

# 硕 士 学 位 论 文

## 基于 STM32 的频率自动跟踪与振幅恒定的 超声电源的研制

**Research and Development of Ultrasonic Power Supply with  
Frequency Auto-tracing and Constant Amplitude Control  
based on STM32**

作 者 姓 名: 郑伟帅

学 科、 专 业: 机械制造及其自动化

学 号: 21504018

指 导 教 师: 康仁科 教授

完 成 日 期: 2018 年 4 月 27 日

**大连理工大学**

Dalian University of Technology

## 摘 要

超声辅助加工技术是将超声振动系统与传统加工方法相结合的一种复合加工方法,近年来在硬脆难加工材料的加工中取得了快速发展并获得广泛应用。超声电源系统作为超声振动系统的核心,直接影响刀具的振动效果和加工表面质量,而且随着各种先进硬脆复合材料的大量应用和更高的加工质量要求的提出,现有超声电源技术已经无法满足高频输出、快速动态响应等性能要求。为了解决以上问题,本文结合 STM32 高速处理器研制了频率自动跟踪与振幅恒定控制的超声电源系统,主要研究内容可分为以下三个方面:

(1) 对超声电源系统的硬件进行了全面的分析和优化,对超声电源的各个功能模块进行重新设计与仿真,最终使用 DDS 技术采用 AD9850 芯片作为高频信号发生器并给出相应控制方法,使用全桥 MOSFET 逆变桥路作为高频逆变器,使用 IR2110 驱动芯片设计全桥驱动电路并进行了负压电路优化,采用串联电感法设计超声换能器的匹配电路,并且为了实现超声电源的自动控制,设计了简单高效的电流电压反馈电路等等。

(2) 提出并实现了三种能够实现超声电源自动控制的具有快速响应能力的软件算法。一是基于二分思想的快速扫频算法,该算法可以在超声电源系统的启动阶段快速找到换能器的谐振频率,加快系统初始化速度;二是频率输出的自动跟踪算法,该算法基于模糊 PID 理论,自适应 PID 参数,当换能器谐振频率发生漂移时,能够实现频率输出的快速跟踪;三是振幅恒定控制算法,该算法在频率自动跟踪的基础上,通过斩波器实现对超声电源供电电压的调节,从而达到换能器振幅恒定控制的目的。

(3) 搭建超声电源系统的测试平台和试验平台,对超声电源的静态输出性能和动态性能进行验证。在测试过程中,多次迭代超声电源系统的设计与优化,最终保证了该超声电源能够很好的满足 20-50KHz 输出的高频特性和快速频率自动跟踪性能。此外设计了单因素试验,对比分析了 C/SiC 材料超声辅助磨削与普通磨削加工方法在磨削力方面的性能差异,加工试验过程中通过对超声电源输出状态的监测,验证了该超声电源振幅恒定控制和动态响应能力。试验结果表明,相对于普通磨削,超声辅助磨削具显著的优势如有效降低磨削力、延长刀具寿命等,进一步证明了本文所设计超声电源具有良好的工作性能。

**关键词:** 超声电源; 频率自动跟踪; 模糊 PID; 振幅恒定; 超声辅助磨削

## Development of ultrasonic power supply with constant amplitude and constant frequency based on STM32

### Abstract

Ultrasonic assisted machining technology is a kind of composite processing method combining ultrasonic vibration system with the traditional processing methods, which in recent years has achieved rapid development and wide application in machining hard, brittle and difficult to machine materials. As the core of ultrasonic vibration system, the ultrasonic power system directly affects the vibration effect of the tool and the quality of the machined surface. With the application of various advanced hard brittle composites and the higher processing quality requirements, the existing ultrasonic power supply technology has been unable to meet the requirements of high frequency output and rapid dynamic response. In order to solve the above problems, an ultrasonic power system with automatic frequency tracking and constant amplitude control is developed with high speed processor STM32. The main research contents can be divided into three aspects:

(1) The hardware of the ultrasonic power supply system is comprehensively analyzed and optimized. The function modules of the ultrasonic power supply are redesigned and simulated. The AD9850 chip is used as the high frequency signal generator by DDS technology and the corresponding control method is given. The full bridge MOSFET inverter bridge is used as the high frequency inverter, and the full bridge driving circuit is designed by using the IR2110 driver chip, and the negative voltage circuit is optimized. The series inductance method is used to design the matching circuit of the ultrasonic transducer. In order to realize the automatic control of the ultrasonic power supply, a simple and efficient current voltage feedback circuit and so on are designed.

(2) Three software algorithms with fast response capability for automatic control of ultrasonic power supply are proposed and implemented. The first is a fast frequency sweep algorithm based on dichotomy. The algorithm can quickly find the resonant frequency of the transducer and speed up the system initialization speed in the starting stage of the ultrasonic power supply system. The second is the automatic tracking algorithm of frequency output, which is based on fuzzy PID theory. Fast tracking of frequency output can be achieved when the resonant frequency of the transducer is drifting. The third is the amplitude constant control algorithm. On the basis of the frequency automatic tracking, the algorithm realizes the

regulation of the voltage of the power supply by the chopper to achieve the purpose of constant amplitude control of the transducer amplitude.

(3) The test platform of the ultrasonic power system is built to verify the static output and dynamic performance of the ultrasonic power supply. In the process of testing, the design and optimization of the ultrasonic power supply system have been iterated many times. Finally, the ultrasonic power supply can satisfy the high frequency characteristics of 20-50KHz output and the automatic tracking performance of fast frequency. In addition, a single factor test was designed, and the difference between the ultrasonic assisted grinding C/SiC material and the ordinary grinding method in the grinding force was compared and analyzed. The constant amplitude control and dynamic response ability of the ultrasonic power supply were verified by monitoring the output state of the ultrasonic power supply during the process of processing. The experimental results show that the ultrasonic auxiliary grinding has significant advantages, such as reducing the grinding force and prolonging the life of the tool, and further proves the good performance of the ultrasonic power supply in this paper.

**Key Words:** Ultrasonic power supply; Frequency automatic tracking; Fuzzy PID; Constant amplitude; Ultrasonic assisted grinding

## 目 录

摘    要.....	I
Abstract .....	II
1 绪论.....	1
1.1 课题背景.....	1
1.1.1 超声辅助加工技术的产生背景.....	1
1.1.2 超声辅助加工系统的组成及其应用.....	2
1.1.3 超声辅助加工技术的基本原理与特点.....	4
1.2 研究现状及发展趋势.....	6
1.2.1 超声电源信号发生技术.....	6
1.2.2 超声波电源频率自动跟踪技术.....	7
1.2.3 超声波电源未来发展趋势.....	10
1.3 本文研究内容.....	11
2 超声电源硬件系统研制及其仿真.....	12
2.1 超声电源系统总体设计.....	12
2.1.1 超声电源系统总体设计要求.....	12
2.1.2 超声电源总体设计方案.....	12
2.2 超声电源的信号发生电路设计及其仿真.....	13
2.2.1 高频逆变器.....	13
2.2.2 IR2110 驱动电路.....	15
2.2.3 超声波信号发生器.....	16
2.2.4 死区形式成电路.....	19
2.3 超声电源的电路匹配系统.....	21
2.3.1 换能器匹配原理.....	21
2.3.2 换能器阻抗测量分析.....	22
2.3.3 匹配电感的设计.....	23
2.4 反馈系统.....	23
2.4.1 采样电路.....	24
2.4.2 鉴相电路.....	25
2.4.3 有效值采样电路.....	25
2.5 本章小结.....	26

3	超声电源软件系统开发及其实现	27
3.1	扫频算法设计及其实现	27
3.1.1	步进扫频方法	27
3.1.2	基于二分法快速扫频方法	27
3.2	频率自动跟踪算法设计及其实现	28
3.2.1	变步长频率自动跟踪算法	28
3.2.2	基于模糊 PID 控制器的快速跟踪算法设计及其实现	28
3.3	换能器振幅恒定控制算法设计及其实现	31
3.3.1	频率调节法	31
3.3.2	电压调节法	31
3.4	本章小结	32
4	超声电源调试与性能测试	33
4.1	超声电源信号发生电路调试	33
4.1.1	DDS 波形产生调试	33
4.1.2	死区形成电路调试	34
4.1.3	IR2110 驱动电路调试	35
4.1.4	逆变输出波形调试	36
4.2	超声电源负载换能器性能测试	38
4.2.1	高频特性验证	38
4.2.2	跟踪算法有效性验证	38
4.3	本章小结	39
5	超声辅助磨削 C/SiC 复合材料磨削力试验	40
5.1	C/SiC 复合材料加工特点	40
5.2	超声辅助磨削试验台搭建	41
5.3	超声辅助磨削试验结果及分析	43
5.3.1	超声电源振幅恒定验证	44
5.3.2	磨削深度对磨削力影响	45
5.3.3	进给速度对磨削力影响	46
5.3.4	主轴转速对磨削力影响	47
5.4	本章小结	48
	结 论	50
	参 考 文 献	52

攻读硕士学位期间发表学术论文情况.....	55
致    谢.....	56
大连理工大学学位论文版权使用授权书.....	57

# 1 绪论

## 1.1 课题背景

### 1.1.1 超声辅助加工技术的产生背景

随着材料技术的发展和日益增长的工业应用需求,近年来多种难加工材料引起了人们的高度和广泛关注。无论是在军工单位还是在民用企业,较多的难加工材料如硬质合金、先进陶瓷和蓝宝石玻璃等硬脆材料,碳纤维复合材料和铝基 SiC 等复合材料等,在各个领域如光学领域、电学领域、航空航天领域等具有非常大的需求量<sup>[1-3]</sup>。例如,图 1.1a 为位于我国贵州 500m 口径的世界最大球面射电望远镜 FAST(Five-hundred-meter aperture spherical radio telescope),使用了约 4600 个大型光学镜片<sup>[4]</sup>;图 1.1b 为美国哈勃望远镜 HST(Hubble Space Telescope),是目前最为敏锐的可信度最高的太空天文望远镜<sup>[5]</sup>,其通光镜片口径为 2.4m;图 1.1c 为由 CFRP 复合材料制作而成的直升机螺旋桨;图 1.1d 为由 C/C 复合材料制作而成的火箭发动机喷管。此外在微机电系统的相关设备中,硅晶片也被广泛的应用<sup>[6,7]</sup>。

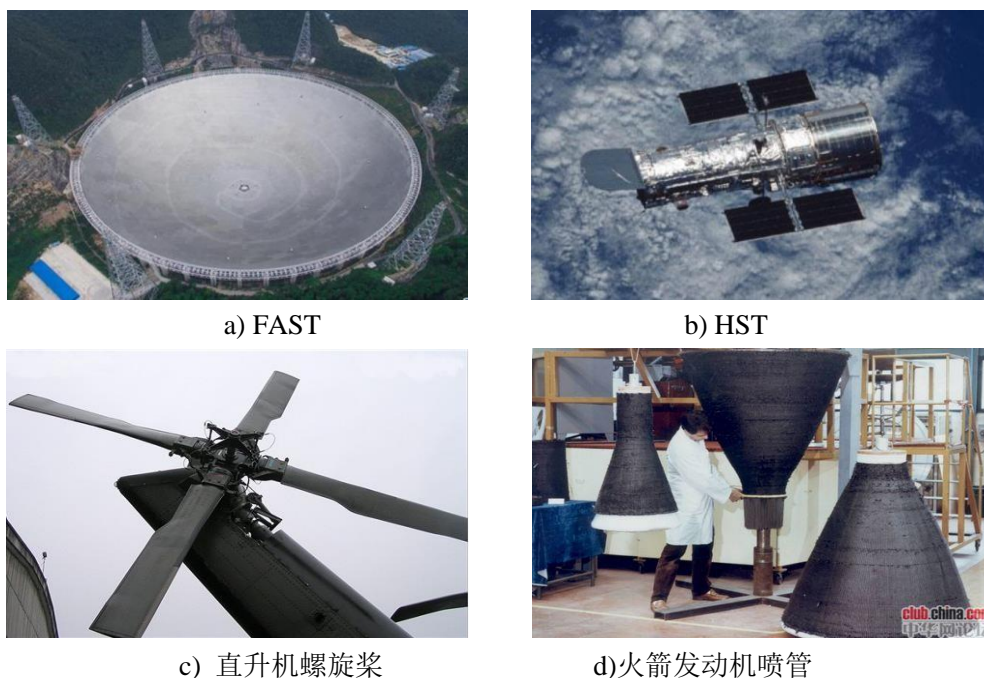


图 1.1 硬脆材料航空航天、精密光学仪器中的应用

Fig. 1.1 Application of hard and brittle materials in aerospace and precision optical instruments



一般而言,这些硬脆难加工材料都具有优异的物理化学性能和力学特性,比如耐磨损、抗腐蚀、抗氧化、强度高、耐高温以及高温条件下变形模量大等。因而在一些工作环境比较严格的情况下,硬脆材料可以用来代替普通金属材料或者其他高分子材料,这也是硬脆材料得到广泛应用的原因,尤其是在航空航天领域、精密光学以及微机电领域。然而硬脆材料具有优异的物理化学性能和力学特性的同时,也因为其硬度较高、脆性很大、塑性很低以及易产生微裂纹的特点,相对于普通金属或高分子材料具有难加工的缺点,出现对于普通机械加工难以加工甚至无法加工的现象。另一方面,在硬脆材料广泛使用的航空航天领域,精密光学领域以及其他特殊领域中,对材料加工质量的要求非常严格,同时对其使用寿命的要求也比较高。例如,对于那些大口径光学镜片的加工,为了保障镜片良好的光学性能和足够长的使用寿命,不仅需要保证加工面型具有极高的精度,同时也要对镜片的表面损伤和亚表面损伤进行严格的控制<sup>[8]</sup>。

当使用传统机械加工方法对这些硬脆难加工材料进行材料去除,比如使用车削、铣削、钻削以及磨削等加工技术进行加工时,都存在刀具与工件之间的作用力大,被加工工件的表面以及亚表面出现损伤的现象,且表面完整性不好,这样就无法达到具有特殊应用的较高的加工要求。随着硬脆材料的大量需求和传统加工技术无法满足硬脆材料加工精度要求的矛盾日益突出,很多学者提出了各种各样的在传统加工技术基础上加以改进的加工技术。如通过使用高速切削加工技术和先进刀具如超硬刀具和涂层刀具等对传统机械加工技术进行发展;提出多种特种加工技术对硬脆材料进行加工如激光加工、超声加工、电火花加工以及高压水射流切割加工等特种加工技术<sup>[9-11]</sup>。无论是对传统机械加工技术的发展还是新型特种加工技术,多数都是通过单一能量作用去除材料,仍然存在加工精度低,加工表面损伤等问题。因此,人们提出了一系列复合加工技术如超声辅助加工、通过机械化学作用磨削以及超声辅助电火花等,通过多种能量共同作用实现材料去除,通过各能量作用的优势互补,实现了硬脆难加工材料的高效去除并保证加工质量要求。其中超声辅助加工,不仅应用于加工硬质合金、淬火钢等硬脆金属材料,同时也能很好地加工玻璃,陶瓷,锗半导体、非导电硅等硬脆性非金属材料,除此之外,也常被用于清洗,焊接、测试、测量、冶金等<sup>[12]</sup>。

### 1.1.2 超声辅助加工系统的组成及其应用

超声辅助加工技术,是将超声振动系统与传统加工技术相复合而形成的加工方法,在原有刀具运动上,施加沿主轴方向的超声高频微振动。按照传统加工方法的不同,可将复合超声振动之后的超声辅助加工分为超声辅助车削、铣削、磨削、钻削以及超声辅助切割等。但任何一种超声辅助加工的系统组成都大同小异,一般如图 1.2 所示。超声

辅助加工系统主要有超声振动系统和加工机床组成，其中超声振动系统又包括超声电源、电能传输和超声振动单元。电能传输单元主要分为有线电能传输和无线电能传输，根据机床设计要求选择相应的电能传输方式。其中有线传输方式能够通过碳刷机构，实现超声电源对超声振动系统的供电，通过这种方式能够实现电能的高效稳定传输，但是碳刷存在磨损，使用寿命较低等问题；而无线电能传输通过全环或者半环线圈的方式根据电磁感应原理实现电能传输，但是能量传输效率降低，电能传输的稳定性降低。超声振动单元主要包括超声换能器、变幅杆以及加工刀具，通过设计变幅杆实现振动幅值的放大，并控制其放大倍数。超声电源技术是超声振动系统中的关键技术，直接决定着超声辅助加工系统的性能。它主要由超声信号发生模块、高频逆变模块、电路匹配模块以及用于频率自动跟踪的信号反馈模块等组成。其中超声信号发生模块通过多种信号调制方法可以产生频率以及相位可调的高频 TTL 方波信号，然后通过开关型高频放大电路，也称为高频逆变器，将高频 TTL 方波信号放大为电压型功率信号。电源型功率方波信号产生后，经过匹配电路和电能传输单元将电能传输给超声振动单元，实现超声振动的目标。

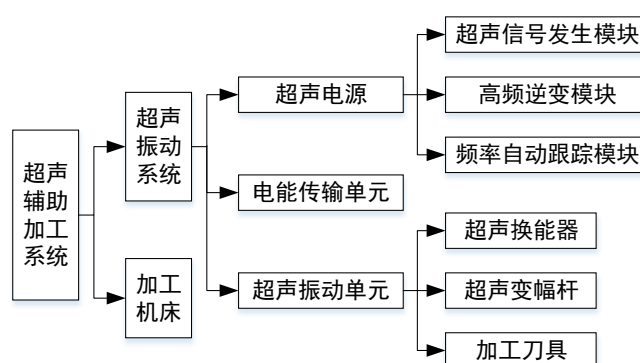


图 1.2 超声辅助加工系统的组成

Fig. 1.2 Composition of ultrasonic assisted processing system

在先进的复合加工技术中，超声辅助加工是一种非常重要的加工技术，它能够有效加工大部分硬脆难加工材料，目前该加工技术广泛地应用于光学精密仪器和航空航天等领域。

超声辅助的加工技术在航空航天领域主要被用于硬脆难加工（复合）材料、高温合金以及钛合金等工件的加工，如火箭发射喷管、发动机活塞等重要部件采用超声辅助车削的加工方法，直升机螺旋桨、飞机蒙皮等部件主要采用超声辅助磨削或铣削的加工方法。如 Babitsky<sup>[13]</sup>等人使用硬质合金车刀分别利用传统车削与超声辅助的加工方法对高

温合金进行对比试验,证明了超声辅助车削对高温合金加工不仅可以很大程度上提高表面质量,同时圆度也有很大改善。Pujana<sup>[14]</sup>等人对比了传统钻削和超声辅助的加工试验,证明了超声辅助钻削可以有效降低轴向力约 20%。

在光学和精密测量仪器领域,超声辅助加工技术主要被用于石英玻璃、先进陶瓷以及蓝宝石等硬脆材料的磨削加工。如各种光学镜片表面的超声辅助磨削加工,光学材料中的制孔多采用超声辅助磨削的制孔方式,精密齿轮、先进陶瓷等精密仪器中所用重要部件也主要采用超声辅助磨削的加工方式等等。杨鑫宏<sup>[15]</sup>等人进行了金刚石砂轮磨削蓝宝石的对比试验,试验结果表明相对于传统磨削技术,超声辅助磨削能够将表面质量提高 30%到 50%,加工效率提高两倍,且刀具磨损减小至十分之一。Yanyan<sup>[16]</sup>等人进行了金刚石砂轮磨削陶瓷材料的对比试验,证明了超声辅助磨削可以有效降低表面粗糙度,此外,砂轮的磨削比得到明显提高。

