

基于物联网技术的柔性管道巡检机器人^{*}

王佳玮¹ 黄莉洁² 蒋宇晨¹ 徐 弢¹

(1. 上海西派埃自动化仪表工程有限责任公司 上海 201612; 2. 上海市计量测试技术研究院 上海 201203)

摘要:介绍了一种基于“物联网传感器”技术,具有强大信息传输功能的智能管道巡检机器人。该型智能管道巡检机器人主要运用于建筑领域,为施工过程中的“管道铺设”、“基坑监测”及“重点管线巡查”提供硬件支持。该型机器人集“智能数据采集”、“智能数据分析”、“智能管内巡检”等功能于一身,能够满足全天候值守巡检的要求。同时,应用“总线设计”及“模块化设计”的思路,使该型检测设备能够与各种类型的专用传感系统进行结合,方便检测人员根据现场的实际需求,随时组装出具有相应功能的管道巡检机器人。

关键词:柔性检测;传感系统;机器人;物联网;智能化

中图分类号: TH7 TN915.03 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 590.6530

Flexible pipeline inspection robot based on the Internet of Things

Wang Jiawei¹ Huang Lijie² Jiang Yuchen¹ Xu Tao¹

(1. Shanghai SIPAI Automation Instrumentation Engineering Co., LTD., Shanghai 201612, China;

2. Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract: This paper introduces a kind of intelligent pipeline inspection robot with strong data capabilities, which based on the Internet of Things. The intelligent pipeline inspection robot provides hardware support for “pipeline laying”, “foundation monitoring” and “key pipeline inspection” in construction engineering. Meanwhile, using design ideas of “modularity machine” and “date bus”, the detection device can combine with other sensor system. At any time, you can use varieties of exclusive sensor system to assemble the pipeline inspection robot in order to meet the needs of the project.

Keywords: flexible detection; sensor system; robot; the Internet of Things; intelligent

1 引言

目前,建筑施工行业对于检测技术的要求越来越高,无论是业主、监理,还是施工方都希望能够对建筑施工过程的相关数据进行准确的监控,而其中管道检测就是其中一个重要的方面。在建筑管道中进行检测,主要是为了满足“管道铺设”、“基坑监测”、“重点管线巡查”等其他检测需求。其检测数据及分析结果,直接影响建筑施工的安全性和建筑质量。

同时,业主和物业还希望将该系统的应用保留到建筑施工完成后,可以对建筑使用过程中的各种细微变化进行实时监控,便于随时发现建筑可能存在的安全风险,可以及时地采取相关措施。

因此,当前的建筑施工现场亟需一种能够符合现场多样化环境、多样化需求,并且能够支持大数据流交互的“物联网传感系统”终端。而智能管道巡检机器人,就是一种专门针对管内作业场景的“物联网传感系统”终端硬件。它的开发基于“总线设计”及“模块化设计”理念,在使用过程中通过具有标准化接口设计部件的更换,即可对于各种各样的管道大小、管壁材料进行适应。同时,通过选择不同传感系统模块进行搭载、组合,就可以简单地形成符合现场工作环境需要的传感系统。

这是一种符合当前“智能制造”理念的“柔性检测”系统。节约了大量的人力、物力成本,改变了过去为特定检测功能、检测环境建造专用检测仪器装置的思路。同时,采用“物联网”设计理念,通过现场通信网络、远程通信网

收稿日期:2016-10

^{*} 项目基金:2015年度上海张江国家自主创新示范区人才培养产学研联合实验室专项发展资金(201505-SJ-CHJ-D108-006)及上海市松江区2015年度信息化和工业化融合专项资金项目资助

络的双层架构,实现数据流的集中传输,借用专用网络云端,实现所有现场检测终端随时随地的访问数据。

2 智能控制系统的应用

管道巡检机器人,是一种具有很强自主性的管道巡检装备。其主要功能之一,就是组合搭载专用传感系统,在管道内完成巡回检测作业,即能够周期性地完成对于管道系统内部各个位置的检测作业。这一功能,极大提升了现场检测数据的实时性,为实时数据分析提供了支持。

该“管道巡检机器人”的设计,需要满足其在现场全天候值守巡回的需要。实际正常使用过程中,其巡回检测运动为全自动控制,不需要进行人为干涉。但全天候运行设备,一旦发生故障必须要有准确的自动判断,并及时向上传达“故障信号”以便及时地进行人为干预。此功能极大地提升了该装置的可靠性,由此也降低了整个全自动“物联网传感系统”的运行风险。

