

Chip Fab Monitoring System Based on Wireless Sensor Networks*

TIAN Yong^{1,2}, TANG Zhenan¹, YU Yan^{1*}

(1. Dalian University of Technology, School of Electronic Science and Technology, Dalian Liaoning 116024, China;
2. Dalian Neusoft University of Information, Department of Electronic Engineering, Dalian Liaoning 116024, China)

Abstract: For the stringent requirements of chip manufacturers about the environment temperature, humidity, pressure, and cleanliness, chip manufacturing clean room environment monitoring system based on wireless sensor networks is designed. The system consists of existing hardware and software components of the proposed routing algorithm. The system is tested in the actual chip manufacturing clean room. The results show that the system can not only monitor the changes of environment parameters in chip manufacturing, but also ensure the effectiveness and balance of energy consumption for sensor nodes.

Key words: wireless sensor networks, monitoring system, routing algorithm, chip manufacturing environment
EEACC: 6150P; 6210 **doi:** 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.10.019

基于无线传感器网络的芯片生产环境监测系统*

田 勇^{1,2}, 唐祯安¹, 喻 言^{1*}

(1. 大连理工大学电子科学与技术学院, 辽宁 大连 116024; 2. 大连东软信息学院电子工程系, 辽宁 大连 116024)

摘 要: 针对芯片生产企业对环境温度、湿度、气压、洁净度等指标的严格要求, 设计了基于无线传感器网络的芯片生产超净间环境监测系统。系统由已有的硬件部分和提出路由算法的软件部分构成, 通过在实际的芯片生产超净间进行测试, 验证了该系统不仅能够实时监测芯片生产企业环境参数的变化, 而且能够保证传感器节点能量消耗的有效性和均衡性。

关键词: 无线传感器网络, 监测系统, 路由算法, 芯片生产环境

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)10-1414-06

生产监控系统^[1]中的一项重要内容就是生产环境的监控^[2]。在各类矿井、化工厂、天然气站、危险品仓库等场所, 实时监测环境中的有毒、有害、可燃和易爆气体等的含量^[3-5], 实时监测环境的温度、湿度、气压等指标^[6-7], 监测地下巷道支撑物及建筑结构的受力变形等情况^[8], 对于确保安全生产是非常重要的。在芯片生产^[9]、制药^[10]等企业, 实时监测生产环境的温度、湿度、气压、洁净度等指标, 并确保这些指标在规定的范围内, 是保证产品质量的必要条件。

本文针对芯片生产企业对环境温度、湿度、气压、洁净度等指标的严格要求, 结合提出的室内无线传感器网络路由算法, 设计了芯片生产企业超净间环境监测系统, 并在芯片生产超净间进行了实验测试, 测试结果表明该系统实现了稳定可靠的室内无

线数据传输, 验证了提出的室内无线传感器网络路由算法的能量有效性和均衡性, 为生产企业监控环境变化提供了一种有效的解决方案。

1 实验环境

集成电路芯片生产设备必须在超净环境下存放和运行, 对环境的温度、相对湿度、压差、照度等指标都有严格的要求。按照国家洁净厂房设计规范^[11], 以及洁净室施工和验收规范^[12]的要求, 洁净室的温度、湿度范围应符合表1的规定^[11]; 洁净室与非洁净室之间的静压差应大于10 Pa, 相邻不同洁净度级别洁净室之间的静压差应大于5 Pa, 洁净室与室外静压差应大于12 Pa^[12]; 无采光窗洁净区工作面上的照度值, 不应低于表2规定的数值^[11]。其中一般照明是指单独使用的一般照明; 混合照明的最低照度是指实

项目来源: 国家自然科学基金项目(61131004, 51108060); 辽宁省教育厅科学研究项目(L2013518)

收稿日期: 2013-06-12 修改日期: 2013-10-09

际工作面上的最低照度;表中I~IV一般照明的最低照度值是指距墙面 1 m(小面积房间为 0.5 m),距地面为 0.75 m 假定工作面上的最低照度;通道、休息室一般照明的最低照度值是指地面处的最低照度值;若暗房工作室为红或黄灯照明时,一般照明的最低照度值是指距地面 0.75 m 假定工作面上的最低照度值。

表 1 洁净室的温、湿度范围^[11]

房间性质	温度/℃		湿度/%	
	冬季	夏季	冬季	夏季
工艺有温湿度要求	按生产工艺要求确定			
工艺无温湿度要求	20~22	24~26	30~50	50~70
人员净化及生活用室	16~20	26~30		

