

听觉显示研究与应用^{*}

喻耀华 刘正捷

(大连海事大学计算机学院中国欧盟可用性研究中心 大连 116026)

摘要 听觉显示是应用声音表示信息,通过听觉来显示和传递信息。本文首先介绍了听觉显示的研究背景,回顾了听觉显示的研究历史和国内外的研究现状,指出了听觉显示方面主要的研究领域;其次通过对听觉显示用户界面研究及可听化研究的分析,对当前听觉显示研究的发展进行了总结;最后对听觉显示及其应用研究前景提出了一些展望,旨在为今后的研究和应用提供一点思路。

关键词 听觉显示,听觉界面,可听化,耳标,听标,非语音声音

Research and Application of Auditory Display

YU Yao-hua LIU Zheng-jie

(Sino European Usability Center, School of Computer, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract Auditory display is the technology that communicates information through sound. The research background, history and current status of auditory display are firstly introduced. The main research areas of auditory display are showed. Secondly the current research situation and development trends about auditory display are reviewed. Finally an overview of prospective development of this area is given.

Keywords Auditory display, Auditory user interface, Sonification, Earcon, Auditory icon, Non-speech sound

1 研究背景

随着计算机计算能力和存储能力的增强,计算机用户获得了越来越多的可以处理的信息,他们需要以一些适当的方式显示这些信息,进而理解并解释这些信息。听觉显示是通过听觉来显示和传达信息,就是应用声音表示信息,实现信息传递。当视觉显示受限,不能用或不适合的时候,例如在手机和其他移动设备上,可以使用这种方式的信息表征来显示信息。

近几年普遍使用的信息显示方法是利用人的视觉,其中可视化技术通过计算机图形学和图像处理技术,将数据信息转换为图形或图像在屏幕上显示出来。视觉显示技术是计算机用户分析大量数据的强有力的工具,已经广泛地应用于自然科学、工程技术、金融和商业等各个领域^[1]。然而,视觉显示信息维度有限,而且人们利用视觉显示的能力已接近极限,在一些场合,比如处理和分析连续多维海量数据时^[2],单靠视觉通道已显得力不从心。人们考虑利用听觉来解决视觉不能单独完成的任务,降低视觉负荷。

目前各种计算机和移动设备的用户界面大多采用图形用户界面,致使大量的信息必须通过视觉来获取,人们越来越依赖于视觉的结果导致了视觉的过载。Wickens 的多资源理论认为,人们在利用感觉器官完成某项任务时,如果能充分调动和利用所有的感官系统,将大大减轻劳动者的劳动强度。因此听觉显示研究具有很强的现实性和必要性。

2 研究历史及现状

听觉是人的感觉通道之一,具有全方向的感觉能力,是仅

次于视觉的与外界交流信息的重要途径。国外最早的关于将听觉通道用于人机交互的论文发表于 20 世纪 50 年代,从 80 年代开始,人们已经意识到人机交互中有必要利用视觉之外的通道,并开始了较广泛的研究^[3]。国外学者在听觉感知、研究开发工具、听觉显示的设计和应用等诸多领域做了大量的工作,进行了深入的研究,取得了较多成果。

自 1992 年起,国际听觉显示委员会(ICAD)每两年召开一次年会,2000 年后每年一次,讨论有关听觉显示的问题,发表已取得的研究成果,逐步建立了一套基本的理论和应用原型,并建立和维护着一个网站,提供听觉显示的相关文献资源和研究信息,方便世界各国研究人员进行听觉显示的研究、交流与探索。与国外相比,国内在听觉显示领域还没有进行深入的研究,尚处于起步阶段。浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室、浙江大学信息与电子工程系与心理学系在这方面进行了一些研究和探索。

