

# 摘 要

运用智能检测技术及相关软、硬件的设计,开发了智能化热膨胀检测系统。系统由具有循环冷却装置的加热炉、检测系统、温度控制系统、微型计算机和打印机五部分组成。运用 C++ Builder 和 Visual Basic 设计开发了联机应用软件,为用户提供了友好的操作界面。检测系统的软、硬件设计实现了被测参量的检测、采集、处理和存储等功能。温度控制系统及其软件使系统可按给定的加热曲线对加热炉进行控制。通过循环水冷却和喷气冷却系统的共同作用使系统可获得不同的冷却速度。应用系统对 PCrNi1MoA 进行了热膨胀系数、临界点以及不同冷却速度下的冷却曲线的检测,绘制了 CCT 图,并进行了复现性试验。结果表明:系统具有精度高,投资小,稳定性和复现性好,操作简便以及良好的功能扩展性等特点。

关键词: 智能检测; 热膨胀; 数据采集; CCT; 临界点

## Abstract

The intellectual thermal expansion detection system has been developed by utilizing intelligent detection technology and designing of software and hardware. This system consists of five parts: heating furnace with circulation cooling device, detection system, temperature control system, microcomputer and printer. C++ Builder and Visual Basic has been used to design online application software, which offers a friendly operation interface. The detection system has functions of data detection, data acquisition, data processing and data storage. The temperature control system can control the heating furnace according to given temperature curves. Different cooling rates can obtain by applying water circulation cooling system and gas cooling system. The system has been used to detect the coefficient of thermal expansion, critical point temperature of phase transformation, and different cooling curves of PCrNi1MoA. CCT curves of PCr1NiMoA were drawn according to the results, and reproductive experiment was also carried out. The system has the properties of high accuracy, low investment, good stability and reproducibility, friendly operation interface and good extensibility.

**Key Words: Intelligent Detection; Thermal Expansion; Data Acquisition ; CCT; Critical Point**

## 声 明

本学位论文是我在导师的指导下取得的研究成果，尽我所知，在本学位论文中，除了加以标注和致谢的部分外，不包含其他人已经发表或公布过的研究成果，也不包含我为获得任何教育机构的学位或学历而使用过的材料。与我一同工作的同事对本学位论文做出的贡献均已在论文中作了明确的说明。

研究生签名： 陈 楠

2004年6月25日

## 学位论文使用授权声明

南京理工大学有权保存本学位论文的电子和纸质文档，可以借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容，可以向有关部门或机构送交并授权其保存、借阅或上网公布本学位论文的全部或部分内容。对于保密论文，按保密的有关规定和程序处理。

研究生签名： 陈 楠

2004年6月25日

# 1 绪论

随着加热技术（加热炉设计和电子程序控制）和位移传感器的发展，热膨胀仪的应用范围不断扩大，来满足人们改进金属材料的使用性能，更深入地了解和控制高速、非恒温热处理时材料结构变化的要求。这就不仅促进了热膨胀仪的不断完善，同时也促进了新型热膨胀仪的设计，以满足科研的要求。国外研制的热膨胀仪已经有着越来越广泛的应用。如德国产的 DIL 402 PC 热膨胀仪，日本产的 Formast-D、Formast-F 全自动膨胀仪，法国产的 DT1000 型高速淬火热膨胀仪，波兰的 LS4 型热膨胀仪。这些热膨胀仪有着较为广泛的用途，可以测定金属材料不同相的转变温度，确定金属材料的 TTT 和 CCT 曲线；可用于热加工工艺过程的最佳化，用来满足人们合理使用钢材和建立各种热处理工艺的要求<sup>[1-5]</sup>，还可以分析焊接热影响区的组织和性能的变化<sup>[6]</sup>。

## 1.1 热膨胀检测技术在材料科学中的应用

在材料科学的研究中，热膨胀检测是一种非常实用、可靠、方便的工具。

晶体发生相变时常伴随着热膨胀量的不连续变化，在膨胀曲线上将出现拐点，检测相变过程中的热膨胀量变化是研究金属材料相变的重要手段之一，它可用来测定金属材料产生各种相变时的温度。钢的低温相（ $\alpha$  相）与高温相（ $\gamma$  相）比容差很大，当发生相变时，相变引起的体积变化迭加在纯粹的热胀冷缩效应上；破坏了膨胀量与温度间的线性关系<sup>[7]</sup>。因此根据热膨胀曲线上所显示的热膨胀量的变化去确定相变温度是十分容易的。可从膨胀曲线上确定  $\alpha \sim \gamma$  的相变温度，可以确定  $Ac_1$  和  $Ac_3$  点。

当给热膨胀仪添加了不同冷却速度连续冷却的冷却系统后，可实现  $Ms$  点以及连续冷却转变曲线图的测定。

$Ms$  点在热处理操作中是个重要的参数，它关系到淬火介质温度的选择，工件的淬火裂纹问题以及残余奥氏体量的多少等。通过淬火过程的膨胀曲线，可以测定  $Ms$  点。冷却时奥氏体呈线性收缩，当发生马氏体转变时，由于其比容较大，使得膨胀量增加，曲线开始偏离，转变量越多，膨胀量增大越大。马氏体转变完成后继续冷却时，又引起线性收缩<sup>[7]</sup>。淬火过程所记录下的膨胀曲线还可用作图分析法求出  $Ms$  点以下各温度所形成的马氏体的百分数，或计算出形成不同百分比数量马氏体的相应温度。

连续冷却转变曲线图，简称 CCT 曲线图，它系统地表示冷却速度对转变开始点、

相变进行速度和组织的影响情况。一般的热处理、形变热处理、热轧材的控制冷却以及焊接等生产工艺，均是在连续冷却的状态下发生相变的，因此 CCT 曲线对热处理生产具有直接指导作用。通过钢的连续冷却转变曲线，可以知道过冷奥氏体在各种不同冷却速度下所经历的转变以及最终得到的组织和性能，同时还能清楚的确定钢的临界淬火速度，为确定钢的淬火方法、选择淬火介质提供了重要依据。CCT 曲线提供的这些信息为新钢种研制和新工艺研究也提供了可靠的参数支持。利用焊接用 CCT 曲线还可以分析焊接热影响区的组织和性能的变化<sup>[1-6,8]</sup>。热膨胀法是测定连续冷却转变曲线的一种较常用的方法。使用设备仪器较为复杂，必须配备有控制不同冷却速度的装置和能快速测量并同时记录温度、长度、时间等三个参数的检测系统。测定的原理是根据钢的各相比容的不同来确定相变点。

综上所述，热膨胀检测在材料科学研究领域中是一种非常简捷，可靠，实用的工具。

## 1.2 智能检测技术的发展

智能检测就是利用计算机及相关仪器，实现检测过程智能化和自动化。智能检测包括测量、处理，性能测试、故障诊断和决策输出等内容<sup>[9,10]</sup>。智能检测能充分地开发和利用计算机资源，在人最少参与的条件下，获得最佳和最满意的结果。智能检测和控制技术能有效地提高被测对象（过程）的安全性并获得最佳性能，使用方便灵活，具有较高的可靠性、可维护性、抗干扰能力以及对环境的适应能力，并具有优良的通用性和可扩展性。

智能检测系统一般主要由检测、输入、接口、计算机、输出和执行六部分组成。

智能检测系统的开发属于工程应用性系统开发。它大体上要经过三个阶段，即确定设计任务；拟制总体设计方案；系统总体设计过程。系统总体设计过程主要是系统硬件和软件的开发。包括四个阶段，即硬件和软件的功能分配；硬件电路的设计与调试；软件模块的设计与调试；系统联调<sup>[9]</sup>。智能检测系统的一般开发过程如图 1.2.1 所示。智能检测具有以下特点<sup>[10]</sup>：

1. 测量过程软件控制：可以简化系统的硬件结构，缩小体积，降低功耗，提高检测系统的可靠性和自动化程度。

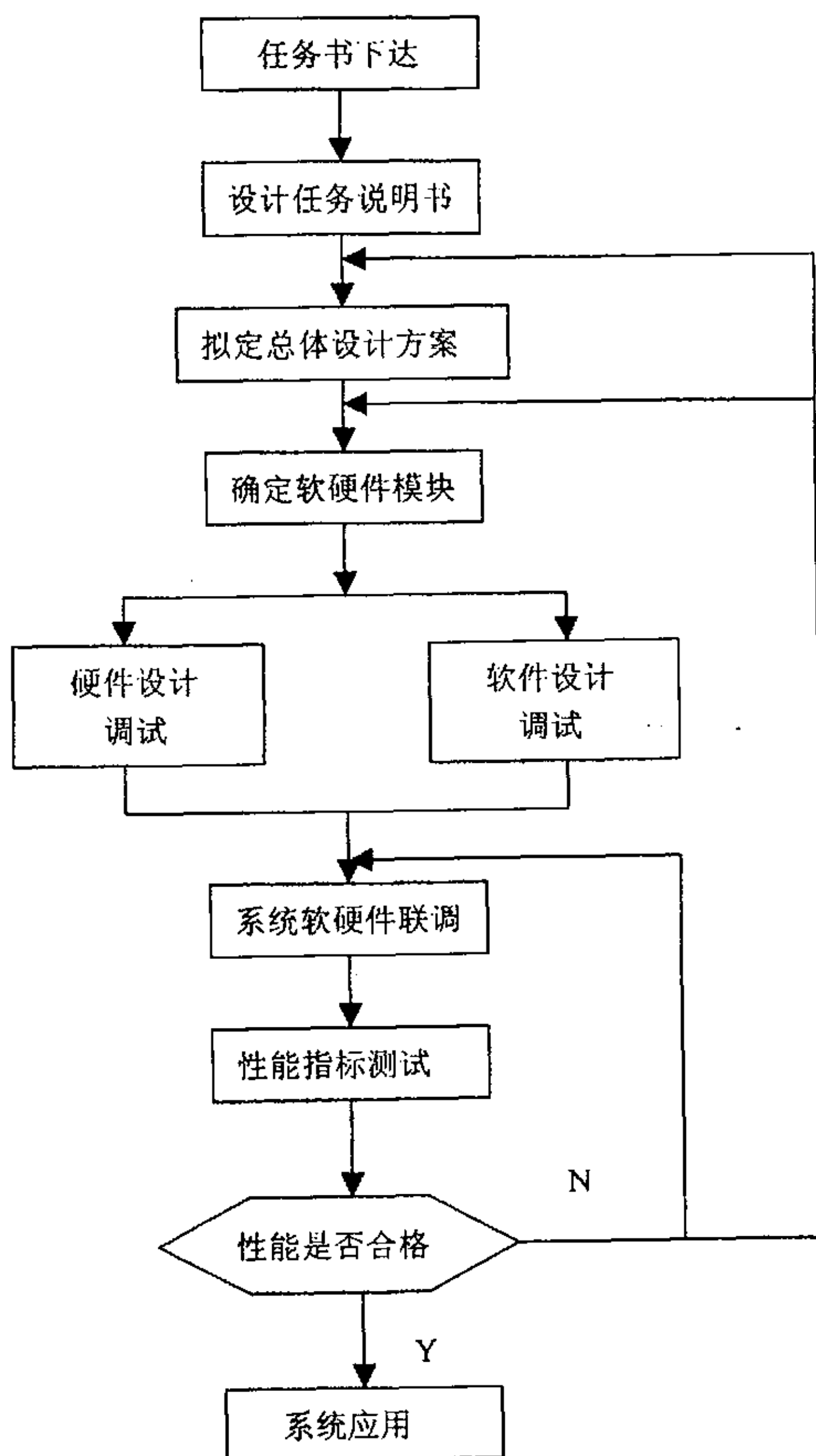
2. 智能化数据处理：计算机可以方便、快捷地实现各种算法。因此，智能检测系统可用软件对测量结果进行及时的在线处理，提高测量精度。另一方面，智能检测系统可以对测量结果进行再加工，获得更多更可靠的信息。

3. 高度的灵活性：智能检测系统以软件为工作核心，生产、修改、复制都较容易，功能和性能指标更改方便。

4. 实现多参数检测与信息融合：智能检测系统可配备多个测量通道，由计算机对多路测量通道进行检测，系统可以对多种参量进行检测。在进行多参数检测的基础上，依据各路信息的相关特性，可以实现智能检测系统的多传感器信息融合，从而提高系统的准确性、可靠性和容错性。

5. 测量速度快：随着电子技术的迅猛发展，高速显示、高速打印、高速绘图设备也日臻完善，这些都为智能检测系统的快速检测提供了条件。

6. 智能化功能强：以计算机为信息处理核心的智能检测系统具有较强的智能功能，可以满足各类用户的需要。



1.2.1 智能检测系统的设计、研制的一般开发过程图

伴随着以计算机为核心的信息处理与过程控制相结合的实用系统的发展,一些先进技术,如信息传感技术、数据处理技术及计算机控制技术正在飞速发展并不断变革,促进智能检测系统将进一步向着以下方向发展<sup>[11,12]</sup>。

1. 综合化: 将本来各自独立的电子测量仪器、自动化仪表、自动化检测系统、数据采集和控制系统, 在应用中相互靠近, 功能相互覆盖, 差异缩小, 体现为一种综合管理与控制。

2. 智能化: 系统可随外界条件的变化, 具有确定正确行动的能力, 即具有人的思维及推理并作出决策的能力。

3. 系统化和标准化: 计算机之间相互联系在一起, 形成各种多计算机系统, 以适应开放、复杂的工程及大系统的需要。在向系统化发展的同时, 还涉及系统部件接口的标准化、系列化与模块化, 以便搭成通用整体。

4. 仪器虚拟化: 虚拟仪器 VI 把传统仪器的控制面板移植到普通计算机上, 利用计算机的资源, 实现相关的测控需求。由于 VI 技术给用户提供了一个充分发挥自己才能和想像力的空间, 用户可以根据自己的需要来设计自己的仪器系统来满足了多种多样的应用要求, 具有极好的性价比。

5. 网络化: 智能检测, 可以用一台计算机作为核心机, 也可以由多台计算机来实现, 在计算机网络技术迅速发展和普及的今天, 将一个智能检测系统接入计算机网络, 无疑会进一步增强其功能和活力。

### 1.3 热膨胀仪的发展现状

目前国内科研院所及高校所配备的较先进的热膨胀仪大多是由国外进口的, 以德国和日本等一些国家的设备为主, 如 DIL 402 PC 热膨胀仪和 Formast-D、Formast-F 全自动膨胀仪。这些设备功能较全, 可以实现加热、冷却、温度控制、数据采集及数据处理等功能, 精度较高, 但是这些进口设备的价格过于昂贵, 对于国内多数单位而言, 不具有推广的可能<sup>[1-5,13-15]</sup>。而目前在国内生产的热膨胀仪还比较落后, 用微机控制及处理的商用仪器还不多见, 功能较为完善基于热膨胀检测的智能检测应用系统尚未见报道, 仅有的产品一般只能提供膨胀系数的测量, 不具备冷却系统, 功能比较单一, 不能满足科研单位及院校的一些较复杂的要求, 不能够提供整体解决方案<sup>[14-18]</sup>。同时采用国外的仪器也由于没有相关的配套软件, 国内以前多采用手工根据测定的相关数据绘制连续冷却曲线, 即浪费时间又不精确。

从目前的文献资料看, 国内较少有关于基于热膨胀检测的智能检测应用系统的文章, 有的单位根据现有设备, 结合具体任务的要求, 利用单片机构成自动检测系统, 其他文献也多是基于传感器与微机的结合利用, 较少将此作为一个完整的智能

检测应用系统来开发的，并且这些装置都没有冷却系统，只能单纯的测加热过程的膨胀系数，无法满足更多的科研工作的要求。清华大学的刘永东设计的热膨胀系数测量仪是完全机械式的<sup>[15]</sup>。吉林电力职工大学模拟电站的薛凯将应变片传感器和温度传感器应用到热膨胀系数的测量中，结合微型计算机进行数据采集与数据处理，实现了固体热膨胀系数的测量<sup>[16]</sup>。但是该系统存在着加热范围小（0~100℃）、采样频率小、精度低及无法实现控温等问题。东北大学的刘晓等人研制了金属线膨胀系数的计算机检测系统<sup>[17]</sup>，以及潘素瑛、肖天来等人研制的热膨胀仪<sup>[18]</sup>，基本实现了对信号进行采集，并对测得的数据进行处理，最终求出了线膨胀系数的值。但这些系统通道都比较少，且都无冷却系统，无法进行 Ms 点以及 CCT 曲线的测定，无法满足人们合理使用钢材和建立各种热处理工艺的要求。

## 1.4 课题的意义及目的

由于检测与测控技术的迅猛发展，智能检测在材料科学中的应用也日益受到前所未有的重视，目前国外的情况相对较好，材料科学方面的智能检测的应用水平较高，相关的产品开发的也比较好，但是国内的情况就有些差强人意了。目前智能化水平较高的检测设备只有少数资金雄厚的单位拥有，高额的售价以及昂贵且滞后的维护服务制约了国外进口设备的普及，而落后的检测水平反过来又限制了研究水平。一套高精度、功能完善、性能稳定、成本低的热膨胀智能检测应用系统在材料科学的研究及教学中的作用不言而喻，因而这样一套智能化热膨胀检测系统的实现与应用有着非常大的应用前景。

课题目的是自行设计一套智能化热膨胀检测系统。系统由具有循环冷却装置的加热炉、检测系统、温度控制系统、微型计算机和打印机五部分组成。系统搭建完成后，进行软件设计与开发，完成硬件和软件的系统联调，并利用设计的算法软件对数据进行完备的处理。该系统能够测定材料的热膨胀系数，测定材料的临界点（ $Ac_1$ 、 $Ac_3$ 、 $Ar_1$ 、 $Ar_3$  和  $Ms$ ）、不同冷却速度下的冷却曲线以及 CCT 曲线，并在此基础上争取开发出更广泛的应用。该系统能够简便、快捷地完成多点多参量的采集，可以满足不同场合的检测要求。系统应具有精度高，功能完善，成本低，性能稳定，操作简便等特点。



## 2. 智能化热膨胀检测系统的总体设计方案

### 2.1 智能化热膨胀检测系统的检测原理

#### 2.1.1 热膨胀曲线的测定原理<sup>[7,8]</sup>

当钢发生固态相变时，常伴随着体积的不连续变化，从而引起热膨胀量的不连续变化，在膨胀曲线上将出现拐点。因此分析热膨胀现象在研究钢的相变方面占有很重要的地位。它可用来测定不同钢的各种相变温度。

设试样 0℃ 时的长度为  $L_0$ ，则其在  $t$ ℃ 时的长度  $L_t$  为：

$$L_t = L_0 (1 + \alpha t + \beta t + \dots) \quad (2.1)$$

式中  $\alpha$ 、 $\beta$  为试样材料的性能常数，一般  $\beta$  后面的项都很小，可以忽略不计，式 (2.1) 可简化为：

$$L_t = L_0 (1 + \alpha t) \quad (2.2)$$

求其微分，可得

$$\frac{dL_t}{dt} = \alpha L_0 \quad (2.3)$$

$\alpha$  为该试样在  $t$ ℃ 时的热膨胀系数，试样在加热和冷却时，膨胀量的变化是由两部分叠加而成的，一部分是由于热胀冷缩引起的膨胀量变化，另一部分是由于相变过程中体积变化所引起的膨胀量变化，以上两部分叠加结果引起总的膨胀量变化。当不发生相变时，由相变引起的膨胀量变化为零，由上式可知，以膨胀量变化  $\Delta L$  为纵坐标，温度  $t$  为横坐标的热膨胀曲线应近似为直线。当试样在加热或冷却过程中有相变发生时，则由于新旧两相的结构、比容不同，试样的体积将发生不连续变化，因而在热膨胀曲线上相变发生和相变结束处形成拐点。根据此拐点，就可以比较容易地确定该相变发生和结束点温度。

表 2.1.1 钢中各基本组织的比容<sup>[7]</sup>

组织名称	C(%)	比容 (20℃) (cm <sup>3</sup> /g)
奥氏体	0~2	0.1212+0.0033×C%
铁素体	0~0.2	0.1271
珠光体	0~2	0.1271+0.0005×C%
贝氏体	0~2	0.1271+0.0015×C%
马氏体	0~2	0.1271+0.0025×C%

从表 2.1.1 中可以看出钢中各组织的比容关系是：奥氏体 < 铁素体 < 珠光体 < 贝氏体 < 马氏体。从图 2.1.1.1 钢的加热和冷却膨胀曲线示意图中可看出：在加热过程中，当发生铁素体和珠光体向奥氏体转变时，由于奥氏体的比容比铁素体和珠光体小，所以引起膨胀曲线在长度方向上的收缩，待全部转变为奥氏体后，膨胀曲线将继续膨胀。这样在膨胀曲线上就出现了两个拐点，从这两个拐点就可以确定出  $Ac_1$  和  $Ac_3$  点温度。在冷却过程中，当从奥氏体中析出铁素体或珠光体时，开始时收缩的曲线会发生膨胀，当奥氏体全部转变为铁素体和珠光体后，膨胀曲线又继续收缩，从而也出现两个拐点，并可根据拐点确定  $Ar_1$  和  $Ar_3$  点温度。同理，从图 2.1.1.2 试样奥氏体化后淬火过程膨胀曲线图中可以看出：冷却时奥氏体呈线性收缩，当发生马氏体转变时，由于其比容较大，引起膨胀，使曲线开始偏离，马氏体转变完成后继续冷却时，又引起曲线收缩，同样会引起膨胀曲线的变化而出现拐点，由此可确定  $M_s$  和  $M_f$  点温度。如上所述，由于钢的奥氏体在连续冷却中，不论在高、中、低温发生相变时都伴随体积效应，因而在曲线上都会出现拐点。测出不同冷却速度下各拐点的温度，就可以判断出相变开始和结束时的温度，将发生相同相变的开始点和结束点在时间—温度半对数坐标系中连接成平滑曲线，标上不同冷却速度的冷却曲线，就可绘出钢的过冷奥氏体连续冷却转变曲线图（CCT 图）。

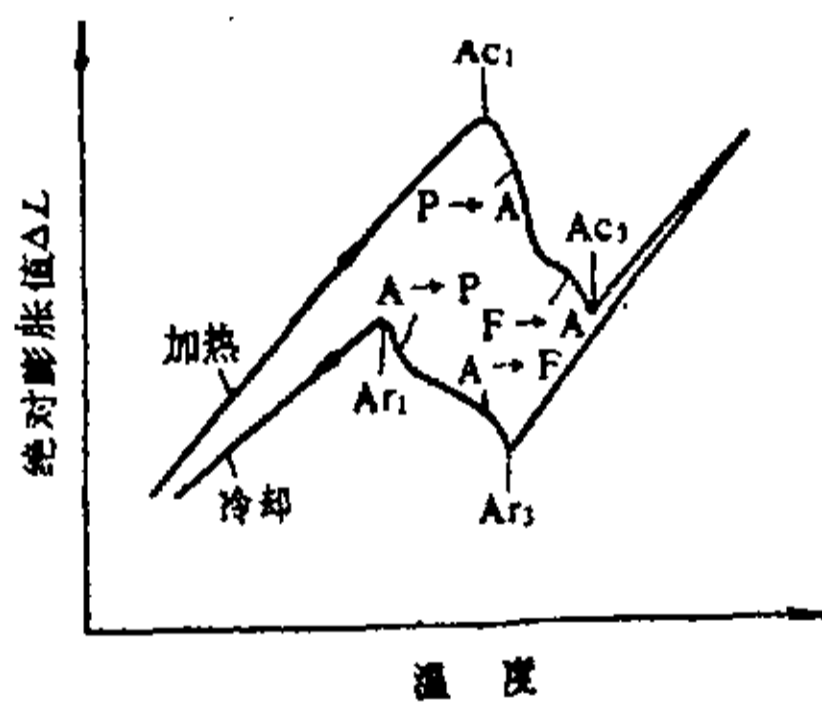


图 2.1.1.1 加热、冷却膨胀曲线图

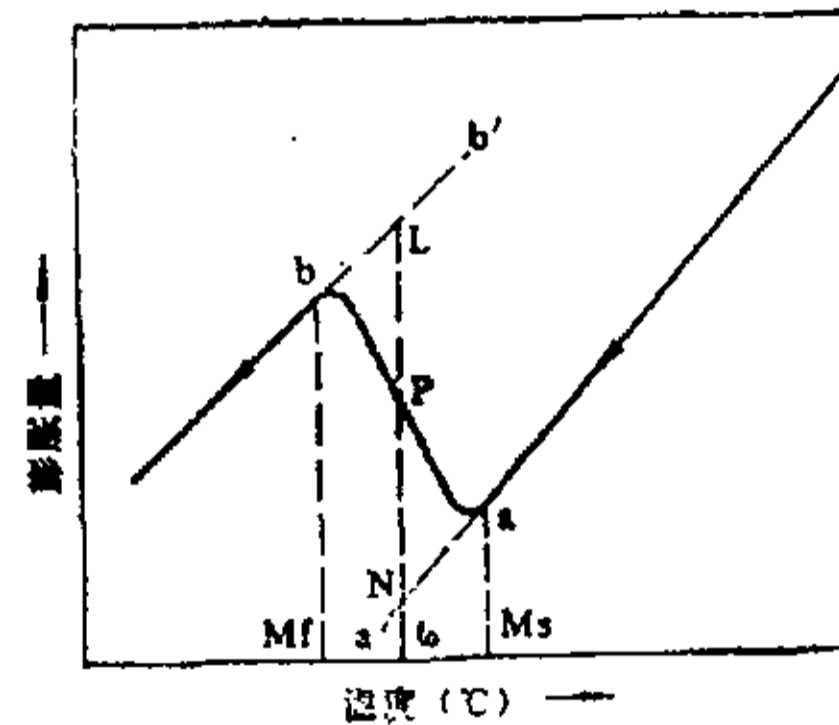


图 2.1.1.2 淬火过程膨胀曲线图

## 2.1.2 临界点的确定

临界点是确定金属和合金热处理规范的重要参数，如钢在退火、正火、淬火等热处理时其奥氏体化加热温度，工具钢的球化退火保温温度，都以其临界点作为制定热处理工艺的首要依据。从膨胀曲线上确定临界点并无统一的准则，通常有以下几种方法<sup>[7]</sup>：

1. 切线法：把热膨胀曲线上的纯热膨胀(或纯冷收缩)的直线段延长，以曲线最新开始偏离直线的位置即切点所对应的温度作为相变点，即临界点，如图 2.1.2.1 中

a 所示。

2. 角切法 如果曲线的过渡圆弧的曲率半径很大, 并且温度范围很小, 不存在直线段, 则可利用作图法。作与温度成某一角度例如  $30^\circ$  (或其他角度) 的直线与曲线相切, 以其切点来确定临界点, 如图 2.1.2.1 中 c 之上部所示。

3. 极值法或叫峰值法 取曲线拐折部分的极大值或极小值的位置作平行于温度轴的直线。其与曲线相切点, 所对应的温度是为极大值或极小值, 用之来作为相变温度, 如图 2.1.2.1 中 b 所示。

4. 平均法 如图曲线圆化, 出现拐点, 以两边直线部分延长所形成夹角的等分线, 与曲线的交点, 作为相变点, 其对应的温度为相变温度。如图 2.1.2.1 中 c 的下部所示。

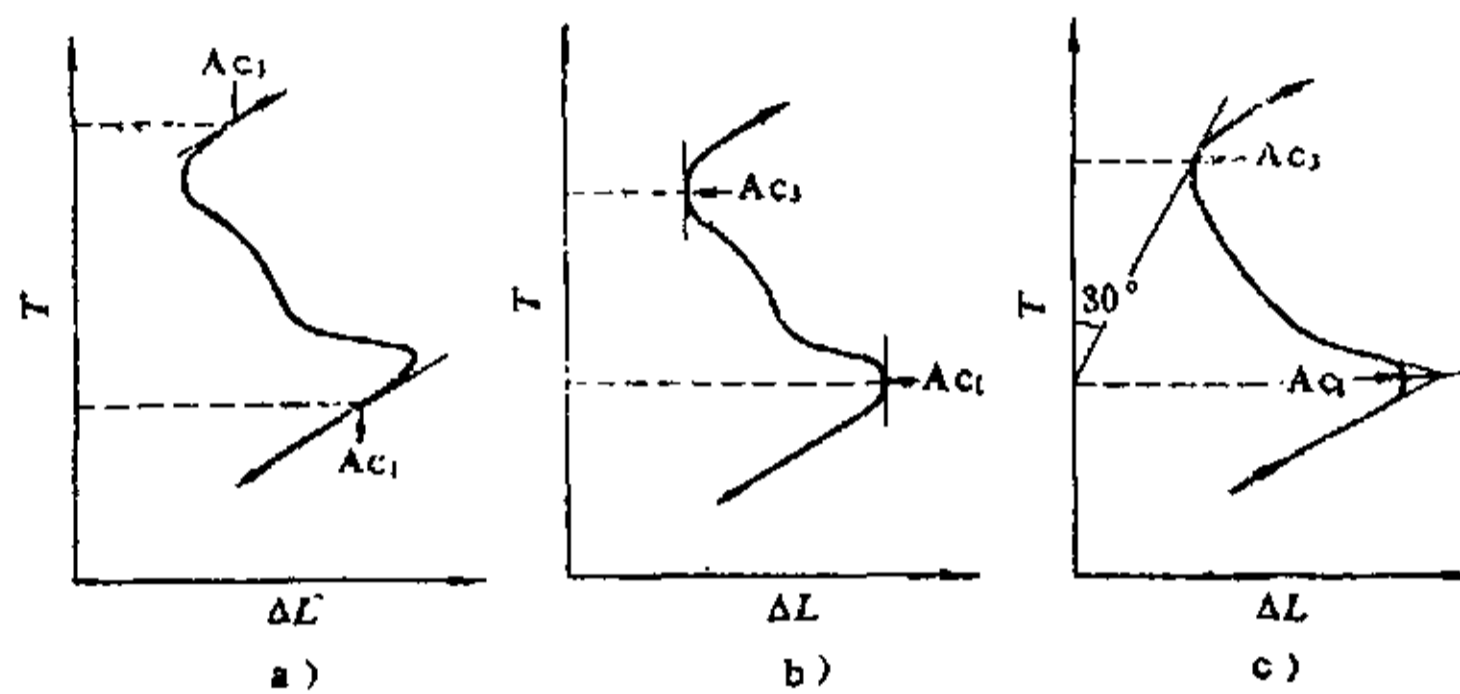


图 2.1.2.1 临界点确定法示意图

四种方法中最常用的是极值法和切线法。极值法的优点是拐点明显, 容易确定。但这种方法确定的临界点与真正的临界点有一定偏差, 根据这种方法确定的临界点对制定实际的热处理工艺不会带来很大影响, 但对 CCT 曲线的位置却会带来相当的影响。而切线法符合金属学原理, 其优点在于它接近真实的相变开始和结束温度, 这样的数据制定热处理规范将更为切合实际。实验采用切线法来确定热膨胀曲线上的相变点。

## 2.2 热膨胀检测系统总体设计方案

### 2.2.1 系统设计的基本思想

智能化热膨胀检测系统的基本构思如下: 将被测试样加工成 50mm 长的细长圆棒状, 两端各有一个台阶, 将试样放入石英载物管中, 一端通过石英棒与位移传感连接, 石英载物管可通入加热炉内。试样台阶上钻一小孔以便插入热电偶。通过温度控制系统控制加热炉以一定的速率加热升温, 随后在循环水和喷气冷却系统的共

同作用下，获得不同的冷却速度，在此过程中，通过编写的软件程序调用数据采集卡同步记录下试样的温度、试样尺寸以及采样时间的变化，并对采集的数据进行滤波平滑处理，随后导入到数据库中，通过相关软件绘制出温度—膨胀量变化曲线，从而可以确定出膨胀系数，临界点和 CCT 曲线。

为了克服传统的热膨胀检测装置的精度不够高（主要涉及膨胀量和温度的测量精度以及温度的控制精度），不具备冷却系统，功能单一，直观性较差等方面的不足。课题所设计的智能化热膨胀检测应用系统需增加或改进以下功能：

1. 设计高精度高检测速度的检测系统，实现检测精度的提高；
2. 采用 PID 控制算法，实现温度的精确控制及模拟复杂的非线性加热和冷却过程，并进一步考虑模糊控制思想在温度控制方面可能的应用。
3. 设计配置一套能以不同的冷却速度连续冷却的冷却系统，使系统可以满足更多的应用，如  $M_s$ 、不同冷却速度下的冷却曲线以及 CCT 曲线的测定；
4. 设计开发智能应用程序，提供友好直观的可视化操作界面，完成热膨胀检测过程的控制及被测参量的处理和存储，并通过相关参量数据或关系曲线确定临界点( $Ac_1$ 、 $Ac_3$ 、 $Ar_1$ 、 $Ar_3$  和  $M_s$ )、不同冷却速度下的冷却曲线以及 CCT 曲线。
5. 设计开发相应扩展接口，为系统功能的进一步扩展和提升提供完善的平台。

### 2.2.2 系统结构组成

智能化热膨胀检测系统组成框图如图 2.2.2.1 所示：

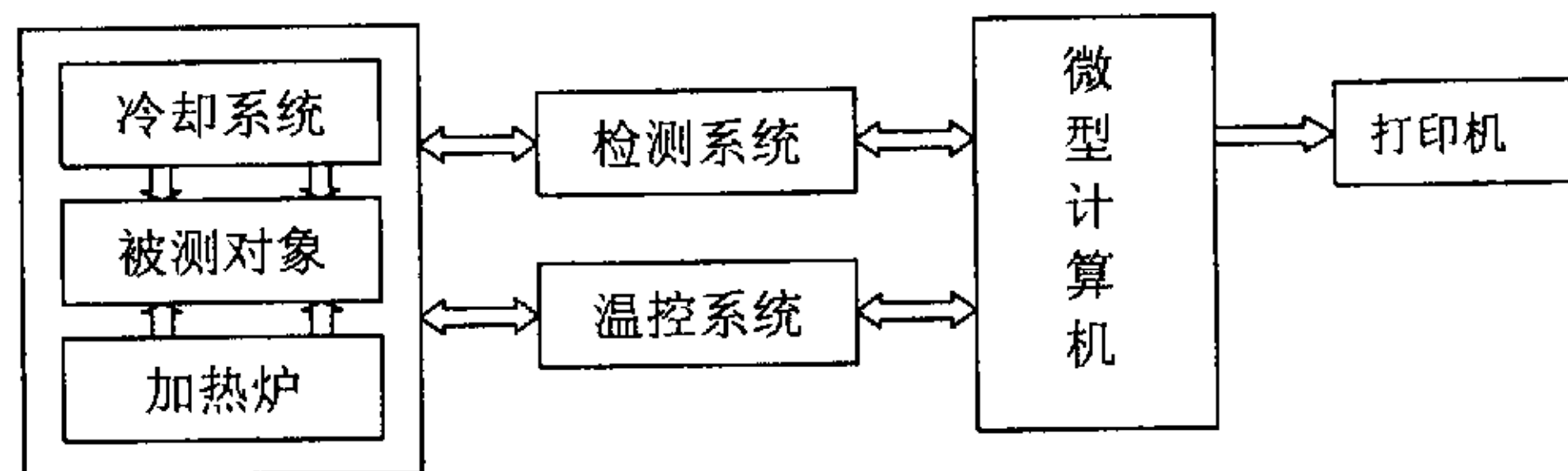


图 2.2.2.1 智能化热膨胀检测系统组成框图

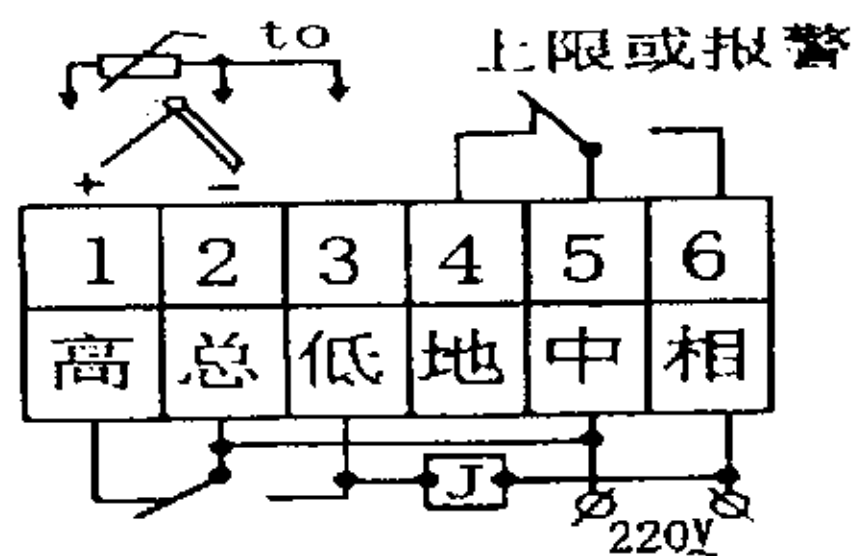
系统由具有循环冷却装置的加热炉、检测系统、温度控制系统、微型计算机和打印机五部分组成。微型计算机通过串行通信控制温度控制器输出控制信号对加热炉进行控制，在循环水和喷气冷却系统的共同作用下可获得不同的冷却速度，试样的温度和膨胀量变化量以及采样时间由检测系统实时采集并输入计算机，计算机运行应用程序对数据进行相应处理，得到所需结果。

### 2.2.3 系统机械组成

智能检测系统的机械部分主要包括试验平台、加热炉、载物管、冷却系统等。

加热炉通过支架和导轨连接在试样平台上，通过支架的调节可以调节加热炉的高度，导轨可以使加热炉在水平方向上自由移动，这样便于试样的取放，载物管的进出加热炉，以及载物管在炉中的位置的调节。载物管是由石英套管组成的，试样放置在石英载物管内，试样的一端与载物管的末端壁接触，另一端与载物管内的石英棒相抵，石英棒与位移传感器相接触，可将试样的膨胀量微小变化传送给位移传感器，再由位移传感器转换成电信号供检测系统检测采集。

冷却系统有两部分组成，一是装在加热炉中的水循环冷却系统，还有一部分就是喷气冷却系统。喷气冷却系统由氮气瓶、流量计、数字显示调节仪、电磁阀、和电磁继电器组成。慢速冷却利用水循环系统和温度控制电路即可实现按设定的冷却速度冷却。快速冷却的实现是通过开了多个孔的导管，垂直于试样轴线，将氮气吹向试样来实现的。气流速率由气体流量计来控制，从而可获得不同冷却速度。冷却时，接通电源，通过热电偶将试样温度传到调节仪上，与调节仪开始设定的温度相比较，高于设定温度时，则电路导通，电磁继电器合上，电磁阀开，开始喷气，当试样温度低于设定温度，则电磁继电器闭合，电磁阀关，停止喷气。数字显示调节仪的接线图如图 2.2.3.1 所示。冷却系统使系统可获得不同的冷却速度，可实现冷却过程膨胀量变化曲线和 CCT 图的测定，并为进行等温检测提供了很好的实现途径。



注：“J”为交流接触器线圈(220V)

图 2.2.3.1 数字显示调节仪的接线图

### 2.2.4 系统硬件电路总体设计

智能检测应用系统的硬件电路如图 2.2.4.1 所示。

1. 数据采集电路，这是系统的核心组成部分，主要由多路模拟开关电路、测量放大电路、采样/保持电路、模数/数模转换电路、控制逻辑与时钟电路等几个部分组成。完成对被测信号的检测采集，并送入 PC 机进行处理。

2. 温控系统电路，是系统的重要组成部分，使加热炉按照程序设定的温度曲线进行工作。温度控制系统主要有温度测量、A/D 转换、单片机系统、键盘操作系统、温度显示系统、报警电路、D/A 转换等部分组成。

3. 串口通信电路，采用 MAX232 芯片，实现与主机的通信。

4. 冷却系统电路，实现冷却气的开通与闭合。

5. 电源电路，提供系统所需的+5V、±12V 电源。

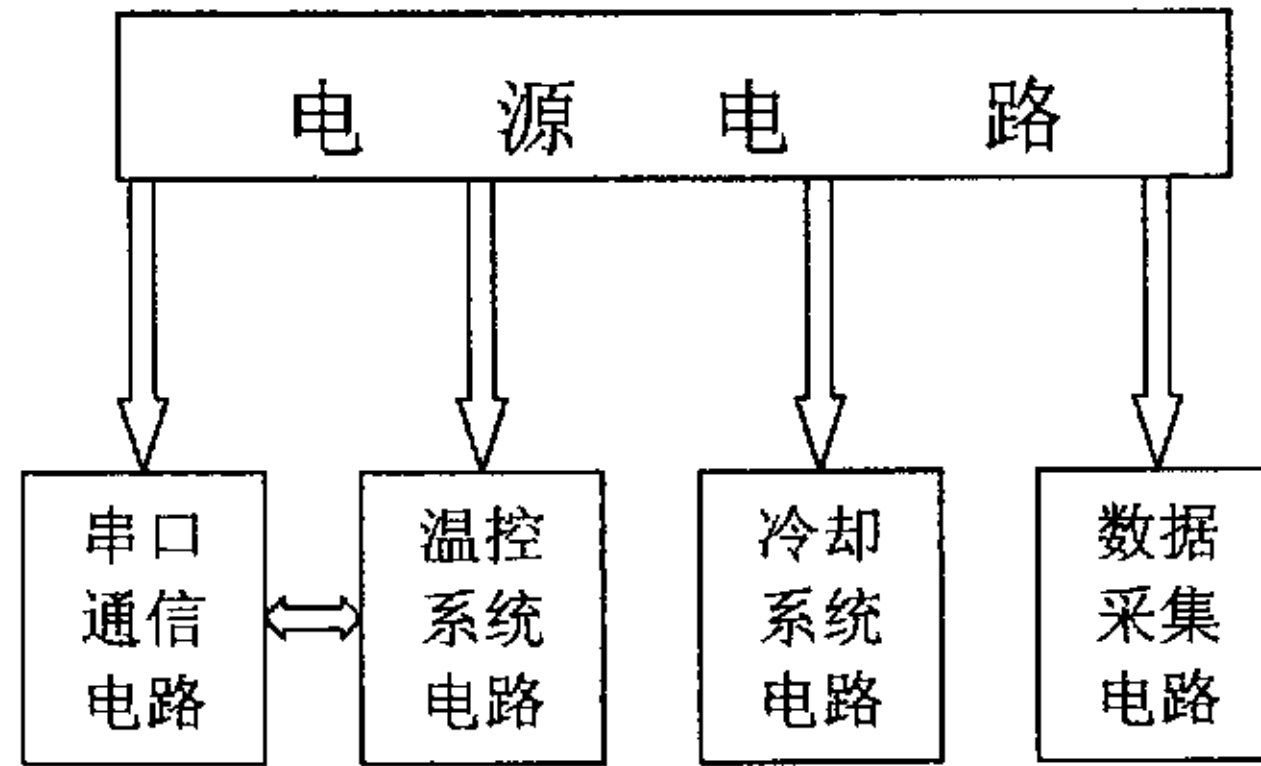


图 2.2.4.1 智能检测应用系统的硬件电路

## 2.2.5 系统软件总体设计

为使智能检测应用系统具有良好的应用及扩展性能，系统的软件部分采用模块化设计，各个模块完成特定的功能，由 PC 机以命令的形式统一调用。其组织结构如图 2.2.5.1 所示。

数据采集和数据库应用模块是用高级语言 C++Builder<sup>[19,20]</sup>来编写的，C++Builder 是全新的 32 位 Windows 开发工具，C++ Builder 不仅继承了传统 C++ 应用程序开发工具高效和低层硬件控制能力强的特点，同时利用了可视化构件类库（VCL, visual component library）所提供的构件，使得该工具具有应用方便和真正可视化的特点。在 Borland C++ Builder 集成开发环境中集成了一百多个各种功能的构件，这些构件覆盖了应用程序开发的各个方面，可使程序开发具有快速和可视化的特点。Borland C++ Builder 也是一个完整的软件开发环境，提供了完整的用于软件设计、编程、测试和调试跟踪的工具。在进行应用程序开发时，主要利用 C++BUILDER 来进行软件设计，包括检测参数的设定；系统用途设定；显示检测过程中的被测量的状态；处理数据；利用其丰富的数据库功能为检测量建立数据库文件等。

下位机软件主要采用单片机的 C 语言——C51 编写，C 语言是一种编译型程序设计语言，它兼顾了多种高级语言的特点，并具备汇编语言的功能。使用 C 语言可以很好的解决汇编语言不能很好解决的一些问题，使用 C 语言可以使程序员尽量减

少对硬件的操作。与汇编语言相比使用 C 语言具有如下优点：使用 C 语言不需要了解处理器的集合指令和存储器结构；不需要考虑存储器的寻址和数据内型等细节；指令操作的变量选择组合提高了程序的可读性，便于改进和扩充；大大缩短了程序的开发和调试时间；C 语言中的库文件提供许多标准的例程，如格式化输出、数据转换和浮点运算等；通过 C 语言可实现结构化和模块化编程，可将编制好的程序加入到新程序中，具有高效、灵活、功能强的特点；同时 C 语言具有很好的移植性，C 语言编译器几乎适用于所有的目标系统，已完成的软件项目可以很容易地转换到其他的环境中。同时，对于在时钟上要求严格时，运用了汇编语言以进行程序的优化<sup>[21]</sup>。

