

## 摘 要

等离子弧淬火是一种表面热处理方法，它是利用高能量密度的等离子弧来快速加热材料表面，使其发生相变，形成马氏体淬硬层的过程。它可以提高零件表面的硬度和耐磨性，而使其内部保持良好的韧性。与感应加热淬火、火焰加热淬火、激光表面强化相比，等离子弧表面淬火工艺具有装置简单，体积小，易操作，成本低，热效率高等优点。在工业发达的国家，对等离子弧表面淬火技术的研究已进入实际应用阶段。国内对等离子弧表面淬火工艺及设备的研究也取得了一些优秀成果，但实际应用仍然不多。因此，实现等离子弧表面淬火技术的工业化应用，具有显著的经济和社会效益。

在实际的生产中，往往由于工艺条件（如等离子枪的喷嘴和钨极的烧损等）变化而影响了淬火效果的稳定性。所以本文从实际出发，着重解决以下几方面：

(1) 建立一个由计算机控制的等离子表面淬火的电源系统，对淬火过程的电压、电流和能量输出状态进行实时检测控制，以解决等离子弧表面淬火过程中的由于温度变化导致的熔化、加热电流冲击等生产实际问题。

(2) 本文采用 PLC 为核心控制单元，与 PC 机连接，利用 MGCS 组态软件采集整个淬火过程的电压和电流信号，并用 MATLAB 进行数据处理，从而得出整个淬火过程的电压和电流曲线，通过研究淬火过程的主要能量参数的变化规律，积累了开发集成智能化专用等离子表面淬火电源的经验。

(3) 为了验证此系统淬火的稳定性，结合实际科研项目的需要，对 45、40Cr、35CrMn、45Mn、38CrSi 等材料进行了表面强化处理。实践证明，该系统可使淬火过程性能稳定，工艺实用性强，同时积累了大量的淬火优化工艺参数。此项研究为等离子弧表面淬火专家系统的建立奠定了基础。

**关键词：**等离子弧，表面淬火，电源，PLC 控制

## **Research of Power Supply Equipment for Plasma Arc Surface Hardening**

### **Abstract**

The plasma arc surface hardening is a method of surface heating. It is a process that material surface is quickly heated by high energy density plasma arc to cause the phase change, to form hardening zone of the martensite. Hardness and wearing resistance of parts are increased by the surface hardening technology and the interior of parts has better toughness. Compared with induction heat, blaze heat and laser surface hardening, the plasma arc hardening technology has some advantages such as simple structure, small volumes, easy manipulation, economy, and high heat efficiency. In developed industry countries, the plasma arc surface hardening has come into practical application stage. The domestic study of the plasma arc hardening technology and equipment has gained some excellent achievement, but few has been put into application. Therefore, the industrializations of plasma arc surface hardening technology will have prominent economic profit and society benefits.

Due to the change of the technology parameters (spout and tungsten electrode of plasma gun burn etc.), the stability of hardening is usually affected in the practical production. Based on these problems, this paper stress on practically solution several facets:

(1) Establish a power-supply system of plasma arc surface hardening which is controlled by computer, during hardening process this system real-time check and control voltage, electric current and the output status of energy.

(2) This paper adopt PLC as core control unit, PLC connect with computer, use MGCS configuration software to gather the voltage and current signal during the hardening process, and then process data with MATLAB, so as to get the curve of voltage and current during hardening. After we research the main energy parameters of hardening process, we accumulate many experiences to develop integrated intelligent and special plasma arc surface hardening power supply.

(3) In order to verify the stability of this hardening system, and according to the needs of practical research item, we deal with 45, 40Cr, 35CrMo, 45Mn, and 38CrSi in our experiments.

Practice proved that this system is more stable, the technology practicability is better. It sets up the foundation to establish expert system of plasma arc surface hardening.

**Key Words: Plasma arc, Surface hardening, Power supply, PLC control**

## 独创性说明

本人郑重声明：所呈交的论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得沈阳工业大学或其他教育机构的学位或证书所使用过的材料。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做了明确的说明并表示了谢意。

签名： 周迎华 日期： 2005.3.12

## 关于论文使用授权的说明

本人完全了解沈阳工业大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅；学校可以公布论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的论文在解密后应遵循此规定)

签名： 周迎华 导师签名： 袁收珍 日期： 2005.3.12

## 1 绪论

在机械制造行业中，有很多零件的破坏是从自身表面开始的，其所造成的能源与材料的消耗是十分惊人的<sup>[1]</sup>。因而材料的磨损与腐蚀问题已受到国内外机械设计与制造部门、材料研究和生产部门的普遍重视，而对材料进行表面处理则是表面工程的一部分。

表面工程技术是一门边缘科学，它主要包括表面堆焊、热喷涂、表面热处理、刷镀、激光表面合金化、电火花表面沉积等技术<sup>[2]</sup>。传统的表面技术，随着科学技术的进步而不断创新。在电弧喷涂方面，发展了高速电弧喷涂，使喷涂质量大大提高。在等离子喷涂方面，已研究出射频感应藕合式等离子喷涂、反应等离子喷涂、用三阴极枪等离子喷枪喷涂及微束等离子喷涂。在电刷镀方面研究出摩擦电喷镀及复合电刷镀技术。在涂装技术方面开发出了粉末涂料技术等。在粘结技术方面，开发了高性能环保型粘结技术、纳米胶粘结技术、微胶囊技术。在高能束应用方面发展了激光或电子束表面熔覆、表面淬火、表面合金化、表面熔凝等技术。在离子注入方面，继强流氮离子注入技术之后，又研究出强流金属离子注入技术和金属等离子体浸没注入技术。在解决产品表面工程问题时，新兴的表面技术与传统的表面技术相互补充，为表面工程工作者提供了宽广的选择余地。

表面工程具有学科的综合性，手段的多样性，广泛的功能性、潜在的创新性、环境的保护性，具有很强的实用性和巨大的增效性，因而受到各行各业的重视。其产生的经济效益更是令人瞩目。目前，我国技术门类齐全，部分表面技术的设备、材料和工艺已达到了国际先进水平。据不完全统计，仅我国自第6个五年计划以来，通过表面工程在设备维修领域和制造领域推广应用，已取得了几百亿元的经济效益<sup>[3]</sup>。表面工程已经发展成为横跨材料学、摩擦学、物理学、化学、界面力学和表面力学、材料失效与防护、金属热处理学、焊接学、腐蚀与防护学、光电子学等学科的边缘性、综合性、复合型学科。

表面热处理是其中的一部分，它是通过快速淬火使金属表层发生相变，从而产生高硬度、耐磨损、抗腐蚀的表面，从而极大地改善金属表面地机械性能。因此，该技术是

解决材料耐磨、抗腐蚀问题的有效途径。所以，研究开发表面淬火新技术，仍是工业发展的重要课题。

### 1.1 表面淬火技术的分类、比较及其发展

表面热处理方法可分为两类：一类叫化学热处理，它即改变表层化学成分又改变表层组织，它包括渗碳、氮化、氰化、渗硼、渗金属等。一类叫表面淬火只改变表层的组织而不改变表层的化学成分，包括火焰加热表面淬火、高中频加热表面淬火、接触电加热表面淬火、电解液加热表面淬火、激光电子束加热表面淬火等。这类技术是利用快速淬火的方法使金属表层发生相变，如碳钢由奥氏体转化为马氏体，产生硬度高、耐磨损、耐腐蚀的表面，从而极大的改善金属表面的机械性能。目前普遍采用的快速淬火的表面热处理方法包括：火焰加热表面淬火、感应加热表面淬火和激光表面强化热处理等。

火焰表面淬火是一种用乙炔一氧火焰(最高温度达 3100℃)或煤气一氧火焰(最高温度达 2000℃)将工件表面高速加热，随后喷水冷却的一种淬火方法<sup>[4]</sup>。一般常用乙炔一氧火焰表面淬火，其优点是：

- (1) 设备简单、投资少、成本低；
- (2) 适用于单件或小批生产，也适用于大型工件的局部淬火要求，如大齿轮、轧辊、大型壳体(马达壳体)、导轨等；
- (3) 不易产生表面氧化与脱碳；
- (4) 不受现场环境与工件大小的限制，适用性广，操作简便。

缺点是：

- (1) 不易稳定地控制质量；
- (2) 大部分是手工操作和凭肉眼观察来掌握温度。表面容易烧化、热与淬裂，很难达到均匀的淬火层与高的表面硬度；
- (3) 实现机械化流水生产较为困难。

感应加热表面淬火，工件是间接的由外加电磁感应线圈在工件中产生的感应电流进行加热，这种技术也有许多不足之处。例如：对工件材质有一定的要求；局部温度控制比较困难，尤其是有锐边或厚度不均的零件更是如此；由于感应加热效果取决于在具体

工件上的感应电流。因此，某些工件由于它们的几何形状而不能有效加热，如：内孔表面等；而且不同形状或尺寸的工件都需要各自特殊设计的感应圈，以使感应加热工艺最优化，当生产批量不大或工件尺寸很大时，这些特殊感应线圈设计、制造和使用的费用也是难以承受的<sup>[5]</sup>。

激光器的出现为表面强化处理提供了一种新型能源<sup>[6]</sup>。上世纪 70 年代开始发现激光辐照金属能改变表面层的微观结构，并能提高金属表面的硬度、耐磨性和抗腐蚀性。现在激光表面处理已作为机械零件表面强化的重要手段被广泛研究和应用<sup>[7]</sup>。激光表面改性处理已成为当前最引人注目的表面强化处理技术之一，也是未来工业应用潜力最大的表面改性技术之一，具有很大的技术经济效益，广泛应用于航空、航天、机械、电器、兵器和汽车等制造行业，利用激光处理技术在一些表面性能差和价格便宜的基体金属表面上能制出耐磨，耐蚀和耐高温的表面合金层，用于取代昂贵的整体合金，节约贵重金属和战略材料，使廉价材料获得应用，从而大幅度降低成本。另外，还可以用来研制新材料和代用材料，制造出在性能上与传统冶金方法根本不同的表面合金，应用在太空，高温和化学腐蚀性强的环境条件下工作的机械零件上，如轴承、气缸、衬套、活塞环、凸轮和传动机构等。目前，美国正在研究用激光淬火处理硬化飞机的重载齿轮的技术，该技术不需要研磨工艺，可以大大降低生产成本，提高生产率。另外，采用激光硬化处理的飞机发动机气缸内壁比氮化处理的效率要快 14 倍，且所得到的硬化层比经过 10~20 小时氮化处理的硬化层还厚，质量优良，几乎无变形<sup>[8]</sup>，耐磨性显著改善。

近年来，随着机械工业，材料工业的迅速发展，对金属表面热处理技术的要求不断提高，表面淬火新技术不断涌现。国外表面淬火技术的发展方向有以下几个方面<sup>[9]</sup>：

- (1) 选择淬火方法；
- (2) 淬火槽中传热模式会保证在淬火件范围内均匀冷却；
- (3) 水和惰性气体淬火方法要超过盐浴和油淬；
- (4) 将计算机和机器人引入热处理过程，向生产自动化发展；
- (5) 防止对环境的污染。

当代新技术，特别是物理学和电子学方面的发展，对新的加热源的开发和利用产生了巨大的推动作用，从而使许多新工艺得到实现，其中，尤以高能量密度热源

表面热处理技术最引人注目<sup>[10]</sup>。所谓高能量密度热源表面热处理，即是对工件表面施加非常高的能量密度，在很短的时间内，将工件表层加热到相变温度以上，达到接近熔融状态，然后靠工件自身传热冷却，实现表面硬化，以提高表面耐磨性和耐腐蚀性。

等离子束与激光束和电子束并称为高能量密度束。但是与后两者相比，等离子束具有发生装置简单、成本低、操作维护方便、对工件表面无特殊要求等突出的优点，非常适合于工业化应用。在美、欧等激光表面淬火技术发达的国家，等离子弧表面淬火的研究已进行了多年<sup>[11]</sup>。据有关资料介绍<sup>[12]</sup>，美国，俄罗斯等国早在二十世纪八十年代就已经完成实验室研究阶段，开始应用于工业生产，并且取得了良好的经济效益。我国对等离子弧表面淬火技术的研究落后于西方国家多年，八十年代末，我国的研究人员才开始进行机理性试验研究，工业化开发至今刚刚起步，若能将其应用于工业设备上，并发挥抗磨减磨作用，无疑是具有深远的意义。

高能量密度表面热处理的特点是：

(1) 高能量密度热源作用在材料表面上的功率密度高、作用时间极其短暂，即加热速度快、冷却速度也快，处理效率高；

(2) 进行处理的面积可根据需要任意选择，并且能量的作用被集中在一定的范围和深度，因此，加热作用仅发生在表面和一个深度不大的表面层，故能量的利用率高，有很好的节能效果；

(3) 其热处理过程是靠工件自身冷却，不需要任何冷却介质。因此处理环境清洁，无污染；

(4) 高能量密度加热的可控性能好，通过磁场或电场信号对激光束、电子束、离子束的强度、位置、聚焦等参数可用计算机精确控制，便于实现自动处理；

(5) 高能量密度热源，尤其是激光可以远离传输或通过真空室对特种放射性或易氧化材料进行表面处理。

高能量密度热源主要有激光、电子束、等离子电弧、太阳能等。在发达国家中，利用激光、电子束、等离子电弧作为热源进行钢铁表面淬火的技术得到广泛的研究与开发，并有许多成功的应用与投产的实例。特别是由于激光、电子束、等离

子电弧的自身特点，使在热处理过程中引入电子计算机和机器人控制成为可能。随着热处理的精确性和可控性的不断提高，高能量密度热源表面热处理必将成为很有前途的热处理方式。

等离子弧表面淬火是应用等离子束将金属材料表面加热到相变点以上，随着材料自身的冷却，奥氏体转变成马氏体，在表面形成由超细化马氏体组成的硬化带，具有比常规淬火更高的表面硬度和强化效应<sup>[13]</sup>。同时硬化层内残留有相当大的压应力，从而增加了表面的疲劳强度。利用这一特点对零件表面实施等离子淬火，则可以提高材料的耐磨性和抗疲劳性能。而且，由于等离子表面淬火速度快，进入工件内部的热量少，由此带来的热畸变小(畸变量为高频淬火的 1/3~1/10)。因此，可以减少后道工序(矫正或磨制)的工作量，降低工件的制造成本。另外该工艺为自冷却方式，是一种清洁卫生的热处理方法。此外对于解决引进设备零部件修复及国产化问题，支持高技术和新技术发展以及节约材料，节约能源等各方面都具有十分重要的意义。所以，近年来，各种各样的表面技术的研究与开发异常活跃，发展非常迅速，在科技界成为一个令人瞩目的新兴领域。等离子弧表面淬火可用于用常规硬化方法不能处理、或者几乎不可能处理到的表面<sup>[14]</sup>，如：丝杠螺纹部分、齿轮和齿条的齿部、凸轮和靠模的工作面以及许多零件的各种槽、沟、孔的局部硬化处理。对于表面积很大的工件—导轨、主轴、转轴、轴、杆等而言，运用等离子弧表面淬火来获得连续的硬化层也颇有前途。同样作为新型表面淬火技术，等离子弧热源是仅次于激光热源的高能量密度热源，用等离子弧热源进行表面淬火具有与激光淬火相同的一些优点，更具有激光淬火无法比拟的显著优点：

(1) 等离子弧表面淬火设备只需在普通应用的等离子弧发生器的基础上作些改进即可实现表面淬火要求，在技术上、制造上都很容易实现。而目前国内只能生产功率较低的激光表面淬火设备，限制了激光表面淬火技术的应用范围；

(2) 在激光淬火前，工件需进行磷化（即黑化）处理，以提高光的吸收系数，这样就增加了淬火工序，并且，黑化质量对激光热处理的效果影响很大，而等离子表面淬火不需类似的工序即可完成；

(3) 由于技术和设备的原因，目前激光器的工业效率（即电光能量转换效率）很低，不超过 15%，而等离子弧表面淬火设备的热效率要高出许多；

(4) 激光表面淬火设备的价格昂贵，体积庞大，对操作人员的技术要求高，造成安装场地要求高，生产成本高，而等离子弧表面淬火设备价格便宜，体积小，降低了生产成本；

(5) 由于激光设备的原因，激光淬火在内孔表面等部位的淬火长度受到限制，等离子弧表面淬火通过采用合适的工装，可以实现对深孔表面强化。

当然，等离子弧表面淬火也存在一些不足。等离子弧表面淬火外部影响因素很多，在淬火过程中都需要控制，对实现稳定的淬火工艺增加了难度。等离子弧表面淬火对于工件的小的局部，窄的沟、槽等表面实现比较困难，而且，硬化层深度较浅，有一定的应用限制。

## 1.2 等离子弧表面淬火技术及其发展

等离子体技术是 20 世纪 60 年代以来，在物理学、化学、电子学、真空技术等学科交叉发展的基础上形成的一门新兴学科<sup>[15~17]</sup>。采用等离子体技术可使物质通过吸收电能实现一系列传统化学所不能实现的新的化学反应。40 年来，等离子体技术在电子学、化学、物理学、医药学、生物学、高分子科学、环境科学、材料学、冶金化工、轻工纺织等广泛领域以应用为中心的技术开发十分活跃<sup>[18]</sup>。而等离子弧表面淬火技术又是近十年来出现的一种很有前途的表面热处理技术。该技术是对金属进行非接触式加热，没有机械应力作用，而且加热速度和冷却速度快，热应力也小，因此处理后工件的变形很小，生产效率高。它与激光表面淬火都是无污染且高效率的表面淬火方法。但等离子弧的热源装置简单，工作成本低，操作方便。所以，它在一定范围内可以替代激光热源。

等离子弧表面淬火技术在工业发达国家几乎同时进行了可行性研究。其中，美国、俄罗斯、日本、德国等激光表面技术先进的国家在等离子弧表面淬火技术方面也处于领先地位。据有关资料介绍，美国、俄罗斯等国家早在二十世纪八十年代就已经完成实验室研究阶段，开始应用于工业生产。并且取得了良好的经济效益。我国对等离子弧表面淬火技术的研究落后于西方国家多年，八十年代末，我国的研究人员才开始进行机理性试验研究，工业化开发至今刚刚起步。

目前，国外的等离子弧表面淬火技术比较成熟且自动化水平也很高，国内对等离子弧表面淬火的工艺性和淬火效果的研究较多。如何实现淬火过程的自适应功能研究尚

少。本文就是以提高工艺稳定性为目的，对 PLC 控制等离子弧表面淬火设备进行了研究，为今后等离子弧表面淬火工艺的广泛应用做准备和铺垫工作。

等离子弧自二十世纪二十年代被开发成功以来，以其热源装置简单，工作成本低，操作方便等优点，表现出巨大的发展潜力。七十年代能源危机的出现，更加速了它的发展。等离子弧作为高能量密度的热源被广泛应用于工业多种领域。等离子弧焊接、等离子弧切割、等离子弧喷涂等技术，已为人们所熟知<sup>[19]</sup>。进入八十年代，又先后出现了等离子弧加热切削，等离子弧加热旋压波纹管等新技术、新工艺<sup>[20]</sup>，同时，伴随着激光表面淬火技术的迅速发展，给人们研究等离子弧表面淬火以很大的希望。

在国内，等离子弧表面淬火的具体应用如下<sup>[21]</sup>：内燃机摇臂件，材料为 45，经等离子弧表面淬火后可达到硬度 58~62HRC，回火后 52~55HRC，淬火层深为 2mm，并使用等离子弧表面淬火机床，显著提高产品质量和性能，实现了工艺半自动化。汽车挂车的无芯轨道，材料 QT50-5，经淬火后硬度达 40~50HRC，径向变形量不超过±0.03mm，并显著提高了耐磨性。喷塑机丝杠，不仅提高硬度，还保证了强度。采用等离子弧表面淬火新工艺对换热器生产线的托辊进行了表面淬火，托辊的材质为 45Cr 钢，表面淬火硬度达到 50~60HRC。托辊无变形，淬火层的机械性能和使用寿命明显提高。对油田井下冲击钻具缸套表面进行等离子弧表面淬火，实现了对长工件深孔内表面的淬火要求。另外，还用于工模具、玻璃马赛克轧辊、机床导轨等零件，均取得了良好效果。近年来在等离子表面淬火领域中又取得了一些新的进展，其中较为突出的是对淬火用等离子束流截面功率密度分布的研究和在等离子束扫描淬火的同时进行多元共渗合金化<sup>[22]</sup>。该技术已在内燃机气缸套中大面积推广使用，收到了很好的效果<sup>[23]</sup>。国外，工业发达的国家尤以俄罗斯、美国、日本、德国等激光表面淬火技术先进的国家在等离子弧表面淬火技术方面也处于领先地位。日本在九十年代初就研究了等离子弧表面淬火的条件和金相组织<sup>[24]</sup>，并用小口径喷嘴进行碳钢的等离子弧表面淬火<sup>[25]</sup>，证明如果考虑加热方法，则和激光同样可进行局部硬化。前苏联将等离子弧表面淬火法成功地用于强化铸铁轧辊，使轧辊使用寿命提高了 1.46 倍，获得很大经济效益<sup>[26]</sup>。后又用氩热等离子弧喷射局部硬化高碳钢，同样获得良好效果<sup>[27]</sup>。M.V.Selivanov 用以氩为源离子的等离子弧发生器硬化铸铁部件<sup>[28]</sup>，研究其抗磨层特性，其硬度可达 52~60HRC。

