

分类号\_\_\_\_\_ 密级 \_\_\_\_\_

UDC \_\_\_\_\_

## 学 位 论 文

### 高性能耐候钢周期浸润腐蚀试验系统设计与实现

作者姓名：陈建军

指导教师：徐林 副教授 东北大学信息科学与工程学院

朱俊红 高级工程师 首钢技术研究院

申请学位级别：硕士 学科类别：专业学位

学科专业名称：控制工程

论文提交日期：2011年11月 论文答辩日期：2011年12月

学位授予日期： 答辩委员会主席：王建辉

评阅人：关守平 刘永军

东 北 大 学

2011年11月

A Thesis in Control Engineering



# **Design and Development of High-performance weathering steel corrosion test cycle infiltration system**

by Chen Jianjun

Supervisor: Associate Professor Xu Lin  
Senior Engineer Zhu Junhong

Northeastern University

November 2011

# 独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是在导师的指导下完成的。论文中取得的研究成果除加以标注和致谢的地方外，不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包括本人为获得其他学位而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示谢意。

学位论文作者签名：陈建军

日期：2011.12.10

# 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者和指导教师完全了解东北大学有关保留、使用学位论文的规定：即学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磁盘，允许论文被查阅和借阅。本人同意东北大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流。

作者和导师同意网上交流的时间为作者获得学位后：

半年 一年 一年半 两年

学位论文作者签名：陈建军

导师签名：

签字日期：2011.12.15

签字日期：2011.12.15

# 高性能耐候钢周期浸润腐蚀试验系统设计与实现

## 摘 要

耐候钢，即耐大气腐蚀钢，与普碳钢相比，耐候钢在大气中具有更优秀的抗蚀性能，可用于铁道、车辆、桥梁、塔架等长期暴露在大气中使用的钢结构，有着广泛的应用前景。在目前国内普通钢材大量过剩的背景下，为了抢占耐候钢的市场份额，钢铁公司都在加大科技投入，努力提高耐候钢的质量水平，以适应市场发展的需要。要提高耐候钢的生产水平，科研人员需要开发新产品，这必然需要大量的耐腐蚀性试验。而大气中耐候钢稳定化锈层的生成需要几年的时间，周期过长，所以通常采用实验室加速试验的方法，加速稳定化锈层的生成，这就需要设计研究制作相应的加速腐蚀试验装置，以满足科研要求。

本文以首钢总公司为背景，以铁道用耐候钢为前提，对加速腐蚀试验方法及其配套的加速腐蚀设备进行深入研究分析，设计制造了适合首钢科研需要的加速腐蚀设备，对装置控制系统进行了详细的设计，包括系统总体设计、硬件结构设计、控制软件及监控软件开发等，基于模糊控制建立了耐腐蚀性模糊综合评价，基于 Z-N 方法实现了 PID 参数的自整定。

该装置由 PLC 对设备的运转及试验环境进行控制，通过触摸屏与 PLC 通讯，实现对试验参数的设定、设备启停的操作和数据的显示存储记录等功能，具有可靠性好、一致性和重复性高、操作简便等特点。通过对装置的组装调试，达到了最初的设计要求，最终满足了用户的使用。现该装置已投入使用，并完成了大量的科研试验，为科研提供了有力的支持。

**关键词:**高性能耐候钢；周期浸润腐蚀；试验装置；模糊综合评判；PID 参数自整定

# **Design and Development of High-performance weathering steel corrosion test cycle infiltration system**

## **Abstract**

Compared with carbon steel, the corrosion resistant steel has a more excellent corrosion resistance, which can be used for railways, vehicles, bridges, towers and other use of steel which long-term exposures to the atmosphere. In order to expand market share and meet market needs, iron and steel companies are increasing investments in technology to improve the quality of the corrosion resistant steel.

To improve the quality of the steel, the researchers need to do lots of tests on resistance to corrosion to develop new products. Accelerated test method in the laboratory is usually used to accelerate the generation of stable rust layer, which may needs a few years to generate naturally. Therefore, it requires to design a set of accelerated corrosion test equipment to meet the scientific requirements.

Taking Shougang Corporation and the corrosion resistant steel for railways as the background, the paper analyzes the accelerated corrosion test methods and supporting equipment, designs and manufactures a set of accelerated corrosion test equipment. The paper introduces the design and implementation of the equipment, including the overall design, the structural design and construction of the hardware, the development of the controlling software and the monitoring software, the establishment of fuzzy evaluation system and Based on Z-N method to achieve a self-tuning PID parameters.

The test equipment uses PLC to control operations and the environment. Through the communication between touch screen and PLC, it can give the experimental parameters, control the operation of starting and stopping and display or storage the data. The equipment has the advantages of good reliability, consistency and high repeatability, operation simply and so on. It meets the original design requirements, has been put into use, and completed a large number of research trials.

**Key Words:** High-performance weathering steel; cycle infiltration corrosion; test equipment; fuzzy comprehensive evaluation; PID-parameter self-tuning

# 目 录

独创性声明 .....	I
摘 要 .....	II
Abstract .....	III
<b>第 1 章 绪 论</b> .....	1
1.1 项目背景及意义 .....	1
1.2 金属大气腐蚀的原理 .....	2
1.3 加速腐蚀设备及其研究现状 .....	4
1.3.1 加速腐蚀试验的意义 .....	4
1.3.2 加速腐蚀试验的方法 .....	4
1.3.3 国内加速腐蚀试验设备现状 .....	5
1.3.4 国外加速腐蚀试验设备现状 .....	6
1.3.5 铁道部 TB/T2375-93 的标准 .....	6
1.4 本文主要研究内容 .....	7
<b>第 2 章 周期浸润腐蚀试验装置</b> .....	9
2.1 试验装置工艺特点及系统结构 .....	9
2.2 试验装置的工作原理 .....	10
2.2.1 机械部分 .....	10
2.2.2 传动部分 .....	12
2.2.3 电器部分 .....	12
2.2.4 控制部分 .....	13
2.3 试验装置的控制要求 .....	13
2.4 本章小结 .....	14
<b>第 3 章 试验装置控制系统设计</b> .....	15
3.1 引言 .....	15
3.2 设计思路 .....	15
3.3 控制系统设计 .....	17
3.3.1 轮盘转速控制单元设计 .....	17
3.3.2 试样烘烤后表面温度控制单元设计 .....	19
3.3.3 箱内温度控制单元设计 .....	19
3.3.4 箱内湿度控制单元设计 .....	21
3.4 软件功能设计 .....	21
3.4.1 PLC 控制程序编程设计 .....	21
3.4.2 触摸屏操作界面编程设计 .....	22
3.4.3 通讯设计 .....	23
3.5 本章小结 .....	24
<b>第 4 章 耐腐蚀性模糊综合评价研究</b> .....	25
4.1 引言 .....	25
4.2 模糊集合概念 .....	25
4.3 模糊综合评判 .....	27

4.3.1 模糊综合评判法的术语及其定义 .....	27
4.3.2 模糊综合评判法实现步骤 .....	29
4.4 本章小结 .....	31
<b>第 5 章 系统实现 .....</b>	<b>33</b>
5.1 系统设备选型及组建 .....	33
5.2 编程软件 .....	34
5.2.1 STEP 7 软件包功能 .....	34
5.2.2 STEP 7 编程语言 .....	35
5.3 硬件环境的搭建 .....	35
5.4 系统控制功能实现 .....	36
5.4.1 温度控制的实现 .....	36
5.4.2 湿度控制的实现 .....	39
5.4.3 轮盘转速控制的实现 .....	40
5.4.4 运行时间的实现 .....	43
5.5 触摸屏组态的实现 .....	43
5.5.1 参数设定界面的组态 .....	44
5.5.2 监测界面的组态 .....	44
5.5.3 历史数据界面的组态 .....	45
5.5.4 试验报表界面的组态 .....	46
5.5.5 报警处理及界面的组态 .....	46
5.5.6 参数连接 .....	46
5.6 系统评判指标实现 .....	47
5.6.1 指标的权重确定 .....	47
5.6.2 试样的评判 .....	47
5.7 系统运行调试 .....	49
5.7.1 电气基本动作调试 .....	49
5.7.2 温度控制系统调试 .....	49
5.7.3 湿度控制系统调试 .....	52
5.7.4 轮盘转速调试 .....	54
5.7.5 整体测试及试运行 .....	54
5.7.6 效果分析 .....	55
5.8 本章小结 .....	56
<b>第 6 章 结论与展望 .....</b>	<b>57</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>59</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>61</b>

# 第1章 绪 论

## 1.1 项目背景及意义

耐候钢，即耐大气腐蚀钢，是介于普通钢和不锈钢之间的低合金钢系列，耐候钢由普碳钢添加少量铜、镍等耐腐蚀元素而成，具有优质钢的强韧、塑延、成型、焊割、磨蚀、高温、抗疲劳等特性；耐候性为普碳钢的 2-8 倍，涂装性为普碳钢的 1.5-10 倍。同时，它具有耐锈，使构件抗腐蚀延寿、减薄降耗，省工节能等特点。耐候钢主要用于铁道、车辆、桥梁、塔架等长期暴露在大气中使用的钢结构。用于制造集装箱、铁道车辆、石油井架、海港建筑、采油平台及化工石油设备中含硫化氢腐蚀介质的容器等结构件<sup>[1,2]</sup>。

近年来，我国铁路迎来了快速发展的时期。2007-2010 年，中国铁路建设高速增长，基本建设投资从 07 年的 1772.1 亿元，猛增至 2010 年的 7074.59 亿元。铁路的快速发展使耐候钢的需求量增大，并对耐候钢的质量也提出了新的要求。现宝钢和武钢已先后研制出新的高耐候钢。宝钢的铁路货车用高耐蚀型耐候钢 S350EW、S450EW，国内首家通过铁道部认证审查，而武钢也于近期成功开发出了铁路车辆用高耐蚀型耐候钢 S450EW。

在目前国内普通钢材大量过剩的背景下，首钢总公司加大科技投入，提出要加速提高耐候钢的水平，使首钢具备批量生产高耐候钢的能力和水平，抓紧使高耐蚀型耐候钢进入铁道部采购范围，抢占高耐候钢的市场份额，为市场提供科技含量更高的产品，以适应我国铁路的快速发展。

一般认为，大气中耐候钢稳定化锈层的生成需要几年的时间，周期过长。为了快速及时地对耐候钢及其配套焊接材料的腐蚀行为做出评判，通常采用实验室加速试验的方法<sup>[3,4]</sup>，所以需要针对加速腐蚀的方法设计研究制作相应的加速设备。由于首钢技术研究院没有对铁路用耐候钢进行检测的设备和手段，都是外委试验，试验成本高，周期长，且外委试验的装置有时不能满足科研试验方法的要求，不利于新产品新工艺的开发，所以需要针对科研的需求自主研发一台腐蚀试验装置。

本课题根据铁道部 TB/T2375-93 铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验的标准要求设计了周期浸润腐蚀试验装置的控制系統<sup>[5]</sup>，该系统拟采用 PLC 控制、触摸屏操作，具有可靠性好，一致性和重复性高，操作简便、价格低廉等特点。

## 1.2 金属大气腐蚀的原理

腐蚀是指材料与周围环境反应而变坏的一种情况。金属在大气自然环境条件下发生腐蚀的现象称为大气腐蚀。金属暴露在大气中要比暴露在其他腐蚀介质中的机会多，大气腐蚀是金属腐蚀中最普通的一种。然而，由于决定腐蚀反应动力学因素的复杂性，至今对它的了解还不是十分清楚。大气腐蚀基本上属于电化学腐蚀范畴，它是一种在液膜下的电化学腐蚀，但和浸在电解质溶液中的腐蚀有所不同<sup>[6,7]</sup>。

在大气中，普遍存在的腐蚀成分是氧、水蒸气、二氧化碳。氧的含量基本保持不变，而且是大量的，它真正的参与腐蚀反应。水和二氧化碳的含量随气候和地理位置的变化而变化。

大气的主要成分有：氮(N<sub>2</sub>)、氧(O<sub>2</sub>)、氩(Ar)、水蒸汽(H<sub>2</sub>O)、二氧化碳(CO<sub>2</sub>)、氖(Ne)、氪(Kr)、氦(He)、氙(Xe)、氢(H<sub>2</sub>)。

大气的次要成分为杂质。杂质主要有：二氧化硫(SO<sub>2</sub>)、三氧化硫(SO<sub>3</sub>)、硫化氢(H<sub>2</sub>S)、氨(NH<sub>3</sub>)、氯化物以及尘粒等。

大气腐蚀的三种类型，有干的大气腐蚀、湿的大气腐蚀和潮的大气腐蚀，这三种腐蚀都是以大气的湿度来衡量的，可见空气的相对湿度对金属的大气腐蚀有重要的影响。

以铁为例，铁在含有 0.01%的二氧化硫的大气环境下暴露 55 天的大气腐蚀增量与相对湿度的关系如图 1.1 所示。

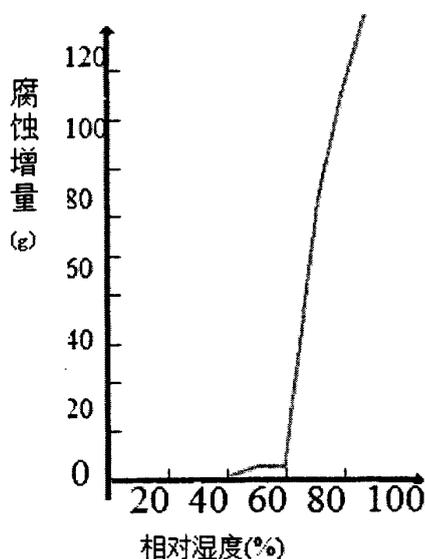


图 1.1 铁的大气腐蚀速度与相对湿度的关系

Fig. 1.1 Relationship between atmospheric corrosion of iron and relative humidity

这是因为金属表面上的水膜对大气腐蚀起着关键性作用。当空气湿度达到100%，形成肉眼可见的水膜。当空气的相对湿度低于100%，金属表面由于毛细凝聚、化学凝聚、吸附凝聚等原因也会形成水膜，且金属表面上形成的水膜并不是纯净的水<sup>[8,9]</sup>。大气腐蚀速度与金属表面水膜厚度的关系详见图1.2。

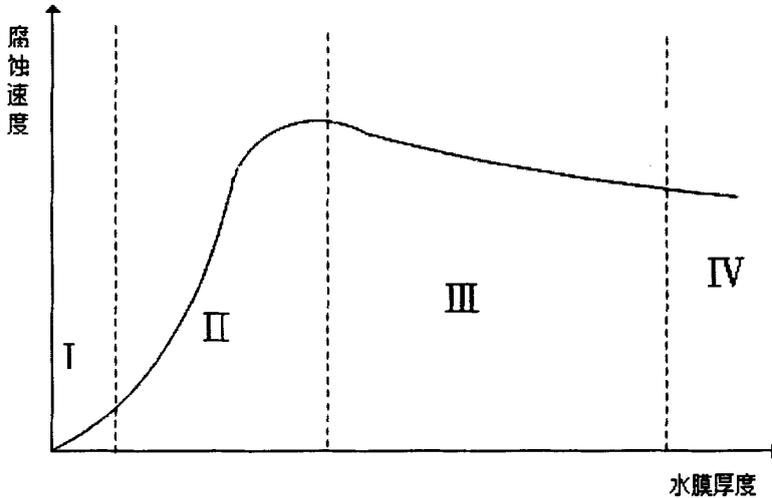


图 1.2 大气腐蚀速度与金属表面水膜厚度的关系图

Figure 1.2 Relationship between atmospheric corrosion rate and metal surface water thickness

在图 1.2 中，I 区为金属表面上有几个分子层厚的吸附水膜，没有形成连续的电解液，相当于“干氧化”状态，发生纯化学腐蚀。II 区对应于“潮大气腐蚀”状态，由于电解液膜的存在，开始了电化学腐蚀过程，腐蚀速度急剧增加。III 区为可见的液膜层，III 区相当于“湿大气腐蚀”。随着液膜厚度进一步增加，氧的扩散变得困难，因而腐蚀速度也相应降低。液膜更厚就进入 IV 区，这与浸泡在液体中的腐蚀相同。

一般环境的大气腐蚀大多是在 II、III 区进行的，随着气候条件和相应的金属表面状态的变化，各种腐蚀形式可以互相转换。因此，大气腐蚀主要属于电化学腐蚀范畴。

大气腐蚀的影响因素主要有气候条件和大气污染物质。其中，气候条件包括：湿度、降水量、温度、日照量；大气污染物质包括：SO<sub>2</sub>、盐粒、烟尘等，具体影响如下：

SO<sub>2</sub>：能强烈促进钢铁的大气腐蚀。

盐粒：溶解于金属表面水膜，增加吸湿性和导电性，氯离子还具有强腐蚀性。

烟尘：烟尘落在金属表面，能吸附腐蚀性物质（如炭粒），或者在金属表面

上形成缝隙，增加水汽凝聚（如硅质颗粒）。

大气中杂质对抛光的钢试样的影响曲线如图 1.3 所示。

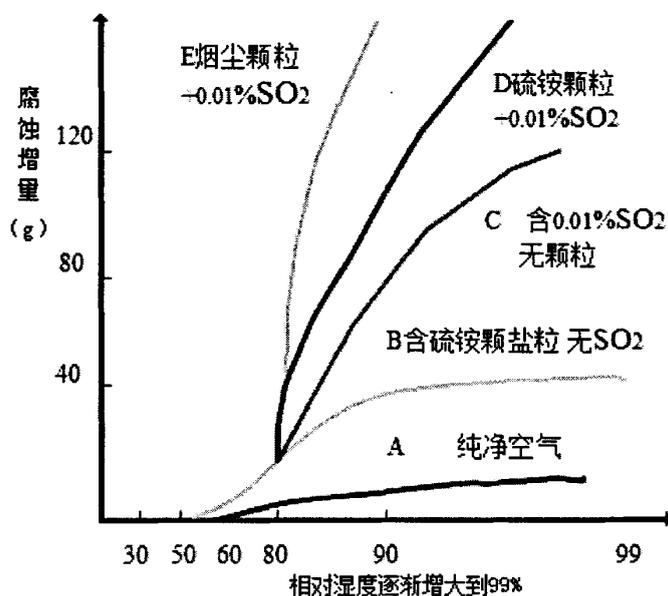


图 1.3 大气中杂质对抛光的钢试样的影响

Figure 1.3 Impact of atmospheric impurities on polished steel specimens

## 1.3 加速腐蚀设备及其研究现状

### 1.3.1 加速腐蚀试验的意义

腐蚀对金属的性能有很大的影响，而且金属在大气中腐蚀所需的周期较长，所以为了更好更快的研究金属在大气中耐腐蚀的性能，就需要对金属进行加速腐蚀。

人工加速腐蚀可模拟金属的各种腐蚀情况：大气腐蚀、海水腐蚀、化学介质腐蚀、土壤腐蚀、工业水腐蚀、高温腐蚀等等，且腐蚀环境可以控制，环境再现性好；试验时间明显缩短；节约了大量的人力、财力、物力。所有试样均在同一标准、同一条件下试验，一致性好，重复性高，对比明显，有利于科研实验工作的开展。

