

现代电子信息技术丛书

微声电子器件

—— 信息化武器装备的特种元件

主编 胡爱民



国防工业出版社

National Defense Industry Press

声学电子器件的基本应用

微声电子器件

——以声化光型器件的器件为例



清华大学出版社
Tsinghua University Press

现代电子信息技术丛书

微声电子器件

——信息化武器装备的特种元件

主编 胡爱民

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书全面介绍微声电子器件的种类、工作原理及应用。全书共分6章,第1章声体波器件(声体波换能器和谐振器,声体波微波延迟线,薄膜声体波谐振器和滤波器等等);第2章声表面波器件(叉指换能器,声表面波谐振器/滤波器/信号处理器/传感器等);第3章声光器件(声光偏转器/调制器/Q开关/锁模器/移频器/可调滤光器,表面波声光器件,光纤声光器件,声光相关/卷积器等);第4章压电陶瓷器件(压电陶瓷滤波器/微位移器/换能器/传感器等);第5章振动惯性器件(振动陀螺,线加速度计,微机械振动惯性器件等);第6章微声电子器件在电子系统中的应用。

读者对象:具有中专以上文化程度的电子工程技术人员、管理干部、电子技术爱好者以及大专院校相关专业师生。

图书在版编目(CIP)数据

微声电子器件 / 胡爱民主编. —北京: 国防
工业出版社, 2008. 5
(现代电子信息技术丛书)
ISBN 978 - 7 - 118 - 05533 - 7
I. 微... II. 胡... III. 电子器件 IV. TN103
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 202830 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 17 1/4 字数 437 千字
2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422
发行传真:(010)68411535

发行邮购:(010)68414474
发行业务:(010)68472764

《现代电子信息技术丛书》

编 审 委 员 会

名 誉 主 任	陈炳德					
主 任	李安东					
常务副主任	童志鹏	张 弛	王志刚			
副 主 任	刘成海	王小谟	熊群力	王 峰	许建峰	
	程洪彬					
委 员	蔡 镭	彭华良	王 政	毕克允	夏乃伟	
	张光义	刘 兴	雷 厉	张冬辰	黄月江	
	李 跃	胡爱民	范茂军	瞿兆荣	张学孝	
	李立功	梅遂生	廖复疆	程辉明	骆光明	
	汪继强	许西安	陈 洁			

总 编 委

总 编	童志鹏	
副 总 编	王晓光	
委 员	张雅丽	线珊珊

《微声电子器件》

主 编 胡爱民

编 委 母开明 刘积学 吕志清 刘 伟 刘光聪

编著人员 (按姓氏笔画排序)

马晋毅 吕志清 刘 伟 刘光聪 刘积学

汤劲松 曹 亮 傅金桥

Preface

序

《现代电子信息技术丛书》(以下简称《丛书》)自 1999 年首次出版,至今已 8 年了。《丛书》综合地反映了 20 世纪 90 年代电子信息技术的进展,受到广大科技工作者、大专院校师生和部队官兵的欢迎。进入新世纪以来,鉴于国内外电子信息技术的飞速发展,世界与局部形势发生了许多新的变化,电子信息技术循着摩尔定律预计的发展速度得到了持续的增长与进步。我国电子信息技术不论在基础层次还是在系统层次也取得了许多世界先进的成果,例如突破了纳米级的金属氧化物场效应器件(MOSFET)的设计与制造技术,研制成功了数十万亿次运算速度的巨型计算机,实现了计算栅格的研制与试验,成功地开发出世界级的第三代数字蜂窝移动通信系统,研制出空中预警与控制机系统和区域级一体化综合电子信息系统等。国际上,美国等发达国家在电子信息技术发展上处于领先地位,成功地研制出 45nm 的微处理器并进行批量生产,正向 20nm 及以下迈进。美国启动了从工业时代到信息时代的军事转型,提出从平台中心战(PCW)向网络中心战(NCW)的转型,并以全球信息栅格(GIG)为基础。GIG 是美国所构想的、正在研发的国防信息基础设施,预计在 2015 年可形成初始作战能力。它以面向服务的结构(SOA)为体系构架,向联网的实体提供成套的、安全的信息服务与电信服务,以加强信息共享、决策优势与异构协同。GIG 包括多模态数据的传递媒介,如陆上电路、空间单元和无线电台等,其所组成的互联网络可动态地、透明地将信息从发源处路由至目的地。以 GIG 为依托,美国军队加速向网络中心化演进,如陆军的未来战斗系统(FCS),海军的兵力网(Forcenet),空军的指挥控制星座(C^2 constellation)等。这里涉及十分巨大(Herculean)的技术挑战,必须通过从基础到系统的多层次创新和突破,才能在未来有限的时间内实现超越前 15 年 Web 网发明以来的发展。凡此种种,都是我们在编著《丛书》第 1 版时只能预测而无法探知的。然而今日,这些高新技术的面貌已逐渐清晰并迅速渗入人们的生活和竞争。这使《丛书》的作者们意识到进行再一次创作的必要性;同时,热心的读者们也期盼我们能及时对第 1 版进行

