

复旦大学

硕士学位论文

带有大林算法的锅炉温度控制系统

姓名：刘建冬

申请学位级别：硕士

专业：电子与通信工程

指导教师：孔庆生

20090326

中 文 摘 要

本文是以国内某冷轧厂煤气罩式退火炉改造项目为背景展开的。退火炉是冷轧钢板热处理的重要热工设备，在国内广泛应用。其各个工艺段的温度控制是影响后续钢板处理的关键因素。在经济危机的大背景下，如何实现退火炉的有效温度控制，有着重要的意义。

退火炉的温度控制具有升温速度快，惯性大，时变等特点。其升温，保温是依靠其炉内的煤气空气混合燃烧来达到工艺要求的，降温则是依靠环境自然冷却。炉温温度一旦超调就无法用控制手段使其降温，因此对于各个温度段控制的主要控制目标就是超调量，超调量的失调会导致炉温控制不稳定，钢卷废品率高，安全隐患大，所以对于此类的工业控制对象采用普通的 PID 控制很难保证小超调或无超调，系统的振荡会严重影响产品质量。

本文根据实际问题，针对退火炉大滞后，大惯性等特征进行探讨，对退火炉进行了建模分析和软件仿真，结合实践经验，确定了退火炉对象的传递函数。采用了专门针对大滞后系统设计的大林算法，仿真结果表明系统的超调量得到了较好的控制。设计了大林算法的炉温控制系统软硬件，特别是硬件电路采用和热电偶相匹配的变送芯片 MAX6675，输出 4-20mA 的模数转换芯片 AD420，不仅解决了温控器常见的输入输出精度差的难题，而且节约了时间，简化了电路设计，同时提高了系统的稳定性。

论文对退火炉这类型的炉温控制系统做了深入的分析，构建了基于大林算法的炉温控制系统，不仅在学术方面，而且在工程应用方面，都有较大的参考价值。

关键词： 大林算法 炉温控制 AVR 单片机

中图分类号： TH7

Abstract

This thesis has been carried out based on the annealing furnace temperature control loop redesign project of a domestic steel Mill. The annealing furnace is very important equipment in cold-roll steel sheets heat treatment process and used widespread in China. Temperature control in each heating phase will significantly impact steel sheets quality. When we facing today's economy crisis, an advanced temperature control will be great significance in steel metallurgy.

Annealing furnace has some distinguishing feature like quick temperature rising, big deadtime. It uses burning mixing with gas and air to meet process requirements. Each phase have to take temperature overshoot into account, if overshoot has been mismatched, will cause furnace temperature control unstable and much higher defective rate. Even use normal PID algorithm for deadtime control loop, system can not kill overshoot and seriously affect the steel quality.

Due to the annealing furnace long delay feature, I made modeling with simulation according to field experience, then determine system parameter and transfer function. This thesis select a famous algorithm, which was developed to be used in process with significant deadtime for annealing furnace. After simulate with Matlab, the system depict a good control quality. This thesis also discuss furnace temperature control system hardware and software design. Especially uses a special IC which compatible with K-type thermocouple, and D/A chip which can output 4-20mA directly, these solution resolve a lot of issue, not only the accuracy issue, but also time saving, simplify circuit design and high stability of control system.

Based on the deep analysis of annealing furnace characteristic, construct furnace temperature control system with Dahlin's algorithm, can be for reference to some extended in the matter of academy studies and application.

Key Words: Dahlin's Algorithm; Reheating Furnace Control; AVR series MCU

Chinese library classification: TH7

引　　言

对冷轧钢板的处理需要对温度进行一定工艺曲线的控制，炉温度控制系统设计的任务就是构造一个数字控制器控制温度来满足工艺要求。

煤气罩式退火炉主要用于对冷轧钢板进行热处理，采用高炉煤气作为燃料。它有内罩与外罩，在内罩内放入退火钢卷，并投入保护性气体防止氧化。燃烧在内罩于外罩之间进行。12个喷嘴分为上下两层，每层有6个环绕排列。煤气和空气的喷燃比由连接各自阀门的杠杆控制（比例阀），这样在燃烧时，其空燃比不变。炉温控制系统测点为保护性气体温度。煤气和空气阀均采用比例蝶阀，由一台电动执行机构通过杠杆连接共同带动。整个系统可以认为是以保护气体温度为输出，以电动执行器带动的蝶阀开度（对应于煤气输入量）为输入的一个单输出单输入的温度控制系统。

本文是按照实际退火炉的特点结合特定的工艺要求来展开的。

第一章 绪论

第一节 课题背景及研究意义

退火工艺是钢材加工和成品生产的关键工序，其目的是改善钢材的工艺性能，使其满足所要求的机械性能和适用性能。退火处理通常是钢板加工的前期工序，对产品的质量和产量有很大的影响。近年来随着钢材市场竞争的不断激烈，对产品性能需求的不断提高，要求工序及温度在控制上更加精确，稳定。对于工业退火炉，为满足工艺需要，退火炉的炉温控制是保证退火质量的关键因素。

本论文的研究课题来自国内某冷轧钢厂的煤气罩式退火炉的技术改造。由于其现有的煤气罩式退火炉的设计不太合理，控制系统为较为落后的继电器输出模式，控制主要根据现场仪表和操作工的经验进行手动调节，致使炉温波动较大，很大程度上影响了退火炉的退火质量，造成能源浪费，安全隐患多，所以决定对退火炉进行改造。

国际上各工业先进国对各种燃烧设备的控制进行了广泛深入研究，主要从设备和自动控制两个方面实施，且都已经取得了不小的进展，实践证明，自动控制技术是一种有效的节约能源和提高生产质量的手段。目前，在民用与工业的各个领域，如冶金、化工、陶瓷等部门，多种型式的锅炉成为了重要的设备。在锅炉运行过程中，需要检测与控制的参数较多，但基本上都围绕温度这个参数进行控制。对于不同锅炉的温度参数实行自动控制，无论是提高产品质量、节约能源，还是在环保等方面都显示出优越性。目前国内的温度控制系统研究非常广泛，但往往研究的重点在复杂的控制算法，大型系统的多回路的应用，而往往对小型系统较少涉及，尤其是单变量的控制回路，不管是算法还是系统设计较少有人研究，本文就从建立退火炉动态数学模型，并以此模型为基础，采用单片机构成的温度控制系统，并结合大林算法来达到所需的工艺曲线要求，实现了系统仿真和软硬件设计，对于小系统的炉温控制应用和研究有着积极的参考意义，同时对于此类型的细分市场也有很大的运作价值。

第二节 炉温控制系统的发展趋势

退火炉作为轧钢企业的主要设备之一，处于关键位置，直接影响产品的质量和成本。退火炉的有效控制恰恰在提高生产效率，改善产品质量和节约能耗方面有着重要的现实意义。

国际上从 70 年代就开始了退火炉的研究，近几十年来随着计算机及智能控制技术的迅速发展，退火炉智能控制应用日趋完善，控制水平明显提高，取得

了一些应用成果^[1]。

随着集成电路技术的不断完善，向着小型化，高速化，低成本化的方向发展，传统的 PID 控制已经渐渐地在一些特定对象的控制领域显得力不从心，尤其是本文所论述的锅炉燃烧这类控制对象。随着控制理论的不断发展，尤其是离散控制理论的发展，出现了一些新型的控制算法。如美国钢厂在其退火炉智能控制系统中应用了广义预测极点配置加权控制，其控制系统中考虑到煤气压力随机波动，变化频繁，且当煤气压力低时，煤气管道阀门开度为 100%，煤气压力仍不能恢复到正常值，对炉温影响较大，所以在模型中将煤气总管压力作为可测干扰量来处理。再考虑到现场随机噪声干扰影响，罩式退火炉可用一个带可测煤气压力干扰，当采样周期为 1min，得到的数字模型为一个有纯滞后的一阶模型。利用广义预测极点配置加权控制器对煤气罩式退火炉进行计算机控制，模型参数很快收敛，跟踪调节性能好，升温段温差不超过±6℃，恒温段温度在±4℃范围内^[2]。

在控制技术日益提高的同时，退火工艺也不断改进。80 年代后，一种崭新的退火技术—全氢罩式退火炉在世界范围的冷轧薄板退火领域受到了广泛的瞩目。在美、英、德、日等发达国家，已得到了广泛应用。德国的布来梅市的克勒克纳(Klockner)冷轧厂，为了解决不不锈钢退火的质量问题，于 90 年代改建了 47 座全氢罩式退火炉。全氢罩式退火炉与传统的罩式退火炉的最大区别在于其保护气氛由传统的氮氢混合气体改进成 100% 氢气。众所周知，氢气是一种危险气体，因此，全氢罩式退火炉在其设备、工艺与控制上较传统退火炉更复杂，对控制系统的可靠性、安全性要求更高，增加了更多的安全连锁控制装置。其优势在于提高了生产效率，并且很大程度上提高了产品质量，提高了产品成材率和钢产品的品性。

80 年代以后，国内对退火炉的控制进行了广泛研究，并且随着微型计算机技术的发展，退火炉计算机控制逐步进入实用化阶段。目前国内退火炉控制系统的研究状况如下：

1.采用先进控制设备

随着工业控制机、单板机、可编程控制器及集散系统等先进控制系统的发
展，逐步取代了以前大规模的继电器、模拟式仪表。无论是 PLC 还是 DCS，其
软件编制均较简单，使用问题语言，无须专门编程人员就可自行编制，此外不
但能独立使用，且其通讯能力较强，便于联网。

2.采用新的控制方法

对传统的负反馈、单一 PID 控制系统做了多种补充从而使控制性能更佳。在以前控制系统中，处理燃料与空气的关系通常采用配比调节，由于燃料与空气调节回路的响应速度不一致，燃料的热值的不稳定及烧嘴特性等的变化，这种配比关系难以保证。特别是在燃烧负荷发生变化的情况下，更无法保持最佳配比。为解决这些问题，产生了 3 种处理空燃关系的交叉限幅法:1)单交叉限幅法;2)双交叉限幅法;3)改进型双交叉限幅法。

