

学校编码：10384
学号：19920101152707

分类号_____密级_____
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

微细电加工脉冲电源的研究

Research on Pulse Power for Micro Electrical
Machining

樊友文

指导教师姓名： 洪永强 教授
专 业 名 称： 机械电子工程
论文提交日期： 2013 年 5 月
论文答辩时间： 2013 年 6 月
学位授予日期： 2013 年 月

答辩委员会主席： _____

评 阅 人： _____

2013 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费的资助,在()实验室完成。

声明人(签名):

年 月

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

摘要

微细电加工因具有非接触式加工、无宏观切削力等传统切削加工难于比拟的独特优势而在微细加工领域有着广阔应用前景,已广泛的运用于汽车、仪器仪表、模具、医疗器械、航空航天等众多领域。脉冲电源作为微细电加工装置中最重要的组成部分之一,其性能的好坏将直接影响到加工的各项工艺指标。随着对多种微细加工技术复合加工装置的研究日益深入,适用于多功能微细电加工的多功能脉冲电源的研究具有着重要意义,因此本文着力于研究一种既可进行微细电火花加工又可进行微细电化学加工的脉冲电源。

本文首先通过查阅大量文献对当前微细电加工以及微细电加工脉冲电源研究现状分别进行了研究。并在对脉冲电源参数对微细电加工的影响分析基础上,综合微细电火花和微细电化学的需求提出了一种多功能微细电加工脉冲电源的设计。

本文设计的微细电加工脉冲电源主要由放电主回路、驱动电路、间隙电压检测电路等硬件电路模块和上位机监控软件、单片机控制系统、CPLD 功能模块构成的控制系统模块组成。脉冲电源以单片机和 CPLD 为双控制核心,CPLD 为主振元件,单片机控制 CPLD 产生高频脉冲驱动功率开关管快速导通和关闭,从而控制脉冲放电主回路的通断。同时实时检测间隙电压,并传回给 CPLD 进行电压值平均,并输出对应频率的脉冲给运动控制卡(PMAC)实现工作台的运动速度控制。在间隙发生短路时 CPLD 切断脉冲输出,用软件方法实现电源短路保护。设计了不同的放电主回路,编制了上位机监控软件,实现了脉冲电源加工参数在线可调。最终可实现一种电源用于微细电火花和微细电化学两种加工中。

最后针对所研制的脉冲电源进行了性能测试。测试了微细电火花加工和微细电化学加工下不同脉宽的脉冲波形。测试结果表明所设计的电源是可行的。

关键词: 微细电加工; 脉冲电源; CPLD

Abstract

Micro electrical machining has a broad application prospect in the field of micro machining because of its non-contact processing, no macroscopic cutting force and other unique advantages which traditional machining is difficult to match. And it has been widely used in many fields such as automotive, instrumentation, medical equipment, mould, aerospace etc. Micro energy pulse power as one of the most important micro electrical machining technology, its performance will directly affect the micro mechanics surface machining quality. With the research on composite processing device increasingly deepening, study on multi-functional pulse power for multi-functional micro electrical machining has an important significance. Therefore, this paper focuses on the research of micro energy pulse power which can be used into not only micro EDM but also ECM.

First, introduced the research status of current micro electrical machining and micro EDM pulse power by consulting massive literature. And presents a design of a multi-functional micro electrical machining pulse power based on the analysis of the influence of the parameters of pulse power to micro electrical machining after integrating the demand of micro EDM and ECM.

Micro energy pulse power for Micro electrical machining is composed of key hardware circuit module and control system module. Including main discharge circuit, drive circuit, the gap voltage detection circuit and PC control software, single-chip microcomputer control system and CPLD module. The micro energy pulse power use single-chip microcomputer and CPLD as double-control core, CPLD is main vibrating element, it control pulse discharge main circuit switching, and real-time detection of the gap voltage, and returns them to the CPLD, and output the corresponding frequency pulse to the motion control card (PMAC) to realize servo

table speed control. CPLD cut pulse output when short circuit happened, so we can realize short circuit protection with software method. Through the design of PC control interface, we can realize Processing parameters of the pulse power adjustable in a wide range. So a pulse power that can be used for micro EDM and ECM processing is finally implement.

