

摘 要

本文是结合低速走丝电火花线切割机床的开发而进行的研究，相对低速走丝线切割机床而言，走丝系统的重要性不言而喻，可以说低速走丝线切割机床就是围绕电极丝在做文章，走丝系统上的各个环节都体现了机床的水平与质量，走丝速度和张力控制是否合适，直接影响加工工件的表面质量。尤其是近年来，随着微细、高精度加工的需要，对低速走丝电火花线切割机床的走丝系统提出了更高的要求，因此研制走丝系统具有现实的意义。

本文在查阅了大量国内外相关低速走丝线切割加工文献的基础上，分析了电火花线切割加工的理论基础，综述了低速走丝线切割机床及其走丝系统的发展状况。在对走丝机构的工作原理进行分析和研究的基础上，提出了丝速采用步进电机开环控制，丝张力采用磁粉制动器加载式开环控制的整体设计方案；建立了以PC机为主控制单元，以基于PCI总线的运动控制卡和基于ISA总线的D/A输出卡建立的功能模块为转换输入输出，以磁粉制动器为张力执行元件、步进电机为丝速控制系统的执行元件的开环控制系统；分析了走丝控制系统主要组成元件的工作原理，建立走丝控制系统的数学模型，得出了张力控制系统的传递函数。

设计并制作了走丝系统的机械装置，在关键部件研制上，设计了张力轮和张力压紧轮之间的压紧力自动调节装置，以及收丝轮和收丝压力轮的压紧力调节装置。

设计并调试了控制系统的稳压电路、磁粉制动器的驱动电路，同时基于VB6.0编写了实时控制程序，实现了走丝系统的自动化控制。

对走丝系统内、外进行了参数设定后，对整个系统调试。经测试，走丝控制系统能够进行实时控制，证明本方案可行。

关键词：低速走丝电火花线切割机床；走丝系统；机构设计；恒速恒张力控制。

Abstract

This article mainly about the research on the development of the WEDM-LS, to WEDM-LS, the wire feed system is very important. Every part of the wire feed system has reflected the level and quality of the machine tool. The speed of the wire and the tension influence the surface quality of processing work piece directly. With the developing of micro and high precise manufacture, more requests on the stability of the wire-feeding system are called on, therefore, it has realistic meanings to research on the wire-feeding system.

The new developments of WEDM-LS and wire-feeding system for WEDM-LS are stated firstly in this paper on basis of a lot of domestic and overseas technique literature on WEDM-LS. After analyzed and researching on the working theory of wire-feeding device ,a method to control open loop tension using magnetic powder brake and wire feeding speed adopting step motor are putted forward; A wire-feeding system is researched with PC as main controlling unit, the kinetic control card of PCI bus and D/A output card of ISA bus as converting I/O ,the magnetic powder brake as performing device and the step motor as the wire feeding motor; The working theory of main part of the wire-feeding system are analyzed. A math model of wire-feeding system is set up and a system transforming function is presented.

The mechanic part of wire-feeding system is developed. On the research of key parts, the device to automatically adjust pressure between the tension pulley and the tension pressing pulley, and the device to adjust the pressure between the recovery pulley and the Pressing pulley are designed.

The content voltage circuit and circuit to drive magnetic powder brake

are designed and debugged , a real-time control software based on VB6.0 has been written, the wire-feeding system is controlled automatically have realized.

After confirming the inside and outside parameters of the wire-feeding system, the general debugging is carried. Through testing, the wire-feeding controlling system can carry on real-time control and control method is confirmed.

Keyword: Low-Speed WEDM, Wire feeding system, Mechanism designs, Content speed and tension control.

独创性申明

秉承学校严谨的学风与优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师的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，论文不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，不包含本人或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明，并表示了谢意。

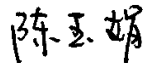
本学位论文成果是本人在广东工业大学读书期间在导师的指导下取得的，论文成果归广东工业大学所有。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任，特此声明。

指导教师签字：



论文作者签字：



2007 年 5 月 20 日

第一章 绪 论

1.1. 引言

1943年,前苏联学者拉扎连珂夫妇发明了电火花加工^[1],20世纪50年代初传入我国,我国开始研究和应用电火花加工技术。60年代初期,我国研制成功靠模仿型电火花线切割加工设备,能够切割尺寸小、形状复杂、材料特殊的冲模和零件。

经过半个多世纪的发展,电火花加工技术已广泛应用于航天、航空、电子、原子能、计算机技术、仪器仪表、电机电器、精密机械、汽车拖拉机、轻工等行业。在加工过程中,电极和工件之间不直接接触,几乎没有切削力,因此在加工高强度、高熔点、高硬度、高脆性、高韧性等难于切削新材料显示了极强的优越性。电火花加工主要分为成型加工和线切割加工。两者都是利用工具电极与工件产生火花放电,蚀除工件,不同的是电火花成型加工需要设计和制造工具电极,放电加工后,工件被蚀除出与工具电极严格一致的型腔;而电火花线切割是利用电极丝(一般为铜丝或钼丝)与工件之间的相对运动,产生火花放电,使工件切割成型^[2]。

1.1.1. 电火花线切割机床简介

电火花线切割机按电极丝传送的速度不同分为高速走丝和低速走丝两种,近年来,也有在高速和低速的基础上发展起来的中速和高低速复合走丝机床以及自旋式电火花线切割机床,但由于起步较晚,这些机床还不普遍^[3]。一般情况下,我们把送丝速度高于8m/s称为高速线切割机床(HS-WEDM),这是我国主要的机种,而低于15m/min称为低速走丝线切割机床(LS-WEDM),这是国外生产的主要机种。高速走丝线切割机电极丝采用的是上下循环轮流送丝方式,电极丝重复使用,电极丝导向采用红宝石导轮,工作时电极丝与导轮高速摩擦而逐渐变细,进而

导致电极丝与导轮之间的间隙过大,加之电极丝的传送速度高引发电极丝发生抖动,所以采用高速走丝线切割加工的模具其型面比较粗糙, Ra值一般在 $1.5\sim 2.5\ \mu\text{m}$ 之间。但由于其走丝速度快,有利于排屑,适合大厚度、大电流切割。低速走丝线切割机其导丝嘴采用耐磨的金刚石材料,它与电极丝的配合间隙仅为 $0.001\sim 0.002\text{mm}$,同时电极丝的传送为单向输送不循环一次性使用,因而低速走丝线切割不存在电极丝变细的情况;又由于低速走丝速度相对较慢,电极丝抖动幅极小^[3];而且低速走丝线切割的脉冲电源各个参数调节范围宽;伺服进给系统一般为四轴联动甚至为五轴联动,能切割锥面,上下异形面,扭转曲面,带尖角内角过渡曲面,切割过程中要求实时更新伺服进给速度,以达到与工件蚀除速度基本同步,因此低速走丝机适用于精密模具和精密机械零件的加工,所加工的模具型腔最佳表面粗糙度值低,加工尺寸精度可控制在几个微米之内^[4]。

1.2. 低速走丝电火花线切割技术的国内外研究概况

1.2.1. 国外研究现状^[5]

国外低速走丝线切割机床主要的生产厂家有瑞士的阿奇、夏米尔公司,日本三菱和沙迪克公司,目前他们的产品基本占领了大部分国际市场。

(1) 最大加工效率 国外LS-WEDM的最大加工效率停留在 $300\text{mm}^2/\text{min}$ 已有多数。国外的脉冲电源都采用无电阻高效节能型窄脉宽高峰值电流脉冲电源,这种脉冲电源低能耗,低损耗,加工精度高,表面质量好。最大加工效率依赖于窄脉宽高峰值电流脉冲电源的开发,国外在窄脉宽的情况下,其最大峰值电流 $\geq 1200\text{A}$,高峰值电流与其它条件配合(各种控制方式、供液条件、复合电极丝等),可使最大加工效率达到 $400\sim 500\text{mm}^2/\text{min}$ 。例如,瑞士阿奇公司的AGIE CUT PROGRESS机床采用数字化的IPG智能电源,用 $\Phi 0.33\text{mm}$ 的电极丝,其最大加工效率可达 $500\text{mm}^2/\text{min}$ 以上;日本三菱电机公司的FA-V机床,采用 $\Phi 0.36\text{mm}$ 的电极丝,加工效率也可达到 $500\text{mm}^2/\text{min}$;日本沙迪克公司开发的LQ33W新电源,在AQ325L机床上,用 $\Phi 0.30\text{mm}$ 的复合电极丝,加工效率可达 $400\text{mm}^2/\text{min}$ 等等。总之,国外目前最大加工效率在 $400\sim 500\text{mm}^2/\text{min}$,又有了新进展。目前最有价值的最大加工

效率要数瑞士阿奇公司的AGIE CUT PROGRESS机床，该机床开发的电源使用标准电极丝在加工效率达到 $350-500 \text{ mm}^2/\text{min}$ 的情况下， R_a 可达到 $0.8\mu\text{m}$ ，这种高效粗加工，对于最终实现精密加工的多次切割来说，可节省约50%的加工时间，减少约40%的滤芯消耗，40%的树脂消耗，具有明显的经济效益。

(2) 变截面加工效率

日本三菱公司的FA系列机床采用了加工电源控制系统，该系统由工件厚度检测器、加工状态检测器和脉冲能量输出控制器等部分组成，以适应加工截面的变化，尤其适合台阶形、中空形、薄形等零件加工，能有效防止断丝，提高加工效率。最大能量控制专家系统只要输入电极丝直径和类型、工件材料即可自动进行最佳加工，根据加工过程中不同的加工厚度自动增减加工能量，以保持最高加工效率，应用这种专家系统效率一般能提高30%左右。

(3) LSWEDM 加工表面质量的新突破

LSWEDM的加工表面质量是影响LSWEDM发展的关键，也就是LSWEDM能否直接进入精密加工领域的关键技术。加工表面质量除表面粗糙度和几何形貌（尺寸精度）外，在LSWEDM中还应包括两个方面：一是LSWEDM加工表层的化学、物理、力学性能，主要包括表层金相组织、表层的显微硬度、残余应力及宏观和微观裂纹等，即所谓表面“变质层”；二是由于LSWEDM采用水质工作液，在脉冲电源的作用下产生的电化学反应在工件表面形成的表面“软化层”，也称表面“变质层”。这两个方面的“变质层”直接影响模具寿命和性能（耐磨性、耐腐蚀性、疲劳强度）等。随着LSWEDM的发展，表面质量的改善有了新的突破，其技术进步主要体现在以下两个方面。

① 优化放电能量的新型电源

电火花加工时，金属材料蚀除分为熔化和气化二种，宽脉宽（放电时间长）易造成熔化放电加工，使加工表面形貌变差、“变质层”加厚、内应力加大，易产生裂纹；而当脉宽小到一定值时，易成为气化放电加工，气化放电加工变质层很小，内应力也减小，并可避免表面裂纹的产生，改善了表面质量。因此为了保持相同的加工效率，在放电能量相同的原則下，采取压缩放电时间和增大峰值电流的方法，这种优化脉冲能量的方法，使表面质量得到很大改善。

② 防电解（AE）脉冲电源

优化放电能量只能改善一个方面的表面质量，如表面粗糙度、形貌、内应力、

裂纹等等。不过 LSWEDM 采用水质工作液，虽然采用的是“去离子”水，但还存在一定数量离子，在脉冲电源的作用下产生电化学反应。当工件接正极时，在电场的作用下，氢氧根负离子 (OH^-) 会在工件上不断沉积，使铁、铝、铜、锌、钛、碳化钨等材料氧化、腐蚀，造成所谓的“软化层”。在使用硬质合金工件时，硬质合金中的结合剂钴成为离子状态溶解在水中，同样形成“软化层”。

开发的 AE 脉冲电源，一系列的生产实践证明是控制工件表面电化学反应最有效的方法。AE 电源是其交变脉冲使平均电压为零的脉冲电源，由于交变脉冲使 OH^- 离子在工作液中处于振荡状态，不趋向于工件及电极丝，这样可防止工件表面的锈蚀氧化，硬质合金的钴结合剂也不会流失，与优化放电能量配合，可使表面“变质层”控制在 $1\mu\text{m}$ 以下，这样 LSWEDM 加工的硬质合金模具寿命可达到机械磨削的水平。

(4) 机床结构

典型的精密机床结构要数瑞士阿奇公司的 AGIE CUT VERTEX 机床。该机床采用了类似三坐标测量机的三点吸振支撑结构，各轴的运动不影响其它轴的精度；各运动轴采用直线光栅尺与编码器双测量反馈伺服系统，其位置检测控制精度达到 $0.1\mu\text{m}$ 。机床上所有的发热源都安装了温度传感器，具有循环气冷、水冷或热隔离结构，消除了温升对机床精度的影响。机床不但热容量大，而且刚性好，因此载荷的变化对机床精度影响极小。机床的 X、Y、U、V 轴的平均定位精度允差 P_a 为 $0.8\mu\text{m}$ ，平均重复定位精度允差 P_s 为 $0.4\mu\text{m}$ 。该机床具有双丝自动交换系统，最细电极丝为 $\Phi 0.02\text{mm}$ ，可进行精确自动穿丝，穿丝孔的直径只需比电极丝大 $5\mu\text{m}$ 即可。为了满足 $\Phi 0.02\text{mm}$ 电极丝的精密切割加工，机床上设置了两个电极丝探测器检测丝的运行状态，以精确控制丝的张力、吸收振动和隔绝外界干扰等，机床还能自动调整上下导向器的偏移量来自动补偿加工中电极丝上下损耗不同，以及冲液造成的垂直度偏差。该机床还推出了锥度切割新功能，有效地提高锥度切割精度等等。日本 Sodick 公司在电火花线切割机床的伺服系统上使用直线马达驱动，使精加工脉冲的利用率大幅度提高。直线运动的导向也采用了与直线电机高响应速度相适应的滚动导轨，这些措施的综合使用，实现了机床的精密控制和长期的精度保持性。

(5) 细丝切割加工技术

细丝切割属于精密加工技术。过去的细丝切割丝直径为 $\Phi 0.05\text{mm}$ ，现在已

达到 $\Phi 0.02\text{mm}$ 。细丝切割加工中的自动穿丝功能十分重要,目前已能对 $\Phi 0.02\text{mm}$ 的细丝进行自动穿丝。在冲压模加工中,细丝用于内清角加工,用 $\Phi 0.02\text{mm}$ 的细丝,可加工出内角半径为 $15\mu\text{m}$ 的内清角。在 IC 行业中,集成电路框架模的细丝切割加工,有其重要的应用价值。目前集成电路引线脚已多达 100 根以上,其引线的线脚间距很小,模具材料一般为硬质合金,所以适合细丝加工。其它如微型接插件、微型马达铁芯、微型齿轮等模具加工。

另外,瑞士阿奇公司已将数据通信和网络技术应用到线切割加工,远程计算机可以通过数据通信网络登陆到本地机床数控系统,实现各种文件传输并能实际操作机床,实行远程切割加工。

1.2.2. 国内研究现状

我国低速走丝线切割机床的研制与生产都比较晚,直到20世纪80年代才开始,生产厂家很少,代表性的厂家是苏州三光科技有限公司、北京阿奇夏米尔工业电子有限公司、苏州电加工机床研究所、汉川机床股份有限公司等。

苏州三光科技有限公司,在机床本体部分,采用工作台固定而立柱移动的形式,由于伺服电机的负荷变成了恒定负载,提高了运行的定位精度。运丝系统由日本进口的伺服马达、磁粉离合器、收丝马达等组成,可准确地调整因微小抖动而带来的走丝系统的不稳定,保证走丝系统的平稳。送丝部分用的是日本进口反向可逆电机,防止在正常加工状态下由于突然断丝而带来的电极丝缠绕。收丝系统采用导管式收丝结构,穿丝时通过高压液体的快速流动导引电极线方便、快速地完成穿丝工作,可靠性高,长期使用无磨损。上下喷嘴本体采用大理石和陶瓷件固定,消除热变形同时可有效防止由于操作员粗心撞坏线架而带来的重大损失,仅仅更换下臂头部即可恢复。导向部分采用金刚石导向器,保证了加工精度及耐磨性。通过上、下同轴式喷流结构,改善了排屑及冷却的效果,获得极高的加工效率。伺服系统由进口高精度直线光栅尺和进口交流伺服电机构成,采用基于 CPLD 的全闭环控制技术,直接检测导轨的实际位移量,通过反馈系统对机床进行动态螺距补偿,使机床运动精度更高且持久不变。立柱部分采用中心负重的形式,形成左右对称的结构,将热变形对机床精度影响降到最小,并便于工件的安装和辅助操作^[6]。

