

基于 ZigBee 与混沌加密的智慧实验室系统设计

康守强¹, 王金龙¹, 王玉静¹, 梁亚琦¹, 郑 势²

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080;

2. 中国移动通信集团黑龙江有限公司网络管理部, 黑龙江 哈尔滨 150028)

摘 要: 为提高高校开放型实验室的安全性及管理的智能化, 提出将物联网技术与混沌加密技术相结合的智慧实验室系统。该系统包括 ZigBee 网络控制子系统、网关模块、视频监控、服务器云平台、手机和 PC 客户端。可使用 IC 卡或手机 NFC 结合 RFID 和 ZigBee 技术控制实验室门禁、设备电源和照明, 所有控制信息均通过网关发送至服务器并同步到云平台; 网络摄像头获取监控信息并传送到服务器; 手机和 PC 客户端可远程访问服务器上所有信息以及控制实验室内的所有网络设备。手机与 ZigBee 网络通信时, 提出采用混沌对传输信息进行加解密, 密钥由两个超混沌系统离散化得到, 并采用置乱结合多轮异或的方式进行加解密。实验测试表明, 系统可实现实验室 24 小时无人值守开放管理, 在安全和远程智能管理方面有显著提高。

关键词: ZigBee 网络; 混沌保密通信; 远程智能管理; 智慧实验室; 近距离无线通信

DOI: 10.15938/j.jhust.2019.05.014

中图分类号: TP393; TN918 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2019)05-0081-07

Design of Smart Laboratory Based on ZigBee and Chaotic Encryption

KANG Shou-qiang¹, WANG Jin-long¹, WANG Yu-jing¹, LIANG Ya-qi¹, ZHENG Shi²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;

2. Network Management Department, China Mobile Group Heilongjiang Co. Ltd, Harbin 150028, China)

Abstract: In order to improve the security and management intelligence of the university open laboratory, based on the combination of Internet of things technology and chaotic encryption technology, the intelligent laboratory system is proposed. The system includes ZigBee network control subsystem, gateway, video surveillance, server cloud platform, mobile phone and PC client. We use IC (Integrated Circuit) card or NFC (Near Field Communication) combined with RFID (Radio Frequency Identification) and ZigBee technology to control laboratory entrance guard, power supply equipment and lighting. All control information is sent to the server via the gateway and synchronized to the cloud platform; the webcam gets the monitoring information and transmits it to the server; mobile phones and PC clients can remotely access all the information on the server and control all network devices in the lab. When mobile phones communicate with ZigBee networks, chaos is used to encrypt and decrypt transmission information, the key is obtained by the two hyperchaotic system discretization and scrambling combined multi wheel XOR is used for encryption and decryption. Experimental tests show that the system can realize the

收稿日期: 2017-09-15

基金项目: 黑龙江省青年科学基金(QC2014C075); 哈尔滨理工大学青年拔尖创新人才资助项目(201511); 哈尔滨理工大学教育教学研究项目(120150007, 220150004).

作者简介: 王金龙(1991—), 男, 硕士研究生;

王玉静(1983—), 女, 博士, 副教授.

通信作者: 康守强(1980—), 男, 博士, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: kangshouqiang@163.com.

laboratory 24 hours unattended open management and has improved significantly in security and remote intelligence management.

Keywords: ZigBee network; chaotic secure communication; remote intelligent management; smart labs; near field communication

0 引言

实验室是培养高校优秀毕业生动手能力和创新思维的重要场所,当代大学生需要在实验室学习现代的新知识、新技术,很多高校都相继建立了开放型实验室。开放型实验室建设的成效以及管理模式都会直接影响到高校的科研及教学质量,因此,高校智慧实验室系统的建设越来越受到高校的重视。

近年来物联网技术发展迅速,应用广泛,遍及智能交通、环境保护、政府工作、公共安全、智能家居和工业检测等多个领域,例如 ZigBee 技术和射频识别(Radio Frequency Identification, RFID) 技术等已经融入到日常生活中^[1-3]。文[4]将 ZigBee 技术运用到水浸系统,利用 ZigBee 无线传感器网络检测室内的漏水情况,并将采集的信息发送到手机客户端,达到了实时监控的目的。文[5]提出了一种 ZigBee 网络抵御 Sybil 攻击的方法,提高了 ZigBee 网络的安全性。云平台的发展让物联网更加贴近人们的生活,文[6]将云平台应用于智慧城市中,并给出云平台的基础框架,文[7]针对云平台下外包数据流不可信、验证范围不可控等问题,提出一种具有访问控制的外包数据流动态可验证方法。

