

ICS 29.240.10

CCS J28

# 团 体 标 准

T/CMES XXXX—202X

代替 T/CMES XXXX—201X

## 变电站多模态感知巡检作业机器人

ReSubstation Multimodal Perception Patrol and Operational  
Robot

(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](http://www.cmes.org) 联系人: 袁俊瑞 电子信箱: [yuanjr@cmes.org](mailto:yuanjr@cmes.org)

## 目 次

前 言 .....	IV
引 言 .....	V
1 范围 .....	1
2 规范性引用文件 .....	1
3 术语和定义 .....	2
3.1 变电站多模态感知巡检作业人形机器人 .....	2
3.2 多模态感知系统 .....	2
3.3 多模态对齐 .....	2
3.4 手眼协作 .....	2
3.5 类人构型本体 .....	2
3.6 自主巡检作业 .....	2
3.7 远程遥操巡检作业 .....	2
3.8 跨域移动 .....	3
3.9 电力场景理解 .....	3
4 系统架构 .....	3
4.1 总体架构 .....	3
4.2 机器人本体 .....	3
4.3 感知系统 .....	4
4.4 决策与控制系统 .....	5
4.5 作业系统 .....	5
4.6 数据采集与管理系统 .....	5
4.7 交互系统 .....	5
5 功能要求 .....	6
5.1 多模态感知与场景理解能力 .....	6
5.2 灵巧操作与作业执行能力 .....	6
5.3 自主导航与移动能力 .....	6
5.4 任务分解与决策能力 .....	6
5.5 人机交互与智能导引能力 .....	7

6 技术要求 .....	7
6.1 本体与移动性能 .....	7
6.2 感知与识别性能 .....	7
6.3 操作与控制性能 .....	7
6.4 环境建模与定位性能 .....	7
6.5 智能决策性能 .....	7
6.6 可靠性要求 .....	8
7 试验方法 .....	8
7.1 本体与移动性能试验 .....	8
7.2 感知与识别性能试验 .....	8
7.3 操作与控制性能试验 .....	9
7.4 环境建模与定位性能试验 .....	9
7.5 智能决策性能试验 .....	9
7.6 可靠性试验 .....	10
8 检验规则 .....	10
8.1 出厂检验规则 .....	10
8.2 型式检验规则 .....	10
8.3 监督检验规则 .....	11
8.4 判定准则与记录 .....	11
9 质量承诺与售后服务 .....	11
9.1 质量承诺体系 .....	11
9.2 售后服务体系 .....	11
9.3 质量追溯与改进机制 .....	12
附 录 A (资料性附录) 人形机器人项目案例 .....	13
A.1 人形机器人示范应用 .....	13
附 录 B (资料性附录) 典型作业流程示例 .....	16
B.1 巡检与状态识别流程 .....	16
B.2 多机协同接地线作业流程 .....	16
B.3 应急事件响应流程 .....	16

## 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、深圳市人工智能与机器人研究院、中国科学院自动化研究所、华中科技大学。

本文件主要起草人：李端姣、孙文星、贾子然、梁永超、覃广胜、刘建明、姚隽雯、陈赟、章敏、吴晓亮、岳晓、徐刚、陆华晴、麦卫华、宁雪峰、丁宁、张建国、何宇翔、何重山、陈雅莉、付伟、杨超、叶树生、许文台。

本文件首次制定。

中国机械工程学会标准征求意见稿

## 引 言

本团体标准供各成员单位自愿采用。提请各使用单位注意，采用本团体标准时，根据各自产品特点，确认本团体标准的适用性。

中国机械工程学会标准征求意见稿

中国机械工程学会标准征求意见稿

# 变电站多模态感知巡检作业机器人

## 1 范围

本文件规定了变电站多模态感知巡检作业人形机器人的术语和定义、系统架构、功能要求、技术要求、试验方法、检验规则、质量承诺与售后服务等。

本文件适用于变电站内巡检、操作等多场景下的人形机器人应用。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期引用文件，其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