Finally, the performance of the micro energy pulse power is tested by testing the pulse waveforms of different pulse width for micro EDM and micro ECM. The test results show that the designed micro-energy pulse power is feasible.

Keywords: Micro electrical machining; pulse power; CPLD

目 录

中文摘要.....	I
英文摘要.....	II
第 1 章 绪论.....	VII
1.1 微细电加工技术的研究现状	1
1.2 微细电加工脉冲电源研究现状	6
1.3 课题研究目的与意义	10
1.4 课题主要研究内容	11
第 2 章 脉冲电源基础理论的分析	13
2.1 微细电火花加工机理	13
2.2 脉冲电源参数对微细电火花加工影响分析	13
2.3 微细电化学加工机理	17
2.4 脉冲电源参数对微细电化学加工影响分析	18
2.5 微细电加工脉冲电源的设计要求	21
2.6 本章小结	22
第 3 章 脉冲电源硬件模块的设计	23
3.1 微细电加工脉冲电源的总体结构设计	23
3.2 放电主回路的设计	24
3.3 MOSFET 驱动电路的设计.....	26
3.4 反馈控制回路的设计	30
3.5 电源干扰来源及抗干扰设计	33
3.6 本章小结	34
第 4 章 脉冲电源控制系统的设计	36
4.1 脉冲电源控制系统的总体方案设计	36

4.2 上位机控制界面设计	37
4.3 单片机设计	40
4.4 CPLD 高频脉冲产生单元的设计	42
4.5 本章小结	49
第 5 章 脉冲电源的调试	51
5.1 CPLD 脉冲发生器输出波形测试	51
5.2 驱动放大电路输出电压波形及 MOSFET 管输出电压波形调试	52
5.3 电源调试过程中解决的问题	54
5.4 本章小结	55
总结与展望	56
参考文献.....	58
附录.....	62
攻读硕士学位期间发表的学术论文	70
致 谢.....	71

Contents

Abstract in Chinese.....	I
Abstract in English	II
Chapter 1 Introduction.....	1
1.1 Research status of micro electrical machining technology.....	1
1.2 Research status of micro electrical machining pulse power.....	6
1.3 Objective and significance of the research	10
1.4 Main purpose and contents of the research.....	11
Chapter 2 The basic theory analysis of power pulse.....	13
2.1 Micro EDM mechanism.....	13
2.2 Analysis of the effect of pulse power parameters on micro EDM	13
2.3 Micro ECM mechanism.....	17
2.2 Analysis of the effect of pulse power parameters on micro ECM	18
2.5 Processing requirements of Micro electrical pulse power.....	21
2.6 The summary of this chapter.	22
Chapter 3 Design of pulse power hardware module.....	23
3.1 The overall structure design of micro electric pulse power	23
3.2 Design of the main discharge circuit.....	24
3.3 Design of MOSFET driver circuit	26
3.4 Design of The feedback control loop	30
3.5 Interference source and design of anti Interference	33
3.6 The summary of this chapter	34
Chapter 4 Design of pulse power control system.....	36
4.1 Overall design of pulse power control system	36
4.2 Design of The PC control interface	37
4.3 Design of MCU system.....	40
4.4 The design of a high frequency pulse generating unit CPLD.....	42

4.5 The summary of this chapter49

Chapter 5 Test of pulse power supply.....51

5.1 Waveform test of generated by CPLD pulse generator.....51

5.2 Waveform debugging of drive circuit output and MOSFET output....52

5.3 The problem have solved in the process of debugging54

5.4 The summary of this chapter55

Summary and Outlook 56

Reference..... 58

Appendix..... 62

Publications70

Thanks71

第1章 绪论

本章针对微细电加工的研究进展，在讨论了微细电加工脉冲电源的基础上，阐述了一种能够满足微细电火花加工和微细电化学加工的多功能微细电加工脉冲电源的研究意义和本课题的主要研究内容。