随着机械制造技术和电子电力技术的发展,超声辅助加工系统也日益完善,这使得超声辅助加工技术得到快速发展,目前超声辅助加工技术在玻璃、蓝宝石、先进陶瓷、高温合金以及各种难加工硬脆复合材料等的加工上表现出极大的优势,并在相关领域得到广泛应用。

### 1.1.3 超声辅助加工技术的基本原理与特点

超声加工技术在 1927 年首次被提出,Wood<sup>[17]</sup>等人成功实现了使用超声振动系统对玻璃进行的加工试验。经过长期的发展与实践,证明超声加工能够有效地解决硬脆材料难加工的问题,并成为一种常用的高效加工方法。对于完全超声加工系统是指仅通过高频的微小撞击作用实现材料去除,这种加工方法在大多数情况下已不被采用。目前广泛采用的超声加工技术是指超声复合加工技术,即将超声振动系统与普通车削、铣削、磨削、钻削以及切割等多种加工技术相复合而形成的新的加工方法,在原有加工工件与加工工具之间相互运动基础上,施加沿主轴方向的超声高频微振动。此时材料去除以传统切削作用为主,以高频微撞击振动以及超声空化作用为辅,实现材料的高效去除。这种方法不仅能够提高加工效率,同时也能够保证较高的加工质量。许多研究证明<sup>[18-20]</sup>,超声辅助加工技术相对于传统机械加工具有材料去除速度快、刀具与工件之间作用力小、刀具的磨损率小以及对被加工材料具有较高的适应性等优点,被广泛应用于硬脆难加工材料的加工。

以超声辅助旋转加工为例,它是一种将超声振动系统与传统旋转加工技术相复合的加工方法,主要有超声电源系统、压电陶瓷换能器、振幅放大器(变幅杆),加工刀具以及其他辅助部件组成,如图 1.3 所示。将锥形刀柄、变幅杆和压电陶瓷换能器通过机

械作用安装或连接为一个整体，通过机械螺纹连接装以刀具，然后将锥形刀柄与机床主轴连接。该超声辅助旋转加工系统工作时，由机床主轴提供高速旋转运动与进给运动；超声电源通过碳刷结构对处于高速旋转的换能器进行供电，压电陶瓷换能器在超声电源的高频高压方波信号的驱动下，将电信号转化为高频的振幅微小的机械振动，然后通过变幅杆将机械振动振幅放大若干倍，并在变幅杆末端端面得到最大振幅。变幅杆将振幅放大后，将能量传递给刀具，带动刀具在原有的旋转运动和进给运动的基础之上附加轴向的高频振动，达到超声辅助加工的目的。

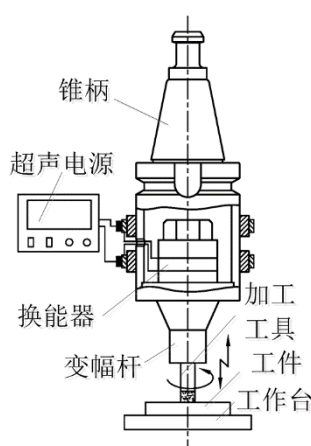


图 1.3 超声辅助旋转加工示意图

Fig. 1.3 A schematic diagram of ultrasonic assisted rotation processing

无论是超声辅助磨削、铣削、钻削等超声辅助旋转加工或是超声辅助车削等其他加工，都是通过超声振动和传统加工相结合的方式实现材料去除，这种复合加工技术与未施加超声前的单一机械去除作用相比，由连续性加工转变为间歇式加工，由单一能量来源转变为多种能量共同作用，材料去除原理发生很大改变，加工过程的散热条件得到改善，加工刀具与工件的温度降低，尤其对于硬脆难加工材料，加工效率得到提高，加工刀具的磨损量在单位材料去除内降低，提高加工刀具的工作寿命，加工过程中切削力得到有效降低，使得材料表面损伤以及亚表面损伤减小，提高工件的加工质量，提高已加工表面的完整性。

超声辅助加工具有如上所述的诸多优点，但是由于超声辅助加工过程中，随着负载动态变化以及刀具磨损等因素，振动单元的谐振频率会发生漂移，漂移量或大或小没有定量分析手段。如果超声辅助系统工作在失谐状态下，超声电源的功率输出大部分转化为热量，使得超声振动单元的振幅大大降低甚至为零，不能体现出超声辅助的作用，此时的加工情况与非超声辅助加工没有区别。为了使超声辅助加工系统稳定工作，必须对

超声电源系统加以控制和优化,使超声辅助电源输出频率自动跟踪超声振动单元的谐振频率,以确保振幅输出稳定。

## 1.2 研究现状及发展趋势

超声辅助加工技术的核心在于超声振动系统的稳定性,而超声振动系统的核心技术在于超声电源的性能。现阶段,随着硬脆难加工材料的大量应用、超声辅助加工技术的普及以及对加工质量更高的要求,国内外学者对超声电源的研究也越来越深入,其中主要包括高频信号的产生技术和快速频率自动跟踪技术等。

### 1.2.1 超声电源信号发生技术

超声电源的信号发生器是整个超声振动系统的输入接口,该高频信号发生技术的优劣直接影响到超声电源频率的稳定性,频率切换的速度以及间接影响到频率自动跟踪的精度和速度,进而对超声电源的整体性能以及加工效果具有很大影响。根据超声电源的高频信号产生硬件以及原理的不同,可以将其分为非集成电路自激振荡式、集成电路模拟芯片激励式、单片机数字芯片激励式以及直接数字频率合成技术(DDS)。

#### (1) 自激振荡式

自激振荡器主要由电流放大器和正反馈电路等分立元器件组成。它能够在不加外部激励信号的情况下自行产生恒稳和持续的振荡,把直流能量输入经振荡器转变为交变能量输出。超声电源系统发展的早期阶段,没有先进的数字信号合成技术,大多数都是依靠非集成电路式的自激振荡器,通过电路元器件的特性,形成高频振荡电流,经过倍频分频器、电压放大器以及电压比较器等系列波形变换得到预设频率和预设电压值的波形。自激振荡电路中常见的主要有三种类型即石英晶体振荡器、RC 振荡器和 LC 振荡器。通过调节振荡器的参数可以产生的任意波形,其工作带宽低至几赫兹高达百兆赫兹,同时根据元器件的选型,也可以将其功率从毫瓦级调整到千瓦级。

自激振荡式超声信号产生技术具有价格低廉、应用简单以及应用范围广等优点,因而在早期的超声电源中得到大量应用,主要应用在超声清洗以及超声雾化的场合。然而自激振荡电路的参数一旦确定,就无法改变其输出频率和功率,不能根据加工情况而实时调节输出而且频率输出的温度漂移现象比较严重,因而现在很多加工领域已逐渐被淘汰。

#### (2) 模拟集成电路式

随着电子技术的发展,具有特定功能的电路逐渐被集成到模拟芯片中。集成电路式信号发生器通过模拟芯片及其外围控制电路的共同作用得到一定频率和电压范围的波

形,并且可以根据需要选择是否具有频率可调节的功能。该技术一般根据模拟式集成芯片生成脉冲宽度调制信号(PWM),然后经过信号放大器比较器等,产生一定频率的方波。目前这类芯片主要有 PWM 控制器 SG3525ADWG、电流模式 PWM 控制器 TL2842P、可调 PWM 控制器 UC2525ADW 等等。该类芯片将 PWM 信号振荡器、控制器、反馈电路和电路保护集成一体,简化电路设计而且价格低廉,在很多应用领域中逐渐取代了自激振荡器,一时得到了广泛应用。但是模拟集成电路式的超声信号发生器仍具有较多问题<sup>[21,22]</sup>,比如温度漂移现象严重,频率精度低,切换频率时的稳定周期较长,动态响应慢等,并且不容易实现其与微处理器协同处理。因此该信号产生技术主要用在频率精度要求较低甚至不需要频率跟踪的场合。

### (3) 数字集成芯片式

随着数字式集成芯片的发展,单片机在嵌入式领域的应用越来越广泛,功能越来越完善。如 STM32 系列单片机已经将可调 PWM 集成到单片机内部。该类芯片一般具有较高的主频,常见的有 72M、180M 以及 400M 等,主频越高单片机的性能越好,价格也越昂贵。该技术通过分频器对高频的时钟信号分频得到预期频率,改善了传统 PWM 芯片不易与控制器协同工作的缺点,此外消除了温度漂移,而且频率切换速度也由几百毫秒级别降低到百纳秒级别,大大提高了信号发生器的性能。但是由于数字分频器的值只能为整数,使得该技术频率分辨率较低,只能在一定频率范围内得到离散频率点,对于 100M 主频的单片机在 30KHz 频率点的精度误差为 $\pm 9\text{Hz}$ 。

### (4) 直接数字频率合成技术

直接数字频率合成技术(Direct Digital Synthesizer)是近几年发展而来的一种重要的数字信号发生技术。与传统的频率发生技术相比,DDS 直接数字频率合成技术成本较高但是具有低功耗、高频率分辨率以及快速频率切换等优点,而且 DDS 技术通过数字合成方式消除了频率的温度漂移,输出频率稳定,在数字化领域得到了广泛的应用。集成了该技术的芯片如 AD9850 等能够方便与各种单片机甚至 PC 进行串联或者并联通信,实现了频率输出的实时控制<sup>[23,24]</sup>。

## 1.2.2 超声波电源频率自动跟踪技术

超声辅助加工过程中,由于加工工况的不稳定性导致超声振动单元的谐振频率发生漂移,为了能够使超声振动系统的稳定工作,必须实时跟踪谐振频率并实时调节输出。因此很多学者纷纷提出了多种频率自动跟踪算法,根据自动控制过程中的反馈信号类型,可以将这些方法划分为两种不同的类型:一种为测量机械振动的声反馈法;另一种为测量电路状态的电反馈法。

(1) 声反馈法根据机械振动测量方法的不同有两种实现方式。第一种是非集成式即通过激光位移传感器测量变幅杆末端振动,然后将测量值实时反馈给超声电源控制系统。第二种是集成式即在超声换能器内部集成两个压电陶瓷片,一个根据压电效应产生超声振动,另一个则根据逆压电效应将机械振动转化为电荷量进而转化为振动幅值。这两种方法都实时地将振动系统的振幅反馈给控制系统,控制系统通过幅值分析可以找到谐振频率,然后调节输出,进而实现自动跟踪<sup>[25]</sup>。该方法能够准确反映刀具振幅变化,适用于各种超声振动系统,是一种理想的反馈方法。但是该方法也存在很大的缺陷,即对于高速旋转的振动单元,其电能来源于电磁感应或者碳刷,而这两种方式都不可避免地对微弱的电荷产生较大影响,使测量结果不准确。而且声反馈法将使反馈系统变得极为复杂且难以实现。

(2) 电反馈法则是利用谐振电路的工作特性,实时对电源输出端的电流电压信号进行采样与分析,计算谐振频率与当前输出频率的关系,进而实时调节频率输出,实现频率自动跟踪。目前超声电源所采用的跟踪方法大多属于电反馈法,常见的主要有:

(a) 桥式差动器跟踪法。该方法需要将原超声振动单元匹配支路接入外接电桥的一个桥臂构成电桥电路,然后利用电桥平衡原理,即两桥臂间电压差为零的原理实现对超声换能器机械振动的提取,而且能够消除整个电桥对原振动信号的影响。当谐振频率发生变化,换能器支路电学状态发生改变,该变化同样可以通过电桥反映到另一电学桥臂中,然后根据振动系统谐振时的特点,分析当前超声振动系统的状态,从而实现频率跟踪的目的。张镜澄<sup>[26]</sup>等人曾对该频率自动跟踪方法的跟踪原理和工作特点进行了研究,并且将其应用到超声清洗和超声雾化电源中。桥式差动器跟踪法电路实现简单,在一定的震动频率范围内,能够有效准确提取机械振动频率,根据电桥原理,抵消了温度漂移的影响,使得测量结果准确偏差较小。但是该方法采用的是模拟电路的思想,虽然能够准确提取超声振动单元的准确频率,但是为了达到电桥平衡需要花费较多的时间,不具有实时性。因此,对于复杂加工过程或者对实时频率跟踪要求较高的场合难以满足应用要求。

(b) 最大电流值搜索法。该方法结合了谐振电路电学特性以及机械谐振的振动特性,利用当超声振动系统在谐振频率下工作时振幅最大,且此时超声换能器匹配支路的等效电路发生谐振,电路中电流值最大的特点,通过检测与分析电流值对频率进行实时调节,实现频率自动跟踪。该方法工作原理简单、电路实现简单,因此得到广泛应用,并得到学者对其进行更加深入地研究。蔡鹤皋<sup>[27]</sup>等人利用单片机等处理芯片对电源输出端电流进行实时检测,通过对电流最大值的搜索,证明了该跟踪方法的有效性,同时描

述了电流双峰值现象并提出解决方法,保证了电源系统能够正确的搜索换能器匹配支路的谐振频率。Tangle<sup>[24]</sup>等人该跟踪算法的基础上,研究了多路输出的超声电源的频率自动跟踪算法,有效地解决了多路输出问题,并研制了多负载超声电源。Chang<sup>[28]</sup>等人则将该最大电流值搜索法应用到 FPGA 芯片中,并研制了用于超声焊接的专用电源,通过优化超声信号的发生机制,大大提高了该跟踪方法的性能。尽管如此,在一些负载变化复杂的超声辅助加工过程中,换能器谐振频率剧烈漂移,导致电流值迅速变化甚至突变,这种情况下如果不进行多次电流检测和误判分析,直接进行频率调节可能导致跟踪失败。因此当电流剧烈变化甚至突变时,需要延时跟踪频率输出,多次检测电流值,这又导致该算法无法满足快速响应的要求,且很可能产生误动作。

(c) 最大功率搜索法。功率搜索法是指对有效功率最大值的搜索,当超声振动系统工作在谐振频率下,其振动幅值最大,此时该支路的有用功最大。因此该方法需要对超声换能器的匹配支路进行电流电压值的实时监测,并分析电流电压的矢量乘积即有用功率的大小。换能器支路的失谐现象越严重,有用功率越小,根据这一现象实时分析有用功率,并实现频率自动跟踪。刘丽华<sup>[29]</sup>等人对最大功率搜索法的具体实现进行了研究并绘制了该控制系统的工作流程框图,实现了基于该跟踪算法的超声电源的研制。Shmuel<sup>[30]</sup>等人研究了负载多变情况下基于最大功率搜索法的频率自动跟踪的实现方法和跟踪效果,并与 CD4046 锁相式跟踪法进行比较,结果表明当超声电源工作功率较小时,锁相法容易失效,无法对微弱电流电压锁相,而最大功率搜索法则可以保证频率自动跟踪的有效进行。该频率自动跟踪方法与最大电流值搜索法的工作原理非常相似,都是利用电学参数检测反映谐振状态并行有效跟踪,但在功率过大时该方法能够有效进行功率限制,功率过小时仍然能够正常工作,具有一定的优势。尽管如此,该方法需要多次乘除运算,当功率突变时仍然需要延时多次检测处理,因此仍然无法满足快速响应的要求。

(d) 最大导纳法。最大导纳法是利用电学谐振电路中导纳值最大时输出有用功最大的原理进行频率自动跟踪。该方法利用信号调制与解调的原理将超声控制信号转换为关于导纳斜率的信号,在通过数学积分控制器得到频率信号,然后将该信号用于频率自动跟踪<sup>[31]</sup>。该方法无需换能器匹配电路,具有较高的输出效率而且消除了匹配电路带来的信号干扰。但是信号调制于解调本身就是一个非常复杂的过程,即便采取高性能单片机处理器也无法实现频率快速响应。

(e) 锁相法。锁相法是利用超声电源输出电路谐振时电压电流信号的相位差为零的特点,使用模拟或者数字的方法对换能器匹配支路中的电压信号以及电流信号进行采样并分析其相位关系,通过分析电流电压信号的超前滞后关系和相位差的大小,计算并



调节电源频率的闭环控制输出,实现频率自动跟踪<sup>[32]</sup>。锁相法的发展早期多数采用模拟电路的方法对电流电压信号进行采样与分析,但是模拟分析法具有较长的稳定时间,外围检测模拟电路比较复杂难以实现频率快速跟踪。随着数字电路以及集成电路的发展,目前已存在各种各样的锁相集成芯片,通过数字技术对电流电压信号进行采样分析。数字分析法相对于模拟分析法具有电路设计原理简单,稳定时间短且稳定性高,能够在一定条件下实现快速频率自动跟踪控制。薛嘉<sup>[33]</sup>等人在 DSP 控制器基础上设计了数字锁相式控制电源电路,实现了超声清洗电源的数字化控制。Bayindir<sup>[34]</sup>等人基于 DSP 控制器采用锁相式控制法研究了在 100KHz 的高频作用下的表面硬化和高频加热装置及其控制系统,该系统能够实现多种负载下不同频率的自动跟踪。锁相法频率跟踪具有稳定性高、响应时间快且具有较高的适应性等特点,是一种重要的频率自动跟踪方法。但是对于负载突变的情况容易出现相位信号的失锁,导致自动跟踪失败。

(f) 复合跟踪法。为了达到超声电源的频率自动跟踪的目的,出现了多种控制方法。近年来随着超声辅助加工技术的发展,对频率跟踪技术的要求更加严格,于是出现了多种跟踪技术相结合的频率跟踪方法,改善了跟踪效果。谢成祥<sup>[35]</sup>等人利用锁相法与最大电流值搜索法的原理将电流电压信号的相位关系与电流信号综合分析,解决了锁相法可能会出现失锁的问题。李小雪<sup>[36]</sup>等人则利用锁相法与相位差信号积分值相结合,实现频率更加快速的自动跟踪。目前很多研究表明将多种跟踪法相结合,能够实现各频率跟踪法的互补,能够满足各种各样的加工工况,已成为后续对频率自动跟踪方法研究的重要方向之一。

### 1.2.3 超声波电源未来发展趋势

随着超声辅助加工技术的发展,超声振动系统得到了越来越广泛的应用,也逐渐深入到除机械加工以外的清洗、雾化等多种领域。尤其在一些精密领域中,对机械振动系统的性能要求越来越高,而超声电源系统作为超声振动系统的核心也得到了越来越多的研究。从近几年的研究态势中可以看出超声电源在未来发展中主要集中在以下几个方面:

(1) 数字化。目前超声电源的控制方式及其工作原理上,模拟电路占主要部分。但随着数字技术的发展以及更多数字功能的提出如远程遥控、无线控制、上位机接入等,势必引起超声电源的数字化。而且数字化电路技术将大大提高超声电源的响应速度及其稳定性。

(2) 智能化。目前各种各样的电子设备都在向智能化方向发展,同样为了简化控制方式、提高人机交互能力、提高适应能力等超声电源必须做到智能化。

(3) 高精度高效化。在具体功能方面, 随着对超声电源的高性能要求的提出如工作频率高、跟踪速度快等, 超声电源必须做到高精度、高效化。

### 1.3 本文研究内容

超声电源技术是超声振动系统中的关键技术, 直接决定着超声辅助加工系统的性能。例如, 超声辅助磨削过程中, 在砂轮切入工件的过程中, 砂轮和工件之间的作用状态持续变化; 同时由于砂轮的持续磨损, 其去除材料的能力不断改变, 这些因素导致超声辅助磨削过程中砂轮和工件之间的接触状态和磨削力的持续变化。众所周知, 砂轮与工件之间接触状态和磨削力的变化会导致超声振动系统谐振频率的改变。因此, 用于超声辅助磨削系统的电源必须具有及其准确和快速的频率跟踪能力。目前常见的超声电源有超声清洗电源、超声焊接电源以及超声医疗电源等, 这些超声电源普遍存在工作频率低、跟踪速度慢等问题, 无法满足超声辅助磨削的加工要求<sup>[37]</sup>。