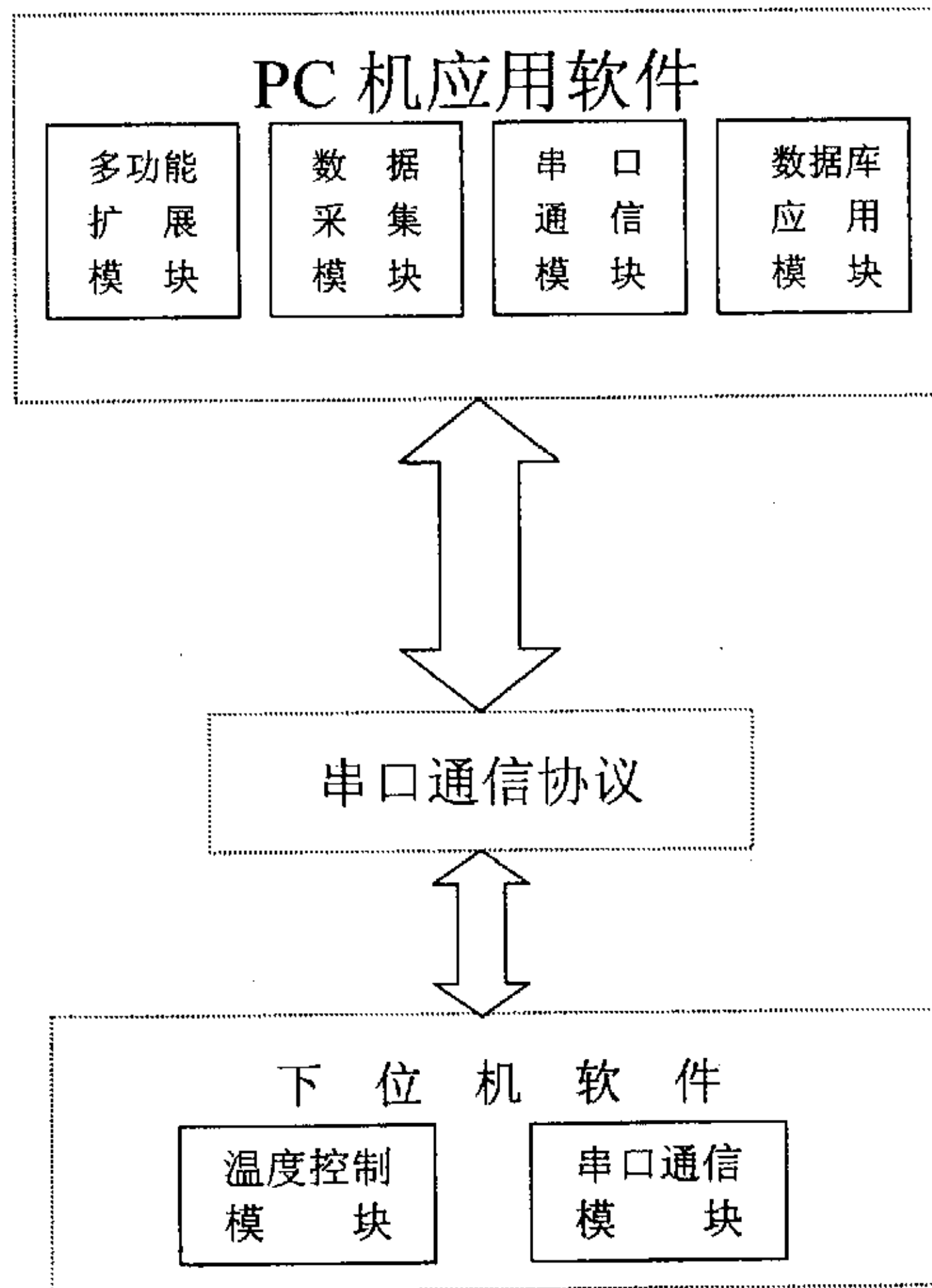


图 2.2.5.1 联机应用软件结构图

利用 Visual Basic 中提供的 MSComm 控件 (Activex 控件)，进行串口通信模块设计，向底层操作模块发出指令和提供数据，协调各个部分的运行，完成整个检测过程<sup>[22]</sup>。串口通信模块完成上、下位机间数据的接收与发送，并按照通信协议对上位机命令进行“翻译”，交由底层模块调用相关操作。Visual Basic 是一种功能强大、简单易学、可视化的程序设计语言。其中 MSComm 通信控件提供了一系列标准通

信命令的接口，它允许上位机与其他通信设备建立串口连接，还可以发送命令、进行数据交换以及监视和响应在通信过程中可能发生的各种错误和事件，从而可以利用它创建高效实用的串行通信程序。



## 3 检测系统的原理与实现

检测系统实现的是试样的温度和膨胀量这两个参量的检测与处理。因此，传感器的信号获取以及计算机信息处理是智能检测系统设计中的重要组成部分。检测系统工作时，被测参量被传感器测量后转换成电信号，经放大电路放大后，再经多路开关，把检测信号送到采样/保持器和 A/D 转换器进行模拟/数字信号转换，转换后的数字量经 I/O 接口读入到 CPU，在 CPU 中经数据处理（数字滤波平滑处理、非线性转换）后，一方面送到显示屏上显示；另一方面导入到后端数据库进行储存，以备后续处理。

### 3.1 信号输入系统

对于智能检测系统总要有被测量信号的输入通道，由计算机拾取必要的输入信息。对于测量系统而言，如何准确获取被测信号是其首要任务。

被测信号，一般可分为开关量和模拟量二种。所谓开关量，是指输入信号为状态信号，如开关的通与断、继电器的吸合与释放等，其信号电平只有二种，即高电平或低电平（0 或 1）。对于这类信号，只需经放大、整形和电平转换等处理后，即可直接输入计算机系统。模拟信号指在规定的连续时间内，输入信号的幅值可以在连续范围内任意取值。由于模拟信号的电压或电流是连续变化信号，其信号幅度在任何时刻都有定义，因此对其进行处理就较为复杂，同时在进行小信号放大、滤波、量化等处理过程中还需考虑干扰信号的抑制、转换精度及线性等诸多因素<sup>[23]</sup>。

对被测对象状态的检测，一般都离不开传感器，这是因为被测对象的状态参数往往是一种非电物理量，而计算机是一个只能识别和处理电信号的数字系统，因此需利用传感器将非电物理量转换成电信号。

利用传感器转换后得到的电信号，尤其是模拟信号，往往是小信号，需经放大后才能进行有效的处理，同时，为了抑制现场噪声干扰的影响，往往需要对该信号进行滤波处理。对于多路输入情况，如多路参数巡回检测等，则需采用多路切换技术；而对被测信号为快速变化信号的情况，为减少由于模数转换的孔径时间等影响，需要用采样保持技术。

#### 3.1.1 温度传感器

热电偶测温是目前广泛使用的接触式测温法之一。它具有足够的精度、较好的动态响应、工作可靠、便于远距离测量、制造方便、价格便宜等优点。

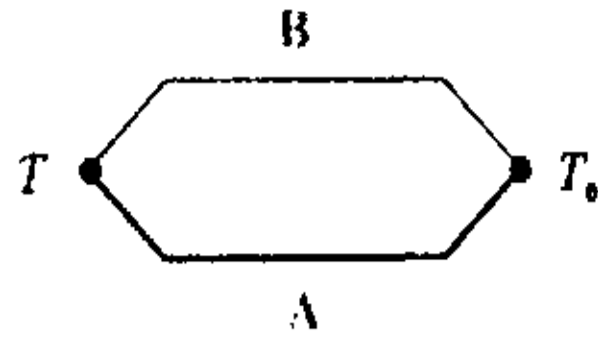


图 3.1.1.1 热电偶原理图

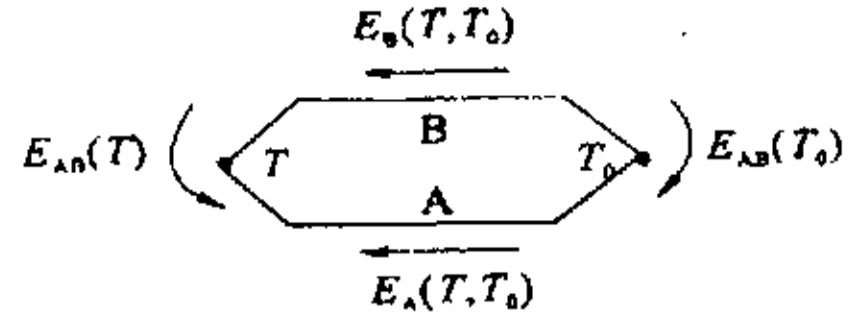


图 3.1.1.2 热电偶回路电势分布图

不同的金属材料组成一个闭合电路，就形成了一支热电偶，如图 3.1.1.1 所示。如果两个接点的温度不同，即  $T \neq T_0$ ，则在回路中就有电流产生，也就是说回路中有电势存在，这种现象叫热电效应。所产生的电势叫热电势。热电势的大小反映了两个接点的温度差。若保持  $T_0$  不变，则热电势就随温度  $T$  而变化，因此测出热电势的值，就可知道温度  $T$  的值。热电势由两部分组成即接触电势  $E_{AB}(T)$  和温差电势  $E_A(T, T_0)$  [12,26]。

$$E_{AB}(T) = \frac{KT}{e} \ln \frac{N_{AT}}{N_{BT}} \quad (3.1)$$

式中， $e$ ——单位电荷； $K$ ——波兹曼常数；

$N_{AT}$ ， $N_{BT}$ ——导体 A，B 在温度为  $T$  时的电子密度。

$$E_A(T, T_0) = \frac{K}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{1}{N_A} d(N_A t) \quad (3.2)$$

式中， $N_A$ ——导体 A 的电子密度，它是温度的函数；

$t$  ——导体沿各断面的温度； $T$ ， $T_0$ ——导体两端的温度。

对于如图 3.1.1.2 所示的材料 A，B 组成的闭合回路，若  $T > T_0$ ，则存在两个接触电势  $E_{AB}(T)$ ， $E_{AB}(T_0)$  和两个温差电势  $E_A(T, T_0)$ ， $E_B(T, T_0)$ ，回路的总电势为

$$E_{AB}(T, T_0) = E_{AB}(T) - E_{AB}(T_0) + E_B(T, T_0) - E_A(T, T_0) \quad (3.3)$$

由式 (3-1)，(3-2)，(3-3) 可得

$$E_{AB}(T, T_0) = \frac{k}{e} \int_{T_0}^T \ln \frac{N_A}{N_B} dt \quad (3.4)$$

由于  $N_A$ ， $N_B$  是温度的单值函数，上式可表示为

$$E_{AB}(T, T_0) = f(T) - f(T_0) \quad (3.5)$$

从而可以得出以下结论 [12,26]：

1 热电偶回路热电势的大小只与组成热电偶的材料和两端的温度有关，而与热电偶的长度及粗细无关；

2 若 A, B 材料相同, 则回路中不会产生热电势, 所以  $E_{AB}(T, T_0)=0$ ;

3 材料确定以后, 热电势的大小只与热电偶两端点的温度有关。如果使  $f(T_0) = \text{常数}$ , 则回路热电势只与温度  $T$  有关, 且是  $T$  的单值函数, 这就是利用热电偶测温的原理。

根据系统的技术要求, 选用镍铬-镍铝 (K 型) 热电偶, 测温范围为  $-200 \sim 1300$   $^{\circ}\text{C}$ 。系统也支持铂铑-铂 (S 型) 热电偶。

热电偶使用时冷端 (即自由端) 的温度一般与标定时总是不同的, 它所引起得误差是热电偶测温时误差地主要成分。因此需要一个冰点基准。AD595 可以很好得实现冷端自动补偿, 它的内部具有冰点补偿电路, 用来监测基准接点温度, 并在内部相加处增加一个合适的电压到热电偶回路之中<sup>[27]</sup>。采用双电源接法, 测温范围为  $0 \sim 1250$   $^{\circ}\text{C}$ 。使用中其他元件和热源不要与 AD595 直接接触, 因为 AD595 必须与热电偶冷端保持在同一温度, 而这些元件的散热可能引起误差。

### 3.1.2 位移传感器

系统选用的位移传感器是 DA-1 型高精度直流差动变压器位移传感器。传感器结构原理如图 3.1.2.1 所示。其中有三个固定绕组和一个活动铁心, 而固定绕组的布置形式有两种: 图 3.1.2.1(a) 是将初级绕组绕在中间, 两个次级绕组分别绕在两端, 图 3.1.2.1 (b) 是将初级绕组绕在两个次级绕组的外面。它们的电路原理均可由图 3.1.2.1(c) 表示<sup>[27]</sup>。

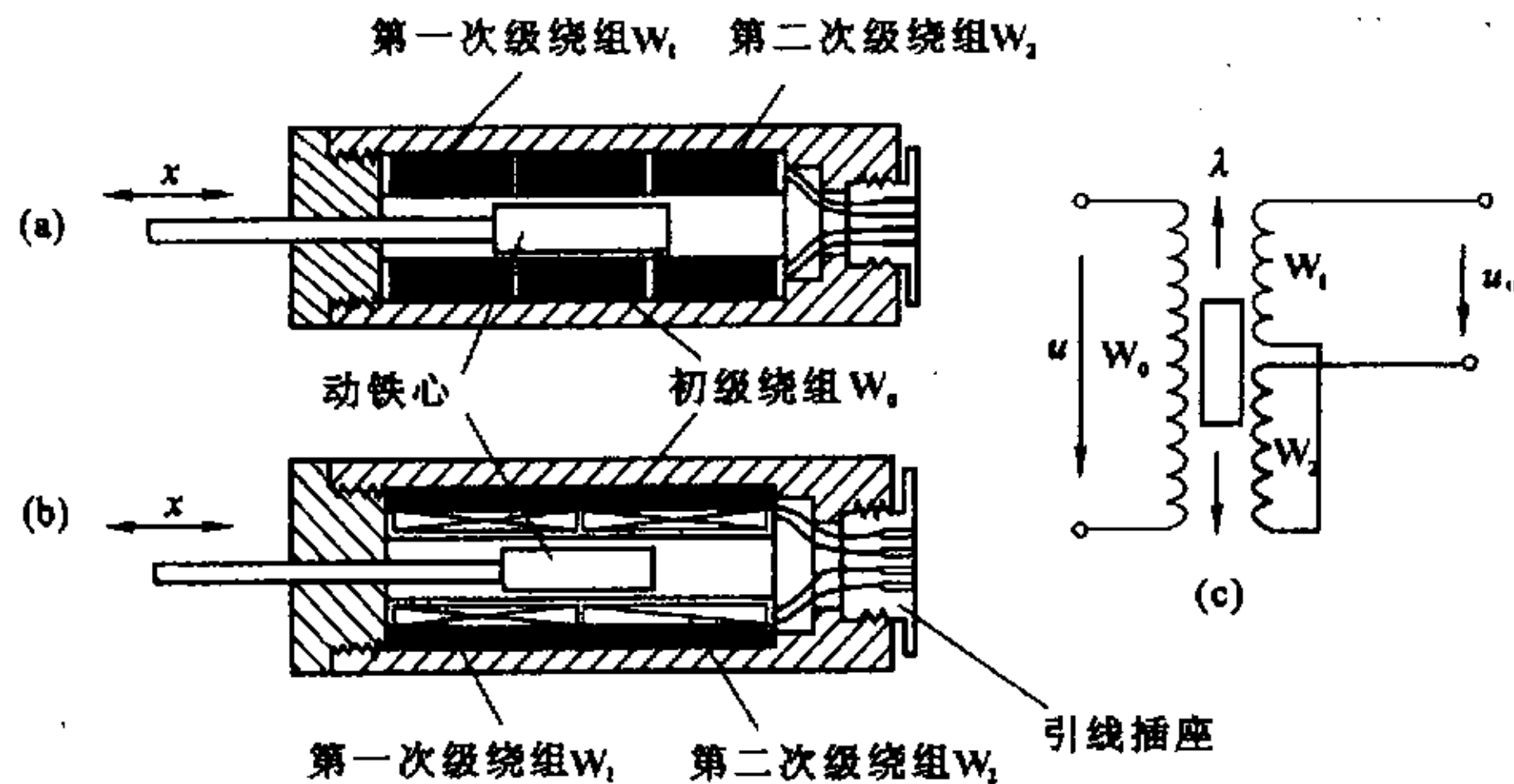


图 3.1.2.1 差动变压器式位移传感器

(a) 初级绕组在中间; (b) 初级绕组在外面; (c) 电路原理图

当初级绕组通以交流电时, 两个次级绕组均有感应电势产生。现将两个次级绕

组引线的首端分别引出，两个末端连在一起。当动铁心置于两个次级绕组中间的对称位置，则两个次级绕组 ( $W_1, W_2$ ) 所产生的感应电势之差为零；如果动铁心向第一次级绕组  $W_1$  方向移动，则  $W_1$  的感应电动势增加，而  $W_2$  的感应电势相应地减小，它们的瞬时值方向相同，但大小不同，其差值就是传感器的输出，并且动铁心位移方向不同，还有不同极性的显示。传感器的输出电势

$$U_0 = U_1 - U_2 \tag{3.6}$$

式中， $U_1$ —— $W_1$  的感应电势； $U_2$ —— $W_2$  的感应电势。

如果铁心向  $W_2$  方向移动时，则有

$$U_0 = U_2 - U_1 \tag{3.7}$$

DA-1 型高精度直流差动变压器把差动变压器 (LVDT) 的电测线路采用电子技术全部封装入 LVDT 的壳体内，实现传感和线路的一体化，即为直流差动变压器 (DC-LVDT)。使用时只要输入  $\pm 12V$  的直流工作电压，就可方便地从同一根多芯电缆中获得与被测位移量成正比的直流  $0 \sim \pm 5V$  或  $0 \sim 5V$  的信号。此输出电压可被采集系统采集送入计算机。选用的 DA-1 型高精度直流差动变压器位移传感器具有良好的环境适应性、使用寿命长、灵敏度和分辨率高的特点，精度可达 1 微米。

DA-1 型高精度直流差动变压器位移传感器的主要性能指标：

- ◆ 测量范围： 0~2mm
- ◆ 线性度： <0.05%
- ◆ 工作电源：  $\pm 12V$
- ◆ 额定信号输出： 0~5V
- ◆ 电缆长度： 2m

传感器电源电缆接线图如图 3.1.2.2 所示。

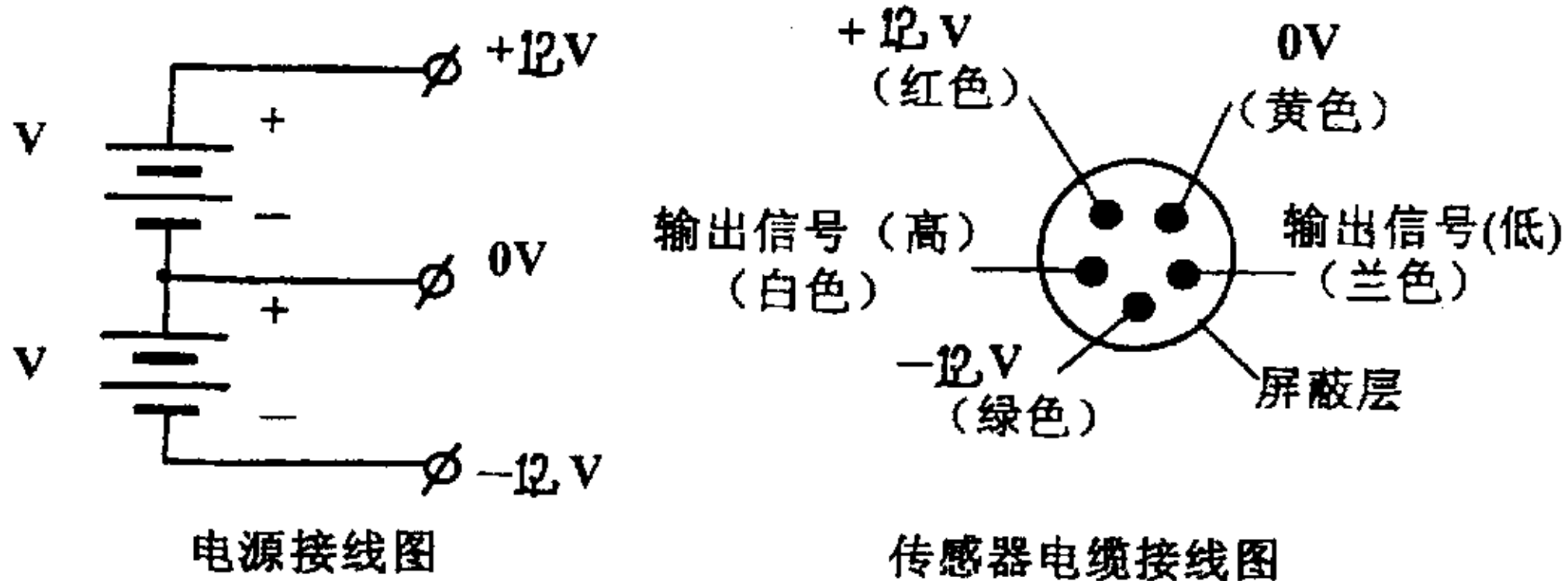


图 3.1.2.2 传感器电源电缆接线图

### 3.2 数据采集系统

智能化热膨胀检测系统的核心任务就是将所测参量经传感器输出的模拟信号经数据采集系统采集转换为计算机能识别并处理的数字信号，交给计算机由数据处理系统进行处理，得到所需的数据，以便其他绘图软件进行绘图。因此数据采集系统在该系统中占有相当重要的地位。系统的数据采集系统采用的是 DAC-7112DG 数据采集卡和 DAT-7689D 多功能扩展卡来实现的。

#### 3.2.1 数据采集基本理论 [24,25]

##### 3.2.1.1 采样过程概述

数据采集首先需要解决模拟量与数字量之间的相互转化问题，即采样与重构(恢复)的问题。数据采集系统可以简化成图 3.2.1.1 的形式。

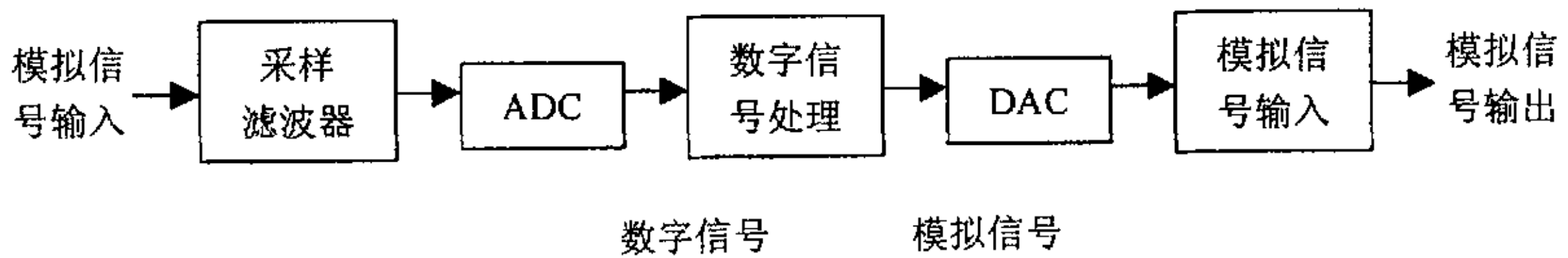


图 3.2.1.1 数据采集系统简化框图

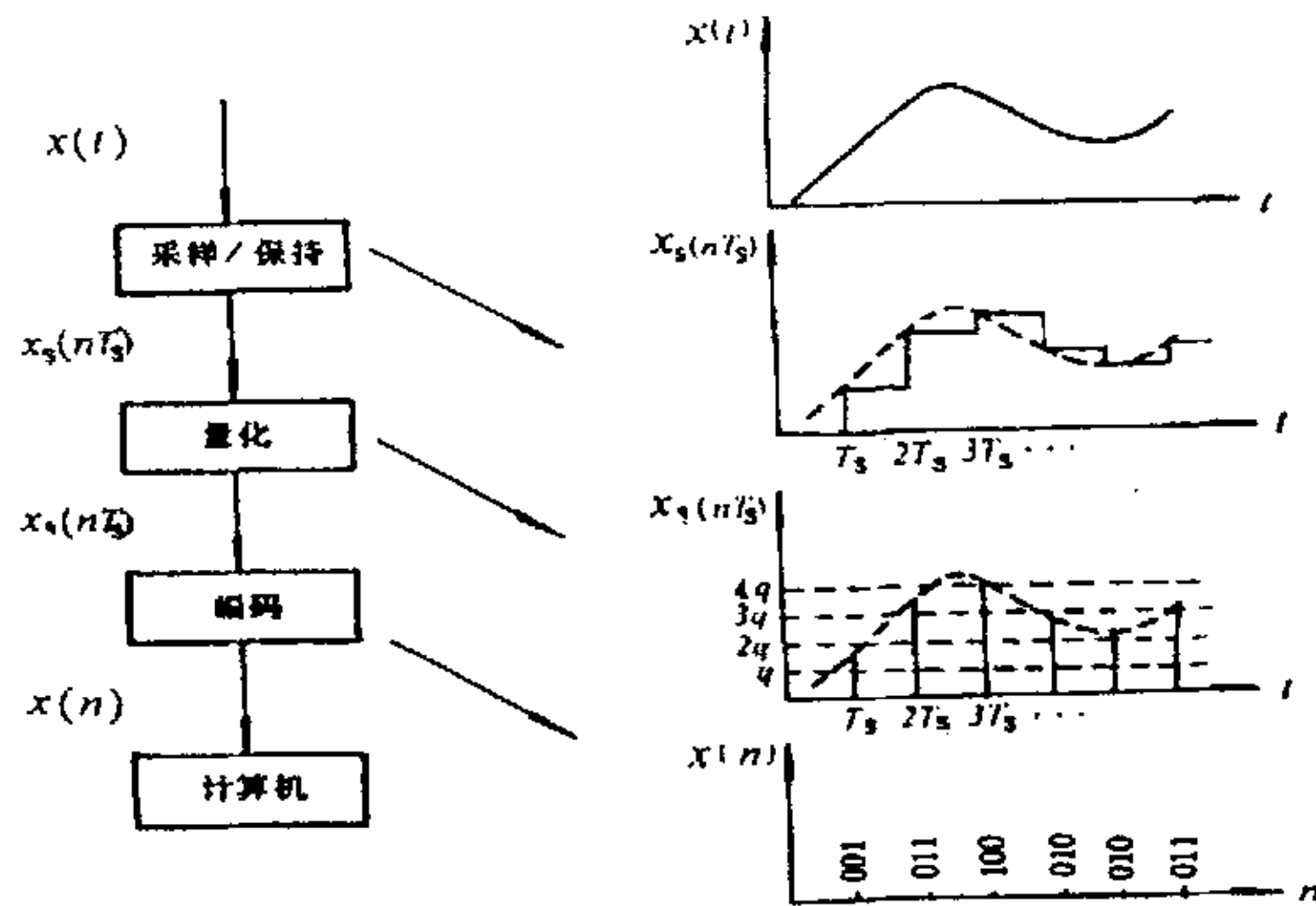


图 3.2.1.2 模拟信号的数字化过程

如图 3.2.1.1 所示，模拟信号首先经过一个预采样滤波器进行初步处理，主要是为满足采样定理的要求而滤除高频干扰，然后由采样器按照预定的时间间隔对模拟

信号离散化,从而把连续的模拟信号转化成离散的脉冲子样,再由模数转换器(ADC)把离散子样进行量化与编码,使之变成数字信号送到处理器进行数字处理,处理器一般由数字计算机来承担,处理结果再由数模转换器(DAC)转换成模拟信号。在此过程中,二进制数码首先转换为连续时间脉冲,脉冲之间的空隙则再经过再建平滑滤波器来填充平滑以恢复为模拟信号。模拟信号的数字化过程如图 3.2.1.2 所示。

$T_s$  为采样时间,  $x(t)$  表示输入的模拟信号,  $x_s(nT_s)$  表示离散的脉冲信号,当采样时间  $\tau$  很小的时候,有如下关系式

$$x_s(nT_s) = x(t) \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \delta(t - nT_s) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x(nT_s) \delta(t - nT_s) \quad (3.8)$$

### 3.2.1.2 采样定理

采样周期  $T_s$  决定了采样信号的质量和数量:  $T_s$  太小,会使  $x_s(nT_s)$  的数量剧增,占用大量的内存单元,  $T_s$  太大,会使模拟信号的某些信息被丢失,这样一来,若将采样后的信号恢复成原来的信号,就会出现失真现象,影响数据处理的精度,因此,必须选择合适的采样周期  $T_s$ , 以确定使  $x_s(nT_s)$  不失真地恢复原信号  $x(t)$ 。依据的就是采样定理。

设有连续信号  $x(t)$ , 其频谱为  $X(f)$ , 以采样周期  $T_s$  采得的离散信号为  $x_s(nT_s)$ , 如果频谱  $X(f)$  和采样周期满足下列条件:

1. 频谱  $X(f)$  为有限频谱, 即当  $|f| \geq f_c$  ( $f_c$  为截止频率) 时,  $X(f) = 0$
2.  $T_s \leq \frac{1}{2f_c}$  或者  $2f_c \leq \frac{1}{T_s} = f_s$

则连续信号

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} x_s(nT_s) \frac{\sin\left[\frac{\pi}{T_s}(t - nT_s)\right]}{\frac{\pi}{T_s}(t - nT_s)} \quad (3.9)$$

唯一确定。式(3.9)中  $n=0, \pm 1, \pm 2 \dots$ 。  $f_c$  就是在采样时间间隔内能辨认的信号最高频率, 称为截止频率, 又称为奈奎斯特频率 (Nyquist)。

从采样定理中可以得出, 在一般情况下, 对一个具有有限频谱  $X(f)$  的连续信号  $x(t)$  进行采样, 当采样频率为  $f_s \geq 2f_c$  时, 由采样后得到的采样信号  $x_s(nT_s)$  能无失真地复为原来信号  $x(t)$ 。

### 3.2.1.3 量化

为了能用计算机处理信号, 须将采样信号转换为数字信号, 也就是将采样信号

的幅值用二进制代码来表示。由于二进制代码的位数是有限的，只能代表有限个信号的电平。故在编码之前，首先要对采样信号进行“量化”。

量化就是把采样信号的幅值与某个最小数量单位的一系列整倍数比较，以最接近于采样信号幅值的最小数量单位倍数来代替该幅值。这一过程称为“量化过程”，简称“量化”。

最小数量单位称为量化单位。量化单位定义为量化器满量程电压 FSR(Full Scale Range) 与  $2^n$  的比值，用  $q$  表示，因此有

$$q = \frac{FSR}{2^n} \tag{3.10}$$

其中  $n$ ——量化器的位数。

量化后的信号称为量化信号，把量化信号的数值用二进制代码来表示，就称为编码。量化信号经编码后转换为数字信号。

### 3.2.1.4 编码

模/数转换过程的最后阶段是编码。编码是指把量化信号的电平用数字代码来表示，编码有多种形式，最常用的是二进制编码，即是用 1 和 0 所组成的  $n$  位数码来代表量化电平。在应用时，可根据被采集信号的极性来选择编码形式。

### 3.2.2 数据采集系统的结构与实现<sup>[9,24,28-31]</sup>

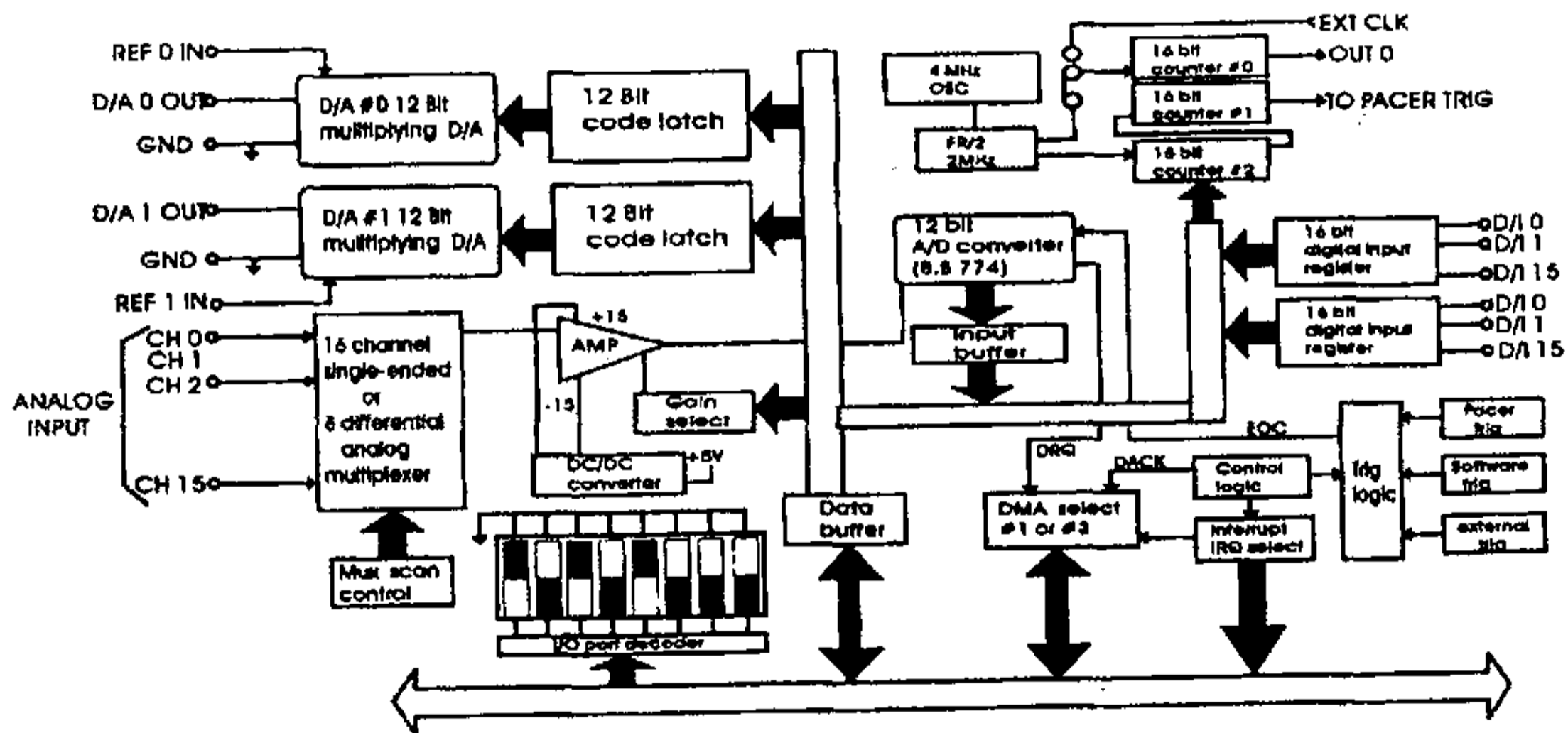


图 3.2.2.1 数据采集系统结构图

系统的数据采集系统采用的是 DAC-7112DG 数据采集卡和 DAT-7689D 多功能扩展卡来实现的。系统主要由多路模拟开关电路、测量放大电路、采样/保持电路、模数/数模转换电路、处理电路、控制逻辑与时钟电路等几个部分组成。系统结构图

如图 3.2.2.1 所示。

该数据采集系统的主要技术指标有：

- ◆ AT—Bus;
- ◆ 16 路单端或 8 路差分模拟输入通道;
- ◆ 双极性或单极性信号输入;
- ◆ 程控增益范围:  $\times 1$ 、 $\times 2$ 、 $\times 4$ 、 $\times 8$  可选;
- ◆ 两个 12 位乘性模拟输出通道
- ◆ 16 路数字量输出通道;
- ◆ 16 路数字量输入通道;
- ◆ 采样频率最高达 100KHz;
- ◆ 三种触发方式: 软件触发, 计数器触发, 外部脉冲触发;

### 3.2.2.1 测量放大电路

由于被检测参量经传感器变送成电信号后均为毫伏级的小信号, 很难直接进行数模转换, 为保证测量的精度, 需对这些模拟信号进行放大处理。

系统利用多路模拟开关与测量放大器 AD521 结合构成的程控增益放大器, 通过改变外接电阻来实现增益控制, 具有高共模抑制比、高输入阻抗、低漂移等优点, 而且增益调试方便, 具备软件可调  $\times 1$ 、 $\times 2$ 、 $\times 4$ 、 $\times 8$  信号放大功能。放大范围为 1~1000 倍, 失调电压为 2mV, 偏置电流为 80nA, 差模输入阻抗为  $3 \times 10^9 \Omega$ , 共模输入阻抗为  $6 \times 10^9 \Omega$ , 增益  $G=1$  时, 差模抑制比为 74dB,  $G=1000$  时, 差模抑制比为 110dB, 工作电源为  $\pm (5 \sim 18) \text{V}$ <sup>[24]</sup>。

### 3.2.2.2 多路模拟开关

根据系统的用途, 数据采集系统需要有多路和多参数信号的采集和控制的能力, 如果每一路都单独采用各自的输入回路, 即每一路都采用放大、采样/保持, A/D 转换等环节, 不仅成本比单路成倍增加, 而且会使系统体积庞大, 同时给系统的校准带来很大的困难。因此除特殊情况采用多路独立的放大, A/D 转换, D/A 转换外, 通常采用多路模拟开关实现多个模拟通道公用一个采样/保持及模数转换电路。

在设计多路选通电路时, 须考虑下列参数<sup>[9]</sup>:

1. 通道数量: 通道数量直接影响切换开关传输被测信号的精度和切换速度, 同时通道越多, 漏电流越大, 通道间的干扰也越多。
2. 泄漏电流: 一般希望泄漏电流越小越好。
3. 切换速度: 对于需传输快速信号的场合, 就要求多路开关的切换速度高, 同时也要考虑采样保持和 A/D 的速度, 以最优的性价比来选取多路开关的切换速度。
4. 开关电阻: 理想状态的多路开关其导通电阻为零, 而断开电阻为无穷大, 而



实际的模拟开关无法到这个要求，因此需考虑其开关电阻，应选择导通电阻足够低的多路开关。

5. 多路开关参数的漂移性及每路电阻的一致性也需作考虑，尤其是进行精密数据采集时。

系统具备 16 路单端/8 路双端模拟信号测量能力，采用高性能的 MPC508A 多路模拟开关将多路被测信号分别传送到 A/D 转换器进行转换，以便计算机能对多路被测信号进行处理。MPC508A 多路模拟开关，采用了介质隔离技术，具有输入过压保护功能，低导通电阻和低泄漏电流，并有锁存保护功能。

### 3.2.2.3 采样/保持电路<sup>[28-30]</sup>

采用数模转换器对模拟信号进行转换时，总需要有一小段时间来完成量化及编码等操作。数模转换器的转换时间取决于器件采用的转换位数、转换方法、采用的器件等因素。如果在转换时间  $T_{CONV}$  内，输入模拟信号仍在变化，此时进行量化显然会产生一定的误差。

我们可以在数据采集器的数模转换器 ADC 前再加一个采样保持放大器 SHA(它的任务是把要转换的信号快速采样后保持一段时间，以备转换用) 来改善  $T_{CONV}$  的影响。这相当于在 ADC 转换时间内开了一个窄“窗孔”，将此窗孔开启瞬时内的模拟信号以量化形式记录下来。此窗孔称为“孔径时间”  $T_a$ (Aperture Time)， $T_a$  一般远小于转换时间  $T_{CONV}$ 。显然，如在孔径时间  $T_a$  内，输入模拟信号仍在变化时进行量化，会引入一定的误差，称为“孔径误差”。考虑对输入的正弦信号采样，那么对 M 位的 ADC，采用 SHA 的数据采集系统，则数字化的最大正弦信号频率为

$$f = \frac{1}{2^{m+1} \pi T_a} H_z \quad (3.11)$$

系统所用的单片 SHA 器件 AD583 的原理及外引脚如图 3.2.2.2 所示。其转换速率为  $5 \mu s$ ，带宽 2MHz，孔径时间  $50 \mu s$ ，可用于峰值保持或做模拟开关，当处于采样状态时，可反接反馈网络构成一运算放大器，其调零即可用中心端接  $V_+$  的 100K  $\Omega$  可变电阻。

### 3.2.2.4 A/D 和 D/A 转换器

在检测与控制系统中，需要将被测模拟信号转变为数字量送入计算机进行处理，而且也需要将经计算机处理后的数字量转变为模拟信号去推动控制系统的执行机构，或者送入模拟显示器、纪录仪器以便进行数据的显示或纪录。把模拟量转换成数字量的装置称为模/数转换器 (A/D 转换器)；把数字量转换成模拟量的装置称为数/模转换器 (D/A 转换器)。

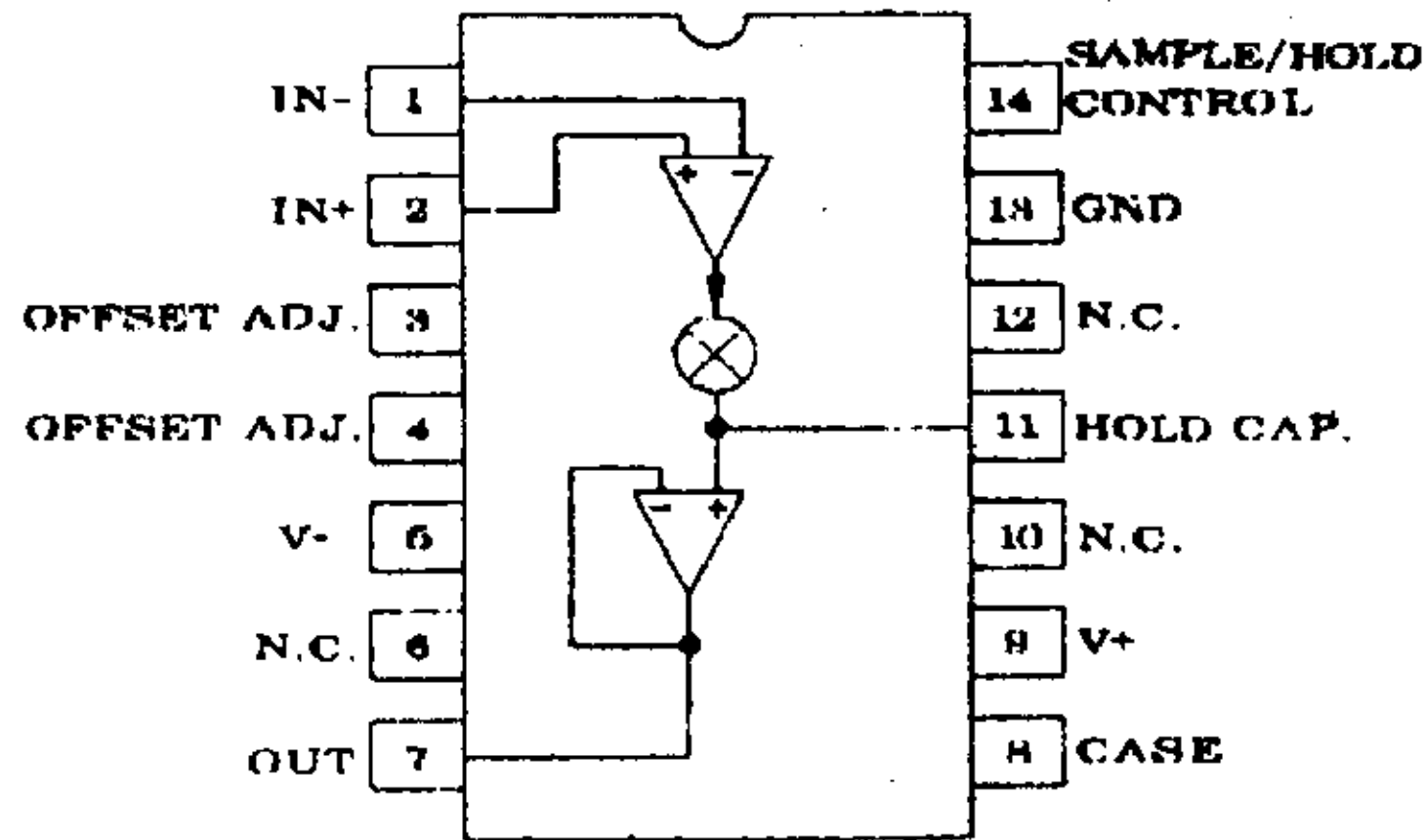


图 3.2.2.2 AD583 原理及外引脚图

系统的 A/D 转换芯片采用 B.B.ADS774, D/A 转换芯片采用 B.B.DAC7541。ADS774 是 BURR—BROWN(BB)公司设计生产的 12 位逐次逼近式模数转换器, 4 种可选电压范围输入: 0~±10V, 0~±20, -5~±5V 和 -10~±10V, 12 位或 8 位可选输出, 单一+5V 供电。ADS774 采用低功耗 COMS 工艺和新的电容阵列技术, 包含有内部时钟、微处理器接口、三态输出缓冲器以及若干组内部可调阻抗, 功耗最大为 120mw, 转换时间为  $t \leq 8.5 \mu s$ 。ADS774 有 5 个输入控制信号 ( $\overline{12/8}$ ,  $\overline{CS}$ , A0,  $\overline{R/C}$  和 CE), 可以与大多数微处理器和其他数字系统直接相连接。ADS774 可以在 2 种模式下工作: 一种是工作过程由微处理器控制, 即所谓非独立方式; 一种是独立运行工作模式, 即通过  $\overline{R/C}$  输入触发信号的采样、保持和转换。系统设计采用的是非独立运行模式<sup>[28-31]</sup>。ADS774 引脚定义如图 3.2.2.3 所示。

A/D 和 D/A 转换器技术指标为:

A/D 转换器:

- ◆ 输入通道: 16 路单端或 8 路差分输入通道;
- ◆ 分辨率: 12 bit ;
- ◆ 转换时间: 8  $\mu s$  ;
- ◆ 过压保护:  $\pm 35V$ ;
- ◆ 输入阻抗: 10M $\Omega$  ;
- ◆ 触发方式: 软件触发, 计数器触发, 外部触发;
- ◆ 数据传输: 程序控制, DMA, 中断;
- ◆ 数据通过率: 100KHz (最大)

D/A 转换器:

- ◆ 输出通道： 2 路双缓冲模拟输出通道；
- ◆ 分辨率： 12 bit ；
- ◆ 建立时间： 30  $\mu$ s；
- ◆ 线性度：  $\pm 1/2$  bit LSB；
- ◆ 输出范围： 0-5V 或 0-10V

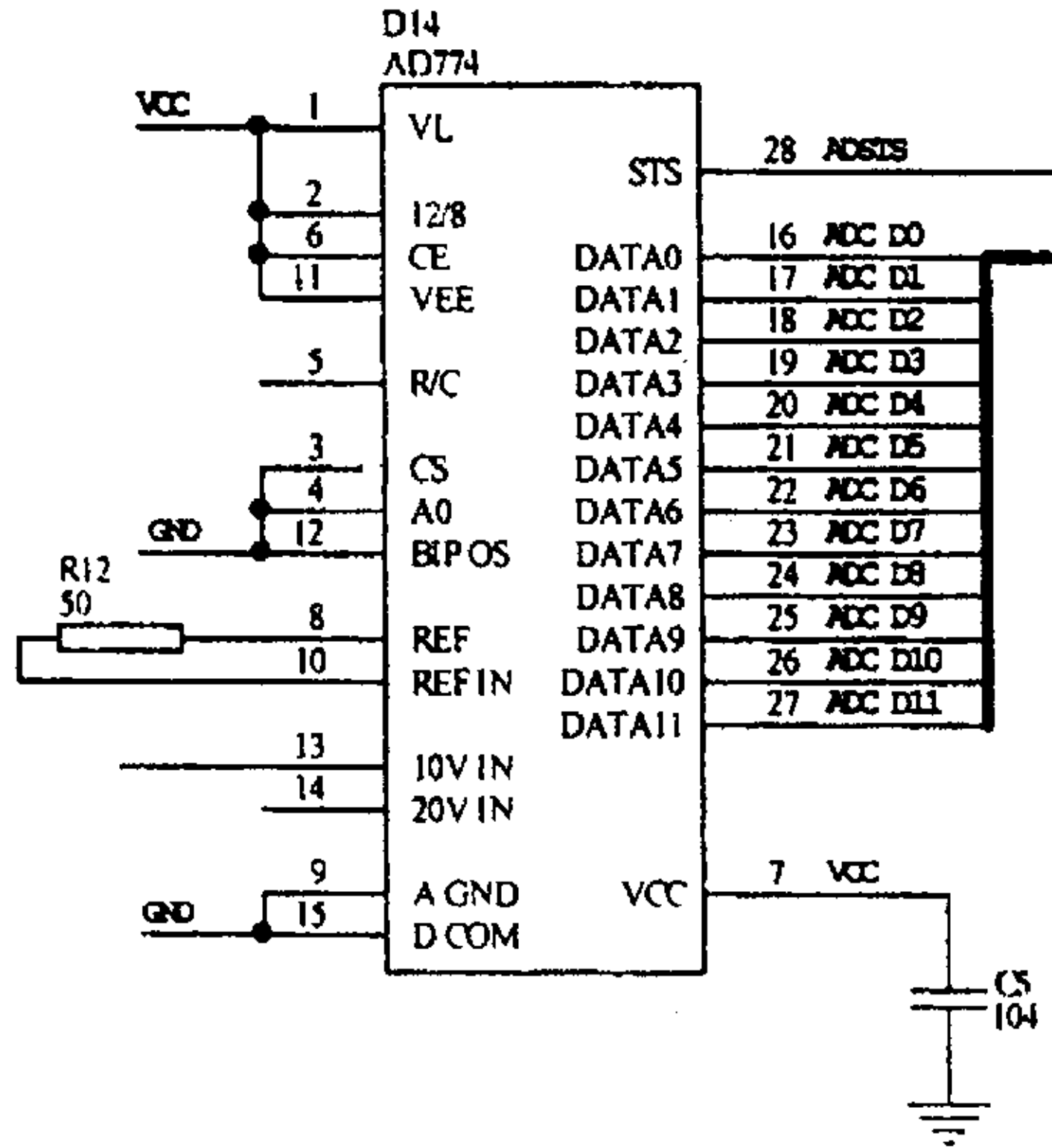


图 3.2.2.3 ADS774 引脚定义图

### 3.2.2.5 逻辑控制与时钟电路

系统采用 Intel(NEC)8254 芯片，包含三个独立、可编程、多制式 16 位时钟 / 计数器，三个 16 位计数器可产生 0~5MHz 的时钟信号。计数器 1 和计数器 2 级联在一起做 A/D 转换的 A/D 计数器触发。8254 时钟/计数器接线图如图 3.2.2.4 所示。

## 3.3 检测系统的抗干扰技术

检测系统一般在使用过程中，由于工作现场弥布着各种干扰以及传感器和放大电路本身的影响，经传感器转换后的电信号上会叠加干扰信号，这些干扰信号通常被称为噪声。所谓干扰就是指内部或外部噪声对有用信号的不良影响<sup>[10]</sup>。当被测信号很微弱时，就会被干扰噪声“淹没”掉，导致很大的数据采集误差。因此，噪声是信号检测的主要障碍。为了能精确地检测信号，需要消除和抑制系统的噪声。

在分析和设计检测系统时，必须考虑到可能存在的干扰对系统的影响，把抗干扰问题作为系统设计中的一个至关重要的内容，从硬件和软件上采取相应的措施以增强系统的抗干扰能力。

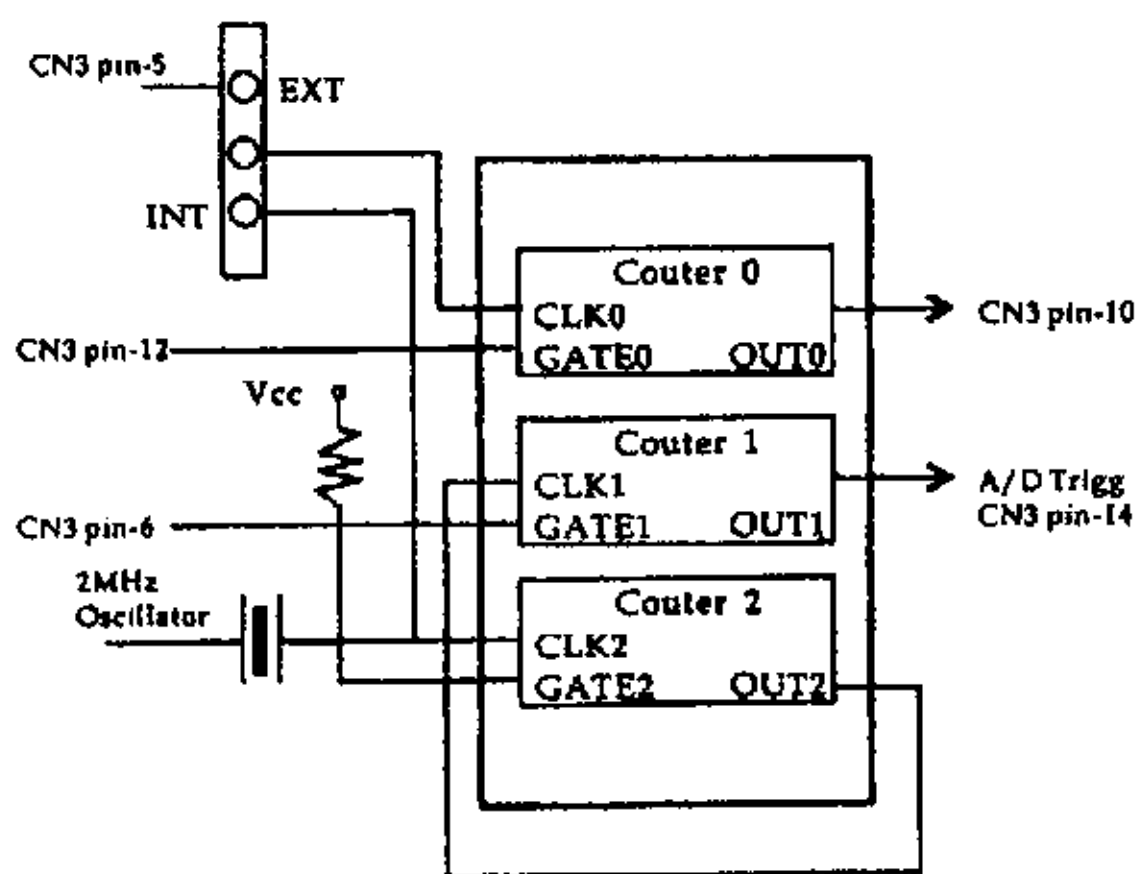


图 3.2.2.4 8254 时钟/计数器接线图

### 3.3.1 常见的干扰<sup>[26,27]</sup>

检测系统的工作环境的干扰源很多，根据干扰的作用方式及有用信号的关系，可将其分为串模干扰和共模干扰两种。

#### 3.3.1.1 串模干扰

干扰信号与被测信号串联起来作用在输入端的干扰称为串模干扰。其形式如图 3.3.1.1 所示，图中  $U_S$  为被测信号， $U_N$  为串模干扰，在信号放大器输入端 AE 处合成为  $U_{SN}=U_S + U_N$ ，如图 3.3.1.2 所示。 $U_N$  叠加到测量信号  $U_S$  之上，成为被测信号的一部分，被送到放大器进行放大，所以会直接影响检测结果。

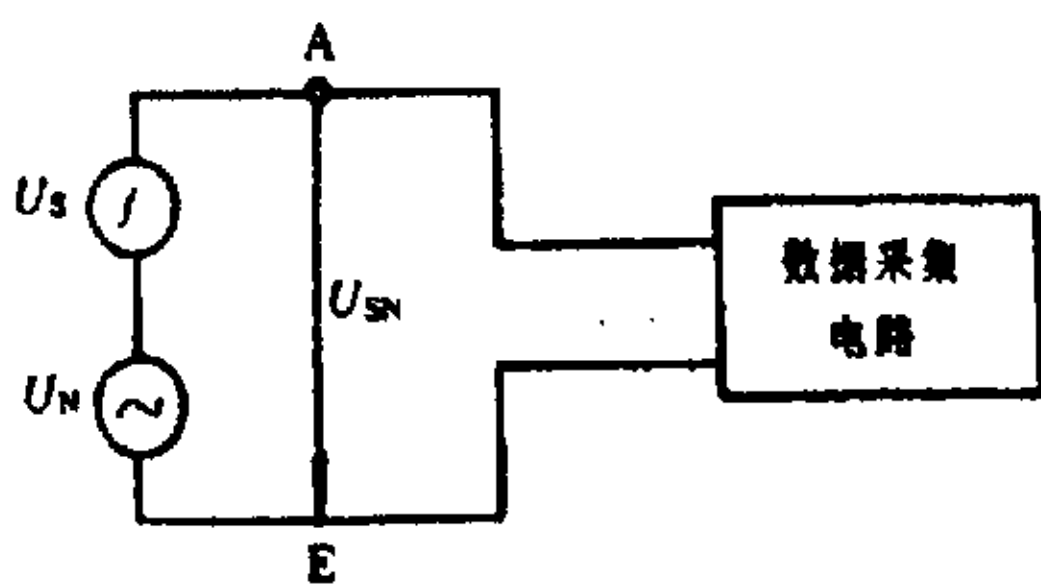


图 3.3.1.1 串模干扰电路图

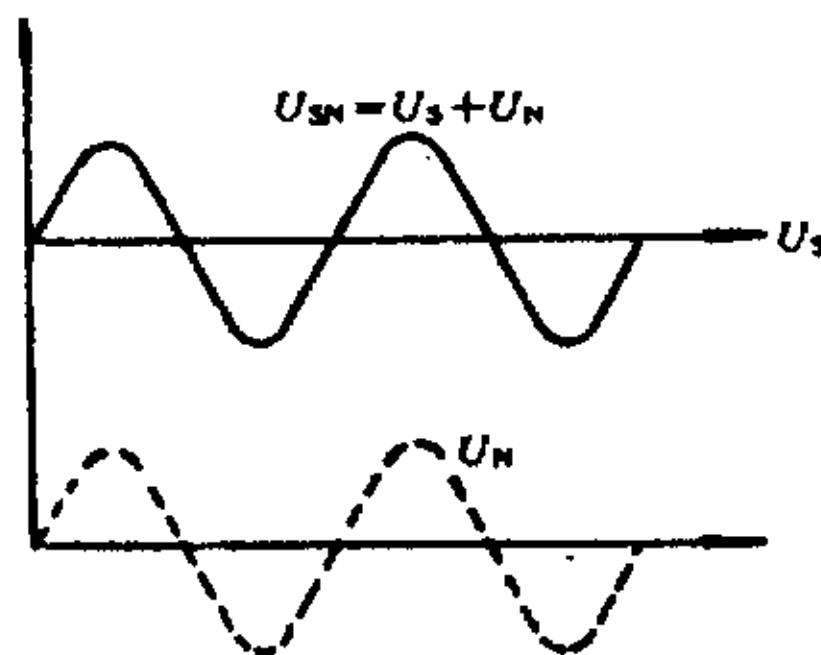


图 3.3.1.2 串模干扰信号图

产生串模干扰的原因有：外部高压供电线交变电磁场通过寄生电容耦合进传感器一端；交变磁通穿过信号传输回路产生干扰电势，造成串模干扰；信号输入回路因接触不良也会引入串模干扰。

### 3.3.1.2 共模干扰

共模干扰是指在信号地和仪器地（大地）之间产生的干扰。如图 3.3.1.3 所示，图中 E 为信号地，F 为仪器地，被测信号为 S，N 是出现在待测信号 S 与仪器地之间的干扰信号。A、B 两端叠加的干扰电压相同。由于有干扰信号 N 的存在，使被测信号 S 受到干扰。如图 3.3.1.4 所示。共模干扰虽然不直接影响测量结果，但是当信号输入电路参数不对称时，它会转化成串模干扰，对检测产生影响。在实际检测过程中由于共模干扰的电压数值一般都比较大会，而且它的耦合机理和耦合电路不易搞清楚，排除也比较困难，所以共模干扰对测量的影响更为严重。

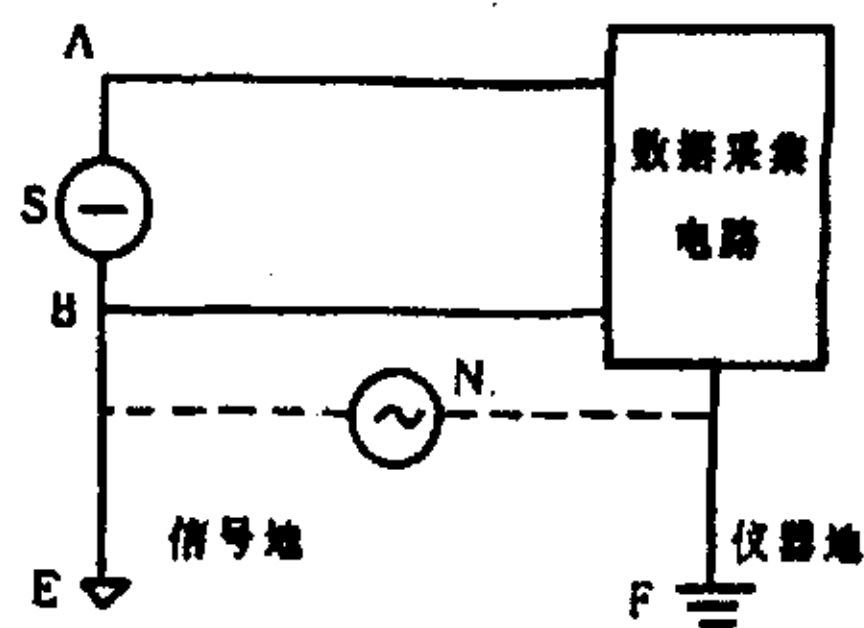


图 3.3.1.3 共模干扰电路图

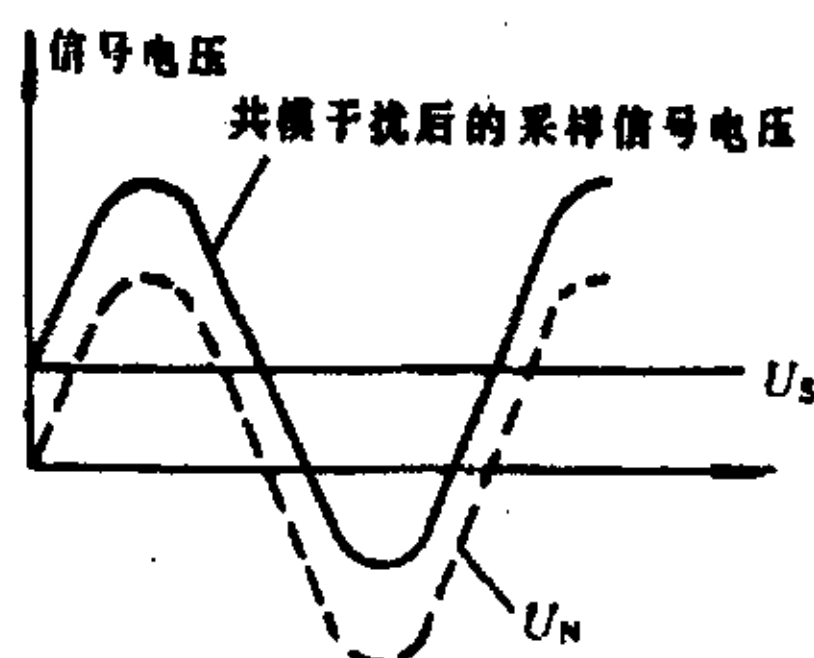


图 3.3.1.4 共模干扰信号图

产生对地共模干扰的原因有：

- 1) 在检测系统附近有大功率的电气设备，电磁场以电感或电容形式耦合到传感器和传输导线中形成共模干扰。
- 2) 电源绝缘不良而引起漏电或三相动力电网负载不平衡致使零线有较大的电流时，存在着较大的地电流和地电位差。如果系统有两个以上的接地点，则地电位差就会造成共模干扰。
- 3) 电气设备的绝缘性能不良时，动力电源会通过漏电阻耦合到数据采集系统的信号回路，形成干扰。
- 4) 在交流供电的仪器中，交流会通过原、副边绕组间的寄生电容、整流滤波电路、信号电路与地之间的寄生电容到地构成回路，形成干扰。

### 3.3.2 检测系统的抗干扰措施<sup>[10,26,27]</sup>

噪声干扰将严重影响采样信号的准确性和可靠性，因此必须予以消除或抑制。采用的抗干扰措施有如下几种。

### 3.3.2.1 电磁隔离

这种方法是在传感器与采集电路之间加入一个隔离放大器，利用隔离放大器的电磁耦合，将外界的模拟信号与系统进行隔离传送。外界的模拟信号由隔离放大器进行隔离放大，然后以高电平低阻抗的特性输出至多路开关。

### 3.3.2.2 采用浮置措施抑制干扰

所谓浮置就是指数据采集电路的模拟信号地不接机壳或大地。对于被浮置的数据采集系统，数据采集电路与接机壳或大地之间无电流直接联系，明显的加大了系统的信号放大器公共线与机壳或大地之间的阻抗。因此，浮置能大大地减少共模干扰电流。

信号检测一般采用差分输入方式，这就要求每个通道需要两个信号线，即 HIGH 和 LOW 线，采集系统测量这两个信号线之间的电压。如果一个信号源没有连接到公共地上，这是一个漂浮的信号源，对于漂浮信号源必须定义一个对地的公共参考点，测量一个漂浮信号的标准连线如图 3.3.2.1 所示。

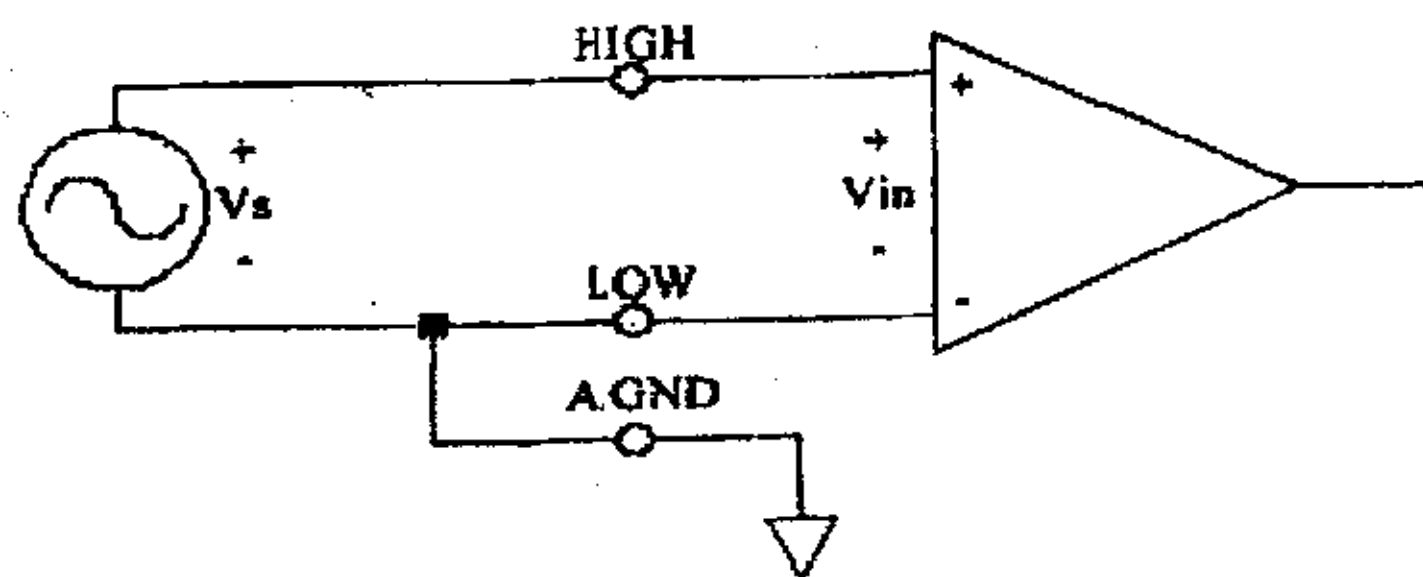


图 3.3.2.1 测量漂浮信号的标准连线

如果一个信号源的一端连接本地地，但信号源的地与板卡的地又不是一个公共端，这两个地之间的电压就形成了一个共模电压，为了避免由于共模电压引起的干扰信号，可以将信号源的地接入板卡的 LOW 端。不必直接将 LOW 端与板卡的地连接，在某些情况下，为了更好的共地，需要将采集系统的地与信号源的地连接起来。正确的接线如图 3.3.2.2，不正确的接线如图 3.3.2.3。

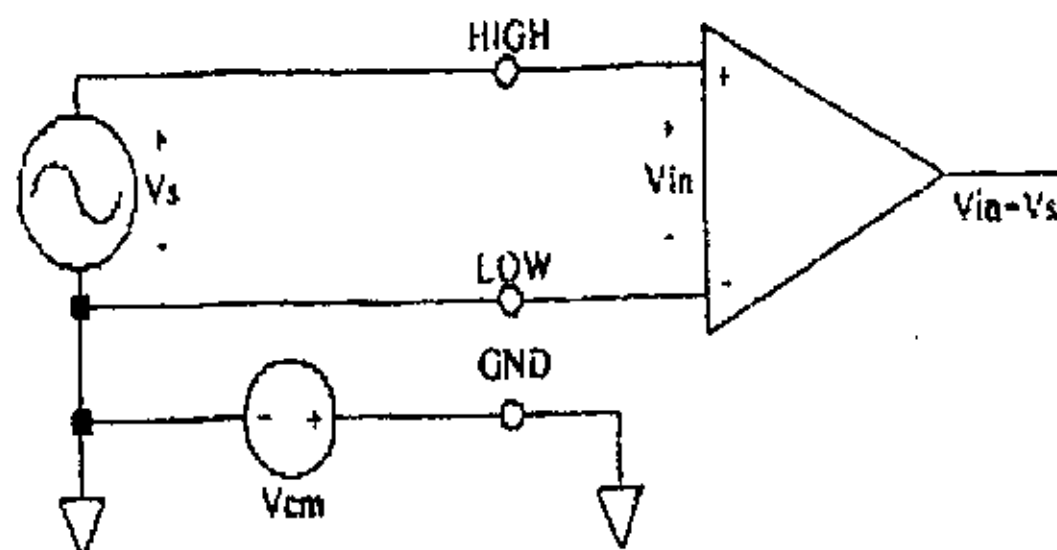


图 3.3.2.2 正确的接线图

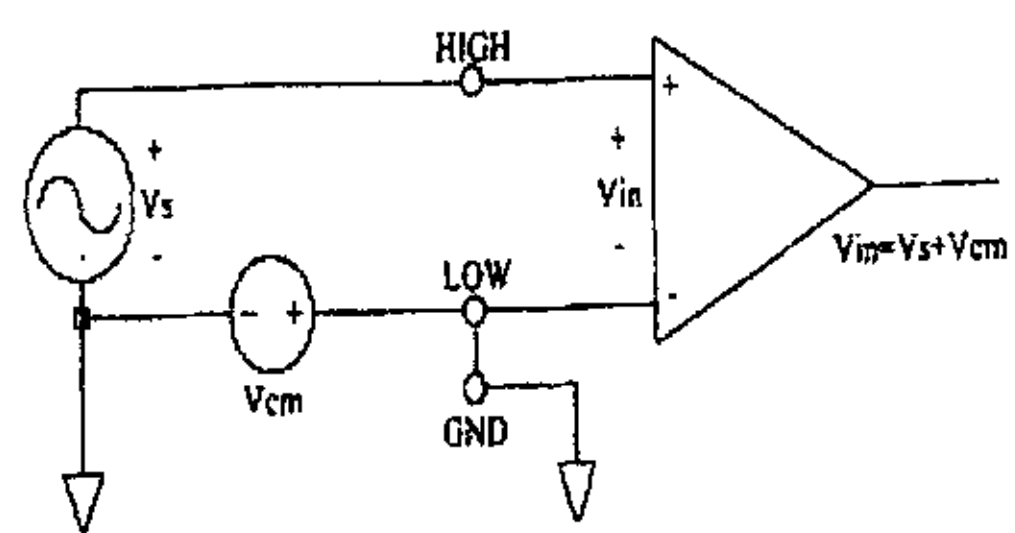


图 3.3.2.3 不正确的接线图

### 3.3.2.3 A/D 转换器的抗干扰措施

A/D 转换器的抗干扰措施可采用三线采样双层屏蔽浮置技术降低共模干扰的影响。三线采样是指将信号线和地线一起采样。双层屏蔽技术，是抗共模干扰的一种十分有效的方法。由于传感器和机壳之间会引起共模干扰，因此，A/D 转换器的模拟地一般采取浮置接地方式<sup>[26]</sup>。图 3.3.2.4 是三线采样双层屏蔽原理图<sup>[27]</sup>。

采用三线采样双层屏蔽之后，由共模电压 ( $U/2+U_{ac}$ ) 引起的共模电流有  $I_{CM1}$ ， $I_{CM2}$ ， $I_{CM3}$ 。 $I_{CM1}$ ，它通过  $R_5$ ， $C_5$  入地，不经过  $R_2$ ，所以不引起与信号相串联的串模干扰； $I_{CM2}$  流经的阻抗比  $I_{CM1}$  流经的阻抗大 1 倍，所以它只有  $I_{CM1}$  的 1/2； $I_{CM2}$  在  $R_2$  上所产生的压降可以忽略不计。所以，只有  $I_{CM2}$  在  $R_2$  上的压降导致串模干扰而引起误差，但其数值很小。如果有 10V 共模电压，仅产生 0.1  $\mu$ V 的 DC 串模电压和 20  $\mu$ V 的 AC 串模电压。在这种情况下（屏蔽层电阻忽略不计），其共模抑制比 CMRR 为

$$DC: CMRR = -20 \lg \frac{10^{11}}{10^3} = -160 \text{ dB} \quad (3.12)$$

$$AC: CMRR = -20 \lg \frac{1}{\frac{2\pi f_{cb}}{10^3}} \Big|_{f=60\text{Hz}} = -120 \text{ dB} \quad (3.13)$$

可见，三线采样双层屏蔽浮置技术，抑制干扰效果是明显的。但是，要注意屏蔽层的接法，否则会引起干扰；A/D 的电流应自成系统，不能与大地相接。

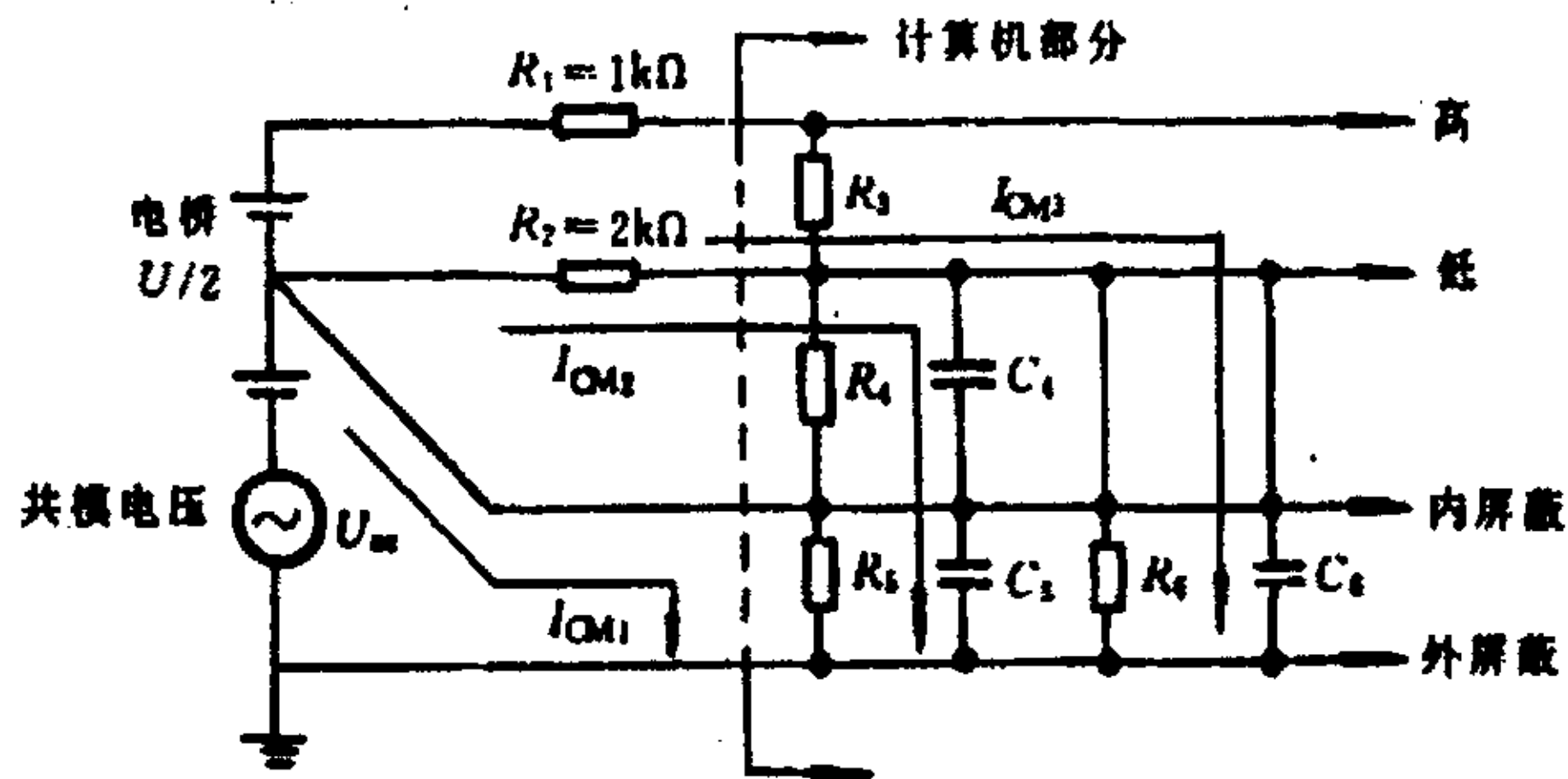


图 3.3.2.4 三线采样双层屏蔽原理图

- $R_3$ ----A/D 的等效输入电阻；
- $R_4$ ----低端到内屏蔽层的漏电阻，约  $10^9 \Omega$ ；
- $C_4$ ----低端到内屏蔽层的寄生电容，约 2500pF；
- $R_6$ ----低端到外屏蔽层的漏电阻，约  $10^{11} \Omega$ ；  $C_6$ ----低端到外屏蔽层的寄生电容，约 2pF。

### 3.3.2.4 长线传输过程中的抗干扰措施

系统还可以进行远距离的信号检测。当检测信号与系统相距较远（如几十米的距离），在进行信号传输时，会因传输线两端阻抗不匹配而出现信号在传输线上反射的现象，并可能在短时间内出现多次反射，就会形成非耦合性的干扰，使信号波形发生畸变。因此，在用长线传输信号时，抗干扰的重点是防止和抑制非耦合性（反射畸变）干扰。可以考虑采用阻抗匹配的方法来提高系统的抗干扰能力<sup>[26]</sup>。

同时当使用系统进行远距离检测时，尽量使用屏蔽线或是同轴电缆作为传输线，特殊情况可以考虑双绞线，这样有助于增强系统抗干扰的能力。

## 3.4 数据处理系统

数据采集系统在采集数据时，由于各种干扰的存在，使得系统采集到的数据偏离其真实数值。去掉采样数据中干扰成分的措施，除了前面所介绍的硬件措施以外，还可以通过一定的计算程序，对多次采样信号构成的数据进行滤波和平滑处理，以提高其有用信号在采样值中所占的比例，减少乃至消除各种干扰及噪声，以保证系统的可靠性。

### 3.4.1 采样数据的数字滤波<sup>[19,20,23]</sup>

为了减少对采样数据的干扰，提高系统的性能，一般先要对采样数据进行数字滤波处理。数字滤波指的是通过特定的计算程序处理，减少干扰信号在有用信号中所占的比例，故实质上是一种程序滤波。数字滤波克服了模拟滤波器的不足，它与模拟滤波器相比具有如下优点：

1. 不需要增加硬件设备，只要在程序进入数据处理和控制算法之前，附加一段数字滤波的程序即可。
2. 由于数字滤波不需增加硬件设备，因而系统可靠性高、稳定性好，各回路之间不存在阻抗匹配等问题。
3. 可以多个输入通道“共用”一个滤波程序，从而降低了成本。
4. 数字滤波可以对频率很低（如 0.1Hz）的信号实现滤波，而模拟滤波器由于受电容容量的限制，频率不可能太低。
5. 使用灵活、方便，通过改写数字滤波程序，可以实现不同的滤波方法或改变滤波参数。

常用的数字滤波方法有中值滤波、算术平均值滤波和复合滤波等。



### 3.4.1.1 中值滤波

所谓中值滤波是对某一参数连续采样  $n$  次（一般  $n$  取奇数），然后把  $n$  次的采样值从小到大，或从大到小排队，再取其中间值作为本次采样值。中值滤波对于去掉偶然因素引起的波动或采样器不稳定而造成的误差所引起脉动干扰比较有效。若变量变化比较缓慢，采用中值滤波效果比较好，但对快速变化过程，则不宜采用。中值滤波程序流程图如图 3.4.1.1 所示。

输入： $n$  次采样值存在一维数组  $S(n)$  中。

输出：滤波后的数据存于 MID 变量中。

一般来说， $n$  的值不宜太大，否则滤波效果反而不好， $n$  一般取 3~5 即可。

### 3.4.1.2 算术平均值滤波

算术平均值滤波就是要寻找一个  $Y(k)$ ，使该值与个采样值间误差的平方和为最小，即

$$S = \min \left[ \sum_{i=1}^n e^2(i) \right] = \min \left\{ \sum_{i=1}^n [Y(u) - X(i)]^2 \right\} \quad (3.14)$$

由一元函数求极值原理，得

$$\bar{Y}(k) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X(i) \quad (3.15)$$

式中： $\bar{Y}(k)$ ——第  $k$  次  $n$  个采样值的算术平均值；

$X(i)$ ——第  $i$  次采样值； $n$  ——采样次数。

算术平均值滤波的实质即把一个采样周期内  $n$  次采样值相加，然后除以采样次数  $n$ ，得到该周期的采样值。

输入： $n$  次采样值存于数组  $X(n)$  中。输出：算术平均值存于变量  $Y$  中。

算术平均值滤波的平滑度和灵敏度取决于采样次数  $n$ ，随着  $n$  的增大，平滑度将提高，灵敏度降低。根据具体情况来选取  $n$ ，保证既少用计算时间，又达到最好的效果。

### 3.4.1.3 复合数字滤波

算术平均值法不易消除由于脉冲干扰而引起的采样偏差，中值滤波法由于采样点数的限制，使其应用范围缩小。系统采用的是复合滤波法进行数字滤波。

防脉冲干扰的复合滤波法是将算术平均法和中值滤波法这两种滤波方法合二为一，即先用中值滤波法滤除由于脉冲干扰而有偏差的采样值，然后把剩下的采样值做算术平均，就可得出防脉冲干扰复合滤波法。其原理可用下式表示：

若  $X(1) \leq X(2) \leq \dots \leq X(n)$ ,  $3 \leq n \leq 14$

$$\text{则 } \bar{Y} = (X(2) + X(3) + \dots + X(n-1)) / (n-2) \quad (3.16)$$

防脉冲干扰的复合滤波法流程图如图 3.4.1.2 所示。

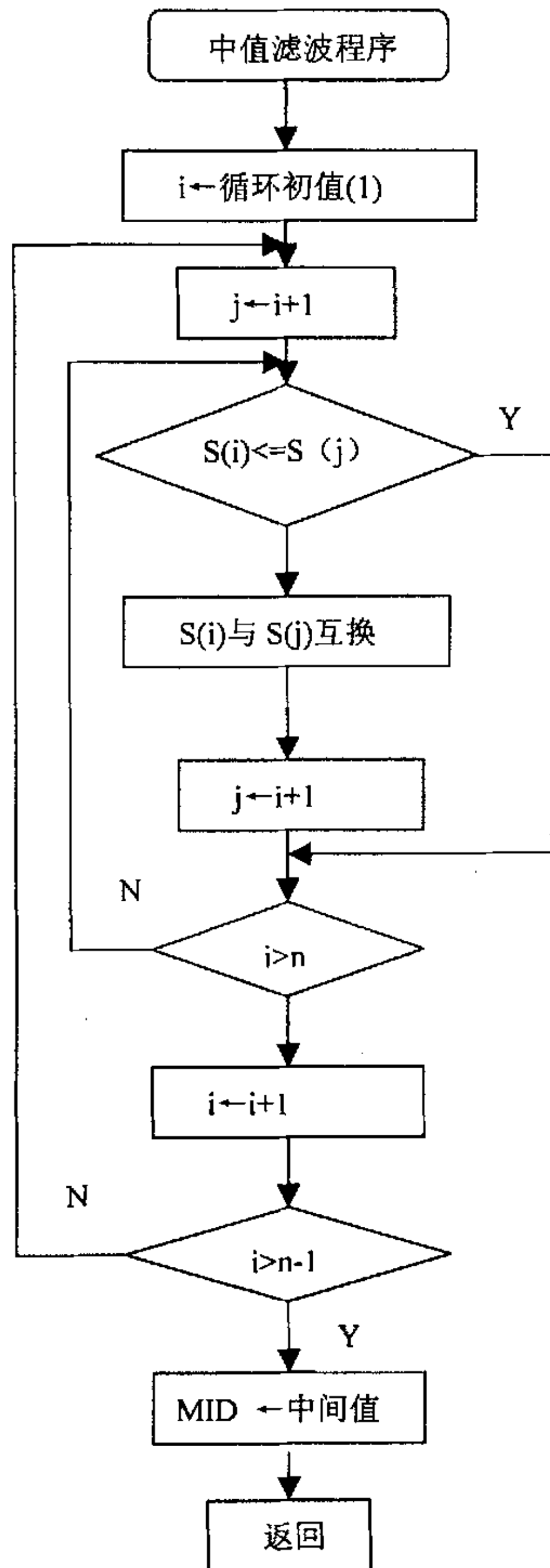


图 3.4.1.1 中值滤波程序流程图

这种方法兼容了算术平均值法和中值滤波法的优点。它既可以去掉脉冲干扰，

又可对采样值进行平滑处理。在高、低速数据采集，它都能削弱干扰，提高数据处理质量。值得注意的是，数字滤波固然是消除干扰的好方法，但是温控程序中应避免使用，因为数字滤波会把偏差值滤掉，使系统失去调节作用。因而在系统中，数字滤波是用在数据处理模块中。

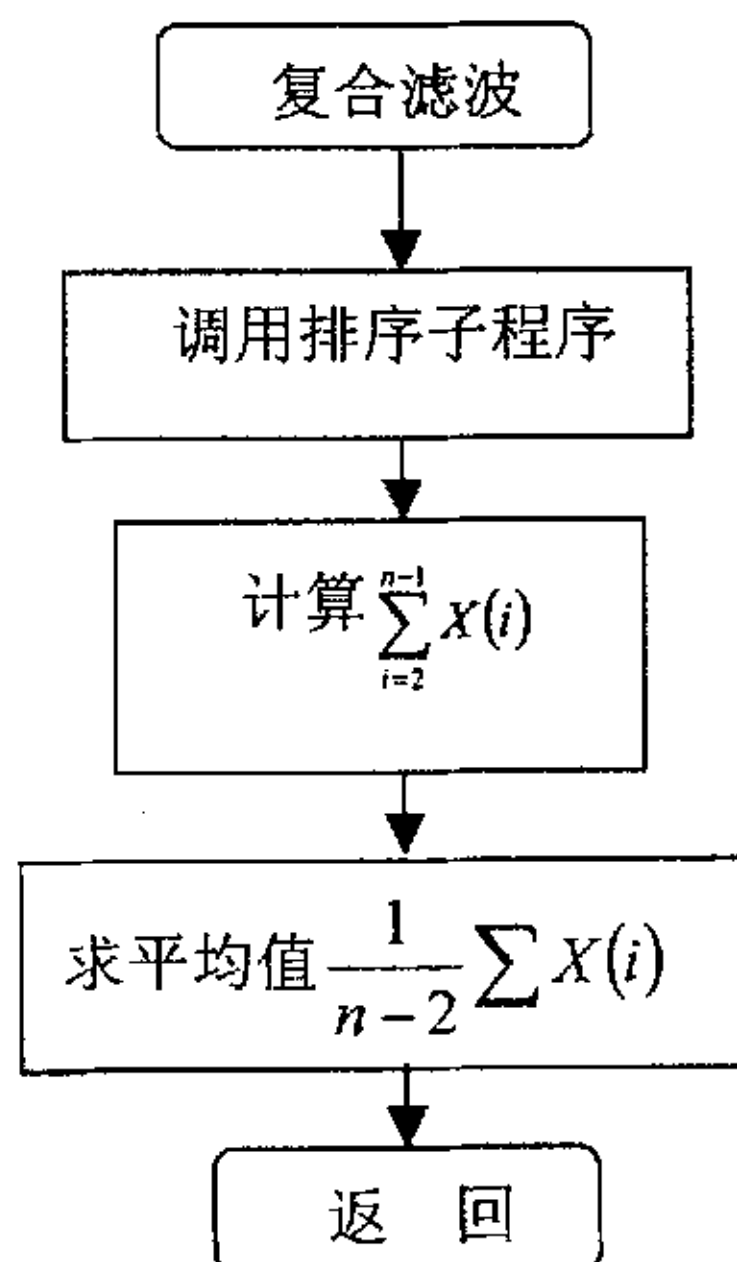


图 3.4.1.2 复合滤波法流程图

### 3.4.2 剔除采样数据中的奇异项<sup>[23]</sup>

采样数据中的奇异项是指采样数据中有明显错误（丢失或粗大）的个别数据。这些奇异项的存在，会使数据处理后的误差大大增加。因此为了减少数据处理后的误差，必须剔除采样数据中的奇异项。

在判断某个数据是否为奇异项时，可依据以下准则：给定一个误差限  $W$ ，若  $t$  时刻的采样值为  $x_t$ ，预测值为  $x'_t$ ，当  $|x_t - x'_t| > W$  时，则认为此采样值  $x_t$  是奇异项，应予以剔除，而以预测值  $x'_t$  取代采样值  $x_t$ 。

由此可知，关键是推算的算法和选择  $W$  的值。

预测值  $x'_t$  可用一阶差分方程推算

$$x'_t = x_{t-1} + (x_{t-1} - x_{t-2}) \tag{3.17}$$

式中， $x'_t$ ——在  $t$  时刻的预测值；

$x_{t-1}$ —— $t$  时刻前一个采样点的值； $x_{t-2}$ —— $t$  时刻前二个采样点的值。

由式(3.17)可知,  $t$  时刻的预测值可以用  $t-1$  和  $t-2$  时刻的采样值为推算。当采样频率大于物理量变化的最高频率时, 这种预测方法有足够的精度。

