

ICS 25.040.30
CCS J28

团 体 标 准

T/CMES XXXX—202X
代替 T/CMES XXXX—201X

变电站多足-多臂机器人作业技术导则 Technical Guidelines for Operating Multi-Legged, Multi- Armed Robots in Substations (征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

中国机械工程学会 发布

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会（英文简称 CMES）是具备开展国内、国际标准化活动资质的全国性社会团体。制定中国机械工程学会团体标准，以满足企业需要和市场需求，推动机械工业创新发展，是中国机械工程学会团体标准的工作内容之一。中国境内的团体和个人，均可提出制、修订中国机械工程学会团体标准的建议并参与有关工作。

中国机械工程学会团体标准按《中国机械工程学会标准化管理办法》进行制定和管理。

中国机械工程学会团体标准草案经向社会公开征求意见，并得到参加审定会议的 3/4 以上的专家、成员的投票赞同，方可作为中国机械工程学会团体标准予以发布。

在本文件实施过程中，如发现需要修改或补充之处，请将意见和有关资料寄给中国机械工程学会，以便修订时参考。

中国机械工程学会标准征求意见稿

本文件版权为中国机械工程学会所有。除了用于国家法律或事先得到中国机械工程学会正式许可外，不许以任何形式复制、传播该标准或用于其他商业目的。

中国机械工程学会地址：北京市海淀区首体南路 9 号主语国际 4 座 11 层

邮政编码：100048 电话：010-68799027 传真：010-68799050

网址：www.cmes.org 联系人：袁俊瑞 电子信箱：yuanjr@cmes.org

目 录

目 录.....	II
前 言.....	IV
1 范围.....	1
2 规范性引用文件.....	1
3 术语和定义.....	1
3.1 多足-多臂机器人.....	1
3.2 臂腿协同.....	1
3.3 全身控制.....	1
3.4 巡操一体化.....	2
3.5 稳定站位.....	2
4 系统概述.....	2
4.1 系统构成.....	2
4.2 主要功能.....	2
4.3 工作环境条件.....	2
5 作业技术原则.....	2
5.1 臂腿协同作业原则.....	2
5.2 巡操一体化作业原则.....	3
5.3 自主与远程监护原则.....	3
6 作业准备与要求.....	3
6.1 人员准备与授权.....	3
6.2 现场环境勘查与准备.....	3
6.3 机器人状态检查与任务载入.....	4
7 作业实施.....	4
7.1 巡检作业.....	4
7.2 基于臂腿协同的操作作业.....	4
7.3 巡操一体化协同作业.....	5
7.4 应急与异常处置.....	5
7.5 作业后恢复.....	5

8 安全保障.....	5
8.1 通用安全要求.....	5
8.2 操作及协同作业专项安全要求.....	5
8.3 网络与信息安全.....	5
9 设备维护保养.....	5
9.1 日常维护.....	5
9.2 定期维护.....	6

中国机械工程学会标准征求意见稿

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》的规定起草。

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专利的责任。

本文件由中国机械工程学会提出并归口。

本文件起草单位：广东电网有限责任公司东莞供电局、广东电网有限责任公司、华中科技大学、联想（上海）有限公司、上海电力大学、华中科技大学无锡研究院、联想（北京）有限公司、上海一疏机器人科技有限公司、浙江灵巧智能科技有限公司

本文件主要起草人：宁雪峰、赵欢、李端姣、张桀馨、孙文星、韦薇、王立成、周海昌、李祥飞、宁为坚、冒建亮、周昕、张敏、徐浩煜、李双圻、余健、郭以坤、费冠博、许春山、周晨、丁汉。

本文件首次制定。

中国机械工程学会标准化管理委员会

变电站多足-多臂机器人作业技术导则

1 范围

本文件规定了变电站多足-多臂机器人系统的术语和定义、系统概述、作业技术原则、作业准备与要求、作业实施流程、安全保障、设备维护保养方法。

本文件适用于变电站内利用多足-多臂机器人进行设备巡检、重载接触操作（如倒闸操作）、带电检测辅助及应急处置等作业的设计、制造、调试、验收及运行维护。其他电力场景类似机器人系统的应用可参照执行。

