

分类号\_\_\_\_\_密级\_\_\_\_\_

U D C \_\_\_\_\_ 编号\_\_\_\_\_

# 中南大學

CENTRAL SOUTH UNIVERSITY

## 硕士学位论文

论文题目 氧化锌晶须生产过程自

动控制系统设计与应用

学科、专业 模式识别与智能系统

研究生姓名 毛友志

导师姓名及  
专业技术职称 桂卫华 教授



## 摘要

氧化锌晶须生产过程是一个较为复杂的过程。由于长期依靠人工经验，现场操作缺乏科学的指导，使得通入氧化炉的气体参数不稳定，导致氧化锌晶须产品质量低。为此开发氧化锌晶须自动控制系统，将先进的自动控制技术应用于晶须生产过程，对稳定工艺参数、提高晶须产品质量以及实现生产过程综合自动化具有非常重要的意义。

本文以氧化锌晶须生产过程为研究对象。在分析了氧化锌晶须生产过程中氧化炉用气参数与晶须质量的关系后，根据影响氧化炉用气的两个主要参数——氧含量和流量，进行了配气控制系统的研究和设计。本文首先提出了该控制系统的结构框架，并总结了其功能特点；然后针对实际配气系统存在时滞性和耦合性的特点，以及配气系统存在不确定外部因素干扰的特点，根据其动态特性建立了数学模型，采用前馈解耦控制算法和增量式 PID 算法，设计了相应的控制器；最后开发了控制系统的监控软件，并给出了运行结果。

应用软件采用 EasyBuilder 组态软件和 Siemens PLC S7-300 系列的 STEP 7 软件编制，实现了配气过程重要参数的监视、氧含量和流量的稳定控制和报警等功能。实际运行情况表明系统可靠性高、实用性好。

**关键词：** 氧化锌晶须，解耦控制，PID 控制，可编程序控制器

## ABSTRACT

Zinc oxide whiskers production process is a more complex process. As a result of relying on artificial experience and lacking of scientific guidance in the practical operation, and then the gas parameters accessed to the oxidation furnace are unstable. So, the product quality of zinc oxide whiskers is low. Therefore, developing automatic control system and using the advanced control technology to the zinc oxide whiskers production process have a very important significance to enhance the stability of parameters, improve the product quality of the zinc oxide whiskers and realize integrated automation of the production process.

Zinc oxide whiskers production process is considered as the research object in the paper. After analyzing the relationships between gas parameters accessed to the oxidation furnace and the whiskers quality, the gas distribution control system is researched and designed according to the request of the main factors—the oxygen content and the gas flux. At first, the paper proposes a framework for the structure of the control system, and summarized its features; The actual gas distribution system has delay, coupling, external uncertainty and interference factors, then, according to such factors and the dynamic characteristic of control system, the mathematic model of the control system is established, and the feedforward decoupling control algorithm and incremental PID control algorithm are used to design the corresponding controller. Finally, the monitoring software is developed, and the operation result is given.

System monitoring software is realized by configuration software EasyBuilder and Siemens PLC S7-300 STEP7. Parameters surveillance, oxygen content and gas flux are controlled stably and alarm functions of the gas distribution control system are realized. The actual operating results demonstrated high reliability and practicality.

**KEY WORDS:** zinc oxide whiskers, decoupling control, PID control, PLC

# 目 录

<b>摘要.....</b>	<b>I</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>II</b>
<b>第一章 绪 论.....</b>	<b>1</b>
1.1 课题的来源及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 氧化锌晶须研究现状.....	2
1.2.2 控制系统研究现状.....	6
1.3 研究内容.....	6
1.4 论文结构.....	7
<b>第二章 控制系统总体设计.....</b>	<b>9</b>
2.1 氧化锌晶须生产工艺过程分析.....	9
2.1.1 氧化炉内晶须生长机理过程分析.....	10
2.1.2 配气过程耦合分析.....	12
2.1.3 生产工艺中尾气利用分析.....	12
2.2 系统控制要求及难点.....	12
2.3 系统设计思想及方法.....	13
2.4 控制系统设计.....	15
2.4.1 硬件选型及特点.....	15
2.4.2 控制系统组成.....	18
2.4.3 触摸屏、PC 和 PLC 三者的通讯.....	20
2.5 小结.....	22
<b>第三章 控制器设计.....</b>	<b>23</b>
3.1 配气系统对象建模.....	23
3.1.1 配气系统对象模型的描述.....	23
3.1.2 系统耦合的数学模型.....	24
3.1.3 系统控制回路选择.....	26
3.2 解耦控制器的设计.....	28
3.2.1 MIMO 系统建模方法 .....	28
3.2.2 解耦控制器的设计思路.....	29
3.2.3 前馈补偿解耦控制器设计原理.....	29
3.2.4 解耦控制器的设计.....	31

3.3 增量式 PID 控制器设计 .....	31
3.3.1 PID 控制原理.....	31
3.3.2 PID 控制器设计.....	33
3.4 基于 Simulink 的控制系统仿真 .....	35
3.4.1 Simulink 模块库介绍.....	35
3.4.2 Simulink 下控制系统的建模.....	36
3.4.3 仿真结果及分析.....	37
3.5 小结.....	37
<b>第四章 软件设计及算法实现.....</b>	<b>38</b>
4.1 应用软件的总体框架.....	38
4.2 软件开发平台及开发工具.....	38
4.2.1 组态软件介绍.....	38
4.2.2 Siemens STEP 7 标准软件包.....	40
4.2.3 软件调试方法.....	40
4.3 软件功能实现.....	41
4.3.1 软件结构及功能.....	41
4.3.2 功能模块介绍.....	41
4.4 PLC 编程及算法实现 .....	43
4.4.1 STEP7 组态 .....	43
4.4.2 控制逻辑分析.....	44
4.4.3 算法实现.....	45
4.5 小结.....	50
<b>第五章 控制系统工业应用.....</b>	<b>51</b>
5.1 操作台设计.....	51
5.2 系统运行效果.....	52
5.3 系统性能评价.....	54
5.4 小结.....	55
<b>第六章 结论与展望.....</b>	<b>56</b>
6.1 结论.....	56
6.2 展望.....	56
<b>参考文献.....</b>	<b>58</b>
<b>致 谢.....</b>	<b>63</b>
<b>参与科研项目及发表学术论文.....</b>	<b>64</b>

# 第一章 绪论

晶须是在人为控制条件下以单晶形式生成的形状类似短纤维、而尺寸远小于短纤维的须状单晶体，由于它的直径小到难以容纳那种存在于大晶体中的缺陷，所以，它的结构几乎达到理想状态，其高度有序的原子排列结构使其强度和模量接近于材料的原子间价键的理论强度，是一类力学性能十分优异的新型复合材料的补强增韧材料<sup>[1-3]</sup>。

氧化锌晶须(Zinc Oxide Whiskers，简称ZnOw)，是氧化锌的单晶体，呈立体四针状，即晶须有一核心，从核心径向方向伸展出四根针状晶体，每根针状体均为单晶体微纤维，任两个针状体的夹角为109°，晶须的中心体直径0.7~1.4μm，针状体根部直径0.5~14μm，针状体长度3~200μm。它是迄今为止被发现的唯一具有三维空间结构的晶体。正是由于其独特的三维空间结构赋予了它许多特殊功能。作为结构及功能添加材料，由它组成的复合材料呈各向同性，性能远优于由单一纤维状晶形组成的复合材料，具有增强耐磨、防爆、减震、降噪、抗菌以及吸波等优异的综合性能。因此，在国防、交通、化工、轻工、电子等领域也有着广阔的应用前景<sup>[1-20]</sup>。

## 1.1 课题的来源及意义

氧化锌晶须作为结构及功能添加材料，有着十分广泛的用途。把它添加到不同的产品中可以制成各种不同的性能优良的复合型材料。比如：轻质多频谱吸波隐身材料、氧化锌晶须复合抗菌剂、氧化锌晶须复合抗菌母粒(塑料、纤维)、氧化锌晶须抗菌防霉后处理剂、氧化锌晶须抗静电剂、氧化锌晶须耐磨剂、氧化锌晶须增强改性剂等等。因此，实现氧化锌晶须的产业化能很好的促进国民经济的发展，有着重大的意义<sup>[3,6,9,10]</sup>。

原有的氧化锌晶须生产工艺没有引入计算机控制系统，从而导致了流量检测不稳定、氧含量等参数达不到指定的控制精度等问题。由此可以看出，好的制备工艺都要有先进的控制技术作为基础，否则，理论上的研究难以实现。利用计算机控制技术实现氧化锌晶须生产过程的自动检测和全过程自动控制能够保持生产过程中参数的稳定、保证参数的控制精度、提高产品质量和生产效率、降低工人的操作失误和劳动强度。因此，要真正实现氧化锌晶须的产业化生产，计算机控制技术在里面的作用是必不可少的。

正是如此，该项目由南县科技工业园、中南大学信息科学与工程学院和中南

大学冶金科学与工程学院共同合作完成。南县科技工业园出资金和厂房，中南大学冶金科学与工程学院确定工艺流程及提出控制要求，中南大学信息科学与工程学院提出控制策略，解决以前存在的问题，共同对原系统实行技术改造。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 氧化锌晶须研究现状

#### (1) 氧化锌晶须制备的研究

在此领域，日本松下电器产业株式会社走在了世界的最前沿，他最早掌握了氧化锌晶须的制备方法、装置，并实现了氧化锌晶须的广泛应用<sup>[6,9,10]</sup>。国内，则由西南交通大学<sup>[11]</sup>首先发明氧化锌晶须的制备方法，使我国成为继日本后全球第二个可生产该晶须的国家。此后，陆续有学者对氧化锌晶须的制备方法进行了研究，并进行了相关报导<sup>[1,6,9,12,15-25]</sup>。具体方法如下：

1) 在惰性气氛中将锌粉先加热气化，然后再以惰性气体为载气，将锌蒸气引入含氧气体中，或将含氧气体吹入锌蒸气中，通过接触生成氧化锌晶须。此法所用惰性气体一般为N<sub>2</sub>或Ar等，对纯度要求较高，反应温度一般在900-1000℃，生产成本较高。

2) 将锌粉预氧化，使其表面覆盖一层氧化膜，然后在含氧的气氛中直接加热，气化获得氧化锌晶须。这种方法对氧化膜的厚度有一定的要求。氧化膜太薄则得不到针状氧化锌晶须。制得的晶须外观松散，密度较小，针状氧化锌晶须的产率较高。该法生产周期长，对设备要求也较高。

3) 将锌粉与CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (或HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) 及H<sub>2</sub>O按一定比例混合，在规定条件下生成ZnCO<sub>3</sub>，再加热到特定温度，使ZnCO<sub>3</sub>分解形成氧化锌晶须。该法容易控制，但产率低，对设备要求较严，不利于连续化生产。

4) 将表面含有一层氧化膜的锌粉与沸石混合后，在含氧的气氛中加热气化制备氧化锌晶须。制得的四针状晶须为针体尾部尺寸约100nm左右的长尾晶须，纯度高，产率可达95%以上。

5) 将锌粉与碳粉混合后，采用碳还原剂控制法来控制氧化锌晶须生长，在大气中加热制备氧化锌晶须。这种方法制得的氧化锌晶须的形态及尺寸可控，产率相较高，成本较低。

6) 以锌粉为原料，白碳黑为催化剂，压缩空气为反应气体，采用高温气相氧化反应法制备氧化锌晶须。此法工艺及设备简单，成本较低，可制得高产率的规整晶须，存在晶须开裂的现象。

7) 采用锌粉直接氧化，通过控制反应器内气相的饱和度、蒸气压，制备氧

化锌晶须。此法可获得高纯、尺寸可控、结晶完整的四针状氧化锌晶须，产率可达95%。

由此可见，现在人们已掌握了多种生产氧化锌晶须的方法。但这些方法基本上仍属于实验室阶段，并未实现工业化生产。如何实现氧化锌晶须的低成本、高产率、高质量的连续、工业化生产是今后研究的主要任务。

## (2) 氧化锌晶须生长机理的研究

关于氧化锌晶须生长机理的研究，上世纪90年代就有报导。但是，对氧化锌晶须生成机理的解释，由于研究者的实验条件不同而所得结论不同<sup>[1]</sup>。

Yoshinaka<sup>[3]</sup>、Motoi K<sup>[26]</sup>、H S Lee<sup>[27]</sup>等通过在表面氧化的锌粉中加沸石作催化剂等制得氧化锌晶须，认为其生长过程是：锌与氧在高温下首先生成八面体晶核，而后在晶核表面逐渐长出四个针状体。Iwanaga<sup>[19]</sup>等则认为氧化锌晶须的生长机理是：首先形成八面体多变双晶；接着在它们的生长过程中，一些双晶的边界发生开裂以释放累积的变形势能；由于生长速率具有较大的各向异性，进一步的生长只发生在多变双晶的四个+C 表面的+C 方向，由此形成四脚状。

最近的报导是戴英<sup>[8]</sup>、裴新美<sup>[12]</sup>、陈尔凡<sup>[14]</sup>等人的研究报导。戴英等人是以锌粉为原料，通过适当的表面处理后，装入反应器中，并置于高温炉中。控制反应炉内气氛及气体压力，并于750~1050℃保温30min，制得氧化锌晶须。裴新美<sup>[12]</sup>等人采用锌粉直接氧化法，高温合成氧化锌晶须。陈尔凡等人是以锌粉为原料，先进行陈化处理，即在去离子水(含质量分数为0.1%的H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)中以60r/min速度研磨30min，然后在室温下放置24h，最后150℃干燥30min制得氧化锌晶须。他们通过扫描电子显微镜观察，都得出氧化锌晶须是按照螺旋位错的气固(VS)生长机理生长的结论。

## (3) 氧化锌晶须表面处理的研究

晶须改性复合材料的性能好坏，除了与基体、晶须本身的性能、复合材料的加工工艺、设备等有关外，晶须的表面处理也是关键。目前，有关氧化锌晶须表面处理及界面问题的报导很少。

周祚万<sup>[28]</sup>、岛村喜代司<sup>[29]</sup>等人在对PVC/ZnOw复合材料的抗静电性能的研究过程中，研究了用不同的表面处理剂处理的PVC/ZnOw复合材料的导电性能。结果发现，用硅烷偶联剂KH-590处理氧化锌晶须比用其它方法处理后的材料的导电性都好。他们对造成几种处理效果的可能原因进行了推断。

田雅娟<sup>[30]</sup>、陈尔凡<sup>[31]</sup>等人则对不同处理剂处理的氧化锌晶须增强“尼龙6”复合材料的力学性能进行了研究，发现在所研究的处理剂中KH-550对该复合体系的改善效果最明显。利用扫描电镜拍摄到的拉伸断口相，证明此时该复合材料

体系中的氧化锌晶须与基体界面结合良好。研究还发现，当偶联剂用量为晶须质量的0.5%时，复合材料的强度提高最多。又利用KH-550对氧化锌晶须增强环氧树脂复合材料进行处理，发现KH-550能在晶须与基体之间形成有效界面层。

从目前报导的文献来看，对于氧化锌晶须增强各种基体所适用的偶联剂的选用，基本上还处于逐个尝试、对比阶段，获得的数据不多。

#### (4) 氧化锌晶须的应用研究

氧化锌晶须独特的空间三维立体结构、良好的单晶性，赋予了它许多独特的功能，如导热、压电、压敏、吸波、吸声、减振、抗菌、防藻、催化等，这使它可在国防、电子、化工、交通等领域广泛应用<sup>[1,6,9,12,16,30-41]</sup>。

##### 1) 增强复合材料

氧化锌晶须独有的结构，使得它与复合材料中的基体的抓着力更大，而且能各向同性地加强基体材料的机械性能，显著地改善基体强度和加工性能，在复合材料中起骨架作用，避免了单一针状晶须增强时需大量加入从而导致复合材料难于加工，增强效果更显著，硬度提高也较大。

氧化锌晶须铝基复合材料不仅综合性能优良，而且成本也较碳化硅晶须、钛酸钾晶须、氧化铝晶须、金属钨晶须等增强的铝基复合材料的成本低很多。氧化锌晶须增强“尼龙6”复合材料体系则不仅可以提高其强度，而且，复合材料的耐热性、尺寸稳定性都随之提高。

国内外对于氧化锌晶须在这方面的应用都较成熟。

##### 2) 静电及导电高分子复合材料

氧化锌晶须的三维结构，能形成非常有效的导电通道(三维网状结构)，从而高效地赋予材料的导电性。它的导电性是基于其单晶体本身具有导电性，而不需要借助于表面涂层和电镀等方式。因此，氧化锌晶须可以高效地降低树脂基复合材料的电阻，起到抗静电作用。

由于氧化锌晶须本身是无色透明的，不具有发色性，因此它可与其他颜料等组合，制成纯白色或其它各种颜色的复合材料制品。

目前这类应用处于推广阶段。

##### 3) 耐磨及防滑材料

氧化锌晶须具有良好的耐磨和提高材料防滑的性能。试验表明<sup>[32]</sup>，将氧化锌晶须应用于橡胶、涂料、塑料都能取得满意的耐磨防滑效果。可广泛用于汽车轮胎、刹车片材料、耐磨齿轮、传送皮带、耐磨抗静电涂料等要求耐磨和防滑的领域。例如，加入氧化锌晶须的橡胶刹车片可使车辆在雨天的刹车距离大幅减少。在PEEK、PES、PPS等树脂中加入ZnOw，用作耐磨齿轮或轴承已获得应用。

#### 4) 电波吸收材料

作为一种N型半导体微晶材料，氧化锌晶须是一种介电损耗材料。氧化锌晶须及其复合材料具有优异的电波吸收性能，可用于电波吸收体和微波发热体。而在硅酸盐水泥块中适当地掺入氧化锌晶须则可极大地改变复合水泥块的电磁波透射能力。目前已经应用到了微波加热元件中。

#### 5) 减振、抗冲及隔音材料

氧化锌晶须能有效的将吸收的机械能转化为热能而损失掉，起到明显的减振阻尼作用。对塑料、橡胶、涂料、陶瓷和金属材料的减振、降噪等性能具有明显效果。氧化锌晶须/橡胶复合材料可广泛用于土木建筑、机械结构、铁路隧道、交通运输等领域作减振降噪材料。氧化锌晶须还可吸收声振动转化为热能，使材料具有吸声功能，达到隔音效果，被用于制造音响设备的内部骨和外壳。

#### 6) 陶瓷复合材料

在工艺陶瓷、结构陶瓷、特种陶瓷等中加入适量的氧化锌晶须，可使该增强陶瓷具有良好的各向同性，且明显提高其抗碎裂和抗急冷性能。这类应用目前处于试验阶段。

#### 7) 涂料

由于氧化锌晶须在涂层中均匀嵌布起骨架作用，将其加到涂料中不仅可提高其触变性，有利于施工使涂层表面光滑平整，而且使涂料抗冲击、抗碎裂强度提高，发泡性、耐磨性能改善。可广泛用于汽车车体的中间涂层、船体外表面涂层以及水泥、矿粉、谷物的管道和设备的内表面保护涂层。用含氧化锌晶须的涂料作公路路标标记，具有耐磨、抗温差能力强，敷设很厚也不发生龟裂，且路标的反光性和可见性也较好。此外，由于其特殊的构型氧化锌晶须，对水状介质、油状介质和树脂介质均有较强适应性，适用于各种涂料，应用很广。

#### 8) 氧化锌晶须复合抗菌剂

利用四脚氧化锌晶须尖端具有纳米活性，能高效杀灭和消除细菌及其残骸，添加适量的氧化锌晶须可制成的复合抗菌剂及抗菌材料，对金黄色葡萄球菌、大肠杆菌、白色念珠球菌和沙门氏菌等常见细菌的杀灭率达99%以上，且用于动物试验无不良反应。可用于制备抗菌、脱臭材料，目前正在积极的试验中。

#### 9) 其它用途

除上述各种应用外，晶须还有很多其它用途。如用于空气清新除臭剂，除去空气中的 $H_2S$ 、 $NH_3$ 等有害气体；作为氧化还原反应的催化剂或载体；与树脂或玻璃料混合用作滤料；作为水处理中活性污泥的沉降剂；也可用作湿度传感器，具有高的灵敏性、稳定性和机械强度；还可用于制造软磁性材料、高强度阴极电池等。这些领域的应用，目前尚处于试验阶段。

### 1.2.2 控制系统研究现状

在国内两种不同的气体相互混合来控制混合后气体的总流量和某一组分的含量的控制系统中，归纳而言，采用的控制手段主要有如下几种。

(1) 传统过程控制的方法。即确定一种气体为主导气体(一般是氧化炉出来的尾气，因为尾气流量比较大)，根据它来控制混合后气体的总流量，这就是混合后流量控制回路；控制另一种气体流量来进行配比，这就是氧含量调节回路。

这种控制策略的主要优点是：控制器设计简单，参数整定方便。其主要缺点为：采用的是变量回路匹配的方法，即被调量和调节量之间的适当匹配来消除系统的耦合，由于系统中流量调节与氧含量调节(流量配比调节)之间的耦合作用非常强烈，导致调节的精度不高。在工况稳定的情况下，系统也需要经过一段时间的震荡才能过渡到稳态；抑制扰动的能力不强，而系统运行时的工况较不稳定，扰动很大，导致实际的控制效果大打折扣。

出于对这种方法的改进，国内有工程人员提出了一种改进型的控制策略，用前馈补偿的方法来进行解耦，就是将其中一种变量作为扰动引入进来，设计前馈补偿器。该方法考虑了耦合的影响，调节的精度有了很大的提高，但该方法实际上也是一种静态解耦的方式，只能对系统的耦合进行一定程度的补偿，对于工况的剧烈变化，也就是扰动的大幅波动，效果有限<sup>[42-47]</sup>。

(2) 智能控制的方法。由于某些实际的控制系统很难建立数学模型，从而采用的是智能控制的方法。其具体的控制思路有如下两种：1) 以传统的过程控制思想为指导，即根据主导气体流量的大小而成比例地调节另一种气体流量，但是在控制器的设计上不采用 PID，而采用模糊控制或其它智能控制方法，这种方法与传统的方法并没有本质区别，同样没有考虑系统耦合的问题。2) 采用先进控制的思想，设计了智能解耦的控制策略，对系统的耦合有较为深入的理解，但其控制效果与解耦策略以及相应的阀门的控制策略都有很大的关系，而且需要在现场整定比较多的参数，在类似控制系统的推广方面有一定的局限性<sup>[48-54]</sup>。