1.1 微细电加工技术的研究现状

1. 微细电火花加工

微细电火花加工技术的研究起步于上世纪60年代末，但直到80年代日本东京工业大学的增泽隆久等人发明了线电极电火花磨削(WEDG)技术^[1]，成功的解决了微细电极在线制作的难题后，才使微细电火花加工技术取得了很大突破。随后出现了磨削装置简单、成本低廉的块电极电火花磨削技术(BEDG)^[2]。目前，微细电火花磨削技术已经可以加工出最小直径为 $1\mu\text{m}$ 的微细轴，这为微细电火花钻孔及铣削加工等提供了重要的工具基础。目前对微细电火花加工技术的研究主要分为两大类：微细电火花工艺研究和微细电火花设备研究。相比较而言，进行微细电火花工艺技术研究的较少。国内有关学者通过反拷法加工微细电极，然后进行微细孔加工，可稳定地加工 $100\mu\text{m}$ 的微细孔^[3]。欧美学者对电极等损耗理论进行了研究和实践，并用以对微细三维型腔进行加工，加工出八分之一球瓣^[4]。哈尔滨工业大学对微细电火花加工工艺与装备的关键技术进行了卓有成效的研究，提出了超低电压微细电火花加工和基于分层微细电火花铣削加工技术，研制了多功能微细特种加工机床，该机床能加工出直径 $10\mu\text{m}$ 以下的微细轴、孔和亚微米级复杂微三维结构，图1-1为加工的直径 $3.5\mu\text{m}$ 的微细轴和直径 $6\mu\text{m}$ 的微细孔^[5]。杨晓冬教授提出了基于静电感应原理的微细电火花加工方法，进一步提高微细电火花加工微细化能力，该方法采用了与目前的电火花加工完全不同的给电方式^[6]。

在微细电火花三维结构的加工研究方面，日本东京大学增泽隆久、Yu Zuyuan等人通过使用形状简单的微细电极，成功的制作出了长 0.5mm 、宽 0.2mm 、深 0.2mm 的微型汽车模具，并用该汽车模具制作出了微型汽车模型^[7]，如图1-2所示。

国内哈工大佟浩等人在自行开发的微细电火花铣削机床上加工出了微型涡轮结构^[8]，如图 1-3所示。

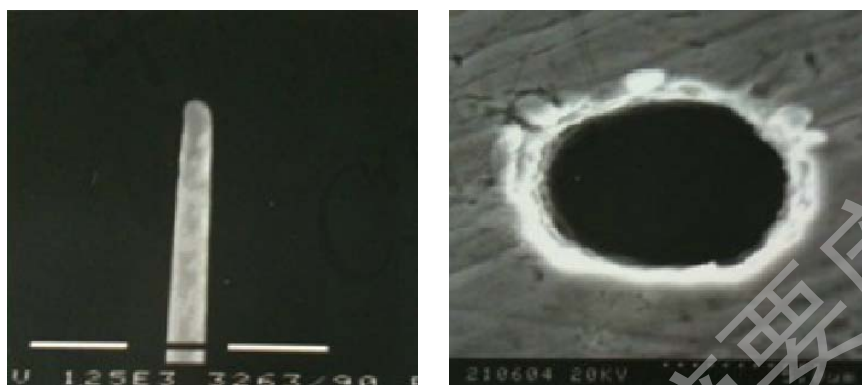


图 1-1 直径 3.5 μm 的微细轴和直径 6 μm 的微细孔^[5]



图 1-2 微型汽车模具^[7]

图 1-3 微型涡轮^[8]

国外的微细电火花加工技术研究以设备研究为主，日本东京大学的通口俊郎、古谷公司和丰田工业大学的毛利商武等先后研制出了蠕动式、冲击式和椭圆驱动式三种由电极直接驱动的微细电火花加工装置。瑞士夏米尔、日本松下精机、美国麦威廉斯等公司已经都有较成熟的产品。其中日本松下精机生产的 MG-ED82W 微细电火花加工机床，是目前商业销售中精度最高的微细电火花加工机床^[9]。该机床可用于微轴加工、微孔加工、三维结构铣削加工以及成型加工等多种电火花加工。