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 30155 智能变电站技术导则

GB/T 5226.1 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件

DL/T 1610 变电站机器人巡检系统通用技术条件

DL/T 2694—2023 变电站巡检机器人与人工协同巡检规范

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

多足-多臂机器人 multi-legged and multi-arm robot

具有三个及以上足部机构用于移动，搭载多个机械臂用于作业的移动操作机器人系统。该系统具备多足协同跨越障碍与运动能力、姿态主动调节能力及手眼协调操作能力。

3.2

臂腿协同 leg-arm coordination

机器人利用腿部关节的自由度调整躯干位姿，以扩展机械臂的操作空间、提高操作稳定性或抵消操作反作用力的控制策略。

3.3

全身控制 whole-body control (WBC)

将机器人的浮动基座（躯干）、腿部和机械臂视为一个统一的动力学系统，通过优化算法统一分配各关节力矩，实现移动、平衡与操作任务的同时执行。

3.4

巡操一体化 inspection-operation integration

指机器人具备在单次任务流程中，既能执行设备状态表征数据的采集（巡检），又能根据采集结果或预设指令对设备进行物理干预（操作）的作业模式。

3.5

稳定站位 stable stance

机器人在执行操作任务前，根据目标物位置和地面地形，规划出的能够保证操作过程中机身不发生倾覆、滑移且机械臂处于最佳运动学构型的足端支撑状态。

4 系统概述

4.1 系统构成

机器人系统主要由机器人本体、远程监控后台组成。

4.1.1 机器人本体：包括多足移动底盘、机械臂系统（含末端执行器）、感知系统、机载计算单元、通信模块及电源管理模块。

4.1.2 远程监控后台：具备三维场景重建、任务规划、实时监控、遥操作控制及数据分析功能的软硬件系统。

4.2 主要功能

4.2.1 全地形移动：具备在碎石路面、草地、电缆沟盖板及一定坡度（ $\geq 15^\circ$ ）地面稳定运动的能力。

4.2.2 设备巡检：支持表计读取、红外测温、局放检测、设备外观缺陷识别。

4.2.3 作业操作：具备旋钮开关、按钮、压板、手车摇把、柜门把手等变电站设备的操作能力。

4.2.4 带电检测辅助：支持搭载局放仪、红外热像仪等检测设备，并利用机械臂调整检测角度。

4.3 工作环境条件

a) 环境温度： $-20^\circ\text{C} \sim +55^\circ\text{C}$ ；

b) 地面条件：包括水泥路面、碎石路、草地、积水路面（水深 $\leq 10\text{cm}$ ）及标准建筑楼梯。

5 作业技术原则

5.1 臂腿协同作业原则

5.1.1 最佳操作域原则：机器人应利用多足平台的移动能力，将目标设备置于机械臂运动学性能

最优的区域，避免机械臂在奇异位形附近作业。

5.1.2 质心动态补偿原则：在机械臂伸展或抓取重负载物体时，腿部机构应主动调整躯干姿态或足端支撑多边形，保持系统整体质心在支撑多边形内的安全裕度。

5.1.3 扰动抑制原则：对于高精度操作（如插入钥匙），腿部关节应进入高刚度位置锁定模式；对于重载操作（如倒闸操作），腿部应做出抗扰反应以吸收反作用力，防止机身倾覆。

5.2 巡操一体化作业原则

5.2.1 以巡定操原则：操作任务的执行应以巡检确认设备状态为前提。在执行分合闸等操作前，机器人必须通过视觉感知确认设备当前的开关状态、挂牌情况及外观完好性，严禁盲目操作。

