

开放实验室系统现场控制器^①

曾 妍

(四川信息职业技术学院 电子工程系, 广元 628017)

摘 要: 为提升实验室的开放式、信息化管理水平, 利用 Zigbee 和多种传感器设计了一套应用于开放实验室系统的现场控制器. 该控制器可实现对室内环境参数及灯光、窗帘运行状态数据的采集和上报, 并根据预置策略执行对灯光、窗帘的远程及联动控制. 在介绍开放实验室系统组成的基础上, 分析了控制器的硬件结构及软硬件实现方法, 并通过实验验证了设计方案的可行性和有效性.

关键词: 开放实验室; 环境参数; 联动控制

Opening Laboratory System Controller

ZENG Yan

(Department of Electronic Engineering, Sichuan Information Technology College, Guangyuan 628017, China)

Abstract: In order to promote the opening and informationization management of laboratory, a set of field controller applied to open laboratory system is designed by using Zigbee and multiple sensors. The controller can collect and report the data of laboratory environmental parameters, lights and running status of curtains, and implement the remote and linkage control on the lights and curtains according to the preset strategy. Open laboratory system composition is introduced. On this basis, the controller hardware structure and realization methods of software and hardware are analyzed and the feasibility and effectiveness of the design scheme are verified by experiment.

Key words: open laboratory; environmental parameters; linkage control

在诸多开放式实验室信息管理系统中, 实时监测室内环境参数及进行电源管控是其重要功能之一^[1-2]. 文献[2]提出了一种基于 ASP 的开放式实验室管理系统, 解决了实验课程管理、实验室预约等应用层的部分问题; 文献[3]提出了基于物联网技术实现的实验室管理系统, 重点分析了感知层、传输层的实现方法, 解决了实验室中灯组、试验台电源管理问题; 文献[4]提出了与文献[3]类似的实验室管理系统, 重点解决了用电设备电压监测问题. 总体而言, 这些文献所述系统为实验室开放式管理提供了良好的支撑, 但也存在底层硬件集成度不够、上层应用不丰富等不足. 针对底层硬件集成度不够问题, 本文为其中的核心部件--现场控制器, 提出了一种基于传感器及 ZigBee 技术的解决方案, 用于采集环境参数及灯光、窗帘等电源管理方面的综合信息, 以及逆向对灯组、窗帘进行远程和

联动控制.

1 总体方案

1.1 实验室环境参数采集与联动控制系统的组成

实验室环境参数采集与联动控制系统的组成如图 1 所示, 包括感知层、传输层、应用层三部分^[3]. 其中, 感知层由现场控制器、传感器及被控设备构成, 用于采集环境参数及现场控制; 传输层包括基于 CC2530 的 ZigBee 无线传输网(含 CC2530 协调器和终端节点)和基于 TCP/IP 的局域网传输网(含数据库服务器、ZigBee-Wifi 网关等); 应用层包括运行于应用服务器上的 Web 应用软件及运行于数据库服务器上的采集服务软件, 前者用于通过人机交互下发各类指令并展示系统运行状态, 后者用于在传输层和应用层之间提供指令解析与数据解析、数据存储、根据运行决策进行

^① 收稿时间:2015-01-21;收到修改稿时间:2015-03-12

状态分析与状态调节等服务。

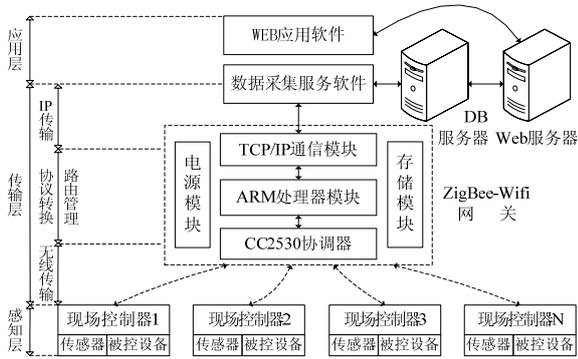


图 1 实验室环境参数采集与联动控制系统的组成

1.2 现场控制器的硬件结构

为了营造良好的实验室运行环境，整个系统需要对实验室的光照强度调节、是否有人员在室操作、以及诸如灯光亮灭等的电源管理、门/窗是否关闭的实时监测等方面进行参数采集及联动控制，现场控制器就是用于采集环境参数及进行现场控制的底层设备。根据需求，为其设计如图 2 所示的硬件结构，主要包括双路供电模块、CC2530 传输控制模块、灯光和窗帘等开关量控制模块、光强及温湿度等模拟量采集模块、窗磁/门磁及热释电人体感应开关量采集模块^[4]。

