



团 体 标 准

T/CES XXX-XXXX

变电站带电拆接引流导线机器人通用技 术条件

General technical specifications for live-line jumper lead disconnection and
connection robot in substation

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国电工技术学会 发布

目 次

目 次.....	II
前 言.....	III
引 言.....	IV
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
4 系统组成.....	2
5 技术要求.....	2
5.1 功能要求.....	2
5.2 性能要求.....	3
5.3 环境适应性.....	4
5.4 保护要求.....	4
6 试验方法.....	5
6.1 功能试验.....	5
6.2 性能试验.....	5
6.3 环境适应性测试.....	6
6.4 安全监控与保护测试.....	6
7 试验规则.....	6
7.1 试验项目.....	6
7.2 出厂试验.....	7
7.3 型式试验.....	7
8 产品要求.....	8
8.1 标志.....	8
8.2 包装.....	8
8.3 运输.....	8
8.4 贮存.....	8
附 录 A（规范性） 试验方法.....	9

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》给出的规则起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本文件由中国电工技术学会提出。

本文件由中国电工技术学会标准工作委员会带电作业与智能运检工作组归口。

本文件起草单位：湖南大学、广东电网有限责任公司电力科学研究院、广东电网有限责任公司肇庆供电局、湖南中联重科智能高空作业机械有限公司、许继三铃专用汽车有限公司、厦门大学。

本文件主要起草人：张小刚、李端姣、邸龙、张英、李哲、方遒、何家祺、黄汉生、黄乃为、袁小芳、高常青、陈芊宇、陈凯、李育、孙鹏程、李居义、王迎、刘鸿、伍旭翔、梁炳钧、吴思远、刘爽、李昌煜、岳晓、黎佳乐、夏天元、刘瞰东；

本文件为首次发布。

引 言

随着变电站运维向智能化升级，传统人工进行带电拆接引流导线作业，存在安全风险高、作业一致性不足等问题。变电站带电拆接引流导线机器人的应用，可有效化解这些痛点，保障作业安全与效率。为规范该类机器人的技术指标、试验方法及应用要求，确保其在变电站场景中稳定可靠运行，特编制本文件。

变电站带电拆接引流导线机器人通用技术条件

1 范围

本文件规定了变电站带电拆接引流导线机器人的术语与定义、系统组成、技术要求、试验方法、试验规则、产品要求，并在附录 A 中具体描述了相应的试验方法。

本文件适用于变电站带电拆接引流导线机器人的设计、检测、使用和管理。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 191-2008	包装储运图示标志
GB/T 2423.1	电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 A:低温
GB/T 2423.2	电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 B:高温
GB/T 2423.3	电工电子产品环境试验 第 2 部分:试验方法 试验 Cab:恒定湿热试验
GB/T 2900.19	电工术语 高电压试验技术和绝缘配合
GB/T 2900.55	电工术语 带电作业
GB/T 4208-2017	外壳防护等级（IP 代码）
GB/T 9174-2008	一般货物运输包装通用技术条件
GB/T 9465-2018	高空作业车
GB/T 9969	工业产品使用说明书 总则
GB/T 13306	标牌
GB/T 16927.3-2010	高电压试验技术 第 3 部分：现场试验的定义及要求
GB/T 17626.2	电磁兼容试验和测量技术 静电放电抗扰度试验
GB/T 17626.3	电磁兼容试验和测量技术 射频电磁场辐射抗扰度试验
GB/T 17626.8	电磁兼容试验和测量技术 工频磁场抗扰度试验
GB/T 18037-2008	带电作业工具基本技术要求与设计导则
GB/T 39586-2020	电力机器人术语

3 术语和定义

GB/T 2900.19、GB/T 2900.55、GB/T 39586-2020 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

