

## 摘要

本文以山西省某电石炉项目为课题背景,根据该项目所提出的电极升降控制、电极压放控制、参数显示等功能要求,以减少能耗、降低人工劳动强度为控制目标,设计实现了一种基于 PLC 的电石炉控制系统。针对三相电极升降系统中三相电流存在耦合性强、灵敏度高、调节困难等问题,分别研究和采用了改进型 PID 控制和模糊控制。

首先,本文研究了电石炉的生产原理、工艺流程,并对电石生产的主要设备进行详细介绍和说明;其次,设计了电石炉控制系统,对该系统的硬件设备进行选型和安装,并完成了下位机 PLC 的程序设计和上位机 WinCC 监控软件的画面设计;再次,本文研究了基于改进型 PID 控制的电极升降系统,提出了带死区特性的改进型 PID 控制方案,给出了电极脉冲控制器的设计方法,并完成了该系统的 PLC 程序设计、调试和应用;最后,设计了基于模糊控制的电极升降系统,提出 PLC 离线创建模糊控制表的方法,并完成了该系统的 PLC 程序设计、调试和应用。

目前,该电石炉控制系统已投入运行,系统的应用降低了人工劳动强度,改善了电极电流的稳定性,提高了电石生产自动化水平,并达到了节能降耗、提高生产效率的最终目的。

**关键词:** 电石炉控制系统, PLC, WinCC, 电极升降系统, 改进型 PID 控制, 模糊控制

## Abstract

The background of this paper is a Calcium Carbide furnace project in Shanxi Province. Based on the functional requirements proposed by the project such as Electrode lift control, Electrode slipping control, Parameters display, a control system with PLC was designed to reduce the energy consumption and release the labor intensity. To solve problems of three-phase current in the three-phase electrode lift system, such as strong coupling, high sensitivity, difficult to adjust, improved PID control and Fuzzy control were put forward in the dissertation.

To begin with, the principle and flow of the Calcium Carbide furnace production were introduced. Furthermore, the control system was designed, the hardware of the system is selected and installed, and then the PLC software and monitoring software with WinCC in the PC were finished. Moreover, the improved PID algorithm with dead zone were proposed, based on which the electrode lift system was designed, and then the corresponding design methods of Electrode Pulse Controller were brought out. Of course, relative PLC program designing, debugging and application were also completed. Finally, the method of off-line Fuzzy Control Table based on PLC was also proposed, based on which the electrode lift system was designed, and the relative PLC program was also designed, debugged and applied.

The Calcium Carbide furnace control system has been put into practice, which releases the labor intensity, enhances the stability of electrode current, improves the automation level of Calcium Carbide production, and realizes the ultimate objects of energy saving and productivity increase.

**Key words:** Calcium Carbide furnace control system, PLC, WinCC, Electrode lift system, improved PID control, fuzzy control

## 声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已在论文中作了明确的说明。

研究生签名: 董杰 2018年10月11日

## 学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的部分或全部内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名: 董杰 2018年10月11日

## 1 绪论

### 1.1 引言

1862 年 Hare 和 Wohler 在实验室中首次利用  $Zn$ 、 $Ca$  与  $C$  等原料制得  $CaC_2$ ，三十年后 Moisson 和 Willson 用  $CaO$  和煤在电炉中制成了  $CaC_2$ <sup>[1]</sup>。由于这种碳化钙是在电炉中反应生成，于是我们俗称它为电石。电石工业品是灰色、黄褐色或黑色的固体，它是有机合成工业的重要基本原料，利用电石与水反应生成的乙炔可进一步合成有关系列产品，如乙醛、醋酸、醋酸乙烯、聚乙烯醇、合成纤维、合成橡胶、合成树脂及有机溶剂等，还可用于金属的切割和焊接。

电石炉内利用三相电极间短路电弧所产生的高温热能将生石灰、焦碳等原料熔融后反应生成  $CaC_2$ ，即工业电石。在电弧高温生产电石过程中，电石炉内温度值的改变是通过调节电极碳棒插入炉料的深度来控制的，并且其温度值一般是利用三相原边电流的大小来间接测算的，当电极下降时电流值增加，反之则电流值减少，因此电极升降控制系统是电石生产的重要部位，电极电流值的大小和稳定性是影响电石生产质量及能耗大小的关键因素。

在电石生产过程中如果仅依赖人工进行手动操作，这不仅使得人工劳动强度加大，而且会使三相电极平衡难以调节、三相电流值不稳定，甚至容易造成断弧或跳闸现象。由于目前国内电石生产的自动化水平仍然较低，使得电石生产的电能损耗增加，生产效率和质量难以提高，从而导致产品缺乏国内外市场竞争力，因此提高现有设备的自动化水平、完善电石炉系统控制机制、加强生产的安全性能是改善当前比较落后的技术现状的有效途径之一。

### 1.2 电石工业的现状和发展前景

随着国际原油价格的上涨，有机合成工业的重要原料——乙炔的生产由石油提炼法转为电石生产法，这就使得电石的需求量与日俱增，给国内外电石行业提供了极大的市场空间。以下就国内外的电石工业现状和发展前景分别加以介绍和说明。

#### 1. 国内外的生产现状

日本、美国、德国等都是世界上电石工业较发达的国家，这些国家在电石工业极盛时期的年生产量都超过 100 万吨。日本电石工业创始于 1901 年，当时只有一座容量 50 千瓦的小型电炉，但在 20 世纪 50 年代末已使用密闭电石炉，80 年代初期日本电石生产电耗已降至 3050 kWh/t 以下，1976 年其电石年产量达到了 56 万吨<sup>[1]</sup>。1895 年，美国建成了第一座工业化电石炉，1904 年，又建成一座功率为 7500kW 的三相电石炉，在恒定

功率运行, 电石电耗到 3034kWh/t, 发气量也稳定在优级品。德国拥有世界最大的电石炉, 容量为 75000 KVA, 日产电石为 435 吨, 净化后炉气为 1 万  $m^3/h$ , 运用空心电极技术, 可利用粉料占总炉料的 1/4 以上, 电石电耗已降至 2940 kWh/t, 质量稳定在 304L/kg 左右, 最大生产厂可年产电石 60 万吨以上<sup>[1]</sup>。

我国在解放前几乎没有电石工业, 只是在某些采矿场建有几座小型电石炉, 容量为 300KVA 左右, 生产电石产生的乙炔主要用于点灯, 与国外电石工业相比, 落后约半个世纪。解放后, 1950 年在吉林建成了第一座容量为 1750KVA 的开放电石炉, 之后在上世纪六十年代由上海吴淞化工厂与化工部第一设计院合作首先自主开发 16500KVA 全密闭电石炉, 1958 年以电石乙炔为原料的有机合成工业在我国兴起以后, 电石工业才在全国各地发展兴起, 许多城市纷纷建设电石厂。1960 年全国共建成容量为 10000KVA 的三相圆形开放电石炉 13 座, 年生产能力超过 35 万吨<sup>[2]</sup>。目前我国约有大、小电石生产厂家 500 余家, 2006 年为 3.35 万吨<sup>[3]</sup>。统计数据显示, 2006 年我国电石产量突破 1000 万吨, 2007 年产量达到了 1500 万吨以上<sup>[4]</sup>。

## 2. 国内外的研究现状

目前国外的性能较好的电石炉大部分采用了空心电极加料, 并采用计算机控制系统实现电极压放控制、电极升降控制以及工艺参数的检测等功能。早在上世纪 60 年代初, 美国在大型密闭电石炉已首先将电子计算机应用于电石生产过程中, 通过过程计算机寻求生产最佳参数值使生产能力和电石质量得到很大提高<sup>[5]</sup>。电石生产过程是一个比较复杂化合反应过程, 电石炉的操作受到炉料配比、水分、粒度、气孔率粒度以及电气参数的设定等诸多因素的影响, 并且原料状态参数、电极升降位置以及电石炉内温度值难以直接准确的测量得到, 这使得建立电石炉系统的数学模型成为主要技术问题, 目前尚无电石炉控制模型的国内外文献资料可供参考。

针对电石炉控制系统的设计, 国内出现了一些相关的工程设计文献<sup>[6][7][8]</sup>, 但这些研究文献有一定的局限性, 或缺少计算机监控系统的设计或缺少三相电极难以调节平衡的问题解决方法。电石炉系统中三相电极升降控制的好坏直接影响到炉温和三相电流或电压的不平衡程度, 并且电石炉电流本身存在灵敏度高、耦合性强、参数时变等因素, 使电石炉系统中电极的升降调节成为控制的重点和难点。针对电石炉电流所存在的问题, 目前国内外对电弧冶炼的三相电极控制做过很多相关研究并提出多种控制算法, 如文献[9]提出 PID 控制算法; 文献[10][11][12]提出模糊控制算法; 文献[13]提出智能 PID 控制算法; 文献[14][15][16]提出神经网络控制算法以及文献[17][18][19]提出其他控制方案等。目前针对电石炉电极升降系统虽然存在多种控制算法和文献参考, 但较多方案存在缺少控制器结构和算法论述或没有系统仿真、应用结果等问题, 因此难以达到理想的理论研究和工程应用参考价值, 如上述文献[10]中提出的三输入单输出结构模糊控制算法、文献[11][12]中所提自适应模糊算法, 对电石炉对象的模糊控制器结构和模糊规则

等均缺少论述和说明以及实际工程应用,如[13][15][16]等参考文献中所提智能控制以及神经网络等控制算法均缺少研究仿真或应用结果。由于国内外的电石炉系统早期主要以单片机、继电器控制为主或以理论研究为主,很多先进算法在电石炉工业现场没有得到具体的应用或实施,而常规控制方案难以达到理想控制效果,并且因电石炉系统无具体控制模型,各种算法在实际的应用中控制参数的选取以实验法为主。本文针对电石炉控制系统参考文献中所研究的算法和结果,结合实际工程项目分别采用改进型 PID 控制和模糊控制策略,此外在电极模糊控制系统中本文提出将模糊控制算法与 PLC 相结合,设计和编程实现离线创建模糊控制表和在线查表控制功能,最终将控制系统投入实际应用,并获得理想控制效果。

### 3. 电石工业的发展前景

70 年代后期到 90 年代初,随着石油化工的发展,西方国家的有机合成工业原料路线由电石乙炔转变到石油乙炔,国际电石行业处于低谷,技术和设备的研究也处于停滞和萎缩状态。但 90 年代后期,由于国际原油价格的上涨,乙炔的生产转向以电石为原料,使得电石行业得到迅速发展。目前,国际上电石市场看好,电石的需求量与日俱增,国内 PVC 产品应用领域在逐渐拓展,这就给国内外电石行业提供了极大的市场空间<sup>[5]</sup>。

目前我国电石行业产能过剩、技术装备水平低、结构不合理、污染严重等问题仍然没有得到根本解决,如何将粗放型的电石工业通过技术更新、设备优化,逐步改造成集约型工业是我国现有电石工业改变落后面貌、提高技术经济效益的关键。改善目前落后生产技术的根本措施应从工艺入手,改善电石生产设备、提高自动化水平以及淘汰高污染高能耗的电石生产企业和设备。

## 1.3 项目背景与研究意义

针对电石炉项目提出的具体设计要求,以节能降耗、降低人工劳动强度为目标,本课题围绕电石炉系统的控制部分展开研究和设计。以下就本课题的项目背景和研究意义进行具体的介绍和说明。

### 1. 项目背景

我国电石生产设备整体技术水平较低,整个生产过程需借助人工进行手动操作,各项电气参数均要通过观察现场仪表才可获得,由于人工操作缺乏规范性,电石产品的质量和效率得不到有效保障。目前继电器电路被广泛的采用于的电石炉控制系统中,由于继电器系统对生产工艺变化的适应性差,使得控制系统存在可靠性差、诊断与排除故障非常困难等缺陷。

鉴于人工操作和继电器系统存在的种种问题,本课题以山西省襄垣县某新建中小型电石炉项目为研究背景,根据其生产工艺和现场设备,选取西门子 PLC、工控机及现场仪表等设备来设计电石炉控制系统。该电石炉项目的设计要求包括:各项工艺参数显示、

电极升降控制、电极压放控制、电能累计以及报警保护等。针对该项目内容，利用 PLC 硬件和 WinCC 监控软件相结合设计实现该电石炉系统各功能要求，针对电极升降系统中三相电流存在灵敏度高、调节困难等问题，分别研究和采用了改进型 PID 控制和模糊控制的两种控制方案。

## 2. 研究意义

该项目结合先进生产工艺和自动化控制设备，研究电石炉相关工艺参数和运行控制模式。采用计算机监控系统取代人工经验操作，结合设计工艺数据和控制参数，合理设计计算控制系统的软硬件，并达到规范生产过程、提高自动化水平的设计效果。

电石炉控制系统投入运行后，可视化的计算机操作界面和报警保护功能使人员劳动强度降低，并能实时有效的掌握现场设备运行情况，从而提高生产的安全性和可靠性。电极自动压放功能的实现，减少了石墨电极的损耗和压放的次数。另外模糊控制算法在电极升降系统中的应用，实现了电极的三相平衡控制，减少电极软断次数，降低电能损耗，节省了设备维修费用，并且提高了产品产量和质量。在项目实施的一年时间内，该电石炉工作电压值 35KV、电流值 250~300A、功率因数值 0.7~0.8，日耗电量 4.5 万千瓦时，电石年产量约 4 万吨左右，模糊控制算法的应用提高了三相电极的平衡和短路电弧产热率，电石生产年耗电量相比同类型电石炉节省约 25 万千瓦时左右。本课题的研究和实施对提高电石生产效率、降低能耗有着一定的作用和意义。

## 1.4 研究内容和章节安排

本文从电石炉设备和工艺要求出发，针对传统电石炉控制系统存在可靠性差、三相电流平衡难以调节等问题，根据项目提出的电极升降控制、电极压放控制、参数显示和报警保护等需求，设计实现了一种基于 PLC 的电石炉控制系统。针对电石炉系统中的电极升降控制部位，主要研究了改进型 PID 控制和模糊控制方案。

本文的主要研究内容包括：

- (1) 研究电石炉的生产原理、工艺流程，详细介绍电石炉的主要设备。
- (2) 设计电石炉控制系统，研究该系统的硬件选型和安装、下位机 PLC 的软件设计和编程以及上位机 WinCC 软件的监控画面设计。
- (3) 研究电极升降控制系统中的改进型 PID 控制策略，并提出脉冲控制器设计方法。
- (4) 研究电极升降控制系统中的模糊控制算法，设计模糊控制器结构，并利用 PLC 创建模糊控制表。
- (5) 对电极控制系统中所提出的两种控制策略的 PLC 程序设计、调试和实现过程分别进行研究和设计，并分析两种控制策略的实际应用效果。

根据以上研究内容，本文内容共分为六章，具体章节安排如下：

第一章：绪论。详细介绍了电石工业的国内外现状和发展前景，同时着重点叙述了

本课题的项目背景、研究意义以及论文的主要研究内容和章节结构。

**第二章：电石炉生产工艺及设备。**主要阐述了电石生产原理，对半密闭型电石炉的电石生产工艺流程以及相关设备进行了研究和描述。

**第三章：电石炉控制系统的设计。**对电石炉控制系统进行设计和规划，并介绍了该系统所采用的 PLC、仪表、上位机等硬件的选型和安装实施工作。最后基于所配置的硬件环境，利用 STEP 7 和 WinCC 软件实现了电石炉的参数显示、电极压放控制、功率累计等功能。

**第四章：改进型 PID 电极升降控制系统。**本章重点论述了电极升降系统中改进型 PID 控制算法和脉冲调节器的研究和设计方法，并对 PLC 和上位机软件的设计和编程以及电极自动升降控制的实际运行状态进行了详细的介绍和说明。

**第五章：基于模糊控制的电极升降系统。**重点阐述电极升降控制系统中模糊控制器结构的研究和设计，提出了 PLC 离线创建模糊控制表的设计方法，并对模糊控制系统的 PLC 程序设计、调试和实际应用进行了详细的描述和说明。

**第六章：总结与展望。**对全文的工作进行总结并给出未来工作的展望。

## 2 电石炉生产工艺及设备

电石俗称卡石，其化学名称叫碳化钙。碳化钙的分子式是  $CaC_2$ ，分子量为 64.10。其工业品是灰色、黄褐色或黑色固体，含碳化钙较高的呈紫色。通常所说的电石是指工业碳化钙，它是由生石灰和焦炭放在电炉中加热到  $2000^{\circ}C$  生成的。电石中除含大部分碳化钙外，还含有少部分其它杂质。

电石是有机合成工业的重要基本原料，利用电石为原料可以合成一系列的有机化合物，为工业、农业、医药提供原料。以电石乙炔为原料可制取乙烯、氯丁橡胶、氰氨化钙、乙酸、三氯乙烯等，电石也可做钢铁的脱硫剂和用于金属的切割和焊接<sup>[1]</sup>。

### 2.1 电石炉生产原理<sup>[20]</sup>

#### 2.1.1 碳化钙的反应机理

电石是石灰与碳素材料在电阻电弧炉中制成的，在工业生产过程中，石灰与碳素材料冶炼生成碳化钙是通过两种方式完成的：

第一种方式：

氧化钙与碳在高温下首先发生下列反应：



钙蒸汽同固态碳又发生如下反应：



反应为双变量系统，气体中存在有气态  $Ca$  和  $CO$  两种气体，反应状态不仅决定于温度，同时决定于气体中  $Ca$  或  $CO$  二者间任意一个压力值。只有在  $Ca$  蒸汽压力较高，而  $CO$  压力较低的情况下， $CaC_2$  才可能在较低温度下生成。

第二种方式：

随着物料不断下移，温度增高，当达到与其成份相适应的温度时，石灰表层生成的碳化钙与石灰物料迅速共熔成含石灰成份较高的  $CaC_2$  和  $CaO$  熔融物，当  $CaC_2$  含量约为 20%，温度在  $2000^{\circ}C$  左右时，发生如下反应：



伴随沸腾现象的发生，反应急剧进行，熔融体中  $CaC_2$  成份迅速增加，形成电炉中电极下端的反应区，在此区域内，根据原料配比完成其最终反应， $CaC_2$  流至炉底而被释放。

整个反应阶段生成电石所需的热量，由电极产生的电弧与电流通过炉料产生的电阻

供给。

### 2.1.2 电石炉电气特性

电石炉的电能是由变压器通过炉子的短网向电炉输送的，因此在整个网络中存在有变压器及短网的阻抗，影响着电石炉的特性。如图 2.1.1 表示电石炉的等效电路图：

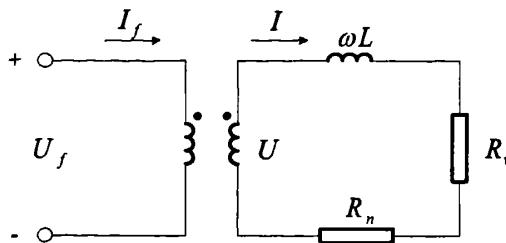


图 2.1.1 电石炉等效电路图

其中：  $U_f$  ——原边电压；  $I_f$  ——原边电流；  $U$  ——副边电压；  $I$  ——副边电流；  $\omega L$  ——总感抗；  $R_v$  ——设备的电阻；  $R_n$  ——炉料和熔体的电阻。

$$\text{副边电流: } I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} = \frac{U}{\sqrt{(R_v + R_n)^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\text{副边视在功率: } P = U \times I$$

$$\text{炉料和熔体总功率: } P_n = I^2 \times R_n$$

$$\text{电路电阻总功率: } P_r = I^2 \times (R_v + R_n)$$

$$\text{效率: } \eta = \frac{P_n}{P_r} = \frac{I^2 R_n}{I^2 R} = \frac{R_n}{R} = \frac{R_n}{R_v + R_n}$$

### 2.1.3 电石炉中的电热过程

由于电石炉中炉料及熔体的高电阻性，电极的工作部分深入到料层中，在电极端头与熔体间形成气体空间的电弧区，使电石炉具有电阻电弧炉的特性。

电能在电石炉内根据焦耳楞次定律转化为热能，当电流  $I$  通过电弧，炉料及熔体，且其电阻为  $R$  时，则在一定时间  $t$  内，供给电石炉的电能为：

$$Q = I^2 \times R \times t \times 10^{-3} \text{ KWh} \quad (2.1.4)$$

电热当量为：  $1 \text{ KWh} = 860 \text{ 千卡}$ ，则：

$$Q = 860 \times I^2 \times R \times t \times 10^{-3} \text{ 千卡} \quad (2.1.5)$$

根据欧姆定律：  $U = I \times R$

又可表示为：

$$Q = 860 \times U \times I \times t \times 10^{-3} \text{ 千卡} \quad (2.1.6)$$

一般情况下,释放于电弧中的能量约为释放于电石炉中总能量的40%,释放于炉料中的能量较多,而释放于融体中的能量则为释放于电石炉中总能量的20%。

## 2.2 电石炉生产工艺及设备

电石炉型式主要分为三种:开放型、半密闭型和全密闭型。开放型电石炉只有用于电石反应用的炉体而没有炉盖,这种电石炉的炉料表面温度高、灰尘多且环境恶劣。半密闭炉是在开放型炉的基础上加上一个集气罩,把炉内产生的一氧化碳抽出一部分,另一部分仍在料面燃烧。而密闭型炉是二十世纪内很多国家推广的环保型电石炉,它诞生于上世纪四十年代末期,是在开放式电石炉基础上加上一个炉盖,将炉内产生的一氧化碳炉气用抽气设备抽出,并将炉气加以净化处理。

由于炉子的构造结构不同,往往工艺流程和相关设备也各有差异,图2.2.1所示为山西某半密闭型电石炉电石生产流程。

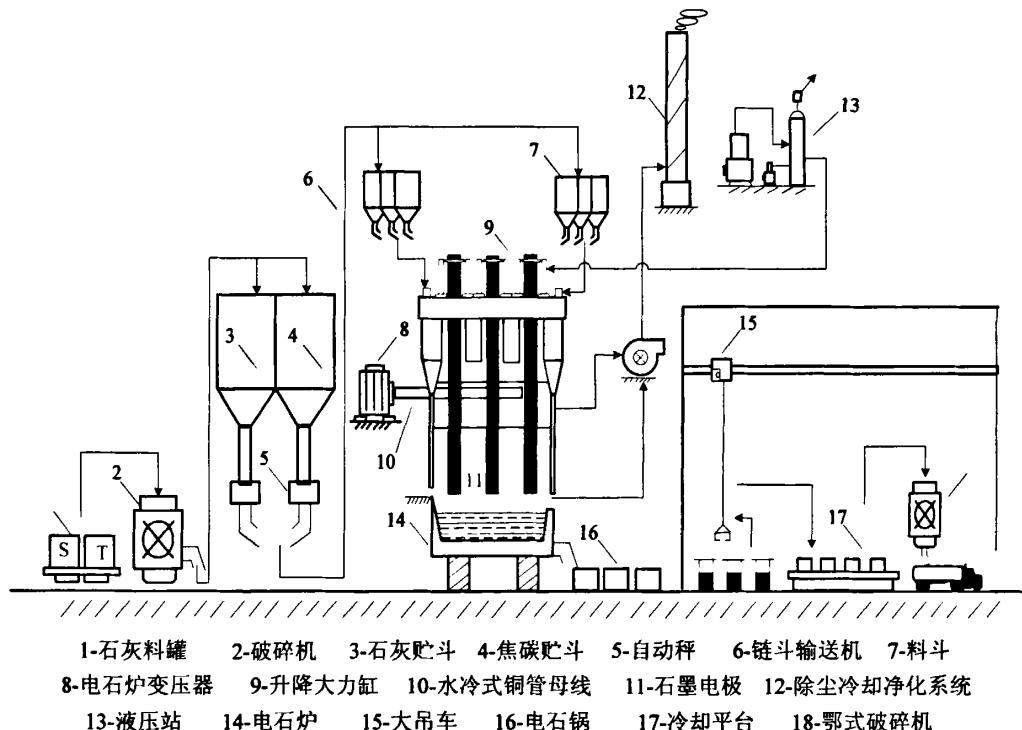


图2.2.1 山西某电石炉生产流程图

在该电石生产系统中,首先将符合电石生产要求的生石灰和焦炭经破碎后送入贮斗,当配料系统自动完成两种原料的称重及配比后,炉料由链斗输送机送入炉顶料斗向电石炉内投料。35KV高压经电石炉变压器给三相石墨电极供电,电极压放和升降控制均由中控室电控系统完成。电石生成后经冷却和破碎后进行贮藏或销售处理。

