

一种基于功能磁共振的味觉刺激装置的设计与验证

梁思^{1,2,3}, 董涛^{1,2,3}, 王慧¹, 杨晓冬¹

1. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163; 2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 3. 中国科学院大学, 北京 100049

【摘要】目的:功能磁共振成像(fMRI)是指在刺激作用下,利用血氧水平依赖信号进行成像,目前常用的感官刺激装置中味觉刺激装置暂无成熟的方案。**方法:**本文提出了一种基于fMRI的味觉刺激装置的设计与验证。设计了味觉刺激装置的液体输送通路;下位机利用以微控制器为核心的数字电路,完成液体的精确投送;上位机通过LabVIEW平台编写满足用户实际需求的刺激序列;同时通过数据采集卡将上位机的刺激序列发送至下位机执行,完成实时定量的味觉刺激输送。**结果:**利用此装置对被试进行了味觉刺激fMRI实验,从采集的功能图像上可以基本验证目前与味觉有关的激活区(脑岛及岛盖区等),可以实现设计的味觉刺激装置功能。**结论:**本实验设计和验证了一种味觉刺激装置方案,并通过实验验证了它的可用性和实用性。

【关键词】功能磁共振成像;味觉刺激;微控制器;LabVIEW

【中图分类号】R318;R445.2

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2016)01-0076-07

Design and evaluation of gustatory stimulation device based on functional magnetic resonance imaging

LIANG Si^{1,2,3}, DONG Tao^{1,2,3}, WANG Hui¹, YANG Xiao-dong¹

1. Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215163, China; 2. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Objective To design and evaluate the gustatory stimulation device, a common sense organ stimulation device. Under the stimulus, the blood oxygen level dependent signal is used to obtain the functional magnetic resonance imaging (fMRI). And there is no sophisticated scheme for gustatory stimulation device yet. **Methods** The design and evaluation of gustatory stimulation device based on fMRI were proposed. The liquid delivery path of gustatory stimulation device was designed; slave computer was the digital circuit with the core of microcontroller unit, delivering precise amounts of liquid; host computer wrote the stimulation sequence for the practical requirement of users by using LabVIEW platform. The stimulation sequence of host computer was sent to the slave computer by using the data acquisition card to execute the order, delivering the quantitative gustatory stimulation in real-time. **Results** The designed device was used to perform the gustatory fMRI experiment. The gustation-related activity areas like insula and island cover area were preliminarily verified by the obtained fMRI images, achieving the function of designed gustatory stimulation device. **Conclusion** A gustatory stimulation device is designed and evaluated in the experiment, and their availabilities and practicability were verified.

Key words: functional magnetic resonance imaging; gustatory stimulation; microcontroller unit; LabVIEW

【收稿日期】2015-08-19

【基金项目】中国科学院科研装备研制项目(YZ201313);江苏省自然科学基金(BK20131171)

【作者简介】梁思(1990-),女,硕士,研究方向:磁共振成像。Tel: 15501603309;E-mail: cecilia.liang06@gmail.com。

【通信作者】杨晓冬,研究员,研究方向:医学成像。Tel: 18900616030; E-mail: xiaodong.yang@sibet.ac.cn。

前言

功能磁共振成像(Functional Magnetic Resonance Imaging, fMRI)技术因其非侵入、无辐射、高分辨率等特点在各种脑功能成像技术中占据一定优势,它能够从活体和整体水平来研究脑,也可以实现在无

