

高压带电作业机器人绝缘防护技术的应用

李胜花 白陆 杨佳睿 李波

国网宁夏超高压公司

摘要: 为满足电力作业的供电稳定性要求, 高压带电作业机器人在其中发挥出重要作用。本文对高压带电作业机器人构造与技术配置加以分析, 探讨了机器人本体绝缘防护技术以及机器人电气系统绝缘防护技术在高压带电作业机器人系统中的应用, 同时开展相应的实验研究, 明确其绝缘方法, 阐述了绝缘斗臂车实验、绝缘机械臂实验以及绝缘平台实验的具体过程, 说明该绝缘系统在高压带电作业中具有较高的可靠性。

关键词: 高压带电作业; 机器人; 绝缘防护技术

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-6288.2023.04.229

引言

随着我国技术水平的升级, 机器人在高新技术领域得到广泛应用, 其中就包括高压带电作业。当前, 高压带电作业机器人大多以车辆为支撑系统, 通过技术人员控制机械臂完成相应的作业操作。考虑到高压带电作业的危险性, 在实际作业中有必要加强绝缘防护技术的应用, 防止高压电流传导至地面给造成生命财产安全隐患。与此同时, 还需要对机器人内部构件采取一定的绝缘防护措施, 确保高压带电作业的顺利开展。

一、高压带电作业机器人构造与技术配置

(一) 构造

高压带电作业机器人由机械臂、车辆、液压装置等构成, 在机器人运行过程中, 由技术人员对其运行状态、运行参数等进行全面控制。机器人系统中包括大量电子器件, 整体运行效果受高压电影响较大。(1) 高压电产生的强烈电磁波可影响控制系统运行状态, 因此需要采取有效的防护措施;(2) 机器人与车辆之间有绝缘防护, 若绝缘系统失效, 高压电会通过车辆进行接地, 造成严重的安全隐患, 给生命财产安全带来威胁^[1]。

(二) 技术配置

1. 绝缘斗

高压带电作业机器人运行过程中, 可通过绝缘斗搭载技术人员进行电力检修, 同时避免高压电流进入到系统中, 这对绝缘斗的绝缘性提出较高要求。为满足绝缘斗的绝缘性能要求, 在选择相关绝缘材料时应充分考虑其强度及可塑性, 进而应用在绝缘斗制造中。

2. 无线数传台

为全面保障技术人员生命安全, 应全面掌握高压带电作用机器人运行过程中可能出现的安全隐患, 其中就包括控制回路故障。因此在进行系统设计时, 对无线数传台的绝缘防护提出很高要求, 进而控制电磁波对设备正常通信功能产生干扰, 确保系统处于正常、稳定状态。

3. 机器人电器系统

高压带电作业机器人运行过程中涉及大量电器设

备, 为规避电力风险, 应通过绝缘防护技术这部分电器进行有效防护。对于整体机器人系统来说, 部分构件也需要具备很高的绝缘防护性能, 例如车辆支架系统, 应保证设备与地面绝缘, 避免高压电流传导至地面; 系统中各构件之间也需要保证绝缘性能良好, 以提高整体系统的绝缘性^[2]。

二、绝缘防护技术在高压带电作业机器人系统中的应用

(一) 机器人本体绝缘防护技术

为隔离作业技术人员与高压电场, 电力检修作业期间大多采取遥控操作机械臂的方式, 由技术人员控制六自由度操作主手, 通过工控机、数传台、控制器进行信号数据传递, 实现六自由度机械臂通讯, 完成相应的作业任务。为保证技术人员人身安全, 应针对机器人本体采取相应的绝缘防护技术。

1. 绝缘斗

绝缘斗设计为两层结构, 其中外层采用FRP绝缘材料, 凭借其良好的强度与可塑性起到固定和支撑作用; 内层采用聚乙烯绝缘材料, 具有良好的耐电压性能与绝缘性能, 可以保证技术人员与高压电流隔绝, 产生良好的保护作用。绝缘斗两层结构材料的电气性能如表1所示。

