

基于无线自组网的灯光照明控制系统设计

王俊影, 李扬, 李伟明, 郝敏

(广东工业大学 机电工程学院, 广州 510006)

摘要: 目前, 灯光照明主要依赖现场开关的手动控制为主, 利用物联网技术实现灯光系统的无线遥控是一个新的发展趋势; 该文利用无线自组网技术通过 Openwrt 路由器的串口输出配合 Web 页面来控制自组网模块的中心节点, 继而对自带自组网模块的照明灯具进行无线控制, 从而实现对灯光系统的无线遥控; 再利用内网穿透技术将路由器的局域网延伸到广域网, 就进一步实现对灯光系统的 Web 远程控制; 该灯控方式无需在固定开关点进行操作, 利用联网计算机或移动终端即可随时随地进行灯光远程控制, 十分方便快捷; 该系统在工厂、学校、楼宇和大型公共场所等场合的灯光照明系统集中控制及远程控制中具有实际应用价值。

关键词: 灯光照明; 控制系统; 无线自组网; Openwrt 路由器

Design of Lighting Control System Based on Wireless Ad Hoc Network

Wang Junying, Li Yang, Li Weiming, Hao Min

(Faculty of Information Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: At present, lighting mainly relies on manual control of field switches. The use of Internet of Things technology to realize wireless remote control of lighting systems is a new development trend. In this paper, the wireless self-organizing network technology is used to control the central node of the self-organizing network module through the serial output of the Openwrt router and the web page, and then the lighting of the self-organizing network module is wirelessly controlled, thereby realizing the wireless remote control of the lighting system. The internal network penetration technology is used to extend the LAN of the router to the wide area Internet, and the remote control of the lighting system is further realized. The lamp control mode does not need to be operated at a fixed switch point, and the remote control of the light can be performed anytime and anywhere by using a networked computer or a mobile terminal, which is very fast and convenient. The system has practical application value in centralized control and remote control of lighting systems in factories, schools, buildings and large public places.

Keywords: lighting; control system; wireless ad hoc network; Openwrt router

0 引言

目前, 有线通信网络已十分成熟, 但对于网络物理线路依赖程度高且其在偏远未覆盖或设施损坏的区域却不能使用, 故无线网络通讯迅速崛起, 当下的移动通讯大多需基站支持, 而无线自组网技术能够在没有固定基站的地方进行通信^[1]。

本设计利用自组网以及无线物联网技术, 实现灯光照明系统的无线控制和远程网络控制; 该系统具有成本低、时延短、功耗低和网络容量大等优点^[2], 为智能照明开拓了一个新的发展方向。

1 无线自组网灯光照明控制系统的组成

无线自组网灯光控制系统原理如图 1 所示, 它包括一台上位机、ZigBee 无线自组网络和灯光系统。其中, 上位机连接 ZigBee 协调器, 无线自组网模块上传的数据经 ZigBee 协调器接收, 并与上位机进行通信; 上位机控制命令也经 ZigBee

协调器下发给无线自组网终端模块^[3]。ZigBee 模块包括主机模块和从机模块, 由一个网络协调器和若干个从机终端组成星型网络, 网络协调器与 PC 机相连, 其既要负责自动搜寻网络中的终端节点, 又要从终端节点获得 PC 机所需的数据, 实现终端节点与上位机之间的通信^[4]。

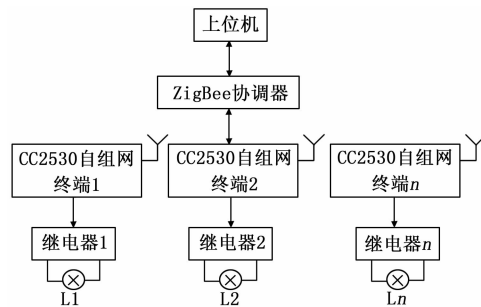


图 1 自组网灯光控制系统示意图

继电器控制灯光电路如图 2 所示, 当自组网终端的输出信号为高电平时, 三极管导通, 继电器通电, 其常闭触点 1 闭合从而连接了灯具电源, 灯具通电; 若自组网终端的输出信号为低电平, 三极管不导通, 继电器断电, 灯具也断电^[5]。在本控制系统中, 每个自组网终端控制一盏灯, 终端加入网络时由协调器为每盏灯自由分配一个 ID, 各个

