

# 巡线机器人的研究综述 及面向智能电网技术的一些探讨

佃松宜<sup>1</sup>, 翁桃<sup>1</sup>, 廖云杰<sup>2</sup>, 陈波<sup>2</sup>

(1 四川大学电气信息学院智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610065;

2 四川省电力公司超高压运行检修公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 在讨论高压/超高压/特高压架空输电线路常用巡检方法和巡线机器人的典型组成结构的基础上, 回顾和分析了国内外架空线巡线机器人的研究和应用现状。面向智能电网这一新的战略规划, 探讨了研究和开发满足高压/超高压/特高压应用领域巡线机器人应关注的一些关键技术。

**关键词:** 架空输电线路; 巡线机器人; 智能电网; 关键技术

**Abstract:** Based on the discussion on the inspection methods commonly used in HV/EHV/UHV overhead transmission lines and the typical configuration of inspection robots, the development and the present situation of mobile robots for overhead line inspection at home and abroad are reviewed and analyzed. Catering to the new strategic project of smart grid, some vital techniques concerned in inspection robots are investigated and developed so as to meet the requirements of HV/EHV/UHV overhead line inspection.

**Key words:** overhead transmission line; inspection robot; smart grid; vital technique

**中图分类号:** TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2009)增-0046-05

## 0 引言

采用高压/超高压/特高压 (high-voltage/extra high-voltage/ultra high-voltage 缩写为 HV/EHV/UHV) 架空电力线是长距离输配电的主要方式。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、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。因此输电线路巡检是保证电力系统安全运行的一项基础工作, 目的就在于掌握线路运行状况及其周围环境的变化、发现线路设备的缺陷及线路安全的隐患。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, 从而保证电力设施工作寿命最大化, 确保供电可靠性和电网运行安全。另一方面, 高压/超高压/特高压线路往往需要穿越各种复杂的地理环境, 如经过大面积大型水库、湖泊和崇山峻岭等, 这些都给电力输电线路的巡检带来极大困难<sup>[1,2]</sup>。

传统的电力输电线路的巡检主要采用两种方法, 即地面人工目测法和直升飞机航测法<sup>[3,4]</sup>。前者的巡检精度低, 劳动强度大, 且存在巡检盲区; 后者则存在飞行安全隐患且巡线费用昂贵。随着机器人技术的发展, 巡线机器人可以克服上述技术手段的各种缺陷, 因此, 巡线机器人已成为特种机器人领域的一个研究热点。下面在叙述巡线机器人的典型组成结构的基础上, 综合了国内外在该领域的研究现状, 探讨了面向智能电网这一新的战略规划、针对 HV/EHV/UHV 应用领域的巡线机器人研究和开发中的关键技术。

## 1 巡线机器人的典型组成结构

巡线机器人是一套复杂的机电一体化系统, 涉及机械结构、多传感器系统及信息融合、自动化、通信、电源技术等诸多领域, 主要由机械结构、控制系统、导航与定位、巡视扫描装置、电源与屏蔽封闭机箱和通信系统等几部分组成<sup>[1,5]</sup>。

### 1.1 机械结构

机械结构是整个系统的基础, 要重量轻巧、结构简单, 同时必须提供在电力输电线路全行程行驶所需

的全部机械运动;能在高压输电线路以一定的速度平稳运行;能灵活地跨越输电线路上的防震锤、耐张线夹、悬垂线夹等典型障碍;能跨越跳线和转弯,具备一定的爬坡能力;能自带电源和各种探测、分析处理和记录仪器设备。

### 1.2 控制系统

由机器人执行机构上的位置检测传感器和各种力传感器构成的位置与力反馈单元、导航系统的伺服控制反馈单元、运动控制单元和任务规划与决策单元等组成,实现巡线机器人的自主控制与遥控操作,故障状态下能可靠自锁防止机器人摔落和事故发生。

### 1.3 导航与定位

导航就是规划巡线机器人的行走路径,一般包括全局路径规划和局部越障规划等。巡线机器人沿架空电力线路爬行,要跨越防震锤、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信息。由于巡线机器人环境中障碍物反射面较小,基于 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重心的偏移会产生摆动,加大了越障控制难度。

