

# 无创检测与评价胃动力功能——生物电阻抗方法

赵舒, 任超世

赵舒, 任超世, 中国医学科学院、中国协和医科大学生物医学工程研究所 天津市 300192

赵舒, 女, 1976年生, 汉族, 河北省唐山市人, 硕士, 中国医学科学院、中国协和医科大学生物医学工程研究所助理研究员, 主要从事生物医学信息检测和信号处理研究。

国家自然科学基金资助项目, No. 60471041

通讯作者: 任超世, 300192, 天津市, 中国医学科学院、中国协和医科大学生物医学工程研究所. renbme@gmail.com

电话: 022-87891583 传真: 022-87891583

收稿日期: 2005-12-15 接受日期: 2005-12-20

## 摘要

生物电阻抗方法具有无创、无害、廉价、操作简单和功能信息丰富等特点。在胃排空或胃收缩、蠕动时, 由于胃的形态、容积及其内容物组成情况的改变较大, 电特性变化非常明显, 变化规律与胃动力学状况相对应, 相关性强。采用生物阻抗方法可以实现无创、高灵敏、准确地提取与胃动力学状况相对应的电特性及其变化信息。本文在胃动力功能及其检测方法的基础上, 着重评述了阻抗胃动力检测方法的基础、发展动态、技术关键和代表生物电阻抗技术发展方向。电阻抗断层成像技术的应用前景, 提出从电活动-机械收缩复合系统的高度认识胃动力学, 将无创伤生物阻抗方法与同步胃电检测相结合, 是生物电阻抗胃动力检测方法的发展方向。

**关键词:** 胃动力; 胃排空; 生物电阻抗; 测量方法

赵舒, 任超世. 无创检测与评价胃动力功能——生物电阻抗方法. 世界华人消化杂志 2006;14(5):465-469

<http://www.wjgnet.com/1009-3079/14/465.asp>

## 0 引言

胃肠疾病常见多发, 其发生率超过总人口的1%, 严重影响了人们的工作、学习和生活质量。在我国, 胃肠疾病患者中的50%与胃动力异常相关, 已受到国内外消化内科医生的特别关注和重视。

胃肠动力学是一门正在迅速发展的、多学科交叉的新兴学科。近20 a, 人们对胃肠动力的生理及胃肠功能紊乱所引起的胃肠动力障碍性疾病的认识有了显著的进步<sup>[1]</sup>。胃的功能分为

内、外分泌功能及动力功能。胃的动力功能是在神经、体液等因素的调节下由胃平滑肌协调运动完成的, 包括食物入胃以后的容纳、混合、推进、排空和屏障等作用, 是消化系统最重要的生理功能之一, 是消化道消化和吸收的基础。

长期以来, 人们对胃动力功能的研究落后于对胃的内、外分泌功能及胃的形态学的研究, 其中一个很重要的原因是由于缺乏方便、有效的胃动力学检查方法或手段。目前, 胃动力临床检查仍缺乏可完整地了解胃运动和排空情况的方法以作为诊断常规<sup>[2]</sup>。胃动力学研究的发展要求提供能全面、准确了解胃运动状态的多参数同步检测与评价方法。

## 1 胃动力检测方法现状

胃动力, 包括胃的运动和排空, 是一个复杂的电活动-机械收缩和传导的过程, 他由胃平滑肌的肌电活动开始, 引发胃体、胃窦收缩并向远端的幽门传播。他遵从电活动的节律, 也取决于传导性收缩的幅度、收缩时限、方向以及传导距离等因素的影响, 同时还受到食物种类、胃肠激素反应、昼间变异等多种因素的制约。胃的收缩是发生在平滑肌细胞膜表面的肌电活动的机械性表现。胃蠕动的节律与胃电活动相一致, 约3次/min, 是胃动力信号的特征频率。

胃动力的检测包括胃的收缩、蠕动规律及胃排空时间的测量。在国内外现有的一些检测方法中<sup>[1-3]</sup>, 腔内压测量、恒压器检查等可观察到由胃蠕动引起的压力波, 但测量时要向胃内插管, 患者不易接受。放射性核素呼气试验, 特别是闪烁扫描法, 其定量性、重复性好, 是目前胃排空测量的金标准, 但因使用核素, 对患者有害, 且价格昂贵, 也不宜长时间、多次重复使用, 其应用受到限制。超声方法可以观察到胃排空或胃运动的情况, 如Hou *et al*<sup>[4]</sup>采用实时超声法估计胃排空, 研究了功能性消化不良病人的胃排空和恒压器测定的感觉阈值之间的关系。但超声方法要用于消化过程的长时间检查