带电拆接 live-line disconnection and reconnection

机器人在进行引流导线拆接时，母线与引流导线为通电状态。

3.2

母线 busbar

在变电站中汇集和分配电能的导体，通常为矩形或管状，用于连接多条线路或多个电气设备。

3.3

引流导线 jumper conductor

用于连接母线与电气设备端子，或跨接不同电气设备以保证电气连续性的柔性导体，通常呈弧形布置以满足安装和运行的机械、电气要求。

3.4

视觉识别 visual perception

机器人通过图像传感器获取作业环境信息，并利用算法对目标（如螺栓、线夹）的位置、姿态和形状进行识别与定位的过程。

3.5

等电位连接 equipotential bonding

机器人与带电部位保持电气连接，而与周围不同电位适当隔离。

3.6

带电拆接引流导线消弧 arc suppression during live-line disconnection and reconnection

指机器人在带电条件下进行引流导线与母线的开断或闭合操作时，采用专用装置或措施（如快速接地旁路、真空灭弧、阻容吸收或磁吹等）在电弧初期迅速抑制并熄灭电弧的过程。其目的在于避免电弧持续燃烧引发过电压、设备损坏或二次击穿，保证带电作业安全与设备可靠运行。

3.7

末端执行器 end-effector

安装在机器人手臂末端，直接执行特定工作任务的装置。根据作业需求，作业末端可以设计成手爪、专用工具（如螺栓拧紧枪、打磨工具）等多种形式，并可通过快换装置进行更换。

3.8

力反馈控制 force feedback control

一种控制策略，机器人通过力/力矩传感器实时测量作业末端与作业对象之间的接触力与力矩，并将这些信息作为反馈信号，用于调节机器人的运动输出。该策略可以主动、柔顺地控制接触力的大小和方向，以完成拧紧螺栓等精密操作。

3.9

绝缘臂架 insulating elevated device

由转台回转机构、升降或伸缩机构、绝缘装置等组成，安装在电力作业机器人本体上，可通过伸缩、回转、俯仰等运动，实现作业工具或末端执行器在作业空间内举升与定位，帮助机器人快速完成等电位连接。

3.10

支腿 outrigger

安装在电力作业机器人本体底盘机构上的，可相对本体展开或收回，并在展开后与地面接触，将机器人自重及作业载荷传递至地面，以提高整机稳定性的结构部件。

3.11

底盘移动机构 undercarriage travel mechanism

能够使机器人具备地面移动能力的履带或轮式等机械动力机构，能够适应变电站的场地环境。

3.12

等电位作业平台 equipotential live working platform

一种加装在绝缘臂架末端，能够进行各种引流线等电位操作的无人作业平台，通常由末端机械执行机构、视觉传感器、力觉传感器、平台控制器等组成。

4 系统组成

机器人系统由机器人本体、控制系统和遥操系统等组成，必要时可包括辅助作业设备。

- a) 机器人本体：包括底盘移动机构、绝缘臂架结构、等电位作业平台及支撑装置等；
- b) 控制系统：包括地盘移动机构、绝缘臂架及等电位作业平台作业控制系统；
- c) 遥操系统：包括地面监控系统，通过无线连接控制器来实现对机器人的状态监控和遥操作；
- d) 辅助设备：根据作业需求，可配置其他辅助装置。

5 技术要求

5.1 功能要求

5.1.1 遥操作功能

机器人应具备遥操作功能，其应满足如下条件：

- a) 应具备远程操控能力，操作人员可通过远程操作端控制机器人的运动状态；
- b) 应支持在遥操作模式下完成等电位连接、螺栓拆装等作业。

5.1.2 行进功能

机器人底盘移动机构应满足如下条件：

- a) 应能在水泥路面、泥土路面、石子路面等典型变电站地面条件下稳定行进，并具备起步、直线行进、转向及爬坡等功能；
- b) 在额定载荷条件下，应能连续完成行进作业，行进过程中不应出现打滑、跑偏或失控现象；
- c) 行进过程中应运行平稳，车体横滚角和俯仰角不应超过 15° ；
- d) 应具备爬坡能力，在坡度为 25%（约 14° ）的坡道上应能正常前进和后退行驶；
- e) 应具备坡道制动能力，在坡道制动过程中，位移量不应大于 100 mm，或不应发生明显溜坡现象；
- f) 宜能在遥操作控制下实现启动、转向及停止等基本运动控制。

