

基于 ARM7 的暖通空调直接数字控制器设计

Design of ARM-based DDC Applied to HVAC System

李国光 王文海

(浙江大学信息学部控制科学与工程系,浙江 杭州 310027)

摘要: 为满足楼宇暖通智能控制的需求,对基于 ARM7 的楼宇暖通 DDC 控制器的设计进行了研究。采用模块化设计和在线编程等技术,详细介绍了控制器的硬件体系结构和各软件功能模块的设计,并对软硬件功能等进行了测试。结果表明,控制器具有显示直观准确、操作方便、运行稳定可靠等优点,适用于各类空调系统。

关键词: 智能控制 ARM7 暖通空调 直接数字控制器 传感器

中图分类号: TP216 **文献标志码:** A

Abstract: To fulfill the requirements of intelligent control of HVAC in buildings, the design of the ARM7-based DDC controller used for HVAC is researched. The technologies including modular design and online programming, etc., are adopted in the design; the hardware and software functions are tested. The hardware architecture of the system and the design of each software functional module are introduced in detail. The result of tests shows that the controller features precise direct display, ease in operation, stable and reliable operation, it is suitable for various air conditioning systems.

Keywords: Intelligent control ARM7 Heating, ventilation & air conditioning (HVAC) Direct digital controller (DDC) Transducer

0 引言

随着中国经济的持续快速发展,建筑行业在我国发展迅猛,但随之而来的资源短缺、环境恶化等问题也日趋严重^[1]。全国建筑消耗能源占能源总消耗量的 50% 以上,而暖通空调系统的能耗又占其中的 50% ~ 60%^[2]。因此,如何降低建筑暖通能耗成为当前亟待解决的问题。

楼宇自动控制系统通过直接数字控制器 (direct digital controller, DDC) 集散组合完成整套空调系统的控制,将空调机组、冷冻机、冷却塔及周边设备集成为一个系统,能针对每台设备精确控制,从而达到优化控制和节能的目的^[3]。通常,一套工况良好的楼宇自动控制系统可节省能耗 15% ~ 25%。因此,研发智能、低耗的楼宇自动控制系统能够有效降低建筑能耗,具有重大的现实意义。DDC 作为底层现场控制器直接挂在设备层的控制网络上,完成被控设备特征参数与过程参数的测量。同时,通过网络与上位机实现双向通信,接受上位机的统一控制和管理,或 DDC 之间的点对点通信,共享信息资源^[4-5]。DDC 设计的优劣,直接影响到楼宇自控系统的整体效能。

1 总体设计

本控制器选用 LUMINARY 公司的 32 位 ARM Cortex-M3 v7M 架构的 LM3S3739 作为主处理芯片;以 Pt100 作为温度传感器,通过 RS-485 接口串行通信,实现联网功能;控制器外接 24 VAC ± 20% 电源,同时提供一组 24 VDC ± 10% 的输出端子用于传感器供电;由标准 Keil C 语言实现的控制器软件可对数据进行分析处理、实时和历史曲线显示、系统组态等,具有强大的数据分析管理能力。系统框架图如图 1 所示。

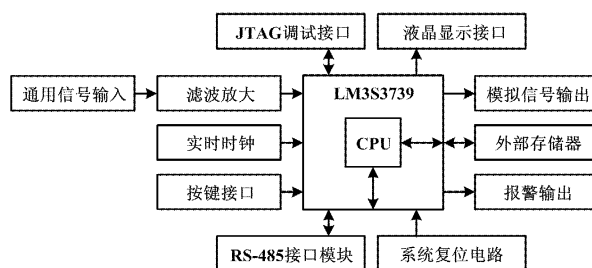


图 1 系统框图

Fig. 1 Block diagram of the system

系统主要由通用信号输入、模拟信号输出、报警输出、24 V 配电输出、液晶显示接口、按键接口、外部存储器接口、实时时钟和 RS-485 通信接口等部分组成。

温、湿度传感器或压力传感器采集信号,经放大、A/D 转换、校正和补偿后,经两线 I²C 接口送到

修改稿收到日期:2010-10-20。

第一作者李国光,男,1982年生,现为浙江大学控制理论与控制工程专业在读硕士研究生;主要从事嵌入式控制系统的研究。

LM3S3739 Buffer,然后再送到串行 Flash MM36SB020 中进行存储,程序存储在 RAM 中。24 VAC 电源对整个电路板供电。控制器与上位 PC 机采用 RS-485 串行异步通信,波特率有 9 600、19 200、38 400(单位:bit/s)等多种选择。实时时钟芯片采用 Philips PCF8563,频率可达 400 kHz,具有极高的精确度。显示屏选择 192 × 64 的 ET-19264BV6-YBSWSG 液晶屏,供电电压为 3.3 V,工作电流为 75 mA。按键接口与液晶接口共用数据端口,通过具有三态输出的 74HC245 隔离,两者互不干扰。

