

# 基于高性能 FPGA 的智能加湿器设计

高 操, 罗小华, 仲雪倩

(浙江大学 电气工程学院, 杭州 310058)

**摘 要:** 针对当前加湿器调节便捷性和准确性不够的问题,设计了一种基于 FPGA 芯片的智能加湿器。通过将环境湿度采样周期、工作条件等代入预测系统,建立预测控制模型,再通过超声波加湿部件、温湿检测部件和 FPGA 控制部件,形成闭环反馈回路系统,FPGA 控制部件根据湿度传感器数据,调节输出方波信号占空比,达到智能调节湿度的效果。系统仿真和实测结果表明,该系统湿度测量准确、稳定可靠、可扩展性强。

**关键词:** 加湿器; FPGA 芯片; 智能控制

**中图分类号:** TP 23; TN 402 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671 - 7147(2011)05 - 0546 - 05

## Design of Intelligent Humidifier Based on High-Performance FPGA

GAO Cao, LUO Xiao-hua, ZHONG Xue-qian

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

**Abstract:** Due to the deficiency in accuracy and convenience of present humidifier, an implementation of intelligent humidifier based on field programmable gate arrays (FPGA) chip is presented. A predictive control model is established by introduction of environment sampling period and working condition into predictive system. A close-loop feedback system is assembled with ultrasonic humidifying unit, temperature and moisture sensor, and FPGA control system. Intelligent control of humidity is thus realized, as output waveform duty-cycle is regulated according to sensor input by FPGA. The results for system simulation and real test demonstrated good accuracy, reliability, and extensibility.

**Key words:** Humidifier, FPGA chip, Intelligent control

加湿器作为调节室内环境、净化空气的装置,在生活和生产中被广泛应用。付卫东等在论文<sup>[1]</sup>中分析了影响超声波加湿器性能的因素,包括环境湿度以及工作占空比等。为改进加湿器性能,已提出多种设计,例如李雯婷<sup>[2]</sup>提出的一种基于单片机的工业加湿系统,以及 Clemens<sup>[3]</sup>提出的基于不同湿度环境的控制方案。然而,一方面,当前加湿器设计主要通过旋钮或按键手动调节喷雾量,使用不便,不能实现根据室内湿度自动控制的功能;另一方面,多是利用被动的电阻型传感器<sup>[4]</sup>或电容型传感器<sup>[5]</sup>,利用简单的控制电路实现恒湿的功能,准确

性和可扩展性都不能够满足用户的需求。

在数字系统之中,FPGA(field programmable gate arrays)相对于单片机控制,具有速度快、应用灵活等优点。FPGA在开发阶段具有安全、方便、可随时修改设计等不可替代的优点,在电子系统中采用FPGA可以极大地提升硬件系统设计的灵活性、可靠性,以及提高硬件开发的速度和降低系统的成本<sup>[6]</sup>。FPGA器件作为系统控制的核心,具有灵活的现场可更改性以及可再配置能力,在不更改硬件电路的基础上,可以进一步提高系统的性能。本文中提出了一种采用数字传感器以及FPGA芯片作为湿

收稿日期:2011-09-05; 修订日期:2011-10-12。

作者简介:高操(1990—),男,江苏南京人,电子信息工程专业本科生。

\* 通信作者:罗小华(1975—),男,江西广昌人,副教授,硕士生导师。主要从事集成电路验证、参数提取及布图自动化研究。Email: luoxh@vlsi.zju.edu.cn

度的检测和控制系统的智能驱动超声波雾化设计方案, 可以很好满足系统的智能控制要求, 并提供良好的准确性及可扩展性。

## 1 基于高性能 FPGA 的智能加湿器

系统采用预测控制, 期望能够获得一组控制量  $u(k)$ , 将环境湿度采样周期、工作条件等代入预测系统, 建立预测控制模型, 通过该控制器施加到被控对象上, 实现湿度控制的最优<sup>[7]</sup>。预测控制中优化指标的表达式如公式(1) 所示:

$$J = \sum_{i=1}^p [y_p(k+i) - y_r(k+i)] \quad (1)$$

式(1) 中,  $J$  表示优化量,  $y_p(k+i)$  表示下一个时刻的预测值,  $y_r(k+i)$  是根据设定值与实时反馈值确定的变化参考轨迹, 计算方法如公式(2) 所示:

$$y_r(k+i) = \alpha^i y_r(k) + (1 - \alpha^i) y_{sp}(k), \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (2)$$