5.1.3 升降功能

机器人举升功能应满足如下条件：

- a) 应具有对地绝缘作用并能可靠支撑等电位作业平台进行升降；
- b) 应能在作业升降过程中始终保持绝缘臂架或等电位作业平台处于安全绝缘距离内，并设有防撞装置。

5.1.4 平台稳定功能

机器人应具有能承载机器人工作时作业支撑力的可伸缩支腿，能控制支腿的伸缩状态，调节支腿工作姿态，在多种地形上保持等电位作业平台相对地面的水平及作业过程的稳定。

5.1.5 等电位连接功能

等电位作业平台应具备母线位置识别与定位能力，能够完成与母线的等电位连接操作，并在作业过程中保持与母线等电位，确保作业安全可靠。

5.1.6 拆装螺栓功能

机器人拆装螺栓功能应满足如下条件：

- a) 应能通过视觉识别定位并对准多规格的螺栓与螺母；
- b) 应具备对螺栓进行拆卸与安装作业的能力；
- c) 宜具备力反馈控制功能，在紧固和拆卸过程中实时反馈末端受力情况，并用于辅助控制拆装过程。

5.1.7 打磨引流线夹功能

机器人打磨引流线夹功能应满足如下条件：

- a) 应能打磨处理线夹表面氧化层，确保电气接触面的导电性能；
- b) 应能远程控制打磨工具的启停。

5.1.8 消弧功能

机器人应具备带电拆接引流导线消弧能力，在引流导线接触母线以及脱离母线过程中，应能抑制并熄灭可能产生的电弧，防止电弧对设备、人员及系统造成冲击。防止电弧对设备、人员及系统造成冲击。

5.2 性能要求

5.2.1 运动性能

运动性能要求如下：

- a) 额定行走速度 ≥ 1 m/s；
- b) 运动续航时间 ≥ 1 h。

5.2.2 整机外壳防护性能

整机防护等级应不低于 IP54，符合 GB/T 4208-2017 的要求，保证灰尘侵入量不影响设备正常运行。

5.2.3 电磁兼容性能

- a) 等电位作业平台宜参照 GB/T 17626.2 的相关规定进行静电放电抗扰度试验，其抗扰度水平应满足 220 kV 带电环境下的电磁防护要求，确保在执行带电作业任务时，各项功能保持正常。
- b) 等电位作业平台宜参照 GB/T 17626.3 的规定进行射频电磁场辐射抗扰度试验，试验应覆盖带电作业现场常见的电磁频率范围，试验结果应证实等电位作业平台具备足够的电磁环境适应能力，能支撑等电位作业平台在 220 kV 条件下进行带电拆接引流导线作业。
- c) 等电位作业平台宜参照 GB/T 17626.8 的规定进行工频磁场抗扰度试验，通过施加符合带电作业现场工况的磁场强度，验证设备在工频磁场干扰下的可靠性，保证等电位作业平台在 220 kV 条件下能进行带电拆接引流导线作业。

5.2.4 绝缘臂架防护性能

绝缘臂架的绝缘防护性能应满足 GB/T 9465-2018 中的绝缘要求，有效绝缘长度 ≥ 3 m，保证机器人能进行 220 kV 引流线带电作业。

5.2.5 举升高度

支撑装置及绝缘臂架可以稳定支撑等电位作业平台的最大平台高度 ≥ 10 m，大于待作业引流线高度。

5.2.6 作业平台稳定性

等电位作业平台进行作业时，由于引流导线负载等因素引起的等电位作业平台的倾角误差在 $\pm 5^\circ$ 的范围内。

5.2.7 拆装扭矩

最大输出扭矩 ≥ 100 N·m，能够有效拆装 M12~M16 规格的标准螺栓。

5.2.8 操作精度与响应时间

操作精度与响应时间要求如下：

- a) 操作精度应优于 ± 2 mm，能够有效对准 M12~M16 规格的标准螺栓；
- b) 机械臂视觉反馈与执行的响应时间 ≤ 500 ms，保证作业操作实时性，缩短作业时间。