北京阿奇工业电子有限公司生产的低速走丝线切割机床主机刚性强，热稳定性好，自动冲液采用变频控制，切割效率高。它所生产的CA20浸水式精密数控慢走丝线切割机床，最佳表面粗糙度 $Ra < 0.25\mu\text{m}$ ；采用全闭环控制，加工精度高；谐振式大功率IGBT电源，节能省电、加工速度快；最新穿丝设计，穿丝仅需5秒；而且它的最大加工锥度达到了 $\pm 25^{\circ}/80\text{mm}$ 。

汉川机床股份有限公司生产的低速走丝线切割机产品结构、造型主要依附于快走丝机床，导轮由高精度宝石导轮和高精度球轴组成，导丝机构精度高，运丝平稳，工作液箱装有两级过滤网，实现精细过滤，走丝机构实现五级调速，能适应不同厚度的材料加工。

台湾低速走丝线切割机床起步虽然较晚，但发展迅速，在控制系统及电源等关键技术方面取得了很大的突破。台湾现在各企业生产的低速走丝线切割机床属于中档机的范围，这些机床采用无电阻防电解电源，具有锥度切割、浸入式加工等功能，有些企业还拥有自己的自动穿丝专利技术。

可以说经过引进消化、合作开发、自行设计等，我国对低速走丝线切割机的研究、开发与生产取得了一定的成效。但不论在机床品种规格、技术含量、工艺水平等各方面，与国外的低速走丝线切割机相比，都存在着很大的差距，远不能满足市场的需求。业内人士对低速走丝线切割机的需求量进行过分析，从加工对象对机床的要求、用户的接受能力等各方面进行评估，认为我国低速走丝线切割机的市场份额可以占整个线切割机市场的15%-20% (不包括远期的预测)。但是，国产低速走丝线切割机床存在许多问题：缺乏创新意识；主要的核心技术仍需借鉴国外的技术；关键的零部件也要引进国外的零部件；机床性能、加工精度、加工稳定性等方面与国外相比都有很大的差距，这些因素影响了国产低速走丝机床的产销量。如何有效地提高我国低速走丝线切割机的水平？从技术质量的角度来讲，可以列出许多的因素，下列两个方面是较为基本的问题：一个是低速走丝线切割机的核心技术还没有掌握好，那就是高水平的脉冲电源；另一个问题是结构件的制造质量较差。如圆形导丝器，无论是尺寸精度还是进出丝口的形状都与国外相同器件有很大差距，其结果是导向精度降低，自然影响了切割精度的提高，同时还容易造成断丝。还有走丝系统，其重要性是不言而喻的，可以讲线切割机就是围绕这根丝在做文章，走丝系统上的各个环节都体现了机床的水平与质量，这个问题是容易认识的，但是走丝系统的平滑、灵活性却不易受人重视^[7]。

展望未来,发展的重点要以中档水平机床的产业化为主:最大切割速度150~250mm²/min,Ra0.4~0.8um,按国标要求的加工精度为0.005~0.01mm,功能较全,稳定可靠。这一方面是因为大量的个体私营及股份制模具生产企业大量需要它们,另一方面是我们现有电加工机床生产企业力所能及并占有一定优势^[8]。

1.2.3. 低速走丝电火花线切割机走丝系统的发展趋势

新型的走丝系统除了能保证加工过程稳定及自动穿丝等传统的要求之外,还能在保证加工精度的前提下提高加工效率。日本三菱PA05S电火花线切割机配备的ATS高可靠性的自动穿丝机构,直径为 $\Phi 0.02\text{mm}$ 的电极丝,穿丝时间为90s左右,而且穿丝准确率达到100%。日本Fanuc公司的Robocut Alpha型电火花线切割机,在加工过程中发生断丝时,系统可在浸液的情况下进行自动重穿丝处理,且穿丝的时间少于15s。为保证加工过程的稳定性,国外许多走丝系统都配备了针对断丝情况的预报及在线检测技术,目前的断丝预报与在线检测技术大量采用了神经网络、时间序列等理论。

张力多级控制。在低速走丝线切割加工中,拉丝轮前的张力往往高于要求的张力,而且也不均匀。因为不单单是加载装置有作用力,从丝轴中拉出丝来,在转向轮上、导电块上、导丝器上都有阻力,最后累加到拉丝轮上,使这个值接近丝的强度极限,就易在此处断丝。所以较先进的机床均采用多级张紧的结构,将前端阻力隔离。

双走丝系统实现了一台机床上自动交换两种材质、直径都不同的电极丝,犹如加工中心换刀一样,实现粗加工用粗丝,精加工用细丝的目的。可大幅度提高平均加工效率,还可以实现精密加工^[9]。瑞士夏米尔的ROBOFIL 2050TW、ROBOFIL 6050TW、AGIECUT VERTEX双丝加工机床,解决了精密和高效加工的矛盾,使总的加工时间大为缩短,一般可节省30—50%的加工时间,同时可节省价格昂贵的细丝,降低了加工成本。

1.3. 课题的研究概况

1.3.1. 课题的研究目的和意义

多年来,我国生产的数控电火花线切割机一直是单一的高速走丝线切割机。高速走丝线切割机在国民经济尤其是模具制造业发挥了巨大的作用。但是随着科学技术的不断发展,复杂形状、难加工材料的精密机械零件不断出现,高速走丝线切割机床因其结构上的局限性不能满足精密加工的要求,因此说快速走丝线切割机床向精密机床发展虽有一定潜力,但发展空间受到限制,潜力有限,已无能为力。

过去低速走丝电火花线切割机是“进口机”的代名词,一直处于较为低迷的状态,大量的进口将花费巨额外汇。因此加快低速走丝线切割机的发展,提高低速走丝线切割机的技术质量水平,扩大低速走丝线切割机的应用,对我国的民用工业、国防工业的发展具有重要意义。

1.3.2. 课题的研究内容

本课题研究内容主要包括设计、制作出低速走丝电火花线切割机床走丝系统机械装备,开发恒张力控制系统的控制电路及其软件,并进行相关调试。本课题研究的主要内容:

(1) 提出丝速采用步进电机开环控制、丝张力采用磁粉制动器加载式开环控制的整体设计方案,并进行系统研制;

(2) 建立以PC机为控制系统主控单元,以运动控制卡和D/A输出卡功能模块为转换输入输出,以步进电机为丝速控制执行元件、磁粉制动器为张力控制执行元件的开环控制系统,分析走丝控制系统主要组成元件的工作原理,建立走丝控制系统的数学模型,得出走丝系统控制的传递函数;

(3) 设计并制作走丝系统的机械装置,在张力轮和收丝轮机构等关键部件上,设计张力轮和张力压力轮、收丝轮和收丝压力轮之间的压紧力的自动调节装置;

(4) 设计控制系统的外围扩展电路，主要包括供电电源电路以及磁粉制动器驱动电路；同时基于VB6.0编写了实时控制程序，开发走丝系统的控制程序，实现走丝系统的自动化控制；

(5) 将走丝系统参数设定后，进行系统调试，并进行实验研究分析。

第二章 线切割加工理论基础及张力执行元件

2.1. 电火花线切割加工的加工原理

电火花线切割加工方法是机械制造领域中一种重要的特种加工技术。它通过两电极间高频脉冲放电的电腐蚀作用实现材料的去除，以加工各种轮廓和形状的零件。这种方法不是靠机械能来对材料进行去除，而是利用电热能、电化学能等特殊的能量形式来实现材料去除。线切割加工无切削力，工件材料硬度对加工性影响不大，基于这种特点，线切割适合加工各种特殊性能的材料和各种复杂成形表面的零件^[10]。

图2.1是电火花线切割加工原理图，工具电极丝接脉冲电源的负极，工件

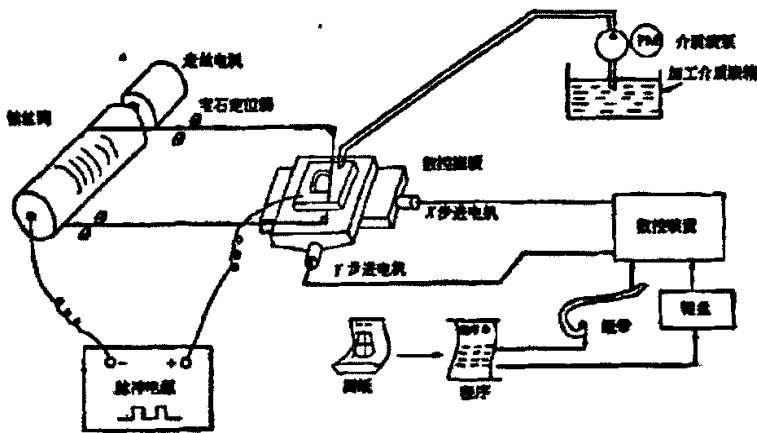


图2.1 电火花线切割原理图

Fig .2.1 Schematic diagram of WEDM

接脉冲电源的正极，电极丝和工件之间保持一个很好的放电间隙（一般是几微米到几十微米），其间充满工作液，当来一个脉冲电压，在工件和电极丝间产生一次电火花放电，在微细的放电通道里，瞬时集中大量热量，温度高达 10000°C 以上，这时压力也急剧变化，在共建表面放电点的局部微量元素立即溶化、气化、爆炸式地飞溅到工作液中，再被迅速冷却而形成固体金属微粒，随工作液带走，

这时在工件表面便留下一个微小地凹坑（称“放电坑”），放电短暫停歇，同时两电极间工作液恢复绝缘状态，紧接着脉冲电源进行第二次放电，重复金属腐蚀过程，这样，虽然每个脉冲放电蚀除的金属都很少，但因在极短的时间内有成千上万次脉冲放电作用，就能蚀除较多的金属材料，从而实现对工件材料进行电蚀线切割加工^[1]。

为了确保每来一个电脉冲时在电极丝和工件间产生的是火花放电而不是电弧放电，首先必须使两个电脉冲之间有足够的间隔时间，使放电间隙中的介质能消电离，也就是使放电间隙中的带电粒子恢复为中性粒子，恢复本次放电通道处间隙中介质的绝缘强度，以免总在同一处发生放电而导致电弧放电，一般脉冲间隔应为脉冲宽度的4倍以上。为了保证火花放电时电极丝不被烧断，必须向放电间隙注入大量的工作液，以使电极丝得到充分冷却，同时电极丝必须做轴向运动，以避免火花放电总在电极丝的局部位置而被烧断，轴向运动电极丝有利于不断往放电间隙中带入新的工作液，同时也有利于把电蚀产物从间隙中带出去。

电火花线切割加工过程的工艺和机理，与电火花成型加工相比既有共性，又有特性。下面主要对两者的不同之处进行讨论：

1 由于采用水或水基工作液，所以不会引燃起火，容易实现安全无人运转，但由于工作液的电阻率远比煤油小，因而在开路状态下，仍有明显的电解电流。电解效应稍有益于改善加工表面粗糙度。

2 一般没有稳定电弧放电状态。因为电极丝与工件始终有相对运动，尤其是快走丝电火花切割加工。因此，线切割加工的间隙状态可以认为是由正常火花放电、开路 and 短路这三种状态组成。

3 电极与工件之间存在着“疏松接触”式轻压放电现象。

4 不需要制造成型电极，大大降低了成型工具电极的设计和制造费用，缩短了生产准备时间，加工周期短。

5 由于电极丝比较细，能方便地加工复杂截面的型柱、型孔、大孔、小孔和窄缝等。

6 脉冲电源的加工电流较小，脉冲宽度较窄、属中、精加工范畴，所以采用正极性加工，即脉冲电源的正极接工件，负极接电极丝。电火花线切割加工基本是一次加工成型，一般不要中途转换规准。

7 由于采用移动的长电极丝进行加工，单位长度电极丝的损耗较小，从而对

加工精度的影响较小^{[12]-[14]}。

2.2. 线切割加工工艺^{[15]-[20]}

2.2.1. 线切割加工的工艺指标

线切割加工的主要工艺指标有切割速度 V 、表面粗糙度、电极丝损耗量及加工精度四个方面。

快走丝时切割速度是指在一定的加工条件下，单位时间内工件被切割的面积，单位是 mm^2/min ；低速走丝时，切割速度一般包括主切割速度、单次切割速度和平均切割速度。选择切割速度时要综合考虑工件材料、脉冲电源参数、工作液的浓度及水质等因素。表面粗糙度是指加工后表面微观不平度的程度，用微观轮廓平面度的平均算术偏差值 R_a (μm) 来表示。这项指标直接反映模具和零件表面的光滑程度；直接影响模具和零件的使用性能。加工精度是指所加工工件的尺寸精度、形状精度（如直线度、平面度、椭圆度）和位置精度（如平行度、垂直度、倾斜度）的总称。加工精度是一项综合指标，它是指切割轨迹的控制精度、机械传动精度、工件装夹定位精度及脉冲电源参数的波动等方面对加工精度的影响。

2.2.2. 线切割加工的基本工艺规律

影响线切割加工工艺指标的因素很多，大致可以分为电参数和非电参数因素的影响。电参数是指脉冲电源输出的参数，包括：脉冲宽度、脉冲间隔、开路电压、短路峰值电流等等；非电参数包括机走丝系统、工作液系统、伺服控制系统，还包括电极丝以及工件的特性等等。

(1) 电参数对加工工艺指标的影响

脉冲宽度是指脉冲电流的持续时间。在其他加工条件相同的情况下，切割速度随着脉冲宽度的增加而增加，但表面粗糙度变差。这时因为脉冲宽度增加，使单个脉冲放电能量增大，则放电痕也大。当脉冲宽度增加到使电蚀产物来不及及

时排除时，就使加工不稳定，反而使切割速度降低。

在一定的工艺条件下，减小脉冲间隔，切割速度提高，表面粗糙度稍有增大，这说明脉冲间隔对切割速度影响较大，对表面粗糙度影响较小。因为在单个脉冲放电能量确定的情况下，脉冲间隔较小，致使脉冲频率提高，即单位时间内放电加工的次数增多，则平均加工电流增大，故切割速度提高。实际加工时，脉冲间隔不能太小或太大，如果太小，放电产物来不及排除，放电间隙来不及充分消电离，将使加工变得不稳定，容易烧伤工件或断丝；太大就会使切割速度明显降低，严重时不能继续进给，加工变得不稳定。选择脉冲间隔和脉冲宽度跟工件厚度有很大关系，随着加工工件厚度的增加，脉冲间隔亦要增加。

开路电压的大小直接影响峰值电流的大小，提高开路电压，峰值电流增大，切割速度提高，但工件表面粗糙度变差。开路电压对加工间隙也有影响，电压高，间隙大，反之则小。

在其他工艺条件不变时，随着峰值电流的增加，单个脉冲能量增大，切割速度提高，表面粗糙度变差，同时，加工间隙大，加工精度降低。

(2) 非电参数对加工工艺指标的影响

我们主要以低速走丝为例讨论非电参数对加工工艺指标的影响：

a 电极丝张力的影响。在加工时放电爆炸力总是将电极丝推向与它前进方向相反的方向，这个力是造成电极丝滞后的主要因素，电极丝在加工过程中应保持恒定，同时丝张力与工件厚度密切相关，工件越厚，所需的张力越大；丝张力越大，加工越稳定，尺寸精度高，表面质量好，但丝张力过大易造成断丝，使加工无法进行下去。

b 导丝器位置与上下喷嘴位置的影响。在加工中，导丝器起着控制电极丝的方向、确定加工位置和保证加工精度的作用。导丝器相对位置的高低直接影响切割时电极丝的张力大小、冲液压力和电极丝的振幅，从而影响切割速度和加工质量。上下导丝器距加工工件表面越近，主切割速度越高。且加工的工件精度高、表面质量好，不易断丝。上下喷嘴影响冲液压力和流量，进而影响线切割使工作液的排屑能力，并且影响到电极丝的运动，从而影响线切割的加工工艺指标。喷嘴位置距工件表面太近，冲液压力、流量太大产生飞溅，造成工件在加工中的偏移，影响工件的位置精度；同时高的冲液压力造成电极丝运动的颤动，使运动不稳定，导致加工精度下降；但喷嘴位置距工件表面太远，压力射流很难加载到电

极丝与工件的缝隙之间，排屑能力降低，使加工速度降低且易断丝。

c 进电块的影响。加工时，电极丝是通过导丝器两端的进电块得到电压和电流的。进电块将丝始终压靠在导丝器上，因此进电块磨出沟槽后要及时调整位置，否则将使加工精度大大降低。

2.3. 磁粉制动器的分类

制动器是具有使运动部件减速、停止或保持停止状态功能的装备，是集工作装置和安全装置于一体，保证机器安全正常工作的重要部件^[21]。一般的离合器和制动器结构差异较大、功能各异，而磁粉离合器和磁粉制动器却具有基本相同的结构和特性，将输出端加以固定就可以完成离合器和制动器的相互转化。

