

雷电监测原理与技术

马启明 编著



科学出版社

雷电监测原理与技术

马启明 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面介绍了国际上现有的雷电监测定位的原理及相应的技术,并以中国气象局国家雷电监测网为实例,详细地讲述了 VLF/LF 三维闪电探测仪、国家雷电监测网数据处理中心及雷电监测网数据应用服务系统对应的技术,以 2012 年全国雷电监测网的监测数据为样板,统计出我国雷电活动的时空特性及对应的雷电密度、雷暴日等重要防雷参数的分布图。本书中的雷电精确定位技术,也适用于导航、无线电监听以及其他通信领域测控与定位。

本书为雷电监测与防御领域的专业书籍,可供高等院校相关专业的师生、科研单位的科研人员及相关管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

雷电监测原理与技术/马启明编著. —北京:科学出版社,2014
ISBN 978-7-03-042661-1

I. ①雷… II. ①马… III. ①雷-监测-研究②闪电-监测-研究
IV. ①P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 284610 号

责任编辑:杨向萍 汤 枫 张艳芬 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张 倩 / 封面设计:蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张:20

字数:394 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书的内容主要建立在作者及所带领的科研团队在中国科学院空间科学与应用研究中心、中国气象局气象探测中心及中国科学院电工研究所工作期间承担并完成的相应科研和业务工作的基础上。

全书共 5 章。第 1 章简要介绍雷电监测的科学意义、社会效益以及国内外的动态。

第 2 章介绍雷雨云的电结构、闪电的放电特性,并依据 Maxwell 方程组,通过 Matlab 仿真计算,得到闪电电磁脉冲辐射与传播特性,这些结果是雷电监测定位所需的理论与技术基础。

第 3 章介绍工作在 VLF/LF、VHF、可见光不同频段,从地基到卫星的雷电监测定位方法及相应的技术。

第 4 章介绍我国自主研发并建设的中国气象局国家雷电监测网系统。

第 5 章以我国雷电监测网 2012 年的监测资料为例,介绍我国雷电气候特征参数的统计方法与 2012 年我国雷电活动的时空特性。

雷电监测技术在中国能有较好的发展,首先要感谢中国科学院空间科学与应用研究中心,以作者导师高潮研究员为首的一批老科学家,奠定了核爆电磁脉冲/雷电监测这个学科方向,将先前美国 LLP 公司研制的 ALDF 闪电探测网引入我国并实现了国产化,让大家看到了雷电监测技术在中国的发展希望;其次,要感谢中国气象局两任局长秦大河、郑国光,推动了雷电监测技术走向气象业务,使雷电监测资料能得到广泛的应用并发挥出较好的社会效益。

在撰写本书过程中,得到了以下学生和同事的帮助:武汉大学物理科学与应用学院 2011 级周晓博士,2012 级肖芳、潘超硕士,2013 级田彩霞硕士,2014 级苑尚博硕士;中国气象局气象探测中心的迟文学博士,陈瑶、任晓毓、陈挺工程师。他们广泛阅读相关文献,并对一些结果进行仿真计算和验证,在整理稿件过程中做了大量的工作,在此一并表示感谢。

国家雷电监测网的运行得益于中国气象局综合观测司的组织与管理,国家气象信息中心的维护等,在此向他们表示感谢。

限于作者水平,加之雷电监测技术知识面很广,书中难免存在不妥之处,希望相关领域的专家、学者及各位同仁不吝赐教,谢谢!

目 录

前言

第1章 概述	1
1.1 开展雷电监测定位的意义	1
1.2 国内外研究现状和发展趋势	2
参考文献	4
第2章 雷电监测定位的理论与技术基础	5
2.1 雷雨云的电结构与电场测量	5
2.1.1 雷雨云的电结构与电场分布	6
2.1.2 地面电场测量技术	6
2.1.3 探空电场测量技术	17
2.1.4 中高层大气电场测量技术	22
2.1.5 星载电场测量技术	26
2.2 闪电的放电特性	28
2.2.1 闪电的分类	28
2.2.2 云地闪的放电特性参数	29
2.2.3 云闪的放电特性参数	35
2.2.4 中高层大气闪电放电特性	39
2.3 闪电电磁辐射特性	44
2.3.1 回击的电流模型及电流测量技术	44
2.3.2 回击辐射的电磁场计算及探测技术	52
2.3.3 云闪辐射的电磁场计算及探测技术	63
2.3.4 中高层大气放电电磁场模型与仿真	71
2.4 闪电电磁波传播特性	78
2.4.1 闪电电磁波传播的一般原理	78
2.4.2 VLF/LF 闪电电磁脉冲传播特性	80
2.4.3 VHF 闪电电磁波的传播特性	92
2.4.4 闪电电磁脉冲波形鉴别与探测技术	94
参考文献	97
第3章 雷电监测定位方法	100
3.1 总论	100