创条件下完成脑的功能活动与人的思维、行动之间联系的研究。1990年,Ogawa等^[1](美国明尼苏达大学贝尔实验室)第一次提出了血液中的脱氧血红蛋白可以改变血管周围水分子的质子信号,可以用梯度回波序列将这种信号提取、检测出来。Ogawa等^[2]、Kwong等^[3]和Bandettini等^[4]所在的3个独立的研究小组分别采用血氧水平依赖(BOLD)效应中血液的磁场性质变化进行大脑皮层活动的研究,这些开创性的工作奠定了fMRI的基础。目前,国际上在神经学和心理学领域中使用fMRI技术进行研究的现现象已经十分普遍^[5-8]。2007年,fMRI检查技术在美国正式用于临床。中国各临床研究机构与国际关于fMRI的合作日渐增多,fMRI已经成为脑功能研究中的重要工具。进行脑功能成像首先需要对目标脑功能区进行最大程度的激活,并尽量排除无关刺激的干扰,实现功能活动的单一化和理想化,同时还要同步完成刺激的投送和功能图像的采集。脑功能成像需要刺激才能引起人脑的功能活动、获得激活信息,这些刺激基本上是借助感官系统产生的,这就需要向人体的5种基本感官(视觉、听觉、嗅觉、触觉和味觉)施加刺激作用,因此,感官刺激系统显得尤为重要。开展fMRI脑功能研究对刺激装置有特定的要求,亟需开发新型的刺激装置,这正成为fMRI脑功能研究领域迫切需要解决的问题^[9]。目前视听觉的刺激装置较为成熟,已有多种商用产品,但是,其他基本感官刺激用到的装置都是自行搭建的^[5-8],而其中味觉刺激装置存在废液处理难、液体量难以精确控制、刺激强度难以更改等问题,刺激装置的设计和制作显得更加困难。

味觉刺激装置需要满足多路刺激、单一刺激、自动控制、电磁屏蔽、成像同步等要求^[10]。本文针对味觉刺激、人体味觉感受的特点及液体输送过程中的

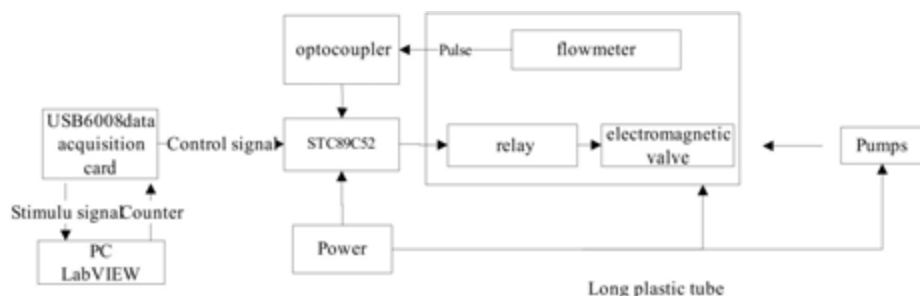
具体要求设计了一套自动化的味觉刺激系统,能够作为fMRI的刺激装置使用。上位机使用的LabVIEW软件可根据实际需求编写刺激序列,通过串口方式将刺激序列传送至下位机的微控制器,微控制器根据设定的刺激序列控制方式来改变电磁阀、继电器的工作状态,实现液体通路工作方式的切换,完成液体的定时、定量投送。本文所述的刺激装置采用持续、非间断刺激,刺激时间精度优于2 s。文中探讨了味觉fMRI实验设计的各种影响因素,采用低成本、模块化的方式进行设计实现,并进行了功能性验证实验。实验中刺激液体采用葡萄糖溶液、氯化钠溶液分别实现甜、咸两种基础味觉的刺激,设置对照组溶液,进行组块实验。实验中使用Siemens 3.0T MRI仪器及EPI序列进行扫描,实验数据采用基于MATLAB软件的DPARSF、SPM等工具包进行处理。实验结果观察到了甜、咸味觉的脑功能激活区的存在,验证了味觉刺激装置的可用性。

1 刺激装置设计

1.1 刺激装置整体设计

刺激装置的整体设计如图1所示,主要包括:上位机PC、数据采集卡、下位机控制装置、液体输送通路及其他辅助部分。上位机PC借助LabVIEW软件编写刺激序列软件;下位机作为控制核心,在接收到刺激序列后作出相应的反馈,控制液体输送通路的状态;数据采集卡将刺激序列软件中控制参数信息传送给下位机执行;辅助电路部分完善装置功能,保障其正常工作。

