

摘要

现场总线使企业信息网络延伸到生产现场，掀起了控制领域的一次革命。由于其背后巨大利益的推动，其国际标准的制定出现了无可奈何的多元化趋势，致使现场总线的开放性、现场设备的互可操作性难以得到实现。与此同时，工业以太网以其成熟的技术优势，开始在现场设备层网络中得到了应用，成为真正统一现场总线标准的希望。顺应发展形势，我国制定了基于以太网的现场总线国家标准 EPA，并得到了 IEC 组织的正式承认。本论文对半干半湿法烟气脱硫工艺和控制系统的组成进行了详细介绍；对 EPA 实时工业以太网标准的体系结构、通信模型、系统组成和特性进行了相关阐述和分析；对 EPA 脱硫控制系统的网络形式进行设计；对基于 EPA 的烟气脱硫控制系统的组成、主要控制量和系统配电进行了分析和设计；对脱硫控制系统进行组态，并进行了仿真界面的设计，其监控系统具有界面友好，操作方便等特点；对模糊控制技术进行研究，并实现了参数自调整模糊 PID 在控制系统中的应用，并对影响脱硫效率的主要因素进行仿真研究。本论文旨在从理论和实践上对半干半湿法脱硫工程的设计问题进行相关研究，促进 EPA 实时工业以太网控制系统在环保控制系统方面的应用。

关键词：现场总线 EPA 工业以太网 自调整模糊 PID

Study of desulphurization control system based on EPA

Abstract

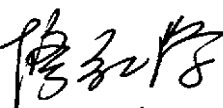
Fieldbus makes enterprise's information network extend to producing line, and it will lead to occur a renovation in control systems. Because of the enormous interests, the trend that has no way out has speared in making the international standard of fieldbus. It cannot be realized to the openness of the fieldbus and the interoperability of the field equipment. Meanwhile, Industrial Ethernet, with its advantage of nature technology, begins to be applied in the field equipment network, and allows us to see a unified fieldbus standard. In accordance to the tendency, our country establishes the fieldbus national standard based on Ethernet(EPA-Ethernet for Plant Automation), which also gains formal recognition by IEC. Technique of semi-dry and semi-wet flue gas desulphurization (FGD) and composing of control system are introduced in this paper. System structures of standard of the real time industrial Ethernet, communication model, structure of system and characteristics of EPA are researched. Composing of control system of FGD, main control objects and distribution network are analyzed and designed. Graphical interfaces and emulation interfaces of the FGD control system are designed. Interfaces of supervisory and control system is friendly and manipulation is very simple. System of automatic measurement and are designed. We research into the fuzzy control technology and apply self-tuning Fuzzy PID control to the FGD control system. We research into problems in design of semi-dry and semi-wet flue gas desulphurization (FGD)

control system from theory and practice. As a result, it accelerates application of environment protection and control systems based on EPA distributed control system.

Key words: fieldbus; EPA; industrial Ethernet; self-tuning Fuzzy PID

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除文中已经标明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：
2007 年 5 月 31 日

学位论文授权使用授权书

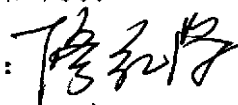
本学位论文作者完全了解我校有关保留、使用学位论文的规定，即：我校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅。本人授权武汉工程大学研究生处可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

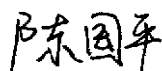
保 密 ， 在 _____ 年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密 。

(请在以上方框内打“√”)

学位论文作者签名：
2007 年 5 月 31 日

指导教师签名：
2007 年 5 月 31 日

第1章 绪论

1.1 选题背景

二氧化硫是大气环境中主要的污染物,全球 SO_2 排放量目前 3.3 亿吨。无控制大量排放造成了世界范围的大污染。据统计,每排放 1kg 的 SO_2 造成的社会经济损失约为 0.22 美元,全世界每年因此而蒙受的损失高达数百亿美元。火力发电厂是主要污染源之一,其 SO_2 排放量占 SO_2 总排放量的三分之一以上。

在目前和今后相当长的一段时间内,中国的能源结构是以煤为主,煤炭在中国能源结构中的比重高达 70%,而且中高硫煤也较多。据统计,中国 SO_2 每年排放量超过 2000 万吨,燃煤产生的 SO_2 占绝大部分,其中燃煤电厂锅炉排放的 SO_2 约占总排放量的 1/4,中小型燃煤锅炉排放的 SO_2 占总排放量的近 40%。中国的大气污染特征也是由于大量燃煤而形成的煤烟型污染。大气环境中的 SO_2 及其形成的酸沉降,是当代人类面临的重大环境问题之一。监测和研究表明,中国华南、西南地区的水酸度上升较快,酸雨频率也在增加,酸雨区面积仍在扩大。酸雨不仅严重腐蚀建筑物和工交设施,而且毁坏大面积的森林和农作物,对生态环境产生严重的影响,每年给中国造成的经济损失超过 150 亿元^[1-2]。

近年来,由于经济的快速发展,能源需求猛增,煤炭消耗量大幅增长。2000 年全国煤炭消耗量为 12.45 亿吨,2003 年 15.8 亿吨,比 2000 年增长了 27%。2000 年全国二氧化硫排放量为 1996 万吨。2003 年全国废气中二氧化硫排放总量为 2167 万吨,其中工业来源的排放量为 1880 万吨,生活来源的排放量为 367 万吨。我国燃煤消耗和二氧化硫排放有关数据,见表 1-1。

我国的烟气脱硫事业还刚刚起步,尽管具有巨大的市场前

景，但是，任务也是相当艰巨的。根据国家经贸委和电力部制定的计划，在我国实施目前最成熟的石灰石—石膏烟气脱硫技术，并在自主消化吸收基础上掌握其设计、制造和维护投资按 600 元/kW 计，需要安装脱硫装置的火电机组按 2.5 亿 kW 计，总计投资需要 1500 亿元，这就是我国的火电厂烟气脱硫市场。另外，电厂配备烟气脱硫装置后，其发电成本将明显增高。保守按 1kw·h 增加 2.5 分钱测算（相当于增加 10%~15%），2.5 亿 kW 发电机组年平均按 5000 小时的运行时间计算，烟气脱硫增加的电价成本在我国将超过 300 亿元/年^[3]。

表 1-1 我国燃煤消耗及二氧化硫排放总量统计预测^[4]

年代	煤炭消耗量（亿吨）		二氧化硫排放量（万吨）	
	全国	其中：火电厂	全国	其中：火电厂
2003 年	15.8	8.5	2167	1200
2005 年	18	10	2500	1600
2010 年	22	14	3500	2200
2020 年	30~40	20~25	4780	3100

因此，在我国开展烟气脱硫工作，其道路无疑也是颇为艰难的。除非经济实力足够强大，否则只能通过技术创新，研究开发新的、适合我国国情的技术途径，降低脱硫装置的投资和运行成本^[5]。

综上所述，解决我国的烟气脱硫事业可以结合我国的国情，走有中国特色的道路。解决工业污染的脱硫技术应当结合世界上先进的技术，结合具体的工程条件，是该技术尽早国产化，为我国环保事业做出贡献。

1.2 本课题研究的意义及内容

本课题是以国家 EPA 科技成果为依托、环境保护公司实际工程项目为背景。目前我国各个省市地区，强调社会和谐发展和生态保护，各个地区纷纷上马脱硫，环境监测方面的项目，进行对空气及大气污染治理，市场需求较大，一些环保公司产品供不应求，工程项目目不暇接。各个燃煤发电厂对其的烟囱

的废气排放，需进行脱硫，脱酸等治理，很多厂矿上马的项目主要靠进口设备，造价较高，进行设备的国产化是改善当前状况的最好途径，该课题的研究对当前现状具有积极作用，既能作到技术含量高，成本低，并且有较大的利润空间。课题研究的重要意义在于它推广了我国第一个拥有自主知识产权的现场总线国家标准—EPA 标准的应用。

研究的内容主要包括以下几个方面：

- 1、EPA 实时工业以太网系统在脱硫控制系统中的实现。
- 2、脱硫控制系统的监控组态界面。
- 3、模糊控制理论在脱硫控制系统中的应用。

创新点：

EPA 实时工业以太网标准应用于脱硫装置控制环护系统的研究在国内、外尚属首例。

第2章 脱硫工艺

目前，世界燃烧所采用的脱硫工艺多种多样，达数百种之多。按脱硫工艺在生产中所处的部位不同可分为：燃烧前脱硫、燃烧中脱硫和燃烧后脱硫即烟气脱硫。在这些脱硫工艺中，有的技术较为成熟，已经达到工业应用的水平，有的尚处于实验研究阶段。

燃烧前脱硫属于洁净煤燃烧。燃烧中脱硫是相关锅炉的改造或选型，比如目前比较热的循环流化床（CFB）锅炉等。燃烧后脱硫即烟气脱硫（FGD）是电厂控制污染气体排放的主要技术手段。目前已经达到工业应用水平的烟气脱硫技术有十余种，大致可分为干法和湿法^[6-10]。

几种主要脱硫工艺的比较见下表 2-1。

表 2-1 几种主要脱硫工艺的比较

工 艺	水耗	蒸汽	新增电耗	占电厂用电	占 地 面 积	单 位 投 资	占电厂投资	运 行 费 用
	t/h	t/h	kwh/h	%	m ²	元/kw	%	元/吨 SO ₂
石灰石-石膏法	45	2	2000	1.5	2700-3000	600	15	850
喷雾干燥法	40		1300	1.0	1500-1800	500	12	1421
LIFAC	40		700	0.6	300-500	250	5-7	850
CFB	40		650	0.5	300-500	250	5-7	600
BGBS	20	2	200	0.15	200-300	200	3-5	400

- (1) 湿法的脱硫效率高，但占地面积要求高；
- (2) 喷雾干燥法需要制石灰浆池，并对石灰纯度要求高且稳定；
- (3) 采用 LIFAC 法，钙硫比高，导致运行费高；
- (4) 采用 CFB 法时，由于脱硫灰浓度高，必须大幅度提高除尘效率，造成除尘系统的投资和运行费用很高；

(5) 采用 BGBS 法，投资和运行费用低，且脱硫灰可以直接利用有利于系统运行。

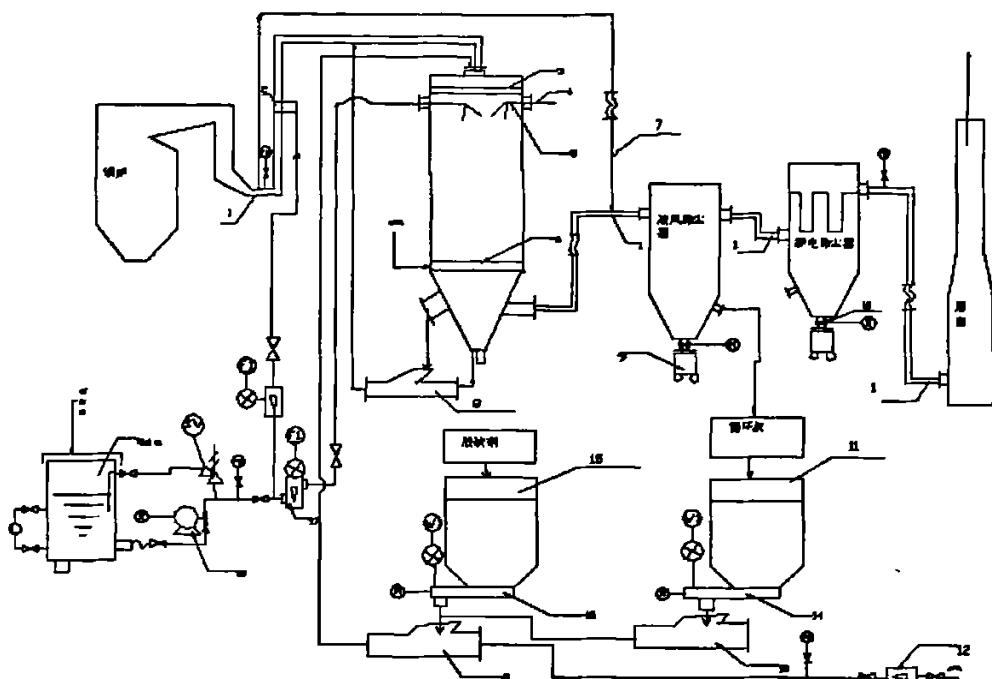
半干半湿法脱硫工艺与国内外同类技术（湿法、干法、半干法）相比，具有投资少，建设费用低，运行费低，脱硫效率较高等特点。如同国外引进消化的 NID 法相比，每整吨投资是该法的 80%，运行成本是该法的 75%。它克服国外的旋转喷雾法（SDA）喷嘴的磨损，对脱硫剂钙含量要求低并省去了制浆系统；以及炉内喷钙增湿活化法（LIFAC）Ca/S 比过高的缺点，在保持二者优点及达到湿法脱硫技术脱硫效率的条件下，仍具有设备系统简单，占地面积少、投资低、运行费低、易操作和维修，脱硫副产物（脱硫灰）可用于建材生产等优点。

结合半干半湿法脱硫工艺的优点，本文基于半干半湿法脱硫工艺对控制装置进行研究。

2.1 半干半湿法烟气脱硫技术

2.1.1 半干半湿法脱硫工艺

半干半湿法脱硫工艺特点^[10-11]：本技术采用锅炉废水进行增湿降温，利用锅炉蒸汽输送脱硫剂及脱硫灰，并激活粉煤灰中 10%以上的碱性物质，降低脱硫剂（CaO）的用量，保证在 $Ca/S < 1$ 的前提下，脱硫效率稳定在 80%~95%的范围内。脱硫工艺见下图 2-1：



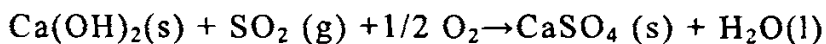
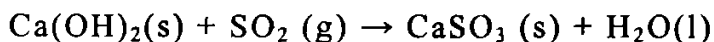
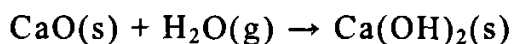
1、尘、SO₂取样口（4处） 2、烟道内喷水雾 3、烟气分布器 4、塔内喷水阀栏（5个）
5、水喷嘴 6、大灰块破碎盘 7、旁路系统 8、文丘里管 9、灰斗 10、星形给料机
11、脱硫灰粉仓 12、蒸汽流量计 13、文丘里管（自吸式） 14、定量螺旋给料机（脱硫灰）
15、脱硫剂粉仓 16、定量螺旋给料机（脱硫剂） 17、水流量计 18、高压给水泵 19、储水池