一般误差限  $W$  的大小要根据数据采集系统的采样速率、被测物理量的变化特性来决定。

### 3.4.3 采样数据的平滑处理<sup>[33,34]</sup>

一般来说, 数据采集系统采集到的数据中, 往往叠加有噪声, 其代表就是随机信号。由于随机干扰的存在, 使得用采样离散数据绘制的曲线多呈现折线形状, 很不光滑。这表明采样数据中的高频成分比较丰富。为了削弱干扰的影响, 提高曲线的光滑度, 常常需要对采样数据进行平滑处理。

数据平滑处理的原则就是通过数据平滑处理, 既要消弱干扰成分, 又要保持原有曲线的变化特性。平滑处理的方法很多, 系统采用的是五点三次平滑法。

采样得到  $2N+1$  个等间隔点  $x_{-N}, x_{-N+1}, x_{-N+2}, \dots, x_{-2}, x_{-1}, x_0, x_1, x_2, \dots, x_{N-2}, x_{N-1}, x_N$  上, 其上的采样值分别为  $y_{-N}, y_{-N+1}, y_{-N+2}, \dots, y_{-2}, y_{-1}, y_0, y_1, y_2, \dots, y_{N-2}, y_{N-1}, y_N$ 。设  $h$  为等间隔采样的步长, 做变换  $t = (x - x_0)/h$ , 则上述  $2N+1$  个等间隔点变为  $t_{-N} = -N$ ,  $t_{-N+1} = -N+1$ ,  $t_{-N+2} = -N+2$ ,  $\dots, t_{-2} = -2$ ,  $t_{-1} = -1$ ,  $t_0 = 0$ ,  $t_1 = 1$ ,  $t_2 = 2$ ,  $\dots, t_{N-2} = N-2$ ,  $t_{N-1} = N-1$ ,  $t_N = N$ 。

假设用  $m$  次多项式

$$y(t) = a_0 + a_1 t + \dots + a_m t^m \quad (3.18)$$

来平滑所得到的采样值, 下面需要确定出(3.18)式中的系数  $a_j (j = 0, 1, \dots, m)$ , 使多项式对于所给的采样离散值具有很好的平滑性, 将所有点  $(t_i, y_i)$  代入式(3.18)中, 可得到  $2N+1$  个等式:

$$\begin{cases} a_0 + a_1 t_{-N} + a_2 t_{-N}^2 + \dots + a_m t_{-N}^m - y_{-N} = R_{-N} \\ a_0 + a_1 t_{-N+1} + a_2 t_{-N+1}^2 + \dots + a_m t_{-N+1}^m - y_{-N+1} = R_{-N+1} \\ \dots \\ a_0 + a_1 t_N + a_2 t_N^2 + \dots + a_m t_N^m - y_N = R_N \end{cases} \quad (3.19)$$

由于平滑的曲线不一定通过所有的点  $(t_i, y_i)$ , 所以这些等式不全为 0。根据最小二

乘法原理，对于 $(2N+1)$ 组数据 $(t_i, y_i)$ ，求其最佳系数值 $a_j$ ，就是求能使误差 $R_j$ 的平方和最小的 $a_j$ 值。即

$$\sum_{n=-N}^N R_n^2 = \sum_{n=-N}^N \left( \sum_{j=0}^m a_j t_n^j - y_n \right)^2 = \varphi(a_0, a_1, \dots, a_m) \quad (3.20)$$

使 $\varphi(a_0, a_1, \dots, a_m)$ 达到最小值。则 $a_0, a_1, \dots, a_m$ 必须满足下列方程组：

$$\frac{\partial \varphi}{\partial a_k} = 2 \sum_{n=-N}^N \left( \sum_{j=0}^m a_j t_n^j - y_n \right) t_n^k = 0 \quad (k=0, 1, \dots, m) \quad (3.21)$$

即

$$\sum_{n=-N}^N y_n t_n^k = \sum_{j=0}^m a_j \sum_{n=-N}^N t_n^{k+j} \quad (3.22)$$

当 $N=2, m=3$ 时，并注意 $N$ 与 $t_i$ 的关系，则有

$$\begin{cases} 5a_0 + 10a_2 = y_{-2} + y_{-1} + y_0 + y_1 + y_2 \\ 10a_1 + 34a_3 = y_1 - y_{-1} + 2(y_2 - y_{-2}) \\ 10a_0 + 34a_2 = y_1 + y_{-1} + 4(y_2 - y_{-2}) \\ 34a_0 + 130a_2 = y_1 + y_{-1} + 8(y_2 - y_{-2}) \end{cases} \quad (3.23)$$

由式(3.23)可解出 $a_0, a_1, a_2, a_3$ ，再代入式(3.18)，得五点三次平滑公式：

$$\begin{cases} \bar{y}_{i-2} = \frac{1}{70}(69y_{i-2} + 4y_{i-1} - 6y_i + 4y_{i+1} - y_{i+2}) \\ \bar{y}_{i-1} = \frac{1}{35}(2y_{i-2} + 27y_{i-1} + 12y_i - 8y_{i+1} + 2y_{i+2}) \\ \bar{y}_i = \frac{1}{35}(-3y_{i-2} + 12y_{i-1} + 17y_i + 12y_{i+1} - 3y_{i+2}) \\ \bar{y}_{i+1} = \frac{1}{35}(2y_{i-2} - 8y_{i-1} + 12y_i + 27y_{i+1} + 2y_{i+2}) \\ \bar{y}_{i+2} = \frac{1}{70}(-y_{i-2} + 4y_{i-1} - 6y_i + 4y_{i+1} + 69y_{i+2}) \end{cases} \quad (3.24)$$

运算时，对于开始两点用式(3.24)中第 1、2 式计算，最后两点用式(3.24)中第 4、5 式计算，而中间各点均用式(3.24)中第 3 式进行平滑。

输入： $n$  次采样值存于数组  $X(n)$  中。

输出：平滑后的结果存于数组  $Y(n)$  中。

## 4 温度控制系统的原理和设计

温度控制系统是智能化热膨胀检测系统的一个重要组成部分，加热炉的加热和冷却过程都是由温度智能控制系统来实现的。课题中运用的控制理论主要是 PID 控制，并初步讨论了模糊控制器在温度控制中运用的可行性。

### 4.1 数字 PID 控制算法

PID 控制是将偏差的比例 (Proportional)、积分 (Integral) 和微分 (Differential) 三者通过线性组合构成控制量，对被控对象进行控制。数字 PID 控制在智能检测与控制技术中是一种普遍采用的控制方法，原理简单，使用方便，适应性强，鲁棒性强，即其控制品质对控制对象特性的变化不太敏感<sup>[27]</sup>。

#### 4.1.1 PID 算法的数字化<sup>[35-38]</sup>

PID 控制器是一种线性控制器，其控制算法的模拟表达式为

$$u(t) = K_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (4.1)$$

式中  $u(t)$  —— 调节器的输出信号； $e(t)$  —— 调节器的偏差信号；  
 $K_p$  —— 调节器的比例系数； $T_i$  —— 调节器的积分时间常数；  
 $T_D$  —— 调节器的微分时间常数。

在计算机控制系统中，使用的是数字 PID 控制器，数字 PID 控制算法通常又分为位置式 PID 控制算法和增量式 PID 控制算法。

由于计算机控制是一种采样控制，它只能根据采样时刻的偏差值计算控制量，因此中的积分和微分项不能直接使用，需要对式(4.1) 进行如下离散化处理：

$$\left. \begin{aligned} t \approx kT \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \\ \int e(t) dt \approx T \sum_{j=0}^k e(jT) = T \sum_{j=0}^k e(j) \\ \frac{de(t)}{dt} \approx \frac{e(kT) - e[(k-1)T]}{T} = \frac{e(k) - e(k-1)}{T} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

式中  $T$  为采样周期，上述离散化过程中，采样周期  $T$  必须足够短，才能保证

有足够的精度。将式(4.2)代入式(4.1)，并将  $e(kT)$  简化表示成  $e(k)$ ，可得：

$$u(k) = K_p \left\{ e(k) + \frac{T \sum_{j=0}^k e(j)}{T_i} + \frac{T_D}{T} [e(k) - e(k-1)] \right\} \quad (4.3)$$

$$\text{或 } u(k) = K_p e(k) + K_i e(j) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (4.4)$$

式中  $k$  —— 采样序号,  $k=0, 1, 2, \dots$ ;  $u(k)$  —— 第  $k$  次采样时刻的计算机输出值;

$e(k)$  —— 第  $k$  采样时刻输入的偏差值;

$e(k-1)$  —— 第  $(k-1)$  次采样时刻输入的偏差值;

$K_i$  —— 积分系数,  $K_i = K_p T / T_i$ ;  $K_D$  —— 微分系数,  $K_D = K_p T_D / T$ 。

由于计算机输出的  $u(k)$  直接去控制执行机构,  $u(k)$  的值和执行机构的位置是一一对应的, 所以通常称式(4.3)或式(4.4)为位置式 PID 控制算法。

该算法由于是全量输出, 所以每次输出均于与过去的状态有关, 计算时要对  $e(k)$  进行累加, 计算机运算工作量大。而且, 因为计算机输出的  $u(k)$  对应的是执行机构的实际位置, 如果出现故障,  $u(k)$  的大幅度变化, 会引起执行机构位置的大幅度变化, 这种情况在温度控制中是不允许的。系统采用的是增量式 PID 控制的控制算法。所谓增量式 PID 是指数字控制器的输出只是控制量的增量  $\Delta u(k)$ 。可以避免过多的累加工作, 增加了温度控制过程的稳定性。

可由式(4.4)导出提供增量的 PID 控制算式。根据递推原理可得

$$u(k-1) = K_p e(k-1) + K_i \sum_{j=0}^{k-1} e(j) + K_D [e(k-1) - e(k-2)] \quad (4.5)$$

用式(4.4)减式(4.5), 可得

$$\begin{aligned} \Delta u(k) &= K_p [e(k) - e(k-1)] + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \\ &= K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [\Delta e(k) - \Delta e(k-1)] \end{aligned} \quad (4.6)$$

式中  $\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$

为了编程方便, 可以将式(4.6)进一步改写为

$$\Delta u(k) = A e(k) - B e(k-1) + C e(k-2) \quad (4.7)$$

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

它们都是与采样周期、比例系数、积分时间常数、微分时间常数有关的系数。可以看出, 由于一般计算机控制系统采用恒定的采样周期  $T$ , 一旦确定了  $K_p$ 、

$K_I$ 、 $K_D$ ，只要使用前后 3 次测量值的偏差，即可由式(4.6)或式(4.7)求出控制增量。

采用增量式算法时，计算机输出的控制增量  $\Delta u(k)$  对应的是本次执行机构位置的增量。对应控制量，即控制量增量的积累  $u(k) = \sum_{j=0}^k \Delta u(j)$  需要用有积累作用的元

件来实现或是利用算式  $u(k) = u(k-1) + \Delta u(k)$  通过执行软件来完成。其控制系统示意图见图 4.1.1.1 所示。程序流程图见图 4.1.1.2 所示。

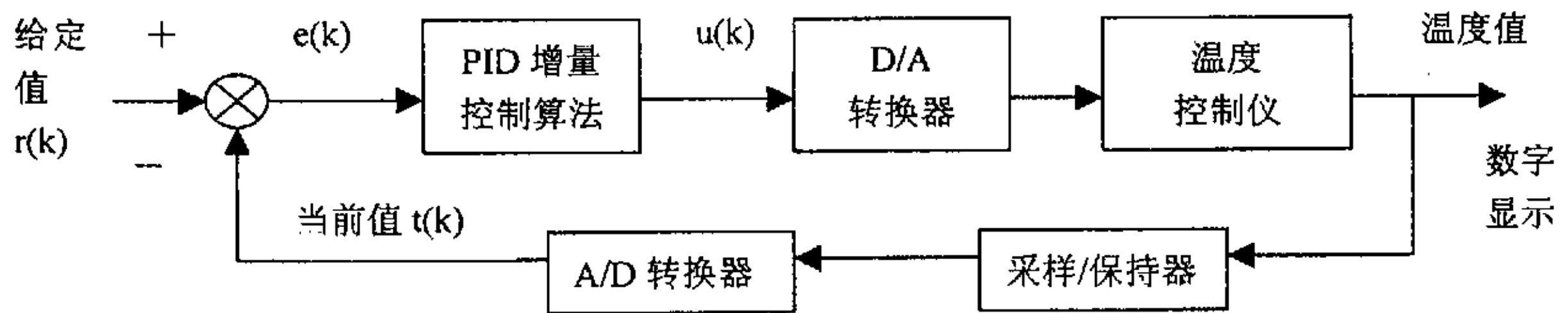


图 4.1.1.1 增量式 PID 控制系统示意图

增量式控制虽然只是算法上作了一点改进，却带来了不少优点<sup>[36]</sup>：由于计算机输出增量，所以误动作时影响小，必要时可用逻辑判断的方法去掉。在手动 / 自动切换时冲击小，便于实现无扰动切换。此外，当计算机发生故障时，由于输出通道或执行装置具有信号的锁存作用，故能仍然保持原值。算式中不需要累加，控制增量  $\Delta u(k)$  的确定仅与最近五次的采样值有关，所以较容易通过加权处理而获得比较好的控制效果。

#### 4.1.2 数字 PID 控制器的参数整定<sup>[23,27,38-40]</sup>

如何正确地选择 PID 控制器的结构和它的参数，使系统在受到扰动后仍保持稳定，并将误差保持在最小值，这是 PID 控制器设计中的一个重要问题。控制器的选择，必须根据工程问题的具体要求，并通过实验来确定。数字控制器与模拟控制器相比除了比例系数  $K_p$ 、积分时间  $T_I$  和微分时间  $T_D$  外，还有个重要的参数——采样周期  $T$ 。

香农采样定理给出了采样周期的上限，采样周期应满足

$$T \leq 1/2f_{\max} \tag{4.8}$$

其中  $f_{\max}$  为被采样信号的上限频率，采样周期的下限为计算机执行控制程序和输入输出所需要的时间，系统的采样周期只能在下限  $T_{\min}$  与上限  $T_{\max}$  之间选择。数字 PID 控制要求采样周期比被控对象的时间常数小得多。采样周期越小，控制效果越接近于连续控制。但采样信号过小，偏差信号也会过小，此时计算机将会失去调



节作用，因此，采样周期  $T$  既不能太大也不能太小。选择采样周期应考虑下列几个因素：

(1)给定值的变化率：加到被控对象上的给定值的变化率越高，采样频率应该提高，采样周期应越小。

(2)被控对象的特性：若被控对象是慢速对象时，采样周期一般取得较大；若被控对象是较快速的系统时，采样周期应取得较小。

(3)执行机构的类型：执行机构动作惯性大，采样周期也应大一些，否则执行机构来不及反映数字控制器输出值的变化。

(4)控制算法的类型：当采用 PID 算式时，积分作用和微分作用与采样周期的选择有关。选择采样周期太小，将使微分、积分作用不明显。

(5)计算机所承担的工作量：如果计算量大，控制的回路数多，则要求采样周期大些。

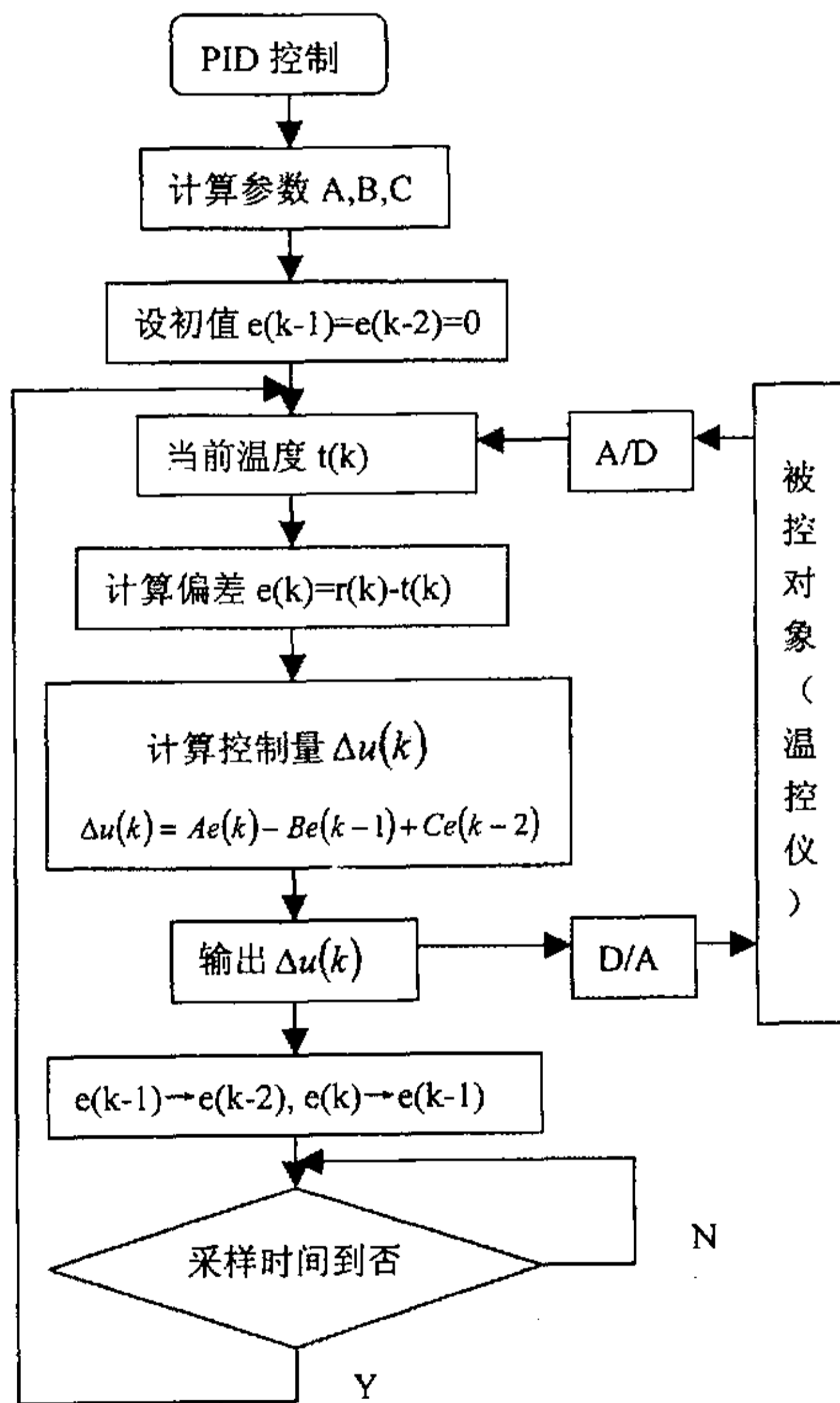


图 4.1.1.2 PID 控制系统程序流程图

由于各方面因素对采样周期的要求是不相同的,甚至是互相矛盾的,必须根据基体情况和性能指标作出折衷选择。对于参数的整定采用经验法中的优化法。其具体做法是根据经验,先把其他参数固定,然后对其中某一参数进行优选,待选出最佳参数后,再换另一个参数进行优选,直到所有的参数优选完毕为止。最后根据  $T$ 、 $K_P$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  诸参数优选的结果取一组最佳值即可。

## 4.2 温度控制系统的构成

温度控制系统检测时,被测炉温度经热电偶测量后转换成电压信号,经变送器转换,再经多路开关,把检测信号送到采样/保持器和 A/D 转换器进行模拟/数字信号转换,转换后的数字量经 I/O 接口读入到 CPU,在 CPU 中经数据处理(数字滤波、标度变换和数字控制计算)后,一方面送到显示屏上显示,并判断是否报警;另一方面与给定值进行比较,然后根据偏差值进行 PID 控制计算。控制器输出经 D/A 转换器转换成电流信号,以带动电动执行机构(可控硅导通角)工作,从而达到控温目的。当采样值小于给定值,加大供电电压和电流,反之则减小,使其能按给定的温度曲线进行控制。

温度控制系统主要有温度测量、A/D 转换、单片机系统、键盘操作系统、温度显示系统、报警电路、D/A 转换等部分组成。

温度检测元件选用的是镍铬-镍铝热电偶(分度号为 K),其对应的输出信号为  $0\sim 41.2643\text{mV}$ 。温度变送器选用集成一体化变送器,温度对应的输出为  $0\sim 5\text{V}$ 。系统采用 12 位 A/D 转换,故系统的采样分辨率为  $1010/4096\approx 0.25^\circ\text{C}/\text{LSB}$ 。

系统采用 AD574 12 位 A/D 转换器,AD574 的转换速度最快为  $35\mu\text{s}$ ,转换误差  $\leq 0.05\%$ ,非线性误差为  $\pm 1/2\text{LSB}$ 。内部含有三态输出缓冲电路,可直接与各种微处理器连接,内部配置的高精度参考电源和时钟电路,能直接完成 A/D 转换<sup>[27]</sup>。

系统具有键盘与显示电路,操作人员可以通过温度显示器及时掌握每个炉子的温度变化情况。同时系统还设计了一个小键盘,用来进行参数设定,自动/手动选择以及系统的启动和停止,通过键盘设定时在显示器上会有相关设定的显示。键盘与显示电路通过可编程接口 8255A 与单片机相连的。

为了安全工作,系统专门设计有一个报警电路。当温度正常时,报警灯是熄的,当温度值高于限值时,报警灯就会亮,同时报警声音电路就会响起。报警灯和报警声音电路也是通过可编程接口 8255A 与单片机相连的。

为了使系统各接口能正常工作,系统有一个译码编译电路。由于系统接口比较多,所以采用 74LS154 四-十六译码器可译出 16 个地址。系统还有 8 个 D/A 转换电路,采用 DAC0832,输出为  $4\sim 20\text{mA}$ 。DAC0832 采用先进的 CMOS 工艺,因此功

耗低, 输出漏电流误差较小, 其特殊的电路结构可与 TTL 逻辑输入电平兼容<sup>[27]</sup>。

### 4.3 模糊控制的原理与实现<sup>[12,27,41-44]</sup>

虽然目前应用中的温度控制仪属于 PID 控制, 控制器的控制效果比较令人满意, 但在期望值附近仍然存在一些振荡。PID 控制器虽然有较强的鲁棒性, 但控制器的参数还比较多的依赖于控制对象的模型。而模糊控制撇开了控制对象的数学模型, 根据专家知识和操作经验, 通过模糊推理和模糊运算实现对被控对象的智能控制, 在很大程度上弥补了传统控制的局限性。模糊控制实质上是用计算机去执行操作人员的控制策略, 因而可以避免复杂的数学模型。模糊控制对过程参数改变不灵敏, 在所有工作点上都能做到较稳定的控制, 这说明模糊控制本质上是非线性的, 并且对于对象的参数变化适应性强, 即所谓的“鲁棒性”较好。因此为了能更好的进行温度控制, 在此对模糊控制算法进行了初步的研究。

#### 4.3.1 模糊控制原理

##### 4.3.1.1 模糊控制系统的组成

模糊控制系统通常由以下 5 个部分组成:

1. 模糊控制器: 一台 PC 机或单片机及其相应软件, 是控制系统的核心部分。
2. 输入 / 输出接口: 控制器通过输入接口从被控对象获取数字信号量, 并将模糊控制器决策的数字信号经过数模转换, 将其转变为模拟信号, 然后送给被控对象。
3. 执行机构: 电动或气动调节装置。
4. 被控对象: 可以是缺乏精确数学模型的对象, 也可以是具有较精确数学模型的对象。
5. 变送器: 由传感器 (热电偶) 和信号调理电路组成。

##### 4.3.1.2 模糊控制器的组成及工作原理

模糊控制系统与通常的计算机控制系统的主要区别是采用了模糊控制器。模糊控制器是模糊控制系统的核心。一个模糊系统的性能优劣, 主要取决于模糊控制器的结构, 所采用的模糊规则、合成推理算法以及模糊决策的方法等因素。

模糊控制器主要包括输入量模糊化接口、知识库、推理机、输出清晰化接口四个部分。

1. 模糊化接口: 将输入变量从基本论域转换到相应的模糊集论域。将输入数据转换成合适的语言值, 如 {PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB} = {“正大”, “正中”,

“正小”，“零”，“负小”，“负中”，“负大”}。

2. 知识库：知识库由数据库和规则库两部分组成。

(1) 数据库：数据库所存放的是所有输入输出变量的全部模糊子集的隶属度矢量值，若论域为连续域，则为隶属度函数。

(2) 规则库：规则库用来存放全部模糊控制规则，在推理时为“推理机”提供控制规则。模糊规则通常由一系列的关系词连接而成，如 if—then, else, also, end, or 等，关系词必须经过“翻译”才能将模糊规则数值化。对于温度模糊控制器，系输入变量为温度的偏差  $e$  和温度偏差的变化率  $ec$ ，输出量为温度控制信号  $u$ ，它们对应语言变量分别为  $E$ ， $EC$  和  $U$ ，可给出如下模糊规则：

$R_1$ : IF  $E$  is 正大 and  $EC$  is 正大 then  $U$  is 负大

$R_2$ : IF  $E$  is 负大 and  $EC$  is 负大 then  $U$  is 正大

第一条模糊规则含义是若温度偏高，且温度上升较快，则调节温度控制信号使温度迅速下降。第二条模糊规则含义是若温度偏低，且温度下降较快，则调节温度控制信号使温度迅速上升。

3. 推理机：根据输入的模糊量和知识库完成模糊推理，并求解模糊关系方程，从而获得模糊控制量。若已知偏差  $E$  和偏差的变化率  $EC$  的模糊集，则控制量的模糊集  $U$  可由模糊推理的合成算法获得，即

$$U = (E \times EC) \cdot R \quad (4.9)$$

式中， $\times$ ——模糊直积计算； $\cdot$ ——模糊合成计算； $R$ ——模糊关系。

4. 清晰化接口：通过推理机进行模糊决策所得到的输出是模糊量，而被控对象只能接受一个控制量，因此要进行控制必须经过清晰化接口将模糊量转换为精确量。将模糊量转换为精确量通常采用加权平均判决法，该方法的输出量  $u^*$  为

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{U_i}(u_i) u_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{U_i}(u_i)} \quad (4.10)$$

## 4.3.2 温度控制系统模糊控制器的设计

### 4.3.2.1 模糊控制器结构的确定

初步研究了双输入单输出模糊控制器，采用二维模糊控制器结构。即在控制过程中，不仅对实际偏差自动进行调节，还要求对实际偏差变化率进行调节，这样才能保证系统稳定，不致产生振荡。模糊控制系统的结构图如图 4.3.2.1 所示。

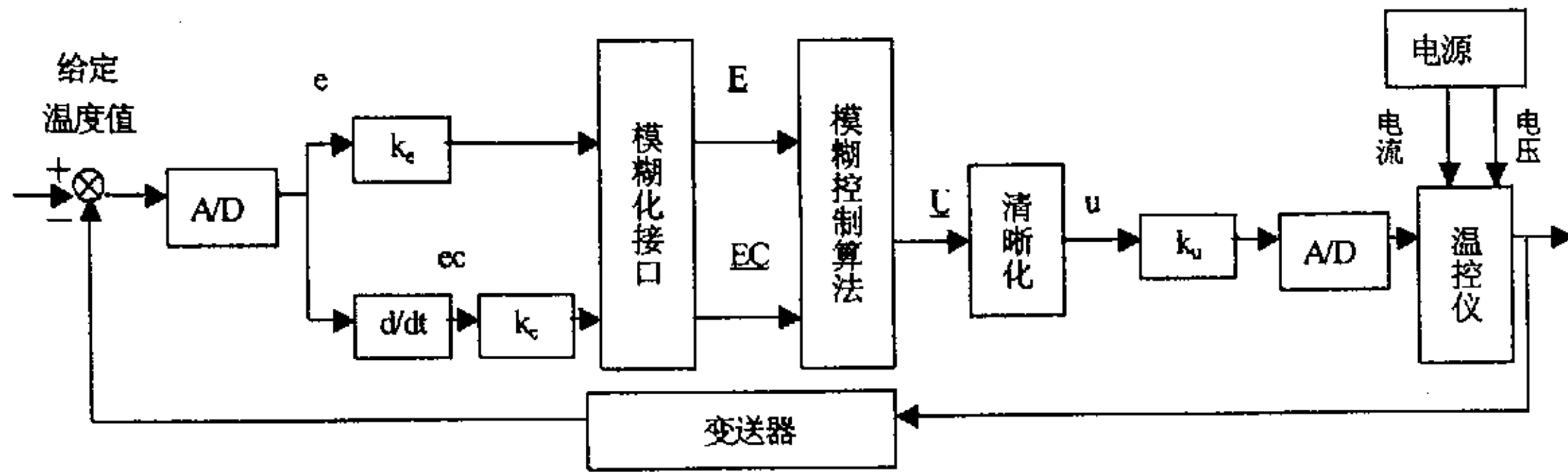


图 4.3.2.1 模糊控制系统的结构图

图中  $e$  为温度返回值和给定值的偏差； $K_e$  为偏差的量化因子； $ec$  为偏差的变化率； $K_c$  为偏差变化率的量化因子； $\underline{E}$  和  $\underline{EC}$  分别为  $e$  和  $ec$  经过模糊化后的模糊语言变量。 $\underline{U}$  为经过模糊控制后的模糊语言输出量； $K_u$  为控制量的比例因子； $u$  为  $\underline{U}$  经过清晰化操作后的输出量。

### 4.3.2.2. 模糊化

对于偏差  $\underline{E}$ ，偏差变化率  $\underline{EC}$  及控制量  $\underline{U}$  的模糊集及其论域定义如下：

$\underline{E}$  的模糊集为：{NB, NM, NS, NO, PO, PS, PM, PB}

$\underline{EC}$  和  $\underline{U}$  的模糊集为：{NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}

$\underline{E}$  和  $\underline{EC}$  的论域为：{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6}

$\underline{U}$  的论域为：{-7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7}

上述误差  $\underline{E}$  的模糊集选取了 8 元素，区分了 NO（负零）和 PO（正零），目的是为了提提高系统的稳定精度。

采取就近取整原则，可得输入语言变量偏差  $\underline{E}$  和偏差变化率  $\underline{EC}$  的赋值表如表 4.3.1 和表 4.3.2 所示，输出语言变量控制量  $\underline{U}$  的赋值表如表 4.3.3 所示。

表 4.3.1 输入语言变量偏差  $\underline{E}$  的赋值表

偏差		-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	1	2	3	4	5	6
隶属度															
模糊量															
PB		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.8	1.0
PM		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
PS		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.8	1.0	0.5	0.1	0.0	0.0
PO		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
NO		0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.6	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NS		0.0	0.0	0.1	0.5	1.0	0.8	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NM		0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
NB		1.0	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 4.3.2 输入语言变量偏差 EC 的赋值表

偏差变化率														
隶属度		-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
模糊集														
	PB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.8	1.0
	PM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2
	PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	1.0	0.7	0.2	0.0	0.0
	O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NS	0.0	0.0	0.2	0.7	1.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NM	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

表 4.3.3 输出语言变量控制量 U 赋值表

控制量																
隶属度		-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
模糊量																
	PB	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.8	1.0
	PM	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0.0
	PS	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0
	O	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	1.0	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NS	0.0	0.0	0.0	0.1	0.4	0.8	1.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NM	0.0	0.2	0.7	1.0	0.7	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	NB	1.0	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

### 4.3.2.3 建立模糊控制规则

对于双输入单输出模糊控制器系统，一般采用“if A and B then C”来描述。模糊控制器有很多条控制规则，归纳成的控制规则表如表 4.3.4 所示，表中“\*”表示实际中不会出现的情况。

操作过程中要遇到的各种可能出现的情况及其相应的控制策略均可用表 4.3.4 描述。模糊控制规则说明如下：

1. 当测量和给定的温度偏差为负大，偏差变化率为负时，偏差有增大的趋势，为尽快消除已有的负大偏差并抑制误差变大，所以控制量取正大。
2. 当偏差为负而偏差变化率为正时，系统有减少偏差的趋势，为尽快消除偏差且又不超调，应取较小的控制量。由表中可看出，当误差为负中且偏差变化率为正小时，控制量取正中。

3. 当偏差为负小时，系统接近稳态，若偏差变化为负时，选取控制量变化为正小，以抑制偏差往负方向变化；若偏差变化为正时，系统本身有消除负小偏差的趋势，选取控制量变化为 0 等级或负小即可。

4. 偏差为正时与偏差为负时相类同，相应的符号都要变化。

上述选取控制量变化的原则是：当偏差大或较大时、选取控制量以尽快消除偏差为主；而当偏差较小时，选取控制量要注意防止超调，以尽量保持系统稳定为主。

表 4.3.4 模糊控制规则表

控制量	偏差								
	NB	NM	NS	NO	PO	PS	PM	PB	
偏差变化率									
PB	PB	PM	NB	NB	NB	NB	*	*	
PM	PB	PM	NM	NM	NS	NS	*	*	
PS	PB	PM	NS	NS	NS	NS	NM	NB	
O	PB	PM	PM	ZO	ZO	NM	NB	NB	
NS	PM	PM	PS	PS	PS	PS	NM	NB	
NM	*	*	PS	PM	PM	PM	NM	NB	
NB	*	*	PB	PB	PB	PB	NM	NB	

#### 4.3.2.4 建立模糊控制表

由于采用控制规则“if A and B then C”，因此模糊关系 R 可以写为

$$R = A \times B \times C \tag{4.11}$$

某一时刻模糊输出

$$U = (E \times EC) \cdot R \tag{4.12}$$

由模糊数学理论知道，R 是一个 14×13×15 的矩阵，每次控制计算都处理这样矩阵是很困难的。为此，事先将 R 矩阵算出，然后根据式(4.12)算出每种输入状态下的模糊控制输出 U。最后用最大隶属度判决法，将 U 转化为精确量。将上述计算结果可制成如表 4.3.5 所示的模糊控制表，作为文件存储在计算机中，当进行模糊控制时，系统通过查表得到确定的输出控制量，然后将输出控制量乘上适当的比例因子  $K_u$ ，其结果进行 D/A 转换，以实现生产过程的控制。

表 4.3.5 模糊控制表

偏差															
控制量		-6	-5	-4	-3	-2	-1	-0	+0	1	2	3	4	5	6
偏差变化率															
-6		7	6	7	7	4	4	4	4	2	1	0	0	0	0
-5		6	6	6	6	4	4	4	4	2	2	0	0	0	0
-4		7	6	7	6	4	4	4	4	2	1	0	0	0	0
-3		6	6	6	6	5	5	5	5	2	2	0	-2	-2	-2
-2		7	6	7	6	4	4	1	1	0	0	-3	-4	-4	-4
-1		7	6	7	6	4	4	1	1	0	-3	-3	-4	-4	-4
0		7	6	7	6	4	1	0	0	-1	-4	-6	-7	-6	-7
1		4	4	4	3	1	0	-1	-1	-4	-4	-6	-7	-6	-7
2		4	4	4	2	0	0	-1	-1	-4	-4	-6	-7	-6	-7
3		2	2	2	0	0	0	-1	-1	-3	-3	-6	-6	-6	-6
4		0	0	0	-1	-1	-3	-4	-4	-4	-4	-6	-7	-6	-7
5		0	0	0	-1	-1	-2	-4	-4	-4	-4	-6	-6	-6	-6
6		0	0	0	-1	-1	-1	-4	-4	-4	-4	-6	-7	-6	-7



## 5 应用软件系统

智能化热膨胀检测系统的联机应用软件是用 Visual Basic、C++ Builder 及其数据库开发软件开发完成的，包括串口通信模块，数据采集模块，数据库应用模块三个部分。其中串口通信模块是用 Visual Basic 开发完成的，数据采集模块和数据库应用模块是用 C++ Builder 及其数据库开发工具开发完成的。

### 5.1 数据采集模块

#### 5.1.1 功能介绍

该模块的主要功能是进行参数设置，并初始化设备，在实时检测中，实现对被测对象的检测、采集、显示，并将采集到的数据经滤波平滑处理后导入数据库中，以备进行后续的调用和处理。程序的流程图如图 5.1.1.1 所示。

数据采集模块的界面主要有两个。即参数设置页面 (FormSetting) 和实时监控页面 (FormARead)。

参数设置页面 (FormSetting) 可根据具体工作进行参数设置和进行系统的初始化。智能检测可适用于多种类型的信号检测过程，最多可同时对 16 路信号实现实时检测。智能检测时可设置的参数如下：扫描通道 (Scan Channel)、温度信号输入通道选择 (Temp Signal)、其他信号输入通道 (Displace Signal)、采样频率 (Scan Time)、所选用的热电偶类型 (TC TYPE) 以及试样编号等相关信息。初始化可以启动板卡所自带的函数，获得设备编号及相应的句柄指针。

实时监控页面 (FormARead) 主要用来实现对被测对象的检测、采集并实时显示被检测参量的当前状态 (如温度值和位移量)，并将采集到的数据经滤波平滑处理后导入数据库中。可为操作者提供一个直观的监控窗口，以便操作者随时了解被测信号的状态，如出问题可以及时调节。

智能检测状态下，被检测信号的每一次采集，都会在相应的窗口显示出当前状态，例如对温度和膨胀量的检测，会在相应的状态栏中显示实时温度值 (单位 °C) 及膨胀量 (单位 mm)，同时会将每一次采集到的数据导入到后端数据库贮存，并且显示当前记录的条数。

A/D 转换：按照设定的采样频率，通过调用 outp 函数可对各个通道进行巡回采样，调用 A/D 转换函数进行转换：

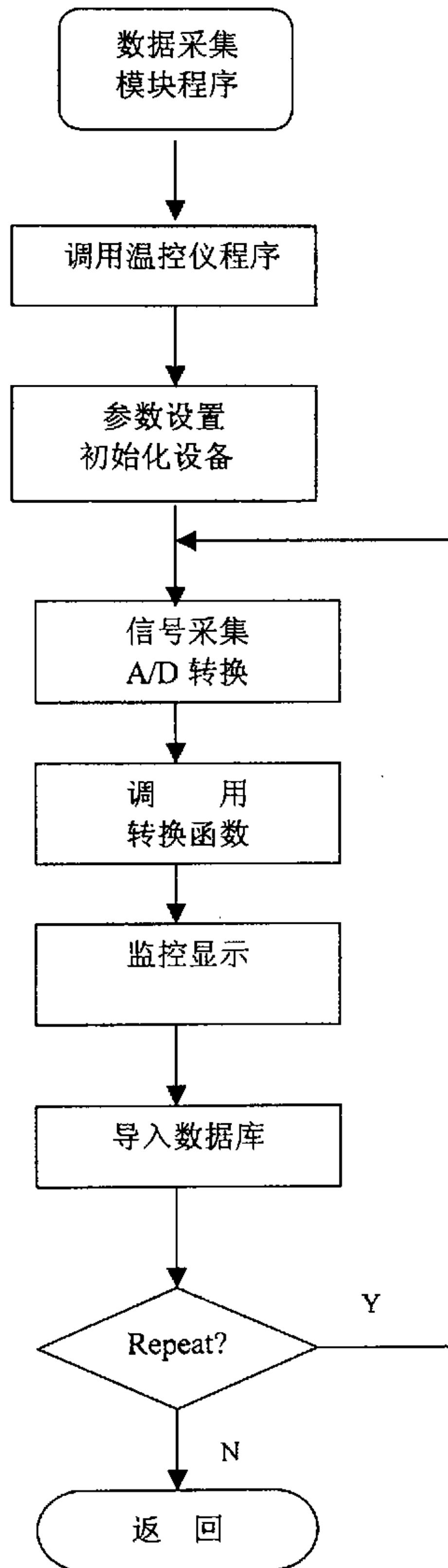


图 5.1.1.1 数据采集模块程序流程图

在数据采集的过程中通过一些函数的调用来实现设备的检测及参量的采集

的。用到的函数有：

DRV\_DeviceOpen: 打开设备，初始化设备，并在内存中为其分配空间，使设备做好 I/O 的准备工作。

DRV\_DeviceClose: 释放 DRV\_DeviceOpen 分配的内存，关闭设备。

DRV\_DeviceGetFeatures: 确定打开的设备的硬件信息，保存在系统结构变量中。

DRV\_GetErrorMessage: 通过一个特定的出错代码，得到出错信息，该代码由前面的调用函数的返回值得到。

DRV\_MAIConfig: 为特定的模拟量输入通道进行增益设定。

DRV\_DeviceGetNumOfList: 返回安装的设备数。

DRV\_DeviceGetList: 返回设备列表，不包括用 COM 口或 CAN 口的连接设备。

DRV\_MAIVoltageIn: 读模拟量输入通道，结果返回一个电势值。

DRV\_MAIVoltageInExp: 通过扩展卡读模拟量输入通道，结果返回一个电势值。

物理量转换：根据所选用的传感器及输入输出关系，调用相应的转换函数，将 A/D 转换后的数据，还原为检测的物理量，如温度、膨胀量等。例如：  
TempTransferK(float x)为镍铬-镍硅型（K 型）热电偶转换函数，TempTransferS(float x)为铂铑-铂型（S 型）热电偶转换函数，DisplaceTransfer(float x)为直流差动变压器位移传感器转换函数。

温控仪程序调用：通过 DriveComBox、DirectoryListBox、FileListBox 三个构件的应用以及 spawnl 函数的调用将温控仪程序嵌套在联机软件中，大大简化了系统的操作。Spawnl 函数的原形是 int spawnl(int mode, char \*path, char \*arg0, arg1, ..., argn, NULL)。DriveComBox 中的 DirList 属性是用来连接 DriveComBox 构件和 DirectoryListBox 构件的。DirectoryListBox 的 FileList 属性是用来连接 DirectoryListBox 构件和 FileListBox 构件的。FileListBox 的 FileType 属性用来决定何种属性的文件在 FileListBox 构件中显示出来，而 Mask 属性决定了有何种后缀名的文件在 FileListBox 构件中显示出来。

### 5.1.2 非线性参数转换

由于热电偶和位移传感器的输出均为电压值，与温度以及位移量之间的关系是非线性的，很难用一个简单的解析式来表达。为了使检测系统能直接显示被检测参量的数值，确保仪器在整个测量范围内具有较高的精度，因此需要采用曲线拟合的方法对检测结果进行线性化处理。

对于位移量的转换函数，系统采用的是连续函数来拟合的。采用最小二乘法拟合得到相应的曲线方程<sup>[33,34]</sup>。其算法如下：

已知  $n$  个数据点  $(x_i, y_i)$  ( $i=0, 1, \dots, n-1$ ), 求  $m$  次 ( $m \leq n-1$ ) 最小二乘拟合多项式

$$P_m(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_mx^m \quad (5.1)$$

即选取合适的  $a_0, a_1, \dots, a_m$  使均方误差  $d = \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - P_m(x_i))^2$  最小。

则  $a_0, a_1, \dots, a_m$  满足下列方程

$$\begin{pmatrix} b_{00} & b_{01} & \dots & b_{0,m} \\ b_{10} & b_{11} & \dots & b_{1,m} \\ \vdots & & \ddots & \vdots \\ b_{m,0} & b_{m,1} & \dots & b_{m,m} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \\ \vdots \\ c_m \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

其中  $b_{ij} = \sum_{k=0}^{n-1} x_k^{i+j}$ ,  $c_i = \sum_{k=0}^{n-1} x_k^i y_i$ 。此方程计算各系数和求解过程计算量非常大,

因此也非常费时。为了减少计算量, 可采用正交多项式族  $\{\varphi_i(x)\}$  来求解。其构造过

程如下:

$$\begin{cases} \varphi_0(x) = 1 \\ \varphi_1(x) = x - \gamma_1 \\ \varphi_{k+1}(x) = (x - \gamma_{k+1})\varphi_k(x) - \beta_k\varphi_{k-1}(x) \end{cases} \quad (5.3)$$

$$\text{其中 } \gamma_k = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i \varphi_{k-1}^2(x_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} \varphi_{k-1}^2(x_i)}, \quad \beta_k = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} \varphi_k^2(x_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} \varphi_{k-1}^2(x_i)}。$$

$\varphi_k(x)$  为  $k$  次多项式, 它们满足  $\sum_{i=0}^{n-1} \varphi_k(x_i)\varphi_l(x_i) = 0$  (即其具有正交性), 且它们

是线性无关的, 则有

$$P_m(m) = c_0\varphi_0(x) + c_1\varphi_1(x) + \dots + c_m\varphi_m(x) \quad (5.4)$$

$$\text{其中 } c_k = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i \varphi_k(x_i)}{\sum_{i=0}^{n-1} \varphi_k^2(x_i)}。$$

为了避免计算过程中的数值过大, 可将各  $x_i$  做平移压缩变化。一般可将各  $x_i$  减

去它们的平均值  $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i$ 。

则计算出来的多项式为

$$P_m(x) = a_0 + a_1(x - \bar{x}) + a_2(x - \bar{x})^2 + \dots + a_m(x - \bar{x})^m \quad (5.5)$$

具体的计算步骤如下：

$$1) \varphi_0(x) = 1, b_0 = 1, d_0 = n, c = \frac{1}{d_0} \sum_{i=0}^{n-1} y_i, a_0 = c_0 b_0$$

$$2) \varphi_1(x) = x - \gamma, \text{ 其中 } \gamma = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i,$$

$$t_0 = -\gamma, t_1 = 1, d_1 = \sum_{i=0}^{n-1} \varphi_1^2(x_i), c_1 = \frac{1}{d_1} \sum_{i=0}^{n-1} \varphi_1(x_i) y_i,$$

$$\gamma = \frac{1}{d_1} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \varphi_1^2(x_i), \beta = \frac{d_1}{d_0},$$

$$a_0 = a_0 + c_1 t_0, a_1 = c_1 t_1$$

3) 对  $j = 2, 3, \dots, m-1, m$  此时已有

$$\varphi_{j-1}(x) = \sum_{i=0}^{j-1} t_i x^i, \varphi_{j-2}(x) = \sum_{i=0}^{j-2} b_i x^i, \text{ 设 } \varphi_j(x) = \sum_{i=0}^j s_i x^i \text{ 则有递推公式}$$

$$\varphi_j(x) = (x - \gamma) \varphi_{j-1}(x) - \beta \varphi_{j-2}(x) \quad (5.6)$$

