

剧院观演空间环境参数自动测试系统研究

任慧^{1,2,3}, 赵博^{1,2,3}, 彭景^{1,2,3}

(1.中国传媒大学 信息与通信工程学院, 北京 100024;

2. 视听技术与智能控制系统 文化和旅游部重点实验室, 北京 100024;

3. 现代演艺技术北京市重点实验室, 北京 100024)

摘要: 为了保障剧院表演者的表演效果、观众的观看感受和自动化舞台设备的正常运行, 国家对剧院观演空间环境温湿度、二氧化碳、背景噪声等多个参数进行了标准规定。目前国内外剧院环境参数测试均采用人工独立测试, 没有集成化、自动化测试系统。为此, 本文采用 ARM 嵌入式技术对多参数进行实时采集、处理、显示以及通过以太网的形式将环境参数传输到其他系统进行集中管理、远程监控和数据存储等。系统硬件主要由 ARM 内核微控制器为核心的主控电路、RS485 通信接口、LCD 液晶显示触摸屏以及支持 Modbus RTU 协议的若干环境传感器等组成; 系统软件是在移植 UCOSII 操作系统、LWIP 网络协议栈的基础上, 完成了各功能模块的程序设计。通过系统调试, 结果表明该系统具有较高的可靠性、稳定性和扩展性, 可以很好的完成剧院观演空间环境参数自动测试任务, 具有一定的实用价值和应用前景。

关键词: 剧院观演空间; 环境参数; 自动测试系统; Modbus RTU 协议; UCOSII 操作系统; LWIP

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A

Research on automatic test system for environmental parameters of theater performing-watching space

REN Hui^{1,2,3}, ZHAO Bo^{1,2,3}, PENG Jing^{1,2,3}

(1.School of Information and Communication Engineering, Communication University of China, Beijing 100024, China;2.Key Laboratory of Acoustic Visual

Technology and Intelligent Control System, Ministry of Culture and Tourism, Communication University of China, Beijing 100024, China;

3.Beijing Key Laboratory of Modern Entertainment Technology, Communication University of China, Beijing 100024, China)

Abstract To ensure the performance effect of performers, the watching feeling of audience, and the normal operation of automatic stage equipment, a national standard is made, including the temperature and humidity, carbon dioxide, background noise, and other environmental parameters in the theater. Now, both domestic and overseas adopt independent manual testing without an integrated and automated measurement system. To this end, this paper applies an embedded technology based on ARM to collect, process, display the parameters in time and transmit the environmental parameters to other systems in the form of Ethernet for centralized management, remote monitoring and data storage. The system hardware is mainly composed of the main control circuit with ARM core microcontroller as the core, RS485 communication interface, LCD touch screen, and several environmental sensors supporting Modbus RTU protocol. The system software completes the program design of each functional module based on transplanting the UCOSII operating system and LWIP network protocol stack. Through the system debugging, the results show that the system has high reliability, stability, and expansibility, and can well complete the automatic test task of environmental parameters of theater. It has certain practical value and application prospects.

Key words: theater performing-watching space; environment parameters; automatic test system; Modbus RTU protocol; UCOSII operating system; LWIP

1 引言

剧院是一个用来表演话剧、歌剧、歌舞等文化艺术活动的场所，在文娱活动演出期间，室内舞台设备和机械的运行、相关人员的密集流动都会导致剧院室内噪声、温度、相对湿度和二氧化碳等环境参数的变化扰动。上述环境参数的变化会直接影响表演者的心理、身体状态，观演者的观看感受，进而影响整个剧院演出效果。为保障剧院的演出效果和观众的观看感受，国家在《剧场建筑设计规范》（JGJ 57-2016）中对剧院室内的一些环境参数制定了相关标准，如在设有空气调节的剧院内，夏季室内相对湿度应在 40%-70%之间，温度应在 24°C-28°C之间，稳定状态下二氧化碳的允许浓度小于 0.25%，对于升降乐池及台口内舞台设备运行时的噪声，在观众席第一排中部应小于 60dB(A)。此外，对于目前配置复杂、规模大、精度高、高度集成化、自动化和信息化的舞台设备来说，合适的剧院室内环境是其安全稳定运行以及保证演出安全和人身安全的必要条件^[1]。