3 听觉显示研究进展

现在正在探索的听觉显示及应用研究不仅面向视觉正常的用户群体,而且还面向有视觉障碍的用户群体。听觉显示利用人的听觉对声音的感知,声音自然综合的特性适合于表现高维数据而不会使用户出现信息过载。在有许多变化参量或者必须同时监视暂态的复杂信息的场合非常适合用声音来表征数据。听觉显示研究中一些主要的研究领域也证明了在那些暂态特性非常重要或视觉通道负荷过重的场合,听觉通道在应用中优于其他通道。

3.1 听觉显示主要研究领域

听觉显示是一个比较新的研究领域,相对于视觉显示而

^{*} 欧盟第 5 框架研发计划和国家中欧科技合作计划项目(IST-1999-29067)资助。喻耀华 讲师,博士研究生,主要研究领域为人机交互、交互系统设计、可用性工程;刘正捷 教授,博士生导师,主要研究领域为人机交互、可用性工程。

言,研究的人员较少。近年来国内外在听觉显示方面主要对如下领域进行研究:(1)非语音声音信号的声学特征和用户听觉模型;(2)人机交互技术中的听觉通道扩展;(3)听觉显示原理技术、系统实现和设计原则^[3]。

目前听觉显示所做的研究大体上分为两类,如图1所示,一类是听觉显示用户界面研究,即研究在用户界面中使用声音;另一类是可听化研究,即研究在可听化中使用声音,又分为数据可听化和算法/程序可听化,前者侧重于用声音表现数据,后者关注呈现算法和程序的状态产生听觉想象,来帮助理解软件。听觉显示界面研究与可听化研究的界限并不是很明显,通过加入听觉显示,可以扩展已有的视觉界面的功能,增强人机交互的效果。目前在移动设备以及电话界面等方面使用听觉显示,可以弥补视觉界面的不足,或在没有视觉界面的情况下尽可能达到高效的人机交互。对于有视觉障碍的用户,听觉显示可以作为一种辅助手段,或者作为视觉显示的替代方式^[4]。

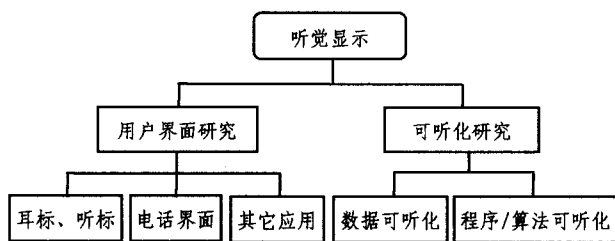


图1 听觉显示研究分类

听标、耳标和可听化技术是听觉显示研究的三个重要研究内容。听标是利用与日常产生声音的事件类比,将日常的声音映射到计算机事件上;耳标是抽象的结构化的声音信号,是将短的音调序列映射到动作或物体上,使声音和动作或物体产生联系,在信息显示中使用非语音声音,向用户提供关于某个计算机对象、操作或者交互的信息,是图标的听觉对应物。可听化是将所研究领域各维度信息间关系映射成声音各维度(频率、音色、音调等)间的关系,即利用非语音信号来表征信息,解释、传达所研究领域数据的各种特征,有助于信息提取或监控。已经有盖革计数器、声纳、听觉温度计,以及许多医学和飞机驾驶座舱等听觉显示成功的例子^[1]。

3.2 听觉显示用户界面研究

3.2.1 耳标和听标

有研究者对听觉界面中耳标与听标的效率和可用性进行了比较研究,结果发现耳标与听标均为听觉用户界面设计中的有效信息表征方式,但其适用场合有所不同^[5]。当需显示信息的数量较少,且其与日常生活中的声音存在明显的语义联系时,听标技术优于耳标技术,而当需显示信息的数量较大,并可组成复杂结构时,耳标技术则显现出明显的优势^[6]。Brewster等人将耳标应用于不同听觉界面的信息导航,结果发现采用耳标技术有助于提高操作者的任务绩效和降低其交互过程的心理负荷^[7]。

