

基于 EIT 测定不同体姿下通气分布实验方法研究

方海东¹, 骆栩潇¹, 吴阳¹, 周童², 高贵锋³, 刘凯¹, 姚佳烽¹

(1. 南京航空航天大学 机电学院, 江苏 南京 210016;

2. 苏州大学附属第二医院 呼吸与危重症医学科, 江苏 苏州 215004;

3. 深圳市安保医疗科技股份有限公司, 广东 深圳 518100)

摘要:提出一种无线远程监控电阻抗成像(WTEIT)实验方法,对坐姿、俯卧和仰卧3种体姿下的通气分布进行测定,采用通气中心(CoV)、不均匀性(GI)、局部通气延迟(RVD)3种指标和RVD分布图对通气均匀程度进行评价。结果表明:俯卧时通气分布相比坐姿和仰卧更均匀。俯卧时,腹背侧通气占比为(57.54±7.89)%:(42.46±7.89)%,最接近1:1;CoV最大,为55.26±1.10,说明背侧通气最多;GI最小,为0.25±0.03;RVD_{SD}最小,为5.01±1.43,说明通气最均匀。此研究用EIT方法反映了不同体姿下肺部通气的均匀程度,证明了俯卧位通气在临床上的有效性。

关键词:电阻抗成像;体姿变化;通气分布;通气均匀性指标

中图分类号:TP391 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2022)05-0252-05

Study on Experimental Method of Measuring Ventilation Distribution under Different Position Based on Electrical Impedance Tomography

FANG Haidong¹, LUO Xuxiao¹, WU Yang¹, ZHOU Tong², GAO Guifeng³, LIU Kai¹, YAO Jiafeng¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Department of Respiratory and Critical Care Medicine, The Second Affiliated Hospital of Soochow University, Suzhou 215004, China; 3. Shenzhen Ambulance Tetch Co., Ltd., Shenzhen 518100, China)

Abstract: A wireless telemonitoring electrical impedance tomography (WTEIT) experimental method is proposed to measure the ventilation distribution under sitting, prone and supine positions. Center of ventilation (CoV), global inhomogeneity (GI), regional ventilation delay index (RVD) and RVD distribution map are used to evaluate the ventilation uniformity. The results show that the distribution of pulmonary ventilation under prone position is more uniform than that under sitting and supine positions. The proportion of ventral and dorsal ventilation under prone position is (57.54±7.89)%:(42.46±7.89)%, closest to 1:1. CoV is the largest with 55.26±1.10, indicating that dorsal ventilation is the most, while GI is the smallest with 0.25±0.03, and RVD_{SD} is the smallest as 5.01±1.43, showing that the ventilation is the most uniform. This study reflects the uniformity of lung ventilation under different positions by EIT method and proves the clinical effectiveness of prone position ventilation.

Keywords: electrical impedance tomography; position change; ventilation distribution; ventilation uniformity index

0 引言

电阻抗成像(electrical impedance tomography, EIT)是一种功能性成像技术,通过向外部电极传感阵列施加一定频率的安全电流,并测量边界电压变化,以此重构生物内部阻抗分布图像,实现诊断或监测患者的功能^[1]。EIT低成本、实时动态功能成像和对组织功能变化高度敏感等优点,使其非常适用于床边连续监测肺功能^[2-3]。在医学领域中,EIT也被积极研究用于乳腺癌检测^[4-5]、体外血栓检测^[6]和脑检测^[7]等。

体姿变化会导致重力依赖区的通气改变,从而导致肺内气体的重新分布以及造成重力依赖区肺排空能力的改

变^[8]。EIT可以实时地监测肺局部通气量的变化,因此,获得了国内外研究小组的关注。FRERICHS I等^[9]通过EIT确定了不规则自主呼吸模式和体姿对无呼吸疾病新生儿通气空间分布的影响。FRERICHS I小组^[10]通过对青年和老人在不同体姿下的EIT研究,确定了年龄和体位对局部通气的影响。张超等^[11]利用EIT监测和比较不同体姿下局部肺通气量和一秒率的改变情况,反映了体姿改变对肺通气的影响。王冠等^[12]统计了不同体姿下健康志愿者EIT的基础范围值,可作为EIT系统研究和临床使用的参考依据。虽然这些研究小组利用EIT开展了不同体姿下的相关临床研究,但仍处于初步探索阶段,仅仅证明了EIT可以反映体姿变化所引起的肺通气变化,缺少量化指标的计算和具体的评价方法。EIT图像所包含的多种

