

摘 要

本课题在新概念动态测试技术基础上,设计了一种电容式微功耗重力开关。此开关是一种新型开关,具有低电压驱动、低功率损耗、微小体积、延时功能、适用于批量生产的微型器件,其工作时不需要人为操作,就能实现‘关’状态和‘开’状态的单向转换。

首先研究了金属表面的微观特性,提出接触金属极板能构成敏感电容的设想,并敏感电容测试电路进行研究。结合间距和电容之间相关性理论,分析了金属极板间距变化对敏感电容变化的影响,归纳出一种提高敏感电容稳定性和可靠性的结构设计方法。

其次针对电容式微功耗重力开关的设计要求,对 RC 振荡电路作为研究核心,深入分析了敏感电容不同状态下的情况,讨论了整个开关的系统设计、敏感电容设计、电源选取、探测模块的设计,对此开关材料和加工尺寸进行分析,讨论了金属平面度和粗糙度对敏感电容的影响,介绍了一种过氧化氢与盐酸来腐蚀印刷电路板的方法,制作敏感电容,详细描述了敏感电容和探测电路的制作过程。

最后对开关进行了性能测试研究,包括芯片性能实验、手动倒置实验和马歇特锤冲击实验,验证了金属极板能够形成敏感电容设想的正确性,并且探测模块经一定延时后,能够输出触发信号启动系统,实现延时开关功能。

关键字: 电容, 重力开关, 振荡

ABSTRACT

Research on capacitive gravity of switch with low consumption

Haixia Ma Tiehua Ma

The low consumption capacitive gravity of switch has been introduced, which one type of component with low driving voltage, low power consumption, small volume, having time delay, volume production, it based on the new concept dynamic test system. Not needing operation, being able to realize 'pass' state and 'on' status changes.

Firstly, characteristic property having studied metal surface microcosmic, the tentative proposing of the new idea is electrodes can compose sensitive capacitance, and the sensitive capacitance testing circuit is in progress to study contacting metal. Correlativity theoretical analysis, the effect that metal counter electrode spacing changes to sensitive capacitance change, the method summing up in one kind of the physical design improving the sensitive capacitance stability and reliability between union spacing and capacitance.

Secondly, it analyses that request about the switch designs, then put forward a core method to using RC oscillatory circuit, go deep into the condition under having analyzed sensitive different capacitance state, design having discussed that entire switch system designs, sensitive capacitance designs, the power source chooses, detecting circuit, material and finish size have carried out analysis on this switch, it was discussed the metal impact of flat surface degree and harshness over sensitive capacitance, the method of making sensitive capacitance that using H_2O_2 and HCl to come to corrode printing circuit board, sensitive capacitance and detecting circuit manufacture process have been described.

Finally, the experiment having been in progress to the switch, such as: the chip function experiment, the inversion experiment and the shocking hammer experiment, it was verified the metal electrode being able to form sensitive capacitance, as the result of detecting circuit output '1' after the certain time-lapse, being able to starting the deferred switch of system.

Key word: electric capacity, gravity switch, vibration

原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在指导教师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 麻海霞 日期： 2008年4月19日

关于学位论文使用权的说明

本人完全了解中北大学有关保管、使用学位论文的规定，其中包括：①学校有权保管、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤学校可以公布学位论文的全部或部分内容（保密学位论文在解密后遵守此规定）。

签 名： 麻海霞 日期： 2008年4月19日

导师签名： 马铁军 日期： 2008.4.19

1 引 言

1.1 课题来源、目的及意义

根据被测物理量随时间变化的特性，测试可分为静态测试和动态测试。被测物理量在测试过程中保持静止不变的测试过程称为静态测试。被测物理量在测试过程中不断变化的测试过程称为动态测试^[1]。

新概念动态测试是祖静教授提出的，定义为把测试系统放置到被测体上或被测环境中，在被测体实际运动的过程中实时实况地测取其动态参数。被测体，可能是飞行中的弹丸，几千米深的石油井下，做功运动中的内燃机活塞炮弹或导弹发射过程中全弹道的动态参数和（或）压裂的动态参数；内燃机活塞实际工作时的应力场、温度场；火炮发射时的膛压；弹上电池在弹丸实际发射过程中的动态参数；子母弹抛撒的动态参数；弹药毁伤效果评价，冲激波、压力场、温度场、振动；高速撞击过程的动态参数等等。要求测试用的传感器和测试仪器放置到被测体中或被测环境中，承受与被测体相同的恶劣环境的作用^[2]。

新概念动态测试是在继承了前人的有关动态测试的理论和实践，为适应国防建设和经济建设新的发展而提出的，它是测试技术的发展和进步，为动态测试技术增添了新的理论内涵。同时也引发了新的问题：比如新概念动态测试系统受体积、重量和功耗等因素的限制；外界测试环境对测试系统的干扰以及测试系统对测试环境的干扰等。

因此，迫切需要一种适应新概念动态测试的开关，本文研究的电容式微功耗重力开关是马铁华教授提出，在有限的狭小空间内，不需要人为操作，在一定的延时后，自动启动动态存储测试系统。开关倒置时改变触发开关内电容的大小，实现开关‘关’状态和‘开’状态的单向转换。当开关正常放置时，开关内的电容很小不能引起所在的振荡电路的振荡，不能输出触发信号启动系统；当开关倒置时，开关内的电容变大，能够引起所在的振荡电路的振荡，产生的振荡信号连接到延时电路，延时电路可以根据不同的需要，设置不同的延时时间，在输出端输出触发信号，控制系统启动。

本文的目的是研制一种工艺简单，低电压驱动的，各项指标符合新概念动态测试系统要求的扩展性好的微型开关。新概念动态测试是把测试系统放置到被测体上或被测环

境中，在被测体实际运动的过程中实时实地地测取其动态参数。被测体，可能是飞行中的弹丸，几千米深的石油井下，做功运动中的内燃机活塞等。要求测试用的传感器和测试仪器放置到被测体中或被测环境中，承受与被测体相同的恶劣环境的作用^[1]。

动态测试所测的动态参量持续时间短，因此对开关的动态特性要求比较高，需要能够适用于新概念动态测试系统下的新型开关。本文研究的电容式微功耗重力开关能保证各种动态参数测试结果的准确性，即放置被测物体中或被测环境中，不需要人为操作情况下，在一定的延时后，启动动态测试系统，在有限时间内测试存储有效实时数据。

本文研究的电容式微功耗重力开关不仅适用于军事国防系统，同样适用于工业、民用系统。开关是常用的电气元件之一，在电路理论及电路分析中采用理想开关元件作为实际开关的电路模型。

近些年来开关种类繁多，例如声光控开关采用现代声光控制技术研究，白天开关自控，灯泡不会亮，夜晚则自动解除闭锁。当脚步声，说话声等声源的声强达到启动值时，开关自动打开；被控灯点亮，并延时自熄；性能稳定可靠，安装简单，使用方便。

微波开关等这些开关都广泛应用于民用、工业装置；微波开关小巧、耐用，结构可靠、低功耗、高灵敏度在感应范围内控制器感应到活动的人则开关打开，直到感应范围内的人离开后延时一定时间后自动关闭开关，有穿透能力，如隔墙、隔物，只要在一定范围内，开关仍可工作。

电容式开关已经非常普及，它们具有体积小、功耗低、易于制作这样一些既重要又有用的特性，这些特性尤其在应用中具有举足轻重的作用。

随着电容式开关电路等各种技术的快速发展，对各种电容式开关进行更细致的分析、分类和研究也日趋重要。本课题微小型电容式重力触发开关是通过倒置，能够引起开关内电容所在的振荡电路的振荡，产生的振荡信号连接到延时电路，输出端输出触发信号，控制系统启动。

目前，虽然国内外生产电容式开关的厂商较多，但生产类似于本设计要完成的这种微型智能化的电容式重力开关的厂商较少。

而本设计所研究微小型电容式重力触发开关具有微功耗、微体积、高可靠性、结构简单、易制作、成本低等特点。可以用于对倒置或方向敏感的各种工业或民用系统，例如工业报警系统、自动断电系统等等。

1.2 国内外研究现状

1) 国内研究现状

就开关而言,我国在二十世纪50年代末开始研制真空开关,基本与美国同步,略早于日本。1958年,由西安交通大学电器教研室和当时的西安高压开关整流器厂合作成立了一个厂校联合研制小组,成功研制出我国第一只真空灭弧室,并在西安交通大学电器实验室的合成回路上通过了50Hz、4kV、5kA的电流开断试验。1968年9月5日,国家重点国防工程(6895工程)在华光电子管厂实施,同年诞生了我国第一只商用真空灭弧室。

1984年,西安高压电器研究所、桂林电器科学研究所、宝光电工总厂和北京开关厂等四家联合引进了德国西门子公司3AF系列真空断路器的全套制造技术(含CuCr触头材料、真空灭弧室和真空断路器三大部分)。1986年,华光电子管厂引进了美国西屋公司全套真空灭弧室的制造技术(含CuCr触头材料)。这两次引进使我国真空开关行业的制造和设计水平均得到了极大的提高,为此后我国真空开关行业的发展和繁荣奠定了技术基础。

1992年,当时机械电子工业部与能源部召开了关于在电力系统广泛推广应用真空开关的“天津会议”,从此我国真空开关进入快速发展期,市场上先后出现了多种由我国自主开发、技术指标达到当时国外先进水平的真空断路器,其代表产品有ZN23、ZN28和ZN63A等。

从2003年至今,我国已研制出72.5kV、110kV/31.5kA和18 kV/80kA的单断口真空断路器,全行业年产各类真空开关20万余台,在世界上真空开关从业厂家最多、产销量最大和品种系列最多,成为名符其实的“真空开关王国”。

目前,国内正在研制一种新的开关:红外线延时开关,采用一种新型热释红外专用器件SNS9201制作,其特点是电路简单,功耗小,性能可靠,可在楼道、厕所等场合或一些需要报警功能的场所作检测开关用。在实现自动控制的同时达到了节能降耗的目的。红外线延时开关具有以下功能:

- 当人体在红外探测区域内连续移动时,则开关一直接通,电灯始终被点亮或报警器始终报警,直至移动的人体离开为止;
- 当光线亮度低于10Lux时,红外开关检测到的红外信号方能被接通;

- 当开关接通时，探测器不再检测到红外信号时，经过一定的时间，开关即自动关闭，电灯便熄灭或停止报警。

对于电容式开关而言，国内市场上存在有很多电容式开关，比如CLS100电容物位开关，频电容开关等。

CLS100电容物位开关是一个性能可靠，价格低廉的点式物位开关。它的尺寸紧凑，插入深度100mm，适用于空间较小的场合。两线制探头可检测固体、液体、浆体、界面和泡沫的高低物位，灵敏度高。适用于容器或管道等多种应用场合，是阻旋开关、振动开关或传统的电容开关替代品。它的先进的顶端传感技术提供了精确的、重复性高的开关信号。探头材质为耐化学腐蚀的PVD/Kynar，工作温度为： $-40\sim 110^{\circ}\text{C}$ 。全密封紧凑的设计使之能够工作在搅拌釜等振动场合，可靠性高，抗振动可达4g。当使用一个SensGuard保护盖时，可以保护它免受剪切，冲击和磨损等恶劣的粗糙工艺的影响。产品特点：易于安装，内置发光二极管LED验证其安装；没有可动部件，低维护；灵敏度可调整；有一体的不锈钢电缆型或ABS外罩型；本安型，防尘防爆型和普通型；一体缆型，不锈钢工艺连接和PPS或PVDF探头；标准外壳型；热塑性塑料聚酯外壳，不锈钢工艺连接和PPS或PVDF探头；全塑料型，热塑性塑料聚酯外壳，PPS工艺连接，PPS探头。

射频电容开关是一种新型的物位检测仪器，采用了“一键标定”技术，解决了长期以来电容式物位开关在使用中标定烦琐的难题。当传感器安装于壳体上时，电极和壳壁分别类似于电容器的两个电极；由于被测物料的介质常数与空气不同，所以壳内物位发生变化时会引起电极对壳壁间的电容量发生变化，当该电容量大于用户设定值时，限位开关内继电器工作，输出开关信号达到控制或者报警目的。

电容接近开关测量头通常构成电容器的一个极板，而另一个极板是物体的本身，当物体移向接近开关时，物体和接近开关的介电常数 ϵ 发生变化，它们之间的距离 d 发生改变，从而导致它两所组成电容的电容值发生改变，使得和测量头相连的电路状态也随之发生变化，由此便可控制开关的接通和关断。被这种开关的检测物体，并不限于金属导体，也可以是绝缘的液体或粉状物体。

开关是常用的电气元件之一，在电路理论及电路分析中采用理想开关元件作为实际开关的电路模型。当开关元件被打开时，不管其两端的电压值是多少，电流恒为零，所

以其伏安特性曲线就是 $i-u$ 平面上的 u 轴；但当它被合上后，情况却恰好相反，此时不管流经开关元件的电流值是多少，电压恒为零，所以其伏安特性曲线就是 $u-i$ 平面上的 i 轴。一个开关元件经常是处于开-关-开-关的工作状态，所以它一会儿电阻 $R = \infty$ ，一会儿电阻 $R = 0$ 。因此，开关元件是一线性时变电阻。由于开关元件其两端的电压值为零，其流经的电流为零，因此在电路理论的研究中，往往认为其消耗的功率始终为零，在电路中除了断开或接通电路之外，不存在其它情况^[3]。

2) 国外研究现状

国外许多国家很早就对开关有研究和应用，尤其常见的是真空开关。早在 1893 年，美国人里顿豪斯(Rittenhause)就设计出世界上第 1 只真空灭弧室，并以专利的形式发表；1920 年，瑞典佛加(Birka)公司研制出世界上第一台真空开关；1926 年，加里福尼亚工学院的索伦森(Sornsen)教授发表了真空开关的试验结果，并预言应用真空开关的时代不久就会到来^[3]。由于当时的真空技术还很落后，使得真空开关在工业上的实际应用被大大推迟了。

到 1950 年前后，随着真空技术以及相关技术如冶金技术等的发展，真空灭弧室的制造技术得到了提高，又重新开始了真空开关在工业上应用的研究。1956 年，罗斯(H.Cross)对杰宁无线电制造公司(Jenning)生产的用于高频回路的真空开关进行了改造，试制出了 15kV、200A 的真空开关。

1961 年美国通用电气公司在总结前人经验的基础上首先研制成功额定电压 15kV、12.5kA 的真空断路器，1966 年相继研制成功额定电压为 15kV、开断电流为 25kA 和 31.5kA 的真空断路器，从此真空开关正式进入电力开关的行列，美国也因此成为世界上最早批量生产和使用真空开关的国家，在其影响和推动下，欧洲和亚洲的部分国家也相继开始了研制工作，真空开关从此在全球范围内得到认同和发展。二十世纪 70 年代初，全球范围掀起的中压开关无油化浪潮给真空开关带来了前所未有的发展机遇。凭借自身巨大的技术优势，真空开关仅用了不到 20 年的时间就取代少油开关而成为中压领域的主导产品。目前单断口真空断路器已达到 145kV 电压等级，短路开断电流已达到 200kA。

随着射频微机电系统(RFMEMS)技术的不断发展，RFMEMS开关由于其插入损耗低、隔离度高、功耗低、易于集成等优点而备受关注，目前已成为微波领域里较为成熟的MEMS器件之一^[2]。现在正在研究一种高 g 值微冲击开关，采用微机电系统(MEMS)技

术设计制作了一种微冲击开关,其敏感元件由悬臂梁支撑的质量块和微触点构成。在冲击加速度作用下,质量块与触点碰撞实现接通。开关芯片体积为 $5\text{mm}\times 5\text{mm}\times 0.5\text{mm}$,动作门限 3000g ,响应时间 $84\mu\text{s}$,能承受极端的高冲击而不被破坏。

冲击开关是感受冲击加速度并输出开关信号的一类惯性器件。已报道的几种应用在汽车防撞气囊控制系统中的微冲击开关均采用硅制作,能承受一定的冲击,但在极端恶劣碰撞条件下有可能损坏。为考核MEMS硅器件的抗冲击能力,Sandia国家实验室在硅器件上加载 40000g 的冲击,发现器件的陶瓷封装管壳都被打碎。为满足高冲击应用的需要,拟采用金属钼制作了一种能承受高速碰撞并瞬间做出响应的微冲击开关^[5]。

安捷伦科技推出两种FET单刀双掷(SPDT)固态开关U9397A和U9397C。工作频率分别为 300KHz 至 8GHz 和 300KHz 至 18GHz 。具有极小的视频泄漏电压、高隔离度和高开关速度,适用于半导体产品研发和生产测试,充分满足验证RFIC元器件特性所需要的高性能宽带开关功能的要求。

与传统视频泄漏电压为 1000mVpp 的PIN开关相比,U9397MC固有视频泄漏电压的典型值还不到 10mVpp 。这是一个在过去不被广为关注的参数,但是研究表明较大的视频泄漏电压经常会敏感对器件和设备造成不可补救的破坏。这两种新型FET开关还采用了专利设计技术,从进行开关切换到开关切换完成(插入损耗稳定为 0.01dB 时)所需要的时间不到 $300\mu\text{s}$,可显著改善高速RFIC生产测试的效率。这两种开关还具有出色的端口之间隔离度,非常保守的指标为不小于 90dB ,将信号通路间的串扰降到最低,保证了测试精度和更高的产能^[6]。

1.3 本课题的研究内容和方法

本课题针对新概念动态测试系统应用环境的恶劣性,和严格受到体积和功耗的限制,基于变间距改变电容的研究,分析了金属表面微观性质,提出由两块金属箔片构成电容的设想,重点研究了在重力影响下电容的变化规律,设计并制作了微型电容式重力触发开关,并进行了多次实验,实现了无需人为操作能够启动动态测试系统。

