

## 摘 要

交流电弧炉炼钢过程是一个极为复杂的物理变化和化学反应过程，同时，在炼钢过程中存在着较强的非线性、不确定性、时变性和强耦合。对于这样一个复杂的过程，要建立其精确的数学模型是非常困难的，甚至是根本不可能的。电极调节是交流电弧炉炼钢中的关键技术，采用传统的 PID 控制很难达到良好的控制效果。

本文在查阅了大量的国内外相关文献的基础上，对电弧炉炼钢的工艺过程，国内外炼钢过程发展状况进行了介绍，并就电弧炉电极控制方法做了分析，然后，针对交流电弧炉炼钢工艺对电极控制的要求，选择恒阻抗控制策略，设计出了由 PLC 和液压调节器组成的电极升降控制系统，介绍了系统主要硬件结构配置，S7-300 PLC 程序结构，软件设计、上位机监控 WINCC 组态画面。

根据电弧炉炼钢过程中各炼期不同的控制要求，本设计采取了智能复合式控制算法，即熔化期希望快速调节采用 Bang-Bang 控制，氧化期应用模糊控制适中调节，还原期用 PID 进行精确调节。并基于 S7-300 对复合式控制算法的实现进行了分析设计，并应用 STEP.7 完成了编程工作。

通过对系统整体设计和具体控制编程的实现表明，对电弧炉电极控制系统的设计是可行的，在提高电弧炉电极控制系统性能上具有参考意义。

**关键词：**电弧炉；电极控制；PLC；智能复合式控制

## **The Electrode Control System of AC Electric Arc Furnace Based on PLC**

### **Abstract**

The steelmaking process of AC electric arc furnace is a rather complex process with physicochemical reactions, characterizing the strong nonlinearity, uncertainty, time-variance and serious interconnection etc. It is impossible to establish a precise model for the steelmaking of the AC electric furnace. Electrode automatic control is a key technique in AC furnace steelmaking and not easy to get a better control effects by adopted traditional PID control stage.

The thesis includes the historic course, the actual research and the tendency of EAF steelmaking control method, which is based on the extensive knowledge of the craftwork of EAF and the development of steelmaking process control at home and on aboard, which all though study on a great deal of documented about control method of the EAF. According to the control demands on electrode, a new control system consisting of PLC and electric-fluid following regulator is designed. The main hardware of the system ,the S7-300 PLC program architecture, program designing and the configuration field of the operating panel winCC are introduced.

The desired control performance of electrode are different among various steelmaking stages, therefore, the intelligent compound control system is adopted in the system, which is consisting of the Bang-Bang control during the melting stage, the fuzzy control technique in the oxidizing stage and the PID control strategy for the refining stage. Satisfying effect is achieved by using above algorithms. The intelligent compound control system is analyzed and designed based on S7-300 PLC, At the same time, the pivotal LAD program is given.

It takes conclusion from designed the control system and given program that the electrode adjusting control system , which illustrated in this paper can use in realization and have the reference significance in enhancensing the arc furnace electrode control system performance.

**Key Words:** Electric arc furnace; Electrode control; PLC; Intelligent compound control

## 目 录

摘 要.....	1
Abstract .....	2
引 言.....	1
1 综述.....	2
1.1 电弧炉炼钢的发展和历史.....	2
1.1.1 电弧炉炼钢的历史 .....	2
1.1.2 电弧炉炼钢的发展 .....	3
1.2 电弧炉炼钢的电极控制.....	5
1.2.1 电极控制在电弧炉炼钢中的地位 .....	5
1.2.2 电极控制的回顾 <sup>[4]</sup> .....	5
1.2.3 电极控制的研究现状 .....	5
1.3 本文要做的工作 .....	6
2 电弧炉炼钢工艺及其电极控制要求.....	8
2.1 电弧炉炼钢工艺 .....	8
2.1.1 电弧炉炼钢过程工艺 .....	8
2.1.2 电弧炉中的电弧.....	9
2.1.3 电弧炉的电气特性 .....	9
2.2 电弧炉炼钢对电极控制器的要求.....	9
2.3 本章小结.....	10
3 电极控制系统的设计.....	11
3.1 电极控制系统的介绍.....	11
3.1.1 机械控制系统的介绍 .....	11
3.1.2 液压式控制系统的介绍.....	13
3.2 电极控制系统组成.....	15
3.2.1 控制系统的组成.....	15

3.2.2 系统功能与工作原理.....	16
3.3 本章小结.....	17
4 电弧炉电极控制算法.....	18
4.1 控制策略.....	18
4.2 控制器算法.....	19
4.2.1 常规算法及其应用分析.....	19
4.2.2 智能复合式算法的应用.....	20
4.3 本章小结.....	24
5 基于 PLC 交流电弧炉电极控制系统及其实现.....	25
5.1 电弧炉控制系统的结构.....	25
5.2 上位机配置与功能.....	25
5.2.1 上位机的配置.....	25
5.2.2 上位机实现的基本功能.....	26
5.3 控制系统（下位机）硬件组成.....	26
5.3.1 PLC 硬件组成 <sup>[22][23]</sup> .....	26
5.3.2 PLC 网络连接.....	29
5.4 控制系统（下位机）软件设计.....	29
5.4.1 控制功能和调节过程.....	29
5.4.2 系统软件设计 <sup>[22][24]</sup> .....	30
5.5 本章小结.....	34
结    论.....	35
参 考 文 献.....	36
附录 A    OB1 主程序框图.....	38
附录 B    数据采集程序框图.....	39
附录 C    程序清单.....	40
致    谢.....	67

## 引 言

近现代炼钢方法主要有转炉炼钢法、平炉炼钢法和电炉炼钢法。平炉炼钢法已基本被淘汰，电炉炼钢法与转炉炼钢法根本的差别在于，电炉炼钢法是以电能作为热源，而电弧炉炼钢是应用得最为普遍的电炉炼钢方法。我们通常所说的电炉炼钢，主要是指电弧炉炼钢，因为其他类型的电炉如感应电炉、电渣炉等所炼的钢数量较少。

电弧炉炼钢是靠电极和炉料间放电产生的电弧，使电能弧光中转变为热能，并借助辐射和电弧的直接作用加热并熔化金属和炉渣，冶炼出各种成分的钢和合金的一种冶炼方法。

现代炼钢电弧炉在国民经济中是电能的巨大消费者。由于电力事业在最近几十年来飞速发展，因此炼钢电弧炉相应地发展也很快。现在的炼钢电弧炉，尽管在冶炼的基本原理上仍然与过去相同，但从生产工艺到炼钢设备都已发生了根本性的变化，世界上一些工业发达国家钢铁企业的电弧炉系统目前已经实现了高度机械化、自动化，以电子计算机为核心的连续化作业式的电弧炉系统已成为现实。

在炼钢过程中我们要求电弧炉耗电量少、热效率高、对电网的谐波干扰小，而这就需要合理控制三相电流、三相功率的大小，也就是要求电极实时、快速、准确地按照冶炼工艺要求移动，使冶炼主回路稳定运行在一定的范围内。

PLC 功能齐全、应用灵活、操作方便、稳定可靠、易维护和故障率低，集现代通讯技术和 IT 技术于一身，在 CPU 运算速度、程序执行效率、故障自诊断、联网通讯、面向工艺和运动控制的功能集成以及实现故障安全的容错与冗余技术等方面取得了公认成就，并可实现复杂的工艺编程、多重回路调节、甚至模糊控制和神经元控制等智能控制算法，已成为现代控制系统设备的发展方向，并已成功应用于冶金、石化、机械等多种工业场合。因此，选择 PLC，设计出基于 PLC 交流电弧炉电极调节系统，有着重要的意义，是现代电极控制的发展趋势。

# 1 综述

## 1.1 电弧炉炼钢的发展和历史

### 1.1.1 电弧炉炼钢的历史

目前，世界上电炉钢产量的95%以上都是由电弧炉生产的，因此电炉炼钢主要指电弧炉炼钢。电弧炉炼钢是靠电极和炉料间放电产生的电弧使电能弧光中转变为热能并借助辐射和电弧的直接作用加热并熔化金属和炉料冶炼出各种成分的钢和合金的一种炼钢方法。

电弧炉炼钢有着很长的历史，从1900年，由法国的海劳尔特(Heroult)在LaPraz研制成功炼钢用三相交流电弧炉成为现代炼钢电弧炉的雏形，至今100多年。二十世纪初，随着发电成本下降和高压输电技术的发展，三相交流电弧炉得到了极大的推广应用。1909~1910年德国和美国分别首次建成6吨和5吨炼钢三相交流电弧炉并投产，首次在电弧炉电极升降系统中应用了继电器与接触式调节器。1920年杠杆平衡式调节器用于电弧炉提高了电极升降速度。1926年德国制造了两台炉盖开出式电弧炉炉料从炉顶加入。1927年美国蒂姆肯公司一台100吨电弧炉投产。1930年出现炉体开出式电弧炉。1936年德国制作了18吨炉盖旋转式电弧炉进一步缩短加料时间提高了热效率。至此普通三相交流电弧炉已基本成形。之后电弧炉的结构、工艺逐渐完善炉子容量进一步扩大炼钢生产率逐渐提高炼钢成本逐渐降低。1964年在美国矿冶石油工程师协会的电炉会议上首次提出电弧炉超高功率概念并在两台135吨电弧炉上进行深入的试验并取得很好的效果。此后的工作主要集中在如何超高功率化以后出现的设备、工艺、冶炼消耗等方面的问题继续提高变压器的最大功率利用率和时间利用率提高电弧炉炼钢生产率、降低能耗和冶炼成本。

