

生物电阻抗分析在疾病临床监测和诊断中的应用

现场应用工程师Cosimo Carriero

生物组织的电特性按照电信号来源可分为主动和被动两类。如果生物组织的电流由细胞内部的离子产生，我们称之为主动响应。这些电信号称为生物电位，最为人所熟知的例子就是心电图(ECG)和脑电图(EEG)信号。如果生物组织对外部电刺激（例如电流或电压发生器）做出响应，则该响应为被动的。在这种情况下，我们需要考虑生物电阻抗。

生物电阻抗分析

生物电阻抗分析是一种用来测量人体组成和评估临床状况的低成本、非侵入技术。生物阻抗是一个由电阻值 R （实数部分）和电抗值 X_c （虚数部分）组成的复数，前者主要由人体内的水分总量所致，后者主要是由细胞膜产生的电容所致。该阻抗也可以用模为 $|Z|$ 、相位角为 φ 的矢量来表示。相位角在确定人体组成方面起主要作用。

$$Z = R + jX_c; \quad (1)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X_c^2} \quad (2)$$

$$\varphi = \tan^{-1}\left(\frac{X_c}{R}\right) \quad (3)$$

横截面积为 S 、长度为 l 的导体的电阻 R ，以及表面积为 S 、距离为 d 的平行板电容的容值 C 由以下公式给出：

$$R = \rho \left(\frac{l}{S} \right) \quad (4)$$

$$C = \varepsilon \left(\frac{S}{d} \right) \quad (5)$$

从公式4和公式5中可以看出，电阻和电容取决于几何参数（长度、距离和表面积），这意味着它们与采用的测量系统和物理参数有关；也就是说，电阻率 ρ 和介电常数 ε 与待测材料的类型（在本示例中为生物组织）密切相关。图1显示了一个生物阻抗及其测量仪器的电特性简化模型。RE考虑的是细胞外液的电阻，RI代表细胞内液的电阻， C_m 是细胞膜的电容。仪器与人体之间的连接通过置于皮肤上的电极实现。仪器向电极提供激励电压并测量产生的电流。激励信号通过连

接到后端驱动器的数模转换器(DAC)产生。通过微控制器对DAC进行编程，从而可设置信号幅度和频率。对于电流测量，则采用跨阻放大器(TIA)，将其连接到高分辨率模数转换器(ADC)以实现精确测量。使用系统微控制器处理采集到的数据，从中提取分析所需的信息。

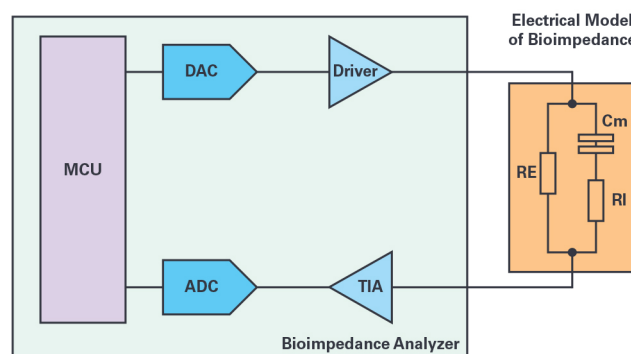


图1 生物阻抗测量系统框图。

在生物阻抗测量中，将人体分为五个部分：两个上肢、两个下肢和躯干。这样区分对于理解所使用的测量方法很重要。最常见的是手到脚、脚到脚和手到手。

在生物电阻抗分析(BIA)测试过程中，需要考虑多个因素，包括人体测量参数；即身高、体重、皮肤厚度和体型。其他因素包括性别、年龄、族群以及（尤其是）患者的健康状况；即任何营养不良或脱水。如果不考虑这些因素，测试结果可能会失真。根据统计数据并考虑了上述各种因素的公式来解读测量结果。

人体组成

在研究人体组成时，我们引用三室模型，其中包括：

- ▶ 脂肪体质量
- ▶ 细胞质量
- ▶ 细胞外质量

图2从众所周知的二室模型瘦体质量（去脂体质量）和脂肪体质量开始，解释说明了这些概念。脂肪体质量有两个组成部分，即必需脂肪和储存脂肪。瘦体质量分为人体细胞质量（由蛋白质质量和细胞内水分组成）和细胞外质量（由细胞外水分和骨质量组成）。最后一个参数是确定含水量的基础，是由细胞内和细胞外水分的总和得到的人体水分总量。

