

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191363

国网山东电力北斗地基增强系统建设方案及应用

张波¹, 张勇², 刘政强¹, 孙海蓬¹, 王海洋¹, 张鹏²

(1. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250002)

摘要: 北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的卫星导航系统。该系统能够提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务。为满足电网业务对高精度授时、定位、导航等应用的需求,分析了地基增强系统建设的条件和要求。并结合山东省电网自身资源条件,从基准站选址、观测墩建设、系统供电、系统防雷、通信接入和安全防护等方面进行研究,给出了电力北斗精准服务网地基增强系统解决方案。该方案也可为其他类似项目建设提供借鉴和参考。

关键词: 北斗; 基准站; 观测墩; 授时; 定位

Construction scheme and application of BDS ground-based augmentation system of State Grid Shandong Electric Power

ZHANG Bo¹, ZHANG Yong², LIU Zhengqiang¹, SUN Haipeng¹, WANG Haiyang¹, ZHANG Kun²

(1. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;
2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250002, China)

Abstract: BeiDou navigation satellite system is a self built and independently operated satellite navigation system in China, which provides all-weather, all-time, high-precision positioning, navigation and timing services. In order to meet the demand of high-precision time service, positioning, navigation and other applications of power grid business, this paper analyzes the technical conditions and requirements of the ground-based augmentation system construction, and combines the resource conditions of State Grid Shandong Electric Power Company. Based on the research on the site selection of base station, the construction of observation pier, system power supply, system lightning protection, communication access and safety protection, the solution of the ground-based augmentation system of Beidou precision service network is given, which can also provide reference for other similar projects.

This work is supported by Key Research and Development Program of Shandong Province (No. 2017GGX201003) "Key Technology Research and Application Promotion Public Security of High-accuracy Dead Zone Positioning".

Key words: BeiDou navigation satellite system; reference station; observation pier; timing; positioning

0 引言

北斗卫星导航系统是我国自主建设、独立运行的卫星导航系统,可为全球用户提供全天候、全天时、高精度的定位、导航和授时服务的国家重要空间基础设施。北斗系统已在交通运输、通信系统、电力调度、救灾减灾、公共安全、农林渔业、水文监测、气象测报等领域得到广泛应用,融入国家核心基础设施,产生了显著的经济效益和社会效益^[1]。

北斗系统一般可获取的民用定位精度平均在5~10 m左右,如果直接接收卫星信号进行解算实现定位的话,不能满足电力业务对分米级、厘米级甚至毫米级的高精度定位需求,目前建设地基增强系统(CORS系统)是实现GNSS系统高精度定位的首选方案^[2]。为了满足电力行业对高精度授时和定位的需求,本文对需要时空位置服务的电力业务进行梳理和分析,研究了地基增强系统建设的条件和要求。结合山东省电网自身资源和基础设施条件,从基准站选址、观测墩建设、系统供电、系统防雷、通信接入和安全防护等方面进行分析研究,本着安全稳定、布局合理、快速准确的原则,给出电力北

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2017GGX201003)“面向公共安全的高精度盲区定位关键技术研究与应用推广”

斗精准服务网地基增强系统解决方案^[3]。

1 业务需求分析

山东电网在运检、调度、基建和营销等多个业务领域对高精度授时和导航定位等有广泛的需求,电力北斗地基增强系统的建设就有了需求基础。

运检业务领域对输电线路杆塔倾斜姿态监测预警、架空输电线路移动巡检、变电站作业人员安全管控、输电线路的防舞动监测、输电线路地质灾害监测预警等方面,可通过植入北斗终端,实现自动监测位移、形变、运动轨迹等并告警提示,能有效提升电网运检管理的能力和水平^[4]。

调控业务是电网调度管理的核心,电网的安全稳定运行是其工作重点,统一授时是电网安全稳定运行的基础,精准统一的时间是电网拓扑分析、潮流计算、事故分析、保护正常动作等计算分析的基础,基于北斗的授时系统对电网安全运行至关重要,有着广泛的应用基础^[5]。

