**硕士学位论文**

**（**工程硕士**）**

电厂锅炉燃烧控制系统主站控制层的设计与实现

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE MAIN CONTROL LAYER OF POWER STATION BOILER COMBUSTION CONTROL SYSTEM**

**徐铜**

**哈尔滨工业大学**

**2015 年 6 月**

国内图书分类号：TP311 学校代码：10213 国际图书分类号：621.3 密级：公开

**工程硕士学位论文**

电厂锅炉燃烧控制系统主站控制层的设计与实现

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 硕士研究 Th | ： | 徐铜 |
| 导 师 | ： | 吴翔虎教授 |
| 副 导 师 | ： | 邱祥辉高级工程师 |
| 申 请 学 位 | ： | 工程硕士 |
| 学 科 | ： | 软件工程 |
| 所 在 单 位 | ： | 软件学院 |
| 答 辩 日 期 | ： | 2015 年 6 月 |
| 授予学位单位 | ： | 哈尔滨工业大学 |

Classified Index: TP311 U.D.C: 621.3

Dissertation for the Master’s Degree in Engineering

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE MAIN CONTROL LAYER OF POWER STATION BOILER COMBUSTION CONTROL SYSTEM**

|  |  |
| --- | --- |
| **Candidate:** | Xu Tong |
| **Supervisor:** | ProfessorWu Xianghu |
| **Associate Supervisor:** | Senior EngineerQiu Xianghui |
| **Academic Degree Applied for:** | Master of Engineering |
| **Speciality:** | Software Engineering |
| **Affiliation:** | School of Software |
| **Date of Defence:** | June, 2015 |
| **Degree-Conferring-Institution:** | Harbin Institute of Technology |

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

摘 要

针对火力发电厂原锅炉燃烧控制系统数据采集实时性不强，通信速率太慢，系统稳定性差、可靠性不高等问题，本文设计并实现电厂锅炉燃烧控制系统主站控制层软件系统。控制系统基于分布式系统架构设计的思想，由主站、从站及操作员站组成。由操作员站发送工程师下达的指令，主站负责闭环过程控制所有锅炉系统，从站负责在现场数据采集；操作员站与主站之间使用工业以太网做为通信网络，主站和从站主从通信网络是Profibus总线。本系统是针对控制系统主站控制层研究设计的，采用冗余容错设计，包括热备份的双主站结构和双冗余通信网络；将本软件系统嵌入到芯片并应用于锅炉燃烧控制中，与控制算法进程间通信，实现闭环控制流程，可以更好的控制电厂锅炉，提升整个控制系统的实时性和可靠性。

在本文中，为达到锅炉燃烧控制系统的控制目的，设计并实现了系统主控层软件系统。根据系统的硬件组成及软件需求，提出了主站控制层软件系统的设计方案，方案包括软件总体设计、功能模块设计及数据交互设计，其中还介绍了软件系统涉及的技术方案设计。根据软件系统的总体设计，介绍每个模块的详细设计及具体实现，以及站与站之间通信的设计与实现，其中包括模块处理流程及关键技术运用。最后，从功能和性能两方面分别测试。通过主站控制层软件系统的测试，覆盖锅炉燃烧控制系统的整体通信测试和功能测试，包括操作员站与主站之间通信测试，主站与从站之间通信测试，系统流程测试。

本文设计的锅炉燃烧控制系统主站控制层软件系统，符合系统的需求规定，应用于电厂中，在系统通信速率及响应时间上都能达到要求，可以做到故障发生时，双冗余主站的无缝切换无数据丢失，在稳定性和可靠性方面都满足系统的需要。

**关键词**：分布式控制系统；双主站结构；闭环控制；进程间通信

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

Abstract

There are some problems in the power plant boiler combustion control system, the collection of real-time data is not strong, the communication speed is too slow, poor stability and reliability is not high. By designing the main software system of boiler combustion control system, we can solve the problems. The new system Based distributed system architecture design ideas, consists of main control station, data acquisition station and operator station. The operator station sends command from Engineer, the main control station is responsible for the closed-loop process control over all boiler systems, the data acquisition station collect data from the field. Industrial Ethernet is used as a network between the operator station and the main station, and Profibus-bus is used as a network between the main station and the data acquisition station. The research and design of the control system of the main control layer is based on redundant, including hot backup dual main structure and dual redundant communication network. The software system will be embedded into chips and used in boiler combustion control, complete the interprocess communication between it and the process control algorithm, to realize closed-loop control, we can better control the power plant boiler, improve timeliness and reliability of the whole control system.

In this paper, through the design and implementation of software systems of main control layer, to achieve for controlling the boiler combustion control system. This paper presents the design of the software system, according to the system's hardware components and software requirements. The program includes design of global software, design of functional modules, design of exchange data, and design of technology used in the system program. According to the overall design of the software system, introduce the detailed design and implementation of each module, including module processing and use of key technologies, as well as the design and implementation of communication networks between all stations. Finally, this paper describes test methods and test results from functionality and performance aspects. Cover the overall communication and functional testing on boiler combustion control system, by testing software system of the main control layer, test the communication between main control station and data acquisition station, and the system flow testing.

In this paper, the design of software systems meet the needs of the system used in power plants, it can meet the requirements in terms of communication speed and response time. When a failure occurs, the redundant system can quickly switch the

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

Machine status without losing data, thus ensuring the performance of the system in terms of reliability and stability.

**Keywords:** Distributed; Control; System; Dual; Structure; Of; The; Main; Station

Closed-loop control, Interprocess communication

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

目 录

[摘 要](#_Toc686865701) 3

[Abstract](#_Toc686865702) 3

[目录](#_Toc686865703) 4

[第](#_Toc686865704)**[1](#_Toc686865704)**[章 绪论](#_Toc686865704) 5

[1.1 课题背景及研究的目的和意义](#_Toc686865705) 5

[1.1.1 课题来源](#_Toc686865706) 5

[1.1.2 课题研究的目的和意义](#_Toc686865707) 5

[1.2 与本课题有关的国内外研究状况](#_Toc686865708) 6

[1.2.1 锅炉燃烧控制系统国内外研究现状](#_Toc686865709) 6

[1.2.2 分布式控制系统国内外研究现状](#_Toc686865710) 6

[1.2.3 工业以太网国内外研究现状](#_Toc686865711) 6

[1.2.4 现场总线国内外研究现状](#_Toc686865712) 7

[1.3 本论文研究的主要内容](#_Toc686865713) 7

[1.4 本文结构介绍](#_Toc686865714) 7

[第](#_Toc686865715)**[2](#_Toc686865715)**[章 主站控制层软件系统需求分析](#_Toc686865715) 7

[2.1 锅炉燃烧控制系统介绍](#_Toc686865716) 7

[2.1.1 操作员站](#_Toc686865717) 8

[2.1.2 主站](#_Toc686865718) 8

[2.1.3 从站](#_Toc686865719) 8

[2.1.4 通信网络](#_Toc686865720) 8

[2.2 需求分析](#_Toc686865721) 9

[2.2.1 功能性需求](#_Toc686865722) 9

[2.2.2 非功能性需求](#_Toc686865723) 10

**[2.3](#_Toc686865724)** [本章小结](#_Toc686865724) 10

[第](#_Toc686865725)**[3](#_Toc686865725)**[章 主站控制层软件系统概要设计](#_Toc686865725) 10

[3.1 总体设计](#_Toc686865726) 10

[3.2 功能模块设计](#_Toc686865727) 10

[3.3 数据交互设计](#_Toc686865728) 11

[3.5 网络设计](#_Toc686865729) 11

[3.7 存储器设计](#_Toc686865730) 12

[3.8 环境设计](#_Toc686865731) 12

[3.8.1 Linux内核裁减](#_Toc686865732) 12

[3.8.2 Linux内核修改](#_Toc686865733) 12

[第](#_Toc686865734)**[4](#_Toc686865734)**[章 主站控制层软件系统详细设计](#_Toc686865734) 12

[4.1 以太网通信模块的详细设计](#_Toc686865735) 12

[4.2 主控模块的详细设计](#_Toc686865736) 13

[4.3 前端网通信模块的详细设计](#_Toc686865737) 14

[4.4 进程间通信的详细设计](#_Toc686865738) 15

[4.5 通信接口的详细设计](#_Toc686865739) 15

[4.6 心跳线的详细设计](#_Toc686865740) 15

[第](#_Toc686865741)**[5](#_Toc686865741)**[章 主站控制层软件系统实现](#_Toc686865741) 16

[5.1 以太网通信模块的实现](#_Toc686865742) 16

[5.1.1 Dpu和Fix通信](#_Toc686865743) 16

[5.1.2 Dpu和对方Dpu通信](#_Toc686865744) 16

[5.1.3 Dpu和Point通信](#_Toc686865745) 16

[5.1.4 Dpu和其他Dpu通信](#_Toc686865746) 17

[5.2 主控模块的实现](#_Toc686865747) 19

[5.3 前端网通信模块的实现](#_Toc686865748) 25

[5.4 进程间通信的实现](#_Toc686865749) 30



[结束](#_Toc686865749)

[5.5 通信接口的实现](#_Toc686865750) 34

[5.6 心跳线的实现](#_Toc686865751) 34

[5.7 本章小结](#_Toc686865752) 34

[第](#_Toc686865753)**[6](#_Toc686865753)**[章 主站控制层软件系统测试](#_Toc686865753) 35

[6.1 测试环境](#_Toc686865754) 35

[6.2 功能性测试](#_Toc686865755) 35

[6.2.1 以太网通信模块的测试](#_Toc686865756) 35

[6.2.2 前端网通信模块的测试](#_Toc686865757) 36

[6.2.3 主控模块的测试](#_Toc686865758) 36

[6.3 非功能性测试](#_Toc686865759) 38

[6.3.1 主备同步测试](#_Toc686865760) 38

[6.3.2 主备切换测试](#_Toc686865761) 39

[6.3.3 性能测试](#_Toc686865762) 40

[6.4 本章小结](#_Toc686865763) 41

[结 论](#_Toc686865764) 41

[参考文献](#_Toc686865765) 41

[哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限](#_Toc686865766) 42

[个人简历](#_Toc686865767) 43

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 第**1**章 绪论

## 1.1 课题背景及研究的目的和意义

### 1.1.1 课题来源

本文来源于公司与火力发电厂合作的项目。随着嵌入式软件的开发，系统的性能、可靠性都得到有效的提升，在电力、化工、石油等领域得到广泛应用

[[1]](#_bookmark69). 针对目前火力发电厂锅炉燃烧控制系统通信速度慢、数据采集实时性不强、

系统稳定性差等问题，基于原有的控制系统进行了重新设计，以提高控制系统的实时性，旨在实现基于稳定控制锅炉的双冗余主控软件系统。

### 1.1.2 课题研究的目的和意义

在我国很多产业的生产过程中，锅炉是转化能源的重要设备，比如化工、石油、电力等行业；所以，作为一个在火力发电的生产过程中起着重要作用的设备，锅炉占据举足轻重的地位。用于发电的能量是通过燃烧产生的化学能量转成动能，推动旋转涡轮旋转发电产生的。燃烧的燃料在锅炉中的作用直接影响发电厂和工人的安全经济效益，如果工艺介质流量太低，中断燃烧器火焰熄灭或燃料管道压力太低会导致回火事故；但当燃料管道压力过高，会引起火灾事故。所以设计一种可以精准控制燃料燃烧情况的系统，对工业生产来说，有重要的意义和商业价值[[2]](#_bookmark70)。

目前，分布式控制系统经常被应用在工业流程中，其分布结构的中心思想是把系统按功能不同分成若干子系统，用网络连接通信[[3]](#_bookmark71)；这种分散控制，集中管理的控制模式可以有效提高系统的可靠性，避免局部故障而导致整个系统瘫痪的局面。与集中式控制系统相比，更具可靠性、层次性、易用性、易于修护性、控制功效完备等特征。

分布式控制系统采用容错设计，使用不同的计算机控制不同功能的子系统，子系统与子系统之间信息共享并协调工作。这样使每台计算机的任务单一化，可以根据需要实现的功能选择特定的硬件结构和软件系统，既提高系统可靠性又使系统易于维护。

在工业化领域，由于现场总线的加入，使工业现场的一些操作的易用性和可靠性都得到提升，比如数据采集、数据处理、监控运行状态等操作。将现场

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

总线融入到分布式控制系统中可以提高系统的性能，这使得现场总线被广泛应用[[4]](#_bookmark72)。

随着工业的发展，分布式系统的精度和速度越来越高，而工业以太网也能够适应高速度和高精度的系统开发。工业以太网高达百兆，千兆的通信速率，而传统的现场总线通信速率不超过20兆。而且，就技术层面上，在分布式系统融合工业以太网技术作为通信手段可以提高系统的通信速率。

本文中的锅炉燃烧控制系统使用分布式结构，采用工业以太网作为管理部分与控制部分的网络传输纽带，采用Profibus-DP现场总线做为数据采集部分与控制部分的通信网络，并且所有网络和子系统都采用双冗余设计，改善了系统的通信速率和稳定性，又在系统可靠性方面得到显著提升。

## 1.2 与本课题有关的国内外研究状况

### 1.2.1 锅炉燃烧控制系统国内外研究现状

最开始，人们使用锅炉燃烧的方式发电，对于锅炉的控制还只是处在一般的PID控制；后来，随着时代的进步，科技的发展，在火力发电中以及一些工业生产中，控制锅炉燃烧的技术逐渐趋于成熟。锅炉燃烧控制系统的发展历经了四个阶段，从纯手动控制，发展到今天的智能控制，这中间也是历经了无数人的奉献与付出[[5]](#_bookmark73)。

##### （1）纯手动控制阶段

在20世纪60年代，自动化技术和电力电子技术的发展还不是很非常成熟，生产过程停留在靠人力手动阶段，而且人们对于自动化生产的理念也不是很了解，自动化相关的技术得不到重视，应用也不广泛。这种纯手动控制方式下，操作人员可以决定供水量、供气量以及供煤量，然后用手控制锅炉。这种完全依靠人力去完成的控制阶段，对工人的要求特别严格，必须是具备一定相关经验的人才能操作，这样就会影响生产效率，工人的安全也不能得到保障[[6]](#_bookmark74)。

