

输电线路巡线机器人

视觉系统图像处理及模式识别研究

傅思遥 梁自泽 侯增广 谭 民 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

输电线路巡线机器人视觉系统 图像处理及模式识别研究

傅思遥 梁自泽 侯增广 谭 民 著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

输电线路巡线机器人是为实现输电线路自动巡检功能而设计的机电一体化设备,其目的是为了提高巡检质量和效率,减少巡检死角,改善工人劳动强度。对保证输电系统的安全可靠运行具有重要意义。基于轮式行走机构的巡线机器人在线上运行时需要在复杂背景和环境下识别架空输电线路相线和地线上安装的防震锤、间隔棒、绝缘子、悬垂线夹、耐张线夹等线路附件。因此,巡线机器人必须借助传感器探测并识别这些障碍,然后根据障碍类型规划越障行为,跨越杆塔,才能沿输电线路大范围自主行走。本书围绕作者所在实验室自主研发的新型双臂巡线机器人的视觉导航、输电线路障碍物识别、图像复原等任务,针对线上障碍物目标的检测、识别、分类和图像复原等问题进行了研究和探讨。

本书可作为机电一体化、自动化控制、模式识别等专业高年级学生、研究生的参考读物,也可供相关研究机构研究人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

输电线路巡线机器人视觉系统图像处理及模式识别研究 / 傅思遥等编著. -- 北京:中国水利水电出版社, 2010.1

ISBN 978-7-5084-7089-4

I. ①输… II. ①傅… III. ①输电线路—检测—机器人视觉—视觉系统—图像处理—研究②输电线路—检测—机器人视觉—视觉系统—模式识别—研究 IV. ①TM726 ②TP242.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第232986号

责任编辑: 庞永江 加工编辑: 庞永江 封面设计: 李 佳

书 名	输电线路巡线机器人视觉系统图像处理及模式识别研究
作 者	傅思遥 梁自泽 侯增广 谭 民 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (营销中心)、82562819 (万水)
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷厂
规 格	148mm×210mm 32开本 7.25印张 208千字 2彩插
版 次	2010年1月第1版 2010年1月第1次印刷
印 数	001—500册
定 价	40.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

电力公司面临不断增加的电力需求、更高供电可靠性要求和激烈的市场竞争,以可靠性为中心的精确维护策略,因能保证电力设施工作寿命最大化,已成为共识。对电力设施早期潜在故障的准确发现和正确评估,是成功实现上述策略的关键。巡线机器人应运而生,具有广阔的应用前景。本书结合国家 863 计划机器人技术主题“110kV 输电线路自动巡线机器人”和“220kV 沿相线巡线机器人关键技术”等研究课题,对架空输电线路巡线机器人的结构设计、控制系统开发、视觉导航中的障碍识别与定位、越障视觉伺服控制、输电线路构件缺陷的视觉检测等关键技术进行了深入研究。

全书的结构安排如下:

第 1 章 绪论。介绍了架空输电线路巡线机器人及机器人视觉的国内外研究状况,对一些典型的巡线机器人样机的机械结构、系统功能与控制系统进行了分析,并针对研制巡线机器人中存在的诸多难点和问题,提出了巡线机器人的主要关键技术。

第 2 章 巡线机器人的体系结构。详细介绍了现有 110kV 巡线机器人的机械结构、控制系统和 220kV 巡线机器人相关系统的组成。

第 3 章 巡线机器人的视觉导航系统。详细介绍了巡线机器人的视觉导航系统以及实验室环境内导航算法的实现。

第 4 章 巡线机器人的线上物体识别。视觉导航系统是巡线机器人重要的组成部分,主要用于对线上障碍物及线路环境的识别,是巡线机器人实现自主导航的重要前提。本章首先简介了图像处理的基本概念,特别对巡线机器人视觉系统设计中所需要着重考虑的图像增强技术、图像高光检测技术以及图像分割技术进行了重点描述。其次,针对我国现有 220kV 架空输电线路的结构特点,采用改进的几何图形检测方法和分层决策机制,设计了基于结构约束的障碍识别算法。算法采用基于直线提取、椭圆和圆的检测算法用于提取线上的典型障碍

