

主动式雷电预警系统的设计与实现

刘世宇¹, 马磊², 石涛²

(1. 宁夏中科天际防雷研究院有限公司, 宁夏 银川 750002;

2. 宁夏中科天际防雷股份有限公司, 宁夏 银川 750002)

摘要:在雷电防护措施中通常会采用主动式雷电预警系统,在综述国内外雷电预警系统研究现状的基础上,设计开发了对雷电可知、可测、可控的主动式雷电预警系统,其中雷电预警仪优化去除了同步信号发生器、电机接地电刷,稳定性得到了提升;通信控制终端实现了采集大气电场仪数据、本地调试升级等功能;终端设备电源进行了防雷电路设计,通过8/20电流冲击试验证明了自身防雷能力;设计了直流电场实验环境对雷电预警仪进行测试和标定;设计了雷电预警系统软件平台,并分析了一次真实的完整的雷击时序图,重点进行了预警阶段的分析;最后结合雷电预警信息,设计了远程实时控制升降避雷针、三色声光报警灯的技术路径。该系统在宁夏等处得到了很好的应用,达到了预期的效果。

关键词:雷电监测;雷电预警;主动式;雷电安全监护

中图分类号:TM28 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqed21769

Design and Implementation of Active Lightning Early Warning System

LIU Shiyu¹, MA Lei², SHI Tao²

(1. China Science Skyline Lightning Protection Research Institute Co., Ltd., Yinchuan 750002, Ningxia, China;

2. China Science Skyline Lightning Protection Co., Ltd., Yinchuan 750002, Ningxia, China)

Abstract: In general, active lightning warning system is utilized in lightning protection measures. An active lightning warning system that is knowable, measurable and controllable to lightning was developed through reviewing the research status of the lightning warning system at home and abroad. To be specific, a synchronizing signal generator and a motor ground brush were eliminated by optimizing the lightning warning device, so as to improve the stability. And functions such as acquisition of atmospheric electric field instrument data and upgrading of local commissioning could be implemented in the communication control terminal. Besides, lightning protection circuit was also designed for the power supply of the terminal equipment. Its lightning protection capacity was proved by the 8/20 current impacting test. Moreover, the lightning warning instrument was tested and calibrated in the DC electric field experiment environment. Meanwhile, by designing software platform for the lightning warning system, a real and complete lightning stroke sequence diagram was analyzed for analyzing the warning stage emphatically. At last, technical paths concerning remote and real-time control of lifting lightning rods as well as tricolor sound-light alarm lamps were designed in conjunction with lightning warning data. With good applications in Ningxia, expected results are witnessed in the proposed system achieves.

Key words: lightning monitoring; lightning early warning; active; lightning safety monitoring

在雷电防护措施中通常会采用主动式雷电预警系统,目前气象系统是以多普勒雷达和卫星提供长时间、大范围的雷电预报,暂无成熟技术手段实现对短时小区域雷暴在何时何地发生进行准确预报,造成局部的雷电预警、预报、主动引

雷处于空白阶段,对文物古建筑、新能源等行业有很大的危害。

基于此,设计了可实现雷电监测预警、远程控制及统计等多元管理任务的主动式雷电预警系统,解决了雷电灾害准确预测技术难题的现实

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划一般科技项目(2018BDE63016);

宁夏回族自治区自然科学基金项目一般项目(2020AAC03500)

作者简介:刘世宇(1981—),男,硕士,高级工程师,Email:150730334@qq.com

需要,突破了无法对雷电可知、可测、可控的技术瓶颈。

该系统采用大气电场侦测仪运用测量环境静电场的原理来对雷云进行侦测分析。在任何时候,系统都可以根据对环境静电场的变化来侦测 15 km 以内靠近的雷雨云,随后将侦测到的雷雨云的具体结果与设定的阈值进行比较,当超过阈值即可进行报警等操作,从而探测到雷暴发生的可能性,并且迅速发出雷暴预警信息,同时也提高防雷系统的管控能力,保障防雷系统稳定运行,降低运维成本。

