

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.05.028

±800 kV复奉线连接金具温升异常原因分析及处理措施

黄福勇, 巢亚锋, 王成, 王峰, 欧阳克俭, 周卫华

(国网湖南省电力公司电力科学研究院, 长沙 410007)

摘要: 针对±800 kV复奉线二起连接金具温升异常进行了跟踪监测,通过多次红外测温 and 软件仿真分析认为复奉线1564、1250号连接金具温升异常是由于6根引流子导线电流不平衡,各引流子导线电流需通过绝缘子串连接金具处进行平衡后再进行传递,5号子导线连接金具中有大电流流过造成过热。检修结果显示2个发热点均存在子导线与管母连接处螺栓连接不紧密的问题,与笔者之前的分析一致。提出特高压线路在例行停电检修时,应对采用管母跳线的耐张塔管母连接处连接螺栓的连接情况进行仔细检查,对松动或没有紧固到位的螺栓应重新紧固的建议;对此类温升异常问题,连接金具安全系数若在允许继续运行的安全范围内时,可等待下次停电检修再行处理,但应跟踪监测。

关键词: 特高压直流;复奉线;连接金具;红外测温;温升

Cause Analysis and Treatment Measures on Abnormal Temperature Rising of Connection Fittings of UHVDC ±800 kV Fufeng Line

HUANG Fuyong, CHAO Yafeng, WANG Cheng, WANG Feng, OUYANG Kejian, ZHOU Weihua
(State Grid Hunan Electric Power Corporation Research Institute, Changsha 410007, China)

Abstract: The two abnormal temperature rising of connection fittings in UHVDC ±800 kV Fufeng line are monitored and tracked, and based on infrared thermometry and software simulation, the simulation analysis shows that the cause of the abnormal temperature rising of No.1564 and No.1250 is the current in the bundled conductors are unbalanced, the current in the bundled conductors need balanced by the connection fittings before re-transmission, the large current in the connection fittings of No.5 bundled conductor caused the abnormal temperature rising. The maintenance results show that the joint of the No.5 bundled conductor and the tubular busbar is loose contacted to No.1564 and No.1250, the maintenance results meet the reason analysis of the authors. The suggestion of carefully reviewed on the joint of the bundled conductors and the tubular busbar is proposed. And to this abnormal temperature rising problem, if the safety factor of the connection fittings is within safe levels, the defect could keep operation until the next maintenance time.

Key words: UHVDC; Fufeng line; connection fittings; infrared temperature measurement; temperature rise

0 引言

±800 kV复奉线西起向家坝复龙换流站,东至上海奉贤换流站,设计额定运行电压800 kV、电流4 000 A、双极功率6 400 MW,输电距离1 916 km,途经四川、重庆、湖南、湖北、安徽、浙江、江苏、上海等省市^[1]。±800 kV复奉线是“西电东送”的大动脉,其运行关乎区域电网的稳定,因此,保证复奉线的安全稳定运行具有重要的意义。

±800 kV复奉线自2010年7月26日正式投运以来,先后出现铝管式跳线接头滑移、重冰区段绝缘子铁帽锈蚀的问题^[2-3]。2014年6月11日,巡检发现复奉线1564号极Ⅱ大号侧5号子导线延长拉杆温升异常,为复奉线投运以来发现的第3类缺陷。

红外测温是一种常用的温升检测手段,目前已广泛应用于输变电设备的运行工况检测^[4-10]。文中通过红外测温跟踪、温升异常分析、停电检修及恢复送电后跟踪,对±800 kV复奉线两起连接金具温升异常原因进行分析,提出处理建议,跟进检修过程,

收稿日期:2016-11-29; 修回日期:2017-01-11

跟踪检修效果。此次 ± 800 kV 复奉线 1564、1250 号两处导线连接金具温升异常点的分析和后续工作, 不仅为复奉线的安全运行提供了重要保障, 更为今后特高压线路的运行提供了一个可供参考的典型案例, 为特高压线路及时发现设备缺陷和消缺提供了重要技术支撑。

1 缺陷基本情况

1.1 直升机巡视情况

2014 年 6 月 11 日, 国网通航公司在对复奉线进行直升机巡视测温时, 发现复奉线 1564 号极 II 大号侧 5 号子导线调整板与 U 型挂环连接螺栓、延长拉杆等部位发热, 发热点温度 83.2°C , 正常点温度 35.1°C , 相对温升 48.1°C , 环境温度 30°C , 相对湿度 30%, 见图 1。

