

# 适应工业 4.0 体系的自动化专业实验系统设计与实现

王 林<sup>1</sup> 徐志涛<sup>1</sup> 张嘉英<sup>1</sup> 王旭东<sup>1</sup> 贾美美<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>内蒙古工业大学自动化系,内蒙古 呼和浩特市 010080)

**摘 要:** 在工业 4.0 体系框架中,对利用物理网络系统,提高生产过程自动化水平提出了更高的要求。与之相对应,在实验教学中强化网络应用,是适应工业 4.0 体系的有效方法。本课题依托过程控制系统实验教学装置,设计了一种无线远程控制系统。系统结构采用双上位机单下位机模式,即将和控制对象相连的嵌入式工控机以及数据传输单元 DTU 均作为上位机,将基于单片机的数据存储和收发单元作为下位机,上位机与下位机通过 MODBUS-RTU 进行 485 通讯。就地设备控制系统的给定值可以通过远端无线设备任意设置,并能实时传送控制系统输出值到远端无线设备。为了验证系统结构的可靠性和系统功能的实用性,将该系统应用于实验室规模的水箱液位控制系统,实验结果验证了该系统功能可靠、操作方便,拓展了网络应用在实验教学中的作用。

**关键词:** 工业 4.0; 自动化专业实验; 无线远程控制系统

## Design and application of an experiment system of process control based on Industry 4.0 framework

Lin Wang<sup>1</sup>, Zhitao Xu<sup>1</sup>, Jiaying Zhang<sup>1</sup>, Xudong Wang<sup>1</sup>, Meimei Jia<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>Department of Control Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot, 010080, Inner Mongolia, China)

**Abstract:** With the development Industry 4.0, cyber-physical system plays an increasingly important role in process control. In the study, a wireless remote control system is designed. The system structure adopts the double master unit-one slave unit mode, that is, the embedded industrial computer, which connected the object, and the wireless data transfer unit (DTU) are set to be two master unit. The slave unit is used as data storage and transferring based on microcontrollers. The communication protocol is RS485 and MODBUS-RTU. The set-point of the control system can be arbitrarily set by the remote wireless device. Meanwhile the output of control system can be transferred to the remote wireless device in real time. Finally, the system is applied to the tank level control in laboratory. The experimental results verify that the system is reliable, accurate and easy to operate.

**Key Words:** Industry 4.0; Experiment system of process control; Wireless remote control system

---

联系人: 王林. 第一作者: 王林(1973—). 男, 博士, 教授.

基金项目: 内蒙古工业大学精品课程建设项目

## 引言

随着工业 4.0 理念的不断深入,世界制造业整体从生产密集型转向技术密集型,生产方式也从按市场需求生产转向面向消费者定制生产<sup>[1-3]</sup>。在图 1 所示的工业 4.0 价值链中,在有效资产利用和节约劳动力两个环节,都阐明了远程监控和控制的重要性<sup>[4]</sup>。将自动化系统与互联网相关联,从远程监控逐步过渡到远程控制,是实现生产设备共享,节约人力成本,在线监控产品质量,实时反映设备工况等诸多功能的必要手段<sup>[5]</sup>。在自动化专业教育中,逐步拓展基于互联网的控制思想和控制方法,是专业发展的必然之路。围绕图 1 的 8 大类 26 个小类结构,在教学内容上,特别是实验系统中,应该首先使学生在应用层面产生对工业 4.0 的认识,产生对实验设备共享和节约人力成本的认识。

本课题围绕上述实验理念设计了一种远程控制系统。系统采用嵌入式工控机进行实时控制和数据采集;采用单片机存储和转发各种数据,形成数据控制中心;采用数据传输单元 DTU,通过 GPRS 无线进行数据传输,上传到云平台。学生可以通过联网电脑或手机 APP 对现场数据进行无线远程控制和过程监测。



图 1 工业 4.0 的价值驱动因素和手段<sup>[4]</sup>

Fig.1 Industry 4.0 value drivers and levers

## 1 系统总体设计

该远程控制系统总体结构及其组成如图 2 所示。包括:与被控对象相连接的各传感器及执行机构(为描述方便,将该设备命名为  $S_1$ )、嵌入式工控机(北京康拓公司,  $S_2$ )、数据池( $S_3$ )、DTU( $S_4$ )、云平台( $S_5$ )、远端的电脑/手机用户( $S_6$ )。