式(2) 中,  $\alpha = 1 - e^{-\frac{T_0}{\tau}}$ , 其中  $\tau$  是参考轨迹的时间常数,  $T_0$  是采样周期,  $y_{sp}(k)$  是系统的预设值。

在收集到室内温湿度的基础上, 运用预测控制算法, 对加湿器的输出加以控制。预测控制系统的结构如图 1 所示。

基于高性能 FPGA 的智能加湿器主要由加湿部件、温湿度检测部件和 FPGA 控制部件形成一个闭环反馈回路系统, 如图 2 所示。湿度由温湿度传感器检测传递给 FPGA 芯片, FPGA 读取传感器数据后, 根据环境湿度确定输出方波信号的占空比。通过读

取环境数据, 调节占空比, 系统可以根据室内情况调节超声波电路的输出, 达到自动控制的效果。

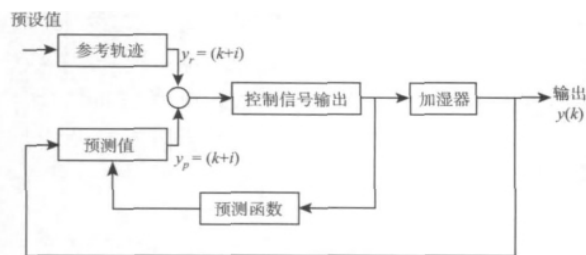


图 1 预测控制系统结构

Fig. 1 Structure of predictive control system

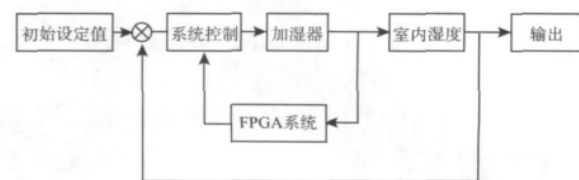


图 2 智能加湿器闭环反馈回路系统

Fig. 2 Close-loop feedback system for intelligent humidifier

## 2 FPGA 逻辑设计

FPGA 逻辑顶层结构如图 3 所示, 以信号收发模块和输出控制模块为程序的核心模块, 分析输入的温湿度信号和产生相应的输出。显示模块用于和用户的交互, 时钟模块和分频模块用于提供其他各模块的时钟信号。

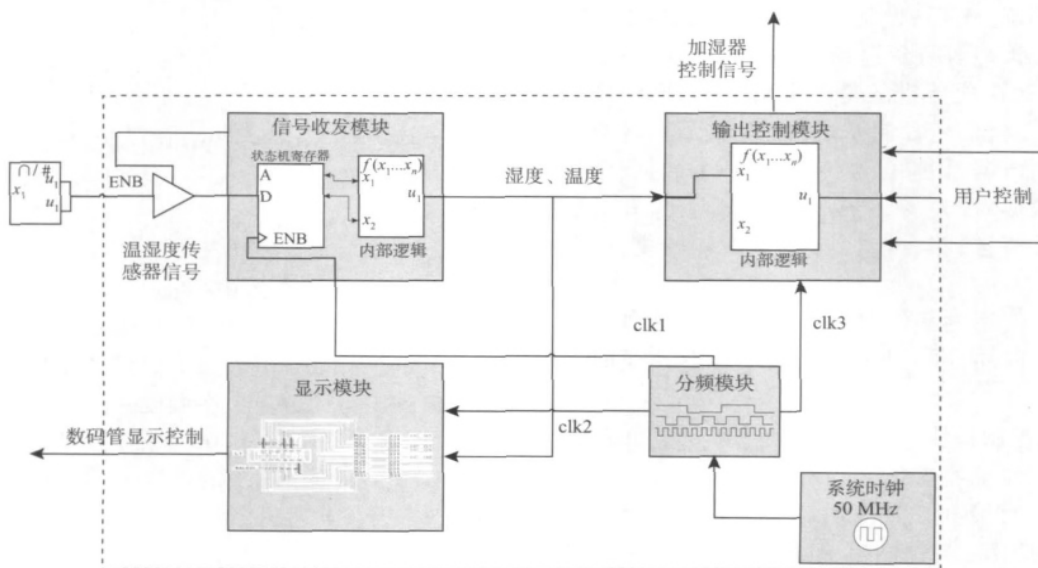


图 3 顶层结构图

Fig. 3 Top module structure

## 2.1 信号收发模块

信号收发模块用于 FPGA 和传感器之间的通信,通过设计有限状态机(FSM),实现存储工作状态,确定延迟时间,并实现各状态间切换。基于稳定性的考虑,模块中采用 Moore 状态机,状态间的切换主要根据温湿度传感器 DHT11 的通信方式设计<sup>[8]</sup>,状态机状态转换如图 4 所示。