目前我国很多高校均设立了供教学以及科研使用的开放型实验室,在建设信息化的开放型实验室的同时,很多问题也渐渐暴露出来。由于实验室人员进行实验和学习时间的不确定性,很难对所有人员的进出信息进行准确的记录,实验室使用时需要管理人员不定时反复的开关门与查看设备情况,管理人员不能随时随地对实验室进行远程控制,种种情况很大程度上增加了实验室管理的难度。同时,实验室的照明电源和工位电源通常是全天供给,这样不仅造成了电能的浪费,还增加了实验室的安全隐患^[8-9]。此外,随着网络技术的发展,信息安全也成为不可忽视的问题^[10]。如果实验室的控制信息没有经过加密直接在信道上发送,网络就会很容易被攻击所击破,导致信息泄露,对实验室关键设备的安全造成很大的影响。基于混沌的图像、语音、

视频、网络通信数据的加解密方法得到应用广泛^[11-14]。

为解决上述问题,提出将 ZigBee 技术和混沌加密技术应用在实验室管理系统中。在实验室建立 ZigBee 网络,使用 IC 卡或 NFC(near field communication)手机与 RFID 模块进行身份识别,从而联动 ZigBee 网络;通过网关模块和云平台实现远程控制;加入视频监控达到远程监控的目的。将手机终端和 PC 客户端远程控制信号进行混沌加密,提高系统的安全性,最终实现智能、安全和便于管理的智慧实验室系统。

1 ZigBee 技术

ZigBee 技术是一种具有统一技术标准的短距离无线通讯技术。其 PHY 层和 MAC 层协议为 IEEE 802.15.4 协议标准,网络层由 ZigBee 技术联盟制定,应用层的开发应用根据用户自己的应用需要对其进行开发利用,因此该技术能够为用户提供机动、灵活的组网方式。在组网性能上,ZigBee 设备可构造为星型网络或者点对点网络^[15]。在每一个 ZigBee 组成的无线网络内,连接地址码分为 16bit 短地址或者 64bit 长地址,理论上可容纳的最大设备个数 65 536 个,具有较大的网络容量。ZigBee 设备为低功耗设备,其发射输出为 0~3.6dBm,通信距离为 30~70m,具有能量检测和链路质量指示能力,根据这些检测结果,设备可自动调整其发射功率,在保证通信链路质量的条件下,最小地消耗设备能量^[16]。因此,ZigBee 技术完全适合高校智慧实验室短距离无线通讯使用。

2 密钥序列的产生及加密

混沌加密过程是利用迭代式(1)的混沌系统 1 和式(2)的混沌系统 2 产生的混沌序列,对指令序列进行置乱和反馈异或加密。

加密方案所使用的超混沌系统 1 为^[17]

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f_1(x, y, z, w) = a(y - x) + w \\ \dot{y} &= f_2(x, y, z, w) = cx - xz - y \\ \dot{z} &= f_3(x, y, z, w) = xy - bz \\ \dot{w} &= f_4(x, y, z, w) = -yz + dw \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: 取 $a=10, b=3/8, c=28, d=-0.06$, 此时系统处于超混沌状态, f_i 表示第 i ($i=1, 2, 3, 4$) 个方程中变量之间的关系。

使用的超混沌系统 2 为^[18]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f_1(x, y, z, w) = n(y - x) \\ \dot{y} &= f_2(x, y, z, w) = qx - xz + w \\ \dot{z} &= f_3(x, y, z, w) = xy - pz \\ \dot{w} &= f_4(x, y, z, w) = -rx \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: 取 $n=35, p=3, q=35, r=8.11$, 此时系统处于超混沌状态。

