

基于 ModBus 通信协议的暖通空调智能控制系统设计

孙增利 王亚峰

(西安交通大学第一附属医院总务部, 陕西西安 710061)

摘要 面对暖通空调功率损耗量大, 系统控制效率低等问题, 设计一种基于 ModBus 通信协议的暖通空调智能控制系统。通过设备层采集暖通空调的信号, 并传输至 PCL 控制层, 通过模糊自适应 PID 控制器对接收的暖通空调信号实施运算后, 调节变频器实时控制暖通空调。将调节后的暖通空调信号, 通过通信层的 ModBus 通信协议实施网络集成与数据交换, 经 PLC 与上位机远程监控实现暖通空调智能控制。结果表明, 基于 ModBus 通信协议的暖通空调智能控制系统适用性高、实时性强, 数据传输效率高且稳定, 可实现暖通空调智能控制。

关键词 ModBus 通信协议; 暖通空调; 智能控制系统; 模糊自适应 PID; PCL 控制

中图分类号 TP273.4 **文献标识码** A

Design of HVAC intelligent control system based on Modbus communication protocol

Sun Zengli

(The First Affiliated Hospital of School of Medicine, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710061, Shaanxi, China)

Abstract Faced with the problems of large HVAC power loss and low system control efficiency, a HVAC intelligent control system based on ModBus communication protocol was designed. The HVAC signal are collected through the equipment layer and transmitted to the PCL control layer. The fuzzy adaptive PID controller calculates the received HVAC signals, and then adjusts the frequency converter to control the HVAC in real time. The adjusted HVAC signal realize network integration and data exchange through ModBus communication protocol in the communication layer, and the intelligent control of HVAC is realized through the remote monitoring of the PLC and the host computer. The results show that the intelligent control system of HVAC based on ModBus communication protocol has strong applicability, real-time, high data transmission efficiency and stability, and can realize intelligent control of HVAC.

Key words Modbus communication protocol; HVAC; intelligent control system; Fuzzy adaptive PID; PCL control

我国二氧化碳的排放量居世界第一位, 环境污染非常严重, 为此政府大力扶持环保企业, 争取早日实现节能减排的可持续发展战略^[1-3]。在现代化的建筑中, 暖风空调是基本配套设备^[4], 能够调节建筑整体的温度与湿度。暖风空调系统用电量占整体建筑总用电量的一半以上^[5], 因此需寻找合适地科学技术减少暖风空调系统能耗。专家指出, 暖风空调系统中智能

控制系统是整体系统的核心。智能控制系统既可减少能源的浪费, 又保障暖通空调系统的有序运转。但是, 在部分工程项目内暖风空调智能控制系统并没有投入使用, 造成资源的浪费。发生此现象主要是因为工程项目单位缺乏科学的系统运行流程, 个别暖通空调设计人员设计水平欠高, 高水平管理人员的严重缺失、暖风空调设备易出现故障等。

收稿日期: 2021-03-26

基金项目: 陕西省创新能力支撑计划软科学研究计划一般项目(陕西省医院病房集中空调系统卫生学评估及干预体系建设研究)(项目编号: 2019KRM186)。

作者简介: 孙增利(1983-), 男, 陕西韩城人, 硕士, 工程师, 研究方向: 暖通空调。

通讯作者: 王亚峰(1969-), 男, 陕西周至人, 硕士, 六级职员, 研究方向: 医院管理。

为此,国内外相关学者对此展开了研究,文献[6]提出了基于物联网的纺织空调智能化监控系统,在进行暖通空调智能控制过程中,需部署多个分布式 CC-LINK 现场总线,暖通空调功率损耗量增大,管理成本增加;文献[7]提出了基于 OPC 的中央空调群控系统,在暖通空调智能控制过程中,侧重于重要设备参数的读取和写入功能,导致暖通空调智能控制效率降低。为解决以上出现的暖通空调功率损耗量大,系统控制效率低等问题,现提出一种基于 ModBus 通信协议的暖通空调智能控制系统,利用 ModBus 通信协议使网络实现无缝连接,是加强设备间通信联络的一种控制系统协议。为了实现数据交换和传输,通过一台主机可与多台副机实施通讯,使用上下位机完成消息—响应模式的运行。ModBus 通信协议的适用性高、实时性强,可实现暖通空调智能控制。

