

摘 要

电阻钎焊是一种利用电流流过电极和焊件所产生的电阻热进行钎焊的焊接工艺。它工艺简单，劳动条件好，容易实现生产自动化，可以被广泛的应用于焊接生产中。而对于钎焊来说，焊接接头质量的好坏，与焊接过程中的温度有很大的关系。但是在焊接过程中对焊接温度进行控制，一直以来没有一个很有效的、简单的方法。因此，如何在焊接过程中进行有效的焊接温度控制，对于电阻钎焊，是一个很值得研究的课题。

因为电阻钎焊焊接中的热量产生于电流流过电极和焊件的过程中，所以为了实现焊接过程温度的控制，我们可以考虑控制焊接过程中的焊接参数，比如流过电极和焊件的电流的大小、通电时间等。

为此，本文在模糊理论的基础上，建立温度控制的模糊系统。通过实时采集焊接过程中的温度，反馈给该系统，由系统对采集的温度信号进行模糊化。利用构造的隶属函数表进行模糊处理，然后再经过去模糊化，输出一个控制信号，利用控制主电路晶闸管导通角来控制电流通断，从而实现对焊接温度的控制。

在本文中，我们采用了以 Atmega128L 单片机为核心构成的恒温控制系统，对单片机系统内部各功能模块电路的设计做了详细的介绍。给出了整个控制程序的设计思路。此外，自行设计控制了反向并联晶闸管的触发电路。

通过试验论证，该系统对于本文所提出的控制温度方法是可行的。

关键词： 电阻钎焊； AVR 单片机； 恒温控制； 模糊控制； 触发电路

ABSTRACT

Resistance braze is one of the welding crafts that utilize the heat generated at electrode and weldment when current is flowing. The craft is simple; the labor condition is good, apt to realize the production automation. It can be applied to produce in welding extensively. And for brazing, the quality of welding connector has much to do by the welding temperature in the welding course. But to controlling the temperature, there is not a very effective, simple method all the time. So how to do the effective controlling for the welding temperature, it is a subject that is very worth studying for the resistances braze.

Because the heat used in resistance braze is come from the welding course that the current is flowing through the electrode and weldment .In order to control the welding temperature, we can use the means that control the temperature by controlling the current value and the current time.

For this reason, this paper utilizes the fuzzy theory, set up the fuzzy system of temperature control. We can gather the temperature signal and feedback it to system in real time, dealt with the data by the fuzzy system. The process for fuzzy control includes fuzzification, fuzzy-inference, defuzzification. After fuzzy process, we output a controlling signal and can realize the control to the temperature of welding.

In the paper, we have adopted the Atmega128L microchip as a controlling core for the thermostatically control system. Have done the detailed introduction to the design of every function module circuit of the microchip system. Provided the whole idea of designing of fuzzy control procedure. Meanwhile we also design the professional trigger circuit to control Thyristor.

Proving in the test, it is feasible to control temperature by the system designed by us.

Key words: Resistance braze; AVR microchip; Thermostatic control; Fuzzy control, Trigger circuit

独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果，除了文中特别加以标注和致谢之处外，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 天津大学 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。

学位论文作者签名： 杨敏 签字日期： 2005 年 2 月 19 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解 天津大学 有关保留、使用学位论文的规定。特授权 天津大学 可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。同意学校向国家有关部门或机构送交论文的复印件和磁盘。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名： 杨敏

导师签名： 廉金瑞

签字日期： 2005 年 2 月 19 日

签字日期： 2005 年 2 月 19 日

第一章 绪论

1.1 电阻钎焊概述^[1-3]

电阻钎焊是钎焊的一种。钎焊是人类最早使用的材料连接手段和焊接方法。它已经广泛地应用于加工制造业中，在桥梁、造船、航空航天、海洋工程、核动力工程、微电子技术、石油化工以及电力电子等尖端技术部门的现代化工业生产过程中，更是起到了举足轻重的作用。例如，在“阿波罗”号宇宙飞船的生产过程中，大约有 1045 处接头是采用钎焊方法制造的；美国麦道公司生产地 343 座 DC-10 飞机，有将近 2000 个钎焊接头分布在 850 米长的管路中；波音公司生产的 707 飞机，其液压系统中有将近 5000 个接头利用了钎焊方法进行连接。

目前，在实际生产中广泛采用的钎焊方法有烙铁钎焊、火焰钎焊、电阻钎焊、超声波钎焊、感应钎焊、浸渍钎焊、炉中钎焊。

其中，烙铁钎焊多用于手工操作，烙铁本身的重量不能太大，同时受烙铁自身功率的限制，一般只适用于以软钎料钎焊薄件和小件。烙铁钎焊多用在电子、仪表工业部门。

火焰钎焊应用比较广泛，通用性大，工艺简单。其缺点是手工操作，加热温度难以掌握，要想达到比较满意的钎焊质量，要求工人有比较高的技术水平。

超声波焊也是一种以机械能为能源的固相焊接方法。进行超声波焊时，焊接工件在较低的静压力下，由声极发出的高频振动能使接合面产生强烈摩擦并加热到焊接温度而形成结合。超声波焊可以用于大多数金属材料之间的焊接，能实现金属、异种金属及金属与非金属间的焊接。可适用于金属丝、箔或 2~3mm 以下的薄板金属接头的重复生产。

感应钎焊是依靠被焊工件在交变磁场中产生的感应电流的电阻热来实现加热。感应钎焊的特点是加热迅速，并且因为是整体加热，可以焊接结构比较复杂的焊件。缺点是因为焊件整体加热，导致填充焊料不方便，比较难控制焊接接头的质量。

浸渍钎焊是把焊件局部或整体地浸入熔化的盐混合物或钎料中来实现钎焊过程的。这种钎焊方法，由于液体介质热容量大，导热好，能迅速而均匀地加热焊接，钎焊过程的持续时间一般不超过二分钟。因此，生产率高，焊件的变形、晶粒长大和脱碳等都不显著。钎焊过程中液体介质隔绝空气，保护焊件不受氧化。并且钎焊过程容易实现机械化，有时能同时完成淬火、渗碳、氰化等热处理过程，广泛用于各种合金的钎焊。用于电子器件的焊接所采用的波峰焊也属于这一类。

炉中钎焊是利用电阻炉来加热焊件。根据炉中钎焊区的气氛组成可以分为：空气

炉中钎焊、还原气氛炉中钎焊、中性气氛炉中钎焊、活性气氛炉中钎焊、低真空钎料和真空炉中钎焊。现在，真空炉中钎焊在工业生产中应用比较广泛。它用于焊接难钎焊的金属和合金，如铝合金、钛合金、高温合金以及难熔金属，且不需要使用钎剂。所钎焊的接头光亮致密，且具有良好的机械性能和抗腐蚀性能。因此在一些尖端技术部门中得到越来越多的应用。

电阻钎焊，是利用电流通过焊件或与焊件接触的加热块所产生的电阻热加热焊件和熔化钎料的钎焊方法。钎焊时对钎焊处应施加一定的压力。

电阻钎焊的基本原理与电阻焊相同，与其他的钎焊方法比较起来，其优点是加热迅速，生产率高，加热十分集中，对周围的热影响小，劳动条件好，容易实现生产的自动化。但是加热温度不易控制，接头尺寸不能太大，形状不能很复杂。电阻钎焊原理图如图 1-1 所示。

一般的电阻钎焊方法与电阻焊相似，是用电极压紧两个零件的钎焊处，使电流流

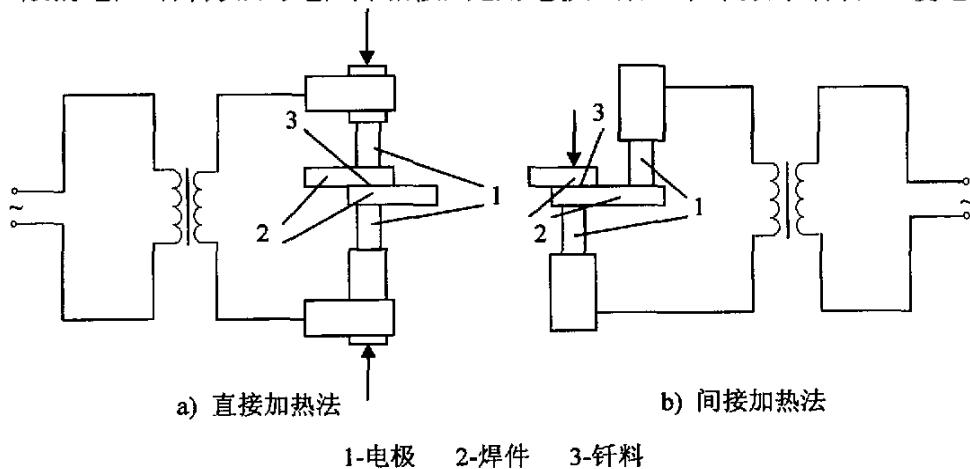


图 1-1 电阻钎焊原理图

经钎焊形成回路，主要靠钎焊面及毗邻的部分母材中产生的电阻热来加热。而特点是被加热的只是零件的钎焊处，因而加热速度很快。在这种钎焊过程中，要求零件钎焊面彼此保持紧密贴合。否则，将因接触不良，造成母材局部过热或接头严重未钎透等缺陷。在某些情况下，例如为了得到更好的压紧状况，焊件的一侧可使用合适的垫板，而把两个电极安排在焊件的同一侧。在微电子产品中，往印刷电路上装连元器件引线时，由于结构原因，也多采用两个电极在同一侧的所谓平行间隙钎焊法。电阻钎焊可采用钎剂和气体介质去膜。但对于这种加热方式，不能使用固态钎剂，因其不导电。因此，如有自钎剂钎料选用是最方便的。当必须采用钎剂时，应以水溶液或酒精溶液形式使用。

电阻钎焊最适于采用箔状钎料，它可以方便地直接放在零件的钎焊面之间。另外，在钎焊面预先镀复钎料层也是常采用的工艺措施，这在电子工业中应用很广。若使用

钎料丝，应使钎焊面加热到钎焊温度后，将钎料丝末端靠紧钎缝间隙，直至钎料熔化，填满间隙；并使全部边缘呈现平缓的钎角为止。

电阻钎焊还有可称为间接加热方式的两种类型：一种是电流只通过焊件中的一个零件，钎料的熔化和其它零件的加热均靠导热来实现；另一种是电流不通过焊件，而是通过紧靠焊件的加热块，焊件则靠由加热块传导来的热量加热。这两种电阻钎焊方法的主要优点是便于钎焊热物理性能差别大的材料和厚度相差悬殊的焊件，使之不会出现加热中心偏离钎焊面的情况。由于电流不需要通过钎焊面，因此可以直接使用固态钎剂，而且对零件钎焊面的配合要求也可以适当放宽，这些均简化了工艺。但为了保证装配准确度和改善导热过程，对焊件仍需要压紧。由于在这两种方式中，焊件的加热是一个热传导过程，因此加热速度较慢。目前，加热块形式的电阻钎焊在电子工业的印刷板电路生产中使用甚广。

电阻钎焊适合宜于使用低电压大电流，通常可在普通的电阻焊机上进行，也可使用专门的电阻钎焊设备（电阻钎焊钳或电阻钎焊机）。根据所要求的导电率，电极可采用碳、石墨、铜合金、耐热钢、高温合金或难熔金属制造。一般电阻钎焊用的电极应有较高的导电率；相反，用作加热块的电极则需要用高电阻的材料。在所有情况下，制作电极的材料应不为钎料所润湿。为了保证加热均匀，通常电极的端面应制成与钎焊接头相应的形状和大小。电阻钎焊使用的电极压力应比电阻焊使用的低，目的仅在于保证零件钎焊面良好的电接触和从缝中排除多余的熔化钎料和钎剂残渣。

电阻钎焊目前主要用于电机的定子线圈、导线端头、各种电触点，以及电子设备中印刷电路板上集成电路块和晶体管等元器件的连接。

1.2 温度控制及其特点^[4,5]

温度是国际单位制中七个基本量之一，在科学的研究和生产实践的诸多领域都占有极为重要的地位，对温度进行测量和控制也是科学实验和工业生产中经常要解决的重要问题。例如，在热科学领域，比热是衡量物质热学性质的重要基本参数，然而，准确的测定各种物质在不同温度条件下的比热是非常困难的。为了高精度的测量物质的比热，有一系列的问题需要解决，其中最重要的是高精度的绝热控制和温度测量。

在实际的实验或生产环境下，由于系统内部与外界的热交换是难以控制的，其他热源的干扰也是无法精确计算的，因此温度量的变化往往受到不可预测的外界环境扰动的影响。为了使系统与外界的能量交换尽可能的符合人们的要求，就需要采取其他手段来达到这样一个绝热的目的，例如可以让目标系统外部环境的温度与其内部温度同步变化。根据热力学第二定律，两个温度相同的系统之间是达到热平衡的，这样利用一个与目标系统温度同步的隔离层，就可以把目标系统与外界进行热隔离。

另外，在大部分实际的环境中，增温要比降温方便得多。因此，对温度得控制精

另外，在大部分实际的环境中，增温要比降温方便得多。因此，对温度得控制精

度要求比较高得情况下，是不允许出现过冲现象，即不允许实际温度超过控制的目标温度。特别是隔热效果很好的环境，一旦出现过冲，将难以很快把温度降下来。这是因为很多应用中只有加热一个环节，而没有冷却的装置。同样道理，对于只有冷却没有加热环节的应用中，实际温度低于控制的目标温度，对控制效果的影响也是很大的。

鉴于上述这些特点，高精度温度控制的难度比较大，而且不同的应用环境也需要不同的控制策略。

对温度的测量与控制是自动控制在工程中应用的一个重要方面^[6]。在一般的工业生产中，温度控制精度达到±5℃已经能够满足要求，利用传统的经典控制方法即可实现；在一些有较高要求的应用领域，如某些晶体的生长，就要求温控精度达到±0.1℃～±0.5℃，即称为高精度温控，这就要求采用各种现代控制方法对生产过程进行控制；而在一些对环境温度有特殊要求的科学试验中，为了得到更加准确的结果，希望在较小温度变化范围内，温控精度能够达到±0.01℃，这时采用已有的控制方法将难以实现。目前，国内外高精度控制多采用各种自适应、自整定技术，但一般仅对某一特定工程应用有较好效果，而且多为恒温控制，动态变化的温度控制精度更难以提高。高精度的温度控制还有待于进一步的理论和应用研究。此外，少数测温系统可以得到0.01℃的最小量程，控温精度还无法达到如此精度，但这说明温控精度达到±0.01℃具有理论上的可能性和工程的衡量手段，只是还需要进一步的理论和应用研究。

1.3 本课题研究的问题^[3]

从钎焊的工艺来看，影响钎焊质量的因素很多^[1]。比如钎料成分、钎料的润湿性等等。在这些因素中，钎料的润湿性是一个最基本和最重要的因素。钎料的润湿性的好坏，直接决定着钎焊焊接接头的质量的好坏。

钎料润湿性的好坏，主要受以下因素的影响：

- 1、钎料和母材的成分；
- 2、温度的影响；
- 3、金属表面氧化物的影响；
- 4、钎剂的影响；
- 5、母材表面状态的影响；
- 6、表面活性物质的影响。

从焊接工艺角度来考虑，在影响钎料润湿性的因素中，除了温度是必须在焊接过程中进行控制的以外，其它几个因素的影响都可以在焊接前期的工作中基本消除或降低。而温度因素是一个在钎焊过程中控制的参数，由于温度的热惯性很大，因此对温

度进行精确的实时控制（特别是对一些合金材料的钎焊）很难实现。现在除了手工用的电烙铁可以进行温度控制以外，一般用来钎焊的焊机还没有或没有一个很有效的方法对钎焊时的焊接温度进行比较精确的控制。

本课题是基于与某电机厂合作项目——电机转子的接线铜排的电阻钎焊工艺改善而进行的。目前，该厂在进行接线铜排的焊接时，采用气动焊钳进行电阻钎焊。但是存在以下问题。

1、焊接时间过长。在钎焊铜排时，从焊钳加紧通电，到结束焊接，一般需要 20s 以上。而对于一台大型发电机的转子，接头有一，二百个，所以导致生产瓶颈，严重影响生产效率。

2、在常时间高温情况下，包在铜排上的绝缘纸发生碳化，绝缘效果下降，需要重新返工，更加造成人力，物力和时间的浪费。

3、焊接过程中补焊频繁。因为该钎焊过程采用人工填充钎料，所以操作工根据自己的判断，频繁的进行钎料的补充，浪费大量钎料。

4、焊接接头质量不稳定。该钎焊过程属于人工操作过程，所以，针对不同的操作工，焊接接头的评定标准也不相同，导致焊接接头质量不稳定。但是对于电机来说，只要有一处接头的质量不达标，就必须返工。所以接头的质量大大影响产品出货时间。