利用 4 阶龙格库塔离散化算法解超混沌系统方程, 龙格库塔算法的构建以数学为基础, 对误差采取一定措施进行抑制^[19-20]。根据数值分析理论, 得到龙格库塔的数学表达式为:

$$\left. \begin{aligned} x_1(n+1) &= x_1(n) + (K_{11} + 2K_{12} + 2K_{13} + K_{14})/6 \\ x_2(n+1) &= x_2(n) + (K_{21} + 2K_{22} + 2K_{23} + K_{24})/6 \\ &\vdots \\ x_N(n+1) &= x_N(n) + (K_{N1} + 2K_{N2} + 2K_{N3} + K_{N4})/6 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式(3)中取 $N=4, x_1, x_2, \dots, x_N$ 为方程(1)或方程(2)的自变量, 各递归参数 K_j 表示为:

$$\left. \begin{aligned} K_{11} &= f_1(x_1(n), x_2(n), \dots, x_N(n)) \Delta T \\ K_{12} &= f_1(x_1(n) + 0.5K_{11}, x_2(n) + 0.5K_{21}, \dots, \\ &\quad x_N(n) + 0.5K_{N1}) \Delta T \\ K_{13} &= f_1(x_1(n) + 0.5K_{12}, x_2(n) + 0.5K_{22}, \dots, \\ &\quad x_N(n) + 0.5K_{N2}) \Delta T \\ K_{14} &= f_1(x_1(n) + 0.5K_{13}, x_2(n) + 0.5K_{23}, \dots, \\ &\quad x_N(n) + 0.5K_{N3}) \Delta T \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中, $i=1, 2, \dots, N, N$ 表示方程阶数, 这里 $N=4$ 。

采用四阶龙格库塔的离散化算法解系统方程(1)和(2)产生两组混沌序列, 并改造为加密所使用的密钥, 两组混沌密钥作用于原文指令产生密文指令。

3 智慧实验室系统设计

3.1 系统功能

1) 门禁考勤: 将 ZigBee 技术和 RFID 技术结合,

实现师生一卡通(IC卡)和 NFC 手机开启门禁或管理员远程控制门禁开启, 同时实现对人员进出的感知和信息的传递, 达到考勤目的。

2) 专用设备: 将实验室设备与人员对应, 在实验人员开启门禁的同时联动对应的实验室设备电源开启, 也可单独使用一卡通控制设备电源通断。

3) 照明管理: 在光线不充足的条件下, 实验人员进入实验室时, 在光敏传感器作用下照明灯会智能开启, 也可在室内手动开启和关闭, 管理人员也可以远程控制照明电源的通断。

4) 视频监控: 设计中采用网络摄像头, 实时监控实验室, 录制和存储视频画面, 并且在监控室和远程终端上可以查看视频画面。

5) 远程终端: 当管理人员在局域网内, 可通过手机终端 APP 和 PC 客户端对实验室进行控制包括查看视频监控, 照明管理, 设备管理和门禁管理等; 当管理人员不在局域网内时, 手机终端 APP 和 PC 客户端通过查看云平台的数据来查看实验室内的状态和视频监控, 也可在远程实现控制功能。

6) 混沌保密通讯: 建设开放型实验室的同时要保障实验室安全, 将系统传输的控制信息进行混沌加密, 保证了信息传输的安全性。

3.2 系统模块设计

所设计的智慧实验室系统包括: ZigBee 网络控制子系统、网关模块、视频监控、服务器云平台、手机和 PC 客户端, 图 1 为系统结构图。

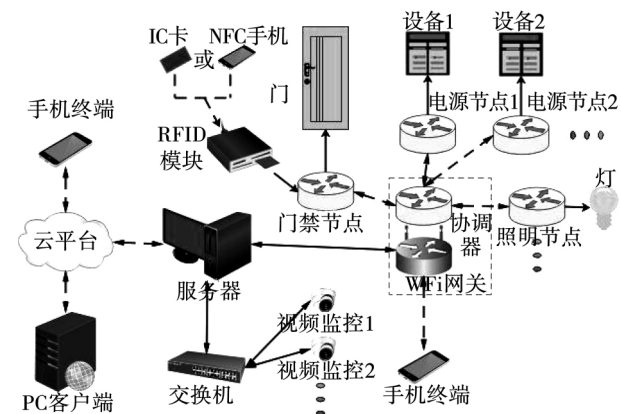


图1 智慧实验室系统结构图

Fig. 1 Structure of smart laboratory system

1) ZigBee 网络控制子系统包括 ZigBee 协调器节点、门禁节点、电源节点和照明节点。ZigBee 各节点选用 CC2530 芯片, 采用 32M 和 32.768K 双晶振, RFID 模块选用 RC522 芯片, EEPROM 选用 AT24C256 芯片。ZigBee 协调器节点负责构建 Zig-

