

# 基于 ZigBee 的 LED 智能照明系统\*

金基宇 王虹元 金桂月 李 鹏 牟 俊 王智森  
(大连工业大学信息科学与工程学院 大连 116034)

**摘 要:**采用 ZigBee 技术,进行了 LED 智能照明系统设计与开发。在 LED 路灯上加装传感器模块,检测环境的照度、温度的变化以及行人、车辆的活动状况,并采用 ZigBee 模块对 LED 路灯进行组网和数据传输,进而完成了以传统 LED 路灯系统实现自动控制及节能降耗为目的的智能化改造。在进行系统整体设计开发的同时,为解决实际系统中的传感器误报、漏报,协调器负担过重,数据拥堵以及节点掉网等关键问题,采用软判决、节点绑定、点对点通信以及节点的掉网检测及重新入网等方法,提高了系统的稳定性。通过该系统方案的设计开发及示范系统的搭建与验证,实现了 LED 路灯的无线组网,依据环境照度变化自动控制系统的开启与关闭,对 LED 路灯的自动、手动控制的切换,依据行人及车辆的活动状况进行相应 LED 路灯的联动调光,对 LED 路灯状态进行监控与管理等功能,并达到了节能降耗的目的。

**关键词:**智能照明;LED;ZigBee;物联网

**中图分类号:** TN92      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.5015

## LED intelligent lighting system based on ZigBee

Jin Jiyu Wang Hongyuan Jin Guiyue Li Peng Mou Jun Wang Zhisen  
(School of Information Engineering, Dalian Polytechnic University, Dalian 116034, China)

**Abstract:** This paper presents the design and development of LED intelligent lighting system by using ZigBee technology. In order to detect the variation of brightness, temperature, pedestrians and vehicles, sensor modules are added to the LED street lamp, and ZigBee modules are used to construct wireless network and data transmission. It realizes intellectualized reconstruction of traditional LED lamp system based on the purposes of automatic control and energy saving. At the same time, in order to solve the problems of misstatements and omission of the sensors, overload of the coordinator, some solutions are used to enhance the stability of the system, such as soft decision, node binding, point to point communication, and detection of the enter/drop from the wireless network. Experiment results show that the intelligent LED lighting system realized network construction, system automatic on/off according to environmental illumination, automatic/manual switching, ganged lighting control, and system management and status monitoring.

**Keywords:** intelligent lighting; LED; ZigBee; Internet of Things

### 1 引 言

智能照明是指利用计算机、无线通信数据传输、扩频电力载波通信技术、计算机智能化信息处理及节能型电器控制等技术组成的分布式无线遥测、遥控、通讯控制系统,来实现对照明设备的智能化控制<sup>[1]</sup>。智能照明系统具有良好的节能效果,并且可以自动调光,使照明效果达到最佳,将传统的开关控制转变成智能控制,大大降低了人的参与。

智能照明从开始到现在经历了以下3个主要阶段。  
1)传统照明控制方式,如利用在回路中的开关元件来控制回路的中断,或者利用回路中的调节元件来改变电压、电流等参数来调节灯光的亮暗;2)自动照明控制方式,这种控制方式是利用数字控制技术来控制照明回路的闭合,达到控制照明的目的,这种方式较传统控制具有一定的自动功能,但不具有调光功能;3)智能照明控制方式,这种控制方式是将计算机技术和网络技术结合起来<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2016-08

