应用于基站接地系统的铝替铜技术方案研究

Research on Aluminum Replacing Copper Technology Scheme Applied to Base Station Earthing System

陈天威[1]，杜　斌[2]，秦庆明[2]，陈　强[1]，杭一帆[1]（1. 中讯邮电咨询设计院有限公司郑州分公司，河南 郑州 450007；2. 中国铁塔股份有限公司聊城分公司，山东 聊城 252000）

Chen Tianwei[1]，Du Bin[2]，Qin Qingming[2]，Chen Qiang[1]，Hang Yifan[1]（1. China Information Technology Designing & Consulting Institute Co.，Ltd. Zhengzhou Branch，Zhengzhou 450007，China；2. China Tower Co.，Ltd. Liaocheng Branch，Liaocheng 252000，China）

摘　要：

接地线作为通信基站的保护导体，在雷电流泄放和人员防护等方面发挥重要作用，目前基站多采用多股铜线作接地线，被盗情况常有发生。铝合金导线作为一种良导体，具有价格低、导电性好等优点，从电缆载流量、机械性能、抗腐蚀性能、抗浪涌冲击等方面，对铝合金接地线和接地铜线进行了性能对比，研究表明相同截面积的铝合金接地线可以替代接地铜线。经现场应用，铝合金接地线满足基站接地系统要求，为通信基站防雷防盗改造提供了良好的解决方案。

关键词：

通信基站；接地线；铝合金；性能对比；防雷防盗

doi：10.12045/j.issn.1007-3043.2025.08.017

文章编号：1007-3043（2025）08-0087-06

中图分类号：E968

文献标识码：A

开放科学（资源服务）标识码（OSID）：

Abstract：

As the protective conductor for telecommunication base station，the earthing wire plays a crucial role in lightning current discharge and personnel protection. At present，multi-strand copper wires are commonly used as earthing wire in base stations，but theft incidents often occur. Aluminum alloy conductors，as a good conductor，have advantages such as low price and good conductivity. A performance comparison between aluminum alloy earthing wires and copper earthing wires has been conducted in terms of cable current-carrying capacity，mechanical properties，corrosion resistance，and surge impact resistance. Research shows that aluminum alloy earthing wires with the same cross-sectional area can replace copper earthing wires. Field applications have demonstrated that aluminum alloy earthing wires meet the requirements of base station earthing systems，providing a good solution for lightning protection and anti-theft renovation of telecommunication base stations.

Keywords：

Telecommunication base station；Earthing wire；Aluminum alloy；Performance comparison；Lightning protection and anti-theft

引用格式：陈天威，杜斌，秦庆明，等. 应用于基站接地系统的铝替铜技术方案研究[J]. 邮电设计技术，2025（8）：87-92.

0 前言

通信基站是移动通信网络中的关键基础设施，担负着用户终端的无线接入与信息传输的作用。截至2024年末，我国基站总数为1 242万个，其中5G基站总数达到425万个。基站的安全运行对整个通信网络的畅通意义重大[1]。完整有效的接地系统是保障基站安全运行的重要措施，其作用主要体现在以下3个方面。

a）电气安全。为了保证电气安全，基站设备必须要求接地，以避免发生电击、火灾危险和设备损坏。

b）防雷。大量基站地理位置较高，易受雷电侵袭，造成设备损坏。接地系统提供了可靠的雷电流泄放渠道以及基础性的等电位平台，确保设备的防雷安全[2]。

c）电磁兼容性。接地系统提供公共的参考电位，

收稿日期：2025-07-10

可减小对敏感的互连的电子及电气系统的干扰。

一直以来，基站设备接地线均采用多股铜芯电缆。由于近年来铜价居高不下，且基站采取无人值守的运行方式，全国大量基站频繁发生接地线被盗的情况，有些基站的接地线刚补充不久又被剪掉，给基站运维工作带来了困扰，也给基站的安全运行埋下了极大的隐患。从现场调研的情况来看，很多基站遭受的雷击损坏和电气失火事故都和基站接地线被盗息息相关。

鉴于上述情况，本文提出了选用更加经济的铝合金接地线替代铜芯接地线的技术方案，对铝合金电缆的技术参数以及在基站应用的适用性进行了研究和论证，并选取了一些基站进行了试点应用，以期为基站接地系统的建设、维护以及相关标准化工作的推进提供技术性参考。

