



## 独创性声明

本人声明,所呈交的论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知,除了文中特别加以标注和致谢的地方外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果,也不包含为获得武汉理工大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。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了谢意。

签名: 张莹 日期: 2011. 5. 28

## 学位论文使用授权书

本人完全了解武汉理工大学有关保留、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电子版,允许论文被查阅和借阅。本人授权武汉理工大学可以将本学位论文的全部内容编入有关数据库进行检索,可以采用影印、缩印或其他复制手段保存或汇编本学位论文。同时授权经武汉理工大学认可的国家有关机构或论文数据库使用或收录本学位论文,并向社会公众提供信息服务。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

研究生(签名): 张莹 导师(签名): 王保昌 日期 2011. 5. 28

## 摘 要

本文研究的对象是双热电偶外热式坩埚盐浴炉的温度自动控制系统。温度自动控制系统的控制质量,如控制精度、响应速度、自动化级别等,对于盐浴热处理工艺的顺利进行和处理后材料的性能有着至关重要的作用。但是,盐浴热处理的温度控制系统具有大滞后性和复杂性等特点。而传统的温度控制系统,多采用的是人工控温、分档调节等方法,能量消耗大并且控制质量低,不适于滞后、复杂、时变温度系统的控制,给热处理工艺的进行过程带来不便,甚至有时不能满足某些材料的加工要求。

本文针对以上问题进行研究,寻找一种好的解决方法。本文的研究目标是设计一种针对外热式坩埚盐浴炉的温度自动控制系统,在传统半自动温控系统的基础上,采用较先进的自动控制理论、控制技术来实现高控制质量的控温系统。同时,针对双热电偶外热式坩埚盐浴炉,计算出加工过程的热量传输量以及系统的温度-热量传递函数,为实际的盐浴处理工艺提供数学理论支持。

本文的研究内容主要有:

- 1) 采用 PID 算法并通过扩充响应曲线法来整定控制参数;
- 2) 计算系统的热量传输量并导出了系统热量传递的函数关系式;
- 3) 设计了温度控制系统的硬件,使用单片机为核心、较先进的电子元件为辅助的硬件系统,实现温度自动控制;
- 4) 设计了温度控制系统的软件结构、系统流程图等。

本文研究结论为:

- 1) 使用 PID 算法以及扩充响应曲线法来整定控制参数可以提高系统的响应速度、降低滞后性、减小温度波动,提高控制质量。
- 2) 系统的热量传输量可以定量求出。热量传输可以分为从电源到炉膛的热量传递,炉膛传入坩埚导致坩埚温度上升的热过程和坩埚将热量传到盐浴使得盐浴温度上升这三个过程,第一种的热量传递方式为将电能转变为热能,第二种的热量传递方式包括辐射传热和对流传热;第三种传递方式包括辐射传热、对流传热和传导传热。
- 3) 计算了系统热量传递的函数关系式。为了方便计算和简化模型,在计算热量传递的函数时,只计算电源传入炉膛的热量传递函数,和从炉膛到坩埚盐浴这一整体的热量传递函数表达式。

4) 温度控制系统的硬件主要是以单片机 AT89C52 作为核心元件, 并采用高精度的数字转换器 MAX6675 来简化电路, 实现了温度的自动化控制。

5) 温度控制系统的软件流程图和软件设计可以辅助系统的硬件完成各项功能。

本文研究成果对双热电偶外热式坩埚盐浴炉的温度控制技术有较为重要的意义, 有一定的实际价值, 可以投入生产使用。

关键词: 温度自动控制, TD 处理, 传递函数, 单片机

## **Abstract**

Automatic temperature control system based on external heated crucible-type salt bath furnace was studied in this paper. The salt bath furnace is one of the most important heating equipment of heat treatment technology. The control quality of automatic temperature control system, such as control accuracy, response speed and automatic level, has a crucial influence on the process of salt bath heat treatment technology and the high performance of treated materials. However, the characteristics of temperature control system for salt bath furnace involve of high hysteresis, volatility and complexity. The traditional temperature control system was based on the method of manual control temperature and step-step regulation, which consumes high energy consumption but with low control quality. It is not easily to control the hysteresis and volatility. All of these gives rise to the inconvenient technology for the process heating treatment, even cannot achieve the processing for some kinds of materials.

Based on the above issues, this paper proposed a novel method to solve the above problems. The aim of this paper is to design an automatic temperature control system based on external heated crucible-type salt bath furnace. On the basis of traditional semiautomatic temperature control system, we choose advanced automatic control theory and control technology to achieve high quality of automatic temperature control system. For external heated crucible-type salt bath furnace, the processing transmission quantity of heat and the temperature-heat function were calculated. This work provides mathematics theory in the practical salt bath treatment process.

The following contents summarize the main research of this paper.

(1) Adjusted the control parameter using the method of digital PID algorithm and expanded response curve.

(2) Calculated the heat transmission quantity and exported the function of heat of this system.

(3) Designed the hardware configuration of this system, used singlechip as the core element, advanced electronic component as the auxiliary hardware configuration,

achieved the automatic temperature control system.

(4) Designed the software of temperature control system and detail flowchart of this system.

The following contents summarize the conclusions of this study.

(1) Adjusting the control parameter by digital PID algorithm method and expanded response curve method can enhance the response speed, decrease temperature wave and enhance the control quality

(2) The heat transmission quantity of this system can be calculated qualitatively. There are two steps in the process of heat transmission, the heat ring from hearth to crucible leads to the enhanced temperature, another step is that the heat s from crucible to salt bath. The heat transmission process of the former one involves the radiant heat and convection heat. The heat transmission process of the latter one involves radiant heat, convection heat, and heat conduction.

(3) The heat function of this system can be calculated.

(4) We used singlechip (AT89C52) as the core element in temperature control system, followed by a high-precision digital converter (MAX6675) to simplify the circuits, the final automatic control of temperature was achieved.

(5) The software flowchart of the temperature control system and the software design can help the system to complete all the functions.

This study has significant meaningful in the application of automatic temperature control system based on external heated crucible-type salt bath furnace, which can put is into practice.

**Key words:** automatic control of temperature, TD process, transfer function, singlechip

# 目 录

摘 要 .....	I
Abstract .....	III
目 录 .....	i
第 1 章. 绪论 .....	1
1.1 TD 盐浴渗金属的发展概况 .....	1
1.1.1 引言 .....	1
1.2 外热式坩埚盐浴炉概况 .....	2
1.2.1 盐浴炉的特点 .....	2
1.2.2 盐浴炉的分类 .....	3
1.2.2.1. 内热式盐浴炉 .....	3
1.2.2.2. 外热式盐浴炉 .....	3
1.2.3 TD 盐浴设备 .....	4
1.2.3.1. 外热式坩埚盐浴炉的结构 .....	4
1.2.3.2. 温度控制模式 .....	5
1.3 自动化控制技术发展和现状 .....	5
1.4 加热炉的温度自动控制概况 .....	7
1.5 单片机和 PID 控制在加热炉温度控制系统中的运用 .....	9
1.5.1 单片机在温度控制系统中的运用 .....	9
1.5.1.1. 单片机控制系统的组成 .....	9
1.5.1.2. 单片机控制系统的概况 .....	10
1.5.1.3. 单片机控制系统的分类 .....	11
1.5.1.4. 单片机在温度控制系统中的运用 .....	11
1.5.2 PID 算法在温度控制系统中的运用 .....	12
1.6 选题内容及课题意义 .....	12
1.7 本章小结 .....	13
第 2 章. 温度控制系统的主要数学模型 .....	14
2.1 双热电偶外热式坩埚盐浴炉温度控制要求 .....	14
2.1.1 炉膛温度控制要求 .....	14
2.1.2 盐浴温度控制要求 .....	14

2.2	数字 PID 算法.....	15
2.2.1	PID 控制原理.....	15
2.2.2	PID 控制参数整定的方法.....	17
2.2.2.1.	按扩充临界比例度法整定参数.....	17
2.2.2.2.	按扩充响应曲线法整定参数.....	18
2.2.3	温度控制系统的 PID 模型和参数的求取.....	20
2.2.3.1	盐浴炉 PID 参数的整定.....	20
2.2.3.2	PID 控制规律和控制参数整定.....	23
2.3	炉膛和盐浴的热量传输.....	24
2.3.1	热量传输的概念和基本方式.....	24
2.3.1.1.	传导传热.....	25
2.3.1.2.	对流传热.....	26
2.3.1.3.	辐射传热.....	27
2.3.2	炉膛到坩锅的热量传递的计算.....	29
2.3.2.1.	炉膛到坩锅的对流换热量.....	29
2.3.2.2.	炉膛到坩锅的辐射换热量.....	30
2.3.3	坩锅传入盐浴的热量传递计算.....	31
2.3.3.1.	坩锅传入盐浴的辐射换热量.....	31
2.3.3.2.	坩锅传入盐浴的对流换热量.....	31
2.3.3.3.	坩锅传入盐浴的导热热量.....	33
2.4	温度控制系统的热量传递函数的求取.....	34
2.4.1	传递函数概念.....	34
2.4.2	温度控制系统的热量传递函数.....	35
2.4.2.1.	电源到炉膛的传递函数表达式.....	35
2.4.2.2.	炉膛到坩锅和盐浴的热量传递函数.....	36
2.5	本章小结.....	41
第 3 章.	温度控制系统硬件设计.....	42
3.1	系统概述.....	42
3.1.1	温度控制系统的硬件结构.....	42
3.1.2	温度控制系统的软件模块.....	44
3.2	温度控制系统硬件电路设计.....	44
3.2.1	电源电路和看门狗电路.....	44

3.2.1.1.	电源电路 .....	44
3.2.1.2.	看门狗电路 .....	45
3.2.2	温度控制电路 .....	45
3.2.2.1.	单片机 AT89C52 .....	46
3.2.2.2.	过零触发器 .....	46
3.2.2.3.	可控硅的型号和功能 .....	47
3.2.3	温度检测电路 .....	48
3.2.3.1.	K 型热电偶 .....	49
3.2.3.2.	高精度数字转换器 .....	49
3.2.4	时钟电路 .....	49
3.2.5	串口通讯电路 .....	50
3.2.6	键盘 .....	52
3.2.6.1.	键盘的设置 .....	52
3.2.6.2.	键盘接口电路 .....	54
3.2.7	LED 显示 .....	56
3.2.7.1.	显示示意图 .....	56
3.2.7.2.	显示电路图 .....	57
3.3	本章小结 .....	57
第 4 章.	温度控制系统软件设计 .....	58
4.1	引言 .....	58
4.2	温度控制系统软件流程图 .....	58
4.3	温度控制系统软件程序设计 .....	60
4.3.1	数字调节器设计 .....	60
4.3.2	键盘显示子程序 .....	61
4.3.3	晶闸管设计 .....	63
4.3.4	中断服务程序 .....	63
4.3.5	系统的调试 .....	63
4.4	本章小结 .....	65
第 5 章.	结论与展望 .....	66
5.1	结论 .....	66
5.2	展望 .....	67
参考文献	.....	68



附 录.....	71
致 谢.....	72

## 第1章. 绪论

### 1.1 TD 盐浴渗金属的发展概况

#### 1.1.1 引言

随着科学技术的发展, 各行各业对产品的质量提出了更高的要求, 尤其是对零件的精度、硬度和表面质量的要求越来越高。因此, 人们对模具也更高的要求, 如高精度、高硬度、高耐磨耐热性和高耐腐蚀性等。在这样的情况下, 模具表面强化技术成为越来越受到人们重视的一个课题。表面强化技术是提高模具表面耐磨耐热性, 硬度精度, 并保证模具内部强韧性的重要技术<sup>[1]</sup>。它也是节约合金元素和提高模具综合性能、降低成本的有效途径。同时, 表面处理是延长模具寿命以及提高各种模具质量的有效手段<sup>[2]</sup>。

化学热处理作为现代工业中非常重要的一种工艺规程, 是将热处理与表面强化相结合的一种技术, 能起到表面改性的作用。在一定温度的活性介质中放入合金或者金属, 使得工件表层渗上一种或几种元素以起到改变工件的组织性能、化学成分的热处理工艺被称为化学热处理<sup>[3]</sup>。

TD 法 (Toyota Diffusion Coating) 又称为液体渗金属法, 最初由日本的丰田中心研究所发明, 并与 20 世纪 70 年代广泛运用于日本的工业领域中。渗金属工艺是采用化学热处理方法, 将金属原子, 如铬、钒、铌、钛, 渗入工件表面, 工件表面的渗层称为渗金属层, 也被称作金属碳化物覆层<sup>[4]</sup>。表 1-1 是其他常见的处理方法与几种渗层的各种性能对比, 从表中不难看出比起其他处理方法, 渗金属层有很好的耐腐蚀和耐磨的性能。

在 TD 渗金属工艺中, 渗铬比较常用于耐磨损和耐腐蚀、抗高温氧化和提高疲劳强度大的工件, 如铁基合金、镍基合金、难熔金属、合金钢等材料的表面性能中。渗钛工艺则多用来可提高铝基合金和铜基合金的硬度、耐磨性和热稳定性<sup>[5]</sup>。

在本文中, 主要以渗铬为例讨论盐浴炉温度自动控制系统的相关参数和数据, 所进行的实验得到的数据都是基于渗铬工艺。

表 1-1 几种渗金属层与其它处理方法的性能对比

渗层种类	渗层厚度/ $\mu\text{m}$	表面硬度 HV	耐磨性	抗热粘着	耐腐蚀	抗高温氧化
VC	5~15	2500~2800	高	高	较高	差
NbC	5~15	2400	高	高	较高	差
TiC	5~15	3200	高	高	高	高
$(\text{Cr,Fe})_{23}\text{C}_6$	10~20	1520~1800	较高	较高	较高	较高
渗硼	50~100	1200~2000	较高	中	中	中
淬火钢	—	600~700	一般	差	差	差

由于液体法渗金属是在熔融的盐浴中进行渗金属的过程，因而也被叫做熔盐法渗金属。熔盐法渗金属可以分为两种，一种是被渗金属和在熔盐中的悬浮着的欲渗金属原子相互作用形成渗层，另一种是通过还原反应，从渗剂中还原出的金属原子吸附在工件表面或扩散渗入工件表面。此外，工业上，熔盐渗金属多在坩埚和盐浴炉中进行，所以加热温度一般不大于  $980^{\circ}\text{C}$ <sup>[6]</sup>。因而，本文提出的双热电偶外热式坩埚盐浴炉的温度控制系统的控温范围在  $0\text{--}1000^{\circ}\text{C}$ 。

## 1.2 外热式坩埚盐浴炉概况

### 1.2.1 盐浴炉的特点

浴炉是以液体为介质，在其中进行加热或者冷却工件的一种热处理炉。根据液体介质的不同，可以分为碱浴炉、油浴炉、铅浴炉和盐浴炉等。其中最为普遍的是盐浴炉。

盐浴炉 (salt-bath furnace) 是以熔融盐为加热介质并将工件浸入盐浴内加热的一种工业浴炉。它的工作范围较广，约为  $600^{\circ}\text{C}$  到  $1350^{\circ}\text{C}$ ，可以完成各项热处理工艺，如局部加热、淬火、回火、正火和化学热处理等。在浴炉中，工件与液体介质相接触，进行对流换热，换热系数大。工件不与外界空气相接触，始终处于盐浴内，而在出炉时会有一层盐膜附着在工件上，因而工件不易被氧化脱碳。盐浴炉的加热温度均匀、加热速度较快，可以进行局部加热及高温短

时加热<sup>[7]</sup>。

## 1.2.2 盐浴炉的分类

根据热源方式供给的不同，盐浴炉可以分为两大类：内热式盐浴炉和外热式盐浴炉。

### 1.2.2.1. 内热式盐浴炉

内热式电极盐浴炉是以熔盐本身为电阻，电流通过熔盐而发热为机理的。它是通过金属电极，同时将低压大电流的交流电引入炉中，电流流过熔盐从而发热<sup>[8]</sup>。可见，盐浴有双重功能：既是发热体，也是对工件加热的介质。在磁场的作用下，盐浴循环翻动有利于均匀加热和提高加热的速度。内热式电极盐浴炉由专用的变压器供电，并由炉壳、密封金属炉罐、电极、绝热层和耐火炉衬构成。根据电极在坩埚内布置的方式不同，可以分为埋入式电极盐浴炉和插入式电极盐浴炉。埋入式电极盐浴炉是指电极不与空气接触，埋入盐浴中。这种使用寿命较长，但是电极的拆卸比较困难。插入式电极盐浴炉结构较简单，容易拆卸，其电极从炉口插入炉内<sup>[9]</sup>。埋入式电极盐浴炉的示意图如图1-1。

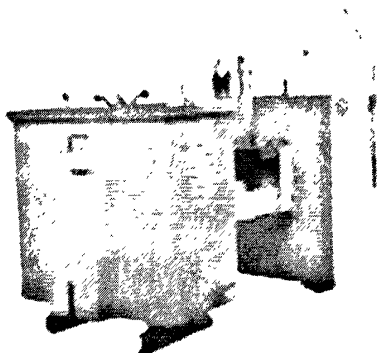


图1-1 埋入式电极盐浴炉



图1-2 外热式坩埚盐浴炉

### 1.2.2.2. 外热式盐浴炉

外热式盐浴炉由坩埚和炉体组成。坩埚放在炉膛内，多在小型盐浴炉上采用，并以电热式坩埚盐浴炉居多，如规格为 RYG 的系列。它主要的优点是操作方便并且不需要变压器。但是实验中必须使用金属坩埚，有一定的热惰性，坩埚内外的温差大。由于温度较高，坩埚的寿命较低<sup>[10]</sup>。外热式坩埚盐浴炉的示意图如图 1-2。

传统的外热式坩埚盐浴炉的四周为0Cr25Al5的电阻丝，中间为1Cr18Ni9Ti的坩埚，用热电偶插入炉膛内测量温度。此结构存在以下问题：

- (1) 传统的坩埚炉没有加装侧面热电偶，仅靠中心热电偶测温，因而测得的盐浴温度相差甚远，造成电炉丝烧断，坩埚烧穿，熔盐温度不均；
- (2) 坩埚的材料为1Cr18Ni9Ti,长期使用易被腐蚀；
- (3) 热电偶腐蚀严重，盐浴炉容易被蚀穿、报废；
- (4) 热效率低，能耗大并且成本高<sup>[11]</sup>。

### 1.2.3 TD 盐浴设备

采用一种精确控温的热扩散处理盐浴设备，该设备主要由两部分组成：电炉控制柜和外热式双热电偶坩埚盐浴设备<sup>[12]</sup>。

#### 1.2.3.1. 外热式坩埚盐浴炉的结构

图 1-3 为外热式坩埚盐浴炉的结构示意图，其中：1—炉盖、2—固定圈、3—炉膛、4—炉膛外壳、5—支架、6—加热元件、7—控温热电偶、8—坩埚、9—中心热电偶。

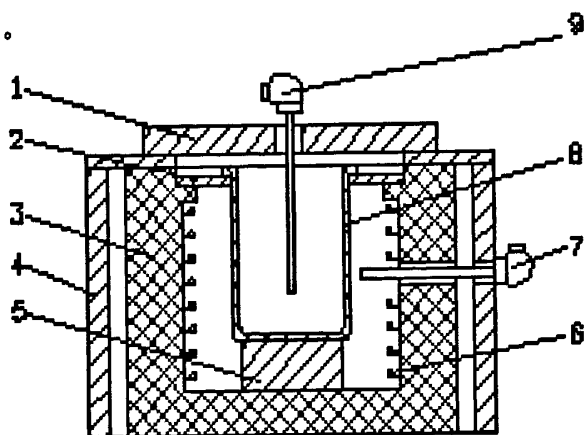


图1-3 外热式坩埚盐浴炉的结构示意图

该实验使用的 TD 盐浴炉为：武汉神工电炉有限公司生产的 GR2-17 型的坩埚电阻炉。其额定电压为 380V，额定功率为 17KW，最高工作温度为 1100℃，重量为 300Kg。工作室尺寸为  $\Phi 300 \times 450\text{mm}$ ，外型尺寸为 1100×1050×800mm。中心热电偶采用的是镍铬式热电偶，控温热电偶采用的是刚玉管热电偶。

### 1.2.3.2. 温度控制模式

本实验中采用双热电偶控温模式。电炉的测温和控温系统是与电炉控制柜相连的两根热电偶，其中一根是通过炉子的侧面插入炉膛内，将其称之为控温热电偶，控温热电偶在工作时通过测量炉膛内的实际温度，可以有效的避免发热造成元件烧坏，同时延长元件的使用寿命，起到了很好的保护作用。它的具体工作流程是测量炉膛的实际工作温度，并将测量的温度数据传入到控制柜里面，通过控制柜以及控制柜中可控硅元器件的相应动作来有效的调整输出电流，从而达到控制炉膛温度的目的。为了满足盐浴处理的工艺要求，在盐浴中直接插入的一个热电偶，称为中心热电偶，在工作时它可以测量坩埚内盐浴的实际温度。它和传统的电炉相比很有优势。传统的电炉没有中心热电偶，测量出来的温度是炉膛的温度，不能测量盐浴的温度，而加装了一个中心热电偶，就能够得到更准确的盐浴的温度。在不需要测量盐浴温度时，热电偶不需要插入盐浴中，这样可以有效降低电偶的腐蚀和破坏，延长其使用寿命，而且不影响炉盖开启及工件的装放。

双热电偶控温系统具有自动化、节能和优质高效的功能，大大的提高了此类设备的技术水平。

本实验采用的与盐浴炉相配套的控制柜型号为 KRJ-50，控温范围为 0-1300℃。图 1-4 为双热电偶外热式坩埚盐浴炉温度控制柜的示意图。

该控制柜采用的是 AI-518/518P 型人工智能温度控制器，具有以下特点：

- (1) 输入采用的是数字校正系统，内置常用的热电偶以及热电阻非线性校正表格，测量精确并且稳定；
- (2) 采用较先进的 AI 人工智能调节算法，无超调同时具备自整定 (AT) 功能；
- (3) 先进的模块化结构；
- (4) 操作简单，易学易用<sup>[13]</sup>。

## 1.3 自动化控制技术发展和现状

自动控制是指在没有人直接参与的情况下，利用外加设备或者外加装置（被称为控制装置或者控制器）等，使得一定的生产过程、机器或设备（称为被控量）的某个参数或者特定的工作状态（称为被控量）自动的按照预定的规律运行<sup>[14]</sup>。自 20 世纪 20 年代以来，自动化控制技术取得了巨大的成就，已经在科