物（包括输电线本身），并结合 Kalman 预估器跟踪障碍物，融合帧间信息以提高障碍物识别质量。

第 5 章 障碍物定位。以巡线机器人视觉导航为背景，对双目立体视觉算法进行了研究。研究工作围绕基于区域的立体匹配方法展开，内容包括区域相似性测度、匹配窗口尺度的确定和匹配搜索策略等。针对障碍物表面亮度较为均匀的问题，提出了一种自适应匹配窗的搜索策略，提高了匹配的精度。最后给出了在实验室模拟线路上进行带电测试运行时障碍定位的实验结果。

第 6 章 障碍物分类学习。根据巡线机器人视觉系统在线上工作时的环境特点，提出了自动进行线上障碍物种属学习以及进行分类的方法，该方法能通过一组无序的局部特征集自动学习物体类别进行物体分类。局部特征集通过嵌入高维空间进行集合之间的部分相似度匹配从而聚类。对于原始障碍物数据集，通过特征提取后，形成特征点集，再通过金字塔匹配核进行无监督的学习，使得系统能自动识别典型线上障碍物以及进行分类，并且提出了基于一组直方图交的核函数线性组合的多核学习法。从场景分类的效果、方法的速度、鲁棒性等方面进行了较详细的分析和比较。

第 7 章 视觉伺服控制。根据巡线机器人越障时的环境特点，在分析其越障行为机理的基础上，设计了基于图像的越障视觉伺服控制方案（image-based visual servo）。通过对傅立叶描述子性能分析，构造了具有平移、旋转、尺度缩放及起始点不变性的轮廓形状特征向量，实现基于傅立叶描述子的驱动轮识别、图像特征的抽取和驱动轮-相线图像空间中相对位姿的估计，在此基础上设计了带有死区的比例控制器实现驱动轮-相线“对中”视觉伺服控制。实验室模拟实验结果表明，该方案能可靠地完成巡线机器人越障过程中驱动轮-相线“对中”控制任务。

第 8 章 图像复原。本章根据巡检机器人在线上由于受到侧风或者机体产生抖动所导致的运动图像模糊的特点，对原因进行了分析并且建模，在估计出图像模糊算子参数后，通过递归神经网络（Recurrent Neural Network）对原始模糊图像进行复原。试验结果表明，该算法能较为可靠的实现在特定环境下的运动模糊图像恢复。

第9章 缺陷检查。本章根据挂网瓷绝缘子的结构特点,从 CCD 摄像机获取的图像中抽取瓷绝缘子局部区域特征,利用三层 BP 神经网络从复杂背景中识别出目标绝缘子并定位,然后采用扫描分析绝缘子图像窗口纵向剖线模式的方法判定绝缘子的完好状态。瓷绝缘子破损视觉检测是一种非接触检测方法,它利用 CCD 摄像机获取待检测瓷绝缘子的一幅或多幅图像,通过图像分析与处理,判断瓷绝缘子外表破损和表面积污程度、绝缘子串单元的缺损等表面缺陷,为挂网瓷绝缘子破损检测提供了一种新的手段。

第10章 结论。给出了全书的结论与展望。

本书的核心内容系本人在中国科学院自动化研究所攻读博士期间的相关研究内容。在本人攻读博士期间,导师侯增广研究员自始至终给予了亲切的关怀和精心的指导,从博士论文的选题到课题的关键问题研究,以及论文的撰写与修改,无不倾尽心力。导师严谨的治学态度、高尚的敬业精神以及平易近人的作风都给我留下深刻的印象,令我受益匪浅。在此谨向侯老师致以最诚挚的感谢!