\* 基金项目:辽宁省科技厅公益人才培养项目(2015003012)、辽宁省自然科学基金项目(2015020031)资助

智能照明系统控制方式主要有总线型<sup>[3]</sup>、电力线载波型<sup>[4]</sup>、无线传感网络<sup>[5]</sup>等。总线型方案采用综合布线的控制策略,布线繁琐、施工困难;单一模块损坏可能影响系统的整体运转,扩展移动性差<sup>[6]</sup>。电力线载波利用载波方式使数字或模拟信号在电力线中传输,该方式不需要重新组网,但电力线存在干扰脉冲,而且载波信号在电力线传输过程中会被减弱,传输距离会受限制<sup>[7]</sup>。无线传感网络(wireless sensor network, WSN)是由大规模、自组织、多跳、动态性的传感器节点所构成的无线网络<sup>[8]</sup>。其中 ZigBee 技术凭借其全自动组网、近距离、低速率、低成本、低功耗等独特优势<sup>[9]</sup>,在工业自动化、远程控制等拥有大量终端节点的设备网络中得到广泛应用,并在其他相关领域也得到普及,例如智能建筑、家居照明、路灯等现代化领域。基于 ZigBee 的智能照明系统应用在国内外逐渐发展起来,但国内智能照明系统的研究还不够完善,国内研究的智能照明控制系统可以对灯光进行简单的控制和显示,却无法达到完全的智能化控制,并且在控制技术上也有待提高,灯光亮度调节技术也不够成熟,而且存在无故障自检功能、维修不便、灵活性低、可扩展性差等问题<sup>[10]</sup>。

综合国内外智能照明发展情况,本文针对居民小区和室外广场路灯现有状况,设计了基于 ZigBee 的 LED 智能照明系统。通过照度传感器检测照度值,以此控制系统的开启与关闭,采用红外传感器检测人、车活动,为照明灯具的智能调节提供信息。采用 ZigBee 模块对 LED 路灯进行无线组网和数据传输,并采用软判决、节点绑定、点对点通信以及节点掉网检测和重新入网等方法,解决实际系统中传感器的误报、漏报、协调器负担过重、数据拥堵及节点掉网等问题。实现了系统的联动调光,达到了节能降耗的目的。

## 2 系统整体设计

智能照明系统结构如图 1 所示。

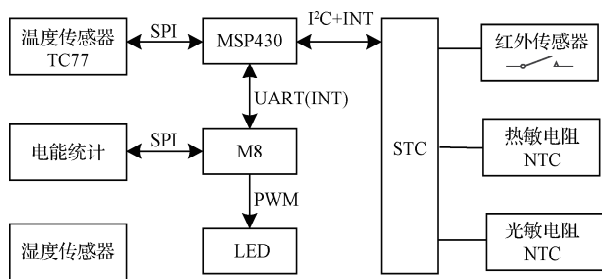


图 1 智能照明系统结构

红外传感器、热敏电阻、光敏电阻、温度传感器构成传感器模块,达到触发条件时,会向主控芯片(MSP430)发送跳变沿信号,该信号触发 MSP430 单片机的外部中断事件,并通过模拟 I<sup>2</sup>C 协议查询传感器内的状态信息,通过该信息的反馈进行相应的处理,其中 STC 单片机是传感器的控制接口芯片。M8 是辅助处理单元,采用 Atmega8

单片机作为 PWM(脉冲宽度调制)发生器和电量芯片控制,对 LED 灯进行调控<sup>[11]</sup>,并实现电能统计功能,测量每个节点的耗电量。照明系统中,加装了湿度传感器,用于检测灯罩内湿度大小,以防湿度过大,损坏整个系统。

## 3 传感器模块设计

### 3.1 传感器模块工作原理

红外传感器选用室外空间三鉴探测器<sup>[12]</sup>,通过 3 组传感器输出信号的组合来判断检测区内是否有人或车辆活动,3 组传感器逻辑关系如图 2 所示。

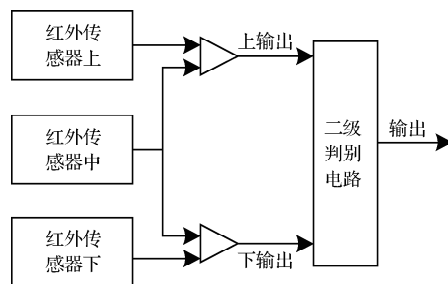


图 2 传感器判别逻辑关系

从图 2 中可以看出,3 组红外传感器之间的关系是上两个的输出进行与,产生上输出,下两个的输出进行与,产生下输出,二级判别电路为硬件判决,通过跳线将上下输出信号进行与/或,得到最后的输出。传感器之间的与操作可以防止误报,或操作可以防止漏报。