学实验和工业生产中起着至关重要的作用。可以说，当今自动化控制技术已经成为衡量工业现代化水平的一个重要标准。

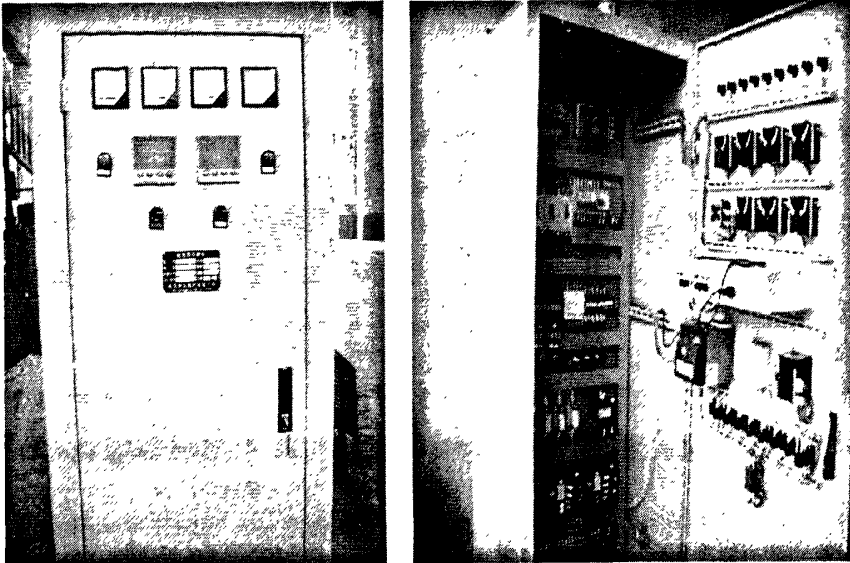


图1-4 双热电偶外热式坩埚盐浴炉温度控制柜的示意图

自动化控制技术的发展与工业生产的发展有着密切的关系，是一个从简单到复杂，从半自动化到全自动化，从低级智能向高级智能发展的一个过程。

18世纪中后期，詹姆斯·瓦特（James Watt）制造出第一台有实用价值的蒸汽机，随后设计出的离心调节器用来控制蒸汽机的速度是自动控制领域的一项重要成果。20世纪20年代，迈纳斯基（Minorsky）发明了船舶操作的自动控制器，并发现了如何从系统的微分方程中确定系统的稳定性。随后，奈魁斯特（Nyquist）提出了奈氏判据，根据正弦输入的开环响应来确定闭环系统稳定性。二战期间，军事科学的需要促进了反馈控制理论的发展。美国麻省理工学院的雷达实验室将PID调节、反馈放大理论与维纳（N. Wiener）的随机过程理论结合在一起，形成了一整套的随动控制系统设计方法。随后的几年里，人们发明了频率响应法，并用来设计线性闭环控制系统。20世纪50年代，伊万斯提出了根轨迹法即当系统参数变化时特征方程根变化的几何轨迹，也推动了控制理论的发展<sup>[15]</sup>。

20世纪50年代末期，工业生产向着连续化、大型化的方向发展，工业过程的时变性、耦合性和非线性的特点愈加明显，这也促使自动化控制技术的发展从经典控制理论、从设计众多可行系统中的一种系统，转变为设计某种最佳的系统。从1960年起，复杂系统的时域分析逐渐成为可能，基于时域分析、采用

状态变量的现代控制技术理论也广泛应用<sup>[16]</sup>。

1969年, DEC公司发明了PDP-14系列的可编程控制器(PLC)。1975年, 美国霍尼威尔公司(Honeywell)发明了分布式控制系统(DCS), 也被称为集散控制系统。这一系统为生产的自动化发展带来了深远的影响, 它集控制技术、计算机技术、通信技术和显示技术为一体, 为现代自动化的实现提供了有力的技术工具。总体来说, 从1960年到1980年, 人们充分研究了随机系统的最佳控制、确定性系统的最佳控制以及复杂系统的自适应行控制, 实现了控制管理一体化的模式。

从1980年到现在, 现代控制理论集中于研究 $H_{\infty}$ 鲁棒控制和鲁棒控制等课题上。此外, 计算机集成过程系统(又称CIPS)也推动了工业自动化。但是, 这些先进的控制理论必须与高效实用的控制策略和方法相结合, 才能满足工业生产提出的高要求。因此, 必须加强生产实际与控制理论的结合, 多引入智能系统, 形成简单实用的控制结构以及算法, 这也是自动控制理论工程化的重要任务<sup>[17]</sup>。

## 1.4 加热炉的温度自动控制概况

在工业生产和科研工作中, 温度的自动控制有着重要的作用, 它对工业生产、国防建设、科学研究甚至对人们的日常生活都有着重要的作用。18世纪开始有出现了一些简单的温度控制的体系, 经过了几百年漫长的发展, 尤其是物理学等自然科学的发展, 使得温度自动控制得到了飞速的进步。人类的日常取暖、工厂车间的正常工作、仪器设备的温度变化等, 都和温度的自动控制有着密切的联系, 它也是国民经济发展过程中一个重要的设备之一, 对科学的发展起着关键的基础作用<sup>[18]</sup>。

我国目前在温度控制系统方面已经发展的十分广泛, 从目前的总体发展情况来看, 发展的状况还算良好, 但是自动温度控制中高科技含量部分所占的比例并不多, 尤其和一些发达国家相比还有着明显的差距, 这些都需要大家的共同努力来发展这一研究领域。温度控制系统中的“点位”控制和常规PID (Proportional, Integral, Differential) 控制器在我国是发展较为成熟的产品。但是就目前研究的较多的PID温度控制系统来看, 它仅仅能够适应一般简单的温度自动控制系统, 还存在许多缺点, 这些缺点包括温度控制的滞后性、实际温度



的复杂性等。除了这些简单的温度控制系统以外，我国在自适应控制仪表、高精度智能化温度控制等较为精密的温度控制系统的发展还并不成熟。和国外先进的技术比较，他们在温度控制方面发展十分迅速，尤其表现在温度控制的自适应、智能化、高精度、参数自整定等方面。国外的一些高科技温度控制技术已经实现了工业化，它们有很多的优点，如：（1）能够在受控系统数学模型难以建立的温度控制系统方面，有着很好的自适应性；（2）有效的运用于一些大滞后、大惯性等复杂的温度控制体系；（3）将先进的理论和计算机技术应用用于温度控制系统方面，比如自校正控制、模糊控制、人工智能和自适应控制等；（4）在应对受控系统温度变化的复杂过程以及参数时变的系统中，可以有效的进行控制；（5）控制系统普遍有着参数自整定功能<sup>[19]</sup>。

炉温自动控制是指根据炉温对给定温度的偏差，自动接通或断开供给炉子的热源能量，或连续改变热源能量的大小，使炉温稳定在设定的温度范围，从而达到所需热处理工艺的要求。设备的温度自动控制常用调节规律有很多种，最常见的是比例、积分和微分，以及其中两者或三者的有机结合等。系统回路的反馈调节是控制热处理炉炉温的一个有效方法，它是将检测到的实际炉温与所设定的温度进行比较和运算，得到两者之间的偏差值。再通过一定的运算规律，对获得的偏差值进行处理，得出控制量并输出出来调节热处理炉的加热功率，从而实现炉温的控制。按照偏差的比例、积分和微分产生控制作用（PID控制），是过程控制中应用最广泛的一种控制形式<sup>[20]</sup>。

以温度控制系统理论为基础的工业加热炉，也是近几十年来发展起来的一项新技术，它是随着计算机技术、电子技术和自动控制技术的发展而发展的。上世纪七十年代，对它的研究主要集中在对加热炉的最优控制方面，后来随着微机技术和自动化技术的不断发展，采用计算机技术来控制加热炉温度的课题也进入了实践化的生产阶段。国内外对于加热炉控制理论的研究主要是集中在以下一些方面：控制过程和最终的决策所取得的实际效益多数是表现为局部最优，生产过程的温度控制和决策往往都是停留在单元自动化阶段。以钢铁企业的生产为例，因为钢铁的生产需要使用到大量的加热炉，钢坯生产有两个联系紧密的生产工序，其一是作为基础自动化级加热炉温度控制，另一个是轧制的负荷控制，这两个工序在实际操作中要用到自动化的加热炉。因此在对钢铁企业基础自动化的研究领域中，应该综合考虑这两方面的控制因素，即加热炉的最优控制与轧制负荷优化控制，在这两个控制因素中找到合适的平衡点达到有效的温度自动控制，实现钢铁生产产量的提高。

加热炉是具有强耦合、纯滞后、大惯性及慢时变等特点的非线性系统，建模较困难，较实用的是通过分析加热炉内的热交换机理建立实时控制模型。由于计算机技术在近20多年中获得了突飞猛进的发展，对于结构复杂、计算量大的加热炉温度控制模型的实时处理成为可能，加热炉计算机控制系统也进入了实用阶段。国内在这方面起步较晚，但在70年代末，随着工业计算机的逐渐普及和自动控制技术在钢铁企业的应用日趋广泛，加热炉温度控制理论的研究开始日渐深入，成为自动控制技术工业应用研究的重要领域<sup>[21]</sup>。

在钢铁工业的发展中，有报道显示作为制造强国的美国、德国等国家已出现了将专家系统和模糊控制等应用于钢铁企业的加热炉燃烧控制和炉温控制中。随着计算机技术的发展，以及将计算机技术和智能控制技术结合在一起的的应用，一些先进的科技手段已成功应用于加热炉的炉温自动控制系统中去了，为温度的自动控制带来了快速的发展。目前，以计算机技术和自动化技术为基础的自动控系统在国内外各钢铁生产中得到了非常广泛的应用。我国在这方面的研究起步较晚，但发展的速度很快，在一些方面已经取得了能够进行实际应用的研究成果<sup>[22]</sup>。

## 1.5 单片机和 PID 控制在加热炉温度控制系统中的运用

### 1.5.1 单片机在温度控制系统中的运用

单片机，也叫微控制器（Microcontroller），是现代控制技术的核心技术，由此构成的控制系统是当今工业控制的主流系统。这种系统已经取代了常规的检测、显示、记录和调节等仪器设备，以及很大一部分的人工操作管理，同时它具有较高复杂度的处理和计算方法，能使受控对象的动态过程以预定的方式和技术要求来运行，从而完成操作管理和过程控制等任务<sup>[23]</sup>。

#### 1.5.1.1. 单片机控制系统的组成

单片机控制系统是由单片机系统和工业对象所组成的，如图 1-5 所示。单片机系统又由硬件和软件组成。其中，单片机本身和外围的设备实体叫做硬件；管理单片机运行的程序、过程控制的应用程序被称为软件。工业对象则包括：被控对象、执行机构、测量变送、电气开关等装置。

硬件由单片机、外部存储器、过程输入输出通道及接口和人机通信设备及

接口等组成。其中，单片机控制系统的核心是单片机，其关键部位是 CPU。CPU 通过接口接收各项被控对象的参数，或者人的指令，并向系统各部分发送指令数据，完成多次检测、数据处理、控制运算和逻辑判断等工作。人机通信设备及接口是由数字显示器（或屏幕显示器）、键盘、显示操作台、记录仪和打印机等组成。它们是单片机系统与工作人员通信的工具<sup>[24]</sup>。

软件包括应用软件和系统软件。应用软件是根据用户要达到的实际要求所配置的程序，包括实现系统内控制任务的各种程序。系统软件有：操作系统、语言处理程序和程序设计系统等。它一般由生产厂家提供，并具有一定的通用性<sup>[25]</sup>。

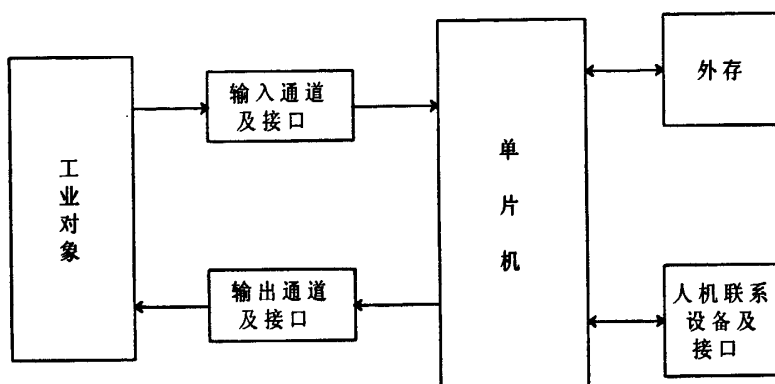


图1-5 单片机控制系统的组成

### 1.5.1.2. 单片机控制系统的概况

将常规按偏差进行调节的模拟闭环负反馈控制系统的控制器，用单片机和转换接口来代替，构成了单片机控制系统，如图 1-6 所示。

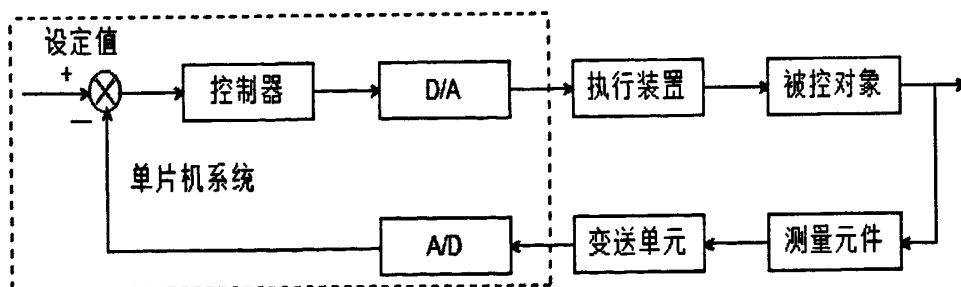


图1-6 单片机闭环控制系统结构图

单片机控制系统有以下 3 个工作步骤：

- (1) 实时数据采集。检测和输入来自变送单元和测量元件被控量的瞬时值。
- (2) 实时数据处理。分析和处理采集到的被控量，并按一定的控制规律进

行运算和控制决策。

(3) 实时控制输出。根据上一步的控制决策，即时地对执行装置发出一定的控制信号，完成任务<sup>[26]</sup>。

与一般的常规模拟系统相比，单片机系统由如下特点：

(1) 系统复杂度高和技术集成；(2) 可维护性好、可靠性高；(3) 抗干扰能力强；(4) 控制的多元化和多功能行；(5) 应用的灵活性。

### 1.5.1.3. 单片机控制系统的分类

根据单片机控制系统的控制功能、系统结构和应用特点，可以分为 5 种类型，分别为直接数字控制系统、计算机操作指导控制系统、集散型控制系统、监督计算机控制系统和现场总线控制系统<sup>[27]</sup>。

本实验采用的是直接数字控制系统 (DDC, Direct Digital Control)，一般为在线实时系统，其结构示意图如图 1-7 所示。微机通过数字开关量的输入通道及接口 DI、模拟量输入通道及接口 AI 进行实时数据采集，然后根据预定的控制规律来实时控制，最后通过数字开关量输出及其接口 DO、模拟量输出通道及接口 AO 来输出控制信号，从而实现对生产过程的直接控制。DDC 系统是单片机在工业生产中应用最普遍的一种方式，它属于计算机闭环控制系统。

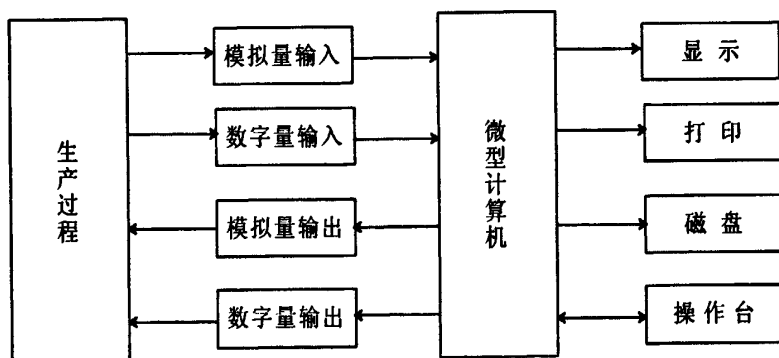


图1-7 直接数字控制系统结构图

### 1.5.1.4. 单片机在温度控制系统中的运用

随着计算机技术的发展和现代控制理论的完善，采用计算机对加热炉温度控制到已经进入了实用阶段。计算机可以优化重要的生产过程参数和组织生产，取得显著的节能效果和经济效益。

将单片机运用于温度控制系统中，应建立加热炉的结构参数、热加工参数和操作参数、以及生产指标的数学模型等，进而实现以数学模型为基本规律、

直接的数字控制为目标的计算机先进控制。

## 1.5.2 PID 算法在温度控制系统中的运用

所谓 PID 控制就是比例 (Proportional)、积分 (Integral)、微分 (Differential) 控制。实际的物理系常常有储能元件的存在, 这些元件就会使系统的响应产生一定的滞后和延迟。系统在运行和能量传递过程中, 这些时间上的延迟和滞后将会导致系统的不稳定性, 并在一定程度上降低了系统的运行质量。因此, 在实际中通常引入偏差的比例调节来保证系统的快速性和调节质量。若要提高控制精度, 可以引入积分调节; 若要消除系统的惯性影响, 则可以引入偏差的微分调节。数字 PID 控制算法是工业控制中最常用的控制算法。对于大多数控制对象, 采用 PID 控制都可以达到较满意的控制效果。它已经成为大多数温度控制系统中必用的算法<sup>[28]</sup>。

## 1.6 选题内容及课题意义

采用 TD 处理可以改善工件的表面性能并延长使用寿命。盐浴渗层均具有很强的抗氧化性能、强耐腐蚀性能、强耐磨性和高硬度, 能够满足需要。但是, 传统的盐浴炉温度控制能耗高, 控温精度低, 炉温和盐浴温度波动幅度大, 噪声大, 需要人为控制, 使得 TD 处理的结果有一定的误差, 因此很有必要针对外热式坩埚盐浴炉进行温度自动控制系统的研究。本课题主要的研究内容包括:

(1) 在不同的加热温度、不同的盐浴成分下, 研究出控制参数和方法, 寻找外热式双热电偶坩埚盐浴炉的温度上升或下降规律, 并将参数建立数据曲线 (或数据表), 便于控制

(2) 选用合适的单片机和一系列较先进的元件, 设计出简单, 实用, 自动化水平高的硬件结构, 并构建出一整套电路图。

(3) 根据系统的硬件结构, 构建出软件流程图, 并用软件编程的方式来取代传统庞大的 PID 调节电路。

采用双热电偶外热式坩埚盐浴炉的温度自动控制系统具有非常重要的意义:

(1) 该系统提高了温度控制精度, 控制精度为 $+3^{\circ}\text{C}$ , 使得最终的加热温度保持在小范围波动, 控制质量大大提高。

(2) 系统采用单片机 AT89C52 作为核心元件和高精度的数字转换器 MAX6675 来代替传统的温度检测电路, 简化了电路图, 降低了生产成本。

(3) 目前专门针对双热电偶外热式坩埚盐浴炉的温度自动控制系统的研究较少, 因此有必要对齐进行一定研究, 从而为表面处理设备的改进和深入发展提供参考依据。

## 1.7 本章小结

本章主要介绍了 TD 盐浴渗金属的发展与国内外研究现状和外热式盐浴坩埚炉的结构和工艺过程。对自动控制技术和自动化温度控制做了简要的回顾和概括描述, 并介绍了单片机和 PID 调节在温度控制系统中的运用, 提出了本文研究的主要内容及意义。

## 第2章. 温度控制系统的主要数学模型

### 2.1 双热电偶外热式坩埚盐浴炉温度控制要求

双热电偶外热式坩埚盐浴炉的温度控制相对于一般的加热炉的温度控制较复杂,这是由于系统需要双重控制:既要控制炉膛的温度,又要控制盐浴的温度。而盐浴的温度才是最终的控制目标,但是它的温度的升高并不是直接通过加热源(这里是加热电流)得到的,而是通过热传递的方式从炉膛中得到的。因而在制定温度控制的要求时,必须综合考虑这两个回路——炉膛回路和盐浴回路的特点<sup>[29]</sup>。

#### 2.1.1 炉膛温度控制要求

炉膛在加热时,为了避免加热温度过高,烧坏加热元件,必须将加热温度控制在一定范围内。温度检测电路检测温度,将其输入单片机,由单片机处理和运算,并发出控制指令进而调节加热速度。当炉膛的温度等于或者高于加热元件所能承受的最高温度时,单片机发出指令,减小电流,对炉膛保温。当炉膛的温度小于加热元件所能承受的最高温度时,根据盐浴的温度情况或全速加热或低速加热。

另外,在保证炉膛温度不至于过高的基础上,同时要尽可能的提高加热速率或全速加热,减少加热升温的时间,提高生产效率。

#### 2.1.2 盐浴温度控制要求

由于外热式坩埚盐浴炉的大滞后性,非线性,传统的温度控制系统的控制精度较低,温度过冲现象较严重。因此盐浴温度控制要求提高温度控制精度,使得最终的加热温度保持在小范围波动,大大提高控制质量。

此外,盐浴的升温过程需要遵循一定的加热曲线,使得加热过程便于控制和调整,提高加热效率和精度。控制系统采用PID调节,当盐浴温度快要达到设定温度时,单片机经过处理和运算,发出指令使加热功率减小,炉膛温度降

低，盐浴温度不过冲，保证控制精度。

## 2.2 数字 PID 算法

PID 控制是工业生产中应用最广泛的一种控制规律，它并不要求被控对象的具体数学模型，其控制的效果好，并广泛运用于计算机 DDC 中。实践证明，PID 算法能满足加热炉的温度控制的要求。

### 2.2.1 PID 控制原理

PID 控制系统是由被控对象和模拟 PID 控制器所组成的。其系统原理框图如图 2-1。

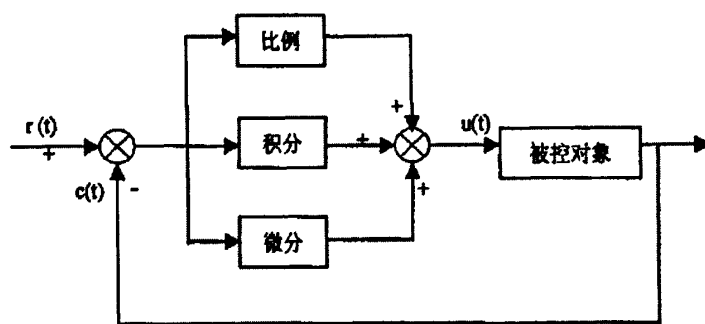


图2-1 PID调节系统框图

PID 的控制规律为<sup>[30]</sup>：

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2-1)$$

式中：  $u(t)$ ——控制量；

$e(t)$ ——系统的控制偏差；  $e(t) = r(t) - c(t)$

$K_p$ ——比例增益， $K_p$ 与比例带  $\delta$ 成倒数关系，即  $K_p = 1/\delta$ ；

$T_i$ ——积分时间；

$T_d$ ——微分时间。

写成传递函数的形式为：

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i S} + T_d S \right) \quad (2-2)$$