1 基站用接地线类型及影响

采用网状接地结构时，基站机房接地系统示意如图1所示，基站机房的接地主要包括总配电箱和防雷箱的接地、开关电源柜内的直流工作地和保护地、光纤配线架（Optical Distribution Frame，ODF）的光缆加强芯及金属外护层接地、通信设备的保护接地。各接地线连接到环形接地汇集线，汇集线通过接地引下线与接地网相连，形成联合接地，共同构成基站的接地系统[3]，各类接地线用途及故障影响如表1所示。接地系统故障对通信基站的安全运行构成了重大威胁，确保接地系统的完整性意义重大[4]。

2 铝合金接地线的应用及标准现状

采用更加经济且性能相当的材料替代接地铜缆，能够减少接地线被盗的风险。金属铝在地壳中的含量约为8%，我国铝土矿资源丰富，已探明的资源量约占世界总储量的15.1%，铝合金是以铝为基础的合金的总称[5]，包括铜、镁、锌、镍等合金元素。随着铝合金电缆技术的发展，铝合金电缆的性能参数与铜芯电缆更加接近。就导电率而言，铝合金导体的导电率是国际退火铜IACS的62.5%，在机房输电线路中，通常采用导体截面积1.5~2倍的铝合金电缆代替铜芯电缆。铝合金输电线在通信领域中已有应用[6]，然而由于截面积的加大增加了经济成本，增大了线缆支架的压力