## ■背景资料

胃肠动力学是一门正在迅速发展的、多学科交叉的新兴学科。胃动力研究与临床检查尚缺乏可完整了解胃运动和排空情况的、方便、有效的方法。胃动力学的进步和发展要求提供能全面、准确了解胃运动状态的多参数同步检测与评价方法。

## ■研发前沿

由于胃在不同时段的收缩和蠕动, 胃的容积、形态及内容物组成状况改变较大, 相应的电特性变化十分明显, 其变化规律与胃动力学状况相对应, 采用生物阻抗方法可以实现无创、高灵敏、准确地提取与胃动力学状况相对应的电特性及其变化信息, 具有良好的发展与应用前景。

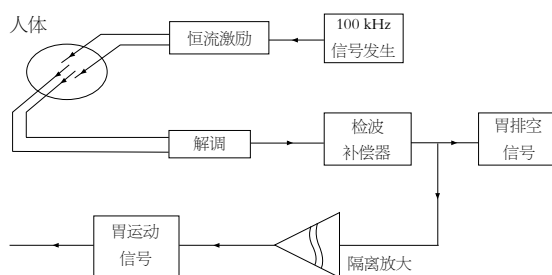


图1 胃阻抗测量方法示意图。

和评价, 在操作技术上还存在不少困难, 而且胃内气体的存在会影响声束传播, 干扰成像结果. 体表胃电图(EGG)无创、方便, 是目前应用较为普遍的方法之一. 如美国德克萨斯大学医学部(University of Texas Medical Branch)Chen *et al*<sup>[5-18]</sup>一直采用胃电, 并与其他方法结合进行与胃肠疾病相关的基础性研究, 不少工作可供借鉴<sup>[5-18]</sup>. EGG虽然与胃收缩频率相关性较好, 可用于研究和评价与胃节律性有关的疾病, 其直接与胃收缩或运动的关联性不强, 相关研究还有待深入. 此外, 现行各种检查方法大都只能检测某一、两项指标, 难于全面、有效地反映胃肠道动力与消化生理、病理变化规律<sup>[19,20]</sup>. 胃动力学研究的发展要求提供能全面、准确了解胃运动状态的多参数同步检测与评价方法。

## 2 生物电阻抗方法

生物电阻抗, 或简称阻抗测量技术, 是一种利用生物组织与器官的电特性及其变化规律提取与人体生理、病理状况相关的生物医学信息的检测技术, 具有无创、无害、廉价、操作简单和功能信息丰富等特点, 医生和患者易于接受. 胃是人体内比较容易提取阻抗信息的器官之一, 在胃的活动期, 如胃排空或胃收缩、蠕动时, 由于胃的形态、容积及其内容物组成情况的改变较大, 其电特性变化非常明显. 阻抗式胃动力检测技术是应用生物阻抗技术和现代电子学和计算机技术, 通过体表电极连续地检测胃的运动信号, 提取与胃动力学状况相对应的电特性及其变化信息, 反映胃的收缩、蠕动及排空过程, 从而达到检测与评价胃动力功能的目的。

Sutton *et al*<sup>[21]</sup>于1985年报告了采用阻抗方法提取胃运动信号的研究工作, 图1为其测量方法示意图. 4只一次性ECG电极置于受试者上腹(图2), 其中的一对激励电极输入峰-峰值为4 mA, 100 kHz的交流电流, 另一对电压检测电极用于提取阻抗信号. Sutton采用阻抗方法得到了反映