收稿日期: 2019-10-17; 修回日期: 2019-11-07。

基金项目: 佛山市产学研专项资金项目(2012HC100195)。

作者简介: 王俊影(1993-), 女, 河南商丘人, 在读硕士, 主要从事热红外测温 and 无线自组网方向的研究。

节点将收集到的数据通过无线发送到协调器, 协调器将数据上传给上位机。同样, 上位机的控制命令也通过协调器发送给各个自组网终端, 从而控制灯光照明系统每一盏灯具的通断电^[6]。

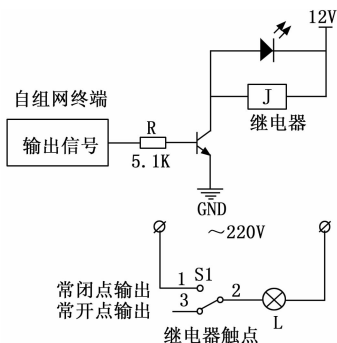


图 2 继电器控制灯光电路图

2 无线自组网技术

无线自组网是自制的无线多跳网络, 在没有基础网络设施时仍可提供通信环境, 自组网中的所有节点都能与其它节点保持动态联系, 节点能自由移动, 网络中没有固定的路由器, 每个节点都具备路由功能, 能够路由发现并维护其它节点的路由信息; 在无线覆盖范围局限的环境中, 某些节点不能直接通信, 而通过其它节点的转发进行数据通信^[7-8]。本设计选用了型号为 DL-LN33 的无线自组网模块, 具体参数如表 1 所示。

表 1 DL-LN33 无线自组网模块参数

| 参数名称 | 参数值 |
|---------|--|
| 型号 | DL-LN33 |
| 芯片选型 | CC2530 |
| 工作频段 | 2400~2450 MHz(16 种信道) |
| 通信接口 | UART 串口支持 13 种波特率, 默认为 115 200 |
| 自组网最大跳数 | 15 跳 |
| 单个传输距离 | 70 m |
| 可容纳的点数 | 190 个 |
| 最大数据包长度 | 63 Byte |
| 传输容量 | 每个包包含 3 Byte 数据时, 2400 Bit/s; 每个包包含 30 Byte 数据时, 10 KBit/s |
| 最大发送速率 | 250 Kbit/s |
| 丢包重传次数 | 最多 15 次, 最少 5 次 |
| 空中延时 | 单跳时小于 10 ms |
| 发射功率 | 4.5 dBm |
| 工作电压 | 2.5~3.6 V |
| 工作电流 | 小于 30 mA |
| 天线接口 | PCB 天线 |

DL-LN33 无线自组网模块上电后会自动组网, 模块工作时, 同附近的模块自动组成无线多跳网络, 即对等网络, 原理上不需要中心节点, 通过 UART, 微控制器 MCU 或者电脑即可告诉模块目标地址和待发送数据, 模块选择

最优的路径, 将信息传输给目标模块^[9]。本设计选定一个模块与路由器串口进行有线连接后, 作为中心节点给其他网络范围内的模块进行数据传输。

3 路由器设计

3.1 硬件设置

使用路由型号为普联 TP-LINK-WR842N 第四代版本, 此架构为多板分布式冗余备份, 能增强转发能力, 提高路由稳定性, 转发芯片支持对报文两层线速转发, 且多片交换芯片间可连接, 形成交换矩阵网络, 其原理如图 3 所示。微处理器选用高通的 QCA9533 芯片, 路由自带 UART 串口输出, 原厂闪存 ROM 容量为 4 M, 原厂内存 RAM 容量为 16 M。