1 雷电预警系统的设计

1.1 系统的基本组成

雷电预警系统主要有雷电预警仪、通信控制终端、供电组件、服务端软件、声光报警装置、自动升降避雷针、手机 APP、微信报警等组成,系统图如图 1 所示。



图1 雷电预警系统图

Fig.1 Lightning warning system

雷电预警系统利用先进的微处理器数据系统,将探测电极带电量转换为数字形式,从而实现了信息的实时监测与显示,记录地面上的静电场值与变化率,进而实现对半径 15 ~ 20 km 区域可能产生的雷电进行预测和启动三级雷电预警报警。系统数据可通过 4G 网络进入数据中心服务器,在网络信息技术的支持下,技术人员可以对不同地区的雷电发生情况进行实时探测,当探测到雷电临近状态时,系统就会以声光、短信等形式提出预警。

1.2 雷电预警仪的设计

静电场产生的基础是单个的电荷,人们所观察到的雷电正是由这一个一个的电荷累积所形成,因此,能够准确观察到雷雨云中的静电场变化就能掌握对雷雨云内部电荷的变化情况。

电流通过接地的金属导体时会产生电场的变化,因此,如果想要了解电场的变化规律,只需

要测量此电流的变化情况。但是,实际情况下的电场变化幅度非常微小、变化速率也比较缓慢,由动态感应原理可知,测量电流通过形成的电场的前提是需要有能够产生静电变化的足够电荷量,因此,通常的测量方法是利用导体屏蔽以及去屏蔽装置。

图2为本文设计的雷电预警仪内部传感结构的示意图,该结构为场磨式结构。当转子和定子的叶片处于相同位置时,转子屏蔽效应会使得电力线无法到达定子叶片上,此时无法产生任何感应电荷,只有当转子转动露出定子叶片时,电荷才会逐渐产生。所以,定子上可以观察到随周期性改变的感应电荷,利用电流的变化即可测量到电场的变化规律:

$$I = \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

$$Q = \epsilon KES \quad (2)$$

式中: I 为测量的瞬时电流; Q 为通过导体横截面的电量; t 为时间; ϵ 为真空环境中的介电常数; K 为导体引入后产生的电场畸变系数^[1]; E 为静电场电场强度; S 为金属导体的表面积。

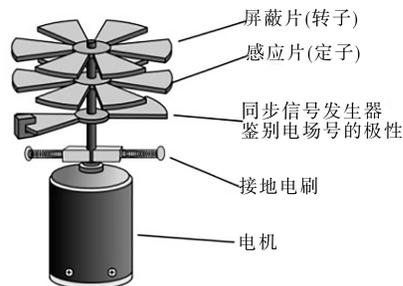


图2 传感结构示意图

Fig.2 The schematic of sensing structure

需要指出的是,我们用电机产生的类似信号代替原同步信号发生器,利用电机的轴接地取代了原接地电刷,采用金属支撑柱硬连接方式直接将电路板与外壳连接,起到了支撑和接地的作用,减少了连接线,使得雷电预警仪的稳定性得到了大大的提升,改进后的场磨式结构和预警仪实物如图3所示。



图3 结构改进后示意图和实物图

Fig.3 Schematic and physical diagram after structure improvement

图3中,左1为场磨式结构(电机及定转子设计)细节图,左2为改进后的场磨式结构设计图,右1为实物图。

该雷电预警仪具备雷电预警信号实时输出功能,预置内部算法,预警准确率高,其主要性能参数设置如下:探测半径15~20 km,测量范围±300 kV/m,电场分辨率≤5 V/m,采样速率≥200 Sample/s,屏蔽模式为非碳刷模式,系统功耗≤5 W。

雷电预警仪可以在单机或联网状态下使用,单机可以为单一场所提供雷电预警;多台联网使用可以组成雷电侦测网络,使用者可以实时地对不同范围进行探测与观察,通过计算机软件把按一定规律分布在各处的探头收集到的数据进行汇总、计算及分析,掌握整个区域某一时段的带电云层的变化资料,以此做出较为准确地推测和预报^[2]。

1.3 通信控制终端设计

本文设计的通信控制终端架构图如图4所示。电源支持12~48 V输入;串口RS485×3;支持无线通讯,支持4G全网通;支持三路继电器输出,根据雷电预警级别控制三色警示灯或电源切换装置;系统有短信功能,能单独发送预警短信,也能作为短信服务器发送预警内容,还支持接收短信指令远程修改设置参数。