图 2-1 BGS 脱硫工艺流程图

2.1.2 半干半湿法脱硫系统组成

半干半湿脱硫系统主要由四部分组成：脱硫塔、制粉输送系统、喷水雾系统和投活性炭系统。

1、脱硫塔：塔直径 1.4m，高 11m，为碳钢结构，塔体内部为高温防耐磨涂料，防止气体被酸性气体腐蚀，同时也防止烟尘因流速过快而磨损塔体。脱硫塔的主要功能为脱硫反应提供适宜的环境，使气、固、液三相在塔内充分反应，从而脱除烟气中的酸性气体 SO₂。主要反应如下：



脱硫塔由塔内烟气分布器、塔底灰渣输送系统组成。烟气从塔顶进入脱硫塔内与蒸汽输送的脱硫剂、脱硫灰混合，一同进入塔内气体分布器，在气体分布器中与喷水系统的水雾充分接触，创造气、液、固三相反应条件，使 SO_2 同 CaO 、 H_2O 发生反应，生成 CaSO_3 、 CaSO_4 等产物，通过塔的高度控制反应时间，使反应得以完成。烟气进入塔内，烟气流速由原来的 15-25m/s 下降到 2-3m/s，使烟气内较大的粒子发生沉降，因此塔体本身又具有除尘作用。

2、制粉输送系统：由粉料罐、震动电机、星型给料机、螺旋给料机、文氏输灰器、蒸汽管路、压力传感器等设备组成。制粉系统的作用是将 CaO 块料经消化、磨细(100-200目)，使 CaO 块料变成 CaO 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉料，通过蒸汽输送到塔顶部与烟气混合。在蒸汽输送过程中， CaO （包括过烧 CaO 和粉煤灰中的 CaO ）与蒸汽发生反应生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，本身具强吸湿性，从而使进入塔内的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 粉料含有较大的水分，从而降低了 SO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的反应活化能，达到反应完全的目的。

(1) 粉料罐为直径 2.0m，高 5.29m，重 15.6t，有效容积 6.6m^3 ，用于盛放脱酸剂，在距锥底 1.0m 处安放了物位开关，当物料料位下降达物位开关时物位开关发出信号，通知工作人员在 24 小时内向罐内添加脱酸剂。粉料罐的侧面有一根进料管和一根出气管，散装水泥车利用压缩空气通过进料管向罐内添加石灰时，排气管向外排气。在罐体的锥底两侧安放了通料孔，它的主要作用为物料在锥斗处形成搭拱，而震动电机也不能破坏拱桥时，采用人工的方法，通过通料孔利用钢钎破坏拱桥，使物料流通顺畅。

(2) 震动电机安装在粉料罐的侧壁，它定时震动避免罐内物料搭桥，使物料流通顺畅。

(3) 星型给料机也称锁气器，它输送物料的同时起到密封的作用，防止文氏输灰器里产生的负压把物料的吸走，同时也起到定量给料的作用。

(4) 螺旋给料机通过螺旋叶片的旋转输送物料，它连接在星型给料机的下端，把星型给料机的旋出的物料输送给文氏输灰器。

(5) 星型给料机和螺旋给料机都是由电磁调速电机和减速箱控制，通过调整电磁调速电机的转速，调整给料机的出料量。

(6) 文氏输送器是投粉系统的关键设备，蒸汽通过文丘里管后使进料口处产生负压，把给料机送出的物料吸入管内并输送回塔内。文丘里产生的动力来源于蒸汽，蒸汽压力越高产生的压力愈大，输送的物料越多。蒸汽物料上的压力使传感器用于检测管路内的蒸汽压力，当压力小于一定值时，则系统自动关闭给料机，避免管路堵塞。输送管路的弯头部分和文丘里的主体均为铸石结构，具有很好的耐磨性延长了管路的使用寿命。

3、喷水雾系统：由高压水泵、储水罐、液位开关、电磁流量计、压力传感器、管路、阀门、喷嘴等组成。其作用是将水以雾状喷入烟道及塔内，达到降低温距、在 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及烟尘表面覆水膜的作用。由于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 表面覆水膜，使气、固反应变成了气、液、固三相的反应，使分子反应变成了部分离子反应，进而降低反应的活化能，缩短了反应时间，有利于完全反应；由于喷水后降低了烟气温度，使水蒸发速度下降，也有利于 SO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的反应完全。喷水的另一作用是使烟气中烟尘增重、增湿，利于发生烟尘之间的凝集，使小粒子变成大粒子，而这些大粒子利于在低烟速条件下沉降于塔底，因此塔体具有除尘作用。

(1) 水泵是喷雾系统的主要部件，系统设计选用的为计量泵，型号为 LJ4—800/4.0，流量为 800l/h，排出压力为 2.5-4.0Mpa，电机型号为 Y(Yb)112M-4B5，功率为 4KW，进口直径为 32mm。

(2) 储水罐的直径为 1.2m，容积为 1.5m^3 ，可供最大流量时系统两小时用水，给水管内有自动补水阀，保持液面在一定水平，同时其下部有液位开关，当给水管路出现故障，液面到达液位开关时，也为开关发出信号，在主控制室内发出信号报警，

通知工作人员检查原因并排除。

(3) 电磁流量计是计量系统工作时喷雾系统向塔内喷加的水量，流量计工作时发出 4-20mA 的信号，再自控系统的显示屏上，显示此时的喷水量。系统通过调节喷水量来调整反应塔内的温度。

(4) 压力传感器用来测量管路内水的压力，通过维持一定的水压，从而保证喷嘴喷雾粒径；计量泵在变频器的控制下，通过改变出水量来改变管路内的压力。

(5) 喷嘴在水管路的末端，水在一定压力下通过喷嘴后变成雾状的液滴，这些液滴在烟气中汽化，使烟气温度降低，同时雾状液滴参与脱硫反应。

4、投活性炭系统：投活性炭输送系统由活性炭储罐、物位开关和自吸式输送器组成。投活性炭系统主要利用烟道产生的负压把活性炭吸入烟道内，把烟气中的二恶英吸附下来。

(1) 活性炭储罐用来储存活性炭，以吸附从烟道中出来的二恶英；其内部装有物位开关，当活性炭物位下降达物位开关时，物位开关发出信号，通知工作人员在 24 小时内向罐内添加活性炭。

(2) 自吸式输送器利用烟道烟气产生的负压，输送器的末端与空气相连，调节吸入空气量来调节输送器进料口的入料量，这种方法既便于调整又节约能源。

2.2 半干半湿法脱硫的特点和技术经济指标

半干半湿法脱硫技术具有流程简单、无废水排放、占地少、设备系统性强便于自控的等优点。35t/h 示范工程（电站锅炉脱硫除尘）主要技术指标见表 2-1。

表 2-1 半干半湿法技术经济指标

序号	项目名称	指标	备注
1	烟气体积流量	60415 Nm ³ /h	
2	烟气温度	141℃	
3	脱硫前烟气中 SO ₂ 排放浓度	1071 mg/m ³	57068 Nm ³ /h
4	脱硫后烟气中 SO ₂ 排放浓度	235 mg/m ³	50094 Nm ³ /h
5	脱硫效率	80.7~95%	
6	SO ₂ 排放量	11.77 kg/h	
7	除尘后烟尘排放浓度	188 mg/m ³	
8	系统除尘效率	97.2%	
9	Ca/S	0.95~1.0	
10	生石灰用量 (49.18%)	121 kg/h	
11	系统用水量	2.2 t/h	锅炉排污废水
12	系统电耗	9 kW/h	
13	总投资	210~300 万元	
14	年运行成本	20.89 万元	
15	脱硫成本 *	348(308 #) 元/吨·SO ₂	

*: 对于灰中含煤量很低且有废热蒸汽的锅炉, 脱硫成本为 396 (357#) 元/吨·SO₂

对于灰中含煤量很低且无废热蒸汽的锅炉, 脱硫成本为 540 (500#) 元/吨·SO₂

#: 带此符号的数均为考虑污水处理费后的脱硫成本。

在实际工程应用中半干半湿法还具有如下特点:

- (1) 设备费比 SDA 低 50%，比 LIFAC 法低 10%；随锅炉吨位的增加，单位整吨的脱硫工程及运行费用下降；
- (2) 脱硫效率可在 80-95%内变化（根据用户要求和当地排放标准），系统阻力 $\leq 600\text{Pa}$ ；
- (3) 脱硫剂中钙含量要求 $\geq 50\%$ ；
- (4) 喷嘴只喷水，其使用寿命是 SDA 法的 20 倍以上（相同材料）；
- (5) 不影响锅炉的出力；
- (6) $\text{Ca/S} \leq 1.0$ ；
- (7) 脱硫灰可制砖，制砖成本比粉煤灰制砖低 20%；
- (8) 占地面积 $< 300\text{m}^2$ ；
- (9) 半干半湿法烟气脱硫工艺运行费用 ≤ 600 元 / 吨 $\cdot\text{SO}_2$ 。

应用范围：

从半干半湿法的特点和技术经济指标可知，半干半湿法脱硫技术适用于煤中硫含量在 3%以下，锅炉周边空地小，水资源不充足的大中型工业锅炉烟气脱硫用户。

2.3 半干半湿法脱硫后产品利用

半干半湿法的脱硫副产物与烟尘一同由除尘器（静电或布袋除尘器）收集，这些混合物中的成分为 SiO_2 、 CaSO_3 、 CaSO_4 、 CaO 、 Ca(OH)_2 及金属氧化物，因此混合物具有制造新型建材的条件。在“九五”工业性实验中，已将这些混合物再加少量的添加剂用高压蒸汽养护法制成了砖，它与粉煤灰制砖的不同之处在于前者制建材不加 CaO ，而后者需加 CaO 、 CaSO_4 等物质，因此前者使制建材的成本有较大的降低。可见，半干半湿法脱硫技术为脱硫副产物的资源化创造了有利的条件。

第3章 EPA 结构组成及其特性

EPA (Ethernet for Plant Automation), 是由浙大中控、浙江大学主持, 中国科学院沈阳自动化所、重庆邮电学院、大连理工大学、清华大学、上海工业自动化仪表研究所等共同研制的一种新一代的基于以太网技术的现场总线标准。通过对以太网技术应用于工业控制现场设备间通信的实时性、总线供电、互可操作、可靠性与抗干扰能力、网络安全性等关键技术的攻关, 将以太网直接应用于工业控制现场设备间的通信。同时, 通过制定基于以太网技术的工业现场设备数据通信标准, 发展拥有我国自主知识产权的现场总线技术, 改变目前我国现场总线研究开发所处的跟踪研究现状, 实现我国工业控制网络技术的跨越式发展。目前, 该 EPA 标准已经通过了 TC124/SC4 的技术审查, 成为我国第一个拥有自主知识产权的现场总线国家标准并提交 IEC 作为 PAS 标准予以发布。同时, 该标准也被正在制定的实时以太网国际标准 IEC61784-2 收录。这是迄今为止, 中国工业自动化领域第一个被国际认可和接受的标准。

EPA 标准针基于以太网 (IEEE802.3) 和无线局域网 (IEEE802.11)、蓝牙 (IEEE802.15) 等信息网络 COTS (Commercial-Off-The-Shelf) 通信技术以及 TCP (UDP) /IP 协议, 适用于工业自动化控制系统装置与仪器仪表间、工业自动化仪器仪表间数据通信。

3.1 EPA 系统体系结构

3.1.1 EPA 系统总体结构

EPA 分布式网络控制系统的体系结构^[12]如图 3-1、图 3-2

所示，包括控制室的操作站、工程师站，以及现场的 EPA 现场控制器、EPA-HUB、EPA 现场设备通信模块（如符合 AI、AO、DI、DO、电动执行机构等通信模块）及其传统模拟变送器、执行机构等现场设备，以及网络部件等组成。

在网络层次上，EPA 网络可以分两层，即 EPA 现场设备层网络和 EPA 控制层网络。

(1) EPA 控制层网络是系统的主干网，由通用以太网构成，通常可形成（冗余）环网，以提高系统可靠性。

(2) EPA 现场设备层网络则采用由网络供电的以太网，EPA 现场设备通信模块 EPA 现场设备层网络取电，并通过 4~20mA 线缆向模拟变送器、执行机构提供 24V 直流电源。

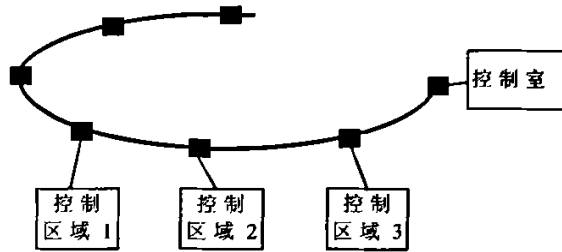


图 3-1 EPA 系统总体结构图

在系统结构上，EPA 系统将工业控制现场划分为若干个区域：

(1) 每个区域由 EPA 现场控制器、EPA-HUB、EPA 变送器、EPA 执行机构等组成，可实现互相之间的通信，并可独立完成控制系统中某一部分的测量与控制功能。

(2) 各个控制区域通过 EPA 现场控制器连接到主干网上，与控制室内的操作站、工程师站交换过程测量与控制信息、组态信息等。

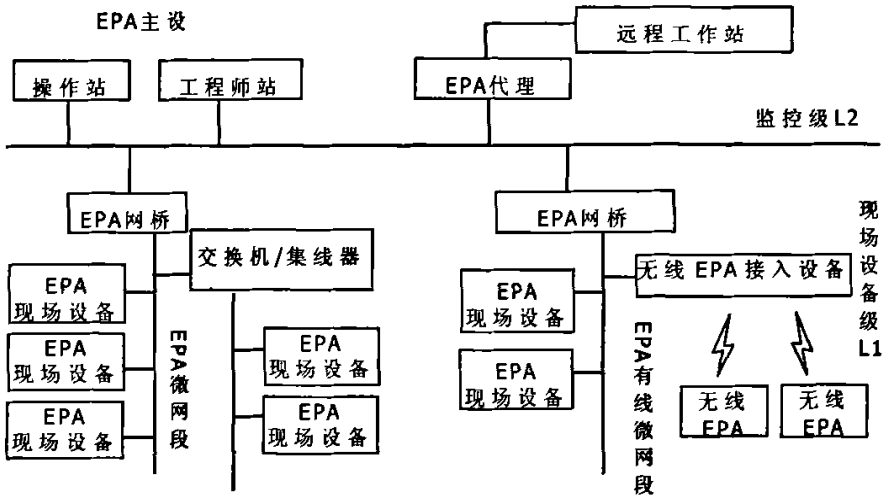


图 3-2 EPA 系统网络拓扑结构示例图

EPA 网络拓扑结构（如图 3-2）由两个网段组成：监控级 L2 网段和现场设备级 L1 网段。

现场设备级 L1 网段用于工业生产现场的各种现场设备（如变送器、执行机构、分析仪器等）之间以及现场设备与 L2 网段的连接；监控级 L2 网段主要用于控制室仪表、装置以及人机接口之间的连接。