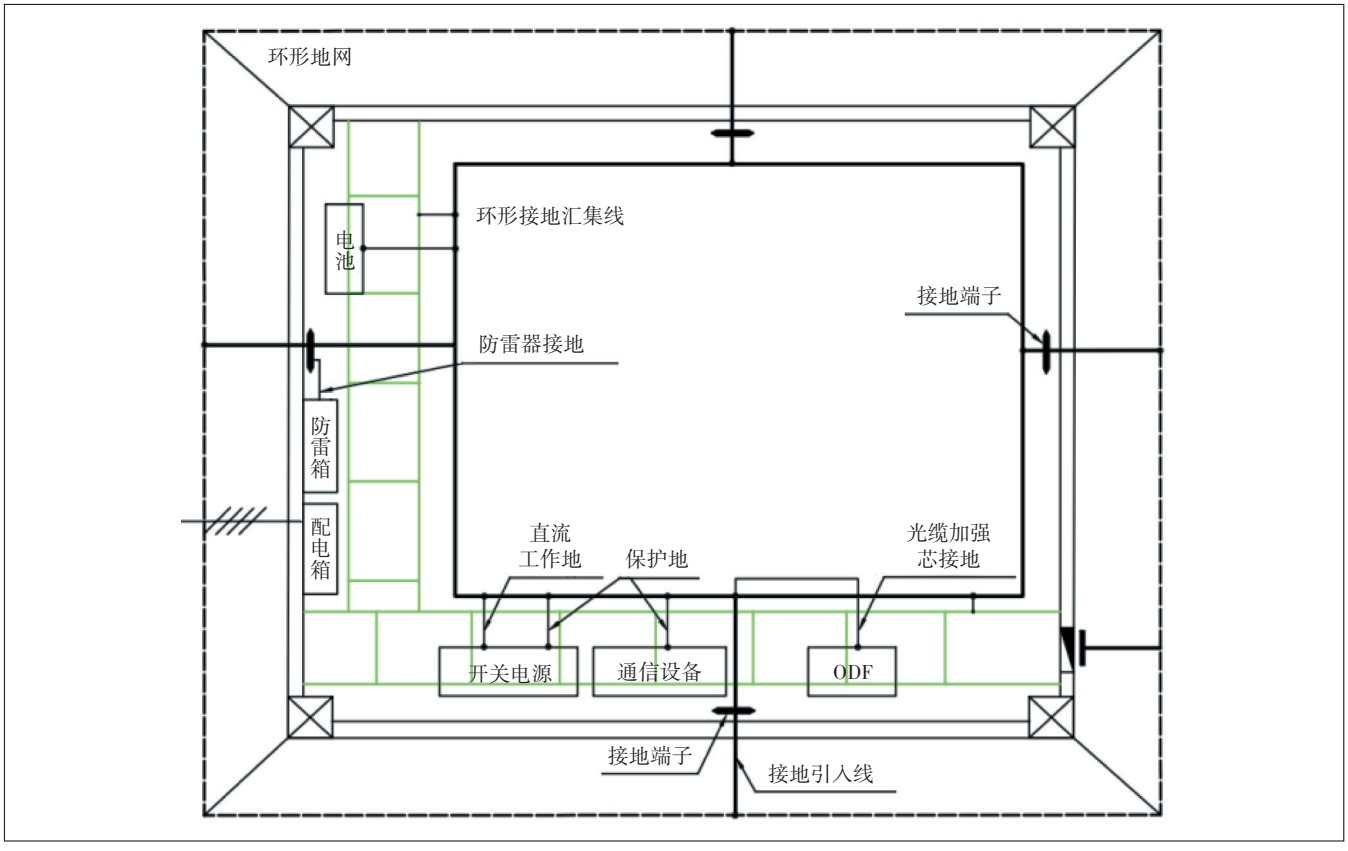

图1 基站机房网状结构接地系统示意

表1　各类接地线用途及故障影响

接地线类型	用途	故障影响（接地线中断或缺失）
接地引入线	连接接地汇流排/汇集线和接地体	机房汇流排/汇集线悬空，所有接地失效，机房设备和人员存在安全风险
防雷器接地线	泄放雷电流，减少瞬态冲击对供电线路和设备的影响	防雷器失效，无法发挥作用，雷电流损坏机房设备，引发火灾
光缆加强芯及金属外护层接地	降低静电干扰、泄放雷电流	雷电流引入机房，引发通信设备损坏和机房起火
直流工作地线	构成直流供电回路、减少通信回路干扰，保障通信设备可靠运行	保护电器无法正常动作，影响直流电源系统的正常运行
保护地线	泄放故障电流，保护人员、保障设备正常运行	故障电流无法正常导出，可能导致人员触电、大规模停电事故

和线缆穿线孔径等，铝合金电缆在机房输电线路中的应用优势不明显。但是接地线在正常情况下不承载电流，仅在出现故障电流或雷电瞬态冲击的情况下，短时承载电流，线缆参数的要求与输电线路不同，因此铝合金电缆在机房接地系统的应用值得进一步研究。

国际标准IEC60364-5-54（对应国家标准GB16895.3）以及国家标准《低压配电设计规范》（GB 50054-2011）允许使用铝导体作为接地线，根据铜、铝导体的特性在截面积的选取上存在差异。但是通信行业标准《通信电源设备安装工程设计规范》（GB 51194-2016）中建议采用多股铜导线作为接地导线，《通信局（站）防雷与接地工程设计规范》（GB 50689-2011）中规定采用铜导线作为接地导线。

3 铜芯电缆与铝合金电缆的对比研究

铜芯电缆在通信机房接地系统中应用广泛，本文从电缆的载流量、机械强度、耐腐蚀性、电阻及电压降、抗浪涌冲击能力等方面，对铝合金电缆和铜芯电缆的性能进行对比。

3.1 电缆载流量对比

载流量是电缆的重要性能指标，电缆的载流量由电缆的材质、截面积和敷设条件3个因素决定[7]，《低压电气装置 第5-52部分：电气设备的选择和安装 布线系统》（GB/T 16895.6-2014）给出了导体的参考载流量。根据机房接地线敷设环境，选择敷设方式F，空气中的绝缘导体与电缆的参考环境温度为30℃，基站ZA-RVV铜芯接地线和某厂家YJLHV铝合金电缆的载流量对比如表2所示。

表2　铜芯电缆和铝合金电缆的载流量对比（敷设方式F）

电缆截面积/mm²	电缆载流量/A	
	铜芯电缆	铝合金电缆
16	92	82
25	120	110
35	147	135
50	182	170
70	223	212
95	267	259
120	308	305

ZA-RVV铜芯电缆的最高允许工作温度为70℃，YJLHV铝合金电缆的最高允许工作温度为90℃，单从载流量对比，铝合金电缆与铜缆相同截面积的载流量差别不大。

3.2 电缆机械性能对比

铝合金电缆在传统铝制电缆的基础上添加多种金属元素，机械性能得到显著提升。在基站低压配电系统中，根据《额定电压0.6/1 kV铝合金导体交联聚乙烯绝缘电缆》（NB/T 42051-2015）和《额定电压1 kV（U_m=1.2 kV）到35 kV（U_m=40.5 kV）挤包绝缘电力电缆及附件 第1部分：额定电压1 kV（U_m=1.2 kV）和3 kV（U_m=3.6 kV）电缆》（GB/T 12706.1-2020）[8]的规定，铝合金电缆的弯曲半径不小于7D（D为电缆外径），单芯铜缆弯曲半径不小于15D，目前多数厂家的铝合金电缆的机械性能优于标准要求。铝合金电缆拥有更好的柔韧性，且铝合金电缆的反弹性能比同等截面积的铜缆小40%，易于安装使用[9]。

