

基于 TK-Noser 正则化算法的警察 极限训练肌肉疲劳电阻抗检测方法*

刘涛^{1,2)} 史曙生^{1)**} 刘俊峰²⁾ 刘凯³⁾ 姚佳烽³⁾

(¹⁾ 南京师范大学体育科学学院, 南京 210023; (²⁾ 江苏警官学院战术指挥系, 南京 210031; (³⁾ 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

摘要 目的 本文提出一种面向警察极限训练疲劳检测的电阻抗成像方法, 以预防警察极限体能训练中过度劳损造成的肌肉损伤问题。方法 首先, 依据人体无氧运动机理确定了肌肉疲劳的标志性指标——乳酸, 证明了针对肌肉乳酸的测量能够有效反应局部部位的疲劳情况。其次, 建立了人体小腿的数值仿真模型, 剖分了小腿内部各组织成分结构, 确定了乳酸扩散变化的阶段。然后, 比较了 3 种不同正则化算法下, 电阻抗成像 (EIT) 对乳酸扩散过程的重建效果, 选取了后续实验所使用的正则化方法。最后, 进行了模拟乳酸扩散的水槽实验, 验证了 TK-Noser 正则化算法对于复杂成像场域内部目标的成像能力。结果 仿真结果表明, 对于肌肉内部乳酸目标成像, TK-Noser 正则化与 TV 正则化算法取得较好的成像效果并有效抑制了伪影, 平均 ICC/RMSE 分别达到了 0.754/0.303、0.772/0.320, 平均 SSIM/PSNR 为 0.677/61 dB、0.488/60 dB。在乳酸扩散水槽实验结果中, 基于 TK-Noser 正则化算法的 EIT 重建结果平均 ICC/SSIM 分别达到 0.701/0.572。此外, 相较于 TV 正则化算法, TK-Noser 正则化重建结果极大程度上保留了成像目标的形状结构信息 (SSIM 数值比 TV 正则化结果高出 21.2%), 保证了实验结果的稳定性, 突破了电阻抗成像技术对于复杂场域内部乳酸扩散监测的能力。结论 该方法具有实时便捷非侵入的优点, 有望应用于警察肌肉乳酸的动态监测中。

关键词 电阻抗成像, 疲劳机理, 正则化算法, 乳酸扩散监测

中图分类号 TH772

DOI: 10.16476/j.pibb.2025.0012

CSTR: 12369.14.pibb.20250012

随着城市化进程的推进及社会矛盾纠纷的增长, 现代化社会治理对警察执法能力和效率都提出了新的要求。警察的日常专业训练是有效提升综合执法能力, 应对紧急复杂情况的重要途径。警察遇有极端暴力阻碍执法行为时, 会随时进入急性应激状态^[1]。急性应激状态下警察执法行动对骨骼肌爆发力、协调性和灵活性较其他活动有更高的要求。这使得参与巡逻盘查、搜捕围捕和竞赛比武的警察必须承受极限强度训练。骨骼肌是人体运动系统必不可少的动力部分, 在神经系统的支配下, 肌肉收缩牵引骨骼肌产生运动。过度的训练时间与训练强度会导致人体肌肉组织的快速疲劳, 严重情况下甚至会引起肌肉损伤, 威胁参训者的长期健康。因此, 日常训练中如何能够稳步扩大训练效果, 而不过度透支肌肉功能成为了目前研究的重点。随着信息技术和人工智能的快速发展, 运用智能检测等技术助力评估警察极限体能训练水平和效果成为必

要和可能。

一些研究表明, 血乳酸浓度的变化与肌肉疲劳状态的发展密切相关, 可以反应受试者身体劳累、肌肉功能的状况^[2]。通常具有较高乳酸浓度的受试者在后续训练过程发生肌肉拉伤的概率会大幅增加^[3]。因此针对人体乳酸的监测具有极大的实际应用价值, 能够充分辅助教练对于参训者肌肉疲劳状态的快速诊断。目前人体血液乳酸浓度作为评价肌肉疲劳的重要标准之一, 已经在运动员肌肉疲劳检测领域得到了广泛的应用。

目前通常使用动脉血气分析 (arterial blood

* 国家自然科学基金 (62471225), 江苏省教育科学规划重大课题 (A/2024/c12), 江苏省教育规划重点课题 (B-b/2024/01/186) 和江苏警官学院教育改革重点课题 (2024A01) 资助项目。