可得

$$\begin{cases} s_j = t_{j-1} \\ s_{j-1} = -\gamma t_{j-1} + t_{j-2} \\ s_k = -\gamma t_k + t_{k-1} - \beta b_k \quad k = j-2, j-3, \dots, 1 \\ s_0 = -\gamma t_0 - \beta b_0 \end{cases} \quad (5.7)$$

在计算出  $d_j = \sum_{i=0}^{n-1} \varphi_j^2(x_i), c_j = \frac{1}{d_j} \sum_{i=0}^{n-1} \varphi_j(x_i) y_i, \gamma = \frac{1}{d_j} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \varphi_j^2(x_i), \beta = \frac{d_j}{d_{j-1}}$  和相应

的  $a_k: a_j = c_j s_j, a_k = a_k + c_j s_k, k = j-1, j-2, \dots, 0$

再进行一些赋值  $t_j = s_j, b_k = t_k, t_k = s_k, k = j-1, j-2, \dots, 0$ , 以便下次迭代。在

源程序中,  $m$ : 拟合多项式的项数;  $n$ : 数据点的个数;

$x[]$ : 存放  $n$  个数据点的  $x$  坐标, 即函数点;

$y[]$ : 存放  $n$  个数据点的  $y$  坐标, 即函数值;

$A[]$ : 存放多项式的系数;

通过该算法可以算出所需得的多项式, 系统中针对位移量的转换采用的是一次多项式, 即  $y = ax + b$ , 通过上面编写的最小二乘法的算法软件确定系数  $a, b$  即可。

软件完成位移量采集的实时非线性处理, 即可以满足实时控制的要求, 又能在工作范围内 (0~2mm) 保证精确度在 1 微米以内。其程序流程图如图 5.1.2.1 所示。

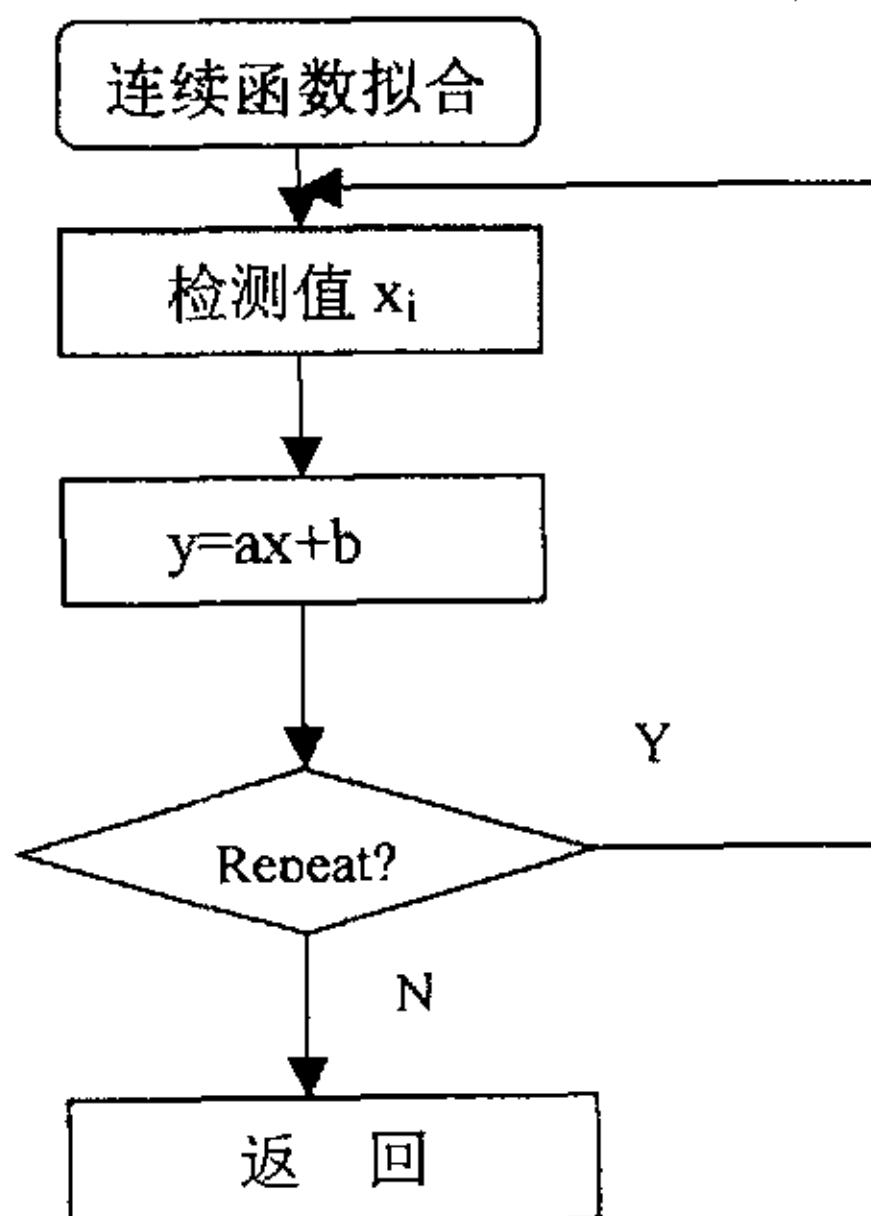


图 5.1.2.1 位移量转换函数流程图

对于热电偶来说, 常规的方法是通过测量热电偶的输出, 然后对照相应型号的热电偶的分度表查出对应的温度值。系统采用的是分段抛物线拟合的方法来编写热电偶的非线性转换函数的。即是把非线性曲线的整个区间根据其变化情况分成若干段, 将每一段用抛物线去逼近。同时对于插值点的选择采用的是等距分段法, 即等距离地选取插值基点<sup>[9,23]</sup>。这种方法使得  $x_{i+1} - x_i = \text{常数}$ , 从而简化计算过程。

在软件的设计过程中, 将热电偶的工作范围的电势值化为四段  $(x_0 \leq x \leq x_1)$ 、 $(x_1 \leq x \leq x_2)$ 、 $(x_2 \leq x \leq x_3)$ 、 $(x_3 \leq x \leq x_4)$ , 每一段都用一个二阶抛物线  $y = a_i x^2 + b_i x + c_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ ) 来描绘。抛物线方程的系数  $a_i, b_i, c_i$  可用上面的最小二乘法确定。检测时, 先根据检测到的电势值的大小确定其所在的范围, 再用相应的抛物线方程  $y = a_i x^2 + b_i x + c_i$  进行计算就可得到所需的温度值。软件完成温度值

采集的实时非线性处理，即可以满足实时控制的要求，又能在工作范围内保证精确度在 1℃ 以内。具体的流程图如图 5.1.2.2 所示。

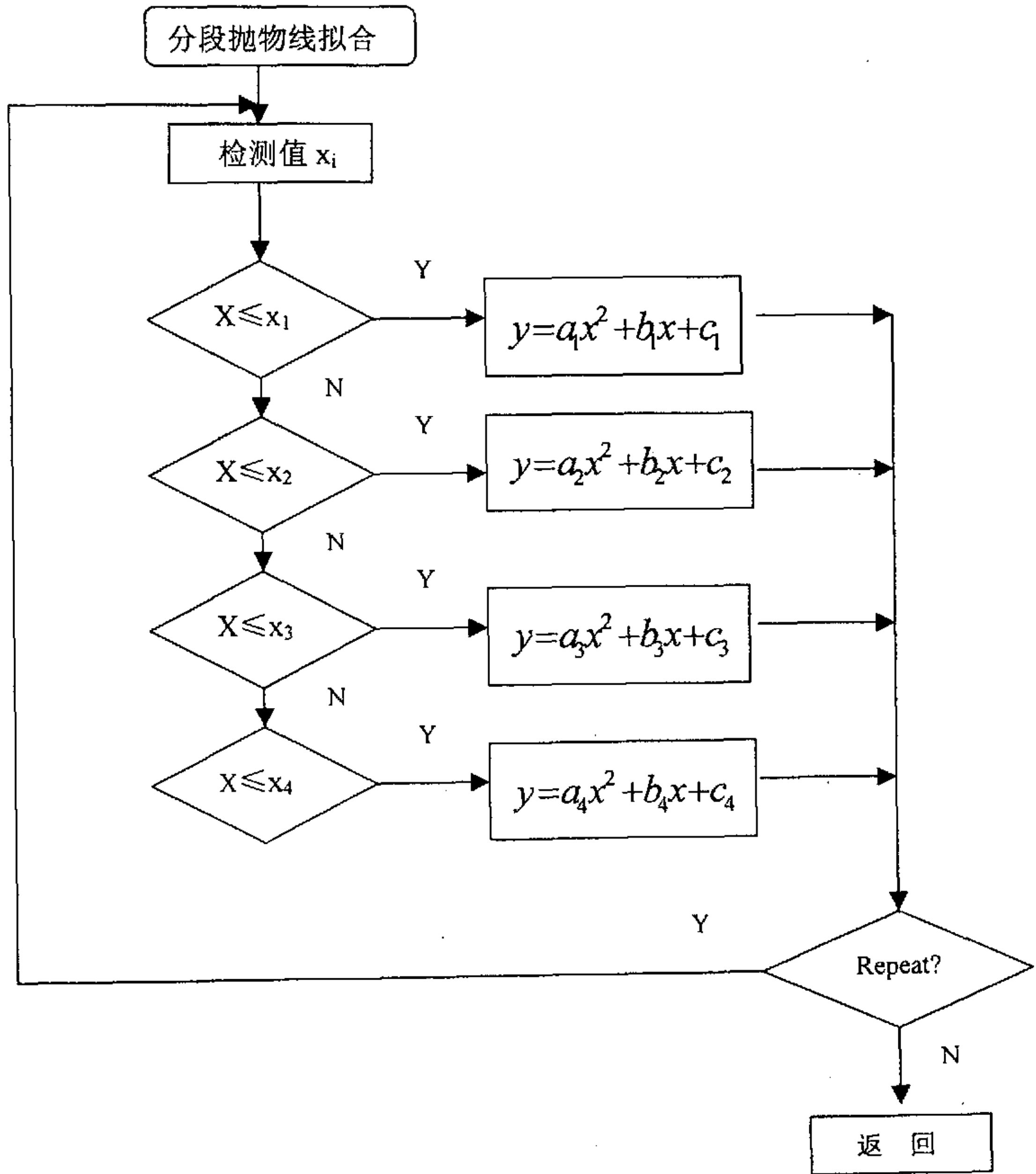


图 5.1.2.2 温度转换函数流程图

## 5.2 串口通信模块

### 5.2.1 串口通信的基本原理

在工业检测和数据采集系统中，计算机和单片机之间经常需要进行数据交换，串行通信以其高效、可靠、标准统一的优点成为主要的通信手段。串行通信口作为

计算机与外设进行信息交流的重要通道,在计算机应用中扮演着愈来愈重要角色。串行通信指的是数据一位一位按顺序传送。在串行通信中,数据传送有三种方式:单工方式、半双工方式和全双工方式。

PC机一般都有1个或2个串行端口,依次为COM1、COM2。这些串口提供了外部设备与计算机进行数据传输和通信的通道。系统采用的接口是RS-232。由于PC机串行口RS-232的电气特性符合EIA-RS232C标准,而单片机的串行口的电气特性为TTL电平。因此为了使两者的硬件连接,采用MAX232芯片对两者进行电平转换。

一般来说上位机始终处于主动状态,根据程序运行的需要向通信端口模块发出读、写等命令;下位机处于被动状态,接收并响应上位机的命令。需要读检测数据时,上位机通过通信口向指定地址的模块发出读数据命令,模块响应并将数据准备好,按统一的数据通信帧格式编成响应字符串,主机再次读通信口接收缓冲区即可读到所需的数据。向模块写数据时,上位机向指定模块发出写命令及参数数据,模块即可接受并返回响应情况。

系统中串口通信的实现是用Visual Basic语言来完成的。在标准串口通信方面,VB6.0提供了具有强大功能的通信控件MSComm。MSComm控件提供了一系列标准通讯属性和方法。使用它可以建立起应用程序与串行端口的连结。该控件可设置串行通信的数据发送和接收,包括对串口状态、串口通信的信息格式和协议进行设置。采用标准的十位串行通信,包括8位标准数据、1位数据的起始位和1位数据的停止位。每个通信控件对应一个串口,可以设计多个通信控件来访问多个通信口。VB的通信控件MSComm能够提供串行通信的全部功能,程序编写、调试简单方便,开发速度快,该控件封装了通信过程中的底层操作程序,用户只需设置和监控控件的属性和事件,可以方便地实现异步串行通信<sup>[22,45]</sup>。

### 5.2.2 MSComm 控件的基本属性<sup>[22,45,46]</sup>

1. Comport 属性:设置或返回通信连接端口号。程序必须指定所要使用的串行端口号,Windows系统会自动使用所设置的通信端口与外界进行通信。程序也可以借助此属性返回所使用的端口号。一般只有COM1和COM2两个端口可供选择,1为COM1,2为COM2。

2. Settings 属性:用于设置初始化参数。以字符串形式设置或返回传输数据速率、校验位、数据位和停止位4个参数。其格式为“BBBB, P, D, S”,其中BBBB表示数据传输速率(波特率),P为校验方式,D表示数据位,S表示停止位数。缺省值为“9600, N, 8, 1”,表示所使用的通信端口以每秒9600位的速度进行数据传



输, 不做奇偶校验, 每个数据单元是 8 位, 停止位为 1 位。传输速率可以是 110、300、600、1200、2400、9600、14400、19200、28800、38400、56000、128000、256000, 其中后 4 个为保留给高速传输装置使用, 可以根据具体通信设备以及工作要求设定合适的波特率。

3. PortOpen 属性: 用于设置或返回通信连接端口的状态。使用前必须将要使用的串行接口打开; 而在使用完毕后, 也必须执行关闭操作。串行通信的各项功能都是在 PortOpen 的 True 和 False 之间完成的。

4. Input 属性: 用于从输入缓存区返回并删除字符。程序靠这个命令将双方传到输入缓存区中的字符读进来, 并清除缓存区中已经被读取的字符。

5. Output 属性: 用于将一个字符串写入输入缓存区。当程序需要向对方传输字符串的时候, 可以使用此命令将字符串写入缓存区。

6. InputLen 属性: 用于指定由串行端口读入字符串的长度。VisualBasic 程序可使用 Input 命令将存放在输入缓存区的字符读入, 但要指定所读入的字符长度则需要设置这个属性。InputLen 的默认值为 0, 此值会使 Input 命令一次读取所有缓存区中的数据。对固定字符串的长度进行特别的运算或判断, 就必须使用 InputLen 属性。

7. InBufferCount 属性: 用于返回在接收缓存区中的字符数。该属性在设计阶段无法使用。InBufferCount 是指已经接收, 并在接收缓存区中等待读取的字符数。可以把其设置为 0, 以清除接收缓存区。

8. InputMode 属性: 用于设置或返回 Input 属性取回的数据形态。有文本形式和二进制形式。

9. Rthreshold 属性: 用于设置或返回引发接收事件的字符数; 即属性页上的“最小接收字符数”。当接收缓存区达到所设置的字符数时, 将会引发 OnComm 事件中的接收事件。此属性的默认值是 0, 其意义是无论缓存区中有多少字符均不引发接收事件。当其属性值为 1 时, 则缓冲区中每接收到一个字符就引发一次 OnComm 事件, 以便及时从缓冲区取走数据。

10. Sthreshold 属性: 设置或返回发送缓冲区中的最少字符数。

11. CommEvent 属性: 返回最近的通讯事件或错误的数字代码。只要有通信事件或错误发生都会产生 OnComm 事件, 该属性存有所发生的事件或错误的数值代码。

### 5.2.3 MSComm 控件的 OnComm 事件

MSComm 控件的触发事件, 串行通信的实现既可以采取中断方式, 也可以采取查询方式<sup>[22,45]</sup>。MSComm 控件提供了实现串行端口中断功能的 OnComm 事件, 根

据属性 CommEvent 的不同返回值来捕获通信时发生的不同通信事件和错误，在 OnComm 事件处理过程中，应用程序可以接收信息或进行错误处理。该控件可以截取串口的任何消息，转入事件处理程序。当有串口事件或错误发生时，VB 会立刻触发一个 OnComm 事件，程序就会自动转入 OnComm 事件处理程序中。在 OnComm 事件处理过程中，可以通过判断 CommEvent 属性值，对于不同的属性值转入不同的事件处理过程中。

### 5.2.4 处理通讯方式

MSComm 控件提供下列 2 种处理通讯的方式<sup>[22,46]</sup>：

1. 查询方式。查询方式实质上还是事件驱动，但在有些情况下，这种方式显得更为便捷。在程序的每个关键功能之后，可以通过检查 CommEvent 属性的值来查询事件和错误。如果应用程序较小，这种方法可能是更可取的。

2. 事件驱动方式。事件驱动通讯是处理串行端口交互作用的一种非常有效的方法。在许多情况下，在事件发生时需要得到通知，如在串口接收缓冲区中有字符，或者 Carrier Detect(CD)或 Request To Send(RTS)线上一个字符到达或一个变化发生时。在这些情况下，可以利用 MSComm 控件的 OnComm 事件捕获并处理这些通讯事件。只要 CommEvent 属性发生变化(即产生了通信事件或通信错误)就能产生 OnComm 事件，然后在该事件中判断 CommEvent 的属性值，并作出相应的处理。这种方法的优点是程序响应及时，可靠性高。

### 5.2.5 用 MSComm 控件进行串口通信一般步骤<sup>[22,46]</sup>

1. 设置通信对象、通信端口号以及配置通信格式(如起始位个数、数据位长度、校验方式、停止位个数等)和其它相关属性。
2. 设定通信协议。
3. 打开通信端口，进行数据的传送和读入。
4. 关闭通信端口，在完成串行通信操作后，将串行通信端口的资源归还给操作系统。

## 5.3 数据库应用模块<sup>[19,20]</sup>

智能热膨胀检测系统的应用程序通过 C++ Builder 中 BDE 与 MS Access 数据库连接，主要任务是为了从数据库引擎中获得数据，并将数据显示给用户，并且可以

将用户对数据库的请求反馈到数据库引擎中,并通过 BDE 与数据库进行交互,从而完成用户与数据库的交互。再通过相关软件根据用户需要绘制温度-膨胀量变化曲线,从而可以确定膨胀系数,所需的临界点和 CCT 曲线。

### 5.3.1 数据库应用程序简介

数据库应用程序的开发是智能热膨胀检测系统的一个重要组成部分。C++ Builder 数据库应用程序的开发环境的核心部分是数据库引擎 (Borland Database Engine, Borland, 简称 BDE)。BDE 位于数据库应用程序和数据库之间,它可以给出一个本地或远程的数据库名称,这就是数据库别名 (Database Aliases),通过该别名来标识一个数据库资源的名称,它包含一系列参数。数据库应用程序是通过该数据库别名来进行数据库操作的,这样就使得数据库应用程序和数据库分隔开来。基于 BDE 的数据库应用程序可以通过 BDE 透明的访问本地和远程的数据库,而不需要了解数据库的具体位置和具体连接方式。

同时, BDE 为客户/服务器应用程序提供了统一的数据库接口 API (Application Program Interface, 应用程序公共接口),因此数据库应用程序对数据库的访问和数据库的类型完全无关,应用程序开发人员可以修改数据库的访问机制,而并不需要修改应用程序的代码。

用户可以通过 BDE 来访问本地或远程的数据库。BDE 通过不同的驱动程序直接访问常见的桌面数据库,包括广泛使用的 Access、dBase、FoxPro、Paradox, BDE 还可以通过连接 SQL Links 驱动程序来访问的网络中的 SQL 数据库如 Oracle、InterBase、SyBas、Informix、DB2 等。数据库应用程序所支持的数据库是 MS Access。

### 5.3.2 数据库应用程序中的构件

在 C++ Builder 中,与数据库应用程序相关的构件处于集成开发环境构件栏的数据访问 (Data Access) 和数据控制 (Data Control) 选项卡。

数据访问构件是一组非可视化的构件,为数据控制构件与数据源提供了一条访问数据库的通道。数据控制构件主要放置在客户应用程序表单中,作为数据库访问界面,完成数据的浏览、编辑、插入和删除等操作。用 C++ Builder 设计的数据库应用程序中存在着一个明显的层次结构如图 5.3.2.1 所示。

从图 5.3.2.1 中可以看出, C++ Builder 开发的基于 BDE 的数据应用程序通过三层机制实现与用户的交互,因此, C++ Builder 也需要提供实现这三层机制的构件。即数据访问构件、数据源构件和数据感知构件。

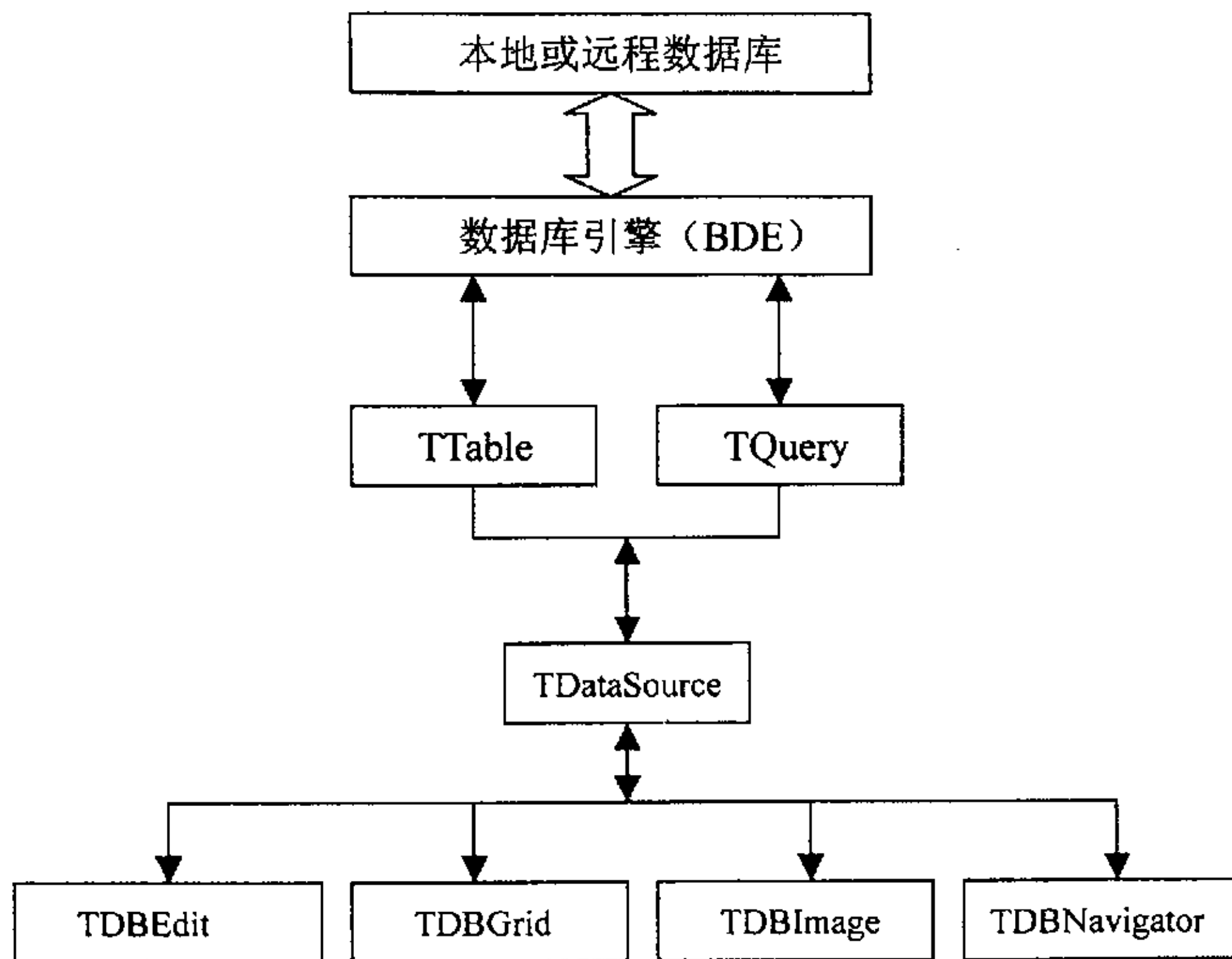


图 5.3.2.1 数据库应用程序结构图

数据访问构件也称为数据集构件，是实现数据库应用程序和 BDE 交互的构件，是数据访问的基础，最常用的数据访问构件主要包括以下两种：TTable 构件和 TQuery 构件，它们提供了访问数据库中数据的基本方法。

TTable 是用来访问数据库中的二维数据表，通过一定的过滤和排序等操作得到原数据表的一个数据映像，它为数据库应用程序提供了需要访问的数据的组合。其主要属性有：

**DatabaseName:** 指示与 TTable 构件相关联的数据库名称。

**TableName:** 确定 TTable 构件所要打开的数据库表格名。

**Active:** 表示 TTable 构件所确定的数据库表格文件是否被激活。

**FieldsValues:** 可以通过该属性来访问数据字段的值。

**ReadOnly:** 设置所访问的数据库表格是否可以被修改，true 表示不能修改。

**Exclusive:** 设置当前数据库表格的打开方式。

在系统中需要用到 TTable 构件的一些方法。主要进行数据库的打开、关闭和追加记录。数据库的打开可以把 Active 属性设为 true；或者通过该构件的 Open(void-Fastall.Open(void))方法打开。关闭表格时可以把 Active 属性设为 false；或者通过该构件的 Close(void-Fastall.Close(void))方法打开。追加记录则用 Append(void-Fastall.Append(void))方法来实现。

TQuery 是支持 SQL 查询的数据库存取构件，可以实现对数据库的结构化查询

操作，并从数据库中返回符合查询条件的纪录，通过数据源（TDataSource）将查询数据送到数据库控制对象。

TdataSource 构件是数据源构件，它是数据库控制构件连接数据集构件的桥梁，为数据集构件和数据感知构件之间的数据交互提供一种更有效、更安全的数据流管道。数据集构件通过 BDE 可以实现对数据库的访问，但它本身不能对数据库的信息进行显示；而数据控制构件能提供可视化界面，显示信息，但不具备访问数据库的能力，而 TdataSource 可以将两者结合起来，用户才能交互的对数据库中的数据信息进行一系列的查询、修改、插入和删除等操作。TdataSource 构件的主要属性有：

DataSet: 确定数据源构件在访问数据库时所使用的数据集构件的名称。

State: 可以反映与数据源构件相关联的数据集构件的当前状态。

Enabled: 控制是否在数据存取构件中显示数据库信息。

系统中的数据库应用模块所连接的后端数据库是 MS Access, MS Access 是功能完备的关系数据库管理系统 (RDBMS), 它提供管理大量数据所需要的数据定义、数据操作和数据控制特征。

数据应用模块的流程图如图 5.3.2.2 所示。

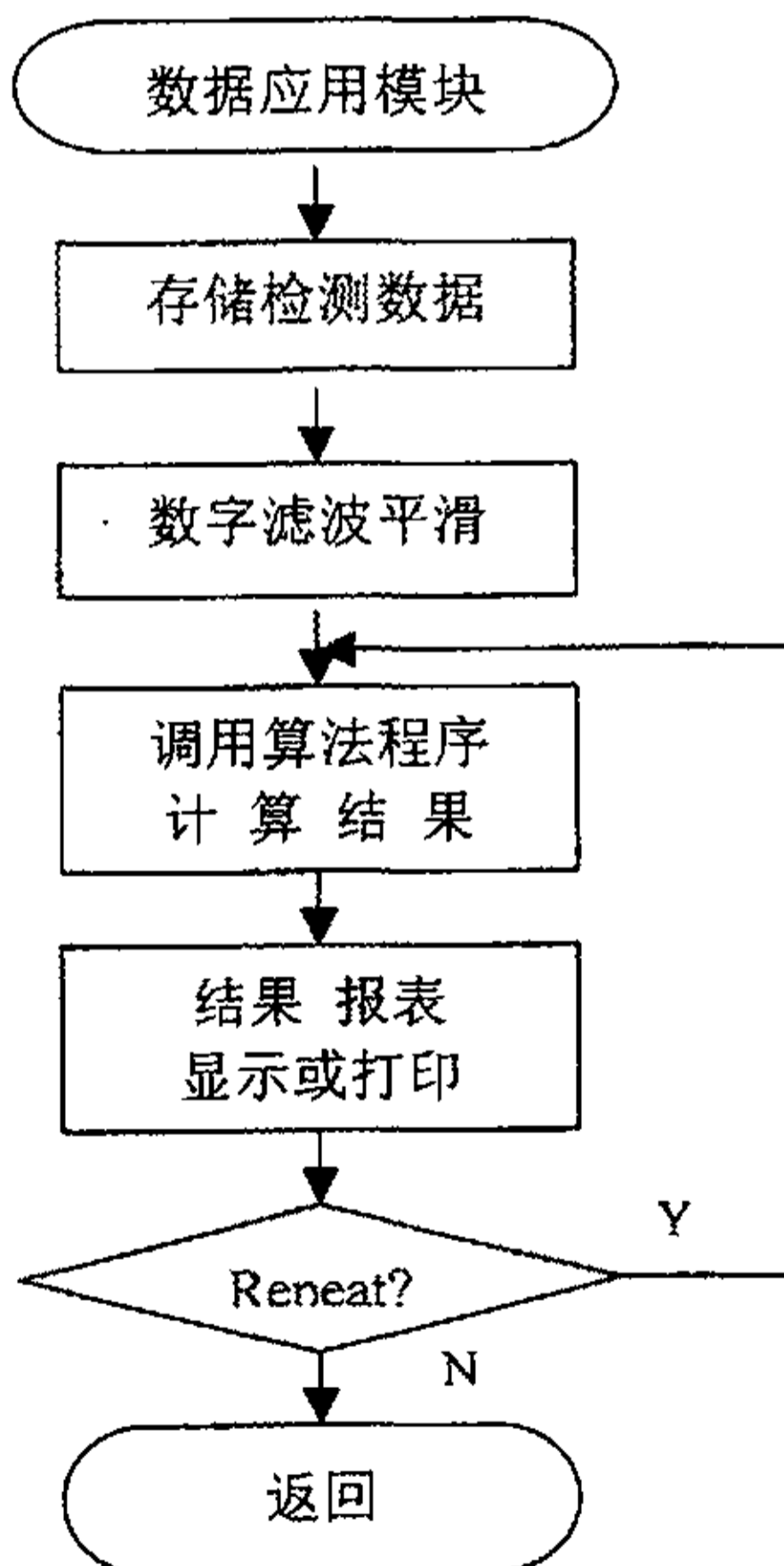


图 5.3.2.2 数据库应用模块流程图

## 6. 系统应用

智能化热膨胀检测系统能够测定材料的热膨胀系数，测定材料的临界点（ $A_{c1}$ 、 $A_{c3}$ 、 $A_{r1}$ 、 $A_{r3}$  和  $M_s$ ）、不同冷却速度下的冷却曲线以及 CCT 曲线的测定。在系统的软、硬件调试通过后，运用系统对 PCrNi1MoA 这一材料的膨胀系数、临界点以及不同冷却速度下的冷却曲线进行了检测，并绘制了其 CCT 图。通过实验结果与文献资料<sup>[47]</sup>的对比，研究了检测结果的准确性、稳定性和复现性（再现性）。

### 6.1 检测过程

首先把样品制备成  $\phi 4 \times 50\text{mm}$  的细长杆状，两端均为平面，端面磨至与样品轴线垂直。在靠近试样两端的位置，各有一个台阶，直径为 5mm，在每个台阶上各钻一个直径为 2mm 的小孔，以便插入热电偶，试样如图 6.1.1 所示。材料成分如表 6.1.1 所示。

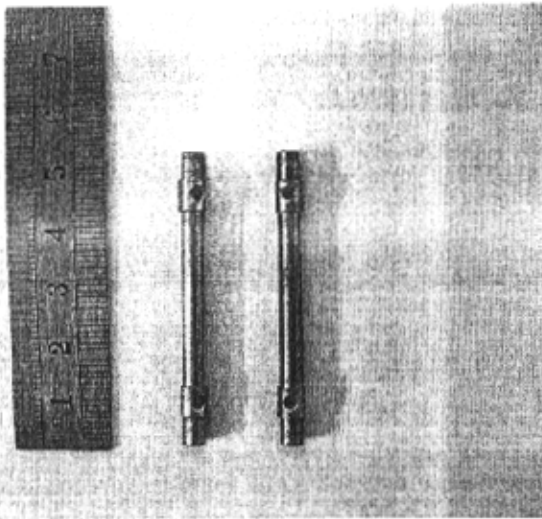


图 6.1.1 热膨胀试样图

表 6.1.1 PCrNi1MoA 试样成分

成分	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S
含量(w%)	0.35	0.33	0.43	1.50	1.55	0.24	0.013	0.018

开始检测前，将试样放入石英载物管中，试样的一端与载物管端面接触，试样的另一端面与石英组件中的石英杆接触，接触面需要保证接触良好，试样在载物管内放好后，将热电偶的触点放入试样台阶的小孔中，热电偶的触点需与试样紧密接触。在载物管外套一个石英管，接入冷却气导管。冷却气导管通过一个电磁阀和一

个流量计后接在氮气瓶上，通过数字显示调节仪控制电磁阀的闭合，来保证冷却气的开和关。随后调整加热炉支架上的调节螺栓，使炉膛的轴线与载物管的轴线基本重合，随着加热炉沿导轨缓慢移动，载物管即可进出炉膛。加热时，应使试样处于炉膛中部。

检测时打开水循环开关，接通各部分电源，运行联机应用程序，首先进入参数设置页面 (FormSetting)，设置检测所需的各项参数 (如图 6.1.2 所示)；然后调用温控仪程序进入温度程序设定页面，设置加热和冷却过程的各项参数 (如图 6.1.3 所示)，试样加热应保持匀速升温；随后松开 DA-1 型直流差动变压器位移传感器的固定螺钉，通过调节位置调节旋钮，使位移传感器输出定位于零输出点上。这样，所有的准备工作完成，即可进入检测阶段。

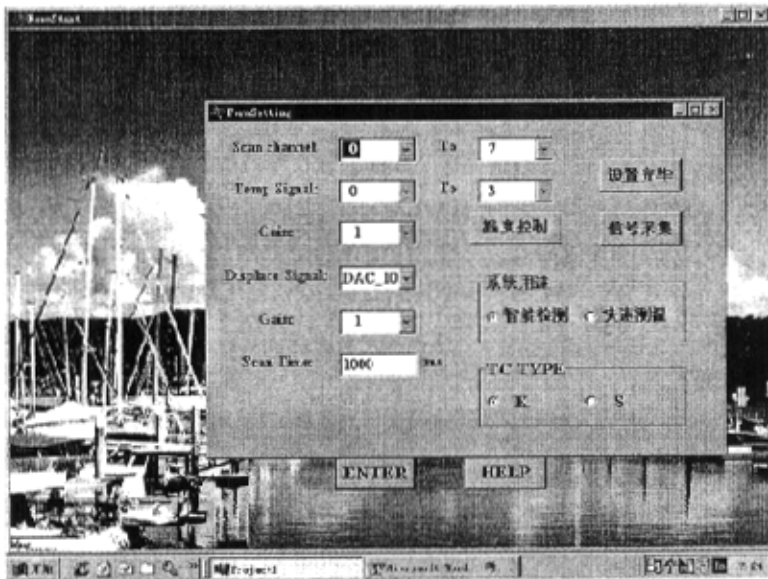


图 6.1.2 参数设置界面

检测时，系统首先将设定的温度程序通过串口通信传递给下位机 (如图 6.1.4 所示)，下位机 (温度控制仪) 接收到数据后，即按照所设定的程序输出控制信号，加热炉开始升温；冷却时，通过水循环冷却和通气冷却的共同作用，得到各种不同的冷却速度。在加热和冷却的过程中，系统进行数据采集，并通过实时监控页面 (FormAIRead) 显示被测参量的状态，同时把所有的原始记录数据导入后端数据库——MS Access 中贮存，以备后面程序进行数据处理 (如图 6.1.5 所示)。

当所设定的温度程序结束后，数据采集模块的任务也就结束了，这时进入数据库应用模块程序，对数据进行后台处理，得出所需结果，在通过相关软件进行所需

曲线的绘制。



图 6.1.3 温度程序设置

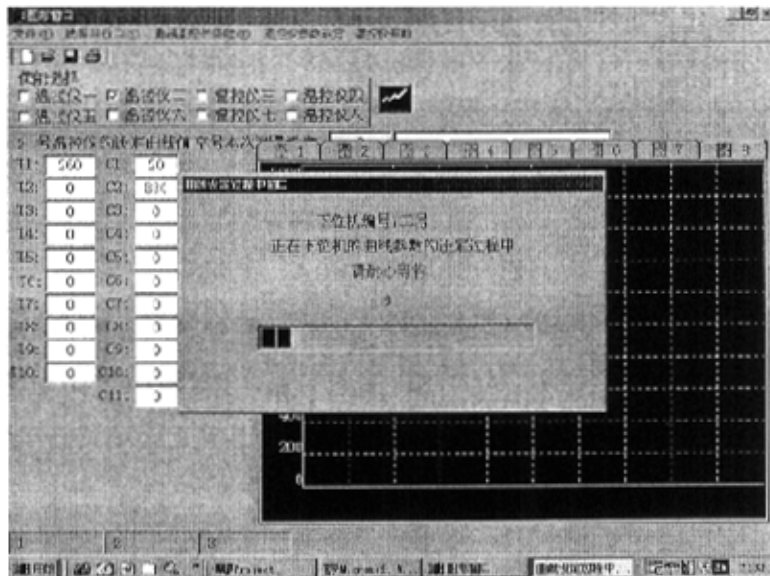


图 6.1.4 温度设定值传送给下位机



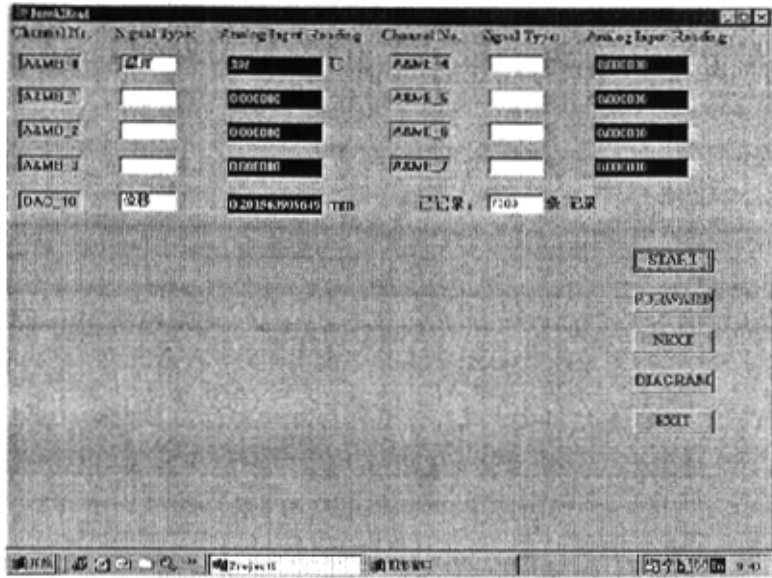


图 6.1.5 数据采集过程

## 6.2 临界点的测定

钢发生固态相变时，常伴随着体积的不连续变化，从而引起热膨胀的不连续变化。因而从图 6.2.1 的加热过程膨胀量变化曲线和图 6.2.2 的淬火过程膨胀量变化曲线中，通过切线法可以判断出  $A_{C1}$ 、 $A_{C3}$  和  $M_s$  点。测得该材料的  $A_{C1}$  为  $745^{\circ}\text{C}$ ， $A_{C3}$  为  $786^{\circ}\text{C}$ 、 $M_s$  点为  $296^{\circ}\text{C}$ ， $M_f$  为  $120^{\circ}\text{C}$ 。

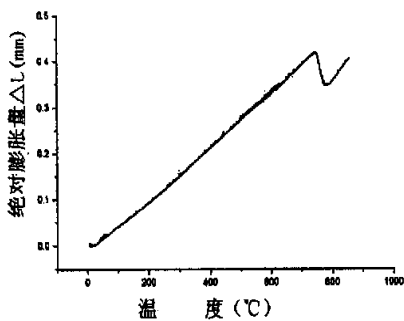


图 6.2.1 加热过程膨胀量变化曲线

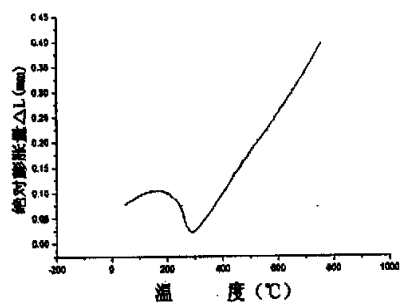


图 6.2.2 淬火过程膨胀量变化曲线

将测得的临界点与文献给出的指相比较，文献<sup>[47]</sup>给出的材料（成分(%)：C0.37、Si0.27、Mn0.42、Cr1.53、iN1.50、Mo0.27、P0.015、S0.018）的  $A_{C1}$  为  $750^{\circ}\text{C}$ ， $A_{C3}$

为 800℃,  $M_s$  点为 290℃,  $M_f$  为 107℃。二者并不完全吻合。这主要是由加热温度和加热速度, 碳含量和合金成分以及原始组织的不同造成的。随着加热速度增大,  $A_{C1}$  和  $A_{C3}$  不断增大。同时,  $A_{C1}$  和  $A_{C3}$  直接同碳的扩散速度呈正比, 对于弥散分布的细晶粒或介稳定的组织, 相界面较多, 有利于奥氏体的形核和长大, 相变较易进行, 且提早发生。系统试验所用材料为淬火组织, 而文献提供的材料是退火组织, 退火组织比淬火组织较为稳定, 晶粒也较粗些, 故相应地有较高的  $A_{C1}$  和  $A_{C3}$ 。同时合金元素会影响碳在奥氏体中的扩散速度。Ni 能提高碳在奥氏体中的扩散速度, 故加快奥氏体的形成速度。Si, Mn 对碳在奥氏体中的扩散能力影响不大。而 Cr、Mo 等碳化物形成元素显著降低碳在奥氏体中的扩散速度, 故大大减慢奥氏体的形成速度。对于马氏体转变温度的影响最为显著的则是碳含量的影响, 随着碳含量的增加,  $M_s$  和  $M_f$  呈比例下降。当含碳量在 0.6% 以下, 碳对降低  $M_f$  的影响比降低  $M_s$  显著。因而随着碳含量的增加  $M_f$  点急剧降低, 不断扩大马氏体转变温度范围。合金元素的影响则没有碳那么强烈。Si 基本上没有影响, 而除 Co、Al 提高  $M_s$  点外, 其余的各元素都降低  $M_s$  点。同时随着含碳量的增加, 合金元素的起的作用越显著。由于以上因素的综合作用, 造成了测量值与文献的不完全相同<sup>[7]</sup>。

### 6.3 热膨胀系数的测定

线性热膨胀指的是与温度变化相应的样品单位长度上的长度变化, 以  $\Delta L/L_0$  符号表示, 其中  $\Delta L$  是检测到的长度变化,  $L_0$  是基准温度  $t_0$  下的样品长度。线膨胀一般以百分率来表示。

平均线膨胀系数: 在  $t_1$  和  $t_2$  温度间的平均线膨胀系数  $\alpha$  的定义为<sup>[48,49]</sup>

$$\alpha = \frac{(L - L_1)}{L_0(t_2 - t_1)} = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta t} \quad (6.1)$$

式中:  $\alpha$  ——单位温度下的线性热膨胀 (单位:  $^{\circ}\text{C}^{-1}$ , 常用  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )

$L_1$  —— $t_1$  温度下的样品长度

$L_2$  —— $t_2$  温度下的样品长度

考虑到石英组件的热膨胀影响, 应用下式计算平均线膨胀系数:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta t} + \alpha_q \quad (6.2)$$

式中,  $\alpha_q$  --石英玻璃的平均线膨胀系数, 一般采用  $0.55 \times 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$ 。

图 6.2.1 即为 PCrNi<sub>1</sub>Mo(A)膨胀量与温度之间的关系图。根据系统检测的数据, 计算出所用试样在各温度下的平均线膨胀系数如表 6.3.1 所示。

临界点和热膨胀系数检测应用实验的结果表明：该系统可以测定金属材料的膨胀系数以及材料的临界点，而且检测精度较高（位移量的检测精度为1微米,温度的检测精度为1℃）。

表 6.3.1 PCrNi1Mo(A)平均线膨胀系数

温 度 (℃)	20~ 100	20~ 200	20~ 300	20~ 400	20~ 500	20~ 600	20~ 700	20~ 800
$\alpha$ ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	11.56	11.88	12.13	12.60	12.88	12.99	12.85	9.83
文献值 <sup>[47]</sup> ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )	11.7	12.1	12.4	12.9	13.2	13.4	13.3	9.7
偏 差	1.2%	1.8%	2.2%	2.3%	2.4%	3.1%	3.4%	1.3%