3.现代控制理论的应用

越来越多的控制系统采用现代控制理论，最优控制、自适应控制、自校正控制器、自整定 PID 参数的控制器，有些已成功地在工业中应用。如太钢公司罩式退火炉微型机自适应群控系统就是使用现代控制理论中输出跟踪自适应控制技术，系统精度有原来的 10℃提高到 3℃。上钢五厂对 20 台罩式退火炉实行温度群控，也使用现代控制理论建立三输入三输出自适应算法进行控制^[3]。总之，微型机的应用，为复杂的现代控制理论的数学计算创造了条件。

4.管理系统的应用

除了传统的闭环控制以外，退火炉也使用上级机进行管理。罩式退火炉群通常每个炉子有外罩、内罩，现代退火车间均采用计算机调度、指导哪个炉台装钢板，使用刚取下的热外罩等等，以节省燃料。

综上所述，目前国内外对于退火炉的研究主要集中在大型企业的大型设备上，这些设备控制回路多，控制节点复杂，集散控制系统或现场总线控制有着明显的优势，利用大系统的操作站或主控站可以很方便的对控制对象进行编程设置。而对于小型系统，由于成本上，时间上的限制，需求相对单一，很难采用 PLC，DCS 等系统进行控制，所以对于小型退火炉的智能控制目前主要采用的还是现场仪表加人工控制。

第二章 煤气罩式退火炉系统介绍

第一节 煤气罩式退火炉系统介绍

煤气罩式退火炉主要用于对冷轧钢板进行热处理，采用高炉煤气作为燃料。其炉体结构如图 1-1 所示：

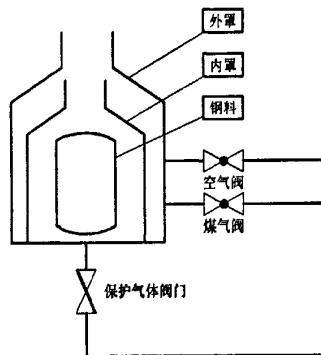


图 1-1

它有内罩与外罩，在内罩内放入退火钢卷，并投入保护性气体防止氧化。燃烧在内罩与外罩之间进行。12 个喷嘴分为上下两层，每层 6 个环绕排列。煤气和空气的喷燃比由两个连接到阀门的杠杆固定，这样在燃烧时，其空燃比不变。炉温控制系统测点为保护气体温度。煤气和空气阀均采用蝶阀，由一台电动执行机构通过连杆共同带动。整个系统可以认为是以保护气体温度为输出，以电动执行器带动的蝶阀开度（对应于煤气输入量）为输入的一个单输出单输入的温度控制系统。

退火炉工艺一般分为升温，保温，降温三个阶段。升温过程按一定的工艺曲线升高温度，保温则要求温度在该时间段内保持恒温，降温段为自由降温。其中升温段和保温段要求的温度控制精度小于±10℃。

在 Y1(400℃) 温度内，保护气体温度在供气阀门开到最大情况下，以自由升温的速率在最短的时间内升到 Y1 (400℃)。从 Y1 开始到 Y2 (700℃) 的保温点，温度按 $45^{\circ}\text{C}/\text{h} \sim 75^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 的速率上升，此段为升温段。到达 Y2 点，开始进入保温段。钢卷保温 ($T_2 \sim T_3$) 后停火，进入降温段，在此段中锅炉温度控制系统复位，炉温自由下降。

对冷轧钢板的热处理需要遵循一个温度变化曲线。如下图 1-2 所示，可将温度变化过程分为四个阶段：

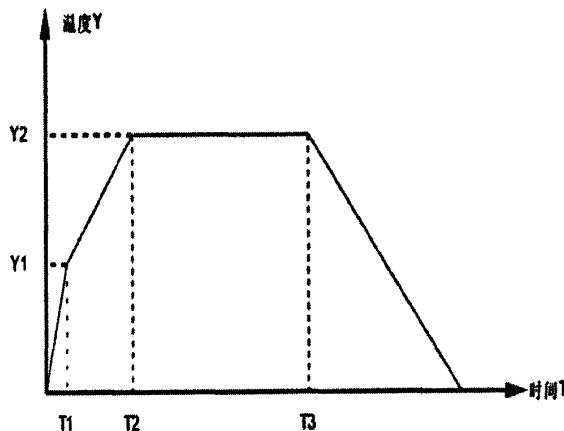


图 1-2

0 ~ T1: 快速升温段。此阶段对应的阀门应为全开状态，这样可以使煤气罩式退火炉以最快的速度升温，升温截止温度为 400℃。

T1 ~ T2: 升温段。此阶段的升温过程是按照一定的速率 (45℃ ~ 75℃/h) 升温，温度值要求控制在误差不超过±10℃的范围内，采用大林算法输出控制碟阀。

T2 ~ T3: 恒温段。此阶段要求系统将温度保持在 700℃，同样应控制温度误差不超过±10℃，保温阶段持续时长为 10 小时。

T3 以后：自由降温段。此阶段温控系统不起作用，阀门全部关闭，系统停机。

工作段	控制算法	估计持续时间	输出量
快速升温段	无	≤3h	0xFF
升温段	大林算法	4h~6.7h	U(k)
恒温段	大林算法	10h	U(k)
自由降温段	无	≤1h	0x00

系统实现的基本功能：

微机自动调节：正常情况下，系统投入自动。

模拟手动操作：当系统发生异常时，可以紧急停车投入手动控制。

本地监控功能：显示当前被控量的设定值，实际值，控制量的输出值。

第二节 退火炉动态特性实验测定

一、系统建模

一个自动控制系统，是由被控对象和控制设备两部分组成。只有熟悉了各自的特性，并把它们合理地构成控制系统，才能实现人们预期的控制目标。控制系统设计的好坏，在很大程度上取决于被控对象动态特性了解的程度。被控对象的动态特性实际上就是建立被控对象的动态数学模型，即用数学方程来描述被控对象各变量间的关系。

被控对象的动态特性可以通过两个途径获得，即理论建模和实验建模。理论建模是根据基本的物理、化学定律和工艺参数，在一定的假设条件下，导出被控对象的数学模型。这种方法一般只用来描述新研制的被控对象动态特性。实验建模是从试验数据中分析推导数学模型，即先根据经验或数据分析确定模型的结构，然后由试验数据确定其未知参数。工程中许多被控对象都是相当复杂的设备和系统，它们的数学模型很复杂，采用理论建模方法获得其数学模型相当困难，或者说需要用很复杂的数学模型来描述其动态特性。因此，在工程上主要借助于实验建模方法来获得可靠的被控对象数学模型。事实证明，对于许多复杂的生产过程，用根据实验分析来建立的近似的数学模型来描述其动态特性，完全能够设计出满意的控制系统^[4]

测定退火炉燃烧系统响应曲线时用的标准信号有阶跃信号和矩形方波信号，阶跃信号是最常见的输入信号，其对应的随时间变化的输出信号曲线称为阶跃响应曲线(或称飞升曲线)，它能比较直观地反映被控对象的动态特性，特性参数数据直接取自记录曲线，无须中间转换，试验方法也较为简单。因此，本系统采用阶跃信号作为输入信号。

将系统处于开环状态，将原有的控制器置于手动，阶跃地改变控制器的输出电压，记录温度测传感器输出的温度信号，可得到一条阶跃响应曲线，经简单处理，就可得到该过程的模型参数。

实验中，为了记录飞升曲线所获得的值需要定制一段程序来记录实验中的输入和输出量。首先是阶跃信号的产生，由 AVR 初始化 AD420 后，通过 SPI 送出 0xFF，同时将 AD420 配置为 4~20mA 输出模式，此时可通过电路控制回路串入电流表的方式判断控制信号的输出是否为 20mA。将炉温控制系统的输出接线接到 Herculine2000 的电流输入端子处，此时应去掉设备原有的红色采样电阻。此时 Herculine2000 会接收到控制信号，电机旋转达到阀门开度最大值。然后是记录温度数据，当阀门开度最大时开始采集温度，采集时间为 30 秒，

此时 AVR 需要周期性地将 MAX6675 的温度数据读出并且用串行口输出到 PC，PC 机用串口调试精灵将接收到的温度数据存储然后用 excel 转化后即得到温度数据。此时可以用 Excel 直接转化为横坐标为时间，纵坐标为温度的曲线，此时完成飞升曲线记录。

实验中应注意以下问题：

(1)根据退火炉的具体情况选择合适的输入信号幅值。为了区分实验输入信号与随机干扰信号，应保证有足够的输入信号幅值，同时也要注意输入信号幅值过大可能引起输出信号超过允许的变化范围这一问题。一般输入信号的幅值取被控对象额定负荷的 10%~15%，即额定符合阀门开度。

(2)实验前应使退火炉在加热温度下保温一段时间，使炉子处于稳定的初始状态。为获得一条准确的阶跃响应曲线，在相同的条件下应重复实验 3 次，得到的实验数据需要综合分析在确定相关的曲线。

二、对象的参数识别和实验数据处理

对于退火炉这类型的对象的典型传递函数为一阶或二节惯性加延时模型，如下式所示：

一阶惯性纯延时系统传递函数：

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (2-1)$$

二阶惯性延时系统传递函数：

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} \quad (2-2)$$

根据实验所得的飞升曲线来选择两种传递函数之一。根据实验经验来选择对象的传递函数是比较常见的做法。一般地，对于相同的飞升曲线，一阶传函拟合，数据处理简单，计算简单，但准确率较低；二阶传函拟合，数据处理复杂，计算量较大，但匹配程度较好。对于传统的闭环控制，采用单片机的闭环控制系统，系统设计对对象的传函精度没有较高要求，所以本文中采用的是一阶惯性纯延时传递函数。