2.1 路径设定及管内定位方式

本文所提到的“柔性管道巡检机器人”,其管内巡回是完全自主、自动的,对其管内巡回路径及停泊方案的设定可以通过“参数设置”和“示教写入”两种方式完成。两种设定方式的结合,能够帮助现场操作人员轻松进行机器人路径设定,尽可能地减少了使用障碍。

而准确的自主巡回,完全依靠机器人在管道系统中对自身进行准确的位置判定。由于管道系统往往复杂性比较高,同时又有大量管线系统布设在地下空间、墙体内部等其他屏蔽区域内,不利于无线信号的传输。因此,无法采用单一的无线定位手段使机器人完成管内定位。而在本装置中,设计采用了“运动计程”以及“定位点定位”相结合的方式,解决了机器人在管道内的定位问题。该方法与当前石油管线中,通过“管道焊点位置”及“里程仪”数据共同定位机器人位置的方法^[1]类似。但本管内定位方式,结合了小型、复杂管道系统的实际工况。

其方案就是在方便安装“定位点”结构的管道段安装一种“定位套环”的结构,并在机器人上安装有相关的感受器,当机器人到达定位点时,会触发形成传感信号。此时,机器人能够对于自身的位置有一个准确的判定。而这种传感方式根据管道材质的不同有所变化。如不透明的塑料管道,利用机器人上安装的金属传感器,对金属材料制成的定位环进行探测;而金属管道内,则利用机器人上搭载的霍尔传感器,对带有永磁体的定位环进行探测。目前,管道机器人定位所采用的“无线电磁自适应定位技术”^[2-3]、“超长波与对称分布天线阵定位技术”^[4-5]、“基于RSSI和辅助节点定位技术”^[6]、“无线射频识别定位技术”^[7]的应用亦为同理。

这种方式定位精度高,但因绝大多数管道系统无法安装一定数量的“定位点”结构,导致“定位点”会相距比较

远,由其产生的定位分辨率根本无法满足机器人管内自动巡回的需要。

而所谓“运动计程”的定位方式,就是通过借用机器人外部导向轮结构,利用计量导向轮与管壁之间的相对转动圈数(角度),经过换算得到机器人相对于管道的行进路程。此判断机器人相对于管道入口的相对位置,从而反映出机器人的位置。如图1所示即为一种“运动计程”结构,在定位轮上安装磁体,在支撑臂上安装霍尔传感器,当定位轮转动时,磁场经过霍尔传感器的次数,即可换算为定位轮对管壁的旋转角度。

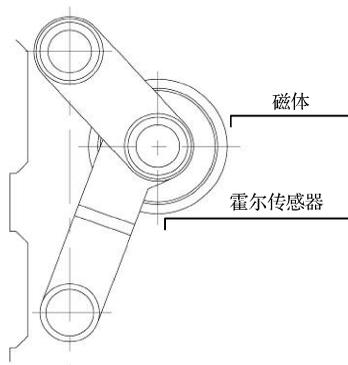


图1 “运动计程”装置结构

这种定位方式,定位分辨率高,管道类型适应性强。但该方式,会因随机性或故障性的“轮壁打滑”、管道弯曲损毁产生“管道形变”等不可控因素,产生累计误差,甚至发生失控。因此也不能单独作为机器人的管内定位方式。

通过结合这两种定位方法,即在定位点与定位点之间,采用“运动计程”的定位方案,提升机器人的定位分辨率;同时,在经过定位点时,以定位点的定位信息为准,帮助机器人消除在“运动计程定位”中所产生的累计误差,并排除了该定位方式失效后,可能产生的失控可能。

2.2 智能故障判断

本装置中采用了“实际结果”及“运行指令”结合判断的方式,即通过对“运行指令”的“理论结果”进行预判,并通过自身的传感系统对于“实际结果”进行采集。当其“实际结果”与“运行指令”对应的理论结果不一致时,即可判断为自动化装置运行故障。指令系统与结果反馈系统在设计上往往完全独立,因此这种故障判断模式出错可能性小、可靠性高。同时,该自动故障判断模式设计简单。当“运行指令”与“实际结果”对应关系比较简单的情况下,采用该方式自动判定“故障”比较适宜。