感谢梁自泽研究员和谭民研究员在我攻读博士学位期间给予的指导与帮助,他们在科研、学习和生活上都给了我莫大的关怀与指导。同时还要感谢同课题组的张运楚老师,李恩老师,左岐老师和黄实老师以及程龙、韩立伟、梁潇、蔡丽等同学给予的帮助,与他们的坦诚交流与讨论使我受益匪浅。

本书在出版阶段得到了中央民族大学信息工程学院杨国胜院长大力支持以及北京市教育委员会共建项目专项资助,中央民族大学 985 工程 2 期建设项目基金的资助,在此表示诚挚感谢。

感谢中央民族大学信息工程学院图像处理实验室郅新凯老师对我的指导和帮助。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在疏漏,恳请读者不吝赐教。联系地址: fusiyaoyao@163.com。

傅思遥

2009 年 11 月

目 录

前言

第1章 绪论	1
1.1 概述	1
1.2 巡线机器人的研究现状及发展	4
1.2.1 研究历史及现状	5
1.2.2 巡线机器人的关键技术	11
1.3 机器人视觉的研究现状及发展	16
1.3.1 视觉导航	17
1.3.2 视觉伺服控制	20
1.4 小结	22
第2章 巡线机器人的体系结构	23
2.1 总体设计思路	23
2.2 机械结构	23
2.3 110kV 巡线机器人的运动学分析	27
2.3.1 运动学分析	27
2.3.2 仿真实验	31
2.4 控制系统	32
2.4.1 层次结构	33
2.4.2 硬件组成	34
2.4.3 软件结构	36
2.4.4 控制模式	38
2.5 220kV 巡线机器人视觉导航系统	39
2.6 小结	40
第3章 110kV 巡线机器人的视觉导航系统	41
3.1 引言	41
3.2 110kV 巡线机器人的视觉导航系统设计	42
3.3 110kV 巡线机器人视觉导航系统的算法实现	43

3.3.1	相关的基础知识	43
3.3.2	单帧巡线图像的障碍物识别算法	45
3.3.3	视觉导航系统的障碍物识别算法	58
3.4	实验	58
3.5	小结	62
第4章	输电线路线上障碍物识别	63
4.1	引言	63
4.1.1	概述	63
4.1.2	典型线上障碍物	64
4.2	物体识别的一般方法	67
4.2.1	物体模型	67
4.2.2	特征检测	68
4.2.3	假设形成	70
4.2.4	假设验证	70
4.3	典型几何形状检测	71
4.3.1	Hough 变换	71
4.3.2	Burns 直线提取方法	74
4.4	基于结构约束的障碍识别方法	80
4.4.1	相线识别与定位	81
4.4.2	防振锤识别	83
4.4.3	悬垂线夹识别	85
4.4.4	耐张线夹识别	86
4.4.5	障碍跟踪	87
4.5	实验结果	88
4.6	小结	96
第5章	障碍定位	97
5.1	引言	97
5.2	双目立体视觉原理	98
5.2.1	摄像机建模	98
5.2.2	空间点三维重构	101
5.2.3	立体匹配	103

5.3 基于区域的立体匹配方法	104
5.3.1 相似性测度	106
5.3.2 匹配窗口及匹配搜索策略	109
5.4 实验分析	113
5.5 小结	114
第6章 基于部分特征匹配的无监督物体分类	115
6.1 引言	115
6.2 无监督学习的问题陈述以及解决思路	117
6.2.1 无监督学习问题陈述	117
6.2.2 问题描述	120
6.3 特征提取	122
6.3.1 常见特征提取法	122
6.3.2 SIFT 特征描述子	124
6.4 特征集之间的部分匹配	130
6.4.1 部分匹配与金字塔匹配核	130
6.4.2 金字塔匹配核与 Mercer 核	134
6.4.3 空间金字塔匹配	135
6.4.4 通过正则图割的方法进行聚类	138
6.4.5 组内在联系成员聚类	140
6.4.6 实验结果	142
6.5 基于直方图交核函数的多核学习问题	144
6.5.1 多核学习问题定义	144
6.5.2 基于多直方图匹配核的多核学习	149
6.5.3 实验结果	151
6.5.4 实验速度	152
6.6 本章小结	152
第7章 运动模糊图像复原	154
7.1 引言	154
7.2 图像退化的数学模型	156
7.2.1 问题概述	156
7.2.2 巡检机器人运动模糊图像建模	157

