

分类号

UDC

密级

编号

中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

硕士学位论文

论文题目 烟气制酸过程智能控制

系统的设计与开发

学科、专业 控制工程

研究生姓名 邵雄奇

导师姓名及

专业技术职务 桂卫华 教授

卢沛光 高级工程师

摘 要

冶炼烟气制酸是硫酸生产的一种重要方法,它具有硫铁矿制酸和硫磺制酸所不具有的优势。但目前国内烟气制酸过程主要是手动控制,控制精度低、效果差。如何针对烟气制酸过程不易建立准确数学模型,具有非线性、大时滞、时变和干扰性强的特点,把智能控制等先进控制思想运用到烟气制酸过程,最终达到转化器内四段温度基本恒定、热量保持平衡,从而降低能耗,已经成为一项意义重大的研究和开发课题。本论文探讨了应用智能控制方法达到烟气制酸过程控制目标的控制系统设计方法。

论文首先介绍课题的研究背景及来源,综述目前国内外冶炼烟气制酸过程的研究现状,指出烟气制酸过程在控制上的难点,然后给出研究的问题和基本的解决思路。通过对烟气制酸生产过程基本原理的具体介绍,说明制酸系统风量调节和转化器内四段温度所需要达到的具体性能指标。接下来对所设计的控制系统从理论上探讨设计的方法。在介绍控制系统设计目标的基础上,提出了控制系统的整体结构,通过专家控制策略实现了风量阀门的准确调节,为保证阀门的正确动作,根据阀门在不同开度的动作特性,对阀门开度的控制量进行了专家修正;通过模糊控制策略实现了风机转速的调节,该模糊控制器以转化器四段温度的整体偏移量为输入,以风机转速为输出,最终通过坐标变换将风机转速转换为变频器的输出。最后探讨了智能控制系统的实现方法,说明风机驱动电机转速调节的方案选择与实现,给出系统应用程序的程序框架、控制算法流程和系统通讯流程,应用 OPC 通讯技术实现了应用软件与底层集散控制系统的无缝连接。实际运行结果表明:论文提出的烟气制酸过程智能控制系统,完全能够达到控制性能指标的要求。论文最后在总结系统设计和应用的基础上,指出了智能控制系统在冶炼企业中广阔的应用前景。

关键词: 冶炼烟气, 硫酸生产, 模糊控制, 风机, 二氧化硫

ABSTRACT

Producing sulfuric acid from sintering machine off-gas is an important way of producing sulfuric acid, it has advantages comparing to other ways. But the control in this process is mainly depends on man in China, how to rebuild the control system from manual control into automatic control, how to achieve maintaining the temperature of chemical reaction container stable, and keep the thermal balance in the container, has become a research hotspot in smelting systems. A design of intelligent control system is introduced in this thesis in order to solve the automation of sulfuric acid producing process which has characteristics which are difficult to build mathematical modal, nonlinear, large time-delaying, time-varying and strong-disturbing.

Firstly, the research background and origin of this task are given. After summarizing the characteristics of nowadays control systems domestically and abroad, difficulties and developing trend are introduced, the way of designing control system is put forward. Based on the demand of technique of the project, exact performance of control system is given. Design of the system is discussed theoretically. Expert control is used to control the wind amount control valve. In order to control the valve precisely at its different state, expert-adjusting strategy is employed. Fuzzy control is used to adjust the rotate state of fan, the output of the fuzzy controller can be adjusted to the input of transducer through coordinate counterchange. At last, the applying of system is discussed. The speeds adjusting of the driving motor of the fan is introduced. The framework of the software, the control algorithm flows and the communication flows are introduced later. The application of OPC technique guarantees the seamless connetion of the system and the DCS. The running of the system proved the validity of the intelligent control system. On the foundation of the design and application of the system, the bright future of the using of intelligent control system is pointed at last.

Key Words: sintering machine off-gas, sulfuric acid production, fuzzy control, fan, SO₂

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的与意义	3
1.3 国内外研究现状	4
1.4 研究内容及论文结构	5
第二章 烟气制酸过程的生产工艺需求.....	7
2.1 硫酸生产的种类	7
3.1.1 硫铁矿制酸.....	7
3.1.2 硫磺制酸.....	7
3.1.3 冶炼烟气制酸.....	8
3.1.4 三种原料制酸的综合比较.....	8
2.2 烟气制酸的基本原理	10
2.3 制酸系统的风量调节	12
2.4 转化器内四段温度控制	14
2.5 SO ₂ 风机的控制	16
2.6 小结	17
第三章 烟气制酸过程智能控制系统设计.....	18
3.1 控制系统整体设计	18
3.1.1 系统设计要求.....	19
3.1.2 系统结构.....	19
3.2 风量阀门的专家控制系统	22
3.2.1 专家控制系统基本概念.....	22
3.2.2 专家控制系统设计.....	23
3.3 阀门开度专家修正规则	28
3.4 风机转速的模糊控制	29
3.5 OPC 通讯技术	34

3.6	小结	36
第四章	烟气制酸过程智能控制系统的实现.....	37
4.1	风机节能控制的实现	37
4.1.1	风机运行状态分析.....	37
4.1.2	风机调速的实现方法.....	38
4.1.3	系统工作流程.....	39
4.2	集散控制系统介绍	40
4.2.1	uXL 系统简介	41
4.2.2	uXL 系统硬件及功能	43
4.3	控制系统应用软件整体框架	45
4.4	OPC 通讯机制的实现	48
4.5	控制算法流程	51
4.6	系统通讯流程	53
4.7	系统运行效果	56
4.8	小结	57
第五章	系统运行结论与展望.....	58
	参考文献.....	60
	致 谢.....	65
	攻读学位期间的主要成果.....	66
	附图 1	67

第一章 绪论

随着国家环保政策的日益严格，近几年，有色金属冶炼企业花费了大量投资，引进世界先进技术，加强烟气制酸，使硫的利用率有很大程度的提高，极大的减少了对环境的污染。在进行技改的同时又有生产规模的扩大，因而由冶炼烟气制酸产量近年有了较快的增长。我国现有硫酸生产厂家约 500 多家，主要采用硫铁矿制酸，冶炼烟气制酸、硫磺制酸三种生产方法，年生产能力在 2400 万吨以上。韶关冶炼厂共有两套硫酸生产系统，硫酸年产量每系统 14 万吨，两个系统共 28 万吨。2000 年的产量约占世界总产量的 12%，仅低于美国，居世界第二位。

为满足硫的利用率和排放烟气的国家要求，各个钢铁集团自行研制或引进了大批的先进设备，以提高劳动生产率，扩大利润，获得好的生产效益。在韶关冶炼厂烟气制酸生产中，将原来的风机液力耦合器调速装置替换为变频器调速装置。这就引入了一个新的矛盾：新的先进设备和原有的基础设施的矛盾。在韶关冶炼厂烧结厂的烟气制酸系统中，这个矛盾主要体现在改造后采用先进变频器系统和过于简单的控制策略上。为满足转化器内四段温度的恒定，并且保证冶炼烟气中的硫达到较高的利用率，简单的靠 PID 等控制手段是不够的，必须提出新的控制策略。

烟气制酸过程是一个分布参数、耦合严重、非线性过程，是一个高度复杂的工业过程。韶关冶炼厂为满足废气排放的国家标准，采用了“两转两吸”过程：即 SO_2 的利用包括两次转化和化学反应生成的 SO_3 有两次吸收的过程，这使得烟气制酸的过程更加复杂。本文就转化器内四段温度的恒定，尽可能的提高 SO_2 的利用率等问题展开了研究，提出了风量自动控制系统的设计方法。

本章首先从研究背景、研究目的与意义和国内外研究现状三方面阐明课题的相关背景，最后对论文构成进行介绍。

1.1 研究背景

硫酸作为我国国民经济和农业生产资料的重要基础原料和物资，已广泛应用于机械、电子、化工、材料、冶金、农业等各个行业，在国民经济发展中具有十分重要的地位。与国际上发达国家相比，我国硫酸生产企业在质量、成本、规模、效益、

品种、环境保护等方面尚存在较大的差距，如劳动生产率低、成本和能耗高、环境污染严重、对国际硫磺市场依赖较重等，这些差距严重威胁到我国硫酸工业的生存和发展，大大削弱了其参与国际市场竞争的能力。差距产生的原因是多方面的，但生产过程控制技术落后、自动化程度低是最主要原因之一。采用先进的控制技术解决包括制酸工业在内的流程工业优化控制问题，改造传统产业，提高我国流程工业的市场竞争能力已成为共识。

烟气制酸过程是一个分布参数、耦合严重、非线性过程，是一个高度复杂的工业过程。由于其复杂性，目前国内很多冶炼烟气制酸企业的生产过程依靠人工控制。就韶关冶炼厂而言，烟气制酸过程所存在的问题，可概述为以下两个方面：

首先，转化流程的核心设备是转化器，核心目标是 SO_2 的转化率。为了保证 SO_2 的转化率稳定在一个较高的水平，必须使转化器的四段温度稳定在一定的范围内，即需要控制一段进口、一段出口、二段进口、三段进口、四段进口的温度。这几个温度指标与以下一些因素相关：转化反应的反应状况、烟气管道和转化器的保温情况、贯穿转化系统的系统风量、各段烟气参与热交换的情况以及烟气中 SO_2 的含量等。这些因素中能进行控制的只有系统风量和参与热交换的情况，而系统风量又牵涉到整个转化系统的热平衡，因此，稳定转化器的四段温度，只能依靠调节各段烟气参与热交换的程度，即调节控制热交换程度的烟气管道上的阀门的开度。但是，这些烟气的热交换是相互耦合的，阀门的开度调节难以简单定量进行，由于滞后性的影响，错误的调节还会使四段温度状况恶化。这些调节都需要操作人员的丰富的经验。这样一来，四段温度的调节就会有较大的随意性，控制效果较差。

其次，对于整个转化系统而言，转化和吸收都是放热反应，但热量也会有很多方式流失，维持系统的热平衡对于节能降耗具有重要的意义。系统热平衡一旦打破并积累，就需要补热或酿成工艺事故。系统损失的能量有较大部分是由烟气（尾气）带走的，这样一来就需要结合 SO_2 浓度对系统风量进行控制。根据经验和资料，转化器四段温度整体偏低时需要减小风量，反之亦然。当然这些都需要考虑 SO_2 的含量以及其它因素。从目前来说，对于风量的调节，也只能依靠操作人员的经验，调节的程度也只是模糊的。

综上所述，冶炼烟气制酸过程的控制是分布参数、耦合严重、非线性系统的控制，这导致了很难求得系统精确的数学模型，采用传统的经典控制手段也难以达到

控制要求，必须采用新型的智能控制方法来解决这一问题。

智能化技术的发展为解决复杂工业过程建模和优化控制问题提供了一种很好的解决方案，逐渐成为工业过程控制研究的热点。智能化技术能对复杂系统（如非线性、快时变、复杂多变量、环境扰动等）进行有效的全局控制，并具有较强的容错能力；定性决策和定量控制相结合的多模态组合控制，其基本目的是从系统的功能和整体优化的角度来分析和综合系统，以实现预定的目标，并应具有自组织能力；同时具有以知识表示的非数学广义模型和以数学模型表示的混合控制过程，人的知识在控制中起着重要的协调作用，系统在信息处理上既有数学运算，又有逻辑和知识推理。智能化技术主要包括：人工智能、神经网络、专家系统、模糊控制、软测量技术、预测技术、进化算法等，已广泛应用于机器人学、机械制造、电力电子、工业过程控制等领域。

由于复杂工业过程构成复杂、功能多样，随着环境变化和工业过程本身的发展，工业过程控制目的、目标、边界约束条件也随着改变，从而使其研究更加艰难。尽管各单项技术各具特色，但要实现对实际工业过程尤其是复杂工业过程有效控制是相当困难的。各种智能化技术，如模糊逻辑、神经网络、专家系统等本身都具有一定的适应面和局限性，很难用一种技术来实现复杂工业过程中的优化控制问题。采用集成化思想综合多种智能化技术优点的智能集成控制技术已经成为复杂工业过程控制研究和发展的方向。

本论文针对烟气制酸过程中“两转两吸”的生产条件，针对控制阀门众多，风机尽可能低速运行的要求，进行了烟气制酸过程的智能控制技术及其应用研究，提出了转化器内四段温度恒定控制的阀门专家控制技术，建立了风机风量自动调节过程智能控制系统。该项目的研究成功，将会对冶炼企业烟气制酸过程控制起到重要的推动作用。

1.2 研究目的与意义

为了解决烟气制酸过程中存在的主要问题，本论文将主要研究以下几个相关问题：

（1）研究模糊控制、专家系统、神经网络等智能化技术在烟气制酸过程中的应用，主要针对烟气制酸过程中转化器内化学反应的本质属性，选择合适的目标温度，

通过调节相关的阀门，使转化器内四段温度保持基本恒定。选择最符合实际情况的控制模型，在转化器内四段温度整体偏离目标温度的情况下如何通过变频器调节风机的转速，并且尽可能的达到节能的目的。

(2) 研究专家控制在风量阀门控制中的应用，在总结现场操作人员调节风量阀门专家经验的基础上，总结出阀门控制的专家规则模型，通过该模型指导四段转化器风量控制阀门开度的控制。

(3) 研究该智能控制系统与原横河 uXL 集散控制系统的连接。智能控制算法在上层应用软件中实现，控制算法所需获得的生产过程参数通过 OPC 技术从 DCS 得到，计算所得的控制量的输出同样通过 OPC 技术下发到组态软件并控制现场的阀门控制器以及变频器的输出。

研究烟气制酸过程智能控制系统的工业化实现方法和技术，研究 OPC 通讯技术在本系统的应用，保证控制的实时性、准确性。

1.3 国内外研究现状

冶炼烟气制酸是一个复杂的物理化学过程，随机干扰因素的影响严重，物理化学反应过程千变万化，不同的生产过程对各个控制量的要求也不尽相同，因此如何保持四段转化器内温度的基本恒定，如何尽可能的提高 SO_2 的转化率一直是困扰烟气制酸生产过程的难题。

目前国内的烟气制酸过程控制系统相对落后，大部分冶炼企业大多还是依靠工艺改造来达到较好控制效果的目的。国内有专家提出通过增强转化器的蓄热作用，增加催化剂用量，采用高效热交换器及选择合适的保温材料等来保持转化器内的热平衡，但是对阀门的控制很简单，只采取简单的全开全闭^{[1][2]}。金昌冶炼厂采取类似的工艺措施保持转化器内的热平衡^[3]。某些企业在两转两吸生产情况下采用设置直接进二段的冷副线、在干燥塔前设置空气放入管线以及设计上考虑一、二段的触媒分配以及各段转化率等措施保持转化器内的热平衡^[4]。对一些企业，例如云南铜业股份有限公司来说，冶炼烟气制酸过程只有简单的自动控制系统，完成基本的监控功能^[5]。杭州富春江冶炼厂虽然对工艺进行了改造，采用了两转两吸生产工艺，但是没有配套的自动化控制系统^[2]。对风机的控制来说，大冶有色金属公司冶炼厂的 KKK 风机用 PLC 进行检测和控制^[6]。大冶的 SO_2 风机用 2 台液力耦合器调速，

能耗较大, SO_2 浓度偏低时用一转一吸或补热炉加热保证两转两吸, 控制手段较为落后^[6]。贵溪冶炼厂提出 SO_2 风机自动改造方案, 用阀门控制风机对冶炼烟气的分配, 但是风机风量调节靠机械调速, 有较大的能耗^[7]。金川公司化工厂将风机和变频器信号都通过 PLC 传送到 DCS, 由 DCS 集中控制, 对风量的调节主要依靠操作人员^[9]。某些企业用 honey well 公司的 S9000 集散控制系统作为冶炼烟气制酸过程中的主要控制设备, 完成对烟气制酸过程的监控^[10-12]。综上所述, 国内的冶炼烟气制酸过程自动化程度相对落后, 各企业为满足生产工艺的要求, 一般在生产工艺上进行了较多的改造, 而没有在工艺改造完毕的基础上建立更高级的自动控制系统, 达到更好的控制效果^{[13][17]}。

根据文献资料, 国外烟气制酸过程的自动化程度相对较好, 其更好的控制效果一般是建立在较好的设备情况基础上的^[14-19]。芬兰开米拉公司化工厂 1987 年已采用两转两吸生产工艺, 共有三台 SO_2 风机, 与国内现有生产工艺类似, 但是产品产量和质量相对较高^[20]。国外的一些学者对冶炼企业降低能耗, 提出了能耗预测模型、局部最优解的获得、控制系统结构最优化实现等方面, 对烟气制酸和其它冶炼企业的生产有较大的指导意义。但是这些控制方案一般都需要建立复杂的数学模型; 而烟气制酸过程是多变量系统, 变量之间的关系难以用精确的数学模型来表达, 单纯的依靠传统的控制思想, 难以实现并且难以取得较好的控制效果^[17]。

总体来说, 对于烟气冶炼过程的控制, 国内电控装置大都是模拟手动控制装置或者由简单的单片机、可编程逻辑控制器组成, 受到控制器速度及内存的限制, 很难应用复杂的控制算法及保证控制的实时性。为此, 引入先进的控制理论和技术, 应用模糊控制、专家控制等多项智能控制理论和技术^[17-23], 建立冶炼烟气制酸过程转化器内四段温度基本恒定、 SO_2 达到较高的转化率、风机以尽可能低的转速以达到节能目的的智能控制系统, 成为当前冶炼企业烟气制酸过程控制的主要发展趋势。

1.4 研究内容及论文结构

本文以韶关冶炼厂烟气制酸过程为研究对象, 提出了一种应用模糊控制、专家控制和阀门控制的智能控制系统, 并在实际工业过程控制系统中应用, 主要研究内容包括:

(1) 通过对专家经验的总结, 建立基于专家经验的四段转化器温度阀门控制的

专家控制系统，根据对现场生产条件的总结，建立特殊生产状况下的处理方法，即专家规则模型；

(2) 分析 SO_2 的转化率相关影响因素，使此可逆反应尽可能的向正方向进行，并且使温度基本保持在最佳温度，以保证转化速率。这要求建立风机转速调节的模糊控制系统，在满足化学反应的条件下尽可能的节能。

(3) 利用企业现有软硬件设施，采用 OPC 技术实现上层控制软件与下层 DCS 之间的通讯，实现应用软件和组态软件之间的无缝连接。

本论文的具体构成如下：

第二章在介绍各种制酸过程特点的基础上，分析了各种制酸过程的优劣，说明了冶炼烟气制酸过程工艺的特殊性，给出了冶炼烟气制酸过程需要实现的技术指标，并指出了传统控制方法的局限性。

第三章从理论上讨论了系统的控制策略。详细分析了要达到控制目标需要采取的控制策略。具体提出了专家控制、模糊控制和专家规则模型的设计思想，并从总体上说明了系统的通讯策略。

第四章给出了烟气制酸过程智能控制系统的具体实现。详细介绍了专家控制、模糊控制和专家规则模型的实现方法，给出了具体的实现步骤，并给出了主要步骤的流程图。详细说明了 OPC 通讯的实现方法。

第五章对本文所做的工作加以总结，并对课题的完善和进一步深入研究提出了建议，最后肯定了课题的现实意义，展望了课题的推广价值。

第二章 烟气制酸过程的生产工艺需求

目前常见的工业制硫酸主要有三种方法：硫磺制酸、硫铁矿制酸和冶炼烟气制酸，本章在介绍在三种制酸方法的基础上，对三种方法的优缺点进行了比较，说明了烟气制酸的优越性。针对韶关冶炼厂烟气制酸过程“两转两吸”工艺的特殊性，对工艺作了详细的说明，指出了该过程控制中需要注意的问题，并对系统中的可检测量和被控量进行了处理，为冶炼烟气制酸过程的智能控制系统的建立奠定了基础。

2.1 硫酸生产的种类

目前工业制硫酸的原理有三种：硫磺制酸、硫铁矿制酸和冶炼烟气制酸。从世界范围来讲，近几十年来一直以硫磺为主要制酸原料，硫磺制酸占 70% 以上，硫铁矿制酸仅占 10% 以下。而绝大多数硫铁矿制酸装置在中国，这是因为中国缺乏天然硫磺资源。

3.1.1 硫铁矿制酸

由于我国天然硫磺资源缺乏，目前我国仍是以硫铁矿制酸为主的国家。目前硫铁矿单系列最大装置为 40 万 t。硫铁矿制酸的企业多以大型化企业为主，且都是老企业。这些大型企业生产的硫酸绝大多数都是供本企业生产自用，少部分流向市场。