** 通讯联系人。

Tel: 025-52881558, E-mail: sssmxy@126.com

收稿日期: 2025-01-10, 接受日期: 2025-04-10

gases analysis, ABGA)^[4]的方法获取血乳酸浓度,但动脉血液采样需要专业医师进行,为有创检测,且只能每隔数小时采集1次,无法满足训练过程实时监测的要求。为实现实时无创测量, Seki等^[5]提出了一种汗液中乳酸的检测装置,并成功测得了乳酸阈值(lactate threshold, LT1)。但是汗液乳酸浓度对应的肌肉疲劳分级并不清晰,且其可靠性仍有待评估。Arwani等^[6]进一步设计了一种固态生物标志物原位检测的可拉伸离子电子双层水凝胶电子器件,能够针对固态汗液进行测量且具有较高测量稳定性,却无法可视化乳酸位置与体积。为探究细胞内部乳酸分布, Li等^[7]制作了一款高灵敏度的乳酸传感器,可以跟踪体外和体内乳酸代谢的瞬时变化,并可视化细胞内乳酸的富集区域,但无法反应整体部位的乳酸分布与浓度。

电阻抗成像(electrical impedance tomography, EIT)技术是通过“激励-采集”的模式注入激励电流并采集相应边界电压,通过计算EIT逆问题进而获得场域内部各处电导率分布情况^[8],具有无创、实时、可视化、可穿戴的特点,已经在生理测量^[9]与疾病评估^[10]方面获得了广泛应用,如肺功能检查^[11-12]、体液异常诊断^[13]和肿瘤组织检测^[14-15]。在生物组织异常检测及肿瘤边界识别应用中, Hu等^[16]采用生物电阻抗谱断层扫描(bioelectrical impedance spectroscopy tomography, BIST)方法,设计了一种阵列式的印章传感器,实现了对舌癌组织的成像定位与良恶分类,证明了生物阻抗方法在生物组织异常判别上的可行性。Deng等^[17]使用3D-BIST技术对乳腺肿瘤进行可视化,确定了乳腺肿瘤的位置、大小、良性和恶性。在人体体液动态监测方面,王等^[18]基于EIT技术分析了血流速度和血乳酸浓度的电学特性响应,并成功可视化经皮电刺激神经疗法(transcutaneous electrical stimulation neurotherapy, TENS)后乳酸的分布结果。Ogawa等^[19]使用频差EIT方法测量了皮下脂肪组织细胞外液中电导率 σ 的变化,并证明了 σ 的频率依赖性与细胞外液(extracellular fluid, ECF)中钠离子浓度的变化有关。

本研究通过将EIT技术引入高强度训练下肌肉乳酸扩散实时检测中,成功实现了对于不同乳酸扩散阶段的肌肉模型电阻抗测量,并利用图像相关性系数(intraclass correlation coefficient, ICC)、均方根误差(root mean squared error, RMSE)、结构相似性指数度量(structural similarity index

measure, SSIM)以及峰值信噪比(peak signal-to-noise ratio, PSNR)评估了基于TK-Noser正则化算法的EIT技术对于复杂大场域内部乳酸目标的成像能力。

1 肌肉疲劳后人体内部乳酸的循环机理分析

由于乳酸穿梭循环(Cori循环)的存在,肌肉内部产生的乳酸在被消耗一部分后,经细胞膜弥散进入静脉血液中参与人体全身体液循环,经心脏急速收缩运动消耗部分后,剩余的乳酸离子被转运入动脉血液进入肝脏及肾脏进行集中代谢,残余部分再度回流至肌肉组织中。因此,针对特殊训练科目,如长跑、搏斗等项目,乳酸的全身体液循环存在明显滞后性,血液乳酸浓度一般低于组织内部乳酸浓度,因此局部组织乳酸含量相比于血乳酸更能反映氧气灌注与肌肉疲劳情况^[20]。

