

肖武军,解滔,胡玉良等,2020,冬奥会保障项目井下地电阻率观测专用电缆设计与测试,中国地震,36(1),146~152.

# 冬奥会保障项目井下地电阻率 观测专用电缆设计与测试

肖武军<sup>1)</sup> 解滔<sup>1)</sup> 胡玉良<sup>2)</sup>

1) 中国地震台网中心,北京 100045

2) 山西省地震局,太原 030021

**摘要** 根据冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目的设计方案,在晋冀蒙交界及附近区域的宝昌、集宁、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷等 8 个地电阻率台站原观测场地建设井下小极距全空间地电阻率观测装置系统。参照该项目对井下地电阻率观测的技术要求,设计了井下地电阻率专用电缆,在项目实施过程中对专用电缆的导体直流电阻、线间绝缘电阻等主要指标进行了技术测试。测试结果表明,该专用电缆适用于本项目井下地电阻率观测,可保障井下地电阻率观测装置的长期稳定性。

**关键词:** 地电阻率 井下观测 观测装置 测试

[文章编号] 1001-4683(2020)01-0146-07 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

在我国 50 多年的地电阻率观测实践过程中,多次记录到了大地震前近震中区域突出的地电阻率中短期异常(钱复业等,1982;钱家栋等,2013;赵玉林等,2001;汪志亮等,2002;Du, 2011;解滔等,2018)。异常形态主要表现为年尺度的持续性下降或上升变化(Du, 2011),同一台站不同方向异常幅度呈现出与主压应力方位有关的各向异性变化(赵玉林等,1995;钱复业等,1996;杜学彬等,2007);在台网相对密集的区域,随着震中距的增加,异常幅度呈现衰减等现象(钱复业等,1982;赵玉林等,2001);邻近发震断层的台站还记录了地震发生前后的同震阶跃变化(Lu et al, 2016)。这些现象说明地电阻率异常变化与孕震构造应力之间存在密切的联系。

目前地电阻率观测面临 2 个主要的瓶颈问题:①部分台站测区环境受到严重干扰,造成观测数据质量下降;②台网的台站密度过于稀疏,难以获取地震前孕震区域附近多台的异常时空演化过程。特别是目前地电阻率地表观测装置的极距大(多数台站极距在 1000m 左右,最大达到 2400m),测区占地面积较大,观测场地勘选不易;此外,在较大面积的测区内,出现环境干扰源的可能性高,观测环境保护难度较大。为应对测区环境的影响,自 2006 年

[收稿日期] 2019-12-30; [修定日期] 2020-01-20

[项目类别] 冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目资助

[作者简介] 肖武军,男,1976 年生,高级工程师,主要研究方向为地球物理观测。E-mail: xiaowj@seis.ac.cn

解滔,通讯作者,男,1986 年生,高级工程师,主要研究方向为地震电磁学。E-mail: xtaolake@163.com

以来,全国地电台网技术管理部门和地电学科专家推进了对井下地电阻率实验的观测,结果表明井下观测方式能较好地抑制地表电性异常体类(如金属管线、沟渠开挖、基本建设等)的干扰。为加强 2022 年冬奥会举办地区的震情保障,中国地震局对晋冀蒙交界地区 8 个地电阻率台站(宝昌、集宁、阳原、大同、代县、临汾、通州和平谷)的监测能力进行提升,在这些台站原测区增加井下地电阻率观测。为进一步探索地电阻率观测技术,此次观测采用井下小极距全空间性质观测装置(肖武军等,2019;解滔等,2019)。井下观测是将供电、测量电极埋入地下一定深度,之后对钻孔回填,观测装置不能再进行更换,因此,电极和井下电缆部分的性能和使用寿命就十分关键。本文主要介绍冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目中专用电缆的设计和测试结果,以期为本项目后续台站建设和今后井下观测提供参考。