## 6.4 CCT 曲线的测定

国内的常用的热膨胀仪一般只能用于测试过冷奥氏体转变的数据，而不能生成 CCT 图，多采用手工根据测定的相变数据绘制曲线，对图上的文字需要先打印再粘贴复印，同时由于 CCT 曲线是绘制在半对数坐标轴上的，即时间轴（横坐标）用对数坐标，温度轴（纵坐标）用实数坐标，这给曲线的绘制带来很大的不便。首先，标注每个时间点需要计算其对数；其次，时间坐标为对数，其特点是不等距。如果要标定（100℃，50s）这个点，这时横坐标应在  $\log 50 \approx 1.7$  的位置，手工很难精确标明。因而手工标注工作量很大，即浪费时间又不精确美观。现在利用相关的绘图软件实现了计算机 CCT 曲线的自动绘图，节省了人力，大大提高了所绘曲线的精确度。

由于从检测中的得到的数据有限，难以直接绘制出光滑的 CCT 曲线，所以利用三次样条插值，对所给的检测数据进行插值<sup>[34,50-52]</sup>。其基本原理如下：

对于给定插值点  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ , 设  $x_i \in [a, b]$ ,  $x_i < x_{i+1}$ , 函数  $S(x)$  在  $[a, b]$  上满足下列三个条件：

1.  $S(x_i) = y_i, i = 0, 1, \dots, n$ ;
2.  $S(x)$  在  $[a, b]$  上有一阶和二阶连续导数，即在连接点处二阶导数连续，采用边界条件  $S''(x_0) = S''(x_n) = 0$ 。
3. 对  $x \in [x_i, x_{i+1}]$ ,  $S(x)$  为三次多项式，则  $S(x)$  即为  $(a, b)$  上的三次样条多项

式。求解过程如下：

记  $S''(x_i) = M_i, i = 0, 1, \dots, n$ ,  $S(x)$  在每个子区间  $[x_{i-1}, x_i]$  上是三次多项式, 故  $S''(x)$  在  $[x_{i-1}, x_i]$  上为线性函数, 可表示为

$$S''(x) = M_{i-1} \frac{x_i - x}{h_{i-1}} + M_i \frac{x - x_{i-1}}{h_{i-1}} \quad (6.3)$$

这里  $h_{i-1} = x_i - x_{i-1}$ , 对上式积分两次, 并利用插值条件  $S(x_{i-1}) = y_{i-1}, S(x_i) = y_i$  可得到

$$S(x) = \frac{(x_i - x)^3}{6h_{i-1}} M_{i-1} + \frac{(x - x_{i-1})^3}{6h_{i-1}} M_i + \left( y_{i-1} - \frac{h_{i-1}^2}{6} M_{i-1} \right) \frac{x_i - x}{h_{i-1}} + \left( y_i - \frac{h_{i-1}^2}{6} M_i \right) \frac{x - x_{i-1}}{h_{i-1}} \quad (6.4)$$

对式(6.4)求导得

$$S'(x) = -M_{i-1} \frac{(x_i - x)^2}{2h_{i-1}} + M_i \frac{(x - x_{i-1})^2}{2h_{i-1}} + \frac{y_i - y_{i-1}}{h_{i-1}} - \frac{M_i - M_{i-1}}{6} h_{i-1} \quad (6.5)$$

利用条件  $S'(x_i - 0) = S'(x_i + 0), i = 1, 2, \dots, n-1$  可得方程组:

$$\begin{cases} 2M_0 + \alpha_0 M_1 = \beta_0 \\ (1 - \alpha_1)M_0 + 2M_1 + \alpha_1 M_2 = \beta_1 \\ \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \\ (1 - \alpha_{n-1})M_{n-2} + 2M_{n-1} + \alpha_{n-1} M_n = \beta_{n-1} \\ \alpha_n M_{n-1} + 2M_n = \beta_n \end{cases} \quad (6.6)$$

式中:  $\alpha_i = \frac{h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i} \quad (6.7)$

$$\beta_i = 6 \frac{(y_{i+1} - y_i)/h_i - (y_i - y_{i-1})/h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i} \quad (6.8)$$

求得  $M_0, M_1, M_2, \dots, M_n$  即可解出式 (6.4) 中得  $S(x)$ 。

应用程序所用得三次样条函数插值采用的方法如下:

首先按式 (6.7) 和式 (6.8) 计算出方程组 (6.6) 的系数, 然后用追赶法求解方程组 (6.6) 得到  $M_0, M_1, M_2, \dots, M_n$ 。然后利用公式 (6.4) 计算分段函数  $S(x)$ 。

源程序中:

数组 x——存放已知节点; 数组 y——存放已知节点的函数值;

n——已知节点的个数; m——插值节点个数;

数组  $t$ ——存放插值节点； 数组  $f$ ——输出插值节点的函数值。

将所得检测数据及用三次样条插值法插值所得的数据作为描绘曲线的点，再利用相关软件将发生相同相变的开始点和结束点在时间—温度半对数坐标系中连接成平滑曲线，在标上冷却曲线，就可绘出试样的过冷奥氏体连续冷却转变曲线。

从下列测得的不同冷却速度下的膨胀量变化曲线图中（图 6.4.1 到图 6.4.12，冷却速度分别为  $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $60^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $120^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $240^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $320^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $480^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $960^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $1440^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 、 $37^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $90^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 、 $3^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 、 $9^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ）通过切线法确定各相变发生转变的开始温度和完了温度（如表 6.4.1 所示）。

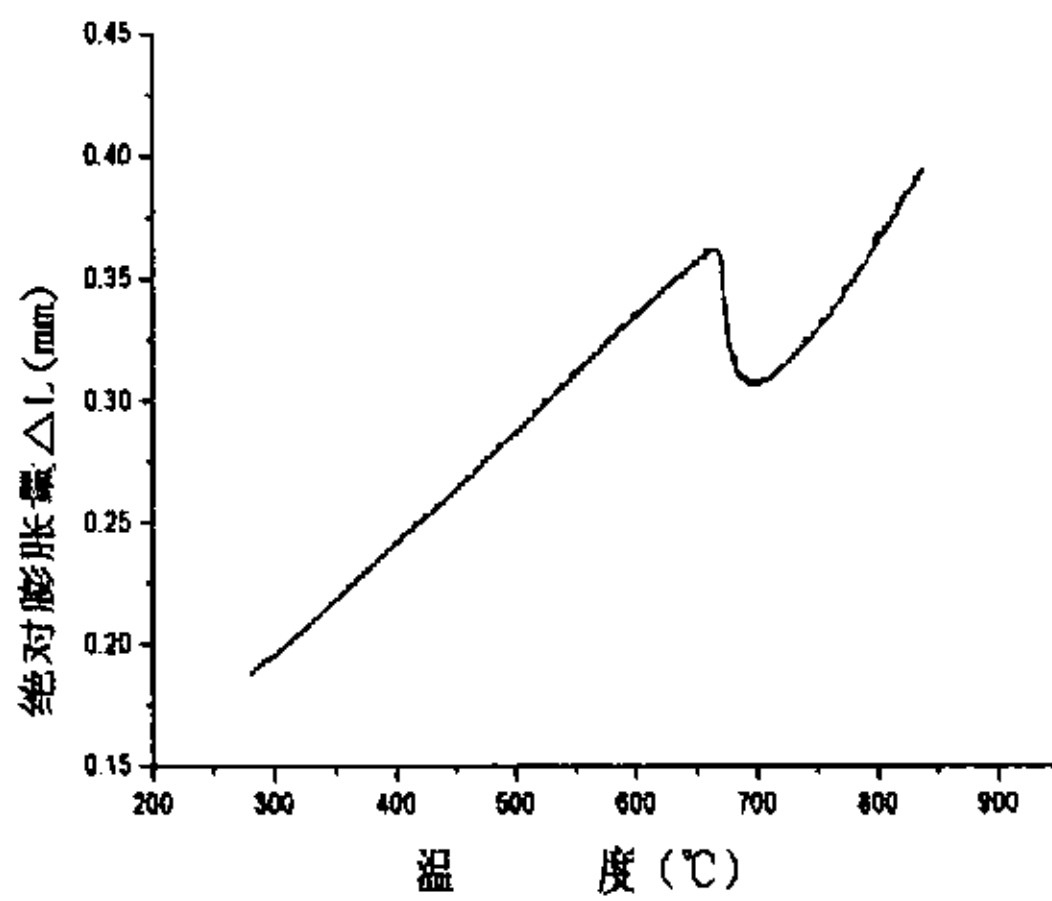


图 6.4.1 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度:  $30^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )

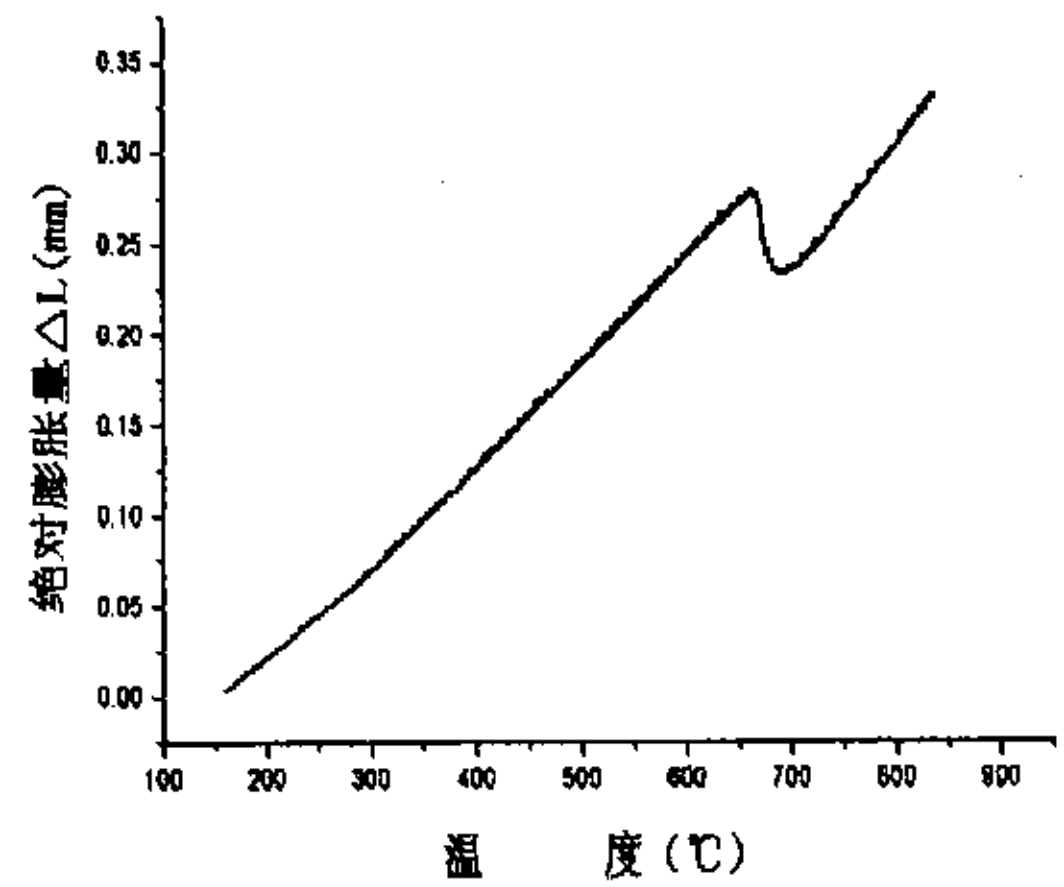


图 6.4.2 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度:  $60^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )

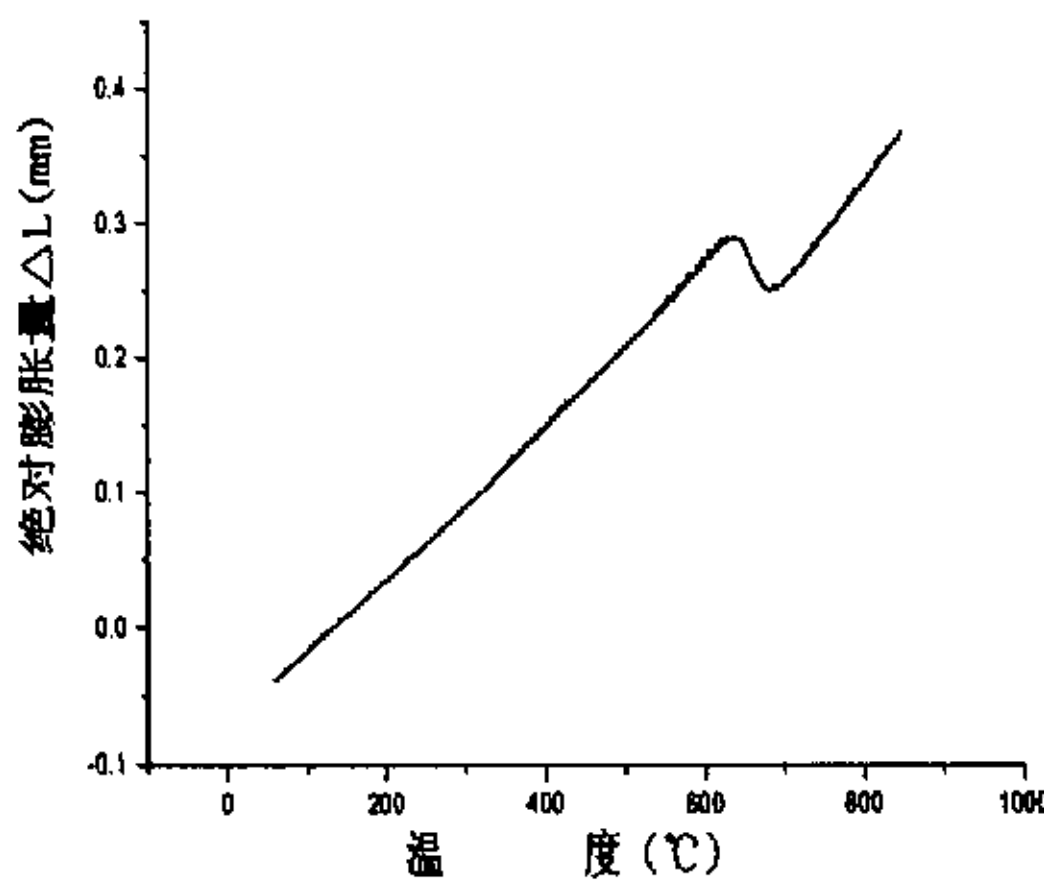


图 6.4.3 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度:  $120^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )

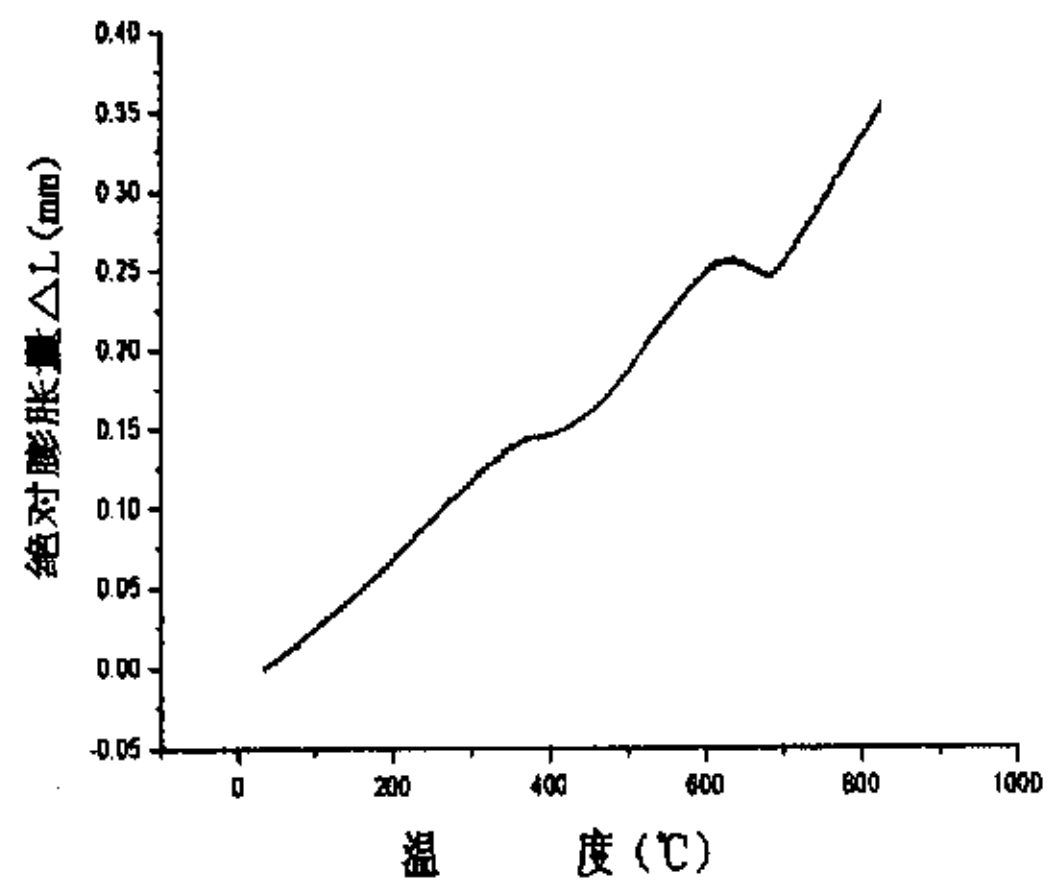


图 6.4.4 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度:  $240^{\circ}\text{C}/\text{h}$ )

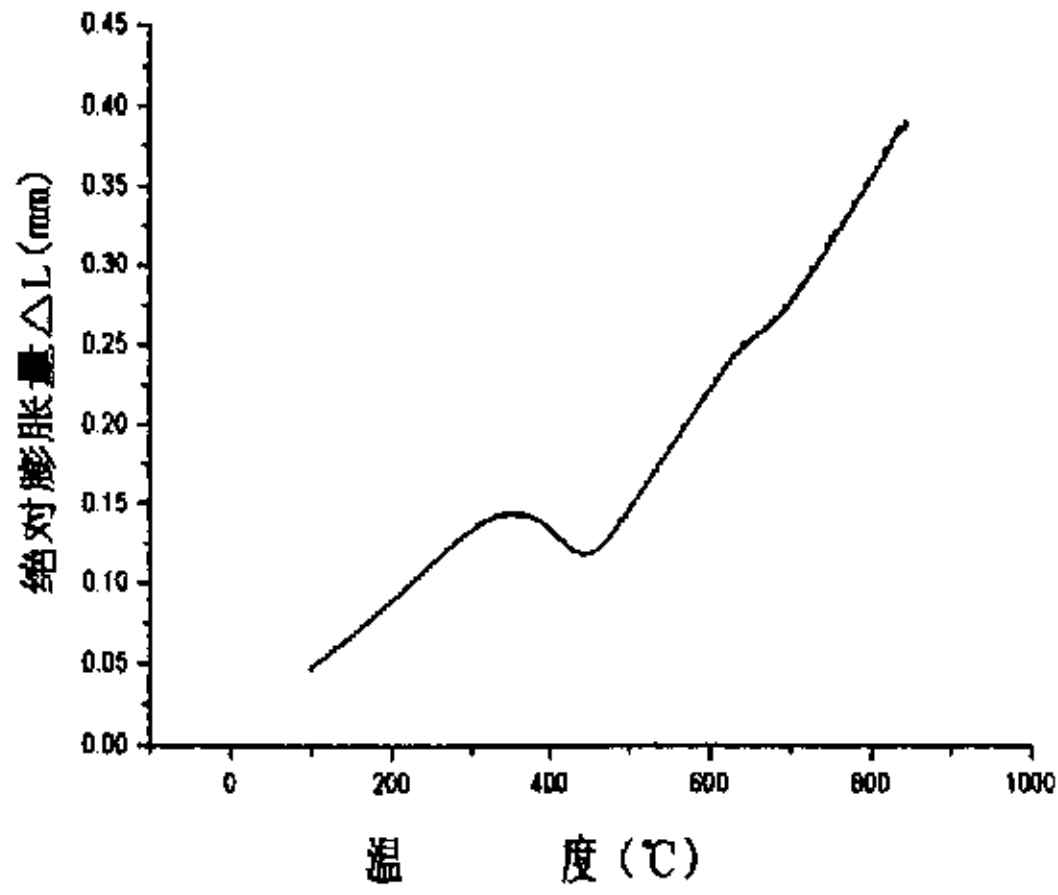


图 6.4.5 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 320°C/h)

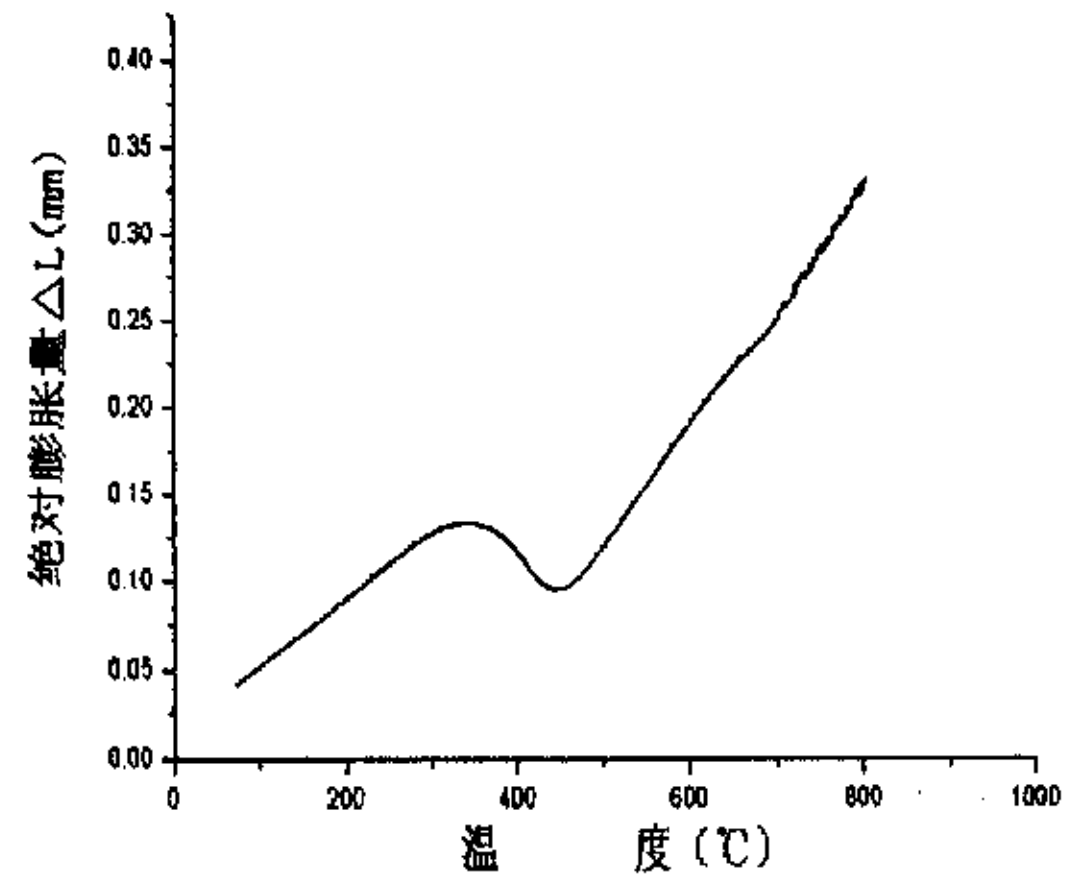


图 6.4.6 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 480°C/h)

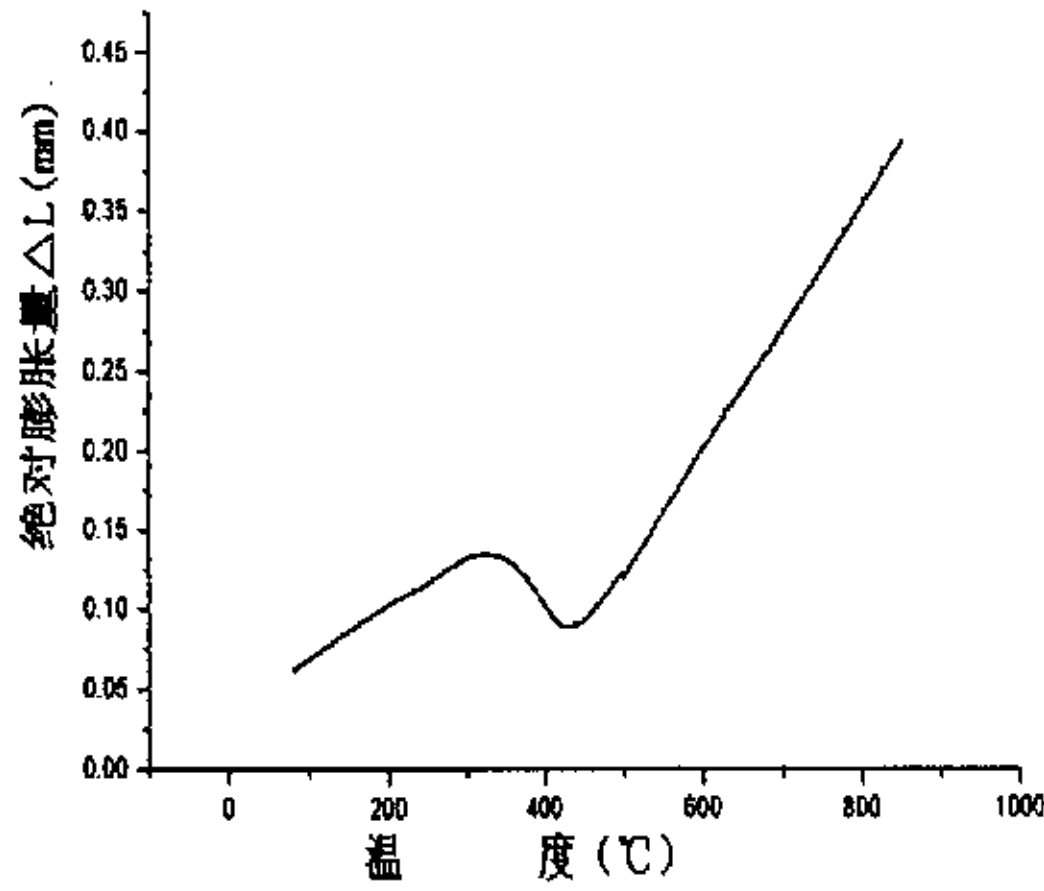


图 6.4.7 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 960°C/h)

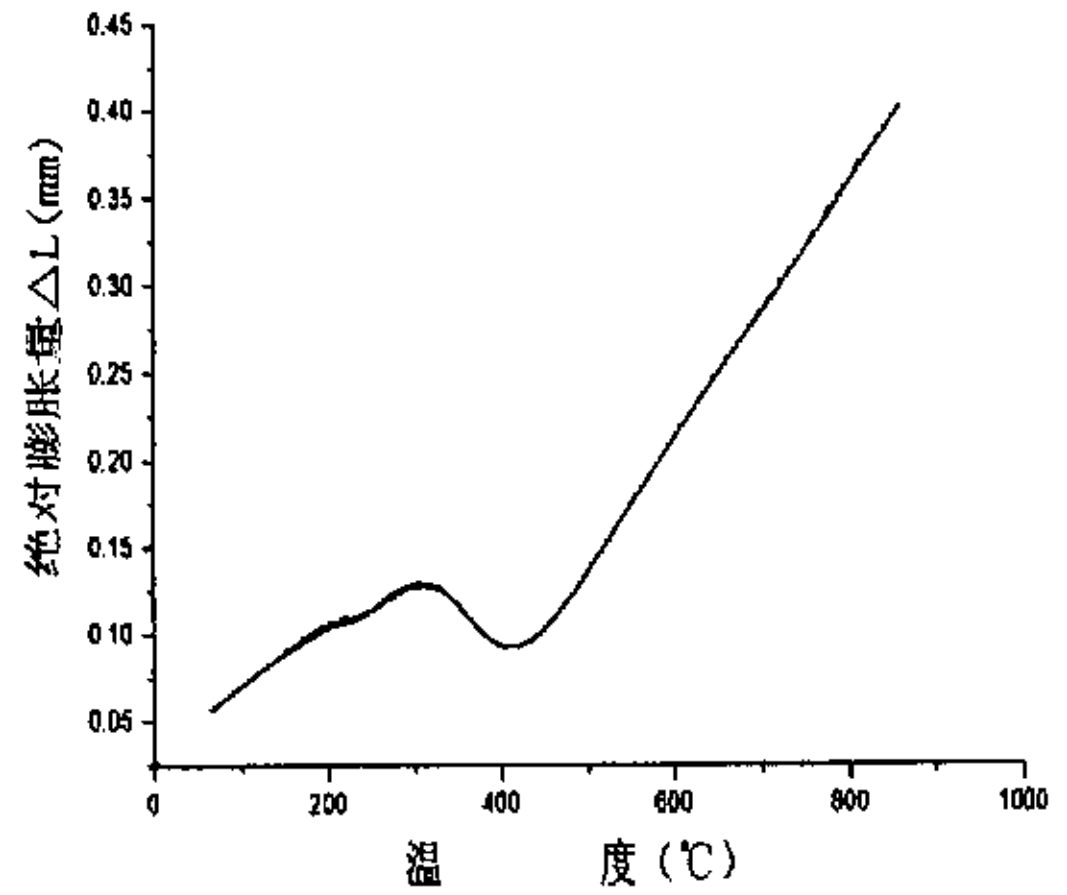


图 6.4.8 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 1440°C/h)

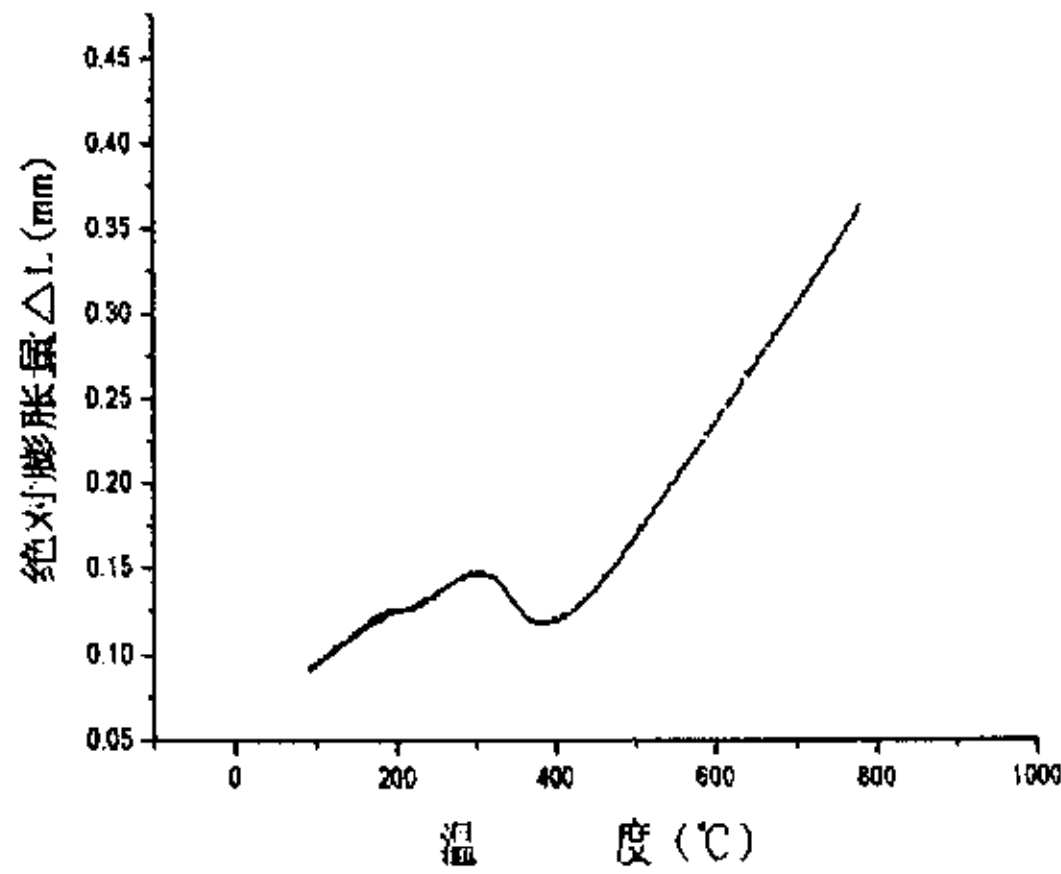


图 6.4.9 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 37°C/min)

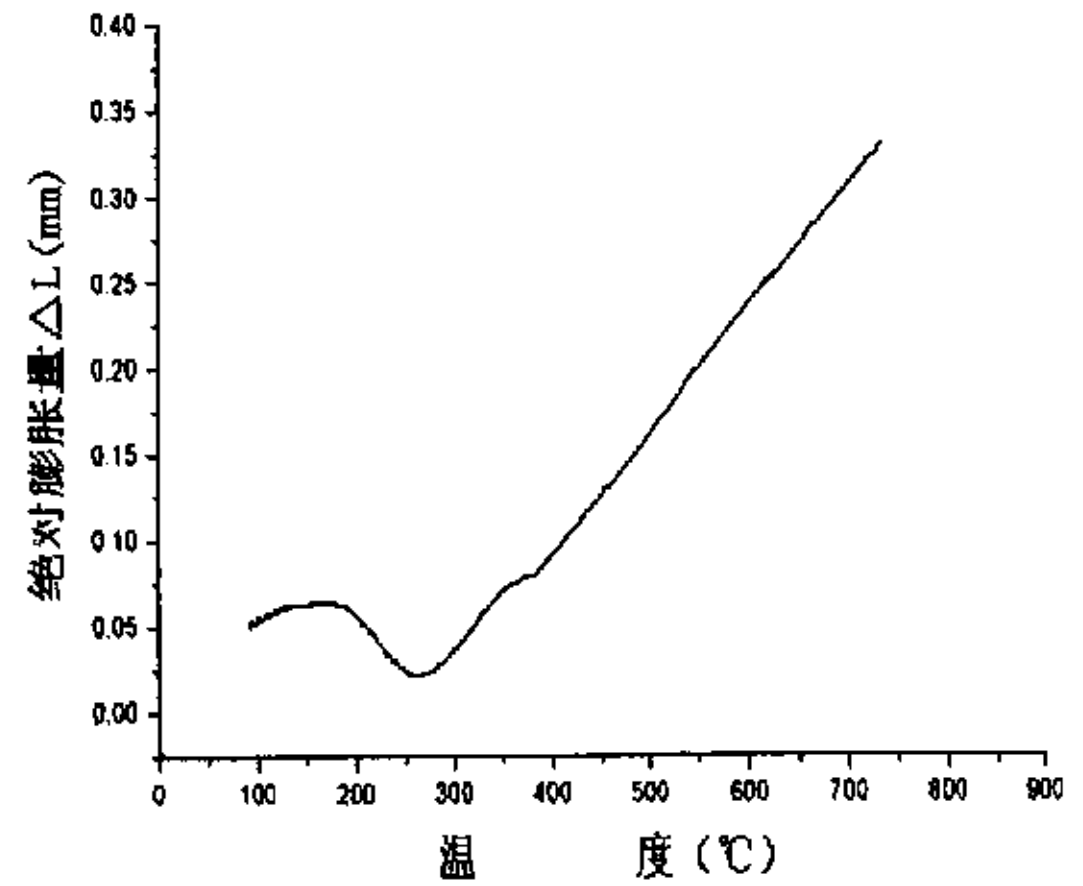


图 6.4.10 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 90°C/min)

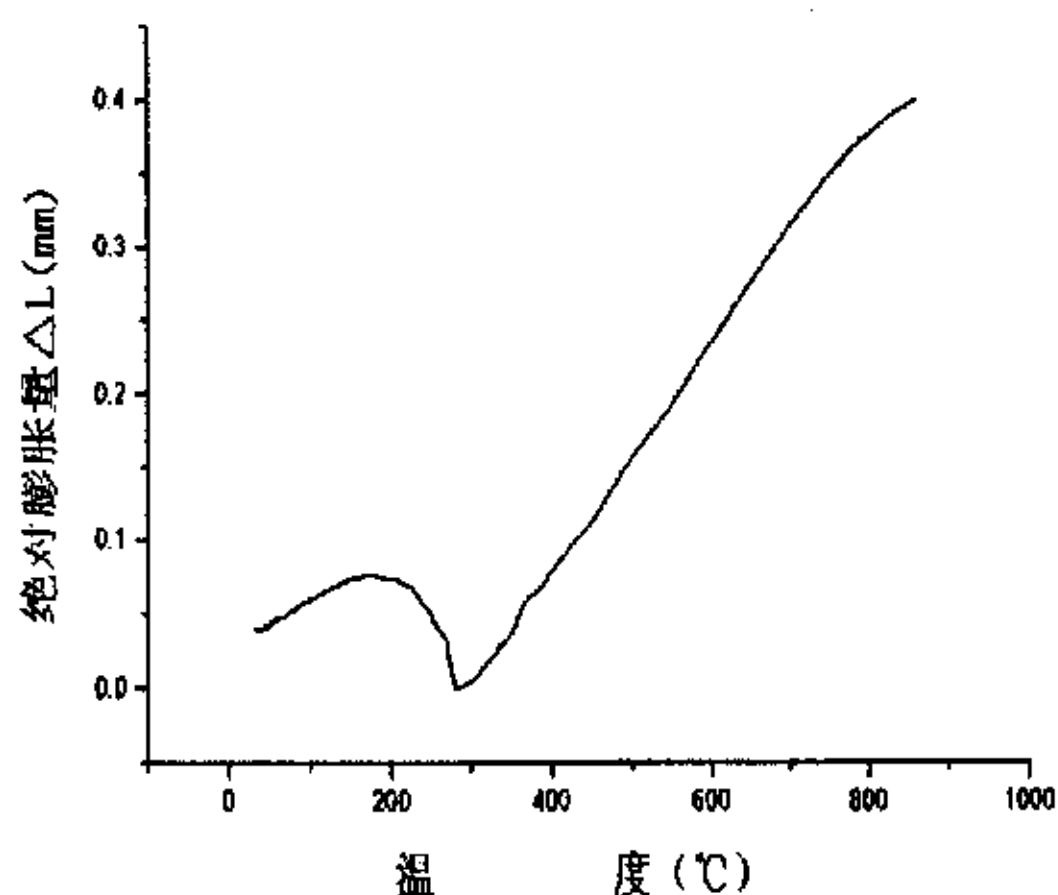


图 6.4.11 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 3°C/s)

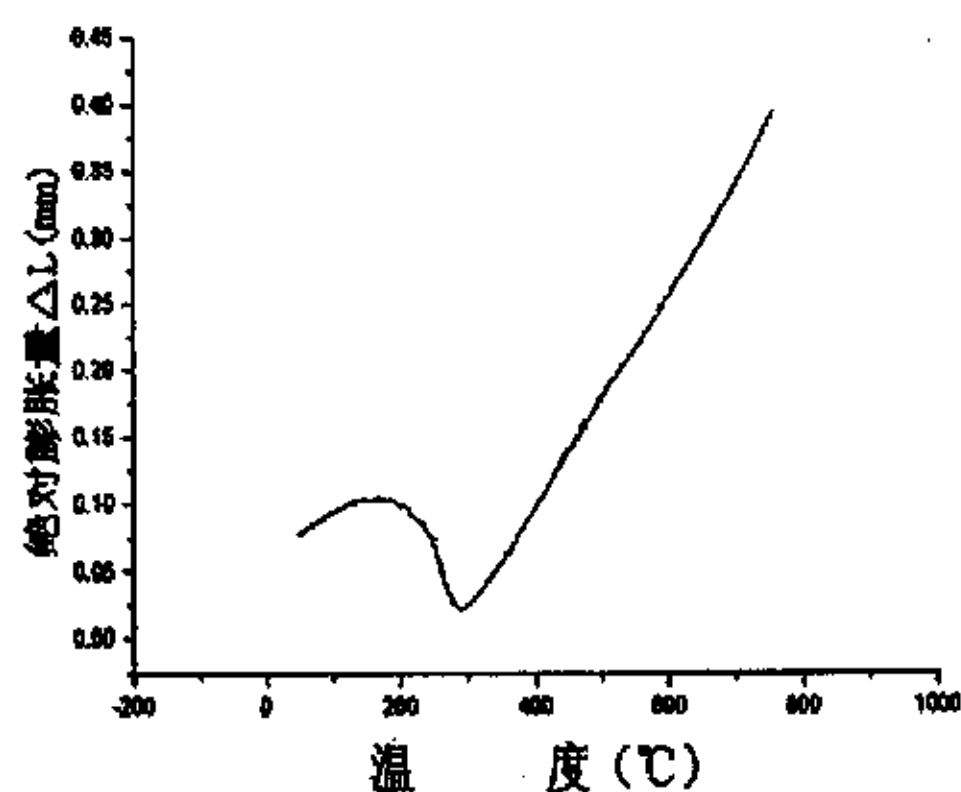


图 6.4.12 膨胀量变化曲线图  
(冷却速度: 9°C/s)

表 6.4.1 相转变开始温度和完了温度表

转变速度	P 转变开始(°C)	P 转变结束(°C)	B 转变开始(°C)	B 转变结束(°C)	M 转变开始(°C)	M 转变开始(°C)
30°C/h	717	665				
60°C/h	712	660				
120°C/h	702	633				
240°C/h	692	630	480	363		
320°C/h	688	640	479	348		
480°C/h	682	659	472	323		
960°C/h			457	310		
1440°C/h			447	295	248	207
37°C/min			422	294	260	178
90°C/min			385	350	275	150
3°C/s					287	137
9°C/s					296	120

将表 6.4.1 中的检测数据及用三次样条插值法所计算的数据作为描绘曲线的点, 将其发生相同相变的开始点和结束点在时间-温度的半对数坐标轴中标定并将其连接, 同时标上不同冷却速度的冷却曲线, 即可得到该试样的 CCT 曲线图, 如图 6.4.13 所示。

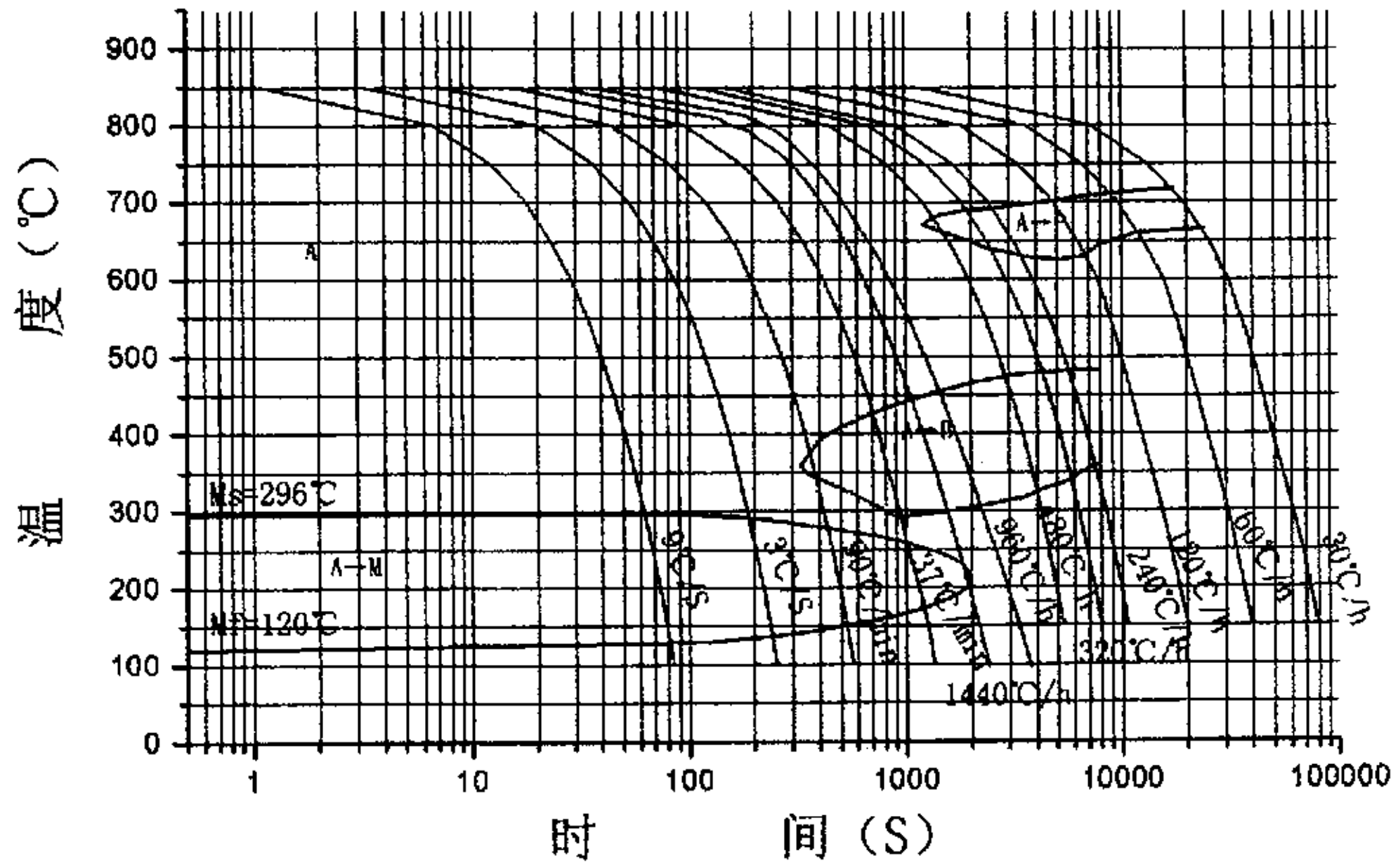


图 6.4.13 PCrNi1MoA 钢的连续冷却转变曲线图

合金成分 (%): C0.35、Si0.33、Mn0.43、Cr1.50、Ni1.55、Mo0.24、P0.013、S0.018  
 奥氏体化温度: 850°C      原始状态: 淬火