5.3 环境适应性

5.3.1 运行环境

机器人应能在以下环境条件下正常工作：

- a) 环境温度: $-10^\circ\text{C}\sim 45^\circ\text{C}$ ；
- b) 环境相对湿度: 5%~65%；
- c) 风速: < 3.3 m/s。

5.3.2 高低温运行与存储

机器人在经 $(-10\pm 2)^\circ\text{C}$ 、 $(45\pm 2)^\circ\text{C}$ 各 2h 运行试验及 $(-15\pm 2)^\circ\text{C}$ 、 $(50\pm 2)^\circ\text{C}$ 各 2h 储存试验（全程湿度 $\leq 65\%$ RH）后，试验样品的外观、性能与试验前相比，应无明显损伤和变化，能正常工作。

5.4 保护要求

5.4.1 意外情况保护

机器人在作业过程中，应具备防跌落能力；机器人意外断电导致无法运行时，应能立即启动保护性停止。

5.4.2 运行日志记录

应具备实时记录机器人运行状态日志且支持实时调取的功能。

6 试验方法

6.1 功能试验

6.1.1 遥操作功能试验

遥操作功能试验应在安全距离外进行。试验时，操作人员通过遥操系统分别发送行进、停止、转向、臂架动作、末端执行器动作等控制指令，观察机器人是否按指令完成相应动作。试验过程中应检查遥操作画面、控制响应和通信状态等。试验结果应符合 5.1.1 的规定。

6.1.2 行进功能试验

行进功能试验应按照附录 A 中的 A.1.1 规定的方法和要求进行。

6.1.3 举升功能试验

绝缘升降及臂架支撑试验步骤如下：

- a) 将机器人设置于模拟高空作业平台环境；
- b) 检查升降臂架的绝缘性能和支撑能力；
- c) 在不同高度和不同负载条件下进行升降操作；
- d) 升降过程中始终保持绝缘臂架或等电位作业平台处于安全绝缘距离内并能避免碰撞；
- e) 不同工况下的试验结果应符合 5.1.3 的规定。

6.1.4 平台稳定性试验

等电位作业平台稳定性功能试验应按照附录 A 中的 A.1.2 规定的方法和要求进行。

6.1.5 等电位连接试验

等电位连接试验应按照附录 A 中 A.1.3 规定的方法和要求进行。

6.1.6 拆装螺栓作业试验

拆装螺栓作业试验应按照附录 A 中的 A.1.4 规定的方法和要求进行。

6.1.7 打磨引流线夹试验

打磨引流线夹试验应按照附录 A 中的 A.1.5 规定的方法和要求进行。

6.1.8 消弧试验

消弧试验应按照附录 A 中的 A.1.6 规定的方法和要求进行。

6.2 性能试验

6.2.1 运动性能试验

运动性能试验应按照附录 A 中 A.2.1 规定的方法和要求进行。

6.2.2 整机外壳防护试验

宜参照 GB/T 4208-2017 的相关要求，对整机防护能力进行评估与试验，应满足 5.2.2 的要求；

6.2.3 电磁兼容试验

- a) 宜参照 GB/T 17626.2 规定的实验方法，对等电位作业平台进行静电放电抗扰度试验；试验期间及试验后，应能正常工作，应满足 5.2.3 的要求；
- b) 宜参照 GB/T 17626.3 规定的试验方法，对等电位作业平台进行射频电磁场辐射抗扰度试验；试验期间及试验后，应能正常工作，应满足 5.2.3 的要求；

- c) 宜参照 GB/T 17626.8 规定的试验方法, 对等电位作业平台进行工频磁场抗扰度试验; 试验期间及试验后, 应能正常工作, 应满足 5.2.3 的要求。