### 1.4 巡视扫描检测装置

合理的机械结构、可靠的控制系统以及精准的导航与定位是巡线机器人能够顺利完成巡检任务的基本前提条件。为了对杆塔、导线及避雷线、绝缘子、线路金具、线路周围环境等电气设备或环节进行巡视检查,必须给机器人配备巡视扫描检测系统,包括配备高清晰度可见光摄像机、红外热成像仪及二自由度扫描云台等仪器用于线路的外观、机械故障的扫描成像。

### 1.5 电源和屏蔽封闭机箱

为了减轻巡线机器人的重量,不能携带过重的电源装备,一般考虑用可充电蓄电池。巡线机器人在静止或运行状态下,由能实现机械开合运动的取电装置将高压线路单导线周围的磁场能转换为电能,并向蓄电池充电。应该采取防雨、防尘和电磁兼容一体化设计。为适应全天候的电力作业巡检任务,主控制器和各种检测部分应置于封闭机箱中。另外,为了在电气上达到电磁场的屏蔽,封闭机箱应与机械系统和导线

构成等电位体。

### 1.6 通信系统

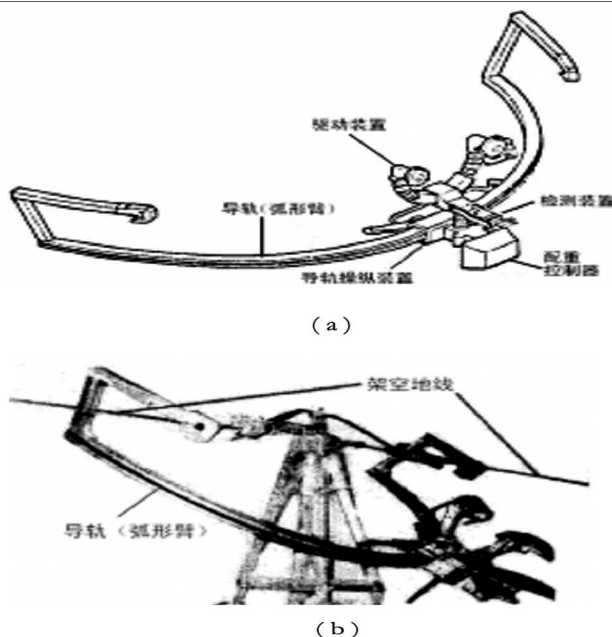
一般而言,巡线机器人的通信系统由数据无线收发装置和图像的无线发送装置两部分组成,还与地面遥控接收移动站构成数据的半双工无线数据传输和图像传输。

## 2 国内外研究现状

### 2.1 国外巡线机器人的研究现状

20 世纪 80 年代末,国际上开始关注和研制高压输电线路巡线机器人。日本、美国和加拿大等国相继开发了不同用途的巡线机器人,取得了一些成果。

1988 年东京电力公司的 Sawada 等人首先研制了具有初步自主越障能力的光纤复合架空地线巡检移动机器人<sup>[6]</sup>,如图 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,能跨越地线上防震锤、螺旋减震器等障碍物。当遇到线塔时,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,然后机器人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。因为没有安装外部环境感知传感器,因而适应性较差。而且导轨约 100 kg 机器人自身过重,对电池供电也有较高的要求。



(a)机器人的组成;(b)机器人在架空地线上的巡检情况

图 1 弧形手臂巡线机器人

美国 TRC 公司 1989 年研制了一台悬臂自治巡检机器人的样机系统<sup>[7]</sup>,如图 2 所示,能沿架空线路较长距离地爬行,可进行电晕损耗、绝缘子、结合点、压接头等视觉巡检任务,并将探测到的线路故障参数进行一定处理后传送给地面指挥人员。遇到杆塔时,只能利用手臂采用仿人攀援的方法从侧面越过,不能跨越如防震锤、悬垂线夹、耐张线夹和绝缘子等输电线路上的典型障碍。由日本 Sato 公司生产的输电线路损伤探测器也采用了单体小车结构(如图 3 所示)<sup>[8]</sup>,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。