硫铁矿制酸生产过程为硫铁矿进入沸腾焙烧——废热锅炉——烟气净化——干吸、转化。生产过程与冶炼烟气制酸基本相同。在硫铁矿制酸过程中，每生产 1t 成品硫酸，就要生产 0.7-1.1t 硫铁矿烧渣，由于烧渣含铁较低，综合利用比较困难，一般是以低廉的价格出售给水泥厂作添加剂使用。或部分取代黏土制砖或作为建筑材料的充填剂。有些厂家弃置堆放，既要占用大量场地，又造成了环境污染^[74]。

硫铁矿制酸，包括污水处理及尾气处理费用，其生产成本在 300-350 元/t。

3.1.2 硫磺制酸

硫磺是生产硫酸的理想原料，与硫铁矿制酸比较，硫磺制酸的设备简单，建设投资少，操作兼并，没有废渣和污水。我国目前硫磺制酸单系列最大装置为 40 万 t，将

来有可能要达到 60-80 万 t。

自 1996 年以来,特别是 1998 年开始,由于国际上硫磺产量供大于求,价格剧跌,中国开始进口大量硫磺用于制酸。1995 年到 2000 年我国的硫磺进口量增加了 15 倍。年递增长 74.7%,可见增长速度之快。中国硫磺消费数量能否持续增加的关键因素是硫磺的市场价格。1998 年国际市场硫磺价格降低,在大多数地区硫磺价格低于等量的硫铁矿价格。因为硫磺制酸生产建设周期短,环保效益好,生产成本低等优点使其规模仅几年时间就急速扩大。同时多数硫铁矿制酸厂均购买硫磺混入硫铁矿中参烧制酸,不用新建厂,所以成本下降,发展很快。

硫磺制酸的生产过程为固体硫磺进入熔硫池——焚硫炉——废热锅炉——干吸——转化。生产过程中没有烟气净化工序。主产品为硫酸,副产品有蒸汽或用蒸汽发电。因硫磺含硫均在 99.9%,所以生产过程中没有烧渣及污水的排放,尾气量减少,外排 SO_2 浓度低。

硫磺制酸,硫磺离岸价格为 30 美元/t 左右,其生产成本在 220-260 元/t 左右。

3.1.3 冶炼烟气制酸

近几年来,随着国内有色工业的逐步发展壮大,冶炼烟气制酸在全国硫酸产量中的比重也在增大。冶炼烟气制酸单系列装置的最大规模达到 60 万 t,技术和装备越来越先进,大型冶炼烟气制酸生产都不同程度的采用了当今国内外先进技术和装备,大大改变了我国冶炼烟气的生产状况。

冶炼烟气制酸的生产过程为:熔炼炉烟气——废热锅炉——净化——干吸——转化。其在有色冶炼过程中硫酸为副产品,由于原料费用低,生产成本较低,在 200-240 元/t 左右。

3.1.4 三种原料制酸的综合比较

从工业方面来讲,由于原料不同,硫铁矿制酸要比硫磺制酸工艺相对复杂,生产过程长,生产设备多。硫磺制酸原料,含硫为 99.9%以上,不需要很大的原料堆存仓库和沸腾焙烧炉,不必净化。烟气制酸是有色冶炼生产过程中的副产品,冶炼烟气经废热锅炉后进入烟气净化,后续生产与硫铁矿制酸基本相同。由于三种原料成分的不同,硫酸产品的质量也有所区别,可根据不同需要用于各行业。

从环保角度来讲,硫磺制酸没有废水,废渣排放,尾气量减少,尾气 SO_2 浓度下降很多,能达到绿色环保化工水平。硫铁矿和冶炼烟气制酸均有废水排放,硫铁矿制酸还有大量烧渣,如找不到销路,是企业的一大隐患。

生产各项材料、动力的消耗,三种原料制酸的主要物料消耗指标见表 2-1。

表 2-1 主要消耗指标比较

项目	单位	硫铁矿制酸	硫磺制酸	烟气制酸
生产能力	t/a	40000	40000	45000
操作人员	人	120	60	46
原料含硫	t/t	0.35	0.332	0.37
电	kWh/t	115	50	130
水	M^3/t	18	2	8

根据表 2-1 中的消耗指标估算了三种原料制酸生产费用如表 2-2 所示。原料费用均采用目前的价格。硫铁矿的价格为 160 元/t 矿 (35%)。硫磺到厂价格按 500 元/t 计算。烟气制酸的原料费以铜精矿含硫计,纯硫量 130 元/t。动力及人工取相同的单价。

经营成本中均未扣除副产蒸汽的回收。从三种不同原料的制酸成本比较结果看出,烟气制酸的经营成本最低,其主要优势是副产品,原料费用低。其加工费用是硫磺制酸最低,主要是生产环节少,投资低,反映到生产中是动力消耗少,发生的维修费用少。但是硫磺制酸的关键是硫磺的价格,如果硫磺的进口价格超过 40 美元/t (离岸价格),硫磺制酸将于硫铁矿制酸的成本相当^[73]。

从上述比较可以看出,冶炼烟气制酸有资源优势和经济效益优势。在资源优势方面,由于有色金属矿大部分是以硫化物形态存在,所以在开采有色金属矿的同时,留的资源仅是附带,不用增加任何建设投资和生产费用。而硫铁矿的硫资源开采要投入大量的建设投资和生产费用。硫磺原料也是需由国外进口,所以从原料资源看,烟气制酸最有优势。另外,从经济效益方面来看,在上面的生产成本比较中已明确,冶炼烟气制酸的生产成本最低。目前硫磺、冶炼烟气制酸发展是并驾齐驱的形势。尽管硫磺制酸具有其加工费用低的优势,但硫磺价格不会再低,一旦价格上涨,其成本就会

增加。但冶炼烟气制酸与硫磺制酸不同，它毕竟是有色金属生产的副产品，目前几家大的有色冶炼企业，均由国外进口铜精矿，而进口精矿中的硫是不计价的，烟气制酸成本还会降低。因此，相对而言冶炼烟气制酸在市场上具有一定的优势，这是硫磺制酸所无法比拟的。

表 2-2 三种原料制酸的经营成本比较（单位：元/t）

项目	硫铁矿制酸	硫磺制酸	烟气制酸
原料费	160	166	48.1
动力费	55	21	56
其中：电	46	20	52
水	9	1	4
人工费	45	22.5	17.3
维修	20	8	28
其它	15	15	15
合计	295	232.5	164.4
其中：加工费	135	66.5	116.3

虽然冶炼烟气制酸与其它制酸手段相比有很大的优势，但是也有其自身的缺陷。首先在产品质量上，由于有色金属矿物成分复杂，冶炼烟气制酸的产品相对硫磺制酸和硫铁矿制酸杂质成分高，质量略差，用途单一，大部分只能用于工业及化肥原料。另外由于市场地域的限制，硫铁矿制酸大部分为化工企业自产自销，有其固定的用户。硫磺制酸可靠近大用户就地建厂。冶炼烟气制酸相对没有这些有利条件。由于硫酸市场价格偏低，且属于危险运输品，铁路和公路运价率相对较高，这一特性决定了硫酸不可能销售的很远。所以烟气制酸市场的地域限制性很强。

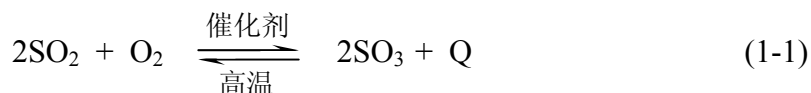
尽管烟气制酸有其自身无法克服的缺陷，但是与硫磺制酸和硫铁矿制酸相比，还是有较大的优势的，因此研究冶炼烟气制酸过程的自动控制，具有重要的意义。

2.2 烟气制酸的基本原理

烟气制酸系统的功能是利用铅、锌硫化物在烧结机中焙烧烧结时所产生的含有 SO_2 的烟气，经过电收尘、净化、干燥、转化、吸收、尾气处理等几个主要工艺处理过程，最后制成工业用硫酸。烟气制酸系统的使用，既可以防止 SO_2 气体对大气的污染，又可以合理地利用了矿产资源，为国民经济建设提供所需的重要的生产原料。

本冶炼烟气制酸系统工艺采用接触法制酸。首先要对烧结机生产过程所生产的含 SO_2 烟气进行预处理。烟气从烧结机烟罩引出，经高温电收尘器收尘后，进入空塔、动力波洗涤器、填料塔进行半封闭稀酸洗涤，再依次经过两级间接冷却器（一级为石墨间冷器，二级为铅间冷器）增湿、降温，两级电除雾器进行除雾，然后经汞吸收塔吸收烟气中的汞后，最后通过 93% 酸塔干燥烟气中的水分。

在烟气进行完干燥和净化预处理后，由 SO_2 主鼓风机送入转化系统，进行烟气冶炼过程中最重要的化学反应，此过程简称为“两转两吸”，即 SO_2 的两次转化为 SO_3 和 SO_3 的两次吸收。在转化器内，在一定反应温度下，通过钒触媒的催化作用，气体中的 SO_2 和 O_2 发生可逆化学反应，生成 SO_3 ，同时放出热量。其化学反应式如下：



经一次转化后的烟气，从下部进入吸收塔，与塔内从上向下喷淋的浓硫酸逆流接触， SO_3 与酸中的水化合生成硫酸，同时放出热量，反应方程式如下：



一次吸收反应将一次转化反应中的生成物基本吸收完，当被吸收后，气体被再次引入转化器内时，原可逆转化反应再次朝正反应方向进行，进行二次转化，二次转化后的烟气再经二次吸收过程后进入尾气处理过程。二次转化及二次吸收的反应式分别与一次转化和一次吸收相同。两转两吸流程主要是通过采用移走可逆反应的生成物的方法来提高总的转化率。

在转化器内进行完烟气制酸过程中最重要的化学反应后，需要对“两转两吸”产生的尾气进行处理。正常生产时，经“两转两吸”处理后尾气中 SO_2 含量可低至 0.05% 以下，若生产不正常，尾气中 SO_2 含量较高时，可采用氨—酸法回收制酸尾气中的 SO_2 ，使废气中 SO_2 含量达到 0.05% 以下，最后经 120m 烟囱排入大气。在烟气制酸

过程中,净化工序定期排放的污酸及设备冲洗水送至硫酸厂西污水处理站,经石灰乳中和沉淀,达到国家环保排放标准后,上清液送往厂东污水处理站。沉淀物用泵打至烧结系统浓密池。由于硫酸生产不但受本系统设备运转状况和工艺条件的影响,而且还受烧结系统生产的制约。由于烟气制酸必须与烧结机同步生产,因此在工艺上具有来源烟气 SO_2 浓度较低、波动大,烟气制酸设备开、停机频繁,制酸烟气中含尘和有害杂质多,净化难度较大等特点。

2.3 制酸系统的风量调节

韶关冶炼厂冶炼烟气制酸过程的智能控制系统最重要的控制目标是提高 SO_2 的转化率,这不仅关系到总硫的利用率和处理制酸废气的氨耗(即制酸成本),更是高空 SO_2 排放达标的保证。

SO_2 转化为 SO_3 是在转化器内完成的,化学反应方程式如式(1-1)所示。为了使反应式能够顺利的向右进行,必须在转化器的各段内保持合适的温度,以使反应条件尽可能的接近平衡转化率状况,从而得到较高的 SO_2 转化率。 SO_2 转化成 SO_3 时放出热量^[23],加热后的热烟气进入热交换器,与进入热交换器的冷烟气交换热量,加热后的冷烟气进入转化器内反应,而冷却后的热烟气进入下一段反应或进入 SO_3 吸收塔。一般来说,只要反应产生的热量与损失的热量相抵,即可使整个转化系统内的热量维持平衡,并通过调节控制好各段温度指标使 SO_2 的转化率维持在一个较高的水平^[61-64]。

SO_2 转化为 SO_3 所释放的反应热主要取决于烟气中的 SO_2 的浓度、风量和转化率,要想维持转化率在一个高水平不变,除控制好转化器内各段温度外,系统风量需要随 SO_2 浓度的变化而变化。因此,在本系统中如何根据系统生产状况的变化通过变频器输出的改变来控制风机转速的变化,是本智能控制系统的一个核心控制问题。

另外,在长时间停机后,如果需要重新生产首先要为转化器升温,这需要借助预热炉来进行加热,同时需将干燥的热空气吹进转化器内,通过这两个步骤可以使设备重新运行。由于转化器内化学反应触媒的特殊要求,升温要逐步进行。正常生产时一般不依靠预热炉来调节转化器内的温度,一是因为这样会耗费大量的能源,使生产成本升高;二是由于加热是一个滞后过程,预测炉的效果不容易检测,如果

温度超调将会带来更加不利的后果。

冶炼制酸的转化器分为四段，四段温度情况和要求各不相同。为了调节四段间的温度，转化器还在各段之间设有短路烟道，即冷烟气不经过热交换器的冷付线和热烟气不经过热交换器的热付线，依靠调节这些烟道上的阀门开度可平衡四段间的温度。但是，由于阀门开度的调节不可避免的酸泥累积严重影响阀门开度的精度，因此阀门开度的调节目前只能达到粗调的目的。在此烟气制酸自动控制系统中必须考虑阀门开度的精度和阀门的动作曲线。

在控制系统投入运行之前，韶关冶炼厂烟气制酸系统的风量调节目前只能依靠人工操作进行。操作人员根据很多现场数据或情况依靠经验来做出决定，并将风机转速调节到他们认为合适的值。测量数据的偏差和操作人员之间经验的不同制约控制效果的进一步提高。为建立烟气制酸过程的智能控制系统，需要总结操作人员的经验，即专家经验。操作人员进行风量调节需要了解的因素有：

(1) 转化器内的四段温度。操作人员要根据每一段的温度综合评价转化器的温度情况，如果温度偏低，则需要降低系统风量；如果温度偏高则需要提高系统风量。这样调节的原因是转化器内温度越高，由于转化器内化学反应是放热反应，阻碍反应向右进行；如果温度过低，则影响反应速度。

(2) SO_2 浓度。如果转化器内 SO_2 浓度高，则需要提高系统风量；如果转化器内 SO_2 浓度低，则需要降低系统风量。

(3) 如果发生了事故，需要检修。在事故检修后开机时，由于 SO_2 低，风量要求小，不能给大风量。

(4) 如果需要对烟气制酸相关设备进行检修，则制酸系统必须停机。在检修停机前，需要将转化器内温度提升 20~30 度。这是为了保证在检修时间段内转化器内温度不会低于需要的温度，在设备正常后可以在最短的时间内使系统投入运行，提高效益。

(5) 及时了解触媒及设备的相关状况，其中设备包括转化器相关的设备和热交的相关设备。如果有设备故障，则应作相应的处理后再使系统投入运行。

烟气制酸系统的风量自动控制的任务，首先也是最核心的任务是如何使得转化器内的四段温度保持基本的恒定，这样才能使 SO_2 转化率稳定在一个高水平。只有这样，才能使整个智能控制系统达到控制的目标。

2.4 转化器内四段温度控制

要实现转化器内四段温度基本稳定在最佳温度的控制目标，需要首先了解转化器的结构及烟气的走向。由于烟气制酸过程六个热交换器、四段转化器，众多阀门，下面以框图的形式表示整个烟气流向，如图 2-1 所示。由于烟气从一个生产环节到另一个生产环节的通道可能有几个，此处只表示出主要的通道，详细的转化器结构及烟气走向的工艺流程图在附图 1 中给出。

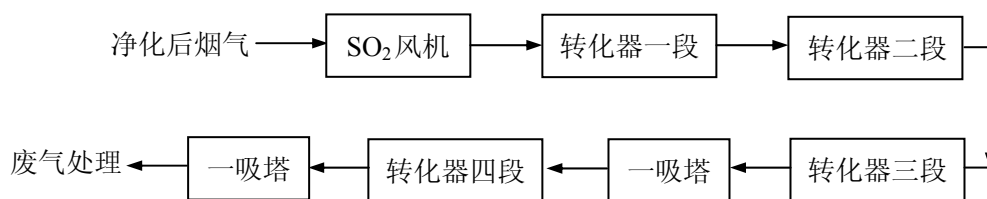


图 2-1 烟气制酸过程烟气流向图

其中转化器共分四段，从上到下依次排列，段与段之间用隔板相互隔开，每一段是由进口、出口及中间触媒层组成。转化器内进行化学反应，生成相应的物质，反应生成物经一定流程进入下一道工序。

首先说明烟气在该制酸过程中的流向。 SO_2 风机出口即 SO_2 烟气总管，一路是经 4a#热交换器（以下简称热交），再经 4b#热交和 1#热交进转化器一段，或者不经 1#热交直接进转化器一段；另一路是经 4a#热交再经 1#热交后直接进转化器二段；第三路是经煤气预热系统加热后直接进转化器一段，这一路是在长期停机后开机前一段时间内，用加热后的热空气对转化器进行热吹才使用的。

一段出口的烟气经 1#热交降温后进入二段，二段出口的烟气经 2#热交降温后进入三段，三段出口的烟气经 3b#和 3a#热交降温后送往一吸塔。至此完成制酸过程的一次转化和一次吸收^[62]。

烟气经一吸塔除去主要的 SO_3 后，一路经 3a#、3b#热交和 2#热交升温后送往转化器四段；另一路经补热炉热交升温后，在经 2#热交进入四段；这两路烟气中间有短路管，见附图 1 所示。分别依靠阀门 12#、13#、14#、15#来完成对转化器四段入口的温度调节。

四段出口烟气经 4b#热交和 4a#热交降温后送二吸塔完成 SO_3 的吸收。至此完

成制酸过程的二次转化和二次吸收。

在制酸烟气流走的大部分烟气管路都有保温层,以减少热量的损失。正常生产情况下,转化器内的反应热可以维持系统的热能守恒,不需要对系统进行补热等操作。如果因为生产状况异常或操作不当,会使转化器内的热能平衡被破坏,要使系统重新达到新的热能平衡,需要不断的调节。因此,消除烟气制酸过程中人工操作的不确定性,利用自动控制系统来实现阀门和风量的自动调节,是具有重要的意义的。

下面简要说明转化器内四段温度的控制目标和基本的调节方法,为建立温度和风量的自动控制系统奠定基础。

转化器内一段的控制目标为:进口温度为 $400^{\circ}\text{C}\sim 440^{\circ}\text{C}$, 出口小于 600°C 。这是因为一段烟气 SO_2 含量高,反应放热量大,导致触媒层温度过高,由于使用的触媒为五氧化二钒,温度过高反而活性降低,根据经验和相关资料的说明,一段出口温度需小于 600°C 。

转化器内一段进口温度调节主要靠调节 4#、5#、6#阀门的开度,以此来调节有多少烟气通过热交来升温;出口温度的控制主要靠调节 7#阀门的开度,如果出口温度超出设定温度则增大其开度,以此来降低一段的烟气量,从而总体减少一段的反应热。

转化器内二段的控制目标为:进口温度为 $430^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$, 出口不做要求。此段温度的控制要求较低。二段进口温度主要与一段出口温度有关,同时受 7#阀门开度和 1#热交的冷风量影响,协同一段出口温度调节这两个阀门即可达到转化器二段温度的控制目标。

转化器内三段的控制目标为:进口温度为 $420^{\circ}\text{C}\sim 450^{\circ}\text{C}$, 出口温度评价反应状况;三段进口温度主要与二段出口温度有关,同时受 2#热交的冷风风量与温度影响。需要改变转化器内三段的温度可以调节 2#热交的冷风风量。

转化器内四段的控制目标为:进口温度为 $400^{\circ}\text{C}\sim 420^{\circ}\text{C}$, 出口温度不做要求,出口主要检测废气中的 SO_2 含量,要保证转化率较高。转化器内四段的进口温度的调节主要是靠 12#、13#、14#、15#阀门的开度来调节。

对转化器内四段温度的控制主要有以下一些原则:正常生产时不考虑投入煤气

预热系统和补热炉补热系统，以减少不必要的能源浪费；在风量一定的情况下，可控输入变量为：阀门 4#、5#、6#、7#、12#、13#、14#、15#的开度，分别用 k_4 、 k_5 、 k_6 、 k_7 、 k_{12} 、 k_{13} 、 k_{14} 、 k_{15} 这些变量来表示；受控输出变量为：一段进口温度、一段出口温度、二段进口温度、三段进口温度、四段进口温度，分别用 T_1 、 T_1' 、 T_2 、 T_3 、 T_4 变量来表示。这样，转化器系统可以用图 2-2 所示的结构来表示。