V.V.Grishanov 等将激光表面淬火工艺和等离子弧表面淬火工艺相结合<sup>[29]</sup>, 证明可有效的避免表面裂纹、涂层剥落、工件翘曲的缺陷。Y.M.Dombrovskii 用空气等离子弧扫描 70 号高碳钢表面<sup>[30, 31]</sup>, 进行表面强化, 表面硬化层宽为 40mm, 厚 2.5mm, 并对处理后金属表面的机械性能进行了研究, 论证了结构强度的变化。A.G.Saakov 提出等离子弧强化轮副<sup>[32]</sup>, 可以有效的提高其接触疲劳应力。

### 1.3 等离子弧表面淬火设备的研究现状

由于等离子弧表面淬火技术是一项综合性的高新技术, 等离子弧的影响因素较多, 淬火重复性差, 必须采取自动控制才能实现稳定的淬火过程<sup>[33]</sup>。国外在在等离子弧表面设备和自动化控制方面研究的较早, 也取得了很大的成就, 并已应用于工业生产。国内在这方面还处于研究阶段。

等离子弧表面淬火要实现稳定的淬火过程, 其中尤以等离子弧表面淬火专用电源最为关键。等离子弧表面淬火电源是空载电压约为 70~80 伏, 并要求其外特性是陡降的专用直流电源。该电源与等离子弧弧焊接电源相似。由于没有等离子弧表面淬火专用电源, 目前以弧焊电源作为等离子弧表面淬火加热电源。

等离子电弧所采用的电源, 一般为具有陡降外特性的直流电源。自二十世纪七十年代以来采用过普通旋转式直流电源、硅整流式电源、可控硅式电源和逆变式电源等作为等离子弧电源<sup>[34~36]</sup>。

目前, 旋转式直流电源和硅整流式直流电源已被可控硅式直流电源和逆变式直流电源所取代。

在二十世纪六十年代初, 随着大功率晶闸管的问世, 出现了以晶闸管为整流元件的电源—晶闸管式电源(又称可控硅式直流电源)。由于其本身具有良好的可控性, 因而, 对外特性形状的控制、工艺参数的调节, 都可以通过改变晶闸管的导通角来实现, 而无需要磁放大器。该电源的性能更优于磁放大器式硅整流器, 已成为目前一种主要的直流电源。日本已用晶闸管式整流器逐步代替磁放大式整流器。德国、芬兰、美国、英国等许多大的电源公司也大多生产晶闸管式电源。我国的科研人员于二十世纪六十年代后期开始了这方面的研究工作, 并研制成功了 ZX5 系列和 ZDK-500 型晶闸管式直流电源。

早在二十世纪七十年代初，逆变器已应用于中频加工领域。1978 年开始出现了晶闸管式弧焊逆变器，1981 年又出现晶体管式弧焊逆变器。在 1981 年世界焊接与切割博览会上，首次展出四个厂家的晶闸管式和晶体管式弧焊逆变器，主要用于焊条电弧焊、低压引弧式的钨极氩弧焊和 CO<sub>2</sub> 气体保护焊，最大电流为 350A。

1989 年在同样的博览会上已有 30 多个厂家展出逆变式电源。除场效应管、晶体管式逆变器以较大的比例增加外，开始出现 IGBT 式逆变器，最大容量达 500A，其用途进一步扩大到等离子弧切割、微机控制等。

在 1993 年的焊接与切割博览会上，绝大多数参展公司均推出他们的逆变式电源产品，并出现了场效应管式和 IGBT 式并举的格局，技术水平达到了新的境界，额定电流 130A、负载持续率为 35% 的场效应管式逆变器，质量仅有 4Kg，逆变频率为 100~130kHz。

在我国，逆变式电源的发展速度也很快，前景十分可观。上世纪七十年代末，我国着手研制晶闸管逆变式电源，80 年代初取得初步成果。特别可喜的是，1982 年我国华南理工大学的学者在德国首次研制出世界第一台场效应管式逆变式电源实验样机，而大功率场效应管在 1981 年才出现在世界工业博览会上。1989 年又出现新型大功率开关元件——IGBT，1990 年华南理工大学就研制出 IGBT 逆变式电源。上述两种逆变器的逆变频率分别为 50kHz 和 20kHz。315A 场效应管逆变式电源质量仅为 20Kg 多，效率达 88.6%；630A IGBT 式弧焊逆变器的质量仅为 50Kg 多。目前部分弧焊器已进入小批量的生产阶段，正在为大批量生产和大面积推广作努力，以 MOSFET 和 IGBT 为主并举发展，可应用于焊条电弧焊、MAG/CO<sub>2</sub>/MIG 焊、等离子弧焊和空气等离子弧切割、矩形波交流弧焊、机器人焊接，以及电脑控制的高性能焊接等场合。具有更新换代意义的高效、节能、重量轻、体积小的逆变式电源，自上个世纪末问世以来已有了很大发展，并被荣称为“明天的电源”。

#### 1.4 本课题的提出

目前使用的等离子弧表面淬火电源存在以下问题：在采用转移型等离子弧进行表面淬火过程中，由于起弧的瞬间喷嘴与工件的电路瞬时接通存在工作电流、电压的突变，产生起弧部位过热熔化，沟、槽断弧和边界过热问题，严重影响工件的表面质量；在淬

火过程中，由于工艺条件（等离子弧喷嘴和钨极的烧损等）的逐渐变化，会导致设定的电源参数不合适而影响淬火表面的硬度和深度，现有电源不具有自适应功能，因此影响工艺的稳定性。

基于上述原因，本课题以实现等离子弧表面淬火的自适应功能，在前人研究成果的基础上，设计等离子表面淬火的 PLC 控制。并利用现有的淬火电源，对等离子表面淬火加热电源进行闭环控制。以稳定电弧的能量为控制目标量，电源输出的电流和电压为反馈信号，对等离子弧表面淬火电源进行控制。我们利用这套设备和事先准备好的材料进行了试验，对采集到的数据进行分析。最终得出了淬火过程中电流和电压的变化关系，根据变化关系，用 PLC 进行补偿淬火电压，从而使淬火过程更加稳定，效果更加理想。此项研究为等离子弧表面淬火技术的推广应用奠定了基础。

### 1.5 本课题研究的目的是和内容

由于等离子弧的影响因素较多，淬火重复性较差，必须采取自动控制才能实现稳定的淬火过程，其中等离子弧加热电源的性能是最为关键。由于没有等离子弧表面淬火专用电源，目前，以硅整流式弧焊机、可控硅整流式弧焊机等作为等离子弧表面淬火加热电源。虽然传统的弧焊电源的技术比较完善，但是用于等离子表面淬火电源还存在以下问题：

(1) 小弧转到大弧时，产生的电流冲击容易造成工件表面烧伤。

(2) 在淬火过程中，由于工艺条件（钨极、喷嘴烧损等）的变化，会导致设定参数不合理，而现有电源不具有自适应功能，因此影响工艺的稳定性，因而限制了该技术的应用推广。以模糊逻辑、人工神经网络和专家系统为标志的人工智能技术成为控制领域中的重要研究方向，取得了很多重大的理论成果，并在实际中有大量成功的应用实例。为了适应等离子弧表面淬火工艺自动化的需要，研制开发各种微机控制式的自动化等离子弧表面淬火设备已成为一大趋势。

由于等离子弧的影响因素较多，等离子表面淬火技术虽然在部分厂家进行了应用，取得了良好的效果，但由于受到自动化控制水平和工艺稳定性的限制，目前还未能形成稳定的工业生产工艺，限制了该技术的推广应用。基于上述原因，本课题以实现工业生产为目的，在前人研究成果的基础上，通过分析不同条件下等离子表面淬火温度场与金

属相变过程的关系，对各种工件材料进行等离子弧表面淬火工艺参数优化，开发等离子弧表面淬火工艺参数优化控制的专家系统，从而降低对操作者技术水平的要求。具体内容如下：

(1) 利用 PLC，以稳定等离子电弧的能量为目标，以电源输出的电流和电压为采样信号，对等离子弧表面淬火加热专用电源进行控制。

(2) 在此控制系统的基础地上，利用实验室已有的实验设备，对具有典型意义的 45、40Cr、球墨铸铁等材料进行实验。通过改变加热功率、扫描速度、扫描螺距、喷嘴的孔径等工艺参数，分析淬火过程中后材料的表面硬度层分布和金相组织。取得等离子弧表面淬火最佳工艺参数的一般规律和推理方法，为建立等离子弧表面淬火工艺参数优化控制的专家系统打下基础。

## 2 等离子弧的基本原理及系统设备的组成

完全电离或部分电离的气体，即等离子体。等离子体是能够导电的气体，它是由负的电子、正的离子或部分原子和分子组成的混合物<sup>[37]</sup>。它类似气体，并服从气体的规律。当工作时，在阴极和阳极之间加一高频高压电，使其间的气体介质电离形成电弧，此电弧柱在经过细孔道的喷嘴时被强迫缩小，这种作用称为“机械压缩”。同时通过的高压气体介质均匀地包围在电弧周围，使弧柱受到强烈地冷却，迫使带电粒子流向弧柱中心集中，弧柱被进一步压缩，这种作用称“热压缩”。此外带电粒子在弧柱中的运动可看成是在一束平行的“导线”内移动，其自身地磁场所产生的电磁力，使这些“导线”互相吸引靠近，弧柱又进一步被压缩，这种压缩作用称为“磁压缩”。在上述三种压缩作用下，弧柱被缩小到很细的范围内，并且由柔性变为刚性，能量密度高度集中，称为等离子弧。用这种等离子弧加热工件表面能形成很大的温度梯度，可使工件表面薄层内迅速升温至熔点或者相变温度以上，弧柱移走后依靠工件自身的热传导，加热区迅速冷却，形成细密的白口或隐针马氏体类的高硬度组织，提高表面的硬度与耐磨性，而且处理工件变形小、效率高。

### 2.1 等离子弧的结构形式

根据导电方式，可将等离子弧结构分为三种形式。

#### (1) 非转移型等离子弧

用这种等离子弧加工时，工件不接电源。轴向分布不均匀。这种等离子弧的形式是在电极与喷嘴之间通以气体，在外加电场作用下，从阴极激发的电子，使气体电离，而产生等离子弧。其特点是以喷嘴约束电弧直径，同时喷嘴为电弧的阳极，工件不接电路。这种电弧热的有效利用率不高。

#### (2) 转移型等离子弧

这种等离子弧，工件是导体并作为阳极，喷嘴用来约束电弧，在工作状态时，喷嘴不接入电路，但在产生这种等离子弧之前，需要先引燃较小电流的非转移型等离子弧，并使其焰流接触工件，以焰流作为导体来沟通电极与工件之间的电流通路。当转移弧电路接通时，则电流由工件经过喷嘴中心通向电极，使通过喷嘴中心的气体得到高度电

离，而形成等离子弧。同时用继电器切断起初引弧用的非转移型等离子弧。存在于电极和工件之间的电弧，称为转移型等离子弧。它的特点是：喷嘴能对弧柱进行良好的压缩，使弧柱有很高的能量密度，由于工件是阳极，热的有效利用率高。

### (3) 联合型等离子弧

这种等离子弧是非转移型等离子弧与转移型等离子弧联合而成的。在工作过程中，转移与非转移型等离子弧同时存在。在微束等离子弧使用过程中，可使电弧稳定。

## 2.2 等离子弧的伏安特性

除了金属、电解质可以导电外，在一定的条件下气体也可以导电<sup>[38]</sup>。在通常的情况下，气体的分子是中性的，仅有极少量的离子，所以气体是良好的绝缘体。但是，气体中如有足够多的电子和离子存在，那么在气体中也能产生电流，即气体导电。金属导电时，导电部分的电流和电压之间的关系遵循欧姆定律，而气体导电时，其导电部分电流与电压的关系也遵循欧姆定律，但是一个复杂的关系，这是因为金属导电时，在整个导电区间其导电机构基本不发生变化，而气体放电时，在不同条件下和不同的导电区间，其导电机构也显著不同。在较小的电流区间，气体导电所需要的带电粒子不能通过导电过程本身产生，而需要外加措施来造成带电粒子，随着外加措施的有无，决定了带电粒子的存在与否，即决定了它的导电性能。这种气体导电现象称为非自持放电。当电流大于一定数值时，气体导电过程本身就可以产生维持导电所需要的带电粒子，这种气体放电只在开始时需要外加措施制造带电粒子，一旦放电开始取消外加措施，放电过程仍可以自己继续下去，放电过程自身能产生维持放电所需的带电粒子，这时的过程称为自持放电区间。当电流再继续增加，即进入了辉光放电区。其伏安特性如图 2.1 所示：

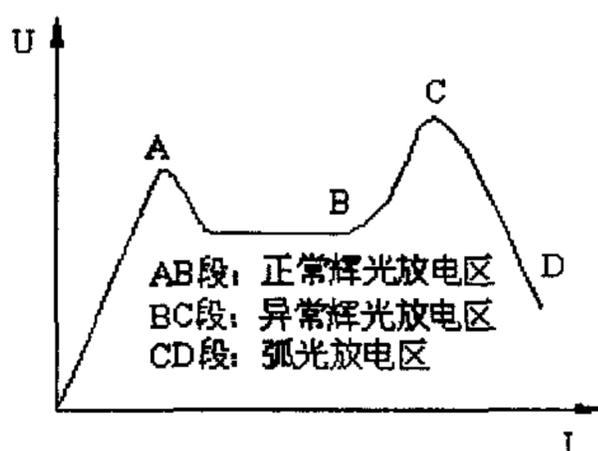


图 2.1 气体放电的伏安特性

电弧是几种自持放电形式中电压最低、电流最大、温度最高、发光最强的一种气体放电现象。因此，电弧在工业中作为热源被广泛使用。等离子弧伏安特性即指电弧电压与电流的关系，它们通过电阻联系起来。等离子弧柱电阻与弧长成正比，与弧柱横截面积及电导率的乘积成反比，由此得：

$$R = \frac{l}{\rho s} \quad (2.1)$$

式中：  $l$ —电弧长度；

$\rho$ —弧柱电导率；

$s$ —弧柱截面积；

$R$ —弧柱电阻。

由于  $\rho$ ， $s$  均为电流的函数，所以弧柱电阻也可以表示为电流的函数

$$R = cf(I) \approx \frac{c}{I^d} \quad (2.2)$$

其中：  $c$ ， $d$  为常系数。

则电压为：

$$U = IR = cI^{1-d} \quad (2.3)$$

当  $d > 1$  时，随电流的增大电压降低，形成下降伏安特性；

当  $d \approx 1$  时，电弧电压不随电流而变化，形成平的伏安特性；

当  $d < 1$  时，随电流的增加电压升高，形成上升伏安特性。

弧长一定，电流较小时，随着电流的增大，电压降低。因为，随电流的增加，温度升高，结果使弧柱电阻减小，电压下降。但当电流增加到一定值时，电离度达到饱和，就会形成平的甚至上升的伏安特性。表面热处理用等离子弧的伏安特性曲线是一条开始下降，而后稍平略有上升的曲线，如图 2.2 中曲线 1 所示：

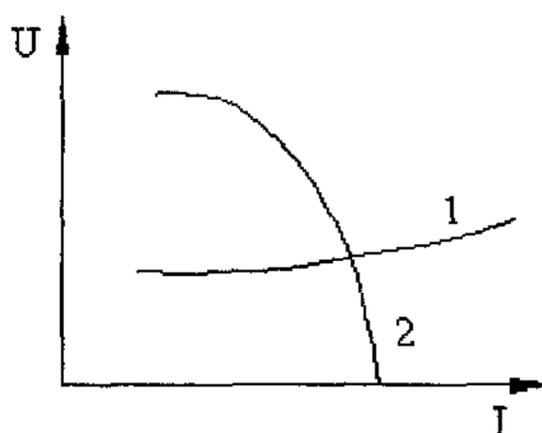


图 2.2 等离子弧的伏安特性曲线(1)和电源外特性曲线(2)

在等离子弧中，由于喷嘴限制了弧柱尺寸的增大，造成了其伏安特性与自由电弧的差别。这种差别表现在两方面：一方面，等离子弧通常有较高电压；另一方面，等离子弧比较容易形成平的及上升的特性。另外，喷嘴直径的不同对电弧的伏安特性也有很大的影响，如图 2.3 所示：

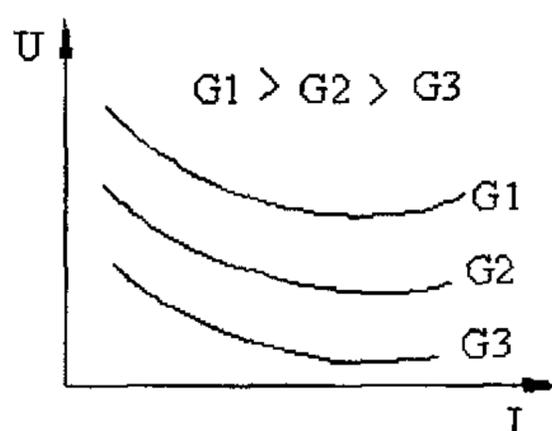


图 2.3 喷嘴直径不同时的伏安特性曲线

在等离子弧柱中，电位梯度是比较低的，同时其数值受气体种类、气体压力（流量）、电极材料、电弧的冷却以及处界的机械力和电磁力等外界因素的影响，其中气体的种类极大影响着弧电压。

惰性气体(如氩气和氦气等)不形成分子，其热电离所需的能量比多原子气体小得多，因此等离子弧电压较低。此外增加电弧周围介质的气体压力，等离子弧电压升高，如图 2.4、图 2.5 所示：

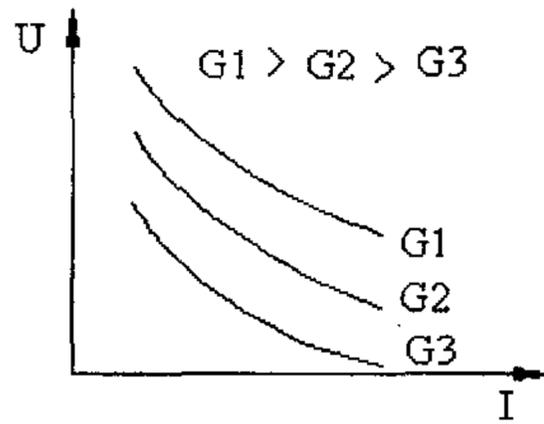


图 2.4 工作气体流量对伏安特性曲线的影响

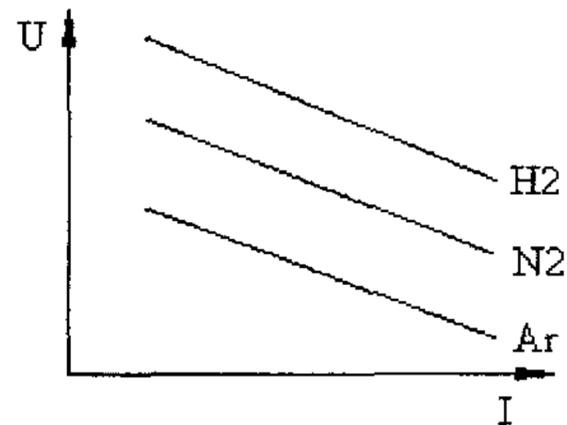


图 2.5 保护气对伏安特性曲线的影响

在等离子弧中，气体的电离度比自由电弧更高，导电截面被压缩的更小，能量密度更高，温度更高，具有很高的导电导热性能，并且比一般电弧稳定。

### 2.3 等离子弧的特点

由于等离子弧的作用，等离子弧在工作中具有“机械压缩效应”、“热收缩效应”、“磁收缩效应”，使等离子弧成为高能量压缩电弧，这种高温等离子弧的能量密度较一般电弧提高十倍以上，温度提高五倍以上<sup>[39]</sup>。