图 2 美国 TRC 公司悬臂自治巡检机器人样机

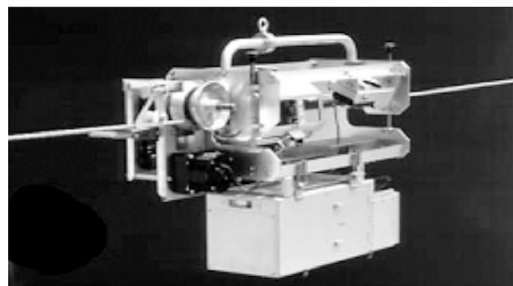


图 3 日本 Sato 公司生产的输电线路损伤探测器

加拿大魁北克水电研究院的研究人员 2000 年开始了 HQ LineRover 遥控小车的研制工作<sup>[9]</sup>,如图 4 所示,遥控小车起初用于电力传输线地线的除冰作业,逐步发展为用于线路巡检、维护等多用途移动平台。该移动小车驱动力大,能爬上 52° 的斜坡,通信距离可达 1 km。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、导线清污和除冰等带电作业。但是, HQ LineRover 无越障能力,只能在两杆塔间的输电线路工作。此外,日本的 Hideo Nakamura 等研制了蛇

形运动机器人<sup>[10]</sup>。泰国 Peungsungwal 等人 2001 年设计的自给电巡线机器人<sup>[11]</sup>,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。

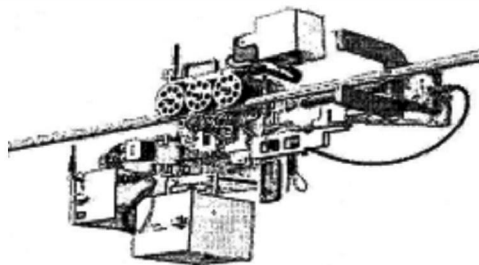


图 4 加拿大魁北克水电研究院的遥控小车

## 2.2 国内巡线机器人的研究现状

20 世纪 90 年代末,在“十五”国家高新技术发展计划(863 计划)的支持下,武汉大学、中科院自动化所、中科院沈阳自动化所等先后开展了巡线机器人的研制工作。武汉大学在 863 计划的支持下,与汉阳供电公司合作,针对 220 kV 单分裂相线,进行了巡线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全面的突破<sup>[5,12]</sup>,如图 5 所示。

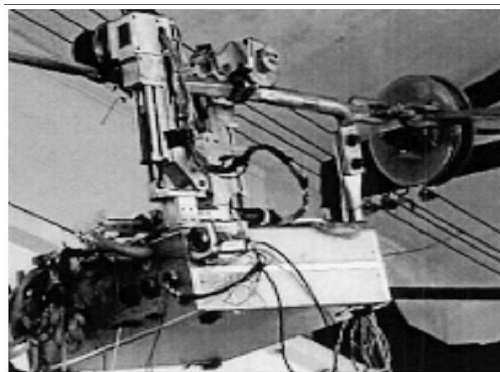


图 5 武汉大学研制的巡线机器人

在 863 计划以及国电东北电网有限公司的支持下,中国科学院沈阳自动化研究所开展了“沿 500 kV 地线巡检机器人”的研制<sup>[13~15]</sup>,如图 6 所示。课题组成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下的巡检试验。该样机的成功研制,在系统电源、机器人本体、控制系统、检测设备和通讯设备、地面控制与数据后台处理等方面积累了丰富的经验。

“十五”期间,中科院自动化所开展了“110 kV 输电线路巡检机器人”的研究<sup>[16~18]</sup>,如图 7 所示。其研

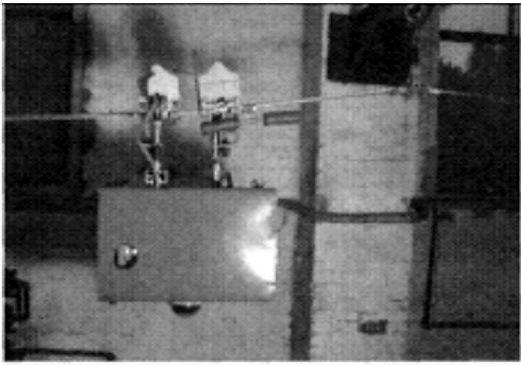


图 6 中科院沈阳自动化研究所 500 kV  
地线巡检机器人样机

究成果主要表现在:一是设计了三臂悬挂式移动机器人机构;二是采用“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;三是采用多层神经网络分类器,实现了实验室复杂环境下绝缘子开裂、破损视觉检查。