表1 绝缘斗两层结构材料的电气性能

材质	外层FRP绝缘材料	内层聚乙烯绝缘材料
耐电压 (kV/min)	20	50
抗拉强度 (MPa)	165	19.0
抗弯强度 (MPa)	220	-
弹性模量 (MPa)	6500	-
20°C 电阻率 (Ω/m^2)	3.5×10^{12}	1×10^{14}
表面电阻率 (Ω/m^2)	1.8×10^{13}	-
电场强度 (MV/m)	29.3	35
介电常数	4.08	-
损耗因数	0.033	1×10^{-4}

2. 无线数传台

加装无线数传台的主要目的是避免机械臂绝缘防护失效导致高压电对技术人员造成损害, 实现主控制柜与

从控制柜的有效隔离, 进而通过相应的绝缘防护措施保证技术人员人身安全。无线数传台运行期间, 其运行技术参数如表2所示。

表2 无线数传台运行技术参数

项目	参数
运行频率	220~240MHz
发送载波功率精度	±2dB
发送频率稳定性	±1.5×10 ⁻⁶
接收同信道抑制	-12dB
接收最大灵敏度	-111dBm
发送信号标准	RS-232
发送邻道功率	-65dBc
连接器	DB-25凹型
数据接口频率	0、3、1.2、2.4、4.8、9.6、38.4kbps
数据延迟时间	≤7ms
字节长度	10或11位

(二) 机器人电气系统绝缘防护技术

高压带电机器人作业过程中, 机械臂与高压线路直接接触, 为实现系统安全运行及作业平台的绝缘, 应针对机器人电气系统采取相应的绝缘防护技术。

1. 机器人系统动力源

机器人系统动力源采用车载柴油发电机, 基于升降系统上的动力线实现供电, 安装10kV隔离变压器起到对地绝缘作用。系统动力源一次、二次电压分别为380V、215V×3; 输入功率为15kVA; 最大输出功率为6.3kVA; 相间绝缘等级为10kV。

2. 机器人系统设计

在高压电带机器人关节末端安装绝缘夹具起到绝缘作用, 同时还在机械臂上涂抹了涂绝缘涂料。

3. 绝缘平台设计

操作平台时整体高压带电作业机器人的重要组成部分, 保证操作平台性能良好不仅可以保证技术人员生命安全, 还可以为复杂线路检测提供技术支持。带电作业操作平台由机器人平台支架、绝缘控制踏板等绝缘防护系统构成, 在不同构件的共同作用下, 形成良好的绝缘性能^[5]。

其一, 机器人平台支架以硬铝合金为主要材料, 同时在外围缠绕环氧树脂布, 起到提高平台质量与强度的作用。平台绝缘成型外壳的主要材料与辅助材料分别是玻璃钢以及零收缩树脂, 通过L-RTM工艺可减少外壳表面出现气泡, 并在40kV电压环境下抗击穿达1min。

其二, 绝缘伸缩设备主要由四部分构成, 首先是控制踏板, 其功能是控制液压缸伸缩; 其次是液压缸, 其功能是实现能量转换; 再次是伸缩管套, 管套可根据机器人平台活动状态进行移动; 最后是伸缩管, 机械臂可随着伸缩管移动^[3]。在上述部件的共同作用下, 机械臂可以有效进行电力作业, 即使在复杂线路环境中也可以保证良好的绝缘性能。此外, 绝缘伸缩设备还具有工艺

良好、机械强度高的特点, 进一步体现出良好的装配优势。绝缘伸缩设备以玻璃钢为主要材料, 其性能参数如表3所示。

表3 玻璃钢性能参数

项目	参数
密度 (g/cm ³)	1.95±0.15
抗弯强度 (MPa)	≥240
抗压强度 (MPa)	≥240
吸水率 (%)	0.6±0.15
电阻 (Ω·cm)	1012~1015