##### （2）仪表继电器控制阶段

随着自动化技术和电力电子技术的逐渐走向成熟，在国外已经研究出使用仪表继电器自动控制工业中锅炉燃烧的技术，并取得可喜的成果，通过现场试验已经投入工业生产中使用。与此同时，我国的相关技术也在快速发展。上世纪60年代开始接触自动控制的技术，到了60年代的后期，国内开始引进国外

成功的自动控制技术应用到锅炉上；发展到上世纪70年代的晚期，国内通过研究国外比较先进的自动控制技术，已经可以通过效仿自己研究出控制锅炉的

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

自动化仪表仪器，并逐渐将相关的技术投入到控制锅炉中。

与人工纯手动控制阶段相比，仪表继电器控制所完成的燃烧率控制更好，同时也基本摆脱了人力阶段的存在的弊端，提高了生产效率，又减少了事故的发生率。虽然，这种方式可以带来很多优点和好处，但是自动控制所依赖的硬件设备的研究还不成熟，可靠性很低，控制精度也不是很理想，功能简单，对于要求比较高的工业控制根本不能够达到其控制要求。

##### （3）微机控制阶段

随着电子技术的飞速发展，出现了可靠性高且集成度好，价格又不贵的微型计算机和一些专门用来控制生产过程的计算机。这使得在工业控制中高频率的使用计算机，可以有效控制工业锅炉的燃烧情况。随着微机控制的普及，自

20世纪80年代后，我国的大部分锅炉都处在这个控制阶段[[7]](#_bookmark75)。

这种技术上的提升对工业控制来说，可以说是技术上进步一小步，自动化控制上进步一大步。微机控制阶段，利用计算机技术开发的可靠性高、效率高、自动工业锅炉控制系统，使得控制性能和仪表继电器阶段相比有很大提高，但仍然是不完美的，其对环境的要求很高，且需要抗干扰能力强。

##### （4）智能控制阶段

随着现代控制理论的发展与应用，以及控制领域硬件技术的显著提高，锅炉控制系统进入了智能控制阶段。出现了很多像智能变频器、数据采集卡等硬件设备应用到控制中。出现多种智能控制系统，主要是自学习模糊控制系统，基于控制系统设计的抗人类人工神经网络系统。在传统的控制系统中，控制算法相对简单，无法解决较复杂的问题；智能控制系统的控制算法就很好的解决了传统控制系统的这一缺陷，使得自动化控制技术又上了一个台阶，具有很高的性能提升，为工业生产带来了新局面，可以取得比较理想的控制结果，是目前发展最快的一个领域，值得继续发展应用。有利就有弊，控制精度提高的同时，控制算法又过于复杂，这样就要求控制器的执行速度要很快，恐怕一般的设备技术层次跟不上[[8]](#_bookmark76)。

国内在自动化控制领域上开始的比较晚，又因为技术跟不上发展，目前仍处在微机控制阶段，正在像智能控制阶段发展。还有一些中小企业仍然处在仪表继电器阶段，无法保证其安全性及系统可靠性。国外由于研究这方面技术比较早，进步又比较快，总是超越国内发展的脚步，现在已经可以达到智能控制的水平。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

### 1.2.2 分布式控制系统国内外研究现状

分布式控制系统(DCS)是由多个子系统和通信网络组成[[9]](#_bookmark77)，包括集中管理子系统、分散控制子系统、前端采集子系统。用网络做为子系统之间通讯手段。

DCS系统的思想就是实现集中操作和分散控制，灵活配置与分级管理相结合。由于分布式控制系统采用多级结构，它适用于现代企业的集中管理和控制，现在已经成为控制领域的主流系统[[10]](#_bookmark78)。

上个世纪70年代[[11]](#_bookmark79)，在很多大型工业生产现场，随着产业的不断发展，工业生产设备也在不断的发展进步，设备的优化加快了生产流程，原材料消耗，人工成本和性能等方面也得到了改善；对生产设备的要求越高就越需要性能越好的控制技术，来管理这些大型的生成设备。

70年代末期，随着工业的发展，控制技术的不断改进，推动了硬件技术的发展，具有现代意义的分布式控制系统随之产生，这样就诞生了第一个基于分布式系统结构的产品，由Honeywell公司在1975年研发推出。最早的制定和实施分布式控制系统应用的公司，包括横滨公司，美国霍尼韦尔公司，后期还有诸如BAILEY，ROSEMOUNT，YAMATAKE等都陆续研究分布式控制系统，有的也研发成功投入生产[[12]](#_bookmark80)。

国内开始接触分布式控制系统是在1981年，由于引用日本横河的相关产品应用在吉化化肥公司合成氨装置中，所表现出的良好的性能和可靠性，使的越来越多的公司开始陆续引进分布式控制系统。国内开始使用后，生产效率得到显著提高的同时又能保证产品的质量过关，也间接的减少了能源的消耗和经济利益的损失。随着DCS产品推动化工、石油产业的发展，DCS产品已经逐渐的发展成主流产品，广泛的应用在各行各业，使其在工业控制的其他领域如电力、建材等方面也开始被关注和使用。

分布式控制系统的软件平台主要分为两部分，人机界面的系统软件平台和控制器系统软件平台；控制器系统的核心区域主要负责将采集的数据经过一系列的逻辑过程控制，传送到人机界面软件平台上，等待工程师发挥其执行能力

[[13]](#_bookmark81). 在火力发电中，电机的容量不断增加，各种类型的电机都需要人为操作和系统控制，在控制中所用到的算法复杂度也在不断提高，这使得对每一组电机单独的组态操作是很困难。为了避免这种大量重复繁冗的工作带来的不利，在分布式控制系统融入复杂的算法计算参数，针对相近的电机组综合在一起控制管理是可行的[[14]](#_bookmark82)。

由于工业生产中需要控制的模块和具体实现的功能都存在一定的差异，就

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

导致了一般DCS产品的内部机制都是由使用厂商自己设计[[15]](#_bookmark83)；因被控对象的复杂性以及逻辑运算的不同，又由不同的工程师设计完成，影响到编程代码的可移植性不好，利用率不高，不能使控制系统中功能结构代码移植到与其相似的模块中，这就是DCS产品的弊端。今后的发展，是需要统一组态标准，提高代码的可移植性[[16]](#_bookmark84)。

在国内比较大型的DCS产品厂商有浙大中控公司、合利时公司、上海新华公司、以及上仪、四联等。我国最开始使用DCS产品都是从国外引进回来的，在引进后通过一边使用一边学习模仿的过程，消化吸收国外高水平技术后，自主创新研发出符合自己需要的特性的分布式控制系统，并且通过多年的努力与坚持，大多都获得很好的成果[[17]](#_bookmark85)。例如，新华控制工程开发XDPS-400产品，北京和利时开发FOCSA产品，华能信息公司开发PINECONTROL产品等。上述的产品都已经在电厂通过测试，经过测试修改后或是达到或是接近国外的先进水平产品，价格上又比国外相同的水平产品便宜很多，而且在200/300WM机组改革或新建工程中普遍使用，并受到一致的好评与口碑[[18]](#_bookmark86)。

### 1.2.3 工业以太网国内外研究现状

在技术上，工业以太网能够与商业以太网兼容；在设计上，满足工业控制的要求；在材质的选用方面，产品的强度是切实可行的，比如可操作性和可靠性，抗干扰能力等都要满足工业标准[[19]](#_bookmark87)。

工业以太网(Ethernet)的优点是成本低，可靠性好，相对稳定，现在已经成为最流行的通讯网络；随着网络技术的成功，在工业过程控制业被广泛的重视和使用。工业以太网中协议层所使用的技术，可以利用相应算法解决节点冲突问题。这种解决方式存在一个缺陷，就是排队延迟不确定性，这个特性不能保障正确的排队延迟，缺陷的存在使得工业以太网不能很好的发挥其优点和作用，受到了一定的限制[[20]](#_bookmark88)。

Ethernet随之计算机技术的快速发展，也取得了本质上的提高。通信可达百兆、千兆并符合工业和国际标准的高速工业以太网应运而生。对于排队延迟的不确定性，实时以太网加双工通信技术和交换技术的以太网来实现。工业以太网是在制定标准后发展最快的总线技术，由多种现场总线的高速组成。FF

HSE是于2000年提出的IEC61158协议中融合工业以太网和现场总线的技术成果。同时，一些与以太网相结合的现场总线技术也相继提出。提出IEC61784后，已有多种现场总线与以太网结合使用，且技术相对已经成熟。这使得工业以太网成为发展最快得总线技术。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

Ethernet的快速发展，主要原因归结于Ethernet遵循IEEE802.3开放的网络协议。Ethernet的快速发展和技术的成熟已经受到广泛的关注和高度的重视，人们急需知道使用工业以太网可以为工业控制领域带来哪些好处。由此，工业过程自动化通讯网络联盟组织机构IANOA在美国被成立了，并在欧洲国家全面推广，本组织的主要工作就是建立工业控制领域Ethernet的通信标准。建立欧洲联盟的主要目的事使工业以太网在自动化和嵌入式计算中良好推广[[21]](#_bookmark89)。

该联盟已成功地扩展到全球的国际能源机构（工业以太网联盟）联盟成立，机构的目标就是统一工业控制工业以太网的产品标准[[22]](#_bookmark90)。在现场总线的发展中，也受到了工业以太网的影响。比如已经用高速工业以太网取代原有H2标准的FF协议。这一变化使的高速工业以太网在高速现场总线的制定中成为新的准则。所以，目前，高速工业以太网已经成为最新的国际标准[[23]](#_bookmark91)。

近年来，国内外很多学者都在研究工业以太网，并有一定的研究成果，研究提出能够融合新技术并具备实时功能的以太网协议可以将工业以太网推上工业控制网络领域的主要技术。基本在理论上解决了由于碰撞冲突而产生的宽带问题还有排队延迟不确定的问题。对工业以太网相关的研究取得了初步的成果，需要进一步研究[[24]](#_bookmark92)。

目前世界上使用比较广泛的有工业以太网协议和TCP/IP协议，以太网协议将作为过程级系统之间传输主要技术。无论是在工业生产过程中，由复杂控制演变到智能控制；还是针对系统架构，由嵌入式系统发展到现场总线系统，都离不开工业以太网。现在将TCP/IP协议应用在输入输出模块和配置系统模块的以太网接口中，它可直接连接工厂信息管理系统，而不需要任何特殊的设备。工业通信网络中应用工业以太网可以建立综合自动化设备，包括从底层采集现场的设备再到中间控制子系统最后到管理决定子系统。这种网络连接子系统的分布式结构消除了子系统独立的状态。然而，在目前研究现状来看，并不是所有的工业自动化装备都能够使用工业以太网[[25]](#_bookmark93)。

简单的执行器和传感器，电子也可以有很大的发展空间。半导体产业将给市场一个更小的，更综合的装置。此外，以太网的简单的终端设备并不出众，和以太网没有政策上的传输介质，提供模拟电压策略。工业以太网是第二十一世纪的第一选择和未来网络产业希望，这已经被人们充分的认识到了。以太网提供了更加成熟的技术，在未来将成为控制级和现场级高速网络标准。

### 1.2.4 现场总线国内外研究现状

现场总线是能与底层网络通信的总线，一般应用于需要在现场生产和多控

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

制设备之间完成双向的多点数据通讯的控制系统[[26]](#_bookmark94)。在制造业、工业、交通运输业具有广阔的应用前景。引入专门微型处理器的测量功能融入到传统控制仪器的现场总线技术，改变后的这些仪器将具有数字计算和通信能力，以多个测控仪表构成的网络系统的结合可以采用双绞线作为连接总线，并根据规范和通信协议，分布在现场的测试设施中，或分布是采集子系统和控制子系统的中间部分。用以实现传输数据和交换数据信息，可以按照所分布植入的系统类型去适应对应的的通信要求[[27]](#_bookmark95)。

言简意赅的说，现场总线是实现把多个单独的分散的测量控制设备连接在一起从而组成网络节点纽带，通过总线连接可以实现双向信息互享、协同工作控制使命。现场总线的到来带给了工业自动化领域很大的变化，这种变化可以使集中管理、分散控制得以实现[[28]](#_bookmark96)。所以，把现场总线看做引领控制技术新的时代的开始一点都不违过。

从全局看，现场总线是一个开放式的通讯网络，它也是一个具有分布式控制结构的系统。因为现场总线表面上是连接各种设备设施的无形纽带，但是实际上它是构建分布式控制系统的重要部分[[29]](#_bookmark97)，它可以自连接成通讯网络系统，又可以把分布式控制系统中具体负责实现各个功能的子系统都集中到一起，相互传递信息，做到资源共享。完成基本控制、补偿计算参数修改、显示、报警、监控等功能，优化各种综合自动化控制功能。

现在世界上现场总线的标准多达几十种，比较常用的有CAN 总线，

LonWorks总线，Profibus总线。在中国，CAN总线技术的广泛应用，它也广泛应用在多种总线技术。CAN控制器局域网络总线，最初由德国设计，专门从事汽车的控制和检查，后来又打破来应用场合的限制，使得更多的应用场合可以在控制系统中使用它[[30]](#_bookmark98)。CAN总线的技术规范的特征是只对数据链路层和物理层进行规定，对于其他应用层不用定义，这样可以在应用中灵活自定义需要的通讯协议。一般比较常用的技术规范是2.0A协议和2.0B协议，上面对

CAN总线做了简单的分析和介绍，很好的提供了使用的参考模版，充分发挥它的灵活性[[31]](#_bookmark99)。

LonWorks总线选用OSI参考模型所有层的通信协议和面向对象的设计方式，这是它的显著特点；它最早是由美国的Echelon公司提出，后来与东芝和摩托两大企业强强联手，联合修改，最终于1990年正式发布[[32]](#_bookmark100)。Profibus总线标准首次提出，是在西门子公司的大力支持下在德国完成，推出后因为其技术成熟的标准，在市场上占据一定的地位，受到一致好评[[33]](#_bookmark101)。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

## 1.3 本论文研究的主要内容

本文是针对电厂控制锅炉燃烧的分布式控制，研究控制系统主站控制层软件系统并实现控制锅炉的功能。主要从三个方面展开研究工作。

第一个方面，控制系统的通信。控制系统采用分布式模式，分为三个站，操作员站、主站和从站。三个子系统各自分工，协同工作，各自处理自己的流程，通过网络连接，实现集中管理。所以，在控制系统中，数据的传递至关重要。通信网络包括两部分，以太网通信和前端网通信。首先，以太网通信主要负责主站与操作员站，与其他所有主站的通信，通过以太网完成数据的收发功能。然后，前端网通信是负责主站与从站完成一些数据的收发功能，包含前端模块、控制指令等重要的数据信息。最后综合以太网和前端网，就可以组建控制系统的通信网络。