### 3.2 传感器模块设计

尽管图 2 中的三鉴传感器已经具备较高的灵敏度和较低的误报与漏报率,但在智能照明系统中使用,因接口信号不能直接识别、无法实现复用。红外传感器的灵敏度会随着检测距离的增加而逐渐减弱,当距离较大时,人和快速移动的车辆会漏报。在北方地区,四季分明,环境温度也会影响红外传感器的检测精度。夏季,由于热气流的运动,会增加传感器的误报率;冬季,室外环境温度低,人体衣着厚,辐射的红外线较少,会导致传感器漏报率高。所以,根据智能照明的需求以及现实环境的影响,需对传感器进行重新设计。改装后三鉴传感器结构如图 3 所示。

在已有传感器内部增加低成本的 51 系列微控制器(单片机),用 51 单片机代替二级判别电路,由原有的硬件判别改为软件判别,并加入热敏电阻,检测环境温度,用环境温度辅助软件判别算法,提高检测精度。软件判别算法根据环境温度值动态调整判别逻辑,根据实际测量数据,设定具体温度阈值,高于温度阈值时使用与逻辑,降低误报率,低于温度阈值时使用或逻辑,提高传感器灵敏度,减少漏报率。

同时,将光敏电阻控制电路改为照度检测电路,用来检测环境光照强度,并将检测的光照强度通过无线传感器网络上传至协调器。协调器在接收到各传感器节点上传

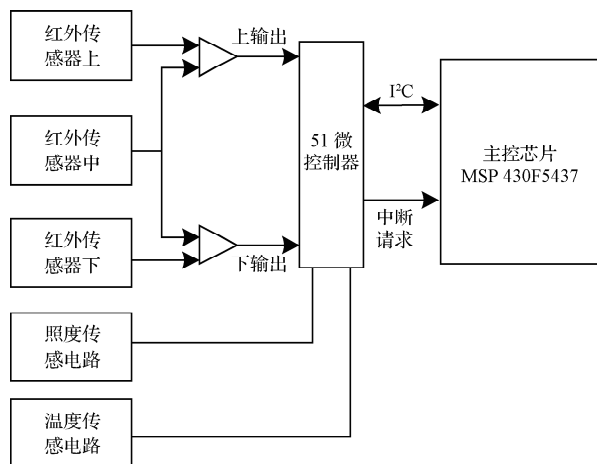


图3 改装后三鉴传感器功能结构

的光照强度数据后,采用相关算法,在剔除异常数据后(防止个别照度检测传感器故障),对环境照度进行综合检测评估,并以此为依据进行系统的自动开启和关闭。

51单片机通过I<sup>2</sup>C接口与路灯主控芯片通信,实现多个传感器线路的复用。考虑到工作电压,外设模块,成本等方面,最终选定STC12LE2052AD作为传感器的控制接口芯片。STC12LE2052AD单片机工作电压范围2.4~3.8V,与主控(MSP430F5437)工作电压(3.3V)兼容,与传感器设计相关的片上资源包括:ADC(模数转换),用于光敏电阻和热敏电阻输出电压采样;EEPROM,用于存储配置参数;定时器,用于模拟I<sup>2</sup>C中断;外部中断,用于检测传感器输出信号。

### 3.3 传感器模块功能

传感器模块功能可分为3方面:1)检测行人、车辆活动情况,为照明灯具的智能调节提供信息;2)检测环境光照强度,为灯具的开启和熄灭提供信息;3)提供一个数字接口,使之能够与灯具中主控芯片通信。