3.2 雷电单站定位系统	101
3.2.1 基于正交环天线测向法的雷电单站系统	102
3.2.2 VLF/LF 单站定位	102
3.2.3 基于干涉仪测向法的甚高频雷电单站探测系统	103
3.3 VLF/LF 频段雷电监测定位系统	105
3.3.1 磁方向雷电监测定位系统	106
3.3.2 时差法雷电监测定位系统	123
3.3.3 混合法雷电监测定位系统	124
3.3.4 VLF/LF 三维雷电监测定位系统	126
3.3.5 地基全球闪电监测网介绍	144
3.4 VHF 频段雷电监测定位系统	150
3.4.1 甚高频干涉法雷电定位系统	151
3.4.2 VHF 时差法闪电定位系统	175
3.5 VHF+VLF 综合雷电监测定位系统	181
3.6 星载闪电探测系统介绍	181
3.6.1 基于极轨卫星的闪电探测方法	181
3.6.2 基于静止卫星的闪电探测方法	190
3.6.3 风云四号闪电成像仪系列技术解决方案	192
参考文献	196
第4章 国家雷电监测定位网技术	201
4.1 国家雷电监测网概况	201
4.1.1 国内外现状	201
4.1.2 国家闪电探测站网主要功能与技术指标	205
4.2 国家雷电监测网探测仪技术	206
4.2.1 探测仪机械结构与技术指标	206
4.2.2 探测仪电路	208
4.2.3 探测仪电源与通信	221
4.2.4 NIOS II 嵌入式 CPU 结构	224
4.2.5 探测仪嵌入式软件	224
4.2.6 探测仪测控命令与集数据格式	228
4.3 定位算法与数据处理中心	231
4.3.1 系统概述与数据处理流程图	231
4.3.2 系统结构设计	233
4.3.3 数据接收与处理模块	234
4.3.4 系统监视模块	243

4.3.5 数据存储模块	258
4.3.6 数据再处理模块	264
4.3.7 定位结果格式与数据库	269
4.4 图形显示系统	273
4.4.1 图形显示系统概述	273
4.4.2 软件的设计与实现	273
4.4.3 软件主要功能模块	275
4.4.4 主要子系统	275
4.5 基于云计算的雷电信息共享平台	282
4.5.1 云计算技术概述与雷电“云”信息共享平台构建	282
4.5.2 雷电监测业务运行部分	283
4.5.3 雷电数据应用服务部分	285
4.5.4 雷电数据应用客户端软件	285
4.6 国家闪电监测网运行状态监控与数据质量控制方法	287
4.6.1 探测仪状态监控及质量控制方法	287
4.6.2 数据处理中心闪电数据同步质量控制方法	288
4.6.3 探测产品的数据质量控制方法	288
4.7 国家雷电监测网探测结果的验证与定标	288
4.7.1 雷电监测网主要技术参数描述与定标	288
4.7.2 火箭引雷	289
4.7.3 高塔雷电流观测验证	291
4.7.4 光学与摄像系统	293
参考文献	294
第5章 我国雷电气候特征参数的统计与雷电活动时空特性	295
5.1 我国雷暴日分布图	295
5.1.1 雷暴日统计意义	295
5.1.2 气象观测资料雷暴日	295
5.1.3 雷电监测网资料雷暴日	295
5.2 我国雷电密度分布	297
5.2.1 雷电密度统计意义	297
5.2.2 气象观测资料雷电密度	297
5.2.3 雷电监测网雷电密度分布	298
5.3 我国雷电强度分布	299
5.3.1 雷电强度统计意义	299
5.3.2 雷电强度测量的方法与测量值	300

5.3.3 负闪强度分布	300
5.3.4 正闪强度分布	300
5.4 正云地闪分布	301
5.4.1 正云地闪的特殊性	301
5.4.2 正云地闪频次分布	302
5.5 我国雷电时间特性	304
5.5.1 我国雷电日变化	304
5.5.2 我国雷电月变化特性	305
5.6 我国雷电活动的空间特性	307
5.6.1 年平均分布特性	308
5.6.2 月平均分布特性	308
5.6.3 闪电频次随经纬度的变化	309
参考文献	311