整个硬件电路在工作前处于待机状态,上位机采用PC上的LabVIEW软件,通过USB6008数据采集卡将LabVIEW的刺激序列发送至下位机。下位机主要包括微处理器、信号处理电路及电源。微处理



a: Design diagram



b: Physical map

图1 整体设计框图及刺激装置实物图

Fig.1 Design diagram and physical map of stimulation device

器接收数据采集卡发送的信号,将上位机的刺激序列转化为液体输送通路中继器的工作状态,控制电磁阀的开合,实现液体输送通路的开闭。当液体输送通路开启时,涡轮流量计会产生一定频率的脉冲,下位机接收这些脉冲并进行处理后做出反馈,使液体输出通路关闭,液体输送停止,刺激装置再次回到待机状态,待收到上位机下发的序列后继续工作。由于涡轮流量计测量范围有限,实验样品需要具有一定的流速。装置中使用 12 V 的 B 型直流医用液体泵,使实验样品的恒定流速约为 300 mL/min。电源模块可提供多种直流电压。本装置可以扩展多条液体输送通路,提供多种刺激液体。

1.2 液体输送通路

液体输送通路保障刺激过程中液体样品被稳定输送至人体口腔,如图 2 所示。输送通路主要由液体盛放装置、医用液体管道组成。为了实现液体的自动输送,输送通路中连接涡轮流量传感器、电磁阀。

涡轮流量传感器对流过的液体量进行测定,电磁阀保障液体通路随控制指令通断,在微控制器控制下完成液体定时、定量输送。为保障刺激装置不对 MRI 图像采集造成干扰,实验过程中需要注意电磁兼容,因此实验时将整套刺激装置放置在屏蔽室外的操作室内,只将医用的液体长导管伸至屏蔽室内并在其一端连接一次性医用细管至两唇间。实验中采用 3 种液体样本,液体输送通路使 3 种液体样品可以顺利输送至口腔。

装置设计过程中,电磁阀用继电器(电控开关)控制液体通路开闭,继电器的输出信号会产生毛刺,需要光电耦合部件起隔离作用,也可利用 RC 回路减少毛刺信号,提高电路的抗干扰能力和可靠性。同时,装置中用继电器同时控制液体泵和继电器通路的通断,实现在需要时液体泵工作,设计简单,提高了装置的工作效率。