基金项目:国家自然科学基金面上项目(62071224);苏州市科技计划项目(SKY2021006)

第一作者简介:方海东(1998—),男,浙江宁波人,硕士研究生,研究方向为电阻抗成像。

生理信息,需要根据预期的临床应用进行进一步的数据处理。

通气中心 (CoV)、不均匀性 (GI)、局部通气延迟 (RVD) 3 种通气均匀性指标^[13]和 RVD 分布图^[14]是在 EIT 研究中衍生出的重要参数。CoV 能够反映肺通气在腹背方向上的均匀性;GI 计算了局部和整体的差异,能够更为精确地反映通气均匀性;RVD 结合 RVD 分布图则能反映出肺通气区域内时间尺度上的不均匀性。利用 3 种通气均匀性指标和 RVD 分布图像可以从 EIT 图像中发掘出更深层次的信息,用于比较不同体姿下的肺通气均匀程度。

目前,临床上一般采用俯卧位通气以促进肺泡复张,改善氧合情况^[15-16]。本文提出一种无线远程监控电阻抗成像 (wireless telemonitoring electrical impedance tomography, WTEIT) 实验方法,对不同体姿下的通气分布进行测定,采用 3 种指标和 RVD 分布图对通气均匀程度进行评价,用 EIT 方法证明了俯卧位通气在临床上应用的有效性,也为深入研究提供了动态监测的方法。

1 实验设备与方法

1.1 实验设备

本实验使用的 WTEIT 系统是自主研发的 JLPulmo01-V1.0.0。该系统包括基于 Red Pitaya 开发板的数据采集模块、可穿戴式弹性缚带多电极传感器和上位机,如图 1 所示。

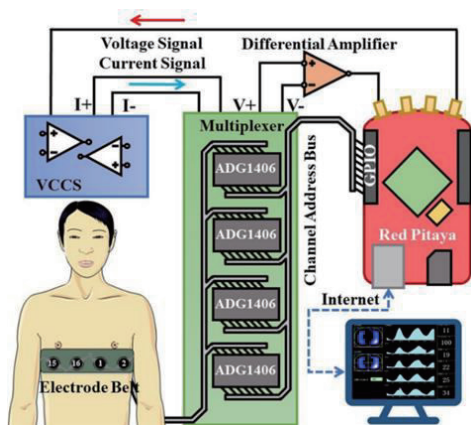


图 1 电阻抗成像实验设备原理

Red Pitaya 发出幅值可调的电压信号,控制压控电流源产生电流信号,电流信号通过模拟多路复用器和多电极传感器对受试者进行激励,采集到的电压信号,经差分放大回到 Red Pitaya。在 Red Pitaya 内完成快速傅里叶变换,并计算出电压幅值,把电压幅值通过无线模块传到上位机,经数据预处理和成像算法进行图像重建、波形显示和数据存储等。电极数量为 16 电极,采用相邻激励、相邻测量的驱动测量方式,激励电流幅值在 1~5 mA 范围内可调,频率为 122 kHz,成像速度 20 帧/s。该系统能够满足肺通气功能的床旁连续监测需求。肺功能仪采用日本某公司的 AS-507。

1.2 实验方法

选取 50 名健康志愿者进行试验,其中男性 33 名,女性 17 名。选取标准如下:无心肺病史、无吸烟史、无饮酒史及无慢性疾病史;体内无移植性电子设备;无胸、脊柱畸形史;同意进行 EIT 测量者^[12]。年龄、身高、体重和身体质量指数如表 1 所示。

表 1 受检人群基线特征

受试者特征因素	特征值 ($n=50$)
年龄/岁	25±5
男	33
女	17
身高/m	1.71±0.08
体重/kg	67.50±9.08
身体质量指数/(kg/m ²)	23.01±1.95

具体实验步骤如下:

1) 根据受试者的胸廓大小选择合适长度的电极带,用酒精擦拭受试者胸部测量区域,在电极上均匀涂抹少量导电膏,将电极带水平固定在第 4-第 5 肋间处,同时保证电极间距均匀、与皮肤接触可靠,且 8、9 号电极间的基准线正对脊柱,连接 EIT 数据采集系统,开始监测;