PID 调节的校正环节的作用如下：

(1) 比例环节



比例环节可以成比例的反映出系统的偏差  $e(t)$ ，一旦产生了偏差，控制器工作以减小偏差。

### (2) 积分环节

在 PID 调节中，积分环节能提高系统的无差度和消除静差，从而尽可能降低偏差。在积分环节中，积分时间常数起到了重要的作用，它可以用来决定调节作用的强弱。当时间常数越大时，积分调节作用就越弱，反之则反。

### (3) 微分环节

PID 系统的偏差是有着不同变化的，为了检测系统偏差信号的变化速率，需要引入微分环节来反映这一变化。微分环节的引入可以减小 PID 系统工作时的调节时间，它通过对系统偏差的分析产生一个有效的早期修正信号，在这一信号的保证下加快 PID 系统的响应速度<sup>[31]</sup>。

对微分方程式离散化，可得到如下的近似：

$$u(t) \approx u(kT) \quad (2-3)$$

$$e(t) \approx e(kT) \quad (2-4)$$

$$\int e(t) dt \approx \sum_{j=0}^k T e(j) \quad (2-5)$$

$$\frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \quad (2-6)$$

式中：T——采样周期

K——采样序号。

为了使计算简单，常把  $e(kT)$  计为  $e(k)$ ， $u(kT)$  计为  $u(k)$ 。将上式代入式 2-1，可得离散的位置式 PID 表达式：

$$u(k) = K_p \{ e(k) + \frac{T}{T_i} \sum_{j=0}^k e(j) + \frac{T_d}{T} [e(k) - e(k-1)] \} \quad (2-7)$$

或

$$u(k) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(j) + K_d [e(k) - e(k-1)] \quad (2-8)$$

式中： $u(k)$ —— $t = kT$  时的控制量；

$K_i = \frac{K_p T}{T_i}$ ——积分系数；

$K_d = \frac{K_p T_d}{T}$ ——微分系数。

PID 控制算法的位置式的积分项是对以前诸次偏差  $e(j)$  累加，这样就会占用

较多的存储单元而不利于软件编程，所以往往会采用增量式 PID。

增量式 PID 是对位置式 PID 取增量式，增量就是数字调节器的输出数值。而 PID 运算的每个输出增量为相邻的两次采样时刻的位置值之差，即

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (2-9)$$

代入式 (2-7) 中可得，

$$\Delta u(k) = K_p \left\{ [e(k) - e(k-1)] + \frac{T}{T_i} e(k) + \frac{T_d}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \right\}$$

或

$$\Delta u(k) = K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_d [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (2-11)$$

以上两种表达方式的共同点是比例、积分、微分的作用都是彼此独立而互不相关的。这有利于人们直接检查各个参数对于控制效果的影响。编程时为了方便，也常采用更为简单的控制算法<sup>[32]</sup>，如下：

$$\Delta u(k) = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (2-12)$$

式中：

$$A = K_p \left( 1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_d}{T} \right); B = K_p \left( 1 + 2 \cdot \frac{T_d}{T} \right); C = \frac{T_d}{T}.$$

## 2.2.2 PID 控制参数整定的方法

PID 控制调节参数的整定在整个温度自动控制的设计中起着关键的作用，通常是根据控制系统的具体运行状况和控制系统的特点来确定比例系数  $K_p$ 、微分时间常数  $T_d$  以及积分时间常数  $T_i$ 。这几个常数在对控制系统的稳定性、过渡过程的时间控制和静态特性等方面起着核心的作用。在常见的 PID 控制参数整定的方法中，最常用的方法有：经验数据法、扩充临界比例度法、扩充相应曲线法、工程整定法等。工程整定法是公认的较为简单的 PID 控制调节参数的整定法，其主要优点在于不依赖于控制对象的数学模型即可进行整定参数。

扩充临界比例度法和扩充响应曲线法是两种常用的数字 PID 控制算法的参数整定法，它们都是通过分析、综合和扩充模拟调节器的工程整定法得到的<sup>[33]</sup>。

### 2.2.2.1. 按扩充临界比例度法整定参数

扩充临界比例度法是实验经验法的一种，其整定  $T$  和  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  的步骤如下：

- (1) 选择一个足够短的采样周期  $T_{\min}$ ，选用尽量短的采样周期是为了保证

这个时间能反应系统阶跃的滞后响应时间和上升的时间，通常情况下  $T_{\min}$  的值是越小越好，这样计算的精确到也会很好，但是太小的  $T_{\min}$  值会是系统运算复杂增加系统计算的工作量和计算时间，因此  $T_{\min}$  值得选取也不能太小。一般  $T_{\min}$  值选用采样周的纯滞后时间的 1/10 以下。

(2) 在选择好采样周期  $T_{\min}$  后，让系统做纯比例控制，采用模拟调节器的临界比例度法求出临界比例度  $k$  和临界振荡周期  $T_k$ 。具体的做法是让 DDC 在纯比例控制过程中逐渐缩小比例度，使系统产生一个临界的振荡，这个临界振荡同时也是等幅振荡。此时的比例度和振荡周期分别为临界比例度  $K$  和临界振荡周期  $T_k$ 。

(3) 选择控制度。其具体做法是选取一个模拟调节器为标准，比较系统的控制效果和这个选取的模拟调节器的控制效果。控制度就是两者比较得出的数值。将其表示为函数，即  $(\int_0^{\infty} e^2(t)dt)_{\min}$ 。从而控制度为：

$$\text{控制度} = \frac{[(\int_0^{\infty} e^2(t)dt)_{DDC}]_{\min}}{[(\int_0^{\infty} e^2(t)dt)_{\text{模拟}}]_{\min}} \quad (2-13)$$

在实际应用中，根据具体的控制系统特性一般不需要计算出两个误差平方面积的具体数值，控制度在实际应用的物理意义上只是表示控制效果的物理概念，并不需要计算误差平方面积。

(4) 根据实验中设计的控制度查表 2-1，求得  $T$  和  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  的值。

(5) 按求得的参数整定运行，在投运中观察控制效果，用探索法进一步寻求比较满意的值<sup>[34]</sup>。

#### 2.2.2.2. 按扩充响应曲线法整定参数

扩充响应曲线法是对模拟调节器重使用的响应曲线法的扩充，也是一种实验经验法，其整定  $T$  和  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  的步骤如下：

(1) 首先，数字控制器不接入系统，使系统处于手动操作的状态，将被调量调节到给定值的附近，并使之稳定下来。然后突然改变给定值，给对象一个阶跃输入信号。

(2) 用记录仪记录被调量在阶跃输入下的整个变化过程曲线，如图 2-2 所示。

(3) 在曲线拐点处作切线，求得滞后时间  $\tau$ 、被控对象时间常数以  $T_r$  及它们的比值  $T_r/\tau$ 。

表 2-1 按扩充临界比例度法整定 T 和  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$

控制度	控制规律	T	$K_p$	$T_i$	$T_d$
1.05	PI	0.03T <sub>k</sub>	0.53 $\delta_k$	0.88T <sub>k</sub>	—
	PID	0.014T <sub>k</sub>	0.63 $\delta_k$	0.49T <sub>k</sub>	0.14T <sub>k</sub>
1.2	PI	0.05T <sub>k</sub>	0.49 $\delta_k$	0.91T <sub>k</sub>	—
	PID	0.043T <sub>k</sub>	0.47 $\delta_k$	0.47T <sub>k</sub>	0.16T <sub>k</sub>
1.5	PI	0.14T <sub>k</sub>	0.42 $\delta_k$	0.99T <sub>k</sub>	—
	PID	0.09T <sub>k</sub>	0.34 $\delta_k$	0.43T <sub>k</sub>	0.20T <sub>k</sub>
2	PI	0.22T <sub>k</sub>	0.36 $\delta_k$	1.05T <sub>k</sub>	—
	PID	0.16T <sub>k</sub>	0.27 $\delta_k$	0.40T <sub>k</sub>	0.22T <sub>k</sub>
模拟调节器	PI	—	0.57 $\delta_k$	0.83T <sub>k</sub>	—
	PID	—	0.70 $\delta_k$	0.50T <sub>k</sub>	0.13T <sub>k</sub>
Ziegler-Nichols 整定式	PI	—	0.45 $\delta_k$	0.83T <sub>k</sub>	—
	PID	—	0.60 $\delta_k$	0.50T <sub>k</sub>	0.125T <sub>k</sub>

表 2-2 按扩充响应曲线法整定 T 和  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$

控制度	控制规律	T	$K_p$	$T_i$	$T_d$
1.05	PI	0.1 $\tau$	0.83T <sub>r</sub> / $\tau$	3.4 $\tau$	—
	PID	0.05 $\tau$	1.15 T <sub>r</sub> / $\tau$	2.0 $\tau$	0.45 $\tau$
1.2	PI	3.6 $\tau$	0.2 T <sub>r</sub> / $\tau$	0.78 $\tau$	—
	PID	0.16 $\tau$	1.0 T <sub>r</sub> / $\tau$	1.9 $\tau$	0.55 $\tau$
1.5	PI	0.5 $\tau$	0.68 T <sub>r</sub> / $\tau$	3.9 $\tau$	—
	PID	0.34 $\tau$	0.85 T <sub>r</sub> / $\tau$	1.62 $\tau$	0.65 $\tau$
2	PI	0.8 $\tau$	0.57 T <sub>r</sub> / $\tau$	4.2 $\tau$	—
	PID	0.6 $\tau$	0.6 T <sub>r</sub> / $\tau$	1.5 $\tau$	0.82 $\tau$
模拟调节器	PI	—	0.9 T <sub>r</sub> / $\tau$	3.3 $\tau$	—
	PID	—	1.2 T <sub>r</sub> / $\tau$	2.0 $\tau$	0.4 $\tau$
Ziegler-Nichols 整 定式	PI	—	0.9T <sub>r</sub> / $\tau$	3.3 $\tau$	—
	PID	—	1.2 T <sub>r</sub> / $\tau$	3.0 $\tau$	0.5 $\tau$

(4) 由求得的  $T_r$  和  $\tau$  及它们的比  $T_r/\tau$ ，选择一控制度，查表 2-2 即求得数字 PID 的控制参数  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$  及采样周期 T。

(5) 按求得的整定参数整定运行，在投运中观察控制效果，用探索法进一

步寻找比较满意的值<sup>[35]</sup>。

对于本设计，采用的是按扩充响应曲线法来整定  $T$  和  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_d$ 。

## 2.2.3 温度控制系统的 PID 模型和参数的求取

### 2.2.3.1 盐浴炉 PID 参数的整定

加热炉炉温的控制，根据工艺的要求不同而有所变化，但大体上可归纳为以下几个过程：

(1) 自由升温段，即根据电阻炉自身条件对升温速度没有控制的自由升温过程。

(2) 恒速升温段，即要求炉温上升的速度按某一斜率进行。

(3) 保温段，即要求在这一过程中炉温基本保持不变。

(4) 慢速降温段，即要求炉温下降的速度按某一斜率进行。

(5) 自由降温段。

而每一段都有时间的要求，如图 2-2 示。

使盐浴炉的炉膛的温度近似的按上图的规律进行变化。从室温  $T_0$  开始到  $a$  点为自由升温段，自由升温阶段温度近似为一条直线。当温度一旦到达  $a$  点(即  $T_Q$  点)，就进入系统调节。从  $b$  点到  $c$  点为保温段，要始终在系统控制之下，以保证所需的炉内温度的精度，温度近似在一条直线上波动。加工结束，即由  $c$  点到  $d$  点为自由降温段。保温段的时间为 50~100min。

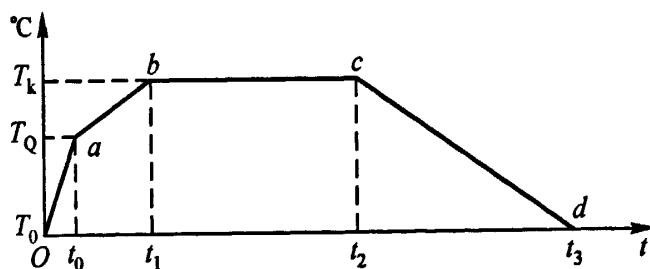


图2-2 加热炉温度曲线

炉温变化曲线对各项品质指标的要求如下：

(1) 过渡过程时间：即从升温开始到进入保温段的时间  $t_1 \leq 110\text{min}$ 。

(2) 超调量：即升温过程的温度最大值( $T_M$ )与保温值( $T_k$ )之差与保温值之比

$$\sigma = \frac{T_M - T_k}{T_k} \leq 10\% \quad (2-14)$$

(3) 静态误差：即当温度进入保温段后的实际温度值(T)与保温值(T<sub>k</sub>)之差与保温值之比。

$$\sigma = \frac{T - T_k}{T_k} \leq \pm 2\% \quad (2-15)$$

外热式坩埚盐浴炉与其他的加热炉一样，属于能够自平衡并且具有有蓄热能力的设备。因此，可以将其视为纯滞后性的一阶惯性环节。设对象的输入信号为  $u(t)$ ，输出信号为  $y(t)$ 。其传递函数可以表示为：

$$G(S) = \frac{K}{1+TS} e^{-\tau S} \quad (2-16)$$

其中，T 为时间常数，K 为放大倍数， $\tau$  为滞后时间，即电源已经通断，炉温变化落后于电压变化的时间。式中的  $\tau$ 、T、K 的数值可以通过实验来整定。T（时间常数）在这里表示炉膛温度变化的快慢程度的参数，即表示炉膛的惯性大小的参数。通常情况下，盐浴炉的时间常数 T 较大，所以是大惯性、大滞后性的环节。

由于本文是在实验的基础上进行的研究，因此采用的是扩充响应曲线法亦即阶跃相应法来求取 T、K、 $\tau$ 。测量的方法是：在盐浴炉控制系统处于开环的状态下，先给它设定一个输入信号。待系统的炉膛温度稳定后，突然在输入端加一幅度适宜的阶跃控制信号，记录下系统的温度变化曲线过程，绘制出响应曲线，此即为输出的飞升曲线，当然它所对应的输入也就是这个突然附加的阶跃信号。本文中，阶跃信号的输入是通过改变可控硅的导通或者断开的时间比率来完成的。控制对象的阶跃响应曲线如图 2-3。

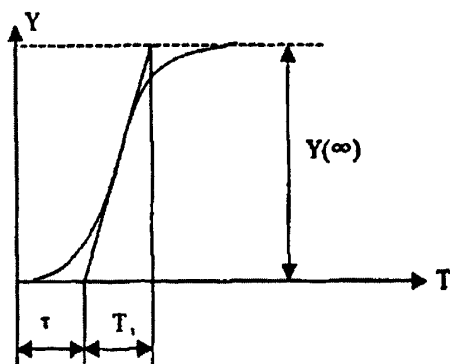


图2-3 控制对象的阶跃响应曲线

(1) 在施加阶跃信号后，盐浴炉从200℃上升到400℃的阶跃响应温度曲线如图 2-4所示。

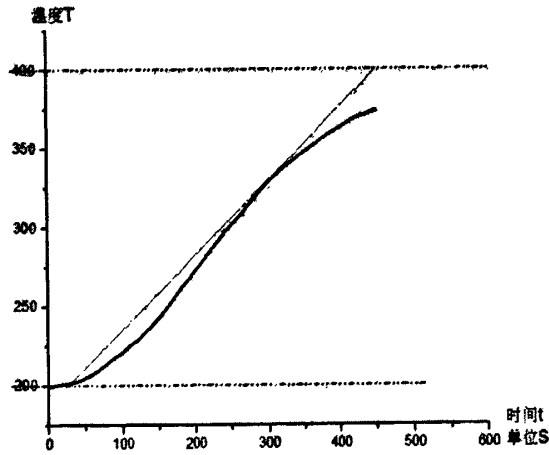


图2-4 从200°C上升到400°C的阶跃响应温度曲线

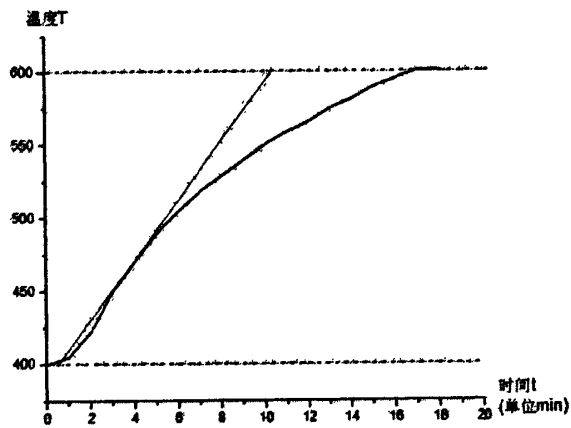


图2-5 从400°C上升到600°C的阶跃响应温度曲线

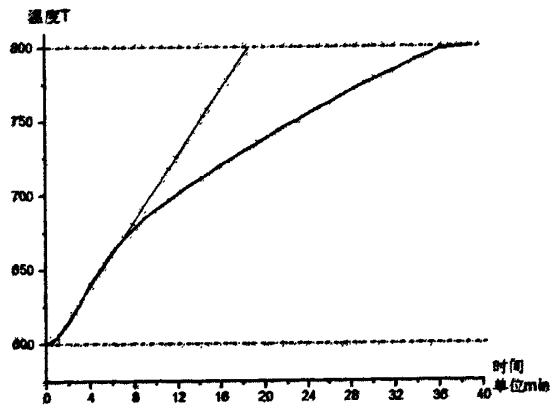


图2-6 从600°C上升到800°C的阶跃响应温度曲线

(2) 在施加阶跃信号后, 盐浴炉从400℃上升到600℃的阶跃响应温度曲线如图2-5所示。

(3) 在施加阶跃信号后, 盐浴炉从600℃上升到800℃的阶跃响应温度曲线如图2-6所示。

可以直接看出, 盐浴炉的纯滞后时间 $\tau$ 为16S, 从200℃升温到400℃时的时间常数 $T$ 为415S, 从200℃升温到400℃时的时间常数 $T$ 为9.6min, 从400℃升温到600℃时的时间常数 $T$ 为17.8min, 则取平均值 $T=11.5\text{min}$ 。放大倍数 $K$ 可以根据下式求得:

$$K = \frac{Y(\infty) - Y(0)}{\Delta r} \quad (2-17)$$

这里 $\Delta r$ 表示的是可控硅的通断比。 $\Delta r$ 分别为0.248、0.246、0.243,

$$K_1 = \frac{400 - 200}{0.248} = 806.45 \quad (2-18)$$

$$K_2 = \frac{600 - 400}{0.246} = 813.008 \quad (2-19)$$

$$K_3 = \frac{800 - 600}{0.243} = 824.04 \quad (2-20)$$

$$\text{取其平均值, } K = \frac{K_1 + K_2 + K_3}{3} = 814.5 \quad (2-21)$$

故坩埚盐浴炉的特性参数为 $K=814.5$ ,  $T=11.5\text{min}$ ,  $\tau=16\text{S} \approx 0.27\text{min}$ 。

即炉膛的传递函数为:

$$G(S) = \frac{K}{1 + TS} e^{-\tau s} = \frac{814.5}{1 + 11.5S} e^{-0.27S} \quad (2-22)$$

### 2.2.3.2 PID 控制规律和控制参数整定

本实验中采取的控制规律为: 根据炉温变化曲线的要求, 可将其分为三段来进行控制: 自由升温段, 保温段和自由降温段。而真正需要电气控制的是前面两个阶段, 即自由升温段和保温段。为避免过冲, 从室温到80%额定温度为自由升温段, 在 $\pm 20\%$ 额定温度时为保温段。在自由升温段中, 希望升温越快越好, 总是将加热功率全开足, 因此得自由升温段控制规律为: 当 $T \leq 0.8T_0$ 时, 选 $P_k = 1$ ; 在 $T > 0.8T_0$ 后, 已较接近需要保温的值 $T_k$ , 为此采用保温段控制方程。保温控制方法有多种, 本实验采用PID控制方法。

在连续系统PID校正的控制量可以表示为:

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2-23)$$



离散算法为:

$$y(k) = y(k-1) + K_p \{e(k) - e(k-1) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] + \frac{T}{T_i} e(k)\} \quad (2-24)$$

$T$ ---采样周期

$T_D$ ---微分时间

$T_i$ ---积分时间

$K_p$ ---比例系数

$e(k)$ --- 误差值  $e(k) = u_0(k) - u_1(k)$ ,  $u_0(k)$ 、 $u_1(k)$  分别为温度给定值及反馈值。

在实际的计算机编程操作中, 可以把上式公式化为:

$$\Delta u(k) = Ae(k) - Be(k-1) + Ce(k-2) \quad (2-25)$$

式中:

$$A = K_p \left(1 + \frac{T}{T_i} + \frac{T_D}{T}\right); B = K_p \left(1 + 2 \cdot \frac{T_D}{T}\right); C = \frac{T_D}{T}$$

根据表 2-2 按扩充响应曲线法整定  $T$  和  $K_p$ 、 $T_i$ 、 $T_D$ , 系统采用的是

Ziegler-Nichols PID 整定, 则计算公式和选用的实际参数为:

$$K_p = 1.2 \frac{T_p}{K\tau} = 1.2 \times \frac{11.5}{814.5 \times 0.27} = 0.0523$$

$$T_D = 0.5\tau = 0.5 \times 0.27 = 0.13$$

$$T_i = 2\tau = 2 \times 0.27 = 0.54$$

$$A = 0.0523 \times \left(1 + \frac{4}{0.54} + \frac{0.13}{4}\right) = 0.441$$

$$B = 0.0523 \times \left(1 + 2 \times \frac{0.13}{4}\right) = 0.057$$

$$C = 0.0523 \times \frac{0.13}{4} = 0.002$$

$$K = 814.5$$

$$T = 4$$

## 2.3 炉膛和盐浴的热量传输

### 2.3.1 热量传输的概念和基本方式

工程上传热现象是相当复杂的。热量的传输实际上是能量在以热的形式而进行的传热过程。按照传热的物理本质, 有三种基本的传热方式: 传导传热、对流以及辐射传热<sup>[35]</sup>。

### 2.3.1.1. 传导传热

传导传热指的是热量从物体的温度较高的部分传递到温度较低的部分，或者从高温物体传递到与之接触的低温物体的过程。物体中的自由运动的电子、分子、原子等的热运动可以作为导热热量传输介质，它可以发生在某个物体的两个部分之间，或者发生在两个物体相互接触的接触面之间。它可以发生在固体、液体或者气体中。