Bee 网络,是 ZigBee 网络的中枢,选用广播方式与其他节点通讯; ZigBee 门禁节点与 RFID 模块连接,读取 IC 卡或 NFC 手机信息与外接 EEPROM 比对,信息正确后发送给 ZigBee 协调器节点,并且 ZigBee 门禁节点与磁力门锁相连,控制门的开关; ZigBee 电源节点接收 ZigBee 协调器信息,控制设备电源接通或断开; ZigBee 照明节点连接光敏电阻模块,结合室内是否有人及光线昏暗或者夜晚情况实现灯光开启或关闭控制。

2) 网关模块将 ZigBee 协调器节点与 WiFi 模块通过串口相连, WiFi 模块选用 RT5350 芯片,配合 Flash 存储芯片,通过配置实现 ZigBee 协调器与 WiFi 模块相互通信。

3) 视频监控系统将各实验室的监控摄像头连接到交换机上,并将交换机连接到服务器,服务器将拍摄到的视频画面存储和上传到云平台,视频监控摄像头采用 84H13p 高清网络监控摄像头。

4) 服务器收集 ZigBee 网络信息与视频监控画面,并将数据同步到云平台,云平台实现对数据的接收、存储、转发和应用。

5) 手机终端的应用程序使用安卓开发工具,利用 Java 语言编写,通过 Android 调试桥 adb 下载到 android 手机上运行。

6) PC 客户端采用 B/S 架构 HTML、CSS、JS 语言编写,PC 客户端通过访问云平台数据查看和控制 ZigBee 网络及视频监控。

4 实验结果与分析

1) 混沌加密测试: 手机终端在发送指令前将指令信号加密,网关模块收到指令后通过串口发送给 ZigBee 协调器, ZigBee 协调器将加密指令解密, ZigBee 协调器根据解密后的指令联动控制整个 ZigBee 网络。用两个超混沌系统 1 和超混沌系统 2 产生的密钥序列对原文数据进行快排和异或操作,产生密文数据。下面对快排操作和异或操作分别测试。

①快速排序置乱操作的思想是将无序的密钥序列进行快速排序,产生一组位置索引,有序的原文数据根据位置索引进行排序操作,这样就将原始有序的数据置乱了。恢复排序操作需要将密文数据根据位置索引进行恢复排序操作,即恢复出原文数据。以图像为例对快速排序算法测试,密钥序列由方程 (1) 产生; 原始图像和置乱后的图像如图 2 和图 3 所示,置乱恢复后的图像与图 2 基本相同。

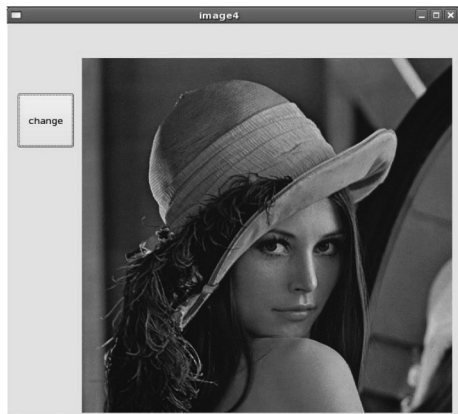


图2 原始图像

Fig. 2 The original image

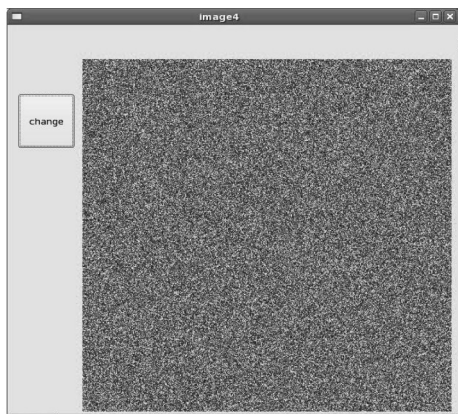


图3 置乱后的图像

Fig. 3 The scrambled image

②反馈异或操作分为第一轮反馈异或操作和第二轮反馈异或操作,第一轮反馈异或操作从数据的起始字节按顺序加密至最后的字节,对原始数据 $\{P(i) | i=1, 2, 3, \dots, L\}$ 按照公式 (5) 进行反馈。