从电特性角度来看，细胞内和细胞外电解溶液的行为就像是良导体，而脂肪和骨骼组织则是不良导体。

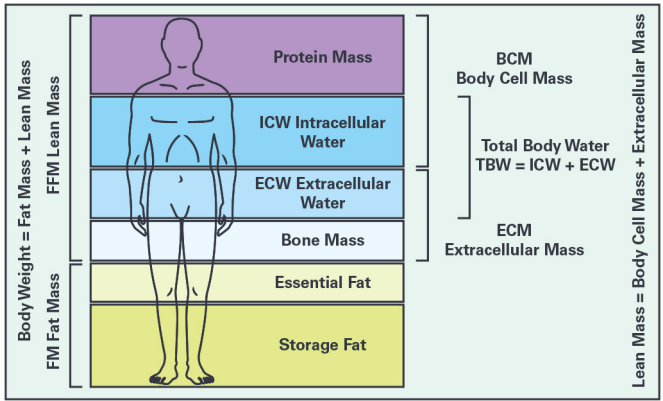


图2. 人体组成。

生物阻抗测量技术

运用广泛的各种生物阻抗测量技术在使用激励信号的频率方面有所不同。最简单的仪器是基于固定频率测量（单频生物电阻抗分析或SF-BIA），有些仪器采用多频率系统（多频生物电阻抗分析或MF-BIA），而最复杂的仪器则在一定频率范围内执行实际频谱测量（生物阻抗频谱或BIS）。评估结果的技术也有很多种，其中最重要的是生物电阻抗矢量分析和实时分析。

在SF-BIA仪器中，注入人体的电流频率为50 kHz；这是基于所测得的阻抗与人体水分总量(TBW)（阻抗的导电性部分）之间成反比关系，而人体水分总量由细胞内水分(ICW)和细胞外水分(ECW)组成。这项技术针对含水量正常的测试对象可以提供良好的结果，而对于含水量发生了剧烈改变的测试对象，由于该技术评估ICW变化的能力有限，因此会丧失其有效性。

MF-BIA技术通过在低频和高频下执行测量来克服SF-BIA的局限性。低频测量允许对ECW进行更准确的估算，而在高频下则可获得TBW的估值。由两个估值的差得出ICW。然而，该技术也并非十全十美，它在对患有疾病的老年人群进行体液估算时显示出局限性。

最后，BIS基于阻抗测量，根据图1的模型，该阻抗在零频率下是由细胞外液产生的电阻RE，而在无穷大频率下则是RE与RI的并联。在这两个极端频率下，由细胞膜产生的电容表现为开路

或短路。中频测量提供与电容值有关的信息。BIS相比其他技术可提供更多的详细信息，但是在这种情况下，测量需要更长的时间。

生物阻抗矢量分析（生物电阻抗矢量分析或BIVA）是一种基于生物阻抗绝对值测量的人体健康评估技术。它使用一个图形来显示阻抗的矢量表示，其中横坐标轴显示电阻值，而纵坐标轴显示容性阻抗值，这两个值均按照患者的身高设定了基准。该方法基于3个公差椭圆的公式：50%、75%和95%。50%的公差椭圆定义了具有人体组成平均值的人群。沿着椭圆的水平轴移动，在右侧可识别出瘦体质量百分比较低的个体，反之亦然；也就是说，在左侧识别出的是瘦体质量百分比较高的个体。沿着垂直轴移动可确定含水量，趋向椭圆上半部分代表低于标准水平，而椭圆的下半部分则高于标准水平。

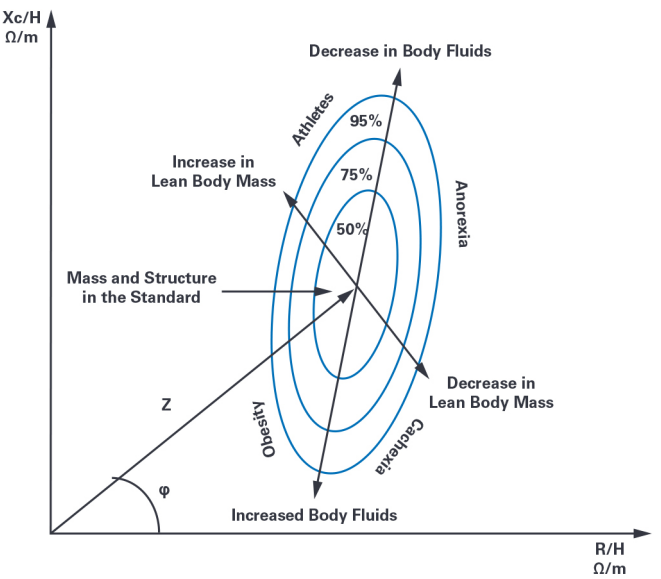


图3. 生物电阻抗矢量-分析公差椭圆。

观察人体组成的波动（例如，与瘦体质量、脂肪体质量和人体水分总量正常值的偏差）是确定患者健康状况的关键因素。瘦体质量明显减少和体液失衡都是诊断疾病时使用的主要参数。当前，生物电阻抗分析已用于诊断以下人体系统疾病：