### 2.2.1 电石炉生产工艺流程<sup>[21]</sup>

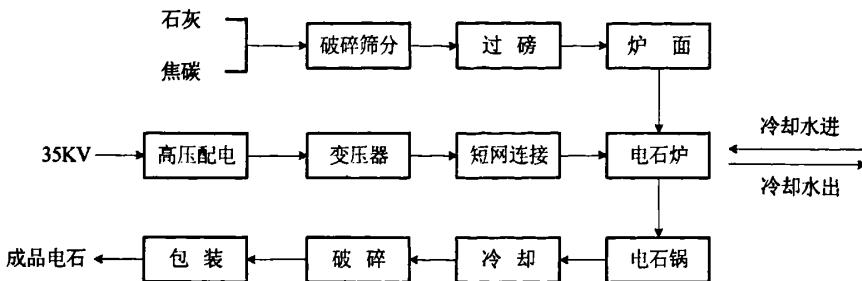


图 2.2.2 电石炉生产工艺流程图

如图所示，电石炉的工艺流程一般为：首先把符合电石生产需求的石灰和焦炭按规定的配比进行配料，然后用斗式提升机将炉料送至电石炉炉顶料仓，经过料管向电炉内加料，炉料在电炉内经过电极电弧垫和炉料的电阻热反应生成电石，当电石定时出炉，放至电石锅内，经冷却后，破碎成一定规格要求的粒度，即得到成品电石。

#### 1. 配料、上料和炉顶布料

合格的原料（石灰石、焦炭）经加工车间经计量、配料后，由斗式提升机送入电炉车间料仓内，通过炉顶布料设施、固定胶带输送机和环形布料机将料送入炉顶环形料仓。炉顶布料设施按需要把炉料布入料仓，由电炉加料管分批加入电炉内。

#### 2. 电石生产

半封闭电石炉是由炉体、炉盖、电极把持器、电极压放和电极升降装置等组成的，是生产电石的主体设备。电能由变压器和导电系统经石墨电极输入炉内，石灰和碳素原料在电阻电弧产生的高温（2000°C~2200°C）下转变成电石，并放出一氧化碳气体，生成的电石由出炉口排出，用烧穿器打开炉口，熔融电石流到冷却小车上的电石锅内。出炉口设有挡屏和电弧打眼架，出炉口的上方设有排烟罩，用通风机抽出出炉时产生的烟气。

#### 3. 电石冷却、破碎及包装

熔融电石在电石锅内用顶车机拉至走廊或包装间进行冷却，电石凝固后，用桥式吊车和单抱钳将电石砣吊出，放在铸铁地面上冷却，冷却到适当程度后将电石破碎到合格粒度，然后分等极进行包装，送入成品库。

### 2.2.2 电石炉的主要设备<sup>[1][22][23]</sup>

电石炉设备主要分为两大部分，炉体设备和热发生设备。炉体设备包括炉壁、炉膛、炉盖以及冷却系统等。热发生设备包括变压器、短网、把持器、导电板、电极等。

#### 1. 电石炉体

电石炉体是生产电石的主要设备。在电石炉内由于电弧发出的高温使炉料熔化相互反应而生成电石。由于反应温度高达 2000°C 以上，这样高的温度，一般耐火材料是难

以承受的，所以炉体的容积必须大于反应的空间，也就是说反应区与电石炉体之间留存一层炉料，用以保护炉体。炉体的形状很多，有圆形的、椭圆形的、方形的和长方形的。由热力学的观点来看，以圆形较为有利。实际上，炉体形状的选择取决于电极位置的布置和一氧化碳抽取设备的安装位置。现今的电石炉大多数都采用圆形炉，采用其它形状的是极少数。

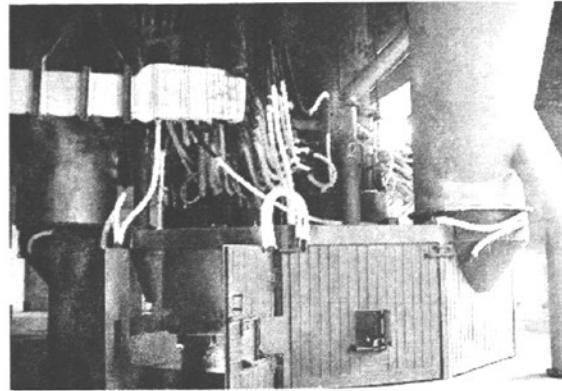


图 2.2.3 山西某电石炉体实物图

上图为山西某 12000KVA 半密闭型电石炉炉体实物图，炉壳采用圆柱造型。目前国内所用炉壳的结构形式有两种：一种是圆柱形壳，大多数工厂都采用这种结构；另一种是倒圆锥形炉壳，锥角为 7 度。这种形式的炉壳在最近几年我国才开始在大容量密闭电石炉上采用。

铁壳侧有竖的加强钢筋 24 个，横的加强钢筋 4 个，这样有利于增加电石炉壳的强度，使其保持圆形，不致有大的变形。在距中心 1 米的两个对称点上有一个铜棒和一个钢管，钢管是测量电极到炉底电压用的电线保护管，铜棒是使炉壳与大地接通，为测定电极对地电压用的。在炉体侧壁上有三个出炉口，在每两个出炉口之间有一个烧穿接点，与炉底碳砖接触，烧穿接点的钢管穿过炉侧壁各处，均有消磁和绝缘材料，防止漏电和电能损失。

在炉子内部，炉底有 6 层耐火砖，可使炉内生成的密度大的熔融物不易渗入碳砖层，延长炉底寿命。在炉壁自炉壳向里铺有一层耐火粘土，作为保温缓冲层，分别砌普通耐火砖和大异形耐火砖。

## 2. 电极

电极也是电石炉的重要设备之一。它既能把强大的电流导入电极端头，在炉内进行电弧燃烧而把电能转换成热能，又能延续电极和调节电极的烧结速度，使电极连续不断地进行工作。中小型电石炉电极由把持筒、电极把持器、升降装置、压放装置以及水冷系统组成。图 2.2.4 所示为电极实物图。

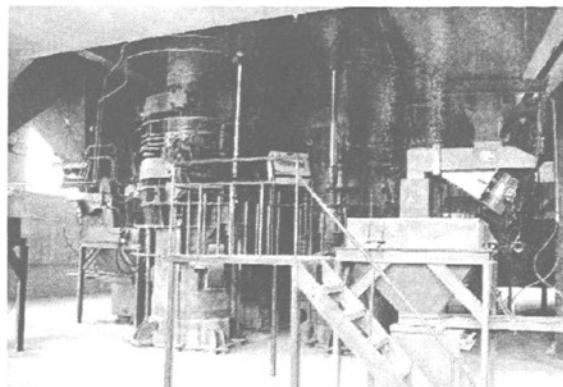


图 2.2.4 山西某电石炉电极实物图

把持筒又称电极外筒，用来悬挂电极及电极把持器，并能在操作时使电极升降。电极把持器是由两个半环顶紧的螺栓及螺帽和导电颤板所组成。有的密闭炉的把持器是采用油压装置，导电铜颤板不采用顶紧环，而是一个呈锥形内圆的套。

电极升降装置包括机动式和液压式电极升降装置，对于中大型电石炉系统一般采用较高压力的液体作为电极升降装置的动力，该电极液压升降系统包括泵系统、阀系统以及升降液压油缸等，油缸的进油、出油由继电器和电磁阀控制。

由于自烧电极在生产过程中不断地消耗，因此要定时压放电极满足电极工作长度。电极压放装置包括上摩擦环、上摩擦片、升降油缸活塞、下摩擦环、下摩擦片、锥环、下摩擦环油缸活塞、上摩擦环油缸活塞等，该压放装置一般由液压系统控制动作。

电极把持器所工作的地区平均温度在 500°C 左右，在强烈高温情况下，也可达到 900°C -1000°C 以上，因此电极把持器部分必须采用冷却系统。

### 3. 电石炉变压器及短网

变压器是保证电石生产的关键因素，它将很高的电压改变为适应电石生产工艺要求的工作电压，如可将 6600V~35000V 的高压降到 65V~250V 的低压，甚至可将 110KV 一次电压变成电石炉二次电压，以满足电石生产需要。

电石炉变压器的功率是根据炉子容量的大小来决定的，必须保证电石炉使用低电压时，变压器二次线圈产生相当大的电流，因此它是一种特殊的变压器。由于变压器转换装置不同，因此改变二次电压的方式（单相或三相模式）也有所不同。各种炉子根据电压调节需要，变压器的可调级有多有少，如 16500KV 全密闭炉变压器为 25 级，每级压差 2.5V，但三相间级数不得超过 10 级。一次侧可方便地改变走线方式，根据需要决定采用“ $\Delta$ ”或“Y”连接。

电石炉短网是变压器二次侧（低压侧）联结电极把持器的导电母线，它由固定部分与移动部分组成，移动部分用以保证电极的上升和下降。图 2.2.5 所示为电石炉短网线路图。

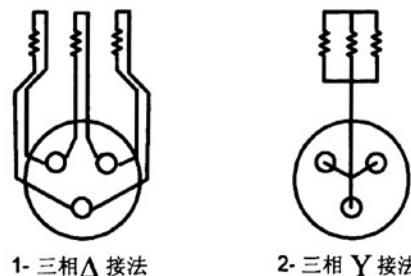


图 2.2.5 电石炉短网线路图

从变压器到电石炉之间电流的输送依靠铜或铝质母线来完成。因输送是大电流，所以需要截面积很大的母线。如短网由钢管组成，当电流通过时产生的热量和炉子的辐射热的正常温度不超过  $80^{\circ}\text{C}$ ，可以用水冷却带走热量。如果短网布置不当，将会影响电石炉的功率因数及降低电石炉的电效率，同时亦会产生静相的功率转移现象。

#### 4. 炉气净化除尘系统

电石炉在生产电石时，伴随有大量一氧化碳气体生成，对高浓度一氧化碳的炉气必须加以回收利用，但由于电石炉气含有大量的烟尘和刺激性气味，因此对其循环利用前要加以净化处理。

炉气除尘系统的主要设备就是除尘器，根据工艺要求选择一些附属设备如：除尘风机、风机入口调节挡板、脉冲布袋除尘器、百叶式预除尘器、高温烟气冷却器、振动器、脉冲控制仪、离线阀、贮气罐和烟囱等。



图 2.2.6 山西某电石炉除尘系统实物图

图 2.2.6 所示为山西某电石炉除尘系统，该系统利用除尘风机产生的吸力将高温烟气送入管式冷却器进行冷却。来自振动给料器、旋转密封阀、皮带转运点以及电石仓等的低温烟气进入百叶式预除尘器，除去大颗粒的粉尘。这两股烟气会合后进入脉冲布袋除尘器，除尘完毕后经由风机从烟囱进行排放。从外界送来的压缩空气经储气罐后，依次提供给布袋除尘器反吹和仪表用风。在管式冷却器、百叶式预除尘器以及脉冲布袋除尘器沉积下来的粉尘，经过格式排灰阀到刮板机会合后外送。

### 2.3 本章小结

本章介绍了电石基本用途及电石炉相关生产原理，同时根据现有电石炉工艺对电石生产的主要设备（如电石炉体、电极、变压器和短网以及净化系统等）进行详细描述和说明。基于对电石炉生产工艺和设备的了解和掌握，之后将对电石炉控制系统进行规划和设计。

### 3 电石炉控制系统的设计

前文已对电石炉的工艺和设备进行了详细的研究和说明，本章将根据山西电石炉工艺设备和项目的具体需求，对其控制系统部分进行设计，为该系统选取相应的软件和硬件，同时结合可编程逻辑控制器（PLC）和上位机监控软件（WinCC）实现电石炉控制系统中的电极压放控制、报警保护及参数显示等功能。

#### 3.1 电石炉控制系统设计

山西某电石炉采用半密闭炉型，电极控制以液压为动力。根据生产工艺和设备，将整个系统分为控制系统、配料系统、净化系统、供电系统等四个主要部分。如图 3.1.1 所示，控制系统主要实现三相电极的压放和升降控制；配料系统完成对石灰、焦炭等生产原料称重配比；净化系统实现电石炉尾气的回收净化等功能。

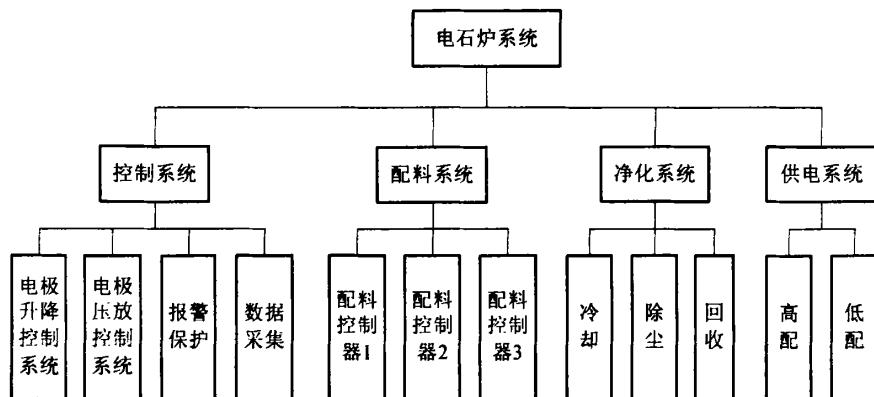


图 3.1.1 山西某电石炉系统结构图

本课题以该电石炉控制系统为开发和设计背景，并实现电极的升降和压放控制、报警保护以及各工艺参数的监控等功能，以下将对该控制系统的项目需求及具体设计加以详细的说明和论述。

##### 3.1.1 项目需求

电石炉控制系统的项目内容为：根据电石炉生产工艺，利用 PLC 和上位机监控软件相结合实现电极恒电流手自动升降控制、电极手自动压放操作以及各项性能参数的显示等各项功能。

控制系统所需监控参数包括：变压器原边、副边三相电压；变压器原边、副边三相电流；变压器副边单相电极对底电压；变压器原边功率因数、有功和无功功率、各班电量值以及电极各相比电阻值等。其中利用 PLC、传感器、变送器等自动化仪表和设备对现场各工艺参数进行采集，并在上位机进行显示和打印。

电石炉控制系统需实现功能如下：

1. 三相电极升降控制：通过控制电极的升降来调节电石炉原边电流，使之等于给定电流，且保持三相电流平衡；同时能对电极电流上限及下限紧急报警；控制参数通过计算机设定，使电石炉达到最佳运行状态。
2. 三相电极压放控制：通过人工补偿方式实现电极定时和定量的压放控制。
3. 报警保护：电极调节至极限时，三相电极还不能平衡，进行报警，电极转变为压放控制，不再进行升降调节。监测电极电流，当出现非常情况（如突然变大或突然减少）时报警。
4. 功率计算：对原边电流、电压、功率因数等参数实时采样，并在计算机上显示、存储和打印，根据系统时间累计班、日和月各项有功、无功功率及电量值。

### 3.1.2 控制系统设计

由于传统半密闭型电石炉现场环境恶劣，系统容易受高温、灰尘等诸多因素的影响，并且电极控制部分控制精度较高、系统复杂，因此采用继电器控制电路不利于系统的维护和运行。针对以上原因该电石炉系统采用西门子 S7-300 PLC 对控制系统部分进行研究和设计，同时采用 SIMATIC WinCC 上位机监控软件实现操作站与 PLC 的数据交换处理，根据项目需求电石炉控制系统结构设计如下所示：

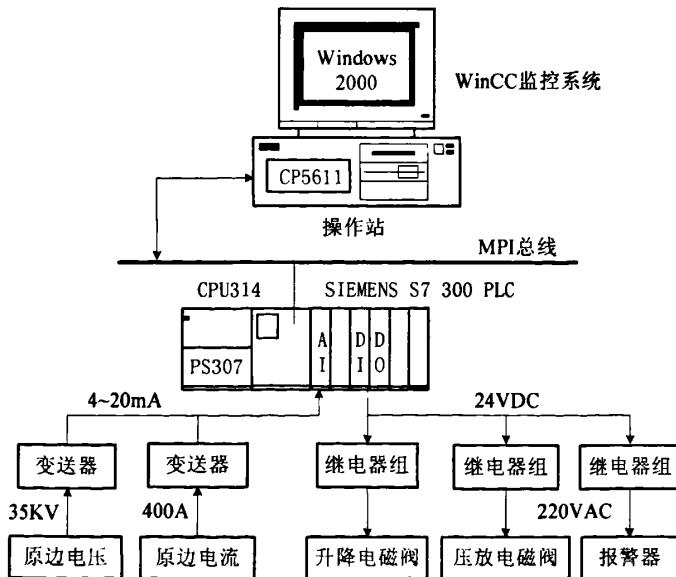


图 3.1.2 电石炉控制系统设计图

由图 3.1.2 可知，变送器将现场的原边电压、电流等参数送入 PLC 中进行运算和处理，WinCC 利用 MPI 通信实现操作站与 PLC 的数据和指令交换处理，另外 PLC 输出 24V 开关输出信号控制中间继电器从而带动现场电磁阀动作。整个电石炉控制系统基于 PLC 和 WinCC 实现数据采集显示、电极升降和压放控制以及报警保护等功能。

### 1. 数据采集显示

现场信号经变送器转化为电流信号后再输入 PLC 的 AI 模块，PLC 的 ADC 硬件电路将电流信号 A/D 转换后所得的数字量信号仍需在 PLC 中利用软件进行采样和标定处理，最后 PLC 将处理过的数据在上位机 WinCC 软件中显示。此外 PLC 根据所采集的数据进行各项功率的计算和累计处理。

### 2. 电极升降控制

三相电极升降控制系统采用恒电流控制方式，根据电石炉对象特性，设计和采用相应控制算法。如图 3.1.3 示，将采集处理后的原边电流值和电流设定值作为控制器输入，利用控制运算的输出值进行脉冲控制得到开关控制信号，最终利用 PLC 实现对电极的自动升降控制。同样操作人员也可以利用上位机 WinCC 监控软件通过 PLC 直接实现对电极的手动升降控制。

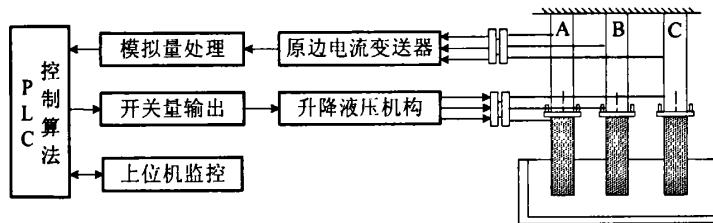


图 3.1.3 电极自动升降控制系统设计图

现场液压电磁阀的开关时间决定电极升降幅度和电极电流值的大小，因此由控制算法得到的输出值需进行脉冲调节后再由 PLC 输出开关量信号给液压执行机构。

### 3. 电极压放控制

石墨电极在生产中不断被消耗，因此为保证电极工作长度需要对电极定时进行压放控制。单相电极压放装置包括上摩擦环、立缸、下摩擦环、锥环，其均由液压阀和液压缸带动。在实际的压放控制中操作人员可以根据现场的设备情况对每个装置单独控制，也可以根据压放工艺流程进行连锁定时控制。电极压放控制系统设计根据实际需要可进行手自动控制，并利用 PLC 和 WinCC 结合实现对各液压阀的开关和时序控制。

### 4. 系统报警保护

报警系统利用 PLC、WinCC、报警器相结合实现对现场运行状态的实时监控，如电极升降达到上下限位或电流达到最高限制值时，PLC 会自动执行保护程序，停止一切自动操作，同时将系统运行故障利用 WinCC 进行可视化显示，操作人员可以根据报警器提示及具体情况做出相应判断和处理。

由于 PLC 和 WinCC 存在编程容易、操作方便、设计和安装简单等优越性，因此该系统以 PLC 为控制器、WinCC 监控软件为操作工具来实现对电极的升降、压放、报警保护等各控制功能。

## 3.2 硬件选型与安装

根据上节所述控制系统的设计，电石炉控制系统的硬件需求分为下位机（PLC）、上位机、现场仪表三个部分，其中下位机 PLC 硬件按照系统控制要求进行配置，上位机根据系统性能要求配置相应工控机和打印机，仪表型号根据实际工艺参数量程范围进行选择。

### 3.2.1 PLC 及相关硬件简介

PLC（Programmable Logic Controller），即可编程逻辑控制器，于 1969 年由美国数字设备公司（DEC）基于集成电路和电子技术的控制装置研制出来，第一代可编程序控制器简称 PC，随着技术的发展和成熟可编程序控制器命名为 PLC。

PLC 是微机技术和继电器常规控制概念相结合的产物，它的组成部分与一般的微机装置类似，它主要由中央处理单元、输入接口、输出接口、通信接口等，其中 CPU 是 PLC 核心，I/O 部件是连接现场设备与 CPU 之间的接口电路，通信接口用于与编程器和上位机连接。对于整体式 PLC，所有部件都安装在同一机壳内；对于模块式可编程序逻辑控制器，各功能部件独立封装，各模块通过总线连接，安装在机架或导轨上<sup>[24]</sup>。

PLC 之所以高速发展，除了工业自动化的客观需要外，还有通用性强、使用方便、适应面广、可靠性高、抗干扰能力强、编程简单等特点。可编程逻辑控制器的模拟量输入接口为标准信号方式，如 1~5V, 4~20mA 等，因此需要将现场实际参数进行处理。变送器则是将非标准电信号转换为标准电信号的仪器。

变送器种类很多，总体来说就是由变送器发出一种信号来给二次仪表使二次仪表显示测量数据，它把传感器采集到的微弱的电信号放大以便转送或启动控制元件，或将传感器输入的非电量转换成电信号同时放大以便供远方测量和控制的信号源，根据需要还可将模拟量变换为数字量。一般分为温度变送器，压力变送器，液位变送器等<sup>[25]</sup>。

另外在工业控制现场计算机是必不可少的设备，常用到工业控制计算机，即工控机，英文简称 IPC，全称 Industrial Personal Computer。工控机通俗的说就是专门为工业现场而设计的计算机，而工业现场一般具有强烈的振动，灰尘特别多，另有很高的电磁场力干扰等特点，且一般工厂均是连续作业即一年中一般没有休息。因此，工控机具有较高的防磁、防尘、防冲击、抗干扰能力、连续长时间工作等特点<sup>[26]</sup>。

在控制系统中，通常将 PLC 称为下位机，IPC 称为上位机。将 PLC、IPC 与现场仪表等设备相结合，就形成了基本的控制系统硬件配置。下面将根据电石炉控制系统对硬件的具体选型和安装配置问题加以说明。

