

# Management Mode Creation of Integrated Research and Development for Intelligent Inspection Robot System of Transmission Lines in Complex Environment of Border Areas

Zhigang Wang<sup>1</sup> Song Yang<sup>2</sup> Gongping Wu<sup>3</sup>

1. State Grid Jilin Electric Power Supply Company, Changchun, Jilin, 130021, China

2. State Grid Jilin Baishan Power Supply Company, Baishan, 134300, China

3. Wuhan University, Wuhan, Hubei, 430000, China

## Abstract

This paper summarizes the management mode creation and work connotation of the integrated research and development of the overhead transmission line inspection robot developed by the research and development team of the transmission line inspection robot of the State Grid Jilin Electric Power Supply Co., Ltd., including organizational management, research and development team management and research and development innovation, institutional innovation and application innovation and its main management work innovation connotation. Through continuous research and development of integrated management mode innovation, the development of complex and difficult inspection robot system has been continued and applied, forming a professional R&D team and creating a new management mode.

## Keywords

overhead transmission line; intelligent inspection robot system; integrated research and development; management mode

# 边境地区复杂环境下输电线路智能巡检机器人系统研用一体管理模式创建

王志钢<sup>1</sup> 杨松<sup>2</sup> 吴功平<sup>3</sup>

1. 国网吉林省电力有限公司, 中国·吉林 长春 130021

2. 国网吉林白山供电公司, 中国·吉林 白山 134300

3. 武汉大学, 中国·湖北 武汉 430000

## 摘要

本文总结归纳了国网吉林省电力有限公司输电线路巡检机器人研发团队十年来持续开展的架空输电线路巡检机器人研用一体的管理模式创建及工作内涵, 包括组织管理、研发团队管理与研发创新、制度创新和应用创新及其主要管理工作创新内涵。通过持续的研用一体管理模式创新, 使得复杂而又困难的巡检机器人系统研发得以持续并走向了应用, 形成了专业的研发团队, 并创建了新型的管理模式。

## 关键词

架空输电线路; 智能巡检机器人系统; 研用一体; 管理模式

## 1 引言

白山市地处于中国边境长白山山区, 毗邻朝鲜, 国网吉林白山供电公司所辖多数线路跨越原始森林等无人区, 输电线路巡视极其困难。为解决此问题, 在国网吉林省电力有限公司积极探索新型巡视方法, 成立了由国网吉林白山供电公司作为牵头单位, 联合武汉大学技术人员组建的创新研发团

队, 历经十年时间, 研发出了高塔跨越林区输电线路巡检机器人系统, 包括智能巡检机器人本体、远程监控基站、在线充电基站和上下线装置, 以及机器人行走地线的少障或无障道路结构。依托跨越长白山原始森林和无人区的 119 公里、332 级塔的 200Kv 松长甲线, 建设了包括 15 级充电基站、2 级终端塔上下线装置和机器人沿地线行走的道路结构的示范应用工程, 实现了机器人在线不下线对 119 公里全线的自主

巡检,解决了松长甲线巡视难的问题。

通过在不断研发改进以及不断积累应用经验,国网吉林省电力有限公司研发团队逐步积累,在传统管理办法的基础上形成了一整套输电线路巡检机器人巡检管理模式,推动了输电线路巡检机器人系统的实用化。

如:在2007年机器人方案论证阶段,研发团队提出“穿越越障”巡检机器人解决方案,而这个方案需要将目前各级直线塔的悬垂挂板改造更换为机器人能通过的“C”型结构、在耐张塔头附加一个耐张过桥和防震锤线来改造更换为削顶线夹;在2008~2015年机器人技术与系统研发期间,持续进行了四个课题讨论和分析,使得研发能持续进行;在2015~2018年面向应用阶段,为了解决机器人持续巡航问题和解决机器人自动上下线问题,研发团队分别提出在塔上安装太阳能充电基站和上下线成套装置的解决方案,并争取了两个企改项目资助,成功实现了机器人在线不下线持续对跨越长白山原始森林的119公里松长甲线全线巡检和雷击故障点的查找。2019年将在119公里松长甲线建设与机器人配套的通信网络和集控后台,实现人不出屋就能在集控室内对巡检机器人进行实时监控,实时接收机器人巡检图像和数据。