#### 1) 红外检测

上下两组传感器输出的信号接到单片机外部中断引脚,软件通过中断方式来检测红外传感器输出信号的变化,并由软件判别算法确定是否产生触发输出。

#### 2) 照度检测

单片机通过ADC模块采集光敏电阻上电压值,间接获得当前环境光照度值。

#### 3) 数字接口

将传感器与内部增加的单片机作为整体,与外部(主控芯片)通信采用标准的I<sup>2</sup>C接口,主控芯片作为I<sup>2</sup>C主器件,传感器内部单片机作为I<sup>2</sup>C从器件。I<sup>2</sup>C接口的使用,使得主控芯片仅通过两根数据线(SDA,SCL)即可与多个传感器通信。另外,传感器被触发后,能够主动上报给主控芯片,因此传感器设置中断请求引脚(INTR),用来通

知主控芯片其产生事件(红外触发、照度改变)需要处理。

#### 4) 参数存储

传感器中的可变参数(照度阈值、温度阈值、工作方式)需要非易失性存储器存储,这些参数使用单片机内部EEPROM来存储,每次上电时,程序将EEPROM中参数加载到单片机RAM(random access memory,随机存储器),当RAM中参数改变时程序将变化的参数写回到EEPROM。

## 4 ZigBee 模块设计

### 4.1 ZigBee 标准技术

无线通信平台采用ZigBee标准技术,应用体系结构如图4所示。

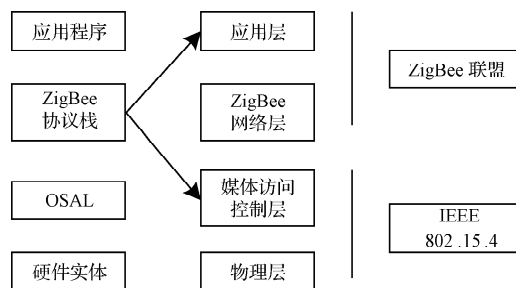


图4 ZigBee节点应用体系结构

其中,硬件实体层主要有处理器模块、无线通信模块(ZigBee)构成,本设计处理器模块采用MSP430,无线通信模块采用CC2520;OSAL软件功能模块作为TI公司Z-Stack协议栈中的操作系统抽象层,统一管理协议栈的运行以及各种任务事件的响应;ZigBee协议运行于OSAL抽象系统之上,该协议是由层来量化表示其整个协议标准,每一层负责完成所规定的任务,并且向上层提供相应的数据接口及服务<sup>[13]</sup>。

ZigBee技术体系结构主要由物理层(PHY)、媒体访问控制层(MAC)、ZigBee网络层(NWK)以及应用层(APL)构成,其中物理层与媒体访问控制层的协议为IEEE802.15.4协议标准,网络层由ZigBee技术联盟制定<sup>[14]</sup>,而应用层是根据用户自己的应用需求进行开发利用。

### 4.2 网络拓扑结构

由于ZigBee是一种低速率、低功耗、低复杂度的近距离无线传输技术<sup>[15]</sup>,应用到室内或室外的环境下,都会受到距离、阻挡等诸多环境因素的限制,影响到其正常通信。因此,对网络拓扑结构设计时,将各节点全部设置为“路由”,这样可以使得距离网关较远无法传送信息的节点能够通过“路由”节点将信息跳转到协调器,如图5所示为数据传输方式。

