

文章编号: 1671-7104(2021)03-0296-05

生物电阻抗测量方法进展及应用

【作者】 孙中标¹, 叶继伦^{1,2,3}, 张旭^{1,2,3}, 罗珺涵¹, 车晓漫¹, 吴柔¹

1 深圳大学 生物医学工程学院, 深圳市, 518060

2 广东省生物医学信息检测与超声成像重点实验室, 深圳市, 518060

3 深圳市生物医学重点实验室, 深圳市, 518060

【摘要】 生物电阻抗测量是一种利用人体组织与器官的电特性及其变化规律来测量人体生理与病理状况相关的生物医学信息的检测技术。从阻抗血流图、电阻抗呼吸监测、电阻抗断层成像技术、电阻抗胃动力学检测、接触阻抗等方面进行综合介绍, 较为全面地介绍生物电阻抗测量方法进展及应用现状。

【关键词】 生物电阻抗法; 呼吸监测; 阻抗成像; 接触阻抗

【中图分类号】 R318

【文献标志码】 A

doi: 10.3969/j.issn.1671-7104.2021.03.014

Progress and Application of Bioelectrical Impedance Measurement Methods

【Writers】 SUN Zhongbiao¹, YE Jilun^{1,2,3}, ZHANG Xu^{1,2,3}, LUO Junhan¹, CHE Xiaoman¹, WU Rou¹

1 School of Biomedical Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, 518060

2 Guangdong Key Lab for Biomedical Measurements and Ultrasound Imaging, Shenzhen, 518060

3 Shenzhen Key Lab for Biomedical Engineering, Shenzhen, 518060

【Abstract】 The bioelectrical impedance measurement is a detection technique that uses the electrical characteristics and changes in human tissues and organs to detect biomedical information related to human physiological and pathological conditions. This article makes a comprehensive introduction from the aspects of impedance cardiography, electrical impedance respiratory monitoring, electrical impedance tomography, electrical impedance gastric dynamics detection technique, contact impedance and so on, as well as comprehensively introduces the progress and application status of bioelectrical impedance measurement methods.

【Key words】 bioelectrical impedance, respiratory monitoring, impedance tomography, contact impedance

0 引言

生物电阻抗测量(bioelectrical impedance measurement), 简称阻抗技术, 是一种利用人体组织与器官的电特性及其变化规律来测量人体生理与病理状况相关的生物医学信息的检测技术^[1]。具有无创、无害、快速、廉价、操作简单和功能丰富等特点, 并且测量可重复性高, 医生与患者易于接受。

随着科学与技术的发展, 生物组织的电阻抗测量技术的不断完善, 此方法越来越多地应用在

临床医学当中。在使用不同频率的交变电信号的激励下, 生物组织所产生的复杂电阻抗特性取决于组织的组成、结构、健康状况以及所施加信号频率的大小, 因为不同的组织所表现出来的电阻抗特性不同, 所以可以根据此特性帮助我们更好地了解生物组织的病理与生理信息^[2-3]。同时, 由于生物阻抗测量的复杂性以及多样性, 在实际测量中可以根据测量的人体部位不同, 使用诸如单频、多频生物阻抗分析或生物阻抗谱之类的方法, 根据生物阻抗的数据, 构建相应的数学模型进行评估^[4]。生物电阻抗测量的影响因素众多, 包括测量的方法、测量电极的尺寸与位置、测量时姿势的变化与食物的摄取量等因素, 都会对测量结果产生一定的影响^[5-6]。但是, 生物电阻抗

收稿日期: 2020-07-13

基金项目: 深圳市科创委重大产业关键技术研发项目基金
(20190215140144982)