2 系统硬件设计

2.1 通用信号输入

通用输入端口能对电压信号、电流信号和电阻信号等信号进行测量。通常采用电流法对 Pt100 进行电阻测量。控制器热电阻采用三线制接法,通用输入端示意图如图 2 所示。这样可以消除连接导线长短引起的误差。同时,控制器的恒流源要求稳定,电流大小为 5 mA,避免热电阻发热产生的额外偏差。由上述电路测得 Pt100 的阻值,然后计算测量温度,并采用软件补偿的方法对测量值进行非线性处理。

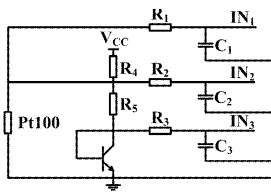


图 2 通用输入端示意图

Fig.2 Universal input schematic

2.2 模/数信号输出

将两个 UART 设置成同步并行接口 (synchronous parallel interface,SPI),从而可以方便地与 10 位的 D/A 芯片 TLC5615C 进行连接。控制器通过给 D/A 提供一个精密电压基准,再通过电压电流转换电路,就可得到 4 ~ 20 mA 的电流模拟信号输出。通过使用通用的 I/O 口,经三极管放大驱动两个继电器,控制器即可得到两路数字信号输出。同时,由于外设可能接电压较高的交流电,在 PCB 设计中也需注意绝缘间距。

2.3 RS-485 通信接口

LM3S3739 内嵌的异步串行接口 (asynchronous serial interface,ASI)支持 CPU 与其他使用标准格式的异步外设之间的数字通信,通过 RS-485 接口可以方便地进行 DDC 与 PC 机之间的异步串行通信。实现方法是首先采用嵌入式 ModBus RTU 协议栈对数据包进行

解码,得到原始的 RS-485 控制数据信息;接着由 LM3S3739 集成的 UART 控制器进行 RS-485 格式的数据封装;最后通过 RS-485 收发器 SP3485 发送到 RS-485 总线上,由相应的 RS-485 终端接收并处理。RS-485通信接口电路如图 3 所示。

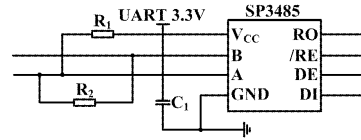


图 3 RS-485 通信接口电路

Fig.3 RS-485 communication interface

2.4 其他设计

本控制器还使用了超低功耗技术、可靠性技术、Flash 在线编程技术和 JTAG 调试技术等嵌入式领域的先进技术,保证了产品优异的性能和品质。如选用 CMOS 集成电路,使控制器具有功耗低、抗干扰能力强、工作温度范围宽等特点。

在 CMOS 器件工作方式选择上,采用高速低频工作方式,减少了逻辑电平频繁转换造成的功耗。选用 LCD 液晶显示器等低功耗外围器件。在前向通道的抗干扰方面,采用软件滤波^[6],不需要增加硬件电路,因而可靠性高、稳定性好、功耗低,不存在阻抗匹配问题,且软件滤波可以多通道共享,从而降低了成本。同时,采用“WatchDog”技术,在跳转指令前、多字节指令前、中断指令前、堆栈指令前及每隔若干条指令加入空操作指令“NOP”,防止程序指针 PC 的内容出错,使程序“跑飞”^[7]。

3 系统软件设计

控制器的软件部分主要包括监控程序、接口程序 and 数据处理程序三大部分。监控程序主要监控仪表的按键和显示器,实现从按键输入数据或设置功能,完成对处理后的数据进行显示的任务;接口程序主要完成数据采集、数据存储和数据通信等任务;数据处理程序主要完成数据滤波、运算和分析等任务。