### 1.3.2 加速腐蚀试验的方法

当前用于金属材料的加速腐蚀试验方法主要有：盐雾试验、腐蚀膏试验（即

CORR试验)及周期浸润腐蚀试验等,每种方法都有其特点。

盐雾试验是目前最广泛采用的一种加速腐蚀试验方法。但是由于在这种试验条件下耐候钢始终处于潮湿的环境中,且有较高氯离子的浓度,稳定化锈层无法生成,其耐腐蚀性能与普通碳钢相近,优势并不明显,因此一般不采用。海洋环境的大气曝晒结果也证明了这一点。

腐蚀膏试验是采用含亚硫酸盐的成分制造出含SO<sub>2</sub>成分的腐蚀膏,涂覆于样板表面后,应用调温、调湿箱控制温度、湿度,一段时间后,对腐蚀膏进行更新,循环往复进行试验。由于这种方法的试验步骤烦琐、周期较长,因此也较少采用。

相比之下,周期浸润腐蚀试验对评判耐候钢最为适用。这是模拟干湿交替大气环境的一种试验方法,试验环境比较适合于耐候钢稳定化锈层的形成条件。应用周期浸润和SO<sub>2</sub>腐蚀气氛,有利于稳定化锈层的形成,是目前国内外常用的耐候钢加速试验方法。所以本装置根据铁道部TB/T2375-93铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验的标准设计制作。

### 1.3.3 国内加速腐蚀试验设备现状

国内厂家有淮安市中亚试验仪器有限公司、西安同晟仪器制造有限公司、沈阳林频试验设备厂、昆山市向科检测仪器有限公司等,但大多都是按照国标GB/T2423.17-93、GB/T10587-2006、GB/T6461-2002、GB10125-1997、GJB150.11-86、GB 6458、GB 6459、GB6460、GB 5938、GB 5939、GB 5940、GB 1771等生产的盐雾腐蚀装置,按照TB/T2375-1993铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验方法制作的厂家并不多,其中西安同晟仪器制造有限公司的ZQFS-1600周期浸润腐蚀试验箱是按照满足TB/T2375-1993铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验方法的要求设计制作的,该试验装置由箱体、升降机构、水浴装置、腐蚀液槽及电气控制面板组成。箱体两侧装有红外加热管,后侧装有排风扇以及支撑杆上固定有热电偶;腐蚀液槽安装在水浴装置中,该装置由高精度智能PID温度控制仪对温度和湿度进行控制。但是没有建立监控画面,没有直观的数据及环境曲线显示,操作不简便,且没有数据存储的功能。

中国铁道科学研究院也有一台周期浸润腐蚀试验装置。该装置是铁科院自行设计的,与西安同晟仪器制造有限公司制造的产品类似,也采用智能仪表控制。该设备通过直接向箱体内吹入大气的方法降低箱内的湿度,对箱内的气体环境氛围会造成一定的破坏。

总结上述设备共同缺点主要有:(1)没有人性化的操作界面,无法提供数据

的记录保存等功能；如果要实现上述功能需选择可通讯的智能仪表，在电脑上用软件编写组态画面，并用电脑与智能仪表进行通讯，读写仪表数据。（2）由于采用继电器控制，可靠性不如 PLC 稳定。（3）采用传统仪表、指示灯及按钮操作显示，不如采用触摸屏的设备美观、可靠。

### 1.3.4 国外加速腐蚀试验设备现状

国外制作腐蚀试验装置的厂家有德国 Liebisich 公司，该公司于 1963 年成立，是一家实验室加热器、实验室测量仪表、实验室恒温器、气候实验柜以及金属块恒温的制造商；还有美国的 Q-PANEL (Q—Panel Lab Products) 公司，该公司是一家专业制造材料耐候性测试仪器、设备的全球供应商，同时提供权威的材料耐候性检测服务。但这类公司产品大多按国际标准或各国的标准生产实验设备。如 Liebisich 公司生产的盐雾箱、盐雾腐蚀试验箱、盐雾试验箱、循环腐蚀试验箱、循环腐蚀试验机，满足符合如下标准：ASTM B117, GM 4298, ISO 9227, DIN 50021, ASTM D1735, GM 4465, ASTM G85, CCTI, CCT II, CCT IV, GM 9540P, SAE J-2334 等其它类似标准。若向国外厂商定制则费用较为昂贵。

### 1.3.5 铁道部 TB/T2375-93 的标准

由于最终确定采用铁道部 TB/T2375-93 铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验标准作为科研实验的标准，故本试验装置的设计开发都是在严格遵守该标准的要求下进行的：既符合其对试验环境的要求，又满足其对实验工艺的要求。

铁道部 TB/T2375-93 标准规定了周期浸润腐蚀试验的试验设备、溶液、条件、方法、结果的评定和试验报告，适用于铁路用耐候钢及其焊接材料的耐大气腐蚀性能的评判。

其实验的工艺流程如下：实验前必须进行试样表面的清理，除去毛刺及孔内杂物，再进行清洗。清洗时先使用汽油或石油醚，再用无水乙醇，最后用丙酮。清洗后用热风吹干。测量并记录试样的原始重量（精确到 1mg），外部尺寸（精确到 1mm），以及表面粗糙度等。试样悬挂应采用非编织材料，悬挂高度应保持一致，并记录试样的位置。当使用非绝缘导线悬挂时，应注意不要使金属线芯接触溶液或试样。溶液只能用于一次连续试验，不得重复使用，不应在试验中途插入新试样。每天应加补给液（0.02mol/L NaHSO<sub>3</sub>）3.0±0.5L，补给液必须现用现配。向液槽中注入新配制的试验溶液至规定刻度，关闭箱门，开机。在 0.5h 内试验机应恢复到试验要求的环境状态。试验期间应尽量减少开箱门的次数，每天

最多不得超过两次。每次时间不得超过 2min，开门时应关闭空气循环装置。试验应连续进行，不得中断，直到规定时间为止。意外停机不得超过 4h，此时试样不得浸泡在溶液中，并应紧闭箱门。试验达到规定周期后，停机，取下试样，用清水涮洗干净，热风吹干，置于干燥器内保存。试验后的试样采用加有缓蚀剂的酸清洗表面锈蚀物。酸洗后用清水冲净，用无水乙醇浸泡，取出后立即用热风吹干，放入干燥器中保存。对放入干燥器中 24h 后的试样进行称量(精确到 1mg)。

由称量所得数据按公式(2.1)计算腐蚀失重率(W)，并记录试样表面状况。

$$W = \frac{G_0 - G_1}{2(a \times b + b \times c + a \times c)t} \times 10^6 \quad (1.1)$$

式中： $W$  为失重率( $g/(m^2h)$ )； $G_0$  为试样原始重量(g)； $G_1$  为试样试后重量(g)； $a$  为试样长度(mm)； $b$  为试样宽度(mm)； $c$  为试样厚度(mm)； $t$  为试验时间(h)。

根据试样的失重率进行耐腐蚀性评判。

由于要用触摸屏组态出实验报告，根据铁道部标准总结出试验报告应包括的内容如下：

- (1) 标准号；
- (2) 所试材料的品种、来源和加工方法；
- (3) 试样的尺寸和表面状况；
- (4) 试样数量；
- (5) 试验条件，包括温度、每周期时间、浸润时间、溶液成分及其浓度；
- (6) 试验时间，有无间断及间断时间；
- (7) 试验后试样的腐蚀失重率（以  $g/(m^2h)$  表示）；

当需方要求时，可注明每片试样的试样结果，每组平行试样的平均实验结果和相对误差；

- (8) 试样表面状况及腐蚀特点，必要时可附试样照片；
- (9) 试验后试样的清洗方法。当需方要求时，可注明由清洗引起的失重量；
- (10) 当需方要求时，可注明放入的参考试样的有关数据及所得结果；
- (11) 试验人员及试验日期。

## 1.4 本文主要研究内容

本文以首钢技术研究院实验室耐腐蚀试验设备开发为工程背景，介绍了该试验装置的设计开发，并建立了试样的耐腐蚀性评判体系，通过该装置可实现试样

的加速耐腐蚀性试验,并能通过评判体系可对试样的耐腐蚀性进行整体的综合评判,给予科研人员相应的指导,有利于新产品的开发。

本文共分为六章:

第一章介绍了金属大气腐蚀的原理及加速腐蚀设备的现状。

第二章介绍了周期浸润腐蚀试验装置的工作原理、特点及其结构。

第三章介绍了试验装置的控制系统设计,着重介绍了控制系统的设计。

第四章介绍了对模糊评判体系的研究,主要介绍了模糊综合评判,并归纳出其评判的实现步骤。

第五章主要内容是控制系统的实现。对各个控制部分分别实现、建立和完善了模糊评判体系,并对总体控制系统进行了测试和试运行。

第六章总结了本文所做的工作,并提出了本课题需要进一步研究的方向。

## 第 2 章 周期浸润腐蚀试验装置

由于最终确定采用铁道部 TB/T2375-93 铁路用耐候钢周期浸润腐蚀试验标准作为科研实验的标准,故本试验装置的设计开发都是在严格遵守该标准的要求下进行的:既符合其对试验环境的要求,又满足其对实验工艺的要求。

### 2.1 试验装置工艺特点及系统结构

周期浸润腐蚀试验的工艺特点要求:试样浸润在腐蚀溶液(10L 0.01mol/L  $\text{NaHSO}_3$ )中  $12\pm 1.5\text{min}$ ,之后脱离溶液在红外光下烘烤( $48\pm 1.5\text{min}$ ),烘烤后试样表面温度为( $70\pm 10$ ) $^\circ\text{C}$ ,之后再浸润到腐蚀溶液中,如此反复,试验连续进行 50h、75h、100h 或由试验双方决定。试验要求在恒温恒湿的环境中进行,要求温度控制在( $45\pm 2$ ) $^\circ\text{C}$ ,湿度控制在( $70\pm 5$ )%RH,此外,要求整个过程中不得有冷凝液滴落在试样上,每天应补加腐蚀溶液(0.02mol/L  $\text{NaHSO}_3$ )( $3.0\pm 0.5$ )L。

根据上述的工艺原理,分析出试验的工艺步骤如下:

(1) 制样:按标准尺寸制备  $60\times 40\times 4\text{mm}$  试样,表面粗糙度为 0.8。机加工好的试样边上容易有毛刺,试验前用砂纸将毛刺磨去。

(2) 清洗:用除油剂除油,用清水清洗,再无水乙醇洗,吹干。

(3) 称重:用天平称取试样重量,精确到 0.1mg。

(4) 量尺寸:用千分尺测量试样长、宽、厚。

(5) 配腐蚀液:配制 0.01mol/L  $\text{NaHSO}_3$  溶液。每个试验槽加注 10L。

(6) 开机:开机设定试验条件,使腐蚀试验机内温度、湿度达到试验条件。需要试验条件达到标准后才能试验,对开机的稳定时间没有具体要求,但时间应尽量缩短。

(7) 挂片:挂样前用丙酮将试样清洗干净,用带胶皮的金属线或塑料绳将试样拴挂在试验架上。避免金属线与溶液接触,与试样及溶液发生电化学反应。

(8) 开始试验:试验过程中每 24h 补加一次腐蚀液,每次先从试验槽放出 1500ml 溶液,再补加 2000ml 的 0.02mol/L  $\text{NaHSO}_3$  溶液。每次补充溶液时 0.5h 内要求恢复到设定试验条件。

(9) 取样:试验时间结束后,取出试片,用清水刷洗干净,吹干,放在干燥器中保存。

(10) 除锈:将试验后试样放在加有缓蚀剂的盐酸溶液中除锈,应同时用空

白试样校正除锈液对基体影响。

(11) 清洗：除锈后用清水将试样冲洗干净，用无水乙醇泡，再用丙酮洗，热风吹干，于干燥器中保存 24h。

(12) 称重：称取除锈后试样和空白试样重量，计算失重率，生成试验报告。

## 2.2 试验装置的工作原理

周期浸润腐蚀试验是一种人工模拟大气环境的试验，它与大气条件下的暴露试验相比，具有显著的优点：腐蚀环境可以控制；环境再现性好；试验时间明显缩短；节约大量的人力、财力、物力。

腐蚀试验装置能模拟大气环境的干湿交替、大气的温度以及大气的日照量。根据上述原理结合铁道部的标准，用红外光灯模拟日照量，用轮盘带动试样浸入溶液模拟大气环境下的干湿交替，用亚硫酸氢钠模拟大气中的污染气氛，采用由加热元件、加湿器、除湿器、传感器及控制器组成的控制系统控制腐蚀试验在温度 45℃，相对湿度 75%RH 的环境下进行，在此环境下更适于耐候钢稳定化锈层的形成，减少了锈层生成的时间，达到了加速腐蚀的效果。所有试样均在同一标准同一条件下试验，一致性好，重复性高，对比明显。

通过对工艺要求的分析，该装置应由机械部分、电器部分、控制部分、传动部分组成，系统结构如图 2.1 所示。



图 2.1 系统结构图

Figure 2.1 System structure

### 2.2.1 机械部分

机械部分由试验箱箱体、恒温恒湿箱体、试样悬挂部件、水槽、气路等部分组成，为试验装置提供平台。

根据铁道部 TB/T2375-93 标准的要求，试样要从溶液里浸泡约 12min，再用红外光烘烤约 48min，将试样悬挂在轮盘上，底部放有盛满溶液的托盘，轮盘反

复旋转，将试样浸到溶液中，再脱离，箱体的后面放有红外光灯，试样脱离后便可得到红外光烘烤。托盘下面安装加热管，使给箱内加热。

设计的箱内结构如图 2.2 所示。

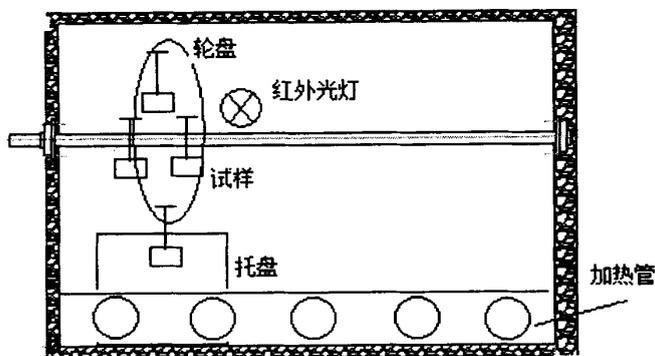


图 2.2 箱内装置结构示意图  
Figure 2.2 Inside structure of the equipment

由于试样要从溶液里浸泡约 12min，且旋转一圈的时间为 1h，所以在一个轮盘上设计可装 10 个试样，相当于把 1h 分成了 10 份，每两个试样之间的间隔时间为 6min，试样的悬挂高度及托盘液位的配合达到一个试样刚完全浸入溶液时，另一个恰好完全脱离溶液，这时，完全脱离溶液的试样的浸润时间正好是 12min，如图 2.3 所示。

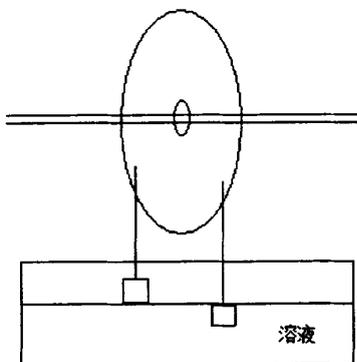


图 2.3 试样浸润示意图  
Figure 2.3 Schematic diagram of sample infiltration

由于腐蚀试验的委托量大，周期长，一般较短的试验需要 50h，在满足试验箱的容积为 $(0.65\pm 0.1)\text{m}^3$ 的条件下，在同一个轴上设计尽量多的试验装置（轮盘、托盘及红外光灯等），这样可在相同环境下做多组试验。

由于湿度要求在 $(70\pm 5)\%RH$  的范围内，湿度较大，所以箱内的部件均采用不锈钢材料制作。

## 2.2.2 传动部分

传动部分由减速机、传动部件、轴及轴承部件等组成。主要负责将电机的旋转转换到轮盘的旋转，满足试验的干湿交替，结构如图 2.4 所示。

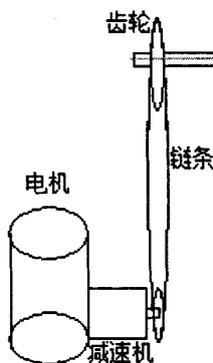


图 2.4 传动部分结构图

Figure 2.4 Structure of transmission part

本装置的传动要求传动平稳，噪音小，传动比大，故采用涡轮蜗杆方式的减速机，该方式的减速机具有结构紧凑，工作平稳无噪音，传动功率范围大，具有自锁性等特点，能获得较大的传动比，适合本装置特点。由于轮盘的转速很低，通过齿轮和链条再进行一次减速，链条上下两个齿轮比为 10:1，以获得更大的减速比。