L1 网段和 L2 网段仅仅是指它们在控制系统中所处的网络层次关系的不同而划分的，它们本质上都遵循同样的 EPA 通信协议。对于处于现场设备级 L1 网段在物理接口和线缆特性上必须满足工业现场应用的要求。此外，无论是过程监控层 L2 网络还是现场设备层 L1 网段，均可分为一个或几个微网段。

一个微网段即为一个控制区域，用于连接几个 EPA 现场设备。在一个控制区域内，EPA 设备之间互相通信，实现特定的测量与控制功能。一个微网段通过一个 EPA 网桥与其他微网段相连。

一个微网段可以由以太网、无线局域网或蓝牙三种类型网络中的一种构成，也可以由其中的两种或三种类型的网络组合

而成，但不同类型的网络之间需要通过相应的网关或无线接入设备连接。

3.1.2 EPA 系统特点

系统特点：

(1) 确保 EPA 通信的实时性

每个控制区域的 EPA 现场控制器与主干网相连，并通过 EPA 现场控制器与其他控制区域隔离，即每个控制区域内，EPA 变送器、EPA 执行机构以及 EPA 现场控制器之间的通信流量（包括广播信息）不会占有其他区域和主干网的网络资源。

因此，每个控制区域的网络负荷均可以控制在较小（小于 5%）的范围内，测试表明，每个控制区域内，以太网报文之间发生的碰撞很少，从而大大提高了通信实时性。

(2) 增强了系统安全性

每个控制区域中，具有网络隔离功能的 EPA 现场控制器除了执行测量、控制运算功能外，还可能通过报文过滤到网络隔离的安全功能，即只有 EPA 现场控制器可与 EPA 主干网上的其他设备（其他区域控制器、操作站、工程师站等）直接通信，控制室的工程师站需要对 EPA 变送器、执行机构等现场设备下载组态信息时，必须通过 EPA 现场控制器进行报文过滤；反之，EPA 变送器、执行机构等需要向 EPA 主干网上传报警、设备状态及其他信息时，也需要通过 EPA 现场控制器进行报文过滤，以防止系统外部意外入侵。

(3) 提高了系统可靠性

系统控制功能遵循“总体分散、局部集中”的原则。所谓“总体分散”，即系统控制功能的实现将不再像 DCS 那样由主控制站对系统中的所有回路进行控制运算，而是由分散在各区域控制器完成，同时大大提高了系统可靠性，任何一部份的故障不会影响整个系统的正常运行；“局部集中”则是指将控制现场分为若干控制区域，每个控制区域由一个区域控制器负责

对本区域内的控制和管理，可降低 EPA 现场设备的技术难度和成本。

3.2 EPA 设备

EPA 控制系统中的设备有 EPA 主设备、EPA 现场设备、EPA 网桥、EPA 现场控制器、EPA 代理、无线接入设备这几类。

1、 EPA 主设备

EPA 主设备是通过监控层 L2 网段上的 EPA 设备，具有 EPA 通信接口，不要求具有控制功能块或功能应用进程。EPA 主设备一般指 EPA 控制系统中的组态、监控设备或人机接口等。EPA 主设备的 IP 地址必须在系统中唯一。

2、 EPA 现场设备

EPA 现场设备是指处于工业现场设备应用环境的设备，如变送器、执行器、开关、数据采集器、现场控制器等。EPA 现场设备必需具有 EPA 通信实体，并包含至少一个功能块实例。EPA 现场设备的 IP 地址必须在系统中唯一。

3、 EPA 网桥

EPA 网桥是一个微网段与其它微网段连接的设备。一个 EPA 网桥至少有两个通信接口，分别连接两个微网段。EPA 网桥是可以组态的设备，具有两大功能：一是通信隔离功能，一个 EPA 网桥必须将其所连接的两个微网段内本地所有通信流量限制在其所在的微网段内，而不占用其它微网段的通信带宽资源。这里所致的通信流量包括以广播、一点对多点传输的组播以及点对点传输的单播等所有类型的通信报文所占的带宽资源；二是报文转发与控制功能，一个 EPA 网桥还必须对分别连接在两个不同微网段的设备之间互相通信的报文进行转发与控制，即连接在一个微网段的 EPA 设备与连接在其它微网段的 EPA 设备进行通信时，其他通信报文由 EPA 网桥负责控制转发。

4、EPA 现场控制器

系统控制功能遵循“总体分散、局部集中”的原则。所谓“总体分散”，即系统控制功能的实现将不再像 DCS 那样由主控制站对系统中的所有回路进行控制运算，而是由分散在各区域的区域控制器完成，同时大大提高了系统可靠性，任何一部分的故障不会影响整个系统的正常运行；“局部集中”则是指将控制现场分为若干控制区域，每个控制区域由一个区域控制器负责对本区域内的控制和管理，可降低 EPA 现场设备的技术难度和成本。

EPA 分布式网络控制系统的现场控制器是整个控制系统的软硬件核心，负责协调控制区域的所有软硬件关系和各项控制任务，完成控制区域内的 I/O 信号处理、控制计算、与上下网络通信控制处理、冗余诊断等功能（当然各个控制区域之间，还可以通过具体数据交互实现跨网段的控制功能），主控制单元的功能和性能将直接影响系统功能的可用性、实时性、可维护性和可靠性。

5、无线 EPA 接入设备

无线 EPA 接入设备是一个可选设备，由一个无线通信接口（如无线局域网通信接口或蓝牙通信接口）和一个以太网通信接口构成，用于连接无线网络与以太网。

6、无线 EPA 现场设备

无线 EPA 现场设备具有至少一个无线通信接口（如无线局域网通信接口或蓝牙通信接口），并具有 EPA 通信实体，包含至少一个功能块实例。

7、EPA 代理

EPA 代理是一个可选设备，用于连接 EPA 网络与其它网络，并对远程访问和数据交换进行安全控制与管理。

8、现场 I/O 设备

在工业控制中，通常采集到的信号有两类：一类是电压或电流模拟信号；另一类是开关量或数字脉冲量（开关量、脉冲

量都属于数字信号)。模拟信号又包括流量信号、压力信号、液位信号、温度信号等许多类型,其中对于流量、液位、压力等信号通过现场变送器转换成标准 II 型电流、电压信号(包括 0—10mA 的电流信号和 0—5V 的电压信号)和标准 III 型电流、电压信号(包括 4—20mA 的电流信号和 1—5V 的电压信号)。而温度信号的采集,主要包括用热电阻(Pt100、Cu50 等)采集的温度信号和用热电偶采集的温度信号。输入的模拟信号必须经过模/数转换器(ADC: Analog-DigitalCoverter)转换成数字量,才能被微处理器 CPU 所接受。同样输出控制量信号也必须是数字信号,需经过数/模转换器(DAC: Digital-AnalogCoverter),将数字信号转换成模拟信号,再送入到控制器去控制生产设备的运行。

3.3 EPA 通信

3.3.1 EPA 通信模型

EPA 通信模型参照 ISO/OSI 通信参考模型,取其物理层、数据链路层、网络层、传输层、应用层,并在应用层之上增加用户层(采用 IEC61499/61804 标准),在网络层和传输层之间增加 EPA 实时通信管理接口,共构成六层结构的通信模型^[13-15]。

EPA 通信结构模型与 ISO/OSI 七层通信结构模型之间的关系,如表 3-1 所示。

表 3-1 EPA 通信模型同 ISO/OSI 七层参考模型比较

ISO OSI 七层参考模型	EPA 通信结构模型
	(用户层)用户应用进程
应用层	HTTP、FTP、DHCP、SNTP、SNMP、EPA 应用层规范、EPA 管理功能块
表示层	未使用
会话层	

续表 3-1

传输层	TCP/UDP
网络层	IP
数据链路层	实时通信调度接口
物理层	IEEE802.3/IEEE802.11/IEEE802.15

(1) 物理层和数据链路层

EPA 的物理层与数据链路层，为 EPA 提供数据传输物理通道以及多个设备共享通信信道的机制，并定义了数据帧的同步，书记传输错误的校验与纠错等。本标准中采用了 IEEE802 协议集，包括 IEEE802.3、IEEE802.11 和 IEEE802.15，但在传输介质和物理接口上增加了适用于工业生产现场的应用规则。

(2) EPA 通信调度接口

EPA 通信调度接口定义了网络层（即 IP 层）与数据链路层（或 MAC 层）之间的接口，用于控制由网络层到 MAC 层的实时数据包与非实时数据包（包括基于 HTTP、FTP 等协议的应用程序数据包）的传输调度，以满足 EPA 周期与非周期信息传输的实时性。

(3) 网络层和传输层

EPA 网络层和传输层为 EPA 应用层提供报文传输与控制的平台。本标准定义的网络层采用因特网协议，版本为带 32 位地质的 Ipv4，提供由 RFC791 定义的不可靠，无连接的数据报文传输服务。

在传输层采用 TCP(UDP)协议集，其中，UDP 协议不需要在通信两端建立连接和确认，用于 EPA 实时数据通信。而对于其他实时性要求不高、对传输的可靠性要求高的应用，可 TCP 协议，也可使用 UDP 协议。

(4) 应用层

EPA 应用层规范为 EPA 设备与控制系统、装置之间实时和非实时的传输数据提供通信通道和服务接口。它由 EPA 实时通信规范和非实时通信协议两部分组成。其中 EPA 实时通信规

范是专门为 EPA 实时控制应用进程之间的数据传输提供实时的通信通道和服务接口。而非实时通信协议则主要包 HTTP、FTP、TFTP 等互连网络中广泛使用的通信协议。

(5) 用户层

用户层直接面向用户，用户根据自己的控制逻辑需要，利用 EPA 组态软件组态不同功能块应用进程以完成各种控制策略，也可根据自己的需要组态各种非实时性应用程序的服务。

EPA 标准给出了基于以太网的工业现场控制网络的模型，属于下一代工业控制网络技术。EPA 网络全盘继承了现场总线技术的优点，包括全分散控制、互可操作、现场设备管理、自主的系统集成权等。同时由于 EPA 现场控制网络给予以太网，统一了从现场设备层到控制层、网络层的网络，实现从上到下各层信息的无缝集成，推动了企业综合自动化、信息化进程，因此具有良好的鲁棒性。

3.3.2 EPA 设备间的通信

基于 EPA 的分布式网络控制系统，分为现场设备层和过程监控层两个层次，采用了不同的通信调度方式。对于现场设备层，采取的是确定性的实时通信调度；对于过程监控层则采用 CSMA/CD 非确定性通信调度。

为了实现现场设备之间的实时通信，又能向上与企业信息网兼容，在 EPA 系统中，将通信分为实时 EPA 通信和非实时通信。其中实时 EPA 通信的信息又区分周期信息和非周期信息两大类。周期信息主要指 EPA 系统中现场设备之间传输的测量、控制与状态数据，非周期信息主要用于过程报警、趋势、变量读/写、域上/下载的数据。非实时通信包括基于 Web 的远程诊断和组态（http 协议）、文件传输（FTP 协议）、网络管理（SNMP 协议）、地质管理（DHCP）、邮件通知（SMTP）以及诸如 ARP、RARP、TFTP、ICMP、IGMP 等其他协议的信息。

EPA 系统为通信信息的发送定义了五个优先级：0、1、2、3、4，其中 0 表示最高优先级。

3.4 EPA 特性

(1) 兼容性

与 IEEE802.3、IEEE802.1P&Q、IEEE802.1D、IEEE802.11、IEEE802.15 以及 TCP/IP 协议兼容。

(2) 微网段系统结构

分利用交换技术及其它 IT 信息技术，将工业现场控制网络划分为若干个控制区域，每个控制区域即为一个微网段，最大程度地限制每个网段内的通信流量和广播风暴，以提高通信响应的实时性。

(3) EPA 网桥

本标准在每一个微网段上定义了一个网络管理器角色，作为可选项，它具有网络安全管理、网络流量限制等功能中的一个或几个功能。

(4) 确定性通信

为了满足工业自动化控制系统中的实时要求，本标准基于 IEEE802.3、IEEE802.1P&Q、IEEE802.1D、IEEE802.11、IEEE802.15，在数据链路层与网络层之间定义了一个确定通信调度接口，控制实时数据包与非实时数据包的传输，以保证实时性强的 EPA 周期信息和非周期信息（如报警信息）得到及时的传输与处理。

(5) 数据传输调度

1) 周期信息采用基于 SNTP 或 IEEE 1588 时间同步的分时确定性调度。

2) 非周期信息采用基于主站令牌的调度方法。

(6) 允许 EPA 实时信息与非实时信息并行传输

本标准允许在不影响实时性的前提下，允许非实时信息的

并行传输，使 IT 技术得以在 EPA 系统中充分应用。

(7) 分层的安全策略

对基于 EPA 的分布式现场网络控制系统，从过程监控层和现场设备层两个层次，采用不同的安全技术，如防火墙技术、网络隔离、硬件加锁等措施。

(8) 总线供电

对于便于布线的应用场合，基于 IEEE802.3af，本标准定义了基于以太网的总线/网络供电方法。

(9) 冗余

作为可选项，本标准定义了 EPA 网络冗余的相关技术，如链路冗余、设备冗余、设备的网络接口冗余，以及必要的故障检测和故障恢复功能等，以保证 EPA 系统运行的可靠性。