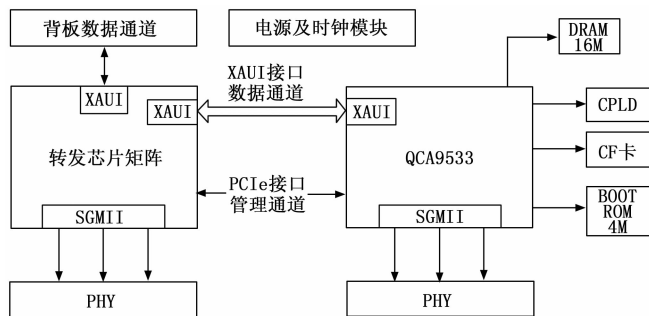


图 3 路由器原理图

3.2 软件设计

3.2.1 固件编译与刷写

切换到 Ubuntu 终端窗口, 进入命令行, 输入 sudo -sH, 输入装系统时设置的用户密码, 切换到 root, 切换到 root 是为了安装或升级部分必要的组件。切到 root 后, 给系统安装编译固件需要使用到的依赖包, 使用一条命令:

```
apt-get install g++ libncurses5-dev zlib1g-dev bison flex unzip autoconf gawk make gettext gcc binutils patch bzip2 libz-dev asciidoc subversion
```

命令中 install 后面的为各依赖包名称, 依赖包安装好后, 接下来下载固件源码进行编译, 直接使用固件的 Imagebuilder 进行固件的快速生成, 下载好 Imagebuilder 文件程序后, 在 Imagebuilder 文件夹界面运行终端, 直接执行 make image 命令即可在 Imagebuilder 的根目录的 bin/ar71xx 目录下找到所生成的固件, 固件的格式是以 .bin 的后缀结尾如图 4 所示。

```
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-tl-wr841n-v9-2019-2-21.bin
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-tl-wr841n-v9-squashfs-factory.bin
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-tl-wr841n-v9-squashfs-sysupgrade.bin
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-tl-wr841n-v10-squashfs-factory.bin
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-tl-wr841n-v10-squashfs-sysupgrade.bin
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-tl-wr847n-v8-squashfs-factory.bin
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-tl-wr847n-v8-squashfs-sysupgrade.bin
openwrt-15.05.1-ar71xx-generic-uimage-gzip.bin
```

图 4 固件的格式示意图

使用网线连接路由 lan 口和电脑，浏览器打开网址 192.168.1.1，进入 breed web 恢复控制台，在页面中固件一栏选择本文已编译出的固件上传更新，利用 uboot，以网页 web 的形式进行固件的刷写，待路由刷写完成并自动启动完成后，可以通过网页网址 192.168.1.1 对路由器进行访问，也可以使用 Putty 以 SSH 的形式登录到路由的微型 Linux 系统下进行固件刷写^[10]。

3.2.2 Linux 串口调试

串口调试需要用软件包 minicom，因此本设计在 Putty 界面输入命令：`sudo apt-get install minicom`，输入路由默认密码 admin 自动下载安装，该流程需要路由器在联网状态下，本文把该路由器作为二级路由以 wan 口用网线连接到上一级路由的 lan 口，二者的网关是不一样的。使用一个 USB 转 TTL 的模块 TX、RX 针分别与路由串口的 RX、TX 针用杜邦线连接，USB 连接电脑，电脑打开 SecurCRT 软件，打开外部串口，设置波特率为 115 200^[11]，打开串口，回到 Putty 的 SSH 登录页面，终端输入命令：

```
minicom-D /dev/ttyS0-b 115200
```