第二个方面，控制流程处理。在实现通信的情况下，实现控制流程才能完成自动控制的目的。在系统中有各种类型的数据，各种信息流。控制系统通过从站采集现场的实时数据信息，使用前端网通信传递到主站，主站作出相应的处理，再通过以太网通信传递到操作员站；工程师根据传递的一些参数信息，作出人为的判断和处理，并把控制命令传达到主站，再由主站传达命令给从站，使从站的执行部件完成相关操作，最后将现场执行的信息报告给操作员站。按照这样的闭环控制流程，可以掌控锅炉的燃烧情况，针对各种情况的发生做出及时的分析与处理。

第三个方面，故障处理。控制系统是应用在电厂中，应用的环境对系统的容错能力要求很高，设计系统结构时需要重点考虑容错技术。周期性的检测系统运行和通信状态，出现通信异常需要根据具体情况，检测故障来源给出处理故障方案。

## 1.4 本文结构介绍

本论文按照结构可以划分为六章：

第1章，是绪论部分，介绍了项目来源及研究的目的和意义，还有与本课题相关技术的国内外研究现状的简介，最后介绍一下本论文的主要研究内容。

第2章，主站控制层软件系统需求的概述，首先简介锅炉控制系统结构，然后从功能、数据、性能及可靠性四个方面分析项目需求。给出了具体的项目指标。

第3章，主站控制层软件系统的概要设计，包括总体设计，系统功能性模

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

块设计，数据交互类型设计，以及相关技术的设计介绍。

第4章，主站控制层软件系统的详细设计，从不同功能模块入手，进行详细设计，设计相应的通信接口。

第5章，主站控制层软件系统的实现，介绍不同功能模块的具体实现，与

第4章主站控制层软件系统的详细设计对应。

第6章，主站控制层软件系统的测试，通过相应的测试环境，根据系统的需求分析和详细设计，测试所有功能模块，并给出具体测试结果，最后对比分析，得出结论。

最后，在结论中对本文的研究内容和结果进行阐述，并展望未来发展前景。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 第**2**章 主站控制层软件系统需求分析

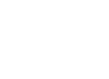
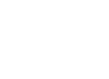
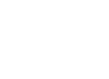
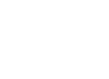
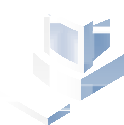
## 2.1 锅炉燃烧控制系统介绍

为了提高电厂锅炉燃烧控制系统的实时性和稳定性，本文对现有的系统进行了改进，采用Profibus现场总线代替原有RS485总线作为底层通信网络，对原有系统结构做出改造，采用Profibus网络完成主从站主从控制的系统控制锅炉燃烧。

整个控制系统采用分散控制集中管理的分布式控制结构，系统结构分为三部分：操作员站，负责监控及配置系统；过程控制站（主站），实现自动控制功能；数据采集站（从站），采集前端模块的实时数据信息。在操作员站与主站通信的上层网络中使用工业以太网完成数据收发功能，同样在底层通信中使用

Profibus网络协议完成数据采集工作。

基于系统的稳定性考虑，设计了双冗余热备份主站，根据工作状态，命名为工作态主站和备份态主站。系统的整体分布如图2-1所示。



操作员站

操作员站

过程控制站

（主站）

过程控制站

（主站）

工业以太网0

工业以太网1

PROFIBUS网0

PROFIBUS网1

从站

图2-1 系统整体分布图

### 2.1.1

操作员站

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

操作员站是工程师实时监控现场及下达控制指令的操作平台，操作软件包括Fix组态软件和Point组态软件，在Windows操作系统的计算机上运行。Fix程序可以监控双主站的运行状态（包括通信错误累计报警等），并且可以记录运行中发生各种事件的准确时间以及实现点表组态。Point点表负责测点配置、控制回路组态、控制参数修改和量程修改等。

### 2.1.2 主站

双冗余结构设计，主站系统由控制层和通信层构成，基于容错考虑，双主站互为备份关系。系统硬件组成如图2-2所示。控制层和通信层通过PC/104接口通信，以底板作为基层电路。

控制层使用的硬件主板是研华PCM-4153, PCM-4153工控机使用AMD处理器，包括以太网端口和串行线端口，IDE接口及PC/104接口，看门狗定时器等。通信层使用的硬件主板包括netX100和其外接电路。netX100芯片使用ARM处理器，具有网络通信功能，提供数据存储空间和内存管理单元，ROM及RAM存储，专门的接口用于连接外部硬件设备，包括UART在内的很多串行线接口，以太网接口等。

仲裁电路所使用的底板提供电源电路，电压转换器，以及外部接口，主要有以太网接口、Profibus接口和485总线接口。

### 2.1.3 从站

从站使用的硬件芯片是netX50, netX50芯片使用ARM处理器，主要包括数据交换器和通信接口，还有一些设备接口。在从站中还有一些外部电路设备，如458总线的收发器电路，供电电路，复位电路和状态运行灯的电路等。

从站数据的种类有四种：AI和AO是模拟量输入与输出，DI和DO是开关量输入与输出。AI和DI作为输入前端，AO和DO作为输出控制端。AO型从站共6个输出通道，输出的是毫安级电流；可以通过调整参数设置输出的电流值的精度，把调好精度值参数烧写到从站中，也可以根据设置不同的参数输出不同的电流值。DO型从站共24个数字输出通道，全部为继电器开关，可以用于执行机构打开或关闭控制阀门。DI型从站共24个数字输入通道；表现状态值为0和1，通道短接为1，否则为0。AI型从站是模拟输入通道，比如热电偶会根据所处环境的温度的不同，产生热效应，在两端会产生一个电动势，根据

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

这个电动势的值，按照其特有的分度表换算，就可以精确计算出所处环境的温度；通过采集其两端的电压值就可以输出其所处环境的温度，可以用于实时监控锅炉水蒸气的温度。这些AI从站可以用于采集现场的电流和电压值。

### 2.1.4 通信网络

通信网络是由工业以太网和现场总线，用于在操作员站和主站之间的数据通信，主站和从站的数据采集。双冗余主站之间通过UART串口通信，UART之间的RS485串行线命名为心跳线，UART串口数据命名为心跳数据。实现双主机数据同步功能是依靠双端口存储器DPM完成的。



控制层

通信层

控制

主备

PCM4153

PCM4153

PC/104

PC/104

心跳线

仲裁切换电路

工作站备份站

|  |  |
| --- | --- |
| netX100 | |
| XC-0 | XC-1 |

|  |  |
| --- | --- |
| netX100 | |
| XC-0 | XC-1 |

## 2.2 需求分析

图2-2 主站硬件组成图

锅炉燃烧控制系统中的操作员站、主站、从站可以作为三个子系统分别实现其功能。本节针对主站子系统，从功能、数据、性能及可靠性四个方面对主站控制层进行了详细的分析。主站控制层软件系统负责数据处理和逻辑运算，在锅炉燃烧控制系统中具有承上启下的作用，是整个系统的核心部分。整个控制系统中需要处理的数据种类繁多，处理流程很复杂。所有数据处理及流程控制都由主站控制层完成。控制流程如图2-3所示。

先初始化系统，指定工作站和备用站，连接以太网，通过工作站进程流程后，向操作员站发送信息，并接收操作员站的下传数据包。双主机的情况下，

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

当有一方出现故障时，另一方可以切换状态，完成接管。其中工作站进程和备份站进程有自己的工作流程，会在详细设计中体现。

|  |  |
| --- | --- |
| 发送信息给操作员站 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 接收操作员站下传数据 | |
|  |  |



开始

是否工作站

是

否

是否重启

否

是否重启

是否重启

否

是

是否重启

否

是否重启

是

是

是

否

是

重启

否

结束

设备初始化

启动主机状态

工作站进程

以太网连接

主机状态

备份站进程

通知备份站接管工作

图2-3 系统流程图

### 2.2.1 功能性需求

##### （1）以太网通信模块

以太网通信模块所实现功能就是完成主站控制层与其他功能模块通信。其他模块包括：操作员站Fix组态软件、操作员站Point组态软件、对方主站以及其他主站。本模块功能的实现需要通过Socket套接字编程完成，数据通信的方式是点对点通信，对于多个主站之间可以广播传输数据。除了与其他主站的通信采用广播方式，其余的都采用点对点通信方式。通过此模块可以实现主站与操作员站数据交互功能，当前主站与其他主站数据同步功能。

##### （2）主控模块

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

主控模块是核心功能模块，具有任务调度功能。通过调用各个模块功能的操作，来完成自动控制流程。主控模块流程的实现需要依靠调用前端网通信模块采集现场实时数据信息；与自动控制算法进程通信传递数据，完成计算的数据参数同样以数据包的形式传递回来，最后上报到操作员站即完成一次单向通信；调用底层通信网络将上面下达的控制命令发送到从站控制件，从前端会返回一个执行结果，调用以太网发送给操作员站完成双向操作。

除了上述的数据处理外，主控模块还负责检测与其他部分的通信状态。通信异常时，需要采取一定的手段恢复状态，修复错误。当工作站出现异常时，需要给通信层发送信号，请求切换主备状态，由备份站接管控制权，工作站恢复上一周期数据转为备份站运行。

##### （3）前端网通信模块

底层通信网是Profibus网络，从站通过Profibus总线，将现场数据传达到主站通信层，控制层与通信层使用DPM双端口存储器交互数据内容，DPM所提供的接口在通信层完成定义。数据分为周期性数据和非周期数据。最终实现主站控制层与从站的数据交互。从站地址及通道号数据结构体使用二维数组存储，如AI[i][j]（模拟量输入型从站），其中i表示从站地址、j表示从站通道号。

### 2.2.2 非功能性需求

#### 2.2.2.1 数据需求

##### （1）以太网通信数据

操作员站主动发送到主控层的数据类型有：1）查询周期数据和运行状态的命令，非周期。2）设置各种参数命令，非周期。3）控制从站执行部件的命令，非周期。4）制定系统状态或修改配置的命令，非周期。

主站控制层主动发送给操作员站的数据类型有：1）从站所带模块的实时数据信息，周期。2）通过算法执行后的数据处理信息，周期。3）从站执行后的运行信息，非周期。4）操作员站发送命令的回复，非周期。

当前主控层与对方主控层的数据交互类型由：1）来自操作员站的通信数据，非周期。2）当前主站控制层的实时数据，非周期。

主控层与其他主控层的交互数据类型由：1）主控层发送给其他主控层的同步数据及运行状态，周期。2）其他主控层发送给主控层的同步数据及运行状态，周期。

##### （2）前端网通信数据

通信层转发给控制层从站采集的现场数据，转发给从站操作员站通过控制

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

层转发的控制从站命令。通信层在主站与从站之间起到传递数据信息的作用，实际最终实现的还是主站控制层与从站的数据交互。数据类型包括：1）从前端周期采集的实时数据，周期。2）操作员站下达的控制命令，非周期。

#### 2.2.2.2 性能需求

按照本项目的实际需求，完成的控制系统在电厂中需要同时挂八个双主站系统和六十个前端模块，每个主站包括工作态主站和备份态主站。不同主站的从站类型也不相同，当前主站与其他主站之间需要同步数据。主站完成一次闭环流程，辅助工程师控制系统的时间周期小于2秒。前端模块数据信息实时采

集的时间周期小于600毫秒。双主机之间切换状态的时间周期小于2秒。

#### 2.2.2.3 可靠性需求

本课题应用于实际项目中，为保证电厂现场的应用价值及操作工人的安全，对系统的可靠性具有较高的要求。需要考虑通信网络及结构的设计保证锅炉燃烧控制系统能不间断、稳定运行，出现故障时也能不停机修复。

## **2.3** 本章小结

本章简单介绍了锅炉控制系统的工作原理及组成结构。提出了主站控制层软件系统的需求分析，包括通信功能及数据处理流程的介绍，详细给出了数据类型。从性能和可靠性发面提出需求。其中还介绍了整个系统的硬件结构组成及详细信息。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 第**3**章 主站控制层软件系统概要设计

## 3.1 总体设计

为了满足系统的稳定性和可靠性需求，锅炉的燃烧控制系统采用双冗余设计，双冗余网络和双冗余热备份主站。网络包括作用于上层通信的工业以太网，和作用于下层主从通信的Profibus总线，还包括两个主站之间的485总线称为心跳线。双冗余热备份主站包括两个相同的并互为主备状态的主站，两个主站同时上电，但只有一个与从站通信，输出结果；两个主站通过心跳线互检状态；当一个出现故障时，另外一个自动切换状态；心跳互检、主备识别、主备切换及故障检测都在主站通信层中完成。

被用于连接主控层与通信层的端口存储器DPM，是通过在通信层上划分出相应的存储空间而实现的。两层间通过访问主机接口的方式收发数据信息，控制层软件在主机接口连接成功后，加载相应的驱动程序，调用接口函数，就可以使用虚拟的接口，连接成功之后发送相关数据即可。

基于系统整体设计，对主站控制层软件提出设计方案。系统软件设计如图3-1所示。主站控制层中的主控任务及控制算法任务，作为系统的两个独立进程运行，通过共享内存的方式分享数据信息。将通过Profibus总线采集的前端数据上传到通信层，主控任务通过访问DPM通信层接收上传的数据。主控任务与控制算法任务进程间通信，传递数据信息。最后，通过以太网将处理过的数据信息发送到操作员站，等待控制指令信息。

## 3.2 功能模块设计

按功能和结构划分为以太网通信模块、主控模块和前端网通信模块；三大模块共实现九个功能，分别是与操作员站Fix通信功能、与操作员站Point通信功能、与对方主站通信功能、与其他主站通信功能、系统数据交互功能、系统运行监控功能、系统流程控制功能、与前端网周期通信功能及与前端网非周期通信功能。功能结构如图3-2所示。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文