接下来需要确定是如何根据实验所得的飞升曲线去确定式 (2-1) 中的参数 K , τ , θ 。

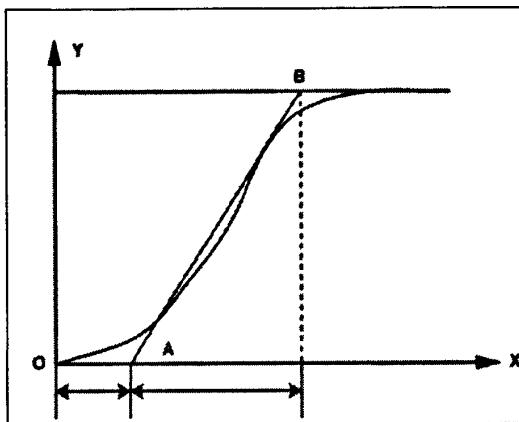
K 参数的确定：

根据式 (2-1) 可知， K 值的选取可依据：

$$K = \frac{C(\infty)}{U}$$

τ , θ 参数的确定:

如图 1-3 所示, 由于飞升曲线切线法被较多地应用到 PID 控制对象的建模上, 所以业界应用较为广泛。如图所示, 通过阶跃响应曲线的拐点作切线, 切



线与时间轴交于 A 点, 与稳态值 $C(\infty)$ 作水平线交于 B 点, 则 OA 即为被控对象的纯滞后时间常数 θ , 切线线段 AB 在时间轴上的投影即为时间常数 τ 。此法的主要缺点是切线不容易作准确, 主要的优点是方法明显, 易于计算。

图 1-3

三、对象的传递函数的确定

与退火炉系统的时间常数相比, 模拟量的输出, 执行器的响应, 模拟量的输入均可简化为一个比例环节。退火炉燃烧系统是一个有自平衡能力的对象, 可用一阶惯性环节加延时环节来近似, 得到的传递函数:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-\theta s} \quad (2-3)$$

式中:

θ 是退火炉的滞后时间

τ 是退火炉的时间常数

K 是退火炉控制系统的放大系数

最后, 利用飞升曲线得到的相关参数的值:

$$\theta = 120 \text{ seconds}, \tau = 27.667 \text{ seconds}, K = 0.1488$$

所以该退火炉的传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.1488}{27.667s + 1} e^{-120s} \quad (2-3)$$

第三章 控制算法实现

在一些实际工程中，经常遇到的是一些纯滞后的调节系统，它们的滞后时间比较长。对于这样的系统，人们更为感兴趣的是要求系统没有超调量或者有很少的超调量，而调节时间则允许在较多的采样周期内结束。因此，超调是主要的设计指标。对于这样的系统，用一般的随动系统设计方法是不行的，用 PID 算法效果也欠佳（超调过大）。

第一节 大林算法的概述

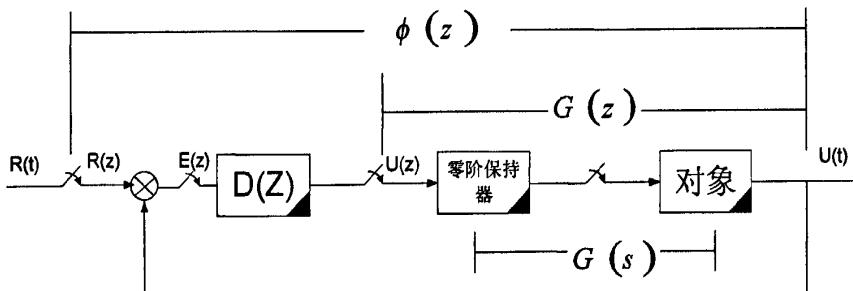
IBM 的 Dahlin 提出了一种针对工业生产过程中含有纯滞后的控制算法，得到了良好的控制效果。

设被控对象为纯滞后的一阶惯性环节，其传递函数分别为：

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta_1 s}}{\tau_1 s + 1}, \theta_1 = NT \quad (3-1)$$

式中， τ_1 为对象的时间常数， θ_1 为对象的滞后时间，其为采用周期 T 的整数倍，N 为正整数。

大林算法的设计目标是，设计一个合适的数字控制器，使整个闭环系统的传递函数相当于一个带有纯滞后的一阶惯性环节：



系统设计中最核心的设计也就是构造出一个 $D(z)$ 数字控制器，使得整个系统的闭环传递函数相当于一个带有纯滞后的一阶惯性环节函数，即：

$$\phi(z) = \frac{e^{-\theta_2 z}}{\tau_2 z + 1} \quad \text{其中 } \theta_2 = NT \quad (3-2)$$

通常认为对象与一个零阶保持器相串联，这是因为任何数字控制系统的输出都是 Step by Step 模式输出，当 t 时刻的输入进入数字控制系统后，系统需要一个节拍去计算所需的输出值，而此时 (t 时刻) 必须有输出来驱动对象，所以此时的输出即为 t-1 时刻的输出，这就是为何数字离散化后总是有一个零阶保持器的原因。 $\phi(z)$ 相对应的整个闭环系统的脉冲传递函数是：

$$\phi(z) = \frac{U(z)}{R(z)} = Z \left[\frac{1 - e^{-TS}}{s} \cdot \frac{e^{-NTS}}{\tau_2 z + 1} \right] \quad (3-3)$$

数字控制系统 $D(z)$ 是由闭环脉冲传递函数得出的：

$$D(z) = \frac{\phi(z)}{\phi(z)[1-\phi(z)]} \quad (3-4)$$

在考虑到系统的振铃现象之后设计出来的 $D(z)$ ，通过反变换之后形成差分方程，用以作为软件系统设计的参考输入。

所以首先来构造 $\phi(s)$ ，由飞升曲线得到了对象的两个重要参数：

对象的时间常数： $\tau_1 = 27.667$ 秒

对象的滞后常数： $\theta_1 = 120$ 秒

大林指出，通常期望的闭环响应是一阶惯性加纯延时形式，其延时时间等于对象的延时时间，即 $\theta_1 = \theta_2$ ；而期望的时间常数是一个待调节的参数，其值的选取与系统采样周期和对象的时间常数有一定的关系。

一、采样周期 T_s 的确定：

实际设计的数字控制器是在工艺要求温度曲线的两个阶段：升温段和恒温段起作用，以 $60^\circ\text{C}/\text{h}$ 的升温速率为例（实际上为了简化处理，在程序设计中就是以 $60^\circ\text{C}/\text{h}$ 的速率计算给定值），系统每秒的温度变化为 0.0167°C ，而通常对退火炉控制系统的采样周期经验值为 $15\sim20$ 秒，温度变化仅为 0.3°C ，不仅现场应用中不常使用如此高的采样周期，而且在数模转换过程中对于 A/D, D/A 器件的要求也会更高，加之对这些没有意义的高精度采样值进行一系列的数据处理，势必会造成执行机构的频繁动作，缩短使用寿命。系统大滞后加一阶惯性的特点，采样时间过短，超调过大，很难稳定。

炉温控制系统的温度变送模块是一个集成电路 (MAX6675)，它的最小分辨率为 0.25°C ，输出为 12BIT 的串行数据流，为了在数据处理中避免引入浮点数的处理，需要使其输出的变化率为 $\pm 1^\circ\text{C}$ ，这时确定出来的系统采样时间为 30 秒。

二、期望闭环传函的时间常数 τ_2 的确定

在确定闭环传函之前，需要首先考虑的是数字控制系统中普遍存在的振铃现象。

振铃现象是数字控制器的输出频率接近于 $1/2$ 采样频率时，会产生大幅度的上下摆动。它对系统的输出几乎是不受影响的。然而由于振铃现象的存在，会使执行机构因磨损而造成损坏。

大林提出了一种消除振铃现象的方法，即合适地选择闭环传函的时间常数 τ_2 ，大林提出闭环传函的时间常数必须大于或等于对象传函的时间常数时，系统才能够无振铃。

根据大林的理论计算，再结合下一节所用到的 Matlab 仿真，可以最终确定出数字控制系统的时间常数。

第二节 大林算法的实现

1980 年前后，MATLAB 的首创者 Cleve Moler 博士在 New Mexico 大学讲授线性代数课程时，看到了高级语言编程解决工程计算问题的诸多不便，因而构思开发了 MATLAB 软件(Matrix Laboratory,矩阵实验室)，该软件利用了 Moler 博士在此前开发的 LINPACK(线性代数软件包)和 EISPACK(基于特征值计算的软件包)中可靠的子程序，用 Fortran 语言编写而成，集命令翻译、工程计算功能于一身。

与 Fortran 和 C 等高级语言比较，MATLAB 的语法规则更简单，更重要的是其贴近人思维方式的编程特点，使得用 MATLAB 编写程序有如在便笺上列公式和求解。

80 年代初期，Cleve Moler 和 John Little 采用 C 语言改写了 MATLAB 的内核。不久，他们成立了 Mathworks 软件开发公司并将 MATLAB 正式推向市场。

现在的 MATLAB 新版本早已不只停留在工程计算的功能上，它由主包、Simulink 以及功能各异的工具箱组成，以矩阵运算为基础，把计算、可视化、程序设计融合到了一个简单易用的交互式工作环境中。在这里可以实现工程计算、算法研究、符号运算、建模和仿真、原型开发、数据分析及可视化、科学和工程绘图、应用程序开发(包括图形用户界面设计)等等功能。

正是凭借 MATLAB 的这些突出的优势，它现在已成为世界上应用最广泛的工程计算软件。在美国等发达国家的大学里 MATLAB 是一种必须掌握的基本工具，而在国外的研究设计单位和工业部门，更是研究和解决工程计算问题的一种标准软件。在国内也有越来越多的科学技术工作者参加到学习和倡导这门语言的行列中来。

根据上一章中确定的对象的传递函数，以及上节中确定的系统传递函数，利用 Matlab 分别确定数字控制系统的脉冲传递函数 $D(Z)$ ，然后通过 SIMULINK 建立整个系统的结构框图，仿真得到整个系统的闭环传递函数的时间常数，可以确定 $D(Z)$ 。

根据大林数字控制器的设计方法，考虑了零阶保持器后，可得到该控制器算法为^[5]：

$$\frac{U(z)}{E(z)} = D(z) = \frac{NUM(z)}{DEN(z)}$$

$$U(z) \bullet DEN(z) = E(z) \bullet NUM(z)$$

经过反 Z 变化

$$U(k) = A_1 U(k-1) + A_2 U(k-N-1) + B_0 E(k) - B_1 E(k-1) \quad (3-5)$$

其中：

$$A_1 = e^{-T/T_r}$$

$$A_2 = 1 - A_1$$

$$B_0 = (1 - e^{-T/T_r}) / K_d (1 - e^{-T/T_d})$$

$$B_1 = B_0 e^{-T/T_r}$$

根据上式可知，确定了对象的纯滞后时间 T_r ，时间常数 T_d ，选取合适的采样周期 T，确定出正整数 $N(\tau = NT)$ ，即可设计出不同期望的闭环系统时间常数时的数字控制系统。