德国柏林技术大学针对夏米尔公司生产的 Robofil2000 五轴线切割机床进行了一些功能上的改进，如图 1-4 所示。通过在线切割机上导丝头上安装一个平行于轴线的可回转主轴头、在工作台上安装一个微型线电极磨削装置以及在工件的加紧系统上安装回转装置，而将其改造成不但可用于微细电火花钻削和铣削加

工，还可用于微小型腔以及微细线切割等多种加工的微细加工中心^[10]。

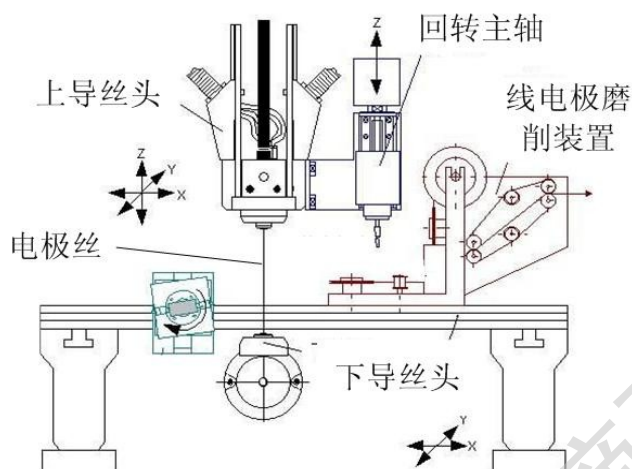


图 1-4 德国柏林技术大学研制的微细加工中心^[10]

山东大学的杜连明等人基于压电陶瓷 (Piezoelectric ceramic, PZT) 的逆压电效应, 提出了一种微细电火花加工新方法, 并设计了一套加工装置^[11]。PZT 促动器伸长和缩短导致放电通道的压缩和拉伸, 该装置采用了具有放电输出回路和 PZT 促动器驱动回路两路独立输出的同步两通道输出脉冲电源。压电促动器驱动回路提供的驱动促动器伸长和缩短的脉冲信号与放电脉冲同步, 从而实现了放电通道压缩过程与火花放电加工的同步控制。并利用 $\phi 40.5\mu\text{m}$ 的棒状电极在厚度为 0.3 mm 的工具钢上加工出 $\phi 67\mu\text{m}$ 的微细孔。哈尔滨工业大学设计了一台既可进行微细电火花加工又可进行微细电化学加工的微细电加工装置^[12], 该装置使用脉冲电源为微细电加工提供放电能量, 利用多轴运动控制卡来控制直流伺服电机分别驱动 X、Y、Z 轴实现 3 轴联动。

2. 微细电化学加工

微细电化学加工技术目前在微细加工中已占有重要的位置。从加工机理上可分为两类: 一类是基于阳极溶解的减材加工技术, 另一类是基于阴极沉积的增材加工技术, 材料的减少或增加都是以离子的形态进行的。由于金属离子的尺寸是纳米级, 且具有加工过程中无加工应力、无热影响层、加工表面质量好、无工具损耗等优点, 因此微细电化学加工技术在微细制造领域具有较广泛的应用前景。各国都对微细电化学加工技术给予了高度重视, 并展开了大量的研究工作, 取得

了很多成果。微细电化学加工技术种类很多，目前已经有 EFAB 制作技术、CELT 刻蚀剂层技术、基于电化学扫描探针显微镜进行的微细电化学加工技术、超微细电极电化学加工技术等多种微细电化学加工技术应用在微细零件的加工中。

EFAB (Electrochemical FABrication) 是基于 SFF (Solid Freeform Fabrication) 的分层制造原理开发出来的金属微结构加工技术。它是利用计算机技术在高度方向上将需要加工的微型零件分解成许多薄层，并采用电镀的方法在每一层上依次沉积牺牲材料或结构材料。采用快速掩膜电镀法对第一次沉积的材料进行精确沉积，第二层材料采用覆盖式淀积，随后对整个两层材料组成的结构进行平面化。经过层层沉积，然后溶解掉牺牲材料，最终可得到三维超微图形结构，图 1-5 是用 EFAB 技术制作的微器件。EFAB 虽然能够加工复杂的三维图形，但是 EFAB 也存在着很难使每层精确对准、加工过程非常复杂，步骤繁多，相当长的零件加工周期，制造费用极其昂贵问题，因此这也将一定程度上削弱它的广泛应用^[13]。