以前非语音听觉界面的研究显示非语音听觉界面可以提高导航菜单任务的绩效。那些研究工作的大部分聚焦在这样一些任务,即菜单不是语音菜单,菜单的视觉显示在整个任务中都是可见的。Maria等人研究了耳标的潜在优势,耳标是一种结构化的声音,可以用在非视觉显示的语音菜单系统中,评价两个语音菜单系统,这两个系统差别只是在于是否使用耳标。研究结果表明,使用耳标提高了任务绩效,减少需要按

键的次数,减少执行每个任务花费的时间^[8]。

Petrie等人进行了两项研究调查在盲人计算机用户的非视觉的MS-Windows界面中使用非语音声音(听标和耳标)的情况。第一项研究主要是研究盲人和视觉正常用户对非语音声音和界面对象、事件之间映射的合适性和它们的识别率,评价界面中非语音声音的使用。结果,修改了一些非语音声音并结合到界面中。第二项研究调查非语音声音对用户的绩效表现和感知的影响。十个盲人用户评估了界面,发现了有趣的对用户感知的影响,在界面中包含了非语音声音的任务的完成时间比较短^[9]。

Crease等人研究了增加耳标到进度指示器的效果。标准的进度指示器有可用性问题,因为它们图形化表示瞬间变化的信息,并且如果用户想要跟踪这信息的话,他或她必须不时地用眼睛扫视这进度指示器。使用称为耳标的非语音声音在任务开始之前指示任务的范围,在任务进行中指示任务的进度状态。当用户在前台执行文本录入的任务,使用声音进度指示器监测后台任务执行情况时,结果显示比标准的视觉指示器能更好地监测后台任务执行的进度状况^[10]。

鉴于设计师在创建声音界面时缺乏相应的设计指导原则,Brewster等人做了一些研究,进行了六个实验,基于所做的六个实验提出了一套创建耳标的一般指导原则。他们先做了两个详细的探索性的耳标实验。之后又做了四个耳标实验,一个是测试并行耳标,另外三个是使用耳标改正图形化小部件的可用性。他们提出的指导原则使界面设计师可以有效地使用耳标。设计师不必再去处理他们在实验中设计耳标时所碰到的问题。设计师使用这些指导原则能创建一套可用的耳标。这些耳标可以有效地传达信息并易于被听者识别和辨认^[11]。

运用并行声音表示信息作为听觉显示的一部分,由于它增加通信带宽和允许更容易地进行数据之间的比较,因此设计人员都愿意使用并行声音表示信息。但是当耳标以并行方式展现时,它们会互相干扰,因此难以确定耳标所代表的信息。McGookin和Brewster提出了一套源于经验的并行耳标设计指南,该指南包括如何修改耳标的设计和呈现以减少耳标并行呈现时的相互干扰,帮助那些在设计听觉显示界面时希望使用并行呈现耳标的设计者,使设计出的界面在使用时能有效地传达数据信息^[12]。虽然并行耳标的识别能通过修改耳标设计和呈现而得以改进,但是为了保持声音和数据间的映射,这些修改受到约束和限制,导致在耳标识别上只有小的改进。如果要利用并行声音的优势,需要做进一步的研究以修改耳标设计,提高并行耳标的识别效果^[13]。

耳标组合听起来和谐或者不和谐,取决于两个耳标是否与对方相容。利用音乐语法来进行耳标设计可以为设计提供一个结构框架,在这个结构框架里可以设计耳标的旋律。这样做的好处是设计出的耳标组合听起来比较和谐。在设计一套耳标时音乐语法的使用可以在耳标基调选择上利用许多有价值的约束。这些约束是有利的,它们可以构建一个基本结构来形成每个耳标的表现形式,这样就只允许某些耳标相互组合。当不适当的组合发生时,在听觉显示界面上利用语法属性给用户额外的反馈^[14]。

利用音乐语法结构可以在耳标设计上施加一些结构上的约束和限制,以此提供一个耳标组合的基础。Hankinson和Edwards研究探讨了基于短语的更复杂的结构组合。通过音乐语法和自然语言语法之间的映射,可以产生音乐短语来