等离子弧具有以下特点：

- (1) 温度高、能量集中；
- (2) 具有很高的导电和导热性能；
- (3) 具有较大的冲击力；
- (4) 比一般电弧稳定；
- (5) 各项有关参数调节范围广。

由于上述特点，决定了等离子弧表面淬火具有生产率高、热能利用率高、热影响区小等优点。当然，也带来了参数控制复杂等问题。

## 2.4 等离子弧表面淬火设备

### 2.4.1 等离子表面淬火设备组成

等离子弧淬火工艺设备主要由：等离子弧淬火专用电源、控制柜、等离子喷枪、保护气体供气系统、机床、和冷却系统等六部分组成，如图 2.6 所示：等离子弧表面淬火用的保护气体，选用氩气。使用氩气的优点是氩气与氢气、氮气相比较，原子量大，导热率小，且因氩气为单原子气体，不吸收分解热。因此，氩气容易电离，容易形成电离度高且有良好稳定性的等离子弧。此外，氩气是惰性气体，它对防止等离子枪的喷嘴、电极氧化烧损有益。用单纯氩气作为保护气体，所需空载电压较低，因其携热性差，导热率小，弧柱较短，可以有很高的热效率。

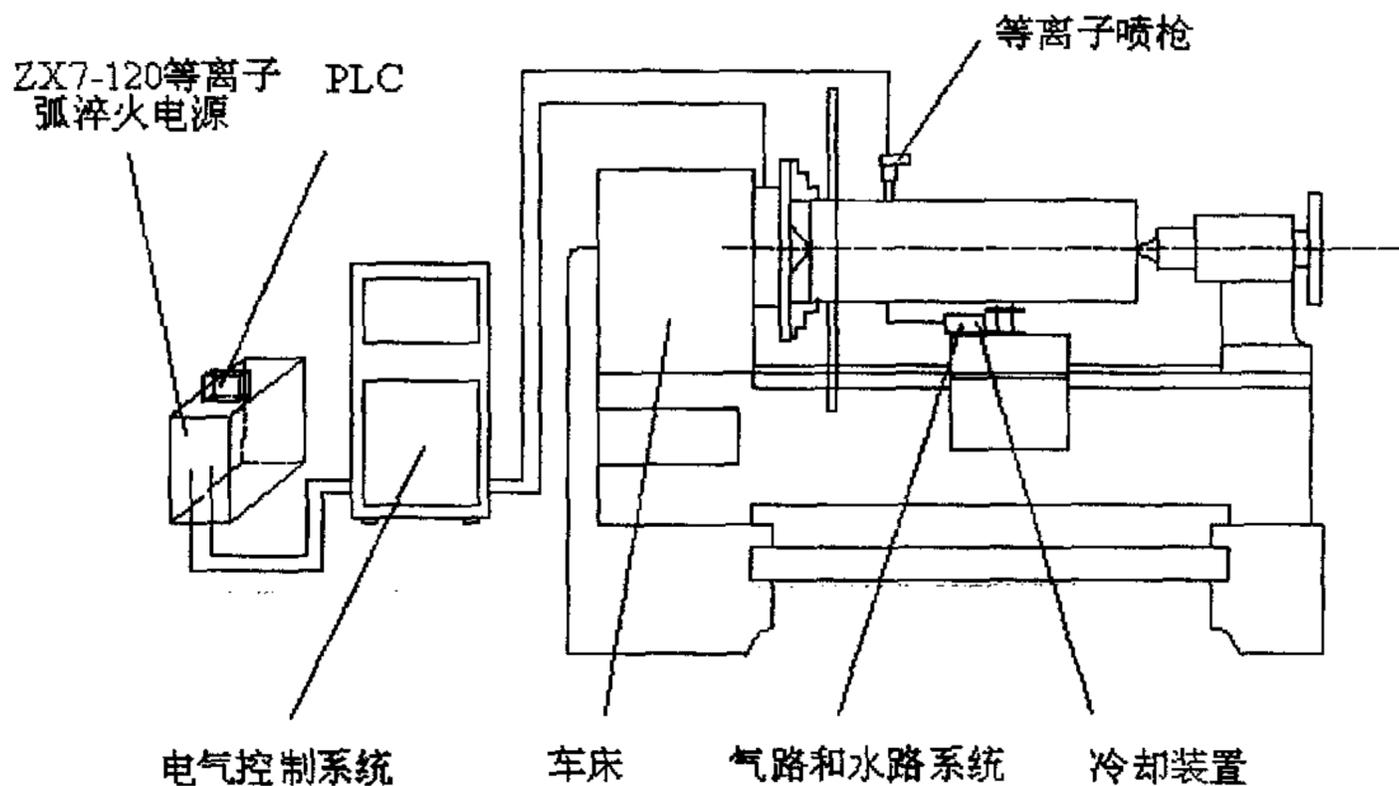


图 2.6 等离子弧表面淬火系统

等离子弧表面淬火所用的电极为钨钨电极，它的优点是，电子发射能力较强，逸出功较小，耐电流密度较大，电极损耗较小，产生的等离子弧相对稳定。

### 2.4.2 等离子弧表面淬火电源特性

本研究中的等离子体是依靠电弧实现的。电弧的稳定工作对电源有特殊的要求，优良的电源反过来对电弧特性又有很大的影响。根据电弧理论和强等离子体的实际工艺情况，其电弧主要呈现水平或上升的伏安特性<sup>[40-43]</sup>，即随弧电流的增大，弧电压基本不变或增大。电弧在整个系统中作为负载，根据电弧—电源理论，常见的恒压源不能使电弧稳定工作，只有具有缓降或陡降外特性的电源才可以使电弧稳定工作，电流变化小。由此可见，等离子体电源应该具有陡降的外特性。这种陡降的外特性不仅可以保证电弧的稳定工作，而且当电弧伏安特性略有变化时，工作电流基本稳定，可以减小由于电流突然增加而引起双弧的可能性，从而保证等离子体的工艺质量。为便于引弧，电源应具有较高空载电压(大于 150V)和工作电压(大于 90V)。

此外，等离子体电弧控制需要很短的反应时间(小于几毫秒)。这就要求电源具有良好的动特性。传统的等离子体电源大多采用硅可控整流器。这种电源必须附加一个感应器来保证短时间的电流稳定。固态器件和感应器会在电路上产生需要过滤的谐波，这将对整机性能产生不利影响。最后，电源必须由一个计算机化的系统控制。对于该控制系统，利用等离子矩电压随气体流率、成分、电弧电流以及压强变化的无量纲关系可能有助于通过改变 DC 涡流矩中的气体流量来快速调节电压。由高压脉冲电弧点火的电源应保护电源免受高压脉冲的影响，并逐渐变化电流和气体流率以缓慢达到运行条件。综上所述，等离子体电源应具有陡降外特性、良好的动特性、可控制性和较小的功耗，以及较高的输出电压。

### 2.4.3 逆变器电源

电源是等离子淬火的关键设备，电源特性直接影响淬火工艺的质量，经对各种电源特性和特点的比较，本课题研究中采用了逆变器电源，并对电源的关键控制部分进行了研究。

直流—交流之间的变换称为逆变，实现这种变换的装置就称为逆变器<sup>[44-46]</sup>。为等离子电弧提供电能，并具有等离子淬火工艺所要求电气性能的逆变器，被称为逆变式等离子弧电源。为了获得较好的传递电能的效果，一般是把直流变换成较高频率的交流电。过去一般是采用电感、电容振荡电路来产生中、高频交流电，这不仅装置庞大、造价

高，而且可调参数也不多。随着大功率电子开关元件和继承电路技术的发展，先进的中、高频逆变技术愈来愈多地被推广和应用。

逆变器对淬火工艺性能的改善很大，传统的电源常用工频来传递电能和变换电参数，而逆变器则把工频提高到几千至十多万赫兹进行电能的传递和变换，因此给结构和性能带来突出的特点：高效、轻便、性能优良。另外，逆变器还给它的电气性能、淬火工艺带来一下好处：

(1) 为频率高，交变电流过零的时间短，电流换向和熄弧期间由于热惯性使得电弧空间得残余热场可以保持在较高得水平，换极性后电弧空间重新进行气体放电所需得电场强度可以降低，从而提高交流电弧的稳定性。

(2) 由于三相或单相交流输入整流成直流后，负载为直流负载，在输入整流电路和输出回路中又均匀存在着起储能作用的电容器，从而可以明显减少无功损耗和提高功率因素。

(3) 淬火回路滤波电抗器的电感量因频率的提高而大为减少，故减小了时间常数。便于采用易于控制的电子电抗器，动特性得到较大的改善。

逆变式电源把工频提高几千至十几万赫兹进行电能的传递和变换，因而给它在结构和性能上带来突出的特点：

(1) 高效节能，效率可达 80%~90%，空载损耗极小，只有几十瓦至百余瓦；

(2) 重量轻、体积小，主变压器的质量仅为传统电源变压器的几分之一；

(3) 具有良好的动特性和工艺适应性。逆变器采用了快速开关功率电子器件和电子控制电路，可以设计出最合适要求的外特性曲线形状，并根据不同的工艺要求，对外特性进行任意的控制，以满足不同场合的需要。

逆变器在本质上说与通常的电子控制电源基本相同。一般都采用闭环反馈系统控制它的电气性能。即控制它的外特性和动特性。图 2.7 本系统电源的组成框图。

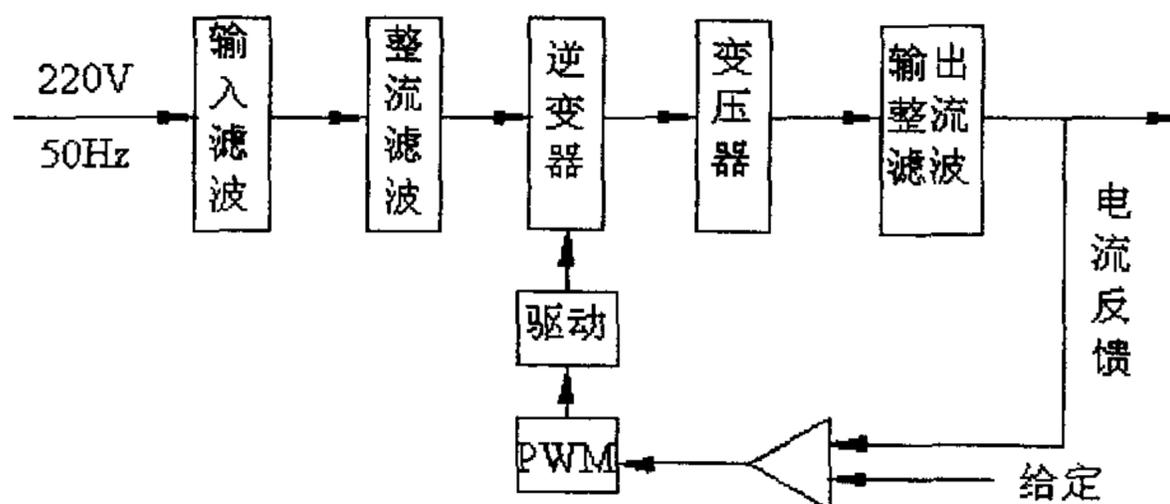


图 2.7 电源组成框图

单相交流网络电压，经过整流和滤波后，获得逆变主电路所需的平滑直流电压。该直流电压在电子功率系统中经逆变主电路，变成几千至十几万赫兹的中频高电压，再经高（中）频变压器降至适合于工作的几十伏电压，并借助于电子控制系统的控制驱动电路和给定反馈电路，以及工作回路的阻抗，获得淬火工艺所需的外特性和动特性。如果需要采用直流电进行工作，还需经整流、滤波把高（中）频交流变换成为直流输出。可以归纳为：工频交流—直流—高中频—降压—交流和直流。

为了满足等离子弧表面淬火对电源陡降特性的要求，等离子弧表面淬火电源采用了电流负反馈闭环控制，如图 2.8 所示：

电流信号是通过对电流表配给的分流器进行采样获得的。该信号经过放大后与给定信号相比较，获得电流偏差信号  $U_e$  即：

$$U_e = U_g - U_f \quad (2.4)$$

式中： $U_g$  为给定电压； $U_f$  为反馈电压。

再经过复杂的运算，进而得到控制电压  $U_k$ 。

由控制电压  $U_k$  调节脉冲宽度，从而实现电流的闭环控制。等离子弧表面淬火专用电源的外特性是由反馈环节决定的。

电源的电流控制采用的脉宽调制（PWM）技术，PWM 控制技术是通过控制电路按一定规律来控制开关管的通断，以得到一组等幅而不等宽的矩形脉冲波形并使其逼近正弦电压波形<sup>[47]</sup>。其特点是频率高，效率高，功率密度高，可靠性高。在此电源中，我们可以调节开关管的通断时间来调节电源的占空比。占空比愈大，则工作电压也愈大。

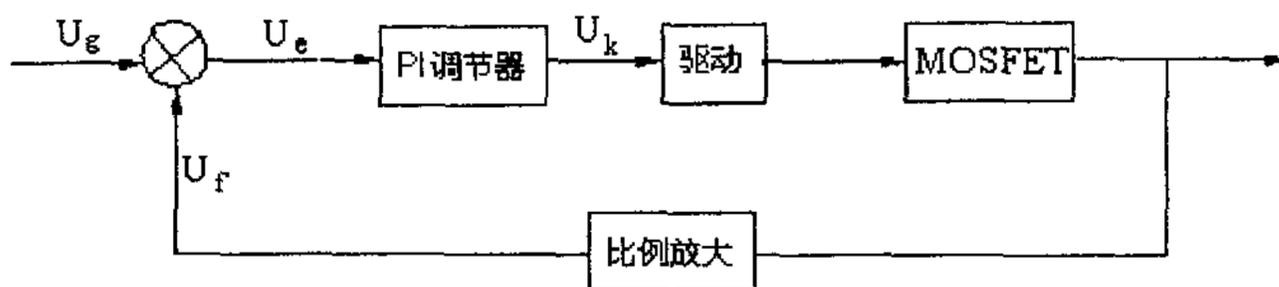


图 2.8 闭环反馈系统原理图

驱动电路作为逆变电路的一部分，对电路的输出有着很大的影响。本电源的驱动电路如图 2.9 所示：

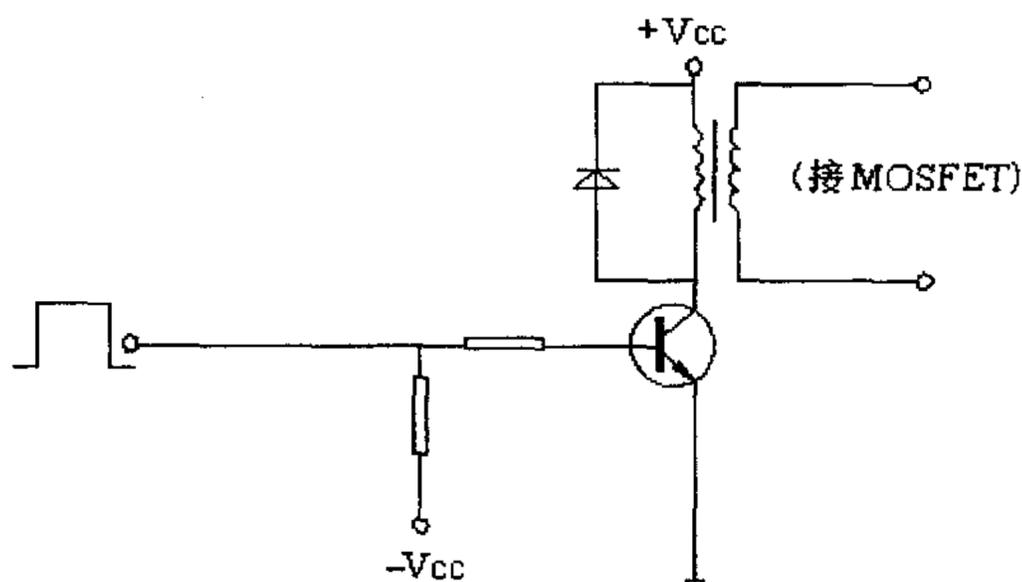


图 2.9 MOSFET 驱动电路图

三极管 T 的基极引入负电压，从而保证在无驱动脉冲的情况下，三极管 T 能够可靠关断。

#### 2.4.4 电气控制系统及其它设备

要想用 PLC 控制好等离子淬火过程，还必须从了解设备的电气特性，如图 2.10 所示。当水路开启，总开关 KS 闭合后，按下联动开关 AN1-1 和 AN1-2，此时小弧电路接通，若想维持小弧电流，只需把 K3 按下，小弧起来后，气路也被接通，可以通过调节阀调节气体的流量，再把常开按钮 AN2 按下，工作电弧接通，此时便可以进行淬火。

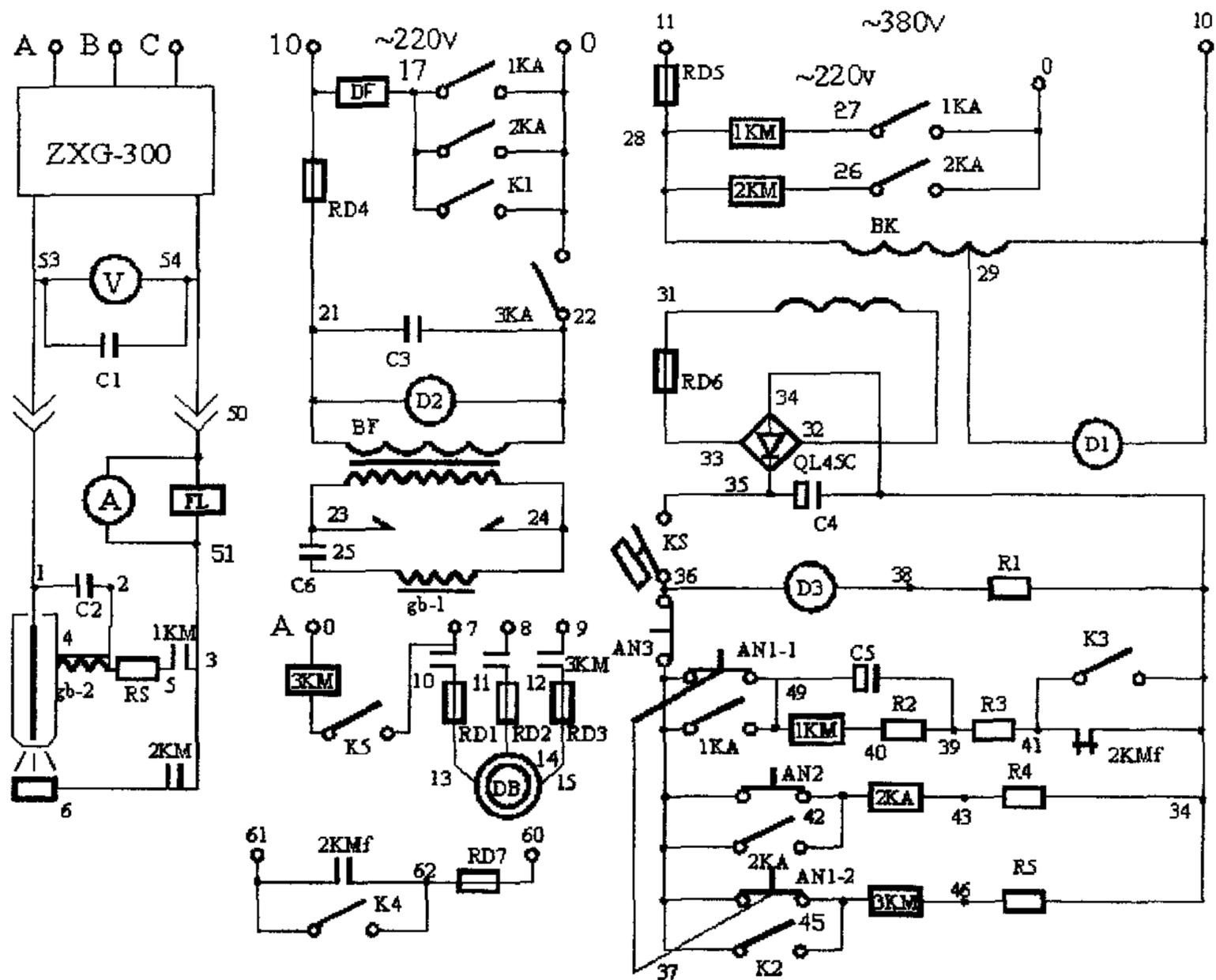


图 2.10 电气控制系统

外围设备:

- 1) C620-1 普通车床
- 2) 冷却泵
- 3) 自制冷却喷嘴

### 3 电源参数和控制系统

#### 3.1 等离子弧表面淬火过程分析

等离子弧表面淬火过程是一个工艺参数多、十分复杂的过程<sup>[48]</sup>。工艺参数的变化会直接影响淬火效果。例如电流，当电流小于某一数值时，电弧不稳定，“小孔效应”消失，引起未淬透，达不到要求的硬度。电流大于某一数值时，淬火表面出现熔化。在其它条件不变，淬火电流增大超过某一数值时，电弧的稳定性破坏，容易产生双弧，烧坏喷嘴。因此，最佳淬火参数正是我们所追求的。为了能够得到最佳的淬火参数，必须了解等离子淬火的整个过程，其时序流程图见图 3.1。其中，除了淬火过程以外的环节均由电气控制部分来完成，而本次课题主要研究淬火过程。

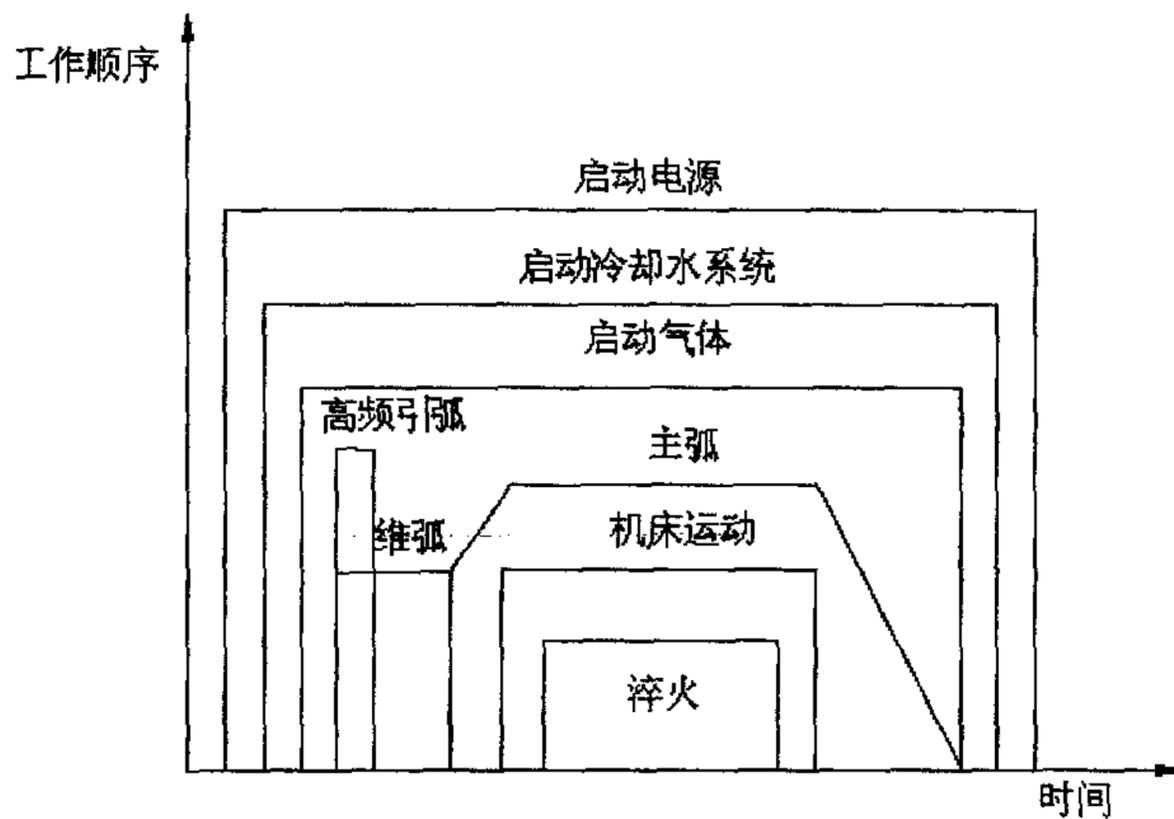


图 3.1 等离子淬火过程的时序流程图

从时序图和淬火过程中了解到，为了能够得到良好的淬火效果，必然保证引弧电流足够大并应有可调的电流上升速率；从小弧转到大弧不能产生过流冲击，淬火过程中工艺参数的变化（例如钨极的烧损导致电压的升高）能够及时调整淬火电流，使淬火前后效果基本一致，这也正是我们所追求的。熄弧时，应具有可调的电流衰减速率。等离子

焰流温度很高，所以等离子喷枪的保护（主要是水冷）变的非常重要。在淬火过程中，水冷贯穿始终。

鉴于以上各种因素，本课题应该建立如下的系统模型，如图 3.2 所示：

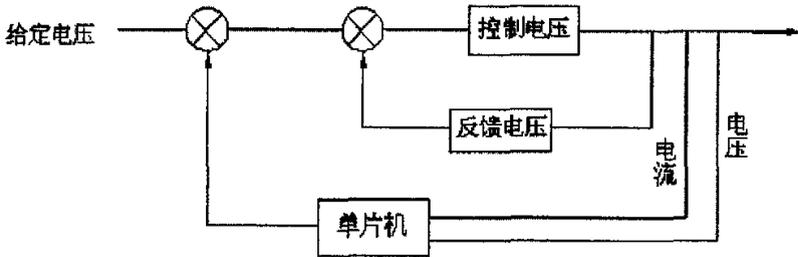


图 3.2 单片机控制淬火过程

选用单片机具有以下几点好处：

- (1) 可以根据实际的需要，脱离上位机随时输入设定参数；
- (2) 单片机具有很强的运算能力，能够把接到的信号进行预定的处理；
- (3) 具有强大的内存，可以形成庞大的专家系统，随时调用我们需要的淬火参数，利于操作，减小对操作者的技术要求。

当此系统形成时，我们只需要首次输入给定电压，单片机控制系统就会根据淬火电流和温度等的变化及时地调整给定电流，减小淬火过程中温度场等影响，使淬火效果达到最佳，不至于淬火过程中由于温度场、钨极烧损等的变化而引起局部熔化等问题。但单片机的设计、调试到使用的周期长，不利于试验的研究。

### 3.1.1 系统存在的问题及其解决方法

由于起弧的瞬间，喷嘴与工件的电路瞬时接通存在工作电流、电压的突变，产生起弧部位过热熔化，即所谓的过冲现象。如图 3.3、3.4 可以明显地看出这种过冲现象，其中电流较小时产生熔沟，电流较大时产生熔包。它也是一直影响等离子淬火难以得到普遍应用的原因之一。能够解决这些问题，等离子淬火的实用性将会大大加强。为了能够解决这种过冲现象，我们先从理论上了解它产生的机理，如图 3.5。通过分析知道，这种过流冲击是在小弧到大弧的过程中，由于机械惯性而产生的，解决这种冲击可以把起

弧电压调小，由于减小了起弧电压，那么它产生的机械惯性也小，造成的过流冲击也就小，如图 3.6，在大弧产生之后再逐步地调节电压以达到淬火最佳电压。还可以在程序中加一个延时电路，通过延时的方法来缓解过冲。正是由于等离子弧表面淬火的特点，也为了在同样试验条件下，能够更好的控制淬火参数以更快的掌握大量最优淬火参数，我们采用了 PLC 控制。其控制原理如图 3.7。同时也是因为 PLC 具有以下特点<sup>[49]</sup>。

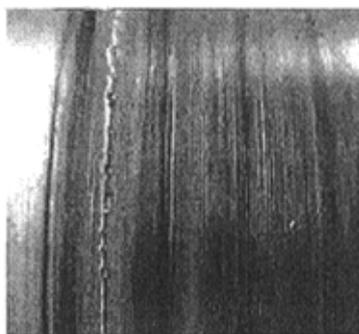


图 3.3 过冲产生的熔沟

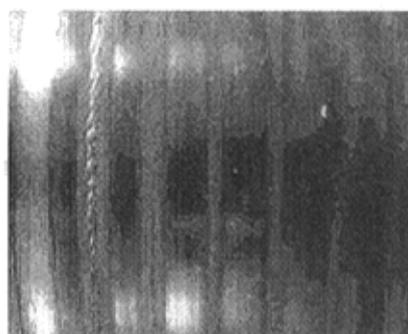


图 3.4 过冲产生的熔包

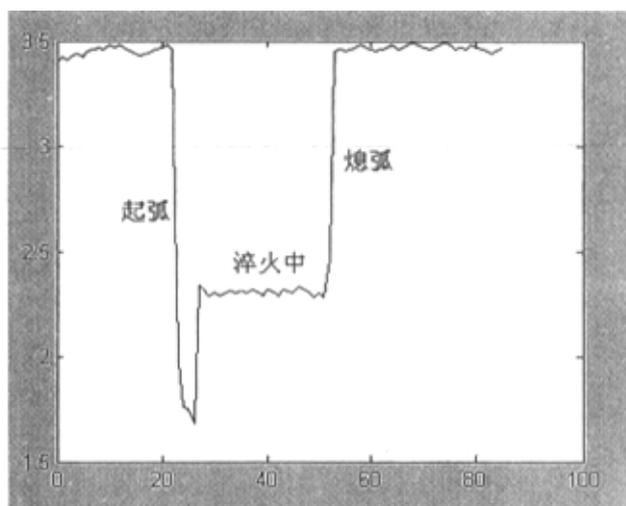


图 3.5 淬火过程中电压的变化

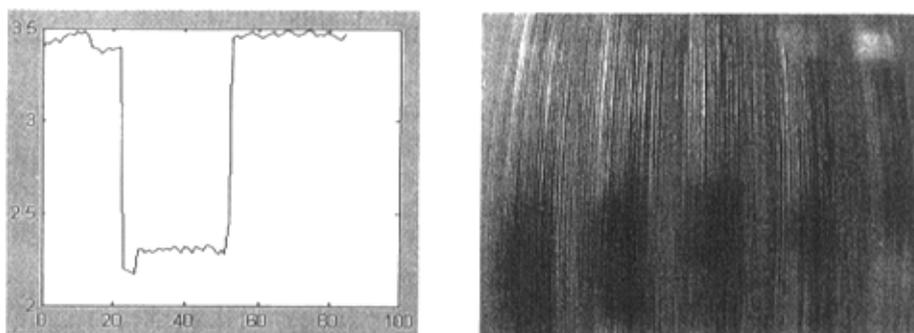


图 3.6 改善的结果

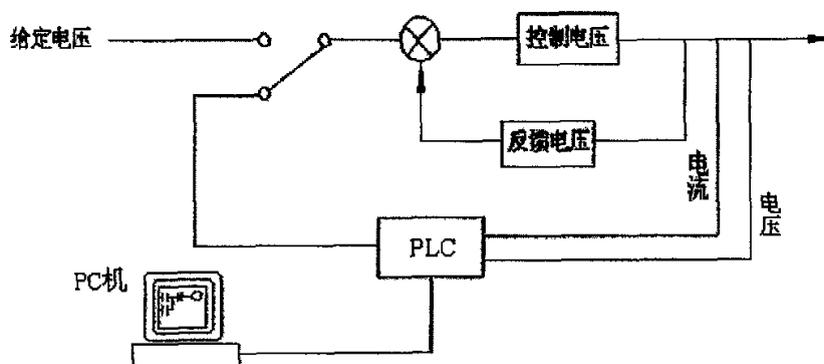


图 3.7 PLC 控制等离子淬火

(1) 高可靠性

1) 所有的 I/O 接口电路均采用光电隔离, 使工业现场的外电路与 PLC 内部电路之间电气上隔离;

2) 各输入端均采用 R-C 滤波器, 其滤波时间常数一般为 10-20ms;

3) 各模块均采用屏蔽措施, 以防止辐射干扰;

4) 采用性能优良的开关电源;

5) 对采用的器件进行严格的筛选;

6) 良好的自诊断功能, 一旦电源或其他软、硬件发生异常情况, CPU 立即采取有效措施, 以防止故障扩大;

7) 大型 PLC 还可以采用由双 CPU 构成冗余系统或有三 CPU 构成表决系统, 使可靠性更进一步提高。

#### (2) 丰富的 I/O 接口模块

PLC 针对不同的工业现场信号, 如: 交流或直流开关量或模拟量; 电压或电流; 脉冲或电位; 强电或弱电等。有相应的 I/O 模块与工业现场的器件或设备, 如: 按钮; 行程开关; 接近开关; 传感器及变送器; 电磁线圈; 控制阀等直接连接。

另外, 为了提高操作性能, 它还有多种人一机对话的接口模块; 为了组成工业局部网络, 它还有多种通讯联网的接口模块等等。

#### (3) 采用模块化结构

为了适应各种工业控制需要, 除了单元式的小型 PLC 以外, 绝大多数 PLC 均采用模块化结构。PLC 的各个部件, 包括 CPU, 电源, I/O 等均采用模块化设计, 由机架及电缆将各模块连接起来, 系统的规模和功能可根据用户的需要自行组合。

#### (4) 编程简单易学

PLC 的编程大多采用类似于继电器控制线路的梯形图形式, 对使用者来说, 不需要具备计算机的专门知识, 因此很容易被一般工程技术人员所理解和掌握。

#### (5) 安装简单, 维修方便

PLC 不需要专门的机房, 可以在各种工业环境下直接运行。使用时只需将现场的各种设备与 PLC 相应的 I/O 端相连接, 即可投入运行。各种模块上均有运行和故障指示装置, 便于用户了解运行情况和查找故障。由于采用模块化结构, 因此一旦某模块发生故障, 用户可以通过更换模块的方法, 使系统迅速恢复运行。

PLC 实质上就是一台专用的工业控制计算机, 它也具有一定容量的内存。CPU 即是整个 PLC 的核心部件。为保证整个系统的运算速度、缩短程序的执行时间, 我们选择了 CPU222, 它的内存容量为 4M。通常一个主控模块都安装有一个或多个的 CPU。若是多个 CPU, 其中必定有一个主 CPU, 其余的为辅助 CPU, 大大提高了整个系统的运算速度和功能, 缩短程序执行时间。

PLC 也有存储功能, 主要用于存放系统程序、用户程序和工作状态数据。它的种类和形式很多。从存贮器种类来分有: ROM、EPROM、EEPROM、RAM; 从安装形式

来分有：直接插入的集成块、存储器板、IC 卡等；从用途来分有：系统程序存储器、数据存储器 and 用户存储器。值得一提的是，RAM 单元可进行数据和程序的读出和写入，但一旦停电，在 RAM 中所保存的内容就会丢失。为了保存其内容，PLC 采用锂电池和电容来进行保护。在环境温度为 25 度时，装上新电池存储的内容可保存 5 年之久。若用电容保护，PLC 主机关断后，存储的内容可保持 20 天，若选用 EPROM 单元，需要用 EPROM 写入器把程序写入 EPROM 芯片中，然后装入 EPROM 单元。若选用 EEPROM 单元，与 RAM 单元一样，可以随时进行程序或数据的写入/读出，不同的是 EEPROM 不需要电池或电容器进行保护。即使断电，程序也不会消失。

为了能和计算机通信，通信口是必备的。近几年出产的 PLC 产品一般都带有通信口。在 S7-200 和 COM1 主控模块上都至少有一个或一个以上的通信口。可与手持式变频器、计算机或其他的外围设备相连，以实现编程、调试、运行、监视、打印和数据传送等功能。若有两个通信口，其中一个可用于与变频器相连，另一个用于与上位计算机相连。S7-200 PLC 提供的 RS-485 通信口，要与计算机相连需经过专用的 PC/PPI 电缆。

一般的主控模块中通常配有锂电池，用于在掉电时，保存用户程序和数据。为了安全，在主控模块上安装有 LED 指示器，用于指示 PLC 电源、运行、编程、测试、断开、出错、电池电量不足、警告等工作状态，便于使用。

### 3.1.2 模拟量 I/O 模块

在工业控制过程中，除了大量的开关量控制以外，还有许多模拟量控制，例如对电压、电流、温度、压力、流量的控制。模拟量 I/O 模块的主要功能就是完成模数(A/D)转换，一般都自带 CPU 和存储器，只要 PLC 上电，PLC 主控模块就将控制字装入其内部存储器中，模拟量 I/O 模块就能独立工作并且与主控模块共享存储器，主控模块只需读写指令便可对模拟量 I/O 模块进行操作。而模拟量模块又分为模拟量输入模块(A/D 模块)和模拟量输出模块(D/A 模块)。

模拟量输入模块的基本功能就是将输入 PLC 的外部模拟量转换为 PLC 所需的数字量，以供给主控模块进行数据处理和控制。模拟量输入模块一般有 2 路、4 路、8 路等规格，每路输入信号都要经过前置放大、多路选择开关、模/数转换、光电隔离等环节

最终送入到锁存缓冲器。当 PLC 程序扫描执行读模拟量指令时，由程序制定的输入通道中的模拟量就被采样，经 A/D 转换后送至指定的存储区域或寄存器。

模拟量输出模块的功能刚好与模拟量输入模块的功能相反。它是将 PLC 处理后的数字量转换为可用于模拟量控制的模拟量输出信号，然后通过工业现场的有关执行部件进行调节控制。输出的模拟量有 2 路、4 路等规格。模拟量输出模块有锁存缓冲器、多路选择开关、光电隔离、数模转换和驱动电路所组成。当 PLC 程序执行到输出模拟量指令时，由程序指定的通道中的数字量经 D/A 转换后，从 PLC 接线端子送出。在 PLC 中这些模块都已经固化好，我们无需再去设计。但我们必须注意电流、电压等模拟信号的接入方法。

### 3.1.3 PLC 的工作原理

要想用好 PLC，还必须了解 PLC 的工作原理。当 PLC 投入运行后，其工作过程一般分为三个阶段，即输入采样、用户程序执行和输出刷新三个阶段：

(1)输入采样。即检查各输入的开关状态，将这些状态数据存储起来为下一阶段使用；

(2)执行程序。然后 PLC 按用户程序中的指令逐条执行，但是把执行结果暂时存储起来；

(3)刷新输出。按第 1 阶段的输入状态在第 2 阶段执行程序中确定的结果，在本阶段中对输出予以刷新。

完成上述三个阶段称作一个扫描周期。在整个运行期间，PLC 的 CPU 以一定的扫描速度重复执行上述三个阶段。PLC 对信号的输入、数据的处理和控制信号的输出分别在一个扫描周期的不同时间进行的方式有助于排除系统中受到的干扰。

### 3.1.4 PLC 与其他顺序逻辑控制系统的比较

#### (1) PLC 与继电器顺序逻辑控制系统的比较

最初研制生产的 PLC 主要用于代替传统的由继电器接触器构成的控制装置，但这两者的运行方式是不相同的。继电器控制装置采用硬逻辑并行运行的方式，即如果这个继电器的线圈通电或断电，该继电器所有的触点(包括其常开或常闭触点)在继电器控制线路的那个位置上都会立即同时动作。PLC 的 CPU 则采用顺序逻辑扫描用户程序的运

行方式，即如果一个输出线圈或逻辑线圈被接通或断开，该线圈的所有触点(包括其常开或常闭触点)不会立即动作，必须等扫描到该触点时才会动作。为了消除二者之间由于运行方式不同而造成的差异，考虑到继电器控制装置各类触点的动作时间一般在100ms以上，而PLC扫描用户程序的时间一般均小于100ms，因此，PLC采用了一种不同于一般微型计算机的运行方式—扫描技术。这样在对于I/O响应要求不高的场合，PLC与继电器控制装置的处理结果上就没有什么区别了。

继电器顺序逻辑控制系统有大量的活动触点和元器件，只要其中任一部件或触点故障，将造成系统的故障。另外，它的体积和重量较大，维修的工作量也较大。PLC除与必要的与外部物理世界的接口(即I/O点)外，其它的逻辑功能均在其内部实现，即简化为内部的软件逻辑。诸如中间继电器、时间继电器等硬件逻辑所能达到的功能不仅可以取代，而其性能更为优越。由于减少大量的元件和接线，故障率和维修时间都大大降低。

