

# 输电线路智能带电检修关键技术研究综述

骆文君

惠州市新科创工程建设监理有限公司

**摘要:** 输电线路智能带电检修是一种在输电线路带电状态下进行检修作业的新技术,可以有效避免停电造成的社会经济损失。该技术的关键在于利用智能机器人系统代替人工操作,实现输电线路在线检测、故障诊断和维修等功能。本文综述了输电线路智能带电检修的关键技术,包括取能技术、控制技术、传感技术、导航技术、防护技术和人机交互技术等。取能技术为机器人系统提供能源;控制技术实现机器人运动控制;传感技术获取线路状态信息;导航技术确保机器人按预定路径行走;防护技术保证作业安全;人机交互技术提高作业效率。该技术的研究和应用将极大提高输电线路检修效率,降低运维成本,确保电网稳定运行,对提高我国电力系统的智能化水平和可靠性具有重要意义。

**关键词:** 输电线路; 智能带电检修; 关键技术

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6261.2023.12.090

## 引言

当前,随着我国电网规模不断扩大,输电线路长度持续增加,对输电线路的运行维护提出了更高要求。传统的输电线路检修方式存在检修周期长、成本高、作业风险大等问题。为解决这些问题,智能带电检修技术应运而生。智能带电检修技术是在输电线路带电状态下,利用智能机器人系统替代人工进行检测、诊断和维修作业的新技术。与传统检修方式相比,该技术具有周期短、成本低、作业风险小的优势,可有效避免大范围停电造成的经济损失。但实现智能带电检修面临诸多技术挑战,需要对机器人取能、控制、传感、导航、防护和人机交互等关键技术进行深入研究。只有突破这些关键技术,才能真正实现输电线路智能带电检修,提高电网运维水平。

### 一、输电线路智能带电检修的优势

#### 1. 避免大范围停电带来的经济损失

输电线路作为电力系统骨干网络的重要组成部分,其可靠运行直接影响着下游用户的供电质量和连续性。传统的线路检修作业需要停电,这不仅会导致大范围地区的用户受到影响,还可能引发严重的经济损失。特别是对于一些连续性生产的工业用户,即使短暂的断电也可能造成生产过程中断、产品损坏等严重后果,从而带来巨大经济损失<sup>[1]</sup>。此外,对于一些关键用户,如医院、交通枢纽等,供电中断可能会威胁到人民生命安全和稳定运行。智能带电检修技术的应用可以避免上述问题,线路在带电状态下进行检修,用电区域不会出现大范围停电,从而最大限度地减少了停电造成的经济

损失。

#### 2. 缩短检修周期,提高效率

传统的输电线路检修作业通常需要大量的人力物力投入,包括线路停电、现场作业准备、架设绝缘操作设备、检修作业实施、拆除临时设施等环节,整个过程周期较长,效率低下。而智能带电检修技术利用先进的机器人和智能装备,可以在线路带电状态下安全高效地开展作业,大大简化了传统作业流程,缩短了检修周期。此外,智能带电检修技术采用自动化、智能化装备,不仅可以避免因人为操作不当导致的安全隐患,还能够提高作业质量和一致性,从而提高整体检修效率。智能检测设备还可以对线路的各个部位进行全面、精准的状态监测,实现状态维护,最大限度延长线路安全运行周期,减少检修频次,进一步提高线路运维效率。

#### 3. 降低人工作业风险,提高安全性

传统的线路检修作业大多需要人工攀爬线杆或通过吊车对高空线路进行操作,存在较高的生产安全风险。智能带电检修技术通过先进的机器人和智能装备实现远程操作,人员可以在地面就位实现对线路的检测、维护等作业,完全避免了攀登高空和直接接触线作业,从根本上消除了人身安全风险。即使遇到恶劣天气,也可以在安全环境下远程操控机器人设备进行作业,大大提高了输电线路检修的安全系数。

#### 4. 减少运维成本,提高经济性

输电线路是电网的“大动脉”,其运维成本占电网运营成本的很大比重。传统的停电检修作业需要大量的人力物力投入,检修前需要架设临时绝缘操作通道,人

工攀登、直接接触线等，导致检修成本较高。而且停电检修会造成部分地区用电中断，给用户和电网公司带来间接的经济损失。相比之下，智能带电检修技术显著降低了线路检修的人工成本，无须架设复杂的临时作业通道，无须大量作业人员进行高空攀登等高危作业，只需少量地面操作人员远程操控智能机器人即可完成作业，从而大幅减少人工投入。同时，线路在带电状态下进行检修，避免了停电带来的经济损失。此外，智能化设备的运行可靠性更高、使用寿命更长，也能从长远来看降低设备采购和更新的成本支出。因此，智能带电检修技术的应用可以显著降低输电线路的整体运维成本，提高经济性。

