

海拔 3 320 m 的 750 kV 交流输电线路无线电干扰 长期测试分析

张业茂, 路 遥, 周 兵, 廖正海, 刘健犇, 陈玉龙
(中国电力科学研究院有限公司电网环境保护全国重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 为获取我国实际运行的高海拔交流输电线路无线电干扰水平与特性, 该文选取青藏高原地区海拔 3 320 m 的 750 kV 交流输电线路建立观测站, 开展了持续 2 年的无线电干扰长期观测, 获取了 92 万组有效数据。将每 1 年度的测量数据分为好天气、大雨、中小雨、大雪、中小雪、雾霾共 6 种天气, 得到了不同天气下的统计结果。研究表明, 750 kV 刚察观测站大雨、好天气下的无线电干扰平均值分别为 69.09、49.22 dB, 全天候无线电干扰小于 58 dB 的概率为 95%, 满足限值要求; 同一种天气下不同年度的无线电干扰平均值差别很小, 对于获取长期运行的交流输电线路无线电干扰水平, 1 年的观测时间已经足够; 提出了通过雨雪天气的短期观测, 快速获取近似 1 年长期测试下大雨天气无线电干扰平均值的方法, 用于输电线路无线电干扰评估, 可节约成本和提高效率; IEC/CISPR 无线电干扰预测结果较实测值偏大约 4 dB, 需要对高海拔线路无线电干扰预测方法开展进一步研究。
关键词: 高海拔; 交流输电线路; 750 kV; 无线电干扰; 长期观测

Long-term Measurement and Analysis of Radio Interference from 750 kV AC Transmission Lines at an Altitude of 3 320 m

ZHANG Yemao, LU Yao, ZHOU BING, LIAO Zhenghai, LIU Jianben, CHEN Yulong
(State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: To obtain the radio interference (RI) levels and characteristics of high-altitude AC transmission lines in China, an observation station was established on a 750 kV AC transmission line in the Qinghai-Tibet plateau at an altitude of 3 320 m. A two-year long-term RI observation was conducted, collecting 920 000 valid data sets. The measurement data for each year were classified into six weather categories, namely, fair weather, heavy rain, light to moderate rain, heavy snow, light to moderate snow, and haze weather, and statistical results for each weather condition were obtained. The study shows that the average RI at the Gangcha observation station during heavy rain and fair weather is 69.09 dB and 49.22 dB, respectively. The probability of RI being below 58 dB across all weather conditions is 95%, meeting the limit requirements. The difference in average RI for the same weather conditions across different years is minimal, and a one-year observation period is sufficient for determining the long-term RI levels of AC transmission lines. Furthermore, a method was proposed to quickly obtain the approximate average value of RI during heavy rain by conducting short-term observations during periods of heavy rain or snow, comparable to the average RI obtained from one year of long-term testing. This method can be utilized to assess the RI levels of transmission lines, significantly reducing costs and improving efficiency. The RI prediction results based on IEC/CISPR standards are approximately 4 dB higher than the measured values, thus the prediction methods for RI in high-altitude transmission lines need to be further researched.

Key words: high-altitude; AC transmission lines; 750 kV; radio interference; long-term observation

0 引言

我国能源资源和负荷分布存在明显的地域差

异, 青藏高原等西部高海拔地区拥有丰富的清洁能源资源, 而东部地区则负荷较高^[1-3]。大力开发青藏高原地区的清洁能源并实现电能的远距离输送, 是践行国家双碳战略的重要环节^[3-5]。但由于高海拔地区空气稀薄, 电子自由行程增大, 导线电晕放电产生的可听噪声、无线电干扰等电晕效应较低海拔地区显著增大^[6-9], 预测与控制更加困难, 无线电干扰

基金资助项目: 国家自然科学基金(52177010; 52277009); 中国电力科学研究院研究开发项目(GY83-22-011)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52177010, 52277009), Research and Development Project of China Electric Power Research Institute(GY83-22-011).

已成为高海拔地区交流输电线路设计与建设中必须考虑的关键因素之一^[9-10]。

我国在低海拔地区的输电线路无线电干扰方面开展了大量研究, 基于电晕笼试验^[11-12]和长期观测数据统计分析^[13-16], 已提出了一种适用于海拔 500 m 以下交流输电线路的无线电干扰预测方法^[17], 为线路设计提供了指导。对于高海拔地区的交流输电线路, 尽管已通过高海拔特高压大电晕笼进行了多分裂导线无线电干扰试验^[18], 并利用可移动小电晕笼开展了不同海拔地区的电晕效应分析比较^[19-20], 但过去我国对高海拔实际线路无线电干扰的测试主要在好天气进行短时测试, 而获取线路实际无线电干扰特性需要开展各种天气下长期观测, 我国一直缺乏高海拔输电线路无线电干扰长期测试数据, 也没有经过实测数据验证的高海拔线路无线电干扰预测方法。国外对高海拔线路无线电干扰进行了长期观测, 但海拔和电压都不太高, 例如: 文献[21]在海拔 3 200 m 的 Leadville 进行了 345 kV 以下试验线段无线电干扰观测; 文献[22]对海拔 1 935 m 和 277 m 的 2 条 500 kV 同塔双回输电线路无线电干扰长期观测数据进行了比较, 验证了 1 dB/300 m 的无线电干扰海拔修正方法, 该方法已被 IEC/CISPR 标准采纳^[23]。海拔 2 000 m 以上、电压 500 kV 及以上线路无线电干扰长期观测数据极其匮乏。现有研究表明, 无线电干扰随着海拔的增加并非一直线性增大^[19-20], 国内外已有无线电干扰实测数据, 但难以满足我国 3 000 m 以上高海拔地区超、特高压交流输电线路无线电干扰准确预测与有效控制的需要, 且无线电干扰随气候环境变化大, 因此迫切需要通过长期观测, 获取我国高海拔地区交流输电线路无线电干扰的真实水平及其变化特性。

根据 IEC/CISPR 的标准要求, 交流输电线路无线电干扰的长期观测周期应不少于 1 年^[24], 国外相关研究也多在 1 年以上, 甚至达到 2~3 年^[25-26]。对于平原低海拔地区, 长期观测相对容易; 而在青藏高原等高海拔地区, 由于地理和气候条件严酷, 长期观测面临着较大困难和一定危险性。特别是许多超高海拔地区尽管线路周围测量条件较好, 但由于没有市电供应且道路险峻, 难以开展长年累月的持续观测。因此, 如何缩短观测周期快速获取线路无线电干扰水平, 已成为亟待研究的问题。

为此, 本文在青藏高原地区海拔 3 320 m 的

750 kV 交流输电线路开展了持续 2 年的无线电干扰长期观测, 对每 1 年度的观测数据分为不同天气进行统计分析, 得到高海拔地区 750 kV 交流输电线路无线电干扰的实际水平与变化规律; 对不同年度的测试结果进行比较, 提出一种通过短期观测快速获取近似大雨天气无线电干扰年度平均值的方法; 最后, 将 CISPR 激发函数法得到的无线电干扰预测值与长期观测得到的统计值进行了比较。

1 刚察观测站测量布置

刚察观测站位于青海省海北州刚察县伊克乌兰乡刚察贡麻村, 观测线路为 2 条平行的 750 kV 单回线路, 观测站位于 750 kV 月海 I 线 334 号—335 号杆塔的档距中央, 该处线路与月海 II 线线路平行, 两回线路边相导线水平距离为 54 m。海拔 3 320 m, 观测站所在地为藏区牧场, 地势较为平坦。测试场布置了无线电干扰测量装置(由 ETS 6502 有源环状天线与 FCKL 1528 EMI 接收机构成)、天气现象仪、气象站。天线布置在月海 I 线边相导线投影外 20 m 处(简称为“边相外 20 m”), 距地面 2 m 高处^[13]。无线电干扰采样间隔为 4 s, 一般取 1 min 的平均值作为测量结果, 与气象站、天气现象仪测量值一一对应^[27]。观测站测量布置如图 1 所示。