法国著名傅里叶 (Fourier) 提出：对于两个表面分别维持均与温度  $t_{w1}$  和  $t_{w2}$  的平壁导热问题，如果两个侧面的温度差为  $\Delta t$ ，厚度为  $\delta$ ，平壁面积为  $A$ ，平壁的导热系数为  $\lambda$ ，则单位时间内通过平壁传导的热量为：

$$\Phi = \lambda A \frac{\Delta t}{\delta} \quad (2-25)$$

式中， $\Phi$  为热流量，单位为 W， $\lambda$  为导热系数或热导率，单位为  $W/(m \cdot ^\circ C)$ ， $A$  为传热面积，单位为  $m^2$ ， $\Delta t$  温度差，单位为  $^\circ C$  或者 K， $\delta$  为壁厚，单位是 m。

传导传热可以分为稳定导热和不稳定导热。稳定导热过程即温度场不随时间变化的导热过程。但是一般在工程上，某些导热的过程是不稳定的，即温度场会随着时间的变化而变化。不稳定导热过程，无论是加热还是冷却的整个过程大致可以分为三个阶段。第一阶段被称为是开始阶段，这时温度的变化逐渐由物体的表面向中心扩展，这个阶段内初始条件对物体的温度分布和各个点的温度变化速率都有很大的影响，没有固定的加热或者冷却的规律，因此称为“不规则过程”。在第二个阶段，这种温度分布的不规则性慢慢消失，物体内部所有各点的温度随时间的变化规律均相等，并且受到该物体的物理性质寄加热或者冷却的外部条件影响，这个过程称为“正规阶段过程”。在经过一段时间达到第三个阶段，物体达到“稳定状态”，此时各点的温度不再随时间变化了，称为稳定导热阶段。

本文所讨论的情况就是属于是不稳定导热。

不稳定导热的计算过程中常会用到主要的相似特征数，包括傅里叶数和毕渥数。傅里叶数为

$$F_o = \frac{a\tau}{l^2} \quad (2-26)$$

其中， $a$  为热扩散系数， $\tau$  为时间， $l$  为定形尺寸。在傅里叶数中， $F_o$  是表示量纲为 1 的时间，因为  $l^2/a$  具有时间量纲。

毕渥数为：

$$Bi = \frac{hl}{\lambda} \quad (2-27)$$

式中,  $h$  为物体的表面与介质间的外部换热系数, 包括了辐射换热系数以及对流换热系数, 单位为  $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ;  $l$  为定形尺寸, 对于本文中半径为  $R$  的圆柱体来说,  $l$  取  $R$ , 单位为  $m$ ;  $\lambda$  为被加热物体的导热系数, 单位为  $W/(m \cdot ^\circ C)$ 。

当  $Bi \rightarrow 0, \frac{l}{\lambda} \rightarrow 0$ , 此时物体的加热或者冷却完全由外部热阻所控制, 物体的内部温度分布比较均匀, 这样的物体被称为薄材。

当  $0 < Bi < \infty$ , 物体的冷却或者加热同时被内部热阻和外部热阻所控制, 这是一般的第三类边界条件下物体的冷却或者加热情况。本文所讨论的传导传热就是属于这种情况。

当  $Bi < \infty, \frac{1}{h} \rightarrow 0$ , 物体的冷却或者加热完全受到内部热阻的控制<sup>[36]</sup>。

### 2.3.1.2. 对流传热

对流传热指的是物体在流动时, 冷热流体互相掺混而引起的热量传输过程。这种传热方式通常发生与流体各部分之间。工程上经常运用流体对流的同时, 流过与本身温度不同的固液表面并与该表面发生热量传递, 这种综合的对流方式被称为对流给热或者对流换热。如果单位时间内通过单位面积的质量通量为  $M$  的流体, 有温度  $t_1$  处流到温度  $t_2$  处, 则以热对流的方式传递的热量为:

$$\Phi = MC_p(t_1 - t_2)A \quad (2-28)$$

式中,  $\Phi$  为对流传热传递的热量, 单位为  $W$ ,  $C_p$  为比定压热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ,  $M$  为质量通量, 单位为  $kg/(m^2 \cdot s)$ ,  $t_1$ 、 $t_2$  为流体在两个不同温度位置出的温度, 单位为  $^\circ C$  或者  $K$ 。

计算对流换热时, 应先判断对流是层流还是湍流。判断的常用方法是计算雷诺数  $Re$ 。

$$Re = \frac{vl}{\nu} = \frac{\text{惯性力}}{\text{黏性力}}$$

实验确定, 对于在圆管内强制流动的流体, 由层流开始向湍流转变的临界雷诺数  $Re_0 \approx 2320$ 。一般来说, 临界雷诺数会随体系的不同而发生变化, 即使是同一体系, 有时也会随着外部因素的不同而发生改变。但是, 在雷诺数上超过上临界雷诺数  $Re' \approx 13000$  时, 流动形态转变为稳定的湍流。当雷诺数  $Re_0 < Re < Re'$  时, 流动处于过渡区域, 既可能是层流也可能是湍流, 是处于一个不稳定的区域。而对于外掠平板的流体, 其层流到湍流转变的临界雷诺数为  $Re = 5 \times 10^5$ , 当  $Re > 10^7$  时, 就进入了紊流状态。

对流换热可以分为自然对流和强制对流两大类。强制对流又有四种最常见

的典型情况：外掠平板、横掠圆柱、管内流动和绕流球体。本实验中全部是强制对流，并且会涉及前三种对流方式的计算。

外掠平板、横掠圆柱和管内流动的热量计算的区别主要是对流换热系数的计算方法不同。

计算外掠平板状态下的对流换热量时，其平均换热系数为  $h_{\text{外}} = \frac{N_u \lambda_m}{d}$ ，而在层流区域， $N_u = 0.664 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{1/3}$ 。其中  $N_u$  称为努塞尔数，表示边界给热过程的特征，即为该条件下对流换热系数与导热系数之比，也可认为是导热热阻与对流热阻之比。且

$$N_u = \frac{hl}{\lambda} = \frac{l/\lambda}{1/h} = \frac{\text{导热热阻}}{\text{对流热阻}} \quad (2-29)$$

$\text{Pr}$  为普朗特(Prandtl)数，是一个综合物性参数且无量纲量。其定义式为  $\text{Pr} = \frac{\lambda}{h}$ ，表示了流体的物性特征，也反映了流体中分子动量扩散和热量扩散能力的相对程度。 $\text{Pr}$  越大，其分子热扩散越困难，热交换过程中越难分布均匀。

在计算横掠圆柱的对流换热量时，层流区域的  $N_u = c \text{Re}^n$ 。其  $c$  和  $n$  的值需要通过查表来求取。

而管内流动的情况下，其经验计算公式为：

$$N_{uf} = 0.027 \text{Re}_f^{0.8} \text{Pr}^{1/3} (\mu_f / \mu_w)^{0.14} \quad (2-30)$$

式中，除  $\mu_w$  或  $\text{Pr}$  取壁温  $T_w$  为定性温度外，其余热物性仍采用流体的平均温度为定性温度<sup>[37]</sup>。

### 2.3.1.3. 辐射传热

辐射传热是指物体之间通过相互辐射和吸收进行的热量传输过程，也称为辐射换热和热辐射。物体会因为各种原因发射辐射能。热辐射是由热引物体内部的原子、分子或者离子振动以及电子激动而发射的辐射能，并以电磁波的方式向空间传播。热辐射和对流以及导热有着本质的差别，它是依靠电磁波的发射和吸收来实现热量传递的，而不需要物体作为传热媒介。

黑体的辐射服从斯忒藩 (Stefan) — 波尔兹曼 (Boltzmann) 定律。

$$E_b = \sigma_0 T^4 \quad (2-31)$$

式中， $E_b$  为黑体的辐射力，单位为  $\text{W}/\text{m}^2$ ， $T$  为黑体的绝对温度，单位为  $\text{K}$ ， $\sigma_0$  为斯忒藩—波尔兹曼常数， $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

实际物体发射的辐射能，可以用辐射四次方定律的经验修正来计算，即：

$$E_b = \xi \sigma_0 T^4 \quad (2-32)$$

式中  $E$  为实际物体的辐射力,  $W/m^2$ ,  $\xi$  为物体的黑度, 其数值小于 1。

本文会涉及到两种辐射换热: 气体与围壁表面间的辐射换热和两个固体表面间的辐射换热。两种情况的辐射换热量的计算有所不同。对于气体与围壁表面间的辐射换热, 其计算公式为:

$$\Phi_{gw} = \frac{C_0}{\frac{1}{a_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \left[ \frac{\varepsilon_g}{a_g} \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] A_w \quad (2-33)$$

其中,  $\Phi_{gw}$  表示气体与围壁间的辐射换热的有效辐射量,  $C_0$  为黑体的辐射常数,  $C_0 = 5.67W/(m^2 \cdot K^4)$ ,  $T_g$  为气体温度,  $T_w$  为围壁的温度, 其单位均为 K, 而  $\varepsilon_g$  为气体的黑度,  $\varepsilon_w$  为围壁固体的黑度,  $a_g$  为气体的吸收率。

特殊的, 当气体的温度与围壁的温度相近的时候, 可以认为  $\varepsilon_g = a_g$ , 则上式化为:

$$Q_{辐} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1} \left[ \left( \frac{T_g}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_w}{100} \right)^4 \right] A \quad (2-34)$$

对于两个固体表面间辐射换热 (本文中两固体均为灰体), 其表面间辐射换热的热流量计算公式为:

$$\Phi_{12} = \varepsilon_{12} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} A_1 \quad (2-35)$$

式中,  $\varepsilon_{12} = \frac{1}{\varphi_{12} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + 1 + \varphi_{21} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$  称为辐射换热系统的系统黑度。

$\varphi_{12}$  为固体 1 对固体 2 表面间的角系数,  $\varphi_{21}$  为固体 2 对固体 1 表面间的角系数,  $\varepsilon_1$  为固体 1 的黑度,  $\varepsilon_2$  为固体 2 的黑度。角系数的定义为: 空间任意两表面辐射传热时, 1 表面发射的辐射能不会全部投射到 2 表面, 因此把 1 表面发射出的辐射总能量中投射到 2 表面的能量所占有的份数, 称为 1 表面对 2 表面的角度系数, 记为  $\varphi_{12}$ 。

通常情况下, 两固体可以有四种组成方式: 1) 两个不可自见面组成的封闭空间, 2) 一个可自见面和一个不可自见面组成的封闭空间, 3) 两个可自见面组成的封闭空间, 4) 三个不可自见面组成的封闭空间, 它们会组成不同的角系数<sup>[38]</sup>。

本文的情况是两灰体固体属于是一个可自见面和一个不可自见面组成的封闭空间。其角系数为:

$$\varphi_{12}=1 \quad (2-36)$$

$$\varphi_{21}=\frac{A_1}{A_2}$$

在实际的传热过程中往往是两种或者三种传热方式同时进行，所以必须考虑它们的综合传热效果<sup>[39]</sup>。针对外热式坩埚盐浴炉加热系统，热量的传递可以分为两个过程：炉膛的电阻丝和炉气将热量传递到坩埚的过程，以及坩埚将热量传递到盐浴的过程。前者主要是电阻丝和炉气以辐射和对流的方式将热量传给坩埚，后者则是坩埚以辐射和对流的方式将热量传递到盐浴表面，再由盐浴表面以传导传热的方式传送至盐浴的内部。因此，有必要对三种传热方式的热量传递逐一的计算。

### 2.3.2 炉膛到坩埚的热量传递的计算

本实验所采用的坩埚尺寸参数如图 2-7。

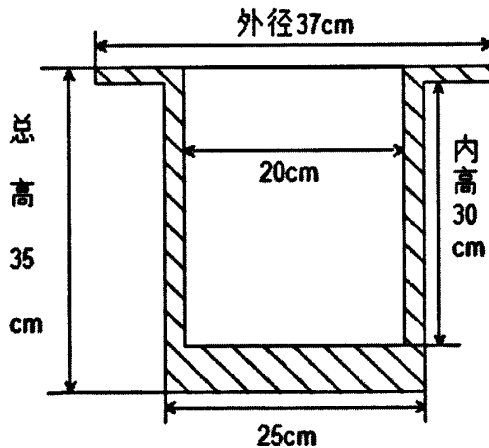


图2-7 坩埚的尺寸参数

为了方便计算，统一将炉膛的加热温度和室温分别设为：910℃和 20℃。

炉膛到坩埚的传热，包括了辐射传热和对流传热，其中辐射传热占较大的比例。因此有： $Q_1 = Q_{对1} + Q_{辐1}$  (2-37)

#### 2.3.2.1. 炉膛到坩埚的对流换热量

炉膛到坩埚的对流换热属于横掠圆柱的情况。根据对流换热的基本公式，可得： $Q_{对1} = h_{对}(T_1 - T_2) A$  (2-38)

其中为  $Q_{对1}$  炉膛到坩埚的对流换热量， $T_1$  为炉膛温度， $T_2$  为坩埚表面温度， $h_{对}$  为对流换热系数， $A$  为坩埚受热的表面积（外表面）。在这里， $T_1$  为 910℃，

$T_2$  为  $20^\circ\text{C}$ 。

求  $h$  对:

$$\text{其定性温度: } T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{910 + 20}{2} = 465^\circ\text{C} \quad (2-39)$$

查表可得: 在  $500^\circ\text{C}$  时, 空气的

$$\lambda_m = 5.74 \times 10^{-2} (\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C})$$

$$\nu_m = 79.38 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$$

坩埚的外直径为  $2.5\text{cm}$ , 则有:

$$\text{Re} = \frac{ud}{\nu} = \frac{1 \times 0.25}{79.38 \times 10^{-6}} = 3149 \quad (2-40)$$

由于此时属于流体横掠圆柱, 因此:  $Nu = c \text{Re}^n$

查表可得,  $c = 0.606, n = 0.466$

$$\text{代入可得, } Nu = c \text{Re}^n = 0.606 \times 3149^{0.466} = 25.86 \quad (2-41)$$

$$\text{则平均换热系数为: } h_{\text{对}} = \frac{Nu \lambda_m}{d} = \frac{25.86 \times 5.74 \times 10^{-2}}{0.25} = 5.93 \quad (2-42)$$

$$\text{又 } A = \pi dh = 3.14 \times 0.25 \times 0.35 = 0.27475 \text{m}^2 \quad (2-43)$$

$$\text{故, } Q_{\text{对1}} = h_{\text{对}} (T_1 - T_2) A = 5.93 \times 890 \times 0.27475 = 1450.05 \text{W} \quad (2-44)$$

### 2.3.2.2. 炉膛到坩埚的辐射换热量

$$\text{根据辐射换热, 有: } Q_{\text{辐1}} = C_{\text{导}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A \quad (2-45)$$

其中,  $Q_{\text{辐1}}$  为炉膛到坩埚的辐射换热量,  $C_{\text{导}}$  为物体的导出辐射换热系数。

$$\text{又: } C_{\text{导}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2-46)$$

$\varepsilon_1$  为坩埚的黑度, 近似的取为不锈钢的黑度,  $\varepsilon_2$  为炉膛内气体的黑度。

查表可得: 不锈钢的黑度  $\varepsilon_1 = 0.6$ , 气体的黑度取  $\varepsilon_2 = 0.48$ 。

$$C_0 = 5.67 \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$$

$$\text{故 } C_{\text{导}} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{5.67}{\frac{1}{0.6} + \frac{1}{0.48} - 1} = 2.06 \quad (2-47)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{辐1}} &= C_{\text{导}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A = 2.06 \times \left[ \left( \frac{910 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \times 0.27475 \\ &= 11043.5 \text{W} \end{aligned} \quad (2-48)$$

因此, 从炉膛到坩埚传递的总热量为:

$$Q_1 = Q_{\text{对1}} + Q_{\text{辐1}} = 1450.05 + 11043.5 = 12493.55W \quad (2-49)$$

### 2.3.3 坩埚传入盐浴的热量传递计算

从坩埚传入盐浴的过程中, 由于坩埚与盐浴相互接触, 所以热量传递包括了热辐射、热对流以及热传导三个过程。

$$\text{即 } Q_2 = Q_{\text{辐2}} + Q_{\text{对2}} + Q_{\text{传}} \quad (2-50)$$

在热对流这个过程中, 由于坩埚是将热量以对流的方式先将热量传给封闭在坩埚内空气, 然后空气再以热辐射和热对流的方式传给盐浴的表面, 因此热对流过程中传递的热量应该以封闭的空气以热辐射和热对流方式传给盐浴表面的热量为准。

#### 2.3.3.1. 坩埚传入盐浴的辐射换热量

坩埚的热量传入盐浴的过程属于是一可自见面和一不可自见面的辐射。因而有:

$$\varphi_{12} = 1 \quad (2-51)$$

$$\varphi_{21} = \frac{A_1}{A_2}$$

查表可得: 盐浴表面的黑度为 0.81, 坩埚的黑度为 0.6。所以有:

$$A_1 = \pi R^2 = 3.14 \times 0.1^2 = 0.0314m^2 \quad (2-52)$$

$$A_2 = \pi dh = 3.14 \times 0.2 \times 0.3 = 0.1884m^2 \quad (2-53)$$

$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\varphi_{12} \left( \frac{1}{\varepsilon_1} - 1 \right) + 1 + \varphi_{21} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)} = \frac{1}{1 \times \left( \frac{1}{0.81} - 1 \right) + 1 + \left( \frac{1}{0.6} - 1 \right) \times \frac{0.0314}{0.1884}} \quad (2-54)$$

$$= 0.743$$

$$Q_{\text{辐2}} = \varepsilon_{12} C_0 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_{12} A_1 = \frac{5.67}{1.35} \left[ \left( \frac{910 + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{20 + 273}{100} \right)^4 \right] \times 0.0314 \quad (2-55)$$

$$= 2573.24W$$

#### 2.3.3.2. 坩埚传入盐浴的对流换热量

炉膛到坩埚的对流换热属于管内流动的情况。根据对流换热的基本公式, 可得:  $Q_{\text{对2}} = h_{\text{对2}} (T_1 - T_2) A_2$



其中  $Q_{对2}$  为炉膛到坩埚的对流换热量,  $T_1$  为炉膛温度,  $T_2$  为坩埚表面温度,  $h_{对2}$  为对流换热系数,  $A_2$  为坩埚受热的表面积 (内表面)。  $T_1$  为  $910^\circ\text{C}$ ,  $T_2$  为  $20^\circ\text{C}$ 。

但是,  $Q_{对2}$  表示的只是坩埚对传热到盐浴上部分空气的热量, 而不是坩埚传入盐浴的真正热量。因此, 必须要求出这部分空气传递到盐浴的热量。此时, 又包括了两种传热: 坩埚内空气对盐浴的热对流和热辐射。

坩埚内空气对盐浴的对流换热量的计算:

由于是空气掠过盐浴的表面, 因此属于外掠平板的情况。根据对流换热的基本公式, 可得:

$$Q_{对3} = h_{对3} (T_1 - T_2) A_3 \quad (2-56)$$

其中  $Q_{对3}$  为炉膛到坩埚的对流换热量,  $h_{对3}$  为对流换热系数,  $A_3$  为盐浴的表面积。

$$\text{其定性温度: } T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} = \frac{910 + 20}{2} = 465^\circ\text{C} \quad (2-57)$$

查表可得: 在  $500^\circ\text{C}$  时, 空气的

$$\lambda_m = 5.74 \times 10^{-2} (\text{W} / \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

$$\nu_m = 79.38 \times 10^{-6} \text{m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Pr} = 0.687$$

又有:

$$\text{Re} = \frac{ud}{\nu} = \frac{1 \times 0.2}{79.38 \times 10^{-6}} = 2519 \quad (2-58)$$

$$\text{由于此时属于流体的外掠平板, 因此有: } N_u = 0.664 \text{Re}^{0.5} \text{Pr}^{1/3} \quad (2-59)$$

$$\text{代入可得, } N_u = 29.427$$

则平均换热系数为:

$$h_{对3} = \frac{N_u \lambda_m}{d} = \frac{29.427 \times 5.74 \times 10^{-2}}{0.2} = 8.4 \quad (2-60)$$

$$A_3 = \pi r^2 = 3.14 \times 0.1^2 = 0.0314 \text{m}^2 \quad (2-61)$$

$$Q_{对3} = h_{对3} (T_1 - T_2) A_3 = 8.4 \times 890 \times 0.0314 = 234.7 \text{W} \quad (2-62)$$

坩埚内空气对盐浴的辐射换热量的计算:

$$C_{导} = \frac{C_0}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} = \frac{5.67}{\frac{1}{0.48} + \frac{1}{0.81} - 1} = 2.45 \quad (2-63)$$

$$Q_{辐3} = C_{导} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] A = 1500.98 \text{W} \quad (2-64)$$

$$\text{所以有: } Q_{\text{对2}} = Q_{\text{对3}} + Q_{\text{辐射}} = 234.7 + 1500.98 = 1735.68 \text{ W} \quad (2-65)$$

### 2.3.3.3. 坩埚传入盐浴的导热量

坩埚的热量传入盐浴的属于是不稳定导热，并且是在第三类边界条件下的一维非稳态导热问题，其周围介质的温度为常数。

由于坩埚的内径为 0.2m，故其盐浴的半厚  $\delta=0.1\text{m}$ ，于是在表面上有：

$$\frac{x}{\delta} = 1 \quad (2-66)$$

经过查表和比较，取盐浴的平均换热系数  $h=8.7[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$ ，盐浴的热导率为  $\lambda=0.98[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$ ，热扩散系数为  $a=0.23 \times 10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ ，则毕渥数 Bi 为：

$$Bi = \frac{h\delta}{\lambda} = \frac{8.7 \times 0.1}{0.98} = 0.89 \quad (2-67)$$

查表可得，在表面上  $\theta/\theta_m = \theta_w/\theta_m = 0.65$ ，（此处  $\theta_w$  为表面上的过余温度），又根据表面上的无量纲过余温度  $\theta_w/\theta_0$  为：

$$\frac{\theta_w}{\theta_0} = \frac{T_w - T_f}{T_0 - T_f} = \frac{910 - 960}{20 - 960} = 0.053 \quad (2-68)$$

平壁中心的无量纲过余温度  $\theta_m/\theta_0$  即可确定如下，

$$\frac{\theta_m}{\theta_0} = \frac{\theta_w}{\theta_0} \frac{\theta_m}{\theta_w} = \frac{0.053}{0.65} = 0.0815 \quad (2-69)$$

