

基于GNSS的电塔形变自动化监测系统设计及应用研究

管明文¹, 尹林², 段谟东¹, 张桐源², 刘建¹, 张永权³

(1. 中国电建集团江西省电力设计院有限公司, 江西 南昌 333000;

2. 国网江西省电力公司, 江西 南昌 333000;

3. 巴东地质灾害国家野外科学观测研究站, 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

摘要: 为避免因电塔形变而造成的安全事故, 需要实时监测电塔的微小形变, 因此, 基于GNSS技术设计一套电塔形变自动化监测系统。为了评估系统的性能, 在江西吉安某电塔进行了实验测试, 结果表明该系统能够长时间连续采集监测数据并进行监测预警, 且该系统在50 km的监测范围内, X和Y向量的监测精度达到了-5-5 mm, H向量的监测精度达到了-8-8 mm, 能够满足电塔形变的监测需求, 为相关电塔监测系统设计提供了参考。

关键词: 微小形变; GNSS; 监测预警

中图分类号: TP274 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)04-0043-05

Research on Design and Application of Automatic Monitoring System for Electric Tower Deformation Based on GNSS

GUAN Ming-wen¹, YIN Lin², DUAN Mo-dong¹, ZHANG Tong-yuan², LIU Jian¹, ZHANG Yong-quan³

(1. Powerchina Jiangxi Electric Power Engineering Co., Ltd., Nanchang 333000 China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 333000 China;

3. Badong National Observation and Research Station of Geohazards, China University of Geosciences, Wuhan 430074 China)

Abstract: In order to avoid the safety accident caused by the tower deformation, it is necessary to monitor the small deformation of the tower in real time. Therefore, this paper designs a set of automatic monitoring system based on GNSS technology. In order to evaluate the performance of the system, experimental tests are carried out at a power tower in Ji'an, Jiangxi province. The results show that the system can continuously collect monitoring data for a long time and carry out monitoring and early warning. In the monitoring range of 50 km, the monitoring accuracy of X and Y vector reaches -5-5 mm, and that of H vector reaches -8-8 mm, which can meet the monitoring requirements of tower deformation. It provides reference for the design of relevant monitoring system of electric tower.

Keywords: small deformation; GNSS; monitoring and early warning

0 引言

目前部分电塔是架设在高山上, 长时间的雨水冲刷以及地壳板块等因素的影响, 导致山体发生滑坡带动电塔发生形变, 严重时造成大面积停电, 带来巨大的经济损失^[1-2], 为避免发生严重事故, 需要对电塔的形变进行实时监测。传统的电塔监测方式包括人工巡检、直升机巡检、机器人巡检和无人机巡检, 人工巡检主要通过人工现场勘察, 巡检效率较低, 而且也不能保证24小时连续观测^[3-5]; 直升机巡检和机器人巡检投入成本较高, 容易受到

外部环境干扰; 无人机巡检难以控制, 且续航能力不高^[6]。因此, 需要一种新的方法进行电塔形变监测。

全球导航卫星系统(global navigation satellite system, GNSS)技术从20世纪70年代初第一次被提出^[7], 随着集成电路技术的进步, GNSS技术已经广泛应用于滑坡监测、沉降监测和形变监测等领域^[8-9]。与传统的监测技术相比, GNSS技术具有高精度、全天候和连续三维定位等优势^[10-13]。因此, 根据GNSS技术设计一种电塔形变自动化监测系统, 该系统能够长时间地连续采集电塔形变数据, 并进行预警处理, 满足了电塔形变监测的需要。

1 工作原理

GNSS定位主要有两种方式, 一种是通过接收伪距测量值RTD定位模式, 另一种是通过接收载波相位测量值

*基金项目: 国网江西省电力公司科技攻关项目(SGTYHT/21-JS-223);

中国电建集团江西省电力设计院有限公司研发中心资助项目(2022-yk-002);

国家自然科学基金国家重大科研仪器研制项目(41827808)