## 2.2.3 电器部分

电器部分由电动机、加热元件、加湿除湿元件、空气开关、按钮、接触器、继电器等，负责各个元器件的动作。

加热元件采用的是桑拿型加热管，管材为不锈钢，适用于本装置的高湿度及腐蚀气氛条件下的加热。原理是电阻加热，可通过调节加热管的电压，调节加热功率。

加湿元件采用超声波高频振荡的原理，将水雾化为  $1-5\ \mu\text{m}$  的超微粒子，通过风动装置，将水雾扩散到箱内。

除湿元件采用半导体制冷方式的除湿器，该方式的除湿器可频繁开关，若采用压缩机制冷方式的除湿器，则每次除湿器停止时，需要大约 5-10min 之后才能再次开启，对除湿控制带来一定的影响，半导体制冷则没有上述问题，其原理是

当直流电通过两种不同半导体材料串联成的电偶时,在电偶的两端即可分别吸收热量和放出热量,可以实现制冷的目的。半导体制冷无运动部件可靠性高,适合本装置使用。

### 2.2.4 控制部分

控制部分按控制原理的不同,自动控制系统分为开环控制系统和闭环控制系统。在开环控制系统中,系统输出只受输入的控制,控制精度和抑制干扰的特性都比较差。闭环控制系统是建立在反馈原理基础之上的,利用输出量同期望值的偏差对系统进行控制,可获得比较好的控制性能。所以对于需要控制的温度、湿度、轮盘转速等被控对象采用闭环控制。闭环控制系统主要由传感器、处理器、执行部件组成,传感器负责信号采集,处理器对信号进行数模转换,并根据控制策略进行运算比较,给执行部件相应的指令,执行部件则负责进行动作,从而控制加热元件、控制加湿除湿元件、控制电机的转速等。

温度控制系统包括测温单元,控制单元和执行单元,使腐蚀试验箱内的温度为 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,且温度均匀;湿度控制系统包括测量湿度单元,控制单元和执行单元,使腐蚀试验箱内的湿度为 $(70\pm 5)\%RH$ ,且湿度分布均匀。烘烤控制系统包括测温单元、控制单元、烘烤执行单元,使试验烘烤后的表面温度为 $(70\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ;定时和传动系统包括通过机械传动使试验周期动作,实现试样的干湿交替,使干湿交替按照试验工艺的要求进行,当试验结束时,能自行停止。

## 2.3 试验装置的控制要求

根据铁道部 TB/T2375-93 的标准要求,试验箱的容积为 $(0.65\pm 0.1)\text{m}^3$ ,以保障箱内环境的一致性和均匀性。箱内温度要求控制在 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,湿度控制在 $(70\pm 5)\%RH$ ,试样干湿交替的一个周期为 $(60\pm 3)\text{min}$ ,其中浸润时间为 $(12\pm 1.5)\text{min}$ ,其余为烘烤时间,烘烤温度要求在 $(70\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ,一天之内开门关门次数不得超过2次,每次不超过2min,且30min内试验箱能恢复到试验要求的标准环境,每次试验的平行试样不少于五个。试验连续进行50h、75h、100h或由试验双方决定。

分析工艺对控制的要求,主要的控制要点在于对三个参数的控制:温度、湿度和轮盘的转速。

箱内温度要求控制在 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ,精度不高,选用传感器、变送器及控制器时

要考虑元件自身的精度，避免超出控制精度范围，且试验周期较长，箱内的热容量较大，温度的惯性及滞后较为明显。工艺要求开门关门后 30min 内达到试验要求的标准环境，所以要求温湿度控制的鲁棒性要高，尽量减少达到试验要求的标准环境所需的时间，提高装置的性能。

烘烤采用红外光灯模拟日照，烘烤温度的控制也就是控制红外光灯的强度，由于烘烤温度要求在 $(70\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ，范围很大，且当箱内温度湿度达到设定状态时，烘烤温度受其他环境影响较小。

箱内湿度要求控制在 $(70\pm 5)\%\text{RH}$ ，同箱内温度一样，对精度要求不高，在选用传感器、变送器及控制器时要考虑元件自身的精度，避免超出控制精度范围。另外，箱内温度在  $45^{\circ}\text{C}$  左右，在选择湿度传感器的时候要特别注意湿度传感器对工作温度的要求。

此外，温度湿度之间相互影响，对信号采集和控制都带来了一定的困难。所以设计时要选好控制策略和执行元件。

轮盘转速很低，约为 1 转/h，对于转速的测量和控制都带来一定的难度，主要是测量方面，导致测量所需时间较长，信号采集相对比较困难，如果试验过程中转速有较小的误差，由于试验周期较长，可能会将误差累计较大。

由于需要较长时间才能生成稳定的锈化层，所以实验运行的周期很长，需要进行长时间的定时，对系统各个元件的稳定性要求较高。

## 2.4 本章小结

本章主要介绍了周期浸润试验装置的特点和工作原理：通过模拟大气环境下的干湿交替、腐蚀气氛及光照等环境，来加速试样的腐蚀；通过对工艺要求的分析，整理出装置的控制要求：在干湿交替方面要求干湿的环境温湿度，要求干湿转换的时间；在腐蚀气氛方面要保证气氛的一致，需要补充腐蚀溶液，补充溶液后要尽快恢复到原环境状态；在光照方面对光照的温度提出要求；在实验运行总时间上也提出要求。根据这些要求进行分析设计，整理了设计思路，设计重点，设计顺序等。

## 第3章 试验装置控制系统设计

### 3.1 引言

本装置拟采用 PLC 控制、触摸屏操作，具有可靠性好，价格低廉，一致性和重复性高，操作简便等优势。通过编写程序实现可提供实验报告、保存实验数据的功能，提供人性化的参数设置，并能保存设置参数，方便用户重复调用，并能提供试样质量判断等。

本系统通过分析检测工艺流程，设计控制系统及结果评判体系。控制上主要以西门子 PLC 为核心，控制温度、湿度及旋转圆盘的转速，以满足工艺需求。

研究内容主要包括以下几个方面：

#### (1) 设备选型及机械部分的设计

通过对检验工艺的分析，对所需设备进行选型，对机械部分进行设计，并外委加工，在满足设计要求的条件下，选取性价比高的设备。

#### (2) 温度、湿度、转速等各环节的控制实现

建立温度、湿度、转速等控制系统，通过不同的控制策略，实现对控制参数的控制，使参数满足工艺要求。

#### (3) 设备调试

对设备进行整体调试，调试设备的各个功能。由于温湿度之间会相互干扰，对系统的鲁棒性是一个考验，通过调节适当的参数，满足设备对温湿度的要求。

#### (4) 评判体系的建立

通过对试验的结果进行分析，基于模糊理论建立一个试样质量的模糊综合评价算法，对试样给予较为准确的评判。

### 3.2 设计思路

根据工艺特点和总结的控制要求及要点来设计各个控制系统，设计的试验装置的控制需要温度控制系统、湿度控制系统、烘烤控制系统、定时和传动系统等组成。各系统及其作用如图 3.1 所示。

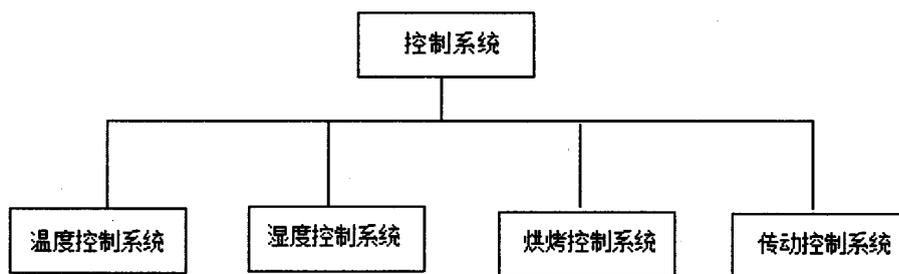


图 3.1 试验装置系统图

Figure 3.1 Test device system diagram

分别对各个系统进行设计，使各系统能分别实现其设计功能，然后考虑各系统的相互影响，对各控制系统进行改进。温度控制系统主要由加热元件、测温元件、控制器组成，控制试验箱内的温度；湿度控制系统主要由加湿或除湿元件、湿度测量元件、控制器组成，控制箱内的湿度；烘烤温度控制系统主要由红外光加热元件、测温元件、控制器组成，控制试样烘烤的温度；传动控制系统主要由电机、调速器、控制器、测速元件组成，控制试样干湿交替时间。

因为开环控制系统主要是根据经验和控制开始时所设定的参数来进行控制，而在控制过程中不改变参数，因此很容易造成控制系统不能完成控制的要求，同时能量损失较大。闭环控制系统能够根据控制对象来给定输入量，在自动控制领域有着独到的优势。闭环控制系统正常运行时，不需要其他投入，能够根据实际的需要控制输入量，最大程度节约能源<sup>[10,11]</sup>。

基于成本考虑，对不同的控制系统的控制器尽量集成至同一元件上。此外，由于箱内温度、箱内湿度和烘烤温度相互影响，相对于大惯性滞后的箱内温度，湿度对象较易于控制，且湿度和烘烤温度对精度的要求较低，所以在保障温度的前提下，对湿度和烘烤温度进行控制。箱内温度要求控制在 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ ，且工艺要求开门关门后 30min 内达到试验要求的标准环境，所以要求温湿度控制的鲁棒性要高，故应采用 PID 控制器进行闭环控制。由于温度是个大惯性滞后的被控对象，为避免执行器的频繁调整动作，所以信号的采样周期暂设为 10s，取 10s 内温度的平均值。

烘烤功能通过红外光灯实现，设计通过调节红外光灯的电压调节红外光灯的亮度，从而调节烘烤温度，烘烤后试样表面温度的要求精度不高，为 $(70\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ，如采用闭环控制，要增加控制器和执行元件，于是采用开环控制，通过调节红外光灯电压的方式，调节烘烤后试样表面的温度，用传感器采集温度信号，并在触

触摸屏上实时显示,当发现温度与要求偏差较大时,进行调整,即可满足工艺要求。

箱内湿度要求控制在 $(70\pm 5)\%RH$ ,对精度要求不高,在选用传感器、变送器及控制器时要考虑元件自身的精度,避免超出控制精度范围,由于试验周期较长,避免因湿度超出控制范围而造成试验失败,应当对箱内湿度采用闭环控制。但湿度执行元件为加湿器和除湿器,不易采用PID控制,考虑采用二位式控制,在湿度低于湿度控制下限时加湿,在高于控制上限时除湿,由于湿度控制有一定的惯性,所以上下限值还需在实际调试中进行调整,以满足控制要求。

传动控制系统设计通过电机及传动部件带动轮盘旋转,通过控制电机的转速,使轮盘转速控制在1转/h。如果试验过程中转速有较小的误差,由于试验周期较长,可能会将误差累计较大,也应当采用闭环控制,避免轮盘转速累计的误差偏大。由于轮盘转速的精度要求不高,所以采用二位式控制即可。轮盘转速采用通过采集实测转速值与理论值转速值比较,按比较的大小进行调节,最初先手动调节,后采用计算机以小步进量逼近调节,即当实测值比理论值大时,以小的步进值向下减小控制信号,反之以该步进值增大控制信号,实现对转速的控制。

设计操作显示平台,一般来说操作和显示方法主要有:工控机显示操作、触摸屏显示操作和按钮及数字仪表显示操作等,如采用按钮及数字仪表显示操作,所需按钮及仪表较多,安装后显得装置操作面板凌乱,装置低档;采用工控机显示操作,则需另配一台工控机及电脑桌椅等,占用空间较大;结合本装置及实验室面积情况,采用触摸屏显示控制,即节省了空间,又简化了操作面板。选择触摸屏时,可选用带网卡的触摸屏,如将来需用工控机显示操作或与其他电脑联网通信时,也可扩展。

设计各个控制系统的组成之后,根据各控制系统所需的元器件,设计试验装置的外观及结构,保证在元器件安装的前提下,使试验装置操作简便实用,外观美观、大方。

## 3.3 控制系统设计

### 3.3.1 轮盘转速控制单元设计

试样是通过轮盘带动实现干湿交换的,且实验周期长,轮盘转速要求低,所以需要电机、减速机、传动部件等。由于该设备属于实验性质的设备,为以后开发需要,配置一台变频器,实现转速可调,以便更好的满足产品开发的需要。考

考虑到成本及尺寸的原因，涡轮减速机为二级减速 500:1，齿轮比为 10:1，电机为三相 175W，传动部件采用链条式传动，结构如图 3.2 所示。

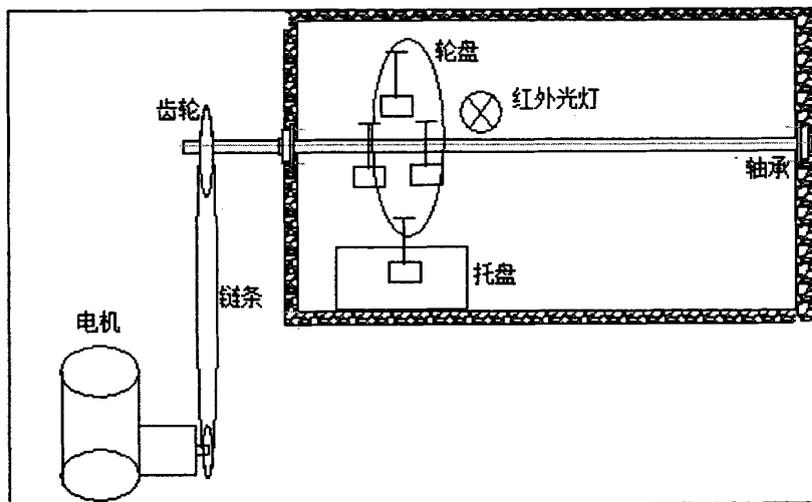


图 3.2 传动部件结构图

Figure 3.2 Transmission parts diagram

由于采用电机和减速机带动轮盘旋转，轮盘的转速很慢，可以考虑测量电机的转速来控制轮盘的转速。轮盘转速控制在 1 转/h，则电机转速需控制在 5000 转/h，采用计数器测量电机转数，采样周期取整为 36s，电机转速应为 50 转/36s，通过 PLC 对当前值与理论值每 36 秒进行一次比较，比较后对变频器发出相应的调整指令，如实测数据大于 50 转则以一定的增量降低电机频率，小于 50 转则以该增量增加电机频率，最终使电机转速稳定在 50 转/36s 左右。为了加快调整速度，可先手动粗调，再通过 PLC 控制变频器按一个较小的步进值进行调整，形成一个二位式的闭环控制系统，以达到控制要求，增加了运转的准确性和抗干扰能力。电机转速控制结构如图 3.3 所示。

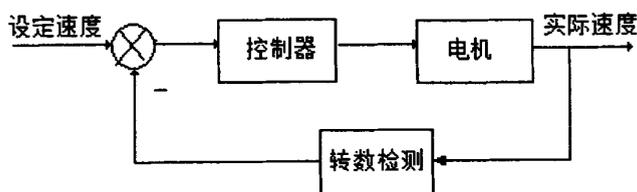


图 3.3 电机转速控制示意图

Figure 3.3 Control structure of motor speed

如电机以达到设定转速，但受到干扰，导致电机转速变小，通过计数器测量的转速就会减少，转速值就会小于理论值 50 转/36s，通过 PLC 比较后，PLC 会给变频器一个增大电机频率的信号，增加电机转速，抵抗干扰带来的影响，最终电机转速稳定在 50 转/36s。反之，如果干扰导致电机转速变快，同理也可通过 PLC 进行相应的动作，减小干扰带来的影响，避免误差的累积。

### 3.3.2 试样烘烤后表面温度控制单元设计

大气的日照量是由红外光灯烘烤模拟的，通过模拟日照将试样从湿润的环境转换到干燥的环境，试样烘烤温度要求在 $(70\pm 10)^{\circ}\text{C}$ ，精度不高，可以采用开环控制，考虑通过设定红外光灯的电压实现控制。设定后考虑到将来光源老化，温度降低等问题，在红外光灯的照射端，放置一个温度传感器，采用 PT100，先将温度的模拟量信号传送至 PLC，经过 PLC 的模数转换，变为数字信号，再由触摸屏组态在屏幕上实时显示，当温度低于或高于工艺要求的范围时，可及时的通过调整红外光灯的亮度。

要实现红外光灯的亮度可调，从成本和简易方面考虑，采用电阻式固态继电器及电位器，调节红外光灯的电压，实现亮度可调。

### 3.3.3 箱内温度控制单元设计

箱内温度的控制是模拟大气环境的一个重要的单元，温度对金属氧化物的生成影响很大，要求温度控制范围在 $(45\pm 2)^{\circ}\text{C}$ 范围内，采用闭环的 PID 控制器控制，算法由 PLC 实现，该设备的工作温度应为室温至  $47^{\circ}\text{C}$ ，考虑温度超调的情况，选用的传感器量程在 $(0-60)^{\circ}\text{C}$ 之间，即可满足要求，所以可以选用热电阻 PT100。考虑到加满溶液时箱内的热容量很大，为了缩短开机稳定时间，选用 2KW 功率的桑拿型加热棒作为加热元件。为了达到较好的控制效果，通过可控硅控制加热棒的功率，需要可控硅、加热棒、可控硅触发板。

温度传感器采用 PT100 及相应的变送器，将温度转换为 4-20mA 的模拟信号，通过香农采样定理进行采样，采样信号通过 PLC 进行模数转换，转换成相应的数字信号。PLC 内部用 PID 算法对数字信号比较计算，PLC 将计算的数字量结果经过数模转换后，给可控硅触发板相应的模拟量控制信号，简单的闭环控制系统示意如图 3.4 所示。

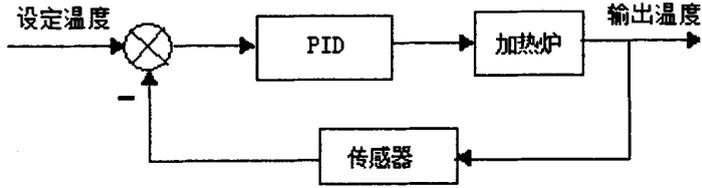


图 3.4 控制系统示意图

Figure 3.4 Schematic diagram of the control system

对被控对象进行分析建模，测量其飞升曲线，实验示意图如 3.5 所示。

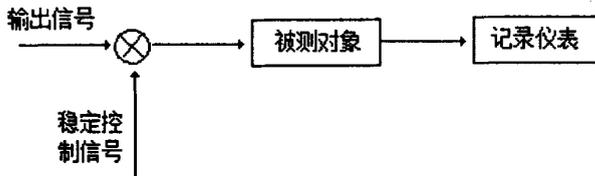


图 3.5 实验示意图

Figure 3.5 lab chart

在稳定控制信号作用下系统有一个稳定的输出，然后突然在输入端加一幅度适宜的阶跃控制信号。输出对应也有一个变化部分，此即为输出的飞升曲线。它所对应的输入也就是这个突然附加的阶跃信号。实验测得的飞升曲线如图 3.6 所示。