针对钎焊温度控制问题，结合工厂实际情况，提出以下解决方案。

对于铜排的钎焊，采用自动控制。在整个过程中，采用程序自动控制，设定好焊接参数，预先将焊料填充在焊件之间，从而缩短焊接时间，提高焊接生产率。为了控制焊接质量，考虑采用闭环控制，控制焊接温度，一方面使焊料充分熔化流动，另一方面，保证绝缘纸不会被碳化。

1.4 本课题具体解决方法

从电阻钎焊过程中可以看出，很多因素都会影响被钎焊工件的温度，而这些因素（例如，周围环境的温度，气流情况，冷却水的温度及水流状况，被加热材料及夹具材料的发射率随着温度的变化而变化的情况等）中，各个因素对温度变化的影响程度又会各不相同。电阻钎焊本身的特点是短时间快速加热，其加热时间可以在短短几秒中达到几百或上千的温度值。因此，很难建立一个比较精确的数学模型，而许多传统经典的控制算法，如 PID 控制。它是最早发展起来的控制策略之一，由于其算法简单，鲁棒性好和可靠性高，被广泛应用于工业过程控制之中，尤其适用于可建立精确数学模型的确定性线性控制系统中。而对于电阻加热这种非线性，时变不确定的过程，缺乏精确的数学模型，应用 PID 控制算法很难达到理想的控制效果。常规 PID 控制器参数往往整定不良，性能欠佳，运行时对于实际情况的适应性很差。以模糊数学为基础发展起来的模糊控制技术是一种非线性的控制方式。实践结果统计表明，对无法

取得数学模型或者数学模型相当粗糙的系统，利用模糊控制技术能够取得令人满意的控制效果。模糊控制技术作为现代智能控制的一个主要分支，因其简单，实用，有效等优点已经成为当前控制领域的又一研究热点^[7]。对于电阻钎焊这种温度要求很严格的非线性系统，采用模糊控制技术能获得令人满意的控制效果。因此，结合温度控制的特点，本课题的温度控制方案选定利用模糊控制技术，构造模糊控制器，实现对电阻钎焊的温度控制。

目前，模糊控制器的构造技术有三种：

1、采用传统的单片机或者微型机作为物理基础，编制相应的软件实现模糊推理和模糊控制；

2、采用模糊单片机或者集成电路芯片构造模糊控制器，利用配置数据来确定模糊控制器的结构形式；

3、采用可编程门阵列构造模糊控制器，这种方式主要是构造模糊推理控制表，需要预先脱机进行处理；

鉴于目前的各种实际情况，我们选择方式 1 作为构造模糊控制器的方案。在电阻钎焊和温度的测量的基础上，根据本文的研究内容的特点，我们采用接触型的热电偶进行温度的采集，进行单片机的选择和模糊控制系统硬件、软件的具体设计。

第二章 单片机系统总体电路设计

单片机系统的开发包括硬件设计和软件设计。硬件设计包括了不同硬件功能模块的设计。程序设计主要是单片机系统的控制程序的设计。

2.1 单片机系统的硬件设计

2.1.1 单片机系统整体电路结构

单片机控制的电阻钎焊恒温控制系统整体电路结构如图 2-1 所示。

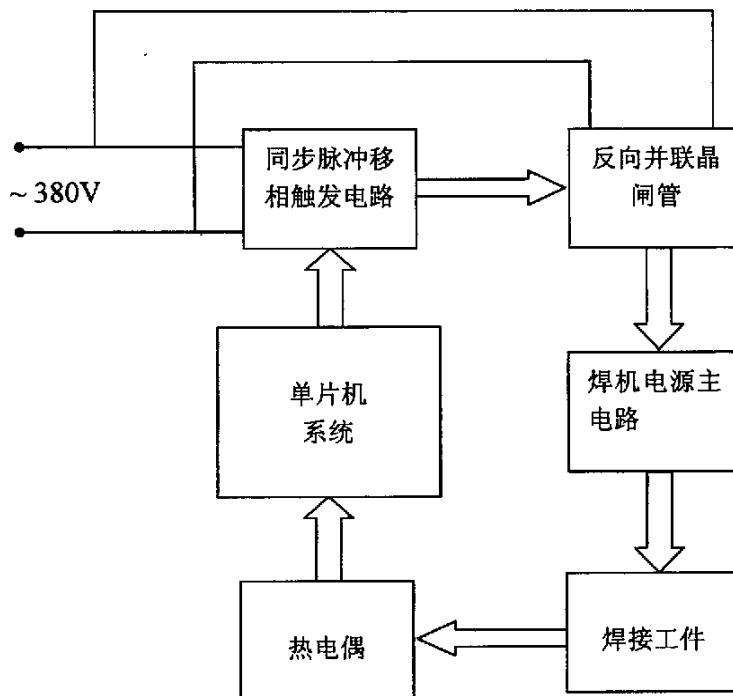


图 2-1 电路系统结构框图

整个系统主要由电阻焊机电源主电路、单片机控制系统、同步脉冲移相触发电路组成。为了便于采用微机控制，可采用串行接口与微机连接^[8,9]。单片机控制电阻焊机电源主电路的基本工作原理如下。

工频电网电压分别加载在电源主电路（反向并联晶闸管）和同步脉冲移相触发电路上。焊接开始，由单片机系统给同步脉冲移相触发电路一个比较电压 V_k ，由 V_k 控制触发板电路，给反相晶闸管提供触发脉冲，使晶闸管导通，电流流过焊件，焊件开始

升温。随着 V_k 的改变, 可以给反相并联晶闸管提供一个可改变晶闸管触发角的触发脉冲, 从而可以控制晶闸管的导通和关断时间而达到控制焊接温度的目的。而 V_k 是随着单片机系统采集的温度信号与设定的温度值进行比较后的差值的变化而变化的。这样, 在焊接开始前根据钎料的熔点设定好焊接的最佳温度值, 焊接开始后, 随着焊件通过电流, 温度不断上升。当温度上升到设定的温度范围内时, 单片机系统开始采集温度信号, 并且与设定温度值不断进行比较。一旦焊件温度值超出设定温度范围, 单片机则给触发电路一个控制信号, 使触发电路停止发出触发信号, 从而使晶闸管关断。当电流停止流过焊件后, 温度逐渐降低, 此时单片机还在不断采集温度信号, 并与设定温度值进行比较。当焊件的温度值低于设定的温度范围时, 单片机系统则重新给触发电路一个控制信号, 并重新发出一个比较电压 V_k , 从而控制触点电路给出一个触发信号, 触发晶闸管门极, 使晶闸管导通, 使电流重新流过焊件, 使焊件温度上升。该系统利用这种闭环反馈控制, 来控制温度保持在一个给定的温度范围内, 从而实现恒温控制。

2.1.2 焊机电源主电路及控制的实现

如图 2-2 所示, 为焊机电源主电路图。从图中可以看出, 控制电路输出脉冲触发电压 V_g , 控制反向并联晶闸管 Q_1 和 Q_2 的门极, 从而控制 Q_1 和 Q_2 的导通。在模糊控制过程中, 通过控制电路采集电极的温度, 改变 V_g 的间隔频率, 从而改变晶闸管的触发角, 到达控制流过电极电流的大小和时间, 最终实现电极温度的模糊控制。

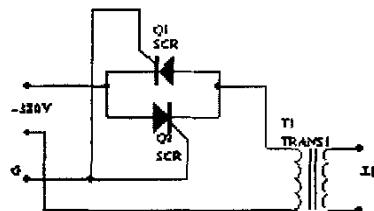


图 2-2 焊机电源主电路

2.2 控制系统的设计

单片机控制
系统主要由以下
几部分组成^[10]:
Atmega128L 最小
系统、数模转换
(D/A) 电路、键
盘输入及数码电
路组成^[11,12], 如图
2-3 所示。该电路

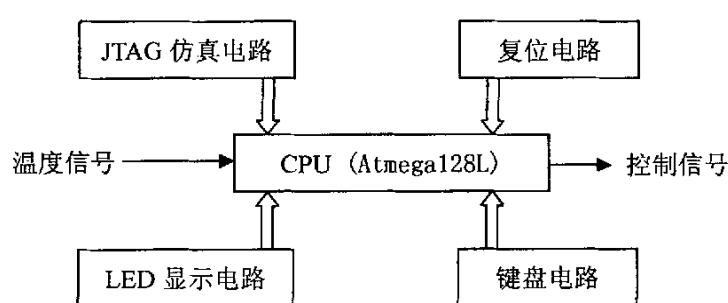


图 2-3 单片机系统硬件结构

2-3 所示。该电路以 Atmega128L 单片机为核心，从键盘选择适当的焊接方法，并输入下相应的焊接工艺参数。当单片机判断当前为焊接状态时，从串行口（SPI）采集温度信号，从其 I/O 口输出信号，通过 D/A 转换，经过比较器，将电流信号转换成电压信号，提供给同步移相脉冲电路，实现对焊接主电路的控制。

下面简要介绍一下这几部分的功能。

(1) Atmega128L 芯片 它是单片机控制系统的核心部分，通过程序的运行使它与外围芯片交换信息，来实现焊机所需的控制功能。

(2) 数模转换（D/A）转换电路 将单片机输出的数字量转换成模拟量来提供基本控制电路所需的给定电压。

(3) 数码显示及键盘输入电路 进行焊接工艺参数的设定、调节和显示。

2.3 单片机系统各部分介绍

2.3.1 单片机的选择^[13]

单片机即单片微型计算机，它把组成微型计算机的各功能部件：中央处理器 CPU、随机存取存储设备 RAM、只读存储器 ROM、I/O 接口电路、定时器/计数器以及串行通讯接口等部件制作在一块集成芯片中，构成一个完整的微型计算机。从 20 世纪 70

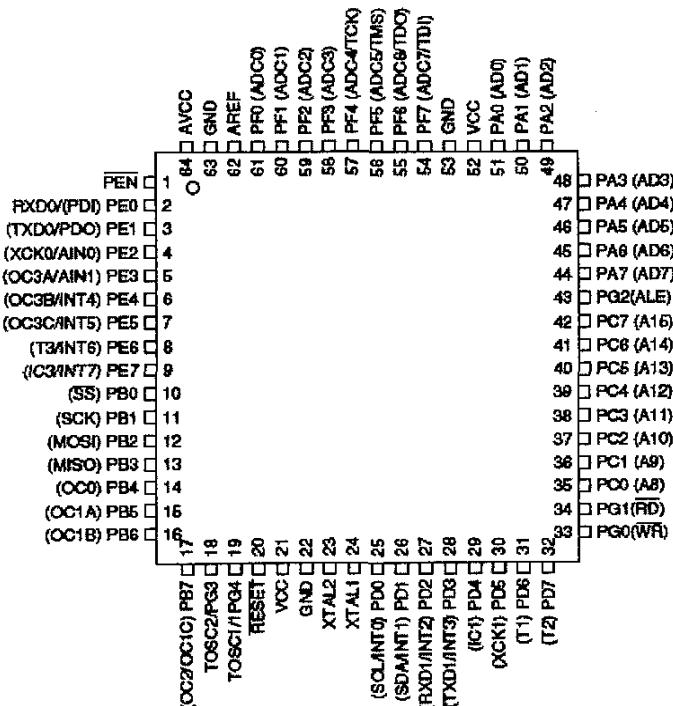


图 2-4 Atmega128L 封装结构

年代 Intel 公司推出第一代以 MCS-48 为代表的 8 位单片机以来，单片机的发展速度是惊人的。其集成度越来越高，功能越来越强大，由原来的 8 位机发展成 16 位、32 位，当然 8 位机的应用仍然非常广泛；原来是 Intel 公司独家生产，后发展成多家公司纷纷推出自己的产品，如 Microchip 公司的 PIC 系列、ATMEL 公司的 AVR 系列等等。本文的单片机系统就采用了 AVR 系列功能最为强大的高档芯片 Atmega128L。如图 2-4 是该芯片的封装结构。

Atmega128 单片机性能特点如下：

- (1) 128 KB Flash ROM、4KB EEPROM、4KB SRAM，可以使用 C 语言，编程更容易，可任意扩展 64KB 外部存储器。
- (2) 独立加密位的 BOOT 代码区，通过 BOOT 区，程序可实现在线自编程，便于产品升级与维护。
- (3) 符合 IEEE1149.1 规范的 JTAG 功能；通过 JTAG 工具，实现片上仿真与在线烧录。
- (4) 8 通道 10 位 ADC，带内部基准与高速转换模式；片内模拟比较器。
- (5) 2 个可编程的 USART 串口，可通过串口来实现对芯片的在线编程；主从 SPI 接口。
- (6) 可校准的最高至 8MHz 的内部 RC 振荡器；片外晶振振荡幅度可调，以改善电磁干扰性能。
- (7) TQFP64 封装，53 个 I/O 口，每个口可输出 40mA 电流，可直接驱动 LED。

2.3.2 键盘电路

1、键盘工作原理

按键设置在行、列交点上，行、列线分别连接到按键开关的两端。列线通过上拉电阻接 PA 口低四位，行线直接连 PA 口高四位。高四位 PA4-PA7 设为输出状态，低四位 PA0-PA3 设为输出状态，初始状态为高电平。扫描键盘时，行线端口 PA4-PA7 输出低电平，检测列线端口 PA0-PA3；当无按键动作时，列线出于高电平状态，而当有按键按下时，列线电平将由与此列线相连接的行线电平决定。行线电平如果为低，则列线电平为低；

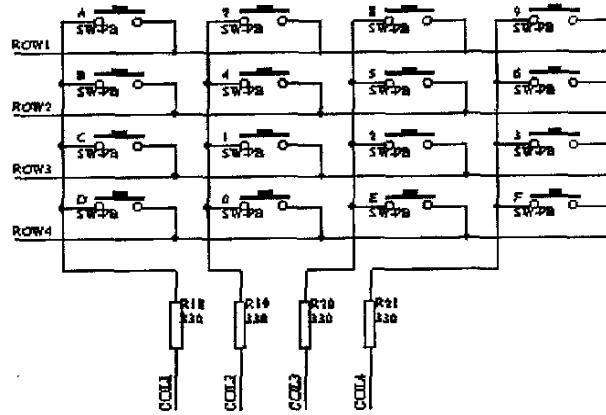


图 2-5 键盘电路

行线电平如果为高，则列线电平亦为高。这一点是识别矩阵键盘按键是否按下的关键。电路如图 2-5 所示^[14]。

2、按键识别

在此键盘逻辑中，我们采用扫描法来实现按键的识别。可以将行线作为扫描线，列线即作为检测线。如前所述，按键进行后，与此键相连接的列电平将由与此键相连的行线电平决定，而列线电平在无键按下时出于高电平状态。如果让所有行线同时出于低电平，则无法识别是哪一个键被按下。因此，单片机是依次向每一行线输入一个低电平，同时向其余的行线输出高电平，并从列线检查各按键的状态。由于列线接有与行相反的电平，因此，如果无键按下，则列线均为高电平；如果有键按下，则相应于该按键的列线电平为低电平，相应未按下键的列线则均为高电平，分析对应的扫描状态和检测结果，便可识别出被按下的键位号。

2.3.3 LED 显示电路

数码显示管（LED）与键盘电路配合使用，能对系统设定的参数进行显示，并能反映程序运行及系统工作状态。

LED 显示块是由发光二极管显示字段组成的显示器，有共阳极和共阴极两种^[14,15]。共阳极 LED 的发光二极管阳极连接在一起，通常此公共阳极接正电压，当某个发光二极管的阴极接低电平时，发光二极管被点亮，相应字段被显示。电路如图 2-6 所示。采用两组 LED 显示块。

单片机对 LED 管的显示可以分为静态显示和动态显示。为了减少硬件开销，通常采用动态扫描显示。由于 Atmega128 能输出 40mA 的电流，可直接驱动数码管，因此无需驱动电路，可直接与数码管相连接。为使流过数码管的电流不至于过大，在 PD 口与 LED 管脚之间接上 220Ω 的电阻。另外，PNP 三极管与 PE 口的低六位及 LED 公共阳极相连，控制各位 LED 状态。

2.3.4 数模转换（D/A）转换电路

数模转换（D/A）转换电路的作用是将单片机输出的数字量转换成模拟量来提供基本控制电路所需的给定电压。

在连续量控制场合，单片机输出的数字控制量必须经 D/A 转换后才能驱动执行

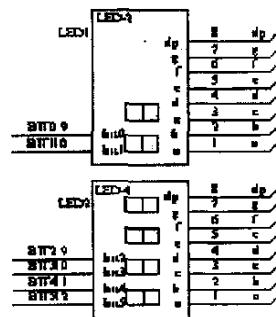


图 2-6 LED 显示电路

元件，从而实现单片机对系统的有效控制。

在本设计的焊机系统中，为了实现钎焊过程的恒温加热，必须实现根据温度的变化来控制反相晶闸管的关断与导通，所以就必须控制使晶闸管导通的触发脉冲。触发脉冲的相位由给定的电压 V_k 的大小控制。因而必须由单片机提供一个可以变化的电压值。为此就需要采用 D/A 转换器将单片机输出的数字量转换成模拟量。在本文的设计中采用了 8 位单片 D/A 转换器 DAC0832 来产生电流，然后经过比较器 LM358，将电流信号转化成所需的电压信号^[16]。