电力基建项目有着建设标准高、专业性强、规模大、安全风险高等特点,对工地现场的人员、车辆、机械设备、物资、场地等的安全监测和管理都有很高要求。通过安装基于北斗的监控终端,实现实时监测人和物的移动轨迹,发生异常实时告警,对危险侵害和事故的预防具有重要的作用,能有效提升项目现场的管理水平^[6-8]。

营销业务领域在重要资产管理、智能电表授时、营销移动作业、仓储物资调配等方面,可利用内嵌北斗模块的终端,依托泛在电力物联网,对高精度位置和时间信号实时监测和管理,结合信息化系统的建设和应用,形成卓有成效的管理,具有广阔的应用前景^[9-10]。

2 系统工作原理

在北斗卫星导航系统的基础上,通过在地面建设基准站,配备北斗卫星测量型接收机和通信终端等设备,连续观测接收卫星信号,实时将数据通过地面传输通道发送给解算运营平台处理,生成差分改正数,通过网络或无线电通信等手段进行播发,形成格网覆盖虚拟参考站网。

用户通过配备高精度位置服务接收终端,借助网络或无线电通信等接收来自解算运营平台播发的所在虚拟参考站所对应的差分改正信号,对自身直接获取的北斗卫星低精度观测值进行实时修正,从而得到高精度定位结果,精度可达实时厘米级。

对于需要更高精度的用户,可将用户站的数据通过数据传输系统传到解算运营平台进行事后差分

解算,得到用户站的高精度定位数据,精度可达毫米级。

电力北斗地基增强系统主要由基准站网子系统、供电系统、通信系统、防雷系统、数据中心子系统(解算运营平台)、用户应用子系统等部分构成^[11-12],如图1所示。

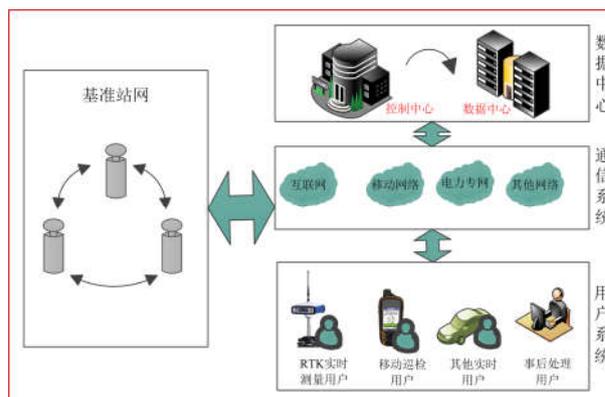


图1 系统构成

Fig. 1 System components

基准站网子系统用于获取解算位置的基准数据,是系统的核心基础;供电系统为基准站系统提供持续可靠供电;防雷系统对基准站实施防雷保护;通信系统实现数据的实时传输。数据中心子系统用来实现基于基准数据及监测数据的位置解算。用户应用子系统是用户对定位数据的获取和利用^[13]。

系统业务流程如图2所示,首先各GNSS接收机实时采集和接收GNSS定位信号,并通过电力数据通信网将数据回传到数据中心^[14]。数据中心采用虚拟参考站(VRS)等方式进行解算,分为实时差分解算和事后差分解算两种方式,前者是由数据中心进行实时差分解算,将差分改正数等信息通过数据通信链路实时传给用户终端,使用户端得到厘米级的高精度实时定位数据;后者是由数据中心进行事后差分解算,将星历和接收机原始观测数据等通过电力数据通信网传送到数据中心进行事后差分解算,使用户端得到毫米级的高精度定位数据。

定位服务播发优先采用虚拟参考站VRS的网络实时动态(Real-time kinematic, RTK)方式进行,工作原理如图3所示。

基准站连续不断地向数据中心传输卫星观测数据,数据中心进行实时解算并建立误差模型,通过内插获得VRS误差改正值或虚拟观测值,以国际海运事业无线电技术委员会(Radio Technical Commission for Maritime services)制定的RTCM SC104协议格式

