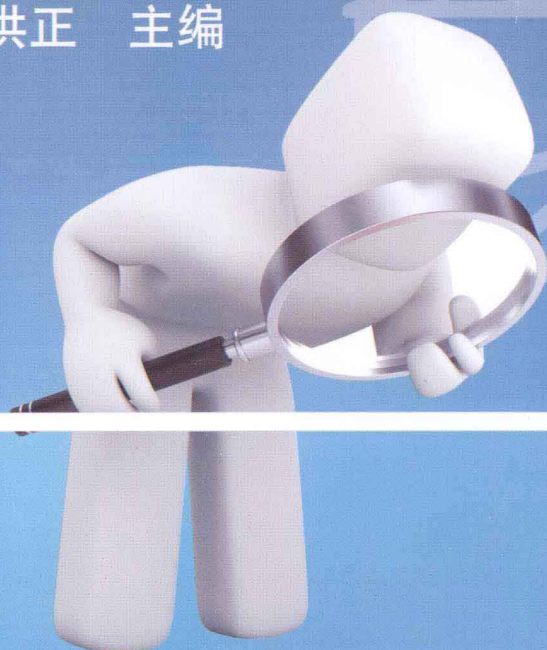


SHUDIANXIANLU
XUNJIAN JIQIREN

输电线路

巡检机器人

刘洪正 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

SHUDIANXIANLU
XUNJIAN JIQIREN

输电线路

巡检机器人

刘洪正 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

机器人技术是集计算机技术、信息技术和控制技术于一体的技术, 现已广泛应用于条件艰苦、高危等作业领域。本书在借鉴国内外相关领域研究结果的基础上, 结合正在开展的研究实践工作, 对输电线路机器人的基本原理、巡检需求分析、巡检机器人关键技术、巡检机器人行走动力学分析、输电线路单挡距除冰机器人设计、输电线路巡检机器人、无人飞机输电线路巡线技术、高压绝缘子检测机器人技术等进行了较为系统、全面地介绍。

本书融理论于科学试验, 讲解通俗易懂, 适合电力系统广大工程技术人员阅读, 也可供科研院所的工程技术人员及高等院校相关专业的师生学习参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

输电线路巡检机器人 / 刘洪正主编. —北京: 中国电力出版社, 2013.12

ISBN 978-7-5123-5104-2

I. ①输… II. ①刘… III. ①机器人技术—应用—输电线路—检测 IV. ①TM726-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 256343 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 12 月第一版 2013 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 10.5 印张 225 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签, 刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

主 任 卢 刚 郁洪涛

委 员 刘洪正 王照晨 孙洗凡 李 龙

王振河 隋邦家 吴虹岩 夏继军

夏树刚 汤建红 郭顺生 段建军

主 编 刘洪正

副主编 高 森

编 委 张天河 乔耀华 郭士照 雍 军

韩志骏 张春波 吕 宁 高 伟

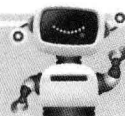
曹卫兵 付以贤 厉秉强 李冬松

李清泉 郑连勇 马玮杰 王 涛

孟令国 刘希峰 李 颖 李 勇

吴观斌 张 军 高焕兵 刘存根

隋首钢 张钦广 李 岐 马建涛



序

高压架空输电线路的传统巡检方式即人工巡检方式是巡线人员沿线逐塔巡视或检测，必要时还要登塔巡检。该工作方式效率低、劳动强度大，且存在设备漏检和巡视死角等问题。近年来，一些单位开展了直升飞机航测法巡检高压线路。由于直升飞机航测法巡检费用较高，并受天气制约和航空管制，仅在山区和大跨越等人员难以到达的高压和超、特高压线路路段巡检。如何有效提高线路巡检效率和质量？如何消除线路巡检过程中的安全隐患？如何对危险点巡视进行更好地管理？电网运行管理部门进行过多方面尝试，但一直没有找到令人满意的解决方法。

国网山东电力集团公司检修公司立足于创新型企业建设，瞄准智能电网前沿技术，历经十余年探索实践，发现一种新的高压架空输电线路巡检方式，取得卓越成就。他们自行研制的高压架空输电线路巡检机器人获得 2011 年国家科技进步二等奖。这种机器人主要包括机器人本体和地面基站两大部分，是一种应用于输电线路设备巡检的特种机器人，机器人本体能够在高压、超高压输电线路沿导线行走，通过机器人本体携带的摄像机等检测设备检测输电设施损伤情况。该机器人还能对导线上悬挂的异物进行清障处理。地面基站对机器人本体具有远程控制与监测功能，机器人本体高速球形摄像机拍摄的输电设施（输电线、绝缘子及杆塔等）图像可通过无线传输系统传送至地面基站，进行显示、存储与处理，为线路运维管理部门及时、准确地掌握输电线路运行状态提供了新的技术支持。

国网山东电力集团公司检修公司在总结高压架空输电线路巡检机器人技术的基础上编写本书，主要目的是要在输电线路巡检管理和机器人技术实践之间架设一道桥梁，力求用机电一体化基础知识，把高压输电线路巡检的基本要求和机器人技术基础理论介绍给他们的同行和所有对此感兴趣的朋友们。