在国外对气体混合过程控制的研究中，有学者提出了一种无模型的自适应控制策略(MFA)来解决这一问题<sup>[54]</sup>。而在解决这一类的气体混合控制中，也有学者提出了一种集成的智能控制策略<sup>[55]</sup>，通过将经典PID控制、前馈控制、专家控制结合起来发挥各自的长处来解决这一类的问题。

## 1.3 研究内容

为了设计一个满意的控制系统，必须事先掌握描述系统运动规律的数学模型及其随机环境等变动的情况，然后用数学方法求解。然而，在许多工业生产中，

由于过程规模大、设备关联严重，因此存在着名目繁多的不确定性和随机性，使得生产过程操作不稳定。这些不确定性和随机因素，是工业生产过程中一种最普遍而又最难控制的一类对象，它们有的是可测的，大多数却是突加的和随机的，并以非模型化的动态时变特性出现在运行过程之中，如不采取措施，将会严重地制约着控制质量的提高，甚至显著地降低自动控制的效益和运行可靠性。

基于上述思想，本文以氧化锌晶须生产过程为研究对象，将混合气体配置系统作为被控对象，分别采用前馈补偿解耦算法和增量式 PID 控制算法实现气体混合后流量和氧含量的恒定。由于配气系统是一个多输入多输出系统，常规方法不适合气体混合过程的控制，尤其是在其中一种气体(尾气)的氧含量成分时刻变化并有耦合的情况下。因此，如何将先进控制技术与传统方法综合集成起来，依据气体混合过程的数学模型建立控制器，消除耦合和干扰，提高控制系统的稳定性，对氧化锌晶须生产工艺有非常重要的意义。为此，本文灵活运用了前馈补偿解耦控制和增量式 PID 调节相结合的先进控制技术。

此外，由于氧化锌晶须生产流程工艺连续，反应机理复杂，非线性、时变、强耦合严重，生产数据复杂，处理量大，如果某一关键设备因为故障而无法继续运行，往往会波及整个生产流程的进行，甚至出现人身安全事故，而恢复整个生产流程的正常运行需要花费很长的时间，从而造成了巨大的经济损失。因此，为了让氧化锌晶须生产工艺流程安全可靠的运行，设置了各个变量参数的故障报警，为工业过程的安全生产提供了保障。

## 1.4 论文结构

本文针对氧化锌晶须加工过程中参数控制不稳定及存在耦合的实际情况，采用前馈补偿解耦控制系统，主控制器为带死区的增量式 PID 控制器，构建了氧化锌晶须的生产过程自动控制系统。解决了系统实际运行中因流量控制长时间振荡不能稳定而使得通入氧化炉的混合气体氧含量不满足要求、压力及流量的控制不稳定等问题，使得控制精度得到提高，改善了氧化锌晶须产品的质量，发挥了极大的经济效益；同时，设计了操作台，操作员可以方便的对整个生产过程进行监控和管理，降低了他们的劳动强度。

文章首先介绍了氧化锌晶须的概念和成功制备高品质氧化锌晶须的意义，并详细介绍了氧化锌晶须及气体混合控制系统的国内外研究现状。针对实际系统给出了本文的研究内容，阐明了自动控制系统的设计和应用对氧化锌晶须生产工艺的意义。

第二章介绍了氧化锌晶须的生产工艺，分析了生产工艺中耦合因素、尾气利用因素等对生产过程的影响。并在此基础上，从自动控制的基本思想出发，提出

以稳定氧化炉用气的氧含量和流量为目标的控制系统的结构框架和功能特点。阐述了系统的设计思想及方法，给出了控制系统的硬件配置。

第三章在具体分析了现场配气系统的特性后，建立了系统的数学模型，采用了前馈补偿解耦技术和 PID 控制技术相结合的设计思想。运用这一思想，在已建构的系统模型基础上，设计了前馈补偿解耦控制器和增量式 PID 控制器，并对控制系统进行了仿真实验和效果说明。

第四章详细提出了系统软件的总体框架，介绍了软件的功能模块：包括实时监控界面的设计和通讯功能的实现等；完成了前馈补偿解耦算法、带死区的增量式 PID 算法和连锁控制技术在 PLC 中的实现。

第五章为控制系统的工业应用，设计了操作台，给出了系统运行的实际结果，并对系统性能作了评价。

第六章为结束语，对氧化锌晶须生产过程控制系统的设计予以总结，并指出下一步的研究工作。

## 第二章 控制系统总体设计

### 2.1 氧化锌晶须生产工艺过程分析

氧化锌晶须生产过程是将纯度为 99.9%以上的锌片放到氧化炉中，在特定的工艺条件下进行加热，形成所需要的四针状的氧化锌晶须的过程，生产工艺流程图如图 2-1 所示。生产工艺可以分为两部分：第一部分为氧化炉用气的配置过程；第二部分为氧化炉加热过程。

氧化炉的用气由在氧化炉加热后剩余的气体——尾气和空气混合配置而成。尾气存放在与氧化炉相连的尾气储气罐中，通过尾气压缩机将其抽出，与空气压缩机出来的空气进行混合，通过电动调节阀调节尾气流量和空气流量的大小，使得混合后的气体的氧含量符合工艺生产的要求，然后经过过滤器和干燥机，再通过后面的电动调节阀将流量控制到需要的值，将其通入到氧化炉中。

氧化炉中的锌片分三部分进行加热，每个部分温度各不相同，每个部分都有上下两个热电偶检测其温度。锌片被切成规整的小片状放入锅中，再将锅（氧化炉中一共有 18 个锅）放入氧化炉中进行加热。每个锅并排的放入氧化炉中，通过液压推舟的方式将锅一个一个向前推，每 10 分钟推一次。出来一锅，再向氧化炉内添加新的一锅，加料方式是靠人工手动操作完成的。如此反复，保证氧化炉氧化加热过程的连续。

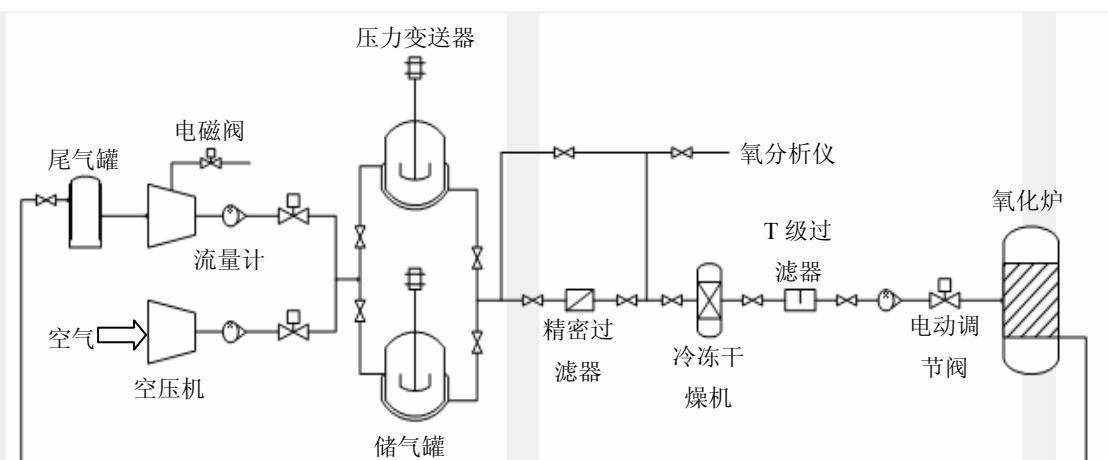


图 2-1 氧化锌晶须生产工艺流程

### 2.1.1 氧化炉内晶须生长机理过程分析

锌蒸气在不同氧化气氛和温度下生成的氧化锌有无定形、颗粒状、单针状、四针状、多针状等五种典型的结晶形貌。那么，锌蒸气在什么条件下才能我们所需要的是四针状的氧化锌晶须呢？这就必须研究锌蒸气的氧化动力学。只有如此，才能把结晶形貌与晶体生长过程的物理化学环境由表及里地联系起来，使晶体生长的微观反应和结晶形态的宏观表象得到统一的认识。

锌蒸气氧化是质量增加的过程，在保证锌蒸气不溢出反应器的前提下，可以采用在不同气氛条件下的热重法来研究锌蒸气的氧化行为，这种方法避免了反应区间内锌、氧分压都不能确定的困难，因而，用热重法得出的氧化动力学规律更能反映锌蒸气氧化过程的实质<sup>[56]</sup>。

图 2-2 表示的是研究氧化锌晶须生长过程的实验室装置，是由自制的石英管和石英反应器构成的。它跟实际生产中的氧化炉结构基本一致。

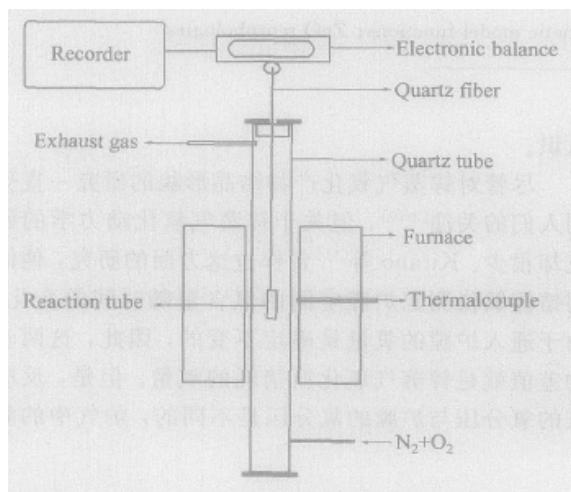


图 2-2 氧化装置示意图

为了消除试样量的影响，采用转化率。 $\alpha$  表示反应物 Zn 向 ZnO 的转化率， $m_0$ 、 $m$  分别表示 Zn 在反应开始时和反应进行到  $\tau$  时刻的质量，那么：

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0} \quad (2-1)$$

以  $\Delta m$ ， $R$  分别表示氧化过程的质量增加和质量增加率，则：

$$R = \frac{\Delta m}{m_0} \quad (2-2)$$

从 (2-2) 式可得到任意时刻  $\tau$  的质量增加率  $R$ ，再由式 (2-1) 和氧化反应的化学计量关系，得到转化率与质量增加率的关系为：

$$\alpha = 0.04086R \quad (2-3)$$

按(2-3)式可以求得任意时刻的转化率 $\alpha$ ，作出相应的TG曲线。图2-3所示为锌蒸气在温度为850°C, 900°C, 950°C, 980°C时不同氧化气氛下的 $\alpha-t$ 曲线。图中N线、O线、F线分别代表氧化气氛为5%O<sub>2</sub>(体积分数)+N<sub>2</sub>、12%O<sub>2</sub>(体积分数)+N<sub>2</sub>、空气，下标1、2、3、4代表4个氧化温度。图2-4所示为不同条件下观察到的SEM结晶形貌<sup>[56]</sup>。

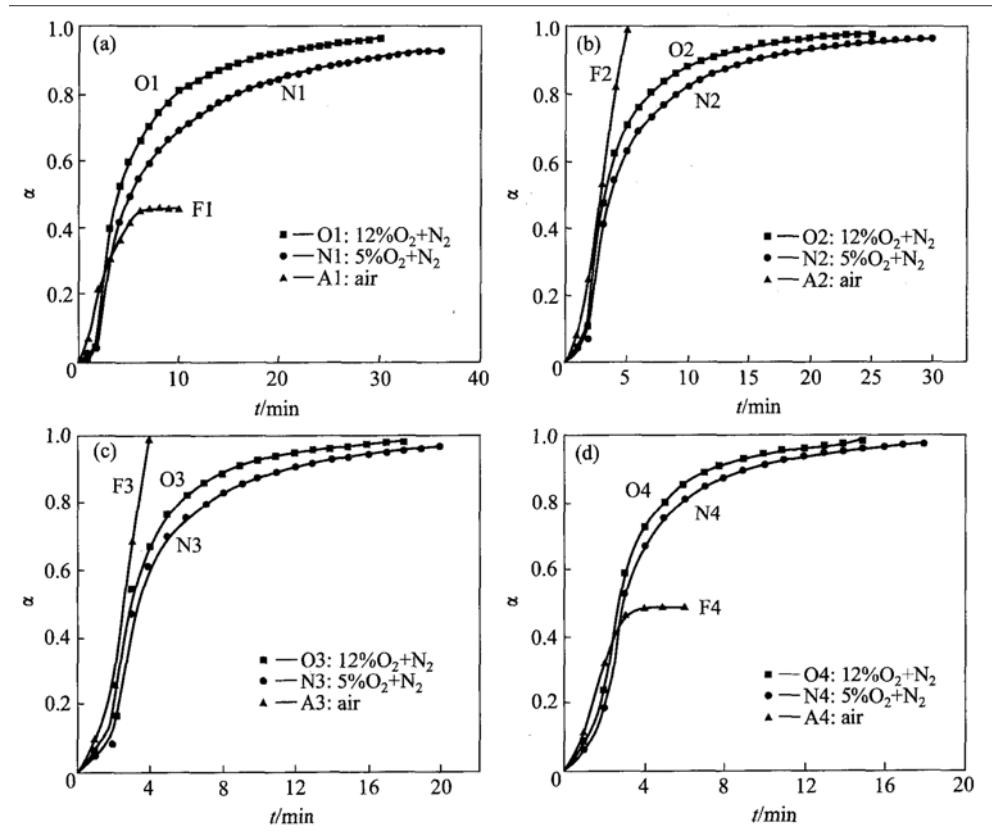


图2-3 锌蒸气在相同温度不同氧化气氛下的 $\alpha-t$ 曲线

(a) : 850°C; (b) : 900°C; (c) : 950°C; (d) : 980°C

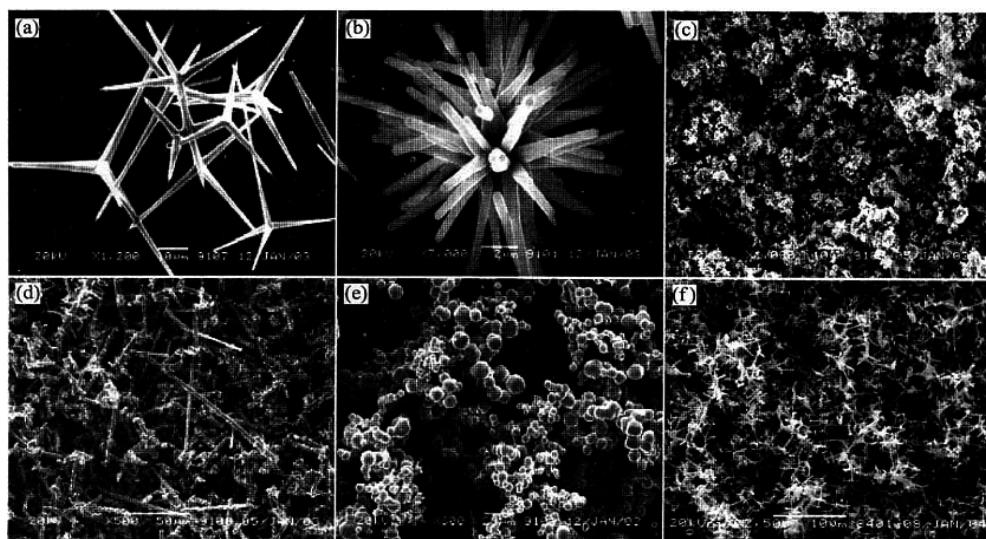


图2-4 不同氧化条件下氧化锌的结晶形貌

### 2.1.2 配气过程耦合分析

通过工艺介绍可以看出，氧化炉用气的配气过程实质就是两种组分不同的气体相互混合的调合过程，即：流量为 $Q_1$ 、氧含量为 $C_1$ 的空气与流量为 $Q_2$ 、氧含量为 $C_2$ （其中尾气的氧含量 $C_2$ 是不断变化和不确定的）的尾气相互混合，得到实际生产所需要的流量为 $Q$ 、氧含量为 $C$ 的混合气体。混合气体的流量 $Q$ 和氧含量 $C$ 都是需要控制的参数，空气流量和尾气流量作为调节手段。它是一个典型的双输入双输出的控制系统，包含氧含量和流量两个控制回路。当调节其中空气的流量时，不仅会影响混合气体的流量，而且会影响其氧含量；同理，当调节尾气的流量时，也会同时影响到混合气体的流量和氧含量。由此可见，两个回路之间是相互关联的，它们之间存在着明显的耦合作用。

### 2.1.3 生产工艺中尾气利用分析

利用氧化炉的尾气与空气混合配置氧化炉的用气有两个目的。第一，为了充分利用资源，降低生产成本。第二，为了不使氧化炉内气体压力过大，影响晶须的生长。氧化炉气体压力过大还会导致操作工人在加入新的一锅锌片或者取出已经氧化好的晶须时炉内大量高温气体涌出，危害操作工人的安全，影响整个生产过程的连续。

实际生产中不可能保证氧化炉完全密封，因此氧化炉内的气压不能为负压，否则会导致外部的气体进入氧化炉内，改变炉内混合气体的氧含量，破坏生产工艺的要求。这就意味着通过尾气压缩机将氧化炉内多余的气体抽出时流量不能过大，因此要根据实际情况选择合适的压缩机。同时，尾气压缩机在工艺进行过程中不能停止，否则会使得氧化炉的气体不能及时的排出，因此，当尾气压缩机的压力过大时，设置一个电磁阀将尾气压缩机排空，保证其连续不断的运转。

## 2.2 系统控制要求及难点

原有的氧化锌晶须生产过程没有引入计算机控制系统，所有参数变量的监测和调节都是人工手动完成，这大大降低了控制精度，并且很多情况下无法让工艺参数稳定在生产工艺所要求的条件下，使得氧化锌晶须的生产过程难以连续进行，产品质量达不到要求。因此，氧化锌晶须自动控制系统主要解决的问题就是稳定生产过程中各个工艺参数值（氧化炉的进气流量和氧含量等）和提高控制精度，从而提高氧化锌晶须的产品品质，获得较好的经济效益。

### （1）控制要求

通过上节对氧化锌晶须生长机理过程的分析可以看出，较高的转化率和较快的转化速度是实际工艺生产过程所希望得到的。图 2-3 显示了锌蒸气在氧含量为 12% (体积分数) 的氧化气氛下有较快的转化速度和转化率；温度控制在 950℃ 左右时，锌蒸气的转化率和转化速度都能达到比较理想的状态。

因此在实际生产过程中，将工艺参数中的温度控制在 960℃，误差范围在 10℃ 以内；混合气体的氧含量控制在 13% (体积分数)，误差范围在一个百分点以内；流量稳定控制在  $4.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，最大偏差不能低于或超过  $0.5 \text{ m}^3/\text{h}$ ，储气罐的压力控制在 4-5 个大气压。

## (2) 控制难点

在氧化锌晶须生产过程自动控制系统中，氧化炉用气的氧含量和流量的稳定是控制系统的难点所在。氧化炉用气的配置过程实质是空气和尾气(尾气的氧含量还是不断变化而且不确定的)的两者的相互混合的过程，是一个双输入双输出系统，氧含量回路和流量回路之间互相关联，存在严重的耦合，需要对被控对象进行分析，建立它的数学模型，设计解耦控制器，这样才能消除回路之间的相互影响，使得控制效果达到要求。

## 2.3 系统设计思想及方法

在现代科学技术的许多领域中，随着电子计算机技术的发展和应用，自动控制技术起着越来越重要的作用。在国民经济各部门中，由于广泛运用了自动控制技术，改善了劳动条件，提高了产品质量和劳动生产率。同时，它的引入使传统的过程控制系统演变为数字化、智能化、集成化和开放化的新型控制系统，降低新系统的总体投资成本，并最大程度上保护在现有系统上的投资；提高生产过程的安全性、可靠性和稳定性，产品的质量、产量以及劳动生产率；满足企业对生产更深入、更及时的管理。

对于氧化锌晶须生产过程这样的滞后、敏感系统，减小氧含量的波动、保持流量的稳定对提高氧化锌晶须的质量、获得最大经济效益、实现企业综合自动化具有深远的意义。针对益阳南县工业园的氧化锌晶须生产工艺的实际运行情况，本文设计了氧化锌晶须生产过程自动控制系统。该系统采用两层结构，即上位计算机监测系统和 PLC 控制系统。其中，上位机监测系统负责接收来自传感器和控制器的信号，显示在界面上，完成生产调度和生产运行监控。PLC 控制系统采集生产过程设备以及生产状况的实时参数，并根据各执行机构的反馈信号作出相应的判断，向生产现场每个相关系统发送命令，同时对采集的混合气体工况变量(流量、氧含量)进行在线控制。在氧化锌晶须的生产过程中，工艺参数一般都是

恒定不变的，工况不会有很大的变化。因此，采用前馈补偿解耦控制算法来消除配气过程中系统的耦合，主回路采用带死区的增量式 PID 控制算法。

### (1) 两级计算机控制系统

PLC (Programmable Logical Controller) 称为可编程序逻辑控制器，是一种以微处理器为基础，综合了现代计算机技术、自动控制技术和通讯技术发展起来的一种通用的工业自动控制装置，由于它拥有体积小、功能强大、程序设计简单、维护方便等优点，特别是它适应恶劣工业环境的能力和高可靠性，使它的应用越来越广泛，称为现代工业的三大支柱之一(即 PLC、机器人和 CAD/CAM)。

触摸屏作为一种新型的人机界面，从一出现就受到关注，它的简单易用，强大的功能及优异的稳定性，使它非常适合用于工业环境，甚至可以用于日常生活中，用户可以自由的组合文字、按钮、图形、数字等来处理或监控管理，同时又可以在其屏上设置触摸开关，对设备进行控制操作。触摸屏可以替代工控机放置在生产环境比较恶劣的现场(如粉尘环境)，便于操作人员对生产现场实时监视和控制，因此触摸屏在工控方面具有广阔的应用前景和可观的经济效益。

遵循“控制分散，监视集中”的原则，本课题采用两级计算机控制系统。MT510T 触摸屏为上位机，完成工艺流程的在线监测、系统参数设置和控制器参数设置等功能。Siemens S7-312 可编程序控制器 (PLC) 为现场控制级，直接与现场设备相连，完成流量、压力和氧含量的采样、操作命令接收和发送、控制算法实现等功能。触摸屏和 PLC 通过 PLC 相应的适配器，将信号转换成 RS232 的信号，然后再用一根 RS232 电缆与触摸屏连接，从而实现两者的通讯。

