

输变电设备机器人 智能巡检技术

彭向阳 王锐 麦晓明 吴功平 陈国强 编著

SHUBIANDIAN SHEBEI JIQIREN

ZHINENG XUNJIAN JISHU



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

输变电设备机器人 智能巡检技术

彭向阳 王锐 麦晓明 吴功平 陈国强 编著

SHUBIANDIAN SHEBEI JIQIREN
ZHINENG XUNJIAN JISHU



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

受我国电网转型升级、提质增效和智能高效运维需求驱动,近年输变电设备机器人智能巡检技术得到迅速发展,并在电网实现规模应用。本书结合中国南方电网有限责任公司输电线路和变电站机器人智能巡检技术研究成果与应用实践经验,系统研究和总结编写而成。

本书共 15 章,包含电网巡检模式及机器人智能巡检技术概述、架空输电线路机器人巡检方法、架空输电线路机器人巡检系统、输电线路机器人视觉检测定位技术、输电线路机器人能耗预测技术、输电线路机器人风载检测及控制技术、输电线路机器人全自主巡检技术、输电线路机器人软件系统设计、架空输电线路机器人性能检测、架空输电线路机器人巡检应用、变电站机器人巡检系统、变电站机器人智能巡检技术、变电站机器人巡检应用工程实施、变电站机器人巡检应用实践、总结与展望。全书内容新颖,著述较为系统和全面,对于推动我国电网输变电设备机器人智能巡检技术研究与应用具有重要意义。

本书可供从事电力系统输变电设备运行维护、人工智能及机器人研发和试验检测领域的工程技术人员,以及相关科研院所、生产制造单位的专业技术人员和管理人员使用,也可作为高等学校相关专业学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

输变电设备机器人智能巡检技术 / 彭向阳等编著. —北京: 中国电力出版社, 2019.2
ISBN 978-7-5198-1741-1

I. ①输… II. ①彭… III. ①机器人技术-应用-输电-电气设备-巡回检测②机器人技术-应用-变电所-电气设备-巡回检测 IV. ①TM72②TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 025636 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 马 青(010-63412784, 610757540@qq.com)

责任校对: 黄 蓓 李 楠

装帧设计: 张俊霞

责任印制: 石 雷

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2019 年 2 月第一版

印 次: 2019 年 2 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 14.75

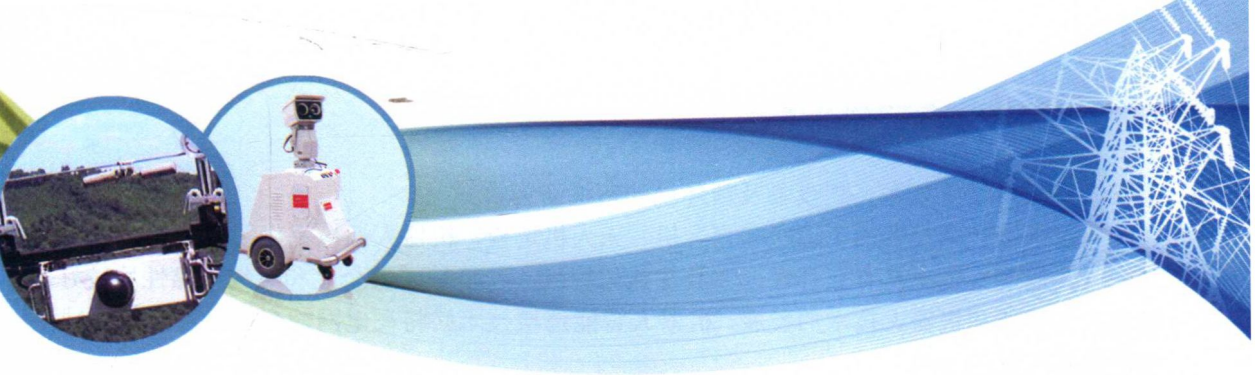
字 数: 353 千字

印 数: 0001—1000 册

定 价: 88.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社营销中心负责退换



前言

输变电设备机器人 智能巡检技术

输电线路和变电站是电力系统的重要组成部分，输变电设备安全可靠运行是保障社会生产、生活优质供电的前提。输变电设备巡检工作尤其关键，它是提前发现设备缺陷和隐患，预防电网故障的重要手段。我国地域辽阔，供电范围及电网规模巨大，各地区地理气候环境差异较大，使电力巡检任务繁重而艰巨。传统人工巡检存在工作量大、劳动效率低、巡检质量差、危险性高等缺点。近年来，无人机、机器人等智能巡检技术的应用，为我国电网巡检作业提供了全新的发展前景。