中国工程院院士：雷清泉

2013 年 12 月 1 日

前言



机器人技术是一种是以自动化技术和计算机技术为主体、有机融合各种现代信息技术的系统集成和应用。相关领域的技术突破，从根本上为提升机器人技术提供了支持，机器人技术应用已涵盖国防、航空航天、工业生产、服务、老人康复、教育甚至普通家庭生活，一场新的机器人技术研究高潮和发展契机业已到来。

国网山东电力集团公司检修公司十余年坚持探索，自行研制的高压架空输电线路巡检机器人获得 2011 年国家科技进步二等奖。该机器人在一定程度上完成了高压架空输电线路巡视和带电检修的部分项目，较好地解决了机器人高压导线上作业强电磁场干扰难题。

本书的主要内容由三部分组成：第一部分，介绍了输电线路巡检机器人国内外研究应用现状，对该类机器人关键技术、输电线路巡检需求进行了分析；第二部分，为了使电力系统技术人员对机器人技术有一个抽象的理解，对机器人技术的一般概念和理论进行介绍，并重点对输电线路巡检机器人的功能、本体机构、运动学建模、动力学分析以及视觉导航等关键技术进行了介绍；第三部分，对目前输电线路巡检机器人的典型应用系统进行了介绍，并重点对输电线路除冰机器人、输电线路巡检机器人、无人飞机输电线路巡线技术进行了详细介绍。

本书在编写过程中得到了山东大学机器人研究中心李贻斌教授的指导；中国电力机器人开拓者鲁守银教授仔细地审阅了本书的初稿，在本书的组织结构、内容安排等方面提了很多宝贵的建议，在此深表感谢！本书还参考了电力机器人相关研究领域的很多科研成果，在此也对有关资料、文献作者一并表示感谢！

由于输电线路巡检机器人技术涉及面广、发展较快，本书的内容本应十分丰富，但限于篇幅，只能对输电线路巡检机器人的重要功能做介绍，希望能起到抛砖引玉之功效。限于水平，书中难免有不足和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2013 年 12 月



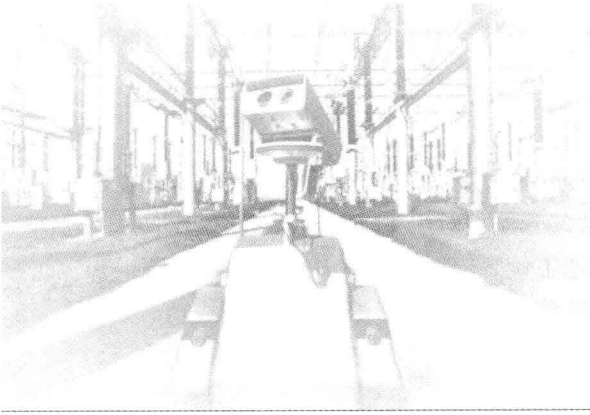
目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 机器人的定义与发展	1
1.2 国外巡线机器人研究现状	3
1.3 国内巡线机器人研究现状	6
1.4 巡线机器人共性关键技术	8
本章小结	11
第 2 章 机器人的基本原理	12
2.1 机器人的基本构成	12
2.2 机器人的主要技术参数	14
2.3 机器人机械结构	15
2.4 机器人驱动技术	19
2.5 机器人运动控制技术	32
本章小结	39
第 3 章 输电线路巡检需求分析	40
3.1 电力线路巡检常用术语及其定义	40
3.2 线路巡视基本要求	41
3.3 交流线路常用杆塔塔型图例	43
3.4 线路巡视维护检查内容、标准及图例	45
3.5 接地装置及辅助设施防护	50
本章小结	52
第 4 章 输电线路巡检机器人关键技术	53
4.1 输电线路巡检机器人功能概述	53
4.2 巡检机器人的本体机构选型	56
4.3 巡检机器人的机械系统	62
4.4 巡检机器人运动学建模	65
4.5 巡检机器人视觉导航技术	75
本章小结	80

第 5 章 巡检机器人行走动力学分析	81
5.1 障碍类型与机器人操作臂构型	81
5.2 数学模型	83
5.3 机器人位姿优化	88
本章小结	92
第 6 章 输电线路单挡距除冰机器人设计	93
6.1 输电线路除冰技术	94
6.2 除冰机器人机械结构	95
6.3 除冰机器人控制系统	98
6.4 试验与应用情况	99
本章小结	100
第 7 章 输电线路巡检机器人	101
7.1 机器人本体机械设计	102
7.2 机器人控制系统设计	103
7.3 机器人自主越障规划方法介绍	114
7.4 基于视频图像的机器人主从控制方法	118
本章小结	119
第 8 章 无人飞机输电线路巡线技术	120
8.1 无人飞机系统	121
8.2 输电线路无人飞机巡线系统	131
本章小结	140
第 9 章 高压绝缘子检测机器人技术	141
9.1 绝缘子的检测方法	141
9.2 绝缘子检测机器人	145
本章小结	150
展望	151
参考文献	152



... 第 1 章 ...