第四章 炉温控制硬件系统设计

对于一个典型的闭环控制系统来讲，系统的硬件基本由三部分构成：输入模块，输出模块，控制模块。

数字控制系统的对象一般为一些工业中常见的温度，压力，流量等模拟量信号，这些信号通过必要的硬件电路处理后送入 ADC，由 ADC 转换后得到数字量再传输给 MCU，这就是输入模块。而对对象的控制一般需要有执行机构去控制，通常工业中用到的执行机构为阀门，电机，开关等，由于数字控制器的输出为数字量，而对象的执行机构往往只能识别工业控制领域常用的电流和电压信号，所以需要将控制器的数字量先转换为对应的模拟量，然后输出控制执行机构，这就是输出模块的主要功能。最后就是控制模块，也称为控制器，它是整个控制系统的中心，它需要将输入模块转换的数字量经过一定的控制算法运算后给到输出模块，控制算法的好坏直接影响着对象的控制品质。系统硬件结构如图 4-1 所示。

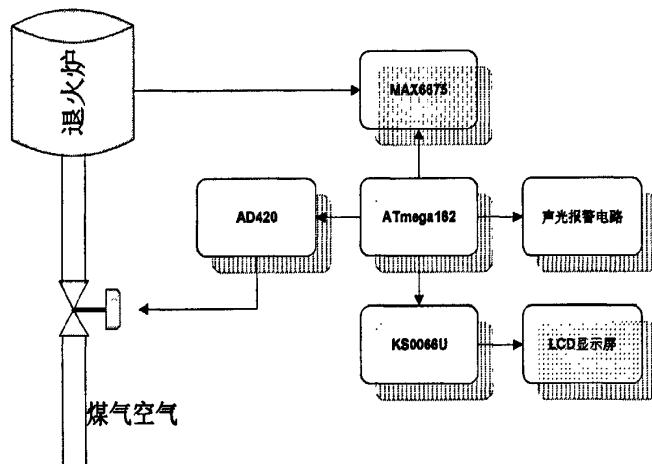


图 4-1

本文所论述的炉温控制系统是利用 K 型热电偶进行测温得到的模拟量的毫伏电压信号传送到输入模块 MAX6675，MAX6675 通过对热电偶信号进行必要的处理（包括非线性补偿，冷端补偿）直接转化为 12bit 的串行数据利用 SPI 送至控制模块单片机 ATMEGA162，MCU 进行数据处理，计算出输出量以后以 12BIT 的串行数据送至输出模块 AD420，AD420 将数据量转化为对应的 4~20mA 电流信号来控制 HERCULINE2000 型电子式电动调节阀。在进行闭环控制的同时，ATMEGA162 同时又把必要的数据送往 KS0066U 进行 LCD 显示。若在工作过程中发生越限问题则 MCU 会调用报警程序进行声光报警。

第一节 模拟量输入模块选型与设计

自从塞贝克发现热电效应以后，随着测温技术的发展，热电偶已经成为应用最广泛的测温元件之一。其主要特点是测温范围宽，可以在 1K 到 2800°C 的范围内使用，精度高，性能稳定，结构简单，动态特性好。本文论述的炉温控制系统采用的是 K 型热电偶。

在工业温度测控场合，K 型热电偶因其线性度好，价格便宜，测量范围宽而得到广泛的使用；但它往往需要冷端补偿，且电路较复杂，调试麻烦。而 MAXIM 公司生产的 K 型热电偶串行模数转换器 MAX6675 不但可将模拟信号转换成 12bit 对应的数字量，而且自带冷端补偿。其温度分辨能力达 0.25°C，可以满足绝大多数工业应用场合。

MAX6675 是美国 MAXIM 公司生产的带有冷端补、线性校正、热电偶断线检测的串行 K 型热电偶模数转换器。它的温度分辨能力为 0.25°C，冷端补偿范围为 -20~+80°C，工作电压为 3.0~5.5V。

根据热电偶测温原理，热电偶的输出热电势不仅与测量端的温度有关，而且与冷端的温度有关，只有当冷端温度固定不变，才能通过热电势的大小去判断热端温度的高低。当冷端温度波动较大时，必须首先使用冷端补偿导线将冷端延长到一个温度稳定的地方，然后再考虑将冷端处理为 0°C，这种方法被成为热电偶的冷端补偿。在以往的应用中，有很多种冷端补偿方法。如冷端冰点法或电桥补偿法等。但调试都比较麻烦；另外，由于热电偶的非线性，以往是采用微处理器表格法或线性电路等方法来减小热电偶本身非线性带来的测量误差。但这些都增加了程序编制及调试电路的难度，而 MAX6675 对其内部元器件的参数进行了激光修正，从而

对热电偶的非线性进行了内部修正，同时 MAX6675 内部集成的冷端补偿电路、非线性校正电路、断线检测电路都给 K 型热电偶的使用带来了极大的方便。MAX6675 的特点如下：

- 内部集成有冷端补偿电路；
- 简单的 SPI 串行口温度值输出；
- 可将温度信号转换成 12 位数字量，温度分辨率达 0.25°C；
- 0°C~+1024°C 的测温范围；
- 高阻抗差动输入，内含热电偶断线检测电路；

- 低功耗特性;
- 工作温度范围-20°C~+85°C;

利用 MAX6675 的特点，可以方便的将其接入 MCU 的 SPI 的数据通道。该芯片没有特殊的控制命令，读取数据时将 CS 引脚拉低，MCU 做为主机需要主动发送 2 个字节长的 CLK 脉冲，即 16 个脉冲到芯片，同步状态下，MCU 此时从 SPI 的输入数据寄存器中可以读取 16bit 的温度数据。数据格式如下：

BIT	DUMMY SIGN BIT	12-BIT TEMPERATURE READING												THERMOCOUPLE INPUT	DEVICE ID	STATE	
		15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
	0	MSB												LSB		0	Three-state

可以看到所需的温度数据位于 BIT3~BIT14 之间，将读回的数据做移位处理即可。BIT2 表示热电偶的断偶指示，高电平有效。

第二节 模拟量输出模块选型与设计

模拟量输出通道主要完成数字量到模拟量的转换，简称 D / A 转换电路，D/A 转换器的输出多数为电流形式，有些芯片内部没有放大器，直接输出电压信号。电压输出型又有单极性输出和双极性输出两种形式。按输入数字量位数来分。D / A 转换器有 8 位、10 位、12 位和 16 位等。为了与自动控制系统中广泛使用的电动单元组合仪表配合使用，还生产出能直接输出 4—20 mA 标准电流的 D / A 转换器(如 AD1422 / 420)，使 D / A 转换器的应用范围越来越广。

AD420 是 ADI 公司生产的高精度、低功耗全数字电流环输出转换器。AD420 的输出信号可以是电流信号，也可以是电压信号。其中电流信号的输出范围为 4 mA~20 mA, 0 mA~20 mA 或 0 mA~24 mA, 具体可通过引脚 RANGE SELECT1, RANGE SELECT 2 进行配置。当需要输出电压信号时，它也能从一个隔离引脚提供电压输出，这时需外接一个缓冲放大器，可输出 0 V~5V, 0 V~10 V, ±5 V 或±10 V 电压。

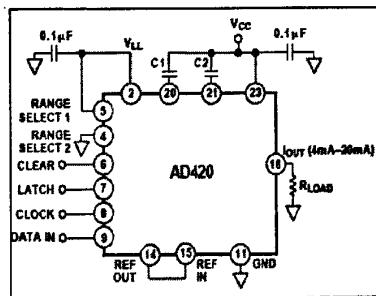
AD420 具有灵活的串行数字接口(最大速率可达 3.3 Mb/s)，使用方便、性价比高、抑制干扰能力强，非常适合用于高精度远程控制系统。AD420 与单片机的接口方式有 2 种：3 线制和异步制。单片机系统通过 AD420 可实现连续的模拟量输出。其主要特点如下：

- 宽泛的电源电压范围为 12 V~32 V,
- 输出电压范围为 0 V~- 2.5 V;
- 带有 3 线模式的 SPI 或 Micro wire 接口，可采集连续的模拟输入信号，

采用异步模式时仅需少量的信号线：

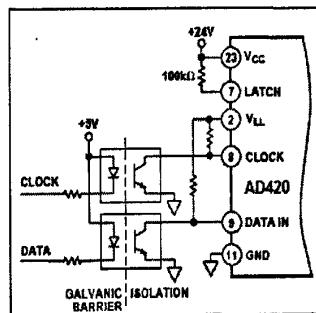
- 数据输出引脚可将多个 AD420 器件连接成菊花链型；
- 上电初始化时，其输出最小值为 0 mA，4 mA 或 0 V；
- 具有异步清零引脚，可将输出复位至最小值（0mA、4 mA 或 0 V）；
- BOOST 引脚可连接一个外部晶体管来吸收回路电流，降低功耗；
- 只需外接少量的外部器件，就能达到较高的精度。
- AD420 采用 24 引脚 SOIC 和 PDIP 封装。

AD420 的典型应用电路如下图所示：



从上图可以看到电流输出电路的负载可以直接输出驱动负载，即电动阀门执行器，简化了外围电路的设计，提高了系统的稳定性。

一般的电动阀门执行器较常见的是 24V 直流电源供电，而本系统的工作电压小于 5V，所以为了能够驱动外部执行，需要从 AD420 的通讯结构进行电平转换和电气隔离，本系统采用的是光电隔离方式，这也是业界普遍采用的隔离方式，其它隔离方式如变压器隔离，电平隔离等，本文不再赘述。光电隔离方案如下图所示：