目前，国内外对于剧院室内环境参数的测试只有单点、单一且非自动、非实时的手持式设备，还未有综合的多参数自动测试系统。因此，针对此问题，本文以 STM32F407ZGT6 微控制器的主控电路、LCD 液晶显示触摸屏、RS485 通信接口、环境传感器以及 Modbus RTU 通信协议、UCS0II 操作系统、LWIP 网络协议栈等软硬件为基础，研究设计了剧院观演空间环境参数自动测试系统。

2 系统硬件设计

2.1 系统总体硬件结构

系统总体硬件结构如图 1 所示，其工作原理是主控电路按照 Modbus RTU 通信协议与 RS485 通信接口相连的四个 CO₂、温湿度一体化传感器和四个噪声传感器进行通信，RS485 通信接口负责转发主控电路的下传命令和传感器的上传数据，主控电路收到由传感器发送来的环境数据后进行处理和转换，并将其显示在 LCD 液晶屏上。屏幕共设置 6 个显示页面，第 1 页为开机界面，第二页为剧

院环境参数选择页面，其余 4 页分别对应相对湿度、温度、二氧化碳浓度和噪声分贝值的界面显示，通过触摸屏实现不同页面间切换。同时，主控电路可以通过以太网或串口（RS232 标准）的方式直接或间接的将环境数据向上传送给具有以太网接口的上位机系统进行集中管理、远程监控和数据存储等。

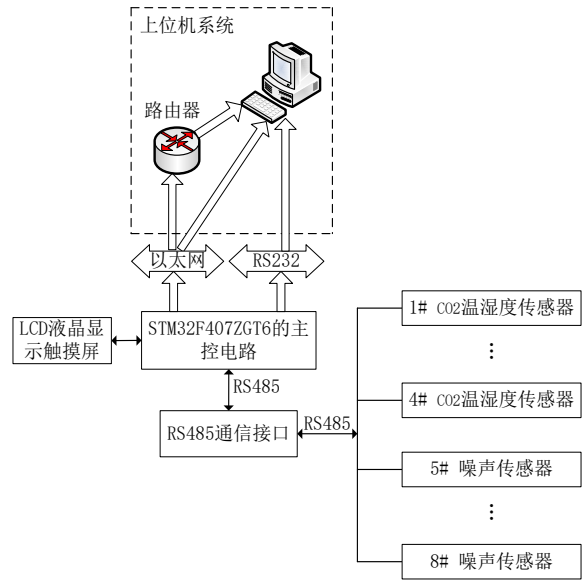


图 1 系统总体硬件结构图

2.2 主控电路设计

主控电路结构如图 2 所示，STM32F407ZGT6 是主控电路的核心，它是完全围绕 ARM Cortex-M4 内核构建的微控制器，有着非常丰富的资源，如集成 FPU 和 DSP 指令、192KB SRAM、1024KB FLASH、12 个 16 位定时器、位定时器、2 个 32 位定时器、10/100M 以太网 MAC 控制器、FSMC 以及各种常用通信接口等，集高性能与低功耗于一身，从而为计算机应用提供了很好的解决方案。

由于 STM32F407ZGT6 内部存储资源有限，且系统的软件设计需要移植 UCS0II 操作系统和 LWIP 协议栈，所以为了满足系统的运行内存需求和字库存储，主控电路中加入了 1MByte SRAM 和 128Mbit FLASH。同时为了方便下载程序代码和调试，板载了 SWD 接口电路。

因为主控电路要通过 RS485 接口与传感器通信，并且可以将采集到的环境数据通过以太网传输到上位机进行集中管理、远程监控和数据

存储，所以在设计主控电路时需要包含 RS485 接口电路和以太网接口电路，并且增设了一个 RS232 接口电路以增加数据传输接口的多样性。

LCD 接口用于外接显示环境参数的 LCD 液晶显示触摸屏，触摸控制显示屏的翻页，LED 用于指示电源状态和程序运行状态，引出的 SPI、IIC 等 I/O 口用于增加更多的外部设备。