观测站所处位置的 4 级杆塔都是酒杯塔, 导线为 6×LGJ-500/45, 子导线分裂间距 400 mm, 一根地线为 OPGW-90, 另一根地线为 JLB23-100 铝包钢绞线, 主要观测的月海 I 线水平排列, 边相、中相导线对地高度分别为 22.5、23.5 m, 相间水平距离为 22 m, 月海 II 线导线布置与之相同。

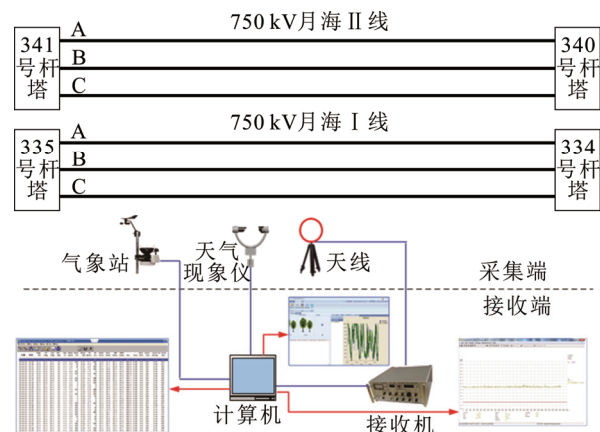


图 1 刚察观测站测量布置示意图

Fig.1 Schematic of the measurement setup at Gangcha observation station

2 第 1 年度不同天气无线电干扰统计分析

2.1 不同天气划分

刚察长期观测站从 2021 年 9 月持续观测至 2023 年 10 月, 完成了近 2 年的长期测试, 观测站每分钟获取 1 组数据, 剔除异常值后获取了 92 万组有效数据。观测站地处海拔约 3 300 m 的高寒草原, 距离青海湖不远, 周围人烟稀少, 电磁干扰小, 针对观测站所在地天气特点以及实测状况, 考虑无线电干扰短期特性分析结果^[27], 将 2021 年 9 月至 2022 年 9 月第 1 年度的有效数据分为好天气、大雨、中小雨、大雪、中小雪、雾霾共 6 类, 对频率 0.5 MHz 的无线电干扰进行统计分析。

天气划分主要依据天气现象仪的测量结果, 其中好天气为降水量为 0、输电线路保持干燥的天气; 雾霾由雾天与霾天组合而成; 大雪为雪天等效降水量 >7.6 mm/h 的天气^[28], 其他降雪都归于中小雪天气; 对于无线电干扰大雨天气 (heavy rain) 的确定, CISPR 认为降雨率 (rain rate) 0.6 mm/h 以上就是大雨^[24], 法国电力集团计算无线电干扰激发函数定义的自然大雨为降雨率 1 mm/h 以上^[9], 而美国 Bonneville Power Administration (BPA) 的 Vernon L. Chartier 等认为大雨天气很难定义, 但 1~2 mm/h 不是大雨, 这是因为持续几小时稳定毛毛雨很容易达到这个降雨量^[22]。美国 IEEE 标准定义的大雨是指降雨率 >7.6 mm/h^[28], 可见对于无线电干扰的大雨定义存在很大差异。本文主要参考 CISPR 和 IEEE 标准, 对降雨率 0.6 mm/h 与 7.6 mm/h 以上的无线电干扰统计结果分别进行了分析。大雨之外的其他降雨都归类到中小雨天气。

我国以往对低海拔特高压交流输电线路进行长期观测时, 对好天气与大雨天气分析较多, 而较少统计其他几种天气状况^[13-16]。由于无线电干扰受相对湿度、雨量等气象参数影响较大^[15,27], 下文统计结果给出了相应的气象条件。

2.2 好天气

刚察观测站好天气无线电干扰统计结果见表 1, 表中 0.5 MHz 无线电干扰简称为 RI, 其单位 “dB(μ V/m)” 简称为 “dB”。

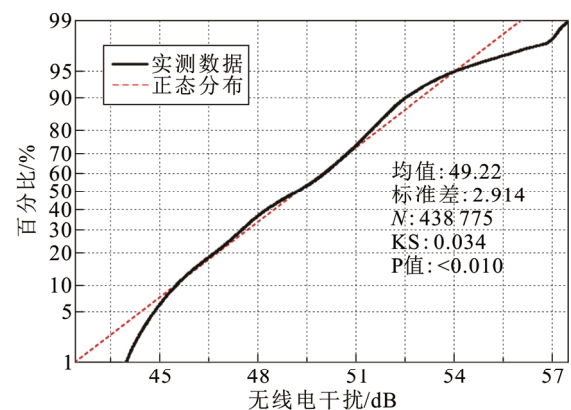
由表 1 可知, 刚察观测站统计的好天气无线电干扰有效数据共 438 775 组, 无线电干扰平均值为 49.22 dB, 标准差为 2.91 dB, 数据的集中度较高, 50% 值为 49.16 dB, 平均值与 50% 值相当, 80% 值

为 51.44 dB。好天气的温度范围为 $-27.00\sim 25.20$ $^{\circ}\text{C}$, 平均值为 0.41 $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度在 4%~96% 之间, 气压在 66.90~69.27 kPa 之间。好天气无线电干扰测量结果如图 2 所示。

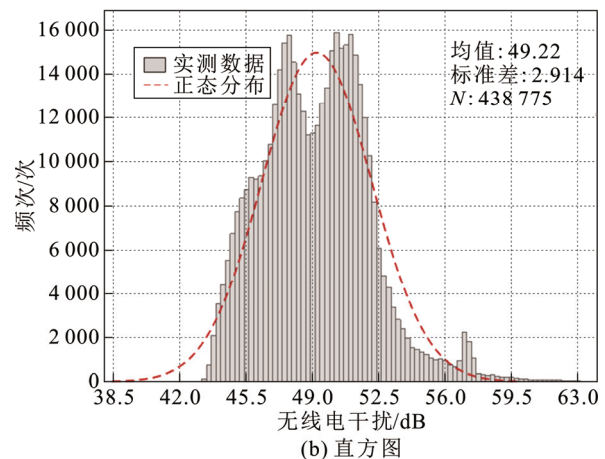
由图 2 可知, 好天气无线电干扰的测量值不超过 55 dB 的概率为 96.4%。对好天气无线电干扰进行了正态性 KS 检验 (Kolmogorov-Smirnov test), P 值 <0.01 , 按显著性水平 $\alpha = 0.05$ 水准, 可以认为数

表 1 好天气无线电干扰统计结果

参数	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	气压/kPa	RI/dB
样本量 N	437 670	437 692	437 692	438 775
平均值	0.41	56.09	68.11	49.22
标准差	10.95	20.69	0.39	2.91
偏度	-0.16	-0.13	-0.05	0.63
偏度标准误差	0	0	0	0
峰度	-0.94	-0.97	-0.02	1.01
峰度标准误差	0.01	0.01	0	0.01
最小值	-27.00	4.00	66.90	42.59
最大值	25.20	96.00	69.27	74.64
50% 值	1.28	56.55	68.17	49.16
80% 值	10.79	77.31	68.43	51.44



(a) 正态性检验与累积概率分布



(b) 直方图

图 2 好天气无线电干扰

Fig.2 RI under fair weather

据不服从正态分布^[29]，但图 2(a)中的实测数据绝大多数靠近正态分布的拟合线，同时表 1 中无线电干扰的分布峰度及偏度分别为 1.01、0.63，其标准误差都未达到 0.05 的显著性水平^[30]，结合直方图可知，好天气无线电干扰数据近似服从正态分布。