概 述

1.1 机器人的定义与发展

一、机器人的定义

“机器人”一词起源于捷克作家卡雷尔·卡佩克在 1920 年发表的科幻剧本《罗萨姆的万能机器人》(《Rossums Universal Robots》)。在剧本中,卡佩克把捷克语 Robota 写成了 Robot, Robota 是一家公司发明的形状像人的机器,可以听从人的命令做各种工作。自此以后,像人一样的机器出现在很多的科幻小说中,我国干脆就将 Robot 翻译成“机器人”。其实,“机器人”不全是像人一样的机器,而是一种可以运动的机械电子装置。虽然是卡佩克将 Robot 这个词代表的一种机械电子装置的概念推向了世界,但是 Robotics (机器人学)这个词是由美国科幻小说家伊塞克·阿西莫夫首次提出来的,并且他在 1950 年出版的《我,机器人》一书中提出了“机器人三原则”:

- (1) 机器人不可伤害人或由于故障而使人遭受不幸。
- (2) 机器人应执行人所下达的指令,除非这些指令与原则(1)相矛盾。
- (3) 在原则(1)、(2)不矛盾的前提下,机器人应能保护自己的寿命。

关于机器人,国内外的学者有着不同的定义。

机器人是高级整合控制论、机械电子、计算机、材料和仿生学的产物。在工业、医学、农业、建筑业甚至军事等领域中均有重要用途。现在,国际上对机器人的概念已经逐渐趋近一致。联合国标准化组织采纳了美国机器人协会给机器人下的定义:“一种可编程和多功能的操作机;或是为了执行不同的任务而具有可用电脑改变和可编程动作的专门系统。”

二、机器人的发展

机器人从幻想世界真正走向现实世界源于自动化生产和科学研究的发展需要。遥控操作器和数控机床的出现为机器人的产生提供了技术条件。

二次世界大战期间,在放射性材料的生产和处理过程中应用了一种简单的遥控操纵器。操纵人员在—层很厚的混凝土防护墙外通过观察,用手操纵两个操纵杆(主动部分),操纵杆与墙内的一对机械抓手(从动部分)通过六个自由度的传动机构相连,于是机械

抓手就能复现人手的动作位置和姿态，代替了操作人员的直接操作。1947 年，人们对这种遥控操纵器进行改进，采用电动伺服方式，使从动部分能相对于主动部分作跟随运动。

1949 年，由于生产先进飞机的需要，美国麻省理工学院辐射实验室开始研制数控铣床，把复杂伺服系统的技术与最新发展的数字计算机技术结合起来，1953 年研制成功。切削模型以数字形式通过穿孔纸带输入机器，然后控制铣床的伺服轴按照模型的轨迹做切削动作。

1954 年，美国的 George C. Devol 设计并制作了世界上第一台机器人实验装置，发表了《适用于重复作业的通用性工业机器人》一文，并获得了专利。Devol 巧妙地把遥控操作器的关节型连杆机构与数控机床的伺服轴连接在一起，预定的机械手动作一经编程输入后，机械手就可以离开人的辅助而独立运行。这种机器人也可以接受示教而能完成各种简单任务。示教过程中操作者用手带动机械手依次通过工作任务的各个位置，这些位置序列记录在数字存储器内，任务执行过程中，机器人的各个关节在伺服驱动下再现出那些位置序列。因此，这种机器人的主要技术功能就是“可编程”以及“示教再现”。

20 世纪 60 年代，机器人产品正式问世，机器人技术开始形成。

1960 年，美国的 Consolidated Control 公司根据 Devol 的专利研制出第一台机器人样机，并成立 Unimation 公司，定型生产了 Unimate（意为“万能自动”）机器人。同时，美国“机床与铸造公司”（AMF）设计制造了另一种可编程的机器人 Versatran（意为“多才多艺”）。这两种型号的机器人以“示教再现”的方式在汽车生产线上成功地代替工人进行传送、焊接、喷漆等作业，它们在工作中表现出来的经济效益、可靠性、灵活性，使其他发达工业国家为之倾倒。于是 Unimate 和 Versatran 作为商品开始在世界市场上销售，日本、西欧也纷纷从美国引进机器人技术。

在机器人崭露头角于工业生产的同时，研究领域不断地把机器人技术引向深入发展。1961 年，美国麻省理工学院 Lincoln 实验室把一个配有接触传感器的遥控操纵器的从动部分与一台计算机连接在一起，这样形成的机器人可以凭触觉决定物体的状态。随后，用电视摄像头作为输入机理的计算机图像处理、物体辨识的研究工作也陆续取得成果。1968 年，美国斯坦福人工智能实验室（SAIL）的 J.McCarthy 等人研究了新颖的课题：研制带有手、眼、耳的计算机系统。于是，智能机器人的研究形象逐渐丰满起来。