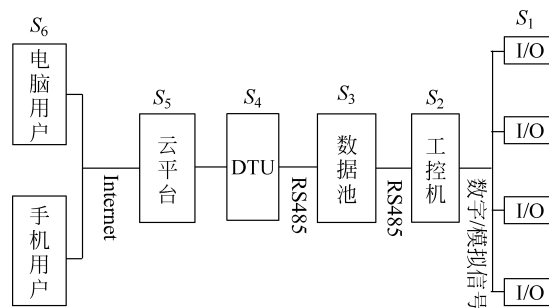


图 2 系统结构及其组成

Fig.2 Structure of the wireless control system

系统中  $S_2$  与  $S_4$  都做 MODBUS-RTU 主站,  $S_3$  做从站,负责连接两个主站,结构形式为主-从-主。这种新改进的控制系统结构形式与主-从式的结构形式相比:1)通过  $S_3$  的设置,有助于提高系统的安全性,便于保护数据的完整性。用户可以根据自己的使用需求将数据存储到数据池或显示到上位机。2)  $S_2$  与  $S_4$  各自独立,保证数据流的流向单一,同时将控制系统和数据传输系统分开,保障控制系统功能独立,结构精简。3)两个主站均可自主设置采样时间。用户可根据自己的使用需求设置相应的采样频率。既能满足用户对实时控制和实时监控的要求,又能节省移动数据传输流量。

### 1.1 嵌入式工控机

工控机(Industrial Personal Computer, IPC)是一种采用总线结构,对生产过程及机电设备、工艺装备进行检测与控制的设备总称。

本系统采用的嵌入式工控机是基于 POWER PC 处理器的控制模块,配有液晶屏和按键,可实现人机交互。通信接口包括 4 路 RS485。I/O 端口包括 6 通道数字量输出,8 通道数字量输入,8 通道模拟输入和 4 路通道模拟输出,3 路 USB 接口,SD 卡接口可支持 16GB 存储,可满足大部分 PLC 现场应用需要。

$S_2$ 采用通用 PLC 编程系统 MULTIPROG 软件进行编程<sup>[6]</sup>。通过模拟量/数字量输入输出端口采集传感器信号,为控制系统设置最优给定值,调节控制参数,并将系统输出通过 RS485 传递给  $S_3$ 。

### 1.2 数据池

$S_3$ 是采用单片机 STC12C5A60S2 设计信息控制中心。它负责将  $S_2$ 采集的数据暂存起来,按照  $S_4$ 设定的采样频率,定时上传给无线用户。其程序流程图如图 3 所示。 $S_4$ 也可以将控制指令传给  $S_3$ ,按照  $S_2$ 设定的数据读取方式,将控制指令应用于被控对象。 $S_3$ 可以同时满足 10 个浮点数据的接收,数据更新频率可以达到 100 Hz 以上。主-从-主设备间的通信参数如表 1 所示。

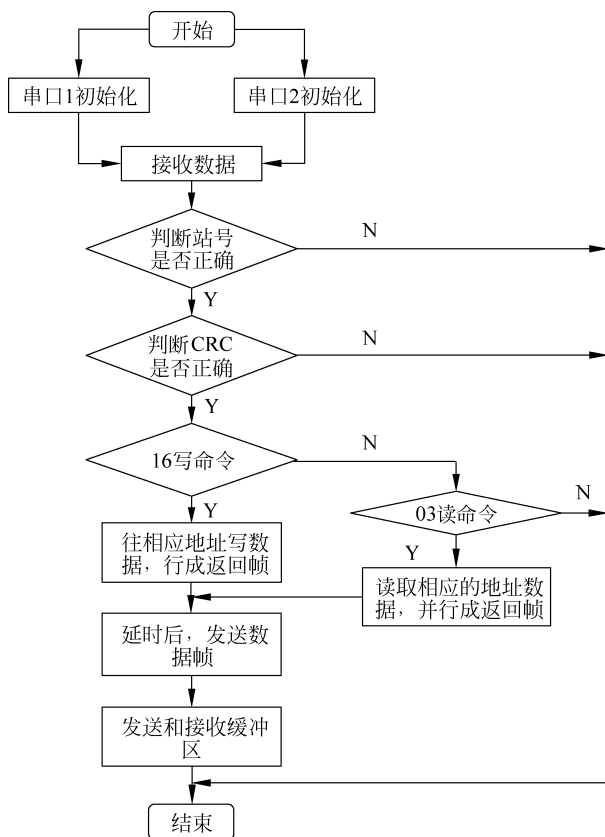


图 3 程序流程图

Fig.3 Flowchart of the program in slave unit

表 1 主-从-主设备间的通信参数

Tab.1 Communication parameters in master-slave-master unit.