### 3.2.2 控制系统硬件选型

#### 1. PLC 选型

该系统选用西门子 S7-300 PLC 相关型号，根据设计需求，所要监控制模拟量参数 13 个，开关量输入通道 12 个，开关量输出通道 25 个，上位机和 PLC 选择 MPI 通讯方式。PLC 硬件配置见表 3.2.1 示，其中 CP5611 通讯卡为 PC 插卡式，需安装在上位机中才可实现与 PLC 的 MPI 通信。

表 3.2.1 PLC 配置清单

序号	名称	型号	数量
1	CP5611 通讯卡	6GK1561-1AA01	1
2	通讯电缆	6ES7 901-0BF00-0AA0	1
3	300 机架/482mm	6ES7 390-1AE80-0AA0	1
4	PS 307 电源	6ES7 307-1EA00-0AA0	1
5	CPU314	6ES7 314-1AG13-0AB0	1
6	MMC 存贮卡/64K	6ES7 953-8LF11-0AA0	1
7	SM331 / AI8	6ES7 331-7KF02-0AB0	2
8	SM321 / DI16	6ES7 321-1BH02-0AA0	1
9	SM322 / DO32	6ES7 322-1BL00-0AA0	1
10	前连接器(20针)	6ES7 392-1AJ00-0AA0	3
11	前连接器(40针)	6ES7 392-1AM00-0AA0	1

在硬件安装时，由于现场模拟量为 4~20mA 电流信号，首先需调换 SM331 模块量程块将其设置在“C”位置，然后依次将各模块安装在机架上，最后安装 PS 电源模块与 CPU 模块的电源连接线、插入 MMC 卡以及在各 AI、DI、DO 模块上安装相应型号的前连接器。PLC 具体安装结构如下图所示。

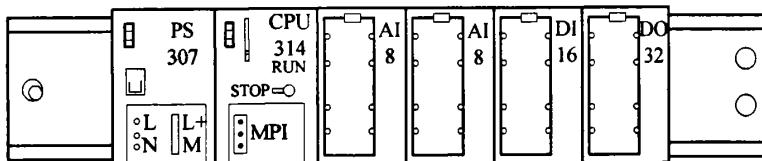


图 3.2.1 PLC 结构图

当模块安装完成后，在现场接线时，考虑到现场对模拟量信号的干扰，需要将 AI 模块的模拟量的负信号端与 M 接线端进行短接处理。

## 2. 仪表和上位机选型

该系统选用许继测控生产的变送器，仪表符合通用技术标准，如对输出负载恒流制输出电压为 10V（电流输出规格），最大电压 15V；恒压制输出驱动电流额定 2mA，最大 5mA 输出等。中间继电器为 24V 直流型。具体仪表配置见表 3.2.2 所示。

表 3.2.2 仪表配置清单

序号	名称	型号	数量
1	原边交流电压变送器	JPVS-V1-F1-P1-O3	3
2	副边交流电压变送器	JPVS-V2-F1-P1-O3	3
3	对底电压变送器	JPV-V2-F1-P1-O3	3
4	原边交流电流变送器	JPAS-A2-F1-P1-O3	3
5	功率因数变送器	JPPF-V1-A2-F1-P1-O3	1
6	报警器		1
7	继电器		25
8	工控机	研华工控机	1
9	UPS电源	1000KVA,山特,30分钟	1

在给现场变送器和 PLC 提供 220V 工作电源时, 由于实际工业电压在 250V 左右, 当工厂停送电时出现的电压峰值往往容易损坏变送器或 PLC 等设备, 因此为确保设备安全, PLC、变送器、报警器等应由 UPS 电源统一供电。

### 3.2.3 控制系统的硬件安装

该电石炉电气控制部分主要由供电柜、继电器柜和操作台组成。控制设备主要分布在主控制室内。供电柜负责短网的电源切换以及液压站、PLC 柜等低压配电系统。操作台上主要安放工控机, 同时操作人员可以利用控制按钮和转换开关对电极进行手动升降、压放以及急停控制, 另外自动配料系统仪表安装在操作台上方便人员对电石炉配料和投料。继电器柜内安装 PLC、变送器以及中间继电器, 主要负责信号的采集、数据处理以及控制动作的输出, 操作指令均由柜内 PLC 控制输出到工业现场。继电器柜电源、现场信号以及通讯电缆统一由柜内端子与外连接实现。图 3.2.2、3.2.3 所示分别为现场继电器柜和操作台硬件安装图。

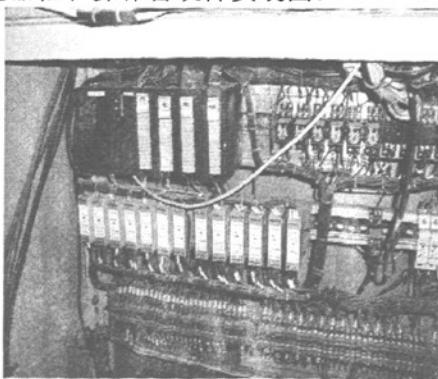


图 3.2.2 继电器柜硬件安装图

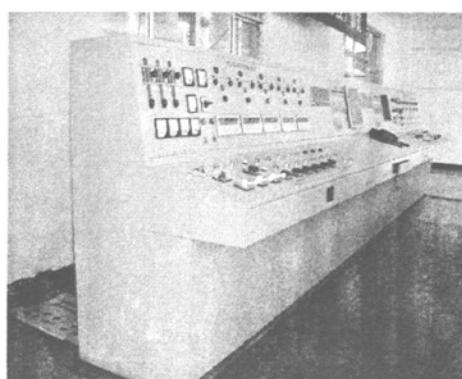


图 3.2.3 操作台硬件安装图

由于现场高温的影响, 在电器柜内和操作室均安装了散热装置, 以便减少因现场高

温环境引起的设备故障现象。

### 3.3 软件设计与实现

硬件的配置和安装完成后，根据系统设计需利用 PLC 的 STEP7 软件编程实现对电极升降、压放系统控制，同时借助上位机 WinCC 图形化监控软件实现对现场工艺参数和控制状态的实时监控和数据存储显示。由于电石炉控制系统是基于西门子 S7-300 PLC 设计的，因此该系统利用 STEP 7 软件实现对下位机 PLC 的编程设计，同时上位机采用 WinCC 软件来完成对现场的监控处理。

#### 3.3.1 STEP 7 和 WinCC 软件简介

STEP 7 是支持西门子 SIMATIC PLC 和编程的标准软件包，它不仅从不同层次充分支持合理的程序结构设计，而且也简化了结构设计的复杂程度。

对于一般系统，STEP 7 软件使用前我们需对程序结构进行设计，然后在 STEP 7 中确定相关数据结构，之后在程序和数据结构基础上进行编程，最终进行程序调试。STEP 7 软件的使用包括：授权安装、项目创建、硬件组态、网络设置、程序设计、调试下载以及诊断和运行等步骤<sup>[27]</sup>。

STEP 7 常见编程语言有 LAD (梯形图)、STL (语句表) 等，在程序结构设计中，根据程序要求，可选择组织块 (OB)、功能块 (FB) 或功能 (FC) 等三种类型的逻辑块，而数据块 DB 则用来存储执行用户程序所需的数据。

项目中常用组织块有 OB1、OB35、OB100。OB1 为主程序循环，是重要的组织块，当 OB1 运行后，操作系统将过程映像输出寄存器写到外设模块中，即 OB1 是程序在硬件电路上运行的软件接口。利用 OB35 可以控制程序的执行和中断周期。OB100 为启动模块，即当 CPU 从 STOP 到 RUN 状态时启动，利用 OB100 可以对一些参数和操作进行开机初始化设定<sup>[28]</sup>。

PLC 常用功能编程模块包括 FB、FC。FB 是一种“带记忆”的逻辑功能块，FC 则是普通编程逻辑功能块，系统在调用 FB 模块时将给 FB 分配相应背景 DB 数据块。

WinCC (Windows Control Center) 是 HMI/SCADA 人机操作软件中的一种，是基于 Microsoft Windows 2000/XP 操作系统的组态软件。WinCC 在数据处理、通讯、监控界面设计、编程语言等方面给用户提供了简单、方便的使用功能<sup>[29]</sup>。

对于一个简单项目，WinCC 软件使用步骤为：1. 安装及授权；2. 建立项目；3. 安装通讯驱动；4. 定义变量；5. 建立和编辑监控画面；6. 激活和运行项目。对于复杂的项目设计，一般要用到用户归档、脚本编程、SQL 数据库等软件功能块。

在工业控制中，西门子 S7 PLC 一般与 WinCC 相结合，现场数据和控制信号经 PLC 运算处理后，可以利用 WinCC 进行状态监控，这样既方便工作人员远程操作又可以较

好的掌握现场运行情况。

### 3.3.2 下位机软件设计与实现

#### 3.3.2.1 组态和通讯设置

在进行 PLC 的程序设计之前, 需根据 PLC 的硬件模块型号及通讯配置通过 STEP7 软件进行硬件组态。组态的实现需根据实际硬件模块在机架上的安装位置进行相应的设置。该电石炉控制系统硬件组态设置见下图所示:



图 3.3.1 STEP 7 硬件组态图

当 STEP 7 软件完成 PLC 的项目创建和硬件组态后, 系统将基于 CP5611 通讯板卡来实现上位机 STEP 7 软件与 PLC 的 MPI 通讯, 其通讯设置画面如下图所示:

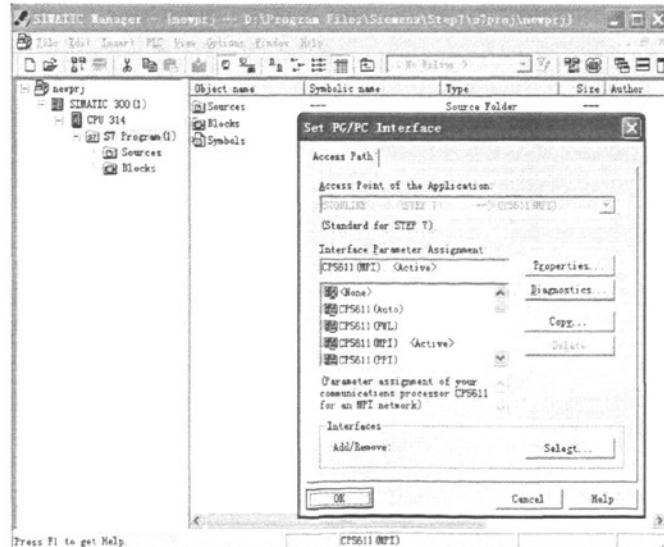


图 3.3.2 STEP 7 通讯设置图

由图 3.3.2 可知, 当 CP5611 通讯板卡插入上位机 PC 插槽中, 并安装相应驱动程序

后，在 Set PG/PC Interface 的 Interface 属性栏中才会出现 CP5611(MPI)选项。当选择并激活该选项后，利用 Diagnostics 项对通讯卡故障诊断后和对 Properties 项的正确设置后，则完成 PLC 硬件与 STEP 7 软件的通讯设置，即可将 STEP7 硬件组态和程序下载到 PLC 的 MMC 卡中。另外利用 CP5611 卡也可实现上位机 WinCC 与 PLC 的 MPI 通讯。

### 3.3.2.2 程序设计

针对电石炉控制系统的控制需求和设计内容，STEP 7 软件将基于下位机 S7-300 PLC 的硬件基础来编程实现各项功能。按照 STEP 7 软件设计步骤，在完成硬件和网络组态后，需根据控制功能来设计程序结构和系统的分配 FC、FB 以及 DB 块。

由于控制目标和数据处理较多，在编程前将各 FC 程序块和 DB 数据块进行分配如下：FC1~FC10—电极升降、压放控制；FC50~FC59—软测量；FC70~FC79—功率计算；FC80~FC89—AI、AO、DI、DO；FC100~FC120—各通用子程序；DB1~DB80、DB100~DB200—共享数据块；DB81~DB99—背景数据块；OB100—启动组织块。最后根据 FC 和 DB 块确定 PLC 程序结构，其层次结构如图 3.3.3。

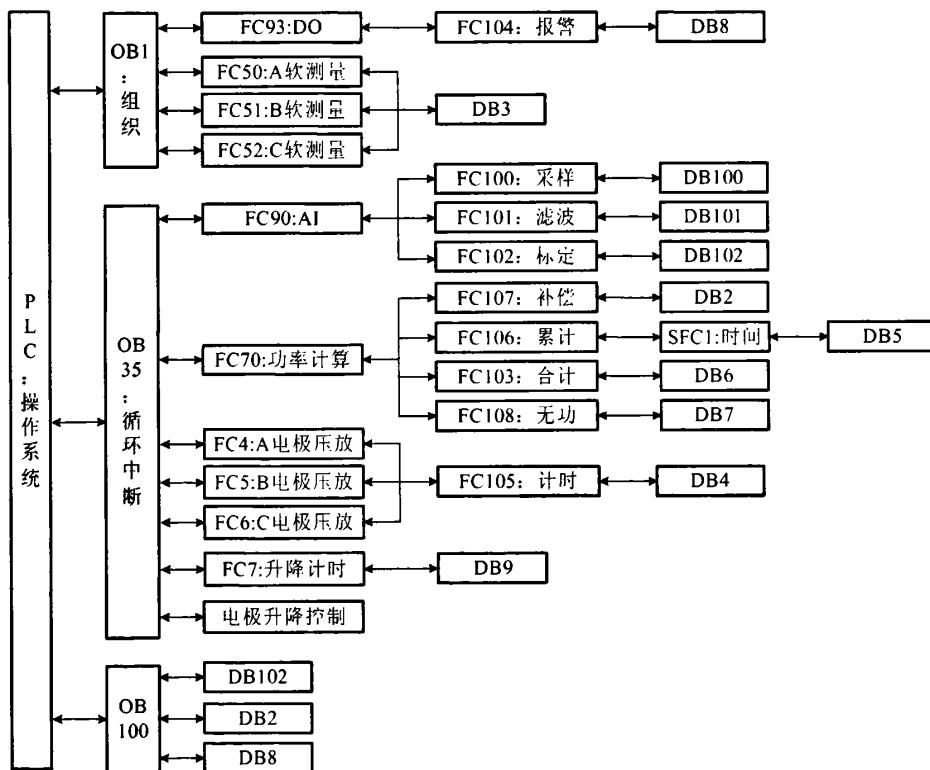


图 3.3.3 PLC 程序分层调用结构图

根据上图所示程序结构，FC90 块中程序实现数据采集和处理，FC4~FC6 块中程序完成电极手自动压放控制，FC70 块中程序对电功率进行累计和统计运算，电极的升降控制的程序结构在后面章节根据具体控制策略再做详细的设计和说明，另外根据项目要求程序将实现比电阻值的计算、报警保护、电极升降时间累计等辅助功能。

### 1. 数据处理

如图 3.3.4 所示, 现场模拟量信号经变送器转换为 4~20mA 电流信号后送入 PLC, 由于生产现场存在电磁干扰的影响, 经 PLC A/D 变换后所得到的数字量信号有一定的干扰和抖动, 因此为避免干扰信号对控制系统的影响, 需要利用软件将数字量信号进行采样存储和滤波处理, 最后为了控制的需要和参数显示的直观, 对滤波处理后的数字量信号根据仪表量程标定处理为实际工程显示值。

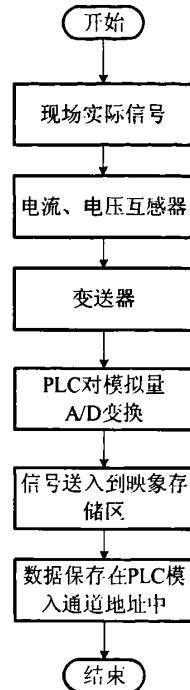


图 3.3.4 信号采集流程图

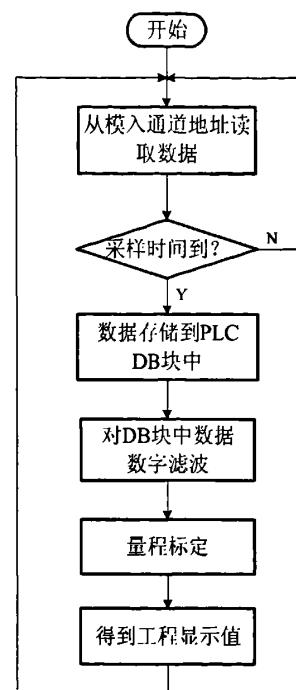


图 3.3.5 PLC 数据处理程序流程图

图 3.3.5 为 PLC 对现场采集信号的程序处理流程。在 PLC 的程序设计中, 利用 FC100 模块根据采样周期从模块通道地址 (如 PIW256) 中读取数字量信号, 在这里选取电石炉原边电流、电压以及其他参数的采样周期为 0.2s。

当采样值存储到 DB 数据块中后, FC101 对其再进行数字滤波处理, 常用滤波方法很多, 如算术平均滤波法、限幅滤波法等, 在这里选取递推平均滤波算法。该法把连续  $N$  个采样值看成一个队列, 每次采样到一个新数据放入队尾, 并扔掉原来队首的一个数据。然后把队列中  $N$  个数据进行算术平均运算, 就可以获得新的滤波结果, 其计算公式为:

$$x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

在这里根据电石炉原边电流、电压参数灵敏度, 选取滤波参数  $N=6$ 。

经滤波处理后的数字量信号根据仪表的量程利用 FC102 程序模块进行标定转换。数字量范围与输入模拟量极性有关, 对于双极性模拟量信号对应 PLC 数字量范围为 -27648~+27648, 对于单极性输入模拟量信号对应 PLC 数字量为 0~27648, 其均为线性

对应关系。对于实际的工程值利用传感器和变送器转换为标准电流、电压、电阻等模拟量信号后再输入 PLC。PLC 采样得到的单极性数据利用公式 (3.3.1) 转换为实际参数显示值。

$$pv = pv\_d \times pv\_l / 27648 + pv\_off \quad (3.3.1)$$

其中:  $pv$ ——实际工程显示值;  $pv\_d$ ——过程输入数字量;  $pv\_l$ ——仪表量程;  $pv\_off$ ——标定补偿。

## 2. 电极压放控制

电极压放控制的执行机构动作流程为: 上摩擦环打开、立缸上升、上摩擦环夹紧、下摩擦环打开、锥环松开、电极压放、下摩擦环夹紧、锥环夹紧, 其中电极压放环节, 摩擦环夹紧电极、立缸下降从而带动电极下压, 压放幅度由立缸下降时间决定。根据现场工艺和操作需要, 电极压放控制 PLC 程序设计包括手动控制和自动控制两部分。

对于手动控制, 操作人员可利用上位机 WinCC 监控软件对每个环节单独控制, 但必须按工艺要求操作, 其中电极的压放量由操作人员点动计算机操作界面内按钮的时间决定; 对于自动控制, 利用 PLC 定时器和 WinCC 软件功能, 操作人员可设定各控制环节的开关时间, 控制时序的设计如图 3.3.6 所示。在调试结束后根据摩环、锥环的机械动作灵敏度可以固定其控制时间值, 而  $t_3$  和  $t_8$  时间值可由操作人员根据压放量需求在 WinCC 上设定后将参数送入下位机 PLC 中, 再按时序和流程进行自动控制。

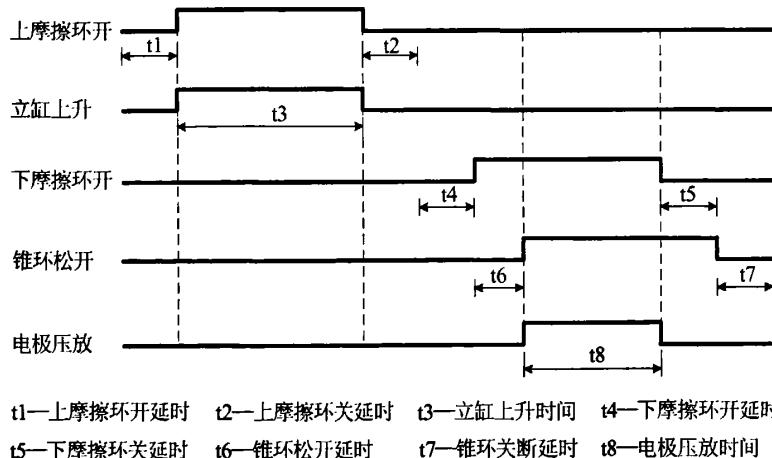


图 3.3.6 电极自动压放控制时序图

PLC 将 24V 电压信号输出给中间继电器, 利用中间继电器常开、常闭触点带动现场 220V 电磁阀线圈从而使各压放机构的液压缸动作, PLC 输出压放控制信号为开关量。另外电极压放装置由行程开关连锁保护, 以防止液压缸动作超过上下限位置而引起机械损坏。

### 3. 功率计算和电量累计

现场各模拟量信号经过 PLC 数据处理后，分别得到三相原边电流、电压、功率因数等实际参数值，然后 PLC 程序利用视在功率公式： $S = U \times I$ ，有功功率公式： $P = U \times I \times \cos \phi$ ，计算各相电极的总功、有功瞬时值。其次根据项目设计要求，利用各相功率瞬时值按班次、日、月对三相有功、总功电量分别进行累计、统计和自动转存清零处理，并最终实现各电量值在上位机 WinCC 监控系统的显示、打印等功能。具体功率统计程序流程如图 3.3.7 所示。

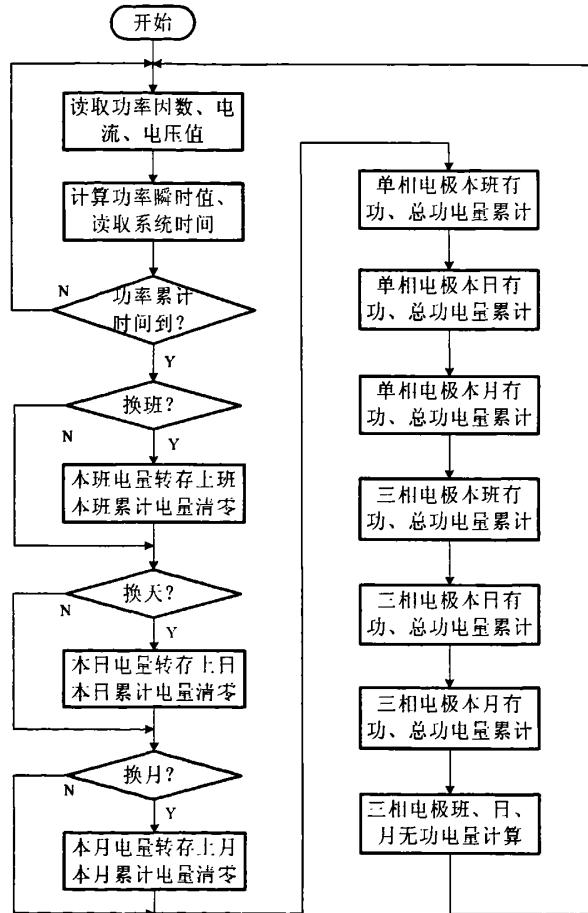


图 3.3.7 功率统计程序流程图

上图流程中，瞬时功率值的计算由 FC107 块中程序实现，各班、日、月电量的累计和自动转存、清零功能则由 FC106 块编程实现。由于系统瞬时功率实时变化，所以采用瞬时功率的采样累加法对电量进行累计，功率累计间隔时间为 1s，总功、有功电量累加公式为： $E_s = (S_1 + S_2 + \dots + S_N) / 3600$ ， $E_p = (P_1 + P_2 + \dots + P_N) / 3600$  其中  $S_N$ 、 $P_N$  为采样计算的总功和有功瞬时功率值，另外 FC106 块调用 SFC1 系统时间模块来判断换班、日、月情况。最后利用 FC103、FC108 子程序块计算三相电量合计值和无功电量值。