2.3 大雨

定义降雨率 0.6 mm/h 以上为大雨，无线电干扰统计结果见表 2。

由表 2 可知，降雨率在 0.6 mm/h 以上时无线电干扰有效数据共 8 991 组，共计 149.85 h，平均降雨率为 2.44 mm/h，相对湿度平均值为 88.32%，无线电干扰平均值为 65.36 dB，标准差为 3.14 dB，50% 值为 65.85 dB，平均值与 50% 值基本相当，80% 值为 68.03 dB。降雨率 0.6 mm/h 以上的无线电干扰如图 3 所示。

由表 2 和图 3 可知，降雨率在 0.6 mm/h 以上时，刚观测站无线电干扰主要分布在 55~71 dB，并未出现明显饱和，测量值的分布范围较宽。从长期测试经验看，为使无线电干扰出现饱和值(短时间内在频点图上近似为直线)，不仅降雨过程要长，降雨率也需较 0.6 mm/h 大大增加，最好是较大雨量的持续降雨。从分布峰度、偏度和直方图来看，降雨率在 0.6 mm/h 以上时无线电干扰近似服从正态分布。

IEEE 标准定义的大雨降雨率>7.6 mm/h^[28]，刚观测站降雨率达到 7.6 mm/h 的时间较少，且持续时间都不长，本文在 0.6 mm/h 以上降雨率数据中，选取降雨率>7.6 mm/h 且前后持续一段时间的数据进行了统计，结果如表 3 所示。

由表 3 可知，统计的刚观测站大雨天气无线电干扰数据为 578 组，约 10 h，气象站直接测量得到的降雨率平均值为 6.79 mm/h，略小于 7.6 mm/h，无线电干扰平均值为 69.09 dB，中位数为 68.92 dB，2 者差别很小，标准差为 1.01 dB，较 0.6 mm/h 以上降雨率的无线电干扰标准差 3.14 dB 大幅减小，数据的稳定性更好。

对大雨天气测量的无线电干扰统计量有取中值和和中位数 2 种方法，从实际测试结果看，由于大雨天气无线电干扰相对稳定，平均值和中位数差别很小，下文主要取与 CISPR 标准一致的大雨天气平均值来评价无线电干扰水平^[24]。

由图 3 可知，测得的数值较大且重复率较高的无线电干扰在 69 dB 左右。根据 CISPR 标准大雨天气无线电干扰为全天候的 95% 值，代表大雨天气平

表 2 降雨率 0.6 mm/h 以上时无线电干扰统计结果

Table 2 Statistical results of RI with rainfall rates above

参数	0.6 mm/h					
	温度/°C	相对湿度/%	气压/kPa	雨量/mm	降雨率/(mm·h ⁻¹)	RI/dB
样本量 <i>N</i>	8 987	8 989	8 989	8 989	8 989	8 991
平均值	7.78	88.32	68.35	0.04	2.44	65.36
标准差	3.50	5.51	0.26	0.10	5.37	3.14
偏度	0.07	-1.91	-0.05	4.52	9.91	-0.88
偏度标准误差	0.03	0.03	0	0.03	0.03	0.03
峰度	-0.39	4.66	0.05	41.86	155.69	1.09
峰度标准误差	0.05	0.05	0.01	0.05	0.05	0.05
50% 值	7.61	89.63	68.35	0.03	1.29	65.85
80% 值	11.20	92.53	68.55	0.16	3.30	68.03

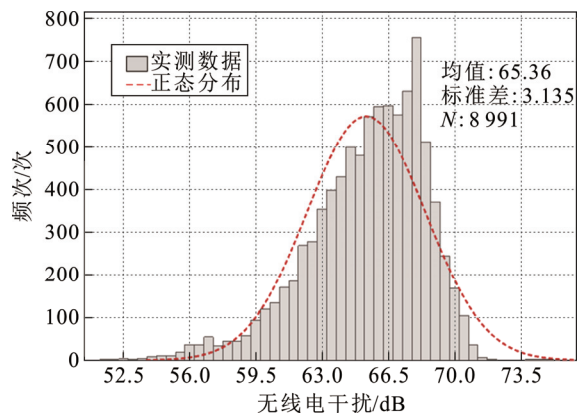


图 3 降雨率 0.6 mm/h 以上时的无线电干扰

Fig.3 RI at rainfall rate above 0.6 mm/h

表 3 大雨天气无线电干扰统计结果

Table 3 Statistical results of RI during heavy rain

参数	雨量/mm	降雨率/(mm·h ⁻¹)	RI/dB
样本量 <i>N</i>	578	578	578
平均值	0.10	6.79	69.09
标准差	0.13	6.93	1.01
最小值	0	1.20	65.9
中位数	0	4.60	68.92
上四分位数	0.20	7.65	69.85
最大值	0.80	56.40	72.02

均水平，降雨率在 0.6 mm/h 以上就是大雨，此时无线电干扰最稳定且能再现^[24]。从数值上看，降雨率在 0.6 mm/h 以上时无线电干扰波动范围较宽，且随着降雨率的增加而增大，而 2 mm/h 以下的降雨率在持续较长时间的毛毛雨天气就可以达到，因此 0.6 mm/h 以上降雨率的平均值无法代表大雨天气无线电干扰的稳定水平，用 7.6 mm/h 以上降雨率代表大雨天气更为准确^[13,28]。由于刚观测站降雨率

7.6 mm/h 以上持续时间较少, 从稳定且能重现方面考虑, 取上文降雨率 6.79 mm/h 的平均值 69.09 dB 代表刚察观测站大雨天气无线电干扰水平。

2.4 中小雨

定义降雨率 0.6 mm/h 以下为中小雨, 无线电干扰统计结果见表 4。

由表 4 可知, 统计的中小雨天气数据共 17 314 组, 无线电干扰平均值为 56.75 dB, 标准差为 4.10 dB, 50%值为 56.75 dB, 80%值为 60.51 dB。平均值较 50%值小约 4 dB。中小雨天气的无线电干扰如图 4 所示。

由表 4 和图 4 可知, 刚察观测站中小雨天气下无线电干扰的测量数据在 46~71 dB 之间, 数据分布范围宽。中小雨天气的无线电干扰测量数据近似服从正态分布, 无线电干扰数值较好天气明显增大。

2.5 大雪

将天气现象仪识别的大雪天气进行汇总, 无线电干扰统计结果见表 5。

表 4 中小雨天气无线电干扰统计结果

Table 4 Statistical results of RI under light to moderate rainfall

rainfall					
参数	温度/℃	相对湿度/%	气压/kPa	雨量/mm	RI/dB
样本量 <i>N</i>	17 104	17 104	17 104	17 104	17 314
平均值	8.31	80.17	68.33	0	56.75
标准差	5.16	11.4	0.27	0.02	4.10
偏度	-0.33	-1.27	-0.02	11.80	0.13
偏度标准误差	0.02	0.02	0	0.02	0.02
峰度	0.08	1.35	0.01	141.26	-0.6
峰度标准误差	0.04	0.04	0	0.04	0.04
50%值	8.42	83.54	68.35	0	56.75
80%值	12.83	89.65	68.54	0.12	60.51

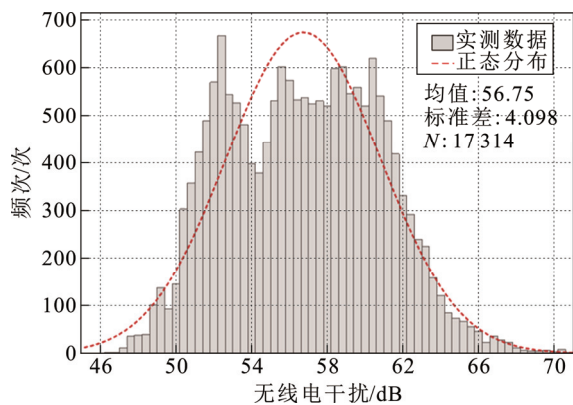


图 4 中小雨天气无线电干扰

Fig.4 RI under light to moderate rainfall

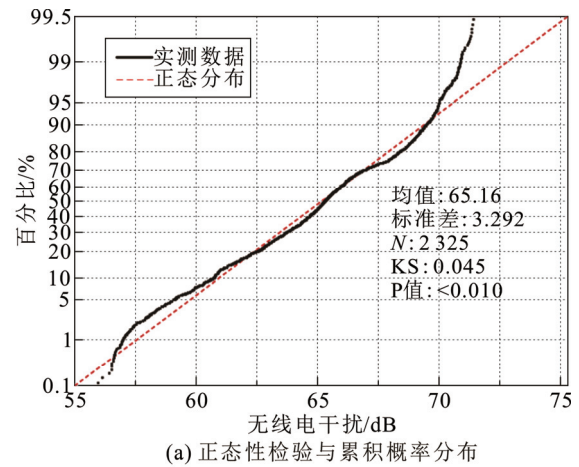
由表 5 可知, 大雪天气下无线电干扰数据共 2 325 组, 平均温度为-1.22 ℃、相对湿度为 89.80%, 无线电干扰平均值为 65.16 dB, 标准差为 3.29 dB, 50%值为 65.29 dB, 80%值为 68.40 dB。大雪天气的无线电干扰测量结果如图 5 所示。