十多年的坚持结出的硕果,得益于不断创新研用一体的管理模式。下面对十年多年来的管理模式创新进行总结,供他人参考借鉴。

## 2 研用一体组织保障模式

### 2.1 组织架构

图1所示为研用一体的组织架构。

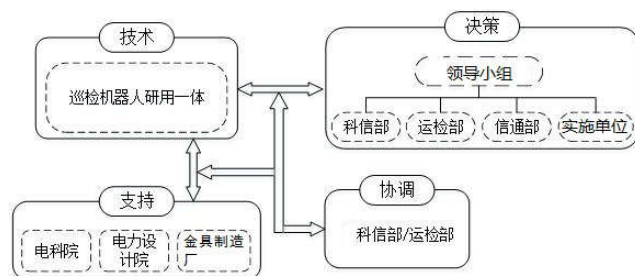


图1 研用一体组织架构图

其中,“技术”是由国网吉林省电力有限公司与武汉大学组成的巡检机器人研用一体的创新研发团队,由国网吉林省电力有限公司提出功能需求,由武汉大学与国网吉林省电力有限公司共同提出需求的技术解决方案,共同提出中长期

规划方案,由国网吉林白山供电公司进行解决方案的修正;“支持层”则对涉及线路改造与安全进行可行性论证,甚至需要对改造结构制造样品,并将样品提供有资质的第三方按相关标准进行检验测试及出具型式试验报告;“决策”则依据技术方案和相关论证情况进行综合分析和评估,决定涉及线路改造与安全重要事项,评估各期项目效果及应用发展方向;“协调”则提供各层级间和层级内部关系、任务及实施方式的协调。

### 2.2 创新组织管理工作内涵

在图1的组织管理架构的保障下,管理团队、实施单位和研发团队不断创新组织管理工作内涵,在符合电力行业发展趋势的同时不断改进创新。

(1)智能机器人管理模式是推进泛在互联网建设,保证电力安全可靠运行的需要。

在国网公司建设泛在互联网的总体规划目标下,各类高科技手段迅猛发展。在科技引领生产力的必然趋势下,利用机器人巡检输电线路也将成为建设坚强输电网的必要手段。机器人与人工协同巡检会更好的解决电网运维管理的实际问题,保证电力安全可靠运行。

(2)智能巡检机器人管理模式是巩固“三集五大”成果,推行国网“163”卓越管理体系的需要。

随着“三集五大”体系的建成,应用新技术提高公司精益化管理水平,适应的新形势下的管理要求,因地制宜解决实际困难,成为了目前公司面临的头等问题。机器人的成功应用为输电线路智能巡检提供了一种全新的、高效的集中管控与巡检方式。利用机器人开展智能巡检,能够推进对人力、物力等的集约管控,也是推行“163”卓越管理体系的需要。

(3)智能巡检机器人管理模式是改变传统巡检模式,弥补企业管理自身短板的需要。

利用机器人巡检方式,输电运维人员的工作方式将被大大改变,运维人员可以在监控中心通过控制巡检机器人就可以完成对多条输电线路的巡视任务,这无疑对输电专业的运维管理是一次巨大变革。利用机器人巡线能够彻底解决中国西部高原地区、山区长距离输电线路巡视难的问题,展望未来机器人巡视也将遍布整个电网。

(4)智能巡检机器人管理模式是保证人身安全,降低劳动强度,提高巡检效率和效益的必然选择。

随着经济社会的发展,线路电压等级的不断升高,对输

电线路的运维水平提出了越来越高的要求。特别是位于偏远边境山区的输电线路，由于所处地形复杂，运维十分困难。人工巡检巡视线路，尽管简单易行，但巡检的精度低、效率低、劳动强度大，巡线工的人身安全甚至受到威胁。无人机巡检可以减少工人登塔作业，但由于其遥控通信距离局限性，人员必须始终与无人机保持一定距离。在山区，人员也必须到达杆塔附近进行遥控，无法减轻人员登山的劳动强度。而且无人机续航时间非常有限，无法满足林区长距离输电线路巡视的需要。直升飞机巡检线路，尽管巡检效率高，但对气候条件的要求会相当严格，巡检时存在飞行安全隐患，同时人工操作仪器跟踪线路的劳动强度大，导航困难，并且巡检费用昂贵，成本过高。机器人巡视可以方便地穿越崇山峻岭，跨越林区、沼泽、湖泊和地面无法到达的无人区等地，几乎不受地域的限制，可以做到线路所至，机器人所达，巡检费用低，巡检精度高。

(5) 始终坚持研用一体，将关键技术攻关分解到各期项目上，分期分步骤攻克关键技术并带动机器人系统逐步成熟，从而可有效避免关键技术堆集、系统复杂带来的负效应问题，审时度势地把握好科技项目研发与技改项目应用，从而使得项目顺利地由研发向应用进行过渡。