1 基于 ModBus 通信协议的暖通空调智能控制系统

1.1 系统总体结构

为了提高暖通空调控制的效率,设计基于 ModBus 通信协议的暖通空调智能控制系统。系统总体结构见图 1。

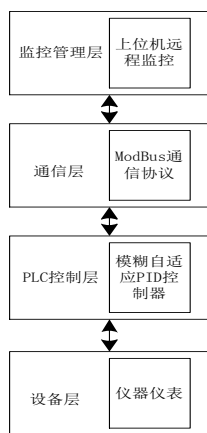


图1 系统总体结构

由图 1 可知,系统由设备层、PCL (Programmable Logic Controller) 控制层、通信层、监控管理层构成。ModBus 通信协议是总体系统网络平稳运行的保证。设备层由基础的仪器仪表组件组成,负责采集暖通空调的信号。设备层将暖通空调信号传输 PCL 控制层,PCL 控制层是系统的核心层,通过模糊自适应 PID

(proportion integral differential)控制器对采集的暖通空调信号实施运算后,通过调节变频器实施实时控制暖通空调,PCL 控制层将调节后的暖通空调信号,通过通信层的 ModBus 通信协议实施网络集成与数据交换,快速接收各层传输暖通空调信号数据并下发监控管理层发送的指令,监控管理层依据通信层反馈的暖通空调信号数据经 PLC 与上位机远程监控,实现暖通空调智能控制。

1.2 控制系统硬件设计

基于 ModBus 通信协议的暖通空调智能控制系统硬件如图 2 所示。

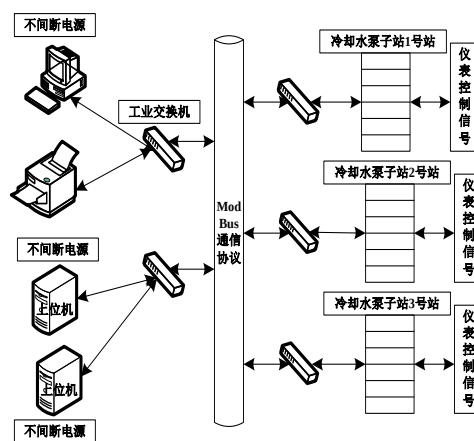


图2 系统硬件

由图 2 可知,系统硬件由 ModBus 通信协议、工业交换机、打印机、上位机组成。整个系统使用工业交换机 5 台,2 台上位机采用 Windows 系统^[8],配置内存为 256G,ModBus 通信协议主要负责为确保系统网络的稳定。

2.3 PLC 控制层的程序设计

为了使 PLC 实现控制的功能,系统使用 ISPSOFT V2.01 编写程序。计算机按照专家总结的模糊控制规则实施控制过程为模糊控制。模糊控制规则确定的三个参数分别用 K_p 、 K_i 、 K_d 描述。暖通空调节能原理是采用变频技术实现对温度的变频控制^[9-11],但是变频控制是不确定性的问题,无法构建精准的数学模型。因此在 PLC 控制层中加入模糊自适应 PID 控制器。为了提高控制的品质,使 PID 控制器具有模糊控制的智能化性能,将常规 PID 控制和模糊控制相融合生成模糊自适应 PID 控制器。模糊自适应 PID 控制原理,

见图 3，由温度传感器测量温度偏差，构建模糊规则库，并通过 PID 控制器进行目标控制。

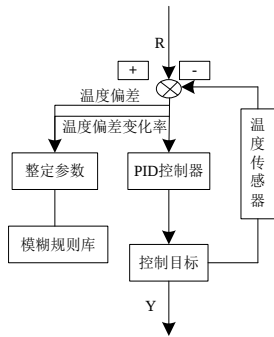


图 3 模糊自适应 PID 控制原理

各个变量、模糊控制规则、模糊子集与输入输出变量隶属函数等参数的设置是通过模糊自适应 PID 控制器设计而成。

如果 K_d 、 K_p 在预规定的 $[K_{d,\min}, K_{d,\max}]$ 、 $[K_{p,\min}, K_{p,\max}]$ 范围内变化，那么归一化处理 K_d 、 K_p 将它们转换为 0-1 间的参数，新转换成的参数分别用 K_d' 、 K_p' 描述，它们换算过程，分别用公式（1）、公式（2）描述：