相对来说，我国电弧炉炼钢起步较晚，但发展较快，尤其是在改革开放以后。在20世纪30年代才只有几台容量为0.5~1.5吨的电弧炉，电弧炉钢产量为1.4万吨。20世纪60年代以前我国只仿造了0.5吨、1.5吨、3吨和5吨4个规格的炼钢电弧炉，都是炉体开出式或炉盖开出式电弧炉。1966年西安电炉研究所设计并试制了我国第一台全液压、炉盖旋转式、顶装料30吨电弧炉。20世纪80年代以后，随着改革开放的逐步深入，电弧炉炼钢发展加快。20世纪90年代以后我国电弧炉装备进入大发展阶段。目前我国设计制造75吨以下的普通功率电弧炉、50吨以下的超高功率电弧炉和150吨以下的钢包精炼炉的技术已经成熟并具备制造130吨电弧炉的能力<sup>[1]</sup>。

100 年来，随着科技的进步，电弧炉钢产量及其比例始终在稳步增长。在这百年中，电弧炉的设备工艺技术在不断发展，产量不断地提高。尤其 20 世纪 70 年代以来，电力工业的进步，科技对钢质量和数量的要求提高，大型超高功率电炉技术的发展以及炉外精炼技术的采用，使电炉炼钢技术有了很大的进步。在钢产量上，尽管全球粗钢总量自 20 世纪 70 年代中期以来一直徘徊在 7.0~7.8 亿吨之间，但电炉钢产量比例一直在稳步上升。近年来，电弧炉炼钢的钢产量增长迅速，超过了钢总产量的增长速度。2000 年全世界钢总产量为 841 15.4 万吨，其中电炉钢产量为 28 352 万吨，占钢总产量的 33.7%，与 1995 年相比，电炉钢产量增长了 16.8%，钢总产量增长 13.2%。而在 2001 年，全世界钢总产量为 84 379.7 万吨，其中电炉钢产量为 29 587.9 万吨，占钢总产量的 35.07%。由于一些发达国家废钢资源丰富，电价低廉，电弧炉炼钢发展迅速。如美国和日本，2000 年电炉钢分别占全国钢总产量的 46.8%和 28.8%。而我国由于废钢资源短缺，电价较高，2000 年电炉钢产量为 2 020 万吨，占全国总产量的 23.9%。2001 年，我国的钢总产量为 15 163 万吨，其中电炉钢产量为 24 00.5 万吨，占全国总产量的 23.83%。20 世纪 90 年代，大容量、超高功率电弧炉在我国仍获得了较快发展<sup>[2]</sup>。

### 1.1.2 电弧炉炼钢的发展

电弧炉炼钢的发展<sup>[3]</sup>前景一片光明炼钢装备不断改进炼钢技术不断进步。在电弧炉炼钢生产中主要采用的技术有：

- 1) 节约电能技术。包括超高功率电弧炉技术、电弧炉合理供电技术、导电横壁节电技术、电极调节智能控制技术。
- 2) 强化冶炼技术。包括强化供氧技术、泡沫渣技术、电弧炉氧燃烧烧嘴技术、偏心底出钢技术、电弧炉底吹搅拌技术。
- 3) 余热利用技术。包括二次燃烧技术、废钢预热技术。
- 4) 优化炉料结构技术。包括改善固态炉料结构、铁水热装技术。

国际钢铁协会的组织者通过问卷调查，对将来电弧炉发展方向进行了预测，得出结论：电弧炉炼钢还是钢铁工业很有吸引力的工艺，在未来的 10 年内，不会受到其它新工艺的挑战。电炉钢的市场份额将进一步扩大，特别是在扁平材方面。在一定程度上，北美和大洋州的电炉生产者与欧洲和亚洲人有不同的观点，他们认为，在 2010 年前，生产合格的镀锌板还要用传统的工艺进行。到 2010 年，典型的电弧炉电能消耗为 360kwh，供电时间为 45min。生产工艺要与用二次燃烧技术加热到 300℃的废钢相匹配。废钢还是主要的炉料，其它为辅助炉料。

国外发达国家电弧炉技术发展方向。美国认为，将来电弧炉炼钢的研究领域主要围绕原料和能源两个方面进行。在原料方面，主要是对废钢的处理，包括物理分离法(振动、磁化)、化学分离法；为了规范废钢的尺寸，可以采用低温冷冻技术破碎废钢，这还需要进一步进行研究。在能源方面，要充分利用废气的余热，如：兴建竖炉；开发“超导”式电极；采用人工智能技术以提高操作水平，降低能耗。欧洲的电弧炉发展计划为如下三个方面：1) 废钢。要开发先进的破碎和废钢处理技术，获得稳定的高质量炉料，如：新的破碎、分级和分类技术。2) 提高生产率，降低能耗，充分利用化学能和废气物理热，如：氧碳喷射、二次燃烧技术、废钢预热技术；开发新型 K-ES 技术，如新型竖炉、中心竖炉、双炉壳等。3) 在工艺及操作控制、检测及诊断方面，提高 IT 专家系统软件的应用水平。相对美国和欧洲，日本制定的计划更为具体，他们甚至提出了完成的具体时间表，他们将把工作重点放在以下三个方面上。1) 研究开发直流电弧炉，虽然直流电弧炉问世已有二十年，但直流电弧炉炼钢的理论解释还有很多未弄清的问题，在作业履历方面有待于进一步增加；另外还需提高直流电弧炉的性能。2) 利用余热使废钢返回料预热，虽然大家都在开发 Consteel 工艺、双罩式炉、立式炉等的余热新方式使废钢返回料预热，但均未能获得满意的结果。研究者要考虑可操作性，还要兼顾环境。3) 高效利用电能。一方面要研制低压高电流型高功率变压器，实现现有电弧炉的高效率化，具体指标为：功率 85%，电弧热功率多 85%，投入电力 800kw/h；另一方面要集中精力研制下一代电弧炉，用强电磁场控制等离子电弧方向，要研制超导线圈高输出变压器及全密封、连续投料并可进行废钢预热的电弧炉。

国内电弧炉技术发展方向。我国的电弧炉技术水平与国际先进国家还有较大差距。应按我国的实际情况制定计划在短期内，应做好以下几点工作：

1) 进一步推广使用已有的成熟技术，如电弧炉合理供电、氧燃烧嘴等技术，使国内电弧炉的整体水平得到提高。

2) 进一步强化冶炼，充分利用化学能，降低电耗。国外的一些先进企业电弧炉吨钢电耗已降低到 300kwh 以下(有的采用废钢预热技术)，而我国远未达到这一水平。

3) 提高我国电弧炉的自动化操作水平及计算机控制管理水平。各企业应和各高校、科研院所加强合作，努力提升我国电弧炉的操作水平。

我国电弧炉的中长期目标为以下几点：

1) 系统地消化从国外引进的废钢预热技术及设备，并开发出适合我国实际情况的新的炉型和技术。

2) 进一步研究高阻抗交流电弧炉，使其发挥最佳的作用。



3) 强化对废钢的分类管理，加快废钢破碎设备的研制。

## 1.2 电弧炉炼钢的电极控制

### 1.2.1 电极控制在电弧炉炼钢中的地位

电弧炉炼钢是靠电极和炉料间放电产生的电弧，使电能弧光中转变为热能，并借助辐射和电弧的直接作用加热并熔化金属和炉渣，炼出各种成分的钢和合金的一种炼钢方法。

现代电弧炉炼钢在国民经济中是电能的巨大消费者。电弧炉的工作特点是需要很大的电功率，一台三相电炉变压器的容量可达几千到几万千伏安，所需功率数值在炉子工作期间急剧地大幅度地波动，而电极调节器的作用正是通过调节电极的位置达到调节功率的目的。因此，确定最优的电极控制方案对熔炼时间的缩短，单位电能消耗的减少，每吨钢的冶炼成本及功率因数最佳都有极其重要的作用。电弧炉控制方法的研究也都集中在电极调节器上。可以说电弧炉控制方法的发展也是电弧炉技术不断向前发展的过程。

电极控制是电弧炉控制技术的中心问题，其工作效果的好坏直接影响炼钢的产量、质量、能源消耗和电炉对电网的影响。

### 1.2.2 电极控制的回顾<sup>[4]</sup>

按电弧炉电极升降机构驱动的不同，电极升降调节系统可以分为机电式调节和液压式调节器两种；通常前者用于容量 20 吨以下的电弧炉，后者用于大型电弧炉。机电式电弧炉经历了：（1）电机放大机——直流电动机式；（2）晶闸管——直流电动机式；（3）晶闸管——转差离合器式；（4）晶闸管——交流电动机式；（5）交流变频器调速式等。液压式调节器按控制部分的不同有：（1）模拟调节器；（2）微机调节器；（3）PLC 调节器。前三种机电式调节器已经很少使用，目前应用的主要是后两种型式及微机控制的产品。液压式调节器三种型式并存，但模拟式调节器将逐步被后两种计算机控制调节器所取代。