7.3 递归神经网络结构	160
7.4 实验结果	164
7.5 小结	166
第8章 架空输电线路绝缘子缺陷的视觉检查	167
8.1 引言	167
8.2 绝缘子识别	168
8.2.1 图像分割	168
8.2.2 特征提取	172
8.2.3 基于 BP 神经网络的绝缘子识别	173
8.3 绝缘子纵向剖线模式分析及表面破损判定	175
8.3.1 纵向剖线模式提取	176
8.3.2 纵向剖线模式分类	176
8.4 实验结果	177
8.5 小结	177
第9章 巡线机器人越障视觉伺服控制	178
9.1 引言	178
9.2 基于图像的视觉伺服 (Image-based visual servo)	178
9.3 巡线机器人越障视觉伺服策略	182
9.4 巡线机器人驱动轮与相线相对位姿估计	185
9.4.1 图像畸变矫正	186
9.4.2 图像特征选择和特征偏差定义	189
9.4.3 图像特征提取及驱动轮与相线相对位姿估计	190
9.5 巡线机器人越障视觉伺服控制律	198
9.6 实验结果	200
9.7 小结	203
第10章 结论	204
参考文献	207

第 1 章 绪论

1.1 概述

架空输电线路是远距离输配电力的主要方式（图 1-1），绝大部分敷设在地形复杂、自然环境恶劣的地方。架空输电线路导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，最终导致大面积停电等严重事故和巨大的经济损失。08 年初我国南方雪灾，出现大面积电力变压器的塔台倒塌，电力设施遭受到毁灭性破坏，需要实施准确可靠的检测手段。另外随着国内国民经济的高速发展，国家经济实力的不断提高以及社会电力市场需求的迅速增加，我国电力建设的规模也在逐步扩大。当前，我国已有超高压线路约 23 万公里，随着经济发展还在进一步增长，保障电网输电安全可靠运行至关重要。尤其在特殊用电部门，供电措施更是重中之重。例如甘肃酒泉航天城的每次发射任务在发射前夕往往需要电业局特别组成专门的保障队，对所有输电线路进行全面的检测与维护，以全面保障神舟系列飞船和卫星发射的用电供应。然而目前高压和超高压输电线路巡检目前主要采用人工巡检作业方式，劳动强度大、费用多且危险性高。随着工业发展，电网容量的增大和额定电压等级提高，使电力系统输电线路污闪事故日益突出，检测高压输电线路的不良绝缘子以及相关线上电力器件已成为国内外电力部门十分关注的问题。因此对线路的维修和监控的要求也不断提高。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，对输电线路进行巡检的方法主要有两种：（1）地面目测法，

采用肉眼或望远镜对辖区内的输电线路进行观测并做出判断。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；另外，复杂光照背景下的输电线路往往给目测巡检方法造成极大不便，这种传统的输电线路巡视方法受人员素质、天气状况及其他不确定因素影响的局限，不能完全掌握设备运行的真实情况，劳动强度大，工作效率和探测精度低，可靠性差。（2）航测法，派直升飞机或者航模沿输电线路飞行，工作人员用肉眼或使用机载摄像设备观测和记录沿线异常点的情况。在我国，使用直升机对超高压输电线路进行巡视检查是近几年来才逐渐开展起来的新兴通用航空飞行项目。然而用直升机对架空输电线路进行巡检、带电作业以及线路施工等在许多西方国家已成为成熟的技术，并使得他们的架空输电线路建设和维修技术推进到一个新的阶段。这种方法属于接近式检测，从而提高了探测效率和精度，但输电线路从观察者或摄录设备的视野中快速通过，工作人员往往不能准确定位检测区域；另外直升机机身抖动极大，给机载摄像设备带来晃动的问题，有时使得采集到的图像无法准确识别，因此增加了技术难度，运行费用较高^[1,2]。