2) 受试者在坐姿下进行测试,平静呼吸一段时间后,待 EIT 采集数据稳定即可开始用力肺活量测试,并同步记录 EIT 数据,重复 3 次;

3) 受试者依次变换为仰卧和俯卧,重复步骤 2) 的测试流程。

进行坐姿 EIT 监测实验如图 2 所示。



图 2 坐姿 EIT 监测实验

采集到的 EIT 数据采用如下方式处理:

- ① 上位机自动完成图像重建、波形显示功能;
- ② 根据 EIT 系统绘制的曲线计算得到一秒率,并与由肺功能仪测得的结果进行比较,验证自主研发设备采集数据的有效性;
- ③ 将得到的 EIT 图像划分为腹侧和背侧两个感兴趣区域,分别统计腹侧和背侧的通气占比。
- 4) 分别计算不同体姿下的 3 种通气均匀性指标,绘制 RVD 图,具体方法在下一小节中给出。

1.3 通气均匀性指标

采用通气中心 (CoV)、不均匀性 (GI)、局部通气延迟 (RVD) 3 种通气均匀性指标和 RVD 分布图,可以对不同

体姿下的肺部通气均匀性进行评估。与通常采用的根据像素计算方式不同,本文是根据节点来计算。

为了计算出这些指标,首先需要表示出功能 EIT 的潮汐变化(TV),根据吸气末图像与呼气末图像来计算。一般取 1 min 为分析周期,并计算平均值以提高信噪比。计算公式如下:

$$T_{V_i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (\Delta Z_{i,in,n} - \Delta Z_{i,ex,n}) \quad (1)$$

式中: T_{V_i} 表示 EIT 图像中*i*号节点的 TV 值; N 表示分析周期内包含的呼吸次数; $\Delta Z_{i,in,n}$ 和 $\Delta Z_{i,ex,n}$ 分别表示吸气末和呼气末对应的阻抗值。由于这些指标的计算需经过归一化处理,阻抗之差可用吸气末与呼气末的计算电导率差代替。

C_{ov} 表示肺背侧通气量与整体通气量之比,比值越大说明肺背侧部分通气越多。计算公式如下:

$$C_{ov} = [\sum (y_i \times T_{V_i}) / \sum T_{V_i}] \times 100\% \quad (2)$$

式中 y_i 表示*i*号节点在腹背方向上对应的高度,该值被归一化到 0~1 之间,腹部对应 0,背部对应 1。

G_1 是反映各节点 TV 值差异的通气均匀性指标,是 EIT 图像中通气区域 TV 值的中位数与各节点之间差异总和,与通气区域所有节点 TV 值总和之比。该比值越小,说明肺通气越均匀。计算公式如下:

$$G_1 = \sum_{l \in \text{lung}} |T_{V_l} - \text{median}(T_{V_l})| / \sum_{l \in \text{lung}} T_{V_l} \quad (3)$$

式中归一化后的 TV 值<0.4 部分对应的节点表示在肺通气区域内,其 TV 值用 T_{V_l} 表示。

RVD 是通过计算各节点通气时在时间上的差异得到的参数,其标准差记为 RVD_{SD} , RVD_{SD} 越小,说明肺通气越均匀。根据 EIT 肺通气区域不同节点通气情况分别绘制出局部阻抗变化曲线,并由曲线进行计算 RVD 值。计算公式如下:

$$\begin{cases} R_{VD1} = (t_{1,40\%} / t_{in-ex}) \times 100\% \\ R_{VDSD} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l \in \text{lung}} (R_{VD1} - \text{mean}(R_{VD1}))^2} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $t_{1,40\%}$ 表示从吸气开始达到最大阻抗 40%所需的时间; t_{in-ex} 表示根据全局阻抗曲线计算的吸气总时间; L 表示通气区域包含节点的总个数。

另外,可以根据肺通气区内各节点的 RVD 生成 RVD 分布图。RVD 代表通气延迟程度,RVD 越大,代表通气越迟。使通气过程中时间尺度上的不均匀性得到直观反映,具体方法如图 3 所示,图中以 A、B、C3 点为例。这 3 点的 RVD 指数依次减小,说明在时间尺度上 A 点通气最迟,实现了区域肺泡通气延迟的可视化。