为了满足各领域对超声电源系统的更高的要求, 本文针对传统超声电源存在的缺陷进行了研究, 主要分为以下几个方面:

(1) 针对目前超声电源工作频率低的问题, 对电源硬件系统进行重新设计。采用高速 MOSFET 全桥替换原有 IGBT 半桥电路, 实现高频信号的逆变; 采用高速处理芯片 STM32F103VET6 作为主控、以 DDS 技术作为高频信号发生模块的超声波电源实现快速频率切换。同时改善反馈回路, 优化驱动电路。

(2) 现有超声电源普遍采用的变步长跟踪方法具有跟踪速度慢、跟踪精度低等问题。本文在复合跟踪原理的技术上, 提出模糊 PID 控制法。该算法能够自适应加工工况, 随工况变化自动调整 PID 参数, 实现频率快速跟踪。

(3) 完成超声电源系统的研制之后, 对该电源系统进行测试, 通过超声辅助磨削 C/SiC 硬脆材料, 验证该超声电源各方面性能。

## 2 超声电源硬件系统研制及其仿真

### 2.1 超声电源系统总体设计

#### 2.1.1 超声电源系统总体设计要求

在超声辅助加工领域中，随着硬脆难加工材料的大量应用，某些对加工质量要求比较高的领域对超声辅助系统也提出了更高的要求，如采用更高的工作频率以改善表面质量，增大电源功率以提高加工效率，加快频率跟踪速度以提高超声辅助系统的稳定性等等。而这些要求仅仅通过软件系统的优化是无法完成的，因此必须对传统超声电源的硬件系统的各个部分进行重新研究与设计以适应更高的技术要求。

#### 2.1.2 超声电源总体设计方案

为了解决传统超声电源所存在的问题，本文基于模块化设计方法对超声电源各功能模块进行重新设计，电源系统如图 2.1 所示。根据超声电源中各电路功能可将其划分为斩波器模块、高频信号发生模块、高频信号逆变模块、匹配电路模块、信号采样模块以及控制模块，各部分模块功能分别为：

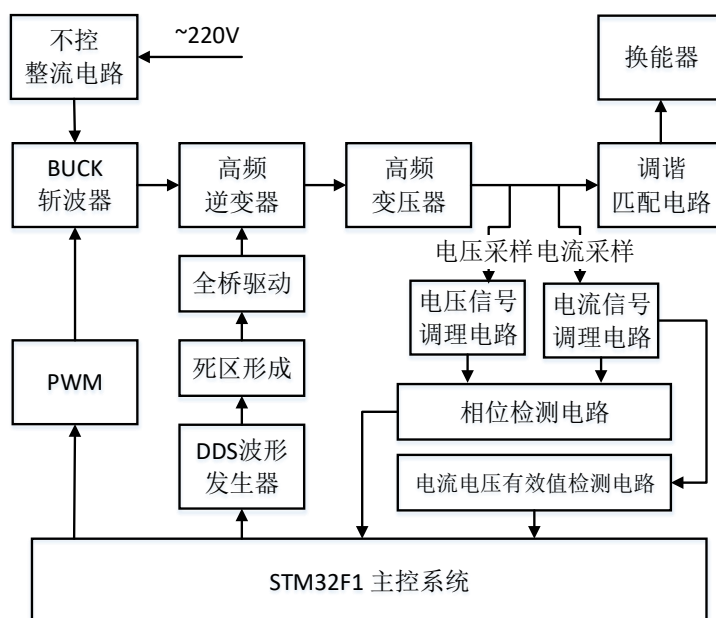


图 2.1 超声电源总体结构

Fig. 2.1 Overall structure of ultrasonic power supply

(1) 斩波器。首先利用全桥或半桥整流电路将 220 V、50 Hz 的交流电转化为 220 V 的直流电，且其大小不可控制。而斩波器可以采用固定频率的方波信号对可控硅进行控制，以 220 V 直流电作为输入，通过调节方波信号的占空比可以得到 220 V 以内的任意电压值。

(2) 信号发生器。使用数字信号产生芯片 AD9850，根据直接数字合成 (DDS) 技术结合 STM32F103 系列控制芯片，通过频率控制字控制方波频率。

(3) 高频逆变器。使用四片 N 型场效应管 MOSFET 构成全桥电路，然后分别使用两片 IR2110 对左右两个桥臂上的 MOSFET 进行驱动，在带死区的驱动信号下完成全桥逆变功能，将斩波器输出的直流电转化为高频交流电输出。

(4) 匹配电路。以超声换能器为核心的振动单元并非纯阻性负载，为了能够使振动单元稳定地工作在谐振频率，同时减小虚功和发热，还需要对其进行调谐匹配。

(5) 信号采样电路。在系统工作过程中，需要对匹配网络支路进行电流电压信号采样，通过对电流电压相位关系、相位差大小以及电流电压有效值的分析，通过闭环反馈控制实现频率自动跟踪。

(6) 控制模块。即以 STM32F103 系列单片机作为控制中心，实现计算分析和控制的功能。

在本章的其余小节中主要以超声波信号的变化为中心对各部分信号变换电路模块、超声电源输出短的信号匹配系统以及超声电源的反馈系统进行详细介绍。

## 2.2 超声电源的信号发生电路设计及其仿真

逆变器模块，亦被称为放大器模块，是超声电源的重要组成部分，该电路模块能够完成高频功率型交流电的产生，对频率的调整也是通过对该电路的控制来实现的。与逆变器相关的桥式驱动电路以及驱动信号的产生电路同样对信号逆变具有非常重要的影响。因此为了保证超声电源的主体回路稳定工作及其良好的工作状态，必须对超声信号相关的各个环节进行设计与分析，主要包括高频逆变器、逆变器的驱动器、DDS 直接数字合成 PWM 信号以及通过 RC 实现的死区电路，下面分别对各部分电路进行设计。

### 2.2.1 高频逆变器

逆变器是一种能够把直流电转变为任意频率控制下的交流电的设备。它主要有由逆变桥路、控制逻辑电路以及滤波电路组成，在信号处理方面还涉及到任意频率信号发生器，死区信号形成电路以及逆变桥路的驱动电路。其中逆变桥路主要有全桥和半桥两种，但其实现方式却多种多样，对于逆变桥路的主体设计不仅要考虑电源输出最大功率和最

高频率的因素,还要结合分析前级驱动电路和后级负载电路的影响。已有较多学者研究了全桥逆变回路与半桥逆变回路的区别<sup>[18]</sup>。对于半桥电路,仅使用两个开关管,电路设计相对简单,但其能量利用率较低,工作功率一般在几百瓦到几千瓦之间,由于缺少的桥臂使用电容代替,整个电路中静电残余较多,可靠性较低。对于全桥电路两个桥臂共使用四个开关管,电路结构相对复杂,输出功率可以从几百瓦到几百千瓦,且稳定性较高。

目前超声电源技术中多采用半桥式 IGBT 开关电路,半桥电路具有电路设计简单,成本低等优点,但半桥电路的电源利用率较低,一般用于中低功率电路中。而 IGBT 属于大功率开关管,同时其工作频率较低,大部分只能工作在 25 KHz 以下,这就限制了传统电源无法在高功高频的条件下工作。本电源设计主要侧重研发高频率高功率以及高稳定性超声电源,经过对比分析与研究两种桥路的特点,本文采用全桥式开关电路作为超声波发生电路,它具有工作电压高,电源利用率高等优点。本文采用 MOSFET 作为开关管,既能满足电源输出功率的要求,又具有高速开关性能,其最高工作频率达 100 KHz。

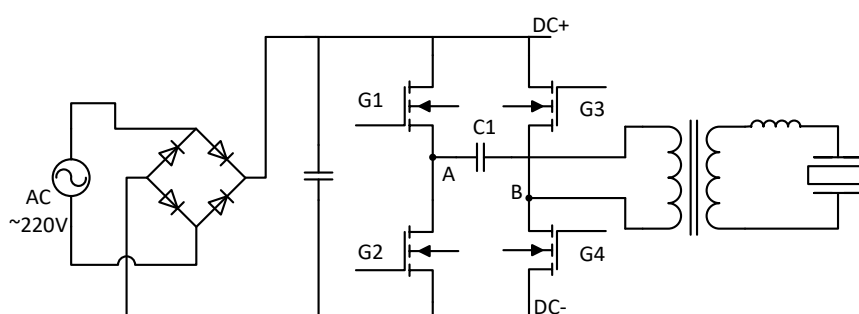


图 2.2 超声电源主回路

Fig. 2.2 Main circuit of ultrasonic power supply

电源主体回路如图 2.2 所示。通过整流滤波之后的直流电,经过该全桥逆变回路得到高频交流电,其工作原理如下: G1, G4 和 G2, G3 在驱动电路的驱动下高频交替导通,当 G1 和 G4 为高电平导通时, G2 和 G3 为低电平截至,此时电流从 A 点经过变压器流向 B 点,当 G1 和 G4 为低电平截至时, G2 和 G3 为高电平导通,此时电流从 B 点经过变压器流向 A 点,从而实现全桥高频逆变功能。本文设计的全桥逆变回路采用 N 型 MOSFET IRF750 作为开关管,交流耦合电容 C1 取 1.5  $\mu$ F / 630 V。

### 2.2.2 IR2110 驱动电路

在全桥逆变电路中使用的功率器件的种类有很多,由于开关管具有压降低,可输出较大功率,因而逐渐成为桥式逆变回路中功率元件的不二选择。但是这种开关管的一个很重要的特点就是外围驱动电路比较复杂,因此对逆变器的驱动设计显得极其重要,驱动电路的性能直接决定了整个逆变桥路的稳定性。

一般对于驱动控制信号,由 DDS 直接数字合成 PWM 或者其他方式产生,其电平格式为 TTL 电平电压为 3.3 V 或者 5 V。而对于功率型器件栅极控制信号则要求 10 V 到 20 V 之间,且该电压为栅极相对于源极而对地浮动,其浮动电压为当输入电压。为了解决以上问题,必须将 TTL 信号进行处理以增强其驱动能力,同时与桥路隔离,防止电源电压对控制回路造成影响甚至烧毁。

于是很多公司推出了各自的驱动芯片,对全桥式高压功率型器件的驱动有很多集成芯片,如 IGBT 专用驱动芯片 EXB840, 这些芯片具有多种电路保护和隔离,超高功率,运行稳定等优点,但工作频率低,集成度不高,只能驱动一个功率管,且价格相对较高。除此之外还有东芝推出的 TK 系列以及摩托罗拉推出的 MPD 系列。传统的超声电源中,多数采用这种驱动芯片,工作频率一般在 30 KHz 以下。为了使超声电源能够在高频率条件下工作,本文选用美国 IR 公司的 IR2110 作为 MOSFET 的全桥驱动。IR2110 系列的集成驱动芯片具有完整的电磁隔离器和光耦隔离电路,具有速度快和体积小的优点。同时具有两路高端、低端输入相互独立,能够同时两路输出对上下桥臂进行驱动。该芯片输入电压为 5 V 到 15 V,而且能够很好的兼容 TTL 和 CMOS 驱动信号,由于其快关速度非常快延时很小,最高工作频率 500 KHz。该芯片耐压值也比较高,最高至 600 V。IR2110 为了保证栅极对源极的相对电压,通过自举电路完成漏极电压自举,而且由于其集成度较高,大大简化了电路设计减少驱动电路的数目,这是该芯片的最大优势<sup>[38]</sup>。正是由于 IR2110 的诸多优点,结合 IR2110 驱动电路的优化,本文设计了基于 IR2110 的驱动电路。如图 2.3 所示。

当 MOSFET 用于大功率场景下,为了保证功率管快速截止,需要采用负压截止的方法。本文通过在上下桥臂的驱动电路中增加电容和稳压二极管的方法<sup>[39]</sup>,获得 4.7 V 负压,保证 MOSFET 工作在大功率的情况下时,能够快速关断,防止电路烧毁。

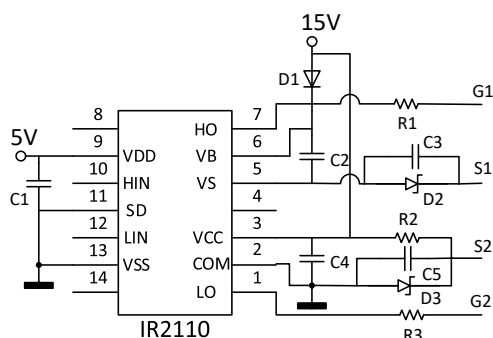


图 2.3 IR2110 驱动电路优化

Fig. 2.3 Driving circuit optimization of IR2110

### 2.2.3 超声波信号发生器

#### (1) 直接频率合成 (DDS) 技术

AD9850 是一个集成度非常高的数字信号发生器件，采用先进的直接数字合成 (DDS) 技术，内置一个高速的数模转换器 (D/A) 和比较器，构成了高速时钟信号发生器和可编程的数字频率合成器。当涉及到一个精确的时钟源，AD9850 产生一个可编程的频谱纯净的频率/相位，输出模拟正弦波。这种正弦波可以直接作为频率源或转换为方波，用于灵活的时钟发生器。AD9850 的创新高速 DDS 内核提供一个 32 位频率控制字，以 125M 的高频晶振作为参考时钟输入，输出频率的调谐分辨率为 0.0291 Hz，AD9850 的电路架构允许最高频率输出为参考输入时钟的一半 (或 62.5 MHz) 而且输出频率异步切换速度每秒多达 2300 万次。该信号发生器还提供五位数字控制相位调制，使其输出的相移增量为 180°、90°、45°、22.5°、11.25° 以及其任意组合。

AD9850 还包含一个可以配置为接受 (外部) 的 DAC 滤波输出的高速比较器，产生低抖动输出方波，可以作为一个灵活的时钟发生器使用。AD9850 的输出可以通过 40 位控制字控制包括频率控制和相位控制。该控制字既可以通过并行的方式加载也可以通过串行方式加载。并行加载情况下需要迭代五次完成每次输入一个字节即 8 位。串行加载是通过一个 40 位串行数据流在一个引脚上完成的。AD9850 的完全 DDS 利用先进的 CMOS 技术实现这一突破性的功能且性能功耗仅 155 mW (3.3V 电源供电)。此外，在工业应用中，其温度范围限制在 -40° C 到 85° C，能够满足大部分应用场景。

AD9850 采用直接数字合成 (DDS) 技术，在数控振荡器的形式，产生频率/相位可灵活控制与快速切换的正弦波。数字正弦波通过内部 10 位高速 D/A 转换器转换成模拟形式，并提供一个板载高速比较器，将模拟正弦波转换成低抖动 TTL 和 CMOS 兼容的

输出方波。DDS 技术采用一种创新的电路结构, 允许在全数字控制下快速精确地处理其输出频率。DDS 在频率输出方面采用非常高的分辨率作为其输出增量; AD9850 在 125 MHz 参考时钟作为输入时, 允许最高频率分辨率 0.291Hz。AD9850 的输出波形改变时, 其相位是连续变化的。

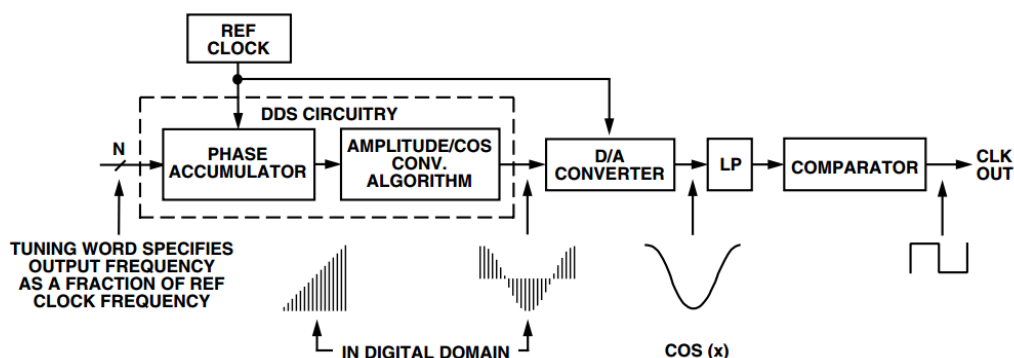


图 2.4 AD9850 功能框图与信号流程图

Fig. 2.4 Function block diagram and signal flow chart of AD9850

当 AD9850 作为信号发生器使用时, 其基本功能框图与信号流图, 如图 2.4 所示。DDS 电路包含一个最基本的数字分频器, 其分辨率的增量是由输入参考时钟频率除以 2 的 N 决定的, 其中 N 为频率控制字的位数。相位累加器是一种可变模数计数器, 它每次接收时钟脉冲时, 都会增加存储在其中的数字。当计数器溢出时, 它就环绕在一起, 使相位累加器的输出连续。频率输出控制字能够改变计数器模量, 有效地确定了被添加到在下一个时钟脉冲的相位累加器的增量值。增加的量越大, 累加器溢出的速度越快, 输出频率就越高。AD9850 采用了具有创新性的专有算法, 将 14 位相位累加器的截断值转化为适当的 COS 值。这种独特的算法使用了一个大大简化了的 ROM 查找表, 并且结合了数字信号处理技术 (DSP) 来执行这个功能, 这有助于 AD9850 的小尺寸和低功耗的实现。输入时钟、频率控制字以及输出频率的关系, 可以通过公式 2.1 描述:

$$f_{out} = (\Delta Phase \times CLKIN) / 2^{32} \quad (2.1)$$

其中,  $\Delta Phase$  为 32 为频率控制字的值;  $CLKIN$  为输入参考时钟频率, 单位为 MHz;  $f_{out}$  为输出信号频率, 单位为 MHz。

DDS 控制模块输出的数字正弦波能够驱动内部高速 10 位 D/A 转换器, 以模拟形式重构正弦波。该 DAC 具有较好的动态性能和抗干扰能量能力, 具体表现为 AD9850 对低抖动的性能优化。由于 AD9850 输出的是采样信号, 其输出光谱遵循奈奎斯特采样定



理。具体来说，其输出光谱包含的基本加锯齿信号，发生在参考时钟频率加减选定的输出频率的倍数的频率点上。用图形表示的带锯齿信号的采样的频谱，如图 2.5 所示。

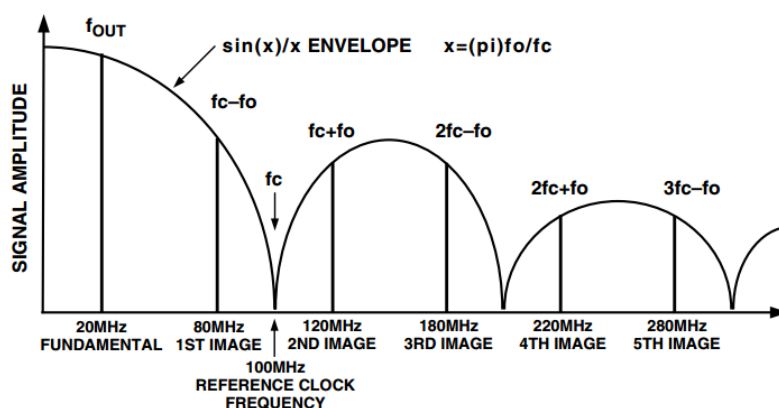


图 2.5 采样信号的输出频谱

Fig. 2.5 Output Spectrum of a Sampled Signal

AD9850 对输入频率参考时钟频率有一个最低限度的要求即 1MHz。该设备具有的 内部电路，能够对频率阈值进行检测，当超过最低时钟频率阈值时，该设备自动感知并 自动处于断电模式。在这种状态下，如果时钟频率再次超过阈值，则设备恢复正常工作。 这种关断模式有效防止了设备动态寄存器中过多的电流泄漏。