- GB/T 39586-2020 电力机器人 术语
- GB/T 36239-2018 特种机器人 术语
- GB/T 36321-2018 特种机器人 分类、符号、标志
- GB/T 38244-2019 机器人安全总则
- GB/T 44589-2024 机器人自适应能力技术要求
- ISO 18646-5: 2023 机器人技术
- ISO 10218-2: 2025 机器人技术 安全要求 第2部分：工业机器人应用和机器人单元
- ISO 13849-1: 2023 机械安全 控制系统的安全相关部件 第1部分：设计的一般原则
- GB/T 30574-2021 机械安全 安全防护的实施准则
- GB/T 4208-2017 外壳防护等级(IP 代码)
- GB/T 19436.1-2013 机械电气安全 电敏保护设备 第1部分：一般要求和试验
- GB/T 5226.1-2019 机械电气安全 机械电气设备 第1部分：通用技术条件
- GB/T 13955-2017 剩余电流动作保护装置安装和运行
- GB/T 20438.1-2017 电气/电子/可编程电子安全相关系统的功能安全 第1部分：一般要求
- IEC 61508-1: 2010 电气、电子、程序可控的电子安全相关系统的功能性安全 第1部分：一般要求
- GB/T 18271.1-2017 过程测量和控制装置 通用性能评定方法和程序 第1部分：总则
- GB/T 29309-2012 电工电子产品加速应力试验规程 高加速寿命试验导则
- GB/T 2828.1-2012 计数抽样检验程序 第1部分：按接收质量限(AQL)检索的逐批检验抽样计划
- GB/T 2829-2002 周期检验计数抽样程序及表(适用于对过程稳定性的检验)
- GB/T 27025-2019 检测和校准实验室能力的通用要求
- ISO 9001: 2015 质量管理体系 要求
- GB/T 12642-2013 工业机器人 性能规范及其试验方法
- GB/T 19025-2023 质量管理 能力管理和人员发展指南
- GB/T 2423.17-2024 环境试验 第2部分：试验方法 试验 Ka：盐雾

### 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

#### 3.1

##### 变电站多模态感知巡检作业人形机器人

由多模态感知系统、类人构型本体组成的机器人，可通过自主或远程遥操方式完成变电站跨区域的巡检作业任务。

#### 3.2

##### 多模态感知系统

集成可见光相机、红外热像仪、声音传感器、气体传感器、激光雷达、力传感器等多种类型传感器，同步采集变电站环境参数、设备状态信息(温度、外观、声音等)及自身位姿信息的系统，通过多模态数据对齐与融合技术实现数据间的互补，提高对环境和设备的感知信息完整性，用于设备缺陷、安全隐患的排查。

#### 3.3

##### 多模态对齐

将不同传感器获取的数据(图像、音频、温度、语言等)转换为统一时空坐标系下的标准化数据，实现多来源信息一致性关联的过程。

#### 3.4

##### 手眼协作

机器人通过视觉系统定位目标对象，结合关节运动控制与力反馈调节，实现末端执行器精准操作(如旋钮调节、插件插拔、仪表读数确认等)的协同控制能力。

#### 3.5

##### 类人构型本体

采用类人化肢体结构设计。具备关节驱动、姿态调节、负载承载等运动功能，能适应变电站设备区、电缆沟、楼梯间等复杂地形。

#### 3.6

##### 自主巡检作业

机器人依据预设巡检计划或边缘节点下发的任务指令，自主完成路径规划、设备定位、多模态数据采集、缺陷初步识别及数据自动上传的巡检模式。无需人工实时干预，可独立完成变电站常规设备外观检测、参数读取、环境监测等基础任务。

#### 3.7

##### 远程遥操巡检作业

当机器人遭遇复杂故障场景、未知障碍或需执行精细操作(如开关柜内部检测、特殊仪表读数)时，由运维人员通过云端或边缘端监控平台，结合机器人回传的实时音视频数据远程操控机器人运动及执行机构动作的巡检模式，可实现特殊场景下的精准作业。

## 3.8

**跨域移动**

机器人在变电站不同功能区域(如主变区、高压开关柜区、电容器区、继保室等)之间的移动能力,需具备水泥地面、碎石路面、电缆沟盖板等不同地形的适可实现力,以及跨越 15cm 以下障碍、攀爬 30° 以内斜坡或上下楼梯的运动能力,确保巡检范围覆盖变电站全域。

## 3.9

**电力场景理解**

系统通过多模态感知模型推理,识别电力场景中的设备类型、环境状态并关联任务信息。

## 4 系统架构

## 4.1 总体架构

变电站多模态感知巡检作业机器人系统采用“云-边-端”协同的总体架构,构建具备感知、决策、执行与交互闭环能力的机器人系统。

## 4.1.1 云端

作为系统的指挥与控制中心,部署于远程数据中心。主要负责宏观任务管理、多机器人协同调度、数字孪生模型运算、大数据分析与长期数据存储,并向边端系统下发任务指令与策略。