5.2.2 自动切换原则：系统架构应支持巡检模式与操作模式的平滑过渡。当巡检/操作过程中接收新的调度指令时，应实现移动导航控制模式与全身操作控制模式自动切换。

5.2.3 结果闭环原则：操作动作完成后，必须再次进行设备状态确认（如识别指示灯变化、仪表读数变化），以验证操作是否成功，形成“感知-规划-执行-验证”的完整闭环。

5.3 自主与远程监护原则

5.3.1 分级自主原则：

- a) L1 遥控作业：由人工实时控制每一个动作，机器人仅提供基础稳定辅助。
- b) L2 监督自主：机器人自主规划路径和操作轨迹，操作员需全程确认关键节点（如接触瞬间）。
- c) L3 全自主：在预设场景（如标准开关柜）内全自主完成任务。

本导则推荐在重载操作中采用 L1 级模式，在一般作业操作中采用 L2 级模式，在常规巡检中采用 L2/L3 级模式。

5.3.2 监护介入时机：

- a) 机器人感知置信度低于预设阈值时；
- b) 机器人规划路径进入禁行区或与带电设备安全距离不足时；
- c) 发生通信延迟超过安全限值或视频卡顿严重时。

5.3.3 监护职责：监护人员应具有通过远程急停装置（物理或软件）随时中断机器人作业的最高权限。

6 作业准备与要求

6.1 人员准备与授权

6.1.1 资质要求

作业人员应由具备变电运维资质的人员担任，并已通过多足-多臂机器人专业操作培训，掌握机器人控制原理、应急处置流程及电力安全工作规程。

6.1.2 角色分工

每次作业应明确监护人和操作人。监护人负责监控机器人运行状态及电网设备状态，操作人负责下达指令及异常干预。

6.1.3 权限管理

作业前应通过生物特征识别或加密令牌登录控制系统。系统应根据人员等级开放相应的控制权限（如参数修改权限、操作执行权限、仅监视权限）。

6.2 现场环境勘查与准备

6.2.1 物理环境检查

作业前应检查机器人运动路径上是否存在积水深度超过 10cm 的区域、松动的电缆沟盖板或未记录的临时障碍物。对于多足机器人，应特别确认碎石区域的紧实度，评估是否存在塌陷风险。

6.2.2 数字环境同步

确认机器人加载的三维点云地图与现场实际一致。若现场设备布局发生变更（如新增开关柜），应先运行“建图模式”进行局部地图更新。

6.2.3 辅助标识确认

检查待操作设备上的视觉识别标识是否清晰完整。若存在污损或遮挡，应人工清理或更换。严禁机器人在识别置信度不足的情况下强行作业。

6.2.4 通信链路测试

在作业区域进行无线信号强度测试（RSSI）。对于全封闭的高压室或地下电缆层，应确认 5G/Wi-Fi 信号覆盖良好，延迟波动范围在允许值内。

6.3 机器人状态检查与任务载入

6.3.1 机械结构检查

- a) 足部检查：检查足部磨损情况，确保纹路清晰，无嵌入尖锐异物；检查腿部无变形、裂纹。
- b) 关节检查：目视检查各关节密封处无渗油；通电后监听关节电机无异响；确认机械臂折叠收纳状态锁定可靠。
- c) 末端工具：检查夹持器指尖橡胶完好，旋转头无卡滞，快换接口触点清洁。