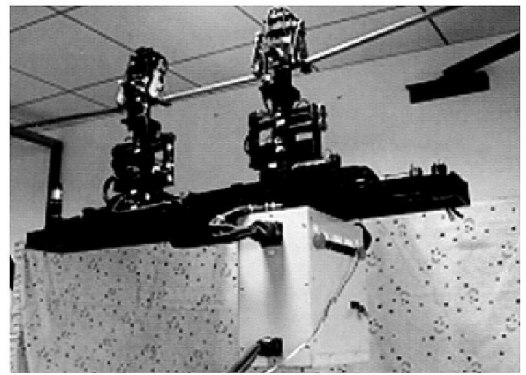


图 8 中科院自动化所的 110 kV 输电线路  
二臂回转式巡检机器人

### 3 面向智能电网技术的探讨

#### 3.1 智能电网技术

随着电力行业在能源、环境、安全运行、市场竞争、企业管理等方面面临的压力日益增大,以及材料、信息、电力电子等领域新技术蓬勃发展带来的驱动力,新一代电力网络“智能电网”应运而生,已成为全球各国电力行业发展的共同目标。2003年北美大停电后,美国电力行业决心利用信息技术对陈旧老化的电力设施进行彻底改造,开展智能电网研究,以期建设满足智能控制、智能管理、智能分析为特征的灵活应变的智能电网。2004年欧盟委员会启动了相关的研究与建设工作,提出在欧洲建设智能电网的定义。中国国家电网公司也于2009年初提出了“建设坚强智能电网”的总体发展目标和规划。在这一新的战略规划中,从确保电网安全稳定运行和可靠供电的战略高度,突出建立针对输配电领域电力设备状态数字化评价体系 and 具有自诊断功能的智能设备技术体系,实现包括电力输电线路在内的电力设备定期检修向状态检修转变的重要性。

#### 3.2 面向智能电网的巡线机器人应具备的关键技术

针对目前高压 超高压 特高压线路巡检机器人存在的问题和研究现状,为了实现巡检机器人的小型化和提高智能化水平,归纳整理了如下的关键技术。

1) 巡检机器人体系结构的小型化技术与模块化技术。体系结构的小型化包括整体机械与驱动机构的小型化与轻量化,采用或研制各类小型先进传感器(如 MEMS 位置、速度、视觉传感器),开发小型化控制系统硬件模块和使用小型化工作电源等。另外,为

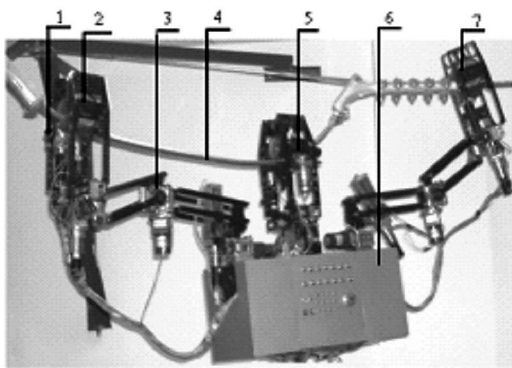


图 7 中科院自动化所的 110 kV 输电线路巡检机器人

目前,中科院自动化所复杂系统与智能科学重点实验室新研制的 110 kV 输电线路巡检机器人采用二臂回转式悬挂机构,如图 8 所示,增加了臂距调整机构、夹持轮抱线机构等,可实现旋转、俯仰等运动功能,爬坡能力强。机器人携带的检测用摄像机,可进行障碍物的检测和越障时的辅助指导工作,有效地克服了三臂机器人的不足,当然两臂机器人的行为规划复杂,增加了控制电路设计及运动控制的难度。

从国内外已取得的研究成果可以看出,国外无越障功能的架空电力线路巡线机器人技术较为成熟,已处于实用阶段。这类机器人一般需人工参与,只能完成两线塔之间电力线路的检查,作业范围小,自治程度低。自主巡线机器人能跨越线路附件、线塔等障碍物,可实施大范围、长时间的线路巡检作业,国内对具有自主越障功能的机器人研究投入力量大,取得了多项研究成果。