修改以便与时俱进。

基于以上原因,在各级领导机关的大力支持下,《丛书》各分册的原作者与新分册的新作者们在从事繁重业务工作的同时,废寝忘食、辛勤耕耘,对《丛书》各分册进行了精心修订、编撰,为第2版的问世做出了卓越的贡献。我谨代表《丛书》编审委员会向他们致以衷心的感谢与感谢。

第2版承袭了第1版的编写宗旨、编写特色及服务对象。在维持原结构不变的基础上,对内容进行了大幅度更新,并明显加大了军事科技的比重,增、删了7个分册,总册数由17分册变为18分册,总字数由800万字增加到1400万字。新版《丛书》仍以先进的综合电子信息系统为龙头,分层次、全方位地介绍各项先进信息技术,具体包括以下分册:

系统性技术分册

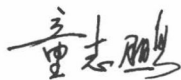
- 综合电子信息系统(第2版)
- 综合电子战(第2版)
- 侦察与监视
- 军事通信(第2版)
- 雷达与探测(第2版)
- 数据链
- 导航与定位(第2版)
- 计算机技术(第2版)
- 计算机软件技术(第2版)
- 信息安全与保密(第2版)

基础性技术分册

- 微电子技术(第2版)
- 光电子技术(第2版)
- 真空电子技术(第2版)
- 传感器技术
- 微声电子器件
- 化学与物理电源(第2版)
- 现代电子测试技术(第2版)
- 先进电子制造技术(第2版)

这两个系统分别从横向、纵向对众多先进的信息技术形成了有机的集成。

《丛书》的编写出版得到总装备部、中国电子科技集团公司及其有关研究所的领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及编辑们的积极推动与努力,谨对他们表示由衷的感谢。



2007年8月26日

Preface

第1版序

信息技术是一个复杂的多层次多专业的技术体系,粗略地可以分为系统和基础两个层次。属于系统层的一般按功能分,如信息获取、通信、处理、控制、对抗(简称为5C技术,即Collection, Communication, Computing, Control, Countermeasure五个词的第一个字母)等;基础层技术一般按专业分,如微电子、光电子、微波真空电子等。

信息技术革命的火炬是由微电子技术革命点燃的,它促进了计算机技术、通信技术及其他电子信息技术的更新换代,迄今,尚未有尽期。信息技术革命推动产业革命,使人类社会经历了农业、工业社会后进入了信息社会。

大规模集成电路的集成度是微电子技术革命的重要标志,它遵循摩尔(Moore)定律,每18个月翻一番,预计可延伸到2010年。届时,每个芯片可包含100亿(10^{10})个元件,面积可达到 10cm^2 ,作为动态存储器的存储量可达64Gb(吉比特),接近理论极限 10^{11} 个元件和256Gb存储量。微处理器芯片的运算速度每5年提高一个数量级,到本世纪末,每个芯片运算速度可达10~100亿次每秒,有人认为,实现2000亿次的单片微处理器在技术上是可能的。与此相适应,每芯片比特存储量与每MIPS(兆指令每秒)运算量的成本将呈指数式下降,现在一个100兆指令/s专用数字信号处理芯片只售5美元。如果飞机的价格也像微电子那样呈指数式下降的话,70年代初买1块比萨饼的费用在90年代就可以买1架波音747客机。3年内1部电话机将只用1块芯片,5年内1台PC机的全部功能可在1个芯片上实现,6年内1部ATM交换机的核心功能也可用1个单片完成。由于微处理器芯片价格持续不断地下降,构成了它广泛应用的基础。现在,在一般家庭、汽车和办公室中,就有100多个微处理器在工作,不仅是PC机,而且在电话机、移动电话机、电视机、洗衣机、烘干机、立体声音响、家庭影院中也有。1辆高档汽车中包含20多种可编程微处理器,1架波音777客机含有100多万行的计算机程序代码。