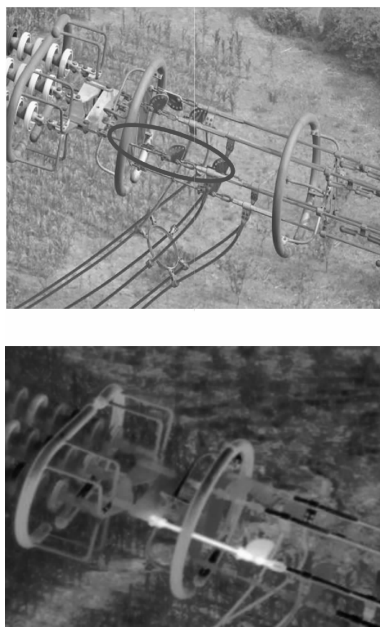


图 1 直升机测温 1564 号发热点图片

Fig. 1 The abnormal temperature rising point of No.1564

2014 年 9 月 16 日, 国网通航公司在对复奉线进行直升机巡视时, 发现复奉线 1250 号极 II 小号侧导线端 5 号子导线延长拉杆等金具发热, 发热点温度 61.1°C , 正常点温度 25.2°C , 相对温升 35.9°C , 环境温度 23°C , 相对湿度 80%, 见图 2。

± 800 kV 复奉线 1564、1250 号均为耐张塔, 极 II 导线均采用六分裂设计, 跳线均采用铝管式管母跳线, 杆塔形式见图 3, 温升异常区段示意图见图 4。

1.2 复测情况

获知金具发热异常情况后, 笔者对复奉线 1564 号发热点进行复测, 多次复测表明, 该连接金具在不同时段发热点温度最高为 103°C 、最低为 67.7°C , 相



图 2 直升机测温 1250 号发热点图片

Fig. 2 The abnormal temperature rising point of No.1250



图 3 1564 号杆塔全貌

Fig. 3 The complete picture of No.1564 tower

对温升为 $34\sim 70^{\circ}\text{C}$, 与直升机巡视测温情况基本一致, 其他检测部位最高温度 35.6°C , 相对温升均小于 10°C , 未发现异常现象。对复奉线 1250 号发热点亦进行了复测, 发现发热点温度为 56°C 、正常点温度 27.8°C , 相对温升 28.2°C , 与直升机巡视测温情况基本一致^[17-18]。夜间巡视均未发现发热 1564、1250 号存在异常响声、电晕放电、拉弧放电等异常情况。

2 缺陷原因分析及处理方式

2.1 缺陷原因分析

1) 自 2014 年 6 月 11 日发现 ± 800 kV 复奉线 1564 号温差问题后, 笔者会同运行单位采用不同厂家测温设备多次到 1564、1250 号现场进行复测, 现场检测数据基本一致, 因此, 可排除现场测温误差和仪器故障问题。

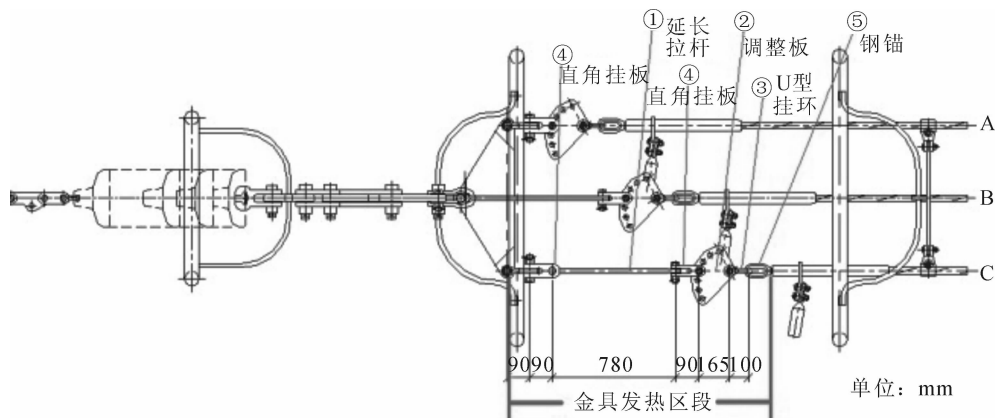


图 4 1564、1250 号发热区段示意图

Fig. 4 The sketch map of the abnormal temperature rising area of No.1564 and No.1250