第三节 电动执行机构的选型与设计

美国霍尼韦尔生产的 Herculine2000 型智能电动执行器，采用这种电动执行器，不但维护简单，控制精度高，更重要的是节约了大量的电能和设备的维护工作量。

电动执行器内部采用微处理器基础的电子部分连续监测执行器的各种参数：运行、安全、执行器位置等，并对输入信号作出反应。当需要动作时，电子单元激发马达驱动电路上的有关构件来定位马达，马达位置确定是通过非接触式位置传感器来实现的，并且由电子部分连续监测。

双级减速蜗轮蜗杆齿轮箱以及可变速马达控制器（倒相器）组成连续负载等级的、精确的、高级定位器。蜗轮蜗杆还起着制动的作用，当出现反冲时它的最大制动力矩可达标称力矩的二倍以上。执行机构可以连续接 4~20mA 调制信号输入，位置比例信号（三线 / PAT ）及 4~20mA 位置反馈信号。内部平衡、位置反馈及模拟反馈电位计输出由非接触式位置传感器完成。

主要特性：

- 马达 / 齿轮系统提供精确定位并具备即开即停特性。
- 非接触式位置传感减少了维护量，提高了控制性能。
- 采用连续负载马达，永不烧毁。
- 全行程速度最快达到十秒。
- 体积小，力矩大（425~5500 磅 / 英 尺）。
- 高精度：典型 0.25%，全量程。高重复性：典型 0 . 2 %，全量程。
- 输入算法可编程为线性、方根、用户定义的 2 1 点的特殊算法，用于满足特殊的控制要求。
- 死区可以编程设置为全量程的 0 . 2 %~5 %。
- 所有执行器均配备半径和位置可调整的输出转臂。可选择包括连接件及各种配套件等。
- 坚固的工业等级外壳。
- 简单而成熟的设计意味着低维护量和高可靠性。

该系统需要特别注意的是执行机构的防爆问题。由于使用的是煤气等易燃

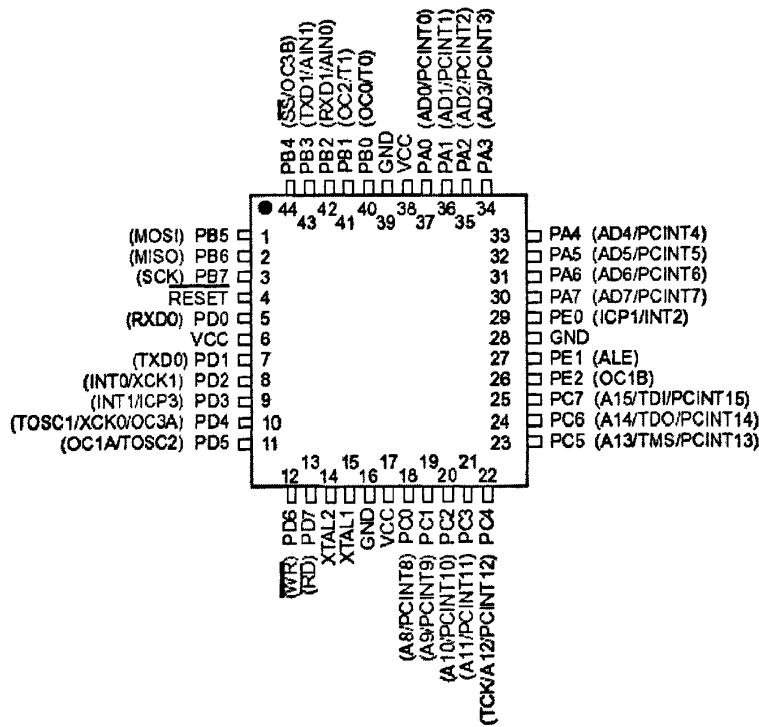
易爆气体，所以电动执行机构必须具有防爆特性，HERCULINE2000 型属于隔爆型电动阀门，设备在正常工作时，其内部电路密闭于一个金属防爆壳中可以有效地防止意外发生。

该电动发梦还具有手动/自动切换功能，正常工作时，金属壳密封内部电路；在进行手动控制时，须先关闭电源，方可打开机壳利用内部调节装置进行手动调节。

第四节 CPU 模块的选型与设计

ATMEL 公司推出的 AVR 单片机采用精简指令集，取指令周期短，又可以预取指令，实现了流水作业，可以完成高速串行处理。本文采用的是 AVR 系列中性价比较高的一款芯片 MEGA162。它是基于 AVR RISC,低功耗 CMOS 的 8 位单片机，芯片内部集成了较大容量的存储器和丰富的外围接口。由于 MEGA162 在一个时钟周期内执行一条指令，所以其工作效率几乎可以工作于 1MIPS/MHz。MEAG162 具有以下特点：16K 字节的在线编程/应用编程 (ISP/IAP)Flash 程序存储器，512 字节 E²PROM，1K 字节 SRAM，32 个通用工作寄存器，35 个通用口，4 个带有比较模式灵活的定时器计数器，内外中断源，2 个可编程的接口，1 个 8 位 I²C 总线接口，可编程的看门狗定时器，2 个 SPI 接口和 5 种可通过软件选择的节电模式。当单片机处于空闲模式时，CPU 将停止运行，而 SRAM、定时器/计数器、SPI 口和中断系统则继续工作；处于掉电模式时，振荡器停止工作，所有其他功能都被禁止，但寄存器内容得到保留，只有在外部中断或硬件复位时才退出此状态处于省电模式时，芯片的所有功能被禁止（处于休眠），只有异步时钟正常工作，以维持时间基准；在待机模式时，CPU 和其他 I/O 的模块都停止运行，但系统振荡器仍在运行，使得系统在低功耗时可以很快地启动。

本文采用 ATMEGA162V 采用 TQFP48 的管脚图如下：



ATMEGA162 采用双列直插和表面贴装形式。其片内集成了 8KB Flash 存储器，368B RAM 存储器，256B EEPROM，3 个定时器，1 个 8bit/10bit ADC，5 个 I/O 端口，看门狗 WDT，14 个中断源，8 级堆栈，通用串口等等，其指令仅有 35 条。

ATMEGA162 利用哈弗总线结构和精简指令集技术，不仅使得指令单字节化而且运行速度可达 20MHz，每秒可以处理百万条数据指令，加之其出色的抗干扰能力，非常适合在实时性要求较高的工业领域使用。

第五节 液晶模块的选型与设计

本系统采用三星公司生产的 LCD 驱动器 KS0066U 并配备双行带背光的 5x7 点阵式液晶模块，每行可显示 16 个字符。

KS0066U 是低功耗点阵式 LCD 驱动控制器，它可以显示 2 行 5 x 8 或 5 x 11 的字符模块，其结构特点如下：

- (1) 内部驱动器：包含 16 个公共地，40 个段码输出
- (2) 与单片机接口兼容
- (3) 显示字符模式：5X8 点，5X11 点

(4)专用字符图形可以由字符发生器 RAM 直接编程

(5)用户字符图形可采用掩模方式写入

(6)各种功能函数

(7)上电自动复位

由于本系统属于工业产品，所以在对 LCD 的选择上主要考虑选择工业级的液晶模块，因为单色液晶显示器是一种比较易受环境干扰的设备，尤其是对温度和湿度的影响非常敏感^[6]。当温度值大于 50 度时，液晶的显示效果明显变差，屏幕模糊，当温度低于 0 度时，又会发生显示缓慢，字符错误显示。湿度对其影响主要是寿命变短，并且会使屏幕发生气泡，腐蚀等。所以提高液晶的使用等级可以提高仪器现场操作的实时性和安全性。

第七节 系统的抗干扰设计

由于工业现场的使用环境极为恶劣，不仅环境温度变化范围大，湿度高，而且还存在着各种各样的干扰通过某些耦合进入控制系统，会使系统死机，程序运行错误，输出误动作等，严重影响设备和人员的安全，所以为了保证系统能够稳定可靠地工作，必须采取有效的措施来防止控制器的异常动作。系统抗

干扰主要从硬件和软件两方面来设计：

一、硬件抗干扰设计

硬件抗干扰主要从以下几个方面入手：

a) 集成电路芯片的选择。一般芯片供应商对同一款芯片会提供几种等级的芯片，从低到高分为通用级，工业级，汽车级，航天级。这些等级代表着不同的工作温度范围，EMC 兼容性能，可靠性，耐腐蚀性，抗辐射能力等。等级越高，抗干扰能力越好，当然价格越高。对于工业应用来讲，尽量选择工业级的产品。

b) 执行器的选择。绝大多数的工业对象的控制失效都会导致人员生命，设备财产的损失，所以执行器在失效时能够迅速返回安全的初始状态可以有效地避免重大事故的发生。如本文中所用到的电动执行阀门，在选型时需要选择常闭型阀门。常闭型阀门是指当阀门在上电复位之前或输出错误时阀门会自动处于开度为 0 的状态，由于阀门控制的是易燃易爆气体，即使控制器失效无输出，阀门也能够有效地防止危险气体进入炉内。

c) 电磁屏蔽。EMC 的电磁干扰严重时会使这个控制器失效，输出误动作。

电磁屏蔽最有效的措施是用一定厚度的导电导磁材料做外壳，高频干扰的电场和磁场在外壳上共同作用相互抵消，来达到消除电磁干扰的目的，外壳必须使用良好的导体如铜，铝等做屏蔽层，并将外壳妥善接地。

d) 信号输入线缆的选择。热电偶的使用过程中需要连接导线到控制设备，为了避免测温不准或受到干扰，热电偶的输出线缆必须使用相匹配的补偿导线来补偿线缆上的电势差，补偿导线的外皮必须采用屏蔽层，接入系统输入端子时必须将屏蔽层接地。

e) PCB 布线。在设计电路板时需要仔细考虑敏感信号的布线以及周围电路对其的影响。尤其是热电偶信号的输入路径必须尽量的短，线径要尽可能的粗，尽量不适用过孔等破坏信号传输的路径。系统的数字地和模拟地需要根据实际情况来选择接地方式等等。

f) 冷端补偿。由于芯片自带了内部的温度补偿，所以在做芯片布局时需要尽可能地将芯片放置于接线端子附近以更好地采集冷端温度。必要时可以做特殊形状的铺铜来获得一个良好的导温通道。