目前，根据采用的巡检工具或平台不同，我国输变电设备巡检可分为人工巡检、直升机巡检、无人机巡检、机器人巡检等多种巡检作业模式。早期电力巡检主要采用人工巡检方式，近年来直升机、无人机、机器人巡检在输电线路和变电站巡检中得到越来越多的应用。其中，变电站巡检主要有工人工巡检和机器人巡检，输电线路巡检主要有工人工巡检、直升机巡检、无人机巡检、机器人巡检等。

输电线路巡检方面，在人工巡检基础上，目前直升机、无人机巡检发挥着越来越重要的作用，但是直升机、无人机巡检存在如下一些局限性：一是直升机巡检存在人员安全问题，国内直升机巡检过程中多次发生人员伤亡事故；二是直升机巡检同样存在机上人员劳动强度大、巡检成本高等问题，并且巡检周期长，短则半年一巡，长则一年一巡；三是直升机、无人机巡检需要提前申请空域，受到空域管制影响；四是直升机和大、中型无人机巡检容易对线路通道附近人们的生产、生活造成影响，大型无人机巡检技术门槛相对较高；五是直升机巡检对城镇和城市郊区线路、110kV 及以下低电压等级线路的适用性差，小型无人机巡检机动灵活，但载荷能力小、续航时间短，巡检距离和通信距离受限等。

相比之下，输电线路机器人虽然巡检速度不及直升机和无人机，但是可以长时间在线巡检、多次重复巡检，近距离巡检效果好，自动化程度高，且能适应跨越大范围林区、大面积水域及其他复杂地理环境和交叉跨越环境，具有全自主巡检、无巡检盲区、巡检周期短、巡检费用低等显著优势，是输电线路智能巡检技术的重要发展方向。

变电站巡检方面，随着电网规模增加和智能化程度提高，变电站运行控制和管理逐步向集约管控和智能化方向发展，智能变电站、无人值守变电站越来越多。调控部门可以运用多种自动化设备对无人变电站进行遥信、遥测、遥控和遥调，基本实现了变电主设备运行监视和远程操作。显然，基于人工巡检的变电站一次设备运维模式已不能适应变电站集控管理和智能运维需求，在巡检效率、巡检频次、重要设备重点监控方面提升空间较小，不能保证大

量新投产变电站新技术、新设备及新环境的巡检新需求。

相对于输变电设备人工巡检和直升机、无人机巡检，机器人巡检提供了一种新的巡检模式，与其他巡检模式具有互补性，并且智能化程度、经济性、安全性和系统可靠性均较好。随着人工智能和机器人技术的发展，机器人智能巡检技术必将在电网输变电设备巡检领域得到快速和广泛的应用。

目前，变电站机器人已在我国电网得到规模应用，但应用效果和作用有待提高，需要进一步积累机器人运行和巡检经验；架空输电线路和电缆隧道机器人已在电网实现初步应用，但尚未开展规模化巡检。总体上来说，一些实用化巡检技术制约着电力巡检机器人的推广应用，急需要进行重点突破，如输电线路机器人全程全自主巡检技术、自动上下线技术、复杂环境下长期在线运行技术、机器人档中故障带电救援技术，以及输电线路和变电站机器人多传感器融合检测 and 智能诊断技术等。

针对上述存在的电力机器人实用化巡检问题，2013年以来，广东电网公司电力科学研究院联合国内相关高校和研发单位，连续开展了输电线路和变电站机器人智能巡检实用化技术研究和应用，系统研发了架空输电线路机器人全程全自主巡检技术，实现机器人巡检作业自主定位、自主巡检、自主越障、自主运行、自主交互及自主故障检测与复位，机器人在通信中断和完全失去监控条件下可在线路上长时间安全运行；研发了穿越式、跨越式两种越障形式的架空线路巡检机器人，首次实现基于可见光和红外（或激光）检测的多任务载荷集成应用，首次实现机器人自动上下线巡检作业，建立输电线路机器人巡检作业模式和档中故障紧急救援模式，完成了机器人行驶路径和配套金具开发；研发了变电站机器人巡检系统，基于四轮独立驱动、柔性匹配控制和无轨组合导航、立体视觉辅助定位等技术优化机器人运动、操控和定位性能，基于可见光模式识别、仪表定位和红外、音频检测技术实现设备缺陷和异常状态的诊断告警；与国内相关单位一起，建立了输电线路和变电站机器人巡检系统产品技术条件和巡检技术规范，为机器人智能巡检推广应用奠定了基础。