3.1 系统软件主程序

系统软件主程序是一个无限循环程序,在芯片复位后程序会跳转到 Reset 处。主程序首先调用 Startup 初始化 CPU 各个数据空间,然后进入 main()函数,完成系统初始化方面的工作,再进入循环实现各个功能,包括采集数据、存储数据、扫描键盘和刷新 LCD 等任务。由于仪表对实时性要求较高,在整个系统中除了数据通信,其他不采用中断。主程序流程如图 4 所示。

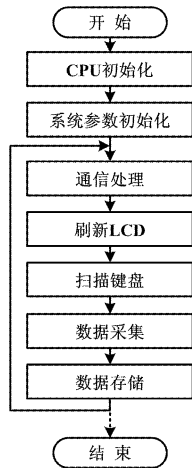


图4 主程序流程图

Fig. 4 Flowchart of the main program

3.2 系统的运行显示和组态显示

在 IAR Embedded Workbench 中,对 人 机 界 面 软 件 的 内 核 进 行 编 译,得 到 扩 展 名 为 .r43 的 库 文 件,将 该 库 文 件 放 到 控 制 器 的 工 程 文 件 中,则 控 制 器 的 系 统 运 行 显 示 模 块 就 能 够 以 库 文 件 的 形 式 调 用 人 机 界 面 系 统 内 核 软 件。然 后,在 画 面 编 辑 软 件 中 编 辑 好 画 面,编 译 成 .bin 文 件,并 通 过 RS-485 下 载 到 Flash 中 就 能 进 行 画 面 显 示。但 控 制 器 的 系 统 组 态 显 示 模 块 独 立 于 系 统 运 行 显 示 模 块,两 者 实 现 机 制 不 同,前 者 仅 仅 是 一 段 解 释 运 行 代 码。

3.3 控制算法模块

在 暖 通 控 制 系 统 中,被 控 制 量 如 温 度、湿 度、压 力 具 有 较 大 的 延 迟 和 惯 性^[8]。理 论 证 明,在 控 制 系 统 中,对 象 为 一 阶 和 二 阶 惯 性 环 节 或 同 时 带 有 滞 后 时 间 不 大 的 滞 后 环 节 时,PID 控 制 是 一 种 最 优 控 制 算 法。本 控 制 器 控 制 模 块 采 用 数 字 PID 增 量 式 算 法。增 量 式 算 法 具 有 下 列 优 点:只 与 当 前 拍 和 前 两 拍 的 误 差 有 关,累 积 误 差 小、精 度 高;若 计 算 机 出 现 故 障,由 于 执 行 机 构 本 身 有 记 忆 功 能,因 此 仍 可 在 上 一 次 控 制 量 作 用 下 按 原 状 态 工 作,可 靠 性 高^[9]。增 量 式 计 算 公 式 为^[10]:

$$\Delta P = K_p \times [e(t) - e(t-1)] + K_i \times e(t) + K_d \times [e(t) - 2e(t-1) - e(t-2)] \quad (1)$$

式 中: K_p 、 K_i 、 K_d 分 别 为 比 例 常 数、积 分 常 数、微 分 常 数; $e(t)$ 为 基 本 偏 差。

DDC 中 的 数 字 PID 控 制 模 块 首 先 完 成 比 例 系 数、积 分 系 数、微 分 系 数、积 分 分 离、输 出 死 区、本 次 偏 差 值 和 前 次 偏 差 值 等 的 初 始 化,然 后 对 输 入 运 算 值 (process value, PV) 和 设 定 值 (set value, SV) 进 行 运 算,求 得 机 械 开 度 变 化 量 ΔMV ,最 后 选 择 PID 输 出 模 式 并 将 机 械 开 度 MV 转 换 到 相 应 的 输 出 值。