由表 5 和图 5 可知, 大雪天气下无线电干扰测量数据在 55~72 dB 之间, 分布范围较宽, 图 5(a)中, 无线电干扰在约 71 dB 处接近饱和。从无线电干扰的分布峰度、偏度和直方图来看, 大雪天

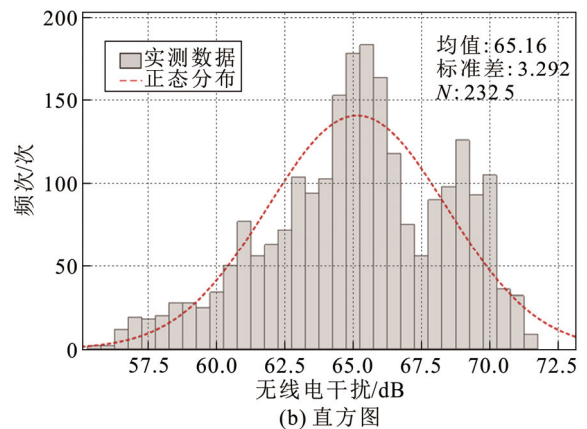
表 5 大雪天气无线电干扰统计结果

Table 5 Statistical results of RI under heavy snow

参数	温度/℃	相对湿度/%	气压/kPa	RI/dB
样本量 <i>N</i>	2 291	2 291	2 291	2 325
平均值	-1.22	89.80	68.22	65.16
标准差	4.13	4.19	0.31	3.29
偏度	-2.52	-1.40	-0.07	-0.38
偏度标准误差	0.05	0.05	0.01	0.05
峰度	5.62	2.56	0.15	-0.32
峰度标准误差	0.10	0.10	0.01	0.10
50%值	0.27	90.41	68.20	65.29
80%值	1.11	93.40	68.41	68.40



(a) 正态性检验与累积概率分布



(b) 直方图

图 5 大雪天气无线电干扰

Fig.5 RI under heavy snow

气无线电干扰近似服从正态分布。同时由图 5(b)可知,大雪天气数值较大且重复率较高的无线电干扰约为 70 dB。

2.6 中小雪

中小雪是以天气现象仪识别的中雪和小雪天气组合而成,无线电干扰统计结果见表 6。

由表 6 可知,中小雪天气无线电干扰有效数据共 4 843 组,平均温度为-6.75 °C、相对湿度为 83.06%,无线电干扰平均值为 56.43 dB,标准差为 4.29 dB,50%值为 55.96 dB,80%值为 60.45 dB。

中小雪天气的无线电干扰测量结果如图 6 所示。

由表 6 和图 6 可知,中小雪天气下无线电干扰的测量数据主要分布在 45~67 dB 之间,分布范围较宽,中小雪天气无线电干扰数据近似服从正态分布。中小雪天气样本量为大雪天气的 2 倍,说明尽管当地海拔高、降雪较多,但还是以中小雪为主,中小雪天气无线电干扰较好天气测量值明显增大,而较大雪天气有所减小。

2.7 雾霾天气

雾霾天气下的无线电干扰统计结果见表 7。由表 7 可知,统计的雾霾天气下无线电干扰数据共 5 940 组,无线电干扰平均值为 50.45 dB,标准差为 3.12 dB,50%值为 50.24 dB,80%值为 51.99 dB。雾霾天气下平均值与 50%值基本一致,相对湿度平均值为 60.44%,较好天气相对湿度的平均值 56.09% 增加不多;而雾霾天气无线电干扰平均值为 50.45 dB,相比好天气平均值 49.22 dB 增大 1.2 dB,2 者差别并不大。

雾霾天气的无线电干扰测量结果如图 7 所示。由表 7 和图 7 可知,雾霾天气下无线电干扰的测量数据主要分布在 45~65 dB 之间,分散性较大,无线电干扰测量值不超过 55 dB 的概率约为 92%。无线电干扰的正态性 KS 检验中 P 值<0.01,可以认为无线电干扰不服从正态分布。此外,图 7 中有较多的实测数据偏离了正态分布拟合线,无线电干扰的分布峰度及偏度分别为 3.20、1.39,其峰度的标准误差大于 0.05 的显著性水平^[30],结合样本直方图可知,雾霾天气无线电干扰数据不符合正态分布。

2.8 全天候

全天候无线电干扰统计结果见表 8。

由表 8 可知,全天候下无线电干扰有效数据共 478 188 组。无线电干扰平均值为 49.96 dB,标准差为 4.14 dB,50%值为 49.51 dB,80%值为 51.91 dB。

表 6 中小雪天气无线电干扰统计结果

Table 6 Statistical results of RI under light to moderate snow

参数	温度/°C	相对湿度/%	气压/kPa	RI/dB
样本量 <i>N</i>	4 831	4 831	4 831	4 843
平均值	-6.75	83.06	68.07	56.43
标准差	6.19	7.52	0.59	4.29
偏度	-0.23	-1.68	0	0.13
偏度标准误差	0.04	0.04	0	0.04
峰度	-1.39	6.67	-0.16	-0.67
峰度标准误差	0.07	0.07	0.01	0.07
50%值	-5.77	83.51	68.19	55.96
80%值	-0.19	89.17	68.77	60.45

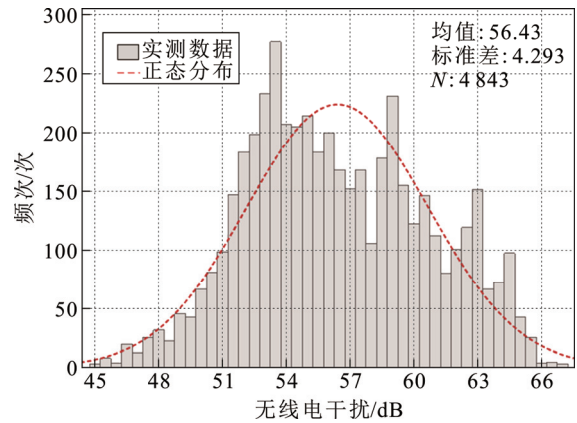


图 6 中小雪天气无线电干扰

Fig.6 RI under light to moderate snow

表 7 雾霾天气无线电干扰统计结果

Table 7 Statistical results of RI under haze weather

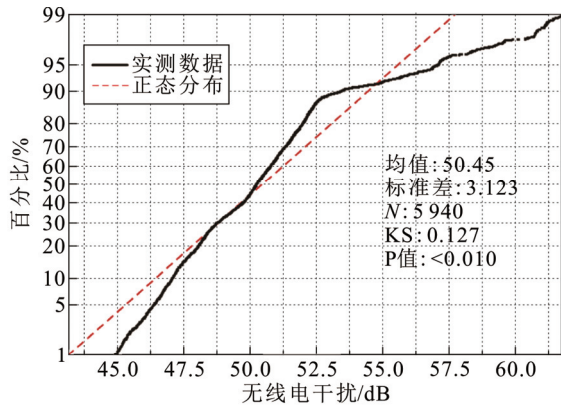
参数	温度/°C	相对湿度/%	气压/kPa	RI/dB
样本量 <i>N</i>	5 940	5 940	5 940	5 940
平均值	2.77	60.44	68.06	50.45
标准差	7.39	30.75	0.45	3.12
偏度	-0.30	-0.35	0.02	1.39
偏度标准误差	0.03	0.03	0	0.03
峰度	0.01	-1.52	-0.09	3.20
峰度标准误差	0.06	0.06	0.01	0.06
50%值	2.76	71.11	68.04	50.24
80%值	9.37	90.46	68.46	51.99