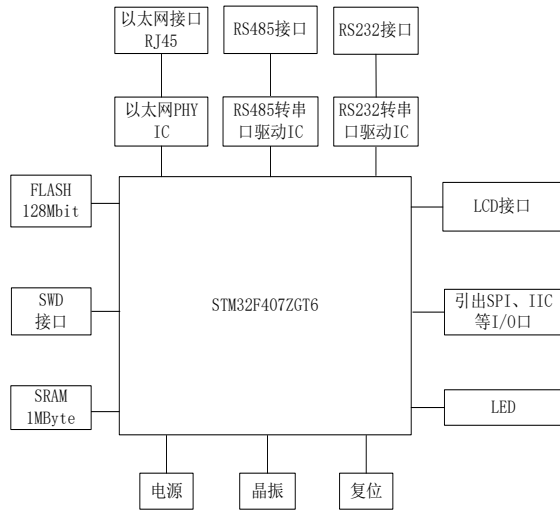


图2 主控电路结构图

3 系统软件设计

3.1 Modbus RTU通信协议分析

Modbus 是一种串行的、非同步的通讯协议和全球通用的工业标准，此协议无需特别的接口，典型的物理接口是 RS485^[2]。通过此协议，控制器相互之间、控制器经由网络和其它设备之间可以通信，不同厂商生产的控制设备可以连成工业网络，进行集中监控^[3]。Modbus 协议规定了主节点的请求的格式、功能码、错误检测域等。

控制器通信使用主—从技术，即仅主设备能初始化传输（查询），从设备根据主设备查询提供的数据作出相应反应。Modbus 协议建立了主设备查询的格式：设备地址、功能代码、所有要发送的数据、错误检测域。主-从查询、回应周期如图 3 所示。

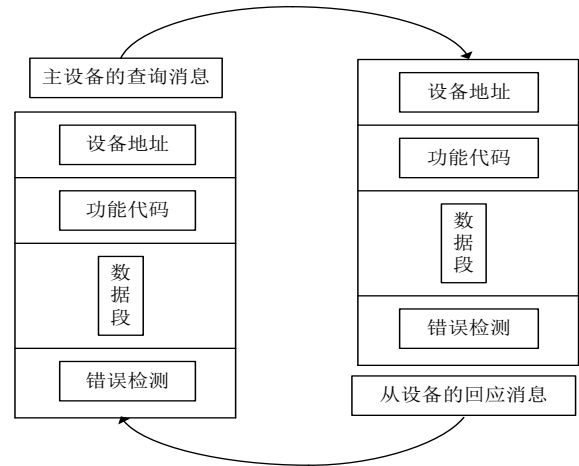


图3 主-从查询、回应周期图

RTU（远程终端单元）是 Modbus 的两种传输模式之一，当控制器设为在 Modbus 网络上以 RTU 模式通信，消息中的每个 8Bit 字节包含两个 4Bit 的十六进制字符。其数据帧如表 1 所示。

表 1 RTU 数据帧

设备地址	功能代码	数据	CRC校验高位	CRC校验低位
8Bit	8Bit	n个8Bit	8Bit	8Bit

使用 RTU 模式，消息发送至少要以 3.5 个字符时间的停顿间隔开始，在最后一个传输字符之后，至少 3.5 个字符时间的停顿标志着传输的结束。

整个消息帧的传输必须连续进行。

标准的 Modbus 协议有两种错误检测方法：奇偶校验和帧检测（LRC、CRC），RTU 模式下，消息帧包含了基于 CRC 方法的错误检测域，CRC 域是两个字节，是一个 16 位的二进制值。它由传输设备计算后加入到消息中，接收设备收到消息后重新计算 CRC，并与接收到的 CRC 域中的值比较，如果两值不同，则有误。

3.2 UCOSII操作系统与LWIP协议栈

3.2.1 UCOSII 操作系统

本系统移植了 UCOSII 操作系统，UCOSII 由 Micrium 公司提供，是一个可移植、可固化、可裁剪、可固化、执行效率高、占用空间小、抢占式多任务实时内核，它适用于多种微处理器，微控制器和数字处理芯片，该系统源代码开放整洁、一致，注释详尽，适合系统开发^[4]。UCOSII 最多可以管理 60 个任务，可以供用户使用的任务