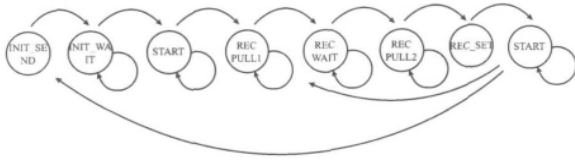


图4 状态机状态转换示意图

Fig.4 State transition diagrams of FSM

状态机共有 8 个状态。

000( INIT\_SEND): 初始化,将信号口转为输出,并输出低电平,即对应 DHT11 的“主机发送开始信号”,设延迟值为 18 ms,转状态 1;

001( INIT\_WAIT): 等待延迟结束,然后将信号口转为输入,设延迟值为 50  $\mu$ s,转状态 2;

011( START): 等待延迟结束,判断 DHT11 有没有将信号拉低,即产生响应信号。如没有,则 DHT11 未成功启动,回状态 0; 如有,则继续,转状态 3;

010( REC\_PULL1): 等待 DHT11 将信号拉高,然后转状态 4;

110( REC\_WAIT): 等待 DHT11 重新将信号拉低,传输开始,然后转状态 5;

111( REC\_PULL2): 等待 DHT11 将信号拉高,然后转状态 6;

101( REC\_SET): 设延迟值为 50  $\mu$ s,转状态 7;

111( REC): 等待延迟结束,如果 50  $\mu$ s 后信号仍为高,那么这次传进的是一个高电平,反之则是一个低电平。将信号存储下来,再回到状态 4,重新传输一个新数据; 如果已经传输了 40 个数据,则处理前面的数据,校验,转化成对应的占空比,并最后传化为开关信号,然后转状态 0,重新初始化,读取数据。

状态机使用的格雷码在任意相邻两个数据之间只有一位不同,可以在很大程度上消除由延时引起的过渡状态<sup>[9]</sup>。

## 2.2 输出控制模块

输出控制模块在信号收发模块获取湿度信号后,根据用户设定的湿度,通过公式计算出合适的占空比控制加湿器。控制模块中使用前述预测控制系统加以实现,以用户所设定的湿度作为标准,与室内的湿度进行比较,得到湿度变化参考轨迹,再进一步得到控制量的调整值。控制系统根据超声波

加湿部分的具体性能指标,确定输入量和输出量即工作占空比之间的关系,由此确定控制系统的输出量。

室温为  $T_0$  (18  $^{\circ}$ C)、空气湿度为  $H_0$  (45%) 的人体感觉最为适宜<sup>[10]</sup>,如果温度上升,则湿度需要下调,以满足人体排汗的需要。一般而言,空气湿度的上限值  $H_{\max}$  为 65%,超过最大湿度值则会感觉不适。由此,可以将室温为  $T_0$ 、空气湿度为  $H_0$  作为输出的基准值,当湿度升高时,则减少加湿器输出占空比,使室内湿度下降,反之同理,即令湿度和温度之间再复合如下简单公式,从而使室内环境最舒适:

$$y_{sp} = 0.87(T - T_0) + H_0 \quad (3)$$

式(3)中,  $y_{sp}$  为预定要达到的湿度标准,  $T$  为室内温度, 0.87 为公式系数。将式(3)代入式(2)中,可得

$$y_r(k+i) = \alpha^i y_r(k) + (1 - \alpha^i)(0.87(T - T_0) + H_0) \quad (4)$$

令式(4)中  $\tau = 0.5T_0$ ,  $\alpha = 0.393$ 。如果在需要较快调节速度的系统中,可以调高  $\tau$  值,降低  $\alpha$ ; 反之,在需要较高稳定性的系统中,可以降低  $\tau$  值,提高  $\alpha$ 。令式(4)中  $i$  取 1,即每一次取样就改变控制系统的输出。在取样频率比较高的系统中,可以增加  $i$  值,以降低输出调节的频率。如果将  $T_0$ 、 $H_0$  以实际值代入,综上所述,式(4)由此可以化为

$$y_r(k+1) = 0.393y_r(k) + 0.528T + 17.8 \quad (5)$$

则式(1)为

$$J = 0.87(T - 18) + 45 - 0.393y_r(k) - 0.528T - 17.8 = 0.342T - 0.393y_r(k) + 11.5 \quad (6)$$