为验证肌乳酸作为肌肉疲劳指标的可行性,本文首先阐述了人体乳酸的产生与循环过程^[21]。人体乳酸主要产生于肌肉、红细胞及脑组织内部,在高强度运动背景下,乳酸主要通过无氧呼吸在肌肉组织中产生。肌肉的收缩或舒张都需消耗能量,当细胞供氧不足时,发生糖酵解就产生了乳酸。肌纤维中速肌拥有更高的糖原产量,因此糖的供应量大于消耗,部分糖原发生糖酵解产生乳酸;而慢肌中线粒体较多,有氧呼吸强烈,糖的供给无法满足需求,从而速肌多余的乳酸就会流向慢肌中消耗;剩下的乳酸溶液就流入血液中参与后续人体体液循环。因此针对肌肉乳酸的动态监测,不仅可以反映整体乳酸循环状况,还能够表示局部部位的疲劳状态。

2 EIT肌肉疲劳仿真分析

2.1 小腿肌肉模型构建

本文以小腿肌肉检测作为研究目标,参照文献中小腿生理结构^[9],建立了人体小腿模型(图1a)。由于人体小腿内部以腓肠肌、腓骨长肌和胫骨前肌等肌肉为主的肌群更易发生疲劳^[22],乳酸堆积情况也更严重,因此本文将图1a中的腓肠肌等划分为M1肌肉隔室,胫骨前肌、指长伸肌和腓骨长肌等划分为M2肌肉隔室,以综合衡量其在肌肉疲劳过程中内部的乳酸扩散变化。图1b中T1~T4分别为假定的肌肉疲劳过程中M1与M2肌肉隔室内乳酸的变化情况^[23-24],分为:正常状态(T1)、轻度疲劳状态(T2)、中度疲劳状态(T3)

以及中度疲劳状态 (T4)。本文 EIT 测量电极总数为 16, 呈环状均匀排列布局, 所采用的测量模式为“相邻激励-相邻测量”。

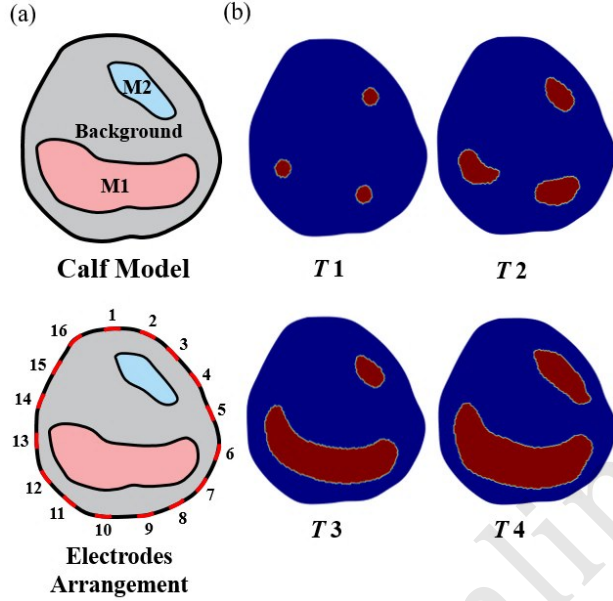


Fig. 1 Three-dimensional Calf Muscle Modeling

(a) Calf muscle model & EIT electrode arrangement; (b) Four stages of lactate diffusion.

2.2 EIT仿真理论介绍

为研究人体内部电导率分布情况, 本文基于麦克斯韦方程组, 使用 Comsol 数值仿真软件模拟乳酸扩散过程的可视化, 为减少仿真难度, 忽略外部环境、下层组织对于测量电极与皮肤接触界面的影响, 应满足公式如下^[25]:

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$J = (\sigma + j\omega\epsilon)E = \sigma E + j\omega D \quad (3)$$

$$\Delta V = S \cdot \Delta\sigma \quad (4)$$

式中 ∇ 为哈密顿算子, J (A/m²) 为传导电流密度, E (V/m) 为场强, ϵ (F/m) 为介电常数, $\Delta\sigma$ (S/m) 为电导率分布变化, ΔV (V) 是边界电压变化, S 为测量场域的灵敏度矩阵, D (C/m²) 为电位移, ρ (C/m³) 为电荷密度, H (A/m) 为磁场强度, Z 为阻抗值, $\tilde{V}(\omega)$ 为傅里叶变换后的响应电压, $\tilde{q}(\omega)$ 为经傅里叶变化后的电荷值, $j = \sqrt{-1}$ 。