### (2) 带死区的增量式 PID 算法

随着工业现代化的发展和各种先进技术的广泛应用，工业过程的自动控制理论和技术已有了很大发展。PID (Proportional-Integral-Differential) 控制作为一种传统的控制方法，由于简单、易于实现，并且具有很好的鲁棒性，现场应用效果明显，所以在冶金、机械、化工等行业中得到了广泛应用，尤其适用于可建立精确数学模型的线性定参数系统。PID 控制技术是基于反馈控制原理的技术之一，它通过测量被控对象的输出与期望值相比较得到的偏差，经过比例环节 (P)、积分环节 (I) 和微分环节 (D) 进行线性组合构成控制量，对被控对象进行控制。

离散 PID 的增量算式相对于位置算式来说，有着不需要给定初始值、可以防止积分饱和等优点。同时，本系统中对于流量的控制在工业生产过程中属于快速变化的系统。为了让系统尽快的稳定而不至于导致振荡状态，同时也防止因电动调节阀过于平凡的调节导致而系统硬件设备使用寿命变短，所以，按照工艺要求的控制精度设置了一个死区。

### (3) 前馈补偿解耦控制算法

解耦控制是控制理论中最早的问题之一，它的设计思想几乎与控制学科同时产生，解耦控制思想最初狭义的提法是不相干控制原则。它是由 Roksenbom 和 Hoodlol 提出来的，他们最先将矩阵分析法应用于多变量控制系统分析，分析了有关飞行器控制的问题，即如何通过分别控制燃料与推进器叶片角度来控制飞行器发动机的速度与功率，并使这两个控制系统互不干涉。1964 年 Morgan 在现代控制理论的框架下正式提出了多输入多输出线性系统(MIMO)的输入输出解耦问题，即无交互系统的设计问题<sup>[57,58]</sup>。

在多变量控制理论和实践中，人们提出了解耦控制问题，即如何通过外部控制手段(如状态反馈)将多变量系统解耦，变成若干个互相独立的单输入单输出(SISO)系统，从而可用单变量控制的各种成熟技术来完成系统的设计。

多变量系统的解耦控制可分为四大类：1) 经典解耦控制方法；2) 自适应解耦控制方法；3) 模糊解耦控制方法；4) 反馈线性化解耦控制方法。前馈补偿解耦法属于经典解耦控制方法的一种，它具有系统结构简单、动态偏差小、响应速度快、过渡时间短、容易在计算机上实现等特点，应用于工艺参数基本恒定、变化不大的氧化锌晶须生产过程来说是适合的。

## 2.4 控制系统设计

### 2.4.1 硬件选型及特点

下位机选用西门子公司的 SIMATIC S7-300 可编程序控制器，上位机选用深圳人机电子有限公司的 MT510T 触摸屏，构成两级计算机控制系统。流量计采用金属管电远传型转子流量计，压力传感器采用溅射薄膜式压力变送器，执行器采用 V 型球阀阀体的电动调节阀。

#### (1) 西门子PLC

PLC(Programmable Logic Controller)是近年来迅速发展并得到广泛应用的新一代工业自动化控制装置。由于具有灵活通用、安全可靠、抗干扰性强、使用方便、维护简单等特点被广泛应用。随着技术的进步，微处理器(Microprocessor Unit，即MPU)获得广泛应用，一些PLC生产厂家开始采用微处理器作为PLC的中央处理单元，大大加强了PLC的功能，不仅具有逻辑控制功能，而且具有算术运算功能和对模拟量的控制功能。

SIMATIC S7-300 PLC 作为西门子公司的新一代产品，具有以下特点：1) 功能强：极强的计算能力，完善的指令集，MPI 接口和通过 SIMATIC NET 联网的

网络能力，功能更强。2)快速：指令处理速度极快，功能强大的 CPU 只需 0.3ms 就可以处理 1024 个二进制语句，在面向字面处理方面也同样表现出色。3)通用：高性能模块和 6 种 CPU 适用任一应用场合，模块可扩展至 4 个扩展机架，这极大的方便了工艺的升级和改造(未来要扩展到多台氧化炉)；集成了 HMI(人机界面)接口电路；用户友好的 WINDOWS STEP7 编程。4)全集成。全部模块化，安装方便，运行可靠，性价比高<sup>[70]</sup>。

### (2) MT500 系列触摸屏

本系统选用深圳人机电子公司的 eView MT500 系列触摸屏，此系列触摸屏的应用是专门面向 PLC 的，具有功能强大、控件外观设计美观、使用方便、组态软件简单易学等特点，非常适合现代工业自动化的要求，日益成为现代化工业控制必不可少的设备之一。

一般的人机界面具有的主要功能有：1)指示灯(PLC I/O 显示、内部节点显示、多段指示灯等)；2)开关(位状态型开关、多段开关、切换窗口开关等)；3)各种动态图表(棒图、仪表、移动元件、趋势图等)；4)数据显示(数据显示、ASCII 显示、文字显示等)；5)数据输入(数值输入、ASCII 输入、文字输入等)；6)异常报警(报警显示、跑马灯显示、事件显示等)；7)静态显示(直线、圆、矩形、文字等)<sup>[75]</sup>。

本系统选用的 eView MT510T 触摸屏，不仅拥有上述的一般人机界面所拥有的功能外，而且提供了许多特有功能：1)可以同时开启 6 个弹出窗口，便于用户查询不同的画面；2)拥有和 windows98 等一样的任务栏和快选窗口工作按钮，利用工作按钮可以呼叫快选窗口，在快选窗口放置要经常显示的元件或直接切换快选窗口的开关；3)可以在弹出窗口中放置窗口控制功能键，使弹出窗口可以最大(小)化，及任意移动窗口；4)新增留言板功能，可更改笔的粗细颜色，以及擦除功能等，便于用户查看工作任务；5)256 色显示方式使触摸屏的表达更加丰富多彩；6)方便易用而又强大的在线模拟和离线模拟功能，便于用户观察系统控制效果等<sup>[75]</sup>。

### (3) 流量计

流量计的选择在本系统显得尤为重要，不论是氧含量的控制还是氧化炉的进气量的控制，都要用到流量计。因此，能否选择出适合气体测量、精度及量程满足要求、安装方便的流量计直接影响整个控制系统的控制效果。

流量测量方法和仪表的种类繁多，分类方法也很多。至今为止，可供工业用的流量仪表种类达 60 种之多。品种如此之多的原因就在于至今还没找到一种对任何流体、任何量程、任何流动状态以及任何使用条件都适用的流量仪表。

这 60 多种流量仪表，每种产品都有它特定的适用性，也都有它的局限性。按测量对象划分就有封闭管道和明渠两大类；按测量目的又可分为总量测量和流量测量，其仪表分别称作总量表和流量计；按测量原理分有力学原理、热学原理、声学原理、电学原理、光学原理、原子物理学原理等。目前最流行、最广泛的分类法，即分为：容积式流量计、差压式流量计、转子流量计、涡轮流量计、电磁流量计、流体振荡流量计中的涡街流量计、质量流量计等。

由于通过空气压缩机出来的气体流量较小(不超过  $5\text{ m}^3/\text{h}$ )、压力较低(不超过 6 个大气压)，再结合现场设备的安装情况，采用上海博欣流量仪表有限公司生产的金属管电远传型转子流量计。

转子流量计，又称浮子流量计，是变面积式流量计的一种，在一根由下向上扩大的垂直锥管中，圆形横截面的浮子的重力是由液体动力承受的，从而使浮子可以在锥管内自由地上升和下降。浮子流量计是仅次于差压式流量计应用范围最宽广的一类流量计，特别在小、微流量方面有举足轻重的作用。

特点：1) 玻璃锥管浮子流量计结构简单，使用方便，缺点是耐压力低，有玻璃管易碎的较大风险；2) 适用于小管径和低流速；3) 压力损失较低。

该型号流量计不仅能满足控制精度，而且安装方便，采用金属管制造，持久耐用，不易破损，而且能耐一定压力。同时，输出标准的 4-20mA 的电流信号，可以输入到 PLC 中转换成数字信号进行控制。

#### (4) 压力变送器

压力变送器的作用是将现场检测到的压力信号转换为相应的统一标准信号(电压 1-5V、电流 4-20mA)，它是基于负反馈原理工作的，如图 2-5 所示。

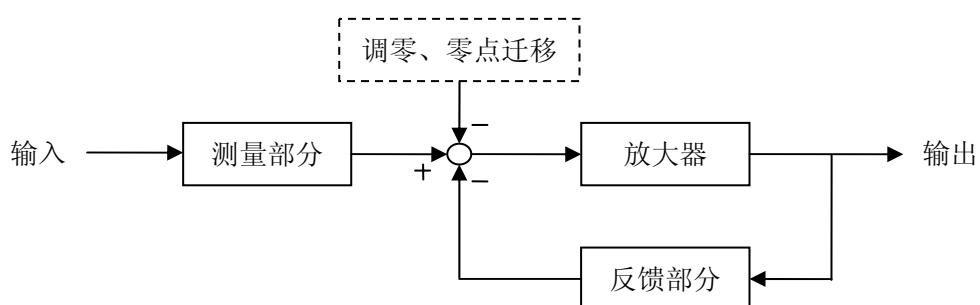


图 2-5 变送器构成原理图

常用的差压变送器有力平衡式差压变送器、电容式差压变送器和扩散硅式差压变送器。三种变送器各用所长，其中扩散硅式差压变送器是无杠杆变送器，它采用硅杯压阻传感器为敏感元件，具有体积小、重量轻、结构简单和稳定性好等优点，精度也较高。

综合上述优点和实际情况，采用湖南赛西公司生产的溅射薄膜压力变送器，它是基于扩散硅式差压变送器的原理制造的，能满足实际检测的需要。

### (5) 执行器

执行器由执行机构和调节机构组成。执行机构是指产生推力或位移的装置，调节机构是指直接改变能量或物料输送量的装置，通常称调节阀。

电动执行机构有角行程和直行程两种，它将输入的直流电流信号线性地转换成位移量。这两种执行机构均是以两相交流电机为动力的位置伺服机构，两者电气原理完全相同，只是减速器不一样。图 2-6 为电动执行机构方框图。

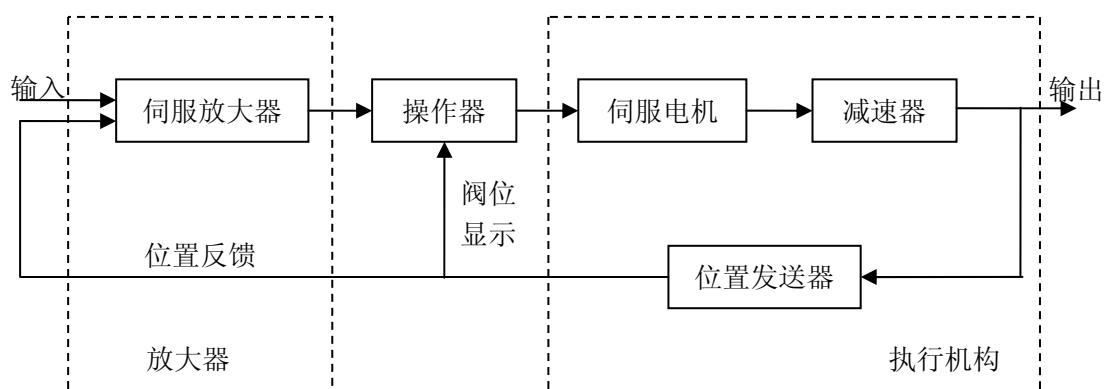


图 2-6 电动执行机构方框图

调节机构又称调节阀，它和普通阀门一样是一个局部阻力可以变化的节流元件。由于阀芯在阀体内移动，改变了阀芯与阀座之间的流通面积，即改变了阀的阻力系数，被控介质的流量相应地改变，从而达到调节工艺变量的目的。

由于调节机构直接与被控介质接触，为适应各种使用要求，阀芯、阀体有不同的结构，使用的材料各不相同。常见的阀芯型式有平板型阀芯、柱塞型阀芯、窗口型阀芯和多级阀芯；常见的阀体有直通单座调节阀、直通双座调节阀、角形阀、三通阀、蝶阀、套筒型调节阀、偏心旋转阀和高压调节阀等。

本系统的实际工况是小流量的气体，采用 V 型球阀阀体比较合适，因此选择了湖南力升信息设备有限公司生产的型号为 LSDF-V 型电动调节阀，它的内置式电子伺服控制器和执行器为一体化结构，具有精度高、结构紧凑和动作可靠等优点。

#### 2.4.2 控制系统组成

控制系统采用两级计算机控制系统结构，如图 2-7 所示。上位机深圳人机电子有限公司的 MT510T 触摸屏，下位机采用西门子公司 S7-300 系列的 PLC。CPU 模块为 CPU312，主要对各个输入模块传输来的指令、信号和数据进行运算处理，

然后通过输出模块，输出给执行机构，实现需要的动作；数字量输入模块和模拟量输入分别采集现场的数字量信号和模拟量信号，送入 CPU 进行处理，数字量输出模块和模拟量输出模块对继电器、接触器、电磁阀和电动调节阀等执行机构进行控制。

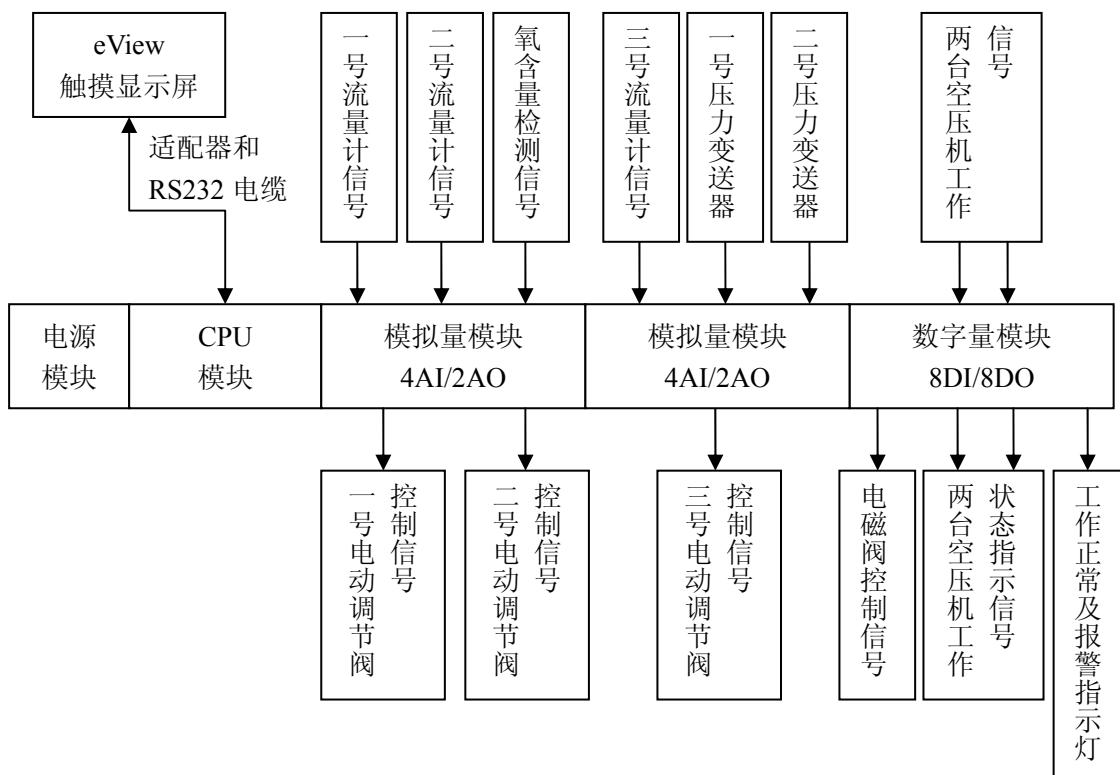


图 2-7 PLC 控制系统结构框图

各模块型号和具体功能如下：

- 1) 电源模块：型号为 PS307，为 PLC 的 CPU 模块、功能模块和扩展模块提供直流 24V 电源。它将 230V 交流电压转变为所需的 24V 直流工作电压，输出电流为 5A。
- 2) CPU 模块：型号为 CPU312，是 PLC 的中央处理单元，适用于要求高速处理和中等 I/O 规模的系统，能够装载较大规模的程序，且指令执行速度也较快，适合于本系统的控制需要。
- 3) 数字量输入输出模块：型号为 SM323，实现数字信号的采集和控制信号的输出。在本系统中有电磁阀的控制等。
- 4) 模拟量输入输出模块：型号为 SM334，实现模拟信号的采集和控制信号的输出。在本系统中输入有流量、氧含量和压力的数据采集，输出为对电动调节阀的控制。

### 2.4.3 触摸屏、PC 和 PLC 三者的通讯

近年来机电一体化技术迅猛发展，由于可编程控制器具有紧凑的设计、良好的扩展性、低廉的价格以及强大的指令等特点，在开关量控制方面具有很强的优势，其在工业生产中的应用越来越广泛。但是 PLC 的显示功能差，所以将 PC 机、触摸屏与可编程控制器组合起来，充分利用 PC 机和触摸屏强大的人机接口功能、丰富的应用软件和低廉的价格来共同实现管理、控制一体化成为当代一个新的发展趋势。本系统不论是在调试或者运行阶段，都经常要让触摸屏、PC 和 PLC 之间互相通讯。

本系统的通讯属于串行通讯。所谓“串行通讯”是指设备间使用两根数据信号线(可能还需要控制线)一位一位地进行传输，每一个数据都占据一个固定的时间长度，这种通讯方式使用的数据线少、成本低。RS-232C 是当前通信工业中应用最广泛的一种串行标准接口。它采取单端传送方式，典型的 RS-232C 信号在正负电平之间摆动，发送数据时，发送器逻辑‘0’电平规定为+5~+15V 之间，逻辑‘1’电平为-5~-15V 之间；接收数据时，接收器逻辑‘0’电平规定为+3~+12V 之间，逻辑‘1’电平为-3~-12V 之间。由于 RS-232C 发送器和接收器具有公共信号地，不可能使用双端信号，因此共模噪声会耦合到信号系统中，这是 RS-232C 使用较高传送电平的主要原因。RS-232C 传送线上的总负载电容量不得超过 2500pF，若电缆电容为 150pF/m(或 125pF/m)时，则传送线的最大长度不应超过 15m(或 20m)。传送线长时，电容量增大，数据传送速率高时，电容的充放电电流增加，以致使接收端(负载端)的信号减弱，严重时甚至信号无法辨认，因此最大数据传送速率(波特率)限制在 20KBit/S(20K 波特)以下，所以 RS-232 仅适用于本地设备之间的低速通信。

为了克服 RS-232 通信距离短和数据传送速率低的缺点，RS-422 定义了一种平衡通信接口，将传送距离延长到 1200 米(数据传送速率低于 100KBit/S 时)，数据传送速率提高到 10MBit/S，并允许在一条平衡总线上连接最多 10 个接收器。RS-422 数据信号采用差分传输方式，也称作平衡传输。它使用一对双绞线，将其中一线定义为 A，另一线定义为 B，如图 2-8 所示。

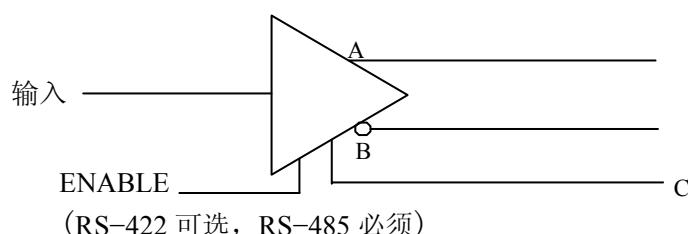


图 2-8 RS-422、RS-485 连线定义

通常情况下，发送器 A、B 之间的电压在+2~+6V 表示逻辑‘0’；在-2~-6V 表示逻辑‘1’，另外有一个信号地 C。在 RS-485 中还有一个使能端 ENABLE，它用于控制发送器与传送线 A、B 的切断与连接。当 ENABLE 不起作用时，发送器处于高阻状态并与传送线 A、B 断开，在 RS-422 中 ENABLE 是可用可不用的。接收器通过平衡双绞线将 A 与 B 分别对应相连，当接收器 A、B 之间的电压在+200mV~+6V 时，输出逻辑‘0’；在-200mV~-6V 时，输出逻辑‘1’。RS-422 是一种单机发送、多机接收的平衡传输规范，它支持点对多的双向通信，即一个主设备(MASTER)与多个从设备(SLAVE)之间的通信，并且从设备之间不能通信。RS-422 需要一个终接电阻接在传送线的最远端(在传送距离小于 300 米时也可不接)，其阻值约等于传送线的特性阻抗<sup>[73]</sup>。

在实际工业应用中使用最广泛的是 RS-485。RS-485 与 RS-422 的主要区别在于：除了实现“点对多”通信之外，RS-485 还可以实现“多对多”通信，无论是“点对多”通信还是“多对多”通信，RS-485 可同时接 32 个发送器和 32 个接收器。RS-485 需要两个终接电阻接在传送总线的两端(在传送距离小于 300 米时也可不接)，其阻值要求等于传送电缆的特性阻抗。PC 机与西门子 S7-300 PLC 之间就是采用 RS-485 接口实现“点对多”通信，工作于半双工方式。

本系统中，触摸屏、PC 和 PLC 三者之间的通讯连接示意图如图 2-9 所示。左边为 MT-500-RS232/485，中间为 PLC-RS485，右边为 PC-RS232。PLC 出来的 RS485 信号通过适配器转换成 RS232 信号，再通过一根 RS232 电缆连到触摸屏，实现两者的通讯；PC 和 PLC 之间直接用适配器连接，将 PC 中的程序下载到 PLC 中进行调试。

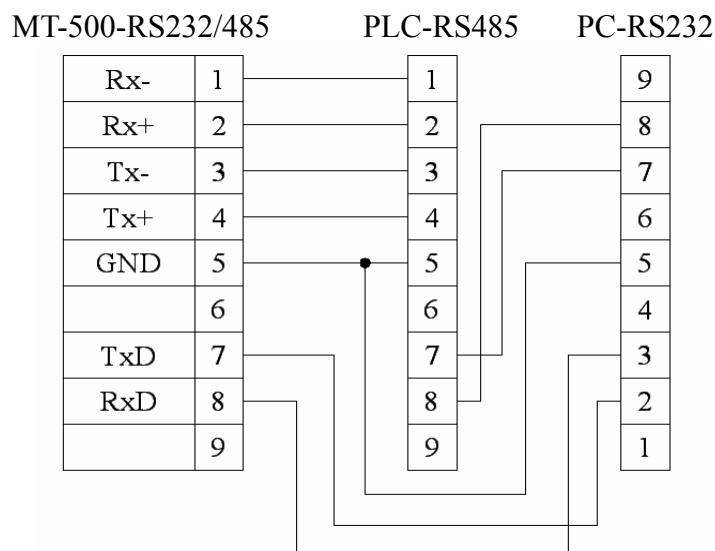


图 2-9 触摸屏、PC、PLC 三者通讯连线图

## 2.5 小结

本章首先对氧化锌晶须的生产工艺过程进行了阐述，分析了影响氧化锌晶须生产工艺参数的主要因素，根据分析的结果结合实际生产情况介绍了氧化锌晶须自动控制系统主要解决的问题，分析了系统的控制要求和控制难点；然后针对控制要求及难点提出了氧化锌自动控制系统的设计思想及解决方法，给出了以稳定氧化炉用气氧含量和流量为目标的控制系统的结构框架。