(10) 基于 XML 的 EPA 设备描述

采用 XML 的结构化文本语言，为不同厂家设备之间实现互可操作性，定义了一种 EPA 设备资源的描述方法。

(11) 支持 EPA 设备的即插即用和在线组态

本标准定义了 EPA 设备即插即用和在线组态所必需的 EPA 管理功能块规范。

(12) 网络拓扑

EPA 系统的网络拓扑，采用星形结构、总线形结构或环网结构，作为可选项，可进行冗余配置。

(13) 传输介质、距离、站点数

通常在工业控制现场可采用屏蔽双绞线、单模或多模光缆，或无线传输介质，取决于具体应用场合，每个网段的 EPA 站点数规模设计需要保证通信实时性要求。

(14) 通信速率

采用符合 IEEE802.3、IEEE802.11、IEEE802.15 规定的通信速率，同时在系统设计时，需要考虑各网段、各链路的通信流量需求。

第4章 EPA 脱硫控制系统的设计

4.1 脱硫控制系统网络形式

本项目的具体实施方案如图4-1所示：

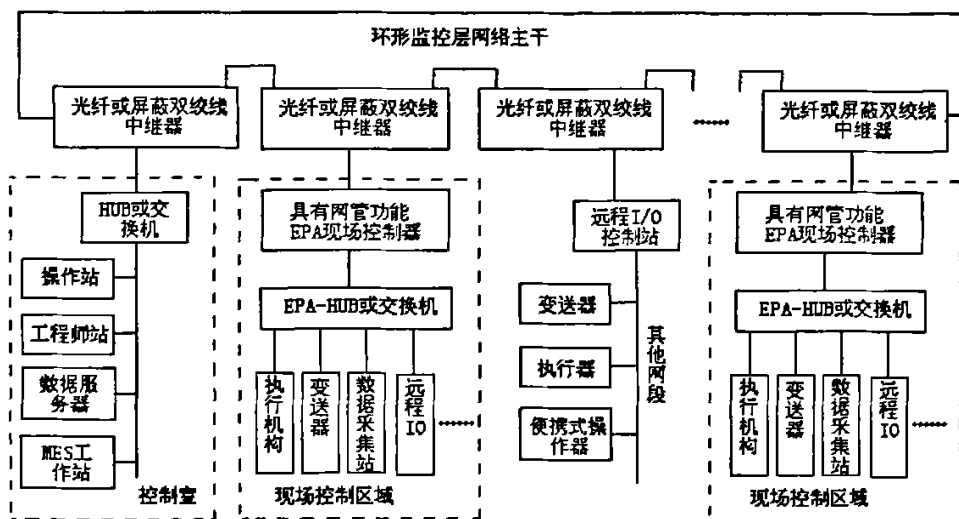


图4-1 EPA脱硫网络实施方案

在上述实施方案中，基于以太网的分布式网络控制系统分为控制室区域（Control Room）和现场控制区域（Field Control Domain）。其中，控制室区域由2台操作站、1台工程师站、1台数据服务器、1台MES工作站等控制室设备组成；而现场控制区域则由EPA现场控制器、电动调节阀、变频器、数据采集站、远程I/O、现场以太网交换机、集线器等现场设备组成，每个控制区域通过具有网管功能的现场控制站连接到主干网上。

在系统网络结构上，基于高速以太网技术的分布式网络控制系统分为系统主干网（过程监控层网络）与现场设备层网络两个层次，均基于EPA（Ethernet for Plant Automation）通信标准协议^[12]。

4.2 烟气脱硫控制系统

脱硫控制系统主要由 EPA 现场控制器对生产过程进行控制。控制系统能够完成所有的开环控制、闭环控制、自动 / 手动操作、资料存取、警报通知、顺序事件记录。在控制室内通过 JX-300X 监控软件对脱硫系统正常工况的监视与调整,以及异常工况的报警和紧急处理。

4.2.1 控制回路组成

控制系统包括水路自控即烟温自控,汽路自控即输料自控和物料补充自控。

1、水路自控:本子系统由水泵、变频器、压力传感器、液位计、流量计、电动调节阀、喷嘴和温度传感器以及烟道短路风门电机组成。具体控制要求如下:

脱硫系统开始运行后,此时电动阀门和烟道风门处于关闭状态,当经换热器换热后烟温达到 120°C 水泵开启,并保证水泵出口压力在 20kgf/cm^2 以上。EPA 现场控制器控制变频器工作,调整水泵的出水量,控制烟气出口温度在 $90\text{-}92^{\circ}\text{C}$ 。当水泵出口压力超过 35kgf/cm^2 时,则 EPA 现场控制器给烟道内喷嘴的电动阀门信号,开启电动阀门,烟道内的喷嘴开始工作,并在显示屏上给出提示。变频器继续调节水泵出口流量,控制烟气出口烟温在 $90\text{-}92^{\circ}\text{C}$ 。如果电动阀门打开并且水泵的压力达到 35kgf/cm^2 时烟温仍高于 92°C ,则发出警报,同时开启短路烟道阀门电机,将阀门开启 15° ,5min 后如果塔出口烟温仍高于 92°C ,则在烟道阀门再开启 15° 到 30° 。5min 后如果塔出口烟温仍高于 92°C ,则在烟道阀门全部开启即开启 90° ,此时再发出警报通知工作人员。

工作期间烟温低于 90°C 时,则 EPA 现场控制器输出信号给变频器,减小水泵出口流量,直到烟温恢复到 90°C 。当三个

喷嘴全部在工作时，如果压力低到 20kgf/cm^2 ，则关闭烟道喷嘴的电动阀门，停止烟道内的喷嘴工作。

水泵入口的水来自储水罐，储水罐内有自动补水阀，当罐内液位降低时补水阀打开，自动补水。在储水罐内有一个液位开关，当自来水水源出现故障液位不断下降，到达液位开关时，发出警报信号通知工作人员检查，此时罐内的水量可供水泵半小时的工作，如果半小时内液位恢复到液位开关以上，则警报解除，如果没有恢复则液位开关发出警报后半小时自动关闭水泵，同时通知工作人员打开烟气短路系统，此时电动风门自动打到全开状态。如果水箱液位在液位计以上时，运行水泵故障停运，此时立即开启另一台备用水泵。如果两台泵均不能正常运转，则立即开启短路烟道阀门，并发出警报。

为高效脱硫，必须控制反应器的温度，使稳定在 $90\text{-}92^\circ\text{C}$ 。因此，需要检测塔入口和出口的烟温、烟气流量，通过自调整模糊 PID 控制调节进入塔的水量，使反应器的温度逼近设定值。

该控制系统不仅要承担起全厂的生产过程控制，还要根据垃圾成分的变化快速调整控制程序，以保证焚烧工艺的安全性，使其不再产生二次污染^[16]。

2、汽路自控：本系统由锅炉分汽缸、压力传感器、鼓轮给料机、螺旋给料机、振动电机组成。

控制要求如下：

(1) 装置正常运行时蒸汽管路内的压力保持在 10kgf/cm^2 以上，此时各给料系统均正常工作，如果蒸汽压力低于 8kgf/cm^2 时则 EPA 现场控制器发出信号停止鼓轮给料机的运行，3min 后停止螺旋给料机运行。

(2) 设备第一次运行时，如果压力一直低于 8kgf/cm^2 则 EPA 现场控制器控制鼓轮给料机和螺旋给料机处于被锁状态不能开启。

(3) 在设备正常运行时，每一小时 EPA 现场控制器发出指令，

控制粉料罐的震动电机工作一分钟。

3、物料补充控制：粉料罐（脱酸剂和活性炭粉罐）内有料位开关，当罐内的粉料逐渐减少到达料位开关时，料位开关发出信号，EPA 现场控制器发出警报，通知工作人员在一日内将粉料罐内的料位补满。

(1) SO₂ 排放量控制

根据燃煤含硫率来对脱硫剂加料量进行粗调节，采用比值控制，以实现给定的 Ca/S 比。如环保部门对烟气监测有要求，则可安装烟气 SO₂ 在线分析仪，通过检测排出烟气中的 SO₂ 浓度和烟气流量与 SO₂ 浓度的设定值相比较，调节脱硫剂的给定量，使 SO₂ 浓度排放值逼近设定值，实现烟气中 SO₂ 排放量的控制。

(2) 脱硫剂粉末量控制

根据 SO₂ 控制回路所要求的脱硫剂给定量，自动调节螺旋给料器，使脱硫剂的给料量适合 SO₂ 控制要求。同时，EPA 现场控制器根据称重传感器得出的脱硫剂给料量、电机运行电流、水量等数据，按时调节电磁调速电机和减速机，从而实现自动控制。

4.2.2 系统低压配电

低压配电要求配电柜规格为 400×900，面板配电压表、电流表、电磁调速器、开关按钮和指示灯、手动自动切换开关，内部有电度表、各继电器等元器件。螺旋给料机和星型给料机形成互锁，只有启动螺旋给料机后才能启动星型给料机。

表 4-1 给料系统主要设备

序号	设 备	数 量	功率 (KW)	备 注
1	水泵	2	4	380v
2	螺旋给料机	1	0.75	电磁调速 380v

续表 4-1

3	星型给料机	1	0.75	电磁调速 380v
4	震动电机	1	0.55	380v
5	电动风门	1	待定	380v

4.2 组态和监控的软件实现

JX-300X 的基本组成包括工程师站 (ES)、操作站 (OS)、控制站 (CS) 和通讯网络 SCnetII。在通讯网络上挂接通信接口单元 (CIU) 可实现 JX-300X 与 PLC 等数字设备的连接; 通过多功能计算站 (MFS) 和相应的应用软件 AdvanTrol-PIMS 可实现与企业管理计算机网的信息交换, 实现企业网络 (Intranet) 环境下的实时数据采集、实时流程查看、实时趋势浏览、报警记录与查看、开关量变位记录与查看、报表数据存贮、历史趋势存贮与查看、生产过程报表生成与输出等功能, 从而实现整个企业生产过程的管理、控制全集成综合自动化 [17]。

JX-300X 覆盖了大型集散系统的安全性、冗余功能、网络扩展功能、集成的用户界面及信息存取功能, 除了具有模拟量信号输入输出、数字量信号输入输出、回路控制等常规 DCS 的功能, 还具有高速数字量处理、高速顺序事件记录 (SOE)、可编程逻辑控制等特殊功能; 它不仅提供了功能块图 (SCFBD)、梯形图 (SCLD) 等直观的图形组态工具, 又为用户提供开发复杂高级控制算法 (如模糊控制) 的类 C 语言编程环境 SCX。系统规模变换灵活, 可以实现从一个单元的过程控制, 到全厂范围的自动化集成。

4.2.1 系统组态

软件组态采用浙大中控 JX-300X 系统的组态软件 Sckey 进行。软件提供专用控制站编程语言 SCX（类 C 语言）、功能强大的专用控制模块、超大编程空间，可方便实现各种理想的控制策略。图形化控制组态软件 SCcontrol 集成了 LD 编辑器、FBD 编辑器、SFC 编辑器、数据类型编辑器、变量编辑器、DFB 编辑器。SCcontrol 的所有编辑器使用通用的标准菜单 File、Windows、Help。灵活的自动切换不同编辑器的特殊菜单和工具条。

SCcontrol 在图形方式下组态十分容易。在各编辑器中，目标（功能块、线圈、触点、步、转换等）之间的连接在连接过程中进行语法检查。不同数据类型间的链路在编辑时就被禁止。SCcontrol 提供注释、目标对齐等功能改进图形程序的外观。SCcontrol 采用工程化的文档管理方法，通过导入导出功能，用户可以在工程间重用代码和数据。

4.2.2 实时监控界面

实时监控软件 AdvanTrol 是基于中文 WindowsNT/95 开发的应用软件，支持实时数据库和网络数据库，用户界面友好，具有分组显示、趋势图显示打印、动态流程、报警管理、报表及记录、数据存档、现场控制站远程自诊断等监控功能。操作员通过丰富灵活的动态画面，可以方便准确地完成生产过程的监视、操作任务。系统监控界面如图 4-2 所示。

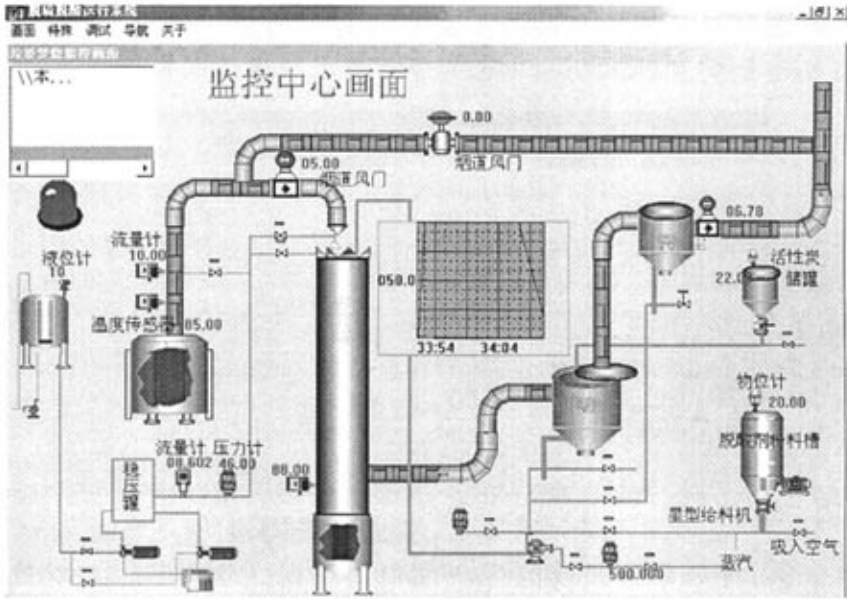


图 4-2 系统运行监控窗口

4.2.3 系统仿真界面

1、首先必须建立画面的图素与数据库变量的对应关系，变量的值改变时，在画面上以图形对象的动画效果表示出来，或者由用户通过图形对象改变数据变量的值。系统组态提供了线属性变化、填充属性变化、文本色变化、填充、缩放、旋转、水平移动、垂直移动、模拟值输出、离散值输出、字符串输出、模拟值输入、离散值输入、字符串输入、闪烁、隐含、水平滑动杆输入、垂直滑动杆输入、按下命令语言、弹起命令语言、按住命令语言等 21 种动画连接方式。如图 4-3 所示。

2、组态中的报警和事件主要包括变量报警事件、操作事件、用户登录事件和 workstation 事件。通过这些报警和事件，可以方便地记录和查看系统的报警、操作和各个工作的运行情况。图 4-4 中的表格即为报警窗。

趋势曲线用来反映数据变量随时间的变化情况。趋势曲线有实时趋势曲线和历史曲线两种。



图 4-3 建立动画连接

3、报表系统是反映生产过程的数据、状态等，并对数据进行记录的一种重要形式。组态王提供内嵌式报表系统，可以任意设置报表格式，对报表进行组态，并提供了丰富的报表函数，可以进行各种运算、数据转换、统计分析、报表打印等。另外，既可以制作实时报表和历史报表，又可以制作模块，实现多次使用，以免重复工作。

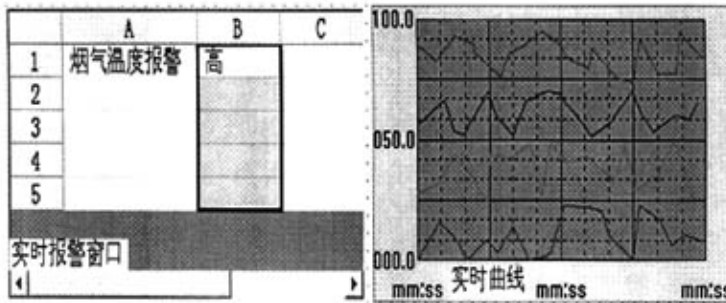


图 4-4 报警窗和曲线窗

4、控件用来执行专门的任务，每个控件是一个微型程序，

但不是一个独立的应用程序，通过控制控件的属性可以控制控件的外观和行为。组态王的控件能够创建条形图、饼形图，用户还可以自由定义 X-Y 轴曲线图、温控曲线图等。

4.2.4 网络特点

高速、可靠、开放的通讯网络 SCnetII。JX-300X 系统控制网络 SCnet II 连接工程师站、操作站、控制站和通讯处理单元。通讯网络采用总线形或星形拓扑结构，曼彻斯特编码方式，遵循开放的 TCP/IP 协议和 IEEE802.3 标准。