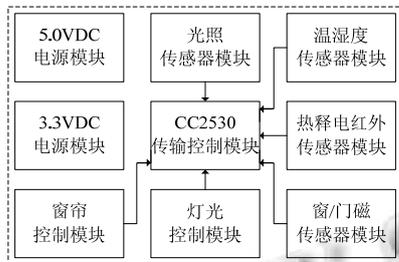


图 2 现场控制器的硬件结构

2 主要电路设计

2.1 电源电路设计

电源电路需为 CC2530 传输控制模块及各类传感器、开关量控制模块提供 3.3V 和 5.0V 直流供电，根据估算，整个控制器的最大瞬时工作电流可达到 1.5A。考虑工程安装需要，决定采用 220V 供电、输出额定直流电压电流分别为 5.0V 和 2.5A 的开关电源为总供电电源，将其进一步降压后再输出 3.3V 直流电压，提供控制器所需的两种供电。

系统选用 NCP1014 为核心部件设计 5.0V 开关电

源，具体电路如图 3 所示，主要由浪涌电流吸收电路、整流电路、开关变压耦合电路及稳压电路组成^[5]。市电经由 C1 进行输入级滤波，然后经桥式整流器 (BR1MB06S) 整流后输出脉动直流电压，送至由 C2、L1、C3 组成的 π 型滤波电路进行滤波，输出纹波较小的直流电压 (约 300V)，再送至由 T1、U1 组成的 DC-AC 变换电路进行 DC-AC 变换。DC-AC 电路振荡产生交变磁场使得在隔离变压器的 7、5 端感应出一定的交流电压，该电压经 D4、C7、L2、C8 整流滤波并经 U3、R1、R1'、R2、R3、R4、U2 组成的电压负反馈电路稳压后输出稳定的 5V 直流电压。隔离变压器的同名端 3 侧的感应电压来自初级的线圈的交流振荡，其作用主要是为 U1 提供基本的偏置电压。D3、C5 组成半波整流电路，用于对该侧感应的交流电压进行整流。R5、C4 组成 RC 滤波电路实现对整流后的电压进行滤波，以便为 U1 提供较为稳定的直流电压。D1、D2 为浪涌保护二极管，主要用于实现对电路瞬间产生浪涌电压进行钳压以保护 U1 内部的 MOS 管^[6,7]。

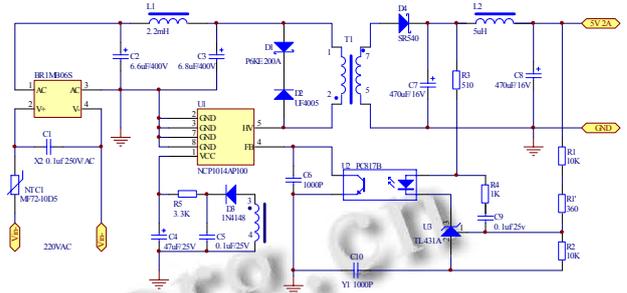


图 3 电源电路原理图

2.2 CC2530 传输控制模块电路设计

在开放实验室系统中，由于每个实验室装有 1 个 ZigBee-Wifi 网关，且实验室的最大传输距离一般不超过 20 米，故以 TI 公司提供的不带增益放大的 CC2530 典型电路为基础进行 CC2530 传输控制模块设计，其电路如图 4 所示^[8,9]。图中，C23、C24、C25、C26、C27、L3、L4 构成天线匹配电路，由于 CC2530 的射频部分工作于 2.4GHz 的频段，在设计 PCB 时需特别考虑这些器件的合理布局，应尽可能减少走线长度，并充分阻抗匹配问题。