回车进入 minicom 控制台，在控制台输入字符，如输入字符“Hello”，对应的字符即可在电脑端的 SecurCRT 界面上显示，说明串口调试成功。

3.3 无线自组网模块控制命令

3.3.1 无线自组网模块的 PC 端配置与调试

DL-LN33 系列无线自组网模块以十六进制的格式用串口调试助手发送调试数据包，其配置与调试规则如表 2、表 3 所示。

表 2 读取模块信息数据包格式

| 功能 | 发送区数据 | 返回区数据 | 模块信息 | |
|----------|----------------------------|----------------------------------|-------|--------|
| 查询 IP 地址 | FE 05 90 21 00 00 01 FF | FE 07 21 90 00 00 21 BA 02 FF | 地址 | 0x20BA |
| 读取网络 ID | FE 05 90 21 00 00 02 FF | FE 07 21 90 00 00 22 16 20 FF | 网络 ID | 0x2016 |
| 读取信道 | FE 05 90 21 00 00 03 FF | FE 07 21 90 00 00 23 13 FF | 信道 | 0x13 |
| 读取波特率 | FE 05 90 21 00 00 04 FF | FE 07 21 90 00 00 24 08 FF | 波特率 | 0x08 |

表 3 修改模块信息数据包格式

| 功能 | 发送区数据 | 返回区数据 | 修改后 | 模块信息 |
|----------|----------------------------------|----------------------------|-------|--------|
| 修改 IP 地址 | FE 07 90 21 00 00 11 1F 00 FF | FE 05 21 90 00 00 00 FF | 地址 | 0x001F |
| 修改网络 ID | FE 07 90 21 00 00 12 91 19 FF | FE 05 21 90 00 00 00 FF | 网络 ID | 0x1991 |
| 修改信道 | FE 06 90 21 00 00 13 12 FF | FE 05 21 90 00 00 00 FF | 信道 | 0x12 |
| 修改波特率 | FE 06 90 21 00 00 14 02 FF | FE 05 21 90 00 00 00 FF | 波特率 | 0x02 |
| 重启包 | FE 05 90 21 00 00 10 FF | 无返回(模块绿灯亮两秒左右) | | |

模块可以通过 Pin4、Pin5 号引脚做高低电平的输出，具体的控制方式是：

0x11 命令控制端口输出高电平

0x10 命令控制端口输出低电平

对于既定已知 IP 地址的模块，例如地址为 0x01 的模块，使用十六进制格式发送命令“FE 05 90 44 01 00 11 FF”即可对 0x01 模块的 Pin4 引脚作高电平输出。对于每一个无线自组网模块，可以获得两个引脚的控制输出。在模块与所控制的设备在使用不同电源的情况下，需要让模块与所控设备作一个共地处理，否则可能会出现输出电平无法控制的后果。Pin4、Pin5 号引脚对应 TestTx 和 TestRx 引脚，如图 5 所示。

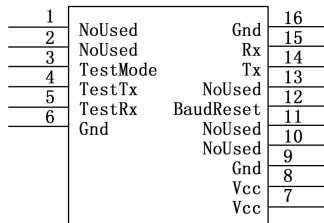


图 5 模块引脚图

3.3.2 无线自组网模块的 Openwrt 路由端调试

路由器 Linux 端的调试是使用 Putty 登录到路由器的后台终端页面。路由器上使用的串口号为“ttyS0”，按 Linux 的命令规则，向串口发送数据的命令为：

```
echo 'xxx' > yyy
```

其中 xxx 为需要发送的数据，yyy 为接收数据的设备号。控制命令为：

```
echo -en '\xFE\x05\x90\x45\x06\x00\x10\xFF' > /dev/ttyS0
```

其中 - en 选项为执行命令后不返回信息、不换行，若使数据以十六进制形式发送，只需在每一位数据前加上“\x”即可进行转换。

4 基于 Openwrt 路由的灯光控制 Web 页面的设计

4.1 Web 页面布局

在 Openwrt 中使用 Lua 语言实现 Html 语言的 Web 页面布局，根据 MVC 架构规则，在控制页面中出现传入参数，因此建立一个配置文件来存放所传入的参数，而这个配置文件的目录位置位于根目录下的 etc 下的 config 文件夹中^[12]，本设计的灯光控制程序名为：lightcontrol。需要建立 4 个基础文件及其目录分别为：