数最多为 56 个。

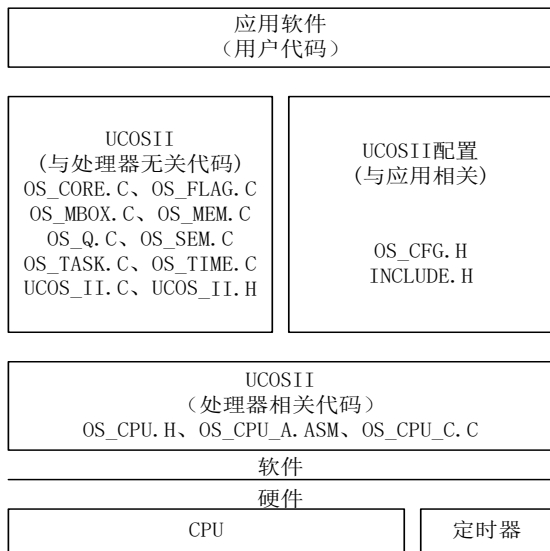


图 4 UCOSII 软硬件体系结构图

UCOSII 的软硬件体系结构如图 4 所示，主要分为应用层、中间软件层和硬件层，中间软件层为 UCOSII 源码内容，移植工作需要结合其体系结构进行，具体步骤为：移植准备（基础工程、UCOSII 源码下载）→在基础工程中按图 4 中间软件层的分类建立 UCOSII 相关文件夹→UCOSII 源码分类存入文件夹→UCOSII 有关文件加入到工程中→屏蔽 ucoss_ii.h 中的 app_cfg.h，添加 includes.h→屏蔽 stm32f4xx_it.c 中的中断服务函数 SysTick_Handler、PendSV_Handler→开启 sys.h 中支持 os 的宏定义 SYSTEM_SUPPORT_OS。经过以上步骤，可完成 UCOSII 的移植。

3.2.2 LWIP 协议栈

LWIP 协议栈是瑞典计算机学院的 Adam Dunkels 开发的一个小型开源的 TCP / IP 协议栈，LWIP 是 Light Weight (轻型)IP 协议，即可以运行操作系统上，也可以运行于无操作系统环境^[5]。因为它只需要很小的 RAM 和 ROM 便可运行，所以适合在中低端嵌入式系统中使用。LWIP 提供 RAW、SOCKET 和 NETCONN 三种接口方式。本系统采用的接口方式为有操作系统的 NETCONN API。

LWIP1.4.1 版本的源码内容如图 5 所示，其中 src 文件夹是移植的重点，该文件夹由 api、core、include、netif 四个文件夹组成。api 文件夹里面是 Sequential API 以及 Socket API 两种接口函数的源码，core 文件夹里面是 LWIP 内核源码，include 文

件文件夹里面是 LWIP 相关的头文件，netif 文件夹里面是与网络底层接口有关的头文件。

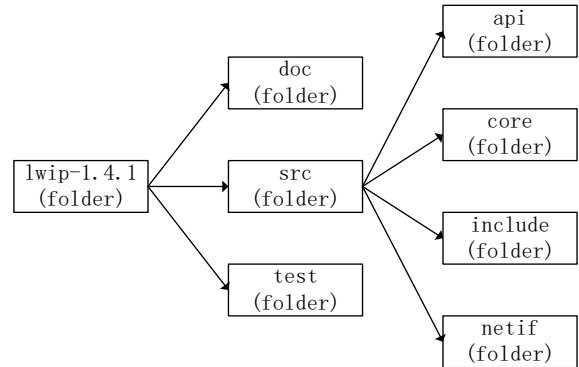


图 5 lwip-1.4.1 源码内容

有操作系统 LWIP 的移植步骤具体为：移植准备工作(基础工程、LWIP 文件下载、ST 以太网库)→添加及修改 ST 以太网库→添加网卡驱动程序→LWIP 数据包和网络接口管理→添加 LWIP 源文件→添加及修改 arch、lwip_comm 等中间文件→LWIP 源码修改→LWIP 的裁剪与配置。经过以上步骤，可完成 LWIP 的移植。