发给终端,终端接收数据中心发送的 VRS 差分改正信息或虚拟观测值,通过差分计算得到用户实时高

精度定位结果,或者自数据中心得到事后毫米级定位结果^[15]。

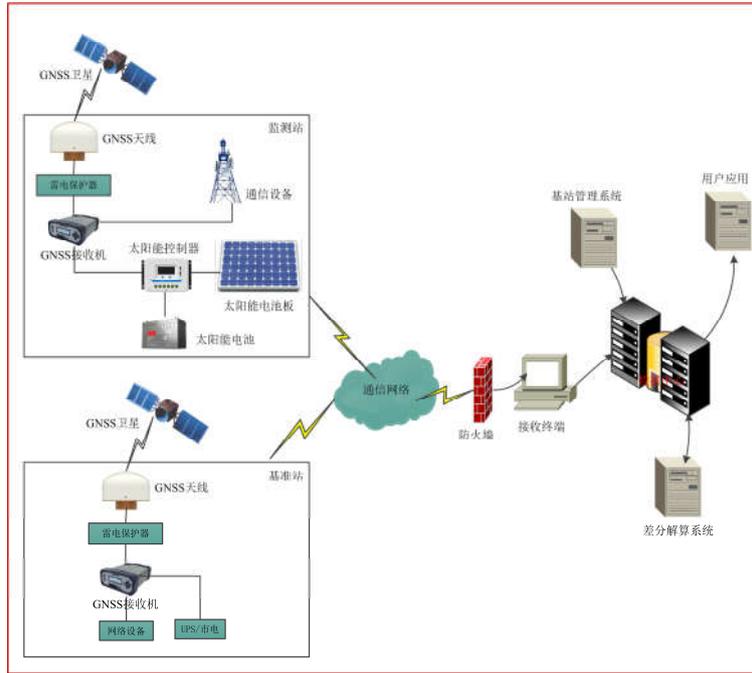


图 2 系统业务流程图

Fig. 2 System business flow chart

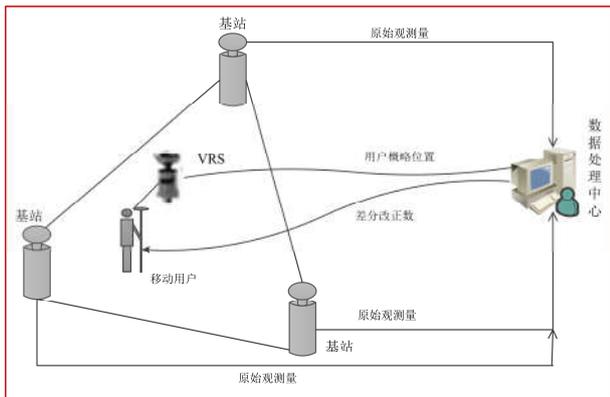


图 3 虚拟参考站工作原理图

Fig. 3 Virtual reference station working principle diagram

3 基准站选址

3.1 观测点位应满足北斗基准站建设要求

基准站的建设是整个系统能否正常运行的基础,应避免断层、滑坡、地震断裂带等不良地质构造区域,保证安全的使用条件,最好选择在电网的变电站内,优先选择基础设施完善、地势开阔且平坦的站点,同时还能减少土地资源成本和风险。在此基础上,还应保障基准站符合其他基本条件:临近易产生多路径效应的地物(如高大建筑、树木、水体、

海滩和易积水地带等)的距离原则上应大于 200 m;应有 10° 以上地平高度角的卫星通视条件;困难环境条件下,高度角可放宽至 25°,遮挡物水平投影范围应低于 60°;应兼顾未来的规划和建设,选择周围环境变化较小的区域进行建设;为保证信号接收质量,观测点位距离观测室距离不宜超过 100 m^[16]。

3.2 环境测试

测试主要对拟选站址采集到的 GNSS 数据进行质量分析,验证拟选站在数据质量方面是否满足建设北斗基准站的要求,为建设北斗基准站提供设计依据^[17-18]。主要从数据完整率、MP₁(第一频率的多路径误差)、MP₂(第二频率的多路径误差)三项测试指标对拟选站点的 GNSS 观测数据进行质量分析,测站数据中有任何一项不满足指标,则认为该测站数据不合格。各指标的具体含义如下。

数据完整率:接收机实际的观测历元与理论观测历元的百分比,计算公式为

$$\alpha = \frac{N_i}{N_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 表示数据完整率; N_i 表示实际观测历元; N_0 表示理论观测历元。数据完整率应 $\geq 90\%$ 。