收稿日期: 2024-01-05

的RTK定位模式。由于电塔形变量非常微小,RTD定位模式仅能达到亚米级定位,RTK定位模式的精度可达到厘米级别,所以选择实时差分定位监测模式。RTK的工作原理是将一台接收机置于基准站上,另一台或几台接收机置于载体(称为流动站)上,基准站和流动站同时接收同一时间相同GPS卫星发射的信号,基准站所获得的观测值与已知位置信息进行比较,得到GPS差分改正值。然后将这个改正值及时地通过无线电数据链电台传递给共视卫星的流动站以精化其GPS观测值,得到经相位差分改正后流动站较准确的实时位置。基于GNSS的电塔形变自动化监测系统的工作原理如图1所示。

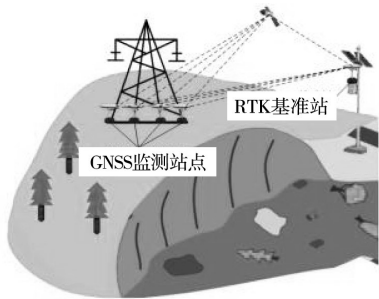


图1 电塔形变自动化监测系统工作原理图

在图1中,布设RTK基准站1个、GNSS监测站点4个,监测数据通过4G联网接入网络平台。整个监测过程是基于载波相对定位理论,基准站点布设选址于山体空旷且稳定性好的位置,监测过程保持长期稳定,可以监测卫星数据,并将基准站点接收到的载波相位信号通过LoRa组网网络发送给监测站点。GNSS监测站点布设在输电塔四个塔脚的位置,也能够监测卫星数据,接收卫星载波相位信号的同时接收监测站点的载波相位信号,然后通过差分结算两组载波相位信号,就能得到监测站点

实时位置坐标,实现监测站点位置的变形监测。

2 电路设计

本次设计的基于GNSS的电塔形变自动化监测系统硬件电路部分主要包括GNSS模块、LoRa模块和4G模块,系统电路如图3所示。GNSS模块选用瑞士公司u-blox生产的ZED-F9P,ZED-F9P支持RTK技术,可以提供厘米级的定位精度。该模块广泛应用于航空、航海、农业、测绘、机器人等领域,是高精度定位应用的理想选择。模块实物如图2所示。GNSS模块与STM32微处理器的UART3进行通讯,GNSS天线与模块的ANT引脚相连。 R_2 和 R_3 的阻值为 $220\ \Omega$,能够降低信号线上的噪声和干扰,调整信号的电平和阻抗,避免信号失真和反射等问题。



图2 GNSS模块实物图

无线通信电路中的LoRa电路通过LoRa协议实现与采集终端的LoRa模块的通信。LoRa无线通信模块与微处理器之间的通信采用串口采集电路,将采集好的传感器数据通过LoRa无线通信模块发送至LoRa无线通信电路中的LoRa模块,最终在上位机软件实现数据的存储和显示等功能。LoRa模块与STM32微处理器的UART2进行通信,通过串口通信实现数据传输。USR>和USR<控制模块的工作模式,配置LoRa模块和微处理的波特