表 2 无采光窗洁净区工作面上的最低照度值^[11]

识别对象的最小尺寸 <i>d</i> (mm)及场所	视觉工作 分类等级	亮度 对比	照度/lx		
			混合 照明	一般 照明	
$d \leq 0.15$	I	甲	小	2 500	500
		乙	大	1 500	300
$0.15 \leq d \leq 0.3$	II	甲	小	1 000	300
		乙	大	750	200
$0.3 \leq d \leq 0.6$	III	甲	小	750	200
		乙	大	750	200
$d > 0.6$	IV			750	200
通道、休息室					100
暗房工作室					30

实验在如图 1 所示的芯片生产超净间进行。该超净间拥有百级净化间 1500m²,要求温度为(23±1)℃,相对湿度为 45%±10%,室内气压为正压 20 Pa。为了保证超净间的环境达到要求,需要设计并安装包括气、水、风、电、蒸汽等子系统的自动化动力系统,其最重要的任务就是对环境的监测和对子系统的全面控制。该系统分为两级,第 1 级是通过网络建立室内环境监测和管理系统,第 2 级是通过工业控制总线建立设备控制系统。



图 1 超净间照片

2 系统架构

在超净间内进行实验的无线传感器网络环境监测系统是自动化动力系统的一个子系统,该自动化动力系统的体系结构如图 2 所示。

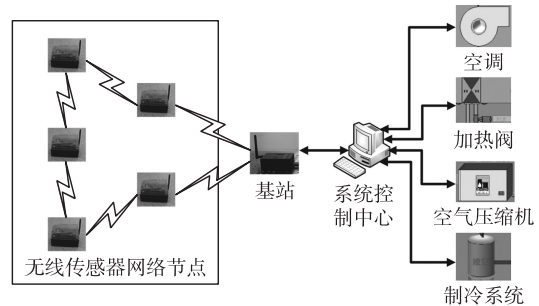


图 2 自动化动力系统体系结构图

该自动化动力系统包括无线传感器网络环境监测系统和设备控制系统两部分,具体构成和相应功能描述如下:

(1)无线传感器网络环境监测系统主要由无线传感器节点、基站和系统控制中心组成,主要负责超净间实验室的温度、相对湿度、压差和照度的实时监测,并将测试数据通过无线传感器网络传送给系统控制中心。其中无线传感器节点负责实时测试环境的各项参数,并通过建立的无线传感器网络将测试数据传输给基站;基站负责网络的启动,之后负责监控无线传感器节点的状态、发出用于建立网络的控制指令、接收网络节点传输的数据,然后将接收的数据传送给系统控制中心;系统控制中心负责接收所有测试数据,对其进行统计、处理和显示,并将数据反馈给设备控制系统部分。

(2)设备控制系统主要由系统控制中心、百级净化自控系统、风机过滤器单元 FFU (Fan Filter Unit) 群控系统、冷源自控系统、热源自控系统等构成,主要负责超净实验室的温、湿度控制,压力控制,洁净度控制等。

3 系统路由实现

本文采用的 Crossbow 公司^[13]的无线传感器网络套件中移植了 TinyOS,并且提供了使用 NesC 程序编写的多个例程,其中包括各种型号传感板的传感器的驱动以及路由程序,在此基础上进行本文路由算法和文献[14]路由算法的实现,并将编写好的程序下载到基站和无线传感器节点中,组建无线传感器网络,对超净间进行环境监测。本文算法与文献[14]采用了相同的多属性决策模型,但是算法完全不同。文献[14]为每个传感器节点寻找到基站

的传输路径,而本文路由算法则采用分簇的形式建立传输路径,并且在建立分簇结构过程中采用了不同的属性和不同的主观权重系数。

本文路由算法的程序分为基站部分和无线传感器节点部分。基站主要负责启动整个网络,并按照路由算法的设计,作为最终的数据汇集节点参与网络的建立,网络启动和建立完成后,基站负责接收所有节点的数据,并传输给系统控制中心。基站的程序流程如图3所示。其中INIT_MSG信息包括由基站发射信号功率值转换的RSSI(Receiver Signal Strength Indicator)值(表示为 $RSSI_{BS-S}$),主观权重系数,主客观权重系数比率,分配给每个节点的TDMA(Time Division Multiple Address)传输时隙。