由于人体小腿外轮廓是一个不对称的不规则形

状, 在经过多路复用循环采样后, 距离中心区域相同距离的位置, 其平均电流密度可能并不相同, 而造成成像能力的强弱, 即电流密度更高, 电场线分布更密集的区域成像能力越强; 电流密度更低, 电场线分布更稀疏的区域成像能力越弱。因此, 为确定成像算法对于目标的成像能力, 本文分析了 Tikhonov、TK-Noser 以及 Total Variation (TV) 三种正则化算法对于肌肉复杂场域及动态变化目标的成像效果。

2.3 Tikhonov、TK-Noser 及 Total Variation 正则化算法对比

由于 EIT 逆问题具有高度病态性, 通常需要加入正则化项以约束其成像伪影。目前最常使用的是 Tikhonov、TK-Noser 以及 TV 正则化方法。

Tikhonov 正则化通过在目标函数中加入罚函数对高阶特征施加约束的办法来达到使解适定的目标, 并在很大意义上提高了重构图像边缘与背景的分辨率:

$$\Delta\sigma = (S^T \cdot S + k_n \cdot D)^{-1} \cdot S^T \cdot \Delta V \quad (5)$$

TK-Noser 正则化在融合了 Tikhonov 正则化的优势基础上, 加入了一步牛顿法 (Noser) 的伪影约束效果:

$$\Delta\sigma = (S^T \cdot S + k_t \cdot I + k_n \cdot D)^{-1} \cdot S^T \cdot \Delta V \quad (6)$$

其中, I 为单位矩阵, D 为对角矩阵, k_t 、 k_n 为正则化系数。

TV 正则化在保留图像的边缘信息的同时, 能够有效提高成像质量, 抑制成像伪影的干扰:

$$L(\Delta\sigma) = \frac{1}{2} \|S \cdot \Delta\sigma - \Delta V\|^2 + \lambda \int_{\Omega} |\nabla(\Delta\sigma)| dx \quad (7)$$

其中 $L(\Delta\sigma)$ 为 $\Delta\sigma$ 的损失函数, $\int_{\Omega} |\nabla(\Delta\sigma)| dx$ 指在定义域 Ω 内对电导率变化 $\Delta\sigma$ 的梯度绝对值进行积分, 即 $\Delta\sigma$ 的全变分。

此外, 小腿肌肉模型中不同组织的仿真介电参数可由公式 (8)、(9)、(10) 获得^[19]:

$$D = \epsilon_0 E + P \quad (8)$$

$$P = D - \epsilon_0 E = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) E \quad (9)$$

$$\epsilon_r = \frac{D}{\epsilon_0 E} \quad (10)$$

其中 P (C/m²) 为极化强度, 其在生物组织表面的单位法向量上的分量与极化面电荷密度 σ_p 相等, ϵ_0 为真空介电常数, 值为 8.853×10^{-12} F/m, ϵ_r 为相对介电常数, 具体仿真参数如表 1 所示。

Table 1 EIT simulation parameter settings

Type	Conductivity σ [S/m]	Relative permittivity ϵ_r [-]
Background	0.024	1 085.3
Muscle	0.341	25 909
Lactate	0.700	5 248.2

3 仿真结果分析

图2给出了在不同乳酸扩散阶段下 Tikhonov、

TK-Noser 以及 TV 三种正则化算法的成像结果。其中第一列为各阶段乳酸扩散的真实图像，第二、三、四列分别为 Tikhonov、TK-Noser、TV 正则化方法下对应的4个阶段重建结果。为分析不同正则化方法间图像重建效果优劣，使用 ICC 与 RMSE 两个指标评价了不同阶段的图像重建结果：

$$ICC = \frac{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})(\sigma_i^* - \bar{\sigma}^*)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\sigma_i - \bar{\sigma})^2 \sum_{i=1}^n (\sigma_i^* - \bar{\sigma}^*)^2}} \quad (11)$$