通信技术的进步还得力于光子技术的进步。光通信速率(比

特每秒)每两年翻一番,现在实验室中已可做到 10^{12} b/s,即可将全世界可能传输的全部通信量于同一时刻内在 1 根光纤中传送,或相当于 1s 内传输 1000 份 30 卷的百科全书。通信速率的提高和通信容量的增大,使光通信成本也不断降低,与 80 年代相比,降低了两个数量级。

因特网是全球信息基础设施的雏形,其发展速度惊人。现在每 0.4s 增加一个用户,每 4min 增加一个网络。1996 年联网数大于 10 万,联网主机数大于 1000 万,用户数大于 7000 万(预计到本世纪末,将大于 2 亿),PC 机总量将达 5 亿,联网主机达 3000 万,信息量每 5 年翻一番。越来越多的公司、团体、机关、个人通过信息网络相互联接,其应用范围从单纯的电子函件通信扩大到远程合作(包括教育、诊断、办公、会议、协作等)、按需点播、多媒体文娱、电子商务、银行、支付等,人类社会生存与发展的另一维空间,即信息空间或称为赛博空间(Cyberspace)正在形成。如果说工业社会是建筑在汽车与高速公路上的话,信息社会则是建筑在信息与信息高速公路上的。政府、军队、经济、金融、电力、交通、电信等关键部门都要依赖于信息基础设施的正常运行。信息技术和信息产业的水平已成为综合国力的重要标志,也是国际竞争力的焦点与热点。

信息技术的飞跃发展及其渗透到各行各业的广泛应用,不仅推动了产业革命,而且也深刻地改变了人们的工作、学习和生活的方式。信息技术不仅扩展了人的视觉、听觉等感知能力,而且还渗透到思维领域,减轻或部分地替代人的脑力劳动,提高思维的效率和质量,实现人的思维能力的延伸,增强人的认知能力。信息作为事物的属性与相互关系的状态的表达是客观存在的,但不是显在的,很多是潜在的,有的是深埋的,有待挖掘与提炼。信息技术大大地丰富了信息采集的内容,提高了信息处理的能力,为人们对客观事物及其规律的认识提供了创新的工具,也为人们正确认识与有效改造主观世界和客观世界提供了源泉,将使社会的物质文明与精神文明建设得到极大的发展。

信息、能源与物质是人类社会赖以生存与发展的三大支柱。在信息社会中,信息是最重要的支柱和最重要的产业,它影响着其他两个支柱的健康发展,包括生产、传输、分配、运行、减少损耗、改善管理、提高效率、降低成本等等;同时,它还能不断地培育与发展新物质和新能源的发明与生产,不断地改善生态环境,从而使人类社会进入可持续发展的健康轨道。

信息革命在带动产业革命的同时也带动军事革命,使得军事技术、武器装备、作战思想、作战方式、战争形态、军事原则、军事条令与部队编成等都将发生深刻的变化。如果农业社会是冷兵器时代,工业社会是热兵器时代,那么信息社会则是信息兵器时代。信息、信息化平台、武器与弹药成为战场上的主战兵器。信息优势成为传统的陆地、海洋、空中、空间优势以外的新的争夺领域,并深刻地制约着传统领域的战斗胜负,从而构成信息化战争的新形态。在这种战争中,战争胜负决定于敌对双方掌握信息与信息技术的广度与深度。信息不仅是兵力倍增器,它本身就是武器和目标,是双方必争的制高点。1991 年初的海湾战争,被称为硅片战胜钢铁的战争,即源于这样的认识。它开启了赛博空间战、网络战、信息战等簇新的作战方式。