20 世纪 70 年代以来，机器人产业蓬勃兴起，机器人技术发展为专门的学科。

1970 年，第一次国际工业机器人会议在美国举行。工业机器人各种卓有成效的实用范例促成了机器人应用领域的进一步扩展，同时，又由于不同应用场合的特点，导致了各种坐标系统、各种结构的机器人相继出现。而随后的大规模集成电路技术的飞跃发展及微型计算机的普遍应用，则使机器人的控制性能得到大幅度提高，成本不断降低。于是，导致了数百种不同结构、不同控制方法、不同用途的机器人终于在 20 世纪 80 年代以来真正进入实用化的普及阶段。

经过几十年的发展，机器人技术已经形成了一门综合性学科——机器人学。一般地说，机器人学的研究目标是以智能计算机为基础的机器人的基本组织和操作，它包括基础研究和应用研究两方面内容，涉及的主要研究内容有机械手设计，机器人运动学、动

力学和控制, 轨迹设计与规划, 传感器, 机器人视觉, 机器人控制语言, 装置与系统结构, 机械智能等。由于机器人学综合了力学、机械学、电子学、生物学、控制论、计算机、人工智能、系统工程等多种学科领域的知识, 因此, 也有人认为机器人学实际上是一个可分为若干学科的学科类。

综上所述, 机器人的发展过程大致经历了以下 3 个阶段:

(1) 第一代机器人——示教再现机器人。机器人没有装备任何传感器, 对环境没有感知能力。机器人的作业路径、运动参数需要操作人员手把手示教或通过编程设定, 在示教过程中, 机器人各关节几何参数的变化被检测出来, 并自动储存。到工作时, 机器人会在这些储存数据的指令下驱动关节重复再现示教的内容。目前商品化、实用化的机器人大多是此类机器人。

(2) 第二代机器人——有感觉的机器人。此种机器人配备了简单的内、外部传感器, 能感知自身运行的速度、位置、姿态等物理量, 并以这些信息的反馈构成闭环控制, 如配备简易视觉、力觉传感器等简单的外部传感器, 因而具有部分适应外部环境的能力。20 世纪 80 年代, 第二代机器人在国外已进入实用化并在工业生产中开始得到了应用。

(3) 第三代机器人——智能机器人。具有多种内、外部传感器组成的感觉系统, 不仅具有比第二代机器人更完善的环境感知功能, 可以感知内部关节的运行速度、力的大小等参数, 还可通过外部传感器, 如视觉传感器、触觉传感器等, 而且对外部环境信息进行感知、提取、处理并做出一定的思维、判断和决策, 根据作业要求和环境信息, 自主地进行工作。目前, 智能机器人尚处于研究和发展阶段。

按照机器人的产生、发展、技术本身和应用环境等因素, 将机器人分为两大类, 即工业机器人和特种机器人。工业机器人就是面向工业领域的多关节机械手或多自由度机器人, 包括装配机器人、焊接机器人、搬运机器人等。特种机器人则是除工业机器人之外的、用于非制造业并服务于人类的各种先进机器人, 包括服务机器人、飞行机器人、空间机器人、排爆机器人、水下机器人、娱乐机器人、军用机器人、微型机器人、医疗机器人、地下机器人、狭窄空间机器人、核工业机器人、农业机器人、教学机器人、机器人化机器、仿人机器人等。有些类型的机器人之间有概念重叠。

1.2 国外巡线机器人研究现状

采用高压和超高压架空电力线是长距离输配电力的主要方式。电力线及杆塔附件长期暴露在野外, 因受到持续的机械张力、电气闪络、材料老化的影响而产生断股、磨损、腐蚀等损伤, 如不及时修复更换, 原本微小的破损和缺陷就可能扩大, 最终导致严重事故, 造成大面积的停电和巨大的经济损失。因此, 电力公司要定期对线路设备巡检, 及时发现早期损伤和缺陷并加以评估, 然后根据缺陷的轻重缓急, 以合理的费用和正确的优先顺序, 安排必要的维护和修复, 从而确保供电可靠性。

目前, 对输电导线进行巡检的方法主要有以下 2 种:

(1) 地面目测法: 采用肉眼或望远镜对辖区内的电力线进行观测。由于输电线路分

布点多面广、地理条件复杂，巡线工人需要翻山越岭、涉水过河、徒步或驱车巡检。这种方法劳动强度大，工作效率和探测精度低，可靠性差。

(2) 航测法：直升飞机巡线。直升飞机沿输电线路飞行，工作人员用肉眼或机载摄像设备观测和记录沿线异常点的情况。这种方法尽管距离接近，提高了探测效率和精度，但电力线从观察者或摄录设备的视野中快速通过，增加了技术难度，运行费用较高。

移动机器人技术的发展，为架空电力线路巡检提供了新的移动平台。巡线机器人能够带电工作，以一定的速度沿输电线路爬行，并能跨越防振锤、耐张线夹、悬垂线夹、杆塔等障碍，利用携带的检测装置对杆塔、导线及避雷线、绝缘子、线路金具、线路通道等实施接近检测，代替工人进行电力线路的巡检工作，可以进一步提高巡线的工作效率和巡检精度。因此，巡线机器人成为巡线技术研究的热点。