已知了  $\theta_m/\theta_0$  以及毕渥数 Bi 的数值，查表可得  $F_0=4.03$ 。

$$\text{由此可以算出, } Bi^2 F_0 = \frac{h^2 a t}{\lambda^2} = 0.89^2 \times 4.03 = 3.19 \quad (2-70)$$

查表，可以得到  $Q/Q_0 = 0.98$ ，再从已知条件可以得到：

$$\rho c = \lambda/a = 0.98/0.23 \times 10^{-5} = 4.26 \times 10^5 \quad (2-71)$$

于是每平方米截面的累积热量为：

$$Q = 0.98 Q_0 = 0.98 \times 2 \delta \rho c \theta = 7.84 \times 10^7 \text{ (J)} \quad (2-72)$$

因而，坩埚传入盐浴的导热量为：

$$Q_{\text{传导}} = QA = 7.84 \times 10^7 \times 0.1884 = 1.477 \times 10^7 \text{ J} \quad (2-73)$$

若要把单位换成 W，而和之前的计算单位相符，则时间 t：

$$t = 1.2 \frac{\delta^2}{a} = 1.2 \times \frac{0.1^2}{0.23 \times 10^{-5}} = 5217 \text{ S} \quad (2-74)$$

$$Q_{\text{传}} = \frac{Q_{\text{传导}}}{t} = \frac{1.477 \times 10^7}{5217} = 2831 \text{ W} \quad (2-75)$$

因此,从坩埚到盐浴传递的总热量为:

$$Q_2 = Q_{\text{辐2}} + Q_{\text{对2}} + Q_{\text{传}} = 2573.24 + 1735.68 + 2831 = 7139.92W \quad (2-76)$$

## 2.4 温度控制系统的热量传递函数的求取

### 2.4.1 传递函数概念

在对系统进行控制的过程中,有时需要计算出控制系统的微分方程。它是在一定的时间域内描述系统动态性能的数学模型。在给定了外部作用和初始条件下,系统输出响应的全部时间信息可以通过求解微分方程而得到。计算系统微分方程的方法虽然准确直观,但是如果系统的某个参数发生变化、或者系统的结构被改变时,微分方程就要改变,因此不利于对系统的分析和设计。

因而本文使用传递函数对温度控制系统进行评估。传递函数是在微分方程进行了拉普拉斯变换的基础上得到的复数域中的数学模型。它不仅可以表征系统的动态特性,而且可以用来研究系统的参数或者结构变化对系统的性能影响。

传递函数是在初始状态为零的条件下,线性定常系统输出量的拉普拉斯变换与输入量的拉普拉斯变换之比<sup>[40]</sup>。

线性定常系统的微分方程一般为:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dc(t)}{dt} + a_0 c(t) = \\ b_m \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dr(t)}{dt} + b_0 r(t) \end{aligned} \quad (2-77)$$

式中, $c(t)$ 为输出量, $r(t)$ 为输入量, $a_n, a_{n-1}, \dots, a_0$ 以及 $b_m, b_{m-1}, \dots, b_0$ 均为有系统结构、参数决定的常系数。

在初始状态为零的条件下,对上式两端进行拉普拉斯变化,可得到相应的代数方程式为:

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0) C(s) = (b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0) R(s) \quad (2-78)$$

故传递函数系统的为:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = G(s) \quad (2-79)$$

传递函数是在零初始条件下定义的。这其中包括两方面的含义:1)输入作

用是在  $t=0$  以后才作用与系统的，所以系统的输入量、其各阶导数在  $t \leq 0$  时均为零；2) 输入作用与系统之前，系统处于稳定的工作状态，即系统输出量及其各阶导数在  $t \leq 0$  时的值也为零<sup>[41]</sup>。

值得一提的是，本文主要是计算热量的传递函数，与系统的传递函数略有不同。由于盐浴炉热量传递的复杂性和难以确定性，有时可以将传递函数直接表示成函数方程式，而不用表示成输入输出之比。

## 2.4.2 温度控制系统的热量传递函数

温度控制系统的热量传递框顺序为：热量首先由电源电流通过电阻丝加热，使得炉膛的温度上升，热量再传入坩埚，使坩埚的温度上升，再由坩埚传热到盐浴，同时盐浴的温度对电源电流又有一定的反馈作用，这样整个过程构成闭环反馈回路。

### 2.4.2.1. 电源到炉膛的传递函数表达式

#### (1) 盐浴炉实际参数

电源的额定电压为 380V。本文采用的坩埚电阻炉是由武汉神工电炉有限公司生产的，其基本参数如表 2-3：

表 2-3 坩埚电阻炉的参数

型号	额定电压	功率	工作温度	重量	工作室尺寸	外型尺寸
GR2-17	380V	17 KW	1000℃	300KG	Φ300×450mm	1100×1050 ×800mm

#### (2) 电源到炉膛的传递函数

热量从电源传递到炉膛的框图显示如图2-8所示。其传递函数之前已经求过，为：

$$G(S) = \frac{K}{1+TS} e^{-\tau s} = \frac{814.5}{1+11.5S} e^{-0.27S} \quad (2-80)$$

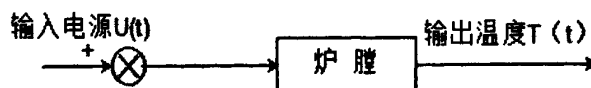


图2-8 电源到炉膛的热量传递框图

### 2.4.2.2. 炉膛到坩埚和盐浴的热量传递函数

电源将一部分热量传递到炉膛中去后，炉膛又将热量传递到坩埚、盐浴以及被加工的工件中。由于被加工的工件的材料未定、各项参数未定，为了方便计算，将系统进行一定程度的简化：在计算的时候，将坩埚和盐浴看做一个整体来求炉膛传递到坩埚和盐浴的热量传递函数。热量传递框图见图 2-9。

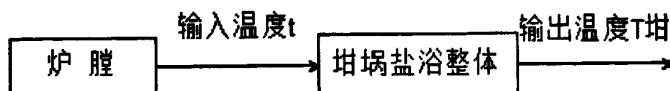


图2-9 炉膛到坩埚和盐浴的热量传递框图

对于整个系统列热量平衡关系有：在任意时间内，有：

电源的发热量  $Q_{\text{电源}}$ —系统总散热量  $Q_{\text{散}} =$  炉膛升温  $\Delta t_{\text{炉}}$  的吸热量  $Q_{\text{炉}}$ +炉膛传给坩埚和盐浴的热量  $Q_{\text{吸}}$

由于在热量计算过程中所取的很多参数会因为温度的不同而有所不同，因此本设计分别计算在  $200^{\circ}\text{C}$ 、 $400^{\circ}\text{C}$ 、 $600^{\circ}\text{C}$ 、 $800^{\circ}\text{C}$  和  $1000^{\circ}\text{C}$ ，整个系统的热量平衡关系。然后用 Origin 软件进行拟合。

1、当炉膛温度  $T_{\text{炉}}$  小于或者等于  $200^{\circ}\text{C}$  时，有：

(1) 求系统总的散热量  $Q_{\text{散}}$ ：系统总的散热量  $Q_{\text{散}} =$  炉膛的散热量  $Q_{\text{散1}}$ +盐浴面辐射热损失  $Q_{\text{散2}}$ 。

炉膛的综合散热过程包括炉气以对流和辐射的方式传给内壁，内壁又以传导的方式传导外壁，和外壁以对流及辐射的方式传给周围的空气这三个过程。设炉膛内空气温度为  $T_{\text{炉}}$ ，炉外空气的温度为  $T_0$ ，炉壁厚度为  $\delta$ ，热导率为  $\lambda$  则有：

$$q = \frac{T_{\text{炉}} - T_0}{\frac{1}{h_{\Sigma_1}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{\Sigma_2}}} \quad (\text{W}/\text{m}^2) \quad (2-81)$$

式中， $q$  ——炉气通过炉墙向外界空气中的散热热流密度 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )；

$h_{\Sigma_1}$  ——炉气对炉墙内表面的综合换热系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ];

$h_{\Sigma_2}$  ——炉墙外表面对空气的综合换热系数 [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ]

本实验使用的炉壁厚度  $\delta=0.3\text{m}$ ，炉壁的保温层是由耐火砖构成，它的热导率  $\lambda$  为  $0.896 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ， $h_{\Sigma_1}$   $h_{\Sigma_2}$  可以查表求得分别为  $7.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$  和  $10.09 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ ，室温取  $20^{\circ}\text{C}$ 。

$$\text{则: } q = \frac{T_{\text{炉}} - T_0}{\frac{1}{h_{\Sigma_1}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{\Sigma_2}}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{\frac{1}{7.09} + \frac{0.3}{0.896} + \frac{1}{10.09}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.574} \quad (2-82)$$

$$Q_{\text{散1}} = qAt \quad (2-83)$$

其中 A 为炉壁的表面积, t 为加热时间。

$$\begin{aligned} Q_{\text{散1}} &= qAt = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.574} \times \pi \times 0.45 \times 0.65t \\ &= 1.6(T_{\text{炉}} - 20)t \end{aligned} \quad (2-84)$$

对于盐浴面辐射热损失  $Q_{\text{散2}} = Aq_{\text{损}}$ ,

式中, A —— 盐浴面对外辐射面积

$q_{\text{损}}$  —— 盐浴面单位面积热辐射量 ( $KW/m^2$ )

查表, 可得  $200^\circ\text{C}$  时, 盐浴液面的热辐射损失  $q_{\text{损}} = 2.86 (KW/m^2)$

$$A = \pi r^2 = 3.14 \times 0.1^2 = 0.0314 m^2 \quad (2-85)$$

$$Q_{\text{散2}} = 89.8 W \quad (2-86)$$

(2) 炉膛升温  $\Delta T_{\text{炉}}$  的吸热量  $Q_{\text{炉}}$

$$Q_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m (T_{\text{炉}} - 20) \quad (2-87)$$

炉膛里主要为空气, 因此  $C_{\text{炉}}$  和  $m$  可以近似的认为是空气的比热和质量。

查表在  $200^\circ\text{C}$  时,  $\rho = 0.746 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_{\text{炉}} = 1.026 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

炉膛内气体的体积为:

$$\begin{aligned} V_{\text{炉}} - V_{\text{坩埚}} &= \pi r_{\text{炉}}^2 h_{\text{炉}} - \pi r_{\text{坩埚}}^2 h_{\text{坩埚}} \\ &= \pi \left(\frac{0.45}{2}\right)^2 \times 0.65 - \pi \left(\frac{0.25}{2}\right)^2 \times 0.35 \\ &= 0.08635 m^3 \end{aligned} \quad (2-88)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{炉}} &= C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = 1.026 \times 0.746 \times 0.08635 (T_{\text{炉}} - 20) \\ &= 66 (T_{\text{炉}} - 20) J \end{aligned} \quad (2-89)$$

(3) 炉膛传给坩埚和盐浴的热量  $Q_{\text{吸}}$

炉膛传给坩埚和盐浴的主要是通过热对流和热辐射进行的,

即  $Q_{\text{吸}} = Q_{\text{对1}} + Q_{\text{辐1}}$ 。

计算可得: 在  $200^\circ\text{C}$ ,  $h_{\text{对}} = 6.69 [W/(m^2 \cdot ^\circ\text{C})]$

$$Q_{\text{对1}} = h_{\text{对}} (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) A = 6.69 \times (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) \times 0.27475 = 1.84 (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) \quad (2-90)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{辐1}} &= C_{\text{导}} \left[ \left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4 \right] A = 2.06 \times \left[ \left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4 \right] \times 0.27475 \\ &= 0.57 \left[ \left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4 \right] \end{aligned} \quad (2-91)$$

综合上述计算, 在炉膛温度小于或等于 200℃时, 有以下函数关系式:

$$17000t - 1.6(T_{\text{炉}} - 20)t - 89.8t = 66(T_{\text{炉}} - 20) + 1.84(T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}})t + 0.57\left[\left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4\right]t \quad (2-92)$$

2、当炉膛温度  $T_{\text{炉}}$  小于或者等于 400℃时, 有:

(1) 求系统总的散热量  $Q_{\text{散}}$ :

炉壁的热导率  $\lambda$  为 1.012 [W/(m<sup>2</sup>·°C)],  $h_{\Sigma_1}$   $h_{\Sigma_2}$  可以查表求得分别为 23.7 [W/(m<sup>2</sup>·°C)] 和 11.04 [W/(m<sup>2</sup>·°C)], 室温取 20℃。

$$\text{则: } q = \frac{T_{\text{炉}} - T_0}{\frac{1}{h_{\Sigma_1}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{\Sigma_2}}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{\frac{1}{23.7} + \frac{0.3}{1.012} + \frac{1}{11.04}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.432} \quad (2-93)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{散1}} &= qAt = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.432} \times \pi \times 0.45 \times 0.65t \\ &= 2.12(T_{\text{炉}} - 20)t \end{aligned} \quad (2-94)$$

对于盐浴面辐射热损失,  $Q_{\text{散2}} = Aq_{\text{损}}$

查表, 可得 400℃时,  $q_{\text{损}} = 11.6$  (KW/m<sup>2</sup>)

$$Q_{\text{散2}} = Aq_{\text{损}} = 0.0314 \times 11.6 \times 10^3 = 364.24W \quad (2-95)$$

(2) 炉膛升温  $\Delta T_{\text{炉}}$  的吸热量  $Q_{\text{炉}}$

$$Q_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m (T_{\text{炉}} - 20) \quad (2-96)$$

查表在 400℃时,  $\rho = 0.524 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_{\text{炉}} = 1.068 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{°C})$ 。

$$\begin{aligned} Q_{\text{炉}} &= C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = 1.068 \times 0.524 \times 0.08635 (T_{\text{炉}} - 20) \\ &= 48.32 (T_{\text{炉}} - 20) J \end{aligned} \quad (2-97)$$

(3) 炉膛传给坩埚和盐浴的热量  $Q_{\text{吸}}$

由前面的计算可得, 在 400℃,  $h_{\text{对}} = 6.41$  [W/(m<sup>2</sup>·°C)]

$$Q_{\text{对1}} = h_{\text{对}} (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) A = 6.41 \times (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) \times 0.27475 = 1.76 (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) \quad (2-98)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{辐1}} &= C_{\text{导}} \left[ \left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4 \right] A = 2.06 \times \left[ \left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4 \right] \times 0.27475 \\ &= 0.57 \left[ \left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4 \right] \end{aligned} \quad (2-99)$$

综合上述计算, 在炉膛温度小于或等于 400℃时, 有以下函数关系式:

$$17000t - 2.12(T_{\text{炉}} - 20)t - 364.24t = 48.32(T_{\text{炉}} - 20) + 1.76(T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}})t + 0.57\left[\left(\frac{T_{\text{炉}}}{100}\right)^4 - \left(\frac{T_{\text{坩}}}{100}\right)^4\right]t \quad (2-100)$$

3、当炉膛温度  $T_{\text{炉}}$  小于或者等于  $600^{\circ}\text{C}$  时，有：

(1) 求系统总的散热量  $Q_{\text{散}}$ ：

炉壁的热导率  $\lambda$  为  $1.128 [W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$ ， $h_{\Sigma_1}$   $h_{\Sigma_2}$  可以查表求得分别为  $49.08 [W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$  和  $11.81 [W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$ ，室温取  $20^{\circ}\text{C}$ 。

$$q = \frac{T_{\text{炉}} - T_0}{\frac{1}{h_{\Sigma_1}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{\Sigma_2}}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{\frac{1}{49.08} + \frac{0.3}{1.128} + \frac{1}{11.81}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.365} \quad (2-101)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{散1}} &= qAt = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.365} \times \pi \times 0.45 \times 0.65t \\ &= 2.5(T_{\text{炉}} - 20)t \end{aligned} \quad (2-102)$$

对于盐浴面辐射热损失， $Q_{\text{散2}} = Aq_{\text{损}}$

查表，可得  $400^{\circ}\text{C}$  时， $q_{\text{损}} = 33.2 (KW/m^2)$

$$Q_{\text{散2}} = Aq_{\text{损}} = 0.0314 \times 33.2 \times 10^3 = 1042.48W \quad (2-103)$$

(2) 炉膛升温  $\Delta t_{\text{炉}}$  的吸热量  $Q_{\text{炉}}$

$$Q_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m (T_{\text{炉}} - 20) \quad (2-104)$$

查表在  $600^{\circ}\text{C}$  时， $\rho = 0.404 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ， $C_{\text{炉}} = 1.114 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

$$\begin{aligned} Q_{\text{炉}} &= C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = 1.114 \times 0.404 \times 0.08635 (T_{\text{炉}} - 20) \\ &= 38.8 (T_{\text{炉}} - 20)J \end{aligned} \quad (2-105)$$

(3) 炉膛传给坩埚和盐浴的热量  $Q_{\text{吸}}$

由前面的计算可得，在  $600^{\circ}\text{C}$ ， $h_{\text{对}} = 6.0 [W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$

$$\begin{aligned} Q_{\text{辐1}} &= C_{\text{导}} \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] A = 2.06 \times \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] \times 0.27475 \\ &= 0.57 \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (2-106)$$

综合上述计算，在炉膛温度小于或等于  $600^{\circ}\text{C}$  时，有以下函数关系式：

$$17000t - 2.5(T_{\text{炉}} - 20)t - 1042.48t = 38.8 (T_{\text{炉}} - 20) + 1.64(T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) t + 0.57 \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] t \quad (2-107)$$

4、当炉膛温度  $T_{\text{炉}}$  小于或者等于  $800^{\circ}\text{C}$  时，有：

(1) 求系统总的散热量  $Q_{\text{散}}$ ：

炉壁的热导率  $\lambda$  为  $1.244 [W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$ ， $h_{\Sigma_1}$   $h_{\Sigma_2}$  可以查表求得分别为  $94.78 [W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$  和  $12.50 [W/(m^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$ ，室温取  $20^{\circ}\text{C}$ 。



$$\text{则 } q = \frac{T_{\text{炉}} - T_0}{\frac{1}{h_{\Sigma_1}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{\Sigma_2}}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{\frac{1}{94.78} + \frac{0.3}{1.244} + \frac{1}{12.5}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.331} \quad (2-108)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{散1}} &= qAt = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.331} \times \pi \times 0.45 \times 0.65t \\ &= 2.77(T_{\text{炉}} - 20)t \end{aligned} \quad (2-109)$$

对于盐浴面辐射热损失,  $Q_{\text{散2}} = Aq_{\text{损}}$

查表, 可得  $800^\circ\text{C}$  时,  $q_{\text{损}} = 76.8 \text{ (KW/m}^2\text{)}$

$$Q_{\text{散2}} = Aq_{\text{损}} = 0.0314 \times 76.8 \times 10^3 = 2411.52\text{W} \quad (2-110)$$

(2) 炉膛升温  $\Delta T_{\text{炉}}$  的吸热量  $Q_{\text{炉}}$

$$Q_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = C_{\text{炉}} m (T_{\text{炉}} - 20) \quad (2-111)$$

查表在  $800^\circ\text{C}$  时,  $\rho = 0.329 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_{\text{炉}} = 1.156 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ 。

$$\begin{aligned} Q_{\text{炉}} &= C_{\text{炉}} m \Delta T_{\text{炉}} = 1.156 \times 0.329 \times 0.08635 (T_{\text{炉}} - 20) \\ &= 32.8 (T_{\text{炉}} - 20) \text{J} \end{aligned} \quad (2-112)$$

(3) 炉膛传给坩埚和盐浴的热量  $Q_{\text{吸}}$

由前面的计算可得, 在  $800^\circ\text{C}$ ,  $h_{\text{对}} = 5.86 \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$

$$Q_{\text{对1}} = h_{\text{对}} (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) A = 5.86 \times (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) \times 0.27475 = 1.61 (T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) \quad (2-113)$$

$$\begin{aligned} Q_{\text{辐1}} &= C_{\text{导}} \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] A = 2.06 \times \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] \times 0.27475 \\ &= 0.57 \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (2-114)$$

综合上述计算, 在炉膛温度小于或等于  $800^\circ\text{C}$  时, 有以下函数关系式:

$$17000t - 2.77(T_{\text{炉}} - 20)t - 2411.52t = 32.8 (T_{\text{炉}} - 20) + 1.61(T_{\text{炉}} - T_{\text{坩}}) t + 0.57 \left[ \left( \frac{T_{\text{炉}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{坩}}}{100} \right)^4 \right] t \quad (2-115)$$

5、当炉膛温度  $T_{\text{炉}}$  小于或者等于  $1000^\circ\text{C}$  时, 有:

(1) 求系统总的散热量  $Q_{\text{散}}$ :

炉壁的热导率  $\lambda$  为  $1.36 \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ ,  $h_{\Sigma_1}$ ,  $h_{\Sigma_2}$  可以查表求得分别为  $149.03 \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$  和  $12.83 \text{ [W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})]$ , 室温取  $20^\circ\text{C}$ 。

$$\text{则: } q = \frac{T_{\text{炉}} - T_0}{\frac{1}{h_{\Sigma_1}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{h_{\Sigma_2}}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{\frac{1}{149.03} + \frac{0.3}{1.36} + \frac{1}{12.83}} = \frac{T_{\text{炉}} - 20}{0.305} \quad (2-116)$$

$$Q_{散1} = qAt = \frac{T_{炉} - 20}{0.305} \times \pi \times 0.45 \times 0.65t = 3.0(T_{炉} - 20)t \quad (2-117)$$

对于盐浴面辐射热损失,  $Q_{散2} = Aq_{损}$

查表, 可得  $1000^{\circ}\text{C}$  时,  $q_{损} = 150 (\text{KW}/\text{m}^2)$

$$Q_{散2} = Aq_{损} = 0.0314 \times 150 \times 10^3 = 4710\text{W} \quad (2-118)$$

(2) 炉膛升温  $\Delta t_{炉}$  的吸热量  $Q_{炉}$

$$Q_{炉} = C_{炉} m \Delta T_{炉} = C_{炉} m (T_{炉} - 20) \quad (2-119)$$

查表在  $1000^{\circ}\text{C}$  时,  $\rho = 0.277 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $C_{炉} = 1.185 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ 。

$$\begin{aligned} Q_{炉} &= C_{炉} m \Delta T_{炉} = 1.185 \times 0.277 \times 0.08635 (T_{炉} - 20) \\ &= 28.3 (T_{炉} - 20) \text{J} \end{aligned} \quad (2-120)$$