3.4 暖通专用算法

取 4 路 模 拟 量 输 入 采 样 通 道 为 AI_{P1} 、 AI_{P2} 、 RI_1 、 RI_2 和 1 路 模 拟 量 输 出 AO 。 AI_{P1} 、 AI_{P2} 通 道 通 过 压 力 传 感 器 测 量 压 力 信 号,其 结 果 线 性 换 算 为 数 值 P_1 、 P_2 ,与 配 对 的 传 感 器 量 程 范 围 一 致。 RI_1 通 道 通 过 热 电 阻 专 门 测 量 空 气 温 度 T_a ,并 根 据 空 气 温 度 测 量 值 报 警;而 RI_2 通 道 则 用 于 测 量 水 温 值 T_w ,当 水 温 $T_w > 30^\circ\text{C}$ 时,自 动 进 入“制 热 模 式”;当 $T_w < 20^\circ\text{C}$ 时,自 动 进 入“制 冷 模 式”;当 $20^\circ\text{C} < T_w < 30^\circ\text{C}$ 时 为 过 渡 区,维 持 上 一 次 的 运 行 模 式。自 定 义 参 数 变 量 电 子 开 度 X 、机 械 开 度 Y 、模 式 参 数 SP_{COOL} 与 SP_{HEAT} 、虚 拟 阀 门 阻 抗 R ,取 初 值 状 态 $X = 0$ 、 $Y = 0$ 、 $SP_{COOL} = 0.25$ 、 $SP_{HEAT} = 0.09$ 、 $R = 10$ 。

在 制 冷 模 式 正 作 用 方 式 下,控 制 器 根 据 设 定 温 度 值 (空 气 温 度 设 定 值),采 用 PID 增 量 算 法 计 算 出 单 位 化 后 的 开 度 X 值,PID 参 数 可 设 定。由 电 子 开 度 X 计 算 输 出 单 元 的 单 位 化 机 械 开 度 Y 值 公 式 如 下:

$$Y = \frac{R^X - 1}{R - 1} \times \sqrt{\frac{SP_{COOL}}{|P_1 - P_2|}} \quad Y \in [0, 1] \quad (2)$$

而 在 制 热 模 式 反 作 用 方 式 下,根 据 设 定 温 度 值 及 式 (3),可 计 算 单 位 化 后 的 开 度 Y 值:

$$Y = \frac{R^X - 1}{R - 1} \times \sqrt{\frac{SP_{HEAT}}{|P_1 - P_2|}} \quad Y \in [0, 1] \quad (3)$$

4 测试过程及结果

4.1 硬件测试

将 空 载 (仅 考 虑 其 内 阻 200Ω) 和 外 接 最 大 负 载 (与 内 阻 共 计 750Ω) 的 DDC 分 别 置 于 小 于 0°C 低 温、 25°C 常 温 以 及 55°C 高 温 条 件 下 进 行 输 出 精 度 测 试。高 低 温 精 度 测 试 结 果 如 表 1 所 示。

表 1 高低温精度测试结果

Tab.1 Accuracy tests under high and low temperature

负载	环境温度 / $^\circ\text{C}$	输出精度测试/mA				
		1	2	3	4	5
200 Ω	<0	4.003	8.003	12.005	16.008	20.014
	25	4.001	8.000	11.999	16.000	20.003
	55	3.985	7.983	11.981	15.980	19.981
750 Ω	<0	4.002	8.003	12.002	16.003	20.006
	25	3.999	7.998	11.996	15.994	19.995
	55	3.982	7.980	11.975	15.971	19.970

测 试 结 果 表 明,在 $0 \sim 55^\circ\text{C}$ 内,在 工 作 负 载 范 围 内 的 DDC 模 拟 量 输 出 测 量 精 度 能 达 到 0.2% 之 内,达 到 了 预 期 目 标。

4.2 软件测试

以 定 风 量 系 统 为 例,将 DDC 与 水 压、温 度 等 信 号

传感器以及阀门执行器相连接进行测试,得到的数据如表 2 和表 3 所示。

可以看到,DDC 通过控制冷水系统风机盘管装置 (fan coil unit,FCU) 上的电动调节阀开关来调整冷水流量,从而改变室温。具体控制是将装设在回风管内的温度传感器检测的温度值和水压传感器检测的回水管三通阀两侧的水压值,送往 DDC 控制器计算压差并

比较实测温度和设定温度;采用 PID 算法控制输出相应的电压信号,以控制装在 FCU 回水管的电动调节阀的开关。当检测温度大于设定点温度时,打开电动调节阀或增加其开度,增加冷水流量,使循环风变冷送入室内,从而降低室内温度;当检测温度低于设定点温度时,关闭电动调节阀或减少其开度,减少冷水流量,使循环风变暖送入室内,从而提高室内温度。