$$K_d' = \frac{K_d - K_{d,\min}}{K_{d,\max} - K_{d,\min}} \quad (1)$$

$$K_p' = \frac{K_p - K_{p,\min}}{K_{p,\max} - K_{p,\min}} \quad (2)$$

公式（3）表示积分、微分时间常数间的关系：

$$T_i = \beta T_d \quad (3)$$

式（3）中， T_d 表示微分时间常数， β 表示参数， T_i 表示积分时间常数。

积分增益求解，用公式（4）描述：

$$K_i = \frac{K_p}{\beta T_d} = \frac{K_p^2}{\beta K_d} \quad (4)$$

温度偏差与温度偏差变化率的隶属函数为模糊子集语言变量，用 $\{NL \ NM \ NS \ ZO \ PS \ PM \ PL\}$ 描述，并且各个值宽度一致呈三角形分布。

为了判断参数 K_d' 、 K_p' 、 β 的推理规则，按照温度偏差、专家经验总结的知识库（模糊规则库）、温度

偏差变化率实施决策。得出的规则如下式（5）所示：

$$\text{if } e(k) \text{ is } A_i, \Delta e(k) \text{ is } B_i \text{ then } K_p' \text{ is } C_i, K_d' \text{ is } D_i, \beta = \beta_i (i=1,2,\dots,m) \quad (5)$$

式（5）中， A_i 、 B_i 、 C_i 、 D_i 表示 $e(k)$ 、 $\Delta e(k)$ 、 K_p 、 K_d' 、 β 的语言变量，一个模糊关系就有一个规则，7 个模糊子集共有 49 个模糊控制规则。计算机存储总结的 49 个模糊规则生成模糊控制表，模糊控制表是按照专家知识经验编制每个输入输出参数之间的关系，生成模糊控制规则，计算机查阅模糊控制表进行运算实现模糊控制。

2.4 通讯层设计

通讯层中 ModBus 通信协议采用 RTU 传输模式实现数据读取。RTU 传输模式消息帧格式：功能码为 8、CRC 校验码为 16 位、数据区为 $N \times 8$ 位、从机位地址为 8。ModBus 通信协议的系统内常用命令码和功能，见表 1。

表 1 ModBus 通信协议的系统内常用的命令码和功能

命令码	作用
01	读取控制器值
02	强制输入单开量值
03	读取开关状态
04	强制输入控制器值
05	用于异常回答
06	通信诊断
07	通断状态

串口接收通讯中断服务程序流程，负责通知主程序并提供其完整的数据报文。串口接收中断模式为 ModBus 通信协议消息的接收主要模式。

2.5 监控管理层的设计

实时在线监控暖通空调系统的运行情况，通过监控管理层上位机远程监控软件，经 ModBus 通信协议与 PLC 实现通信。为了实现系统远程的智能控制模式的转换，在远程在线监控软件中通过 ModBus 通信协议的命令码，经串口通信向 PCL 控制层传递控制信号。自动控制与手动控制只能二选一，如果选择自动控制模式，PCL 选取控制器中的数据，依据模糊自适应 PID 控制器对采集的暖通空调信号实施运算，并对运算结果进行判断，自动控制暖通空调设备停止或

开始。如果选择手动控制模式,为了控制暖通空调设备,单个设备开关量的输入通过 ModBus 通信协议实现,改变 PLC 里继电器的开关,手动远程控制暖通空调设备停止或开始。

3 仿真实验分析

实验选取某医院的暖通空调器和安装暖通空调器的房间作为实验对象,设置输出变量是室内温度、输入变量为暖通空调器压缩机的频率。设置室内温度与暖通空调器压缩机的频率的传递函数模型,用公式(6)描述:

$$H(s) = \frac{G'}{Ts+1} e^{-\phi s} \quad (6)$$

其中, s 表示复变量, T 表示系统时间常数, G' 表示开环增益,设置为 $0.3^{\circ}\text{C}/\text{Hz}$, ϕ 表示延时环节的时间常数,设置为 1000ms 。

为了验证本文系统的有效性,利用 MATLAB 实施系统测试,实验采用的对比系统分别是文献[6]提出的基于物联网的纺织空调智能化监控系统以及文献[7]提出的基于 OPC 的中央空调群控系统。实验设置暖通空调器压缩机的上限频率是 120Hz ,室内的初始温度是 0°C ,设定温度是 26°C ,将三个实验系统施加阶跃输入。同时在 5000ms 时,设定温度降至 22°C ,在 9000ms 时,设定温度升至 26°C 。经反复测试,记录三种系统的室内温度响应时间曲线,用图 4 描述。