(6) 严把安全关，如涉及到线路改造、机器人运行对线路影响，则必须经支持单位进行严格的论证，并委托有资质的第三方（中国电科院）进行检验测试，论证合格并提供决策层决策。

### 3 研用一体的技术保障模式

#### 3.1 创新团队

图2所示为研用一体创新团队组成图。

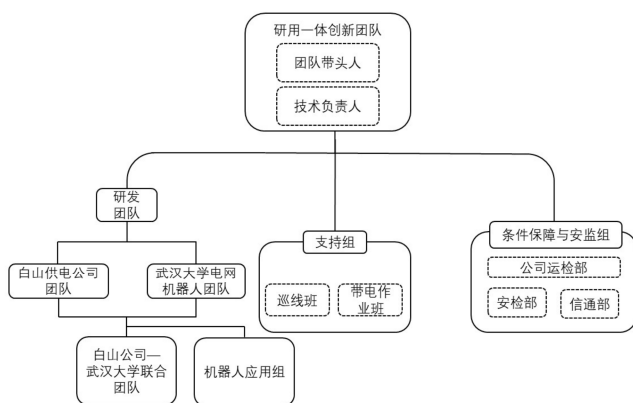


图2 研用一体创新团队结构图

由白山公司和武汉大学电力机器人研发团队联合组建研用一体创新团队。团队负责人由实施单位主管运维技术相关领导担任，下设研发核心团队、技术支持组和应用条件与安全保障组。其中，核心团队由联合团队和应用组组成，均为大学本科以上学历，承担技术与系统研发和机器人应用；技术支持组由资深的运维人员组成，提供研发过程中的技术支持和应用效果评估；条件与安全组由实施单位运检部、安监部人员组成，提供应用条件保障与安监及评估。

#### 3.2 创新技术管理工作内涵

(1) 要充分了解和理解关键核心创新人员的思维习惯，做到将尊重技术创新规律和研发人员创新“灵感”有机结合进行管理。

(2) 多种途径和手段调动创新团队成员的主动性和积极性，尤其是调动技术支持组的积极性。

(3) 优选专业领域优选人员进入团队，维持团队的创新活力。

#### 3.3 技术与系统创新

上述管理模式和工作内涵的创新，为研发团队的持续创新提供了有力保障。十多年来，研发团队取得了一系列创新性研究成果，主要有：

(1) 提出了融合机器人行走地线道路结构的穿越越障机器人新构型，为机器人在线上安全行走和自动巡线提供了平台技术保障；

(2) 提出了大坡度爬坡打滑检测、打滑程度辨识与智能自适应控制解决方案，实现了大爬度自动行走，有效地控制了行走轮磨损；

(3) 提出了融合多传感器的机器人自动检障定位算法、自主行走和自主巡检控制方法，实现了机器人沿线自主巡检；

(4) 提出了巡检机器人能耗预测模型及充电基站布局计算模型和自主充电解决方案，解决了机器人电源的智能管理、在线自主电能补给，实现了机器人在线不下线持续巡检；

(5) 提出了机器人自动上下线解决方案，解决了机器人上下线难的应用瓶颈问题；

(6) 研制了具有工业产品级的巡检机器人设备，通过了第三方检验测试和长时间、长里程、全天候、极低温的巡检应用验证；

(7) 提出了融合巡检机器人管理与线路运维管理的机器



人巡检管理解决方案,实现了大数据管理。

(8) 119公里跨越长白山原始森林和无人区的220kV松长甲线全线的在线不下线持续巡检应用,无论线路长度还是全线原始森林和无人区线路巡检,在国际上均属于首次。

## 4 研用一体的制度建设

### 4.1 制定电力行业标准

通过在国家能源局立项支持,国网吉林白山供电公司和武汉大学作为技术支持单位,参与制定了《架空高压输电线路机器人巡检技术导则》和《架空输电线路巡检机器人技术规范》两个电力行业标准,并已颁布。这两个电力行业标准分别为机器人的使用和机器人的技术性能提供了法律依据,也推动了巡检机器人发展。

### 4.2 制定企业标准

在上述两个电力行业标准指导下,结合国网吉林公司的实际,团队制定了相应的企业标准来规范巡检机器人系统的使用维护,规范与巡检机器人配套的地线道路结构、充电基站和上下线的相关要求及规范。