本书瞄准我国电网转型升级和智能运维技术需求，针对人工巡检和直升机、无人机巡检存在的局限性，基于解决现有电力机器人巡检实用化问题，全面著述了输变电设备机器人智能巡检技术、巡检系统和巡检技术规范，在此基础上介绍了开展输电线路和变电站机器人全自主巡检应用的情况。希望本书工作及内容对推动我国电网机器人智能巡检技术研究和应用、提高我国电网输变电设备安全运行水平具有一定的借鉴作用。

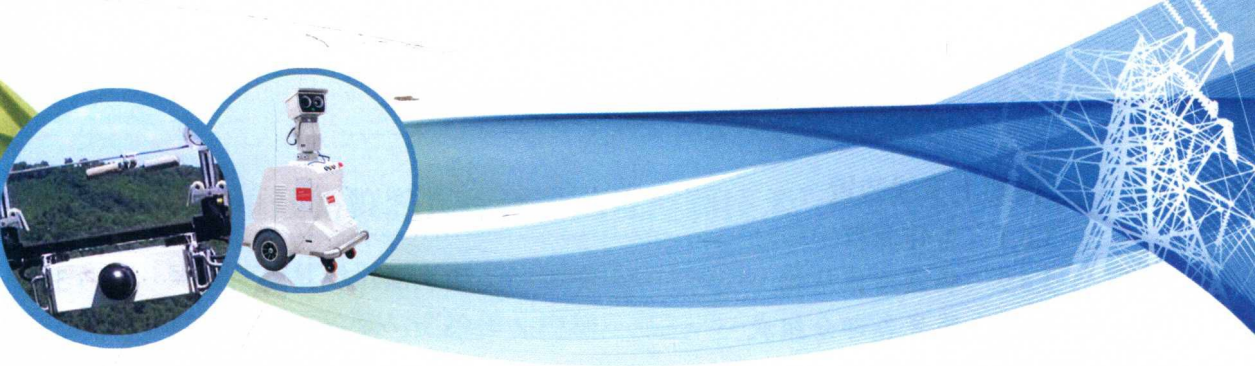
王柯、钱金菊、易琳、樊飞、岳卫兵等同志在编写本书的过程中提供了热情的帮助和支持，在此一并致以衷心的感谢。

本书可供从事电力系统输变电设备运行维护、人工智能及机器人研发和试验检测领域工程技术人员，以及相关科研院所、生产制造单位的专业技术人员和管理人员使用，也可作为高等学校相关专业学生的参考用书。

由于编者的水平、时间以及本书的篇幅有限，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

编 者

2019年2月



前言

第 1 章 概述	1
1.1 电网巡检模式简介	1
1.2 输变电设备对智能巡检的需求	2
1.3 巡检机器人技术发展现状与趋势	3
1.3.1 输电线路巡检机器人	3
1.3.2 变电站巡检机器人	5
1.4 本书主要内容	6
第 2 章 架空输电线路机器人巡检方法	8
2.1 机器人巡检问题分析	8
2.2 机器人行驶路径的选择	8
2.3 机器人巡检模式	9
第 3 章 架空输电线路机器人巡检系统	12
3.1 机器人巡检系统	12
3.2 机器人行驶路径设计	13
3.2.1 穿越越障机器人	13
3.2.2 跨越越障机器人	17
3.3 机器人本体设备	18
3.3.1 穿越越障机器人	18
3.3.2 跨越越障机器人	24
3.4 地面监控基站	29
3.5 塔上充电装置	30

3.6	自动上下线装置	32
3.6.1	工作原理	32
3.6.2	装置总体结构	33
3.6.3	装置各部分组成	33
3.6.4	装置安装	36
3.6.5	试验验证	38
3.7	任务载荷系统	40
3.7.1	任务载荷选型及集成	40
3.7.2	试验验证	45
第4章	输电线路机器人视觉检测定位技术	50
4.1	机器人视觉系统及其伺服控制机构	50
4.2	常规和异形障碍物的视觉检测定位	51
4.2.1	检测思路	51
4.2.2	检测方法	51
4.3	手眼视觉模型及控制设计	59
4.3.1	手眼视觉模型	59
4.3.2	伺服控制设计	60
4.3.3	机器人自主找线流程	60
4.3.4	试验验证与评估	62
第5章	输电线路机器人能耗预测技术	64
5.1	机器人能耗预测方案	64
5.2	机器人锂电池剩余电量估计	64
5.2.1	负载电压法	64
5.2.2	电池放电实验	65
5.3	线路工况、机器人构型及巡检规划	67
5.4	基于线路工况的能耗模型及续航预测	70
5.4.1	机器人静态能耗	70
5.4.2	机器人动态能耗	70
5.4.3	机器人总能耗	75
5.4.4	续航里程估计	75
5.4.5	能耗预测软件	75