表 2 制冷工作模式
Tab.2 Refrigeration mode

设定温度 $T_s/^\circ\text{C}$	水温 $T_w/^\circ\text{C}$	环境温度 $T_a/^\circ\text{C}$	阀门两侧压强差 $\Delta P/\text{kPa}$	电子开度 $E_v/\%$	机械开度 $M_v/\%$	阀门流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
20	26.9	28.0	201	100	42.10	39.1
30	27.0	27.6	192	47	16.50	14.9
20	26.9	27.7	396	100	33.00	43.0
30	27.0	27.7	403	70	19.50	25.5
20	26.9	27.8	597	100	28.80	46.2
30	26.9	27.9	605	91	24.60	39.2

表 3 加热工作模式
Tab.3 Heating mode

设定温度 $T_s/^\circ\text{C}$	水温 $T_w/^\circ\text{C}$	环境温度 $T_a/^\circ\text{C}$	阀门两侧压强差 $\Delta P/\text{kPa}$	电子开度 $E_v/\%$	机械开度 $M_v/\%$	阀门流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
23	31.5	27.7	202	71.90	18.50	17.30
30	31.5	28.0	189	100.00	29.90	27.10
23	31.0	27.6	392	81.50	18.40	23.60
30	31.0	27.9	392	100.00	24.10	31.20

机械开度随温差变化的情况,以及理论计算值与实际 DDC 显示的测量计算值作比较的结果如图 5 所示。

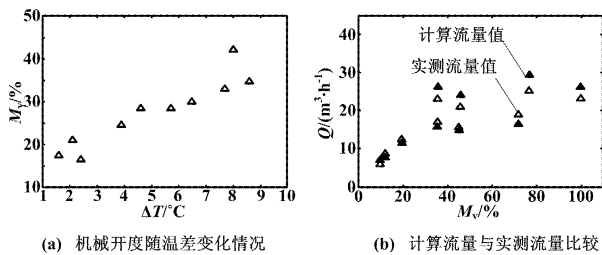


图 5 机械开度变化及与理论值的比较
Fig.5 Variation of mechanical valve opening and the comparison with theoretical values

图 5(a) 给出了在一定水温和工作模式下,环境温度与设定温度差对瞬时阀门机械开度的影响。可以看出,固定环境下阀门开度随环境温度与设定温度差呈正增长变化。这一变化趋势可充分说明由 PID 算法控制下的暖通控制器可以根据外界环境及目标参数的变化进行智能调节。

图 5(b) 给出了在不同机械开度下阀门的理论流

量值与实测流量值的变化趋势。由于多重参数的影响,理论流量值的计算在机械开度较大时仍需要进一步修正。

5 结束语

本控制器采用多项嵌入式先进技术,具有使用简单、技术成熟、开发相对容易和开发周期短的优点。控制器测量电路采用软件补偿法提高精度,符合 0.5 s 级精度要求;采用 RS-485 串行传输数据,既可进行 DDC 之间的异步通信,也可直接与 PC 机相连,接受上位机的统一管理;具有历史曲线记录和数据追忆功能,方便用户获取数据并分析数据。

该 DDC 集工作曲线和配置信息记录、运行状态和实时数据显示、热量和流量积算、温度和流量调节等功能于一体,适用于各种定风量、变风量和变流量的空调系统。测试结果表明,系统测量精度高、运算速度快、控制效果好、运行稳定,符合设计预期,能够满足功能要求及操作环境要求。

(下转第 17 页)

时体积收缩产生的空隙。而通过离心作用会使液体接触充分,局部过热现象减少;同时因为强大的离心力,使体积收缩的空隙立刻被 MMA 液体填补。可见离心旋转是抑制气泡产生的有效手段。

2.3 聚合条件分析

测试样品的具体工艺过程如表 1 所示。

表 1 工艺过程
Tab.1 Technical process

样品	各温度下的保温时间/h		
	45 °C	70 °C	90 °C
试样 2	24	120	48
试样 7	48	160	48
试样 8	12	72	48

甄珍等人曾经讨论过凝胶聚合反应中聚合反应条件对 GI POF 预制棒的折射率分布的影响,但其仅采用恒温方法进行试验^[10]。在聚合过程中缓慢、分阶段的升温可以让反应进行得更平稳、更充分。混合物中 AIBN 和 BPO 的分解温度分别为 80 °C 和 100 °C,一旦温度过高分解,会生成 N₂,同时,引发剂减少,使聚合反应速度变慢,导致聚合物分子量上升,不利于后续的拉丝成纤。综合考虑后试验采用逐级升温的方法,3 个样品各温度阶段的保温时间长度不同。由图 2 可看出,样品在边缘处的折射率分布较一致,虽然 45 °C 反应的时间差别很大,但此时聚合反应缓慢,温度对折射率分布的影响较小。当升温到 70 °C 后反应增强,比较 3 个样品中段半径的折射率分布随着反应时间的增加变得更加陡峭。由此可看出,随着时间增加,聚合反应的影响大于离心旋转的影响,对折射率的分布起到决定性的作用。