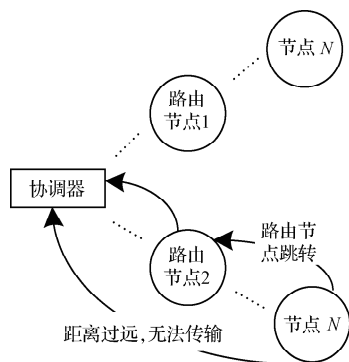


图5 数据传输方式示意

#### 4.3 ZigBee 模块工作流程

整体的 ZigBee 模块工作流程如图 6 所示。

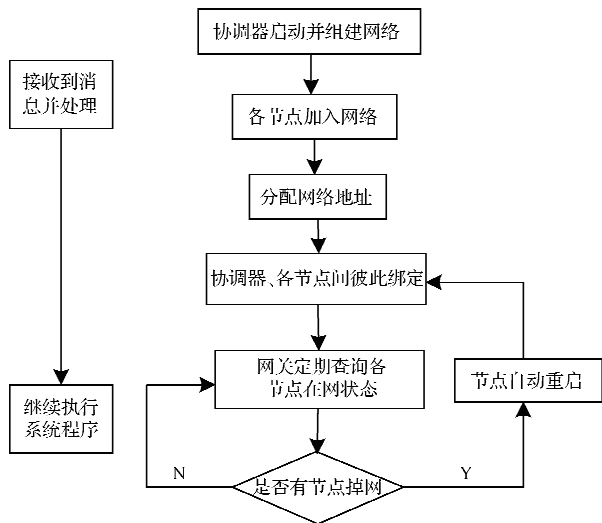


图6 ZigBee 模块工作流程

1) 协调器启动后开始组建网络,待网络组建完成后,各节点可以申请加入网络,并由协调器统一随机分配网络地址;

2) 在每个节点加入协调器所创建的网络后,协调器发送请求,要求各节点上报自己的物理地址和网络地址,协调器将它们存储下来。此外,各节点需要广播获得与它相邻节点的网络地址,以实现各节点间的彼此通信;

3) 网络组建完成后,协调器定期向每个节点发送数据要求进行反馈,若节点没及时进行信息反馈则认为掉网;对于节点来说,若超过限定时间没收到任何信息,则默认为自身已经掉网,此时通过看门狗程序实现软复位;对于协调器来说,若超过限定时间未收到任何信息,也默认为自身已经掉网,此时通过看门狗程序实现软复位。

4) 若 ZigBee 模块有事件被触发,则转去处理该事件,待事件处理结束后继续执行相应程序。

#### 4.4 节点入网与绑定

因为居民小区或者广场内,路灯固定,每个节点的信号变化不大,为减少协调器的负荷,提高系统效率,减少数据拥塞的概率,采用节点绑定。如图 7 所示,为节点入网绑定的流程。

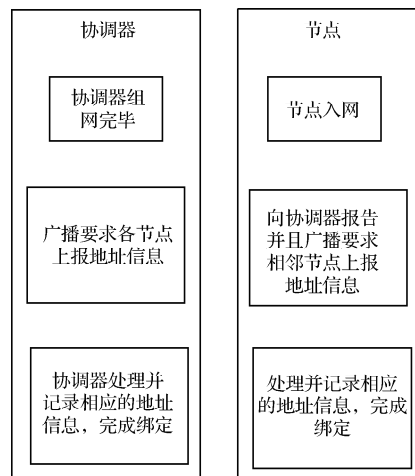


图7 节点入网绑定流程

协调器建立网络完毕后,等待一段时间后发送广播,要求已经入网的各节点上报自身物理地址和网络地址,协调器接收到上报的信息后进行存储记录。

在协调器以及各个节点内设有一个映射表格,协调器中的表格反映的是所有节点所对应的物理地址和网络地址;各个节点中的表格反映的是与其相邻节点的网络地址。

#### 4.5 掉网与重加入网络

通过更改协调器中的相应设置,使得掉网的节点,通过看门狗实现软复位后,能够重新加入之前建立的网络,这样使得原有的系统可以继续正常运行。对于重新加入的节点,需要重新广播自身地址以实现与协调器以及相邻节点的地址更新。

#### 4.6 点对点通信的核心设计

本文的设计优点在于能够实现节点与节点之间的通信,不需要使用广播,也不需要通过协调器进行中转。大大提高了系统运行效率,减少了数据拥塞情况的发生,减轻协调器负荷。

为了保证点对点通信的正常实现,设计采用了如下算法以保证其稳定运行,如图 8 所示。

在点对点通信的情况下,假设节点 A 与节点 B 是相互绑定的相邻节点:

1) 节点 A 发送信息给节点 B,节点 B 需要发送确认收到信息反馈给 A;

2) 若 A 没有接收到由 B 发送来的确认信息,则此时可能有两种情况:①节点 B 的网络地址信息发生更新;②节点 B 已经不在这个网络中;