2.3 开关量传感采集部分电路设计

门窗的开关及教室内人的有无均只有两种状态，因此可用开关量来表征其状态。本系统分别选用通用无源霍尔传感器和 3.3V 开关型红外传感器模块做门

窗开关及人体感应检测, 电路如图 5 所示. 红外传感器模块在检测到有人后输出高电平到 CC2530 的 P0.1 口, 下拉电阻 R6 用于确保在无人时将 P0.1 口拉为低电平. 门/窗磁传感器一端接地, 另一端接 CC2520 单片机的 P0.0 口, 当门窗关闭时霍尔传感器导通, P0.0 口为低电平. 上拉电阻 R7 用于确保在门窗未关时 P0.0 口为高电平.

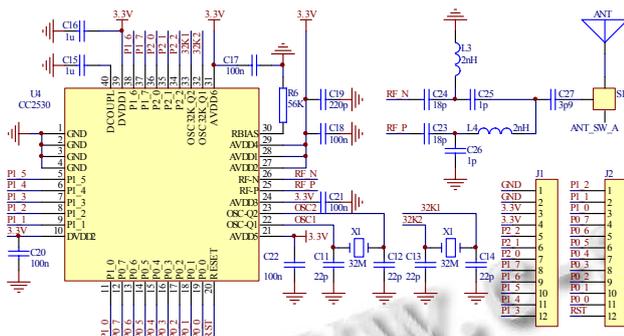


图 4 CC2530 传输控制模块电路原理图

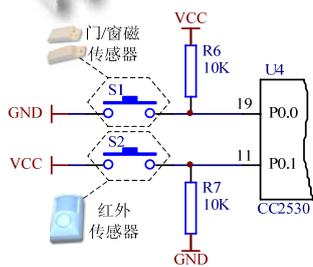


图 5 开关量采集传感器电路

2.4 模拟量传感采集部分电路设计

模拟量传感参数包括光照强度和温湿度, 对应电路如图 6 所示. 图中, 3.3V 电压经电位器 RP1、电阻 R8、光敏电阻串联分压, 光敏电阻两端获得的电压送至 CC2530 的 P0.7 口进行采样, 经计算后获得光照强度值. 温湿度传感器选用含已校准数字信号输出的温湿度复合传感器 DHT11, 其单线制串行引脚(pin 2)连接上拉电阻 R9 及 CC2530 的 P1.6 口, 在 P1.6 口上按照指定的协议可读取温湿度值^[10,11].

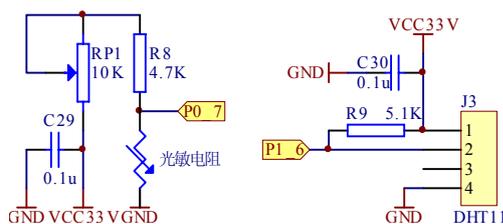


图 6 光照及温湿度传感器电路

2.5 开关量控制部分电路设计

开关量控制包括灯组的开关和窗帘电机的正转、反转、停止控制, 电路设计既要满足无线控制需求, 又要考虑在内置 CC2530 节点掉网后能手动控制. 为简化设计, 本系统采用 CC2530 和 STC89C52 双 CPU 结构设计, 利用 CC2530 做无线传输, 利用 STC89C52 单片机做现场控制, 主要电路如图 7 所示. 本系统中, 窗帘电机选用佳力斯三线控制电机(其中一线为 L, 另外两线为控制电机正反转的 N 线). 图中, 按键 S3、S4、S5 用于手动控制, 当 STC89C52 单片机检测到某个按键按下时, 就通过 P0.4 和 P0.5 口输出不同的电平, 分别控制 ER1 和 ER2 构成的继电器电路, 通过 ER1、ER2 的导通或截止来控制交流电 N 极为窗帘电机供电的通断, 从而实现电机的正转、反转和停止等控制. CC2530 的 P1.0 到 P1.3 口通过限流电阻连接 STC89C52 单片机的 P0.0 到 P0.3 口, 可通过 CC2530 的 I/O 口模拟按键按下的电平变化, 达到利用 CC2530 也可以触发 STC89C52 单片机按键事件的目的, 从而实现手动控制与无线控制的兼容. 灯组控制的原理与此类似.