MP₁: 反映的是观测信号第一频率上多路径效应的影响。MP₁ 的值越大,观测环境产生的多路径

效应影响越大,计算公式为

$$MP_1 = P_1 - \left(1 + \frac{2}{\alpha - 1}\right)\varphi_1 + \left(\frac{2}{\alpha - 1}\right)\varphi_2 \quad (2)$$

式中: P_1 为第一频率上的伪距观测值; φ_1 、 φ_2 分别为第一和第二频率上的相位观测值; α 为第一和第二频率 f_1 、 f_2 之比的平方,即 $\alpha = (f_1/f_2)^2$ 。 MP_1 应 ≤ 0.5 m。

MP_2 : 反映了观测信号第二频率上多路径效应的影响。 MP_2 的值越大,观测环境产生的多路径效应影响越大,计算公式为

$$MP_2 = P_2 - \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1}\right)\varphi_1 + \left(\frac{2\alpha}{\alpha - 1} - 1\right)\varphi_2 \quad (3)$$

式中: P_2 为第二频率上的伪距观测值; φ_1 、 φ_2 、 α 与 MP_1 公式中的相同。 MP_2 应 ≤ 0.65 m。

3.3 测试数据采集要求

通过在拟选站址上架设临时基准站实地进行卫星定位观测,以 1 s 采样间隔记录不少于 24 h 的数据,需要连续观测和数据采集,过程中需确保供电正常。

3.4 站址规划

为满足北斗基准站建设要求,同时兼顾电力行业规范及山东省电网变电站或营业所分布情况,通过踏勘测量选择合适的站点作为基准站站址,进行 Delaunay(三角剖分算法)^[19] 三角形构网评估网形情况如表 1 所示。

表 1 拟选站点全局构网基线边长统计

Table 1 Baseline length statistics of the global network of the proposed site

基线长度	条数	百分比	基线总条数	平均边长
<50 km	11	11.1%	99	78.4 km
50~100 km	69	69.7%		
100~150 km	18	18.2%		
150~200 km	1	1%		

其边长统计情况见图 4 所示。

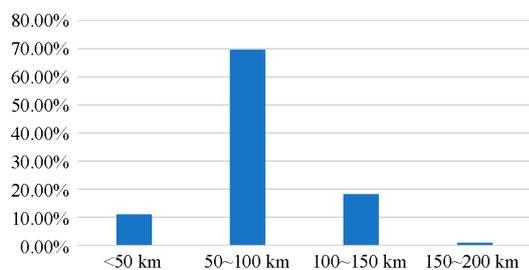


图 4 拟选站点全局构网-基线边长统计柱状图

Fig. 4 Statistical histogram of the baseline length of the global network of the proposed site

以山东省电网拟选址的基准站为例,统计分析可见:相邻基准站平均长度为 78.4 km,80%左右的相邻基线边长在 100 km 以内,18.2%的相邻基线边长在 100~150 km 以内,网形基线边分布整体较为均匀。个别较长基线边是由于省界外围站点较少所致,等相邻省份构网之后,效果还会相应改善。

4 系统建设方案

建立覆盖山东省的北斗精准服务网系统,提供统一的、高精度的、实时动态的三维空间定位基准,将为电力调度、检修管理、营销管理、基建管理等业务应用提供厘米级、分米级、亚米级、米级的实时动态的北斗定位服务,以及事后毫米级的位置数据服务。

4.1 基准站主要配置

各基准站结构基本相同,主要由室外设施和室内仪器柜组成,室外设施包括观测墩、扼流圈天线、避雷器等。室内设备主要包括机柜和安装在机柜内的 GNSS 接收机、网络设备、浪涌保护设备、电源设备等。室内与室外设备相互独立,通过扼流圈天线与基准站 GNSS 接收机连接^[20-21]。基准站主要设备配置如图 5 所示。