SCnet II 采用 1:1 冗余的工业以太网，TCP/IP 的传输协议辅以实时的网络故障诊断。其特点是可靠性高、纠错能力强、通信效率高。通讯速率为 10Mbps。

SCnet II 真正实现了控制系统的开放性和互连性。通过配置交换机 (SWITCH)，操作站之间的网络速度能提升至 100Mbps，而且可以接多个 SCnet II 子网，形成一种组合结构。

每个 SCnet II 网理论上最多可带 1024 个节点，最远可达 10,000 米。目前已实现的网络可带载 15 个控制站和 32 个其它站。

第5章 模糊控制在脱硫控制系统中的应用

众所周知，现代控制论在工业控制、军事科学、空间飞行等方面取得了可喜的成就，而且还将随着现代科学技术的发展而不断向前发展。但是将控制理论应用于各个对象，必须首先建立对象的数学模型。然而在一些复杂的控制系统中，例如在系统工程、经济学、人工智能、心理学、医学、生物学等领域中，很难建立其精确的数学模型。而对这种情况，能否绕过其精密数学模型的建立而且用其他的方法对系统进行控制呢？

模糊控制理论是由美国著名学者加利福尼亚大学教授 Zadeh L A 于 1965 年首先提出，至今仅有 30 余年时间。它以模糊数学为基础，用语言规则表示方法，由模糊推理进行决策的一种高级控制策略。它无疑是属于智能控制范畴，而且发展至今已成为人工智能领域中的一个重要分支。

1974 年，英国工程师马丹尼首先把模糊数学用于锅炉和蒸汽机的控制，使用效果良好，这一开创性的试验工作充分展示了模糊控制技术的应用前景。模糊控制技术是由模糊数学、计算机科学、人工智能、知识工程等多门学科相互渗透，且理论性很强的科学技术。

半干半湿法烟气脱硫受到液气比、吸收塔出口烟气温度的、烟气含湿量、吸收反应特性等多因素影响，较难建立精确的数学模型。模糊控制用于控制那些复杂性、非线性、时变性、不确定性和不完全性等而无法获得精确的数学模型的控制对象，可获得比较理想的动静态性能。

PID 控制以其简单可靠、容易实现以及稳态无静差等优点而广泛应用于工业过程，即使在现代控制技术飞速发展的今天，仍有很多控制回路采用 PID 控制。但是，传统的 PID 控制主要是控制具有确切数学模型的线性过程，而半干半湿法烟气

脱硫控制系统不能建立精确的数学模型，并且它还是一个时变的非线性系统，因而采用一般的 PID 控制无法实现对其进行精确控制。为了满足工业过程控制的要求，需要将 PID 控制器与智能控制相结合；而模糊控制的算法简单，用于计算机实时控制计算量很少，并且自适应模糊控制可以使控制参数和控制规则在控制过程中自动调整、修改和完善，从而使系统的控制性能不断完善，达到最佳的控制效果。针对常规 PID 控制和自适应模糊控制的特点，本章将研究自调整模糊 PID 控制器，并研究自调整模糊 PID 控制器对半干半湿法烟气脱硫控制系统的控制策略^[18-19]。

5.1 模糊控制系统的基本组成

模糊控制算法是一种新型的计算机数字控制算法，因此，模糊控制系统具有数字控制系统的一般结构形式，其系统方块图 5-1 所示：

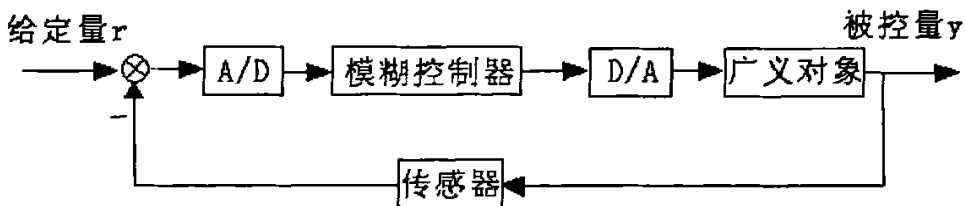


图 5-1 模糊控制系统组成^[20-21]

(1) 模糊控制器：它是整个系统的核心，实际上是一台微型计算机，主要完成输入量的模糊化、模糊关系运算、模糊决策以及决策结果的精确化等重要过程。可以说，一个模糊控制系统性能指标的优劣在很大程度上取决于模糊控制器的“聪明”程度。

(2) 输入/输出接口装置：该接口电路主要包括前向通道中的 A/D 转换电路和后向通道中的 D/A 转换电路等两个信号转换电

路。前向通道的 A/D 转换把传感器监测到的反映被控对象输出两个大小的模拟量转换成微机可以接受的数字量，送到模糊控制器进行计算；D/A 转换把模糊控制器输出的数字量转化成与之成比例的模拟量，来控制执行机构的动作。在实际应用中，选择 A/D 和 D/A 转换器主要考虑转换精度、转换时间以及性能价格等三个因素。

(3) 广义对象：广义对象包括执行机构和被控对象。执行机构包括电磁阀、液压阀、伺服电动机等；被控对象可以是线性或非线性的、定常或时变的，也可以是单变量或多变量的、有时滞货物时只得以及有强干扰的多种情况。

(4) 传感器：它也是检测装置，负责把被控对象的输出信号（往往是非电量的，如温度、湿度、压力、液位、浓度、流量等）转换成对应的电信号（模拟的或数字的）。传感器在模糊控制系统中占有十分重要的地位，它的精度往往直接影响整个控制系统的精度。因此，在选择传感器时，应注意选择精度高且稳定性好的传感器。

5.2 模糊控制器

模糊控制系统与通常的计算机控制系统的主要区别是采用了模糊控制器。模糊控制器是模糊控制系统的核心，一个模糊系统的性能优劣，主要取决于模糊控制器的结构，所采用的模糊控制规则、合成推理算法以及模糊决策的方法等因素 [22-24]。

模糊控制器主要包括输入量模糊化接口、知识库、推理机、输出清晰化接口四个部分，如图 5-2 所示。

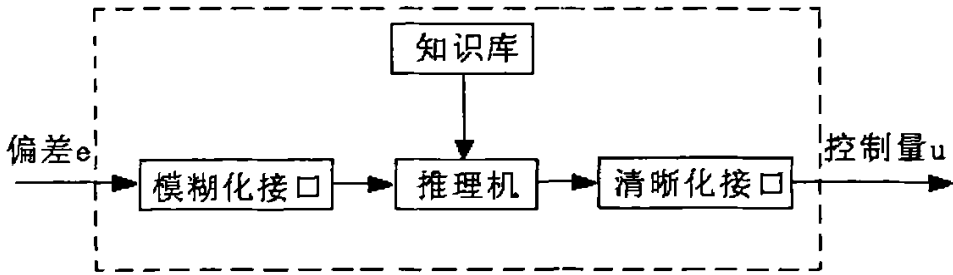


图 5-2 模糊控制器的组成^[25]

1、 模糊化接口

模糊控制器的确定量输入必须经过模糊化接口模糊化后，转换为一个模糊矢量才能用于模糊控制，具体可以按模糊化等级进行模糊化。

例如，取值在 $[a, b]$ 间的连续量 x 经公式

$$y = \frac{12}{b-a} \left(x - \frac{a+b}{2} \right)$$

变换成取值在 $[-6, 6]$ 间的连续量 y ，再将 y 模糊化为七级，相应的模糊量用模糊语言表示如下：

在 -6 附近称为负大，记为 NB；

在 -4 附近称为负中，记为 NM；

在 -2 附近称为负小，记为 NS；

在 0 附近称为适中，记为 ZO；

在 2 附近称为正小，记为 PS；

在 4 附近称为正中，记为 PM；

在 6 附近称为正大，记为 PB；

因此，对于模糊输入变量 y ，其模糊子集为 $y = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

2、 知识库

知识库由数据库和规则库两部分组成。

数据库所存放的是所有输入输出变量的全部模糊子集的隶属度矢量值，若论域为连续域，则为隶属度函数。在规则推

理的模糊关系方程求解过程中，向推理机提供数据。

规则库是用来存放全部模糊控制规则的，在推理时为推理机提供控制规则。模糊控制器的规则是基于专家知识或手动操作经验来建立的，它是按人的直觉推理的一种语言表示形式。模糊规则通常是由一系列的关系词连接而成，如 if-then、else、and、or 等。

若有 n 个模糊规则，可写成：

R_1 : if E is A_1 and EC is B_1 then U is C_1

R_2 : if E is A_2 and EC is B_2 then U is C_2

.....

R_n : if E is A_n and EC is B_n then U is C_n

其中：E，EC 是控制对象的状态变量；U 是控制变量。

3、推理机

推理机是模糊控制器中根据输入模糊量和知识库（数据库和规则库）完成模糊推理，并求解模糊关系方程，从而获得模糊控制量的功能部分。目前模糊推理有十几种方法，大致分为直接法和间接法两类。通常把隶属函数的隶属值视为真值进行推理的方法是直接推理法。其中最常用的是 Mamdani 的 max-min 的合成法。

当把知识库中的 A_i 、 B_i 、 C_i 的空间分别看作 X、Y、Z 的论域时，可以得到每条控制规则的关系：

$$R_i = (A_i \times B_i) \times C \quad (5-1)$$

R_i 的隶属函数为：

$$\mu_{R_i}(X, Y, Z) = \mu_{A_i}(x_i) \wedge \mu_{B_i}(y_i) \wedge \mu_{C_i}(z_i) \quad (5-2)$$

$$\forall x \in X, \forall y \in Y, \forall z \in Z$$

全部控制规则所对应的模糊关系，用取并的方法得到，即：

$$R = \bigcup_{i=1}^n R_i \quad (5-3)$$

R 的隶属度函数为：

$$\mu_R(X, Y, Z) = \bigvee_{i=1}^n [\mu_{R_i}(X, Y, Z)] \quad (5-4)$$

当输入变量 E、EC 分别取模糊集 A、B 时，输出的控制量变化 U。

可根据模糊推理合成得到：

$$U = (A \times B) \circ R \quad (5-5)$$

U 的隶属度函数为：

$$\mu_U(Z) = \bigvee_{\substack{x \in X \\ y \in Y}} \mu_R(X, Y, Z) \wedge [\mu_A(x) \wedge \mu_B(y)] \quad (5-6)$$

4、 清晰化接口

通过模糊决策所得到的输出是模糊量，要进行控制必须经过清晰化，接口将其转换成精确量。若通过模糊决策所得到的输出量为：

$$\underline{B}_1 = \{\underline{\mu}_C(u_1)/u_1, \underline{\mu}_C(u_2)/u_2, \dots, \underline{\mu}_C(u_n)/u_n\} \quad (5-7)$$

经常采用下班三种方法，将其转换成精确的执行量。

(1) 选择隶属度最大的原则

若对应的模糊决策的模糊集 \underline{C} 中，元素 $u^* \in U$ 满足：

$$\underline{\mu}_C(u^*) \geq \underline{\mu}_C(u), \quad u \in U$$

则取 u^* （精确量）作为输出控制量。

如果这样的隶属度最大点 u^* 不唯一，就取他们的平均值 $\overline{u^*}$ 或 $[u_1^*, u_p^*]$ 的中点 $(\overline{u_1^*} + \overline{u_p^*})/2$ 作为输出执行量（其中 $u_1^* \leq u_2^* \leq \dots \leq u_p^*$ ）。这种方法简单、易行、实时性好，但它概括的信息量少。

(2) 加权平均原则

该方法的输出控制量的值，由下式来决定：

$$u^* = \frac{\sum_i \mu_C(u_i) \cdot u_i}{\sum_i \mu_C(u_i)} \quad (5-8)$$

在这种方法中，可以选择加权系数 K_i ，其计算公式为：

$$u^* = \frac{\sum_i K_i u_i}{\sum_i K_i} \quad (5-9)$$

加权直接影响着系统的响应特性，因此，该方法可以通过修改加权系数以改善系统的响应特性。

(3) 中位数判决

在最大隶属度判决法中，只考虑了最大隶属数，而忽略了其他信息的影响。中位数判决是将隶属函数曲线与横坐标围成的面积平均分成两部分，以分界点所对应的论域元素 u_i 作为判决输出。

这种方法虽然比较充分地利用了模糊子集提供的信息量，但是计算时比较繁琐，而且缺乏对隶属度较大元素提供主导信息的充分重视，因此，这种方法在实际应用中受到了限制。

5、模糊控制器论域及比例因子的确定

一切实际系统的信号都是有界的。在模糊控制系统中，这个有限界一般称为改变量的基本论域，它是实际系统的变化范围。

以两输入单输出的模糊控制系统为例，设定误差的基本论域为 $[-|e_{\max}|, |e_{\max}|]$ ，误差变化率的基本论域为 $[-|ec_{\max}|, |ec_{\max}|]$ ，控制量的变化范围为 $[-y_n, +y_n]$ 。类似地，设误差的模糊论域为：

$$E = \{-n, -(n-1), \dots, 0, 1, 2, \dots, n\}$$

误差变化率的论域为：

$$EC = \{-m, -(m-1), \dots, 0, 1, 2, \dots, m\}$$

控制量所取得论域为：

$$U = \{-l, -(l-1), \dots, 0, 1, 2, \dots, l\}$$

若用 K_e 、 K_{ec} 、 K_u 分别表示误差、误差变化率和控制量的比例因子，则有：

$$K_e = n / |e_{\max}| \quad (5-10)$$

$$K_{ec} = m / |ec_{\max}| \quad (5-11)$$

$$K_u = y_u / l \quad (5-12)$$

5.3 模糊 PID 控制器

5.3.1 模糊 PID 控制器设计

模糊 PID 控制系统结构方框图 5-3 所示。该系统由模糊控制器和 PID 控制器组成。PID 控制器为常规 PID 控制器，其参数采用常规整定法整定。

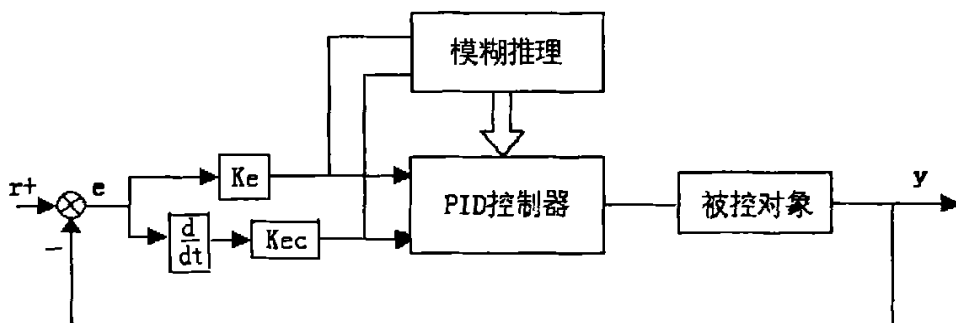


图 5-3 模糊 PID 控制系统结构框图^[20]