第6章 输电线路机器人风载检测及控制技术 76

- 6.1 风载荷及其对机器人姿态的影响 76
- 6.2 机器人姿态检测与巡检作业控制 77
- 6.3 风载试验验证 79

第7章 输电线路机器人全自主巡检技术 81

- 7.1 机器人自主定位 81
- 7.2 机器人自主巡检 85
 - 7.2.1 巡检作业对象 85
 - 7.2.2 巡检作业内容 86
 - 7.2.3 巡检作业方法和流程 86
- 7.3 机器人自主越障 89
 - 7.3.1 自主越障规划 89
 - 7.3.2 面向对象的控制系统设计 90
- 7.4 机器人自主运行 93
- 7.5 机器人与地面基站自主交互 95
- 7.6 机器人自主故障诊断与复位 97

第8章 输电线路机器人软件系统设计 100

- 8.1 软件开发平台 100
- 8.2 机器人本体软件 102
- 8.3 人机交互平台 104
 - 8.3.1 机器人运动交互控制系统 104
 - 8.3.2 机器人视觉交互控制系统 106
 - 8.3.3 太阳能充电控制系统 106
- 8.4 巡检数据分析管理系统 107
 - 8.4.1 系统结构 107
 - 8.4.2 系统设计 108
 - 8.4.3 系统实现 110

第9章 架空输电线路机器人性能检测 113

- 9.1 检测目的 113
- 9.2 检测对象 113
- 9.3 检测项目与方案 114

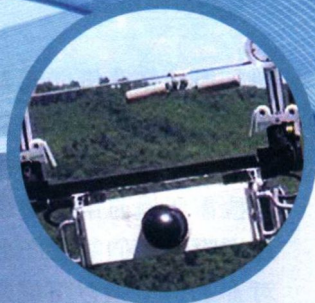
9.3.1	电磁兼容性能试验	116
9.3.2	气候(环境)防护性能试验	119
9.3.3	风载试验	121
9.3.4	淋雨试验	122
9.3.5	整机振动试验	122
9.3.6	运输振动试验	123
9.4	检测结果与评价	124
9.4.1	检测评价方法	124
9.4.2	检测评价标准	126
9.4.3	检测评价结果	127
第 10 章	架空输电线路机器人巡检应用	128
10.1	机器人巡检系统实用化要求	128
10.1.1	巡检系统组成及功能要求	128
10.1.2	机器人功能及性能要求	128
10.1.3	地面监控基站要求	130
10.1.4	巡检数据管理系统要求	130
10.1.5	自动上下线装置要求	131
10.1.6	塔上充电装置要求	131
10.2	机器人巡检应用技术规范	131
10.2.1	巡检方式	131
10.2.2	巡检作业要求	132
10.2.3	巡检作业流程	134
10.3	示范应用情况	135
第 11 章	变电站机器人巡检系统	138
11.1	巡检系统组成	138
11.2	机器人本体	139
11.2.1	外形结构部件	139
11.2.2	运动控制系统	139
11.2.3	供电系统	142
11.2.4	传感器系统	143
11.2.5	导航系统	146
11.3	充电系统	146
11.4	无线传输系统	147

11.5	本地监控后台	147
11.5.1	硬件设计	148
11.5.2	软件设计	148
11.6	环境适应性	153
第 12 章	变电站机器人智能巡检技术	155
12.1	组合导航技术	155
12.1.1	技术原理	155
12.1.2	实现方法	155
12.2	基于特征地图的定位技术	158
12.2.1	技术原理	158
12.2.2	实现方法	158
12.2.3	应用效果	161
12.3	红外与数字地图辅助导航	162
12.3.1	技术原理	162
12.3.2	实现方法	162
12.3.3	应用效果	164
12.4	基于立体视觉的机器人辅助定位	164
12.5	任务路径规划	166
12.5.1	技术原理	166
12.5.2	实现方法	166
12.5.3	应用效果	170
12.6	可见光检测及模式识别	171
12.6.1	技术原理	171
12.6.2	实现方法	171
12.7	仪表定位	173
12.7.1	技术原理	173
12.7.2	实现方法	174
12.7.3	应用效果	177
12.8	红外热像检测	178
12.8.1	技术原理	178
12.8.2	实现方法	178
12.9	基于立体视觉和红外热像的设备提取	180
12.9.1	技术原理	180
12.9.2	实现方法	180