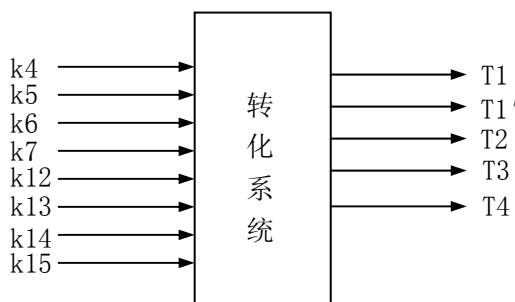


图 2-2 转化系统变量图

在烟气制酸转化器和其它相关设备存在多种扰动，如保温层脱落、环境温度变化、测量仪表故障和触媒活性变化等，因此转化系统的四段温度控制属一个多变量、多耦合、大滞后、多扰动的非线性系统。由于无法建立系统的精确数学模型，无法用传统的解耦等控制方法来实现控制目标，必须提出与传统控制方法不同的控制方案。

2.5 SO₂ 风机的控制

SO₂ 风机是烟气制酸工艺流程重要设备，SO₂ 风机为 SO₂ 烟气提供动力，让其贯穿整个流程。原系统的 SO₂ 风机实际上是四台风机，生产时两台风机运行两台风机备用，四台风机各由一台 800KW 的电动机带动，并分别由风门或液力耦合器来调节风量。但是由于四台风机存在如下的一些缺陷，SO₂ 风机进行了改造，这些缺陷包括：

(1) 旧风机、电机及控制系统老化程度严重，作业率低下，维护工作量及成本高；

(2) 随着生产的发展，旧风机的风量、风压已经不能满足生产的要求，开始制约烟气制酸系统的正常生产；

在综合衡量各个方面的情况后，对系统进行了“两转两吸”改造，风机由四台

换为一台。但是改造后，新的风量、风压工作点难以确定，在风道系统改变的情况下，对风机的功率提出了更高的要求。由于制酸工艺改造完成后，风路系统改动较大，所以新风机运行的工作点很难确定，因此，在新风机的选型上必须考虑以下因素：

- (1) 可靠性高，保护功能齐全；
- (2) 运行及维护成本低；
- (3) 功率更大，以适应生产的发展；

在满足上述三个条件的基础上，新风机应具有良好的调速性能，并且节能。综合考虑各个方面的要求，新风机选型为德国的 KKK 公司生产的 IFO14 型风机。该风机配 siemens 2250kw 电机，采用 siemens 中压矢量变频器 8026 系列，风机系统设一个就地控制屏，配 siemens 的 S7-300 PLC 和一个带触摸屏的平板式电脑，用现场总线结构对众多的风机测点如振动、油压、温度等进行监控。同时该电脑与 DCS 进行连接，将单回路数据通过转接卡连入到 DCS 进行显示。这样就达到了风机的自动控制。

2.6 小结

本章在对硫磺制酸，硫铁矿制酸和冶炼烟气制酸等三种常见的制酸方式介绍的基础上，综合比较了三种制酸方式的优缺点，得出了冶炼烟气制酸所具有的优越性。接下来介绍了烟气制酸过程中重要的化学反应，特别说明了韶冶烟气制酸系统“两转两吸”工艺的特点，对四段转化器内不同的温度特点做了说明。然后对烟气制酸系统中最重要转化器内四段温度的恒定控制和风机的风量控制以及相关的控制目标进行了阐述。风量以及相关风量阀门的控制是保证转化器内四段温度基本恒定的重要控制目标，只有达到这个控制目标，才能保证转化器内的热平衡，并且保证 SO_2 较高的转化率。对转化器内各段进出口温度的介绍和相应的烟气流通管道的介绍为自动控制系统的设计奠定了基础。

第三章 烟气制酸过程智能控制系统设计

冶炼烟气制酸过程的传统控制方法是由现场操作人员根据经验手动调节风量控制阀门来调节风量的大小，在转化器内四段温度整体偏高或偏低的情况下调高或降低风机转速，最终使转化器内四段温度基本保持在最佳值，保证转化器内的热平衡。由于转化器内需要完成“两转两吸”，涉及到了十多个阀门，如何协调各个阀门，使转化器内各段的温度基本保持恒定，并且保证转化器内的热平衡，需要操作人员很强的经验和责任感。但是由于来自烧结厂烟气中含 SO_2 含量的不断变化，使得人工手动调节的难度很大，因此要获得更好的控制效果，必须建立烟气制酸过程的智能控制系统。

在分析冶炼烟气制酸生产过程生产工艺需求的基础上，保留了原有的集散控制系统（DCS），鉴于原鼓风系统电机老化，不能满足生产需要的现状，将原有的四台风机撤换，新风机选型为德国的 KKK 公司生产的 IFO14 型风机，并且把变频控制引入到 DCS，通过 DCS 输出信号直接控制可控硅变频器，从而实现新风机的转速调节。

在前一章介绍生产工艺和控制目标的基础上，本章首先讨论了冶炼烟气制酸过程智能控制系统的总体物理结构和逻辑结构，在整体设计的基础上，总结了四段转化器温度控制阀门的专家调节经验，建立了温度控制阀门的专家模型。针对异常生产条件，建立了阀门调节的规则模型，利用规则来实现特殊工况的处理。最后，根据操作人员调节变频器的经验，建立了烟气制酸过程的风量调节模糊控制器，该模糊控制器能根据转化器内不同的温度状况随时调节风机的转速，实现转化器内的温度恒定和热平衡。为实现应用软件和原有 DCS 的无缝连接，讨论了 OPC 通讯技术的实现。

3.1 控制系统整体设计

韶冶烟气制酸系统通过调节四段转化器相关风量调节阀门调节转化器各段进口、出口温度，并在正常生产时保持四段转化器温度基本保持在最佳值，并且转化器内保持热平衡；在四段转化器温度整体偏高或偏低的情况下调节风机转速来调节

转化器内的温度。针对这些控制目标,设计面向韶冶烟气制酸过程的智能控制系统。

3.1.1 系统设计要求

为了满足韶冶烟气制酸过程生产工艺的需要,适应冶炼烟气 SO_2 含量波动、控制阀门众多、鼓风机转速实时调整等复杂工况,面向冶炼烟气制酸过程的智能控制系统必须具有如下功能:

(1) 实时监测韶冶烟气制酸生产的过程参数,进行模拟画面监视、四段转化器内温度的实时监视、 SO_2 含量监视、系统风量监视、变频器频率监视、异常情况报警、风量控制阀门控制和系统风量控制等,满足实时监视和现场控制的功能。

(2) 在总结操作人员专家控制经验的基础上,实现风量控制阀门的专家控制,对特殊工况采用规则模型,利用规则实时调整阀门开度和系统风机的转速,满足阀门实时控制要求。

(3) 采用模糊控制专家控制策略,根据转化器内整体温度情况实现温度和系统风量的模糊控制,同时在计算机上提供手动控制功能,基本达到转化器内四段温度和系统风量实时控制的要求。

(4) 以现场设备为基础,最大限度的实现对原始系统的保留和利用,通过 OPC 技术实现计算机和集散控制系统的通讯,通过组态软件决定手动控制和自动控制之间的切换,最终建立面向冶炼烟气制酸过程的智能控制系统。

3.1.2 系统结构

根据系统设计要求,本文提出了两级计算机面向烟气制酸过程的智能控制系统,控制系统的物理结构如图 3-1 所示。

控制系统由两级组成,第一级由横河 uXL 集散控制系统、风机控制变频器、风量控制阀门等组成,实现现场级的分布式控制和监视。通过控制器对风量控制阀门的直接控制,实现对转化器内各段风量的调节,间接调节转化器内各段进口和出口的温度;通过控制器对变频器频率调节,实现对变频器的频率的调节,从而调节系统的整体风量;集散控制系统不但负责采集整个控制系统的监测数据,还承担着将控制量发送给执行机构的任务。

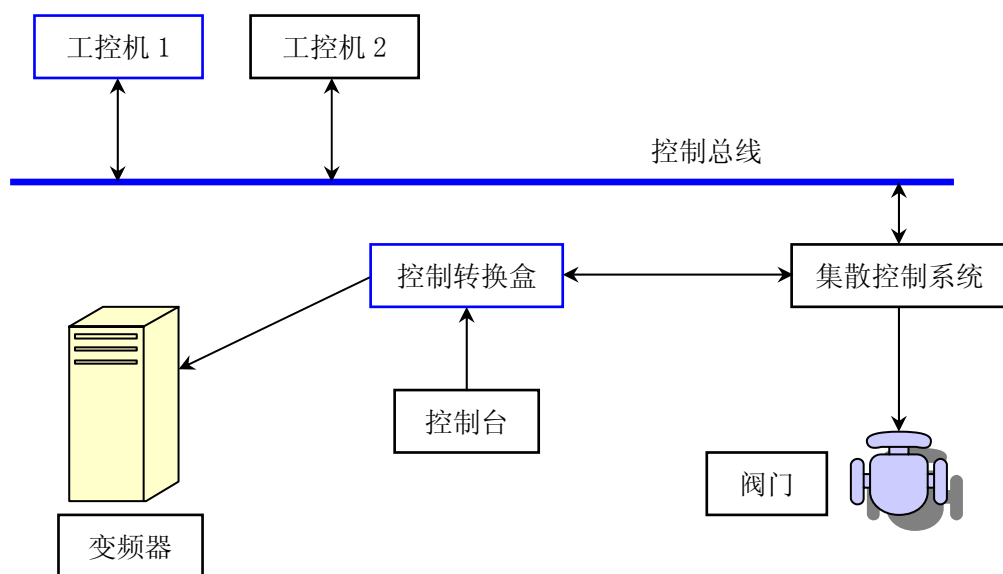


图 3-1 智能控制系统物理结构图

第二级主要包括两台工控机。本控制系统的软件部分就运行在工控机 1 上。控制软件从 uXL 集散控制系统中读取数据，进行运算后下把控制量发给 uXL，由 uXL 分别发送给阀门执行器和变频器。

控制系统的逻辑结构如图 3-2 所示。控制系统主要分为两个部分，首先根据检测到的转化器的各段温度，分析是否各段温度整体偏高或者偏低，如果无整体偏高或偏低的情况，进入专家控制器和规则模型，通过专家控制器和规则模型来实现各段温度的调节，专家控制器和规则模型的输出决定各段转化器控制阀门的调节方法；如果各段温度整体偏高或者偏低，则表明风机的整体转速偏低或偏高，此时通过模糊控制器调节变频器的输出信号，间接调节风机的转速，进而改变系统的风量，这样，使各段转化器的整体温度基本达到设定的最佳温度，如果仍有某段温度偏高或偏低，则可以通过第一步的专家控制器和规则模型来控制阀门的开度，进而使某段温度达到最佳温度。在这些温度调节和风量调节的过程中，为保证转化器内的热平衡，必须使下发的控制量尽可能的小，以免使系统很长时间才能达到新的热平衡，导致控制效果变差。

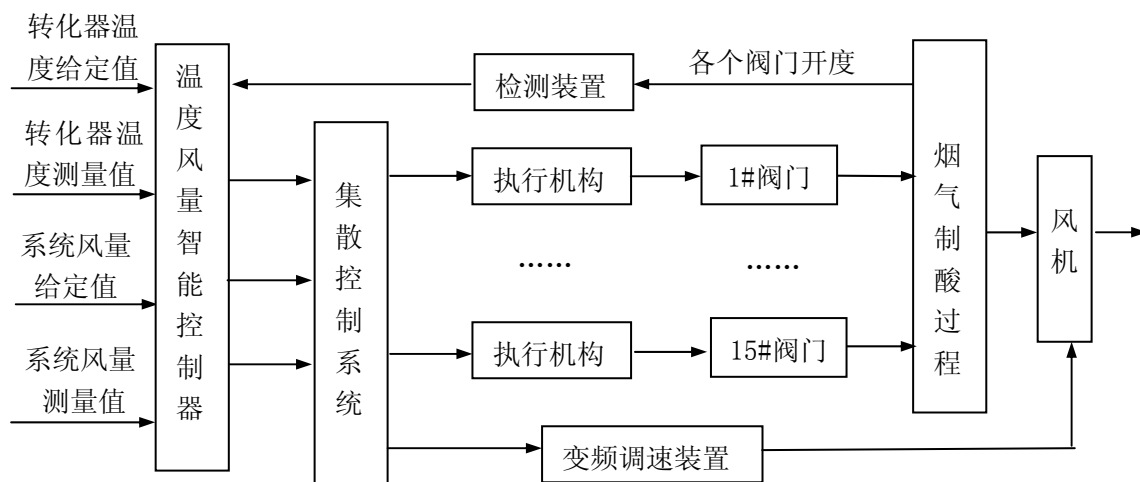


图 3-2 智能解耦控制系统逻辑结构图

从图 3-2 中可以看出，控制系统根据转化器内四段温度的情况主要分为两个调节回路。内环控制回路主要是在四段转化器温度有高有低的情况下通过调节各段的风量控制阀门来调节各段转化器内的温度。此控制回路主要是通过专家控制规则和特殊工况的规则模型实现的。外环控制回路是在四段转化器温度整体偏高或者偏低的情况下才起作用，首先根据四段转化器内温度的整体偏离情况查询模型控制规则表，得出需要调整的风量的改变量，进而调节变频器的输出，通过 DCS 实现风量的整体变化，然后根据转化器内各段温度的情况通过内环控制回路实现温度的细调。这样，就构成了一个面向冶炼烟气制酸过程的智能控制系统。

在图 3-2 中，温度风量智能控制器根据转化器内温度给定值和测量值，以及系统风量的给定值和测量值，首先确定是否需要调节变频器来调节系统的整体风量，然后根据各段转化器内温度的情况，得到转化器内各段温度控制阀门开度的给定值，通过 uXL 控制模块，由执行机构分别调节各段温度控制阀门的开度，使转化器内各段温度符合要求。变频调速装置的控制频率由模糊控制规则得到，通过 uXL 控制模块，由变频调速装置控制 SO_2 风机的转速，使系统整体风量符合要求。转化器各段温度控制阀门的开度、系统风量以及转化器内的各段温度，反馈到风量温度智能控制器，形成控制回路的闭环。

3.2 风量阀门的专家控制系统

由于烟气制酸系统的最终目标是 SO_2 的高转化率，而 SO_2 转化率的高低与四段转化器内的温度有直接的关系。如何通过各种控制装置使四段转化器内的温度保持在最佳值，并且保持转化器内的热平衡，是面向烟气制酸过程智能控制系统的核心控制目标。鉴于风量阀门对转化器内温度的直接影响，这一节专门讨论各段转化器的风量控制阀门的调节方法。

3.2.1 专家控制系统基本概念

烟气制酸过程是一个分布参数、耦合严重的非线性系统，而且进行风量控制的众多阀门是无法求得其精确的数学模型的。传统的 PID 控制是难于解决此类问题的，必须考虑新型的控制技术。最近十多年兴起的智能控制就是针对这类无法求得精确数学模型的控制对象而提出的，这些控制算法并不需要精确的数学模型，它从实际的控制过程中提取有用的专家经验，结合模糊控制、专家控制、规则模型等先进的控制技术，能较好的适应复杂的被控对象，取得较好的控制效果。

在系统改造之前韶冶主要根据转化器内四段温度采用手动调节方法通过调节四段转化器风量控制阀门来调节转化器内的四段温度，手动调节完全根据操作人员个人的经验，各人的控制方法都有所不同，由于转化器内温度的变化有滞后性，从而导致人工调节的滞后和盲目性，所以调节效果一般，而且现场操作人员需要根据转化器温度的整体情况调节变频器，这给他们带来了很大的工作压力。针对上述问题，本系统总结现场所有熟练工人的操作经验，并经过实际的验证，保留有效的控制规则，组成本风量阀门的专家控制器。

专家系统是人工智能的一个重要研究方面，自从 Stanford 大学研制了世界上第一个专家系统 DENDRAL 以后，专家系统得到了越来越广泛的应用并显示出了强大的生命力。专家控制系统是专家系统在控制领域中应用的一种类型，通过监视对象的状态，给对象施加一系列操作，使对象状态按预先设定变化，以达到控制对象的目的。专家系统的基本结构如图 3-3 所示，包括知识库、推理机和人机接口。

图 3-3 中，知识库用来保存从控制过程中提取的专家经验，知识库可以随生产过程的进行而逐渐补充新的知识，保持与生产状况改变的同步。推理机是专家系统的核心机构，它从知识库中提取相应的专家经验，进行简单的推理后通过人机接口

输出。人机接口是专家系统中操作人员与系统存储知识的交互接口，操作人员可以通过人机接口向知识库中补充新的专家知识，也可以通过人机接口获得推理机输出的推理结果。

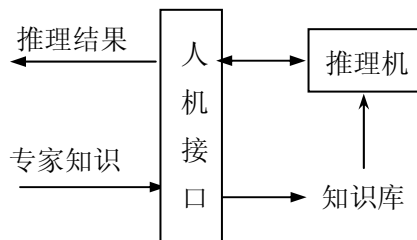


图 3-3 专家系统结构图

在过程控制领域，建立了越来越多的专家控制系统，为解决复杂的工业过程控制提供了一种有效途径。专家控制具有高可靠性、长期运行的连续性、在线控制的实时性、抗干扰性、使用的灵活性以及维护的方便性等特点。

3.2.2 专家控制系统设计

专家系统最常用的知识描述方法是产生式规则描述方法，它把人类专家的知识描述成 IF-THEN 的形式。这种描述方法的含义是：如果给定的条件满足，则采取相应的行动。人类解决问题的经验和方法，有相当大的一部分可以用这种描述方法来表示。

条件部分可以是逻辑组合或表达式，例如：

- ① 条件 1 AND 条件 2 AND ... AND 条件 n ;
- ② 条件 1 OR 条件 2 OR ... OR 条件 n ;
- ③ $x^2 + y^2 \leq z^2$ 。

其中 AND 和 OR 分别表示与逻辑和或逻辑， x 、 y 和 z 表示对象的状态变量。行动部分可以是中间结果、最终结果或相应动作。

针对转化器内四段温度，需要加以控制的有一段转化器的进口温度 T_1 和出口温度 T_1' ，二段转化器的进口温度 T_2 ，三段转化器的进口温度 T_3 ，四段转化器的进口温度 T_4 。针对这五个控制目标，分别建立五个专家控制器。专家控制器的描述采用

IF-THEN 的方式。下面对这五个专家控制器分别作介绍，并给出主要的调节方法。由于阀门的调节很难量化为“开度增大总量程的 2%”等很精确的语言，在这五个专家控制器中阀门的开度变化量采用模糊语言表示，阀门开度变化等级共七级，分别为正大（PB），正中（PM），正小（PS），不变（O），负小（NS），负中（NM），负大（NB）。专家规则中：1#阀门开度变化为正大（PB），则表示按照此阀门的行程范围，参考操作人员经验，将 1#阀门的开度增加操作人员总结出来的“大”；如果专家规则为 1#阀门开度变化为负中（NM），则表示参考操作人员经验将 1#阀门的开度减小操作人员总结出来的“中”。

对于针对一段转化器进口温度 T_1 的专家控制器 1 而言，专家控制器的输入为转化器内一段的进口温度，输出为 4#、5#、6#阀门的开度。正常生产情况下， SO_2 风机出口即 SO_2 烟气总管，一路是经 4a#热交换器，再经 4b#热交换器和 1#热交换器进转化器一段，或不经 1#热交换器直接进转化器一段；另一路是经 4a#热交换器再经 1#热交换器后直接进转化器二段；第三路是经煤气预热系统加热后直接进转化器一段，这一路是在长期停机后开机前一段时间内，用加热后的热空气对转化器进行热吹才使用的。烟气在这一段的流向如图 3-4 所示。