1.4 论文的主要内容

电容式微功耗重力开关是一种低电压驱动、低功率损耗、微小体积、具有时间延时、

能够批量生产的器件，本文在新概念动态测试技术理论上，即系统环境的恶劣性和严格受到体积和功耗的限制。采用理论研究、试验测试并重的方法，研究了变间距改变电容的规律，设计并制作了微小型电容式重力触发开关，并对开关做了加速度冲击实验，获得了较好的测试结果，并对实测数据进行深入分析。本文的内容可以结合下面的流程图来说明：

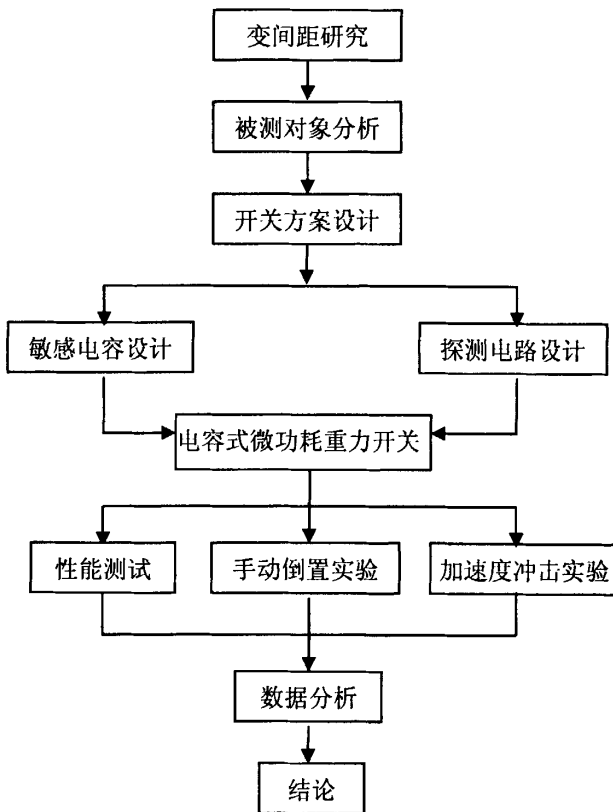


图 1.1 论文内容流程图

本文主要阐述了以下几个方面的问题：

(1) 研究金属表面的微观特性，分析接触金属极板间存在微小距离，进行了敏感电容能否存在的测试电路研究，提出金属极板能构成敏感电容的设想；

(2) 分析了金属极板间距变化对敏感电容变化的影响，归纳出一种提高敏感电容稳定性和可靠性的结构设计方法；

(3) 分析了开关设计的具体要求，研究与敏感电容相关的探测电路模块，深入分

析了振荡电路的各种情况，讨论了整个开关的系统设计、敏感电容设计、电源选取、探测模块的设计，提出提高开关稳定性的振荡电路设计方法；

(4) 分析了开关材料选择和加工尺寸，利用机械加工技术和一种过氧化氧与盐酸来腐蚀印刷电路板的方法，制作完成了敏感电容，并且详细描述了敏感电容和探测电路的制作过程；

(5) 分析了实验数据，验证了金属极板能够形成敏感电容，并且探测模块经一定延时，能够输出触发信号启动系统，实现延时开关功能。

2 变间距式敏感电容研究

变间距式敏感电容研究，是电容式微功耗重力开关的研究主要依据，是基于对被测系统结构和环境的分析，从而达到准确性好、可靠性高的开关器件而设计的。本章基于金属箔片微观研究，提出由两片接触金属导体极板构成敏感电容的设想，分析了敏感电容的构成，并且对间距引起电容改变的进行研究，提出准确性好、可靠性高的敏感电容设计方案。

2.1 敏感电容构成研究

2.1.1 金属箔片微观研究

活动极板和固定极板没有接触时，构成以空气为绝缘介质的电容；活动极板在重力作用下，活动极板落在固定极板表面上，用肉眼观察两极板相接触连在一起。但是理论上，即使两个极板相接触，极板之间总会存在一定的距离。

本小节主要对金属表面进行微观研究，论证两块金属极板相互接触，极板间总会存在间距。

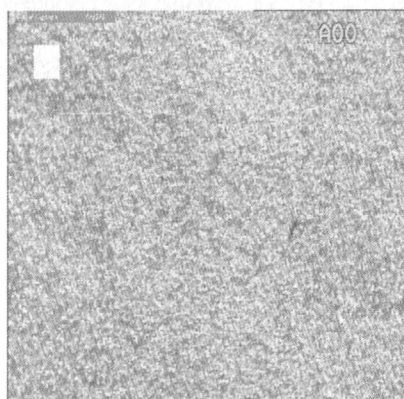


图 2.1 显微镜下实际极板表面放大图

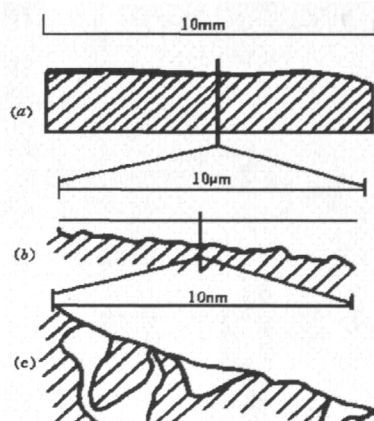


图 2.2 经抛光后的金属表面显微图形

对于一些经过研磨、抛光的固体表面，用眼睛直接观察时好像光滑如镜，十分平坦，但是只要在放大倍数 50 倍左右的显微下观察，情况就完全不一样了，表面呈现出明显的起伏。如图 2.1 是显微镜下实际将金属极板表面放大图，能够看出表面比较粗糙。

如果在电子显微镜下观察，则情况就更不同了。这时表面除了表现出不平整外，还可能有裂缝和空洞。这种情况会随着放大倍数的增大而更为明显^[10]。如图 2.2 是一个抛

光后金属表面显微图形。图 2.2 (a) 为波纹图；图 2.2 (b) 为表面粗糙度；图 2.2 (c) 为表面宏观空洞和微孔结构。其金属表面是相当不平整的，一般认为表面的不平整程度(起伏的波形)的波距，大于 10mm 为形状误差；1~10mm 之间波距为波纹度，小于 1mm 为表面粗糙度讨论的范围。

2.1.2 敏感电容构成分析

常用的各种类型的电容的基本结构相同，都由两片面积较大的金属导体极板中间夹一层绝缘介质组合而成。本文涉及的电容是仅由两块金属导体极板构成，通过对接触金属极板存在微小间距进行研究，提出由两片接触金属导体极板构成敏感电容的设想。

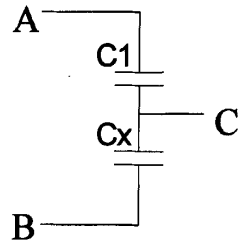


图 2.3 敏感电容形成示意图

电容是表征电容器容纳电荷的本领的物理量，要证明接触金属极板能够构成敏感电容设想的正确性，就要证明敏感电容能否容纳电荷，是否有电容充放电过程。如图 2.3，把 A，B 端接入电路，监测 C 点充放电周期，得出 C_x 是否形成电容。如果 C 点充放电周期和仅连接电容 C_1 周期相同，那么，证明 C_x 导通，即接触金属极板形成导线；如果 C 点充放电周期和仅连接电容 C_1 的周期不同，那么，证明 C_x 不导通，即接触金属极板间能够形成电容。

针对这个设想，详细研究了两种可以测试敏感电容的振荡电路，分别是基于比较器结构的 RC 振荡电路和基于反相器结构的 RC 振荡电路。

1、基于比较器结构的 RC 振荡电路^[11]

a) 介绍：

由于其参考电压会随着比较器结构的变化而变化，在很大程度上抑制了电源上的噪音 R 和 C，所以对频率有影响，并且其关键参数中只有其振荡频率不受工艺影响。其基本原理是通过比较器的反馈使 M1 开关管开闭，改变比较器反相输入端的参考电压，而电容通过 M2 开关管放电。电容上极板电压在两个参考电压之间变化，从而周而复始的振荡。由于其结构的特点，如果外置，只会占用一个芯片管脚，即比较器的同相输入端，

并且可以直接从这个管脚测量振荡频率，也可以从这个管脚直接灌入频率来测试芯片。

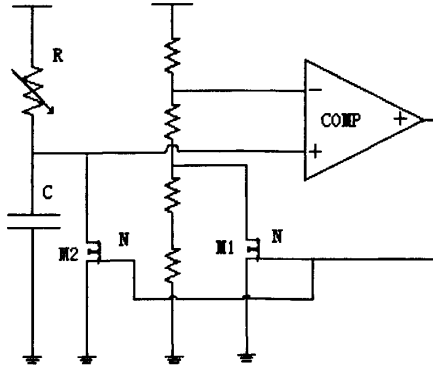


图2.4比较器结构RC振荡器

b) 振荡过程分析:

电源上电后，电阻R开始对电容C充电。电容上极板电压，即比较器正相输入端的电压开始上升。此时M1, M2管处于关闭状态，比较器负相输入端的参考电压为 $3/4V_{DD}$ 。电容上的电压开始上升；

当电容上极板的电压上升至刚好超过 $3/4V_{DD}$ 时，比较器输出立刻跳变为高电平，此时M1, M2管打开。M1管将下面的电阻短路，参考电压迅速降为 $V_{DD}/2$ 。于是电容C通过M2管放电，即比较器正相端电压开始下降，放电电流大小等于M2管抽取的电流减去电阻通路上的电流，M2管抽取电流要远远大于电阻对电容的充电电流。下降时间由M2管抽取电流的能力决定，所以一般情况下，由M2的宽长比会比较大；

当降到 $V_{DD}/2$ 时，比较器输出又迅速跳变为低电平。此时M1, M2管关断。参考电压立即上升到 $3V_{DD}/4$ 。C不再通过M2放电。电源又开始通过R对电容C充电。电容C上极板的电压又开始上升。下一个振荡周期由此开始。由于电压下降时间由M2管抽取电流的大小决定，所以下降沿的时间是一定的，如果电阻调节的范围比较大，波形的占空比在频率较低的情况下会变得不好。在电阻可调所有振荡频率范围都要得到很好的占空比在这里比较困难。为了延缓波形的下降沿，可以在M2管的栅极上接上另外一个RC串连网络，以延长下降沿的时间，稍微改善整形后的占空比，使得下一级的反相器或者触发器能分辨出来，只要经过一次分频后，占空比就变为50%了。

2、基于反相器结构的RC振荡电路

探测模块中，计数芯片选择14位二进制模拟计数器4060，如图2.5，Enable为敏感电容探测端，能够探测到敏感电容充放电的变化，产生振荡信号。如图2.6，虚线为Enable输入端信号波形，即上文提到的RC振荡电路的电容充放电波形；实线为OSC输出波形，即选择4060不同的输出引脚，输出不同时间延时的触发信号。

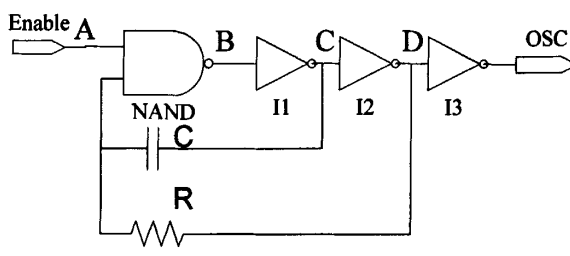


图2.5芯片4060内部电路结构

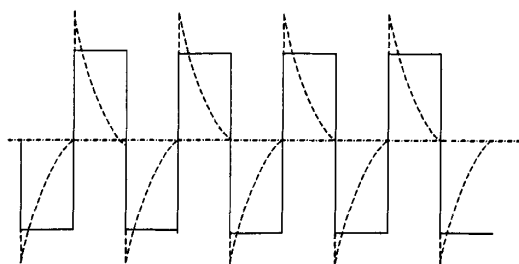


图2.6探测电路波形示意图

1) 内部电路分析:

一般情况下，我们假设反相器的逻辑翻转电压 $V_{LTH} = V_{DD}/2$ 。 V_{LTH} 与MOS管的阈值电压 V_{th} 和MOS管的宽长比有关。开始的时候我们假设电路处在平衡状态，A点的电压刚好等于反相器的逻辑翻转电平，即 $V_A = V_B = V_{DD}/2$ 。

当探测信号Enable从低电平跳变到高电平时，会使点处的电压减小，于是将发生如下的正反馈过程 $V_B \downarrow \rightarrow V_C \uparrow \rightarrow V_D \downarrow \rightarrow V_A \downarrow$ 。 V_B 迅速跳变成低电平，而 V_C 迅速跳变成高电平，电容电压被抬高了 V_{DD} ，升至 $V_{LTH} + V_{DD}$ ，电路进入第一个暂稳态。

这时电容C开始放电，随着电容C放电， V_A 逐渐下降，当 $V_A = V_{LTH}$ 时，又会有另一个正反馈过程发生 $V_B \downarrow \rightarrow V_C \uparrow \rightarrow V_D \downarrow \rightarrow V_A \downarrow$ 。使得 V_B 迅速跳变成高电平，而 V_C 迅速跳

变成低电平，电容电压被迅速拉低到 $V_{LTH} - V_{DD}$ 。电路进入第二个暂稳态，电容C开始充电。当 V_A 升高到 $V_A = V_{LTH}$ 时，路又回到第一个暂稳态，如此周而复始。

2) 数学计算分析

V所需要的时间公式如下：

$$t = RC(V_f - V_i)/(V_f - V) \quad (2.1)$$

式中， V_i ——为电容初始电压值；

V_f ——为电容最终稳定电压值；

V ——为一段时间t后的电容电压值。

电容上电压从过渡过程开始变到反相器的逻辑翻转电平 V_{LTH} 的时间为：

$$t_1 = RC \ln \frac{V_{DD} - (V_{LTH} - V_{DD})}{V_{DD} - V_{LTH}} \quad (2.2)$$

$$t_2 = RC \ln \frac{0 - (V_{LTH} + V_{DD})}{0 - V_{LTH}} \quad (2.3)$$

一般情况下 $V_{LTH} = V_{DD}/2$ ，将其带入上面两式，可得：

$$t_1 = t_2 = RC \ln 3 \approx 1.1RC$$

$$\text{周期} \quad T = 2t = 2.2RC \quad (2.4)$$

由于振荡电路采用反相器结构，做 EMC 验证时在电源中加入脉冲群干扰，其振荡频率直接随干扰变化，因为反相器的翻转阈值电压对于电源电压的变化非常敏感， V_{LTH} 会随着 V_{DD} 的变化而变化。噪声几乎完全叠加到振荡信号上，很难通过 EMC 验证，这是电路结构所导致的固有缺点。在版图布局方面，如果 RC 不是做在芯片内部，会有一个芯片管脚直接接在 MOS 管的栅极上，易将管子击穿。所以需要在反相器输入端连接限流电阻。由于 MOS 器件的输入电流几乎为零，这个电阻对电路的振荡频率几乎没有影响。

2.2 间距与电容相关性研究

2.2.1 常用电容与间距关系研究

常用的电容包括：平行板电容、同轴圆柱形电容和同心球形电容，这三种常用的具有固定电容的共同特征是金属极板面积 S 的线度 \sqrt{S} 远大于其间绝缘介质的厚度。

1、平行板电容

$$C_p = \epsilon S/d \quad (2.5)$$

2、同轴圆柱形电容

$$C_z = 2\pi\epsilon L/\ln(R_2/R_1) = 2\pi\epsilon L/\ln(1+d/R_1) \approx 2\pi\epsilon R_1 L/d = \epsilon S_1/d = \epsilon S/d. \quad (2.6)$$

式中， $S_1 = 2\pi R_1 L$ 为内圆柱面之面积，由于二圆柱面的电场和电势由内圆柱面及其相接触的内层绝缘介质表面之电荷与束缚电荷决定，因此，若用内圆柱面之面积 S_1 为有效面积 S ，则同轴圆柱形电容器之电容 C 也近似用 $C = \epsilon S/d$ 来表示。

3、同心球形电容

$$C_s = 4\pi\epsilon R_1 R_2 / d = \epsilon \sqrt{4\pi R_1^2} \sqrt{4\pi R_2^2} / d = \epsilon \sqrt{S_1 S_2} / d = 4\pi R^2 \epsilon / d = \epsilon S/d \quad (2.7)$$

式中， $R = \sqrt{R_1 R_2}$ ， $S = \sqrt{S_1 S_2}$ 分别为 R_1 与 R_2 及 S_1 与 S_2 之几何平均值。若用二极板面积 S_1 与 S_2 之几何平均值 S 或忽略二极板面积之差，则同心球形电容器之电容可用 $C = \epsilon S/d$ 来表示。

4、横截面为平行四边形之柱形电容

若忽略四个侧面交线处的边缘效应，则截面为平行四边形之柱形电容可看成四个平行板电容并联。由于每个平行板电容器之电容都可表示为 $C_i/d, i=1,2,3,4$ 。

所以，此电容器之电容为

$$C = \sum C_i = (\epsilon/d) \sum S_i = \epsilon S/d \quad (2.8)$$

5、任意横截面之柱形电容器的电容

因为二极板间之距离 d 为恒量且远小于侧面元 $\Delta S = L\Delta l$ 之线度，即 $d \leq \Delta l < L$ 。

所以，可将此任意截面之柱形电容器看成若干个面积为

$$\Delta S_i = L \Delta L_i, \quad S = \sum S_i \quad (2.9)$$

的平行板电容器之并联，或者看成面积为

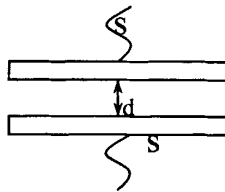
$$\Delta S_i = LR_i \Delta \phi_i, \quad S = \sum L(R \Delta \phi) \quad (2.10)$$

