

## 摘要

作为砖瓦工业中一种非常重要的烧成设备，隧道窑在卫生陶瓷、耐火材料等砖瓦产品的生产过程中已经得到了越来越广泛的应用。隧道窑的测控系统也从早期的仪表控制发展到现代控制技术的应用，如 PLC 的应用，DCS 系统的普及以及模糊控制技术的应用等。然而，总体上我国隧道窑生产过程自动化程度相对较低，既严重限制了砖瓦产品质量水平的提高，又造成了较大的能源消耗。因此，通过 PLC 的应用，系统管理利用 DCS 系统，提高我国隧道窑生产过程的自动化水平，降低能源消耗，具有重要的理论及现实意义。

本文针对某企业 156 米高温隧道窑，在深入分析隧道窑生产工艺要求以及国内外隧道窑自动控制系统发展状况之后，设计了一套包括现场控制层、显示操作层和信息管理层的集成自动化控制系统。该控制系统采用稳定性、可靠性高的 PLC（可编程逻辑控制器）作为现场控制层的控制器，编程控制采用智能化改进型积分分离 PID 控制器控制压力和流量，利用先进的网络技术构建了一个生产管理平台，实现隧道窑生产信息管理系统稳定可靠地运行。它既着眼于窑炉设备的安全、经济运行，又着眼于整个企业的生产管理。通过管理促进控制，管控结合，有效地提高了窑炉系统的生产效率。该系统采用全集成自动化工程的思想进行设计，整个系统应用共同的组态和编程，共同的数据管理与通信，实现了各层之间的高度集成。系统采用模块化的设计结构，并具有完全的开放性，使系统具备良好的可扩充性。

在实际生产过程中良好的运行状况表明，本文开发的隧道窑计算机控制与管理系统设计合理，功能先进。降低了工人的劳动强度，降低了能源的消耗，在一定程度上为隧道窑生产过程自动控制技术的发展进行了实践探索和理论储备。

**关键词：**隧道窑；DCS 系统；网络技术；组态软件

## Design of Tunnel Kiln Control and Management System

### Abstract

As one of the most important burnt equipments in the tile industry, tunnel kiln already obtained more and more widespread application in sanitary ceramics, refractory material and other tile production process. The measuring and control system of tunnel kiln already developed from early instrument control to modern control system, such as PLC application, DCS system and fuzzy control technology application. However, the tunnel kiln process automation is relatively low compare to other countries. That restricts the improvement of the tile products quality, and result in huge energy consumption. Therefore, it will have an important theory and practical significance to improve our tunnel kiln process automation through PLC application while system management through DCS system.

This article aims at one enterprise's tunnel kiln system with 156 meters long high-temperature tunnel kiln. After analyzing tunnel kiln process requirements and its automatic control system development status in domestic and abroad, designed a set of integrated automatic control system consists of on-site operating floor, display operating floor and information management. This control system adopts the stable and reliable PLC as controller; it formed a plant supervision platform through advanced network technology. It considered the tunnel kiln equipments safety, economic operation, also for the whole enterprise production control. To accelerate control through management, we combined control and management together; therefore, the production efficiency of the tunnel kiln was improved effectively. This control system designed according to fully integrated automatic engineering theory, the whole system applied the same configuration and program, the same data management and communication system to realize high integration among all levels. This system adopts modularized configuration, possess wholly openness in order to keep the system well expendability.

The practical process performance indicates the tunnel kiln control system and the management system that we exploit is reasonable and with sufficient functions, that decreased human workload and energy consumption, and theory preparation for tunnel kiln process automatic control technology development in a certain extent.

**Key Words: Tunnel kiln; DCS System; Network; Configuration software;**

# 大连海事大学学位论文原创性声明和使用授权说明

## 原创性声明

本人郑重声明：本论文是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，撰写成硕士学位论文“隧道窑控制及管理系统设计”。除论文中已经注明引用的内容外，对论文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表或未公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 王飞                      2007年10月26日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者及指导教师完全了解“大连海事大学研究生学位论文提交、版权使用管理办法”，同意大连海事大学保留并向国家有关部门或机构送交学位论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权大连海事大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，也可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编学位论文。

保密口，在\_\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于：    保密口

不保密口（请在以上方框内打“√”）

论文作者签名： 王飞                      导师签名： 汪恩波

日期：2007年10月26日

## 第1章 绪论

我国市场经济的建立与发展,要求我国的砖瓦及陶瓷企业必须在管理方面适应新的趋势,而这一趋势就包括计算机在企业生产控制与管理中的应用。该系统主要是从两方面实现,一是应用计算机进行窑炉自动控制,二是应用计算机进行企业的系统管理<sup>[1]</sup>。耐火制品烧成的热工设备主要有两大类。一类为连续式窑——隧道窑,其主体为一条类似铁路隧道的长通道,通道两侧用耐火材料和保温材料砌成窑墙,上面为由耐火材料和保温材料砌筑的窑顶,下部为由沿窑内轨道移动的窑车构成的窑底。隧道窑属于逆流操作的热工设备。沿窑长分为预热,烧成,冷却三带。制品与气流依相反方向运动,在三带中依次完成制品的预热,烧成,冷却过程。隧道窑两端设有窑门,每隔一定时间将装好制品(砖坯)的窑车推入一辆,同时装有已烧成制品的窑车被顶出一辆。目前在大中型耐火厂广泛采用隧道窑。另一类为间歇式窑,主要为倒焰窑,近年来在倒焰窑的基础上又发展起梭式窑,钟罩窑,半隧道窑等。烧成是耐火制品生产的最后一道工序,它将最终决定产品的性质,因此对整个生产过程来说是尤为重要。隧道窑作为砖瓦工业中一种非常重要的烧成设备,具有许多优点<sup>[2]</sup>。

- (1) 机械化、自动化程度高,劳动强度低,生产能力大,应用范围广。
- (2) 操作环境良好,装卸窑车均在窑外,常温下进行。
- (3) 使用寿命较长,比较好的隧道窑可以使用十几年。
- (4) 热效率高,由于充分利用燃料燃烧热量在预热带将砖坯和空气预热,以及具有固定的预热,燃烧及冷却带。

基于此,隧道窑在耐火材料,陶瓷和建筑材料工业的生产过程中已经得到了越来越广泛的应用。研究隧道窑生产过程的自动化具有重要的理论及现实意义。本文的研究工作就是围绕隧道窑生产过程的自动控制问题展开的。

### 1.1 隧道窑生产工艺及结构

#### 1.1.1 隧道窑生产工艺

隧道窑是耐火材料,陶瓷和建筑材料工业中最常见的连续式烧成设备。其主体为一条类似铁路隧道的长通道。通道两侧用耐火材料和保温材料砌成窑墙,上面为由耐火材料和保温材料砌筑的窑顶,下部为由沿窑内轨道移动的窑车构成的窑底。

隧道窑属于逆流操作的热工设备。沿窑长分为预热，烧成，冷却三带。制品与气流依相反方向运动，在三带中依次完成制品的预热，烧成，冷却过程<sup>[3]</sup>。隧道窑两端设有窑门，每隔一定时间将装好制品（砖坯）的窑车推入一辆，同时装有已烧成制品的窑车被顶出一辆。

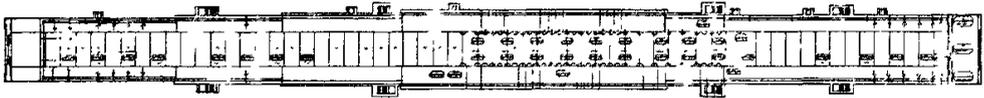


图 1.1 隧道窑工艺流程图  
Fig.1.1 The technical flowchart of tunnel kiln

其工作过程如图 1.1 所示。由该图可以看出，窑车进入预热带后，车上制品首先与来自烧成带的燃烧废气接触并被加热。而后随着窑车移动进入烧成带，借助燃料燃烧放出大量热，达到烧成最高温度并经过一定保温时间后制品被烧成。烧成制品至冷却带，与鼓入的大量冷空气相遇，制品被冷却后出窑。

冷却制品用的空气经鼓风机从冷却带两侧窑墙及窑顶送入窑内，空气在冷却制品时本身被加热。由于冷却风量大，超出燃料燃烧所需的空气量，因此只有一部分热风供给燃烧使用，另一部分则可抽出，作为砖坯干燥的热源或另作他用。燃料燃烧所产生的高温烟气沿隧道窑流入预热带，在加热制品的同时本身被冷却，最后经排烟机，烟囱排出。

由以上分析可以看出，隧道窑中由于制品和气流按逆流方向运动，烧成制品及废气热量都得到较充分的利用，因此较间歇式窑炉热效率高。

隧道窑各带长度应根据制品烧成曲线来确定，一般原则是：

(1) 为了更好地利用热量，预热带长度应根据排出废气温度来确定，一般废气温度低于 250°C。（本隧道窑 400°C）

(2) 烧成带（设置烧嘴的部分）长度应按制品最终烧成温度所需持续时间的长短而定。

冷却带长度应根据出窑制品的温度来确定，一般应低于 100°C。

因此我们可以看出，在隧道窑的控制中，最重要的就是压力和温度的控制。

由于窑内复杂的气流运动，沿窑长方向形成一定的静压强分布规律，即所谓的隧道窑压力制度。在冷却带由于鼓入大量冷空气，而形成正压。在预热带由于排烟机和烟囱

的抽力作用而形成负压。因此在正压与负压之间有一静压强为零。窑内压力制度的确定，对于保证烧成温度的稳定，燃料消耗量的降低，砖垛或面烧成的均匀性以及减少漏气，改善操作条件等方面都具有重要意义。在本系统中压力的控制器设计采用智能化改进型积分分离 PID 控制器，合理控制窑内压力，保证隧道窑的稳定运行。

隧道窑温度制度的稳定对产品质量起着重要作用，在隧道窑中应具有完整的温度制度控制系统。而窑温度制度的稳定主要是保证烧成带温度的稳定。而烧成带的温度与燃料热值，供给量，燃料空气比例，一，二次空气比例及温度，推车时间，窑车装砖量和装窑图等因素有关。

### 1.1.2 隧道窑的物理结构与功能分区

根据生产工艺流程的介绍可知，隧道窑的结构包括：截面尺寸和长度，窑顶结构，窑墙结构，隧道窑各带结构及装置，窑车和窑的密封结构。沿窑长分为预热，烧成，冷却三带。

#### ① 预热带窑墙排烟装置

在烧成带产生的燃烧废气需经设在预热带窑墙上的排烟孔排出窑外，排烟孔设在两侧窑墙并靠近车台平面，这样可使隧道窑窑车上面的气流向下流动，从而减少上下温差。

排烟孔的数目根据隧道窑类型不同而不同。少的 3~5 对，多的达十几对。多设排烟孔的目的是为了灵活的调节升温曲线，然而如果从靠近烧成带的部位排出过多的烟气，会浪费较大的热量，但排出的废气量过少又起不到调节温度曲线的作用。所以，排烟孔的数目应结合窑炉具体情况加以确定。

#### ② 烧成带一次空气送风装置

燃料燃烧所需的一次空气，可由风机从冷却带抽出部分热空气送至各烧嘴，由于风机材质限制，抽引空气温度不超过 250℃。

#### ③ 冷却带抽热风装置

为使制品有效地冷却，从冷却带鼓入的冷风量比燃烧所需的空气量要大，因此，热空气在进入烧成带之前要从窑内抽出一部分。为避免烧成带烟气向冷却带倒流，抽热风孔位置不宜太靠近烧成带，一般距烧成带 9 米左右。

#### ④ 冷却带送风方式和送风装置

冷却带的送风方式有分散送风和集中送风两种形式。本隧道窑在冷却带出口窑顶上设置离心轴流风机,引起气流的上下循环流动,以提高冷却效果。

## 1.2. 国内外隧道窑自动控制系统现状、前景和意义

### 1.2.1 隧道窑自动控制系统的现状

隧道窑作为砖瓦工业的主要烧成设备已经历了多年的成长和发展,相比于其他类型的工业窑炉来说,自动化程度较高。但是国内现有隧道窑的控制大多还停留在常规仪表控制的水平上,实现温度自动调节的不是很多,控制水平较为低下。控制系统的这一现状产生了大量的工业问题:一是造成操作人员多,劳动强度大;二是导致窑炉运行不稳定,造成产品质量差异较大;三是热损失较大,造成能源浪费<sup>[4]</sup>。

近年来,随着计算机硬件水平和网络技术的飞速发展,隧道窑自动控制设备的硬件配置也已从传统的模拟仪表、数字仪表发展到计算机控制。系统结构从集中式控制、分布控制向计算机集成管理控制系统方向发展<sup>[5]</sup>。

国内研究机构及相关企业在该领域做了大量的工作,并取得了显著的成绩,使我国隧道窑自动控制的水平逐步提高。例如,铁道科学院自主研发的隧道窑多变量智能控制及管理系统,是专门针对我国现有工业隧道窑特点而设计制造的。适用于以重油、轻油以及清洁燃气为主要燃料的工业窑炉。该系统采用了先进的计算机硬件、软件、网络通信以及智能控制技术,无论在控制方式、性能、功能、可靠性和灵活性方面都具有很高的性能价格比,是代表未来发展方向的新一代工业窑炉自动控制系统。该系统控制精度达到国外同类窑炉先进水平<sup>[6]</sup>。

从国外引进先进窑炉进行消化和吸收,也是国内隧道窑自动控制系统实现快速发展的方式之一。例如,广东佛山市某企业从西德 Riedhammer 公司引进了一条 TW120/300/75 型隧道窑,这条窑采用以微机为基础的小型分布式控制系统(DCS),实现了窑炉生产过程集中操作和分散控制,提高了窑炉的热工性能和节能水平<sup>[7]</sup>。

国内部分先进企业的隧道窑自动控制也已经具有了较高的水平。例如,黄冈某企业隧道窑的温度、压力、气氛及流量等均采用先进的多变量模糊控制(FC, Fuzzy Control)结合 PID 控制的计算机自动控制技术,通过计算机、模糊控制器、可编程序控制器(PLC)和智能仪表,实现了高精度的双回路串级自动调节、控制和管理<sup>[8]</sup>。

综合评价,国外新型隧道窑自动控制系统的总体水平好于我国,并正向着更快、更轻、更好、更少的方向发展。一些经济发达的西方国家,在砖瓦业中已实现了工厂全自动化生产,无论窑断面大小如何,从码窑车开始,到窑车运转系统、顶车、烧成、窑内温度和压力的监控,到各风闸的动作,窑门升降全部实现自动控制。

在新型隧道窑自动控制系统应用领域,欧洲和日本都有长足进展。例如,已经在西班牙投入使用的一座钢外壳隧道窑采用了大功率的过程控制计算机,该计算机同存储程序控制装置和数字调速器一起以最佳效果控制着隧道窑的运行。该套系统中成功应用了精心设计的菜单技术,通过彩色的工艺过程图像为用户提供了大量有用信息,并且操作简便。该系统能够模拟隧道窑全部重要部件及管道的运行状况。过程参数的测量值,设定值以及工艺过程的状态信息实时的反映在大屏幕显示器上。当产品或吨位数发生变化时,烧成曲线会全自动的适应该变化,并以最快速度中止所有临界边缘条件,如加热和冷却速度等。这种现代化的数字硬件调速器借助友好的人机交互界面从过程计算机获得设定值和设定参数。由于调节系统始终参与生产过程而不是在计算机可能出现故障时才开启,这样就可以确保较高的运行可靠性<sup>[9]</sup>。

德国 RIEDH AMMER 燃气 TW65/210/75-G 现代轻型隧道窑的控制系统大体由四个部分组成:A、电机系统;B、输车系统;C、热工检测及自动调节系统;D、工况监护及报警系统。全部由微机自动调节和控制。整个控制系统包括:电子自动点火、火焰探测、喷嘴火焰回流防爆。自动调温及比例调节压力,推车超压报警,煤气阀连锁自动启闭等功能。操作人员通过人机交互界面设定温度、压力、气氛、流量、燃起与助燃风调节比值等主要过程参数。自动显示、记录仪表具有显示窑炉运行状况或记录历史曲线的功能<sup>[10]</sup>。

为进一步提高耐火材料生产企业的产品质量和管理水平,奥地利的一些耐火材料生产厂家也已经广泛采用了计算机控制系统。这些计算机控制系统一方面实现窑温、窑压等参数的自动调节,设定值的修改、趋势图的绘制以及报警等功能;另一方面可以对窑内温度、压力分布情况、各台车的生产信息等重要的质量参数进行监测和记录,并将这些重要的历史数据进行存储,便于对历史生产信息的查询和分析。

但是由于隧道窑生产过程是典型的热工生产过程,因此,窑内的温度直接影响着烧成产品的质量。通常情况下,为了使产品达到要求的技术指标,在焙烧过程中必须严格保证烧成带各区温度符合技术部门下发的烧成曲线,同时尽可能保持窑内温度制度的稳定。

从控制对象动态特性的角度讲,隧道窑是属于具有时变性、大滞后、多干扰的热工过程,各调节参数与被调参数之间存在着多层次的交叉耦合作用<sup>[11]</sup>。目前,在实际过程中广泛采用传统的PID方式对烧成带各区分别进行控制,尽管这种方式能够基本实现各区温度的自动调节,但是由于多变量相互耦合,使PID的参数整定很复杂,而且控制速度慢、系统超调大,控制效果并不十分理想。