3.3 电缆抗腐蚀性对比

铝合金电缆的基础材料是铝，具有金属铝的氧化特性，在空气中氧化会形成致密氧化膜，阻止金属被进一步氧化。通过混合其他元素和合金化处理，有的铝合金电缆中加入了稀土元素，铝合金电缆的耐腐蚀性进一步增强，特别是在含硫环境中，铝合金电缆的抗腐蚀性能远优于铜芯电缆[10]。

3.4 电缆重量及价格对比

铜缆和铝合金电缆的近似外径、重量对比如表3所示。在相同标称截面积下，铝合金电缆的近似外径更小，质量更轻，且有随着截面积增大铝合金与铜缆质量比减小的趋势。在基站机房安装的环境下，采用铝合金电缆更能够减轻走线架的负重[11]。根据厂家

表3 铜缆电缆的近似外径及重量

标称截面积/mm²	近似外径		重量/(kg/km)		铝合金与铜缆质量比
	铜缆	铝合金	铜缆	铝合金	
16	10	10.9	212	102	0.481
25	11.6	12.3	308	143	0.464
35	13.3	13.3	420	181	0.431
50	15.2	14.6	576	239	0.415
70	17.2	16.5	786	312	0.397
95	19.8	18.2	1 032	404	0.391
120	21.4	19.9	1 273	494	0.388

数据，每吨铝合金的价格约为每吨铜价格的40%，在截面积相同的情况下，铝合金电缆的价格优势更为明显。

3.5 电缆电阻及电压降对比

电缆电阻和电压降是电缆的重要参数，电阻过大会导致电缆发热严重，远距离传输电压损失大，电能传输效率低下。基站机房的设备多以直流供电为主[12]，铜缆和铝合金电缆直流电阻和直流电压降的对比如表4所示。

表4 电缆直流电阻及电压降对比

标称截面积/mm²	直流电阻/(Ω/km)		直流电压降/(V•km⁻¹•A⁻¹)	
	铜缆(70℃)	铝合金(90℃)	铜缆	铝合金
16	1.448	2.454	2.896	4.908
25	0.933	1.542	1.867	3.084
35	0.663	1.115	1.326	2.231
50	0.462	0.824	0.924	1.647
70	0.325	0.569	0.651	1.138
95	0.246	0.411	0.493	0.822
120	0.193	0.325	0.385	0.650

从表4可知，铜缆在电阻和直流电压降方面表现出了材料的优越性，铝合金电缆稍显欠缺。在工频负载线路的敷设上，铝合金电缆需要提高截面积等级来达到类似的电阻、电压降性能，需要进一步分析铝合金电缆在基站接地系统的应用。

3.6 电缆抗浪涌冲击测试

基站机房接地线发挥着承载瞬态过电压的功能，在机房遭受雷击或大功率电气设备的投切时，电涌保护器泄放的瞬态过电压通过接地线和地网等装置导入大地，起到保护机房设备的功能。电缆瞬态冲击电压降是衡量电缆抗浪涌冲击能力的重要指标[13]，在遭受浪涌冲击时，由于浪涌冲击电流随时间变化陡度大，电缆因自身电感的存在而产生数值很高的瞬态冲击电压降$U(t)$，使其被保护的电子设备不能耐受，从而损坏电子设备[14]。$U(t)$如式(1)所示。

$$U(t) = L \times (di/dt) \tag{1}$$

目前基站使用的铜缆符合相关标准要求。搭建接地线抗浪涌冲击测试系统，检测铝合金接地线和铜缆接地线的抗浪涌冲击能力。采用8/20冲击电流发生器模拟通信基站遭受的浪涌冲击，对通信基站常用的16 mm²、95 mm²的接地铜缆和铝合金接地线进行冲击测试。测试系统连接示意如图2所示。