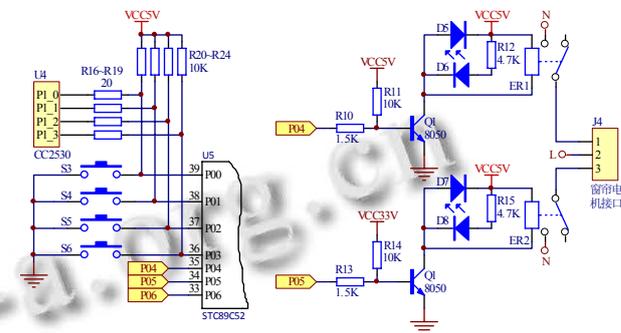


图 7 窗帘与灯组控制电路原理图

3 软件设计与实现

现场控制器软件设计主要包括网络拓扑选择、传输控制协议设计, 以及相关软件的编写等. 此处选择在 ZigBee2007Pro 协议栈中实现具体功能.

3.1 网络拓扑的选择

在工程中, 控制器部署的数量、位置因实验室的大小及实验室间的相对位置不同需选择不同的网络拓扑. 若多个实验室呈链型分布, 可选择树形网络拓扑结构, 多个实验室共享一个 ZigBee-Wifi 网关, 实验室内的每个控制器均工作于路由器模式, 既作控制终端又提供路由功能; 若多个实验室呈星型分布或独立分

布,可选择星型网络拓扑结构,在每个实验室部署一个 ZigBee-Wifi 网关,室内的控制器工作于终端模式,仅作为控制终端使用^[12].

3.2 传输控制协议设计

从图 1 可知,系统运行主要包括对灯及窗帘的控制过程、实验室环境参数采集及展示过程、系统协调运行过程三个部分.从数据传输角度看,这三个部分所包括的主要传输环节如下:(1)控制器入网时向网关主动上传入网参数;(2)用户通过网关向控制器下发获取网络参数指令、控制指令(开关灯、窗或采集环境参数)及各控制器向网关返回执行结果.

根据业务需求及透明传输原则,可将图 1 所示系统的整个传输控制协议从下自上分为三层,包括 CC2530 终端与协调器的无线网络传输层、CC2530 协调与 ZigBee-Wifi 网关的串口传输层和网关与服务器的 IP 传输层.为了便于处理,可采用固定帧长的数据格式.以 CC2530 终端与协调器的无线网络传输层为例,数据帧格式组成如表 1 所示.

表 1 无线传感网通信帧格式

帧结构	长度	备注
帧头	4	&WSN
帧类型	3	自定义:RNP/JNS/CNA
帧长度	1	长度为 0x10
物理地址	8	功能复用:(1)注册网络和获取网络参数时:承载源节点物理地址(8B)、网络地址(2B);(2)下发控制指令时:承载目标节点物理地址(8B)、网络地址(2B);(3)上传执行结果时:承载源节点物理地址(8B)、网络地址(2B).
网络地址	2	
数据包	11	功能复用:(1)注册网络和获取网络参数时:承载父节点网络地址(2B)、节点类型(3B);(2)下发控制指令时:承载控制参数(≥1B);(3)上传执行结果时:承载执行结果(NB).三种情况中,没有定义具体功能的字节填充 0x00.
连接质量	1	由目标节点提取
帧尾	3	END

3.3 ZigBee 通信信道分配

当采用 ZigBee-Wifi 网关实现组网时,系统中将存在 ZigBee 与 Wifi 的同频干扰,合理分配 ZigBee 的信道是确保系统可靠通讯的关键.根据 ZigBee 与 Wifi 的信道频谱分配关系,可采取两项措施减小干扰,一是为 ZigBee 选择 15、20、25、26 等与 Wifi 工作频率不重叠的信道,二是在 ZigBee 中实时扫描各信道,根据信道信号强度动态选择最佳传输信道.