2)经现场红外测温发现,除温升异常部位之一复奉线 1564 号极Ⅱ前侧 5 号子导线耐张线夹钢锚、U 型挂环、调整板、直角挂板、延长拉杆共 4 个类型 5 个相连金具,温升异常部位之二 1250 号极Ⅱ后侧 5 号子导线延长拉杆等 4 个类型 5 个相连金具外,同一批次其他金具未发现过热现象,耐张线夹仅钢锚锚头温差异常,而锚管无异常(同一锻造件另一部位未出现发热现象)。因此,可排除发热点金具材质问题。

3)运行经验表明,若引流板连接不到位或耐张线夹过压、欠压等都将出现过大温差,经查阅历史

记录和 2015 年多频次、多位置红外检测,复奉线 1564、1250 号极Ⅱ前后侧线夹、引流板、跳线管母、间隔棒、接续管、导线等部位均未出现过温差现象。因此,可排除引流板连接不到位或耐张线夹过压、欠压等问题。

2.2 金具温度场热电耦合仿真计算与分析

直流线路发热故障常为电流制热型,为明确发热金具流通电流大小,针对连接金具开展了热电耦合仿真计算。鉴于连接金具流通电流全部经过圆形截面的延长拉杆,选取一段延长拉杆进行仿真计算,热电耦合仿真计算参数见表 1。

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters of the connecting fitting

热传导 $k/[W \cdot (m^{\circ}C)^{-1}]$	金具直径 D/mm	对流换热系数 $H/[W \cdot (m^2C)^{-1}]$	线电阻率 $r/(\Omega \cdot m)$	计算选取长度 L/mm	环境温度 $T/^{\circ}C$
60.5	30.0	5.0	1.7×10^{-7}	100.0	30.0

以 1564 号某一次红外测温数据为依据进行仿真计算,延长拉杆温度为 $67.7^{\circ}C$,进一步通过热电耦合仿真计算得到流通延长拉杆的电流大小。计算模型节点数为 22 044,单元数为 4 902。计算结果表明:当流通连接金具延长拉杆电流为 253 A 时,金具温度约为 $67.7^{\circ}C$,计算网格划分及温度场分布见图 5、6。

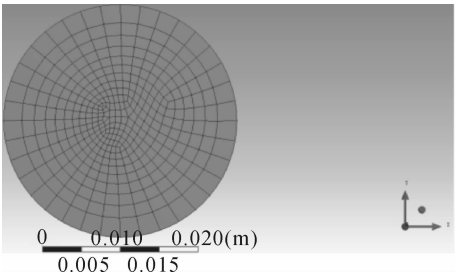


图 5 延长拉杆横截面网格划分

Fig. 5 Mesh generation of the connecting fitting

仿真计算结果表明,发热延长拉杆中有大电流流过。1564、1250 号连接金具温升异常是由于 6 根

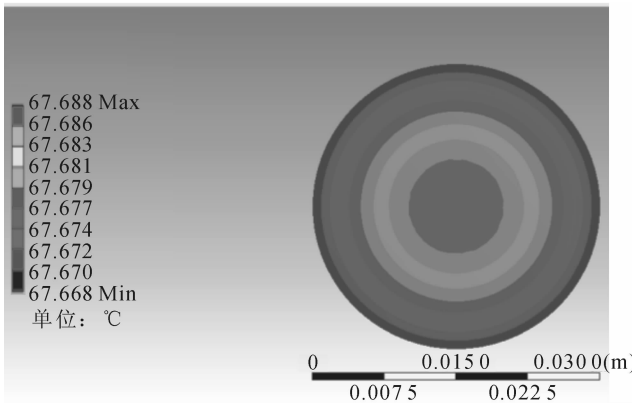


图 6 延长拉杆发热温度为 $67.7^{\circ}C$ 的温度场分布

Fig. 6 Temperature field of connecting fitting

引流子导线电流不平衡,1564 号极Ⅱ前侧 5 号引流子导线和 1250 号极Ⅱ后侧 5 号引流子导线电流偏小,而其他引流子导线电流偏大,需通过绝缘子串连接金具处进行平衡后再进行传递,因此原本不应

