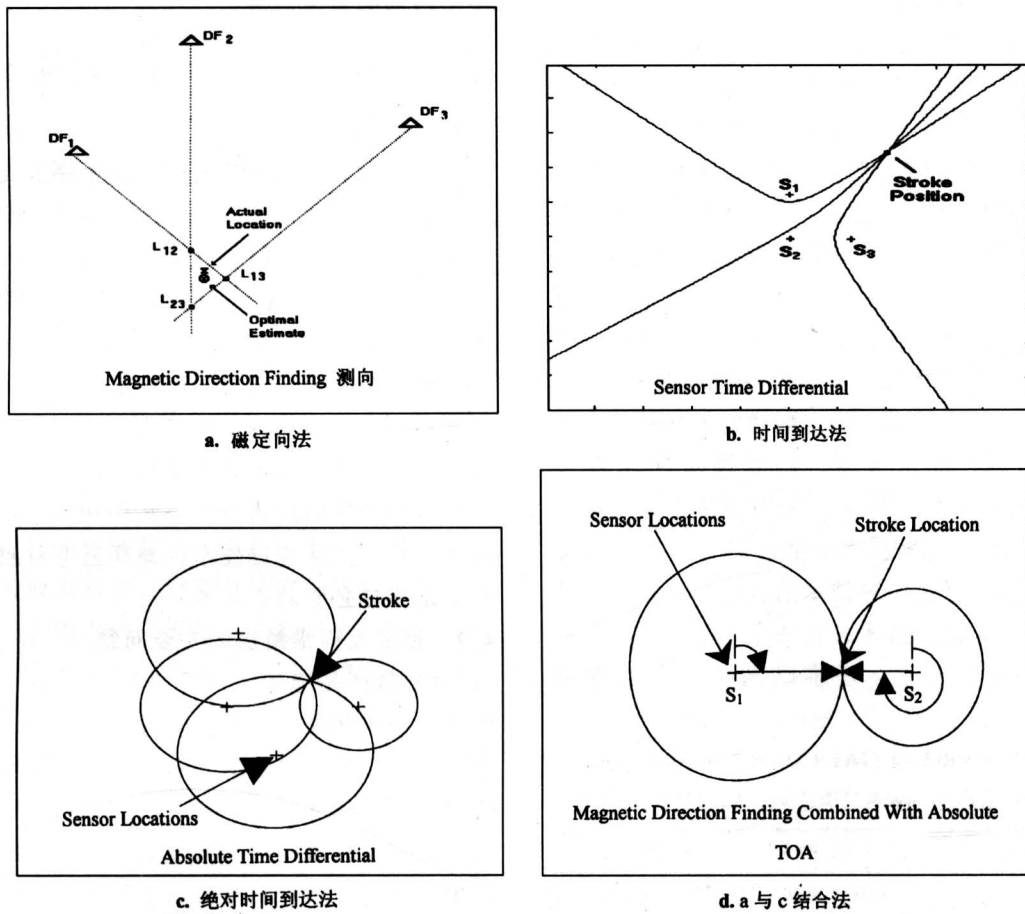


图 3 几种雷电定位技术原理图

Fig.3 Lightning positioning technologies

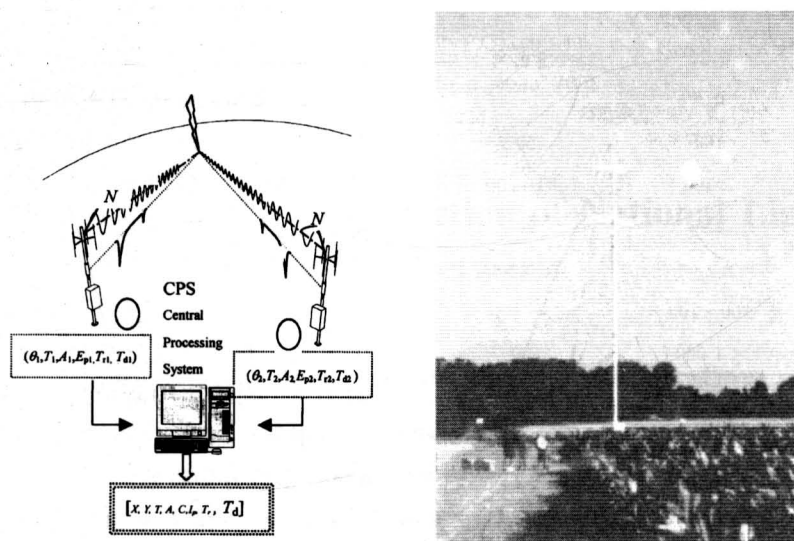


图 4 SAFIR 系统定位原理示意图和实物图片

Fig.4 SAFIR system principle and real picture

### 3.2 雷电监测网发展

随着社会经济的发展,对雷电监测与防护的要求会越来越高,雷电引起的灾害及相关问题也越来越多。因此,目前在主要发达国家已基本上建立了雷电监测网,用于雷电防护和相关科学问题的研究。如美国、加拿大、法国、英国、澳大利亚、日本、巴西、比利时、新加坡等国都相继建成了闪电定位网,促进了这些国家在雷电防护、短时天气预报与服务、云物理和化学研究等领域的发展。从使用技术来看,美洲国家一般使用美国 GAI 公司的产品比较多,技术上采用磁定向和时差法相结合的方式,如美国、加拿大等。欧亚国家使用芬兰 VAISALA 公司的产品较多,采用原法国 DIMENSIONS 公司的 SAFIR 技术,如法国、日本、新加坡等。表 1 给出了这两种技术的若干技术指标:从目前的报道看,两种技术各有特点,在缺乏大量资料对比分析的情况下,还难以判断哪种技术更优<sup>[1]</sup>。

表 1 SAFIR3003 与 GAI LDAR II 的技术指标

Table 1 Parameters for SAFIR3003 and GAI LDAR II

性能指标	SAFIR 3003	GAI LDAR II
探测原理	VHF 干涉法	3D VHF 时间差法 TOA
工作频率范围/MHz	110~118(VHF) 0.0003~3(LF)	45~150
信号带宽/MHz	0.6	5
信号测量动态范围/dB	100	70
探测灵敏度/dBm	≤-90	
方位角分辨率/(°)	0.25	<0.5
仰角分辨率/(°)	0.5	
时间同步分辨率/ns	100	50
数据闪电事件探测率/s <sup>-1</sup>	≥100	≥10 000