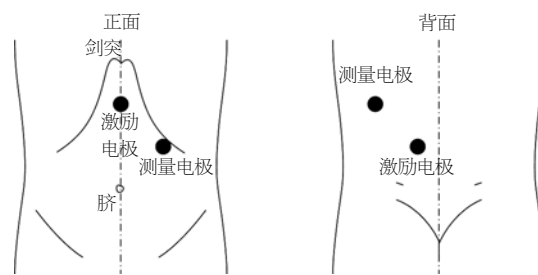


图2 电极位置。

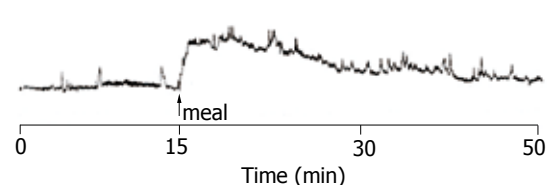


图3 典型的阻抗法胃排空信号。

胃排空过程的曲线, 并从中获取到与胃收缩频率相一致的, 2-4次/min的胃蠕动信号(图3)。

在随后的研究中, Sutton *et al*将阻抗法测得的胃排空时间与染料稀释法得到的结果进行了比较, 发现两者差别不大, 认为上腹阻抗法能反映胃内容物变化及排空过程. 此外, 他们还对食物电导率和胃酸变化所导致的影响进行了考察. 结果表明, 对于不同电导率的定量液体食物, 阻抗的变化没有一致的联系; 对同一受试者同时测量pH值、电导率和阻抗, 当食物的导电性增加时, 阻抗值和pH值下降, 阻抗和食物电导率之间不存在线性互反关系. 他们还研究了药物对胃排空的影响, 观察到在服用胃复安后, 阻抗法记录的平均半排空时间显著降低. Sutton *et al*的研究工作卓有成效, 为采用阻抗方法提取胃动力信息奠定了良好的基础。

Familoni *et al*<sup>[22]</sup>于1987年将阻抗方法和胃电测量同步进行以获得胃电活动(GEA)和胃收缩的信息, 他们采用有限圆柱近似模型进行研究, 并进行了三维功率谱计算和相关性分析. 结果表明, 只要合理放置电极就可以通过阻抗方法无创伤检测胃电和胃收缩活动信息, 而且可以通过体表胃电波形(EGG)的分析获得胃内电活动的运动方向。

为了研究胃部阻抗信号变化的原因, Kothapalli<sup>[23]</sup>在1992年建立了一个腹部三维模型以研究相关因素对胃阻抗的贡献, 分析了当电流激励电极和电压检测电极位于不同的位置时, 阻抗信号与食物容量、电阻率和胃收缩的关系. 研究表明, 当检测电极靠近激励电极时, 阻抗信号的变

化与进食量呈正线性关系, 对于高电阻率的食物, 阻抗信号的幅度随着进食量的增加而增大; 而对于低电阻率的食物, 随着进食量的增加而降低。食物的电阻率与电阻抗信号的关系是非线性的。阻抗信号的变化与远端胃环状平滑肌的收缩呈线性关系, 而与食物的电阻率呈非线性关系。电极的安放位置对于胃阻抗信号的检测至关重要, 研究采用了7种电极位置的组合形式, 表明阻抗信号是电极位置和结构的函数。

在药物影响实验方面, Murphy *et al*<sup>[24]</sup>1997年以生物电阻抗法作为胃排空检测手段比较了镇痛药盐酸曲马多和吗啡对人体胃排空的影响。Nakae *et al*<sup>[25]</sup>应用电阻抗断层成像方法(EIT)对年轻和老年健康人进行了胃排空测量, 试餐包括含有和不含油脂的液体食物, 其目的是为了确定年龄对脂类胃排空的影响。结果表明, 脂类食物增加了老年人的胃排空延迟, 服用脂肪酶会加速脂类食物的排空。Hadi *et al*<sup>[26]</sup>采用三种不同配比(糖、脂肪、热量)的试餐, 在胃底、胃体和胃窦三个部位进行了电阻抗法与闪烁扫描法胃排空实验。结果表明, 在胃体的测量结果能较好地反映胃的排空特性。Giouvanoudi *et al*<sup>[27]</sup>2003年用电阻抗法与闪烁扫描法对不同受试者进食相同试餐后的胃排空情况进行了实验比较, 以获取阻抗法测量胃动力的生理解释。实验结果表明, 对于相同成分不同能量的食物, 用阻抗法测定的半排空时间小于闪烁扫描法测定的时间。当食物的能量增加时, 两者的差异更加明显, 提示存在附加的胃部生理过程对阻抗信号影响。其原因是消化过程中的胃酸分泌使胃内容物电导率发生变化, 因而阻抗测量得到的半排空时间较低, 提示胃部阻抗测量还可用来估计胃酸分泌。