若干个同轴圆弧形电容器之并联。由以上的结果可知，此任意截面形电容也可近似表示为 $C = \epsilon S/d$ [35]。

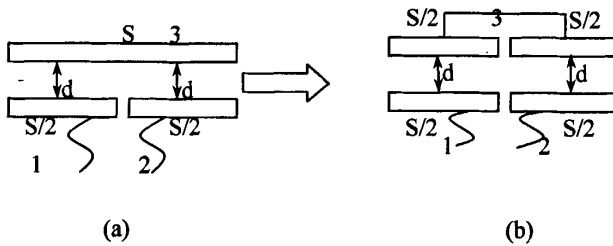
综上所述，三种电容量都可以近似用一个统一的公式 $C = \epsilon S/d$ 来表示，电容量 C 和面积 S 成正比，和间距 d 成反比，间距 d 逐渐变小，电容 C 逐渐变大；反之，间距 d 逐渐变大，电容 C 逐渐变小。

2.2.2 敏感电容极板间距变化研究

电容间距 d 指两片金属导体极板间的垂直距离，电容用公式 $C = \epsilon S/d$ 来表示，和间距 d 成反比，电容随着间距的变化而变化。



2.7 常用电容极板间距变化分析示意图



2.8 敏感电容极板间距变化分析示意图

如图 2.7 是常用电容和极板间距变化分析图，其中上下极板面积相同为 S ，极板间距为 d ，电容等效计算公式为：

$$C = \epsilon S/d$$

如图 2.8 是本课题设计敏感电容和极板间距变化分析图, (a)所示, 上下极板面积不同, 下极板近似两块面积均为 $S/2$ 的极板, 图(b)为图(a)近似等效电路, 敏感电容相当于面积分别为 $S/2$, 极板间距为 d 的两个电容串联, 电容等效计算公式为:

$$1/C = 2d/\epsilon S + 2d/\epsilon S$$

$$C = \epsilon S/4d \quad (2.11)$$

一般电容的电极分别位于电容极板两侧, 如图 2.7 所示, 电容由于极板引线连接, 不适合极板活动改变间距。本文设计的敏感电容, 不是简单的电容两个引线极板之间改变间距, 而是引入第三极板, 通过改变第三极板与两个引线极板间的距离, 间接改变引线极板间距。如图 2.8 所示, 第三极板可以由于重力作用活动, 敏感电容的电极引线极板连接电路。不仅有利于敏感电容电极引出, 不会影响第三极板上下活动, 而且能够提高敏感电容的可靠性。

2.2.3 重力影响分析

敏感电容从环境中得到的一种特定的激励, 称为环境力。即敏感电容放置到被测体上或被测环境中, 受到外界环境的影响。针对本次研究的环境力——重力来说, 在敏感电容受重力影响的变化过程中, 可以被分为两个阶段, 重力作用前和重力作用后。分别对两个阶段进行计算分析, 如下:

1、敏感电容正常放置

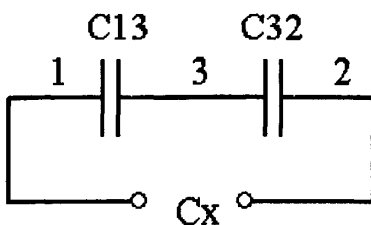


图 2.9 敏感电容电工等效图

如图 2.8 所示, 假设极板间距为 d_1 , 固定极板 1 和活动极板 3 之间的电容用 C_{13} 表

示，活动极板 3 和固定极板 2 相当于电容 C_{32} ，那么敏感电容 C_x 相当于 C_{13} 、 C_{32} 的串联后的电容，如图 2.9 所示。

$$\text{电容 } C_{13} \text{ 表示为} \quad C_{13} = \frac{\epsilon S_1}{d_1} \quad (2.12)$$

$$\text{电容 } C_{32} \text{ 表示为} \quad C_{32} = \frac{\epsilon S_2}{d_1} \quad (2.13)$$

$$\text{电容 } C_x \text{ 表示为} \quad \frac{1}{C_x} = \frac{1}{C_{13}} + \frac{1}{C_{32}} \quad (2.14)$$

$$\text{得} \quad C_x = \frac{C_{13} \cdot C_{32}}{C_{13} + C_{32}} \quad (2.15)$$

$$\text{固定极板面积表示为} \quad S_1 = S_2 \approx S/2 \quad (2.16)$$

$$\text{则} \quad C_x = \frac{C_{13} \cdot C_{32}}{C_{13} + C_{32}} = \frac{\frac{\epsilon S_1}{d_1} \cdot \frac{\epsilon S_2}{d_1}}{\frac{\epsilon S_1}{d_1} + \frac{\epsilon S_2}{d_1}} = \frac{\epsilon S}{4d_1} \quad (2.17)$$

式中： S_1 ——为引线极板 1 的金属表面积；

S_2 ——为引线极板 2 的金属表面积；

S ——为活动极板的金属表面积；

ϵ ——为所充气体的介电常数；

d_1 ——为引线极板 1、2 和活动极板间距。

2、敏感电容倒置放置

引线极板 1 和活动极板 3 之间的距离为 d_2 ，相当于电容 C'_{13} ，活动极板 3 和引线极板 2 相当于电容 C'_{32} ，那么开关内部的电容 C_x 相当于 C'_{13} 、 C'_{32} 的串联，

$$C'_x = \frac{C'_{13} \cdot C'_{32}}{C'_{13} + C'_{32}} \quad (2.18)$$

$$\text{电容 } C'_{13} \text{ 表示为} \quad C'_{13} = \frac{\varepsilon S_1}{d_2} \quad (2.19)$$

$$\text{电容 } C'_{32} \text{ 表示为} \quad C'_{32} = \frac{\varepsilon S_2}{d_2} \quad (2.20)$$

$$\text{固定极板面积表示为} \quad S_1 = S_2 \approx S/2$$

$$\text{则:} \quad C'_x = \frac{C'_{13} \cdot C'_{32}}{C'_{13} + C'_{32}} = \frac{\frac{\varepsilon S_1}{d_2} \cdot \frac{\varepsilon S_2}{d_2}}{\frac{\varepsilon S_1}{d_2} + \frac{\varepsilon S_2}{d_2}} = \frac{\varepsilon S}{4d_2} \quad (2.21)$$

式中： S_1 ——为引线极板 1 的金属表面积；

S_2 ——为引线极 2 的金属表面积；

S ——为活动极板的金属表面积；

ε ——为所充气体的介电常数；

d_2 ——为引线极板 1、2 和活动极板间距。

当敏感电容正常放置时， d_1 较大，敏感电容 $C_x = \varepsilon S/4d_1$ 较小；当敏感电容倒置后，由于重力影响， d_2 变小， $d_2 < d_1$ ，敏感电容 $C'_x = \varepsilon S/4d_2$ 变大，即 $C'_x > C_x$ 。因此，敏感电容在倒置前和倒置后比较，电容明显不同。活动极板在重力作用前，极板间的间距较大，敏感电容值较小；在重力作用后，较大的重力加速度使得活动极板瞬间落在固定极板上，极板间距突然变大，电容值在很短时间内变大。

2.3 敏感电容的结构分析

2.3.1 外界环境分析

敏感电容在被测体实际运动的过程中受外界环境影响。被测体，可能是飞行中的弹丸，几千米深的石油井下，做功运动中的内燃机活塞炮弹或导弹发射过程中全弹道的动态参数和（或）压裂的动态参数；内燃机活塞实际工作时的应力场、温度场；火炮发射时的膛压；弹上电池在弹丸实际发射过程中的动态参数；子母弹抛撒的动态参数；弹药

毁伤效果评价，冲激波、压力场、温度场、振动；高速撞击过程的动态参数等等可能是飞行中的弹丸，几千米深的石油井下，做功运动中的内燃机活塞等。要求敏感电容放置到被测体中或被测环境中，承受与被测体相同的恶劣环境的作用^[9]。因此，根据环境的不同，来确定及选取敏感电容的材料。

2.3.2 结构研究

敏感电容结构包括密封壳体和金属极板，壳体选用耐高温、高压和绝缘性良好的材料，并且能够承受高温、高压等恶劣环境作用。壳体内有能够活动的金属极板和可以连接引线的固定金属电极，且极板材料也选用耐高温、高压材料。

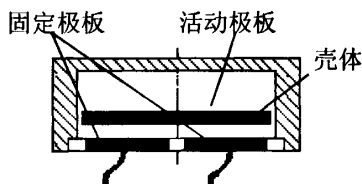


图 2.10 敏感电容结构示意图

如图 2.10 所示，为敏感电容结构示意图，阴影部分为敏感电容壳体，材料选择耐高温高压的绝缘材料。图中活动极板和固定极板黑色部分为金属，导电性能良好；固定极板的白色部分为绝缘介质，能够防止两端引线导通。密封在壳体内的连接引线的固定极板和活动极板形成变间距的电容。固定极板嵌在壳体上，电容引线分别从固定极板两端金属部分引出，作为敏感电容的电极；活动极板能自由活动，活动极板在重力作用下，靠近并接触固定极板，活动极板和固定极板的间隙减小，敏感电容值变大。

敏感电容的结构中，固定极板比较重要，一般电容的电极分别位于电容极板两侧。本文设计固定极板不是一块导通的金属，而是一块两端金属部分不导通的极板。因为，其中一块极板由于重力作用活动，即要求敏感电容的电极不适合从活动极板引出，此设计不仅避免了活动极板引线带来的不便，而且增加了敏感电容的稳定性和可靠性。

如图 2.11(a)或(b)，把固定极板分为不导通的两块金属极板，即把中间小部分导电金属腐蚀掉。有利于敏感电容电极引出，不会影响固定极板上下活动。一块金属极板由于重力原因，落在另一块金属极板上，在活动极板落下之前，如图 2.11 (a)活动极板和固定极板之间有一定的距离；如图 2.11 (c), (d)，可以近似为电容；极板落下之后，如图 2.11(b)，

能够形成电容，记为 C_x 。

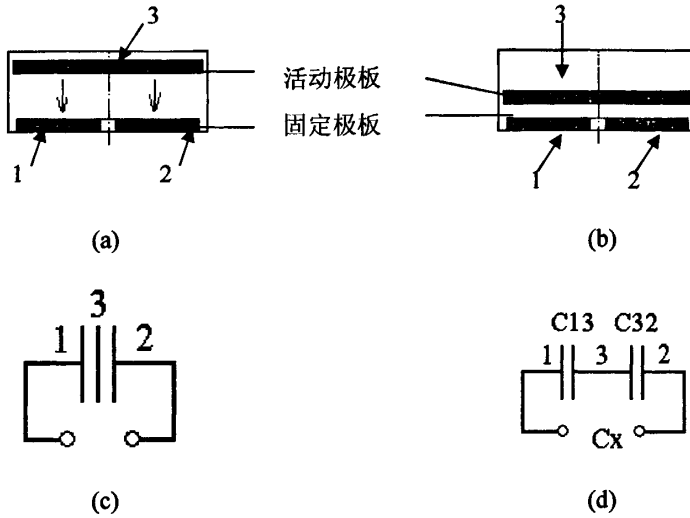


图 2.11 敏感电容形成简单示意图

2.4 小结

本章主要对金属表面进行微观研究，提出接触金属极板间存在微小距离，能够构成敏感电容测试理论设想，并且分析了测试敏感电容的研究方法；结合间距和电容间的相关性理论，分析了金属极板间距变化对敏感电容变化的影响；对敏感电容的结构进行了研究。

3 基于振荡电路电容开关的设计

3.1 电容开关设计的要求

新概念动态测试是为适应国防建设和经济建设新的发展而提出的，它是测试技术的发展和进步，为动态测试技术增添了新的理论内涵。新概念动态测试系统受体积、重量和功耗等因素的限制；外界测试环境对测试系统的干扰以及测试系统对测试环境的干扰等。电容式微功耗重力开关。

本文研究分析的基于敏感电容研究的电容式微功耗重力开关，是在新概念动态测试系统前提下提出的，需要放置到被测体中或被测环境中，承受高温、高压等恶劣环境作用，材料的选用必须适合被测环境。

设计指标：

- 1、低驱动电压。微型开关的驱动电压 3.3V。
- 2、低功率损耗。当开关没有倒置之前，处于‘关’的状态，电路工作电流只有几个微安；开关倒置后，电路工作电流几百微安。
- 3、高可靠性。开关在一定时间延时后输出触发信号，启动动态测试系统，防止电路误触发或系统误启动。
- 4、微型体积、工艺简单。本发明采用可导电的活动极板、固定极板作为电极，结构简单，小体积，易制作，成本低等特点。

3.2 电容式微功耗重力开关设计

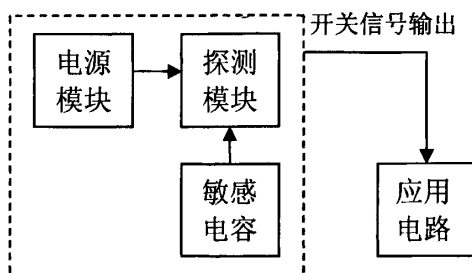


图 3.1 开关设计原理框图

本文研究的电容式微功耗重力开关，不需要人为操作，能实现开关‘关’状态和‘开’

状态的单向转换。当敏感电容正常放置时，金属极板间距较大，电容小，探测电路不能检测到敏感电容变化；当敏感电容倒置时，金属极板间距变小，电容变大，探测电路检测到电容充放电，开始计数，经过一定延时时间，输出上升沿触发系统启动。

如图 3.1 所示：开关由三个模块组成，分别是电源模块、探测模块和敏感电容两个部分。探测模块是负责探测敏感电容变化的电路，当敏感电容瞬间变大，探测模块根据敏感电容的变化，向应用电路发出触发信号启动系统。

3.2.1 敏感电容设计

敏感电容包括密封壳体、密封壳体内易导电活动极板 3 和固定于密封壳体内底部易导电的、不连接的、边缘有绝缘介质的两个固定极板 1、2，见第二章的图 2.5 所示，两个固定极板 1、2 各有一个电极引线。所述的密封壳体可以为绝缘介质壳体，也可以是内、外镀一层绝缘介质的合金壳体；考虑到防止活动极板 3 会在密封壳体内打转，在壳体高度设计必须大于 h ， $h = d_{\text{固}} + d_{\text{活}} + d_{\text{间隙}}$ ，其中： $d_{\text{固}}$ 是固定极板固有厚度； $d_{\text{活}}$ 是活动极板固有厚度； $d_{\text{间隙}}$ 是影响敏感电容引起振荡的最小间距。当敏感电容正常放置时，动极板 3 在固定极板另一端时，动极板和定极板的间隙大于 $d_{\text{间隙}}$ ，构成的电容较小，不能引起振荡电路产生振动；当敏感电容倒置后，活动极板靠近固定极板，间隙逐渐变小，构成的电容逐渐变大，直到能够引起振荡电路振荡，通过探测电路产生一个触发信号启动系统。

为了防止电路误触发，活动极板和固定极板完全与壳体绝缘，在固定极板的边缘设计绝缘介质；为避免固定极板 1 和 2 本身构成一个电容，在加工的时候尽量使固定极板（例如：附铜板）的厚度减到最小，可以减小误差；振荡电路没有严格要求（例如：RC 振荡电路）；计数电路没有具体的限制，可以选择具有计数功能的芯片（例如：4060）；密封壳体没有严格要求的形状（例如：圆柱筒）；密封壳体内所充气体，没有严格要求（例如：空气）。

3.2.2 电源研究及选取

1. 电源研究

电源的种类很多，比如像大功率稳压电源、可调开关电源、蓄电池组充电电源、可调直流稳压电源、直流稳压开关电源等等。

电源部分选择用直流电源，直流稳压电源一般分为化学电源，线性稳定电源和开关电源，各自具有不同的类型和特点：

化学电源：常用的有干电池、铅酸蓄电池、镍铬、镍氢、锂离子电池均属于化学电源。随着科学技术的发展，又产生了智能化电池；再充电电池材料方面，美国研制人员发现锰的一种碘化物，用它可以制造出便宜、小巧、放电时间长，多次充电后仍保持性能良好的环保型充电电池。

线性稳定电源：有一个共同的特点就是它的功率器件调整管工作在线性区，靠调整管之间的电压来稳定输出。由于调整管静态损耗大，需要安装一个很大的散热器给它散热。而且由于变压器工作在工频50Hz上，所以重量较大。虽然稳定性高，波纹小，可靠性好，但是体积大，较笨重，效率相对较低，不适用于本设计。

开关型直流稳压电源：它的电路形式主要有单端反激式、单端正激式、半桥式、推挽式和全桥式。它体积小，重量轻，稳定可靠。和线性电源的根本区别在于它变压器不工作在工频面而是工作在几万赫兹到几兆赫兹。属于工作在高频段的电源，不能用于本设计中^[36]。

2. 电源选取及特点

本设计所用电源的要求是能为电路提供稳定直流电并且输入电压为3.3~5V输出为3.3V的电源。经过分析，本设计采用直流电源芯片MAX894，这个电源特点如下：^[37]

- 1) 输入电压从+2.7V到+5V，一般的小型电池给它提供合适的电压就可以了；
- 2) 静态工作电流仅0.1 μ A，工作电流16 μ A，符合本设计中低功耗的要求；
- 3) 芯片体积大约是5mm \times 5mm \times 1.2mm，符合微小体积要求；
- 4) MAX894内部电路保护输入提供反超载，热量超载保护限制热量逸散和连接点温度，当连接点温度超出+135 $^{\circ}$ C时，电源停止工作，当设备冷却到10 $^{\circ}$ C时，电源可以开始工作，在高温条件不会损坏电源。