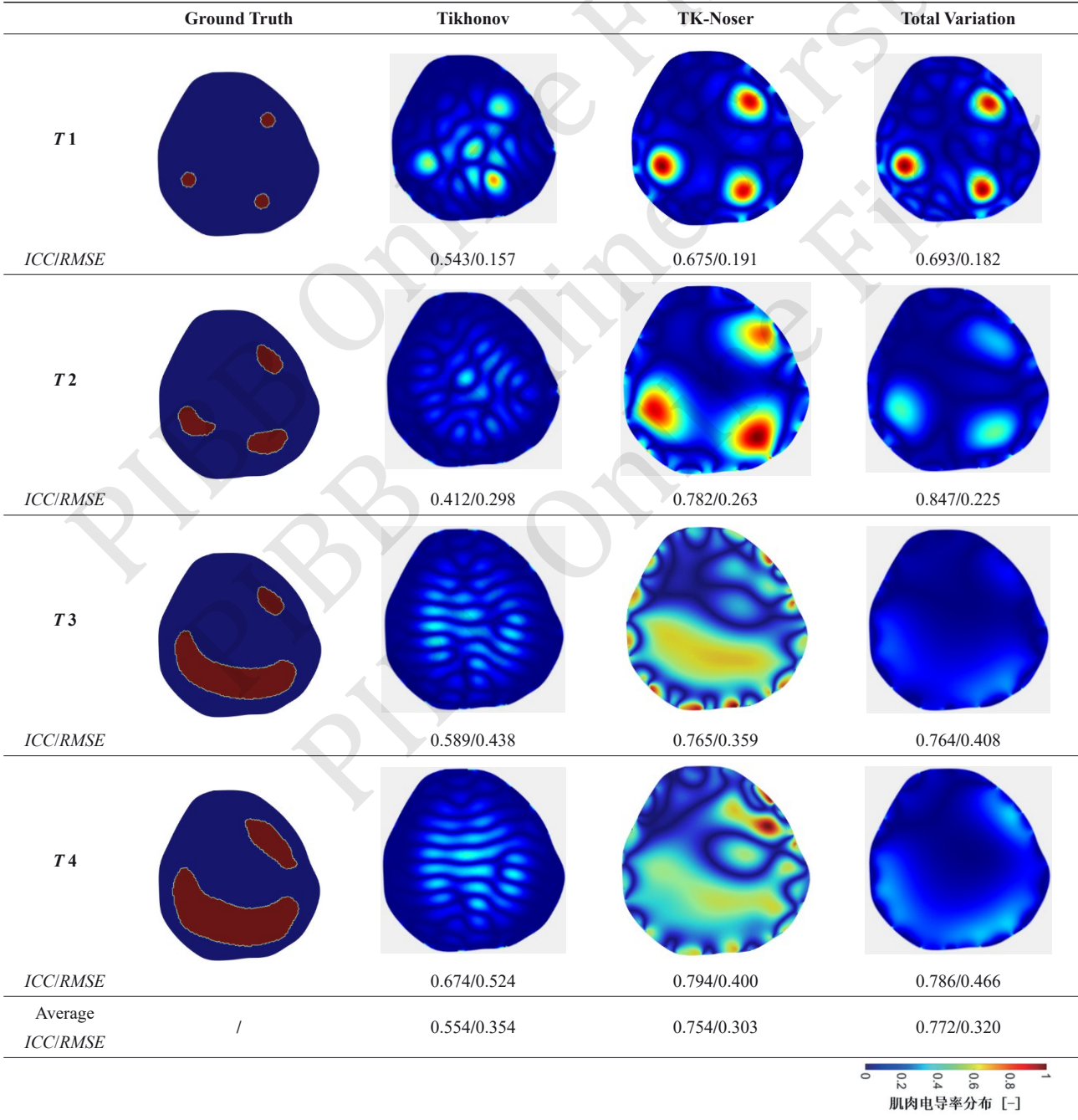


Fig. 2 Imaging Results of Three Regularization Algorithms under Different Lactate Diffusion Stages

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\sigma_i - \sigma_i^*)^2} \quad (12)$$

其中 σ_i 是重建图像内第 i 个点的电导率变化, $\bar{\sigma}$ 是重建图像的平均电导率, σ_i^* 为图像内第 i 个点的电导率变化真实值, $\bar{\sigma}^*$ 是真实电导率分布图像的平均电导率, n 为图像内节点数目。