## 1 井下地电阻率观测装置

冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目(以下简称冬奥会保障项目)组在原测区建设 8 个井下地电阻率小极距观测系统。本项目在建设过程中基于地电阻率影响系数理论(毛先进等,2014;解滔等,2016),根据台站钻孔岩芯取样和电测深数据,反演测区水平层状电性结构。计算各层介质影响系数随极距和埋深的变化,使浅层介质对地电阻率观测的影响尽可能小,目标层位对观测的贡献尽可能大,减少浅层介质对观测的影响,由此得出冬奥会保障项目各台站观测极距及埋深等装置系数(肖武军等,2019)。为降低建设成本,采取 3 个水平测道等边三角形布极,每个供电电极为 2 个测道共用。在水平测道最近电极约 50m 水平距离外安装 1 个垂直测道,并增加地表水位和气象三要素观测,地电阻率观测布极示意图见图 1。

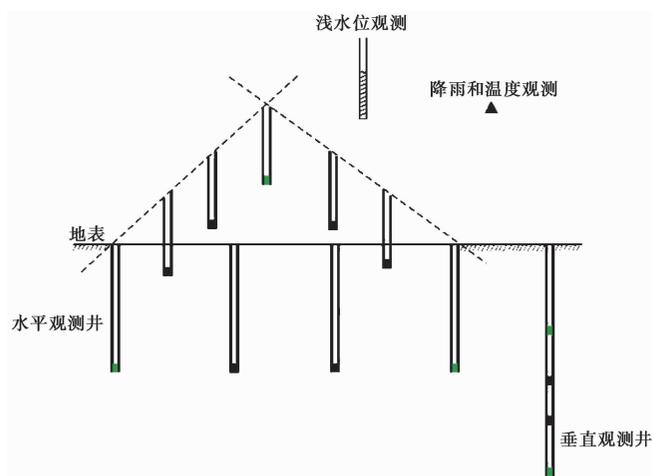


图 1 小极距井下地电阻率观测布极示意图

## 2 井下观测装置电缆技术要求

根据《DB/T 18.1-2006 地震台站建设规范 地电台站 第 1 部分:地电阻率台站》(中国地震局,2006)的要求,在地电阻率观测中,为保障地电阻率观测装置的长期稳定性,观测装置的外线路应符合以下技术要求:供电导线漏电电流与供电电流的比值不应大于 0.1%,供电导线漏电电位差的绝对值与人工电位差的比值不应大于 0.5%;测量导线对地绝缘电阻不应

小于  $5M\Omega$ ;使用抗老化绝缘导线,导线电阻不应大于  $20\Omega/km$ ,拉断力不宜小于  $2000N$ ;地电阻率台站建设规范中提出的外线路技术要求同样适应于井下观测装置。

王兰炜等<sup>①</sup>对井下地电阻率观测装置的相关技术要求也进行了梳理,提出了井下电缆的技术要求和指标。建议井下电缆要采用防腐、抗拉的单股两芯铠装绝缘电缆。在电缆与电极连接的一端,除芯线和抗拉纤维裸露外,其余部分都应密封在绝缘层内,以保证线缆的绝缘和防水。地下  $100m$  左右深度的浅层介质一般是饱水的,因此要求芯线与铠(屏蔽层)间绝缘大于  $100M\Omega$ ;浸入水中时,铠与外皮的绝缘电阻大于  $50M\Omega/100m$ 。为了避免电极自重下移导致的地电阻率观测装置的变化影响观测装置的稳定性,电缆的拉断力要大于  $1.5$  倍电极重量,不小于  $8kN$ ;防水抗压  $\geq 30MPa$ 。同时要求导线电阻小于  $10\Omega/km$ ;电缆耐温  $-30^{\circ}C$  到  $100^{\circ}C$ 。

### 3 井下专用电缆设计

为了冬奥会保障项目井下地电阻率观测的室外线路的技术指标能满足上述技术要求,参考《井下地电阻率观测技术指导意见》<sup>①</sup>和《地电观测深井电缆的研制》(胡哲等,2017),设计了本项目井下电缆的结构和相关技术指标。要求井下电缆全部采用双芯铜芯电缆,加金属地电阻率检测层(图2)。电缆需有外护层,具备耐压、耐磨、耐油等功能,承受大地侧压力须大于  $30MPa$ ;电缆破拉断力须满足井下电缆技术要求,金属检测层井下端与大地间绝缘电阻、芯线与金属检测层绝缘电阻均须大于  $1000M\Omega$ ;在井下电缆与电极连接的一端,除芯线和抗拉纤维裸露外,其余部分均应密封于绝缘层内,以保证线缆的绝缘和防水。