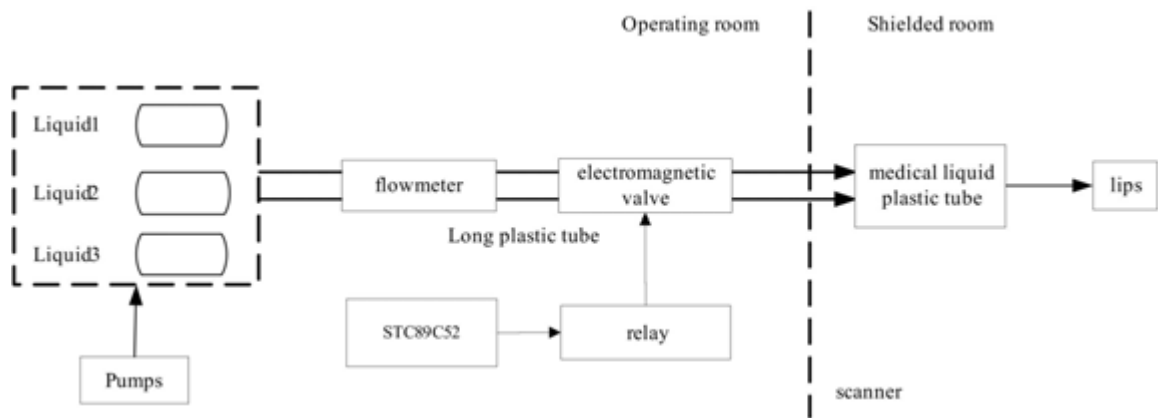


图2 液体通路示意图
Fig.2 Schematic diagram of liquid delivery path

1.3 下位机控制单元

下位机是刺激装置的核心,完成分析需求、发送指令的功能。微控制器型号选择 STC89C52,将其作为硬件装置的控制中心。USB6008 数据采集卡可提供 12 个数字输入/输出(DIO)通道,刺激装置仅使用了数据采集卡的 8 个数字输入/输出通道,将其连接至微控制器的 P1 端。将 P1.0 输入/输出引脚设置为触发信号连至微控制器的“外部中断”端。刺激序列来临,“外部中断”端检测到信号跳变产生的下降沿或上升沿,唤醒微控制器工作,待信号执行完成,回到待机状态。未检测到信号跳变时,微控制器处于

待机状态,该执行方式大大提高了微控制器的执行效率。

刺激序列包括刺激通道的开启和刺激保持时间,刺激序列发送至微控制器,待微控制器识别后改变电磁阀工作状态开启相应液体通路,传感器脉冲信号传至微控制器计数端计数,在流速已知情况下计数即为测定流量,待计数达到设定阈值后,微控制器反馈继电器断开、液体通路关闭。

1.4 上位机设计

LabVIEW 是 NI 公司商用的程序开发环境,与其他软件控制台相比,该平台使用 G 语言编写功能和界

面,使代码图形化和框图化。利用LabVIEW软件和配套的板卡可以完成对常规仪器的需求,能够在计算机上完成测试测量、控制、快速开发和跨平台等功能。本实验采用LabVIEW软件搭建上位机平台,通过NI的数据采集卡完成上下位机数据的发送。

上位机LabVIEW软件界面包括两大部分:刺激序列参数界面、刺激进程显示界面。刺激序列参数界面主要用来输入刺激序列的各种参数,包括刺激种类、刺激序列参数(刺激种类及刺激时间)、刺激总时间及刺激信息文件设置。这些都需要在实验准备阶段进行填写,“刺激信息文件设置”设定实验记录文件存放的目录,实时记录刺激发生的时间和刺激的种类并与MRI仪器采集图像进行匹配。刺激进程显示界面用以显示刺激执行过程中的实时状态和运行进程。

2 脑功能实验设计

2.1 实验对象

实验选取右利手的健康志愿者6名,男性3名,女性3名,年龄23~26岁,平均年龄24岁。所有志愿

者实验前均已统计个人信息,确认无精神、神经病史,具有功能正常的口颌系统。这些志愿者在实验前已知道实验内容、同意并签署被试知情同意书。扫描前1 h禁食,正常饮水。

2.2 实验设计

本实验采用组块相关的实验设计,以图3所示序列进行刺激。样品1为1.0 mol/L葡萄糖溶液,作为甜味觉的刺激物;样品2为0.1 mol/L氯化钠溶液,作为咸味觉的刺激物;样品3为无味液体(含有唾液主要离子成分:25 mmol/L KCl及2.5 mmol/L NaHCO_3 ,作为对照)。将以上3种溶液通过3路液体输送通路送至口腔,每路输送通路中通过流量传感器每次对液体计数40个脉冲(约4.58 mL刺激物)。实验刺激序列的每组块中单种刺激给予5次,图3中“上升沿”表示液体刺激开始,“下降沿”通过“请吞咽”提示音提醒受试者自行吞咽液体。液体刺激及保持时间为20 s,液体吞咽及静息时间为10 s。本实验提前准备提示音,在听到“请吞咽”的提示音后,需要受试者自行吞咽且尽量控制头部不要运动,实验全长700 s。