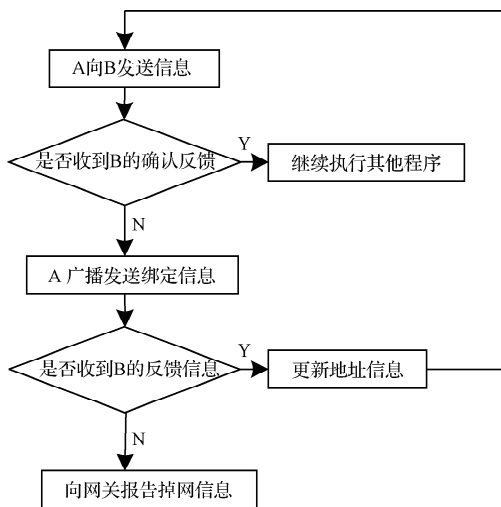


图8 点对点通信流程图

3)为确认是上述哪种情况发生,节点A需要发送广播要求查询与其绑定的各节点的地址信息;

4)若节点B向A反馈了地址信息,A点需要更新自身的绑定地址信息;若B节点依然没有反应,则A点默认B点已经掉网,并向网关报告掉网信息。

## 5 实验结果

基于以上设计方案,进行了系统的软硬件开发(包括上位机软件),并完成了实验系统的搭建、调试与验证。

首先对某广场的15盏LED路灯进行了智能化改造,如图9和图10所示,在路灯内部集成了ZigBee模块及调光控制模块,ZigBee模块的天线安装在路灯顶端,便于信号的发送和接收,将传感器模块安装在路灯的灯杆上,便于信号的采集。在此基础上,进行了系统的无线组网、自动开启/关闭、手动/自动控制、节点的掉网及重新加入、点对点通信以及联动调光等功能测试。联动调光的主要目的是当行人或车辆经过时,调高其所在区域及前方路灯的照度,并在行人或车辆经过后,降低路灯的照度或关闭该路灯,以达到节能降耗的目的。为避免路灯在调光过程中照度的突变惊扰行人或驾驶员,出于人性化考虑,在无行

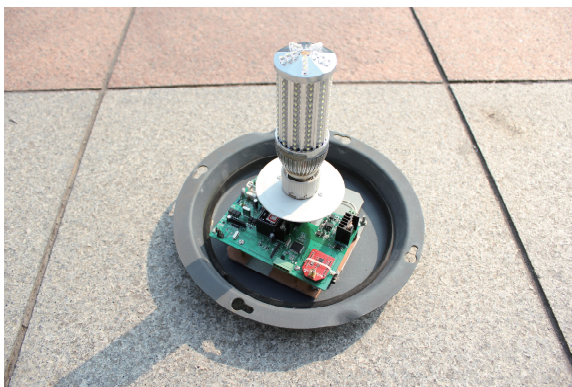


图9 ZigBee模块和调光控制模块

人或车辆经过时,将路灯的照度设置为微亮状态(微亮的照度可依据实际场景通过参数进行设置)而非关闭路灯,并在有行人或车辆经过时逐步调高照度至全亮。联动调光的实验结果如图11所示。



图10 改装后的路灯

当无行人经过时,图11中的1—4号灯状态为微亮;当行人行至1号灯附近,1号灯的红外传感器触发,1号灯调光至全亮,同时2号灯进行联动调光至全亮,为行人提前照亮前方道路,如图11(a)所示;当行人行至2号灯附近,2号灯红外传感器触发(此时2号灯已为全亮状态),3号灯进行联动调光至全亮;当行人行至3号灯附近,4号灯进行联动调光至全亮,此时1号灯因其红外传感器在一段时间内无触发且无联动调光事件发生,调光至微亮,如图11(b)、(c)所示。

另外,为方便系统的监控、管理及维护,通过上位机软件开发,实现了以下功能:

1)系统参数设置。包括系统的自动开启(傍晚)/关闭(凌晨)时的照度阈值;微亮的照度值;行人或车辆经过后且后续无触发事件时,路灯维持全亮状态的延时时间(路灯经延时后切换为微亮状态);以及为避免惊扰行人或车辆,路灯调光时的照度渐变值以及调光时间等。