### 3 信号处理与分析

由于其他生理信号(如心电、呼吸)以及受检者体位变化等的干扰, 采集到的胃动力阻抗信号往往是多信号的混合, 信号分离与处理难度较大。其中呼吸信号的频率约为12次/min, 与胃运动信号接近, 同属于超低频范围, 且其幅度还可能远大于胃阻抗信号, 故胃阻抗测量中的首要干扰是呼吸干扰。采用低通滤波可排除高频噪声和心电等的干扰, 但有效分离呼吸干扰的高阶有源低通滤波电路通常难以设计和调试。如何在超低频段上稳定可靠的去除呼吸干扰, 有效提取胃阻抗信号, 至今还是有待解决的重要

技术问题之一。

胃动力信号具有3次/min的频率特征, 因此频谱及相关分析技术成为提取和处理胃动力信号的重要手段。张锋 *et al*<sup>[28]</sup>在体表胃阻抗测量系统中采用以等波动法设计的线性相位有限冲击响应(FIR)数字滤波器提取胃阻抗信号。滤波过程分两步进行: 首先滤除心脏射血造成的干扰; 第二步是消除呼吸干扰, 将胃阻抗信号分离出来。滤波器在长时间的测量过程中工作稳定, 性能良好。Akin和Sun于2002年提出了一种基于时-频域分析的方法<sup>[20]</sup>, 可从高速采样的胃电信号中提取反映胃阵发性蠕动收缩的锋电位活动信息及其时-频特性, 以评价进餐前后胃部活动情况。该方法用于胃阻抗信息的提取与处理也应该有类似的效果。小波变换和分析技术也用于胃电和胃阻抗的处理。Cintra *et al*<sup>[29]</sup>采用小波变换方法检测胃电解耦。赵瑞珍 *et al*<sup>[30]</sup>用小波变换的方法对实测的胃电信号进行低通或带通滤波, 在去除餐后胃运动信号的高频噪声后, 可较精确地计算出胃的半排空时间; 在对空腹胃运动信号进行带通滤波后, 根据小波变换的多分辨率特性, 可同时滤掉基线漂移和其他高频干扰, 从而在小波变换域内, 可分辨出胃运动的三相特征。Wang *et al*<sup>[31]</sup>采用独立分量分析的方法, 通过建立的神经网络模型, 采用相应的自学习算法实现信号分离, 可在干扰信号信息未知的情况下, 从含噪声的多通道EGG信号中分离出胃信号。其仿真和实测EGG数据分析处理结果表明, 独立分量方法可从呼吸干扰和随机噪声中分离出胃慢波信号; 当胃部包含不同频率的胃电信号时, 可经独立分量法分离这些不同频率的信号。Irimia和Bradshaw<sup>[32]</sup>采用快速独立分量方法处理胃磁(magnetogastrographic, MGG)信号, 可将MGG中的胃动、心搏、呼吸信号以及噪声分别分离出来, 并对其可靠性进行了验证。Wang *et al*<sup>[8]</sup>使用全新的交叉谱分析的方法分别计算了采用浆膜电极和体表胃电图(EGG)的多通道胃慢波记录的耦合百分比, 两者的计算结果有相关性, 表明采用多通道EGG信号实现胃慢波信号解耦是可靠的。

### 4 电阻抗断层成像技术

电阻抗断层成像技术(electrical impedance tomography, EIT)是继形态、结构成像之后, 于近20 a才出现的新一代更为有效的医学成像技术, 具有功能成像、无损伤和医学图像监护三

#### ■创新盘点

从电-机复合系统的认识高度, 依据胃电、胃的运动、形态、容积及胃内容物组成情况的电-机特性变化提取整个电-机过程的胃动力学参数, 并联系胃肠生理、病理状况及其变化规律, 是采用生物阻抗技术建立胃动力学检测与评价方法的创新思路。

### ■应用要点

本文在胃动力功能及其检测方法的基础上,着重阐述了阻抗胃动力检测方法的基础、发展动态、技术关键和应用前景,提出从电活动-机械收缩复合系统的高度认识胃动力学,将无创伤生物阻抗方法与同步胃电检测相结合,是生物电阻抗胃动力检测方法的发展方向。