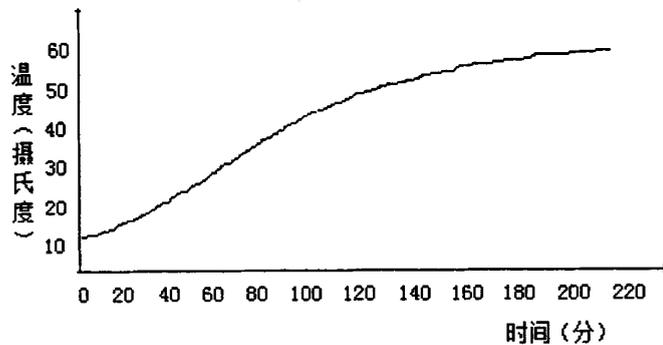


图 3.6 飞升曲线图

Figure 3.6 response curve

由以上所测得的飞升曲线可知，被控对象可近似为带纯滞后的一阶惯性环节，其传递函数表达为：

$$W(s) = \frac{Ke^{-\tau s}}{Ts + 1} \quad (3.1)$$

式中： $K$  为放大系数， $T$  为对象时间常数， $\tau$  为对象滞后时间。

输出从起始值到达 0.623 倍稳态值的时间即为对象时间常数  $T$ 。而对对象滞后时间  $\tau$  可直接从图中测量。通过测量飞升曲线求得被控对象参数。

$$K=3, T=4800s, \tau=600s$$

虽然该系统的滞后较大，但是由于装置对系统升温时间没有具体要求，且对控制精度要求不高，只采用传统的 PI 控制即可，不再对时滞系统进行分析控制。

### 3.3.4 箱内湿度控制单元设计

湿度控制在相对湿度为  $(70 \pm 5)\%RH$  的范围内，执行元件为抽湿机和加湿器，由于要求范围较宽，且不易采用 PID 控制，所以决定采用二位式控制，即在相对湿度大于某一个值  $U_h$ （最高 75）时抽湿，小于某一个值  $U_l$ （最低 65）时加湿。 $U_h$ 、 $U_l$  的值由设备运行调试时，经观察后整定给出。抽湿器的进气口和出气口均与箱体相连，保证箱体的密闭性，减少外部环境对试验的干扰。湿度控制如图 3.7、3.8 所示。

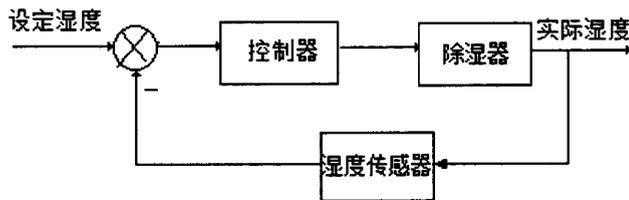


图 3.7 除湿控制图

Figure 3.7 Control Structure of humidity

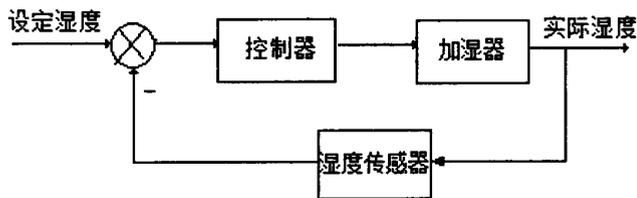


图 3.8 加湿控制图

Figure 3.8 Control Structure of humidity

## 3.4 软件功能设计

### 3.4.1 PLC 控制程序编程设计

PLC 作为控制系统的下位机，其作用是直接控制设备、获取设备状况。获取

设备状况主要是采集设备的各个信息，如箱内温度湿度等。控制设备主要是要按照工艺流程顺序编写运行程序，使设备按照工艺流程运转。

试验工艺流程如下：第一步，开机，设备进行初始化。第二步，输入参数，设定试验的时间、控制参数等；第三步，等待装置环境稳定，此阶段控温控湿单元工作，使箱内的温湿度达到试验要求；第四步，装入试样后开始试验，此时轮盘旋转，红外光灯开启，定时器计时；第五步，试验结束时定时器触发，此时轮盘停止旋转，控温控湿单元停止，红外光灯关闭，装置并发出相应的提示声；第六步，结果分析和报表生成，对试验结果进行简单的分析和评判。

按照 PLC 的输入输出类型可将程序分为：模拟量输入程序的编写，模拟量输出程序的编写，数字量输出程序的编写，由于采用触摸屏组态 HMI 系统，所以不需要进行数字量输入的编写。此外还有一些为触摸屏显示而进行的人性化编程，如运行时间及剩余时间的显示等，最后还要通过软件编写相应的程序，实现对试样耐腐蚀性模糊评判系统的建立。编写程序时，先设计信号表，按照信号表编写符号表，编程要规范，便于以后的编写修改等，程序流程如图 3.9 所示。

### 3.4.2 触摸屏操作界面编程设计

使用触摸屏组态生成 HMI 系统 (Human Machine Interface)，HMI 系统广义的解释就是“使用者与机器间沟通、传达及接收信息的一个接口”，主要功能有：

- (1) 实时的资料趋势显示——把获取的数据立即显示在屏幕上。
- (2) 自动记录资料——自动将资料储存至数据库中，以便日后查看。
- (3) 历史资料趋势显示——把数据库中的资料做可视化的呈现。
- (4) 报表的产生与打印——能把资料转换成报表的格式，并能够打印出来。
- (5) 图形接口控制——操作者能够透过图形接口直接控制机台等装置。
- (6) 警报的产生与记录——使用者可以定义一些警报产生的条件。

按照工艺的流程及操作人员的要求和习惯来编写操作界面，界面应包括：试验参数输入，当前运行状态显示，历史数据显示，报警信息显示，报表生成及试验结果计算评判等内容<sup>[12]</sup>。

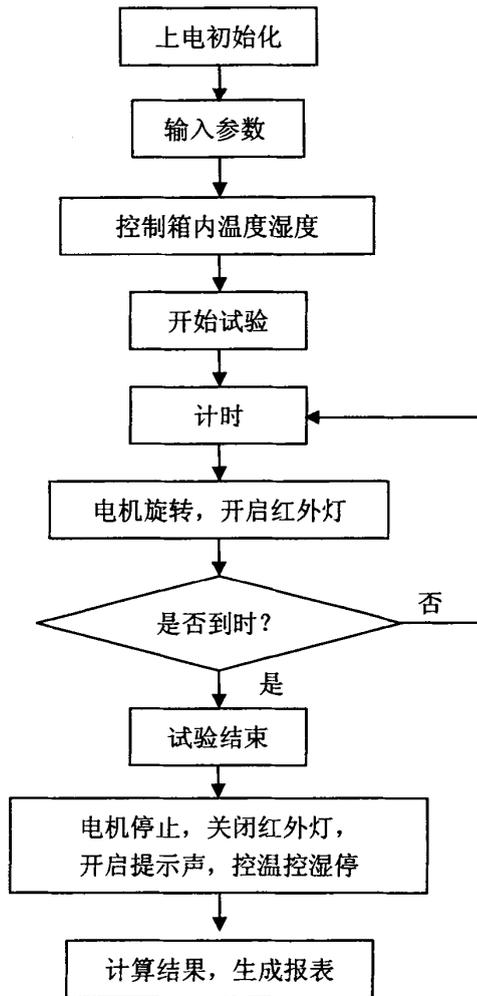


图 3.9 PLC 程序流程图

Figure 3.9 PLC program flow chart

### 3.4.3 通讯设计

通信主要包括：PLC 与触摸屏之间的通信、触摸屏与编程电脑之间的通信、PLC 与编程电脑之间的通信。其中 PLC 与触摸屏之间的通信由组态软件实现，通过 RS232 端子连接；PLC 与编程电脑之间的通信可由编程电缆连接。触摸屏有操作系统和网口，将编程电脑和触摸屏的 IP 地址设到同一网段，即可通过网线与编程电脑通讯。

PLC 与触摸屏通信时，PLC 负责读取触摸屏的输入数据，包括试验时间等参数设定值、各种运行停止指令信号等，触摸屏显示的设备信息则需从 PLC 中读取，如箱内温度湿度的数据、轮盘、红外光灯、加湿器除湿器的运行状态等。编程电脑与 PLC、触摸屏的通信，则是编程电脑将编写好的程序下载到 PLC、

触摸屏内，或将 PLC、触摸屏的程序上载到编程电脑，保存修改等<sup>[13,14]</sup>。

### 3.5 本章小结

本章对控制系统进行了全面的设计，对系统的控制策略进行了分析，对被控的箱内温度、箱内湿度、烘烤温度和转速等单元进行设计，还有对软件实现的各种功能和目标进行了研究，为将来的系统实现打好了基础。

## 第4章 耐腐蚀性模糊综合评价研究

### 4.1 引言

针对铁路用钢的特点,对试样的耐腐蚀性建立一个模糊评判体系,更准确更权威的对钢材的耐腐蚀性予以评判,从而更好地支持科研工作、指导生产。金属腐蚀具有腐蚀程度复杂、模糊、腐蚀评判指标种类较多等特点,适合采用模糊数学评判方法对金属腐蚀程度进行整体评判。

模糊数学评判方法是1965年美国自动控制专家L. A. Zadeh首先提出的。该方法是建立在集合论的基础上,设给定论域 $u$ ,  $u$ 上一个模糊子集 $A$ ,对于任意元素 $X \in U$ ,都能确定一个函数 $A(x) \in [0,1]$ ,用以表示隶属 $A$ 的程度。 $A(x)$ 称为对 $A$ 的隶属度。模糊关系矩阵中的每个元素代表了每个指标对每一评判等级的隶属度。因此可以把隶属度看成是评判指标和评判标准的函数;采用的函数形式不同,则描述的评判等级的隶属性不同。它具有结果清晰、系统性强的特点,能较好地解决模糊的、难以量化的问题,适合各种非确定性问题的解决<sup>[15,16]</sup>。

### 4.2 模糊集合概念

用集合的观点看,一个概念的内涵就是集合的定义,外延则是组成该集合的所有元素,这表明集合可以描述概念。

用来表达模糊性概念的集合,又称模糊集、模糊子集。普通的集合是指具有某种属性的对象的全体。这种属性所表达的概念应该是清晰的,界限分明的。因此每个对象对于集合的隶属关系也是明确的,非此即彼。但在人们的思维中还有着许多模糊的概念,例如年轻、很大、暖和、傍晚等,这些概念所描述的对象属性不能简单地用“是”或“否”来回答,模糊集合就是指具有某个模糊概念所描述的属性的对象的全体。由于概念本身不是清晰的、界限分明的,因而对象对集合的隶属关系也不是明确的、非此即彼的。模糊集合这一概念的出现使得数学的思维和方法可以用于处理模糊性现象,从而构成了模糊集合论的基础。

于是,把特征函数值的范围从集合 $\{0,1\}$ 扩充到在区间 $[0,1]$ 上连续取值,那么某一对象符合某概念的程度,就可以用区间 $[0,1]$ 内的数来表示,对象所对应的数值越靠近1,表示该对象符合概念的程度愈大,反之愈小。这样一来,集合 $A$ 就

相应地扩充为一个带有不分明边界的模糊集了,从而模糊概念也就可用这样的模糊集来表达。

基于上述想法,得出模糊集的定义为:

设在论域  $U$  上给定了映射:

$$\mu_A : U \rightarrow [0,1] \quad u \mapsto \mu_A(u) \tag{4.1}$$

则称  $\mu$  确定了  $U$  上的一个模糊子集,记为  $A$ ,  $\mu$  称为模糊子集  $A$  的隶属函数,  $\mu_A$  在  $u \in U$  点处的值  $\mu_A(u)$  称为  $u$  对  $A$  的隶属度,表示  $u$  属于  $A$  的程度。模糊集  $A$  完全由其隶属函数所描述,即只要给定隶属函数  $\mu_A(u)$ ,那么模糊集  $A$  也就完全确定了,不同的隶属度函数确定着不同的模糊集。同一论域  $U$  上可以有多个模糊集。

对  $\forall u \in U$  及  $U$  上的模糊集,一般不能说  $u$  是否隶属于  $A$ ,只能说  $u$  多大程度上隶属于  $A$ ,这正是模糊集与普通集的本质区别。特别地,当  $\mu_A(u)$  的值取  $[0,1]$  的两个端点时,隶属函数变退化为特征函数,模糊集  $A$  就退化为一个普通集合。这表明普通子集是模糊集的特殊形态。此外,若  $\forall u \in U, \mu_A(u) = 0$ ,则  $A$  称为空集  $\phi$ ,若  $\forall u \in U, \mu_A(u) = 1$ ,则  $A$  称为全集  $U$ 。

设有限集  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ , 模糊集通常有四种表示方法:

(1) Zadeh 表示法

$$A = \frac{A(u_1)}{u_1} + \frac{A(u_2)}{u_2} + \dots + \frac{A(u_n)}{u_n} \tag{4.2}$$

其中  $A(u_i)/u_i$  不表示分数,而是  $U$  中的元素  $u_i$  与其隶属于  $A$  的程度之间的对应关系,“+”也不表示求和,而是表示模糊集在论域  $U$  上的整体,且当某元素的隶属度为零时,可略去不写。

(2) 序偶表示法

$$A = \{(A(u_1), u_1), (A(u_2), u_2), \dots, (A(u_n), u_n)\} \tag{4.3}$$

这种表示法是由普通集合的列举法演变而来,它由元素和它的隶属度组成的有序对(前者是隶属度,后者是元素)一一列出。

(3) 向量表示法

$$\underline{A} = (\underline{A}(u_1), \underline{A}(u_2), \dots, \underline{A}(u_n)) \quad (4.4)$$

这种表示法是借助于 n 维数组来实现的, 即当论域 U 中的元素先后次序排定时, 按此顺序记载各元素的隶属度 (此时隶属度为 0 的项不能舍弃)。

(4) Zadeh 与向量的结合表示法

$$\underline{A} = \left( \frac{\underline{A}(u_1)}{u_1}, \frac{\underline{A}(u_2)}{u_2}, \dots, \frac{\underline{A}(u_n)}{u_n} \right) \quad (4.5)$$

### 4.3 模糊综合评判

在实际问题中, 我们总要比较不同事物然后择优录取。如仅考察单一因素, 那么问题较简单, 只需分别给对象一个评判分数, 依据分数高低, 变可排出对象的优劣次序。然而, 同一事物往往有着多种属性, 有的属性还带有模糊性, 人们对这类事物的评判, 不是简单的“好”与“不好”, 而是用模糊语言分为不同程度的评语, 此时在进行比较时, 就必须既要兼顾到各个方面, 又要注意优者, 就需要综合考虑, 这就要用到模糊综合评判, 又称为模糊综合决策。简单地说, 模糊综合决策就是应用模糊集方法通过对事物所涉及到的因素进行单一决策, 然后综合各方面的情况, 给出一个总体的评判。

对金属在大气中的腐蚀情况就可以使用这种评判方法, 金属的腐蚀程度有多个评判的指标, 不同的用途对不同的指标有所侧重, 且金属的耐腐蚀程度是个模糊概念, 极其适合用该方法评判。

在使用模糊评判系统前, 对试样的耐腐蚀性程度用相应的指标逐次评判, 因为改变生产工艺或试样成分后对试样耐腐蚀性的各项指标都有影响, 有些影响是正面的, 有些影响是负面的, 无法确定改正后的工艺和配方对试样耐腐蚀性整体的影响是正面的还是负面的, 若只以某一项指标为主进行工艺和配方的调整, 常常会导致最后试样耐腐蚀性的某一项指标很好, 而其他的指标很差, 影响了试样的整体耐腐蚀性程度。但采用模糊评判系统后, 可对试样的整体耐腐蚀性程度进行评判, 对于调整工艺和配方都有很积极的指导意义。

#### 4.3.1 模糊综合评判法的术语及其定义

有时一个问题的某一因素是由若干因素决定的, 同样若干因素中的某一单因素, 也可能是更低一层次的多因素所决定的, 对这类问题称为多层次问题。对于多层次问题, 可以把高层次的诸因素看作子问题, 先对诸子问题分别进行综合评

判, 然后再对总体进行综合评判, 即先对低层次因素进行综合, 再对高一层的因素进行综合, 这就是多层次综合评判。

两层综合评判的模型:

$$B = A \bullet R = A \bullet \begin{pmatrix} A_1 \bullet R_1 \\ A_2 \bullet R_2 \\ \vdots \\ A_n \bullet R_n \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

其中:

$$R_1 = \begin{pmatrix} A_{1_1} \bullet R_{1_1} \\ A_{1_2} \bullet R_{1_2} \\ \vdots \\ A_{1_l} \bullet R_{1_l} \end{pmatrix}, \quad R_2 = \begin{pmatrix} A_{2_1} \bullet R_{2_1} \\ A_{2_2} \bullet R_{2_2} \\ \vdots \\ A_{2_l} \bullet R_{2_l} \end{pmatrix}, \quad \dots, \quad R_n = \begin{pmatrix} A_{n_1} \bullet R_{n_1} \\ A_{n_2} \bullet R_{n_2} \\ \vdots \\ A_{n_l} \bullet R_{n_l} \end{pmatrix}$$

根据上述理论, 对模糊综合评判法中的有关术语定义如下:

(1) 评判因素: 系指对项目评议的具体内容, 即对试样耐腐蚀性的评判。

为便于权重分配和评议, 可以按评判因素的属性将评判因素分成若干类, 把每一类都视为单一评判因素, 并称之为第一级评判因素。第一级评判因素可以设置下属的第二级评判因素。依此类推。