## 第三章 控制器设计

由第二章可以得知，在氧化锌晶须加工的过程中，产品的品质会受到通入氧化炉的气体氧含量、流量和氧化炉温度等工艺过程变量的影响而变得不稳定。在这些变量中，以氧化炉用气的氧含量和流量的影响最大。本文依据现场情况，针对实际工艺配气过程中存在滞后性和耦合性的特点，采用基于带死区的增量式PID算法并加入前馈补偿解耦算法设计自动控制系统的控制器。

### 3.1 配气系统对象建模

配气系统的控制实际上是混合用气氧含量和流量的控制。如果改变其中一种气体的流量，混合气体的流量和氧含量都将随之变化，二者之间存在着严重的耦合，是一个典型的双输入双输出系统。同时，尾气的氧含量在实际的过程中也会因为氧化炉不同的氧化情况存在着微小的波动，使得氧化炉用气的氧含量更加难以控制。若不加入解耦控制器，混合气体的参数将在很长时间内难以达到稳定，满足工艺的要求，影响氧化锌晶须的产品质量。因此，氧化炉用气的氧含量和流量的恒定是整个控制系统的关键和难点。

#### 3.1.1 配气系统对象模型的描述

图 3-1 是配气系统的控制示意图。其中： $Q_1$ 、 $C_1$ 为空气的流量和氧含量； $Q_2$ 、 $C_2$ 为尾气的流量和氧含量； $Q$ 、 $C$ 为混合气体的流量和氧含量； $V$ 为储气罐的体积。

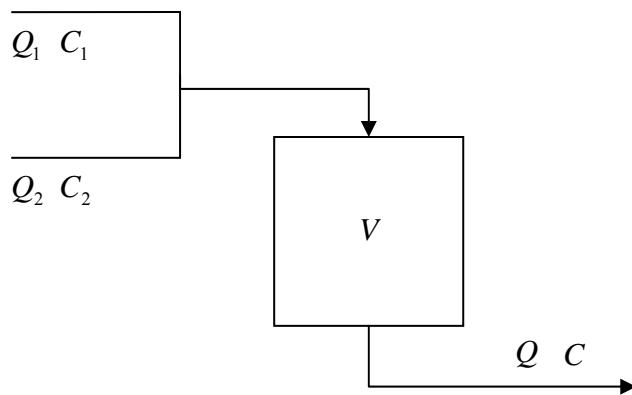


图 3-1 混合过程图

对工艺流程的分析可以看出：在配气过程中，氧含量和流量都是需要控制的

量，整个过程实际上是一个调合过程。通入氧化炉的混合气体由流量为  $Q_1$ 、氧含量为  $C_1$  的空气和流量为  $Q_2$ 、氧含量为  $C_2$  的尾气混合而成，产生流量为  $Q$ 、氧含量为  $C$  的混合气体。其中：流量  $Q$  和氧含量  $C$  为被控变量， $Q_1$  和  $Q_2$  为操纵变量。它们的数学关系为：

$$\begin{cases} Q = Q_1 + Q_2 \\ QC = Q_1 C_1 + Q_2 C_2 \end{cases} \quad (3-1)$$

对式(3-1)分析可以得知，这是一个双输入、双输出的过程，控制系统有氧含量和流量两个控制回路。当流量  $Q$  的设定值改变时，流量回路同时调节  $Q_1$  和  $Q_2$ ，使流量  $Q$  保持在新的设定值上，随着  $Q_1$  和  $Q_2$  的改变，又会使氧含量  $C$  发生改变。同理，当氧含量  $C$  的设定值改变时，氧含量回路同时调节  $Q_1$  和  $Q_2$ ，使氧含量保持在新的设定值上，随着  $Q_1$  和  $Q_2$  的改变，流量  $Q$  也会发生改变。因此，两个控制回路是相互影响的，二者之间存在着明显的耦合。

### 3.1.2 系统耦合的数学模型

流体在图 3-1 的装置中流动，可以分为两个部分：第一部分为系统的调合过程，第二部分为流体混合后在管道内流动<sup>[71]</sup>。

#### (1) 调合过程的数学模型

1) 根据总质量平衡原则有：

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \rho_1 Q_1 + \rho_2 Q_2 - \rho_3 Q \quad (3-2)$$

式中  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  和  $\rho_3$  分别为空气、尾气和混合气体的密度， $\rho$  为储气罐内气体的密度， $V$  为储气罐的体积。

假定储气罐内的气体均匀混合，则有：

$$\rho = \rho_3$$

一般来说，密度与相应的浓度和温度有关系，即：

$$\rho = f(C, T)$$

为了简化，可以认为密度与浓度和温度无关，故有：

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$$

那么，简化式(3-2)有：

$$\frac{dV}{dt} = Q_1 + Q_2 - Q \quad (3-3)$$

储气罐的体积  $V$  是恒定的，则式(3-3)表示成传递函数的形式为：

$$Q(s) = Q_1(s) + Q_2(s) \quad (3-4)$$

把任一物料的流量的变化而引起混合气体总流量的变化看成对系统的扰动，可以得到任一物料因流量变化而引起的与输出流量之间的输入输出模型：

$$\frac{Q(s)}{Q_i(s)} = 1 \quad (i=1,2) \quad (3-5)$$

2) 根据总组分平衡原则，令槽内氧的浓度为  $C'$ ，则氧含量的平衡方程为：

$$\frac{d(C'V)}{dt} = (C_1 Q_1 + C_2 Q_2) - CQ \quad (3-6)$$

即有：

$$V \frac{dC'}{dt} + C' \frac{dV}{dt} = V \frac{dC'}{dt} + C'(Q_1 + Q_2 - Q) = C_1 Q_1 + C_2 Q_2 - CQ \quad (3-7)$$

假定槽内混合气体均匀搅拌，则有  $C' = C$ 。故可得：

$$V \frac{dC}{dt} = C_1 Q_1 + C_2 Q_2 - CQ \quad (3-8)$$

同理，将任一物料的流量的变化而引起的混合气体氧含量的变化看成对系统的扰动，可以得到任一物料因流量变化而引起的与输出氧含量之间的输入输出模型：

$$\frac{C(s)}{Q_i(s)} = \frac{C_i}{Q} \frac{1}{\left(\frac{V}{Q}s + 1\right)} \quad (i=1,2) \quad (3-9)$$

## (2) 混合流体在管道内流动的数学模型

假定混合流体在管道内的流动为理想状态，流体的所有部分都朝同一方向以同一速度流动着。这时，某个瞬间输入管道的流体的各微元都以相同流速  $v$  流动，经过  $\theta$  时间后同时排出，所以停留时间的分布函数  $g(t)$  是整齐的单向分布，即：

$$g(t) = \delta(t - \theta) \quad (3-10)$$

设管道全长为  $L$ ，则  $\theta = \frac{L}{v}$ ，正好是流体在管道内的平均停留时间。上次分布的平均值为  $\theta$ ，方差为零。

现在来建立混合流体在管道内流动时氧的非稳态物料衡算。 $C$  为氧含量的浓度， $C$  是时间  $t$  和与入口之间距离  $z$  的函数。以微元长度  $dz$  建立物料衡算关系式：

流入  $dz$  的氧为：  $vC$ ；

流出  $dz$  的氧为:  $v(C + \frac{\partial C}{\partial z} dz)$ ;

在  $dt$  时间内在  $dz$  中累积的氧为:  $\frac{\partial C}{\partial t} dz$ 。

按  $dz$  中物料衡算即流入与流出氧之差应等于累积, 即有:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -v \frac{\partial C}{\partial z} \quad (3-11)$$

对式(3-11)两边的  $t$  进行拉氏变换可得:

$$sC(s, z) + C(0, z) = -v \frac{dC(s, z)}{dz}$$

式中  $C(0, z)$  为初始条件, 若令  $C(0, z) = 0$ , 用分离变量法解上述微分方程可得:

$$C(s, L) = e^{-\frac{sL}{v}} C(s, 0)$$

转化为传递函数形式为:

$$G(s) = \frac{C(s, L)}{C(s, 0)} = e^{-\left(\frac{L}{v}\right)s} \quad (3-12)$$

### 3.1.3 系统控制回路选择

对于耦合系统, 采用相对增益原理来分析被控变量与操纵变量之间的搭配关系, 使得控制回路间的相互关联最小、解耦效果达到最佳。

设一个双输入和双输出的过程由式(3-13)表示:

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \quad (3-13)$$

为了简单, 只考虑稳态部分, 式(3-13)可以表示为:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad (3-14)$$

其中  $k_{ij}$  表示第  $j$  个输入变量作用于第  $i$  个输出变量的放大系数。系统 2 开环时,  $u_1 \rightarrow y_1$  的放大系数是  $k_{11}$ 。而系统 2 闭环后且满足无静差要求时,  $u_1 \rightarrow y_1$  通道的放大系数将成为:

$$k_{11} \left( \frac{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22}} \right)$$

因此,回路2与回路1的关联程度可用上述两个放大系数之比来描述。这个比就称为相对放大系数 $\lambda_{ij}$ ,或称为相对增益。这样,相对增益 $\lambda_{ij}$ 可以用下式来定义:

$$\lambda_{ij} = \frac{\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_u}{\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_y} \quad (3-15)$$

式(3-15)中,  $\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_u$  表示除 $u_j$ 以外其它 $u$ 都保持恒定,即其它回路都为开环时,  $u_j \rightarrow y_i$  通道的增益;  $\left( \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right)_y$  表示除 $y_i$ 以外其它 $y$ 都保持恒定,即其它回路都为闭环时,  $u_j \rightarrow y_i$  通道的增益。

对于双输入和双输出系统,显然有:

$$\begin{aligned}\lambda_{11} &= \lambda_{22} = \frac{k_{11}k_{22}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}} \\ \lambda_{12} &= \lambda_{21} = -\frac{k_{12}k_{21}}{k_{11}k_{22} - k_{12}k_{21}}\end{aligned}$$

写成矩阵形式为:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix}$$

如果相对增益为1,它表示其它回路的作用对该开环没有影响,因而它与其它回路不存在关联。偏离1越大,表示关联越严重。如果相对增益为0,意味着所有其它操纵变量都保持恒定时, $y_i$ 不受 $u_j$ 的影响,因而不能用 $u_j$ 来控制 $y_i$ 。因此,在选择配对变量时,应该选择彼此的相对增益接近于1的来配对。

式(3-1)表示了调合过程的物料平衡和组分平衡,在实际系统中,空气的氧含量 $C_1 = 21$ ,尾气的氧含量 $C_2 = 11$ ,实际控制的混合气体的氧含量 $C = 13$ 。按照上述方法可以求得系统的相对增益矩阵为:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} \end{bmatrix} = \frac{C}{Q} \begin{bmatrix} \frac{C-C_1}{C_2-C_1} & \frac{C_2-C}{C_2-C_1} \\ \frac{C_2-C}{C_2-C_1} & \frac{C-C_1}{C_2-C_1} \end{bmatrix} = \frac{C}{Q} \begin{bmatrix} 0.8 & 0.2 \\ 0.2 & 0.8 \end{bmatrix} \quad (3-16)$$

由式(3-16)可以看出：用操纵变量  $Q_1$  (空气流量)与被控变量  $C$  (氧含量)，操纵变量  $Q_2$  (尾气流量)与被控变量  $Q$  (用气流量)配对是合理的。

因此，由式(3-5)、(3-9)和(3-12)，并结合由式(3-16)分析得出的结论，可以得到被控对象的传递函数为：

$$\begin{bmatrix} C(s) \\ Q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_1}{Vs+Q} e^{-\frac{L}{v}} & \frac{C_2}{Vs+Q} e^{-\frac{L}{v}} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} \quad (3-17)$$

在实际系统中，空气的氧含量  $C_1 = 21$ ，尾气的氧含量  $C_2 = 11$ ，储气罐的体积  $V = 16$ ，通入氧化炉的用气量  $Q = 4.5$ ，管道长度  $L = 5$ ，流体速度  $v = 2$ ，将这些参数代入式(3-17)中，可得：

$$\begin{bmatrix} C(s) \\ Q(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{21}{16s+4.5} e^{-2.5s} & \frac{11}{16s+4.5} e^{-2.5s} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1(s) \\ Q_2(s) \end{bmatrix} \quad (3-18)$$

## 3.2 解耦控制器的设计

### 3.2.1 MIMO 系统建模方法

对于 MIMO 系统解耦控制器的设计，就是要求在充分了解被控系统耦合特性的基础上，确定期望性能指标和控制器类型和参数，消除耦合或者弱化耦合的影响，其基本思路是：

(1) 对实际被控系统进行输入输出特性分析，得到被控系统所固有的物理特性，即建立对象的数学模型。

建立系统的数学模型有两种方法：机理分析方法和实验方法。机理分析法需要深入分析系统的运动规律，利用已知的物理定律和方程，作为建立数学模型的依据。实验方法是在得到系统的模型结构之后，根据系统的输入输出数据所提供的信息，估计出模型中有关参数的值。在此采用机理分析方法建立耦合对象的数学模型<sup>[57-59]</sup>。

对于 MIMO 系统，设置一个输入量(设为第  $i$  个输入量)为阶跃信号，其余输入量为稳态恒定值，得到各输出对此输入信号的灵敏度，然后对其余的输入做同样的处理，最终得到整个被控系统的基本特性。

进一步确定各子系统的主导特性。因为对于 MIMO 系统，从理论上说，各个输入都可对输出量  $j$  产生影响，而且这些影响也会各有其不同响应特性。为了

简化系统设计，往往通过输入输出特性分析得出输出量  $j$  的主导特性，如果输出量  $j$  对输入量  $i$  的灵敏度很小，就可以认为输出量  $j$  基本不受输入量  $i$  影响，从而为各子系统设计各自的闭环控制提供依据，简化设计过程。

(2) 设计解耦控制器，使耦合的对象变成一个无耦合的控制对象，或者耦合程度极其轻微的控制对象，成为单回路控制系统。

### 3.2.2 解耦控制器的设计思路

在氧化锌晶须加工过程控制系统的配气过程中，两个输入量分别为空气流量和尾气流量，输出量为混合后气体的氧含量和流量，由于它们存在严重的耦合，且两个回路的耦合程度有较大的差异，所以必须进行解耦设计。典型的解耦设计方法有对角矩阵解耦和改变目标矩阵的解耦。对角矩阵解耦的一个重要特性是解耦目标矩阵  $G_A(s)$  保留了原耦合矩阵的主对角线上的元素，而非主对角线上的元素为零。而改变目标矩阵的解耦方法是在加入一组解耦网络以后，在解除系统间的耦合之外，同时改变各个控制通道的特性，使各个独立的控制系统变得更加容易控制，前馈补偿解耦法就是其中一种。从 MIMO 控制系统设计方法的工程性、实用性的角度来出发以及为了使得加入解耦控制器后控制系统更加容易控制，采用前馈补偿解耦法，通过改变系统的目标矩阵  $G_A(s)$ ，再设计一个 PI 反馈控制器，通过设计反馈控制系统的参数，使闭环控制系统达到期望的动、静态性能与较好的抗干扰能力。前馈补偿解耦法具有运算简单、动态偏差小、响应速度快、过渡时间短、容易在计算机上实现等特点<sup>[74]</sup>。

### 3.2.3 前馈补偿解耦控制器设计原理

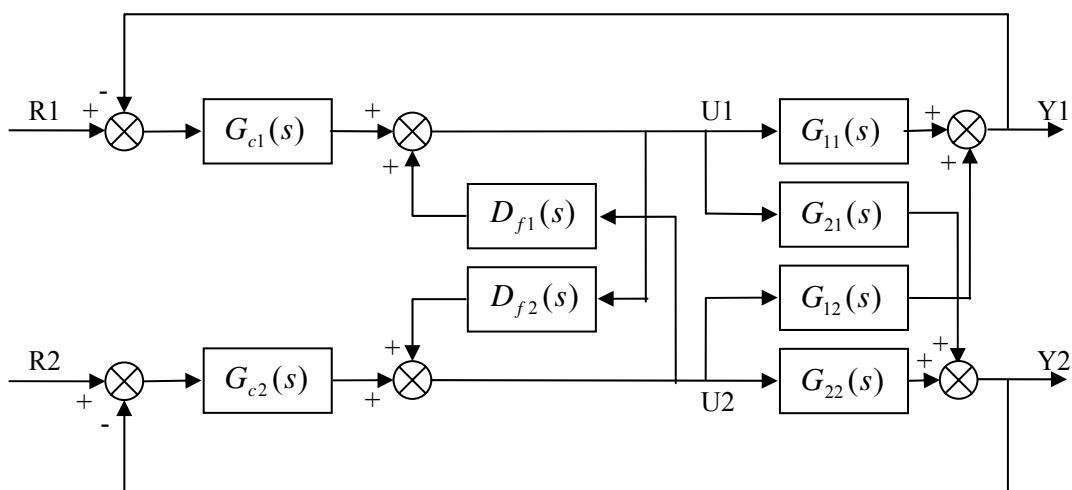


图 3-2 前馈补偿解耦控制系统方框图

图 3-2 为前馈补偿解耦控制系统的方框图。其中：R1、R2 为设定值，分别表示混合气体的氧含量、流量；U1、U2 为操纵变量，分别表示空气流量和尾气流量；Y1、Y2 为被控变量的实际反馈值。 $G_c(s)$  为控制器， $D_f(s)$  为解耦控制器， $G_{ij}(s)$  为系统的传递函数。

前馈补偿解耦法实际上是把某通道的调节器输出对另外通道的影响看作是扰动作用，然后应用前馈控制的原理，解除控制回路之间的耦合。例如， $u_1$ 会影响  $y_2$ ，对第二个回路来说是一个扰动因素，通过解耦装置的  $D_{f2}(s)$  环节产生的控制作用  $u_2$  来补偿  $u_1$  对  $y_2$  的影响。因此，可以按前馈控制的不变性原理来设计解耦控制器  $D_{f1}(s)$  和  $D_{f2}(s)$ 。

对于双输入双输出系统，按不变性原理可得：

$$G_{11}(s)D_{f1}(s) + G_{12}(s) = 0 \quad (3-19)$$

$$G_{22}(s)D_{f2}(s) + G_{21}(s) = 0 \quad (3-20)$$

由式(3-19)和式(3-20)有：

$$D_{f1}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (3-21)$$

$$D_{f2}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (3-22)$$

采用前馈补偿解耦后，可得：

$$\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & D_{f1}(s) \\ D_{f2}(s) & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{22}(s)} & 0 \\ 0 & \frac{G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s)}{G_{11}(s)} \end{bmatrix}$$

可见，前馈解耦后所得的仍是对角矩阵。这样也完全解除了各回路之间的关联，但是各条通道的传递函数并不是原来的传递函数  $G_{ij}(s)$  了。

设计前馈解耦控制器时还应注意以下几个问题：

(1) 当前馈解耦只考虑静态解耦时，式(3-21)和式(3-22)可写成

$$D_{f1} = -\frac{k_{12}}{k_{11}}; \quad D_{f2} = -\frac{k_{21}}{k_{22}}$$

实践表明，在很多情况下，特别是在 $G_{12}(s)$ 与 $G_{11}(s)$ 和 $G_{21}(s)$ 与 $G_{22}(s)$ 动态响应相近时，用静态解耦就能取得很好的效果。

(2) 对于前馈解耦，当各条通道特性为 $G_{ij}(s)=\frac{k_{ij}e^{-\tau_{ij}s}}{T_{ij}s+1}$ 时， $D_{f1}(s)$ 或 $D_{f2}(s)$ 有时会出现纯超前环节 $e^{ds}$ ，这会对实施带来困难。此时可删去该项，或者在 $D_{fi}(s)$ 中改取其它元素为 1。

(3) 当需要动态解耦时， $D_{fi}(s)$ 一般可采用 $k \frac{T_1 s + 1}{T_2 s + 1}$ 的形式。

(4) 当目标函数矩阵为奇异矩阵时，即目标函数矩阵的行列式为零时，采用前馈时会使 $G_{ij}(s)D_{fi}(s)$ 为零阵。因此，对于双输入双输出系统，当 $G_{11}(s)G_{22}(s)$ 和 $G_{12}(s)G_{21}(s)$ 很接近时，解耦是比较困难的<sup>[62-64,74]</sup>。

### 3.2.4 解耦控制器的设计

通过前面的分析，可以由式(3-17)、式(3-21)和式(3-22)求得系统的解耦控制器，即：

$$D_{f1}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = -\frac{\frac{11}{16s+4.5}e^{-2.5s}}{\frac{21}{16s+4.5}e^{-2.5s}} = -0.5238 \quad (3-23)$$

$$D_{f1}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} = -\frac{1}{1} = -1 \quad (3-24)$$

## 3.3 增量式 PID 控制器设计

对于实际的过程控制，主控制器采用经典的增量式 PID 控制算法，利用 PID 控制器结构简单、易于实现、可靠性高等优点，进行流量的快速调节。

### 3.3.1 PID 控制原理

PID 控制器包括比例、积分和微分三部分，其控制原理图如图 3-3 所示。比例(P)控制是一种最简单的控制方式，其控制器的输出与输入误差成比例的关系。系统一旦出现了偏差，比例调节立即产生调节作用用以减少偏差。比例作用越大，可以加快调节，减少误差，但是过大的比例，使系统的稳定性下降，甚至造成系统的不稳定。积分(I)控制是消除系统的稳态误差，提高无差度。如果系统有误差，积分调节就进行，直至无误差，积分调节停止，积分调节输出为常值。积分

作用的强弱取决于积分时间常数  $T_i$ ， $T_i$  越小，积分作用就越强，反之  $T_i$  大则积分作用弱，加入积分调节可使系统稳定性下降，动态响应变慢。微分(D)控制反映系统偏差信号的变化率，具有预见性，能预见偏差变化的趋势，因此能产生超前的控制作用，在偏差还没有形成之前，已被微分调节作用消除。因此，微分调节可以改善系统的动态性能。在微分时间选择合适情况下，可以减少超调，减少调节时间。另外微分作用对噪声干扰有放大作用，因此过强的加微分调节，对系统抗干扰不利<sup>[65]</sup>。