12.9.3	应用效果	183
12.10	声音检测及诊断	183
12.10.1	技术原理	183
12.10.2	实现方法	184
12.10.3	检验测试	186
12.11	机器人自动充电	188
12.11.1	技术原理	188
12.11.2	实现方法	188
12.12	充电房自动控制	189
12.12.1	自动门控制	189
12.12.2	自动充电控制	190
第 13 章	变电站机器人巡检应用工程实施	191
13.1	现场勘查	191
13.2	任务规划	191
13.3	设备安装	191
13.4	巡检准备工作	193
13.5	工程实施计划	195
13.6	应用调试流程	195
第 14 章	变电站机器人巡检应用实践	196
14.1	红外检测电流致热型发热缺陷	196
14.1.1	单相绝对温度测量	196
14.1.2	相间温度对比测量	199
14.1.3	HGIS 站 SF ₆ 罐体测温	200
14.2	可见光检测开关分合闸状态	201
14.2.1	刀闸开合状态识别	201
14.2.2	开关分合状态识别	202
14.3	可见光检测表计读数	203
14.3.1	SF ₆ 气压表	203
14.3.2	避雷器泄漏电流表	205
14.3.3	指针式避雷器计数器	206
14.3.4	数字式避雷器计数器	207
14.3.5	油位表	207
14.4	人工辅助诊断	209

14.4.1	红外检测电压致热型缺陷·····	209
14.4.2	可见光检测设备外观缺陷·····	209
14.5	音频检测设备异常振动或噪声·····	214
14.6	巡检应用中发现问题及改进·····	215
第 15 章	总结与展望·····	218
参考文献	·····	220

第1章 概述



1.1 电网巡检模式简介

输电线路和变电站是电力系统的主要组成部分，输变电设备的安全可靠运行直接影响到工农业生产和社会生活。输变电设备巡检工作至关重要，它是预防输变电设备故障的主要手段，是保障电网安全运行和可靠供电的重要保障。我国地域辽阔，各地区的地理气候等自然环境差异较大，电力线路巡检经常需要经过高山、江河、湖泊地区，并且经常遭遇严重覆冰等自然灾害，使电力线路巡检任务繁重和异常艰难。传统人工巡线存在工作量大、效率低、巡检准确度低且危险性高等缺点。我国电网规模增大，而相应运维资源、人力物力存在并未等比例提升的状况，迫切需要先进巡检手段提高电力线路巡检能力。

根据巡检目的不同，输变电设备巡检可分为正常巡检、故障巡检、特殊巡检三类。正常巡检指根据巡检计划对输电线路和变电站进行周期性巡检工作，故障巡检指输电线路和变电站发生故障或异常后开展针对性巡检工作，特殊巡检指在自然灾害等特殊条件或因保供电等特殊原因安排输变电设备专项巡检。

根据巡检工具或平台不同，输变电设备巡检又可分为人工巡检、直升机巡检、无人机巡检、机器人巡检等多种作业模式。早期电力巡检主要采用人工巡检模式，近年来直升机、无人机、机器人巡检在输电线路和变电站巡检中得到越来越多的应用。其中，变电站巡检主要有有人工巡检和机器人巡检，输电线路巡检主要有有人工巡检、直升机巡检、无人机巡检、机器人巡检等。

目前输变电设备巡检主要依靠人工巡检，并手动记录巡检数据，每次巡检时间长，劳动强度大，人员素质要求高。然而我国输电线路乃至部分变电站分布范围广、运行环境复杂，如高海拔、高山、高寒、高温、跨江跨河等大面积水域等，依靠人工在户外长时间进行设备巡检工作难度高、监测结果容易出错。人工巡检存在劳动强度大、工作效率低、检测质量分散、管理成本高等劣势。

此外，受制于人员素质及管理水平，人工巡检质量很难得到充分保证。例如，难以从制度和行为规范上对现场运行人员的责任心和工作态度进行约束，现场巡检路线不规范，人员巡检不到位，巡检质量大打折扣，存在漏巡情况；人工巡检对于重要设备或区段缺乏灵活、高效的检测手段，巡检达不到预期目标；人工巡检主要依靠工作经验判断，但现场巡检人员文化素质和技能水平参差不齐；人工巡检记录和数据处理效率低，不便于进行存档和数据分析。

在人工巡检基础上，目前直升机、无人机在输电线路巡检过程中发挥着越来越重要的作

用,但是直升机、无人机巡检也存在一定的局限性:① 直升机巡检存在人员安全问题,国内直升机巡检过程中多次发生人员伤亡事故;② 直升机巡检同样存在机上人员劳动强度大、巡检成本高等问题,并且巡检周期长,短则半年一巡,长则一年一巡;③ 直升机、无人机巡检需要提前申请空域,受到空域管制影响;④ 直升机和大、中型无人机巡检容易对线路通道附近人们的生产、生活造成影响,大型无人机巡检技术门槛相对较高;⑤ 直升机巡检对于 110kV 及以下线路适用性较差,小型无人机巡检机动灵活,但续航时间短,巡检距离和通信距离局限性较大等。