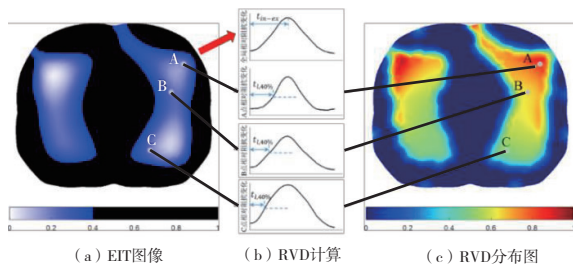


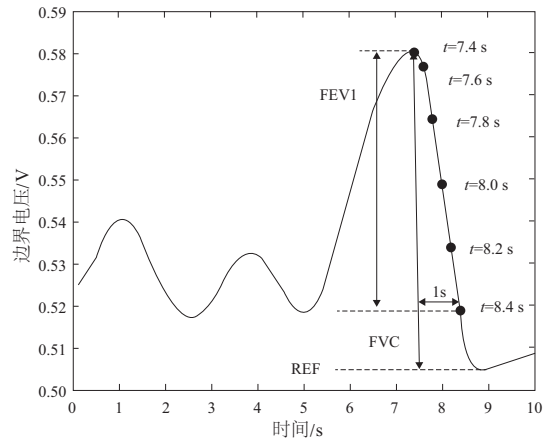
图 3 RVD 分布图

2 实验结果

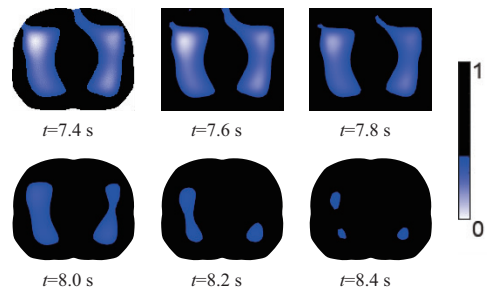
2.1 不同体姿下用力肺活量测试

肺功能检查是对受试者的整体肺通气功能进行诊断和评估的金标准,健康人的一秒率>70%^[17-18]。一秒率是其中的重要指标,常用于判断阻塞性气道疾病的严重程度^[19]。将 EIT 系统与肺功能仪测得的一秒率进行比较,验证自主研发设备采集数据的有效性。

某一受试者坐姿下用力肺活量期间 EIT 测试结果如图 4 所示。图 4(a)中反映了呼吸过程中 208 个通道的边界电压之和随时间变化的关系。吸气过程中,随着空气的吸入,肺部阻抗增大,边界电压和随之增大;呼气时,边界电压和不断减小。在两次平静呼吸之后,开始进行用力肺活量测试,用力吸气至 $t=7.4$ s 时,达到吸气最大值,随后尽力尽快呼出肺内所有气体。这部分呼气量记为用力肺活量(FVC),7.4 s~8.4 s 这 1 s 内的呼气量记为一秒钟用力呼气容积(FEV1)。FEV1 与 FVC 之比即为一秒率(FEV1%),此受试者的一秒率为 82.8%。图 4(b)反映了用力肺活量测试呼气前 1 s 内的 EIT 图像。此过程中,肺部截面积不断减小,说明肺部气体不断减少,与图 4(a)中的曲线相对应。



(a)呼吸过程中边界电压之和随时间变化关系



(b)用力肺活量测试呼气前 1 s 内的 EIT 图像

图 4 受试者坐姿下用力肺活量期间 EIT 测试结果

在坐姿、仰卧和俯卧 3 种不同体姿下分别进行用力肺活量测试,其余条件保持相同。用 EIT 系统和肺功能仪测得的一秒率结果分别用平均值±标准差形式给出,如图 5 所示。结果表明志愿者不同体姿下的一秒率平均值都在 80%以上。EIT 系统测得的一秒率结果与用肺功能仪测得的结果具有良好的 consistency,说明该系统采集数据的有效性。