MAX894也是一种短路保护电源。在产品短路或电流过载情形下，过载电流通过或者开关由内部当前限制的放大器限制 $1.5 \times I_{LIMIT}$ 。当条件被去除，复制品放大器当前

的极限回到 I_{LIMIT} 的情况下，开关关闭和分开输入提供从产品。当前限制的放大器然后慢慢地起动开关以输出电流被限制 $1.5 \times I_{SET}$ 条件被去除，电流过载极限回到 I_{LIMIT} ^[37]。

3. 电源连接

MAX894 输入电压范围是 2.7V 到 5.5V，可编程进行电流限制，其最大电流达到 500 mA，SETA，SETB 是输出选通开关。选通时最大静电流是 16 μ A，没有选通是 0.1 μ A。电源连接电路时，如图 3.2，在电路中安置一个接地的电容器 C_3 、 C_4 ，当信息输入时，电容器将会限制输入电压，使产品不会出现间断性的短路情况。0.1 μ F 电容是应用最为广泛的^[37]。但是电容器的更高的价值在于进一步减少输入电压的下落。在布局 and 散逸热量时要考虑到利用电源反应时间的输出短路情况，这是非常重要的，因为可以减少寄生感应。要安装尽可能和输出电容器一样紧密的输出设备。在正常工作状态下，设备能消散掉热量^[39]。

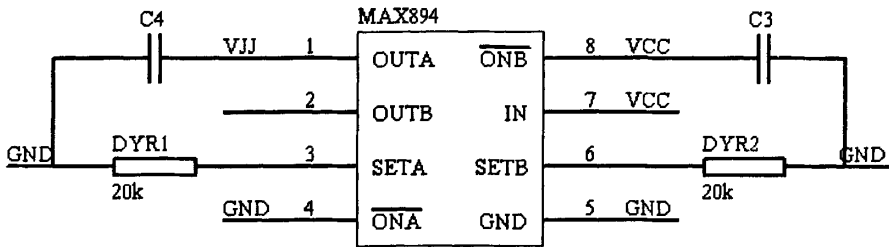


图 3.2 电源电路图

3.2.3 敏感电容探测电路设计

针对目前微小电容探测方法进行分析比较，介绍了本课题敏感电容探测方法和实现基本原理。如图 3.3 是敏感电容连接探测模块示意图，虚线部分为 RC 振荡电路， C_x 为敏感电容，当 C_x 电容值变化，直接影响振荡电路中电容充放电；计数延时芯片能够记录振荡电路充放电次数，用户根据所需时间延时，选择计数芯片不同引脚输出触发信号延时时间不同，启动应用电路。

图3.3中实线框的部分为电容充放电电路，即 R_2 与 C_1 和 C_x 串联后电容 C_3 的充放电电路。RC振荡电路中，要求 $2R_2 < R_1 < 10R_2$ ，电容选择直接影响RC电路是否振荡。如下

分情况讨论：

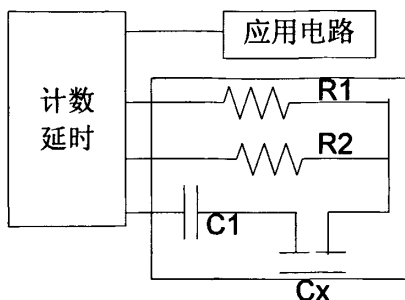


图 3.3 探测模块示意图

(1) 敏感电容极板完全导通（如图）

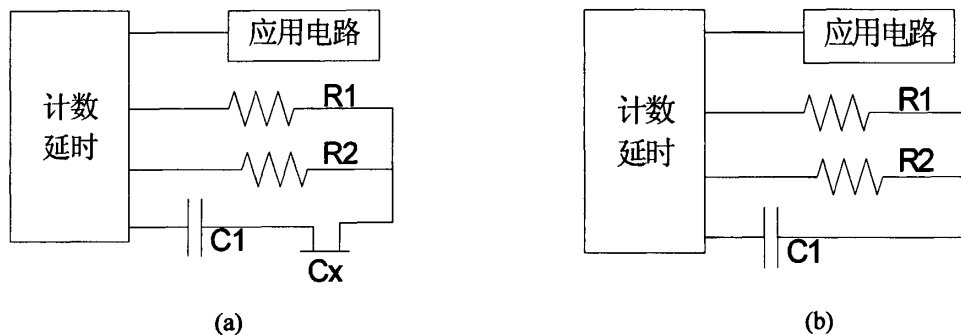


图 3.4 敏感电容完全导通示意图

敏感电容的上下极板完全接通，即 C_x 相当于导线，串联后的电容 $C=C_1$ ，如图 3.4

(b) 是图 3.4 (a) 的等效电路图，则 R_2 与 C_1 也能构成 RC 振荡电路，如果选择 C_1 的电容值在振荡范围，那么，电容能够充放电。

(2) 敏感电容极板不导通

两个极板完全没有接通， C_x ，是电容值相同的 C_2 和 C_3 串联，相当于间隙很小的电容，如图 3.5 (a) 等效电路图 3.5 (b)， C_1 和 C_x 串联后的电容比 C_1 、 C_0 中任何一个值都小，设串联后的电容为引线极板 1 和活动极板 3 之间的距离为 d_2 ，真空介电常数为 ϵ ，由第二章公式(2.6)得

$$C_x = \frac{C_2 \cdot C_3}{C_2 + C_3} = \frac{\epsilon S}{4d_2} \quad (3.1)$$

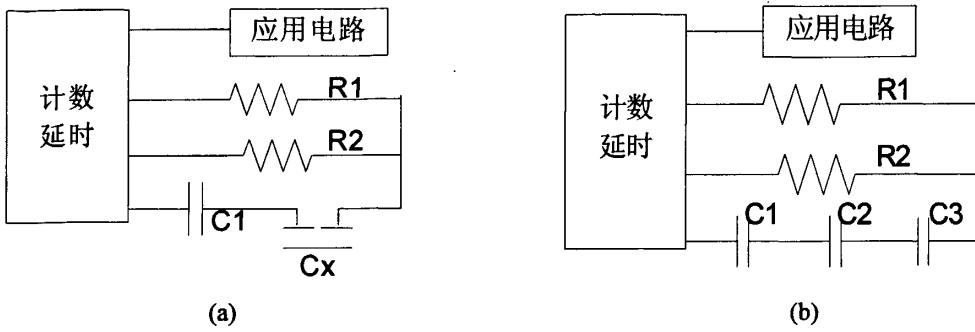


图 3.5 敏感电容不导通示意图

- a. 当 $C_1 > C_x$ 时，串联后的电容小于 C_x ，那么要求只有电容 C_x 时就能够起振，但是，这样没有把握确定电容 C_x 的值。
- b. 当 $C_1 < C_x$ 时，串联后的电容小于 C_1 ，那么要求只有 C_1 时能够起振，就可以起振。

(3) 敏感电容极板部分导通

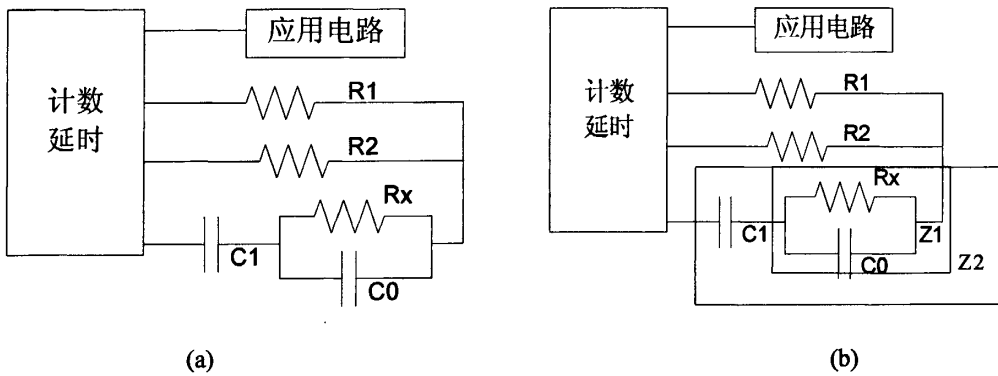


图 3.6 敏感电容部分导通示意图

(3)、两个极板部分接触，部分有缝隙

C_x 就相当于一个电阻 R_x 和一个电容 C_0 并联，再和 C_1 串联，如图 3.6 所示，(b) 为 (a) 的等效电路图。

$$Z_1 = R_0 // \frac{1}{j\omega C_0} = \frac{R_0}{1 + \frac{1}{j\omega C_0}} = \frac{R_0}{1 + j\omega C_0} \quad (3.2)$$

$$Z_2 = \frac{1}{j\omega C_1} + Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_0}{1 + j\omega C_0} = \frac{1 + j\omega C_0 + j\omega C_1 R_0}{j\omega C_1 - \omega^2 C_0 C_1} \quad (3.3)$$

由上述分析得，在RC振荡电路中，假如电容 C_1 直接换为 C_x ，在第一种情况下，不能形成RC振荡电路。本次设计中，保留了 C_1 ，并且与 C_x 串联，能够有效提高振荡电路的稳定性和可靠性。

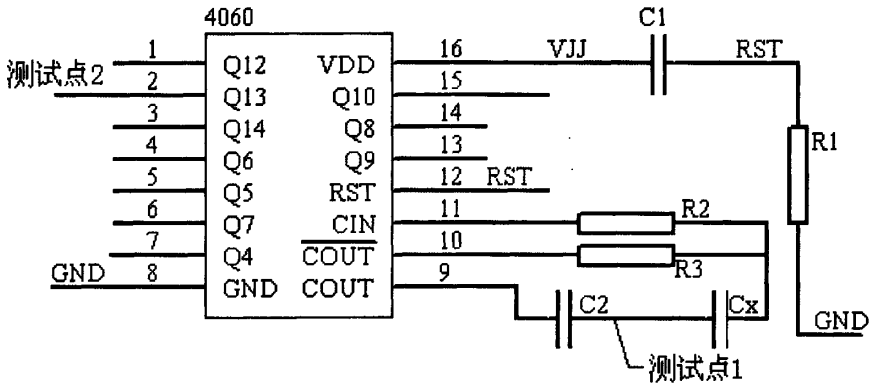


图3.7探测电路原理图

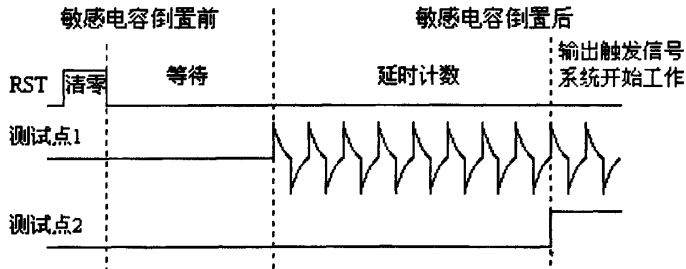


图3.8探测电路工作时序图

图3.7是探测电路原理图，通过重力作用改变电容 C_2 的大小，从而引起整个电路中的RC电路的振荡。4060内含振荡器及14级计数单元时钟振荡周期 $t = 2.2R_2 \times C$ ，要求4060对电阻有要求，对电容没有严格要求，否则不易起振。所以，当4060内含振荡器起振时，会输出一个方波信号。

图3.8是探测电路工作时序图，在敏感电容倒置前，探测电路上电的一瞬间4060计数器首先清零，防止重复计数，然后等待；敏感电容倒置后电容 C_x 值变大，引起RC振荡

电路的振荡，探测电路检测到电容充放电，4060对振荡信号进行计数，所需时间延时后输出高电平。

从上述分析可以看出，因为振荡频率和MOS管的电压有关，即振荡频率和RC振荡电路的电容充放电的电压有关，所以振荡频率会随电容改变而变化。芯片4060具有计数功能，能够记录RC振荡电路电容充放电次数，选择不同引脚输出，实现延时输出触发信号，防止敏感电容瞬间变化后，电路误触发，提高开关的可靠性。

3.3 小结

本章首先分析了开关设计的具体要求，提出采用RC振荡电路作为设计核心，设计与敏感电容相关的探测电路模块，当敏感电容值满足一定值时引起RC电路振荡，探测电路对振荡产生的电容充放电信号进行计数，实现延时开关功能。设计部分可以采用一般元器件实现，也可以采用集成芯片实现，本设计选用的是4060芯片，经过延時計数后，产生触发信号，对应用系统实现由‘开’和‘关’的单向转换，深入分析了振荡电路的各种情况，并提出一种提高开关稳定性的方法。

4 电容开关的制作工艺

新概念动态测试与系统微型化：新概念动态测试所需的技术包括存储测试技术及存储测试、无线控制及转发技术、遥测技术、近场（程）遥测技术、无线电近场遥测、红外近程遥测、激光测试技术等等。但是无论哪种技术的开发应用都会面临一个相同的问题：所设计系统的体积、功耗、可靠性问题^[4]。

因为开关必需放置到被测体上或被测环境中，因此需满足：微小体积；低功率损耗；对严峻环境的耐受能力。因此，开关的材料选取、制作工艺直接影响其性能。本章研究了开关的材料，进行了金属表面微观分析，详细陈述了开关的制作过程。

4.1 敏感电容材料研究

4.1.1 材料研究

敏感电容壳体材料选择绝缘性良好的尼龙棒，尼龙棒具有韧性好、耐磨力强、耐油、抗震、拉伸、弯曲强度好，具有尺寸稳定性好等特点，因而被用来加工各种耐磨的高强度零件。敏感电容内金属极板用敷铜板制作，具有制作简单、易加工、成本低等特点。且铜是人类发现最早的金属之一，也是最好的纯金属之一，铜在自然界储量非常丰富，并且加工方便。熔点 $1083.4 \pm 0.2^\circ\text{C}$ ，沸点 2567°C ，稍硬、极坚韧、耐磨损。有很好的延展性，导热和导电性能较好，较好的耐腐蚀能力，在干燥的空气里很稳定。

4.1.2 平面度、粗糙度影响分析

直线度和平面度是表示零件形状的主要几何要素之一，在许多场合下，它们是影响仪器和机器精度、性能、质量的重要因素，在有些条件下，甚至是决定的因素。美国韦恩·R·穆尔^[5](Wayne. R. Moore)在其1970年出版的著作《机械精度基础》(Foundations of Mechanical Accuracy)中提出：有四种机械技术构成了机械精度的基础。这四种机械技术是：几何精度；长度标准；圆分度；圆度。其中保证几何精度的基础则是平面和直线。例如，机床的全部几何精度是以平面为基础的。由此，可以看出直线度和平面度在机械精度中的重要地位和作用^[6]。

表面粗糙度是指加工表面具有的较小间距和微小峰谷不平度。其两波峰或两波谷之

间的距离（波距）很小（在 1mm 以下），用肉眼是难以区别的，因此它属于微观几何形状误差。表面粗糙度越小，则表面越光滑^[8]。这种微观几何形状的尺寸特征，主要是由切削过程和其他因素所形成。

国家标准规定，表面粗糙度的评价参数主要有以下三个：轮廓算数平均差(R_a)，微观不平度十点高度(R_z)和轮廓最大高度(R_y)^[24]。

(1)轮廓算数平均偏差 R_a

在取样长度 l 内，测量表面上一些点距中线 m 的距离 y_1, y_2, \dots, y_n ，取其绝对值的算数平均值，用公式表示为

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (4.1)$$

其近似表达式为：

$$R_a = \sum_{i=1}^n \frac{|y_i|}{n} \quad (4.2)$$

表 4.1 不同粗糙度的取样长度和评定长度

参数及数值(μm)		L	Ln
Rn	Ri		
$\geq 0.008 \sim 0.02$	$\geq 0.025 \sim 0.1$	0.08	0.4
$> 0.02 \sim 0.1$	$> 0.1 \sim 0.5$	0.25	1.25
$> 0.1 \sim 2.0$	$> 0.5 \sim 10.0$	0.8	4.0
$> 2.0 \sim 10.0$	$> 10.0 \sim 50.0$	2.5	12.5
$> 10.0 \sim 80.0$	$> 50 \sim 320$	8	40.0

(2)微观不平度十点高度 R_z

在取样长度内，从平行于中线的任何一条线起，到被测量轮廓的五个最高峰 ($y_{p1}, y_{p2}, \dots, y_{p5}$) 与五个最低谷 ($y_{c1}, y_{c2}, \dots, y_{c5}$) 平均值之和为：

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{ci}}{5} \quad (4.3)$$

(3)轮廓最大高度 R_y

在取样长度内，除去个别明显的偏离值之后，过最高峰和最低谷，分别作平行于中线的平行线，这两条平行线间的距离称轮廓最大高度，以 R_y 表示。

国标 GB3505-83 中规定用轮廓算数平均偏差 R_a 和微观不平整十点高度 R_z 两个参数表示粗糙度。根据 R_a 和 R_z 的数值大小，将粗糙度划分为 14 个级别，以 $\nabla_1 \sim \nabla_{14}$ 表示。对于 9~14 级的范围，每个级别之间又细分为 a, b, c 三个小级^[25]。

(4)表面粗糙系数 R

对于一些多晶材料、薄膜材料以及有孔的材料，它们形状复杂，除了外表面外还有内表面，一般采用粗糙系数(roughness factor) R 来表示， R 定义为 $R = A_r/A_q$ ，式中 A_q 为几何表面， A_r 为实际表面。 A_r 一般是通过吸附试验按照吸附公式计算出来的。如果表面不平整，而且有孔， A_r 就大， R 也就大。一些材料的比表面和粗糙系数如表 4.2 所示。