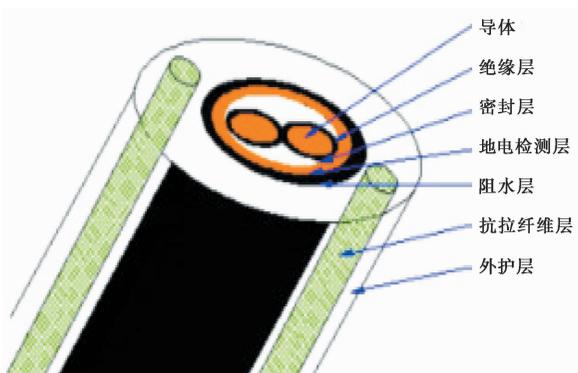


图2 水平井电缆结构设计示意图

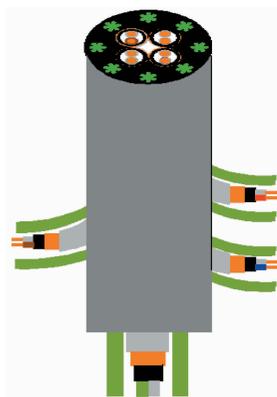


图3 垂直井电缆结构设计示意图

为了保证测量电极和供电电极位置不发生变化,满足垂直观测的特殊要求,要求采取多根单股双线预分支组合式设计垂直电缆。垂直观测井电缆应按照冬奥会保障项目设计的观测装置的确定尺寸要求,将  $4$  根双芯井下专用电缆进行分支,组合成垂直观测井井下专用电缆(图3)。由于需要在垂直观测井电缆的  $4$  个分支电缆处固定  $4$  个垂直观测电极,井下垂直观测地电阻率观测的电缆地表固定装置应能承载大于  $32000N$  的拉力,且能保证长期观测

<sup>①</sup> 王兰炜等,2017,井下地电阻率观测技术指导意见。

的稳定性。

## 4 电缆测试

在对冬奥会保障项目井下专用电缆设计的基础上,本项目组织开展了电缆采购工作,并制定电缆测试大纲,要求开展电缆供货前的测试工作。测试电缆在电缆出厂前随机抽取。测试内容包括电缆导线直流电阻、绝缘电阻、电缆线内导线的线间绝缘电阻、交流耐压实验等主要技术指标。在电缆敷设施工前,开展了现场测试工作。

### 4.1 导线直流电阻

采用双臂电桥在实验室测量导线直流电阻,在整根电缆上可以使用 SB2230 数字直流表直接测量。测量时保证被测电缆温度与环境温度平衡。共计测试 3 次,根据下式得出测试结果,测试结果见表 1。

$$R_{20} = K_t \times R_t \times 1000 / L \quad (1)$$

式中, $R_{20}$ 为 20℃时每千米长度电缆的直流电阻; $R_t$ 指温度为  $t$  时导体的实测直流电阻; $K_t$ 指温度为  $t$  时直流电阻温度校正系数; $L$ 为电缆长度。

表 1 电缆线直流电阻测试结果(单位:Ω/km)

电缆名称	测试 1	测试 2	测试 3
电缆 1	<4.50	<4.50	<4.50
电缆 2	<4.50	<4.50	<4.50

### 4.2 绝缘电阻测试

测试时保证电缆温度与环境温度平衡,空气相对湿度不大于 80%。浸入水中实验时,电缆导线 2 个端头露出水面的长度应不小于 250mm,绝缘部分露出的长度应不小于 150mm。注意露出的绝缘表面应保持干燥和洁净。在水中浸泡的时间应为 2h 以上,金属互层绝缘处应浸入水中。使用绝缘电阻摇表或数字绝缘电阻表测量时要保证足够的充电时间,一般以一分钟后的稳定值为准。测试时,对电缆内金属导线和金属检测、金属导线和屏蔽层同时进行测量。测试 3 次,测试结果见表 2。

表 2 电缆绝缘电阻测试结果(单位:MΩ/km)