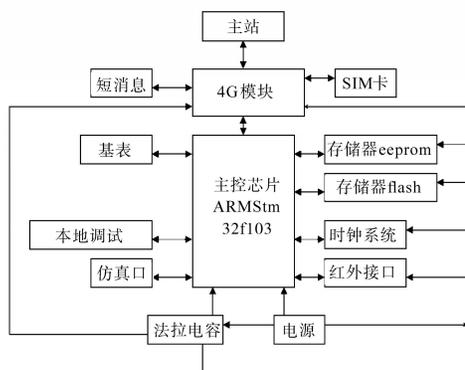


图4 通信控制终端架构图

Fig.4 Communication control terminal architecture

通信控制终端实现主要功能:

1)数据读取。采集大气电场仪数据,包括实时数据、平均数据、变化率、电源电压、电机转速及预警等级。读取大气电场仪设备参数,包括通信地址、全部报警级别阈值、数据发送时间间隔、总系数、分段系数及百分比倍率等。

2)参数设置。设置大气电场仪通信地址、全

部报警级别阈值、数据发送时间间隔、总系数、分段系数、百分比倍率及大气电场极性等。

3)工作模式设置。声光报警、电源切换模式;自动控制升降避雷针模式;远程控制升降避雷针模式。

4)本地调试功能。有一路独立RS485,使用通用的RS485线连接至该接口,即可烧写程序,模块正常工作过程中通过该接口可输出模块运行信息,方便调试。该接口还支持远程通信协议。

本地调试进行系统升级,流程图如图5所示。

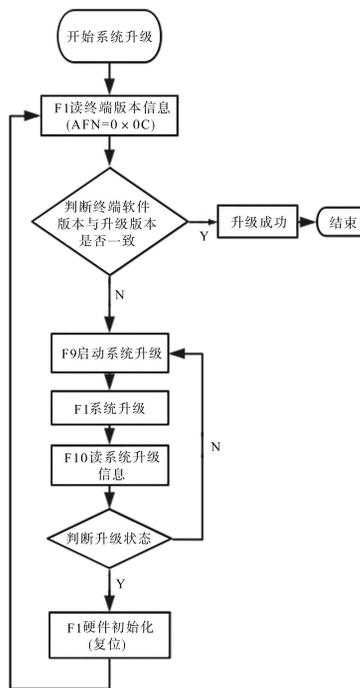


图5 系统升级流程图

Fig.5 System upgrade process

1.4 终端设备电源防雷设计

将220 V交流电源经开关电源转换成直流电压24 V,12 V,3.3 V,并经过直流电源防雷器后供给大气电场仪和通信控制终端等系统终端。

图6为本文设计的雷电预警系统中的终端设备电源防雷电路。

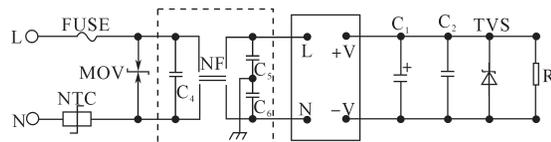


图6 终端设备电源防雷电路

Fig.6 Lightning protection circuit of terminal power supply

表1为电源输入部分以及输出部分的元器件名称及其功能^[3]。

表1 电源输入/输出部分的元件名称及功能

序号	元件名称	作用	推荐型号/值
1	FUSE/保险管	电源异常时,保护电路免受伤害	0.5 A/250 V AC, 慢熔断(必接)
2	功率型热敏电阻	抑制浪涌电流,保护模块不受损害	NTC-5D7或MF72-5D7,额定电阻5 Ω
3	MOV/压敏电阻	在雷击浪涌时,保护模块不受损害	07D471k,直径7 mm,耐电压470 V
4	C ₄ /X ₂ 电容	抑制差模干扰	0.22 μF/275 V AC
5	C ₅ ,C ₆ /Y ₂ 电容		1 000 pF/275 V AC
6	NF/共模电感	抑制共模干扰,提高设备的抗干扰能力及系统的可靠性	10~30 mH
7	C ₁		1 000 μF/35 V DC
8	C ₂		1 μF/50 V DC
9	TVS	在电路中产生瞬态电压时,TVS利用雪崩原理,以ps级的反应速度瞬间起到分流限压作用,从而保护负载不被损坏	SMAJ5.0A(3.3 V) SMBJ28CA(12 V) SMBJ36CA(24 V)