1) /etc/config/lightcontrol，配置文件内容。

格式为首行固定 config lightcontrol，option 后跟传入的参数变量名，引号内是对应变量的值的内容。

2) /usr/lib/luas/luci/controller/lightcontrol.lua，Controller 控制器程序定义的配置文件的地址，以及在调用了 model 下的 cbi 内的“lightcontrol.lua”模块，并将入口命名为“无线自组网灯光控制”，“1”为顺序优先级。

3) /usr/lib/luas/luci/model/cbi/lightcontrol.lua。

4) /usr/lib/luasrc/view/admin_system 分别建立了 lightcontrol1.htm、lightcontrol2.htm、lightcontrol3.htm、lightcontrol4.htm 四个 html 的模块供调用使用。View 下的 html 文件要求采用常规 html 网页编程语言进行编写, html 文件不需使用类似 `<html></html>` 的开头文件类型的标签, 只需在 `<% + cbi/valueheader% ><% + cbi/valuefooter% >` 之间编写常规 html 代码即可。

对 ImageBuilder 目录文件进行重新编译得到新的固件, 并刷新路由当前系统, 通过 web 登录到路由器 192.168.1.1 后台得到所设计的基于 Openwrt 路由的灯光控制 web 页面。

4.2 Shell 控制脚本语言

在脚本的首行使用命令声明该脚本需要用到的解析器以及解析器的位置, 如: “#! /bin/bash” 即说明该脚本需要用到根目录下的 bin 目录下的 bash 解析器。在声明之后换行编写需要执行的命令。

4.3 编写控制脚本

在 ImageBuilder 的根目录的 bin 文件夹内新建文件夹存放各个页面中所需要调用的脚本文件。

1) 在单个灯光控制页面中, 按钮按下就调用/bin/classroom 中的 test1 脚本, 首先, 使用 uci 命令读取配置文件 lightcontrol 里面变量名分别为 color1 和 status1 的值, 把值分别存放在 value1 和 value2 的新的局部变量中, 确保自组网模块四为控制单个灯光的状态。然后使用 if 语句对 value1 和 value2 的值进行判断, 如果 value1 值为 ‘red’, value2 值为 ‘低电平’, 则在此使用 uci 命令将配置文件 lightcontrol 面变量名分别为 color1 和 status1 的值更改为 ‘green’ 和 ‘高电平’, 同时向串口发送模块命令, 0x04 无线自组网模块的 Pin4 输出高电平, 实现同一个按钮可以同时实现开和关的功能。对于 color1 的 red 和 green 的值, 在 html 模块中对 color1 的值进行可读取, 并把读取到的值作为 html 编程中 font 标签中的颜色参数, 以此来实现对反馈状态的字体颜色的变化。如图 6 所示。

2) 在情景模式控制页面中, 用到的修改配置文件的方式是 model 页面参数改变并触发保存应用, 对页面的参数进行选择, 如情景模式, 点击“保存设置”按钮, 即可修改配置文件中对应变量的值, 点击“应用设置”来调用/bin/meetingroom 中预先编写好的可执行脚本。

脚本通过读取配置文件信息, 使用 if 语句进行状态判断, 从而按需求实现灯光控制。

3) 在定时循环开关控制页面中, 实现的是对指定灯光的定时开关。定时循环开关, 在预先设定好的时间段内, 实现使特定的灯光重复开关的功能, 时间段以秒起步, 小时封顶。代码中主要通过判断预设参数来重新调用预设的循环脚本, 其中使用的是 while 循环。

sleep 关键字作为延时功能, 将读取到的预设的时间作为 sleep 的参数, 实现在一个循环中延时, 如图 7 所示。

定时循环开关控制页面的定时开/关, 区别与定时循环开关功能, 该选项的时间设定是绝对时间, 表示在指定时



图 6 单个灯光控制 Web 页面



图 7 情景模式控制 Web 页面

间点进行动作, 其中可传入的参数有周、月、日、时、分、秒。Openwrt 的计划任务可以按照指定的时间去执行指定的命令。计划任务的配置文件位置位于/etc/crontabs/root 下, 本设计在 Shell 脚本中把预设的时间参数整合成一条计划任务命令, 将该命令写入到/etc/crontabs/root 中, 把编写好的定时开关的脚本命令为 warm_on, 放置到目录/bin/shine_time/下, 如图 8 所示。