## (2) AD9850 数字芯片接口电路及其编程

本文所设计的超声信号发生单元采用 AD9850 数字芯片，利用 DDS 技术进行直接 频率合成，并采用 STM32F103VET6 作为其控制芯片，结合 AD9850 的 SSOP 封装形式 设计接口电路分别如图 2.6 和 2.7 所示。本接口电路的设计实现了 AD9850 与 STM32 F103VET6 的并行通信，即将 AD9850 的平行数据端口 D0~D7 并行接入到 STM32 F103VET6 的 GPIOA 端口的低八位，将 AD9850 的多个时序控制引脚分别接入到单片机 相应时钟信号的端口上。

对 AD9850 频率输出对的控制主要是对芯片内部的一个 40 位寄存器内容的改写， 这 40 位控制字包括 32 位频率控制字，5 位相位控制字和一位断电功能控制字。该寄存 器即可以以并行方式写入，也可以以串行方式加载。

在并行输入模式下，寄存器通过 8 位总线加载，完整的 40 位控制字需要 8 位字的 五次迭代。 $w\_clk$  和  $fq\_ud$  这两个信号分别用于寄存器地址寻址和寄存器内容加载。对 于  $fq\_ud$  信号，其上升沿的到来表示 40 位控制字数据已经完全加载到设备中而且重置 地址指针指向寄存器首地址。随后第一个  $w\_clk$  上升沿到来时，第一个 8 位数据字[7:0]

被加载到寄存器并且将地址指针移动到下一个字节位置。反复五次之后，40 位数据已经全部写入，此时  $w\_clk$  上升沿被忽略直到复位或  $fq\_ud$  上升沿到来，复位地址指针指向寄存器首地址。在串行写入模式下，将 AD9850 的 D7 引脚作为输入引脚，40 位控制字信息将在一系列的  $w\_clk$  信号的上升沿驱动下进行串行写入，并每次移位 1 直至全部输入后  $w\_clk$  信号被忽略。此时需要在  $fq\_ud$  信号端口输出一个脉冲信号，用来更新频率或相位输出。

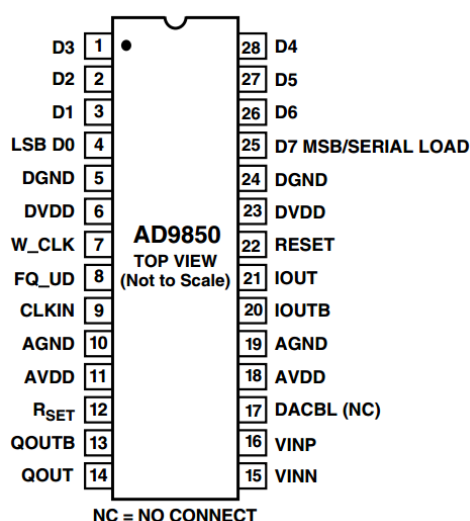


图 2.6 AD9850 的 SSOP 封装形式

Fig. 2.6 SSOP encapsulation of AD9850

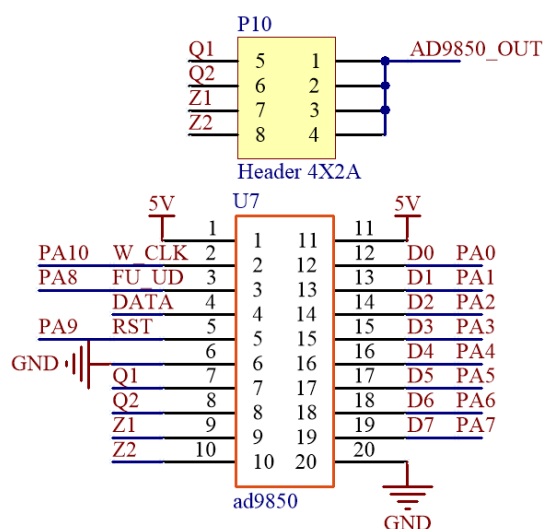


图 2.7 AD9850 接口电路

Fig. 2.7 Interface circuit of AD9850

## 2.2.4 死区形式成电路

在 2.2.1 小节中已经提到，对于全桥抑或半桥逆变桥路中，单侧桥臂中的上下两个开关管直接串联连接在直流电源的两端。因此这两个 MOSFET 开关管绝对不能同时导通。对于 MOSFET 和 IGBT 等功率元件，即便进行信号关断，它也会存在一个延时效应，具体延时时间跟功率大小以及开关管的类型有关。对于本文所选的 MOSFET 开关管其关断时间大约为 400 ns，为了整个电路能够平稳运行，设置死区延时电路，两路具有死区时间的信号分别对上下桥臂的 MOSFET 进行驱动控制，延时时间设置为 1  $\mu$ s。

所谓带死区时间信号是由一路来自信号发生器产生的占空比为 50% 的 PWM 方波信号，经过一个反向比较器，得到两路波形完全相反的信号波形，即当一路信号从高电平转变为低电平时，另一路信号从低电平转换为高电平。所谓死区时间即这两路信号的电平转换之间存在的时间差。如图 2.8 所示。

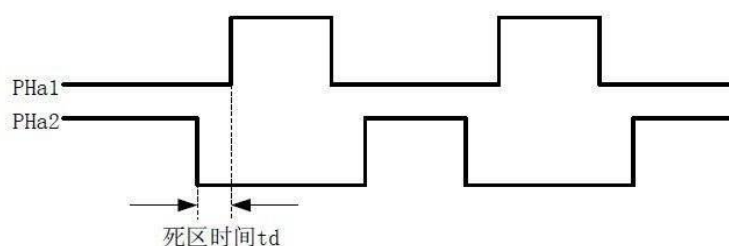


图 2.8 死区信号

Fig. 2.8 Dead zone signal

一路 PWM 输入信号经过死区电路输出两路死区信号,对死区电路的设计多种多样,但其工作原理大同小异。大多是利用 RC 延时电路结合比较器和反相器实现。本文所设计的死区形成电路如图 2.9 所示。该电路工作原理为:当一路 PWM 信号输入,高电平到来时,第一路信号流经上部分电路,利用二极管正向导电给电容 C1 快速充电,因此在 A 点得到高电平;第二路信号流经下部分电路,二极管 D2 反向截止,于是流经电阻 R2,此时 R2 与 C2 形成 RC 延时电路,在 B 点得到一个斜坡上升信号。同理当低电平到来时,在 A 点得到斜坡下降信号,在 B 点得到低电平。信号 A 和 B 经过反相器和比较器后得到了带有死区时间的两路信号 PWM1 和 PWM2。电路中各标记点具体电压变化如图 2.10 所示。这里采用  $R1=R2=10\text{ K}\Omega$ ,  $C1=C2=100\text{ pF}$ 。可计算死区时间为  $T_d = 1.2RC=1.2\text{ us}$ 。

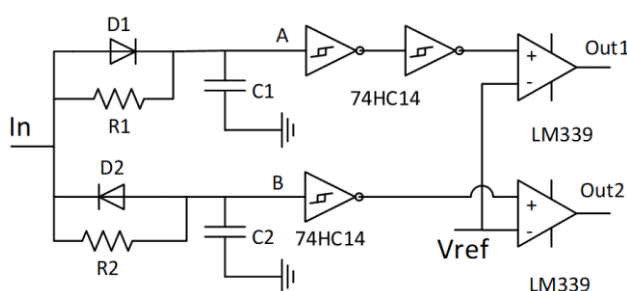


图 2.9 死区电路

Fig. 2.9 Dead zone circuit

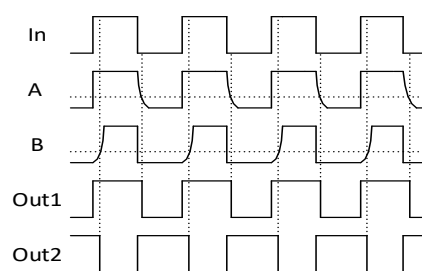


图 2.10 死区电路输出分析

Fig. 2.10 Dead zone circuit output analysis

通过 Multism12.0 电路仿真软件对死区形成电路进行仿真,得到波形图如 2.11 所示,方波频率为 20KHz,为了放大死区时间的视觉效果,这里取电阻阻值为 30K $\Omega$ ,死区时间大约为 4us。

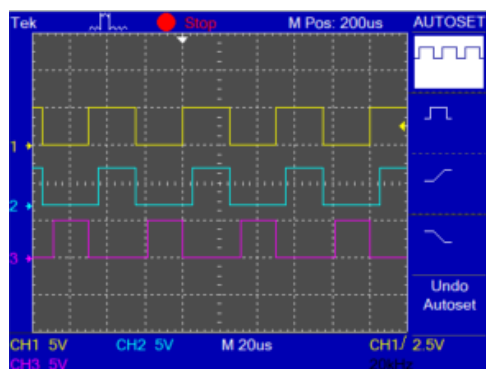


图 2.11 死区电路输出仿真

Fig. 2.11 Dead zone circuit output simulation

## 2.3 超声电源的电路匹配系统

匹配系统主要有两个功能即调谐匹配和阻抗匹配，二者相互影响，密不可分。调谐匹配指根据换能器电学特性选择合适的匹配电路使电源输出的电流电压相位差尽量趋于零，提高功率因数和电源效率。而阻抗匹配指在匹配过程中对电路总阻抗的控制，避免总阻抗过大以保证电源输出功率。对于超声振动单元，良好的匹配系统能够保证良好的振动状态，增加超声电源的稳定性。

### 2.3.1 换能器匹配原理

压电换能器并非纯电阻态，在电学特性上呈现为一种非线性容性负载<sup>[40]</sup>，导致它工作在谐振频率时，电流电压相位差较大，产生较多的虚功，发热严重，电源利用率低。因此必须为换能器支路设计匹配电路。

换能器等效电路如图 2.12 所示，其中  $C_s$  为加持引起的静态电容， $C_d$ 、 $L_d$  和  $R_d$  分别为动态电容、动态电感和动态电阻，它们由换能器动量和负载变化所引起。

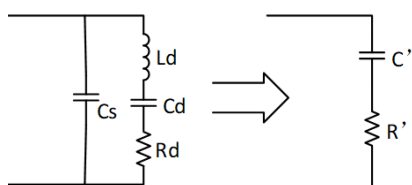


图 2.12 换能器等效电路简化

Fig. 2.12 Transducer equivalent circuit

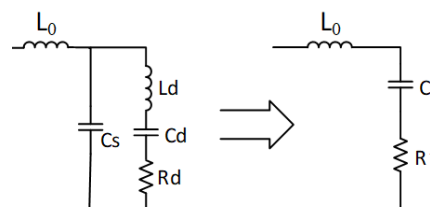


图 2.13 换能器匹配电路

Fig. 2.13 Transducer matching circuit

于是可计算换能器总阻抗：

$$Z = \frac{1}{j\omega C_s + \frac{1}{\frac{1}{j\omega C_d} + j\omega L_d + R_d}} \quad (2.2)$$

$$= \frac{1 - \omega^2 L_d C_d + j\omega R_d C_d}{j\omega(C_s + C_d - \omega^2 L_d C_d C_s) + \omega^2 R_d C_d C_s}$$

当  $\omega = \sqrt{\frac{C_s + C_d}{L_d C_d C_s}}$  时, 换能器支路达到谐振状态, 此时阻抗  $Z = \frac{1}{\omega^2 C_s^2 R_d} + \frac{1}{j\omega C_s}$ 。

其等效电路  $R' = \frac{1}{\omega^2 C_s^2 R_d}$ ,  $C' = C_s$ 。等效电容  $C'$  与静态电容  $C_s$  相等, 等效电阻  $R'$  与动态负载  $R_d$  成反比关系。换能器转化为机械能的功率与负载成正相关关系, 这一特性使得负载剧烈变化时, 超声振动系统仍然能够正常工作。

结合以上分析结果, 为了使换能器更好地工作在谐振状态, 应对换能器支路进行串联电感匹配, 电感量

$$L_0 = \frac{1}{j\omega C_s} \quad (2.3)$$

换能器匹配电路及其等效模型如图 2.13 所示。

### 2.3.2 换能器阻抗测量分析

由上一节分析可知, 超声振动单元的核心部件换能器在电学方面表现为容性, 且匹配电路的设计与换能器的具体电学参数有关。本文采用了由清华大学和中国科学院共同研发的阻抗分析仪对测试所用的换能器进行了阻抗测量分析。该阻抗分析仪能够对压电陶瓷换能器进行电学参数的测量分析, 直观地对换能器参数进行评估。

测量结果如图 2.14 所示, 包括了换能器各项参数。其中  $F_s$  为谐振频率,  $F_p$  为发谐振频率,  $G_{max}$  为导纳的最大值,  $F_1$  和  $F_2$  为半功率点,  $C_0$  为静态电容,  $C_1$ 、 $R_1$  和  $L_1$  分别为动态电容、动态电阻以及动态电感, 除此以外还包括品质因数、介电常数等。

从测量结果中我们可以看出, 该换能器的谐振频率为  $F_s$  为 28372Hz, 静态电容  $C_0$  为 2.16nF, 动态电容、电感和电阻分别为: 0.18nF、171.58mH 和 100.60Ohm。

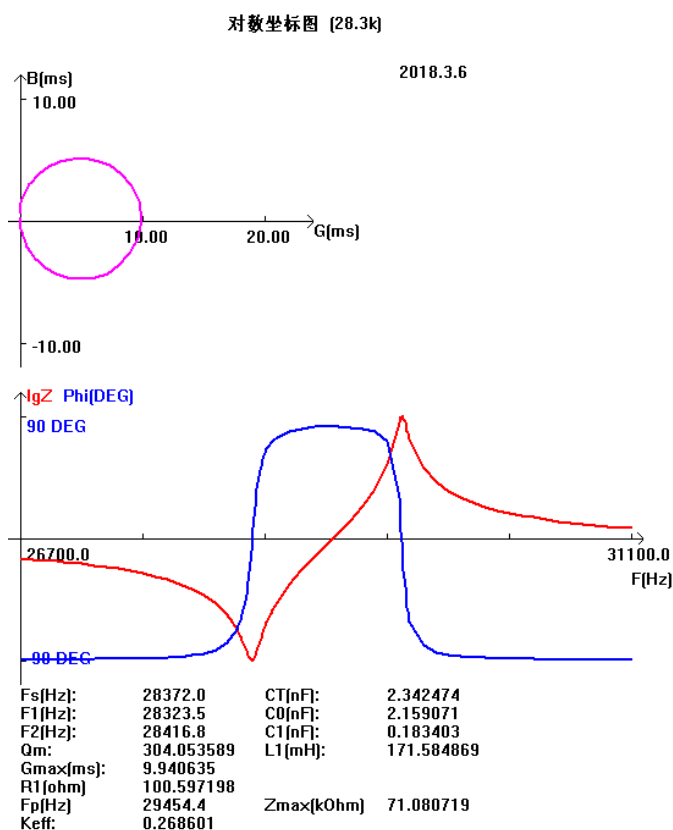


图 2.14 换能器阻抗分析测量结果

Fig. 2.14 Measurement results of transducer impedance analysis

### 2.3.3 匹配电感的设计

根据 2.3.2 的测量结果, 结合公式 (2.3) 可以计算出换能器匹配电路在理论上的应该匹配电感的感抗大小为 1.23mH。这里需要指出, 由于换能器并没有严格的工作在谐振点, 因此动态电感和动态电容的值在谐振点附近会产生比较剧烈的变化, 该变化带来的因素不可忽视, 因此实际匹配的电感值应大于该计算值。

为了得到理想的匹配电路, 本文进行了大量实验测试, 通过多次更换电感值观察超声电源的输出波形及其振动状态。发现当电感值为 2.5mH 到 4mH 之间时, 超声电源工作状态良好。当然针对不同的加工情况以及不同的换能器, 应选择适当的匹配电感值。

## 2.4 反馈系统

超声电源的自动跟踪是长期以来一直困扰着超声加工的技术难题, 超声辅助加工过程中随着刀具的磨损、加工条件的变化等因素, 换能器谐振频率往往发生较大范围的漂移, 漂移的频率非常高而且没有任何规律可循, 从而导致振动系统失谐。为了达到频率

自动跟踪的闭环控制，需要对超声电源的输出状态进行监测与分析，这就需要一个完整的反馈系统。根据本文所设计的自动跟踪算法，需要对电流电压的相位信息和有效值信息进行检测分析，于是分别设计了鉴相电路和有效值检测电路。其中鉴相电路用于频率自动跟踪而有效值检测电路用于振幅恒定控制。

### 2.4.1 采样电路

为了监控超声电源的输出状态，将采样点设置在超声电源的变压器输出回路的换能器串联匹配支路中。高频率的电流电压采样主要有电阻法和互感器法。其中互感器法具有将采样回路与电源电路隔离而且损耗较小的优点，但是互感器将给电路带来额外的电感量引起相位信息偏差，且偏差量呈非线性，不适用于对相位信息具有严格控制的电路中。因此，本文采用电阻法，使用无感精密电阻，通过电阻分压原理，提取电路中的电压电流信息。然后进行相关的信号处理如信号放大、信号滤波等。采样电路图如图 2.15 所示。其中电压采样电阻  $R5$ 、 $R8$  的阻值分别为  $1\text{ M}\Omega$  和  $1.5\text{ K}\Omega$ ，通过分压得到实际电压的  $1.5\%$ 。电流采样电阻为  $0.5\text{ }\Omega$ ，将电流信号以实际电流的一半以电压的形式采集出来。然后分别将电流电压信号经过比例放大器或差分放大器、带通滤波器之后，输出到鉴相电路和有效值检测电路中，分别提取电流电压信号的相位差信息及其有效值信息，信号处理框图如图 2.16 所示。

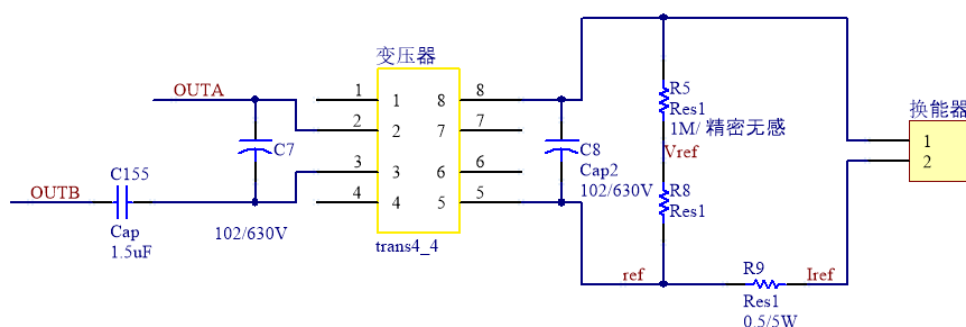


图 2.15 信号采样电路

Fig. 2.15 Signal sampling circuit

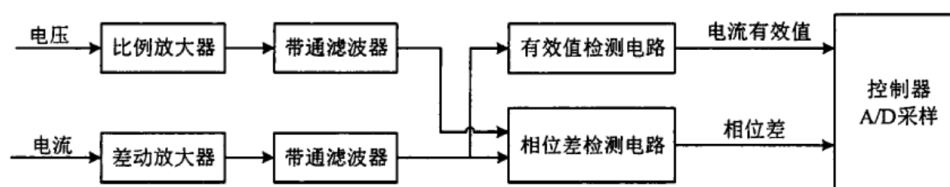


图 2.16 采样信号处理

Fig. 2.16 Sampling signal processing



### 2.4.2 鉴相电路

本文设计的相位检测电路如图 2.17 所示， $V_{in}$  和  $I_{in}$  分别为由换能器支路采集到的电压电流交流信号，其波形近似正弦波，经过电压比较器之后，转化为方波信号。具有超前和滞后关系的两路方波信号经过 D 触发器后，根据 D 触发器的输出即可判断二者相位关系。如 D 触发器输出逻辑电平“1”，说明电压相位超前于电流，如 D 触发器输出逻辑电平“0”，说明电流相位超前于电压。同时将这两路方波信号输入至异或门，异或门将输出具有一定占空比的方波信号，其占空比正比于相位差。