对管道巡检机器人而言,其主要运行指令无外乎“前进”、“后退”两种,而所对应的运行结果即为“管道内位置改变”。由于管道内运动路径具有唯一性,导致其对应关系比较简单。因而可以采用上述方式,完成自动化的“故障判定”。

如图2所示,在设计中,判定系统自动采集“运动指令”,并查找对应表中预设的“理论结果”待比较。并借用上一节所提到的装置管内定位系统,实现对其“实际结果”的判定。当“实际结果”与“理论结果”不一致时,即判定为“装备运行故障”。

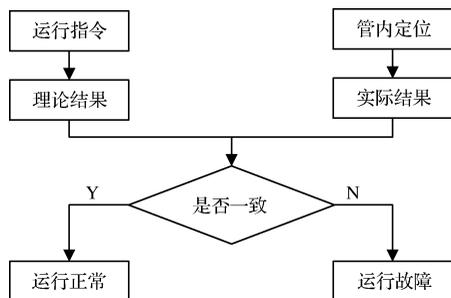


图2 自动故障判断系统流程

3 “柔性检测”系统

当前随着“智能制造”理念的不断深入,各个行业对于自动化生产的需求也日益迫切,直接导致了对于检测技术要求的不断提高。而检测环境多变、功能需求多样,使得专用检测装备层出不穷,数量不断增加。

专用检测装备,生产设计周期长,多工况适应能力差;使用大量的专用零件,维护存在困难;由于生产数量少,无法形成批量化生产,导致大量质量问题、设计缺陷的存在。这些问题制约了检测行业的发展。然而,基于“模块化设计”思路,形成一种“柔性检测”系统就可以将大量的专用检测装置,浓缩为种类不多的通用装置。

本文所描述的“柔性管道巡检机器人”就是“柔性检测装备”的一个设计实例。无论在装备的“机械硬件”、“电路硬件”,又或是“软件系统”,都贯穿的“模块化”设计的思路。保证该检测装备能够通过简单的改装、组合,在短时间内完成一套符合要求的“专用”检测系统。

3.1 模块化硬件

“柔性管道巡检机器人”是一个组合式的装置,也可以说是一种“开放”的检测实验平台^[8],由一套具有不同尺寸和性能特征的模块组成,通过这些模块能快速装配出最适用于完成给定任务的“管道巡检机器人”,结构如图3所示。

其核心设计思想是:借鉴人工智能领域中的多 Agent 系统理论,把机器人系统中每个模块看作独立的 Agent,并能与相邻模块或外界任务与环境交换信息^[9]。本设计中,具体模块介绍如下:

动力输出模块、驱动轮模块以及机器人外围可拆卸的定位轮结构,都是有多种规格可以进行任意组合的。通过多种规格的切换,可以在硬件上实现对于不同负载程度、管道尺寸、管道材料进行适应。

供电通信模块,主要是为机器人提供电力和通信方式的模块。目前,为该机器人装置提供两种供电通信模块。

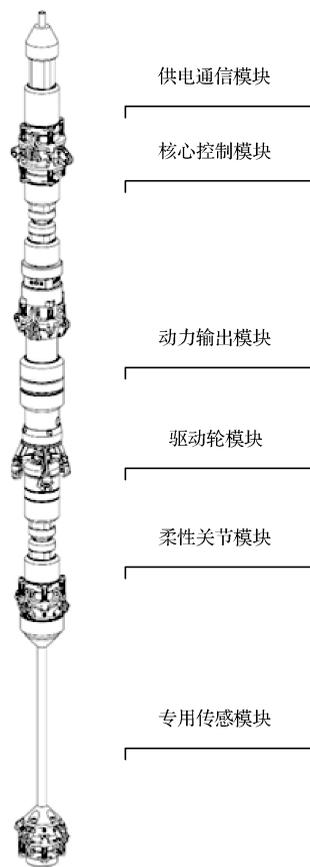


图3 管道巡检机器人基本组合模块

即“电池供电/无线通信”、“电缆供电/有线通信”。也可以进行多电池供电、充电模式。即当单片机检测到两个电池模块中,某一个在进行供电,而另外一个电池电量不足的情况下,将设置控制充电系统为电池电量不足的电池模块进行充电^[10]。

专用传感器模块,是专门结合管内固定要求特制的传感系统。目前可以提供包括“倾角检测”、“影像检测”、“温湿度检测”在内的多种检测功能,其他检测功能仍在根据实际需求进一步拓展中。