第 1 章 概 述

雷电是自然界中的强放电现象,据估计,全球每年大约发生 10 亿次雷暴,地球上每时刻有 2000 个雷暴云存在。在我国,根据最近几年雷电监测网资料显示,每年大约要发生 1300 万次左右的云地闪电。一方面,雷电维持着由雷暴-电离层-晴天大气-地球所构成的全球电路,号称大自然的“电源”,在自然界中起着不可替代的作用;另一方面,雷电也是一种典型的自然强电磁危害源。在现代生活中,闪电仍然威胁着人类生命财产的安全,引燃森林、火工品等造成重大损失,对航空、航天、通信、电力、建筑、石油化工等国防和国民经济的许多部门都有着很重大的影响;落地雷往往引起森林火灾,导致成片原始森林的烧毁;高压电网附近的雷电往往引起线路故障,中断电网的供电;导弹、火箭发射场及飞机场附近的雷电对导弹、火箭的发射及飞机的起飞构成威胁。另外,由于闪电辐射的电磁波频谱极宽、强度极大,常常干扰正常的无线电通信和飞行器的遥控而造成事故。在 20 世纪末联合国组织的国际减灾十年活动中,雷电灾害被列为最严重的十大自然灾害之一。美国将雷电列为排名第二的天气杀手,根据美国国家海洋大气管理局(NOAA)天气局的统计,美国平均每年因雷电灾害致死 73 人,伤 300 多人,雷电比飓风和龙卷风造成的人员伤亡还要多。我国每年发生的雷电灾害有近万次,造成的人员伤亡有 3000~4000 人,直接经济损失达几十亿人民币,雷电造成的损失在我国众多自然灾害中排第六位。随着计算机、微波站、智能传感器、电子信息显示与处理等弱电设备的广泛普及与使用,雷电损失大有上升趋势。因此,在现代信息社会,各国都很重视雷电的研究、监测及防护。

1.1 开展雷电监测定位的意义

雷电监测定位理论与技术研究开始于 19 世纪末 20 世纪初,在雷电研究、监测及防护领域中处于核心的位置。首先,通过遥测方式能大范围、较准确地提供雷电发生的时间、位置、强度等放电参数,供雷电科学家进一步研究雷电的放电特性和其他更细致的物理过程,为进一步认识、防护雷电提供科学依据;其次,通过实时监测雷暴的发生、发展、成灾情况和移动方向及其他活动特性,对一些重点目标进行类似于台风的监测预报,使雷电造成的损失降到最低点;第三,雷电往往和暴雨、飓风、冰雹等强对流天气现象有很强的相关性,监测雷电活动的范围和频度是监测、预报上述灾害性天气的手段之一;第四,雷电的监测及准确定位在电力系统雷击故

障点的查巡、森林雷击火灾的定点监测、火箭卫星发射场附近的雷电预警、石化企业安全生产等方面都有很高的经济效益。所以,几乎所有发达国家和地区都建有全国和地区性的雷电监测定位网。

1.2 国内外研究现状和发展趋势

现代 VLF/LF(very low frequency/low frequency)频段的雷电监测定位系统起源于 1976 年美国 Krider 等成功地对原双阴极示波器闪电探测仪的改进^[1]。在此基础上研制出了智能化的磁方向闪电定位系统(ALDF),该系统采用宽波段接收闪电辐射的 VLF/LF 信号,克服了原窄波段信号带来的偏振误差、电离层反射等不利影响,使测角误差在 $\pm 1^\circ$ 以内。20 世纪 80 年代初期又增加了云地闪波形鉴别技术,使云地闪电探测效率在 90%以上。80 年代中期和末期,几乎世界上所有发达国家和地区都布有这种设备组成的雷电监测定位网。与此同时,美国大气科学研究公司又研制了一种时差法(TOA)雷电定位系统,1986 年产品形成,并在美国东部建网,同时也在日本、巴西、澳大利亚等国家和地区建网。进入 90 年代后,由于 GPS 等技术的飞速发展,在原测向系统的基础上增加了时差功能,称为时差测向混合系统(IMPACT)^[2]。这种系统在定位精度和探测效率上较原系统都有较大的提高,是当时的主流系统。进一步研究云地闪和云闪的放电过程后,发现云闪 K 过程等也辐射 VLF/LF 脉冲,VLF/LF 系统更进一步升级为时差测向混合云地、云闪探测系统(IMPACT-ESC),并在美国、加拿大布设 187 个站,形成了现在的北美闪电监测网。