随着乳酸的扩散加剧 ($T1 \sim T4$), 重建目标的体积急剧变大, 重建图像的成像位置与形状都有所偏移和扭曲。但综合来看, TK-Noser 及 TV 正则化算法, 对于乳酸位置定位较为准确, 形状重建近似真实结果, 并且有效降低了 EIT 逆问题图像伪影的影响, 平均 ICC 相较于 Tikhonov 正则化算法, 分别提升了 20 %、21.8 %, 平均 RMSE 则分别提升了 14.4 %、9.6 %。

ICC 及 RMSE 数值与重建图像节点的电导率数值密切相关, 对于重建图像的抗噪能力及形状结构一致性的衡量不足。因此, 本文引入了 SSIM 及 PSNR (dB) 两个指标:

$$SSIM = \frac{(2\mu_t\mu_r + L_1)(2\delta_t\delta_r + L_2)}{(\mu_t^2 + \mu_r^2 + L_1)(\delta_t^2 + \delta_r^2 + L_2)} \quad (13)$$

$$PSNR = 10 \log_{10} \left(\frac{(2^k - 1)^2}{MSE} \right) \quad (14)$$

其中 t 、 r 分别代表真实结果与重建结果, μ_t 、 δ_t 分别代表真实结果的平均值和标准差; μ_r 、 δ_r 分别代表重建结果的平均值和标准差; δ_{tr} 代表真实结果与重建结果的协方差; L_1 、 L_2 是亮度和对比度的正则化常数, 均取为 0.005; k 为每个像素的比特数, 此处为 8。不同乳酸扩散阶段下 Tikhonov、

TK-Noser 以及 TV 成像结果对应的 SSIM 及 PSNR 如图 3 所示, TK-Noser 与 TV 正则化方法对应的

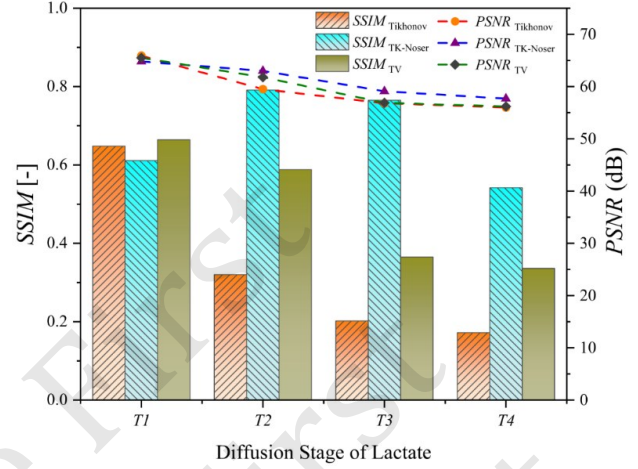


Fig. 3 SSIM and PSNR values for lactate diffusion simulation results

SSIM 比 TK 正则化的分别高了 33.6 %、14.7 %, 三者 PSNR 基本相同, 为 60 dB。

分析结果表明, Tikhonov 正则化算法对于成像区域出现过度平滑现象, 颜色梯度过于明显。而 TK-Noser 正则化与 TV 正则化算法具备较好的成像效果, 再充分抑制成像伪影的前提下, 成像目标定位精确, 成像形状大致贴合真实结果。因此本文将进一步在水槽实验中对两种正则化算法对于腿部复杂大轮廓的实际成像能力。