$$\left. \begin{aligned} P'(1) &= \text{mod}(P(1) + C_0, 128) \oplus G_1(1) \\ P'(i) &= \text{mod}(P(i) + P'(i-1), 128) \oplus G_1(i) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中 C_0 为加密首个明文字节时引入的常数, $C_0 \in [0, 127]$, $i=2, 3, \dots, L$, $G_1(i)$ 是由方程 (1) 产生的密钥序列。加密后得到第一轮加密数据 $\{P'(i) | i=1, 2, 3, \dots, L\}$ 。

第二轮反馈从数据最后字节开始按逆序加密至开始字节,对 $P'(i)$ 按照公式 (6) 进行反馈。

$$\left. \begin{aligned} P''(L) &= \text{mod}(P'(L) + C_1, 128) \oplus G_2(1) \\ P''(n) &= \text{mod}(P'(n) + P''(n+1), 128) \oplus G_2(L+1-n) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

其中 C_1 为引入的常数, $C_1 \in [0, 127]$, $n=L-1, L-2, \dots, 1$, $G_2(n)$ 是由方程 (2) 产生的密钥序列。经过两轮加密得到最终的密文 $\{P''(n) | n=1, 2, 3, \dots, L\}$ 。

解密过程是反馈异或操作的逆过程,原始图像和恢复图像分别如图 2、图 4。

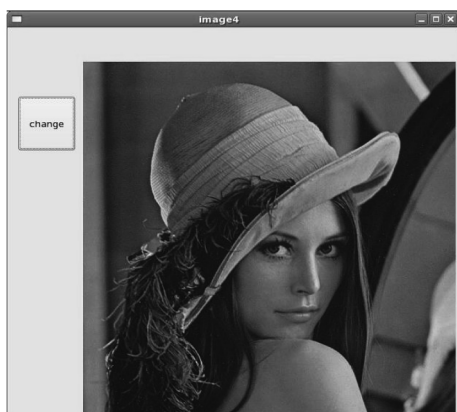


图 4 异或恢复后的图像

Fig. 4 The restored image after XOR

2) 手机终端测试: 手机终端包括视频监控、远程开关门、远程开关灯和远程开关电源功能,手机 APP 界面,视频监控画面分别如图 5、图 6。



图 5 手机终端界面

Fig. 5 Mobile terminal interface



图 6 视频监控画面

Fig. 6 Video surveillance screen

通过测试,可以实现手机终端对 ZigBee 网络的控制功能和视频监控功能。测试中手机终端和 ZigBee 协调器之间通过网关模块的 WiFi 信号相连,手机终端和 ZigBee 协调器之间的信号为混沌加密信号,以开关门为例:

开门的指令为:

“0x3A, 0x00, 0x01, 0x0A, 0x00, 0x31, 0x23”

加密后的密文为:

“0x2D, 0x46, 0x3C, 0x00, 0x72, 0x67, 0x32”

ZigBee 协调器接收到的指令后解密为:

“0x3A, 0x00, 0x01, 0x0A, 0x00, 0x31, 0x23”

手机终端加密发送,ZigBee 协调器上接收解密,即发即收,效果良好。

手机终端的视频监控画面清晰,存在略微的延迟(约 300 ms),可以实现实时监控的功能。

3) PC 客户端测试: PC 客户端实现的功能包括远程开关门、开关灯、远程开关设备电源和视频监控。通过测试,PC 客户端可以很好的完成远程控制和查看信息功能,稍有延迟(大约 500 ms)。