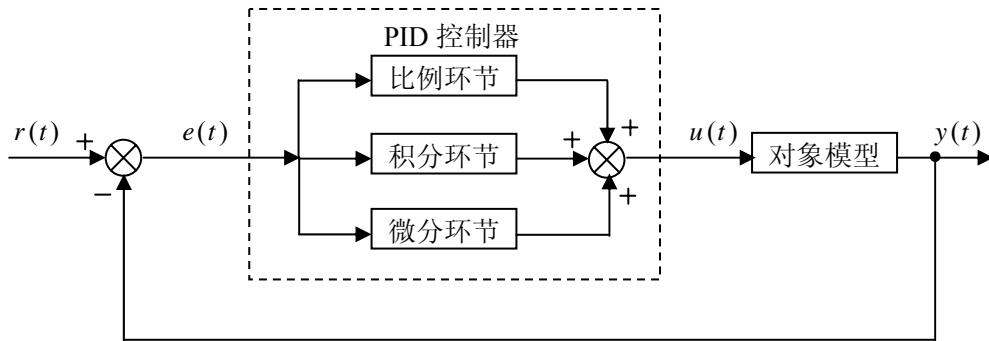


图 3-3 典型 PID 控制结构

PID 控制器是一种线性控制器，它根据给定值  $r(t)$  与实际输出值  $y(t)$  构成控制偏差：

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3-25)$$

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

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (3-26)$$

式中， $K_p$  为比例系数； $T_i$  为积分时间常数； $T_d$  为微分时间常数。

在计算机控制系统中使用的是数字 PID 调节器，就是对式(3-26)离散化，离散化时，令：

$$\left. \begin{aligned} u(t) &\approx u(kT) \\ e(t) &\approx e(kT) \\ \int_0^t e(\tau) d\tau &\approx T \sum_{j=0}^k e(jT) \\ \frac{de(t)}{dt} &\approx \frac{e(kT) - e(kT - T)}{T} \end{aligned} \right\} \quad (3-27)$$

式中  $T$  是采样周期，显然，上述离散化过程中，采样周期  $T$  必须足够短，才

能保证有足够的精度。由式(3-26)及式(3-27)可得:

$$u(kT) = K_p \left\{ e(kT) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(jT) + \frac{T_d}{T} [e(kT) - e(kT - T)] \right\} \quad (3-28)$$

数字 PID 控制系统可以分为位置式 PID 和增量式 PID。式(3-28)是位置式 PID 算法。位置式 PID 数字调节器的输出  $u(kT)$  完全是输出量, 是执行机构所应达到的位置(如阀门的开度), 数字调节器的输出  $u(kT)$  跟过去的状态有关, 计算机的运算工作量大, 需要对  $u(kT)$  作累加, 而且, 计算机的故障有可能使  $u(kT)$  作大幅度的变化, 这种情况往往是生产实际中不允许的, 而且有些场合可能会造成严重的事故。目前增量式 PID 控制比较广泛的应用, 所谓增量式 PID 是对位置式 PID 取增量, 数字调节器的输出只是增量  $\Delta u(kT)$ 。

$$\begin{aligned} \Delta u(kT) = & K_p [e(kT) - e(kT - T)] + K_i e(kT) + \\ & K_d [e(kT) - 2e(kT - T) + e(kT - 2T)] \end{aligned} \quad (3-29)$$

增量式算法和位置式算法在本质上没有大的差别, 增量式算法把计算机的一部分累加的功能  $u'(kT) = K_i \sum_{j=0}^k e(jT)$  由其它部件去完成。虽然增量式算法只是算法上的一点改动, 却带来不少优点:

- 1) 计算机(数字调节器)只输出增量, 计算机误动作时造成的影响比较小;
- 2) 算式中不需要作累加, 增量只跟最近的几次采样值有关, 容易获得较好的控制效果。由于式中无累加, 消除了当偏差存在时发生积分饱和的危险。

在实际过程中, 考虑到在满足控制精度的情况下控制作用尽量少变动, 并且尽量使得电动执行机构的寿命更长, 主控制器还设定一个死区, 采用带死区的增量式 PID 算法。比较被控变量实测值和设定值的差值绝对值与工艺要求精度(死区)的大小, 只有当差值绝对值超出精度范围才进行 PID 的调节, 否则不进行调节, 维持原输出。

### 3.3.2 PID 控制器设计

结合 PID 控制器的设计原理和控制对象的描述, 下面进行配气系统的主控制器设计。在对耦合系统解耦后, 各回路之间相互不影响, 为单回路控制。图 3-4 为典型的 PID 闭环控制系统结构图。

其中  $sp(n)$  为给定值,  $pv(n)$  为 A/D 转换后的反馈量,  $ev(n)$  为误差,  $mv(n)$  为控制器输出,  $mv(t)$  为 D/A 转换后的模拟控制信号,  $c(t)$  为被控量,  $pv(t)$  为现场传感器的检测后转换过来的电信号。

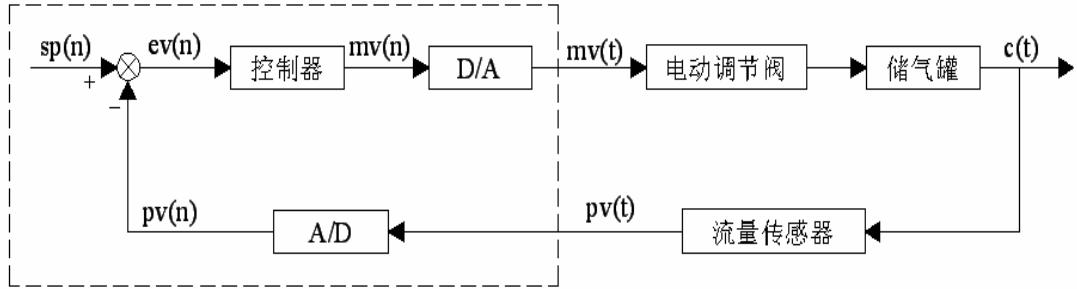


图 3-4 PID 闭环控制系统方框图

氧化锌晶须加工工艺中需要控制的为流量，属于快速反映系统，采用 PI 控制。此类系统的广义对象时间常数比较接近，稳定欲度小，因而所用比例度大，开环静态增益小，不用积分会产生很大的余差。另外，由于流量控制系统的滞后小，运行周期短，积分时间可以取得很小。比例作用随偏差的产生会瞬时变化，而积分作用总是有些滞后，所以有了积分作用并相应地将比例作用调弱，还有利于减少高频噪声的影响。

PI 控制器用传递函数的形式表示如下：

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (3-30)$$

PID 算法的参数采用工程整定法获得控制器的近似整定参数，其步骤为：

- 1) 置控制器积分时间  $T_i$  为最大值  $T_i = \infty$ ，微分时间  $T_d$  为零，比例系数为较大值，并将控制系统投入运行；
- 2) 待控制系统稳定后，观察其响应。若响应衰减太快，则减小比例系数；反之，如响应衰减较慢，应适当加大比例系数或减小积分时间；
- 3) 如响应超调过大或调节时间过长，应适当加大微分时间。通常取  $T_d = (1/8 \sim 1/4)T_i$ 。

这样，经试凑法得到解耦后两个单回路闭环控制系统的主控制器的 PID 系数分别为：

$$K_p = 0.16, \quad T_i = 5, \quad T_d = 0 \quad (3-31)$$

$$K_p = 8, \quad T_i = 10, \quad T_d = 0 \quad (3-32)$$

式(3-31)、(3-32)分别表示氧含量回路和流量回路的 PID 参数。

将式(3-31)、(3-32)代入式(3-30)可以得到氧含量回路和流量回路主控制器的传递函数为：

$$G_c(s) = 0.16 \left(1 + \frac{1}{5s}\right)$$

$$G_c(s) = 8\left(1 + \frac{1}{10s}\right)$$

同样，将式(3-31)、(3-32)代入式(3-29)有：

$$\Delta u(k) = 0.16[e(k) - e(k-1)] + 5e(k) \quad (3-33)$$

$$\Delta u(k) = 8[e(k) - e(k-1)] + 10e(k) \quad (3-34)$$

这样，计算机输出的控制增量  $\Delta u(k)$  对应的是本次流量调节时电动执行机构输入电流的增量。这样通过不断地改变电动调节阀的输入来改变流量的大小，最终实现氧含量和流量的恒定<sup>[65,67]</sup>。

## 3.4 基于 Simulink 的控制系统仿真

### 3.4.1 Simulink 模块库介绍

MATLAB 是一种用于科学计算的高级语言，而它所包含的软件包 Simulink 是一个功能强大的用于进行建模、仿真和动态系统分析的平台。Simulink 最大的特点就是基于框图的仿真功能，众多的功能模块库使得模型输入的方式令人耳目一新。图 3-5 为 Simulink 的模块库界面<sup>[60-61,66]</sup>。

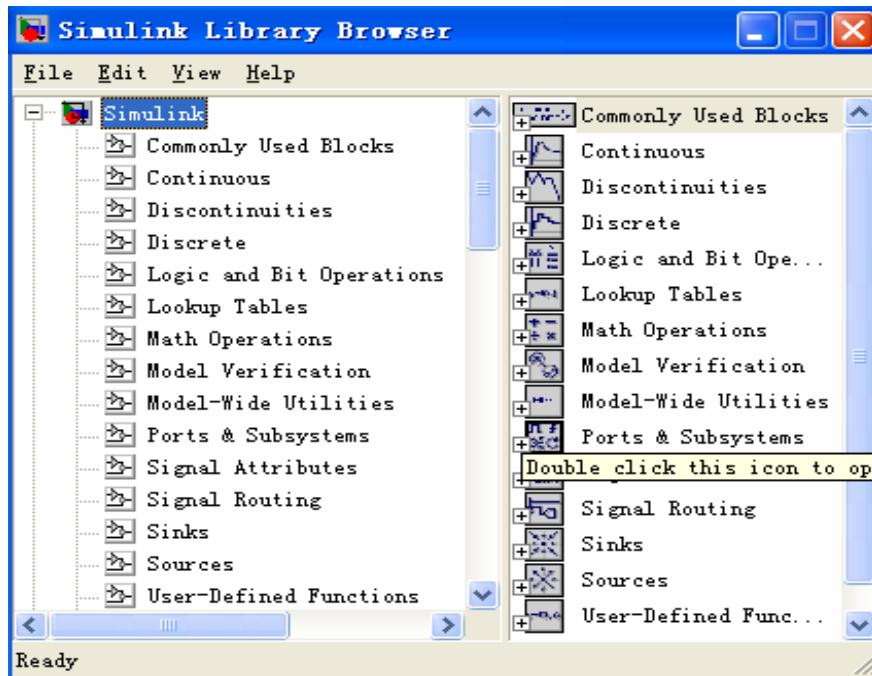


图 3-5 Simulink 模块库界面

从图 3-5 中可以看出，整个 Simulink 模块库是由各个模块组构成的，因此又称为模块库浏览器。控制系统建模与仿真常用的模块都在标准模块库中，包括信号源模块组、输出池模块组、连续模块组、离散模块组、数学运算模块组、非线

性模块组、函数与表格模块组、信号与系统模块组和子系统模块组几个部分。有了这些模块，可以方便的将控制系统的模型在 Simulink 下建立，并进行仿真。

### 3.4.2 Simulink 下控制系统的建模

在 MATLAB 的命令窗口中输入 new\_system 命令，就会弹出如图 3-6 所示的空白窗口模型。

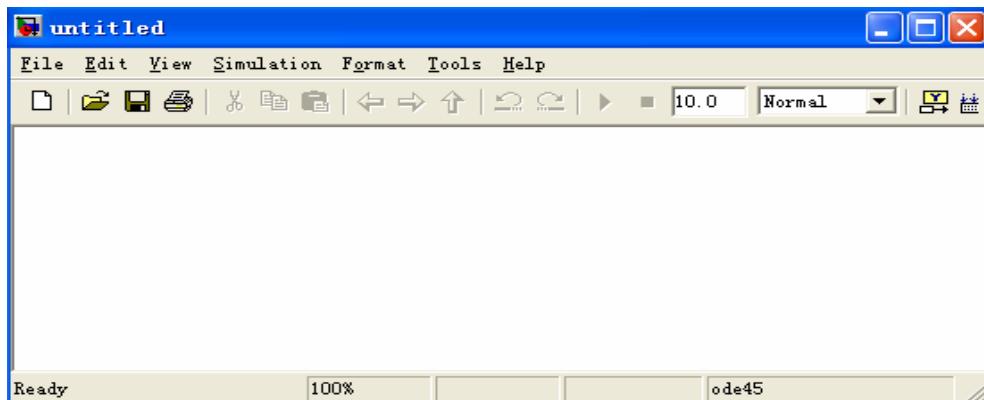


图 3-6 Simulink 模块编辑窗口

在图 3-6 中，依据求得的控制系统各个环节的传递函数，在模块库中找到与之相对应的模块形式，把它们放入 Simulink 模块编辑窗口，并按照相应的结构进行连接，构成一个完整的系统控制方框图，这样就方便的建立了所需要的数学模型，并能对其进行仿真。图 3-7 表示了控制系统的数学模型。

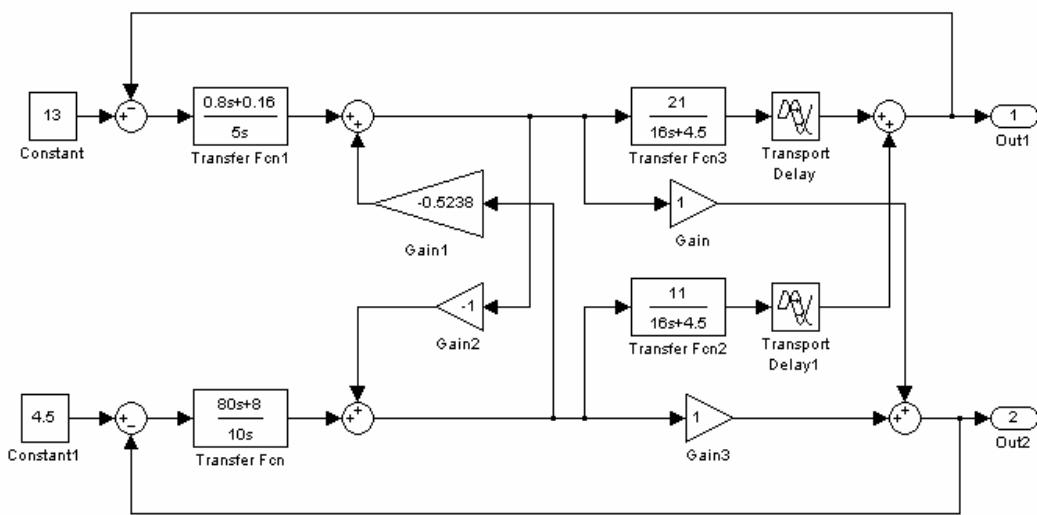


图 3-7 控制系统数学模型

图 3-7 中，Constant 表示被控变量给定值，Out 表示被控变量的输出，Transfer Fcn 表示表示传递函数，Gain 表示增益，Transport Delay 表示传递滞后。其各个模块的意义与图 3-2 相对应。

### 3.4.3 仿真结果及分析

对图 3-7 进行在线仿真，可以得到控制系统混合气体的氧含量和流量仿真曲线，如图 3-8 和图 3-9 所示。

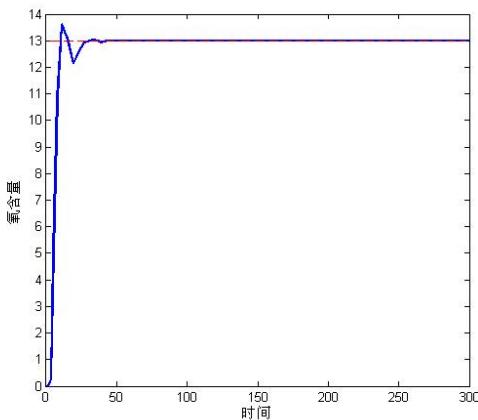


图 3-8 控制系统氧含量仿真曲线

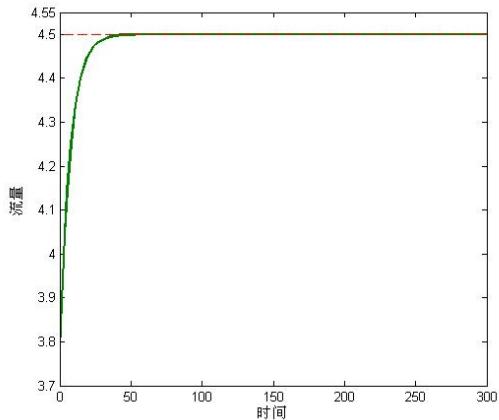


图 3-9 控制系统流量仿真曲线

以上两幅图的仿真结果是在主控制器参数反复试凑后得到的最佳结果，不论是流量还是氧含量的动态响应曲线都是非常理想的。从图 3-8 和图 3-9 的理论仿真结果可以得出结论：只要实际过程中整定好主控制器的 PID 参数，并把前馈补偿解耦算法和带死区的 PID 算法在 PLC 中实现，就能满足工艺要求的控制精度，达到预期的控制效果。

## 3.5 小结

本章首先通过对配气系统被控对象的分析，得出系统具有耦合性和时滞性的特点。针对这些特点，采用前馈补偿解耦法对控制系统进行解耦设计，主控制器为带死区增量式 PID 算法。

然后，通过阐明解耦控制系统的建模方法和设计思路，以及前馈补偿解耦控制器的设计原理，根据建立的配气系统动态特性模型设计解耦控制器，并得出了系统解耦矩阵和系统结构图。

其次，在解耦以后控制系统就成为单回路的闭环控制系统，因此采用工业过程中经典的 PID 控制算法作为系统的主控制器。在阐述其控制原理后，结合工程整定法和试凑法进行 PID 控制器的设计。

最后，将设计好的控制系统在 Simulink 环境下建模，并给出了仿真结果。仿真结果说明了原理的正确性并得到了较好的动态响应曲线，为实际使用提供了理论依据。

## 第四章 软件设计及算法实现

### 4.1 应用软件的总体框架

氧化锌晶须生产过程控制系统采用模块式结构。该系统以实现工况监测和实时控制为主，主要包括监视模块、数据管理模块、控制算法模块和通信模块等四大模块。其中数据管理模块和控制算法模块是最重要的两个模块，它们分别负责整个控制系统的数据操作、氧含量和流量的调节，以及保证整个氧化锌晶须加工过程的稳定运行。应用软件总体框架如图 4-1 所示。

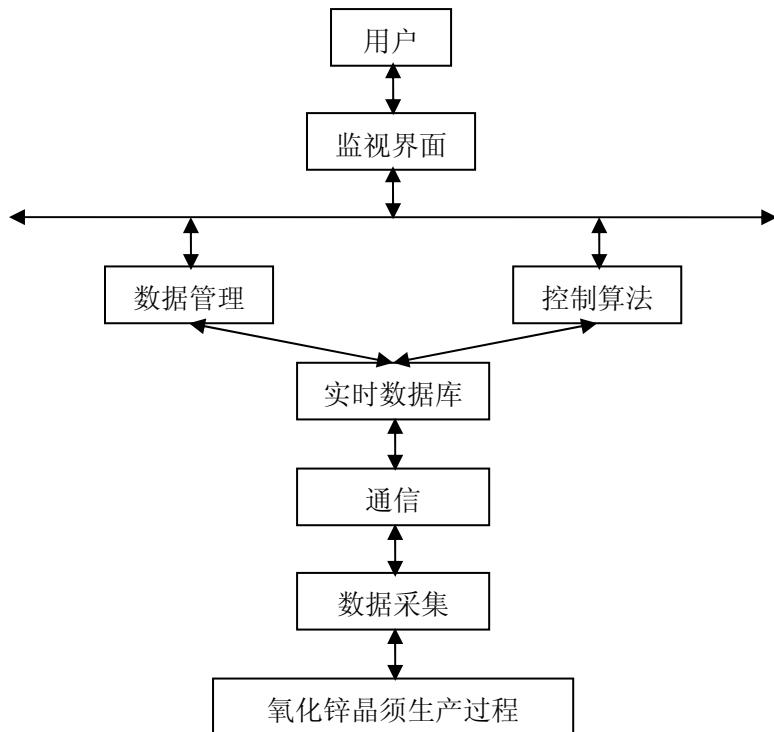


图 4-1 应用软件总体框架

### 4.2 软件开发平台及开发工具

本软件是在 Windows XP 的操作平台下开发编写的。上位机用 MT510T 触摸屏自带的组态软件 EasyBuilder 设计各个监控和管理模块；下位机采用 Siemens PLC S7-300 系列专业软件包 STEP 7，在 PLC 中实现各算法。

#### 4.2.1 组态软件介绍

触摸屏组态软件 eView500 包含 3 个模块：EasyLoad（Upload 上传和 Download

下载), EasyWindow(在线模拟和离线模拟) 及 Easybuilder。Easybuilder 是组态软件编程环境, 用来配置各种元件, 在 Easybuilder 中也可以上传和下载及在线(或离线) 模拟, 但是它是通过 EasyManager 调用其它两个模块的方式实现的。Easybuilder 下面具有 6 个功能: BootRomUpdate、EsayAsciiFontMaker、EasyBuilder500、EasyManager、PLCAddressView、ReleaseNote, 其中常用的是 EasyManager、EasyBuilder500 和 PLC AddressView 3 个功能, EasyManager 是整个软件的管理部分, 程序开始首先应对 EasyManager 进行设置, 比如设置通讯口、通讯速率、检验位、PLC 站号等, 它们是计算机和触摸屏之间进行正确通讯的必备设置。EasyBuilder500(EB500) 是组态软件环境, 所有的功能(系统控制界面、开关量控制输入输出点、错误报警、数据传输等等) 都在这里完成; PLC Address View 则是与 PLC 相对应的触摸屏可以操作的地址表。触摸屏可对自身内存地址(LW、RW) 等进行操作, 也可对 PLC 地址进行操作, PLC Address View 可以显示出触摸屏可以操作的 PLC 的地址范围<sup>[68-69]</sup>。

进行编程之前必须进行参数设置, 包括对组态软件 EasyBuilder 的参数设置和 PC 机中相关的设置, 使得触摸屏能完成同 PC 机和 PLC 的数据通讯, 即: 组态、监控程序由 PC 机下载到触摸屏; 触摸屏与 PLC 进行实时数据通讯。