## (2) PLC与计算机控制系统的比较

计算机控制系统是指用单片处理器或工控机组成的计算机控制系统。在可编程序控制器发展的阶段中，单片处理器组成的计算机控制系统对顺序逻辑控制系统的发展发挥了较大的作用。但可编程序控制器对此进行了改造。它变通用为专用，降低了成本，缩小了体积。采用扫描方式工作，有利于顺序逻辑控制的实施。功能分散、危险分散，并适应恶劣工业应用环境。集散控制系统(Distributed Control System)是专门为工业过程控制设计的过程控制装置。它主要应用场合是连续量的模拟控制。而可编程序控制器的主要应用场合是开关量的逻辑控制。可编程序控制器是按扫描方式工作的。集散控制系统是按用户的程序指令工作的。在集散控制系统中，可有多级优先级中断的设置，而可编程序控制器通常不采用中断方式。在存储器的容量上，由于可编程序控制器所需的运算多是逻辑运算，因此所需的容量较小，而集散控制系统需进行大量的数字运算，所需容量较大。在可靠性方面，两者都是有较高要求的。为了扩大应用的范围，可编程序控制器正在向分散控制系统靠拢，扩展模拟量的控制功能。同样，集散控制系统也正在扩展逻辑控制功能，出现综合集成趋势。

## 3.2 控制电路的设计

### 3.2.1 PLC 主控电路

整个淬火过程是一个双闭环系统，电源内部自身有一个闭环系统。主要达到恒流的作用，但这种条件下此电源不能检测、反馈淬火过程中由于工艺参数变化而引起的电流、电压变化，用 PLC 控制形成一个外闭环，便能够检测电流和电压以及及时改变设定值。针对以上等离子弧表面淬火的特点，鉴于实际淬火的 I/O 点数，我们选用的 PLC 为 CPU222，并扩展了一个模拟量模块 EM235，TD200 主要用于设定电压和显示淬火过程中的电压和电流。

而在此过程中，CPU222 主要起运算作用，它接受 EM235 采集到的电流和电压后进行运算处理。

模拟量信号经过 EM235 后变成 CPU 能够处理的数字信号，经过 CPU 运算后的数字量信号又经过 EM235 输出，提供所需的淬火电流。

TD200 用于设定给定电压，并根据实际需要能够修改给定电压。

M 与 M 相连， $L^+$  与 CPU222 地  $L^+$  相连为 EM235 供电， $A^+$  与电压信号正极相连， $A^-$  与电压信号负极相连， $B^+$  与电流信号正极相连， $B^-$  与电流信号负极相连，RB 与  $B^+$  短接。M0 与  $B^-$ 、 $A^-$  相连，实现共地，U0 即为淬火电源的输入电压，由于电源内部电路需要，我们选择输入范围为 0~5V，连接时注意共地，如图 3.8 所示：

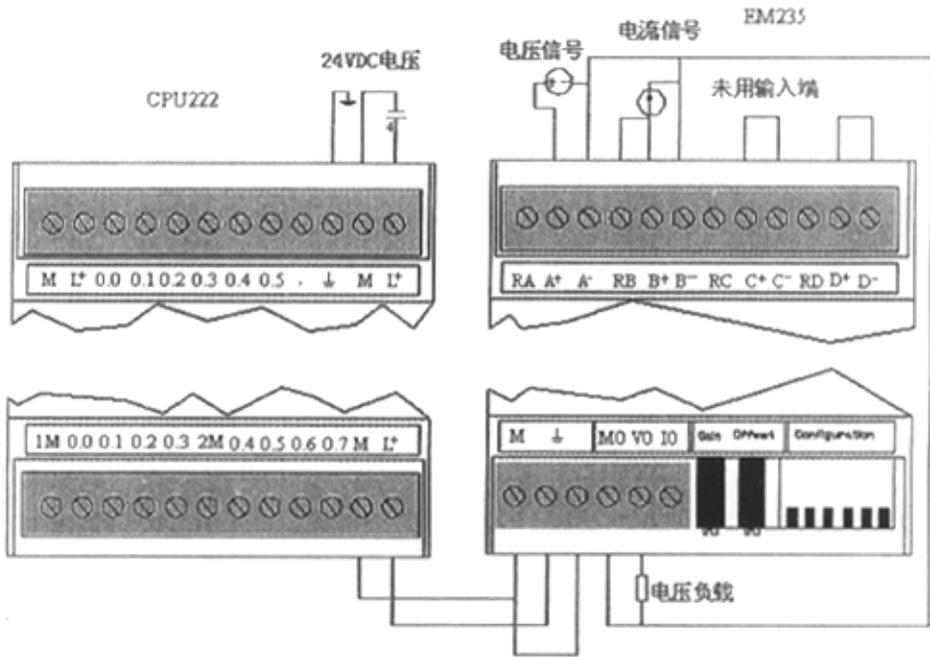


图 3.8 控制系统的接线图

### 3.2.2 开关电路

由于此电源是在原有模拟电源的基础上经过改装而来的，所以在此对电源的开关电路做一下说明。当接 1 和 2 时说明此时是模拟控制；当接 2 和 3 时说明此时是数字控制，即 PLC 控制，如图 3.9 所示：

### 3.2.3 接口电路

为了实现 PLC 和淬火电源的连接，需要有一个接口，其电路见图 3.10，I 代表淬火电流、U 代表淬火电压、OUT 代表 PLC 的模拟量输出、GND 代表地。

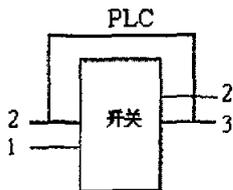


图 3.9 开关模拟电路

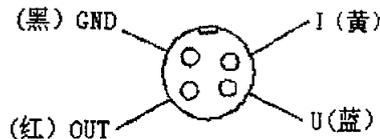


图 3.10 电源接口电路

### 3.3 上位机数据的接收和控制系统的通讯实现

此系统是一个需要实施上位机监控并采集数据的系统。在上位机上运行的该软件能够对需要采集的信号进行数据采集并保存。目前工业监控软件的设计已进入采用图形组态软件进行开发的阶段。本系统监控软件采用了 MCGS (Monitor and Control Generated System) 组态软件,因为它为用户提供了解决实际工程问题的完整方案和开发平台,能够完成现场数据采集、实时和历史数据处理。报警和安全机制、流程控制、动画显示、趋势曲线和报表输出以及企业监控网络等功能。并且在采集数据的同时自动形成一个 Access 表,将数据保存在其中。并且它和下位机的通讯也很容易。

工控组态软件是在生产和过程自动化中解决可视化和控制任务的工业技术支撑系统,它提供了适用于工业控制的多种功能模板。MCGS 提供的开放界面用于用户解决方案,因而使得将 MCGS 集成到复杂广泛的自动控制解决方案成为可能。可以集成通过 ODBC 和 SQL 方式的归档数据访问,以及通过 OLE2.0 和 ActiveX 控件的对象和文档的连接。

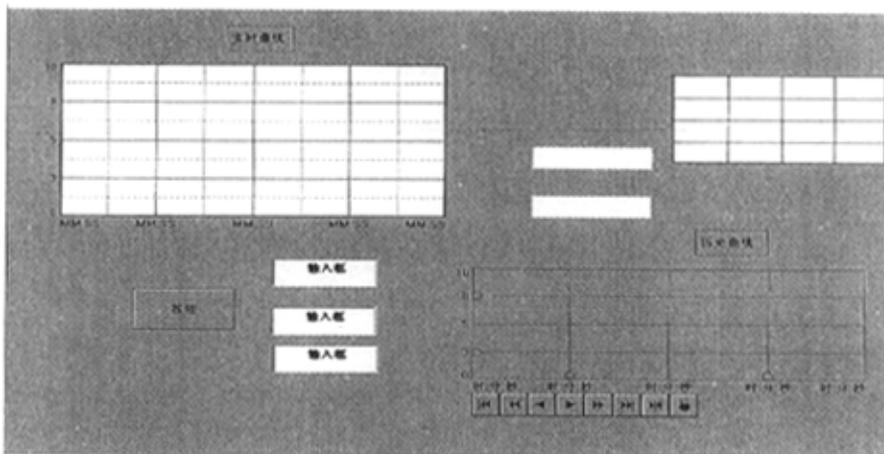


图 3.11 变量记录界面

在本课题中,根据现场情况和实际需要设计了变量记录界面,如图 3.11 所示:

注意在用图形编辑器设计各界面之前，先要在实时数据库中定义所需变量的名称和数据类型。变量界面如图 3.12 所示：



图 3.12 变量设置图

### 3.3.1 变量记录界面的设计

该界面要求在系统运行时，实时地显示数据的真实值。在界面的设计过程中增加了实时曲线和历史曲线，以方便观察数据的变化情况。此运行界面如图 3.13 所示，从图中可以直接查看数据及数据的变化趋势。若想仔细查看数据情况，单击图中的“按钮”，界面会变切换到历史数据界面，从中可以详细查看数据。在创建变量—记录界面之前，先在变量记录编辑器中定义归档、将要归档的过程值和归档周期，以及表窗口模板。借助于图形编辑器中的“用户窗口”这一智能对象，在运行系统中显示数据。在系统中，采用的是周期性连续归档。采集周期是每 1s 采集一次，归档周期是每 1min 数据归档一次。另外，还可通过外设的打印机将一段时间的变量记录打印出来，以便资料保存。

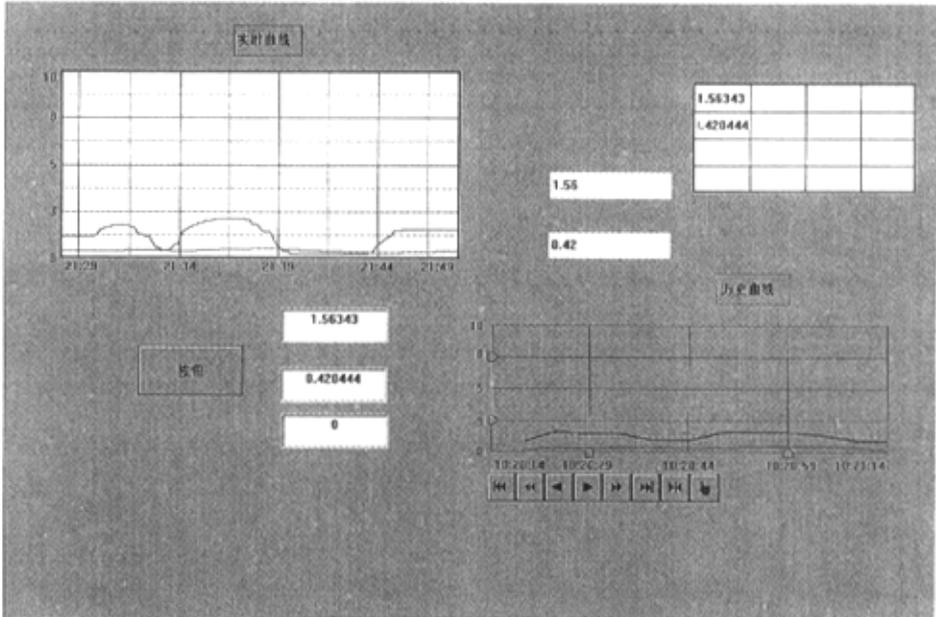


图 3.13 MCGS 运行状态图

SIMATIC S7 系列的 PLC 向用户提供了强大的通讯功能。接口物理特性为 RS-485，通讯方式主要有以下几种：

(1) PPI 方式

PPI 通讯协议是西门子专为 S7-200 系列 PLC 开发的一个通讯协议<sup>[50]</sup>。可通过普通的两芯屏蔽双绞电缆进行联网。波特率为 9.6kbit/s, 19.2kbit/s 和 187.5kbit/s。S7-200 系列 CPU 上集成的编程口同时就是 PPI 通讯联网接口。利用 PPI 通讯协议进行通讯非常简单方便，只用 NETR 和 NETW 两条语句即可进行数据信号的传递，不需额外再配置模块或软件。PPI 通讯网络是一个令牌传递网，在不加中继器的情况下，最多可以由 31 个 S7-200 系列 PLC, TD200, OP/TP 面板或上位机(插 MPI 卡)为站点，构成 PPI 网。

(2) MPI 方式

S7 系列 PLC 可以通过内置接口连接到 MPI 网络上，波特率为 19.2k、187.5kbit/s。S7-200 CPU 在 MPI 网络中作为从站，它们彼此间不能通讯。

### (3) 自由口通讯

S7-200 CPU 拥有自由口通讯能力。自由口通讯是建立在 RS-485 硬件基础上的一种通讯方式,它允许用户自己定义一些简单、基本的通讯协议设置,如数据长度、奇偶校验等等。灵活运用自由口,可以实现比较复杂的通讯功能,以适应各种通讯协议。处于自由口通讯模式时,通讯功能完全由用户程序控制,所有的通讯任务,必须由用户编程完成。信息的定义,完全由用户制定。它使 S7-200 PLC 可以与任何通讯协议公开的其它设备、控制器进行通讯,由于用户可以自己定义通讯协议(例 ASCII 协议),因此使可通讯的范围大大增加,使控制系统配置更加灵活、方便。任何具有串行接口的外设,例如:打印机或条形码阅读器,变频器,调制解调器((Modem),上位 PC 机等。S7-200 系列微型 PLC,用于两个 CPU 间简单的数据交换。用户可通过编程来编制通讯协议,用来交换数据(例如:ASCII 码字符),具有 RS232 接口的设备也可用 PC/PPI 电缆连接起来进行自由通讯方式通讯。

#### 3.3.2 RS-485 传输

现场总线系统的应用在很大程度上取决于选用的传输技术,既要考虑一些总的要求(传输可靠传、传输距离和高速),又要考虑一些简便而又费用不大的机电因数( RS-485 , PROFITBUS 最常用的一种传输方式,通常称为 H2。这种方式采用屏蔽双绞机式电缆,共用一根导线对。适用于需要高速传输和设施简单而又便宜的各个领域,RS-485 的传输技术的基本特性可归纳如下<sup>[51]</sup>:

- (1) 网络拓扑。线性总线,两端有有源的总线终端电阻;
- (2) 介质。屏蔽双绞电缆,也可取消屏蔽,取决于环境条件;
- (3) 站点数。每段 32 个站,不带转发器。带转发器最多可到 127 个站;
- (4) 插头连接器。最好为 9 针 D 副插头连接器。

RS-485 操作容易,总线结构允许增加或减少站点,分步投入不会影响到其他站点的操作。传输速度可选用 9.6kps-12Mbps,一旦投入运行,全部设备均需选用同一传输速度。电缆的最大长度取决于传输速度。

### 3.3.3 TD200 文本显示器

TD200 (Text Display 200) 是专用于 S7-200 系列的文本显示和操作员界面<sup>[52]</sup>。其图如 3.14, TD200 支持中文操作和文本显示。TD200 包装中提供了专用电缆 (TD/CPU) 用以与 S7-200CPU 连接, 电缆能从 CPU 通讯口上取得 TD200 所需的 24VDC 电源。TD200 同时提供了 24VDC 电源输入接口, 仅供通过 Profibus 电缆连接到 CPU 或 PPI 网络上时使用。

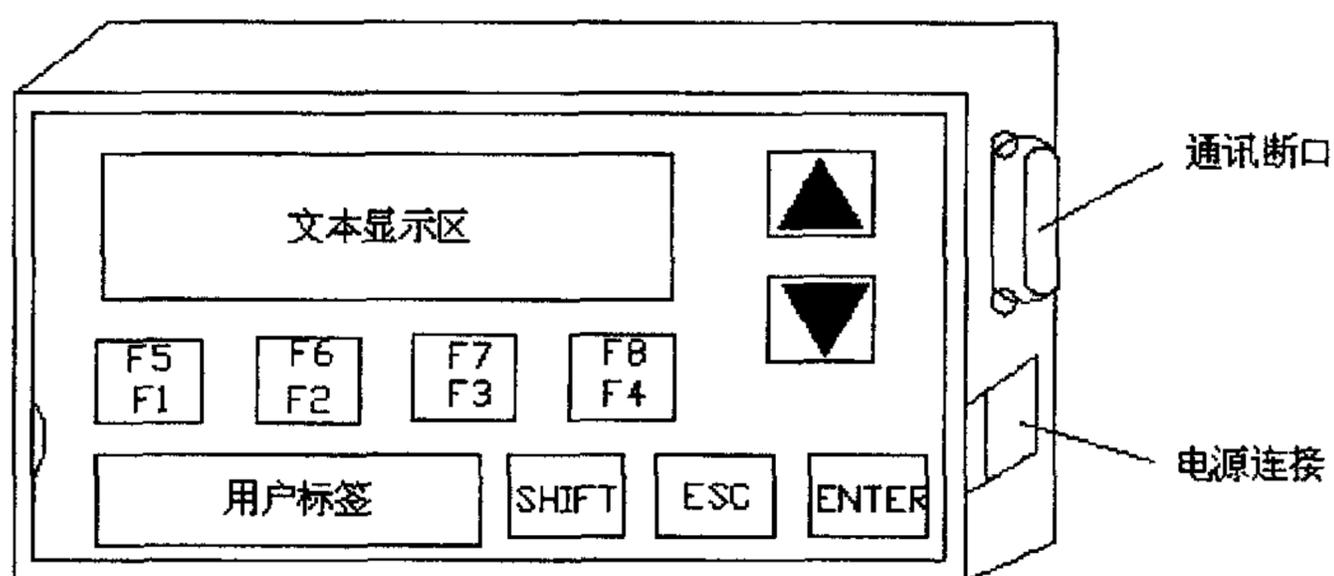


图 3.14 TD200 文本显示器

TD200 作为主站在 PPI 网络上工作。网络上的 TD200(包括其他设备)都有唯一的地址。1 个 S7-200CPU 最多可以连接 4 个 TD200; 1 个 TD200 只能与一个 S7-200CPU 建立连接。连接到同一个 S7-200CPU 的多个 TD200 可以访问同一个参数块, 也可以设置不同的数据块偏移地址按不同的参数块工作。不同的参数块可以分多次调用 TD200 向导定义。

TD200 通过设定 S7-200CPU 的地址决定访问哪个 CPU, 使用数据块偏移地址访问自身的组态信息。这些参数, 包括 TD200 自身的地址和通讯速率等在 TD200 的系统菜单中设置。

TD200 重要部件的说明

文本显示区：文本显示区为一个背光液晶显示（LCD），可显示两行信息，每行 20 个字符。它使使用者可以看到从 S7-200 接受来的信息。

通讯接口：通讯接口是一个 9 针 D 型连接器，它使使用者可以用提供的 TD/CPU 电缆把 TD200 连接到 S7-200CPU。

电源连接：可以通过 TD200 右边的电源接入口，把外部电源连接到 TD200。当使用 TD/CPU 电缆时，则不需要外部电源。

TD/CPU 电缆：通过 TD/CPU 电缆可以与 TD200 通讯并向其提供电源。它是 9 针直通的电缆，与 TD200 随时提供。

键：TD200 有 9 个键。其中有 5 个键提供预定义的、上下文有关的功能，其余 4 个键用户可定义其功能。

TD200 键盘共有 9 个键。其部分说明如下：

命令键：用此键写入新数据和确认信息

ESC：用此键转换 Display Message 方式和 Menu 方式，或紧急停止一个编辑。

UP ARROW：UP 箭头用于递增数据和上卷光标到下一个更高优先级的信息。

DOWN ARROW：DOWN 箭头用于递减数据和卷动光标到下一个较低优先级的信息。

SHIFT：SHIFT 键转换所有功能键的数值。当按下 SHIFT 键时，在 TD200 显示区的右下方显示一个闪烁的 S。

## 4 控制程序的编写

### 4.1 S7-200 编程软件及程序的结构

STEP7-Micro/WIN 是专门为 S7-200 设计的在个人计算机 Windows 操作系统下运行的编程软件，它的功能强大，使用方便，简单易学。CPU 通过 PC/PPI 电缆或插在计算机中的 CP5511、CP5611 通信卡与计算机通信。通过 PC/PPI 电缆，可以在 Windows 下实现多主站通信方式。

STEP7-Micro/WIN 的用户程序结构简单清晰，即通过一个主程序调用子程序或中断程序，还可以通过数据块进行变量的初始化设置。用户可以用语句表（STL）、梯形图（LAD）和功能块图编程，不同的编程语言编制的程序可以相互转化，可以用符号表来定义程序中使用的变量地址对应的符号，使程序便于设计和理解。

用户还可以通过 PUI02(手持式编程器)对 S7-200PLC 进行编程。但所有的 S7-200 必须采用规定的结构，应有一个主程序，然后跟一些子程序和中断处理程序。