作者简介: 孙中标, E-mail: 2846077561@qq.com

通信作者: 叶继伦, E-mail: yejilun@126.com

测量具有廉价、便携及易于使用的特点,使得其在生物医学测量领域仍占有重要地位。

近些年来,随着科技的发展,生物电阻抗测量技术不断被深入研究,其检测的范围和方法也不断完善,对临床辅助诊断具有重要的意义。介绍了生物电阻抗测量在医学测量方面的应用,主要包括阻抗血流图、电阻抗式呼吸监测、电阻抗断层成像技术以及生物电阻抗测量与分析等内容。

1 生物阻抗模型

人体是由细胞构成的,细胞是生物体结构和功能的基本单位,要构建人体阻抗模型需要先构建单个细胞阻抗模型。为此研究者们提出了多种模型理论,其中三元件生物阻抗模型是目前应用最广泛的。细胞由细胞膜以及细胞内液组成,细胞膜由磷脂质双层分子构成,细胞内液主要是胶状体的液体物质。细胞外主要是细胞外液和细胞外间质,细胞外液的主要物质构成是电解液,是物质和能量进行交换的场所,细胞外间质由纤维结构蛋白、多糖等高分子物质组成,主要负责调节细胞的动态性行为。就电特性而言,可将细胞内液以及细胞外液等效为电阻,细胞膜等效为电容,细胞外间质通常将其看作绝缘体。其等效阻抗模型,如图1(a)所示:

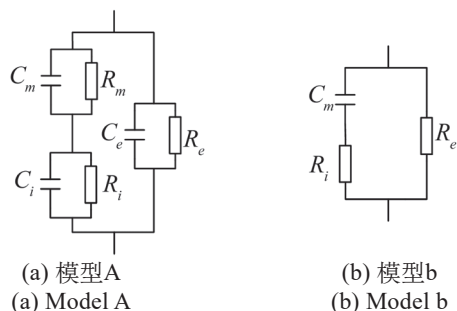


图1 生物组织等效电路模型
Fig.1 Equivalent circuit model of biological tissue

其中: R_e 为细胞外液的电阻; C_e 为细胞外液并联电容; R_m 为细胞膜的电阻; C_m 为细胞膜的并联电容; R_i 为细胞内液的电阻; C_i 为细胞内液的并联电容。

在1~500 kHz频率范围内,可将细胞内外液

的并联电容以及细胞膜的电阻视为开路,进而将图1(a)所示的电路等效简化为图1(b),此模型也被称为并联等效电路模型。生物的组织是由细胞构成的,可将其视为多细胞的集合,因此生物组织的电路模型亦可等效为图1(b)所示的电路模型。此时, R_i 、 R_e 、 C_m 可分别等效为整个生物组织内、外液电阻和膜电容,这就是三元件生物阻抗模型^[7]。

2 生物电阻抗测量系统

生物电阻抗测量系统在对人体进行测量时,当使用不同的频段测量同一组织或者同一频段测量不同组织的时候可能会略有不同,但是总体测量思路是在人体施加一个激励信号,一般采用正弦信号作为激励信号源,目前是使用DDS集成芯片或者是基于FPGA设计的高精度正弦信号的方法。正弦信号多使用正弦电流信号,电流信号对测量未知电阻影响小且电流信号易于控制,然后通过测量电极将采集的信号经过滤波、放大以及A/D转换,传输到单片机中进行数据处理与分析,最后上传至PC进行实时显示^[8]。生物电阻抗测量系统,如图2所示。测量的关键因素在于频段的选择以及电极的数量,从传统的二电极、四电极、六电极、八电极以及单频率,发展到现在的多电极、多频率以及多通道测量方法。