表 4.2 常用材料的比表面和粗糙系数

材料	加工条件	测试气体	比表面 (m ² /g)	粗糙系数
纯铁	1000°C 烧氢, 210 金刚砂 抛光, 苯去脂	C2H5	/	1.22
	2 号金刚砂抛光, 苯去脂	C2H5		3.4
铁膜	/	Kr	22.6	60
铝	箔	Kr	/	6
	板材抛光	Kr		1.6
	阳极氧化层, 厚 20μm	Kr		200~900
镍	抛光	Kr	/	9.7

4.1.3 高温下微观分析

高温环境下，固体表面原子的振幅通常要大于体内好几倍。因此表面热导、热胀系数等都明显高于体内^[30]。X 射线形貌分析表明。在低于熔点时，由于表面附近原子的强

烈热振动，会在表面及其附近生出很多的表面位错、空位凝聚团、滑移带，这些都表明表面区是高度形变的。此外还可能感生出微裂缝，使表面区分裂，出现小晶块。通过以上讨论，可以认为，高温时固体表面振幅大的原子离开平整表面，成为台阶，留下很多空位。从能量的观点来看，表面的很多空位，从分散状态成为凝聚态(几个空位合并成空位团)能使自由能降低，因此空位往往凝聚在一起，进一步会形成微观孔或微裂缝^[31]。图 4.1 表示团体表面附近的原子排列：

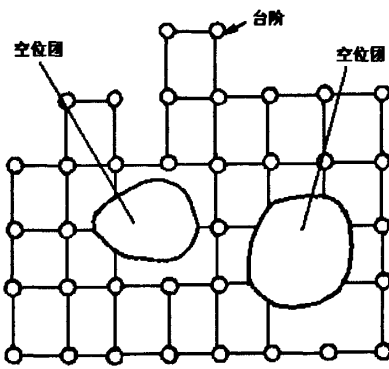


图 4.1 固体表面附近的原子排列图

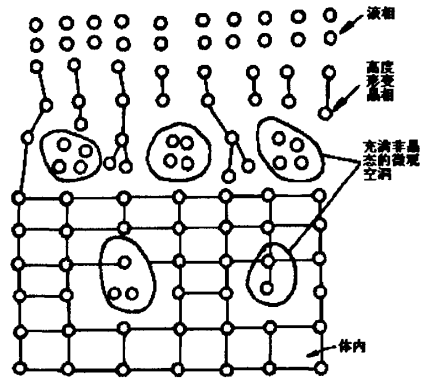


图 4.2 高温下固体表面原子排列示意图

如前所述，晶界原子活动能力强，所以在不到熔点前已开始熔解。该处杂质的扩散系数也很大，它将向体内扩散^[32]。一般来说，扩散都是通过空位机内进行。所以晶界上会有空位的积累和凝聚，并进一步感生出位错、滑移带和微裂缝。当表面附近或晶界处形成了足够的空位团或微观空洞之后，在高温下，其周围晶格上的原子可能会“蒸发”到这些微观空洞上，成为“气”相或非晶态相^[33]。

通常的非晶态相与晶态相的热胀系数差别很大，故在交界处会产生张应力，于是又进一步感生位错、滑移带、微裂缝等从而增大表面和晶界的畸变和活动能力^[34]。图 4.2 是一个在熔点附近的高温表面或晶界附近原子排列示意图。对于单晶固体、出于表面原子的能量大，活动性高，熔融会首先在整个表面上发生。对多晶体而言，晶界和表面原子的能量和活动性较体内大，熔融会首先从表面和晶界处发生，而多晶体中晶界的面积远大于它的表面积。

4.2 开关制作

4.2.1 敏感电容制作

从理论研究和实际应用上来看，结构动态设计主要包含结构动态修改和结构优化设计两方面内容。其中优化设计的过程主要是基于已发展的相对成熟的优化理论来进行，而结构动态修改是近些年来才发展起来的一个相对新兴、活跃的研究领域，其本身就带有设计的性质，同时也是动态设计中的关键所在，因此，结构动态修改将是整个设计的重点所在。

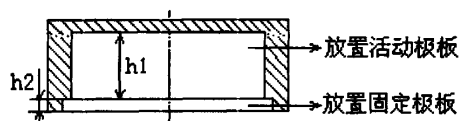


图 4.3 敏感电容壳体结构放大示意图



a.活动极板平面示意图

b.固定极板平面示意图

图 4.4 极板平面示意图

在本课题的设计中，敏感电容设计尤为重要。敏感电容包括密封壳体、密封壳体内易导电活动极板 3 和固定于密封壳体内底部易导电的、没有连接的、边缘有绝缘介质的两个固定极板 1、2，两个固定极板 1、2 各有一个电极引线。

密封壳体设计为圆柱体状，绝缘介质壳体——尼龙，如图 4.3，敏感电容壳体结构放大示意图，壳体外部体积为设计为 $\pi \times 7\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，壳体的内部用来放置活动极板，高度 h_1 为 1.5mm，壳体的台阶上放置固定极板，高度 h_2 为 1mm。极板一般用敷铜板即可，极板厚度为 0.5mm，如图 4.4(a)，活动极板敷铜面（即阴影部分）的直径为 9mm，如图 4.4(b)，固定极板敷铜面（即阴影部分）的半圆半径为 4mm，而白色的部分是绝缘介质。

电容式微功耗重力开关工艺流程如图4.5所示，用一块敷铜板（见图4.5a）制作固定

极板。首先把敷铜板中间敷铜的部分腐蚀掉，成为两个敷铜面不连接的半圆敷铜板。通常制作印刷电路板用三氯化铁来腐蚀，但这种方法需要时间长，而且加温不便，如温度过高又会引起漆皮脱落，甚至把线路腐蚀断。我用的是一种过氧化氢（双氧水）与盐酸来腐蚀印刷电路板的方法，具有操作简便、速度快、成本低等特点。

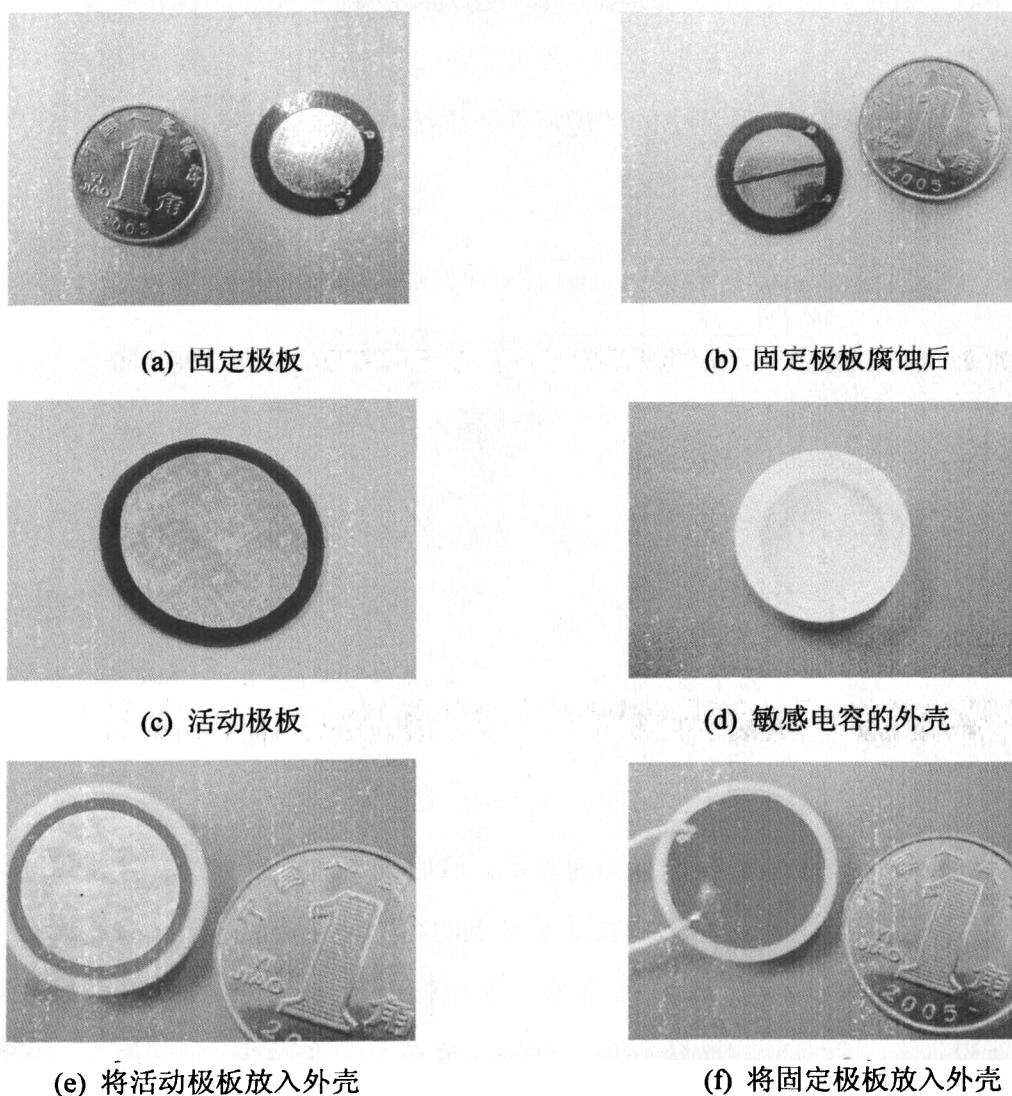


图 4.5 敏感电容制作流程

腐蚀液配置方法：把浓度为31%的过氧化氢（工业用）与浓度为37%的盐酸（工业用）和水按1：3：4比例配制成腐蚀液。先把4分水倒入盘中，然后倒入3分盐酸，用玻璃棒搅拌再缓缓地加入1分过氧化氢，继续用玻璃棒搅匀后即可把用漆描绘过的（也可用透明胶带粘贴用小刀裁去不用的部分）铜箔板放入，一般五分钟左右便可腐蚀完毕，取出铜箔板，用清水冲洗，擦干后就可使用了（见图4.4b）。两极板敷铜一面分别镀一层

石蜡。其中，敷铜板上两个半圆面分别引出两个过孔，方便引出电极。

把活动极板（见图 4.5c）放入敏感电容外壳（见图 4.5d），将活动极板放入壳体底端，敷铜面朝上（见图 4.5e），最后将固定极板有敷铜的一面面对活动极板敷铜面放入壳体（见图 4.5f），固定极板的两端分别引出导线，用于连接电路，制作出敏感电容。

制作工艺要求，第一，要求敏感电容的固定极板和活动极板相对应的面积保持一致；第二，固定极板和活动极板接触表面应当比较光滑；第三，开关壳体内的高度必须大于 h ，

$$h = d_{\text{固}} + d_{\text{活}} + d_{\text{间隙}}。$$

4.2.2 探测模块制作

探测电路包括 RC 振荡电路和 4060 计数器，在制作 PCB 电路板时，注意 4060 芯片和 RC 振荡电路的位置，图 4.6 圆圈部分为 RC 振荡电路的位置。图中可以看出，RC 振荡电路电容、电阻没有随意摆放放置，否则会影响电容充放电，降低电路的稳定性和可靠性。焊接电路应注意：首先，观察印制电路板是否存在问题，例如是否有明显的裂痕，有无短路、开路等现象，检查一下电源和地线之间是否有短接现象；其次，安装元件或芯片，为了保证电路板正常工作，分块儿焊接各个部分，如果电路虚焊，会直接影响整个电路工作，或出现大电流现象。图 4.7 为制作的开关成品，左端第二根引线为开关输出端。

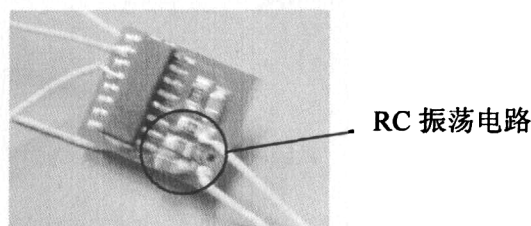


图 4.6 探测电路图

输出端 Q13 →

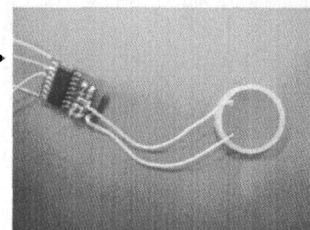


图 4.7 开关成品

4.3 小结

本章介绍了电容式低功耗重力开关材料、加工尺寸，详细描述了敏感电容和探测电路的制作过程。敏感电容壳体是良好的绝缘体，金属极板加工简单、易制作，固定极板独特设计有效的提高了敏感电容的可靠性。这种电容式低功耗重力开关设计简单，而且探测模块有防止电路误触发或系统误启动等功能。

5 开关性能测试

5.1 性能测试实验

5.1.1 芯片测试实验

1、测试原理

4060 芯片性能受敏感电容影响,所以,在本小节主要研究没有连接敏感电容时 4060 芯片的工作性能,实验原理图如图 5.1 所示,将 RC 振荡电路连接到 4060 输入引脚端,测试点 1 是检测电容 C_2 充放电测试端,通过改变 C_2 电容值,测试 RC 是否振荡。

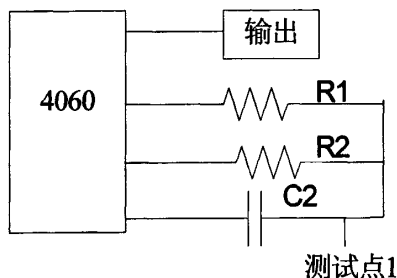
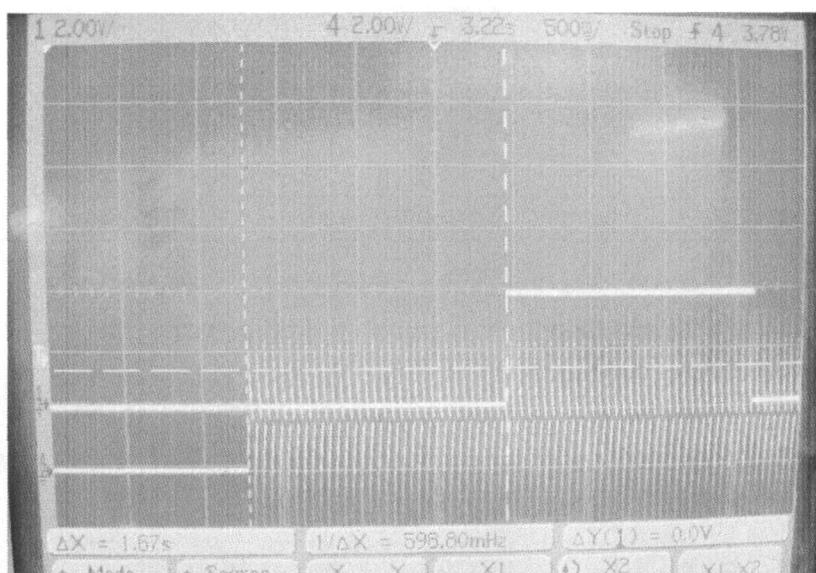


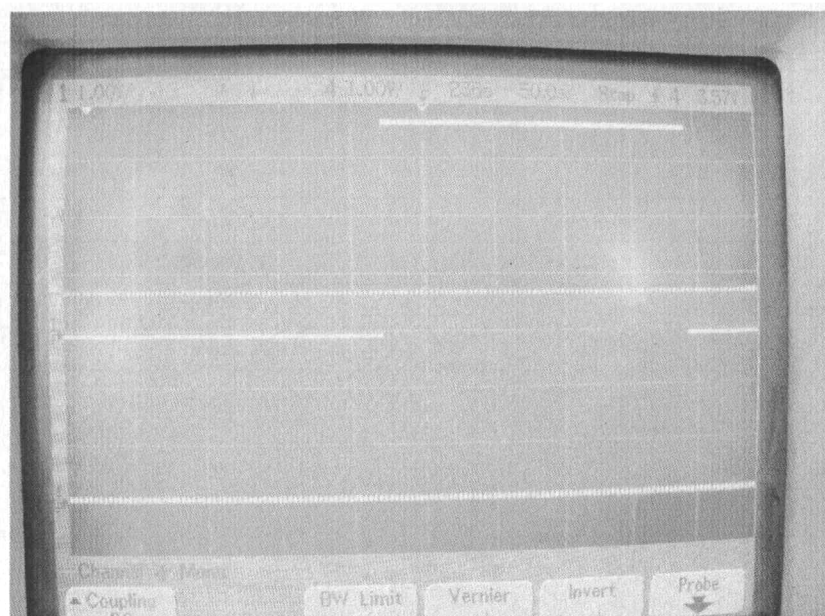
图 5.1 实验原理图

由于测试电路时所用的电阻、电容比较多,不可能将全部测试的电阻、电容用来检测,目的就是寻找使 RC 振荡电路振荡的最小电容、电阻匹配值。综合考虑经济和试验效率的因素,选取电阻 $R_2 = 9.1K, 18K, 36K$ 时,电容 C_2 选择 $0.5pF \sim 2.2\mu F$ 测试,表 5.1 数据显示,当固定电容 $C_2 > 1pF$, RC 振荡电路中电容 C_2 才能够充放电。

图 5.2 是测试电容 $C_2 = 2.2\mu F$, $R_2 = 9.1K$ 时测试的波形图,图 5.2 (a) 为电容 C_2 充放电和引脚 Q_6 输出波形图,其中,下位置是测试电容 C_2 充放电波形,充放电周期 $t_1 = 54ms$,上位置是引脚 Q_6 输出波形图。引脚 Q_6 在记录 C_2 充放电 2^5 次后输出高电平,即 $T_1 = 54ms \times 2^5 = 1.7s$ 后输出高电平;图 5.2 (b) 是测试不同输出引脚波形图,其中,下位置是引脚 Q_6 输出波形图,测得输出周期 $T_2 = 3.5s$,上位置是引脚 Q_{13} 输出波形图。引脚 Q_{13} 输出在引脚 Q_6 振荡 2^6 次后输出高电平,即 $T_3 = 3.5s \times 2^6 = 224s$ 。