二、软件抗干扰设计

软件的抗干扰主要从以下几个方面着手：

g) 使用看门狗。AVR 内部带有硬件看门狗，可以在主系统循环中使用硬件看门狗，定期喂狗来实现系统稳定。

h) 程序存储区的处理。绝大多数的系统不稳定是由于 MCU 收到外部的强电场或强磁场导致内部 PC 计数器的数值发生紊乱造成的，此时 MCU 的运行会脱离原来的程序区进入一些未知区域，所以可以在没有使用的程序存储区内全部写入一条跳转指令或软件复位指令，这样即使程序跑飞也可以在很短时间内跳转或复位。

i) 采用软件滤波。输入模块的数据在进入算法之前需要进行必要的软件滤波，来有效地防止，测量过程和传输过程的干扰而导致的数据紊乱问题。

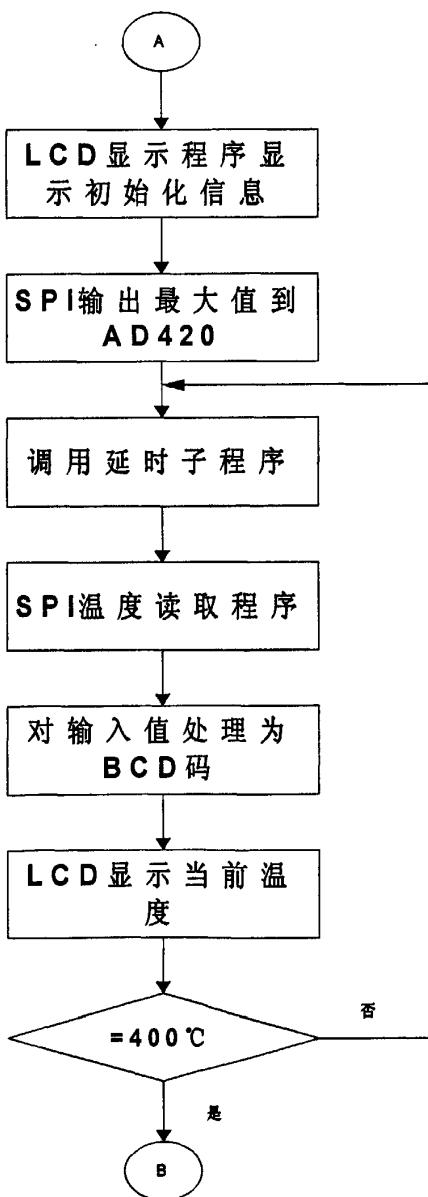
j) 输出模块的闭环反馈。一般的智能阀门都带有输出反馈，不仅可以接收输入信号来驱动阀门，同时还可以将阀门当前的位置反馈给控制器，这样软件设计时可以充分利用这个闭环环节，有效地控制阀门动作，一旦出现阀门误动作，就可以立刻输出复位信号使阀门处于安全位置。

第五章 炉温控制系统的软件设计

根据之前的需求分析可知，系统的控制分为四个阶段，所以将软件架构也分为四个阶段设计。

第一节 快速升温段的软件设计

该阶段的软件设计的功能是将输出值设为最大，使阀门开度最大才可将升温速率提升到最大，同时每隔一定的周期对炉温进行采样，将等到的温度值送到 LCD 模块显示，同时对温度值进行比较来判断是否进入下一个升温段。软件流程图如下：



第二节 升温段的软件设计

升温段的系统运行不同与快速升温段，此阶段温控系统需要对温度的升温控制做大林算法控制，有快速性，无超调，精确性的要求。同时该阶段会调用温度读取函数，中值滤波函数，控制电流输出函数等。

一、规格化数的问题

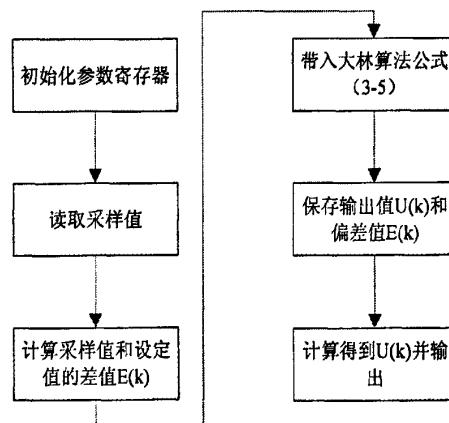
该阶段使用大林算法计算输出值。由于大林算法系数中引入了小数，所以需要采用浮点数来进行计算，AVR 单片本身不带有硬件浮点运算单元，但基于 AVR 的 C 语言调试环境 AVR Studio 集成了常用的数学运算库，用户可以方便地使用 C 语言来进行数学运算。通常 C 语言库中的浮点运算是将带有小数的数字转化为规格化数，然后利用规格化数进行小数的加减乘除运算。

符号	偏移阶码	数符	15 位尾数
----	------	----	--------

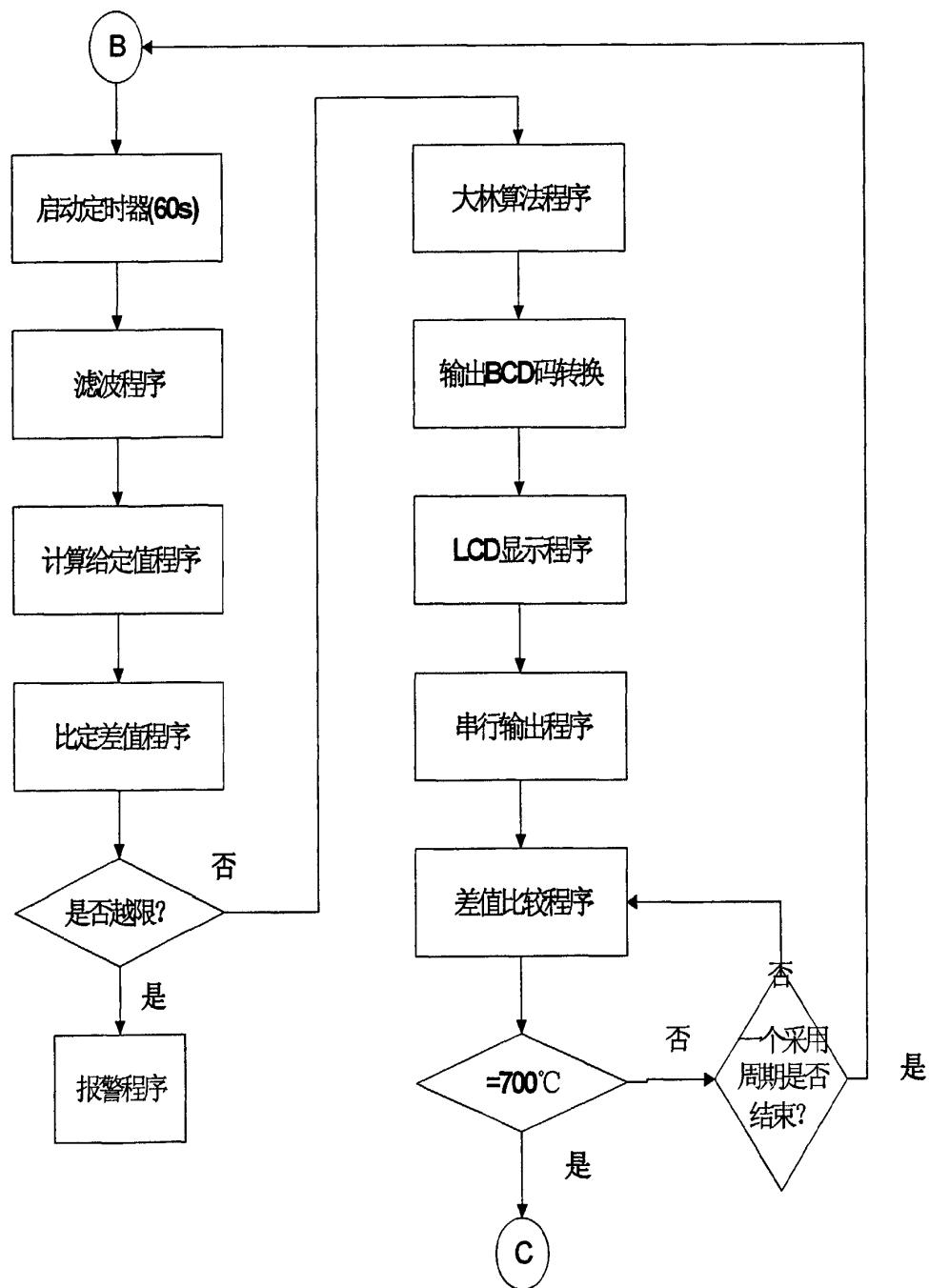
整个浮点数用 24 位二进制数表示，其中 16 位为尾数（包括数符），8 为阶码（包括阶码）。浮点运算的算法规则已经集成于函数包中，可以自动调用相应的函数来进行计算。

二、大林算法的计算

根据第三章所得的大林算法计算公式（3-5）可知，大林算法的每一步输出为一个自迭代过程，其输入分为两类数据：偏差值 $E(k)$ 和以前的输出值 $U(k-N-1)$ 。公式中的 A_1, A_2, B_0, B_1 均为常数，在系统参数确定后可以用软件仿真得到。公式中主要为相乘和相加操作，对于 AVR 单片机来讲，可以使用 C 语
言编写公式，大林算法的流程图如下：