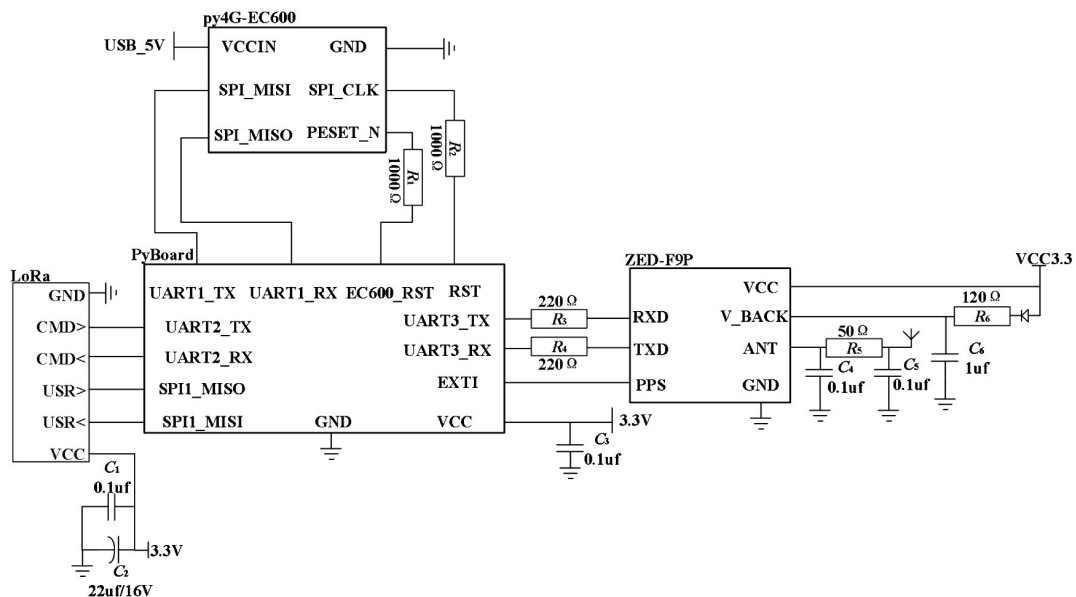


图3 系统电路图

率、传输速率等参数。

4G模块选用的是EC600,该4G模块能够实现良好的网络覆盖,具有低功耗、低延迟和良好的移动性等特性。四个塔腿的形变数据通过4G模块接入到服务器,然后再进行数据分发存储。4G模块与微处理器的UART1进行通信。

3 GNSS定位算法分析

GNSS定位的核心是通过差分计算监测站点和基准站点的卫星信号,实现毫米级的高精度定位。为了完成这一过程需要获得GNSS观测方程,引用差分算法,并进行模糊度解算,下面是一些GNSS定位算法的关键公式。

假设卫星S在某一时刻t发射的载波信号为:

$$A \cdot \cos(2\pi f^s t + \phi_0^s) \quad (1)$$

式中,A为载波信号的振幅, f^s 为载波信号频率, ϕ_0^s 为载波信号初相。

将载波信号除以 2π ,就可以得到以周为单位的载波相位为:

$$f^s t + \phi_0^s \quad (2)$$

同理可以得到GNSS接收机的相位为:

$$f_i^s t + \phi_{i,0} \quad (3)$$

由于信号从卫星到GNSS接收机之间的时间非常短,所以可以忽略由频率漂移引起的误差,即可以认为卫星和接收机的载波信号频率相等,且等于标准GNSS载波相位信号频率。那么卫星S发射端载波相位和接收端载波相位表示为:

$$\varphi_i^s(t) = f \cdot t + \phi_{i,0} \quad (4)$$

$$\varphi^s(t) = f \cdot (t + \Delta t(t)) + \phi_0^s \quad (5)$$

式中, $\varphi_i^s(t)$ 为发射端载波相位, $\varphi^s(t)$ 为接收端载波相位, $\Delta t(t)$ 为t观测历元。

结合式(4)式(5)就可以得到观测历元载波相位测量值为:

$$\tilde{\varphi}_i^s(t) = \tilde{\rho}_i^s(t) / \lambda - N_i^s(t) + (\phi_0^s - \phi_{i,0}) \quad (6)$$

式中, $\tilde{\rho}_i^s$ 为t观测历元接收机i到卫星S的伪距, λ 为载波信号波长。

获得观测方程后进行差分计算,设p、q分别为两个卫星,1为基准站点,2为监测站点,采用双差模型得到GNSS双差载波相位观测方程为:

$$\nabla \Delta \phi_{1,2}^{p,q} = f/c \cdot [\rho_2^q - \rho_1^q - \rho_2^p + \rho_1^p] - \nabla \Delta N_{1,2}^{p,q} + \varepsilon_\phi \quad (7)$$

式中:

$$\rho_2^q = [(X^q - X_2)^2 + (Y^q - Y_2)^2 + (Z^q - Z_2)^2]^{1/2}$$

$$\rho_1^q = [(X^q - X_1)^2 + (Y^q - Y_1)^2 + (Z^q - Z_1)^2]^{1/2}$$

$$\rho_2^p = [(X^p - X_2)^2 + (Y^p - Y_2)^2 + (Z^p - Z_2)^2]^{1/2}$$

$$\rho_1^p = [(X^p - X_1)^2 + (Y^p - Y_1)^2 + (Z^p - Z_1)^2]^{1/2}$$

$\Delta \nabla N_{1,2}^{p,q}$ 可以通过初始化确定, ε_ϕ 为基准站点和监测站点的双差残差,数值较小可忽略不计。

最后围绕最小二乘法进行模糊度解算,根据GNSS观测方程得到误差方程为:

$$V = AX - L \quad (8)$$

对应的随机模型为:

$$D = \sigma_0^2 Q = \sigma_0^2 P^{-1} \quad (9)$$

式中,L为 $n \times 1$ 维的观测向量;A为 $m \times n$ 维的系数矩阵;X为 $m \times 1$ 维的未知参数向量;V为 $n \times 1$ 维观测向量L的随机误差向量;D为L的协方差矩阵;P是相应的权矩阵;Q为相应的权逆矩阵; σ_0^2 为单位权方差。