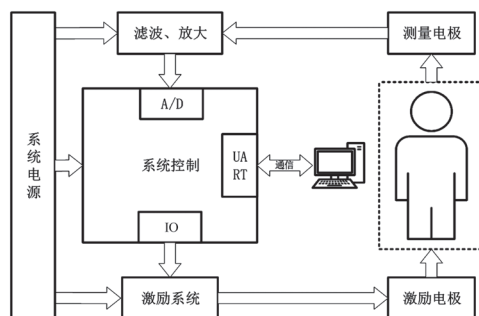


图2 生物电阻抗测量系统
Fig.2 Bioelectrical impedance measurement system

3 生物电阻抗测量技术的应用

3.1 阻抗血流图

阻抗血流图是通过测量体外电阻抗变化的信息,来确定体内组织或者器官血流容积的变化。阻抗血流图于20世纪30年代提出,60年代开始在

临床上应用。主要是测量人体组织或器官相关的电阻抗参数,包括阻抗大小、阻抗微分和阻抗变化量等,再结合微分、频谱分析和数学建模等方法使得阻抗血流图进一步发展,在临床诊断方面应用广泛,如心阻抗图(ICG)、肺循环阻抗图(IPR)、脑阻抗血流图(IEG)和肢体阻抗图等。心阻抗图可监测胸腔中的电阻抗变化,是一种测量胸腔中生物组织电特性的诊断技术^[9],主要研究目标是根据公式计算每搏输出量,目前国内计算每搏输出量主要是根据圆柱体模型的Kubick公式以及锥台模型的Sramek公式^[10],如图3所示为血管的圆柱体模型,图3左边为单个血管阻抗模型,右边为血管和周围组织并联阻抗模型^[11]。肺循环阻抗图主要是反映机体内肺血流容积的变化曲线图,可用于肺心病以及肺动脉高压的早期诊断。脑阻抗血流图是通过测量人体头部的生物电阻抗来反映脑血管弹性和脑血流变化的检查方法^[12]。脑阻抗血流图主要应用于诊断血管神经性头痛、闭塞性脑血管病、高血压、脑动脉硬化以及对脑血流变化的监护。

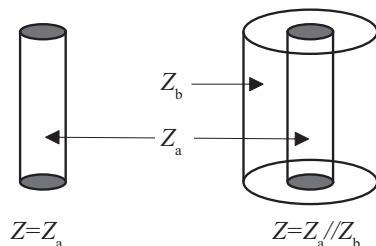


图3 血管圆柱体模型
Fig.3 Vascular cylinder model

3.2 电阻抗式呼吸监测

人体呼吸的原理是横膈膜的收缩以及变平,胸腹部的肌肉交替张弛,胸廓的起伏变化,由此导致肌体胸腹部的电阻抗也随之发生变化。基于此原理可以通过测量人体胸腹部电阻抗的变化来监测人体呼吸的频率以及波形等。电阻抗式呼吸监测系统一般采用四电极法,分别是一对激励电极和一对测量电极,电极位置对称地放置于胸腔两侧腋中线之间,测量电极位于激励电极内侧,两电极保持适当的位置,如图4所示。

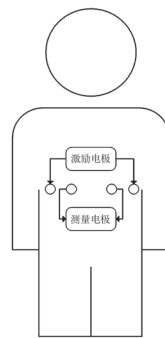


图4 呼吸阻抗测量电极位置示意图
Fig.4 Schematic diagram of electrode position for respiratory impedance measurement

通过激励电极引入一个高频的(如80 kHz)、恒定的电流,人体呼吸时胸廓的起伏变化,引起胸腹部的电阻抗相应的改变,使得测量电极采集到的电压发生变化,将该高频电压经过检波、放大、滤波等处理后传入A/D进行模数转换,最后传入MCU进行相关的数据处理,最终转换为呼吸曲线^[13]。人体的呼吸深度和频率等生理信息可通过该曲线直观反映。通过对人体呼吸的监测,可以为人体相关的呼吸类疾病监测提供有利的信息,例如老年慢性阻塞性肺疾病、睡眠呼吸暂停低通气综合征(SAHS)等^[14]。