(3) 炉膛传给坩埚和盐浴的热量  $Q_{吸}$

由前面的计算可得, 在  $1000^{\circ}\text{C}$ ,  $h_{对} = 5.77 [\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})]$

$$Q_{对1} = h_{对} (T_{炉} - T_{坩}) A = 5.77 \times (T_{炉} - T_{坩}) \times 0.27475 = 1.58 (T_{炉} - T_{坩}) \quad (2-121)$$

$$\begin{aligned} Q_{辐1} &= C_{导} \left[ \left( \frac{T_{炉}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{坩}}{100} \right)^4 \right] A = 2.06 \times \left[ \left( \frac{T_{炉}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{坩}}{100} \right)^4 \right] \times 0.27475 \\ &= 0.57 \left[ \left( \frac{T_{炉}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{坩}}{100} \right)^4 \right] \end{aligned} \quad (2-122)$$

综合上述计算, 在炉膛温度小于或等于  $1000^{\circ}\text{C}$  时, 有以下函数关系式:

$$17000t - 3.0(T_{炉} - 20)t - 4710t = 28.3 (T_{炉} - 20) + 1.58(T_{炉} - T_{坩}) t + 0.57 \left[ \left( \frac{T_{炉}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{坩}}{100} \right)^4 \right] t \quad (2-123)$$

## 2.5 本章小结

本章主要介绍了双热电偶外热式坩埚盐浴的温度自动控制系统的 PID 算法和参数的整定。此外, 计算了整个加热过程的传递, 更重要的是导出了系统的热量传递函数, 为温度自动控制系统提供了直观的输入—输出关系和系统输出响应的全部信息。

## 第3章. 温度控制系统硬件设计

### 3.1 系统概述

加热电阻炉在冶金和化工等行业的应用甚广，因此温度的测量和控制科学研究和实际生产中有着重要的意义。而传统的温度控制系统的特点是：控制精度低、调节时间较长、具有超调性<sup>[42]</sup>。盐浴炉的温度控制属于纯滞后环节，有非线性、纯滞后以及大惯性的特点。本系统以单片机为核心、以一些较先进的元件为辅，设计了一套控制系统，控制精度高、超调性小、电路简单，对提高盐浴炉的加热效率、表面处理工艺的技术进步有重要的意义。本温度控制系统应具备的功能和主要技术指标有：

- (1) 能实现给定的工艺温度曲线，温度控制范围为 0-1200℃
- (2) 响应速度快，能迅速跟踪给定的温度变化率，控制精度为 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，超调量： $<1\%$
- (3) 能对生产过程参数（如温度）的自动记录和显示。

从上述功能分析中可以看出，该系统主要要完成炉温和盐浴温度的自动检测和温度控制，其他功能，诸如超温报警等可以根据需要增减和修改。

#### 3.1.1 温度控制系统的硬件结构

通过上述的描述和对盐浴炉工作状况的分析，本实验在设计炉温控制中使用了直接数字控制系统 DDC (Direct Digital Control)，对于 DDC 系统如下所述<sup>[43]</sup>：

温度控制系统的核心思想选用了主从分布式，“主从”是表示实际温度的采集由上位机（PC 微型计算机）和下位机（单片机）两部分共同完成。系统的描述如下：控制系统工作时，温度的采集是以 RS-232 串行通讯为标准通过 PC 计算机运算和发出指令控制单片机的操作指令来实现的。温度测量、温度数值的显示、对各点的温度控制这一系列的过程可以由单片机单独工作完成。当然温

度数据也可以通过串行通讯输入到 PC 计算机中进行数据处理,并由液晶显示器显示。这两种温度传感的方法都能实现温度的准确测量。

单片机由于自身的优点可以作为主控制部分,实验中由一台上位机(PC 微型计算机)和下位机(单片机)进行数据的采集和温度处理,组成两级分布式测控系统,由两点温度测量的巡回检测系统来实现温度控制。本实验采用的单片机为 AT89C52 八位单片机,它有着以下的一些优点:由于单片机软件编程的自由程度很大,可以通过编程的方法来实现不同方式的逻辑控制和算术算法;单片机的体积小,可以简单快捷的实现硬件,同时硬件的安装方便。这些优点决定了它可以对温度的数字的信号进行单独采集,同时实现与 PC 机的通信。另外 AT89C52 单片机在工业控制和实际生产中也有着广泛的应用,相关的外围功能电路和编程技术发展的都很成熟<sup>[44]</sup>。

温度传感器采用的是 K 型热电偶,并采用高精度的集成芯片 MAX6675 作为热电偶的模拟信号向数字信号转换的工具,它具有精度高、不需要外围的电路、成本低以及 I/O 接线简单等优点。而传统的温度检测电路精度低、电路庞大复杂并且转换的环节多。

系统的工作过程为:单片机通过温度传感器 K 型热电偶对炉膛温度和盐浴温度进行巡回的检测,经集成芯片 MAX6675 转换为数字信号后输入单片机。单片机根据预先设定的控制规律进行处理和运算并做出控制决策,然后发出控制信号直接控制可控硅的导通时间,通过控制炉温来调节盐浴温度。盐浴炉温度控制系统的原理图如图 3-1。

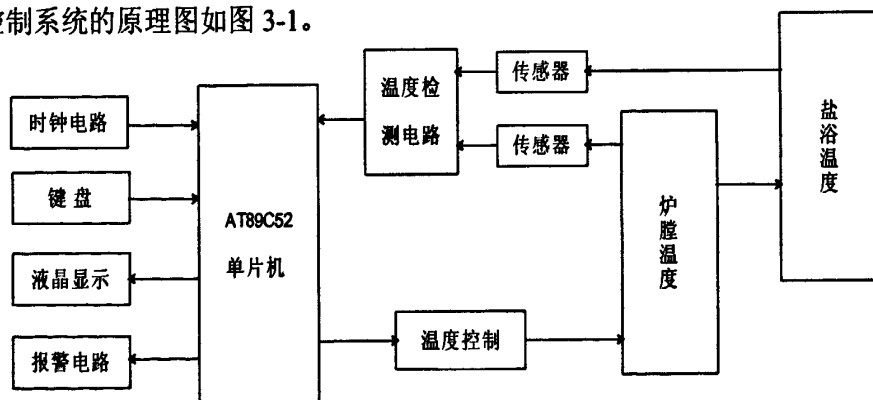


图3-1 盐浴炉温度控制系统的原理图

(1) 单片机 AT89C52 是整个控制系统的核心。在单片机中运行各项程序,并实现 PID 控制算法。此外,由它来控制 MAX6675 的温度模拟信号—数字信号转换、键盘和液晶显示、报警电路、时钟电路和控制量输出等。

(2) 时钟电路可以准确的显示升温时间和恒温时间,为系统提供准备计时。

它可以用来直观的衡量控制系统是否在预期的时间里达到了预期温度。

- (3) 温度控制系统可以通过键盘来设定温度及其他需要的参数。
- (4) 液晶显示可以用来显示时间、温度等信息。
- (5) 报警电路是当炉膛温度或盐浴温度超过设定温度时用来提醒用户的。

### 3.1.2 温度控制系统的软件模块

温度控制系统的软件用来辅助系统硬件完成各个模块的功能，主要可以分为以下几个模块：

- (1) PID 控制模块——是系统的核心模块，用来调节炉膛温度从而调节盐浴温度。
- (2) 时钟模块——用来进行时钟的读写。
- (3) 显示模块——主要用来显示温度和工作时间，也可以用来显示其他操作信息。
- (4) 中断模块——包括按键识别和键盘扫描等。
- (5) 串口通讯程序——单片机与 PC 机串口通讯程序，用来传递上位机和下位机的信息

## 3.2 温度控制系统硬件电路设计

本文主要设计了以下几个电路模块：电源以及看门狗电路，键盘显示电路，温度检测电路，温度控制电路，串口通讯电路，时钟电路。下面对电路分模块进行说明。

### 3.2.1 电源电路和看门狗电路

#### 3.2.1.1. 电源电路

电源电路是提供给用电设备和电力供应的电源部分<sup>[45]</sup>。因为单片机工作电源为+5V，且底层电路功耗很小。采用 7805 三端稳压片即可满足要求。7805 是三端稳压集成电路，有三条引脚用来输出，分别是：接地端、输入端以及输出端。具体电源电路图如图 3-2：

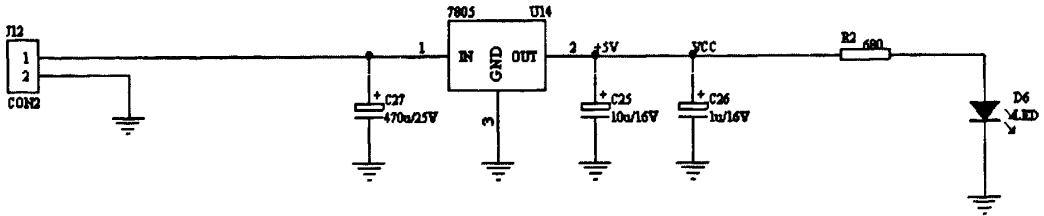


图 3-2 电源电路

### 3.2.1.2. 看门狗电路

嵌入式控制系统在运行时可能会导致整个系统瘫痪，这是因为它在运行时可能会产生系统误差、同时也容易受到外部各种环境的干扰，程序有可能会出现“跑飞”。因此在设计时应该尽量避免这一现象的发生，尤其是对整体系统稳定性要求较高的温控设计的场合往往要引入看门狗 (watchdog) 电路。看门狗电路在温控系统中的主要作用就是当系统在“跑飞”时而进入死循环的状态下，可以让系统恢复正常的运行。为实验中的逻辑系统和多种微处理器提供复位信号的看门狗电路型号为 NE56604，在系统运行时可以定时查询单片机的工作状态，当电能供应不平衡或电源出现问题的情况下，可以产生精确的复位信号以保证系统正常运行<sup>[46]</sup>。

NE56604的门限电平为4.2V，看门狗的监控周期为100mS（典型值）。电路图如图3-3。

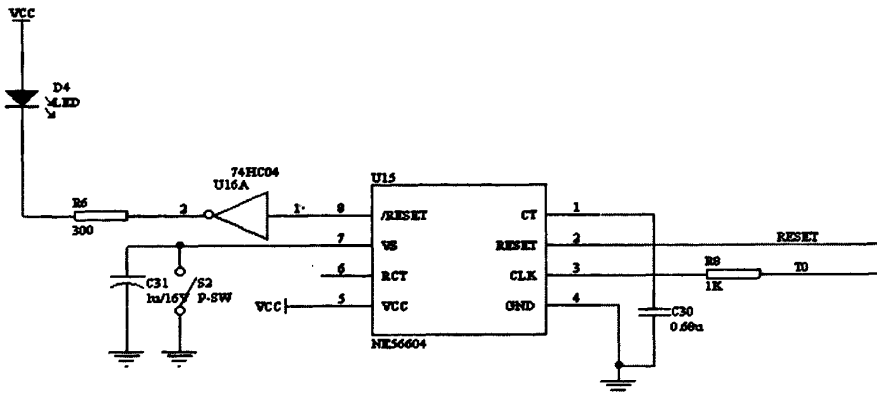


图 3-3 看门狗电路

### 3.2.2 温度控制电路

温度控制电路是非常重要的一个电路模块，其核心元件是单片机 AT89C52。

当热电偶采集的模拟信号转换为数字信号，并输入到单片机 AT89C52 中时，单片机经过处理和计算，发出控制指令。温度控制电路通过可控硅调压来控制加热功率的大小，采用过零触发方式。只有当加载了控制信号并且负载电源电压过零时，可控硅才能导通。采用 MOC3021 的光点隔离可控硅触发器，可用来驱动可控硅<sup>[47]</sup>。

### 3.2.2.1. 单片机 AT89C52

自从 20 世纪 70 年代，大规模的集成电路发展起来后，微型计算机在工业上的应用越来越广泛，呈现明显的体积小、类型多的趋势。自 Inter 公司推出 MCS-51 系列的微处理器后，许多厂家、电气公司竞相使用，并以此为基核，推出许多与 MCS-51 有极好兼容性的 CHMOS 单片机，并增加一系列的新功能。

AT89C52 是 ATMEL 公司生产的。ATMEL 公司是美国 20 世纪 80 年代中期成立并发展起来的半导体公司。该公司的技术优势在与 Flash 存储器技术，将 Flash 与 80C51 核相结合，形成了 Flash 单片机 AT89 系列。AT89 系列单片机和 MCS-51 单片机在内部功能、引脚以及指令系统方面有着较强的兼容性。该系列在电子自动控制仪器仪表及智能化控制系统中有着广泛的用途，目前可以用来取代 MSC-51 系列单片机的主流芯片。

AT89C52 单片机与 Inter 公司的 80C52 在很多方面都能很好的兼容，其兼容性主要表现在以下一些方面：硬件组成、引脚排列、工作特性和指令系统。

AT89C52 存储器在逻辑上存在着三个存储空间：这三个存储空间分别为：

(1) 片内 128 字节 SFR 地址空间和 256 字节数据存储器；(2) 片外 64KB 的数据存储器地址空间；(3) 片内和片外相同的 64KB 程序存储器地址空间。

AT89C52 存储器在存储方式上存在 4 个存储空间：这 4 个存储空间可以分为两类，即数据存储器 and 程序存储器，其中数据存储器包括片内数据存储器 and 片外数据存储器；程序存储器包括片内程序存储器和片外程序存储器<sup>[48]</sup>。

AT89C52 安全运行所限定的极限参数为如表 3-1。其运算能力能够达到系统的要求。

### 3.2.2.2. 过零触发器

电热炉的温度取决于电热元件消耗的电能。而控制电热元件消耗的电能主要有两种方法即改变输入电压大小和改变输入电压接通时间。有触点控制的噪声大，对电网冲击大，元件使用寿命短，所以本系统用无触点开关的晶闸管控制。

而采用晶闸管控制电热元件消耗电能的方法有两种工作方式：一是调压方式，即采用移相触发控制输入电压的大小；另一种是调功方式，即采用过零触发控制输入电压加到电热元件上的周波数。

表 3-1 AT89C52 极限参数

参 数	数 值
运 行 温 度	-55—+125℃
存 储 温 度	-65—+150℃
引 脚 对 地 电 压	-1.0—+7.0V
最 大 运 行 电 压	6.6V
直 流 输 出 电 路	15.0mA

本系统采用可控硅的调功方式。由于相位控制会使负载上的电压波形发生畸变，产生高次谐波，对电网造成公害。而过零触发是在一定的时间间隔内，通过改变晶闸管通断比来控制输出功率达到调功目的。过零触发能使负载上产生较完善的正弦电压波形，同时由于过零时通断，防止了过大的电流冲击。因而，本系统采用的触发方式为过零触发。

过零触发器采用的是 MOC3021 的光点隔离可控硅触发器，可用来驱动可控硅，它自带有过零的检测电路。当控制电压对其作用后，就可以完成可控硅的触发导通。其参数为<sup>[49]</sup>：

运行温度：-40℃—+100℃，输入/输出绝缘电压：7500V

### 3.2.2.3. 可控硅的型号和功能

本系统为电阻炉温的自动控制系统，被控对象电阻炉的额定功率为17KW，额定电压为380V，因此可算出其额定电流（有效值）得

$$I = \frac{17 \times 1000}{380} = 44.736 A \quad (3-1)$$

由于正弦半波情况下，有效值与平均值间的比值为1.57，则计算得

$$I_d = \frac{I}{1.57} = \frac{44.736}{1.57} = 28.49 A \quad (3-2)$$

所以该系统所采用晶闸管的额定电流为

$$1.5 \sim 2.0 I_d = 42.735 \sim 57.0 A \quad (3-3)$$

因为本系统采用的额定电压为工频50HZ的380V电压，因此，晶闸管的额定电压选取为 $(2.0 \sim 3.0) \sqrt{2} U_2 = (2.0 \sim 3.0) \sqrt{2} \times 380 = 1074.8 \sim 1612.2 V$ 。



根据上述数据，系统采用晶闸管的型号为：KP400。KP400型大功率的主要技术参数如表3-2。

由于整个温度控制系统的电源电压峰值为 380V，而可控硅允许的  $U_{DRM}$ (断态重复峰值电压) 以及  $U_{RRM}$  (反向重复峰值电压) 的范围是 400-3000V，因此 KP400 可控硅可以满足系统的要求<sup>[50]</sup>。可控硅许用电流有效值为  $1.57 \times 400 = 628$  (A)，大于温度控制系统变压器原边电流的有效值。综上，KP400 可控硅满足系统要求，可以使用。

表 3-2 KP400 主要技术参数

浪涌电流 $I_{TSM}(A)$	工作结温 $T_J(^{\circ}C)$	断态电压 临界上升 率 $du/dt$ ( $V/\mu S$ )	关断时间 $T_q(\mu S)$	通态平均 电流 $I_T(A)$	断态重复 峰值电压 $U_{DRM}$ , 反 向重复峰 值电压 $U_{RRM}(V)$	通态峰值 电压 $U_{TM}(V)$
5600	125	$\geq 200$	$\leq 250$	400	400-3000	$\leq 2.0$

可控硅串接在 50Hz 交流电源和加热丝中，只要在给定周期内改变它的接通时间，就能达到加热功率改变的目的，从而实现温度调节。单片机的 P1.5 口输出能控制可控硅通断时间的脉冲信号。P1.5=1 时关断可控硅，P1.5=0 时开启可控硅。温度控制电路如图 3-4 所示。

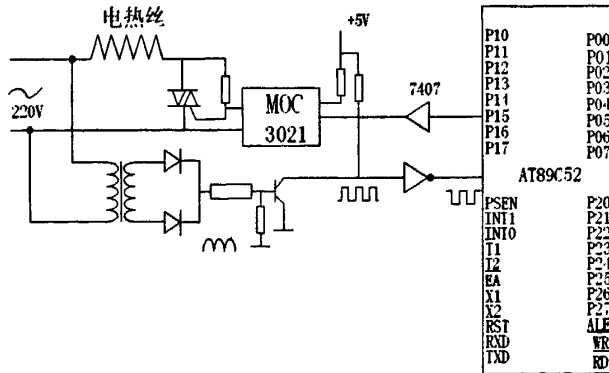


图 3-4 温度控制电路

### 3.2.3 温度检测电路

本系统的温度测量电路采用 K 型热电偶以及高精度的数字转换器 MAX6675，并和单片机相连，组成温度检测电路。

### 3.2.3.1. K 型热电偶

温度测量电路采用 K 型热电偶，其测量温度可达 1300℃，满足系统的需要。热电偶的型号和技术参数是如表 3-2。

表 3-2 热电偶的型号和技术参数

型号	分度号	量程	规格
WRN-130	K	0—1300℃	500mm

### 3.2.3.2. 高精度数字转换器

由于 K 型热电偶输出的是模拟信号，需要将其模拟信号转换成数字信号才能输入到单片机中进行处理和计算。传统的温度检测电路需要使用放大器，冷端补偿，A/D 转换，电路较为复杂；热电偶具有非线性特性，即热电偶输出的热电势与温度之间的关系为非线性关系，使用时要进行线性化处理。本系统采用高精度的数字转换器 MAX6675，它自带滤波器，放大器和冷端补偿，能将模拟信号直接转换成数字量，分辨率达到 0.25℃，提高系统温度测量精度，降低成本。

MAX6675 是 Maxim 公司生产出的具有冷端补偿特性的 K 型热电偶的放大器和数字转换器<sup>[51]</sup>。它内置一个 12 位模拟数字转化器的模数转换器（ADC），具有冷端补偿、校正、SPI 兼容接口和数字控制器。除此以外，MAX6675 的主要特性如下：（1）0—1024℃的测温范围；（2）电源电压为单一的 5V；（3）简单的 SPI 串行口温度值输出。

各引脚的具体功能见表 3-3。根据各引脚不同的功能，可得出温度检测电路如图 3-5 所示。

### 3.2.4 时钟电路

因为温度控制系统大多都要求能够在控温时显示升温时间、恒温时间等，以便操作和设计的准确性，基于此种考虑，需要一个准确的时间控制器，本系统选用时钟电路来完成在温控过程中时间的准确计时。本系统采用时钟芯片 DS12887 来实现对温度的时钟控制，这一芯片具有闹钟、时钟、24/12 小时选择等功能，同时包含有时钟控制寄存器、状态寄存器和通用 RAM 等，且具有可编程方波输出功能<sup>[52]</sup>。

表 3-3 MAX6675 各引脚功能

引脚	名称	功能
1	GND	接地端
2	T-	K 型热电偶负极
3	T+	K 型热电偶正极
4	VCC	正电源端
5	SCK	串行时钟输入
6	CS	片选端, $\overline{CS}$ 为低时、启动串行接口
7	SO	串行数据输出
8	N.C.	空引脚

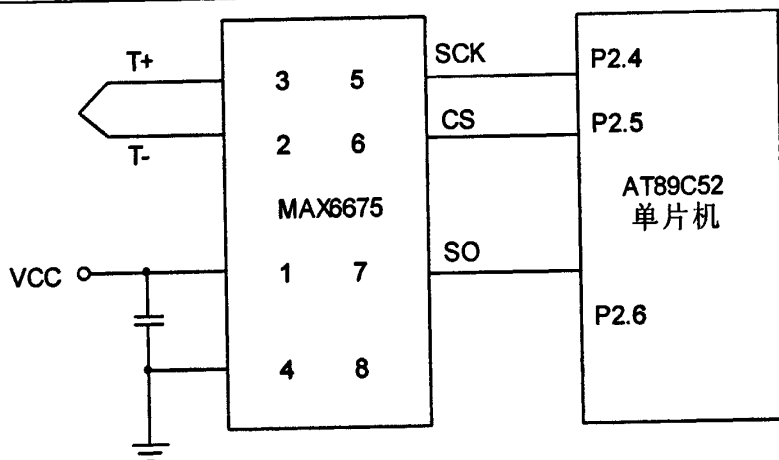


图 3-5 温度检测电路

含有 DS12887 时钟芯片的电路不需要任何外围电路, 且具有良好的微机接口。DS12887 芯片具有低消耗、外围接口简单、精度高、工作稳定可靠等优点, 可广泛用于各种需要较高精度的实时时钟场合中。

根据各引脚的功能, 将 DS12887 的地址、数据总线与单片机的端口相连接, CPU 每隔 0.4S 可读取一次 DS12887 的内部寄存器从而得到当前的时间, 并显示在液晶显示器上。又当盐浴炉的状态改变时, CPU 通过 DS12887 将时间清零, 开始重新计时。时钟电路图如图 3-6。

### 3.2.5 串口通讯电路

数据传输的硬件基础在于数据传输接口, 它也是计算机网络以及数据通信的不可或缺的组成部分。随着新的数据传输接口标准的大量涌出, 为使单片机

更好的工作、更好的适应不同标准的数据传输协议，人们制定了一系列的接口标准用来对单片机的数据传输接口进行扩展。目前关于数据传输接口主流的接口标准有 RS-232 标准和 RS-485 标准。本系统采用的标准是 RS-232<sup>[53]</sup>。