3.3 系统程序设计

3.3.1 UCOSII 用户任务设计

本系统共设计了六个 UCOSII 用户任务，任务参数如表 2 所示，其中 TCPSERVER 任务用于创建 TCP 服务器线程，LWIP_DHCP 用于获取动态 IP 地址、子网掩码以及默认网关等，GET_DATA 任务用于实现传感器数据获取与处理、触摸检测翻页、TCP 传输数据处理等功能，TCP 任务用于实现 LWIP 初始化、TCP 服务器初始化、DHCP 任务等，LED 任务用于检测系统运行情况，START 任务用于创建 GET_DATA、TCP、LED 任务。

表 2 任务参数

任务名	优先级	堆栈大小	任务函数
TCPSERVER	6	300	lwip_dhcp_task()
LWIP_DHCP	7	128	tcp_server_thread
GET_DATA	8	128	getdata_task()
TCP	9	128	tcp_task()
LED	10	64	led_task()
START	11	128	start_task()

3.3.2 系统主程序设计

系统首先进行HAL库、时钟、延时、USART、USMART、LED、RS485、触摸屏、外部SRAM、外部FLASH、内存池等相关功能和外设的初始化，然后对UCOSII初始化，初始化成功后创建START任务，最后开启UCOSII。主程序流程图如图6所示。

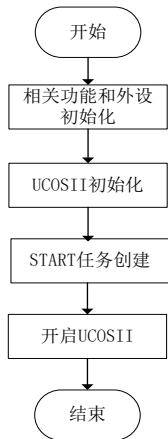


图6 主程序流程图

3.3.3 系统功能模块程序设计

(1) 基于 Modbus RTU 协议的 RS485 通信程序

根据 Modbus RTU 协议主设备的查询格式，依次将设备地址、功能代码、所有要发送的数据，CRC 校验函数计算的校验值存入发送数组，在发送命令后，依据数据段长度的不同分别将接收到的且校验无误的温湿度、CO₂ 和噪声数据存入不同的缓存数组。具体通信流程如图7所示。