探测效率/%	≥90	99
无故障工作时间 MTBF/h		>30 000
探测子站的基线距离/km	100~200	25~100
探测(定位)精度/m	<1 000	500

目前国内也陆续建设了一些雷电监测小网,分布在气象、电力、电信、民航、部队等部门使用。国内产品生产主要集中在四五家单位,如中科院空间中心、武汉高压所、信息产业部 22 所、安徽科技大学等。各家采用的定位技术不尽相同,但大部分产品与 GAI 公司的技术路线比较一致,采用超低频二维定位技术。目前国内闪电定位系统还主要

用于局地的雷电监测。

## 4 主要技术问题分析与建设方案设想

### 4.1 加强雷电监测手段

由于我国目前还没有建立高水平的大范围雷电监测网,使得我国无论在雷电的业务监测领域还是在理论研究方面都受到了很大制约,总体水平无法与国际先进水平相比,从而影响了我国在雷电防护、中小尺度对流天气系统中的云物理和化学研究等方面的进展。许多科学家只好通过从国外获取资料开展研究或到国外实验室去工作。这种状况与我国社会经济的迅速发展是不相适应的。为了提高我国在这一领域的科研与业务水平 and 预防雷电灾害的能力,采用国际先进技术,提高雷电监测的能力和水平是十分必要的。

### 4.2 目前建网需解决的主要问题

1) 从产品选型上,可考虑引进部分国外先进产品,如美国 GAI 公司或芬兰 VAISALA 公司的产品。一方面可以尽快获取到较高质量的雷电探测资料,供业务和科研使用,另一方面可以通过使用、研究这些系统后,为提高国产设备的水平提供有价值的经验。对国内目前研制和发展的系统,也应加快业务应用进程,通过改进、提高和完善,解决关键技术,争取逐步取代国外产品。

2) 测站之间的通信网络,特别是对多测站的系统,信息交换能力将是重要的制约因素。因此要把雷电监测网的建设与通信系统一并考虑,选择有通信条件的地点建站,并注意软件系统的设计。

3) 建立严格的雷电监测业务规范。雷电监测是一项科技含量较高的探测技术,要实现全国联网监测,应有一套较完善的业务流程,包括信息采集、数据格式、传输方式、显示拼图、质量控制、仪器标定、检验方法等。