## 二、输电线路带电检修需求

### 1. 架空线路运行环境及带电检修需求

架空输电线路长期面临复杂多变的自然环境，包括强风、冰雪、雷击、盐雾、酸雨等，会加速绝缘子涂层老化、金具腐蚀、导线缺陷等问题。同时，外力破坏如树枝缠绕、鸟击、外物撞击也是隐患。这些问题若不及时排除，可能导致绝缘子串损坏、金具断裂、导线绞合散开等严重事故，危及线路安全运行。此外，架空线路输电容量大、电压等级高，一旦发生故障会造成大范围供电中断，影响范围广、损失巨大。因此，必须定期开展带电检测和维护，发现并消除潜在隐患，确保架空线路的安全可靠运行，提高供电可靠性。

### 2. 电力电缆运行环境及带电检修需求

随着城市化进程加快，电缆线路应用日益广泛。但由于长期敷设在潮湿、盐碱、腐蚀性土壤环境中，易导致金属件腐蚀、绝缘层老化开裂等缺陷。此外，城市建设及第三方施工也可能造成电缆外力撞击损伤。上述问题若不及时检修，都可能引发绝缘击穿、导体短路等严重故障。电缆线路一旦发生故障，不仅会造成较大范围的供电中断，而且由于线路敷设在地下，故障点难以快速精确定位和切除，影响范围可能扩大<sup>[2]</sup>。因此，必须通过带电检修手段，对电缆各部位状态开展全面检测，及时发现并修复缺陷，避免故障扩大，提高线路可靠性。

### 3. GIL运行环境及带电检修需求

GIL作为未来城市超高压大容量输电的重要方式，其内部绝缘气体和外壳金属均面临一定的风险。长期

运行会导致内部SF<sub>6</sub>等绝缘气体老化、渗漏，降低绝缘强度；外壳也可能出现应力集中、腐蚀等问题，影响绝缘性能。一旦发生击穿或短路，将造成严重事故。另一方面，GIL为封闭式结构，设备间存在电磁耦合，局部故障可能会改变外部绝缘，引发更大范围的停运。而传统停电检修作业不仅影响范围大，而且GIL内部环境狭窄、有害气体存在，给检修带来极大挑战。因此，必须利用带电检测技术，对GIL各部位绝缘状态开展实时监测，及时发现并修复隐患，确保长期安全运行。

## 三、输电线路智能带电检修关键技术

### 1. 取能技术

输电线路智能带电检修机器人需要在高压带电环境下工作，必须具备独立供电能力，避免接入外部电源引入电击风险。取能技术就是从线路本身获取所需的运行电能，并通过隔离、滤波等方式将其转化为机器人可安全使用的电能形式。常见的取能方式包括电容分压取能、电磁感应取能和电离子风取能等。电容分压取能利用线路与机器人机身形成电容分压电路，通过静电耦合获取电能；电磁感应取能则利用线路的电磁场感应出足够的电流驱动机器人运行；电离子风取能则利用高压线路电离空气产生的离子风驱动微型涡轮机发电。不同取能技术适用于不同的线路电压等级和作业环境，需要结合具体应用场景进行选择。同时，还需要对取能电路进行优化设计，提高取能效率，并通过多级变换将取能电能转换为适合机器人使用的电压电流形式。此外，取能装置还需具备一定的机械强度和绝缘能力，确保在恶劣环境下的可靠工作。

### 2. 控制技术

智能带电检修机器人涉及多自由度运动控制、作业过程自动化等多个环节，因此需要先进的控制技术为支撑。机械运动控制技术，通过构建机器人运动学和动力学模型，结合现代控制理论，实现机器人各关节的协调控制，保证运动的平稳性和精确性。同时，还需要融合视觉、惯性传感等反馈信息进行闭环控制，提高跟踪和抗干扰能力。作业过程控制技术，包括作业流程规划、自动化操作等。通过事先建模和优化，生成最优作业路径，并结合实时状态感知，动态调整控制策略，实现自适应操作。对于复杂的检修作业，还需要机器人具备一定的智能决策能力，根据获取的线路健康状态信息，自