设偏差 e 的语言变量为 E ，其相应的模糊子集 A 的语言取值为 $\{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB\}$ 。其论域量化等级为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。设偏差变化 ec 的语言变量为 EC ，其相应的模糊子集 B 的语言取值为

{PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}。其论域量化等级为{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}。设置控制量 u 的语言变量为 U , 其相应的模糊子集 C 的语言取值为 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB}。其论域量化等级为{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}。E、EC、U 的隶属度函数 $\mu_A(e)$ 、 $\mu_B(ec)$ 、 $\mu_C(u)$ 取为分段线性函数。

根据模糊控制规则合成, 可求得模糊查询表如表 5-1 所示。其模糊控制算法编程框图如图 5-4。

5.3.2 量化因子和比例因子对控制性能的影响

在图 5-3 中, 模糊自适应控制器的输出 u_f 可表示为:

$$u_f = K_u \cdot f(K_e \cdot e, K_{ec} \cdot ec) \quad (5-13)$$

式中: K_e 、 K_{ec} —量化因子

K_u —比例因子

表 5-1 模糊查询表

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

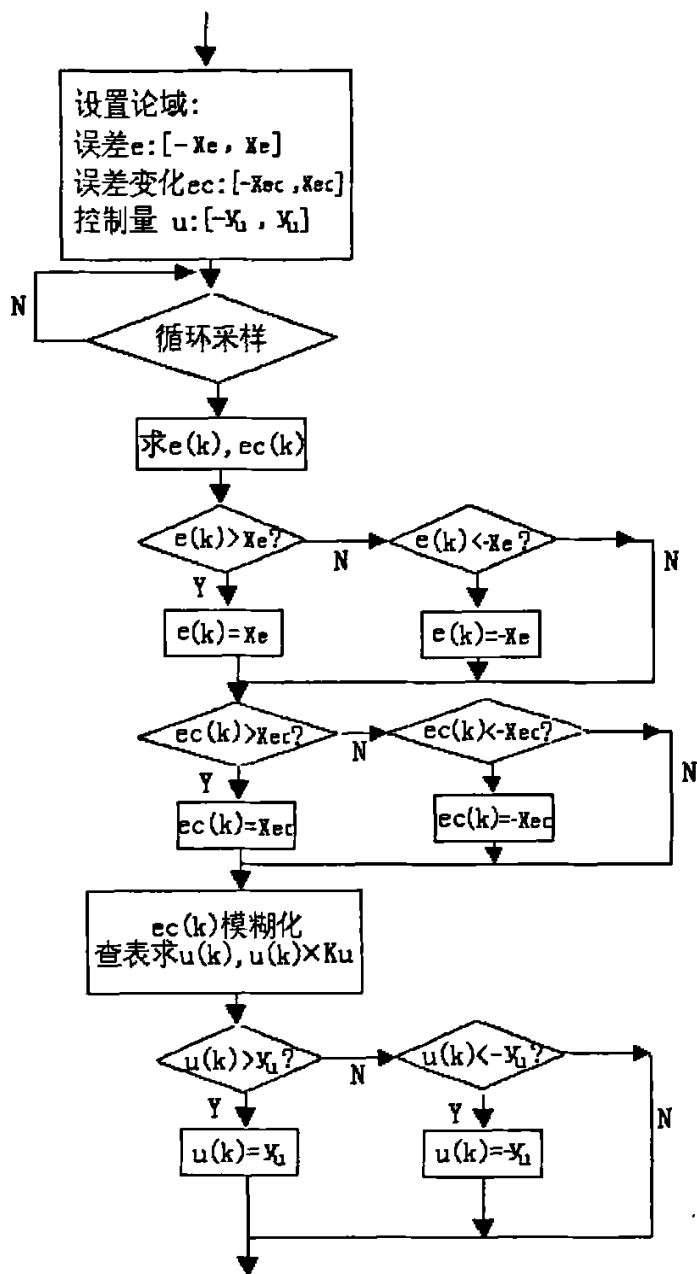


图 5-4 模糊控制算法程序框图

由此可见，合理选择量化因子和比例因子对系统的控制性能非常重要。

图 5-5 描述了误差由基本论域到模糊集论域的转变，这种

变换也是一种映射，即由基本论域中任意一点映射到模糊集论域中相近的整数点。如基本论域中的一点 x_{ei} 映射到模糊集论域中的一相近整数点 n_{ej} ，一般情况下 $K_e \neq n_{ej}/x_{ei}$ 。

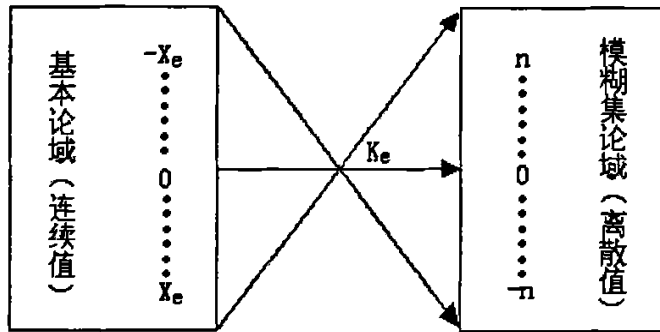


图 5-5 误差的论域变量变换

对于误差变化的量化因子 K_e 同样也是如此。这表明量化因子在两个论域变化换中，论域与基本论域中相对应的两个点间的比值不恒等于其量化因子。

由于控制量的基本论域为一连续的实数域，所以，从控制量的模糊论域到基本论域的变化，可以利用公式 $K_u = y_u / I_j$ 计算，即：

$$y_u = K_u \cdot I_j$$

式中： I_j 为控制量模糊集论域中的任一元素或为控制量的模糊集所判决得到的确切控制量， y_u 为控制量基本论域中的一个精确量， K_u 为比例因子。

由于误差及误差变化的基本论域一般很难确定，需要人为估计，这就导致在实际运行时，误差和误差变化的区间并不一定在其基本论域内，从而影响控制效果。若 e 实际运行区间为 $[e_{\min}, e_{\max}]$ ， ec 实际运行区间为 $[ec_{\min}, ec_{\max}]$ ，他们对控制性能的影响如下：

当 $[e_{\min}, e_{\max}] \subset [-x_e, x_e]$ 时，系统地输出平稳，但响应慢；

当 $[e_{\min}, e_{\max}] \supset [-x_e, x_e]$ 时，控制器的响应快，但超调大；

当 $[ec_{\min}, ec_{\max}] \subset [-x_e, x_e]$ 时，控制器对系统输出的变化

抑制减弱，即响应快；

当 $[ec_{min}, ec_{max}] \supset [-x_e, x_e]$ 时，控制器对系统输出的变化抑制增强，即响应慢；

由于模糊控制表可知，如果 K_e 、 K_{ec} 发生变化，则实际的误差或误差变化率所对应的论域上的语言值也将发生变化。一般情况下，当 K_e 、 K_{ec} 值越大，所对应的误差所取的语言值越大，相应控制器的输出（控制量的变化）所取的语言值也越大；而在误差所取语言值不变的条件下，误差变化率所取的语言值越大，相应控制器的输出所取的语言值越小。因此，可以适当调整 K_e 、 K_{ec} 的值使得 e 、 ec 的基本论域相对合理。

就系统的动态性能来说，量化因子 K_e 越大，系统的超调也越大，过渡过程也越长。因为从理论上讲， K_e 增大，相当于缩小了误差的基本论域，增大了误差变量的控制作用，导致上升时间变短，由于出现超调，使得系统的过渡过程变长。当 K_{ec} 较大时，超调量较小。 K_{ec} 越大，系统超调越小，但系统的过渡过程时间变长，实验表明 K_{ec} 对超调的抑制作用十分明显。若 K_{ec} 越小，系统上升速度增加越大，反应加快。但 K_{ec} 值取得太小，会产生很大的超调和振荡，尤其是反向超调，这同样使系统的超调时间变长。

就系统的静态性能来说，增大量化因子 K_e 、 K_{ec} 的值，可减少系统的稳态误差和误差的变化率，但不可能消除稳态误差。假设在 k 时刻误差和误差变化的量化值为 $E(k)$ 、 $EC(k)$ ，其精确量为 $e(k)$ 、 $ec(k)$ ，则有：

$$E(k) = \text{INT}(K_e \cdot e(k) + 0.5) \quad (5-14)$$

$$EC(k) = \text{INT}(K_{ec} \cdot ec(k) + 0.5) \quad (5-15)$$

当误差和误差变化都进入语言值“零”所对应的范围时，系统即进入稳态。由公式可导出误差的稳态取值范围如下：

$$|K_e \cdot e(\infty)| < 0.5$$

即：

$$|e(\infty)| < \frac{1}{2K_e} \quad (5-16)$$

同时可导出，稳态时，误差变化的取值范围如下：

$$|K_e \cdot ec(\infty)| < 0.5$$

即：

$$|ec(\infty)| < \frac{1}{2K_{ec}} \quad (5-17)$$

所以，从理论上讲， K_e 越大，稳态误差越小，调节死区也越小；反之亦然。同理， K_{ec} 越大，稳态误差变化越小，调节死区也越小；反之亦然。此外，比例因子 K_u 的大小也影响着模糊控制系统性能。在上升阶段， K_u 取得太大，上升越快，然而容易引起超调，而 K_u 取得太小，则系统的反应比较缓慢。在稳定阶段， K_u 过大将导致系统振荡。

从上面的讨论可以发现，模糊控制同常规控制一样，其动、静态特性之间存在一定的矛盾。在系统运行过程中，采用一组固定不变的量化因子和比例因子难以收到预期的控制效果，又必要在控制过程中采用改量化因子和比例因子的方法，来调整整个控制过程中不同阶段上的控制特性。

5.3.3 模糊 PID 控制系统稳定性分析

根据图 5-3 所示给出的系统，可以得到：

$$y(s) = G(s) \cdot u_f(s) \quad (5-18)$$

其中： $G(s) = G_{pid}(s) \cdot G_0(s)$

由于 $u_f(s) = f(e, ec)K_u e(s)$

$$e(s) = r - y(s)$$

所以 $G_e(s) = \frac{e(s)}{r} = \frac{1}{1 + f(e, ec)K_u G(s)}$ (5-19)

设 $G(s) = \frac{Z(s)}{N(s)}$, 则有

$$G_c(s) = \frac{e(s)}{r} = \frac{N(s)}{N(s) + f(e, ec)K_u Z(s)} \quad (5-20)$$

系统的特征方程为: $N(s) + f(e, ec)K_u Z(s) = 0$ (5-21)

由上特征方程可知, 若多项式 $N(s) + f(e, ec)K_u Z(s)$ 为稳定多项式, 在系统稳定。又因被控子系统 $G(s)$ 稳定, 其极点位于左半平面, 所以, 方程 $N(s) + K_u Z(s) = 0$ 的根轨迹各分支的起点都位于左半平面。由于根轨迹是连续的, 因此, $N(s) + K_u Z(s) = 0$ 的根轨迹必然落在 s 左半平面。又由于 $0 \leq f(e, ec) \leq 1$, 所以 $0 \leq f(e, ec)K_u \leq K_u$, 因此 $N(s) + f(e, ec)K_u Z(s) = 0$ 的根轨迹必然落在 s 左半平面, 故模糊 PID 控制系统稳定。

5.4 自调整模糊 PID 控制器的实现

5.4.1 常规 PID 控制

按偏差的偏差比例 (Proportional), 积分 (Integral) 和微分 (Derivative) 线性组合进行控制的方法, 就是 PID 控制。PID 控制器早在 30 年代末期就已经出现, 经过五十多年来不断地发展, 由模拟控制器发展到数字 PID 控制器, 已被广泛用于工业过程控制。为了改善其性能, PID 控制算法也在发展, 出现了非线性 PID 控制, 选择性 PID-PD 控制, I-PD 控制以及自适应 PID 控制算法等, 尤其是近年来又出现了专家自适应 PID 控制器, 或称为智能 PID 控制器。所有这些都表明, PID 控制作为一种最基本最常用的控制方法包括了一些本质的东西, 需要我们去认识和总结, 这对于研究和设计智能 PID 控制器是非常必要的^[19]。

1、 模拟 PID 调节器

在工业控制系统中，常常采用的模拟 PID 控制的控制规律为：

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (5-22)$$

对应的模拟 PID 调节器的传递函数为：

$$D(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) \quad (5-23)$$

其中： K_p —为比例增益，与比例带成倒数关系，即 $K_p = \frac{1}{\delta}$ ；

T_I —积分时间常数；

T_D —微分时间常数。

2、数字 PID 控制器

a) 数字 PID 位置型控制算法

根据差分方程，由式（4-22）可得数字位置型控制算式为：

$$u(k) = K_p[e(k) + \frac{T}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(i) + T_D \frac{e(k) - e(k-1)}{T}] \quad (5-24)$$

式中： T 为采样周期； k 为采样序号； $e(i)$ 为偏差。

b) 数字 PID 增量控制算法

根据上面的位置型算式，可得出数字 PID 增量型控制算式为：

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= u(k) - u(k-1) \\ &= K_p[e(k) - e(k-1)] + K_I e(k) + K_D[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \end{aligned}$$

其中： $K_p = \frac{1}{\delta}$ 称为比例增益；

$K_I = K_p \frac{T}{T_I}$ 称为积分系数；

$K_D = K_p \frac{T_D}{T}$ 称为微分系数。

为了编程方便，可将上式整理成如下形式：

$$\Delta u(k) = q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2) \quad (5-25)$$

$$\text{其中: } q_0 = K_p \left(1 + \frac{T}{T_I} + \frac{T_D}{T}\right)$$

$$q_1 = -K_p \left(1 + \frac{2T_D}{T}\right)$$

$$q_2 = K_p \frac{T_D}{T}$$

比例控制的优点是：误差一旦产生，控制器立即就有控制作用，使被控制量朝着减小误差方向变化，控制作用的强弱取决于比例系数 K_p 。比例控制的特点是对于具有自平衡性（即系统阶跃响应终值为一有限值）的被控对象存在静差。加大 K_p 可减小静差，但 K_p 过大时，会导致动态性能变坏，甚至会使用闭环系统不稳定。

积分控制的优点是：它能对误差进行记忆并积分，有利于消除静差。但它的不足之处在于积分具有滞后特性，积分控制作用太强会控制的动态性能变差，以至于使系统不稳定。

微分控制的优点是：能对误差进行微分，敏感出误差的变化趋势，增大微分控制作用可加快系统响应，使超调量减小，增加系统的稳定性。它的缺点是对于干扰同样敏感，使系统抑制干扰能力降低。