3.3 电阻抗断层成像技术

生物电阻抗断层成像技术(electrical impedance tomography, EIT)是一种功能性医学成像技术,具有无创、无害、无放射性的特征^[15]。检测原理是通过向人体表面施加安全的激励电压(或电流),然后检测人体表面的电流(或电压)信号来获得人体内部电阻率的分布,使用不同的重建算法,如等位线反投影算法和Newton-Raphson算法,可以重建人体内部电阻抗变化的图像或电阻率的分布^[16]。

EIT检测系统包括硬件系统和图像重建,硬件系统主要由激励源、阻抗检测、成像显示部分、系统控制等部分组成,主要是采集人体内部电阻抗的分布信息。图像重建是根据采集到的电阻抗信息利用图像重建算法实现人体内部电阻抗的图像显示、重建等,如图5所示。

综合评述

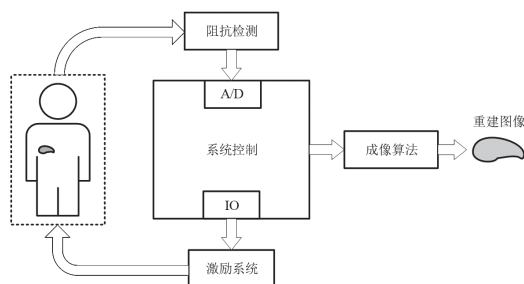


图5 生物电阻断层成像检测系统
Fig.5 Bioelectrical impedance tomography detection system

EIT是功能性成像，并且操作简单，成像成本低，具有较好的临床应用价值，可用于肺部成像，检测人体呼吸的变化^[17]，或者用于危重患者胸腔成像，判断是否积液等^[18]。但是EIT成像相对于CT、超声成像空间分辨率较低。成像算法稳定性、提高空间分辨率、阻抗扰动的灵敏度、精确的系统建模^[19]是未来EIT成像需要解决的问题。

3.4 生物电阻抗测量与分析

3.4.1 生物电阻抗法胃动力学检测

利用生物电阻抗法检测胃动力学参数是近年来的研究热点，临床上胃电信号常作为胃动力系统紊乱的诊断依据，但是胃的全部生理活动并不能完全由胃电信号反应，特别是对于胃的收缩、蠕动、排空等机械活动^[20]。将电阻抗方法用于检测胃阻抗信息来反应胃的机械活动，建立对胃动力学评测更加准确的方法以及为临床胃动力学的研究提供新的思路。

3.4.2 生物电阻抗人体成分分析

生物电阻抗人体成分分析的原理是人体内各个组织、器官在不同生理、病理状态下其电特性不同，通过电阻抗法可采集人体相应部位的阻抗与相位信息。生物电阻抗人体成分分析可应用于营养医学，主要对肥胖的管理、人体体脂率的测量^[21]以及识别低肌肉量的患者等^[22]，用于运动医学领域对于人体水分、热量损耗和非脂肪物质分析等。

3.4.3 脑部监测

脑损伤后的脑水肿、脑出血以及颅脑炎症等疾病都会造成脑内物质增加，颅腔为一个近似封

闭的环境，当脑内物质增加时会导致颅内压强增加，在医学上将这种现象称之为颅内压增高。较长时间处于颅内压增高会造成脑卒中，威胁人的生命安全^[23]。当颅内压增高的时候，脑内物质增加可以使得脑阻抗发生变化，所以可以采用生物电阻抗检测技术测量脑部阻抗，判断颅内压是否升高，对脑部诊断起到一定的辅助作用，在临床应用中具有重要的意义。

3.4.4 人体信号监测中的接触阻抗测量

在使用电极对人体生命信号的检测过程中，由于患者体位的变化、监测部位的出汗、电极的脱落以及电极耦合剂的改变等因素导致电极与监测部位之间的接触发生改变，引起电极与监测部位之间接触阻抗明显的变化。在对颅脑EIT成像监测^[24]、脑电接触阻抗的测量监测导联有无脱落^[25]以及移动心电对于运动干扰的去除时^[26]，对于接触阻抗的监测均具有重要意义。