(1) 主程序以“主程序终点”指令(MEND)结束；

(2) 子程序是程序的可选部分，如果需要使用子程序，它必须跟在以 MEND 指令结束的主程序的后面；

(3) 中断处理程序也是程序的可选部分，如果需要使用中中断处理程序，它必须跟在以 MEND 指令结束的主程序的后面；

(4) 在主程序之后，中断处理程序和子程序是随意组合的。如果把所有的中断处理程序和子程序集中起来放在主程序之后，使所有的中断处理程序紧跟在子程序之后，那程序结构就是显得易懂易读。

如上所述，首先通过 STEP7-Micro / DOS(个人计算机用编程工具)或 PC702(手持式编程器)对 S7-200 系列进行编程，然后将程序下载到 PLC 中，在设备启动后，PLC 运行下载的程序对设备进行控制。在使用软件进行编程时，必须选用操作方式：STOP/ RUN 方式，可以通过改变 STOP/ RUN 开关的位置来选择方式。

(1) 在 STOP 方式下

1) 可将程序下载到 PLC 中；

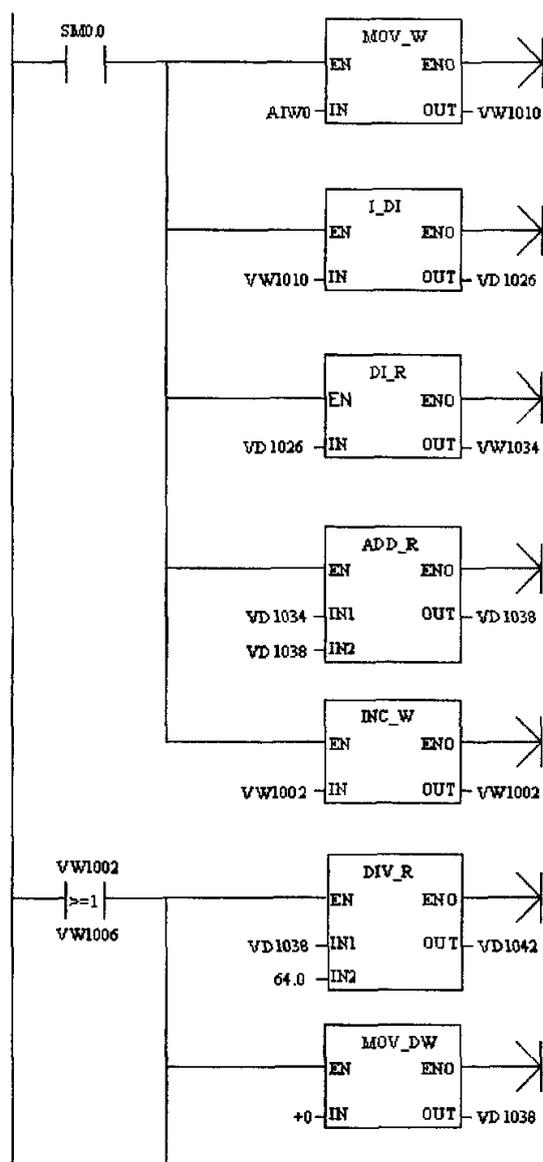


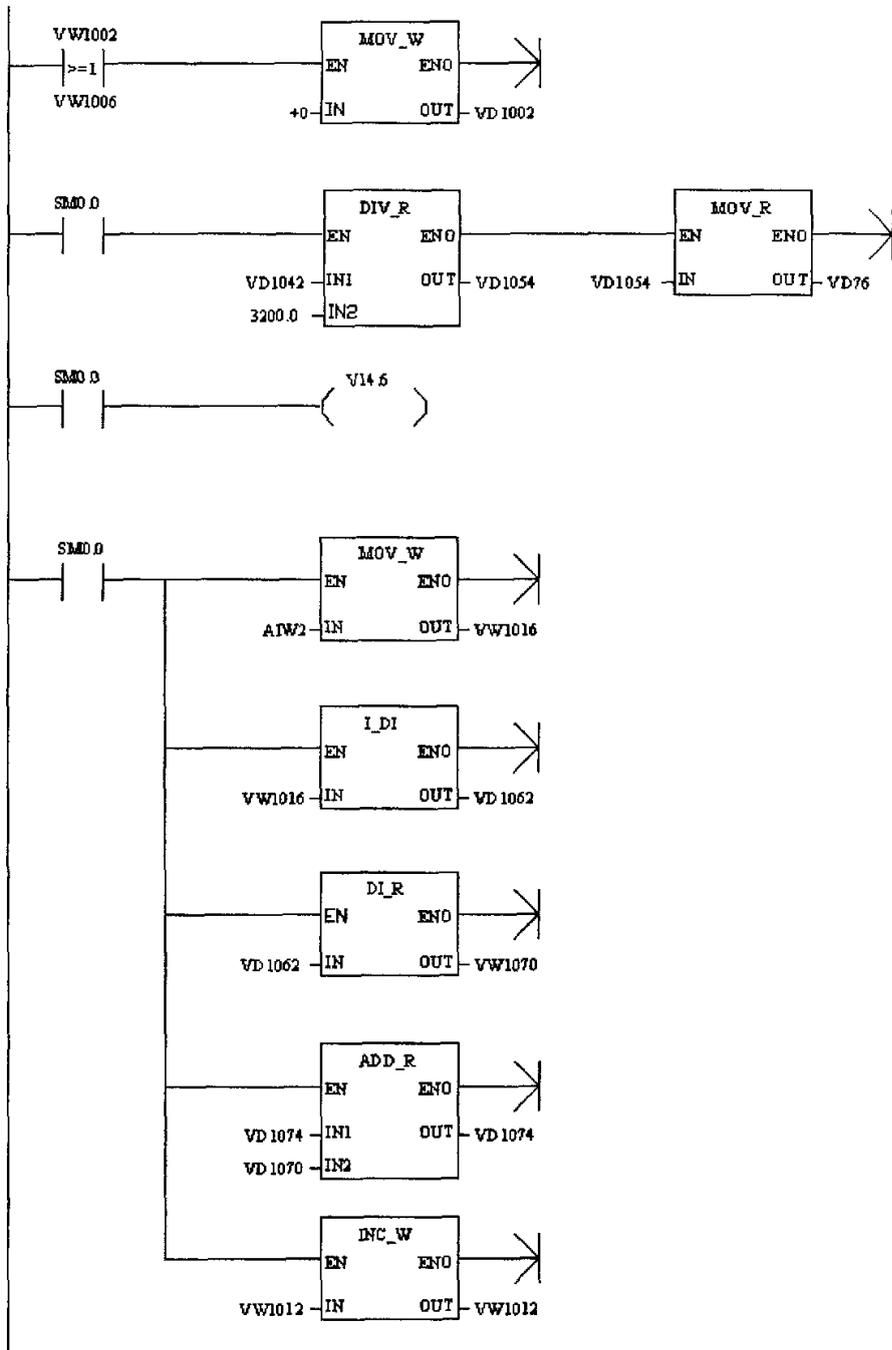
### 4.2.2 子程序

模拟量处理初始化程、TD200 初始化、自由口通讯初始化程序见附表。

### 4.2.3 中断程序

(1) 模拟量处理过程如图所示：





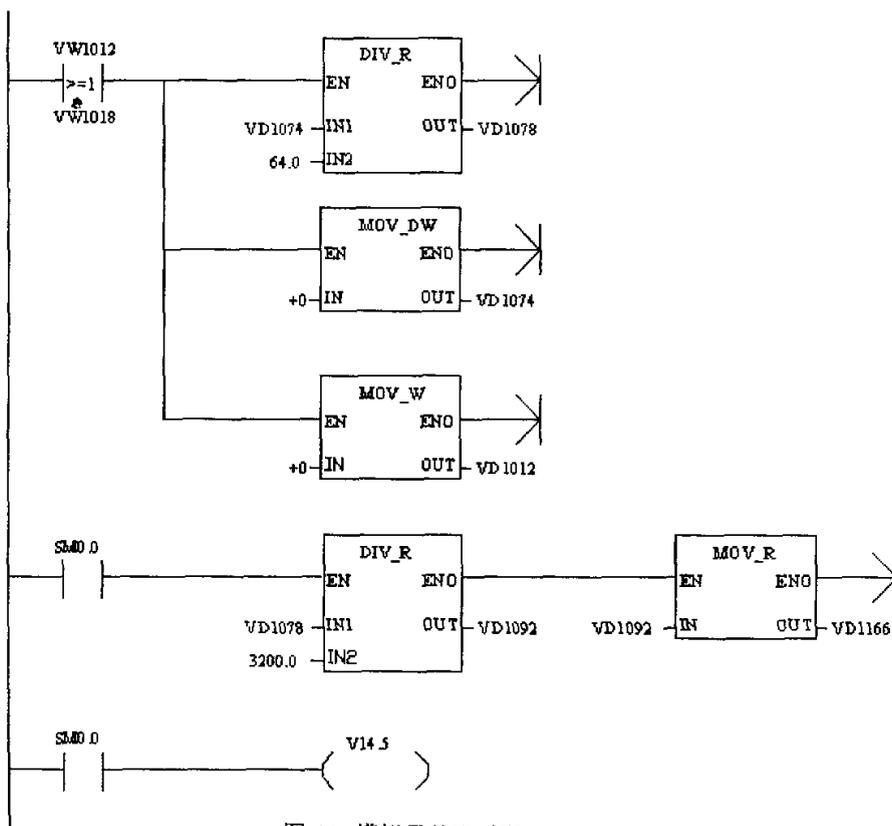
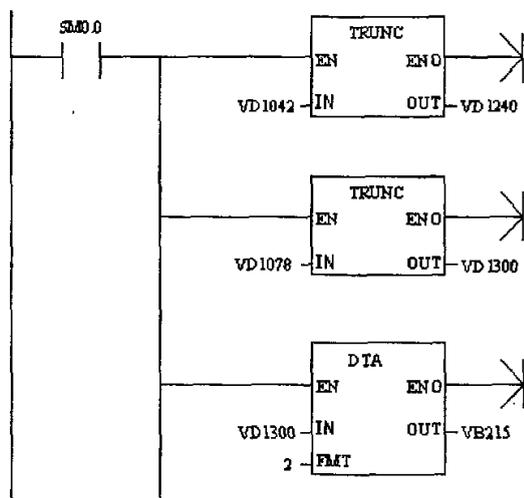


图 4.2 模拟量处理过程

(2) 自由口通讯过程如图所示:



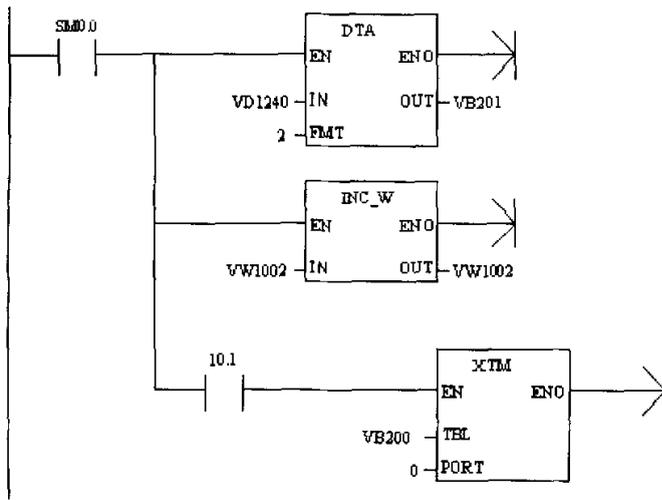


图 4.3 自由口通讯程序

以上我们对子程序和中断流程做了部分说明。其程序运行如图 4.4 所示：

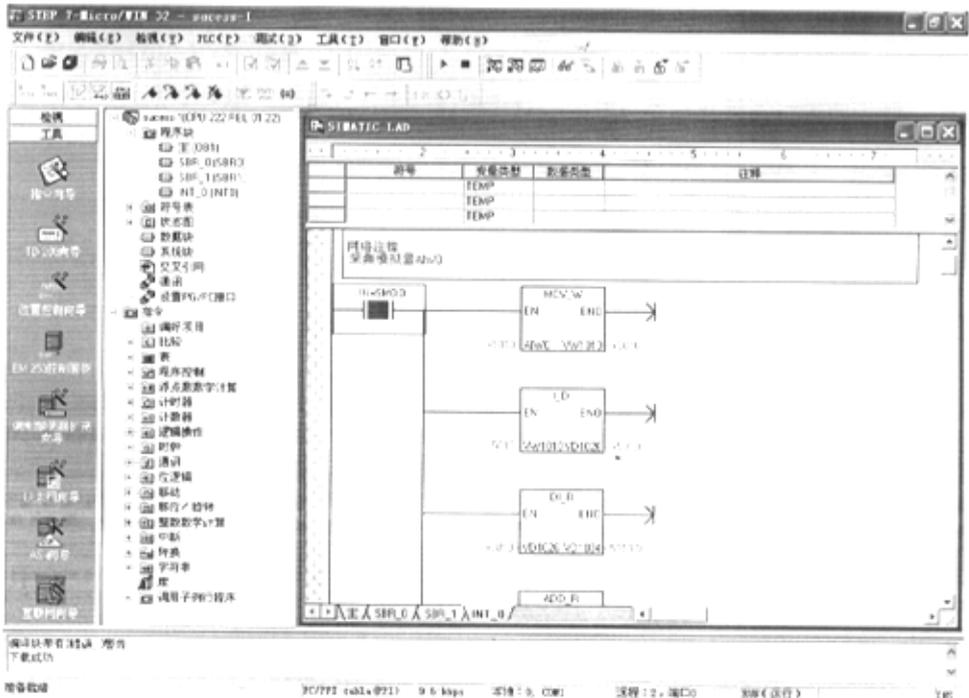


图 4.4 PLC 程序运行图

## 5 试验

等离子弧的影响因素较多，淬火重复性较差。由于工艺参数的变化而导致淬火失败，会给经济带来很大的损失。所以就要求等离子弧表面淬火过程具有自适应功能，即能根据工艺参数的变化及时调整淬火电流。

### 5.1 试验目的

等离子弧表面淬火过程中工艺参数较多，工艺参数的变化会导致电流和电压的变化。本系统控制的最终目的就是使 PLC 能根据电流和电压的变化，及时的弥补这种变化。使淬火效果达到前后一致，从而使淬火工艺更加稳定，并对 5 种材料（35CrMn、45Mn、38CrSi、45、40Cr）在一些工艺参数条件下的淬火效果的研究，这里所说的工艺参数主要是指：主轴转速、弧长、喷嘴直径、气体流量、扫描螺距、工作电流等。总结它们的最佳淬火参数，为以后淬火专家系统的形成打下基础。也今后的等离子弧加热电源朝着智能化、数字化方向发展提供一个技术平台。

### 5.2 等离子弧淬火试验准备

等离子弧淬火工艺要求材料具有良好的导电性。因此，要对材料进行表面去油、去锈等清洗处理。为了掌握淬火前后材料的参数变化，需要对所有材料的尺寸、形状和表面参数进行测量，部分测量结果见表 5.1。

### 5.3 淬火工艺参数的确定

等离子弧表面淬火工艺需确定的参数包括加热功率（电流和电压）、喷枪相对工件的扫描速度、扫描螺距、等离子喷枪的喷嘴直径、保护气体流量、等离子弧长度及冷却方法等。我们对试验参数进行了优化，并对一些工艺参数进行了总结。

表 5.1 等离子弧表面淬火工艺参数

喷嘴直径 (mm)	扫描螺距 (mm)	扫描速度 (m · min <sup>-1</sup> )	电弧功率 (KW)	电弧长度 (mm)	喷枪倾角 (°)	氩气流量 (m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )
2.5	8	19	3.5	4	0~30	0.2~0.4

## 5.4 淬火过程

等离子弧表面淬火工艺的主要设备有等离子弧表面专用直流电源、电控柜、等离子弧喷枪、保护气体的供气系统、机床以及冷却等部分组成。试验过程如图 5.1 所示。淬火时，将淬火材料夹在车床的夹具上，将等离子弧喷枪安装在大滑板上，通过电刷将电源的阴极与车床的卡具连接。将等离子弧喷枪的喷嘴对正材料待淬火表面的起始部位，保持 4mm 的距离。选择适当的转速和纵向进给量，以满足所确定的扫描速度和扫描螺距。将 PLC 与淬火电源连接好，同时启动服务程序。等离子弧表面淬火试验采用的是转移型等离子弧，热效率较高。为了避免烧损零件表面，必须在零件转动平稳后再启动转移型等离子电弧。等离子弧喷枪产生的高温聚能等离子弧，可在瞬间将材料表层加热到相变温度以上，熔融状态以下。扫描过的材料表层由自身导热冷却，温度迅速下降，实现表面硬化。

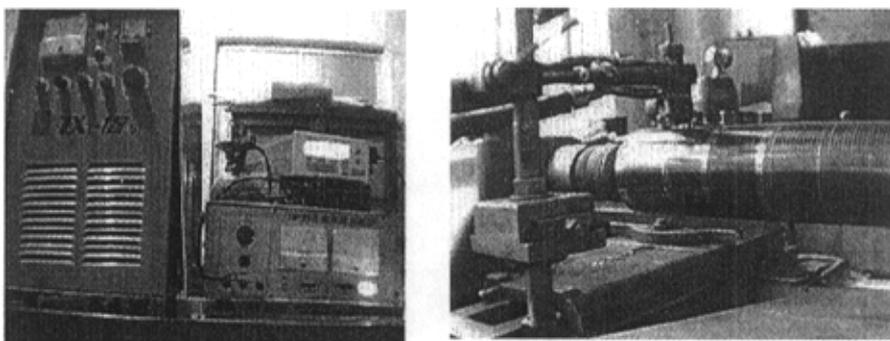


图 5.1 等离子试验过程图

## 5.5 试验结果分析

### 5.5.1 淬火工艺参数对表面硬度的影响

#### (1) 等离子弧淬火电流对表面硬度的影响

等离子弧的功率是由淬火电流、淬火电压、喷嘴直径、弧长决定的。本课题已固定喷嘴直径为 2.5mm、弧长为 4mm，而且弧长是影响电压的最主要因数，试验中电弧电压在 33~35V 间波动。所以在工艺试验中主要是调节淬火电流来控制电弧功

率。即：淬火电流的变化是直接影响因素。淬火电流是一个相当重要的工艺参数，在一些淬火参数固定的条件下，电流增加，电弧火舌长度增加，电弧的穿透性增加。

淬火电流对表面硬度的影响如图 5.2 所示。

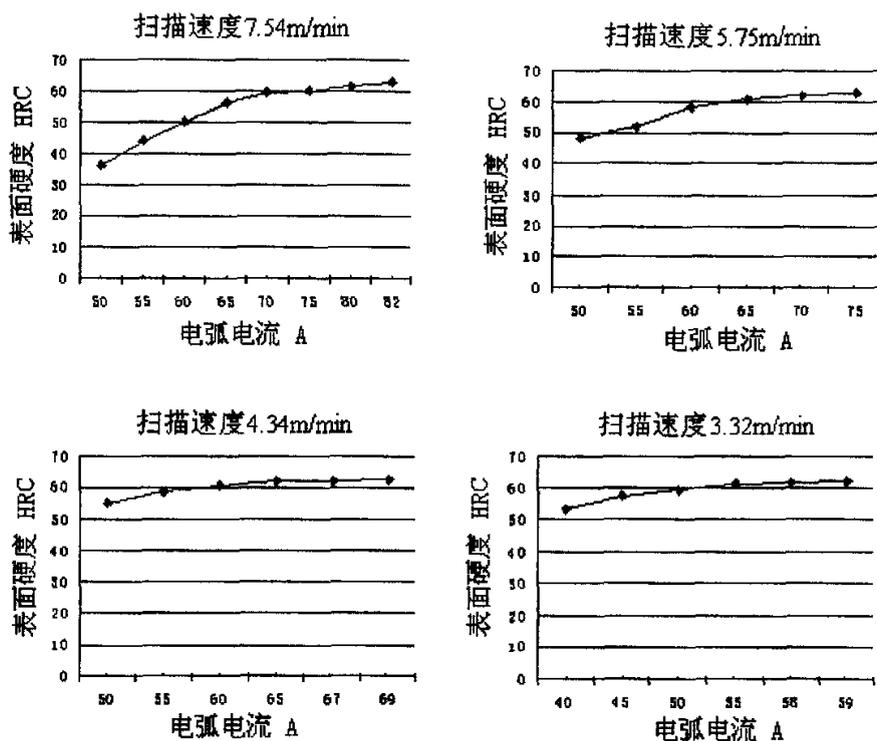


图 5.2 淬火电流与表面硬度的关系

等离子弧以高能量作用于工件后，硬化区的温度急剧上升，当温度超过  $Ac_3$  时，珠光体转变成奥氏体，同时渗碳体也向奥氏体扩散，当冷却速度大于  $V_c$  时，由奥氏体转变成马氏体。马氏体的硬度与其含碳量有关。随着马氏体含碳量的增加，其硬度也随之增加。当等离子弧功率增大时，则处理温度就增高，珠光体转变成奥氏体越充分，碳扩散越充分，转变成马氏体越多，其硬度也就越高。从图 5.2 中可以看到，电弧功率高，淬火条纹的表面硬度也高。在低功率区，硬度相对较