## 4.1.2 边端

部署于变电站现场或邻近区域,作为云与端的桥梁。负责接收云端指令,进行实时数据处理、局部环境建模、单体机器人任务分解与路径规划,并协调多个机器人终端(端)的协同作业。

## 4.1.3 端侧

即机器人本体,是任务的最终执行单元。负责接收边端指令,通过自身搭载的多模态传感器实时感知环境,依托本机算力进行即时决策与运动控制,完成具体的巡检、操作、移动等作业动作,并将过程数据实时回传。

## 4.2 机器人本体

## 4.2.1 本体构型与基本参数

机器人本体应采用仿人形构型。其基本尺寸与结构参数符合下列要求:

- a) 身高: 不小于 1.65m, 适应变电站设备操作高度。
- b) 重量: 具备良好的功率重量比, 确保移动灵活性与作业稳定性。
- c) 臂展: 单臂展长不小于 0.8m。
- d) 全身自由度: 不低于 40 个自由度(含灵巧手)。

## 4.2.2 本体及执行部分

## 4.2.2.1 双足结构

负责机器人在变电站多种地形下的稳定移动与越障。

#### 4.2.2.2 灵巧操作模块

包含多自由度机械臂与执行末端，可实现高精度机械臂轨迹规划与柔顺控制能力，用于执行工具使用、开关操作等精细作业。

#### 4.2.2.3 特种作业工具

为适应变电站高压、高危环境而设计的专用末端执行器，如绝缘操作杆、可伸缩验电装置等。

### 4.2.3 性能要求

#### 4.2.3.1 运动与越障性能

- a) 地形适应性：能在铺装路面、碎石、鹅卵石、电缆沟盖板等变电站典型非平整路面稳定行走。
- b) 越障能力：垂直跨越障碍高度不低于 20cm。
- c) 坡道通过性：最大爬坡角度不小于 15°。

#### 4.2.3.2 负载与操作性能

- a) 负载能力：双臂协同搬运负载能力不小于 10kg。
- b) 握持能力：单手握力不小于 5kg，整手承载力不小于 30kg。
- c) 操作精度：末端重复定位误差不大于±2mm；手眼协同操作精度误差不大于 5mm。
- d) 灵巧手性能：单手机械自由度不少于 10 个，指尖力不小于 30N，重复定位精度不低于 0.1mm。

#### 4.2.3.3 电源与续航

- a) 机器人采用高能量密度电池，工作电压宜为标称 60V/72V。
- b) 系统支持热更换电池，确保单次更换电池期间可实现不间断作业，满足长时间续航需求。

### 4.3 感知系统

#### 4.3.1 多模态感知部分

##### 4.3.1.1 视觉感知模块

采用 RGB-D 相机、红外热像仪等，负责采集高分辨率图像、视频流及温度信息，用于设备状态识别、仪表读数、人员行为分析等。

##### 4.3.1.2 力/触觉感知模块

集成六维力传感器、触觉等传感器阵列，实时感知机械臂末端操作过程中的接触力、力矩与表面软硬。

##### 4.3.1.3 定位与惯性测量模块

集成深度相机、激光雷达(Radar)、惯性测量单元(IMU)、全球导航卫星系统(GNSS)等，为机器人提供自身位姿估计与环境三维信息。

#### 4.3.2 感知融合与理解层

##### 4.3.2.1 多模态数据融合模块

对视觉、力觉、点云等异构传感数据进行时空同步、特征提取与跨模态关联，形成统一的环境态势感知。

#### 4.3.2.2 场景语义理解模块

基于视觉模型与分割算法，实现对变电站设备类型、工作状态、环境要素的细粒度识别与语义标注。

### 4.4 决策与控制系统

#### 4.4.1 任务规划模块

接收来自云侧或本地的完整任务指令，将其分解为可执行的子任务序列，并确定执行主体(单机或多机)。

#### 4.4.2 行为决策与路径规划模块

基于实时构建的环境地图，为机器人生成无碰撞、符合作业规范的最优运动轨迹与操作序列。

#### 4.4.3 调度模块

在机器人系统中，负责动态任务分配、与行为规划。

### 4.5 作业系统

作业系统指机器人直接执行变电站各类任务的功能集合。

- a) 巡检类作业：能自主或遥控执行设备外观巡视、仪表数据读取、红外测温、局放检测等。
- b) 操作类作业：能执行开关(空开、按钮、旋钮)操作、柜门/箱门开启与关闭、安全围栏及标示牌布设、接地线装拆、工器具搬运等。
- c) 安全辅助作业：能执行人员身份与安全着装识别、作业过程安全监护、语音安全提醒等。