2 终端设备的防雷能力试验

所谓终端设备的防雷能力测试试验,通常为8/20冲击电流试验,进行该试验的目的是检查本文雷电预警系统的终端设备能否在大电流的工作状态下依旧维持良好的电性能。在进行冲击电流试验过程中,通常选择单极性的电流试验波形,当然,有的时候也可以选择比较常见的振荡波形,利用上述试验波形可以实现对雷电放电过程中产生的雷电冲击电流的模拟,同时也可以在一定程度上模拟电力系统开关开/闭过程中的冲击电流。利用上述冲击电流试验可以检测出本文设计的预警系统设备的防雷击能力是否能够满足实际雷电预警的应用需求^[3]。

被测样品在冲击电流为100 kA试验下波形图如图7所示。

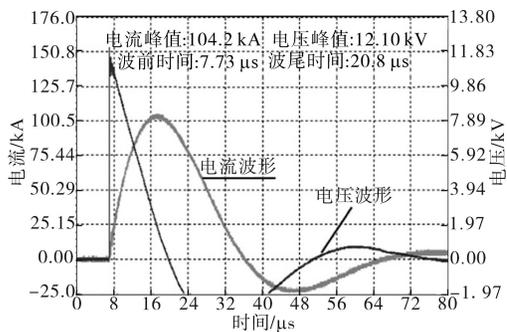


图7 100 kA冲击电流试验波形

Fig.7 The test waveforms with 100 kA impulse current

在被测样品加220 V工频电压的条件下做8/20电流冲击试验,依次增大冲击电流值,当冲击电流值达到100 kA时,电流波形和电压波形仍正常,说明被测样品正常通电工作时也具有较强的防雷能力。

3 直流电场试验设计

本文利用可以达到0~120 kV的直流微电流高压发生器(模拟雷电发生器)进行直流电场试验设计。

首先将不锈钢板以悬挂式的方式固定,进行必要的隔离绝缘操作。

其次,向不锈钢板上引入一个可调的高压电流,从而模拟出一个电场环境来对雷电预警仪进行测试和标定。

直流电场试验示意图如图8所示。

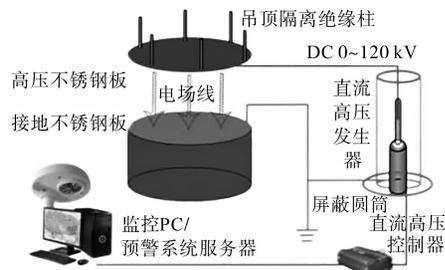


图8 直流电场试验示意图

Fig.8 DC electric field test

为达到要求,按以下要求进行了试验:

1)试验样品安装在测试板下面,确保其下方中心区域的电场是均匀的(附近线性电场的变化小于2%,可以通过仿真或测量进行确认)。为达到电场均匀的要求,应考虑测试板边缘的电场效应。

2)应按照正常使用方式组装试品,其最高点高于测试板下方的接地板1 m。可以使用木质支架以达到该高度。

3)测试板宜设置在2 m高位置(确保高于传感器最高点1 m),公差为±1 cm。

4)施加在测试板的电压宜为直流高压(负极性),从而使得试品探头获得0.1~15 kV/m的电场。

5)增减电压使试品探头获得0.1~15 kV/m线性分布的多个值。

大气电场仪所测的电场强度因为线性关系,可以用软件修正测试标定值,经过试验,测试标

定值表如表2所示。

表2 测试标定值表
Tab.2 Test calibration value

序号	电压/kV	场强/(kV·m ⁻¹)	值浮动区间/%
1	1	0.25	-30 ~ +30
2	3	0.82	-25 ~ +25
3	5	1.25	-20 ~ +20
4	10	3.05	-15 ~ +15
5	20	5.98	-10 ~ +10
6	30	8.65	-10 ~ +10
7	40	11.45	-10 ~ +10
8	50	14.89	-10 ~ +10