DAC0832 芯片结构如图 2-7 所示。此芯片是一种 8 位单片 D/A 转换器，它采用 R-2RT 型网络转换法，由二级缓冲器和 D/A 转换电路组成，可直接与 Atmega128L 的总线连接。输入寄存器用来锁存数据总线上送来的数据。当输入锁存允许控制信号 ILE (高电平有效)、片选输入信号 \overline{CS} (低电平有效) 和写控制信号 1 $\overline{WR_1}$ 和写控制信号 2 $\overline{WR_2}$ (低电平有效) 同时有效时，输入寄存器中的数据送 DAC 寄存器，然后由 D/A 转换电路进行转换。最后，在 I_{OUT_1} 和 I_{OUT_2} 端获得模拟量的电流输出信号。然后经二级运算放大器 LM358，转换成所需的电压信号 V_k ，提供给触发电路。图 2-8 是 LM358 的封装结构。

DAC 0832 与 LM358 的电路连接见图 2-9。

2.3.5 温度采集电路

在采集温度时，选用了单片 K 型热电偶放大与数字转换器 MAX6675。MAX6675 是 Maxim 公司推出的具有冷端补偿的单片 K 型热电偶放大器与数字转换器。

热电偶作为一种主要的测温元件，具有结构简单、制造容易、使用方便、测温范围宽、测温精度高等特点。但是热电偶应用在基于单片机的嵌入式系统领域时，却存在着以下几个方面的问题：

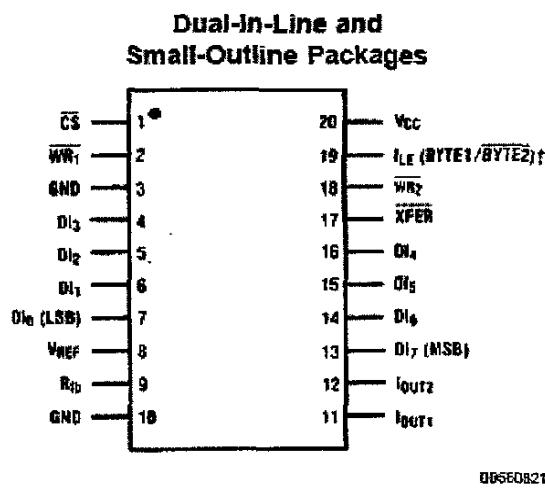


图 2-7 DAC0832 芯片封装

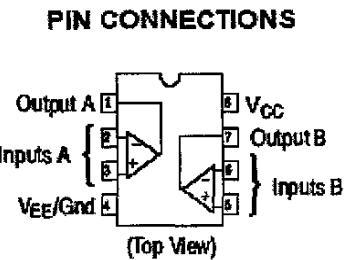


图 2-8 LM358 芯片封装

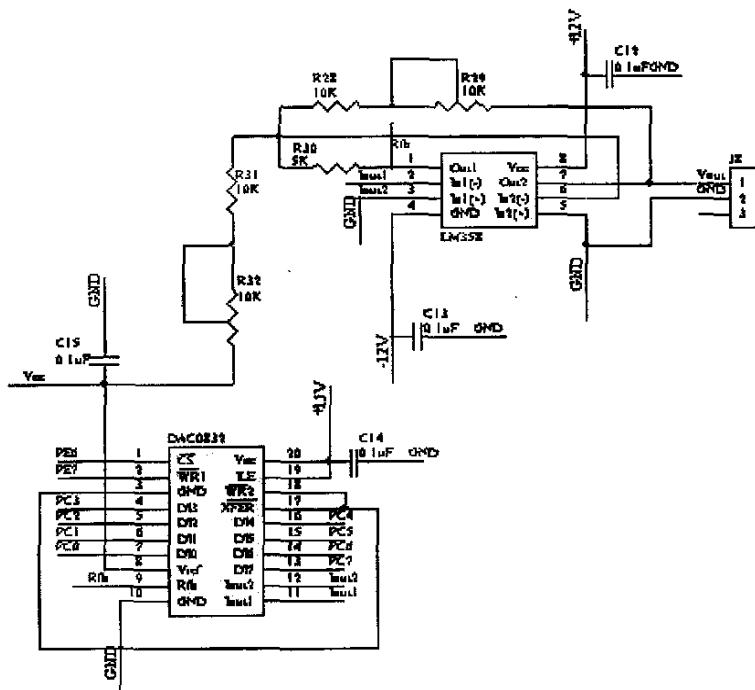


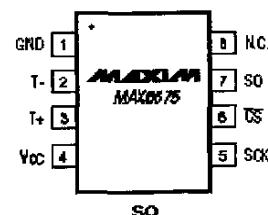
图 2-9 D/A 转换电路图

① 非线性 热电偶输出热电势与温度之间的关系为非线性关系，因此在应用时必须进行线性化处理。

② 冷补偿 热电偶输出的热电势为冷端保持为 0°C 时与测量端的电势差值，而在实际应用中冷端的温度是随着环境温度而变化的，故需进行冷端补偿。

③ 数字化输出 与嵌入式系统接口必然要采用数字化输出及数字化接口，而作为模拟小信号测温元件的热电偶显然无法直接满足这个要求。因此，若将热电偶应用于嵌入式系统时，须进行复杂的信号放大、A/D 转换、查表线性化、温度补偿及数字化输出接口等软硬件设计。如果能将上述的功能集成到一个集成电路芯片中，即采用单芯片来完成信号放大、冷端补偿、线性化及数字化输出功能，则将大大简化热电偶在嵌入式领域的应用设计。

Maxim 公司推出的 MAX6675 即是一个集成了热电偶放大器、冷端补偿、A/D 转换器及 SPI 串口的热电偶放大器与数字转换器^[17]。



1. 性能特点：

MAX6675 的主要特性如下，封装如图 2-10 所示：

- 1) 简单的 SPI 串行口温度值输出；

图 2-10 MAX6675 芯片封装

- 2) 0°C ~ +1024°C 的测温范围;
- 3) 12 位 0.25°C 的分辨率;
- 4) 片内冷端补偿;
- 5) 高阻抗差动输入;
- 6) 热电偶断线检测;
- 7) 单一+5V 的电源电压;
- 8) 低功耗特性;
- 9) 工作温度范围: -20°C ~ +85°C;
- 10) 2000V 的 ESD 信号。

2、MAX6675 引脚功能:

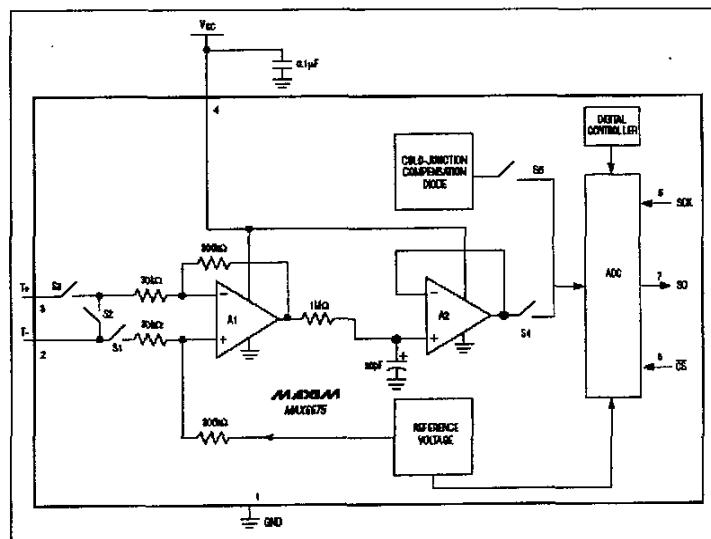
如表 2-1 所示, 为 MAX6675 管脚的功能。

表 2-1 MAX6675 管脚功能

| 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 | V _{CC} | 正电源端 |
| 5 | SCK | 串行时钟输入 |
| 6 | CS | 片选端, CS 为低时钟、启动 |
| 7 | SO | 串行数据输出 |
| 8 | N.C. | 空引脚 |

3、工作原理:

MAX6675 的内部结构如图 2-11 所示。该器件是一复杂的单片热电偶数字转换器, 内部具有信号调节放大器、12 位的模拟/数字化热电偶转换器、冷端补偿传感和校正、数字控制器、1 个 SPI 兼容接口和一个相关的逻辑控制。



1) 温度变换

图 2-11 MAX6675 芯片内部结构

MAX6675 内部具有将热电偶信号转换为与 ADC 输入通道兼容电压的信号调节放大器，T+和 T-输入端连接到低噪声放大器 A₁，以保证检测输入的高精度，同时使热电偶连接导线与干扰源隔离。热电偶输出的热电势经低噪声放大器 A₁放大，再经过 A₂ 电压跟随器缓冲后，被送至 ADC 的输入端。在将温度电压值转换为相等价的温度值之前，它需要对热电偶的冷端温度进行补偿，冷端温度即是 MAX6675 周围温度与 0℃实际参考值之间的差值。对于 K 型热电偶，电压变化率为 41μV/°C，电压可由线性公式 $V_{out} = (41\mu V/^{\circ}C) \times (t_R - t_{AMB})$ 来近似热电偶的特性。上式中，V_{out} 为热电偶输出电压 (mV)，t_R 是测量点温度；t_{AMB} 是周围温度。

2) 冷端补偿

热电偶的功能是检测热、冷两端温度的差值，热电偶热节点温度可在 0℃～+1023.75℃范围变化。冷端即安装 MAX6675 的电路板周围温度，此温度在-20℃～+85℃范围内变化。当冷端温度波动时，MAX6675 仍能精确检测热端的温度变化。

MAX6675 是通过冷端补偿检测和校正周围温度变化的。该器件可将周围温度通过内部的温度检测二极管转换为温度补偿电压，为了产生实际热电偶温度测量值，MAX6675 从热电偶的输出和检测二极管的输出测量电压。该器件内部电路将二极管电压和热电偶电压送到 ADC 中转换，以计算热电偶的热端温度。当热电偶的冷端与芯片温度相等时，MAX6675 可获得最佳的测量精度。在实际测温应用时，应尽量避免在 MAX6675 附近放置发热器件或元件，否则会造成冷端误差。

3) 热补偿

在测温应用中，芯片自热将降低 MAX6675 温度测量精度，误差大小依赖于 MAX6675 封装的热传导性、安装技术和通风效果。为降低芯片自热引起的测量误差，可在布线时使用大面积接地技术提高 MAX6675 温度测量精度。

4) 噪声补偿

MAX6675 的测量精度对电源耦合噪声较敏感。为降低电源噪声影响，可在 MAX6675 的电源引脚附近接入 1 只 0.1μF 陶瓷旁路电容。

5) 测量精度的提高

热电偶系统的测量精度可通过以下预防措施来提高：

- ① 尽量采用不能从测量区域散热的大截面导线；
- ② 如必须用小截面导线，则只能应用在测量区域，并且在无温度变化率区域用扩展导线；
- ③ 避免受能拉紧导线的机械挤压和振动；
- ④ 当热电偶距离较远时，应采用双绞线作热电偶连线；
- ⑤ 在温度额定值范围内使用热电偶导线；

- ⑥ 避免急剧温度变化;
- ⑦ 在严劣环境中, 使用合适的保护套以保证热电偶导线;
- ⑧ 仅在低温和小变化率区域使用扩展导线;
- ⑨ 保持热电偶电阻的事件记录和连续记录。

6) SPI 串行接口

MAX6675 采用标准的 SPI 串行外设总线与 MCU 接口, 且 MAX6675 只能作为从设备。MAX6675 SO 端输出温度数据的格式如表 2-2 所示, MAX6675 SPI 接口时序如图 2-12 所示。

表 2-2 MAX6675 SO 端输出数据的格式

| 位 | 空标志位 | 12 位温度读 | | | | | | | | | | | | | 热电偶输入 | 设备身份 | 状态 | |
|---|------|---------|----|----|----|----|----|---|---|---|---|---|---|---|-------|------|----|----|
| | | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | | | | |
| | | MSB | | | | | | | | | | | | | LSB | | 0 | 三态 |

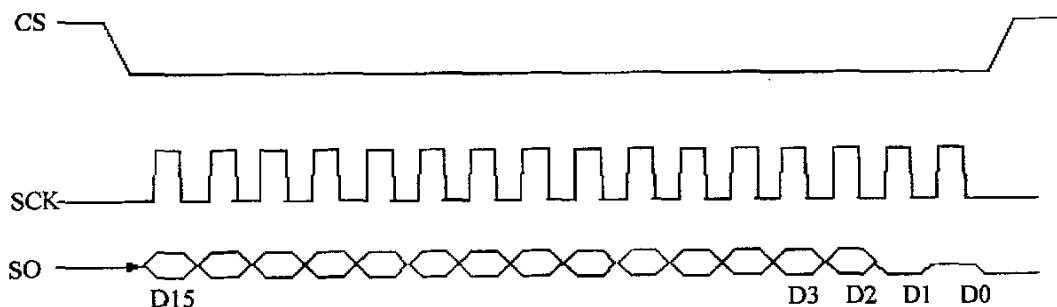


图 2-12 MAX6675 SPI 接口时序

MAX6675 从 SPI 串行接口输出数据的过程如下: MCU 使 CS 变低并提供时钟信号给 SCK, 由 SO 读取测量结果。CS 变低将停止任何转换过程; CS 变高将启动一个新的转换过程。一个完整串行接口读操作需 16 个时钟周期, 在时钟的下降沿读 16 个输出位, 第 1 位和第 15 位是一伪标志位, 并总为 0; 第 14 位到第 3 位为以 MSB 到 LSB 顺序排列的转换温度值; 第 2 位平时为低, 当热电偶输入开放时为高, 开放热电偶检测电路完全由 MAX6675 实现, 为开放热电偶检测器操作, T 必须接地, 并使能地点尽可能接近 GND 脚; 第 1 位为低以提供 MAX6675 器件身份码, 第 0 位为三态。

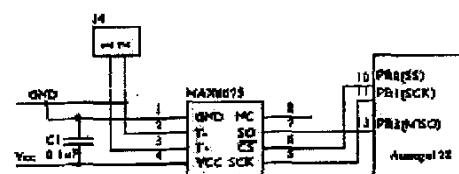


图 2-13 温度采集电路图

4、测温电路

如图 2-13 所示, 为 MAX6675 应用于嵌入式系统的具体电路图。本系统采用的单片机为 Atmega128L。MAX6675 为单片数字式热电偶放大器, 其工作时无需外接任何的外围元件, 这里为降低电源耦合噪声, 在其电源引脚和接地端之前接入了 1 只容量为 $0.1\mu\text{F}$ 的电容。

具体数据传输过程如下:

在 Atmega128L 的 PB1 端口提供时钟信号给 MAX6675 的 SCK 端口, 作为采集信号的基本时钟。当焊接开始后, 由 PB0 发出一低电平, 选择了温度采集芯片 MAX6675, 它开始从热电偶上采集电压信号, 并通过 SO 串行口, 传给 PB3。这样, 温度信号就采入了 Atmega128L。经程序处理, 从而改变脉冲触发电压 V_k , 达到控制温度的目的。

2.4 同步移相脉冲触发电路系统

为了配合单片机系统, 自行设计了可控硅触发电路, 来触发反向并联晶闸管。

在设计触发电路时, 我们采用 TCA785 芯片^[18]。它是德国西门子 (Siemens) 公司开发的第三代晶闸管单片移相触发集成电路。因为它优秀功能, 我们采用它来触发晶闸管, 实现对反向并联晶闸管的控制。图 2-14 是该集成电路的封装。

1、TCA785 主要设计特点:

① 能可靠的对同步交流电源的过零点进行识别, 因而可方便的用作过零触发而构成零点开关。

② 具有宽的应用范围, 可用来触发普通晶闸管、快速晶闸管、双向晶闸管及作为功率晶体管的控制脉冲, 故可用于由这些电力电子器件组成的单管斩波、单相半波、半控桥、全控桥或三相半控、全控整流电路及单相或三相逆变系统或其它拓扑结构电路的变流系统。

③ 输入、输出与 CMOS 及 TTL 电平兼容, 具有较宽的应用电压范围和较大的负责驱动能力, 每路可直接输出 250mA 的驱动电流。

④ 其电路结构决定了自身锯齿波液压的范围较宽。对环境温度的适应性较强, 可应用于较宽的环境温度范围 ($-25^\circ\text{C} \sim +85^\circ\text{C}$) 和工作电源电压范围 ($-0.5 \sim +18\text{V}$)。