因此,如何进一步提高烧成带温度控制的精度和稳定性,已经成为隧道窑自动控制中的研究热点和难点之一。

随着智能控制方法的快速发展,针对上述问题的研究取得了一定的进展。文献中认为,对此种复杂的生产过程,有经验的操作工人却能凭经验使系统基本正常运行,主要是对整个系统有综合判断能力,即具有模糊控制能力。基于此,该文章尝试了Fuzzy(模糊)控制和PID控制相结合的控制系统,并取得了较好的控制效果<sup>[12]</sup>。文献中也对隧道窑温度控制中使用模糊控制方法进行了探讨,并对传统模糊控制方法进行了改进<sup>[13]</sup>。

近年来,神经网络在解决与隧道窑过程类似的温度过程的控制问题中得到了越来越广泛的应用。文献中建立了一种基于DRNN神经网络的PID控制器,该控制器具有参数自整定,多输入多输出特点<sup>[14]</sup>。文献中采用PID神经网络实现在线学习,根据对象过程参数调整控制作用,达到了系统解耦和控制的目的<sup>[15]</sup>。

尽管前人已经在该领域的某些方向进行了深入的研究,但由于这些方法或要求大量操作经验,或结构复杂、稳定性差,要将其应用于实际生产过程还有许多工作要做。

### 1.2.2 隧道窑自动控制系统的前景

虽然目前隧道窑生产过程的自动化已经取得了长足的进步,但是限于现有的技术和工艺水平,并没有真正实现隧道窑生产的全过程自动化。随着自动控制技术的不断进步,隧道窑生产工艺的不断改进,隧道窑自动控制系统将更加完善,体现隧道窑特性的温度制度和压力制度将实现智能优化控制,控制系统将具有更高的精度、更快的速度以及更强的抗干扰性能。例如,窑炉监控系统能够根据已经设定的烧成制度,对窑内发生的各种变化自动进行调控。当系统当前状态发生变化时,控制系统将驱动执行机构对相应参数做出调整<sup>[16]</sup>。隧道窑的辅助过程也将进一步实现自动化、一体化。例如,隧道窑的进车、出车、窑门升降按预先设定的程序自动完成,在无人干预的情况下,窑车能在回车线上顺利完成码坯,砖坯转运,卸砖,返回等作业。利用电子计算机技术实现全过程自

自动化控制的隧道窑可以准确、及时、灵敏地调整各项热工参数,减少对操作经验的依赖,降低操作人员的劳动强度;提高窑炉运行稳定性,进一步改善产品的质量,增加产品的产量;并且进一步降低能耗,减少能源浪费。

### 1.2.3 开发隧道窑自动控制系统的意义

我国现有隧道窑在生产效率、节能、节约耗材、热能利用(热效率)、控制操作及环境保护等方面的技术和管理水平还比较落后。这种落后的生产工艺和技术水平,使得我国砖瓦工业的产品质量仍处于较低水平,严重制约了我国砖瓦行业的发展。同时,我国还是一个人口众多,资源相对匮乏的国家,这样的国情要求我们必须不断提高技术水平,逐步降低隧道窑生产过程中的能耗。通过技术引进虽然有助于快速提高我国隧道窑生产过程的技术水平,但是由于无法获取关键技术,阻碍了对引进系统的消化吸收。而且,少数由国外高价引进的全套控制系统,也由于缺乏必要的维护措施,运行效果并不理想。因此开发适合我国国情的高水平隧道窑生产过程自动控制系统是提高我国砖瓦产品质量和管理水平的必由之路。

## 1.3 本文的主要工作

本文以某企业自动化生产系统中 156 米高温隧道窑计算机控制与管理系统的开发和开发工作为主要内容,采用稳定性、可靠性高的 PLC(可编程逻辑控制器)作为现场控制层的控制器,采用智能化 PID 控制,较好的完成了隧道窑压力、温度、流量的控制,以及隧道窑窑门、拉车机及推车机的连锁控制,利用先进的网络技术构建了一个生产管理平台,实现隧道窑生产信息管理系统稳定可靠地运行,提高控制系统的自动化水平和企业的管理水平。通过管理促进控制,管控结合,有效地提高了窑炉系统的生产效率,并对系统进行优化设计,使系统适应节能改造。该系统采用全集成自动化工程的思想进行设计,整个系统应用共同的组态和编程,共同的数据管理与通信,实现了各层之间的高度集成。系统采用模块化的设计结构,并具有完全的开放性,使系统具备良好的可扩充性。

## 1.4 本文的结构布局简介

- (1) 绪论:隧道窑结构及生产工艺,隧道窑自动控制系统的现状、前景和意义。
- (2) 过程控制与管理的基本理论:DCS, PLC, 组态软件, PID 控制算法器。

(3) 系统设计：计算机控制与管理系统总体设计，控制系统的实现，管理系统的实现。

(4) 试验结果：生产信息管理功能的实现，系统优化节能的实现。

(5) 结论：安全可靠，运行稳定，功能先进，操作方便，节约能源。

## 第 2 章 过程控制与管理的基本理论

科学技术的发展对于改变社会的生产面貌，推动人类文明向前发展，具有及其重要的意义。特别是计算机技术和网络技术的发展，为实现高水平的自动化提供了强有力的技术工具，给生产过程自动化的发展带来了深远的影响，生产过程控制系统已经从常规仪表和继电器逻辑控制系统，发展到了计算机控制系统。计算机控制系统的应用领域非常广泛，涉及到工业、国防和民用的各个领域。计算机控制系统是以计算机、自动控制理论和自动化仪表等技术为基础，将这些技术集成起来构成计算机控制系统。典型的计算机控制系统有直接数字控制（DDC）、集散控制系统或分散控制系统（DCS）、现场总线控制系统（FCS）、可编程控制器系统（PCS）<sup>[17]</sup>。计算机网络技术的发展实现了管理、控制一体化的要求，使企业的管理信息系统、技术信息系统与生产过程自动控制系统有机地结合起来，实现计算机集成制造系统 CIMS 或计算机集成过程系统 CIPS<sup>[18]</sup>。

### 2.1. 分散控制系统（DCS）

分散控制系统（DCS）亦称集散控制系统，其本质是采用分散控制和集中管理的设计思想，分而自治和综合协调的设计原则，采用层次化的体系结构，从下到上依次分为直接控制层，操作监控层、生产管理层的决策管理层<sup>[19]</sup>。

集散控制系统最初产生于 70 年代中期，它是 4C 技术（即计算机 Computer，控制技术 Control，通信技术 Communication 和 CRT 显示技术）综合的产物，其核心是微型计算机。可以说集散控制系统是一种以微型机为主的分级分布式微机网络控制系统。

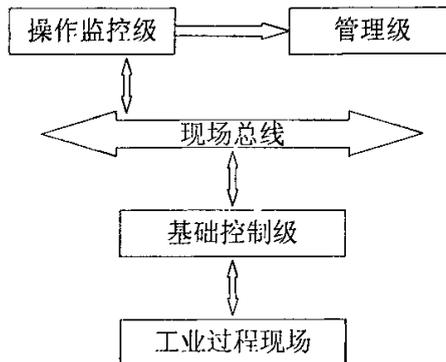


图 2.1 集散控制系统组成

Fig.2.1 The structure of distributed control system

集散控制系统具有一般计算机控制系统控制算法先进、精度高、响应速度快的优点，同时它还具有常规仪表控制系统安全可靠，配置灵活以及维护方便等优点<sup>[20]</sup>。

图 2.1 为典型集散控制系统的基本组成。它具有分层结构，可划分为三个层次，分别为基础控制级，操作监控级和生产管理级。对于不同的生产过程，可根据其对自动控制系统复杂程度的要求选用第二，第三级<sup>[21]</sup>。

## 2.2. PLC 可编程控制器

PLC 于 60 年代末期在美国首先出现，目的是用来取代继电器，执行逻辑、计时、计数等顺序控制功能，建立柔性程序控制系统。1976 年正式命名，并给予定义：PLC 是一种数字控制专用电子计算机，它使用了可编程序存储器储存指令，执行诸如逻辑、顺序、计时、计数与演算等功能，并通过模拟和数字输入、输出等组件，控制各种机械或工作程序。自 1973 年提出第一台以微处理器为基础的控制器以来，它逐步完善，并最终形成功能齐全、安全可靠的数字式分散控制系统 DCS。它的性能大大优于以往任何一种控制系统。

PLC 的市场的潜力是巨大的，不仅在我国，即使在工业发达的日本也有调查表明，PLC 配套的机电一体化产品的比例占 42%，采用继电器、接触器控制尚有 24%。所以说，需要应用 PLC 的场合还很多，在我国就更是如此了。

### 2.2.1 PLC 的硬件和软件

量为主的顺序控制自动化产品，但随着其功能的提高已经广泛应用于各种控制领域。PLC 一般提高强大的开发环境（如西门子公司的 SIMATIC7），除了提供梯形图等开发语言外，还能提供 C 语言等高级编程语言，能够轻松应付含有大量复杂控制回路和人机交互(1)PLC 的分类

PLC 在 90 年代已经形成微、小、中、大、巨型多种 PLC。按 I/O 点数分，可分为：

微型 PLC: 32 I/O

小型 PLC: 256 I/O

中型 PLC: 1024 I/O

大型 PLC: 4096 I/O

巨型 PLC: 8195 I/O

近年来有单机支持 300 回路和 65000 点 I/O 的大型系统对应中型 PLC 以上,均采用 16 位~32 位 CPU,微、小型 PLC 原采用 8 位 CPU,现在根据通讯等方面要求,有的也改用 16 位~32 位 CPU。由于 I/O 64 点以下 PLC 销售额占整个 PLC 的 47%, 64 点~256 点的占 31%, 合计占整个 PLC 销售额的 78%。可编程控制系统的核心是可编程逻辑控制器 PLC。PLC 是一种专门为了在工业环境下运用而设计的专用数字运算电子系统,适用于恶劣的环境,可靠性极高,早期设计定位于处理开互的控制系统。

PLC 的可靠性已经得到了广大用户的青睐,由计算机+PLC 组成的控制系统已经得到了广泛的应用。现场的控制层采用 PLC 控制器,具备极高可靠性和稳定性;显示操作层采用基于 WindowsXP 操作系统计算机,它能够丰富的人机交换界面、数据管理和网络功能,为信息管理层提供良好的通讯接口。

## (2) PLC 的硬件

PLC 控制器本身的硬件采用积木式结构,各厂家产品结构大同小异。PLC 厂家将硬件各部件均向用户开发,便于用户选用,配置成规模不等的 PLC,而且这种硬件配置的开放性,为制造商、分销商(代理商)、系统集成商、最终用户带来很多方便,为营销供应链带来很大便利,这是一大成功经验。

PLC 内的 I/O 模板,除一般的 DI/DO、AD/DA 模板外,还发展了一系列特殊功能的 I/O 模板,这为 PLC 用于各行各业打开了出路,如用于条形码识别的 ASCII/BASIC 模板,用于反馈控制的 PID 模板,用于运行控制、机械加工的高速计数模板、单轴位置控制模板、双轴位置控制模板、凸轮定位器模板、射频识别接口模板等,这在以后还会有很大发展。另外在输入、输出的相关元件、强干扰场合的输入、输出电隔离、地隔离等方面也会更加完善。

PLC 中的 CPU 与存储器配合,完成控制功能。它与 DCS 系统处理温度、压力、流量等参数的系统不同,采用快速的巡回扫描周期,一般为 0.1~0.2s,更快的则选用 50ms 或更小的扫描周期。它是一个数字采样控制系统<sup>[23]</sup>。

## (3) PLC 的软件

为了完成控制策略,为了替代继电器,使用户等完成类似继电器线路的控制系统梯形图,而编制了一套控制算法功能块(或子程序),称为指令系统,固化在存储器 ROM 中,用户在编制应用程序时可以调用。指令系统大致可以分为两类,即基本指令和扩展指令。细分一般 PLC 的指令系统有:基本指令、定时器/计数器指令、移位指令、传送指

令、比较指令、转换指令、BCD 运算指令、二进制运算指令、增量/减量指令、逻辑运算指令、特殊运算指令等,这些指令多是类似汇编语言。另外 PLC 还提供了充足的计时器、计数器、内部继电器、寄存器及存储区等内部资源,为编程带来极大方便<sup>[22]</sup>。

### 2.2.2 基于 Windows 的编程语言标准—IEC61131-3

由于各 PLC 厂家产品在指令系统上的差异及编程方法上用户要求不同,近年来 IEC 制订了基于 Windows 的编程语言标准 IEC61131-3(1993 年 IEC 颁布可编程序控制器的国际标准 IEC1131),它规定了指令表(IL)、梯形图(LD)、顺序功能图(SFC)、功能块图(FBD)、结构化文本(ST)五种编程语言。这包括了文本化编程(IL、ST)和图形编程(LD、FBD)两个方面,而 SFC 则在两类编程语言中均可使用。IEC 技术委员会(TC65)近来开展了 IEC61499 项目,将 IEC61131-3 进行了扩展,它是针对通过通信网络互联的模块化分布系统的体系结构的标准,将对 IEC61131-3 有所改善。这是以数字技术为基础的可编程序逻辑控制装置在高层次上走向开放性的标准化文件,是 PLC 发展的一大趋势。

### 2.2.3 PLC 的网络及发展趋势

一个或若干 PLC 与 PC 机联成系统,PC 机起到原编程器及人机界面操作站的作用,这是 20 世纪 90 年代的新潮流,这样为系统集成带来了商机,同时编程软件和人机界面软件(监控软件或称组态软件)及软件接口(或称驱动软件)也得到了发展。

近年来,PLC 厂家在原来 CPU 模板上提供物理层 RS232/422/485 接口的基础,逐渐增加了各种通讯接口,而且提供完整的通讯网络。由于近来数据通讯技术发展很快,用户对开放性要求很强烈,现场总线技术及以太网技术也同步发展,所以 PLC 构成的 PCS 系统比 DCS 的开放性所处的现状稍好一些。目前西门子公司在 Profibus-DP 通讯网络及 Profibus-FMS 网络以外,提出了 S7 Routing 网络,即 Profibus-DP 和 Industrial Ethernet 两层结构。罗克韦尔 AB 公司已形成了多层结构体系,即 Ether Net、Control Net、Device Net 及 Asi 等现场总线(原 DH+网也可兼容)<sup>[23]</sup>。

网络向上连是互联网问题,向下连是现场总线问题,另外现有网络能否用以太网“e 网到底”方式、网络采用客户器/服务器方式、浏览器/服务器方式、生产者/消费者方式、接口软件采用 OPC 方式等问题都有待进一步落实。PLC 与智能 MCC 马达控制中心、与数控机床配套的 NC/CNC 数控设备,以及与其它运行控制系统、电控设备、变频器和软起动器等连成系统;PLC 要与 DCS 分工合作,充当 DCS 的远程 I/O 站等;PLC 要与 IPC

分工合作，除用 IPC 作人机界面外，作软件 PLC 的 I/O 部件也是可行的<sup>[24]</sup>。

### 2.3. 组态软件

工业控制组态软件的使用和开发已经有了几十年的历史。早期的工业控制组态软件大多是基于 UNIX 和 DOS 平台的，随着 Windows 系列操作系统的普及和发展，越来越多的工业控制组态软件都选择基于 Windows 平台开发。

Wondeware InTouch 是创建 Microsoft Windows 2000 和 Windows NT 操作系统下的人机界面（HMI）应用程序的最简便快捷的方法。InTouch 是 Wondeware FactorySuite 的一个组成部分。InTouch 广泛应用于包括食品加工、半导体、石油、汽车、化工、制药、纸浆和造纸、交通等在内的全球众多纵向市场。

通过运用 InTouch 用户可以创建强大的、功能齐全的应用程序，可充分利用 Microsoft Windows 的关键功能，包括 ActiveX 控件、OLE 图形和网络等。InTouch 可以通过添加自定义 ActiveX 控件、向导、常规对象以及创建 InTouch QuickScript 等来进行充分地扩展。

InTouch 包括三个主要程序，它们是 InTouch 应用程序管理器、WindowMaker 和 WindowViewer。此外，InTouch 还包括诊断程序 WondewareLogger。InTouch 应用程序管理器用于组织用户所创建的应用程序，也可以用于将 WindowViewer 配置成一个 NT 服务程序，为基于客户机和基于服务器的结构体系配置网络应用程序开发（NAD）以及配置动态分辨率转换（DRC）和/或分布式报警。DBDump 和 DBLoad 数据库实用程序也是从应用程序管理器启动的。

WindowMaker 是一个开发环境，在这个个开发环境中可以使用面向对象的图形来创建富于动画感的触控式显示窗口。这些显示窗口可以连接到工业 I/O 系统和其它 Microsoft Windows 应用程序。WindowViewer 是用于显示在 WindowMaker 中创建的图形窗口的运行时环境。WindowViewer 执行 InTouch QuickScript 执行历史数据的记录和报告、处理报警记录和报告，并且可以充当 DDE 和 SuiteLink 通讯协议的客户机和服务器<sup>[25]</sup>。

### 2.4 PID 控制算法器

PID 控制是仪表过程控制系统应用最广泛的一种控制规律。由于 PID 技术最成熟，技术人员和操作人员比较熟悉，它不要求被控对象的数学模型，控制效果好，在计算机

DDC 全数字整流装置中仍然得到广泛的应用。即使在比较复杂的系统如串级控制等，也还是用 PID 算法。实践证明，这种算法能适应许多工业生产过程。

#### 2.4.1 PID 控制原理

控制器最常用的控制规律是 PID 控制。常规 PID 控制系统原理框图如图 2.2 所示。系统由模拟 PID 控制器和被控对象组成

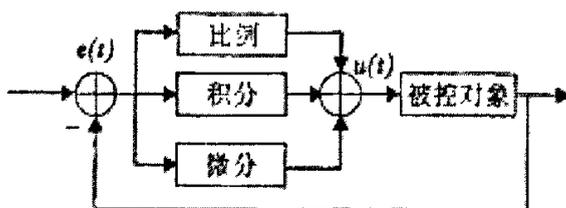


图 2.2 常规 PID 控制系统原理框图

Fig.2.2 The principle diagram of normal PID control system

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值  $r(t)$  与实际输出值  $c(t)$  构成的控制量偏差

$$e(t) = r(t) - c(t) \quad (2-1)$$

将偏差的比例（P）、积分（I）和微分（D）通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制，故称为 PID 控制器。其控制规律为