4 雷电预警系统软件平台设计

4.1 软件平台结构模型

现阶段基于分布式对象的物联网软件体系中,为物理数据与真实世界提供交互功能的主要是有益于物端的各类服务组件,但是,这部分的服务组件不能脱离云服务或者用户指令而独立执行任务。鉴于此,基于智能体的概念,我们提出了一种新的物联网软件体系结构设计,其中,物理实体服务被重新地定义为可以执行目标任务的软件实体,该软件实体还能够完成与周围环境的交互任务,并且,不同智能体之间以物联网的形式“互联互通”。

软件平台智能体体系结构参考模型由意大利卡拉布里亚大学的研究人员提出,该体系结构的基础是无线感知与执行网络(wireless sensor and actuator network, WSAN),将WSAN中节点视为智能体的执行任务的执行单元,网关等则为智能体之间的信息交通、用户与外界环境之间的交互提供了相应的接口^[4]。任意的WSAN智能体都可以在没有用户参与的前提下自主完成某些特定的任务,同时也可以接收用户指令,完成与其他智能体的协同配合,从而形成一个整体性的物联网体系。智能体体系结构的参考模型如图9所示。

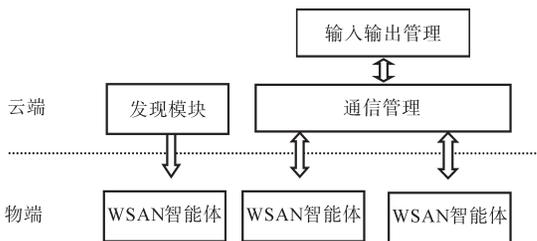


图9 智能体体系结构模型
Fig.9 WSAAN architecture model

基于智能体体系结构的雷电预警系统软件平台具有自治性、互动性、主动性等特点。软件平台功能模块如图10所示。

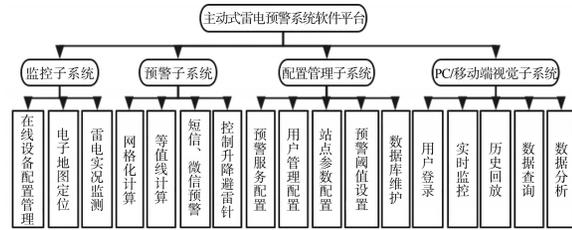


图10 软件平台功能模块
Fig.10 Software platform function module

4.2 雷电预警实时监控

该功能主要是在电子地图上实时显示此时此地大气电场强度值(以s为单位)。在嵌入式软件中,增加了数据预处理功能,使周边的环境电场对探测所造成的影响降至最低限度,保证了所测数据的有效性,同时在某种程度上,降低了对安装点的要求。实时监控流程图如图11所示,其运行界面如图12所示。