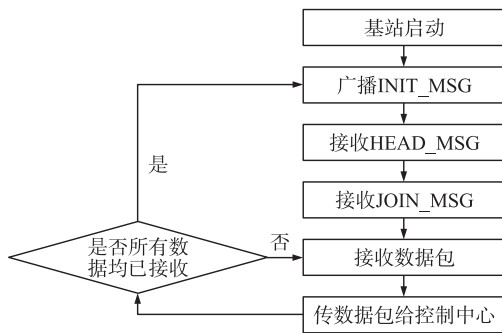


图3 基站程序流程图

无线传感器节点主要负责监测环境的各项参数,并根据路由算法的设计建立数据传输路径,在路由结构建立完成后,将监测的数据发送给各自的转发节点。无线传感器节点的程序流程如图4所示,详细解释如下:

(1)当传感器节点接收到INIT_MSG信息后,通过式(1)计算它是否能直接和基站进行通信。

$$RSSI_{BS-S} - RSSI_{i-BS} < RSSI_{N-S} - RSSI_{BS-M} \quad (1)$$

其中 $RSSI_{N-S}$ 表示节点的固定传输功率对应的RSSI值, $RSSI_{BS-M}$ 是基站能够识别的最小RSSI值, $RSSI_{i-BS}$ 表示节点*i*接收基站信号的强度值。

(2)节点广播的信息包括节点ID、节点剩余能量、RSSI_{i-BS}和能否与基站通信的标志Flag_{i-BS}。

(3)节点接收其他节点的广播信息,将其定义为邻居节点,并建立如式(2)的邻居节点集合。

$$S_{i-N} = \{s_j, ID, s_j, E, s_j, Flag_{j-BS}, RSSI_{j-BS}, RSSI_{i-j}\} \quad (i=1 \dots n, j=1 \dots s_i, m) \quad (2)$$

其中 s_j, E 是节点 s_j 的剩余能量,RSSI_{i-j}是节点 s_i 接收的节点 s_j 的RSSI值, s_i, m 表示节点 s_i 的邻居节点的总个数。

(4)确定簇头节点时采用 s_j, E 和RSSI_{j-BS}作为参与多属性决策的评估属性,对应的主观权重系数

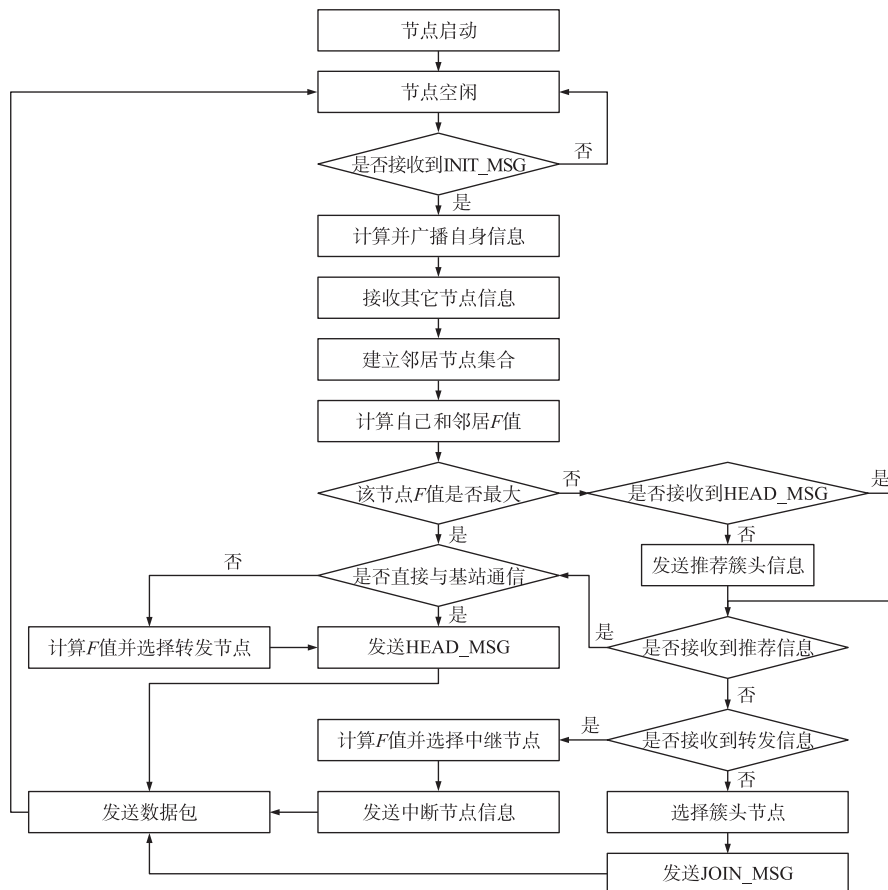


图4 无线传感器节点程序流程图

分别为 0.8 和 0.2。多属性决策 F 的公式^[14]如下:

$$\begin{aligned} \max F &= \sum_{j=1 \dots m}^l (\lambda \cdot w_k + (1 - \lambda) \cdot w'_k) \cdot u_{jk} \\ s. t. &\begin{cases} \sum_{k=1}^l w_k = 1, \sum_{k=1}^l w'_k = 1 \\ 0 \leq w_k \leq 1, 0 \leq w'_k \leq 1 \\ 0 \leq \lambda \leq 1, u_{jk} \geq 0 \\ l \geq 1, l \in N \end{cases} \end{aligned} \quad (3)$$

其中 u_{jk} 表示节点的第 j 个邻居节点的第 k 个归一化属性, l 表示评估属性的个数, w_k 和 w'_k 分别表示主观和客观权重系数, 主观权重系数就是算法设计者主观给出的属性被重视程度的权重系数, 客观权重系数就是受属性值影响的权重系数, λ 表示主客观权重系数的比率, N 表示自然数。

(5) 确定转发节点时仍采用 s_j , E 和 $RSSI_{j-BS}$ 作为多属性决策的评估属性, 但对应的主观权重系数分别为 0.4 和 0.6。选择具有最大 F 值的邻居节点作为簇头节点的转发节点。

(6) 广播的 HEAD_MSG 信息包括自己的 ID、它的转发节点的 ID 和自己的多属性决策结果 F 。

(7) 每个非簇头节点判断接收的簇头节点的多属性决策结果的大小, 选择加入具有最大 F 值的簇头, 并发送一条带有其 ID 的 JOIN_MSG 信息。另外, 能够与基站直接通信的非簇头节点不属于任何簇, 而是直接与基站进行通信。

(8) 确定中继节点时, 选择邻居节点中能够直接与基站通信的节点, 以及邻居节点中除了把数据转发给它的簇头节点外的其他簇头节点。如果没有符合上述要求的候选节点, 则候选节点将包括除了把数据转发给它的簇头节点外的所有邻居节点。用确定转发节点时的参数计算 F 值, 选择 F 值最大的节点作为其中继节点。

4 系统测试

在超净间 1 500 m² 的百级净化区域内, 部署了 4 行 10 列, 共 40 个无线传感器节点, 采用 ZigBee 方式进行通信, 测试中选取的信号中心频率为 2.4 GHz, 最大数据传输速率为 250 kbit/s, 选取的发射节点的输出功率为 3.2 dBm。每个节点都具有唯一的 ID 号, 负责测量其周围的温度、湿度、气压、亮度信息, 并连同自身的电压值, 通过建立的路由传输给基站。系统节点的部署情况如图 5 所示。基站部署在超净实验室的入口处, 并通过 USB 连接线与笔记本电脑相连。基站的 ID 号为 0, 负责接收所有传感器节点的数据, 并将数据传输给笔记本电脑。笔记

本电脑安装了 Crossbow 公司无线传感器网络套件中包含的 MoteWorks 和 MoteView 软件, 作为系统控制中心。该控制中心利用 MoteWorks 软件进行无线传感器节点和基站程序的编写、编译、调试和下载, 利用 MoteView 软件接收从基站传输来的数据, 并对数据进行多种形式的统计和显示。图 6 是基站和系统控制中心的照片。