(a)



(b)

图 5.2 输出波形图

根据公式 $t \approx 2.2 \times R_2 \times C_2$ 算出理论值，当固定电容 C_2 一定时，周期 t 随着 R_2 的增大而增加，图 5.3 是 $R_2 = 9.1K, 18K, 36K$ 时， C_2 的充放电实测周期拟合曲线。从图中可以看出，曲线与理论分析是一致的， C_2 一定时，随着电阻 R_2 逐渐增大， C_2 充放电周期逐渐变大，越容易起振。

表 5.1 当 R2=9.1K、18K、36K 时，C1 的充放电周期

电容 C2(nF)	电流 I(uA)	C2 充放电周期测试值(us)		
		R2=9.1K	R2=18K	R2=36K
0.0005	0.3	不振荡	不振荡	不振荡
0.001	0.3	1.3	2.6	5.21
0.004	0.4	1.61	3.22	3.92
0.008	0.3	1.68	3.36	4.6
0.024	0.3	2.36	4.72	7.44
0.039	0.3	3.06	6.12	9.96
0.047	0.3	3.36	6.72	10.8
0.1	0.3	5.56	11.12	17.6
0.22	0.3	9.2	18.4	30
0.47	0.3	15.25	30.5	52.4
0.62	0.3	18.15	36.3	62
1	0.3	27.8	55.6	100.4
4.7	0.3	106.5	213	414
10	0.4	221	442	872
82	0.3	1860	3720	7000
100	0.3	2210	4420	7960
120	0.3	2430	4860	8400
470	0.3	10100	20200	36500
1000	0.3	20200	40400	80800
2200	0.3	44116	88400	176460

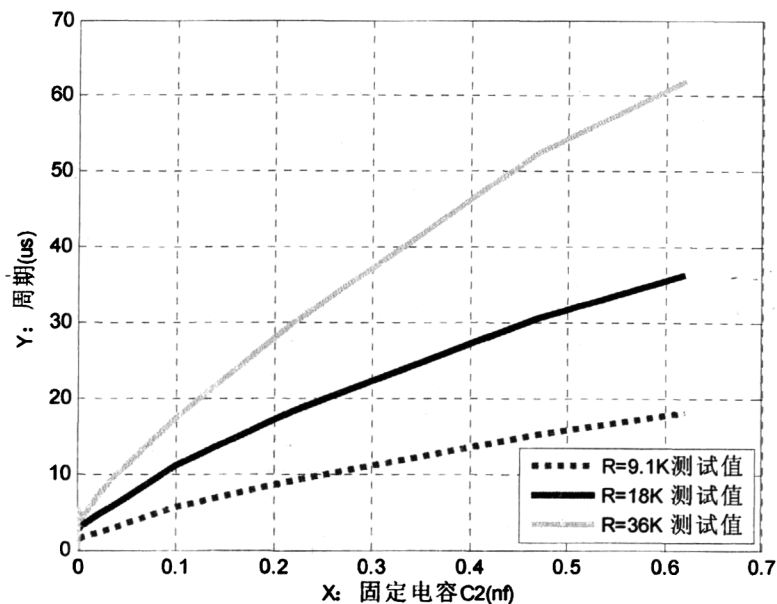


图 5.3 C2 的充放电周期拟合曲线

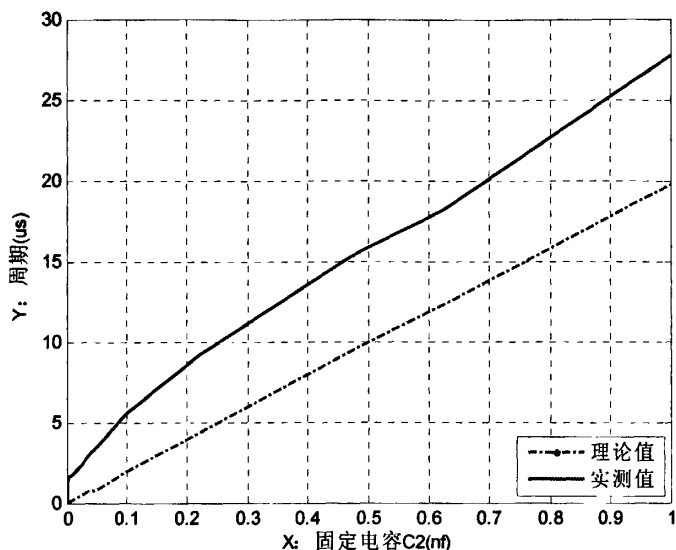


图 5.4 R2=9.1K, C2 的充放电周期比较

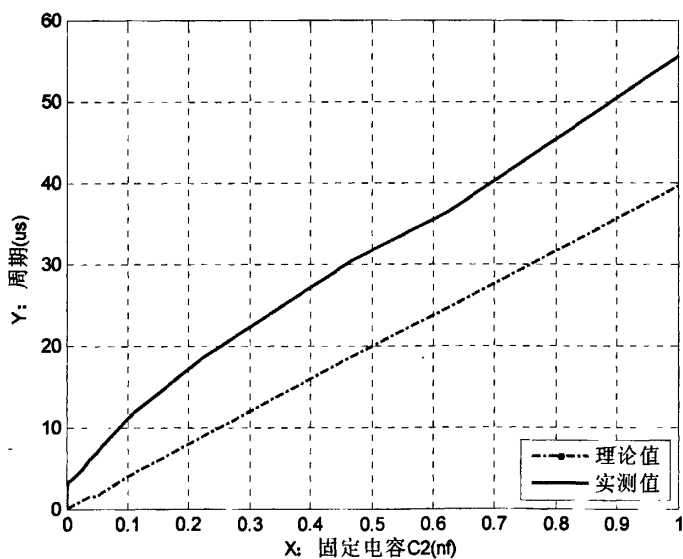


图 5.5 R2=18K, C2 的充放电周期比较

如图 5.4, 5.5, 5.6 所示, 实际测试的数据和理论值比较后的拟合曲线, 从图中可以看出, 曲线与理论分析是一致的。在测试仪器精度和环境的影响下, 虽然理论值和实际值有一定的误差。但是, 在一定范围内, 随着 R_2 取值慢慢变大 ($2R_2 < R_1 < 10R_2$), 理

论值和实测值间的误差会逐渐变小。

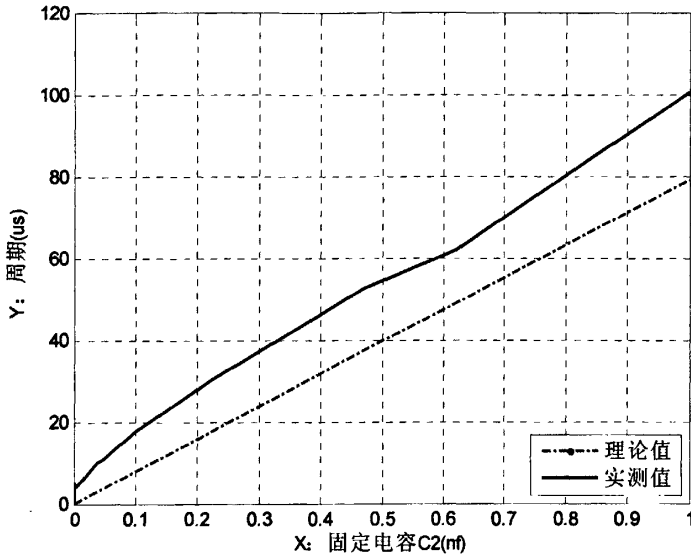


图 5.6 R2=36K, C2 的充放电周期比较

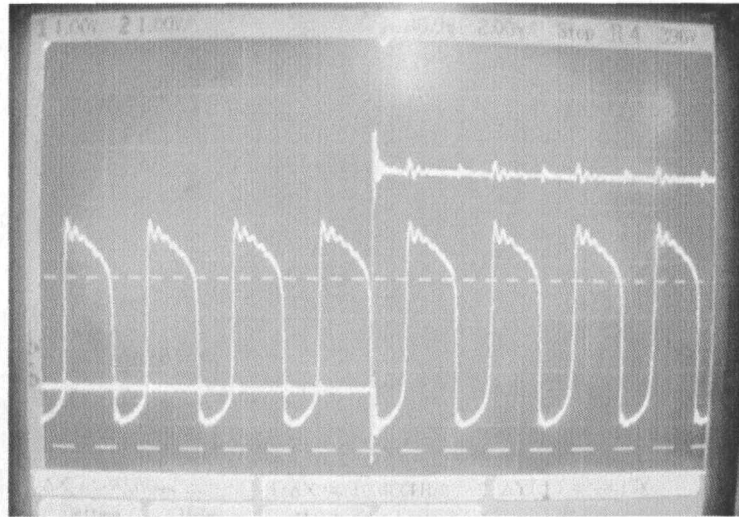
5.1.2 手动倒置实验

手动倒置实验中，重力加速度为 1g，取电阻 $R_2 = 9.1K$ ，改变电容 C_2 ，分别对两个测试点进行测试，如图第三章 3.9 所示，用示波器直接测试电容（测试点一）充放电周期；用示波器测试出引脚 Q_{13} （测试点二）输出波形周期来计算电容充放电周期。测试数据见表 5.2。

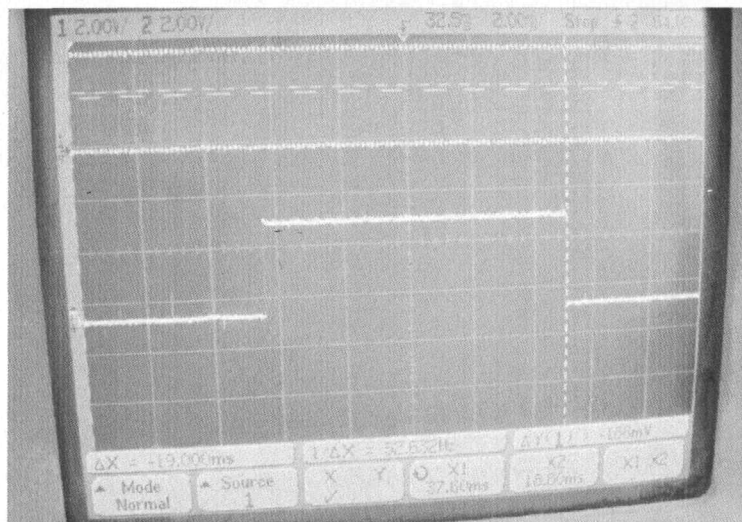
表 5.2 测试数据

电容(uF)	工作电流(uA)	测试点一(us)	测试点二	
			Q13 输出(ms)	推导周期(us)
0.0047	17	2.4	96.59	11.79
0.001	16	2.38	95.29	11.68
0.082	15	2.32	94.89	11.63
0.01	16	2.4	94.32	11.56
0.12	16	2.38	94.37	11.52
0.47	17	2.39	95.11	11.61
1	17	2.4	95.09	11.63
2.2	17	2.4	95.6	11.64

图 5.7 是电容 $C_2 = 2.2\mu\text{F}$ ， $R_2 = 9.1\text{K}$ 时探测电路测试的波形图，图 5.7 (a) 为电容充放电和引脚 Q_6 输出波形图，其中，振荡形状波形是电容充放电波形，充放电周期 $t_2 = 2.4\mu\text{s}$ ，上升沿是引脚 Q_6 输出波形图。引脚 Q_6 在记录 C_2 充放电 2^5 次后输出高电平，即 $T_4 = 2.4\mu\text{s} \times 2^5 = 76.8\mu\text{s}$ 后输出高电平；图 5.7 (b) 是测试不同输出引脚波形图，其中，上位置是引脚 Q_6 输出波形图，测得输出周期 $T_2 = 745\mu\text{s}$ ，下位置是引脚 Q_{13} 输出波形图。引脚 Q_{13} 输出在引脚 Q_6 振荡 2^6 次后输出高电平，即 $T_3 = 745\mu\text{s} \times 2^6 = 47.68\text{ms}$ 。



(a)



(b)

图 5.7 输出波形图

5.1.3 加速度冲击实验

利用马歇特锤击装置对开关进行了重力加速度小 g 值冲击，直接用外力激起开关内部的敏感电容元器件极板间距改变，达到改变电容间距的目的，引起 RC 振荡电路振荡，有探测电路计数，输出触发信号。

马歇特锤的原理是用重力对冲击锤加速，使其击打铁质目标，从而产生较大的加速度过载。抬起的高度低产生的加速度小，抬起的高度高产生的加速度大，当马歇特锤落下时，由于其与平台撞击时间短，故产生的瞬间加速度大。预置不同的齿数进行冲击试验，可产生 $20\sim 50000g$ ，持续时间 $100\sim 120\mu s$ 的冲击加速度。

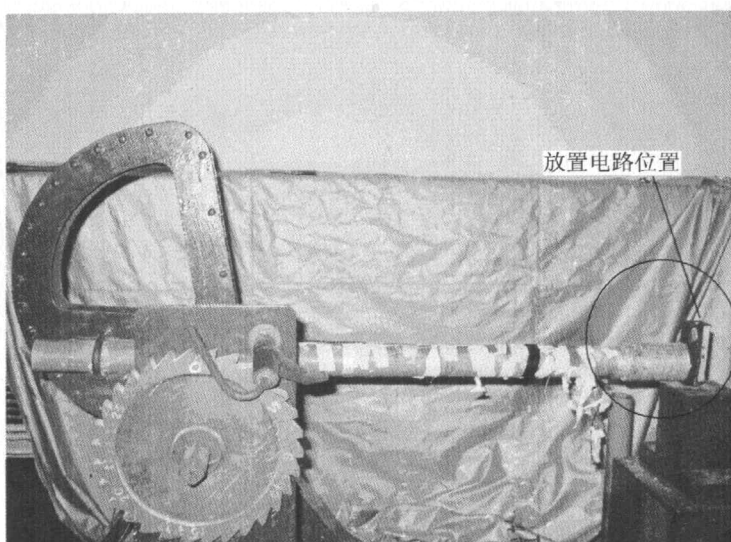


图5.8马歇特锤冲击装置

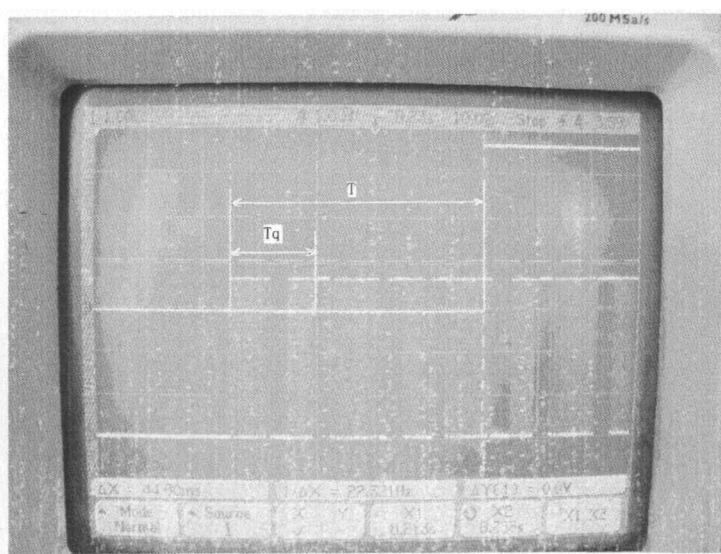


图5.9在 $10g$ 加速度下输出波形

受力方向：按敏感电容活动极板位于下方的方向冲击。

电路要求：电路模块和敏感电容用细绳绑好。

安装要求：按实际使用情况在电路模块上下各加 2mm 的胶皮、四周加一圈 1mm 的胶皮进行缓冲，锤击时锤头与接触面刚性碰撞。

性能要求：电路设定为待触发状态，锤击后引脚 Q_6 和引脚 Q_{13} 输出是否正常。

冲击加速度值：选取 10g、20g、30g、40g、50g 几个加速度值进行冲击。

试验设备：马歇特锤击装置，示波器。

实验数据：当 $C_2=2.2\mu\text{F}$ 时实验数据见表 5.3，实验数据可以看出，当加速度值大于 40g，实验数据发生突变。

表 5.3 测试数据

加速度 (g)	测试点一		测试点二	
	T(ms)	推导周期(us)	Q13 周期 (ms)	推导周期(us)
10	44.86	10.95	95.6	11.66
20	45.8	11.18	95.87	11.7
30	79.8	19.48	162	19.78
40	165.6	40.43	334.7	40.85
50	166.4	40.625	335.8	40.99