#### 4. 电极升降控制

电石炉电极升降是电石炉生产过程中十分重要的操作环节。它的控制好坏，直接影响电石炉的电耗与产品质量。其控制指标为电石炉的加热电流，即原边电流值。根据图3.1.3所示系统设计方法，在电极升降控制初期运行中采用改进型PID控制器，但由于控制系统灵敏度高，电流波动较大，以及参数选择困难等问题，之后采用基于人工经验的模糊控制方案。电极升降的改进型PID控制和模糊控制具体算法和程序设计将在第四章和第五章分别予以详细设计和说明。

#### 5. 其他功能

FC104块对系统进行监控报警保护，如操作人员利用WinCC设置系统报警电流上下限，当实际电流超过限制范围，PLC则使报警器工作，且使系统电极压放、升降自动控制切换为手动控制。FC7块则对每次电极升降动作时间进行累计，同时在WinCC界面上显示，这样有利于现场操作人员掌握整个电极的升降趋势和幅度。

#### 3.3.3 上位机监控系统设计与实现

电极的手自动压放、升降等控制功能必须依靠上位机监控软件来对对象进行实时监控和设置参数。根据3.3.1节中所述的WinCC使用步骤，WinCC监控系统的设计包括变量管理、通讯设置以及画面设计等步骤，以下将对其进行详细介绍。

##### 3.3.3.1 变量管理和通讯设置

如下图所示，在WinCC变量管理器中添加由STEP7程序所确定的PLC变量地址，利用MPI通讯方式即可实现PLC和WinCC的数据共享和交换处理。



图3.3.8 电石炉WinCC变量管理器

WinCC创建PLC变量地址之前，需在变量管理器中添加SIMATIC S7 Protocol Suite

通讯协议来构建 WinCC 与 PLC 的数据通讯接口。由于电石炉控制系统利用 MPI 通讯方式来实现 PLC 与 WinCC 的通讯, 因而在创建完协议后即可在 MPI 变量管理栏中创建所需监控的 PLC 变量地址和类型。最后对 WinCC 的 MPI 通讯参数进行设置, 即完成 WinCC 与 PLC 的变量和通讯处理。

### 3.3.3.2 WinCC 画面设计

该电石炉控制系统人机界面的功能设计包含: 数据的显示和记录、电极升降和压放控制、实时变量参数曲线、电量值的显示和打印、报警设置和显示、参数的设置等。鉴于软件实现的功能较多, 将功能设计分布在不同的监控画面中, 这样便于现场人员操作。其主要的功能画面设计如下:

#### 1. 电极升降控制

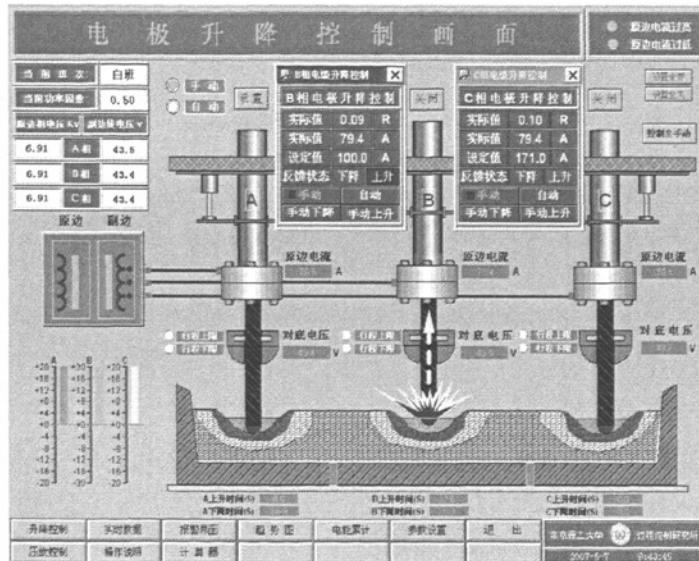


图 3.3.9 电极升降控制画面

该图中功能包括:

- 显示各工艺参数。如原边电流和电压值、电极升降时间、当前班次以及软测量的比电阻值等。
- 电极手自动升降控制。在操作子窗口中, 当操作人员设置完原边电流控制值, 选择“自动”按钮时, 利用 PLC 实现电极自动升降控制; 当选择“手动”按钮时, 点击“手动上升”或“手动下降”按钮实现电极点动升降控制。
- 控制状态显示。利用现场继电器触点反馈, 可以实时监视电极升降状态反馈, 图中黑色电极棒上的箭头和火花即表示当前电极为上升状态。

#### 2. 电极压放控制

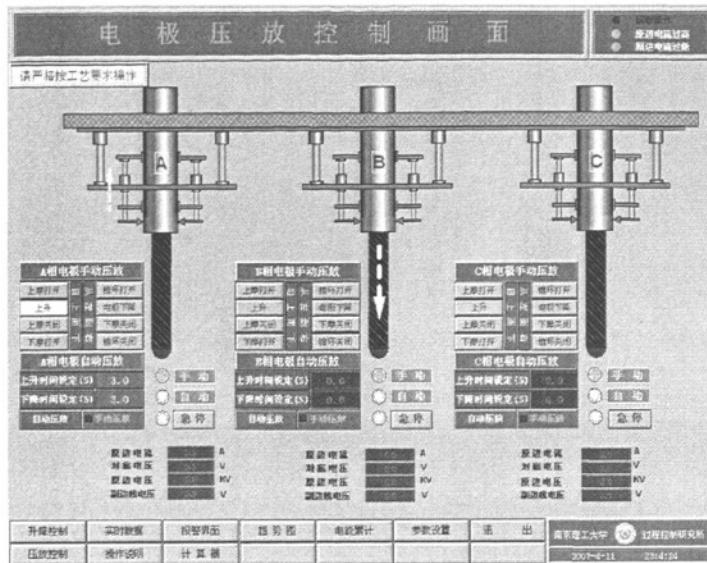


图 3.3.10 电极压放控制画面

该图中功能包括：

- 显示现场各控制参数（如变压器原边电流、电压、功率因数等值）。
- 电极压放控制。在三个操作子窗口中设置完立缸上升和压放下降时间后，选择“自动压放”按钮，电极按工艺流程自动完成单周期的压放控制；选择“手动压放”按钮，操作人员利用“上摩打开”、“上升”等按钮手动完成压放控制。

### 3. 电能显示



图 3.3.11 电能累计画面

该图中功能包括：

- 电量显示。显示 A、B、C 三相电极各班、天、月电量，统计量，功率因数和瞬时功率值等。
  - 累计清零。操作人员根据需要手动进行所有记录清零，点击“累计清零”按钮后，弹出密码输入对话框，当输入正确后出现警告提示对话框，选择“是 (Y)”按钮后，即完成清零操作。
  - 报表打印。将监控画面中所有电量、功率等值进行报表打印。

#### 4. 报警和变量趋势显示等

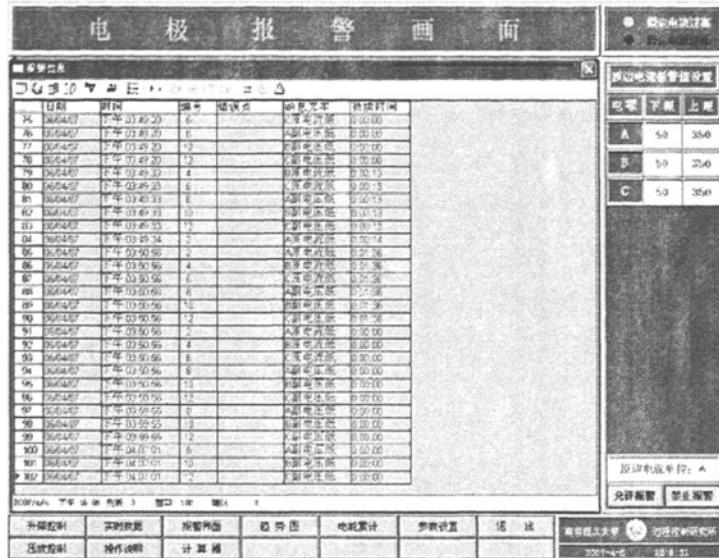


图 3.3.12 报警显示画面

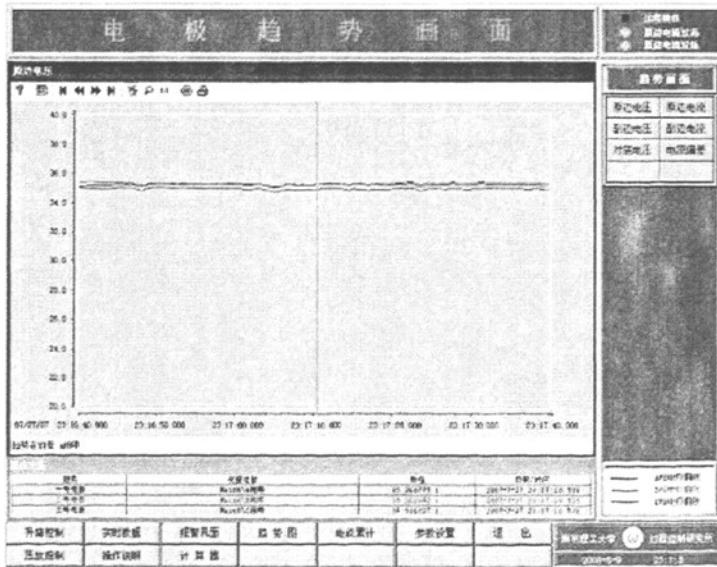


图 3.3.13 参数曲线画面

图 3.3.12 所示功能包括：

- 报警显示。当原边电流、电压等实际值超过上下限或当电极升降到达最大行程位时，进行相应状态显示。
- 报警设置。操作人员按照工艺要求分别设置 A、B、C 三相原边电流上限和下限值，设置的参数会送入 PLC，该参数作为原边电流的安全工作范围。
- 报警器消音。当系统处于报警状态时候，操作人员点击“禁止报警”按钮，可以使报警器停止工作，但系统故障消除前，仍处于故障保护状态，如禁止系统自动控制等。

图 3.3.13 中的趋势图能对实时和历史记录参数值（如原边电压值）进行曲线表示，图中黑、红、蓝三种颜色分别表示 A、B、C 三相电极参数值，另外 WinCC 将数据描绘成曲线的同时，将数据进行归档和压缩存储到 SQL 数据库中，因此可以另外利用 SQL 和 ADO 控件等对数据进行查询和统计处理。

除了电极升降、压放、电量、报警、曲线监控显示画面外，上位机 WinCC 还包括参数设置、操作说明、棒图等画面。曲线画面是将实际参数趋势进行曲线化处理，而棒图画面则是将实际参数显示成棒图，棒图虽能更加动态的显示参数的变化，但不能对历史数据进行显示。此外，操作员可以按照“操作说明”画面的软件和控制说明进行正规操作。

整个上位机 WinCC 控制系统是基于下位机 PLC 的软硬件环境和现场工作人员的操作需要为出发点进行设计和开发的，利用其与下位机 PLC 的数据交换和处理功能，简化了电极控制系统的设计难度，尽可能的方便了现场人员的操作。

### 3.4 本章小结

本章根据山西电石炉的项目背景和需求对电石炉控制系统进行详细的研究和设计，提出采用上位机 WinCC 监控系统和下位机可编程逻辑控制器（PLC）相结合的方案来实现对整个电石炉控制系统的构建。此外本章论述了 PLC、仪表等硬件的选型和安装实施过程，并对该控制系统的下位机 PLC STEP 7 软件及上位机 WinCC 监控软件的设计和实现进行了详细的说明和描述。

## 4 改进型 PID 电极升降控制系统

上一章节对电石炉控制系统的硬件、软件以及流程的设计已做了详细的介绍和分析。针对电石炉系统中三相电极升降平衡控制的设计要求，本章基于控制系统的软件和硬件基础将详细描述该电石炉项目中电极升降控制系统所采用的改进型 PID 控制器的方案设计、软件编程以及调试运行等过程。

### 4.1 电极升降控制系统的整体设计

#### 4.1.1 常规 PID 控制器

PID (proportional-integral-derivative) 控制是比例-积分-微分的简称。在生产过程自动控制的发展历程中，PID 控制是历史最久、生命力最强的一种基本控制方式。在计算机用于生产过程以前，过程控制中采用的气动、液动和电动的 PID 调节器一直占垄断地位，它具有原理简单、易于实现、鲁棒性强和适用面广等优点。下面对常规 PID 控制算法和参数整定分别加以介绍。

##### 1. PID 控制算法

在过程控制系统中，常规 PID 控制算法被广泛使用，一般采用两种调节器：模拟式 PID 调节器和数字式 PID 调节器。模拟式 PID 控制器通过运算放大电路、电阻以及电容等元件来实现，在实际中的使用越来越少。针对电极控制器所采用的控制算法，在这里主要介绍数字式 PID 调节器。

如图 4.1.1 所示，控制系统由 PID 控制器和被控对象组成。常规 PID 控制器由比例 (P)、积分 (I)、微分 (D) 三个部分组成。

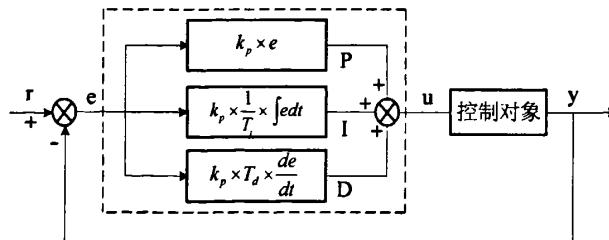


图 4.1.1 PID 控制系统框图

PID 控制器根据给定值  $r$  与被控量  $y$  构成偏差  $e$ ，即  $e = r - y$ ，构造模拟量连续控制函数为：

$$u = k_p(e + \frac{1}{T_i} \int e dt + T_d \frac{de}{dt}) \quad (4.1.1)$$

或写成传递函数形式：

$$\frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (4.1.2)$$

其中:  $k_p$  ——比例增益;  $T_i$  ——积分时间;  $T_d$  ——微分时间;  $u$  ——控制量。

由于计算机控制技术的发展非常迅速, 数字化 PID 控制算法得到了大量应用。采用如下转换公式即可由模拟算法近似得到数字化控制算法:

$$\begin{cases} \int_0^t e(t) dt \approx T_s \sum_{i=0}^k e(i) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T_s} \end{cases} \quad (4.1.3)$$

其中  $T_s$  为采样周期。根据式 (4.1.3) 和式 (4.1.1) 可以推导出目前常用的二种控制算法形式: 位置型算式和增量型算式。

由于模拟仪表调节器的调节动作是连续的, 任何瞬间的控制量输出  $u$  都对应于执行机构(如调节阀)的位置。因此数字 PID 控制器的输出  $u$  要和阀位对应, 故位置型算式为:

$$u(k) = k_p \{ e(k) + \frac{T_s}{T_i} \sum_{i=0}^k e(i) + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - e(k-1)] \} \quad (4.1.4)$$

对上式位置型算法进一步推导即得到增量型算式为:

$$\Delta u(k) = k_p \{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T_s}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T_s} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \}$$

$$u(k) = u(k-1) + \Delta u(k) \quad (4.1.5)$$

由于上式中的  $\Delta u(k)$  对应于第  $k$  时刻阀门的增量, 故称此式为增量型算式。在实际 PID 控制算法的选择与所使用执行器的形式有关系, 两种控制算法但无本质区别。从执行器形式来看, 位置型算法输出一般经数模 (D/A) 转换, 变为模拟量, 并经保持电路输出。而增量型算法的输出则可通过步进电动机等具有零阶保持特性的累计机构, 转化为模拟量。

## 2. 参数整定

PID 控制算式参数整定就是选取式 (4.1.4) 或式 (4.1.5) 中  $k_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  和  $T_s$  的值, 使系统输出  $u(k)$  满足控制性能指标。如何选择一组较好的 PID 参数的初始值是 PID 参数整定中的关键问题。

PID 控制参数的选择首先要考虑采样周期 ( $T_s$ ) 对系统的影响。从执行机构的特性要求来看, 由于过程控制中常采用电动调节阀或气动调节阀, 如果采样周期过短, 那么执行机构来不及响应, 仍达不到控制目的, 因此实际采样周期的选择受多方面因素的制

约。

在选取适当的采样周期  $T_s$  值后, 然后选取  $k_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  的参数值, 以下介绍几种常用参数整定方法。

稳定边界法: 先设置一个比例度, 确定出系统振荡周期  $T_p$ , 然后根据被控过程的特点, 当采用 PI 控制时, 设置  $T_i = (0.5 \sim 1)T_p$ ; 对温度、成分等, 可采用 PID 控制, 设置  $T_d = (0.25 \sim 0.5)T_i$ 。

扩充临界比例法: 该法是稳定边界法的推广, 是闭环整定法。首先选取采样周期, 控制器纯比例控制; 其次增大比例, 使系统出现振荡, 得到临界振荡周期  $T_{cr}$ ; 然后根据对象控制效果选择控制度; 最后根据控制度查表获得  $k_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  值。

衰减曲线法: 该法和稳定边界法相似, 首先选取纯比例控制, 给定值  $r$  做阶跃扰动, 逐渐减少比例度, 直到达到要求的衰减过程为止, 这时得到比例度, 相邻波峰时间  $T$ , 最后按照经验公式计算  $k_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  值。

#### 4.1.2 改进型 PID 控制系统的设计

在电石炉的电极升降控制方式设计中, 有恒功率、恒电流或比电阻<sup>[30]</sup>控制。在该改进型 PID 控制系统中, 采用了恒电流控制方式, 三相电极中的任意一相升降控制是利用电弧电流的设定值与实际值比较进行差动调节, 当该相电流设定值大于实际值, 电极应下降调节, 反之则上升调节, 并最终达到电流平衡点进行稳弧加热的过程。

电石炉电极升降系统控制器结构设计如图 4.1.2 所示, 该系统由改进型 PID 控制器、脉冲控制器、液压执行机构、电极以及被控变量等部分组成。电极升降系统控制原理为: 首先变送器将电石炉原边电流 (0~400A) 转换为 4~20mA 信号送入 PLC, 经 A/D 变换后的数字量利用软件对其数据处理后, 即得控制器反馈值, 同时利用 WinCC 上位机软件通过 MPI 通信将人工电流设定参数送入 PLC, 即得控制器设定值; 然后采用改进型 PID 控制算法, 根据偏差  $e$  计算输出  $u$ ; 最后利用脉冲控制器将连续  $u$  值转换为两路开关脉冲信号, 并由 PLC 输出来控制中间继电器和现场电极升降液压电磁阀的开关时间, 从而利用液压缸带动电极架实现对电极的升降控制。

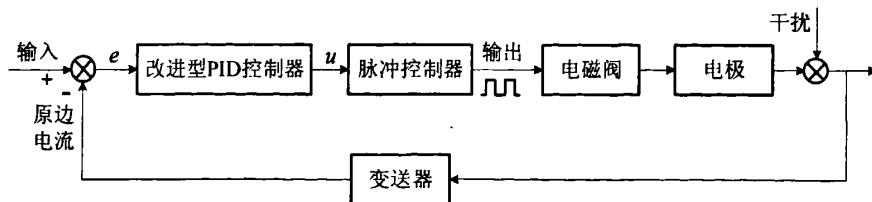


图 4.1.2 电极升降闭环控制系统设计图

根据图中电极闭环控制系统结构设计, 以下分别对改进型 PID 控制器和脉冲控制器进行详细的设计和说明。

##### 1. 电极改进型 PID 控制器

电石炉三相电极有单独的执行机构，对三相电极的控制需分开进行，但由于三根电极的升降控制相似，因此现仅对单相电极控制器的设计进行具体描述和说明。

为避免执行机构的频繁动作，系统在此设计死区（又称冶炼稳定区）控制范围。实际电流值一旦进入此区，系统自检定为稳弧区，系统对电极一般不再加以控制以此保证弧流的稳定，但当电流进入死区范围内后，随着炉料的损耗，则会出现电流值逐渐降低的现象，如果此时系统对电极不予控制，则会出现电极相对炉料上漂的情况。根据工艺要求电极的整体趋势需保持下降状态，因此在死区内采用积分控制器，利用电流偏差累计量对电极进行下降调节，以此防止电极上移。

此外为防止电极动作过大引起电极断弧事故，系统需有上升下降输出限幅，一般上升、下降限幅比值设为 0.8: 1 即上升值为下降值的 80%，此参数可根据实际情况进行调整。对于在死区和限幅区域间的电流值的控制，为快速和及时进行调节，采用比例控制。单相电极的控制算法曲线设计如下图所示。

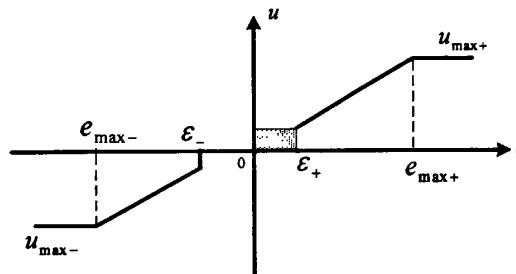


图 4.1.3 改进型 PID 电极控制曲线图

其中： $e = I_{sp} - I_{pv}$ ， $I_{sp}$ ——电流给定值， $I_{pv}$ ——实际电流值； $\varepsilon_+$ ——电极下降电流死区； $\varepsilon_-$ ——电极上升电流死区； $e_{max+}$ ——电流最大偏差值； $e_{max-}$ ——电流最小偏差值； $u_{max+}$ ——电极最快下降控制输出值； $u_{max-}$ ——电极最快上升控制输出值。当输出  $u > 0$  时，电极下降动作； $u < 0$  时，电极上升动作； $u = 0$  时，电极不动作。

如上图所示，系统控制规则设计如下：

1)  $\varepsilon_- \leq e \leq \varepsilon_+$ ，即电流值在给定的死区范围内时，系统采用积分 (I) 控制，且：

$$\sum_{i=0}^k e(i) > \varepsilon_+ \text{ 时, } u = k \sum_{i=0}^k e(i) > 0; \quad \sum_{i=0}^k e(i) \leq \varepsilon_+ \text{ 时, } u = 0.$$

2)  $e \geq e_{max+} > 0$ ，即电流设定值与实际值偏差过大时，为快速提高电流值，则电极应全速下降， $u = u_{max+} > 0$ 。

3)  $e \leq e_{max-} < 0$ ，即电流实际值与设定值偏差过大时，为避免跳闸的危险，降低电流值，则电极应全速提升， $u = u_{max-} < 0$ 。

4)  $e_{max-} < e < \varepsilon_-$  或  $\varepsilon_+ < e < e_{max+}$  时，系统即采用比例 (P) 进行控制，同时为防系统调节过大，对于计算输出的  $u$  进行限幅处理。即：

$u_{\max-} \leq u \leq u_{\max+}$  时,  $u(k) = k_p e(k)$ ;

$u < u_{\max-}$  时,  $u = u_{\max-}$ , 电极最大速度上升;

$u > u_{\max+}$  时,  $u = u_{\max+}$ , 电极最大速度下降。

- 5)  $e(n) - e(n-1) \geq 40$  时候, 即参数突然变化, 为保证系统安全, 则电极控制由自动转为手动调节。

针对电流偏差值在不同的参数区域和工艺要求, 设计相应的控制算法, 这样有利于对电石炉三相电极实施有效、快速和稳定的调节。由于现场执行机构为开关量控制, 因此基于改进型 PID 控制算法基础上, 对其输出  $u$  值需进行脉冲调节。以下将脉冲控制器的设计和实现予以详细说明和介绍。

