

嵌入式智能听力诊断仪的算法设计和实现

毛建灿

指导教师 李咏梅教授

厦门大学

厦门大学博硕士学位论文摘要库

学校编码: 10384

分类号_____密级_____

学号: 23020051302525

UDC _____

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

嵌入式智能听力诊断仪的算法
设计和实现

Algorithm Design and Implementation of Embedded
Smart Hearing System

毛建灿

指导教师姓名: 李咏梅 教授

专业名称: 计算机软件与理论

论文提交日期: 2008 年 5 月

论文答辩日期: 2008 年 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，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的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1、保密（ ），在 年解密后适用本授权书。

2、不保密（ ）

（请在以上相应括号内打“√”）

作者签名： 日期： 年 月 日

导师签名： 日期： 年 月 日

摘要

耳声发射 (Otoacoustic Emission, OAEs) 是由内耳中外毛细胞产生, 经听骨链、鼓膜传导, 释放入外耳道的音频能量。它首次由英国人 Kemp 在 1978 年通过放入外耳道的耳机—话筒组合探头检测到。耳声发射的发现, 对听觉系统的基础与临床研究都具有重要的意义。它的存在, 为耳蜗存在主动活动机制找到了直接的证据, 打破了耳蜗是机械—生物电换能器, 只能被动地感受外界声刺激的传统观念, 建立了耳蜗是双向换能器的学说, 为人们研究听觉系统机理提供了新的方向与思路; 同时, 作为检测耳蜗功能的客观手段, 大量的研究正在进行, 以期探索耳声发射与各种听觉系统疾病的关系, 建立新的诊断手段。

瞬态诱发耳声发射 (Transiently Evoked Otoacoustic Emissions, TEOAEs) 是对耳蜗瞬态响应的测试, 在正常耳具有长期稳定性, 检出率可达 100%, 对多种损伤因素较为敏感, 且检测客观、无损、快速, 因而是被广泛应用和研究的耳声发射。

目前我国自主开发的 OAEs 检测仪非常少, 大多是从国外进口价格昂贵、不便于推广, 而且硬件电路复杂, 不易维修和调试, 因此本课题设计了基于 DSP 的嵌入式智能听力诊断仪, 力求使用简单、功能可靠, 价格低廉, 能够满足中小城市特别是农村的听力检测。

本论文设计了智能嵌入式听力诊断仪的硬件系统, 并设计了系统启动程序、Boot Loader 程序, 并详细介绍了显示驱动程序和数据采集模块的驱动程序的设计, 具有较好的实时性。

本论文重点介绍了听力诊断仪的算法研究, 先对探头的密合情况的检测算法进行了设计, 综合运用了多种噪声消除和伪迹去除算法, 达到了比较好的效果, 利用系数相关判别方法和 3dB 判别方法分别用于检测 OAEs 信号, 最后对测试结果进行了详细的分析。

本论文最后对 uClinux 在 ADSP-BF531 的移植进行了研究, 给出了 uClinux 操作系统移植的过程。

关键字: 信号处理; uClinux; 耳声发射

Abstract

Otoacoustic emissions (OAEs) is are lease of audio-frequency energy from the outer hair cells of the inner ear into the external ear canal, transmitted though the ossicular cnain and tympanum. It was first reported in 1978 by Kemp by placing a earphone-micphone probe in the ear canal. OAEs provides direct evidence for the cochlea active process mechanism and a new idea to research the auditory mechanism .At the same time, as an objective means to assess the cochlear functional status, otoacoustic emissions has been studied largely to find out the relation between otoacoustic emissions and various hearing impairments, and further establish a new diagnostic tool.

Transiently evoked otoacoustic emissions (TEOAEs) tests the transient response of the cochlea, it stabilizes over along term, can be detected in 100% normal ears, and more sensitive to injuries, Also it is an objective, noninvasive and quick method. TEOAEs has been widely researched and used.

So far, there are a few OAEs systems in our country, all the OAEs systems are expensive, and not convenient for spread. In addition, their hardware systems are too complex to maintain and repair. Hence, this dissertation designs an embedded smart hearing system ,which use simply and is reliable and cheap, in order to fulfill the need of middle and small cities, especially the country.