有电流流过的1564号极Ⅱ前侧5号子导线连接金具和1250号极Ⅱ后侧5号子导线连接金具中有大电流流过,因焦耳定律的作用造成连接金具过热。

2.3 缺陷处理方式

基于以上分析,笔者初步排除了现场测温误差、仪器故障、引流板连接不到位、耐张线夹欠压过压和发热金具材质等问题。

红外测温结果显示1564号发热金具在不同时段的最大温度103℃,其金具材质为Q345,目前处于长期超常温运行状态。据相关文献报道:钢材的高温屈服强度随温度升高而逐渐降低,在200℃以下,屈服强度降低较小;在200~600℃内,屈服强度降低幅度增大。Q345屈服强度为345 MPa,其在100℃的屈服强度降低系数为0.96,故1564号极Ⅱ5号子导线连接金具在温度为103℃时的屈服强度约为330 MPa。参照Q/GDW 296—2009和GB 50545—2010标准:连接金具在正常工况的安全系数为2.5,事故工况的安全系数为1.5^[19-20]。目前复奉线1564极Ⅱ5号子导线连接金具安全系数为2.4,介于1.5与2.5之间。

综合分析认为:在当前温度及运行条件下1564、1250号连接金具结构受力性能是安全的,建议等待下次检修再行更换。同时建议运行单位加强现场监视,在未查出温差异常原因和消除温差现象前,一是应定期进行温度检测和夜间巡视,如有异常及时上报;二是应定期观测金具表面锌层情况,如锌层出现起壳、剥落等现象(则认为连接金具温度在400℃以上),则应立即申请更换。

3 检修结果及处理措施

3.1 检修结果

2015年2月1-12日,±800 kV复奉线开展计划性停电检修期间,笔者随检修人员一起赶赴常德、张家界2个发热点现场,对1564、1250号两基杆塔的检修工作进行了全程跟进。检修人员在登杆检查后,发现2个发热点均存在子导线与管母连接处螺栓连接不紧密的问题。

检修结果与之前笔者认为1564号极Ⅱ前侧、1250号极Ⅱ后侧连接金具温升异常可能是由于6根引流子导线电流不平衡的分析相吻合。由于子导线与管母连接处螺栓连接不紧密,接触电阻增大造成极Ⅱ前、后侧5号引流子导线电阻偏大,因此流经极Ⅱ5号引流子导线电流减小,1-4、6号引流子导线电流增大,1-6号子导线电流在绝缘子串连接金具处进行平衡后再进行传递,因此原本不应有大电

流流过的1564、1250号极Ⅱ前、后侧5号子导线连接金具中有大电流流过,造成连接金具过热。

3.2 处理措施及跟踪情况

对1564、1250号极Ⅱ前、后侧5号引流子导线与管母连接处松动的螺栓进行了紧固,并更换了延长拉杆。同时对±800 kV复奉线湖南运维段所有耐张塔管母连接处连接螺栓进行了检查。

在2015年2月12日±800 kV复奉线恢复送电后,笔者先后对1564、1250号塔进行了红外测温,测量结果均显示5号子导线延长拉杆温升正常,见图7、8。在随后的1个月中,笔者先后3次赶赴常德、张家界对1564、1250号两基杆塔进行了跟踪测温,测量结果均显示温升正常。

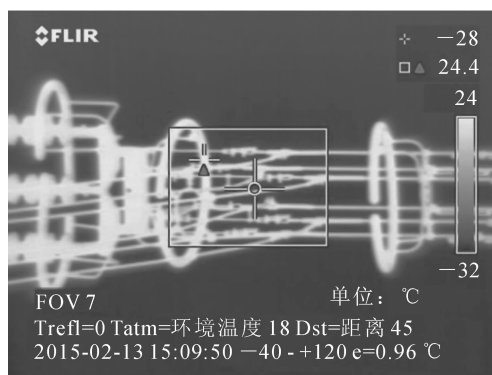


图7 1564号发热点检修后复测情况

Fig. 7 Repetition measurement to the abnormal temperature rising point of No.1564 after maintenance