命令

应答数据

以太网通信

主

现场数据

站

控制算法

任务

共享内

存

主控

任务

控

制

控制命令

周期非周期

应答数据

周期非周期

层

前端网通信

DPM通信

通信层

Profibus 通信

操作员站

从站

图3-1 系统软件设计

主站控制层软件系统

以太网通信

图3-2 主站控制层功能结构图

操作员站

Fix

通

信

操作员站

Point

通

信

对方主站通信

其他主站通信

主控

系统数据交换

系统流程控制

系统运行监控

前端网通信

周期通信

非周期通信

## 3.3

数据交互设计

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

主站控制层软件系统的主要功能是数据处理与数据同步，逻辑运算与流程控制。其核心是现场数据的实时传递及数据的交互。通过数据交互实现分散控制、集中管理的分布式控制系统。系统中数据交互存在三种形式。数据交互关系如图3-3、图3-4和图3-5所示。

（1）主站与操作员站数据交互。通过以太网通信，完成数据交互。

（2）控制层与通讯层数据交互。控制层与通信层之间通过DPM传递数据。

（3）主站与从站数据交互。通信层拥有Profibus总线的控制权，实际上通信层只是数据传递的一个平台，最终实现的是控制层与从站的数据交互。通信层负责从站数据采集工作，将控制层转发操作员站下达的控制命令发送到从站。



现场数据采集()

应答数据

现场数据

应答数据

控制命令

应答数据

同步数据

应答数据

配置参数

应答数据

另外一台控制层

操作员站

自动控制算法

控制层DPU程序

通信层

图3-3 控制层与操作员站数据交互时序图

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文



周期通信模块

非周期通信模块 心跳线通信模块 Profibus协议栈

现场数据采集

应答数据

现场数据

控制层采集数据命令

应答数据

控制层控制从站命令

非周期命令

非周期控制命令

应答数据

应答数据

应答数据

本站与对方站运行状态

主机接口(DPM)

主控模块

3.4容错设计

图3-4 控制层与通信层数据交互时序图

本系统应用到电厂中，基于特定环境对可靠性的要求，系统采用冗余容错设计。避免单点故障发生而造成的停机影响问题[[34]](#_bookmark102)，本系统设计成双冗余主站结构，双机备份模式。当出现主站发生故障时，备份主站及时接管当前主站工作，这样的设计模式可以使系统不间断的运行，提高了系统的稳定性能。同样，对于系统中网络通信的设计，也采用冗余网络的模式，两路网络同时运行，可以保证采集数据的周期不间断，使控制的精度在很大程度上得到保证。关于冗余主机的工作方式有四种[[35]](#_bookmark103)，下面是对这四种主机工作方式的具体介绍，选择一个最适合本系统的方式。

（1）冷备份方式。本工作方式的原理是，只将工作站上电运行，使备份态处于闲置状态。当前主站工作时，如果发生异常，需要通过人为方式更换主站，主

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

这样就会导致故障处理时间过长而使得周期数据损失太多。所以，这种工作方式只适合对运行速度和控制精度要求不高的嵌入式系统。

（2）温备份方式。在温备份工作方式下，工作站和备份站同时上电，但只有工作站工作，备份站通过心跳线互检数据并处于就绪状态。当前主站工作时，如果发生异常，工作站与备份站可以自动切换状态，避免了人为切换的一些弊端。但是，由于备份站与工作站状态不一致，接管后需要重新初始化，会有一定时间延迟，还是会有数据丢失的情况。

（3）热备份方式。在热备份工作方式下，工作站与备份站同时上电，通过心跳线互检数据，备份站同时通过总线或心跳线与工作站保持一致状态。当前主站工作时，如果发生异常，备份站能及时接管并继续工作，避免了初始化带来的时间延迟，不会降低控制精度。

（4）双工方式。本方式工作原理是，工作站和备份站均上电，且同时工作，通过心跳线互检数据。工作站和备份站同时产生输出，需要经过专门的处理模块通过比较结果觉得输出。当两个主站的输出结果相同时，结果会直接输出；当两个主站结果不相同时，会重新开始并检查故障来源。这种工作方式需要系统中有比较完善的处理模块，对系统要求比较高。

综上所述，热备份方式更符合系统对实时性和可靠性的要求。

## 3.5 网络设计

系统通信网络采用双冗余设计，双冗余网络工作方式有两种：单工和双工

[[36]](#_bookmark104). 顾名思义，单工是两路网络只有一路网络通信；当工作网络通信出现问题

时，另一路网才会上电启动运行，替代当前网络完成通信任务。双工与单工恰好相反，两路网络同时运行工作，当其中有一路网络出现问题而不能收发数据时，还有另外一路网络在继续工作。相比之下，双工的模式更可取[[37]](#_bookmark105)。综上所述，本系统的通信网络都采用基于双工模式的容错设计。

本系统使用工业以太网作为操作员站和主站之间数据通信网络。工业以太网是在传统以太网上构建开放式的工业自动化、信息化网络系统。结合标准以太网和通用以太网得到了工作以太网，其满足工业上对自动化实时性操作的需求[[38]](#_bookmark106)。工业以太网技术可以与上级系统通过网络或无线连接，通过服务器控制网络连接，同时提供标准的OPC接口。以太网应用范围广，几乎支持所有编程语言；通信速率快，可达百兆千兆；可靠性好，可以用于需要在条件恶劣的环境中操作的设备[[39]](#_bookmark107)。

本系统使用Profibus总线作为主站与从站数据通信网络。Profibus现场总线

###### 哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

有三种协议，Profibus-PA协议、Profibus-DP协议和Profibus-FMS协议，第一种协议适合在过程自动化控制网络中使用，第二种协议适合在控制现场级别的过程控制网络中使用，第三种协议比较适合在监控车间级别的网络中使用。本系统适用的环境是现场级别的，所以使用第二种Profibus-DP通信协议[[40]](#_bookmark108)。



现场数据采集

应答数据

采集数据命令

应答数据

控制层控制从站命令

非周期命令

运行状态

应答数据

运行状态

应答数据

另一个通信层

控制层

通信层

从站

应答数据

3.6心跳线设计

图3-5 主站与从站数据交互时序图

本系统中，双冗余主机根据工作状态区分是工作态主站还是备份态主站，双主站同时上电运行，只有当前工作态主站输出结果，备份态主站虽然不需要完成工作，但是它需要与工作态主站时刻保持相同的运行状态。我们利用UART串口的通信功能，在串口中使用RS485总线连接双主站，同步运行状态。因双

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

主站时刻保持相同的状态，串口之间的485总线称为心跳线，串口中传递的数据称为心跳数据。

心跳线存在的意义就是用于检测主站的状态，通过这种方式的检测，可以判定故障。如果只使用一根485总线作为心跳线，一旦当总线本身出现问题，就会导致双主站不能识别对方状态，影响系统正常运行，基于容错和可靠性考虑，使用两根总线作为心跳线同步数据。如果备份态主站现在收不到当前工作主站的心跳数据，表示当前主站故障，备份态会主动抢夺总线控制权，接管当前工作主站，切换状态，使得系统可以继续工作，系统可靠性得到了保障。

## 3.7 存储器设计

在控制系统中主站控制层与通信层的数据收发功能是虚拟的双端口存储器

DPM实现的，下面具体介绍一下DPM的访问过程。

通信层的netX100芯片内部RAM地址空间提供64K的空间作为DPM的存储地址，提供外部主机接口。当通信层芯片的处理器没有在访问接口时，主控层可以通过主机接口访问DPM。当主控层访问DPM时，会有一个DPM信号判断通信状态；主控层通过信号线发送就绪信号，通知通信层芯片当前需要访问DPM；当通信层收到请求信号后，会完成DPM的存储功能，然后回复主控层准备好的信号；主控层收到该信号后，可以访问DPM。主控层与通信层通过各自访问DPM进行读操作和写操作，当有一方在读写时，信号阻塞，另一方处于等待状态，直到DPM的读写权限被释放，对方可以进行相关的操作。

## 3.8 环境设计

### 3.8.1 Linux内核裁减

主站控制层软件系统的运行环境是Linux操作系统，Linux OS的特点是其内核可以进行裁减，删除不需要的功能，基于这一特性，Linux一般被应用在嵌入式软件开发中。针对系统的不同需求，裁减Linux内核，去掉系统不需要的功能模块，减少内核大小，方便使用[[41]](#_bookmark109)。本系统所使用的Linux OS是经过内核裁减的，删除了很多不需要的模块，诸如声卡、光驱等。经过内核裁减的OS运行在系统中，可以加快系统启动速度。

### 3.8.2 Linux内核修改

主控层的外部硬件是4153芯片，通信层的外部硬件是netX100芯片，通过

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

4153芯片的PC/104总线接口连接netX100芯片的外部主机接口。硬件环境通信方式如图3-6 所示。在软件上，在通信层的操作系统上虚拟出双端口存储器

DPM，控制层通过PCI卡与通信层DPM连接，主控任务通过调用其驱动程序驱动PCI卡进行通信任务。软件环境通信方式如图3-7所示。在硬件环境中，没有PCI卡的硬件设备，导致无法通信。综上所述，对于硬件环境和软件环境不匹配问题，我们要改变软件环境，在系统的内核中修改代码，创建一块可以将地址空间映射到PC/104总线上的PCI卡，使软件环境与硬件环境相匹配，这样主控层就可以与通信层完成互相访问，进行数据的接收和发送。

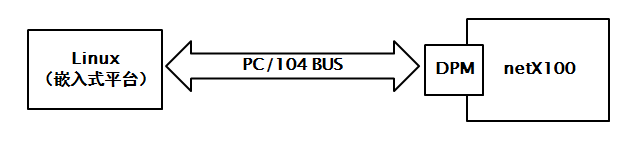
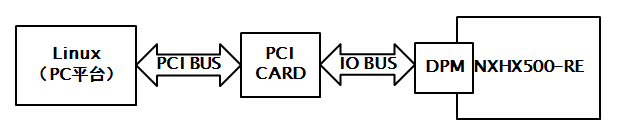


图3-6 硬件环境通信方式



**3.9**本章小结

图3-7 软件环境通信方式

本章提出了锅炉燃烧控制系统主站控制层软件系统的概要设计，给出系统总体设计，从功能出发划分模块，阐述每个模块的功能，以及与系统其他部分需要完成的功能，对第2章给出的数据做数据交互设计，还包括系统中关键技术提出设计方案。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 第**4**章 主站控制层软件系统详细设计

## 4.1 以太网通信模块的详细设计

本节将介绍以太网通信模块的详细设计。以太网通信包括四种不同数据的处理：操作员站Fix命令数据类型、操作员站Point命令数据类型、对方主站数据类型、来自其他主站的数据类型。以太网模块根据数据的类型进行相应的处理，以太网通信模块的流程图如图4-1所示。

开始

套接字读取数据

来自操作员站

来自操作员站

还是主站

来自主站

来自fix还是point

来自对方主站还是

其他主站

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 处理fix命令请求 | |  | 处理point命令请求 | |  | | 同步对方数据 | |  | 同步现场数据 | |
|  |  | | |  | | | |  | | |  |
|  | | | | | |  | | | | | |

来自fix

来自point来自对方主站

结束

图4-1 以太网通信流程

来自其他主站

以太网通信模块接口，即与操作员站的通信接口，采用Socket套接字接口。不同设备的IP地址和端口号都不一样，根据不同的标示符来判断是来自何种设备的数据，针对不同的数据请求，有相应的数据处理模块。比如，检测到是来自对方主站的数据请求，就会进入到同步数据流程。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文



Modbus通信模块

操作员通信模块

操作员通信模块

监控模块

秒中断函数

## 4.2 主控模块的详细设计

主控模块是系统的核心模块，具体实现两大作用。第一，负责来自其他模块的数据处理，包括与操作员站、对方主站、其他主站、通信层和自动控制算法程序。第二，负责检测各类数据通信情况，处理数据异常。主控模块通过调用其他功能模块实现控制流程，主控模块调用图如图4-2所示。



循环体函数

软件初始化

软件退出处理

监控模块

Modbus通信模块

主控模块

由图我们可以看到整个控制系统具体有哪些功能模块，而主控层软件系统中的主控模块就是通过调用这些功能模块，顺序处理完成控制流程。第一层模块包括软件初始化模块、循环体函数模块和软件退出处理模块；第二层包括监控模块、Modbus通信模块、操作员通信模块、秒中断函数模块；第三层包括Modbus通信模块、监控模块、工作主机控制函数模块；最后一层包括操作员通信模块（上传主机状态）、前端网通信模块（采集数据）、自动控制模块、操作员通信模块（数据同步）、前端网通信模块（控制）。

Modbus通信模块

监控模块

监控模块

Modbus通信模块

工作主机控制函数

图4-2 主控模块调用图

操作员通信模块

(上传主机状态)

前端网通信模块(采集)

自动控制

模块

前端网通信模块(控制)

操作员站通信模块(数据同步)

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文



开始

加载网卡

主控模块的实现流程如图4-3所示。通过成功加载网卡，设置中断信号，创建共享内存，然后对设备初始化，连接以太网后就进入循环流程，完成循环流程后关闭信号灯和看门狗，清除缓存，关闭网卡驱动，就完成了主控流程。若此时有重启标记，直接切换备份站。



是否成功加载

前端网卡

是

是否有重启标志

是

否

否

结束

设置中断信号

创建共享内存IPC

初始化指针分配内存空间

各种设备初始化

主机状态设备用状态

建立以太网连接

循环进程

关闭电子狗和运行灯

通知备用主机接管重启系统

清数据缓存关闭网卡驱动

图4-3 主控模块的流程图

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

设备初始化

循环进程流程图如图4-4所示。进入循环后，设备初始化，启动主机工作，若没有重启标志，进入秒中断进程，完成秒中断流程后，接收操作员站下传的数据包，退出进程；若此时有重启标志，就通知备份站抢夺控制权，接管工作站的工作，并重启系统。

开始



是否有重启标志

是

否

是否有重启标志

是

否

启动工作

主机状态

秒中断进程

接收操作员站下传数

据包

图4-4 循环流程图

结束

通知备用站接管

并重启

秒中断进程的流程图如图4-5所示。进入秒中断流程，诊断以太网连接情况，判断主机状态。如果此时主机是工作态，进入工作态主站进程，完成系统闭环控制流程，并向点表发送运行信息；如果是备份态，进入备份态工作进程，完成数据备份流程。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