随着电力电子技术，计算机控制技术和控制理论的发展，国内外学者和工程技术人员围绕电弧炉电极升降调节器系统的计算机控制，开展了大量的研究和开发工作，先后研制了多种基于微机的新型电极升降调节器，并在实际中得到了推广应用，取得了良好的社会效益和经济效益。

### 1.2.3 电极控制的研究现状

电极控制是电弧炉控制技术的中心问题，其工作效果的好坏直接影响炼钢的产量、质量、能源消耗和电炉对电网地影响。另一方面，因其为非线性系统，且许多因素都对电极电流有很大的影响，情况十分复杂，致使控制难度增大。所以长期以来，电弧炉电极升降系统成为人们研究的热点。

近些年来，国内外学者和工程技术人员先后研制了多种新型电极升降调节器。美国斯坦福大学和美国北星钢铁公司联合研制了基于神经网络的智能电弧炉<sup>[5.6]</sup>。该电弧炉可根据电弧炉的不同炼钢时期的具体工作情况，自动设置最佳工作点。不过，智能电弧炉目前仅能用于电弧炉工作比较稳定的条件下，即当所需电极调节较大时不能投入神经网络，这样就使智能电弧炉的应用受到一定限制。国内也早就开始了智能电弧炉方面的跟踪研究工作，但目前还没有成果在实际系统中采用，主要处于研究阶段<sup>[7.8.9]</sup>。一些单位在电极调节器控制算法中采用单个神经元<sup>[10]</sup>、基于规则的智能控制<sup>[9]</sup>等，与国外已投入实用的调节器相比还有较大的差距。Nadira 等(1998)提出了应用于三相电弧炉的自调整模型算法，但该算法没有考虑电弧的非线性关系，将其作为一个线性电阻来处理，与实际工程对象还有较大差距；模糊控制能完成电极电流的调节，未出现频繁振荡、调节较平滑，但对系统变化的响应不灵敏<sup>[11]</sup>。自校正控制是对被控过程的在线辨识与控制参数的自动整定相结合的一种自适应控制技术，当有较大的确定性扰动作用时，其稳定性较差。自校正 PID 调节器具有自校正控制和常规 PID 调节器两方面的优点，使得它成为工业过程控制的一种较理想的控制装置，但它不能很好的解决三相耦合问题。

基于以上分析，可以得出：全面的全方位的解决电弧炉电极调节中存在的问题是在现在是不可能的，也就是说电弧炉电极控制技术目前还不完全成熟。当然，本文不做这方面的研究工作，但力求利用现有的技术成果结合实际，基于传统的控制算法结合新的算法，设计电极调节器。

### 1.3 本文要做的工作

综上所述，电弧炉炼钢有着很长的历史和良好的发展前景，并且在技术上趋于成熟。其关键技术——电极控制，受到国内外专家、学者的普遍关注和热点研究，在控制算法的研究上、调节器的改进上、系统组成上都有很大的进步，随着电力电子和计算机技术的水平的进步，已经发展到微机控制水平，并向智能方面转变。尽管我国在控制技术方面取得很大的发展，但同国外先进国家相比，差距还很大，要使我国的电弧炉熔炼产品在世界市场具有竞争力，就必须尽最大可能提高产品质量、降低能量消耗。而这一性能指标的取得，必须通过采取先进的过程控制技术来实现，仅靠人工手动操作或一般

常规控制策略是无法实现的。设计基于 PLC 的电弧炉电极控制系统，有着重要的意义，本文后续章节做以下工作：

- 1) 针对电弧炉炼钢工艺和其对电极控制的要求，设计电极控制系统。

- 2) 针对电弧炉炼钢工艺和其对电极控制的要求，分析控制算法，采用合适的控制器算法，以提高系统控制性能。
- 3) 基于 PLC 做电弧炉电极控制实现方面的工作，包括硬件组态和软件编程。

## 2 电弧炉炼钢工艺及其电极控制要求

### 2.1 电弧炉炼钢工艺

#### 2.1.1 电弧炉炼钢过程工艺

目前普遍认为采用电弧炉初炼，钢包炉精炼相配合的工艺流程是比较合理的短流程工业过程。本电弧炉项目也是和精炼炉相配合，这样工艺有了新的特点即把原来的炼钢工艺分成两步进行。第一步在一般炼钢炉中进行熔化和初炼，一般炼钢炉称为初炼炉。第二步在钢包中进行精炼。

氧化法是电弧炉炼钢工艺的最基本的方法传统的氧化法治炼工艺由补炉、装料、熔化期、氧化期、还原期和出钢六个阶段组成。它集熔化、精炼和合金化于一炉，在炉内即要完成熔化、脱磷、脱碳、升温，又要进行脱氧、脱硫、去气、去除夹杂物、合金化以及温度、成分的调整，因而冶炼周期很长。这既难保证对钢材越来越严格的质量要求，又限制了电弧炉生产率的提高。现代工艺只在电弧炉中保留了熔化、升温 and 必要的精炼，如脱磷、脱碳，而把其余的精炼过程均转移到钢包二次精炼炉中进行。工艺上的这种改进大大提高了电弧炉设备能力，使其能够以尽可能大的功率进行熔化、升温操作，而把那些只需要较低功率的操作转移到钢包精炼炉内进行。并且越来越完善的电弧技术能满足钢液清洁度和严格的成分、温度控制的要求。同时，在现代电弧炉炼钢工艺中，在熔化初期就对炉内进行吹氧，因此熔化期和氧化期已无明显的区分，所以现代电弧炉炼钢工艺<sup>[12]</sup>包括补炉、装料、熔化期和出钢四个阶段。

**补炉：**补炉是指当上炉出钢完后，需要迅速将炉体损坏的部位进行修补，以保证下一炉钢的正常冶炼。新炉子在冶炼前几炉一般不需要补炉。

**装料：**装料是指将固体炉料(按冶炼钢种要求配置的废钢铁料及少量石灰)装入炉膛内。目前多数电弧炉采用炉盖上升技术，炉体开出，或者炉盖生起旋开，用吊车吊起炉料一次加入炉膛内，称顶装料。

**熔化期：**从通电开始到炉出钢阶段称为熔化期。熔化期的主要任务是迅速熔化全部炉料，去除钢液中的磷、钢液中的气体和夹杂物，将钢液温度加热到高于出钢温度 10~20℃。为了加速熔化和节约电能，在熔化期一般采用吹氧助熔，有条件的也可以采用煤氧助熔。此外，如果电极需要接长则在熔化期进行，更换渣罐、堵出钢口、准备冶炼用工具以及其他准备工作都在熔化期进行。

出钢：钢液脱碳、脱磷良好，化学成分符合要求，温度达到出钢要求炉渣合乎出钢要求，即可出钢。因此，电弧炉炼钢的一般流程为：上炉出钢——补炉——装料——熔化期——出钢。

### 2.1.2 电弧炉中的电弧

开炉时，将电极下降，当与炉料接触后，变压器二次绕组被短路，此时有大电流通过电极与炉料接触处，因接触电阻将电能转换为热能，而产生高温，随后将电极提起（有自动控制设备完成），电极与炉料间将因高温与高电场的作用而发射大量电子，在电场的作用下，电子获得极大能量而加速运动，从而产生撞击游离，形成强离高流电弧。

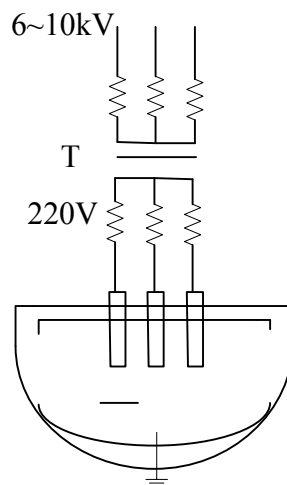


图 2.2 电炉电弧的产生

### 2.1.3 电弧炉的电气特性

保持电弧电压和电弧电流的比值恒定，即  $U/I = \text{常数}$ 。

## 2.2 电弧炉炼钢对电极控制器的要求

电极调节器的调节条件和调节任务颇为复杂。在起弧熔化冷料时，长度为数毫米的电弧在不甚大的范围内，就能产生数千千瓦的功率，此时电弧温度高达数千度，被熔料在电极下面迅速而激烈的熔化、飞溅，时有短路和断弧现象的发生，因此弧长、输入功率不断变化。当电弧电流小于额定值时，输入到炉内的电能减少，熔化时间拖长，电能及电极消耗均有增加；而当电流非常大时，虽仅数秒钟，就能使线路损耗大大增加，导致输入电弧炉内的电能减少，降低设备的各项指标，此时电弧长度非常短，特别是当电极同赤热或液态熔液接触时，会使熔液遭受增碳的危险，严重时可折断电极。可见，电弧炉电极调节器的调节任务非常关键，即在保证稳定调节的条件下，要求电极调节器灵敏度高，快速性好，超调小。具体地说，本电弧炉对自动调节器的要求如下：

(1)高灵敏度。对电弧电流变化的反应要灵敏，可以用非灵敏区来衡量。非灵敏区指当电极调节量发生变化时，电极仍保持静止的整个区间。通常用不感系数代表调节器非灵敏区的大小。执行机构在开始向两个方向动作时的被调量之差与其算术平均值之比的百分数称为不感系数。