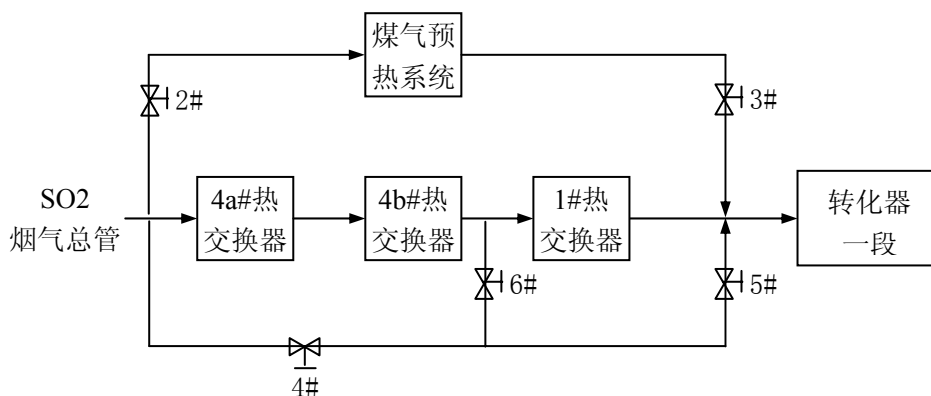


图 3-4 烟气进入转化器一段流向示意图

根据图 3-4 可知，对于第一条通路经 4a#热交换器，再经 4b#热交换器进入转化器一段而言，此时起作用的阀门为 5#、6#阀门。针对此条通路，专家控制器 1 的具体专家控制规则设计如下：

Rule1: IF 转化器一段进口温度与目标温度偏差 $\geq 20^{\circ}\text{C}$
 THEN 5#阀门开度变化正大（PB），6#阀门开度变化正大（PB）；

- Rule2: IF 转化器一段进口温度与目标温度偏差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10^{\circ}\text{C}$
THEN 5#阀门开度变化正小 (PS), 6#阀门开度变化正中 (PM);
- Rule3: IF 转化器一段进口温度与目标温度偏差 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ and $\geq -10^{\circ}\text{C}$
THEN 5#、6#阀门开度不变;
- Rule4: IF 转化器一段进口温度与目标温度偏差 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ and $\geq -20^{\circ}\text{C}$
THEN 5#阀门开度变化负小 (NS), 6#阀门开度变化负中 (NM);
- Rule5: IF 转化器一段进口温度与目标温度偏差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$
THEN 5#阀门开度变化负大 (NB), 6#阀门开度变化负大 (NB)。

为保证系统在各种情况下均能正常运行, 还设计了其他进入转化器一段的相应专家规则, 这些专家控制规则与上述规则非常类似, 此处不一一列举。

对于针对一段转化器出口温度 T_1' 的专家控制器 2 而言, 专家控制器的输入为转化器内一段的出口温度, 输出为 7#阀门的开度。正常生产情况下, 一段出口的烟气经 1#热交换器降温后进入二段。对于此条通路, 当一段出口温度超出设定温度时增大 7#阀门的开度, 以此来降低一段的烟气量, 从而总体减少一段的反应热。由于此段通道很少, 烟气流向单一, 不再给出烟气流向示意图。根据上述原理, 专家控制器 2 的典型专家控制规则设计如下:

- Rule1: IF 转化器一段出口温度与目标温度偏差 $\geq 20^{\circ}\text{C}$
THEN 7#阀门开度变化正大 (PB)
- Rule2: IF 转化器一段出口温度与目标温度偏差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10^{\circ}\text{C}$
THEN 7#阀门开度变化正中 (PM)
- Rule3: IF 转化器一段出口温度与目标温度偏差 $\leq 10^{\circ}\text{C}$ and $\geq -10^{\circ}\text{C}$
THEN 7#阀门开度不变;
- Rule4: IF 转化器一段出口温度与目标温度偏差 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ and $\geq -20^{\circ}\text{C}$
THEN 7#阀门开度变化负中 (NM);
- Rule5: IF 转化器一段出口温度与目标温度偏差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$
THEN 7#阀门开度变化负大 (NB)。

由于一段转化器的出口温度稍低对生产无大的影响, 如果较高的话会对触媒以及其它设备造成损害, 所以专家控制规则中主要针对温度超过设定值上限的情况。

对于针对二段转化器进口温度 T_2 的专家控制器 3 而言, 专家控制器的输入为转

化器内二段的进口温度，由于 7#阀门的开度已经在专家控制器中设定，此处只作微调，转化器二段进口温度的控制主要靠 1#热交换器的冷风量的控制。根据上述烟气流向，专家控制器 3 的典型专家控制规则设计如下：

- Rule1: IF 转化器二段进口温度与目标温度偏差 $\geq 20^{\circ}\text{C}$
 THEN 7#阀门开度变化正中，1#热交换器的冷风量变化正大（PB）；
- Rule2: IF 转化器二段进口温度与目标温度偏差 $< 20^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10^{\circ}\text{C}$
 THEN 5#阀门开度变化正小，1#热交换器的冷风量变化正中（PM）；
- Rule3: IF 转化器二段进口温度与目标温度偏差 $< 10^{\circ}\text{C}$ and $> -10^{\circ}\text{C}$
 THEN 5#阀门开度不变，1#热交换器的冷风量不变；
- Rule4: IF 转化器二段进口温度与目标温度偏差 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ and $> -20^{\circ}\text{C}$
 THEN 5#阀门开度变化负小，1#热交换器的冷风量变化负中（NM）；
- Rule5: IF 转化器二段进口温度与目标温度偏差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$
 THEN 7#阀门开度变化负中，1#热交换器的冷风量变化负大（NB）；

对转化器二段进口温度采用上述专家调整规则后，达到了较好的控制效果，基本稳定了二段进口温度。

对于针对三段转化器进口温度 T_3 的专家控制器 4 而言，专家控制器的输入为转化器内三段的进口温度，输出为 2#热交换器的冷风风量。由于输入量和被控量都只有一个，因此专家控制器 4 的典型专家控制规则设计如下：

- Rule1: IF 转化器三段进口温度与目标温度偏差 $\geq 20^{\circ}\text{C}$
 THEN 2#热交换器的冷风量变化正大（PB）；
- Rule2: IF 转化器三段进口温度与目标温度偏差 $< 20^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10^{\circ}\text{C}$
 THEN 2#热交换器的冷风量变化正中（PM）；
- Rule3: IF 转化器三段进口温度与目标温度偏差 $< 10^{\circ}\text{C}$ and $> -10^{\circ}\text{C}$
 THEN 2#热交换器的冷风量不变；
- Rule4: IF 转化器三段进口温度与目标温度偏差 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ and $> -20^{\circ}\text{C}$
 THEN 2#热交换器的冷风量变化负中（NM）；
- Rule5: IF 转化器三段进口温度与目标温度偏差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$
 THEN 2#热交换器的冷风量变化负大（NB）；

在烟气经过上述转化器三段的转化后，就进入吸收塔进行 SO_3 的第一次吸收，

即完成了“两转两吸”中的“一转一吸”。第二次转化在转化器的四段完成。从吸收塔出来的烟气一路经 3a#热交换器、3b#热交换器和 2#热交换器升温后送往转化器四段；另一路经补热炉热交换器升温后，在经 2#热交换器进入四段；这两路烟气中间有短路管。此处分别依靠阀门 12#、13#、14#、15#来完成对转化器四段入口的温度调节。进入转化器四段的烟气流向如图 3-5 所示。

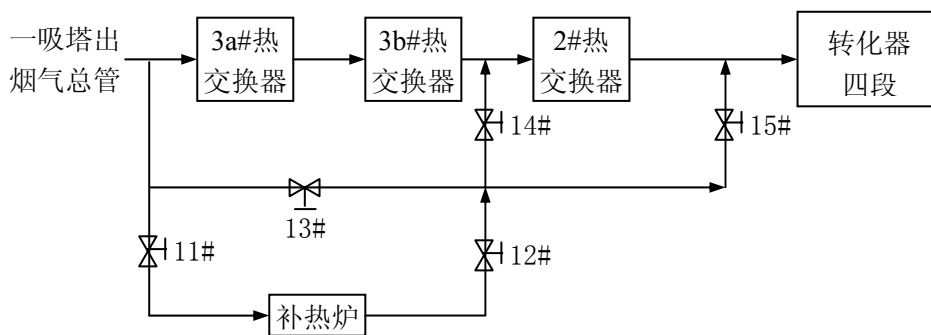


图 3-5 烟气进入转化器一段流向示意图

正常生产情况下，由于不需要补热炉进行补热，可以保持 12#阀门开度基本不变，从而保持来自补热炉风量基本不变，此时需要调节 13#、14#阀门的开度来调节来自一吸塔的烟气总量从而控制转化器的四段的入口温度。对 13#、14#阀门的开度的控调节构成专家控制器 5，其典型专家控制规则设计如下：

- Rule1: IF 转化器四段进口温度与目标温度偏差 $\geq 20^{\circ}\text{C}$
 THEN 13#阀门开度变化负中 (NM)，14#阀门开度变化正中 (PM)；
- Rule2: IF 转化器四段进口温度与目标温度偏差 $< 20^{\circ}\text{C}$ and $\geq 10^{\circ}\text{C}$
 THEN 13#阀门开度变化负小 (NS)，14#阀门开度变化正小 (PS)；
- Rule3: IF 转化器四段进口温度与目标温度偏差 $< 10^{\circ}\text{C}$ and $> -10^{\circ}\text{C}$
 THEN 13#阀门 14#阀门开度不变；
- Rule4: IF 转化器四段进口温度与目标温度偏差 $\leq -10^{\circ}\text{C}$ and $> -20^{\circ}\text{C}$
 THEN 13#阀门开度变化正小 (PS)，14#阀门开度变化负小 (NS)；
- Rule5: IF 转化器四段进口温度与目标温度偏差 $\leq 20^{\circ}\text{C}$
 THEN 13#阀门开度变化正中 (PM)，14#阀门开度变化负中 (NM)；

通过上述五个专家控制器，可以基本实现转化器四段进口和出口温度的调节。因为转化器温度的变化与其中化学反应特性相关性很大，并且温度是一个缓慢变量，对阀门的调节不可以很频繁，以免造成很大的超调。在经过多次的试验后，初步确

定这五个专家控制器的控制周期为 2 分钟。

3.3 阀门开度专家修正规则

在转化器的四段温度进口和出口温度的专家控制器中，需要对阀门进行调节。但是阀门的输入和输出特性并不是线性关系，即在不同的阀门开度情况下，下发不同的控制量并不一定能取得同样的控制效果。经过多次试验，得到阀门在一定压力下的流量特性如图 3-6 所示。

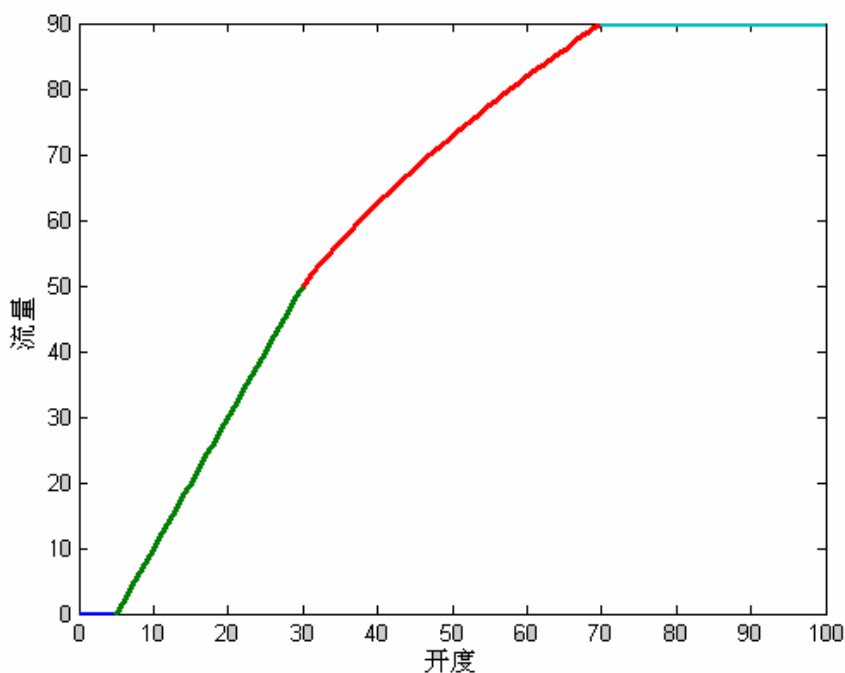


图 3-6 阀门流量特性曲线

在开度为 0~5%时，阀门由于蝶板的厚度较大，蝶板还未脱离阀座密封圈，实际上没有打开，流量为零，当开度大于 5 时，蝶板脱离密封圈，随开度增加，流量增加。

在开度为 5%~30%时，流量特性曲线为直线型，用微分方程描述为

$$\frac{dR}{du} = K \quad (3-1)$$

其中 K 是相应阀门起调节功能时的放大系数， R 为流量， u 为阀门开度。

在开度为 30%~70%，阀门的流量特性曲线为快开型，用微分方程描述为

$$\frac{dR}{du} = K * R^{-1} \quad (3-2)$$

阀门开度从 70%~100% 已无任何调节作用。

从以上公式可看出, K 值越大, 曲线越陡, 也就是阀门起调节功能的范围越小; 反之, 则阀门所起调节功能的范围越大。

由此可见, 在不同的阀位区域, 相同的阀位调节, 作用是不同的。为此就有必要专门来进行阀门专家修正。

因此, 在本系统中专门设计了单阀门专家修正器, 拟合了阀门的流量特性曲线, 在不同的阀门开度区间, 用不同的参数修正控制量。

其专家修正规则如下:

R1: IF 阀门的检测值 $U \in [5, 30]$, 计算得阀门增量为 ΔU

Then $U = U + \Delta U$;

R2: IF 阀门的检测值 $U \in [30, 85]$, 计算得阀门增量为 ΔU

Then $U = U + \Delta U^*$;

其中 $\Delta U^* = \frac{\Delta U}{2K}$, ΔU^* 由公式 (3-1) 和 (3-2) 推导而来。

R3: IF 阀门的检测值 $U \geq 85$, 计算得阀门增量为 $\Delta U \geq 0$

Then $U = U + 0$;

R4: IF 阀门的检测值 $U \leq 5$, 计算得阀门增量为 $\Delta U \leq 0$

Then $U = U + 0$;

根据阀门的控制特性, 针对阀门的不同开度, 对阀门控制量的下发值进行专家修正, 保证了阀门能够完全按照控制器的输出值进行动作。

3.4 风机转速的模糊控制

模糊控制器是一种语言控制器, 它模拟专家的控制经验, 用语言描述规则, 根据控制规则进行控制计算, 从而完成闭环控制的任务。与传统控制理论相比, 模糊控制有两个突出的优点: 第一, 模糊控制在许多应用中可以有效且便捷地实现人的控制策略和经验; 第二, 模糊控制不需要被控对象的数学模型即可实现较好的控制, 这是因为被控对象的动态特性已隐含在模糊控制器输入、输出模糊集及模糊规则中^[25]。因此在网络控制环境下, 模糊控制不依赖于准确的被控对象模型, 避免

了模型误差对控制效果的影响,能根据不同的网络延时获得相应的控制策略和经验,从而得到良好的控制效果。

模糊控制器是模糊控制系统的核心,一个模糊控制系统的性能优劣,主要取决于模糊控制器的结构,所采用的模糊规则、合成推理算法,以及模糊决策的方法等因素。模糊控制器的组成框图如图 3-7 所示,它包括有:输入量模糊化接口、数据库、规则库、推理机和输出解模糊接口五个部分。

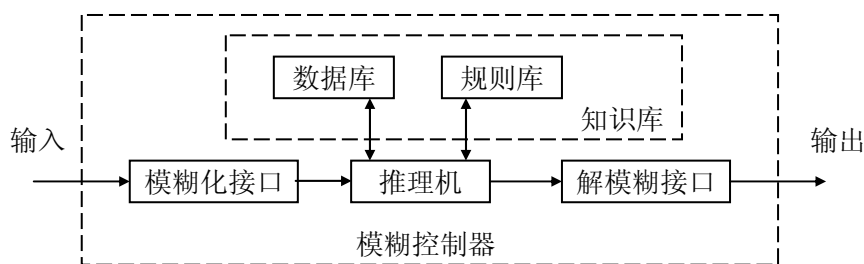


图 3-7 模糊控制器结构

从模糊控制的原理可以看出,烟气制酸系统的风机转速的调节符合这种控制思想,可以把转化器四段温度的整体偏移量作为模糊控制的输入,模糊控制器的输出即为变频器的输出^[33]。下面根据模糊控制器的基本实现步骤来说明风机转速模糊控制器的实现。模糊控制器的设计步骤如下:

Step 1: 确定模糊控制器的输入变量和输出变量(即控制量)。

作为设计工作的第一部分,进行系统分析,然后确定模糊控制器的输入变量及输出变量,包括它们的数值变化范围,及要求达到的控制精度等,需要根据实际问题进行具体分析,在建立一个过程的物理模型的基础上,确定控制器的结构。

根据专家经验,风机转速的调节是在转化器四段温度整体偏高和偏低的情况下才调整的,而转化器四段温度可以通过热电偶实时获得,因此将转化器四段温度跟设定温度比较后确定四段温度的整体偏移情况,整体偏移温度模糊化后作为模糊控制器的输入。模糊控制器的输出取风机的转速,即控制量。风机转速的调节范围为其额定最高转速的 50%~75%。

Step 2: 设计模糊控制器的控制规则。

控制规则的设计是设计模糊控制器的关键,一般包括三部分的设计内容:选择描述输入输出变量的词集与论域大小,定义各模糊变量的隶属度函数及建立模糊控

制器的控制规则。

① 确定模糊变量集合

模糊控制器的控制规则表现为一组模糊条件语句，在条件语句中描述输入输出变量状态的一些词汇(如“正大”、“负小”)的词集，称为这些变量的词集。选择较多的词汇描述输入、输出变量，可以使控制规则的制定更方便，但是控制规则相应变得复杂。选择词汇过少，使得描述变量变得粗糙，导致控制器的性能变坏。在论域的大小的选取上，必须要满足论域中所含元素个数为模糊语言词集总数的二倍以上，确保诸模糊集能较好的覆盖论域，避免出现失控现象，论域范围越大，模糊化精度越高，但计算量增大，也显得没有必要。

对于风机转速模糊控制器而言，其控制目标为温度，其控制精度要求相对较高，故转化器四段温度平均偏移值 E_1 的模糊变量的词集选择为 7 个：{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，论域为：{-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}；转化器四段温度平均偏移值的变化率 EC_1 的模糊变量的词集选择为 5 个：{NB, NM, ZO, PM, PB}，论域为：{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}；模糊控制器输出变量风机转速 U_1 的模糊变量的词集选择为 7 个：{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}，论域为：{-8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8}。

② 定义隶属函数

隶属函数是对模糊概念的定量描述，常用的有高斯函数、三角函数、钟形函数、S 形函数、Z 形函数等。

三角形隶属函数的形状和分布由三个参数表示，一般可描述为

$$\mu(x) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & \text{若 } a < x < b \\ (x-c)/(b-c) & \text{若 } b < x < c \end{cases} \quad (3-3)$$

适合于有隶属函数在线调整的自适应模糊控制。

高斯型隶属函数用两个参数来描述，一般可表述为

$$\mu(x) = \exp[-(x-c)^2 / \sigma^2] \quad (3-4)$$

比较适合于自适应、自学习模糊控制的隶属函数修正。

一般来说，隶属函数的形状越陡，分辨率越高，控制灵敏度也越高；相反，若隶属函数的变化很缓慢，则控制特性也较平缓，系统的稳定性较好。因此，在选择语言值的隶属函数时，一般在误差为零的附近区域，采用分辨率较高的隶属函数，