图 4-2 表示了 EasyBuilder 的系统参数设置, 其中重要的包括: PLC 类型、人机类型、通讯口类型、波特率、数据位、校验位和 PLC 站号等, 其设置要与 PC 机相对应。PC 机中的设置在 WindowsXP 中的“操作面板”内, 主要包括适配器类型、波特率等。



图 4-2 EasyBuilder 系统参数设置

### 4.2.2 Siemens STEP 7 标准软件包

STEP7是用于SIMATIC可编程控制器组态和编程的标准软件包，它是SIMATIC工业软件的组成部分。标准软件包运行在Windows95/98/NT4.0/2000/XP下，并与Windows的图形和面向对象的操作原理相匹配。STEP 7中集成的SIMATIC编程语言和语言表达式，符合EN 61131-3或IEC 1131-3标准。标准软件支持自动任务创建过程的各个阶段，如：

- 1) 建立和管理项目
- 2) 硬件、通讯组态
- 3) 为功能模块和通讯处理器赋值参数
- 4) 定义绝对地址和符号地址
- 5) 创建程序
- 6) 下载程序到可编程控制器
- 7) 测试自动化系统
- 8) 诊断设备故障

STEP 7标准软件包提供了一系列的应用工具，当选择相应功能或打开一个对象时，这些工具会自动启动，如图4-3所示。

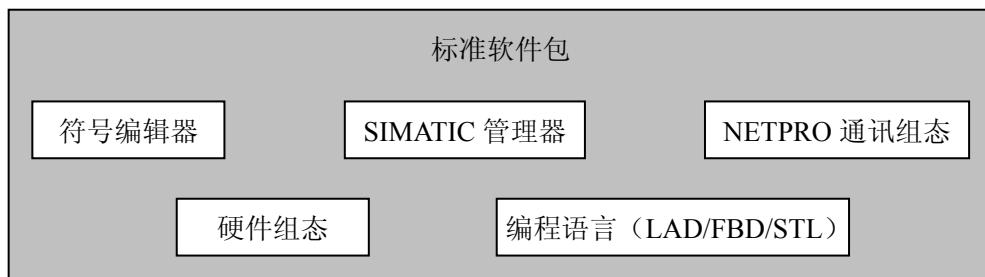


图 4-3 STEP 7 标准软件包应用程序结构

### 4.2.3 软件调试方法

eView 的组态软件 EasyBuilder 具有在线模拟的功能，可以在手头没有触摸屏的情况下，实现与 PLC 的通讯功能。这样就方便了工程的调试及减少调试时刷新触摸屏的 FLASH ROM 的次数，大大节约了调试时间。其具体使用方法如下：

- 1) 将你编辑好的工程文件存盘、编译，编译后的文件均为“\*.eob”文件。
- 2) 用 PLC 的编程电缆跟电脑连接起来。
- 3) 打开“EasyManager”，将“Direct Online—Simulator”前面打勾，然后点击第二项的“OnLine — Simulator”，进入对话框。在对话框内找到刚刚编译后的“\*.eob”文件，然后点击“打开”就可以了，相当于把电脑当触摸屏用。

## 4.3 软件功能实现

### 4.3.1 软件结构及功能

自动控制系统的监控软件是完成与实时控制和显示密切相关的一些功能，基本的要素包括可视化的监控界面、控制算法的实现和数据管理。本软件实现的主要功能如下所述：

- 1) 过程状态可视化监控：提供友好的“人机界面”，实现工艺流程图、氧含量实时曲线、流量实时曲线、工艺参数显示和控制参数设置等。
- 2) 控制算法实现：将解耦控制算法和 PID 算法在下位机(PLC)上实现，完成系统的自动化控制。
- 3) 数据管理：实现数据的采集、显示和传送等功能，它还包含了 PC、PLC 和触摸屏之间的三者通讯的实现。

监控软件结构如图 4-4 所示。

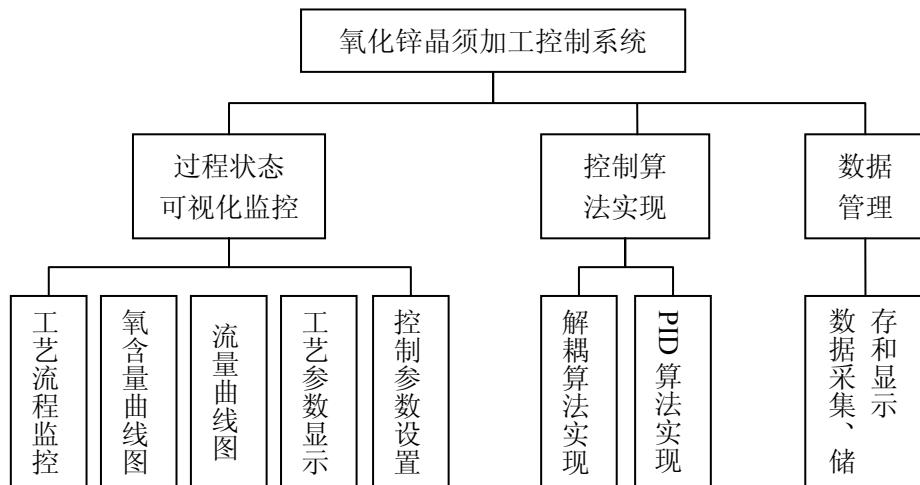


图 4-4 监控软件结构

### 4.3.2 功能模块介绍

#### (1) 实时监控模块

实时监视模块主要包括控制软件的工艺流程图画面、实时趋势图显示、过程控制系统实时数据显示、各子系统当前运行状态显示和报警显示等，给用户提供友好易用的操作信息。同时该模块还设有多个子模块，通过点击界面上的按钮可进入到用户需要查看的子模块。

从安全、稳定运行的角度考虑，各子模块的进入都必须有权限限制，因此系统设置了三级操作：操作工级别、工艺员级别以及电气工程师级别。操作工级只

允许操作工查看系统运行状况、报警信息等，不能作任何修改；工艺员级除允许作上述查阅外，还可作一些常见工艺参数的修改和设定，以及对结果数据、曲线进行分析；电气工程师级则允许操作者对程序、曲线等各种参数作任何修改。每一种级别之间的切换都需要进行用户登录，以方便工艺参数的修改和维护。

## (2) 数据管理模块

数据管理模块分为实时数据库和数据处理两大部分，其中实时数据库是数据进行共享和处理的数据源。

系统中建立的实时数据库为表型结构，用户可自由开辟一组连续的地址。数据库提供的数据类型有浮点型、整型、长整型等，用户可根据需要进行更改。根据需要，该模块开辟了三组数据区，分别定义为 DB1、DB2 和 DB10。其中 DB10 专用于与上位机通信时共享数据的存储，这些数据大都为控制变量和工艺参数；DB1 用于自动闭环调节时相关数据的存储；DB2 则用于系统临时变量的存储。三个区中数据可供任何其他模块使用，同时这三组数据区可以相互进行访问。

数据处理部分主要完成实时数据的采集和显示，这些数据包括较重要的工况信息，如流量、氧含量、压力、压缩机排空情况和报警信号等。

## (3) 控制算法模块

控制算法模块是应用软件中的底层，却是最重要、最核心的一个模块，它实现了氧化锌晶须自动控制系统中氧含量和流量的控制。该模块通过访问实时数据库，得到输入输出和调节反馈等信息，然后对这些信息进行比较分析，分析结果如果表明被控参数当前状态不在工艺要求范围内，该模块依据控制算法计算出控制量，进行调节。

## (4) 通信模块

通信模块实现数据的传输和共享。SIMATIC S7-300 具有多种不同的通讯接口：用来连接点到点通讯系统的通讯处理器、用来连接 AS-I 接口、PROFIBUS 和工业以太网总线系统、用于连接编程器、PC 机及其他自动化控制系统的 MPI(多点接口)以及用于 I/O 模块周期寻址的总线接口(AS-I 或者 PROFIBUS)。但 MPI 作为经济有效的解决方案，给用户提供了通讯组态功能，使得通讯非常简单、容易，因此系统采用 MPI 接口进行数据通讯。

MPI 通讯口集成在 S7-300 CPU 上，它能同时连接几个带 STEP 7 的编程器 /PC/人机界面(HMI)。利用 MPI 接口，联网的 CPU 可以利用全局数据(GD)服务，周期性地相互进行数据交换。而且 MPI 直接与 S7-300 内部的 K 总线连接，通过 K 总线接口从编程器对 FM/CP 模块进行编址。图 4-5 表示了通讯接口设置。

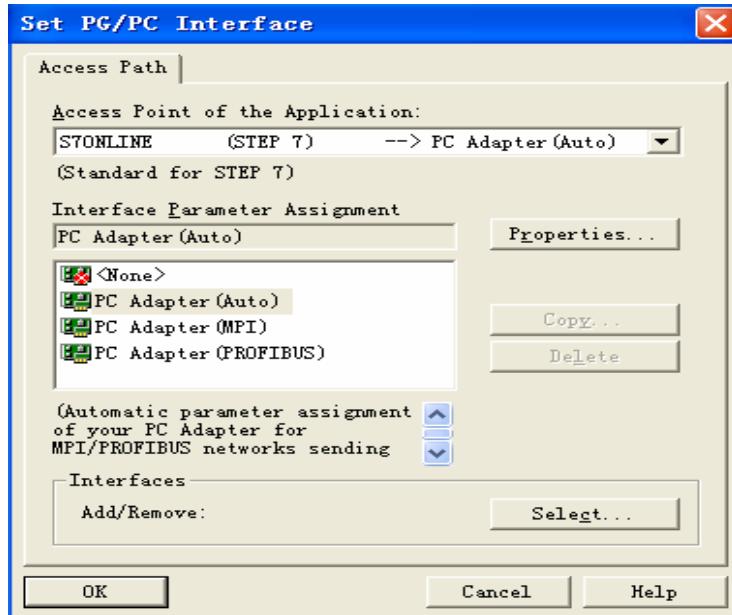


图 4-5 通信接口设置

## 4.4 PLC 编程及算法实现

### 4.4.1 STEP7 组态

Step7 是应用于 SIMATIC 可编程逻辑控制器的组态和编程的标准软件包，它是 STMMATIC 工业软件的组成部分。用 Step7 创建一个项目时，一般按照如下几个步骤：

- 1) 首先设计程序结构。使用 Step7 中可用的块系统控制器设计草案中所描述的任务转化位程序结构。
- 2) 启动 Step7，创建一个项目结构。项目就像一个文件夹，所有数据都以分层的结构存于其中，其它任务都在这个项目下执行。
- 3) 组态一个站。即指定系统所使用的 PLC，本系统为 SIMATIC300。
- 4) 组态硬件。即对于具体的项目，选用了哪些功能模块(如 CPU、数字量输入模块、数字量输出模块等)，系统会根据这些模块的型号，来自动给其分配操作地址，如图 4-6 所示。
- 5) 定义符号、创建程序。在符号表中定义局域或共享符号，用这些符号来替代绝对地址；根据系统要求完成各功能块的编写并对其进行编译。
- 6) 程序下载、测试、诊断。在编译无误的情况下将整个项目从 PG/PC 下载到 PLC 内存里面。并利用 Step7 的在线监视(程序监视和变量表在线监视)功能，检查程序的执行情况，不断地进行调试。

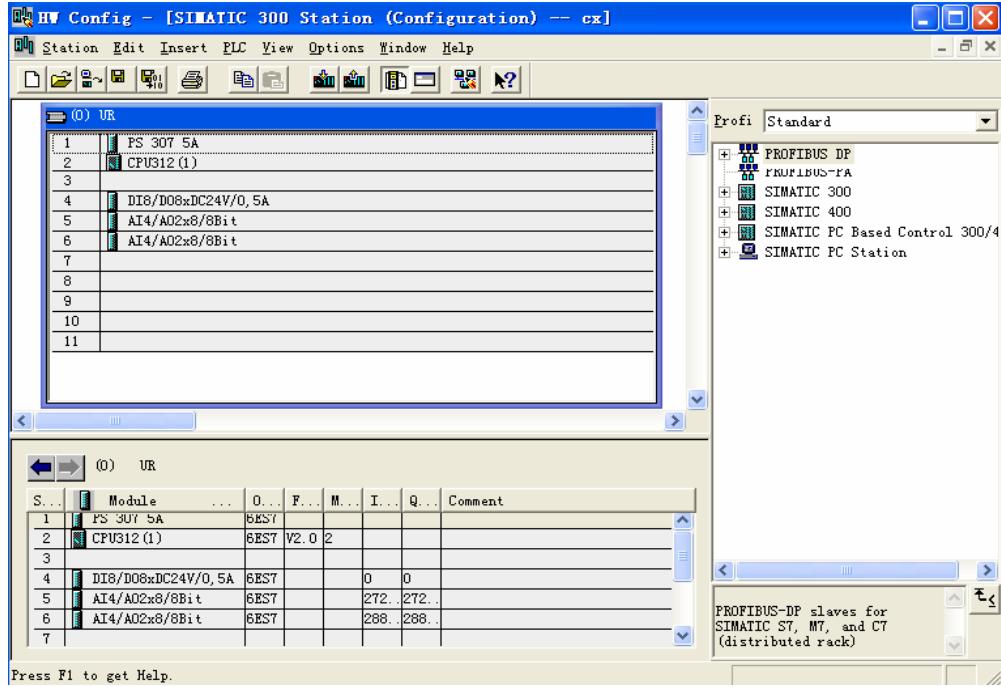


图 4-6 PLC 硬件组态

#### 4.4.2 控制逻辑分析

从对工艺流程的分析可知，系统主要控制的参数为氧含量和进气流量，氧含量又由尾气流量和空气流量来决定，即通过检测氧含量的设定值来调节尾气流量和空气流量，用电动调节阀进行控制。这种变化是连续性的，并含有耦合，由前馈补偿解耦控制器进行解耦和主控制器为带死区的增量式 PID 算法完成。由于气体是可压缩的，流量的变化与压力密切相关，因此，在每个电动调节阀前面必须加入一个稳压阀，这样才能确保流量调节的稳定。

尾气压缩机连着氧化炉，要把氧化炉中反应后剩余的气体抽出，当尾气压缩机抽出的气体大于自身的输出时，尾气压缩机的压力就会越来越高，当压力达到保护设定值时就会自动停止，这是不允许的。因此，用一个电磁阀来控制排空。为了不让电磁阀在保护设定值附件频繁的开闭，让电磁阀的通电动作具有滞回特性，即：设定一个压力值  $P_2$ ， $P_2$  小于尾气压缩机自身的保护压力，现场设定为保护压力的 95%，当压力小于  $P_2$  时，让电磁阀继续通电进行尾气排空，直到压力小于在程序中设定的最小值  $P_1$  时再让电磁阀断电，停止尾气排空；当压力再次增加  $P_2$  时，使电磁阀通电，重复上面的逻辑动作。

当排空电磁阀通电排尾气时，关闭尾气输入管道上的电磁阀，为了使氧含量不受影响，也将空气输入管道上的电磁阀关闭。与此同时停止 PID 调节，让电动调节阀的阀位停留在原来的位置，这样保证再次调节时电动调节阀只在原来的阀位附近做小幅度的调节，保证了流量控制的稳定；当关闭排空电磁阀时，打开尾

气管道和空气管道上的电磁阀，同时也使 PID 调节继续进行，实现尾气排空与流量调节的连锁控制。图 4-7 表示了系统的单回路自动控制流程图。

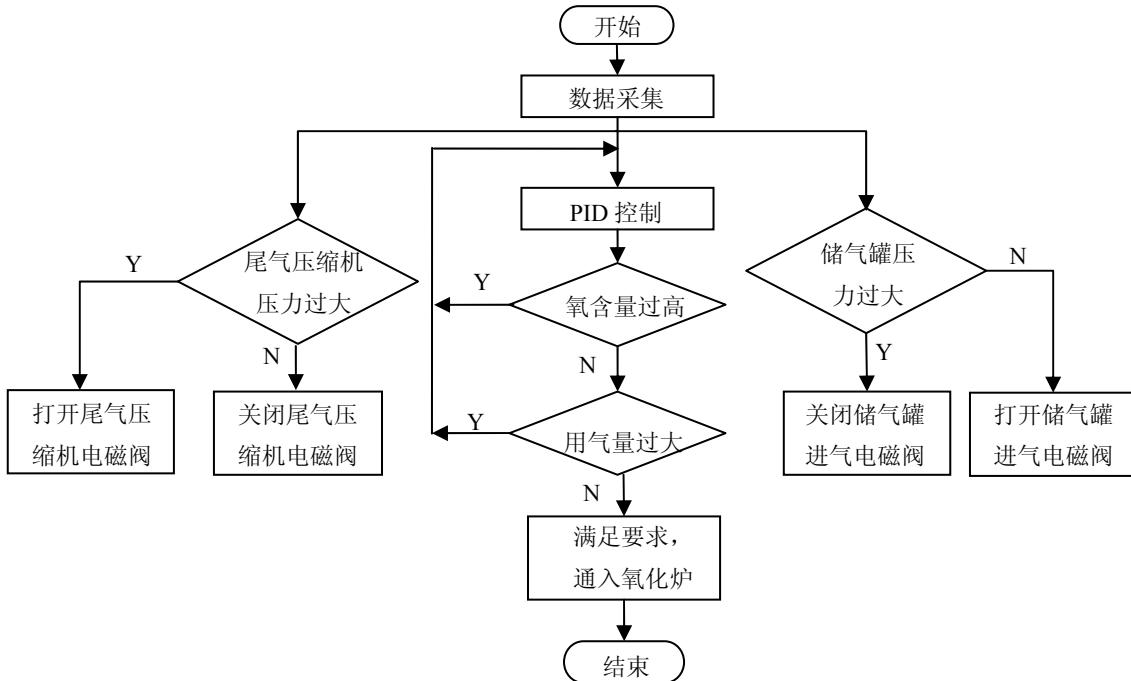


图 4-7 单回路自动控制流程图

### 4.4.3 算法实现

### (1) 前馈补偿解耦控制算法实现

双输入双输出系统前馈补偿解耦控制算法流程分为如下几步：

- 1) 输入解耦矩阵  $D(kT)$ , 采样  $y(kT)$ ;
  - 2) 计算偏差  $e(kT)$ ;
  - 3) 计算主控制器输出  $u(kT)$ ;
  - 4) 计算解耦装置输出  $u_{ij}(kT)$ ;
  - 5) 最后计算机输出  $u'(kT)$ 。

从 PLC 的模拟量通道输出的数据是十进制格式，而程序中所有的参数为了方便操作都是以实数形式处理，因此流量控制量输出前必须要进行转换。已知 Siemens300 系列 PLC 的测量精度为 27768 分之一，即 PLC 可测量范围为十进制 0-27768；同时，检测空气和尾气的流量计量程分别为 2-20 和 0.5-5，设控制量对应的十进制为  $U'$ ，则有：

$$\frac{U_1'}{U_1} = \frac{27768 - 0}{20 - 2} = 1542.7 \quad (4-1)$$

$$\frac{U_2'}{U_2} = \frac{27768 - 0}{5 - 0.5} = 6170.7 \quad (4-2)$$

由此得出：

$$\begin{bmatrix} U_1' \\ U_2' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1542.7 & 0 \\ 0 & 6170.7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} \quad (4-3)$$

将式(4-3)取整后就可以从PLC的模拟量通道直接输出了。图4-8为前馈补偿解耦控制算法在PLC中的实现。

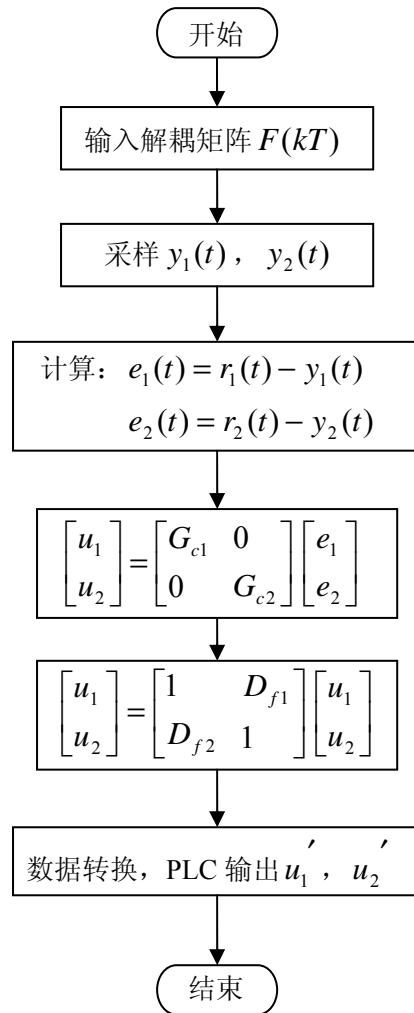


图 4-8 前馈补偿解耦控制算法流程图

## (2) 增量式 PID 算法实现

S7-300 PLC 中有自带的 PID 模块，为了实际使用的方便，自行编写了带死区的增量式 PID 算法模块，如图 4-9 所示。图 4-10 为算法流程图。

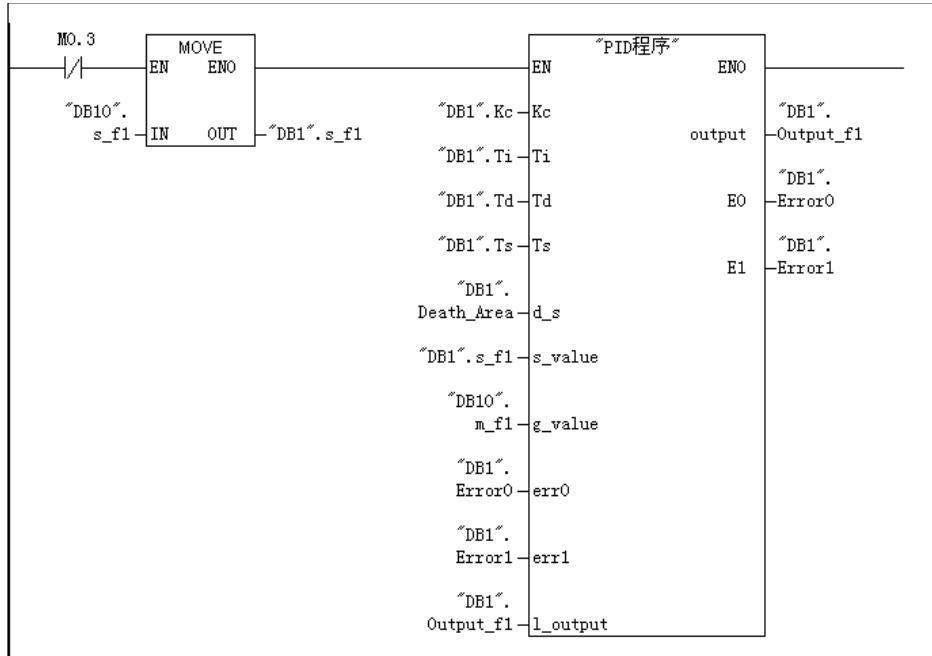


图 4-9 带死区的增量式 PID 梯形图

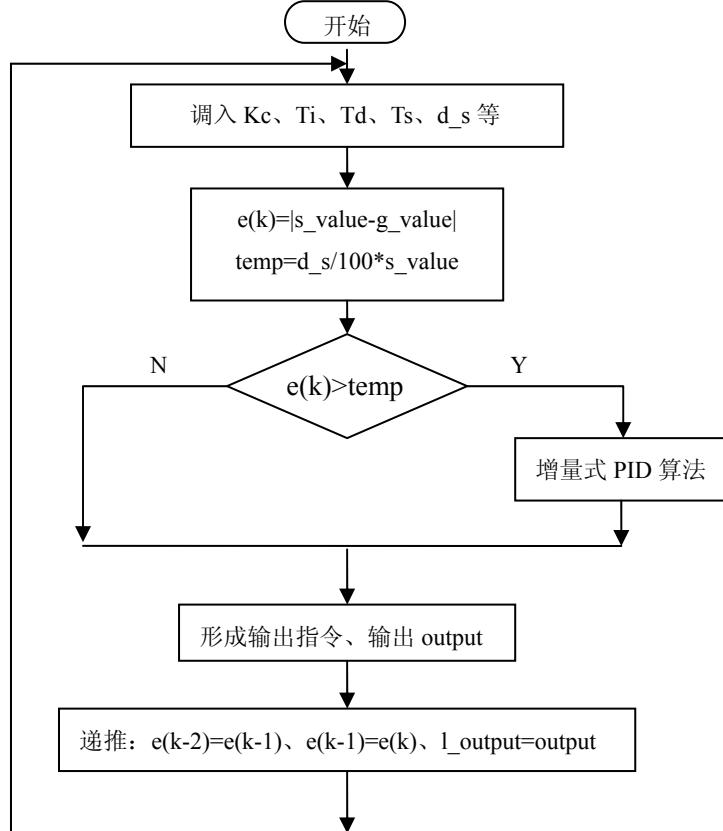


图 4-10 带死区的增量式 PID 算法流程图

图中 "DB1".K<sub>c</sub> 为比例系数， "DB1".T<sub>i</sub> 为积分系数， "DB1".T<sub>d</sub> 为微分系数， "DB1".T<sub>s</sub> 为采样时间， "DB1".Death\_Area 为设置的死区值， "DB1".s\_f1 为流量设定值， "DB10".m\_f1 为流量实际输出的采样值， "DB1".Error0 为 k-1 时刻的误差 e(k-1)， "DB1".Error1 为 k-2 时刻的误差 e(k-2)， "DB1".Output\_f1 为增量式 PID 算法的输出量，也就是电动调节阀的控制量。其具体的在 PLC 中实现过程如图 4-11 所示。