现代雷电放电过程观测研究表明,不仅云地闪回击过程辐射 VLF/LF 脉冲信号,云闪正负电荷中和过程(也叫云闪闪击)也产生较强的 VLF/LF 脉冲。通过接收闪电闪击(包括云闪、云地闪)辐射的 VLF/LF 脉冲信号,采用 TOA 定位方法,研发对闪电 VLF/LF 辐射源的时间、位置、高度、强度及极性等主要参数的三维定位技术,是升级传统闪电监测定位系统的最好方案。2007 年,德国慕尼黑大学天电研究小组采用该技术研制了 LINET 闪电监测网^[3],不仅能同时探测云地闪、云闪,还能提供三维定位,定位精度达到 150m。该系统目前由 17 个国家约 90 个传感器组成,使用范围覆盖了西经 $10^\circ \sim$ 东经 35° 、北纬 $30^\circ \sim 65^\circ$ 。LINET 监测网为预报单位提供服务并可进行连续工作,为德国气象服务提供闪电数据,为许多国家和国际科学项目提供实时和历史数据,得到了很高的评价。

为了更好地研究全球范围内雷电特性,美国华盛顿大学地球与空间科学中心利用电离层对闪电 VLF 脉冲信号的反射特性,研发了能探测全球闪电位置的全球闪电定位监测系统(WWLLN)^[4],并已在全球完成 60 个站点的建设。通过改进的 TOGA 定位方法,利用接收到 VLF 脉冲信号的相位变化率来确定各探测站点间

的时间差,进而确定闪电发生的位置。目前 WWLLN 系统的探测效率只有 30% 左右,但随着站点的建设及系统的完善,其探测效率和精度也会不断提升。

由于云地闪预击穿、先导等放电过程,云闪都辐射大量的 VHF(very high frequency)频段的脉冲,在 VHF 频段探测闪电,尤其对探测闪电的放电轨迹三维结构的研究非常活跃。20 世纪 80 年代后期,采用 VHF 干涉法测定闪电位置可以判定放电通道走向的系统(SAFIR)开始商业化,进而发展成有三维定位功能的系统,工作在甚高频波段的系统还有时差法的系统 LDAR。近年来在此基础上,美国 NMIMT(New Mexico Institute of Mining and Technology)又发展了具有更高定位精度的 LMA 系统^[5],基本实现了闪电放电轨迹的准确探测。

中国科学院空间科学与应用研究中心雷电探测研究团队从 20 世纪 70 年代开始研究闪电与核爆电磁脉冲探测技术,先后和中国人民解放军第二炮兵工程大学(简称二炮)合作研制了数代国产闪电监测定位网设备。“七五”期间,从美国 LLP 公司引进了当时最先进的磁方向闪电监测定位系统(ALDF),1990 年国产化成功。1991 年开始正式建立闪电监测定位网,受通信方式的制约主要是电力和军队系统自建自用。1996 年又在国内最先成功研制采用 GPS 卫星定位系统的高精度时差测向混合定位系统,使得雷电监测定位系统定位精度、探测效率有了明显的提高,随后在我国电力、电信、军队等部门采用专线通信,建立了一批专业闪电监测网,取得了明显的社会与经济效益。从 2003 年开始,随着雷电探测技术越来越成熟,探测设备稳定性、可靠性越来越高。另外,我国宽带网通信价格低廉、通信质量稳定可靠,为气象系统建设业务运行网提供了有力的保障。福建省气象局、江西省气象局率先以省为基本单位建设全省雷电监测定位网。2004~2005 年,湖南、陕西、云南、湖北、四川、黑龙江、山西、江苏等省气象系统纷纷建成了各省雷电监测定位网。

为了整合全国的资源,避免重复建设,中国科学院空间科学与应用研究中心从 2004 年开始将军队、电力、电信、气象等部门建设的闪电监测定位网联网,开展“国家雷电监测定位”的综合联网试验研究。国家雷电监测试验网到 2005 年 10 月 31 日为止,共计联网 186 个探测站,涉及电力、军队、气象、电信、林业等多个部门,探测范围覆盖到我国 20 多个省(市、自治区),全天候实时运行,并通过 WebGIS 实时显示最新 2 小时内的闪电监测资料。另外,在 2004 年 8 月正式开通从中国科学院空间科学与应用研究中心到中国气象局的专线,将探测结果实时传送到中国气象局大院供信息中心、气象中心等部门使用。2007 年底,中国气象局和中国科学院协商将中国科学院空间科学与应用研究中心雷电探测团队整体转到中国气象局,基于中国科学院原有的系统联成国家级闪电监测定位网。目前,该网拥有 346 个闪电探测器,除新疆、西藏、甘肃、内蒙古部分地区没有覆盖外,几乎覆盖了全国。2007~2011 年,该网连续、不间断运行了 4 年,探测到大量的雷电数据,为我国雷电灾害的防御作出了重点贡献,特别是在 2008 年奥运会期间、2009 年国庆 60 周