6.2.4 绝缘臂架防护试验

绝缘臂架防护试验应按照附录 A 中 A.2.2 规定的方法和要求进行。

6.2.5 举升高度试验

举升高度试验应按照附录 A 中的 A.2.3 规定的方法和要求进行。

6.2.6 平台稳定性试验

等电位作业平台稳定性试验应按照附录 A 中的 A.2.4 规定的方法和要求进行。

6.2.7 拆装扭矩试验

拆装扭矩试验应按照附录 A 中的 A.2.5 规定的方法和要求进行。

6.2.8 操作精度与响应时间测试

操作精度与响应时间测试应按照附录 A 中的 A.2.6 规定的方法和要求进行, 应满足 5.2.8 的要求。

6.3 环境适应性测试

6.3.1 运行环境适应性测试

机器人运行环境适应性测试步骤如下:

- a) 在环境温度为 $-10^{\circ}\text{C}\sim 45^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度为 5%~65% 的条件下, 对试验样品进行通电运行试验;
- b) 在试验环境中, 启动机器人, 执行行进、举升、平台稳定、等电位连接及末端作业等基本功能操作;
- c) 在试验过程中, 检查机器人运行状态、控制响应、结构稳定性及功能完整性。
- d) 试验结束后, 对试验样品进行外观检查和性能检查, 其结果应符合 5.3.1 的规定。

6.3.2 高低温运行与存储测试

高低温运行与存储测试方法如下:

- a) 按 GB/T 2423.1 和 GB/T 2423.2 规定的方法, 对试验样品分别进行低温运行、高温运行试验, 运行条件为 $(-10\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 和 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$, 每种工况运行时间不少于 2 h;
- b) 按 GB/T 2423.1 和 GB/T 2423.2 规定的方法, 对试验样品分别进行低温存储和高温存储试验, 存储条件为 $(-15\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 和 $(50\pm 2)^{\circ}\text{C}$, 每种工况存储时间不少于 2 h, 试验全过程相对湿度不大于 65%RH;
- c) 试验后, 机器人外观应无明显损伤, 结构和功能应正常, 其性能不应低于试验前水平, 测试结果应符合 5.3.2 的规定。

6.4 安全监控与保护测试

6.4.1 意外情况保护功能测试

在试验环境中启动待验机器人进行带电作业, 设置意外断电情况, 观察机器人的意外情况保护能力是否符合 5.4.1 的规定。

6.4.2 运行日志测试

调取机器人实时运行状态日志, 检查日志记录的完整性与调取的及时性, 验证运行日志记录功能是否符合 5.4.2 的规定。

7 试验规则

7.1 试验项目

试验分为型式试验和出厂试验，试验项目见表 1。

表 1 试验项目

序号	试验项目		试验方法	出厂试验	型式试验
1	功能	遥操作功能	6.1.1	√	√
2		行进功能	6.1.2	√	√
3		升降功能	6.1.3	√	√
4		平台稳定性	6.1.4	√	√
5		等电位连接	6.1.5	√	√
6		拆装螺栓功能	6.1.6	√	√
7		打磨引流线夹	6.1.7	√	√
8		消弧功能	6.1.8	√	√
9	性能	运动性能	6.2.1	√	√
10		整机外壳防护	6.2.2	√	√
11		电磁兼容	6.2.3	√	√
12		绝缘臂架防护	6.2.4	√	√
13		举升高度	6.2.5	√	√
14		作业平台稳定性	6.2.6	√	√
15		拆装扭矩	6.2.7	√	√
16		操作精度与响应时间	6.2.8	√	√
17	环境适应性	运行环境	6.3.1	—	√
18		高低温运行与存储	6.3.2	—	√
19	安全监控与保护	意外情况保护	6.4.1	√	√
20		运行日志记录	6.4.2	√	√

7.2 出厂试验

出厂试验应逐台试验，每项试验全部合格后方可出厂。

7.3 型式试验

在下列情况之一，需要进行型式试验：

- a) 新产品试制定型投产或老产品转产鉴定时；
- b) 因工艺、材料或结构的变化而影响产品质量时；
- c) 出厂试验结果与上次型式试验有较大差异时；
- d) 停产超过三年恢复生产时；
- e) 正常生产时，每两年进行一次；

f) 国家质量监管机构提出型式试验的要求时。

8 产品要求

8.1 标志

机器人产品上应装有铭牌，铭牌应符合 GB/T 13306 的要求。铭牌的字迹应清晰，且牢固不易擦掉。铭牌上应包括产品名称、型号、外形尺寸和重量、制造商名称、出厂编号等。