而在误差较大的区域，可采用分辨率较低的隶属函数。

在风机转速模糊控制器的隶属度函数设计上，控制的精度要求比较高，故采用了通常的三角隶属度函数，曲线如图 3-8 所示。

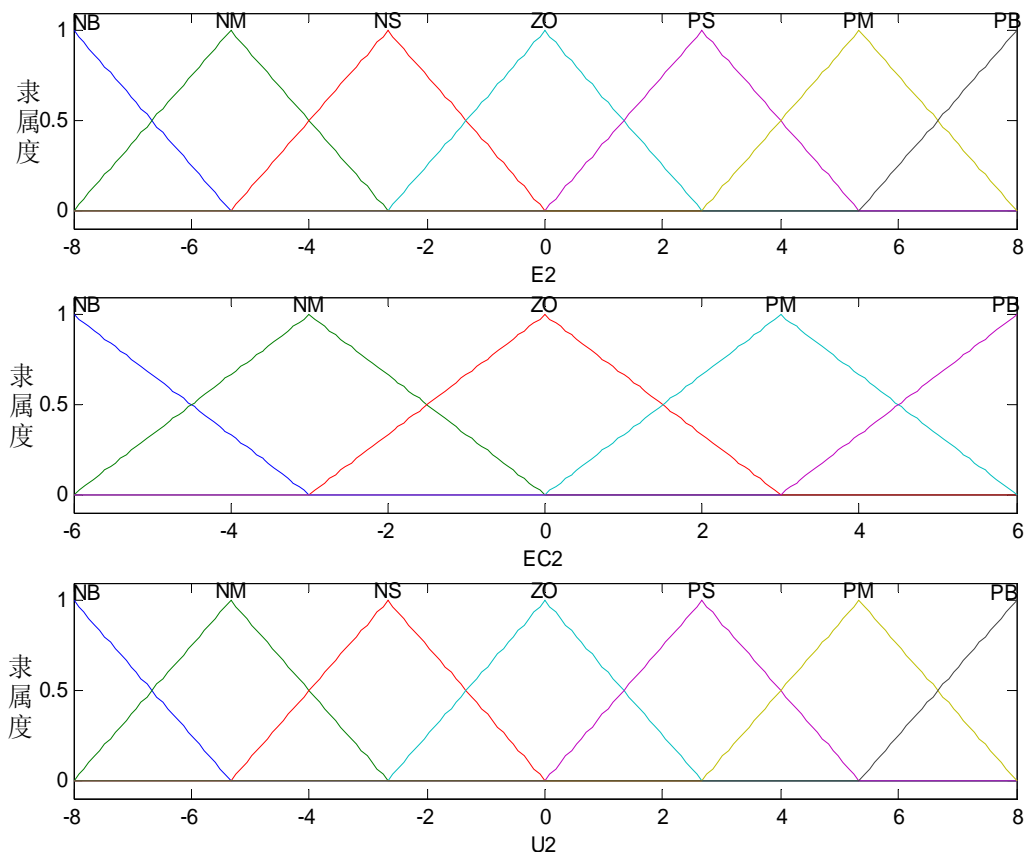


图 3-8 温度整体偏移 E_1 、 EC_1 、 U_1' 的隶属度函数图

③ 建立模糊控制规则

模糊控制的控制规则是基于手动控制策略，而手动控制策略又是操作者通过学习、试验以及长期的经验积累而逐渐形成的，存在于操作者头脑中的一种技术知识集合。利用模糊集合理论和语言变量的概念，可以把利用语言归纳的手动控制策略上升为数值运算，从而可以采用计算机来进行控制。

模糊控制规则选取的基本原则是：当转化器四段整体温度与设定值误差大或较大时，选择控制量以尽快消除误差为主；当误差较小时，选择控制量要注意防止超调，以系统的稳定性为主要出发点。根据这一原则制定一系列的控制规则，再将这些控制的规则汇总为表，就得到了模糊控制规则表。

风机转速模糊控制器的控制规则表如表 3-1 所示。

表 3-1 风机转速模糊控制规则表

$U_1' \backslash EC_1$	NB	NS	ZO	PS	PB
E_1					
NB	PB	PB	PB	PM	PS
NM	PB	PB	PM	PS	ZO
NS	PB	PM	PS	ZO	NS
ZO	PM	PS	ZO	NS	NM
PS	PS	ZO	NS	NM	NB
PM	ZO	NS	NM	NB	NB
PB	NS	NM	NB	NB	NB

Step 3: 确定模糊控制器参数

根据经验和现场调试结果，风机转速模糊控制器的各项参数如下所示。

温度偏差范围为 $[-50,50]$ ，转换器四段温度整体偏差 e_1 到其论域 E_1 的映射式为：

$$E_1 = 8 \times \frac{e_1 - (e_{1_L} + e_{1_H})/2}{(e_{1_H} - e_{1_L})/2} \quad (3-5)$$

Step 4: 模糊推理、解模糊并计算模糊控制查询表

在模糊控制中，对建立的模糊规则要经过模糊推理才能决策出控制变量，本系统采用了 Mamdani 推理法，其实质就是加权平均法。

解模糊是将语言表达的模糊量回复到精确数值，也就是根据输出模糊子集的隶属度计算出确定的输出的数值。解模糊有各种方法，如重心法、最大高度法、最大平均值法、高度法、面积法、最大面积法等。在实用上重心法比较理想；面积法控制性能优于重心法，但计算量大；最大值法通常收敛到一个特定的点，控制性能较差，但由于计算简单，数据量少，在某些场合也有用，如测试等。本系统采用在控制技术中常用的面积重心法。面积重心法的计算式为：

$$u_0 = \frac{\sum \mu(u_i) \cdot u_i}{\sum \mu(u_i)} \quad (3-6)$$

公式(3-6)中 u_i 为控制量论域中的第 i 个元素， $\mu(u_i)$ 为 u_i 对应的隶属度。 u_0 为解模糊后算出的精确控制量。利用 MATLAB 的 Simulink 工具箱可以很容易的根据模

糊逻辑运算规则离线计算模糊查询表。最终得到的风机转速模糊控制器的模糊查询表如表 3-2 所示。

表 3-2 风机转速模糊控制查询表

$U_1' \begin{matrix} \nearrow ec_1 \\ \searrow e_1 \end{matrix}$	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
-8	7	7	7	7	7	7	7	6	5	5	4	4	3
-7	7	7	7	7	6	6	6	5	4	4	3	3	2
-6	7	7	7	7	6	5	5	4	4	3	2	2	1
-5	7	7	6	6	5	5	5	4	3	2	1	1	0
-4	7	6	6	6	5	4	4	3	2	1	0	0	-1
-3	7	6	5	5	4	4	3	2	1	0	-1	-1	-2
-2	6	5	5	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-3
-1	6	5	4	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-3	-4
0	5	4	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5
1	4	3	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-6
2	3	2	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-5	-5	-6
3	2	1	1	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-7
4	1	0	0	-1	-2	-3	-4	-4	-5	-6	-6	-6	-7
5	0	-1	-1	-2	-3	-4	-5	-5	-5	-6	-6	-7	-7
6	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-7	-7
7	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-6	-6	-6	-7	-7	-7	-7
8	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-7	-7	-7	-7	-7

得到模糊查询表后，可以在应用软件中将查询表以数组的形式保存，根据不同的输入查询达到相应的输出，将此风机转速的调节值与相应的变频器的频率对应起来，就可以通过下发信号直接控制变频器的输出，进而调节风机的转速。

3.5 OPC 通讯技术

为实现实时、精确的数据通讯，同时避开下位机繁杂的设备驱动，本系统结合现场的实际情况，使用了 OPC 通讯协议，这是目前国际上通用的工业通讯标准。

在本系统中，必须实现智能控制系统与原有集散控制系统的信息交换，因为现场中的过程控制数据都已经接入了原有的 uXL 集散控制系统中，若是本智能控制系统不能存取这些过程数据，那么智能控制系统也就失去了意义。由于智能控制系统要进行大量的计算，要求很高的实时性，同时要便于调试，只有采用 C/C++ 等高级

语言来进行开发，所以必须采用一种方式使得用高级编程语言编制的程序能够动态的存取现场的过程控制数据，故本系统采用了 OPC 技术。

OPC 全称为 OLE for Process Control，它是一种规范，符合该规范的接口称为 OPC 接口。OPC 以组件对象模型和分布式组件对象模型(COM/DCOM)技术为基础，采用客户/服务器(Client/Server)模式，定义了一组 COM 对象及其接口规范。OPC 规范主要是为了适应现场各种设备与应用软件之间交换数据而产生的。在 OPC 技术产生之前，每一个应用程序都要为它所连接的设备提供相应的驱动程序，由于现场设备的多样性，这大大增加了软件设计者的负担。

在这样的情况下，OPC 规范定义了客户程序与服务器程序进行交互的方法，OPC 服务器可由不同供应商提供，其代码决定了服务器访问物理设备的方式，数据处理等细节。但这些对 OPC 客户程序来说是透明的，只需遵循相同的规范或方法就能读取服务器中的数据。图 3-7 为采用了 OPC 规范后控制系统的连结模型。如图 3-7 所示，SCADA 系统就是工业用监控软件，负责数据采集和下发，OPC 规范即相当于一条“软总线”，只要符合其规范的 OPC 客户程序或服务器程序都可以挂接到该“总线”上。所以说，不同厂商的 OPC 服务器都可以通过这种 OPC 规范交换数据，这使不同的工控设备的可连接性，可互操作性的实现非常方便。

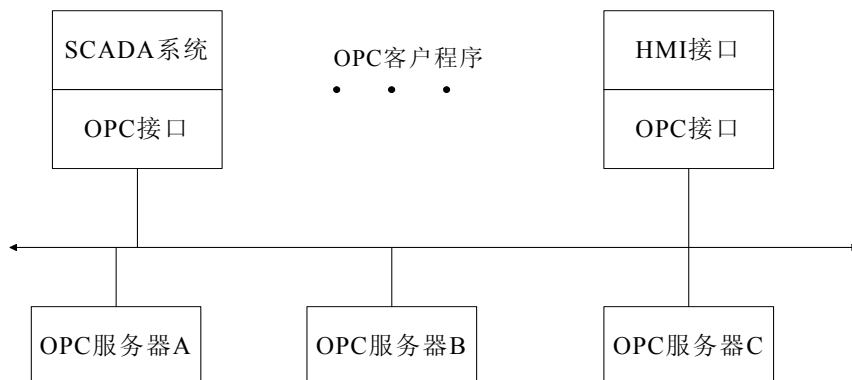


图 3-9 采用了 OPC 规范后的控制系统连接图

从第三方软件的编写角度上来看，只需要按照 OPC 规范中提供的标准接口就可以和任何一家厂商提供的 OPC 服务器通信了，而不必关心底层的细节。

在烟气制酸过程控制系统中，若不使用 OPC 技术，需要编写众多的底层设备驱

动，且需增开多个线程，这样通讯的实时、准确无法保证，软件的可靠性也大大降低。

本烟气制酸过程使用的 OPC 服务器是 uXL，它支持 OPC2.0 通讯协议，通过编写 OPC 客户端软件，就能从 uXL 中实时、准确的读取过程控制数据，同时避免编写繁重的底层设备驱动。

3.6 小结

本章在上一章介绍冶炼烟气制酸生产工艺要求的基础上，讨论了烟气制酸过程的智能控制系统的设计。首先介绍了本智能控制系统的设计要求，综合工艺要求，给出了智能控制系统的物理结构图，标明了系统中的数据流向，进而讨论了系统的逻辑结构图，说明了系统的逻辑结构。在接下来的章节中，重点讨论了风量阀门调节的专家控制方法。由于风量阀门无法求得精确的数学模型，只能考虑智能控制方法，在总结现场操作人员经验的基础上，针对转化器的一段的进口、出口温度，二段转化器的进口温度，三段转化器的进口温度，四段转化器的进口温度，设计了五个专家控制器，分别采用不同的专家控制规则实现了风量控制阀门的专家调节。为满足转化器内四段温度整体偏移需要调节风机转速的需要，设计了风机转速调节的模糊控制器。该模糊控制器以转化器内四段温度的整体偏移为输入，以风机转速为输出，可以实现风机转速的准确调节。最后，为满足控制系统与原有 DCS 之间的通讯，采用了 OPC 通讯技术，这最大限度地利用了现场设备特性的情况下保证了通讯的准确性、实时性。

第四章 烟气制酸过程智能控制系统的实现

本章主要介绍面向烟气制酸过程智能控制系统的具体实现方法。具体讨论了系统中风机节能调速控制的实现方法，简要介绍了将风机转速转换为变频器输出频率的改变的方法。针对控制系统的软件实现，给出了具体的程序实现和控制算法流程，详细介绍了 OPC 通讯机制的软件实现。

4.1 风机节能控制的实现

要实现转化器内四段温度的控制，主要控制手段是风量控制阀门和风机转速的调节，其中风机调速方法的实现是关键技术。本节首先对风机的各种运行状态进行分析，在对几种风机调速控制方法比较的基础上，采用了变频调速技术，实现了风机调速的节能控制。

4.1.1 风机运行状态分析

由于烟气制酸过程中的风机属于大型风机，其电机功率很大，消耗的电能很多，节能效果的好坏将直接影响到产品的生产成本的高低。如何使风机尽可能的运行在节能状态，是一个重要的研究课题。

为了满足生产的需要，最初调节风机风量的方法是在风机的出口装上阀门，利用阀门的开闭来完成风机的启动与风量的调节。启动风机时，将阀门全关，启动完毕后，根据生产对风量的要求，调节阀门的开度，以此达到调节风量的目的。但是这样一来，风机能量有一部分消耗到阀门挡板上了，阀门开度愈小，浪费掉的能量就愈大。

由流体力学可知，对于风机而言，调节风机转速时有下式成立：

$$Q = K_1 \times N \quad (4-1)$$

$$H = K_2 \times N^2 \quad (4-2)$$

$$P = K_3 \times N^3 \quad (4-3)$$

其中， Q 为风量， H 为风压， P 为风机的轴功率， N 为风机转速， K_1 、 K_2 、 K_3 为比

例因子（受风道系统情况及其他因素影响）^[34]。

由式（4-1）和（4-3）可知，通过降低风机转速 N ，可比例降低风量 Q ，此时风机输出的轴功率 P 成三次方减小，节能效果非常显著，因此通过调节风机转速来达到风机节能目的的方法得到很快的发展。

4.1.2 风机调速的实现方法

机械调速是一种比较直观的调速方法，应用得比较广泛的是液力耦合器调速。液力耦合器是利用主动旋转的叶片带动其中的油运动，从而使从动叶片旋转的一种机械装置，两个叶片之间仅通过油来连接，从动叶片的旋转速度处决于装置中的油的多少，油越多，主从叶片之间的转速差越小。液力耦合器是一种软连接，不仅能很好地解决风机的启动问题，也能通过调节注入其中的油的多少来方便地调节风机的转速^[58]。

对于大型风机来说，液力耦合器需要一套完善的具有冷却及过滤功能的油系统来支撑，还需要有一定精度的仪表检测及控制与驱动系统来配合。

虽然液力耦合器可通过调节风机的转速来实现节能的目的，但其机械传动效率同样限制了节能的效果，其稳定性和调速精度也并不能满足所有的场合。取代机械调速最直接可靠的方法就是调节电机的转速。

直流电机调速发展的较早，模型比较简单，在经典控制理论的支撑下，直流电机调速精度高，性能好，能进行四象限运行，能满足绝大部分应用场合。但直流电机调速也有其显著的缺点：结构复杂、成本高、维护工作量大。这使得科研人员不得不寻找更好的调速方法，最终使交流电机调速方法得到了飞速的发展，并且逐步取代了支流电机调速^[66]。

相对于直流电机调速而言，交流电机调速结构简单、成本低廉、工作可靠、维护方便、转动惯量小、效率高，具有非常广阔的应用前景。交流调速主要指异步电机而言，因为同步电机只有变压变频才可以调速，没有别的形式。交流异步电机调速形式很多，主要有：

- （1）降电压调速；
- （2）电磁转差离合器调速；
- （3）绕线转子异步电机转子回路串电阻调速；

- (4) 绕线转子异步电机串级调速;
- (5) 变极对数调速;
- (6) 变压变频调速。

按照交流异步电机的基本原理,从定子传入转子的电磁功率 P_m 可分为两部分:一部分是 $P_{mech}=(1-s)P_m$ 是拖动负载的有效功率;另一部分是转差功率 $P_s=sP_m$ 与转差率 s 成正比。从能量转换的角度看,转差功率是否增大,是消耗掉还是得到回收,显然是评价调速系统效率高低的标志。这样一来,交流异步电机调速可分成三部分。

转差功率消耗型调速系统:全部转差功率都以热能的形式消耗掉,降电压调速、电磁转差离合器调速和绕线转子异步电机转子回路串电阻调速方法属于这一类;这类调速系统结构简单,虽不节能,但仍有一定的应用场合。

转差功率回馈型调速系统:转差功率中小部分消耗掉,大部分通过变流装置回馈给电网。绕线转子异步电机串级调速属于这一类。这类调速系统效率高于上一类,但增加的变流装置仍然要消耗掉部分能量。

转差功率不变型调速系统:这类系统中无论转速高低,转差功率都不变(铜损部分),效率最高。这类调速系统包括变极对数调速和变压变频调速,其中变极对数调速只能有级调速,应用面较窄,变压变频调速应用最广,可以构成高动态性能的交流调速系统,并将取代直流调速,发展前途最广^[70]。

4.1.3 系统工作流程

变频器一般分为交-交变频和交-直-交变频,交-交变频只有一个环节,采用反并联的可逆线路,需要大量的功率元件,再加上受到谐波电流与脉动转矩的限制,其最高输出频率一般不超过电网频率的 1/2,其发展受到一定限制,应用面不广。

常用变频器采用交-直-交结构,按中间直流环节可分为电流源型和电压源型,用大电容滤波,直流电压平直,为电压源型,其特点是动态响应慢,不能实现回馈制动,可多电机传动;直流回路用大电感滤波,电流波形平直,为电流源型,其特点是动态响应快,可实现四象限运行,适用于单电机可逆传动。

变频器的逆变回路一般采用正弦脉宽调制波形,即 SPWM 波形,可方便地控制等效正弦波的频率与幅值。在此基础上又发展出三电平 PWM 菱形调制,可获得更小的谐波分量和更好的低速性能。

三电平 PWM 菱形调制是一种新兴的调制方法，其全称是电压矢量“等效”三电平 PWM 调制。其原则是按变频器瞬时输出三相脉冲电压合成空间电压矢量与届时所期望输出的三相正弦波电压的合成空间电压矢量的模相等，而它的幅角按一定的间隔跳变^[76]。从微观上讲，幅角变化是不连续的。电压矢量“等效”三电平 PWM 变频器一相的输出状态如图 4-1 所示。

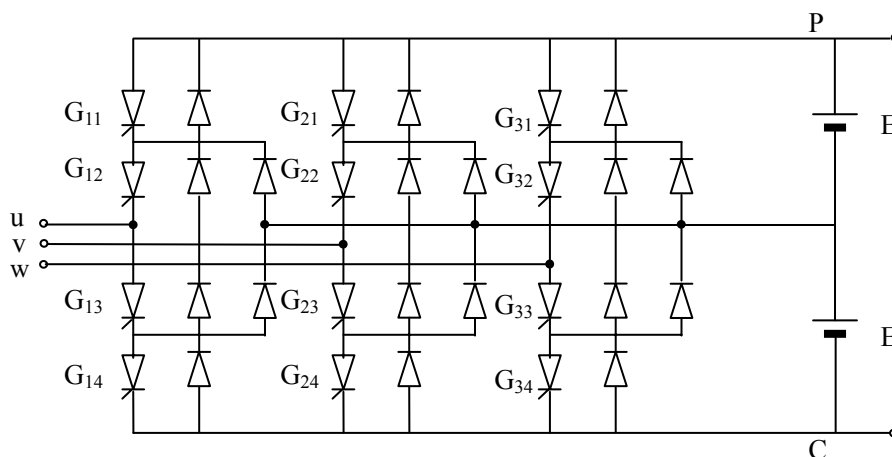


图 4-1 电压矢量“等效”三电平 PWM 变频器一相的输出状态

常用变频器的整流回路采用不可控整流，逆变回路则区别很大，受电流、电压、开关频率、控制回路的要求而变化，功率器件也得到长足的发展，半控型的 SCR 由于需强制换流而应用很少，仅在超大功率场合有用武之地^[62]。全控器件中 BJT 和 GTO 属电流控制型，驱动复杂，但有功率大的优点，而 P-MOSFET 属场控型，虽功率低但开关频率高，有更高的可靠性。场控型的 IGBT 各方面的特性都较好，因此本系统中风机驱动电机转速的调节系统中采用了 IGBT。

本变频调速系统首先根据风机转速模糊控制器的输出确定风机转速的变化值，然后根据转速变化与变频器输出之间的关系，对把风机转速变化值转化为变频器的输出，最终实现对风机转速的准确调节。

4.2 集散控制系统介绍

为达到系统改造的目的，需要对原有的集散控制系统有比较深入的了解，达到合理利用的目的。下面从几个方面介绍系统原有 uXL 集散控制系统的功能和构成，

为智能控制系统的建立奠定基础。

4.2.1 uXL 系统简介

uXL 系统是日本横河公司的一种成熟的工控系统，属于一种 DCS (Distributed Control System, 集散控制系统)。集散指的是危险分散、管理和实现集中。下面简单介绍 DCS 的一些发展概况和特点。