了适应高压、超高压、特高压输配电线路的不同特点,研制与开发不同的功能模块,以便于在通用的机器人平台上针对不同的应用搭载不同的功能模块实现巡线机器人通用化。

2) 基于先进控制方法的导航定位与姿态控制技术。巡线机器人在输电线路应自主行走、跨越典型障碍,还需要在强电磁干扰、线路因风力产生不同程度的舞动情况下正常工作,这就要求巡线机器人具备高度有效的导航定位方法和强鲁棒性的行走姿态控制算法。如何在巡检机器人的导航定位与姿态控制中尝试应用一些先进控制方法(如智能控制、滑模变结构控制等)也是关键技术之一。

3) 基于多传感器信息融合的线路损伤探测技术。巡检机器人运用多种传感器同时扫描电力线路,传感器信息融合技术以更高的辨别率和可靠性发现各种类型的早期故障并加以评估,为维护人员实时提供架空电力线设施的工作状态报告。

4) 分布式多巡线机器人系统技术。多机器人有组织的协作,使巡线机器人群体产生高性能的智能行为,通过群体间的知识共享和交换,可进一步提高线路故障的探测灵敏度和可靠性。

5) 基于新的互联协议的巡线机器人。随着智能电网的提出,电网的信息化逐渐成为一种共识。以 IEEE P2030 和 IEEE 1547 标准为代表的新一代电网设备互联标准日益受到重视<sup>[19]</sup>。这就要求巡线机器人必须具备基于这些新标准互连到智能电网信息网络的能力,快速高效地与其他设备通信,实现网络化巡线机器人。

## 5 结论与展望

从国内外研究现状来看,迄今为止国内外对架空输电线路巡线机器人的研究大都还处于实验室研制或改进阶段,尚无成熟的产品应用于实际输电线路的巡检作业。虽然存在诸多困难,但研制智能化水平高、自身重量轻、体积小、运行稳定可靠的巡线机器人仍是今后 HV/EHV/UHV 输电线路巡检技术的重点研究方向之一。前面简要概括巡线机器人的研究背景及其典型组成结构,在调查和分析国际国内在该领域最新研究成果的基础之上,结合智能电网的概念,探讨了在中国坚强智能电网总体建设规划中研制、开发巡线机器人应关注的一些关键技术。

## 参考文献

- [1] Jaka K, Franjo B, et al. A survey of mobile robots for distribution power line inspection [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, in press
- [2] 张运楚, 梁自泽, 谭民. 架空电力线路巡线机器人的研究综述 [J]. 机器人, 2004, 26(5): 467-473.
- [3] Jaensch G, Hoffmann H, Markees A. Locating defects in high voltage transmission lines [C]. Proceedings of the 1998 IEEE 8th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 1998, 179-186.
- [4] Whitworth C C, Duller A W G, Jones D I, et al. Aerial video inspection of overhead power lines [J]. Power Engineering Journal, 2001, 15(1): 25-32.
- [5] 吴功平, 肖晓辉, 肖华, 等. 架空高压输电线路巡线机器人样机研制 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(13): 90-93, 107.
- [6] Sawada J, Kusumoto K, Maikawa Y, et al. A mobile robot for inspection of power transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 309-315.
- [7] Robots repair and examine live lines in sever condition [J]. Electrical World, 1989, (5): 71-72.
- [8] Sato Kensetsu Kogyo Co., Ltd. Automatic Overhead Power Transmission Line Damage Detector Website. (<http://www.sato-k.co.jp/technology/sonshou-e.htm>).
- [9] Montambault S, Pouliot N. The HQ LineRover: Contributing to innovation in transmission line maintenance [C]. Proceedings of 2003 IEEE ESMO - IEEE 10th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-Line Maintenance, 2003, (1): 33-40.
- [10] Nakamura H, Shimada T, Kobayashi H. An inspection robot for feeder cables - snake like motion control [C]. Proceedings of the 1992 International Conference on Industrial Electronics, Control, Instrumentation, and Automation, 1992, (1): 849-852.
- [11] Peungsungwal S, Pungsiri B, Channongthai K, et al. Autonomous robot for a power transmission line inspection [C]. The 2001 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Sydney, 2001, (1): 121-124.
- [12] 伍洲, 方彦军. 高压巡线机器人电磁导航系统研究与设计 [J]. 高压电技术, 2008, 34(9): 1959-1963.