(2) 评判因素值: 系指评判因素的具体值。

(3) 评判值: 系指评判因素的优劣程度。评判因素最优的评判值为 1 (采用百分制时为 100 分); 欠优的评判因素, 依据欠优的程度, 其评判值大于或等于零、小于或等于 1 (采用百分制时为 100 分), 即  $0 \leq E \leq 1$  (采用百分制时  $0 \leq E \leq 100$ )。

(4) 平均评判值: 系指评判成员对某评判因素评判的平均值。平均评判值 = 全体成员的评判值之和 ÷ 评委数

(5) 权重: 系指评判因素的地位和重要程度。第一级评判因素的权重之和为 1; 每一个评判因素的下一级评判因素的权重之和为 1。

(6) 加权平均评判值: 系指加权后的平均评判值。

$$\text{加权平均评判值} = \text{平均评判值} \times \text{权重}$$

(7) 综合评判值: 系指同一级评判因素的加权平均评判值之和<sup>[17,18]</sup>。

模糊综合评判法的特点:

(1) 相互比较。以最优的评判因素值为基准, 其评判值 1; 其余欠优的评判因素依据欠优的程度得到相应的评判值。

(2) 可以依据各类评判因素的特征, 确定评判值与评判因素值之间的函数关

系（即：隶属度函数）<sup>[19,20]</sup>。

根据腐蚀试验的特点建立评判指标，金属的耐性腐蚀主要考察均匀腐蚀程度和局部腐蚀程度，均匀腐蚀的评判标准主要有：增/失重率，根据腐蚀产物容易除去还是牢固地附着于试件表面的不同情况，可分别采用单位时间内单位面积上的失重或增重来表示腐蚀程度；腐蚀深度，通过腐蚀深度判断腐蚀程度；腐蚀电流，以金属电化学腐蚀过程的阳极电流密度的大小来衡量金属的电化学腐蚀速度来表示腐蚀程度。

局部腐蚀程度评定较为复杂，没有统一的定量评定标准。金属的局部腐蚀形式很多，反映在物理和机械性能方面的变化也各不相同。需要根据腐蚀形式采用合适的物理、机械性能变化指标来进行评定。目前对点蚀的评判采用点蚀密度、平均点蚀深度、最大点蚀深度等指标进行综合评判，晶间腐蚀和应力腐蚀则采用腐蚀前后机械强度的损失来进行评定。

于是建立 2 个一层指标，即均匀腐蚀程度和局部腐蚀程度，7 个二层指标，即增/失重率、腐蚀深度、腐蚀电流、点蚀密度、平均点蚀深度、最大点蚀深度、机械强度损失，均匀腐蚀程度和局部腐蚀程度的评判体系分别如表 4.1 所示、表 4.2 所示。

表 4.1 试样均匀腐蚀程度的评判指标体系

Table 4.1 Sample evaluation system about uniform corrosion

增/失重率	腐蚀深度	腐蚀电流
U <sub>11</sub>	U <sub>12</sub>	U <sub>13</sub>

表 4.2 试样局部腐蚀程度的评判指标体系

Table 4.1 Sample evaluation system about localized corrosion

点蚀密度	平均点蚀深度	最大点蚀深度	机械强度损失
U <sub>21</sub>	U <sub>22</sub>	U <sub>23</sub>	U <sub>24</sub>

### 4.3.2 模糊综合评判法实现步骤

层次分析法是一种把定性分析与定量相结合的求目标权重的方法，通过两两比较、判断及推算等，具有客观和准确的特点<sup>[21,22]</sup>。模糊综合评判法是应用模糊关系合成原理，从多个因素对被评分事物隶属等级状况进行综合评判的一种方法，能对多因素的模糊事物有一个明确的认识，使综合评判中多层次的模糊性科学化 and 量化<sup>[23,24]</sup>。两种方法的综合运用不仅可以解决多因素和多指标的权重问

题, 同时也可解决综合评判问题, 因此综合运用层次分析法和模糊综合评判法是解决多因素和多指标评判问题较为有利的方法。这两种方法的综合可称为多层次模糊综合评判法<sup>[25,26]</sup>, 其具体步骤如下。

(1) 确定评判耐腐蚀因素集  $U$ 。

将  $U$  划分为几个子集, 即  $u = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ , 其中每个子集  $u_i = \{u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im}\}$ , ( $i = 1, 2, \dots, s$ ),  $m$  表示组成  $u_i$  元素的个数。本评判体系为  $u_1, u_2$  两个子集, 其中  $u_1$  有三个元素,  $u_2$  中有四个元素。

(2) 确立评判耐腐蚀性的评语集  $V$ 。评语集可根据各种指标的要求不同而设定, 评判等级一般不宜划分得过粗或过细, 通常可分为 5~7 级, 评判标准的含义则随评判等级的划分而相应得到确定。本评判体系取耐腐蚀性的评语集为  $V = \{\text{好, 较好, 一般, 差, 较差}\}$  5 个等级; 这些评判指标的评判结果需要赋予一定的分值, 以便进行定量分析及评判, 这里所给的分值如表 4.3 所示。

表 4.3 指标评判分值表

Table 4.3 Score of indicators to assess

好	较好	一般	差	较差
100-90	89-70	69-50	49-20	20 以下

(3) 确立各评判指标间的权重分配

$A = \{a_i\} (i = 1, 2)$  和  $A_i = \{a_{im}\} (i = 1, 2; m = 1, 2, \dots, q)$ 。权数  $a_i$  是指因素在评判体系中所起作用大小和相对重要程度的度量。权数的确定是一项非常重要的工作, 可采用直接赋权法, 也可采用层次分析法确定。先根据科研人员的意见给予各项指标权数, 然后运用层次分析法来确定各项指标的权重, 即分别得到因素  $u_1, u_2, \dots, u_m$  的权重:

$$a_1, a_2, \dots, a_m, \text{ 且 } \sum_{i=1}^2 a_i = 1 \text{ 及 } a_{im}, \text{ 且 } \sum_{m=1}^q a_i = 1。$$

(4) 确立从  $U$  到  $V$  上的模糊关联矩阵  $R$

$$R = \begin{bmatrix} U_{11} & U_{12} & \cdots & U_{1m} \\ U_{21} & U_{22} & \cdots & U_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ U_{s1} & U_{s2} & \cdots & U_{sm} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

式中:  $u_{ij}$  为对第  $i$  个评判指标作出第  $j$  级评语的隶属度, 即对因素  $u_i$  被评为  $V_j$  等级的可能性, ( $i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, m$ )

(5) 对各指标体系各因素进行评判。即进行一层综合评判及二层综合评判

等, 设  $u_i$  中各因素相对于  $U$  的权重分配为  $A_i = \{a_m\} (i = 1, 2, 3; m = 1, 2, \dots, q)$ , 则得到一层评判向量为:

$$B = A \bullet R = (b_1, b_2, \dots, b_m), b_j = \vee(a_i \wedge u_{ij}) (0 \leq b_j \leq 1) \quad (4.8)$$

式中: “ $\wedge$ ” 为  $a_i$  与  $u_{ij}$  相比取最小值; “ $\vee$ ” 为  $(a_i \wedge u_{ij})$  几个值中取最大值。

如果  $\sum_{j=1}^m b_j \neq 1$ , 则采用归一法处理  $B$  矩阵。将每个  $u_i$  看作一个因素集, 则  $u_i$  的单因素评判矩阵为:

$$R' = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{s1} & b_{s1} & \dots & b_{sn} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

按层次分析法中权重的确定方法确定权重  $A = \{a_i\}$ , 于是得到二层评判向量:

$$B' = A \bullet R' = p(p_1, p_2, \dots, p_s) \quad (4.10)$$

如果每个子因素集  $u_i$  含较多因素, 可将  $u_i$  再划分, 于是有三层综合评判模型、甚至四层、五层综合评判模型。

(6) 综合评判采用加权平均的原则进行处理, 加权平均的原则为:

$$C = \frac{\sum_{j=1}^m b_j^k \cdot c_j}{\sum_{j=1}^m b_j^k} \quad (4.11)$$

式中:  $k$  为待定系数, 一般取  $k = 1$ ;  $c_j$  为评语集的相应分值。计算所得之值与评判指标分值档次表对照评判结果。

## 4.4 本章小结

本章通过对模糊评判体系的研究, 建立了一个适合本实验的模糊评判方法, 即多层次模糊综合评判法, 该方法有利地解决了多因素和多指标评判问题, 并归纳出其评判的实现步骤。对试样耐腐蚀性的各个评判因素予以评判, 按照权重进行计算, 综合计算了各个因素和指标的影响, 而不是单纯的只考虑某一个因素和指标, 得出的判断准确度更高, 更有说服力, 通过这种评判方法对试样进行了一个综合性整体性的评判。



## 第 5 章 系统实现

### 5.1 系统设备选型及组态

首先分析输入输出信号的类型和数量来选择 PLC，因为要与触摸屏通信，还需要通信接口。信号的类型有模拟量输入输出、数字量输出，输入的模拟信号有箱内及烘烤的温度信号、湿度信号、变频器返回信号，需要 4 个模拟量输入点；输出的模拟信号有给可控硅触发板的信号，给变频器的频率控制信号，需要 2 个模拟量输出点；数字量输入信号有箱门关闭信号及其他操作信号如启动、停止、输入试验时间等由触摸屏给出，需要通讯接口；数字量输出信号有 4 个红外灯的控制信号，变频器控制的电机启停信号，加湿器和除湿器的信号，需要 7 个数字量输出点<sup>[26,27]</sup>。

由于是个小型的控制系统，决定选择 CPU224XPDC/DC，配合一个 EM235 模拟量模块，CPU224XP 有 10 个数字量输出，14 个数字量输入，2 个模拟量输入，1 个模拟量输出，所以再增加一个 4 模拟量输入 1 个模拟量输出的 EM235 模块即可满足要求，但在配盘时，需预留出一定的空间，以备将来需求增加时，增加扩展模块使用。至此整个控制系统硬件选型基本结束，腐蚀试验装置控制结构框图如图 5.1 所示。

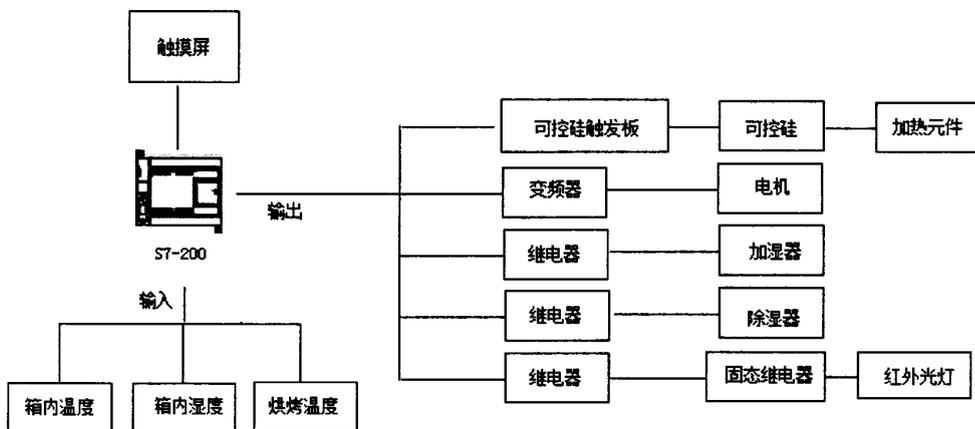


图 5.1 腐蚀试验装置控制结构框图

Fig 5.1 Control structure of corrosion test equipment

按控制结构框图将硬件安装在如图 5.2 所示的保温箱内，保温箱外壳采用镀锌板喷塑，内部采用印花不锈钢材料；中间加装保温层，左边开孔位置为触摸屏，右边为箱体，箱体对开门，门上安装两个双层玻璃，便于试验的观察；电机及电源和控制盘均在左侧，加湿器及抽湿器安装在底部。

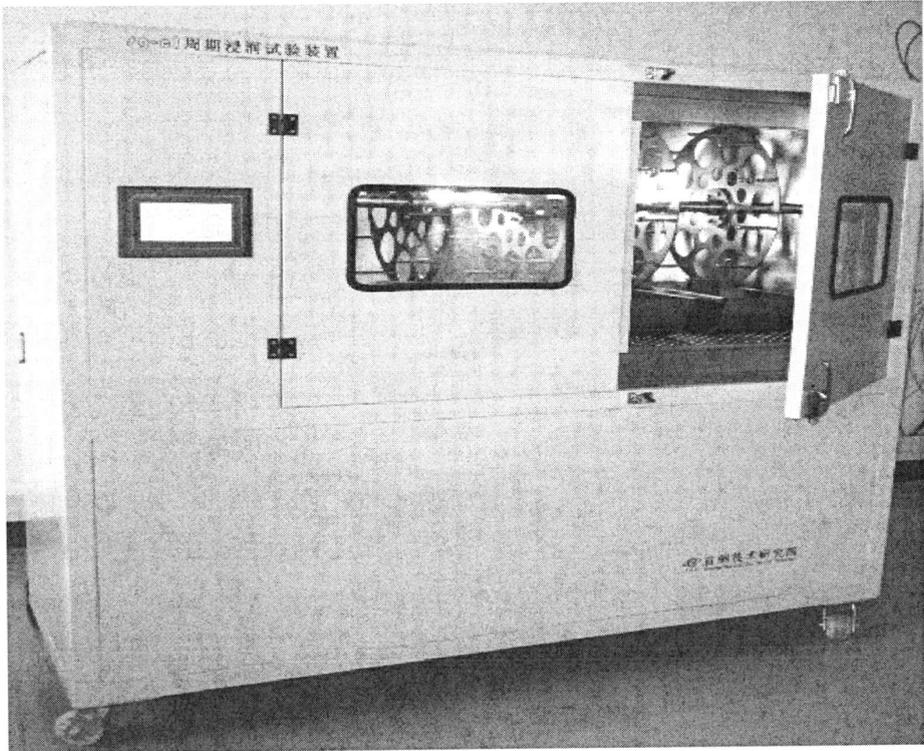


图 5.2 试验装置外观图

Figure 5.2 Appearance of test equipment

## 5.2 编程软件

使用西门子 PLC-200 作为控制器，针对 PLC-200 编程的软件是 STEP 7，STEP 7 是用于 SIMATIC 可编程逻辑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。

### 5.2.1 STEP 7 软件包功能

STEP 7 中集成的 SIMATIC 编程语言和语言表达方式，符合 EN 61131-3 或 IEC 1131-3 标准。标准软件包运行在操作系统 Windows 95/98/NT 4.0/2000/Me/XP 下，并与 Windows 的图形和面向对象的操作原理相匹配。

- (1) 标准软件支持自动任务创建过程的各个阶段，如：  
建立和管理项目；

对硬件和通讯作组态和参数赋值；

管理符号；

创建程序，例如为 S7 可编程控制器创建程序；

下载程序到可编程控制器；

测试自动化系统；

诊断设备故障；

(2) STEP 7 标准软件包提供一系列的应用程序（工具），如：

符号编辑器；

SIMATIC 管理器；

NETPRO 通讯组态；

硬件组态；

编程语言 LAD、FBD、STL；

硬件诊断。

### 5.2.2 STEP 7 编程语言

用于 S7-200 的编程语言梯形逻辑图 (Ladder Logic)、语句表 (Statement List) 和功能块图 (Function Block Diagram) 都集成在一个标准软件包中。

(1) 梯形逻辑图 (或 LAD) 是 STEP 7 编程语言的图形表达方式。它的指令语法与一个继电器的梯形逻辑图相似：当电信号通过各个触点、复合元件以及输出线圈时，使用梯形图，可以追踪电信号在电源示意线之间的流动。

(2) 语句表 (或 STL) 是 STEP 7 编程语言的文本表达方式，与机器码相似。如果一个程序是用语句表编写的，CPU 执行程序时则按每一条指令一步一步地执行。为使编程更容易，语句表已进行扩展，还包括一些高层语言结构 (例如，结构数据的访问和块参数)。

(3) 功能块图 (或 FBD) 是 STEP 7 编程语言的图形表达方式，使用与布尔代数相类似的逻辑框来表达逻辑。复合功能 (如数学功能) 可以用逻辑框相连直接表达<sup>[28,29]</sup>。

## 5.3 硬件组态

首先，根据 PLC 的输入输出点的需求进行信号表的编写，按照信号表编写 PLC 程序及连接 PLC 外部电路，信号表如表 5.1 所示。

表 5.1 PLC 信号表  
Table 5.1 PLC signal diagram

输入/输出端	输入/输出信号
AIW4	箱内温度信号
AIW6	箱内湿度信号
AIW8	变频器当前频率信号
AIW10	烘烤后试样表面温度信号
AQW0	箱内温度控制信号
AQW2	变频器控制信号
I0.0	箱门关闭信号
Q0.0	红外加热灯 1 开启/关闭
Q0.1	红外加热灯 2 开启/关闭
Q0.2	红外加热灯 3 开启/关闭
Q0.3	红外加热灯 4 开启/关闭
Q0.4	电机启动/停止
Q0.5	加湿器工作/停止
Q0.6	除湿器工作/停止

根据表 5.2 对 PLC 及其他电路进行连接, 完成硬件系统的搭建。接线图如图 5.3 所示。

## 5.4 系统控制功能实现

### 5.4.1 温度控制的实现

在实际采购传感器时, 发现有温湿度一体检测及变送的元件, 可同时检测温度和湿度, 温度量程为 0-60℃, 湿度为 0-100%RH, 精度为 0.5 级, 完全满足要求, 于是决定采用该元件, 该元件为三线制接法, 接线图如图 5.4 所示。