根据最小二乘准则:

$$V^T P V = \min \quad (10)$$

对X进行偏导,得到最小二乘参数估计模型的最优估计值:

$$\hat{X} = (A^T P A)^{-1} A^T P L \quad (11)$$

4 软件设计

基于Nodejs开发环境设计了电力铁塔倾斜沉降远程监测平台,该软件能够清晰地显示四个塔脚的形变情况和预警信息,还能够将形变数据打包下载进行后续分析。

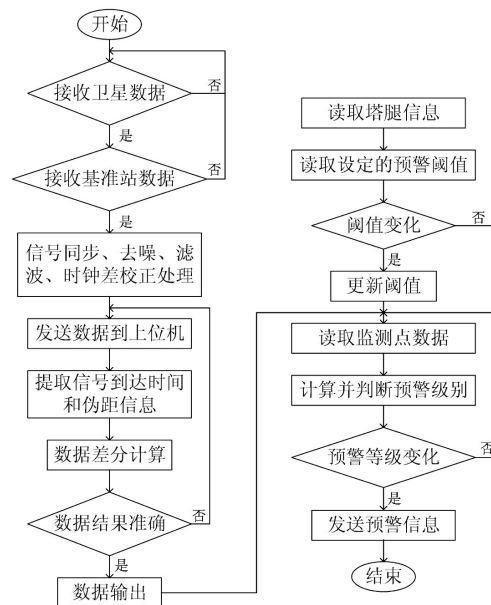


图4 GNSS软件流程图

根据监测需求,对GNSS软件进行程序设计,程序流程图如图4所示。首先是监测点和基准站的GNSS接收机同时获取到卫星数据,基准站接收到的数据再传递给监

测点,然后监测点对接收到的卫星数据和基准站数据进行信号预处理,将预处理过后的数据一起打包发送给上位机,上位机进行计算得到卫星信号的发射时间和载波相位参数,将监测点卫星数据和基准站数据进行差分运算。采用卡尔曼滤波算法,对监测点的经度、纬度和高程参数进行估计和优化,使用线性动态系统的模型来描述状态的演化,同时考虑到测量噪声和过程噪声的影响,根据监测点的位置估计值和基准站数据,预测当前监测点位置的估计值和协方差矩阵为:

$$X_{K/K-1} = AX_{K-1} \quad (12)$$

$$P_{K/K-1} = AP_{K-1}A^T + Q_K \quad (13)$$

然后对当前的测量值与预测值进行比较,并结合协方差矩阵进行加权平均,得到当前时刻的最优监测点位置估计值和协方差矩阵,监测点位置更新方程为:

$$K_K = P_{K/K-1}H^T(HP_{K/K-1}H^T + R_K)^{-1} \quad (14)$$

$$X_K = X_{K/K-1} + K_K(Z_K - HX_{K/K-1}) \quad (15)$$

$$P_K = (1 - K_KH)P_{K/K-1} \quad (16)$$

式中: K_K 为 $n \times m$ 阶增益矩阵,为最优卡尔曼增益; X_k 为滤波后 k 时刻估计值; P_k 为更新后 k 时刻估计协方差矩阵。

通过不断地重复上述操作,可以得到准确的位置估计值^[12]。最终,将监测点的经度、纬度和高程参数转换成 X 向量、 Y 向量和 H 向量变化量,并通过网站表现出来。

采用二级数据融合分析方法进行预警系统设计,第一级为局部融合中心,采用位移平均算法进行数据融合,将塔腿的形变分为水平形变和垂直形变,水平形变根据 X 向量和 Y 向量的形变量分别减去初始量的平方和的根作为累积水平形变量,垂直形变则是根据 H 方向的位移量减去初始量作为累积垂直形变量,根据累积形变量设定预警等级;第二级为全局融合中心,对同源融合后的融合