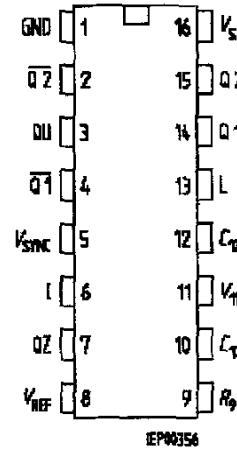


图 2-14 TCA785 芯片封装

2、引脚名称和功能：

TCA785 芯片的管脚功能如表 2-3 所示。

表 2-3 TCA785 芯片的管脚功能

| 引脚 | 名称 | 功能 |
|----|-------------|------------------------|
| 1 | Q_S | 接地端 |
| 2 | \bar{Q}_2 | 输出脉冲 2 的非端 |
| 3 | Q_V | 输出的逻辑脉冲信号端 |
| 4 | \bar{Q}_1 | 输出脉冲 1 的非端 |
| 5 | V_{SYNC} | 同步电压输出端 |
| 6 | I | 脉冲信号禁止端 |
| 7 | Q_Z | 输出的逻辑脉冲信号端 |
| 8 | V_{REF} | 自身输出的高稳定基准电压端 |
| 9 | R_9 | 锯齿波电阻连接端 |
| 10 | C_{10} | 外接锯齿波电容连接端 |
| 11 | V_{II} | 移相控制直流电压输入端 |
| 12 | C_{12} | 输出 Q_1 、 Q_2 脉宽控制端 |
| 13 | L | 非输出脉冲宽度控制端 |
| 14 | Q_1 | 输出脉冲端 |
| 15 | Q_2 | 输出脉冲端 |
| 16 | V_S | 电源端 |

3、外围电路：

如附录 1 所示，为 TCA785 的外围电路。

2.5 测温器件

2.5.1 测温器件简介

测量温度的器件，即温度传感器^[19]。它是利用一些金属、半导体等材料与温度有关特性（包括热膨胀、电阻、电容、磁性、热电势、热噪声、弹性及光学性能等）而制成的测温器件。

温度传感器从使用上可划分为接触型温度传感器和非接触型温度传感器两大类。前者在测量温度时，要将温度传感器直接接触被测物体，如热电偶、水银温度计、热敏电阻等等；后者则是利用被测物体发射出的红外线，将温度传感器设置在一定距离

下进行测量，这种非接触型就是红外线温度传感器。

2.5.2 热电偶的选择^[19,20]

1、热电偶的工作原理

把两根不同质的导体或半导体（A 和 B）连接起来组成一个闭合回路，该闭合回路叫热电回路，如图 2-15 所示。当两导体两个接点 1 和 2 处于不同温度 T_0 和 T_1 时，回路中有一定的电流，表明回路有电势产生，该电势称为热电势，这种产生热电势的效应叫作热电效应。

2、热电偶材料

组成热电偶的两根热电偶丝称作为热电极，根据热电效应的原理，任意两种不同质的导体和半导体都可以作为热电极组成热电偶。但实际情况并非如此，对它们还必须经过严格的选择。热电极材料应该满足一下要求：

- ① 制成的热电偶的热电势应较大，热电势和被测温度之间应尽量地成线性关系；
- ② 化学稳定性要高，不易氧化和腐蚀；
- ③ 重复线性好，响应速度快。

一般的讲，纯金属热电极容易复制，但其热电势小；非金属热电极的热电势大，熔点高，但复制性和稳定性都较差；合金热电极的热电性能和工艺性能介于前面两者之间，所以合金热电极用的较多。目前在国际上被公认有代表性的或比较普遍采用的热电偶并不多，这些热电偶的热电极材料都是经过大量试验并分别被应用在各温度范围内，测量效果良好。

3、常用热电偶

① 铜-康铜热电偶

这类热电偶属于低温热电偶，其正极为纯铜，负极为 60% 铜、40% 镍的康铜合金，热电极在 0℃ 以下时极性相反。它具有稳定性、均匀性好的特点，但电极容易老化。主要用于 -200℃—300℃ 范围内温度的测量。

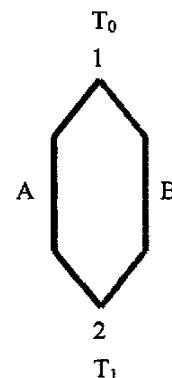


图 2-15 热电偶测温原理

② 镍铬-考铜热电偶

其正极为 90% 镍、10% 铬的镍铬合金，负极为 44% 镍、56% 铜的合金。它具有热电势大、灵敏度高、抗氧化性好及价格低等特点，使用于石油、化工等部门 800℃ 以下温度的测量。

③ 镍铬-镍硅热电偶

它是非金属热电偶中性能最稳定的一种。其热电极通常做得较粗，直径一般为 $\Phi 1.2 \sim \Phi 2.5\text{mm}$ 。其正极为 90% 镍、(9~10)% 铬、0.4% 硅的合金，负极为 90% 镍、(2.5~3)% 硅、0.6% 钴的合金。因热电极中含有大量的镍，故高温下抗氧化和抗腐蚀能力很强。它广泛应用于 0~1300℃ 的温度测量。

④ 铑-铂热电偶

它属于贵金属热电偶。其正极较硬，是 90% 铂、10% 铑的铂铑合金；负极为纯金属铂。它具有测量精度高、稳定性好、抗氧化性能好等特点，适用于各种高温加热炉、热处理炉及钢水的测温。最高的应用温度为 1100℃。

⑤ 铂铑₃₀-铂铑₆热电偶

它也属于贵金属热电偶。其正极较硬，是 70% 铂、30% 铑的合金；负极为 94% 铂、6% 铑的合金。它具有测量精度高、稳定性好和更强的抗氧化性能，可长期在 1600℃ 下使用，适用于各种高温测量。

图 2-16 给出了一些常用热电偶的热电势与温度的关系曲线。

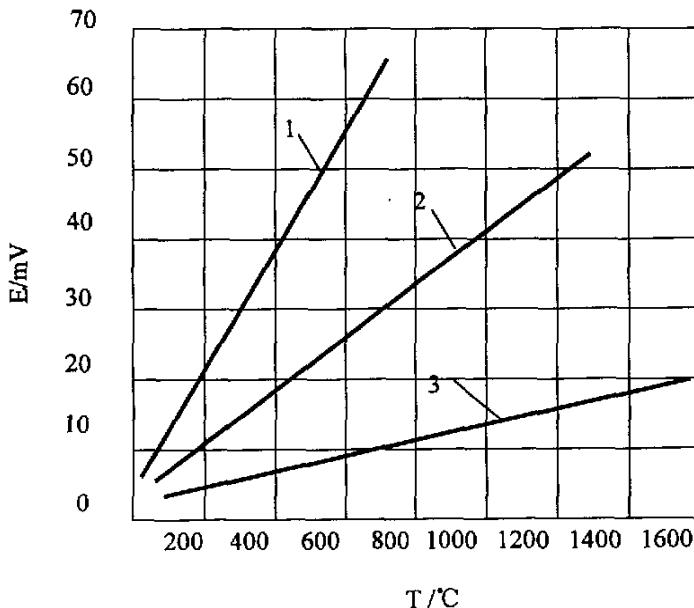


图 2-16 热电偶的热电势与温度的关系曲线

1—镍铬-铸铜 2—镍铬-镍硅 3—铂铑-铂

根据我们采集温度的范围和精度要求，我们选用镍铬-镍硅铠装型热电偶，代号：

WR，分度号：K，测温范围：0℃~1300℃，精度：±1.5℃或±0.25%t。它的主要优点是：测温端热容量小、动态响应快、挠性好、强度高、寿命长及适应性强，适用于位置狭小部位的温度测量。

2.6 本章小结

1、本章系统的介绍了单片机系统的硬件电路的设计，从单片机的选择（Atmega128L）到外围电路（键盘电路、LED 显示电路、D/A 转换电路）的设计，都给出了具体的型号和电路的连接方法。整体电路图见附录 2

2、根据采集温度的要求，本章同时给出了选择的温度采集芯片的型号以及其与单片机的连接。

3、设计了同步触发电路，利用 TCA785 芯片，给晶闸管提供触发信号。给出了集成电路的外围电路的设计和连接方法。

4、选择了温度采集时使用的传感器，给出了具体的型号、参数以及其温度与电压曲线。

第三章 模糊控制系统程序设计

3.1 模糊控制理论

模糊理论在控制领域里的应用开始于 1974 年。英国科学家 Mamdani 首次将模糊理论应用于蒸汽机的控制系统中，开辟了模糊理论应用的新领域。

随着计算机技术的发展，模糊理论在控制领域取得了巨大的成功，使模糊控制理论成为模糊理论最广泛最成熟的应用分支^[7,21]，其主要原因是：

1、模糊集的引入扩展了古典逻辑中“生硬”的分类方法，使控制逻辑更加接近于人类思维。在很多工业控制中，熟练工人对系统控制的经验可直接用于控制器中。

2、控制系统可以解决复杂系统的控制问题。当系统为多输入多输出、强非线性、时变及滞后系统时，系统的数学模型非常复杂或根本就不存在，不能用常规控制方法控制系统。模糊控制建立在对过程的语言型经验之上，不需要精确的数学模型。

3、对于在模糊控制系统中直接采用人类语言型控制规则，使得控制机理和控制策略易于理解和接受，设计简单，便于维护和推广。

模糊控制（Fuzzy Control）是指模糊理论在控制技术上的应用。模糊控制器由模糊化（fuzzification）、模糊推理（fuzzy-inference）和去模糊化（defuzzification）三部分组成，它们都是建立在知识库（knowledge base）基础之上。因为模糊控制器是采用数字计算机来实现的，所以它应该具备下列三个重要功能：

1、系统的偏差以及偏差变化从数字量转化为在该语言变量相应论域内不同语言值的模糊子集（该功能由模糊化过程和数据库两个模块完成）。

2、对得到的模糊子集按照给定的推理规则进行模糊推理（该功能由模糊推理规则库和推理决策两个模块完成）。

3、把推理得到的模糊输出量结果转化为实际系统能够接受并利用的精确数字量或模拟量（该功能由精确化计算模块完成）。

因此，模糊逻辑控制器的设计问题就是模糊化过程、知识库（含数据库和规则库）、推理决策和精确化计算四部分的设计问题^[22]。

模糊化过程要完成的任务是测量输入量的值，并将以数字形式表示的输入量转化为用通常语言表示的某一限定码的序数。每一个限定码表示论域内的一个模糊子集，并由其隶属函数来定义。

知识库包括数据库和规则库。数据库提供必要的定义，其中包含了语言控制规则论域的离散化、量化和规则化以及输入空间的区分、隶属度函数的定义等。规则库根据控制目的和控制策略给出了一套由语言变量描述的并由专家或者自学习产生的控制规则的集合。

推理决策是整个模糊控制逻辑控制系统的中心，它利用知识库的信息模拟人类的推理决策过程，给出适合的控制量。它的实质就是模糊逻辑推理。

通过模糊推理得到的结果是一个模糊集合。而在实际使用中，必须要有一个确定的值才能去控制或驱动执行机构。在推理得到的模糊集合中选取一个能够最佳代表这个模糊推理结果的可能性的精确值的过程就称为精确化计算过程（又叫逆模糊化运算、解模糊化运算或者模糊判决）。精确化计算可以采取很多不同的方法，用不同的方法所得到的结果也不同。

在模糊控制器中则使用语言型模糊控制率来描述模糊控制器的控制特性。模糊控制率是将人类对某一过程的推理和判断知识加以提炼后形成的。例如在室温控制问题中对温度的控制有如下描述^[23]：

如果室温很低，室温还在微量降低，则全力加热；

如果室温适中，室温不再变化，则不加热；

如果室温偏高，室温微量上升，则中等降温；

如果室温较高，高温不再变化，则微量降温；

如果室温较高，室温微量上升，则中等降温。

在上述语言描述中，都是根据条件部分中条件满足的情况得出定性的结论。如果用 T 代表室温， dT 代表温度的变化， du 代表加热的大小，再为每个输入输出量定义出相应的语言值，即形成模糊集。

室温 $T=\{NB: \text{很低}, ZR: \text{适中}, PS: \text{偏高}, PM: \text{较高}\}$

室温变化 $dT=\{NS: \text{微量降低}, ZR: \text{不加热}, NS: \text{微量降温}, NM: \text{中等降温}\}$

则可将上述语言描述改写成：

```

if T=NM and dT=NS then du=PB
if T=ZR and dT=ZR then du=ZR
or if T=PS and dT=PS then du=NM
or if T=PS and dT=ZR then du=NS
or if T=PS and dT=PS then du=NM

```

(3-1)

式 (3-1) 模型称为温控模糊控制率。它是由模糊算子 or 将单一的 if-then 规则连接在一起的模糊控制规则。其基本形式为

```

R1: if (条件 1 and/or 条件 2...)
Then (结论 1 and/or 结论 2...)
Or R2: if (条件 1 and/or 条件 2...)
Then (结论 1 and/or 结论 2...)
Or ...
Or Rn: if (条件 1 and/or 条件 2...)

```

(3-2)

Then (结论 1 and/or 结论 2...)

模糊控制率是模糊控制器的重要组成部分，它和隶属函数及推理方法共同决定着模糊控制器的传递特性。

3.2 模糊控制器的设计

模糊控制器的输入和输出都是非模糊量，而其内部却建立在语言型的模糊控制率上，由条件满足的程序推出模糊输出的大小。该推理过程采用模糊理论，称为模糊推理。为了进行模糊推理必须先将非模糊量转化为模糊值，该过程成为模糊化。由于模糊推理的输出是模糊值，还必须将模糊输出转化为非模糊集，该过程称为去模糊化。模糊控制器由模糊化、模糊推理及去模糊化三部分组成^[24,25]。三部分共同建立在知识库基础之上。图 3-1 是模糊控制器的组成原理方块图。

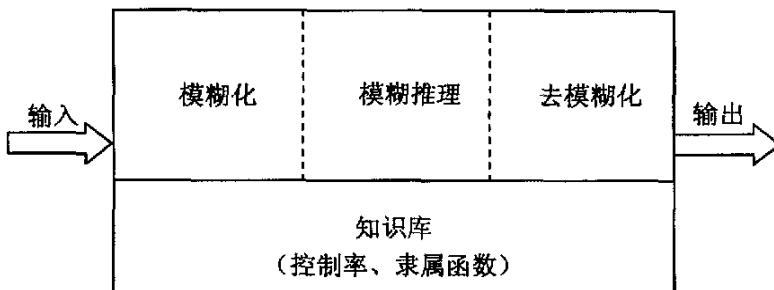


图 3-1 模糊控制器组成

3.2.1 模糊化

模糊控制器的输入量为非模糊量，必须转化为模糊量后才能用于模糊推理。在模糊控制中，输入量的取值为语言值即模糊集：输入量 $\in \{\text{语言值 } 1, \text{ 语言值 } 2, \dots, \text{ 语言值 } n\}$ 。

输入量本身也称为语言变量。例如在温控系统中，温度 T 为语言变量，其语言值

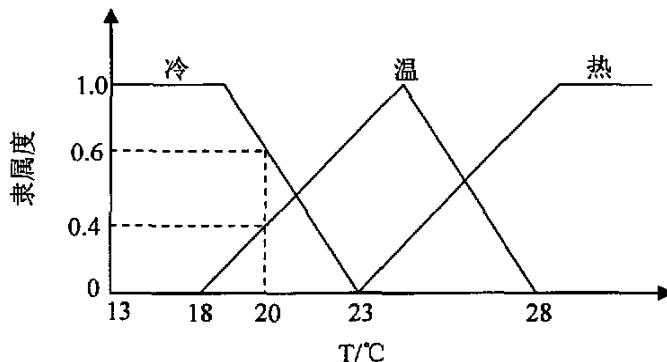


图 3-2 语言变量温度 T 的语言取值

可为 $T \in \{\text{冷 (cold), 温 (warm), 热 (hot)}\}$

语言变量的定义大都将其语言值的隶属函数画在一个坐标系内。图 3-2 是语言变量 T 的语言值定义。

当输入 $T=20^\circ\text{C}$ 时其输入量的模糊化为：

$$\mu_{\text{冷}}(20^\circ\text{C}) = 0.6$$

$$\mu_{\text{温}}(20^\circ\text{C}) = 0.4$$

$$\mu_{\text{热}}(20^\circ\text{C}) = 0$$

$\{0.6; 0.4; 0\}$ 称为温度 20°C 的语言解释。在语言中人们认为温度 $= 20^\circ\text{C}$ 为冷。一个非模糊值的模糊化就是根据输入语言变量的定义确定相应于每个语言值的隶属度。

3.2.2 模糊推理

根据语言变量的定义对输入量模糊化后，下一步是模糊推理。模糊推理由条件聚合 (aggregation)、推断 (implication) 和累加 (accumulation) 三部分组成。模糊推理首先计算控制率中每条规则条件的满足程度 (条件聚合)，然后依据条件的满足程度推断单一规则输出的大小 (推断)。最后将所有规则的输出累加，得到总的模糊输出。控制规则的条件部分由通过模糊算子联接的数个子条件组成，例如：

if $T = \text{cold}$ or $T = \text{warm}$ then...