图 1-1 高压架空输电线路网络

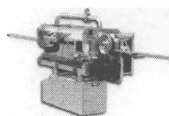


图 1-2 2008 年年初我国南方雪灾现场，巡检工人正在作业

综上所述，由于众所周知的原因，常规的基于人力的巡视劳动强度非常大，而且效果不好。智能移动机器人技术的发展，为架空输电线路巡检提供了新的移动平台。巡线机器人的产生，就是为了减少人力负担，用于对输电线路进行状态检测的。巡线机器人能在输电线路带电情况下沿输电线路爬行，跨越防震锤、耐张线夹、悬垂线夹、杆塔等障碍，利用携带的传感仪器代替人对杆塔、导线及避雷线、绝缘子、线路金具、线路通道等实施接近检查。具有巡检灵活机动和不受高山深谷限制的独特优势，利用机载设备能够发现一些人工巡视中难以发现的隐蔽的线路故障（可提供线路导地线、绝缘子、金具、通道、树木生长、线路结构、杆塔基础等详细情况），第一时间为电网调度和开展设备状态检修提供真实全面的现场资料，从技术层面上保障了电网的安全稳定运行。针对于雪灾危害，巡检机器人使用随机携带的传感器可针对架空线路、绝缘子、线路杆塔进行附冰预警，并能在结冰初期有效防止冰层加厚，进行未停电情况下的带电除冰，线路故障后的附冰处理，以及灾情发生后的受灾情况评估。巡检机器人的应用可以直接降低人员除冰的人身危险，降低输电线路倒塌的危险性，提高除冰的效率，保障电网系统的可靠运行，减少因冰雪灾害停电引起的工农业经济损失以及铁路停运等造成的城乡居民生活不便，大大提高巡检的效率，降低维护成本，确保输电线路的安全运行。因此巡检机器人是节约成本的有效办法，更是保证安全的重要措施。

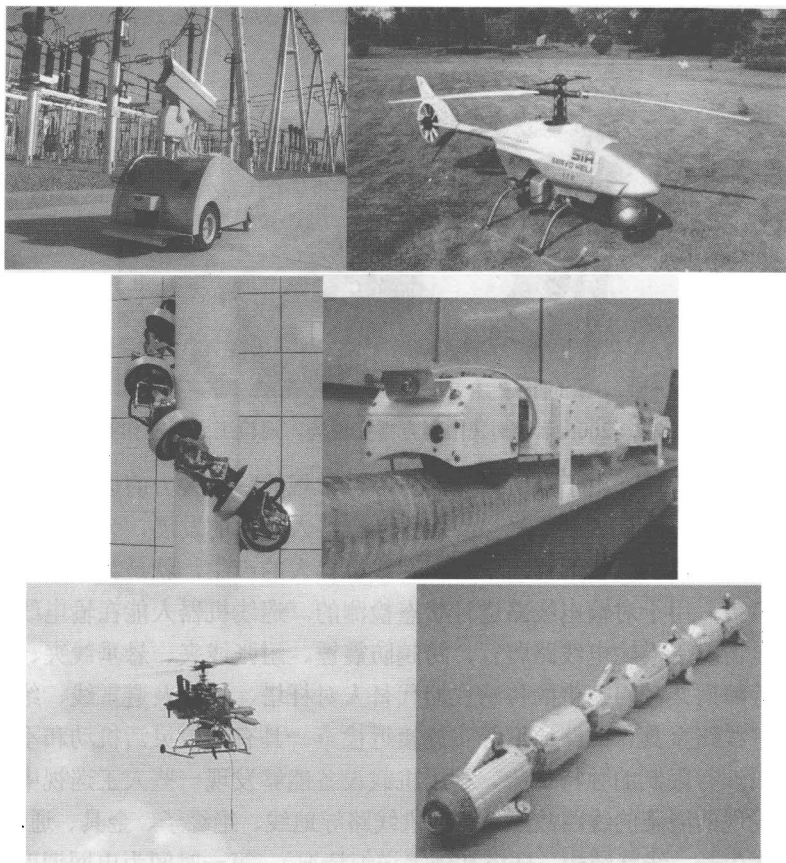
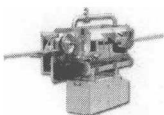
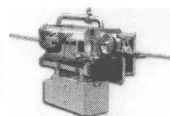


