

# 实时闪电电磁场同步观测系统

范雯杰<sup>1,2</sup> 张义军<sup>1</sup> 孟青<sup>1</sup> 张阳<sup>1</sup>

(1 中国气象科学研究院, 北京 100081; 2 成都信息工程学院电子工程系, 成都 610225)

**摘要** 阐述如何对亚微秒级的闪电电磁场变化波形进行同步采集。设计制作了量程可调的快、慢电场变化观测系统,用以获取闪电电场变化信息,并结合磁场同步资料实现了不同环境下的闪电观测要求。基于数据采集卡(PCI-5105)和 Labwindows/CVI 开发平台,研制了闪电波形同步数据采集系统和分析处理软件。整套系统具有高采样率、大容量、多参量、同步观测等特点,并已通过野外试验的验证,为研究闪电放电的微物理过程提供了探测手段。

**关键词** 闪电 同步观测 数据采集 量程可调

## 引言

闪电是发生在大气中的一种瞬态大电流、高电压放电现象,一般伴随强对流天气过程发生。20 世纪 80 年代以来,随着经济发展及电子器件的大量使用,雷电对微电子设备正常工作的影响几率大大增加,有时甚至会造成设备的严重损害<sup>[1]</sup>。雷电辐射的电磁场是产生间接雷电灾害的重要部分,深入研究其特征对于雷电防护来说是非常必要的。

虽然雷电的观测记录由来已久,但早期只能通过目测等方法获得雷暴日、雷暴时数以及雷暴起止时间等信息。随着雷电研究的逐步深入,研究人员需要获取雷电辐射场的瞬间特征必须用高速而精确的数字化设备,这就对观测系统的硬件和软件都提出了新的要求。伴随着数据采集技术的发展,闪电观测也向集成化和高速化的方向发展。近几年来,雷电观测系统的发展更为迅速,获取的数据日益增多,性能也越来越高。Parker 等<sup>[2]</sup>利用 4 通道采集卡,在 14 位分辨率和 2.5 MHz 采样率下对闪电光强变化信号和电场变化信号进行了采集,并结合数字摄像机观测了闪电的发展过程。目前国内应用的雷电观测系统主要有以下几种:王怀斌等<sup>[3]</sup>利用 TCCJ-2000 波形存储器对一路快电场变化信号和两路磁场信号进行了采集,该系统的采样率达到了

10 MHz,但其记录时间仅为 200  $\mu$ s;张广庶等<sup>[4]</sup>利用数据采集卡 GaGe1602 设计了闪电多参量快速记录系统,可同时记录闪电快电场变化、慢电场变化和静电场变化信息,其采样率为 10 MHz,但采样深度仅为 4 MHz;目前国内最新的观测系统是李伏琼等<sup>[5]</sup>利用 GaGe8224 型采集卡实现的,具有 12 位分辨率、128 MB 内存和更高的采样率,该系统对闪电快、慢电场变化和静电场变化信息进行了采集。此外,杨静等<sup>[6-7]</sup>及殷启元等<sup>[8]</sup>也分别制作了磁场传感器,并使用示波记录仪等设备来获取闪电电磁场变化信息,对人工引雷和自然闪电的磁场特征进行了相关研究。

综上所述,针对闪电电磁场信号的测量,国内外已经开展了大量的研究工作。为了进一步补充和完善现有的闪电观测设备,本文利用高性能数据采集卡 PCI-5105,开发了一套完整的闪电电磁场同步观测系统,可实时采集、储存和显示闪电波形数据,并同步获取闪电电磁场变化信息。同时,本文自制了新型的闪电快、慢电场变化仪,该仪器具有 4 档量程可调功能,能够通过软件窗口对各量程进行灵活选择,满足了不同环境下的闪电观测需求。

广东地处副热带地区,对流活动旺盛,雷暴活动频繁。2009 年夏季,我们在“中国·广州野外雷电试验基地”进行的闪电综合观测试验中,利用该系统取

国家自然科学基金(40875003)、科研院所技术开发研究专项资金(雷电光电磁集成探测平台的开发)、公益性行业科研专项(GYHY2007622)、中国气象科学研究院基本科研业务费专项(2009Y008)共同资助