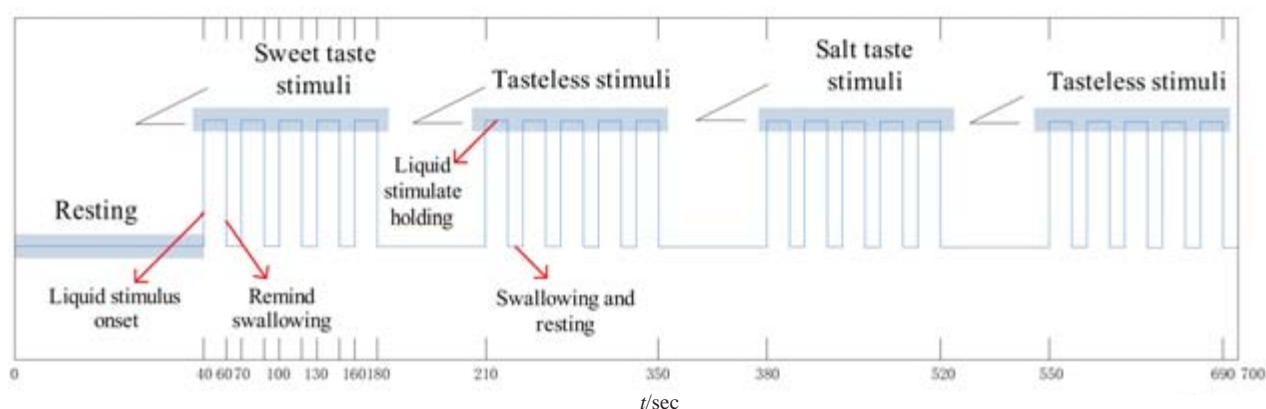


图3 实验刺激序列

Fig.3 Experimental stimulation sequence

2.3 数据采集

实验过程中,使用3.0T Trio Tim MRI成像仪(Siemens)和12个通道的头部线圈完成扫描成像。志愿者双眼闭合、自然仰卧于扫描床上,佩戴耳机和耳塞用以减少图像扫描过程中的噪音,耳机可以同时获取实验中的提示音,用棉垫固定头部,避免图像采集过程中头部运动造成的运动伪影对实验结果的影响。选取平面回波序列(Echo Planar Imaging, EPI)进行扫描,过程中的主要参数:TR/TE=2000/30 ms,层厚=3 mm,Matrix=64×64,FOV 220 mm×220 mm。

2.4 数据处理

将扫描生成的DICOM格式的数据转化为DCM格式,借助包含DPARSF工具包的MATLAB软件完成图像预处理过程,具体包括:Slice Timing、Realign、Normalize和Smooth等,然后根据实验中生成的刺激记录文件和MRI图像成像时间点将刺激条件和MRI图像进行匹配,使用SPM8对其进行个体统计分析,以对照组作为参考,获取不同任务态激活图。数据处理过程中参数 $P<0.01$, Cluster>10(将所得脑区中像素超过10个以上的区域视为激活区),经分析后得

到甜、咸味觉的味觉激活结果。

3 结果与讨论

实验中6名受试者均已配合完成了MRI图像扫描过程,1名受试者头动过大,其余5名被试者数据是有效的。所获图像资料需要经过统计学处理和平均等过程,待处理完成后得到如图4所示脑激活图。图4中甜和咸两种刺激的具体激活情况如表1所示,两者均在脑岛、岛盖区(BA45区和BA43区)有激活,相比咸味觉而言甜味觉的激活区域较强。初级味觉皮层的脑岛位于大脑外侧沟底,岛盖是被额、顶、颞叶等所覆盖的脑岛的部分区域,是主要的味觉区^[8, 11]。察觉系统包括前额叶和丘脑背内侧核,是精神活动最主要的场所。额叶通过交换产出样本,借助联结路径,丘脑点亮,产生相应的意识。额叶眶回的皮质(眶额皮质)被称为二级味觉中枢,多数脑功能研究中都显示味觉刺激甚至味觉想象会引起该区兴奋。由边缘叶(扣带回、海马回、齿状回等组成)及其隔区等结构组成的区域叫做边缘系统,它与内脏运动及