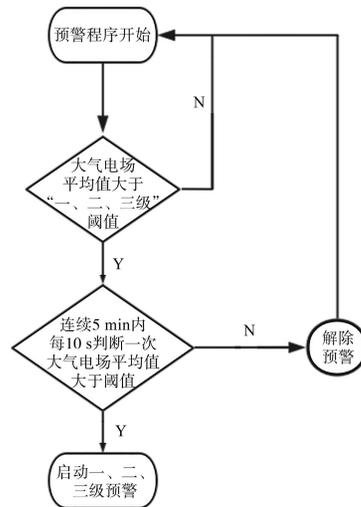


图11 实时监控流程图
Fig.11 Real time monitoring process



图12 程序运行界面
Fig.12 Program running interface

4.3 雷电预警数据分析

4.3.1 雷电预警系统的雷击过程数据分析

图13为2019年6月25日雷击时序图,图中展示了一次雷击随时间变化的完整过程。由图

13可知,整个雷电过程对于大气电场强度会产生非常显著的影响。图13中,雷击过程划分为6个不同的阶段^[5],本文的研究重点在于雷电形成的预警阶段。

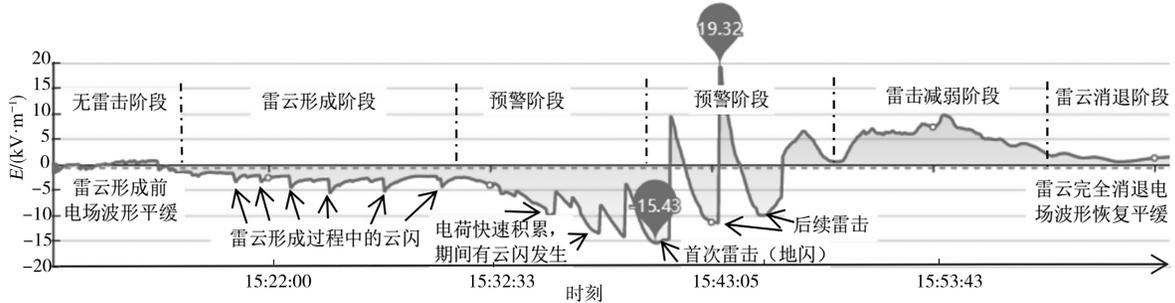


图13 雷击时序图

Fig.13 Lightning sequence

4.3.2 雷电预警系统的预警临界值的分析

接下来将以2019年6月25日收集到的雷电发生前的大气电场数据为例,如图14所示,当天天气晴朗时,大气电场的数值基本在0附近微弱波动,此时当地地面的电场值也基本维持稳定,即带电云层的电荷扰动的影响效果非常微弱。

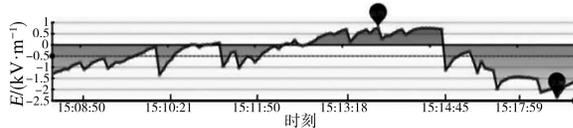


图14 晴天电场值折线图

Fig.14 Line chart of electric field value in sunny days

2019年6月25日15点40分,目标区域内第一次出现雷电,整个雷暴一共持续约20 min,图15展示了利用本文设计的雷电预警系统所收集到的实验数据。

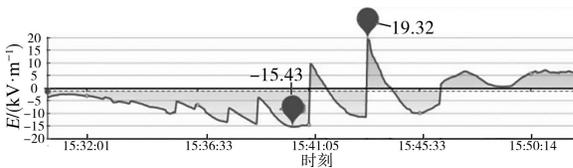


图15 15点32分至15点50分电场值折线图

Fig.15 Line chart of electric field value at about 15:10 to 15:50

通过图15可以明显看出雷暴对于大气电场具有较为显著的影响,其中,在雷云初步形成时期:大气电场值出现了小幅度的波动,一般情况下,独立雷雨云或雷雨云群的产生需要至少约20 min。

预警阶段:从15时32分开始,大气电场的数值在非常短暂的时间内就迅速到达报警阈值附

近,随后触发报警信号。在这个过程中,电场值的大小直接决定了报警级别的不同,目前初步将报警级别设定为3个。

雷击阶段:到15时40分第一次出现雷击现象,当发生雷击时电场值迅速达到15.43 kV/m,此后雷击多次发生,电场值在整个雷暴天气发生的过程中一度高达19.32 kV/m。

雷击减弱阶段:电场值的大小在短时间内迅速减弱至平稳状态。

雷云消退阶段:电场值的大小基本恢复到雷击发生前的初始状态。

通过长时间对于雷击数据的全面系统性分析,本文提出了3个不同的雷击预警等级。

一级黄色警报:阈值的默认值为3.4 kV/m;对正在接近的雷电或在本地生成的雷电进行报警,一般提前时效为20~30 min。

二级橙色警报:默认的阈值为4.7 kV/m,此时雷电正逐渐逼近。

三级红色警报:阈值的默认值为7 kV/m,此时雷电随时发生^[5]。

5 雷电临近主动防护设计

当接受到雷电预警信号后,系统平台发送指令提前启动自检程序使得自动升降避雷针、双回路电源自动切换装置等达到最佳的避雷状态,必要时关口前移,在雷电拦截区提前升起主动放电接闪装置(自动升降避雷针),由保护物被动接闪变成异地拦截放电,拒雷于本体之外,同时在雷电保护区LPZ1,自动切换供电回路,有效阻断线