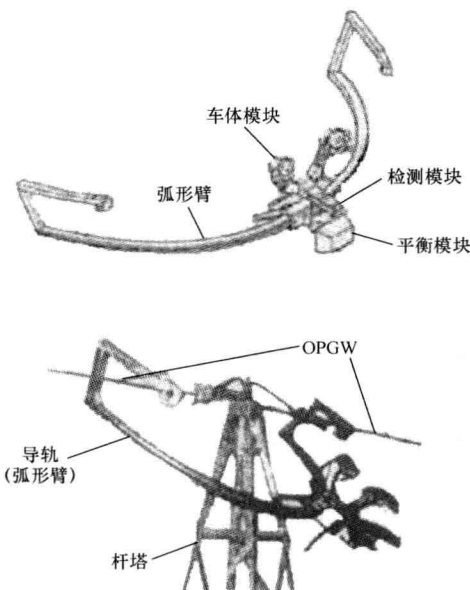


图 1-1 弧形手臂巡线机器人

巡线机器人的研究始于 20 世纪 80 年代末，日本、加拿大、美国等发达国家先后开展了巡线机器人的研究工作。1988 年，日本东京电力公司研制了光纤复合架空地线巡检移动机器人，如图 1-1 所示。该机器人利用一对驱动轮和一对夹持轮沿地线爬行，能跨越地线上防振锤、螺旋减振器等障碍物。遇到线塔时，机器人采用仿人攀援机理，先展开携带的弧形手臂，手臂两端勾住线塔两侧的地线，构成一个导轨，然后本体顺着导轨滑到线塔的另一侧；待机器人夹持轮抱紧线塔另一侧的地线后，将弧形手臂折叠收起，以备下次使用。

机器人运动控制有粗略控制和精确定位控制两种模式。粗略控制是把线塔和地线的资料数据（线塔的高度、位置，地线长度，线路上附件数量等）预先编制好程序输入机器人，据此控制机器人的行走和越障；精确定位控制则根据传感器反馈信息来控制。机器人携带的损伤探测单元采用涡流分析方法探测光纤复合架空地线铠装层的损伤情况，并把探测数据记录到磁带上。

美国 TRC 公司 1989 年研制了一台悬臂自治巡线机器人原型，它能沿架空导线长距离爬行，执行电晕损耗、绝缘子、结合点、压接头等视觉检查任务，对探测到的线路故障数据预处理后，将数据传送给地面人员。当机器人遇到杆塔时，利用手臂采用仿人攀援的方法从侧面越过杆塔。

图 1-2 是泰国的一台自给电巡线机器人原型。该机器人采用电流互感器从爬行的电力线路上获取感应电流，作为机器人的工作电源，从而解决了巡线机器人

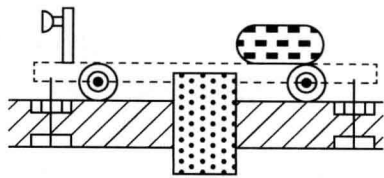


图 1-2 自给电巡线机器人

长时间驱动的动力问题，并初步实现了根据摄像机图像判断电力线上绝缘子等障碍物位置的视觉导航功能。不过，该试验型巡线机器人仅能在两线塔间的电力线上爬行，无避障能力。

由日本 Sato 公司生产的电力线损伤探测器也采用了单体小车，结构如图 1-3 所示。

它能在地面操作人员的遥控下沿电力线行走，利用车载探测仪器探测线路损伤程度及准确位置，将获取的数据和图片资料存储在数据记录器中。地面工作人员可回放复查，进一步确定损伤情况。探测器不具备越障功能，遇到线路附件等障碍物时便自动停止前进。

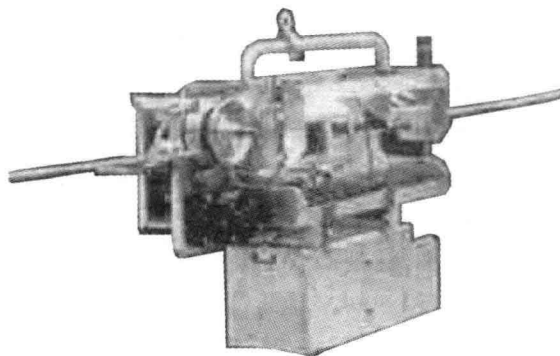


图 1-3 损伤探测机器人结构

加拿大魁北克水电研究院 2000 年开始遥控小车（见图 1-4）的研制工作。遥控小车起初用于清除电力传输线地线上的积冰，逐渐发展为用于线路巡检、维护等多用途的移动平台。第三代原型机结构紧凑（23cm×17cm×12cm），质量为 25kg，驱动力大，抗电磁干扰能力强，能爬 52°的斜坡，通信距离可达 1km。小车采用灵活的模块化结构，安装不同的工作头即可完成架空线视觉和红外检查、压接头状态评估、导线和地线更换、导线清污和除冰等带电作业，已在工作电流为 800A 的 315kV 电力线上进行了多次现场测试。但是，该遥控小车无越障能力，只能在两线塔间的电力线上工作。目前，研究组正在开发具有越障功能的自治移动小车，实验结果表明，新一代遥控小车能在无人干预的情况下跨越障碍物，巡检范围达 4km。