工作态进程的流程图如图4-6所示。首先读取前端数据，接收操作员站命令，调用单步运算及逻辑连锁，完成这些准备工作后，与控制算法进程间通信，把处理后的数据写入前端相应模块，存盘实时数据，同步数据后再向点表发送数据信息。

开始

|  |  |
| --- | --- |
| 计算主机状态 | |
|  |  |

工作态主站进程

是否有重启标志

否

是否工作态主站

是

是

否

结束

与计算机以太网连接状

态的分析管理与报警

备份态主站进程

向点表发送运行信息

图4-5 秒中断流程图

备份态主站流程图如图4-7所示。备份站的主要流程就是同步数据，然后存储当前工作态数据，以备主备状态切换时恢复实时数据。进入备份站后，从网卡读取工作站的实时数据，对实时数据进行存盘，并将累计值数据存盘，完成数据备份存盘工作。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文



开始

发送状态包给操作员站



向前端写入AO,DO

实时数据存盘

数据同步

向点表发送采集数据

结束

读取前端数据

读取操作员站命令

调用单步运算及联锁逻辑

与控制算法进程通信

图4-6 工作站进程流程图



开始

从IO网卡读取工作态主站的实时数据

实时数据存盘



结束

累积值数据存盘

图4-7 备份站进程流程图



哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

## 4.3 前端网通信模块的详细设计



是否采集现场数据

否

是

是

是否配置通信层

否

是

是否控制前端 否

执行部件

是否配置前端参数

是

调用cifx卡的发送函数并发送数据包 到通信层

接收通信层返回的确认数据包

否

接收其他函数的调用命令

填写包头信息填写命令码

填写包头信息填写命令码

填写包头信息填写命令码

填写参数数据

填写参数数据

前端网通信模块从逻辑上来说是实现主站与从站之间的通信，但是Profibus网的通信功能是在通信层完成，所以此模块在本软件系统中实际上是实现主站控制层与通信层的数据交互。该模块通过与通信层通信交互数据，由通信层转发到从站的执行部件。前端网通信模块的流程如图4-8所示。初始化cifx卡驱动后，接收其他函数的调用命令，判断命令的类型，根据不同类型的命令做相应的处理流程。之后，再调用cifx卡的发送函数把数据包发送给通信层，并接收从通信层返回的确认数据，针对返回数据做相应的处理。

开始

初始化cifx卡驱动

|  |  |
| --- | --- |
| 填写包头信息填写命令码 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 处理返回的函数 | |
|  |  |

图4-8 前端网通信流程图

结束

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

## 4.4 进程间通信的详细设计

主站控制层中主控任务与控制算法任务在操作系统中以两个独立的进程运行，共享内存进行数据的接收与发送。主控进程负责实现系统闭环控制流程的处理，控制算法进程负责计算合理的控制参数；主控进程接收从站采集的现场实时数据，将数据写入共享内存空间中，等待控制算法进程从内存中读取数据信息，控制算法将计算后的参数信息写入内存空间，等待主控进程读取控制参数。

共享内存区划分称两个区，一个用于存放主控进程的数据内存区，另一个用于存放控制算法进程的数据内存区。

## 4.5 通信接口的详细设计

主站分为控制层和通信层，控制层负责控制流程，通信层负责通信。控制层与通信层的接口使用虚拟双端口，下面从两个方面具体介绍接口的设计。

（1）接口数据格式。接口之间的数据种类有很多，比如采集的实时数据有AI、

DI、AO、DO四种，数据来源不同，识别数据内容需要通过数据本身的一些特性识别，本文给出标准的格式，包括从站地址、命令码、数据长度、数据内容四个参数。所有种类的数据按照本数据格式包含四个参数。

（2）接口通信方式。

在通信层的运行系统RAM区域划分出一块64K的地址空间，作为接口使用。使接口与控制层的PC/104总线相连。两层之间通信方式是邮箱机制，分为发送邮箱和接收邮箱，主控任务发送请求数据到发送邮箱，等待命令处理，通信任务命令处理后，发送应答数据到接收邮箱，主控任务从接收邮箱提取应答数据。接口的通信方式如图4-9所示。

## 4.6 心跳线的详细设计

心跳线可以使双主站保持心跳数据，识别对方状态，用于判定是否故障及故障出处。双主站之间会发送周期查询命令，查看当前双主站运行状态，是否正常。对于双主站故障的判定有五种情况。

（1）双主站之间都能收到对方的两路心跳数据，表示运行正常，没有故障。

（2）双主站之间都只能收到一路心跳数据，表示有一路心跳线故障。

（3）双主站之间只有一方能收到对方的两路心跳数据，表示对方故障。

（4）双主站之间只有一方能收到对方的一路心跳数据，表示对方故障，有一

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

路心跳线也故障。

（5）双主站之间都收不到对方的心跳数据，表示两路心跳线都出现故障。



控制层应用

控制层

主控任务

DPM

发送邮箱

接收邮箱

命令处理

通信层

通信层协议栈

4.7本章小结

图4-9 接口的通信方式

本章提出了锅炉燃烧控制系统主站控制层的详细设计，其中包括各个功能模块的详细设计，网络通信接口设计，进程间通信设计，以及心跳线的详细设计。给出了每个功能模块的功能流程图。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 第**5**章 主站控制层软件系统实现

## 5.1 以太网通信模块的实现

以太网通信模块使用套接字编程实现功能。在Dpu程序中，涉及到套接字通信连接包括：Dpu和Opu(操作员站Fix程序)，Dpu和对方Dpu, Dpu和Point(点表)，Dpu和其他站Dpu四种节点间的通信。其中，由于所有的网络皆为冗余网络，即任何两个节点间的连接都有两条链路，因此，至少存在8条链路，其中的Opu节点和其他Dpu节点可以存在多个。

Dpu和所有节点间的网络通信方式，采用面向连接，非阻塞的方式。一方作为服务器端等待连接，一方作为客户端主动发起连接。

### 5.1.1 Dpu和Fix通信

Dpu作为服务器端，Fix作为客户端。

##### （1）Dpu发送的数据信息有：

1）PackSendtoFix\_FAST(): Dpu快速发送给Fix的以太网回复包，主要是对来自Fix的以太网包做出快速回应。

2）SendAOToFix（）：工作态Dpu发送给所有Opu的AO通道实时信息数据包。

3）SendSPToFix（）：工作态Dpu发送给所有Opu的SP通道实时信息数据包。

4）PackSendtoFix(): 工作态Dpu发送给所有Opu的AI、DI、AO、DO的实时数据包。

##### （2）Dpu接收的数据信息PacketArrive1()：

主要内容包括GP、MOD、DAO、BSP 等数据，并存入对应的全局变量中。

Arrive1[]用于存储来自Fix的数据包信息，收到消息后的Dpu根据不同的数据包内容，可能做出回复。

### 5.1.2 Dpu和对方Dpu通信

一方作为服务器端，另一方就作为客户端，由IP地址决定决定，主机号为

1是客户端，主机号为51是服务器端。

##### （1）Dpu发送的数据信息有：

1）NotifyOtherToWork\_ByNet（）：工作态Dpu发送给对方Dpu的切换命令的数据包，包中由具体的切换原因。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

2）MonitorWrite\_ByNet(): Dpu发送给对方Dpu的心跳数据包，包中有自己的四种报警信息以及自己主备状态信息。

3）SendSyncPack（）：工作态Dpu给备份态Dpu发送实时同步数据。

##### （2）Dpu接收的数据信息PacketArrive3()：

Dpu接收来自对方Dpu的数据包，根据包的数据类型不同，有不同的处理函数，由接收包的设备号判断数据类型。收到来自对方的数据包类型有以下几种情况：

1）收到对方的心跳数据包，用OnRecvOtherState\_ByNet()处理。

2）收到对方主动退出的消息，用OnCatchOtherExit\_ByNet()处理。

3）收到对方的数据同步包，用OnRecvSyncPack（）处理。

### 5.1.3 Dpu和Point通信

Dpu作为服务器端，Point作为客户端。

##### （1）Dpu发送的数据信息有：

1）SendDpuinfoToPoint(): 工作态Dpu发送自己的运行信息给点表。

2）SendRealTimeData\_Point(): 工作态Dpu发送给点表自己的实时数据包。

##### （2）Dpu接收的数据信息是PacketArrive2()：工作态Dpu接收来自点表的通道数据信息。

### 5.1.4 Dpu和其他Dpu通信

Dpu 和其他Dpu 既可以是服务器端，也可以是客户端。osfg.

bConnectMode[i] =1配置Osd Dpu为客户端，osfg. bAcceptMode[i] =1配置Osd

Dpu为服务器端。

##### （1）Dpu发送的数据信息有SendCallToOsd\_ByWorker()：

工作态Dpu发送call（调数包）给其他Dpu。数据包以通道号作为纪录单元，信息包括PointStationID（所在从站号）和PointChannelID（通道号）。

##### （2）Dpu接收的数据信息有OnRecvCallFromOsWorker ()：

工作态Dpu收到其他Dpu对call包的回复数据包，包的主要内容：读取回复包中需要调取的哪些通道通道，工作态Dpu收到Osd Dpu对call包的回复。用于以太网通信的数据结构体包括tagDPUENET（连接情况）和tagDPUSYNC(以太网通信)，tagDPUOSD（主站与其他主站通信）。详细信息如表5-1，表5-2，表5-3所示。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | 表 5-1 以 | 太网连接表 |  |
|  | 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |  |
|  | WorkState | short | 工作状态 |  |
|  | CircleCount | unsigned long | 循环次数 |  |
|  | IpAdd[50] | byte | IP 地址 |  |
|  | IpNum[50] | byte | IP 端口号 |  |
|  | SockMaxNum | byte | 套接字最大值数 |  |
|  | DataType[50] | byte | 数据类型 |  |
|  | SockValue[50] | long | 套接字返回值 |  |
|  | reConnect[50] | short | 服务器端 connect 返回值 |  |
|  | reAccept[50] | short | 客户端 accept 返回值 |  |
|  | SendTimes [50] | short | 发送以太网数据包次数 |  |
|  | RecvTimes [50] | short | 接收以太网数据包次数 |  |
|  | SuccessCount[50] | unsigned long | 连接成功次数 |  |
|  | CloseCount[50] | unsigned long | 连接关闭次数 |  |
|  | SendLength [50] | unsigned long | 该套接字上次发送数据长度 |  |
|  | RecvLength[50] | unsigned long | 该套接字上次接收数据长度 |  |
|  | lsCloseDebug [50] | short | 上次连接关闭的原因 |  |

表5-2 主站之间同步表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| WorkState | short | 工作状态 |
| CircleCount | Unsigned long | 循环次数 |
| lzSendCou[30] | Unsigned long | 统计前端网发送次数 |
| lzRecvCou[30] | Unsigned long | 统计前端网接收次数 |
| leSendCou0[30] | Unsigned long | 统计 0 路以太网发送次数 |
| leRecvCou0[30] | Unsigned long | 统计 0 路以太网接收次数 |
| leSendCou1[30] | Unsigned long | 统计 1 路以太网发送次数 |
| leRecvCou1[30] | Unsigned long | 统计 1 路以太网接收次数 |

表5-3 与其他主站通信表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| WorkState | short | 工作状态 |
| CircleCount | Unsigned long | 循环次数 |
| IpAdd [oslink\_max\_num] | byte | IP 地址 |
| IpNum [oslink\_max\_num] | byte | IP 端口号 |
| NumAiCall\_B[oslink\_max\_num] | short | 调用 AI 个数 |
| NumDiCall\_B[oslink\_max\_num] | short | 调用 DI 个数 |
| NumAiRecv\_B[oslink\_max\_num] | short | 接收 AI 个数 |
| NumDiRecv\_B[oslink\_max\_num] | short | 接收 DI 个数 |
| SendTimesCall\_B[oslink\_max\_num] | Unsigned long | 统计发送 Call 包 |
| RecvTimesCall\_B[oslink\_max\_num] | Unsigned long | 统计接收 Call 包 |
| RecvlTimesData\_B[oslink\_max\_num] | Unsigned long | 统计接收 Data 包 |
| SendTimesData\_B[oslink\_max\_num] | Unsigned long | 统计应答 Data 包 |

## 5.2

主控模块的实现

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

主控模块的处理流程比较复杂，其中有很多进程。本模块的程序流程图如图5-1所示。首先根据主站的IP地址配置变量，加载前端网卡并判断是否加载成功，加载成功后，判断程序执行所在路径，设置定时器的触发时间，设置捕获各种信号以及处理函数。然后创建进程间通信的共享内存IPC，并设置读写信号量；创建并初始化数据缓冲区，从硬盘文件中读取全部配置信息。初始化报警值，限制量程值，初始化主站和其他主站的网络连接信息；初始化前端网通信，查询主站和前端从站模块通信网络连接情况。初始化0路网络连接，创建并初始化套接字表，纪录主站程序启动运行的开始时间。初始化所有同步数据标志，启动看门狗，向操作员站和其他主站发送心跳数据，并进入while循环进程。

开始

加载网卡

|  |  |
| --- | --- |
| 建立以太网连接 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| While循环程序 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 关闭电子狗  关闭运行灯清除内存共享  485设置成接收态关闭 | |
|  |  |



是否加载前端网卡

是

是否有重启标志

是

否

否

结束

设置中断信号

创建共享内存

初始化指针分配

内存空间

各种设备初始化DataInit(0); UpdateAll(0); StartConfig(0);

...