图 1-3 各式各样的陆地巡线机器人与线路巡检航空器（航测装置）

1.2 巡线机器人的研究现状及发展

从 20 世纪 80 年代末开始，日本、美国和加拿大等国相继开展了巡线机器人的研究与开发，并取得了较大的进展，尤其是可在两杆塔之间实施巡检作业的巡线机器人技术已经发展成熟。然而巡线机器人要爬行的架空输电线路存在着支撑高空输电线路的多个杆塔，在输电线路上有多种线路附件，如防震锤、悬垂线夹、耐张线夹和绝缘子等，这些附件既是要巡检的目标，也是影响巡线机器人爬行的障碍物。显



然仅可在两个杆塔之间爬行的巡线机器人已远远不能满足实际线路上较长距离巡检工作的要求，因此具有越障功能的巡线机器人逐渐成为研究的热点。

1.2.1 研究历史及现状

1988 年，东京电力公司的 Sawada^[3]等人研制了光纤复合架空地线（OPGW—Optical Fiber Composite Overhead Ground Wire）巡检移动机器人，如图 1-4 所示。该机器人利用一对驱动轮和一对夹持轮沿地线爬行，能跨越地线上的防震锤、螺旋减震器等障碍物。遇到线塔时，机器人采用仿人攀缘机理，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。

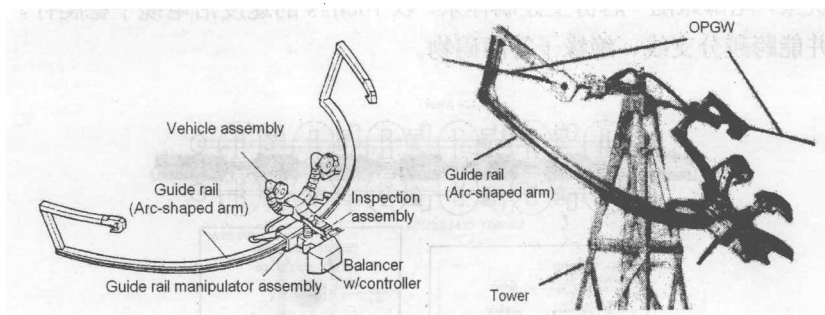
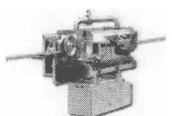


图 1-4 弧形手臂巡线机器人

OPGW 机器人运行有粗略和精确两种控制模式。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。精确控制则根据接近传感器反馈信息进行控制。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^[4]1989 年研制了一台悬臂自治巡线机器人原型，如图 1-5 所示。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，