情绪的运动性行为有关^[12]。颞叶与听觉系统相关,与记忆和情感也有关系。因此表1中显示的脑岛及岛盖区、额叶、颞叶部分、扣带回、海马旁回等区域的激活与味觉或味觉刺激过程中被试的情感、心理活动相关。同时,顶上小叶(BA5,BA7)与触觉有关,枕叶区域、楔叶与视觉有关,顶上小叶和楔叶的激活可能是刺激过程中触觉、视觉等无关刺激引起的,可以对装置进行改进实验来避免无关刺激。另外,甜味刺激采用的葡萄糖溶液可以为人体补充能量,咸味觉刺激采用的NaCl溶液可以为人体补充电解质、保持体液平衡,所以两者在引起脑部区域激活的同时还对机体的生理状况产生影响^[13-17]。

本实验通过两种不同的基本味觉刺激(甜、咸)产生的fMRI图像激活区域的对比研究,结果表明两种味觉的主要脑区具有明显的激活,但仍有一些较小的差别,同时由于实验中不能够完全避免其他刺激从而造成了其他脑区的激活。由于本次实验侧重于验证该味觉刺激装置的实用性,激活结果分析仅具有参考意义,并未做深入详细分析。

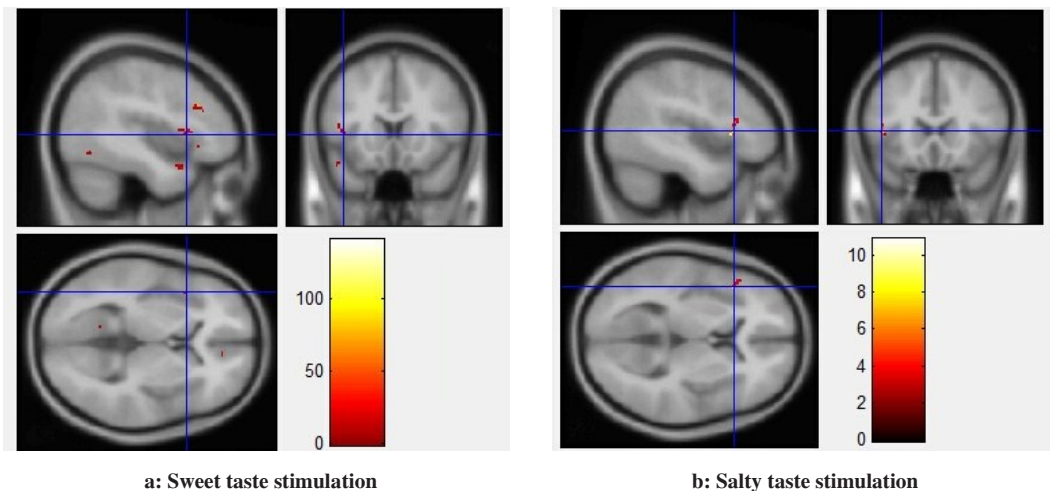


图4 甜、咸味觉刺激激活图
Fig.4 Sweet taste and salty taste stimulation activation diagrams

4 结论

本文首先介绍了味觉刺激的研究背景及意义,给出了味觉刺激装置的测量原理,在此基础上详细阐述了味觉刺激装置的设计与构架,上位机发送刺激指令,通过数据采集板卡传送至下位机,下位机的硬件装置实时、定量地完成液体的输送,具有较好的时间精确度,并可以实现刺激和成像的时间同步,满

足了fMRI脑功能实验的要求。通过脑功能实验和采集的实验数据验证了装置的可用性,并初步验证了与味觉有关的主要脑区。尽管如此,实验过程中仍存在一些不足,实验中的味觉浓度单一,为避免浓度污染,在更改实验液体或浓度时,需要多次冲洗管道。实验过程中“请吞咽”的提示音在实验前根据刺激序列编写完成,随实验播放,导致不能随机更改实