- 肺系统
 - 肺癌
 - 肺水肿
- 心血管系统
 - 术后积液
- 循环系统
 - 血管内容积
 - 低钠血症
 - 水合作用

- 肾脏系统
 - 血液透析
 - 评估干重
- 神经系统
 - 阿尔茨海默氏病
 - 神经性厌食症
- 肌肉系统
 - 训练期间身体组成的变化
- 免疫系统
 - 艾滋病病毒感染者评估
 - 癌症患者评估
 - 登革热

AD5940，一款灵活的高精度模拟前端

ADI公司具有广泛的阻抗分析产品组合，包括ADuCM35x等器件，ADuCM35x是专为阻抗频谱设计的高度集成的片内系统(SoC)。最近投放市场的AD5940是一款高精度、低功耗模拟前端，非常适合便携式应用。AD5940专为测量生物阻抗和皮肤电导率而设计，由两个激励环路和一个通用测量通道组成。第一激励环路能够产生最大频率为200 Hz的信号，并且可以配置为恒电势器，用于测量不同类型的电化学电池。其基本组件包括一个双输出DAC、一个可提供激励信号的精密放大器以及一个用于测量电流的跨阻放大器。该环路在低频率下工作，功耗低，因此也称为低功耗环路。第二个激励环路具有类似的配置，但能够处理最高200 kHz的信号，因此称之为高速环路。该器件配备了一个采集通道，内置一个16位、800 kSPS SAR型ADC和转换器模拟信号处理链前端，其中包括一个缓冲器、一个可编程增益放大器(PGA)和一个可编程抗混叠滤波器。为了完善该架构，采用了一个开关矩阵复用器，它允许将来自多个器件内部或外部信号源的多个信号连接到ADC。这样，除了主要的阻抗测量功能外，还可以执行准确的系统诊断以验证仪器的全部功能。

图4显示了采用四线配置将AD5940用于人体绝对阻抗测量的连接方式。对于这种类型的测量，使用高频环路；可编程交流电压发生器提供激励信号。第二个发生器可提供共模电压，以实现正确测量。通过跨阻放大器测量由人体阻抗产生的电流，并采用16位ADC进行转换。该系统能够在最高200 kHz的频率下进行测量，在50 kHz下可提供100 dB的信噪比(SNR)。将数字数据发送到硬件加速器以提取所需数值；即阻抗的实数部分和虚数部分。

作为医疗设备，生物阻抗分析仪必须符合IEC 60601标准。该标准设定了可施加于人体的电压和电流限值。为此，这款器件提供了一个电阻 R_{limit} 来限制最大电流，并提供了四个耦合电容 $C_{iso}X$ ，以防止将直流分量施加于人体上。

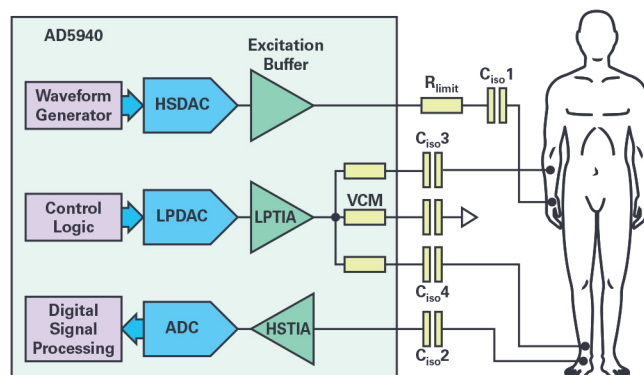


图4. AD5940用于生物电阻抗分析的四线连接。

结论

生物阻抗测量是一种快速无创评估人体组成和诊断某些类型疾病的低成本通用方法。由于使用AD5940等器件，当前的技术可以实现紧凑、高性能、低功耗的生物阻抗分析仪，并且该分析仪可以使用电池供电。AD5940的高集成度、小尺寸和低功耗特性也使其特别适合可穿戴应用。

作者简介

Cosimo Carriero于2006年加入ADI公司，担任现场应用工程师，为战略和关键客户提供技术支持。他拥有意大利米兰Università degli Studi的物理学硕士学位。他过去的经历包括：在意大利核物理研究所(INFN)定义和开发核物理实验仪器，与小公司合作开发工厂自动化传感器和系统，以及在Thales Alenia Space担任卫星电源管理系统高级设计工程师。联系方式：cosimo.carriero@analog.com。

在线支持社区



访问ADI在线支持社区，中文技术论坛
与ADI技术专家互动。提出您的棘手设计问题、浏览常见问题解答，或参与讨论。

请访问ez.analog.com/cn



ADI公司
请访问analog.com/cn

如需了解区域总部、销售和分销商，或联系客户服务和
技术支持，请访问analog.com/cn/contact。

向我们的ADI技术专家提出棘手问题、浏览常见问题解答，或参与EngineerZone在线支持社区讨论。
请访问ez.analog.com/cn。

©2019 Analog Devices, Inc. 保留所有权利。
商标和注册商标属各自所有人所有。

“超越一切可能”是ADI公司的商标。

TA21591sc-9/19