### 4.6 数据采集与管理系统

#### 4.6.1 具身行为数据库

存储和管理机器人在真实作业中采集的多模态数据，为模仿学习与强化学习提供数据基础。

#### 4.6.2 数据分析与效能评估模块

对机器人作业数据进行分析，评估系统性能，生成运维报告，支撑决策优化。

#### 4.6.3 数据采集

系统能自动记录所有作业任务的执行过程，包括传感器原始数据、机器人状态数据、操作结果数据、异常事件数据等。

#### 4.6.4 数据管理

采集的数据在边端或云端进行结构化存储、处理与分析，用于生成巡检报告、操作日志、性能报表，并支撑数字孪生模型的更新与优化。

### 4.7 交互系统

#### 4.7.1 AI 语音助手

支持通过自然语言进行任务指令下达、状态查询与作业逻辑解释。

#### 4.7.2 远程遥操作平台

在复杂或异常情况下，允许操作人员通过远程遥操接口对机器人进行远程干预和精细控制。

#### 4.7.3 数据可视化看板

以图形化方式集中展示机器人实时状态、作业进度、环境信息与系统告警。

### 5 功能要求

#### 5.1 多模态感知与场景理解能力

机器人系统可实现通过多种传感器协同工作，实现对作业环境与目标对象的全面感知与理解能力。

- a) 环境状态感知：可实现对变电站室内外环境进行三维测量与建模，识别地面类型、通道状况及障碍物信息。
- b) 设备状态识别：可实现基于视觉与红外感知，对开关、刀闸、压板、指示灯、仪表盘、绝缘子等设备的运行状态与位置进行识别和分类。
- c) 异常与缺陷识别：可实现识别设备表面的破损、污秽、发热等缺陷隐患，并对人员未按规定着装、未设置安全措施等不规范行为进行识别。
- d) 跨模态信息融合：可实现将视觉、力觉、触觉等不同模态的感知信息进行融合处理，提升对环境与目标对象理解的完整性和鲁棒性。

#### 5.2 灵巧操作与作业执行能力

机器人系统可实现在高压、复杂环境下完成各类精细操作任务的能力。

- a) 工具使用能力：可实现稳定抓持和使用常用电工工具，并操作局放测试仪等专用检测设备。
- b) 设备操作能力：可实现完成开关柜门开闭、按钮按压与复位、小型开关旋钮操作、空开投退等标准操作。
- c) 柔顺与力控操作：在操作过程中可实现力感知与柔顺控制能力，避免对设备和自身造成刚性冲击。

#### 5.3 自主导航与移动能力

机器人系统可实现在变电站复杂地形下的稳定移动与精确定位能力。

- a) 多地形适应性：可实现在铺装路面、草地、坡道、楼梯等典型变电站地形上稳定行走和移动。
- b) 精准定位与导航：可实现在全局地图支持下实现自主定位，并规划无碰撞路径到达目标作业点。
- c) 动态避障：在移动过程中可实现实时感知动态障碍物，并重新规划路径或暂停运动。

#### 5.4 任务分解与决策能力

机器人系统可实现对高层指令的理解、分解，并调度多种资源协同完成任务的能力。

- a) 任务解析与分解：可实现接收自然语言或结构化任务指令，并将其自动分解为可执行的机器人动作序列。

- b) 机器人调度：可实现人形机器人实现任务分配与行为决策。
- c) 作业流程合规性：生成的作业计划应符合变电站安全规程。

### 5.5 人机交互与智能导引能力

机器人系统应提供高效、自然的人机交互手段，支持人员在作业过程中的监督与介入。

- a) 多模态交互：可实现通过语音、图形界面等方式进行任务指令下发、状态查询和作业过程监控。
- b) AI 语音助手：可实现通过语音对话回答业务咨询，并在作业关键节点向操作人员解释作业逻辑与后续步骤。
- c) 远程遥控操作：可实现远程操控接口，允许操作人员在必要时对机器人进行远程干预和精细控制。