This dissertation design a OAEs hardware system and software system, and focuses on OAEs hearing detection algorithm for the study: Firstly it design a algorithm for the sensor detection; Then it uses a variety of noise elimination and pseudo-track removal algorithms in comprehensive ,and gets a good results; Finally 3dB determine methods and factors related determine methods were used to detect OAEs signals; and Analysis the test results in detail. This dissertation also introduces the uClinux operating system transplant to ADSP-BF531 platform.

Keywords: DSP; uClinux; Otoacoustic Emissions

目录

第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 研究工作的目的和意义	2
1.3 耳声发射仪的国内外研究现状	4
1.4 本论文的创新点	5
1.5 本论文的工作和内容	5
第二章 嵌入式智能听力诊断仪的检测原理	7
2.1 听觉生理学原理	7
2.2 耳聋的定义	9
2.3 听力减退分级	9
2.4 耳声发射的技术机制	11
2.5 目前常用的耳声发射检测的方法	13
2.6 本章小结	14
第三章 嵌入式智能听力诊断仪的硬件设计	15
3.1 探头	15
3.2 放大器	16
3.3 数据采集模块	16
3.4 显示模块	18
3.5 键盘	18
3.6 数据处理器	19
3.7 通讯接口模块	20
3.8 本章小结	21
第四章 嵌入式智能听力诊断仪的系统软件设计	22
4.1 系统启动过程	22
4.2 Boot Loader 的设计	23
4.3 显示驱动程序设计	23
4.4 数据采集模块驱动程序设计	25

4.5 uClinux 操作系统在 Blackfin 平台上的移植	26
4.5.1 交叉编译环境的建立	26
4.5.2 uClinux 内核源代码的修改和裁剪	27
4.6 本章小结	31
第五章 嵌入式智能听力诊断仪算法设计	32
5.1 探头密合情况检测	33
5.2 耳声发射信号处理	34
5.2.1 噪声的去除	35
5.2.2 伪迹的消除	36
5.2.3 耳声发射信号处理的新方法	38
5.3 耳声发射信号的判别方法	39
5.3.1 3dB 判别方法	39
5.3.2 系数相关判别方法	41
5.3.3 判别准则	42
5.4 测试过程和结果分析	43
5.5 本章小结	45
第六章 总结与展望	47
6.1 本论文的研究工作	47
6.2 进一步工作	47
参考文献	48
致谢语	51
附录 作者在攻读硕士学位期间发表的文章	52

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Objective and Signification	2
1.3 Recent Development of OAEs.....	4
1.4 Innvation.....	5
1.5 Structure	5
Chapter 2 Mechanism of Embedded Smart Hearing System	7
2.1 Introduction of Audiology	7
2.2 Definition of Deafness	9
2.3 Audition Level	9
2.4 Mechanism of OAEs	11
2.5 OAEs Commom Detection Method	13
2.6 Summarization	14
Chapter 3 Hardware System of Embedded Smart Hearing System .	15
3.1 Sensor	15
3.2 Amplifier	16
3.3 Data Collection Module.....	16
3.4 LCD	18
3.5 Keyboard	18
3.6 CPU	19
3.7 Communicating Interface Module	20
3.8 Summarization	21
Chapter 4 Software System of Embedded Smart Hearing System....	22
4.1 Start of System.....	22
4.2 Boot Loader	23
4.3 LCD Driver.....	23

4.4 Data Collection Driver	25
4.5 Transplant uClinux OS to Blackfin	26
4.5.1 Cross-Compiler Environment	26
4.5.2 uClinux Kenel's Modification and Cutting	27
4.6 Summarization	31
Chapter 5 Algorithm Design of Embedded Smart Hearing System ..	32
5.1 Sensor Detection	33
5.2 OAEs Signal Disposition	34
5.2.1 Noise Elimination	35
5.2.2 Pseudo-track Removal	36
5.2.3 New Method of OAEs	38
5.3 Differentiation of OAEs	39
5.3.1 3dB Method	39
5.3.2 Correlation Coefficient Method	41
5.3.3 Verdict Criteria	42
5.4 Process and Analysis	43
5.5 Summarization	45
Chapter 6 Conclusion	47
6.1 Conclusion	47
6.2 Future Work	47
References	48
Acknowledgements	51
Applendix	52