低，主要是功率小，表面能量密度低，加热温度低，珠光体没有完全转变成奥氏体，另外，渗碳体中碳的扩散也不充分，残留奥氏体多，导致硬度低。

在其它淬火参数不变的情况下，随着电弧功率的增加，淬火区的硬度增加，因此，为获得要求的表面硬度，应尽可能提高电弧功率。不过，当电弧功率高过一定值后，工件表面容易部分熔化且硬度有所下降，条纹中心线产生熔融沟，影响工件的表面质量（见图 5.3），反而导致强化效果减弱。熔融部分凝固后表面硬度波动较大，且易出现裂纹（见图 5.4），所以淬火时应予避免。

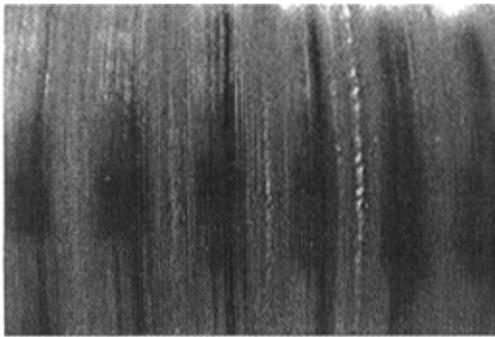


图 5.3 淬火条纹熔化图



图 5.4 淬火条纹微观裂纹

## （2）扫描速度对表面硬度的影响

在其它淬火条件不变时，增加扫描速度，等离子弧与材料交互作用时间减少，使试件表面单位时间单位面积上受到的电弧能量减少，温升范围会变窄，淬火条纹的表面硬度下降。为提高淬火效率，扫描速度也应控制在合适的范围内，否则将不能获得一定面积淬硬层的连续条纹。若淬火速度过快，则温度来不及升至临界点以上，工件不能实现淬火或完全淬火，不能充分得到硬化，当扫描速度极快时，等离子弧的固态加热作用仅起到了退火软化作用。如果速度过慢，则由于吸收能量过多，表面将会产生熔融。

扫描速度与淬火层表面硬度关系如图 5.5 所示：

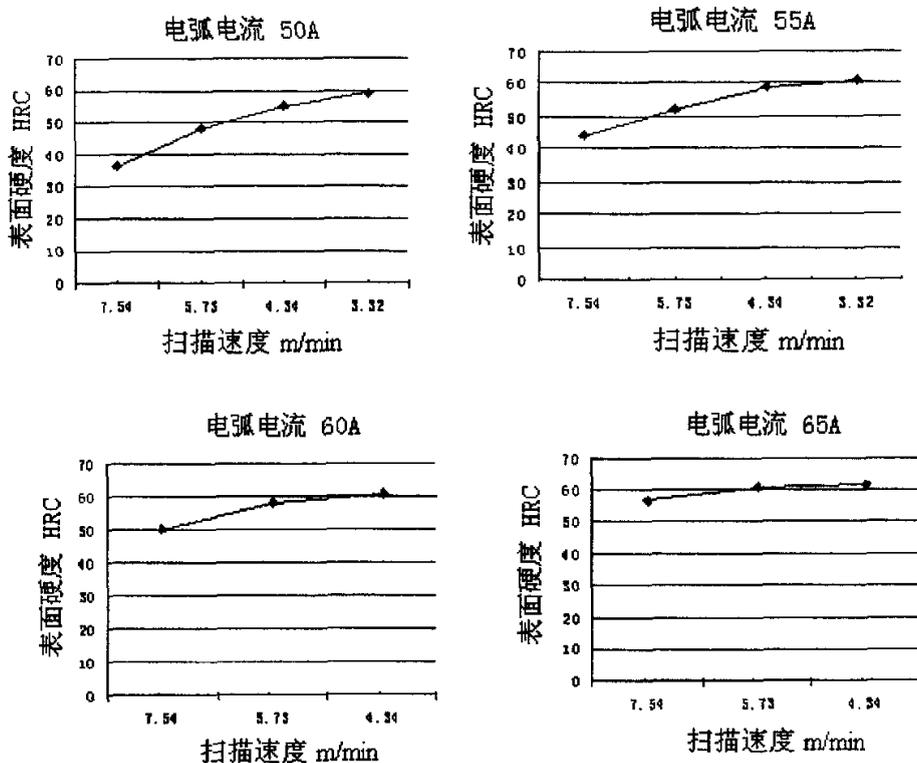


图 5.5 扫描速度与表面硬度的关系

从图 5.5 中可以看出，相同的淬火电流，随着扫描速度的提高，表面层的硬度也相对下降。但当电流大于 60A，扫描速度为 3.32m/min 时，其表面层出现熔融现象，马氏体粗大，硬度反而有所下降。扫描速度快，单位时间内表面接受的单位能量下降，温度下降，珠光体转变奥氏体不充分，导致硬度下降。从试验结果来看，表面硬度基本上是随着扫描速度增加而下降。

### (3) 工作气体流量对表面硬度的影响

气体流量增加，一方面电弧电压随之增加，则电弧功率提高。另一方面，气体流量增加，这时电弧压缩程度增加，能量更集中，弧柱温度急剧上升，电弧喷射速度加快，弧流冲击力提高，等离子弧的穿透性增强，电弧比较挺直，弧柱截面变细，

火舌长度增加。但气流的增加是有一定限度的，否则会导致工作效率降低或电弧熄灭。

工作气体流量与淬火层表面硬度关系如图 5.6 所示：

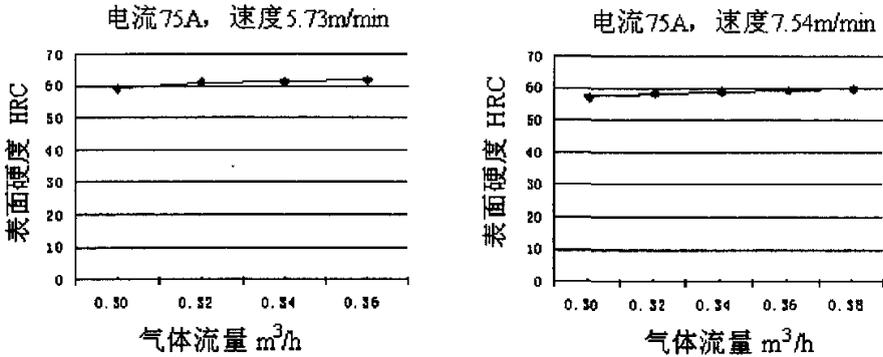


图 5.6 气体流量与表面硬度关系

从图 5.6 中可以看出，气体流量增加，淬火表面硬度有所提高，但提高不是很明显。气流量在  $0.24\text{m}^3/\text{h}$ 、 $0.28\text{m}^3/\text{h}$  时，淬火条纹有间断性的熔点，好像是由电弧间断性扫描而成，条纹表面很粗糙、不亮。气流量在  $0.42\text{m}^3/\text{h}$ 、 $0.46\text{m}^3/\text{h}$  时，淬火过程中有很大的“吱吱”声，灭弧以后喷枪周围有刺激性气味，但条纹表面很光滑、很亮。如果这时的淬火电流为最大极限电流（在  $0.36\text{m}^3/\text{h}$  条件下取的），气流量调到  $0.42\text{m}^3/\text{h}$ 、 $0.46\text{m}^3/\text{h}$  时，淬火表面出现熔化。所以工作电流和工作气体流量必须有合理配比：

- 1) 电流小，气流小，则从喷嘴喷出的气体火舌短，直径小，弧发散；
- 2) 电流大，气流大，则弧柱直径大，工件易熔融；
- 3) 电流小，气流大，造成等离子弧功率不足；
- 4) 电流大，气流小，电弧压缩无力，破坏电弧的稳定性。

#### (4) 扫描螺距对热处理效果的影响

将扫描螺距定义为单位长度内的螺纹个数。它是我自行规定的一个衡量指标，可以方便问题的研究，并使表面硬度和条纹宽度的测量直观化。扫描螺距随着主轴

转速的改变而改变。在其它淬火条件不变时，增加扫描螺距，淬火带的宽度增大，这主要是因为冷却速度发生了变化。过大的扫描螺距，使工件表面淬火覆盖率降低，表面波度过大。过小的扫描螺距，则淬火效率降低，而且淬火条纹重叠，形成二次淬火或回火，达不到预期淬火效果，强化失去意义。经过大量的试验和表面波度的测量，扫描螺距应 $\leq 4\text{mm}$ 。

材料经过淬火后，不但其硬度发生改变，材料的其它参数也会有所改变。（见表 5.2）

表 5.2 等离子弧表面淬火试验前后材料参数

序号	材料	表面尺寸/mm		硬度/HRC	
		淬火前	淬火后	淬火前	淬火后
1	45	150	150-0.4	25~29	58~63
2	40Cr	150	150-0.35	23~26	55~60
3	38CrSi	150	150-0.4	22~26	54~61
4	45Mn	150	150-0.42	23~27	54~60
5	35CrMn	150	150-0.36	23~28	53~62

## 5.6 工艺参数总结

通过淬火机理分析和大量工艺试验的结果可知，等离子弧淬火工艺参数：等离子弧功率、电弧扫描速度，工作气体流量等，对材料淬火后表面金相组织、表面硬度、硬化层深度、表面粗糙度都有决定性的影响。

可以得出等离子弧表面淬火工艺参数范围为：

(1) 对大长轴、大长孔等淬火面积大的工件进行等离子弧表面淬火、或在生产线上作为一道工序要求连续 8 小时淬火时。应选用孔径为  $\Phi 2.5\text{mm}$  的喷嘴，电极内缩量取  $4.5\text{mm}$ ，电弧长度取  $4\text{mm}$ （这时电弧电压在  $33\sim 35\text{V}$  之间波动），淬火电流取  $75\text{A}\sim 78\text{A}$ ，电弧扫描工件的速度取  $5.73\text{m/min}$ ，工作气体流量取  $0.34\sim 0.36\text{m}^3/\text{h}$ ，扫描螺距  $4\text{mm}$ 。

(2) 对淬火面积比较小的工件、或不要求连续淬火时，也可选用孔径为  $\Phi 3.0\text{mm}$  的喷嘴，电极内缩量取  $4.5\text{mm}$ ，电弧长度取  $4\text{mm}$ （这时电弧电压在  $29\sim 31\text{V}$  之间波动），淬火电流取  $85\text{A}\sim 88\text{A}$ ，电弧扫描工件的速度取  $5.73\text{m}/\text{min}$ ，工作气体流量取  $0.36\sim 0.38\text{m}^3/\text{h}$ ，扫描螺距  $4\text{mm}$ 。

## 6 结论

等离子弧表面淬火是一种非常有前途的工艺，本课题也是以工业应用为目的，并借鉴了弧焊电源中先进、成熟的技术。研究了等离子弧表面淬火控制系统。通过试验来验证设备的性能和工艺参数的稳定性，为今后等离子弧表面淬火工艺的进一步推广应用奠定了基础。

通过本次课题的研究，可以得出了以下结论：

(1) 为了使等离子弧表面淬火工艺在长时间连续作业时保证工艺参数的稳定性，便于实现等离子弧表面淬火电源的智能化和数字化，采用 PLC 控制系统，对电源的电流进行采样，对电源进行闭环控制，实现加热功率保持不变，可以保证等离子弧表面淬火工艺的稳定性。为今后的等离子弧加热电源向智能化、数字化方向发展，提供一个技术平台。

(2) 通过 MGCS 组态软件采集淬火过程的电流和电压值，分析起弧、熄弧以及淬火过程电流和电压的变化规律，可以发现现有电源设备在控制中存在的问题，这对淬火质量的提高有着非常重要的意义。

(3) 通过对 45、40Cr 等材料进行离子弧表面淬火试验，用组态软件来采集并分析此数据。优化工艺参数，可使淬火表面硬度达到 HRC55~65。这对形成淬火过程控制的专家系统提供了重要的基础数据。

(4) 等离子弧表面淬火的智能化和自动检测淬火工艺参数，实现稳定的工艺过程是未来的发展方向。

## 参 考 文 献

- [1] 徐滨士主编. 表面工程与维修. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [2] 钱苗根等编著. 现代表面技术. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [3] 徐滨士. 表面工程的应用与展望. 中国科技前沿(中国工程院版). 北京: 高等教育出版社, 2000, 6, 337~357
- [4] 闻立时, 黄荣芳. 先进表面工程技术发展前沿  
[http://www.hotwork-china.com/news\\_t.asp?id=3287,2004-11-5](http://www.hotwork-china.com/news_t.asp?id=3287,2004-11-5)
- [5] [美]B.格罗斯等. 等离子体技术. 北京: 科学出版社, 1985, 1~30
- [6] 顾洪武. 几种表面处理工艺对钢的耐磨性和耐蚀性的影响. 机械工程材料, 1994, 6(3): 12
- [7] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性. 北京: 清华大学出版社, 1995, 302~372
- [8] 黄小枚. 材料的激光加工概况. 国外金属热处理, 1996, 4
- [9] 崔信昌. 等离子弧焊接和切割. 北京: 国防工业出版社, 1980
- [10] 汪泓宏等编. 离子束表面强化. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [11] 阎洪编著. 金属表面处理新技术. 北京: 冶金工业出版社, 1996, 64~70
- [12] (日)多田信彦, 山田俊宏, 姚桐年译. 碳素钢(S50C)的等离子弧表面淬火条件. 国外金属热处理, 1991, 9, 12卷5期, 12~16
- [13] 等离子束淬火技术及其专用发生器的研究. 制造技术与机床.  
<http://ste-bohai.ntem.tj.cn/hts/bf/jssp/18754.htm>.2001 3
- [14] [苏]B.A. NHHNK 等, 林凤谟译. 应用等离子淬火法进行钢的表面硬化. 国外金属加工, 1984, 3, 1~4
- [15] Sabate J A .Lee F C .Design Considerations for High-voltage Full Bridge Zero-voltage Switched PWM Converter[A].ProCeedings of IEEE Apec[C],1990,274
- [16] Neal Borchert . Newtechnology and Pulsed MIG Welding [J]. Technology Directions, 1995,55 (2) : 45 ~47
- [17] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册·第二册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992

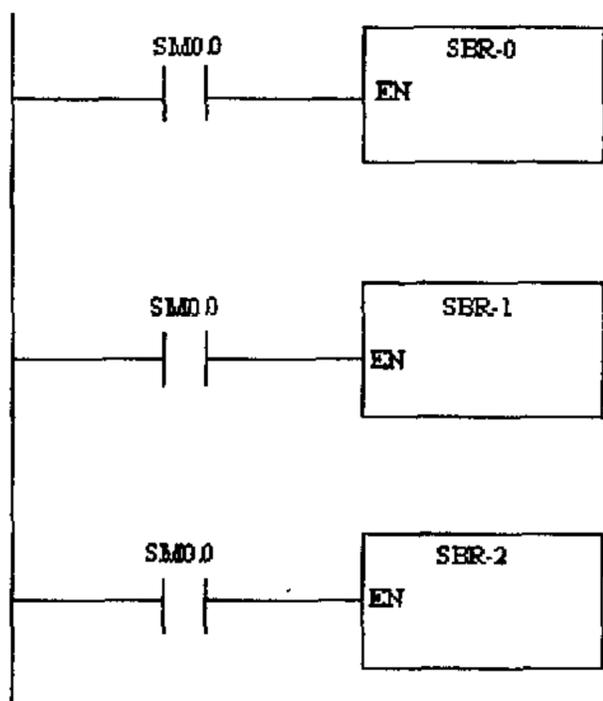
- [18] 董允. 现代表面工程技术. 北京: 机械工业出版社, 2000, 3
- [19] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体. 北京: 科学出版社, 1980
- [20] 赵文珍等. 厚壁波纹管加工新工艺方法. 沈阳工业大学学报, 1996, 12
- [21] 林化春. 等离子淬火技术研究与应用. 热加工工艺, 1997, 4, 21~22
- [22] 李惠琪, 李惠东, 吴玉萍等. 气缸套等离子多元共渗[J]. 金属热理, 1998, (23): 25~26
- [23] 吴玉萍, 李惠琪. 常压弧光等离子体的三元共渗研究[J]. 机械工材料, 2000, 24(8): 22~24
- [24] [日]藤木荣, 中岛宏兴. 平成元年我国热处理研究动向. 国外金属热处理. 1991, 3, 12卷2期, 17~22
- [25] [日]木村达夫, 宫崎峻行. 用小口径喷嘴进行碳钢等离子淬火. 国外金属加工, 1991, 2, 30~35
- [26] A.A.Bepnkob, B.C.emnh, E.capepkaba 等. 国外钢铁, 1996, 1, 65~68
- [27] F.W.Giacobbe. 使用氩热等离子喷射局部硬化高碳钢. High Temperature Technology, 1990, 8
- [28] M.V.Selivanov, V.Ya.Syropyatov. Plasma Hardening Parts. Izobret.Mashinostr, July, 1997, 3~4
- [29] V.V.Grishanov, V.I.Mordasov. Combination of Laser and Plasma Processes for Metal Treatment. IZV.Ross.Akad.Nauk, Met, July-Aug, 1999, 4, 98~103
- [30] Y.M.Dombrovskii, A.V.Brover. Treatment of Steel by an Air-plasma Arc with Scanning Met.Sci.Heat Treat, July 1999, 12~15
- [31] Y.M.Dombrovskii. Effect of Plasma Heat Treatment of the Surface on the Strength of Steel Structures Weld.Int. 1999, 13, 826-828
- [32] A.G.Saakov, S.V.Petrov. Plasma Surface Hardening Wheel Couples Avtom.Svarka, July, 1999, 7, 71
- [33] 赵铁军. 等离子弧表面淬火技术试验研究: [学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学
- [34] 沈阳机电学院焊接教研室. 等离子弧与焊接. 北京: 机械工业出版社, 1978, 11
- [35] 郑宜庭, 黄石生. 弧焊电源(第二版). 北京: 机械工业出版社, 1988, 11

- [36] 黄石生. 新型弧焊电源及其智能控制. 北京: 机械工业出版社, 2000, 3
- [37] 赵化侨等. 离子体化学与工艺[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993
- [38] 金佑民, 樊友三著. 低温等离子体物理基础. 清华大学出版社, 1983, 236
- [39] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册·第二册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [40] 过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体[M]. 北京: 科学出版社, 1986, 18~22
- [41] Ruslan Z Valiev. Structure and Mechanical Properties of Ultrafine Grained Metals[J]. *Matel. Sci. Eng.*, 1997, 236(A): 50~66
- [42] Cranqvist C G, Buhrman R A. Ultrafine Metal Particle[J]. *J Appl Phys.*, 1976,(47):2200~2219
- [43] 中国机械工程学会焊接学会. 焊接手册·第二册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1992
- [44] 黄石生. 新型弧焊电源及其智能控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000
- [45] 赵家瑞. 逆变焊接与切割电源. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [46] D. Rehfeldt. Assesment of the Characteristics of Power Sources for Metal Active Gas Welding. *Welding and Cutting*, 1996
- [47] 冬雷, 李永东. 变频调速系统的发展现状与前景展望  
[http://www.ylzb.com/gk\\_news/ReadNews.asp?NewsID=476&BigClassName=%B9%A4%BF%D8%D0%D0%D2%B5%D0%C2%CE%C5&SmallClassName=%D7%DB%BA%CF%D0%C5%CF%A2&SpecialID=0](http://www.ylzb.com/gk_news/ReadNews.asp?NewsID=476&BigClassName=%B9%A4%BF%D8%D0%D0%D2%B5%D0%C2%CE%C5&SmallClassName=%D7%DB%BA%CF%D0%C5%CF%A2&SpecialID=0)
- [48] 林化春, 丁润刚. 等离子体相变硬化处理后的残余应力及残留奥氏体. *金属热处理*, 1992(5): 23
- [49] 盛苏. PLC 控制感应加热成套系统研究: [学位论文]. 浙江: 浙江大学, 2003
- [50] 张桂臣. PLC 控制感应加热成套系统研究: [学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2004
- [51] 西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团. 深入浅出西门子 S7-200PLC. 北京: 并非经航空航天大学出版社, 2003