大突出优势,代表了生物电阻抗技术的发展方向。人体中,胃是比较容易提取EIT信息的组织与器官,在胃的活动期,即在食物消化期间,由于胃的收缩和运动,其形态、体积及内容物组成情况改变较大,电特性变化非常明显。信号较大,信息丰富。EIT以图像形式给出检测结果,无论在灵敏度或获取信息的数量与质量上都超过普通阻抗方法<sup>[33,34]</sup>。

Mangnall *et al*<sup>[35]</sup>1987年报道了应用EIT测量人体胃排空和胃酸分泌的研究。实验采用16个沿着上腹部表面等间距排列的环形电极阵和相邻激励(激励电流为1 mA、50 kHz)、相邻测量模式,用反投影算法获得电极所在区域阻抗分布变化的断层图像。他们测量进餐前后各相应时刻的断层图像,以餐后第一幅图像为参考,计算不同时刻图像中胃部区域的阻抗变化百分比以形成胃排空曲线。结果表明对于不同受试者在服用抑制胃酸分泌的甲氧咪胺后, EIT法得到的胃排空曲线与用闪烁扫描法或染料稀释法同步得到的胃排空曲线非常接近,并具有良好的重复性。当向健康志愿者的胃内注入酸性溶液时,阻抗的变化与酸的体积和氢离子的浓度都有很强的相关性,故EIT还可为总胃酸分泌提供非侵入的指示。1988年Mangnall *et al*<sup>[36]</sup>还将Sutton的阻抗测量方法和EIT方法进行了比较,结果表明,两种方法均可跟踪胃内液体食物的排空,但是由于EIT方法受到人体和食物运动的干扰小,得到的结果重复性更好,与同时进行的闪烁扫描法试验结果有更好的相关性。如果不用甲氧咪胺以抑制胃酸分泌,则两种方法都不能准确跟踪胃排空。

Smallwood *et al*<sup>[37]</sup>应用Sheffield Mark 1系统分别对患有幽门狭窄的婴儿和健康成人进行了胃部EIT测量,并对EIT结果和同步测量的压力曲线进行功率谱(FFT)分析,表明了EIT方法可提取清晰的胃收缩活动的信息。并于1994年在包含胃的径向断层平面采用玫瑰形电极阵列获得的EIT图像基础上生成了胃壁运动的矢量柱状图,为胃传输过程中的蠕动波提供了一种非侵入的量化方法<sup>[38]</sup>。

### 5 生物电阻抗胃动力检测方法的发展方向

胃的运动和排空是一个复杂的电活动-机械收缩和传导的过程,只是从电(活动)或机(机械收缩)的角度认识和研究胃动力是不完整的。准确、有效的胃动力学检查和评价方法应能完整提取电

-机过程信号、并分析和评价电起搏-引导-收缩-传导控制-排空整个电-机复合过程中胃动力学状态及其变化信息。

在胃不同时段运动过程中,胃的收缩、蠕动情况,胃的容积、形态及内容物组成状况改变较大,其相应的电特性变化十分明显,信号较大,变化规律与胃动力学状况相对应,相关性强。采用生物阻抗方法可以实现无创、高灵敏、准确地提取与胃动力学状况相对应的电特性及其变化信息。

胃动力阻抗检测方法因其信息量大,无损伤、操作简单,费用低廉等优点,已受到广泛关注,具有良好的发展与应用前景。但是作为一种发展中的新技术,胃动力阻抗信息的有效提取尚需继续深化以提高重复性、稳定性;信号分离与处理技术也有待进一步完善;阻抗信息与胃动力功能间的生理和病理解释还需要与临床应用的紧密结合。

从电-机复合系统的认识高度,通过食物消化过程中胃电,胃的运动,胃的形态、容积及胃内容物组成情况的电-机特性变化提取整个电-机过程的胃动力学参数,结合胃肠生理、病理状况及其变化规律,建立一种全新的胃动力学检测与评价方法是生物电阻抗胃动力检测方法的发展方向。

