

机场接地系统铜扁带折弯施工技术应用研究

完颜晖

(中交一公局电气化工程有限公司, 北京 100000)

摘要 针对大型基础设施项目中接地铜扁带折弯作业存在的效率低、精度差等问题, 本文提出一种适用于机场电气工程的铜扁带机械折弯施工工法。该方法基于杠杆—碾压复合结构设计, 配套使用自主开发的折弯设备, 形成标准化、模块化的施工流程。通过工程实例验证, 系统建立了设备安装参数、操作步骤、角度控制与质量检测等一体化工序体系, 结合现场数据分析其经济性与工程适配性。研究结果表明, 该工法在结构设计、施工组织与成型精度方面具有良好的适应能力, 可为复杂场景下的接地系统建设提供新型技术参考。

关键词 机场工程; 接地系统; 铜扁带

中图分类号: V35

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.019

0 引言

在现代机场建设中, 接地系统是保障电气安全和设备稳定运行的基础设施, 它的施工质量直接影响整个机电系统的运行可靠性。铜扁带因为导电性能好、耐腐蚀, 在机场接地工程中得到广泛应用。但是, 由于建筑结构复杂, 布线路径老变, 因此施工时铜扁带经常需做多角度、高精度的水平折弯。传统手工折弯效率不高, 效果不佳, 很难满足大规模工程对质量和进度的要求^[1]。基于此, 本文以乌干达恩德培国际机场改扩建项目为例, 研究铜扁带折弯施工工法的应用, 系统分析它的工艺原理、施工流程、质量控制办法和实际效益, 为类似工程提供可以参考的技术路径和现场管理方案。

1 工程概况

乌干达恩德培国际机场改扩建工程由中交一公局电气化工程有限公司负责建设, 接地系统用了总长大概 10 000 m、规格 40×4 mm 的紫铜扁带, 覆盖航站楼、指廊与附属设施。工程布线密, 铜扁带要在结构转角、设备接地引出这些地方做水平折弯, 折弯的地方超过 480 处, 常见角度在 30° 到 120° 之间, 有些地方间距不到 1 m。铜带敷设需满足电气连续性、形变控制和施工精度等要求, 施工时和土建预埋、弱电及动力管线交叉很多, 作业环境复杂, 对成型质量和定位精度要求很高。为保证后续系统联通性和接地电阻控制效果, 现场对铜带敷设路径、折弯节点布局以及设备接口坐标进行了精细建模和预先校核, 确保所有铜带段连接可靠, 弯折角平顺, 既符合电气规范, 又能够保证运行可靠。

2 机场接地系统铜扁带折弯施工

2.1 工艺原理

铜扁带折弯施工是按照机械碾压的原理进行的, 通过杠杆机构把一定角度的位移变成对铜带的定向碾压形变, 实现高精度、能控制角度的冷态折弯。采用的折弯装置中, “F”型活动拉杆和圆盘中心连在一起, 形成可以调节的力臂; 钢制碾压套筒直接和铜扁带接触, 转动的时候就能让铜带弯折^[2]。在铜带不断开的情况下完成局部弯曲, 避免应力集中或者材料疲劳失效, 满足接地系统在电气和机械规范下的敷设要求。

2.2 工艺流程及操作要点

2.2.1 工艺流程

铜扁带折弯施工严格按照标准化流程执行, 保证每道工序都有明确的控制节点和质量闭环机制。整体施工流程见图 1。

2.2.2 操作要点

1. 材料准备。铜扁带为 40×4 mm 规格的紫铜制品, 符合《电工用铜、铝及其合金母线第 1 部分: 铜和铜合金母线》(GB/T 5585.1-2018) 标准。材料进场前要进行外观检验和导电性抽检, 确保没有裂边、氧化皮和弯曲变形。配套施工材料有最小刻度 1° 的定位量尺、耐磨绝缘手套、记号笔以及标识夹具^[3]。设备方面要准备好完整的铜扁带折弯机、角度测量装置和润滑组件。

2. 折弯设备安装。安装时, 把底座和操作平台固定紧, 保持水平稳定, 用地锚螺栓防止滑动。固定杆和圆盘焊接牢固, 保证扭矩传递一致; 再把活动拉杆穿进中心轴套, 用插销限位固定。碾压套筒要套在拉杆前端, 轴套用高强度碳钢材料, 其耐压性能较好。设备全部连好后, 要空转一圈, 检查是否有卡阻、偏