温度在-27.00~25.20 °C之间,相对湿度在 4%~96%之间,气压在 66.90~69.27 kPa 之间。1 年中最大相对湿度仅 96%,低于低海拔地区雨天较为常见的 100%,这也表明刚察观测站所在地气候较为干燥,即使在雨雪天气相对湿度也不是很大。由于好天气在全天候中占比为 92%,因此全天候与好天气平均值基本相当。

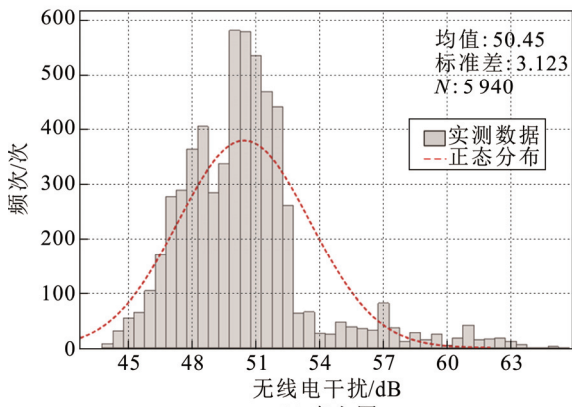
在高海拔线路电晕效应研究中,气压与海拔的数学关系应用较多,本文采用 2 种经验公式^[6,9,31]:

$$p = p_0(1 - H / 10.7) \tag{1}$$

$$p = p_0(1 - H / 44.33)^{5.255} \tag{2}$$



(a) 正态性检验与累积概率分布



(b) 直方图

图 7 雾霾天气无线电干扰

Fig.7 RI during haze weather

式中: p 、 p_0 分别为气压、标准大气压, kPa; H 为海拔, km。

对于海拔 3 320 m 的刚察观测站, 式(1)、(2)计算得到的气压分别为 68.97、66.43 kPa, 分别与 1 年平均气压 68.12 kPa 相差 1.25%、-2.48%, 式(1)与实测结果更相符。

温度为 t (单位为 $^{\circ}\text{C}$)时, 相对空气密度^[6,9,24]的计算式为:

$$\delta = \frac{298p}{(273+t)p_0} \quad (3)$$

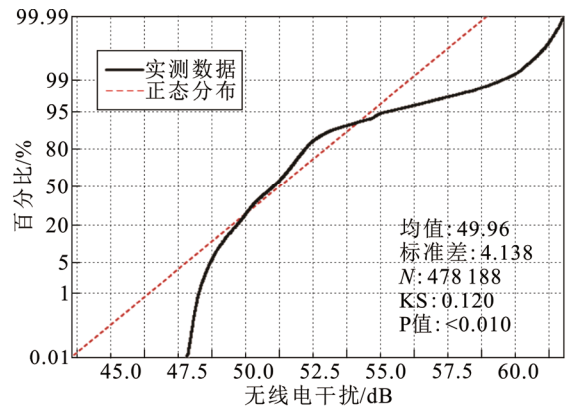
表 8 中 1 年中气压变化量为 3.5%, 由于温度变化范围较宽, 刚察观测站 3 320 m 海拔下相对空气密度^[9]在 0.671~0.806 之间, 其值变化量达到了 20%。国内外已有大量文献通过相对空气密度分析电晕效应的海拔变化影响^[9,22,32], 而上述测量结果表明, 尽管在一个固定海拔下气压变化较小, 几乎可以忽略其差异, 但因温度变化范围大, 相对空气密度并非一个确定的数值, 因此通过单一的相对空气密度值分析海拔变化的影响会造成一定误差。

全天候无线电干扰测量结果如图 8 所示。

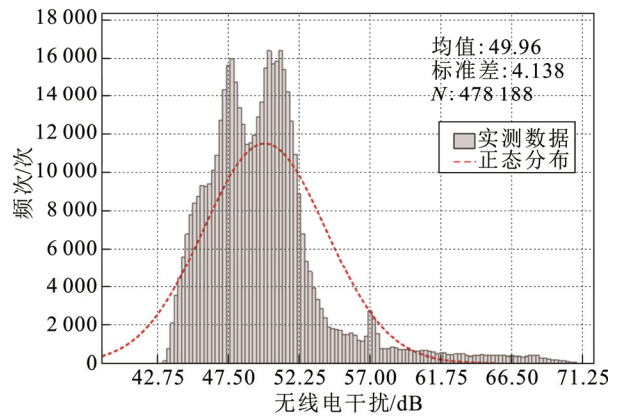
表 8 全天候无线电干扰统计结果

Table 8 Statistical results of RI under all weather

参数	温度/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	气压/kPa	雨量/mm	RI/dB
样本量 N	476 823	476 847	476 847	476 847	478 188
平均值	0.78	58.05	68.12	0	49.96
标准差	10.78	21.45	0.39	0.02	4.14
偏度	-0.22	-0.19	-0.05	30.53	1.75
峰度	-0.88	-1.01	-0.02	1 759.11	4.63
最小值	-27.00	4.00	66.90	0	42.59
最大值	25.20	96.00	69.27	1.80	75.87
50%值	1.88	58.81	68.19	0	49.51
80%值	10.82	80.12	68.44	0.12	51.91



(a) 正态性检验与累积概率分布



(b) 直方图

图 8 全天候无线电干扰

Fig.8 RI under all weather

由图 8 可知, 全天候下无线电干扰绝大多数点远离拟合线, 可以认为无线电干扰不服从正态分布, 从以往研究来看, 全天候由好天气、大雨等多个近似正态分布的曲线组合而成, 其形态不符合正态分布^[24], 从直方图上看拖尾较多。直方图左侧突出部分为好天气测量结果, 右侧细长部分为雨雪天气测量结果。

全天候和各种天气下的无线电干扰比较结果如图 9 所示, 图中大雨为降雨率 0.6 mm/h 以上数据。

图 9 中, 无线电干扰平均值从大到小依次为大雨、大雪、中小雨、中小雪、雾霾、好天气, 其中大雨与大雪、中小雨与中小雪、好天气与雾霾的无线电干扰平均值基本相当, 雨雪对无线电干扰影响较大, 大雪可以达到与大雨相当的无线电干扰水平。各种天气下无线电干扰累积概率曲线如图 10 所示。图中坏天气+小雨包括雾霾、中小雨、中小雪、大雪天气。

由图 10 可知, 大雨天气累积概率曲线接近直线, 说明其分布近似服从正态分布^[24], 这也表明大雨天气下测量值更稳定, 外界偶然因素对其影响小。刚察观测站全天候 80%值为 51.91 dB, 95%值为 57.77 dB, 2 者相差 5.86 dB, CISPR 统计认为 95%值与 80%值一般相差 5~12 dB^[24], 5.86 dB 的差值在这个范围内, 但接近下限值。刚察观测站好天气无线电干扰平均值为 49.22 dB, 0.6 mm/h 以上雨天和大雪天气下无线电干扰平均值分别为 65.36、65.16 dB, 较好天气平均值增大约 16 dB, 大雨天气(平均降雨率 6.79 mm/h)无线电干扰平均值为 69.09 dB, 与好天气平均值相差 19.87 dB, 都在以往研究得到的无线电干扰大雨与好天气差值 16~25 dB 的范围内^[13]。大雨与好天气的差值约 20 dB, 而低海拔的特高压枣阳观测站长期测试得到的差值为 17.3 dB^[13], 2 者差别较大, 这是因为高海拔地区空气洁净, 进而降低好天气的无线电干扰水平^[22], 导致差值增大。