第一章 绪论

1.1 引言

听力与语言是人类相互交流和认识世界的重要手段，然而，耳病和听力障碍的阴霾却袭扰着人类。据世界卫生组织估算，全世界有轻度听力者损失近 6 亿，中度以上的听力损失 2.5 亿。我国有听力障碍残疾人 2057 万，居各类残疾之首，其中 7 岁以下聋儿达 80 万，老年性耳聋患者 949 万；由于药物、遗传、感染、疾病、环境噪声污染、意外事故等原因每年约新生聋儿 3 万余名。对于新生儿童来说，越早诊断出听力损伤则治愈的机会越大，因此，用听力诊断仪对他们进行听力筛查尤为重要。听力诊断仪能够及早发现他们的听力损伤程度并给予及时干预，减少对语言发育和其他神经精神发育的影响。对成年人及老年人来说，良好的听力诊断仪不仅能够帮助他们了解自己的听觉系统，并且能够协助听力障碍残疾人选配恰当的助听器，帮助他们恢复健康生活^[1]。

听力测试方法可分为主观听力测试方法和客观听力测试方法。

主观听力测试方法又称行为测试听力法，指用不同程度、不同频率的纯音或语音测试人耳的最低声音强度。常用的主观测试方法有：简单测听法和纯音测听法。主观测听法由于需要受检查者对声刺激做出判断反应，所以易受被检者的年龄、智力、文化程度、身体状况、精神状况、配合意愿等主观因素的影响，不适合用于幼儿和伪聋者，因此一般只作为客观测听的辅助手段。

客观测听法的测试结果不受被测试者主观意志或意识状态的影响，因此对小儿听力评估以及不配合患者的听力评估具有重要意义。目前采用的客观测听法包括：耳声发射（Otoacoustic Emissions, OAEs），听力脑干反应（Auditory Brainstem Response, ABR），40Hz（40 Hertz Event-Related Potential, 40 Hz AERP）听力相关电位。

OAEs 以机械振动的形式起源于耳蜗，经听骨链传导引起鼓膜的振动而在外耳道记录到的声信号。现在普遍认为这种振动能量来自外毛细胞的主动运动。外细胞这种运动可以是自发的，也可以是对外来刺激的反应，其运动通过耳蜗螺旋器（Corti 器）与其相邻结构的机械联系使基膜发生机械振动。这种振动在淋巴

液中以压力变化的形式传导，并通过卵圆窗推动听鼓膜及鼓膜振动，最终引起外耳道内空气振动。上述过程大体上是声音传入的逆过程。

OAEs 具有如下特性^[1]：

(1) 客观性

诱发性耳声发射 (evoked otoacoustic emissions, EOAEs) 检测由计算机程序自动进行，并根据统计学方法给出，因此避免了 ABR 的“客观检查，主观判断”的缺点。

(2) 非线性

EOAEs 的振幅在低强度声刺激下可随声刺激强度增加而呈比例 (线性) 增长，当刺激声强度增加到接近 40~60 dB SPL 时，OAEs 强度增长减慢并趋于饱和，这就是非线性。这一特点反映了 OAEs 来源的生物学属性，也是对其与声伪进行鉴别的一个主要特征。

(3) 锁相性

OAEs 的相位取决于声刺激信号的相位，并跟随其变化而发生相应的变化。利用 OAEs 的锁相性特点，结合其非线性特点，在测试时可用来减少或消除记录伪迹。在测量刺激频率耳声发射 (SFOAEs) 时，利用这以特点可将 OAEs 和刺激声相区分。

(4) 可重复性和稳定性

正常耳的 EOAEs 的声学特性 (如时域波形或频域) 存在明显的个体间差异，但在个体自身则具有良好的可重复性和稳定性，可连续数年无明显变化。

(5) 快速简便

EOAEs 测试仪通常可以同时测试双耳 250Hz~4000Hz 的多个频率，并自动打印测试频谱图，而且由于测试是自动给声并经计算机自动进行处理的，一旦结果满足统计学检验水准则自动停止给声，或人为停止给声，所以 EOAEs 的测定通常比 ABR 和纯音测试更快捷。