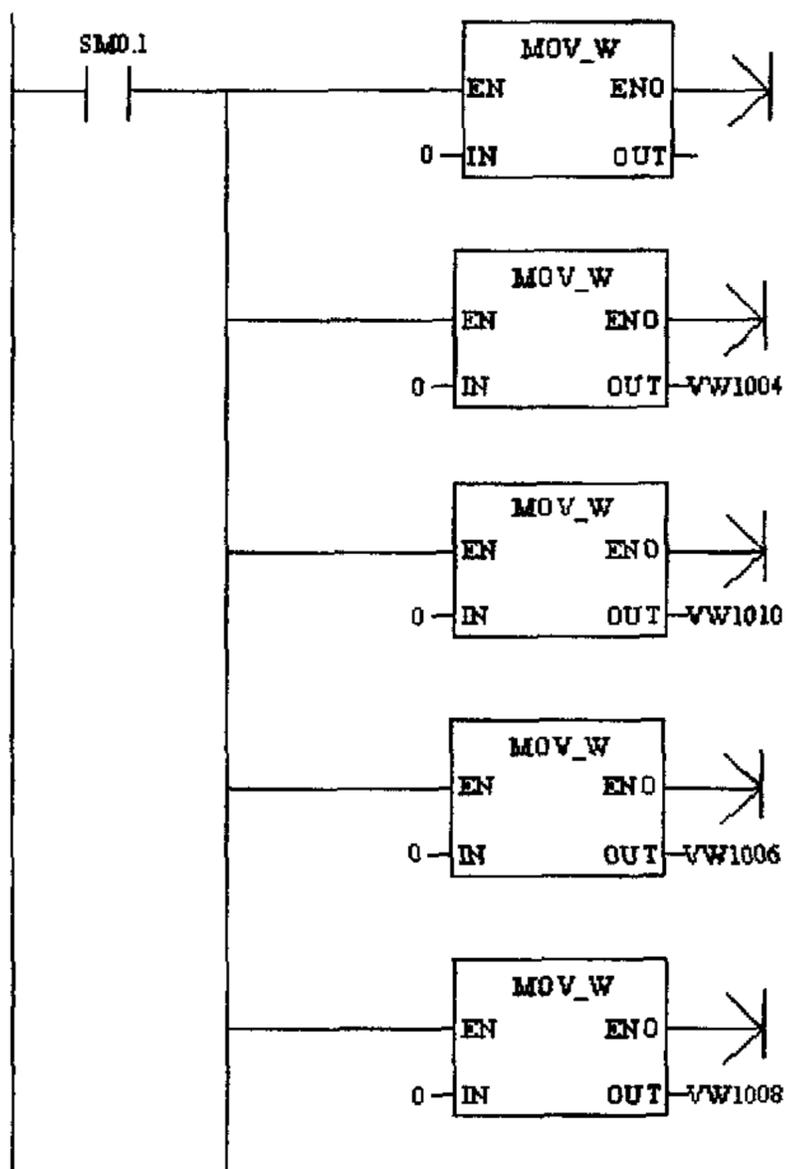
- [52] 腾文华. 可编程控制器控制等离子弧喷涂设备的研究: [学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2002

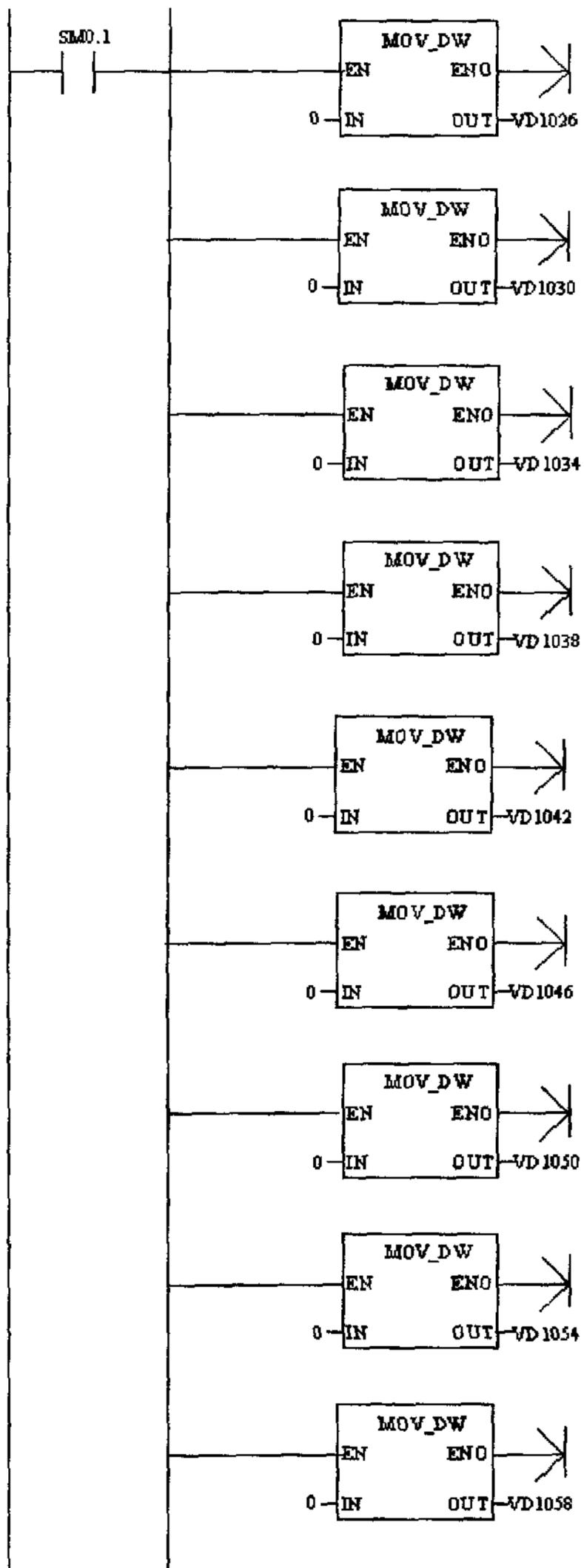
## 附录A 初使化程序

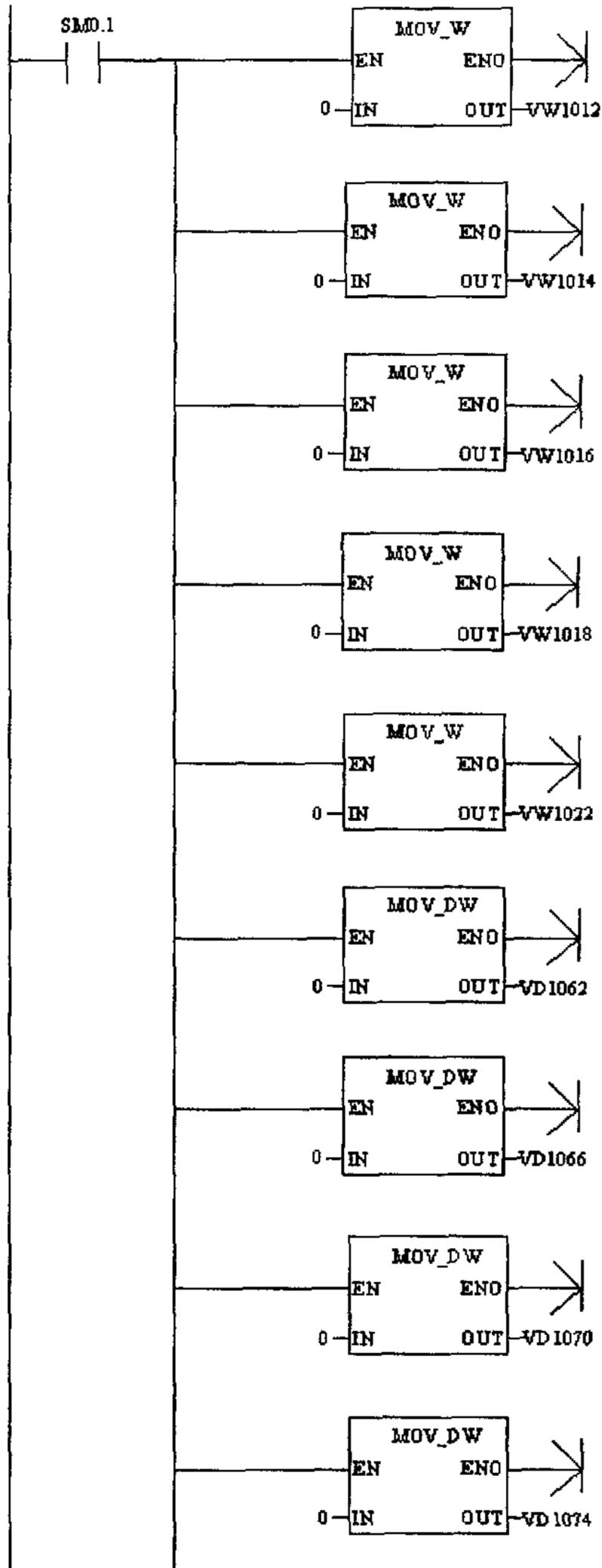
### (1) 主程序初始化

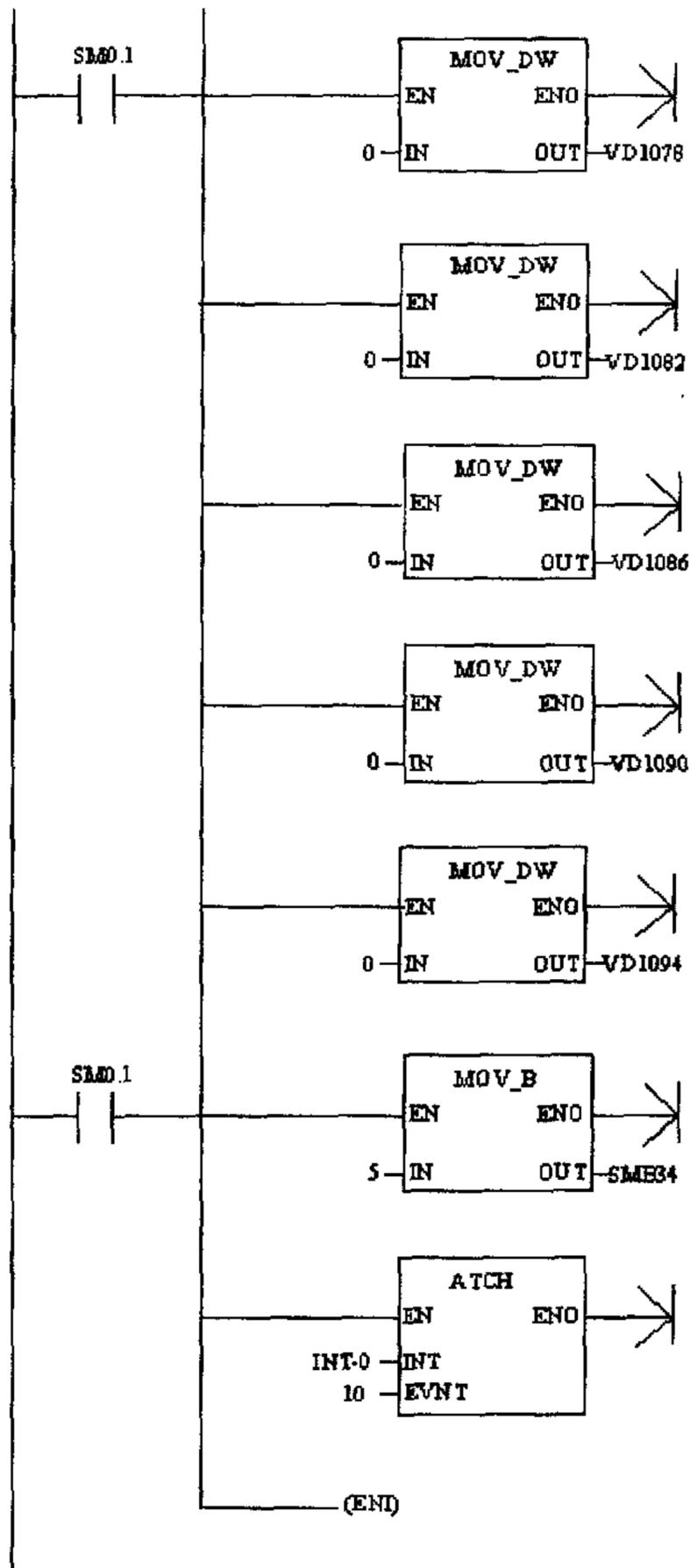


### (2) 模拟量初始化子程序

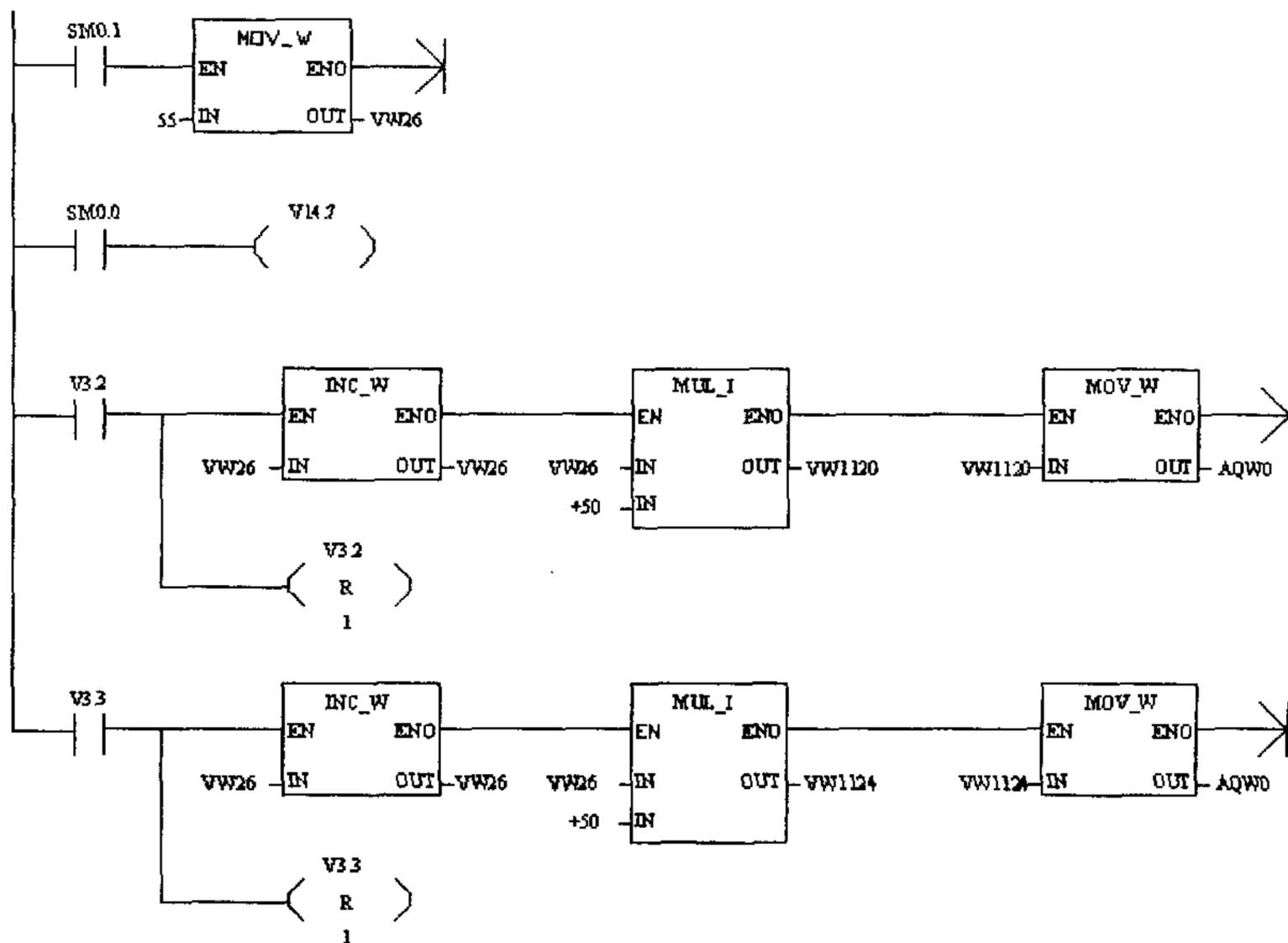




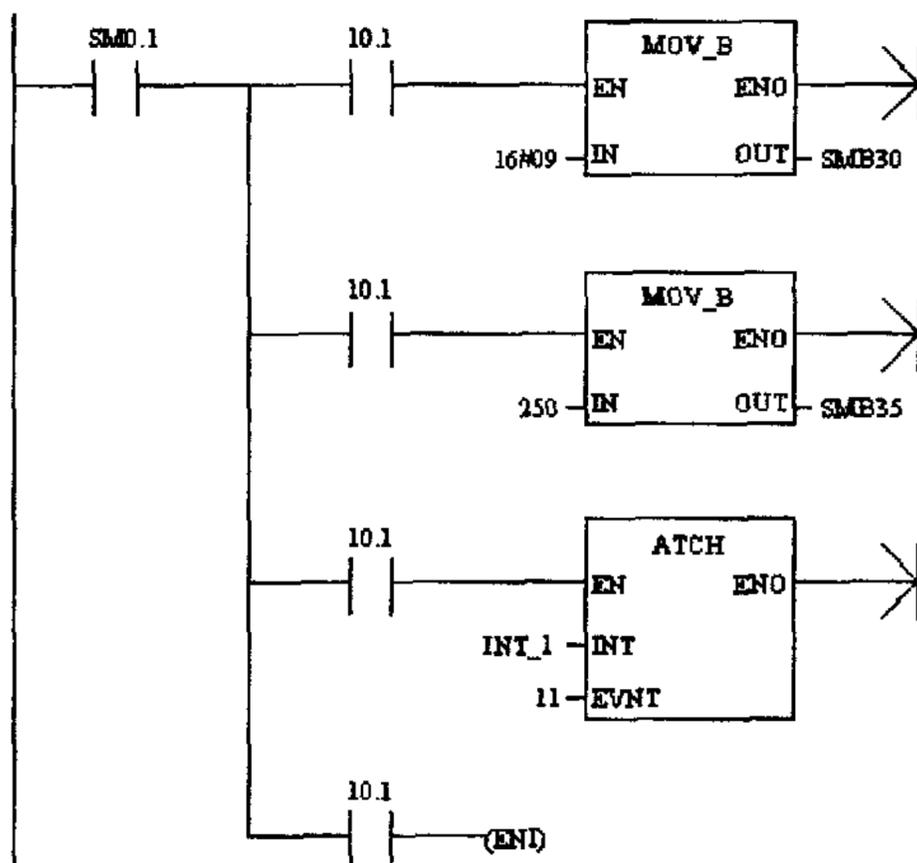




(3) TD200 设定初始化



(3) 自由口通讯初始化



## 在学研究成果

### 一、 在学期间所获的奖励

沈阳工业大学 2002—2003 年度“优秀团员”称号，沈阳工业大学，2004，

### 二、 在学期间发表的论文

张剑，周迎华，赵文珍. 等离子淬火扫描螺距对摩擦磨损的影响，机械设计与制造  
2004 年 10 月.

## 致 谢

本论文是在导师赵文珍教授的精心指导下完成的，导师渊博的学识，严谨的治学态度，敏锐的学术思想，深入细致的工作作风以及对前沿领域和交叉学科的深刻见解，使我受益终生。同时感谢吴洪新老师和张剑老师，感谢两位老师在课题实验上对我的指导和支持。三位老师对我的帮助和成长所起的作用，不是只言片语就能表达的，我只能将深深的感激之情化作一句：老师，辛苦了，谢谢你们！

沈阳工业大学机械工程学院、工程实践中心和研究生学院提供了珍贵的学习机会，并在学习、工作和生活等方面给予了诸多关怀和照顾，对此表示十分感谢。

本人在此向其他热忱帮助过我的老师及同学们致以诚挚的谢意！