结果进行信度分析与数据推理,引入速度和加速度算法,获得形变速度和形变加速度,形变速度为单位时间形变量的变化量,形变加速度为单位时间形变速度的变化量,以此对杆塔变形演化过程进行一致性解释与描述。然后将数据接入到系统中,将预警信息通过邮件或短信形式推送给用户。

5 监测数据分析

系统设计完成后,在江西某电塔进行现场安装测试,图5为电塔其中一个塔脚安装现场照片。每个塔脚都用抱箍固定有一个GNSS天线,通过单独的太阳能供电系统进行供电。

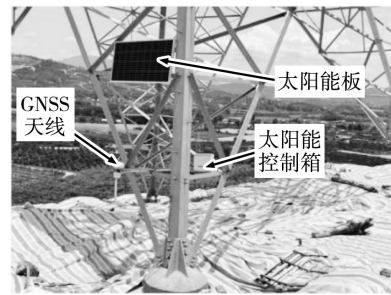


图5 现场安装照片

经过7月1日到9月15日的现场测试,获得了四个塔脚形变数据,可以直接在电力铁塔倾斜沉降远程监测平台下载,如图6、图7所示。图6为四个塔脚水平方向的形变量,可以看出四个塔脚的水平形变的变化趋势较为平稳,大部分形变都在 $-1 \sim 1$ mm之间,且最大的水平形变量为 ± 5 mm。其中7月1日到8月15日之间形变量波动较小,8月15日之后形变量波动较大,这些波动都是正常现象,可以认为波动范围即为设备精度。