年雷电保障及“5·12”汶川大地震抗震救灾中表现突出。

2008年,在“十一五”国家科技支撑计划“雷电灾害监测预警关键技术研究及系统开发”的支持下,中国气象局气象探测中心牵头,联合武汉大学物理科学与技术学院、中国科学院等单位,结合美国 IMPACT 系统的结构、波形鉴别技术和 Linnet 三维定位技术特点,成功研发了 VLF/LF 三维闪电探测系统(ADTD-2型),并开始对原 ADTD-1 型闪电定位仪(中国科学院空间科学与应用研究中心研制)进行技术升级,到 2013 年年底,有近 80 个探测仪升级为 VLF/LF 三维闪电探测仪,我国北京、天津、河北、大连、海南、江苏、贵州、湖北等省(市)可以实时获取三维闪电监测信息,同时在中国科学院电工研究所建立了国家三维闪电数据处理中心。

地基闪电监测网能够实时监测陆地及陆地周边海洋上发生的闪电,全球闪电监测网最多只能探测到海洋上发生的 30% 的闪电,发生在海洋上的雷电只能靠卫星探测。20 世纪 80 年代末,Christian 等指出作为探测闪电理想平台的卫星应该具有较大的探测范围^[6]。在 90 年代中期,美国先后发射了 OTD 和 LIS 两个搭载在极轨卫星上的闪电光学探测器。随后,美国和欧洲的地球静止轨道卫星闪电成像仪 GLM 和 LI 都在准备之中,我国即将发射的静止轨道气象卫星(“风云四号”)也将搭载闪电仪。卫星上探测闪电视野大、效率高(尤其是云闪效率高)、时间分辨率高(2ms),但定位精度并不高,光学探测器并不是直接探测闪电亮光的位置,而是测量闪电亮光照亮的云顶区域,一般探测精度为 5~10km,并不能代替地基闪电监测网。

参考文献

- [1] Krider E P, Noggle R C, Uman M A. A gated wideband magnetic direction finder for lightning return strokes[J]. Journal of Applied Meteorology, 1976, 15(3): 301~306.
- [2] Cummins K L, Murphy E A, Bardo W L et al. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U. S. national lightning detection network[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103 (D8): 9035~9044.
- [3] Betz H D, Schmidt K, Laroche P, et al. LINET—An international lightning detection network in Europe[J]. Atmospheric Research, 2009, 91(2-4): 564~573.
- [4] Dowden R L, Brundell J B, Rodger C J. VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites[J]. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2002, 64(7): 817~830.
- [5] Krehbiel P R, Thomas R J, Rison W, et al. Lightning mapping observations in central Oklahoma[J]. Eos Trans. AGU, 2000, 81(3): 21~25.
- [6] Christian H J, Blakeslee R J, Goodman S J. The detection of lightning from geostationary orbit[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(D11): 329~337.

第2章 雷电监测定位的理论与技术基础

2.1 雷雨云的电结构与电场测量

晴天情况下,地球带负电荷,地球表面周围的大气中分散着很多带正电荷的离子,这样,在大气中就形成了指向朝下的垂直电场,大气电学中将这种指向的电场规定为正电场。晴天电场是大气电场的正常状态,常用做参考电场。晴天电场值随地点而异,存在着随纬度而增大的纬度效应。晴天大气电场随高度的分布也因时、因地而异,尤其是在陆地上,其分布规律较复杂^[1]。通常晴天大气电场具有随高度增加近似呈指数规律递减的分布特性,但即使在同一时刻,在不同的高度范围内其随高度的分布规律也不尽相同。就全球平均而言,在陆地上为 120V/m,在海洋上为 130V/m,工业地区由于空气高度污染,场强值会增至每米数百伏。晴天电场具有日和年两种周期变化。在海洋和两极地区电场日变化与地方时无关,在格林尼治 19 时出现极大值而于 4 时左右出现极小值,呈现一峰一谷的简单形状,变化振幅可达平均值的 20%。但对于大多数陆地测站电场日变化则取决于地方时,通常存在着两个起伏,地方时 4~6 时与 12~16 时出现极小值,而 7~10 时与 19~21 时却出现极大值,变化振幅可达平均值的约 50%。这种变化与近地层粒子的日变化密切相关。在海洋上,电场的年变化不明显;而南北半球的陆地测站,在当地冬季出现极大值,夏季则出现极小值。此外大气电场还有许多非周期性变化,它与气象要素的变化有一定关系。