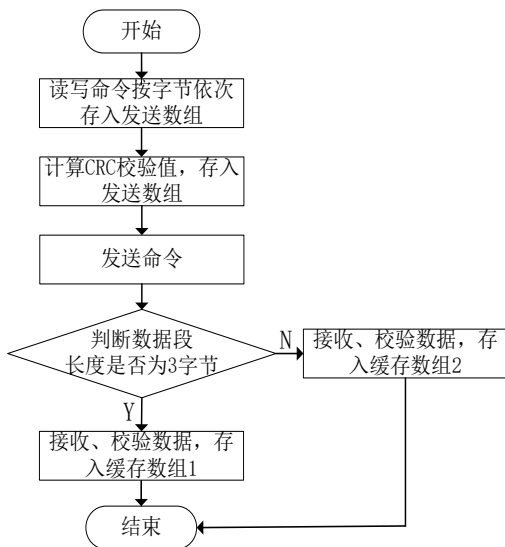


图7 RS485 通信流程图

(2) 传感器数据获取与处理程序

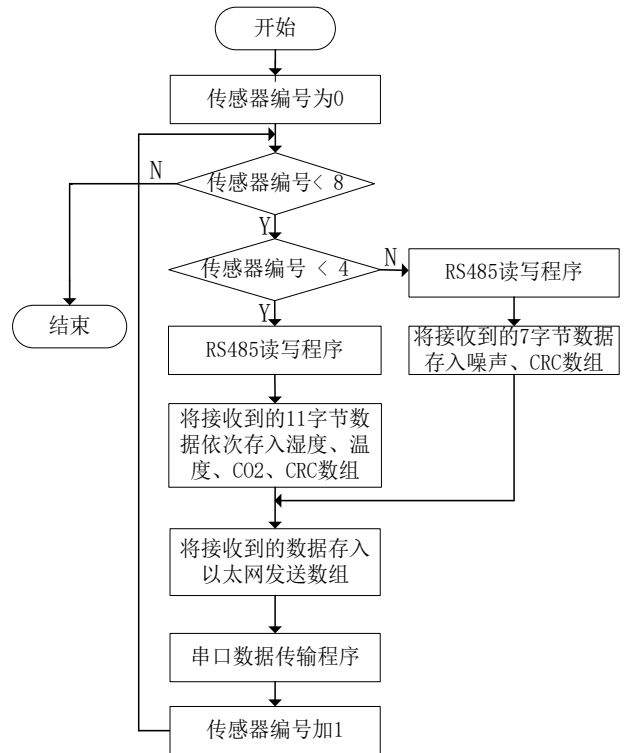


图8 传感器数据获取与处理流程图

八个传感器的地址码依次被设定为01H-07H，依据地址码八个传感器分别被编号为0-7，前四个为温湿度、CO₂ 传感器，后四个为噪声传感器。当传感器编号小于4时，将获取到的原始数据存入以太网发送数组，将处理后的数据依次存入湿度、温度、CO₂ 和CRC数组，当传感器编号大于4时，将获取到的原始数据存入以太网发送数组，将处理后的数据依次存入噪声和CRC数组。具体流程如图8所示。

(3) TCP 连接与数据传输程序

为了节省 CPU 资源，加快运行速度，经由以太网向上位机传输的环境数据需要先经过缓存处理，当缓存完一次采集的所有传感器数据时（72 个字节）下位机将数据打包后（加入 CRC 校验）发送到上位机进行分析、图形化显示和存储，发送过程是在 TCP 服务器线程进行的，其具体流程如图9所示。

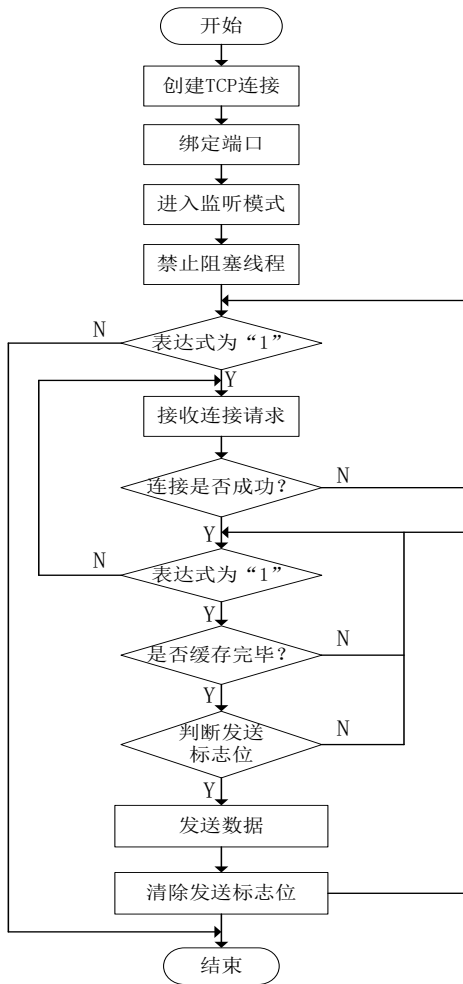


图9 TCP连接与数据传输流程图

(4) LCD显示程序

根据功能需求，系统共设计了开机、参数种类选择、湿度、温度、CO₂、噪声界面六个界面，界面页数依次被设定为 0-5，界面的选择显示由界面页数确定，其具体显示方式和过程如图 10 所示。

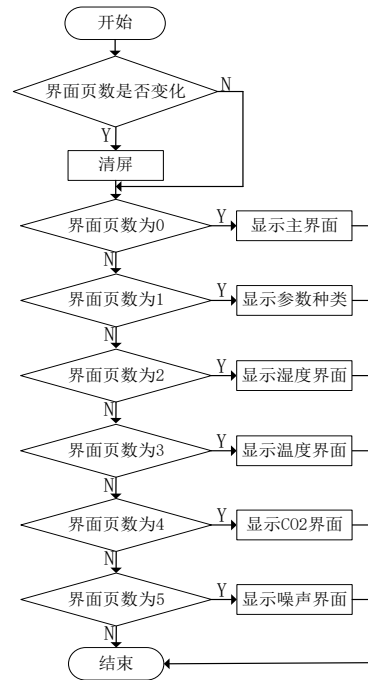


图10 LCD显示流程图

(5) 触摸检测翻页程序

本系统在触摸屏上共设定了“进入系统”、“湿度”、“温度”、“CO₂”、“噪声”、“返回”等六个触摸按键，当在相应界面触摸按键被按下时，系统会执行界面跳转动作，具体触摸控制流程如图 11 所示。