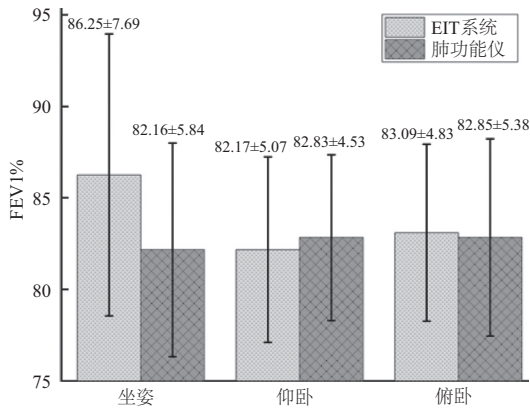


图 5 不同体姿下 EIT 系统与肺功能仪一秒率测试结果

2.2 肺部通气均匀性评价

对坐姿、仰卧和俯卧 3 种不同体姿下腹侧和背侧的通气占比进行统计,结果用平均值±标准差形式给出,如图 6 所示。3 种体姿下,腹背侧肺通气占比分别为 (61.25±9.61)% : (38.75±9.61)%、(66.13±9.27)% : (33.87±9.27)%和(57.54±7.89)% : (42.46±7.89)%。其中,俯卧时两者之比最接近 1 : 1,说明俯卧时的通气分布最均匀。结果表明:EIT 能够反映体姿变化导致的肺通气分布和肺排空能力的改变。

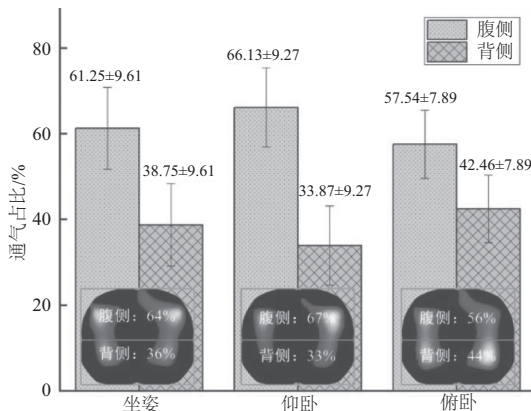


图 6 不同体姿下腹背侧通气比例结果

根据计算公式,得到不同体姿下 3 种通气均匀性指标的计算结果如表 2 所示,用平均值±标准差形式给出。

表 2 3 种体姿下的通气均匀性指标结果

指标名称	坐姿	仰卧	俯卧
CoV/%	54.13±1.66	54.09±1.07	55.26±1.10
GI	0.32±0.07	0.34±0.05	0.25±0.03
RVD _{SD}	5.15±1.62	6.59±1.50	5.01±1.43

图 7 以雷达图的形式给出结果,直观地反映出指标大小关系,并根据肺通气区域内各点的 RVD 生成 RVD 分布图。结果表明:CoV 在俯卧时最大,代表俯卧时肺背侧通气最多,与通气占比结果吻合;GI 在俯卧时最小,代表俯卧时肺通气最均匀;RVD_{SD} 在俯卧时最小,也说明了俯卧时通气最均匀。图中的灰度深浅分布清晰地反映出区域通气延迟的程度。俯卧时,肺通气区域范围内的颜色分布变化较为平缓,而对应的 RVD_{SD} 在俯卧时最小,进一步说明了俯卧时通气最均匀。

3 讨论

本文采用 3 种通气均匀性指标对不同体姿下的通气情况进行评价。CoV 不需要经过复杂的计算,就能反映重力对通气分布的影响。KARSTEN J 等^[20]用实验证明:基于 EIT 的 CoV 监测可以评估麻醉、气腹和不同 PEEP 水平的效果。GI 与 CoV 相比,更好地反映了局部与整体的差异。ZHAO Z Q 等^[21]利用 GI 来选择与通气均匀性相关的 PEEP 水平。RVD 则体现了肺在通气过程中时间尺度上的局部差异。MUDERS T 等^[14]利用 RVD 估计潮气补充量,可能有助于个性化的通气设置。这些指标在临床上已有简单的应用,但仍需要进一步深入研究。

3 种体姿的 EIT 实验证明了俯卧位通气在临床应用上的合理性。不同区域的肺通气量会随体姿改变而变化,且与重力影响有关。俯卧时,腹侧区域通气减少,而背侧区域通气增加,相对另外两种体姿,肺通气分布更均匀。从生理角度分析,主要有以下几点原因^[15-16, 22]:1) 俯卧时腹侧区域血流增加而背侧区域血流减少,通气血流比改善,分流减少;2) 俯卧能减少心脏、腹部对肺的压迫,促进重力依赖区肺复张;3) 俯卧时重力依赖区和非重力依赖区变化导致腹背侧顺应性变化,而背侧通气区域顺应性增加相较于腹侧减少明显,使整体顺应性增加。因此,临床上采用俯卧位通气方式。