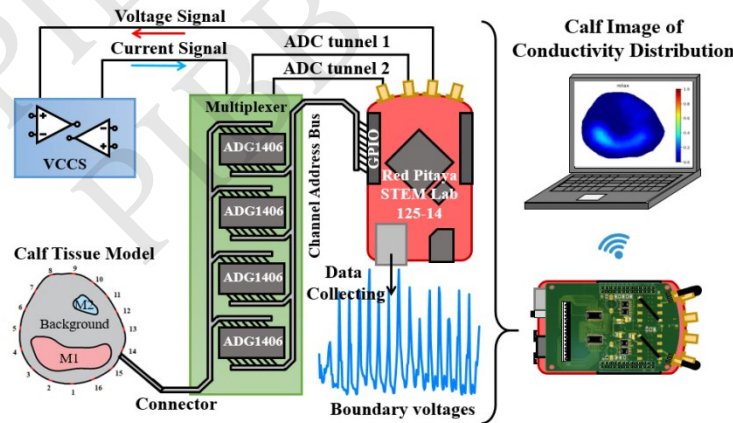


Fig.4 Establishment of EIT experimental platform

4 实验结果分析

4.1 EIT实验平台搭建

本文搭建了乳酸动态变化电阻抗成像平台 (图 4), 包含水槽模型、环形阵列传感器、硬件采集与数据处理模块以及上位机图像重建模块。首先建立人体小腿肌肉三维水槽模型 (图 1a), 模型内部分为参考背景以及目标肌肉隔室群 M1 和 M2。同时为简化肌肉乳酸测量情况, 本文仅考虑乳酸在 M1 及 M2 肌肉隔室内的动态变化 ($T1\sim T4$), 乳酸溶液的电导率被设置为人体正常状况下的血液电导率 0.700 S/m 。由于差分 EIT 的特性, 前后未发生变化的区域将被抵消, 因此背景的电导率可设置为肌肉组织的电导率 0.341 S/m 。背景区域利用调配电导率后的琼脂填充, 乳酸区域则倒入经调配后的生理

盐水溶液。环形阵列电极由一圈 16 个均匀放置于水槽中央的电极组成, 负责施加激励电流并采回边界电压。硬件采集与数据处理模块包含多路复用与火龙果硬件两部分, 多路复用用于环形电极的交替激励-采集过程, 实验所采用的激励采集模式为“相邻激励-相邻采集”。火龙果则负责生成激励电流并对返回的电压数据进行初步预处理。上位机图像重建模块负责接收硬件模块上传的电压数据, 并通过 EIT 逆问题算法重建人体肌肉内部乳酸的电导率分布图像。

4.2 EIT实验结果分析

如图 5 所示, EIT 乳酸扩散成像实验结果与目标物的复杂程度及位置大小密切相关, 整体上图像重建精度随乳酸的扩散增大而上升, 以圆弧过渡的重建结果相较于尖锐过渡的形状具有更高的成像精度 ($T3/ICC: 0.813 > T4/ICC: 0.787$)。