(2)电极调节快速性好。电极提升速度要快，否则容易造成短路而使高压断路器自动跳闸；下降要慢，以免电极碰撞炉料而折断或插入熔液中。电极速度由零升至最大速度的90%所需时间不得大于0.3S，电极速度由最大速度降到10%所需时间不得大于0.15S。

(3)保证电弧电流能在额定值的30~125%的范围内平滑地整定。

(4)电极同炉料短路时，在保证电弧稳定的情况下，应使电极以最大速度上升

(5)保证电极升降控制能迅速地从自动切换为手动，或由手动切换为自动

(6)电弧炉通电时，电极调节器应能保证自动燃弧。

(7)调节器应能保证调节工作高度可靠，操作简单。

(8)良好的三相间的平衡性及相互间的尽可能小的影响。由于炉内废钢的放置不是均匀的，因而三相电极之间是不平衡的。同时，三相电极之间也存在相互间的影响。这些都是设计电极调节器时需要考虑的。

(9)具有抗参数时变的能力，即鲁棒性好。

## 2.3 本章小结

本章主要对电弧炉炼钢工艺及其控制要求做了必要的阐述，目的是为了更清楚的介绍控制对象，为以后章节工作做铺垫。

按照其工艺特点和对自动调节器的要求，采用适当的控制算法，设计控制系统，选取较理想的电极调节器和控制器，这些内容将在后续章节详细介绍。





### 3 电极控制系统的设计

电弧炉电极控制说直接了，也就是控制其电弧长度，使其保持不变就是控制的目的所在。电弧的长度控制也就是电极升降控制。基于电弧炉冶炼过程的复杂性和难控性，一般的采用闭环控制回路来完成其电极自动控制，控制框图如下：

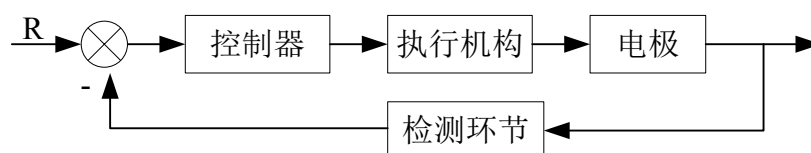


图 3.1 闭环控制系统框图

#### 3.1 电极控制系统的介绍

电极控制系统有以下几种形式：机械控制系统、液压控制系统及液压——气动联合控制系统。常用电极自动调节器：电机放大式、可控硅——直流电机式、可控硅——交流力矩电机式、可控硅——电磁转差离合器式、电液随动式等，近年来，又研制成功交流调速式和微机控制的调节器等新型调节器<sup>[13]</sup>。

液压——气动联合控制系统，尚属研究阶段，采用的厂家很少。下面就其它两种方式做一些介绍。

##### 3.1.1 机械控制系统的介绍

机械控制系统也叫马达作用式控制系统，这种系统比较简单，也很可靠。在老式炉子上，这种控制系统是用钢丝绳来调节电极臂的位置的，钢丝绳和齿轮的磨损都非常严重，而且“惰死”时间和调节时间都比较长，比较笨重，控制精度也不太高，但由于有简单可靠的特点，所以现时仍被采用。

交流电弧炉一般都是三根电极各加一套控制系统，对三根电极分别进行控制。其中一相的调节系统示意图如图 3.2 所示，控制系统由电弧电流、电压测量回路、调节器、功率放大环节、电动机和传动机械等组成。为使系统快速稳定运行，通常引入速度反馈环节。电弧的电压和电流信号经过它们的测量回路，分别转换成直流电压信号与给定输入进行比较。它们的差值信号通过调节器进入触发回路来控制晶闸管整流电压，由这个电压控制的电动机来带动机械传动机构，使电极上下移动来调节电弧长度，维持电弧电压和电流与给定值一致。

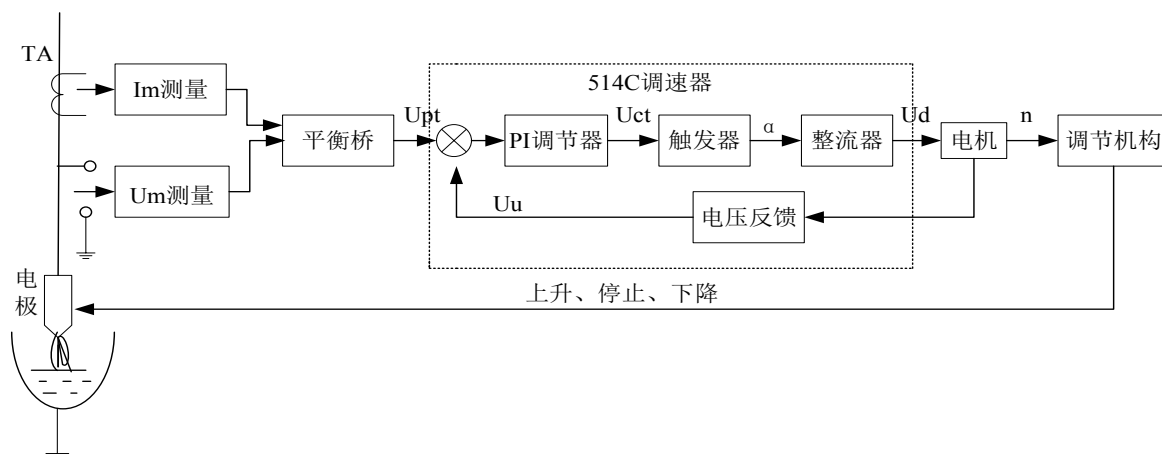


图 3.2 交流电弧炉单相电极控制原理框图 1

当然上图这种电弧炉电极升降控制系统采用了纯模拟器件控制方式，这种控制方式有故障率高、维护量大、生产成本高等一系列问题。随着电子电力技术的发展这种控制已经被淘汰，机械式控制系统有了新的构成结构，诸如文献<sup>[14]</sup>设计出了由 PLC 和模拟调速器组成的电极升降控制系统，就是一种典型系统。如图：