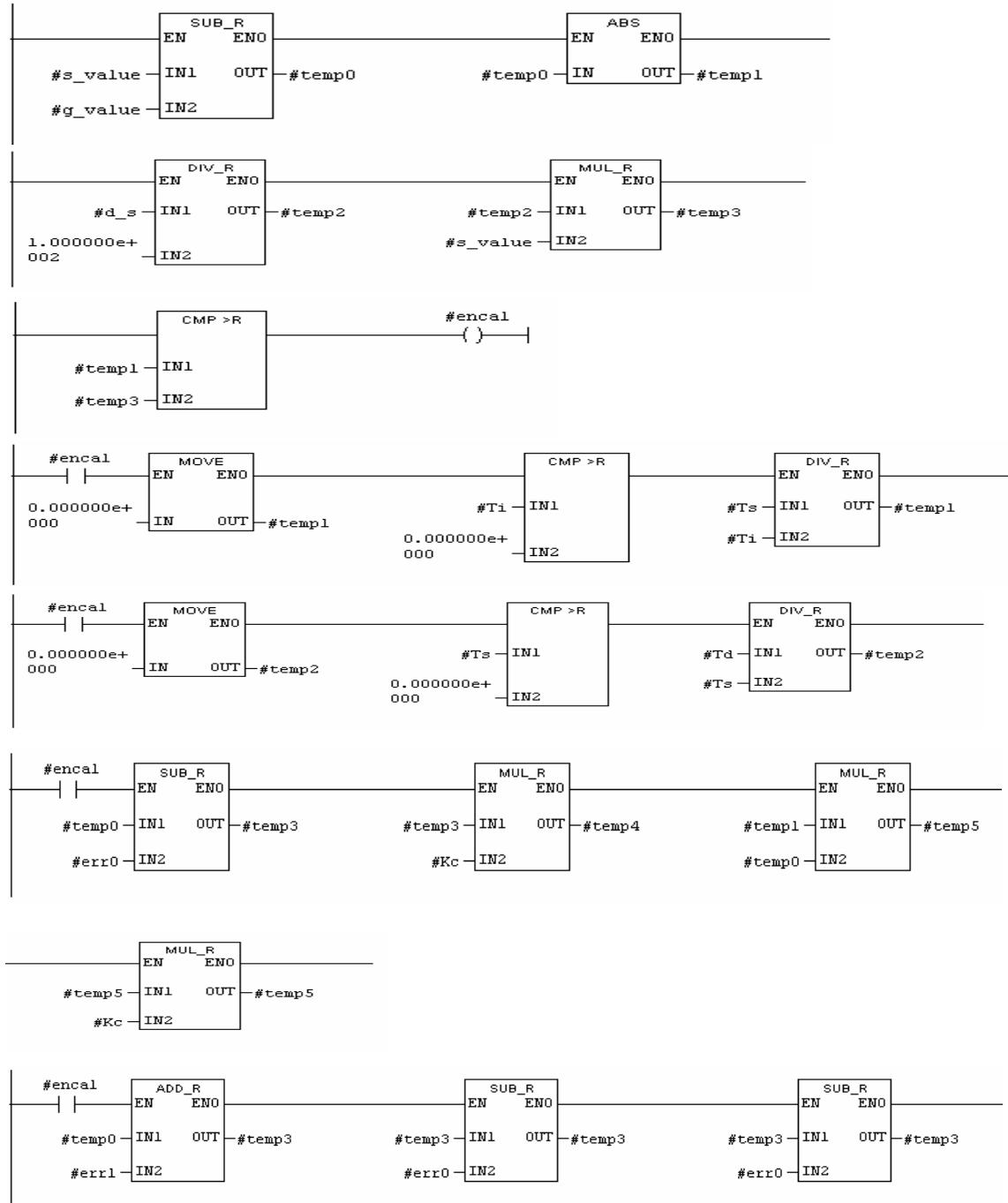


图 4-11 带死区的增量式 PID 算法在 PLC 中的实现

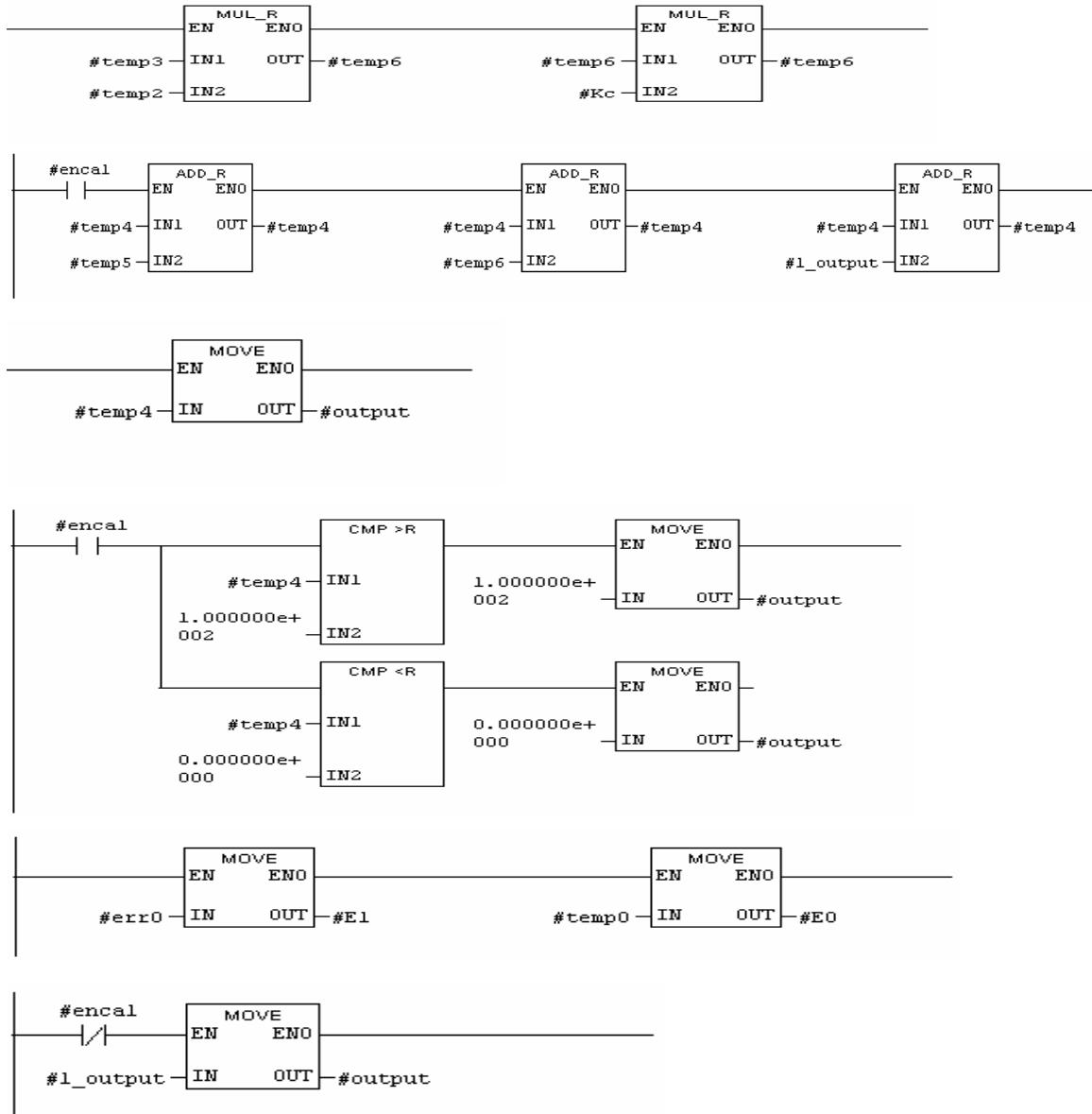


图 4-11 续 带死区的增量式 PID 算法在 PLC 中的实现

在 4.4.2 中提到了连锁控制，图 4-12 表示了尾气排空与流量调节的连锁控制在 PLC 中的实现。

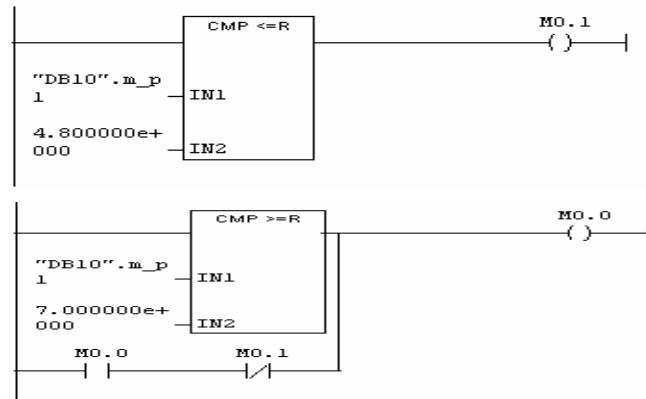


图 4-12 尾气排空与流量调节连锁控制

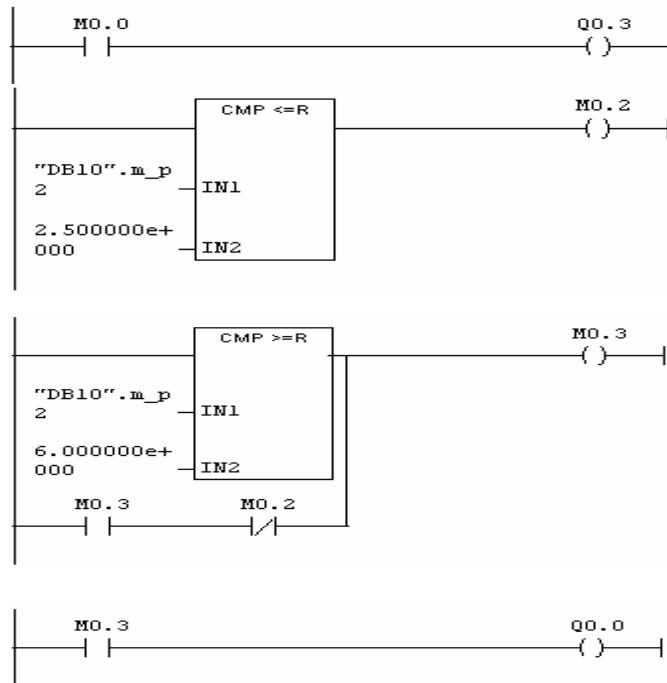


图 4-12 续 尾气排空与流量调节连锁控制

## 4.5 小结

本章主要阐述了氧化锌晶须自动控制系统的软件设计框架及内容，重点介绍了软件模块的功能，包括实时监视模块、数据管理模块、控制算法模块和通信模块，并介绍了前馈补偿解耦控制算法和带死区的增量式 PID 算法在 PLC 中的实现以及以流量调节之间的连锁控制的程序实现。

## 第五章 控制系统工业应用

### 5.1 操作台设计

操作台用于存放 PLC、电气元件(空气开关、接触器、继电器、按钮和指示灯等)以及上位机(eView 触摸屏)；同时，也是操作员监控整个工艺流程的地方。因此，操作台设计应该有实用性，让操作员能方便的进行操作，降低其工作强度。图 5-1 为操作台面板示意图，其中在触摸屏的左边是按钮，右边是指示灯。

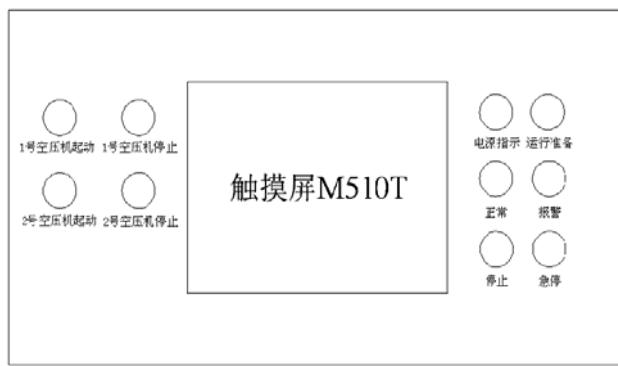


图 5-1 操作台面板示意图

图 5-2 为操作台的主回路电气原理图。其中 QS1、QS2 为带热继电保护的空气开关，QS6、QS7、QS8 为普通空气开关，KM1、KM2、KM3 为交流接触器，QF 为操作台的总电源开关。

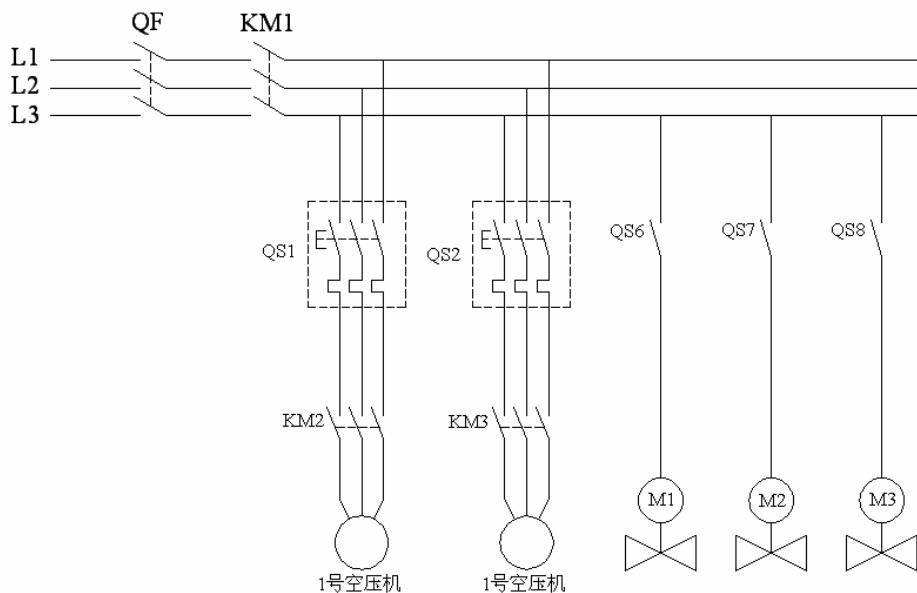


图 5-2 操作台主回路电气原理图

图 5-3 为操作台的部分接线图(省略了触摸屏和 PLC 的接线), 表示了给操作台上电、运行准备以及控制空气压缩机的运行状态的功能。

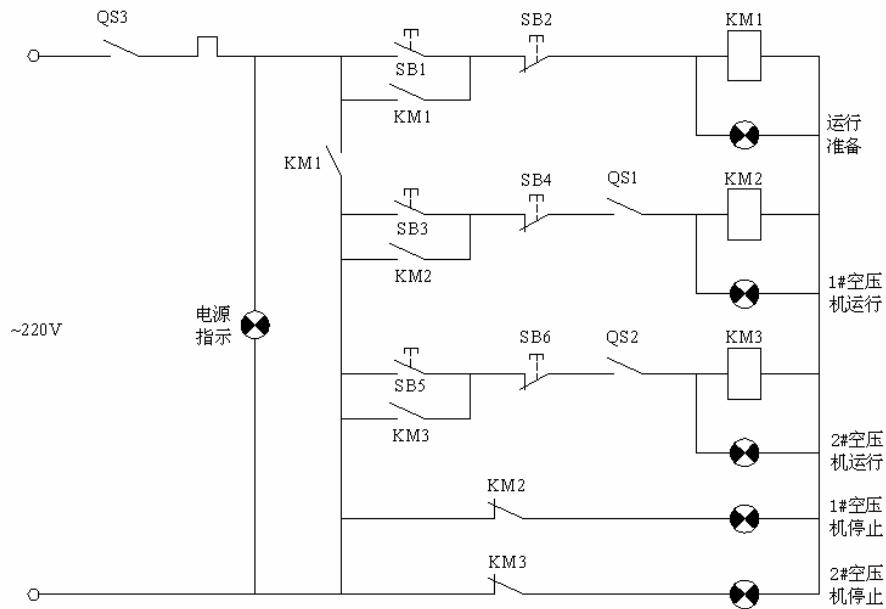


图 5-3 操作台接线图

## 5.2 系统运行效果

图 4-4 介绍了控制系统监控软件的结构。其中过程状态可视化监控模块的作用为人机交流, 它提供了工艺流程监控、氧含量实时曲线、流量实时曲线、工艺参数显示和控制器参数设置画面, 实现了对工艺流程的实时监控。

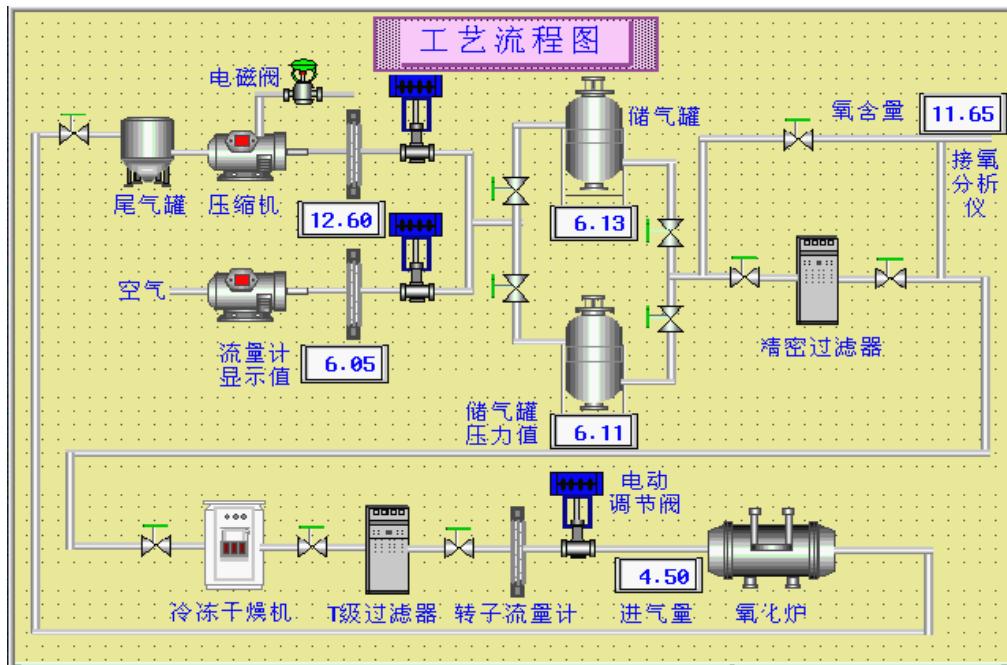


图 5-4 工艺流程监控图

(1) 工艺流程监控界面。图 5-4 为氧化锌晶须生产工艺的流程图画面，工艺流程图完全按照现场设备的实际情况根据一定的比例真实的反应出来的，并且在每个传感器下面都设置了传感器参数的显示值；当电磁阀排空时，画面中的电磁阀会闪烁。操作员可以非常方便的观察到整个氧化锌加工过程中的参数变化。

(2) 实时曲线图。图 5-5 和图 5-6 分别为氧含量和流量的实时曲线图。对比第三章中的仿真结果：流量调节在实际过程中都出现了一定的超调量，这主要是因为调节阀打开时压力差过大的原因，由于流量计前有稳压阀对进气压力降低并稳定，所以超调量很小，同时，流量在达到设定值后非常稳定，这主要是由于管道内的气体经过一段时间后流量计的进气压力稳定的原因；氧含量的控制也取得了很好的效果，尽管有小幅度的波动，但都在精度允许的范围之内。