该规则条件部分由通过算子 or 连接的两个子条件组成，若采用最大算子进行 or 运算，则总条件的满足度可由条件聚合得出：

$$\begin{aligned} \mu_{\text{cold}} \cup \mu_{\text{warm}}(20^\circ\text{C}) &= \max\{\mu_{\text{cold}}(20^\circ\text{C}); \mu_{\text{warm}}(20^\circ\text{C})\} \\ &= \max\{0.6, 0.4\} = 0.6 \end{aligned} \quad (3-3)$$

在计算出条件满足度之后，要计算结论的满足度。在模糊逻辑中，对 if A then B 规则，结论部分的满足度受条件部分满足度的限制。常见的限制方法有最大最小法 (max-min-inference) 和最大乘积法 (max-prod-inference)。在最大最小方法中结论的满足度和结论的隶属函数的乘积得出。在最大最小推断方法中结论的隶属函数由条件的总满足度截断。而在最大乘积法中继续保护结论隶属函数的原有形式，只有结论隶属函数按条件的满足度成比例的缩小。

3.2.3 去模糊化

由模糊推理得出的模糊输出必须转换为非模糊值输出，才能用于调节过程。常见的去模糊化方法有面积重心法和平均最大值法。在面积重心中，非模糊量输出为模糊输出多边形面积的重心。而在平均最大值法中非模糊输出为模糊输出最大值的平均。

如图 3-3 所示。

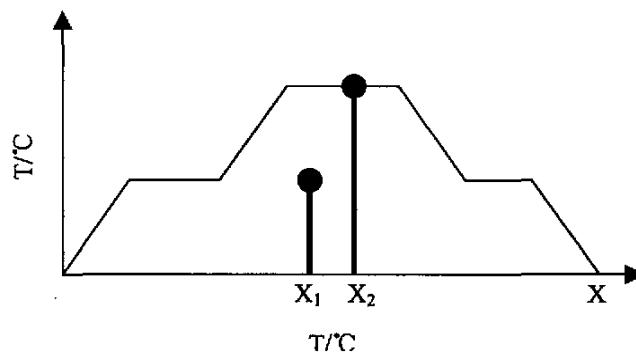


图 3-3 去模糊化方法
(X_1 : 面积重心法; X_2 : 平均最大值法)

3.2.4 三部分数学公式描述

下面将分别给出三部分的数学公式。

设模糊控制率为:

$$\begin{aligned} R_1: & \text{ if } E=E_1 \text{ and } CE=CE_1 \text{ then } CU=CU_1 \\ \text{Or } R_2: & \text{ if } E=E_2 \text{ and } CE=CE_2 \text{ then } CU=CU_2 \\ \text{Or } & \dots\dots\dots \\ \text{Or } R_n: & \text{ if } E=E_n \text{ and } CE=CE_n \text{ then } CU=CU_n \end{aligned} \quad (3-4)$$

其中, $E \in \{E_1, E_2, \dots, E_n\}$ 和 $CE \in \{CE_1, CE_2, \dots, CE_n\}$ 为输入模糊变量; $CU \in \{CU_1, CU_2, \dots, CU_n\}$ 为输出模糊变量。

1、模糊化

设输入为 (e, ce) , 则模糊输入为:

$$\{\mu_{E1}(e), \mu_{E2}(e), \dots, \mu_{En}(e), \} \quad (3-5)$$

$$\{\mu_{CE1}(ce), \mu_{CE2}(ce), \dots, \mu_{CEn}(ce), \} \quad (3-6)$$

2、模糊推理

对于模糊控制规则 R_1 , 其条件部分由用 and 算子联接的两个子条件组成, 其总条件的满足度由子条件隶属函数的最小值算出(条件聚合):

$$\mu_{E1} \cap \mu_{CE1}(e, ce) = \min\{\mu_{E1}(e), \mu_{CE1}(ce)\} \quad (3-7)$$

在模糊逻辑中, if-then 关系可用条件和结论的叉积表示, 叉积的隶属函数是条件和结论隶属函数的最小值(推断)。规则 R_1 可表达为:

$$R_1 = (E_1 \times CE_1) \times CU_1$$

$$\mu_{R1}(e, ce, cu) = \min\{\min\{\mu_{E1}(e); \mu_{CE1}(ce)\}; \mu_{CU1}(cu)\}$$

同样可推导出规则 R₂ 至 R_n 表达式：

$$R_2 = (E_2 \times CE_2) \times CU_2$$

$$\mu_{R2}(e, ce, cu) = \min\{\min\{\mu_{E2}(e); \mu_{CE2}(ce)\}; \mu_{CU2}(cu)\}$$

.....

$$R_n = (E_n \times CE_n) \times CU_n$$

$$\mu_{Rn}(e, ce, cu) = \min\{\min\{\mu_{En}(e); \mu_{CEn}(ce)\}; \mu_{CUn}(cu)\}$$

.....

由于所有规则是由 or 算子联接起来的，故可得总的模糊关系（累加）：

$$R = \bigcup_{i=1}^N R_i$$

$$\mu_R(e, ce, cu) = \max_i \{\mu_{Ri}(e, ce, cu)\} = \max_i \{\min\{\min\{\mu_{Ei}(e); \mu_{CEi}(ce)\}, \mu_{CUi}(cu)\}\}$$

以上模糊推理是最大最小推理。

3、去模糊化

去模糊化输出 cu 为一多边形面积，必须转化为非模糊值，该过程称为去模糊化。常见的去模糊化方法有面积重心法（COG——center of gravity）和平均最大值法（MOM——mean of maximum）。

（1）面积重心法

面积重心法是最常用的一种去模糊化方法，该方法取模糊输出多边形面积重心的横坐标为该模糊输出的非模糊值：

$$CU^* = \frac{\int CU \times \mu_{CU}(cu) dCU}{\int \mu_{CU}(cu) dCU}$$

在实际运算中，常采用数字积分作为近似和：

$$CU^* = \frac{\sum_{i=1}^n CU_i \mu_{CU}(cu_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_{CU}(cu_i)}$$

当隶属函数为三角形或矩形时，可采用下式近似计算面积重心。设每一规则输出面积的高为 H_i 和重心的横坐标为 CU_i，其面积重心：

$$CU^* = \frac{\sum_{i=1}^m H_i CU_i}{\sum_{i=1}^m (CU_i)}$$

面积重心法是最常见的去模糊化方法。该方法的特点如下：

- ① 所有有效规则都体现在最终结果中；
- ② 随着输入量的变化其输出过程连续变化；
- ③ 数字式重心计算太复杂，在在线应用中有计算时间过长问题；
- ④ 硬件实现太复杂；
- ⑤ 输出不能覆盖整个输出范围；
- ⑥ 只有一个控制规则有效且输出模糊集对称时，其非模糊输入与条件的满足程度有关。

(2) 平均最大值法

该方法取模糊输出多边形面积最大值平均量的横坐标为非模糊值：

$$CU^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N CU_{\max}$$

平均最大值法是另外一种常见的去模糊化方法，它的主要特点是：

- ① 具有最大满足度的规则都将考虑到结果中；
- ② 有效规则非模糊集的算术平均确定了非模糊输入；
- ③ 可以使用内插法；
- ④ 输出值与有效规则的满足度无关；
- ⑤ 在输入呈连续变化时，输出呈跳跃状态，不连续。

3.3 控制系统程序的设计

3.3.1 温度模糊控制器的设计基础

在系统软件的设计中我们充分考虑了与硬件电路的有机结合，有效地利用了模糊控制技术来减小过程时间和提高控制精度。模糊控制器设计为双输入单输出型^[26-28]。输入量一为设定温度和当前电极温度的偏差 E，输入量二为偏差变化率 EC（即当前的偏差减去前一采样时刻的偏差），输出量是一个控制加到脉冲触发电路上的电压控制量 U。其原理框图如图 3-4 所示。

首先，对输入量 E 和 EC 进行模糊化处理，分别将它们划分为 5 个模糊子集，即 PL（正大），PS（正小），O（零），NS（负小），NL（负大），分别确定出对应的隶属

度。

然后，对输出量 U 进行模糊化处理，将它们划分为 5 个模糊子集，即：PL（正大），PS（正小），O（零），NS（负小），NL（负大），确定出对应的隶属度。

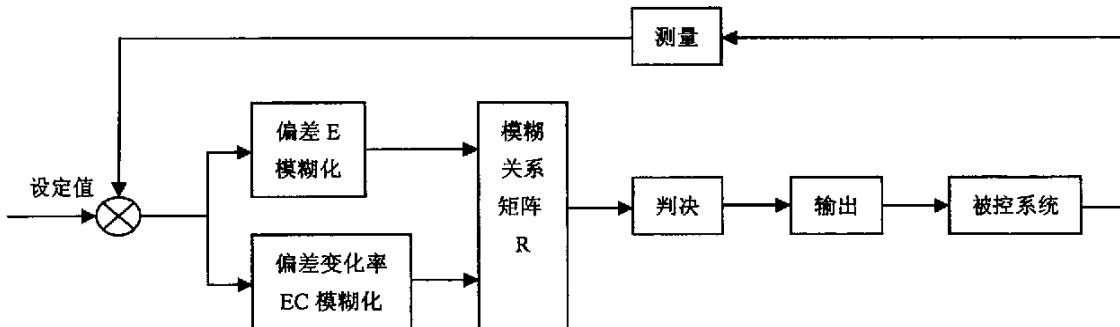


图 3-4 模糊控制原理框图

控制规则的一般形式为：IF $E=T_i$ AND $EC=\Delta T_j$ THEN $U=V_{ij}$ ，可得模糊关系矩阵 R 为： $R=T_j \times \Delta T_j \times V_{ij}$ ，如果偏差 E 和偏差变化率 EC 分别取模糊集 T_j 和 ΔT_j ，则根据模糊推理的组合法则，输出的控制量 U 应为模糊集 V_{ij} ，即 $V_{ij}=(T_j \times \Delta T_j) \times R$ 。同时借现场调试的实际情况，最后得出的模糊控制规则如表 3-1 所示。

表 3-1 模糊控制规则表

| | NL | NS | O | PS | PL |
|----|----|----|----|----|----|
| PL | PL | NL | NL | NL | |
| PS | PL | NS | NS | NS | NL |
| O | PL | PS | O | NS | NL |
| NS | PL | PS | PS | PS | NL |
| NL | | PL | PL | PL | NL |

3.3.2 系统温度模糊逻辑控制的设计与实现

根据上述控制系统的总体设计思想，进行了温度模糊逻辑控制系统的设计。具体过程分为如下几步^[29]：

1、模糊逻辑控制器的结构设计

选用目前使用广泛的二维模糊控制系统，2 个输入变量和一个输出变量的意义分别设计如下：

E：e——偏差（被控制对象的实际温度和设定温度的差值，单位： $T/^\circ C$ ）；

EC：de——偏差的变化（被控制对象相邻两次温度偏差的变化情况）；

U：u——对同步脉冲触发信号进行控制的电压的控制量（单位：V/v）。

$U: u$ ——对同步脉冲触发信号进行控制的电压的控制量（单位：V/v）。

2、模糊逻辑控制器的输入输出变量的实际变化范围的确定

根据电阻钎焊温度模糊控制系统的具体情况，本文确定的模糊逻辑控制器输入输出变量的实际变化范围是：

$$-20 < e < 20; -5 < de < 5; -2 < u < 2$$

3、模糊逻辑控制器的各输入输出模糊变量与模糊状态的关系设计

模糊变量 e 用 5 个模糊状态描述，即：PL（正大），PS（正小），ZE（零），NS（负小），NL（负大）。偏差 e 与模糊状态关系如下：PB ($e > 20^{\circ}\text{C}$)，PS ($20^{\circ}\text{C} < e \leq 10^{\circ}\text{C}$)，ZE ($-10^{\circ}\text{C} < e \leq 10^{\circ}\text{C}$)，NS ($-20^{\circ}\text{C} \leq e < -10^{\circ}\text{C}$)，NL ($e < -20^{\circ}\text{C}$)。

模糊变量偏差变化 de 用 5 个模糊状态描述，即：PL（正大），PS（正小），ZE（零），NS（负小），NL（负大）。偏差变化 de 与模糊状态关系如下：PB ($de > 5^{\circ}\text{C}$)，PS ($2^{\circ}\text{C} < de \leq 5^{\circ}\text{C}$)，ZE ($-2^{\circ}\text{C} < de \leq 2^{\circ}\text{C}$)，NS ($-5^{\circ}\text{C} \leq de < -2^{\circ}\text{C}$)，NL ($de < -5^{\circ}\text{C}$)。

输出控制量 u 用 5 个模糊状态描述，即：PL（正大），PS（正小），ZE（零），NS（负小），NL（负大）。控制量 u 与模糊状态关系如下：PB ($u > 5\%$)，PS ($2\% < u \leq 5\%$)，ZE ($-2\% < u \leq 2\%$)，NS ($-5\% \leq u < -2\%$)，NL ($u < -5\%$)。

4、模糊逻辑控制器控制规则的设计

模糊控制规则实质上将操作员的控制经验加以总结而得出的一系列模糊条件语句的集合^[30]。模糊控制规则的确定原则是必须保证模糊逻辑控制器的输出能够使系统输出响应的动态、静态特性尽可能达到最佳^[31]。可以设定模糊逻辑控制参数的示意曲线如图 3-5 所示。

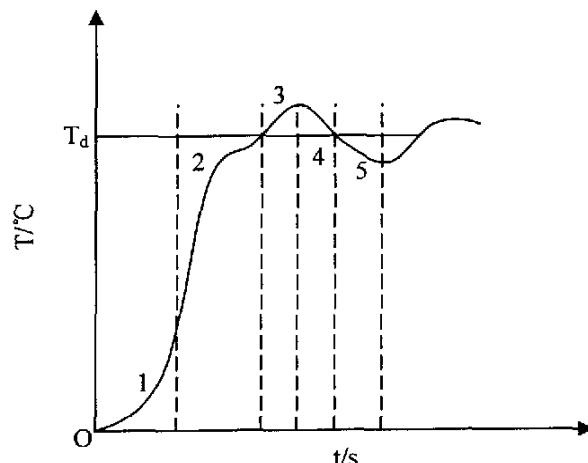


图 3-5 温度模糊逻辑参数示意图

考虑偏差 $e = T_d - T$ 为负的情况。当 e 为负大 (NL) 时, 即系统响应处于曲线第 1 段的时候。此时, 为了消除偏差应该使控制量加大而不考虑 de 的情况。所以控制量 u 应该取正大 (PL)。即有如下控制规则:

规则 1: 如果偏差 e 是 NL、且偏差变化 de 是 PL, 则控制输出 u 为 PL;

规则 2: 如果偏差 e 是 NL、且偏差变化 de 是 PS, 则控制输出 u 为 PL;

规则 3: 如果偏差 e 是 NL、且偏差变化 de 是 ZE, 则控制输出 u 为 PL;

规则 4: 如果偏差 e 是 NL、且偏差变化 de 是 NS, 则控制输出 u 为 PL;

当偏差 e 为负小或零时, 主要考虑的问题是为了使系统稳定下来。为了防止超调过大并使系统尽快稳定, 就要根据偏差变化 de 的情况来确定控制输出的变化。

当偏差变化 de 为正的时候, 表明偏差有减小的趋势。系统响应位于曲线的第 2 段, 所以可以选取较小的控制量, 即有如下的控制规则:

规则 5: 如果偏差 e 是 NS、且偏差变化 de 是 ZE, 则控制输出 u 为 PS;

规则 6: 如果偏差 e 是 NS、且偏差变化 de 是 ZE, 则控制输出 u 为 ZE;

规则 7: 如果偏差 e 是 NS、且偏差变化 de 是 ZE, 则控制输出 u 为 NS;

规则 8: 如果偏差 e 是 ZE、且偏差变化 de 是 ZE, 则控制输出 u 为 NS;

规则 9: 如果偏差 e 是 ZE、且偏差变化 de 是 PS, 则控制输出 u 为 NS;

规则 10: 如果偏差 e 是 ZE、且偏差变化 de 是 PL, 则控制输出 u 为 NL;

当偏差变化 de 为负的时候, 表明偏差有增大的趋势, 此时系统响应位于曲线第 5 段。这时应该使控制量增加, 防止偏差进一步增加。因此, 有如下控制规则:

规则 11: 如果偏差 e 是 NS、且偏差变化 de 是 NS, 则控制输出 u 为 PS;