使用 Multism12.0 仿真软件对该电路进行仿真，通道 1 和通道 2 为输入的两路具有相位差的 5V 方波信号分别输入到  $V_{in}$  和  $I_{in}$ ，通道 3 和通道 4 分别为仿真电路的 Dir 和 Ang 端的输出，如图 2.18 所示。由于输入信号  $V_{in}$  超前  $I_{in}$ ，D 触发器 74HC74 输出的鉴相信号为低，代表  $V_{in}$  超前于  $I_{in}$ ，这与实际相符。在 74HC86 的异或门 Ang 输出端，得到两输入信号的异或值，代表二者的相位差信息。然后将 Dir 端和 Ang 端的输出信号输入到 STM32F103VET6 控制器，就可以分析计算电流电压的超前之后关系以及二者相位差大小。

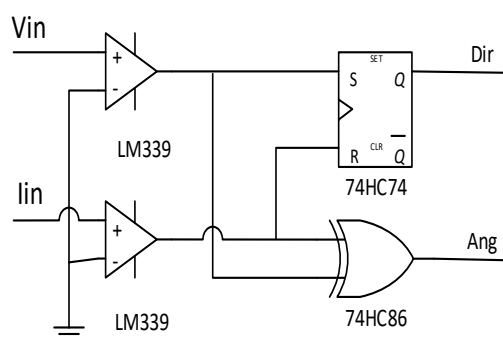


图 2.17 鉴相电路

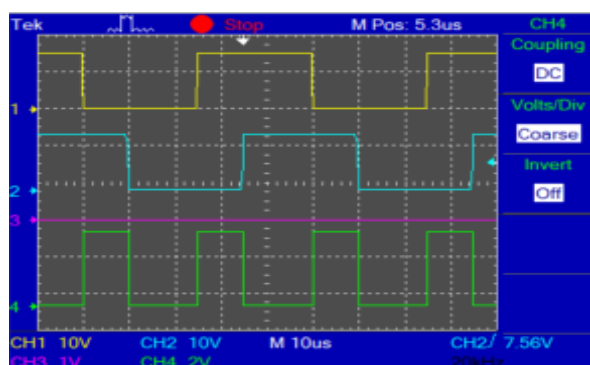


图 2.18 鉴相电路波形仿真

Fig. 2.17 Phase discrimination circuit Fig. 2.18 Waveform simulation

### 2.4.3 有效值采样电路

对于电流有效值检测常用方法有电流互感器法、集成电路法和峰值采样法<sup>[41,42]</sup>。传统超声电源主要采用了前两种方法，二者均属于有效值直接测量法，电路设计简单，无需其他转换计算。但其缺点也非常明显，无法满足动态快速准确测量。电流互感器采用了变压器原理，采用这种方法将会在测量支路引入额外相位差，对电流电压相位差的检测带来影响。而集成电路法一般采用 TI 公司的电流有效值检测芯片，这种方法检测精度高，但是其响应时间较长，不满足高速动态测量要求。本文设计的有效值检测电路，



如图 2.19 所示，在经典峰值采样电路的基础上进行优化，能够实现动态、快速地峰值检测，然后根据有效值与峰值对对应关系，进行电流有效值计算，实现了电流有效值的快速准确测量。

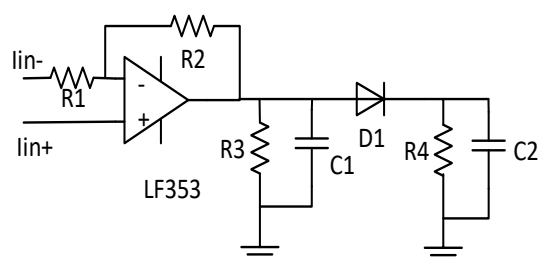


图 2.19 电流有效值检测电路

Fig. 2.19 Current effective value detection

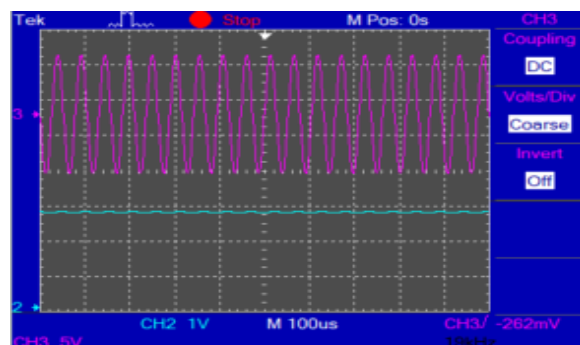


图 2.20 电流有效值波形仿真

Fig. 2.20 Simulation

首先利用 LF353 集成电路放大器对电流信号进行差动式放大，放大倍数为  $(R3/R2+1)$  倍。然后将放大器输出端通过 C1 和 R3 组成的低通滤波器经过低压降二极管对电容 C2 充电，然后将 C2 两端电压输入给 AD 转换器，计算得到放大器输出的实际电压值。以上便构成了经典的峰值检测电路，但峰值检测电路只能够检测峰值，不能对连续变化的电压实时检测，本文在峰值检测技术上增加放电电阻 R4，实现电压值的连续测量，仿真波形如图 2.20 所示。

## 2.5 本章小结

针对基于 STM32 控制器的频率自动跟踪控制以及振幅恒定控制的超声电源的研制，本章提出了超声电源系统的硬件整体设计方案。分别研究了超声电源的总体结构、逆变器模块、匹配系统以及反馈系统。在高频逆变模块中，着重研究了逆变原理、逆变电路的驱动电路的优化以及驱动信号的 DDS 直接信号产生技术及其控制方法；在匹配系统中，研究了匹配电路对超声电源的影响，分析了匹配原理并提出合理的匹配方案；最后针对频率自动控制结合控制系统，研究并设计了适用于本电源的反馈系统。本章中硬件电路的设计结合了强电驱动部分和弱电控制部分以及如何将二者进行隔离，涉及范围比较广。此外每部分电路都有多种设计方案，而这些不同的设计思路将对电源整体产生非常重要的影响，因此需要根据超声电源的具体功能因地制宜。

### 3 超声电源软件系统开发及其实现

本文第二章节已经对超声电源的硬件系统进行了具体的电路设计并对各部分电路功能进行了仿真试验,硬件电路是实现超声电源系统的基础支持。本章所研究的超声电源的软件系统设计,是对超声电源控制思想的具体化,对超声电源工作的性能具有非常重要的意义。在本章的研究中主要针对超声电源频率自动跟踪控制以及振幅恒定控制等问题,提出相应的快速的调节控制方法,与传统超声电源的控制方法相比,本软件设计能够使超声电源更加稳定和高效的工作

#### 3.1 扫频算法设计及其实现

##### 3.1.1 步进扫频方法

对于任一换能器系统,都有一个最佳工作谐振频率点,且每个换能器的谐振频率各不相同,尤其对于不同用途的换能器如用于磨削的换能器系统、用于切削的换能器系统等,其谐振频率点的变化更为剧烈。因此为了能够使同一个超声电源系统可以适用于不同的加工工况以及适应多种换能器系统,超声电源必须能够通过软件查询的方式查找不同的谐振点,增加电源的适应性。为了实现这一功能,传统的超声电源一般采用步进扫频的方式,为了防止步进扫频过程中越过谐振频率点,步进频率一般较小。这也就导致步进扫频的时间较长,该扫频算法的时间复杂度与扫频区间长度呈线性关系,这也是导致目前超声电源开机初始化时间较长的原因。

##### 3.1.2 基于二分法快速扫频方法

为了改善现有超声电源的扫频功能,本文提出了基于二分思想的快速扫频方法。即在一定的扫频区内,通过检测电流电压相位关系判断当前超声电源输出频率与换能器系统的谐振频率的大小关系,然后逐渐将扫频区间减半,最终可以在一定误差范围内得到谐振频率。该算法的时间复杂度与扫频区间长度呈对数关系,大大降低频率扫描时间。该基于二分法快速扫频算法的伪代码如下:

```
While( ( F1 - F2 ) >  $\Delta$  )  
  If ( Dir = 1 )           //电压超前, 输出频率高于谐振频率, 应取下区间  
    F2 = ( F1+F2 ) / 2  
  Else  
    F1 = ( F1+F2 ) / 2  
F0 = ( F1+F2 ) / 2
```

其中 F1 和 F2 分别为扫描频率区间的最小值和最大值，F0 为在误差  $\Delta/2$  允许范围内基于二分法的扫频算法得到的谐振频率，Dir 为反馈信号反映超声电源输出端的电流电压超前滞后关系。

## 3.2 频率自动跟踪算法设计及其实现

基于二分法的频率扫描算法主要工作于超声电源的初始化阶段。当超声电源处于稳定工作阶段时，由于负载的波动，刀具磨损等各个方面原因的影响导致换能器谐振频率发生漂移，换能器工作在非谐振状态下，导致超声复制加工系统发热，振幅大大降低，加工效果与加工质量都会受到影响。因此必须对换能器谐振频率进行跟踪，实时调节电源输出频率。

### 3.2.1 变步长频率自动跟踪算法

目前传统超声电源主要采取的跟踪策略是基于变步长的方法。该方法工作原理简单，控制方法的实现也很容易。即通过反馈系统检测电流电压的超前之后关系以及电流有效值大小，然后根据电流有效值偏离额定值的大小选择合适的频率调节步长。该方法通过增加或减小一定步长的方式改变电源频率输出，虽然实现起来简单，但无法做到准确控制而且需要多次步长调节才能将频率调节到合理范围内，对振幅稳定型要求较高的情况下无法适用。

### 3.2.2 基于模糊 PID 控制器的快速跟踪算法设计及其实现

目前传统超声电源主要采用变步长的跟踪方法，该方法存在跟踪速度慢，跟踪精度低等问题。屈百达<sup>[42]</sup>等提出了基于 PI-DDS 的频率跟踪方法，能够快速频率跟踪，但是单一 PI 参数无法满足多种加工工况。李夏林<sup>[43]</sup>等指出换能器的负载变化时，电流电压相位差对频率的变化率不同。本文基于以上特点提出模糊 PID 控制方法，根据负载变化情况，适当调整 PID 参数，实现了频率快速高精度自动跟踪。图 3.1 和图 3.2 分别是基于模糊 PID 控制器频率跟踪的原理和软件工作流程示意图。基于模糊 PID 控制器的频率跟踪方法能够有效的解决变步长跟踪方法中的跟踪速度慢、跟踪精度低的问题。

#### (1) 模糊 PID 控制器

模拟 PID 控制器的微分方程为：

$$u(t) = K_p [e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (3.1)$$

其中  $K_p$ ， $T_i$ ， $T_D$  分别为比例系数，积分时间和微分时间。

对上式进行离散化，得到数字 PID 控制器，其表达式为：

$$u(k) = K_p e(k) + K_I \sum_{k=0}^n e(k) + K_D [e(k) - e(k-1)] \quad (3.2)$$

其中积分系数  $K_I = K_p * T / T_I$ ，微分系数  $K_D = K_p * T_D / T$ ， $T$  为采样周期。

进一步得到增量式 PID，即

$$\Delta u = u(k) - u(k-1) = (K_p + K_I + K_D)e(k) + (-K_p - 2K_D)e(k-1) + K_D e(k-2) \quad (3.3)$$

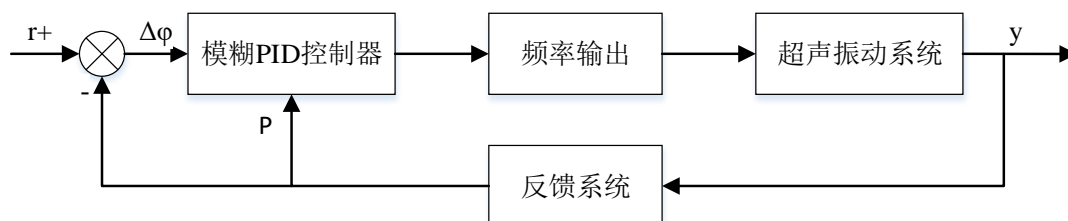


图 3.1 模糊 PID 频率跟踪原理

Fig. 3.1 The principle of fuzzy PID frequency tracking

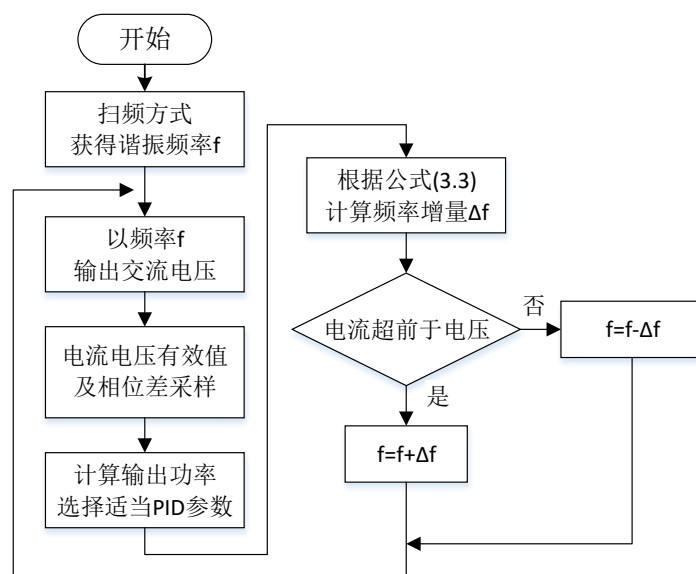


图 3.2 模糊 PID 控制器工作流程

Fig. 3.2 Work flow of fuzzy PID controller

## (2) 模糊控制规则

在对超声换能器振动系统的研究中，模糊控制器的输入参量多数采用的是振幅差及其变化率或最大电流值及其变化率<sup>[42,44]</sup>，此外，还有利用相位差与相位差变化率作为输入量<sup>[43]</sup>。李夏琳等人通过仿真得到相位差变化率与功率大小密切相关，为了更加直观的设计模糊控制规则，本文所设计的模糊控制器分别使用相位差  $E$  和输出功率  $P$  作为输入，

PID 作为输出，其中 E、P 和 PID 都称为模糊变量。通过试验验证分析可得到模糊控制表，如表 3.1 所示。在表中，将相位差从  $-30^\circ$  到  $+30^\circ$  划分为六个区间，分别为 NB、NM、NS、ZE、PS、PM、PB；将功率从 0W 到 500W 划分为五个区间，分别为 ZE、PS、PM、PB、PL 和 PLL。

表 3.1 模糊控制表  
Tab. 3.1 Fuzzy control table

E/P/PID	ZE	PS	PM	PB	PL	PLL
NB	ZE	NM	NB	NL	NLL	NLL
NM	ZE	NS	NM	NB	NL	NLL
NS	ZE	NS	NS	NM	NB	NL
NE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
PS	ZE	PS	PS	PM	PB	PL
PM	ZE	PS	PM	PB	PL	PLL
PB	ZE	PM	PB	PL	PLL	PLL

### (3) 模糊 PID 控制算法仿真

传统超声电源基于变步长的频率跟踪技术，其跟踪速度为频率偏移量与跟踪步长的比值，而跟踪精度与跟踪步长成正比。跟踪步长大则跟踪快，跟踪精度降低；步长小则跟踪精度高，跟踪速度慢。因而无法同时满足跟踪速度与跟踪精度的要求。而基于模糊 PID 控制器的频率自动跟踪方法，则可以自适应调节 PID 参数，频率调节量与频率偏移量成正比，因此能够同时保证跟踪速度与跟踪精度的要求。例如当超声电源输出频率偏离换能器谐振频率 95 Hz，根据传统超声电源采用的变步长跟踪方法，假定三个步长分别为 50 Hz，20 Hz 和 2 Hz，则需要跟踪次数为 5-6 次；采用基于模糊 PID 控制器的频率自动跟踪方法，假定此时 PID 参数分别为  $K_p=0.1$ ， $K_I=1.0$ ， $K_D=0$ ，则根据模糊 PID 控制器工作流程图可计算跟踪次数为 2-3 次，频率自动跟踪速度明显提高，跟踪效果示意图如图 3.3 所示。

相位差与频率差的对应关系与换能器自身特点密切相关，不同的换能器具有不同的对应关系，但同一类换能器的对应关系大体相同。本文在模拟过程中为了简化模拟过程，直接对频率差值进行跟踪而没有通过相位差值。模拟过程中仅使用一组 PID 值就已经达到比较理想的效果，实际工作中通过适应 PID 值可以达到一个更加快速跟踪的效果。

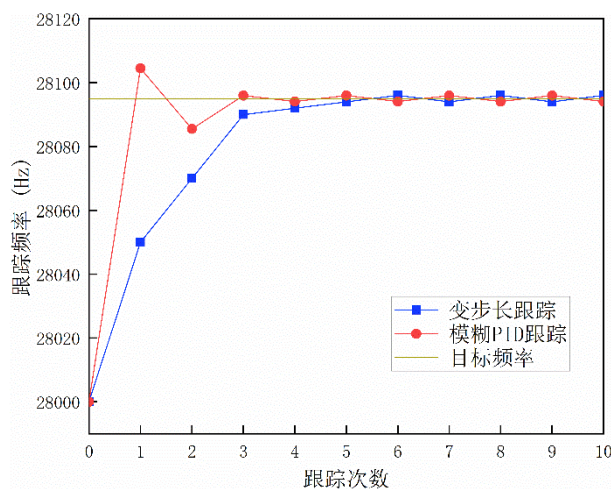


图 3.3 变步长跟踪方法与模糊 PID 跟踪方法的对比示意图

Fig. 3.3 Comparison between variable step tracking method and fuzzy PID tracking method

### 3.3 换能器振幅恒定控制算法设计及其实现

目前换能器振幅恒定控制主要是通过监测换能器回路的电流有效值来实现的，流过换能器的电流值大小反映了换能器振幅幅值大小。因此控制换能器振幅恒定即是控制换能器支路的电流值恒定。为了达到这一目的，主要可以采用两种控制方法，即频率调节法和电压调节法。

#### 3.3.1 频率调节法

频率调节法是指超声电源工作在谐振频率点附近的非谐振频率点上，当加工工况发生变化引起电流值变化时，通过调节频率来调节电流电压相位差大小，进而间接调节电流值。但该方法与本文所设计的超声电源控制系统相违背。因此本文设计了基于电压调节法的振幅恒定控制算法。

#### 3.3.2 电压调节法

振幅恒定控制是在超声电源控制的最后一道控制程序。理论上该控制算法可以在超声电源工作的任意时刻实现调节控制。但是本文为了增加超声电源的稳定性，尽量减少调节次数，将该振幅恒定控制置于最后，即在实现了频率自动跟踪的基础上进行基于电压调节法的振幅恒定控制。如果电压调节过早，则会由于频率跟踪导致电流电压相位变化继而引起换能器支路的电流有效值变化，还需要重新调节电压。其具体实现的伪代码如下：

```

If  CurVal1 / CurVal0 > 1.1 or CurVal1 / CurVal0 < 0.9 //当振幅偏离设定值 10% 以上
    If Ang > 5°
        Do nothing                                //按计划执行频率自动跟踪
    Else
        PWM *= CurVal0 / CurVal1                //通过斩波器，按比例调节电压输出。
    
```