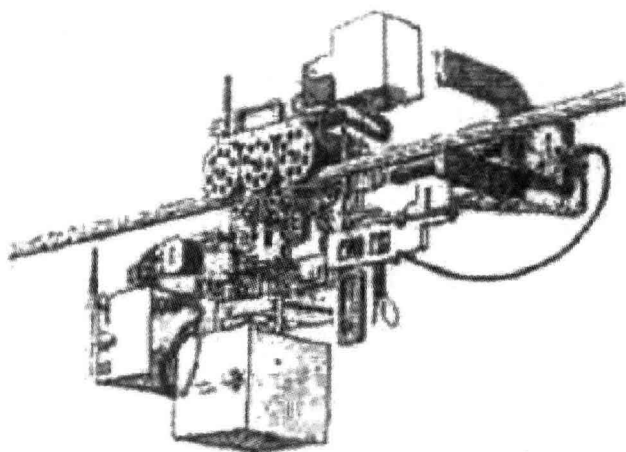


图 1-4 HQ LineROver 遥控小车

1.3 国内巡线机器人研究现状

国内在架空电力线路巡线机器人研究方面也做了大量工作。20 世纪 90 年代末,国内的一些研究机构 and 高等院校也开始了巡检机器人的研究工作,并已经研制出多种机构的巡检机器人样机。武汉大学和山东大学在这方面的研究起步较早。在“十五”国家高新技术发展计划(“863 计划”)的支持下,中国科学院沈阳自动化研究所、武汉大学与汉阳供电公司、中国科学院自动化研究所与山东大学同时开展了对架空输电线巡检机器人的研制工作。

在“863 计划”以及国家电网公司东北分部的支持下,中国科学院沈阳自动化研究所开展了“沿 500kV 地线巡检机器人”的研制,课题组攻克了机器人机构、自主控制、数据和图像的传输等关键技术,成功地开发出由巡检机器人和地面移动基站组成的系统,并与锦州超高压局合作进行了现场带电巡检试验,完成了超高压实际环境的巡检试验。该机器人能够沿 500kV 地线行走、跨越障碍,利用携带的摄像机或红外热像仪等检测装置,检测输电线、防振锤、绝缘子和杆塔等输电设备的损伤情况。实现机器人和地面基站远程通信,基站对机器人运行状态的远程控制。该样机的成功研制,在系统电源、机器人本体、控制系统、检测设备和通信设备,地面控制与数据后台处理等方面积累了一些经验。2010 年,由清华大学电力系统国家重点实验室和中国科学院沈阳自动化研究所联合研制的巡线除冰机器人装置已经完成,如图 1-5 所示,并且经过实验室的模拟线路

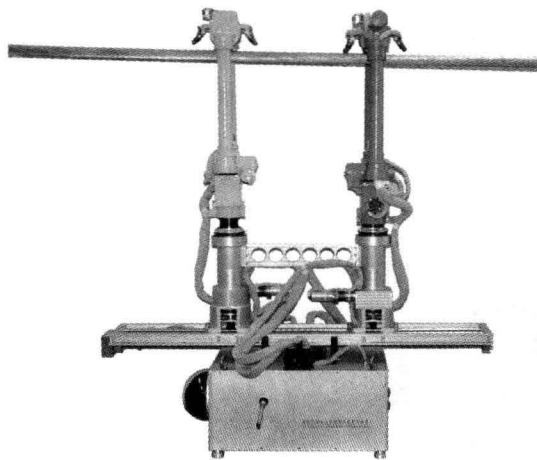


图 1-5 清华大学和中国科学院沈阳自动化研究所研制的电力系统线路巡检除冰机器人

实验。该机器人可以以一定的速度沿输电线爬行,并能跨越防振锤、耐张线夹、悬垂线夹等障碍,同时利用携带的传感仪器对杆塔、导线及避雷线、绝缘子、线路金具、线路通道等实施接近检测,同时它可以携带装置通过物理方式对线路进行除冰雪工作,以代替工人巡检和除冰工作。它还可以携带在线感应取电装置,从而满足机器人在线充电的需求。

在“863 计划”的支持下,武汉大学与汉阳供电公司合作,针对 220kV 单分裂相线,进行了巡检机器人关键技术的研究,在机器人越障机构、智能控制、移动导航、机器视觉技术、电能在线补给等方面

取得了一定的突破。该巡检机器人(见图 1-6)采用二臂回转式悬挂机构,如图 1-7 所示,能够避让和跨越两档线路间的防振锤、悬垂和耐张绝缘子串和跳线等各种障碍物。利用机器人携带的摄像装置,实现线路及其安全通道的检测与巡视,将检测到的数据和图像信息经过无线传输系统发送到地面基站;过地面基站接收、显示发回的数据