4) RFID 与 ZigBee 门禁节点调试结果分析: 当 RFID 模块识别 IC 卡后,读取卡内信息,并将卡内信息发送给 ZigBee 门禁节点,ZigBee 门禁节点收到信息后,将信息与 EEPROM 中的数据进行对比,如果数据无误,ZigBee 门禁节点将数据信息发送给 ZigBee 协调器,并控制门的磁力锁断电,3 秒钟后磁力锁恢复通电,如果不匹配就不进行任何反应。用示波器测得 RFID 识别 IC 卡信号如图 7 所示。

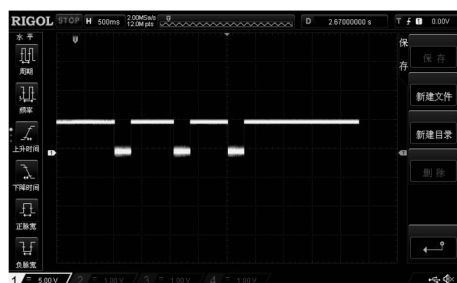


图 7 RFID 模块测试结果

Fig. 7 The test result of RFID module

图 7 中的高电平变成低电平代表 RFID 模块检测到 IC 卡,且 IC 卡信息与 EEPROM 中数据吻合,即为刷卡成功;低电平变成高电平处代表 RFID 模块将 IC 信息已发送至门禁节点且 RFID 模块回到检测模式。利用具有 NFC 功能的手机进行相应测试也得到类似实验结果。

5) ZigBee 协调器与 ZigBee 电源节点间调试结果: ZigBee 协调器节点是整个系统的核心,在这个调试过程中,希望协调器可以在接收到门禁节点传来信息时可以对内容进行解析,并联动控制 ZigBee 网络。当 ZigBee 协调器收到人员进入的信息时,联动相应的设备电源开启,当 ZigBee 协调器收到人员离开的信息时,联动相应的设备电源关闭。其结果如图 8 所示。

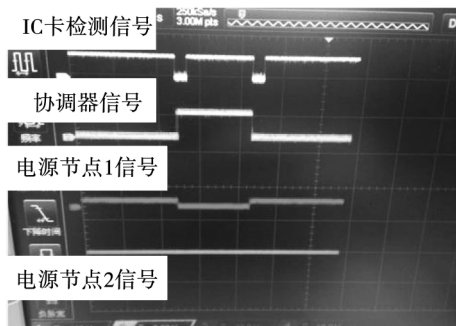


图 8 ZigBee 各节点测试图

Fig. 8 Test diagram of each node of ZigBee

图 8 中 IC 卡检测信号从高电平到低电平表示成功读取 IC 卡且 IC 卡有效, ZigBee 门禁节点将信号发给 ZigBee 协调器, 所以协调器信号从低电平变化到高电平并稍有延迟, 之后电源节点 1 信号从高电平变化到低电平, 说明 ZigBee 协调器接收到 ZigBee 门禁节点发送的消息, 并联动控制电源节点 1 打开设备电源; 当再次检测到 IC 卡时, 协调器信号从高电平变为低电平, 电源节点 1 信号从低电平变为高电平, 说明 ZigBee 协调器收到 ZigBee 门禁节点的信息, 并联动控制电源节点 1 关闭设备电源; 电源节点 2 信号没有电平变化说明电源节点 2 没有收到与其对应的消息, 不做任何响应。利用具有 NFC 功能的手机进行相应测试也得到类似实验结果。由此, 验证了协调器与设备电源节点之间通信功能已经满足设计要求, 照明节点进行类似测试, 可得到类似的实验结果, 证明照明节点可以完成既定功能。

6) 系统整体测试: 智慧实验室系统结合门禁考勤、视频监控、设备管理、智能灯光、远程控制等功能, 各模块之间联动完成整体功能, 智慧实验室整体调试如图 9。

通过测试, 在人员进出时, ZigBee 网络可以很好的联动, 视频监控系统可以完成实时监控和录像等功能。手机终端和 PC 客户端在控制 ZigBee 网络时有良好的即时性和准确性。



图 9 系统整体调试图

Fig. 9 Overall debugging picture of system

5 结 论

1) 设计了 RFID 与 ZigBee 的识别联动系统, 实现了 IC 卡和 NFC 手机的识别与实验室门禁、工位电源等设备的联动控制, 提高了实验室系统的兼容性, 可节约电能并使管理更加智能方便快捷; 设计了基于 ZigBee 和 WiFi 的网关模块, 实现了系统各节点的远程管理和控制。