4) 加强对雷电的分析和研究,包括雷电的发生机理、对大气成分变化的影响、与天气气候系统的关系、对雷电的防护方法、探测方法的提高、人工引雷等。

### 4.3 建设方案设想

4.3.1 加快建立全国雷电监测网 从需求上看,应建成一个覆盖全国范围的雷电监测系统,才有可能满足各方面的需求。但从实际出发,考虑到经济上和自然环境方面的制约,以及雷电发生频数的分布,目前应以在中东部和西部的重点地区布设地面

雷电监测设备，组网监测。这样一个系统应包括约100个雷电探头。操作步骤上，可先以若干经济技术条件较好的大城市为中心，建设区域示范网，取得经验后逐步扩大，形成全国网。气象部门目前已开始实施试验网计划，预计2002年将若干示范网相继建成。

4.3.2 技术方案选择 中国气象局已于2000年正式发布了雷电监测系统的“功能规格需求书”，明确了雷电监测系统的具体要求。在技术选择上，可采用LF-VLF和VHF两种探测相结合。由于闪电过程中VHF高频段的信息比LF-VLF低频段部分要丰富得多，高频闪电定位系统能够提供高精度的云间闪电活动的三维分布，得到雷暴活动的移动发展过程的详细数据。低频闪电定位系统主要用于监测云地闪活动，对雷电灾害的防护也是十分必要的。对于雷电的三维信息采集，也可采取与二维探测相结合的方式。在重点城市和雷电多发区，进行三维探测，在其他地区则仅探测二维信息。

4.3.3 信息共享、提高效益 考虑到对雷电信息有需求的部门很多，包括气象、电力、民航、林业、航天、部队、科研、通信、建筑、旅游、一般民众等，应在建设时充分考虑信息服务与信息共享，特别是要利用现代技术手段（如网络、网站、电视、手机等）为用户提供及时有效的服务，充分发挥系统建设效益。

4.3.4 发展卫星雷电监测技术 从技术发展的角度看，发展卫星雷电监测技术将是对大范围雷电现象进行监测的有效手段，特别是在对海洋和大范围荒漠、高原等无人区的监测，只有依靠卫星探测技

术才能完成。一些发达国家已在一些试验卫星上安装了闪电探测器。美国预计将在于2003年发射的GOES-O静止卫星上安装一台凝视型闪电探测器。我国计划于2010年左右发射的FY-4号静止卫星上安装闪电探测设备，若计划能按时实现，将使我国的雷电探测水平迈上一个新的台阶，进一步推动对雷电现象的研究和防护。

#### 参考文献

- [1] 中国气象学会. 第三届全国雷电物理、监测和防护科学讨论论文集[C], 北京. 2001
- [2] 王道洪, 郝秀书, 郭昌明, 等. 雷电与人工引雷[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2000
- [3] 周秀骥. 高等大气物理学[M]. 北京: 气象出版社, 1991
- [4] 张义军, 言穆弘, 张翠华, 等. 不同地区雷暴电荷结构的模式研究[J]. 气象学报, 2002, 58: 618~627
- [5] 国家自然科学基金委员会地球科学部等. 21世纪初大气科学回顾与展望[M]. 北京: 气象出版社, 2000
- [6] Dimensions thunderstorm hazards nowcasting system [M]. Dimensions Co Confidential Document, 1998
- [7] 张霁琛. 现代气象观测[M]. 北京: 北京大学出版社, 2000
- [8] Krider E P, Nogge R C, Uman M A. A gated, wide-band magnetic direction finder for lightning return strokes [J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15: 301~306
- [9] Cummins K L. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. National Lightning Detection Network [J]. J of Geophysical Res, 1998, D8: 9035~9044

## Technical Analysis and Construction of National Lightning Detecting Network

Xu Xiaofeng

(China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

[Abstract] Lightning is a natural phenomenon that seriously affects the natural environment and human activities. Therefore, it is of important social, economical and scientific value to detect the lightning effectively. Comparing with the developed countries, China has some gaps in the fields of lightning studying, forecasting and detecting. In this article, the mechanism of lightning and its influence are described. The present situation and the direction of lightning detecting technology at home and abroad are also analyzed. Several suggestions and issues have been proposed for constructing the national lightning detecting network.

[Key words] lightning detecting; technical analysis; system construction