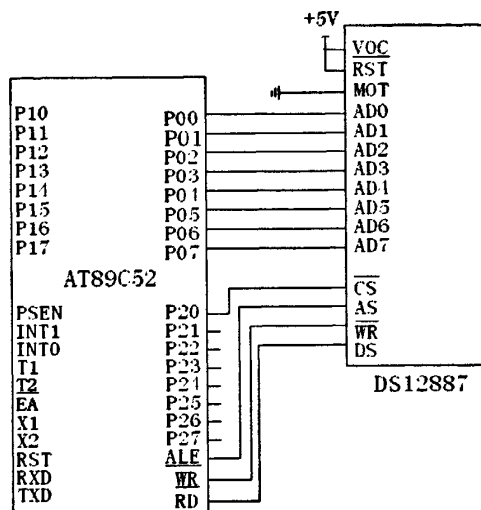


图 3-6 时钟电路

在实际温控设计中，单片机要计算机之间有很好的连结，本实验中使用的 AT89C52 单片机有一个全双工的串行通讯口，由于串口的存在这个单片机和电脑之间能够实现有效的串口通讯连接。但是由于单片机 RS232 的串口是 TTL 电平的，而电脑的串口并非 TTL 电平的，两者之间则需要一个电路来实现电平转换。实验中的温度控制系统的转换电路使用了专用的芯片 MAX232，在设计上使用的是三线制的连接方式进行串口的连接，连接方式是电脑的 9 针串口只连接其中的 3 根线，连接的 3 根线分别为第 2 脚的 RXD、第 3 脚的 TXD 第 5 脚的 GND。MAX232 是 MAXIM 公司设计的单电源电平转换芯片，使用+5V 单电源供电，其设计的目的就是专门针对电脑的 RS-232 标准串口。

表 3-5 MAX232 各引脚的功能

电路名称	构成	备注
电荷泵电路	由 1、2、3、4、5、6 脚和 4 只电容构成	产生+12V、-12V 两个电源，提供给 RS-232 串口电平电源
数据转换通道	由 7、8、9、10、11、12、13、14 脚构成两个数据通道。	7-10 脚构成第二数据通道，11-14 脚构成第一数据通道
供电电路	15 脚 GND、16 脚 VCC	供电功能

串口通讯电路图如图 3-7。

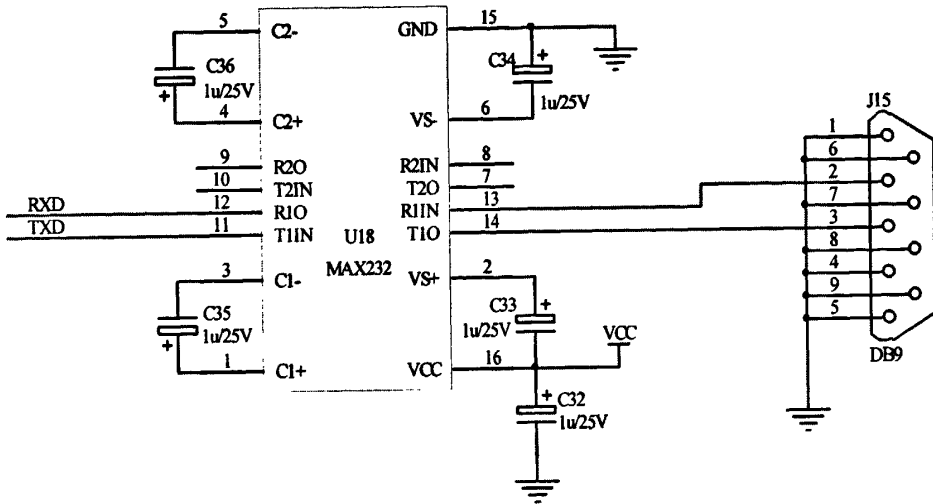


图 3-7 串口通讯电路

### 3.2.6 键盘

#### 3.2.6.1. 键盘的设置

键盘采用的是标准的 4\*4 矩阵式键盘，其设定如图 3-8。

##### (1) 时间设置

外热式双热电偶坩埚盐浴炉的温度控制需要准确的计时，因而在系统里植入了标准时钟用来计时。在设置时间时，先按下“设置时间”键，会提示输入“小时”，输入某数值后，按下“确定”键；系统又会提示输入“分钟”，输入分钟数值后，接着按下“确定”键完成时间的设置。

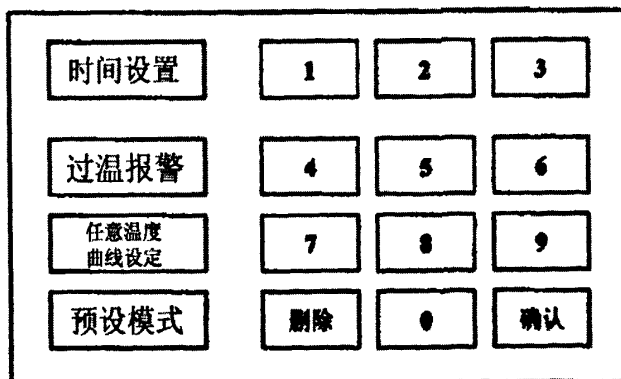


图 3-8 键盘的设置

## (2) 过温报警

按下“过温报警”键后，将会提示输入过温报警的温度，输入数值后，按“确定”键后完成过温报警温度设置。

## (3) 任意温度曲线的设定

由于温度显示装置的限制，设定温度曲线使用简单的坐标点输入方式。根据时间 $t$ —温度 $T$ 组成的温度曲线，选取一定数量的点，得到近似的设定温度曲线。温度曲线的设定示意图如图 3-9。

设定温度曲线的操作比较简单：先按下“温度曲线”键，出现提示要求输入第一个坐标，先输入时间的数值并按“确定”键，再输入温度的数值，按下“温度曲线”键完成第一个坐标点的输入；随后会提示输入第二个坐标，输入方法与第一个相同。最后一个坐标点，只须输入相应的时间并把温度的数值设为 0，系统就默认完成最后一个点的输入。这时，会提示是否执行，按下“确定”键后，完成温度曲线设定的输入。

## (4) 预设模式

实际生产中，有很多表面处理采取的是几乎相同的升温曲线，为了避免每次都设定温度曲线、减少人力，可以采用预设模式。

预设模式的操作：

A、设定。按下“预设模式”键，提示选择“使用”或者“选择设置”，按键“1”用来选择设置。这时，提示要选择第几个预设模式，在数字选择并按下“确定”键后，可以按照（3）中温度曲线的设定方法来设定。

B、使用。按下“预设模式”键，提示选择“使用”或者“选择设置”，按键“2”用来选择使用。这时，提示要使用第几个预设模式，在数字选择并按下“确定”键后，系统按照设定好的温度曲线进行加热。

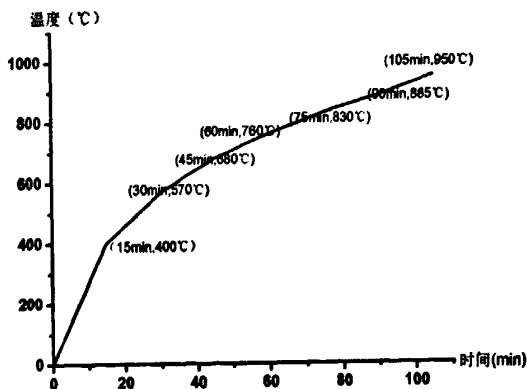


图 3-9 温度曲线的设置

### 3.2.6.2. 键盘接口电路

#### (1) 键盘串行扩展技术

单片机的硬件设计简单，系统结构紧凑。但是由于本身的芯片结构和引脚的关系，在片 ROM、RAM 以及 I/O 端口等功能不可能做得很多，因此对于一些复杂的场合，需要在片外做相应的扩展，才能构成完整的系统。本系统的键盘和显示就采用了单片机扩展技术进行扩展。

单片机的扩展技术可以分为串行扩展和并行扩展。部分系统采用并行接口方式的键盘/显示器，但是由于并行接口线比较多，还要配置译码、驱动等外围芯片，电路复杂，占用印制板面积大，应用十分不便。因此，本系统采用串行扩展技术。串行扩展接线灵活，占用单片机资源少，系统结构简单，易形成模块化结构。它还具有工作电压宽、抗干扰能力强、功耗低、数据不易丢失等特点。

#### (2) 键盘电路

本系统的键盘/显示器采用专用芯片 HD7279A。这种键盘接口芯片片内具有译码、驱动电路，使结构大大简化，在智能化仪器仪表等现代化单片机应用系统中被广泛应用。它采用动态循环显示方式，它能同时驱动 64 键的键盘（8\*8 键盘矩阵）和 8 为共阴极 LED 数码管（或 64 个独立的 LED 发光二极管）。具有如下特点：

A、内部含有驱动器，这样可使得外围电路变得简单，因为不需要扩充有源器件就可以直接驱动 25.4mm 及以下 LED 数码管；

B、含有不同种控制指令，如消隐、位寻址、左右移、段寻址和闪烁等；

C、具有自动消除键抖动的功能，同时能够准确识别按键键值；

D、内部含有译码器，具有两种译码方式，同时实现 LED 数码管的位寻址和段寻址，译码器可直接接收十六进制码或 BCD 码，同时可以方便地控制每位数码管或数码管中任意一段是否发光；

E、与 CPU 间的连接接口简单，采用的是串行连接的方式，连接时只占用 4 根口线；

HD7279A 为 28 脚标准双列直插式封装（DIP），供电采用单一的+5V 电压。引脚排列如图 3-10 所示，引脚的功能如表 3-6 所示。

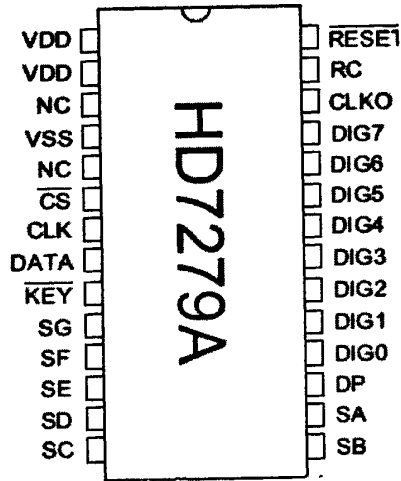


图 3-10 HD7279A 引脚排列图

表 3-6 HD7279A 引脚的功能

引脚	名称	说明
1,2	V <sub>DD</sub>	正电源 (+5V)
3,5	NC	悬空
4	V <sub>SS</sub>	接地
6	$\overline{CS}$	片选信号, 低电平有效
7	CLK	同步时钟输入端
8	DATA	串行数据写入/读出端
9	KEY	按键有效输出端
10—16	SG—SA	LED 的 g—a 段驱动输出
17	DP	小数点驱动输出端
18—25	DIG0—DIG7	LED 位驱动输出端
26	CLKO	振荡输出端
27	RC	RC 振荡器连接端
28	$\overline{RESET}$	复位端, 低电平有效

键盘接口电路图如图 3-11。

HD7279A 的端口连接矩阵式键盘, 在这 8 根接口线进行扫描和去抖动后, 就可以得到按键是否被按下、哪个按键被按下的结论。

当确定下某个按键被按下时, 系统可以分析决定将要进行的操作:

当按下的是“温度曲线”并且设置结束后, 引起单片机中断, 单片机读取



设定好的温度曲线并执行。

当按下的是“时间”并由键盘设定好后，数值将送入实时时钟芯片，设置时间启效。

当按下的是“过温报警”并设定好后，单片机中断，读取过温报警的数值。

当按下的是“预设模式”，如果是设置预设模式，单片机中断，读取设置好的模式；如果是直接选择使用预设模式，则预设模式的序号通过单片机的中断

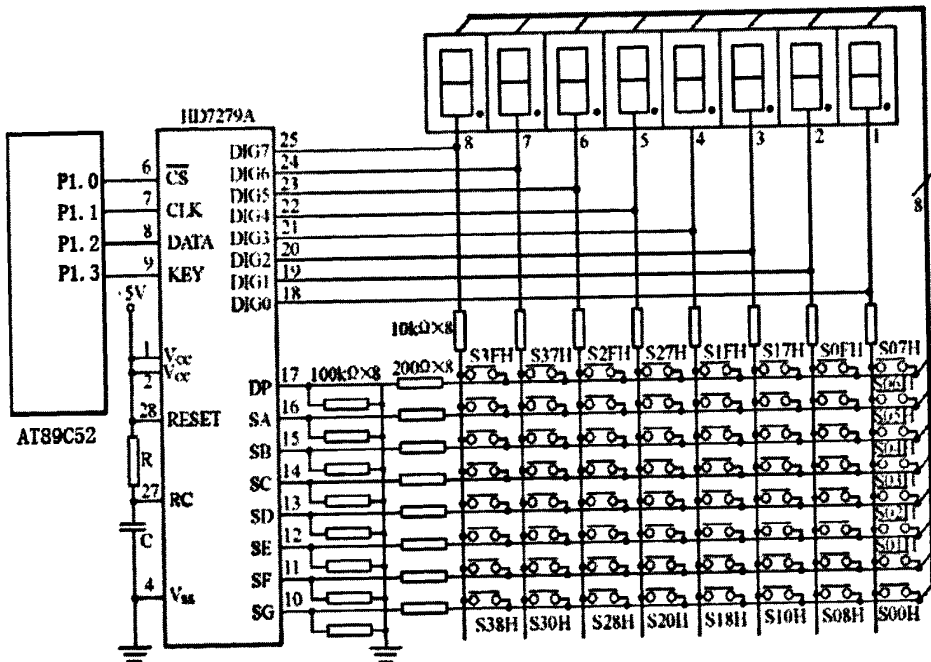


图 3-11 键盘显示电路

### 3.2.7 LED 显示

LED 显示屏是通过控制半导体的发光二极管的显示方式。它由很多个红色的发光二极管组成，靠灯的亮或者灭来显示字符。

#### 3.2.7.1. 显示示意图

LED 显示的示意图如图 3-12。

状态显示：

时间设置显示为“1”

温度曲线设置显示为“2”

超温报警设置显示为“3”

预设模式显示为“4”

执行显示为“5”。

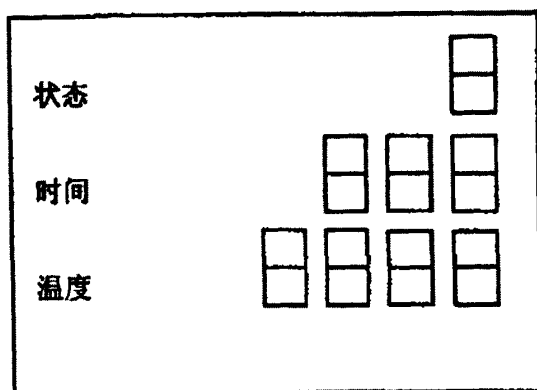


图 3-12 LED 显示示意图

时间显示第一位为小时，后两位为分钟。温度显示最高位为百位数，后面依次为十位数、个位数和小数点后一位。

### 3.2.7.2. 显示电路图

显示器和键盘一样，通过 HD7279 这个键盘/显示器串行控制芯片来进行扩展。采用动态循环显示，数码管分为“温度”、“状态”、“时间”三组。其接口电路图如图 3-11 所示。

## 3.3 本章小结

本章主要介绍了双热电偶外热式坩埚盐浴的温度自动控制系统的硬件设计。详细叙述了设计原理、元件的选取，并设计出了具体的电路图，为温度自动控制系统的硬件生产提供了依据。

## 第4章. 温度控制系统软件设计

### 4.1 引言

每个电路单元模块都有各自的工作方式、功能, 这些都是由相应的引脚或者寄存器来实现的。寄存器包括数据类寄存器、控制类寄存器两种。控制类寄存器是用来规定某个时刻应该使用哪种工作方式、功能。因此, 在对控制类的寄存器初始化以后, 才能使用这种电路的功能模块。这样的模块被称之为可编程模块。从编程的角度来说, 使用某个功能模块其实是对相应的寄存器进行读写, 其他的物理过程, 如: 引脚的变化等是模块自身完成的。

在整个系统中, 从软件的功能不同可分为两大类: 监控软件和执行软件。监控软件就是主程序, 它作为整个控制系统的核心结构, 用来协调各执行模块, 使其满足使用者的需要。执行软件也是子程序, 对于一些系统的实际的功能如测量、计算、显示、通讯等都是由它来实现的。软件设计要综合考虑所需系统的主要功能、键盘等输入硬件的设置来选择一种最优的模块结构和程序, 并且合理的协调主程序和子程序的运行关系。

### 4.2 温度控制系统软件流程图

在双热电偶外热式坩埚盐浴炉温度自动化控制系统中, 主程序完成系统的初始化、盐浴炉加热电流的通断。而主程序调用子程序, 如数码管显示程序、键盘输入程序、温度测试程序、中断控制程序、单片机与 PC 机串口通讯程序、时间确定及显示程序、控制算法等来完成相应的功能。

本系统主程序流程图如图 4-1。

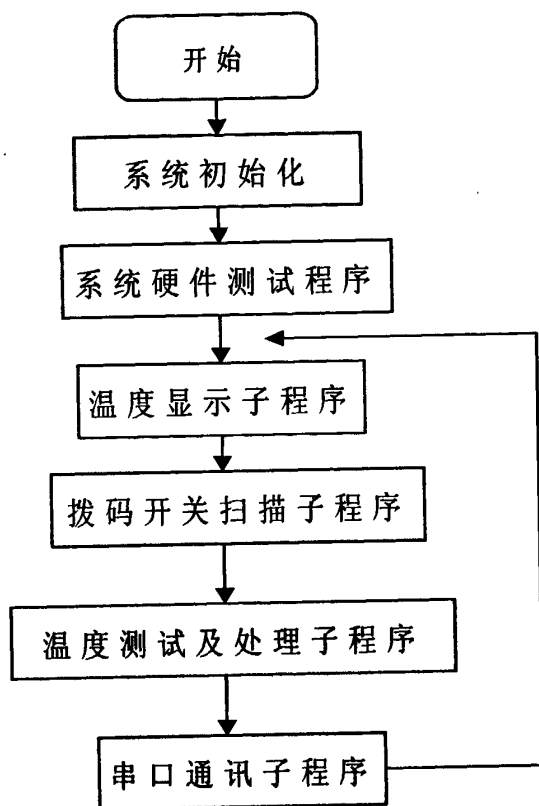


图 4-1 主程序流程图

对于本系统，首先要设定好盐浴的下限温度  $T_1$ 、炉膛的上限温度  $T_2$  和盐浴的上限温度  $T_3$ 。其中，盐浴的下限温度  $T_1$  是指系统可以以满速加热的最高盐浴温度，超过这个数值，系统的加热电流就要减小，防止盐浴上升的温度过冲。炉膛的上限温度  $T_2$  是指炉膛可以允许的最高温度，超过这个温度，加热电阻丝就有可能被烧断。盐浴的上限温度  $T_3$  是指盐浴要求达到的加热温度，也即最终温度。

系统运行的流程为：系统进行初始化设置，软件提示对盐浴温度进行测量与显示，并与盐浴设定下限温度进行比较。若盐浴的实际温度低于设定的下限温度  $T_1$ ，则直接对炉膛温度进行测量与显示，并与炉膛的上限温度  $T_2$  相比较，若低于温度  $T_2$ ，可以继续满速加热；若高于温度  $T_2$ ，则应停止加热。

若盐浴的实际温度高于设定的下限温度  $T_1$ ，则应该再与盐浴的上限温度  $T_3$  比较一次。若实际温度高于盐浴上限温度  $T_3$ ，系统应停止加热。若实际温度低于盐浴上限温度  $T_3$ ，则系统应进行 PID 调节，适当降低炉膛温度来减小盐浴温度的过冲。同时，再对炉膛的温度进行检测、显示和比较，若高于炉膛上限温度  $T_2$ ，则停止加热；若低于，则继续加热。

系统的软件流程图如图 4-2 所示。

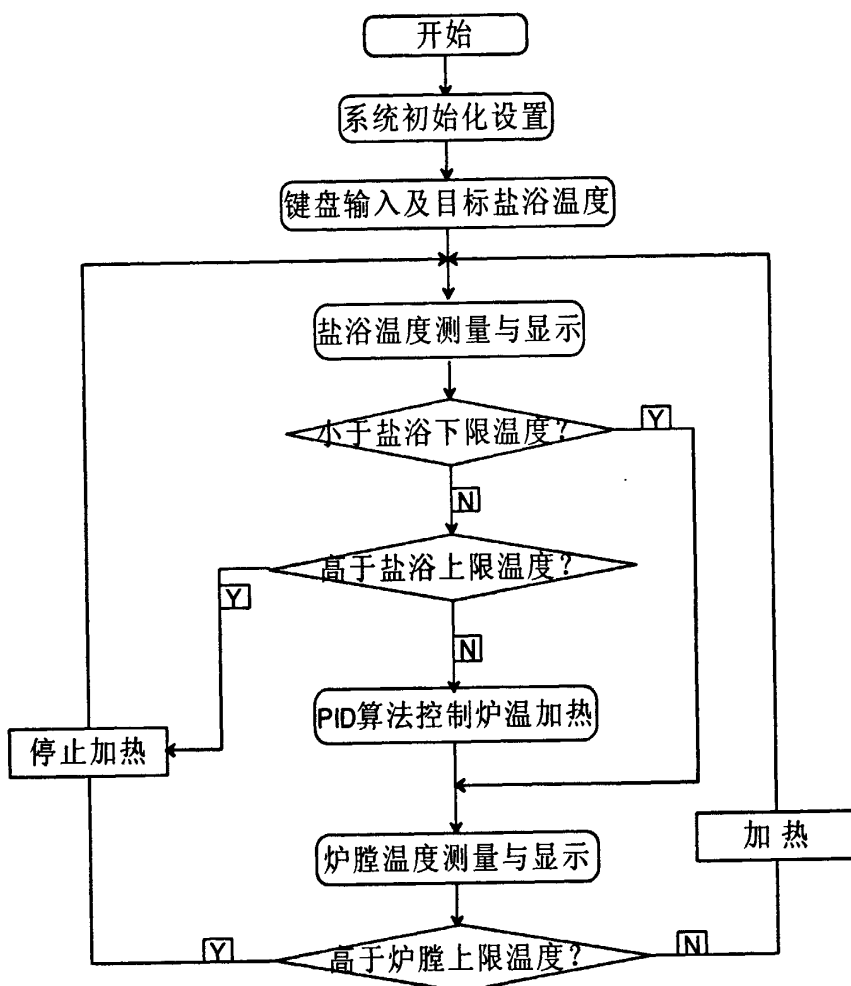


图 4-2 系统软件流程图

### 4.3 温度控制系统软件程序设计

温度控制子程序主要包括：键盘显示子程序，数字调节器的设计和数字触发器的设计。

#### 4.3.1 数字调节器设计

按温度控制的工艺要求可以把电阻炉的工作过程分为三段：自由升温段、恒温段和自由降温段，其中需要单片机参与控制的就是恒温段，在本程序里面，

采用了PID算法，它有效地减少了系统的超调和稳态误差。

由第二章的计算可知，离散式的PID控制方程为：

$$y(k) = y(k-1) + K_p \{e(k) - e(k-1) + \frac{T_D}{T} [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] + \frac{T}{T_I} e(k)\} \quad (4-1)$$