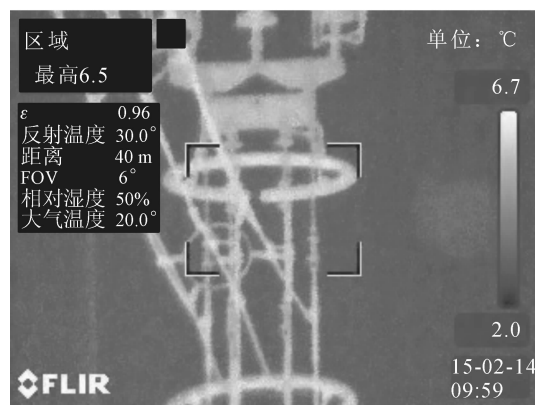


图8 1250号发热点检修后复测情况

Fig. 8 Repetition measurement to the abnormal temperature rising point of No.1250 after maintenance

笔者对±800 kV复奉线1564、1250号更换下来的延长拉杆进行了机械试验和电阻测试,其各项参数与备件参数无明显差别。

4 结论

1)±800 kV复奉线1564、1250号极Ⅱ前、后侧5号

子导线连接金具温升异常的原因是子导线与管母连接处螺栓连接不紧密, 接触电阻增大造成 1564、1250 号极 II 前、后侧 5 号引流子导线电阻偏大;

2) ± 800 kV 复奉线 1564、1250 号极 II 前、后侧 1-6 号子导线电流在绝缘子串连接金具处进行平衡后再进行传递, 使得原本不应有大电流流过的 1564、1250 号极 II 前、后侧 5 号子导线连接金具中有大电流流过, 造成连接金具过热;

3) 在特高压线路例行停电检修时, 应对采用管母跳线的耐张塔管母连接处连接螺栓的连接情况进行检查, 对松动或没有紧固到位的螺栓应重新紧固;

4) 对此类因耐张塔管母连接处螺栓连接不紧密造成的温升异常, 连接金具安全系数若在允许继续运行的安全范围内时, 可暂不做处理, 等待下次停电检修再行处理, 但应跟踪监测。

参考文献:

- [1] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wanjun. Engineering technology for DC transmission lines[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 陈亚奎. ± 800 kV 复奉线铝管式跳线接头滑移缺陷处理措施研究[J]. 宿州学院学报, 2013, 28(6): 76-78.
CHEN Yakui. Study on the treatment measures of the defect in aluminum tube type jumper slipping for DC 800 kV Fufeng line[J]. Journal of Suzhou University, 2013, 28(6): 76-78.
- [3] 曾忱, 李勇, 王品. ± 800 kV 复奉线重冰区段绝缘子铁帽锈蚀分析及建议[J]. 湖北电力, 2012, 36(5): 66-67.
ZENG Chen, LI Yong, WANG Pin. Analysis and recommendations of insulator gossans corrosion of heavy ice zone in ± 800 kV Fufeng line[J]. Hubei Electric Power, 2012, 36(5): 66-67.
- [4] 任子平, 曾庆立. 使用红外热象仪航测 220 kV 输电线路缺陷[J]. 华北电力技术, 1989(1): 36-40.
REN Ziping, ZENG Qingli. Study on aerial survey using infrared thermal imager to look for the defects of 220 kV transmission lines[J]. North China Electric Power, 1989(1): 36-40.
- [5] 许阳, 郑远锋, 王琨, 等. 输电线路无线红外测温系统应用研究[C]//2009 年全国输变电设备状态检修技术交流研讨会论文集. 西安: [s.n.], 2009: 7.
XU Yang, ZHENG Yuanfeng, WANG Kun, et al. Study on wireless infrared temperature measurement system for transmission lines[C]//the National Power Transmission and Transformation Equipment State Overhaul Technology Symposium on Translation for Communication in 2009. Xi'an: [s.n.], 2009: 7.
- [6] 王彪, 张艳军. 红外测温技术在架空输电线路故障诊断中的应用[J]. 河北电力技术, 2014, 33(4): 18-20.
WANG Biao, ZHANG Yanjun. Applications of infrared thermometry technology in fault diagnosis of overhead transmission line[J]. Hebei Electric Power, 2014, 33(4): 18-20.
- [7] 戴文进, 郭世才. 高压输电线路故障的红外诊断技术[J]. 电力建设, 2005, 26(4): 46-47.
DAI Wenjin, GUO Shicai. Infrared diagnostic technique for failures of HV transmission lines[J]. Electric Power Construction, 2005, 26(4): 46-47.
- [8] 陶留海. 1 000 kV 特高压交流输电线路典型红外缺陷原因分析及处理措施[C]//第四届全国架空输电线路技术交流研讨会论文集. 济南, 山东: [s.n.], 2013: 9.
TAO Lihai. Reason analysis and treatment measures of typical infrared defects in 1 000 kV UHV AC transmission lines[C]//4th Session of National Technology Symposium on Translation for Overhead Transmission Line. Jinan, Shandong: [s.n.], 2013: 9.
- [9] 赵伟. 红外线成像仪在电气线路检测中的应用[C]//中国有色金属学会第六届学术年会论文集. 北京: [s.n.], 2005: 4.
ZHAO Yi. Application of infrared imager in power line detection[C]//China Nonferrous Metals Society Proceeding of the Sixth Academic Conference. Beijing: [s.n.], 2005: 4.
- [10] 刘新业, 常大定, 欧阳伦多. 红外热成像在电气设备维护中的应用[J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 220-224.
LIU Xinye, CHANG Dading, OUYANG Lunduo. Application of infrared imaging in the maintenance of electric devices[J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 220-224.
- [11] 李晓莉. 应用红外成像技术检测电气设备热缺陷的探讨[J]. 华中电力, 2007, 20(5): 43-45.
LI Xiaoli. The application discussion of infrared image technology to detect thermal defects of electric equipment[J]. Central China Electric Power, 2007, 20(5): 43-45.
- [12] 晏节晋, 钱玉柱, 卢鹏飞. 跨区电网输电线路红外测温技术应用研究[J]. 宿州学院学报, 2013, 28(5): 72-74.
YAN Jiejun, QIAN Yuzhu, LU Pengfei. Study on application of infrared temperature measurement technology in transmission line of trans-regional power grid[J]. Journal of Suzhou University, 2013, 28(5): 72-74.
- [13] 李锡刚, 和发波, 王敏, 等. 架空线路连接点的综合红外测温技术[J]. 冶金动力, 2009(4): 21-22.
LI Xigang, HE Fabo, WANG Min, et al. Application of integrated infrared temperature measurement technology in wiring points of overhead line[J]. Metallurgical Power, 2009(4): 21-22.
- [14] 黄一鸣, 高瑾, 陈贵, 等. 输电线路发热点实时监控预警系统研究[J]. 华东电力, 2013, 41(9): 1971-1974.