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缘的方法从侧面越过杆塔。

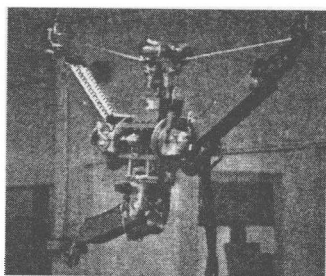


图 1-5 TRC 悬臂巡线机器人

1990 年日本法政大学的 Hideo Nakamura^[5,6]等人开发了电气列车馈电电缆巡线机器人，见图 1-6。机器人采用多关节小车结构和“头部决策，尾部跟随”的仿生控制体系，以 10cm/s 的速度沿电缆平稳爬行，并能跨越分支线、绝缘子等障碍物。

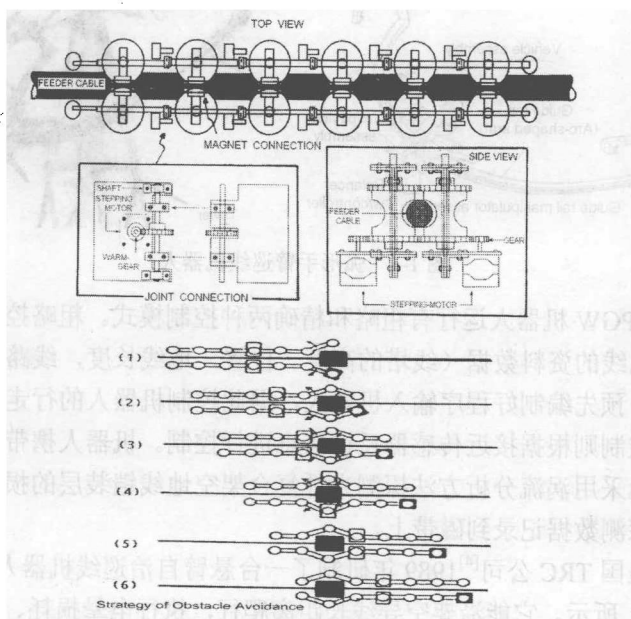
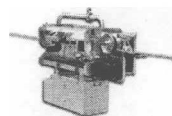


图 1-6 蛇形巡线机器人



机器人由六对左右对称、相互联结的小车组成。每个单体小车有两个电机，一个用于行走驱动，另一个用于控制联结前后小车的旋转关节的关节角。左右小车采用具有自保安功能的磁锁系统联结，磁锁系统用永久磁铁将左右小车牢牢锁紧，使两车橡胶驱动轮抱住馈电电缆，由行走电机驱动沿电缆平稳爬行。当机器人遇到分支线、绝缘子等障碍物时，每对小车上的磁锁系统的电磁铁通电，顺次将磁锁打开，机器人再改变两侧旋转关节的关节角，使左右小车分开，依次通过障碍物。然后控制两侧旋转关节使左右小车合拢，电磁铁断电，磁锁再次锁紧，机器人恢复正常行走状态。

图 1-7 是泰国 Peungsungwal^[7]等人 2001 年设计的一台自给电巡线机器人。该机器人采用电流互感器从爬行的输电线路获取感应电流，作为机器人的工作电源，从而解决了巡线机器人长时间驱动的动力问题。该巡线机器人初步实现了根据摄像机图像判断输电线路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之间的输电线路爬行，无越障能力。

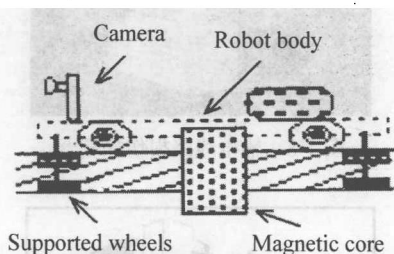


图 1-7 自给电巡线机器人

由日本 Sato 公司^[8]生产的输电线路损伤探测器也采用了单体小车结构（图 1-8 所示），能在地面操作人员的遥控下，沿输电线路行走，利用车载探测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。该损伤探测器于 1993 年赢得了 Shibusawa 大奖。

加拿大魁北克水电研究院 (IREQ-Quebec Research Institute on Electricity) 的 Serge Montambault^[9,10]等人 2000 年开始了 HQ LineROVer