图7为四个塔脚垂直方向的形变量。可以看出垂直形

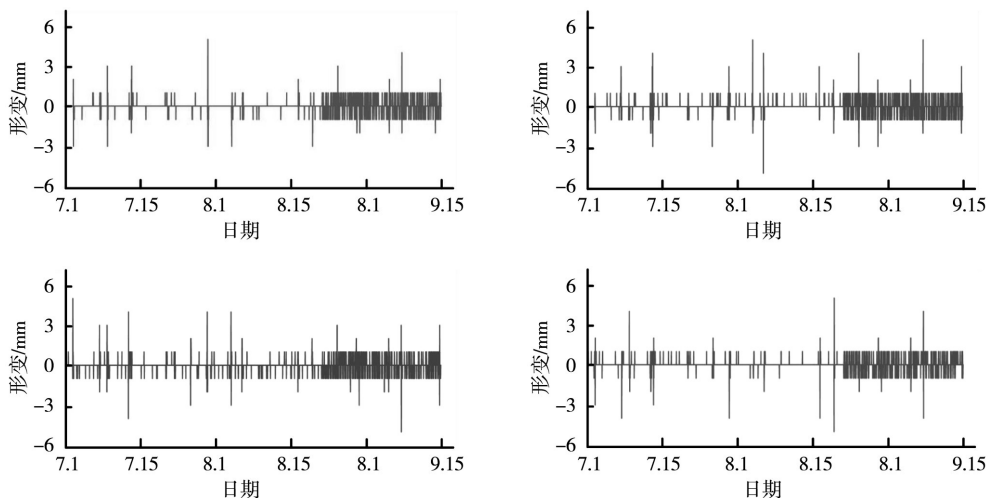


图6 水平形变量

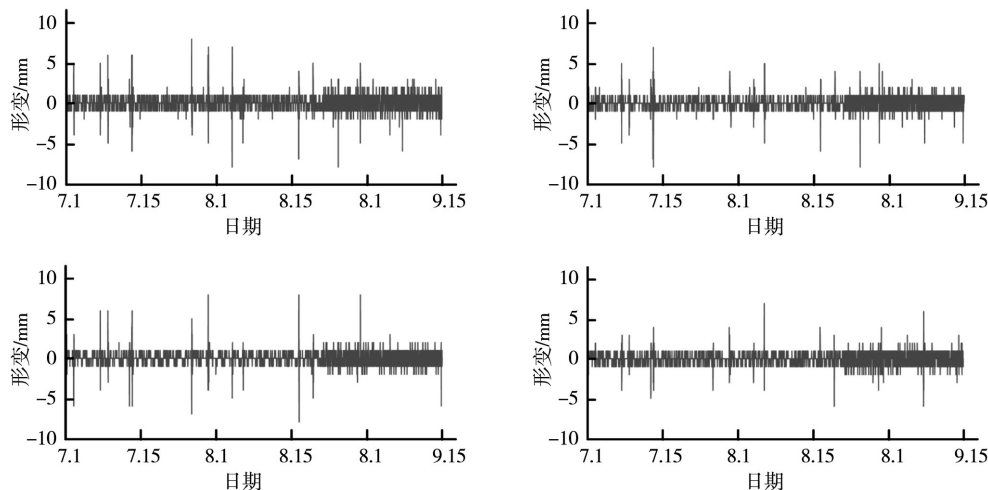


图7 垂直形变量

变量要普遍大于水平形变量,大部分形变都在 $-2\sim 2$ mm之间,最大垂直形变量为 ± 8 mm,整个观测时期波动都较为明显,但也没有达到预警阈值,处于相对安全的状态。该系统工作时始终保持在50 km的范围内进行监测,可以最大程度地保证系统的精度和准确性。排除系统误差的影响,根据图6和图7形变量的波动值分析出,所设计的基于GNSS的电塔形变自动化监测系统,水平向量的精度为 $-5\sim 5$ mm,垂直向量的精度为 $-8\sim 8$ mm,能够满足电塔的监测需要。

6 结束语

本文通过硬件和软件的分析设计了一套基于GNSS的电塔形变自动化监测系统,该系统能够长时间连续监测电塔产生的形变,并对数据进行预警分析。在江西吉安市某电塔进行现场测试后,发现该系统在50 km的范围内X和Y向量的监测精度为 $-5\sim 5$ mm,H向量的监测精度为 $-8\sim 8$ mm,表明该系统具有良好的准确性和稳定性,为电塔工程和监测领域提供了借鉴。

参考文献:

- [1] 高智,顾中华,王浩.公路边坡与坡顶输电铁塔相互作用与成灾机制的反演分析[J].水利与建筑工程学报,2020,18(2):184-189.
- [2] 王锴,党于航.砂黄土塔基边坡破坏机理研究[J].河北工程大学学报(自然科学版),2019,36(3):57-61.
- [3] 马晓峰,任秉珍,赵锦,等.高压输变电塔架及通道巡检技术综述[J].上海电力大学学报,2022,38(5):501-506.
- [4] 刘玉贤,阮明浩,闫臻.一种基于机载激光点云的门型电塔精确提取方法[J].测绘通报,2022(7):129-133.
- [5] 操松元,郭可贵,谭弘武,等.激光雷达在输电线路巡检中的关键技术及应用[J].地理空间信息,2021,19(2):83-86,105.
- [6] 陈泌溼,范菁.无人机在输电线路巡检中应用的探索[J].电工技术,2019(3):80-81,85.

[7] 王晓燕,杨晶晶,黄铭,等.GNSS干扰和欺骗检测研究现状与展望[J/OL].信号处理,2023,39(12):2131-2152.

[8] 沈楠.基于GNSS与加速度计融合的建筑形变监测关键技术研究[J].测绘学报,2023,52(8):1414.

[9] Egea-Roca D, Arizabaleta-Diez M, Pany T, et al. GNSS user technology: State-of-the-art and future trends[J]. IEEE Access, 2022(10): 39939-39968.

[10] Hao Z, Jiming Y, A O, Hongzhen Y, et al. Transmission tower monitoring system based on beidou RTK precise locating[C]//2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference(ITNEC). IEEE, 2019: 2298-2302.

[11] Bu X, Liu F, Fan S, et al. Research On Monitoring System Of Power Transmission Tower And Foundation Landslide Based On Beidou Technology[C]//2023 Panda Forum on Power and Energy(PandaFPE). IEEE, 2023: 1456-1460.

[12] 赵乃辰,赵斌,衣淑娟,等.基于多传感器数据融合的播深检测系统研究[J].农机化研究,2023,45(11):49-53.

[13] 李亚军,向阳,刘研等.基于卡尔曼滤波的播种机GPS测速数据优化算法研究[J].中国农机化学报,2020,41(1):148-154.

作者简介:管明文(1987-),男,副高,研究方向:电力工程地质灾害防治及输电线路设计。

通信作者:张永权(1987-),男,博士,副教授,研究方向:地质灾害监测仪器设备。