## 6 技术要求

### 6.1 本体与移动性能

机器人系统应满足在变电站复杂环境下的基本移动与适应力。

- a) 地形适应力：可实现在铺装路面、草地、坡道等至少 3 种不同地形上保持稳定移动。
- b) 越障能力：可实现跨越高度不低于 20 厘米的障碍物。
- c) 攀爬能力：可实现攀爬高度不低于 20 厘米的台阶。

### 6.2 感知与识别性能

机器人系统可实现准确感知环境和识别目标对象的能力。

- a) 设备识别准确率：对变电站主要电气设备的识别准确率不应低于 90%。
- b) 仪表读数识别准确率：对指针式、数字式仪表的读数识别准确率不应低于 90%。
- c) 缺陷识别能力：可实现识别设备破损、发热等典型缺陷隐患，平均识别准确率不低于 90%。

### 6.3 操作与控制性能

机器人系统可实现完成各项作业任务所需的操作精度与可靠性。

- a) 操作精度：机械臂末端重复定位误差应不大于  $\pm 2$  毫米；手眼协同操作精度误差应不大于 5 毫米。
- b) 负载能力：双臂协同搬运最大负载应不小于 10 公斤；灵巧手单手握力应不小于 5 公斤，整手承载力应不小于 30 公斤。
- c) 灵巧手性能：单手机械自由度应不少于 10 个；指尖力应不小于 30N；重复定位精度应不低于 0.1 毫米。
- d) 任务执行成功率：对操作开关柜等典型任务的整体执行成功率不应低于 90%。
- e) 任务覆盖种类：可实现完成不少于 8 种不同类型的作业任务。

### 6.4 环境建模与定位性能

机器人系统可实现准确感知环境并实现自我定位的能力。

- a) 三维场景重建精度：环境三维建模的精度误差不应超过 10 厘米。
- b) 机器人定位误差：在运动过程中的定位和导航误差不应超过 10 厘米。

### 6.5 智能决策性能

机器人系统可实现高效决策与多机协同能力。

- a) 决策大模型推理速度：多模态大模型运行时的推理速度不应低于 30 tokens/秒。
- b) 决策时间：系统每轮决策时间不应超过 1 秒。
- c) 多机协同支持：系统支持不少于 3 种异构机器人的协同任务调度与执行。

## 6.6 可靠性要求

机器人系统可以在变电站典型环境条件下长期稳定运行。产品在正常使用及维护条件下，其核心功能模块的设计寿命不低于 10000 小时，平均无故障工作时间(MTBF)不低于 5000 小时。产品具备良好的耐环境腐蚀能力。其金属结构件及表面防护层能耐受盐雾环境的长期侵蚀，关键电接触部件在腐蚀试验后保持稳定的电气连接性能。此外，系统中外露的传感器、接口等部件的防护等级应满足在变电站户外复杂环境下的长期使用要求。

## 7 试验方法

### 7.1 本体与移动性能试验

#### 7.1.1 越障能力试验

在平整测试场地设置高度为  $200\text{mm} \pm 5\text{mm}$  的标准垂直障碍物。控制机器人以稳定步态从静止状态启动，直接跨越该障碍物。试验重复进行 3 次，机器人应能成功跨越且不发生倾覆、部件碰撞或程序中断。以 3 次试验均成功则符合要求。

#### 7.1.2 攀爬能力试验

在平整测试场地设置高度为  $200\text{mm} \pm 5\text{mm}$ 、深度不小于 300mm 的标准台阶。控制机器人以稳定步态连续攀爬该台阶。试验重复进行 3 次，机器人应能自主、连续、稳定地完成上下台阶动作，过程中无失稳、滑落或异常停顿。以 3 次试验均成功则符合要求。

#### 7.1.3 地形适应力试验

在测试场内分别铺设平整铺装路面、模拟草地(采用低矮密实地毯)及倾斜角度为  $15^\circ \pm 1^\circ$  的坡道三种典型地形。控制机器人在每种地形上自主行走至少 10 米。观察并记录其行走过程中的平稳性、连续性 & 姿态控制情况。机器人在三种地形上行走均应连续、平稳，无打滑、卡滞或倾覆现象。

### 7.2 感知与识别性能试验

#### 7.2.1 设备识别准确率试验

准备包含变压器、开关柜等变电站主要设备的测试图像库，图像应涵盖不同光照、角度和距离条件。使用机器人感知系统对图像中的设备进行识别，统计识别正确的图像数量与总图像数量之比。统计正确识别次数与总次数的比值，准确率不应低于 90%。