4.4 编写控件的触发功能

在 model 页面模块中的按钮控件的 function 函数中设置在点击按钮时需要执行的命令, 该执行命令为执行预先编写好的特定目录下的 Shell 控制脚本文件。

设计至此, 已实现通过路由 Web 页面对无线自组网模块的控制, 从而实现对灯光系统的无线遥控。

5 基于 frp 内网穿透技术的远程控制

无线遥控仅限于路由器局域网内的控制, 如果离开的



图 8 定时循环开关 Web 页面

局域网, 便无法实现对灯光的控制。为了解决这个问题, 使用开源的内网穿透软件, 脱离局域网也能实现远程控制的功能。

5.1 申请临时阿里云 ECS 作为远程控制中转站

服务器中转访问是本地设备经由公网上的服务器转发实现对远程设备路由器控制页面的访问。本文采用“云服务器”+ openwrt 路由器 + frp (内网穿透软件) 实现这个功能。

5.2 Linux 下配置服务端 frp server (frps)

在根目录下新建一个名为 frps 的文件夹, 把下载好的 frp 软件中的 frps 和 frps.ini 文件拖拽到文件夹中, 双击 frps.ini, 修改配置, 将 bind_port 通信端口号设置为 7000, 并且把使用 http 访问页面的 vhost_http_port 端口号随意设置为 7007。

使用 Putty 远程登录服务器管理终端页面, 使用 cd 命令进入 frps 文件夹, 先使用 chmod 命令给两个文件赋予权限, 即:

```
chmod 777 frps
chmod 777 frps.ini
```

再使用 nohup 命令执行 frps 服务端程序, 并保持在后台运行, 即:

```
nohup ./frps -c ./frps.ini
```

运行结果如图 9 所示。

```
root@i2uf6911gb00q6mmanhaeyZ:~# cd /frps/
root@i2uf6911gb00q6mmanhaeyZ:/frps# nohup ./frps -c ./frps.ini
nohup: ignoring input and appending output to 'nohup.out'
```

图 9 运行结果图

至此, 在远程 Linux 下配置 frp 的服务端完成。

5.3 本地 Linux 下配置客户端 frp client (frpc) 并执行连接

使用 Winsep 登录到 192.168.1.1 本地路由系统文件目录, 在根目录下新建 frpc 文件夹, 把 frp 软件中的 frpc 和 frpc.ini 拖拽到文件夹中, 双击打开 frpc.ini, 将服务地址更改为我们的云服务器公网地址, 服务端同步为 7000, 添加一

个 web 命令块, type 类型为 http, 本地端口 local_port 设置为 80, custom_domain 为域名。

配置保存后, 运行 Putty 登录本地路由系统终端页面, 使用 cd 命令进入 frpc 文件夹, 给文件赋予可执行权限后, 执行命令:

```
./frpc -c ./frpc.ini
```

即可连接到云服务器, 在网址中使用公网地址加 http 端口号, 即实现远程登录路由页面并实现远程灯光控制。

5.4 配置 frp 开机启动及手动连接功能

使用内网穿透远程连接服务器, 可实现外网远程控制, 为解决调试中需手动输入执行连接命令的麻烦, 本设计编写了 Shell 执行脚本用于路由器开机后便自动执行连接服务器的操作, 步骤为: 在系统开机后, 使用 ping 命令检测路由器本身是否已经连接互联网, 如未连接互联网, 则不执行操作; 如已连接互联网, 则首先执行连接服务器的命令, 等待三秒后对地址 47.103.1.231:7007 进行检测是否连通, 如已连通, 则停止操作。如未连通, 继续返回执行连接命令。对于连接服务器与否, 也在 web 控制页面中给出状态反馈。