电缆名称	测试 1	测试 2	测试 3
电缆 1	>17000	>19000	>18000

### 4.3 电缆线内导线线间绝缘电阻

测试条件和测量结果计算方法同绝缘电阻测试。对于水平井专用电缆,依次两两测量电缆内部导线与金属检测层之间的绝缘电阻;对于垂直井专用电缆,先后两两组合检测 4 根子电缆之间绝缘电阻。测试 3 次,测试结果见表 3、4。

### 4.4 交流耐压测试

实验时需将电缆的两端充分分离,导体不能与屏蔽层接触,需要有一定的距离。接线时需将每一被测导体接高压端,其余所有导体与屏蔽层相连。升压时,电压应从较低值(不超

表 3 电缆导线之间绝缘电阻测试结果(单位:  $M\Omega/km$ )

电缆名称	测试数据		
	导线 1 与导线 2	导线 1 与金属层	导线 2 与金属层
水平电缆 1	>40000	>19000	>130000
垂直电缆子电缆 1	>152000	>104000	>111000
垂直电缆子电缆 2	>67000	>153000	>95000
垂直电缆子电缆 3	>111000	>141000	>124000
垂直电缆子电缆 4	>135200	>87800	>92600

表 4 垂直电缆内子缆间绝缘电阻测试结果(单位:  $M\Omega/km$ )

测试分组	垂直井用电缆 1			垂直井用电缆 2		
子电缆 1 与子电缆 2	>40000	>63000	>46000	>81000	>71000	>102000
子电缆 1 与子电缆 3	>107000	>57000	>101000	>77000	>84000	>76000
子电缆 1 与子电缆 4	>141000	>101000	>83000	>92000	>84000	>83000
子电缆 2 与子电缆 3	>84000	>97000	>91000	>81000	>59000	>91000
子电缆 2 与子电缆 4	>91000	>84000	>82000	>104000	>79000	>87000
子电缆 3 与子电缆 4	>83000	>76000	>104000	>96000	>81000	>69000

过产品标准所规定实验电压值的 40%) 开始, 缓慢平稳地升至规定的实验电压值, 并维持规定的时间后降低电压, 直至所规定的实验电压值的 40%, 然后再切断电源。不允许在高压下突然切断电源。实验结束后做放电处理。测试时抽取了 2 根电缆进行测试, 测试结果见表 5。

表 5 电缆交流耐压测试结果(单位: V)

电缆名称	测试数据
电缆 1	>3000
电缆 2	>3000

#### 4.5 敷设现场测试

在电缆供货后、井下电缆敷设前, 项目组又组织开展了电缆敷设现场测试工作。在电极制作过程中, 将电缆和电极进行焊接, 制作完成后, 对电极及井下电缆进行浸水测试, 测试电极连接井下电缆之间的内阻以及导线与外部屏蔽层之间的绝缘电阻。

通过以上对冬奥会保障项目井下电缆线的导线直流电阻、绝缘电阻、电缆线内各导线间的绝缘电阻、交流耐压实验等主要技术参数进行测试, 要求导线直流电阻小于  $5\Omega/km$ , 浸水后电缆线对水的绝缘电阻远大于  $20M\Omega$ , 电缆线内线间绝缘电阻远大于  $100M\Omega$ , 电缆线交流内压大于  $3000V$ 。从测试结果看, 本项目拟采用的电缆的技术指标满足项目设计的技术需求, 可以应用于本项目井下地电阻率观测装置外线路敷设的技术要求。

## 5 结论

由于地表地电阻率观测极距大、布极区范围大、地表干扰几率高, 井下地电阻率观测将

会越来越被重视和推广。如何保障观测装置的长期稳定性和观测数据的可靠性,是目前面临的一个重要课题。冬奥会保障晋冀蒙监测能力提升项目组拟在晋冀蒙交界及附近区域的通州等 8 个台站的观测场地增建小极距井下地电阻率观测装置,以提升地电阻率方法对该区域的震情监测预测能力。项目前期对观测装置进行了详细设计,从电极布极方式、极距大小、电极制作、井下专用电缆等方面全面设计了系统的观测装置。在电缆采购过程中,对电缆的技术性能进行了测试,结果表明,项目采购的电缆能满足本项目井下地电阻率观测的需求,其各项性能指标满足地电阻率台站建设规范及《井下地电阻率观测技术指导意见》的要求,有效地解决了深井电缆绝缘漏电检测、承载重量、抗深井压力等问题,可以有效地保证本项目井下地电阻率观测装置系统的长期稳定性和观测数据的可靠性。