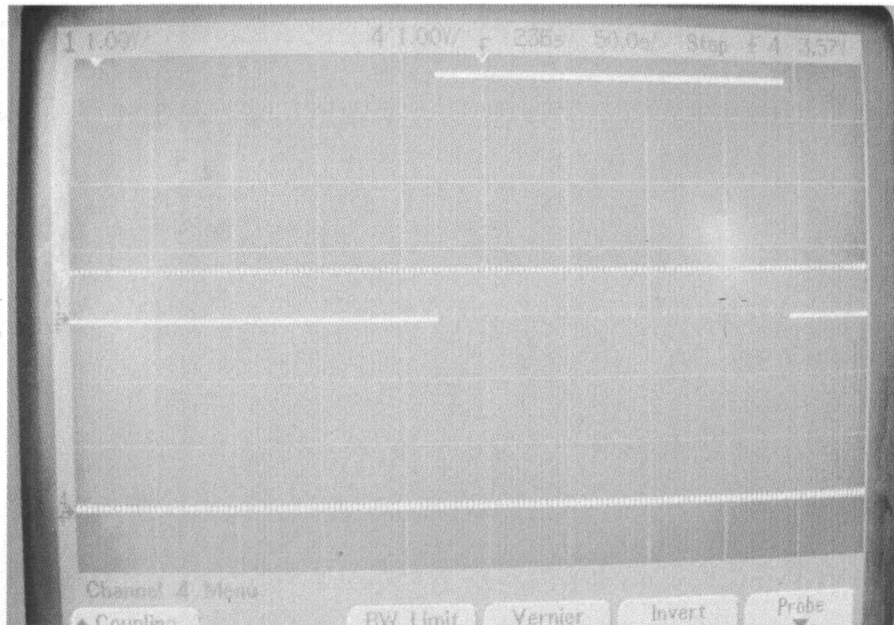


图 5.10 在 50g 加速度下输出波形

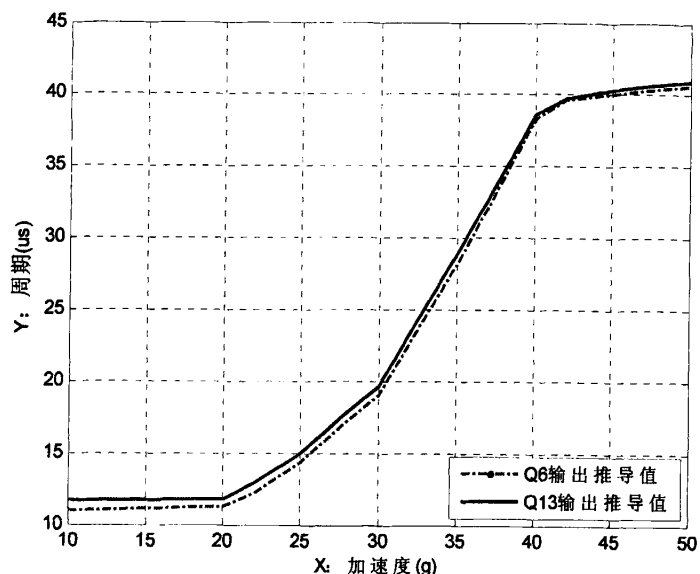


图5.11在10g~50g加速度下比较拟和波形

由上可以看出，加速度在 10g~50g 时，电路模块正常，如图 5.9 所示，为加速度在 10g 冲击下，引脚 Q₆ 和引脚 Q₁₃ 的波形输出比较；图 5.10，为加速度在 50g 冲击下，引脚 Q₆ 和引脚 Q₁₃ 的波形输出比较，由图可以看出，引脚 Q₆ 波形输出波形基本保持一致，虽然波形周期不确定，但是记录次数是正确的，即 Q₆ 振荡 $2^6=64$ 次后输出 Q₁₃，持续时间用 T 表示，所以输出基本正常，引脚 Q₁₃ 的波形输出正常。图 5.11 是 10g~50g 加速度冲击下，引脚 Q₆ 和引脚 Q₁₃ 数据推导出电容充放电周期比较拟和曲线图，加速度在 40g 后，电容充放电周期基本稳定。

5.1.4 微功耗测试实验

当开关在静态工作时，静态电流仅为几个微安，正常工作电流为十几个微安。本文分别对 3 套开关进行静态工作和正常工作的微功耗测试实验，即用电压大约为 4.2V 的电池为开关进行两个月不间断供电，每天分别记录开关在静态工作和正常工作时电池电压降，则能够计算开关的功率损耗的大小。

表 5.1 为开关静态工作测试实验数据，表 5.2 为开关正常工作时测试实验数据。有

表中数据得出，在长期供电下，电池压降较小。

表 5.1 开关静态工作测试部分实验数据

编号	1#	2#	3#	4#	5#
1	4.163	4.144	4.123	4.142	4.165
2	4.155	4.139	4.12	4.135	4.16
3	4.154	4.136	4.119	4.134	4.159
4	4.154	4.135	4.119	4.134	4.159
5	4.153	4.134	4.119	4.134	4.158
6	4.152	4.132	4.117	4.133	4.157
7	4.152	4.13	4.116	4.132	4.156
8	4.151	4.13	4.115	4.131	4.156
9	4.15	4.128	4.114	4.131	4.155
10	4.149	4.127	4.115	4.129	4.155
11	4.148	4.126	4.115	4.127	4.153
12	4.148	4.126	4.113	4.127	4.152
13	4.147	4.124	4.113	4.127	4.151
14	4.147	4.123	4.112	4.126	4.15
15	4.145	4.123	4.11	4.126	4.15
16	4.145	4.123	4.11	4.126	4.15
17	4.145	4.122	4.11	4.125	4.149
18	4.143	4.12	4.108	4.124	4.148
19	4.143	4.12	4.108	4.123	4.148
20	4.14	4.119	4.106	4.122	4.146
21	4.138	4.116	4.104	4.12	4.144
22	4.138	4.116	4.104	4.119	4.144
23	4.137	4.115	4.103	4.118	4.143
24	4.136	4.114	4.103	4.117	4.142
25	4.135	4.113	4.102	4.116	4.141
26	4.134	4.112	4.101	4.115	4.14
27	4.132	4.11	4.099	4.114	4.138
28	4.132	4.11	4.099	4.114	4.138
29	4.132	4.109	4.099	4.114	4.138
30	4.131	4.109	4.098	4.112	4.137
31	4.131	4.108	4.097	4.112	4.137
32	4.13	4.108	4.097	4.111	4.136
33	4.129	4.107	4.096	4.11	4.135
34	4.128	4.106	4.095	4.11	4.134
35	4.128	4.106	4.095	4.109	4.134
36	4.127	4.105	4.095	4.109	4.133

表 5.2 开关正常工作时测试部分实验数据

编号	1#	2#	3#	4#	5#
1	4.158	4.142	4.122	4.138	4.164
2	4.154	4.136	4.119	4.134	4.159
3	4.153	4.133	4.118	4.134	4.158
4	4.151	4.131	4.115	4.131	4.156
5	4.15	4.127	4.114	4.13	4.154
6	4.149	4.125	4.114	4.128	4.153
7	4.148	4.124	4.112	4.126	4.151
8	4.146	4.124	4.112	4.127	4.151
9	4.143	4.121	4.109	4.124	4.148
10	4.142	4.12	4.108	4.123	4.147
11	4.138	4.116	4.104	4.119	4.143
12	4.137	4.115	4.103	4.119	4.143
13	4.134	4.112	4.101	4.116	4.14
14	4.132	4.11	4.098	4.113	4.138
15	4.132	4.11	4.099	4.113	4.138
16	4.13	4.108	4.097	4.112	4.136
17	4.128	4.107	4.096	4.11	4.135
18	4.128	4.106	4.095	4.109	4.134
19	4.125	4.103	4.093	4.107	4.131
20	4.123	4.102	4.091	4.105	4.13
21	4.121	4.101	4.09	4.104	4.129
22	4.119	4.099	4.089	4.101	4.127
23	4.117	4.097	4.087	4.099	4.125
24	4.116	4.095	4.086	4.098	4.123
25	4.114	4.094	4.085	4.097	4.122
26	4.112	4.091	4.083	4.094	4.119
27	4.11	4.09	4.082	4.093	4.118
28	4.108	4.089	4.081	4.091	4.115
29	4.106	4.087	4.079	4.09	4.113
30	4.102	4.086	4.104	4.089	4.1
31	4.099	4.085	4.103	4.087	4.098
32	4.097	4.084	4.1	4.086	4.095
33	4.093	4.081	4.097	4.085	4.093
34	4.091	4.079	4.095	4.084	4.091
35	4.087	4.078	4.092	4.081	4.089
36	4.084	4.078	4.086	4.079	4.084

5.2 测试数据分析

如图第四章 4.4 (b) 中阴影部分表示固定极板敷铜的面积，半圆面的半径是 4mm，那么整个敷铜板部分的面积近似为：

$$S_{\text{阴影}} = \pi R^2 = \pi \times 4^2 = 50.265 \text{ mm}^2 = 5.0265 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

1、当电路没有接可变电容时：

理论计算

根据 4060 公式计算，电容充放电的时间周期为

$$t_1 = 2.2 \times RC = 2.2 \times 2.2 \mu \times 9.1K = 2.2 \times 2.2 \times 10^{-6} \times 9.1 \times 10^3 = 44.04 \text{ms}$$

实际测试

1)、用示波器直接测得敏感电容的充放电时间周期为 $t_2 = 54 \text{ms}$

2)、用示波器测得 Q_{13} 的输出时间周期为 $T_1 = 443.32 \text{ms}$ ，根据推倒公式，引脚 Q_n 输出波形周期 $T = t \times 2^n$ ， t 为 C_2 电容充放电周期，算出敏感电容充放电的时间周期为

$$t'_2 = \frac{T_1}{2^{13}} = 54.116 \text{ms}。$$

4060 给出的公式计算前提是 $2R_2 < R_1 < 10R_2$ ，而实际电路中用的电阻 $R_1 = 680K, R_2 = 9.1K$ ，所以用公式计算的只是估计值；在实测环节，用示波器直接测得的敏感电容时间周期 t_2 比用示波器测得 Q_{13} 输出算得的时间周期 t'_2 小，即 $t_2 < t'_2$ ，原因可能是用示波器的探头直接测电容 C_2 充放电端，会影响电容充放电，部分电荷会流向示波器探头，导致部分有用电荷流失，使得 $t_2 < t'_2$ 。

2、当 $R_2 = 9.1K, C_2 = 2.2 \mu F$ 接敏感电容时，手动倒置实验数据分析：

理论计算

$$\text{敏感电容形成的电容值：} C_x = \frac{\epsilon S}{4\pi K d}$$

其中： ϵ ——为空气的相对节电常数， $\epsilon = 1$ ；

K——为静电常数， $K=8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$ 。

设：活动极板落在固定极板上后，极板之间的微小距离 $d_2 = 5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ ，计算得：

$$C_x = \frac{\epsilon S}{4\pi K d} = \frac{1 \times 5.0265 \times 10^{-5}}{4 \times \pi \times 8.988 \times 10^9 \times d}$$

$$d_2 = 5 \mu\text{m} : C_x = 0.0935 \text{ nF};$$

$$d_2 = 10 \mu\text{m} : C'_x = 0.047 \text{ nF}.$$

理论计算敏感电容值 C_x 在 $0.047 \text{ nF} \sim 0.094 \text{ nF}$ 之间。

如图 5.12：当 $d = 5 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ 时， $C_x = \frac{\epsilon S}{4\pi K d}$ 的变化趋势。

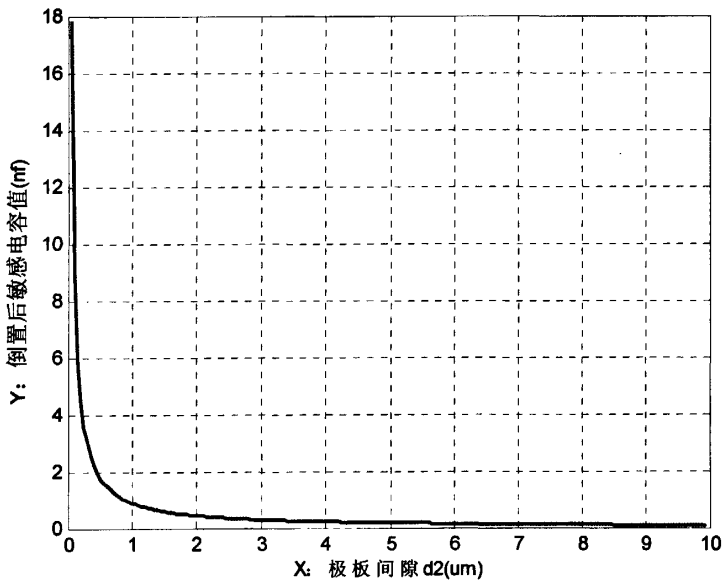


图 5.12 C_x 理论计算值与极板间隙的关系

实际测得

1)、用示波器直接测得的敏感电容充放电时间周期为 $t_3 = 2.4 \mu\text{s}$ ，根据 CD4060 计算公式，算出 $C_{\text{总}1} = \frac{t_3}{2.2 \times R} = \frac{2.4 \mu\text{s}}{2.2 \times 9.1 \text{ K}} = 0.11 \text{ nF}$ ，因为 C_2 和 C_x 串联后为 $C_{\text{总}}$ ，且 $C_2 = 2.2 \mu\text{F}$ ，

则 $C_{x1} \approx 0.11 \text{ nF}$ 。

2)、用示波器测 Q_{13} 的输出时间周期为 $T_2=95.6\text{ms}$, 算出敏感电容充放电的时间周期为 $t'_3 = \frac{T_2}{2^{13}} = 11.6\mu\text{s}$, 根据 4060 计算公式, $C_{\text{总}2} = \frac{t_3}{2.2 \times R} = \frac{11.6\mu\text{s}}{2.2 \times 9.1\text{K}} = 0.58\text{nF}$, 那么 $C_{x2} \approx 0.58\text{nF}$; 则实际测得敏感电容值 C_x 在 $0.11\text{nF} \sim 0.58\text{nF}$ 之间。

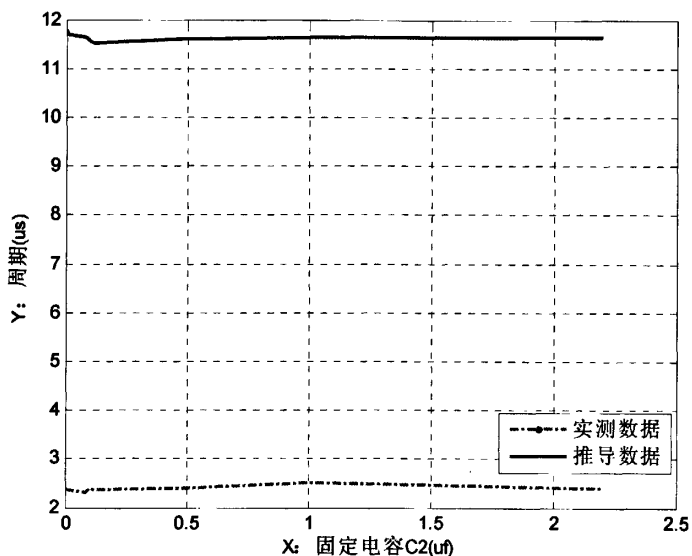


图 5.13 实测数据和推倒数据拟合曲线

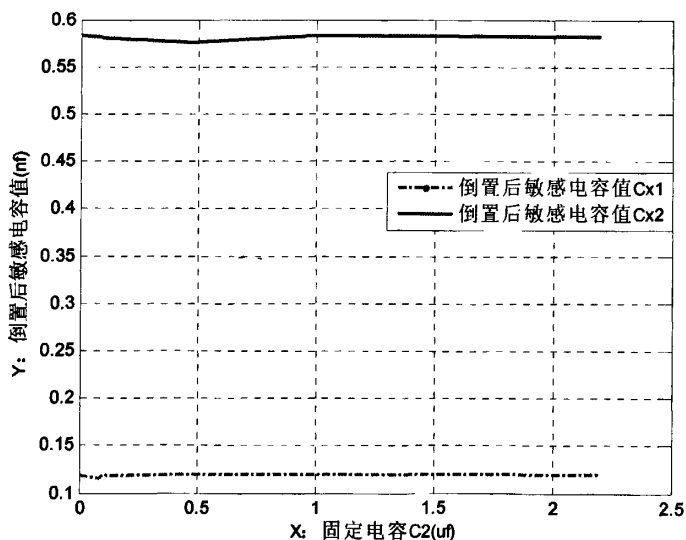


图 5.14 C_{x1} 和 C_{x2} 比较拟合

如图 5.13, 对测试点一的实验数据周期和测试点二的实验数据计算后的数据周期进行比较拟合。如图 5.14, 当 C_2 取不同的电容值时, 把测试点一数据推导出敏感电容值 C_{x1} 和 Q_{13} 输出数据推导的敏感电容值 C_{x2} 比较拟合。

3、当 $R_2=9.1K$, $C_2=2.2\mu F$, 基于马歇特锤的冲击实验数据分析:

理论计算

敏感电容形成的电容值: $C_x = \frac{\epsilon S}{4\pi K d}$, 其中: 空气相对介电常数 $\epsilon=1$, 静电常数 $K=8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, 设: 在 $10g \sim 40g$ 的加速度冲击下, 极板之间的间距随着加速度的增大而减小, $d_2 \approx 0.05\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$, 由 $C_x = \frac{\epsilon S}{4\pi K d} = \frac{1 \times 5.0265 \times 10^{-5}}{4 \times \pi \times 8.988 \times 10^9 \times d}$ 计算得,

$$d_2 = 0.05\mu\text{m}: C_x = 18.7\text{nF};$$

$$d_2 = 1\mu\text{m}: C'_x = 0.94\text{nF};$$

理论计算敏感电容值 C_x 在 $0.94\text{nF} \sim 18.7\text{nF}$ 之间。

实际数据:

1、加速度为 $10g$ 时, 用示波器测 Q_6 经过 44.8ms 后输出 Q_{13} 上升沿, 假设 4060 振荡计数正确, 算出敏感电容充放电的时间周期为 $10.95\mu\text{s}$, 根据 4060 计算公式, 算出

$$C_{x3} = \frac{t'_4}{2.2 \times R} = \frac{10.95\mu\text{s}}{2.2 \times 9.1K} = 0.54\text{nF}, \text{ 那么 } C_{x3} \approx 0.54\text{nF}。$$