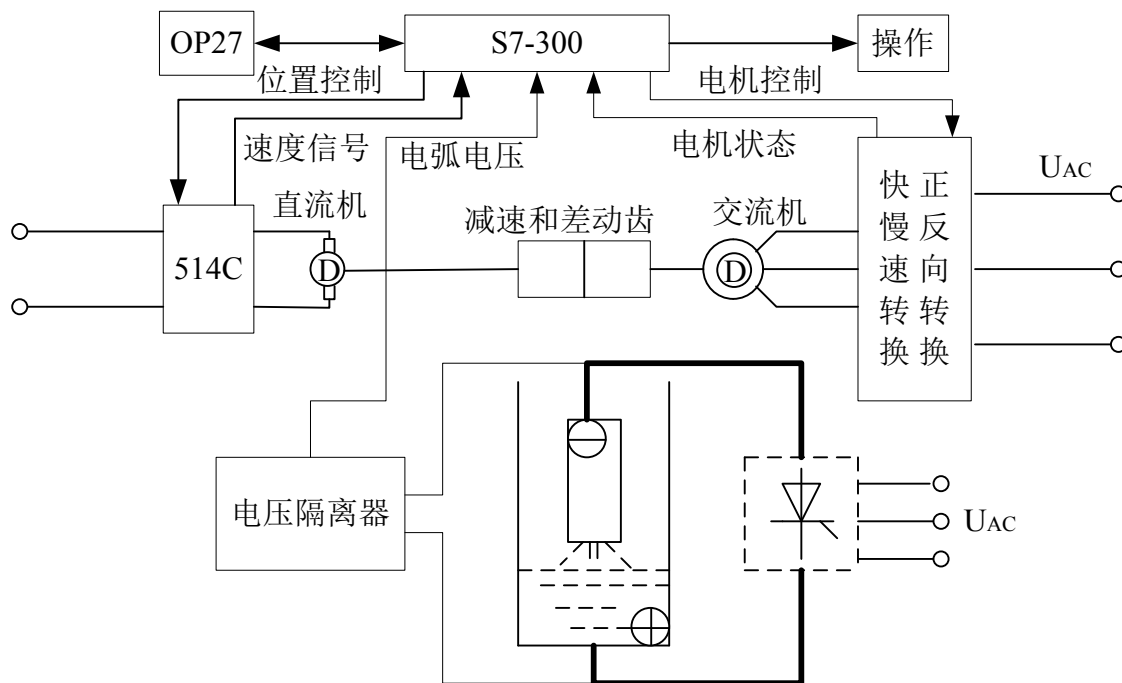


图 3.3 电弧炉单相电极控制原理框图 2

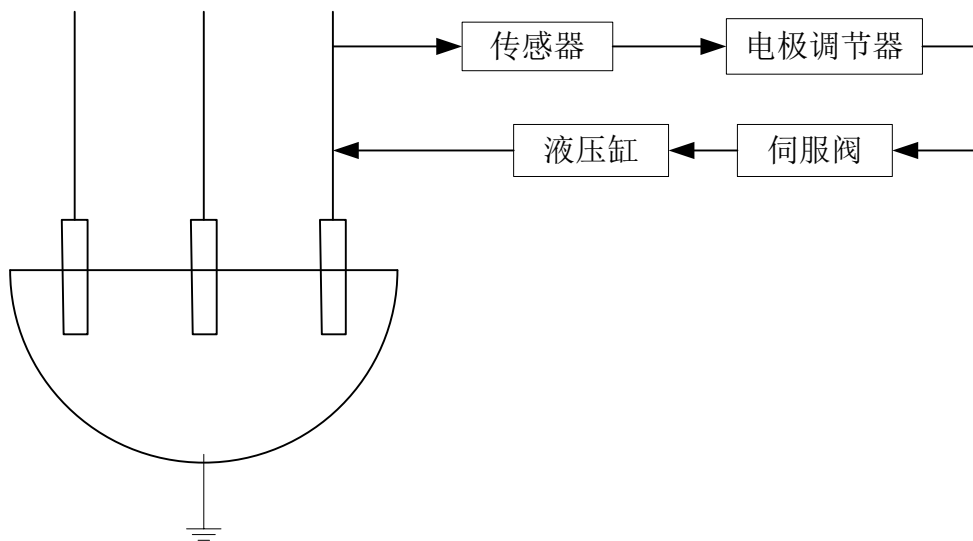
此设计方案应用了 S7-300PLC 做为控制器，但调速部分仍采用 514C，鉴于目前变频器采用超功率技术，响应速度快和能对电机进行无级调速，如能结合变频器进行调速，那系统无论是在速度上和调节质量上都将会有比较好的改善。

### 3.1.2 液压式控制系统的介绍

相对与机械式控制系统，液压式电极控制系统控制精度比较高，提升速度比较快，而且所需要的拖动电机最少，因为它只需要一、二台电机带动液压泵，整个的电气控制系统简单。液压控制系统还有检修方便的优点，因而，这种控制系统近来得到了很大的发展。本文设计液压式控制系统完成电弧炉电极的控制。

下面对液压式控制系统的原理及其调节特点做些介绍。

如图 3.4，电弧炉的弧流、弧压信号经整流、滤波后，在平衡臂电阻上进行比较，其差值送入伺服阀线圈。在额定状态下工作时，差值为零，伺服阀不动作；当弧长偏离给定值时，此时电弧电流大于给定值，则送入伺服阀电磁线圈的电气信号是阀杆向上运动，从而载能液体流入电极升降液压缸，使电极上升，其速度取决于阀孔开口大小。当电流重新达到给定值时，电气信号消失，电极停止动作；相反，若弧长大于给定值时，即炉内电弧电流小于给定值时，则阀杆向下移动，液压缸内的液体便在电极升降装置自重的作用下，流回储液槽，电极下降直至重新达到给定弧长。此调节系统可实现高速度、高精度的调节。



3.4 交流电弧炉电极伺服阀控制原理图

电液比例阀——液压传动式调节系统（图 3.5）有以下特点：

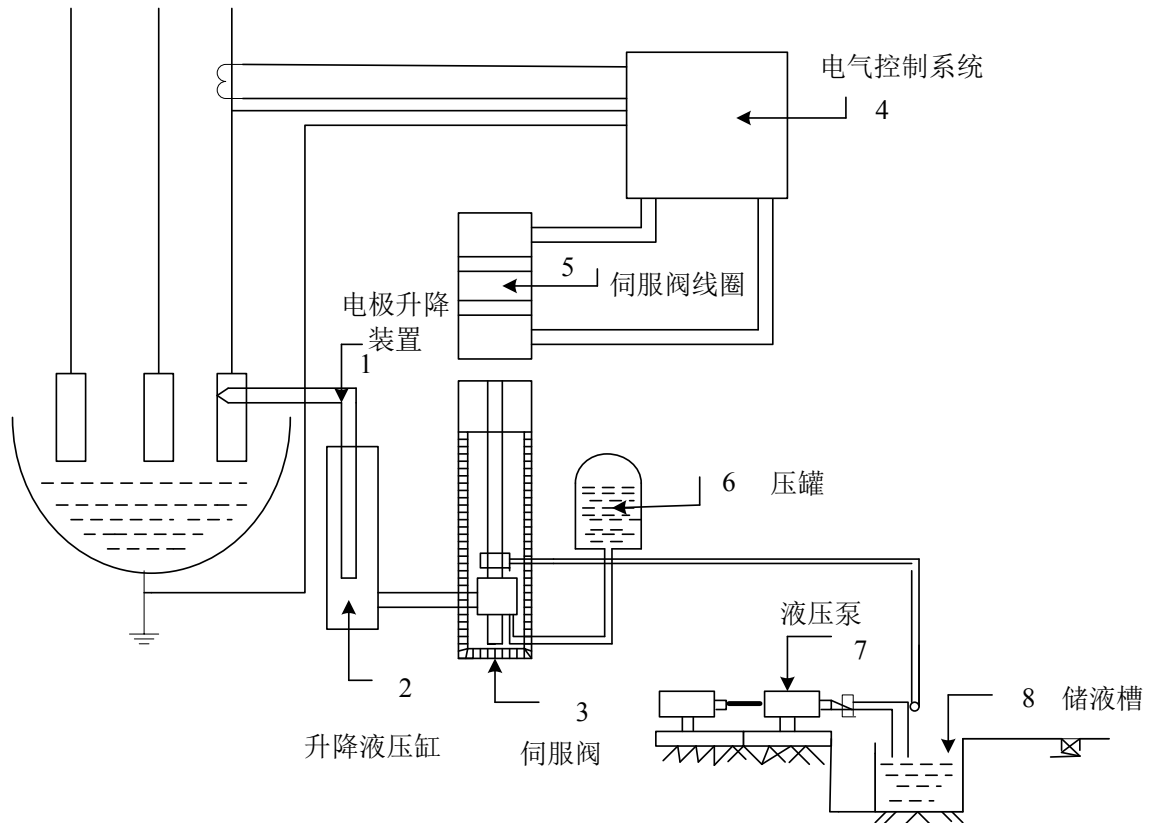


图 3.5 液压式电极调节系统原理图

（1）由于比例阀其载能液体可以为水、油或乳化液，他们的惯量都很小，因此调节系统的动态特性很好，可以实现快速、高精度的调节，电极最快上升速度可达到 8~9m/min；过滤过程时间短，只有 0.15S；灵敏度高，非灵敏区约为 6%。

（2）由于比例阀采取异性开口结构调节系统的静态特性呈非线性，因而能保证理想的调节特性。冶炼过程的各个阶段的燃弧行为是不同的，为了达到最佳运行状态，调节器在各个冶炼阶段要解决的问题有所侧重。在起弧熔化阶段，电弧变化急剧，而且经常发生断弧和短路现象。在此期间，当出现大的扰动时，电极应快速动作，迅速消除大扰动。当电极位置接近给定值时，电极能迅速停止运动，以避免因惯性造成的超调，保证系统稳定运行。熔化阶段的特点是电弧燃烧稳定，扰动量小，为了避免电极插入熔池，造成增碳，此阶段的关键是要求调节器灵敏度高，并且调节精度高。比例阀的开口结构保证了各冶炼阶段的调节要求。