规则 12: 如果偏差 e 是 NS、且偏差变化 de 是 NL, 则控制输出 u 为 PL;

规则 13: 如果偏差 e 是 ZE、且偏差变化 de 是 NS, 则控制输出 u 为 PS;

规则 14: 如果偏差 e 是 ZE、且偏差变化 de 是 NB, 则控制输出 u 为 PB。

根据系统的工作特点, 当偏差 e 和偏差变化 de 同时变号时, 控制量的变化也应该变符号。这样就可以得到剩余的 9 条规则。所有的控制规则汇总以后如表 3-2 所示。

表 4-2 模糊逻辑控制器的控制规则表

| $U \backslash E$ | NL | NS | ZE | PS | PL |
|-------------------|----|----|----|----|----|
| $DE \backslash U$ | NL | * | PL | PL | PL |
| NL | PL | PS | PS | ZE | NL |
| NS | PL | PS | ZE | NS | NL |
| ZE | PL | ZE | NS | NS | NL |
| PS | PL | ZE | NS | NS | NL |
| PB | PL | NS | NL | NL | * |

5、模糊控制器的模糊变量 e 、 de 及 u 的隶属函数设计

模糊变量 e、de 及 u 的隶属函数选用正态型函数，其离散值表分别如表 4-3、4-4 和 4-5 所示。具体数值见表 4-6^[32]。

表 4-3 模糊变量 e 的离散值表

| | PL | PS | ZE | NS | NL |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| -3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| -2 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| -1 | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0.5 | 1 | 0.5 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 0 |
| 2 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 4-4 模糊变量 de 的离散值表

| | PL | PS | ZE | NS | NL |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| -3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| -2 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 |
| -1 | 0 | 0 | 0.5 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 0.5 | 1 | 0.5 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0.5 | 0 | 0 |
| 2 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 4-5 模糊变量 u 的离散值表

| | PL | PS | ZE | NS | NL |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|
| -4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| -3 | 0 | 0 | 0 | 0.5 | 0.7 |
| -2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0.2 |
| -1 | 0 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0.5 | 0.5 | 0 | 0 |
| 2 | 0.2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0.7 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

表 4-6 模糊控制系统输入输出变量数值表

| DE U E | -3 | -2 | -1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
|--------------|-----|----|----|---|---|---|----|
| <-3 | MAX | | | | | | |
| -3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 2 | 2 | 0 |
| -2 | 4 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | -2 |

(续上表)

| | | | | | | | |
|----|-----|----|----|----|----|----|----|
| -1 | 4 | 2 | 2 | 2 | 0 | 0 | -2 |
| 0 | 4 | 1 | 1 | 0 | -1 | -1 | -4 |
| 1 | 2 | 0 | 0 | -2 | -2 | -2 | -4 |
| 2 | 2 | 0 | 0 | -2 | -2 | -2 | -4 |
| 3 | 0 | -2 | -2 | -4 | -4 | -4 | -4 |
| >3 | MIN | | | | | | |

6、模糊控制器的控制表求解流程^[33]

本文利用 C 语言编制了模糊控制表的求解软件^[26,34]。如图 3-6 所示，为模糊控制器的控制表求解流程。

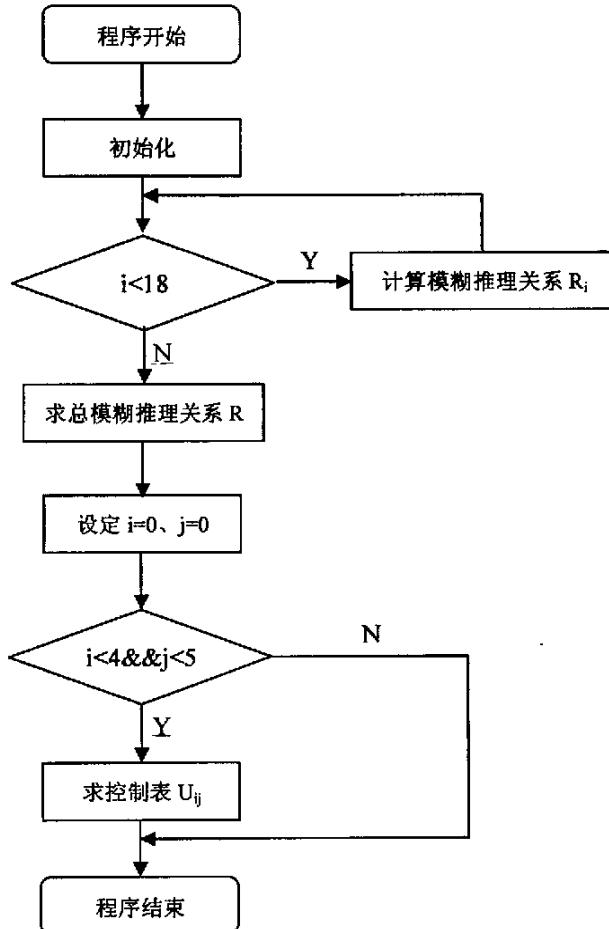


图 3-6 模糊逻辑控制表求解流程图

3.4 温度模糊控制系统程序总体设计

电阻钎焊温度模糊控制系统的软件工作过程是这样的^[26,35,36]：系统的前向通道不断地检测被控制对象（被钎焊工件）的当前温度。在被钎焊工件的真实温度没有超过某一门限值的时候（该门限值可以根据被钎焊工件要求控制的温度，在系统开始工作以前由人工设定），电阻钎焊供电电源向被钎焊工件提供最大功率的能量输出，以使被钎焊工件的温度以最快的速度上升。当被钎焊工件的温度超过所设定的门限值的时候，模糊控制系统开始工作，该系统利用检测得到的被钎焊工件的当前温度作为一个原始数据，再根据被控制对象要求控制的温度，进行计算，获得当前时刻的温度偏差以及温度偏差的变化的精确量。对该时刻的温度偏差以及偏差变化量按照一定的运算规则进行模糊化计算，得到当前时刻的温度偏差以及偏差变化量的模糊值；然后按照模糊控制运算法则进行模糊运算（即模糊推理），得到当前时刻的模糊控制查表值；再按照模糊控制查表值查模糊控制表，得到当前时刻的模糊输出控制量（仍然为模糊量）。系统再对模糊输出控制量按照确定的规则进行反模糊化运算（即模糊判决），得到此时的模糊控制系统模糊输出控制量对应的精确控制量。这样的精确输出控制量才能够用于对实际被钎焊工件的控制。完成一个调节过程以后，系统再次对被钎焊对象的当前温度状态进行检测，从而又开始了新一次的模糊控制调节过程^[37]。可以看出，模糊控制的调节过程是一个滞后调节。模糊控制系统软件流程图如图 3-7 所示。

3.5 本章小结

- 1、本章主要介绍了模糊控制理论的原理和模糊控制器设计。对工程中应用模糊控制的过程（包括模糊化、模糊推理和去模糊化）也进行了比较详细的介绍。
- 2、对本系统的研究方向，设计出了应用于单片机系统的模糊化温度控制程序。控制程序是利用 C 语言开发，基于模糊控制参数和隶属函数表设计出的。同时给出了整个程序的控制流程。

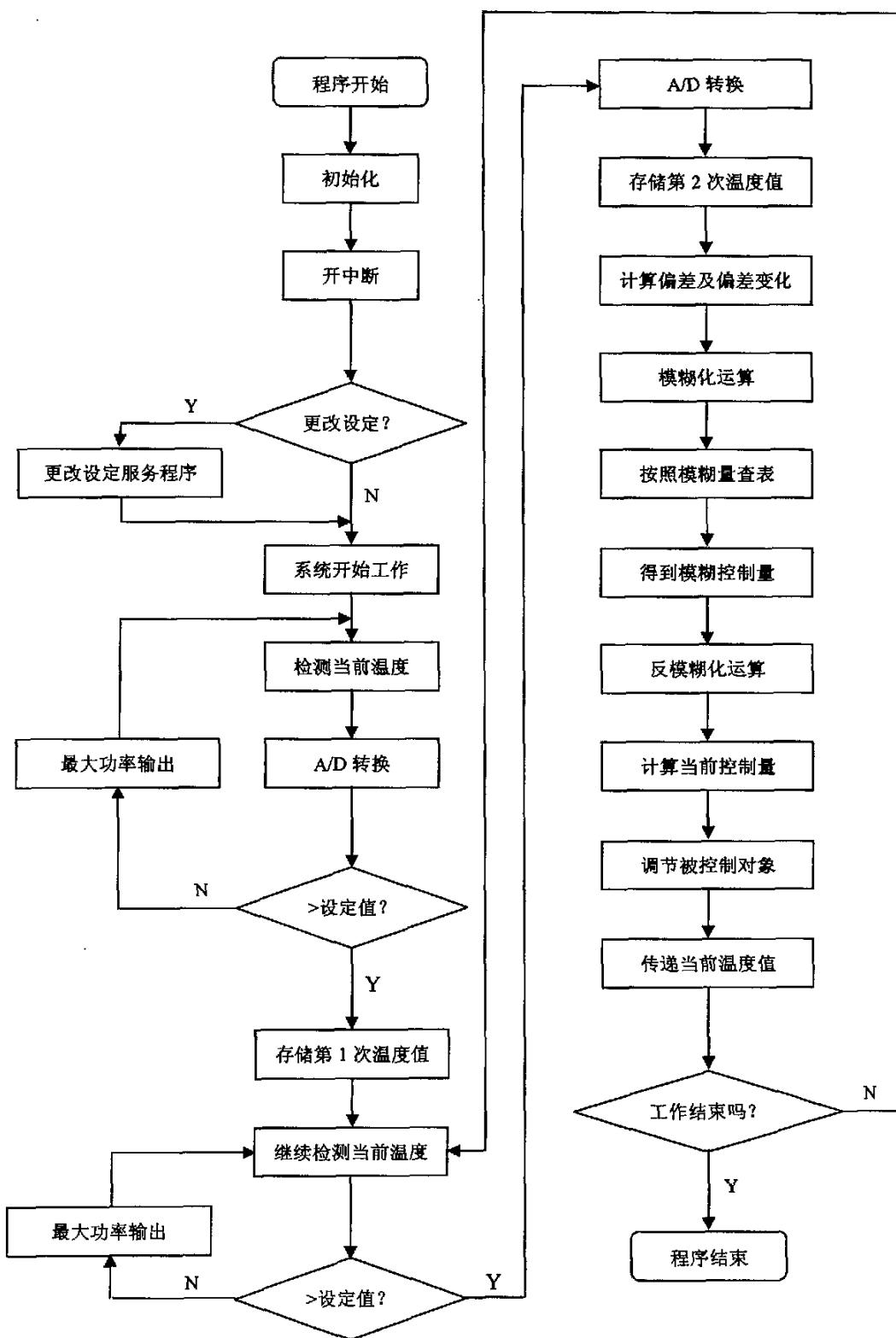


图 3-7 模糊控制系统程序流程图

第四章 实验验证及分析

4. 1 试验设备和材料

本次试验的电阻钎焊焊接系统的试验，是利用实验室中现有的唐山松下产业机器有限公司生产的型号为 YR-700CM2HGE 的固定式点凸焊机进行的。焊机的具体参数如下：

额定容量：70KVA；

额定输入电压：AC380V；

额定频率：50Hz；

最大短路电流：22.5KA；

最大焊接输入容量：138KVA；

允许负载持续率：12.9%；

电阻钎焊焊接系统的整体结构如图 4-1 所示。

本次试验中采用的焊接材料为紫铜，形状为扁平状（规格：12mm×4.5mm×40mm）；钎料采用铜磷银钎料（国际牌号：Cu89AgP，熔点：645℃-800℃），形状为铜箔；电极采用钼（熔点为 2620℃；强度硬度高、高温性能好、高温强度大）。

4. 2 电阻钎焊焊接试验

本次试验分为两部分，我们先拟采用开环控制系统，即焊机本身的恒流控制系统，采用一定的焊接规范进行钎焊试验。通过开环控制试验，找出钎焊焊料熔化所需焊接电流和电极温度的大致范围。然后，采用自行设计的闭环系统进行钎焊试验。通过两种不同的控制方法，比较钎焊后的焊接接头质量，从而得出期望的结果。

4. 2. 1 开环控制钎焊试验

开环控制是采用该焊机自身的控制系统。该系统为多规范控制系统（型号：YF-0201Z2）。该控制器具有以下的特征：

- ① 焊接多条件设定（15 种条件，2 次通电+9 次脉动）；
- ② 通过选择步进和指令设定，使电极长寿命化及便于电极管理的电流增加功能；
- ③ 对生产数、打点数进行技术，防止生产管理、制造失误（加算式、减算式）；
- ④ 自动焊机使用方便的 9 种输入（起动输入出外）与 7 种输出。

整个试验分为 3 组，从第一组开始，焊接参数不断的在优化，从而保证在开环控制下获得比较理想的焊接接头。然后，利用大量的试验结果，找出一个比较合理的焊接电流值，作为在模糊控制下采用温度反馈的闭环控制的初始设定值。焊件的安装形式如图 4-1 所示。

在正式试验之前，我们尝试通电加热，初步确定焊接工艺的基本参数。在试验中，电流从 2KA 逐渐递增到 7KA，采用 2 片 L 型钎料。具体情况如表 4-1 所示。

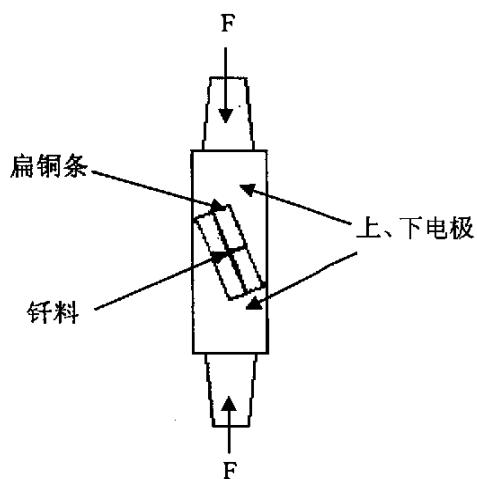


图 4-1 焊件的工装图

表 4-1 初始焊接参数下的焊接情况

| 电流 | 通电时间 | 过程及状态描述 |
|------|------------|---------------------|
| <7KA | 不固定 (<10s) | 电极、工件上产热太少，工件刚刚发热。 |
| 7KA | 20s | 工件表面开始出现氧化色，但钎料还未熔化 |

根据初步试验判断，焊接电流应大于 7KA。以下为 3 批试验的具体情况。

1、第一次试验

本次采用了不同的焊接电流，气缸压力为 0.2Mpa(约 130Kg)。具体情况如表 4-2 所示。

表 4-2 第一次设定的焊接参数下的焊接情况

| 试件号 | 电流 | 通电时间 | 过程及状态描述 |
|------|-------|-----------------|---|
| 1-1# | 9KA | 14s(99cyc*7 次) | 在最后两次通电时，试件、电极整体发红，钎料熔化。焊后检查，在四个外边沿处的钎料还未熔化，而且在端部熔化的前了被挤出。 |
| | 9.5KA | 22s(99cyc*11 次) | 继续焊接该工件。由于钎料已有部分熔化，接触电阻减小，所以产热减小。在后三次，电极整体发红，钎料再次熔化并挤出。工件整体上有些过热。 |
| 1-2# | 10KA | 20s(99cyc*10 次) | 由于电流加大，在后三次通电时电极发红严重，钎料大量流出，并伴随产生大量烟尘，说明钎料挥发严重。焊后检查，焊缝严重过热，成型不好。(采用了比扁铜条宽 |

| | | | |
|------|------|----------------|---|
| | | | 和高略大的钎片，为了保证边沿部位的充分填充。 |
| 1-3# | 10KA | 18s(99cyc*9 次) | 因为上次为连续通电加热，导致试件过烧，所以在本次焊接中间停顿一次。在最后一次通电时电极整体发红，钎料刚好熔化并流动。焊后从外观检查，钎料成型较以前都好，边沿部位也熔化较好。(钎片同上次) |

总结第一批试验的过程和结果，决定继续加大电流，同时缩短通电时间，保证在短时间内可以完成钎料的熔化。

2、第二次试验

基于第一次试验，增大电流，同时缩短通电时间，焊接压力为 0.2Mpa。焊接具体情况如表 4-3。

表 4-3 第二次设定的焊接参数下的焊接情况

| 试件号 | 电流 | 通电时间 | 状态描述 |
|------|----------|------|-------------------------------------|
| 2-1# | 10.54KA | 4s | 钎料刚要熔化但还未熔。 |
| 2-2# | 12.18KA | 4s | 电极微微发红，钎料局部熔化。 |
| 2-3# | 12.18KA | 6s | 电极整体发红，钎料基本熔化，边缘少量未熔化。 |
| 2-4# | 12.2 KA | 7s | 同上 |
| 2-5# | 13.17 KA | 7s | 电极发红，有稍微过热症状，钎料旁流十分严重。 |
| 2-6# | 13.2 KA | 6s | 电极发红适当，但钎料熔化不足。 |
| 2-7# | 12.74 KA | 8s | 电极发红，过热明显，但钎料在中部熔化仍不完全，而端部钎料却被大量挤出。 |