### 3.4 本章小结

本章针对超声电源控制系统的频率扫描控制、频率自动跟踪控制以及振幅恒定控制等分别设计并优化了控制算法。为了提高超声电源系统的适用性和响应速度，本文提出了基于二分法的自动扫频算法，大大节约了超声电源的初始化时间。结合硬件反馈系统得到的电流电压有效值以及其相位差大小，提出了基于模糊 PID 控制器的频率自动跟踪算法，相对于传统的变步长跟踪方法，该算法具有跟踪速度快、精度高等优点。根据电流有效值设计了振幅恒定控制算法，保证超声辅助加工过程中超声振动系统的稳定性。

## 4 超声电源调试与性能测试

超声电源的硬件电路部分的设计与软件部分的优化都需要借助大量的测试调试试验来迭代完成,重复调试、修改、再调试、再修改的迭代过程,一般经过 4 到 5 次的迭代才能达到一个比较好的状态,在调试过程中一旦发现问题或者调试结果不够预期或理论计算值,都需要即使修改相应的硬件电路或者对相应软件部分进行优化。因此在超声电源的研制过程中,调试阶段是不可或缺的重要阶段。本章节将根据超声电源的硬件及软件结构依此对超声电源的各个模块包括斩波器模块、高频逆变电路模块以及频率自动跟踪等反馈系统进行调试,最后在空载和带载换能器的情况下对超声电源输出做整体测试。

### 4.1 超声电源信号发生电路调式

#### 4.1.1 DDS 波形产生调试

本文所研制的超声电源系统的高频驱动信号是利用了 DDS 直接数字合成技术,采用 AD9850 控制芯片,通过对 AD9850 写入控制字的方式来产生 TTL 格式的 PWM 方波。该 PWM 方波是超声电源逆变模块的驱动信号,该驱动信号的产生速度及其切换速度对整个超声电源系统具有非常大的影响。

##### (1) 频率控制字的计算

AD9850 集成芯片可以根据所写入的控制字产生高频率宽带的任意频率方波。如第二章对 DDS 技术的介绍,AD9850 的输出频率完全取决于 40 位控制字。该 40 位控制字与频率的解析关系见公式(2.1)。在 DDS 波形调试过程中,以输出频率 30KHz 为例,根据公式(2.1),可计算得到频率控制字的大小为 1030792,转化为十六进制 0xFBA88,其中时钟输入 CLKIN 为 125M。

##### (2) 频率控制字的写入

AD9850 具有串行和并行两种通讯方式。为了提高写入速度和加快频率的响应速度,这里采用并行通信方式,每次写入一个字节(8 位),先后通过五次迭代将 40 位控制字全部写入。通过 STM32F103VET6 控制器对 AD9850 写入控制字的写入实现频率快速调整。具体实现方法的伪代码如下:

```
CNT = 5
While N > 0
    Data = (Control_Word >> 8*(N-1)) % 256
    W_CLK = 1
```



$W\_CLK = 0$

$CNT = CNT - 1$

$FQ\_UD = 0$

$FQ\_UD = 1$

其中“>>”代表十六进制数按位右移，“%”代表对某整数取余数，CNT 代表迭代次数，Data 代表 AD9850 的数据端口，Control\_Word 代表 40 位控制字，W\_CLK 与 FQ\_UD 代表 AD9850 的时钟控制器。

### (3) PWM 信号输出

经过以上五次迭代过程，实现了 40 位控制字的输入，此时 AD9850 在微妙级的时间范围内迅速响应，产生 30 KHz 的方波。波形如下图 4.1 所示。由于频率控制字的精确值在 1030792 与 1030793 之间，于是可以分别计算两者控制字所对应的输出频率，可以得到频率输出的误差值仅为 0.025 Hz。

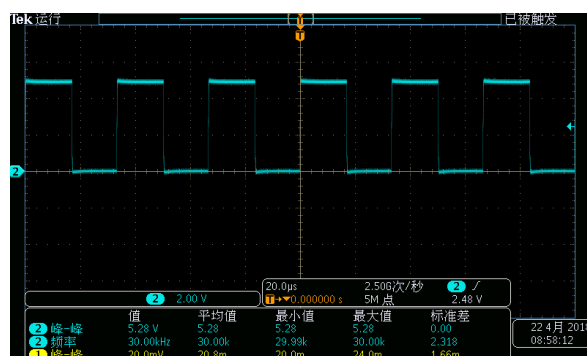


图 4.1 DDS 输出波形调试

Fig. 4.1 Debug of DDS output waveform

## 4.1.2 死区形成电路调试

### (1) 死区电路的设计方案

对于死区电路的设计多种多样，但主要分为两种集成电路是和 RC 组成的延时电路。集成电路如 SG3525 等是一种专用的电流型 PWM 控制器，通过外围电路的配置达到死区控制的目的，又如 STM32 控制器内部集成的 PWM 控制模块可以通过数字编程实现死区控制，这种死区控制方式控制电路复杂，成本较高。本文为了简化设计，采用了 RC 延时电路结合二极管单向导电原理实现死区时间的简单控制，通过调试来优化输出波形。电路原理图如图 4.2 所示。

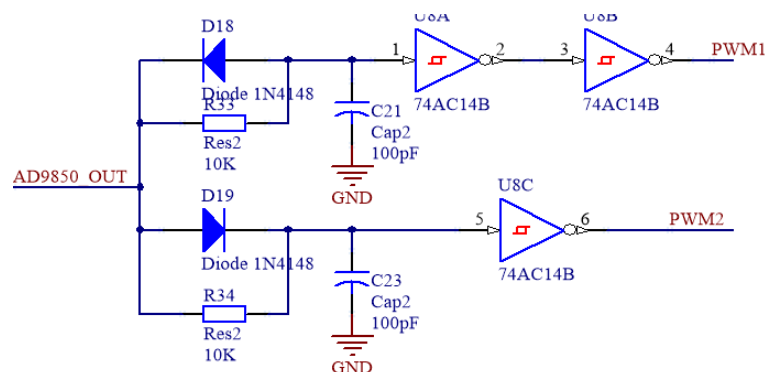


图 4.2 死区电路原理图

Fig. 4.2 Schematic diagram of dead zone circuit

## (2) 死区电路的调试与改进

对于死区时间的控制可以通过电阻 R33、R34 和电容 C21 和 C23 确定。这里选取电阻电容分别为 10 K $\Omega$ 、100 pF，延时时间经过测试约 1.1  $\mu$ s。同时在波形调试过程中发现，其中一路 PWM 输出波形的上升沿会对另一路波形造成毛刺影响，如图 4.3 所示。该尖峰毛刺如果不加处理将导致驱动桥路的误导通，可能发生烧毁整个电源的严重后果。为了解决这一现象在电路的输出端分别并联 100 pF 电容至电源地，利用电容的高通滤波原理将剑峰毛刺滤掉，使输出波形达到理想状态。经过优化后的电路输出波形如图 4.4 所示。

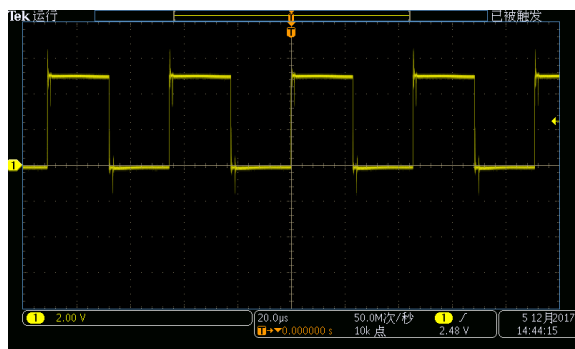


图 4.3 优化前的输出波形（带毛刺）

Fig. 4.3 Pre optimized (with Burr)

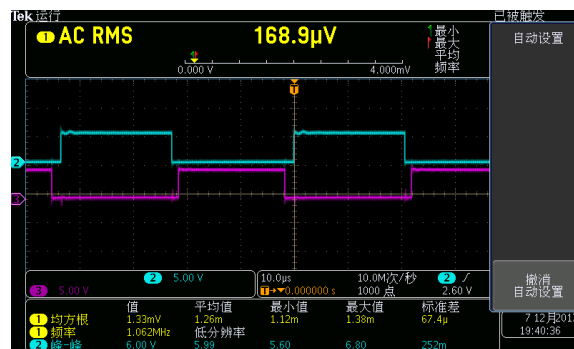


图 4.4 优化后的输出波形

Fig. 4.4 Optimized output waveform

## 4.1.3 IR2110 驱动电路调试

第二章已经对驱动电路进行了相关介绍，近年来随着集成电路的发展，对于桥式电路的驱动集成芯片也越来越多，尤其对于 MOSFET 开关管的驱动，IR2110 芯片具有很多优势，因此在桥式驱动电路中得到了广泛应用。对于功率型开关管由于工作电流较大

并且受到制造工艺的影响,当驱动信号处于截至状态时,开关管并不能够马上关闭,这一现象很可能导致死区时间失效,造成上下桥路同时导通烧毁电源。因此为了增加电路的稳定性,必须对传统 IR2110 驱动电路进行优化,当驱动信号截止时,需要在栅极与源极之间形成负压,迫使开关管快速关闭,电路原理图见 2.3。调试波形如图 4.5 所示,该波形为 IR2110 的低端驱动信号的电压输出波形,该电压将直接作用于某桥臂下半桥臂的开关管上。在测量过程中,所使用探头为 50 倍衰减的电压差分探头。图中在低电平侧出现 4.7V 负压,正是由于在驱动电路中通过增加稳压二极管和放电电容所达到的效果,有效保证了开关管的快速关断,保证超声电源系统的稳定性。

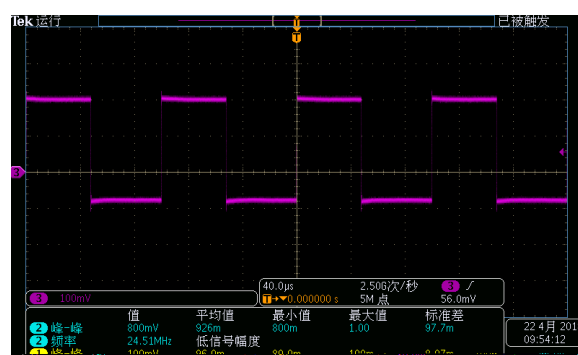


图 4.5 IR2110 输出带负压的驱动信号

Fig. 4.5 Driving signal with negative pressure in IR2110 output

#### 4.1.4 逆变输出波形调试

全桥逆变器的输出波形状态决定了超声电源工作性能的优劣,该模块是超声电源电路的重要组成部分。由于全桥逆变输出电路输出功率较高、频率较高,因此对该模块输出的控制比较复杂,一旦外围电路参数选取不当将造成输出波形的振荡。在对该全桥逆变回路的设计之处,除了一些基本的安全保护电路之外,并没有设置任何波形保护或滤波电路。因此在调试过程中出现了如图 4.6 所示的尖峰电压,在测量过程中由于采用了直流耦合方式,所以只能测量单侧波形即测量结果为输出波形的峰值而非峰峰值。图 4.7 是尖峰电压的局部放大部分,从这两幅波形测量图中,可以直观的看到尖峰电压峰值高达桥路输出有效值的 1 倍左右,随着电源电压的升高,极可能造成该逆变桥路的烧毁。

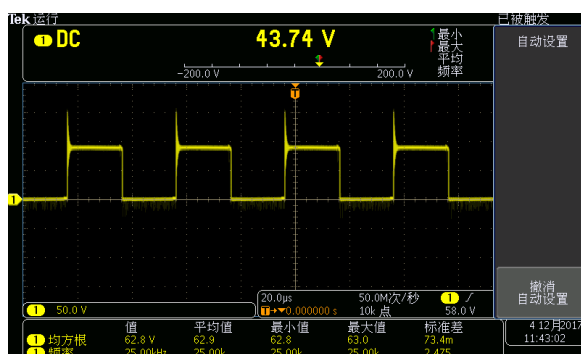


图 4.6 优化前全桥逆变输出（带尖峰电压）

Fig. 4.6 Pre optimized (with peak voltage)

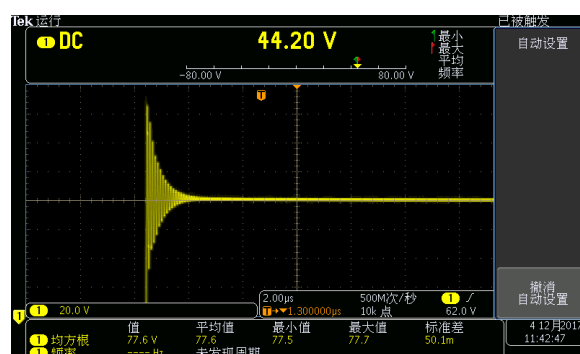


图 4.7 尖峰电压

Fig. 4.7 Peak voltage

尖峰电压是一种浪涌电压即呈现出超高频振荡波形状状态，尖峰电压的持续时间很短，但是尖峰的峰值非常高，可高达有效值的 1~2 倍。对于功率型开关器件，电压过载将造成元器件击穿，可能造成整个电源系统的烧毁甚至更严重的后果，因此必须对这种尖峰电压进行抑制。为了解决以上问题，在对功率型开关型电源设计时，一般都采用并联吸收电路的方法来抑制尖峰峰值。在设计尖峰电压的吸收电路的设计时，一般都会采用以下三种方案：①利用齐纳二极管和超快恢复二极管（SRD）组成齐纳钳位电路；②利用阻容元件和超快恢复二极管组成的 R、C、SRD 软钳位电路；③由阻容元件构成 RC 缓冲吸收电路<sup>[45,46]</sup>。

通过对以上三种吸收电路的对比分析，本文选择第二种方案即 RCD 吸收回路对尖峰电压进行抑制。具体实现原理见图 4.8，其中电阻 R 的参数为 10K/3W，电容 C 的参数为 4.7nF/630V，超快恢复二极管 MUR160。经过对原逆变电路的优化，并重新测量该全桥电路的输出，测量结果如图 4.9 所示，由于所施加直流电压较大约 150V 左右，这里在测量时采用了 500 倍衰减的高压差分探头。可以看到波形完好尖峰电压得到很好的抑制，大大提高了超声电源的输出效果及其稳定性。

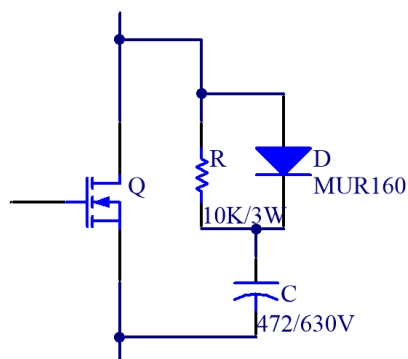


图 4.8 RCD 吸收电路

Fig. 4.8 RCD absorption circuit

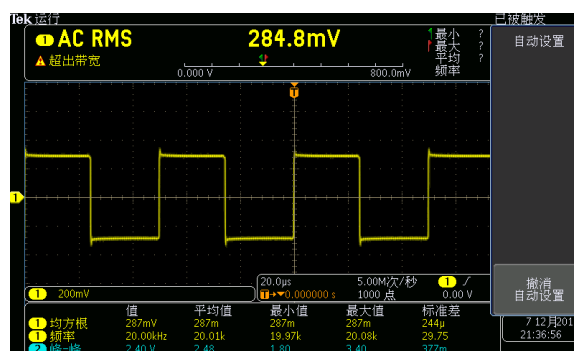


图 4.9 优化后全桥逆变输出

Fig. 4.9 Optimized full bridge inverter output

## 4.2 超声电源负载换能器性能测试

经过对超声电源各个重要功能模块的调试与优化之后，完成了该超声电源的设计与研制，实物图如图 4.10 所示。本节将对该超声电源系统做整体调试，调试内容主要包括两部分：一是对超声电源输出的高频特性进行验证，测试超声电源能否在 40 KHz 以上的高频率条件下正常工作；二是对超声电源跟踪效果进行调试与验证，测试该超声电源系统能否实现频率自动跟踪以及超声电源的稳定性是否满足设计要求。

### 4.2.1 高频特性验证

由于试验条件的限制，没有找到谐振频率在 40 KHz 以上的超声换能器。因此在对超声电源的高频验证实验中，输出端接阻抗为 10 K $\Omega$  纯电阻电路。当电源输出 600 V、40 KHz 的电压波形如图 4.11 所示，波形完整，尖峰电压仅为峰值的 30% 左右，不会对电源稳定性造成影响，电源最大输出频率为 50 KHz。

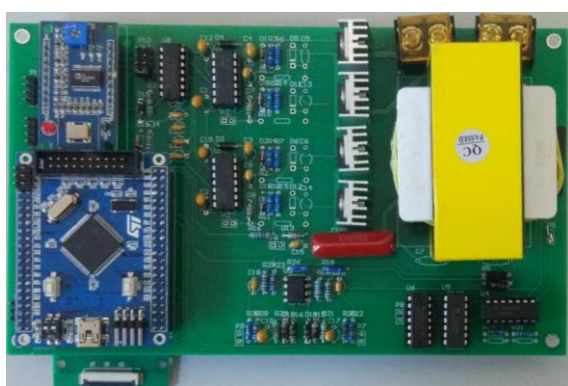


图 4.10 超声电源电路实物图

Fig. 4.10 Ultrasonic power supply

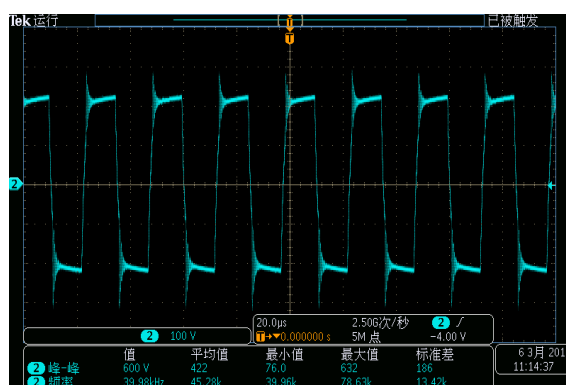


图 4.11 负载为纯电阻电路的频率输出波形

Fig. 4.11 Output with a load as a pure resistance

### 4.2.2 跟踪算法有效性验证

为了验证超声电源运行的稳定性，其输出端接换能器，检测超声电源输出波形。该验证实验所使用的换能器经过阻抗分析仪检测，得到换能器各项参数分别为：谐振频率 28372 Hz，静态电容 2.159 nF，动态电容 0.1834 nF，动态电感 171.58 mH，动态电阻 100.60  $\Omega$ ；换能器匹配电路选择 2.6 mH 进行电感串联匹配，各部分接线图如图 4.12 所示。

换能器稳定工作时，电源输出电流电压波形及其相位差如图 4.13 所示，其中通道 2 和通道 3 分别为电压电流波形，通道 1 为相位差信号。可以看出电源输出频率为 27.62 KHz 时，换能器谐振，工作电压 292 V，电流 2.40 A，相位差信号占空比 2.7%，可计算