70 年代微机技术还不成熟，计算机技术还不够发达。操作站、控制器、I/O 板和网络接口板都是 DCS 厂家自行开发的，也就是所有部件都是专用的。70 年代初，有人用如 PDP/1124 这样的小型机代替原来的集中安装的模拟仪表控制。这种系统中连接到中央控制室的电缆很多，如用小型机既作控制器，同时把连接小型机的 CRT 又作为显示设备（即人机界面），一台小型机须接收几千台变送器或别的传感器来的信号，完成几百个回路的运算，很显然其危险性有点集中。一旦小型机失灵，系统将失去所有的监控，无法达到数字控制的预期目的。后来有人提出把控制和显示分开，一台计算机完成控制计算任务，另一台计算机完成显示任务。另外，由于一个工艺过程作为被控对象可能需要显示和控制的点很多，其中有一些还需要闭环控制或逻辑运算，工艺过程作为被控对象的各个部分会有相对独立性，可以分成若干个独立的工序，再把在计算机控制系统中独立的工序上需要显示和控制的输入、输出的点分配到数台计算机中去，把原来由一台小型机完成的运算任务由几台或几十台计算机（控制器）来完成，即使其中一台机器损坏也不影响全局。这就是危险分散的思想。把显示、操作、打印等管理功能集中在一起，用网络将控制和显示连成一个系统，这种系统成为集散系统。

从目前的 DCS 来看，一个控制器可以完成几十个回路的运算和几百点的采集，再加适量的逻辑运算，在工业生产现场可以取得较好的效果。

DCS 分为三大部分：带 I/O 板的控制器、通讯网络和人机界面（HMI）。I/O 板通过端子板直接与生产过程相连，可以读取传感器信号。I/O 板有几种不同的类型，每一种 I/O 板都有相应的端子板。其常用的端口分为以下几种：

模拟量输入：4~20 毫安的标准信号板和用以读取热电偶的毫伏信号板，4~16 个通道不等；

模拟量输出：通常都是 4~20 毫安的标准信号，一般此通道比较少，为 4~8 个。

开关量输入：16~32 个通道；

开关量输出：开关量输入和输出分不同电压等级的板，如直流 24 伏，125 伏；交流 220 伏或 115 伏等，8~16 个通道不等；

脉冲量输入：用于采集速率的信号；4~8 通道不等；

80 年代的 DCS 由于控制器的运算能力不强，为了增加 I/O 点数，把控制器的任务分开，实际上是有三种类型的控制器。即：完成闭环运转的控制器、模拟量数据采集器和逻辑运算器，它们分别有自己的 I/O 总线，各种 DCS 的 I/O 总线各不相同。如果要求快速，最好采用并行总线。一般采用串行总线比较多，尤其是 RS485 总线较多。模拟量数据采集器和逻辑运算器的 I/O 点数可以多一些。闭环控制器、模拟量数据采集器和逻辑运算器可以和人机界面直接联在通讯网络上，在网络上的每一个不同的控制器作为网络上的一个独立节点。每个节点完成不同的功能。它们都应有网络接口。有的 DCS 为了节省网络接口，把所有的过程控制用的设备即闭环控制器、模拟量数据采集器和逻辑运算器预先连在控制总线上，称为过程控制站，这可以增加过程控制站能接收的 I/O 点数，又能节省接口。然后再通过接口连到网络上与人机界面相连。随着计算机技术的发展，控制器的运算不断增强，如 PC 机作的一个控制器能力很强，既可以接收模拟量运算，也可以接收开关量逻辑运算。一个控制器成为网络上的一个节点，通过网络与人机界面相连。

控制器是 DCS 的核心部件，它相当于一台 PC 机。有的 DCS 的控制器本身就是 PC 机。它主要有 CPU、RAM、E²PROM 和 ROM 等芯片，还有两个接口，一个向下接收 I/O 总线来的信号，另一个接口是向上把信号送到网络上与人机界面相连。ROM 用来存储完成各种运算功能的控制算法（有的 DCS 称为功能块库）。在库中存有功能块，如控制算法 PID，带死区 PID，积分分离 PID，算术运算加、减、乘、除、平方、开方、一次滤波、正弦、余弦、X-Y 函数发生器、超前-滞后；比较先进的算法有史密斯预估，C 语言接口，矩阵加、矩阵乘；逻辑运算有逻辑与、逻辑或、逻辑非、逻辑与非等。通常用站功能块不仅把模拟量和开关量结合起来，还与人联系起来。功能块越多，用户编写应用程序（即组态）越方便。组态按照工艺要求，把功能块连接起来形成控制方案。把控制方案存在 E²PROM 中。因为 E²PROM 可以擦写，组态要随工艺改变而改变，所以把组态存在 E²PROM 中。不同用户有不同组态。组态时，用户从功能块库中选择要的功能块，填上参数，把功能块连接起来，

形成控制方案存到 E²PROM 中。这时控制器在组态方式，投入运行后就成为运行方式，控制器中安装有操作系统，功能块组态软件和通讯软件。为了系统安全运行，闭环控制器一定是冗余运行的，一用一备，并且是热备备用。为了使冗余成功，应注意以下几点：两个控制器的硬件、软件版本必须一致，检查发送接受的芯片是否完好；冗余的芯片是否完好，两个模块的设定是否一样，还要检查有没有带手操站等。

通讯网络把过程站和人机界面连成一个系统。通讯网络有几种不同的结构形式。如总线式、环形和星形。总线型在逻辑上也是环形的。星形的只适用于小系统。不论是环形还是总线形，一般都采用广播式。通讯网络的速率在 10M~100M 左右。人机界面有 4 种不同形式的结点，它们是操作站，工程师工作站，历史趋势站和动态数据服务器。

操作站安装有操作系统，监控软件和控制器的驱动软件。显示系统的标签，动态流程图和报警信息。工程师工作站给控制器组态（CAD），也可以给操作站组态（作动态流程图）。历史趋势站用于存储历史数据，一般用磁盘阵列（称为 RAID 技术）。动态数据服务器是 DCS 和 MIS 系统的接口，也是 DCS 和 Web 的隔离设备。

4.2.2 uXL 系统硬件及功能

uXL 是多功能的具有优良的价格/功能比的分散系统，是灵活而又完善的小型装置，并可容易地扩展成中规模和宽网控制系统，能实现高级过程控制，批量和顺序控制及运行分散实时的 BASIC，并具有高清晰度画面。

uXL 的硬件构成即现场控制单元有 MFCU，MFCN 或 MFCD。每个单元能在 1 秒钟内完成 16 回路（80 个反馈控制仪表）和 40 张顺控表 256 个数字 I/O 信号的控制。扩展型控制单元 MFCN 可以增加若干个 MFXU I/O 扩展单元，并能采用以微机处理机为核心的高精度信号转换器。

uXL 系统包括现场控制站、现场监视站和 MOPS（台式）/MOPL（落地式）操作站，同接在 RL 数据总线上。一个 uXL 系统可以容纳多达 63 个单元，每个站可以监控多达 6000 个 2 位。RL 总线是一条具有过程控制所需要的足够的通讯速率和实时性的数据总线。该系统的基本功能包括：

反馈控制功能：类似于传统的控制仪表的反馈控制功能，做成完整的软件模块

提供使用。使用时和相应的 I/O 插件配套或“软接线”连接到其他仪表。还有信号输出以及多种输入信号线性化和计算模块，可在 MCPS 操作站上用对话式编程进行系统生成。

报警器信号功能：利用控制仪表报警状态检查功能及顺控功能可以控制报警接点开关。该接点开关将报警器信息传送到操作站。可以定义最多 127 个报警器信息，这些信息可显示在报警综合画面上。

顺控功能：顺控功能显示测试及改变 I/O 接点状态，用软件模拟的内部定量器、计数器、开关、控制仪表来处理运行方式及报警状态，顺控表可以跳步长执行其他顺控表，参照其他顺控表的条件操作，中止和再启动顺序及条件转移到另一顺控器号。

BASIC 功能：扩展 MFCU 现场控制单元支持用户 BASIC 程序，可直接与模拟和数字 I/O 插件进行信号传输，与子系统（如 PLC）通信，并支持高级的反馈控制，批量及顺序控制。

整个系统的配置配置如图 4-2 所示。

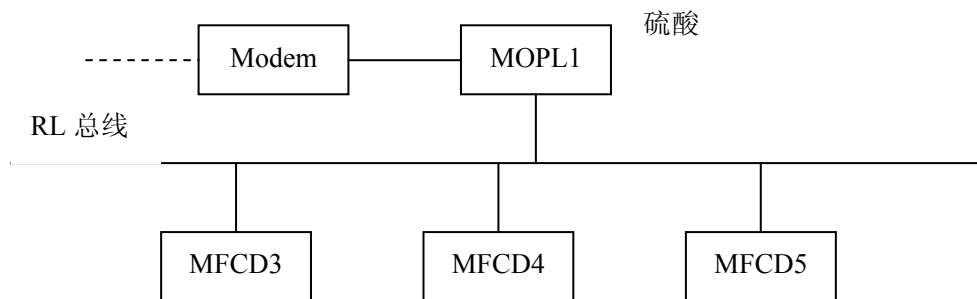


图 4-2 风机转速模糊控制算法流程图

烟气制酸中的 uXL 集散控制系统有一个 MOPL 加强型操作站，三个现场控制站 MFCD。都配置了交流稳压器和不间断电源。该系统的控制功能包括大型风机的启动、报警、停机；多个电动阀门的远程控制；八个槽的液位报警、调节控制；与烧结 UXL 系统的数据通讯等。该系统共包括模拟输入量 104 点，模拟输出量 37 点，开关输入量 124 点，共有调节系统 33 套，另有定时趋势显示，历史趋势记录及报表打印等功能。

该 uXL 系统中的通讯主要包括以下一些内容：984PLC 至 PXI（通信卡）的通

讯,把有关的电气设备开停状况信息送入(接收);各现场控制箱之间相关信号通信,以交换所需的信息;本操作站所属现场控制箱信号通过 RL 总线向另一操作站所属现场控制箱发送信号;以 RS-232C 口经调制解调器实现与化验室 X 荧光计算机的远程通信,接收物料分析信号。

该 uXL 系统还完成一些简单的闭环控制,这些闭环控制主要包括:

空塔循环槽液位控制系统:根据空塔循环槽液位去吸脱塔的喷淋量,对象特性呈积分型,采用 PID 调节器;

洗涤塔循环槽液位控制系统:该调节系统是为保洗涤塔循环槽液位而设,对象特性呈积分型,采用 PID 调节器;

间冷循环槽液位控制系统:该调节系统是为保间冷循环槽液位而设,对象特性呈积分型,采用 PID 调节器;

风机转速控制系统:该系统与烧结烟罩负压控制串级,以空塔入口压力为副环,烧结烟罩负压为主环,是为确保烧结烟罩负压而设,但对稳定硫酸工艺好处并不多,投运时需兼顾烧结,硫酸操作条件,在运行中摸索出最佳的整定参数方能见效;

电动阀门的运行控制系统:为方便电动阀门的操作和控制,本系统有阀门软手操,阀门开放,显示功能,并设有专门的组显示画面。

以上简要介绍了原有 uXL 集散控制系统的一些情况,在此系统的基础上,设计了上层智能控制系统。

4.3 控制系统应用软件整体框架

本智能控制系统软件是面向烟气制酸过程智能控制系统中的重要组成部分,具有管理、决策和控制的作用,是为满足实际应用环境而编制的软件,主要负责数据的采集、处理等操作,软件的品质直接影响系统的安全和控制效果,从而进一步影响到控制系统的稳定性和产品的质量,是工业控制系统的灵魂。

面向烟气制酸过程的智能控制系统的软件部分采用 VC++ 6.0 进行开发,控制算法使用了 Matlab 软件辅助开发。软件的编写中采用了面向对象的编程思想。

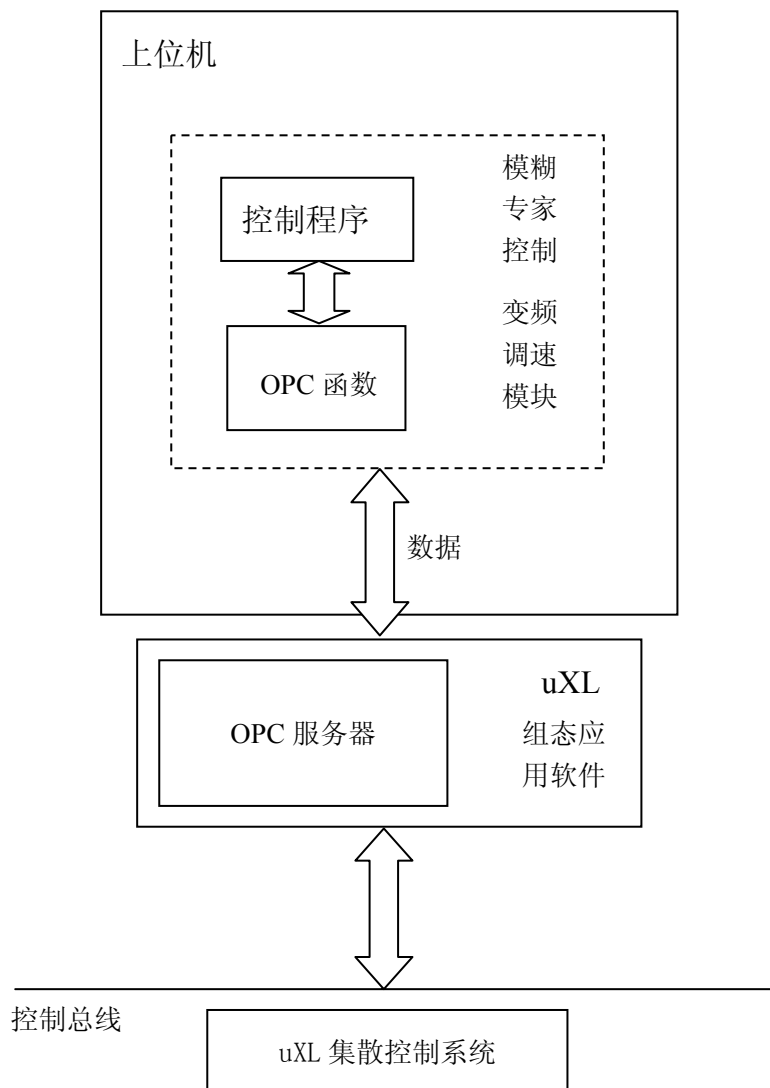


图 4-3 烟气制酸过程智能控制软件体系

从面向烟气制酸过程智能控制系统整个软件体系来看，控制系统如图 4-3 所示。控制软件为虚线框所包括的内容：控制算法、OPC 通讯类、风量控制阀门的专家调节、风机转速的模糊控制、风机驱动电机的变频调速模块等。控制程序包括简单人机界面、控制程序初始化、报警处理等模块。

本系统软件的实现是基于 OPC 的系统通讯技术。本系统软件为一个实时控制的应用软件，需要不间断的稳定运行，因此它的稳定性与正确性就显得特别重要，在软件的框架分析中将采用面向对象的思想以及模块复用的策略。将 OPC 通讯机制和控制算法封装成不同的类，使得主程序主要考虑界面方面的处理，特别是在控制方

式的切换上，对用户逻辑的处理显得简单而高效。

根据模块复用和类机制的相关编程思想，最终得到该智能控制系统的软件体系结构如图 4-4 所示。控制系统分成四个功能模块，主程序框架下整合了三个功能模块：人机界面、通讯模块、控制算法模块。

一般来说，人机界面模块的功能是实现“人机对话”，提供友好易用的用户操作，但是由于本智能控制系统基本不需要用户干预，相当于一个后台程序，故本程序的人机界面只完成表示程序正在运行的功能。该系统按功能分又可以分为控制过程操作模块、控制过程报警模块。人机界面模块通过简单的人机界面实现智能控制系统的运行状态，并能容易的实现手动控制和自动控制的切换。通讯模块的功能是利用集成了实现大量的数据采集、校验、控制量的下发。控制算法模块的功能是对采集信息进行加工计算，包括数据处理、优化、依据给定算法进行数据运算等，它主要包括转化器四段温度风量控制阀门的专家控制模块、风机转速模糊控制模块等。

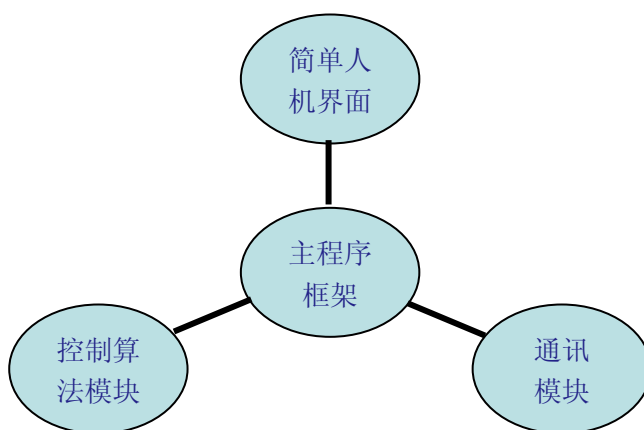


图 4-4 控制软件结构框图

整个控制软件功能模块方框图如 4-5 所示。

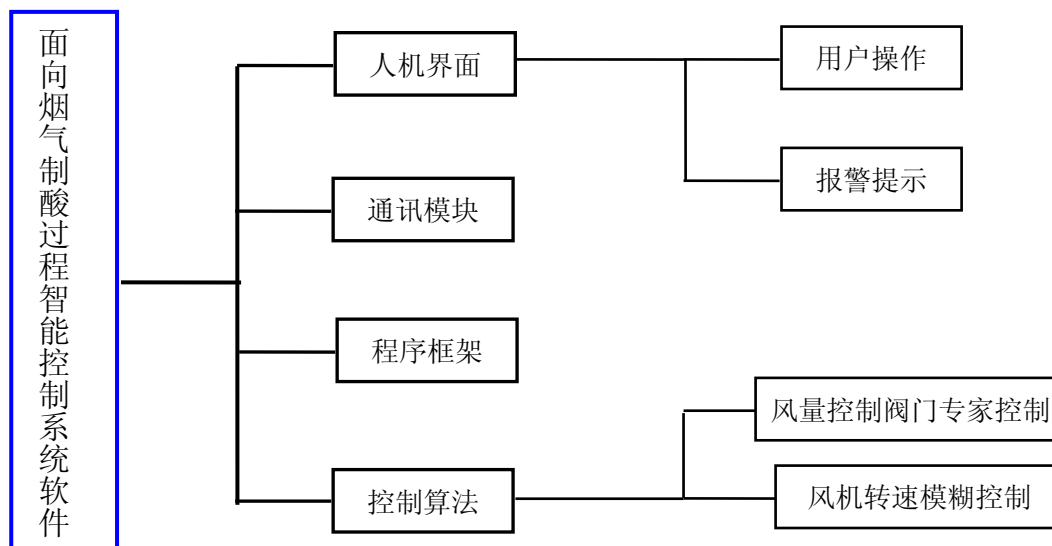


图 4-5 控制软件功能模块方框图

4.4 OPC 通讯机制的实现

OPC 的规范有多个内容，其中包括历史数据存取(Historical Data Access, HDA) 规范,报警与事件(Alarms and Events, AE) 规范,以及最重要的数据存取(Data Access, DA) 规范。根据数据存取规范实现的服务器就是本系统要与之通信的数据存取服务器。

根据 OPC 数据存取规范，OPC 数据服务器定义了两种标准的 COM 对象，即 OPC Server、OPC Group 对象。OPC Server 对象，是客户端软件与服务器交互的首要对象。客户端访问 OPC Server 对象的接口，通过接口函数组织管理 OPC Group 对象，OPC Group 对象用于组织管理服务器内部的实时数据信息。在 OPC 标准中使用 Items 对象描述实时数据，Items 是非 COM 对象，是客户端不可见的对象。

OPC Server 对象功能主要表现为：

- (1) 创建和管理 OPC Group 对象；
- (2) 保存服务器内部的状态信息；
- (3) 保存 OPC 服务器内部的数据组织结构以供客户浏览。

OPC Group 对象的主要功能表现为：

- (1) 创建和管理 Items 对象；

(2) 以 Group 为单位进行实时数据存取服务（同步与异步方式）；

(3) 保存 OPC Group 对象的内部状态信息。

通过 OPC Server 对象与 OPC Group 对象存取数据的示意图如图 4-6 所示。

OPC 规范定义了两套服务器接口：定制接口(Custom Interface)和自动化接口(Automation Interface)，定制接口是 OPC 服务器所必须实现的接口，它适合 C++ 语言，编程比较复杂，并可实现最佳运行性能的客户应用程序；自动化接口是可选接口，它主要应用于 VB 等脚本语言，该接口使用比较方便，但它的便利性是以牺牲性能为代价得来的。以下给出了通过 OPC 的定制接口存取数据需要经过的步骤，其中采用了 windows 操作系统提供的 COM 库函数。