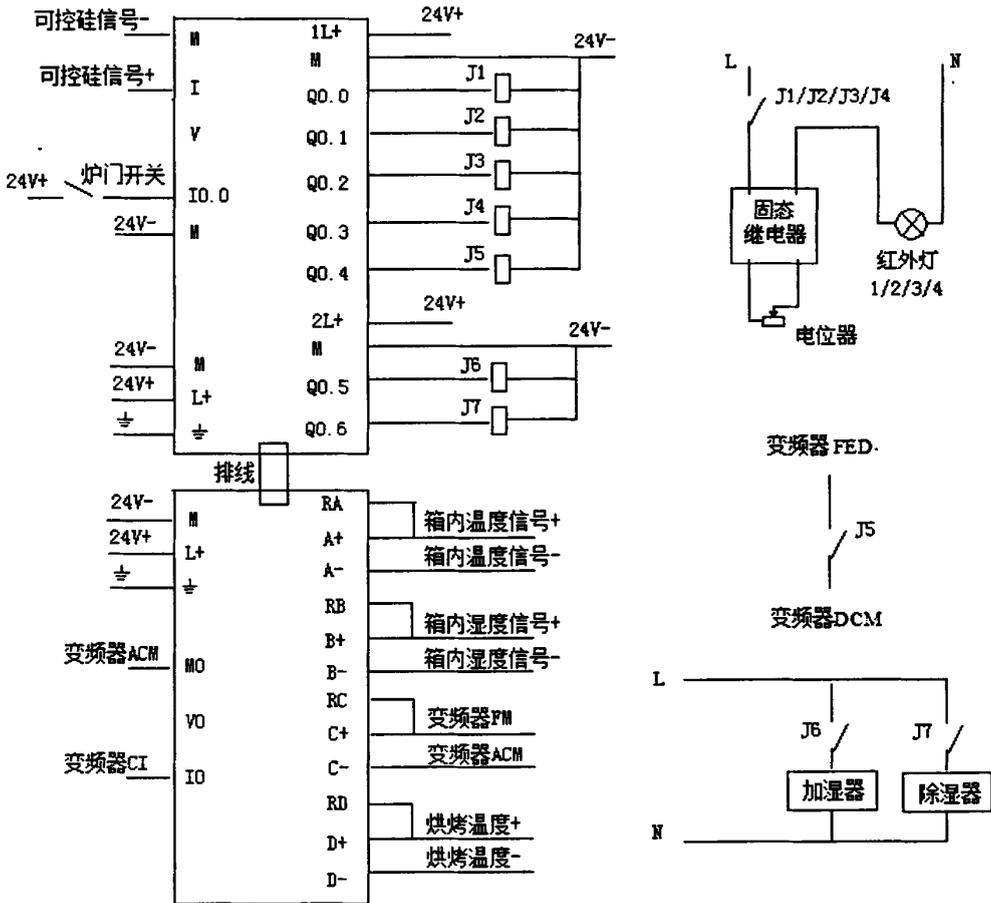


图 5.3 硬件系统接线图  
Figure 5.3 Hardware system wiring diagram

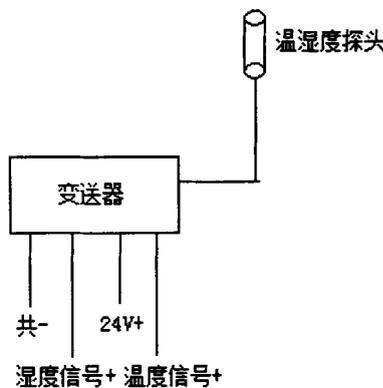


图 5.4 温湿度检测变送器  
Figure 5.4 Temperature and humidity test transmitter

温度经检测器检测后由变送器变送为 4-20mA 信号，将 4-20mA 信号传输给 PLC，PLC 经过模数转换后，即变成了实际物理值，用 PLC-200 自带的 PID 中

断子程序进行控制，将控制信号给可控硅触发板，从而控制可控硅导通角，控制加热棒的功率。由于 PLC-200 自带的模拟量输入为电压型，如使用则需增加 500 欧的电阻，EM235 模块上有 4 个模拟量输入点，可直接使用，但 CPU224 的两个模拟量输入点已占两个地址，所以起始地址为 AIW4，使用 EM235 模块时，还需将输入的类型选为电流输入 0-20mA，通过 EM235 模块的配置开关更改，配置开关的定义如表 5.2 所示。

表 5.2 EM235 模拟量量程的配置开关表  
Table 5.2 Configuration of switch of EM235 analog scale

单极性						满量程输入
SW1	SW2	SW3	SW4	SW5	SW6	
通	断	断	通	断	通	0-50mV
断	通	断	通	断	通	0-100mV
通	断	断	断	通	通	0-500mV
断	通	断	断	通	通	0-1V
通	断	断	断	断	通	0-5V
通	断	断	断	断	通	0-20mA
断	通	断	断	断	通	0-10V

更改配置开关后，温度信号经传感器检测，变送器变送后为 4-20mA，需要 PLC 进行模数转换，由于存在偏移量，传感器最小值 0 度对应 4mA，传感器最大值 60℃对应 20mA，在 PLC 内 0mA 对应数字量 0，20mA 对应数字量 32000，温度的物理量大小与模拟量数字量信号的数值关系如图 5.5 所示。由于线性关系，可将模拟量转化成相应的数字量，方法可由两点式直线方程计算<sup>[29,31]</sup>。

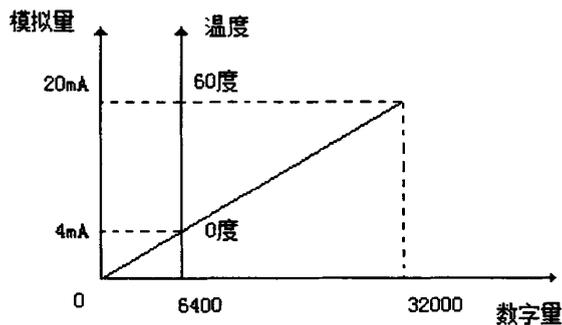


图 5.5 温度物理量与模拟量、数字量关系  
Figure 5.5 Relationship between temperature, analog and digital

将采集到的数字信号转化为相应的物理值，进行显示和计算等操作，由于温度是个大惯性滞后的被控对象，为避免执行器的频繁调整动作，所以信号的采样周期设为 10s，为避免采样时的干扰，1s 读取一次温度值，读取 10 次，取 10s 内温度的算术平均值。

编写程序如下：

```

//每一秒触发一次
LD    SM0.5
EU
//将温度输入信号放入 V 存储区的 VW0 中，此信号为数字量
MOVW  AIW4, VW0
-I    +6400, VW0
/I    512, VW0
+I    2, VW0
//计算后 VW0 中存放的就是转化后的温度实际物理量值
//VW0 自加 10 次，之后除 10 给 VW10，VW10 是温度 10s 的平均值
LD    SM0.5
EU
+I    VW0, VW0
INCB  VB50
AB=   VB50, 10
MOVW  VW0, VW10
/I    +10, VW10
MOVB  0, VB50
//控制输出 PID 中断
//75.0 为目标值 45 除以量程 (60-0) 后乘以 100 得出，PID 中断程序由指令向导生成，
为带偏移量的连续控制，PID 各环节参数有待调整
LD    SM0.0
CALL  PID0_INIT:SBR0, VW10, 75.0, AQW0

```

#### 5.4.2 湿度控制的实现

湿度采用闭环系统的二位式控制，为保证湿度不超过上下限设定，暂时设湿度的采样周期为 0.5s。由于湿度控制在 65-75 之间， $U_h$ 、 $U_l$  暂定 75、65，具体数值经调试后给出，湿度控制示意图如图 5.6 所示。

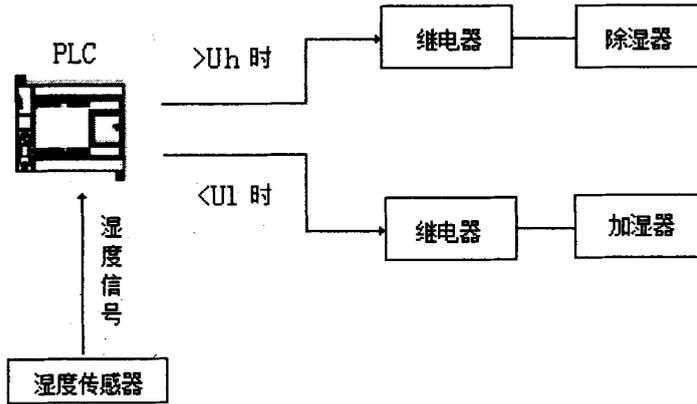


图 5.6 湿度控制示意图

Figure 5.6 Control Structure of humidity

湿度由检测器检测后由变送器变送为 4-20mA 信号，将 4-20mA 信号传输给 PLC，PLC 经过模数转换后，即变成了实际物理值，具体方法和程序同温度转化类似，模数转换程序方式同上，控制程序如下：

```

// 加湿器工作    Q0.0 为加湿继电器输出    VW30 为模数转换后的湿度值
LDW<    VW30,65
=        Q0.0
// 除湿工作 Q0.1 为除湿继电器输出
LDW>    VW30,75
=        Q0.1
    
```

### 5.4.3 轮盘转速控制的实现

轮盘转速也是采用二位式的控制，通过比较实际电机的转数与理论值相比较，通过 PLC 控制变频器改变电机的频率来改变电机的转速，采用的是富凌 DZB300 系列的变频器，参照该变频器的说明书对 PLC 与变频器进行连接。PLC 与变频器连接的目的是：PLC 控制变频器的启动、停止和频率设定，读取当前频率的返回数据信号；变频器负责执行 PLC 给出的控制信号，发送频率的当前数据<sup>[30,31]</sup>。

查找变频器说明书，在功能参数一览表中可以查到主频率输入来源设定、运转信号来源设定等代码参数。参数一览表如表 5.3 所示。

将主频率输入来源的设定值从出厂值 00 改为 01，即主频率输入由模拟信号输入。运转信号来源的设定值从出厂值 00 改为 01 或 02，即运转指令可由外部端子控制<sup>[32,33]</sup>。

查找说明书中的端子说明，将启停的控制信号、给定频率信号和频率反馈信

号的线路接到相应的 REV-DCM、CI-ACM 和 FM-ACM 端子上，端子的定义如表 5.4 所示。

表 5.3 变频器输入参数  
Table 5.3 Input parameters of inverter

代码	参数名称	设定范围	出厂值
01	主频率输入来源设定	00: 主频率输入由操作面板控制	00
		01: 主频由模拟信号输入	
		02: 选择恒压供水自动控制	
		03: 选择一拖二模式控制	
02	运转信号来源控制	00: 运转指令由操作面板控制	00
		01: 运转指令由外部端子控制，键盘 STOP 键有效	
		02: 运转指令由外部端子控制，键盘 STOP 键无效	
		03: 运转指令由 RS485 串口通信界面控制键盘 STOP 键无效	
		04: 运转指令由 RS485 串口通信界面控制键盘 STOP 键有效	

表 5.4 变频器外部端子参数  
Table 5.4 Parameters of outside terminals of frequency transformer

端子记号	电子功能说明	规格
FED-DCM	正转/停止	“开”-停止，“闭”-正转
CI-ACM	模拟电压输入端子	0-+10V
FM-ACM	模拟频率	0-+10V/最高输出频率

连接好 PLC 与变频器后，对 PLC 进行编程，由于电机侧的计数器每 36 秒的读数与理论值比较一次，36 秒电机应转 50 转，如实测数据大于 50 转则降低电机频率，小于 50 转则增加电机频率。通过比较，对变频器发出相应的调整指令，先手动粗调，再通过 PLC 控制进行细调，以达到控制要求，将来如需设定新的转数只需调整参数即可，流程图如图 5.7 所示。

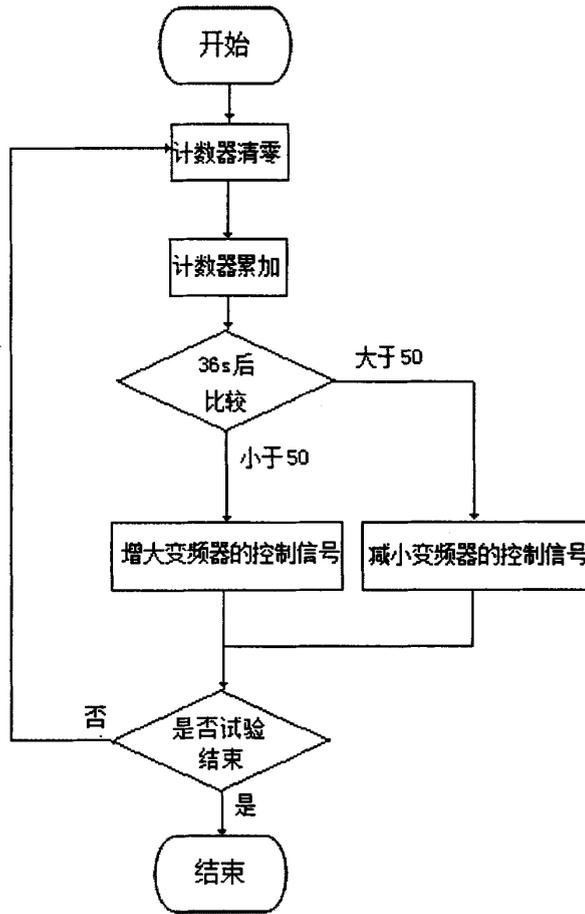


图 5.7 轮盘转速控制流程图

Figure 5.7 Control of wheel speed

控制程序如下：

//VW200 为输出给变频器的控制信号 AQW2, 先赋初值, 该值为暂定值 16000, 即 25Hz, 具体数值由调试后给出

LD SM0.1

MOVW 16000, VW200

//采用周期为 6min, T37 为每 36s 动作一次且自复位的定时器, VW100 为计数器所得转数, 上升沿触发累加

LD SM0.0

LPS

AN T37

TON T37, 360

LPP

A I0.0

EU

INCW VW100

//每到 36s 的控制程序, 暂定 20 为修正的偏移量, 修正后的 VW100 给 AQW2 输出至变频器, 并将计数器 VW100 的值清零

```
LD    T37
LPS
AW>   VW100, 50
+I    20, VW200
LRD
AW<   VW100, 50
-I    20, VW200
LRD
MOVW  VW200, AQW2
LPP
MOVW  0, VW100
```

#### 5.4.4 运行时间的实现

由于试验时间很长，一个定时器不足以满足定时要求，于是用一个定时器和一个计数器组成长定时，程序如下：

//M1.0 为启动信号，M1.1 为停止信号，VW300 为试验时间，M1.0、M1.1 及 VW300 的数值均由触摸屏给出

//T38 为每 5min 动作一次。

```
LD    M1.0
AN    T38
TON   T38, 3000
//试验时间 VW300 乘以 12 后为试验时间内所需动作的次数
```

```
LD    SM0.0
*I    +12, VW300
MOVW  VW300, VW400
```

//当 C4 的计数达到 VW400 时，即试验时间到达，C4 动作，试验结束，VW100 的数值由触摸屏输入。

```
LD    T38
LD    C4
O     M1.1
O     SM0.1
CTU   C4, VW400
```

### 5.5 触摸屏组态的实现

计算机技术和网络技术的飞速发展，为工业自动化开辟了广阔的发展空间，用户可以方便快捷地组建优质高效的监控系统，并且通过采用远程监控及诊断、双机热备等先进技术，使系统更加安全可靠。此次采用的北京昆仑通态公司生产的 MCGS 系列嵌入版触摸屏，其工控的组态软件系统是以应用为中心，软硬件可裁减的工业控制系统。该“MCGS 嵌入版组态软件”是基于 RTOS (real-time multi-tasks operating system) 实时多任务操作系统的专门应用于嵌入式操作系统

的组态软件，只需要通过简单的模块化组态就可构造自己的应用系统<sup>[34-38]</sup>。

### 5.5.1 参数设定界面的组态

主要需要设定的参数有：对试验时间的参数设定，对试验温度及试验湿度的设定（预留），对 PID 参数的更改（预留），对采样周期时间的设定（预留），对 4 个红外光灯的开启关闭操作等。参数设定界面如图 5.8 所示。



图 5.8 参数设定界面

Figure 5.8 Interface of parameters setting

### 5.5.2 监测界面的组态

该装置可显示箱内湿度、箱内温度数值及实时曲线，当前时间、试验时间及试验进度条，各个红外加热灯的运行情况 & 轮盘加湿除湿的工作状态，并可进行启动、停止、暂停，暂停等操作。暂停时，轮盘停止转动，计时器暂停计时，该功能为开箱门补充液体时使用。监测界面如图 5.9 所示。

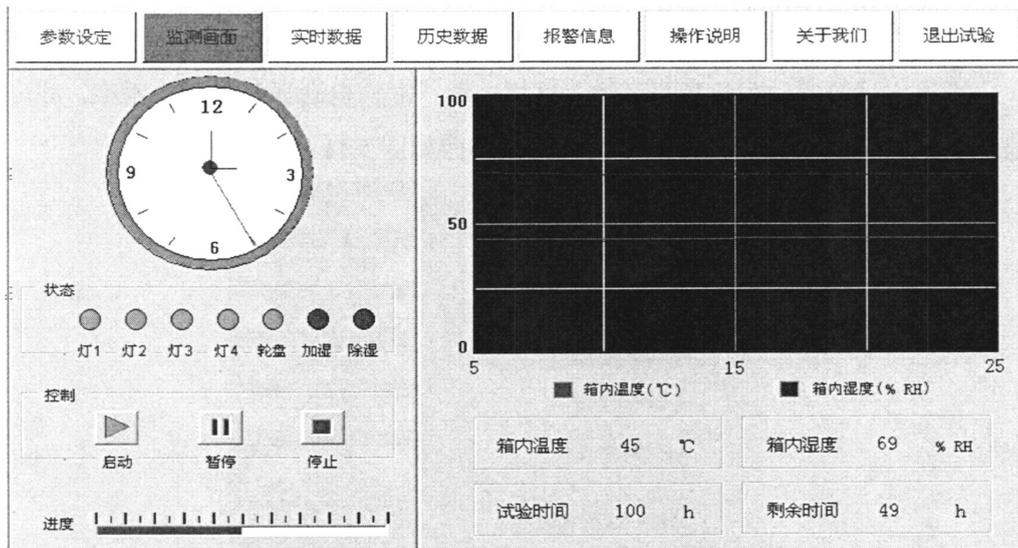


图 5.9 监测界面

Figure 5.9 Monitoring Interface

### 5.5.3 历史数据界面的组态

历史数据界面可显示历史数据及历史曲线，并可通过数据导出操作将历史数据导入到触摸屏的所插入的 U 盘中，数据导出控件脚本程序的主要代码为：`CopyDateFileToDisk ("harddisk\test", 0, copy)`，操作界面如图 5.10 所示。左侧历史数据栏显示记录的时间和当时温湿度的数值，保存周期设为 5min 一次，可通过箭头向下翻页查找某一时刻的温度及湿度的具体数值，右侧历史曲线框显示温湿度的曲线，直观形象。