电液比例阀——液压式调节器具有灵敏度高，非灵敏区小，升降速度快，输出功率大等特点，其调节特性较为理想，能实现快速、高精度调节，满足了电弧炉电极调节器的技术要求。

## 3.2 电极控制系统组成

### 3.2.1 控制系统的组成

交流电弧炉电极调节系统以PLC为控制器，采用恒阻抗控制策略对电极进行控制，保证电弧炉按供电制度炼钢。该控制系统的原理框图如图3.6所示。

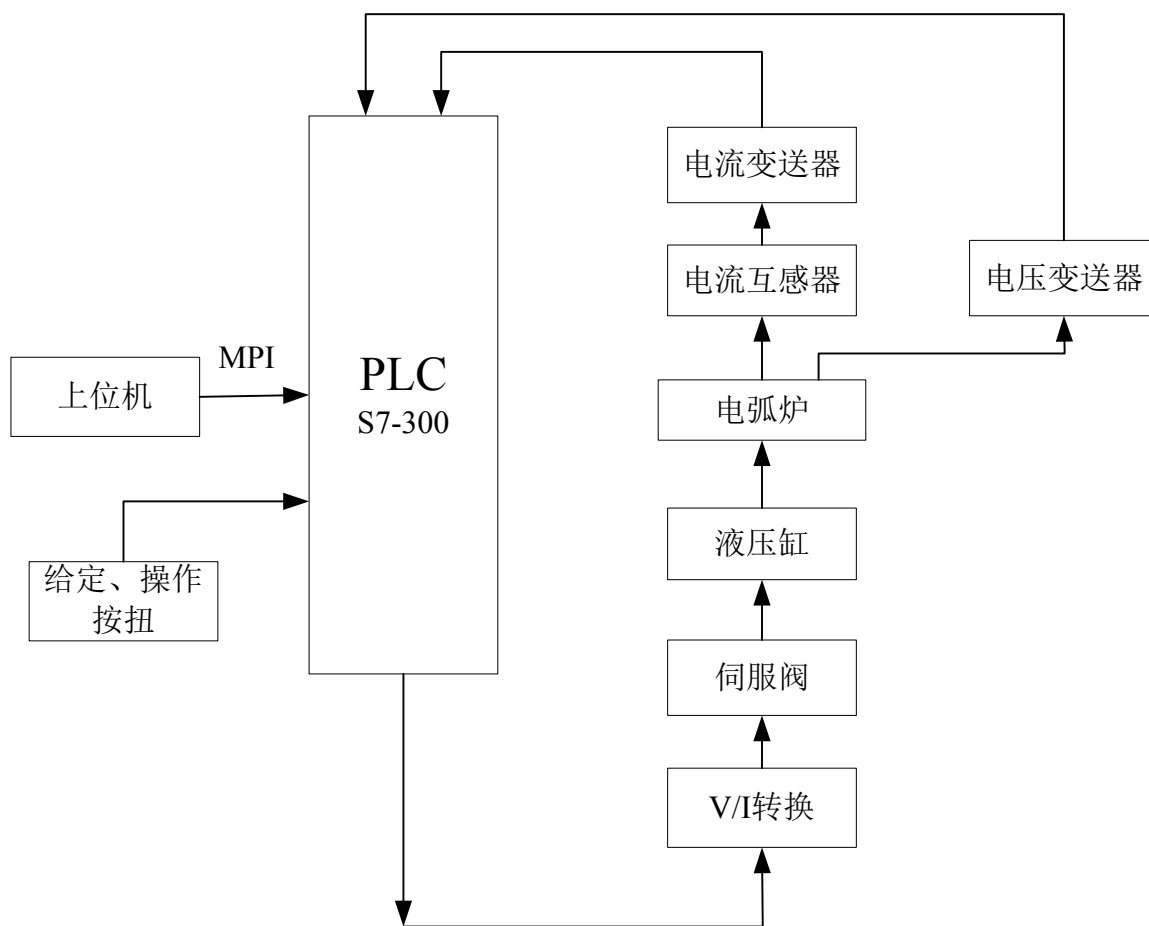


图 3.6 电极控制系统组成原理图

该系统主要由如下几部分组成。

(1) 电流、电压的给定部分：

该环节用于操作人员根据供电制度，选择电弧炉的工作点。按照恒阻抗控制策略，操作人员应根据供电制度给出工作点的电弧阻抗，但是由于电弧阻抗很难直

接给出，只能给出各冶炼阶段的变压器的电压档位和工作点的电弧电流。PLC 根据变压器的电压档位以及工作点的电弧电流求出电弧阻抗。电弧电流给定：通过操作控制台上的  $10k\ \Omega$  滑动变阻器来实现，滑动变阻器的两端加 10V 直流电压，滑动端取 1~5V 信号给 PLC 的模拟输入模块，输入通道完成电流给定。

电压档位选择：通过操作控制台上的转换开关来实现，通过拨动电压转换开关引起调压动作。电弧炉变压器共有 5 个电压档位，其中 150V、139 V 两档为烘炉电压；260 V、210 V、240V 应用于冶炼过程的熔化期、氧化期和还原期。

#### (2) 弧流弧压检测环节部分：

按照恒阻抗控制策略，需检测实际电弧阻抗作为反馈量，但电弧阻抗很难直接测得，只能测取电弧电流和电弧变压器的二次侧出口处对炉底的电压来间接求取电弧阻抗。弧流检测是先通过一个变比为 20000: 5 的电流互感器将 0~40 kA 的电弧电流信号转变为 0~10 A 的信号，再经电流变送器转变为 1~5 V 的电压信号送入 PLC。弧压信号经过 280~5 的电压变送器转变为 1~5 V 的电压信号送入 PLC。

#### (3) 执行机构：

选取输出功率较大的电气——液压伺服阀系统作为电极升降的执行机构。PLC 给出的控制信号为 -10~10V 电压，经过 V/I 转换板转换为 +130 ~ -110mA 的电流信号，控制伺服阀的开度调节电极的上升和下降速度。电极的最大下降速度为 4m/min,最大上升速度为 6m/min。

#### (4) 控制器 S7-300 PLC（将在第五章详细介绍）。

### 3.2.2 系统功能与工作原理

通过对实际电弧阻抗的反馈控制，使整个系统按照恒阻抗的控制策略对电极进行控制，从而保证电弧炉按供电制度炼钢。

电极调节系统的调节对象是弧长，但由于弧长还没有合适的检测设备，因此只能通过检测电弧炉主电路的电弧电流和电弧电压来间接控制整个系统，利用某一熔炼过程中最有利的调节电流和电压值作比作为电弧阻抗的标定值，通过电流、电压互感器检测电流，经电流、电压变送器转变为 1~5V 的电压信号，送入 PLC 模拟输入模块，通过数据采集转换成标准数字与给定值进行比较、PLC 进行熔期判断运算，选择适当的控制算法对信号进行处理，通过 PLC 模拟输出模块转化为 -10~10V 电压信号送给 V/I 转换 +130 ~ -110mA 信号送伺服阀，由其对电极进行升降调节。

液压调节器调节过程：当弧长偏离给定值时，此时电弧长度小于给定值，即给阀信号为正值，则送入伺服阀电磁线圈的电气信号是阀杆向上运动，从而载能液体流入电极

升降液压缸，使电极上升，其速度取决于阀孔开口（给阀信号）大小。当电弧长度重新达到给定值时，电气信号消失，电极停止动作；相反，若弧长大于给定值时，即给阀信号为负值，则阀杆向下移动，液压缸内的液体便在电极升降装置自重的作用下，流回储液槽，电极下降直至重新达到给定弧长；电弧长度等于给定值时，差值为零，伺服阀不动，电极不动，当然，在实际中这种情况几乎不能出现。

### 3.3 本章小结

通过对电弧炉电极控制系统的介绍，结合最新的发展趋势，设计了由液压调节器和PLC控制器构成的控制系统。

## 4 电弧炉电极控制算法

### 4.1 控制策略

电弧炉电极控制系统从控制策略上可分为三种，即恒电流控制、恒功率控制、恒阻抗控制。

(1)恒电流控制方式，该方式是通过控制电极的升降实现电弧电流的稳定控制。但是该控制策略本身有明显的不足。由于三相交流电弧炉的三相电流满足如下关系：

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (4-1)$$

这样就有可能出现一种误控制的短路状态，由于电弧炉的设定工作电流都是比较高的(20 000~40 000A)，例如  $I_a$  工作在短路状态，并且此时的短路工作电流正好在设定工作电流附近，这时会出现何种情况呢？根据(4-1)， $I_b$  和  $I_c$  的和等于  $I_a$ ，则  $I_b$  和  $I_c$  可能比较小，或者一相电流很小而一相电流较大，而三相独立的控制器却可以为  $I_a$  处在最佳工作点，因此不断调节  $I_b$  和  $I_c$  的电极升降，结果短路一相始终处于短路工作状态，而外两相处在不断调节的状态，导致电弧炉的效率很低，并且处于危险的工作状态。这虽然是一个比较极端的例子，但是反映了恒流控制本身存在缺陷。

(2)恒功率控制，是继恒流控制之后的一个新的控制方式，但是它本身也存在许多不足之处。表 4.1 为电极上升和下降与电弧电压  $U$ 、电弧电流  $I$  的关系。

表 4.1 电极移动对电极参数的影响

电极移动方向	电弧长度变化	电压变化 (U)	电流变化 (I)
上升	伸长	升高	降低
下降	变短	降低	升高

单相电弧功率  $P=U \times$



I, 当短路和断流时功率均为零, 但是此时电极要做上升或下降的动作就无法通过功率一个参数来计算, 必须附加控制算法。即使在非特殊工作点也有误操作的可能, 因为无论电弧电流或电弧电压的升高都会增加功率, 同理二者的降低都会降低功率。当功率偏低时提升电极, 电压的升高导致电流的降低, 结果有可能电压升高低于电流降低的速度导致功率进一步降低, 反之也有可能出现相同的情况。由于电弧炉的工作情况非常复杂, 炉内不确定因素非常多, 所以这种情况下出现误操作的可能性非常大。因此以功率为被控制参数不适合实现电弧炉的稳定和自动控制。

(3)恒阻抗控制, 是目前应用最广的控制策略, 其最大优点就是有利于系统的平衡和稳定。我们假设弧压弧流及阻抗满足关系式  $R=U/I$ , 根据表 4.1 可以看出当电极上升时电弧电压上升电弧电流下降阻抗上升; 当电极下降时电弧电压下降电弧电流上升阻抗降低。这样电极的升降与被控制参数的关系就很清晰了, 多年的生产实践表明恒阻抗控制是最可靠的控制方式。

基于以上分析本文采用恒阻抗控制方式。

## 4.2 控制器算法

交流电弧炉冶炼生产是一种多干扰和非线性时变的复杂的物理化学过程, 不容易建立其精确的数学模型, 所以要想对其精确控制是非常难做到的。长期以来, 针对电弧炉电极调节系统的研究, 国内外学者、专家和工程技术人员做了大量工作也取得了不少成果, 在控制算法上也收获颇丰, 提出了电极升降智能复合控制<sup>[15]</sup>, 模糊控制<sup>[16]</sup>, 自校正控制<sup>[18]</sup>, 有限代遗传算法及其在电弧炉自适应控制中的应用<sup>[17]</sup>等先进控制理论在电极控制中的应用性研究, 但在仅是理论上的研究(国内), 实际应用中的电极控制算法大多数还是以 PID 算法为主, 只有少数厂家通过引进国外先进先进设备, 实现了电弧炉的集散控制系统和电极调节智能控制。