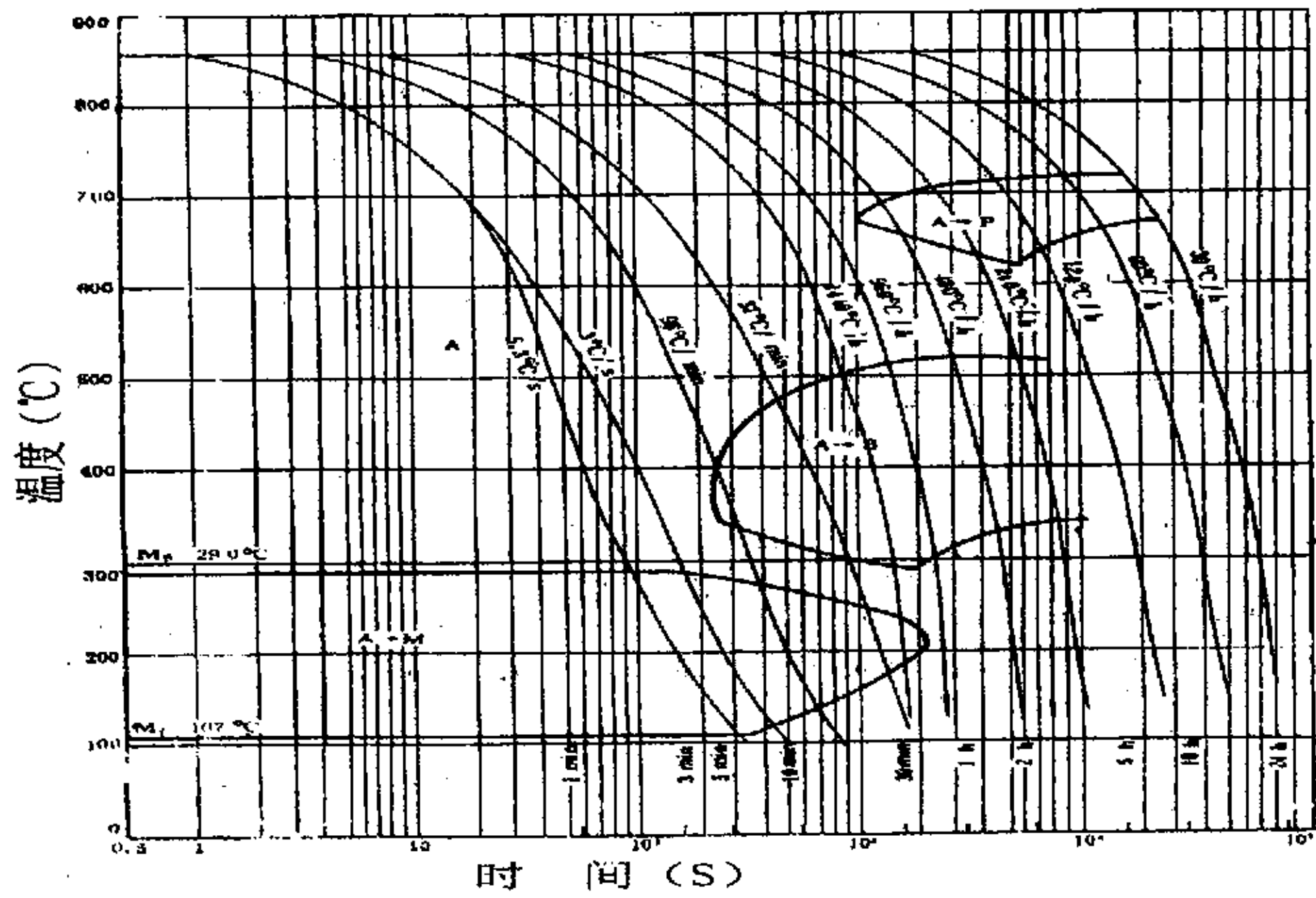


图 6.4.14 PCrNi1MoA 钢的连续冷却转变曲线图<sup>[47]</sup>

合金成分 (%): C0.37、Si0.27、Mn0.42、Cr1.53、Ni1.50、Mo0.27、P0.015、S0.018  
 奥氏体化温度: 860°C      原始状态: 退火

测定的 CCT 曲线图与文献<sup>[47]</sup>所提供的基本吻合, 相变区域有所偏移, 这主要是



由于合金元素含量的不同引起的。非碳化物形成元素 Si 增加过冷奥氏体的稳定性，推迟贝氏体转变的作用比推迟珠光体转变的作用更明显，同时降低贝氏体转变温度，提高珠光体最大转变速度的温度，使珠光体和贝氏体转变区分离。非碳化物形成元素 Ni 也增加过冷奥氏体的稳定性，推迟珠光体和贝氏体转变。Cr、Mn 为中、弱碳化物形成元素，它们都有推迟珠光体和贝氏体转变的作用，推迟贝氏体转变转变更强烈些。强碳化物形成元素 Mo 当它固溶于奥氏体中，增大过冷奥氏体稳定性，而且推迟珠光体转变的作用比推迟贝氏体转变的作用更明显。同时 Mo 还具有降低贝氏体转变温度，升高珠光体转变最大转变速度的温度的作用<sup>[7]</sup>。上述合金元素的复合作用与单独使用其中某一元素的作用形式不同，与不是各种元素的简单叠加，其综合作用的结果使的试验测定的 CCT 图如图 6.4.13 所示。

### 6.5 系统复现性（再现性）的判断<sup>[53-55]</sup>

由于测试过程中固有的不可避免的偶然误差造成几次相同条件的测试结果一般是不会相同的，引起测试结果变化的其他因素还有操作人员、仪器设备和环境（温度、湿度）等。复现性是用来表征在改变了测量条件下，同一被测量结果之间的一致性，又称为再现性。改变的条件可包括测量原理、测量方法、观测者、测量仪器、参考测量标准、地点、使用条件和时间等。在实验中改变的条件主要指地点、使用的周围环境和测量时间。

上述的“一致性”是定量的，可以用复现性条件下对同一量进行重复测量所得结果的分散性定量地表示。这个表示测量结果分散性的量，通常用贝塞尔公式算得（如示 6.9 所示），被称为“复现性标准差”，记为  $s_R$ 。

$$s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.9)$$

下标 R 被称为“复现极限”。它是复现性条件下测量结果之差以 95% 的概率所存在的区间。即测量结果之差落在 R 这个区间内或这个差  $\leq R$  的概率为 95%。可用  $R = 2\sqrt{2}s_R = 2.83s_R$  来表示。通常可以利用复现极限来了解测量方法的不确定度，并用来评定测量结果是否符合要求。

$$\text{对于实验标准[偏]差 } s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (6.10)$$

是单次观察值  $x_i$  的实验标准[偏]差,  $\frac{s}{\sqrt{n}}$  才是  $n$  次测量所得算术平均值  $\bar{x}$  的实验标准[偏]差, 它是  $\bar{x}$  分布的实验标准[偏]差, 记为  $s(\bar{x})=s(x)/\sqrt{n}$ 。通常用  $s(x)$  表示测量仪器的重复性和复现性, 如上面的  $s_R$ , 也可用百分比给出复现性指标, 即  $\delta_R = s_R / \bar{x}$ 。用  $s(\bar{x})$  评价测量结果的分散性, 即测量的不确定度。

由于  $s(\bar{x})$  与测量次数  $n$  的平方根成反比, 可以用提高测量次数的方法来提高结果的精确度, 当  $n \leq 10$  时, 通过增加测量次数来减小标准差的效果明显; 但是当  $n > 10$ ,  $s(\bar{x})$  减小的非常缓慢。因此一般情况下, 测量次数选在 10 次左右<sup>[55]</sup>。

在试验中, 分别对某一相同加热速度 (前 500℃ 加热 80 分钟, 后面每小时 200℃ 加热到 850℃) 和冷却速度 (960℃/h) 进行了 10 次检测, 测定了每次加热和冷却过程中发生相变的温度, 以此来评定系统的复现性和测量结果的不确定度。

加热过程的 10 次测定的膨胀量变化曲线图如图 (图 6.5.1-图 6.5.10) 所示。采用切线法测得  $A_{C1}$  点分别为 753℃、746℃、741℃、748℃、750℃、752℃、744℃、751℃、745℃、750℃。测得  $A_{C3}$  点分别为 791℃、788℃、786℃、780℃、779℃、790℃、789℃、778℃、783℃、786℃。

$$\text{对于检测的 } A_{C1}, \text{ 有 } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 748 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 3.9 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$\delta_R = s_R / \bar{x} = 0.52\%$ , 同时可以计算得  $R = 2\sqrt{2}s_R = 2.83s_R = 11.037^\circ\text{C}$ , 检测数据的  $\bar{x}$  的最大偏差为  $7^\circ\text{C} < R$ ,  $s(\bar{x}) = s(x) / \sqrt{n} = 1.23^\circ\text{C}$ 。

$$\text{对于检测的 } A_{C3}, \text{ 有 } \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 785 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 5.0 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$\delta_R = s_R / \bar{x} = 0.64\%$ , 同时可以计算得  $R = 2\sqrt{2}s_R = 2.83s_R = 14.15^\circ\text{C}$ , 检测数据的  $\bar{x}$  的最大偏差为  $7^\circ\text{C} < R$ ,  $s(\bar{x}) = s(x) / \sqrt{n} = 1.58^\circ\text{C}$ 。

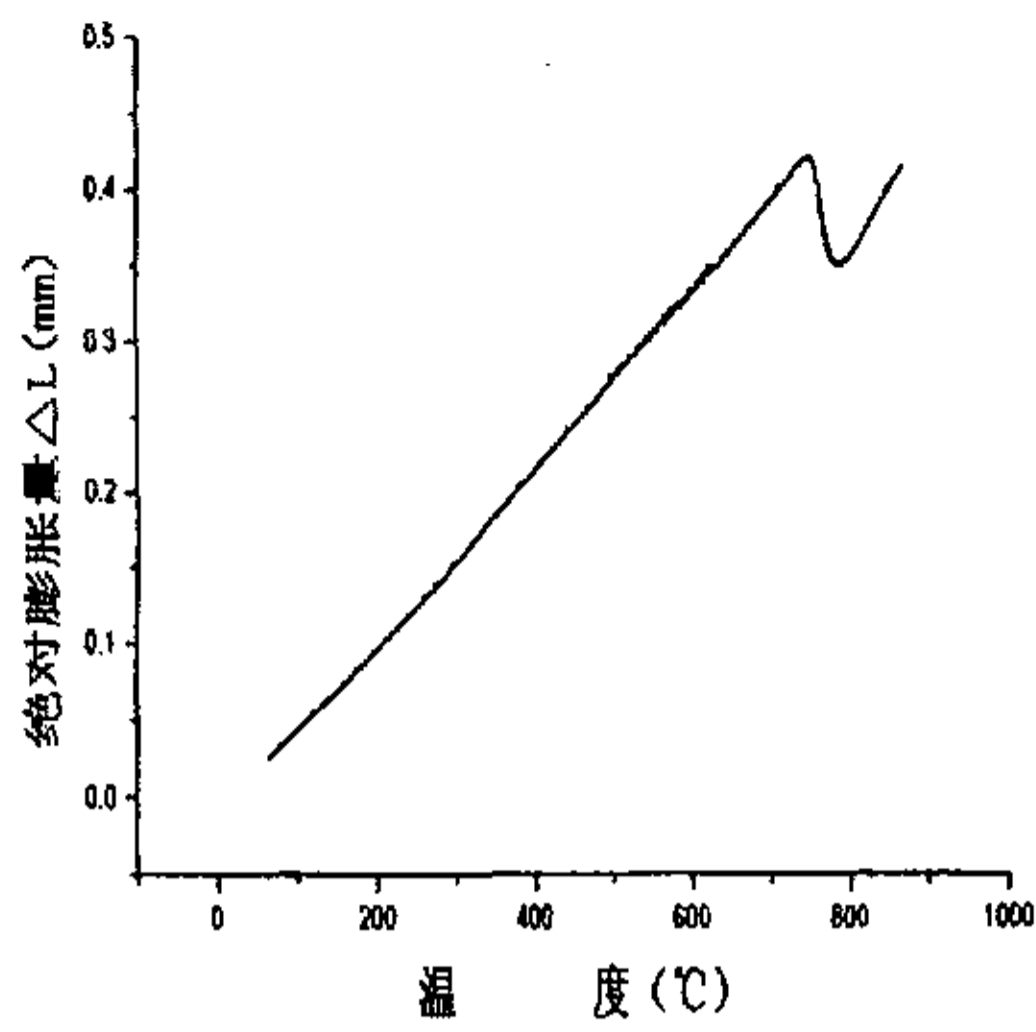


图 6.5.1 加热过程膨胀量变化曲线 (1)

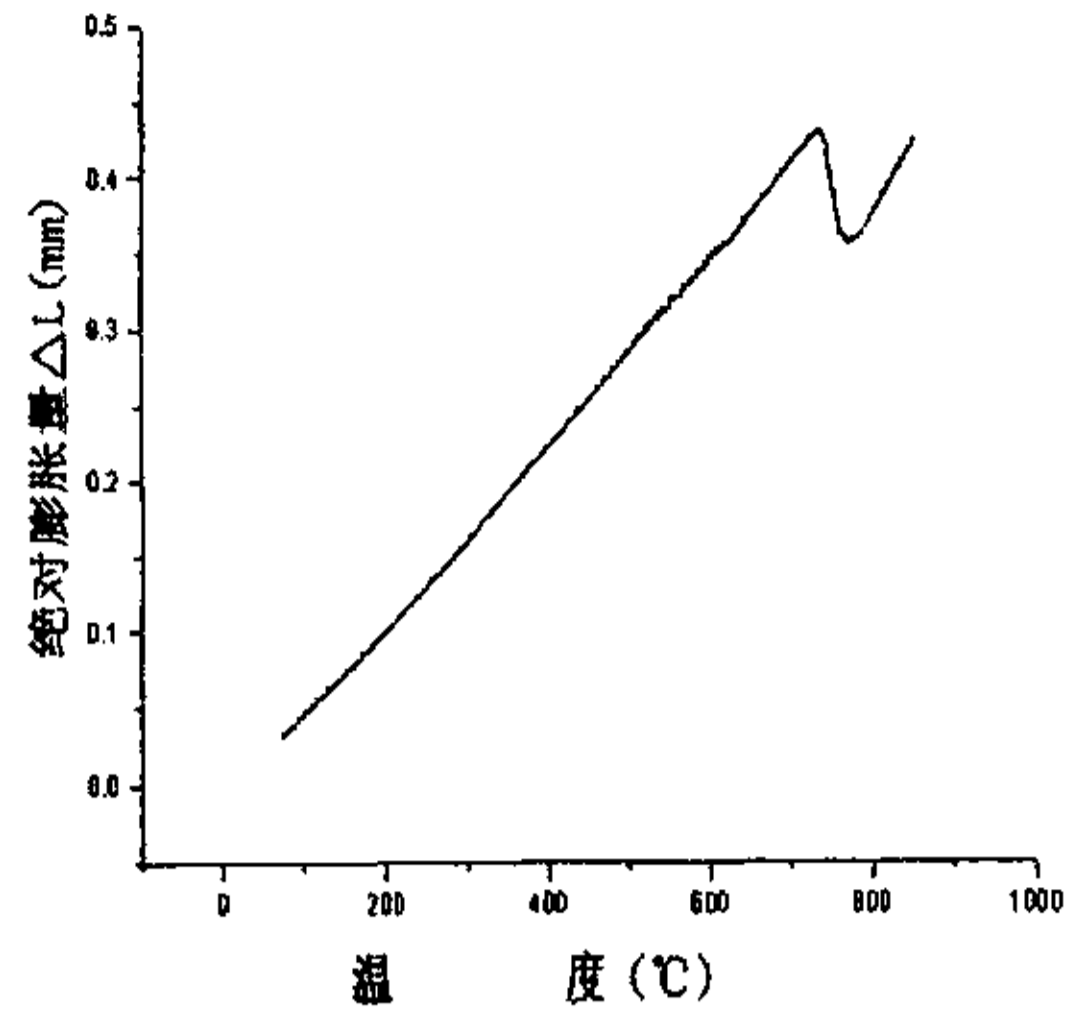


图 6.5.2 加热过程膨胀量变化曲线 (2)

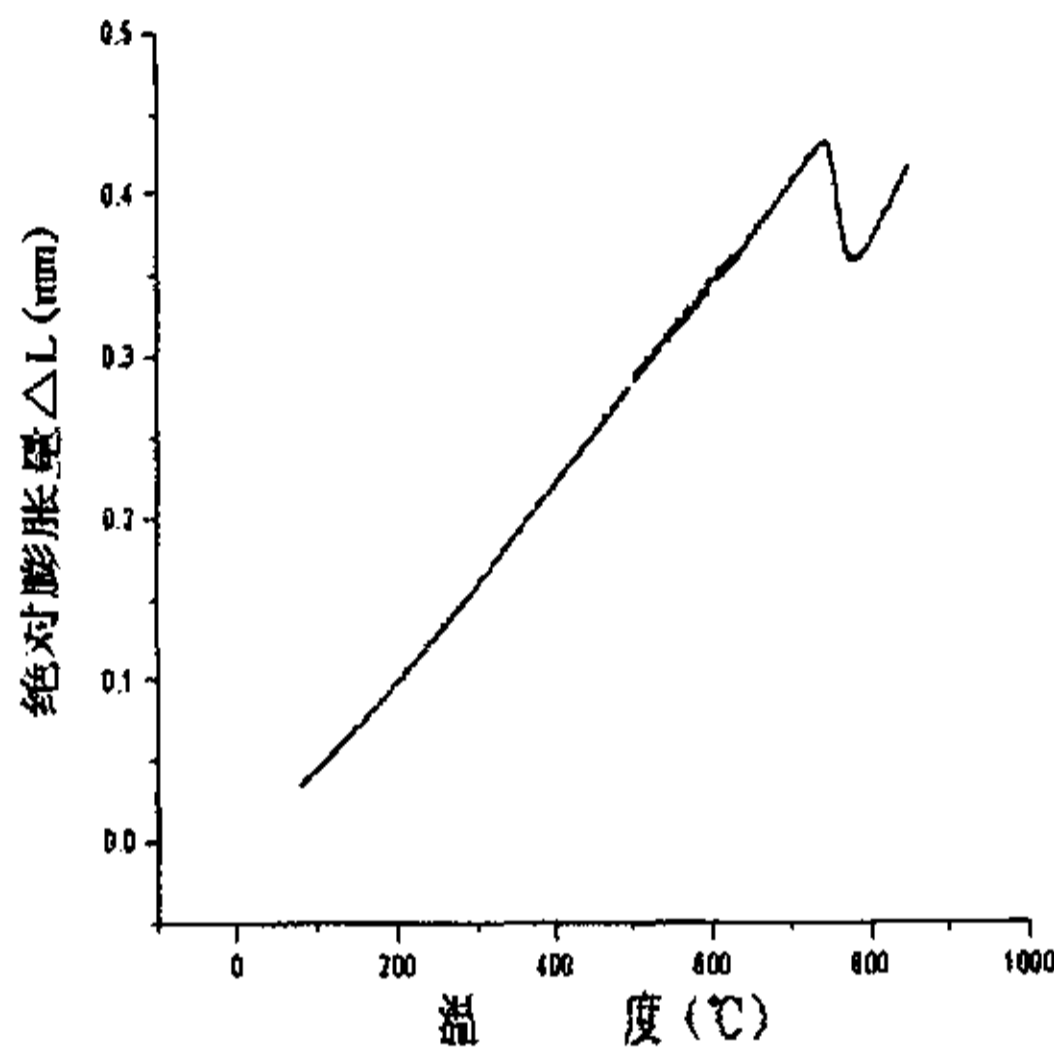


图 6.5.3 加热过程膨胀量变化曲线 (3)

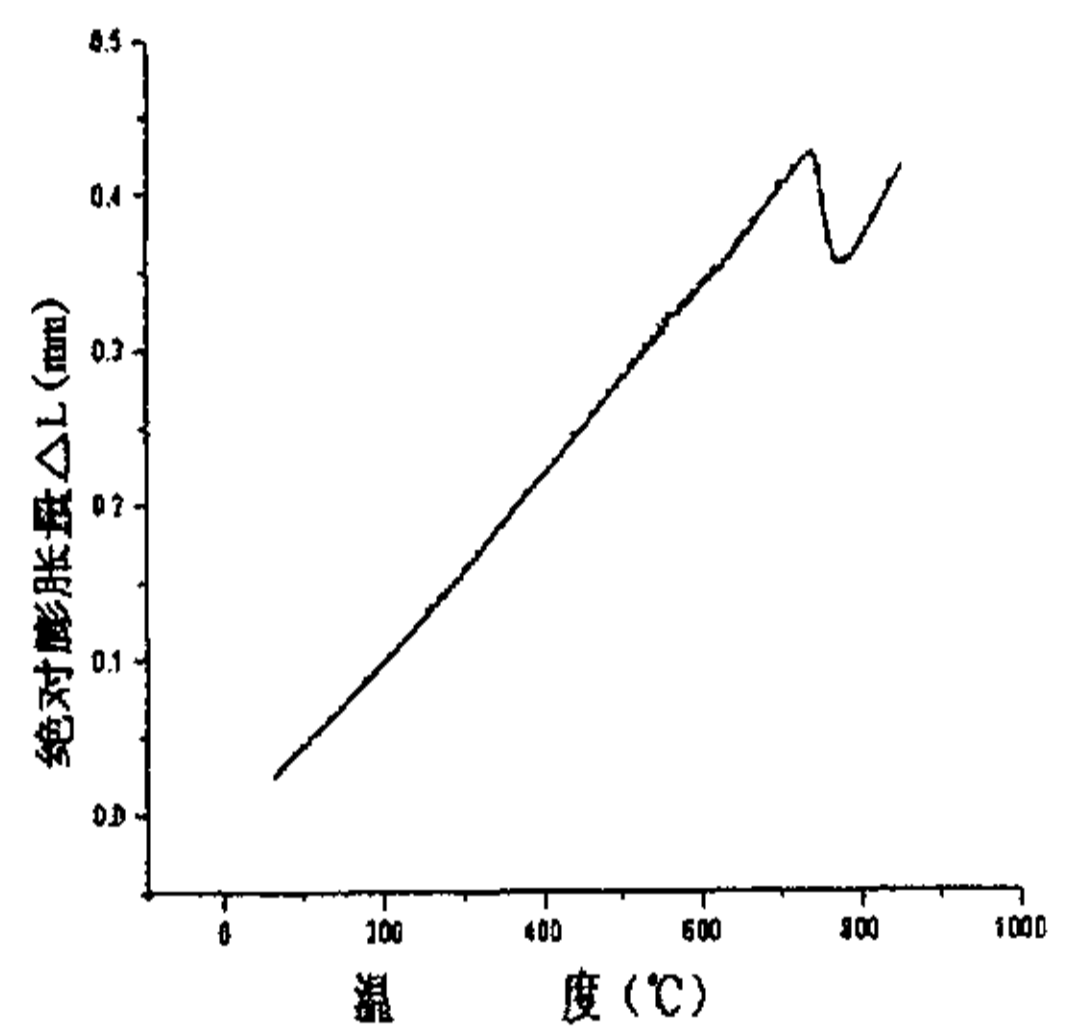


图 6.5.4 加热过程膨胀量变化曲线 (4)

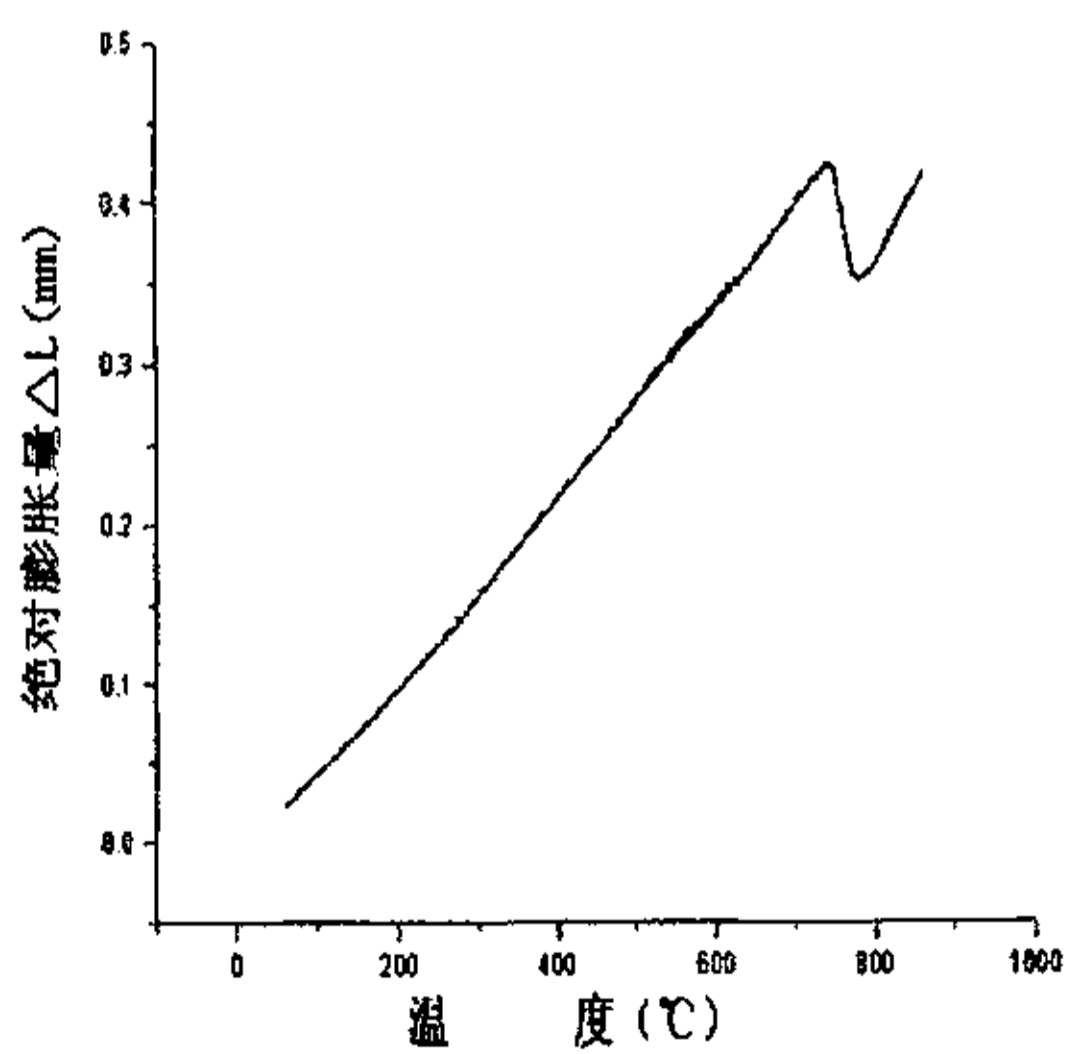


图 6.5.5 加热过程膨胀量变化曲线 (5)

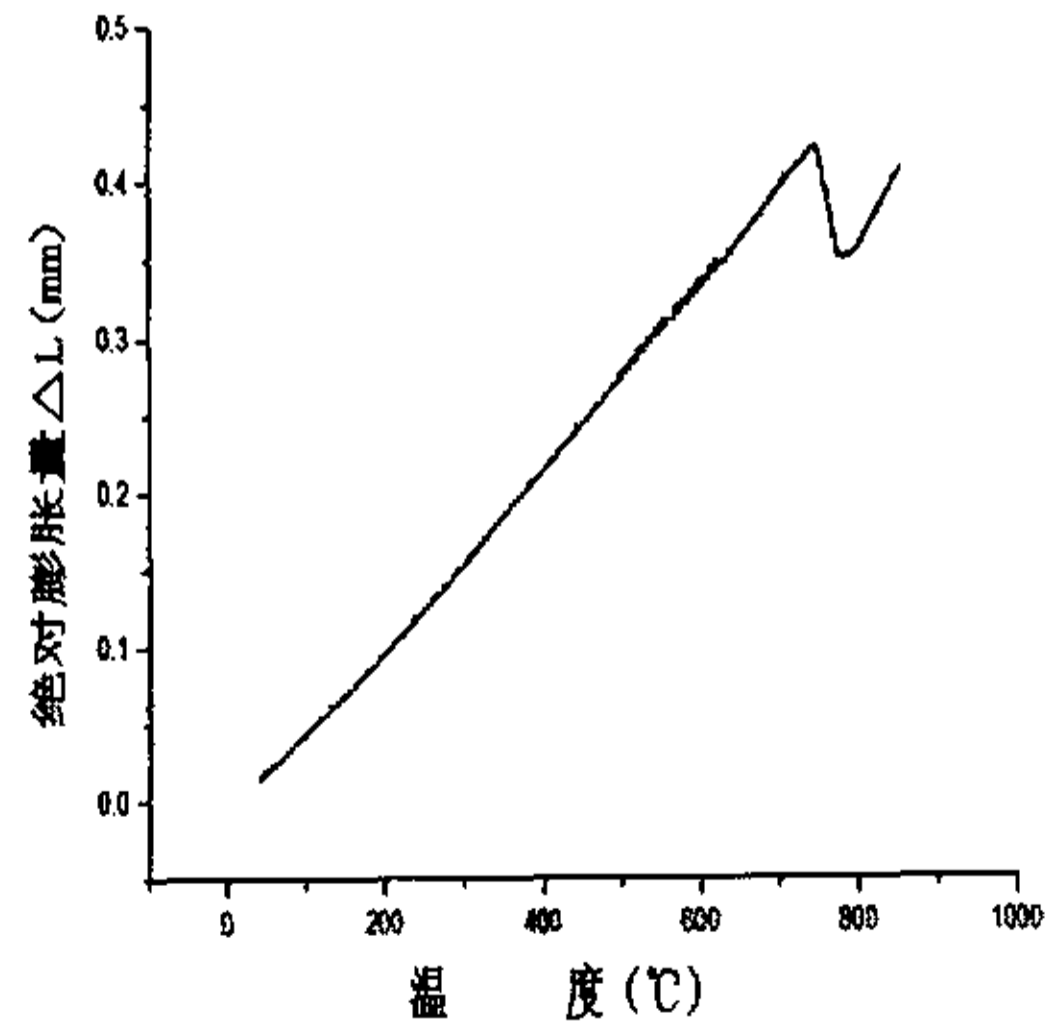


图 6.5.6 加热过程膨胀量变化曲线 (6)

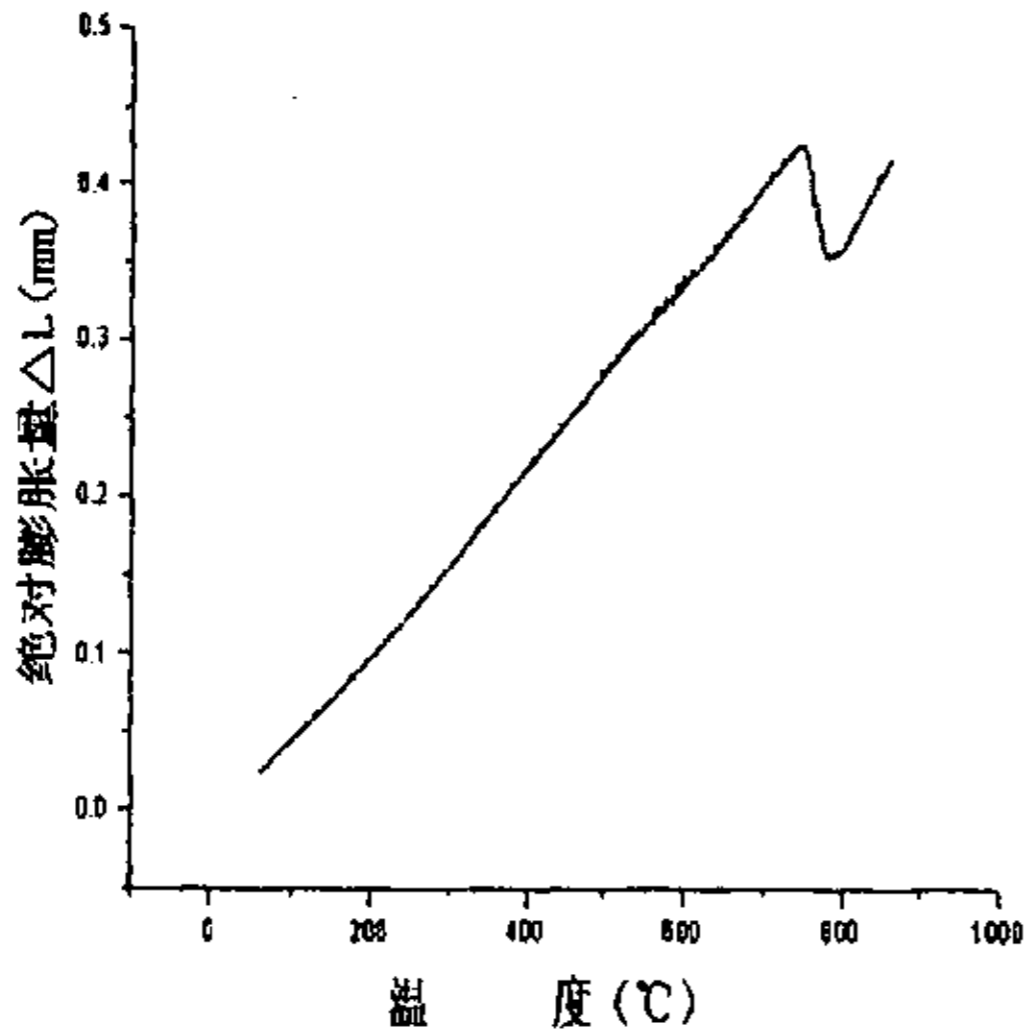


图 6.5.7 加热过程膨胀量变化曲线 (7)

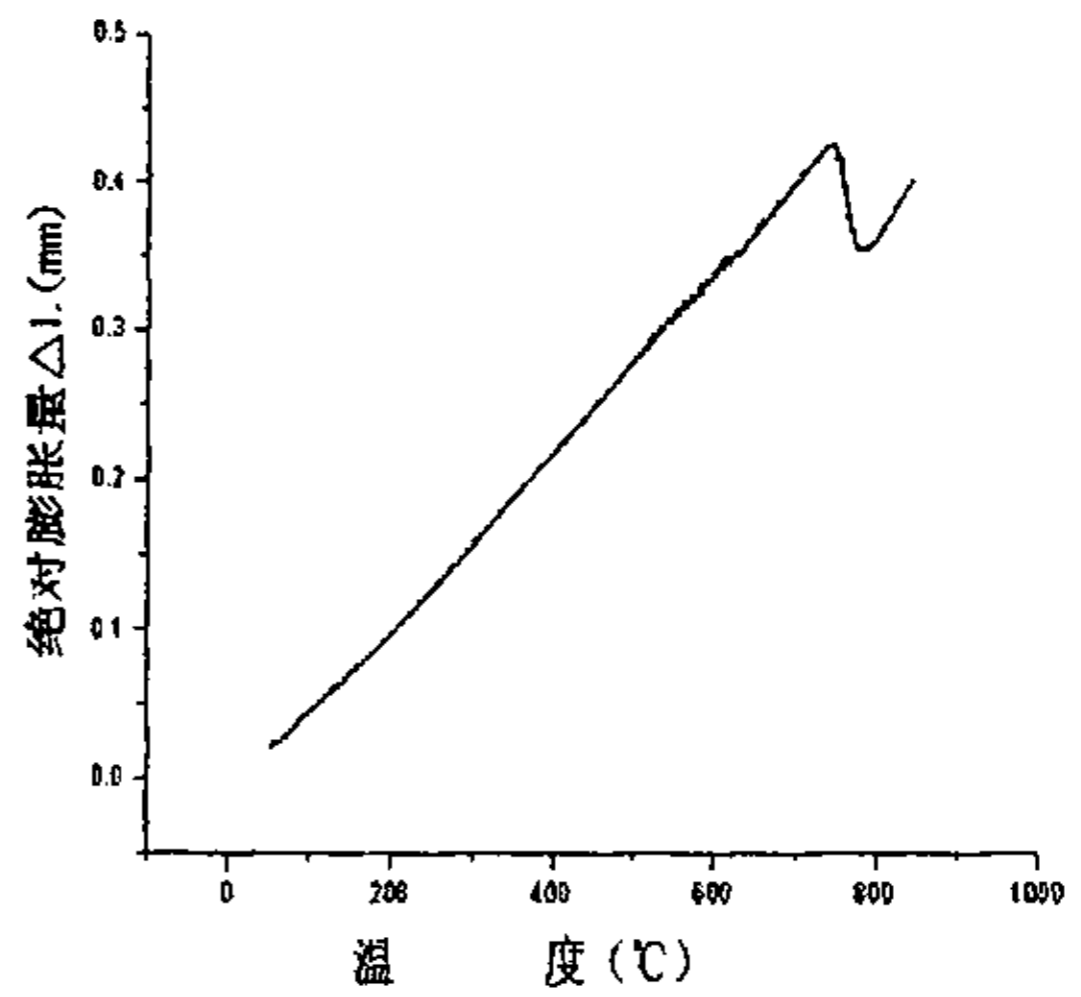


图 6.5.8 加热过程膨胀量变化曲线 (8)

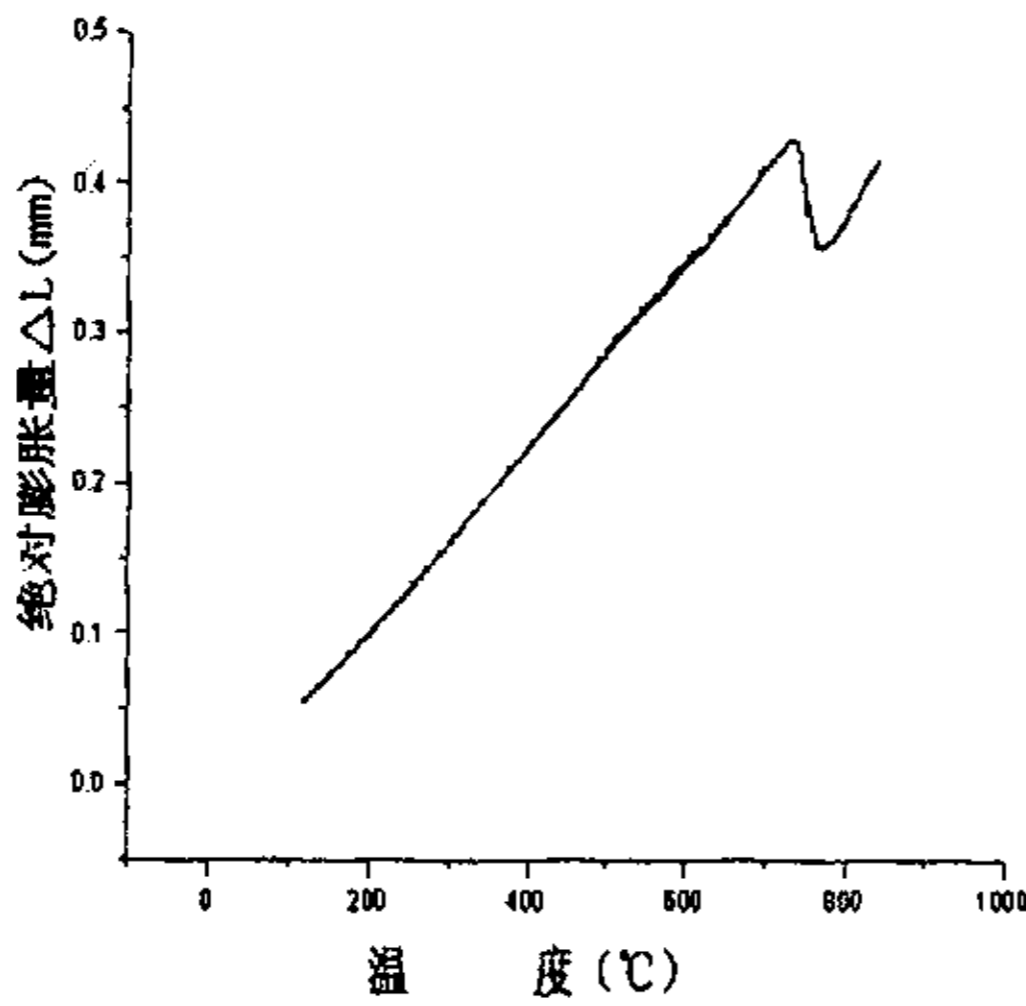


图 6.5.9 加热过程膨胀量变化曲线 (9)

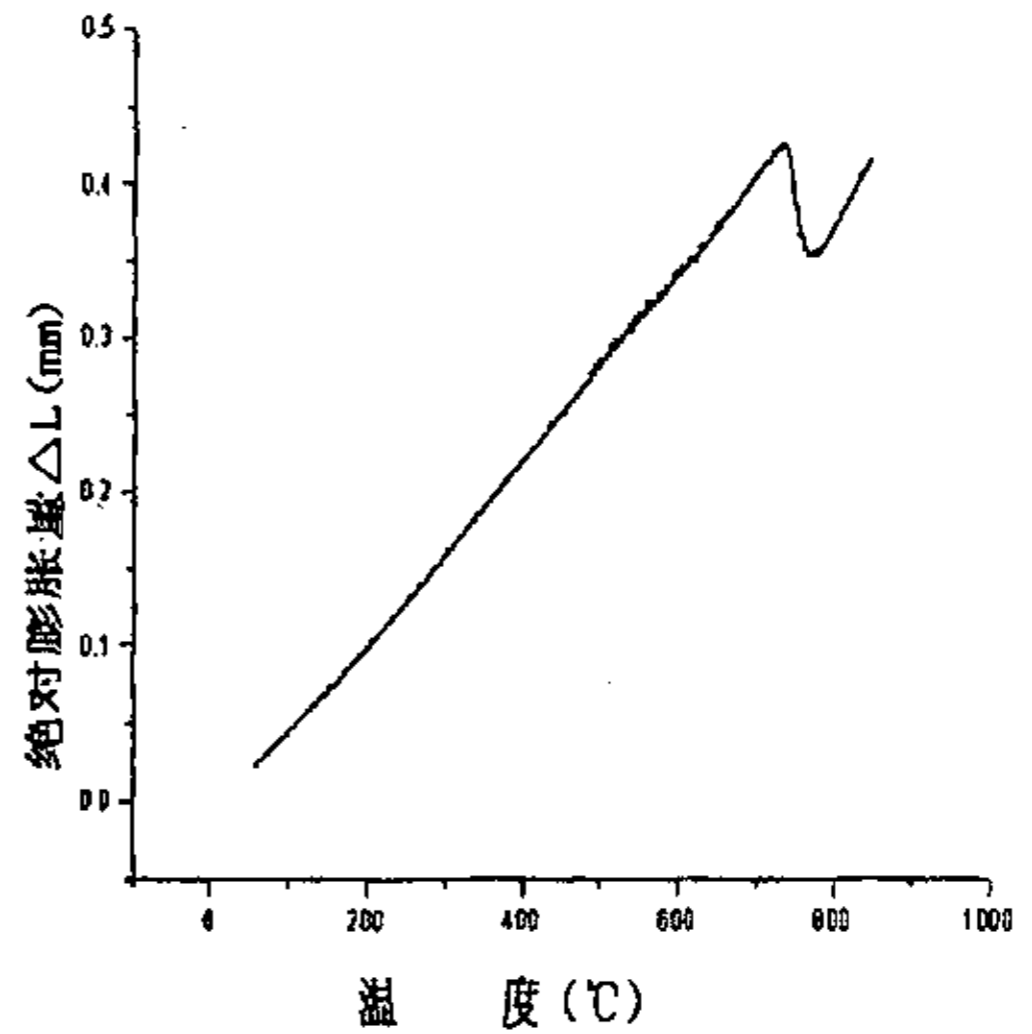


图 6.5.10 加热过程膨胀量变化曲线 (10)

冷却过程的 10 次测定的膨胀量变化曲线图如图 (图 6.5.11-图 6.5.20) 所示。采用切线法测得贝氏体转变开始点分别为 456°C、459°C、460°C、456°C、461°C、458°C、452°C、457°C、459°C、450°C。测得贝氏体转变结束点分别为 309°C、311°C、312°C、315°C、303°C、310°C、311°C、306°C、313°C、309°C。

对于检测的贝氏体转变开始点, 有  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 456.8^\circ\text{C}$ ,  $s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 3.5$

°C,  $\delta_R = s_R / \bar{x} = 0.76\%$ , 同时可以计算得  $R = 2\sqrt{2}s_R = 2.83s_R = 9.905^\circ\text{C}$ , 检测数据的  $\bar{x}$  的最大偏差为  $6.8^\circ\text{C} < R$ ,  $s(\bar{x}) = s(x) / \sqrt{n} = 1.11^\circ\text{C}$ 。

对于检测的贝氏体转变结束点, 有  $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^{10} x_i}{10} = 309.9^{\circ}\text{C}$ ,  $s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 3.4$

$^{\circ}\text{C}$ ,  $\delta_R = s_R / \bar{x} = 1.09\%$ , 同时可以计算得  $R = 2\sqrt{2}s_R = 2.83s_R = 9.962^{\circ}\text{C}$ , 检测数据的  $\bar{x}$  的最大偏差为  $6.9^{\circ}\text{C} < R$ ,  $s(\bar{x}) = s(x) / \sqrt{n} = 1.08^{\circ}\text{C}$ 。