## 5 智能巡检机器人应用管理案例

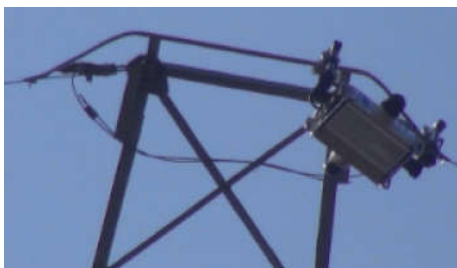
自2016年以来,巡检机器人研发全面转向示范应用阶段,并结合松长甲线巡线最困难的实际,开展了松长甲线机器人巡检应用示范工程建设。220kV松长甲线是向中国长白县供电的唯一一条输电线路,起于松江河变电站、止于长白变电站,全线均跨越原始森林和无人区及中朝边境,全长119公里,共332级塔,最大档距离932米,最大坡度35度(机器人实测),已完成机器人行走地线道路结构施工改造,建设了起止塔两级自动上下线装置,共布局建设了15级充电基站,巡检机器人已多次分别成功完成了全线不下线持续巡检、重点线路段巡检和雷击故障查找,巡检到的缺陷有:地线接续管变形、绝缘爆瓶、塔材联接螺栓缺失、金具锈蚀和雷击点等。在机器人研发阶段,已将机器人应用和相关管理列入了机器人研发,实现了巡检线路管理、巡检图像分析与管理、线路缺陷或故障管理及与线路关联,以及巡检作业管理和机器人维护管理等。机器人巡检松长甲线和巡检管理分别如图3、图4所示。



(a) 自动上下线



(b) 过直线塔



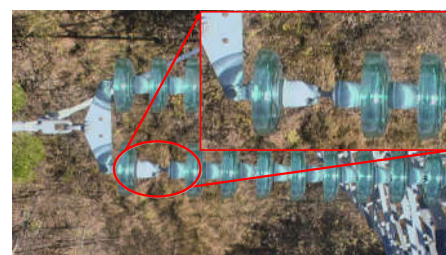
(c) 过耐张塔



(d) 自动充电对接



(e) 地线接续管变形



(f) 绝缘爆瓶



(g) 联接螺栓缺失



(h) 过耐张塔

图3 机器人巡检松长甲线案例典型图片



(a) 地面基站 (b) 监控操作与巡检管理界面

图4 地面基站及巡检管理

## 6 巡检机器人巡检作业流程

### 6.1 线路状况分析

收集巡检线路的设计、运行资料，进行线路状况分析，为制订巡检计划和任务规划提供参数。线路分析内容主要包括：

(1) 线路本体分析。线路类型、线路长度、线路高差、直线塔和耐张塔数量、最大坡度及其所在档段，以及线路是否有大跨越及其档距和杆塔号等。

(2) 机器人行走路径及其配套设备分析。行走路径是否具备穿越或跨越条件，是否安装在线充电基站及其数量和对应的杆塔号，是否安装自动上下线装置及其对应的杆塔号。

(3) 线路走廊及其环境分析。是否有交叉跨越及其所在档段和杆塔，是否跨越大江、大河、山区或森林及其所对应的杆塔，线路周边建筑或设施及其对应杆塔，线路周边交通情况等。