为了避免系统误判将未连接当成已连接, 而导致无法远程访问的现象, 本设计特意在控制页面中上方添加专门为手动连接服务器的按钮, 其原理是在灯控操作按钮的基础上, 修改其所执行的命令。

6 实验结果与分析

设计制作软硬件实物之后, 对该灯光控制系统进行了调试检验, 包括单个灯光的网页开关控制、灯光组的情景模式开关控制和定时模式下时长、指定时间、指定灯光类型的开关调节, 以及远程页面访问控制等。测试结果表明, 所设计的系统能够实现灯光组的控制和调节需求, 整个系统运行稳定, 实时性好, 操作方便, 满足设计要求。该灯光系统的远程控制台界面如图 10 所示。



图 10 远程页面访问控制

7 结束语

本设计使用 Openwrt 路由器串口输出控制无线自组网模块, 通过模块控制继电器来控制灯光系统。在路由器控制方面, 设计 Web 控制页面以及使用 Shell 脚本语言作为控

制程序,并且 Web 和 Shell 两者相联系形成一个完整的控制系统。在远程控制方面,采用开源的 FRP 内网穿透软件,分别在远程服务器和本地服务器配置好 FRP 软件,从而将本地控制页面映射到远程服务器上,实现远程的页面访问控制。该系统具有智能化、功耗低、成本低、时延短等优点,在灯光照明系统中具有较大应用价值。

参考文献:

- [1] 刘建金. 无线自组网中可自维护的拓扑控制算法研究 [D]. 长沙:中南大学,2018.
- [2] 鲁进,郭利进. 基于 ZigBee 的 LED 路灯照明系统设计与研究 [J]. 微型机与应用,2013,32(9):78-80.
- [3] 刘玉良,杨伟明,张志允. 基于 CC2530 的无线自组网太阳能路灯控制系统 [J]. 天津科技大学学报,2014(1):59-64.
- [4] 王军,程增艳,朱秀林. 基于 ZigBee 的滴灌自动控制系统的研究 [J]. 数字技术与应用,2012(1):3-4.

(上接第 69 页)

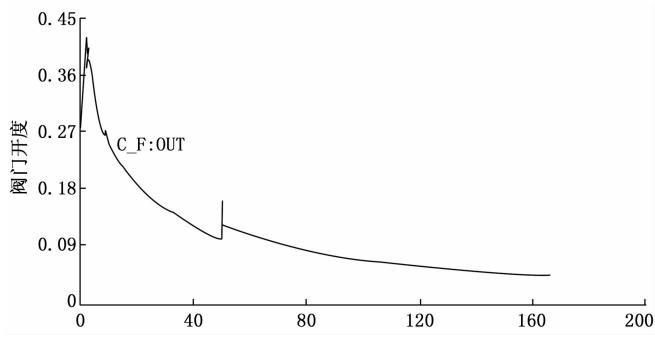


图 10 单纯 PID 控制器输出

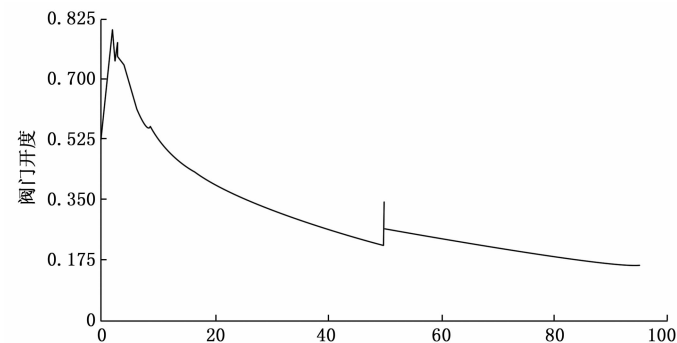


图 11 添加前馈控制后控制器输出

效果输出对比可以看出,调节阀特征改变时添加前馈之后的输出明显增大,这就使得控制效果更加迅速,调节阀能够快速达到设定值。并且前馈作用保持实时的输出,对 PID 控制器进行补偿,使得调节速度大大加快。