### 4.2.1 常规算法及其应用分析

PID 控制算法是工业控制领域中一种被广泛采用的控制方法, 因为 P 是比例, 具有对目前偏差量负责的特点; I 是积分, 它是在时间坐标上对 K 时刻及 K 时刻以前的偏差量的总结, 形成的控制量具有对历史数据负责的特点; D 是微分, 它是对 K+1 时刻偏差量变化趋势的一种预报(或预测), 具有对未来负责的特点; 因此 PID 控制算法具有全局消差的能力。

#### 1) PID 控制算法

在 PID 控制中，将系统的设定值  $i(t)$  与系统输出值  $y(t)$  比较，得出控制偏差  $e=i(t)-y(t)$ ，并依据偏差情况，给出控制量  $u$ 。对于连续时间系统来讲，模拟 PID 控制算法的一般形式为

$$u(t) = \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (4-2)$$

写成拉氏变化形式为：

$$U(s) = k_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) E(s) \quad (4-3)$$

数字式 PID 的离散形式为：

$$u(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{j=0}^n e(j) + k_d [e(k) - e(k-1)] \quad (4-4)$$

式中  $k_p, k_i, k_d$  分别为 PID 控制作用的比例、积分和微分系数。采用增量形式的控制输出有：

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) = k_1 e(k) + k_2 e(k-1) + k_3 e(k-2) \quad (4-5)$$

式中  $k_1 = k_p + k_d/T; k_2 = k_i T - k_p - k_d/T; k_3 = k_d/T; T$  为采样周期

## 2) PID 策略在电极控制中的问题

电弧炉系统是一个随机干扰十分严重的非线性时变系统，采用常规 PID 调节器很难收到良好的控制效果，甚至无法达到基本要求。PID 控制算法有它的局限性和不足，由于 PID 算法只是在系统模型参数为非时变的情况下（即静态），才能获得理想的效果。当一个调整好参数的 PID 控制器被应用到模型参数时变系统时，系统性能会变差。另外，在对 PID 参数进行整定的过程中，PID 参数的整定值是具有一定局限性的优化值，而不是全局性的最优值，因此这种控制作用无法从根本上解决动态品质和稳态精度的矛盾。面对电弧炉这样的具有较强不定性的受控系统，当对受控对象的特性尚未完全掌握，系统本身又存在不可忽视的不定性时，PID 是不能做到理想的控制效果的。

### 4.2.2 智能复合式算法的应用

鉴于以上分析，PID 控制算法在电极控制系统中不能够达到好的效果，归结起来是电弧炉这一系统的复杂性和非静态性做决定的。电弧炉冶炼过程分为融化期、氧化期、还原期 3 个阶段。在电弧炉炼钢各过程中，电极和炉料的接触、融化、塌料等造成的电弧长度、电弧电压、电弧电流和输出功率不断变化。融化期输入功率最大，电弧燃烧不平衡、电弧电流波动大，电弧点燃的瞬间，经常发生断弧和短路现象；氧化期相对（融化期）输入功率较小，电弧燃烧趋于平稳；还原期输入功率最低，电弧燃烧更加平稳，电弧电压也接近正弦波。作为控制系统设计，目的就是要让其稳定、快速、精确的运行，稳定是前提。针对各阶段的不同特点，对控制有不同的要求。融化期希望电极无超调的快速调整，对控制要求不高；氧化期扰动减小，弧长变化较稳定，偏差较大，快速性和精度要求适中；还原期炉况较稳，只需要较高的控制精度即可。

针对不同阶段的控制要求，本文拟采取智能复合式算法：即融化期采取快速最优 Bang-Bang 控制；氧化期干扰较小用模糊控制；还原期燃烧最稳定，可视为静态，当然用 PID 控制。此算法，吸取了 Bang-Bang 控制、模糊控制、PID 控制策略各自的长处，克服其不足，提高了系统的控制精度和跟踪能力。

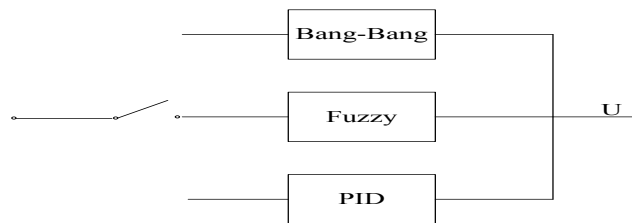


图 4.1 算法说明简图

当  $|e(k)| > 3.8$  时  $U=U_m$  最大速度调节，Bang-Bang 控制；

当  $0.8 < |e(k)| \leq 3.8$  时 模糊控制，通过模糊表查询得到 U；

当  $0.1 < |e(k)| \leq 0.8$  时 PID 控制输出；

当  $|e(k)| \leq 0.1$  时  $U=0$  ；

这种分阶段控制方法在本文之前已经有资料[19]介绍过，并对其进行了仿真验证，结果表明智能复合控制系统的响应速度比一般的 PID 系统快 5 倍；智能复合控制系统的静差为 0.056094mm，而 PID 系统的静差为 0.170782mm，取得了良好的控制效果。PID 控制在前面已经有了详细介绍，在此不再叙述，下面对其它两种算法进行介绍。

1) Bang-Bang 控制  
Bang-Bang 控制<sup>[17]</sup>

是一种时间最优控制，又称快速控制法。它的输出只有开和关两种状态。在输出低于设定值时，控制为开状态(最大控制量)，使输出量迅速增大。在输出预计达到设定值的时刻，关闭控制输出，依靠系统惯性，使输出达到设定值。它的优点是控制速度快，执行机构控制比较简单(只有开、关两种状态)。但它的缺点是如果系统特性发生变化，控制将发生失误，从而产生大的误差，并使系统不稳定。在偏差大时，使用 Bang-Bang 控制，以加快系统的响应速度。

$$|E| > Q \quad (4-6)$$

Q 是一个可调参数。Q 取得小，Bang-Bang 控制范围大，过渡过程时间短，但超调量可能变大。Q 取得大，则情况相反。控制时，为  $E > Q$  时，控制量取与偏差同符号的最大值或最小值，因此，当偏差较大时，该最大的控制量将使偏差迅速减小，可加速过渡过程。

## 2) 模糊控制<sup>[20]</sup>

模糊控制是建立在人类思维模糊性的基础之上，模糊控制与传统自动控制有着本质的区别，它能很好的仿效和描述人的思维方式，总结和反映人的经验，对复杂事物和系统可进行模糊度量、模糊识别、模糊推理、模糊控制和模糊决策。模糊控制的核心在于它具有模糊性语句条件语句，作为规则去控制。控制规则由对控制过程十分熟悉专门人员给出，所以，模糊控制本质上是一种专家控制。这种控制的控制规则充分反映了人的智能活动。

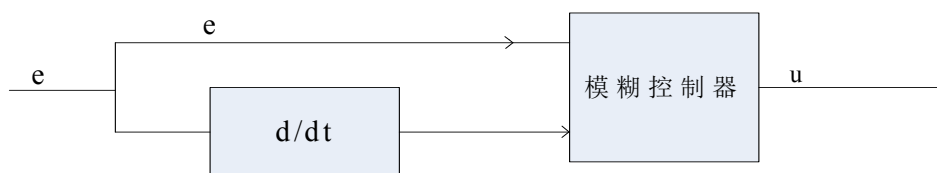


图 4.2 二维模糊控制器图

根据参考文献[21]，在实际生产过程中的电弧长度 e 的偏差进行抽样（检查）时，偏差变化率符合下列等式：

$$E = \text{int}(e \frac{6}{E_M}) + \text{sgn}(e) \quad (4-7)$$

$$E = \text{int}(\& \frac{6}{E_M}) + \text{sgn}(\&) \quad (4-8)$$

其中，偏差变化范围限制在  $(-E_m, +E_m)$  之间，偏差变化率限制在  $(-E_m, +E_m)$  之间。控制变量  $u$  分解为 13 个，即：-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6，但是控制变量  $U'$  的变化范围在  $(-2.5, +2.5)$  之间。变化因子  $q = 2.5/6 = 4.2$ ，因此有：

$$U = qU' \tag{4-9}$$

在工程实践中为了方便， $E_m$  和  $U(P_B, P_M, P_S, 0, N_S, N_M, N_B)$  作为语言变量，应用三角形隶属函数， $A_i, B_i, C_i$ ，定义为语言值，这样，模糊语言规律如下：

$R_1$ : if  $E_m$  is  $A_1$  and  $E_m$  is  $B_1$  then  $U$  is  $C_1$  ;

$R_2$ : if  $E_m$  is  $A_2$  and  $E_m$  is  $B_2$  then  $U$  is  $C_2$  ;

.....

