

# 焓差实验室控制系统的设计实现

王晓乐, 王少林, 王 岷

山东建筑大学, 山东 济南

收稿日期: 2022年5月17日; 录用日期: 2022年6月16日; 发布日期: 2022年6月27日

## 摘 要

为提高焓差实验室控制系统的实时性、稳定性, 提出引入实时数据库系统将多台PLC组成一个统一整体, 分析了现有焓差实验室的控制方法, 阐述了控制系统的整体架构、硬件架构以及实时数据库系统架构, 该控制系统采用模糊控制算法, 为焓差实验室控制系统提供自动化控制和数据监控, 确保焓差实验室的恒温恒湿自动控制的准确性与稳定性。

## 关键词

实时数据库系统, 数据监控, 多源异构数据采集, 模糊控制

# Design and Realization of Enthalpy Difference Laboratory Control System

Xiaole Wang, Shaolin Wang, Min Wang

Shandong Jianzhu University, Jinan Shandong

Received: May 17<sup>th</sup>, 2022; accepted: Jun. 16<sup>th</sup>, 2022; published: Jun. 27<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

To improve the real-time and stability of enthalpy difference laboratory control system, the paper puts forward the introduction of real-time database system to form a unified whole of multiple PLCs. By analyzing the existing control methods of enthalpy difference laboratory, the overall architecture, hardware architecture and real-time database system architecture of the control system are described. The control system adopts fuzzy control algorithm to provide automatic control and data monitoring for the control system of enthalpy difference laboratory, ensuring the accuracy and stability of the automatic control of constant temperature and humidity of enthalpy difference laboratory.

## Keywords

Real-Time Database System, Data Monitoring, Multi-Source Heterogeneous Data Acquisition, Fuzzy Control

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前, 风机盘管供冷量和供热量的测试方法主要是空气焓差法。焓差实验室就是通过采用制冷机组、电加热、电加湿使房间达到恒温恒湿的实验环境, 模拟各种不同的温、湿度环境工况, 并同时测试空调的各种性能参数如制冷能力、制热能力等。

目前国内焓差实验室试验台控制系统大多采用单一 PLC、智能仪表的计算机控制系统, 实现对工控设备的逻辑控制和单回路 PID 控制[1]。对大型焓差实验室系统, 其控制复杂性高, 属于多参数耦合的大滞后系统, 数据量大, 实时性强[2], 仅采用 PLC 作为主控器的方式已无法满足需求。因此本文提出采用实时数据库系统解决这一问题。