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d \cdot de(t)}{dt}] \quad (2-2)$$

式中  $K_p$  ——比例系数

$T_i$  ——积分时间常数

$T_d$  ——微分时间常数

简单说来，PID 控制器各校正环节的作用如下：

##### (1) 比例环节

即时成比例地反映控制系统的偏差信号  $e(t)$ ，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，以减少偏差。比例作用太小，对象控制不住（失控），而太强又容易引起振荡，因此应根据对象的特性加入适度的比例控制作用。由于只有偏差存在，才能有比例作用，因此单纯比例控制一定有静差（余差）存在。

##### (2) 积分环节

积分作用是指控制输出偏差大小和持续的时间成比例。即使偏差大，但是只要持续足够时间均可产生很强的控制输出作用。积分主要用于消除静差，提高系统的无差度，因为只要偏差存在，积分作用将按减小偏差方向去改变输出控制量。积分作用的加入将使系统动态响应变慢，相当于加入滞后，且积分作用太强时，易产生积分饱和。因此，积分作用大小要适当。积分作用的强弱取决于积分时间常数  $T_i$ ， $T_i$  越大，积分作用越弱，反之则越强。

### (3)微分环节

微分作用是指控制输出与偏差的变化率成正比例。因此，即使偏差不大，但只要变化率大，仍能产生很强的控制输出作用。因此，微分能反映偏差信号的变化趋势（变化速率）并能在偏差信号值变得太大之前，在系统中引入一个有效的早期修正信号，从而加快系统的动作速度，相当于加入超前，从而减小调节时间。但是，微分作用对噪声很敏感，有放大作用，因此对于噪声大的控制对象，微分作用不应大，甚至可以不加。

## 2.4.2 数字 PID 控制算法

在计算机控制系统中，使用的是数字 PID 控制器，数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。

### (1) 位置式 PID 控制算法

由于计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量，因此式 (2-2) 中的积分和微分项不能直接使用，需要进行离散化处理。则可作如下近似变换：

$$\left\{ \begin{array}{l} t = kT (k = 0, 1, 2, \dots) \\ \int_0^t e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{array} \right. \quad (2-3)$$

式中  $T$ ——采样周期。

显然，上述离散化过程中，需要满足香农采样定理。为书写方便，将  $e(kt)$  表示成  $e(k)$  等，即省去  $T$ 。将式 (2-3) 代入 (2-2)，可得离散的 PID 表达式为

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2-4)$$

式中  $k$ ——采样序号  $k=0,1,2,\dots$

$u(k)$ ——第  $k$  次采样时刻的计算机输出值；

$e(k)$ ——第  $k$  次采样时刻输入的偏差值；

$e(k-1)$ ——第  $k-1$  次采样时刻输入的偏差值；

$K_i$ ——积分系数,  $K_i=K_p \cdot T/T_i$ ;

$K_d$ ——微分系数,  $K_d=K_p \cdot T_d/T$ ;

由于计算机输出的  $u(k)$  直接去控制执行机构（如阀门）， $u(k)$  的值和执行机构的位置（如阀门开度）是一一对应的，所以通常称式（2-4）为位置式 PID 控制算法。

这种算法的缺点是，由于是全量输出，所以每次输出均与过去的状态有关，计算时要对  $e(k)$  进行累加，运算工作量大。而且，因为计算机输出的  $u(k)$  对应的是执行机构的实际位置，容易产生  $u(k)$  的大幅度变化，会引起执行机构位置的剧烈动作，这种情况往往是生产实践中不允许的，在某些场合，还可能造成重大生产事故，因而产生了增量式 PID 控制的控制算法。所谓增量式 PID 是指数字控制器的输出只是控制量的增量  $\Delta u(k)$ 。

### （2）增量式 PID 控制算法

当执行机构需要的是控制量的增量（例如驱动步进电机）时，可由式（2-4）导出提供增量的 PID 控制算式。根据递推原理可得

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_d [e(k-1) - e(k-2)] \quad (2-5)$$

用式（2-4）减式（2-5），可得

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] = K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_d [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \quad (2-6)$$

式中  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

式（2-6）称为增量式 PID 控制算法。

可以看出，由于一般计算机控制系统采用恒定的采样周期  $T$ ，一旦确定了  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ ，只要使用前后三次测量值的偏差，即可由式（2-6）求出控制增量。采用增量式算法时，计算机输出的控制量  $\Delta u(k)$  对应的是本次执行机构位置（例如阀门开度）的增量。对应阀门实际位置的控制量，即控制量增量的积累

$$u(k) = \sum_{j=0}^k \Delta u(j)$$

需要采用一定的方法来解决，例如用有积累作用的元件（如步进电

动机)来实现;而目前较多的是利用算式  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$  通过执行软件来完成。

就整个系统而言,位置式和增量式控制算法并无本质区别,或者仍然全部由计算机承担其计算,或者一部分由其他部件去完成。

然而,增量式控制虽然只是算法上做了一点改进,却带来了不少优点:

①由于计算机输出增量,所以误动作时影响小,必要时可用逻辑判断的方法去掉。

②手动/自动切换时冲击小,便于实现无扰动切换。原因是,当采用位置式时,在进行手动/自动切换时,控制量  $u$  从手动(或自动)时的值直接跳至自动(或手动)时的值,变化比较剧烈,对系统冲击较大;采用增量式时,控制量  $u(n) = u(n-1) + \Delta u$ ,当进行手动/自动切换时, $u$  在原值上对  $\Delta u$  进行累加,且  $\Delta u$  有最高限值, $u$  不会剧烈变化,对系统冲击较小。此外,当计算机发生故障时,由于输出通道或执行装置具有信号的锁存作用,故仍能保持原值,不至于出现控制紊乱。

算式中不需要累加。控制增量  $\Delta u(k)$  的确定,仅与最近  $k$  次的采样值有关,所以较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果<sup>[26]</sup>。

### 2.4.3 智能化改进型 PID 控制

在计算机控制系统中,PID 控制规律是用软件来实现的,因此它的灵活性很大。一些原来在模拟 PID 控制器中无法实现的问题,在引入计算机后,就可以得到解决。于是产生了一系列的 PID 改进算法,如积分分离 PID 控制算法,遇限削弱积分 PID 控制算法,不完全微分 PID 控制算法,微分先行 PID 控制算法和带死区的 PID 控制算法等。

#### (1) 积分分离 PID 控制算法

在普通的 PID 数字控制器中引入积分环的目的,主要是为了消除静差,提高精度。但在过程启动、结束或大幅度增减设定值时,短时间内系统输出有很大的偏差,加上系统本身的迟延,在积分项的作用下,将引起系统过量的超调和振荡。为此,可采用积分分离对策。也就是根据实际情况,人为设定一阈值  $\alpha > 0$ ,在被调量开始跟踪,系统偏差较大即  $|e(k)| > \alpha$  时,取消积分作用,采用 PD 控制,可避免过大的超调,又使系统有比较快的响应。当系统偏差较小即  $|e(k)| < \alpha$  时,引入积分作用,采用 PID 控制,可保证系统的控制精度。

## (2) 遇限削弱积分 PID 控制算法

积分分离 PID 控制算法在开始时不积分,而遇限削弱积分 PID 控制算法则正好相反,一开始就积分,进入限制范围后即停止积分。遇限削弱积分 PID 控制算法的基本思想是:当控制进入饱和区后,便不再进行积分项的累加,而只执行削弱积分的运算。因而,在计算  $u(k)$  时,先判断  $u(k-1)$  是否已超出限制值。若  $u(k-1) > u_{\max}$ ,则只累加负偏差;若  $u(k-1) < u_{\max}$ ,则只累加正偏差。这样可以避免控制量长时间停留在饱和区。

## (3) 不完全微分 PID 控制算法

微分环节的引入,改善了系统的动态特性。但对于干扰特别敏感,容易引起控制过程振荡,降低调节品质。为克服这一弱点,在 PID 调节器输出串联一个一阶惯性环节。这就是不完全微分 PID 控制算法。

## (4) 微分先行 PID 控制算法

微分先行 PID 控制算法是只对输出量进行微分,而对给定值不作微分。这种输出量先行微分控制适用这样,可以避免给定值升降时所引起的系统振荡,明显地改善了系统的动态特性。

## (5) 带死区的 PID 控制算法

在计算机控制系统中,某些系统为了避免控制动作的过于频繁,消除由于频繁动作所引起的振荡,可用带死区的 PID 控制算法,相应的控制算法为:

$$\begin{aligned} u(k) &= u(k), \text{ 当 } |e(k)| > e_0 \\ u(k) &= 0, \text{ 当 } |e(k)| \leq e_0 \end{aligned} \quad (2-7)$$

式中,  $e_0$  为死区宽度,其数值根据被控对象由实验确定。若  $e_0$  值太小,使控制动作过于频繁,达不到稳定被控对象的目的;  $e_0=0$  则为标准 PID 控制算法,

若  $e_0$  值太大,则将产生较大的滞后<sup>[27]</sup>。

## 第3章 系统设计

### 3.1 计算机控制与管理系统总体设计

本节围绕某企业自动化生产系统中一条 156 米高温隧道窑开发的计算机控制与管理系统的总体架构展开，分别对该套系统的总体结构设计，各层功能，所涉软硬件做了深入研究。

本文研究的计算机控制与管理系统采用三级集散控制系统结构，如图 3.1 所示。

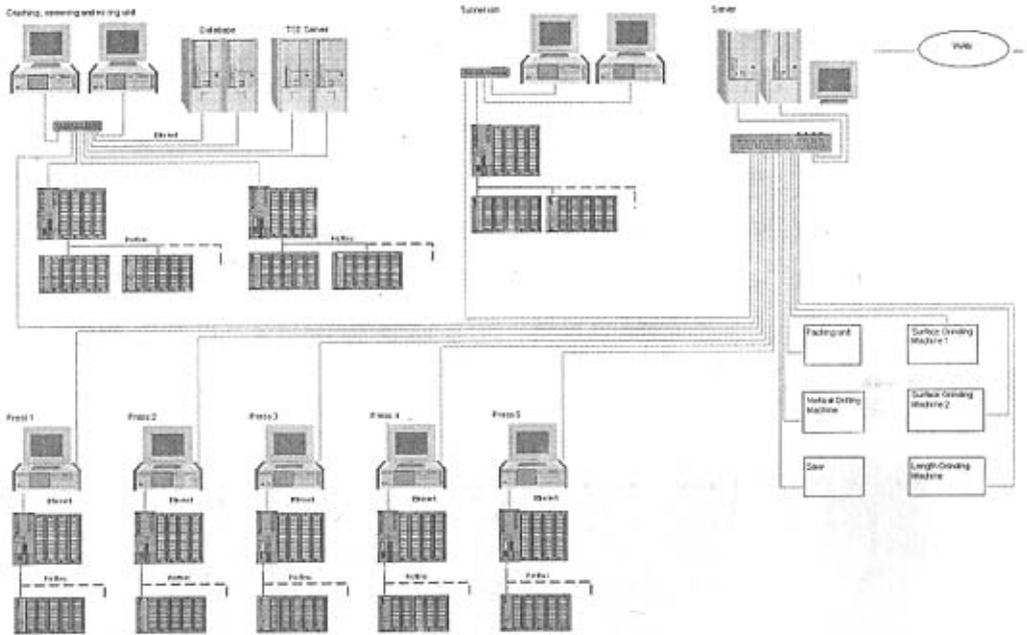


图 3.1 计算机控制与管理系统结构

Fig.3.1 The structure of control and management system

#### (1) 系统结构设计

根据集散控制系统的基本组成，本文对本系统的层次结构进行了设计。如图 3.2 所示，本系统采用了基础控制级，操作监控级和生产管理级。

基础控制级包括四套德国 SIEMENS 公司的 S7-400 可编程控制器（下文使用 S7-400PLC 表示），以及其它辅助设备。四套 PLC 系统分别用于破碎系统，配料/混料系统，轨迹车系统及窑炉系统。本文只叙述窑炉部分。窑炉系统隧道窑 S7-400PLC 由一个

CPU 模块, 6 个机架, 22 个 SM321, 4 个 SM 22, 13 个 SM331, 8 个 SM332, 以及配套的 PROFIBUS 网线及连接器组成。回火窑由一个 CPU315-2DP 模块, 3 个 ET200M 组成。KIBO 窑由一个 CPU315-2DP 模块, 及输入输出模块组成。

操作监控级由七台工业控制计算机及运行于其上的组态软件 INTOUCH 开发的监控系统软件组成。其中两台用于破碎系统, 两台用于配料/混料系统, 一台作为工程师站, 两台用于窑炉系统。主要通过工业以太网进行实时数据及历史数据的处理, 主要完成生产过程数据设定、操作指导、作业管理、控制计算、数据处理及存储, 并用于将长期存储的数据报表传送到基础控制级。

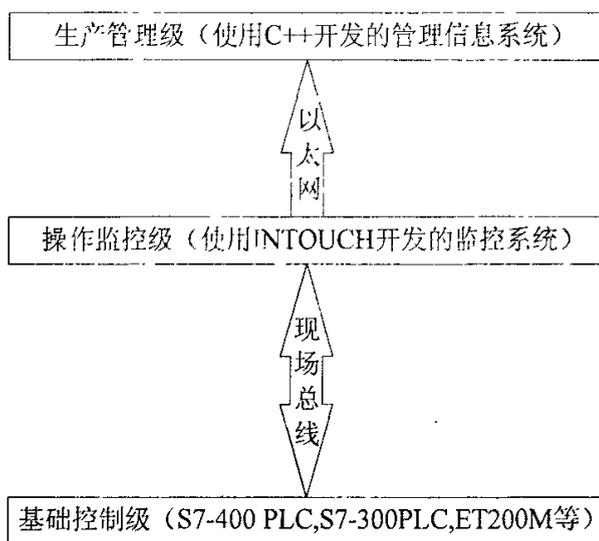


图 3.2 本系统总体结构及各层组成

Fig.3.2 The structure and component of the system

操作监控级由七台工业控制计算机及运行于其上的组态软件 INTOUCH 开发的监控系统软件组成。其中两台用于破碎系统, 两台用于配料/混料系统, 一台作为工程师站, 两台用于窑炉系统。主要通过工业以太网进行实时数据及历史数据的处理, 主要完成生产过程数据设定、操作指导、作业管理、控制计算、数据处理及存储, 并用于将长期存储的数据报表传送到基础控制级。

生产管理级由两台管理计算机及使用 C++ 开发的隧道窑管理信息系统软件 ToMIS/TE 和配料/混料系统的管理信息系统软件 MIRAV 组成。

## (2)各层功能设计

基础控制级主要完成现场过程数据的采集, 处理以及主要过程参数的控制等任务。隧道窑 PLC 用于预热带, 燃烧带, 冷却带的压力控制, 温度控制, 流量控制, 助燃风机的控制, 冷却风机的控制, 此外还用于现场实时数据采集, 处理, 运算, 分析及数据通信等工作。

操作监控级通过监控软件为现场操作人员和技术人员提供工况及流程信息, 控制参数设定和调节, 实时过程数据, 曲线的显示和打印, 历史过程数据和历史趋势查询及打印, 报警管理以及操作权限分配等功能。

生产管理级通过隧道窑管理信息系统提供生产信息录入和查询, 操作信息记录和查询, 过程数据存储和查询, 编制及打印报表等功能。

### (3) 控制系统中硬件及软件的使用

现场控制级中的工作都是由 S7-400/S7-300 PLC 完成的。可编程控制器, 是一种数字运算操作的电子系统, 专为在工业环境下应用而设计。它采用可编程序的存储器, 用于在其内部储存执行逻辑运算, 顺序控制, 定时, 计数和算术运算等操作的指令, 并通过数字式, 模拟式的输入和输出, 控制各种类型的机械和生产过程。西门子公司生产的 S7-400/S7-300 系列 PLC 是目前应用最为广泛的一种 PLC 系统。

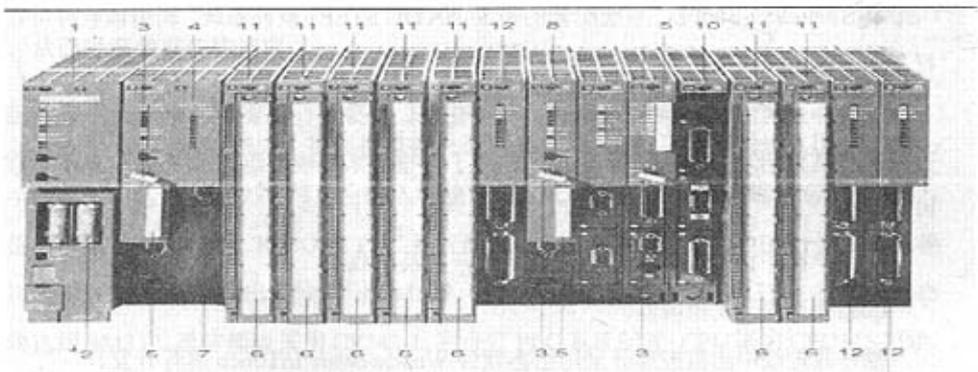


图 3.3 西门子 S7-400 系列 PLC  
Fig.3.3 Siemens S7-400 PLC

如图 3.3 所示 S7-400 PLC 是用于中, 高档性能范围的可编程序控制器。模块化及无扇的设计, 坚固耐用, 容易扩展和广泛的通讯能力, 容易实现的分布式结构以及用户友好的操作使 SIMATIC S7-400 成为中、高档性能控制领域中首选的理想解决方案。