按励磁线圈的供电方式不同，磁粉制动器和离合器有两大类产品：线圈旋转式和线圈静止式。线圈旋转式磁粉制动器旋转线圈的供电是经过安装在轴上的滑环进行的，这种结构不适合用于周围有水或有油的工作环境，由于主动部分转动惯量大，起惯性飞轮作用，从动部分转动惯量非常小，快速性能好。它的主动、从动、支撑三部分同轴套装，所以结构紧凑。磁路部分因为没有工作间隙，所以体积小，重量轻，用料省，装卸磁粉方便，其工作间隙部分和线圈都接近壳体表面，而壳体一直旋转，所以对散热有利，这类磁粉制动器一般应用于航空工业中。线圈静止型产品又有外壳静止和外壳旋转二种类型。对于外壳静止的产品，静止线圈位于转子的外部，对于外壳旋转的产品，静止线圈位于转子的内部。根据输出转子工作面的形状不同，常用的产品有圆柱形转子、杯形转子和盘形转子之分。圆柱形转子一般用于大中型产品，结构比较简单；杯形转子一般用于外壳旋转型产品，散热好，滑差功率较大；而盘形转子一般用于微型产品，适用于精密控制场合。

按粉末气隙形式分，分为单隙式和复隙式两种，单隙式结构简单，目前的产品几乎全部都是这一种，这种方式也有线圈回转型和线圈静止型两种，复隙式离合器是有双层粉末气隙的结构，相当于多片型摩擦离合器，复隙式的特点就是能以较小的外形尺寸获得较大的传递力矩，并且可以使输出轴的惯性力矩设计得小一些，提高制动器的反映快速性。按规格可分为大型(1000Nm以上)、中小型(6-800Nm)和微型(4Nm以下)，按其冷却方式可分为自然冷却式、强迫风冷却式和

水冷却式，按连接型式还可分为伸出轴型和空心轴型，按安装形式还有卧式和立式等等。各种形式可以根据使用的需要进行组合设计，完成相应的功能，但立式和卧式安装的形式不可以交替使用^[21]。

2.4. 磁粉制动器的结构及其工作原理：

磁粉离合器和制动器有主动单元（输入轴）和从动单元（输出轴），在两单

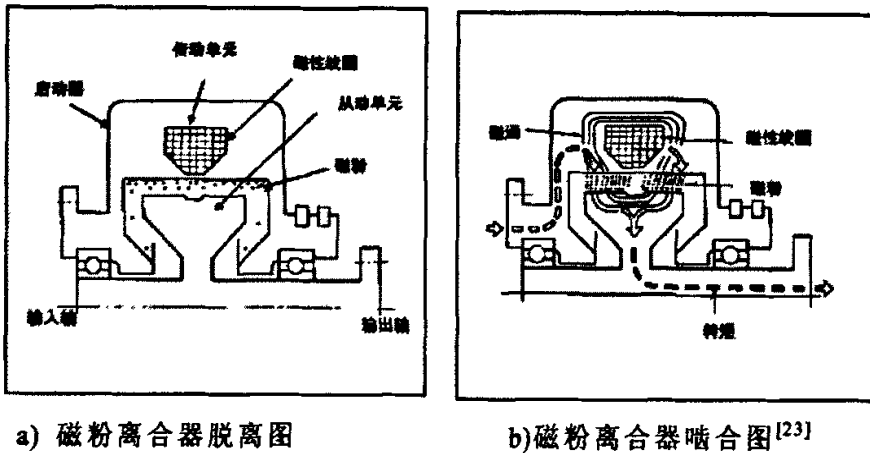


图2.2 磁粉离合器原理图

Fig .2.2 Schematic diagram of magnetic powder clutch

元之间，填充有导磁率高、耐热性好的微粒状的磁粉（体积大约40微米）。嵌装着线圈的部分为磁扼，当主动单元回转而线圈不通电励磁时，工作间隙中的磁粉由于离心力作用被压附在主动单元的内壁上，主、从动单元之间没有力的相互作用，也就没有转矩的传递，从动单元与主动构件处于完全脱离状态，即“离”如图2.2a)。当励磁线圈通电时，沿着磁扼—主动转子—磁粉—从动转子—磁粉—主动转子—磁扼产生工作磁通，在磁通的作用下，磁粉沿磁通方向呈链状连接起来，称磁粉链，而且由于磁力作用而吸引磁粉产生硬化现象。此时，磁粉与磁粉之间产生由磁拉力和机械力联合作用的抗剪力，磁粉链与工作面之间产生摩擦力，磁粉链把两个回转头连接在一起传递转矩，即“合”如图2.2b)。磁粉链的接合力的大小由磁扼励磁后的磁场强度所决定。激励电流越大，则工作间隙中的磁感应强度增大，电磁吸力加大，传递的转矩变大；反之，激励电流减小，则传递的转矩变

小。因此，磁粉离合器具有三种工作状态：

(1) 当磁粉制动器励磁电流小于某一数值时，磁粉硬化程度较弱，磁粉制动器所能传递的力矩小于负载力矩，从动单元转速为零；

(2) 当磁粉制动器励磁电流逐渐增大到某一特定值时，磁粉硬化达到一定程度，磁粉制动器虽然仍然能传递力矩，但是从动单元的转速低于主动单元的速度，磁粉制动器处于“滑差”工作状态；

(3) 当磁粉制动器的励磁电流加到足够大时，磁粉硬化程度很强，从动单元与主动单元之间的摩擦力很大，使两单元转速相同，处于“同步”工作状态；

无论是在同步工作状态或滑差工作状态，由于磁粉链的接合是非刚性连接，当负载的扭矩超过磁粉离合器的传递力矩时，磁粉链的抗剪力不足以抵抗外力的作用^[24]，主从动单元之间出现打滑或处于滑转工作状态，张力控制，限载启动，过载保护，负载控制等都是这一性能的运用。对于磁粉制动器来说，制动转子固定，制动转矩全部转化为负载转矩，即制动器始终在滑差状态下工作。处于滑转状态的磁粉制动器会将由滑差转矩与转速所消耗的功率全部转化为热量，使工作器件的温度升高，因而磁粉离合器、制动器必须在允许温升的条件下工作。

磁粉制动器中，决定其特性好坏的一个很关键的要素就是磁粉性能的好坏。磁粉的导磁率越高且剩磁越少，磁粉制动器的控制特性越好。磁粉导磁率越高，则通电时磁通建立的越迅速，主动件和从动件之间的力矩传递也更加完全，剩磁越少，则相应的断电瞬时力矩释放越快，更能实现快速的控制效果。同时，由于磁粉离合器的主动部分是做高速运转的，必将产生很大的热量，因而要求磁粉要有较好的耐热性和耐磨性能。

2.5. 磁粉制动器的电气工作特性：

2.5.1. 激励电流和转矩的关系：

磁粉制动器传递的转矩和激励电流的关系又叫磁粉制动器的静特性。它是指磁粉制动器主动端转速恒定，从动端制动时，磁粉制动器的激流电流和输出转矩之间的关系。当磁粉制动器激励线圈没有通电流的时候，由于主动旋转部件和静

止部件之间不存在磁的耦合，因此只有一个初始的空载转矩 T_0 。当磁粉线圈通以激励电流，这就在主动部件和静止部件之间很快的形成一种磁的耦合，因而产生转矩。从图2.3可以看出，磁粉制动器的转矩特性曲线可以分为三部分：非线性

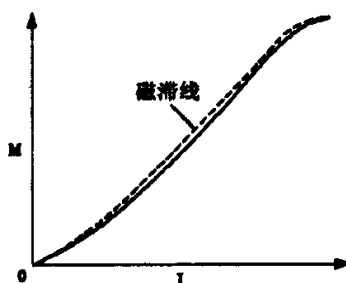


图2.3 磁粉制动器电流转矩曲线

Fig 2.3 Electrical--torque curve of magnetic powder brake

性区；线性区；和饱和区。非线性区就是因为磁粉制动器线圈没有通电时，存在一个初始的空载转矩 T_0 ，这是由于轴承、密封摩擦、剩磁等综合作用的结果。在线性区，传达的转矩大致上跟随激励电流的大小成线性变化，且磁滞较小，即：

$$M = K_L \times K_C \times I \quad (2-1)$$

式中， M ：制动力矩；

K_L ：磁粉制动器的结构参数；

K_C ：磁粉的性能参数；

I ：激磁电流。

因此磁粉制动器转矩控制的范围广，控制的精度高，能用简单方法来实现转矩的大范围调整和精密微调，只要变更激励电流，便会在较大的范围内可容易控制转矩大小。控制功率小(约为输出功率的1%左右)，输出转矩大(可达数万N.m)，为简化控制方式提供了方便。所以，同样的使用功能下，具有较简单的结构和较低的成本。饱和区是施加激励电流过大时，即 $I > I_m$ ，这时磁粉制动器的输出转矩不再随着激励电流的增大而线性增大，这是因为激励电流饱和而形成饱和区，当激励电流下降时，转矩不是沿着原始曲线下降，而是沿着另一条略高于原始曲线的

曲线下降，这是因为导磁材料有剩磁和磁滞特性。

2.5.2. 滑差工作特性

当激励电流保持不变时，转矩将会稳定的传达（如图2.4）。不会受滑差速度（主动组件与从动组件之间的差速）所影响。这就是磁粉制动器的恒转矩特性。磁粉制动器在滑差工作时，扭矩的传递主要是靠磁粉之间的摩擦力转化的剪切力。也就是说，磁粉制动器的静摩擦转矩与动摩擦转矩无分别，因此可稳定地传达恒定的转矩。此特性用在张力控制上，用户只需调整激励电流便能准确地控制传达的转矩，从而有效地控制卷料的张力。

滑差工作状态是磁粉制动器应用得最多的工作状态，此外，磁粉制动器还有两种工作状态，即“同步”工作状态和“全滑差”工作状态。

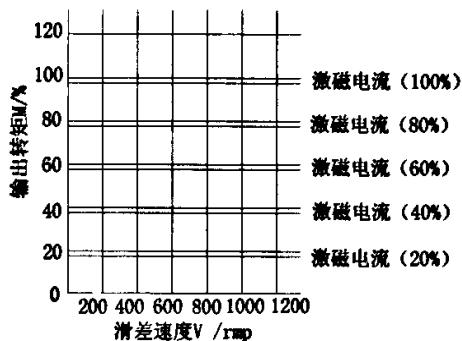


图2.4 力矩——滑差速度曲线

Fig 2.4 The curve of torque—slip speed

2.5.3. 动作特性

磁粉制动器的动作特性主要是指励磁线圈加阶跃电压之后的激励电流以及转矩等的过渡过程。图2.5是磁粉制动器的动作特性图。磁粉制动器的激励电流的过渡过程是由于激磁回路中存在着线圈电阻，电源的内阻以及线圈本身的电感量。当磁粉线圈加一阶跃的电压之后，由于本身电感的存在，激励电流不可能一下子发生突变，所以有一个逐渐增大的过程。电流增大越快，制动器的快速性就

越好。激励电流根据由激励线圈电感量 L 和电阻 R 共同决定时间 T ($T=L/R$)，按指数函数上升，与滑差转速无关。转矩的过渡过程虽然在电流建立初始阶段，由于漏磁以及静特性的非灵敏区的影响，有一小段时间基本不动作，但是其后就随着电流、磁通的增长也近似按指数规律增长。

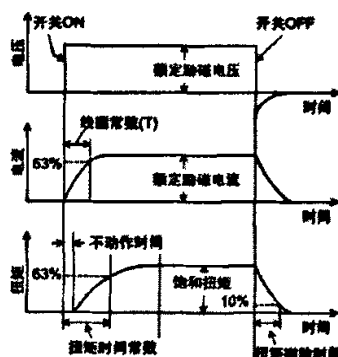


图2.5 磁粉制动器的动作特性曲线

Fig 2.5 Performance characteristic curve

此特性配合制动器热容量大的特点，对缓冲停止、高速停止具有较为理想的特性，特别是要求快速制动时，可通过在激励线圈上串联电阻，以减少时间常数，或者只在转矩时间常数的时间内施加额定电压的2~3倍电压进行过激励，可加速转矩的启动。

2.6. 磁粉离合器和制动器的选用

选定磁粉离合器·制动器时，需计算所使用的扭矩、转速和滑差功率(发热量)，并确认所有指标都在允许值范围内。

(1) 扭矩

需计算使用扭矩的最大值、最小值，并确认计算值是否在可控制的范围内。磁粉离合器·制动器的扭矩可控制范围在额定扭矩到产品空转扭矩的范围之间(额定扭矩的10%~100%)。

(2) 转速

最高转速无论是磁粉离合器还是制动器都需要控制在允许转速以下。此外，

磁粉制动器的最低转速一般要控制在15r/min以上，磁粉离合器其输入和输出转速之差也需要设置在15r/min以上（即无论磁粉离合器还是磁粉制动器滑差转速都需要在15r/min以上）。滑差转速较低，会使内部磁粉分布恶化，导致无法得到稳定的扭矩性能，或者会延长启动后达到规定扭矩所需的时间。

（3）滑差功率（发热量）

由于磁粉离合器·制动器通常是在连续滑差状态下使用，受滑差热影响，磁粉离合器·制动器的温度会上升。温度上升值受使用零部件耐热温度的限制，因此一般厂家都根据不同机型规定了允许连续滑差功率（发热量的允许值）。即，在该允许值范围内运行时，可以在长时间稳定的状态下使用磁粉离合器·制动器。相反，超过该允许连续滑差功率使用，会导致磁粉离合器·制动器损坏。

滑差功率（发热量） $P(W)$ 计算公式：

$$P = \frac{2\pi}{60} T \cdot N_r \quad (W) \quad (2-2)$$

式中， T ：扭矩（N·m）；

N_r ：磁粉离合器·制动器的滑差转速（r/min）。

当用于间歇工作状态下，且每次动作的滑差功率为已知时，可按下式换算成平均滑差功率来选择：

$$P \geq \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2}{T}} \quad (2-3)$$

式中 P ：磁粉制动器额定功率

P_1 ： t_1 时间内的滑差功率， W ；

P_2 ： t_2 时间内的滑差功率， W ；

T ： 动作周期。

2.7. 本章小结

本章详细阐述了电火花线切割加工的基本原理和特点以及张力执行元件磁粉制动器的结构原理和特性，在此基础上，详细分析了电火花加工工艺及其影响加工工艺的因素和磁粉制动器的选用方法。

第三章 装置的方案设计

走丝系统是低速走丝电火花线切割机床的重要组成部分，加工时，走丝系统即要保证电极丝运行过程中不发生振动和断丝，还要保证穿丝快捷，满足高效生产的要求。

3.1 走丝系统总体结构

低速走丝电火花线切割加工机床走丝系统的要求主要有：

1 走丝系统工作稳定。需要从走丝机构的设计、张力的精确控制等方面尽量避免电极丝运动中的不稳定现象。

2 张力控制精确。张力的精确控制包括两个方面：一个是张力大小的精确控制；一个是张力分布的均匀性。一般要求电极丝的张力应该控制在2-20N，张力太大容易断丝，太小影响加工精度。

3 走丝机构的高可靠性。可靠性主要是针对走丝机构各部件的使用寿命而言，低速走丝电火花线切割加工走丝机构各部件无论尺寸精度还是装配精度都有很高的要求，因此对工作环境、操作过程以及维护都有许多严格的要求，否则会减少走丝系统的使用寿命，或降低走丝系统工作的可靠性。

4 穿丝方便可靠。要求走丝系统结构简单，维护方便，穿丝方便。

总的来讲，走丝系统应使电极丝在加工区能精确定位，能保证恒定张力，能恒速运行，能够自动穿丝。

装置控制系统主要对电极丝运行速度和张力的稳定性进行控制。在低速走丝线切割时，电极丝的走丝速度直接影响着加工工件的形状和精度。丝速较慢，丝用量减少，成本降低，但容易断丝，切割速度下降，工件直线度差；丝速较快，丝的使用量增加，成本增加。速度轮电机决定了电极丝运行速度的稳定性，因此需要对速度轮电机进行恒速控制；在加工过程中，电极丝受到放电作用力、电磁力、静电引力以及摩擦力等的影响，张力会有波动，影响加工精度，因此需要对电极丝进行恒张力控制。