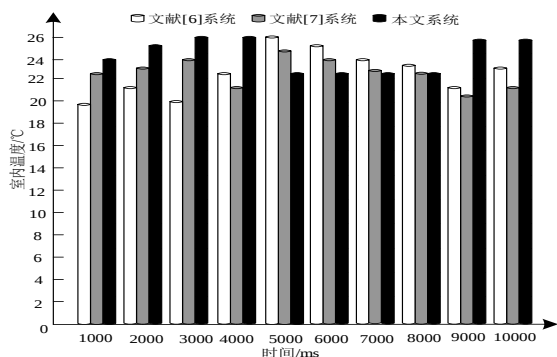


图4 室内温度响应曲线

由图 4 可知,本文系统的室内温度响应的速度与温度控制方面明显高于其它两种系统,本文系统能很快地控制暖通空调器,并使室内温度达到设定温度,在 5000ms 时,室内温度降至 22°C ,在 9000ms 时,室

内温度升至 26°C ,同时具有稳定趋势。而其他两种系统调节的时间较长,其中,文献[7]系统只在 7000ms 时,室内温度降至 22°C ,文献[6]系统始终处于波动状态,并未达到设定温度的要求,说明本文系统具有较好的控温效果。

在降温实验中,当延迟 1000ms 时,三种系统降温-延时时间曲线,用图 5 描述。

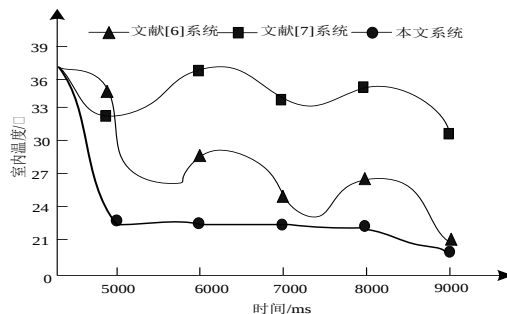


图5 降温-延时时间曲线

由图 5 可知,随着延时时间的增加,本文系统的降温-延时时间曲线波动较小,且降温时间快,而其它两种系统的降温-延时时间曲线波动较大,且降温时间慢,说明本文系统降温性能良好。

为了提高暖通空调器的节能减排,实验中将室内相对湿度设定在 $40\%\sim 60\%$ 区间,二氧化碳体积分数设定为 0.03% ,分析三种系统控制结果,用图 6、图 7 描述。

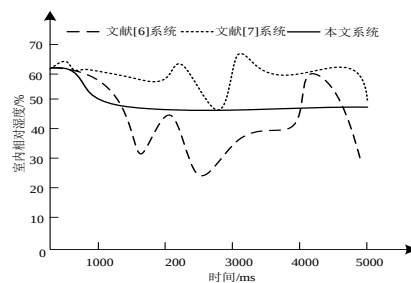


图6 室内相对湿度控制曲线

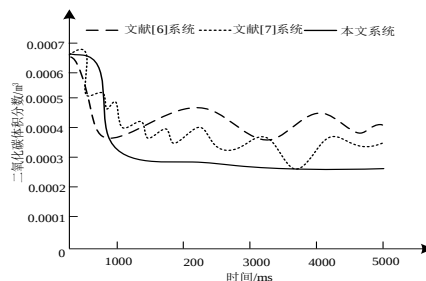


图7 二氧化碳体积分数控制曲线

由图 6 可知,本文系统室内相对湿度控制的效果比其它两种系统具有明显优势,本文系统符合室内相对湿度为 40%~60%的控制要求,其它两种系统控制效果不佳,室内相对湿度波动较大,因此采用本文系统对室内相对湿度实施控制,符合人们对舒适性的需求,控制效果好。

由图 7 可知,本文系统的二氧化碳体积分数控制效果明显优于其它两种系统,本文系统在 1000ms 时,室内二氧化碳体积分数到达 0.0003m^3 ,并在此之后控制的比较稳定,而文献[7]系统虽然在 4000ms 时,符合设定室内二氧化碳体积分数,但是控制时间段且不稳定,文献[6]系统始终未达到设定室内二氧化碳体积分数要求,因此本文系统实现二氧化碳量的控制,符合节能减排的要求。