S7-400 自动化系统采用模块化设计。它所具有的模板的扩展和配置功能使其能够按照每个不同的需求灵活组合。

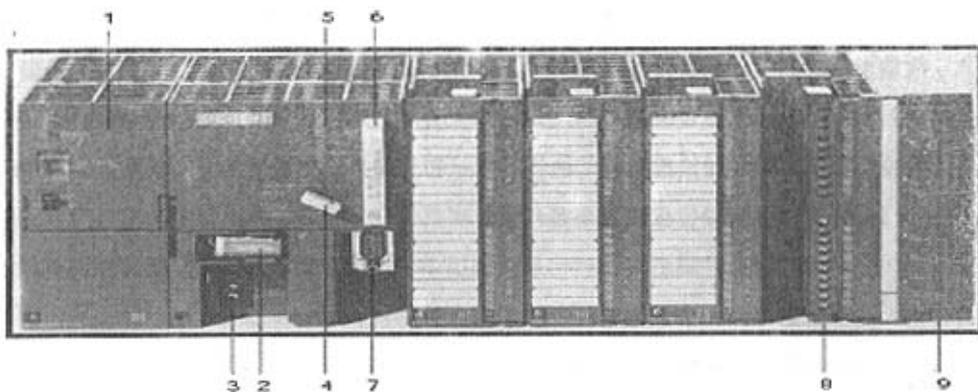


图 3.4 西门子 S7-300 系列 PLC  
Fig.3.4 Siemens S7-300 PLC

如图 3.4 所示 S7-300 PLC 是模板化结构设计。各种单独的模板之间可进行组合以用于扩展。整个控制单元由中央处理单元 (CPU)，信号模板 (SM)，通讯处理器 (CP)，接口模板 (IM) 以及负载电源模板 (PS) 等部分组成<sup>[28]</sup>。

与 S7-400/S7-300 PLC 系统配套的是 SIMATIC STEP7 软件系统。利用该软件可以进行下述工作。

①硬件系统的组态:硬件系统除了需要在模板本身进行必要的选择设置外,还需要通过软件对具体的功能规范进行设定,才构成了完整的系统硬件组态.组态的信息需下载到 PLC 中。

②用户程序块,数据块及系统功能块的开发及下载。

③相关说明与文档编制。

操作监控级中的监控部分采用组态软件 Wonderware InTouch 进行开发。

生产管理级中的隧道窑管理信息系统是采用 C++进行开发的。

本节对隧道窑计算机控制与管理进行了总体设计,明确了系统结构、各部分的功能以及各部分之间的结合方式。这些工作为计算机控制系统和管理信息系统的开发建立了框架,明确了目标和要求,对下一步的设计开发工作具有指导意义<sup>[29]</sup>。

### 3.2. 隧道窑计算机控制系统的实现

上节主要对隧道窑计算机控制及管理系统进行了总体设计,明确了各部分所要实现的功能。在此基础上,本节主要完成其中的计算机控制系统的设计工作。计算机控制系统由控制和监控两部分组成,下面将分别对其进行详细研究和阐述。

隧道窑自动化控制系统,主要设备是可编程序控制器 PLC,执行对生产过程的连续调节控制和逻辑顺序控制。采用德国 SIEMENS 公司推出的 SIMATIC\_S7 控制器。它是全集成自动化系统,它代表了一种将生产制造和工艺过程领域统一起来的革命性的新方法,从而使所有的软硬件都能合成为一个系统<sup>[30]</sup>。

控制系统中各单元通过 Profibus-DP 和以太网进行通信,控制系统设备按不同的控制对象,设置在相应的 MCC 控制室和现场 PLC 控制室内。网络通讯采用 Ethernet、Profibus-DP。S7-400 PLC 之间,及上位机工作站之间通过 Ethernet 网相连,S7-300 PLC、ET200M 等通过现场总线 Profibus-DP 相连。热电偶、流量/压力变送器、调节阀及其它过程信号连接到 ET200M 上。

由于现场总线设备具有自诊断功能,因此,可以预先诊断和维护在线设备,提前排除故障,减少停机时间,提高了生产的安全性,真正实现了“集中管理,分散控制”的目的,为整机的安全顺产提供了重要的技术保证。PLC 与上位机之间采用工业以太网连接,从而提高数据传输速度。

隧道窑(包含干燥窑)PLC 系统配置:电源模块 PS405,10A;CPU 采用 CPU414-3DP。下面有 6 个 ET200M 从站,扩展接口模块选用 IM153-1,数字输入模块选用 SM321,数字输出模块选用 SM322,模拟量输入模块选用 SM331,模拟量输出模块选用 SM332,通信模板采用 CP443-1。KIBO 窑 PLC 系统配置:CPU 采用 CPU315-2DP,数字输入模块选用 SM321,数字输出模块选用 SM322,模拟量输入模块选用 SM331,模拟量输出模块选用 SM332。通信模板采用 CP343-1。回火窑 PLC 系统配置:CPU 采用 CPU315-2DP,下面有 3 个 ET200M 从站,扩展接口模块选用 IM153-1,数字输入模块选用 SM321,数字输出模块选用 SM322,模拟量输入模块选用 SM331,模拟量输出模块选用 SM332。通信模板采用 CP343-1。

隧道窑系统采用 S7-400PLC 可编程控制器作为下位机来实现所有信号的采集、运算、调节。具有 6 个从站。在 MCC 控制中心具有 10 个 MCC 控制柜,2 个 PLC 控制柜。在现场 PLC 控制室具有 3 个 PLC 控制柜。其中,控制风机,窑门,推车机等电机位于

MCC控制室 KM1M01~L, KM1C01, KM1C03。而现场仪表等测量及检测设备的 PLC 控制在窑炉控制室内 KK1C01~C03。

上位机装有编程软件 STEP 7 及 SCADA 软件 INTOUCH,可以在线调试程序及通过人机界面监控现场设备。

### 3.2.1 隧道窑系统主要工艺参数及概述

风机参数:

排废气风机: 90KW, 一用一备, 变频控制, 风机配冷却风扇;

助燃空气风机: 37KW, 一用一备, 变频控制, 风机配冷却风扇;

窑尾冷却风机: 11KW, 变频控制, 风机配冷却风扇;

烟道抽热风机: 7.5KW, 5台, 均为变频控制, 风机配冷却风扇;

从隧道窑引热风到干燥窑风机: 7.5KW, 变频控制, 风机配冷却风扇;

干燥窑进风风机: 5.5KW, 变频控制;

干燥窑排废气风机: 11KW, 变频控制;

窑门电机: 2.2KW;

链式推车机电机: 1.1KW;

液压推车机电机: 5.5KW.

温度采集及控制:

隧道窑内 13 支 K 型热电偶位于预热及冷却带, 18 支光学高温计位于烧成带, 用于测量隧道窑内燃烧带各车位温度。干燥窑 2 支 K 型热电偶测窑头, 窑尾温度。4 支 K 型热电偶测助燃风及排废气管道温度。

压力信号的测量:

液化气 LPG 主管道压力测量及显示, 助燃风管道压力, 9 组烧嘴的液化气及助燃空气的压差, 烧成带开始及结束处的压力, 排废气管道压差, 3 个窑下均压抽风机处压差。

设计要求推车速度 26 车/天, 隧道窑内共 61 个车位, 这样每辆窑车及产品要在窑内运行约 55 小时。烧成带温度要求从 1400°C~1800°C。

为了满足隧道窑生产过程正常运行的要求, 必须对该生产过程中的主要参数进行监测和控制, 根据隧道窑生产工艺, 我们把设计的重点放在能够反映生产状态的温度、压力和流量等参数的监控与自动调节上。在控制方面, 系统需要完成烧成带 16-33 车位的

温度控制、预热带压力控制、冷却带压力控制、助燃风压力控制、15#车位氧含量控制、抽热风流量控制以及助燃风流量控制。其中，对成带各车位温度的控制是通过控制液化汽调节阀和助燃空气调节阀以控制液化汽的流量，从而对温度进行调节的。而对窑压和流量的控制是通过根据测量温度及流量调节风机变频器来实现的。在监控方面，系统需要能够快速、准确的将窑内各测点的实时数据采集、汇总到监控系统，并进行显示。此外监控系统还需要具有流程监控、历史趋势查询、参数设定与调节、报警管理等功能。由于监控系统覆盖的生产流程范围较广，过程信息很多，故监控系统还需要具有美观、友好的人机交互界面，合理安排信息的表现形式，既要全面，又要重点突出、简洁明了。

### 3.2.2 控制系统控制功能的实现

隧道窑由于必需连续点火，不能停电停火，否则产品及隧道窑就要成为废品。所以采用双回路电源供电系统。一路为市电，另一路为柴油发电机供电。

柴油发电机组的工作方式为：当柴油发电机组选择开关在自动位置时，应急发电系统处于备用状态，收到失电信号后，发电机组将在 15 秒内启动。当正常电源恢复后，发电机断路器断开，切换回正常电源，发电机将在无负载状态下运行 0 到 30 分钟，时间可以通过控制箱调节。所有控制将自动复位，并为下一次运行做好准备。

当控制开关位于手动位置时，整个应急发电系统处于手动状态，由柴油发电机选择开关控制柴油发电机组启动和停止。

MCC 室窑炉控制系统前电源切换装置，可以保证隧道窑系统电源正常。在 MCC 控制室的窑炉控制柜的进线柜内，采用施耐德万高的自动转换开关来进行电源切换。施耐德万高的自动转换开关从检测到电源故障到切换完成最短切换时间为 1.5-3S。产品适用于交流 50Hz，额定工作电压 380V 及以下，额定电流至 800A 的配电或电动机网络一主一备或互为备用的电源切换系统中，作为不频繁接通，分断电路及线路的隔离之用。市电系统为主供电回路，发电机为备用供电回路系统，当主供电回路断电后开关控制器发出启动发电机信号，当发电机电压正常，开关将负荷自动投入发电机供电回路。主供电回路恢复供电，开关将负荷投入主供电回路同时提供发电机关机信号。图 3.5、3.6 为隧道窑双电源供电控制图。

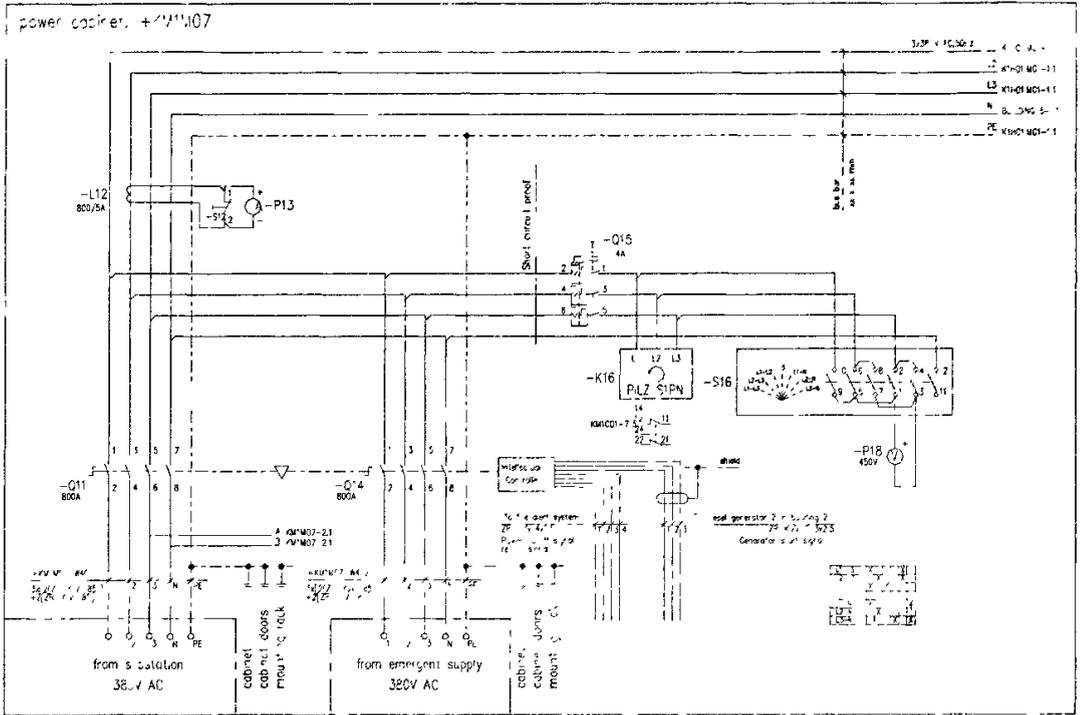


图 3.5 隧道窑双电源供电控制图 1

Fig.3.5 The control drawing 1 of double power for tunnel kiln

图 3.5 为隧道窑双电源供电控制原理的主回路，主电源分别引自变电所的市电和发电机房的发电机供电。包含保护与控制电路。

图 3.6 为隧道窑双电源供电控制原理的控制回路，变电所的市电和发电机房的发电机供电信号均反馈到计算机中，可以在上位中直接观察到是市电供电，还是发电机供电。

隧道窑的几个风机是非常重要的，关系到整个窑炉的压力，温度及气氛。图 3.7、3.8、3.9 为隧道窑排气风机控制原理图。其余的风机控制均与隧道窑排气风机控制原理是一样的，为变频控制。