根据不同被控对象适当地整定 PID 的三个参数，可以获得比较满意的控制效果。但是，这种整定参数的过程，实际上是对比例、积分和微分三个部分控制作用的折衷。

分析常规 PID 控制可以发现，这种控制无法解决稳定性与准确性之间的矛盾，加大控制作用可使误差减小，准确性可以提高，但是降低了稳定性。反之，为了保证稳定性，限制控制作用，这样又降低了控制的准确性。

为了获得满意的控制系统性能，单纯采用线性控制方式是不够的，还必须引进一些非线性控制方式。因为，在系统动态及暂态过程中，对于比例控制、积分控制和微分控制作用的要求是不同的。所以，在控制过程中要根据系统的动态特征和行

为，采取“灵活机动”的有效控制方式，如采用变增益(增益自适应)、智能积分(非线性积分)、智能采样等多种途径。实现这些途径的重要方式是借助于专家经验、启发式直观判断和直觉推理规则。这样的控制决策有利于解决控制系统中的稳定性与精确性的矛盾，又能增强系统对不确定因素的适应性，即鲁棒性。这样的 PID 控制就成为智能控制的一个研究方向，即智能或专家自适应 PID 控制。

5.4.2 参数自调整模糊 PID 控制器

采用计算机实现的 PID 控制算法，其离散控制规律为式 5-24；其中增量式为式 5-25。此增量算式只与前 k 次采用值相关，计算量少、实时性强。但它与模拟 PID 控制器一样，存在参数修改不方便、更不能进行调整等缺陷。如果能实现 PID 控制器的参数自适应，那么就进一步完善了 PID 控制器的自适应性能。目前，较多地是采用被控对象在线辨识，然而根据一定的控制要求或目标函数，针对 PID 控制器的三个参数 (K_P 、 K_I 、 K_D) 进行在线调整。此外，还有用计算机最优化方法寻求最佳 PID 参数等方法。采用辨识方法必须建立在被控对象的精确数学模型基础上，当被控对象具有结构非线性、参数时变性与模型不确定性时，其辨识结果不一定有效。为此，提出一种用模糊控制器对 K_P 、 K_I 、 K_D 三个参数进行在线自调整模糊 PID 控制器^[27-34]。

1、参数自调整 PID 控制器结构

为了满足不同偏差 E 和偏差变化率 EC 对 PID 参数自整定的要求，利用模糊控制规则在线对 PID 参数进行修改，便构成了参数自调整模糊 PID 控制器，其结构如图 5-6 所示：

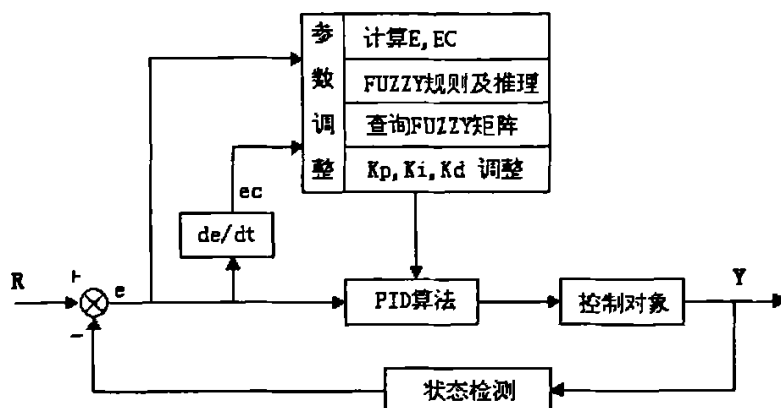


图 5-6 参数自调整模糊 PID 控制器结构图

其实现思想是先找出 PID 三个参数与偏差 E 和 EC 之间的模糊关系，在运行中不断检测 E 和 EC ，再根据模糊控制原理来对三个参数进行在线修改，以满足在不同 E 和 EC 对控制参数的不同要求。这种被控对象具有良好的动、静态性能，而计算量小，易于用单片机实现。

2、参数对系统性能的影响

由于 K_p 、 K_i 和 K_d 是表征 PID 控制器在控制过程中的比例、积分和微分作用程度的参数，因此下面从系统稳定性、响应速度、超调量和控制精度等方面特性来分析 PID 参数对 PID 控制品质的影响。

模糊整定的推理过程和常规模糊控制器类似，均根据当前特征值进行动态调整，以下分析过程的响应状态及所需的校正方向，典型的阶跃响应曲线如图 5-7 所示。通过响应曲线可以归纳出系统在被控过程中对不同的 $|e|$ 和 $|ec|$ ，参数 K_p 、 K_i 和 K_d 自整定的原则：

根据图 5-7，系统输出响应曲线分为三个部分，即图中的 1、2、3 个阶段。

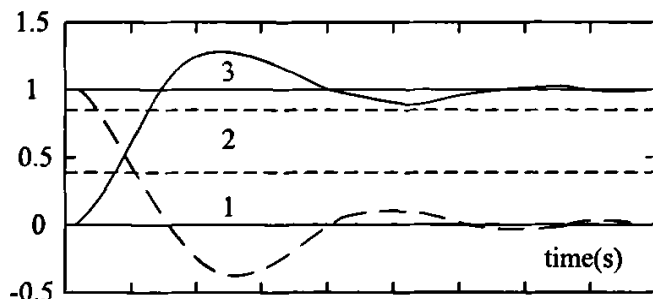


图 5-7 典型阶跃响应图

(1)当输出响应处于曲线的起始阶段时， $|e|$ 较大，为了加快系统速度，并防止因开始时 $|e|$ 的瞬间变大，可能会引起的微分溢出，应取较大的 K_p 和较小的 K_d 。另外为防止积分饱和，避免系统响应出现较大的超调，此时应取掉积分作用，取 K_i 。

(2)在响应曲线的中间阶段， $|e|$ 值中等大小，为了使系统响应的超调量减小和保证一定的响应速度，应取较小的 K_p 、 K_i 、 K_d 的数值要取得适中。

(3)在响应的最后阶段， $|e|$ 较小，为使系统具有良好的稳态性能，应增大 K_p 和 K_i 的数值，同时避免输出响应在设定值附近振荡，并考虑系统的抗干扰性能，应适当地选取 K_d ，其原则是：当 $|ec|$ 值较小时， K_d 取大一些，当 $|ec|$ 值较大时， K_d 取较小的数值，通常 K_d 为中等大小。

因此由上述分析可得表 5-2 到表 5-4 的模糊规则。

表 5-2 K_p 模糊规则表

K_p \ EC	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E							
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	ZO
NM	PB	PB	PB	PB	PM	ZO	ZO
NS	PM	PM	PM	PM	PS	ZO	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NS	NS
PS	PS	PS	NS	NM	NM	NM	NM

续表 5-2

PM	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB
PB	ZO	ZO	NM	NB	NB	NB	NB

表 5-3 K_i 模糊规则表

K_i \ EC		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E \		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		NB	NM	NM	NS	NS	ZO	ZO
NM		NM	NM	NS	NS	ZO	ZO	ZO
NS		NM	NM	NS	ZO	ZO	ZO	NS
ZO		PS	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NS
PS		PS	ZO	ZO	ZO	PS	PM	PM
PM		ZO	ZO	ZO	PS	PS	PM	PM
PB		ZO	ZO	PS	PS	PM	PM	PB

表 5-4 K_d 模糊规则表

K_d \ EC		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
E \		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB		PS	NB	NB	NS	NB	NB	PS
NM		PS	NB	NB	NS	NB	NB	PS
NS		ZO	NM	NM	NS	NM	NM	ZO
ZO		ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS		ZO	PM	PS	ZO	PS	PM	ZO
PM		PS	PB	PS	PS	PB	PB	PS
PB		PS	PB	PM	PB	PB	PB	PS

3、参数自调整模糊 PID 控制算法

由参数自整定模糊 PID 控制器的图可知，其中的参数校正部分实质为一个模糊控制器，其输入语言变量为 E、EC，输出语言变量分别为 K_p 、 K_i 和 K_d 。

运用模糊规则集推理进行 PID 参数自校正的模糊算法设计

步骤如下：

第一步：将 E、EC 和 K_p 、 K_i 、 K_d 变量模糊化，确定各自的模糊子集的隶属度。

第二步：用 K_p 、 K_i 、 K_d 得模糊校正模型来表达参数的校正过程。

第三步：应用模糊合成推理计算出 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊校正矩阵表。

由 E、EC 及 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊子集的隶属度，在根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数的模糊调整规则模型，运用模糊合成推理设计出的 PID 参数模糊调整矩阵表，这是整定系统模糊控制算法的核心。我们将其存入程序存储器中供查询。

定义 K_p 、 K_i 、 K_d 参数调整算式如下

$$\begin{cases} K_p = K'_p + \{E, EC\}K_p = K'_p + \Delta K_p \\ K_i = K'_i + \{E, EC\}K_i = K'_i + \Delta K_i \\ K_d = K'_d + \{E, EC\}K_d = K'_d + \Delta K_d \end{cases}$$

式中 K_p 、 K_i 、 K_d 参数是 PID 控制器的参数， K'_p 、 K'_i 、 K'_d 是 K_p 、 K_i 、 K_d 的初始参数，它们通过常规方法得到，在线运行过程中，通过微机测控系统不断的检测系统的输出响应值，并实时的计算出偏差和偏差变化率，然后将它们模糊化得到 E 和 EC，通过查询模糊调整矩阵即可得到 K_p 、 K_i 、 K_d 三个参数的调整量，完成对控制器参数的调整。

4、输入输出变量的模糊化

对于系统响应的误差 E、误差变化率 EC 分别具有一定的变化范围，将其变化范围分别定义模糊集上的论域。

$$E、EC = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

$$K_p、K_i、K_d = \{-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3\}$$

并设其模糊子集为：

$$E、EC = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

$$K_p、K_i、K_d = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

对 E 、 EC 、 K_p 、 K_i 和 K_d 进行模糊化：

取输入 E 、 EC 及输出 K_p 、 K_i 和 K_d 的隶属度函数为三角型函数：

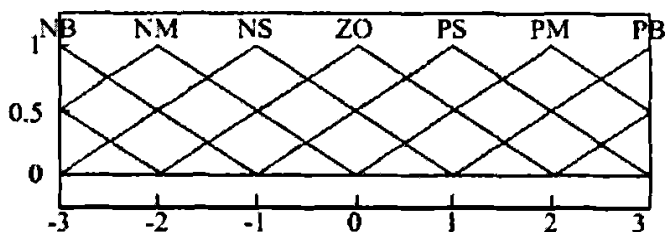


图 5-8 输入及输出隶属度函数曲线

对应的误差 E 和误差变化率 EC 的模糊变量表如图表 5-5 所示：

表 5-5 E 、 EC 模糊变量表

E/EC	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0
ZO	0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0

对应的 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊变量表如表 5-6 所示。

表 5-6 K_p 、 K_i 、 K_d 模糊变量表

$K_p/K_i/K_d$	-3	-2	-1	0	1	2	3
PB	0	0	0	0	0	0.5	1
PM	0	0	0	0	0.5	1	0.5
PS	0	0	0	0.5	1	0.5	0
ZO	0	0	0.5	1	0.5	0	0
NS	0	0.5	1	0.5	0	0	0
NM	0.5	1	0.5	0	0	0	0
NB	1	0.5	0	0	0	0	0

5、模糊合成推理算法及调整决策矩阵

由自调整模糊 PID 控制器的结构可知,它属于二维输入三维输出的模糊控制系统,输入分别为 E 和 EC,而输出分别为 PID 的三个调节参数 K_p 、 K_i 和 K_d ,并获得了三者的调整规则模型后,接下来的工作即是根据模糊理论进行算法合成,求得相应的 K_p 、 K_i 、 K_d 的三个控制表,因为三个控制表的求解过程完全一样,故在此仅将 K_p 控制表的求解取样过程详述如下:

(1) 合成推理算法

对于二维输入 (E、EC) 单输出 (K_p) 的模糊控制系统,其控制规则一般可以写成如下语言推理形式:

$$\text{If } E = E_i \text{ and } EC = EC_j \text{ then } K_p = k_{pij} \quad (5-26)$$

$$i=1,2,3,\dots,m; j=1,2,3,\dots,n$$

其中 E_i 、 EC_j 、 K_{pij} 分别是定义 E、EC、 K_p 上的模糊集,式 (5-26) 一般可用一个 $E_i \times EC_j$ 到 K_{pij} 的模糊关系 R 来描述,即

$$R = U_{ij}(E_i \times EC_j) \times K_{pij} \quad (5-27)$$

根据模糊数学理论,“ \times ”运算的含义由下式定义:

$$\mu_R(e, ec, K_p) = \vee [\mu_{E_i}(e) \wedge \mu_{EC_j}(ec) \wedge \mu_{K_{pij}}(K_p)] \quad (5-28)$$

如果偏差和偏差变化率分别取 E 和 EC,则模糊控制器给出的控制量的变化由模糊推理合成规则算出:

$$K_p = (E \times EC) \circ R \quad (5-29)$$

即

$$\mu_{K_p}(K_p) = \vee [\mu_R(e, ec, K_p) \wedge \mu_E(e) \wedge \mu_{EC}(ec)] \quad (5-30)$$

因此,根据所得 K_p 的模糊规则就可按式 (5-27) 和 (5-28) 把相应的模糊关系 R 求出来,反之若系统的模糊关系 R 为已知时,就可以根据输入 E 和 EC 利用公式 (5-29)、(5-30) 求出 K_p 的调整表。

(2) 控制规则

由 K_p 模糊规则集模型可得出下列控制规则:

If E is PB and EC is PB then K_p is PB
 If E is PB and EC is PS then K_p is PM
 If E is PB and EC is ZO then K_p is PS

.....