表 1 味觉刺激脑激活区组分析结果
Tab.1 Results of gustatory stimulation on brain activation area

Taste	Activation area	Area in brain	Activation center			Voxel
			x	y	z	
Sweet	Temporal-pole-Sup-L	Superior temporal gyrus	-48	20	-20	26
	Brodmann area 47		-56	24	-28	56
	Precuneus		-14	-44	48	13
	Parahippocampagyrus		26	-32	-18	35
	Inferior frontal gyrus/BA47	Inferior frontal gyrus	-46	28	-6	26
	Brodmann area 45		-40	20	6	21
	Frontal-Inf-Oper-L		-42	10	8	21
	Occipital-Inf-R	Inferior occipital gyrus	46	-82	-8	26
	Occipital-Mid-R	Middle occipital gyrus	38	-78	0	26
	Temporal-Inf-L	Inferior temporal gyrus	-44	-66	-10	11
	Cingulum-Ant-R		6	46	2	13
Salty	Inferior frontal gyrus/BA45/BA13	Inferior frontal gyrus/insula	44	40	8	32
	Precuneus-R	Cuneus	18	-78	44	22
	Occipital-Sup-R (Occipital-Sup-L)	Superior occipital gyrus	28	-76	30	17
	Cingulate gyrus	Cingulate gyrus	-8	-10	-24	11
	Temporal-Inf-L (aal)	Inferior temporal gyrus	-42	-22	-22	11
	Frontal lobe		-10	32	-18	30
	Superior parietal lobule		24	-66	54	11

Note: Parameter: $P<0.01$; Cluster>10; Degrees of freedom=[1.0,2.0]; Voxel size=[2.0,2.0,2.0] mm

验序列,可以在LabVIEW平台上扩展声卡,将声音信息随刺激序列发放。通过以上分析,为了更好地满足实际需求,现有的味觉刺激装置可优化以下几点:管道采用一次性医用材料;LabVIEW增加声卡模块,使装置更一体化;可以增加液体混合通路更改味觉刺激的浓度、研究不同浓度的味觉刺激脑功能实验中的激活情况;优化废液处理模块,减少液体吞咽过程中的轻微运动可能对实验结果造成的干扰。通过上述优化,使该装置能够真正用到味觉刺激实验当中去,为味觉脑功能实验提供有力的仪器支持。

致谢:感谢上海磁共振重点实验室开放课题的支持。

【参考文献】

[1] OGAWA S, LEE T M, KAY A R, et al. Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1990, 87(24): 9868-9872.

[2] OGAWA S, TANK D W, MENON R, et al. Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation: functional brain mapping with magnetic resonance imaging[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1992, 89 (13): 5951-5955.

[3] KWONG K K, BELLIVEAU J W, CHESLER D A, et al. Dynamic magnetic resonance imaging of human brain activity during primary sensory stimulation[J]. Proc Natl Acad Sci USA, 1992, 89 (12): 5675-5679.

[4] BANDETTINI P A, WONG E C, HINKS R S, et al. Time course EPI of human brain function during task activation [J]. Magn Reson Med, 1992, 25(2): 390-397.