以信息优势为核心的军事革命是建筑在先进的指挥、控制、通信、计算机、情报、监视、侦察及其一体化的信息战能力的基础上的,这个众系之系(系统的系统)我国称为综合电子信息系统,与美军后来提出的 C^4 ISR/IW 相当,它由以下 6 部分组成。

1. 鲁棒的多探测器信息栅格网络。为作战部队提供作战空间感知优势。
2. 先进的指挥控制与作战管理栅格网络。为部队提供作战的先期规划、胜敌一筹的作战部署,执行作战指挥控制与一体化兵力管理能力。
3. 从探测器到射击器的栅格网络。为部队提供精确制导武器的动态目标管理、分配与

引导,协同作战,一体化防空,快速战损评估和再打击能力。

4. 联合的通信、导航与定位栅格网络。提供可靠、安全、大容量与高精度的信息,以支持部队的机动行动,确保全面优势。

5. 信息进攻能力。采取侵入、操纵与扰乱等手段,阻碍敌人作战空间感知、认知与有效用兵能力。

6. 信息防护能力。保证我方信息系统的安全,防护敌方对我信息网络的利用、干扰和破坏。

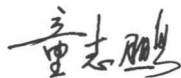
这个系统的系统涉及众多先进的信息技术的横向与纵向的有机集成,它包括雷达和光电的有源与无源探测技术、有线和无线及固定和移动通信技术、计算机硬件和软件技术、精确导航定位技术、航天航空测控技术、信息安全保密技术、电子战技术等横向专业技术的集成;也涉及微电子技术、光子与光电子技术、真空电子技术、压电与传感器技术等先进元器件技术,电子材料技术、电源技术、测试技术、先进制造技术等纵向基础技术的集成。当代军事革命要求在创新的军事思想指引下,发展有层次多专业的纵横集成的信息技术;同时,又要求在先进的信息技术驱动下,培育与发展新的军事思想,并在此基础上推动作战原则、军事条令与部队编成的变革,形成军事革命与信息革命的有机结合。

我们正处于世纪之交,党的第十五次代表大会的胜利召开,启动了有中国特色的社会主义事业在邓小平理论的指引下全面进入21世纪。我国的国防与军队现代化建设的跨世纪历史进程已经开始。为了适应军事革命环境下的高新技术军事斗争的需要,我军必须拥有信息优势,必须拥有以先进的综合电子信息系统为基础结构的性能优良的武器装备,必须提高部队素质,把人才培养推上新的台阶。

江泽民总书记非常重视人才的培养,他多次指示,要用高新技术知识武装全军头脑。在未来的信息化战场上,知识将成为战斗力的主导因素,敌对双方的较量将更突出地表现为高素质人才的较量。本丛书的编写出版就是为贯彻这个伟大号召提供系统基础知识。全书以先进的综合电子信息系统为龙头,多层次、全方位地介绍相关的各项先进信息技术,既包括系统技术,也包括基础技术,共17个方面,荟萃成17个分册。丛书的编写以普及先进信息技术知识为目标,以中专以上文化程度,从事军、民用电子信息技术有关业务的技术人员和管理干部为主要对象,努力做到深入浅出,雅俗共赏,图文并茂,引人入胜,文字简练,语言流畅,学术严谨,论述准确,使其具有可读性、可用性、先进性、系统性与权威性。参加丛书各分册撰写的作者都是长期从事现代信息技术研究与发展的专家,他们在繁重的业务工作的同时,废寝忘食,长期放弃节假日的休息,辛勤耕耘,鞠躬尽瘁,为本丛书做出了卓越的贡献。他们以自己的模范行动,“努力成为先进思想的传播者、科学技术的开拓者、‘四有’公民的培育者和优秀精神产品的生产者”。我谨代表总编委向他们致以衷心的敬意!

本丛书的编写出版得到原国防科工委与原电子工业部领导的大力支持,得到国防工业出版社领导及责任编辑们的积极推动与努力,借此之机,向他们表示由衷的感谢!