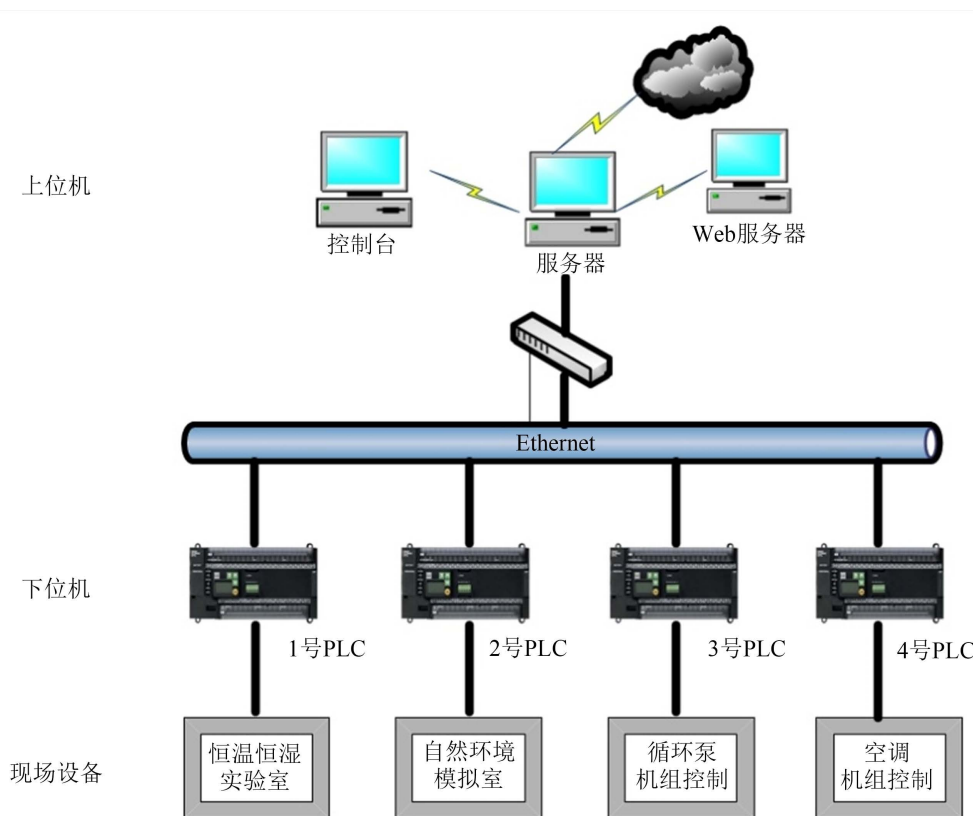
实时数据库的研究自 20 世纪 80 年代后期开始越来越受到重视, 实时数据库系统是其事务和数据都可以具有定时特性或显性的定时限制的数据库系统, 是传统的实时系统和数据库系统相结合的产物[3]。实时数据库能够有效的控制系统对数据的实时性、准确性、高吞吐量和高效存储的要求, 同时依赖事务调度优化算法保障系统可靠性和稳定性。目前已有一些比较成熟的实时数据库产品, 海外的实时数据库产品主要有美国 OSI 公司的 PI 实时数据库系统、AspenTech 公司研发的 InfoPlus21 实时数据库系统、HoneyWell 公司研发的 PHD 实时数据库系统等, 国内有浙江中控公司研发的 ESP-iSYS 实时数据库系统、大庆金桥公司研发的 ConRTDB 实时数据库系统、北京三维天地公司研发的 SuperInfo 实时数据库系统[4]。但是这些实时数据库系统大部分是应用于大型工业领域, 并不能够与小型控制系统有较好地融合, 同时这些系统的产品成本和工程成本高。

文章第 2 节, 介绍焓差实验室控制试验台采用三层分布式控制系统架构; 文章第 3 节针对焓差实验室控制系统的需求, 提出采用实时数据库系统对多源异构数据进行集成, 实现数据采集、分析处理, 后台数据处理与前台界面设计相剥离, 达到对焓差实验室控制系统的分散控制、集中管理; 文章第 4 节提出采用模糊控制算法, 对水泵频率、风机风速大小、电加热占空比等参数进行自动调节, 实现保持焓差实验室恒温恒湿的自动控制; 文章第 5 节对该文章进行总结。

## 2. 控制系统概述

焓差实验室控制系统总体分为现场设备层、控制层、和管理应用层。控制系统总体框图如图 1。现场设备有包括流量计、温度传感器、压力变送器、循环泵、电加热器、电加湿器、空气源热泵系统、计量称等, 通过分布式 PLC、串口、以太网接口等形式与服务器连接, 服务器通过同 PLC 以以太网的形式进行通信, 采集现场设备的相关数据。控制台是负责对下位机进行控制, 同时服务器还具备将数据发送至云服务器的功能。

多台 PLC 分别放置在不同的区域, 每台 PLC 对每个区域的设备和仪表进行控制。再经交换机将上位机同四台 PLC 组成一个局域网, 通过上位机实现统一管理, 从而达到分散控制, 集中管理。



**Figure 1.** Overall block diagram of enthalpy difference laboratory control system  
**图 1.** 焓差实验室控制系统总体框图

PLC 通过扩展模拟量输入输出模块，实现 PLC 与现场各个传感变送器和控制器信号的传输。现场采用 PT100 热电阻、压力变送器、流量计等传感变送器，将测量值以 4~20 mA 的电流信号传输给 PLC 后转化为数字信号，实现对所需各种类型数据的采集。现场部分的需要精细控制的执行器配备其控制器，可以接收 PLC 模拟量输出模块的模拟信号，间接实现对执行器的精确控制。PLC 同上位机通信是 Fins 协议，采用套接字通信，PLC 为客户端，上位机为服务端。