主机状态设为

备用

通知备用站接管

重启

图5-1 主控程序流程图

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

其中while循环体有自己的流程，从循环体入口到出口经过相应的函数判断，如图5-2所示。进入while循环进程后，会执行秒中断函数，并打印主站运行信息。此时有重启标志，需要重启程序就会退出循环程序。不需要重启，执行秒中断并置标志位intrflag为0，接收来自各方的以太网数据包，检查备用态主站是否切换成工作态主站，工作态主站向操作员站和对方主站发送心跳数据，判断程序的执行时间是否在正常的范围内。如果在正常范围时间内，置标志位

intrflag为1，允许下次执行秒中断函数。然后，统计主站通信错误信息，如果错误次数超过设定次数就置重启标记为1并延时10ms。



开始

进入循环

|  |  |
| --- | --- |
| 打印运行信息 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 延迟10ms | |
|  |  |



判断是否退出循环

否

本次是否需要执行秒中断函数

程序执行是否越界

是

否

打印运行信息

下次执行秒中断

标志位Intrflag=1

是

执行秒中断函数

否

主站错误次数是否达到6次

是

否

是

结束

接收以太网数据包

重启标志置1 bFlagReboot=1

发送心跳数据

检查备用站状态

图5-2 循环程序流程图

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

在循环程序流程图中有秒中断进程，其相应的过程如图5-3所示。纪录秒中断函数的开始时间，获取上次进入秒中断函数到本次进入秒中断函数所用的时间（一个周期所用的时间）并打印出来。

打印进入秒中断的次数和主站主备切换的次数。如果是第一次进入秒中断函数，检查与自动控制算法进程通信环境，检查和串口进程通信环境，计算获取本机网卡的状况，并向对方主站发送心跳数据。

检测备份主站是否有主备切换情况，向操作员站发送心跳数据。打印主站与各个以太网节点的网络连接状态，检查重启标志，决定是否重启。

开始

Dynlink();//建立各以太

网连接

是

否

JudgeHos tEcard();//计

算本机网卡故障报警

值

Dynlink();//建立各以太网连接

以太网连接状态的分析、管理、报警



是否工作DPU 否

SendDebugNum

设置网络操作时间计算CPU负载 填充DPU数据 计算主机状态

工作DPU进程

向POINT发送

DPU数据信息

|  |  |
| --- | --- |
| 备份DPU进程 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 重置DPU网络连接数据， 各类连接信息清零 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 保护上一循环的主  机状态 | |
|  |  |

是否有重启标志

是

结束

重启

SendDebugNum

图5-3 秒中断函数程序流程图

计算本次循环网络通信所用时间和本主站的Cpu处理负荷率，填充主站数据。计算并更新主站的当前主备状态，查询对方主站的工作状态。

判断当前主站的工作状态，如果当前主站是工作态主站，调用工作处理程序；如果当前主站是备份态主站，调用备份态处理程序，填充并打印本主站当前系统时间。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

判断是否是工作态，是工作态主站向操作员站点表发送本主站数据信息，复位主站网络状态纪录信息，存入本次主站工作状态，以便于下次进入秒中断时比较是否主备切换。

工作态主站的工作流程：进入工作态主站流程，向操作员站发送自己和对方主站的状态信息，调用前端网通知备份站自己已经占用前端网，调用以太网通知其他主站自己占用前端网。当前主站读取前端信息，并接收点表的信息，向所有主站和操作员站发送心跳信息。

如果是第一次到工作态流程，需要填写主站当前工作时间。通过AI初始化

AO值，直接从AO模块中读取AO；通过DI初始化DO值，直接从DO模块中读取DO。将数组中的实时数据赋值到结构体中，以便联锁和自动控制程序使用。读取AO和DO数据，控制前运行的单步运算调用和联锁逻辑，设置AI变化率报警值，设置各个控制参数量程范围；然后与自动控制算法进程通信，计算控制参数是否超出限制范围，将AI值赋给AO，运行累计函数，再调用前端网通知对方主站自己已经使用前端网完成数据通信。

与前端网通信采集完数据后，判断操作员站的网络连接状态，发送处理完的数据信息；与串口通信，将结构体里的实时数据赋值到数组并存盘。工作态主站工作流程如图5-4所示。

备份态主站的工作流程：将重要的实时数据存盘，保存通过以太网同步的数据，将实时数据赋到结构体中，最后将工作态主站循环次数清零。备份态主站工作流程如图5-5所示。

当前主站通过调用网络来接收和发送自己的数据信息，信息以结构体的形式存在，以包的方式发送。当前主站发送的数据包tagPacketUp结构体的数据信息如表5-4所示。

主站接收其他结构发送的数据tagPacketDn结构体信息如表5-5所示。主站会有自己的时间表纪录开始和结束的时间，以及一些操作的用时，tagDPUTIME结构体具体的信息如表5-6所示。

主站程序运行时也会出现通信错误，在程序中有专门存储错误信息的结构体，tagDPUERR结构体具体信息如表5-7所示。最多只能纪录100条，新的纪录会存在最前面，后面的纪录自动下移一位，就是说信息会重新覆盖存储。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

开始

发送状态包给

操作员站

|  |  |
| --- | --- |
| 检测AO和DO模块  情况 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 调用单步运算 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 调用联锁逻辑 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 设置AI变化率报警值 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| 与控制进程通信 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| CalcuRunlimitAfterC  trl();  //与控制算法完成通信 | |
|  |  |

|  |  |
| --- | --- |
| SendDebugNumber;  DynMonitor; | |
|  |  |

是

工作站是否初始化

否

否

是否准备好数据

是

PrepareRunlimitBefo

reCtrl();

//准备与控制算法进程通信

否

是否有重启标志

是

结束

数据赋值到结构体

//自控进程可以使用

前端状态分析

如果是第一次读前端

不计算和上传数据

PlcProcess()

信息采集

通过AI、DI初始化

AO、DO并读取

清回路切手动

DynMonitor;

SendDebug;

//动态监视

通知备用站自己已经占据总线

让主备灯不亮

请求其他站的数据包

读取前端数据

运行累计函数

通知对方自己释放总线

**StartPlcProcess();**

将结构体中的数据赋

值数组，用于存盘

判断以太网连接状态

发送数据到操作员站

填写点表信息

图5-4 工作主站程序流程图

PlcProcess()

信息采集

写AO、DO到前端

通过以太网读取操作

员站命令

数组的实时数据赋值到结构体

调用单步运算和逻辑

联锁

设置AI变化率报警值

DynMonitor;

SendDebug;

//动态监视

PrepareRunlimitBefo

reCtrl();

//准备与控制算法进程通信

与控制进程通信

CalcuRunlimitAfterC

trl();

//与控制算法完成通信

SendDebugNumber;

DynMonitor;

写热偶温度补偿值

分析前端状态

运行累计函数

将结构体中的数据赋值数组，用于存盘

清回路切手动

实时数据存盘

以太网同步数据

如果以太网与备用站失联。用前端网同步数据

通知对方自己释放总线

将AO和DO数据发送

到操作员站

|  |  |
| --- | --- |
| 将AO和DO数据发送  到操作员站 | |
|  |  |

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | 表 5-4 | Dpu 发送包表 |  |
|  | 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |  |
|  | wID | short | 序号 |  |
|  | nPacketID | short | DPU 发送用包号 |  |
|  | wCount | short | DPU 包内数据个数 |  |
|  | szName[20] | char | DPU 包名称 |  |

表5-5 Dpu接收包表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| wID | short | 序号 |
| nDataStartID | short | 数据起始包号 |
| nStartID | short | DPU 接收用起始包号 |
| nEndID | short | DPU 接收用终止包号 |
| szName[20] | char | DPU 包名称 |

表5-6 Dpu时间表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| WorkState | short | 工作状态 |
| nStart[6] | short | 启动时间 |
| nWork[6] | short | 开始进入工作状态时间 |
| nCurr[6] | short | 当前时间 |
| CircleCount | Unsigned long | 循环次数 |
| CircleUse | short | 本次循环用时 |
| FrontReadUse | short | 前端采集用时 |
| FrontWriteUse | short | 前端输出用时 |
| NetUse | short | 网络操作用时 |
| CpuBurden | float | CPU 负载率 |
| CtrlWarn | byte | Ctrl 报警值 0 表示正常 4 表示未运行 |
| SerlWarn | byte | Serl 报警值 0 表示正常 4 表示未运行 |

表5-7 Dpu错误表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| WorkState | short | 工作状态 |
| time\_escape[err\_record\_num] | Unsigned long | 表示错误发生时刻已过去多少秒，发生错误时值为 0 |
| CircleCount | Unsigned long | 循环次数 |
| CircleHappen[err\_record\_num] | Unsigned long | 发生错误时的循环次数 |
| wErr[err\_record\_num] | short | 记录主错误码 |
| Sub[err\_record\_num] | long | 记录次错误码：默认为 0 |

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

开始

让主备灯不亮

485串口

设置成可接收状态

备用方从自已的IO网卡读

来工作DPU传来的实时数据

实时数据存盘,不包括

Accumu

Accumu数据存盘

将数组里的数据放入结构体，以便程序使用

结束

填写组态信息及控制回路信息

图5-5 备份主站程序流程图

## 5.3 前端网通信模块的实现

每个AI类型的从站采集通道共有16路，每个DI类型的从站采集通道共有24路。需要数据采集时，从前端读取从站号，判断从站类型，根据不同的类型进行相应的流程，最后将数据存入从站类型所在的点表，数据采集完成。具体流程图如图5-6所示。从站四种数据类型对应四种结构体的数据信息详见表5-8、表5-9、表5-10及表5-11。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  | 表 5 | -8 AI 点表 |  |
|  | 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |  |
|  | PointID | short | 点表识别号 |  |
|  | Packet\_Offset | short | 包内的偏移量 |  |
|  | TypeValue | short | 点类型 |  |
|  | SPPacket\_Offset | short | SP 包内的偏移量 |  |
|  | RunLowValue | float | 控制运行的最小值 |  |
|  | CutLowValue | float | 自控变手动最小值 |  |
|  | LimitLowValue | float | 信号转换的最小值 |  |
|  | SignalLowValue | float | 信号最小值 |  |
|  | RunHighValue | float | 控制运行的最大值 |  |
|  | CutHighValue | float | 自控变手动最大值 |  |
|  | LimitHighValue | float | 信号转换的最大值 |  |
|  | SignalHighValue | float | 信号最大值 |  |
|  | LbTime | byte | 滤波时间 |  |
|  | Station\_ID | byte | 点来源识别号 |  |
|  | SignalValue | byte | 信号值 |  |
|  | ChannelType | byte | 通道类型 |  |
|  | Runlow\_Offset | char | 运行最小值的序号 |  |
|  | TagName[20] | char | 点名称 |  |
|  | avValue | float | 从站采集模拟量值 |  |
|  | ExtractValue | byte | 开方 |  |
|  | Channel\_ID | short | 通道识别号 |  |
|  | RateLimit | byte | 变化率极限值 |  |
|  | CorrectValue | float | 改正值 |  |
|  | SelPacket\_Offset | short | 已选点的序号 |  |
|  | RetValue | short | 当前 AI 的报警值 |  |
|  | RunHigh\_Offset | char | 运行最大值的序号 |  |
|  | Zuni | Byte | 阻尼信号 |  |
|  | Selected\_tip | byte | 选择上传点的状态 |  |
|  | FilterValue | byte | 滤除小信号的比例值 |  |
|  | sp\_tip | float | 选择上传 sp 的状态 |  |
|  | LongName[40] | char | 长名称描述 |  |
|  | UnitValue [6] | char | 单位值 |  |
|  | OriginalValue | float | 从站物理原始值 |  |

表5-9 AO点表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| PointID | short | 点表识别号 |
| GPPacket\_Offset | short | GP 包内序号 |
| TypeValue | short | 点类型 |
| Station\_ID0 | byte | 通道 1 的站地址号 |
| Packet\_Offset | short | 包内的偏移量 |
| LimitLowValue | float | 信号转换的最小值 |
| Station\_ID1 | byte | 通道 2 的站地址号 |
| LimitHighValue | float | 信号转换的最大值 |
| TagName[20] | char | 点位号 |

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 表 5-9 AO 点表（续表 | ） |
|  | 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |  |
|  | MAPacket\_Offset | short | MA 包内的偏移量 |  |
|  | GPValue | byte | GP 的实时值 |  |
|  | AI\_IDNum | short | 初始化 AO 的 AI 点号 |  |
|  | Ret0\_Value | short | 通道 1 报警值 |  |
|  | avValue | float | 从站采集模拟量值 |  |
|  | LongName[40] | char | 长名称描述 |  |
|  | StartTimeValue | short | 开始时间 |  |
|  | UnitValue [6] | char | 单位 |  |
|  | WholeTimeValue | byte | 整个时间 |  |
|  | MA\_tip | byte | 选择上传 MA 的状态 |  |
|  | RetValue | short | 当前 AI 的报警值 |  |
|  | Channel\_ID0 | byte | 通道 1 的标识号 |  |
|  | Channel\_ID1 | byte | 通道 2 的标识号 |  |
|  | LineFlag\_Value | byte | 线性标志值 |  |
|  | Ret1\_Value | short | 通道 2 报警值 |  |

表5-10 DI点表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| PointID | short | 点表识别号 |
| RetValue | short | 当前 DI 的报警值 |
| TypeValue | short | 点类型 |
| dvValue | byte | 从站采集数字量值 |
| Packet\_Offset | short | 包内序号 |
| Channel\_ID | short | 通道号 |
| Station\_ID | byte | 点来源识别号 |
| TagName[20] | char | 点名称 |
| ChannelType | byte | 通道类型 |
| LongName[40] | char | 长名称描述 |

表5-11 DO点表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| Point\_ID | short | 点标识 |
| GPValue | byte | GP 实时值 |
| Type Value | short | 点类型 |
| Packet\_Offset | short | 包内的偏移量 |
| GPPacket\_Offset | short | GP 包内偏移量 |
| Station\_ID | byte | 点来源识别号 |
| DvValue | byte | 从站采集数字量值 |
| TagName[20] | char | 点名称 |
| Channel\_ID | byte | 通道号 |
| TimeValue | float | 脉冲时间 |
| RetValue | short | 当前 DI 的报警值 |
| LongName[40] | char | 长名称描述 |
| ReverseValue | byte | 取反值 |
| DI\_IDValue | short | 初始化 DO 的 DI 点号 |

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

D



开始

从站类型

读取从站号

SID



I

接收24路通道数据

扫描DI点表

向通信机发送

DI采集命令

AI



向通信机发送

AI采集命令

接收16路通道数据

扫描AI点表

数值写入

tagAIPOINT

|  |  |
| --- | --- |
| 数值写入  tagDIPOINT | |
|  |  |

## 5.4 进程间通信的实现



结束

图5-6 读取从站流程图

主控进程在代码中称为Dpu程序，控制算法进程在代码中称为Ctrl程序；存放主控进程的内存区在代码中称为in\_buff，拷贝各种实时数据；存放控制算法进程的内存区在代码中称为out\_buff，拷贝各种控制参数。对内存区的读取用read（）函数实现，对内存区的写入用write（）函数实现，对于数据信号的获取用wait(signal)实现，对于数据信号的释放用post(signal)实现。Dpu进程与Ctrl进程通信的输入信息如表5-12所示。与Ctrl进程通信的输出信息如表5-13所示。