而实现模块化的方式,就是在各个模块两端都设计标准接插口及标准螺纹,使得机器人各模块间实现可靠对接,实现起来非常便捷,同时具有极强的可操作性。

3.2 柔性软件架构

在各功能区实现硬件系统的模块化设计后,还需要一套“柔性软件架构”,当硬件系统完成组合之后,软件系统也能够数据通信、控制通信上,随之完成自动“对接”。由此,各模块统一受控、统一进行数据通信,整机“融为一体”。

如图4所示,在“柔性管道巡检机器人”上,软件系统以一条“通信总线”为主,形成了一套柔性软件架构。无论是数据通信信号,还是控制信号,都搭载在同一条总线上。通过问答式的系统结构,实现核心控制模块对其他各组合模块的控制。

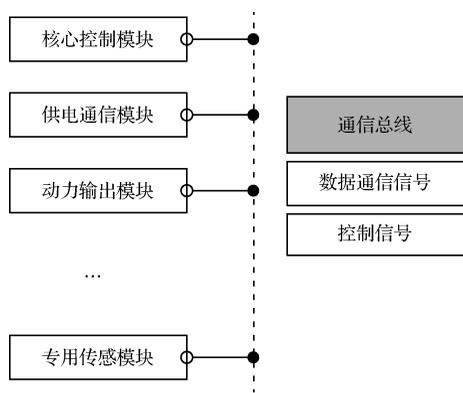


图4 柔性软件架构示意

这样的柔性软件架构,1)对于硬件电路接口的要求比较低,只要提供总线接口即可在硬件上介入总线系统;2)扩展性很强,只要整个系统中使用统一的通信协议,对于模块的数量和功能并没有限制。

目前,采用的总线形式为:458 总线协议。未来,随着模块种类的更加多样,系统指令的更加复杂,可以通过升级目前的总线及总线协议以提升总线效率。

4 “物联网”传感系统

“物联网”传感系统,是一种特别适用于数据量大、种类多、实时性要求高的工控现场网络。物联网体系结构通常包括传感网络、传输网络和应用网络^[11]。而电脑、手机、平板电脑等终端常见的终端设备,都可以作为接入设备融入该应用网络^[12]。

本文的“柔性管道巡检机器人”,就具有组成传感网络的功能。在硬件设备上,主要有3个部分组成:机器人及其地面基站、传输网络节点(数据中继器)、网关节点。

在现场使用的过程中,由于机器人安装位置的随机性大,大量的工程现场不适宜大规模布线。因此机器人及其地面基站与传输网络节点(数据中继器)之间,采用“工业无线通信”网络进行。在相距的距离相对较近时,无线数据传输方式为机器人的现场布设提供了便利。

5 设备实验室测试

设备系统完成后,就其管内爬行运动及传感系统制定了《系统测试大纲》,对其进行了实验室测试,以检视其运动情况及传感器数据采集结果是否符合设计要求。

运动情况测试,主要包括:带载水平测试、整备运动情况测试、地面随动系统测试。测试实验预期证明:1)管道机器人能够携带5 kg 额定载荷运行正常运动;2)管道机器人运动过程中机械运动无异常;3)地面随动系统供电通信及保护缆随动运动无异常。通过这3方面测试,确认机器人管内爬行运动无异常。

测试条件:1)管道机器人独立且可以正常进行垂直管内爬行运动;2)机器人驱动模块电机供电正常(对于驱动模

块进行DC 24 V 供电),经实验测试,获得测试结果如下:

1)带载水平测试

机器人带载5 kg 标准砝码,进行一次完整的加减速过程无异常。

2)整备运动情况测试

在正常控制下,令机器人本身进行往复升降运动,运行10个运动周期以上,进行观察测试:

- ①运动过程中,无明显卡顿、无杂音;
- ②运动过程中,机械结构未见明显扭曲;
- ③加减速过程中,无噪音、啸叫现象;
- ④上升过程中提升主梁无明显弯曲变形;
- ⑤运动启停阶段,无明显滑行、滞后现象。

3)地面随动系统测试

在正常控制下,令机器人本身进行往复升降运动,运行10个运动周期以上,进行观察测试:

- ①运动过程中,无明显卡顿、无杂音;
- ②加减速过程中,无噪音、啸叫现象;
- ③运动启停阶段,无明显滑行、滞后现象;
- ④控制过程,无逻辑异常。

(本试验为检视实验,结果由试验员观测获得)