6.3.2 传感器标定检查

执行开机自检程序，确认 LiDAR、各路相机等数据流正常，检查“手眼”标定参数是否准确。

6.3.3 能源状态确认

动力电池电量应不低于 80%。

7 作业实施

7.1 巡检作业

7.1.1 自主导航：机器人应根据预设巡检点，自主规划跨越障碍物的路径。在遇到楼梯、碎石时，应自动切换至相应的步态（如小碎步、爬行步态）。

7.1.2 位姿调整：到达巡检点后，若目标位置过高或过低，机器人应利用腿部伸缩调整机身高度，或通过俯仰机身角度，配合云台获取最佳观测视角。

7.1.3 数据采集：机器人应保持静止状态进行高清拍照或红外测温，以防运动模糊影响数据质量。

7.2 基于臂腿协同的操作作业

本章节规定执行典型操作任务的标准流程。

7.2.1 操作前定位：机器人移动至距操作目标 0.5m~1.0m 处（根据臂长调整），选择“四足全站立”或“跪姿”等高稳定性站位，锁定腿部非必要自由度。

7.2.2 视觉伺服与规划：识别操作目标的图像与位姿，机器人根据目标信息，计算机械臂运动轨迹。

7.2.3 接触操作：a) 机械臂接近目标时，应降低速度（末端速度宜 $\leq 0.1\text{m/s}$ ）。b) 机器人应激活操作控制算法，限制接触力峰值防止损坏设备或推倒自身。

7.3 巡操一体化协同作业

7.3.1 任务链编排：作业人员可在监控后台编排长序列复合任务。

7.3.2 异常中断：在巡操过程中，若巡检环节发现设备异常（如柜体温度过高），机器人系统应向监控人员弹窗报警，等待人工研判。

7.4 应急与异常处置

7.4.1 通信中断：若机器人与后台失联超过 30 秒，机器人应立即停止当前动作，保持原地待命。若处于移动中，应就地安全停靠；若处于操作接触中，机械臂应依据预设的安全策略保持柔顺状态或尝试安全回撤。

7.4.2 自身倾倒：机器人应具备跌倒检测功能。一旦检测到机器人位姿数据异常，应立即切断关节伺服动力或进入阻抗模式以保护机械结构，并向后台发送信号。

7.4.3 紧急避障：在操作过程中若有人或异物闯入作业空间，机器人应急停。

7.5 作业后恢复

作业完成后，机器人应将机械臂收回至折叠收纳姿态，确保整体重心位于系统几何中心，并自主返回充电站。

8 安全保障

8.1 通用安全要求

8.1.1 电气安全距离：机器人在变电站内活动时一旦超过最小安全绝缘距离，应立即报警并限制向该方向运动。

8.1.2 防撞与防跌落：机器人应具备全周向防撞能力，具备台阶边缘检测能力，防止踏空跌落。

8.2 操作及协同作业专项安全要求

8.2.1 接触安全与防误碰：在操作模式下，各关节输出力矩应设置软限位。一旦检测到外部非预期碰撞力（如碰触人员或非目标设备），应触发“碰撞停机”或“零重力顺应”模式。

8.2.2 人机协作安全：a) 作业警示：作业期间，机器人应开启声光报警（如黄色旋转灯、蜂鸣器）。在机械臂展开操作时，应通过地面投影或语音提示“正在操作，请勿靠近”。b) 人员探测：当检测到人员进入机器人运动学范围内时，机器人应降低运动速度。

8.3 网络与信息安全

8.3.1 边界防护：机器人操作系统应关闭不必要的端口和服务，数据交互应通过部署有防火墙和正反向隔离装置的安全接入区进行。

8.3.2 日志审计：所有操作指令、传感器数据、异常事件均应本地存储并上传。

9 设备维护保养

9.1 日常维护

每次作业完毕后进行：a) 清洁：清理附着在机器人上的泥土、碎石；使用专用无尘布擦拭传感

设备。b) 外观检查：检查机械臂线缆是否有磨损、裸露，检查急停按钮是否灵敏。c) 数据归档：确认巡检数据已完整上传，无积压。

9.2 定期维护

a) 月度维护：检查腿部与机械臂关节状态；检查足部磨损程度，必要时更换；检查电池组单体压差，进行均衡维护。

b) 年度维护：进行全面的精度校准，包括手眼标定、运动学参数标定；测试急停功能的响应时间；检查液压系统（若有）油质及管路密封性。

中国机械工程学会标准征求意见稿