其三, 高频变压器磁芯型号设计常见的方法为AP法与KG法, 即利用几何参数完成型号设计。以AP法为例, 在进行高频变压器设计与选型时, 公式表示为:

$$AP = A_w A_e = \frac{P_T \times 10^4}{K_o K_f f_s B_m j} \quad (1)$$

(1) 中 A_w 表示磁芯窗口面积; A_e 表示磁芯有效截面积; P_T 表示高频变压器功率; K_o 表示窗口使用系数; K_f 表示波形系数; f_s 表示开关管频率; B_m 表示变压器磁感应强度; j 表示电闸电流密度。

其中, 高频变压器功率 P_T 会受到变换器以及输出电路影响, 得到实际功率公式:

$$P_T = P_o \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{\eta}\right) \quad (2)$$

(2) 中 P_o 表示输出功率; η 表示变压器效率。将(2)带入(1)中, 可得:

$$AP = A_w A_e = \frac{P_T = P_o \left(1 + \frac{\sqrt{2}}{\eta}\right) \times 10^4}{K_o K_f f_s B_m j} \quad (3)$$

其四, 机械臂是整个带电作业机器人中的重要组成部分, 通过微控制器技术进行机械臂设计, 得到主从式液压机械臂。机械臂运行期间, 可通过远近两种方式进行控制, 主手与从手遵循相同的控制原理, 保证从手可随着主手运动而运动, 进而完成一系列电力作业。与此同时, 机械臂上光纤的安装还可以有效实现信息传递, 保证作业人员可以及时了解相关参数, 为电力作业的开展提供数据支持。

其五, 绝缘遮蔽罩设计中, 根据功能差异可分为机械臂遮蔽罩以及相间遮蔽罩, 前者以玻璃钢为主要材料, 安装在机械臂四周起到保护作用, 避免机械臂运行过程中出现短路问题; 后者以软质导线为主, 可为带电作业机器人构建相应的防护层, 避免机械臂运行时触碰线路造成系统短路问题^[5]。

三、高压带电作业机器人绝缘系统实验研究

(一) 绝缘方法

高压带电作业机器人绝缘系统运行采取3种绝缘方法, (1) 系统对地绝缘。使用绝缘斗臂车, 整车耐电压为105kV/1min, 泄漏电流测试为70kV/1min。(2) 技术人员与电场绝缘。由绝缘斗承载技术人员进行电力作业, 实现操控主手控制, 技术人员与机械臂之间通过光

纤通信实现信息传递,进而保证技术人员与电场绝缘。

(3) 相间短路绝缘。空气间隙和绝缘平台在相间起到绝缘作用,由绝缘遮蔽罩实现绝缘防护,同时机械臂上的绝缘材料也可以起到防护作用,避免机械臂作业期间触碰线路出现系统短路情况。相间短路绝缘的绝缘模式主要包括以下几种,一是机械臂绝缘,使用耐压20kV、厚度3mm的机械臂建立模型,保证良好的表面平整度与密实程度,同时根据构件尺寸设计关节活动范围,避免机器人运行期间互相干扰;二是平台绝缘,设计绝缘斗规格为610mm×610mm×1066mm,确保底座间距 ≥ 500 mm,使用绝缘材料对机械臂伺服系统及其他各构件进行封装,避免高压线磁场对其造成干扰。与此同时,为减少高压电场对技术人员的影响,应保证留出0.4m安全距离。在进行绝缘平台设计时,支架为钢结构并在其外部缠绕环氧玻璃布,通过机械臂连接绝缘子(耐受电压40kV)与绝缘平台,有效防止平台作业过程

中出现短路的情况;三是边相遮蔽,边相遮蔽是电力作业中必须采用的防护方法,即使用绝缘遮蔽罩其防护作用。其主要材料为软质导线,具有良好的抗紫外线及臭氧性能,同时其柔软度并不会受到低温环境影响,因此在寒冷天气下仍可以有效应用^[2]。