图 3.7 为隧道窑排气风机控制原理的主回路，变频器的运行及调节信号均在计算机中，可以在上位机中控制与监测变频器的状态。

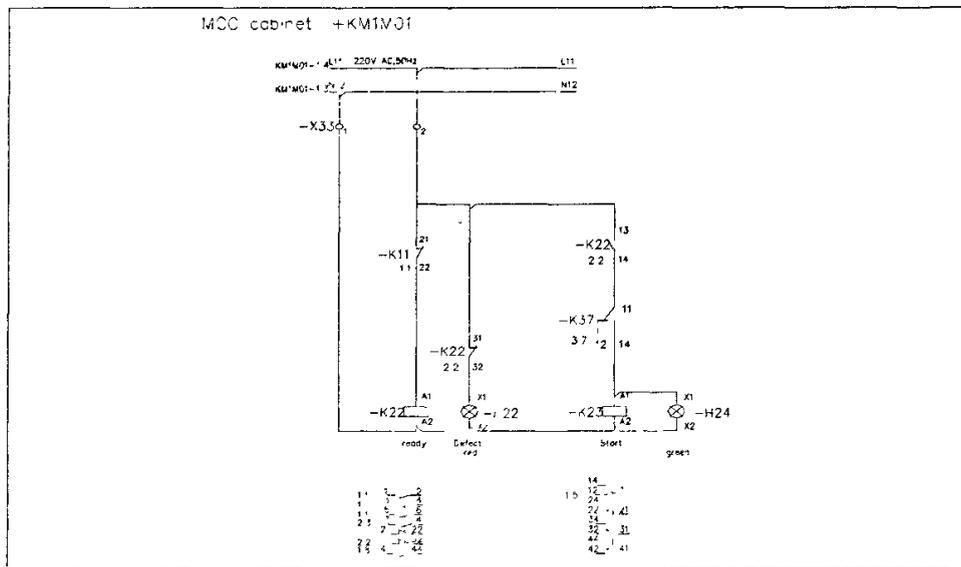


图 3.8 隧道窑排气风机控制原理图 2

Fig.3.8 The control principle2 of exhaust fan for tunnel kiln

图 3.8 为隧道窑排气风机控制原理的控制原理图，控制变频器的启动及停止。并且在现场控制柜有信号反馈。

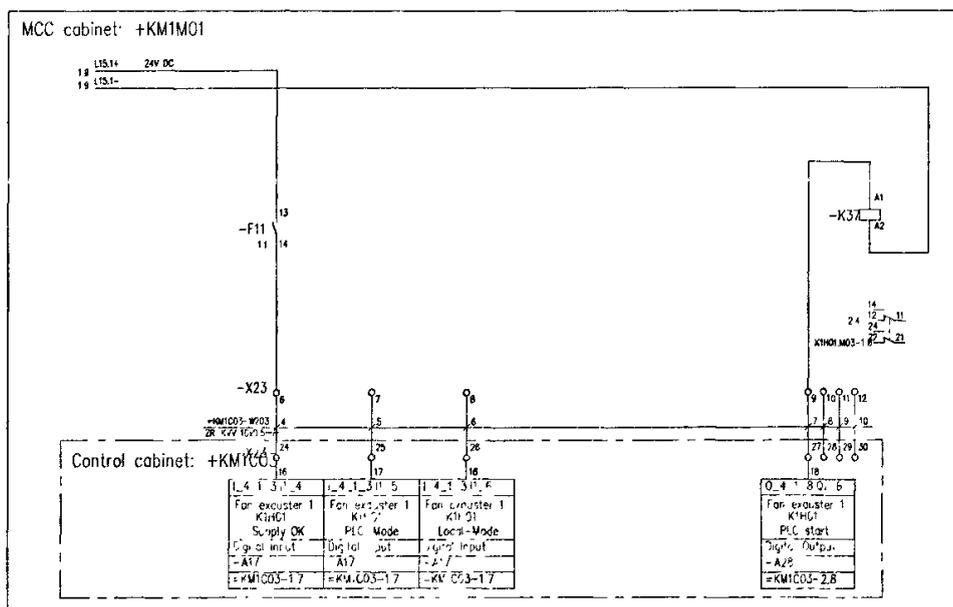


图 3.9 隧道窑排气风机控制原理图 3

Fig.3.9 The control principle3 of exhaust fan for tunnel kiln

图 3.9 为隧道窑排气风机控制原理的控制原理图，变频器的启动信号在计算机中控制。

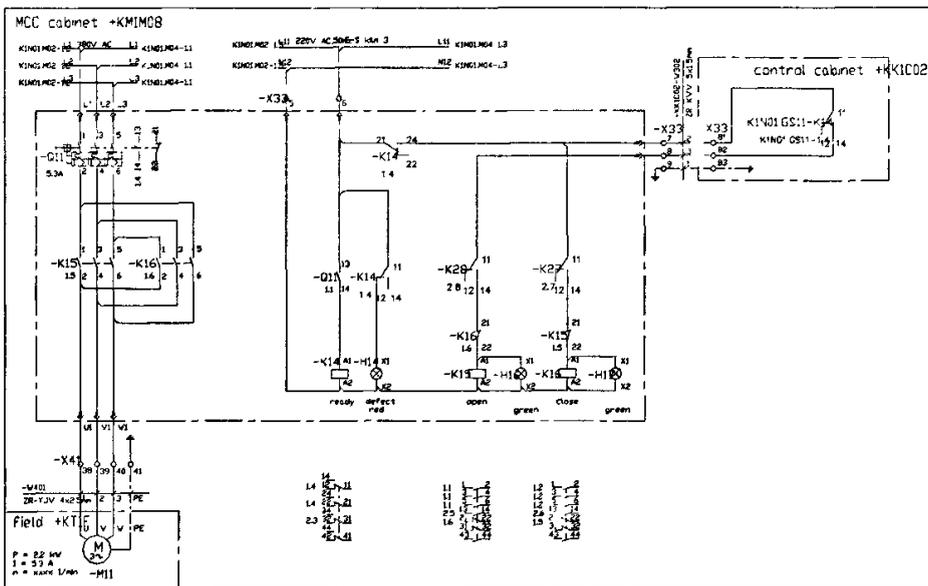


图 3.10 隧道窑窑门控制原理图 1

Fig.3.10 The control principle 1 of the door for tunnel kiln

图 3.10 为隧道窑窑门控制原理的主回路，控制隧道窑窑门的起升和降落。

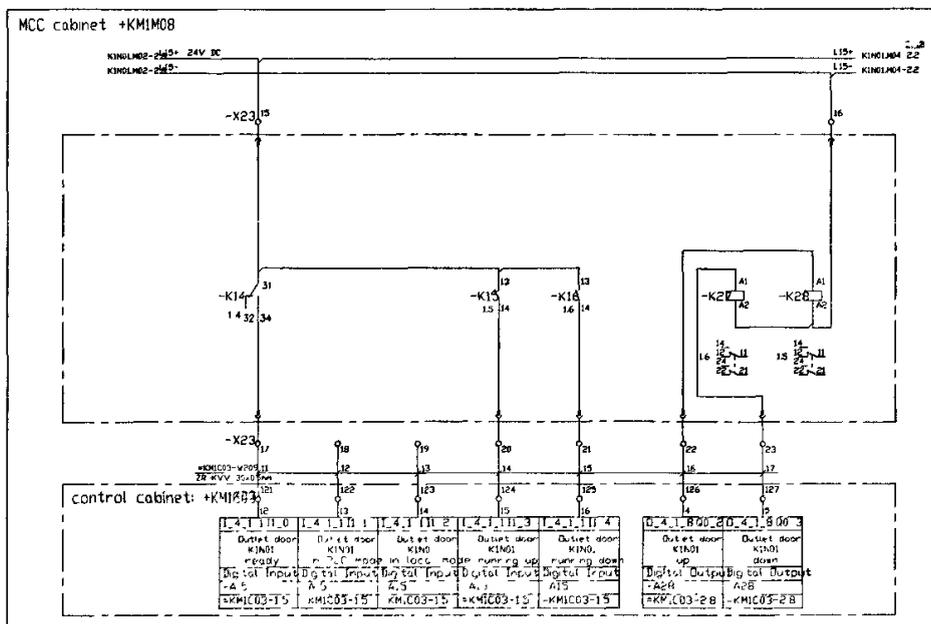


图 3.11 隧道窑窑门控制原理图 2

Fig.3.11 The control principle 2 of the door for tunnel kiln

图 3.11 为隧道窑窑门控制原理图，窑门的起升和降低的控制和反馈信号均在计算机中，可以在上位机中控制与监测窑门的状况。

隧道窑窑车入窑主要是由液压推车机构来完成，为了防止窑内热量向外扩散及窑外冷风进入窑内，入窑采用双门控制，入窑时内门关闭，首先打开外门，窑车进入隔离室，然后，外门关闭，内门开启，由液压推车机推车入窑。这样确保每次窑炉进车时窑炉内都是封闭的，保证窑内温度及压力稳定。图 3.10、3.11 为隧道窑窑门控制原理图。

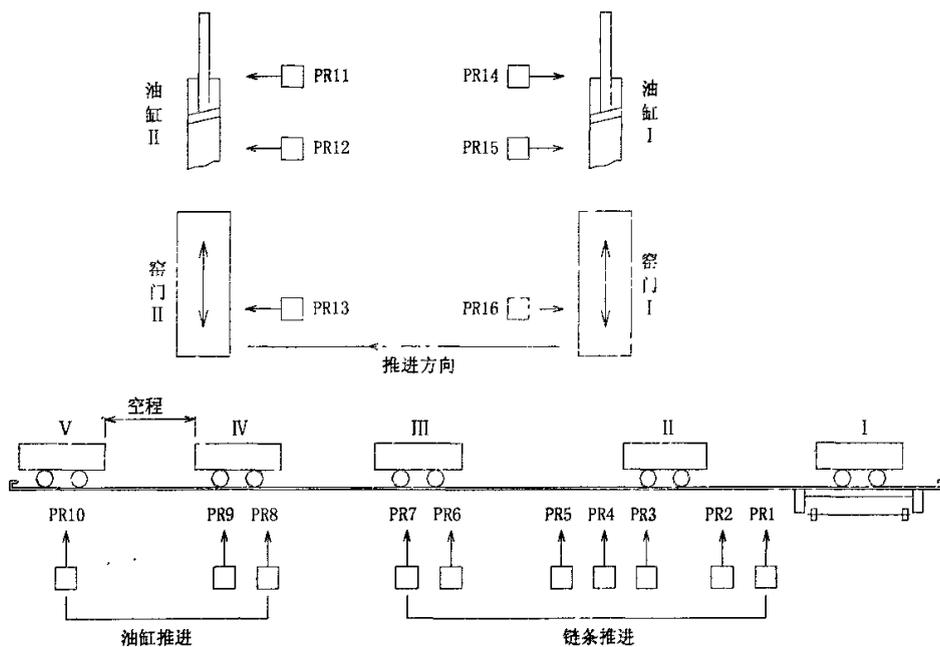


图 3.12 隧道窑入窑控制示意图

Fig.3.12The control sketch map of the into tunnel kiln

如图 3.12 所示为隧道窑入窑控制示意图，下面对入窑机构及动作过程详述如下：

配套设备：链条拉车机，将窑车从移动平台（I 位）拉至 II 位及 III 位；液压推进机构，将窑车从 IV 位推至 V 位以及将窑车从 III 位带至 IV 位；窑门提升机构（窑门 I 和 II）。

入窑动作过程：链条机构退至 PR2 位，一旦移动平台有信号，快退到 PR1 位，挂上窑车后立即慢进至 PR2 位，然后转换为快进至 PR3 位，再慢进至 PR4 位停下等候；如果窑门 I 是开启状态，那么链条机构启动慢进至 PR5 位，接着换成快进至 PR6 位，再换成慢进至 PR7 位停，然后下关窑门 I 到 PR16 位，同时链条机构快退到 PR2 位，完成其一个循环；当窑门 I 到达 PR16 位后，窑门 II 立即提升至 PR12 位，一旦窑尾有允

许进车信号，推进油缸立即由 PR3 位快速推进（与链条慢进同速）至 PR9 位（图中所示空程，目的是将 IV 位的窑车与 V 位的窑车接上），接着按正常推进速度慢进至 PR10 位；当窑车进至 V 位后，窑门 II 立即关闭，同时推进油缸快退 PR8 位停，当窑门 II 降至 PR13 位后，窑门 I 立即提升至 PR12 位，开始下一次进车。

如图 3.13 所示为隧道窑入窑控制程序框图，根据如上所述工艺过程，画出控制程序框图，然后根据此框图编制出逻辑关系图，再转换成程序。因此，隧道窑入窑系统采用自动化控制对于减轻工人劳动强度，提高生产效率和产品的产质量具有重要意义。

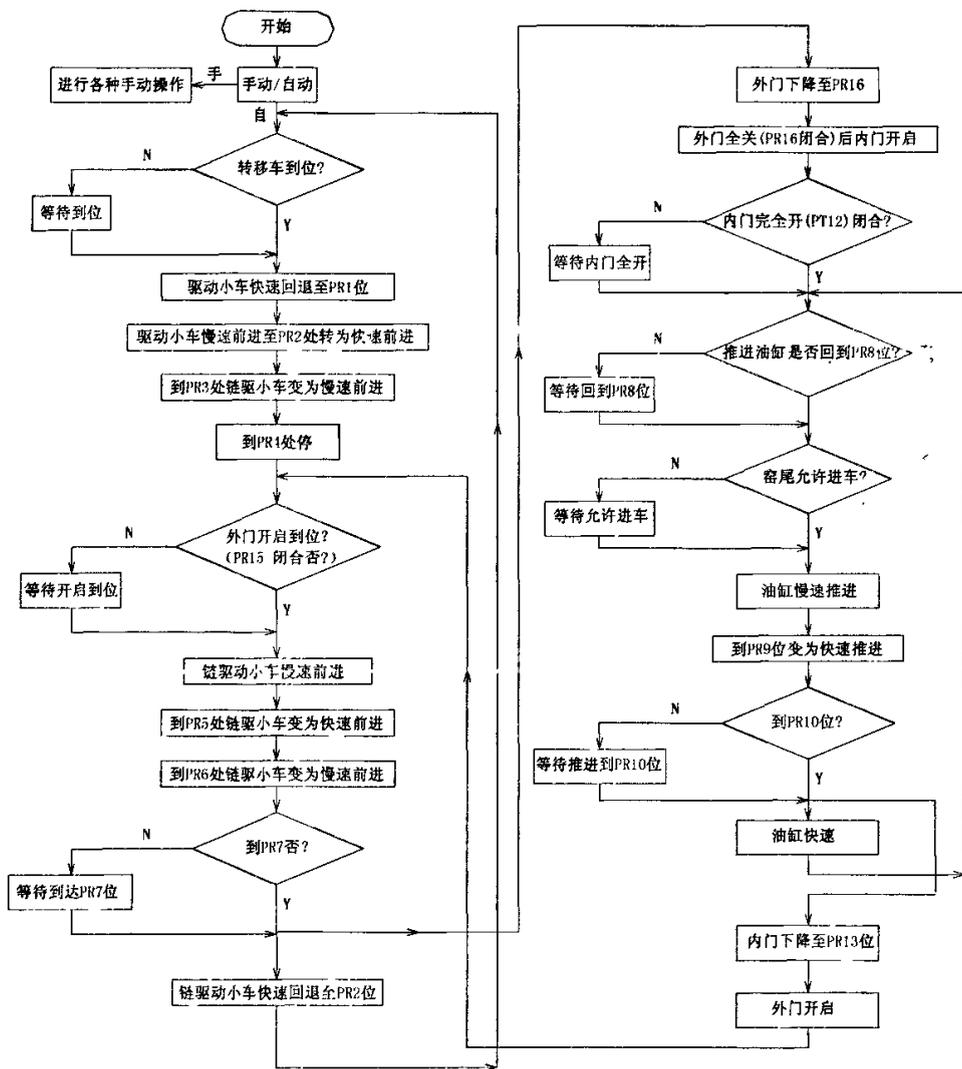


图 3.13 隧道窑入窑控制程序框图

Fig.3.13 The control program block diagram of the into tunnel kiln

控制部分的设计工作主要包括烧成带温度控制,各压力、流量参数的控制以及阀门等控制功能的实现。开关量互锁,设计时保证硬件互锁和软件互锁,进一步落实工艺互锁要求。

现场控制柜设 TP270 触摸屏,与计算机画面一样都能对窑炉重要参数进行操作。为了预防计算机系统崩溃时使用。所有重要设备的控制及重要参数均可在人机界面 TP270 触摸屏上完成。画面应含有:现场模拟图、温度实时曲线图、控制设定曲线图、历史趋势曲线图、并完成报表打印功能、历史记录查询、数据存储等功能

### (1) 烧成带温度的控制

隧道窑烧成工艺主要在烧成带内完成。正常情况下,烧成带各区温度必须严格按照根据烧成制品制定的温度曲线进行调节。图 3.14 为隧道窑温度曲线图。烧成带温度制度的稳定与否直接决定着烧成产品的质量。因此,对烧成带各区温度的精确控制是隧道窑自动控制系统重中之重。

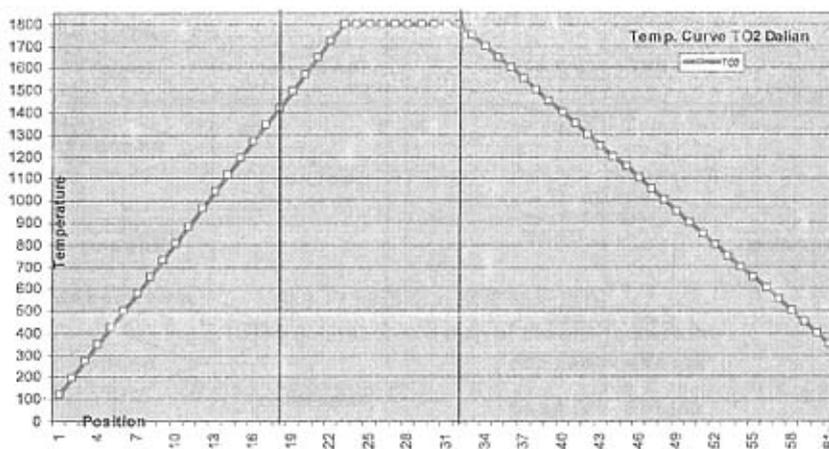


图 3.14 隧道窑温度曲线图

Fig.3.14 The temperature trend drawing for tunnel kiln

#### ① 被控量的选取

本文研究的隧道窑烧成带由 19 个车位组成,分为 9 组,从 16#车位开始,直到 34#车位为止。在每个车位的南北侧墙上各安装有烧嘴,其位置对称。烧成带区间的划分和烧嘴的分布如图 3.15 所示。

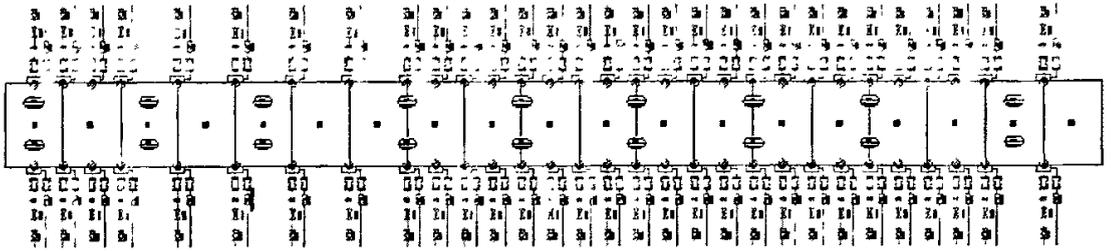


图 3.15 烧成带区间的划分和烧嘴的分布  
Fig. 3.15 Sections of heating zone and the distribution of burners

由于窑内气流是由冷却带经烧成带吹向预热带的，因此，烧嘴喷射的火焰会产生偏转，高温气体方向是偏向预热带的。受到窑内气流方向的影响，烧成带所有车位的实际温度也都向预热带方向偏转。根据隧道窑工艺要求及以往操作经验，对被控量选择如下：控制烧成带 1 区时，以 16 号车位的温度作为该区温度被控量；控制烧成带 2 区时，以 18 号车位的温度作为该区温度被控量；控制烧成带 3 区时，以 20 号车位的温度作为该区温度被控量；而控制烧成带 4 区、5 区、6 区、7 区、8 区时分别以 22，23 号中间车位、24，25 号中间车位、26，27 号中间车位、28，29 号中间车位、30，31 号中间车位的温度作为这些区段温度被控量；控制烧成带 9 区时，以 33 号车位的温度作为该区温度被控量。

此外，每个车位上均有南北两个温度测点，即有两个温度测量值。根据工艺要求，本系统中我们对这两个测量值进行比较，选择其中较高的一个参与控制。

### ② 烧成带温度控制设计与实现

选用 krom schroder 公司的 RV 系列控制阀。能够实现大调节比的连续调节流量的工况下。能够对空气及燃气进行连锁控制。可精确调解烧嘴的功率。保证较高的控制精度。本系统根据不同类型砖的温度曲线设定控制液化汽阀门的开度对烧成带各区温度进行控制。当实际温度偏离设定温度时，控制液化汽阀门电机的输出的控制改变烧嘴喷气的流量，增大或减小烧嘴喷出的液化汽流量，从而达到控制温度的目的。根据生产不同型号类型的砖，在上位操作画面设定控制  $\lambda$  值来控制助燃风的风量。公式 (3-1) 公式为隧道窑液化气主要成分丙烷燃烧需要的氧气含量的化学分子式，氧气占空气含量的 21%，因此， $\lambda$  值的设定液化气与空气配比近似取为 1: 24。