在结合实际情况的基础上，通过对低速走丝电火花线切割加工特点的分析，设计并制作了一套走丝系统，如图3.1所示：

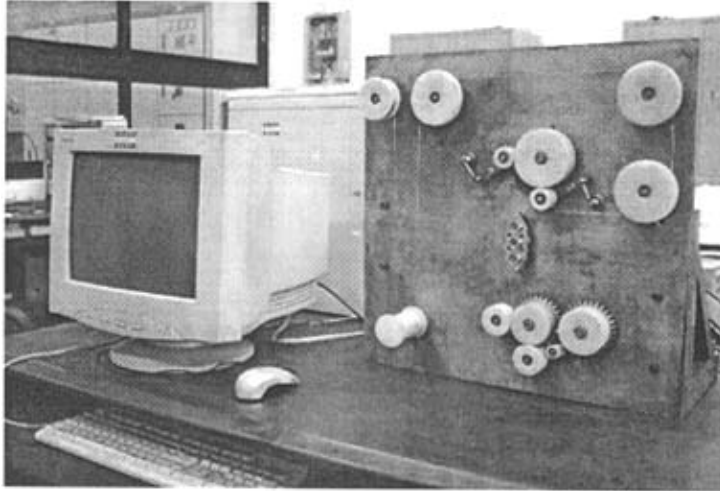


图3.1. 装置总体图

Fig 3.1 The diagram of wire-feeding system

该装备主要分为机械本体和电气两大部分，机械本体部分主要有：放丝机构，张力轮机构、导丝部分、收丝轮机构以及一些辅助装置部分；电气部分包括核心控制系统、恒张力走丝控制电路等，如图3.2所示：

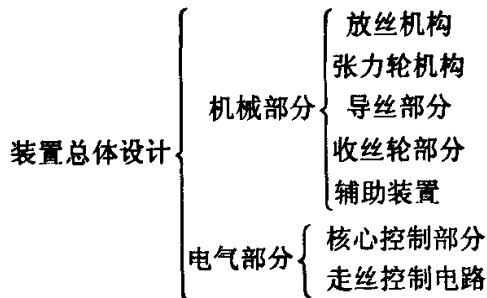


图 3.2 装置各部分组成

Fig 3.2 Components of setup

走丝系统的工作过程：电极丝从储丝筒被抽出，经导向轮部分牵入张力轮机构，形成张力，再经由上下导丝嘴，最后的废丝经收丝轮拉出到废丝处理机构。

3.2 低速走丝线切割机床张力装置及种类

低速走丝线切割加工中，走丝系统的控制方法可分为直接张力控制和间接张力控制，前者是用张力传感器等张力元件直接测出丝的张力，并作为张力反馈元件，构成闭环控制，后者是用间接的方式测出张力，通过对张力模型进行静态和动态的分析，找出张力变化的因素，然后通过对这些因素进行控制，间接实现系统的恒张力控制。

低速走丝线切割机床的电极丝张紧加载常见有以下几种^[25]：

(1) 磁粉制动器加载式

当电极丝由硬特性的系统拖动匀速走丝时，一个磁粉制动器在后面加载，将电极丝绷紧，达到要求的张力^[26]。激磁电流和传递转矩基本成线性关系，通过改变激磁电流的大小可以任意调节和控制转矩的大小。磁粉制动器具有响应速度快、价格相对便宜、结构简单、无冲击、无振动、无噪音、无污染、控制简单等优点（如图3.3）。

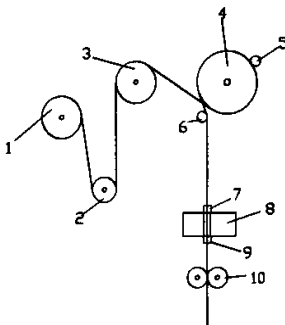


图3.3 磁粉制动器加载式简图

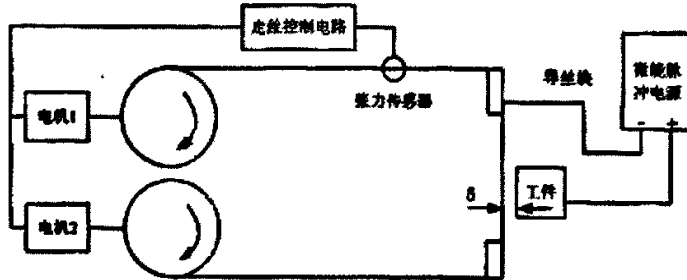
Fig 3.3 Diagram of magnetic particle detent load manner

图中：1. 丝筒 2、3、导丝轮 4.张力轮 5. 磁粉制动器 6. 张力检测轮 7. 上导丝嘴 8. 加工件 9. 下导丝嘴 10. 拉丝轮

(2) 双机转速差加载式。

图3.4为双电机转速差式恒张力走丝系统原理示意图。采用两个调速电机，分别联接在放丝轮和拉丝轮上，利用两个电机微弱的速度差来形成张力，放丝电机速度较慢，即每转少放出电极丝的长度等于该张力下相当于张力轮周长的电极

丝的伸长量。这个速度差与电极丝的材质、直径和电极丝要求的张力有关，所以在走丝过程中加了一个张力传感器，当加工过程中出现张力跳动时，安装在走丝



3.4 双机转速差式恒张力走丝系统原理图

Fig 3.4 Schematic diagram of double motors rotational speed difference type constant tension winding system

机构中的张力传感器就会检测出来，把信号传给走丝控制电路，由走丝控制电路来控制电机1和电机2的转速，从而控制电极丝的移动速度和张力大小，实现电极丝的恒张力控制。

(3) 电机加载式

永磁式直流电机是一种能够长期处于启动（堵转）状态下工作得控制电极，是由伺服电动机和驱动电动机结合起来而成的特殊电机。其工作原理和直流电机相同。利用力矩电机具有能长期工作在堵转状态的性能，可由堵转力矩提供卷绕材料张力，通过控制堵转力矩大小来控制张力。在结构上，直流力矩电机为了能在相同的体积和电枢电压下产生较大的力矩和较低的转速，一般都做成扁平形。定子是由软磁性材料做成的带槽的圆环，槽中镶入永久磁钢作为主磁场源。转子铁心由导磁冲片叠压而成，槽中防治电枢绕组，槽楔由铜板做成，两端伸出槽外，一段用于电枢绕组接线，另一端兼作换向片，电刷装在电刷架上。

与其他张力执行元件相比，直流力矩电机的主要特点是：

- ① 反应速度快，直流力矩电动机的机电时间常数小，约十几毫秒至几十毫秒；
- ② 能在堵转和低速下运行，堵转情况下能产生足够大的转矩而不损伤；
- ③ 机械特性和调节特性的线性度好；
- ④ 可以不经减速机构直接驱动负载，从而避免了传动误差，提高可传动

精度。

低速走丝电火花线切割在加工是以半柔性的极细金属丝作为工具电极，并通过电极与工件之间的脉冲放电作用来进行加工的，电极丝在加工区受放电力、电磁力等作用，会沿加工进给的反方向弯曲并产生一定的绕度，如图3.5所示，如电极丝张力不恒定，则加工过程中绕度值是变化的，且绕度值的变化将随张力的减小而增大。这种丝的弯曲偏移随着走丝时张力的变化而飘动，造成加工尺寸误差和切割表面凹凸不平。同时由于机床制造和安装精度等问题，也会使得电极丝运行时张力不均匀，产生振动。研究表明，电极丝的张力对工件的质量和切割速度影响很大，在其它条件不变的情况下，张力越大，加工表面质量就越好。分析其原因，一方面是增大电极丝的张力可减小动态电极丝的绕度值。另一方面，增大张力可提高电极丝的固有频率，避开走丝系统其它部件的振动频率，防止共振，减少电极丝横向和纵向振幅。

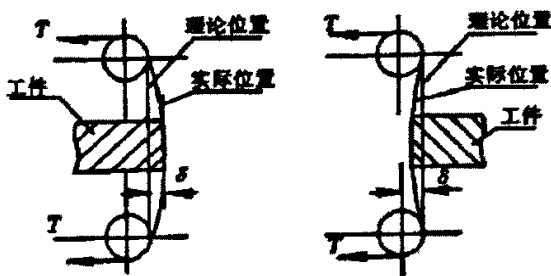


图3.5 电极丝的实际位置

Fig 3.5 The real position of wire

因此，走丝控制系统要求在运动中能有效控制电极丝的张力，保持张力始终恒定，本装备张力控制采用响应速度快、价格便宜、结构简单、无冲击、无振动、无噪音、无污染、控制简单磁粉制动器加载式。

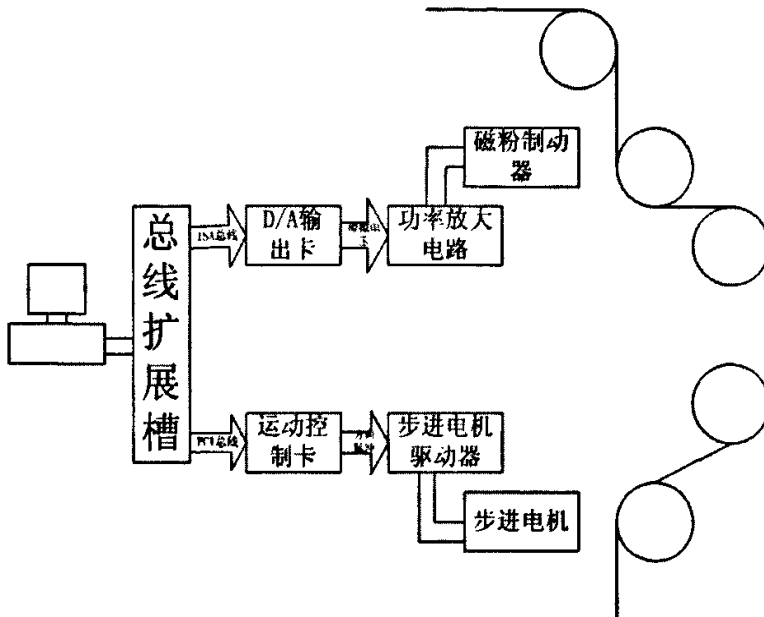
3.3 控制系统方案

低速走丝线切割机床因为精密加工的要求，要求走丝控制系统应具备精度高、反应灵敏等特点。本装备速度控制方案是步进电机作为走丝电机，开环控制的方式；恒张力控制采用磁粉制动器加载式。控制系统的整体方框图如图3.6示。本装备控制系统以计算机为主控单元；运动控制卡DMC1000控制步进电机驱动器输出脉冲，从而控制步进电机的运动；D/A转换器输出模拟电压信号控制磁粉制动器的驱动电路电压的变化，实现恒张力的控制；采用VB6.0作为软件的开发

工具，开发配合加工的控制软件。

由图可以本控制系统的主要组成部分有：

- (1) PC机；
- (2) 运动控制卡
- (3) 步进电机及其驱动器
- (4) D/A输出卡
- (5) 磁粉制动器



3.6控制系统结构框图

Fig 3.6 The Frame of Control System

磁粉制动器的结构、原理以及它的特性在第二章已做介绍，下面对控制系统的其它主要组成部分作一个简单的介绍，并说明其主要的选择原则

3.3.1 控制系统主控单元的选择

控制系统的性能如何、是否实用、能否有扩展的可能，很大程度取决于主要控制单元的选择，所以选择适当的控制单元是开发控制系统的第一步。可以作为控制单元的主要有单片机、DSP、和工控机，这几种方式各有优缺点^[27]。

单片机较易实现数字控制，成本低、尺寸小，结构易布置。但开发周期相对较长，且对于一些比较复杂的控制，计算量往往很大，直接影响控制精度，一般用于下位机和小型控制；同时单片机易受外界的干扰，以及强电、磁场、电脉冲工作环境的影响。

DSP是一种独特的微处理器，它适合用于数字信号的处理，强调运算处理的实时性，具有精确、可靠性好、体积小、功耗低等优点。但其硬件研发成本高、开发周期长、延续性差、对用户软硬件能力要求高等缺点。基于PC机构建的控制平台恰恰能满足这一要求，其强大的数值运算于实时处理能力，为走丝控制系统性能的提高提供了可靠的保障，使用PC机的控制平台主要优点是^[27]：

1⁰ 友好界面，PC平台控制系统受到机器操作员的普遍欢迎。与单片机和PLC方案的界面相比，PC机（显示器、键盘、鼠标、通讯端口、硬盘、软驱等）具有无可比拟的输入输出能力。

2⁰ 功能强大，由于PC机的强大功能控制卡的先进技术，基于PC机的运动控制系统能够实现单片机系统和PLC系统所无法应付的无数高级功能。

3⁰ 开发便利，用户可使用VB、VC、C++Builder等高级编程语言，快速开发人机界面、调用成熟可靠的运动函数，在几天或几周时间内完成强大控制软件的开发。修改和添加功能十分便利，而且开发好的软件极易移植到类似的机器中。

4⁰ 成本优势，由于PC机成本持续下跌且一般控制卡具有很高的性价比，使得由此构成的基于PC机和控制卡的控制系统在大多数运动控制场合中具有良好的综合成本优势。当然，PC机平台在体积、抗环境干扰地稳定性上，相对单片机和DSP平台有一定的劣势。但是就研究阶段作为控制器实验平台而言，是很好的选择。

3.3.2 运动控制卡

运动控制卡是一种安装在PC机中专门用于电机控制的板卡，它与PC机构成主从式控制结构：PC机负责人机界面的管理和其它管理工作（如键盘和鼠标的输入、图形显示、网络通讯等）；而控制卡负责运动控制方面的所有细节（如升降速处理、脉冲输出、直线圆弧插补等）。控制卡原理结构见图3.7。

本控制系统运动控制卡采用深圳雷赛DMC1000型运动控制卡，走丝系统所

有的运动控制，都是以该卡作为基础进行开发的。该卡直接连接到计算机的PCI总线上，通过配套的68针电缆线和接线板连接到电机驱动器，能同时控制1—4轴运动，输出脉冲范围为1~400KPPS，能实现圆弧和直线插补，可编程中断源，多轴

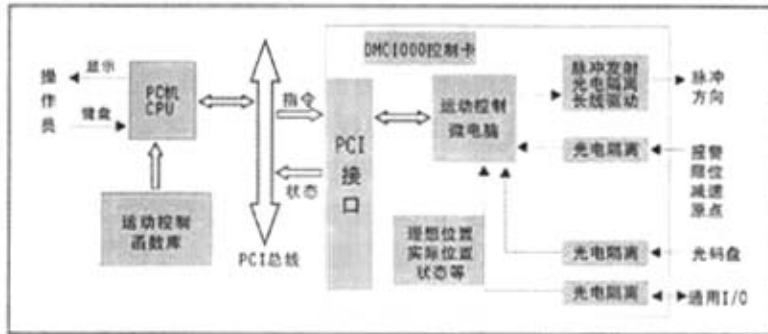


图3.7 运动控制卡结构原理图

Fig3.7 Schematic diagram of kinetic control apparatus

同时起停，运动中可实时变速，高集成、高可靠性等优点，能够满足本装备的运动控制要求。该卡的驱动程序中配有函数库模块，在VB编程中，只要添加该模块，即可在其内部函数库中调用函数，在相关的函数中输入参数，如驱动轴号、起动速度、加速时间、驱动速度、加速模式（梯形加速或S形加速）、运动模式等，即可实现各轴不同运动控制。

3.3.3 步进电机及其驱动器

步进电机是将电脉冲信号转变为角位移或线位移的是一种控制用的特种电机，它的旋转是以固定的角度（称为“步距角”）一步一步运行的，其特点是只有周期性的误差而没有积累误差，所以广泛应用于各种开环控制。其运行由步进电机驱动器驱动，驱动器把控制系统发出的脉冲信号转化为步进电机的角位移，控制系统每发出一个脉冲信号，通过驱动器就能够使步进电机旋转一个步距角，因而可以通过控制脉冲信号的个数来控制角位移量，从而达到准确定位的目的；同时还可以通过控制脉冲频率来控制电机转动的速度和加速度，达到调速的目的。因而在非超载的情况下，电机的转速、停止的位置只取决于脉冲信号的频率和脉

冲数，而不受负载变化的影响，即给电机加一个脉冲信号，电机则转过一个步距角。使用、控制步进电机必须由环形脉冲，功率放大等组成的控制系统，其方框图如图3.8所示^{[29]~[30]}；

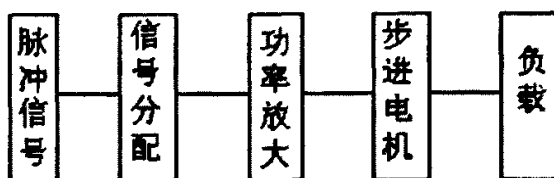


图3.8 步进电机控制方框图

Fig3.8 The frame of controlling step motor

与伺服电机相比，步进电机的控制精度较低，在高速驱动时力矩下降，起点点速度过高时容易丢步，在本演示装备中，起动、驱动速度低，所需力矩也不大，所以步进电机所具有的缺点不突出，且其价格便宜。