刚察观测站全天候下无线电干扰小于 58 dB 的概率为 95%, 无线电干扰满足双 80%值(80%时间、具有 80%置信度)58 dB 的限值要求^[10,33]。

3 不同年度无线电干扰统计结果比较

对 2022 年 9 月至 2023 年 9 月获取的第 2 年度有效测试数据进行统计分析, 采用与第 1 年度相同的 6 种天气类型划分, 并将第 1 年度和第 2 年度的数据汇总得到 2 年期的无线电干扰数据, 不同年度无线电干扰统计结果如图 11 所示。

第 2 年度全天候无线电干扰有效数据约 44 万组, 由图 11 可知, 2 年期无线电干扰好天气与雾霾、中小雨与中小雪的平均值基本相当, 其中全天候与雾霾平均值相差仅 0.20 dB, 大雨(降雨率 ≥ 0.6 mm/h)与大雪的无线电干扰平均值和标准差相当, 这表明在测试时间较长、样本量足够多的情况下, 大雨与大雪天气无线电干扰水平基本相当。

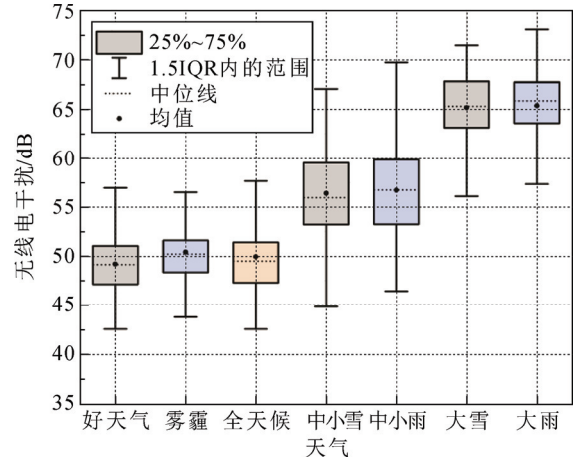


图 9 第 1 年度不同天气下无线电干扰比较

Fig.9 Comparison of RI under different weather conditions in the first year

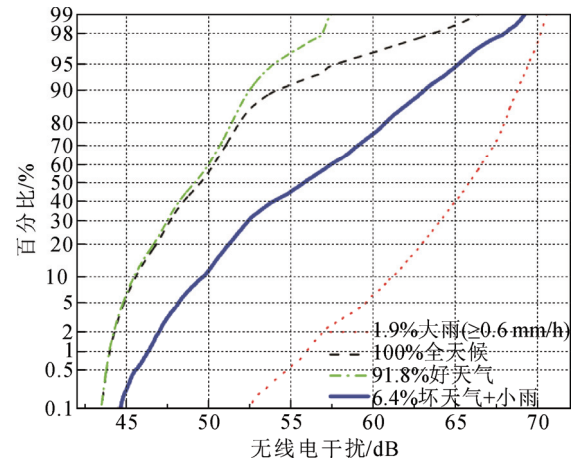


图 10 刚察观察站无线电干扰累积概率分布曲线

Fig.10 Cumulative probability distribution curve of RI at Gangcha observation station

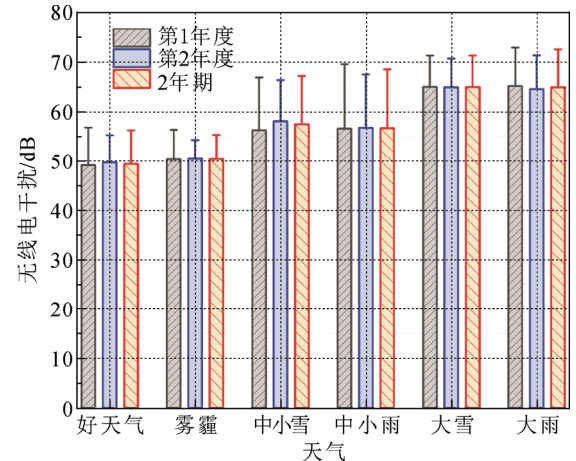


图 11 不同年度无线电干扰比较

Fig.11 Comparison of RI across different years

图 11 中, 在相同测点和天气类型下连续观测 2 年, 所得数据的一致性很好。比较 2 个独立年度和 2 年期数据可知, 只有中小雪天气第 2 年度比第 1 年度平均值大 1.8 dB, 其他天气无线电干扰平均值基本相当, 这说明对于获取运行时间较长、充分老化的输电线路无线电干扰水平, 1 年的观测时间已经足够, 2 年长期观测除了雨雪天气受实际降水量不同略有差异外, 其他天气统计结果差别很小。

4 无线电干扰快速评估方法

刚观测站在 2021 年 9 月 14 日 23:00 至 9 月 15 日 03:00 短期持续降雨时的 0.5 MHz 无线电干扰如图 12 所示。

该时段近 6 h 内降雨量为 20 mm, 其中 1 h 最大降雨量为 6.8 mm, 气象站测量的瞬时最大降雨率为 41.6 mm/h, 超过了 IEEE 标准大雨的下限值 7.6 mm/h。图 12 中, 无线电干扰随着降雨率的变化而变化, 由于降雨率 > 7.6 mm/h 持续时间较短, 无线电干扰在峰值处近乎饱和, 降雨率由约 40 mm/h 快速降至 5 mm/h, 尽管无线电干扰也在逐渐减小, 但下降趋势较为缓慢。对强降雨下连续测量时间分别为 1 h 和 2.5 h、采样间隔 4 s 的无线电干扰数据进行了统计, 结果如表 9 所示。

由表 9 可知, 该时段 1 h 内降雨量为 6.8 mm, 无线电干扰平均值为 70.37 dB; 2.5 h 内降雨量为 10.8 mm, 平均降雨率为 4.32 mm/h, 无线电干扰平均值为 69.38 dB; 其平均值分别与 1 年内统计的大雨天气平均值 69.09 dB 相差 1.28、0.29 dB, 2 者基本相当。

如同大雨时一般, 刚观测站在较为稳定的大雪天气(强降雪)时, 无线电干扰也接近饱和, 2021 年 10 月 19 日大雪天气测量的无线电干扰如图 13 所示, 图中等效降雨率多次在 7.6 mm/h 以上, 达到了大雪天气要求^[27-28]。

该时段 4.5 h 的强降雪天气下, 采样间隔 4 s 的无线电干扰数据的统计结果如表 10 所示。

由表 10 可知, 强降雪天气无线电干扰共 4 050 组, 平均值为 69.91 dB, 标准差为 0.68 dB, 50% 值为 69.88 dB, 80% 值为 70.57 dB, 平均值与 50% 值大小相当。强降雪天气接近饱和的无线电干扰平均值与大雨天气平均值 69.09 dB 相差仅 0.82 dB, 2 者基本相当。

这里需要指出的是, 由 2 年长期观测结果可知,

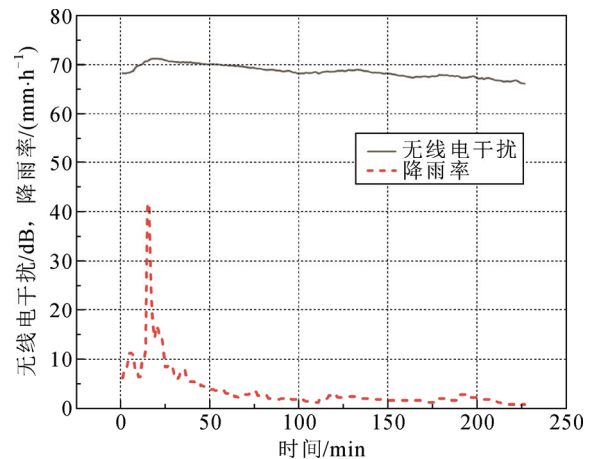


图 12 降雨率较大时的无线电干扰

Fig.12 RI under high rainfall rates

表 9 强降雨天气下无线电干扰统计结果

Table 9 Statistical results of RI under heavy rainfall

测量时间/h	样本量 N	无线电干扰/dB			
		平均值	标准差	50%值	80%值
1	900	70.37	0.48	70.33	70.80
2.5	2 250	69.38	0.92	69.07	70.33