主判断并执行相应的维护操作。此外，控制系统还需要具备容错、自修复等能力，确保在复杂环境下的可靠运行。同时，对于多机器人协同作业场景，需要构建多智能体控制系统，实现高效协作。控制算法的实时性、鲁棒性也是关键。

### 3. 传感技术

输电线路智能带电检修需要对线路各部件的状态进行全面检测，及时发现缺陷和潜在故障隐患，因此需要集成多种先进的传感技术。电压、电流、电磁场等基础参数检测，这些参数的实时监测对于机器人作业安全至关重要。线路外观检测技术，如高精度视觉传感、激光成像等技术，用于全面获取线路外观缺陷信息。再者，对于不可见的内部缺陷，需要采用射线成像、超声波探伤、电磁场成像等技术进行无损检测。此外，机器人自身的位姿检测、环境感知等也离不开惯性导航、视觉导航等传感技术的支持。传感器信号的实时处理、融合与分析也是关键的技术难点。传感系统需要具备高精度、抗干扰能力，并能在恶劣环境下长期可靠工作。同时，传感器的小型化、集成化也是一大挑战，需要将多种传感器模块紧凑布置于机器人本体，并与控制系统协同工作。

### 4. 导航技术

输电线路带电检修机器人需要沿着线路安全、精准地运行，并识别线路的各个部位，完成检测维护作业。因此塔、绝缘子串等，也需要特殊的导航算法支持。多机器人协同作业时，彼此之间的相对位置校准也很关键。

### 5. 防护技术

智能带电检修机器人面临着高压、强电磁场、恶劣气候等复杂环境，需要具备全面的防护能力，确保作业安全。绝缘防护技术，机器人整体需要具备足够的绝缘强度，并采用绝缘外壳或绝缘材料包裹，避免与带电体接触而发生电击或闪络。对于运动部件，需要采用特殊绝缘结构设计和间隙尺寸控制。同时，机器人机身也需要做好静电防护。电磁防护技术，高压线路下存在强电磁场，会对机器人电子元件和通信系统造成干扰。因此需要对机器人进行电磁屏蔽和抗干扰设计，并优化系统的抗电磁干扰性能。此外，机器人还需要具备一定的机械防护能力，如防冲击、防覆压等，避免在恶劣环境

下发生机构损坏。同时，对于检修作业过程中可能产生的电弧、化学污染等也需要做好相应的防护。

### 6. 人机交互技术

智能带电检修机器人的作业过程需要人机协作，通过人机交互技术实现人机协调指挥和状态监控。需要构建高效的人机交互界面，通过图形化、可视化的方式展示机器人的运行状态、传感信息、检修操作等，方便作业人员快速掌握情况。同时，界面需要具备远程控制功能，人员可以下达各种指令，调整作业流程。此外，人机交互系统需要支持智能决策辅助，对检修过程的数据进行分析和处理，为人员提供决策建议。必要时，系统还可以具备一定的自主决策能力，在人员确认后自动执行相应操作。同时，人机交互界面还需要支持多模态交互，如语音识别、手势识别等，提高人机交互的自然性。对于复杂的检修操作，虚拟现实技术还可以提供直观的模拟训练环境，方便人员提前规划。人机交互技术还需要结合远程通信技术，实现远程操控和实时监控，使得人员可以远离现场，在安全环境下指挥作业。此外，多机器人协同作业时，人机交互系统也需要支持协同控制。

### 结束语

综上所述，输电线路智能带电检修技术是智能电网建设的重要组成部分。该技术的关键在于突破取能、控制、传感、导航、防护和人机交互等关键技术，才能实现安全高效的线路检修作业。未来，随着人工智能、机器人和新材料等技术的发展，相信输电线路智能带电检修技术一定能取得重大突破，为建设坚强智能电网贡献力量。当前，我国智能电网建设正处于关键时期，亟须加大对输电线路智能带电检修关键技术的研究投入，培养高水平复合型人才队伍，抓住机遇，直面挑战，力争在该领域取得新的重大理论和技术突破。

### 参考文献

- [1] 江维. 绝缘子/引流板带电检修机器人机械手自主定位与鲁棒运动控制[D]. 武汉大学, 2017.
- [2] 江维, 吴功平, 樊飞等. 高压输电线路带电检修机器人作业臂运动优化[J]. 工程科学学报, 2016, 38(11): 1643-1651.