相比之下,输电线路机器人虽然巡检速度不及直升机和无人机,但是可以长时间在线巡检、多次重复巡检,且能适应跨越大范围林区、大面积水域及其他复杂地理环境和交叉跨越环境,具有全自主巡检、无巡检盲区、巡检周期短、巡检费用低等显著优势,是输电线路智能巡检技术发展的重要方向。

1.2 输变电设备对智能巡检的需求

相对于输变电设备人工巡检和直升机、无人机巡检,机器人巡检提供了一种新的巡检模式,与其他巡检模式具有互补性,并且智能化程度较高,经济性、安全性和系统可靠性均较好。随着机器人技术的发展,利用机器人对输变电设备进行检测的需求应运而生。其目的在于及时发现电网设备运行缺陷和安全隐患,以便及时进行处理,通过使用机器人巡检能大幅提高电力巡检的智能化程度。

随着电网规模增加和智能化程度提高,变电站运行管理和控制逐步向集约管控和智能化方向发展,智能变电站、无人值守变电站越来越多。调控部门可以运用多种自动化设备对无人变电站进行遥信、遥测、遥控和遥调,基本实现了变电主设备运行监视和远程操作。显然,基于人工巡检的变电站一次设备运维模式已不能适应变电站集控管理和智能运维技术的发展,在巡检效率、巡检频次、重要设备重点监控方面提升空间较小,不能保证大量新投产变电站新技术、新设备及新环境的巡检新需求。

利用巡检机器人来部分或全面替代人工巡检已成为变电站设备巡检的必然趋势。巡检机器人可携带红外热成像仪、可见光相机等检测装置,根据预先设定的巡检任务,来完成变电站设备的可见光检测和红外检测等,记录设备检测数据并进行分析诊断和异常告警。

输电线路人工巡检劳动强度大,运行人员沿线路行走,借助望远镜或红外热成像仪或测距仪等,在地面或登塔对线路设备、交叉跨越及通道环境进行观测和记录,发现设备缺陷和安全隐患,及时进行处置。我国电网输电线路规模巨大,并且逐年增加,诸多线路跨越大江大河、崇山峻岭,甚至位于原始森林和无人区,人工巡检任务繁重和危险,并且人工巡检存在局限性,部分复杂危险线路区段,无法进行人工巡检,或者代价极大,人工巡检难的问题突出。输电线路巡检迫切需要先进实用的智能巡检技术来代替人工巡检。

多年的研究与实践表明,机器人巡检技术,是现有输电线路巡检技术的发展和有益补充,能够克服人工巡检存在的一些问题,而且相对直升机、无人机巡检,它具有较为突出的优势:一是自动化程度高,可实现全自主巡检;二是安全性高,巡检系统可靠性已达到实用化要求,能适应一般野外气候环境;三是近距离巡检质量高、效果好;四是使用简单方便,成本可以接受。

2015 年国务院印发《中国制造 2025》，提出“机器人”作为大力推动的十大重点领域之一；2016 年广东省政府工作报告提出，实施重大科技专项，在智能机器人等九大领域突破一批核心共性技术，研发一批重大战略产品；2016 年中国南方电网有限责任公司提出强化电网运维能力，全面推行“机巡+人巡”的运维模式，推广智能作业、无人机、机器人等先进技术，至 2020 年在无人机/直升机/机器人巡检作业领域达到国际先进水平。机器人智能巡检是电网巡检模式的新发展，随着电力机器人技术的快速发展，机器人可在电网智能巡检、电气操作、检修试验、带电作业、现场安全管控等多方面发挥机器人的优势，完全或部分代替人员工作，降低人工劳动强度和作业风险。

1.3 巡检机器人技术发展现状与趋势

1.3.1 输电线路巡检机器人

国外输电线路机器人相关研究开始较早。在 20 世纪 80 年代，日本、加拿大、美国等国家的电力公司就开始开展输电线路巡检机器人技术的研究。加拿大魁北克水电研究院在 80 年代开始研制的检修维护作业机器人，最初用于线路除冰工作，2008 年开发了一种具有双臂结构的越障机器人，其两个手臂可以相互独立地运动。日本东京电力公司于 1988 年开始研制高压线巡检机器人，并于 1989 年开发出一台主要用于光纤复合架空地线（optical fiber composite overhead ground wire, OPGW）外包钢线及内部光纤铝膜检查的机器人样机。日本法政大学的 Hideo Nakamura 等人于 1990 年开发了用于电气列车馈电电缆巡检的机器人。日本三菱电机株式会社于 1990 年开发出越障机器人样机，其具有翻越杆塔的功能。日本关西电力公司（KEPCO）和日本电力系统公司（JPS）于 2008 年共同研制出了名为“Expliner”的巡线机器人样机，该机器人可以实现跨越障碍物运动。总的来讲，国外输电线路机器人以研发越障功能为主。机器人主要配备可见光、红外等传感器，只有个别单位研究线路检修维护用机器人。目前较为流行的输电线路机器人越障机构多为双手臂型结构。