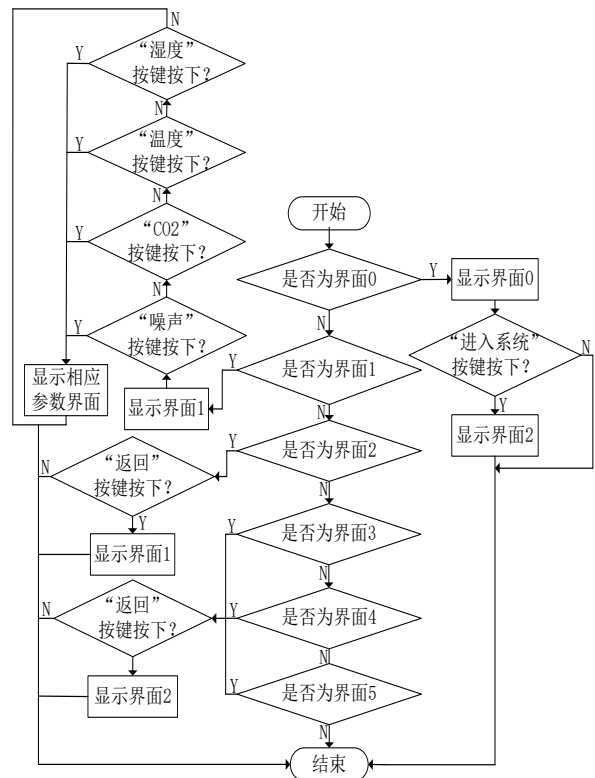


图11 触摸检测翻页流程图

(6) 串口数据传输程序

当获取到一个传感器采集的环境参数时，经 RS232 标准串口传输数据的过程如图 12 所示，串口依据传感器编号是否大于 4 选择发送温湿度、CO₂ 数据或噪声数据。

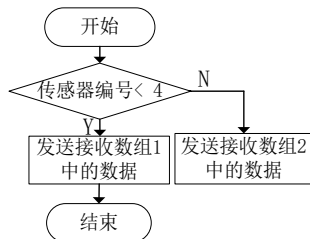


图 12 串口数据传输流程图

4 结论

目前，对于国内外剧院观演空间没有完整的环境参数自动测试系统，本文采用先进的 ARM 嵌入式技术将多个环境参数进行了集成化、自动化测试，填补了国内外剧院环境多参数自动测试的空白。系统调试结果表明，实现了操作便捷、功能齐全的要求，具有较高的可靠性、稳定性和扩展性，可以很好的完成剧院观演空间环境参数自动测试任务。本系统的研究，对剧院观演空间环境的实时监测提供了有效的参考数据，保障了剧院演出效果，具有一定的实用价值。

参考文献

- [1] 荣志晓.剧场舞台机械设备管理与维护——以国家大剧院歌剧院为例[J].演艺科技,2020,(06):31-34.
- [2] 马宁,胡应洪,甘宁.Modbus/RTU协议在智能包装集成系统中的应用[J].工业控制计算机,2020,33(12):68-69.
- [3] 张浩,魏飞,张家旭.基于Modbus-RTU的水面航行平台无线动力控制系统[J].电子测量技术,2021,44(02):6-9.
- [4] 廉小亲,张阳伟,郝宝智,段振刚,魏伟.基于Ucos II 系统的电气火灾远程监控系统[J].测控技术,2015,34(12):70-73.
- [5] 胡守峰,陈文俊,黄光明.基于轻型协议栈LwIP的LXI接口实现[J].电子测量技术,2019,42(20):114-119.