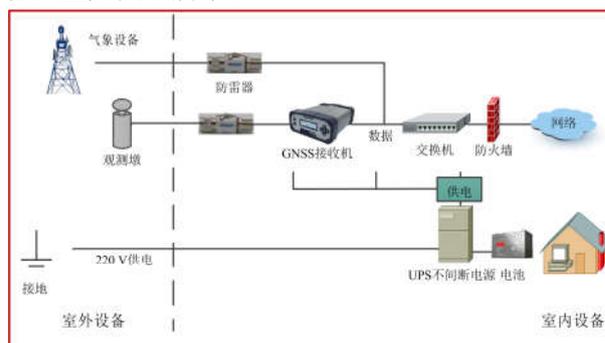


图 5 基准站主要设备配置

Fig. 5 Reference station main equipment configuration

4.2 观测墩建造

1) 建设基本要求

基准站观测墩的建设关系到系统的稳定性、可靠性,其建设必须充分考虑到站址所在地的地理、气候特点,需要选择受环境温度影响小、形变小的材料,以保证观测墩结实稳固。可选的建设方式如:钢筋混凝土浇筑、混凝土预制件、预制钢结构等。对比来看,前两种形变小,与基础结合更紧密,稳定性更好些;第三种受温度影响形变大,将影响数据采集精度。推荐采用第一种方式建造。观测墩的建设可选择变电站的主控楼的楼顶搭建,具体位置应充分考虑楼顶楼板的承重,必须满足荷载要求,一般情况下选择在楼顶的承重梁和承重墙的位置搭

建，与屋顶面结合处应做防水处理并修复原建筑物的防水层；屋面观测墩不能对原房屋结构造成损害或安全隐患，对现有结构不满足观测墩建设要求的应进行结构加固处理。同时观测墩建造还要满足：在观测墩顶端浇注安装强制对中标志，并严格平整；埋设 4 个水准标志，便于水准观测；应高出屋顶面不少于 0.8 m 建设；在观测墩加装防护层，防止风雨与日照辐射影响；观测墩到观测室的信号线需外套不锈钢保护管；预埋的避雷针地线与建筑物的地线应连接完好，北斗基站防雷地网接地电阻应小于 10 Ω。电源避雷器和信号避雷器接地电阻应小于 4 Ω。

2) 观测墩设计

观测墩的设计施工应考虑防风、防雨雪、防盐雾的要求，GNSS 接收机天线防护罩的安装应平整、稳固，不增加信号的延迟和多路径效应。以山东电网基准站观测墩为例，采用钢筋混凝土结构，由于混凝土观测墩自重较大，从房屋结构安全考虑，观测墩建设于屋顶承重墙或承重梁位置。观测墩结构设计参考图 6 所示。

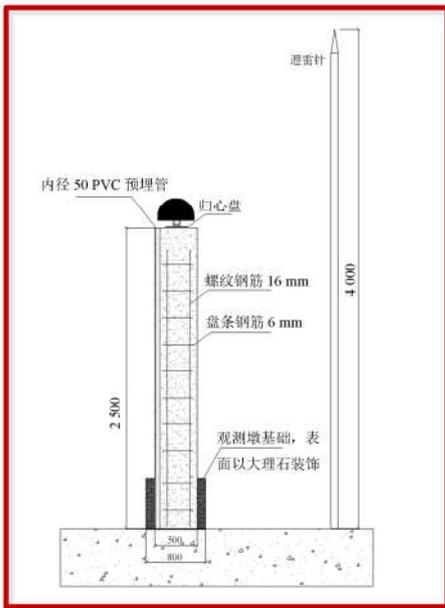


图 6 观测墩结构设计图

Fig. 6 Observation pier structure design

3) 观测墩施工工艺和材料要求

柱体内部布置钢筋笼，主筋直径为 20 mm，内部浇筑混凝土，标号不低于 C25，顶部预埋强制对中器；观测墩内预埋直径为 50 mm 的 PVC 管 1 根；柱体外部用真石漆做保护层；内部填充实混凝土，标号不低于 C25；底部外表可做装饰和标识。

4.3 系统供电设计

基准站的室内设备安装在变电站主控室内，GNSS 接收机选择直流供电的产品，可直接利用站内已有的-48 V 通信电源供电，无需单独配套 UPS 电源，一方面可保证系统连续供电需求，另一方面又能减少新上一套 UPS 设备的投入及相应的运维服务。