## 2. 脉冲控制器

脉冲控制器与改进型 PID 控制器配合使用, 用脉冲输出来控制现场的开关量执行机构。常用脉冲控制器的设计包括二级和三级控制器<sup>[31]</sup>, 如图 4.1.4 所示, 二级控制器表示由发生器输出信号只有正脉冲单相输出控制现场 I/O 执行机构, 而三级则有正负双相输出脉冲形式。

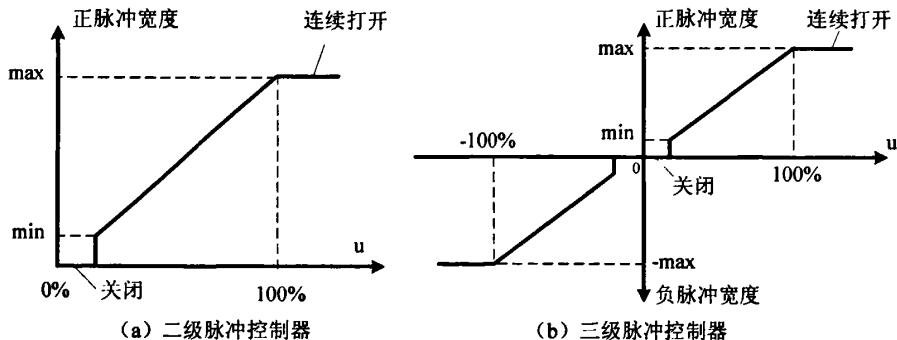


图 4.1.4 脉冲控制器曲线图

二级脉冲控制器输出的单路脉冲信号对控制对象一般只是简单的周期启停控制, 输出脉冲信号只对系统的某一执行元件进行控制。而三级脉冲控制器则可根据控制器输出信号值对一对象采用三种控制方式, 如对液位系统的上升、下降和停止控制, 对温度系统的加热、冷却和停止控制。控制器方式的选择与执行机构、现场工艺有密切关系。

三级脉冲控制器调节波形如图 4.1.5 所示, 其中  $T_{\text{RUN}}$  表示系统对象的控制周期,  $T_{\text{CYCLE}}$  表示脉冲控制器循环调用周期, 一个控制周期内脉冲控制器调用次数  $N = T_{\text{RUN}}/T_{\text{CYCLE}}$ 。每个控制周期的脉冲宽度与发生器输入  $u$  成正比, 其中: 脉宽  $L_+ = u \times K_D \times T_{\text{RUN}}/100$ ; 脉宽  $L_- = |u| \times K_U \times T_{\text{RUN}}/100$ 。 $K_D$ 、 $K_U$  分别为  $Q_D$ 、 $Q_U$  的脉宽调节系数。

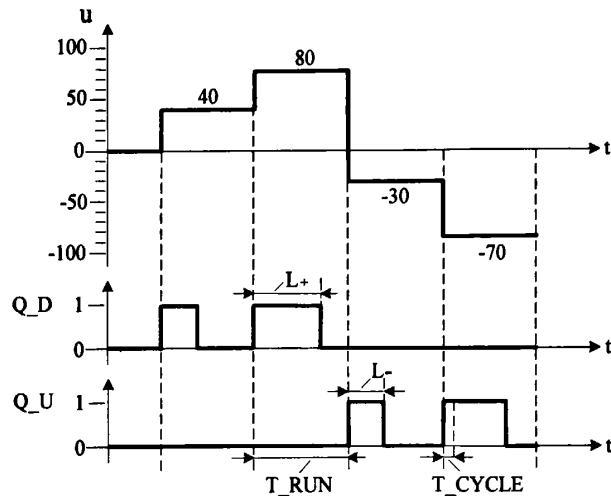


图 4.1.5 脉冲调节波形图

根据上图所示,对于电极升降控制系统,以改进型 PID 控制器的输出  $u$  值为脉冲控制器输入信号。 $Q_D=1$  时,电极下降; $Q_U=1$  时,电极上升; $Q_D=Q_U=0$  时,电极不动作。电极升降控制的脉冲调节器具体设计方法如以下流程图:

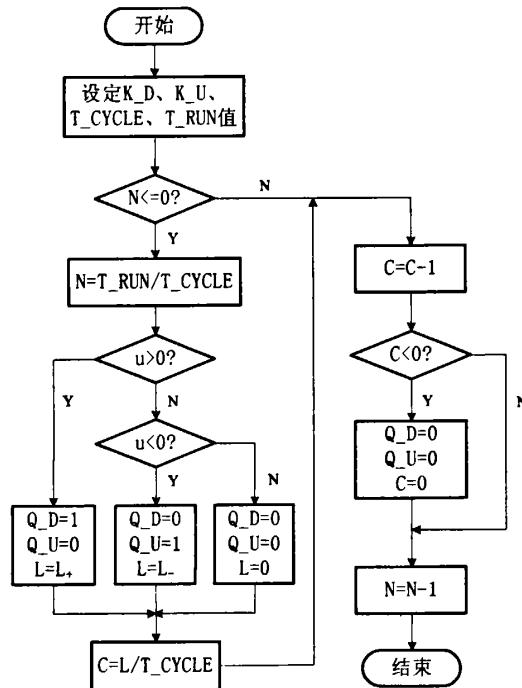


图 4.1.6 电极升降脉冲控制器流程图

图中所示为脉冲控制器一个调用周期内的控制流程,其中脉冲控制器循环调用周期为  $T_{CYCLE}$ ,如  $T_{CYCLE}=0.1s$ 。根据流程设计,设  $T_{RUN}=2s$ 、 $K_D=K_U=1$ 、 $u=-30$ ,则在  $2s$  控制周期内,脉冲控制器被调用 20 次,  $N=20$ ,  $C=6$ 。前 6 次调用时  $Q_U=1$ ,即

电极上升时间为  $L=|u| \times K_U \times T_{RUN}/100=0.6s$ ，而后 14 次调用时  $Q_D=Q_U=0$ ，即电极不动作。因此利用该脉冲控制器根据  $u$  值的大小可实现对电极的升降开关量控制。

### 3. 参数整定

由于缺少对象的建模分析，在系统调试中采用实验法进行控制器的相关参数整定。针对电流被控变量，确定采样周期为 0.2s，系统控制周期为 2s，脉冲控制器循环调用时间为 0.1s，正负脉宽调节系数为 1.0，即  $T_{RUN}=2s$ ,  $T_{CYCLE}=0.1s$ ,  $K_D=1$ ,  $K_U=1$ 。最后确定改进 PID 控制的电极下降电流死区  $\varepsilon_+=6$ ，上升电流死区  $\varepsilon_-=10$ 。

改进型 PID 控制器比例系数利用开环给定脉冲方法进行整定。首先根据  $u$  值大小由脉冲控制器发出一个下降（上升）脉冲信号，然后记录电流的变化  $\Delta e$  的值，经过测算几十组数据后得出  $\Delta e$  的平均值，最后由  $u$  和  $\Delta e$  的比值关系即可求得  $k_p$  值。如：  $u=5$  时，脉冲控制器根据该  $u$  值由 PLC 仅输出一个电极下降脉冲信号，如测得  $\Delta e=3A$ ，则根据  $u=k_p \times e$ ，即知  $k_p = 5/3 = 1.67$ 。系统运行时可对初步整定的  $k_p$  值再做调整。

改进型 PID 控制器积分系数利用在线闭环整定的方法。令电流给定值等于实际值，随着物料损耗电流值逐渐降低，当电流累计误差  $\sum e(i) \geq \varepsilon_+$  时，通过调整  $k_i$  值，使得一个控制周期内电极下降后让实际电流值上升到设定值，这时  $k_i$  即为参数整定值。

## 4.2 控制系统的 PLC 程序设计

### 4.2.1 整体设计

改进型 PID 控制系统的 PLC 程序结构主要包括控制算法和脉冲控制两部分。根据 PLC 模块分配和电极控制系统的设计，PLC 的电极控制程序结构设计如下图所示。

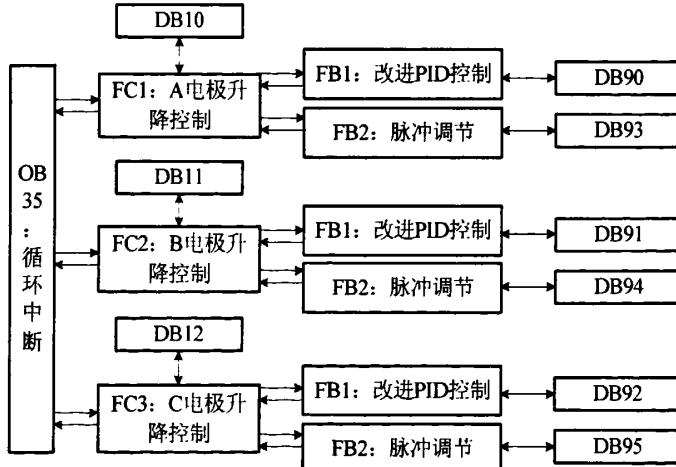


图 4.2.1 电极调节 PLC 程序块分层调用结构图

图中程序结构是整个电极控制系统 PLC 程序中的一部分，是对图 3.3.3 的 PLC 模块结构图中升降控制部分的补充和说明。图 4.2.1 中 DB 数据块功能说明见表 4.2.1。

表 4.2.1 升降控制系统 PLC 数据模块组成

类型	地址	名称	功能
背景数据块	DB90	A相PID算法	A相电极PID控制计算状态
	DB91	B相PID算法	B相电极PID控制计算状态
	DB92	C相PID算法	C相电极PID控制计算状态
	DB93	A相脉冲控制	A相电极脉冲调节模块参数
	DB94	B相脉冲控制	B相电极脉冲调节模块参数
	DB95	C相脉冲控制	C相电极脉冲调节模块参数
共享数据块	DB10	A相控制参数	存储A相电极控制系统相关参数
	DB11	B相控制参数	存储B相电极控制系统相关参数
	DB12	C相控制参数	存储C相电极控制系统相关参数

如图 4.2.2 所示, 根据图 4.2.1 所示程序分层调用结构, 利用 OB35 组织模块循环中断调用 FC1、FC2 和 FC3 模块来分别实现 A、B、C 三相电极的手自动升降控制。同时在 FC1~FC3 块中分别调用 FB1 (改进型 PID 算法) 和 FB2 (脉冲控制) 子程序模块来实现电极手动控制、控制算法以及电极升降脉冲控制, 并利用 DB10~DB12 数据块对 FB1 和 FB2 子程序控制参数赋值, 如控制周期 (T\_RUN) 值、改进型 PID 控制器的比例值、积分值等。

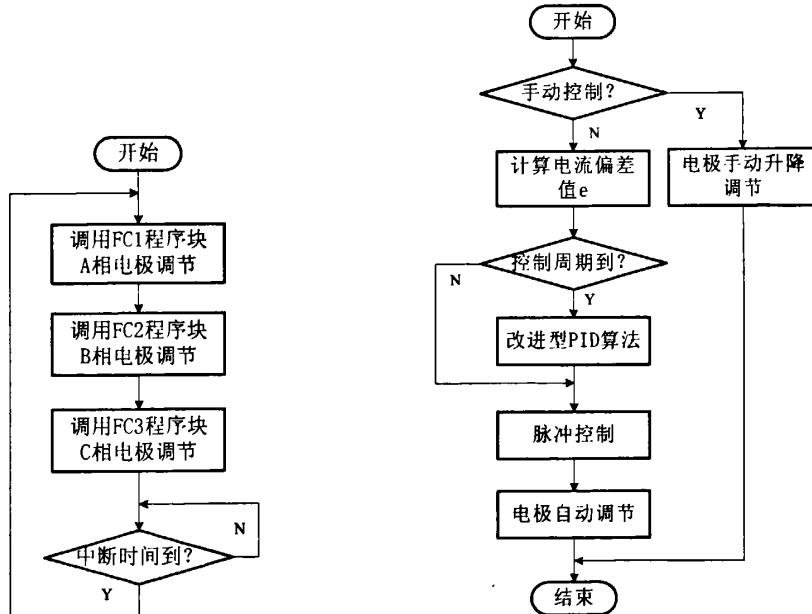


图 4.2.2 OB35 模块中断调用流程图

图 4.2.3 FC 模块中电极调节程序流程图

根据上节所述控制算法和脉冲调节方法, 图 4.2.3 为 FC1~FC3 程序块中各相电极调节的 PLC 程序控制设计流程。图中电极的手动控制和控制算法由 FB1 子程序块编程实现, 而电极自动升降脉冲控制则由 FB2 子程序模块编程实现, FB1 和 FB2 程序及控制

参数由 FC1、FC2、FC3 模块分别调用和分配。

本系统采用结构化编程设计方法，根据控制要求将程序进行模块化划分，利用 FC 模块对各 FB 功能块进行组织调用和参数赋值，最后利用 OB35 组织模块中断执行各 FC 块程序，整个程序控制流程和框架清晰，这样便于对其调试和修改。根据 PLC 程序运行流程和控制流程，以下将对各模块功能和程序编程实现进行详细的说明和介绍。

#### 4.2.2 编程实现

##### 1. 循环中断调用程序 ——OB35

在 CPU 中将 OB35 系统中断时间设为 100ms，此时间也是根据 OB35 中所要执行程序需要的时间确定的。必须保证程序在所设时间间隔内能够执行完毕，否则将造成系统异常。OB35 部分代码为：

```
CALL  “A 电极升降控制”          //调用 FC1 程序
CALL  “B 电极升降控制”          //调用 FC2 程序
CALL  “C 电极升降控制”          //调用 FC3 程序
```

当 PLC 处于运行状态时，CPU 检测 OB35 的中断请求，操作系统根据中断周期对 OB35 中的程序模块进行调用，即 PLC 每 0.1s 执行 FC1、FC2 和 FC3 程序块一次。

##### 2. 三相电极升降调节主程序 ——FC1、FC2、FC3

电石炉的三根电极可根据操作要求对某一相电极单独进行手自动升降控制，并且 A、B、C 三相电极采用相同控制系统，因此 FC1、FC2、FC3 的程序设计相似。现以 A 相电极控制为例加以说明：根据图 4.2.1 和图 4.2.3 所示结构和流程，在 FC1 调用 FB1、FB2，电极手自动升降控制所需参数利用 DB10 共享数据块进行存取。

FC1 代码为：

```
CALL  “改进 PID 控制”， “A 相 PID 算法” //调用 FB1 及其背景数据块 DB90
MAN_ON  := “A 相手动升降”          //电极手自动控制选择 M1.2
PV      := “A 相控制参数” . PV      //读取 DB10. DBD24 的实际电流值
SP      := “A 相控制参数” . SP      //读取 DB10. DBD20 的电流值设定值
Kp      := “A 相控制参数” . Kp      //比例系数 DB10. DBD28
Ki      := “A 相控制参数” . Ki      //积分系数
T_RUN   := “A 相控制参数” . T_RUN   //控制周期
T_CYCLE := “A 相控制参数” . T_CYCLE //中断周期
DEAD_UP := “A 相控制参数” . DEAD_UP //上升电流偏差死区  $\varepsilon_+$ 
DEAD_DOWN := “A 相控制参数” . DEAD_DOWN //下降电流偏差死区  $\varepsilon_-$ 
MAN_UP  := “A 相手动上升”          //手动上升控制
MAN_DOWN := “A 相手动下降”          //手动下降控制
OUT     := “A 相控制参数” . OUT     //将控制输出 u 值存储到 DB10. DBD8 中
UP      := “A 电极升-”              //电极手动上升
DOWN    := “A 电极降-”              //电极手动下降

CALL  “脉冲调节”， “A 相脉冲控制” //调用 FB2 及其背景数据块 DB93
INV    := “A 相控制参数” . OUT     //读取 DB10. DBD8 的 u 值，进行脉冲调节
T_RUN  := “A 相控制参数” . T_RUN   //控制周期
```

```

T_CYCLE := "A 相控制参数" . T_CYCLE      //脉冲控制器调用周期
K_U     := "A 相控制参数" . K_U          //上升脉宽调节系数
K_D     := "A 相控制参数" . K_D          //下降脉宽调节系数
MAN_ON  := "A 相手动升降"                //电极手自动控制选择
COM_RST := "A 相控制参数" . COM_RST      //急停控制
UP      := "A 电极升"                     //电极自动上升
DOWN    := "A 电极降"                     //电极自动下降

```

由上述程序及注释内容可知, FC1 起组织调用 FB1、FB2 模块并对其进行控制参数赋值的作用, 也可不采用 FC1 程序模块而直接将该程序编写在 OB35 模块中, 但为了 PLC 程序框架的清晰和便于调试, 在这里利用 FC1~FC3 加以中转。程序中 DB10~DB12 数据块参数值可由上位机 WinCC 监控系统进行赋值, 具体实现方法本章下节将予以详细描述。

### 3. 改进型 PID 控制子程序 ——FB1

根据上节所述改进型 PID 控制算法结构, 在 FB1 中利用 PLC 的 STL 语言来实现电极的手动升降控制和改进型 PID 控制算法的编程计算, FB1 中程序设计流程如下图所示:

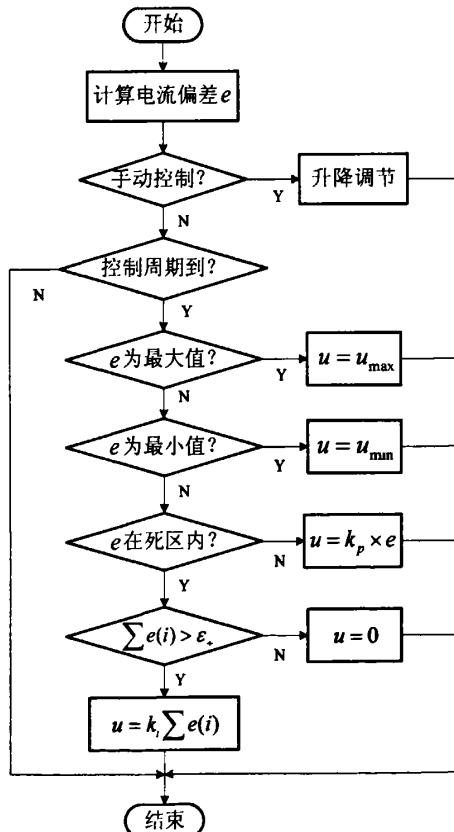


图 4.2.4 改进型 PID 控制子程序流程图

在程序的设计中, 图中  $u$  值的计算周期须与系统的控制周期一致。其中  $u_{max}$ 、 $u_{min}$  等控制参数值从 DB10~DB12 数据块中读取。对电极的控制时, 操作人员可根据现场工艺

需要利用 WinCC 上位机监控系统实现电极的手自动升降控制和电流控制值的设定，且其他所需数据值也可利用 WinCC 软件在上位机中直接设置和读取。

#### 4. 脉冲控制子程序 ——FB2

当系统采用自动控制时，FB1 模块根据改进型 PID 控制算法和电流的偏差值  $e$  可计算获得电极升降控制量  $u$ ，然后 FB2 则将该  $u$  值作为脉冲控制器的输入量并利用图 4.1.6 所示脉冲控制器设计方法来编程实现电极的自动升降控制。现 FB2 程序流程设计如下图所示：

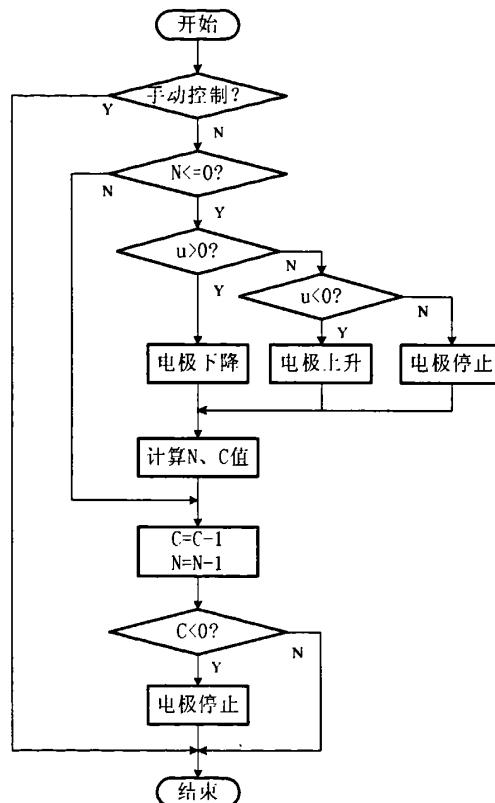


图 4.2.5 脉冲控制子程序流程图

图中  $N=T_{\text{RUN}}/T_{\text{CYCLE}}$ ,  $u>0$  时,  $C=u \times T_{\text{RUN}} \times K_D / (100 \times T_{\text{CYCLE}})$ ;  $u<0$  时,  $C=|u| \times T_{\text{RUN}} \times K_U / (100 \times T_{\text{CYCLE}})$ 。根据脉冲控制器设计方法,  $T_{\text{CYCLE}}$  与 OB35 中断周期一致,  $T_{\text{CYCLE}}$  与脉冲控制精度有较大关系, 对于固定的控制周期和  $u$  值,  $T_{\text{CYCLE}}$  越小则控制精度越高, 如  $u=16$ ,  $T_{\text{RUN}}=1\text{s}$ ,  $T_{\text{CYCLE}}=0.1\text{s}$ , 电极在  $1\text{s}$  的控制周期内下降时间为  $0.1\text{s}$ , 而当  $T_{\text{CYCLE}}=0.05\text{s}$  时, 电极则可下降  $0.15\text{s}$ 。OB35 中断周期过小, 即  $T_{\text{CYCLE}}$  值如果过小则会导致在控制周期内调用脉冲控制器次数增多, 使 PLC 的 CPU 负荷加重。另外值得注意的是, 当  $u=9$ ,  $T_{\text{RUN}}=1\text{s}$ ,  $T_{\text{CYCLE}}=0.1\text{s}$ ,  $K_D=1$  时,  $C=0.9$ , 则在整个控制周期内电极均处于停止状态。

### 4.3 控制系统的 WinCC 软件设计

在电极升降系统中，操作人员仅凭下位机 PLC 和操作台按钮、开关来对完成电极的手自动控制是难以实现的，由于控制参数的设置，如电流设定值、脉宽调节系数等均需要根据系统运行状态加以调整，因此利用 WinCC 上位机监控软件来实现各项参数设置和控制选择功能。鉴于论文上一章节对电极控制系统的 WinCC 的变量管理以及画面设计已经加以描述，在此仅对 WinCC 的手自动升降控制和参数设置部分进行说明。

图 4.3.1、图 4.3.2 分别给出了电石炉三相电极中的 A 相电极手自动升降系统的参数设置和操作运行子窗口画面。

A 相控制参数			
比例值	1.5	积分值	0.8
控制周期 [S]	1.0	循环周期 ms	100
上升速率	0.8	下降速率	1.2
上升死区	10.0	下降死区	5.0
压放上升时间限制 [S]	0.0		
压放下降时间限制 [S]	0.0		

图 4.3.1 电极控制参数设置画面

A 相电极升降控制		
实际值	-0.07	R
实际值	0.0	A
设定值	250.0	A
反馈状态	下降	上升
■ 手动	自动	
手动下降	手动上升	

图 4.3.2 电极升降操作窗口

在参数设置画面中，工程师可根据工艺和炉况要求对比例值、积分值等进行调整，参数设置完成后 WinCC 利用 MPI 通讯方式直接将数据送入 PLC 的相应变量地址中，如上图中比例值设为 1.5，即 PLC 中 DB10.DBDB28=1.5，“A 相控制参数” .Kp 值为 1.5。