本装备选用的是日本东方 UPK596-NA 型步进电机，它的保持转矩是 2.1N.M，驱动器为 UDK-5114N，它具有半步细分功能，最少输出步距是 0.36 度。

3.3.4 D/A 模块

D/A转换器就是将离散的数字编码信号转化为连续的模拟信号的装置。目前常见的D/A模块中，有权电阻网络D/A、倒梯形电阻网络D/A、权电流型D/A、权电容网络D/A转换器以及开关树型D/A等几种类型^[31]。此外，在D/A模块数字量的输入方式上，又有并行输入和串行输入两种。本装备选用的D/A输出卡是北京双诺测控技术有限公司生产基于ISA总线的AC1343 D/A输出卡。AC1343是8路8位数模转换板，具有多功能的特点。AC1343还特别设计了上电输出清零的功能，防止PC机上电过程中D/A输出电压过高而引起的用户设备的损坏。

它的主要性能特点是：输出 DB25 芯(孔)插座；每路输出可分别选择输出为：0-5V、-5V—+5V、0-10V，同时上电清零；电压输出精度 1%；输出分辨率 8 位，误差 $\pm 1\text{LSB}(\text{FSR})$ ；电压输出负载电流 $< 5\text{mA}/\text{通道}$ ；电压输出建立时间 $< 50\mu\text{s}$ ；输出最大电容负为 100PF；工作温度为 0—70℃。因此这种卡完全能

满足我们的设计要求。

3.4 走丝系统的数学模型

低速走丝线切割走丝控制系统要求对电极丝的速度和张力进行有效的控制。在走丝系统中，拉丝轮电动机以恒定速度运转，它的速度决定了电极丝的运行速度，因此对拉丝轮电动机的控制是恒速度控制。电极丝的张力控制是通过张力轮磁粉制动器的控制实现的。

如图3.9所示，电极丝运转时，由于电极丝和导轮之间有摩擦力，设A、B、C、D、E、F点的摩擦力分别为 f_1 、 f_2 、 f_3 、 f_4 、 f_5 、 f_6 ，则AB段电极丝的张力应为 f_1 ，BC段为 f_1+f_2 ，CD段 $f_1+f_2+f_3$ ，DE段为 $f_1+f_2+f_3+f_4$ ，EF段 $f_1+f_2+f_3+f_4+f_5$ ，GF段为 $f_1+f_2+f_3+f_4+f_5+f_6$ ，即电极丝进入张力轮的时，有基本张力 T_0 ，该基本张力等于各段电极丝和导轮摩擦力之和。

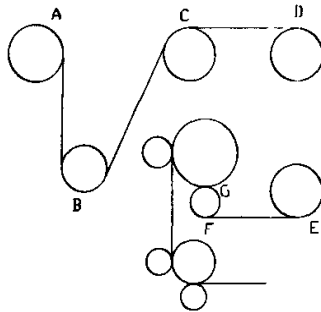


图 3.9 走丝系统示意图

Fig 3.9 The diagrammatic sketch of wire-feeding system

再取张力轮为研究对象，对其进行受力分析，如图3.10所示，电极丝以线速度 V 在拉力 T 的作用下和张力轮同步运动。张力轮在拉力 T 的作用下形成力矩 $M_{拉}$ ，其方向与张力轮的转动方向相同。设张力轮的半径为 R ，则 $M_{拉}=T \cdot R$ 。为了保证电极丝有一定的张力，需在张力轮上施加一个反向制动力矩 $M(t)$ 。在运转过程中，张力轮的支承摩擦力以及其它阻力等都会形成阻止张力轮转动的阻力矩 M_0 ，其方

向与张力轮转动方向相反^[32]。

因此，张力轮的动态力矩平衡方程为：

$$M(t) + J\dot{\omega}(t) + M_0 + T_0(t)R - TR = 0 \quad (3-1)$$

式中 T ： 电极丝张力值 (N)

R ： 张力轮半径 (m)

$M(t)$ ： 磁粉制动器产生的阻力矩 (N.m)

$\omega(t)$ ： 张力轮旋转角速度 (rad/s)

J ： 张力轮的转动惯量 ($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)

M_0 ： 阻力矩 (N.m)

$T_0(t)$ ： 前端阻力 (N)

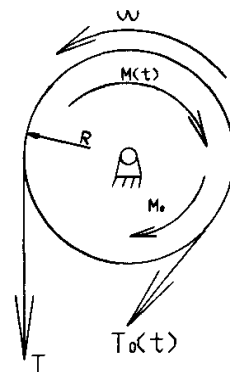


图 3.10 张力轮受力图

Fig 3.10 the force diagram

由式 (3-1) 可以看出，张力轮角速度的变化率以及前端阻力是时间的函数，所以系统是一个复杂的时变系统。运用经典控制理论的分析方法，对力矩平衡方程进行合理的简化。简化的基本原则：

(1) 阻力矩影响较小，可忽略不计

(2) 前端阻力变化较小，可以认为固定不变。

经简化，式 (3-1) 可变形为：

$$T = \frac{M(t) - T_0 R - J\dot{\omega}(t)}{R} \quad (3-2)$$

由此可见，磁粉制动器的制动力矩和张力轮角速度的变化是影响电极丝张力的主要因素。又由于低速走丝线切割加工时，电极丝匀速运动，张力轮匀速转动，因而调节磁粉制动器的制动力矩 $M(t)$ 的大小，就能得到不同的电极丝张力。磁粉制动器的制动力矩和磁粉制动的控制电流成线性关系，因而，电极丝张力的控制转化为控制磁粉制动器的驱动电流。

3.5 张力控制系统的传递函数^[33]

根据前面第三章的分析，我们知道磁粉制动器是一个比较大的感性负载，磁通的增长速度取决于磁粉自身的电感量，是一个惯性的环节。另外，磁通建立后，

磁粉由离散状态到形成横过间隙的磁粉链时有延时过程,而且系统从控制信号的输出到磁粉制动器产生制动力矩,期间也存在着一个时间的滞后环节,根据相关的文献,我们知道磁粉制动器的典型传递函数是:

$$G_1(s) = \frac{k_0}{TS+1} e^{-\tau s} \quad (3-3)$$

而功率放大器可以看作一个比例环节,因而其传递函数:

$$G_2(s) = k_p \quad (3-4)$$

式中, k_p : 功率增益

因此整个张力控制系统的开环传递函数:

$$G(s) = G_1(s) * G_2(s) = \frac{k_p k_0}{TS+1} e^{-\tau s} \quad (3-5)$$

式中, K_0 : 磁粉制动器的制动增益;

τ : 磁粉制动器滞后时间

T : 时间常数。

如图3.11所示:

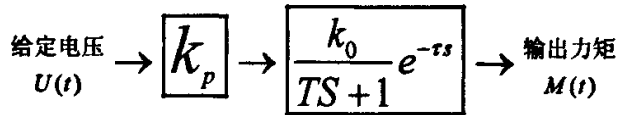


图3.11 张力控制系统传递函数方框图

Fig 3.11 The frame of transfer function of tension control system

由此可以得出:

$$M(t) = \frac{k_p k_0}{TS+1} e^{-\tau t} U(t) \quad (3-6)$$

用阶跃响应曲线法可以求出传递函数G(S)中的未知参数T、 τ ,在实验时,在磁粉离合器的输入端加上一个阶跃信号(激磁电压),然后用光线记录示波器可以记录到电极丝张力的响应曲线。

因为装置中采用了磁粉制动器做执行元件,所以必须解决其滞后问题,提高其响应速度,否则将影响整个控制系统的稳定性和精度。我们可以采用过激控制的方法,即在磁粉离合器启动和停止瞬间,使电压上升到给定张力的最大电压,然后再降到给定电压,从而使力矩曲线的上升沿变得很陡,减少了系统

的滞后时间。

3.6 本章小结

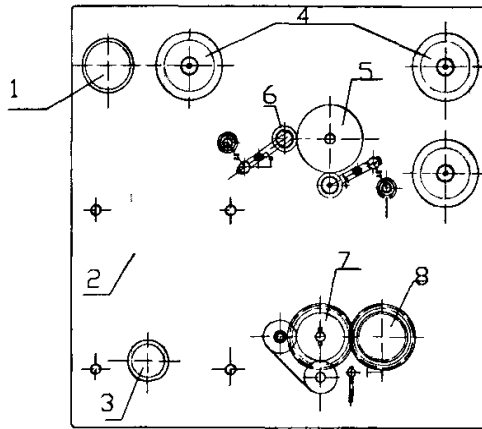
本章通过分析走丝系统，提出了装备的整体结构方案。同时还通过对张力控制种类和构成的分析，提出了张力控制的方案。选用 PC 机为控制系统的主控元件，运动控制卡和 D/A 输出卡为控制系统的转换输入输出模块，以磁粉制动器为张力执行元件，丝速控制采用步进电机，对系统进行开环控制。本章还介绍了控制系统的主要组成部分，分析了它们的功能及在控制系统中的作用。分析了走丝系统工作时，张力轮的动态平衡方程，并对其进行了合理的简化。在此基础上建立了张力控制系统的传递函数。

第四章 装备软硬件设计

本章主要包括走丝系统机械部分和电气部分硬件的设计以及控制系统软件的设计。

4.1 装备的机械结构

如图 4.1 所示，所设计的走丝系统的机械部分主要部分有：储丝筒部分、导轮部分、张力轮部分以及收丝轮部分^{[34]~[35]}。



4.1走丝系统结构简图

Fig 4.1 the structure diagram of wire-feeding system

1储丝筒 2电极丝 3光筒 4导轮 5张力轮 6压力轮 7收丝轮 8收丝用储丝筒

4.1.1 张力轮机构及其电极丝的夹持

电极丝夹持的难点是电极丝如何保证在张力轮上可靠的夹持,并要将光滑而且细的电极丝夹牢又不压扁和拉毛。常见的张力轮结构有带式 and 轮式两种,如图

4.2 所示, 张力轮的受力和带传动相似, 电极丝被紧压在张力轮上, 因此, 电极丝和张力轮的接触面产生了正压力 F_0 。当收丝电机拖动电极丝匀速运动时, 电极丝和张力轮之间便产生了摩擦力 F_f , 张力轮作用在电极丝上的摩擦力和电极丝的运动方向相反, 根据作用力和反作用力, 电极丝作用在张力轮上的摩擦力和张力

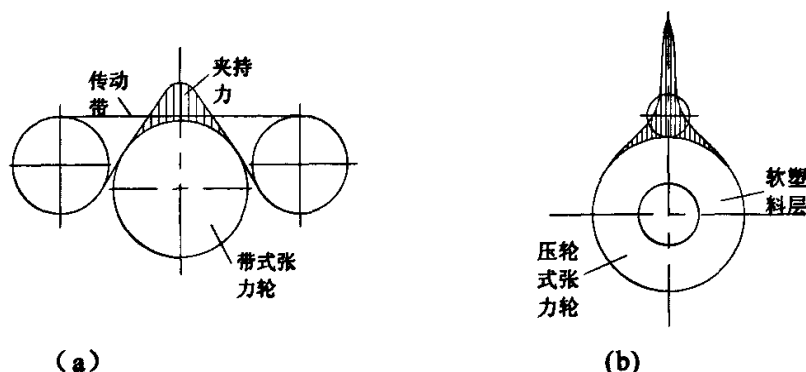


图4.2 张力轮结构种类

Fig 4.2 The tension pulley structure type of wire-feeding system

轮的转动方向相同, 电极丝靠摩擦力来驱动张力轮转动, 根据著名的柔韧体摩擦欧拉公式以及带传动的相关理论, 我们可以知道电极丝和张力轮之间最大(临界)静摩擦力 F_{ec} 与下列几个因素有关:

(1) 正压力 F_0 最大(临界)静摩擦力 F_{ec} 与正压力成正比。这是因为, 正压力越大, 则电极丝运动时的摩擦力就大, 最大(临界)静摩擦力 F_{ec} 也就越大。但正压力 F_0 过大时, 将会使电极丝被压扁或压毛; 如果 F_0 过小, 则电极丝在运动的过程中会发生打滑(电极丝和张力轮不同步转动)和跳动, 严重影响加工。

(2) 包角 α 最大(临界)静摩擦力 F_{ec} 随包角 α 的增大而增大。这是因为 α 越大, 电极丝和张力轮接触面上所长生的总摩擦力就越大, 最大(临界)静摩擦力 F_{ec} 也就越大。

又因为张力轮过的是新丝, 不能有损伤, 即使无打滑, 电极丝从只有基本张力状态, 通过张力轮后即进入张力状态, 丝的长度也会稍有变长, 在轮缘上肯定有微量规律性的滑移, 从而带来张力轮工作面的磨损。为了减少磨损, 也必须将张紧的路程尽可能延长, 即电极丝在张力轮上的包角 α 尽量增大, 使之更加平缓。

从夹压力分布的均匀性来说, 带式要好一些, 但带的使用寿命偏低; 压力轮式结构则主要利用压力轮把电极丝压靠在张力轮上, 使丝和轮一起转动。

本装置采用压力轮式结构的夹持方式，具体结构如图4.3：

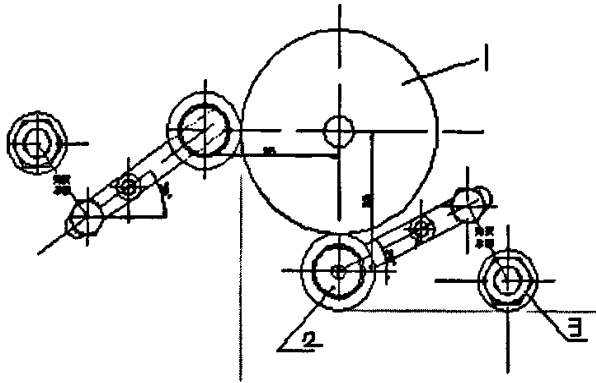


图4.3 装置张力轮结构

Fig4.3 The tension pulley structure of setup

张力轮轴和磁粉制动器轴相连，由计算机通过D/A输出卡控制磁粉制动器的驱动电压来调节磁粉制动器的制动转矩，从而调节张力的大小。粗加工时加工速度较大、大电流或使用细电极丝时，所需张力较小，则要求磁粉制动器的制动力矩较小，驱动电压就小；相反精加工时加工速度较小、电流小或使用较粗的电极丝时，所需张力大，则要求磁粉制动器的制动力矩较大，驱动电压就大。

由图可以看到，压力轮把电极丝紧压在张力轮上，使丝和轮一起转动。将压力轮压靠在张力轮上的力来自弹簧，因此在弹簧的选择上需要注意，需选择弹性系数较大的弹簧，这样才能产生所需要的压力，但弹簧的弹性系数也不能过大，以免把丝压扁。弹簧还起到自动调节两者之间压紧力的作用和吸收振动的作用；为保证压力轮面和张力轮面能更好的贴和，设计时应注意压力轮轴和张力轮轴的平行关系，这样才能保证压力轮和张力轮相互紧靠，形成所需要的压力。

4.1.2 收丝机构

收丝机构的作用是使张力轮与排丝轮之间的电极丝产生恒定的张力和恒定运丝速度，并将用过的电极丝排到废丝箱内。常见低速走丝电火花线切割机床的排丝机构采用压力调整装置通过调整弹簧压力使压力轮和主动排丝轮之间产生压力，两轮夹着电极丝做收丝转动。

本装置由于电极丝并没进行加工，因此电极丝没有发生变化，为不造成电极

丝浪费，收丝机构设计成图4.4的结构。图4.4中，收丝压力轮3、4把丝压靠在收

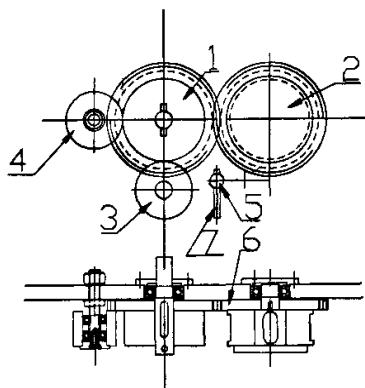


图4.4 装置收丝机构

Fig 4.4 The waste wire recovery mechanism

1 收丝轮 2 收丝用储丝筒 3、4 收丝压力轮 5 重锤 6 齿轮副 7 槽
 丝轮1上实现收丝，收丝轮通过齿轮副和收丝用储丝筒同步转动，收丝用储丝筒直径比收丝轮稍小，以补偿电极丝逐渐被收回的过程中，收丝用储丝筒的直径变大所引起的电极丝在两个轮上的线速度的不同，防止电极丝在收丝的过程中被拉断。收丝用储丝筒和储丝筒结构完全一样，可以完全互换，还为了防止在开始收丝时越收越松，设计了轮5，轮5轴可以在槽7内自由滑动，利用它的重力使丝不会松弛。因此，从整个结构来看，当储丝筒的丝放完之后，我们可以把两个储丝筒位置互换，实现丝的重复利用。同时我们所设计的收丝用压力轮3的轴线可在水平方向移动，轮4的轴线可在垂直方向移动，这样当它们和收丝轮1之间的压力需要调整时，可以调整通过调节压力轮轴来得到所需要的压紧力。