$T$ ---采样周期

$T_D$ ---微分时间

$T_I$ ---积分时间

$K_p$ ---比例系数

$e(k)$ --- 误差值  $e(k) = u_0(k) - u_1(k)$ ， $u_0(k)$ 、 $u_1(k)$  分别为温度给定值及反馈值。

根据参数计算的结果，有

$$y(k) = y(k-1) + 0.0523\{e(k) - e(k-1) + 0.0325[e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] + 7.4e(k)\} \quad (4-2)$$

为了减小超调和消除振荡现象，当温度的检测值到达给定值的80%时，系统开始进行恒温控制。此时系统的控制算法为：当温度检测值少于设定值的80%时，即温度偏差 $\Delta\theta > 0.2\theta_0$ 时，系统为自由全速升温，即在采样周期 $T$ 内全部导通，同时令 $y(k) = y_{\max} = 200$ ，200是一个采样周期的工频电源周波数。程序框图如图4-3所示。

### 4.3.2 键盘显示子程序

#### 1. 键盘子程序设计

系统中的键盘显示扩展是用HD7279来实现的，键盘和LED显示利用HD7279内部定时扫描来实现。设LED显示的扫描频率为50HZ，在一个扫描周期内每个LED显示的时间为1ms，所以每20ms就有8ms用于显示的扫描，其余12ms用于其它服务程序的执行。而温度控制和采样周期设为4s，利用对过零检测的脉冲进行计数，在这里用单片机自带的计数器T0，初始值设为200，每出现一个电源周波计数器减1。然后进行一次温度数据采集，然后进行相应的标度变换，将其转化为温度值。再根据测得的温度值和从键盘输入的设定值进行比较，当测量值少于设定值的80%，则进行全速升温，往导通周波数计数器寄存器20H和21H分别送数据200；当测量值大于设定值的80%时，进行PID运算，得出的导通周波数也同样送往20H、21H。

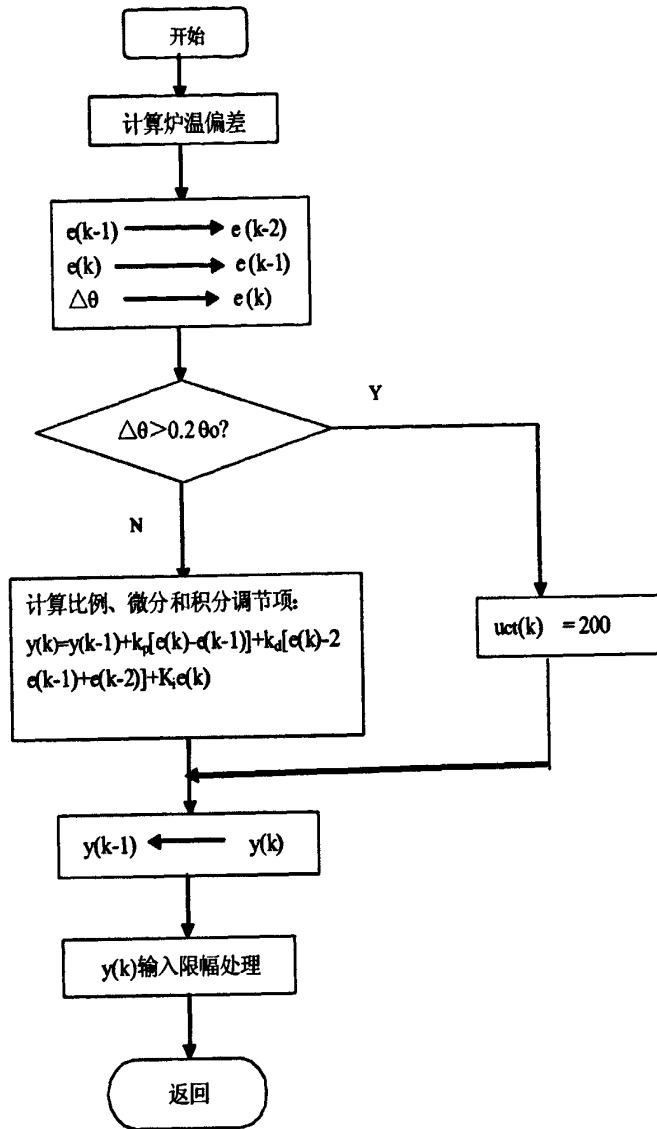


图 4-3 数字调节器程序框图

计算结果。值得注意的是，由于每个采样周期内有200个周波数，所以当20H减到0时，立即把21H的值装入20H，再一次进行导通控制，直到下一次采样周期的到来。

## 2. 显示子程序设计

显示系统是人机进行信息传递的接口系统，本系统作为一个温度控制系统，必须通过显示系统了解当前温度值和设定温度值，以及其它的一些参数，因此，本系统需要扩展8个LED显示，分别用来显示“状态”、“时间”、“温度”（如第三章所设计）。在该显示系统中，设定了显示缓冲区，都建立在片内的RAM

中,其中60H—62H作为当前恒温温度的显示缓冲区,60H为高位,62H为低位;64H—67H作为当前检测温度的显示缓冲区,同样,64H为高位,67H为低位。

### 4.3.3 晶闸管设计

本系统采用晶闸管的过零触发来根据调节器输出的控制量控制输送给电阻炉的能量。

准备程序根据调节器输出 $y(k)$ 对导通周波计数器 $C_k$ 置初值,并对采样周期定时器 $C_L$ 置初值。INT0在每个电源正负跳变均产生中断申请,执行其中断服务程序时,完成采样周期定时和晶闸管导通控制,并对导通周波计数。当晶闸管在某周波可导通时,P1.5口输出正脉冲。

该程序在一个采样周期开始时,执行数字调节程序之后开始执行。完成两项工作:第一将一个采样周期(4s)所对应的电源周波数200置入采样周期定时计数器CL;第二将调节器输出 $y(k)$ 变换为导通周波数置入 $C_k$ 。工频电源在一个采样周期(4s)有200个周波,所以 $y(k)$ 的最大值亦为200个周波全部导通。

### 4.3.4 中断服务程序

该程序完成采样周期定时和晶闸管导通控制。

采样周期定时用对电源周波计数来实现,进行调节器设计时,采样周期为4s,对于工频电源有200个周波。在采样周期开始时,将计数器CL设为初值为200,每经过一个电源周波(正或者负跳变时),其值减1,当CL为0时,采样周期到,开始下一个采样周期。

晶闸管导通控制:若触发时间到,则P1.5产生一个正脉冲,触发晶闸管导通,否则不产生触发脉冲,这时 $C_k$ 、CL均减1,否则不产生触发脉冲,仅CL减1。程序框图如图4-4所示。

### 4.3.5 系统的调试

系统的调试分为两步:第一步分调,第二步联调。

调试过程中首先依次完成以下调试:

1. 调试键盘与显示电路及给定值输入处理程序。
2. 调试炉温及温度检测电路。当温度在预定范围变化时,也要确保放大器



的输出在设计范围内变化。

3. 调试数字转换子程序、温度检测子程序。

4. 调试脉冲输出电路。调试时，用一简单程序在P1.0产生连续的窄脉冲，通过示波器观察脉冲变压器的输出波形，使之达到设计要求。

5. 调试报警与指示电路，当单片机相应的输出接口为1时，扬声器发出声音，相应的指示灯亮。

6. 调试过零检测电路与数字式过零触发器程序。

7. 调试调节器子程序和主程序。调试时，炉温值用仿真器提供的办法预置到内存单元进行模拟。

完成上述分调后，将主回路连接好，使系统各部分相互连接再进行调试，通过调整调节器的控制参数，最后使系统达到设计要求。

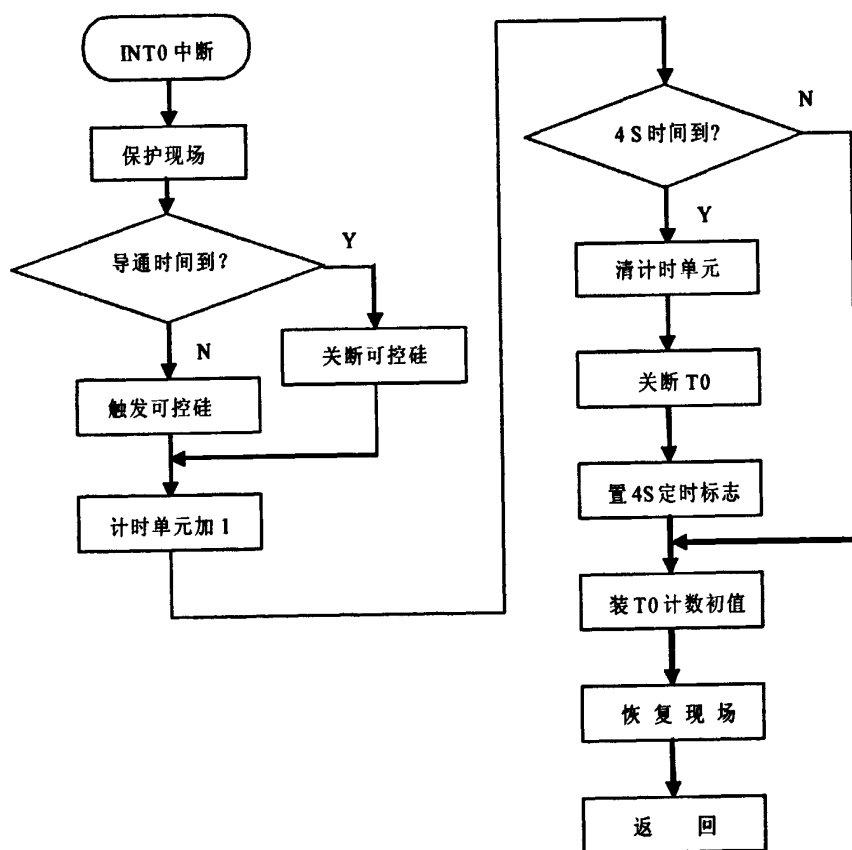


图 4-4 中断程序框图

## 4.4 本章小结

本章就温度控制系统的软件进行了设计。构建了控制系统的主程序流程图和系统的软件流程图，为温度控制系统的制造提供了依据。同时以键盘/显示器接口的程序为例，编写了部分程序。本章在前几章的理论计算和硬件设计的基础上，提供与之相呼应的软件设计，完善了双热电偶外热式坩埚盐浴炉温度自动控制系统的设计。

## 第5章. 结论与展望

### 5.1 结论

大多数热处理设备均需要温度自动控制系统。盐浴炉作为热处理工艺中非常重要的一种设备,有必要对其进行自动控制的研究,提高盐浴炉的控制精度和自动化水平。针对这种形势,本文针对外热式坩埚盐浴炉提供一种自动化水平高、控制精度高以及滞后性小的温度控制系统。在研究过程中,详细的分析了控制系统所要达到的控制要求,并通过理论计算、系统硬件和软件的讨论和设计,得出了以下的结论:

- 1、采用数字PID算法,通过比例、积分、微分环节来调节控制系统的特性,并采用扩充响应曲线法来整定控制参数,提高系统的响应速度,降低滞后性。能够根据不同加热曲线的不同要求,自动控制而无需人工调控,炉温的波动在一个较小的范围里。

- 2、详细的计算了炉膛和盐浴温度的热量传输。把热量的传输分为从炉膛传入坩埚导致坩埚温度上升以及坩埚传热到盐浴的两个过程,分析了这两个过程的传热方式,并计算了热量的传输量,为抽象、不易控制的加热升温过程提供详细的数学依据和准确的数值。

- 3、导出了控制系统热量传递的函数关系式,为控制系统提供了直观的输入—输出关系,为进一步研究热量在从电流—炉膛—坩埚—盐浴的热量传递和温度变化过程,并据此提高和改善系统控制性能提供了定性的数学函数支持。

- 4、设计了温度控制系统的硬件,包括系统总体结构、硬件电路模块设计、电路元件的选取等。采用单片机AT89C52、高精度数字转换器MAX6675、可控硅等,达到降低电路的复杂性、提高系统控制质量的目标。

- 5、设计了温度控制系统的软件流程图,和部分软件程序,辅助硬件完成各项功能。程序能自动实现对各种加热速率的调节、升温降温以及保温的控制。

## 5.2 展望

本文针对外热式双热电偶坩埚盐浴炉设计了温度自动控制系统，有一定的实用性和经济价值，得出了一些有意义的结论，但是还存在一定的不足之处：

1、理论和定性的分析设计较多，没有真正的投入实际生产。根据实际情况，在今后可以将该控制系统运用于实验室的镀铌测性能的实验中，在实际中调试和更深入的研究。

2、该自动控制系统主要针对的是外热式双热电偶坩埚盐浴，而对于其他的盐浴或者热处理设备，是否有同样的可实用性和控制质量，还有待更多的实验研究和计算。尤其是系统的 PID 参数的整定，完全是基于该盐浴炉性能的基础上进行，缺乏广泛的适用性。

3、对炉膛到坩埚、坩埚到盐浴的热量传递只求出了传递函数，缺乏更深入对系统输入—输出关系和输出响应的研究和讨论。

4、为了便于计算，在传递函数的求取过程中，忽略了部分热量传递过程中温度上升对参数求取的影响。更为精确、系统的传递函数求取有赖与后人的探索和研究。

5、软件和硬件的融合性只是理论上可行，而没有经过实验的证明。还需要后人通过实验或模拟实验的进行还进一步的讨论和研究。

## 参考文献

- [1] 徐滨士, 刘世参. 中国材料工程大典, 第 16 卷[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [2] 潘邻. 表面改性热处理技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] Xiujuan Liu, Huachang Wang, Etc. Study on kinetics of carbide coating growth by thermal diffusion process[J]. Surface & Coatings Technology. 2006: 2414-2418.
- [4] 张来启, 孙希泰. 盐浴渗金属工艺发展概况[J]. 金属热处理. 1993(1): 3-14.
- [5] T Arai. New Carbide Coating Process by Use of Molten Salt Bath-TD process: International Congress On Surface Technology[Z]. 1981.
- [6] 刘秀娟. 模具钢表面 TD 法制备碳化钒覆层的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [7] Matijevic B., Stupnišek M. Application of vanadizing process for tools and dies[C]. Proceedings - 15th IFHTSE - International Federation for Heat Treatment and Surface Engineering Congress : 2006.: 278-282.
- [8] 李竹君, 谷志刚, 杨建新. 中温盐浴渗钒工艺及其应用的研究[J]. 热加工工艺. 1995(1): 38-40.
- [9] 王林梅. 提高轴承钢性能的热处理工艺研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [10] 邹敢锋, 黄元盛, 袁叔贵. T10 钢低温盐浴渗铬工艺的研究 [J]. 金属热处理, 2000.(4): 28~29.
- [11] Chicco B., Borbidge W. E., Summerville E. Experimental study of vanadium carbide and carbonitride coatings[J]. Materials Science and Engineering. 1999, 266(1-2): 62-72.
- [12] 王华昌, 程立本, 王洪福. GCr15 钢模具 TD 渗金属及最终热处理的工艺优化[J]. 热加工工艺, 2009,(38).
- [13] 白美卿, 高富强. 电阻炉炉温控制中的可控硅触发技术[J]. 自动化仪表, 1996, (2): 28-31.
- [14] 顾百揆. 微处理机在热处理中的应用[J]. 金属热处理, 1985, 1,23(3): 54~57.
- [15] 黄一夫. 微型计算机控制技术[D]. 北京: 机械工业出版社, 1997, 5.
- [16] 李德, 王桂棠, 冯宝祥, 等. 基于嵌入式技术的热处理多用炉控制系统[J]. 中国材料科技与设备, 2008, (4): 77-79.
- [17] 陶永华, 尹怡欣, 葛芦生. 新型PID控制及其应用[D]. 北京: 机械工业出版社, 1998,

9.

- [18] N. Masaaki, O. Aira, Y. Kazuyoshi. Improvement of blast furnace reaction efficiency by temperature control of thermal reserve zone[J]. Source: Nippon Steel Technical Report, n 94, p 103-108, July 2006.
- [19] 王敏. 盐浴炉的节能改造[J]. 热加工工艺, 2003, (4): 65-66.
- [20] 卢伯英, 于海勋等. 现代控制工程[D]. 北京: 电子工业出版社, 2000, 5.
- [21] 李德, 王桂棠, 冯宝祥, 等. 基于嵌入式技术的热处理多用炉控制系统[J]. 中国材料科技与设备, 2008, (4): 77-79.
- [22] 陈杰, 黄鸿. 传感器与检测技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
- [23] 康华光. 电子技术基础[M]. 北京: 高等教育出版社, 1989.
- [24] 徐用懋, 颜纶亮. 微机在过程控制中的应用[D]. 北京: 清华大学出版社, 1989. 12.
- [25] 葛芦生, 陶永华. 新型PID控制器及其发展[J]. 工业仪表与自动化装置, 1998, (3): 59-50.
- [26] 刘明, 李贻斌等. 加热炉温度控制系统的实现[J]. 微型计算机信息, 1998, (5): 91-93.
- [27] Chin-Teng Lin et al. Neural Network-Based Fuzzy Logic Control and Decision Systems. IEEE Tram on Computer, 1991, 40(12): 1320~1336.
- [28] Yager R R. On a Hierarchical Structure for Fuzzy Modeling and Contr01. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, 1993, 23(4): 1189~1197
- [29] 陆道政, 季新宝. 自动控制原理及设计[D]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978, 11.
- [30] 朱欣华, 姚天忠, 邹丽新. 智能仪器原理与设计[M], 北京: 中国计量出版社, 2002.
- [31] 一夫. 微型计算机原理及接口技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [32] 金春林, 邱慧芳, 张皆喜. AVR系列单片机C语言编程与应用实例[M], 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [33] 付家才. 单片机控制工程实践技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [34] 邵裕森, 戴先中. 过程控制工程[M]. 北京: 北京机械工业出版社, 2000.5
- [35] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2001
- [36] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第三版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998-9.
- [37] 顾元宪. 瞬态热传导问题的优化设计与灵敏度分析[J]. 大连理工大学学报, 1993 - 3. 158-165.
- [38] 能源部西安热工研究所. 热工仪表与自动化[M]. 热工技术手册: 第5卷. 北京: 水利电力出版社, 1992.

- [39] WAN Li, LIU Yuming, WU Junqiang. Application interface technology of real time database in industrial process monitoring and control system[ J ]. Journal of Engineering Design, 2006, 13 (1) : 49250.
- [40] 李均宜. 炉温仪表与热控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981, 7.
- [41] Xue D, Atherton D.E. Simulation analysis of continuous system driven by Gaussian white noise. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B V1992,431~452.
- [42] 苏晓生. 掌握MATLAB6.0及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002. 1
- [43] 鄢定明. 单片计算机应用技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1988, 5.
- [44] 丁元杰. 单片微机原理及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997, 10.
- [45] 刘洪恩. 利用热电偶转换器的单片机温度测控系统[J]. 仪表技术,2005.2: 29- 30.
- [46] 孙凯,李元科. 电阻炉温度控制系统[J]. 传感器技术, 2003.2:50- 52.
- [47] 凌志浩. 智能仪表原理与设计技术[M]. 上海:华东理工大学出版社, 2003.
- [48] Rangaswamy T R , Shanmugam J , Mohammed K P. Adaptive Fuzzy Tuned PID Controller For Combustion Of Utility Boller [ J ] . Control and Intelligent System, 2005 ,33 (1) :63 - 71.
- [49] 卫晓娟,蒋赵远. 基于AT89C51的数据采集通信系统设计[J]. 工业控制计算机,2004, (12) :43 - 44.
- [50] Kolen P T. SelfCalibration Compensation Technique for Microcontroller Based Sensor Arrays [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement ,1994 ,43 (4) :620 - 623.
- [51] Kolen P T. SelfCalibration Compensation Technique for Microcontroller Based Sensor Arrays [ J ]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement ,1994 ,43 (4) :620 - 623.
- [51] 虞致国. MAX6675的原理及应用[J]. 国外电子元器件,2002 , (12) :41 - 43.
- [52] Wittenberg C. A pictorial human - computer interface concept for supervisory control [ J ]. Control Engineering Practice ,2004 ,12 (7) :865 - 878.
- [53] 黄军. Delphi 串口通信编程[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.

## 附 录

### 攻读硕士学位期间发表的论文

1. 王华昌, 张莹, 屈鹏. 双热电偶外热式坩埚盐浴炉温度自动控制系统设计[J]. 材料科技与设备, 2011, 7(2):88-90



## 致 谢

本论文是在导师王华昌教授的精心指导下完成的。从选题、实验方案的确定，到实验过程中遇到的种种问题的解决直至论文的撰写，导师都给了我极大的帮助和不尽的教诲，为我的论文顺利完成付出了辛勤的汗水。

在攻读硕士学位的近三年的时间里，无论是在学业上、思想上还是在日常生活上，敬爱的王华昌导师都给予我极大的关怀和帮助。他深厚的学术造诣、严谨的治学作风、忘我的工作态度都给我留下了深刻的印象，也是我终生学习的楷模。同时，王老师传授给我许多思考 and 解决问题的方法，并为我们创造了良好的工作和学习环境。在此，谨向王华昌老师表示我崇高的敬意和由衷的感谢！

同时我还要衷心感谢师兄王洪福博士、师兄程立本、师姐王潇在论文撰写过程中给我的大力指导和帮助；感谢同门蔺涛涛，屈鹏对我实验工作的大力支持与帮助，感谢师弟何鹏、孙启坤等同学对我的支持！

感谢我的家人。不管在什么时候，他们总是支持与鼓励我完成学业！

最后，对所有帮助过我，关心过我的老师、同学、朋友和亲人再一次表示最诚挚的感谢！

张莹

2011年5月于武汉理工大学