作者简介:范雯杰,男,1984 年生,硕士,从事大气探测工作,Email:fanwenjie@cma.gov.cn

收稿日期:2010 年 6 月 9 日;定稿日期:2010 年 12 月 15 日

得了一批自然闪电的观测资料,并对观测结果进行了初步分析,同时验证了该系统的整体运行效果正常、稳定。

## 1 系统结构

系统整体结构如图 1 所示,主要由 3 部分组成:第 1 部分是闪电快、慢电场变化仪,它由电场传感器、量程可调电路和单片机控制单元组成,能够测量闪电电场变化信息;第 2 部分为全相(东西向、南北向、水平向)闪电磁场传感器,可将闪电磁场变化信号转化为了电压模拟信号;第 3 部分包含了 NI 公司的 PCI-5105 高速数据采集卡以及工控机,用来完成闪电信号的数字化采集和数据的实时存储。此外,该系统还外接了高精度 GPS 接收机,用以获取闪电发生时刻的准确时间信息。

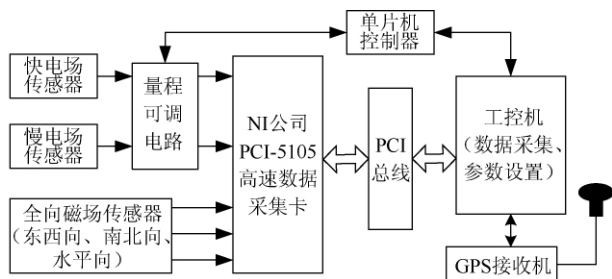


图 1 高速闪电电磁场同步观测系统结构

### 1.1 快、慢电场变化仪设计

快、慢电场变化仪能够直观地反映闪电各子物理过程的发生和发展,在闪电观测和分析过程中发挥着重要作用。在进行观测时,现有的快、慢电场变化仪由于量程单一,无法根据雷暴的不同特点对其进行探测;对近距离处闪电,由于电场衰减较弱,测得的电场值极易饱和,会丢失掉回击峰值等闪电电场信息;对远距离处闪电,由于电场衰减较强,测得的电场值有时非常小,又难以反映初始击穿、梯级先导等闪电物理过程。因此,本文设计了量程可调的闪电快、慢电场变化仪,在很大程度上弥补了上述不足,满足了不同环境下的闪电观测要求。

自制快、慢电场变化仪分别具有 4 档可调的增益设计,对闪电电场变化信号的相对放大倍数分别为 1 倍、5 倍、10 倍和 20 倍。其中快电场变化仪具有 2 ms 的时间常数,带宽为 500 Hz~2 MHz,测量的电压动态范围为  $\pm 14$  V,可有效反映闪电回击、梯级先导等快速放电过程内的亚微秒级精细结构。

而慢电场变化仪的时间常数为 4 s,带宽为 0.5 Hz~1 MHz,可反映闪电放电全过程的电场变化信息,其电压动态范围也为  $\pm 14$  V。

量程可调功能主要是通过模拟开关芯片和单片机控制单元来实现的。模拟开关芯片可以根据选通端的电平,决定输入端与输出端的状态,已广泛应用于自动控制系统中。单片机控制单元与工控机之间通过串口进行数据通信,可输出高低不同的逻辑电平到模拟开关芯片的选通输入端,操纵模拟开关的工作状态。在时间常数一定的情况下,单片机控制单元与模拟开关芯片相配合,确定了 4 组不同参数电路的通断状态,完成了对积分电路放大倍数的调整,进而实现了量程切换功能。同时,研究人员可直接通过相应的计算机软件窗口对快、慢电场变化仪的量程进行选择,整个量程切换过程方便、快捷。

### 1.2 磁场测量装置

本系统使用了武汉大学高电压技术研究所研制的全相三维磁场传感器来获取闪电磁场变化信息<sup>[9]</sup>。该传感器由 3 个呈正交的磁场线圈组成,可反映东西方向、南北方向和水平方向上的磁场变化信息,其中磁场线圈是由多匝漆包线紧密绕制在环氧筒骨架上而成。同时,由于该套传感器自身未包含积分处理功能,因此其测量得到的是  $\text{dB}/\text{dt}$  信号,即闪电磁场变化率信号。