3.4 主要软件实现方法

3.4.1 开关量传感参数采集实现方法

门窗磁、人体感应开关量传感参数的采集比较简单,首先是合理初始化端口,然后按照电平扫描方式获取端口电平状态,再根据电平变化判断门窗的开关、人体的有无.

3.4.2 模拟量传感参数采集实现方法

光照传感参数需利用 AD 转换方式获取.在 ZigBee2007Pro 协议中,首先需配置 P0_7 口为外设 I/O 口(代码为: P0SEL |= 0x80),然后调用 HalAdcInit()初始化 ADC、调用 HalAdcRead(0x07,14)函数获取光敏传感器两端的电压采样值,最后再根据公式换算为电压值.在 14 位分辨率下,电压值换算的公式为: $1.25 \times (x + 0x0E) / 8191$,其中 1.25 表示参考电压选择内部 1.25V 电压,0x0E 为温度补偿系数,x 为调用 HalAdcRead 函数获取的十六进制形式采样值.若 $x = 0x1572$,则经过换算后的光敏电阻两端的电压值为 0.8398V.为确保采样精度,可通过多次采样、加权平均方式计算最终光强值.

温湿度传感器 DHT11 与 CC2530 之间的通讯和同步采用单总线数据格式,其时序如图 8 所示^[10-11].DHT11 上电后,CC2530 将连接 DHT11 DATA 端的 I/O 口设置为输出状态,同时输出持续时间在 18ms 以上的低电平(即开始信号),然后将 I/O 设置为输入状态.在上拉电阻 R9 的作用下,CC2530 与 DHT11 DATA 相连的数据线被拉为高电平,等待 DHT11 响应. DHT11 接收到开始信号后从低功耗模式转换到高速模式,并通过 DATA 引脚先输出 80us 的低电平作为应答信号,然后输出 80us 的高电平通知 CC2530 准备接收数据.接下来 CC2530 根据 I/O 电平的变化接收 40 位数据(数据“0”的格式为:先 50us 低电平再 26-28us 高电平;数据“1”的格式为:先 50us 低电平再 70us 高电平). DHT11 输出 40 位数据后,继续输出低电平并保持 50us 后转为输入状态.

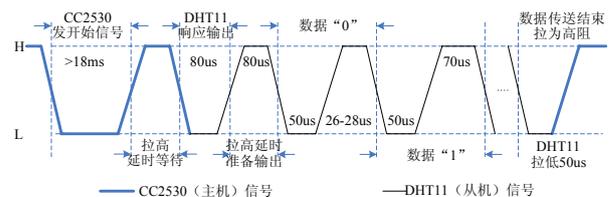


图 8 DHT11 温湿度采集时序图

温湿度采集的具体程序流程如图 9 所示, DHT11 初始化完成后, CC2530 发出起始信号, 待 DHT11 响应后读取 40 位数据, 通过校验后计算出温度值和湿度值。

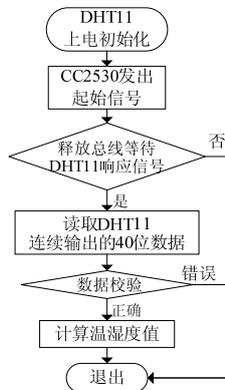


图 9 温湿度采集流程

3.4.3 灯光及窗帘控制实现方法

在图 7 中, 对灯光及窗帘的直接控制由 STC89C52 单片机实现, 它通过检测按键 S3-S6 的按下与否, 对应控制窗帘电机的正转、反转、停止, 以及灯组的亮灭。在 CC2530 中编程时, 首先将 CC2530 对应 I/O 口置为输出状态, 然后在控制 I/O 口上模拟按键按下与弹起的动作, 即先拉低 I/O 口电平, 待延时 50ms 后拉高 I/O 口电平, 即可实现对窗帘电机的灯组控制。