Dpu程序往in\_buff中写入数据，从out\_buff中读取数据。Ctrl程序从in\_buff

Ctrl程序读取数据，写入数据到out\_buff. 由Read\_B1和Write\_B1、Read\_B2

和Write\_B2四个信号量控制两个进程对共享内存区in\_buff和out\_buff的读写。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

其中Read \_B1和Write \_B1用于控制Ctrl进程和Dpu进程对in\_buff的读和写；其中Read \_B2和Write \_B2用于控制Dpu进程和Ctrl进程对out\_buff的读和写。所有的读变量，0表示不可读，1表示可读；所有的写变量，0表示不可写，1表示可写；对共享内存读写时，要按照先写后读的顺序。保证同步控制，当Dpu程序写in\_buff时，Ctrl程序不可以读in\_buff；当Ctrl程序写out\_buff时，Dpu程序不可以读。

开始

初始化读写变量

否否

是否dpu进程

否

是

是否写in\_buff

是否读out\_buff

Ctrl进程读写内存

读out\_buff

写out\_buff

是是

获取信号量

Wait(Read\_B2)

获取信号量

Wait(Write\_B1)

获取信号量

Wait(Read\_B1)

获取信号量

Wait(Write\_B2)

释放信号量

Post(Write\_B2)

释放信号量

Post(Read\_B1)

释放信号量

Post(Write\_B1)

释放信号量

Post(Read\_B2)

结束

Ctrl进程写out\_buff

Ctrl进程读in\_buff

Dpu进程写in\_buff

Dpu进程读iout\_buff

图5-7 进程间通信流程图

进程间通信的程序流程图入图5-7所示。初始化变量，Read\_B1＝0、Write\_B1＝1，Read\_B2＝1、Write\_B2＝0。选择进程，如果是主控进程，选择写入in\_buff时，等待获取写信号量Wait(Write\_B1)，数据拷贝到内存区后释放读信号量Post(Read\_B1)，代表Ctrl程序可以读取in\_buff；选择读取out\_buff时，等待获取读信号量Wait(Read\_B2)，读取数据完毕后，释放写信号量

Post(Write\_B2)，代表Ctrl程序可以继续写out\_buff。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

如果是控制算法进程，选择读取in\_buff 时，等待获取读信号 量

Wait(Read\_B1)，读取完毕后，释放写信号量Post(Write\_B1)，代表此时Dpu程序可以写in\_buff；选择写入out\_buff时，等待获取写信号量Wait(Write\_B2)，数据拷贝后，释放读信号量Post(Read\_B2)，代表此时Dpu程序可以读out\_buff。

表5-12 与Ctrl进程通信输入表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| gdata->FlagFromCtrl[0] | long | ctrl 进程读取的标志 |
| shared->in\_buff[0] | char | 用于存放主控程序放入的  全局内存区 |
| aipoint[0] | 结构体 | 模拟输入点表结构体 |
| aopoint[0] | 结构体 | 模拟输出点表结构体 |
| dipoint[0] | 结构体 | 数字输入点表结构体 |
| dopoint[0] | 结构体 | 数字输出点表结构体 |
| loop[0] | 结构体 | 控制回路组态结构体 |
| looppara[0] | 结构体 | 控制回路的前馈系数 |
| xz[0] | 结构体 | 控制回路的矫正参数结构体 |
| ids[0] | 结构体 | 控制回路辅助结构体 |
| pidloop[0] | 结构体 | PID 控制器结构体 |
| fzloop[0] | 结构体 | FUZZY 控制器结构体 |
| ai\_run\_h[0] | float | Ctrl 计算前 AI 点运行上限 |
| ai\_run\_l[0] | float | Ctrl 计算后 AI 点运行下限 |

表5-13 与Ctrl进程通信输出表

| 数据名称 | 数据类型 | 数据描述 |
| --- | --- | --- |
| gdata->FlagFromCtrl[0] | long | ctrl 进程操作后的标志 |
| gdata->sz\_from\_ctrl[0]) | char | 包括 AO、ZXQDAO、AI、SP 数据的  起始地址 |
| gdata->fao\_from\_ctrl[0] | float | Ctrl 计算后的 AO 通道值，提供所有  AO 虚点通道的值 |
| gdata->fai\_from\_ctrl[0] | float | Ctrl 进程计算后的 AI 通道值，提供所  有 AI 虚点的值 |
| gdata->ai\_run\_h\_from\_ctrl[0] | float | Ctrl 进程计算后的 AI 运行上限 |
| gdata->ai\_run\_l\_from\_ctrl[0] | float | Ctrl 进程计算后的 AI 运行下限 |
| Gdata->ProcessValue\_from\_ctrl [0][0] | float | Ctrl 进程计算后的控制回路过程值 |
| gdata->v\_do\_from\_ctrl[0] | byte | Ctrl 进程计算后的 DO 值  所有 DO 虚点都有 ctrl 提供输出 |
| gdata->bOutputDO\_by\_ctrl[0] | byte | ctrl 计算后需要由 Ctrl 输出的 DO 为  1，表示由 ctrl 提供 DO 值 |
| gdata->v\_di\_from\_ctrl[0] | byte | Ctrl 进程计算后 AI 通道值，提供所有  DI 虚点的值 |
| gdata->loopwarn\_from\_ctrl[0] | byte | Ctrl 计算后的控制回路报警值，是否  需要程控切手动 |

## 5.5

通信接口的实现

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

通信接口的定义和实现在通信层软件上完成，在通信层rcX系统中配置主机接口成为虚拟双端口存储器的工作模式。控制层通过连接主机接口，访问双端口存储器，然后加载cifX网卡自带的驱动程序，再调用接口函数，就能与通信层连接通信，完成数据的接收与发送。

## 5.6 心跳线的实现

当系统运行时，通过发送随机字符到双主站，字符数比较大的默认为工作态主站，另一方为备份态主站。心跳线的协议流程如图5-8所示。



开始

两路心跳线是否

都正常

否

两路是否都错误

是

否

是

是否工作站

否

是

定时检查心跳线状态

对方主站出错

报警

心跳线错误报警

主备状态切换

|  |  |
| --- | --- |
| 清心跳数据 | |
|  |  |

图5-8 心跳协议流程图



结束

发送心跳数据给

对方主站

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

周期检查心跳线状态，检测两路心跳线是否都正常通信；如果两路都正常，清除心跳数据，然后发送当前心跳数据给对方主站；如果两路心跳线都异常，心跳线错误报警；如果不属于以上两种情况，说明是对方主站故障；当主站出错报警时，区分主站工作状态，如果是工作态主站，进行主备状态切换，备份态主站工作，清心跳数据，发送当前心跳数据；如果是备份态主站，对系统没有影响。

## 5.7 本章小结

本章介绍了锅炉燃烧控制系统主站控制层的实现，对第4章提出的详细设计对应给出了具体实现内容，结合程序流程图和数据字典对每个模块功能的实现流程进行详细解释，设计中的所有模块都已经实现。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 第**6**章 主站控制层软件系统测试

## 6.1 测试环境

##### （1）系统硬件测试环境

处理器：Intel Corel(TM) 2

显卡：ATI Radeon HD 4600

内存：2.00GB

硬盘：320G

##### （2）系统软件测试环境

操作系统：Windows XP /Ubuntu 9.04

运行环境：EclipseJDK7

## 6.2 功能性测试

### 6.2.1 以太网通信模块的测试

操作员站的控制软件运行在Windows操作系统上，不属于本软件系统的开发内容，因为本文设计的锅炉燃烧控制系统主站控制层软件系统没有图形界面，需要植入到硬件芯片中连接外部硬件设备才能发挥其软件功能，所以需要利用操作员站的软件来测试以太网连接情况以及工作情况。

#### 6.2.1.1 测试方法

以太网通信模块的功能就是实现操作员站与主站控制层之间数据通信，双主站控制层之间数据同步，需要测试的两端分别做为发送方和接收方，发送方按照一定的频率发送数据到接收方，如果接收方接收到发送来的数据，表明两方通信成功，这样长时间的发送数据，并统计发送与接收数据的错误率。

#### 6.2.1.2 测试内容

##### （1）操作员站与主站控制层通信功能测试

在程序运行时，通过调用以太网通信，操作员站向工作态主站发送随机数，统计操作员站发送的次数和收到的次数，进而计算得出错误率，根据测试结果，分析通信状态。

##### （2）双主站控制层之间通信功能测试

在程序运行时，工作态主站通过调用以太网通信，向备份态主站发送测试

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

数据，统计接收次数和发送次数，计算错误率，分析状态。通信的目的是同步实时数据。

#### 6.2.1.3 测试结果

通过发送方连续的发送测试数据给接收方，统计发送次数和接收次数，计算错误率，结果如表6-1所示。结果表明，以太网通信成功，并且无漏包的情况，正确率百分之百，符合项目需求。

表6-1 以太网通信测试结果

| 测试情况 | 测试内容 | 测试时间 | 测试次数 | 错误次数 | 错误率 | 状态 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 操 作 员 站 与 工  作站 | 随机数 | 600ms | 9056 | 0 | 0% | 合格 |
| 工 作 站 与 备 份  站 | 0x55 | 300ms | 16288 | 0 | 0% | 合格 |

### 6.2.2 前端网通信模块的测试

前端网通信模块的功能是实现控制系统的主站与从站之间通信，通信网络采用Profibus总线网，Profibus总线的控制权在主站通信层，所以主站与从站通信包括两个过程，即控制层与通信层通信，通信层与从站通信。完成这两个部分的通信测试，前端网通信成功。

#### 6.2.2.1 测试方法

前端网通信模块的测试也是通信测试，与以太网通信模块的测试方法相同。控制层与通信层通信时，控制层做为发送方，通信层做为接收方，按照一定频率发送测试数据，接收到测试数据即表示通信成功。同理，通信层与从站通信时，同上所述。长时间发送测试数据，统计数据包的错误率。

#### 6.2.2.2 测试内容

##### （1）控制层与通信层通信测试

控制层与通信层通过DPM双端口存储器交换数据，物理存储连接控制层所在板卡的PC/104总线和通信层所在板卡的主机接口。软件层面，需要在控制层的操作系统Linux上，从0xD0000~0xDFFFF的64k地址空间被映射到通信层的主机接口，这64k的空间被做为虚拟的DPM。通过调用驱动程序和API接口就可以使用DPM。我们修改Linux的内核代码，虚拟出PCI卡以完成地址映射。在Linux地址空间为0xD0000~0xDFFFF可以做为通信接口被访问。然后加载

cifX卡驱动程序，就完成了控制层与通信层的连接。连接成功后，控制层发送命令给通信层，通信层发送应答命令给控制层。发送的数据 为

0x55,0xAA,00…00，返回的应答数据应该是0xAA,0x55,00…00.

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

##### （2）通信层与从站之间通信测试

主站通信层的实现不在本文介绍，但是为了测试主站控制层与从站通信功能，需要完成通信层与从站的通信测试。主站通信层与从站通过Profibus总线通信，主站发送周期数据到从站，然后读取从站返回的周期数据，主站发送非周期数据到从站，然后读取从站返回的非周期数据。

#### 6.2.2.3 测试结果

通信层返回的应答数据是把控制层发送数据的前两个数据位置调换之后的数据，表示控制层与通信层通信成功。前端网通信测试结果如表6-2所示。

表6-2 前端网通信测试结果

| 测试情况 | 测试内容 | 测试时间 | 测试次数 | 错误次数 | 错误率 | 状态 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 从站 发 给 通 信  层 | 0xaa | 20ms | 1193385 | 1145 | 0.02% | 合格 |
| 通信 层 发 给 主  控层 | 0x55 | 20ms | 511780 | 315 | 0.06% | 合格 |

### 6.2.3 主控模块的测试

#### 6.2.3.1 测试方法

主控模块是通过调用其他模块来完成整个锅炉闭环流程控制的，包括与操作员站的数据交互，与通信层的数据交互。完成一个周期的闭环流程，包括从前端采集数据，操作员站下达命令等操作，看程序是否能运行成功。

#### 6.2.3.2 测试内容

主控模块控制闭环流程，调用前端网模块采集从站现场数据，调用控制算法模块计算控制参数，调用以太网通信模块下达操作员站控制命令。主控模块控制闭环流程，测试的内容包括采集从站数据，主从站通信，闭环控制流程，进程间通信，下达执行命令，Cpu负载量。通过一定时间内的发送测试数据，根据通信情况，计算通信错误次数，分析通信错误率。

#### 6.2.3.3 测试结果

通过测试一个周期内，从站采集数据时间，主从站通信时间，Dpu 进程与

Ctrl进程通信时间，以及下达命令的时间。周期内，闭环流程控制时间大约600毫秒，以太网通信周期在20ms左右，前端网通信周期在200ms左右，Cpu负荷率在15%～20%。测试结果如表6-3所示。综上所述，系统上电后，主控模块可以通过调用其他模块功能完成闭环控制，每次循环流程周期600ms，且Cpu负载不超过20%，符合本系统的要求。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 表 6-3 主控 | 模块测试结 | 果 |  |  |
|  | 测试情况 | 测试时间 | 测试次数 | 错误次数 | 错误率 | 状态 |  |
|  | 采集从站数据 | 200ms | 4092 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 闭环控制循环 | 600ms | 4092 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 主从站通信 | 20ms | 9225 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 进程间通信 | 20ms | 6758 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 下达执行命令 | 300ms | 4092 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | Cpu 负载量 | 10ms | 4092 | 0 | 0% | 合格 |  |

## 6.3 非功能性测试

### 6.3.1 主备同步测试

#### 6.3.1.1 测试方法

双主站之间通过通过双冗余UART串口同步数据信息。工作态主站按照一定周期发送当前运行状态给对方主站，并接收来自对方主站返回的状态信息。同样，备份态主站发送相同周期的数据信息给工作主站并接收其返回的数据信息。

#### 6.3.1.2 测试内容

工作态主站利用双冗余UART串口分别发送字符‘A’和字符‘B’给备份态主站，备份态主站收到字符信息后，返回给对方字符‘a’和字符‘b’。备份态主站发送字符‘C’和字符‘D’给工作态主站，工作态主站返回字符‘c’和字符‘d’给对方。多次发送字符信息，统计接收和发送的错误率。