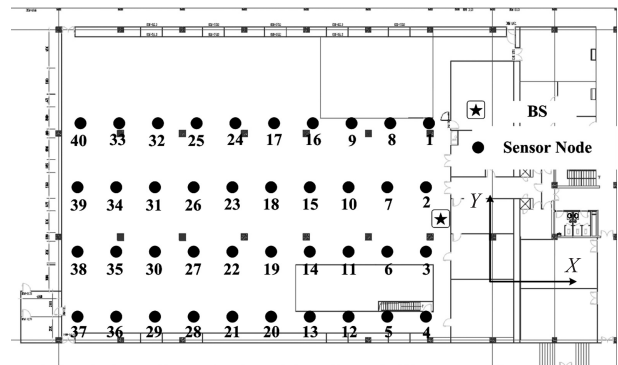


图 5 传感器节点的分布

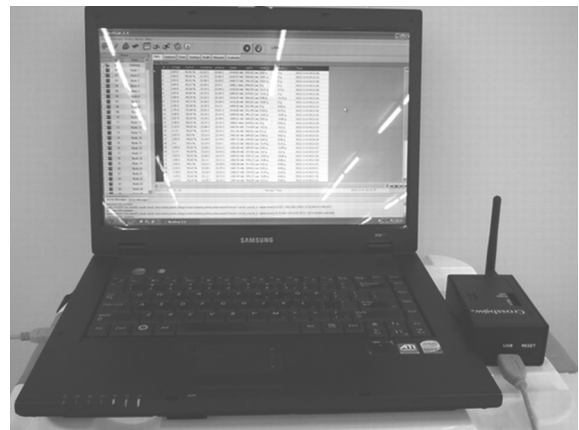


图 6 基站和系统控制中心照片

4.1 测试数据

分别将本文路由算法和文献[14]提出的路由算法在系统中实现, 并各测试 68 min。测试系统首先需要完成基站和节点的初始化工作, 然后按照路由算法建立网络的路由结构。路由结构建立完成后, 网络开始传输数据。基站接收到数据后, 将数据传输给控制中心, 控制中心通过 MoteView 软件显示测试数据。数据显示界面共分为 10 列, 分别是无线传感器节点的 ID 号、节点电源的电压、湿度值、湿度温度值、气压温度值、气压值、亮度值、X 轴加速度值、Y 轴加速度值、数据测试时间。

利用 MoteView 软件对所有传感器节点的测试数据进行了统计, 其中采用本文路由算法的 ID 号为 1 到 12 的节点的电压数据统计结果如图 7 所示。从图 7 可以看到, 随着时间的推移, 各节点的电压值逐步均匀下降。由于每个传感器节点每秒钟向基站

传输一次数据包,每一轮每个节点将会发送30个数据包,大约30s系统需要重新建立网络的路由结构,因此路由结构变化比较频繁,节点的电源能量消耗也较快。从对超净间湿度、湿度温度和气压的测试数据统计结果来看,室内湿度维持在41%~49%之间,湿度温度维持在22℃~24℃之间,气压维持在 1.008×10^5 Pa~ 1.0109×10^5 Pa之间,这些环境指标均在参数要求范围内。

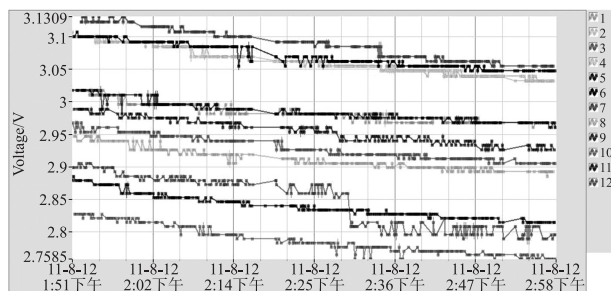


图7 电压数据统计

4.2 数据分析

为了分析传感器节点能量利用的效率和网络能量消耗的均衡性,根据测量的节点电压值可以得到此段时间内电压值下降的情况,如图8所示,其中电压差值为测试前节点电压值和测试后节点电压值之差。

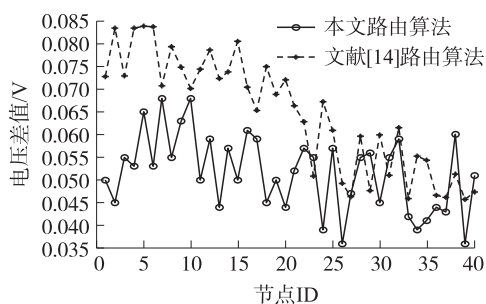


图8 节点电压数据统计

由于采用的无线传感器节点的工作电压在3.6V~2.7V之间,因此当节点电池的剩余电压小于2.7V后,就需要更换该节点的电池,否则该节点测量的数据就是不可用数据。根据图8统计的数据可以看出,在测试的68min时间里,传感器节点的电压下降较快。这是因为在实验过程中,为加快节点能量消耗,网络每30s建立一次路由结构,并发送30个数据包,在测试的68min时间里,网络共建立路由136次,使得节点的电源能量消耗较快。正常情况下,由于厂房密封性较好,环境变化较慢,因此可以设定每个无线传感器节点在建立好路由结构后,每隔15min、或者环境湿度超出40%~50%范围、或者环境湿度温度超出22.5℃~23.5℃范围、