在晴天大气电场的作用下,大气中的离子形成一个电流密度每平方米约为 10pA 的指向地球的大气电流。虽然空气中的电流密度很小,但地球球面积很大,考虑到地球是半径为 6400km 的球体,很容易计算出:从大气流向地球的总电流约为 1350A,地球总电荷量为 $-5 \times 10^5 \text{C}$,从地面到大气顶部总电势差约为 400kV,功率为 5 亿多瓦。

随着这么大的正电流从大气中流向地球,地面上的负电荷几乎不到半小时就被中和光,但自然界中并没有出现这种情况,科学家证明是地球上发生的雷电维持着大气的这种电平衡。

在非晴天时,云起电机制非常复杂,到目前为止尚未形成令人信服、完满的解释,对应的大气电场变化就更复杂了,本章将更多地讨论在地面、高空、中高层大气及卫星平台上电场的探测技术与探测结果,而不研讨理论解释。

2.1.1 雷雨云的电结构与电场分布

通常情况下,雷雨云中电荷结构如图 2.1 所示。云顶带正电荷,云底大部分区域带负电荷,也有小部分带正电荷。云顶正电荷区域在 8~12km,云底负电荷区域在 3~6km,云底小部分正电荷在 3km 以下区域^[2]。

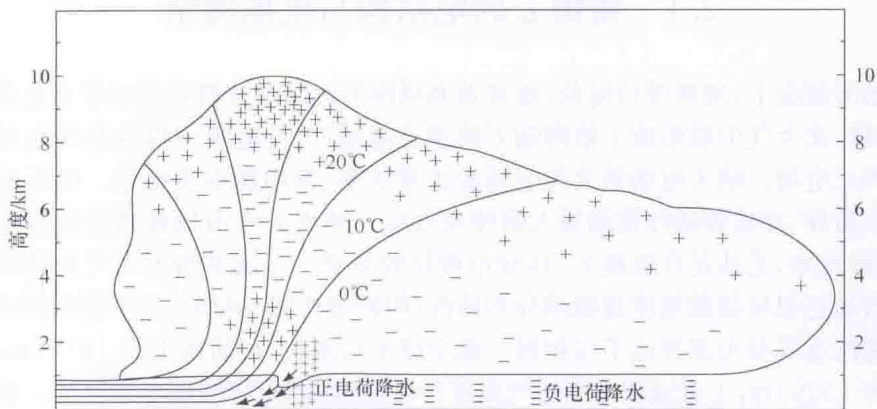


图 2.1 云电荷结构图

(图片源自于 the Lightning Charge P59)

云中携带的电荷在地面、高空、中高层大气层都可以探测到其产生的电场,并通过不同位置点电场值,选取一定电荷分布模型,计算出云中电荷的大小、极性及电荷中心位置等结构,随时间连续观测,进一步得到云中电荷的演变、移动规律。

2.1.2 地面电场测量技术

在地球表面探测云中电荷在地表产生的电场方法很多。测量原理简单、价格低廉、测量精度与性能稳定、用途最广泛的应该是磨盘电场仪,其次是振动式电场仪。为了满足一些特殊场所探测电场的需要,也可以用光电式电场探测仪。

电场测量仪原理图如图 2.2 所示。在静电场 E 中放置一块面积为 S 的金属平板,导体表面就会产生感应电荷 q ,感应面电荷密度为 σ , ϵ 为介电常数,真空中为 ϵ_0 , K 是由于导体放入引起的电场畸变系数。

$$q = \sigma S = \epsilon K E S \quad (2.1)$$

电压为 V ,导体电容为 C_n ,则

$$V = \frac{q}{C_n} = \frac{\epsilon K E S}{C_n} \quad (2.2)$$

通过后置积分电路,输出电压信号波形反映出电场的变化。其中,天线对地电容设为 C_n , R 的作用是与电容 C 形成放电回路以防止低频分量的饱和, $\tau = RC$ 为

积分器的时间常数。

云在电荷累积过程中, E 是一个缓慢变化的准直流分量, τ 很大, 对其测量比较困难, 科学家想了许多方法, 设法改变 S 、 C_a 等参数, 使 E 变为脉动交流信号以便于放大、测量。