对应相应的自然语言句子。以这种方式基于一个简单的音乐词汇可以产生大量唯一的含义。这对听觉显示设计人员很有价值。用户研究显示,经过少量培训,用户就可以明白这些复杂音乐短语所表达的意义^[15]。音乐语法是非常有用的,足以描述比它自身更复杂的结构组合。当然还需要做进一步的研究来揭示这些语法如何利用,以使听觉显示设计从中受益。

3.2.2 基于电话的用户界面

目前电话银行和各种自动语音服务使用了很多的基于电话的用户界面。手机等移动设备的听觉用户界面是当前中的一个研究热点。创建可用的基于电话的用户界面(TBI)需要设计师充分利用在这种类型界面中占优势的声音通道。考虑在基于电话的用户界面使用非语音声音之前,首要工作包括在这类用户界面中应用已有的设计指南。这样才能有一个坚实的基础,利用各种非语音声音来增强交互的效果。

Leplâtre 等人研究了为什么,在哪里,怎样在基于电话的用户界面中使用非语音声音,并开发了一个工具,这个工具可以在设计工作中支持界面设计师的设计工作,允许设计师指定他要开发的界面的属性、根据人因学原理确定的界面结构和支持交互的声音材料。Leplâtre 等人相信他们的开发工具和提出的方法对许多的可听化问题都会有用的^[16]。

Leplâtre 和 Brewster 研究提出了一个框架,将非语音声音集成到视觉反馈有限的手机层次菜单结构中,并将它应用到实践中,设计、实施和评估了基于计算机模拟的诺基亚 6110 手机的一套声音系列。评估结果表明,在完成给定任务的出错次数和按键次数方面非语音声音可以提供任务导航的绩效。这项研究提供了关于设计声音提示来支持复杂菜单结构导航方面的理论和实践的探索^[17]。

Helle 和 Leplâtre 研究了手机听觉菜单结构的效果和接受程度。他们使用耳标对手机做听觉设计,它涵盖整个菜单结构,除了服务和电话簿程序(动态结构,而不是预定的)。设计出带特殊的软件的手机,给测试用户使用三周。测试用户可以调整可听化参数-可听化菜单深度、声音音量的大小等。在测试之前、测试期间和测试之后使用问卷和访谈收集数据,测试期之后在实验室进行一些实验。这项研究的重点是在用户的主观反应,作者也试图搜集一些客观的数据^[18]。

Leplâtre 在他的博士论文中提出了一个支持在显示屏幕大小受限的移动设备上交互的非语音声音设计原则。在这之前,在设计声音以支持手机菜单导航方面没有设计原则可供参考,因此没有成功地支持在这界面上导航的可听化设计。在 2 个案例中应用这个设计原则。第一个应用案例是手机可听化原型开发,其中的声音由手机蜂鸣器产生,这在声音设计的选择上构成了一个非常大的限制。第二个应用案例是在声音设计上没有技术限制的类似菜单可听化。评估第二个应用的可听化设计,结果显示声音在许多方面改善了菜单中导航任务的绩效。这些结果验证了设计是合理和有效的,也证实了非语音声音可以改善显示受限设备上菜单的可用性^[19]。

方志刚等人研究了非语音声音用于用户界面的原理及其可能的形式,并设计与实现了一个听觉用户界面原型系统——盲人手机界面,其核心结构为听觉菜单,综合使用语音和非语音声音作为听觉显示,主要用非语音作为操作的及时反馈,其次用语音作为上下文帮助提示。结果表明,非语音是设计听觉用户界面的可行途径。他们基于在听觉用户界面方面的研究工作,探讨利用非语音声音增强或替代传统的视觉用户界面的必要性、可行性及其应用前景。着重探索了听觉