路引雷入室。

雷电预警系统复用了3路继电器,单路继电器控制电路如图16所示,可支持双回路电源自动切换、远程实时控制升降避雷针、三色声光报警灯。

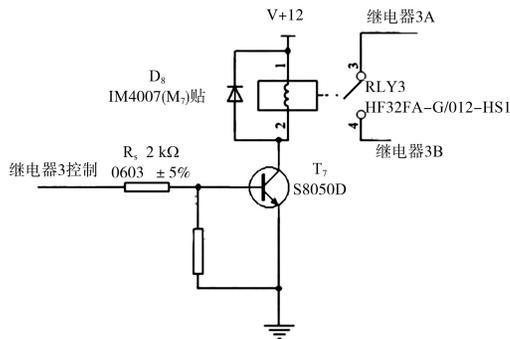


图16 继电器控制原理图

Fig.16 Relay control principle

现有的部分厂家都安装双路供电电源,从而避免雷暴对用电设备造成影响,而目前用于双路电源的切换开关经常会被大电流烧毁,此时整体便无法实现切换功能。为了实现常用电源切换至防雷效果更好的备用电源,同时整个双电源切换开关在损坏时更换方便,设计开发了一种雷电临近预警电源自动切换装置,装置结构如图17所示。

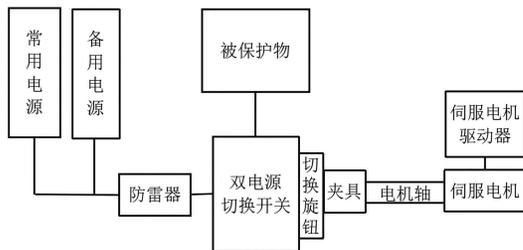


图17 雷电临近预警电源自动切换装置结构图

Fig.17 Structure of automatic switching device for lightning proximity warning power supply

由图17可知,雷电临近预警电源自动切换装置,主要包括常用电源、备用电源、防雷器以及双电源切换开关,双电源切换开关上设有用于供电切换的切换旋钮,通过转动切换旋钮实现常用电源和备用电源的选择^[6]。当监测到有雷电临近

时,伺服电机在驱动作用下,夹具带动切换旋钮转动切换,从而实现常用电源切换至防雷效果更好的备用电源,这样有助于被保护物的保护,同时整个双电源切换开关在损坏时更换方便,而伺服电机不受双电源切换开关的影响,因此后期更换双电源切换开关成本更低。

6 结论

主动式雷电预警系统除实现了雷电监测、预警、临近主动防护等功能,还具有自动分析、学习、评判防雷效果、实时告警及维护故障等功能,防雷系统运维由静态管理提升为动态管理,全面、主动、智能,构筑全维立体防线。该系统在工程应用方面具有很好的前景和推广价值,已在四川合江县尧坝古镇、宁夏文物保护中心等处得到了很好的应用,达到了预期的效果。

雷电预警系统的误报率一直是雷电预警系统的一项重要指标,目前雷电预警系统已通过大气电场仪与闪电定位仪数据相结合的方式将误报率由10%降低至5%,后期将继续接入雷电云雷达,将回波数据进行科学、有效地融合,实现更准确的雷电临近预警,进而降低误报率,同时保证预警成功率。

参考文献

- [1] 肖正华,惠世德,肖庆复,等.倒置式大气平均电场仪[J].高原气象,1994,13(1):107-109.
- [2] 王智敏.大气电场探测网络在克拉玛依地区的应用[J].价值工程,2016,35(17):145-148.
- [3] 刘世宇.智能防雷体系关键技术的研究与应用[J].数字技术与应用,2017(11):67-68.
- [4] 陈海明,崔莉.面向服务的物联网软件体系结构设计与模型检测[J].计算机学报,2016,39(5):853-871.
- [5] 舒诚舜.基于WebGIS的综合雷电预警管理系统设计与实现[D].武汉:湖北工业大学,2018.
- [6] 高攀亮,刘世宇,韩超,等.一种雷电临近预警电源自动切换装置:中国,CN201720839286.1[P].2018-01-05.

收稿日期:2020-04-14

修改稿日期:2020-05-29