$S_3$	$S_2$ 串口 1	$S_4$ 串口 2
起始位	1 位	1 位
数据位	8 位	8 位

续表

$S_3$	$S_2$ 串口 1	$S_4$ 串口 2
校验方式	无校验	无校验
停止位	1 位	1 位
波特率	9600bps	9600bps
通信协议	Modbus-RTU	Modbus-RTU
从站地址	1	2
物理层	RS485	RS485
单片机引脚	P3.0、3.1	P1.2、1.3

### 1.3 DTU 与云平台

DTU 是用于物联网云平台连接下位设备所用的 GPRS 网关,DTU 利用 GPRS 网络实现 MODBU 数据自动采集和传输,配置参数灵活,运行安全稳定适合于恶劣的工业现场。利用 DTU 作为 MODBUS 主站,可以实现  $\leq 4$  个 MODBUS 子设备的接入,适用于 MODBUS IO 模块、PLC、MODBUS 仪表或串口设备的远程联网与控制。

设备云平台网络侧采用相对成熟的阿里服务器集群组成数据收发,数据存储,平台展示等专属服务器。系统架构分为下位设备、数据传输设备、服务器云平台。平台可实现跨行业跨设备的无缝接入功能,是一种以机器终端交互为核心、网络化的应用服务。本系统没有架设专属云平台,利用该成熟技术实现  $S_4$ 与  $S_6$ 之间的数据传输。 $S_6$ 上的应用 APP 也采用和云平台配套的成熟 APP。

## 2 系统应用

上述系统应用于一个实验室规模的水箱液位控制,系统的整体结构图如图 4 所示。 $S_2$ 计算实际液位和设定液位的偏差,通过 PID 控制策略,为电动调节阀提供驱动信号。整个系统的应用流程如下:

首先,用 MULTIPROG 软件编写一个 PID 功能块的液位控制程序下装到工控机里面,程序如图 5 所示,所采用的编程语言为功能块图语言。在该功能模块中主要集成了以下功能: 1) 液位和电流信号的对应数值关系,受实验设备的制约,该数值关系为非线性特性。模块设计了查询表模式,并为非表中数据的电流液位关系设置了插值算法。2) 量程设置功能,主要是定义了电动调节阀驱动信号的上下限,也是控制器输出的上下限。该限

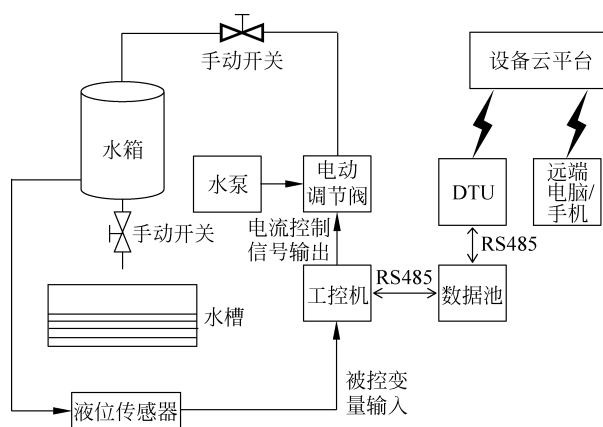


图4 液位控制系统

Fig.4 A tank level control system

值主要取决于电动调节阀的开度。3) 为 PID 参数设置了可变窗口, 为远程设定 PID 参数, 获得最佳控制效果提供支持。

然后,按照图 2 的工作原理,将各功能组件集成到一个平台上,形成如图 6 所示的无线远程控制系统。在系统调试前,需要首先确定各模块的采样时间:过程对象的慢变特性,使得对数据传输的实时性要求不是很高。 $S_3$  的采样时间设定为 6ms,特殊情况不超过 20ms,数据类型为 10 位浮点数,每个浮点数占两位寄存器,可以同时接收 10 个数据,可以精确到小数。接收数据时判断站地址、CRC 校验、功能码等是否正确,正确后把之前的数清零换上新数据<sup>[8,9]</sup>。 $S_4$  的采样时间是 1s(最大可

(\*PLC运行时,将PID切换至自动调节状态\*)