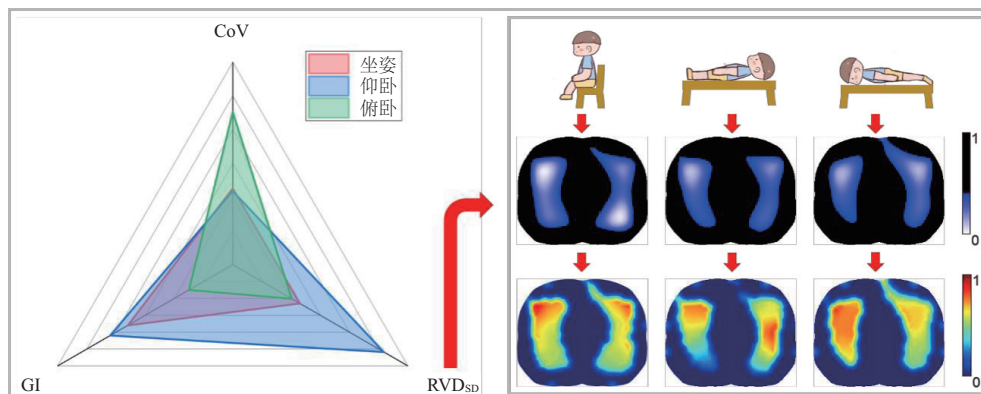


图 7 不同体姿下通气均匀性指标和 RVD 分布图

4 结语

本文提出一种无线远程监控电阻抗成像实验方法,对健康人开展肺通气数据采集,对不同体姿下的通气分布进行测定,采用CoV、GI、RVD3种指标和RVD分布图对通气均匀程度进行评价。得到以下结论。

1)EIT能够反映体姿变化导致的肺通气分布和肺排空能力的改变,俯卧时腹背侧通气占比为 $(57.54\pm 7.89)\%$: $(42.46\pm 7.89)\%$,最接近1:1。

2)3种指标和RVD分布图在不同体姿下能反映肺通气分布的均匀性。俯卧时CoV最大,为 $(55.26\pm 1.10)\%$,说明背侧通气最多;GI最小,为 0.25 ± 0.03 ,说明通气最均匀;RVD_{SD}最小,为 5.01 ± 1.43 ,也说明通气最均匀。

3)俯卧相比坐姿和仰卧,能够使肺部通气更加均匀。因此,临床上采用俯卧位通气以促进肺泡复张,改善氧合情况。

参考文献:

- [1] 吴阳,刘凯,陈柏,等. 自适应粒子群优化算法优化径向基函数神经网络用于电阻抗成像图像重建[J]. 仪器仪表学报, 2020,41(6):240-249.
- [2] SANG L, ZHAO Z Q, LIN Z M, et al. A narrative review of electrical impedance tomography in lung diseases with flow limitation and hyperinflation: methodologies and applications[J]. Annals of Translational Medicine, 2020,8(24):1688.
- [3] FRERICHS I, AMATO M B P, VAN KAAM A H, et al. Chest electrical impedance tomography examination, data analysis, terminology, clinical use and recommendations: consensus statement of the TRanslational EIT developmeNt stuDy group[J]. Thorax, 2017,72(1):83-93.
- [4] HONG S, LEE K, HA U, et al. A 4.9 mΩ-sensitivity mobile electrical impedance tomography IC for early breast-cancer detection system[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2015, 50(1):245-257.
- [5] AKHTARI-ZAVARE M, LATIFF L A. Electrical impedance tomography as a primary screening technique for breast cancer detection[J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention: APJCP, 2015,16(14):5595-5597.
- [6] SAPKOTA A, FUSE T, SEKI M, et al. Application of electrical resistance tomography for thrombus visualization in blood[J]. Flow Measurement and Instrumentation, 2015,46:334-340.
- [7] YERWORTH R J, BAYFORD R H, BROWN B, et al. Electrical impedance tomography spectroscopy (EITS) for human head imaging[J]. Physiological Measurement, 2003,24(2):477-489.
- [8] 刘丽娟,索文超. 急性呼吸窘迫综合征患者下呼吸道重力依赖区气道关闭数值模拟[J]. 中国医学影像技术, 2019, 35(11):1722-1726.
- [9] FRERICHS I, SCHIFFMANN H, OEHLER R, et al. Distribution of lung ventilation in spontaneously breathing neonates lying in different body positions[J]. Intensive Care Medicine, 2003, 29(5):787-794.
- [10] FRERICHS I, BRAUN P, DUDYKEYVICH T, et al. Distribution of ventilation in young and elderly adults determined by electrical impedance tomography[J]. Respiratory Physiology & Neurobiology, 2004,143(1):63-75.
- [11] 张超,吴佳铭,代萌,等. 基于EIT技术监测体姿改变对肺通气影响的实验研究[J]. 医疗卫生装备, 2018,39(4):6-10.
- [12] 王冠,李天娇,张艺,等. 健康人群电阻抗层析成像的特征及正常范围分析[J]. 实用临床医药杂志, 2021,25(15):14-17.
- [13] YANG L, DAI M, CAO X S, et al. Regional ventilation distribution in healthy lungs: can reference values be established for electrical impedance tomography parameters? [J]. Annals of Translational Medicine, 2021,9(9):789.
- [14] MUDERS T, LUEPSCHEN H, ZINSERLING J, et al. Tidal recruitment assessed by electrical impedance tomography and computed tomography in a porcine model of lung injury[J]. Critical Care Medicine, 2012,40(3):903-911.
- [15] GATTINONI L, TOGNONI G, PESENTI A, et al. Effect of prone positioning on the survival of patients with acute respiratory failure[J]. The New England Journal of Medicine, 2001, 345(8):568-573.
- [16] GUÉRIN C, REIGNIER J, RICHARD J C, et al. Prone positioning in severe acute respiratory distress syndrome[J]. The New England Journal of Medicine, 2013, 368(23):2159-2168.
- [17] 周营营,朱蕾. 慢性阻塞性肺疾病的肺功能诊断标准不同于阻塞性通气功能障碍的诊断标准[J]. 中国呼吸与危重监护杂志, 2008,7(5):323-324.
- [18] 刘锦铭. 限制性通气功能障碍肺功能指标特点[J]. 中国实用内科杂志, 2012,32(8):578-580.
- [19] 黄艺林,郭岩斐. 一秒率正常值下限与固定比值对诊断慢性阻塞性肺疾病的影响[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2020, 43(7):581-584.
- [20] KARSTEN J, LUEPSCHEN H, GROSSHERR M, et al. Effect of PEEP on regional ventilation during laparoscopic surgery monitored by electrical impedance tomography[J]. Acta Anaesthesiologica Scandinavica, 2011,55(7):878-886.
- [21] ZHAO Z Q, STEINMANN D, FRERICHS I, et al. PEEP titration guided by ventilation homogeneity: a feasibility study using electrical impedance tomography[J]. Critical Care (London, England), 2010,14(1):R8.
- [22] 罗红,张晗. 俯卧位通气的细节与实施[J]. 中华结核和呼吸杂志, 2016,39(9):666-668.

收稿日期:2022-04-25

(上接第251页)

- [8] 孙自飞,钱堃,马旭东,等. 多传感器的移动机器人可定位性估计与自定位[J]. 智能系统学报, 2017,12(4):443-449.
- [9] 李沛,李新德. 基于多传感器信息融合的AGV避障算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015,43(S1):224-227.
- [10] LIN L C, SHIH H Y. Modeling and adaptive control of an omnimechanum-wheeled robot[J]. Intelligent Control and Automation, 2013,4(2):166-179.
- [11] ABBAS S M, ASLAM S, BERNS K, et al. Analysis and

- improvements in AprilTag based state estimation[J]. Sensors, 2019,19(24):5480-5512.
- [12] 楼航飞,武星,陈华,等. 基于领航-跟随策略的跟随AGV协同控制方法[J]. 机械制造与自动化, 2020,49(6):95-97, 105.
- [13] CHEN B D, LIU X, ZHAO H Q, et al. Maximum correntropy Kalman filter[J]. Automatica, 2017,76:70-77.

收稿日期:2022-03-25