### 6 参考文献

- 1 周吕,柯美云. 肠胃动力学: 基础与临床. 第1版. 北京: 科学出版社, 1999; 279-476
- 2 潘国宗. 现代胃肠病学(上册). 第1版. 北京: 科学出版社, 1994; 123: 853-859
- 3 马文M舒斯特. 舒斯特胃肠动力学. 第2版. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2003; 130-196
- 4 Hou XH, Li Q, Zhu L, Xie X, Chen JD. Correlation of gastric liquid emptying with various thresholds of sensation in healthy controls and patients with functional dyspepsia. *Dig Dis Sci* 2004; 49: 188-195
- 5 Qian LW, Pasricha PJ, Chen JD. Origins and patterns of spontaneous and drug-induced canine gastric myoelectrical dysrhythmia. *Dig Dis Sci* 2003; 48: 508-515
- 6 Ouyang H, Yin J, Chen JD. Therapeutic potential of gastric electrical stimulation for obesity and its possible mechanisms: a preliminary canine study. *Dig Dis Sci* 2003; 48: 698-705
- 7 Ouyang H, Yin J, Zhu H, Xu X, Chen JD. Effects of gastric electrical field stimulation with long pulses on gastric emptying in dogs. *Neurogastroenterol Motil* 2003; 15: 409-416
- 8 Wang ZS, Elsenbruch S, Orr WC, Chen JD. Detection of gastric slow wave uncoupling from multi-channel electrogastrogram: validations and applications. *Neurogastroenterol Motil* 2003; 15: 457-465
- 9 Chen JD, Qian L, Ouyang H, Yin J. Gastric electrical