通过测试系统控制性能的指标,依据实验结果统计出三种系统控制性能指标的成功率表,见表 2。

表 2 控制性能指标的成功率 (%)

性能指标	文献[6]系统	文献[7]系统	本文系统
负载保护	78	89	95
超调量	81	92	98
升温控制	79	90	99
降温控制	78	89	99
调节时间	79	90	99
继电保护	80	91	97
电流恒定	81	92	96
换气控制	80	91	98
清洁控制	79	90	96

由表 2 可知,本文系统控制指标的成功率明显高于其它两种系统,本文系统控制指标的平均成功率高达 97%,分别比文献[6]系统、文献[7]系统的控制指标的平均成功率高出 18%、7%,说明本文系统控制性能良好。

为了进一步验证系统的数据传输性能,在高斯信道下,三种系统的数据传输频率,用图 8 描述。

通过图 8 结果可知,文献[6]系统、文献[7]系统在控制产生信号时数据传输会出现显著的波动现象,数据传输频率不稳定。本文系统在信噪比增加的情况下数据传输频率明显高于其它两种系统。数据传输平均频率高达 $450\text{次}/\text{min}^{-1}$,因此本文系统数据传输效率高且稳定。

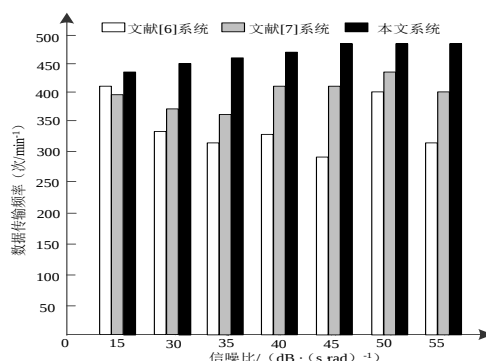


图 8 数据传输频率

4 结论

ModBus 通信协议的快速发展,驱动本文设计暖通空调智能控制系统逐渐向更长远方向发展,ModBus 通信协议在暖通空调智能控制过程中的深入应用,可全面提升暖通空调智能控制效率。ModBus 通信协议能够保证暖通空调智能控制的数据通讯网络性能稳定,确保暖通空调智能控制系统的高质量运行。

暖通空调智能控制对环保与节能减排非常重要,仍需要经过专业的测试过程,才能研发出更加优质的暖通空调智能控制系统。在以后的研究中,将对不同通信协议下的暖通空调智能控制做更多对比分析,从而更好优化暖通空调智能控制系统的各项性能。

参考文献

- [1] 何海亮,陈晓春,潘云钢,等.中国建筑设计研究院创新科研示范楼暖通空调设计新技术应用[J].暖通空调,2018,48(10):34-37.
- [2] 李文胜.独联体国家电力工程暖通专业设计要点[J].暖通空调,2018,48(02):56-59,55.
- [3] 王旭东,吴莉萍,戚艳,等.基于模型预测控制的智能楼宇暖通空调能量管理策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(06):98-106.
- [4] 张海尚.地铁站通风空调智能控制系统的节能[J].城市轨道交通研究,2018,21(09):45-48.
- [5] 李卓阳,靳小龙,贾宏杰,等.考虑建筑物热动态特性的暖通空调模型预测控制方法[J].中国电机工程学报,2020,40(12):3928-3940.
- [6] 陈怀忠,何仁初.基于物联网的纺织空调智能化监控系统设计[J].上海纺织科技,2018,46(07):59-62.
- [7] 高照,胥布工,匡付华,等.基于 OPC 的中央空调群控系统设计与实现[J].电气传动,2018,48(05):43-48.
- [8] 俞倩,王玉刚,耿丽萍.基于 PLC 的中央空调制冷系统变频控制研究[J].低温与超导,2020,48(03):88-93.
- [9] 康伟,崔军胜,王绅宇,等.轨道交通车辆空调系统智能控制与大数据应用[J].城市轨道交通研究,2020,23(04):134-136.
- [10] 夏麟,刘剑,喻伟,等.基于空调系统能耗限额控制的上海某办公建筑运行效果分析研究[J].暖通空调,2020,50(05):26-33.
- [11] 胡金双,张绍君,王伟,等.基于 Modbus 通信的热成型压机加热控制系统[J].机械设计,2020,37(S1):154-158.