#### 6.3.1.3 测试结果

通过工作态主站和备份态主站之间收发测试字符测试双主站同步数据情况，结果如表6-4所示。由结果可知，发送心跳数据频率太快，会导致系统通信错误。

表6-4 主备同步测试结果

| 测试情况 | 测试内容 | 测试时间 | 测试次数 | 错误次数 | 错误率 | 状态 |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 工作态主站 | ‘ A '和  ‘B’ | 5ms | 97005 | 7263 | 7.45% | 不合格 |
| 备份态主站 | ‘ C '和  ‘D’ | 20ms | 11578 | 0 | 0.00% | 合格 |

### 6.3.2 主备切换测试

双冗余主站设计保证了系统单主站出现故障，另一个主机可以实现无缝切换，以保证系统的不间断运行，保证系统的可靠性。双主站功能相同，状态不同，同时上电启动，但是只有一方主站工作，令一方主站与工作主站通过心跳

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

心保持相同的心跳数据；双主站根据工作状态不同称为工作主站和备份主站，简称工作站和备份站。只有工作站出现故障，不能正常工作时，备份站抢夺总线权变成工作站，而故障工作站恢复正常后变成备份站，与当前工作站保持心跳数据。

#### 6.3.2.1 测试方法

操作员站每次运行时会读取双主站当前的工作状态，双主站的IP地址不同，上电时可以区分是工作态还是备份态还是故障态。操作员站周期的发送查询指令，如果双主站进行了主备状态切换，会在操作员站软件系统上打印输出当前双主站的主备状态。

#### 6.3.2.2 测试内容

对于系统可靠性测试，根据双主站的状态分为五种情况测试。

（1）只有一个主站上电运行。

（2）两个主站都上电，一个先上电，一个后上电。

（3）两个主站同时上电运行。

（4）两个主站都上电运行，将工作态的主站断电。

（5）两个主站都上电运行，将备份态的主站断电。

#### 6.3.2.3 测试结果

根据上一节中提出的五种情况，分别测试，并打印主备状态信息，通过多次测试统计错误率。主备切换测试结果如表6-5所示。

（1）只有一个主站上电运行时，初始化后状态自然成为工作态，夺到总线控制权。

（2）两个主站都上电，分先后顺序，先上电抢夺总线控制权成为工作态，后上电的主站自然成为备份站。后上电的主站不会影响之前主站的控制。

（3）两个主站同时上电运行，系统会根据产生的随机数大小判断主备关系，随机数大的成为工作态，另一个主站自然成为备份态。

（4）两个主站都上电运行，一个是工作态，一个是备份态。将工作态主站断电后，备份态主站抢夺总线控制权，成为工作态，接管工作。主备主站切换时间在300ms以内，符合系统需求。

（5）两个主站都上电运行，一个是工作态，一个是备份态。将备份态主站断电后，工作态主站不会受到任何影响，继续控制总线工作。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  | 表 6-5 主备切换测试 | 结果 |  |  |
|  | 测试情况 | 测试次数 | 错误次数 | 错误率 | 状态 |  |
|  | 情况 1 | 2452 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 情况 2 | 2341 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 情况 3 | 2258 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 情况 4 | 2654 | 0 | 0% | 合格 |  |
|  | 情况 5 | 2086 | 0 | 0% | 合格 |  |

### 6.3.3 性能测试

#### 6.3.3.1 测试方法

系统的性能测试主要是从需求分析中的性能需求中性能指标完成测试内容，并与原系统对比分析结果是否符合项目需求。

#### 6.3.3.2 测试内容

测试的内容包括以下四个方面：从站采集有效数据的周期，主站获取有效数据的周期，系统控制流程周期，以及主备状态切换时间。

#### 6.3.3.3 测试结果

与原锅炉系统相比，本控制系统在系统性能上有大幅度的提高，比如提高通信速率，减少主备切换时间，提高数据采集速度等。设计前系统与设计后系统的性能对比结果如表6-6所示。

表6-6 性能测试结果

| 测试情况 | 设计前性能 | 设计后性能 |
| --- | --- | --- |
| 从站采集有效数据周期 | 6 | 1 |
| 主站获取有效数据周期 | 600ms | 300ms |
| 系统控制流程周期 | 2s | 600ms |
| 主备故障切换时间 | 2s | 300ms |

## 6.4 本章小结

介绍了锅炉燃烧控制系统的主站控制层软件系统测试，主要内容包括测试环境，测试过程和结果分析。测试内容，包括功能测试和非功能测试，根据测试结果进行分析得出结论。最后表明，无论从功能层面还是性能层面都符合系统需求。本项目中，现场需要挂载多个主机上电，本章是针对一个双主站系统测试，主站与其他主站的通信测试需要到电厂试验阶段才能完成，所以本文不介绍此部分的测试。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

结 论

本文主要论述了基于电厂的锅炉燃烧控制系统主站控制层的设计与实现，原锅炉系统通信速率慢，采集数据不及时，发生故障时双机主备切换周期过长损失数据严重。本文所设计的控制系统针对这些存在的问题提出具体解决方案，使控制系统在性能和可靠性上都优于原系统。

本文基于容错考虑，采用双冗余设计。双主机热备份模式，可以实现单主机出现故障时，主备状态无缝切换，响应时间短又不损失精度，充分提高了系统的可靠性。双冗余网络，两路网络同时通信传递数据信息，避免了因单路网异常而影响系统运行的情况，具有很高的稳定性。系统从数据通信和流程管理两方面分别研究设计方案，且完成了所有功能模块的实现。实现了系统以太网通信功能和前端网通信功能，实现了主控任务的数据收发及数据处理功能，完成了主控进程于控制算法进程间通信功能。

本系统严格按照项目开发需求指标设计模块，实现功能，且通过功能和性能测试。系统中现场数据采集实时有效，网络通信又快，双机主备切换响应时间短，精度高，应用在电厂中，可以自动控制锅炉燃烧，有效的降低工业成本，提高工作效率，具有很大的商业价值，值得推广。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

参考文献

[1] 周述科, 梁坚. 使用VISUAL C~(++) 6.0实现DCS组态软件的设计[J]. 仪器仪表用户, 2002, 9(1): 19-22.

[2] 任向民等. 工业锅炉控制系统的设计与实现. 中国科技信息, 2005.12: 153．

[3] 黄素文. 火电厂控制系统的模块化设计[D]. 浙江大学, 2014.

[4] 黄俊. PROFIBUS现场总线技术及其应用[J]. 制造业自动化, 2003, 25(2): 41-44.

[5] 田彬. 电厂锅炉燃烧控制系统的研究[D]. 华北电力大学(北京), 2007.

[6] Peng GL, Liu Z G. Boiler control system with PLC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006.

[7] A. Burns, A. J. Wellings. Real-Time Systems and Programing Lenguajes: Ada 95, Real Time Java and Real Time Posix[M]. Addison Wesley Longman, 2001.

[8] H. Kopetz. Real-timesystems: designprinciplesfordistributedembedded applications[M]. Springer Science+ Business Media, 2011.

[9] 赵立厂. 矿井胶轮车运输信号系统的分布式架构设计[J]. 工矿自动化, 2012, 38(9): 101-103.

[10] M. Wolf. Computers as components: principles of embedded computing system design[M]. Morgan Kaufmann Pub, 2012.

[11] 刘神. 探讨DCS系统在煤矿中的运用[J]. 科技资讯, 2010, (18): 111-111.

[12] P. Marwedel. Embedded system design: Embedded systems foundations of cyber-physical systems[M]. Springer Science+ Business Media, 2011.

[13] 贺心燕, 李国庆. 软件工程理论和方法在火电厂DCS 设计中的应用[J]. 科技信息, 2009, (30).

[14] 田祥文. DCS系统控制逻辑组态问题的分析[J]. 湖北电力, 2010, 34: 33-34.

[15] 白慧军. DCS系统逻辑组态的探究与问题分析[C]. 第十届工业仪表与自动化学术会议论文集, 2009.

[16] Bonnie S. Heck, Linda M. Wills, George J. Vachtsevanos. Software Technology for Implementing Reusable, Distributed Control Systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23: 21-35.

[17] Sun M. Cyclone Signal Instability Detection Method in Desulfurization DCS System[J]. Bulletin of Science & Technology, 2014.

[18] Liu Y Q, Liu L. DCS system in molybdenum iron smelting system[J]. Automation & Instrumentation, 2014.

[19] Huang Z, Chen W, Wang X Q. Application of IEEE1588 protocol on industrial

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

Ethernet switch[J]. Modern Electronics Technique, 2012.

[20] Zhang X, Duan Y. Research and Design of Belt Conveyor Centralized Control System Based on Industrial Ethernet[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2013.

[21] An C. Design control scheme for boiler in 50MW[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006.

[22] Zhao J, Wang D, Qian K, et al. A New Hybrid Communication Network Scheme for Distribution Networks Based on EPON and Industrial Ethernet[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014.

[23] Li Shanshan, Liu Kui. The Design of Power Plant Wellsping Control System Based on Industrial Ethernet[J]. Electrical Engineering, 2014, 15: 60 -62.

[24] 张跃文. 基于工业以太网络的密闭门远程控制系统的设计及应用研究[J]. 科技创新与应用, 2014, (32): 27-28.

[25] Li L, Liu R, Zhang C. Redundancy Control System of Stage Based on Indus trial Ethernet Bus[J]. Computer Measurement & Control, 2012, 20(9): 2396 -2398.

[26] 潘龙. 现场总线控制系统(FCS)在化工生产中的应用优势分析[J]. 中国科技信息, 2009, (3): 103-104.

[27] 王春利, 万勇, 胡博等. 现场总线设备监控管理系统应用[J]. 热力发电, 2014, 43(4): 110-112.

[28] 彭玉娟. 探讨现场总线技术与水电自动化[J]. 城市建筑, 2014, (35).

[29] 王玉民. 电气控制系统中现场总线技术的应用[J]. 城市建设理论研究: 电子版, 2014, (29).

[30] 丁海大, 胡林献. PROFIBUS 总线在发电厂数据采集系统中的应用[J]. 节能技术, 2008, 26, (4): 379-381.

[31] 徐前, 孙志锋. 基于CAN总线的隧道环境监控系统的研究[J]. 电子技术应用, 2011, 37(2): 85-87.

[32] 佟为明, 林景波, 张东中等. 现场总线概述[J]. 电器与能效管理技术, 2002, (4): 34-39.

[33] 陆翔, 翟梦莹. 基于Profibus-DP现场总线的远距离多站点通信[J]. 电器与能效管理技术, 2014, (24).

[34] Wu Y, Jin X, Automation D O. Design of the Combustion Control System Based on the Feedback of Boiler Combustion Conditions[J]. Journal of State Grid Technology College, 2013.

[35] Di W U, Feng Z M, Zhang G, et al. Simulation: Fault Diagnosis Observer Design for Boiler Combustion Control System[J]. Journal of Ningbo University, 2014.

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

[36] Qiang M A, Song X Y. Research Progress of Circulating Fluidized Bed Boiler Control Technology[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy & Hydroelectric Power, 2011.

[37] Gutmark E, Parr T P, Schadow D M H P K C. On the Role of Large and Small-Scale Structures in Combustion Control[J]. Combustion Science & Technology, 2007, 66(1): 107-126.

[38] Cheng B. Combustion Control System Based on O\_2 and CO Monitor[J]. Journal of Anhui Electric Power College for Staff, 2003.

[39] Jones C M, Lee J G, Santavicca D A. Closed-Loop Active Control of Combustion Instabilities Using Subharmonic Secondary Fuel Injection[J]. Journal of Propulsion & Power, 2012, 15(4): 584-590.

[40] 邹智慧, 杨帅. 基于PROFIBUS 的工业以太网在海水淡化中的应用[J]. 商场现代化, 2012, (21): 311-311.

[41] Wang J, Ai H. Research on Boiler Control System Based on SIMATIC PCS7[J].

Computer Measurement & Control, 2013.

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《电厂锅炉燃烧控制系统主站控制层的设计与实现》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名  日期：2015年07月01 日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

（1）学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；（2）学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；（3）研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名  日期：2015年07月01 日

导师签名  日期：2015年07月01 日

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

致 谢

在哈尔滨工业大学完成了研究生学位的攻读，这也是我人生中最后的学习经历，在工大读研的这两年，我学到了很多，成长了很多，感谢工大给予我的学习机会。

首先，特别感谢我的导师吴翔虎教授，吴老师在学习和生活上都给予我特别大的帮助。吴老师为人正直，学术态度严谨，对待学生又很有耐心，是难得一见的好老师。尤其在撰写学位论文方面，无论哪个环节的顺利通过，都离不开老师的细心指导。

其次，感谢实验室曲明成老师对我的帮助与督促。研一在实验室的学习阶段，曲老师对我的影响很大，传授我很多知识与经验。还有我的师兄师弟们对于我的帮助，尤其是骆正新师兄，骆师兄一直带着我学习，带着我做项目，孜孜不倦的给我解疑答惑；还有邹炳松同学，在实验室的期间，也给予我很多帮助。感谢你们，我亲爱的同学们。

感谢深圳市航天华拓的邱祥辉老师，邱老师在工作和生活上都对我很照顾。在实习的十个月中，我收获了很多，技术上的提升，以及为人处事方面。感谢实习公司与我共事的小伙伴们，我们共处一个项目团队，我们就像一家人一样，患难与共，共同解决项目的各种难题。

感谢哈工大软件学院的各位老师，在我的研究生生涯中，你们就是我的人生的指路者，感谢你们默默的付出，从来不求回报。

最后，感谢软件三班的全体同学，正是有了你们的陪伴，才使我有了今天的茁壮成长，你们对于我的帮助和关心我很感动，谢谢你们。

哈尔滨工业大学工程硕士学位论文

# 个人简历

徐铜，女，汉族，1988年2月出生于黑龙江省。

2006年9月考入黑龙江科技大学电子信息学院测试技术与仪器专业，2010

年7月毕业获工学学士学位。

2013年9月考入哈尔滨工业大学软件学院，攻读软件工程硕士学位。

2014年6月至2015年5月在深圳市航天华拓科技有限公司实习，实习期间主要从事设计和实现电厂锅炉燃烧控制系统的工作。