4.4 系统通信设计

北斗服务网系统按国网一级部署建设，数据中心设置在国网公司总部通信机房。为保证数据传输的可靠性和安全性，北斗基站与数据中心之间可通过国网数据通信网连接。系统端到端通信时延应小于 50 ms，尽量压缩传输时延。基站接入带宽应大于 64 kbps。传输通道可选择 SDH 和 PTN，SDH 通道传输的实时性和可靠性要略优于 PTN，PTN 传输路由有一定的随机性，传输时延也不固定^[22]，有条件的地方可优选 SDH 组织数据传输通道。下面是以 PTN 为例组织的 GNSS 数据传输通道。

各基准站组织 PTN 以太网链路至省公司本部接入电力数据通信网。基准站 GNSS 接收机接入站内地市 PTN，组织以太网通道至地市公司汇聚后，跳接至省网 PTN 在地市公司机房的 PTN 传输设备，最终汇聚接入省公司的通信 CE 路由器，与数据通信网骨干网相连。系统的通信路由组织如图 7 所示。

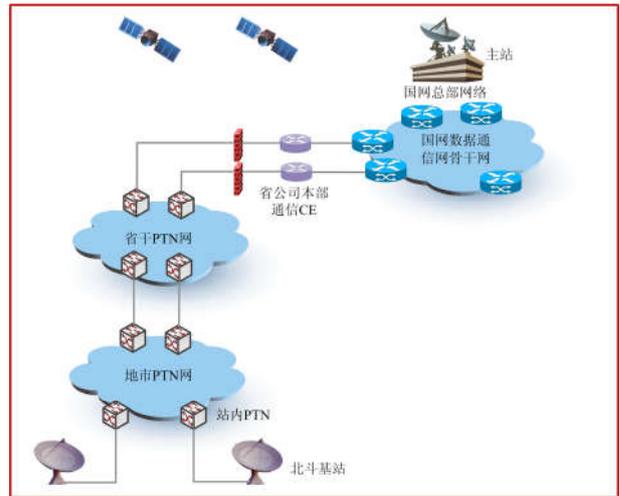


图 7 通信系统示意图

Fig. 7 Communication system diagram

4.5 系统防雷设计

为了保障系统安全运行，GNSS 天线及观测墩应设置在站内避雷针保护范围之内，充分利用站内已有避雷设施和浪涌保护器来达到对基准站设备的防雷目的。

天馈线线路的感应雷防护，在 GNSS 接收机端(室内)安装浪涌保护器实现感应雷防护，并将天馈

线的接地端和地网进行连接;同轴电缆的金属外护层,应在进机房入口处就近接地;同轴电缆进入机房处应安装馈线避雷器,馈线避雷器接地端子应就近引接到室外馈线入口处接地线上。

利用变电站主控室内已有的地网,使用 50 mm² 胶皮铜线将基准站室内机柜与该地网有效地连接,接地电阻不大于 4 Ω。机柜的所有设备与机柜连接。

4.6 系统安全防护设计

北斗基站为泛在电力物联网提供授时、导航定位、短消息报文服务,从系统应用场景看,应归类为通信类业务,而不是办公信息类业务^[23]。安全级别要高于信息类,整个基站系统应在各边界做好安全防护。在数据通信网内应将该业务划入通信 VPN 或单独建立 VPN^[24]。

在网络安全防护方面,GNSS 接收机设备中加装国网定制的安全芯片,采用唯一性识别机制对登录注册的网络设备进行身份鉴别和认证。数据传输通道采用国网内部电力数据通信网,以保证数据通信安全。

在用户层面,对电力信息内网横向边界,利用电力公司现有的逻辑强隔离、硬件防火墙、IDS/IPS 等边界安全防护设备,配置网络访问控制、网络入侵检测、日志安全审计等安全策略,实现边界隔离和防护^[25]。

5 结论

本项目提供了一种基于北斗卫星导航系统的地基增强系统的建设方案,是落实军民融合发展战略,深化北斗电力行业应用的关键措施。系统的建设将结束我国电力行业长期依赖美国 GPS 的历史,是保障电力行业关键领域高精度位置服务安全的重要手段,并能进一步推进北斗系统在电力行业的规模化、产业化应用,助力泛在电力物联网的建设和发展,将带来良好的经济和社会效益。

参考文献

[1] 麦绿波,徐晓飞,梁响,等.北斗地基增强系统标准体系的构建[J].中国标准化,2016,485(11):118-124.
MAI Lübo, XU Xiaofei, LIANG Xu, et al. Study on the establishment of standard system for Beidou ground-based augment system[J]. China Standardization, 2016, 485(11): 118-124.