8.2 包装

8.2.1 机器人的包装应符合 GB/T 9174 的规定。

8.2.2 外包装上的储运标志应符合 GB/T 191-2008 的规定。

8.2.3 包装箱内应附有装箱单、产品合格证、使用说明书等文件。

8.2.4 产品使用说明书应按照 GB/T 9969 编写，其主要内容包括但不限于产品名称、规格、型号、主要参数。

8.3 运输

机器人的运输、装卸过程中不应受到剧烈的撞击、颠簸，不应使最下层包装被挤压变形。

8.4 贮存

机器人产品应贮存于干燥、防潮、防腐、无油污、通风的室内，周围无强烈机械振动、无冲击、无强磁场。

附录 A
(规范性)
试验方法

A.1 功能试验

A.1.1 行进功能试验

行进功能试验步骤如下：

- a) 将机器人放置于测试区域起点，检查底盘移动机构状态正常后，由静止状态开始运动，按 $\geq 1\text{m/s}$ 的速度在额定载荷条件下，分别在水泥路面、泥土路面和石子路面等变电站可能出现的地面上进行直线行进试验，行进距离不小于 10 m；
- b) 在行进过程中，记录机器人运行状态，测量最大横滚角和俯仰角，并观察是否存在打滑、跑偏或失控现象；
- c) 在坡度为 25%（约 14° ）的坡道上进行上坡和下坡试验，坡道有效行驶距离不应小于 5 m，分别验证机器人前进和后退行驶能力；
- d) 在坡道上进行制动试验，控制机器人停止并保持不少于 1 min，记录是否发生溜坡及位移情况；
- e) 在遥操作控制方式下，分别发出启动、转向及停止指令，观察机器人响应情况，应能够正常执行相应动作。
- f) 试验数据应按表 A.1、A.2、A.3 进行记录，试验结果应符合 5.1.2 的规定。

表 A.1 行进试验记录表

序号	试验项目	地面类型	行进距离 (m)	是否完成	最大横滚角 ($^\circ$)	最大俯仰角 ($^\circ$)	是否打滑	是否跑偏
1	直线行进	水泥						
2	直线行进	泥土						
3	直线行进	石子						

表 A.2 坡道行进试验记录表

序号	坡度	行驶方向	行进距离 (m)	是否完成	是否打滑	是否失稳
1	25%（约 14° ）	前进上坡				
3	25%（约 14° ）	后退上坡				
3	25%（约 14° ）	下坡				

表 A.3 坡道制动试验记录表

序号	坡度	保持时间 (min)	是否溜坡	位移量 (mm)	判定（合格/不合格）
1	25%（约 14° ）				

A.1.2 平台稳定功能试验

A.1.2.1 可伸缩支腿承载力试验

可伸缩支腿承载力试验步骤如下：

- a) 在不同地形条件下进行支腿支撑试验；

- b) 记录不同负载条件下支腿的支撑能力；
- c) 检查平台在负载条件下的稳定情况；
- d) 试验结果应符合 5.1.4 的规定。

A. 1. 2. 2 支腿伸缩状态控制试验

支腿伸缩状态控制试验步骤如下：

- a) 进行机器人支腿伸缩操作试验；
- b) 检查支腿在不同工作状态下的伸缩情况；
- c) 记录支腿伸缩效果及平台稳定情况；
- d) 试验结果应符合 5.1.4 的规定。

A. 1. 2. 3 支腿姿态调节与地形适应性试验

支腿姿态调节与地形适应性试验步骤如下：

- a) 在不同地形条件下进行支腿姿态调节试验；
- b) 检查支腿随地形变化进行姿态调节的能力；
- c) 验证平台在多种地形条件下的稳定保持能力；
- d) 试验结果应符合 5.1.4 的规定。