### 1.3 采集设备的选取

为了满足多通道高速数据采集的需求,本系统采用美国 NI 公司生产的 PCI-5105 型号数据采集卡。该采集卡由 8 个模拟输入通道和 1 个触发输出通道组成,具有 12 位分辨率,最大 60 MS/s 的采样率和 512 MB 的板载内存,电压测量范围为  $\pm 15$  V。采集卡安放在性能稳定的工控机内,经 PCI 总线与工控机进行实时通信和数据传输,将闪电波形信息以二进制的形式存入工控机硬盘内。

## 2 系统软件设计及功能

本系统的软件编程工作主要是在 NI 公司的 LabWindows/CVI 9.0 软件开发平台下进行的。LabWindows/CVI 在数据采集领域应用广泛,它以 ANSI C 为核心,将 C 语言平台与数据采集和测控技术进行了有机结合,具有丰富的控件和库函数<sup>[10]</sup>。

结合高速数据采集卡 PCI-5105,本文编程实现

了对闪电波形信息的同步采集和分析处理。系统软件部分设计主要由参数设置模块、数据采集模块、时间获取模块、实时显示模块和历史文件浏览模块组成。

参数设置模块可在进行闪电观测之前,对数据采集卡的各项参数进行设置,以完成不同条件下的数据采集要求。该部分采用菜单化设计,操作方便,通过下拉菜单可对采集通道、采样率、触发通道、触发电平和预触发深度等参数进行调整。

数据采集模块主要负责将用户设定的各种操作参数交给采集卡,由采集卡完成相应的功能。当采集卡开始采集时,会进入数据监控状态,此时若触发通道外接信号的输入电平超过了触发电平,则采集卡便将采集到的闪电波形数据从板载内存中转存入工控机的内存,并以二进制的形式将数据保存在工控机硬盘里。完成一次数据采集之后,采集卡会自动进入数据监控状态,等待下一次闪电触发事件产生。数据采集功能的实现流程如图2所示。

时间获取模块的功能是获得闪电触发时刻的高精度GPS时间信息,并将其作为文件名进行保存。该部分的工作原理是:在触发产生时,数据采集卡会通过触发输出通道向GPS接收机发送一个上升沿信息;GPS接收机收到该上升沿信息后,通过串口向工控机传递该时刻的精准时间信息,其精度可以达到50 ns;数据采集软件接收到该时间信息后,将其作为文件名进行自动保存,同时清空串口,等待获取下一次时间信息。

实时显示模块能够对采集到的闪电波形数据进行实时显示。当一次数据采集完成后,相关的闪电波形信息便以不同颜色实时显示在相应面板上,观测者可直观地获得当前闪电的特征信息,并可依据这些信息对采集参数进行调整。

历史文件浏览模块主要是对历史数据进行查询和再显示操作,主要包括以下主要功能:①选择所要查询的历史文件,并通过相应窗口进行显示。②利用鼠标和键盘,可对波形进行多种形式的放大、缩小和截图操作。③按照“年月日时分秒”的方式,显示闪电发生时刻的时间信息。④能够将闪电波形数据转换为ASCII码的形式进行保存,并生成相应的文本文件,可利用第三方软件进行后续分析和绘图操作。