4.2 走丝系统控制电路

走丝控制系统电路设计了控制系统的外围扩展电路，主要是指供电电源电路和磁粉制动器驱动电路等。

本文所采用的磁粉制动器是三菱ZKG-10YN型磁粉制动器，它的主要参数如表1所示：

表1: 磁粉制动器参数

型 号	磁性线圈		额 定 转 矩(N.M)	容 许 的 热 耗 损 功 率 (W)	必 要 的 放 热 面 积 (CM ²)	重 量(Kg)
	电 流 (A)	功 率 (W)				
ZKG-10YN	0.42	10	1	20	350	0.54

磁粉制动的驱动电路有多种, 常见的有PWM功率放大驱动, 恒流源驱动等等。

本文主要设计了两种磁粉制动器的驱动电路, 以期经过比较, 选择一种合适的驱动电路。

4.2.1 供电电源电路

在电路设计和应用中, 电源的稳定性是一个关键的因素, 它直接影响电路的稳定性。良好的电源供电可以提高系统的稳定性的同时, 还能延长系统电子元件的使用寿命, 所以稳压电路是很重要的^[37]。设计的稳压电源电路如图4.5所示, 以集成稳压器LM317为基础设计的稳压电路。LM317是美国国家半导体公司的三端可调稳压器集成电路, 输出电压稳压精度高, 输出纹波小。这种集成稳压器有三个输出端, 即电压输入端V_i, 电压输出端V_o和调节端ADJ。它没有公共接地端, 公共

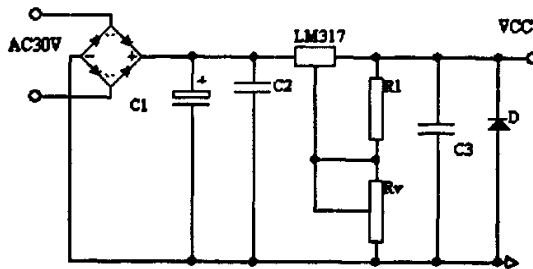


图4.5 电源电路图

Fig 4.5 The circuit of power supply

接地端往往通过串接电阻, 再接到地。LM317输出电压为1.2V~35V, 输出最大电流1.5A, 负载稳定度 5×10^{-3} , 纹波电压 $\leq 5\text{mV}$, 电压稳定度 1×10^{-3} 。因此其输出的电压

精度能满足电路的要求。

设计的稳压电路主要由变压器、整流桥、电容、电阻以及稳压芯片、二极管以及电源指示灯组成。

电源电路的抗干扰问题：

所谓的干扰，就是外界强加在系统有用信号之上的不需要的信号，这些信号会干扰系统的正常稳定工作，在实际的工作环境中，这些干扰总是存在。电路在实验室的调试过程中，由于没有很多的干扰，所以能够比较稳定的工作，但往往有些能够在实验室正常工作的设备在工业应用中由于干扰源的存在而不能正常的工作，因而必须采用有效的方法和措施来应对可能存在的干扰。本电路的抗干扰技术主要是指来源于电源的干扰。

电源的通断，瞬时的短路以及电网窜进来的干扰脉冲造成电路的干扰，一般的工业电网中，都存在生产负荷的变化，由于负荷的变化产生的“尖峰干扰”在电力系统中危害较大。产生：尖峰干扰“的用电设备有：重型交直流电机、可控硅、电焊机、电弧炉等大电流用电设备，这些设备的停止启动往往会造成工业电网很大电压的脉冲冲击，因此抑制来自电网的干扰，如何保证为系统提供一个稳定可靠的电源至关重要，在我们设计的电路中，有一个直流供电电源，目前广泛应用的供电电源主要有两种：串联型稳压电源，另一种就是开关电源模块。我们采用的是开关电源模块，在交流电压接入端接滤波电容，以消除电网尖峰电流脉冲和高频谐波，在电源输入端增加滤波电容 C_2 ，减少纹波干扰； C_1 为电容滤波器，使输出直流电压更加平稳，输出的平均值也有所提高，接近于变压器输出电压的幅值。

4.2.2 方案一：PWM 功率放大驱动

PWM (Pulse Width Modulation) 控制就是对脉冲的宽度进行调制的技术，即通过对一系列脉冲的宽度进行调制，来等效地获得所需要的波形，PWM控制技术最主要的理论基础是：冲量相等但是形状不同的窄脉冲加在局域惯性的环节上，其效果基本相同。这里冲量就是指窄脉冲的面积，效果基本相同就是指环节的输出响应波形基本相同。如果把环节的输出波形进行傅立叶变换的话，其低频段非常接近，高频段略有小差异。也就是说PWM控制技术是利用半导体器件的开通或者关断把直流电压变成一定形状的脉冲方波序列，并通过控制电压脉冲方

波的宽度或周期来达到变压的目的，或者通过控制电压脉冲宽度和脉冲列的周期以达到变压变频控制和消除谐波的一门技术。

为本文所设计的PWM功率放大电路是以TL494芯片为基础做成的。

TL494是美国德州仪器公司生产的电压驱动型固定频率脉宽调制器^[38]，它包含了开关电源控制所需的全部功能，广泛应用于单端正激双管式、半桥式、全桥

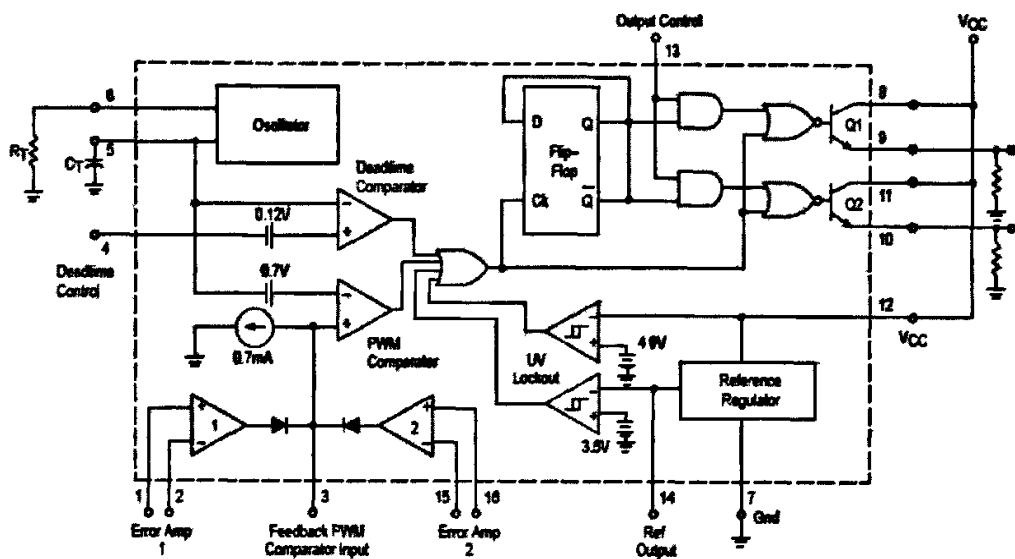


图 4.6 TL494内部原理图

Fig 4.6 The internal schematic diagram of TL494

式开关电源中。其输出三极管可接成共发射极和射极跟随器两种形式，因而可以选择双端推挽电路输出或单端输出方式，在推挽输出方式时，它的两路驱动脉冲相差180度，而在单端方式时，其两端驱动脉冲为同频同相。TL494 芯片原理图如图4.6所示^[39]。由图可以看出，TL494的内部电路由基准电压产生电路、振荡电路、间歇调整电路、两个误差放大器、脉宽调制比较器以及输出电路等组成。

TL494的核心部分是脉冲宽度调制比较器，比较器的反相端接至振荡器，从该端输入标准锯齿波，振荡器的振荡频率是通过外部的一个电阻和一个电容进行调节。其振荡频率由下式计算：

$$f_{osc} = \frac{1.1}{R_T * C_T} \quad (4-1)$$

式中， R_T ：6脚外接的电阻值

C_T ：5脚外接的电容值

比较器的同相输入端接至误差放大器的输出端。芯片内部的两个误差放大器的结构相同，输出端用二极管隔离，每个误差放大器可独立使用，一般一个放大器用作误差放大器，另一个可用作过流保护放大器。TL494独特之处在于设置了一个独立的死区时间控制比较器，其同相端接0.12V的电平后引向4脚，利用外控电位可以改变调制器的死区时间。输出级由触发器将PWM脉冲分成两相脉冲，分别控制两路晶体管输出级。触发后的输出方式控制端13可使芯片工作在单端或双端推挽输出方式。若该端连接到参考电压源，那么调制脉冲交替输出至两个输出晶体管，输出频率等于脉冲振荡器的一半。如果工作于单端状态，且最大占空比小于50%时，输出驱动信号分别从晶体管Q1或Q2取得。输出变压器一个反馈绕组及二极管提供反馈电压。在单端工作模式下，当需要更高的驱动电流输出，亦可将Q1和Q2并联使用，这时，需将输出模式控制脚13接地以关闭双稳触发器。这种状态下，输出的脉冲频率将等于振荡器的频率。

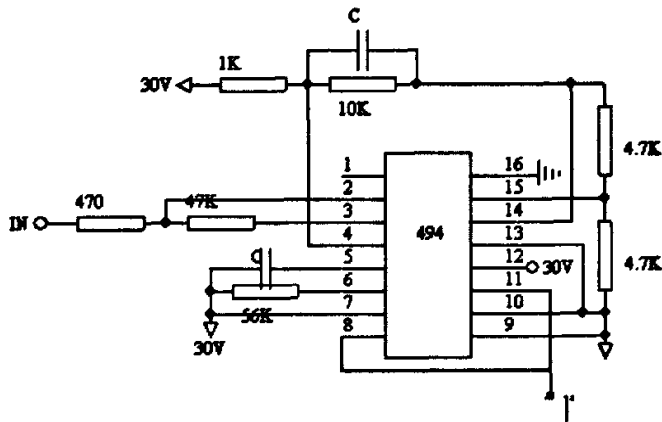


图4.7 TL494外围电路图

Fig 4.7 The peripheral circuit of TL494

图4.7为由TL494组成的PWM输出电路，图中的IN连接D/A输出卡。TL494工作在单端工作方式，并接成共集极方式，由8、11两脚输出的脉宽信号来控制后接三极管，使三极管工作于激振荡状态。3脚接一个电阻构成放大器的负反馈环节。

根据计算，本文设计的振荡频率 $f = \frac{1.1}{1 \times 10^{-9} * 56 * 10^3} = 20kHz$

TL494输出的波形叠加后类似PWM波，在脉冲的下降沿有类似电容放电的一段波形，原因是6脚所接电阻两端没有并联稳压电容。磁粉制动器驱动电路如图4.8所示，图中1接图4.7中的1'：

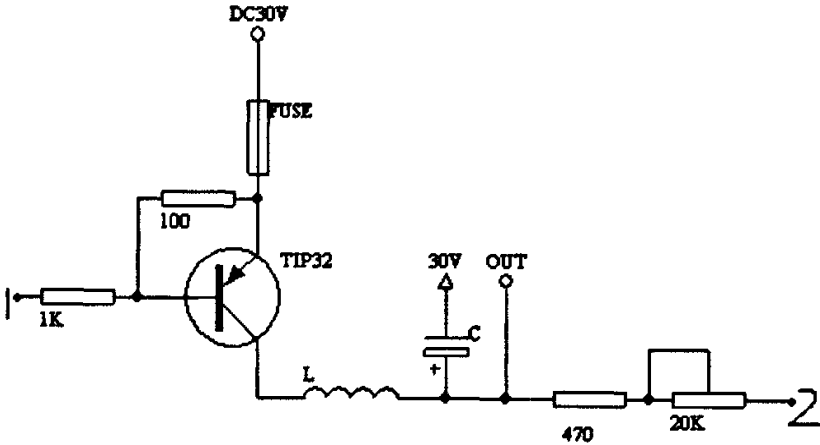


图4.8 磁粉制动器驱动电路

Fig 4.8 The drive circuit of magnetic powder brake

三极管TIP32的供电电源是前面设计的电源电路。电路的工作原理是，5A的保险起保护作用，当电路电流过大，会在此处熔断，以保护后面的元器件不会被损坏。PNP型三极管TIP32的打开与关断由11脚和8脚发出的PWM信号控制，电感器的作用是当三极管在关断的时候能够续流，使输出波形稳定。在输出端，通过电阻R1和电位器R2使输出电压反馈到TL494芯片的1脚，同时可以通过调电位器电阻值的大小，调节输出电压值，所设计的电路的带负载能力由TIP32的电气参数决定，TIP32的主要电气参数如表2：

表2：TIP32电气参数^[40]

型号	P _{tot} (W)	V _{CEO} (V)	I _{CM} (A)	T _j (°C)
TIP32	40W	-40	-5	-65~150

由表我们可以看出，TIP32的带负载能力能满足设计要求。

4.2.3 方案二：比例运算放大驱动

所设计的电路以LM324和达林顿管BDW93C为基础。LM324是四运放集成电路，它采用14脚双列直插塑料封装。它的内部包含四组形式完全相同的运算放大器，除电源共用外，四组运放相互独立。每一组运算放大器可用图4.9(a)所示的符号来表示，它有5个引出脚，其中“+”、“-”为两个信号输入端，“V+”、“V-”为正、负电源端，“Vo”为输出端。两个信号输入端中，Vi- (-) 为反相输入端，表示运放输出端Vo的信号与该输入端的相位相反；Vi+ (+) 为同相输入端，表示运放输出端Vo的信号与该输入端的相位相同。LM324 的引脚排列见图4.9(b)^[41]。

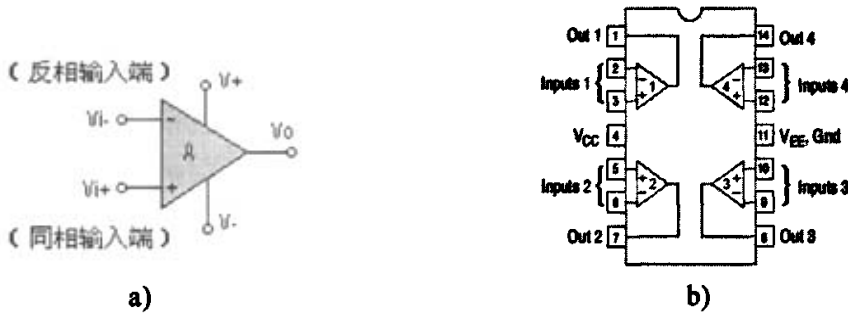


图4.9 LM324引脚图

Fig 4.9 The pin connection of LM324

由于LM324四运放电路具有电源电压范围宽，静态功耗小，可单电源使用，价格低廉等优点，因此被广泛应用在各种电路中。

达林顿管工作原理是将两只或更多只晶体管的集电极采用复合连接方式连在一起，而将第一只晶体管的发射极直接耦合到第二只晶体管的基极，依次连接而成，最后引出E、B、C三个电极。因此，达林顿管具有很高的放大系数。不过，这类直接耦合的高放大倍数的管子只能在功率为2W以下才能正常使用，当功率增大时，管子的压降造成温度上升，前级晶体管的漏电流会被逐级放大，导致整体热稳定性差，所以，大功率选林顿管内

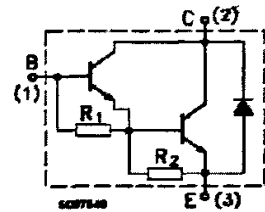


图4.10 BDW93C的内部结构图

Fig 4.10 The internal schematic diagram of BDW93C

部均设有均衡电阻，这样，除了大大提高热稳定性外，还有效地提高末级功率管的 V_{CC} 耐压值。本文所采用的BDW93C达林顿管内部设有均衡电阻。由于达林顿管具有增益高、开关速度快、能简化设计电路等优点，颇受人们的欢迎^[42]。BDW93C的内部结构如图4.10所示。

比例运算放大驱动电路的设计思路是：控制卡输出的0~5V电压，其带负载能力很小，因而同时需要放大电压和电流，因此采取了先放大电压，再扩展电流的方法。比例运算放大电路如图4.11所示，图中的out接磁粉制动器。由图可以看到，电路主要由运算放大器LM324、电阻、电容以及BJT达林顿管BDW93C组成。