试验结束后，对 2-6# 和 2-7# 试件拉开，观察其内部焊接质量。2-6# 只在工件的前端钎料发生了熔化，而后部均未熔化；2-7# 也出现同样情况，而且端部出现大量气孔，钎料颜色发黑，与一侧母材结合很差，说明端部钎料过热。通过这次试验，说明在大电流，较长时间连续通电的情况下，很容易造成端部过热而后部欠熔的情况。这样很难找出温度控制下的电流的初始设定值。

针对这样的情况，决定在下面的试验中采用大电流，短时间，中间停顿的通电加热——冷却——再通电加热的循环工艺参数进行焊接。通过这样的过程，大致模拟升温——冷却——再升温的过程。这样设想目的是为了保证工件和钎料在该工艺参数下不能过热，钎料有充分的熔化和流动，而且保证钎料不会受高温而挥发。

3、第三次试验

在这批试验时，对通电时间的方式做了大的改变。本次试验的通电时间为 2 个阶段。第一阶段为 2s(99cyc), 大电流。。第二阶段电流降低，采用循环的通电时间和冷却时间，焊接压力为 0.2Mpa。具体焊接情况如表 4-4 所示。

表 4-4 第二次设定的焊接参数下的焊接情况

| 试件号 | 电流和通电时间 | 状态描述 | 焊接温度 |
|------|---|--------------------------------------|-----------|
| 3-1# | 14KA/2s+12KA/4s | 钎料基本熔化。因为采用 2 片钎料，钎料量太少，两侧焊缝明显欠料。 | 653℃~748℃ |
| 3-2# | 14KA/2s+12KA/5s | 电极、试件的加热和钎料熔化和流动均良好，焊接接头焊接质量良好。 | 671℃~732℃ |
| 3-3# | 14KA/2s+12 KA/ (2s(99cyc)+0.2s(10cyc)冷却) 循环 4 次 | 电极，试件未出现过热，钎料熔化略欠。 | 645℃~739℃ |
| 3-4# | 14KA/2s+13KA/ (2s(99cyc)+0.2s(10cyc)冷却) 循环 4 次 | 钎料过烧，流失较严重。 | 677℃~790℃ |
| 3-5# | 14KA/2s+13KA/ (2s(99cyc)+0.3s(15cyc)冷却) 循环 4 次 | 钎料熔化过头，试用手工填丝补料。 | 692℃~784℃ |
| 3-6# | 14.5KA/2s+12.5KA/ (2s(99cyc)+0.3s(15cyc)冷却) 循环 4 次 | 电极、试件的加热和钎料熔化和流动均良好，不足是最后一次循环导致稍微过热。 | 637℃~789℃ |
| 3-7# | 15KA/2s+12.5KA/ (2s(99cyc)+0.4s(20cyc)冷却) 循环 4 次 | 情况同上，仍然是最后一次通电过热。 | 662℃~778℃ |

通过本次试验，我们可以看出，在焊接开始，采用大电流，短时间，可以使焊件快速升温，同时使电极和焊件的电阻值上升。然后采用的较小电流、间断通电，可

以使钎料充分流动。同时，采用温度测量仪测定焊接过程中的温度变化范围。由此可以初步确定出在采用的温度反馈的模糊控制的初始设定值。通过试验，初步设定在模糊控制时，初始设定温度范围在 680℃~780℃之间，初始焊接电流为 15KA。

4.2.2 闭环控制试验

本次试验采用自行设计的闭环控制系统，将 K 型热电偶安装在下电极，进行温度信号的采集。电极、焊件和热电偶的安装如图 4-2 所示。

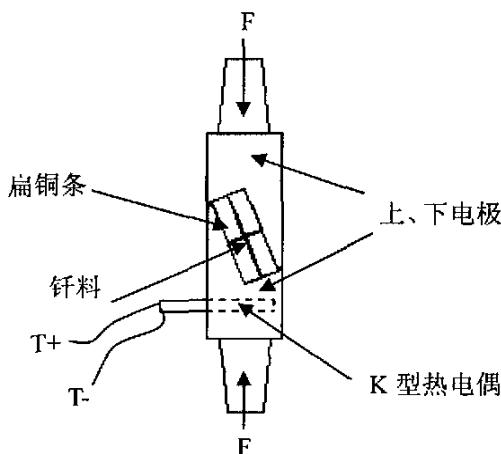


图 4-2 焊件的工装图

根据前面的试验数据，初步得出闭环控制焊接的初始设定值为：电流 15KA，温度在 680℃~780℃范围内分级设定。

整个试验结果如表 4-5 所示。

表 4-5 恒温控制下的焊接参数和焊接状态

| 试件号 | 初始电流值 | 初始设定温度 | 焊接时间 | 状态描述 |
|------|-------|--------|------|---------------------|
| 4-1# | 15KA | 680℃ | 8s | 钎料在外侧熔化较好，但在内侧熔化不足。 |
| 4-2# | 15KA | 720℃ | 7s | 问题同上 |
| 4-3# | 15KA | 750℃ | 10s | 加热略为不足 |
| 4-4# | 15KA | 780℃ | 9s | 整体过程良好，略有过热。 |
| 4-5# | 15KA | 780℃ | 8s | 整体过程良好，钎料刚好熔化但还未流失。 |

图 4-3, 4-4, 4-5, 4-6, 4-7 是每次焊接过程采集的热电偶的输出电压信号(热电偶本身电压信号太微弱，为 mV 级，在此数据是放大 100 倍的采集结果)。

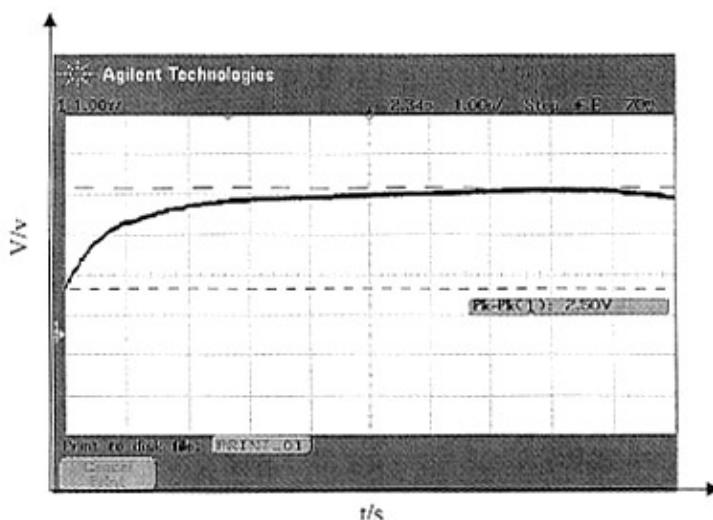


图 4-3 680℃下的热电偶电压

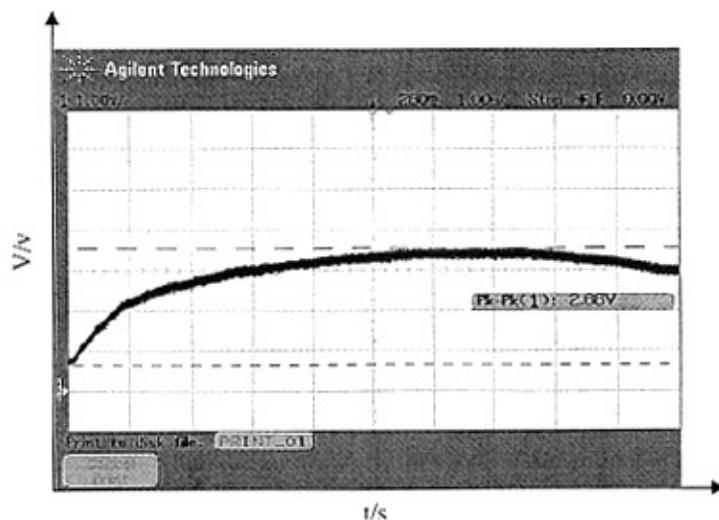


图 4-4 720℃下的热电偶电压

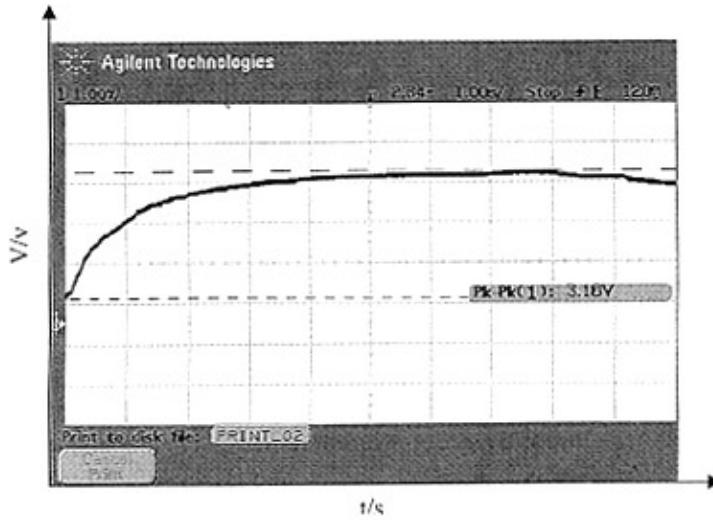


图 4-5 750℃下的热电偶电压

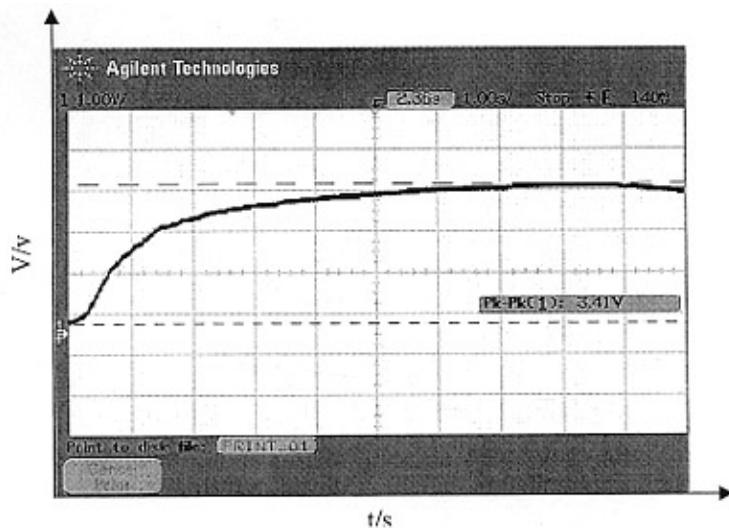


图 4-6 780℃下的热电偶电压 (9s)

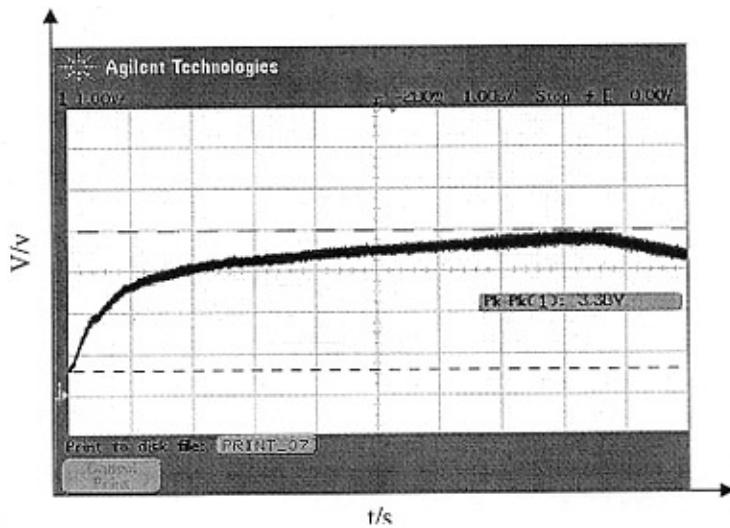
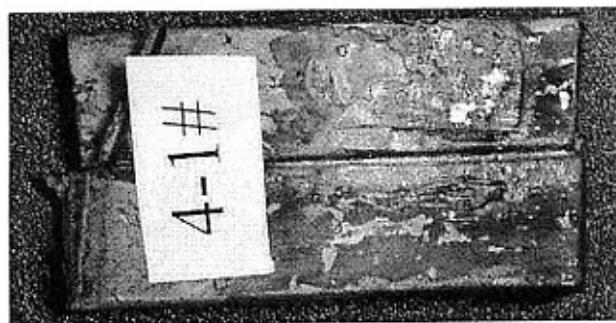


图 4-7 780℃下的热电偶电压 (8s)

如图 4-9 所示，为 5 次焊接的接头照片。



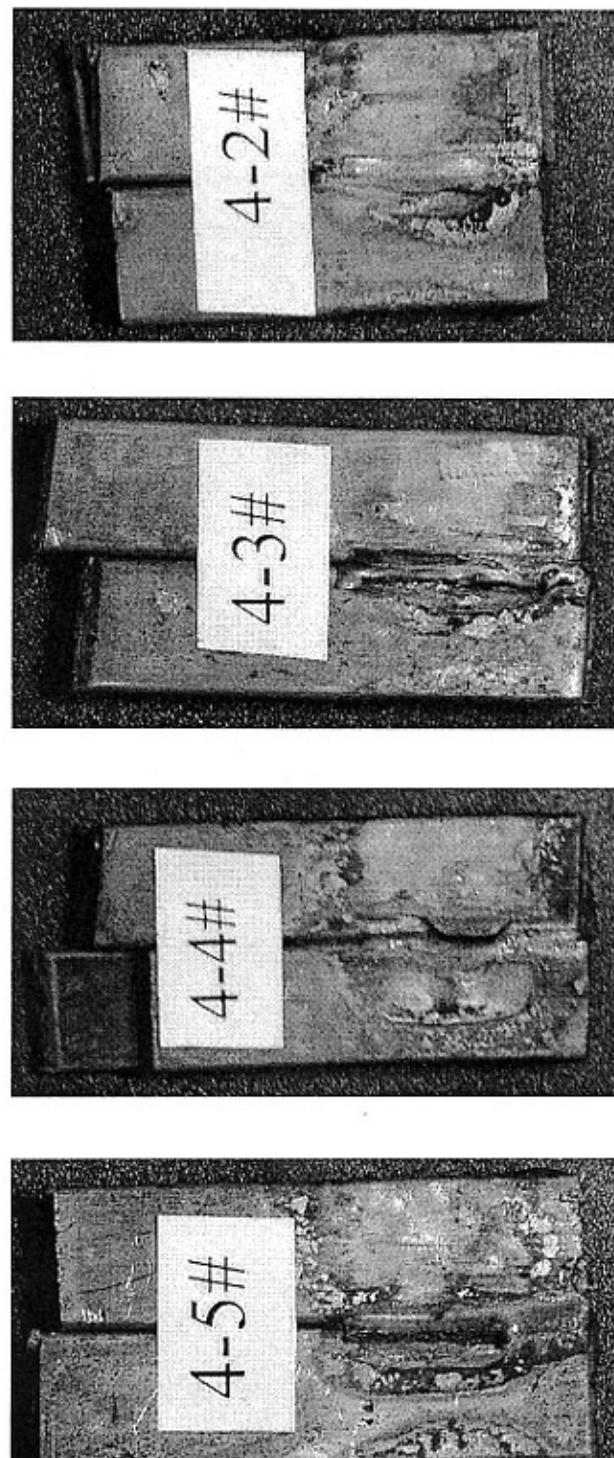


图 4-9 温度控制后钎焊接头试样

由 5 个试件可是看出，试件 1、2、3 的焊料均未充分熔化；试件 4 因为加热时间略长，导致过热，钎料挥发比较严重；试件 5 的钎料填充饱满，焊料也未出现受热挥

发的情况，对该焊件做质量分析（表面质量，钎料填充评定，拉开分析），完全达到预期质量要求。

4.3 试验结果分析

如表 4-6 所示，为恒温控制下，初始设定温度和实际采集的电压信号的数值。

表 4-6 恒温控制下温度与电压测量值

| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 温度 (℃) | 680 | 720 | 750 | 780 | 780 |
| 电压 (V) | 2.50 | 2.88 | 3.16 | 3.38 | 3.41 |

根据图 4-5 可知，所设定的温度与热电偶所对应的理想电压（放大 100 倍）如表 4-7 所示。

表 4-7 热电偶温度与相应电压对应表

| 次数 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|--------|------|------|------|------|------|
| 温度 (℃) | 680 | 720 | 750 | 780 | 780 |
| 电压 (V) | 2.70 | 2.80 | 3.00 | 3.10 | 3.10 |