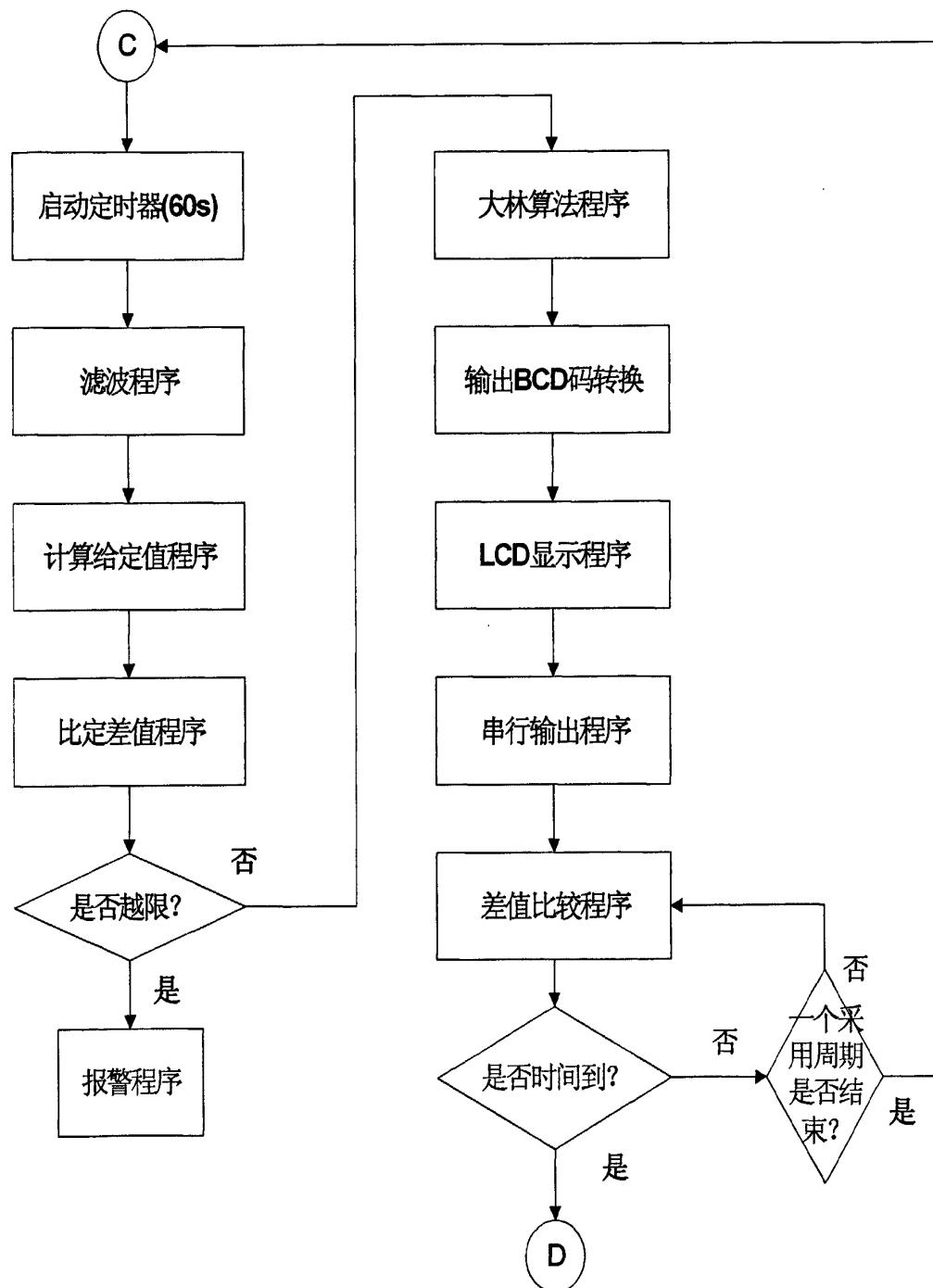


该阶段的软件流程图如下：



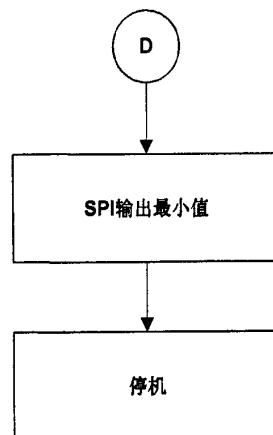
第三节 恒温段的软件设计

该阶段给定值为 700℃，程序执行过程和上一阶段工作过程大致相同。当恒温时间结束时，进入自由降温段。该阶段的程序流程图：



第四节 自由降温段的软件设计

该阶段中温控系统不起作用，系统软件到此只需输出一个 4mA 的控制信号将电动蝶阀关闭即可。该阶段的软件流程图如下：



第六章 系统设计结果与展望

第一节 系统设计的结果

一、数字控制系统 D(Z):

通过实验的方法得到了对象的传递函数:

$$G(s) = \frac{0.1488}{27.667s+1} e^{-120s}$$

根据大林算法的可以得到 D(Z):

$$D(Z) = \frac{\phi(Z)}{G(Z)[1 - \phi(Z)]}$$

用以下的命令输入 Matlab 来求解 D(Z), 其中 $\phi(Z)$ 的初始时间常数 τ_2 为对象的时间常数, 采样时间为 30 秒。程序如下所示^[7]:

```
gs=tf([1],[27.667,1],'inputdelay',120);

sys=tf([1],[30,1],'inputdelay',120);

ts=30;

gz=c2d(gs,ts,'zoh');

sysz=c2d(sys,ts,'zoh');

gcz=1/gz*sysz/(1-sysz);

[num,den]=tfdata(gcz,'v');
```

其中 gcz 即为所要求的数字控制系统的脉冲传递函数, 在 Matlab 中首先运行 `gethf`, 然后运行 `gcz` 命令后可得脉冲传递函数为:

Transfer function:

$$D(Z) = Z^{-4} * \frac{0.6321Z^{10} - 0.4378Z^9 + 0.0755Z^8}{0.6753Z^6 - 0.4969Z^5 + 0.0914Z^4 - 0.4269Z + 0.157}$$

Sampling time: 30

注: $D(Z)$ 在论文录入时格式有所变化, 但数学公式和参数保持一致。

二、闭环控制系统模型仿真：

得到上式以后，利用 Matlab 的 SIMULINK 工具进行系统的软件仿真。利用 SIMULINK 自带的工具库，分别调入：Step 函数来模拟阶跃响应，离散脉冲传递函数来模拟 $D(Z)$ ，连续脉冲传递函数来模拟对象的一阶环节，传输延时函数来模拟对象的滞后环节，Scope 模块来观察系统的阶跃响应的输出，同时采用添加 workspace 来打印输出，如图 6-1 所示：

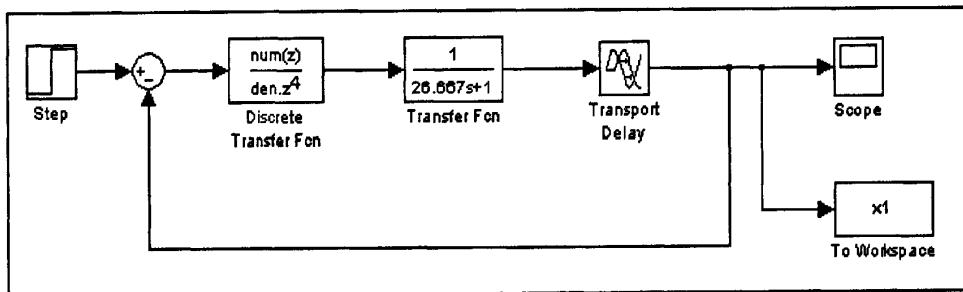


图 6-1

输入时间段为 1000，运行仿真后得到系统的阶跃响应如图 6-2 所示。

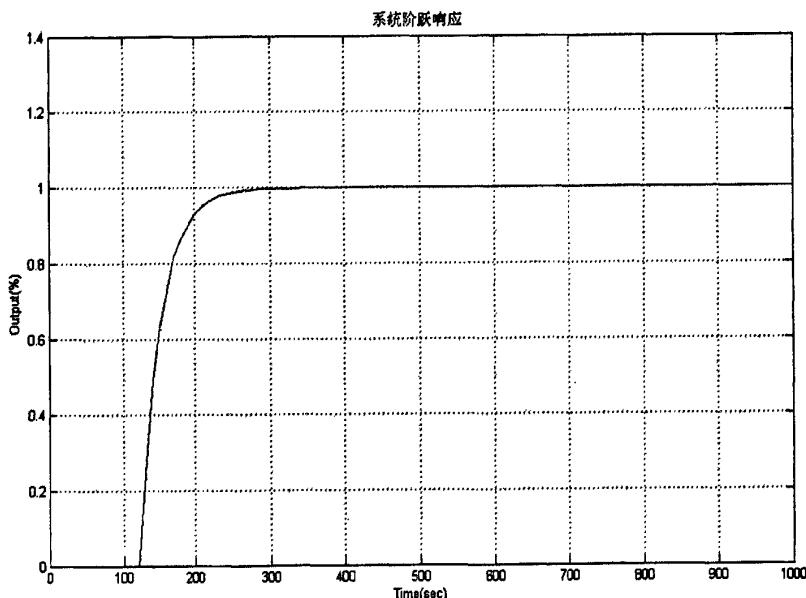


图 6-2

此时重新确定的数字控制器 $D(Z)$ 方程为：

Transfer function:

$$D(Z) = Z^{-4} * \frac{0.002996Z^{10} - 0.003999Z^9 + 0.00101Z^8}{0.6619Z^6 - 1.32Z^5 + 0.6579Z^4 - 0.001983Z + 0.001977}$$

Sampling time: 30

三、炉温控制系统实测结果：

在完成设备的组装调试后，按照退火工艺要求分为几个阶段进行了退火炉的实际调试。

	输出量	设定温度	实测温度	时间
快速升温段	20mA	无	约 133°C/h	约 3 小时
升温段	U(k)	60°C/h	55-60°C/h	约 5 小时
恒温段	U(k)	700°C	700°C +/- 6°C	10 小时
自由降温段	4mA	无	约 60°C/h	>10 小时