#### 7.2.2 仪表读数识别试验

选取变电站现场运行的指针式、数字式仪表，在不同示值状态下采集图像数据。将机器人读数与标准值对比，误差应在仪表精度等级允许范围内，且识别准确率不低于 90%。

#### 7.2.3 缺陷识别试验

准备包含设备破损、污秽、发热等典型缺陷的图像和红外热像数据。测试系统对缺陷的识别能力，识别准确率不应低于 90%。

### 7.3 操作与控制性能试验

#### 7.3.1 任务成功率试验

在典型变电站作业场景中，设置开关柜门操作、按钮按压复位等不少于 8 种作业任务。每种任务重复执行 10 次，统计成功完成次数与总次数之比，计算任务成功率。统计总成功次数与总次数的比值，成功率不应低于 90%。

#### 7.3.2 手眼协同控制精度试验

在机械臂末端安装标记点，设定 5 个标准目标点位。控制机械臂依次运动至各目标点，使用高精度测量仪器测量实际位置与目标位置的偏差。重复测量 10 次，取最大偏差值作为控制精度。计算实际位置与目标位置的误差平均值，应不大于 5mm。

### 7.4 环境建模与定位性能试验

#### 7.4.1 多地形移动试验

铺设铺装路面、草地、坡道三种典型地形测试区，令机器人在各测试区连续行走 10 分钟，观察其移动状态，机器人在所有地形均应保持稳定，无倾覆或异常姿态。

#### 7.4.2 定位误差试验

在已知坐标的测试场内设置系列路径点，令机器人按序行进至各路径点，记录其定位系统输出的位置坐标，计算实际定位坐标与真实坐标的误差，平均值不应超过 10cm。

### 7.5 智能决策性能试验

#### 7.5.1 决策大模型推理速度试验

在机器人系统典型算力平台上，加载其多模态决策大模型。准备一组标准化的多模态输入数据，通过程序接口连续发起推理请求并记录时间戳。统计处理完固定数量 Token 所消耗的时间。推理速度按公式(1)计算，结果应不低于 30tokens/秒。

$$\text{推理速度} = \frac{\text{处理的总Token数}}{\text{消耗的总时间}} \dots\dots\dots(1)$$

#### 7.5.2 单轮决策时间试验

在变电站作业场景中，令系统执行一项包含环境感知、任务规划到生成控制指令的完整决策循环。使用高精度计时器，测量从传感器数据帧输入就绪到系统输出可执行动作指令的时间间隔。该过程重复测量 100 次，计算平均决策时间。平均决策时间应不大于 1 秒。

#### 7.5.3 多机协同支持试验

在仿真测试环境中，配置人形机器人、四足机器人及无人机等至少 3 种异构机器人模型。通过调度系统向该异构群体下发一项需要协同完成的复合任务。观察并记录任务分解、分配、执行及冲突解决的全过程。试验结论为系统应能成功调度所有机器人，完成协同任务流程，并实现基本的信息交互与行为协调。

## 7.6 可靠性试验

### 7.6.1 加速寿命试验

采用步进应力法，在温度 125℃、电压 1.3 倍额定值条件下运行，记录故障发生时间。通过阿伦尼斯模型推算，试样在正常工况下预期寿命 $\geq 10000$  小时，可靠性指标 MTBF $\geq 5000$  小时，符合 GB/T 29309 的要求。

### 7.6.2 盐雾试验

依据 GB/T 2423.17 的规定，在 5%NaCl 溶液雾化环境中，持续 96 小时，评估金属部件耐腐蚀性。试样表面无红锈，电接触点电阻变化率 $\leq 10\%$ ，满足 GB/T 2423.17 的防腐蚀要求。

## 8 检验规则

### 8.1 出厂检验规则

#### 8.1.1 抽样方案

依据 GB/T 2828.1 的规定，采用正常检验一次抽样方案，接收质量限(AQL)设定为 0.65。抽样数量根据批量大小按 GB/T 2828.1 确定，确保样本代表性满足统计控制要求。

#### 8.1.2 检验项目与判定

出厂检验涵盖外观检查、功能测试三大类项目，每类项目需符合对应技术要求。所有项目均合格时判定为合格批次；任一项目不合格时，依据 GB/T 2828.1 执行拒收程序，并启动复检流程。

#### 8.1.3 复检规则

初检不合格批次可申请复检，复检抽样数量为原样本量的两倍，检验项目与初检一致。复检仍不合格时，该批次产品不得出厂，需追溯至生产环节进行原因分析并整改，直至连续三批次复检合格后方可恢复出厂检验通过。