界面作为独立和替代的用户界面的可行性,但这方面的研究工作目前开展得还不够深入,盲人或特殊场合(如驾驶)对用户界面的需求还不能得到满足。他们选择盲人手机界面作为研究的原型系统,旨在探索听觉界面作为独立的和替代的用户界面的可行性。同时,还兼顾对于视觉界面的听觉增强的研究,即为提高正常人的交互效率^[20]。

3.2.3 其它应用

早期的 Web 应用几乎清一色都是视觉界面。由于 Web 已成为从事知识或信息工作不可或缺的工具,在电子商务、虚拟交互,有必要将听觉界面应用到 Web 应用中。听觉界面对视障人士以及眼睛忙碌于别处(如在一个浏览环境中导航)而想听信息的人是特别重要的。Ferworn 等人进行了一项创新的听觉搜索引擎的设计和测试。这个搜索引擎通过利用实时文本分类组织搜索结果成语音菜单格式,提供更加友好的听觉输出形式。初步结果显示,听觉搜索引擎原型可以很好地供弱视、正常视力用户使用。开发出来的听觉搜索引擎原型通过听觉界面可访问有组织的信息。原型演示系统已供公众使用及由此产生的可用性测试结果已被用来发现第二期工程需要解决的问题和需求^[21]。

这个应用软件将被设计成可被通用的读屏软件和听觉浏览器所访问。预计这一项目将刺激针对 Web 信息的更先进的听觉界面的发展,最终造福于视觉障碍用户。预计将开发基于这一项目展示的对象为视障人士提供信息服务。为了扩展这些成果的价值,以这项作为基础,他们为视障人士、视力正常和配备小屏幕设备的移动用户创建了一个网站(www.eyesfree.com)。这个门户网站将包括一个综合搜索引擎,外加了使分类结构个性化以满足每个用户的需求和兴趣的特征。这将使我们能够利用这个项目开发的创新技术构建一个为视障人士服务的有广泛基础的信息服务解决方案^[21]。

当用户是盲人,信息交流的视觉通道不可用时,就必须开发非视觉方式的信息显示用户界面。EDWARDS 和 EVANGELOS 提出了一种应用于交互任务的听觉显示方法,内容包括概念层、结构层和实现层。在概念层以抽象的术语说明信息和被支持的任务,同时考虑操作交互设备产生的需求和视觉表现的分析提供的信息。接着在结构层说明听觉场景的感知结构,然后在实现层定义声音的物理属性。该方法被应用到许多小部件的听觉显示设计上,例如复选按钮、单项按钮、滚动条、列表框等^[22]。

用当今的软件开发工具包添加声音输出到用户界面是一项很困难的任务。Myers 和 Strickland 研究设计了一个体系结构,使得它很容易地添加声音输出到用户界面中。任何交互、动画或命令都可在开始、结束或进行期间通过加入声音而增强效果。声音的参数,如节奏或音量,可以通过使用一些约束规则很容易地与数据的一些属性绑定或关联。目前提供两种不同的声音对象:一是放录音,另一是文本转换成语音。文本转换成语音的声音对象可以用来快速构建各种读屏软件。该体系结构易于使用的机制使设计师在多重声音同时播放时可以完全掌控中断权和优先权。由于通过很少的额外程序代码就可以将声音输出添加一个现有的应用程序中,他们预期这项新机制使研究者和开发者探索和调查在各种应用程序中声音的使用将变得更加容易和方便^[23]。

3.3 可听化研究

当接触到二维数据表时,用户常常希望在详细分析它们

之前尽快大致地浏览一下这些数据。盲人和视障人士使用视觉显示根本不能完成这个任务。此外,合成语音不利于充分地帮助浏览和模式识别。Kildal 和 Brewster 研究了一种利用其他感官提供给用户有效的浏览数据表的方法,对不得不分析复杂数据集的正常视力用户也能够从多通道表现数据编排中受益。这种方法采取的步骤是利用声音获取表格信息,设计了一个表格数据的可听化以及一种访问可听化数据的新颖方式。表格每行或列可听化作为一条信息,被顺序访问,降低二维数据结构的整体复杂性。研究表明,使用这种可听化技术能比使用读屏软件更快地获得表格数据的概貌,而且不会降低准确度^[24]。