[2] 李康,巩冠峰, SABATINI R. GPS 地基增强系统简介及其性能仿真验证[J]. 电光与控制, 2013, 20(8): 89-94.
LI Kang, GONG Guanfeng, SABATINI R. Introduction of GPS ground based augmentation system and performance simulation[J]. Electronics Optics & Control, 2013, 20(8): 89-94.

[3] 姜彤,艾琳,杨以涵.北斗导航系统及其在电力系统中的应用[J].华东电力,2009,37(4):611-614.
JIANG Tong, AI Lin, YANG Yihan. Beidou satellite navigation and position system and its application to power system[J]. East China Electric Power, 2009, 37(4): 611-614.

[4] 徐祥海,杨翮,时锐,等.一种基于输变电设备集中监控信息的试运行变电站风险评估方法[J].高压电器,2018,54(4):245-249.
XU Xianghai, YANG Xuan, SHI Rui, et al. Risk assessment method of substation in trial stage based on centralized monitoring of transmission and transformation equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(4): 245-249.

[5] 范凯迪.电力调控运行系统的优化方法[J].通信电源技术,2019,36(7):237-238.
FAN Kaidi. Optimization method of electric power control and operation system[J]. Telecom Power Technologies, 2019, 36(7): 237-238.

[6] 林宇龙,李冰,王德宇,等.多旋翼无人机巡查系统在特高压基建工程中的应用[J].中国电力,2017,50(12):141-147.
LIN Yulong, LI Bing, WANG Deyu, et al. Application of multi-rotor UAV patrol system in UHV power grid construction[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 141-147.

[7] 李冰,林宇龙,黄珣,等.基于激光雷达技术的无人机电网基建管控系统[J].现代电子技术,2018,41(2):99-101.
LI Bing, LIN Yulong, HUANG Xun, et al. Infrastructure management and control system for UAV grid based on laser radar technology[J]. Modern Electronic Technique, 2018, 41(2): 99-101.

[8] 刘勇,陈海滨,刘方.基建现场巡检无人机智能感知系统的研究与应用[J].电力系统保护与控制,2018,46(15):155-161.
LIU Yong, CHEN Haibin, LIU Fang. Research and application of intelligent perception system for unmanned aerial vehicle inspection at construction site[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 155-161.

[9] 李兆伟,刘福锁,崔晓丹,等.计及电力安全事故风险的电网动态分区与切负荷协调控制研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(1):35-40.
LI Zhaowei, LIU Fusuo, CUI Xiaodan, et al. Coordinate control study for dynamic division and load shedding considering electrical security accident risk[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 35-40.

[10] VESPIGNANI A. Complex networks:the fragility of interdependency[J]. Nature, 2010, 464(7291): 984-985.

[11] 李志才,张鹏,陈明,等.华北区域分米级北斗地基增强服务系统构建及精度分析[J].地理信息世界,2019,26(3):60-64.
LI Zhicai, ZHANG Peng, CHEN Ming, et al. Construction and accuracy analysis of decimeter level Beidou ground