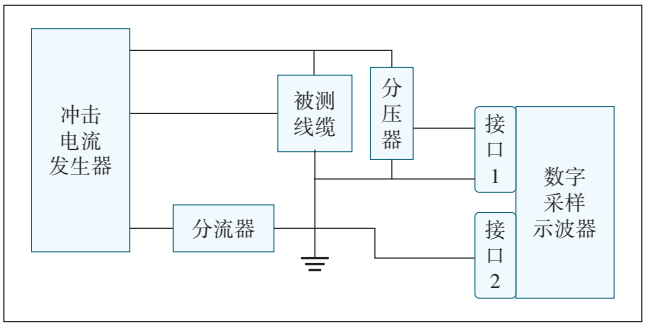

图2 电缆浪涌冲击测试系统连接示意

不同材质和截面积电缆在3、5、10、15、20 kA冲击电流下进行测试，测试结果如图3和图4所示，其中冲击电流-电压降曲线上方数值为铜缆降压降数值，下方数值为铝合金线缆电压降数值。

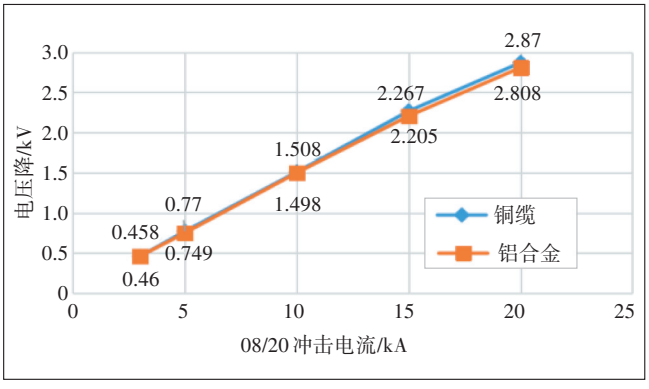

图3 16 mm²线缆浪涌冲击电压降

通过对比分析接地铜缆和铝合金接地线在不同8/20冲击电流下的浪涌冲击电压降，可以看出2种材质的线缆电压降差别较小。

4 铝合金电缆应用于基站环境的适应性评估

通过铝合金电缆与铜芯电缆的性能对比，可以看出铝合金电缆在机械性能、耐腐蚀性、电缆重量及价

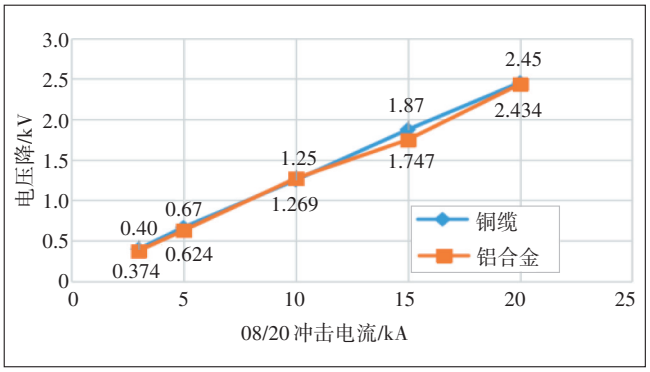

图4　95 mm²线缆浪涌冲击电压降

格等方面表现出优越性，但是铝合金电缆在基站的应用还需要进行进一步的适用性评估。

4.1 铝合金电缆基站故障电路响应评估

基站接地线的一个重要功能是短时承载故障电流、构建故障电流回路，使防护电器能够及时动作，防止电气火灾和电击事故。当基站电源系统故障，产生过载（回路载流量的几倍）、短路（回路载流量的上千倍）等情况时，回路会装设熔断器、断路器之类的防护电器来防范异常电流引起的危害。在电缆载流量方面，铝合金电缆和铜芯电缆性能差别较小，但2种电缆的电阻和电压降有差异（见表4），铝合金接地线替代铜芯接地线应能保证保护电器的正常工作。