电路的工作原理是：从D/A输出卡发出的0-5V控制信号先经过第一级同相放大放大电压，再经过差动放大和电流扩展，输出0-24V的电压。同相放大部分电压增益 $A_v = \frac{R_4}{R_3}$ 。第二级的功率放大引入电压串联负反馈，由电路可以看到，第

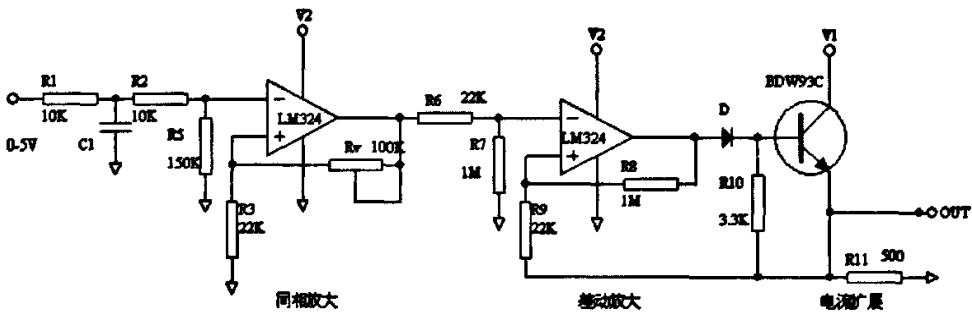


图4.11 磁粉制动器驱动电路

Fig 4.11 Another drive circuit of magnetic powder brake

二个运算放大器的同相输入端的电压值确定，当负载电压由于不明原因引起下降，运算放大器的反向输入端电压也随着下降，运放两端的电压差值变大，运放的输出电压值则升高，补偿负载下降电压，反之亦然。为了抑制噪音和防止高频自激，电路选用了电容 C_1 、电阻 R_5 以及 R_7 。同时因为电路功耗较大，应注意电路的散热问题，我们选用了比较大的散热片。电路的带负载能力由达林顿管BDW93C的参数决定。达林顿管BDW93C的主要参数如表3：

表3: BDW93C电气参数^[43]

项 目	符 号	参数值	单 位
集电极-基极电 压	V_{CBO}	100	V
集电极-发射极 电压	V_{CEO}	100	V
集电极电流	I_C	12	A
集电极最大电流	I_{CM}	15	A
集电极功耗	P_{tot}	80	W

由参数可以看出，达林顿管BDW93C能满足设计要求。

当负载 $R_L = 50\Omega$ ，测量的输出电压与输入电压之间的如图4.12：

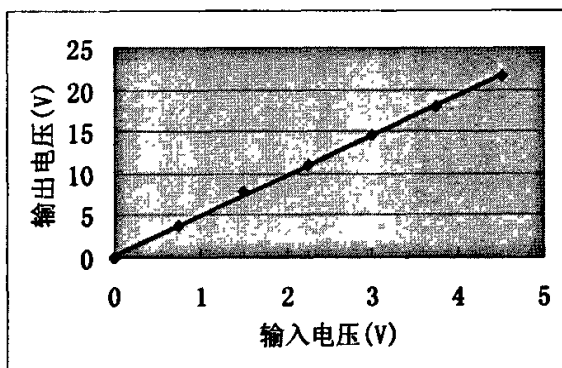


图4.12 输出电压和输入电压关系曲线

Fig 4.12 The connection between output voltage and input current

由图可以看到，输出电压 V_1 与输入电压 V_0 成线性关系。

两种方案的比较：

方案一所采用的PWM电路是磁粉制动器常见的驱动方式之一，它相对功耗少，但元器件较多，电路较为复杂，PWM功率放大电路采用了开关电源技术，输出电压有较大的纹波，这会引起磁粉制动器张力变化；方案二采用的比例运算放大驱动所选用的元器件便宜，电路简单，电压稳定，易于实现，但相对功耗较大。由于本文所用磁粉制动器采用开环控制，因此要求驱动电压非常稳定，所以

选用方案二。

4.3 控制系统接线设计

本装备选用的UDK-5114N步进电机驱动器有六个端子和控制卡相连，其中CW两个端子为指令脉冲差分信号，CCW两个端子为指令方向差分信号，另外H.OFF两个端子为输出电流切断方式指令信号。

运动控制器的引脚35、36、37和38分别为X轴指令脉冲输出、指令脉冲输出地、指令方向输出和指令方向输出地，分别连接步进电机驱动器相应的输入端子。采用共阳极的接线方式，步进电机则是脉冲+方向的控制方向。步进电机驱动器与运动控制卡的接线设计如图4.13所示：

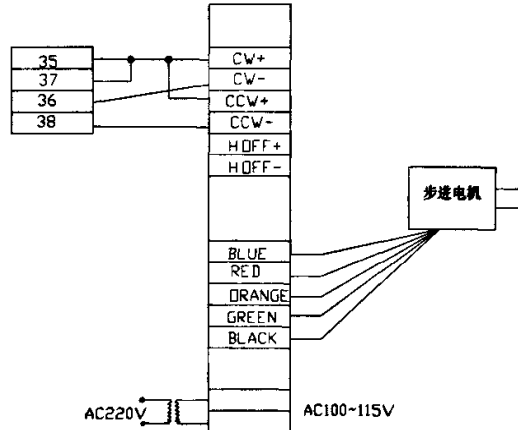


图4.13 步进电机驱动器与控制卡接线图

Fig 4.13 The connection between driver of the step motor and motion control apparatus

4.4 走丝控制系统的开发

线切割运动控制系统的软件模块是机床数控软件系统的主要组成部分，目前高速走丝线切割机数控系统运行在DOS操作系统上。本项目是在WINDOWS系统平台上，以VB作为编写程序的计算机软件语言。WINDOWS有丰富的窗口界面，在VB开发平台下可以快速方便地编辑出优美的窗口界面^[44]。

4.4.1 走丝系统控制软件的功能分析

根据低速走丝线切割加工以及本装备的实际要求，控制系统应具有走丝、停止、退出等几种功能。

(1) 走丝 走丝状态是工作状态，因此也是程序执行时间最长的状态，是最主要的执行程序。当点击界面上开始按钮后，系统先读取张力和速度值，然后向步进电机发送脉冲信号，向磁粉制动器输出电压信号，实现恒速恒张力控制。

(2) 停止 当点击界面上停止按钮，系统从走丝状态中退出，保持步进电机锁死，同时停止给磁粉制动器发送驱动电压信号，为继续工作做准备。

(3) 退出 当点击界面的关闭按钮，控制系统释放整个系统的设备资源，退出控制系统。

4.4.2 丝速控制系统

丝速控制系统采用运动控制卡控制驱动器发送脉冲信号，从而控制电机，并最终实现电极丝的恒速控制。走丝速度控制为开环控制，根据走丝速度的要求，计算出相应的脉冲数，并在装备的控制软件输入命令，经过计算机运算，由运动

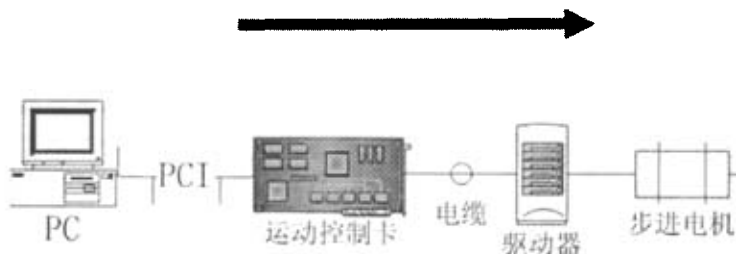


图 4.14 丝速控制硬件图

Fig 4.14 Control Process of wire feeding speed

卡向步进电机驱动器发送脉冲信号，控制步进电机的转动。

丝速控制系统的流程图如图 4.15 所示。

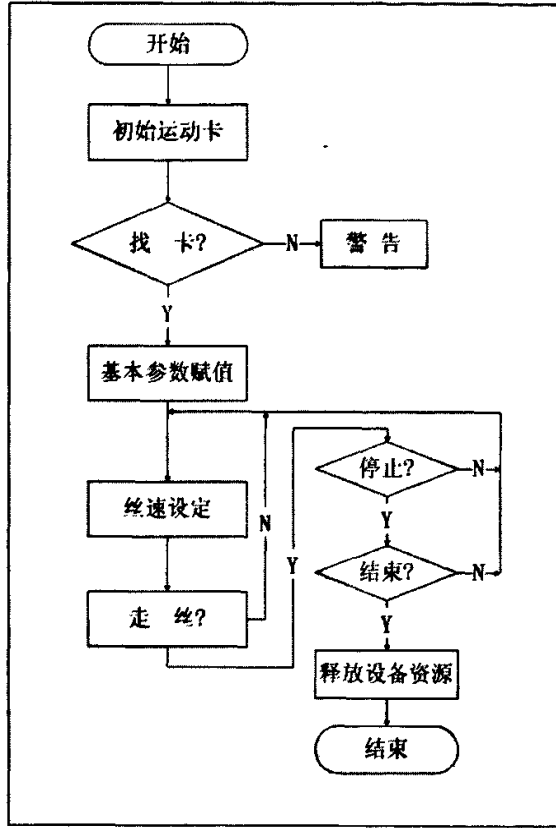


图 4.15 走丝控制系统流程图

Fig 4.15 The flow chart of wire-feeding speed control system

在控制软件里，需要先设定加工的走丝速度、起始速度、变速时间、运行模式等参数，运动控制卡根据设定的运动参数，对走丝电机运动进行控制，开始运丝。

4.4.3 恒张力控制系统

恒张力控制系统的硬件如图 4.16 所示，恒张力控制系统以 D/A 输出卡为基础，开环控制，根据电极丝张力要求，计算出相应的驱动电压，并在装备的控制软件输入命令，经过计算机运算，由 D/A 输出卡发送信号到磁粉制动器的驱动电路，驱动电路把电压放大，控制磁粉制动器的输出转矩。

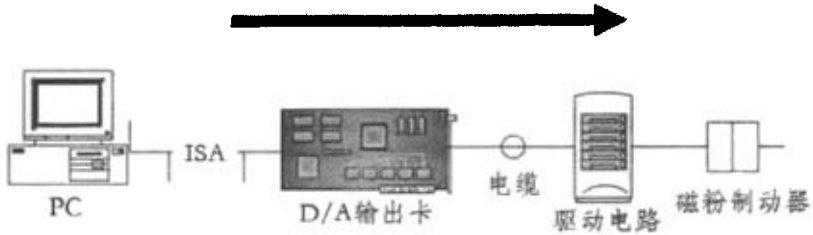


图 4.16 恒张力控制系统硬件图

Fig 4.16 Control Process of content tension control system

恒张力控制系统的流程图如图 4.17 所示：

在控制软件里，需要先设定张力值，D/A 输出卡根据设定的张力参数，输出相应的模拟电压值，对磁粉制动器进行控制，完成张力控制。

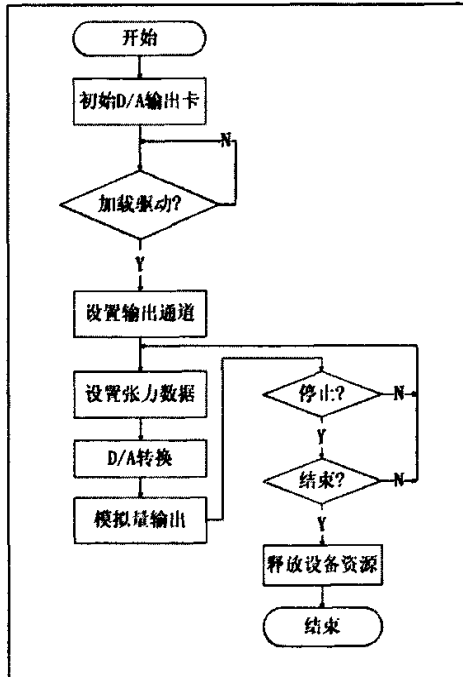


图 4.17 张力控制系统流程图

Fig 4.17 The flow chart of tension control system

4.4.4 控制软件主界面

所设计的控制软件主界面，如图 4.18 所示：

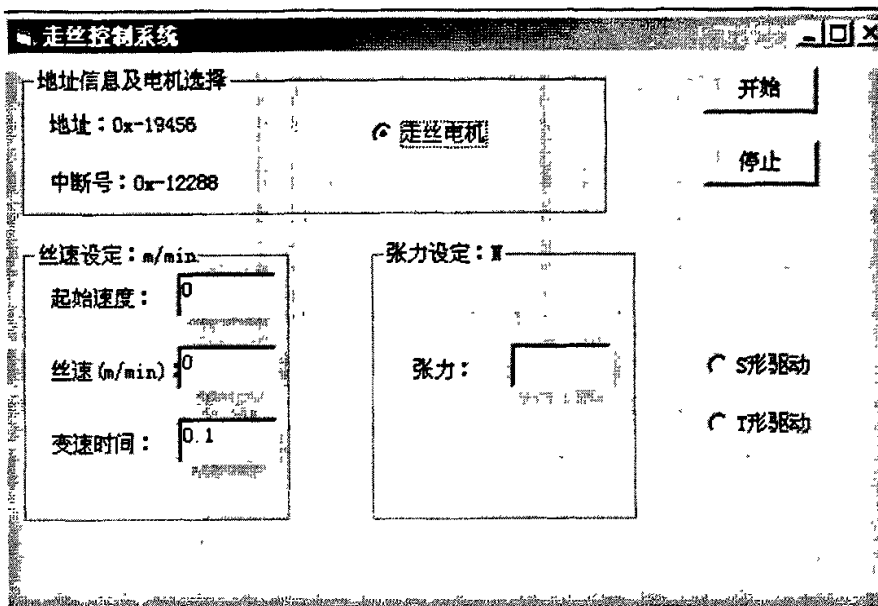


图 4.18 控制软件界面

Fig.4.18 The soft interface of the control program

4.5 本章小结

根据装备的设计要求，设计了装备的关键零部件及机械总体结构；设计了控制系统的硬件、软件，实现了电极丝恒速、恒张力的控制。硬件上采用深圳雷赛的 DMC1000 型运动控制卡控制步进电机运动，从而控制电极丝的恒速运动；采用北京双诺测控技术有限公司的 AC1343D/A 转换器控制磁粉制动器的驱动电路，实现对电极丝恒张力控制；分析了控制系统各组成硬件的工作原理。采用 VB6.0 为平台，开发了控制软件，可用计算机对加工过程进行自动控制，为装置的使用奠定了基础。

第五章 走丝系统的实验研究

至此，走丝系统实验装置已全部组装完成，该装备主要由两部分组成：机械本体部分和电气部分。走丝系统的整体外观如图 3.1 所示。控制系统主要有丝速控制、张力控制两部分。本章将在走丝系统装备上进行张力测试实验。通过实验检验装备的性能以及控制系统的稳定性。

走丝系统的稳定状态是指控制系统的丝速和张力都不变化的工作状态，这个状态也是低速走丝电火花线切割走丝系统在整个工作过程中占据时间最长的工作状态，是确定走丝控制系统性能好坏的重要指标之一。

5.1 实验仪器

本实验选用北京正开公司生产的 MCL-T2 型张力传感器（如图 5.1），它是一种高精度、低漂移的张力测量传感器，便携手持与设备在线张力检测控制均可使用。适用于各种光纤、纱线、化纤、金属丝、电线、电缆、胶带、钢带的张力测量。传感器以 24VDC 作为激励电源，量程是 50N，输出为 0~5V 直流电压，传感器的非线性、滞后和不重复性均为 0.5~1% F·S，温漂是 0.05~0.1% F·S/°C，灵敏度为 1.5mV/V，过载能力为 150%，能满足张力测量的要求。张力传感器的受力和实物如图 5.1 所示。在测试过程中，将示波器接在张力传感器输出端口，通过记录示波器输出电压信号的变化曲线，就能推出电极丝张力的变化。

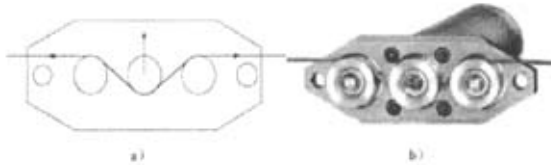


图 5.1 张力传感器

Fig 5.1 The tension sensor

5.2 输出电压与张力的关系

根据张力控制的流程，我们知道，计算机先设定一个张力初始值，经过 D/A 输出卡转换，输出模拟电压控制磁粉制动器的输出转矩，电极丝张力控制的实质就是控制磁粉制动器的输出转矩，电极丝的张力用张力传感器在线测量，这个实验检验的是磁粉制动器的工作特性。从图 5.2 中可以看出，磁粉制动器的输出转