$R_n$ : if  $E_m$  is  $A_n$  and  $E_m$  is  $B_n$  then  $U$  is  $C_n$  ;

第  $i$  次模糊关系(式) $R_i$  :

$$R_i \triangleq (A_i \text{ and } B_i) \rightarrow C_i$$

$$\mu_{R_i} = \mu_{(A_i \text{ and } B_i \rightarrow C_i)}(E_m, E, U) = [\mu_{A_i}(E_m) \text{ and } \mu_{B_i}(E_m)] \rightarrow \mu_{C_i}(U)$$

总模糊关系为：

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i$$

当输入数据被当作为  $E_m$ ，那么它用  $A'$  表示，当被当作为  $E_m$ ，那么它用  $B'$  表示，假设输出数据为  $U'$ ，则

$$U' = (A' \text{ and } B') \cdot R$$

此处  $\mu_{(A_i \text{ and } B_i)}(E_m, E_m) = \mu_{A_i}(E_m) \wedge \mu_{B_i}(E_m)$ ，最后，控制查询表由取中值的方法制成。



表 4.1 模糊控制查询表

EC U E	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-6	6	5	6	5	6	6	6	3	3	1	0	0	0
-5	5	5	5	5	5	5	5	3	3	1	0	0	0
-4	6	5	6	5	6	6	6	3	3	1	0	0	0
-3	5	5	5	5	5	5	5	2	1	0	-1	-1	-1
-2	3	3	3	4	3	3	3	0	0	0	-1	-1	-1
-1	3	3	3	4	1	1	0	0	-1	-1	-3	-3	-3
0	3	3	3	4	1	1	0	0	-1	-1	-3	-3	-3
1	2	2	2	2	0	0	-1	-3	-3	-2	-3	-3	-3
2	1	1	1	-1	0	-2	-3	-3	-3	-2	-3	-3	-3
3	0	0	0	-1	-2	-2	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
4	0	0	0	-1	-3	-3	-6	-6	-6	-5	-6	-5	-5
5	0	0	0	-1	-3	-3	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
6	0	0	0	-1	-3	-3	-6	-6	-6	-5	-6	-5	-6

### 4.3 本章小结

本章内容从控制策略和控制器算法的选择应用上做了具体的阐述，分析了常规 PID 在电弧炉电极控制上应用的不足，结合电弧炉冶炼的不同时期，采取了智能式复合控制算法以满足不同时期的控制要求。选择恒阻抗控制策略能保持三相电极互不干扰，自动调节。

## 5 基于 PLC 交流电弧炉电极控制系统及其实现

在前面章节详细介绍了电弧炉电极控制系统组成及其算法，本章作者试图应用 PLC 完成电弧炉电极的自动调节。

### 5.1 电弧炉控制系统的结构

一般的电弧炉控制系统都经过改造，实现冶炼过程的全程控制。其基础自动化级采用两级控制结构，上位机负责过程参数的监视、数据的报表存档及提供优良的用户操作界面。下位机负责现场参数的采集；数据处理与对象的控制，将采集数据上传到上位工控机，并接受来自上位机的用户操作指令。上位机与下位机之间、两个下位机电极调节 PLC 和炉体动作 PLC 之间通过 PROFIBUS 网总线连接，实现数据的传输与通讯。系统结构如图：

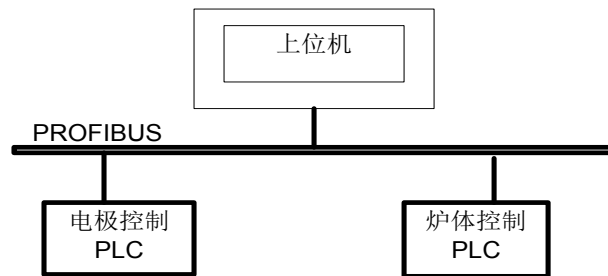


图 5.1 电弧炉控制系统结构简图

本文只做电极调节 PLC，对炉体动作 PLC 不做深入的叙述

### 5.2 上位机配置与功能

上位机为 PC 站，配备 winCC 组态软件，Step7 编程调试环境，提供人机操作面。

#### 5.2.1 上位机的配置

上位机采用研华工控机，基本配置如下：

操作系统：WINDOWS 2000；

通讯卡：CP5611 MPI/PROFIBUS 网卡，用于实现与 PLC 的网络连接；

组态软件 1：WinCC V5.0，用于上位机，可实现过程监控、数据存档、流程显示以及人机交互等功能。

组态软件 2: step7 v5.2 用于 PLC 系统组态、程序设计与调试及软件与数据的下装与上传。

### 5.2.2 上位机实现的基本功能

上位机监控软件是在 WinCC 环境下开发的应用程序，它在实现了与下位 PLC 的数据通讯的基础上，提供了方便应用的用户操作界面。

(1)操作方式设定：电弧炉控制系统采用两种方式操作，一种是在操作台上完成的；一种是在上位机上完成的，两种操作是独立的。操作方式设定在上位机完成。

(2)电弧炉的熔炼过程的动态跟踪：主要监视在熔炼开始后，电弧炉的熔炼进度及一些重要参数的动态跟踪显示和一些生产状态的显示。如：手自动状态、运行状态等。

(3)现场重要数据的动态采集和归档：当熔炼开始以后，数据的采集和归档即已启动，并开始记录。通过趋势图和趋势表的形式加以显示，用户可根据需要随时查看记录。

(4)报警的记录和显示：当生产过程发生报警时，系统会自动触发相应的报警信息项，此信息会马上显示到报警信息表中。

(5)参数输入：完成电弧电流的设定和 PID 控制器的系数的给定，并将它们传送到 PLC 中，使生产过程按设定要求的参数进行生产。

(6)打印报表：这个界面主要用于完成一些报表的打印。其实有些报表如运行参数，和一些设定参数在设定完成之后就可以打印了。通过动作检测或标签值的变化触发均可启动打印任务，完成打印。

(7)用户权限：这里将用户权限分为三种，一是操作员(即普通用户)权限，只能进行界面中提供的操作，如画面切换、参数输入、历史数据查询，趋势图显示等，无权进行涉及系统参数的操作，也不能退出操作界面。二是管理员权限，除了享有操作员的权限外，还允许对报警参数进行修改。三是程序员权限，该权限为超级权限，除享有管理员的所有权限外，还允许进入量程设定画面，对过程检测参数量程进行设定及修改。

(8)作为编程器：通过上位机安装的 STEP7 集成开发环境进行下位机编程，然后通过 MPI/PROFIBUS 网下载到 PLC。

## 5.3 控制系统（下位机）硬件组成

### 5.3.1 PLC 硬件组成<sup>[22][23]</sup>

控制系统的基础级采用西门子的 S7-300 系列 PLC 产品构成，作为下位控制级，它负责完成对过程参数的实时采集、数据处理及参量控制等一系列功能，并实现与上位机之间的数据交换。要实现这些功能，就要按照一定的组态规则将电源、CPU 各种应用模板安插在机架上组成一个有机的整体。PLC 系统硬件配置如下：

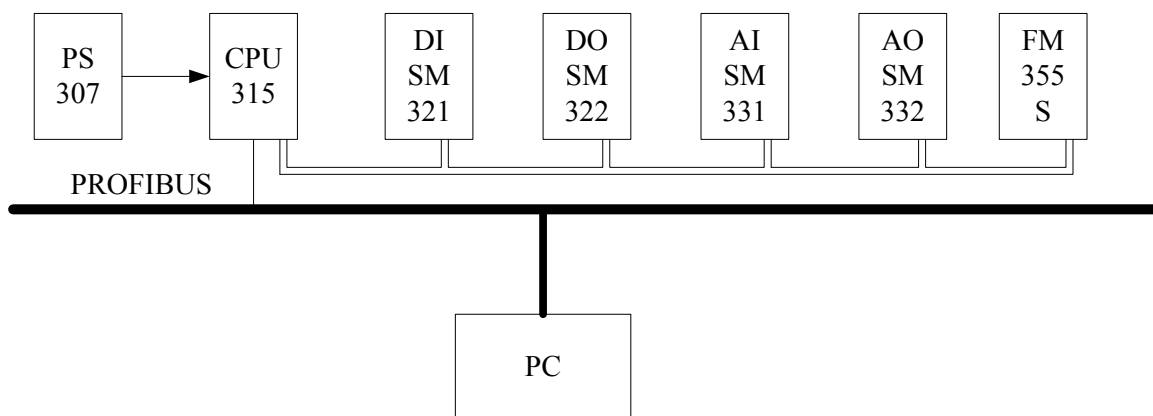


图 5.2 S7-300 控制系统硬件组成

Step.7 中硬件组态如下：

S...	Module	Order number	Firmware	MPI address	I add...	Q ad...
1	PS 307 5A	6ES7 307-1EA00-0AA0				
2	<b>CPU315-2DP (1)</b>	<b>6ES7 315-2AG10-0AB0</b>	<b>V2.0</b>	<b>2</b>		
DP	DP				2047*	
3						
4	DI16xDC24V, Interrupt	6ES7 321-1EH01-0AA0			0...1	
5	DO16xAC120V/0.5A	6ES7 322-1EH01-0AA0				4...5
6	AI8x12Bit	6ES7 331-7NF10-0AB0			288...303	
7	AO4x12Bit	6ES7 332-7ND01-0AB0				304...311
8	FM 355 S PID Control	6ES7 355-1VH00-0AE0			336...351	336...351

图 5.3 硬件组态型号与地址分配

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：

<https://d.book118.com/366001030102010114>