对温度控制的各项操作,例如:手、自动控制方式的切换、手动时输出的给定、自动时给定值的设定、控制参数的设定均通过上位机操作画面来实现。

## (2) 压力、流量的控制

除烧成带各区温度外,窑内各车位压力和各段风流量也会直接影响到烧成产品的质量,因此必须对关键的压力和流量参数进行控制。根据工艺要求,本系统设计实现了6#,11#,14#车位北侧墙压力、17#车位窑底压力、预热带压力、冷却带压力、抽热风流量、总助燃风流量等参数的控制功能。此外,为了进一步改进烧成带温度控制效果,降低燃料消耗,系统中还设计了烧成带各区助燃风流量与液化气流量比值控制功能。

### ①被控压力的选取

实现自动调节的压力参数包括17#车位北侧墙压力、预热带压力、冷却带压力,助燃风压力。

根据隧道窑工艺可知,如果车下压力大于车上压力,则车下冷风将流向车上,对烧成带各区的温度产生干扰,从而影响烧成制品的质量。反之,如果车下压力小于车上压力,则车上的高温空气将流向车下,这种情况下极易损坏小车和轨道。因此,需要保证车上车下压力的平衡。这里我们是通过变频控制调节车下风机转速的来实现的。选取17#车位西侧墙压力为被控量,将其控制在工艺要求的范围内,从而保证车上车下压力的平衡。

为了保证窑内压力制度的稳定,需要将预热带压力控制在负压状态,预热带压力的控制主要是通过排烟风机变频实现的。这里我们选取6#车位拱顶压力作为被控量,以控制预热带压力。同样是为了保证窑内压力制度的稳定,应使冷却带处于正压状态。因此,冷却带进入窑内的冷却空气量的调节是很重要的。冷却空气压力过大,送至烧成带作为二次空气的量相应增多,使空气的过剩量变大,必然会降低烧成带的温度。冷却空气量过少,不仅达不到冷却制品的目的,而且也影响到烧成带燃料燃烧所需二次空气的供应以及窑内压力制度的稳定。冷却带压力控制主要是通过冷却风机变频实现的,这里我们选取34#车位北侧墙上部压力作为被控量,以控制冷却带压力。

### ②被控流量的选取

需要控制的流量包括抽热风流量、总助燃风流量以及烧成带各车位助燃风流量。由于烧成带各车位助燃风流量采用比值控制方式,与其它两个流量及前文所述的压力的控制方式有所不同,我们将对其单独阐述,这里只考虑抽热风流量和总助燃风流量。

抽热风机的入口设在冷却带，热风打出量的多少直接影响着冷却带温度及压力的分布。当抽出的热风量过大时，在该处会引起温度急剧下降，烧成产品容易产生冷却裂纹。若抽力过大，还易引起烧成带的高温气流向抽热风出口的方向倒流，破坏窑内气流的运动方向，所以抽热风流量的控制非常重要<sup>[31]</sup>。抽热风流量控制主要通过变频调节抽热风机实现。

助燃风用于供应烧成带各区液化气燃烧所需的空气。如果助燃风流量过大将降低烧成带温度，同时影响烧成带的压力平衡。如果助燃风流量过小，烧成带含氧量可能不足，可能导致烧嘴熄灭。因此，需要对助燃风流量进行控制。助燃风流量控制主要通过变频调节助燃风机实现。

需要指出的是，针对流量传感器的特点，在将流量传感器输出的过程值读入 PLC 后需要首先对其进行开方处理，开方后的值才可用于控制<sup>[32]</sup>。

### ③压力、流量单回路控制设计与实现

上述压力和流量参数的控制可使用相同的单回路控制器实现。因此，本文设计了可用于各参数控制的通用单回路控制器，该控制器采用智能化改进型 PID 中的积分分离式 PID 算法。在前文工艺简述中提过隧道窑内压力制度的确定，对于保证烧成温度的稳定，燃料消耗量的降低，砖垛截面烧成的均匀性以及减少漏气，改善操作条件，具有重要意义。在本系统中压力的控制器设计采用智能化改进型积分分离 PID 控制器，合理控制窑内压力，保证隧道窑的稳定运行，降低燃料消耗量。如果不采用 PID 控制，则隧道窑内压力不能保证稳定，影响产品的质量，浪费能源<sup>[33]</sup>。

如果以预热带压力控制为例，其系统框图如图 3.16 所示。

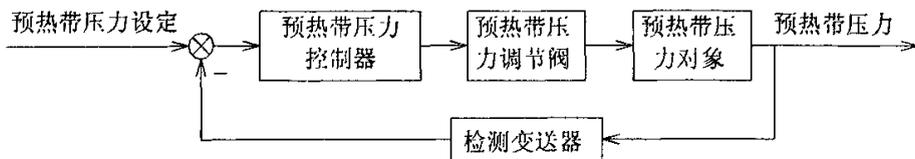


图 3.16 预热带压力控制方框图

Fig.3.16 Block of pressure control of preheating zone

下面将具体讨论 PID 控制器的程序实现方式，程序流程如图 3.17 所示。

首先对设定值及反馈值进行预处理，将其转换为 0 到 100 之间的数值。之后需要设定控制器的作用方式，对作用方式的设定是通过改变参数  $k$  实现的，若  $k=1$ ，表明控制

器在被控量小于设定值时,需要控制器输出增大,若 $k=-1$ 则表明控制器在被控量小于设定值时需要控制器输出减小。

接下来,需要判断控制器工作模式是自动还是手动。

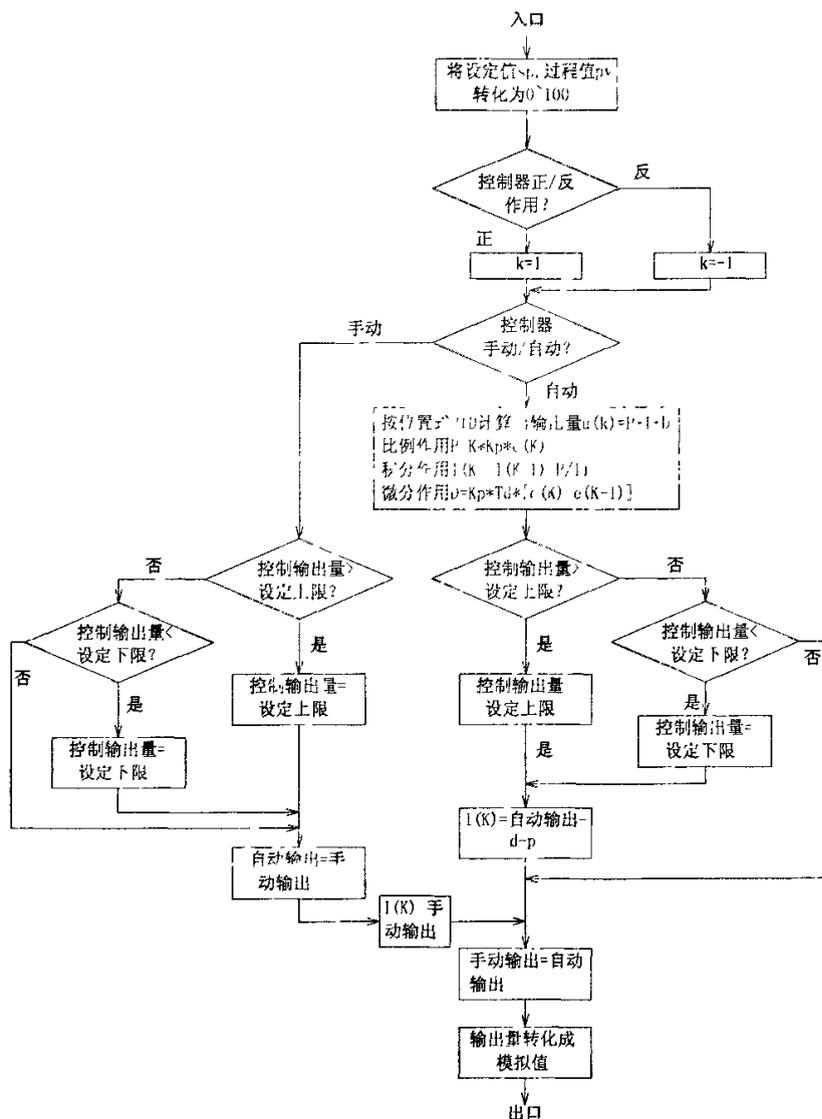


图 3.17 单回路控制算法流程图

Fig.3.17 Arithmetic flow chat of single loop control

若将控制器设定为自动方式, 则控制器将根据位置式 PID 算法计算控制量:

$$u(k) = k_p \left\{ e(k) + \frac{1}{T_i} \sum_{i=1}^k e(i) - T_d [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (3-2)$$

KP — 比例系数

T<sub>i</sub> — 积分时间

T<sub>d</sub> — 微分时间

若要从自动状态切换到手动状态，程序将把当前自动输出值赋给手动输出值，以实现自动与手动无扰切换。同时在位置式 PID 中引入了积分分离算法，以防止积分饱和和现象的出现。

若将控制器设定为手动方式则有：

(a) 判断手动输出值(0~100，对应阀位开度)是否超出控制输出上下限，如超出上限(下限)则将上限(下限)值赋给手动输出值。

(b) 当要从手动状态切换到自动状态时，将当前反馈值赋给自动状态的设定值，以实现手动与自动的无扰切换。

#### ④各车位助燃风流量比值控制设计与实现

烧成带的热量是通过液化气燃料的燃烧提供的，为了保证液化气燃料的高效经济燃烧，必须保证烧成带具有一定的助燃风量。如果助燃风量过多，冷风会带走一定的热量，造成热能浪费；助燃风量过少，液化气燃料不能经济燃烧，造成燃料浪费。为此，本文设计了各车位液化气流量和助燃风流量的比值控制系统。

在控制两种物料的比值系统中，其主导作用的物料流量称为主动量，跟随主动量而变化的物料流量称为从动量，在本控制系统中液化气燃料流量为主动量，助燃风流量为从动量。控制系统根据变化的液化气流量自动调节助燃风流量。

首先，系统需要根据液化气流量计算助燃风流量设定值。在烧成过程中，液化气燃料的用量必须和辅助燃烧的空气量配合，这就为按照液化气流量计算助燃风流量的设定值提供了依据<sup>[34]</sup>。

当助燃风流量控制选择比值控制方式时，助燃风流量设定值根据上文所述方法由液化气流量值按相应比例关系计算。当助燃风流量控制没有选择比值控制方式时，助燃风流量设定值为工程设定值。这时，对助燃风流量的控制问题就转化为与其它压力、流量控制相同的单回路控制问题，其实现方式是类似的。

#### (3)保阀位功能

当进行出车或入车操作时,需要提起窑头或窑尾的窑门,这一变化将使得窑内的压力、温度产生较大的波动。在这种情况下如果还使用控制器进行自动调节必然导致执行机构的大范围频繁动作,这对执行机构是非常不利的。为了防止由于此种情况的发生而导致执行机构使用寿命缩短或直接损坏执行机构,需要在打开窑门时自动将控制器切换到手动状态,当窑门重新关闭,窑内压力、温度稳定后再将控制器自动切回到原状态,这就是保阀位功能。

### 3.2.3 控制系统监控功能的实现

为了更加全面,直观的反映隧道窑生产的过程信息,使操作人员和技术人员能够及时掌握系统当前运行状况,发现并处理各种异常,达到进一步降低成本,提高产品质量的目的,同时也为了便于操作人员进行操作,本文设计开发了隧道窑生产过程监控系统。

#### (1)监控系统组成

监控系统主要由过程数据监控功能,操作与参数调整功能,历史数据查询及趋势图显示功能,报警管理功能,操作权限分配功能等功能组成<sup>[35]</sup>。

其中,过程数据监控功能包括生产流程图画面,过程参数画面等,主要完成对生产过程信息的实时显示。

操作与参数设置功能包括控制器调节,控制器参数设定画面,过程参数设定画面,主要完成生产操作及参数设定。

历史数据查询及趋势显示功能包括预热带,烧成带及冷却带的温度,压力和流量的趋势图等画面,主要完成对当前及历史生产信息的记录和查询。

报警管理功能包括实时报警信息显示及报警一览画面,主要完成对过程报警信息的显示及管理。

#### (2)过程数据监控功能

过程数据监控功能主要完成对生产信息的实时显示,在这一小节中具体介绍过程数据监控功能的各个画面。

##### ①隧道窑流程图画面

隧道窑流程图画面模拟显示了隧道窑生产过程的运行状态。给出了各区主要压力,温度,流量等参数信息。除了主流程图外,为了更全面的反映过程信息,监控系统中还包含了预热带,烧成带及冷却带各自的流程图,分别对各带生产流程进行模拟,并给出

了各带的关键生产信息。图 3.18 为隧道窑流程总貌图。在本画面中可以监测和控制排废气风机，均压风阀，助燃风机，新风风机的启、停；测量液化气主管道压力，温度；从冷却带引风至干燥窑风机及干燥窑循环风机的监测及控制，干燥窑窑头窑尾的温度检测；并显示当前推车速度，混合气的热值及流量，液化气总量，当前流量，以及电源系统的状态。

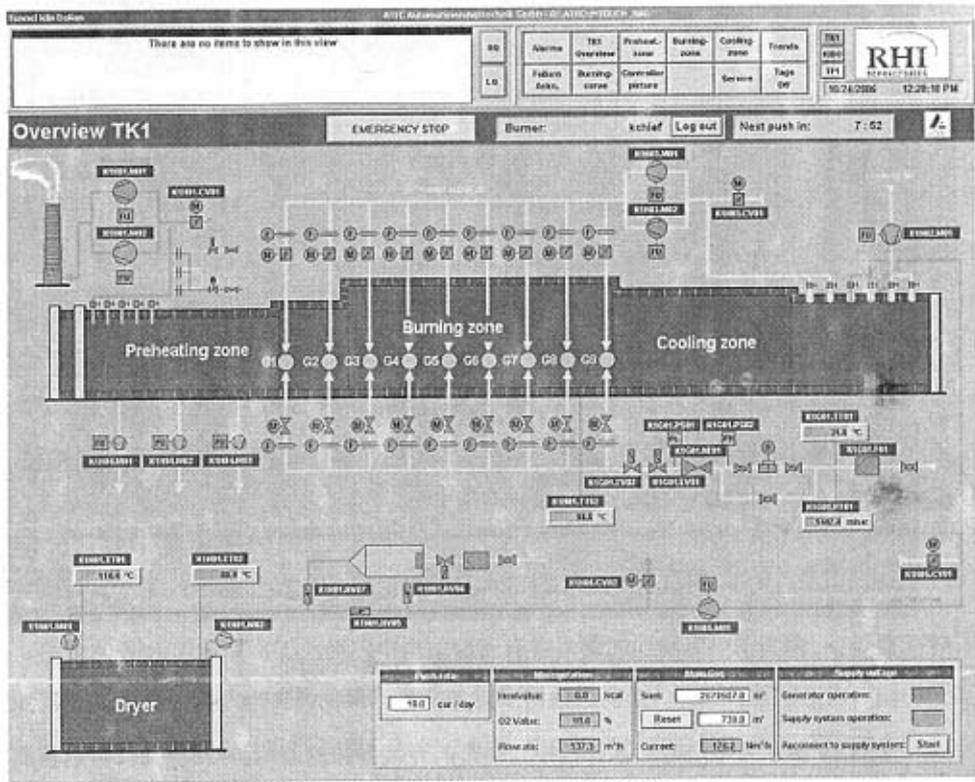


图 3.18 隧道窑流程总貌图

Fig.3.18 Overall interface of process of tunnel kiln

如图 3.18、3.19、3.20 所示为隧道窑工艺流程中预热带，烧成带，冷却带主要分区的详细参数的监测和控制画面。可以监测和控制全部风机的手，自动的切换，显示风机的变频器的频率；显示窑内各检测点的温度及不同测点的压力和各管道压力，流量；与风机相配套的调节阀门的开度；氧气含量的设定及检测；9 组燃烧嘴的液化气温度的