- HUANG Yiming, GAO Jin, CHEN Gui, et al. Real-time monitoring and early warning system for transmission line hot spots[J]. East China Electric Power, 2013, 41(9): 1971-1974.
- [15] 葛 猛, 姜大宇, 梁之林. 220 kV 输电线路耐张线夹过热原因分析[J]. 吉林电力, 2005(1): 49-50.
- GE Meng, JIANG Dayu, LIANG Zhilin. Analysis on super-heat for anchor clamp of 220 kV transmission line[J]. Jilin Electric Power, 2005(1): 49-50.
- [16] 高 强, 徐芳芳. 红外点温仪检测输电线路导线连接器[J]. 高电压技术, 2002, 28(6): 51-52.
- GAO Qiang, XU Fangfang. Infrared nod temperature instrument used to detect connector of transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6): 51-52.
- [17] 钟 义, 陈小军, 程 锦. ± 800 kV 特高压直流换流站设备红外热像带电检测技术应用探讨[J]. 电气应用, 2013, 32(21): 38-42.
- ZHONG Yi, CHEN Xiaojun, CHENG Jin. Application of infrared thermal image detection technology for ± 800 kV UHV DC converter station[J]. Electrotechnical Application, 2013, 32(21): 38-42.
- [18] DL/T 664—2008 带电设备红外诊断应用规范[S]. 2008.
- DL/T 664—2008 Application rules of infrared diagnosis for live electrical equipment[S]. 2008.
- [19] Q/GDW 296—2009 ± 800 kV 架空输电线路设计技术规程[S]. 2009.
- Q/GDW 296—2009 Technical code for design of ± 800 kV overhead transmission line[S]. 2009.
- [20] GB 50545—2010 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[S]. 2010.
- GB 50545—2010 Code for design of 110 kV~750 kV overhead transmission line[S]. 2010.
- 黄福勇(1976—), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事高电压与绝缘技术、输电线路运检研究。
- 巢亚锋(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 技师, 主要从事复杂环境下电气外绝缘、输电线路智能运检、输电线路覆冰研究(通信作者)。