4 系统搭建与功能测试

4.1 现场控制子系统的搭建

以现场控制器为主体的现场控制子系统的接线关系如图 10 所示。现场控制器通过两线接 220V 交流电; 通过三线连接窗帘电机, 分别提供 220VAC 的 L 及正反转控制电压; 通过三线连接热释电红外传感器, 分别提供 5V 供电和采集传感器反馈信号; 通过两线连接窗磁传感器, 提供接地和采集反馈信号; 通过两线连接灯组, 其中 N 线由控制器的 I/O 口进行通断控制。

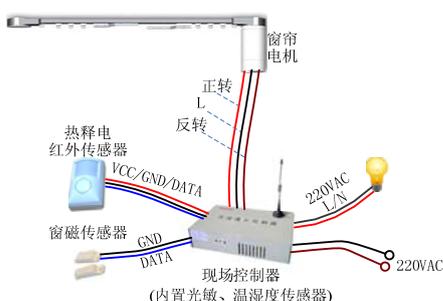


图 10 现场控制子系统的搭建示意图

4.2 系统功能性能测试

为了验证设计方案的可行性和有效性, 分别从 CC2530 通信节点性能、ZigBee 网络传输性能测试、传感参数采集与反馈控制功能与性能等方面进行实验验证^[13]。

4.2.1 CC2530 通信节点性能测试

图 4 所示 CC2530 通信节点在通信距离、发射功率及功耗控制等方面的性能将直接影响现场控制系统的性能, 为此采用表 2 所示条件进行测试。

测试中通过修协议栈中 reqTxPower 及 MAC_RADIO_TX_POWER_DEFAULT 的值, 然后执行 macRadioSetTxPower(txPower)和 macRadioUpdateTxPower() 实现功率配置。以收包率大于 80%作为通信可达标准, 其测试结果如表 3 所示。由表可知, 所设计的 CC2530 节点具有较好的无线通信能力, 可满足基于星型拓扑的教室内通信需要。

表 2 CC2530 通信节点性能测试条件

序号	测试条件	主要内容
1	测试地点	教室(长 12m 宽 10m)
2	网络拓扑	星型网络(现场控制器内置 CC2530 节点工作于终端模式)
3	布设方式	每间教室靠墙装 4 个现场控制器(含 4 个 CC2530 节点, 各节点距离地面 2m); ZigBee-Wifi 网关内置图 4 电路所示协调器, 由教室内讲桌逐步向教室外走廊移动, 以测试节点的通信距离
4	工作信道	15 号信道(工作频率 2425MHz)

表 3 CC2530 通信节点性能测试结果

TXPOWER 寄存器的值	0xF5	0xE5	0xD5	0xC5	0x85
发射功率(dBm)	4.5	2.5	1	-2	-6
通信距离(m)	75	60	49	38	25

4.2.2 ZigBee 网络传输性能测试

实验中以表 2 所示条件为基础, 从自组网及数据传输两个方面对无线传输性能进行测试。在实验室环境中, 现场控制器内置节点以 15s 为周期向 ZigBee-Wifi 网关上传数据帧(格式见表 1, 每帧 33B), 然后在 PC 上利用 TCP/IP 调试助手接收数据包, 以 13200 个数据包(400 帧数据)为单位, 进行丢包率统计, 测试结果如图 11 所示。由图可知, 系统的稳定性较好。经深入分析, 发现影响丢包的主要因素是 ZigBee-Wifi 网关的串口传输可靠性控制与 TCP 传输性能问题。

实验中进一步进行网络鲁棒性测试, 在网络连续

开通 12 小时期间未发现链路中断。测试中人为将部分节点断电并再次上电,所有节点均能再此入网,稳定性达到了设计预期目标。

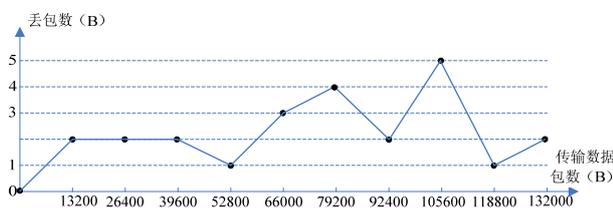


图 11 无线传输丢包率测试结果

4.2.3 传感参数采集与反馈控制功能测试

实验中仍以表 2 所示条件为基础,分控制器入网和未入网两种情况下进行测试,未入网情况主要测试极端情况下的人工控制功能是否实现,入网情况下主要测试无线控制、人工控制、传感参数采集、传感参数采集与反馈控制等四种功能能否实现。在两种情况下各进行 100 次测试,结果均实现预期功能。