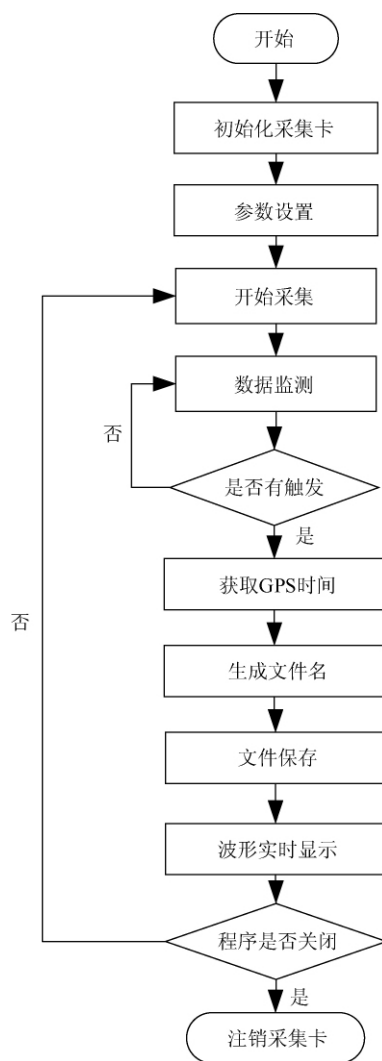


图2 数据采集的实现流程

### 3 观测

在2009年夏季进行的闪电综合观测试验中,整套系统工作正常、稳定,获取了一批自然闪电数据。本文以2009年8月17日的一次负地闪过程为例(图3),从电场变化和磁场变化两方面对该次闪电过程进行了初步分析。其中,电场变化信息的获取使用的是自制闪电快、慢电场变化仪,磁场信息的获取使用的是全向磁场传感器。

由图3可见,该次负地闪过程包含有7次回击,其中首次回击的电场变化值最高,强度也最大。在回击发生时刻,快、慢电场变化波形上主要表现为尖脉冲现象,对应有电场强度的突变。回击过程之后,由于衰减时间常数不同,慢电场变化波形呈缓慢下降趋势,其波形特征明显区别于快电场变化波形。

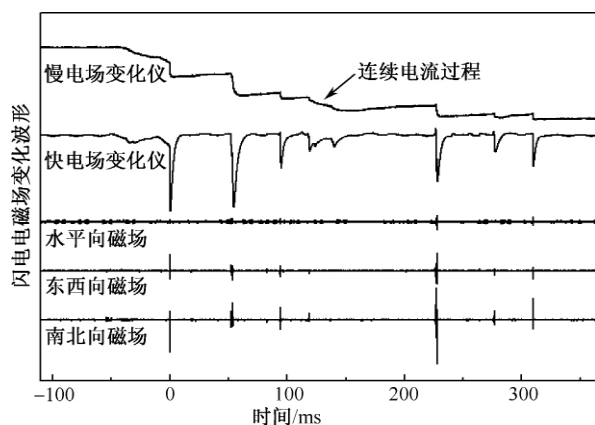


图3 2009年8月17日一次负地闪过程的电磁场变化波形  
(纵坐标值均为相对电压变化值且量程一致,为了方便对比,  
图中未给出纵坐标轴的刻度值信息)

在地闪第4次回击之后,慢电场变化波形上出现了一段持续时间约25 ms的连续电流过程(如图3中箭头所示)。地闪的连续电流过程是雷暴云中局地电荷中心在回击之后沿闪电通道对地产生的持续放电过程,它可以引起慢而大幅度的地面电场变化,并对应云下闪电通道的持续发光现象。连续电流过程持续时间多为几十到几百毫秒<sup>[11]</sup>,向地面转移的电荷量很多,是引起森林火灾、建筑物损坏、油库爆炸和输电线熔断的重要原因。从图3可以看出,在回击发生时刻,全向三维磁场变化波形上也对应产生有突变产生,其中,水平方向放置的磁场传感器所感应出来的电压信号较微弱。这是由于当回击发生时,地闪的放电通道近似于垂直地面,因此其水平方向上产生的磁场分量较少。由上述分析也可看出,自制闪电综合观测系统工作正常、稳定,能够对闪电波形变化信息进行实时和同步采集。

#### 4 结论

本文利用高性能数据采集卡,结合高速数据采集技术,实现了对闪电电磁场变化信息的实时和同步采集,整套系统具有以下几个主要特点:自制快、慢电场变化仪具备量程切换功能,可以满足不同环

境下的闪电观测需求;能够同步采集闪电快、慢电场变化波形和全向磁场变化波形,并实时显示;数据采集界面采用菜单化设计,可灵活的设置和修改各项采集参数;能够获取闪电触发时刻的高精度GPS时间信息,并将其作为文件名进行保存;该系统具备较好的扩展性,可外接其他闪电探测设备进行同步观测。