根据加湿器性能参数,将  $J$  转化为合适的占空比,即可控制加湿器的输出。

## 3 仿真与测试

系统选用 Xilinx 的 Virtex2 FPGA 芯片进行了逻辑设计,软件平台为 Xilinx ISE9.1,采用 Verilog HDL 硬件语言编写。

图 5 是 FPGA 的状态机完成一个周期后并输出控制信号的情况。其中,check 信号为验证信号, duty cycle 为占空比输出。利用 check 信号成功确认 mois(湿度)和 temp(温度)信号的正确性后,计算出相应的占空比。可见,在湿度 45%、温度 18  $^{\circ}$ C 的条件下,占空比输出为 30,实现了预期的效果。

在 FPGA 程序实现的基础上,将其他模块连接到 FPGA 开发板上,搭建了智能加湿系统,以测试整个系统的功能。测试系统使用 DHT11 作为温湿度传感器,一组开关电源和超声波换能电路作为超声波输出。在 15  $\text{m}^2$  的房间中,以不同的温度和湿度条件完成了多次测试,测试结果见表 1—3。

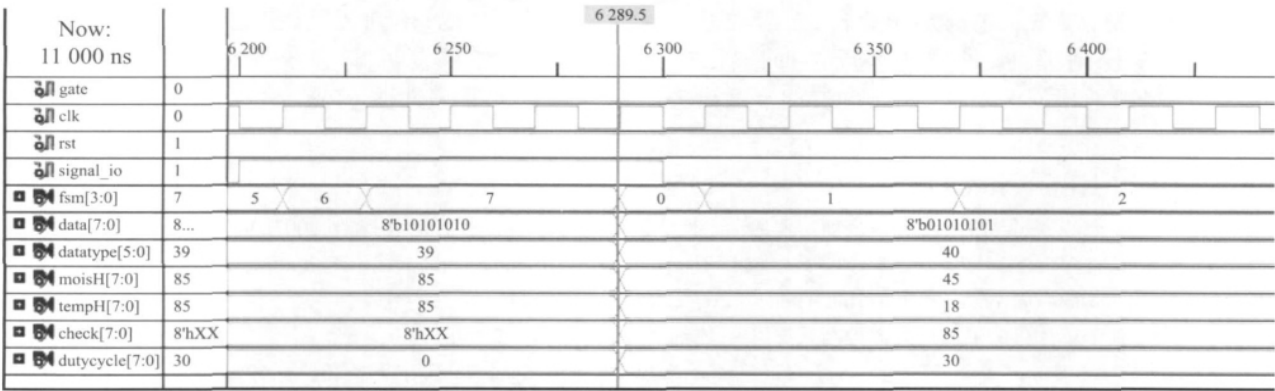


图 5 FPGA 仿真输出(完成一个周期)  
Fig. 5 FPGA simulation waveform (accomplishing one full cycle)

表 1 18 ℃ 加湿器工作情况  
Tab.1 Working status of the humidifier at 18 ℃

组别	湿度 /%	工作占空比 /%	时间 /min
第 1 组	30	48	0
	35	44	2
	41	41	4
	43	37	6
	45	34	8
	45	31	10
	45	30	12
	45	30	14
第 2 组	80	3	0
	70	3	2
	62	3	4
	57	5	6
	52	16	8
	48	24	10
	44	34	12
	45	32	14

表 2 26 ℃ 加湿器工作情况<sup>1)</sup>  
Tab.2 Working status of the humidifier at 26 ℃

湿度 /%	工作占空比 /%	时间 /min
30	54	0
36	51	2
41	46	4
44	44	6
46	41	8
48	38	10
50	36	12
50	34	14