3 结束语

本文利用离心旋转装置,采用界面凝胶法制备出

具有折射率梯度分布的 PMMA 聚合物光纤预制棒,利用拉丝机将其热拉伸成纤,制备出 POF。经测试得出制备的 POF 的折射率分布是梯度折射率分布,说明界面凝胶反应对折射率分布的影响大于离心旋转的影响,同时又能够消除聚合反应中产生气泡的不良因素。这种方法是较好的 GI POF 预制棒的制备方法。初步分析不同聚合温度时间对折射率分布的影响,对于制备光纤预制棒有一定的指导意义,如果进一步研究掺杂浓度、温度、分子体积等条件,可以完善聚合物光纤的制备条件,得到性能优良的样品。

参考文献

- [1] 杨春,孙小蕊,张明德,等.用于短距离通信的塑料光纤技术[J].高技术通讯,2000(2):107-111.
- [2] Masataka S, Takaaki I, Yasuhiro K, et al. Thermally stable high-bandwidth graded-index polymer optical fiber[J]. Lightwave Technology, 2000, 18(7):952-958
- [3] 明海,马辉,张涛,等.聚合物光纤与功能器件的研究与应用[J].量子电子学报,2004,21(2):258-264.
- [4] 许兴胜,王苗,马辉,等.100 Mbit/s 聚合物光纤通信系统[J].中国激光,2003,30(1):38-40.
- [5] Losada M A, Garces, Mateo J. Mode coupling contribution to radiation losses in curvatures for high and low numerical aperture plastic optical fibers[J]. Lightwave Technology, 2002, 20(7):1160-1164.
- [6] 于荣金,张冰.新一代塑料光纤及其功能开发[J].中国科学 E 辑:技术科学,2008,38(5):807-816.
- [7] 郝爱华,毛智礼,贺锋涛.单模及多模光纤折射率分布测量方法研究[J].应用光学,2005(5):41-44.
- [8] 王学忠,阮驰,高英俊.低损耗阶跃塑料光纤工艺的研究[J].光子学报,2001,31(7):870-873.
- [9] 李忠辉,葛文萍,殷宗敏,等.渐变型聚合物光纤研究进展[J].光纤与电缆及其应用技术,2003(1):1-6.
- [10] 甄珍,唐俊辉,王东君,等.聚合反应条件对渐变型塑料光纤预制棒的折射率分布的影响[J].高分子学报,2000(2):153-156.

(上接第 14 页)

参考文献

- [1] 江亿.我国建筑耗能状况及有效的节能途径[J].暖通空调,2005,35(5):30-40.
- [2] 罗鑫,沈大中,冯冬青.神经网络算法在暖通空调控制中的应用[J].微计算机信息,2009,25(1):26-27.
- [3] 李冬辉,邹宝兰.楼宇自动化系统中 DDC 控制器模块化组态设计[J].仪器仪表学报,2002,23(z1):347-348.
- [4] 方忠祥,屠立,孟建翔.基于 DDC 控制的空调节能技术研究与应用[J].机电工程技术,2005,34(7):53-56.
- [5] 曹立学.基于智能采集模块的 DDC 系统设计与实现[J].自动

化技术与应用,2008,27(6):97-99.

- [6] 杨剑,刘光斌.单片机系统中应用的几种数字滤波方式[J].微计算机应用,2006,27(1):114-115.
- [7] 刘虎,孙博,张振兴.中央空调空气处理机组 DDC 控制器的研制[J].制冷与空调(四川),2007,21(2):94-96.
- [8] 田应丽,任庆昌.基于 DDC 的变风量空调机组复合模糊控制[J].制冷与空调,2007,7(6):17-21.
- [9] 赵畅,张嵘.小型温控系统的研究[J].微计算机信息,2008,24(19):8-10.
- [10] 历风满.数字 PID 控制算法的研究[J].辽宁大学学报:自然科学版,2005,32(4):369-370.