图 4-10 是测量温度与热电偶实际采集电压与和理想电压的相应曲线。从图中看出，采集电压与理想电压误差不是很大，整体变化趋势基本吻合，符合预期控制思想。

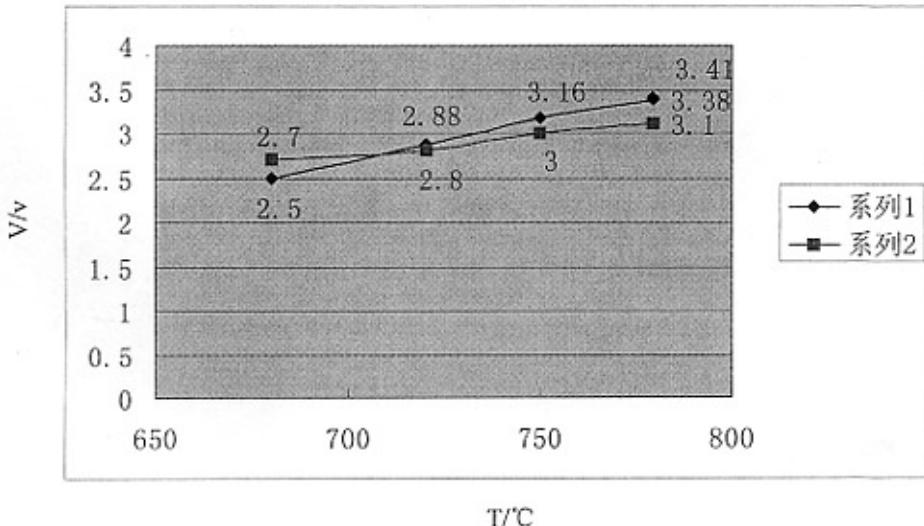


图 4-10 温度与测量电压和理想电压的曲线

4.4 本章小结

1、本章通过试验，在开环控制系统下确定了模糊控制系统焊接的初始设定值（电流和温度），继而通过试验验证了自行设计的控制系统的功能。根据试验证明，该系统基本达到了设计要求。

2、从采集结果可以得出，单一的温度反馈控制，因为温度的滞后性比较大，受环境影响大，控制精度不是很高。由此，为了提高控制精度，在本研究基础上，可以采用多信号，加入对焊接电流的采集和控制，从而提高焊接温度的精度。

结 论

从本研究课题开始，通过对关于温度测量控制方面资料的查阅，作者分析了目前国内外相关领域的研究现状以及各自的优缺点。同时，针对本课题的特点，提出了自己的一套控制系统方案。

本论文在电阻钎焊工艺的基础上，研究了通过控制钎焊过程中的温度来提高焊接质量的问题。通过整个研究过程，得出以下结论：

1、采用单片机进行焊接过程的控制和数据的采集、处理简单，控制高效。完成了以单片机作为物理基础的温度测量控制系统的全部硬件、软件设计、调试和开发工作。避免了使用价格昂贵的专门模糊控制芯片、模糊控制系统来实现模糊控制功能，大大降低了开发温度测量模糊控制系统需要的成本。

2、确定了电阻钎焊温度模糊控制系统的整体方案，最大程度地降低了整个温度测量控制系统对电阻钎焊系统参数的敏感程度，本文确定的温度模糊控制方案不需要精确的数学模型，可以稳定可靠地工作，具有非常好的适应性。

3、在试验中，采用铜磷银钎料（国际牌号：Cu89AgP，熔点：645℃-800℃），在采用自行设计的模糊系统进行焊接时，焊接电流采用15KA，设定焊接温度为780℃，焊接时间为8s。对在该参数下的焊接接头进行分析，焊接质量（表面质量，钎料润湿和饱满程度，强度）达到预期效果，从而说明在电阻钎焊中，采用温度进行模糊控制是比较成功的控制方式。

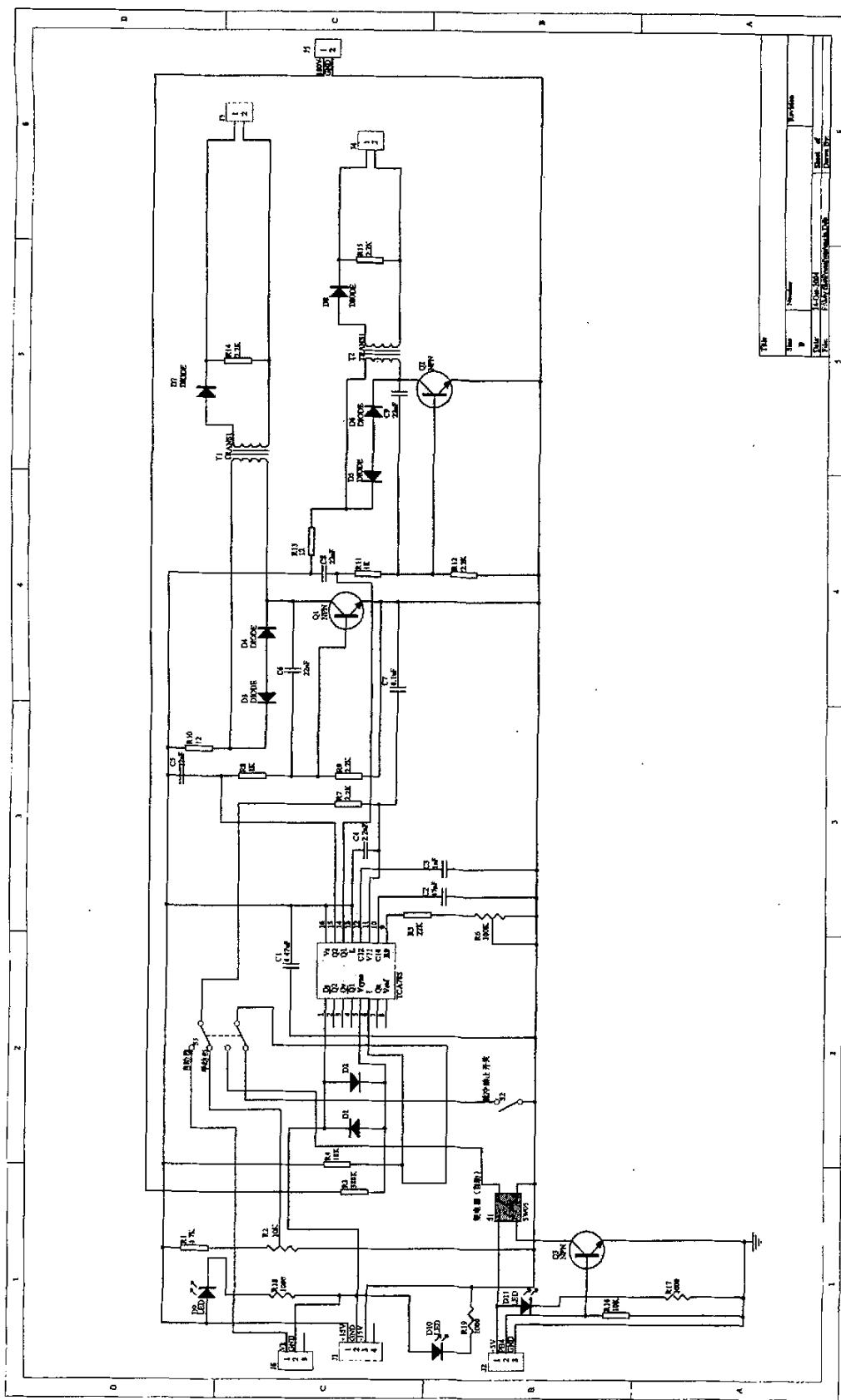
参考文献

- [1] 邹僖主编. 钎焊[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [2] 庄鸿寿, (联邦德国)E.罗格夏特(Lugscheider,E.), 高温钎焊[M]. 北京: 国防工业出版社, 1989.
- [3] 张启运, 庄鸿寿主编. 钎焊手册 (Manual of Brazing and Soldering) [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [4] 白雪飞. 神经网络自适应 PID 高精度温度控制研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2002.
- [5] 凌善康, 李然编. 温度测量基础[M]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
- [6] 王耀南. 神经网络自适应模糊控制在温度系统中的应用, 信息与控制[J], 1996 (4): 246~251.
- [7] 诸静等. 模糊控制原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [8] 胡汉才. 单片机原理及其接口技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [9] 谢宋和, 甘勇, 等. 单片机模糊控制系统设计与应用实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999.
- [10] John Catsoulis. 徐君明, 许铁军, 黄年松等译. 嵌入式硬件设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [11] 丁化成, 耿德根, 李君凯. AVR 单片机应用设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [12] 李勋, 耿德根. AVR 单片机应用技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [13] 余永权. ATMEL89 系列单片机应用技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [14] 沙占友, 王彦朋, 孟志永, 等编著. 单片机外围电路设计[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [15] 万福君, 等编. 单片微机原理系统设计与开发应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995.
- [16] 孙德文, 叶春. 微机原理及其应用[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.
- [17] 李敏, 孟臣. 单片 K 型热电偶放大与数字转换器 MAX6675, 单片机与嵌入式系统应用[J], 2003 (9): 41~43, 50.
- [18] 李宏编. 晶闸管触发器集成电路实用技术大全(Z), 西安: 西安石油学院, 1998.
- [19] 黄继昌, 徐巧鱼, 张海贵, 郭继忠, 傅润何编. 传感器工作原理及应用实例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1998.

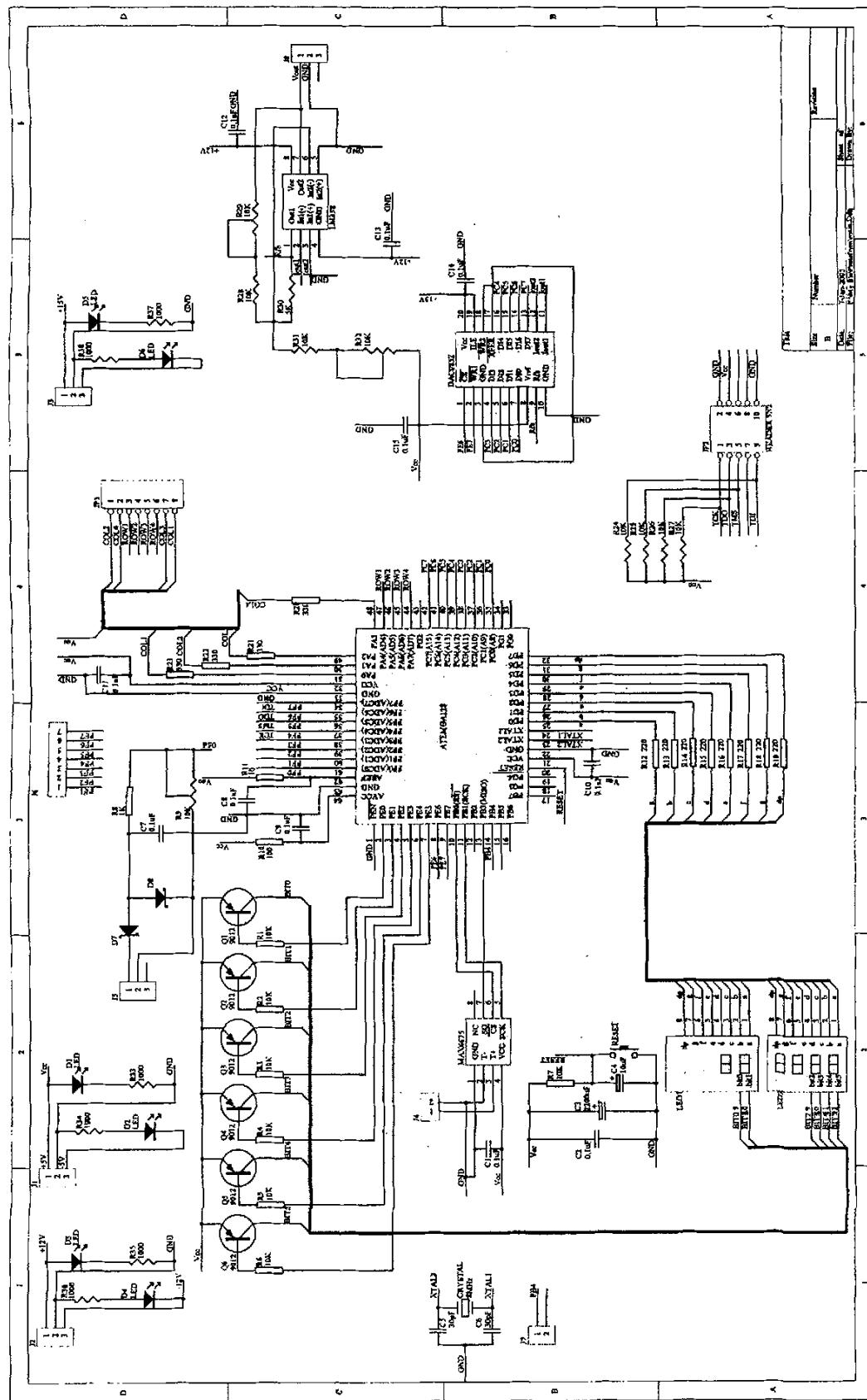
- [20] (美)金齐(P.A. Kinzie) 著. 陈道龙译. 热电偶测温[M]. 北京: 原子能出版社, 1980.
- [21] 王磊, 王为民. 模糊控制理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1997.
- [22] 刘曙光, 魏俊民, 竺志超编. 模糊控制技术[M]. 北京: 中国纺织出版社, 2001.
- [23] 何平, 王鸿绪编. 模糊控制器的设计及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [24] 蒋泽军主编. 模糊数学教程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [25] 陈理君, 符健豪编. 微机模糊控制[M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1992.
- [26] (美) Richard Barnett, Larry O'Cull, Sarah Cox 编. 周俊杰等译. 嵌入式 C 编程与 Atmel AVR[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [27] 张克彦编. AVR 单片机实用程序设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2004.
- [28] Ying H. Necessary conditions for some typical fuzzy systems as universal approximators[J], Automatica, 1997, 33(7):1333-1338.
- [29] 冯冬青, 谢宋和, 等编. 模糊智能控制[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.
- [30] 窦振中编. 模糊逻辑控制技术及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [31] User's Guide of Fuzzy Logic Toolbox[Z]. Mathworks , 1998.
- [32] Tanak K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems[J], Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2):135-156.
- [33] 胡伟, 季晓衡编. 单片机 C 程序设计及应用实例[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [34] 朱志辉主编. 程序设计基础 C++编程方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2002.
- [35] 张友德, 谢伟毅, 等编. 单片机原理与应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [36] 余勇权等著. 单片机模糊逻辑控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995.
- [37] 宋建国主编. AVR 单片机原理及应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1998.

发表论文

- 1、杨敏, 廉金瑞, 程方杰, 顾立志. 凸轮式闪光焊机的变频送进控制[J]. 电焊机, 2004, 34 (6): 57—60.
- 2、杨敏, 廉金瑞, 程方杰, 顾立志. 单片机控制的电阻钎焊系统[J]. 电焊机, 2004, 34 (11): 18—20.



TCA785 外围电路



单片机系统整体电路图

致 谢

本论文是在导师廉金瑞副教授、程方杰副教授的精心指导和亲切关怀下完成的。

科学是社会进步的阶梯，是人类不断了解自然规律，并充分利用自然规律为社会发展服务的根本工具。本人求学期间，是廉老师以其渊博的知识，开阔的视野和具有前瞻性的敏锐的洞察力把我引入焊接自动控制——这一具有广阔发展前景、对科学技术发展具有重大意义的科学领域。并帮助我不断提高独立获取知识、分析问题和解决问题的能力，培养我独立从事科学研究的精神。同时，廉老师以其严谨的科学态度和宽厚的长者风范为我指明了人生方向。在本论文完成之际，特向廉老师表示诚挚的谢意！

在硕士阶段的学习和工作以及论文撰写过程中，程方杰老师给予了我精心的指导和帮助，为解决我在工作和学习中遇到的问题提供了大力的支持，衷心感谢他无私的关怀和指导！

同时，我还要对给予我指导和帮助的胡绳荪老师、路登平老师、罗震老师、吴志生老师表示我衷心的谢意。

在我整个硕士阶段的工作和生活中得到了同级的顾立志、牛虎理、韩俭、韩敬华、朱玉欣、王珩、卢亚静同学、博士王晓峰师兄和师弟唐欣欣、师妹李凌同学的热心关怀和无私帮助，在论文完成之际，也向他们表示我最真挚的谢意。

我还要感谢父母对我的鼓舞和支持，是他们给予了我克服一切困难、不断开拓进取的决心和勇气，他们是我永久的动力！

谢谢参加本论文评审和答辩的所有专家老师！

谢谢所有给予过我帮助和支持的朋友们！

申请人： 杨政

2005年1月于天津大学