CELT (Confined Etchant Layer Technique) 约束刻蚀剂层技术是由我国厦门大学的田昭武院士等人提出的一种用于三维超微纳米图形复制加工的新技术。其加工基本原理是：利用电化学或光化学反应在三维图形的模板表面产生刻蚀剂，这些初生的刻蚀剂在向外扩散过程中会与溶液中的捕捉剂迅速发生氧化/还原反应而失活，没有被还原的刻蚀剂被约束在紧贴模板表面的微小区域内，当模板非常接近被加工工件表面时，被约束的刻蚀剂与待加工工件表面发生反应，这样就加工出与模板互补的图形。但是这种加工方法也存在着两个问题，一个是加工所需要的高精密模板需要采用别的技术制作，另一个是为达到纳米级精度刻蚀则需要选择合适的刻蚀系统，图 1-6 为用 CELT 技术在铜表面上刻蚀图^[14]。

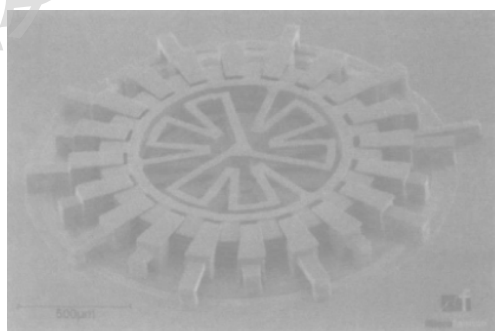


图1-5 用EFAB技术制作的微器件^[13]

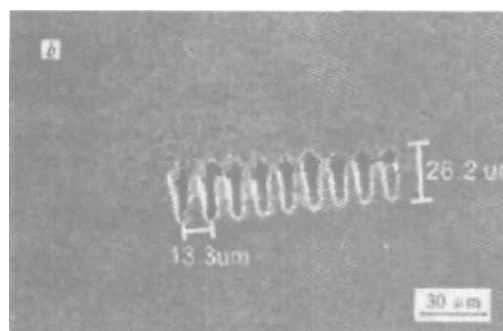


图1-6 用CELT在铜表面上刻蚀^[14]

扫描探针技术的发明，尤其是扫描隧道显微镜(STM) 的出现，使得基于电化学扫描探针显微镜进行的微细电化学加工技术得到了较大发展。Penner 等人第一次用电化学扫描隧道显微镜 (elect rochemical STM) 的针尖在碳表面预定的位置上沉积出纳米级金属簇。STM 在电化学方面的使用引发了一种在电极上加工纳米结构新方法的研究。图 1-7 是 D. M. Klob 等人用电化学 STM ，通过编程在浓度为 0.05mol/ L 的 H_2SO_4 和浓度为 0.01mol/ L 的 $CuSO_4$ 混合溶液中最终在 Au 电极表面沉积出 12 个规则的 Cu 簇，每个 Cu 簇半径为 3.5nm ，高为 0.8nm^[15]。

高频窄脉冲电源的研制使得脉冲微细电化学加工应用到微细加工中，国内外对脉冲微细电化学加工进行了大量研究，并取得了很大成就。南京航空航天大学朱荻进行了微细电铸和微细电化学加工技术的大量试验研究工作。采取纳秒脉宽脉冲电流、电化学微铣削等手段，进行加工试验，获得了较好的试验结果^[16]。南京航空航天大学张朝阳进行了微细电化学加工试验，实现了微米级工具电极的制作和工件微细结构的加工。图 1-8 是张朝阳在 50 μm 厚镍片上加工的槽宽为 30 μm 的“十”字形孔的 SEM 照片^[17]。