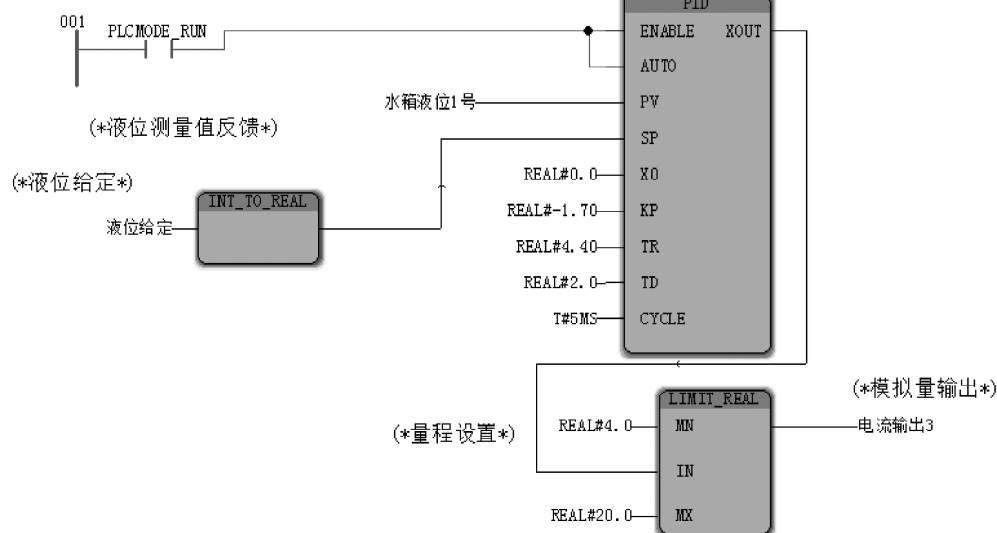


图5 PID控制策略在MULTIPROG中的实现  
Fig.5 PID control strategy in MULTIPROG

设置 40s),主要是考虑了 GPRS 网络流量的更新速率。作为嵌入式设备, $S_2$ 的采样时间可以非常小,考虑到研究对象的慢变特征,本系统将写入从站和读取液位设定值得两个采样时间均设定为 100ms。

系统的调试过程如下:

第一步,验证从  $S_1 \rightarrow S_6$  的数据传输,即液位控制曲线在  $S_6$  的实时显示。 $S_1$  将检测到的水箱液位信号转换位电流信号,传给  $S_2$ ,在  $S_2$  中将电信号转换为水箱液位值。

第二步,将实际水箱液位值与设定值比较,经PID控制系统运算,输出信号来控制电动调节阀开度,实现水箱液位定值。

第三步,将  $S_2$  采集到的水箱液位值通过 485 口采用 MODBUS-RTU 协议传递给  $S_3$ ,  $S_4$  按照定时轮询方式,将  $S_3$  存储的数据上传到  $S_5$ ,远端的无线设备  $S_6$  就能够读取到水箱的液位值。该流程的检测结果如图 7 所示。

第四步,验证从  $S_6 \rightarrow S_2$  的数据传输,即远程液位设定值在  $S_2$  显示屏的显示,这也同时表明,控制系统的给定值实时可变。通过无线终端  $S_6$  设定一个液位值,  $S_4$  通过  $S_5$  读取该值,并将其传送到  $S_3$ ,  $S_5$  也按照定时轮询方式从  $S_4$  中读取该值。