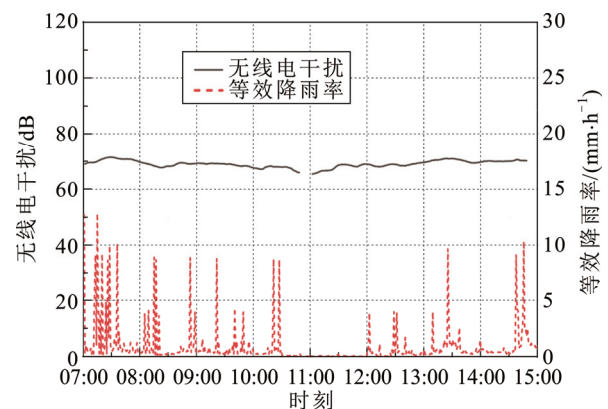


图 13 典型大雪天气无线电干扰

Fig.13 RI under typical heavy snow conditions

表 10 强降雪天气下的无线电干扰统计结果

Table 10 Statistical results of RI under heavy snowfall

样本量 N	无线电干扰/dB			
	平均值	标准差	50%值	80%值
4 050	69.91	0.68	69.88	70.57

对于青藏高原地区实际运行的输电线路, 由于受西北地区相对干燥的气候环境影响, 其降雨率都不太大, 降雨率 7.6 mm/h 以上持续时间较为短暂, 往往

不到 1 h, 严格按照 7.6 mm/h 以上降雨率来获取无线电干扰的大雨水平比较困难。而上述短期持续强降雨和强降雪天气下, 统计的无线电干扰均值与 1 年期大雨天气统计值基本相当。因此, 可以在降水较多的雨季开展无线电干扰的短期测试, 如果能获取持续几个小时的连续降雨(一般不少于 5 h), 降雨率最大值超过 7.6 mm/h, 且观测到无线电干扰测量值随降雨量变化不大, 在频点图上看接近直线、近似饱和, 则其中平均降雨率 4.3 mm/h 以上的短时无线电干扰平均值基本可以代表线路大雨天气的无线电干扰水平。当然, 鉴于雪天短时强降雪天气下无线电干扰与大雨天气平均值基本相当, 也可以在降雪较多的冬季进行测试, 从 2 年观测情况来看, 刚察观测站在当年 9 月至次年 5 月都可能出现降雪, 降雪时间较多, 只是高原地区冬季气候异常寒冷, 刚察观测站最低温度达到了 -27°C , 强降雪天气下观测会更加困难。

大雨天气是计算与评估 500 kV 及以上超、特高压输电线路在其他各种天气类型下的无线电干扰的基础^[9,11-13], 获取大雨天气值, 就可以利用天气修正因子得到其他天气下的无线电干扰水平^[17,23], 因此, 快速获取大雨天气无线电干扰水平即可得到各种天气无线电干扰近似年度统计值。

5 无线电干扰预测值与实测值比较

CISPR 推荐利用激发函数法计算 4 分裂以上线路无线电干扰^[23], 其大雨条件下的激发函数为:

$$\Gamma = 70 - (585 / g_{\max}) + 35 \lg(d) - 10 \lg(n) \quad (4)$$

式中: g_{\max} 为导线表面最大电位梯度, kV/cm; d 为子导线直径, cm; n 为导线分裂数。CISPR 建议采用 1 dB/300 m 进行海拔修正^[23]。

采用激发函数法对无线电干扰进行计算, 大雨到好天气的差值取特高压线路实测推荐的 20.5 dB^[13], 并与第 1 年长期观测统计结果进行比较, 边相外 20 m 处无线电干扰如表 11 所示。

由表 11 可知, CISPR 激发函数法得到的无线电干扰预测值较实测值偏大较多, 大雨和好天气下分别偏大 4.4、3.8 dB, 这是因为高海拔地区气候环境和空气更为洁净^[22], 且导线工艺等相比过去有所进步, 进而降低了导线电晕放电产生的无线电干扰, 因此, 后续还需要在高海拔电晕笼试验和多点长期观测研究的基础上^[18,20,27,34], 提出更为准确的预测方法。此外, 与低海拔的特高压枣阳观测站相比,

表 11 无线电干扰预测值与实测值比较结果

Table 11 Comparison of predicted and measured RI values

参数	无线电干扰/dB	
	大雨	好天气
CISPR 激发函数法(未加海拔修正)	62.45	41.95
CISPR 预测值(海拔修正后)	73.52	53.02
实测值	69.09	49.22
CISPR 预测值-实测值	4.43	3.80

采用同样的预测方法, 大雨天气无线电干扰计算偏差仅增大了 0.8 dB, 几乎可以忽略, 而好天气无线电干扰计算偏差增大了 3.4 dB^[13], 这也表明在高海拔洁净空气中实测得到的好天气无线电干扰水平低于以往预测结果。

不考虑海拔修正, 月海 I 线单独布置时大雨天气计算得到的边相外 20 m 处无线电干扰为 62.26 dB, 与考虑平行影响时相差仅 0.2 dB, 2 者差别很小。这表明由于两回线路相距较远, 边相外 20 m 的观测点无线电干扰统计结果可以代表 750 kV 单回线路的无线电干扰水平。

6 结论

本文对海拔 3 320 m 的 750 kV 刚察观测站 2 年持续观测得到的 92 万组 0.5 MHz 无线电干扰有效数据进行了统计分析, 主要结论如下文所述。

1) 将第 1 年度的无线电干扰长期测试数据分为 6 种天气, 获取不同天气下的无线电干扰统计值, 无线电干扰平均值从大到小依次为大雨、大雪、中小雨、中小雪、雾霾、好天气, 雨天、雪天、好天气无线电干扰近似服从正态分布。

2) 750 kV 刚察观测站在大雨、好天气、全天候下的无线电干扰平均值分别为 69.09、49.22、49.96 dB, 好天气无线电干扰不超过 55 dB 的概率为 96.4%, 全天候下无线电干扰小于 58 dB 的概率为 95%, 满足 750 kV 线路双 80% 值 58 dB 的限值要求。

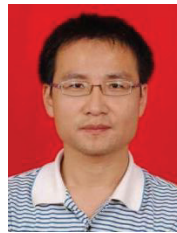
3) 对于获取长期运行充分老化的输电线路无线电干扰水平, 1 年的观测时间已经足够; 建议采用降雨率 7.6 mm/h 以上代表大雨天气, 并提出通过雨雪天气短期观测, 快速获取近似 1 年长期测试大雨天气无线电干扰平均值的方法。