(4) 线路历史故障及缺陷分析。故障及缺陷类型及其部位。

### 6.2 任务规划

制订巡检计划，根据巡检目的和任务进行任务规划，做好巡检前的准备工作：

(1) 根据巡检内容确定机器人检测设备的配置。

(2) 根据巡检线路和天气情况，预估机器人巡检作业时间、工作日、每日巡检的起止杆塔号及其巡检线路段长度。

(3) 依据巡检线路情况，检查核实机器人巡检任务规划的正确性。

(4) 安排好人员、车辆、工器具等。

(5) 完成巡检前的其它准备工作。

### 6.3 巡检申请

准备以下材料，提出巡检作业申请，办理机器人巡检作业手续：

(1) 巡检线路名称、巡检线路或线路段长度、巡检模式、主要巡检内容等。

(2) 巡检计划。

(3) 巡检作业准备情况。

(4) 巡检作业应急预案。

### 6.4 出库检查

进行机器人出库检查，做好出库记录。出库检查内容主要包括：

(1) 设备完整性检查。

(2) 设备外观检查。

(3) 设备状态检查。

(4) 确定设备是否具备巡检作业条件。

### 6.5 上线前检查

机器人上线前，应在地面开展巡检系统自检和操作检查，确保系统功能正常。检查内容一般包括：

(1) 完整性检查。

(2) 联接的牢固性检查。

(3) 开机自检，检查机器人与地面监控基站的工作状态是否正常。

(4) 遥控操作检查，检查机器人与地面监控基站通讯是否正常，各项遥控操作是否正常。

## 6.6 上线及线上检查

机器人上线后，再次进行检查，检查内容主要包括：

- (1) 机器人和地面监控基站工作状态。
- (2) 遥控操作检查。
- (3) 任务规划检查，确认任务规划文件与实际巡检任务

一致。

## 6.7 巡检作业

一般巡检作业过程或事项如下：

(1) 线上检查完成且正常时，由地面监控基站向机器人发送巡检指令。

(2) 机器人正确接收并执行巡检指令，开始自主巡检作业，按任务规划自动执行巡检任务；或持续接受地面监控基站指令开展遥控巡检作业。

(3) 按巡检任务规划，机器人完成全部巡检任务，并到达下线杆塔处停止作业。

(4) 机器人可在在线充电装置处暂停作业自动充电，充电完成后继续巡检作业。

(5) 遇大风等突发天气状况时，机器人暂停作业并原地待命，待突发情况解除后继续巡检作业。

(6) 可临时中止机器人自主巡检作业，改用遥控模式，待遥控巡检结束后，继续自主巡检作业。

(7) 如遇特殊情况无法继续进行巡检作业时，可中止当前巡检任务，停止作业。

## 6.8 机器人下线

机器人到达下线杆塔处并停止作业后，自动下线，按照巡检计划，可继续转场到下一个作业点进行巡检作业，直至完成全部巡检任务。

## 6.9 数据导出

从机器人及地面监控基站中导出影像文件、点云数据文件、机器人运行日志记录文件等，并将巡检过程中作业人员记录的事件、信息等整理成文件。

## 6.10 检查入库

对收回的机器人巡检系统进行设备完整性检查、外观检查、状态检查。检查无异常后，对机器人巡检系统进行常规保养维护并入库。如有异常，及时通知技术支持人员进行维修。

## 6.11 资料整理

对巡检数据进行核对，检查数据是否完整、有效，检查无误后，将数据录入信息系统。对巡检数据进行分析，判断巡检线路是否存在缺陷及隐患，并编制巡检报告。核实巡检发现的线路缺陷、隐患，及时进行处理。

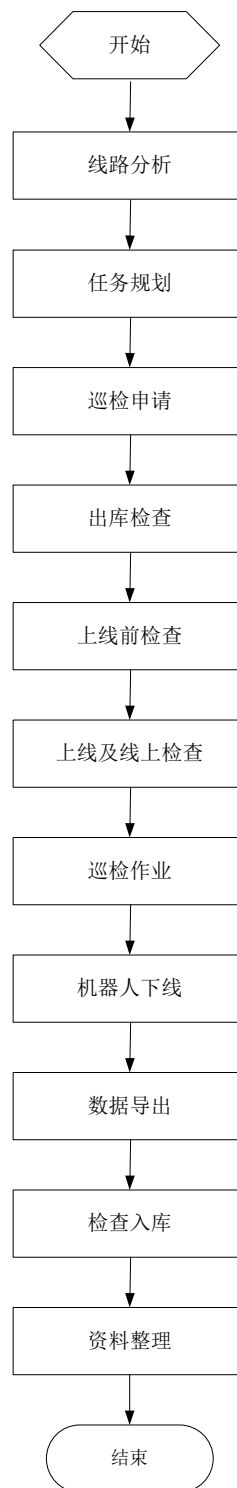


图5 机器人巡检作业流程图

## 7 结语

创新项目管理和创新研发的双创管理模式及工作机制,使得二者相得益彰,又彼此促进和彼此融合创新,给巡检机器人系统应用带来了广阔应用前景,也给企业带来了创新活力,巡检机器人研究成果也得到中国中央电视台1套《新闻联播》和《晚间新闻》、13套《新闻直播间》及其他主流媒体的报道。项目管理和创新团队仍在创新路上,正朝着人不出户、集控室内完成机器人对线路的巡检,以及融合无人

多机器人协调巡检,将成果拓展到以变电站为节点的高压输电网巡检,从而实现包括地面人巡线在内的立体式巡检解决方案的方向迈进,为坚强智能电网和泛在电力物联网发展作出贡献。

## 参考文献

- [1] 聂洪强. 配电网管理模式的探究[J]. 电力系统装备, 2019,(1):160-161.
- [2] 张惠民. “零库存”管理新模式[J]. 企业管理, 2019,(1):75-77.