- based augmentation system in Northern China[J]. *Geomatics World*, 2019, 26(3): 60-64.
- [12] 委民正, 明国辉. 基于 GNSS 基准站网的对流层延迟建模[J]. *测绘科学*, 2018, 43(2): 39-44.
WEI Minzheng, MING Guohui. Tropospheric delay modeling based on GNSS network[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2018, 43(2): 39-44.
- [13] 李源林, 刘行波, 杨洁. 北斗地基增强技术在电网高精度地理位置服务中的应用[J]. *工程建设与设计*, 2017(6): 47-48, 65.
LI Yuanlin, LIU Xingbo, YANG Jie. Application of the Beidou ground based augmentation technology in power network high precision location service[J]. *Construction & Design for Project*, 2017(6): 47-48, 65.
- [14] 杜鹏, 晏亮, 高保成, 等. 基于电力调度数据网的广域数据采集方案[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(13): 156-161.
DU Peng, YAN Liang, GAO Baocheng, et al. Wide-area data acquisition scheme based on power dispatching data network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(13): 156-161.
- [15] 叶昆平. 基于基准站网的区域参考框架维持及精度分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2019, 42(8): 148-150, 154.
YE Kunping. Maintenance method of regional reference frame based on reference station and precision analysis[J]. *Geomatics & Spatial Information Technology*, 2019, 42(8): 148-150, 154.
- [16] 韩德强, 党亚民, 王虎, 等. 引入国家基准站的北斗导航卫星精密定轨[J]. *测绘通报*, 2017(8): 1-6.
HAN Deqiang, DANG Yamin, WANG Hu, et al. Precise orbit determination of BeiDou satellite navigation system based on national reference station[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2017(8): 1-6.
- [17] 任凯强, 孙正波. 基于虚拟参考站的同步三星时差定位系统广域差分校正算法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(2): 433-439.
REN Kaiqiang, SUN Zhengbo. Wide area difference calibration algorithm based on virtual reference station for tri-satellite TDOA geolocation system[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(2): 433-439.
- [18] 陈明, 郭际明, 龚晓鹏, 等. 基于国家基准站的北斗数据质量分析[J]. *测绘科学*, 2017, 42(7): 29-35.
CHEN Ming, GUO Jiming, GONG Xiaopeng, et al. Data quality analysis of BDS observation data based on the national GNSS reference stations[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2017, 42(7): 29-35.
- [19] 潘志庚, 马小虎, 董军, 等. 基于图的任意域内点集的 Delaunay 三角剖分算法[J]. *软件学报*, 1996, 7(11): 656-661.
PAN Zhigeng, MA Xiaohu, DONG Jun, et al. A graph-based algorithm for generating the delaunay triangulation of a point set within an arbitrary 2D domain[J]. *Journal of Software*, 1996, 7(11): 656-661.
- [20] 陈明, 武军邴. 国家 GNSS 连续运行基准站系统设计与建设[J]. *测绘通报*, 2016(12): 7-9, 38.
CHEN Ming, WU Junli. Design and construction of the national GNSS continuous operation reference stations[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2016(12): 7-9, 38.
- [21] 党亚民, 许长辉, 王虎, 等. 国家北斗动态基准服务产品精度分析[J]. *测绘科学*, 2019, 44(6): 23-28.
DANG Yamin, XU Changhui, WANG Hu, et al. Accuracy assessment and analysis of national BeiDou dynamic datum service products[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(6): 23-28.
- [22] 许俊现, 高会生, 汪洋. 用于线路纵差保护的 PTN 时分复用业务时延分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(23): 56-62.
XU Junxian, GAO Huisheng, WANG Yang. A delay time analysis of time division multiplexing services over PTN applied to line longitudinal differential protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(23): 56-62.
- [23] 赵子岩, 刘建明. 基于业务风险均衡度的电力通信网可靠性评估算法[J]. *电网技术*, 2011, 35(10): 209-213.
ZHAO Ziyang, LIU Jianming. A new service risk balancing based method to evaluate reliability of electric power communication network[J]. *Power System Technology*, 2011, 35(10): 209-213.
- [24] 李旻菊, 黄宏光, 舒勤. 相依网络理论下电力通信网节点重要度评价[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(11): 143-150.
LI Guiju, HUANG Hongguang, SHU Qin. Evaluation method for node importance in power telecommunication network based on interdependent network theory[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(11): 143-150.
- [25] 张涛, 赵东艳, 薛峰, 等. 电力系统智能终端信息安全防护技术研究框架[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(19): 1-8, 67.
ZHANG Tao, ZHAO Dongyan, XUE Feng, et al. Research framework of cyber-security protection technologies for smart terminals in power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(19): 1-8, 67.

收稿日期: 2019-10-31; 修回日期: 2019-12-04

作者简介:

张波(1971—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电网调度自动化、电力通信系统; E-mail: bozhang@sdepcci.com

张勇(1971—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力通信, 无线网络; E-mail: zhangyong@sd.sgcc.com.cn

刘政强(1990—), 男, 硕士, 研究方向为电力通信系统。E-mail: liuzhengqiang@sdepcci.com

(编辑 魏小丽)