在国内，自 20 世纪 90 年代中期开始一些研究单位就开始从事线路巡检机器人研究开发工作，主要有武汉大学、中国科学院沈阳自动化研究所、国网山东省电力公司电力科学研究院、山东大学等单位。输电线路机器人搭载的检测设备以高清可见光摄像机和红外摄像机为主；数据传输通过短距离无线链路、4G 网络或机内存储方式发送或保存，巡检机器人普遍没有采用缺陷智能专家诊断系统。

1. 机器人越障技术

从国外来看，移动机器人及其越障技术表现为两个技术发展方向：一是跨越越障的移动机器人技术，如加拿大魁北克水电研究院研制的“LineScout”巡检机器人、日本东京大学与日本关西电力公司（KEPCO）和日本电力系统公司（JPS）共同研制的“Expliner”巡线机器人，均采用了轮式悬挂、轮臂复合、跨越越障的移动机器人技术；二是轮式移动非越障的移动机器人技术，如美国电力研究所提出的给巡检机器人架设一条无障碍的专用轨道，机器人在专用轨道上采用轮式驱动行走的移动机器人技术。

从国内来看，国内移动机器人及其越障技术也表现为两个技术发展方向：一是跨越越障的移动机器人技术，如武汉大学研制的沿地线或导线跨越越障的“LineBot-G/W-J”巡检

机器人、中国科学院沈阳自动化研究所研制的沿地线跨越越障巡线机器人，均采用了轮式悬挂、轮臂复合、跨越越障的移动机器人技术；二是轮式移动穿越越障的移动机器人技术，如武汉大学提出将现有地线线路上阻挡型防振锤、悬垂线夹改造为非阻挡型结构，在地线耐张塔头的两端搭建过桥，将地线上改造成为机器人可以穿越越障的“准高速”道路，以及针对这一“准高速”道路研制的“LineBot-G/C”巡检机器人。

2. 机器人智能技术

从国外来看，加拿大魁北克水电研究院、日本东京大学除在各自研制的巡检机器人通过了在线路上的行走、越障试验验证外，均已开展了相关智能技术的研究工作，但目前有关研究成果的报道较少，目前这两种巡检机器人可能不具有全自主工作的智能行为能力。

从国内来看，近几年开展了巡检机器人智能技术研究，包括环境智能检测 and 智能控制。“LineBot-G/W-J”和“LineBot-G/C”巡检机器人分别具有大范围局部自主工作的智能行为能力和全局自主工作的智能行为能力，其中：① 采用了线路的先验信息、数据传感器和机器视觉信息融合的方法，实现了导/地线线路上的障碍物检测识别定位；② 采用手眼视觉及其视觉伺服控制，实现了机器人自动找线及其控制；③ 采用行走轮打滑检测与辨识及其模糊控制方法，实现了行走轮的打滑控制；④ 采用面向对象的行为控制方法，实现了机器人的自主行为控制。中国科学院沈阳自动化研究所、中国科学院自动化研究所也分别开展了基于视觉的障碍物识别与定位技术、手眼视觉伺服控制技术和基于专家系统的智能控制技术的研究，其中中国科学院沈阳自动化研究所研制的沿地线巡检机器人具有局部自主工作智能行为能力。

3. 机器人电能补给技术

从国外来看，在“LineScout”和“Expliner”两种机器人中，还未见到有关电能在线补给技术研究的报道。但美国电力研究所，在其提出的概念样机模型中，拟采用机器人携带太阳能电源和感应取电电源作为机器人的在线补给电源，但尚未见到有关的技术研究报道。

国内研究了机器人电能在线补给技术，沿地线穿越越障“LineBot-G-J”和跨越越障“LineBot-G/C”这两种巡检机器人中，采用在杆塔上建设固定的太阳能充电基站，通过机器人与其对接充电，实现机器人在线电能补给；在沿导线跨越越障“LineBot-W-J”巡检机器人中，采用感应取电电源，实现机器人在线电能补给。此外，还研究了将导线上感应取得的电能无线传输的方法及其技术，为巡检机器人电能在线补给提供了一种解决方案。