在2009年的野外观测试验中,整套系统工作稳定、可靠,能够实时和同步地获取闪电电磁场波形变化信息,其数据采集和分析处理能力可以满足闪电探测的特殊需求,为进一步研究闪电微物理过程奠定了技术基础。

#### 参考文献

- [1] 张义军,周秀骥. 雷电研究的回顾和进展[J]. 应用气象学报, 2006,17(6):829—834.
- [2] Parker N G, Krider E P. A Portable, PC-Based System for Making Optical and Electromagnetic Measurements of Lightning [J]. American Meteorological Society, 2003, 42: 739—751.
- [3] 王怀斌,鄒秀书,张义军,等. 云闪和地闪的波形采集、数据处理及其初步应用[J]. 高原气象,2002,21(1):74—78.
- [4] 张广庶,鄒秀书,王怀斌,等. 闪电多参量同步高速即时记录系统[J]. 高原气象,2003,22(3):301—305.
- [5] 李伏琼,田杨萌,鄒秀书,等. 雷电多参量快速大容量数据采集和分析系统[J]. 北京机械工业学院学报, 2007, 22(3): 10—14.
- [6] 杨静,鄒秀书,赵阳,等. 人工触发闪电电流及磁场变化特征对比[J]. 气象科技,2007,35(增刊1):14—17.
- [7] Yang J, Qie X, Zhang G, et al. Magnetic field measuring system and current retrieval in artificially triggering lightning experiment [J]. Radio Sci, 2008, 43, RS2011, DOI: 10. 1029/2007R S003753.
- [8] 殷启元,张义军,吕伟涛,等. 全相闪电电磁场测量系统实现与试验[J]. 气象科技, 2009,37(6):713—718.
- [9] 王建国. 冲击电压放电产生的电磁脉冲的实验研究[D]. 武汉: 武汉大学,2004.
- [10] 马明建. 数据采集与处理技术[M]. 西安:西安交通大学出版社,2005.
- [11] 陈绍东,李斌,孟青,等. 正性地闪和双极性闪电特征[J]. 气象科技,2007,35(增刊1):21—26.

## Real-Time Synchronous Observation System of Lightning Electromagnetic Field

Fan Wenjie<sup>1,2</sup> Zhang Yijun<sup>1</sup> Meng Qing<sup>1</sup> Zhang Yang<sup>1</sup>

(1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081; 2 Electronic Engineering College, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

**Abstract :** The synchronous observation of sub-microsecond electromagnetic changes resulted from lightning is described. A new-type fast/slow range-adjustable measuring system of electric field changes is developed. The equipment can be used to observe lightning in different environments in combination with magnetic measuring devices. The software of the system based on Labwindows/CVI with the PCI-5105 card is discussed. The main advantages of this system include high sampling rate, high capacity, multiple parameters, and synchronous measurement. This system was used to observe lightning flashes and analyze lightning physical processes in a field experiment.

**Key words :** lightning flash, synchronous observation, data acquisition, automatic gain control

=====

(上接第 783 页)

## Severe Weather Nowcasting Based on Radar Tracking and Extrapolation and Google Maps

Ding Jianjun<sup>1,2</sup> Hu Wendong<sup>1,2</sup> Zhao Guangping<sup>3</sup> Liang Xu<sup>2</sup> Chen Xiaojuan<sup>2</sup>

(1 Key Laboratory of Meteorological Disaster Prevention and Reduction of Ningxia, 2 Ningxia Meteorological Office, Yinchuan 750002; 3 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)

**Abstract :** Nowcasting of severe convective weather in the north-central region of Ningxia within 0 to 1 hour based on radar tracking and extrapolation is realized by using the Yinchuan Doppler Weather Radar data, by means of the TREC algorithm with the localized quality control of radar data. The web-based Ningxia nowcasting system is established on the basis of Google Maps with high-resolution geographic information. This system can display multi-source meteorological data, such as data of radar, satellites, lightning position finders, etc., as well as various derived and forecasted products. It can also provide forecasters with technical support according to the distributional characteristics of terrain conditions, population, industry and agriculture.

**Key words :** Doppler weather radar, TREC, Google Map, nowcasting