4.2.4 传感参数采集与反馈控制时延分析

在传感参数采集与反馈控制过程中, ZigBee 网络传输时延、Wifi 网络传输时延、ZigBee 终端节点参数采集与控制时延、ZigBee-Wifi 网关中协调器的串口处理与传输时延,以及节点休眠和唤醒时延等都将影响传感参数采集与反馈控制的时效性。除了节点休眠和唤醒时延外, ZigBee-Wifi 网关中协调器的串口处理与传输时延是影响时效的关键。在 ZigBee2007Pro 协议栈中,与串口时延有关的主要参数是 `nwk_globals.h` 中的 `BCAST_DELIVERY_TIME` 和 `_hal_uart_dma.c` 中的 `HAL_UART_DMA_IDLE`。经试验,若上述参数使用协议栈默认值,网关协调器串口处理与传输时延可达 2~3 秒;而将其分别修改为 10 和 $1 * HAL_UART_MSECS_TO_TICKS$ 后,时延可控制在 ms 级。

5 结语

根据开放实验室系统对环境参数采集及灯组、窗帘的远程及联动控制需要,设计了一种具备传感参数采集、设备控制、远程操作功能的现场控制器,利用光敏传感器、温湿度传感器、热释电红外传感器、门/窗磁传感器、端口扫描等方式采集环境参数或提取窗帘、灯组的运行状态,并通过 ZigBee 方式上传网关,

再由网关上报采集服务软件,最终在用户应用程序上展示环境参数及设备状态。根据需要,用户既可在下行链路中向现场控制下发指令,由现场控制器执行环境参数采集、灯组控制、窗帘控制等操作,又可以在应用程序中设置联动控制参数,由系统自动将采集的环境参数与预设阈值进行对比,并实时下发指令,实现对现场控制器的操作。该控制器已在四川信息职业技术学院的 20 余个实验室投入使用并展示了良好的稳定性和可靠性,成为了学院开放实验室系统中的重要组成部分。

参考文献

- 1 谢青,吴元喜,杨广笑.开放实验室管理模式的探索.实验科学与技术,2013,(4):162-163,167.
- 2 马华,吴沛林.高校开放式实验教学管理系统.计算机系统应用,2014,23(1):73-77.
- 3 曾宝国.开放实验室电源管理系统.实验室研究与探索,2013,32(3):255-262.
- 4 张敏.ZigBee 无线网络在开放实验室电源控制中的应用.科学技术与工程,2012,12(8):1920-1922,1927.
- 5 吕鑫,王忠.ZigBee 无线数据传输模块的设计与实现.安徽师范大学学报(自然科学版),2010,33(4):332-335.
- 6 戚敏敏,戚莹.基于 NCP1014 芯片的多路输出开关电源设计.江苏电器,2008,(12):2.
- 7 吴国平,杨仁刚,杜海江.一种基于 NCP1014 的反激式开关电源设计研究.电力电子技术,2010,44(1).
- 8 A True System-on-Chip Solution for 2.4-GHz IEEE 802.15.4 and ZigBee Applications. <http://www.ti.com>. [2014-09-09].
- 9 章伟聪,俞新武,李忠成.基于 CC2530 及 ZigBee 协议栈设计无线网络传感器节点.计算机系统应用,2011,20(7):184-187,120.
- 10 倪天龙.单总线传感器 DHT11 在温湿度测控中的应用.单片机与嵌入式系统应用,2010,(6):60-62.
- 11 DHT11 电阻式数字传感器温湿度模块. <http://www.aosong.com/>.
- 12 平青.基于物联网技术的城市照明控制系统[学位论文].苏州:苏州大学,2010.
- 13 曾宝国.基于 WSN 的水产养殖水质实时监测系统研究[学位论文].重庆:西南交通大学,2013.