由此可以证明,管道巡检机器人的管道内运动过程,并未发现异常。

随后,对于管道巡检机器人的传感系统,进行数据采集测试。本测试实验,采用“高精度倾角传感器模块”进行系统搭载测试。“高精度倾角传感器”,可以对于管道双轴方向对于“铅锤线”的倾角进行检测,结合机器人位置数据由此可以对管道形状变化进行监测。

设计实验:机器人搭载“高精度倾角传感器”,对2 500 mm长直管道进行检测。检测间隔为94.2 mm,检测过程往复一次。观察检测数据重复性,以确定该传感系统数据的可靠性,并对数据误差的产生原因进行分析。测试数据如表1所示。

表1 高精度倾角传感器测试数据

位置/mm	下降过程		上升过程	
	X	Y	X	Y
000.0	-1.142	-0.069	-1.085	-0.063
094.2	-1.253	-0.055	-1.230	-0.078
188.4	-1.315	-0.073	-1.313	-0.068
282.6	-1.371	-0.091	-1.343	-0.057
376.8	-1.460	-0.081	-1.395	-0.089
471.0	-1.560	-0.129	-1.426	-0.122
565.2	-1.554	-0.127	-1.540	-0.096
659.4	-1.661	-0.154	-1.642	-0.132
753.6	-1.750	-0.162	-1.711	-0.153
847.8	-1.747	-0.210	-1.716	-0.218
942.0	-1.796	-0.230	-1.780	-0.193
1 036.2	-1.870	-0.246	-1.878	-0.192
1 130.4	-1.989	-0.287	-1.959	-0.258
1 224.6	-2.044	-0.348	-2.036	-0.342
1 318.8	-2.149	-0.355	-	-

根据表1数据进行管道形状描绘:设机器人数据采集间隔为 L ,检测获得倾角值为 θ ,可得管道形状描绘坐标为:

$$(\Delta x, \Delta y) = (L \cdot \sin\theta, L \cdot \cos\theta)$$

由此可得,管道X截面形状描绘坐标如表2所示。

表2 X截面管道形状描绘坐标表

位置/mm	X下降过程		X上升过程	
	Δx	Δy	Δx	Δy
000.0	-1.877	94.181	-1.784	94.183
094.2	-2.060	94.177	-2.022	94.178
188.4	-2.162	94.175	-2.159	94.175
282.6	-2.254	94.173	-2.208	94.174
376.8	-2.400	94.169	-2.293	94.172
471.0	-2.564	94.165	-2.344	94.171
565.2	-2.555	94.165	-2.532	94.166
659.4	-2.730	94.160	-2.699	94.161
753.6	-2.877	94.156	-2.813	94.158
847.8	-2.872	94.156	-2.821	94.158
942.0	-2.952	94.154	-2.926	94.155
1 036.2	-3.074	94.150	-3.087	94.149
1 130.4	-3.269	94.143	-3.220	94.145
1 224.6	-3.360	94.140	-3.347	94.141
1 318.8	-3.532	94.134	-	-

管道Y截面形状描绘坐标如表3所示。

表3 Y截面管道形状描绘坐标表

位置/mm	Y下降过程		Y上升过程	
	Δx	Δy	Δx	Δy
000.0	-0.113	94.200	-0.104	94.200
094.2	-0.090	94.200	-0.128	94.200
188.4	-0.120	94.200	-0.112	94.200
282.6	-0.150	94.200	-0.094	94.200
376.8	-0.133	94.200	-0.146	94.200
471.0	-0.212	94.200	-0.201	94.200
565.2	-0.209	94.200	-0.158	94.200
659.4	-0.253	94.200	-0.217	94.200
753.6	-0.266	94.200	-0.252	94.200
847.8	-0.345	94.199	-0.358	94.199
942.0	-0.378	94.199	-0.317	94.199
1 036.2	-0.404	94.199	-0.316	94.199
1 130.4	-0.472	94.199	-0.424	94.199
1 224.6	-0.572	94.198	-0.562	94.198
1 318.8	-0.584	94.198	-0.584	94.198