第五步,在 MULTIPROG 平台中自动更新液位设定值,按照 PID 调节模式,控制电动调节阀开度对水箱液位值做出调节。该流程的检测结果如图 8 所示。

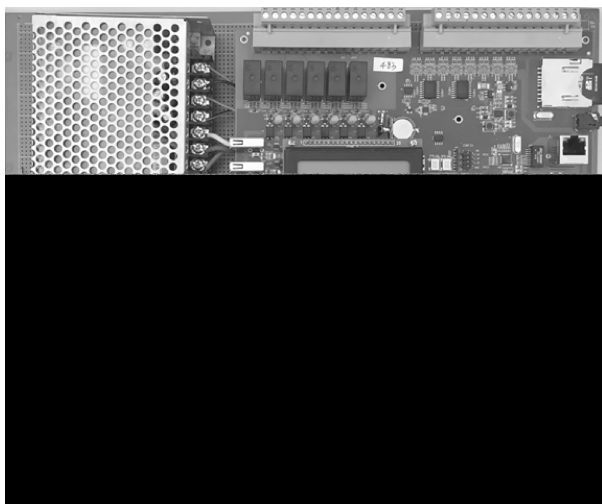


图6 无线远传控制系统平台

Fig.6 A platform for remote wireless control system

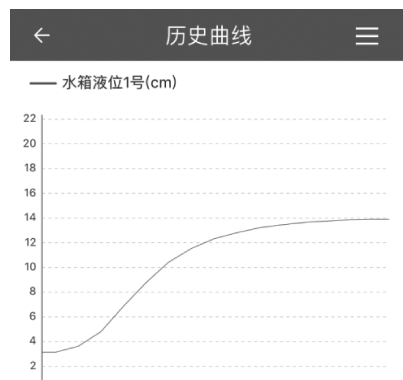


图7 水箱液位曲线在无线终端上的显示

Fig.7 Tank level curve on mobile phone

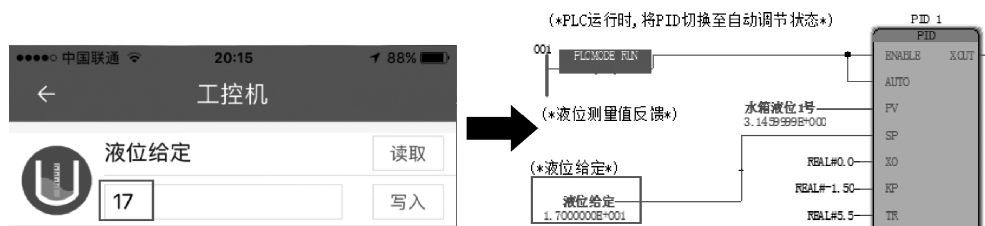


图8 无线端液位给定值设定

Fig.8 Set-point change of tank level control system on mobile phone

在图8中用手机端APP设定一个液位值17(图中红框所示),在MULTIPROG的PID控制算法界面中,可以看到该值的实时显示。图7和图8的测试结果表明,水箱系统的液位值可以在无线终端显示,同时无线终端的不同液位给定值也可以驱动水箱系统的液位变化。

实验室原有实验设备6套,平均每学期学生人数在140人左右。采用远程控制系统后,学生实验时间机动灵活,单套实验设备可以在一周时间内满足24人的实验学时。同时减少了指导教师的工作压力,实验曲线和实验数据可以同步云端监控。本实验系统,在设备共享和节约人力成本两个方面,都体现了工业4.0框架下远程监控和控制的优越性。

本实验系统的设计,在学生能力培养方面有以下几个方面的优点:1. 提高了完成实验全过程的能力。原有实验系统,受制于时间约束,实验过程

通常以时间结束为结点,引入远程控制系统之后,实验过程以质量合格为结点,学生可以反复调试实验过程,保证了实验效果。2. 提高了学生独立完成实验的能力,在远程控制系统中,每个学生都可以在自己选择的合理时间范围内完成实验工作,避免了因台套数不足导致的“一人做,多人看”的不良状况。3. 提高了对工业4.0的认识,了解了远程控制和设备共享的工业生产远景,适应因需开放的新实验体系,强化理论与实践能力的结合。

### 3 结论

在自动化专业教学中,特别是实验系统中应用工业4.0框架中约定的各项技术,既增强了学生对互联网技术和自动化技术相互融合的认识,又在应用层面解决了实验室设备台套数少,实验人员少的缺陷。

本课题设计的无线远程控制系统通过数据池



的设定,保证了 DTU 和工控机的双独立上位机特性,既能满足实时控制的目的,又能满足移动端用户的需求。在应用效果上,分散了设备的运行时间和运行负荷,以共享模式,减少设备投资。对学生而言,可以有效减少设备使用时间制约,保证实验效果。

本课题的下一步工作是扩展远程控制应用范围,在 PLC,组态软件等软硬件平台上,实现多重控制手段的集成,力争在参数响应实时性和实际控制效果方面实现全面的远程控制能力。

## References

- [1] 魏星. 工业远程控制与物联网技术[D]. 内蒙古科技大学,2012.
- [2] 王东. 工业 CT 平台运动控制与数据采集的研究与实现[D]. 兰州大学,2015.
- [3] 程城远. 支持农业虫害自动监测的数据采集与远程控制技术的研究[D]. 浙江工业大学,2012.
- [4] Baur, C. and Wee, D., Manufacturing's next act [EB/OL]. <http://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act>. 2015.
- [5] 付强松. 基于无线移动通信网络和 Internet 网络的远程数据采集与控制系统的设计[D]. 中国工程物理研究院,2007.
- [6] 魏东,潘瑞锋,王克成. 单片机总线技术结合 Modbus-RTU 协议的智能仪表通讯[J]. 辽宁科技大学学报, 2015,(01): 32-35.
- [7] 孟祥剑,黎向阳. 基于 MODBUS 协议的人机界面和单片机串行通信[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2014,(09): 87-91.
- [8] 张云鹤. 基于 Internet 温室环境远程智能控制系统研究[D]. 吉林大学,2004.
- [9] 亓涛. 基于 RS485 网络的远程集中抄表系统设计与实现[D]. 山东科技大学,2004.