(下转第 60 页)



图 9 虚拟现实变电站展示与电网可视化调度系统

“军事集团”进行分类,确定人员与设备编制,并进行相应的专业训练;其对应的救援设备也效仿军队作战,利用集装箱进行“集成化”;针对不同的灾害因素,编制不同的应急预案和战术,使应急救援的目标更明确、效率更高。这种“集团化”、“集成化”的准军事应急管理将大大提高应急处置的效率,增强队伍的应急作战能力。

## 6 结 语

四川省电力公司充分总结抗冰保电、抗震救灾的应急抢险经验,结合四川电网实际情况,利用先进通信手段和特种装备,建设了“天地空一体化”立体应急通信网。目前应急培训基地与通信自动化中心已联合进行多次演练,全面展示出了“一体化”立体应急通信网络高效、可靠的通信能力,为电力系统应急体系开创了国内领先的管理和建设模式。在 2009 年 10 月举行的第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛中,四川省电力公司应急体系建设的汇报得到了电力行业专家广泛的认可。四川省电力公司也将积极参与电力行业应急管理的行业规范、标准的制

订,努力成为电力行业安全生产、应急管理的领跑者。

## 参考文献

- [1] 杨洪. 关于电力应急通信体系建设的几点建议 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 6—8.
- [2] 元翔. 贵州电力应急通信网建设思路探讨 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(2): 37—40.
- [3] 谷坊祝. 卫星通信技术在电力应急通信中的应用 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 29—32.
- [4] 崔燕明, 刘孝先, 吴维农, 等. 电力应急通信指挥系统的建设方案 [J]. 电力系统通信, 2009, 30(6): 33—36.
- [5] 四川新闻网. 二郎山电网“告急”, 四川电力实施立体应急战. <http://scnews.newsse.org/system/2009/01/23/011501514.shtml>
- [6] 薛禹胜. 从更广的视角看电力系统稳定性 [C]. 第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛. 2009, 10.
- [7] 卢强. 智能电力调度控制系统与电力系统安全运行 [C]. 第一届中国国际电力安全发展暨应急管理论坛. 2009, 10.
- [8] 刘俊勇, 陈金海, 沈晓东, 等. 电网在线可视化预警调度系统 [J]. 电力自动化设备, 2008, (1): 1—5.

(收稿日期: 2009—10—10)

(上接第 51 页)

- [13] 王鲁单, 王洪光, 等. 一种输电线路巡检机器人控制系统的设计与实现 [J]. 机器人, 2007, 29(1): 7—11.
- [14] 王鲁单, 王洪光, 等. 基于视觉伺服的输电线路巡检机器人抓线控制 [J]. 机器人, 2007, 29(5): 451—455.
- [15] 付双飞, 王洪光, 等. 超高压输电线路巡检机器人越障控制问题的研究 [J]. 机器人, 2005, 27(4): 341—346.
- [16] 周风余, 吴爱国. 架空输电线路自动巡线机器人 [J]. 农村电气化, 2008, (2): 59—60.
- [17] 周风余, 吴爱国, 李贻斌. 110kV 输电线路巡线机器人控制方法及实现 [J]. 山东大学学报, 2007, 37

(6): 31—35.

- [18] 周风余, 吴爱国, 李贻斌, 等. 高压架空输电线路自动巡线机器人的研制 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 89—91.
- [19] Richard D. Cherry T. Standards for the Smart Grid [C]. IEEE Conference on Global Sustainable Energy Infrastructure 2008, 1—7.

## 作者简介:

佘松宜 (1973—), 男, 湖北松滋人, 博士, 副教授, 主要从事精密运动控制、智能机器人等方面的教学和科研工作。

翁桃 (1987—), 男, 四川简阳人, 硕士研究生, 研究方向为检测技术与自动化装置。

(收稿日期: 2009—11—04)