设定值及检测值，液化气管道压力，阀门开度，助燃空气管道压力，阀门开度，及光学高温计所测的烧成各区南北侧窑炉温度。

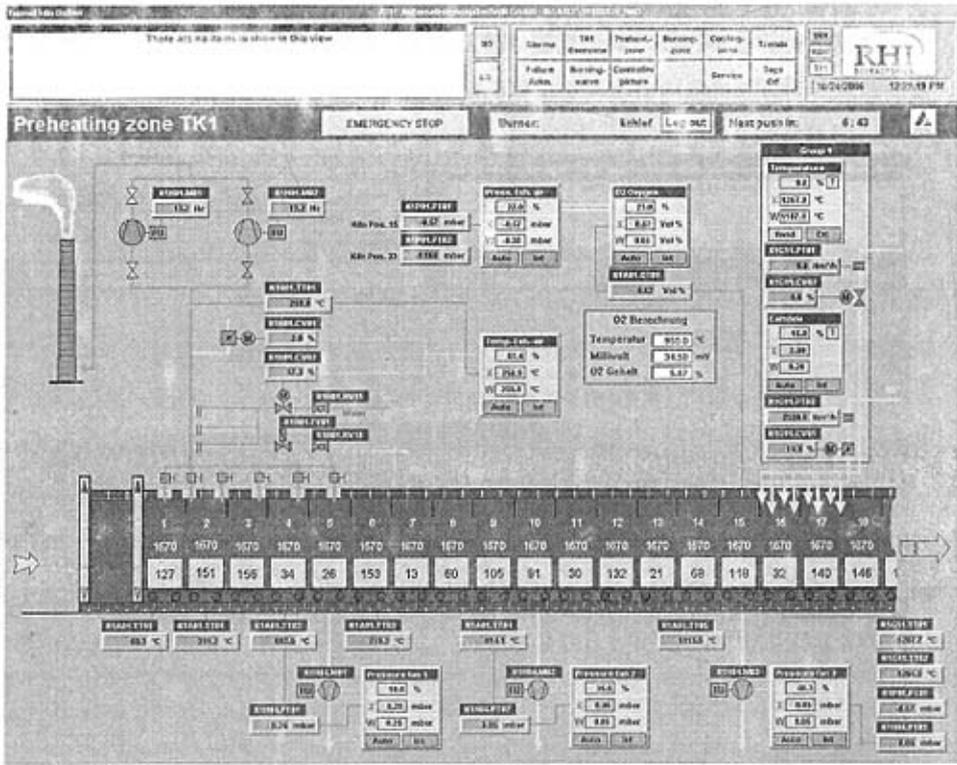


图 3.19 预热带流程及参数画面  
Fig.3.19Interface of Preheating process of tunnel kiln

图 3.19 所示为隧道窑工艺流程中预热带的详细参数的监测和控制画面。可以监测和控制排废气风机的手，自动的切换，显示风机的变频器的频率及风机的状态；显示预热带窑内各检测点的温度及不同测点的压力和排废气管道压力，流量；排废气管道调节阀的开度显示值；3 组均压风机的手，自动的切换，显示风机的变频器的频率及风机的状态；15#车位氧含量控制及反馈值；第 1 组燃烧嘴的液化气温度的设定值及检测值，液化气管道压力，阀门开度，助燃空气管道压力，阀门开度，及第 1 组光学高温计所测的烧成第 1 组区南北侧窑炉温度。

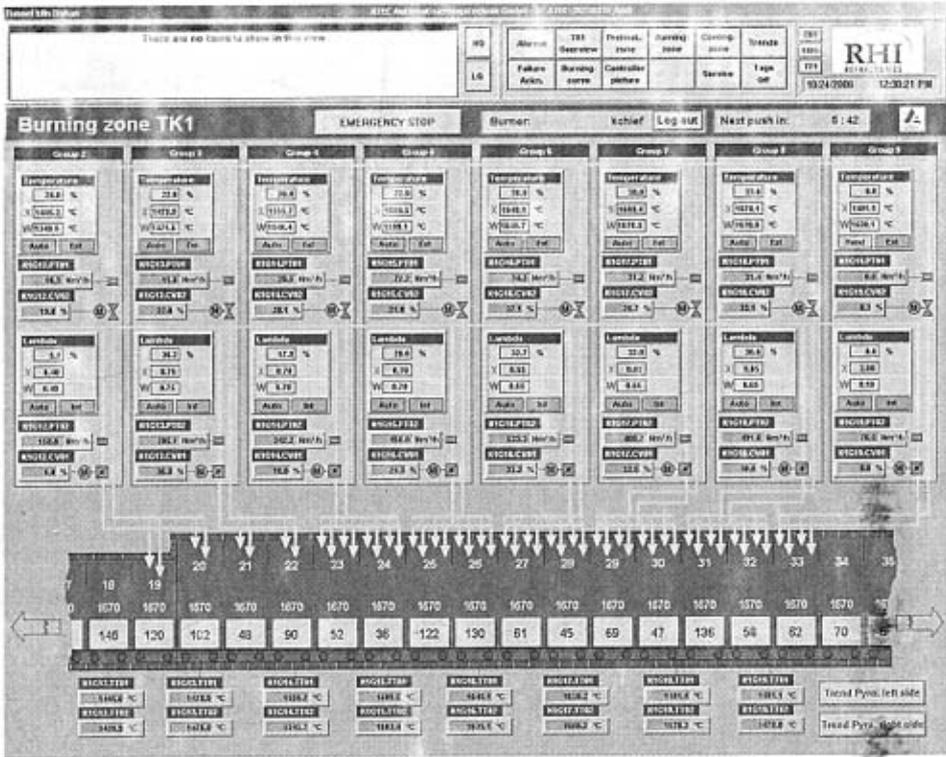


图 3.20 烧成带流程及参数画面  
Fig.3.20Interface of burning process of tunnel kiln

图 3.20 所示为隧道窑工艺流程中烧成带的详细参数的监测和控制画面。可以监测和控制第 2 组到第 9 组燃烧嘴的液化气温度的设定值及检测值，液化气管道压力，阀门开度，助燃空气管道压力，阀门开度，及第 2 组到第 9 组光学高温计所测的烧成第 2 组到第 9 组南北侧窑炉温度。

图 3.21 所示为隧道窑工艺流程中冷却带的详细参数的监测和控制画面。可以监测和控制总助燃风机的手，自动的切换，显示风机的变频器的频率及风机的状态；显示冷却带窑内各检测点的温度及不同测点的压力和助燃风管道压力，流量；助燃风管道调节阀的开度显示值；从 57#，58#车位引风至干燥窑风机的手，自动的切换，显示风机的变频器的频率及风机的状态。



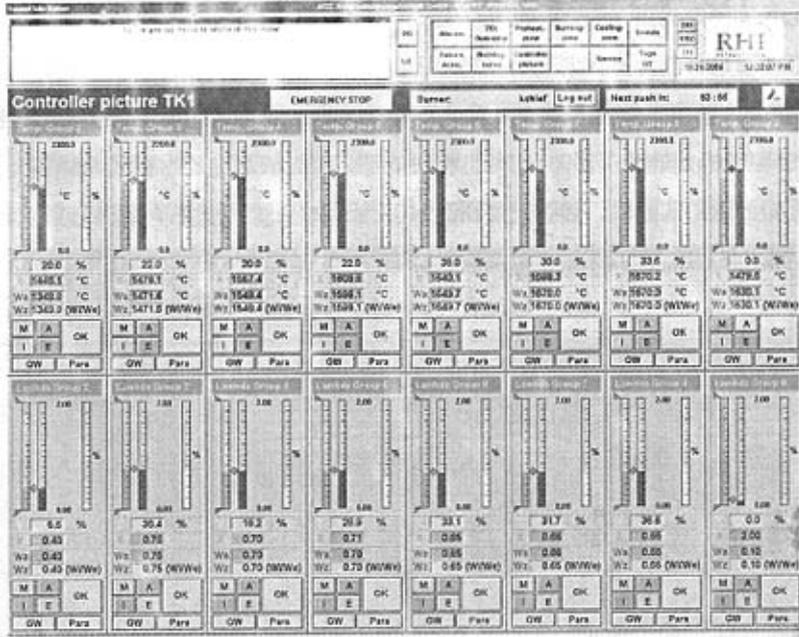


图 3.22 控制画面  
Fig.3.22 controller picture of tunnel kiln

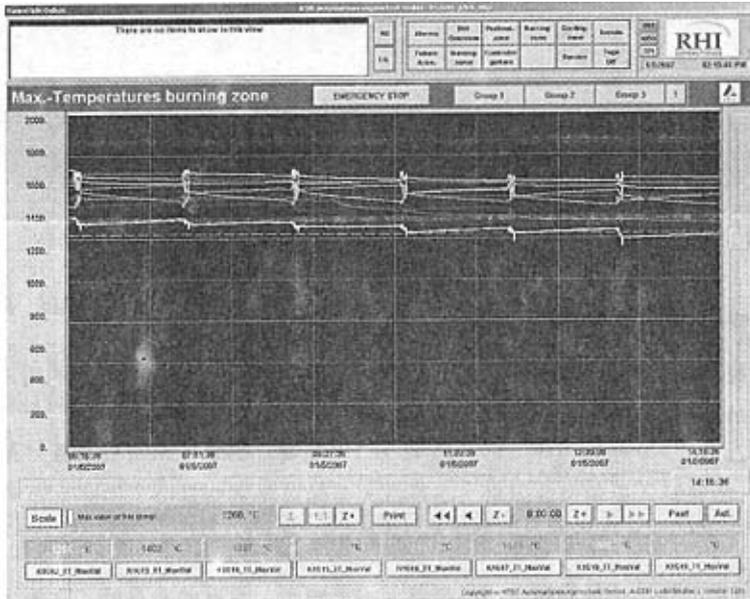


图 3.23 烧成带温度趋势画面  
Fig.3.23 Interface of temperature trend of heating zone

## ④报警管理功能

报警管理功能为操作人员提供了最新发生的报警信息，这些信息包括：报警名称，报警情况，当前值，发生的事件，参考提示等内容。通过该功能使操作人员能够及时了解系统的各种异常情况，并对其做出相应处理。同时该功能还为在线诊断各类故障，查找及分析故障原因提供了依据。如图 3.24 所示为本系统的报警画面。

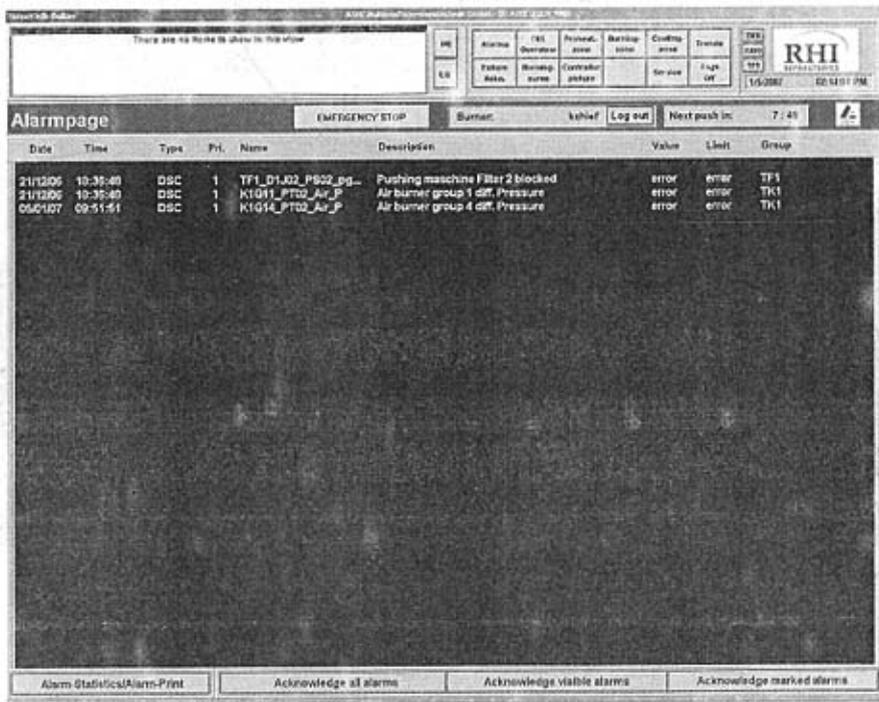


图 3.24 报警画面

Fig.3.24 interface of alarm management

## ⑤操作权限分配功能

为避免对系统的误操作，在开发监控系统时，我们设计 3 个以上的用户权限等级，以不同等级的用户登录将获得不同的操作权限：

- (a) 管理员——可以进行一切操作；
- (b) 工程师——可以进行高级维护工作，可以修改所有的控制参数，只屏蔽少数特殊功能；
- (c) 操作员——可以进行所有运行操作，不可以退出系统，也限制对一些参数的修改。

## ⑤监控系统的冗余设计

为了确保监控,操作的连续性和稳定性,还对监控系统进行了冗余设计,使两套监控系统互为备份。即第1台监控计算机除了能完成对隧道窑的监控和操作外,还能完成对回火窑的监控操作。同样的第2台监控计算机也能同时完成对隧道窑和回火窑的监控和操作。这样,即使在一台计算机出现故障时也能保证两条窑监控和操作的顺利进行。

实现监控系统冗余的关键在于如何保证其过程信息的同步。本监控系统中过程信息的同步是 PLC 中的数据,由于监控系统能够同时与两条窑的 PLC 建立连接,所以监控系统可以同时采集两条窑的过程数据来实现这部分信息的同步。

以上 3.2 小节完成了隧道窑计算机控制系统的设计与实现。其中,控制部分的设计不仅满足工艺要求,而且成功实现了节能的要求;监控部分在信息全面清晰、操作简单易用的基础上还做到了界面的美观、友好和人性化。现场运行状况表明,该隧道窑计算机控制系统是科学和高效的。

### 3.3 隧道窑计算机管理系统的实现

本小节以隧道窑计算机控制与管理系统中的计算机管理系统为主要研究对象,在对计算机管理系统所要实现的功能进行概述后,分别对过程数据采集、生产信息录入、过程数据查询和报表等功能的实现方式以及管理系统的冗余设计进行了介绍。通过使用隧道窑管理系统,管理人员可以实时监控隧道窑的运行状况,对窑炉操作工人的生产操作起到监督作用。通过不同用户等级的登陆,生产管理人员可以随时掌握生产情况,协调生产。设备技术人员可以实时了解窑炉各设备的运行状况,有利于窑炉生产设备的维护。服务器存储的大量窑炉运行数据,可以被数据挖掘软件分析处理,从中找到窑炉可达最佳优化状态,对窑炉工人的操作起到指导作用。

#### 3.3.1 管理系统功能概述

隧道窑管理系统 TOMIS 要实现的总体任务是生产过程信息的自动化、系统化、规范化管理。根据隧道窑工艺及生产管理的要求,它应该具备以下功能:

- (1) 系统设置,包括用户登陆、添加用户、修改密码、退出登陆等。
- (2) 生产信息管理,包括窑车信息的录入与查询、烧成曲线的录入与查询、窑车的统计、用户信息的添加、删除与修改、砖型信息的添加、删除与修改等。
- (3) 实时数据,包括参数显示、流程显示、预热显示、烧成显示与冷却显示。

(4) 变化曲线, 包括实时窑温、窑压曲线以及历史窑温、窑压曲线, 对不同时间、不同区域的数据进行比较, 并显示绘制出曲线图。

(5) 报表打印, 包括操作记录信息的报表、窑车信息的报表、品种、砖型、用户名称及吨数等信息的报表。

### 3.3.2 过程数据采集和存储

要实现隧道窑生产过程信息的管理, 首先必须获取这些信息, 并对其进行存储。因此, 过程数据采集、存储的实现方式是计算机管理系统设计的首要问题。

#### (1) 数据源及通信方式的选择

系统中有两个可用的数据源, 它们是基础控制级中的 PLC 和操作监控级中的监控系统。如果要从 PLC 中获取实时数据, 硬件上需要在管理计算机与 PLC 之间建立物理连接, 或者通过已经和 PLC 建立了物理连接的监控计算机中转来实现。软件上, 如果采用串行通信协议则需要用户开发自己的通信程序, 这种做法是低效而且困难的。如果采用通用的 OPC 协议进行通信虽然避免了通信程序的开发, 但由于需要安装额外的 OPC 服务器软件, 必将导致系统成本的增加。与从 PLC 直接获取数据相比, 从监控系统中获取过程数据则较为方便且高效。首先监控系统与 PLC 之间已经建立起了物理连接, 获取了 PLC 中的过程数据。这样管理信息系统只需建立与监控计算机的连接, 这种连接可以通过低成本的以太网实现。此外, 监控系统中已经集成了 OPC 服务器, 用户只需在客户端程序中编制简单的代码, 建立客户端与服务器之间的连接即可。这些代码可以在 Intouch 的帮助文档中方便的获得。因此, 在本系统中我们以操作监控级中的监控系统为数据源, 通过以太网建立管理计算机与监控计算机之间的硬件连接, 通过 OPC 协议建立数据服务器和客户机之间的软件连接, 从而实现实时数据的采集。

#### (2) 数据源及通信方式的选择

在获取实时过程数据之后, 还需对其进行存储。存储方式的选取必须能够满足计算机管理系统对实时和历史数据检索的要求。Microsoft SQL Server2000 是一个分布式的关系型数据库管理系统, 它的高速、高度安全性和稳定性以及能在低廉的硬件环境中运行的特点, 使它成为今天数据库开发者的首选。SQL Server 的另外一个重要的优点就是与主流客户机/服务器开发工具和桌面应用程序的紧密集成。可以在 Visual Basic, C++、Access, Power Builder, Delphi 及其它的 PC 开发环境创建的应用程序中访问 SQL Server

数据库。在数据库开发时,也可以使用 DAO, RDO, ADO, OLE DB, ODBC, DE-Library 和其他第三方提供的开发工具访问 SQL Server 数据库。鉴于 SQL Server 数据库的上述优点,在管理信息系统中使用它进行过程信息的存储。

### (3)数据采集程序的实现

在选定了数据源、通信方式及数据存储方式之后,本文使用 C++对过程数据采集、存储程序进行了开发。数据采集程序首先需要完成的工作就是建立与监控系统中的 OPC 服务器的连接,这一部分的核心代码可以在 Intouch 的帮助文档中方便的获得。

在成功建立了与 OPC 服务器之间的连接之后,如果不人为退出程序或终止 OPC 连接,系统将自动保持这个连接。当监控系统中过程变量的值发生变化时,系统将自动触发 DataChange 事件,通过对该事件的响应,就能够捕获过程变量的这一变化,并将其读入到数据采集程序中。基于这一原理,当 DataChange 事件被触发时,循环读取全部需要采集的变量,即可实现从监控系统中采集实时过程数据。对于过程变量的存储,我们使用定时器来完成这一过程。当定时器定时时间到事件被触发时,响应该事件的代码按照设计好的数据库及表对当前时刻的过程数据进行存储。通过以上步骤,就实现了实时过程数据的采集和存储。