或者气压低于外界气压加10Pa时,节点传输一次当前数据包,每轮节点仍然发送30个数据包,当出现第一个已经发送30个数据包的节点后,网络重新建立路由结构。这样,如果该系统按照正常情况下每隔15min发送一次数据包进行设置,网络平均将每450min重新建立一次路由结构。图8所示的电压差将使网络正常运行1020h。另外,从图8可以看出,与文献[14]提出路由算法相比,采用本文路由算法的监测系统的节点能量消耗更低。对图8中采用2种算法的节点电压差求标准差,本文路由算法对应的标准差为0.0084,文献[14]提出算法对应的标准差为0.0126,这说明采用本文路由算法的监测系统的节点能量消耗更加均衡。通过上述实验数据的分析,可以看出使用本文路由算法的无线传感器网络环境监测系统实现了能量利用高效和网络能量消耗均衡的目的。

5 结语

生产环境的监控对很多企业的产品生产和环境安全是至关重要的,例如矿井、化工厂、天然气站、以及芯片生产等企业。本文针对芯片生产企业对环境温度、湿度、气压、洁净度等指标的严格要求,设计了芯片生产企业超净间环境监测系统。该系统利用现有的无线传感器网络实验套件,集成了本文提出的室内路由算法,对芯片生产企业的超净间进行了测试实验。通过对环境参数的监测和传感器节点电源能量消耗的分析,表明该系统实现了稳定可靠的室内无线数据传输,验证了本文提出的室内路由算法的能量有效性和均衡性。利用该系统进行生产环境监测具有网络部署灵活,维护简单,成本较低等特点,可推广应用到各类对环境参数要求严格的企业,具有良好的工程应用前景。

参考文献:

- [1] 段翠翠,王瑞荣,王建中,等.基于无线传感器网络的高危生产区人员定位系统[J].传感技术学报,2012,25(11):1599-1602.
- [2] Fabiano S, Maurício C, Paulo S, et al. Monitoring in Industrial Systems Using Wireless Sensor Network with Dynamic Power Management[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3104-3111.
- [3] Wang J, Wang P. Based on Wireless Sensor Network Coal Mine Gas Monitoring System [C]//2012 International Conference on Industrial Control and Electronics Engineering, 23-25 August, 2012: 1291-1294.
- [4] 杨维,王彬.矿井巷道层次型无线监测无线传感器网络的实现[J].煤炭学报,2008,33(1):94-98.
- [5] 付华,谢森,徐耀松,等.光纤布拉格光栅传感技术在隧道火灾

- 监测中的应用研究[J]. 传感技术学报,2013,26(1):133-137.
- [6] Vana J, Michele M, Davide B, et al. Context-Adaptive Multimodal Wireless Sensor Network for Energy-Efficient Gas Monitoring[J]. IEEE Sensors Journal,2013,13(1):328-338.
- [7] 刘昊灵,仲元昌,杨柳,等. 基于三峡库区水环境监测的 WSN 信息融合算法[J]. 传感技术学报,2012,25(12):1761-1765.
- [8] 乔钢柱. 基于无线传感器网络的煤矿安全综合监控系统设计与关键技术研究[D]. 甘肃:兰州理工大学,2012.
- [9] Domart F, Saout D, Degand F, et al. An Efficient Methodology for Electrical Monitoring in Manufacturing Environment [C]//2008 IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference, 5-7 May,2008:117-122.
- [10] 侯运河. 基于网络环境的生产过程质量监控系统的研发[D]. 山东:山东理工大学,2010.
- [11] 中华人民共和国建设部. 洁净厂房设计规范(GB 50073—2001)[S]. 北京:中国计划出版社,2001.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 洁净室施工及验收规范(GB 50591—2010)[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [13] <http://www.moog-crossbow.com/>[EB/OL].
- [14] 黄河,石为人,许磊,等. 一种基于自适应加权的无线传感器网络室内能量均衡路由[J]. 电子学报,2010,38(11):2493-2498.



田 勇(1975-),男,博士研究生,副教授,研究方向为无线传感器网络和物联网技术,tianyong@neusoft.edu.cn;



唐祯安(1955-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为集成电路设计和制造、传感器及其应用,tangza@dlut.edu.cn;



喻 言(1977-),男,博士,副教授,研究方向为无线传感器网络、结构健康监测、信号检测与处理,yuyan@dlut.edu.cn。