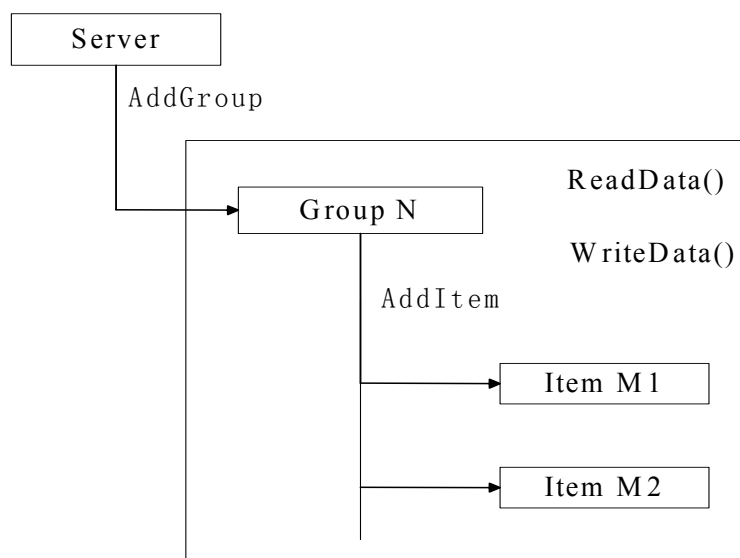


图 4-6 OPC 存取过程示意图

(1) 连接一个 OPC Server

本系统首先要连接 uXL 集散控制系统监控软件内带的 OPC 服务器，其具体过程如下：

① 初始化 COM 库

```
if(FAILED(CoInitialize(NULL)))
    return E_FAIL;
```

② 将 OPC 服务器“uXL.DAServer.2”从字符串转化为全局唯一的标识符

```
CLSID OPCCLSID;
```

```
CLSIDFromProgID(“uXL.DAServer.2”,
                &OPCCLSID);
```

③ 将该服务器装载到内存中，并获取该 OPC 服务器的初始(IUnknown)接口指针，方便下一步的接口跳转。

```
HRESULT hRet=CoCreateInstance( OPCCLSID,
                                NULL,
                                CLSCTX_LOCAL_SERVER,
                                IID_IUnknown,
                                (void **)&m_pUnk);
```

(2) 建立一个 Group;

首先，通过接口查询(QueryInterface)获得 IOPCServer 接口的指针。

```
IOPCServer *pServer;
hRet=m_pUnk->QueryInterface(IID_IOPCServer, (void **)&pServer);
```

然后，设置必要的参数后，建立(AddGroup)一个 OPC Group 并且获得该 Group 的初始接口(IUnknown)指针，

```
DWORD ActualRate;
IUnknown *pGroupUnk;
float b=0.0;
hRet=pServer->AddGroup(L"", TRUE, 500, 1235, 0, &b, 0,
                      &hOPCServerGroup, &ActualRate, IID_IUnknown, &pGroupUnk);
```

释放 IOPCServer 接口指针，以防止指针丢失引起的内存泄漏。

```
pServer->Release();
```

(3) 在 Group 中增加所要存取数据的 Item。

定义必要的参数，其中 OPCITEMRESULT 和 OPCITEMDEF 都是 OPC 规范中定义的结构体(struct)。OPCITEMDEF 是客户程序对增加的数据项(Item)的定义，OPCITEMRESULT 则为 OPC 服务器对该数据项(Item)的属性设置。

```
OPCITEMRESULT *pItemResult;
HRESULT *pErrors;
HRESULT hRet;
OPCITEMDEF ItemName;
```

定义该数据项的名称以及其他属性。

(4) 以 Group 为单位存取数据。

有两种存取数据的方式，一种是同步读取，一种为异步读取。同步方式就是直接读取过程数据，成功后返回；而异步方式则是给 OPC 服务器发送一条命令，通知它要读取那些数据，然后马上返回，而 OPC 服务器则在这些数据一旦发生改变时，主动通知客户程序。这两种方式都各有好处，同步方式能够马上得到数据，而异步方式只在数据发生改变时才传输数据，在数据变化不大的情况下可以减轻系统负担，但是异步存取应用到了 COM 规范中的连接点性质，需要客户程序实现接收器(sink)对象，编程较为复杂。以下为采用同步方式读取数据时的步骤，写数据的情况与此类似。

```
OPCITEMSTATE *pItemValue;
```

```
IOPCSyncIO *pOPCSync;
```

```
HRESULT *pErrors;
```

通过接口查询，得到同步存取数据的接口指针(IOPCSyncIO)。

```
HRESULT hRet=m_pItem->QueryInterface( IID_IOPCSyncIO,  
                                         (void **)&pOPCSync);
```

调用该接口的成员函数(Read)，读取现场过程数据。

```
hRet=pOPCSync->Read(OPC_DS_CACHE, len, m_hReadServer,  
                    &pItemValue, &pErrors);
```

读写现场过程数据必须预先确定该数据在 OPC 服务器中所表示的项(Item)名。否则程序会发生错误。

以上介绍了 OPC 技术的规范以及客户端程序编写的具体步骤，经过在现场的实际应用，结果证明，OPC 通信的实时性完全能满足本项目需要。

4.5 控制算法流程

控制算法程序是本系统的核心，本系统的控制对象主要有两个：风量控制阀门和风机转速。由于这两部分的控制各自有自动/手动控制，可以分别切换控制方式，而且风量控制阀门的控制周期相对较短，而风机转速控制的控制周期很长，因此这两个控制回路的算法代码并不在同一个部分内。这样可以使得操作人员根据情况对

每个回路设置控制方式，方便了操作，达到了最大灵活性。

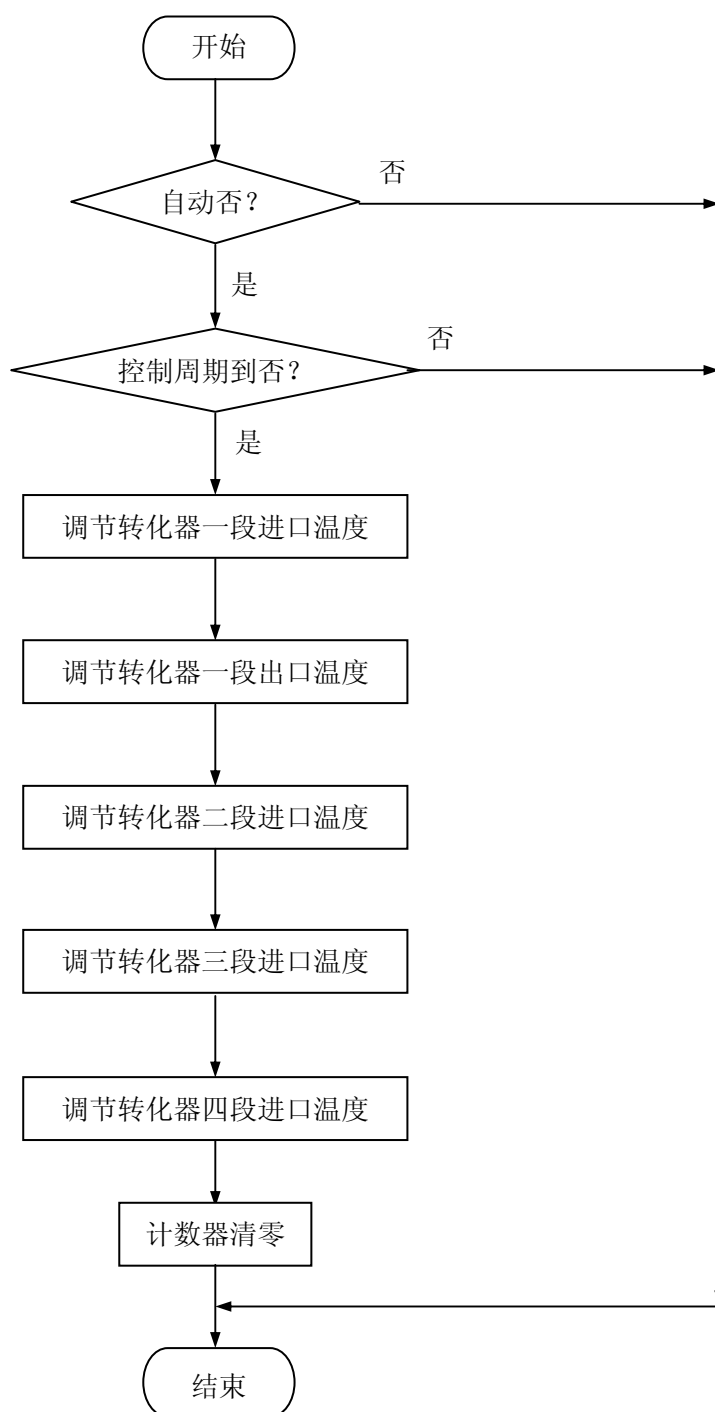


图 4-7 风量阀门专家控制算法流程图

面向烟气制酸过程的智能控制系统的风量阀门专家控制部分的算法流程如图 4-7 所示。根据现场的转化器内温度变化的特点，为了保证在恶劣的工况条件下正

常的实现化学反应速率和方向，保持转化器内的热平衡，并且在温度偏离设定温度的情况下及时调节各段转化器内的风量，将转化器各段的风量控制阀门的专家控制器的控制周期设置为 15 秒。

程序启动后，初始化模糊控制器、完成烟气制酸工艺参数值的设定，并装载解耦模糊控制表；为了保证数据读取正确和保证控制初始化完成，算法启动延时了 30 秒。专家控制器是由若干条件语句组成的程序段；模糊控制算法是一个查表程序，由转化器温度整体偏差 e 及其变化率 e_c 按(3-5)、(3-6)式算得其论域值 E 、 E_c ，由 E 、 E_c 查二维模糊表得风机转速改变的模糊值，按(3-7)式对该模糊值解模糊得风机转速改变量。其中，模糊表是用 MATLAB 软件编制的一段程序，根据输入、输出变量的隶属度函数、模糊推理规则、推理方法等得到的。风机转速调节模糊控制算法的流程如图 4-8 所示。

4.6 系统通讯流程

为了保证控制系统安全可靠的工作，首先要保证数据通信的实时性、准确性。为不影响控制算法的工作效率，保证系统有足够资源进行算法计算和界面显示，采用了 OPC 通讯协议，并使用定时器定时，让其循环不断的读取 uXL 的数据，并实时下发各种控制量到 uXL 设备。

本控制系统通讯流程如图 4-9 所示。

Step 1: 当程序启动后，在对话框类的构造函数中生成 OPC 类实例，完成连接服务器、为读写数据做准备、添加数据标签等工作；

Step 2: 然后启动定时器，若启动不成功则结束程序；

Step 3: 调用 `opc.ReadData()`函数读取数据，转换数据类型，并把读来的数据存入全局变量区；

Step 4: 采用“限幅滤波+中值滤波”的方法进行数据滤波，排除异常数据；

Step 5: 判断是否到控制周期，到控制周期则从全局变量区取出控制量的下发值，下发控制值；

Step 6: 判断是否结束循环，若结束则退出，若不然，则跳到 Step 3 继续读取和下发数据。

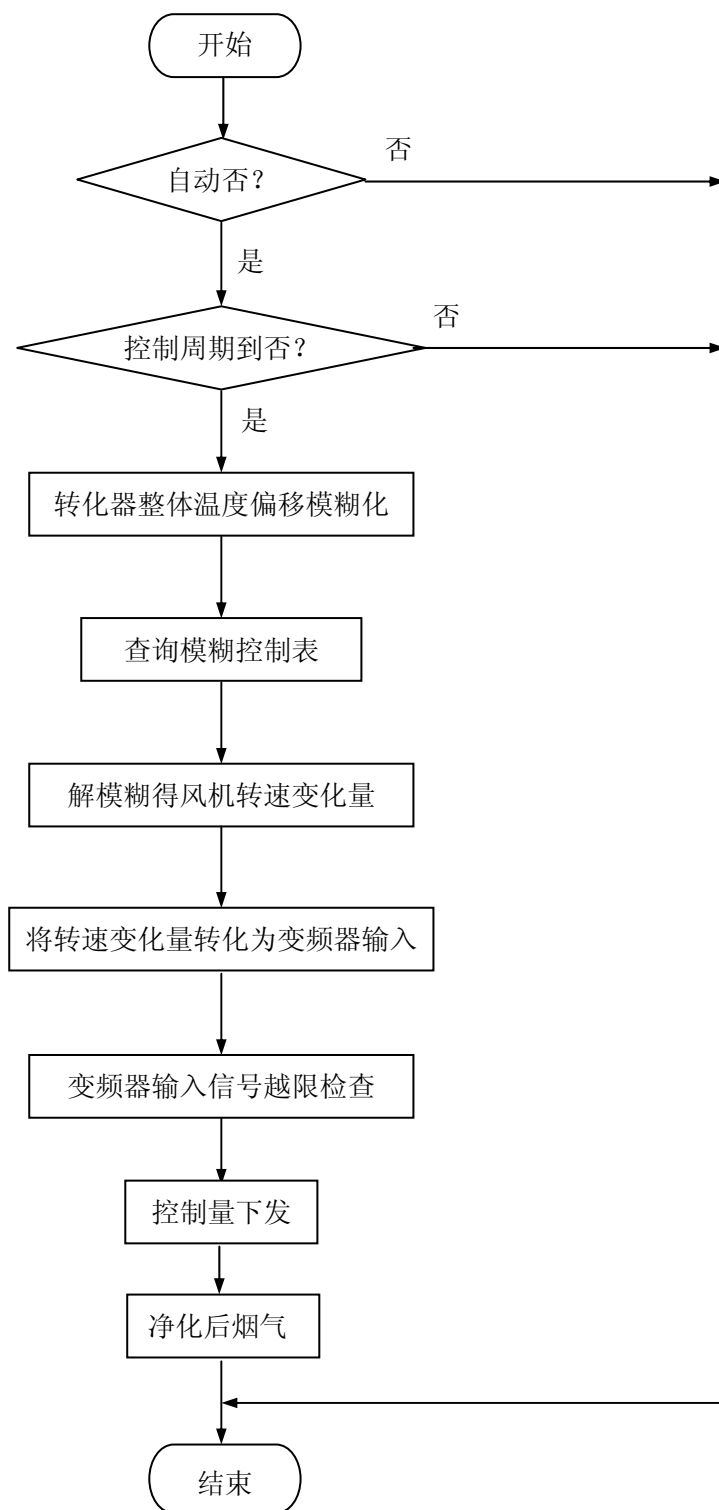


图 4-8 风机转速模糊控制算法流程图

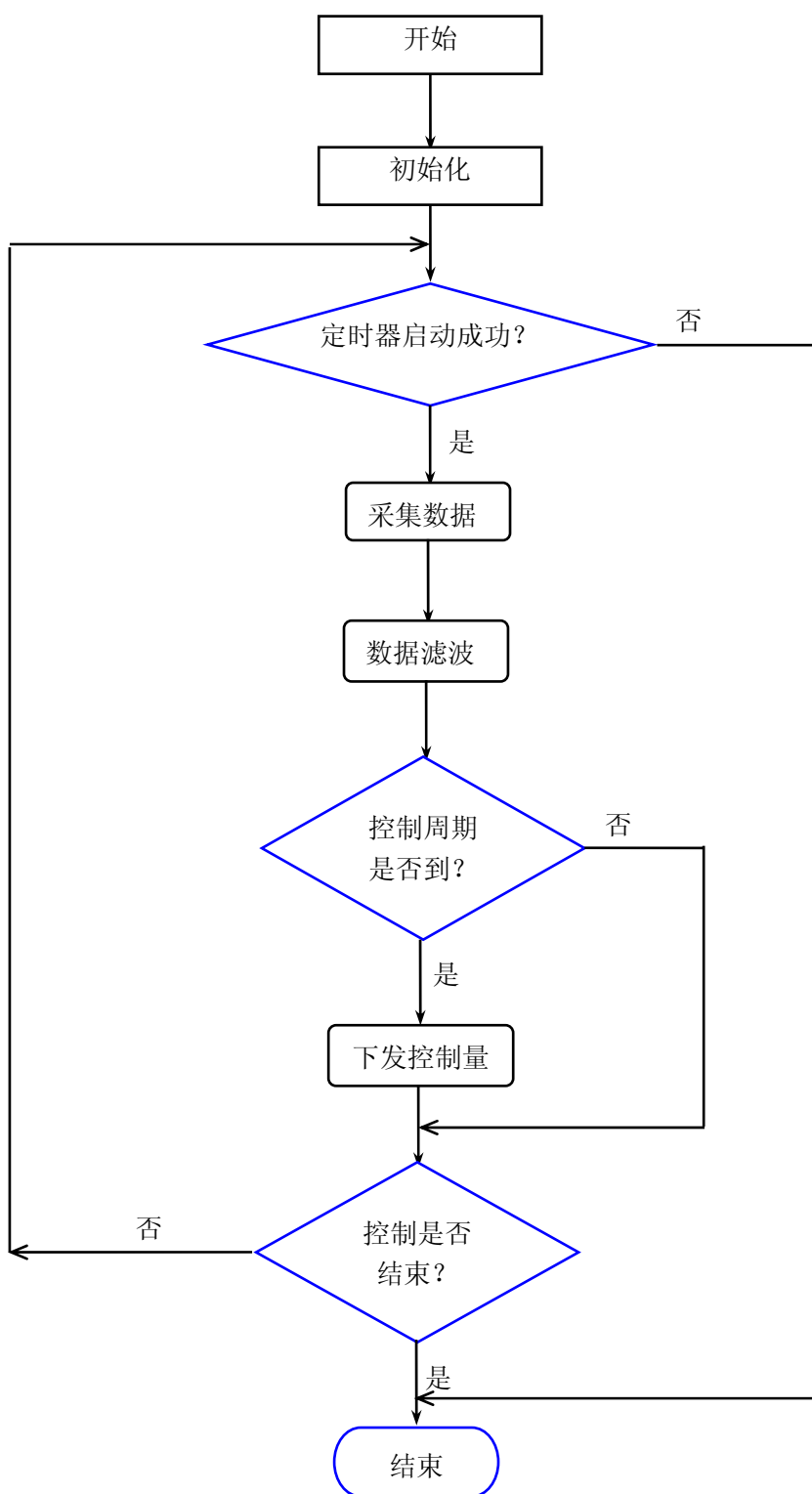


图 4-9 通讯流程图

4.7 系统运行效果

目前本面向烟气制酸过程的智能控制系统已经投入运行，能完成制酸过程的监视和控制功能。系统运行画面如图 4-10，图 4-11 所示。

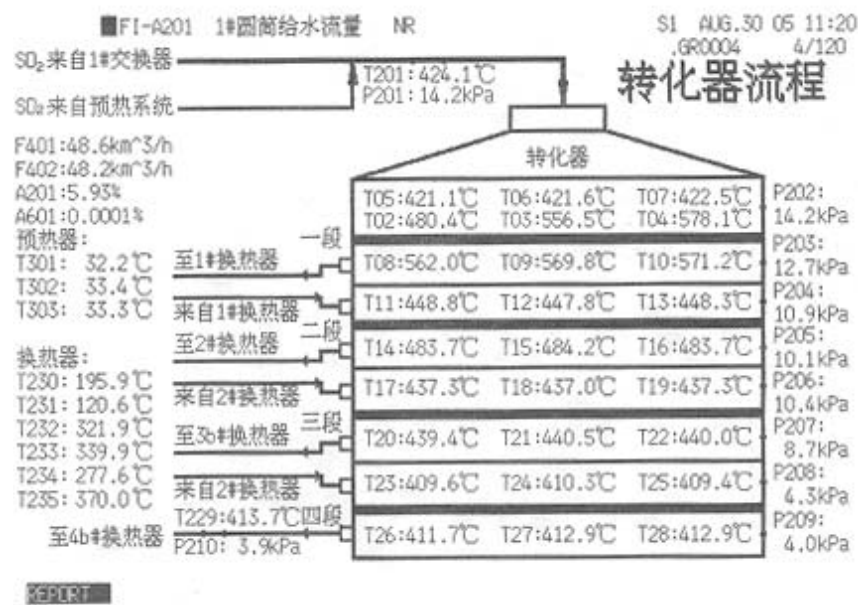


图 4-10 制酸过程控制系统主监控画面



图 4-11 制酸过程过程参数监控画面

4.8 小结

在对本智能控制系统进行结构和概念设计之后，本章具体讨论了本面向烟气制酸过程的智能控制系统的实现。由于风机驱动电机的转速调节是本系统中重要的节能手段，本章首先分析了电机节能的理论基础，并比较了几种电机转速调节的方法，最终采用了简单可靠并相对成熟的变频调速技术，实现了节能基础上的电机转速准确调节。接下来讨论了智能控制系统软件的整体结构和编写方法，简要介绍了各个功能模块的设计方法，并详细介绍了 OPC 通讯机制的实现。控制算法是本控制系统的关键，本章给出了风量阀门专家控制策略的算法流程和风机转速模糊控制算法的流程图，说明了程序中控制算法的实现。最后，说明了本智能控制系统和原集散控制系统之间的通讯流程，实现了从集散控制系统读取过程数据并实时下发控制量的功能。