1.2 研究工作的目的和意义

耳声发射的发现，对听觉系统的基础研究及临床研究都具有重要的意义。它的存在，使人们对听觉产生的生理过程有了一个新的认识，并以一种全新的观念

去探索听觉灵敏度、分辨率及动态范围的机理。初步认为，正是通过耳蜗内的主动机械活动，增加了听觉系统初级传感器—毛细胞换能器的灵敏度及分辨力，从而为听觉系统的精细分析提供了丰富的原始信息。同时，作为正常听力的重要组成部分，耳声发射反映了耳蜗的功能状态，耳蜗功能的损伤，可导致耳声发射的降低或消失。因而，大量的研究工作正在进行，以期揭示耳声发射与各种听觉系统疾病的关系，以便建立一种客观、无损及快速的诊断方法。目前的研究结果表明，耳声发射对感音神经性聋具有辅助定位诊断的意义^[2]。耳声发射现应用于如下几个方面：

(1) 新生儿听力筛查^[3]

OAEs 检测方便、快捷、而且无创是目前听力筛查的主要手段。一般在产房或婴儿室中即可进行，环境噪声低于 40 dB SPL，可选择婴儿入睡时进行检测。检测前应注意排除中耳和外耳的病变，避免出现假阴性结果。

(2) 耳蜗性听功能障碍的检测

在正常耳几乎可以 100% 引出，当纯音听阈 (0.5 ~ 4 kHz) >30 dB HL 时，TEOAEs 则不能检出。

(3) 传导功能障碍的检测

当鼓膜、听骨链及中耳存在轻微疾患时，由于传导功能障碍致由耳蜗传至鼓膜的声发射受到影响；外耳道传至耳蜗的声能受到衰减，致耳蜗受到的刺激量降低，故耳道记录不到 TEOAEs。

(4) 动态检测耳蜗功能

对一些内耳疾患如梅尼埃病，噪声性暂时性阈移、老年性聋、耳毒性聋等，不仅可以作为长期性能暂时性检测耳蜗功能变化的手段，且可作为迅速、安全地早期发现耳蜗功能变化的客观指标。TEOAEs 的存在意味着外毛细胞功能正常或比较正常。

(5) 检测耳蜗血液供应的状况^[1]

研究表明，在耳损或阻断耳蜗供血动脉时，OAEs 的强度下降，DPOAEs 的部分频率不能引出。

此外，我国省、市级医院的耳声发射检测仪多是外国进口，价格昂贵，中小医院难以承受，特别是农村的医疗单位；引进的耳声发射检测仪硬件电路复杂，

不易维修和生产调试，而且是英文界面，不易推广。

基于以上的目的和意义，本课题以嵌入式系统为基础，设计一个易于操作的、携带方便的、廉价的、能够广泛普及的耳声发射检测系统，希望促进中小城市特别是农村的听力障碍防御和康复事业的发展，推进社会主义和谐社会和新农村的构建。

1.3 耳声发射仪的国内外研究现状

耳声发射现象的发现是听觉生理学和听力学近20年来最重要的进展之一，对耳声发射的研究是对听觉生理及病理机制研究的一部分。耳声发射来源于耳蜗，代表了耳蜗内的主动机械活动，并可以反应听觉传出系统的活动情况。目前，对耳声发射的研究工作已不再限于对耳蜗发射机制和临床应用的研究，而进一步以耳声发射为观察耳蜗结构及听觉中枢的生理活动的研究手段，并试图通过对耳声发射的观察了解有关结构的病理机制，为临床诊断治有关疾病提供依据。有些国家已经研制出了耳声发射仪，但为数不多。

丹麦国际听力公司生产的OtoRead OAE Clinical耳声发射仪具有灵活的多种测试组合模式，提供比较宽频率的测试范围，可以通过菜单可以设置平均时间、测试强度、频率、时间/日期等；测试给出的“PASS”（通过）或者“REFER”（转诊）的结果明确、易于判断，但用户界面不是很友好^[4]。

美国Bio-Logic系统公司研制的AUDX耳声发射仪，是为畸变产物耳声发射测试和瞬态耳声发射测试而设计的医疗设备。它具有将可控频率的信号输入受试者耳道内，并测量产生于耳蜗外纤毛细胞的耳声发射反应，读取到的耳声发射数据求均值而完成测试^[5]。