(3) 模糊关系 R 的求取

由式(5-26)、(5-27)设

$$D_k = E_i \times EC_j \tag{5-31}$$

其中

$$i=1,2,3,\dots,m ; j=1,2,3,\dots,n$$

则隶属度为:

$$\mu_{E_i \times EC_j(e,ec)} = \mu_{E_i} \wedge \mu_{EC_j} \tag{5-32}$$

由式(5-27)可得到模糊集 D_k , 将 D_k 该成 D_k^T 形式, 即将 D_k 的第有行元素按列的次序写下后, 再将第二行的元素接着往下写, 其它行类推。

$$\text{即: } R_k = D_k^T \times K_{pk} \tag{5-33}$$

当 R_k 均求出后, 则

$$R = R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_k \tag{5-34}$$

这样, 由控制规则表和式(5-31)、(5-33)得:

$$\begin{aligned} D_1 &= (NB)_e \times (NB)_{ec} & R_1 &= D_1^T \times (PB)_{K_{p1}} \\ \vdots & & \vdots & \\ D_{49} &= (PB)_e \times (PB)_{ec} & R_{49} &= D_{49}^T \times (PB)_{K_{p49}} \end{aligned}$$

再根据 $K_p = (E \times EC) \circ R$, 求出 $K_{p1} \dots K_{p49}$

通过以上模糊推理得到的结果是一个模糊集合, 或者说是隶属函数, 但在实际应用中, 必须要用一个确定的值才能去控制被控对象。在推理得到的模糊集合中, 取一个能代表这个模糊集合的单值的过程称为解模糊判决。我们这里根据实际情况采用了最大隶属度法进行解模糊判决, 从而得到了表 5-7 K_p 参数模糊调整控制表。同理可得表 5-8、表 5-9 K_i 和 K_d 的模糊调整

决策矩阵。

表 5-7 K_p 参数的模糊调整表

K_p \ EC \ E	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	3.0	3.0	3.0	3.0	2.0	1.0	0
-2	3.0	3.0	3.0	3.0	1.5	0	0
-1	2.0	2.0	2.0	2.0	1.0	0	-1.0
0	2.0	1.0	1.0	0	-1.0	-1.0	-1.0
1	1.0	0	-1.0	-2.0	-2.0	-2.0	-2.0
2	0	0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0
3	0	-1.0	-2.0	-3.0	-3.0	-3.0	-3.0

表 5-8 K_i 参数的模糊调整表

K_i \ EC \ E	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	1.0	-3.0	-3.0	-1.0	-3.0	-3.0	1.0
-2	1.0	-3.0	-3.0	-1.0	-3.0	-3.0	1.0
-1	0	-2.0	-2.0	-1.0	-2.0	-2.0	0
0	0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	-1.0	0
1	0	2.0	1.0	0	1.0	2.0	0
2	1.0	3.0	1.0	1.0	3.0	3.0	1.0
3	1.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	1.0

表 5-9 K_d 参数的模糊调整表

K_d \ EC \ E	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-3.0	-2.0	-2.0	-1.0	-1.0	0	0
-2	-3.0	-2.0	-2.0	-1.0	0	0	0
-1	-2.0	-2.0	-1.0	0	0	0	-1.0

续表 5-9

0	1.0	1.0	0	0	0	-1.0	-1.0
1	1.0	0	0	0	1.0	2.0	2.0
2	0	0	0	1.0	1.0	2.0	2.0
3	0	0	1.0	1.0	2.0	3.0	3.0

这样,设计好的参数自调整模糊 PID 控制起就可以对 PID 控制器的三个参数进行在线调整。

5.5 仿真研究

温度控制是影响半干半湿法烟气脱硫效率的关键因素,所以对其进行仿真研究。 SO_2 出口温度控制回路通过调节进入塔内的水量来调节烟气出口温度,使之控制在 $90\text{-}92^\circ\text{C}$ 这个范围内,使脱硫效率达到最优。常规 PID 已经不能满足其控制要求,因而采用自调整模糊 PID 进行控制。

系统结构示意图如图 5-8。

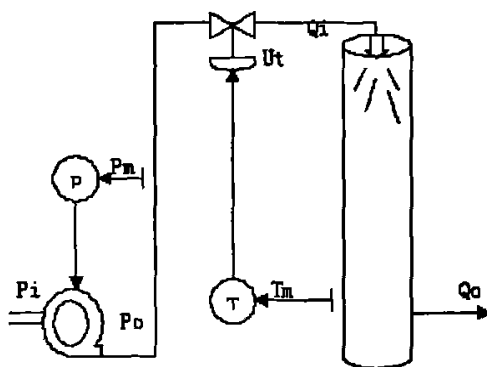


图 5-8 塔温控制系统

过程传递函数为:

$$\frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1}$$

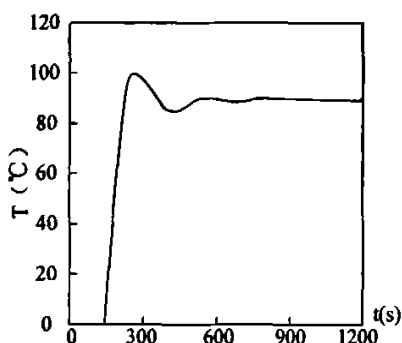
K、T、 τ 的确定,根据阶跃响应曲线,人工测出 K、T、 τ 有:
K=5;

$T=200-300s$;

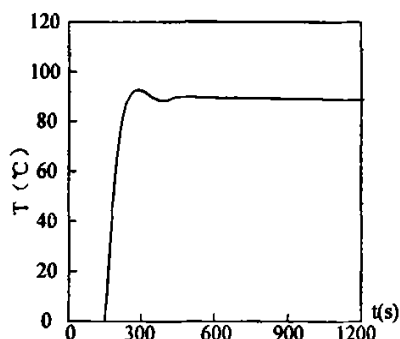
$\tau=100-200s$ 。

本仿真试验中取 $K=5$ 、 $T=240s$ 、 $\tau=150s$ ，要求系统超调 $\leq 5\%$ ，常规 PID 控制器的参数 K_p 、 K_i 、 K_d 分别按临界比例法整定为：0.35、0.08、0.3。模糊控制器的量化因子 $K_c=20$ 、 $K_{ec}=120$ ，比例因子 $K_u=10$ 。

1、仿真图 5-9 为系统正常无干扰情况下的仿真曲线。图中曲线 a、b 分别对应于常规 PID 控制和参数自调整模糊 PID 控制的系统输出响应曲线。



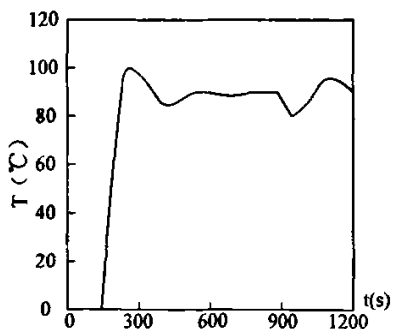
(a) 常规 PID 的响应曲线



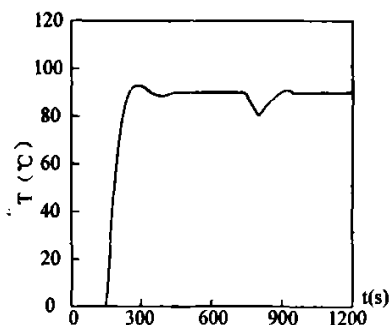
(b) 自调整模糊 PID 的响应曲线

图 5-9 系统无干扰情况下输出响应曲线图

2、仿真图 5-10 为系统受干扰情况下的仿真曲线。图中曲线 a、b 分别对应于常规 PID 控制和参数自调整模糊 PID 控制的系统输出响应曲线。



(a) 常规 PID 抗干扰的响应曲线



(b) 自调整模糊 PID 抗干扰的响应曲线

图 5-10 系统受干扰情况下输出响应曲线图

由以上的仿真响应曲线图 5-9 和图 5-10, 可以看出: 自调整模糊 PID 控制系统与常规 PID 控制系统相比, 具有更快的响应速度和更好的跟踪性能; 在系统遇到干扰时, 及时对控制作用进行调整, 并以比常规 PID 更小的偏差和更快的速度重新进入预先设定的稳态工作点, 它的抗干扰性能要优于常规 PID 控制器。

第 6 章 总结与展望

6.1 研究总结

目前,我国在 EPA 方面的研究还刚刚起步,虽然已经有不少的文章和论文,但是基本上都是关于现场设备的开发的分析与探讨上,真正关于 EPA 应用方面的研究资料还很少。本文基于工业控制领域发展的趋势和 EPA 实时工业以太网标准的特点,提出了 EPA 脱硫控制系统的设计方案,并结合常规 PID、自适应控制和模糊控制技术的长处,对系统的控制策略进行了分析与仿真研究。主要研究结果如下:

- 1、详细的介绍了半干半湿法烟气脱硫工艺和系统组成,并分析其脱硫的特点和经济指标更适合我国脱硫技术的发展。
- 2、脱硫控制系统采用 EPA 实时工业以太网标准进行设计,系统完全替代目前常用的(DCS、PLC、FCS)一些系统。采用开放性的国际标准互连结构,实现网络化,克服目前常用的一些系统自动化孤岛的弊端,并且具有通信实时性强、安全性高和可靠性好等优点。
- 3、论文介绍的参数自调整模糊 PID 控制器,在脱硫控制系统中的应用,对该系统的控制性能有明显提高。根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数的模糊调整规则模型,运用模糊合成推理设计出的 PID 参数模糊调整矩阵表。并且通过对系统温度控制的仿真结果证实,参数自调整模糊 PID 具有较强的鲁棒性。对参数变化和变负载干扰的非线性、时变系统,具有较好的控制效果。

6.2 有关研究展望

EPA 脱硫控制系统的网络化方案设计、系统组态和模糊控制等方面都有很多需要进一步加强的地方。因此本文在 EPA 脱硫控制系统设计方面还仅仅是一个开始，需要后续研究人员去不断完善它。

参考文献

- [1] 赵毅,李守信.有害气体控制工程.北京:化学工业出版社,2001.8,2-7.
- [2] 杨飏.二氧化硫减排技术与烟气脱硫工程[M].北京:冶金工业出版社,2004.
- [3] 尹华强,刘中正,朱联锡.试论我国二氧化硫污染控制战略.四川环境.Vol.15 No.3,1996:1-4.
- [4] 国家环境保护总局.2005年中国环境状况公报.2006.
- [5] 赛俊聪,吴少华,汪洪涛等.中国烟气脱硫技术现状及国产化问题.电站工程.Vol.19 No.1,2003:53-54.
- [6] 林永明,韦志高.湿法石灰石/石灰-石膏脱硫技术应用综述.广西电力工程,2000(4).92-98.
- [7] 管一明,李仁刚.湿式石灰石烟气脱硫工艺现状和发展.电力环境保护,1999,15(2).53-58.
- [8] YuLiu, QingLi, and Anmin Yan. Comment on "Calcium Bisulfite Oxidation Rate in the Wet Limestone-Gypsum Flue Gas Desulfurization Process". Environmental Science & Technology, Vol.35, No.15, 2001:3270-3271.
- [9] 晓斐,傅大放等.半干法烟气脱硫技术—粉末颗粒喷动床技术[J].环境污染治理技术与设备, Vol3, No.6.
- [10] 张凡,张伟,半干半湿法烟气脱硫技术研究[J].环境科学研究,2000.13(1).
- [11] 王凡,王红梅,张凡等.半干半湿法烟气脱硫技术的原理及应用研究.安全与环境报, Vol.4, No.1, 2004:26-28.
- [12] 冯冬芹,黄文君.工业通信网络与系统集成[M].北京:科学出版社,2005.
- [13] 冯冬芹,廖智军.基于EPA以太网的工业控制网络实时通信模型研究.仪器仪表学报,2003.
- [14] 冯冬芹,金建祥,褚健.以太网与现场总线.自动化仪表,2003.
- [15] 阮冬茹,谢东光.基于EPA的工业以太网确定性研究.控制系统,2006,3(1).
- [16] 王军方,王凡,张凡等.半干半湿法烟气脱硫主要影响因

- 素分析.环境污染治理技术与设备, Vol15,No.12,2004:21-24.
- [17] 褚健, 金建祥, 黄文君等. “JX-300X集散控制系统” 鉴定技术报告. 浙江大学, 2000, 11.
- [18] 王树青等编著. 工业过程控制工程. 化学工业出版社, 2003.
- [19] 孙增析等. 智能控制理论与技术. 清华大学出版社, 2002.
- [20] 李士勇. 模糊控制·神经控制和智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2002, 6.
- [21] G.K.Mann, B.G.Hu. Analysis and Performance Evaluation of Linear-like Fuzzy PI and PID Controller[J]. Fuzzy-IEEE, 1997.
- [22] Leehter Yao. “Design of a Self Tuning Fuzzy PID Controller by the Accumulated Genetic Algorithm”. IEEE ICIT'02, Bangkok, THAILAND, pp.649-654, 2002.
- [23] Fu K S. Learning Control Systems and Intelligent Control Systems. An Intersection of Artificial Intelligence and Automatic Control. IEEE Trans. On AC, Feb. 1971.
- [24] Chang J C S, et al. Testing and commercialization of hyproduct dibasic acids as buffer additives for limestone flue gas desulfurization systems. Journal of the Air Pollution Control Association, 1983, 33(10); 955-962.
- [25] 蔡自兴等. 人工智能及其应用. 北京: 清华大学出版社, 2000.5.
- [26] 李华. 用模糊控制实现 PID 参数自整定的研究. 甘肃科学学报, 1998, 10(1), 71-74.
- [27] 梁坚等. 一种新型的在线实时整定 PID 控制器. 自动化与仪器仪表, 1996 (3) : 32-35.
- [28] 纪宗南. Fuzzy-PID 控制器的自调调节设计. 电气自动化, 1996(1): 13-15.
- [29] 张持健, 王元航, 方明星. 高精度 PID 控制器及其在温度控制中的应用. 自动化仪表, Vol.23(7), 2002, 21-23.
- [30] Blanco J.S. Hybrid self-learning fuzzy PD+I control of unknown linear and nonlinear systems, Computer Science. Proceeding of the Fifth Mexican International Conference in, 2004, 233-240.
- [31] Gao Y.D., Hu B.G., Gao D.J. Genetic-based robust optimal design for one-input fuzzy PID controllers. Systems, Man,

- and Cybernetics, IEEE International Conference on, Vol.4
2001,2263-2268.
- [32] Visioli A. Tuning of PID controllers with fuzzy logic, Control Theory and Applications. IEEE proceedings, 148(1),2001,1-8.
- [33] J.X.Xn, C.C.Hang. C.Liu, Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller. Automatica, 36(5),2000,673-684.
- [34] B.Hu.G.K.I.Mann, and R.G.Gosine, "A systematic study of fuzzy PID controller-Function-based evaluation approach". IEEE Trans.Fuzzy Syst.2001,11(9):699-712.

致谢

首先感谢陈国平老师，本论文是在他的悉心指导下完成的。在撰写论文的最后几个月期间，陈老师严谨的治学态度、忘我的工作热情对我的一生都有着非常深远的影响。

我要感谢原导师杨宁教授，本人在研究生的三年学习期间，杨老师在学术给予我很多的指导和帮助，为我们创造良好的学习氛围，正是这种环境为我能够顺利完成学位论文奠定了基础，在这里表示深深的感谢！

在论文撰写期间，我要感谢谈宏华老师、沈斌老师等，他们为我论文的完成提出了许多宝贵建议和帮助，在此表示深深的谢意！

感谢父母的养育之恩！感谢家人的理解与支持！感谢同学的帮助！