在电极升降操作窗口中，数据表格中显示当前状态的比电阻值和实际电流值的测量值及设定值，该窗口画面并显示电极的升降反馈状态。其中按钮分别表示手自动切换和手动状态下电极下降和电极上升的动作。图中当操作人员选择“手动”按钮时，即可根据图中“手动下降”或“手动上升”按钮对电极进行点动升降控制。

利用 WinCC 监控软件，操作人员可在上位机上实现对电极的远程手自动升降控制，并且操作简单，可实时准确掌握系统运行状态。另外利用 WinCC 软件针对不同用户设计相应用户权限，图 4.3.1 画面中参数只可由工程师等技术人员设置，而 4.3.2 画面中控制参数则可由操作人员加以设置，利用控制权限有利于保护系统的安全运行和控制。

### 4.4 系统调试与运行

本章前文对电极改进型 PID 控制算法及 WinCC 监控软件进行了编程和设计，利用 PLC 和 WinCC 的结合即能实现电极的手自动升降控制。但系统在实际运行前需要对其进行相关调试和修改，一般可利用 S7-PLCSIM 软件对 PLC 程序进行离线测试和仿真，

这样有利于查找和修改程序中的缺陷和错误,如图 4.4.1 为 A 相电极控制的 PLC 程序运行状态。

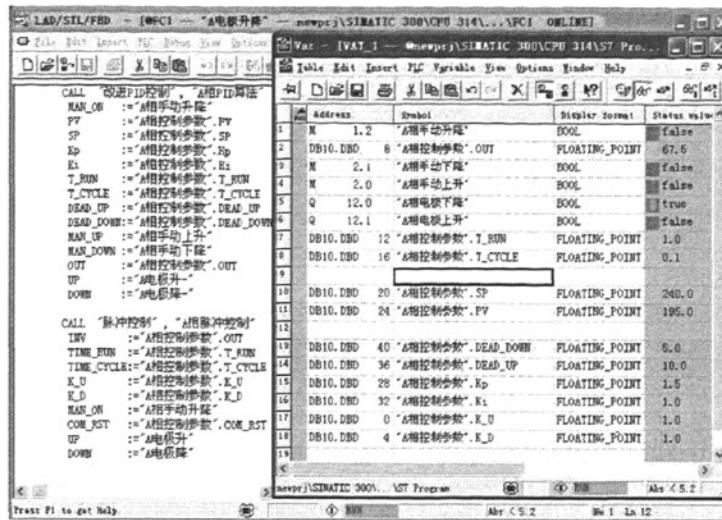


图 4.4.1 改进型 PID 电极控制程序运行状态图

当程序测试无误后,将设计和编写好的各 PLC 程序模块下载存储到现场安装柜内 PLC 的 MMC 卡中。在调试过程,根据参数信号进行模拟量读取和量程标定,针对控制对象进行打点测试后才可正式运行。在电石炉送电运行时,一般先采用手动方式对电极进行升降调节,当系统稳定运行后,即可进行参数设置和手自动控制切换。

当完成现场 PLC 软硬件调试以及实现软件系统的正常运行后,利用 WinCC 和 PLC 相结合,通过 WinCC 将参数和指令直接传送给 PLC,并且利用其显示参数的历史和实时趋势曲线,图 4.4.2、图 4.4.3 分别为电极手动控制和改进型 PID 自动控制下的电石炉三相原边电流运行状态曲线。

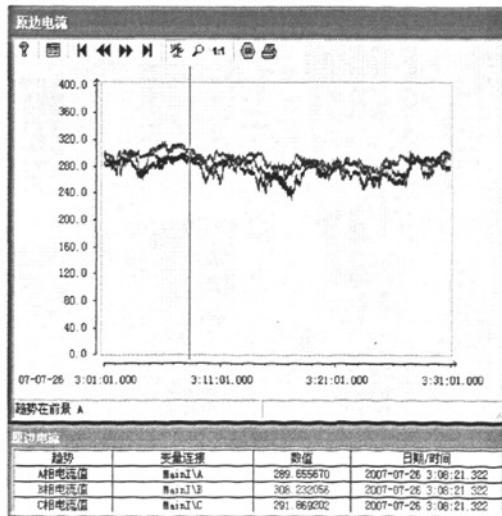


图 4.4.2 手动控制下三相原边电流曲线

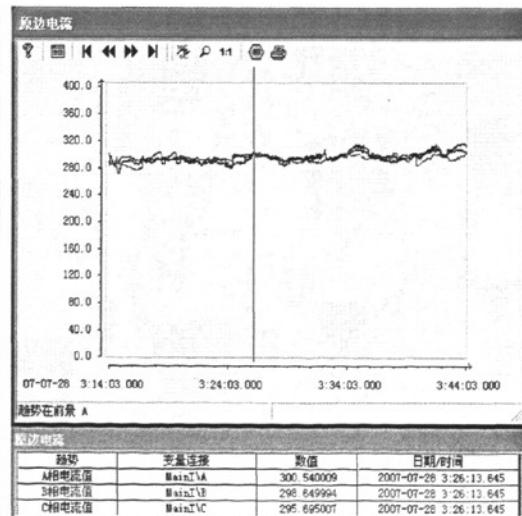


图 4.4.3 改进型 PID 控制下三相原边电流曲线

由图 4.4.2 曲线可知, 电极在手动升降控制时三相原边电流值出现较大波动, 并难以稳定在设定的工艺参数范围内。由于电流抖动, 致使电石炉内温度不稳定, 从而影响电石生产效率。

如图 4.4.4 所示, 电极在改进型 PID 自动控制时三相电流能保持在相对稳定的控制范围内, 但由于电石炉内出现塌料或物料分布不均的现象, 使得控制中电流仍然有一定的波动。从图中三条电流曲线趋势可以看出当电极电流处于死区的稳定范围内时电流值会逐渐降低, 这时系统会利用积分环节控制电极下降使得电流升高, 当电流出现较大波动超出死区范围时, 比例控制可以及时的对电流进行调整。因而利用改进型 PID 控制即可使电极保持下降趋势, 也可使电流保持相对稳定状态。

改进型 PID 控制相比手动控制使系统运行效果得到提高, 但该改进型 PID 在控制电石炉三相电极这一时变、耦合及参数和结构不确定的过程时, 系统的实际稳态性能方面仍有欠缺, 对三相电流的控制容易出现较大的波动。鉴于改进型 PID 控制系统的运行状态和效果, 本文下一章节将详细介绍和描述电极升降系统所采用模糊控制策略及其运行效果。

## 4.5 本章小节

本章重点介绍了电石炉电极改进型 PID 控制系统的设计和实现过程, 并提出了带死区特性的改进型 PID 控制方案的设计思路以及脉冲控制器的实现方法。另外本章详细描述了该电极升降控制系统中 PLC 和 WinCC 的软件设计和编程实现过程, 对软件的调试和实际运行效果加以说明, 并对比分析了电极手动升降控制和改进型 PID 自动控制效果。

## 5 基于模糊控制的电极升降系统

上一章详细阐述了改进型 PID 控制器在电极升降控制系统中的设计和应用, 由于电极升降系统存在强耦合性、灵敏度高、参数时变以及非线性等因素, 在实际控制过程中所采用的改进型 PID 控制难以达到理想的调节效果。本章针对工程前期所采用的改进型 PID 控制方法和实际运行效果, 提出基于人工操作经验为基础的模糊控制策略, 利用 PLC 的编程运算能力实现创建模糊控制表及电极升降查表控制功能。

### 5.1 模糊控制系统的控制设计

模糊控制器在对一个过程进行控制时, 从中测得反馈数据, 利用设定值可得到偏差、偏差变化量及其他参数。将这些参数作为模糊控制器的输入, 控制器便可模仿人的思维, 根据模糊规则进行推理决策, 并最终得到所要的输出值, 用来对对象进行控制, 并且整个过程无需建立精确数学模型, 而是完全凭个人的经验知识直观的进行控制, 因此模糊控制常被应用于复杂的工业过程中。

模糊控制器与常用的负反馈闭环系统相似, 其基本结构<sup>[35]</sup>如图 5.1.1 所示, 主要由模糊化、知识库、模糊推理及清晰化四部分组成, 模糊控制系统一般包含模糊控制器, 输入、输出通道, 控制对象及执行机构, 传感器等。

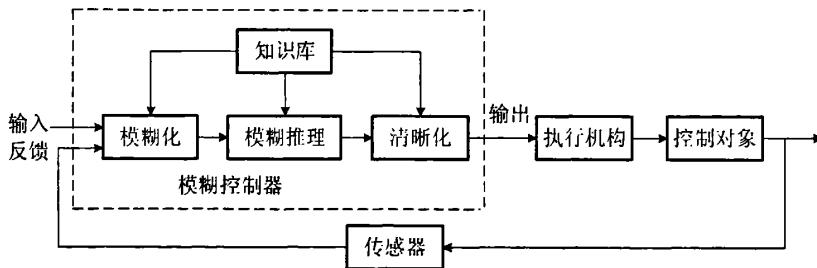


图 5.1.1 模糊控制器基本结构图

文献[32]中, 详细论证了电石炉采用模糊控制器的稳定性, 因而从理论基础出发该电石炉系统采用模糊控制策略是可行的。根据模糊控制器的简单介绍, 以下将对电极调节系统模糊控制器的控制结构、推理算法等具体环节分别加以研究和设计。

#### 5.1.1 模糊控制器的结构设计

模糊控制器的维数与控制性能和控制器的复杂程度密切相关。考虑一维情况下只有误差输入, 其动态性能往往不佳, 增加维数可提高控制精度, 但控制规则变得复杂, 算法实现也变得困难, 因此将电极升降模糊控制系统设计成一个双输入单输出的系统。以电石炉三相电极为被控对象, 原边电流值为被控变量。将原边电流设定值与变送器所测

电流值比较得到的偏差( $e$ )和偏差变化量( $\Delta e$ )作为模糊控制器的输入信号。

如图 5.1.2 所示, 电石炉电极升降控制系统的模糊控制器结构设计为: 1. 基于 PLC 程序离线计算模糊控制表, 其中将模糊语言集  $e$ 、 $\Delta e$  对应论域的全部元素  $x$ 、 $y$  的所有组合, 经过模糊化、模糊推理及清晰化运算后, 即可得到模糊控制表; 2. 当模糊控制表创建完成后, 将模糊控制器输入  $e$  和  $\Delta e$  值进行尺度变换, 根据上一步得到的模糊表实时查询得到输出值并将其量化处理得到控制器输出  $u$ ; 3. 利用脉冲控制器对模糊控制器输出信号进行调节处理后, 由 PLC 输出 24V 开关电压信号控制中间继电器, 利用其带动现场 220V 开关电磁阀从而使液压缸动作, 最终实现对电极的升降自动控制。

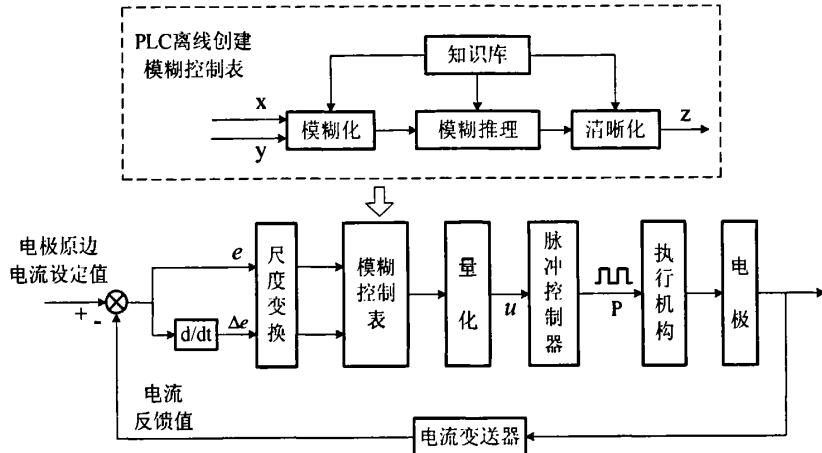


图 5.1.2 电极升降模糊控制系统结构图

整个模糊控制系统基于 PLC 实现创建控制表和查表控制的功能, 对所创建的模糊控制表可根据模糊规则、论域和隶属度函数进行修改和变动。整个模糊控制器的结构由知识库、模糊化、模糊推理和清晰化四个功能模块组成, 输入量是电流偏差  $e$  和电流偏差的变化量  $\Delta e$ , 输出量是  $u$ 。

### 5.1.2 模糊知识库的建立

模糊控制器中的知识库由两部分组成: 数据库和规则库。知识库包含语言变量值和论域、尺度变换、隶属度函数和模糊规则表等部分。

#### 1. 语言变量值和论域<sup>[33]</sup>

对于输入输出变量而言选择较多的语言来描述, 可以使制定控制规则方便, 但是使控制规则变得很复杂。根据实际情况和经验, 由于三相电极间的电流耦合且波动较大,  $\Delta e$  的语言值和论域等级不宜过大, 控制输出  $u$  需要精细化。

电流偏差( $e$ )和输出( $u$ )的模糊语言集为: {NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB};

电流偏差变化量( $\Delta e$ )的模糊语言集为: {NB, NS, ZE, PS, PB};

$e$  和  $\Delta e$  的论域为: [-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6];

$u$  的论域为: [-3, -2.5, -2, -1.5, -1, -0.5, 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3] 。

## 2. 尺度变换<sup>[35]</sup>

尺度变化是指将实际的输入量变换到要求的论域范围, 将清晰化后的输出量变换到实际控制量范围。变换的方法可以是线性的, 也可以是非线性的。若实际的输入量为  $e$ , 其实际变化范围为  $[A_{\max}, A_{\min}]$ , 论域为 [-6, 6], 若采用线性变换, 则可利用下式进行尺度变换。

$$x_0 = \frac{12}{A_{\max} - A_{\min}} \left( e - \frac{A_{\max} + A_{\min}}{2} \right) \quad k = \frac{12}{A_{\max} - A_{\min}} \quad (5.1.1)$$

其中比例因子  $k$  的选取与控制系统的控制周期、控制精度和系统特性都有较大的关系, 在这里根据电石炉系统控制周期短、系统灵敏度强的特性选取电流偏差  $e$  的比例因子为 3.0, 偏差  $\Delta e$  的比例因子为 3.5。输出量线性变换与上式相同, 根据实际脉冲控制器的输入信号需要,  $u$  的比例因子选为 2.0。

## 3. 隶属度函数<sup>[34]</sup>

由于论域可以是连续的或离散的, 所以隶属度函数也有两种表示方法, 即数值描述法和函数描述法。函数法通常采用三角形、梯形、钟形等函数来描述, 图 5.1.3 中所采用的三角形和梯形函数具有计算精度高的优点, 同时由于两者具有形式简单、计算效率高以及软件编程量小的特点, 因而得到广泛使用。一般来说, 比较陡窄的隶属度函数使得控制灵敏度较高。

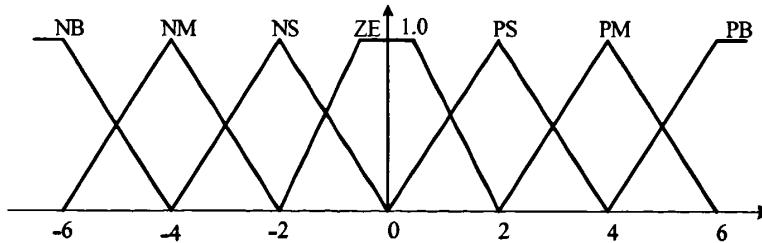


图 5.1.3 典型隶属函数分布图

三角形隶属度函数由三个参数  $\{a, b, c\}$  ( $a < b < c$ ) 来描述, 函数公式为:

$$\text{triangle}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & , \quad x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & , \quad a \leq x \leq b \\ (c-x)/(c-b) & , \quad b \leq x \leq c \\ 0 & , \quad x \geq c \end{cases} \quad (5.1.2)$$

梯形隶属度函数由四个参数  $\{a, b, c, d\}$  ( $a < b < c < d$ ) 来描述, 函数公式为:

$$\text{trapezoid}(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0 & , \quad x \leq a \\ (x-a)/(b-a) & , \quad a \leq x \leq b \\ 1 & , \quad b \leq x \leq c \\ (d-x)/(d-c) & , \quad c \leq x \leq d \\ 0 & , \quad x \geq d \end{cases} \quad (5.1.3)$$

本系统  $e$ 、 $\Delta e$  和  $u$  的隶属度函数描述如表 5.1.1、表 5.1.2、表 5.1.3 所示。

表 5.1.1  $e$  的隶属度函数

隶属度 \ 论域	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
模糊集合	NB	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NM	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NS	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0
	PM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
	PB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

表 5.1.2  $\Delta e$  的隶属度函数

隶属度 \ 论域	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
模糊集合	NB	1.0	0.8	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NS	0.0	0.33	0.67	1.0	0.67	0.33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.33	0.67	1.0	0.67	0.33	0.0	0.0	0.0
	PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.33	0.67	1.0	0.67	0.33	0.0
	PB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.8	1.0

表 5.1.3  $u$  的隶属度函数

隶属度 \ 论域	-3	-2.5	-2	-1.5	-1	-0.5	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
模糊集合	NB	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NM	0.0	0.5	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NS	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	ZO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0
	PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0
	PM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0
	PB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0

#### 4. 模糊规则库

模糊控制规则实质上是将操作者在控制过程中的实践经验和对象的工作情况结合和总结而得到的控制规则，并对这些控制规则加以归纳处理，从而得到与输入、输出相

关的控制规则集合。

由于操作人员在控制过程中可能会遇到各种情况,因此模糊规则条数取决于很多因素,但因 PLC 的运算和处理能力的限制,应尽量选取较少的规则数来简化模糊控制器的设计和实现。

以电流偏差  $e$  和  $\Delta e$  为输入量的二维模糊控制器,常采用 Mamdani 控制规则,用模糊条件语句表示为:若  $E_1 = A_k$  and  $E_2 = B_k$  则  $U = C_k$ 。其中  $k$  为规则编号,  $k=1, 2, 3, \dots, m$ ;  $A_k, B_k, C_k$  分别为定义在  $e, \Delta e$  和  $u$  上的状态词汇。

本系统根据人工的操作经验,总结出相应的模糊控制规则如表 5.1.4 示。

表 5.1.4  $e, \Delta e, u$  模糊控制规则表

$e \backslash \Delta e$	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS
NM	NB	NB	NM	NS	NS
NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	NM	NS	ZO	PS	PM
PS	ZO	PS	PS	PM	PM
PM	PS	PS	PM	PB	PB
PB	PS	PM	PM	PB	PB

表 5.1.4 所示为模糊控制规则的简洁形式,电石炉原边电流偏差  $e$  的模糊分割数为 7,偏差变化量  $\Delta e$  的模糊分割数为 5,所以该表包含 35 条规则,其所表示的规则依次为:

R1: 若  $e=NB$  and  $\Delta e=NB$  则  $u=NB$

R2: 若  $e=NB$  and  $\Delta e=NS$  则  $u=NB$

⋮

R35: 若  $e=PB$  and  $\Delta e=PB$  则  $u=PB$

### 5.1.3 模糊化方法的选取

前面的设计已实现模糊集合的选取、实际输入量的尺度变换以及隶属度函数的计算,之后则需对尺度变换后的输入量进行模糊化处理。模糊化作用就是根据具体情况将电石炉原边电流偏差精确量和偏差变化精确量分别转化成模糊量,用于确定该模糊量对于模糊集合的匹配程度,为模糊推理做准备。为实现基本模糊控制器的标准化设计,在实际应用中常采用离散精确量和模糊化特例两种方法<sup>[33]</sup>。

本控制系统采用模糊特例法进行模糊化处理,将准确的输入量模糊化为单点模糊集合。在电流偏差  $e$  的论域  $[-6, 6]$  内,假设论域元素  $x=4$ ,则在该元素上对应的隶属度为 1,其他各点的隶属度均为 0,即  $e$  模糊化后得到的单点集合  $A$  为:

$$A=(0, 0, \dots, 0, 0, \dots, 1, 0, 0)$$

### 5.1.4 模糊推理算法的研究

在确定知识库和模糊化处理后，则可以对  $e$  和  $\Delta e$  模糊集进行推理运算并获取模糊输出矩阵。目前比较常见的模糊推理方法有扎德（Zadeh）法、马丹尼（Mamdani）法、耶格（Yager）法等，本文模糊推理中的蕴含运算采用 Mamdani 的最小运算规则。

由于电石炉模糊控制系统采用双输入单输出模糊控制器，表 5.1.4 中每条语句对应有模糊关系  $R_{ij} = (A_i \times B_j)^T \times C_{ij}$ ，其中  $A_i$ 、 $B_j$  和  $C_{ij}$  分别对应  $e$ 、 $\Delta e$  和  $u$  的模糊子集。根据全部的模糊控制规则可确定整个模糊关系为：

$$R = R_1 \vee R_2 \vee R_3 \dots \vee R_{31} \vee R_{35} = \bigcup_{i=1}^{n=35} R_i \quad (5.1.4)$$

当模糊控制器输入  $e$  和  $\Delta e$  经模糊化处理分别得到单点集合  $A$  和  $B$  后，按照模糊推理规则  $C = (A \times B) \circ R$ ，可以求取相应的模糊控制量。

由于利用 PLC 来编程获取模糊关系矩阵  $R$  的推理过程和运算处理较为复杂和困难，因而可以对模糊推理算法进行优化处理。

$$\begin{aligned} C &= (A \times B) \circ R = (A \times B) \circ \bigcup_{i=1}^{n=35} R_i = \bigcup_{i=1}^{n=35} (A \times B) \circ [(A_i \times B_i) \rightarrow C_i] \\ &= \bigcup_{i=1}^{n=35} [A \circ (A_i \rightarrow C_i)] \cap [B \circ (B_i \rightarrow C_i)] = \bigcup_{i=1}^{n=35} C_{iA} \cap C_{iB} = \bigcup_{i=1}^{n=35} C_i \end{aligned} \quad (5.1.5)$$

其中：“ $\times$ ”表示直积；“ $\circ$ ”表示最大、最小合成运算；“ $\rightarrow$ ”表示模糊最小蕴含运算；“ $\cap$ ”表示交运算；“ $\cup$ ”表示并运算；“ $C$ ”为模糊推理结果。由上式 (5.1.5)<sup>[35]</sup> 可知，该模糊推理算法，不但可以简化计算过程、减少矩阵运算量，也使我们可以更加方便的利用 PLC 软件编程实现推理获取模糊控制输出量。

### 5.1.5 清晰化及模糊控制表的建立

经模糊推理所得模糊矩阵集合是反映控制语言的不同取值的一种组合，其不能直接应用于对象的控制，因此这就需要从该模糊集合中解模糊计算出一个精确的控制量，这个过程称为清晰化，又叫做反模糊化（Defuzzification）。目前常见的清晰化方法有最大隶属度法、取中位数法及加权平均法。

最大隶属度法是将输出模糊集合中最大的论域元素作为清晰化结果，如果出现多个相同的最大隶属度值，则取他们的平均值；中位数法则充分利用输出模糊集合所包含的信息，可将集合的隶属函数曲线与横坐标所围成区域的面积的均分点对应的论域元素作为解模糊结果。

本系统则采用加权平均法计算获取精确控制量。该算法将输出论域中的全部元素  $x_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) 作为模糊推理输出集合  $C$  的隶属度  $\mu_c(x_i)$  的加权系数，并利用

公式:  $u = \sum_{i=1}^{n=13} x_i \mu_c(x_i) / \sum_{i=1}^{n=13} \mu_c(x_i)$  [36], 即可解模糊计算获得精确输出值  $u$ 。在这里若设