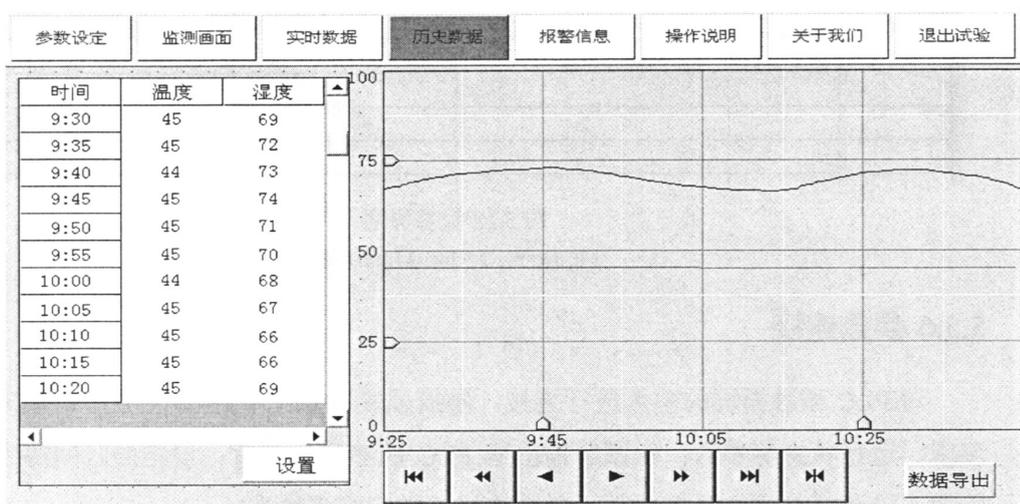


图 5.10 历史数据界面

Figure 5.10 Historical data interface

### 5.5.4 试验报表界面的组态

当退出试验时，在此界面可输入试样参数，电脑自动计算试样失重率，并可通过打印机将该页面打印出来。试验报表界面如图 5.11 所示。

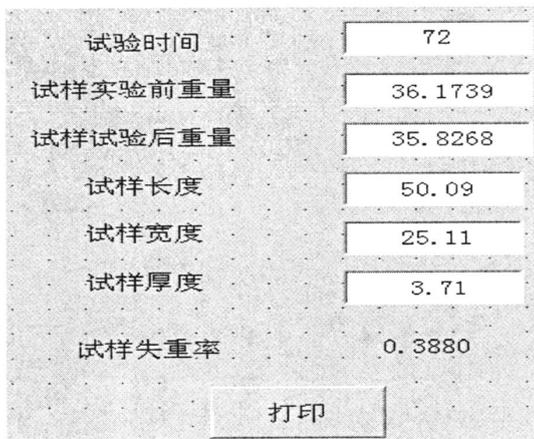


图 5.11 失重率显示界面

Figure 5.11 Mass loss rate interface

### 5.5.5 报警处理及界面的组态

装置由于各种原因可能出现意外情况，出现意外情况时应有相应的报警及处理动作，如当温湿度超出限定时，会产生上下限报警，并进行相应的动作以保护设备，如停止加热、停止电机旋转等，报警界面如图 5.12 所示。

参数设定	监测画面	实时数据	历史数据	报警信息	操作说明	关于我们	退出试验
日期	时间	对象名	报警类型	当前值	界限值	报警描述	

图 5.12 报警界面

Figure 5.12 Alarm Interface

### 5.5.6 参数连接

对 PLC 和触摸屏的参数进行连接。触摸屏读取 PLC 的参数主要有：温度、湿度、运行状态等参数；触摸屏输出给 PLC 的参数主要有：设定的时间等参数数据、设备的操作信号等参数。参数连接后进行画面组态。

通过变量选择窗口，将参数连接到组态界面的响应输入输出控件上，变量选

择窗口如图 5.13 所示:

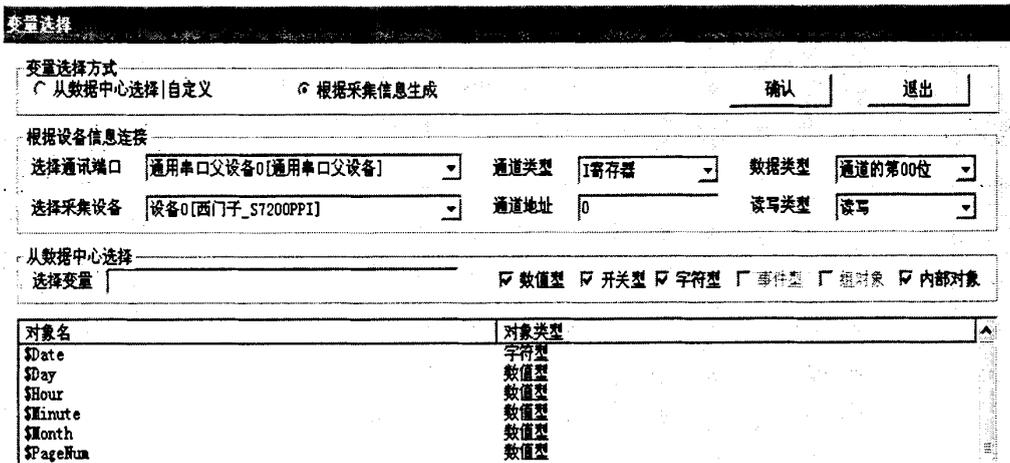


图 5.13 变量选择窗口

Figure 5.13 Variable Selection interface

## 5.6 系统评判指标实现

### 5.6.1 指标的权重确定

在广泛征求科研人员的意见之后，给予各项指标权数，然后运用层次分析法来确定各项指标的权重，结果如表5.5所示。

表5.5指标因素权重

Table 5.5 Weighting factors in Indicators

一级指标	权重	二级指标	权重
均匀腐蚀	0.7	增/失重率	0.7
		腐蚀深度	0.2
		腐蚀电流	0.1
局部腐蚀	0.3	点蚀密度	0.4
		平均点蚀深度	0.2
		最大点蚀深度	0.1
		机械强度损失	0.3

即得  $A = \{0.7, 0.3\}$ ,  $A_1 = \{0.7, 0.2, 0.1\}$ ,  $A_2 = \{0.4, 0.2, 0.1, 0.3\}$

### 5.6.2 试样的评判

采用第4章所研究的模糊综合评判法对试样的耐腐蚀性进行评判，按照第4章所述的步骤进行，具体如下。

通过测量计算后对各个指标进行评判,在统计时按统一标准将五级定性意见(好,较好,一般,差,较差)量化为评估值,五级定性意见的相应评估值为1.0,0.8,0.6,0.4,0.2 五档,以一个钢板取五个平行试样为例进行说明,对五个平行试样进行评估,每个评判属性的最后得分为各平行试样的评估值相加,结果如表5.6所示。

表5.6 试样的指标评判结果

Table 5.6 Results of a sample

指标	好	较好	一般	差	较差
增/失重率	1	2.4	0.6	0	0
腐蚀深度	0	3.2	0.6	0	0
腐蚀电流	0	2.4	1.2	0	0
点蚀密度	2	0.8	1.2	0	0
平均点蚀深度	1	1.6	1.2	0	0
最大点蚀深度	1	0.8	1.8	0	0
机械强度损失	0	2.4	1.2	0	0

由此可按式(4.7)得模糊关系矩阵为:

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0.6 & 0.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0.84 & 0.16 & 0 & 0 \\ 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad R_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.2 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0.26 & 0.42 & 0.32 & 0 & 0 \\ 0.28 & 0.22 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0.67 & 0.33 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

由式(4.8)计算得:

$$B_1 = A_1 \cdot R_1 = (0.175, 0.655, 0.17, 0, 0);$$

$$B_2 = A_2 \cdot R_2 = (0.28, 0.387, 0.333, 0, 0)。$$

$$\text{计算式(4.9), } R' = \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

$$\text{式(4.10)计算得: } B' = A \cdot R' = (0.2065, 0.5746, 0.2189, 0, 0)。$$

根据加权平均的原则,设评语集V相应的值为100, 90, 70, 50, 20,则根据式(4.11)计算该试样评判结果为:

$$C = (0.2065, 0.5746, 0.2189, 0, 0) \begin{bmatrix} 100 \\ 90 \\ 70 \\ 50 \\ 20 \end{bmatrix} = 87.687$$

则参照表4.3,得出该试样a的耐腐蚀性为较好。

采用这种方法可对试样的耐腐蚀性做一个整体的模糊评判而不只是单纯的

考虑某一个指标的数值,得出的判断准确度更高,更有说服力,而且此方法具有计算简便易掌握的特点,有较大的应用价值,得到科研人员的一致认可。

## 5.7 系统运行调试

### 5.7.1 电气基本动作调试

将编写的程序通过编程电缆下载到 PLC-200 中,将组态的程序网线传入触摸屏内,操作触摸屏,通过 STEP7 状态表观察 PLC 各参数的数值,及各输入输出点的动作,监控程序运行及参数连接是否正确。

STEP7 提供 PLC 程序在线监控,可在线监控梯形图的能流动作,判断程序的运行逻辑是否合理,可先将定时器的时间改小,以便观察定时器的动作,便于程序的修改调整。

对编写的数字量部分的程序进行调试,在触摸屏上进行操作,通过状态表及程序状态监控,观察到设备运行正常。当变频器启停时,观察温湿度等信号未发生变化,因为强弱电安装在不同的线槽,且温湿度信号线采用屏蔽电线,并良好接地,所以当变频器启停时未对温湿度等信号造成干扰。

经电气基本动作调试检查无误后,开始对控制系统进行调试。

### 5.7.2 温度控制系统调试

首先调节红外光灯烘烤的试样表面温度,在悬挂试样的位置放置一个水银温度计,通过手动调节加湿器和抽湿器,使相对湿度控制在 65-75 之间,通过一个电位器调节固态继电器的输入电阻,从而调节红外灯两端的电压,调节其亮度,将温度控制在 $(75\pm 10)^{\circ}\text{C}$ 内。

接下来调节恒温箱内的温度,用 STEP-7 的编程软件编写程序,通过指令向导编写一个 PID 中断,由于温度为大惯性对象,采用周期设为 10s,通过 PLC-200 的参数自整定功能对 PID 进行自整定。

PLC 采用的是继电自整定方法,该方法的基本原理是利用继电反馈引起的极限周期振荡确定系统的临界增益和临界周期,然后采用 Z-N 方法来整定 PID 参数,再依据新整定的 PID 参数切换到 PID 控制状态,如图 5.14 所示。

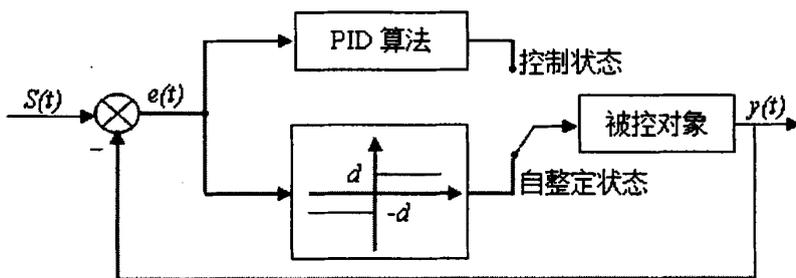


图 5.14 PID 自整定原理图

Figure 5.14 self-tuning PID

在实际工业控制过程中,继电器控制信号往往是执行器的输入信号,该信号不能为负值,通常取控制对象达到稳态(在设定值附近)时所对应的控制量  $u$  叠加上一个上下偏差控制信号  $d$ ,如图 5.15 所示,因此有

$$u(t) = \begin{cases} u + d \\ u - d \end{cases} \tag{5.1}$$

式中:  $u, d$  为常数。

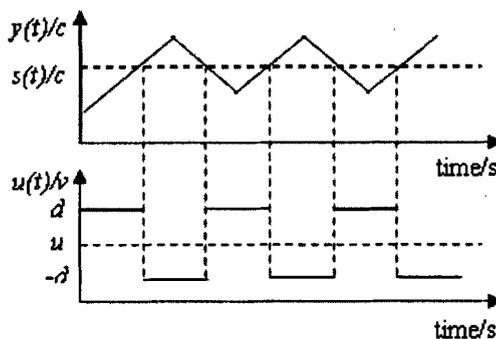


图 5.15 控制信号图

Figure 5.15 Control signal diagram

$$e(t) = s(t) - y(t) \tag{5.2}$$

其中  $y(t)$  是输出测量值,  $s(t)$  是设定值。

对  $u(t)$  进行 Fourier 展开取一次谐波, 则有

$$u(t) = u + \frac{4d}{\pi} \sin \omega t \tag{5.3}$$

其中  $\pi$  为常数,  $\omega$  为系统角速度。

若  $G(s)$  具有与负实轴相交的 Nyquist 曲线, 则上述系统满足极限环生成条件, 此时有,

$$G(j\omega_d) = -\frac{1}{K_u} \tag{5.4}$$

其中  $\omega_d = \frac{2\pi}{T_u}$ 。

$K_u$  为继电特性在传输幅度为  $A$  的正弦信号的等价增益,  $T_u$  为临界振荡周期,  $\omega_d$  为临界角速度。再由叠加原理有,

$$y(t) = K_0 u - \frac{4d}{\pi K_u} \sin \omega_d t \tag{5.5}$$

所以, 要使  $e(t) = A \sin \omega_d t$ , 必须满足  $s(t) = K_0 u, A = \frac{4d}{\pi k}$ , 因而可得临界等价增益,

$$K_u = \frac{4d}{\pi A} \tag{5.6}$$

其中  $A$  为系统振幅<sup>[39,40]</sup>。

求出对象参数  $K_u$  和  $T_u$  后, 就可以套用 Ziegler-Nichols 公式, 求  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ , 结果见表 5.7 所示。

表 5.7 Z-N 法 PID 参数整定表  
Table 5.7 PID parameter tuning by Z-N

控制器	$K_p$	$T_i / s$	$T_d / s$
P	$0.5 K_u$		
PI	$0.45 K_u$	$0.85 T_u$	
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

通过自整定得到 PI 参数: 回路增益为 10、积分时间为 100s。

由于中途需要打开箱门观察测量试样及更换补充溶液, 这个过程需要 (2-3)min, 对箱内的温度造成影响较大, 把自整定的参数作为参考, 再进行修改。

通过 STEP-7 的编程软件的数据块, 找到 PI 参数地址, 根据传统理想 PI 的传递函数及 PI 各环节的作用在状态表中修改各参数并观察 PI 输出, 进行调试修改。根据 PI 的调节原理, 先增大比例环节, 增大后, 发现系统响应有所加快,

达到设定温度的时间有所减少，开门关门后，温度恢复速度有所加快，温度曲线分别如图 5.16、图 5.17 所示。

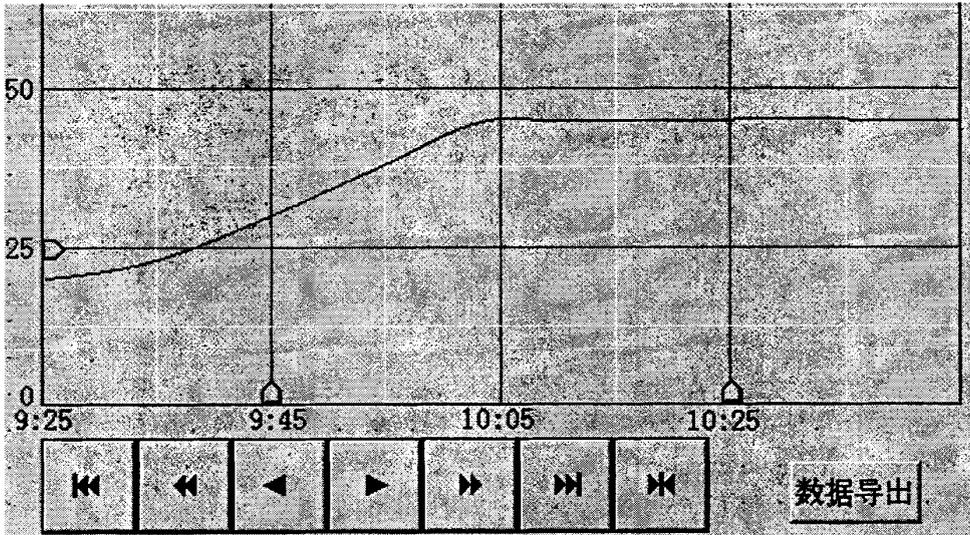


图 5.16 系统稳定阶段温度曲线

Figure 5.16 Stable temperature phase profile

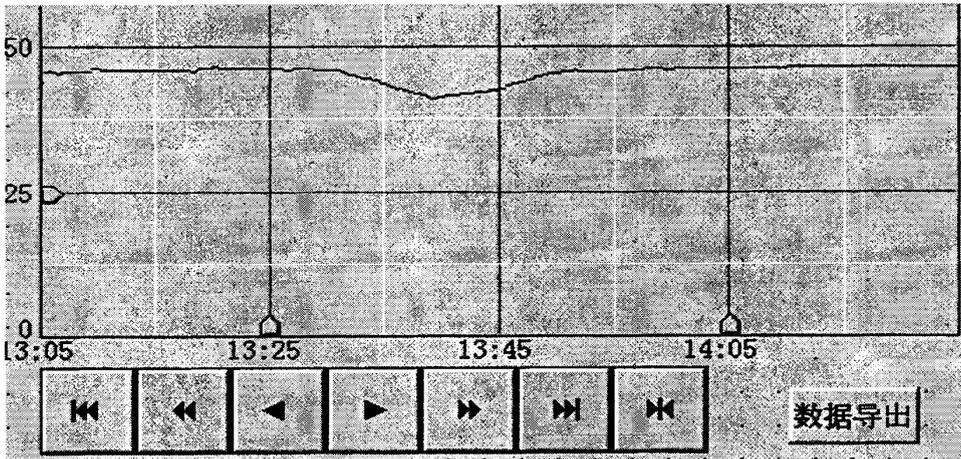


图 5.17 系统开关门时温度曲线图

Figure 5.17 Temperature profile when the door switch

稳定时间约为 30min，满足试验要求。装置开门关门后，系统恢复稳态的时间约为 15min，满足 0.5h 恢复到实验环境的要求。

### 5.7.3 湿度控制系统调试

湿度由加湿器和抽湿器控制，由于有两个执行元件，湿度控制精度不高，且元件不适合变频控制和按占空比控制频繁启停，所以考虑二位式控制。当湿度低于某一数值时加湿器工作，高于某一数值时抽湿器工作。湿度要求控制在