中国工程院院士
原电子工业部科技委常务副主任



Preface

前言

声学是一门古老而又极具活力的科学,起初的动力主要源自对乐器的研究;随着社会和科学的发展,声学已经渗入许多学科(特别是电子信息领域),成为近代物理学中一个特别活跃的分支。

超声技术一直是声学中一个最重要的部分,它从经典声学发展而来,而电子学的发展和各种电声换能器的出现则赋予超声技术极大的发展潜力,到20世纪初,随着无线电电子学、超声工程,特别是信号处理技术的发展需要,超声技术又被推向微波段并得到飞速发展。

20世纪中期,电子技术特别是雷达、通信、测控、电子战等信号处理技术的发展给微波超声技术以有力推动。瑞利(Lord Rayleigh)1885年发现的被称为瑞利模的声表面波(SAW)在此期间由R. M. White和F. W. Voltmer发明了有效的激励和检测结构——叉指换能器,由此给中频和射频信号处理带来极大的希望,实时相关解调/匹配滤波有了实现手段;在脉冲压缩等信号处理需求的原动力的强力推动之下,SAW技术借助集成电路的现成工艺迅速发展起来;加上通过压电效应实现的声光互作用的声光技术,成为当今实时处理的核心基础技术;同时通过各种因素对声介质声电参数的影响而开发的各种理化生物传感器也成为一类前景广阔的信息获取器件,这其中惯性量获取的振动惯性器件又是惯性制导的重要技术支撑产品。

上述以微波超声电子学为理论基础、以微电子工艺为核心工艺手段开发的一系列电子信息产品,均归类为微声电子器件。在信息获取和处理、定位定向等方面,这些器件推动了系统、装备等的一系列核心技术和功能的实现,大幅度地提升了系统的功能和能力。

本书共分6章,依次为声体波器件、声表面波器件、声光器件、压电陶瓷器件、振动惯性器件、微声电子器件在电子系统中的应用。第1章~第5章主要介绍各类器件的发展简况、工作原理、设计基础、性能特点、分类和主要应用,第6章则介绍了一些重要的应用实例。本书可供使用相关产品的工程技术人员和相关设备维护人员阅读参考。

本书是《现代电子信息技术丛书》的一个分册,是从该丛书 2000 版的《传感器与压电器件》分册中分离出第二篇、第三篇内容,并进行修订增补而独立成册的,内容上增加了压电陶瓷器件及微声电子器件在电子系统中的应用共 2 章。全书内容无论在深度或广度方面都有较多更新,其中不少是近年新成果。

本书第 1 章由汤劲松编写,第 2 章由曹亮(2.1 节~2.4 节)、傅金桥(2.5 节)、马晋毅(2.6 节)编写,第 3 章由刘伟、何晓亮编写,第 4 章由刘光聪编写,第 5 章由吕志清编写,第 6 章由刘积学编写。母开明审阅了全书。

受编者水平和经验所限,谬误、缺陷之处诚望读者批评指正。

胡爱民

Contents

目 录

第 1 章 声体波器件	1
❑ 1.1 概述	1
1.1.1 声体波器件的分类与组成	1
1.1.2 声体波器件应用简介	2
❑ 1.2 声体波换能器和谐振器	2
1.2.1 换能器的基本原理	2
1.2.2 晶体谐振器	3
1.2.3 晶体滤波器	4
❑ 1.3 声体波微波延迟线	6
1.3.1 工作原理与性能	6
1.3.2 微波声体波的激励	7
1.3.3 声体波延迟线的构造与基本性能分析	10
1.3.4 声体波延迟线的制备	14
❑ 1.4 薄膜声体波谐振器和滤波器	16
1.4.1 薄膜声体波谐振器	16
1.4.2 薄膜声体波谐振器集成放大滤波器	17
❑ 1.5 高次谐波声体波谐振器	19
1.5.1 结构与性能	19
1.5.2 测量与应用	20
❑ 1.6 声体波器件的发展对军事工程的影响	23
❑ 参考文献	23
第 2 章 声表面波器件	24
❑ 2.1 概述	24
2.1.1 声表面波技术特点及器件制作	26