2) 开发了手机终端 APP 和 PC 客户端软件, 实现了对实验室各硬件设备的无线及远程智能管理, 学生可预约授权进入实验室, 实现 24 h 无人值守, 减少了人力资源。同时可查看实验室任意时刻的监控画面, 提升了实验室的安防能力。

3) 从控制信息传输安全的角度, 提出了利用混沌序列对手机终端与网关之间的通信信息和服务器与网关之间的网络信息进行加解密。密钥序列由两个超混沌系统生成, 加密算法中引入密文反馈机制, 从而保证传输信息更加安全。

另外, 实验室管理涉及到的因素有很多, 所设计的智慧实验室系统的软件方面还需要进一步完善。

参 考 文 献:

- [1] 钱志鸿, 王义君. 面向物联网的无线传感器网络综述 [J]. 电子与信息学报, 2013, 35(1): 215.
- [2] 孙其博, 刘杰, 黎羲, 等. 物联网: 概念、架构与关键技术研究综述 [J]. 北京邮电大学学报, 2010, 33(3): 1.
- [3] 袁红林, 包志华, 严燕. 基于对数谱射频指纹识别的 RFID 系统信息监控方法 [J]. 通信学报, 2014, 35(7): 86.
- [4] 张贝贝, 周祖荣. 基于 ZigBee 技术的智能水浸系统设计 [J]. 计算机工程与设计, 2016, 37(11): 3130.
- [5] 郁滨, 黄美根, 黄一才, 等. ZigBee 网络抵御 Sybil 攻击的自适应链路指纹认证方案 [J]. 电子与信息学报, 2016, 38(10): 2627.
- [6] 李德仁, 姚远, 邵振峰. 智慧城市中的大数据 [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(6): 631.
- [7] 孙奕, 陈性元, 杜学绘, 等. 一种具有访问控制的云平台下外包

- 数据流动态可验证方法 [J]. 计算机学报, 2017, 40(2): 337.
- [8] 周健, 吴炎, 朱育红, 等. 信息化背景下高校实验室安全管理新趋势 [J]. 实验技术与管理, 2016, 33(1): 226.
- [9] 元文涛, 孙淑强, 樊冰. 基于信息化的高校实验室安全文化体系构建 [J]. 实验室研究与探索, 2016, 35(2): 295.
- [10] 沈昌祥, 张焕国, 冯登国, 等. 信息安全综述 [J]. 中国科学(E 辑: 信息科学), 2007, 37(2): 129.
- [11] 邓晓衡, 廖春龙, 朱从旭, 等. 像素位置与比特双重置乱的图像混沌加密算法 [J]. 通信学报, 2014, 35(3): 216.
- [12] 张朝霞, 禹思敏. 基于数字信号处理器的语音无线混沌通信——系统设计 与 硬件实现 [J]. 物理学报, 2010, 59(5): 3017.
- [13] 康守强, 郑建禹, 王玉静, 等. 混沌系统动态密钥与 RSA 联合的流媒体保密方法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2015, 20(4): 109.
- [14] 刘嘉辉, 颜景斌, 宋大华. 基于混沌的网络通信数据加密方法 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2007, 12(1): 32.
- [15] 杨柳, 穆浩森, 邓钧文, 等. 基于 ZigBee 无线传输的果园机车防撞防倾翻预警系统 [J]. 农业工程学报, 2014, 30(21): 25.
- [16] 黄学哲, 邓庆绪, 李传文, 等. 采用邻居节点的改进 ZigBee 路由选择算法 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2013, 34(12): 1703.
- [17] 王兴元, 王明军. 超混沌 Lorenz 系统 [J]. 物理学报, 2007, 56(9): 5136.
- [18] 刘明华, 冯久超. 一个新的超混沌系统 [J]. 物理学报, 2009, 58(7): 4457.
- [19] 李夏云, 陈传森. 用龙格-库塔法求解非线性方程组 [J]. 数学理论与应用, 2008, 28(2): 62.
- [20] 富明慧, 梁华力. 一种改进的精细-龙格库塔法 [J]. 中山大学学报(自然科学版), 2009, 48(5): 1.

(编辑: 温泽宇)