第五章 系统运行结论与展望

在对烟气制酸生产过程工艺特点研究的基础上,设计完成了面向烟气制酸过程的智能控制系统的设计与开发。该系统投入运行后,系统的运行状态良好,该系统减少了以往单纯依靠操作人员经验调节风量控制阀门和风机转速,使控制效果差等问题,对于提高冶炼企业烟气制酸过程的自动化控制水平具有重要的意义。

本文对烟气制酸过程的自动控制进行了分析和研究,并成功的将设计的智能控制系统应用于烟气制酸过程中,课题研究过程主要完成了以下几个方面的工作:

(1) 通过查阅国内外相关文献资料,了解了烟气制酸过程自动控制系统的研究现状,结合烟气制酸企业的生产特点,提出了一种基于智能控制的自动控制系统,为提高烟气制酸过程自动化水平奠定了概念基础。

(2) 设计了转化器内四段温度控制阀门的专家控制器。针对转化器四段进口温度和出口温度要求的不同,通过分析烟气流向及总结操作人员的专家经验,通过专家控制实现了风量阀门的专家控制。

(3) 设计了风机驱动电机转速的模糊控制器。针对转化器内四段温度整体偏移需要调节风机转速的工艺要求,通过模糊控制实现了检测温度整体偏移量得到风机转速变化量,然后将该转速变化量变换为变频器输出的控制策略,实现了风机转速的可靠调节。

(4) 完成了上层控制软件的设计。在设计控制系统软件整体框架的基础上,分别设计了各个功能模块,通过类机制实现了应用程序的面向对象编程。对控制系统软件和原有集散控制系统之间的通讯做了深入研究,采用 OPC 技术实现了应用程序和集散控制系统组态软件之间的无缝连接。

虽然课题的研究和系统的开发取得了初步的成果,但是风量控制阀门的控制规则和电机的变频调速的设计上仍然需要不断改进,新型智能控制技术如神经网络的发展,为智能控制系统的设计提供了更多的选择,如何设计出性能更好的自动控制系统有待于进一步的深入研究。课题可以从以下几个方面进行研究和开发:

(1) 随着企业数据采集系统的完善,可以获取更多的影响转化器内四段温度的实时数据,如何将其引入到专家控制器和模糊控制器的输入中,提高专家控制和

模糊控制的准确性；

(2) 如何在专家控制器中加入自学习机制，使专家控制策略能够随工况的改变而不断的更新。

(3) 如何对上位机系统软件进行优化设计。

总之，面向烟气制酸过程的智能控制系统的研究以及其工业实现与应用，将科学的控制方法与现场工艺相结合，在冶炼企业和相关的冶炼设备控制领域具有重要的参考价值和推广价值，相信随着更多的企业和个人意识到自动控制对提高冶炼工艺的重要性，此类智能控制系统和此种控制思想的研究也将具有更加广阔的前景。

参考文献

- [1] 罗忠平, 丁治元, 赵家锦. 低浓度冶炼烟气制酸实现两转两吸的技改和生产实践. 硫酸工业, 2001, 3: 46-49
- [2] 叶树滋. 低浓度冶炼烟气制酸转化热平衡问题探讨. 硫酸工业, 2000, 5: 23-25
- [3] 王敬. 低深度冶炼烟气制酸装置转化系统的自热平衡实践. 硫酸工业, 2001, 16: 53-54
- [4] 何超砷. 两转两吸在锌精矿烟气制酸中的实践. 硫酸工业, 1991, 3: 17-21
- [5] 李湛. 工业控制及管理计算机在硫酸生产的应用. 昆明理工大学学报, 1999, 24 (6): 107-109
- [6] 冯梦秋. KKK 风机应用 PLC 检测与控制. 有色设备, 2000, 3: 34-36
- [7] 杨国才. SO₂ 风机自动控制方案的改造. 有色冶炼, 2001, 1: 39-48
- [8] 唐云辉. 330kt/a 硫磺制酸装置风机驱动汽轮机的特点与应用. 硫酸工业, 2003, 6: 31-33
- [9] 赵群, 唐文军, 刘彤东等. DCS 系统在硫酸余热发电过程中的应用. 自动化技术与应用, 2003, 22(4): 29-32
- [10] 唐飞. S9000 集散控制系统在冶炼烟气制酸装置中的应用. 硫酸工业, 1998, 4: 48-49
- [11] 高贵文. 大型硫酸装置生产过程三级工业控制集散系统的思想. 硫酸工业, 1992, 5: 55-57
- [12] 高贵文. 工业控制及管理计算机在硫酸生产的应用. 硫酸工业, 1992, 5: 55-57
- [13] 邱祖廉, 尹征琦, 杨青等. 硫酸生产过程的计算机控制系统. 西安交通大学学报, 1997, 31 (2): 26-31
- [14] Srivastava, R.K. Miller, C.A. Erickson, C. Jambhekar, R. Emissions of sulfur trioxide from coal-fired power plants. Journal of the Air and Waste Management Association, 2004, 54(6): 750-762.
- [15] Noda, K.; Tanaka, S.; Hamamoto, M.; Shimokawa, K. Optimization of the energy cost at Tamano Smelter. TMS Annual Meeting, 2002: 295-303
- [16] Hathorn, John W. Continuous emissions monitoring can contribute to plant profitability, Proceedings of the Air & Waste Management Association's Annual Meeting & Exhibition, 96-TA31.03, 1996, 10pp
- [17] 任克敏. 从我国硫酸生产现状看冶炼烟气制酸. 世界有色金属, 2002, 5: 60-63
- [18] Friedman, Leonard SO₂ emission control: the problem and solutions. J. Journal of

- Metals, 1981, 33(3): 44-50.
- [19] Gandel'sman, T.A.; Darkhovskij, B.S.; Magaril-Il'yaev, G.G. Methodology of control synthesis of chemical-engineering system. *Teoreticheskie Osnovy Khimicheskoi Tekhnologii*, 1991, 25 (2): 254-261
- [20] 罗贞宪. 芬兰硫酸生产简介. *株冶科技*, 1995, 23 (1): 8-10
- [21] 德瑛, 刘永成, 方先梅. SO₂ 鼓风机震动事故原因分析及防范对策. *硫磷设计与粉体工程*, 2000, 6: 38-40
- [22] 冯世钧, 李芝生. 大冶硫酸生产简介. *硫酸工业*, 1997, 3: 29-33
- [23] Mazana, N.; Nleya, B. Design of a control system for computer aided SISO and MIMO intelligent control. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Proceedings. ISIE'98 (Cat. No.98TH8357)*, 1998, 1: 120-6
- [24] Doernemann, A.G. Model-based control system for pickling lines. *Iron and Steel Engineer*, 1997, 74(1): 47-50
- [25] Chatwin, Terrence D.; Kikumoto, Nobuo eds. Sulfur dioxide control in pyrometallurgy. *Proceedings - Trends & Applications (IEEE Computer Society)*, 1981: 261
- [26] 常伟. 大型硫酸装置炉气风机安全保护与逻辑停车. *硫磷设计*, 1996, 4: 29-33
- [27] Largest SO₂/NO_x removal process also recovers acid. *Electric Power International*, 1992, 9: 36- 40
- [28] Preda, Micaela; Cox, Malcolm E. Temporal variations of mineral character of acid-producing pyritic coastal sediments, *Science of the Total Environment*, 2004, 326, (1-3), : 257-269
- [29] 魏世发. 富氧炼铜烟气制酸采用二转二吸工艺初探. *工程设计与研究*, 1998, 6: 19-21
- [30] 谷新艳. 干吸工段酸浓控制方式的探讨. *有色冶炼*, 1998, 4: 40-42
- [31] Summers, Robert; Clarke, Martin; McCafferty, Peter; Pope, Tim. A slowly soluble, sulfur fertiliser from a by-product of mineral sands processing. *Australian Journal of Soil Research*, 2003, 41(6): 1213-1227
- [32] Maddox, Jack D.; Hinerman, Kenneth B.; Ellison, William. Soluble FGD chemical production through national SO₂ emission inventory reduction. *Proceedings, Annual Meeting - Air Pollution Control Association*, 1984, 2: 84-87
- [33] Smith, A. C. S.; Middleton, B. J. environmental control of calcine waste disposal. *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1981, 2: 379-382

- [34] 刘义, 曹子栋. 活性炭法烟气脱硫工艺中硫酸转化条件的实验研究. 西安交通大学学报, 2002, 36 (1): 108-110
- [35] Okino, Susumu; Sakamoto, Reiko; Kono, Susumu; Oshima, Mitio; Inoue, Seiji. Development of automatic calcium carbonate slurry analyzer for optimum control system of desulfurization plant. Technical Review - Mitsubishi Heavy Industries, 1997, 34(1): 15-19
- [36] Davis, Mackenzie L.; Mikucki, Walter J. Choosing a technology for simultaneous control of NO_x/SO_x from industrial boilers. Proceedings - A&WMA Annual Meeting, 1989, 2: 24-27
- [37] Raufer, Roger K.; Feldman, Stephen L.; Jaksch, John A. emission trading and acid deposition control: the need for ERC leasing. Journal of the Air Pollution Control Association, 1986, 36(5): 574-580
- [38] 赵立华. 可编程调节器在硫酸生产过程控制中的应用. 炼油化工自动化, 1995, 4: 31-35
- [39] 龚裕男. 可编程序控制器在 SO₂ 鼓风机供油系统中的应用. 磷肥与氮肥, 2001, 16 (1): 50-51
- [40] Dill, W.R.; McFatridge, D.G. Iron control in west Texas sour gas wells provides sustained production increase Walker, M.L.; Proc SPE Prod Oper Symp, 1991, 4: 9-14
- [41] Huang, W.; Hobbs, B.F. Optimal SO₂/sub 2/ compliance planning using probabilistic production costing and generalized benders decomposition. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 174-80
- [42] Keifer, Donald J. Furnace gases can be controlled. Glass Industry, 1990, 71(7): 23-24, 27-28
- [43] M. Funk. 硫酸厂主鼓风机的主要设计准则. 硫酸工业, 2003, 4: 9-13
- [44] 李一农, 沙淳. 硫酸废热发电的生产控制及其在企业生产中的重要作用. 硫酸工业, 1995, 9: 49-50
- [45] Monterroso, C.; Macias, F. Prediction of the acid generating potential of coal mining spoils. International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment, 1998, 12(1): 5-9
- [46] 陈文燕, 刘柯. 硫酸风机的 PLC 控制. 金川科技, 2001, 3: 46-47
- [47] 刘更新. 硫酸过程风机的改造. 四川冶金, 1999, 4: 13-16
- [48] 胡芒. 硫酸生产过程微机控制系统. 湖南冶金, 1997, 2: 57-59
- [49] 王雪林. 硫酸生产中的检测仪表及控制系统. 硫酸工业, 1996, 3: 8-12

- [50] 万宁, 袁文章, 姚卫等. 硫酸生产自动化研究十年回顾. 硫酸工业, 2000, 2: 41-43
- [51] Rabellino, Larry; Applegarth, Chuck; Vergani, Giorgio. Contamination control methods for gases used in the microlithography process. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2002, 4689 II: 790-801
- [52] 解天楷, 梅基强. 硫酸系统自控工程设计. 硫酸工业, 1996, 6: 6-8
- [53] 钱能. C++程序设计教程. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [54] 何文旭. 罗茨鼓风机用于硫酸工业的可取之处. 中国设备工程, 2002, 4: 58
- [55] 萨师煊, 王珊. 数据库系统概论. 北京: 高等教育出版社, 2000
- [56] 吴安康. 目前大型硫酸装置控制方案概述. 炼油化工自动化, 1992, 3: 58-60
- [57] 赵中, 赵明君, 谢银星等. 铅锌烧结烟气制酸装置的技术改造. 硫酸工业, 2004, 1: 12-15
- [58] Ellison, William. Regulation of coal-based SO₂/NO_x emissions and management of resulting gas cleaning wastes. Radiation Physics and Chemistry, 1992, 40(4): 279-285
- [59] 朱森. 日本东予冶炼厂硫酸生产近况. 硫酸工业, 1989, 4: 42-43
- [60] 龙红卫, 李颖. 韶关冶炼厂低浓度烟气两转两吸制酸工艺的设计及生产实践. 硫酸工业, 2001, 6: 35-38
- [61] 魏世发, 周桂月. 韶关冶炼厂二系列硫酸工程施工总结. 工程设计与研究, 1998, 12: 38-39
- [62] 李颖. 韶关冶炼厂一系统硫酸技术改造总结. 有色金属, 2003, 3: 167-169
- [63] 龙红卫. 韶冶二期硫酸装置及试生产简况. 硫酸工业, 1995, 2: 18-21
- [64] 武希彦. 深化企业改革迎接入世挑战——在全国有色金属、黄金冶炼烟气制酸工作座谈会上的讲话. 硫酸工业, 2001, 3: 11-14
- [65] Shroff, G. H.; Papa, A. F.; Whalen, J. M. emissions control at a coke-fired cogeneration plant. Chemical Engineering Progress, 1985, 81(10): 51-56
- [66] K.H.DAUM. 世界上最大的冶炼烟气制酸装置的设计. 硫酸工业, 2001, 3: 1-6
- [67] 张均杰, 李鹏. 铜陵一冶硫酸系统干吸工序的改造. 硫酸工业, 2001, 3: 6
- [68] 胡松. 铜冶炼烟气制酸中的 SO₂ 风机简介. 有色设备, 1999, 5: 40-42
- [69] 葫芦岛锌厂. 微机控制系统在制酸工艺过程中的应用. 硫酸工业, 1994, 6: 10-13
- [70] 康志良, 马春熠. 微机控制系统在制酸工艺过程中的应用. 有色矿冶, 2001, 17 (3): 34-37
- [71] Green, L., Jr. Alternatives for effective emissions control. Public Utilities

Fortnightly, 1984, 114(10): 22-8

- [72] 郭泾平, 肖波, 祁永唐. 微型计算机硫酸生产过程自控系统. 化工自动化及仪表, 38-43
- [73] 蒋继穆. 我国冶炼烟气制酸进展及展望. 有色冶炼, 2003, 1: 1-4
- [74] 郑喜林. 烟气制酸系统的部分改造与完善. 有色矿冶, 1999, 2: 47-48
- [75] 蒋继穆, 孟昭华. 有色冶炼烟气制酸工业现状及发展. 有色金属, 2000, 2: 22-25

致 谢

在我攻读学位期间，以及在本课题从提出到完成的过程中，自始至终都得到了我的导师桂卫华教授和卢沛光高级工程师的指导和帮助。导师不仅在学术上给予我悉心的指导，而且在生活和工作上也给予了我无微不至的关怀，使我受益终生，特向他们致以深深的谢意！

在课题的进行过程中和完成学位论文期间，还得到了中南大学信息科学与工程学院沈德耀教授，喻寿益教授，曹卫华副教授的悉心指点，在此向他们致以衷心的感谢！

同时，在工作和完成论文的过程中，得到了韶关冶炼厂有关同志的大力支持，再次致以诚挚地谢意！

最后，感谢我的家人、同事和朋友们对我的支持和鼓励。

邵雄奇

2005 年 9 月于韶关

攻读学位期间的主要成果

参加科研项目情况：

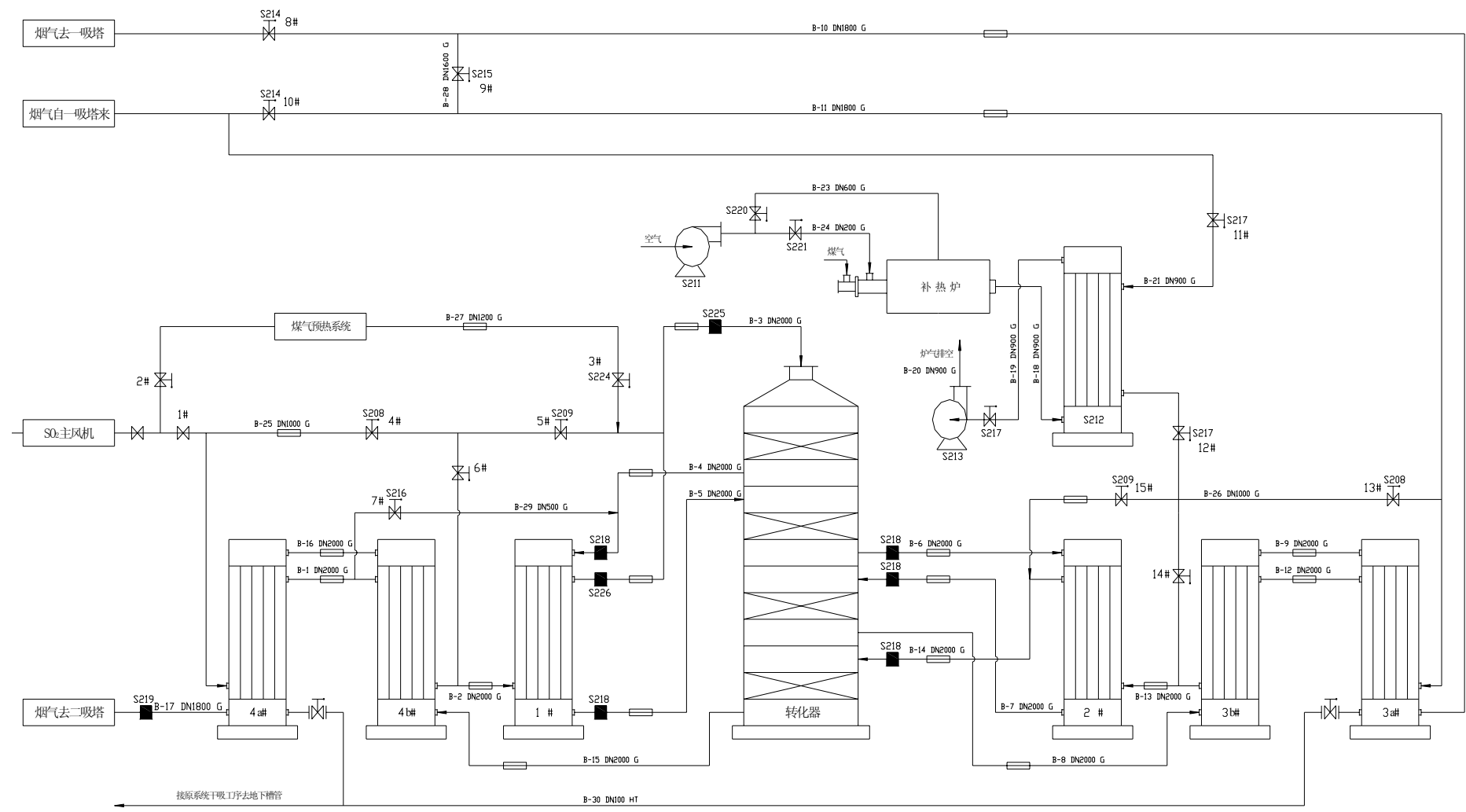
（1）2003 年参加韶关冶炼厂烟气制酸过程控制系统的设计与开发，参与风机变频调速装置的选型与调试；

（2）2001～2003 年参与项目“高压变频在韶关冶炼厂的应用与改进”，该项目获韶关冶炼厂科学技术进步奖一等奖；

（3）2002～2003 年参与项目“烧结机配料控制系统改造”，该项目获韶关冶炼厂科学技术进步奖二等奖。

发表论文情况：

邵雄奇，桂卫华. 变频器及其应用探讨. 计算技术与自动化, 2004, 23（3）：86-88



附图 1 转化工艺流程图