以上 3.3 小节完成了计算机管理系统的设计与实现。本节所研究的实时数据采集程序成功实现了过程数据的获取;生产信息管理部分高效搜集了隧道窑生产和操作的相关信息。系统现场运行状况表明该隧道窑计算机管理系统设计合理,易于操作,适应现场生产管理的要求。

## 第4章 试验结果

生产信息管理部分需要实现的功能，包括窑车信息的录入与查询、烧成曲线的录入与查询、窑车的统计、用户信息的添加、删除与修改、砖型信息的添加、删除与修改等。

### 4.1 生产信息管理功能实现

如图 4.1 所示为隧道窑生产信息管理窗口。可以显示隧道窑各车位温度及各车产品的温度曲线要求。

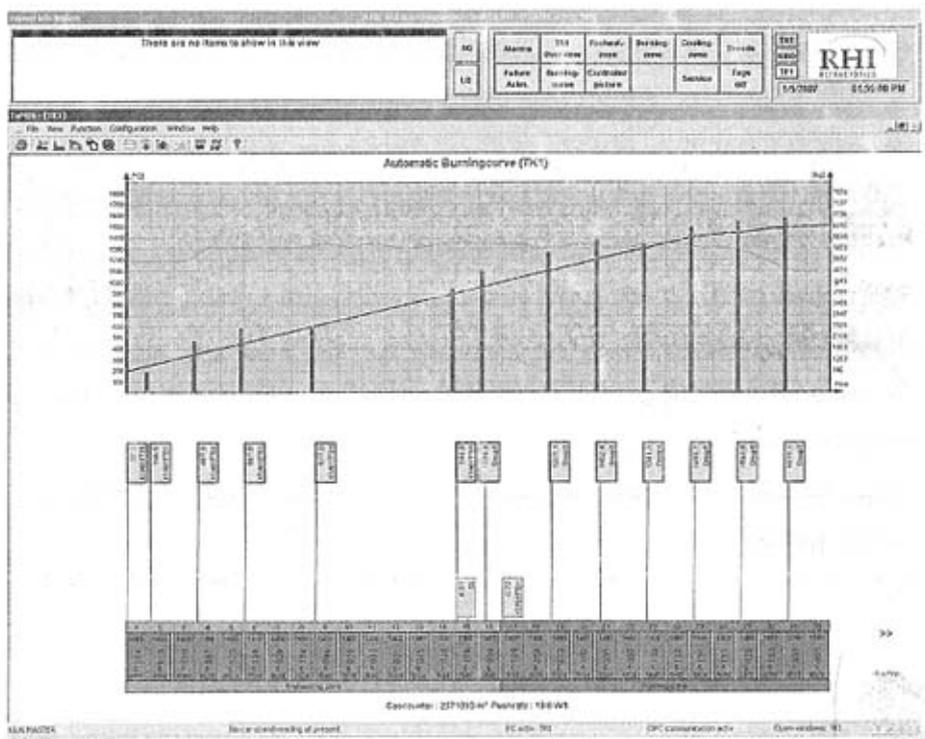


图 4.1 隧道窑生产信息管理窗口

Fig.4.1 production information management window for tunnel kiln

如图 4.2 所示为窑车信息录入窗口，主要录入窑车车号，产品型号，产品烧成曲线，产品重量等信息。

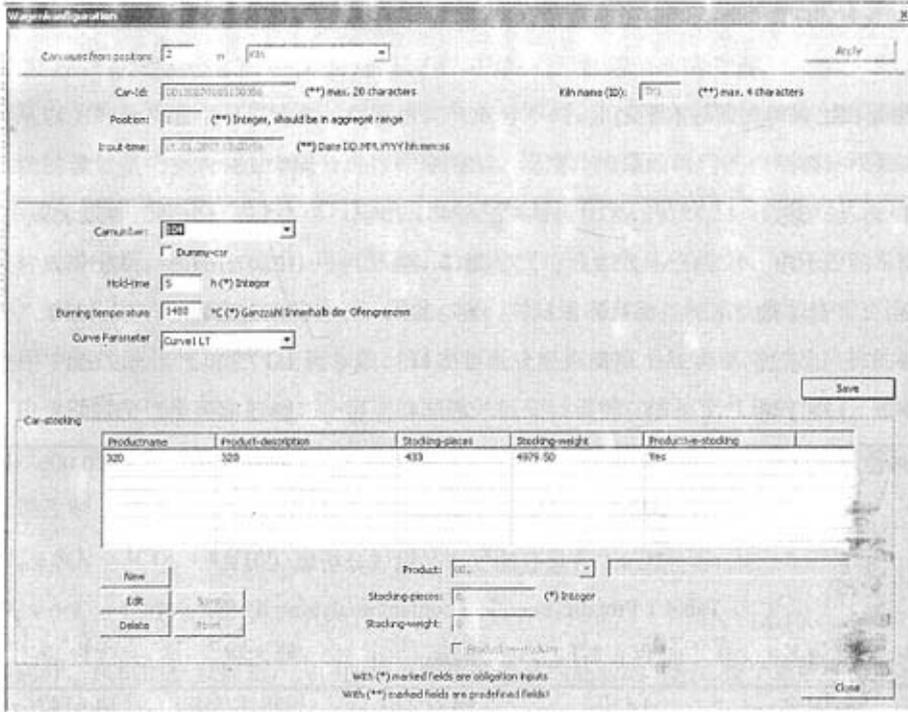


图 4.2 窑车信息录入窗口  
Fig.4.2 kiln car information input window

此外，由于每套管理信息系统都可实现对两条窑的管理，这就可能导致操作人员在录入信息时因疏忽将隧道窑的信息作为回火窑的信息进行录入，从而导致信息混乱。为了防止这种情况的发生，系统在用户登录时要求用户选择当前登录是用于对哪条窑进行管理。如果以隧道窑管理登录，则用户有权浏览和查询两窑相关信息，并可对隧道窑相关信息进行录入和修改，但无权对回火窑相关信息进行操作。

本生产信息管理系统还提供了对于当前及历史数据的查询、绘制曲线以及报表打印的功能。

#### 4.2 系统优化节能的实现

通过近三年的时间运行，证明本系统是安全可靠的，运行稳定、功能先进、操作方便，同样也是节约能源的。尤其是今年的液化气成分进行了更换，由于控制系统符合“柔性”生产与制造技术的特征，使得原先只能吃“细粮”的系统也可以吃“粗粮”了。传统的

控制方式，如果进行燃料成分改变，是根本不可能在短时间内就能达到产品质量稳定，也不可能保证窑炉系统稳定。经过目前9个多月的运行，系统运行良好，产品合格率与原先相比保持在同等水平之上。

峰号	峰名	保留时间	峰高	峰面积	含量
1	丙烷	3.982	43441.754	481490.656	95.2453
2	丙烯	4.682	810.184	12207.167	2.3992
3	异丁烷	5.340	672.122	9582.584	1.4920
4	正丁烷	6.698	275.113	4327.300	0.6517
5	顺丁烯	8.307	55.554	1443.400	0.2118
总计			45254.727	509051.107	100.000
			热值 (KJ/Kg) : 46364.3	比重: 0.503	

表 4.1 液化石油气产品组成分析表 (旧)

Tab.4.1 Propane chemical content analyzing list(before)

峰号	峰名	保留时间	峰高	峰面积	含量
1	丙烷	4.157	9449.270	95918.758	14.6147
2	丙烯	4.815	1172.545	13688.443	2.0722
3	异丁烷	5.457	12438.270	174711.594	20.9525
4	正丁烷	6.840	11985.038	198458.188	23.0200
5	正异丁烯	8.498	5203.437	137369.828	16.4742
6	反丁烯	9.898	4978.216	107767.094	12.5003
7	顺丁烯	11.198	3545.368	89683.602	10.1383
8	丁二烯	12.965	70.447	1854.329	0.2279
总计			48842.590	819451.836	100.000
			热值 (KJ/Kg) : 45640.76	比重: 0.562	

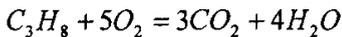
表 4.2 液化石油气产品组成分析表 (新)

Tab.4.2 Propane chemical content analyzing list(present)

表 4.1 为前二年液化石油气产品组成分析表，表 4.2 为今年液化石油气产品组成分析表。从表中我们可以看出前二年液化石油气主要成分为丙烷，而今年液化石油气主要

成分为丙烷，丁烷，丁烯，这两种不同成分的液化石油气的价格相差 600 元/吨，每天用量约 21 吨，每天节约 1.3 万元，每年节约 475 万元。节能效益非常明显。

从以上的分析表中可以看到，尽管液化气成分不同，但是热值是近似的。由于原控制系统的设计是依据表 4.1 中成分进行程序编制，温度，流量及阀门的控制都是根据表 4.1 中成分进行控制，公式 3-1 可以算出，助燃空气与液化气比值约 24；而我们从表 4.2 中进行成分分析，根据公式 4-1 可以算出，助燃空气与液化气比值约 26，由于控制系统符合“柔性”生产与制造技术的特征，因此，我们对隧道窑自动控制系统参数进行更改，在程序中更改液化气与空气比例系数，则控制系统根据温度曲线调整阀门及风机的控制。由于助燃空气量需求的增加，窑尾的助燃风机变频调节，增加空气量的供给，影响窑内压力，温度等一系列参数变化。自控系统会快速反应，根据各种检测量，迅速判断，并反馈控制，因此，只有自动化控制系统才能保证窑炉安全稳定运行。



同样，风机的变频控制，阀门的调节都遵循着节约能源的要求。整个系统在电能及液化气能源的使用上都本着节约的原则设计施工，效益显著。

## 结论

正如前文所述，由于受到资金及技术水平的限制，我国隧道窑生产过程自动化程度较低，这种状况既严重制约了砖瓦产品质量水平的提高，又造成了较大的能源消耗。因此，为了改变这一现状，本文针对隧道窑生产过程的自动控制问题进行了研究。

本文的研究工作围绕某企业 156 米高温隧道窑计算机控制与管理系统的设计与实现展开，在深入了解隧道窑生产工艺要求、总结国内外隧道窑自动控制系统发展状况的基础上，分别对隧道窑自动控制与管理系统的整体架构、控制部分以及管理部分进行了设计与实现。通过在实际生产过程中的成功应用证明，该隧道窑计算机控制与管理系统能够满足设计要求，运行稳定、功能先进、操作方便，对于今后类似系统的设计、开发具有一定的指导意义。本文采用智能化 PID 控制，较好的完成了隧道窑压力、温度、流量的控制。

本文虽然在隧道窑计算机控制与管理系统的的设计开展了一些有意义的研究工作，但是由于时间和条件的限制，本文的研究工作还不够深入和系统。隧道窑生产过程的控制与管理是一个较大的系统工程，还有许多问题有待进一步研究，例如，配料、混料及烧成的全流程自动化，通过自动控制进一步降低能耗、减少污染等。本文作者将继续在这一研究领域进行探索，力争为推动我国隧道窑生产过程的自动化进程做出贡献。

本文所述窑炉存在一些本体制造方面问题：由于窑头和窑尾的窑顶是按拱顶设计制造，而中间部分是平吊顶，则存在气流紊乱现象。因此，今年目前正在设计的第二条新的隧道窑将全部采用平吊顶。另一个问题也是由于窑炉本体工艺引起，氧气分析仪检测位置，由于是在负压力区，而平吊顶本身有缝隙，因此窑外空气侵入窑内，测氧值不准，影响调节空气比例参数。这个问题我们在新的第二条隧道窑中设计一种新型结构吊砖，我们将会在实际使用中看到它的良好效果。

## 参 考 文 献

- [1] 曹明月. 浅谈陶瓷生产企业的计算机应用[J]. 河北陶瓷, 1996
- [2] 李西利. 砖瓦工业的隧道窑[J]. 砖瓦, 1998, 5.
- [3] 姜金宇. 耐火材料工业热工过程及设备[M]. 北京:冶金工业出版社, 1997, 10.
- [4] 刘志国. 我国陶瓷窑炉技术水平现状与发展思路[J]. 四川建材, 2002, 1.
- [5] 高平良. 陶瓷工业及陶瓷窑炉自动控制系统发展的展望[J]. 陶瓷, 1995, 6.
- [6] 雷涛, 曾学军. 现代隧道窑的计算机控制与管理系统[J]. 佛山陶瓷, 2002, 12(12):30-31.
- [7] 万全应. 引进西德卫生陶瓷隧道窑的消化与吸收[J]. 陶瓷研究, 1994, 6.
- [8] 徐胜昔. 卫生陶瓷烧成用窑炉发展之我见[J]. 中国陶瓷工业, 2004. 4, 11(2):47-49.
- [9] 第一座凯乐钢外壳隧道窑在西班牙投入使用[J], 砖瓦, 1994, 3.
- [10] 贺燮炎. 谈现代轻型隧道窑[J]. 陶瓷科学与艺术, 2004. 5.
- [11] 边冰. 基于 PLC 硬件系统的隧道窑温度模糊控制方案[J]. 佛山陶瓷, 2004. 8, (92):24-25.
- [12] Zhang Huaguang, Yang Yingxu, Chai Tianyou. The present status and future developments of multivariable fuzzy control(I I) [J]. Control and Decision, 1995, 10(4):28 9-295.
- [13] 陈理君, 宋镜明, 沈丽. 隧道窑模糊控制中模糊控制解析式及隶属函数的研究[J]. 中国建材科技. 2000, 5
- [14] 田军, 李成利, 王文韬. DRNN 神经网络的电加热炉解耦控制[J], 青岛科技大学学报, 2005. 8, 26(4):359-361.
- [15] 舒怀林, 郭秀才, 舒杰磊. 注塑机料筒多段温度 PID 神经网络解耦控制系统[J]. 计算技术与自动化, 2004, 23(4):55-57.
- [16] Gilman, G. F. Jerry. Boiler control systems engineering. Portland: Scitech Book News, Sep 2005.
- [17] 王锦标. 计算机控制系统[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [18] 孙增圻. 计算机控制理论及应用. 北京:清华大学出版社, 1989.
- [19] 何衍庆. 集散控制系统原理及应用(修订版), 化学工业出版社, 1999. 5
- [20] Broomhead D S, Lowe D. Multivariable functional in terpolation and adaptiven etworks[J]. Complex Systems, 1988, 2:3 21-355.
- [21] Boiler control system reducers NOx emissions without burners. New York:Chemical Engineering. Jul 1994.
- [22] 西门子中国有限公司自动化与驱动集团自动化系统部. 深入浅出西门子 S7-300PLC. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004.

- [23] 王树青. 先进控制技术及应用. 化学工业出版社, 1999.
- [24] 王为兵. PLC系统通信扩展与网络互连技术. 机械工业出版社, 2005. 1.
- [25] Chai T.Y. Multivariable Intelligent decoupling control and its application[C]. Hefei: Proceedings of the 3th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2000.
- [26] 陶永华主编. 新型PID控制及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社. 2002
- [27] 翁维勤, 孙洪程. 过程控制系统及工程 第二版. 北京: 化学工业出版社, 2002, 7.
- [28] Siemens AG Statement: List (STL) for S7-300 and S7-000 Programming Reference[M], 2002.
- [29] 王锦标. 计算机控制系统. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [30] 常斗南. 可编程控制器原理、应用、实验. 机械工业出版社, 2002.
- [31] 杨玉飞. 高温隧道窑[J]. 有色冶金节能, 1997, (4): 68
- [32] Gilman, G. F. Jerry. Boiler control systems engineering. Portland: Scitech Book News, Sep 2005.
- [33] Jim Cahill. Potlatch uses "mini-DCS" to upgrade boiler control at its Lewiston, Idaho, mill. San Francisco: Pulp & Paper. Apr 1997.
- [34] Karppanen, Erkki, Tech. D., Advanced control of an industrial circulating fluidized bed boiler using fuzzy logic. Finland: Oulun Yliopisto, 2000,
- [35] 西门子中国有限公司自动化与驱动集团. SIEMENS SIMATIC S7-300 PLC 硬件和安装手册. 北京: 西门子公司, 2003.

## 致 谢

在论文即将完成之际，我首先向关心帮助和指导我的导师汪思源教授和何宝刚高级工程师表示衷心的感谢并致以崇高的敬意！

在整个论文工作期间，一直得到导师汪思源老师的亲切关怀和悉心指导。导师以其渊博的学识、严谨的治学态度、求实的工作作风给我留下了深刻的印象，我将终生难忘。

在完成课题任务期间，得到了何宝刚高级工程师、刘晓辉工程师、李鹏工程师等大力协助。特别是在遇到困难的时候，他们寄予了全力的帮助，同我共渡难关，最终顺利完成项目任务。

回首三年来的艰辛历程，面对今天的收获，我感到无限欣慰。感谢公司给了我这次进一步学习的机会，使我的人生更加丰富。为此，我向热心帮助过我的所有领导、老师和同事表示深深地敬意！

将完成学业之际，我深深地感谢我的家人，在生活的各个方面给予了我极大的支持，今天能完成学业与他们分不开的。

## 研究生履历

姓 名	王飞
性 别	女
出生日期	1970年11月19日
获学士学位专业及门类	工学
获学士学位单位	洛阳工学院
获硕士学位专业及门类	工学
获硕士学位单位	大连海事大学
通信地址	辽宁省大连市欣乐西街18号
邮政编码	116038
电子邮箱	wangfei-dl@163.com