65%RH-75%RH 之间，现将上下阈值分别设为 65、75，由于加热、光照和箱内的溶液都会对箱内湿度产生影响，所以在装置正常工作状态下，观察系统运行状况，如图 5.18 所示。

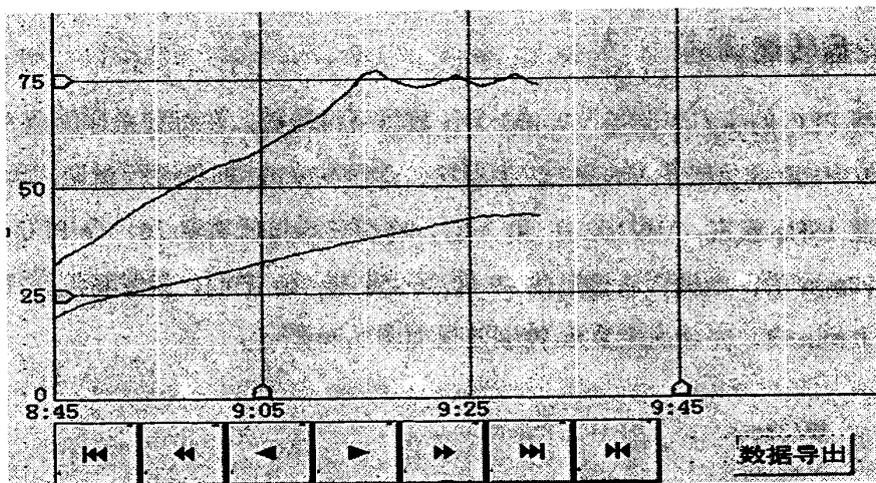


图 5.18 系统温度湿度曲线图

Figure 5.18 Temperature and humidity profile

湿度达到控制范围的时间要早于温度，所以系统稳定时间主要受温度影响。但加湿或抽湿都会导致温度的降低，系统稳定时间略微延长。

当湿度达到控制范围后，抽湿器和加湿器工作时间不长，且溶液的热容量较大，对温度的影响有限。由于湿度均存在一定的滞后，所以湿度超过上限的范围，应提早开启抽湿器，并且为了不让抽湿器频繁启动，增加一个延时关断，当湿度低于设定上阈值时，再运行一段时间后停止。

根据反复试验后，将湿度的上阈值设为 72，将下阈值也相应的提高至 67，最终上下阈值分别设为 72、67，满足控制要求。湿度曲线如图 5.19 所示。

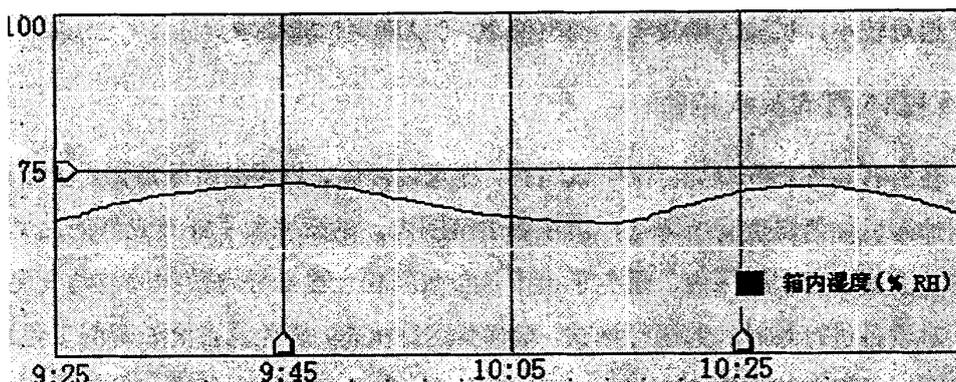


图 5.19 湿度曲线图

Figure 5.19 Humidity curve

观察开门关门对湿度的影响较大, 开门时湿度很快降到接近外部环境状态, 但关门后湿度回升速度也很快, 大约 10min 可回复到稳定状态, 满足标准要求的 0.5h 内恢复到试验环境的要求。

#### 5.7.4 轮盘转速调试

根据 PLC 的状态表监控 VW100 为计数器所得转数, 在每到采样周期 36 秒时, 将 VW100 的值赋予 VW102 以便观察, 观察 VW102 的值进行粗调, 此时电机频率在 15Hz 左右, VW102 在 50 左右, 将调整增量值暂定 20, 令 PLC 自动调整, 10min 后, 电机转速稳定在 49 转/36s-51 转/36s 之间, 轮盘转速在 1 转/(60±3) min 内, 完全满足要求, 控制效果如图 5.20 所示。

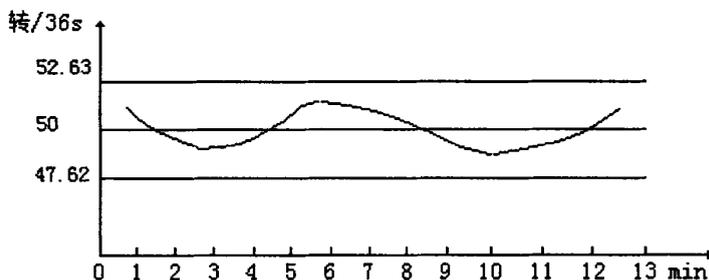


图 5.20 电机转速控制效果图

Figure 5.20 motor control effect chart

模拟干扰情况, 人为改变变频器频率, 增大 1Hz, 观察电机转速加快, 10min 后, 电机的转速可稳定达到 48 转/36s-52 转/36s 之间, 恢复到设定转速, 如将调整值增大可加快对干扰的相应, 但会导致系统稳态的波动较大, 但考虑到正常时干扰相对较小, 试验周期较长, 调整值 20 可以满足试验要求。

#### 5.7.5 整体测试及试运行

在所有装置都开启的情况下试运行。测量温湿度、烘烤温度等数据, 实际观察到加湿后烘烤温度有所降低, 仍在要求范围内, 略微增大了红外光灯的功率。所有数据都在要求范围内, 避免了由于各参数间相互影响导致数据的波动变化。

对设备进行长时间的运行测试, 观察其运行状态, 避免设备因长时间工作出现问题。开机连续运行 120h 后, 未发现故障, 现已交付用户使用, 而且使用状况良好。

### 5.7.6 效果分析

从一个钢板取每组 5 个平行试样，共 3 组，使用本装置在不同时间做各组对比试验，分析其试验结果，发现各组试样的腐蚀情况基本一致，可得出装置的重复性好、一致性高，且利用本系统的模糊评判体系，对试样的耐腐蚀性做综合评判，比仅以失重率作为单一的评判指标更全面，更能满足科研要求。

采用本装置进行的五组平行试样耐腐蚀性试验结果如表 5.8-5.10 所示。

表 5.8 A 组试验结果

Table 5.8 A set of test results

指标	好	较好	一般	差	较差
增/失重率	2	1.6	0.6	0	0
腐蚀深度	1	2.4	0.6	0	0
腐蚀电流	0	2.4	1.2	0	0
点蚀密度	1	1.6	1.2	0	0
平均点蚀深度	1	1.6	1.2	0	0
最大点蚀深度	1	1.6	1.2	0	0
机械强度损失	0	2.4	1.2	0	0

表 5.9 B 组试验结果

Table 5.9 B set of test results

指标	好	较好	一般	差	较差
增/失重率	1	2.4	0.6	0	0
腐蚀深度	0	3.2	0.6	0	0
腐蚀电流	0	2.4	1.2	0	0
点蚀密度	2	0.8	1.2	0	0
平均点蚀深度	1	3.2	0	0	0
最大点蚀深度	1	0.8	1.8	0	0
机械强度损失	1	2.4	0.6	0	0

表 5.10 C 组试验结果

Table 5.10 C set of test results

指标	好	较好	一般	差	较差
增/失重率	1	2.4	0.6	0	0
腐蚀深度	1	3.2	0	0	0
腐蚀电流	1	2.4	0.6	0	0
点蚀密度	2	0.8	1.2	0	0
平均点蚀深度	1	1.6	1.2	0	0
最大点蚀深度	1	0.8	1.8	0	0
机械强度损失	0	2.4	1.2	0	0

根据 § 5.6 的计算方法，计算出各试样的评判结果。

A 组:  $C=89.62$

B 组:  $C=88.49$

C 组:  $C=89.90$

则参照表4.3, 得出该钢样A、B、C、D、E各组的耐腐蚀性均为较好, 且评判的数值差距不大, 可见装置的重复性好、一致性高。

## 5.8 本章小结

本章主要介绍了系统的实现与运行, 按照设计方案, 选择相应的硬件, 对硬件进行组装, 搭建硬件平台。按照试验工艺和设计方案, 编写上位机和下位机程序, 并下载到 PLC 及触摸屏内, 建立触摸屏和 PLC 之间的通信, 通过触摸屏操作, 实现电气控制的基本功能。通过最终的运行调试, 修改 PLC 内部的各种参数, 完善各个控制单元的功能, 实现对装置的控制, 满足试验工艺的要求。

## 第6章 结论与展望

本文以首钢技术研究院实验室耐腐蚀试验设备开发为工程背景,通过对金属腐蚀设备及方法的分析研究,设计开发出一台周期浸润腐蚀试验装置,该装置用加热元件模拟大气的温度,用加湿器除湿器模拟大气的湿度,用红外光灯模拟日照量,用轮盘带动试样浸出入溶液模拟大气环境下的干湿交替,用亚硫酸氢钠模拟大气中的污染气氛,加速金属氧化物的形成。

试验装置由 PLC 对设备的运转及试验环境进行控制,结合不同环境参数的特性及控制精度要求,对不同的环境参数采用不同的控制方法,以实现工艺要求,对箱内温度采用 PI 算法的闭环控制、对箱内湿度和轮盘转速采用二位式闭环控制、对试样的烘烤温度采用开环控制。通过触摸屏与 PLC 通讯,实现对试验参数的设定,设备启停的操作和数据的显示存储记录等功能,具有可靠性好、一致性和重复性高、操作简便等特点。

最后针对本试验的结果建立了试样耐腐蚀性的模糊评判体系,可对试样整体的耐腐蚀性进行评判,解决了以往采用单一指标逐次评判带来的问题,即解决了无法确定修改后的工艺和配方对试样耐腐蚀性的整体影响,从而推动了科研工作的进展。

此次设计的装置实现了设计要求,满足用户使用,但设计上还存在一些可以提高和改进的地方,如增大加热棒功率,增加溶液液位偏低的报警装置,增加自动更换及补充溶液的装置,增加加湿器自动补水装置等,下次设计会予以改进。由于该装置有一定的市场前景,下次设计时可根据用户需求对装置的功能进行增删,也可将触摸屏与电脑通讯或将触摸屏改为电脑控制,以便组建网络,将实验结果网络传输,实现无纸化办公。



## 参考文献

1. 汤精明,姜忠宇. 表面完整性对 40Cr 钢耐腐蚀性的影响[J], 热加工工艺, 2010(2):13-15.
2. 杨松柏. 铁道车辆用耐候钢腐蚀性能评判方法[J], 铁道车辆, 2001(5): 9-11.
3. 杨松柏. 耐候钢周期浸润腐蚀试验方法的研究[J], 铁道技术监督, 1996(2): 7-13.
4. Pourbaix M. An Electrochemical Wet and Dry Method for Atmospheric Corrosion Testing[J], Report Techniques Cebelcor, 1978(133a): 167-177.
5. 陈小平, 王向东, 刘清友等. 耐候锈层的耐腐蚀机理研究[J], 腐蚀与防护, 2009(4):25-27.
6. 韩薇, 汪俊, 王振尧等. 低合金钢耐大气腐蚀规律研究[J], 腐蚀科学与防护技术, 2003(06): 1-5.
7. 刘云. 大气对常用触点金属材料的腐蚀影响[D], 北京: 北京邮电大学, 2008.
8. Gibson JE. Nonlinear Automatic Control[M], McGraw Hill Book Co.Inc., 1963:5-10
9. 赵为光,杨莹. 电锅炉温度控制系统 PID 参数整定算法的改进[J],工业仪表与自动化装置, 2009(1):43-45.
10. 王建辉, 顾树生. 自动控制原理[M], 北京: 清华大学出版社, 2007:50-60.
11. 艾淑平. 半导体激光器恒温控制单元的控制模式与算法研究[D], 东北师范大学, 2005.
12. Norman S. Nise. Control Systems Engineering [M]. Second Edition. Benjamin-Cummings, Redwood City, California, 1995:30-35.
13. 张龙娟. 西门子 PLC 在温室控制中的应用[J], 中国科教创新导刊, 2008(31):32-34.
14. 尹朝,张万英. 西门子: PLC 全能冠军[J], 电气时代, 2008(9):12-15.
15. Zheng Jie, Yi Bo. Application for Fuzzy Mathematics Failure Diagnosis Technology about Chilly Water Set of Single Screw [J], Software Engineering, 2009. WCSE '09. WRI World Congress on , 2009(2):249 - 253.
16. 王子子, 王鹏. 模糊数学在国家奖助学金评比中的应用[J], 山东英才学院学报, 2011(1):23-25.
17. 段健, 金龙哲, 欧盛南. 模糊数学方法优选高炉喷吹煤[J], 煤炭学报, 2011(9):27-29.
18. 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M], 上海: 上海科学技术出版社, 1983:20-35.
19. Yao Ligen, Dong Zhenlin. Research on the evaluation of enterprise's core competence based on AHP and fuzzy mathematics [J], E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies (EDT), 2010 International Conference on,

- 2010, 341 - 344.
20. Yangyu. A fuzzy parameters adaptive PID controller design of digital positional servo system. Proceeding of 2002 International conference on machine learning and cybernetics, 2002(3):10-14.
  21. 杨纶标. 模糊数学原理及应用[M], 广州: 华南理工大学出版社, 2003:10-20.
  22. Zuogang Zhang, Zhiqiang Yang. Fuzzy mathematics assessment in the evaluation of air quality [J], Multimedia Technology (ICMT), 2011 International Conference on, 2011(1):12-14.
  23. 付云鹏. 权及其在模糊数学中的应用[D], 辽宁师范大学, 2005.
  24. Research and Statistics Department's, Secretariat. Ministry of International Trade and Industry. Census of commerce in 1976, Printing Bureau (1977), in Japanese.
  25. 冯保成. 模糊数学实用集萃[M], 北京: 中国建筑工业出版社, 1991:41-45.
  26. 李安贵. 多元模糊模式识别在钢中碳化物评级中的应用[J], 北京科技大学学报, 1994(2): 13-15.
  27. 赵光荣.多因子模糊评审及其应用实例[J],系统工程,1983(01):31-33.
  28. 孙威武.模糊综合评判中权重向量的确定与多对象综合评判结果对比分析[J],统计与决策,1992 (06):21-23.
  29. 宋建成. 可编程序控制器原理与应用[M], 北京: 科学出版社, 2004:65-79.
  30. 朱延钊. PLC 输入信号的滤波方法[J], 电子工程师, 2006(10): 4-7.
  31. 咸庆信. 变频器实用电路图集与原理图说[M], 北京: 机械工业出版社, 2009:43-47.
  32. 鄢光辉. 变频调速系统中电动机和变频器选择及问题分析[J], 自动化博览, 2006(4): 66-67.
  33. 唐新平, 赵金, 陈治刚, 万淑芳. 基于 PC 机的生产过程计算机监控系统设计[J], 计算机自动测量与控制, 2000, 8(2): 35-37.
  34. 杨国栋, 沈培宏. 触摸屏技术发展简介计[J], 光电技术, 2002(1): 49-55.
  35. 师宁. 基于 HMI 的 PLC 温度控制系统的设计[J], 科技信息, 2010(22): 9-12.
  36. 毛朝辉. PLC 与人机界面在变频监控系统上的应用[J], 电工技术杂志, 2004(3): 13-15.
  37. 汪晓平. 可编程控制器系统开发实例导航[M], 北京: 人民邮电出版社, 2004:57-62.
  38. 郑圣德. 触摸屏的类型用途及工艺流程[J], 电子工艺技术, 2005(3): 32-34.
  39. Yan chen, Jin-huiLei, Xuebing yan. Variable discourse of universe Fuzzy-PID temperature control system for vacuum smelting based on plc. 2009GCIS,2009.5.
  40. 何颖, 鹿蕾, 赵争鸣. PID 参数自整定方法概述[J], 仪器与仪表, 2004(24): 20-23.

## 致 谢

本研究及学位论文是在我的导师徐林老师的亲切关怀和悉心指导下完成的。他严肃的科学态度，严谨的治学精神，精益求精的工作作风，深深地感染和激励着我。徐林老师不仅在学业上给我以精心指导，同时还在思想、生活上给我以无微不至的关怀，在此谨向徐林老师致以诚挚的谢意和崇高的敬意。我还要感谢在一起愉快的度过毕业论文小组的同学们，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。

在论文即将完成之际，我的心情无法平静，从开始进入课题到论文的顺利完成，有多少可敬的师长、同学、朋友给了我无言的帮助，在这里请接受我诚挚的谢意。

最后，再次对关心、帮助我的老师和同学表示衷心地感谢！