### 3. 数据采集与处理

#### 3.1. 实时数据库系统架构

实时数据库系统架构可分为三层：应用层、数据管理层、数据采集层，如图 2 所示。基于 SOA 的设计思想，实时数据库系统架构的不同功能单元被设计为服务，这些服务之间通过定义良好的接口进行任务交互和处理。实时数据库可以对所有的事务和数据设置定时，利用定时显式的限制事务处理数据的时间，确保了限时的数据处理能力，以达到实时性要求。

#### 3.2. 数据采集

焓差实验室的模拟量数据主要是温度、流量、压力、水箱液位等，数据来源有 PLC、空气源热泵、现场传感器的数据，数据接口有 RS485、以太网、OPC 等，数据协议包括 Fins、ModBus、TCP/IP 等。数据采集软件采用分而治之的思想进行数据采集，依据设备类型、接口类型、协议类型等进行分类采集。数据处理模块将这些多源异构的数据进行数据处理，按照统一的通信协议进行组织上传。

该焓差实验室系统采用欧姆龙(OMRON) PLC，通讯协议为 FINS (factory interface network service)通信协议，FINS 以太网通信协议模型如图 3 所示，FINS 协议是欧姆龙公司开发的用于工业自动化控制网络的指令/响应系统。使用 FINS 指令可实现各种网络间的无缝通信，包括用于信息网络的 Ethernet (以太网)，用于控制网络的 ControllerLink 和 SYSMAC LINK。通过编程发送 FINS 指令，上位机或 PLC 就能够读写另一个 PLC 数据区的内容，甚至控制其运行状态，从而简化了用户程序。FINS 协议支持工业以太网，这就为 OMRON PLC 与上位机以太网通信的实现提供了可能。

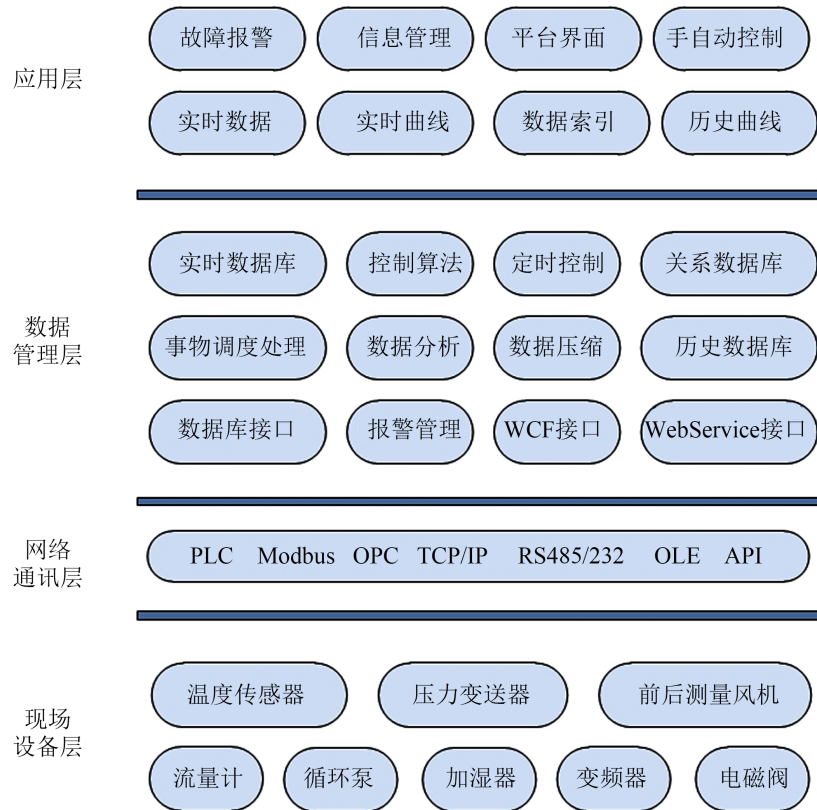


Figure 2. Real-time database system architecture  
图 2. 实时数据库系统架构

应用层	Fins	Node Address	
传输层	UDP	UDP Port No.	TCP TCP Port No.
Internet层	IP	IP Address	
物理层	Ethernet	Ethernet Address	