2.1.2	声表面波器件用的主要压电材料及各种声波模式	29
2.1.3	声表面波技术的应用	32
 2.2	叉指换能器	32
2.2.1	基本工作原理	32
2.2.2	脉冲响应模型	33
2.2.3	均匀叉指换能器特性及其导纳	35
2.2.4	指间反射分析	36
2.2.5	叉指换能器加权及二阶效应	37
 2.3	声表面波谐振器	39
2.3.1	声表面波单端对谐振器	39
2.3.2	声表面波双端对谐振器	40
2.3.3	声表面波振荡器	42
2.3.4	声表面波陷波器	44
 2.4	声表面波滤波器	45
2.4.1	基本工作原理	47
2.4.2	横向高损耗滤波器	48
2.4.3	单相单向换能器构成的横向滤波器	52
2.4.4	倾斜换能器构成的滤波器	56
2.4.5	耦合谐振型滤波器	58
2.4.6	阻抗元型滤波器	62
2.4.7	声表面波滤波器组	64
2.4.8	声表面波滤波器的使用和匹配	67
 2.5	声表面波信号处理器件及组件	70
2.5.1	声表面波延迟线及组件	70
2.5.2	声表面波编码抽头延迟线及组件	73
2.5.3	声表面波色散延迟线及组件	78
2.5.4	声表面波卷积器/相关器	82
2.5.5	声电荷转移器件	86
2.5.6	声表面波信号处理器在系统中的应用	91
 2.6	声表面波传感器	99
2.6.1	声表面波信息敏感原理	100
2.6.2	声表面波传感器检测原理	101
2.6.3	声表面波传感器	101
2.6.4	声表面波传感器的应用	108
 参考文献		109
第3章	声光器件	110
 3.1	概述	110

3.2	声光器件的基本原理、结构和分类	111
3.2.1	基本原理	111
3.2.2	基本结构	112
3.2.3	分类	114
3.3	声光偏转器	116
3.3.1	工作原理	116
3.3.2	特性及应用	117
3.4	声光调制器	118
3.4.1	工作原理	119
3.4.2	脉冲声光调制器	119
3.4.3	正弦波声光调制器	119
3.4.4	线性声光调制器	120
3.4.5	多频声光调制器	120
3.4.6	多信道声光调制器	121
3.4.7	特性及应用	121
3.5	声光 Q 开关	126
3.5.1	声光调 Q 工作原理	126
3.5.2	声光 Q 开关的特性及应用	127
3.6	声光锁模器	131
3.6.1	工作原理	131
3.6.2	特性及应用	131
3.7	声光移频器	132
3.7.1	工作原理	132
3.7.2	特性及应用	133
3.8	声光可调滤光器	134
3.8.1	工作原理	134
3.8.2	特性及应用	135
3.9	表面波声光器件	136
3.9.1	工作原理	137
3.9.2	表面波声光调制器	137
3.9.3	表面波声光偏转器	137
3.9.4	表面波声光器件的特性及应用	138
3.10	光纤声光器件	140
3.10.1	工作原理	141
3.10.2	特性及应用	142
3.11	声光相关/卷积器	143

3.11.1	几种基本结构及工作原理	144
3.11.2	特性及应用	145
	参考文献	147
第4章	压电陶瓷器件	148
	4.1 概述	148
4.1.1	压电陶瓷材料的基本特性	149
4.1.2	压电陶瓷体振动模式	152
	4.2 压电陶瓷器件分类	153
4.2.1	按工作方式分类	153
4.2.2	按应用门类分类	153
	4.3 压电陶瓷滤波器	153
4.3.1	压电陶瓷振子	154
4.3.2	压电陶瓷单片滤波器	155
4.3.3	组合式压电陶瓷滤波器	156
4.3.4	机械滤波器	157
	4.4 压电(电致伸缩)陶瓷微位移器	158
4.4.1	双模片型压电微位移器	159
4.4.2	压电陶瓷管型微位移器	160
4.4.3	多层压电(电致伸缩)陶瓷微位移器	160
	4.5 压电陶瓷换能器	161
4.5.1	电能—机械能转换换能器	161
4.5.2	机械能—电能转换换能器	161
4.5.3	压电陶瓷变压器	161
	4.6 压电陶瓷传感器	165
4.6.1	压电陶瓷爆震传感器	165
4.6.2	压电陶瓷压力传感器	166
	参考文献	167
第5章	振动惯性器件	168
	5.1 概述	168
5.1.1	振动惯性器件的特点	170
5.1.2	振动惯性器件的分类	170
	5.2 振动陀螺	171
5.2.1	哥氏加速度	171
5.2.2	振动陀螺原理模型	172
5.2.3	音叉振动陀螺	172