A. 1. 3 等电位连接试验

等电位连接试验步骤如下：

- a) 参考 GB/T 16927.3 要求布置实验环境；
- b) 启动机器人，在遥操作控制或手动模式下等电位作业平台与带电母线完成等电位连接操作；
- c) 测量连接前后等电位作业平台与母线之间的电位差；
- d) 观察连接过程及等电位连接后机器人状态；
- e) 在作业过程中监测电位波动情况；
- f) 在连接保持过程中，应观察是否存在电位波动、接触不良或机械松动现象；
- g) 进行多次重复连接与断开试验，试验结果应符合 5.1.5 的规定；等电位连接过程应平稳可靠，不应出现拉弧或异常放电；连接后系统应迅速进入稳定状态；连接过程中机械结构应无卡滞、脱落或异常变形；多次重复操作结果应一致，无失效情况。

A. 1. 4 拆装螺栓作业试验

拆装螺栓作业试验步骤如下：

- a) 在试验场所搭建与实际工况一致的螺栓连接环境，准备符合 GB/T 或 IEC 标准的与引流线夹所用规格一致的螺栓和螺母；
- b) 等电位作业平台举升于螺栓作业位置；
- c) 利用视觉系统进行螺栓定位；
- d) 控制工装和拧紧枪完成螺栓拆卸或装配操作，并监测力反馈状态；
- e) 对作业结果进行确认，螺栓和螺母状态及作业稳定性；
- f) 依次完成不同规格螺栓的拆卸与安装后，控制机器人复位；
- g) 试验结果应符合 5.1.6 的规定。

A. 1. 5 打磨引流线夹试验

打磨引流线夹试验步骤如下：

- a) 准备与作业场景一致的引流线夹，在试验场所搭建与实际工况一致的引流线夹连接环境；
- b) 等电位作业平台运行到打磨引流线夹作业范围内；
- c) 利用视觉系统对线夹进行定位；
- d) 远程控制打磨工具对线夹表面进行打磨，并在作业过程中进行监控；
- e) 观察是否能远程控制打磨工具的启动与停止；
- f) 作业完成后，对打磨效果进行检测，并按规定进行重复试验和数据整理；
- g) 试验结果应符合 5.1.7 的规定。

A.1.6 消弧试验测试

消弧试验应针对机器人带电拆接引流导线消弧能力，在模拟带电或实际带电试验环境下进行，试验步骤如下：

- a) 试验环境应满足规定电压等级（如 220 kV）要求，并配置相应的电弧监测装置；
- b) 控制机器人分别执行带电连接与断开操作，模拟实际带电作业工况；
- c) 通过电弧检测装置记录电弧产生情况，包括电弧出现时刻、持续时间及熄灭过程；
- d) 检测是否存在电弧复燃、二次击穿或异常放电现象；
- e) 试验结束后，应检查连接部位、末端执行器及相关工装是否存在烧蚀、熔损或结构损伤；
- f) 必要时应进行多次重复试验，以验证带电拆接引流导线消弧性能的稳定性；
- g) 试验结果应符合 5.1.8 的规定，电弧应在短时间内被有效抑制并熄灭、不应产生持续燃弧或明显延迟熄弧现象、不应发生电弧复燃或二次击穿，不应设备造成明显损伤或影响后续正常作业。

A.2 性能试验

A.2.1 举升高度试验

行走速度试验步骤如下：

- a) 在平整、坚实、干燥的试验场地上布置直线测试路段，测试距离不应小于 20m；
- b) 机器人在额定载荷状态下，以最高行走速度沿测试路段直线行驶；
- c) 采用秒表或其他计时装置记录机器人通过规定距离所需时间，计算机器人的单次前进行走速度；
- d) 同一工况下重复测试 3 次，取平均值作为额定行走速度试验结果；试验结果应符合 5.2.1 的规定。