Figure 3. FINS Ethernet communication protocol model  
图 3. FINS 以太网通信协议模型

### 3.3. 数据管理层

微内核是面向对象理论在操作系统设计中应用的产物，把操作系统结构中的内存管理、设备管理、文件系统等高级服务功能尽可能从内核分离变成独立模块，使内核功能变得简洁可靠，而各独立模块具有各子独立的运行空间，模块之间以 LPC (进程间通信)方式来完成单内核中相同功能的调用。

实时数据库依照微内核结构的思想，将数据管理层再细分成内核层和系统服务层。无论内核层里的模块还是系统服务层的模块都作为独立的进程运行，相互之间通过 LPC 进行通信。

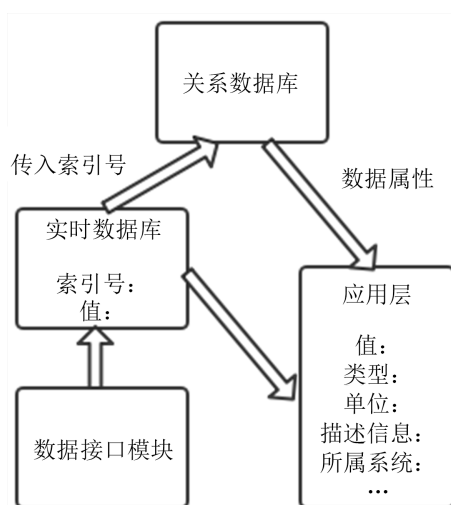


Figure 4. Centralized organizational structure in a real-time database

图 4. 实时数据库中的中心化组织结构

数据管理层内核层是一个以内存实时数据库为基础的实时数据库，组织结构采用中心化组织结构如图 4，关系数据库模块负责存储和管理焓差实验室系统中所有数据的元数据，包括数据类型、所属系统、单位、量程等，中心化组织结构的实现相对简单，能够降低控制系统的设计负责度。控制算法服务模块中有预先设定得 PID 控制算法，通过 LPC 同内核层进行数据交互和数据处理实现自动化控制；事务调度服务模块使得各个事务均得到最快处理，实现事务并发处理及负责平衡；WCF 接口服务模块方便数据库系统被第三方集成，为 B/S 架构和 C/S 架构提供接口基础。

### 3.4. 应用层

实时数据库应用层如图 5 是在数据集成的基础上对数据进行利用和发掘，实现实时数据库系统的增值应用。焓差实验室实时数据库系统采用定制开发模式，使管理系统同实验实际流程紧密结合。

## 4. 模糊控制算法

模糊控制是以模糊集合理论和模糊推理为基础，可类比人完成特定的控制工作。模糊控制是用于非线性控制的方法，适合于非线性时变和纯滞后的系统控制[5]。在焓差实验室控制系统中，温度调节的被控参数主要是水泵的流量、风机的风量大小以及电阻丝的电加热来实现对焓差实验室控制系统的温湿度调节，以保证系统的恒温恒湿稳定[6]。在控制系统中，温度调节的鲁棒性较强，具有大滞后的特点[7]，因此本文采用模糊控制算法，根据专家对于焓差实验室控制系统温度调节的经验总结并归纳出控制规则设计模糊控制器来实现自动控制。