[5] KAMI Y N, GOTO T K, TOKUMORI K, et al. The development of

- a novel automated taste stimulus delivery system for fMRI studies on the human cortical segregation of taste[J]. *J Neurosci Methods*, 2008, 172(1): 48-53. DOI:10.1016/j.jneumeth.2008.04.009.
- [6] NAKAMURA Y, GOTO T K, TOKUMORI K, et al. Localization of brain activation by umami taste in humans[J]. *Brain Res*, 2011, 1406: 18-29. DOI:10.1016/j.brainres.2011.06.029.
- [7] MARCIANI L, PFEIFFER J C, HORT J, et al. Improved methods for fMRI studies of combined taste and aroma stimuli[J]. *J Neurosci Methods*, 2006, 158(2): 186-194. DOI:10.1016/j.jneumeth.2006.05.035.
- [8] IANNILLI E, NOENNIG N, HUMMEL T, et al. Spatio-temporal correlates of taste processing in the human primary gustatory cortex[J]. *Neuroscience*, 2014, 273: 92-99. DOI:10.1016/j.neuroscience.2014.05.017.
- [9] 王骁冠. 功能磁共振成像嗅觉刺激器的设计与验证[D]. 中国科学院大学, 2013.
- WANG X G. Design and evaluation of an Olfactometer for fMRI studies[D]. University of Chinese Academy of Sciences, 2013.
- [10] 王骁冠, 祝祯伟, 徐雅洁, 等. 功能磁共振成像自动刺激装置研究进展[J]. *中国医疗设备*, 2013, 28(1): 1-8. DOI:10.3969/j.issn.1674-1633.2013.01.001.
- WANG X G, ZHU Z W, XU Y J, et al. Advances in automatic stimulation devices for functional magnetic resonance imaging[J]. *China Medical Equipment*, 2013, 28(1): 1-8. DOI:10.3969/j.issn.1674-1633.2013.01.001.
- [11] 刘雪梅. 甜味及咸味觉在大脑皮质投射区的功能性磁共振成像研究[D]. 中国人民解放军军医进修学院, 2005.
- LIU X M. Cortical representation of sweet and salty taste in human brain studied with fMRI [D]. The PLA Postgraduate Medical School, 2005.
- [12] 刘雪梅, 刘洪臣, 金香兰. 味觉的脑功能成像研究[J]. *中华老年口腔医学杂志*, 2005, 3(2): 126-128.
- LIU X M, LIU H C, JIN X L. Functional brain imaging studies of taste [J]. *Chinese Journal of Geriatric Dentistry*, 2005, 3(2): 126-128.
- [13] 闵智乾. 甜味和酸味觉的磁共振脑功能成像研究[D]. 南昌大学, 2007.
- MIN Z Q. A functional MRI study of sweet taste and sour taste cortical areas in humans[D]. Nanchang University, 2007.
- [14] 刘雪梅, 贾静, 刘洪臣, 等. 两种基本味觉的口腔感知对味觉中枢激活情况的探索[J]. *口腔颌面修复学杂志*, 2010, 11(3): 147-150. DOI:10.3969/j.issn.1009-3761.2010.03.005.
- LIU X M, JIA J, LIU H C, et al. Human brain gustatory area activation induced by sweet and salty taste studied with fMRI[J]. *Chinese Journal of Prosthodontics*, 2010, 11(3): 147-150. DOI: 10.3969/j.issn.1009-3761.2010.03.005.
- [15] 刘雪梅, 刘洪臣, 金真, 等. 人脑对味觉刺激反应的功能磁共振成像的任务模式的初步探讨[J]. *中国医药导刊*, 2010, 12(5): 837-838. DOI:10.3969/j.issn.1009-0959.2010.05.070.
- LIU X M, LIU H C, JIN Z, et al. Preliminary study of human brain to gustatory stimulation fMRI task mode [J]. *Chinese Journal of Medicinal Guide*, 2010, 12(5): 837-838. DOI:10.3969/j.issn.1009-0959.2010.05.070.
- [16] 杨秀文. 口腔内冷热水感觉的功能性磁共振成像研究[D]. 解放军军医进修学院, 2006.
- YANG X W. Functional magnetic resonance imaging of feeling of hot and cold water in the mouth [D]. The PLA Postgraduate Medical School, 2006.
- [17] 杨秀文, 刘洪臣, 李科, 等. 初步探讨利用fMRI技术研究口腔内冷热刺激的中枢反应[J]. *口腔医学研究*, 2008, 24(1): 64-66.
- YANG X W, LIU H C, LI K, et al. Pilot study on functional activity mapping during intraoral thermal sensory stimulation using fMRI [J]. *Journal of Oral Science Research*, 2008, 24(1): 64-66.