并且,系统增加前馈与未增加前馈相比,由于它们的传递函数分母是相同的,则传递函数的极点是相同的,因此在增加前馈情况下并不会影响整个系统的稳定性,而且在不改变原系统结构和参数的情况下,增加前馈更是有利于提高系统的稳定精度,动态性能也比较容易保证。因

- [5] 杨超,王雷. 无线自组网太阳能路灯控制器设计 [J]. 自动化仪表,2012,33(5):25-27.
- [6] 刘宁宁. 教室照明智能控制系统的研究与开发 [D]. 天津:天津大学,2014.
- [7] 王真真,尹晓伟,宋树丽,等. 无线自组网的技术研究 [J]. 信息通信,2019,195(3):72-73.
- [8] 杨晓娇. 小型化无线 MESH 路由器研究及实现 [D]. 西安:西安电子科技大学,2014.
- [9] 李旭彦. 基于 ZigBee 的无线通信模块射频电磁场抗干扰性能研究 [D]. 保定:华北电力大学,2012.
- [10] 陈晓狮,骆德汉,张奎宝,等. 基于智能路由器的楼宇设备监控系统设计 [J]. 信息通信,2016(7):108-109.
- [11] 张敏. 基于北斗通信的 WSN 区域监测系统数据传输技术研究 [D]. 青岛:中国石油大学,2014.
- [12] 夏则恒. 基于 Wi-Fi 的遥操作移动机器人研究 [D]. 南京:南京林业大学,2016.

此,前馈加反馈控制方案可以完全取代 PID 参数的在线整定。

4 结束语

本文系统全面地阐述了造成天然气分输站场控制稳定性差的根本原因基础上,提出了前馈-反馈控制的整体控制策略。为了克服长期稳定自运行过程中因调节阀流量特性发生变化以及上下游压力和流量扰动变化带来的执行误差影响,提出了基于广义回归神经网络和头脑风暴优化算法的自适应方法。最后,基于 SPS 仿真对比实验的结果表明所提控制策略以及自适应规则很好地解决了当前天然气分输站场控制中遇到的难题。

参考文献:

- [1] 周湃,姜希彤,陆津津,等. 天然气管道分输站场调压系统调节方法的改进 [J]. 油气储运,2018,37(3):356-360.
- [2] 杨康. 天然气管道分输站场调压系统研究 [J]. 石化技术,2018,25(10):71.
- [3] 安鹏飞,胡剑峰,罗成相,等. 天然气站场自力式调压截断系统的技术及应用研究 [J]. 化工管理,2015,14:91-92.
- [4] 华贲,岳永魁,赖元楷. 天然气能源利用技术在中国的发展战略探讨. 天然气工业,2004,24(7):1-4.
- [5] 郑云萍,肖杰,孙啸,等. 输气管道仿真软件 SPS 的应用与认识 [J]. 天然气工业,2013,11:104-109.
- [6] 黄靖雅,梁光川,周军. 基于 SPS 软件的输气管网调峰分析 [J]. 化工管理,2017(2):30.
- [7] 沈掌泉,孔繁胜. 基于广义回归网络的动态权重回归神经网络集成方法研究 [J]. 计算机应用研究,2005,12:41-43.
- [8] Specht D F. A general regression neural network [J]. IEEE Transaction on Neural Network, 1991,2(6):568-576.
- [9] 杨玉婷,史玉回,夏顺仁. 基于讨论机制的头脑风暴优化算法 [J]. 浙江大学学报:工学版,2013,47(10):1705-1711.
- [10] 林诗洁,董晨,陈明志,等. 新型群智能优化算法综述 [J]. 计算机工程与应用,2018,12:1-9.