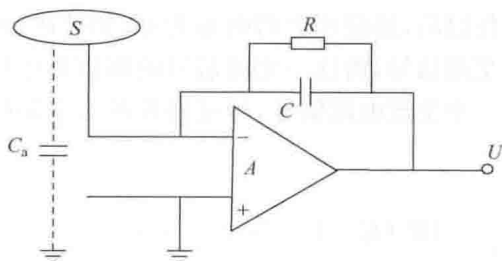


图 2.2 电场仪电路原理

1. 磨盘电场仪

磨盘电场仪是通过电机带动动片在感应片表面旋转来改变平行板电容面积, 实现改变 C_a 的一种手段, 如图 2.3 所示。磨盘电场仪的磨盘设计为两组形状相似且相互连接在一起的导电片, 并分别称之为感应片(定子)和动片(转子)。小叶片的形状与定片相似, 也由电机带动旋转, 并通过光电开关的缺槽口使光电开关产生同步参考脉冲, 用于鉴别电场信号的极性。动片随电机同轴转动, 感应片固定不动且与电机轴绝缘, 屏蔽片与感应片形状相同, 有相同等分开孔。

设定片的总面积为 S , 每小片导体面积为 S_i , 动片和定片距离恒定为 d , 则机械结构固定后, S 、 d 确定。当动片完全和定片对准时, C_a 最大, 当完全对不上时, $C_a = 0$ 。假定电机的转速为 ω (单位: 转/s), 并忽略动定片构成的电容边缘效应, S_i 随 ω 周期性变化, 导致 C_a 也随 ω 周期性变化, 则会产生一交变电信号。

当垂直方向的电场线能够“照射”到

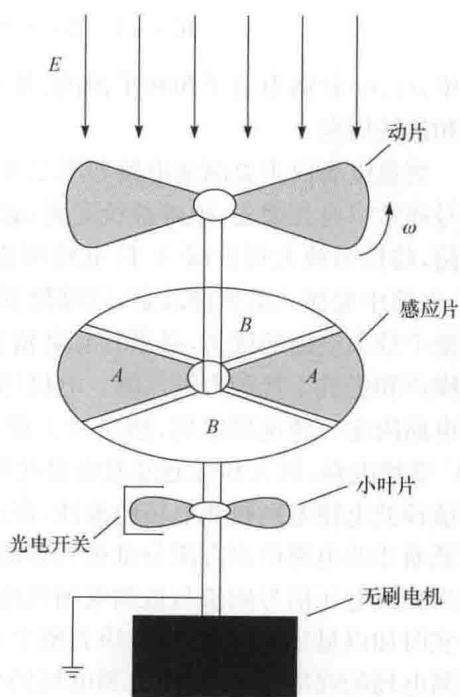


图 2.3 磨盘电场仪机械结构

感应片上时,感应片上感应出的电荷与电场的大小呈线性关系:

$$Q(t) = -\epsilon_0 ES(t) \quad (2.3)$$

式中, ϵ_0 为自由空间介电常数,一般取 $\epsilon_0 = 8.754 \text{ pF/m}$; $S(t)$ 为定子的表面积; E 的方向指向转子时为正。

电场线被动片挡住以后,感应片上的电荷为零,如果让动片不停地转动,感应片就会持续输出一个交流信号,而这一交流信号的幅值和电场强度成线性比例关系。感应片输出的是一个交流电流信号,经过前置放大电路的 $I-V$ 转换以后得到一个交流电压信号:

$$V(t) = \begin{cases} IR[(K+1) - 2e^{-\frac{t}{RC}} - 1], & 0 < t < T \\ IR[(K+1 - 2e^{-\frac{t}{RC}})e^{\frac{t}{RC}} + 1], & T < t < 2T \end{cases} \quad (2.4)$$

式中, I 为传感器输出的电流幅度,如式(2.5)所示; K 为无量纲常数,如式(2.6)所示; R 、 C 为电流放大器的反馈电阻和电容。

$$I = 4\pi f_0 \epsilon_0 (r_2^2 - r_1^2) E \quad (2.5)$$

$$K = (1 - 2e^{-\frac{T}{RC}} + e^{-\frac{2T}{RC}}) / (1 - e^{-\frac{2T}{RC}}) \quad (2.6)$$