得到相位差大小为  $4.86^\circ$ 。该结果不仅验证了电源能够在高频输出下稳定工作，同时验证了本文基于模糊 PID 控制器跟踪算法的有效性。

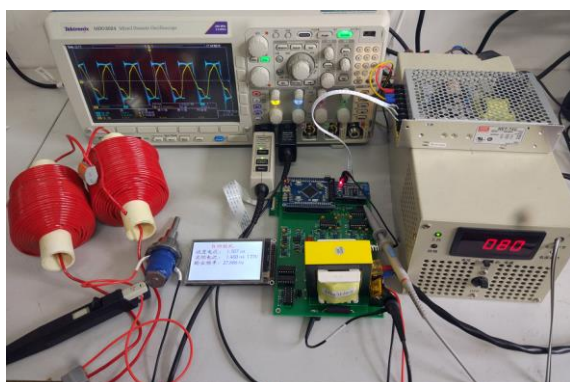


图 4.12 硬件接线图

Fig. 4.12 Hardware wiring diagram

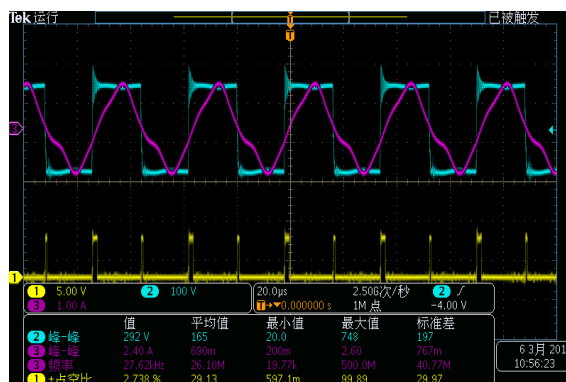


图 4.13 换能器稳定工作时电源输出波形

Fig. 4.13 Steady output waveform

### 4.3 本章小结

对本文所研制的超声电源系统的各个功能模块都进行了全面调试。在调试过程中，不断迭代修正电源系统中存在的硬件或软件问题。经过 5 次电源系统的迭代设计，完成了基于 STM32 的频率自动跟踪振幅恒定的超声电源的研制。最后，在带载情况下，分别在负载为纯电阻电路和换能器匹配电路的情况下，测试了电源的高频输出特性和自动跟踪效果，验证了该超声电源系统能够在高频输出下，实现快速跟踪和稳定工作。



## 5 超声辅助磨削 C/SiC 复合材料磨削力试验

在第四章已经对超声电源的静态工作性能进行了测试包括高频输出特性和快速精准的静态频率跟踪能力。但在超声电源实际工作过程中,负载的变化和刀具的磨损等都会引起谐振点的漂移和振幅的变化,为了能够在这种情况下达到一个良好的工作状态,超声电源必须具有快速响应的动态性能。因此,为了进一步验证超声电源的振幅恒定控制以及运行稳定性等动态性能,本文搭建了超声辅助磨削试验台,采用单因素试验法对 C/SiC 复合材料进行了加工试验研究。在试验过程中,使用示波器实时监测超声电源的运行状态,通过对运行状态的分析,得到超声电源的振幅恒定控制性能和运行稳定性。另外,对比分析了超声辅助加工方法相对于普通加工方法,在切削力上所表现的特点与优势,进一步说明该超声电源的运行效果。

### 5.1 C/SiC 复合材料加工特点

碳纤维增强陶瓷基复合材料 (Carbon fiber reinforced ceramic matrix composites, CFCMC) 具有密度低、强度高、热变形小以及良好的耐热耐腐蚀等诸多优点。C/SiC 材料是一种典型的碳纤维增强的陶瓷基复合材料,常常被用于航空航天领域中的关键零部件的制造。该材料制造而来的零部件能够集耐高温、耐腐蚀和机械支撑作用等多种功能于一体,从而在保证各方面性能要求的情况下实现结构部件的重量大大降低。

尽管 C/SiC 材料在航空航天等领域具有非常重要的用途,但这种材料也是一种非常典型的硬脆难加工材料。由于该材料具有非常高的硬度和耐磨度,材料内部结构不均匀,同时表现出比较大的脆性和各向异性,而且在加工过程中对冷却条件的要求比较严格,使得该材料的加工变得异常困难,在对该材料的加工过程中常常存在非常高的刀具磨损,使得刀具寿命大大缩短,加工成本翻倍,同时加工表面容易引起崩边现象,而且多数情况下都会造成加工表面和亚表面的损伤。因此在某些需要大量应用 C/SiC 材料的重要领域,必须解决该硬脆材料难加工的问题。目前对于这种材料的加工主要采用超声辅助磨削的加工方法,它能够有效地降低切削力,改善加工质量。该 C/SiC 材料使用超声加工方法可有效改善普通加工方法所具有的种种问题,是一种典型的超声加工材料。这也是本文选取该材料作为试验研究分析的原因。

## 5.2 超声辅助磨削试验台搭建

为了验证本文所设计超声电源运行的稳定性和对比超声辅助加工与普通加工的切削力大小,本文对 C/SiC 材料进行了加工试验。首先搭建了超声辅助磨削试验台,使用了三轴数控铣床作为加工机床,然后将超声电源系统和超声振动单元集成到该机床主轴上,实现刀具沿机床主轴方向上的高频微振动,本文所搭建试验台的原理图如图 5.1 所示。其中超声电源放置在机床外部,输出端直接连接到机床主轴上的固定线圈上,通过无线电能传输方式将能量输送给换能器。然后通过变幅杆结构将振幅放大,最后传递到刀具上。在加工试验过程中,通过示波器实际监测超声电源的输出状态,通过压电测力仪实时监测三个坐标方向上的磨削力。超声电源的控制系统并没有与机床的控制系统相集成,二者相互独立,控制方式也存在很多不同之处。试验台具体搭建方式如图 5.2 所示。该机床属于立式数控铣床,可以实现 XYZ 三轴的联合运动,机床的主要技术参数如表 5.1 所示。

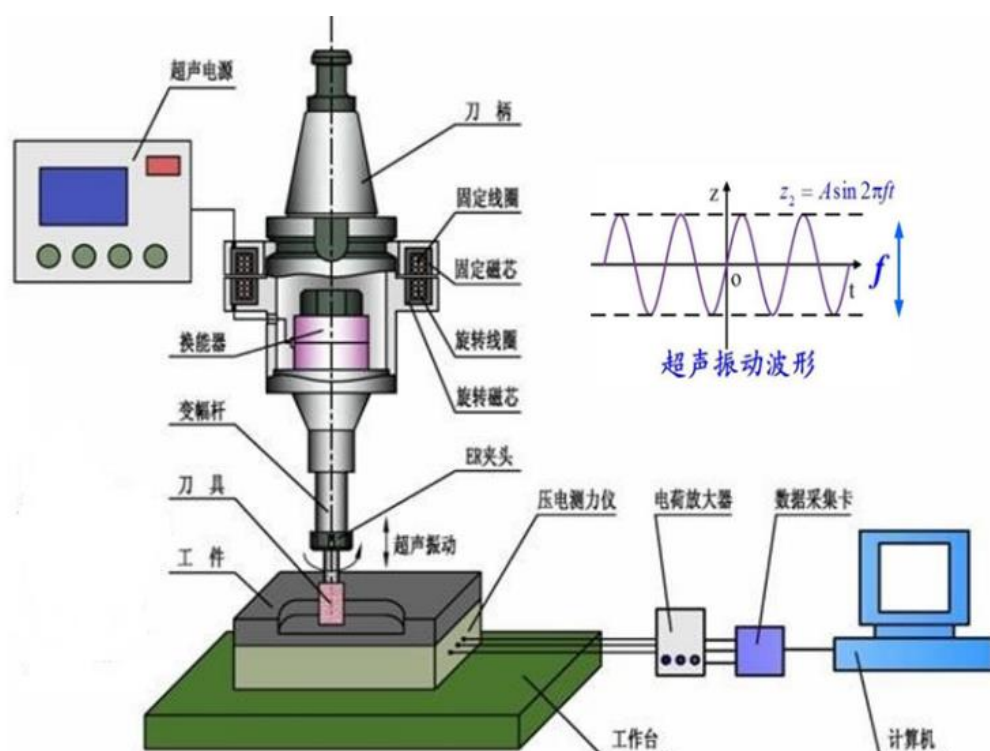


图 5.1 超声辅助磨削试验台原理图

Fig. 5.1 Schematic diagram of ultrasonic auxiliary grinding test rig



表 5.1 数控机床主要技术参数

Tab. 5.1 Main technical parameters of CNC machine tools

项目	单位	参数
X\Y\Z 轴行程	mm	600×700×350
工作台尺寸(长×宽)	mm	600×800
工作台最大载荷	kg	400
主轴功率	KW	5.5
主轴转速	rpm	18000
主轴弹簧夹头	ER	40
最大夹刀直径	mm	25
最大空载进给	m/min	12
最大切削进给	m/min	8
定位精度	mm	±0.003
重复定位精度	mm	±0.002
润滑系统		自动润滑

加工试验过程中,所采用的刀柄为内置超声换能器刀柄,所用刀具为超声专用砂轮,电镀金刚石。将砂轮固定到刀柄上之后,开启超声电源系统,通过示波器实时检测换能器支路的电流,间接的反映出刀具振幅大小及其稳定性。在开始加工试验之前,使用激光位移传感器测量砂轮断面振幅大小,将电源控制方式切换为手动控制,不断调整超声电源的初始化参数,直至振幅达到加工要求,然后将电源控制方式切换为自动控制。将被加工工件固定到测力仪上,通过测力仪实时监测加工过程中的切削力变化。

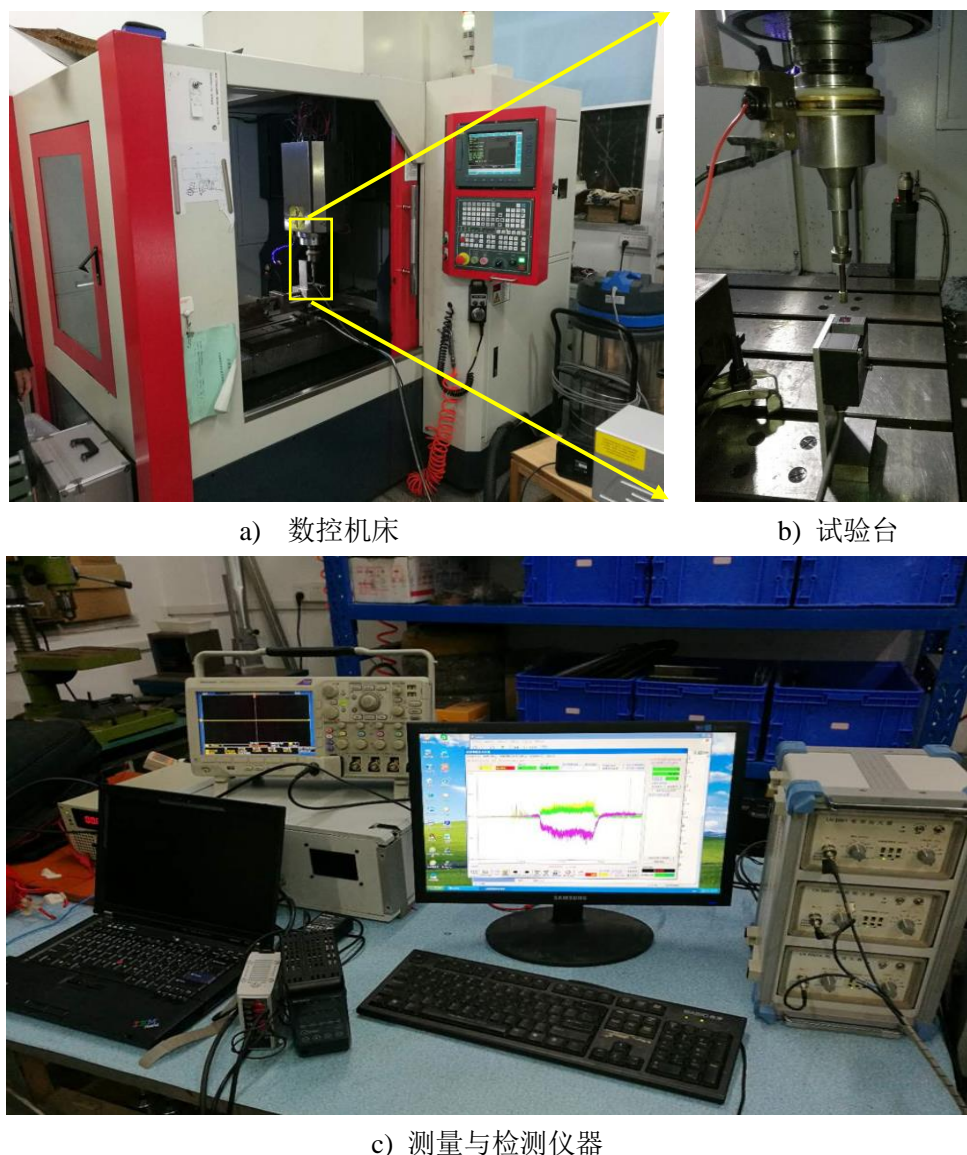


图 5.2 超声辅助磨削试验台搭建

Fig. 5.2 Construction of ultrasonic auxiliary grinding test bench

### 5.3 超声辅助磨削试验结果及分析

在加工试验过程中，由于需要对比超声辅助加工和普通加工中磨削力的变化，因此需要不断的对加工状态进行切换，这里可以通过是否打开超声电源的方式来实现。当超声电源启动时，这意味着超声振动系统已经将振动附加到砂轮端面上，砂轮除了具有高速的回转运动与主轴进给运动之外，还具有沿主轴方向上的高频振动；当超声电源关闭时为普通加工，砂轮不具有沿主轴方向的振动。超声辅助磨削的加工原理示意图如图 5.3

所示。加工过程中需要对 XYZ 三个方向上的磨削力进行测量，即沿圆周方向的周向力  $F_x$ 、沿进给方向的进给力  $F_y$  以及沿主轴方向的轴向力  $F_z$ 。本加工试验分别使用单因素法研究了磨削深度、主轴转速和进给速度对切削力的影响，同时对比分析有无超声振动情况下的切削力关系。试验过程中每个加工参数重复三次试验，各项切削力取平均值。另外由于测力仪的采样频率较低，远低于超声振动频率，因此三个方向的力都只能表示一段时间内的平均值。

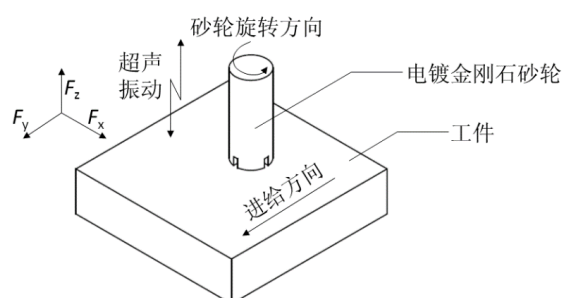


图 5.3 超声辅助磨削加工原理图

Fig. 5.3 Principle diagram of ultrasonic assisted grinding

### 5.3.1 超声电源振幅恒定验证

为了验证超声电源在实际加工过程中具有稳定的振幅恒定控制性能和长时间稳定工作等良好的动态性能，在加工试验中，对超声电源的工作状态进行了示波器实时监测，并记录了一段时间内超声电源电流输出的辅助变化情况，如图 5.4 所示。从图中可以看出，超声电源输出的电流在 4s 时间范围内非常稳定，很好的实现了超声电源输出振幅的恒定控制，保证了刀具振动情况的稳定性，这对提高超声辅助加工的加工质量具有非常重要的意义。另外在加工试验过程中，超声电源没有出现跟踪失效、振幅大幅度波动等现象，再一次证明了该超声电源在实际工作过程中的动态响应性能和运行的稳定性都能够满足超声电源的设计要求和实际的加工要求。

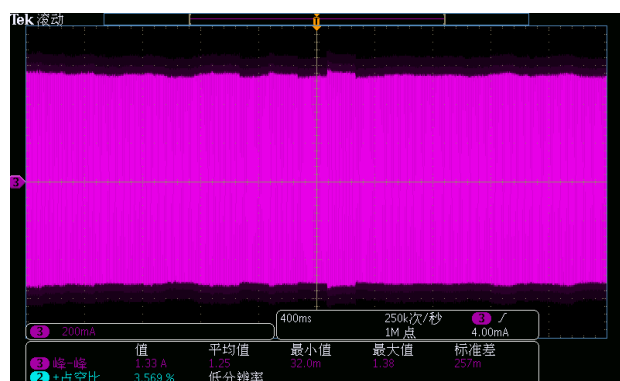


图 5.4 超声电源输出电流监测

Fig. 5.4 Monitoring of output current of ultrasonic power supply

### 5.3.2 磨削深度对磨削力影响

在探究磨削深度对切削力的影响试验中，需要保证主轴转速和进给速度不变，分别给定值为  $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  和  $200 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ，而磨削深度参数设计为从  $0.1 \text{ mm}$  增加到  $0.4 \text{ mm}$ ，如表 5.1 所示。

表 5.1 磨削深度试验加工工艺参数

Tab. 5.2 Processing parameters of grinding depth test

工具粒度	主轴转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	进给速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	磨削深度/ $\text{mm}$	超声振幅/ $\mu\text{m}$
80#	3000	200	0.1	10
80#	3000	200	0.2	10
80#	3000	200	0.3	10
80#	3000	200	0.4	10

根据试验测量结果，分别绘制磨削深度与进给力、磨削深度与轴向力的关系，如图 5.5、图 5.6 所示。从图中我们可以得到两个明显的变化规律，一进给力和轴向力都会随着磨削深度的增大而增大，在一定范围内呈线性增长关系；二相对于普通加工超声辅助加工能够大大降低磨削力，在同一加工参数下超声辅助加工可以减小进给力 47%~76%，减小轴向力 49%~65%。

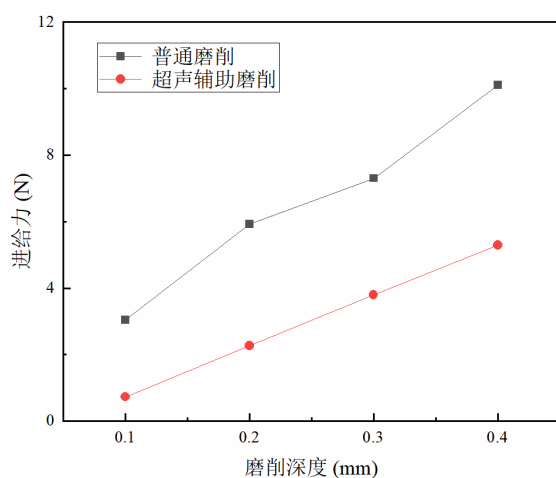


图 5.5 磨削深度与进给力关系

Fig. 5.5 Grinding depth and feed force

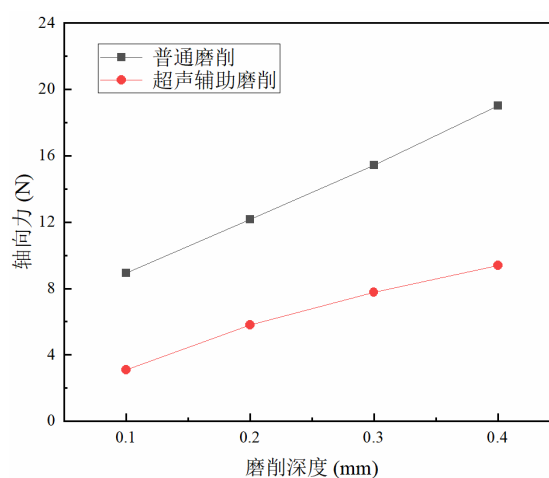


图 5.6 磨削深度与轴向力关系

Fig. 5.6 Grinding depth and axial force

在超声辅助磨削过程中,砂轮在超声振动单元的驱动下附加有高频振动,砂轮端面的磨粒的运动速度是高速回转运动和高频振动的复合,使得磨粒运动速度加快,增加砂轮的材料去除能力,同时引入的高频微撞击使得被加工工件表面产生微小破裂,改变了传统磨削加工机理,材料由连续去除转变为间歇式去除,使得磨削力平均值大大降低。在磨削力参数逐渐增加的过程中,实际参与磨削过程的砂轮部分从只有下端面部分转变为下断面与圆周面共同作用,且圆周面参与加工的面积与切削深度成正比,实际参与磨削过程的砂轮面积逐渐增大,所以两种加工方式下随着磨削深度增加轴向力增长速度基本相同。