2、加速度为 $40g$ 时, 用示波器测 Q_6 经过 165.6ms 后输出 Q_{13} 上升沿, 算出敏感电容充放电的时间周期为 $40.43\mu\text{s}$, 与不接敏感电容测试数据相比较 (见表 5.1), 算出

$$C_{x4} = \frac{t'_4}{2.2 \times R} = \frac{40.43\mu\text{s}}{2.2 \times 9.1K} = 2.019\text{nF}, \text{ 那么 } C_{x4} \approx 2.019\text{nF}。$$

4、微功耗测试实验数据分析:

当开关静态工作时, 电流大约为 $0.6 \sim 0.7\mu\text{A}$; 当开关工作时, 电流大约为 $16 \sim 17\mu\text{A}$,

根据公式： $P = UI$ ，能够近似计算功率损耗。如图 5.15 是静态工作时功率损耗拟和曲线；图 5.16 是开关工作时功率损耗拟和曲线。

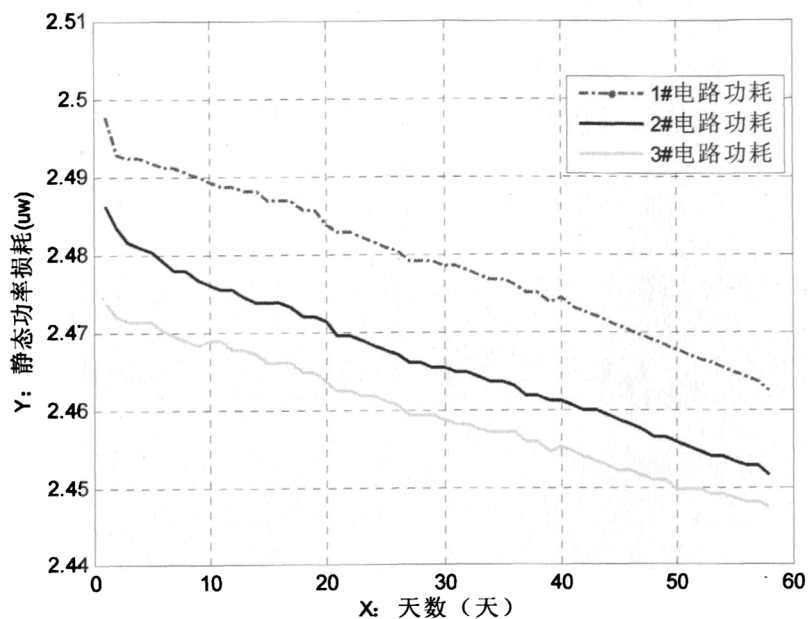


图 5.15 是静态工作时功率损耗拟和曲线

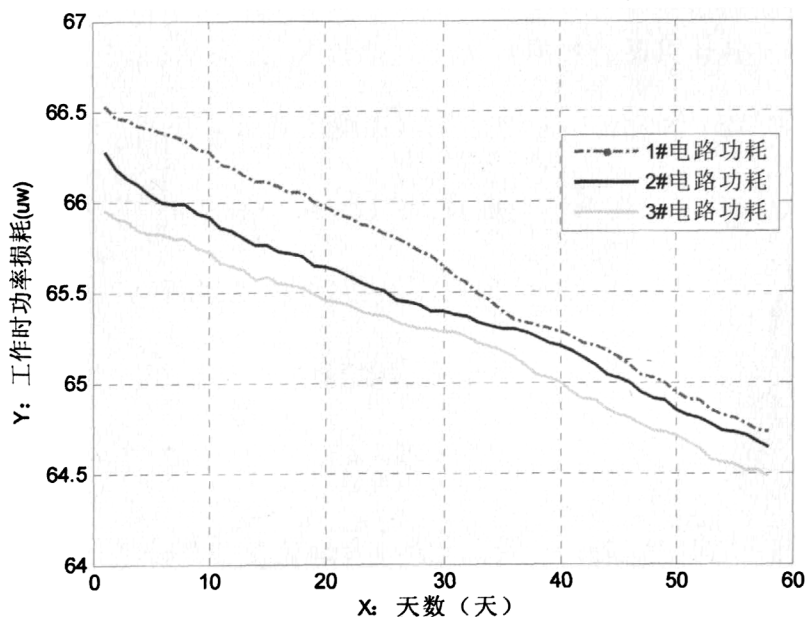


图 5.16 是开关工作时功率损耗拟和曲线

由图 5.15 和图 5.16 看出，在两个月的时间里，开关静态工作时，电压压降约 0.06V，

功率损耗不超过 $2.5\mu\text{W}$ ；开关工作时，电压压降约 0.12V ，功率损耗不超过 $67\mu\text{W}$ ，验证了此开关具有微功耗的特点。

5.3 小结

本章在模拟环境下对探测模块和敏感电容进行测试，将结果总结如下：

1、当固定电阻 $R_2=9.1\text{K}$ ， 18K ， 36K 时，分别测试振荡模块数据，说明固定电容 $C_1>1\text{pF}$ ，引起 RC 振荡电路振荡，由于测试仪器或环境的影响，实际测试数据与理论值比较有一定的误差。但是， R_2 取值在一定范围内慢慢变大 ($2R_2 < R_1 < 10R_2$)，误差会逐渐变小。

2、测试敏感电容时，分别对两个测试点进行测试，测试点一：直接测试敏感电容充放电周期；测试点二：测试出 Q_{13} 输出波形周期来计算电容充放电周期，综合比较了振荡输出信号、直接测试输出数据和理论数据：第一，理论计算敏感电容值 C_x 在 $0.094\text{nF}\sim 0.187\text{nF}$ 之间，实际测得敏感电容值 C_x 在 $0.11\text{nF}\sim 0.58\text{nF}$ 之间，根据敏感电容计算公式 $C_x = \epsilon S/4\pi Kd$ 计算理论数据和实际测试数据比较，误差较小。第二，当 $C_1>1\text{pF}$ 时，引起振荡电路振荡（如表 6.1），符合电容式微功耗重力开关的性能要求。

3、基于马歇特锤开关性能测试，选 $R_2=9.1\text{K}$ ， $C_2=2.2\mu\text{F}$ 。当加速度为 10g 时，
$$C_{\text{总}2} = \frac{t'_4}{2.2 \times R} = \frac{10.95\mu\text{s}}{2.2 \times 9.1\text{K}} = 0.54\text{nF}$$
，那么敏感电容 $C_{x3} \approx 0.54\text{nF}$ ；当加速度为 40g 时，
$$C_{\text{总}3} = \frac{t'_4}{2.2 \times R} = \frac{40.43\text{ms}}{2.2 \times 9.1\text{K}} \approx 2.019\text{nF}$$
，那么敏感电容 $C_{x4} \approx 24.54\text{nF}$ ，因此，敏感电容 C_x 在 $0.54\text{nF}\sim 24.54\text{nF}$ 之间，与理论计算敏感电容值 C_x ($0.94\text{nF}\sim 18.7\text{nF}$) 比较，误差较小。

综上所述，当开关在加速度为 1g 时，敏感电容理论值和测试值 $10^{-2}\text{nF}\sim 10^{-1}\text{nF}$ 之间；当在加速度为 $10\text{g}\sim 50\text{g}$ 时，冲击较大，敏感电容极板间距减小，理论值和实测值在 $10^{-1}\text{nF}\sim 10^1\text{nF}$ 之间。根据表 5.1，电容 $C_2 > 1\text{pF}$ ，引起 RC 电路振荡，验证了金属极板能够形成敏感电容。另外，经探测电路输出延时触发信号，实现开关的延时功能。

6 总结与展望

6.1 全文总结

本文综述了电容式开关在国内外的研究现状，研究了金属表面的微观特性，提出接触金属极板能构成敏感电容的设想。研究了在重力影响下敏感电容的变化规律，针对新概念动态测试系统应用环境恶劣、严格受到体积和功耗的限制的前提下，分析了开关研究要求，设计并制作了电容式微功耗重力开关，进行了手动倒置实验和马歇特锤装置实验，验证了金属极板能够形成敏感电容，并且实现了开关工作时无需人为操作，就能够启动动态测试系统。具有低电压驱动、低功率损耗、微小体积、具有时间延时等特点，且制作简单、能够批量生产的器件。

6.2 创新点、不足和进一步工作

6.2.1 创新点

本文由以下创新点：

1. 研究了金属表面的微观特性，提出接触金属极板能构成敏感电容的设想，并对敏感电容测试电路进行研究；
2. 用简单金属极板倒置的方法，引起敏感电容值的改变，设计了电容式微功耗重力开关；
3. 在探测过程中结合马歇特锤装置，进行加速度冲击实验，获得较好的测试数据；
4. 与之前的电容式开关相比，具有微功耗、微体积、高可靠性、结构简单、易制作、成本低等特点。

6.2.2 不足之处和下一步工作

由于作者的知识背景、能力水平、工作时间所限，在以下几方面有不足之处，还需进一步探索：

- (1) 在电路设计和机械设计中的微小型问题方面研究欠缺；
- (2) 对敏感电容极板接触时，极板间距理论值研究不够充分，使得数据分析部分敏感电容理论计算不够准确；

(3) 没有进行高温、高压实验，在今后的试验中要继续完成。

6.3 成果应用前景与展望

本发明解决了在民用、工业中，对倒置或方向敏感的系统需要手动引起的应用的问题，提供了一种电容式微功耗重力触发开关。该电容式微功耗重力触发开关具有低功耗、微体积、高可靠性、结构简单、易制作、成本低、能批量生产等特点。不仅能用于国防、航空系统，例如放入式电子测压器，而且可以用于对倒置或方向敏感的各种工业或民用系统，例如工业报警系统、自动断电系统等等。

参考文献

- [1] 朱明武. 动态测量原理. 北京理工大学出版社. 1993.03. 36~37
- [2] 祖静, 张志杰, 裴东兴, 范锦彪. 新概念动态测试. 测试技术学报. 2004.18 卷. 52~53
- [3] 刘顺新, 丛吉远, 廖敏夫等. 真空灭弧室发展分析. 电器制造. 2006.No.17.12~13
- [4] Rebeiz. G. MRFMEMS switches status of the technology[C]. The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers. 2003(2):1726~1728
- [5] 陈光炎, 杨黎明. 一种高 g 值微冲击开关的研制. 爆炸与冲击. 2007.3. 54~55
- [6] 新型 FET 开关. 国外电子元器件. 2007.4. 123~124
- [7] [美]韦恩.R.穆尔. 机械精度基础. 北京: 国防工业出版社, 1970.4 期. 55~56
- [8] 黄福会等. 形状误差测量. 北京: 中国计量出版社, 1986. 11 期. 47~48
- [9] 张善锤等. 双频激光三尺组合法直线度测量系统. 仪器仪表学报. 1994, 15(2): 133~137
- [10] 游效曾. 结构分析导论. 科学出版社. 1980.7 期. 12~13
- [11] 陈巨. 鲁斌. 王晓蕾. 消费类芯片 RC 振荡器的分析与设计合肥: 合肥工业大学微电子设计研究所. 2005.9. 121~123
- [12] L. C. Feldman, J. w. Feldman(严燕来, 薄平译)表面薄膜分析基础. 复旦大学出版社. 1989. 12 期. 110~112
- [13] 吴清辉. 表面化学与多相催化. 化学工业出版社. 1991. 7 期. 77~78
- [14] 方俊鑫. 陆栋. 固体物理学(下册). 上海科学技术出版社. 1981. 128~130
- [15] 熊欣等. 表面物理. 辽宁科学技术出版社. 1985. 5 期. 45~47
- [16] 张善锤编著. 精密仪器精密理论. 北京: 机械工业出版社. 1993.3 期. 213~214
- [17] 《几何量实用测试手册》编委会编. 几何量实用测试手册. 北京: 机械工业出版社. 1980. 2 期. 145~147
- [18] 黄情渠主编. 几何量计量. 北京: 机械工业出版社. 1981.8 期. 218~220
- [19] W. Beyer. Computer-aided calibration of angle standards and straightness standards. Measurement. 1989, 7(1): 35~37

- [20] ZANG Yan-Fen. LIU Xiang-Yang. ZHANG Guo-Xiong. Method for the straightness measurement of vertical guideways of machine tools using capacitive and inductive and inductive sensors. SPIE Vol. 2101. (1993): 846~847
- [21] 黑龙江省标准计量管理局、哈尔滨工业大学编. 长度计量手册. 北京: 科学出版社, 1979. 33~35
- [22] 张善锺主编. 精密仪器结构设计手册. 北京: 机械工业出版社. 1993. 72~73
- [23] 强锡富主编. 电动量仪器上册. 北京: 机械工业出版社, 1983. 56~58
- [24] 蔡淑璋、景芳盛等编著. 光电自准直仪器及其应用. 北京: 中国计量出版社. 1986. 33~35
- [25] 恽正中等. 半导体与薄膜物理. 国防工业出版社. 1981. 143~144
- [26] 冯端等著. 金属物理学. 科学出版社. 1987. 126~127
- [27] R. W. 卡恩, 物理金属学(中册). 科学出版社. 1986. 74~75
- [28] (美)J. M. 波特等著. 张永康译. 薄膜的相互扩散和反应. 国防工业出版社. 1983. 56~57
- [29] 闻立时. 固体材料界面研究的物理基础. 科学出版社. 1991. 85~86
- [30] R. 泽仑. 非晶态固体物理学. 北京大学出版社. 1988. 54~55
- [31] A. W. 亚当森. 表面的物理化学. 科学出版社. 1985. 47~48
- [32] R. 戈默. 金属表面上的相互作用. 科学出版社. 1985. 154~155
- [33] S. R. Morrison. 表面化学物理. 北京大学出版社. 1984. 78~79
- [34] D.P.Woodnuff and T.A.Decher, Modern Techniques of Surface Science, Cambridge University Press, 1986, 12(9):1123~1156
- [35] Fox R L. KaPoor M P. Structural Optimization in the Dynamic Regime: A Computational Approach, ALAAJ, 1970, 8 (10):1798-1804
- [36] Chahande AI, Arora J S .Optimization of Large Structures Subjected To Dynamic Loads with the Multiplier Method, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1994, 37:413~430
- [37] Ramana Grandhi. Strustural Optimization with Frequency Constraints-A Review, ALAA Journal, 1993, 31(12):2296-2303

- [38] 谢希德. 固体物理学(上册). 上海科学技术出版社. 1961[24]. 77~78
- [39] http://www.2008red.com/member_pic_90/files/wtuvtk/html/article_2034_1.shtml
- [40] 杨欣荣. 凌玉华等. 现代测控技术与智能仪器[M]. 湖南: 湖南科学技术出版社. 1995. 99~100
- [41] 赵新民. 王祁. 智能仪器设计基础. 哈尔滨工业大学出版社. 2005. 56~57
- [42] 赵凯华. 陈熙谋. 电磁学上册. 北京: 人民教育出版社. 1978. 147~148
- [43] 梁灿彬. 秦光戎. 梁竹健. 电磁学. 北京: 高等教育出版社. 1980. 164~165
- [44] 王远. 第2版模拟电子技术. 北京: 机械工业出版社. 2000.10. 82~83
- [45] 朱洪玉. 刘美驹. 几种常用电容器之电容的近似计算. 内江: 内江师范学院学报. 2000(4)17~20

攻读硕士学位期间发表的论文及参与课题情况

发表论文和申请专利：

[1] 麻海霞，马铁华. 基于 FPGA 的高速大容量 FLASH 存储. 微计算机信息. 2008.10. 1008-0570. 14-1128/TP

[2] 麻海霞，马铁华. 基于马歇特锤的 CA-YD 系列压电传感器. 中北大学学报（自然科学版）. 1673-3193（2006）增刊-0239-03

[3] 马铁华、祖静、裴东兴、麻海霞. 微小重力式敏感电容及其后续处理电路.

申请日：2007 年 10 月 17 日

申请号：200710139596.3

专利申请受理：中华人民共和国国家知识产权局

参与课题情况：

[1] 多通道飞行测试系统；

[2] 微小电容式重力触发开关；

[3] 基于 FPGA 的测试平台的研究。

致 谢

在研究生期间，感谢我的导师马铁华教授在学习和科研中给予我无微不至的关怀和无私的帮助，感谢尤文斌老师在学习和生活中给予的帮助。本文是在导师马铁华教授、尤文斌老师的悉心指导下完成的。在课题进行的整个过程中，他们都给了我认真、细致、耐心的指导。衷心感谢他们在整个研究生阶段给予我的教育和培养。

在过去的日子里，马铁华教授渊博的理论知识、严谨的治学态度、敏锐的洞察能力、严密的逻辑思维和丰富的工作经验使我永生难忘，对我今后的工作和学习影响深远；尤文斌老师忘我的工作热情、一丝不苟的工作作风、敏锐而活跃的思维方式以及科学的工作方法都使我受益颇深。在即将毕业之际，特别向两位老师献上我崇高的敬意和深深的谢意！

我能够顺利的完成课题和论文，与我学习和工作的环境——动态测试与智能仪器教研室这个团结、温暖的集体是分不开的，这所有的老师和同学都给予了我极大的帮助、支持和鼓励。我感谢祖静教授、申湘南高工、张志杰教授、杨志刚高工、裴东兴老师、范锦彪老师、李新娥老师及智能一所有老师表示衷心的感谢。同时感谢动态测试教研室的全体同学，在我进入实验室以来，他们在各个方面都给予我诸多帮助，在此表示真诚的谢意。

感谢我的父母和家人给予我的帮助。最后感谢审阅本文的所有专家们。由于本人水平有限，错误和不足之处在所难免，请批评指正。