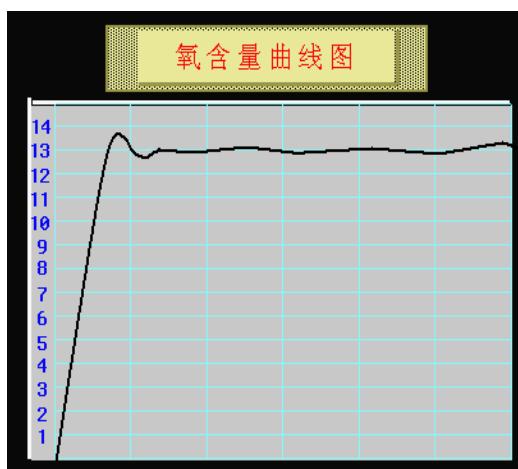


图 5-5 氧含量实时曲线图

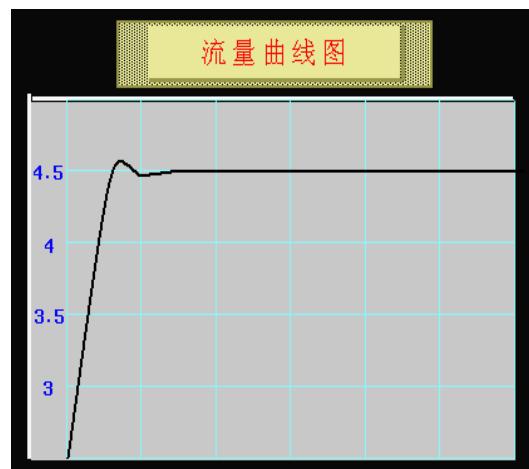


图 5-6 流量实时曲线图

(3) 工艺参数集中显示。图 5-7 集中显示了各传感器参数值，方便操作人员集中监测数据的变化情况，对生产状况有更清晰的了解。

各传感器参数值	
氧含量	11.65
尾气流量	12.60
空气流量	6.05
用气点流量	4.50
1号储气罐压力	6.13
2号储气罐压力	6.11

图 5-7 工艺参数显示表

(4) 控制器参数设定。该模块提供了主控制器参数和工艺参数的设定。一般情况下控制器参数是不需要改变的，技术人员只需要设定混合气体氧含量和流量的值就可以了。同时，该模块设定了访问密码，只允许技术人员来操作。

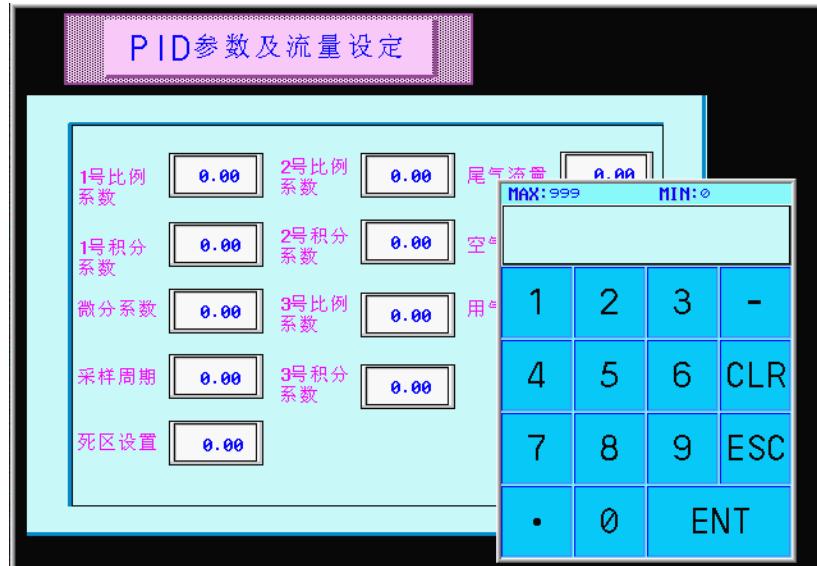


图 5-8 控制器参数及被控量设置

### 5.3 系统性能评价

氧化锌晶须生产过程自动控制系统已经应用到实际生产过程中，其整体性能从如下几个方面来评价：

#### (1) 系统的稳定性

由于采用了上下位机实现分级控制，下级 PLC 系统直接参与过程控制，大大提高了系统的可靠性。另外，标准化和商品化的工业控制软件也为整个软件系统的可靠性提供了保障。

#### (2) 系统的实时性、灵活性

Siemens S7-300 系列 PLC 的 CPU 循环周期为 20ms，即每隔 20ms 扫描一次程序。对于实际生产的流量快速调节系统来说也是足以满足现场实时性的要求。同时，系统的灵活性表现在对实时数据的采集、显示和工艺流程画面的监控等，简化了用户操作，提高了工作效率。

#### (3) 系统的先进性

从系统的硬件配置中可以看出，本系统正符合当前以微型机为主机的集散型系统的发展方向。在系统的软件中，不仅实现了氧化锌晶须加工过程的在线监测，而且完成了以稳定氧含量和流量，提高晶须产品质量为目标的整个控制系统实时控制，使得该系统生产出来的氧化锌晶须品质达到上等。同时，本系统以简单实用为设计宗旨，操作简单、界面清楚明了，系统容易维护。

#### (4) 运行效益

降低了以往凭经验调节的盲目性，减少由于工艺参数变化引起的工况不稳定，稳定了氧化炉用气的氧含量和流量，有效改善了氧化锌晶须的质量，同时综合利用了氧化炉反应后的尾气，减少生产成本，为提高企业的经济效益发挥了积极的作用。

### 5.4 小结

本章首先介绍了氧化锌晶须自动控制系统操作平台的设计；然后给出了系统的运行效果图；最后，对系统进行了评价。

## 第六章 结论与展望

### 6.1 结论

本文针对氧化锌晶须生产加工过程中氧含量、流量和压力不稳定等现象，以对氧含量和流量有直接影响的配气系统为研究对象，进行了氧化锌晶须生产自动控制系统的研发及软件的开发。本文的主要研究工作总结如下：

- (1) 在详细分析氧化锌晶须生产工艺的基础上，提出了控制系统的结构框架，并总结了其功能特点；
- (2) 通过对氧化锌晶须配气系统实际运行过程的分析，建立了被控对象的对象模型；
- (3) 针对配气系统具有明显的时间延迟和耦合性的特点，以及系统具有不确定外部因素干扰的特点，基于建立的对象模型采用了前馈补偿解耦控制算法和则增量式 PID 控制算法进行控制器的设计。最后通过仿真效果图证明了控制系统的设计是正确的，能够将被控对象恒定在工艺要求范围内；
- (4) 系统软件采用 EasyBuilder 组态软件和 Siemens PLC S7-300 系列的 STEP 7 软件编制，实现了配气过程重要参数的监视、氧含量和流量的稳定控制和报警等功能。本文详细说明了软件各模块的功能，并介绍了前馈解耦控制算法和增量式 PID 控制算法在 PLC 中的实现流量连锁控制的程序实现；
- (5) 开发的氧化锌晶须加工自动控制系统已于 2005 年 12 月正式投入运行。实际运行表明系统具有较高的稳定性、可靠性和实用性，也证明了开发所采用的总体方案、技术措施和程序设计的合理性。

### 6.2 展望

在解决了单台氧化炉晶须生产过程控制后，一套配气系统带多台氧化炉的系统正在研究。课题的深入研究可以从以下几方面着手：

- (1) 被控对象模型的复杂化

如果采用一套配气带多台氧化炉，那么除了配气过程具有耦合之外，供气部分也将有强耦合，其实质为分流过程的控制。除了对配气过程要进行解耦控制外，供气过程也需要解耦。解耦时需要考虑各回路之间压力、组分、流量等多方面的因素，要结合控制理论、流体力学和数学方法等多学科的知识。氧化炉台数越多，对象模型建立就越复杂，控制难度就越大。因此有必要了解相关

知识，对对象进行严谨的数学分析，实现整个氧化锌晶须生产过程的在线监控。

## (2) 应用现场总线及工业以太网技术

随着氧化炉台数的增多，不同的氧化炉可能摆放在不同的厂房，实际距离急剧增加；并且控制系统的输入输出点也随之增加，信息处理量增大。因此，可以采用现场总线技术，利用分布式控制系统的高速数据传输的特点，使中央控制器通过高速串行线同分散的现场设备进行通信，同时也解决了现场传感器与控制器距离远而连接不方便、成本高的弊病。

将工业以太网技术应用到氧化锌生产过程控制系统中，可以使得管理者通过网络远程的访问控制系统，及时了解实际生产情况，对生产过程中出现的问题作出快速的修正，避免错误操作而导致的对现场设备或者生产过程的破坏，提高生产效率和效益。

## 参考文献

- [1] 游贤贵, 黄学超. 四脚状氧化锌晶须—特性、应用和制备. 四川有色金属, 2003, (3): 13~17
- [2] H Saitoh, Y Okada, Synthesis of MgO/ZnO Hetero-Epitaxial Whiskers Using Chemical Vapor Deposition Operated Under Atmospheric Pressure. Journal Of Materials Science, 2002, 37(21): 4597~4602
- [3] Yoshinaka M, Miyoshi I, etc. Method of Producing Zinc Oxide Whiskers. EP 378995, 1990, 07~25
- [4] 周祚万, 胡书春. 晶须的特点及其产业化前景. 新材料产业, 2002, (6): 18~28
- [5] 刘玲, 殷宁, 亢茂青等. 晶须增韧复合材料机理的研究. 材料科学与工艺, 2000, 18(2): 116~119
- [6] 程敬泉. 氧化锌晶须的制备及应用. 衡水师专学报, 2000, 2(4): 64~67
- [7] 彭曙光. 四针状氧化锌晶须的生产和市场. 有色冶炼, 2003, 6(3): 16~23
- [8] 戴英, 张跃, 方圆等. 高品质四针状氧化锌晶须的结构及生长机理. 北京科技大学学报, 2002, 24(2): 200~202
- [9] 吕越峰, 吴华武. 四针状氧化锌晶须的制备性能及应用. 化学通报, 1996, 11(3): 15~18
- [10] 苏威. 日本氧化锌晶须扩产. 无机盐工业, 1990, 22(4): 42~46
- [11] 周祚万, 楚珑晟, 段小飞. 无机抗菌剂材料的产业化现状. 新材料产业, 2003, 12(6): 20~23
- [12] 裴新美, 张聚宝. 四针状氧化锌晶须的制备. 陶瓷, 2001, 6(4): 36~37
- [13] 陈尔凡, 周本廉. T-ZnO晶须增强环氧树脂复合材料的抗静电性. 塑料工业, 2003, 31(10): 40~42
- [14] 陈尔凡, 田雅娟, 程远杰. 四脚状氧化锌晶须的生长习性及机理的研究. 硅酸盐学报, 2001, 20(2): 151~156
- [15] 陈尔凡, 田雅娟, 程远杰等. 四脚状氧化锌晶须的制备及微观形态研究. 高等学校化学学报, 2000, 21(2): 172~176
- [16] 田雅娟, 陈尔凡, 程远杰等. 四脚状氧化锌晶须及应用. 硅酸盐学报, 2000, 28(2): 165~168
- [17] 周祚万, 楚珑晟, 顾利霞. ZnO改善橡胶和轮胎耐磨性能的研究. 汽车技术, 2003, 30(7): 29~32
- [18] 吴华武, 来月英. 氧化锌晶须的特点及其应用. 无机盐工业, 1996, 28(4):

17~20

- [19] Iwanaga H., Kunishige A., Takeuchi S. Anisotropic thermal expansion in wurtzite-type crystals. *Journal of Materials Science*, 2000, 35(10): 2451~2454
- [20] Zhu B L, Zeng D W, Wu J, etc. Synthesis and gas sensitivity of In-doped ZnO nanoparticles. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2003, 14(8): 521~526
- [21] 李树尘. 碳还原剂控制氧化锌晶须生产工艺方法. 中国发明专利: CN.1101925A, 1995
- [22] Kalinina M V, Moshnikov V A, Tikhonov P A, etc. Electron Microscopic Investigation of the Structure of Gas-Sensitive Nanocomposites Prepared by the Hydrolytic Method. *Glass Physics and Chemistry*, 2003, 29(3): 322~327
- [23] Park S, J C Lee, D W Lee, etc. Photocatalytic ZnO Nanopowders Prepared by Solution Combustion Method for Noble Metal Recovery. *Journal of Materials Science*, 2003, 38(22): 4493~4497
- [24] Panatarani Camellia , Lenggoro I Wuled , Okuyama Kikuo. Synthesis of Single Crystalline ZnO Nanoparticles by Salt-Assisted Spray Pyrolysis. *Journal of Nanoparticle Research*, 2003, 5(1): 47~53
- [25] 宾万达, 潘朝群, 杨天足. 刺状氧化锌晶须的特点、应用和制备. *湖南有色金属*, 1998, 14(5): 38~40
- [26] Motoi K, Takeshi H , Sachiko M. Growth of Large Tetrapod-like ZnO Crystals and Experimental Considerations on Kinetics of Growth. *Crystal Growth*, 1990, 36(102):965~973
- [27] H S Lee, J Y Lee, T W Kim, etc. Formation mechanism of preferential c-axis oriented ZnO thin films grown on p-Si substrates. *Journal of Materials Science*, 2004, 39(10):3525~3528
- [28] 周祚万, 谢宁, 易锦. PVC/ZnO复合材料的抗静电性能研究. *西南交通大学学报*, 1998, 33(2): 179~182
- [29] 岛村喜代司, 氏家和尚. 热安定性带电防止树脂组成物. 公开特许公报, JP4-68045, 1992, 299~3072
- [30] 田雅娟, 杨东梅, 陈尔凡. 四脚状氧化锌晶须增强尼龙6复合材料的研究. *塑料工业*, 2002, 30(5): 32~34
- [31] 陈尔凡, 田雅娟, 周本廉. 偶联剂对T-ZnO晶须/环氧树脂复合材料的影响. *塑料工业*, 2003, 31(4): 19~21
- [32] 周祚万, 楚珑晟, 雷强. 氧化锌晶须在树脂基复合材料中的应用. *化工新型*

- 材料, 2001, 29(9): 45~47
- [33] 周祚万, 楚珑晟, 张再昌. 氧化锌晶须在橡胶复合材料中的初步应用. 橡胶工业, 2002, 49(7): 403~405
- [34] Skidan B S. The Effect of Additives on Properties of Ceramics Based on Zinc Oxide. Glass and Ceramics, 2003, 60(9): 339~341
- [35] Hng H H., Tse K Y. Grain Growth of ZnO in Binary ZnO -V.O. Ceramics. Journal of Materials Science, 2003, 38(11): 2367~2372
- [36] Stroyuk A L, Shvalagin V, Kuchmii S Ya. Photochemical Synthesis, Spectral-optical and Electrophysical Properties of Composite Nanoparticles of ZnO/Ag. Theoretical and Experimental Chemistry, 2004, 40(2): 98~104
- [37] Thurgood C P, Amphlett J C, Mann R F, etc. Deactivation of Cu/ZnO/AlO Catalyst: Evolution of Site Concentrations with Time. Topics in Catalysis, 2003, 22(3): 253~259
- [38] H T Cao, C Sun, etc. Properties of Transparent Conduction ZnO: Al Oxide Thin Films and Their Application for Molecular Organic Light-Emitting Diodes. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2004, 15(3): 69~74
- [39] Shaldin. Effect of Heat Treatment on the Magnetic Properties of Hydrothermally Grown ZnO Crystals. Inorganic Materials, 2003, 39(10): 52~57
- [40] Sokol S A, Bromley S T, Catlow C R A. Identification and Characterization of Active Sites and Their Catalytic Processes-the Cu/ZnO Methanol Catalyst. Topics in Catalysis, 2003, 24(1): 161~172
- [41] Z Dang, L Fan, Y Shen, C Nan. Study Of Thermal And Dielectric Behavi or Of Low-Density Polyethylene Composites Rein-forced With Zinc Oxide Whisker. Journal of Thermal Analysis And Calorimetry, 2003, 71(2): 635~641
- [42] 曹剑梅, 黄际民, 武志中. 太钢煤气混合、加压控制系统. 工业计量, 2000, 10(4): 24~26
- [43] 何建平. 煤气混合站微机控制串级调节系统. 特殊钢, 1991, 12(2): 54~58
- [44] 孟春, 夏晨, 苑莉. SMAR 智能调节器与混合煤气热值的控制. 河北冶金, 2002, 7(4): 53~55
- [45] Shinskey, F G. Process-Control Systems: application, design, adjustment. New York: McGraw-Hill Book Company, 1979
- [46] 秦璐. 带解耦和 Smith 补偿器的混合煤气热值控制. 控制工程, 2002, 9(4): 73~75
- [47] 黄辉先, 杨飞, 柳树林. 模糊控制算法在混合煤气热值控制中的应用. 电气

- 自动化, 1996, 18(3): 19~21
- [48] 陈远明. 煤气混合流量配比、热值串级调节计算机控制系统. 冶金动力, 1999, 18(1): 33~36
- [49] 任海龙, 李胜玉. 混合煤气压力和热值的模糊解耦控制. 南方金属, 2003, 6(2): 23~25
- [50] 王峰, 何建平, 王顺晃等. 仿人规则在混合煤气压力热值控制系统中的应用. 新技术新工艺, 1999, 12(5): 4~7
- [51] 王峰, 何建平, 王顺晃等. 高炉和焦炉混合煤气压力及热值智能复合控制. 自动化学报, 2000, 26(6): 820~824
- [52] 郭江. 智能控制高炉、焦炉混合煤气压力和热值. 新疆大学学报(理工版), 2001, 18(2): 231~235
- [53] 任海龙, 李胜玉, 任永锋等. 模糊神经网络在混合煤气解耦控制中的应用. 广东自动化与信息工程, 2003, 24(1): 13~15
- [54] Cheng George, Huo Lee. Chinese steel plant clears air with software. InTech, 2003, 16(50): 1046~1049
- [55] Yang C, Wu M, Shen D. Hybrid Intelligent Control of Gas Collectors of Coke Ovens. Control Engineering Practice, 2001, 9(7): 725~733
- [56] 陈艺锋, 彭长宏, 杨声海, 唐謨堂. 锌蒸气高温气相氧化动力学. 中国有色金属学报, 2005, 15(1): 133~140
- [57] 陈健翼, 崔天祥. 浓度控制中的一种解耦算法. 自动化技术与应用, 2001, 10(4): 17~19
- [58] 刘涛, 张卫东, 欧林林. 双输入输出时滞过程解耦控制的解析设计. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 31~38
- [59] 刘涛, 张卫东等. 化工多变量时滞过程的频域解耦控制设计的研究进展. 自动化学报, 2006, 32(1): 73~82
- [60] 宁海峰. MATLAB在解耦方法分析中的应用. 福建电脑, 2006, (2): 136~137
- [61] 吴忠强, 嵇胜龙. 基于MATLAB语言的多变量系统解耦. 信息技术, 2006, 10(12): 12~14
- [62] 闵娟, 黄之初. 多变量解耦控制方法. 控制工程, 2005, 12(5): 125~127
- [63] 王晓哲, 李界家, 吴成东, 顾树生. 多变量系统解耦方法综述. 沈阳建筑工程学院学报, 2000, 16(2): 143~145
- [64] 郑亚锋, 陈彦桥, 刘吉臻. 基于动态解耦的多变量协调控制系统设计及应用. 华北电力大学学报, 2005, 32(5): 75~78
- [65] 王骥程, 祝和云. 化工过程控制工程. 北京: 化学工业出版社, 1996. 39~68

- [66] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析-Matlab 语言应用. 北京: 清华大学出版社, 2001. 197~218
- [67] 邵裕森, 吕强等. 智能 PID 调节器. 南京航空航天大学学报, 1994, 11(26): 163~169
- [68] 郑震宇, 周立等. Windows 平台上过程监控软件的设计. 工业控制计算机, 1999, 12(6): 42~54
- [69] 陈曦, 姚普光. 工业控制软件的面向对象开发技术. 河北工业大学学报, 1998, 27(2): 107~113
- [70] 西门子 STEP7 编程手册. 2000. 56~168
- [71] 王骥程. 过程动态模型. 杭州: 浙江大学出版社, 1994. 200~220
- [72] 邵惠鹤. 工业过程高级控制. 上海: 上海交通大学出版社, 2003. 60~80
- [73] 阳宪惠. 工业数据通信与控制网络. 北京: 清华大学出版社, 2003. 112~120
- [74] 何克忠. 计算机控制系统. 北京: 清华大学出版社, 1998. 198~256
- [75] 组态软件 EasyBuilder 编程手册. 深圳人机电子有限公司, 2005. 325~375

## 致 谢

在本项目课题的研究、设计、调试和论文撰写过程中，我得到了导师桂卫华教授的悉心指导和亲切关怀。导师深厚的理论基础、丰富的实践经验、敏锐的思维、见微知著的洞察力、严谨的治学态度和永不懈怠的工作作风，在给我留下深刻印象的同时，也成为我学习的光辉榜样。在此对导师的关心和指导表示衷心的感谢。

同时，非常感谢阳春华教授、喻寿益教授和谢永芳副教授的悉心指导和帮助，还要感谢冶金科学与工程学院的唐谟堂教授。他们渊博的知识和敬业的精神将对我今后的学习和工作产生巨大的影响。

在这三年共同学习、工作和生活过程中，得到了师兄、师姐和同学们的宝贵支持。特别感谢李志刚硕士、张红军硕士在项目开展过程中提出的宝贵建议和给予的帮助；感谢叶红梅硕士、鄢峰硕士、邓子畏硕士、黄佳硕士、何卉硕士、颜青君硕士、赵长平硕士、赵学起硕士、王罡硕士和陈亚硕士，他们在各方面工作中给了我极大的帮助和指导；还要感谢南县工业园的有关领导以及很多默默无闻的工人师傅们，没有他们的帮助，我也不可能完成我的课题及论文。

最后，衷心感谢我的父母在我漫长的求学生涯中所给予的支持与鼓励与爱护。感谢所有关心、帮助过我的老师、同学和朋友们！

毛 友 志

2007年4月于云麓园

## 参与科研项目及发表学术论文

### 参与科研项目

1. 湖南益阳南县工业园氧化锌晶须自动控制系统开发和设计，
2. 西南铝业有限公司一万吨模锻水压机的开发控制系统开发和设计。

### 发表学术论文

- [1] 桂卫华, 毛友志. PLC 在氧化锌晶须加工生产中的应用. 冶金自动化, 2007, 31(1): 61-65
- [2] 毛友志, 桂卫华, 喻寿益. 基于 S7-300 PLC 的一万吨多向模锻水压机控制系统. 自动化与仪表, 2007(11)