以采用TT系统的基站防间接接触电击为例，设备保护接地的接地电阻R_A是影响电源保护装置响应的关键，接地极至设备外露导电部分的电压是施加在人体的预期接触电压。在干燥场合，接触电压限值为50 V[15]，设备故障电流I_d大于保护装置在规定时间切断电源的动作电流，如式（2）所示：

$$I_d = \frac{50}{R_A} \geqslant I_a \tag{2}$$

在潮湿场合，则如式（3）所示：

$$R_A I_a \leqslant 25\,\mathrm{V} \tag{3}$$

其中，R_A为设备保护接地的接地电阻，为接地极电阻与接地线电阻之和，单位为Ω；I_a为保护装置在规定时间切断电源的动作电流，单位为A。

固定式设备和配电线路的切断电源时间为5 s，采用TT系统的基站多采用剩余电流动作保护器（residual current operated protective device，RCD）防止间接接触电击，当常用的额定动作电流I_a为30 mA的RCD时，根据式（2）可得R_A电阻值为1 666 Ω，即额定动作电流I_a为1 A的RCD，R_A电阻值为50 Ω。因此，相较于铜缆接地线，铝合金接地线产生的多余电阻不会对设备故障保护装置的正常工作产生影响。

4.2 铝合金电缆抗化学腐蚀评估

因基站含有铜制接地端子、镀锌扁钢等多种材质的接地连接点，铝合金电缆在应用中会受到连接部位的电化学腐蚀影响。当2种不同电极电位的金属相接触，其间又有水或其他电解质时，2种金属之间就会产生电流，形成一个原电池，其中一种金属处于正电位，另一种处于负电位。处于负电位的金属就不断地以离子状态经电解液向处于正电位的金属聚积，使处于负电位的金属逐渐损失破坏，形成电化学腐蚀[16]。2种金属的电极电位之差越大，电化学腐蚀就越强烈。常见金属的标准电极电位如表5所示。

表5　金属在25℃时的标准电极点位

金属	银（Ag）	铜（Cu）	铅（Pb）	锡（Sn）	铁（Fe）	锌（Zn）	铝（Al）	镁（Mg）	钠（Na）
标准电位/V	+ 0.799	+ 0.337	− 0.126	− 0.136	− 0.440	− 0.763	− 1.662	− 2.363	− 2.714

铜、铝直接接触的电极差为1.999 V，汇流排为铜排，铝合金电缆直接压接，铝将被腐蚀。电化学腐蚀会生成电阻极大的金属化合物，增大接触电阻，增加发热量，会导致电化学腐蚀加剧。为了减少铜铝不同金属直接接触产生的电化学腐蚀，采用DTL型铜铝连接器（见图5），采用专用压接工具连接后的DTL型铜铝连接器如图6所示。铜铝连接器的应用降低了2种金属因连接产生的接触电阻，减少了化学腐蚀。