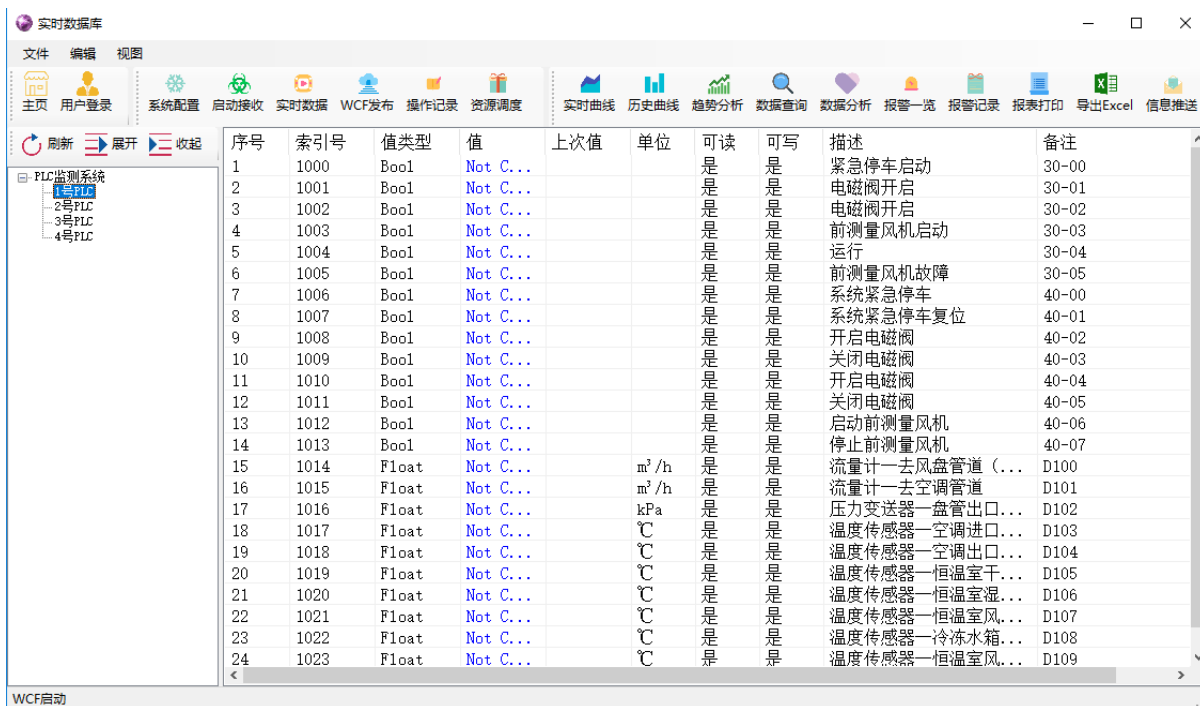


Figure 5. Real-time database application layer  
图 5. 实时数据库应用层

### 4.1. 模糊化

模糊控制器的设计包括的部分有输入模糊化，根据专家经验和数据总结建立规则库，模糊推理和逆模糊化。本设计中，设  $r$  为目标温度值， $y$  为当下实际测得室内温度值，则输入为  $e = r - y$ ，即室内温度误差。设  $e$  对应的模糊变量为  $SE$ ，在建立模糊集的时候并非越多越好，因为数量的增多会加大模糊推理的计算量，故 3 至 10 个为最适宜，从这个角度出发，定义  $SE$  和  $SEC$  的模糊子集各取的 7 个语言值，即 {负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，简记为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，则变量的量化(模糊)论域均为  $\{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$ 。模糊控制最终控制的是电阻丝的占空比  $U$ ，定义其基本论域为  $[0, 100]$ ，模糊子集为 {零，微调，中调，长调}，简记为 {ZO, PS, PM, PB}，量化论域为  $\{0, 1, 2, 3, 4\}$ 。模糊输入变量  $SE$  和模糊输出变量  $U$  合理赋值，如表 1 和表 2 所示。

Table 1. Fuzzy input variable assignment table  
表 1. 模糊输入变量赋值表

SE	-3	-2	-1	0	1	2	3
NB	1.0	0.5	0	0	0	0	0
NM	0.5	1.0	0.5	0	0	0	0
NS	0	0.5	1.0	0.5	0	0	0
ZO	0	0	0.5	1.0	0.5	0	0
PS	0	0	0	0.5	1.0	0.5	0
PM	0	0	0	0	0.5	1.0	0.5
PB	0	0	0	0	0	0.5	1.0