Hermann 和 Ritter 研究了结晶可听化(Crystallization Sonification),一种研究分析高维数据的可听化模式。该模式旨在提供有关内在数据维度(即局部特征)和全局数据维度的信息,以及在一个数据集上局部和全局视图之间的转换。此外,让声音展示在高维数据集中的聚类。这个模型定义了在高维数据空间的一个晶体生长过程,它以一个用户选定的“凝结核”开始,根据一些成长准则逐步包含周边数据。可听化的声音总结了这一晶体生长的逐渐演化过程。这个模型使用一个简单的生长规律,另外使用在分级聚类背景中的生长规律也适合,结晶可听化的应用提供了检查数据聚类结果的新途径,以替代系统树状图^[25]。

可听化工具尚未成为数据分析软件的典型组件,尽管在过去 10 年个人电脑的声音处理能力取得了非常大的进展,但是,听觉显示对正常视力用户的小规模数据研究分析和作为视障用户获取信息的一种形式都是十分有用的。听觉数据显示的有效实例示范和灵活的数据可听化软件工具的设计将是影响决定数据表现方法的关键因素。对很可能从数据可听化的发展受益的人们来说,数据可听化依然还是一个不熟悉的主题,尽管最近个人计算机硬件的发展使听觉数据显示对广泛用户都是可能的。什么时候或是否数据可听化成为数据分析软件的一个标准部件,可能取决于一个或更多的关键性的研究成果和发现,这些研究成果和发现对可听化提供了重要的启发作用。可听化不断追求“问题为本”的研究,包括对听觉感知有兴趣的认知科学家和有数据研究分析需要的研究人员之间的协作,将增加这些发现的可能性^[26]。

结束语 听觉显示及其应用研究与人机交互、听觉心理和生理研究等方面的研究进展是密切相关的。未来听觉显示应用前景很好,但还需要根据不同的应用领域与知识背景进行大量的研究和实验。比如可听化研究上需要研究产生出面向具体的数据分析任务的可视化模型的一个标准库,对于大量数据从局部维度分析到聚类,由此,可听化模型才能成为数据挖掘和其它应用领域数据分析的通用组成部分。听觉显示用户界面研究上需要进行一些实验研究,研究探讨可能的不同声音参数以及界面元素、操作或者交互与声音的各种映射关系,以便设计师做出恰当的设计,人们在面对听觉显示时才能更容易地感知信息。

参 考 文 献

- [1] Kramer G, Walke B, Cook P, et al. Sonification report; status of the field and research agenda [EB/OL]. <http://www.icad.org>, 2004-06-12
- [2] 方志刚, 吴晓波, 徐新民, 等. 非语音声音在人机交互技术中的应用[J]. 计算机科学, 1997, 24(6): 62-65
- [3] 徐义东, 方志刚, 张丽红, 等. 可听化研究综述[J]. 计算机辅助设计与图形学报, 2004, 16(1): 14-18