$C = (0, 0.5, 0.67, 0.5, 0.4, 0.4, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ , 输出  $u$  论域为  $[-3, 3]$ , 则

$$u = \frac{(-3) \times 0 + (-2.5) \times 0.5 + (-2) \times 0.67 + (-1.5) \times 0.5 + (-1) \times 0.4 + (-0.5) \times 0.4}{0 + 0.5 + 0.67 + 0.5 + 0.4 + 0.4} = -1.595$$

经模糊化、模糊推理和解模糊等过程, 控制器输入的  $e$  和  $\Delta e$  论域中元素值根据模糊规则推理输出相应的  $u$ 。因此我们对模糊语言集  $e$ 、 $\Delta e$  对应的论域的全部元素的所有组合计算出相应  $u$  的控制变化值, 并将他们描绘成二维控制表。如表 5.1.5 所示, 该表可以根据知识库和模糊算法离线手工计算得到, 也可利用 MATLAB 软件的 fuzzy 功能库辅助实现。本文将在下一节设计利用 PLC 来编程实现计算模糊控制表, 这样有利于调节系统参数和更正模糊规则, 使电极升降系统达到更好的控制效果。

表 5.1.5 模糊控制表

$e \backslash \Delta e$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
$u$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	-2.83	-2.81	-2.79	-2.83	-2.41	-2.17	-2	-2	-2	-2	-1.59	-1.34	-1
-5	-2.75	-2.75	-2.75	-2.75	-2.35	-2.18	-2	-1.62	-1.5	-1.5	-1.5	-1.38	-1
-4	-2.83	-2.81	-2.79	-2.83	-2.41	-2.17	-2	-1.64	-1.36	-1	-1	-1	-1
-3	-2.25	-2.25	-2.25	-2.25	-1.88	-1.68	-1.5	-1.5	-1.38	-1	-0.56	-0.5	-0.5
-2	-2	-2	-2	-2	-1.64	-1.36	-1	-1	-1	-1	-0.59	-0.34	0
-1	-2	-1.62	-1.5	-1.5	-1.13	-0.87	-0.5	-0.13	0	0	0.43	0.63	1
0	-2	-1.66	-1.41	-1	-0.64	-0.36	0	0.36	0.64	1	1.41	1.66	2
1	-1	-0.63	-0.43	0	0	0.13	0.5	0.87	1.13	1.5	1.5	1.62	2
2	0	0.34	0.59	1	1	1	1	1.36	1.64	2	2	2	2
3	0.5	0.5	0.57	1	1.38	1.5	1.5	1.68	1.88	2.25	2.25	2.25	2.25
4	1	1	1	1	1.36	1.64	2	2.17	2.41	2.83	2.79	2.81	2.83
5	1	1.38	1.5	1.5	1.5	1.62	2	2.18	2.35	2.75	2.75	2.75	2.75
6	1	1.34	1.59	2	2	2	2	2.17	2.41	2.83	2.79	2.81	2.83

由模糊控制表所得清晰值还需乘以量化因子转为实际的控制量, 对表中的输出值, 按照实际控制经验其应符合从上至下、从左到右逐渐递增的规律, 此外表中参数值可以根据实际控制效果加以修整, 以达到最佳控制效果。

## 5.2 控制系统的 PLC 程序设计

目前基于 PLC 的模糊控制器的设计方法通常是采用人工离线计算获取模糊控制表, 然后再进行查表控制。但由于创建模糊控制表的运算推理较为复杂和繁琐, 常需借助 MATLAB 等软件, 并且当对论域、隶属度函数或模糊规则加以调整时, 需重新计算得

到模糊控制表，因此不利于实际的工程调试和运用。根据上节所确定的电极升降系统模糊控制器的结构和相关参数后，本节将介绍基于西门子 S7-300 PLC 模糊控制器的程序设计与实现，利用 SIMATIC Manager 的 STL 编程语言实现模糊化、模糊推理、清晰化、计算模糊控制表以及电极升降查表控制等功能。

现针对模糊控制器的结构设计要求，将程序设计步骤分为：1、设计 PLC 程序的结构和流程；2、利用 STL 编程语言实现电极调节系统的模糊控制功能；3、对程序进行调试和修改。

### 5.2.1 程序结构和流程设计

根据模糊控制策略，电极升降控制 PLC 程序结构设计如图 5.2.1 示，整体结构主要包含创建模糊控制表和电极升降查表控制两大部分。

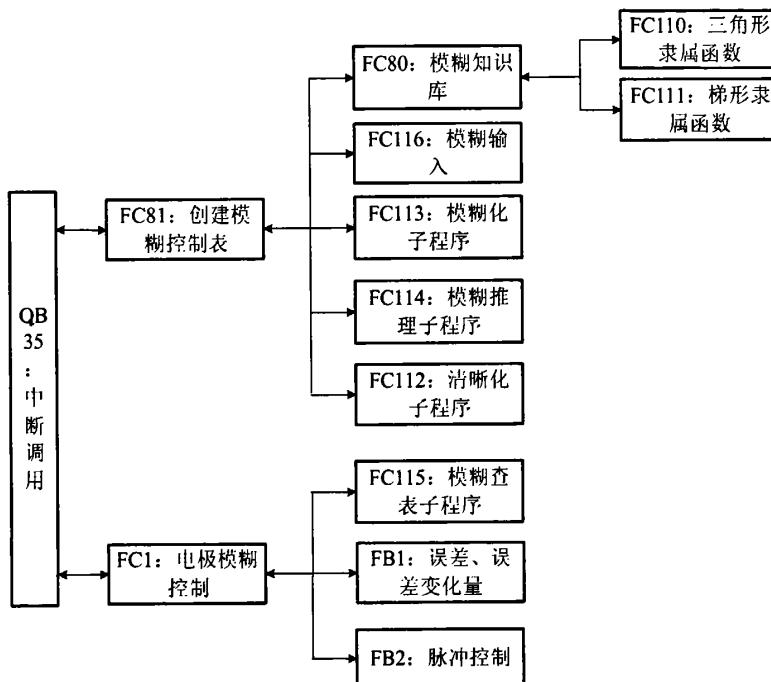


图 5.2.1 电极控制 PLC 程序模块分层调用结构图

图中 FC81 和 FC1 模糊控制程序由 OB35 组织块循环调用，其中 FC81 和 FC1 由多个子程序块组成，整个 PLC 程序采用四层树状调用结构，这样有利于对程序进行调试和修改。各 FC 程序块中的控制和运行参数在相应的 DB 数据块进行读取和存储，如 FC110 和 FC111 计算得到的  $e$ 、 $\Delta e$  及  $u$  的隶属度函数值存储在 DB41 ~ DB67 中；模糊规则存入 DB72 中；FC112 计算得到的控制表存入 DB74 中。利用背景和共享 DB 数据块，可以确保 PLC 在停电情况下，仍可寄存数据以防止重要信息丢失，从而提高系统的安全性和可靠性。

下图所示为模糊控制系统 PLC 程序设计流程。在实际控制中可以根据具体需要进 52

行创建表和电极手自动调节的切换选择。当选择创建模糊表时, 将  $e$ 、 $\Delta e$  论域[-6~6]中所有元素共 169 种组合作为模糊控制器输入, 其经过 PLC 模糊化、模糊推理、清晰化运算后分别存入 DB74 数据块中, 即由 PLC 离线创建得模糊控制表。当完成控制表的创建后, 即可根据实际的  $e$ 、 $\Delta e$  值利用查表法得到模糊控制器输出值, 之后对该值进行脉冲控制, 最终由 PLC 输出开关信号到现场执行元件从而实现对电极的升降调节。

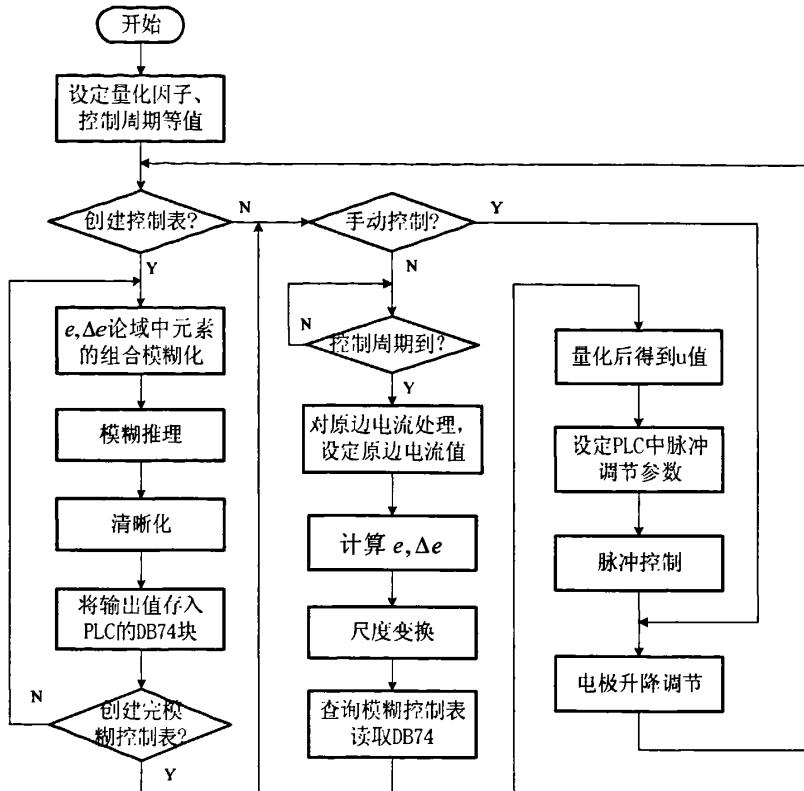


图 5.2.2 电极升降控制系统的程序流程图

在控制系统中, 模糊控制表一般在调试完成后固定不做变动, 即在无人工干预下 PLC 不执行创建模糊控制表程序, 但由于 PLC 故障或其他人为操作等因素可能会引起 PLC 寄存器中模糊控制表数据丢失, 因此可利用 PLC 的 OB100 启动模块在 PLC 重新启动后初始化数据, 自动选择执行创建控制表程序, 当完成创建后, 程序自动切换执行手动或自动电极升降控制。手动控制基于上位机软件 WinCC 直接进行点动操作, 自动控制则采用查询模糊控制表的方式得到控制输出量。

## 5.2.2 程序设计与编程

由于上一章已对脉冲控制器的系统设计和程序实现予以详细说明, 这里不再加以论述, 根据图 5.2.1 所示的程序结构, 电极模糊调节系统主要由三部分编程实现: 创建控制表、电极模糊查表控制、创建表和查表控制功能切换。

### 5.2.2.1 创建模糊控制表的程序设计

根据创建模糊控制表的步骤和 SIEMENS PLC 的编程<sup>[37]</sup>环境, 编程前需系统的创建和分配若干子程序块 (FC) 和数据块 (DB), 编程所需 FC、DB 名称及功能列表如下, 且所建立的各 FC 和 DB 块按图 5.2.1 所示结构分层调用。

表 5.2.1 创建模糊控制表程序模块组成

类型	地址	名称	功能
程 序 功 能 块	FC80	模糊知识库	创建隶属度函数和模糊规则库
	FC81	创建查询表	调用模糊化、模糊推理等子程序
	FC110	三角隶属函数子程序	三角形隶属函数公式
	FC111	梯形隶属函数子程序	梯形隶属函数公式
	FC112	清晰化子程序	解模糊输出矩阵
	FC113	模糊化子程序	输入元素模糊化处理
	FC114	模糊推理子程序	推理计算输出矩阵
	FC116	模糊输入子程序	将论域元素组合作为模糊输入
共 享 数 据 块	DB41~DB47	E_NB~E_PB	存储 $e$ 模糊语言隶属度数据
	DB51~DB55	EC_NB~EC_PB	存储 $\Delta e$ 模糊语言隶属度数据
	DB61~DB67	U_NB~U_PB	存储 $u$ 模糊语言隶属度数据
	DB70	E	存储 $e$ 论域元素模糊化后的单点集合
	DB71	EC	存储 $\Delta e$ 论域元素模糊化后的单点集合
	DB72	R	存储模糊规则表中数据
	DB73	U	存储模糊推理输出矩阵
	DB74	TABLE	存储模糊查询控制表数据

以下根据程序结构和流程, 对各 FC 程序功能块, 分别加以详细的介绍和说明。

#### 1. 知识库 ——FC80

根据模糊控制器的结构和参数建立模糊知识库, 选取隶属度函数和论域, 确定模糊控制器输入、输出对象的隶属度函数值和模糊规则。利用 FC80 程序块调用 FC110 和 FC111 块来计算  $e$ 、 $\Delta e$ 、 $u$  隶属度函数, 并将执行结果分别存入 DB41~47, DB51~DB55, DB61~DB67 中, 同时将 7 行 5 列共 35 条模糊规则送入 DB72 数据块中, 以便 PLC 的操作系统执行模糊化和模糊推理程序时对 DB 块中所需数据进行调用和计算。

FC80 部分核心代码为:

```

CALL “模糊三角隶属函数子程序”
a := -4.000000e+000
b := -3.000000e+000
c := -2.000000e+000
max := 3
min := -3
float:= 5.000000e-001
DB_N := “U_NB”                                //将  $u$  的 NB 隶属度函数存入 DB61 数据块中
L    61                                         //DB61 (U_NB) 的数据块号

```

```

T      "R" . R[0, 0]           //将 61 存入 DB72 数据块的 DBW0 地址中
L      62
T      "R" . R[1, 2]           //将 62 存入 DB72 数据块的 DBW14 地址中

```

程序中利用梯形或三角型函数计算各隶属函数值, 如  $u$  的  $NB=[1, 0.5, 0, \dots, 0]_{1 \times 13}$ , 结果存入相应 DB61 块中。另外程序将表 5.1.4 中模糊规则从左到右、从上自下依次存入 DB72 数据块相应地址中, 其中 NB~PB 分别用 61~67 数字表示, 如表中第 1 行、1 列规则为 NB, 则将 61 存入 DB72.DBW0 地址中; 表中第 2 行、3 列规则为 NM, 则将 62 存入 DB72.DBW14 中。这样以便在模糊推理过程中根据 DB72 地址中的数据来查询  $u$  隶属函数所在的 DB 数据块。

### 2. 模糊输入、模糊化 ——FC116、FC113

根据模糊控制器结构设计, 进行离线创建控制表和模糊推理前首先需要利用 FC116 将  $e$  和  $\Delta e$  的论域[-6 6]中的 169 种元素组合, 如  $x=3$ 、 $y=4$  作为模糊控制器输入, 然后再利用 FC113 对该组合进行模糊化处理后得两个单点矩阵, 并分别存入 DB70 和 DB71 数据块中。FC116、FC113 程序流程如图示:

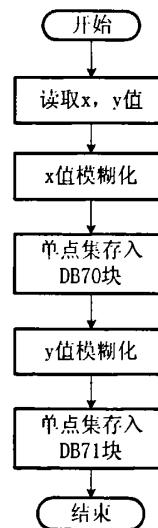
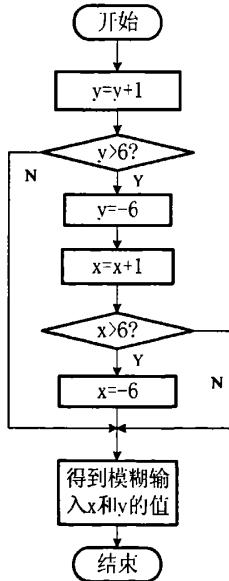


图 5.2.3 模糊输入子程序流程图

图 5.2.4 模糊化子程序流程图

由上图可知, 当运行 FC116 子程序块后, 如得到模糊控制器输入组合  $x=-5$ ,  $y=0$ , 则可利用 FC113 程序将  $x$ ,  $y$  值模糊化处理, 得到  $[0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, \dots, 0]_{1 \times 13}$ ,  $[0, 0, 0, 0, 0, 0, 1, 0, \dots, 0]_{1 \times 13}$  两单点集合, 并分别存入 DB70 和 DB71 数据块中的地址中。如  $x=-5$ , 则  $DB70.DBW4=1$ , 其它地址内容均为 0。

### 3. 模糊推理、清晰化 ——FC114、FC112

当创建完知识库和模糊化后, FC114 程序块利用 5.1.4 节中的所述简化推理算法编程实现模糊推理功能, 并将模糊化得到的单点集合推理计算得到输出矩阵, 结果存储在 DB73 中。最后 FC112 利用 5.1.5 节中的加权平均清晰化算法, 对 DB73 中的输出矩阵解

模糊计算获得准确控制量，将结果存入 DB74 数据块中，用以模糊查表控制。FC114、FC112 程序流程如图示：

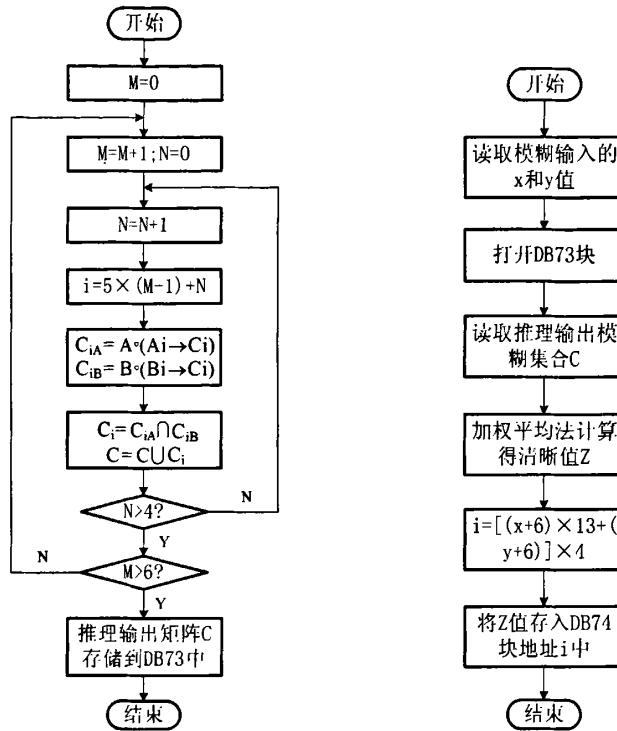


图 5.2.5 模糊推理子程序块流程图

图 5.2.6 清晰化子程序块流程图

图 5.2.5 所示为模糊推理简化流程，其根据式(5.1.5)所述算法并结合 DB 块中隶属度函数、模糊规则以及单点模糊集进行模糊推理运算。其中 A、B 分别表示 DB70、DB71 块中模糊单点矩阵，Ai、Bi、Ci 分别表示第 i 条模糊规则所对应 DB41~47、DB51~56、DB61~67 块中  $e$ 、 $\Delta e$  和  $u$  的隶属度函数值，M 和 N 分别为模糊规则表的行和列编号。

图 5.2.6 所示为  $e$  和  $\Delta e$  论域中不同元素  $x$ 、 $y$  的组合所得到的推理结果利用公式存入 DB74 数据块相应地址中。如  $x=-6$ ,  $y=5$ , 模糊推理和清晰化后结果为-2.83，则该数据存储到 DB74 块的地址 44 中，即 DB74.DB74=−2.83，这样为查表控制做准备。

#### 4. 创建控制表 ——FC81

由于模糊化、模糊推理、清晰化等功能均以子程序形式在各 FC 块中编程实现，因而需要利用 DB 块分别对其分配相应参数，各模块在 FC81 中调用顺序为：FC80(模糊知识库)、FC116(输入组合)、FC113(模糊化)、FC114(模糊推理)、FC112(清晰化)。由程序块执行得到的模糊控制表存入 DB74 块中。FC81 部分核心代码为：

```

CALL “模糊推理子程序”          //调用 FC114
V_A_RN := 7                      //模糊规则表 7 行
H_B_RN := 5                      //模糊规则表 5 列
A_N := 13
B_N := 13
  
```

```

C_N      := 13          //u 论域元素个数
R       := "R"          //DB72 模糊规则数据块
A       := "E"          //读取 DB70, 调用 e 的模糊单点集合
B       := "EC"         //读取 DB71, 调用 Δe 的模糊单点集合
C       := "U"          //推理结果存入 DB73 数据块中
A_START_DB:= 41        //e 隶属函数首 DB 块
B_START_DB:= 51        //Δe 隶属函数首 DB 块

CALL   "清晰化子程序"    //调用 FC112
U_DB   := "U"
U_MAX  := 3.000000e+000 //u 论域最大范围
U_MIN  := -3.000000e+000 //u 论域最小范围
FLOAT  := 5.000000e-001
A_IN   := MD124         //e 论域元素 x 的值
B_IN   := MD128         //Δe 论域元素 y 的值
TABLE  := "TABLE"       //推理结果存入 DB74 模糊控制表数据块中

```

当 OB35 定时中断组织模块调用执行 FC81 时, 各子程序根据分配的参数, 进行模糊化、模糊推理、清晰化等运算, 由于  $e$  和  $\Delta e$  论域元素  $x, y$  均为  $(-6, 6)$  集合中的任意值, 其共有 169 种组合, 因此当 OB35 调用 FC81 块 169 次时, 即可得到 13 (行)  $\times$  13 (列) 模糊控制表 (见表 5.1.5), 其以一维数组形式存储在 DB74 块中。

### 5.2.2.2 电极升降控制的程序设计

上文详细介绍了利用 STL 语言编程实现模糊控制表的创建。因此根据程序流程设计, 模糊控制表创建完成后, 即可根据原边电流设定值与实际值的偏差  $e$  和偏差变化  $\Delta e$  在线查询模糊控制表获取控制输出量  $u$ , 并利用  $u$  值实现对电极的升降控制。整个过程需编程实现计算  $e$  和  $\Delta e$  值、查询模糊控制表、脉冲控制三部分功能, 根据程序结构设计建立 FB 块及背景 DB 数据块, 具体 PLC 模块分配见表 5.2.2 所示。

表 5.2.2 电极控制程序模块组成

类型	地址	名称	功能
程序功能块	FC1	电极模糊控制	调用 FB1、FC115、FB2 块
	FB1	E_EC	采样计算原边电流偏差 $e$ 和 $\Delta e$
	FB2	脉冲调节	将查询控制表所得输出值脉冲控制
	FC115	模糊查表控制子程序	电极手动调节和查询控制表
背景数据块	DB81	A_E_EC	A 相电极的 FB1 背景数据块
	DB82	A_PULSE	A 相电极脉冲控制背景数据块
	DB83	B_E_EC	B 相电极的 FB1 背景数据块
	DB84	B_PULSE	B 相电极脉冲控制背景数据块
	DB85	C_E_EC	C 相电极的 FB1 背景数据块
	DB86	C_PULSE	C 相电极脉冲控制背景数据块
共享数据块	DB10	A 相控制参数	存储 A 电极查表控制及脉冲调节参数
	DB11	B 相控制参数	存储 B 电极查表控制及脉冲调节参数
	DB12	C 相控制参数	存储 C 电极查表控制及脉冲调节参数

由于在上章已对脉冲控制器的设计和编程予以详细说明, 在这里不再对 FB2 模块做

以介绍，另外由于电石炉的 A、B、C 三相电极升降模糊控制原理和结构设计相同，因此以下将以 A 电极的模糊查表控制程序设计和实现步骤为例加以具体介绍。

### 1. 计算 $e$ 和 $\Delta e$ ——FB1

电极模糊控制器采用双输入单输出模式，因此在对对象进行模糊查表控制之前，需要计算输入值。FB1 程序块根据三相原边电流的设定值和反馈值以及控制周期计算  $e$  和  $\Delta e$ ，并将运行结果存在相应数据块中，如 A 相电极的  $e$  和  $\Delta e$  存储在 DB10 中。