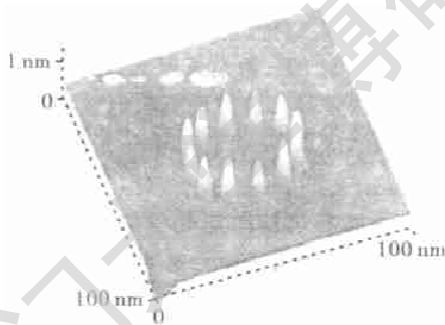


图1-7 纳米级Cu簇形貌图^[15]

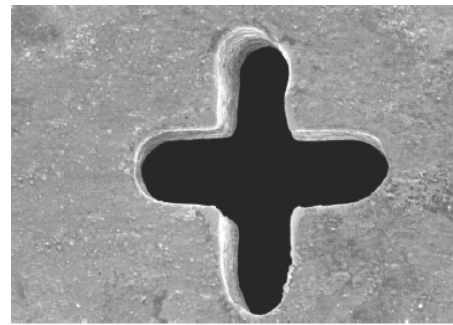


图1-8 “十”字形孔的SEM照片X600^[17]

国外许多工业发达国家对于微细电化学加工技术给予了高度重视，并进行了大量的研究工作，取得了很大的发展。如德国 MPG 采用纳秒级超短脉宽脉冲电流技术，极大的提高了电化学溶解区域性，从而实现了数十微米尺度的金属三维复杂型腔的微细加工^[18]，MPG 经过进一步研究，加工出 100nm 宽的沟槽^[19]。德国佛里·哈尔贝尔研究所的 rolf. Schuster 等人研究出的利用持续时间以纳秒计的超短脉冲电压进行微细电化学加工新技术，成功加工出加工精度可达几百纳米

的微米级尺寸的微细零件^[20]。

1.2 微细电加工脉冲电源研究现状

1. 微细电火花加工脉冲电源研究现状

RC 弛张式脉冲电源和独立式脉冲电源是目前电火花加工主要采用的两种电源。RC 式脉冲电源放电脉冲的发生与结束与加工间隙状况有关, 脉冲放电能量不可控且没有专门的消电离过程, 容易导致电弧性放电, 烧伤工件表面, 使加工的一致性很差。但 RC 脉冲电源不存在放电维持电压, 可在低于放电维持电压下加工^[21,22], 能产生很小的单脉冲放电能量。因此世界各国在 RC 电源基础上进行了大量的研究。由于低电压放电时, 放电间隙非常小, 间隙放电环境恶劣^[23], 这就要求更加精确的间隙控制技术, 否则加工效率将会受到严重制约, 加工质量也得不到保障。这一因素制约了低电源电压放电加工的实际应用。

山东工业大学霍孟友研制了可控式 RC 脉冲电源, 在充电回路和放电回路上分别加入开关管来对充、放电过程进行控制, 检测电容器充、放电电压, 进而控制电容器充电控制开关管 T1 和放电通道消电离控制开关管 T2。该电源能使放电通道彻底消电离, 脉冲放电电压大小一致, 工件表面的坑痕较为均匀。故加工质量比 RC 脉冲电源高, 比较适合于微细电火花加工过程^[24]。其原理如图 1-9 所示。

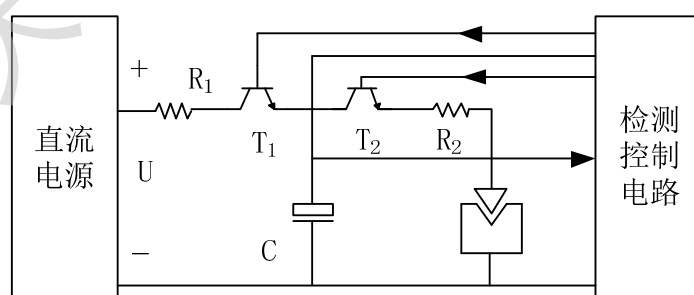


图1-9 霍孟友研制的可控式RC脉冲电源^[24]

独立式脉冲电源具有脉冲参数容易调节、脉冲波形好、容易实现控制等优点^[25]。其放电脉冲的发生与结束是由直流电源和放电间隙之间的开关元件来控制的, 不受放电间隙状态影响。脉冲发生部分产生的高频脉冲通过驱动放大电路控

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库