### 5.3.3 进给速度对磨削力影响

一般在加工过程中为了提高加工效率,都会采用增大进给速度的方法。因此这里对比了超声辅助加工和普通加工两种加工方法中进给速度对进给力和轴向力的影响关系。在主轴转速为  $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$  和切削深度  $0.2 \text{ mm}$  保持不变的情况下,进给速度分别设置为  $100/200/300/400 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。具体加工参数见表 5.3。

根据试验测量结果分别绘制进给速度与进给力、进给速度与轴向力的关系,如图 5.7 和图 5.8 所示。在两种加工情况下,轴向力都会随着进给速度的增加而增加,二者影响关系近似线性,其中超声辅助加工方式比普通加工方式的轴向力小  $18\% \sim 37\%$ 。但是进给力会随着进给速度的增加先减小后增加,在进给速度为  $200 \text{ mm/min}$  时的进给力最小,这与 C/SiC 材料本身特性相关,其中超声加工方式比普通加工方式小  $50\% \sim 55\%$ 。由此

可见，超声辅助加工方式在 C/SiC 材料的加工上具有明显的优势，而且在保证相同的加工效果的前提下，能够大大提高加工效率。

表 5.2 进给速度试验加工工艺参数

Tab. 5.3 Processing parameters of feed speed test

工具粒度	主轴转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	进给速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	磨削深度/ $\text{mm}$	超声振幅/ $\mu\text{m}$
80#	3000	100	0.2	10
80#	3000	200	0.2	10
80#	3000	300	0.2	10
80#	3000	400	0.2	10

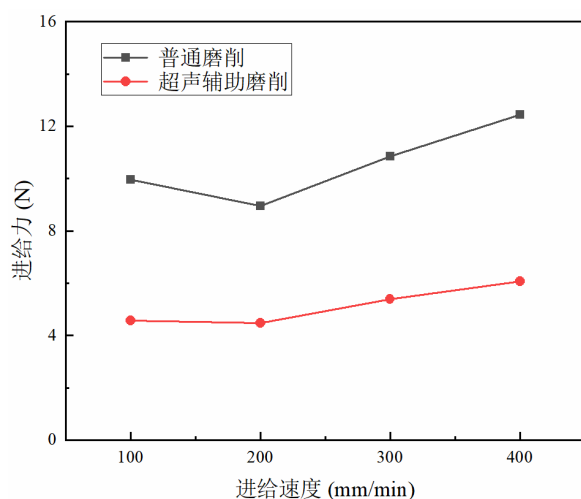


图 5.7 进给速度与进给力关系

Fig. 5.7 Feed speed and feed force

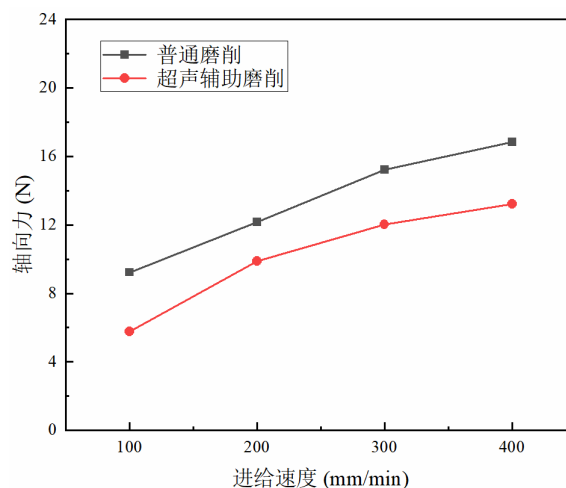


图 5.8 进给速度与轴向力关系

Fig. 5.8 Feed speed and axial force

#### 5.3.4 主轴转速对磨削力影响

对比研究超声辅助加工和普通加工方式中主轴转速对进给力和轴向力的影响，在进给速度 200mm/min 和切削深度 0.2mm 保持不变的情况下，主轴转速分别设置为 2000/3000/4000/5000 r/min，具体加工参数见表 5.4。

表 5.3 主轴转速试验加工工艺参数

Tab. 5.4 Experimental processing parameters of spindle speed test

工具粒度	主轴转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	进给速度/ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$	磨削深度/ $\text{mm}$	超声振幅/ $\mu\text{m}$
80#	2000	200	0.2	10
80#	3000	200	0.2	10
80#	4000	200	0.2	10
80#	5000	200	0.2	10

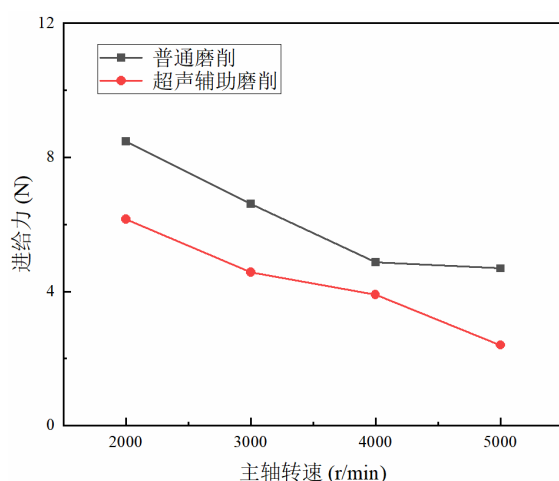


图 5.9 主轴转速与进给力关系

Fig. 5.9 Spindle speed and feed force

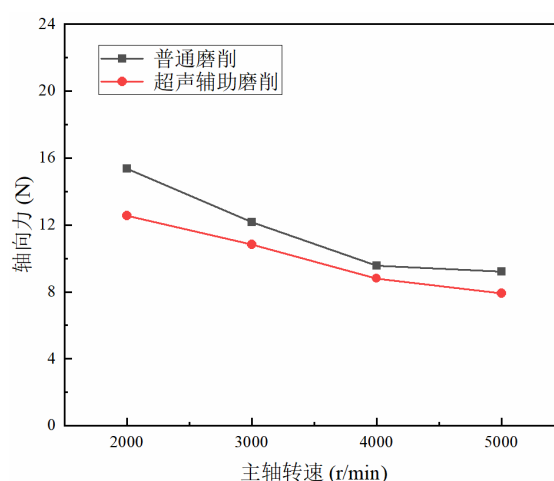


图 5.10 主轴转速与轴向力关系

Fig. 5.10 Spindle speed and axial force

根据试验测量结果,分别绘制主轴转速与进给力、主轴转速与轴向力的关系,如图 5.9 和图 5.10 所示。在两种加工情况下,轴向力和进给力都会随着主轴转速的增加呈现出比较明显的减小现象且影响关系近似线性,相对于普通加工,超声辅助加工中轴向力减小 7%~18%,进给力减小 19%~48%。主轴转速的提高增加了单位时间内参与磨削过程的磨粒数量,减小了单个磨粒的切削厚度,增强了材料去除能力和加工过程中磨削力的稳定性,因此磨削力减小。而且附加超声振动之后,增加了磨粒实际运动速度,引入微机械撞击作用,使得磨削力进一步降低。

## 5.4 本章小结

本章采用单因素实验法对 C/SiC 硬脆复合材料进行了超声辅助磨削试验,搭建了超声辅助磨削试验台,在加工过程中,实时监测超声电源的工作状态并实时记录加工过程中磨削力的变化。通过对超声运行状态的分析,验证了超声电源在实际工作过程中,能

够有效地进行频率自动跟踪控制并保证超声电源输出的振幅恒定，并且具有较高的稳定性和快速的动态响应性能。此外，使用单因素实验法分析了切削深度、进给速度以及主轴转速对磨削力的影响，同时对比分析了超声辅助加工与普通加工方法在切削力上的差异，结果表明超声复合加工方法能够有效降低各个方向上的切削力，进一步说明了本文所设计的超声电源的运行效果良好。



## 结 论

本文对超声电源的各个功能模块进行了分析和优化设计,在硬件电路部分包括超声信号发生模块、全桥逆变及其驱动模块、换能器调谐匹配电路模块等,软件部分包括快速扫频算法、频率输出的自动跟踪算法以及振幅恒定控制策略等,并基于 STM32F103 系列控制芯片完成了频率自动跟踪振幅恒定的超声电源的研制。对于超声信号发生模块本文综合对比了多种信号产生方法,最终采用 AD9850 芯片利用 DDS 直接数字合成技术,通过改写控制字,不仅能够快速改变超声电源的频率输出,而且具有极高的输出精度,本文给出了具体控制方法和流程。高频逆变电路是超声电源的关键模块,该电路将直流功率电源逆变为所需频率下的交流电源以驱动超声振动单元,本文逆变器采用 MOSFET 全桥电路,该电路具有高频特性好、电源利用率高等优点。本文基于该全桥电路设计,优化了 IR2110 驱动电路,使其输出带有 4.7V 负压信号,保证开关管的快速关断。由于换能器元件在电学特性上呈现容性,为了提高超声电源系统的工作效率,需要对换能器支路做调谐匹配。使用阻抗分析仪对换能器系统进行测量,并通过理论分析和计算得到匹配电路的形式和匹配电感的感抗。此外为了完成超声电源的频率自动跟踪等控制,本文设计并优化了电流电压的反馈电路,反馈信息包括电流电压有效值及其相位关系。在超声电源自动控制方面,本文设计了相应的软件控制算法,一是基于二分思想的快速扫频算法,该算法可以在超声电源系统的启动阶段快速找到换能器的谐振频率,加快系统初始化速度;二是频率输出的自动跟踪算法,该算法基于模糊 PID 理论,分别以电源输出功率和电流电压相位差作为输入,自适应 PID 参数,当换能器谐振频率发生漂移时,能够实现频率输出的快速跟踪;三是振幅恒定控制算法,该算法在频率自动跟踪的基础上,通过斩波器实现对超声电源供电电压的调节,从而达到换能器振幅恒定控制的目的。

本文先后搭建了测试系统和试验平台对该超声电源进行调试和检验。在测试阶段分别调试了超声电源硬件电路的各个模块输出,并通过多次迭代和优化,完成超声电源系统的研制,同时验证了该超声电源能够很好的满足 20-50KHz 高频输出特性及频率快速自动跟踪的要求。最后通过超声辅助磨削 C/SiC 复合材料磨削力试验,验证了本文所设计超声电源的运行稳定性,并且对比分析了有无超声辅助系统两种情况下磨削力大小。试验表明相对于普通磨削,超声辅助磨削具显著的优势如有效降低磨削力、延长刀具寿命等。

由于超声电源系统所涉及的领域较宽，包括机械加工技术、电力电子技术、自动控制工程、嵌入式设计等，而且研究时间有限，所以在超声电源的软硬件设计中必然存在一些有待进一步优化的地方。比如：

1. 对模糊 PID 控制器的进一步优化。结合不同种类换能器的频率相位差对关系，进一步优化模糊控制规则表中的各项参数，甚至提出新的模糊控制规则表输入参数，以提高超声电源系统的适应性。

2. 将超声电源系统与数控机床集成。本文所设计的超声电源系统没有以 380V 工业交流电作为接口，此外一定程度上依赖模拟量输入，如换能器匹配系统。为了提高超声电源系统与数控机床的兼容性，应该将超声电源完全数字化。

## 参 考 文 献

- [1]Darder M, Aranda P, Ruiz-Hitzky E. Bionanocomposites: A New Concept of Ecological, Bioinspired, and Functional Hybrid Materials[J]. Advanced Materials, 2007, 19(10):1309-1319.
- [2]Venkatachalam S, Li X, Liang S Y. Predictive modeling of transition undeformed chip thickness in ductile-regime micro-machining of single crystal brittle materials[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2009, 209(7):3306-3319.
- [3]Garcia A P, Buehler M J. Bioinspired nanoporous silicon provides great toughness at great deformability[J]. Computational Materials Science, 2010, 48(2):303-309.
- [4]李辉, 朱文白, 潘高峰. FAST 望远镜馈源支撑中的力学问题及其研究进展[J]. 力学进展, 2011, 41(2):133-154.
- [5]Shore P, Cunningham C, De Bra D, et al. Precision engineering for astronomy and gravity science. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2010, 59(2): 694 -716.
- [6]Bonerz, Jens. More Moore & more quality[J]. Optik & Photonik, 2011, 5(4):47-49.
- [7]Zhang J H, Zhao Y, Tian F Q, et al. Kinematics and experimental study on ultrasonic vibration-assisted micro end grinding of silica glass[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 78(9-12):1893-1904.
- [8]慢光. 国家点火装置点火项目的进展和计划(2007-2010)[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(5):68-72.
- [9]刘雄亚. 透光复合材料、碳纤维复合材料及其应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [10]于启勋, 全燕鸣. 超硬刀具切削复合材料的实验研究[J]. 河北科技大学学报, 2002, (02):1-5.
- [11]鲍永杰, 高航, 董波等. C/E 复合材料“以磨代钻”制孔工艺[J]. 宇航材料工艺, 2010, 40(4):47-49.
- [12]Zhang L Z, Li J M. The Application of Ultrasonic Technology in the Hard, Brittle Materials Processing Research[J]. Advanced Materials Research, 2012, 538-541:1387-1392.
- [13]Babitsky V I, Kalashnikov A N, Meadows A, et al. Ultrasonically assisted turning of aviation materials[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2003, 132(1-3):157-167.
- [14]Pujana J, Rivero A, Celaya A, et al. Analysis of ultrasonic-assisted drilling of Ti6Al4V. Int J Mach Tools Manuf[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49(6):500-508.
- [15]杨鑫宏, 韩杰才. 脆性光学材料的超声磨削实验研究[J]. 光学技术, 2007, (01):65-67.

- [16]Yanyan, Zhao Bo, Liu Junli. Ultraprecision surface finishing of nano-ZrO<sub>2</sub> ceramics using two-dimensional ultrasonic assisted grinding[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology . 2009, 43(5):462-467.
- [17]R.W. Wood, A.L. Loomis. The physical and biological effects of high frequency sound-waves of great intensity[J]. Philosophical Magazine . 1927(4):417-436.
- [18]陈道炼. DA-AC 逆变技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
- [19]雷立煜. 基于中小功率面向铝金属铸轧超声波电源研究[D]. 长沙:中南大学信息科学与工程学院, 2010.
- [20]王鸿麟, 景占荣. 通信基础电源[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2001.
- [21]Yakut M, Tangel A, Tangel C. A microcontroller based generator design for ultrasonic cleaning machines[J]. Journal of Electrical & Electronics Engineering . 2012, 9(1):835-860.
- [22]滕旭东, 傅友登, 王弘辉. 基于数字 PWM 的新型超声波电源的研究[J]. 微计算机信息. 2008(07):125-126.
- [23]Bal N, Bekiroglu E. A PWM Technique for DSP Controlled Ultrasonic Motor Drive System[J]. Electric Power Components & Systems, 2005, 33(1):21-38.
- [24]Tangel A, Yakut M, Afacan E, et al. An FPGA- based multiple-output PWM pulse generator for ultrasonic cleaning machines[C]. International Conference on Applied Electronics. 2010:1-4.
- [25]罗晓宁, 周兆英, 曹群等. 压电传感器在超声振动系统中的设计与应用[J]. 仪表技术与传感器, 2002, (06):6-7.
- [26]张镜澄. 差动变量器桥式自动频率跟踪电路[J]. 应用声学. 1988, (04):17-19.
- [27]董惠娟, 张广玉, 董玮等. 压电超声换能器电端匹配下的电流反馈式频率跟踪[J]. 哈尔滨工业大学学报. 2000, (03):115-117.
- [28]Chang W C, Ma K H, Yarn K F. New frequency-tracking control method for ultrasound welding system by the FPGA Chip[J]. International Journal of the Physical Sciences . 2010, 5(13):2014-2019.
- [29]刘丽华, 顾煜炯, 杨昆. 智能化功率超声发生器的研制[J]. 电子器件. 2002, (01):67-70.
- [30]BenYaakov.S, Lineykin.S. Maximum power tracking of piezoelectric transformer HVconverters under load variations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics . 2006, 2(1):73-78.
- [31]Mortimer B, Bruyn T D, Davies J, et al. High power resonant tracking amplifier using admittance locking[J]. Ultrasonics, 2001, 39(4):257-61.
- [32]车保川, 屈百达. 基于 74HC4046 新型频率跟踪电路的研究[J]. 现代电子技术. 2008, (03):188-190.
- [33]薛嘉. 基于 DSP 的超声波电源系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2009.

- [34] Bayindir N S, Kukrer O, Yakup M. DSP-based PLL-controlled 50-100 kHz 20 kW high-frequency induction heating system for surface hardening and welding applications[J]. Electric Power Applications, IEE Proceedings -, 2003, 150(3):365-371.
- [35] 谢成祥, 张健, 邓志良. 基于单片机的超声冲击装置频率跟踪控制和恒幅控制[J]. 应用声学. 2006, (04):201-205.
- [36] 李小雪, 汪东, 李平等. 基于 DDS 的超声换能器频率跟踪系统[J]. 压电与声光. 2009, 31(05):692-694.
- [37] 赖郭晖. 用于超声辅助磨削的超声电源研制[D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [38] IR2110 Datasheet. International Rectifier, Ltd. 2009.
- [39] 张明, 章国宝. IR2110 驱动电路的优化设计[J]. 电子设计工程, 2009, 17(12):66-67+70.
- [40] 董惠娟, 张广玉等. 压电超声换能器电端匹配下的电流反馈式频率跟踪[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2000, (03):115-117+122.
- [41] 刘晓佳, 朱兆优等. 基于峰值保持器 PKD01 的采样保持电路[J]. 电子元器件应用, 2009, 11(12):18-20.
- [42] 屈百达, 刘辉洪. 基于 DSP 的超声换能器频率跟踪系统[J]. 压电与声光, 2014, 36(2):297-301.
- [43] 李夏林, 刘雅娟, 朱武. 超声电源频率自动跟踪的模糊控制算法研究[J]. 应用声学, 2017, 36(02):135-141.
- [44] 曹群, 周兆英, 罗晓宁等. 基于自寻最优模糊控制的自动频率跟踪[J]. 应用声学, 2003, 22(1):22-25.
- [45] 孙余凯, 吴鸣山, 项绮明. 变频器选型安装与维修[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [46] 马洪涛, 周芬萍, 沙占友. 开关电源制作与调试[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

## 攻读硕士学位期间发表学术论文情况

- 1 郑伟帅，康仁科，刘津廷，赵凡，董志刚. 超声辅助磨削专用电源的研制. 金刚石磨具磨料工程，2018 年， 主办单位：郑州磨料磨具磨削研究所（本硕士学位论文第 2 章、第 3 章、第 4 章）

## 致 谢

在论文即将完成之际，首先我要感谢我的导师康仁科教授。康老师的渊博的知识、严谨的治学态度和一丝不苟的科研精神对我产生了极大的帮助和影响。在对该课题研究期间，康老师对我的课题进展和方向进行了精心的指导和规划，使我能够更加顺利的完成对本课题的研究。

感谢我的老师董志刚副教授，在我对课题研究过程中提出了很多指导意见，董老师以认真负责的态度一步一步指导我顺利的完成课题研究。同时董老师在生活和经济方面也对我提供了很多帮助，再一次表示感谢。

感谢刘津廷博士和王毅丹博士，在我研究期间遇到的问题，都能够与他们一起讨论并快速地解决。尤其在超声电源的调试和试验阶段，他们给予了我很大的帮助。此外感谢刘津廷博士对我研究工作的指导以及对我论文修改提供了宝贵意见。

感谢教研室里的同学，能够理解在电源调试阶段所发出的刺耳噪音。感谢宿增迪、孟凡通、赵凡、张军飞等硕士，在研究阶段对我的启发和帮助。

最后感谢我的家人，是他们的理解和支持使我能够在学校专心地完成论文研究工作。

---

## 大连理工大学学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位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贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目： 基于STM32的频率自动跟踪与振幅恒定的超声波的研究

作者签名： 郑伟帅 日期： 2018 年 6 月 10 日