从上面四组  $s_R$ ,  $\delta_R$ ,  $R$  和  $s(\bar{x})$  的分析中可以看出, 系统的复现性是很好的, 同时测量结果的分散性也比较小, 所以可以说系统具有较高的稳定性和精确性。

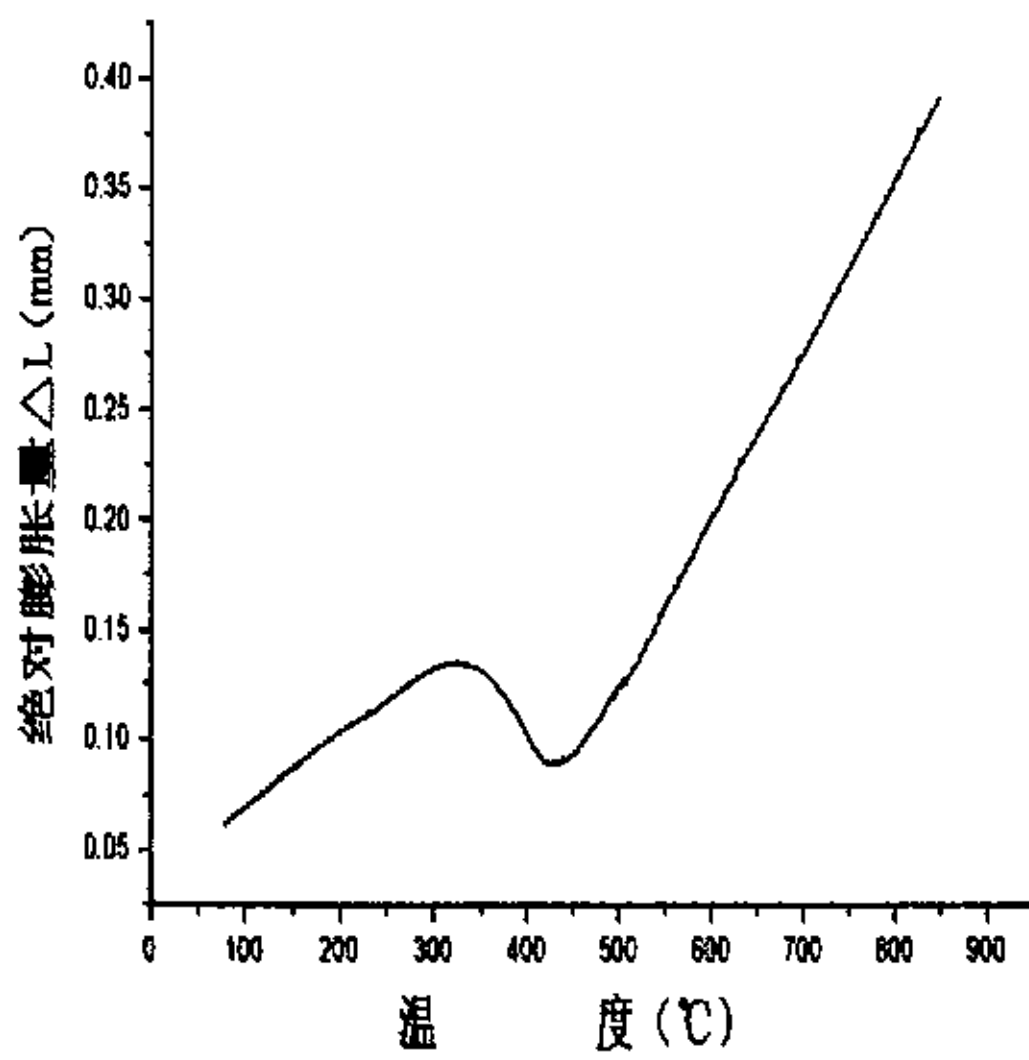


图 6.5.11 冷却过程膨胀量变化曲线 (1)

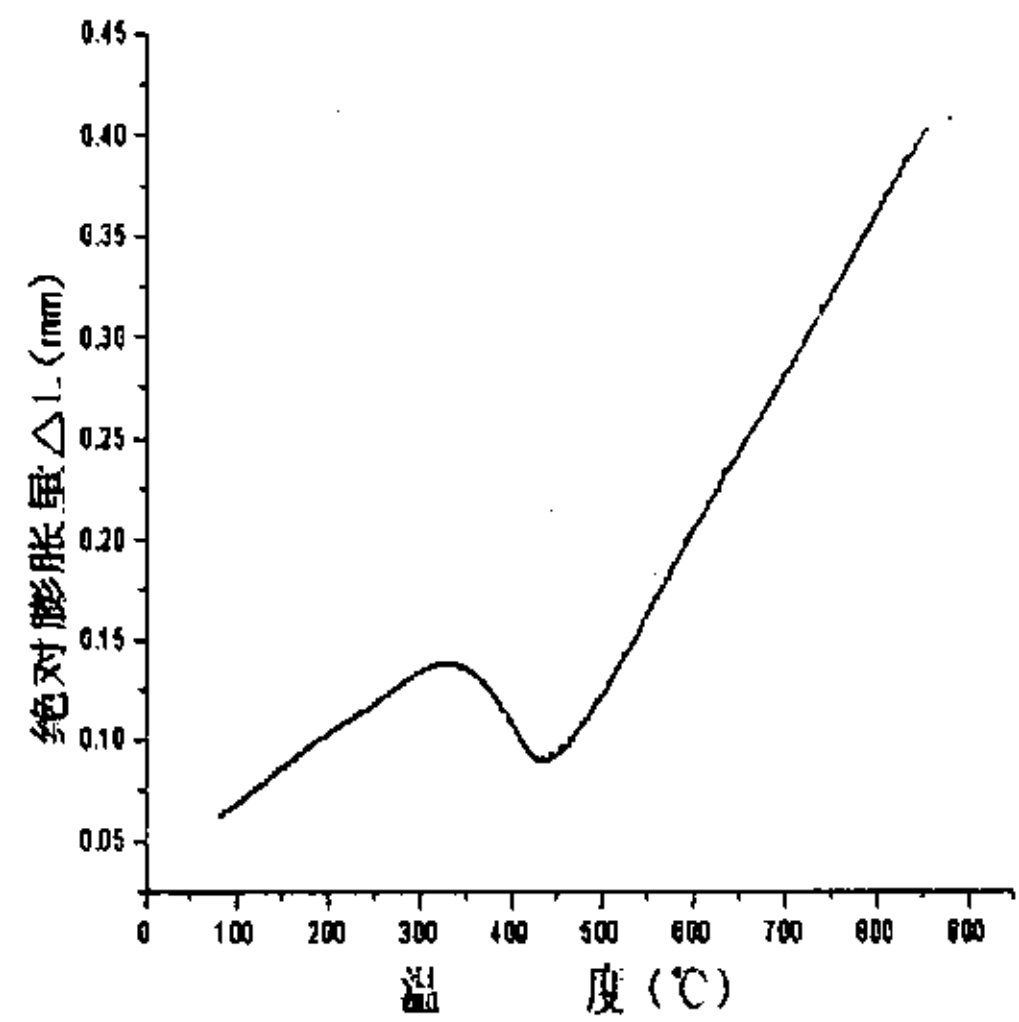


图 6.5.12 冷却过程膨胀量变化曲线 (2)

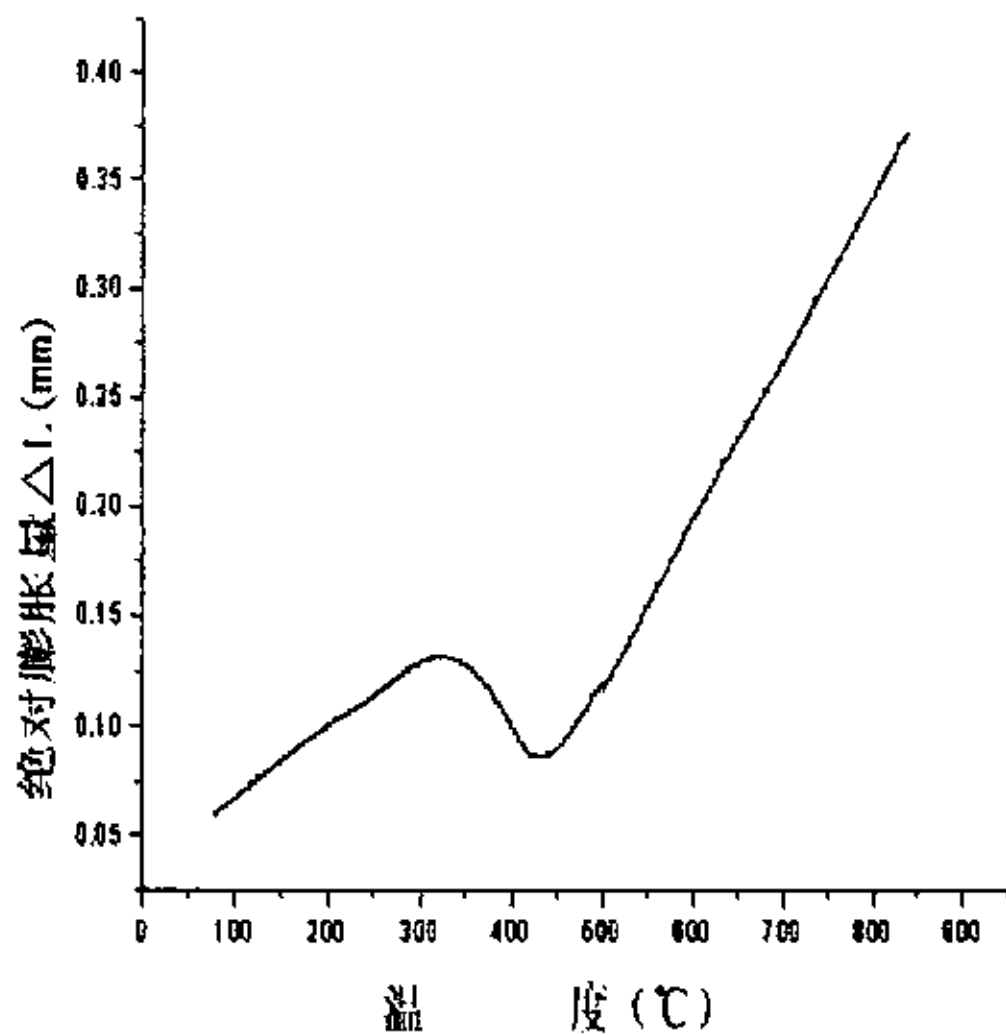


图 6.5.13 冷却过程膨胀量变化曲线 (3)

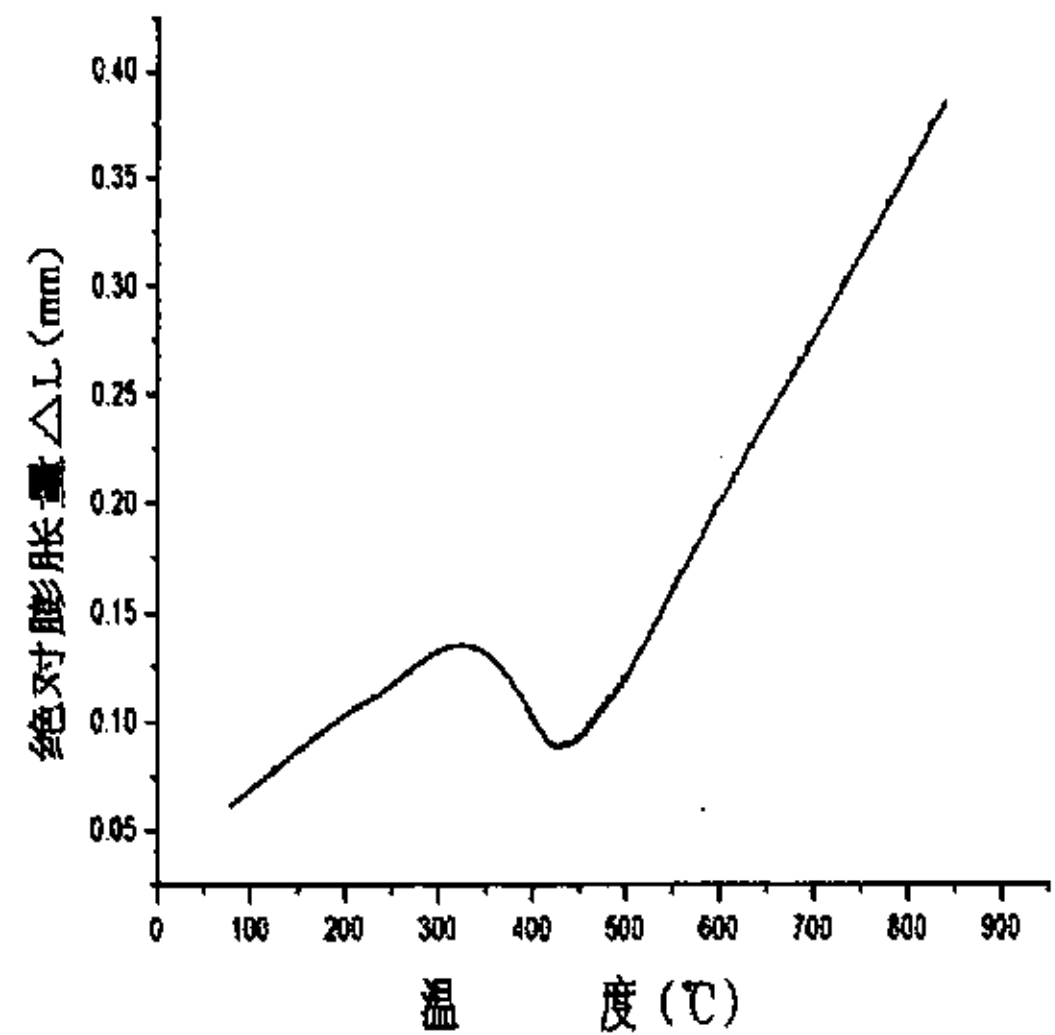


图 6.5.14 冷却过程膨胀量变化曲线 (4)

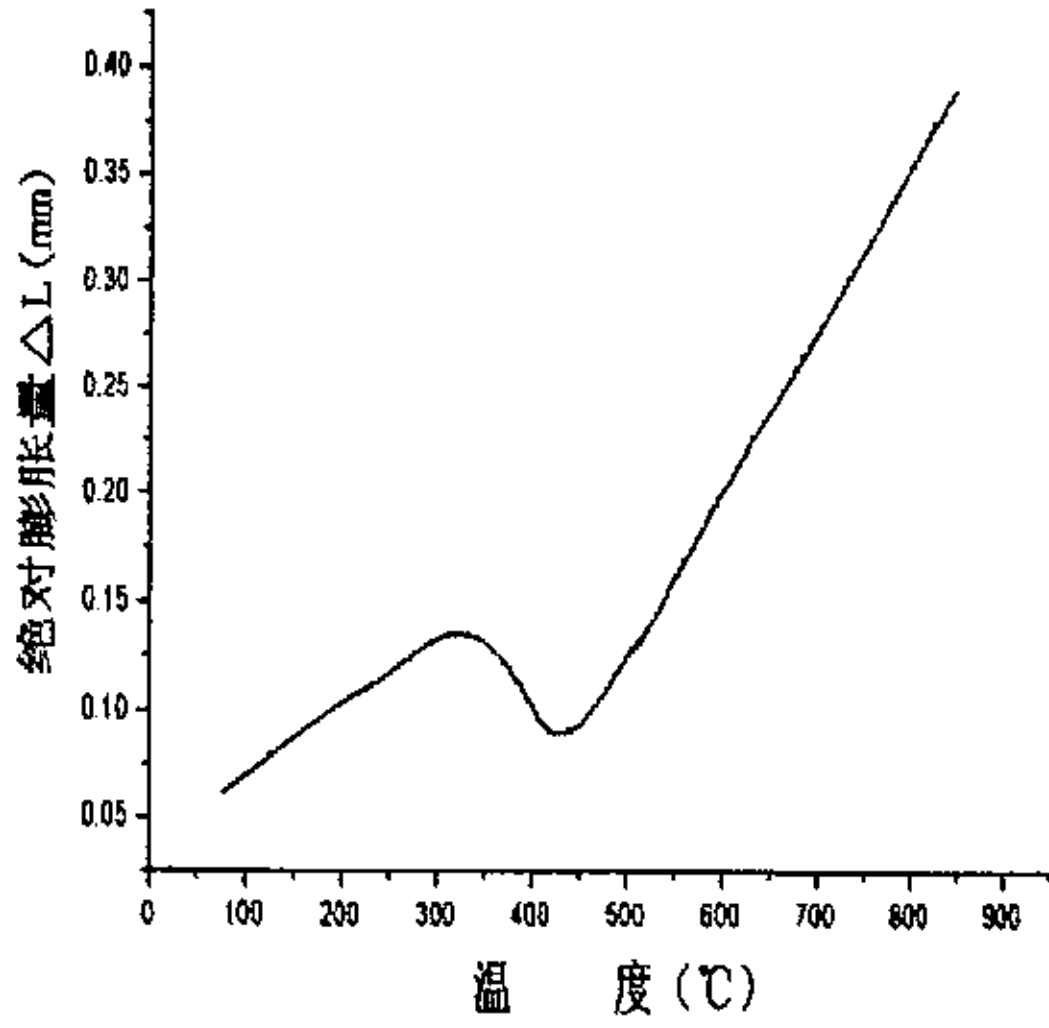


图 6.5.15 冷却过程膨胀量变化曲线(5)

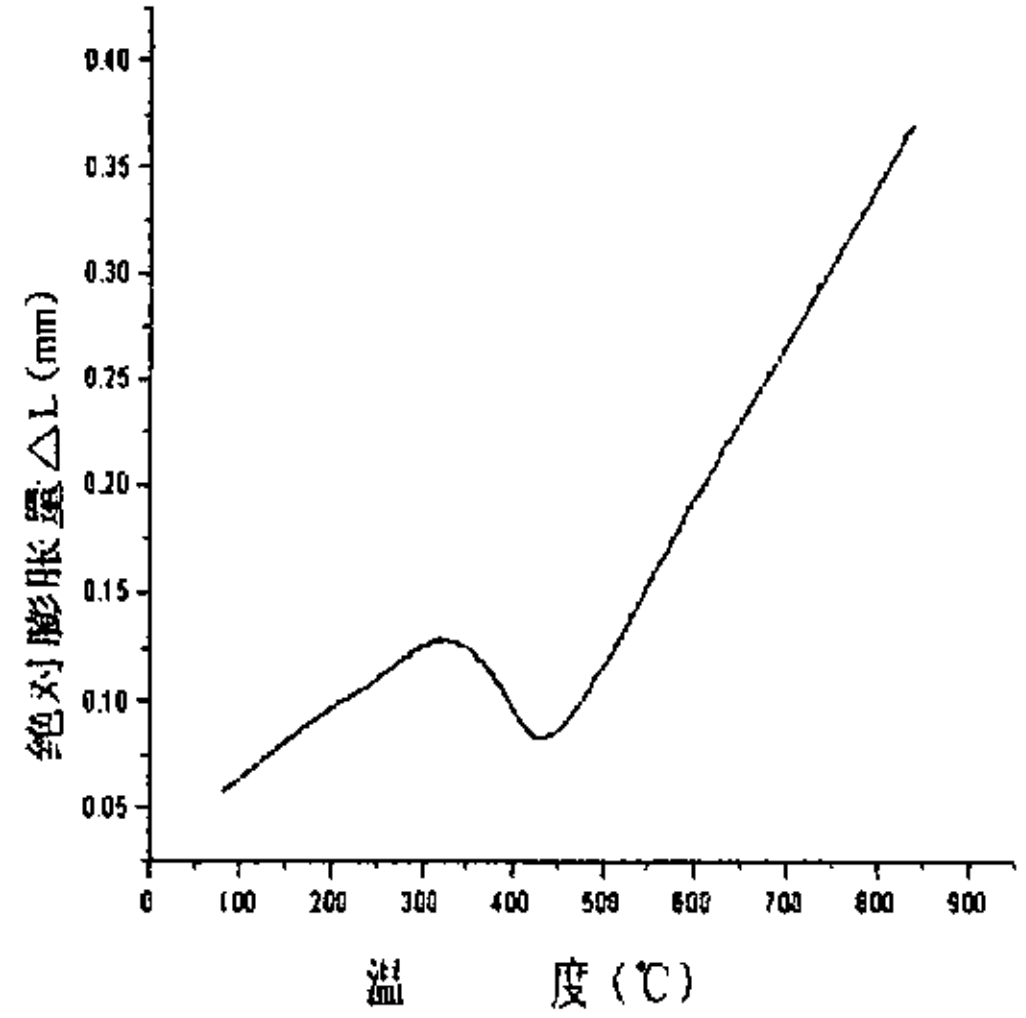


图 6.5.16 冷却过程膨胀量变化曲线(6)

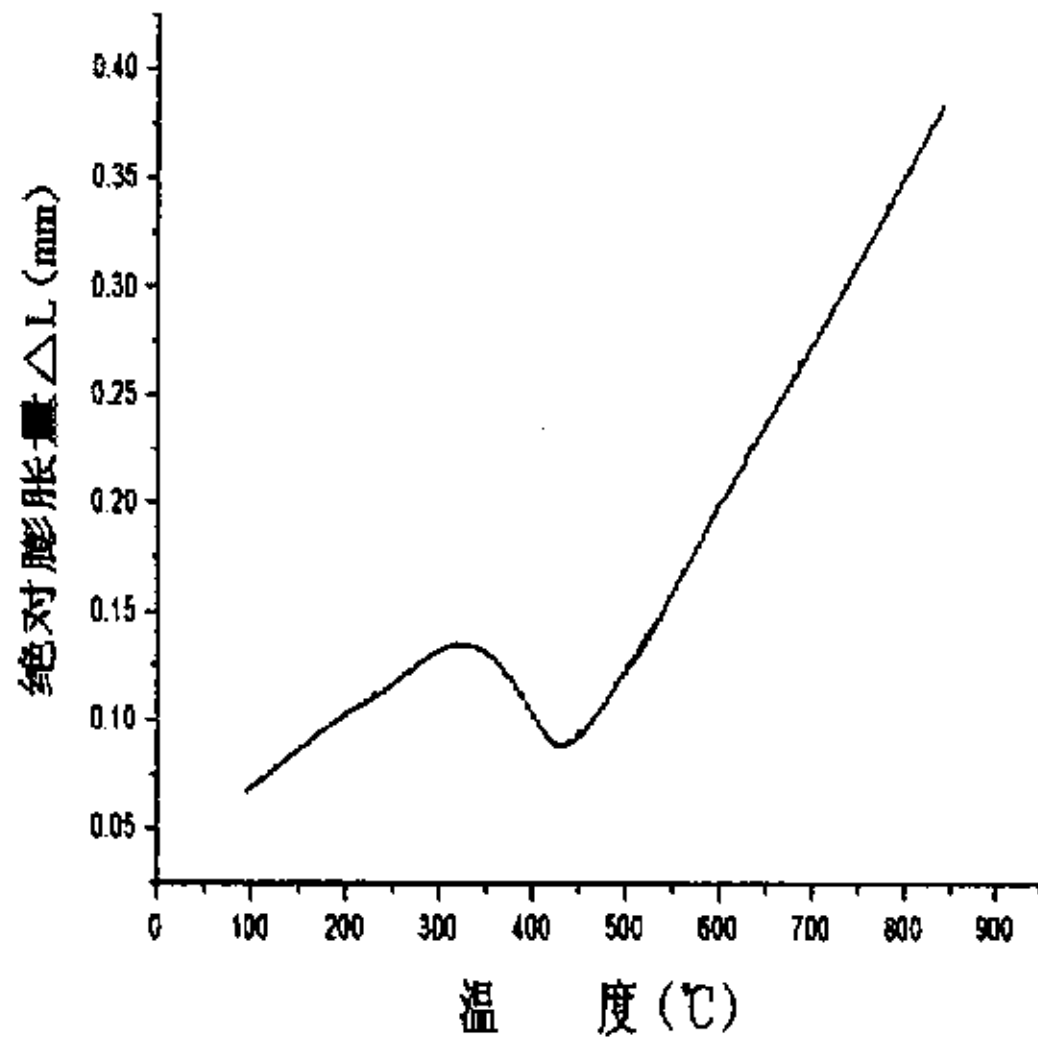


图 6.5.17 冷却过程膨胀量变化曲线(7)

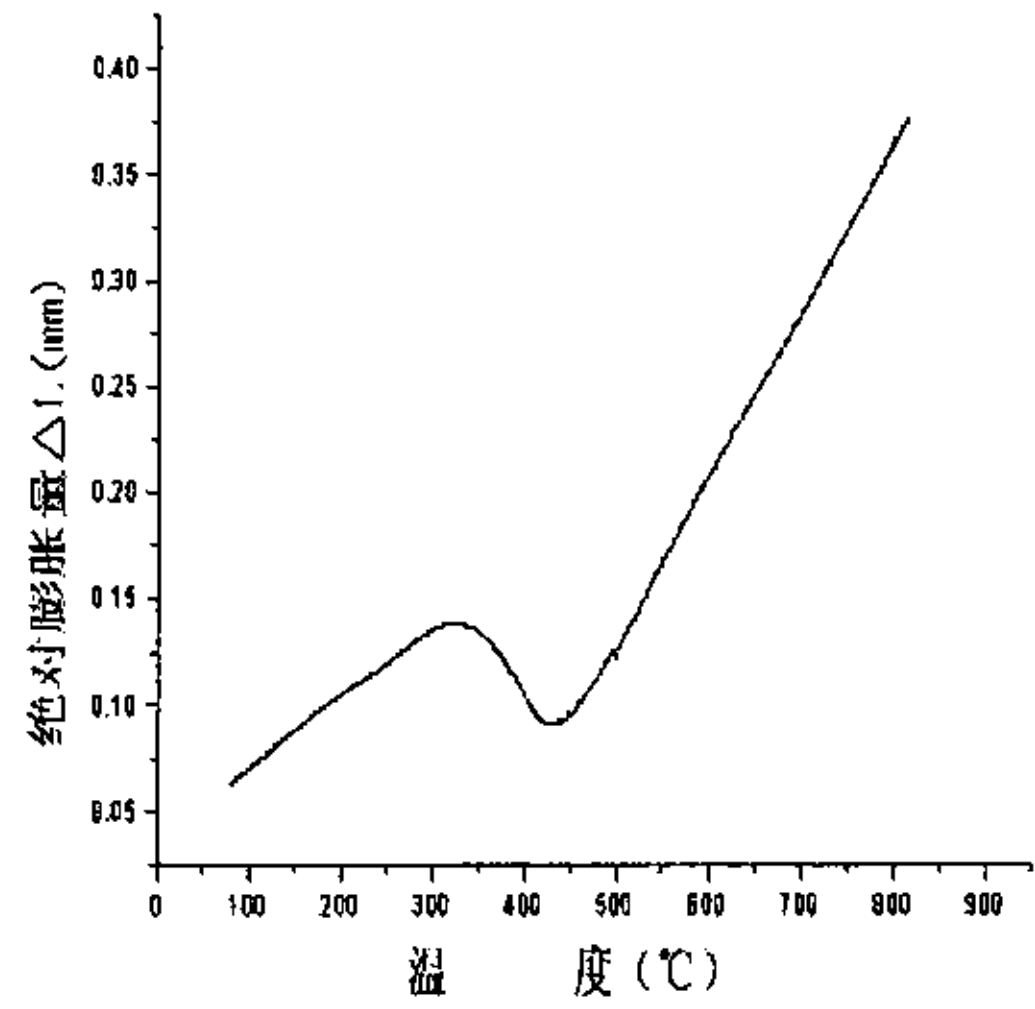


图 6.5.18 冷却过程膨胀量变化曲线(8)

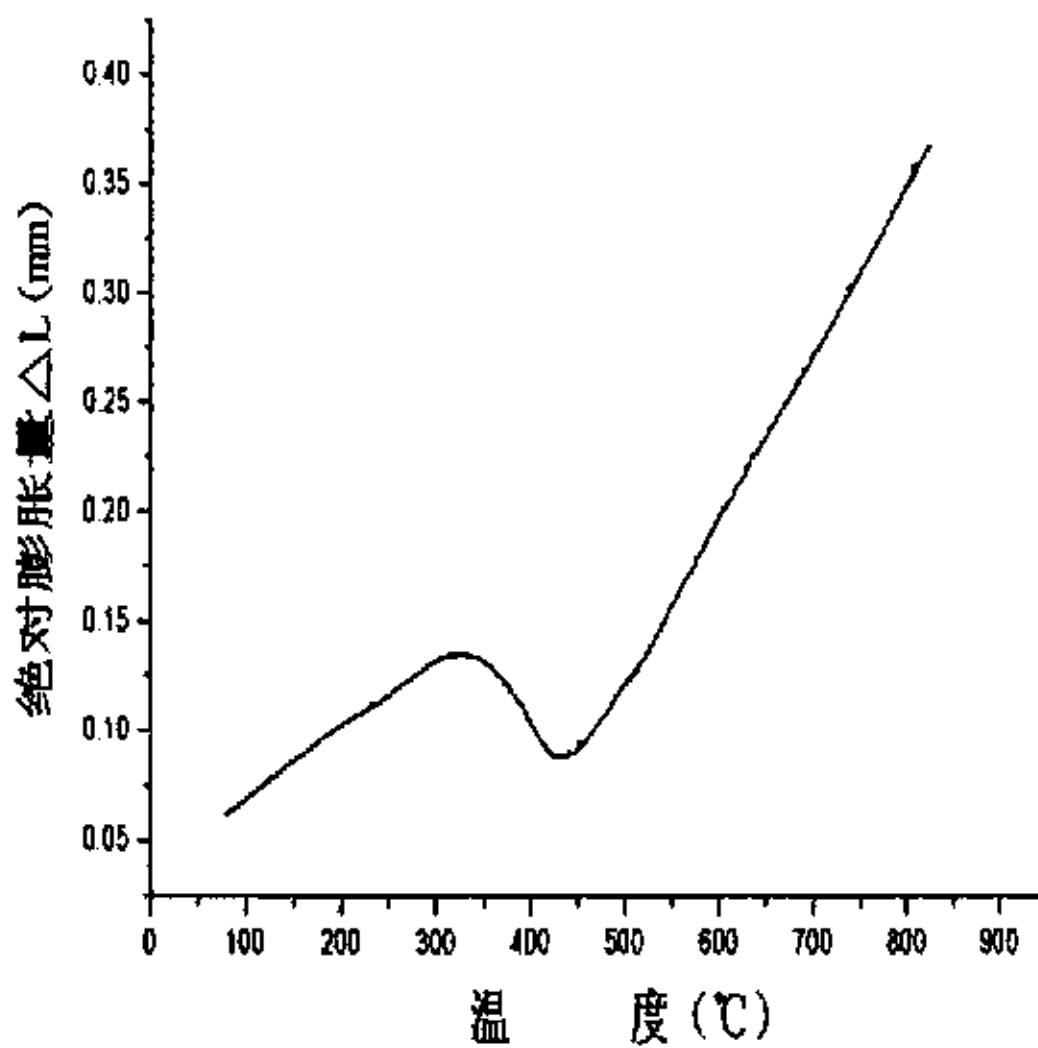


图 6.5.19 冷却过程膨胀量变化曲线(9)

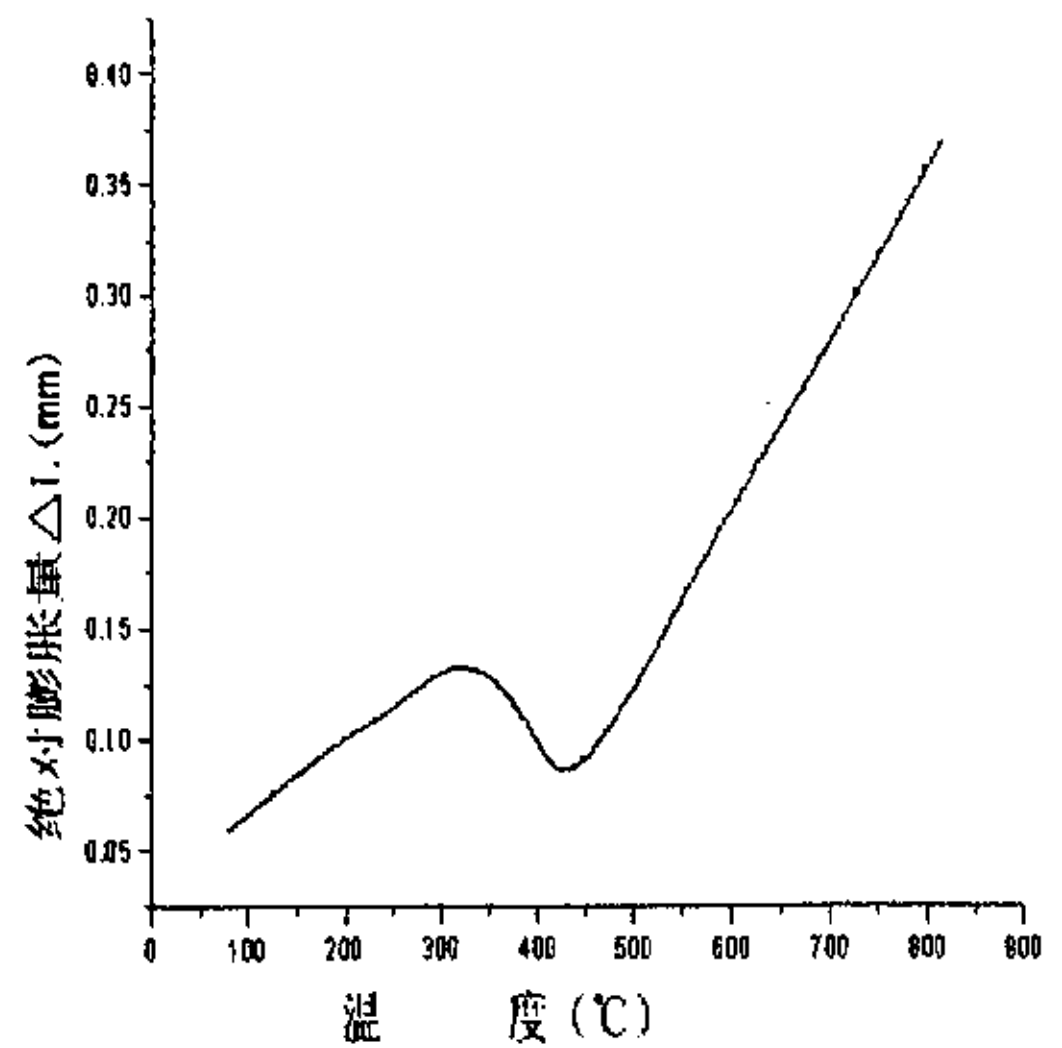


图 6.5.20 冷却过程膨胀量变化曲线(10)

## 结 论

1. 应用智能检测技术及相关软、硬件的设计,完成了智能化热膨胀检测系统的开发。系统由具有循环冷却装置的加热炉、检测系统、温度控制系统、微型计算机和打印机五部分组成。应用该系统测量了 PCrNi1MoA 材料的热膨胀系数、临界点以及不同冷却速度下的冷却曲线,并利用三次样条插值函数进行插值获得更多的数据点绘制了 CCT 图,三次样条插值函数的运用,大大提高了做图的精确性和光滑程度。将试验结果与文献提供的数据进行比较,并进行了复现性试验。结果表明:系统具有精度高,界面友好,操作简便,测量结果分散性较小、稳定性和复现性好等优点。表明相关的软、硬件设计开发是完全可行的,能满足相变过程的研究以及制定合理的热处理工艺的要求。同时系统的投资小,成本远低于国外进口设备。

2. 检测系统由多路模拟开关电路、测量放大电路、采样/保持电路、模数/数模转换电路、控制逻辑与时钟电路几个部分组成。系统采用连续函数拟合和分段抛物线拟合方法实现了位移量和温度值的非线性转换,具有较高的精度。相关软件的设计实现了被检测参量的检测、采集、处理和存储等功能。

3. 温度控制系统由温度测量、A/D 转换、单片机系统、键盘操作系统、温度显示系统、报警电路、D/A 转换几个部分组成。通过 C++ Builder 中提供的构件以及 spawnl 函数的调用将温控仪程序嵌套在联机软件中,大大简化了系统的操作。系统可按给定的温度曲线对加热炉进行控制。通过循环水冷却和喷气冷却系统的共同作用可使系统获得不同的冷却速度,使系统可以实现冷却过程膨胀量变化曲线和 CCT 图的测定。

4. 运用 C++ Builder 设计开发了上位机联机应用软件,为用户提供了友好的操作界面,实现了检测过程的实时监控,并通过复合滤波和五点三次平滑算法对实验数据进行处理后导入数据库,减少并削弱了噪声的干扰,保证了系统的可靠性,为进一步的分析提供了准确完善的数据资料。

5. 系统具有实现快速淬火(如水淬)检测和等温转变检测等扩展功能,系统还能进一步实现多点检测和多传感器信息融合,可应用于各种复杂条件下的测量。

## 致 谢

首先感谢尊敬的导师樊新民教授。在整个论文工作期间，樊教授无论在学习上还是在生活中都给予我悉心的指导和无私的关怀，特别是在课题的指导过程中，倾注了大量的心血，使我克服了很多课题中遇到的困难。樊教授对于工作的认真态度、对于科研的严谨作风以及渊博的学识不仅对我现在的学习、科研产生了良好而重要的影响，也将在我今后的工作学习中继续影响着我。在此，向樊新民教授表示崇高的敬意和诚挚的感谢！

其次要感谢孔见老师。孔见老师在学习和生活方面的都给予了我很大的关心与帮助。孔老师的认真、负责和敬业给我留下了很深刻的印象。感谢本教研室的高海勇师兄，高师兄在课题方面给予了我很大的指导和帮助。

另外，还要感谢李友荣老师、王恒志老师、王建平老师、黄洁雯老师的帮助与支持；感谢李慧中老师和王裕民书记在学习和生活中给予的关心与照顾。感谢惠静师姐、刘强师兄、葛盛健师姐以及殷胜、朱琳、刘俊、姚董、张伦等硕士给予的协助和支持。

最后，还要衷心感谢我的家人，是他们给予了我极大的关心、理解、帮助与支持，他们对我的关爱、理解、鼓励将是我永远的前进动力。

感谢所有给予我支持和帮助的人！



## 参考文献

- 1 石振华, 李彦温. 16Cr2Ni2A 钢连续冷却转变图及等温转变图的测定. 理化检验-物理分册. 1998, 34 (9): 12-13
- 2 肖福仁, 乔桂英. 86CrMoV7 钢的过冷奥氏体转变. 特殊钢. 1999, 20 (4): 17-18
- 3 樊翔宇, 许云杰, 傅喜秋. 利用法国进口高速淬火膨胀仪绘制 CCT 图和 TTT 图. 一重技术. 1993 (2): 40-42
- 4 克拉克夫. 镍、铜低合金奥贝球体特性研究. 铸造. 2001, 50 (9): 537-540
- 5 包耳, 廖波. 30CrMoV 钢 CCT 图的测定. 金属热处理. 1992 (12): 27-29
- 6 祁文军, 方建疆, 周建平. 基于焊接 CCT 图的焊接接头组织和性能预测. 焊接技术. 2003, 32 (5): 12-13
- 7 林慧国, 傅代直. 钢的奥氏体转变曲线. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 8 张世中. 钢的过冷奥氏体转变曲线图集. 第 1 版. 北京: 冶金工业出版社, 1993
- 9 赵茂泰. 智能仪器原理及应用. 第 1 版. 北京: 电子工业出版社., 1999
- 10 滕召胜, 罗隆福. 智能检测系统与数据融合. 第 1 版. 北京: 机械工业出版社, 2000
- 11 王鸿钰, 董奇. 自动测量仪器与测试系统的发展综述. 计算机自动测量与控制. 2000. 8(4): 7-9
- 12 胡瑞雯. 智能检测与控制技术. 第 1 版. 西安: 西安交通大学出版社, 1991
- 13 O. ERB, GHINZ and N. PREUSSE. PLCD, A Novel Magnetic Displacement Sensor. Sensors and Actuators A. 1991 (25-27) :277-282
- 14 Jung-Hun Chae , Jae-Youl Lee , Sang-Won Kang. Measurement of thermal expansion coefficient of poly-Si using microgauge sensors. Sensors and Actuators. 1999(75):222-229.
- 15 刘永东. 零件材料精确热膨胀系数的测定. 计量学报. 1998, 19 (3): 216-219
- 16 薛凯. 传感器与微机相结合测量固体的热膨胀系数. 大学物理. 1994, 13(3): 33-35
- 17 刘晓, 周瑛玮. 金属线膨胀系数的计算机检测系统的研制与应用. 中国仪器仪表. 1997(1): 17-18
- 18 潘素瑛, 肖天来. 热膨胀仪的研制. 武汉工业大学学报. 1993, 15 (3): 8-12
- 19 陈周造, 陈灿煌. 精通 C++ Builder 5 程序设计高级教程. 第 1 版. 北京: 中国青年出版社, 2001
- 20 刘海涛. Borland C++ Builder 入门与提高. 第 1 版. 北京: 清华大学出版社, 2000
- 21 赵亮, 侯国瑞. 单片机 C 语言编程与实例. 第 1 版. 北京: 人民邮电出版社, 2003
- 22 Evangelos Petroustos. Visual Basic5 从入门到精通. 第 1 版. 北京: 电子工业出版社,

1997

- 23 潘新民, 王燕芳.微型计算机控制技术.第1版.北京:人民邮电出版社, 1999
- 24 沈兰荪.数据采集技术.第1版.合肥:中国科技大学出版社, 1990
- 25 肖忠祥.数据采集技术.第1版.西安:西北工业大学出版社, 2001
- 26 陈润泰, 许琨.检测技术与智能仪表.第1版.中南工业大学出版社.1995
- 27 王仲生.智能检测与控制技术.第1版.西安:西北工业大学出版社, 2002
- 28 夏世长, 陈迪平.一种多通道数据采集电路的设计..湖南大学学报..2002,27(6):  
80-84
- 29 庞晓晖, 胡修林等.高速数据采集系统的设计与实现.仪器仪表学报.2000, 21(3):  
297-299
- 30 郭凯, 徐诚等.用软件扩展数据采集卡功能的方法及实现.电子测量与仪器学  
报.2000, 14(4): 19-22
- 31 王学良, 来忠信.基于 PCI 总线控制器的高速大容量实时数据采集.光学精密工程.  
2000, 8(1): 29-34
- 32 李华.MCS-51 系列单片机实用接口技术.第1版.北京:北京航空航天大学出版社,  
1993
- 33 陈进, 梁健.科学与工程计算常用算法程序库.第1版.上海:上海交通大学出版社,  
1995
- 34 李庆扬, 关治.数值计算原理.第1版.北京:清华大学出版社, 2000
- 35 Park J H, Sung S W, Lee I B.Improved relay autotuning with static load  
disturbance.Automatica.1997, 33(4): 711-715
- 36 陶永华, 尹怡欣.新型 PID 控制及应用.第1版.北京:机械工业出版社, 1998
- 37 谢松云, 张健, 王公望.热处理过程计算机控制策略.计算机应用.1999(8): 26-29
- 38 Schei T S.Automatic tuning of PID controllers based on transfer function  
estimation.Automatica.1994, 30(12): 1983-1989
- 39 Voda A A, Landau L D.A method for the auto-calibration of PID  
controllers.Automatic.1995, 31(1): 41-53
- 40 Astrom K J, Hang C C, Persson P, Ho W K.Towards intelligent PID  
control.Automatica.1992, 28(1): 1-9
- 41 韩启纲, 吴锡祺.计算机模糊控制技术与仪表装置.第1版.北京:中国计量出版社,  
1999
- 42 仲崇权, 郑旭.基于模糊控制方法的智能温度控制仪的研制.电测与仪表.2001,  
38(4): 23-26
- 43 Buckley J J.Controllable processes and the fuzzy controller. Fuzzy Sets and

- Systems.1993,53: 27-31
- 44 Fabrizio Russo, Giovanni Ramponi.Fuzzy Methods for Multisensor Data Fusion.IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement.1994, 43(2): 288-293
  - 45 丁建军, 周国柱.基于 VB6.0 的 PC 机与单片机间的串口通信.机械与电子.2004(2):47-49
  - 46 陈三凤, 刘晓波.基于 VB6.0 与单片机串行通信的数据采集系统设计.计算机应用.2004(1):66-68
  - 47 张祖贤.兵器黑色金属材料手册.第 1 版.北京: 兵器工业出版社.1989
  - 48 中国金属学会.金属物理性能及测试方法.第 1 版.北京: 冶金工业出版社,1987
  - 49 师昌绪.材料大辞典.第 1 版.北京: 化学工业出版社, 1994
  - 50 张兰欣, 王长富.C 语言程序设计与计算方法基础.第 1 版.北京: 北京航空航天大学出版社, 2000
  - 51 宋又廉.基于三次样条插值的采样数据光滑曲线形成法.数据采集与处理.1999, 14(2): 193-196
  - 52 任晓燕.分段三次样条插值的计算方法.济南教育学院学报.2002(4): 67-70
  - 53 国家质量技术监督局计量司.通用计量术语及定义解释.第 1 版.北京: 中国计量出版社, 2001
  - 54 李慎安.重复性、复现性和测量不确定度.测试技术.1998(1): 21-24
  - 55 宋明顺.测量不确定度评定与数据处理.第 1 版.北京: 中国计量出版社, 2000