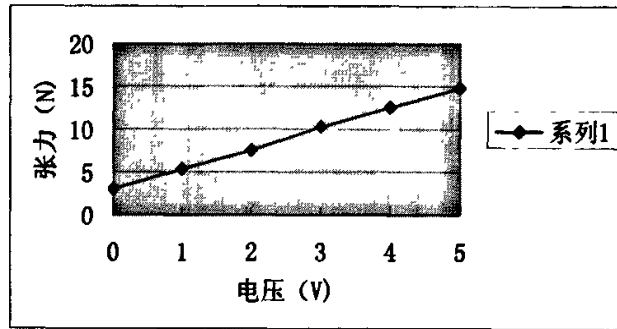


图 5.2 输出电压—张力关系图

Fig 5.2 Relationship between output V and tension

矩和激励电流的线性关系成立，但在 D/A 输出卡没有电压输出时，有张力值大概 3N，这是我们前面分析的前端摩擦力和基本张力。

5.3 系统的调试

电极丝的运行速度是慢走丝线切割加工重要的参数之一，本实验的目的是发现丝速对电极丝张力的影响规律。在测试中，选用了 0.2mm 的电极丝，张力设定为 8N，测试了丝速分别是 2m/mim、5m/mim、8m/mim、11m/min 四组数据，根据张力传感器参数，输出的电压目标值应该是 0.8V，示波器输出的电压信号分别如图 5.3 a)、b)、c)、d)所示，可以看到走丝控制系统输出的电压值基本稳定在 0.8V 左右，总的来看张力波动率小于 10%。从图中我们还可以看出，当丝速较低时，电极丝张力较稳定，张力波动较小，反之，则波动较大。

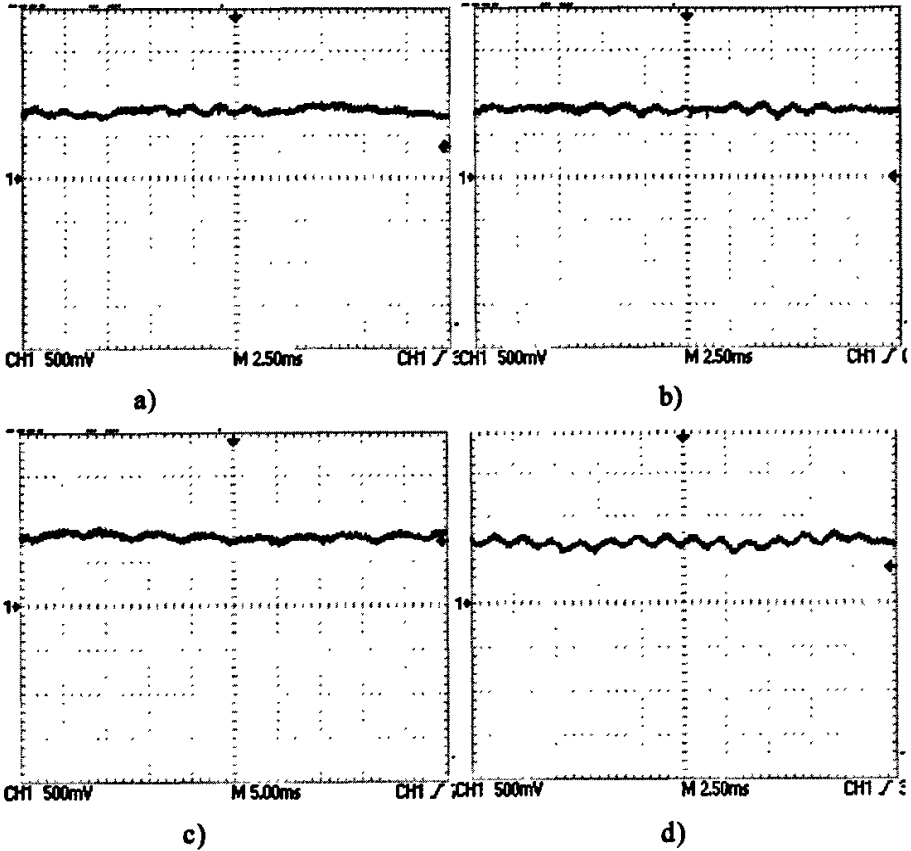


图 5.3. 不同速度下走丝系统张力状态图

Fig 5.3. The tension of wire-feeding device in different speed

原因分析：当电极丝因外界因素引起振动时，丝速越大，振动就越明显，振动的衰减也越慢，因此振动引起电极丝张力波动就会越明显。

图 5.4 是走丝系统电极丝速度设定为 6m/mim 不变，图 a)、b)、c)、d)张力分别为 5N、7N、9N、11N 的张力状态图，从图中可以看出，在电极丝速度不变的情况下，张力的波动率和波动周期基本不变。

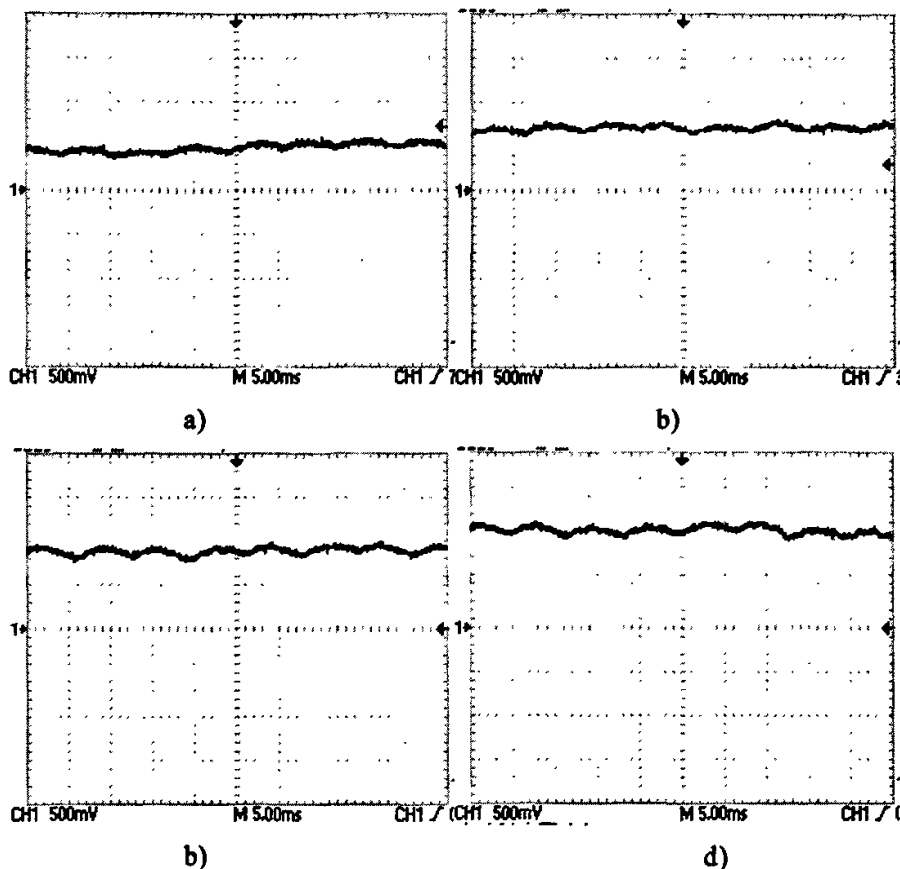


图 5.4 相同走丝速度下走丝系统张力状态图

Fig 5.4 The tension of wire-feeding device in same speed

根据以上两组图可以看出，在非加工状态下，电极丝的速度是影响电极丝张力波动的主要因素。

5.4 本章小结

本章通过对走丝系统参数的设定，测试了走丝系统在工作状态时的张力状态，分析了电极丝张力和走丝速度的关系，实验证明，本文所设计的走丝系统性能稳定，工作可靠。

总 结

相对低速走丝线切割机床，其走丝系统的重要性是不言而喻的，应该说低速走丝线切割机就是围绕丝在做文章，走丝系统的各个环节都体现了机床的水平与质量，走丝速度和张力控制是否合适，直接影响加工工件的表面质量。本文再分析国内外走丝控制系统的研究基础上，提出了张力和速度的控制方案，进行了走丝系统的研究，并制作了一套走丝系统的演示装置。

本文完成的主要工作和取得的成果如下：

(1) 提出了丝速采用步进电机开环控制、丝张力采用磁粉制动器加载式开环控制的整体设计方案，并进行了系统研制；

(2) 建立了以PC机为控制系统主控单元，以运动控制卡和D/A输出卡功能模块为转换输入输出，以步进电机为丝速控制系统执行元件、磁粉制动器为张力控制系统执行元件的开环控制系统，分析了走丝控制系统主要组成元件的工作原理，建立走丝控制系统的数学模型，得出了走丝系统控制的传递函数；

(3) 设计并制作了走丝系统的机械装置，在张力轮和收丝轮机构等关键部件上，设计了张力轮和张力压力轮、收丝轮和收丝压力轮之间的压紧力的自动调节装置；

(4) 设计了控制系统的外围扩展电路，包括供电电源电路和磁粉制动器驱动电路；同时基于VB6.0编写了实时控制程序，开发了走丝系统的控制程序，实现了走丝系统的自动化控制；

(5) 对走丝系统进行了参数设定后，进行系统调试。经测试，走丝控制系统能够进行实时控制，性能可靠稳定。

课题完成了走丝系统的整个设计、制作和调试过程，开发了许多模块功能。基本上完成了预定的研究工作，但由于时间上的不足，还存在很多问题，应在如下几个方面继续进行研究 and 探索：

(1) 机床电器保护措施以及抗干扰措施在设计中没有给予充分考虑，I/O接口卡以及布线比较零乱，没有形成结构化、模块化的设计标准；

(2) 软硬件设计有待于进一步完善，将整个控制系统的效果调到最佳，提高系统的稳定性；

(3) 还需要做大量的工艺实验，更进一步验证系统的可靠性。

参考文献

- [1].白木,子荫.EDM技术的过去和现状[J].精密制造与自动化,2003,4:17~19
- [2].倪高红.低速走丝线切割运动控制系统的设计与开发[D].南京:南京航空航天大学,2005
- [3].赵淑金,于海军,宋全伟.浅谈慢走丝线切割在模具制造中的应用[J].防爆电机,2001,4:32~34
- [4].李明辉.电火花线切割技术的研究现状及发展趋势[J].模具技术,2002.N0.6:49~52
- [5].叶军.数控低速走丝电火花线切割加工技术及市场发展分析 [EB/OL].<http://www.cechinamag.com/Article/html/2006-04/200644113423.htm>
- [6].http://www.ssgedm.com/eBusiness/GB/product_detail.asp?catalogid=1&productid=52
- [7].连克,仁蔡立.谈谈我国低速走丝线切割机的水平与发展[J].中国机械工程学会,2001年中国机械工程学会年会(暨第九届全国特种加工学术年会),北京,机械工业出版社,2001:P176~178.
- [8].邢海涛.电火花加工技术与模具制造业[J].机械工人(冷加工),2002,4:14~15
- [9].高精密慢走丝线切割机的世界顶级精品首次在中国亮相[J].WMEM,2005,4:67~70
- [10]程新江.高速走丝气中电火花线切割精加工机理的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004
- [11]高上品.电火花加工过程的物理本质[J].机电一体化,1996,3:29~31
- [12]刘忠辉.慢走丝电火花线切割机间隙控制系统的研究[D].南昌:南昌大学,2005
- [13]于滨.两轴联动电火花线切割控制系统的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学

- [14]王彤. 低速走丝气中电火花线切割精加工机理的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005
- [15]曹凤国. 电火花加工技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.10~12;266~271
- [16]K.H.Ho, S.T.Newman, S.Rahimifard, R.D.Allen. State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM) [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004, 44: 1247~1259
- [17]王军. 超硬刀具材料电火花线切割加工(WEDM)加工参数的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005
- [18]A.B. Puri, B. Bhattacharyya. Modelling and analysis of the wire-tool vibration in wire-cut EDM[J]. *Journal of Materials Processing Technology* 141 (2003) 295-301
- [19]闫开印. 高速走丝电火花线切割机加工精度分析及今后的发展方向[D]. 成都: 西南交通大学, 2003
- [20]J.A. Sanchez, J.L. Rodil, A. Herrero, L.N. Lopez de Lacalle, A. Lamikiz. On the influence of cutting speed limitation on the accuracy of wire-EDM corner-cutting [J]. *Journal of Materials Processing Technology* 182 (2007): 574-579
- [21]龚金农. 全自动恒张力控制系统的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006
- [22]张光荣. 磁粉离合器和磁粉制动器的结构、性能及选用[J]. *机电工程技术*, 2004, 10: 173~176
- [23]三菱电机磁粉制动器、离合器选型手册 [EB/OL]. <http://www.mitsubishielectric-automation.cn/products/manual.asp?cateid=9&navid=3,19>
- [24]王思刊. 磁粉离合器在控制系统中的应用[J]. *电气传动自动化*, 1999, 21(4): 40~43
- [25]沈洪. 低速走丝电火花线切割机走丝系统的现状和发展[J]. *电加工与模具*, 2002, 6: 17~19
- [26]刘斌, 丁人平, 张鲲. 数控低速走丝电火花线切割专用机床的设计[J]. *电加工与模具*, 2005, 2: 55~58
- [27]董晓东. 慢走丝电火花线切割机床走丝系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业

大学, 2006

[28]http://www.szlianyang.cn/szlianyang_Product_2607956.html

[29]<http://www.lvhangye.com/viewthread.php?tid=13074>

[30]<http://dianli1000.com/scjs/showarticle.asp?articleid=2179>

[31]康华光. 电子技术基础(数字部分)[M].北京:高等教育出版社.1998,388~399

[32]赵利平,高殿斌. 一种典型的张力控制系统的研究[J].机械与电子, 2006(11): 41~43

[33]王春香,王永章,贾延林,黄开榜. 精密张力控制系统研制中的几个问题[J]. 自动化技术与应用, 1999, 4: 20~22

[34]Takuji Magdra, Takashi Iwasaki, Toshio Suzuki, Masahiro Yamamoto, all of Aichi, Japan. Wire Cut Electric Discharge Machining Method [P]. America patent:5237145,Aug.17,1993

[35]Yasue Arakawa, Oshino, Japan. Wire feed device [P]. America patent:5281787,Jan.25.1994

[36]Takashi Iwasaki, Aichi, Japan. Wire Electrical Threading Apparatus For a Wire Cut Electric Discharge Machine [P]. patent:5162630,Nov.10,1992

[37]直流稳压电源的原理和设计[Z].

[38]候振义. 直流开关电源技术及应用[M].北京:电子工业出版社.2006,113~115

[39]<http://www.piekarz.pl/pdf/Uklady%20scalone%20PDF/T1494.pdf>

[40]http://instruct1.cit.cornell.edu/courses/ee476/FinalProjects/s2007/arb66_ak364/arb66_ak364/TIP32.pdf

[41]<http://www.51mculab.com/labzl/upimg/LM324%E5%9B%9B%E8%BF%90%E6%94%BE%E7%9A%84%E5%BA%94%E7%94%A8.pdf>

[42]李学芝,沙占友.达林顿管的原理与应用[J].

[43]<http://www.dzsc.com/icstock/166/BDW93C.html>

[44]Harvey M.Deitel, Paul J.Deitel, Tem R.Nieto. Visual Basic 6 How to Program[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry

攻读学位期间发表论文

陈玉娟, 于兆勤, 郭钟宁. 低速走丝线切割机床走丝系统的应用. 机电工程技术, 2007, 04: 82-85

致 谢

本文是在导师于兆勤副教授的悉心指导下完成的,在此我要衷心感谢于老师三年来在学习、科研和生活中对我的指导和关怀,我的每一点进步都离不开他的精心教导。于老师治学态度严谨,学术知识渊博,具有敏锐的创新思维,从他身上我学到了许多科学的思维方式和科研方法。同时,于老师作为学校实验中心的副主任,兢兢业业的工作态度以及平易近人的生活作风也深深地教诲了我。导师对我的教导是我成长中宝贵的财富,必将使我受益终身。

在学习和课题研究期间,得到机电学院郭钟宁教授、张永俊教授、李锻能高工,傅惠南教授、马平教授、以及刘晓宁老师、李远波博士、唐勇军博士以及材料与能源学院何建文副教授等诸多指点,他们给我提供了许多宝贵的建议,在此表示感谢。

感谢黄志刚师兄、曾繁章师兄、刘江文师兄、徐大敏师姐,莫秉华、柴牧舟、黄小舟、陈柱春、许志永等同学以及韩子平、梁嘉豪等师弟对我的帮助。

特别感谢我的家人和朋友三年来对我的支持和帮助!

感谢百忙之中对本论文评审的专家和学者!

最后对所有曾经帮助过我的老师和朋友致以衷心的感谢!

陈玉娟

2007年5月20日