心或者轴向间隙，最后在转轴、轴承接口加润滑脂，降低工作时的摩擦阻力和振动影响。

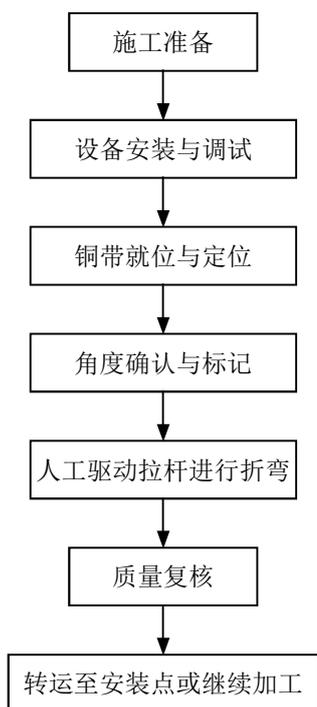


图1 施工流程图

3. 工位布置要求。施工工位要选地势平整、无遮挡的地方，设一个至少 2.5×2.5 m的操作区。操作人员两侧要留1.5 m以上的安全缓冲带，方便操作臂旋转。操作台面要放软质防滑垫，防止铜扁带被划伤。为保证施工安全，作业区域周边要设安全警戒线、警示标志和临时照明。

4. 折弯操作步骤。把要加工的铜扁带插进圆盘卡槽，铜带要紧紧贴着卡槽内壁，别松动位移。按照设计图纸要求，用角度量尺在铜带表面标折弯线，对照设备上的角度标尺先定位。操作人员将活动拉杆慢慢向上拉，通过杠杆原理带动钢制碾压套筒以弧形路径碾压铜带表面，铜带就会塑性变形，折弯成需要的角度。在整个折弯过程中，拉杆牵引速度需保持均匀，避免瞬时冲击使铜带局部受力不均。碾压完后，松开拉杆让设备自己回位^[4]。

5. 成型质量验收。折弯完成后，及时检查角度和平整度。用精密角度尺测折弯角度，偏差不能超过正负 2° 。若铜带折弯点有明显波纹、扭曲或者横向凹陷，则不合格，需返工重做。为保证电气连续性，随机抽至少5%的成型铜带测电阻值，检测点在折弯段两侧100 mm的地方，电阻值不能超过直线段均值的110%。同时，操作人员要填每日施工记录单，记折弯数量、折弯角

度、检验结果和处理情况，交给工区质检员签字存档。

6. 转运与堆放管理。检验合格的铜扁带要按分区编号捆好，搬运时用缓冲衬垫，防止折弯部位被压坏。运输用防静电推车，不能和其他金属构件硬接触。堆放时把折弯方向朝上，底部铺木板防潮，存放环境要干燥通风。暂时不用的铜扁带，要每周盘点和复检，保证一直符合使用要求。

3 机场接地系统铜扁带折弯施工质量控制

铜扁带折弯工序作为接地系统施工中的关键节点，其质量直接关系到整体电气系统的导通稳定性与接地可靠性。为确保成型质量符合《电气装置安装工程接地装置施工及验收规范》(GB 50169-2016)要求，施工管理团队通过组织管理与技术手段双线并行，构建全过程质量控制体系，从源头预控、过程管控至结果验收，形成闭环控制机制。

3.1 组织保证措施

1. 建立质量控制责任体系。项目部成立了由项目总工牵头的质量管理专组，包括施工、质检、技术、安全等岗位的人员，明确各自职责，实行“分级负责、全过程监管”的管理模式。折弯工序归到接地子系统质量专项，指定专业技术人员每天负责工艺指导和质量巡检。

2. 细化作业任务包分解机制。结合图纸设计和现场布线实际情况，把所有折弯点按区域、角度和难度系数分成作业单元，用“班组+工序长”承包机制，把每班次的施工目标和质量指标量化，建立质量和进度同步控制的目标导向体系^[5]。

3. 执行三级检验制度。每道折弯工序要经过施工人员自检、工区技术员专检和项目部质检复核，三级验收一个都不能少。不合格的工序实行“挂牌返修”制度，返修后要重新验收，记在质量追踪卡上，保证问题能追溯，责任能查到。

4. 实施质量考核与奖惩机制。项目部把折弯工艺质量作为专项考核指标，纳入月度绩效考评体系中，质量好的奖励，频繁返工的限期整顿。因质量问题导致工期滞后、材料浪费的责任人，按项目施工管理规定追究责任。

3.2 技术保证措施

1. 标准化作业参数控制。所有铜扁带折弯作业都要按照技术交底文件明确折弯角度、公差范围和操作路径。折弯角度控制精度是 $\pm 2^\circ$ ，表面不能有裂纹、凹痕和明显塑性回弹。设备调试时要先做样品预制，实测合格后才能批量作业。

2. 折弯设备精准标定与维护。施工前由专人校准

折弯机，重点检查卡槽中心对称性、转轴灵活度和角度标尺零点偏移量。每完成 50 次折弯操作，要检查一次和给轴承润滑，防止设备疲劳导致角度误差。

3. 引入角度辅助校准系统。铜带折弯时，同时用活动角尺和定位夹具控制复位精度。对于特殊角度（比如大于等于 120° 的缓弯段），加限位垫片当辅助定位基准，保证角度一致，减少人为误差。