### 2. 查询模糊控制表子程序 ——FC115

根据图 5.2.2 所示程序流程可知，电极模糊控制器程序设计的核心部分为模糊控制表的查询程序，模糊控制表（见表 5.1.5）中控制输出值  $u$  按照先行后列、从左到右的一维访问方式存储在共享数据块 DB74 中，因此可以将实际  $e$ 、 $\Delta e$  值经尺度变换后直接查询 DB 块中相应地址，从而得到控制输出  $u$  值。FC115 程序如图所示：

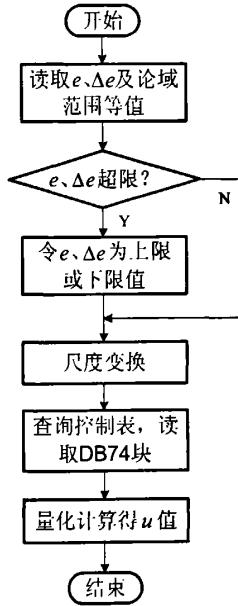


图 5.2.7 查询控制表子程序流程图

由于之前创建控制表的程序部分已将  $e$ 、 $\Delta e$  论域元素  $x$ 、 $y$  的组合所对应的模糊计算结果存储到 DB74 相应地址中，因此在这里 FC115 查表程序模块首先将实际  $e$ 、 $\Delta e$  值尺度变换到论域  $[-6, 6]$  中，利用变换后得到的  $x$ 、 $y$  值，并结合公式  $[(x + 6) \times 13 + (y + 6)] \times 4$  即可从 DB74 数据块的地址中查询得到实际输出  $u$  值。如当  $x = -3$ ， $y = 0$  时，则应读取 DB74 块的 180 地址中数据，此时得 DB74.DBD180 = -1.5 即查询模糊控制表所得结果  $u = -1.5$ ，然后对此结果乘以量化因子即可得到实际的控制输出。

### 3. 电极升降控制主程序 ——FC1

在 FC1 主程序中调用 FB1、FC115 及 FB2 各子程序块，实现对电极的升降模糊查表控制。首先执行 FB1 程序块，根据设定的控制周期计算  $e$  和  $\Delta e$  值，然后利用 FC115

程序将计算结果进行尺度变换和查询模糊控制表, 最后将查询结果乘以比例因子转换为实际控制输出值, 再调用 FB2 对其进行脉冲调节, 最终 PLC 将控制信号输出给现场执行元件。其中由于 FC115、FB1、FB2 均为子程序模块, 在 FC1 程序块中利用 DB10~DB12 分别对其分配控制参数。FC1 程序中三相电极的 A 相电极控制程序流程如图示:

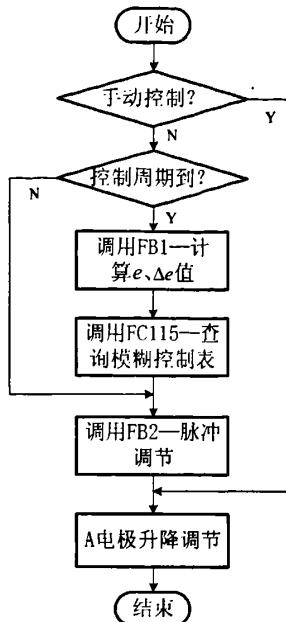


图 5.2.8 A 相电极控制程序流程图

### 5.2.2.3 功能切换的程序设计

综合上两节所述: FC81 块程序实现创建控制表功能, FC1 块程序实现模糊查表控制功能, 当分别完成控制表和查表控制的编程设计后, 按照图 5.2.1、5.2.2 程序设计结构流程, 需要利用 OB35 循环中断组织模块进行切换调用 FC81 和 FC1 程序块。OB35 程序流程如图示:

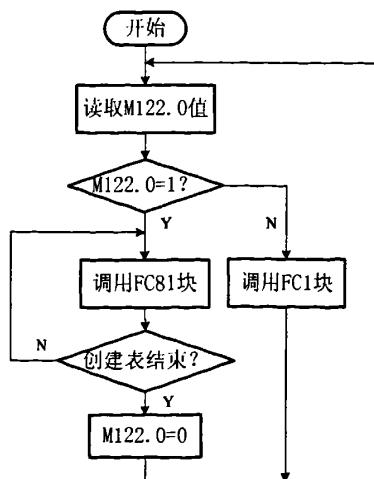


图 5.2.9 OB35 中断调用主程序流程图

在程序执行中，利用条件语句和其他参数判断 FC81 程序创建模糊控制表进度，当完成模糊控制表后，OB35 会切换执行 FC1 查表控制程序块。由于创建控制表程序一般仅在 PLC 故障或停电重启后执行，因此可以利用 OB100（PLC 启动执行功能块）组织块将变量 M122.0 变量置 1，此时 OB35 只执行 FC81 程序块，即创建模糊控制表，当 FC81 完成 13 行  $\times$  13 列模糊控制表格后，自动将 M122.0 变量置 0，此时 OB35 只执行 FC1 程序，即执行电极查表控制。整个程序自动完成 FC81 和 FC1 的功能切换。

利用创建控制表和查表控制两部分程序相切换的方法，不仅可以避免 PLC 因实时计算模糊控制表使 CPU 负荷过大而影响其他程序执行，而且可以修改模糊控制表却不影响电极升降控制，因此基于 PLC 的电极模糊控制器程序设计具有简单、可行和层次清晰的特点，有利于实际的工程调试和应用。

### 5.3 系统调试与运行

由于创建模糊控制表程序以及电极模糊控制程序的结构和逻辑复杂，因此将编写好的程序投入实际的运行之前需要进行调试和修改。以下分别对系统程序的调试和实际运行加以介绍和说明。

#### 1. 程序调试

本文虽采用式 (5.1.5) 所列简化模糊推理算法创建模糊控制表，但在推理计算中仍有大量数组进行大小比较，因此 PLC 程序的逻辑结构复杂、编程量较大，在程序编写中容易出现错误。当程序编译无故障后，选用 S7-PLCSIM 仿真软件测试运行结果。STEP7 软件程序运行状态如下图所示。



图 5.3.1 创建模糊控制表程序运行状态图

图 5.3.1 中, 当 M122.0 为“1”,  $e = -6$ ,  $\Delta e = 4$  时, 输出模糊矩阵  $u = [0, 0.5, 0.6667, 0.5, 0.4, 0.4, 0, \dots, 0]_{1 \times 13}$ , “TABLE” .TABLE[0, 10] = -1.59, 即得清晰化结果为 -1.59, 模糊控制表 (如表 5.1.5) 第 1 行、第 11 列值为 -1.59。

对于 PLC 程序运行结果, 可以利用人工和其他软件辅助计算的方式来验证其结果正确与否, 在这里借助 MATLAB 软件<sup>[38][39]</sup>和人工计算方法。如图 5.3.2 所示, 在 MATLAB 的 FUZZY 功能库中确定模糊结构、建立隶属度函数和模糊规则后, 当在 Rule Viewer 窗口中设置 input 参数为  $[-6 4]$  (即  $e = -6$ ,  $\Delta e = 4$ ) 时, MATLAB 显示结果  $u = -1.6$ , 因此利用 MATLAB 软件验证得 PLC 程序执行结果是正确的。最后我们利用人工计算得到的模糊矩阵值和  $u$  值与程序执行结果也相同, 同样也验证了 PLC 程序的执行结果也是正确的。

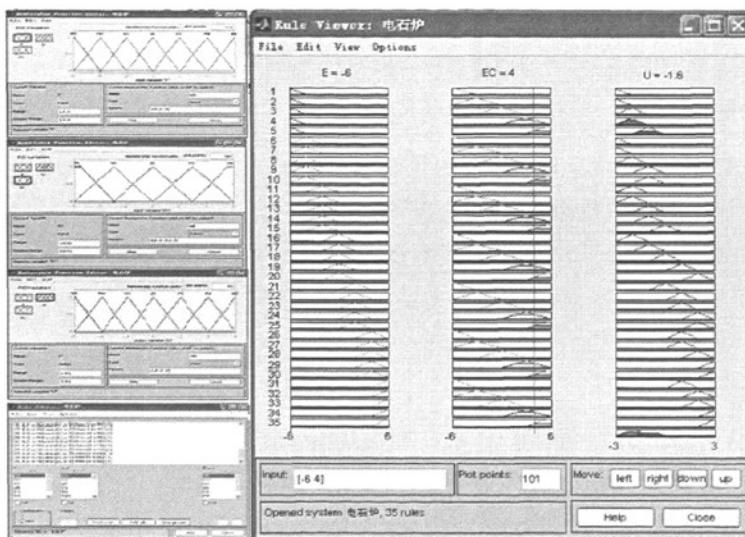


图 5.3.2 MATLAB 模糊控制工具图

最后选取  $e$ 、 $\Delta e$  元素的任意 20 种组成 (如  $e = -3$ ,  $\Delta e = 2$ ), 利用 MATLAB 软件和手工计算均验证了 PLC 程序的正确性和可行性。

当完成电极升降模糊控制系统的程序调式后, 即可将程序下载到现场 PLC 的 CPU 硬件存储器中, 再进行实际的硬件调试和诊断工作。

## 2. 实际运行

系统运行时, 利用上位机 WinCC 软件的图形化监控功能显示被控变量的实时和历史数据曲线, 图 5.3.3、图 5.3.4 所示分别为电极改进型 PID 控制和模糊控制下的三相原边电流运行状态曲线。

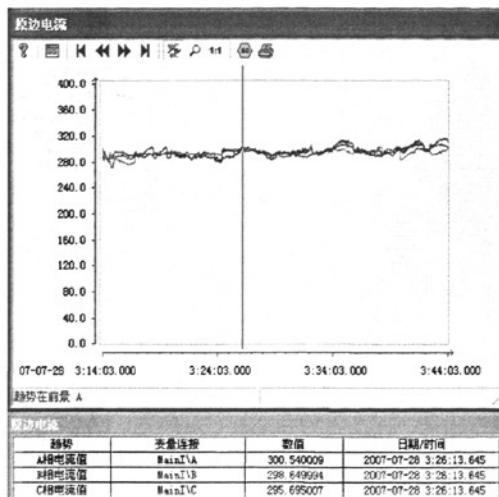


图 5.3.3 改进 PID 控制下三相原边电流曲线

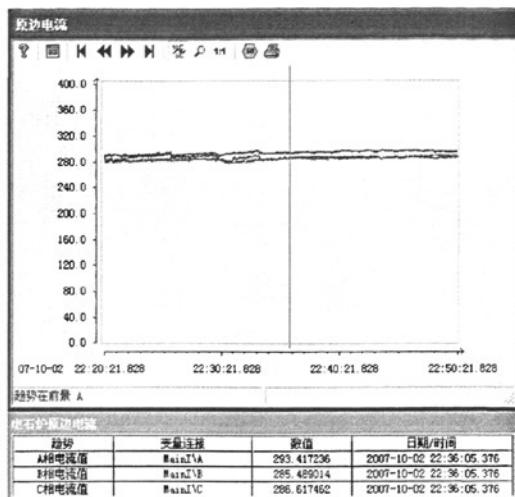


图 5.3.4 模糊控制下三相原边电流曲线

图 5.3.3 中三相原边电流曲线如同图 4.4.3 所示。由图中曲线可知, 利用改进型 PID 控制方案对电极调节后三相电流仍会出现较大的波动。

图 5.3.4 所示为电极模糊控制下三相电流曲线, 由图中三根曲线可以看出, 在系统运行的三十分钟时间内, 三相电流运行平稳, 并且没有较大波动, 电极的调节效果较好。由于三相电极间存在电流耦合现象, 当对一相进行调节时则另两相电流也相应发生变化, 这样使得电极的调节频繁, 因而模糊控制策略虽使系统达到较好的稳定效果, 但仍存在电极调节频繁的问题。

在改进型 PID 控制和模糊控制的参数均利用实验法进行选取的前提下, 将图 5.5.3 和图 5.3.4 的这两种电极控制算法的电流曲线进行比较可以看出, 在电极升降系统中模糊控制相比改进型 PID 控制的效果有所改善, 三相电流的抖动次数减少, 系统控制效果得到提高。

## 5.4 本章小结

本章重点介绍了电石炉电极模糊控制系统的设计和研究过程, 并提出基于 PLC 离线创建控制表和在线查表控制的模糊控制策略。另外本章详细描述了电极模糊控制系统中 PLC 的 STEP 7 程序设计和编程实现过程, 最后对软件的调试和实际运行效果加以陈述, 并对比分析了电极升降改进型 PID 控制和模糊控制效果。

## 6 总结与展望

### 6.1 总结

本文根据山西省电石炉项目所提出的电极升降和压放控制、参数监控等要求,设计实现了一种基于 PLC 的电石炉控制系统,针对电石炉电极控制升降部位,着重探讨了改进型 PID 控制和模糊控制方案,以达到满足项目需求、稳定三相电流值、减少能耗、降低人工劳动强度等设计目的。

本文工作主要分为电石炉控制系统的设计和电极升降控制方案的研究两大部分,主要成果如下:

(1) 综述了电石工业的国内外生产现状、研究现状和发展前景;重点说明了本课题的项目背景、意义以及论文的主要研究内容和章节安排。

(2) 分析了电石炉的电石生产反应机理、电气特性、电热过程;详细介绍了电石生产工艺和相关设备,分别对电石炉的炉体、电极、变压器和短网等主要设备加以描述和说明。

(3) 根据生产工艺和项目需求,设计了电石炉控制系统;对系统的硬件包括 PLC、现场仪表、工控机等设备进行了选型和安装规划;对系统的软件进行设计,完成了下位机 PLC 软件的通讯设置和程序结构流程的设计,完成了上位机 WinCC 软件的变量管理和画面设计。

(4) 设计了改进型 PID 电极升降控制系统;在常规 PID 控制算法基础上,研究和提出了带死区特性的改进型 PID 控制方案,并给出了脉冲控制器的设计方法;完成该系统的 PLC 程序设计、调试和应用,并对比分析了实际运行中电极手动控制和改进型 PID 升降控制下的电流状态曲线。

(5) 设计了基于模糊控制的电极升降系统;研究模糊控制算法以及模糊控制器的结构和组成,提出了 PLC 离线创建模糊控制表的设计方法;完成了该系统的 PLC 程序设计、调试和应用,对比分析了实际运行中电极改进型 PID 控制和模糊控制下的电流运行效果。

该电石炉控制系统利用上位机 WinCC 监控软件与下位机 PLC 硬件相结合,其直观的监控界面和报警功能降低了人工劳动强度,提高了生产安全性。电极升降控制系统所采用的模糊控制方案相比改进型 PID 控制,使得三相电极的平衡性得以改善,电流的稳定效果得到提高,从而达到节能降耗、提高产品质量的设计目的。

## 6.2 展望

目前所设计的电石炉控制系统已经投入实际运行，操作人员可利用上位机软件直接实现电极的手自动升降、压放控制等功能。但就目前系统的运行状态，部分程序和参数需进一步改善和调整以便适应现场控制需要，仍然有一定的工作需要进一步研究和完善：

(1) 在电极升降控制系统研究设计期间，因缺少实际运行的数据没有对电石炉对象进行建模研究，下一步工作的重点是采集现有运行系统的参数数据，建立电石炉控制对象模型，对模糊控制算法和改进型 PID 算法进一步分析，完善参数整定工作。

(2) 现有电极升降系统采用原边电流控制方式，但因原边电流不能完全反映当前电石炉系统的运行状态，下一步工作是尝试利用软测量技术中的比电阻值来实现三相电极的自动升降控制，使系统达到更佳运行效果。

基于 PLC 的电石炉控制系统的工作将为电石炉自动化水平的提高和改善发挥一定的作用，同时由于电石炉三相电极电弧冶炼系统在金属冶炼领域有较强的代表性，本控制系统的研究和设计在这些领域具有较大的推广和应用价值。

## 致 谢

在两年研究生学习生活即将结束之际，特向所有关心、爱护我的老师和同学们表示真诚的谢意。

本论文的选题、研究和撰写工作都是在导师孙瑜教授的悉心指导下完成的。感谢孙老师对我论文提出的宝贵意见和精辟的指正。孙老师工作认真，治学严谨，诲人不倦，不仅使我在生活、学习上取得了很大进步，同时也教会了我很多为人处事的道理。在我攻读学位期间孙老师给我提供了优越的科研环境和条件，使我的理论和实践知识得到很大提高，在此对孙瑜老师深表感谢！

感谢戚志东老师在我研究生的学习和生活中给予的帮助和教导，感谢他对我良师益友般的关心和指导。

感谢自动化学院过程控制研究所的同窗彭媛媛、陈刚、李志安、李求根、司徒嘉、查吉顺、王森林、王伟等人在课题研究中给了我许多帮助和意见，以及学院的全体同学所形成良好的学习氛围和团结进取的优良风气，这也给本论文的顺利完成创造了良好的条件，希望我们在今后的道路上共同进步。

感谢我的父母亲和女朋友，感谢他们这些年来对我一如既往的关心和支持！他们给我的关怀与理解将使我牢记自己的责任。在今后的学习与工作中，事无大小，必尽全力，无论成败，永不言弃。

最后，谢谢各位评阅学位论文和出席学位论文答辩的老师。

学生：黄杰  
2008年10月

## 参考文献

- [1] 熊谟远, 岳宏亮. 电石生产加工与产品开发利用及污染治理[M]. 北京: 化学工业出版社出版, 2005
- [2] 顾明聪. 电石生产节能降耗研究及工程应用[D]. 四川大学, 2005, 11:7
- [3] 吴樟生. 我国电石行业现状分析与未来展望[J]. 化工管理, 2007, 9:67-71
- [4] 王炳盛, 刘亚奎. 电石生产的发展方向[J]. 中国氯碱, 2007 (5) :43-44
- [5] 刘炳宇. 内蒙古电石行业的调查报告[D]. 内蒙古大学, 2006, 5:4-10
- [6] 李淑雪, 张秀玲, 刘金胜. 电石炉电流微机自动控制装置[J]. 河北大学学报(自然科学版), 1992(1):27-34
- [7] 蔡胜年, 王强. 智能控制策略在矿热炉微机控制系统中的应用[J]. 工业控制计算机, 1995(4):12-15
- [8] 刘兆飞, 任庆昌, 张巍. 基于模糊解耦算法的电石炉控制系统设计[J]. 工业加热, 2006, 35(6):32-33 46
- [9] 付丽君, 李宗纲. 电石炉单片机控制系统[J]. 节能, 1990(10):45-47
- [10] 李建兴, 蒋新华. 基于 PLC 的电石炉模糊控制系统研究与应用[J]. 福建工程学院学报, 2007, 5(6):555-557 585
- [11] A.R.Sadeghm, J.D.Lavers. Application of Adaptive Fuzzy Logic Systems to Model Electric Arc Furnaces[J]. 1999, 6:854-858
- [12] Rangaswamy.T.R, Shanmugam.J, Mohammed.K.P. Fuzzy based automatic control system for an electric arc furnace[J]. ISA TECH/EXPO Technology Update Conference Proceedings, 2001:347-357
- [13] 陈龙, 马泊渊, 张雪峰. 智能 PID 控制在电石炉电极调节系统中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(7):1544-1547
- [14] Zhang Shao-de. Decoupling Control for Electrode System in Electric Arc Furnace based on Neural Network Inverse Identification[J]. 2006,10: 112-116
- [15] 郝晓弘, 强明辉, 李占明. 电石电弧炉节能型智能控制系统[J]. 甘肃工业大学学报. 1997, 23(1):30-35
- [16] FenghuaWang, ZhijianJin, ZishuZhu, XushengWang. Modeling the DC Electric Arc Furnace Based on Chaos Theory and Neural NetWork[J]. 2007,6: 1-6
- [17] Q.P.Wang, D.L.Tarn, Y.C.WANG. Event-based Intelligent Control System of Carbide Electric Arc Furnace(CEAF)[J]. Proceedings of the 3nd World Congress on Intelligent Control and Automation,2000,6-7:471-476

- [18] 谢更柱, 王德志. 模糊控制与 PID 结合控制在电石炉上的应用 [J]. 化工自动表, 2004, 31(5):82~83
- [19] 王庆鹏, 郝晓弘. 电石生产复合 FUZZY-PI 控制的研究 [J]. 甘肃工业大学学报, 1998, 24(2):54~58
- [20] 府谷县新龙化工有限责任公司编印. 12000KVA 电石炉生产规程 [M]. 2001. 1:8~18
- [21] 海川化工论坛, <http://bbs.hccbbs.com/index.php>
- [22] 上海吴淞化工厂业余写作组. 电石生产 [M]. 北京:燃料化学工业出版社, 1972
- [23] Л. А. 库兹涅佐夫. 电石生产 [M]. 北京:化学工业出版社, 1957
- [24] 郑晟, 巩建平, 张学. 现代可编程序控制器原理与应用 [M]. 科学出版社, 1999
- [25] 中国设备网, [http://www.cnsb.cn/html/news/124/show\\_124984.html](http://www.cnsb.cn/html/news/124/show_124984.html)
- [26] <http://hi.baidu.com/wqch04f/blog/item/3571ce8f44e63cff513d92e7.html>
- [27] 西门子有限公司. STEP 7 V5.1 编程使用手册 [M]. 1998
- [28] 周泽魁. 控制仪表与计算机控制装置 [M]. 北京:化学工业出版社, 2002:224~282
- [29] 西门子(中国)有限公司. 深入浅出西门子 WinCC V6 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2004:18~38
- [30] 李永博, 孙瑜. 电石生产中比电阻的软测量 [J]. 化工自动化及仪表, 2005, 32(1):21~22 28
- [31] 廖常初. S7-300/400 PLC 应用技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005:400~405
- [32] 彭佩珍, 吴介一. 埋弧电石炉模糊控制系统的稳定性 [J]. 冶金自动化, 1995(5), 39~42
- [33] 许力. 智能控制与智能系统 [M]. 北京:机械工业出版社, 2007
- [34] 曾光奇, 胡均安, 王东, 刘春玲. 模糊控制理论与工程应用 [M]. 武汉-华中科技大学出版社, 2006
- [35] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京:清华大学出版社, 南宁:广西科学技术出版社, 2007:52~66
- [36] 李友善, 李军. 模糊控制理论及其在过程控制中的应用 [M]. 北京:国防工业出版社, 1993, 6:70
- [37] 西门子公司. S7-300 和 S7-400 编程语句表 (STL) 参考手册 [M]. 2004. 1.
- [38] 张国良, 曾静, 柯熙政, 邓方林. 模糊控制及其 MATLAB 应用 [M]. 西安:西安交通大学出版社, 2002, 11:43~61
- [39] 王忠礼, 段慧达, 高玉峰. MATLAB 应用技术在电气工程与自动化专业中的应用 [M]. 北京:清华大学出版社, 2007:198~248

## 附录

### 攻读硕士学位期间发表的学术论文：

- [1] 基于 WinCC 的双机冗余及数据库查询系统的设计 [J]. 工业控制计算机, 2008, 21(3):1-2

### 攻读学位期间参加的科研项目：

- [1] 2007 年 4 月~2007 年 11 月 • 山西襄垣电石炉自动控制系统

利用西门子 PLC 软硬件和 WinCC 监控系统, 本人独立完成了电石炉控制系统的  
设计、软件编程以及 WinCC 监控界面的设计; 完成了电石炉电极升降控制方案的  
研究、设计以及编程调试工作。

- [2] 2008 年 1 月~2008 年 3 月 • 山西太原万邦铬铁炉控制系统

采用西门子 S7 300 PLC, 设计了铬铁炉监控系统。系统将 PLC 与 WinCC 相结  
合实现了电极手自动升降控制和复杂的电极压放控制以及参数显示等功能。