(二) 实验方法

1. 绝缘斗臂车实验

在进行绝缘斗臂车实验的过程中,主要可以分为斗臂车绝缘臂实验以及其他构件的绝缘实验。首先在进行斗臂车绝缘臂实验的过程中,应采用连续升压法提升电压,将检测电极安装在机械臂外部,确保在有效绝缘区内完成实验。实验过程中,应避免出现击穿、过热等情况的出现,并采用规格为12.7mm的导电胶带作为试验电极。斗臂车绝缘臂实验在额定电压下的1min工频耐压实验电压数据以及交流泄漏实验数据如表4所示。

表4 斗臂车绝缘臂1min工频耐压实验电压数据及交流泄漏实验数据

额定电压/kV	1min工频耐压实验电压/kV		交流泄漏实验		
	实验距离L/m	出厂实验	实验距离L/m	实验电压/kV	泄漏值/ μ A
10	0.4	50	0.4	20	≤ 200

在完成绝缘斗臂车实验后,还需要进行斗臂车整车实验。在绝缘系统运行期间,除了绝缘臂可发挥相应的绝缘防护作用,胶皮管、光缆、平衡拉杆等构件也具有一定的绝缘需求^[4]。因此有必要进行斗臂车整车交流泄漏实验,同样控制额定电压在10kV,实验电压为20kV,泄漏值 $\leq 500 \mu$ A。

2. 绝缘机械臂实验

同绝缘斗臂车实验一致,绝缘机械臂实验也由交流耐压实验与交流泄漏实验构成,在对机械臂施加电压时,由一个机械臂末端施压,另一机械臂末端接地,1min工频耐压实验电压为42kV。机械臂和绝缘平台之间1min工频耐压实验电压为42kV。而在进行交流泄漏实验时,不论是两机械臂末端还是机械臂和绝缘平台之间,都采用规格为12.7mm的导电胶带作为试验电极,其实验电压为20kV,泄漏值 $\leq 500 \mu$ A。

3. 绝缘平台实验

为保证绝缘平台实验的顺利开展,可以将锡箔纸贴在绝缘平台上下,保证边沿距离在150mm以内。在进行交流泄漏试验时,仍采用规格为12.7mm的导电胶带作为试验电极,额定电压为10kV,电极实验沿面间距为0.4m,1min工频耐压实验电压为50kV,实验电压为20kV,泄漏值 $\leq 500 \mu$ A。值得注意的是,在进行绝缘平台实验时,应保证绝缘平台表面平整性良好,避免对后续实验造成不利影响。

4. 实验结果分析

绝缘平台交流耐压实验中,1min耐压时间下,机械臂与平台、机械臂末端以及机械平台的实验电压分别是42kV、42kV、30kV,3组绝缘护套的实验电压均为

20kV;交流泄漏实验中,1min耐压时间下,机械臂与平台、机械臂末端以及机械平台的实验电压分别是20kV、20kV、10kV,3组绝缘护套的实验电压均为10kV。综合上述实验过程来看,为满足高压带电作业的绝缘防护要求,分别采用了系统对地绝缘、技术人员与电场绝缘以及相间短路绝缘3种方法,同时对不同方法的应用效果进行实验验证。实验中,避免了击穿、过热等情况的出现,并将泄漏值控制在500 μ A以内,说明该绝缘系统的应用具有良好的绝缘防护性能^[3]。

结语

综上所述,机器人在高压带电作业中发挥出十分关键的作用,在落实绝缘防护技术时,技术人员应充分关注绝缘斗、无线数传台以及机器人电器系统的设计,保证材料应用与参数设定的科学性与合理性,保证起到良好的绝缘防护作用。绝缘防护技术的应用应从机器人本体以及整体电器系统出发,同时针对高压带电作用安全要求应用性能良好的绝缘系统,提升其应用成效,为我国电力系统稳定运行提供技术支持。

参考文献

- [1]陈富国,赵盼盼,牛博,等.输电线路带电作业机器人的电磁分析与防护设计[J].高压电器,2023,59(02):81-88+96.
- [2]陈欣欢.配电网带电作业机器人机构配置与协调控制方法分析[J].吉林化工学院学报,2022,39(03):95-99.
- [3]徐善军,夏益青,杜婧,等.高压带电作业机器人系统研制[J].科技创新与应用,2020(04):31-33.