并由以上表2、表3数据,可绘出如下管道X截面、Y截面形状描绘如图6所示。

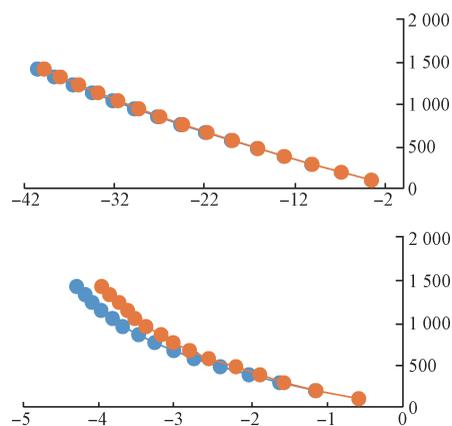


图6 管道X截面、Y截面形状描绘

根据该组检测数据及数据分析结果可以发现,管道形状变化在一次往复检测后具有相当的重复性。因此,可以判定该系统所提供的检测数据具有相当的可靠性。

当然在数据研究中可以发现,管道形状的拟合在沿竖直方向上具有一定的错位。通过分析可知,该检测数据误差源头为机器人位置的定位误差。由于在本实验中,采用的装置定位数据采用机器人本体的“运动计程”装置,定位精度为 ± 47.1 mm,在短管道中,容易产生误差。在进行长管道的检测过程中,该误差可以忽略。在之后的使用中,可以考虑搭载专用的“运动计程”模块进行装置的管道内位置检测,提高管内定位精度。

6 结论

随着“中国制造2025”发展要求的进一步深入,“检测装备”作为基础数据来源,其地位一定会日益凸显。而智能化的柔性物联网传感系统,由于其适应性强、架构便捷、自动化程度高等优势,逐步替代现有的传感系统设备。

下一步工作,将开发更多种类的“柔性管道巡检机器人”专用传感系统,以扩展管道巡检机器人的应用领域,增加它的功能。同时,将开发适用于其他环境下的“柔性检测机器人”,拓展该类型“柔性”检测机器人的应用环境。

参考文献

- [1] 王忠巍,曹其新,栾楠,等. 基于多传感器数据融合的管道机器人精确定位技术[J]. 机器人, 2008, 30(3): 238-241.
- [2] 魏明生,童敏明,訾斌,等. 管道机器人无线电磁自适应定位技术[J]. 光学精密工程, 2012(4): 772-781.

- [3] QI H M, YE J R, ZHANG X H, et al., Wireless tracing and locating system for in-pipe robot [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2010, 159 (1): 117-125.
- [4] 齐海铭, 张晓华, 陈宏钧, 等. 基于超长波与对称分布天线阵的管道机器人定位技术[J]. 机器人, 2009, 31(2): 104-109.
- [5] 魏明生, 童敏明, 訾斌, 等. 基于粒子群-拟牛顿混合算法的管道机器人定位[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2595-2600.
- [6] 李奇越, 李伟, 孙伟, 等. 基于 RSSI 和辅助节点协作的 Wi-Fi 室内定位方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(5): 94-801.
- [7] 高玉苹, 渠慎丰, 郑静. 无线射频识别在机器人导航中的应用 [J]. 电子测量技术, 2006, 29 (3): 114-115.
- [8] 徐建安, 王玉甲, 张铭钧. 自主式水下机器人试验平台研制与实验研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2007, 28(2): 212-217.
- [9] 费燕琼, 董庆雷, 赵锡芳. 自重构模块化机器人的结构[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(6): 877-883.
- [10] 段颖妮. 管道检测机器人乒乓供电管理系统设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(7): 66-69.
- [11] 徐尉, 孙力娟, 王汝传, 等. 基于物联网/传感网的智能节能系统[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(增刊 2): 366-371.
- [12] LEI L, WANG H J. Bluetooth based wireless network sensor in Robot wireless network, Advanced Design and Manufacture (ADM2006).

作者简介

王佳玮, 1992 出生, 助理工程师, 工学学士, 控制工程硕士研究生在读。主要研究方向为自动化检测系统、自动化装置、控制工程、机械设计。

E-mail: wangjiawei19920711@qq.com

(上接第 46 页)

作者简介

张超, 1977 年生, 研究生, 高级工程师, 信号与信息处理专业, 主要研究方向为微波毫米波测试技术。

许建华, 1966 年生, 研究员, 电子测量技术专业, 主要研究方向为微波测试仪器设计与开发。

张志, 1978 年生, 高级工程师, 电子工程专业技术, 主要研究方向为微波测试仪器设计与开发。