### 8.2 型式检验规则

#### 8.2.1 适用场景

型式检验在产品定型、关键工艺变更、停产后复产或质量监督部门要求时实施，依据 GB/T 2829 确定检验周期与样本量，判别水平采用 II 类。

#### 8.2.2 检验项目全覆盖

型式检验覆盖本规范全部试验项目，包括环境适应性、机械性能、电气安全、可靠性验证等。每个项目均需提供量化试验数据，并依据对应技术要求进行符合性判定，确保产品设计满足全性能指标。

#### 8.2.3 判定与追溯

所有检验项目均符合要求时判定型式检验通过；任一项目不合格时，需分析原因并采取纠正措施，重新提交型式检验。检验记录需保存至少 10 年，支持产品质量追溯与问题分析，符合 ISO 9001:2015 要求。

### 8.3 监督检验规则

#### 8.3.1 抽样与执行

由第三方质量监督机构实施不定期抽样检验，抽样比例不低于批量 5%，检验项目根据监督重点动态调整，确保覆盖关键质量特性。

#### 8.3.2 结果处理

监督检验不合格时，生产企业需立即启动质量整改程序，包括暂停生产、追溯问题批次、分析根本原因并实施纠正措施。整改完成后需重新申请监督检验，连续两次检验合格后方可恢复正常生产秩序。

### 8.4 判定准则与记录

#### 8.4.1 合格判定

产品合格判定需满足所有检验项目符合对应技术要求，且无系统性缺陷模式。判定依据采用量化指标与定性评价相结合的方式，确保判定结果的科学性与可追溯性。

#### 8.4.2 记录管理

检验记录需包含样品信息、检验项目、试验数据、判定结果及检验人员签名，记录格式符合 GB/T 27025 记录控制规范。记录保存期限不少于产品寿命周期加 10 年，支持质量追溯与法律纠纷处理。

## 9 质量承诺与售后服务

### 9.1 质量承诺体系

#### 9.1.1 全生命周期质量保证

依据《中华人民共和国产品质量法》、《中华人民共和国消费者权益保护法》及 ISO 9001: 2015 的规定，承诺产品自出厂之日起，在正常使用及维护条件下，核心功能模块质保期为 3 年，关键结构件质保期为 5 年，易损件质保期为 1 年。质保期内因材料缺陷、制造工艺问题或设计瑕疵导致的功能失效，制造商将免费提供维修、更换或退换服务，并承担相关物流费用，确保质量承诺具有法律约束力及可执行性。

#### 9.1.2 性能指标保障

承诺产品性能参数符合技术规格书及国家/行业标准要求，关键指标偏差 $\leq \pm 3\%$ 。依据 GB/T 12642 的规定，通过定期远程监测或现场检测验证产品性能稳定性，确保持续满足承诺指标，并建立产品性能数据库实施动态跟踪分析。

### 9.2 售后服务体系

#### 9.2.1 服务响应机制

依据 ITIL v4 服务管理框架，建立 7×24 小时全天候服务热线及在线支持平台。客户提交服务请求后，1 小时内响应并确认问题性质，4 小时内提供初步解决方案，24 小时内派遣技术人员到场(覆盖全国主要城市)。紧急故障承诺 48 小时内完成修复或提供备机支持，确保服务流程标准化、可追溯。

### 9.2.2 维修与更换服务

提供原厂认证维修服务。无法现场修复的故障，提供免费取件—维修—返还服务，维修周期不超过7个工作日。关键部件更换后，提供至少1年的延长质保服务，并确保维修后产品性能与原厂一致。

### 9.2.3 技术支持与培训

依据 GB/T 19025 的规定，组建专业技术支持团队，提供产品使用、维护、升级咨询及指导。定期举办线上/线下技术培训，内容涵盖产品原理、操作规范、故障排查等，确保客户操作及维护能力持续提升。

### 9.2.4 备件供应保障

建立全国性备件仓储及物流网络，常用备件库存充足，紧急备件24小时内送达，备件质量与原厂部件保持一致，并经过严格质量检测及认证。

## 9.3 质量追溯与改进机制

### 9.3.1 质量追溯体系

建立完善的产品质量追溯系统，通过序列号、批次号等信息实现从原材料采购至售后服务的全流程追溯，客户可通过官方渠道查询产品生产信息、维修记录及质量证明文件，确保数据真实、完整、可追溯。