4 生物电阻抗测量技术面临的主要问题

生物电阻抗测量目前在应用中仍存在测量方法的局限性，其中主要的关键技术点表现在以下几个方面：

① 人体对应的不同组织或者器官，在进行测量时、电极粘贴的位置、恒压或者恒流流量的大小、具体模型相对简单以及测量电流分布不均匀等^[27]；② 测量时的体位不同、食物的摄取量均会对测量结果有一定的影响；③ EIT算法的不足，有限元模型对于边界的电压（电流）的敏感性差异较大，使得阻抗重构效果不佳，如何实现测量人体最优的有限元自动剖分是目前EIT所面临的问题^[28]；④ 复阻抗虚部信息不易提取，忽略相位的影响，可能丢失大量重要信息。

5 生物电阻抗测量技术的发展前景

随着科学与技术的发展，测量技术与计算机技术的不断进步，势必使得生物电阻抗测量技术的测试和操作更加方便与快捷，可将其应用在以下几个方面：

① 对于一些潜在的淋巴水肿的患者，通过电阻抗测量的技术可以早期发现异常的病理组

综合评述

织,明确病因,便于进行治疗^[29];②用于肿瘤的早期发现以及恶性肿瘤术后的短期结果的预测^[30];③对于复阻抗信号的采集,获得更多的人体生物信号,建立更加精确的生物模型;④可进一步将电阻抗测量技术应用于食物的检测,判断食物的成熟度以及新鲜程度。

6 总结与展望

较为全面地介绍了生物电阻抗测量方法进展及应用现状,旨在让读者更加清晰地认识和了解生物电阻抗在不同方面的应用。目前,生物电阻抗测量技术主要应用在阻抗血流图、呼吸监测、断层成像技术、胃动力学检测、人体成分分析、颅内压检测、接触阻抗等几个方面。虽然生物电阻抗测量技术影响因素众多,但是与其它非侵入性监测方式相比,生物电阻抗测量具有无创、无害、快速、廉价、操作简单和功能丰富等特点。随着工程化设计的进步和临床实践的研究,生物电阻抗法在临床诊断中将发挥着重要作用。