运动续航时间试验步骤如下：

- a) 在机器人充满电或处于额定能源供给状态下进行试验；
- b) 机器人在额定载荷状态下，按照规定的行驶工况连续运行；
- c) 运行过程中应记录机器人从开始运行至因电量不足、能源耗尽或系统报警而无法继续正常行驶的持续时间；
- d) 试验期间机器人应能够保持正常行走功能，不应出现影响试验结果的故障或异常停机；
- e) 续航时间试验宜在平整、坚实的场地条件下进行；
- f) 运动续航时间试验结果应符合 5.2.1 的规定。

A.2.2 绝缘臂架防护性能试验

绝缘臂架防护试验步骤如下：

- a) 试验前应对绝缘臂架进行外观检查，确认无裂纹、破损、污染、受潮等缺陷；
- b) 试验环境应符合高电压试验要求，按 GB/T 9465-2018 规定进行布置；
- c) 测量绝缘臂架的有效绝缘长度，并确认其满足 GB/T 9465-2018 中不同等级电压下的设计要求；
- d) 将绝缘臂架完全展开至最大作业高度；
- e) 在绝缘臂两端施加工频耐压电压（作业电压为 220kV 时工频耐压试验电压为 450 kV）；
- f) 保持规定时间（一般为 1 min），监测是否发生击穿、闪络或局部放电；
- g) 在试验过程中，应监测泄漏电流变化情况；
- h) 测量泄漏电流变化情况是否符合 GB/T 9465-2018 中的规定；
- i) 试验结果应符合 5.2.4 中的规定；绝缘臂架在试验过程中不应发生击穿或闪络；泄漏电流应保持在允许范围内；试验后绝缘性能不应明显下降；结构应无损伤、变形或功能异常。

A.2.3 举升高度试验

举升高度试验步骤如下：

- a) 在试验场地将机器人展开至工作状态；
- b) 控制绝缘臂架逐步升高至最大平台高度，保持姿态稳定；

- c) 测量在最大举升状态下，等电位作业平台距离地面高度是否 $\geq 10\text{m}$ ；
- d) 在不同负载条件下重复试验，观察运行稳定性；
- e) 重复进行至少 3 次试验，试验结果应符合 5.2.5 的规定。

A. 2. 4 平台稳定性试验

平台稳定性试验应在典型作业工况下进行，试验步骤如下：

- a) 将机器人布置在测试场地，展开支腿并调整至稳定工作状态；
- b) 在最大作业高度及额定载荷条件下，控制绝缘臂架和等电位作业平台达到作业姿态；
- c) 在不同地形条件下进行支腿支撑及姿态调节操作；
- d) 执行作业动作（如螺栓拆装等动作）；
- e) 在作业过程中，记录平台倾角及整体稳定状态；
- f) 必要时可在规定风速条件下进行试验，以模拟实际环境扰动；
- g) 观察作业过程中是否存在明显晃动、倾覆趋势或支撑失稳现象；
- h) 重复进行至少 3 次试验，试验结果应符合 5.2.6 的规定。平台在各工况下应保持稳定，不应发生倾覆或明显失稳；平台倾角应在允许范围内；支腿应工作正常，无滑移和沉陷等异常状况；作业过程中不应影响机器人正常操作。

A. 2. 5 拆装扭矩测试

拆装扭矩测试步骤如下：

- a) 选取符合要求的与引流线夹所用螺栓规格一致的标准螺栓（M12~M16）；
- b) 控制机器人执行螺栓拆卸及安装操作；
- c) 在拆卸及安装过程中，记录机器人末端执行器的受力情况及力反馈控制状态，观察末端执行器是否能够根据受力变化保持稳定作业；
- d) 使用测力工具对最终锁紧力矩进行检测；
- e) 计算 5 次以上有效拧紧扭矩测试结果的平均值和标准偏差，试验结果应符合 5.2.7 的规定。

A. 2. 6 操作精度与响应时间测试

操作精度与响应时间测试步骤如下：

- a) 选取引流线夹所用的标准螺栓作为目标对象；
- b) 控制机器人进行视觉识别与定位；
- c) 测量末端执行器对准误差；
- d) 记录从指令发出至开始执行动作的响应时间；
- e) 重复试验并取平均值；
- f) 试验结果应符合 5.2.8 的规定