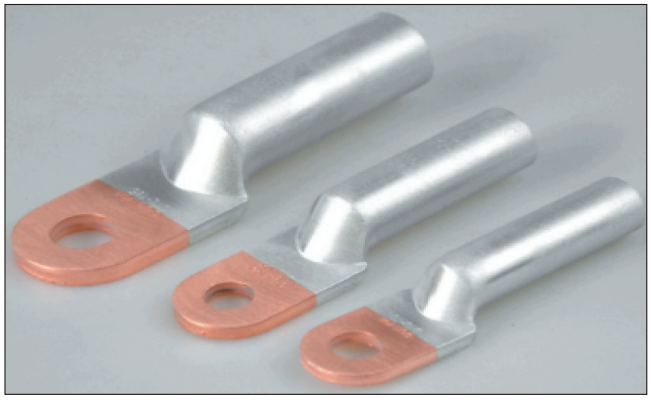

图5　DLT型铜铝连接器

因此，在基站接地系统中，可以使用与铜芯电缆相同截面积的铝合金电缆进行替代，在接地线的连接处，应采用专用的铜铝连接器进行连接。

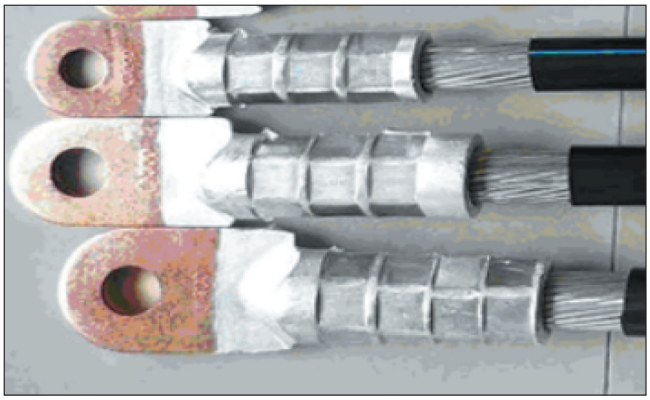

图6 压接连接后的DLT型铜铝连接器

5 铝合金接电线的试点应用

本文选择了84个接地系统被盗且易遭受雷击的典型站点进行了试点。某基站机房铝合金接地线改造的现场照片如图7所示，通过防雷防盗改造，以均压环取代传统汇流排，将与铜缆接地线相同截面积的铝合金电缆应用于基站接地系统。改造的站点运行时间超过一年，期间基站电源和接地系统运行正常，未再发生被盗现象，也未发生雷击损坏现象，初步验证了铝合金接地线的可靠性。

(a)铝合金接地引下线 (b)铝合金设备接地线

图7 铝合金接地线的现场应用

6 总结

通过上述对比研究及试点应用，铝合金接地线具备与铜缆接地线相似的性能，对于负荷较小、系统相对简单的基站应用环境而言，能够满足各类需求。而通过铝合金接地线替代铜缆接地线，从根本上解决了接地线频繁被盗的问题，具有良好的应用前景和经济效益。下一步项目组也将尽快推进相关技术要求的标准化工作，使其在基站工程建设及防雷防盗整治中得到更为广泛的应用，切实有效地提升基站的安全运行水平。

参考文献：

[1] 祁征，胡煜华，陈强，等. 通信基站防雷检测关键问题及接地要点分析[J]. 邮电设计技术，2020(10)：83-87.
[2] 陈强，唐余兵，刘吉克，等. “隔离+浮地”防雷新技术在小型通信设施的应用[J]. 邮电设技术，2019(12)：74-78.
[3] 牛年增，陈强. 临近基站民房雷击事故分析[J]. 邮电设计技术，2014(6)：84-86.
[4] 刘蕊，齐道坤，莫娟，等. 共享铁塔防雷接地可靠性研究[J]. 电瓷避雷器，2021(6)：125-132.
[5] 梁文娟. 铝合金电缆在工程中的应用探讨[J]. 轻金属，2016(7)：56-59.
[6] 陈迪，李成栋，赵晓冬. 铝合金在电力传输领域的研究及应用[J]. 材料导报，2013，27(15)：145-148.
[7] 马铂浩. 平价上网时代光伏项目铝合金电缆的应用建议[J]. 电工技术，2021(7)：91-93，97.
[8] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 额定电压1kV(Um=1.2kV)到35kV(Um=40.5kV)挤包绝缘电力电缆及附件 第1部分：额定电压1kV(Um=1.2kV)和3kV(Um=3.6kV)电缆：GB/T 12706.1-2020[S]. 北京：中国标准出版社，2020.
[9] 刘皞，张鹏，李书森，等. 通信工程电力电缆施工问题探讨[J]. 邮电设计技术，2023(6)：89-92.
[10] 侯帅，傅明利，黎小林，等. 220kV交联聚乙烯电缆绝缘料性能对比研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(6)：2483-2495.
[11] 濮星海，王飞，张正东. 建筑电气设备接地的安装调试与检修[J]. 工业建筑，2023，53(6)：18.
[12] 马文生，关强华，黄建华. 通信局站等电位连接系统详解[J]. 广东通信技术，2019，39(8)：59-64.
[13] 巩汉春，王炳华，张新. 无线通信设备接地和屏蔽方案[J]. 通信电源技术，2021，38(2)：199-202.
[14] 张蒙，徐利军. 通信综合楼防雷与接地案例分析[J]. 邮电设计技术，2019(2)：90-92.
[15] 王厚余. 低压电气装置的设计安装和检验[M]. 北京：中国电力出版社，2012.
[16] 李燕，赖云亭，张忠伟，等. 电机铜铝接线端子失效机理[J]. 焊接，2023(8)：55-59.

作者简介：
陈天威，助理工程师，硕士，主要从事通信系统防雷、电磁防护相关研究及咨询工作；杜斌，高级工程师，硕士，主要从事通信系统研究、通信设施安全和防护工作；秦庆明，工程师，学士，主要从事通信传输、通信设施运行和防护工作；陈强，教授级高级工程师，学士，主要从事通信防护、防雷及电磁兼容相关的咨询、设计、检测及研究工作；杭一帆，工程师，硕士，主要从事通信局站防雷防护工作。