参考文献

- [1] 任超世. 生物电阻抗测量技术[J]. 中国医疗器械信息, 2004, 10(1): 21-25.
- [2] BRAJESH K, PAL K, KHAN M. Assessment of human joints using bioelectrical impedance technique[J]. Studies Indian Place Names, 2020, 40(10): 272-285.
- [3] 苒飞霸, 张和华, 尹军. 生物电阻抗测量技术研究与应用[J]. 中国医学物理学杂志, 2015, 32(2): 234-238.
- [4] NAGEL E, HICKEY M, TEIGEN L, et al. Clinical Application of Body Composition Methods in Premature Infants[J]. JPEN J Parenter Enteral Nutr, 2020, 44(5): 785-795.
- [5] LYONS-REID J, WARD L C, KENEALY T, et al. Bioelectrical impedance analysis—an easy tool for quantifying body composition in infancy[J]. Nutrients, 2020, 12(4): 920.
- [6] 王倩, 许欢, 周广敏, 等. 生物电阻抗测量技术及其临床应用研究进展[J]. 北京生物医学工程, 2014, 33(2): 185-190.
- [7] KANAI H, SAKAMOTO K, HAENO M. Electrical measurement of fluid distribution in human legs: estimation of extra- and intra-cellular fluid volume[J]. J Microwave Power, 1983, 18(3): 233-243.
- [8] 卜世俊, 张伟, 李思君, 等. 多通道生物电阻抗测量系统的设计与开发[J]. 信息技术与信息化, 2016(1): 54-57.
- [9] MANSOURI S, ALHADIDI T, CHABCHOUB S, et al. Impedance cardiography: recent applications and developments[J]. Biomed Res, 2018, 29(19): 3542-3552.
- [10] 任超世, 沙洪, 王妍. 阻抗血流图测量方法的发展与提高[J]. 中国医学装备, 2005, 2(4): 37-40.
- [11] 董秀珍. 生物电阻抗技术研究进展[J]. 中国医学物理学杂志, 2004, 21(6): 311-317, 320.
- [12] 王丽春. 脑阻抗图的功率谱分析[J]. 医学物理, 1985(2): 23-30.
- [13] 叶继伦, 邓云, 黄燕. 病人监测的呼吸测量方法及其有效性的评价[J]. 中国医疗器械杂志, 2011, 35(2): 94-96.
- [14] 席延琴, 孙华, 陈现杰. 动态心电图推导呼吸曲线在老年慢性阻塞性肺疾病合并睡眠呼吸暂停低通气综合征患者中筛查价值的分析[J]. 心肺血管病杂志, 2020, 39(3): 268-271.
- [15] 徐灿华, 董秀珍. 生物电阻抗断层成像技术及其临床研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3738-3745.
- [16] 罗仕强, 周兴龙, 黄华. 电阻抗断层成像技术研究进展[J]. 现代生物医学进展, 2009, 9(6): 1189-1191.
- [17] 陈晓艳, 顾鹏, 常晓敏. 生物医学电阻抗成像技术[J]. 生命科学仪器, 2017, 15(3): 3-7.
- [18] BECHER T, BUBMEYER M, LAUTENSCHLAGER I, et al. Characteristic pattern of pleural effusion in electrical impedance tomography images of critically ill patients[J]. Br J Anaesth, 2018, 120(6): 1219-1228.
- [19] 吴石增. 人体功能成像技术的研究和发展[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 58-64, 74.
- [20] 王伟, 李章勇, 魏进民, 等. 基于阻抗法的胃动力信息检测系统设计[J]. 中国医学物理学杂志, 2006(6): 437-438, 472.
- [21] 许伟成, 张鸣生, 陈茵. 多频生物电阻抗分析法测量人体脂肪率的可行性研究[J]. 中国康复医学杂志, 2013, 28(10): 947-949.
- [22] LOOIJAAARD W G P M, STAPEL S N, DEKKER I M, et al. Identifying critically ill patients with low muscle mass: Agreement between bioelectrical impedance analysis and computed tomography[J]. Clin Nutr, 2020, 39(6): 1809-1817.
- [23] 冯颜. 基于脑阻抗的颅内压检测系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
- [24] 马航, 夏军营, 刘本源, 等. 一种颅脑EIT中多路电极/头皮接触阻抗的同步测量方法研究[J]. 医疗卫生装备, 2018, 39(4): 1-5.
- [25] 文斌, 叶继伦, 张旭, 等. 脑电接触阻抗精确测量系统设计与实现[J]. 中国医疗器械杂志, 2019, 43(6): 414-417.
- [26] 张洹千, 张树林, 杜晓薇, 等. 去除移动心电检测中运动干扰的多通道电极皮肤接触阻抗研究[J]. 北京理工大学学报, 2018, 38(8): 868-873.
- [27] 肖贵遇, 韩冰, 刘国庆, 等. 生物电阻抗技术的医学运用[J]. 中国医学物理学杂志, 2003, 20(4): 287-290.
- [28] 徐桂芝, 杨硕, 李颖, 等. 电阻抗断层成像技术综述[J]. 河北工业大学学报, 2004, 33(2): 35-40.
- [29] 张如意, 王宏, 秦晨, 等. 生物电阻抗分析测定液体状态在失代偿性心力衰竭诊治和预后评估中的作用[J]. 临床心血管病杂志, 2020, 36(7): 672-677.
- [30] KIM E Y, KIM S R, WON D D, et al. Multifrequency bioelectrical impedance analysis compared with computed tomography for assessment of skeletal muscle mass in primary colorectal malignancy: a predictor of short-term outcome after surgery[J]. Nutrit Clin Practic, 2020, 35(4): 664-674.