4) 采用 IEC/CISPR 激发函数法计算得到的无线电干扰较实测值偏大, 需要对高海拔交流输电线路的无线电干扰预测方法开展进一步研究。

参考文献 References

- [1] 刘冀邱, 张珊珊, 熊凌飞, 等. 高海拔特高压换流变压器冷却性能修正研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 242-249.
LIU Jiqiu, ZHANG Shanshan, XIONG Lingfei, et al. Research on the cooling performance correction for UHVDC converter transformers at high altitudes[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 242-249.
- [2] 贺之渊, 高冲, 丁骁, 等. 多馈入高压直流输电系统换相失败防御技术研究综述[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2735-2746.
HE Zhiyuan, GAO Chong, DING Xiao, et al. A review of commutation failure prevention technology for multi-infeed HVDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2735-2746.
- [3] 刘鹏, 张军, 谢梁, 等. 4 000 m 高海拔地区特高压变电站导线电晕特性与选型研究[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2919-2928.
LIU Peng, ZHANG Jun, XIE Liang, et al. Study on corona characteristics and type selection of UHV substation conductor in 4 000 m high altitude area[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2919-2928.
- [4] 舒印彪, 张正陵, 汤涌, 等. 新型电力系统构建的若干基本问题[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(21): 8327-8340.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhengling, TANG Yong, et al. Fundamental issues of new-type power system construction[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(21): 8327-8340.
- [5] 张军, 刘鹏, 滕文涛, 等. 超高海拔地区 1 000 kV 变电站导线连接金具防晕型结构设计与优化[J]. 电网技术, 2024, 48(4): 1787-1798.
ZHANG Jun, LIU Peng, TENG Wentao, et al. Design and optimization of corona-proof structure for wire connection hardware at 1 000 kV substations in ultra-high-altitude areas[J]. Power System Technology, 2024, 48(4): 1787-1798.
- [6] HUANG S L, LIU Y P, CHEN S S, et al. Corona onset voltage gradient of bundle conductors for EHV/UHV AC power lines in corona cages considering altitude correction[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2020, 6(3): 693-703.
- [7] ZHANG Y M, XU J L, LI N, et al. Audible noise analysis of 750-kV AC transmission line in high-altitude area under different weather[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(11): 2644-2654.
- [8] HE W L, WAN B Q, HUANG S L, et al. Audible noise performance of high voltage AC conductor bundles at an altitude of 2 261 m[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(6): 2447-2455.
- [9] Electric Power Research Institute. EPRI AC transmission line reference book—200 kV and above[M]. 3rd ed. Palo Alto, CA, USA: EPRI, 2005.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line: GB 50545—2010[S]. Beijing, China: China Planning Press, 2010.
- [11] 唐剑, 杨迎建, 李永双, 等. 特高压交流输电线路电晕效应的预测方法, II: 无线电干扰[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2942-2947.
TANG Jian, YANG Yingjian, LI Yongshuang, et al. Prediction of corona effects generated from UHVAC transmission lines, II: radio interference[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2942-2947.
- [12] 裴春明, 万保权, 何旺龄, 等. 应用电晕笼的特高压交流输电线路无线电干扰试验研究[J]. 电网技术, 2016, 40(5): 1582-1588.
PEI Chunming, WAN Baoquan, HE Wangling, et al. Experimental investigation with corona cage for radio interference of UHVAC power transmission line[J]. Power System Technology, 2016, 40(5): 1582-1588.
- [13] 张业茂, 张建功, 鄂雄, 等. 特高压试验示范工程输电线路无线电干扰长期测试数据的统计分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3708-3714.
ZHANG Yemao, ZHANG Jianguo, WU Xiong, et al. Statistic analysis of long-term measured data of radio interference on UHV AC demonstration project transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3708-3714.
- [14] XIE H C, WAN B Q, ZHANG J G. Outliers analysis of RI long-term data in fair weather from 1 000 kV UHV AC power lines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(4): 3277-3279.
- [15] XIE H C, CUI X, WAN B Q, et al. Statistical analysis of radio interference of 1 000 kV UHV AC double-circuit transmission lines in foul weather[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2016, 2(2): 47-55.
- [16] 谢辉春, 崔翔, 鄂雄, 等. 1 000 kV 特高压交流单回输电线路好天气下无线电干扰的统计分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 861-870.
XIE Huichun, CUI Xiang, WU Xiong et al. Statistical analysis of 1 000 kV UHV AC single-circuit transmission line radio interference under good weather condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 861-870.
- [17] 国家能源局. 高压架空输电线路无线电干扰计算方法: DL/T 691—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
National Energy Administration. Calculation method of radio interference from high voltage overhead power transmission lines: DL/T 691—2019[S]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2019.
- [18] HE W L, LAN L, WAN B Q, et al. Radio interference performance of HVAC conductor bundles at high-altitude location: measured data analysis and altitude correction[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5): 1322-1329.
- [19] 裴春明, 何旺龄, 万保权, 等. 海拔高度对交流线路无线电干扰水平的影响[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3330-3336.
PEI Chunming, HE Wangling, WAN Baoquan, et al. Effects of altitude on radio interference of AC power lines[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3330-3336.
- [20] HE W L, HE J J, WAN B Q, et al. Influence of altitude on radio interference level of AC power lines based on corona cage[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2015, 9(7): 861-865.
- [21] ROBERTSON L M, PAKALA W E, TAYLOR E R. Leadville high-altitude extra-high-voltage test project part III—radio influence investigations[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1961, 80(3): 732-743.
- [22] CHARTIER V L, LEE L Y, DICKSON L D, et al. Effect of high altitude on high voltage AC transmission line corona phenomena[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(1): 225-237.
- [23] IEC. Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment, part 3: code of practice for minimizing the generation of radio noise: CISPR TR 18-3[S], 2010.
- [24] IEC. Radio interference characteristics of overhead power lines and high-voltage equipment, part 1: description of phenomena: IEC/TR CISPR 18-1[S], 2010.
- [25] KOLCIO N, DIPLACIDO J, HAAS R J, et al. Long term audible noise and radio noise performance of American electric power's operating 765 kV lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(6): 1853-1859.
- [26] CHARTIER V L, SHANKIE D F, KOLCIO N. The apple grove 750-kV project: Statistical analysis of radio influence and corona-loss

- performance of conductors at 775 kV[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89(5): 867-881.
- [27] 张业茂, 李妮, 周翠娟, 等. 750 kV 高海拔交流输电线路无线电干扰测试数据分析[J]. 中国电力, 2023, 56(2): 77-85.
ZHANG Yemao, LI Ni, ZHOU Cuijuan, et al. Analysis of radio interference measurement data for 750 kV AC transmission lines at high altitude[J]. Electric Power, 2023, 56(2): 77-85.
- [28] IEEE. IEEE standard definitions of terms relating to corona and field effects of overhead power lines: 539-2020[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2021.
- [29] 李志辉. Minitab 统计分析方法及应用(经典版)[M]. 3 版. 北京: 电子工业出版社, 2023.
LI Zhihui. Minitab statistical analysis methods and applications (classic edition)[M]. 3rd ed. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2023.
- [30] 李昕, 张明明. SPSS 28.0 统计分析从入门到精通[M]. 北京: 电子工业出版社, 2022.
LI Xin, ZHANG Mingming. SPSS 28.0 statistical analysis: from beginner to master[M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2022.
- [31] DU Z Y, XIU L, HE J X, et al. Computation of total electric field considering natural wind under high-altitude UHVDC transmission lines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(9): 1-4.
- [32] 张延泽, 刘洋, 龙涛, 等. 海拔高度对导线负极性直流电晕特性的影响[J]. 高电压技术, 2024, 50(11): 5192-5205.
ZHANG Yanze, LIU Yang, LONG Tao, et al. Effect of altitude on negative polarity DC corona characteristics of conductors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5192-5205.
- [33] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 高压交流架空输电线路无线电干扰限值: GB/T 15707—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Limits of radio interference from high voltage AC overhead power transmission lines: GB/T 15707—2017[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2017.
- [34] 李鹏飞, 张业茂, 路遥, 等. 高海拔地区 750 kV 输电线路可听噪声环境影响分析及预测模型研究[J]. 高电压技术, 2024, 50(12): 5648-5657.
LI Pengfei, ZHANG Yemao, LU Yao, et al. Environmental impact analysis and prediction method of audible noise on 750 kV transmission lines in high altitude areas[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5648-5657.



张业茂(通信作者)

1982—, 男, 博士, 教授级高工

主要从事电力系统电磁兼容和电磁环境方面的研究

E-mail: zhangyemao@epri.sgcc.com.cn

ZHANG Yemao

Ph.D., Professor

Corresponding author

收稿日期 2024-12-10 修回日期 2025-01-26 编辑 程子丰