4. 构建折弯质量数据库。每一批铜扁带折弯作业都要编号记录，收集成型角度、加工时间、作业班组、验收结果等关键参数，形成电子数据库。用数据分析方法评估不同作业模式下的成品合格率，为后续工艺改进和风险预判提供依据。

5. 加强关键岗位技术培训。对所有参与折弯作业的施工人员组织专项技术培训和实操考核，内容包括力臂控制、角度读数、设备使用、安全防护等。考核合格才能上岗，将培训合格率和作业返修率进行对比分析，作为技术质量联动指标。

4 机场接地系统铜扁带折弯施工效益分析

为验证机场接地系统铜扁带折弯工法在实际工程中的应用效果，项目部选乌干达恩德培机场主航站楼和动力中心区域的 8 个施工分区作为样本区，对比用该工法前后的施工效率、人工成本、成品合格率等核心指标，对比其在工程建设中的经济和社会效益，如表 1 所示。

表 1 不同折弯施工方式的关键指标对比

指标项目	传统手工折弯方式	铜扁带折弯施工方式	提升幅度
单点平均折弯时间 (s)	185.4	38.7	↓ 79.1%
每日平均成型数量 (处)	62	298	↑ 380.6%
折弯角度合格率	91.20%	98.60%	↑ 8.1%
成型段电阻偏差控制率	86.50%	97.40%	↑ 12.6%
每百米人工成本(元)	147.8	62.3	↓ 57.9%
每百米返工率	9.40%	1.80%	↓ 80.9%

(注：数据来自现场记录、质检台账和进度控制系统自动生成的结果。)

1. 社会效益。项目数据显示，成型段的角度偏差和电阻控制都比传统方式好很多，明显降低了因为折弯缺陷引起的电气事故风险。另外，该工法无需依赖电力系统，操作方便，适应性强，适合机场、铁路、电厂等工程推广。通过标准化作业模板和全过程数据记录机制，为行业提供了可以复制、量化的现场工艺

管理模式，具有较好的行业示范作用。

2. 经济效益。从施工效率和成本控制来看，该工法明显缩短了单位工作量的时间，单点加工周期压缩了近 80%，返工率下降了 80.9%。在总施工铜带长度约 10 000 m、有折弯点约 5 000 处的实际应用中，保守估计节省人工工时超过 1 200 h，节约直接人工费用约 6.8 万元，减少间接材料浪费约 1.5 万元，总共经济效益接近 8.3 万元。

5 结束语

本文围绕机场接地系统铜扁带折弯施工过程中的关键技术问题，系统阐述了一种基于机械杠杆原理的折弯工法在乌干达恩德培机场工程中的实际应用。通过对工艺原理、施工流程、设备结构与质量控制措施的全面解析，结合现场应用数据，验证了该工法在提高折弯效率、保障施工质量、降低人工成本等方面的显著优势。研究结果表明，该工法具备结构简洁、适应性强、工艺稳定等特点，适合在机场及类似大体量机电工程中推广应用。随着施工装备标准化和现场数据闭环管理的持续优化，该技术体系将在提升电气安装工程现代化水平方面发挥更大作用。

参考文献：

[1] 韩兆儒,石访,靳宗帅,等.基于同步李萨如曲线的免整定高阻接地故障选线及区段定位方法[J/OL].电网技术,1-16[2025-05-26].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLlloKm75-WdNyW6SKg6jCdas5AFYFRGaQkuqUOWtfa5EDtGgAO6P9K3ZXqpyKCouQ-PVt0J05GXKobIU6-zXKrRNuIqZRwHaxCmOZJJSdRaMTj6QDuJ0On2xgpwXh8Wf9it_A6Neeg3YM4hTAoOTS6IEdgsdHhTb13uARqEirVb0rg==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[2] 孙中玉,徐丙垠,王伟,等.基于剩余电流时域参数向量的低压中性线多接地系统接地故障检测方法[J/OL].电网技术,1-15[2025-05-26].https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=X84Xx1LLlloKso3IHwRtj14d1e2C3D3pp-EN5lnG2TVI1UzDOyDDw08mSWF84ZjY7aVmKQaEU8XyYj-s58_QE_l-kMvt7JbjfPWZjMqsjzbSirLs8iFFhpPwNlq0kfXNZaXxPhm8-egZLKOBDcCfK3Q_2bfKXr5k_c8hxcxjawbfniXAzBqd1OQ==&uniplatform=NZKPT&language=CHS.

[3] 魏征,高丽娜.从贝宁波多诺伏新议会大厦项目设计浅谈法国标准下防雷接地系统设计要点[J].智能建筑电气技术,2023,17(01):36-41,45.

[4] 杜倩倩.机场通信导航台站接地技术与方法研究[J].数字通信世界,2021(05):116-117.

[5] 张晨曦.民用机场远机位机坪照明与供电接地系统设计探讨[J].现代建筑电气,2021,12(03):50-54,68.