4. 人机交互技术

国内外巡检机器人，尤其是跨越越障巡检机器人人机交互技术，均采用基于视频图像的本体设备和地面基站的人机交互方法。在“LineScout”巡线机器人中，在本体设备上安装了一台云台摄像机，专门用于本体设备的人机交互操作。在“LineBot-G/W-J”和“LineBot-G/C”巡检机器人中，均采用对机器人搭载多自由度云台摄像机的方法，用于地面基站基于视频图像的对本体设备的人机交互操作。但在“Expliner”巡线机器人和中国科学院沈阳自动化研究所沿地线巡检机器人中，未见到基于视频图像的人机交互技术报道。

5. 机器人任务载荷技术

机器人可同时搭载多种检测设备，但受负载能力和近距离巡检的制约，目前国内外市场上仅云台可见光摄像机比较适合机器人搭载，而红外热成像仪、紫外成像仪和激光测距仪，由于不具有一体化的多自由度云台功能，不满足巡检机器人实用化要求。因而，开发具有多

自由度云台功能的红外热成像仪、紫外成像仪和激光测距仪或将这些巡检仪器集成在多自由度云台上,应是适用于巡检机器人的检测仪器或检测平台的发展方向。

6. 机器人上下线技术

目前,国内外线路机器人上下线仍然采用人工带电作业或人工辅助带电作业上下线技术,需要耗费较大的人力和物力,也制约了巡检的实用化及其进程。

1.3.2 变电站巡检机器人

国外变电站机器人研制较早,20世纪90年代,日本率先开展应用于500kV变电站的有轨巡检机器人,代替人工实现了基于红外传感器的设备温度自动测量。日本三菱公司和东京电力公司早在20世纪80年代就联合开发500kV变电站巡检机器人,该机器人基于路面轨道行驶,使用红外热成像仪和图像采集设备,配置辅助灯光和云台,自动获取变电站内的实时信息,并进行上传和处理。

加拿大魁北克水电站研制的变电站巡检机器人,同样是搭载红外热成像仪、可见光图像采集系统,实现了远程监控,并配置了遥控装置,可实现对机器人的实时控制。2008年,巴西圣保罗大学研制了用于变电站内热点监测的移动机器人,该机器携带红外热成像仪通过在变电站内架起的高空行走轨道线在站内移动。

国外有关变电站智能巡检机器人的研究工作起步虽然较早,但未见大规模推广应用的情况。另外,从资料文献了解到,国外有关变电站巡检机器人在传感器和导航系统应用中也开展了一些工作。

2005年,A. Birk等开发的履带式变电站巡检机器人,采用红外热成像仪对电气设备进行红外测温,该机器人在变电站现场投入应用,应用的效果表明利用该机器人在变电站进行巡检工作能有效实现对变电站设备的红外测温,开启了对变电站巡检机器人研究的新篇章。

D.A. Camegie等提出了一种基于光纤陀螺、里程计、加速度计、激光雷达、差分GPS(global positioning system,全球定位系统)和导航计算机的机器人导航系统。该导航系统用GPS进行定位,利用基于陀螺仪、里程计和加速度计的航位推算进行导航。在多次进行实验后得出:该导航系统能在变电站设备巡检机器人巡检时为机器人提供实时连续高精度的定位信息,使变电站巡检机器人的发展向前迈进了一大步。

在国内,经过多年的探索,目前在变电站智能巡检系统研发领域取得了长足进展,并积累了宝贵经验,产品已在多个变电站得到实际应用并取得了一定效果。但该技术尚处于起步阶段,目前在多传感器综合探测、四轮驱动移动平台、综合导航和精确对准、故障精确诊断、自动寻桩充电等关键技术上还存在瓶颈,形成了探测及故障判断精度不高、环境及地形适应能力不足等技术难点。国内研制的智能巡检机器人具有可靠性有待提高、地形适应能力不强、检测覆盖面不全等缺点,但高清可见光探测、红外测温、紫外探测等技术在民用和军事领域的大量应用,为开展智能巡检机器人探测技术的研究提供了良好的技术基础。

国网山东电力公司于1999年最早开始变电站巡检机器人的研究,2004年研制成功第一台功能样机,后续在国家“863项目”支持和国家电网公司多方项目支持下,研制出了系列化变电站巡检机器人。机器人综合运用非接触式检测、机械可靠性设计、多传感器融合的定位导航、视觉伺服云台控制等技术,实现了机器人在变电站室外环境全天候、全区域自主运行,开发了变电站巡检机器人系统软件,实现了设备热缺陷分析预警,开关、断路器开合状