其中, r_1 、 r_2 分别为定子和转子的内、外半径; f_0 和 $T = 1/f_0$ 分别为电机的旋转频率和旋转周期。

磨盘电场仪主要测量电路如图 2.4 所示^[3]。电场传感器感应电极输出的交流信号通常只有几微安,很难被检测到,必须采用多级的、高增益的、强抗干扰的放大电路,将信号放大到后端 A/D 电路所能接受的范围。为了避免干扰造成信号失真,电路中要加入低通滤波器,以降低低频噪声的干扰。其中,前置放大电路关系到整个放大电路的优劣,必须具有高精度、高稳定性、高输入阻抗、高共模抑制比、低噪声和强抗干扰能力等性能。电机用来带动动片及定片的旋转,转速由电机控制电路决定。转速稳定后,感应片上将产生幅值大小一定的感应电流信号,经过 $I-V$ 变换电路、放大和带通滤波电路处理之后,输出为单一频率的正弦信号。通过相敏检波电路鉴别被测电场的极性,将正弦信号转换为同一极性全波信号,最后经过低通滤波电路取出直流分量送入数据采集及处理系统,并将该值代入已标定的输出直流电压信号幅值与被测电场强度特性曲线中,解算出被测电场强度的大小,并实时加以显示,电源管理模块为整个系统提供电源。大气电场仪不仅能测量出被测电场的强度,还能辨别被测电场的极性,通常采用相敏检波的方法来实现^[3]。常用的相敏检波器有两种:一种由变压器和二极管桥组成,这种电路体积大,稳定性差;另一种则由模拟乘法器构成,性能上得到了很大提高,但价格高,调试麻烦。目前又发展出利用光电开关实现的相敏检测器^[4]以及运用单片机设计的相敏检波

器等新型检波器。图 2.5 所示为最终输出的检测电压。

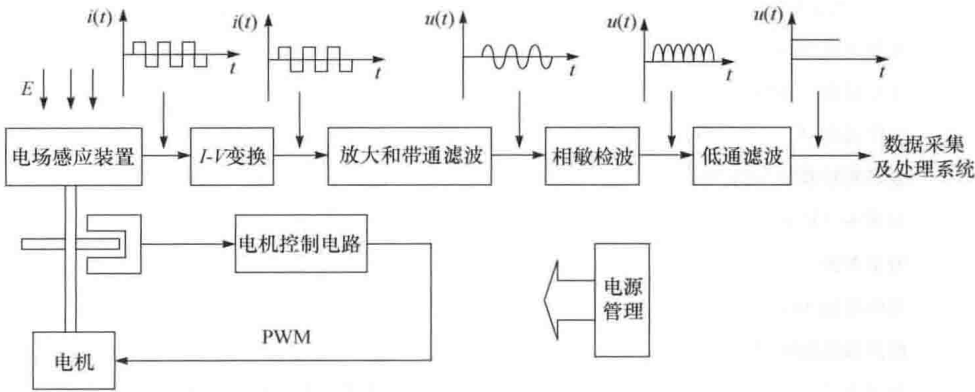


图 2.4 主要测量电路

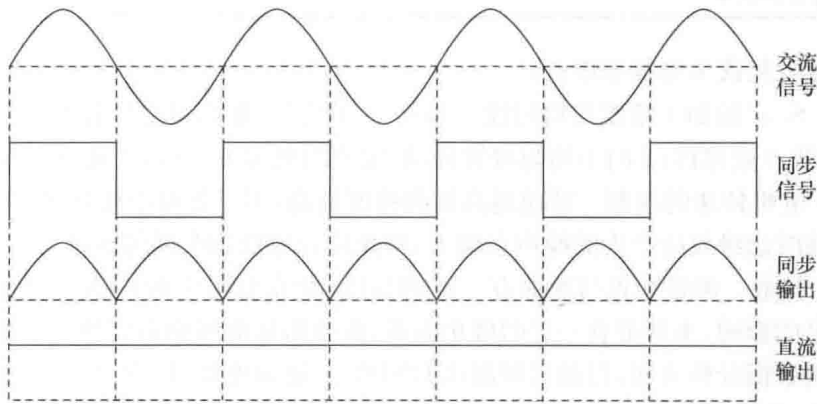


图 2.5 电场仪检波过程

磨盘电场仪参考技术指标如表 2.1 所示。由于电场仪需要长时间在室外运行,因此需要仪器舱有防水防露的能力(环境湿度为 0~100%RH)和宽的工作环境温度(-20~60℃),且在室外长时间运行以后不应出现锈蚀现象。由于设备需要不间断地采集大气电场数据,因此需要设备可靠性高,平均无故障运行时间(MTBF)大于 2400h,且维修简单,平均维修时间(MTTR)应不大于 0.5h。探测到的数据能够发送到远端显示,以达到综合多站数据和其他气象资料实现更精确预警的目的。出于安全考虑,设备电源线与机壳之间的绝缘电阻应大于 2MΩ,且电源和通信线端口应有防雷措施。