**Table 2.** Fuzzy output variable assignment table  
**表 2.** 模糊输出变量赋值表

U	0	1	2	3	4
ZO	1.0	0.3	0	0	0
PS	0	1.0	0.5	0.5	0
PM	0	0	0.8	1.0	0.5
PB	0	0	0	0.5	1.0

#### 4.2. 模糊控制规则

本文采用的是 Mamdani 直接推理法，根据现场使用人员长期对于焓差实验室手动控制的实践和经验总结，可设置模糊规则如表 3 所示。在实际应用中可根据具体情况合理调整模糊规则，以达到最佳的控制效果。

**Table 3.** Fuzzy control rules table  
**表 3.** 模糊控制规则表

SE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
NM	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
NS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PM
ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PB
PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB	PB

由上述模糊控制规则和隶属度函数，构建模糊推理控制系统。采用最大隶属度法进行逆模糊化，即可求得电阻丝占空比大小的模糊控制表，如表 4 所示。表 4 所得到的是控制量的量化等级，然后在与比例因子相乘才能得到执行结果[8]。当为 1，则表示占空比的大小为 20，2 表示占空比的大小为 40，依次类推[9]。

**Table 4.** System fuzzy control  
**表 4.** 系统模糊控制

SE	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	0	0	0	0	0	0	0
NM	0	0	0	0	0	0	1
NS	0	0	0	0	0	1	2
ZO	0	0	0	0	1	2	3
PS	0	0	0	1	2	3	4
PM	0	0	1	2	3	4	4
PB	0	1	2	3	4	4	5

Figure 6. Cooling capacity test software for fan coil units  
图 6. 风机盘管机组供冷量试验软件

## 5. 总结

经过一段时间的投入使用，程序运行十分稳定。并且达到预期的效果。在焓差实验室控制系统中引入实时数据库，有效地解决了单个 PLC 的信息孤岛，将 PLC 系统组成一个整体，进行统一的管理调度，同时引入模糊控制算法，一方面提高了焓差实验室的控制系统实时性、稳定性使焓差实验室恒温恒湿效果可以保持在误差范围内，另一方面为检测人员进行空调性能测试检测提供数据和设备运行状况监控 [10]。为了方便检测人员进行试验记录，开发风机盘管机组供冷量试验软件，如图 6 所示，计算出被测空调的制冷能力、制热能力等，自动生成报表 [11]。目前，这套系统的投用已经得到预期的成果，在今后的工作中会进一步对程序完善和微调进行测试，来适应更高要求。

## 参考文献

- [1] 陈坤, 李征涛, 肖庭庭, 等. 焓差实验室节能控制系统研究[J]. 能源工程, 2014(4): 71-75.
- [2] 王志远, 徐志亮. 焓差法实验室制冷系统的控制策略[J]. 低温与超导, 2008, 36(8): 70-75.
- [3] 李龙. 流程工业实时数据库分布式服务框架的设计与开发[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [4] 苏博群. 面向离散制造行业的实时数据库系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- [5] 梁月云, 崔天时, 何亚非. 温室节水灌溉系统模糊控制器设计及 MATLAB 仿真[J]. 农机化研究, 2014, 36(6): 202-205, 209.
- [6] 林运龄, 黄汉华, 蔡晓东, 等. 某焓差实验室控制系统的优化[J]. 机电工程技术, 2012, 41(8): 43-46.
- [7] 李曼曼. 焓差实验室自动控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 济南: 济南大学, 2019.
- [8] 刘振奎. 基于模糊控制的节水智能灌溉系统设计[J]. 安徽农学通报, 2021, 27(23): 143-145.
- [9] 刘志兵. 基于模糊控制的空调水节能控制系统设计[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州大学, 2020.
- [10] 段雪涛, 郭鹏, 罗浩. 基于 PID 控制的空调器性能测试装置研制[J]. 低温与超导, 2013, 41(10): 76-80.
- [11] 陈进, 刘仕杰, 李桥, 等. 基于力控的焓差室空调器性能测试监控系统[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(4): 1079-1082, 1089.