和图像资料。

同时，中国科学院北京自动化研究所、山东大学和遵义供电局联合开展了“110kV 输电线路自动巡检机器人”的研究，其研究成果主要表现在：①设计了三臂悬挂式移动机器人机构；②采用“基于知识库的自动控制”和“基于视觉的远程遥控主从控制”的混合控制系统，实现了典型障碍的越障；③采用多层神经网络分类器，实现了复杂环境下绝缘子开裂、破损视觉检查；④基于远红外热释电传感器及小波熵理论实现了输电线断股的在线检测与诊断。巡线机器人如图 1-7 所示。

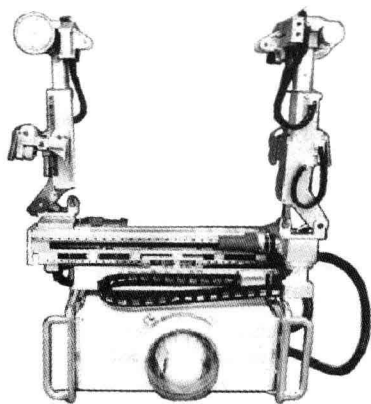


图 1-6 武汉大学研制的线路巡检机器人

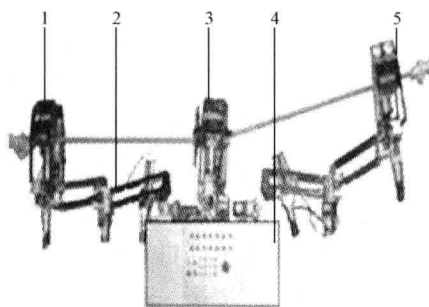


图 1-7 中国科学院北京自动化研究所、山东大学和遵义供电局等研制的巡线机器人
1—驱动装置；2—柔性臂；3—制动装置；4—控制箱；
5—手掌开合装置

随着工业发展，电网容量的增大和额定电压等级的提高，电力系统输电线路污染程度不断加大，这大大增加了输电线路运营成本及作业风险，不利于智能电网建设。为了解决上述问题，有的电力公司联合科研单位进行了机器人绝缘子检测技术研究，开发了绝缘子检测机器人系统。图 1-8 为辽宁省电力公司和中国科学院沈阳自动化研究所开发的绝缘子检测机器人样机照片。采用绝缘子检测机器人后，检修人员只需配合机器人检测程序操作，将机器人放置在需要检修的绝缘子上即可。机器人会自动逐片移动检测，每越过一片绝缘子，立即触发智能绝缘子检测仪，完成阻值检测。此项目由中国科学院沈阳自动化研究所机器人学国家重点实验室历经三年研制的科技成果，是国内首个可进行带电检测作业的机器人，适用于耐张塔双联水平串的带电检测，具有运动连续性好、检测作业速度快、对绝缘子防污闪涂料涂层磨损小等优点，于 2011 年 5 月由辽宁省电力公司配合完成性能检测试验。

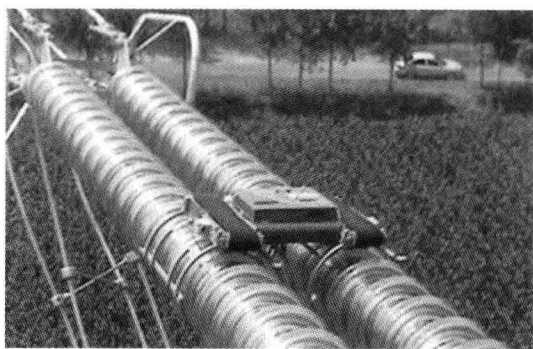


图 1-8 辽宁省电力公司开发的绝缘子检测机器人

1.4 巡线机器人共性关键技术

一、机械机构设计技术

巡线机器人是机电一体化系统，涉及机构、控制、通信、定位系统、移动平台上传感器的集成和信息融合、电源等，而机械机构是整个系统的基础，也是目前制约巡线机器人发展的技术障碍之一。巡线机器人机械机构的设计要求是：

- (1) 能在架空高压线上以期望的速度平稳爬行。
- (2) 具有一定的爬坡能力。
- (3) 能够避越高压线路上的防振锤、线夹、绝缘子、线塔等障碍。
- (4) 在故障情况下有可靠的自保安措施，防止机器人摔落。
- (5) 提供足够的空间安装所携带的电源以及探测、记录和分析处理仪器。

可实现在管线上爬行的机构可分为步进式爬行机构和轮式爬行机构两类。步进式爬行机构通过多只手臂的交替移动完成爬行，一般用于斜拉桥缆索、管道外壁的检查维护；轮式爬行机构依靠由电动机驱动的行走轮与管线之间的摩擦，驱动机器人前进。轮式爬行机构行走平稳，速度快，有利于移动平台上线路探测仪器的可靠工作，因此，目前巡线机器人多采用此类爬行机构。

越障机构是巡线机器人机构的关键。由于机器人悬挂在架空线上，越障时应保证机器人姿态平稳，并保持与其他导线和线塔金属部件的安全间距，因此设计难度较大。文献[3]采用了仿人攀援的弧形手臂越障机构，姿态控制较为复杂，文献[5]中给出的分体蛇形越障机构不适合跨越直径和间距较大的障碍，文献[11]的越障机构也同样存在跨越间距小的问题（见图1-9）。