### 9.3.2 持续改进机制

基于客户反馈、维修数据及质量监测结果，依据 ISO 9001:2015 改进要求，定期开展产品质量分析会议。通过实施纠正措施及预防措施(CAPA)，持续优化产品设计、制造工艺及售后服务流程，确保质量管理体系动态适应内外部环境变化，提升客户满意度。

附录 A  
(资料性附录)  
人形机器人项目案例

A.1 人形机器人示范应用

实现设备状态检查、表计读取、红外测温等巡视任务；可使用局放测试仪开展开关柜局放测试，完成倒闸操作；可开展人员身份校验和安全措施布置等安全监管工作；并作为 AI 助手，通过语音对话在作业过程中进行人机交互。



图 A.1 读取仪表



图 A.2 红外测温



图 A.3 投退空开



图 A.4 搬运工具



图 A.5 人员身份查验



图 A.6 布设安全措施



图 A.7 电力业务 AI 助理



图 A.8 AI 指导

附录 B  
(资料性附录)  
典型作业流程示例

B.1 巡检与状态识别流程

该流程适用于对变电站设备进行例行巡检与状态数据采集。

- a) 任务下达与规划：运维人员通过系统平台下达巡检任务。机器人系统接收任务后，基于预设的变电站三维地图，自动规划出覆盖所有目标设备的最优巡检路径。
- b) 自主导航与数据采集：机器人沿规划路径自主移动，在指定点位通过搭载的视觉、红外等传感器，对设备外观、仪表读数、温度状态等进行多模态数据采集。
- c) 数据处理与状态分析：采集到的数据实时回传至后台系统。系统对数据进行分析处理，自动识别设备状态，并与历史数据进行比对。
- d) 报告生成与归档：巡检结束后，系统自动生成包含设备状态列表、异常项说明及初步诊断结论的巡检报告，并归档至数据库，供后续查询与分析。

B.2 多机协同接地线作业流程

该流程展示了异构多机器人系统协同完成一项复杂操作任务的典型过程。

- a) 作业启动与三维场景确认：地面工作人员打开五防锁并下达检修指令。人形机器人与无人机协同对作业区域进行快速扫描，通过多源数据融合更新三维场景模型，确认作业环境与目标设备状态。
- b) 协同任务分解与规划：群体决策框架根据作业指令，将任务动态分解为移动、举升、验电、挂接等子任务，并分配给高空作业车、人形机器人及无人机。
- c) 机器人就位与举升：高空作业车与无人机自主移动至作业点。人形机器人步入高空作业车作业平台，由高空作业车将其托举至指定作业高度。在此过程中，各机器人持续共享位置与状态信息。
- d) 协同验电操作：人形机器人从工具舱中取用验电器。无人机在空中监视验电器的接近路径，为人形机器人提供实时视角反馈，辅助其将验电器准确接触带电部位并判定是否满足操作条件。
- e) 协同挂接操作：验电结束后，若满足条件，人形机器人执行接地线挂接操作。无人机持续监控挂接设备的姿态，并将信息反馈给人形机器人，人形机器人根据反馈微调动作，确保挂接可靠。
- f) 作业完成与资源释放：挂接任务完成后，系统确认操作结果。所有机器人接收指令，返回待命区或驶向下一作业点，系统释放机器人资源以备新任务。

B.3 应急事件响应流程

该流程适用于对变电站内突发异常事件进行初步识别与响应。

- a) 事件感知与识别：机器人通过持续的环境监测，自动识别异常事件，并立即向后台系统发

送告警信息。

- b) 初步研判与预案启动：系统接收到告警后，结合机器人上传的现场数据，对事件类型和等级进行初步研判，并自动启动相应的应急预案。
- c) 应急资源调度与出动：系统调度距离事发地点最近的机器人，并可根据事件性质，增派其他类型的机器人协同前往。机器人接收指令后自主规划路径，快速抵达事发区域。
- d) 现场处置与信息回传：机器人抵达后，执行预设的处置措施，如布设安全警示带、进行持续近距离监测、利用扬声器进行语音警示等。同时，将清晰的现场视频、环境数据等高价值信息实时回传至指挥中心，为人员决策提供支持。
- e) 后续交接与总结：待专业人员抵达现场后，机器人配合进行工作交接，并提供事件前后全过程的数据记录。事后，系统基于机器人采集的数据生成事件分析报告。

中国机械工程学会标准征求意见稿