注: <sup>1)</sup> 第 3 组。

表 3 32 ℃ 加湿器工作情况<sup>1)</sup>  
Tab.3 Working status of the humidifier at 32 ℃

湿度 /%	工作占空比 /%	时间 /min
30	56	0
37	53	2
43	49	4
47	46	6
50	44	8
54	41	10
56	38	12
57	36	14

注: <sup>1)</sup> 第 4 组。

在第 1 组测试中,在室温 18 ℃、初始湿度 30% 的情况下,加湿器经过约 8 min,将湿度调节至 45%,并稳定保持,满足式(3) 的要求。其中加湿器在室内湿度和实际湿度差距较大的情况下运行在比较大的占空比之下,在差距较小时则减少输出,满足理论设定的预测控制的要求。在第 2 组测试中,在室温 18 ℃、初始湿度 80% 的情况下,加湿器则保持很低的输出功率,直到湿度达到预定的 45%,再保持该湿度值,同样满足设计要求。同样,在第 3、第 4 组测试中,在不同的室温条件下,加湿器都可以将湿度最终调节为式(3) 所确定的最佳湿度,并加以保持。

从表中可以看出,对应不同的温度,系统最后会将环境的湿度调节成对应的最佳值并保持,能够实现室内湿度的正确控制,满足设计要求。

4 结 语

作者设计的加湿器系统基于 FPGA 芯片,将环境湿度采样周期、工作条件等代入预测系统,建立

预测控制模型,通过超声波加湿部件、温湿检测部件和 FPGA 控制部件,形成闭环反馈回路系统,FPGA 控制部件根据湿度传感器数据,调节输出方

波信号占空比,达到智能调节湿度的效果。系统仿真和实测结果表明,该系统具有湿度测量准确、稳定可靠、可扩展性强等特点。

## 参考文献(References):

- [1] 付卫东,王海峰,王保东.一种超声波加湿器的动态性能研究[J].郑州大学学报:工学版,2007,28(2):57-59.  
FU Wei-dong, WANG Hai-feng, WANG Bao-dong. The study of the dynamic performance of an ultrasonic humidifier [J]. Journal of Zhengzhou University: Engineering Science, 2007,28(2):57-59. (in Chinese)
- [2] 李雯婷.基于单片机的工业加湿器控制系统[D].成都:成都理工大学,2010.
- [3] Clemens R B. Control option for various humidification technology [J]. Symposia SA,1996,10(1):607.
- [4] 李文强,杨录,王万月.一种具有温度补偿的盐雾湿度传感器的设计[J].传感器世界,2008(11):29-32.  
LI Wen-qiang, YANG Lu, Wang Wan-yue. Study on a kind of humidity sensor with temperature compensation used in salt air [J]. Sensor World, 2008(11):29-32. (in Chinese)
- [5] 常君,李延.湿度传感器 HS1101 在智能家居控制系统中的应用[J].电子测试,2008(2):77-80.  
CHANG Jun, LI Yan. Application of humidity sensor HS1101 in intelligent home control system [J]. Electronic Test, 2008(2):77-80. (in Chinese)
- [6] 刘如金.基于FPGA同步电路的实现[J].电子产品可靠性与环境试验,2011(2):39-41.  
LIU Ru-jin. Implementation of FPGA synchronous circuit [J]. Electronic Product Reliability and Environmental Testing, 2011(2):39-41. (in Chinese)
- [7] 贺培春.基于舒适度的室内空气调节系统研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [8] 倪天龙.单总线传感器 DHT11 在温湿度测控中的应用[J].单片机与嵌入式系统应用,2010(6):60-62.  
NI Tian-long. Application of single bus sensor DHT11 in temperature humidity measure and control system [J]. Microcontrollers and Embedded Systems, 2010(6):60-62. (in Chinese)
- [9] 宋烈武,石强.设计 CPLD/ FPGA 状态机的稳定性探究[J].中南民族大学学报:自然科学版,2003(9):24-27.  
SONG Lie-wu, SHI Qiang. Study of design of CPLD/FPGA state machine [J]. Journal of South Central University for Nationalities: Nat Sci Edition, 2003(9):24-27. (in Chinese)
- [10] 刘朝纯.基于FPGA的粮仓温湿度模糊监控系统[D].哈尔滨:东北农业大学,2008.

(责任编辑:秦和平)