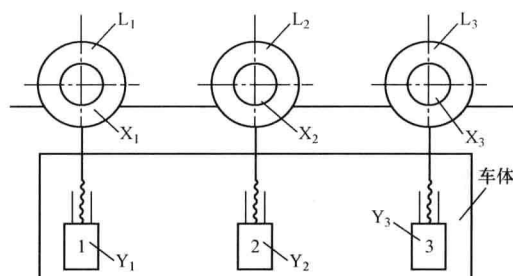


图 1-9 小车式巡线机器人机械机构

L—行走轮；X—行走电机；Y—越障电机

文献[3]采用了仿人攀援的弧形手臂越障机构，姿态控制较为复杂，文献[5]中给出的分体蛇形越障机构不适合跨越直径和间距较大的障碍，文献[11]的越障机构也同样存在跨越间距小的问题（见图1-9）。

巡线机器人越障操作类似人的空中攀援行为，因此，仿生设计是解决这一难题的有效方法。一种很有前景的方案是采用多只可伸缩机械臂结构，机械臂上部为爬行驱动机构，下部通过旋转关节相互链接。

遇到障碍时，机械臂之间相互配合，采用仿人攀援策略调整姿态跨越障碍。由于采用多只自由度机械臂，机器人可以完成更为复杂的空中姿态调整，因而可跨越各种类型的线路障碍。

二、工作电源管理技术

要保证巡线机器人在野外大范围内长时间工作，必须提供持续可靠的电源。巡线机器人功率一般为几百瓦，由于受体积和重量的限制，蓄电池组不能满足长时间供电要求。文献[3]尝试采用小型汽油发电机为机器人供电，但汽油发电机需携带油箱，工作时受环境影响大，可靠性差。由于巡线机器人一般沿大工作电流的电力线爬行，因此，最好

能直接从电力线上获取能源,即耦合供电。文献[7]对采用电流互感器耦合从高压电力线上获取电源的设计方法进行了深入研究,分析了机器人所需的最大驱动力与其重量的比率、磁芯的截面积、二次绕组匝数等变量的关系,实验结果验证了方案的可行性。

采用电力线耦合供电虽然解决了巡线机器人长期工作的电源问题,但同时也导致了机械机构及控制系统的复杂化。这是因为机器人越障时,电流互感器磁芯要从电力线上脱离,从而需解决磁芯分离机构控制和备用电源切换等问题。

三、导航及定位技术

导航是规划巡线机器人的行走路径,包括全局路径规划和局部越障规划等^[13]。巡线机器人沿架空电力线路爬行,要跨越防振锤、悬垂绝缘子、线夹、杆塔等障碍,行走环境介于结构化和非结构化环境之间,因此导航问题主要为局部越障规划。局部越障规划就是利用环境传感器(如超声传感器、激光测距仪、视觉传感器等)提供机器人周围的局部环境信息,产生下一时刻机器人位姿(位置和姿态,简称位姿)信息。由于巡线机器人环境中障碍物反射面较小,基于 CCD (Charge Coupled Device, CCD) 摄像机的视觉传感器更适合作为巡线机器人的环境传感器。另外,悬挂在导线上的机器人,由于风力作用和自身姿态调整时中心的偏移会产生摆动,加大了越障控制难度。

实时确定巡线机器人在作业环境中所处的位置,即机器人定位,对于准确标识线路故障点的位置至关重要。一种方案是采用里程计的相对定位技术,但累积误差较大;在经过的杆塔上贴上路标,也可以解决定位问题。

四、通信技术

通信模块完成基站和巡线机器人之间的双向数据传输,包括来自机器人的实时视频图像、线路探测传感器数据、机器人位姿状态和由地面基站发出的各种遥控命令等,要求具有带宽高、距离远、抗干扰能力强等特点。

五、线路损伤探测技术

巡线机器人需完成以下基本巡检任务:

杆塔巡视检查:检查杆塔横担、杆塔本体是否损坏、变形、锈蚀、被盗等。

导线及避雷线巡视检查:检查有无锈蚀、断股、损伤,有无悬挂异物等。

绝缘子巡视检查:检查普通和钢化绝缘子有无闪络、裂纹、破碎和烧伤痕迹;检查合成绝缘子有无严重污秽、伞裙开裂,均压环是否松动、歪斜或脱落。

线路金具巡视检查:检查金具有无锈蚀或损坏,防振锤有无生锈、脱落等。

线路通道检查:检查线路通道内的树木、建筑物等与线路导线之间的距离。巡线机器人需携带必需的探测仪器完成上述探测任务,故障和损伤探测方法有以下几类:

1. 非接触探测方法

(1) 视觉检查:视觉检查是应用最为广泛的线路检查方法,采用高分辨率 CCD 摄像机摄取目标图像,实时传输到地面基站或存储下来,由基站操作人员根据图像中导线、绝缘子等设施的外观确定是否损坏。人工复查需对图像逐帧观察,效率较低;采用计算机图像处理技术自动判断线路故障,能快速识别多种故障现象,从而提高了工作效率。采用图像处理技术自动评估架空线路的腐蚀程度,准确度与熟练技术工人相同。