- stimulation with short pulses reduces vomiting but not dysrhythmias in dogs. *Gastroenterology* 2003; 124: 401-409
- 10 Xu X, Qian L, Chen JD. Anti-dysrhythmic effects of long-pulse gastric electrical stimulation in dogs. *Digestion* 2004; 69: 63-70
  - 11 Simonian HP, Panganamamula K, Parkman HP, Xu X, Chen JZ, Lindberg G, Xu H, Shao C, Ke MY, Lykke M, Hansen P, Barner B, Buhl H. Multichannel electrogastragraphy (EGG) in normal subjects: a multicenter study. *Dig Dis Sci* 2004; 49: 594-601
  - 12 Liu J, Qiao X, Chen JD. Vagal afferent is involved in short-pulse gastric electrical stimulation in rats. *Dig Dis Sci* 2004; 49: 729-737
  - 13 Yin J, Levanon D, Chen JD. Inhibitory effects of stress on postprandial gastric myoelectrical activity and vagal tone in healthy subjects. *Neurogastroenterol Motil* 2004; 16: 737-744
  - 14 Yin J, Chen JD. Retrograde gastric electrical stimulation reduces food intake and weight in obese rats. *Obes Res* 2005; 13: 1580-1587
  - 15 Lu CL, Chen CY, Luo JC, Chang FY, Lee SD, Wu HC, Chen JD. Impaired gastric myoelectricity in patients with chronic pancreatitis: role of maldigestion. *World J Gastroenterol* 2005; 11: 372-376
  - 16 Liu S, Wang L, Chen JD. Cross-talk along gastrointestinal tract during electrical stimulation: effects and mechanisms of gastric/colonic stimulation on rectal tone in dogs. *Am J Physiol Gastrointest Liver Physiol* 2005; 288: G1195-G1198
  - 17 Xu X, Zhu H, Chen JD. Pyloric electrical stimulation reduces food intake by inhibiting gastric motility in dogs. *Gastroenterology* 2005; 128: 43-50
  - 18 Zhu H, Ouyang H, Chen JD. Pathophysiological roles of ectopic tachygastria induced with antral electrical stimulation. *Digestion* 2005; 71: 192-198
  - 19 Moraes R, Cora LA, Americo MF, Oliveira RB, Baffa O, Miranda JR. Measurement of gastric contraction activity in dogs by means of AC biosusceptometry. *Physiol Meas* 2003; 24: 337-345
  - 20 Akin A, Sun HH. Non-invasive gastric motility monitor: fast electrogastragram (fEGG). *Physiol Meas* 2002; 23: 505-519
  - 21 Sutton JA, Thompson S, Sobnack R. Measurement of gastric emptying rates by radioactive isotope scanning and epigastric impedance. *Lancet* 1985; 1: 898-900
  - 22 Familoni BO, Kingma YJ, Bowes KL. Noninvasive assessment of human gastric motor function. *IEEE Trans Biomed Eng* 1987; 34: 30-36
  - 23 Kothapalli B. Origin of changes in the epigastric impedance signal as determined by a three-dimensional model. *IEEE Trans Biomed Eng* 1992; 39: 1005-1010
  - 24 Murphy DB, Sutton A, Prescott LF, Murphy MB. A comparison of the effects of tramadol and morphine on gastric emptying in man. *Anaesthesia* 1997; 52: 1224-1229
  - 25 Nakae Y, Onouchi H, Kagaya M, Kondo T. Effects of aging and gastric lipolysis on gastric emptying of lipid in liquid meal. *J Gastroenterol* 1999; 34: 445-449
  - 26 Hadi NA, Giouvanodi A, Morton R, Horton PW, Spyrou NM. Variations in gastric emptying times of three stomach regions for simple and complex meals using scintigraphy. *IEEE Trans Nuclear Science* 2002; 49: 2328-2331
  - 27 Giouvanoudi A, Amaee WB, Sutton JA, Horton P, Morton R, Hall W, Morgan L, Freedman MR, Spyrou NM. Physiological interpretation of electrical impedance epigastragraphy measurements. *Physiol Meas* 2003; 24: 45-55
  - 28 张锋, 蒋大宗. 以阻抗法实现胃运动功能的测量. *中国医疗器械杂志* 2001; 25: 209-212
  - 29 de Sobral Cintra RJ, Tchervensky IV, Dimitrov VS, Mintchev MP. Wavelet analysis in a canine model of gastric electrical uncoupling. *Physiol Meas* 2004; 25: 1355-1369
  - 30 赵瑞珍, 郑建勇, 宋国乡. 小波变换方法检测胃动力. *第四军医大学学报* 2000; 22: 1700-1703
  - 31 Wang ZS, Cheung JY, Chen JD. Blind separation of multichannel electrogastragrams using independent component analysis based on a neural network. *Med Biol Eng Comput* 1999; 37: 80-86
  - 32 Irimia A, Bradshaw LA. Artifact reduction in magnetogastragraphy using fast independent component analysis. *Physiol Meas* 2005; 26: 1059-1073
  - 33 任超世. 生物电阻抗测量技术. *中国医疗器械信息* 2004; 10: 21-22
  - 34 Brown BH. Medical impedance tomography and process impedance tomography: a brief review. *Meas Sci Technol* 2001; 12: 991-996
  - 35 Mangnall YF, Baxter AJ, Avill R, Bird NC, Brown BH, Barber DC, Seagar AD, Johnson AG, Read NW. Applied potential tomography: a new non-invasive technique for assessing gastric function. *Clin Phys Physiol Meas* 1987; 8: 119-129
  - 36 Mangnall YF, Barnish C, Brown BH, Barber DC, Johnson AG, Read NW. Comparison of applied potential tomography and impedance epigastragraphy as methods of measuring gastric emptying. *Clin Phys Physiol Meas* 1988; 9: 249-254
  - 37 Smallwood RH, Nour S, Mangnall Y, Symthe A, Brown BH. Impedance imaging and gastric motility. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society PARIS, FRANCE, October 29- November 1 1992*; 5: 1748 - 1749
  - 38 Smallwood RH, Mangnall YF, Leathard AD. Transport of gastric contents. *Physiol Meas* 1994; 15: A175-A188

## ■名词解释

1 生物电阻抗测量技术: 一种利用生物组织与器官的电特性(阻抗)及其变化规律提取与人体生理、病理状况相关的生物医学信息的检测技术, 具有无创、无害、廉价、操作简单和功能信息丰富等特点。

2 电阻抗断层成像技术(EIT): 继形态、结构成像之后, 于近20 a才出现的新一代更为有效的医学成像技术。EIT以人体组织、器官的阻抗分布或变化为依据, 通过配置于人体体表的电极系统, 提取与人体生理、病理状态相关的组织或器官的电特性信息, 具有功能成像, 无损伤和医学图像监护三大突出优势。

电编 张敏 编辑 张海宁