实验过程中遇到两大问题影响了实测数据，

- 大林算法输出为 0 的情况，即输出 4mA，使得阀门完全关闭导致炉膛熄火现象。
- 在恒温段阀门频繁动作导致温度调节有小超调（<10°C）。

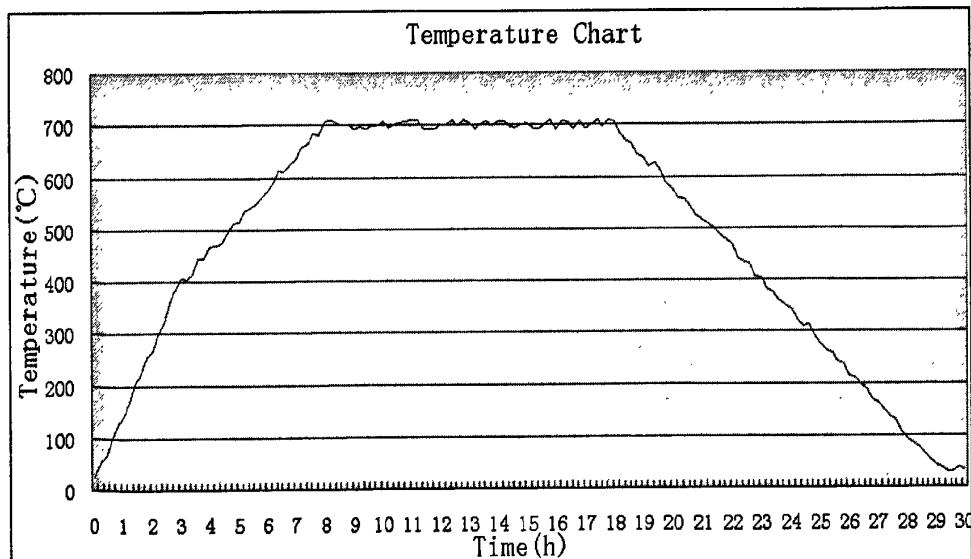


图 6-3

如图 6-3 所示，系统基本满足工艺要求，同时系统自带的液晶屏可以实时显示当前的设定值，输出电流值，实际采集的温度值，以及所处的温度段等信息。

第二节 系统的设计展望

在完成了系统设计初期提出的要求后，回顾温控系统的设计，在以下几个方面有待提高：

- a) 系统的网络互联。对于有系统联网要求的控制网络，本温控系统可以通过加入通讯模块的方式来联网。如 RS485，可以满足远距离，小数据量的传输；如无线 Zigbee,GPRS 模块，可以实现远程控制，无需预布线，实时传输现场的信号。
- b) 多回路控制。对于复杂的控制系统，不仅仅要求对温度进行控制，还会要求对流量，气压，含氧量等参数的控制。这些可以通过增加相应的传感器模块来完成相应的测量并升级系统的软硬件实现控制。
- c) 冷端补偿。由于本系统采用的是芯片内部集成的温度传感器，这类型的传感器的测量冷端的主要途径是芯片管脚，即冷端温度通过芯片的引脚将热量传递到芯片内部，受到周围电路和 PCB 走线的影响会使温度测量不准确。通过对芯片内部的布局走线进行调整，或是增加独立的测温电路来完成冷端补偿。
- d) 参数调节。仿真过程中发现大林算法对参数依赖性较大，数字控制器是基于理想的时不变系统而设计的，当对象的传递函数发生变化后，会对控制系统的调节品质产生影响，有待进一步完善。

结语

本文论述的炉温控制系统采用 SPI 通信规程，仅需三根引线就可以将整个系统的输入输出模块连接起来，采用高度集成的芯片来实现数据采集和输出，具有物料少，功能强，可靠性高，便于维护的特点，可以在较短的时间内完成硬件设计，软件编程，将系统的主要工作量放在研究控制对象上，再结合 Matlab 强大的仿真和计算功能，可以适合各类型独立控制算法。由于采用的是模块化设计，可以根据不同对象的特点选择不同的传感器设计，如可以扩展为各类型的热电偶输入，电压输入，电流输入，只需更换相应的 ADC 通道芯片；对于工业中使用的各种类型的执行机构，可以输出电流，电压，数字量的直接输出等。这种小型独立控制系统，对于成本低，改造时间短，对象简单等应用具有很大的市场潜力和实际应用价值。

参 考 文 献

- [1] 刘静. 冷轧罩式退火炉 TI 控制系统的研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002.
- [2] 窦坦明. 卧式连续退火炉控制系统及加热区温度控制优化 [D]. 武汉: 武汉科技大学, 2002.
- [3] 张胜利. 加热炉燃烧智能控制算法的研究 [D]. 河北: 河北工业大学, 2003.
- [4] 金以慧. 过程控制. 北京: 清华大学出版社 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [5] 山崎俊一. 计装 [J]. 计装, 1987, 30 (10) : 114-119.
- [6] 王志宏, 唐正宁, 李婧伟, 高松. LCD 显示器显示特性分析 [J]. 包装工程, 2008, (04)
- [7] 郑剑. 一阶惯性延时系统的免分析建模法 [J]. 福州大学学报, 2007, 35 (1) : 64-69.
- [8] 华东. 大林算法在电加热炉温度控制中的应用 [J]. 浙江工贸职业技术学院学报, 2004, (4) : 31-35.
- [9] 张德江. 大林算法与 SMITH 预估器的比较及前馈抗扰补偿 [J]. 长春工业大学学报(自然科学版), 1989, (2) : 29-33.
- [10] 师玉宝. 大林算法在纯滞后控制系统中的应用研究 [J]. 工业仪表与自动化装置, 2001, (4) : 6-7.
- [11] 刘明兰, 王运梅, 李京兵. Bang-Bang 大林算法在炉温微机控制系统中的应用 [J]. 冶金自动化, 1990, (5) : 13-15.
- [12] 朱学峰, 黄道平. 大林算法探讨 [J]. 化工自动化及仪表, 1987, (5) : 31-35.
- [13] 赵德元. 大林算法参数的自寻最优控制 [J]. 信息与控制, 1991, (3) : 54-59.
- [14] 李永存, 黄剑光. 燃气炉炉温 DDC 控制系统与节能研究 [J]. 湘潭师范学院学报(自然科学版), 2004, (2) : 40-43.
- [15] 梁读勇, 陈金醣. 大林算法几个问题的仿真研究 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 1984, (1) : 13-15.
- [16] 任继领, 陈寿元. MSC-51 单片机在陶瓷敏感器件烧结工艺中的应用 [J]. 石家庄职业技术学院学报, 2000, (2) : 21-23.
- [17] 谭永红. 关于大林算法的一些研究 [J]. 化工自动化及仪表, 1990, (4) : 18-20.
- [18] 陈金醣, 梁读勇. 大林算法在单板机上实现的精度分析 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 1985, (2) : 35-42.
- [19] 康赐荣. 瓷器隧道窑 8098 单片机控制探讨 [J]. 华侨大学学报(自然科学版), 1994, (4) : 15-18.
- [20] 欧阳鑫玉, 赵楠楠. 大林算法与 Smith 预估法在温度控制中的优效研究 [J]. 鞍山钢铁学院学报, 2001, (4) : 277-280.
- [14] 张涛, 薛鹏骞, 孟庆春. 大林算法在位置随动系统中的应用 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, (3) : 398-400.

- [15] 杨琳娟, 李秋明, 顾德英. 大林算法在炉温控制中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2005, (S2): 450-454.
- [16] 张汉祥. 消除振铃现象的一种改进方法 [J]. 自动化学报, 1992, (4): 508-512.
- [17] 崔墨. 单片微机在 RJX 系列加热炉上的应用 [J]. 电工技术, 1996, (11): 26-29.
- [18] 刘建辉, 叶景楼, 杨永. 自寻优 Dahlin 控制算法的研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 1992, (4): 58-62.
- [20] 王俊杰. 检测技术与仪表 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社. 2002.
- [21] 夏路易, 石宗义. 电路原理图与电路板设计教程 [M]. 北京: 北京希望电子出版社. 2002.
- [22] 李学海. PIC 单片机实用教程—提高篇 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2002.
- [23] 胡大可. MSP430 系列单片机 C 语言程序设计与开发 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社. 2003.
- [24] 沙占友. 智能化集成温度传感器原理与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社. 2002.
- [25] 黄泽锐. 热电偶原理及其测定 [M]. 北京: 中国计量出版社. 1993.
- [26] J·F·斯库利 (邓大任译). 科学和工业中温度的测量与控制 [M]. 北京: 计量出版社. 1985.
- [27] 欧阳振中. 怎样做毕业设计和毕业论文 [M]. 武汉: 中南工业大学出版社. 1989.
- [28] 程卫国, 冯峰, 王雪梅等著. MATLAB5. 3 精要编程及高级应用 [M]. 北京: 机械工业出版社. 2000.
- [30] 杨琳娟, 李秋明, 顾德英. 大林算法在炉温控制中的应用 [A]. 杨琳娟. 第七届青年学术会议 [C]. 第七届青年学术会议:, 2005-08-01.
- [31] 刘锡权. 电加热炉温度控制系统的设计 [D]. 吉林: 吉林大学, 2008.
- [32] 胡玲艳. 42m 卧式退火炉 PID —模糊控制系统在 PLC 环境下的设计与开发 [D]. 大连: 大连海事大学, 2004.
- [33] 周瀚. 型钢加热炉系统中一种温度及空燃比控制方式研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [34] 张咏梅. 退火炉 PLC 控制系统的应用 [D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- [35] 边琳. 时滞控制系统控制方法的研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2007.
- [36] 邓华. 电动阀门智能控制器及手持调试仪研制 [D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [37] 卢伟伟. 基于 AVR 单片机的现场监控系统的开发与实现 [D]. 大连: 大连海事大学, 2008.

后记

随着“结语”最后一个标点的落下，我的两年多的在职研究生生活即将落幕。望着满眼的文字，我心潮澎湃，既有对未来征程的向往，亦有对过往美好的留恋。虽然我总在说，天下无不散的筵席，但当离别悄悄走近，感觉学校的一草一木都透露着伤感，同学的一笑一颦都诉说着别离，往事也总是不经意地跑到眼前。

两年前，我怀揣着对知识的渴望，挤进了理想中的复旦；两年后，我即将告别校园继续自己追逐梦想的征程。是老师们给了我追逐梦想的翅膀，是家人给了我遨游蓝天的力量。我要感谢我的导师孔庆生老师，没有他的指导，我的论文就没有灵魂；我要感谢企业导师徐秀芳，没有她的教诲，我的论文就没有血肉；我要感谢我的家人，没有她的关心，我的在职研究生生活就没有这么精彩。未来在我手中，我要努力打拼；过往在我心中，我会永远珍藏。

刘建冬

2009年3月27日于复旦