2)手动/自动模式切换。

3)系统状态监控。在监控主画面的地图上实时显示各路灯的状态,包括路灯调光(全亮或微亮)状态;入网/掉网状态(掉网时闪烁),并在辅助窗口中实时显示各路灯的具体状态及参数。

4)故障报警。当路灯节点掉网且无法重新入网,或节点状态正常而路灯照度值等参数异常时显示相应报警。

5)节点设备检测。为方便系统的维护与维修,节点设备检测可以对单灯设备进行检测,也可以对整个系统进行检测。

6)耗电量统计。提供单灯及整个系统耗电量的实时曲线及日志。

7)调试接口。



(a)



(b)



(c)

图 11 联动调光

## 6 结 论

本文针对居民小区和广场路灯现有情况,设计出基于 ZigBee 技术的 LED 智能照明系统,采用 ZigBee 技术进行系统方案设计,依靠传感技术感知周围环境变化,应用智能网络将相邻灯具的测量数据通过传感器网络纳入到智能控制当中,自动控制路灯的开启/关闭与联动调光,并完成了系统状态实时监控、手动/自动模式切换、节点掉网检测及恢复、故障报警、耗电量检测及统计等功能,同时提高了传感器的检测精度,减少了数据拥塞情况的发生,减轻了协调器的负荷。实现了单灯智能化和网络控制的智能化。实际系统的测试表明,在不同场景和不同的参数设置下可节约电能 30%~70%,达到了节能降耗的目的。

## 参 考 文 献

- [1] 詹杰,吴伶俐,唐志军. 基于 ZigBee 的智能照明控制系统设计与实现[J]. 电力电子技术,2007,41(10):25-26.
- [2] 陈小荣. 关于智能控制系统在照明中的应用问题的几点思考[J]. 制造业自动化,2012,34(9):131-133.
- [3] HUANG Y S. Intelligent lighting control device based on bus mode[P]. CN: 201110180770, 2012.
- [4] ZHANG C L, WANG W, SU X J. Design of intelligent lighting control system based on power line carrier communication technology[J]. Advanced Materials Research, 2014(1051): 937-941.
- [5] CHONG C Y, KUMAR S P. Sensor networks: evolution, opportunities, and challenges[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 91(8):1247-1256.
- [6] 孙凯霞. 建筑智能照明系统的要点之初探[J]. 城市建设理论研究(电子版),2013(10):1-6.
- [7] 程通. 电力线载波路灯控制系统研究[D]. 济南:山东科技大学,2013.
- [8] 李晓维. 无线传感器网络技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2007.
- [9] 俞建. 基于 ZigBee 无线传感网络的 LED 智能照明控制系统研究[D]. 浙江:浙江工业大学,2012.
- [10] LIU D, YU H. Smart control for wireless indoor lighting system based on ZigBee technology[J]. Advanced Materials Research, 2014(898): 792-796.
- [11] 刘蕴. LED 智能照明控制系统的设计与研究[D]. 西安:陕西科技大学,2013.
- [12] 张月桥,杨小平. 降低误报的三鉴智能探测器的硬件和软件设计[J]. 现代电子技术,2007(12):4-5.
- [13] 吴光荣,章剑雄. 基于 ZigBee 技术的无线智能照明系统[J]. 现代电子技术,2008,14(277):67-69.
- [14] 高守玮. ZigBee 技术实践教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2009.
- [15] 莫振栋,赵中华. 物联网 RFID 和 ZigBee 技术在高铁列控系统的应用研究[J]. 中国测试,2014(1): 97-100,114.
- [16] 唐涛. ZigBee 技术与应用[J]. 数字通信世界,2013,64(2):78-81.

## 作 者 简 介

金基宇,1975 年出生,工学博士,副教授,主要研究方向为无线通信与网络、物联网技术及应用。

E-mail: jiyu.jin@dlpu.edu.cn

王虹元,1989 年出生,工学硕士,主要研究方向为通信与物联网。

E-mail: yuan1096018567@126.com

(下转第 86 页)