- [4] 徐义东. 听觉显示开发平台的设计及应用[D]. 浙江大学硕士论文, 2004. 3
- [5] 沈模卫, 白金华, 陈硕, 等. 耳标在小屏幕界面设计中的应用[J]. 应用心理学, 2003, 9(2): 35-40
- [6] Lucas P A. An evaluation of the communicative ability of auditory icons and earcons [C]//Proceeding of ICAD'94 Second International Conference on Auditory Display. 1994: 121-128
- [7] Brewster S A. Using non-speech sound to overcome information overload [J]. Displays, special issue on multimedia displays, 1997, 17: 179-189
- [8] Vargas M L M, Anderson S. Combining speech and earcons to assist menu navigation [C]//Proceedings of 2003 International Conference on Auditory Display. Boston, Massachusetts, 2003: 38-41
- [9] Petrie H, Morley S. The Use of Non-Speech Sounds in Non-Visual Interfaces to the MS-Windows GUI for Blind Computer Users [C]//Proceedings of the International Conference on Auditory Display. 1998: 1-5
- [10] Crease M, Brewster S A. Scope for Progress - Monitoring Background Tasks with Sound [C]//Volume II of the Proceedings of INTERACT '99 (Edinburgh, UK) British Computer Society. 1999: 19-20
- [11] Brewster S A, Wright P C, Edwards A D N. Experimentally Derived Guidelines for the Creation of Earcons [C] // Adjunct Proc. British Computer Soc. Human-Computer Interaction Conf. (BCS HCI '95), SpringerVerlag, London, 1995: 155-159
- [12] McGookin D K, Brewster S A. Empirically Derived Guidelines for the Presentation of Concurrent Earcons [C]//Proceedings of BCS HCI 2004. Leeds, UK, 2004, 2: 65-68
- [13] McGookin D K, Brewster S A. Advantages and Issues With Concurrent Audio Presentation as Part of an Auditory Display [C] //Proceedings of the 12th International Conference on Auditory Display. London, UK, June 2006: 44-50
- [14] Hankinson J C K, Edwards A D N. Designing Earcons with Musical Grammars [C]. ACM Special Interest Group on Computers and the Physically Handicapped, (ACM SIGCAPH). September 1999: 16-20
- [15] Hankinson J C K, Edwards A D N. Musical Phrase-Structured Audio Communication [C]//Online Proceedings of the International Conference on Auditory Display. April 2000
- [16] Leplâtre G, Brewster S A. Improving the Design of Telephone-Based Interfaces [C]//Volume II of the Proceedings of INTERACT '99 (Edinburgh, UK). British Computer Society, 1999: 45-46
- [17] Leplâtre G, Brewster S A. Designing non-speech sounds to support navigation in mobile phone menus [C]//Cook P R, ed. 6th International Conference on Auditory Display (ICAD). Atlanta, Georgia, USA, April 2000: 190-199
- [18] Helle S, Leplâtre G, Marila J, et al. Laine, Menu sonification in a mobile phone-a prototype study [C]//Proceedings of the 2001 International Conference on Auditory Display (ICAD2001). Espoo, Finland, August 2001: 255-260
- [19] Leplâtre G. The design and evaluation of non-speech sounds to support navigation in restricted display devices [D]. PhD Thesis, Department of Computing Science, University of Glasgow, UK, 2002
- [20] 方志刚, 胡国兴, 吴晓波. 基于非语音声音的听觉用户界面研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2003, 37(6): 684-688
- [21] Ferworn A, Bodner R, Chignell M H. Auditory WWW Search Tools [C]//Online Proceedings of the International Conference on Auditory Display. April 2000
- [22] Edwards A D N, Mitsopoulos E. A Principled Methodology for the Specification and Design of Nonvisual Widgets [C]. ACM Transactions on Applied Perception, 2005, 2(4): 442-449
- [23] Myers B A, Strickland K A. Easily Adding Sound Output to Interfaces [EB/OL]. <http://www.cs.cmu.edu/~amulet/papers/soundinamulet.ps>, 2005
- [24] Kildal J, Brewster S A. Explore the matrix: Browsing numerical data tables using sound [C]//Proceedings of ICAD2005 (Limerick, Ireland). ICAD, July 2005: 300-303
- [25] Hermann T, Ritter H. Crystallization Sonification of High-Dimensional Datasets [J]. ACM Transactions on Applied Perception, 2005, 2(4): 550-558
- [26] Flowers J H, Turnage K D. Desktop Data Sonification; Comments on Flowers et al. [C]. ICAD 1996. ACM Transactions on Applied Perception, 2005, 2(4): 473-476