美国GSI公司生产的GSI 70自动筛查型耳声发射仪是用于畸变产物耳声发射（DPOAE）测验，测验信号为4K、3K、2K音量强度为65/55dB SPL，内置显示屏和打印机，配合资料整理软件可储存150人名/编号及350个测试结果；配合电脑及资料整理软件（DMS）可用于1.5—6KHz自定6个畸变点作测验。其认为解决新生儿听力筛查的最好方法，GSI 70有如下特点：①速度比较快，在做好准备的情况下，每只耳朵只需要10秒的时间；②操作简单，GSI-70简单易用，只要输入姓名，进行测试，储存结果。③能打印出测试结果，能打印出左右耳的测试结

果，并附有图表^[6]。

德国 MAICO 公司生产的 ERO-SCAN 耳声发射测试仪具有 DPOAE 和 TEOAE 的功能，测试项目多样，可供用户按需选择；独特的双探头设计（具有专利的一体化探头和专为婴儿测试用微型探头），因而为所有年龄段的人进行客观听力评估测试，提供了较佳的解决方案；精巧的探头支架设计，解决了耳声发射仪必须反复清除测试探头堵塞物，而可能损坏精密探测元器件的烦恼，使用更加放心；仪器测试全自动进行，结果准确、可靠，仅用数秒就可完成对一只耳的测试，测试快速（典型值 7 秒/次）；配有快速低噪音打印机，数秒钟内可自动打印出左右耳测试结果，以 PASS 或 REFER、数据和图形详尽方式显示出测试结果；OAEs 的测试结果都会在主机液晶图形显示屏上显现出来，且按键的设计与液晶显示屏界面直观巧妙的结合，方便初学者快速上手操作，操作非常的简便容易；独特的降噪抗干扰专利探头设计，测试环境噪声只需低于 70dB SPL 即可，无需屏蔽室或单独安静的测试房间，使用更为方便；易于随身携带，方便实用^[7]。

我国听力事业起步比较晚，研制听力检测单位不多。根据在中国期刊网、万方数据库和互联网搜索发现，我国只有清华大学生物医学工程中心研制出的耳声发射听力检测器，但其是用 PC 机为平台的。

1.4 本论文的创新点

本论文有三个创新点：

一、与国外引进的 OAEs 检测仪的 PC 机平台不同，本论文按照嵌入式系统的设计方法，设计了低功耗、便于携带的嵌入式产品。

二、设计编写嵌入式系统的软件 Boot Loader 和各模块的驱动程序，完成预定的工作，具有较高的实时性。

三、对 OAEs 检测算法进行了研究，综合运用了目前的信号处理方法，对耳声发射信号的处理取得了很好的效果。

1.5 本论文的工作和内容

在本题研究工作中，本人熟悉了利用耳声发射检测听力的原理，并在掌握了基于 DSP 的嵌入式系统设计方法和 ADSP-BF531 的芯片特征后，设计了嵌入式

智能听力诊断仪的硬件和软件系统，并对 OAEs 信号处理算法做了研究。本论文的具体内容安排如下：

第一章，绪论。通过比较，阐述了耳声发射检测技术的优点，在听力检测中有其特定的地位，并介绍了嵌入式智能听力诊断仪的目的和意义，同时概括了基于耳声发射的听力检测仪的国内外现状，以及本课题的创新点和本论文的内容安排。

第二章，嵌入式智能听力检测仪的检测原理。首先介绍了听觉听力学原理，然后阐述了 OAEs 检测仪的检测原理以及 WHO 和我国的听力减退分级，OAEs 的产生机制和目前常用的 OAEs 检测方法。

第三章，嵌入式智能听力检测仪的硬件设计。先给出了嵌入式智能听力检测仪的硬件的系统框图，然后对探头、放大器、数据采集模块、键盘、数据处理器等模块进行芯片选择和设计进行详细的说明。

第四章，嵌入式智能听力检测仪的系统软件设计。从系统软件的角度介绍了系统的上电启动后的下载程序，接着就开始执行 Boot Loader 程序，再开始初始化各个模块。讨论了移植 uClinux 操作系统的步骤，并介绍了 uClinux 内核的目录结构，对内核进行裁剪，编译生成镜像文件，然后下载到目标板上，对移植操作系统的优点进行了分析。

第五章，嵌入式智能听力检测仪的算法设计。本章先给出了耳声发射信号的提取及处理流程图，然后分别对探头密合情况检测，噪声的去除、伪迹的消除以及耳声发射信号的处理进行了详细的研究，并对测试结果进行了讨论。

第六章，总结与展望。

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