**致谢:**感谢冬奥会保障项目专家组的大力支持,项目专家组在前期电缆设计与测试过程中提出诸多宝贵意见,项目实施组参与相关的测试工作,在此一并表示感谢。

### 参考文献

- 杜学彬,李宁,叶青,等,2007. 强地震附近视电阻率各向异性变化的原因. 地球物理学报, **50**(6):1802~1810.
- 胡哲,蒋延林,张秀霞,等,2017. 地电观测深井电缆的研制. 中国地震, **33**(2):338~344.
- 解滔,杜学彬,卢军,2016. 井下视电阻率观测影响系数分析. 中国地震, **32**(1):40~53.
- 解滔,刘杰,卢军等,2018. 2008年汶川  $M_s 8.0$  地震前定点观测电磁异常回溯性分析. 地球物理学报, **61**(5):1922~1937.
- 解滔,于晨,卢军,2019. 开展小极距井下地电阻率观测的可行性分析. 中国地震, **35**(1):14~24.
- 毛先进,杨玲英,钱家栋,2014. 水平层状介质中深埋装置系统地电阻率影响系数特征研究. 地震学报, **36**(4):678~685.
- 钱复业,赵玉林,黄燕妮,1996. 地电阻率各向异性参量算法及地震前兆实例. 地震学报, **18**(4):480~488.
- 钱复业,赵玉林,于谋明,等,1982. 地震前地电阻率的异常变化. 中国科学:B辑, (9):831~839.
- 钱家栋,马钦忠,李劭稷,2013. 汶川  $M_s 8.0$  地震前成都台 NE 测线地电阻率异常的进一步研究. 地震学报, **35**(1):4~17.
- 汪志亮,郑大林,余素荣,2002. 地震地电阻率前兆异常现象. 北京:地震出版社.
- 肖武军,解滔,张尧,2019. 晋冀蒙交界及附近地区小极距井下地电阻率观测装置设计. 中国地震, **35**(1):134~143.
- 赵玉林,李正南,钱复业,等,1995. 地电前兆中期向短临过渡的综合判据. 地震, (4):308~314.
- 赵玉林,卢军,张洪魁等,2001. 电测量在中国地震预报中的应用. 地震地质, **23**(2):277~285.
- 中国地震局,2006. DB/T 18.1-2006 地震台站建设规范 地电台站 第1部分:地电阻率台站. 北京:地震出版社.
- Du X B,2011. Two types of changes in apparent resistivity in earthquake prediction. Science China Earth Science, **54**(1):145~156.
- Lu J,Xie T,Li M,et al,2016. Monitoring shallow resistivity changes prior to the 12 May 2008  $M 8.0$  Wenchuan earthquake on the Longmen Shan tectonic zone,China. Tectonophysics, **675**:244~357.

## Special Cable Design and Test for Underground Earth Resistivity Observation of Winter Olympic Games Support Project

*Xiao Wujun*<sup>1)</sup> *Xie Tao*<sup>1)</sup> *Hu Yuliang*<sup>2)</sup>

1) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

2) Shanxi Earthquake Agency, Taiyuan 030021, China

**Abstract** According to the design scheme of the 2022 Winter Olympics support project, apparent resistivity measurement in short electrode spacing wells will be installed at 8 stations, (i. e., Baochang, Jining, Yangyuan, Datong, Daixian, Linfen, Tongzhou and Pinggu station), around vicinity of Shanxi-Hebei-inner Mongolia area. Following the observation requirements of well apparent resistivity measurement, the underground special cable is designed. During the implementation of the project, the main indexes such as cable DC resistance and line to line insulation resistance are tested. The results show that the special cable of this project is suitable for underground earth resistivity observation and can guarantee the long-term stability of underground earth resistivity observation device.

**Keywords:** Apparent resistivity; Well apparent resistivity measurement; Observation device; Test