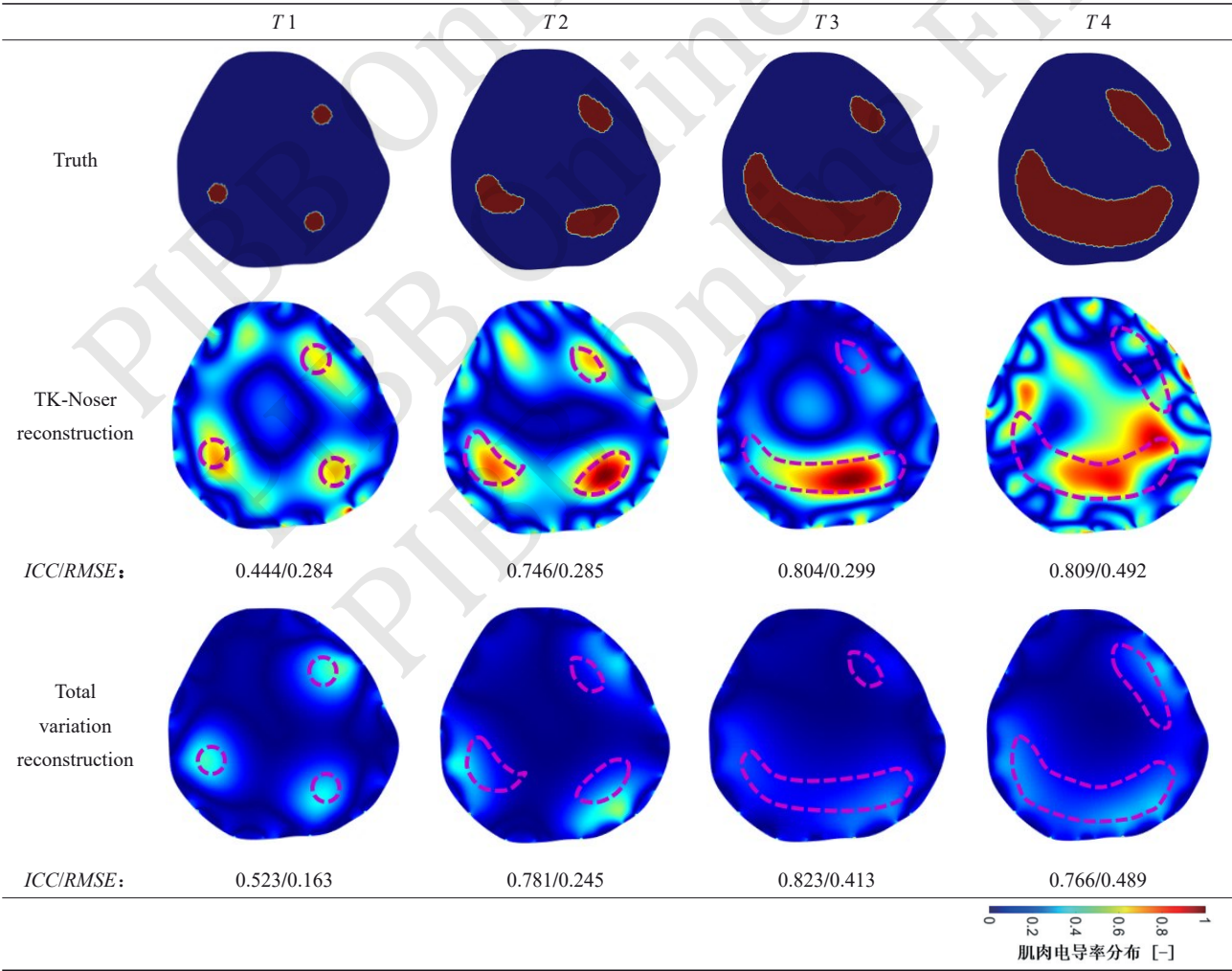


Fig. 5 Experimental results of different lactate diffusion stages

同时, 图 6 展示了实验中不同算法下的 $SSIM$ 及 $PSNR$ 结果。由于实验的测量噪声及 EIT 成像伪影的影响, TK-Noser 的重建图像形状发生了一些扭曲, 平均 $ICC/ RMSE$ 的数值为 0.701/0.340, 但保持了较高的定位精度和形状结构一致性, 平均 $SSIM$ 达到 0.572。TV 正则化算法由于自身强去噪能力, 能够保持较少的成像伪影, 成像结果平均 $ICC/ RMSE$ 达到 0.723/0.327, 但是感兴趣区域的成像目标相较于 TK-Noser 结果也同样受到抑制, 因此整体成像结果较为暗淡, 平均结构相似度 $SSIM$ 仅为 0.360, 较之 TK-Noser 结果降低了 21.2 %。这是由于 TV 正则化算法在复杂多目标不规则成像过程中过于强调边缘特征从而导致成像区域过度平滑, 而 TK-Noser 算法融合了 Noser 正则化对于过度平滑的抑制效果, 能够在低噪声情况下准确重建目标形状与位置。

综上所述, TK-Noser 正则化算法在保持较好的 $ICC/ RMSE$ 指标前提下, 对于人体复杂乳酸成像目标拥有较好的成像能力, 表明基于 TK-Noser 正则化方法的 EIT 技术可以对不同复杂情况的乳酸扩散展开有效监测。

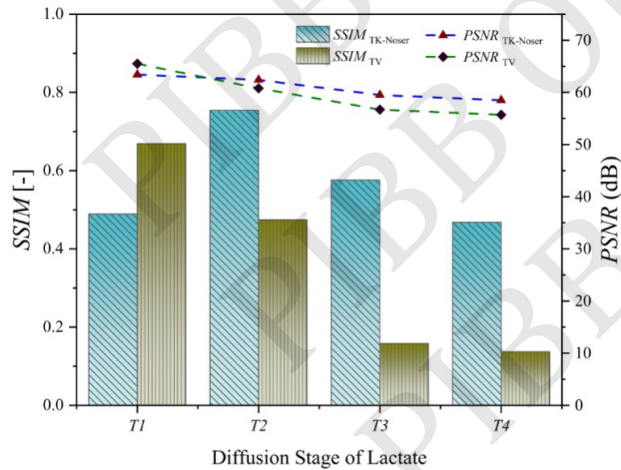


Fig. 6 $SSIM$ and $PSNR$ values for lactate diffusion experiments

5 总结

本文提出了一种面向警察极限训练过程中肌肉内部乳酸变化的可视化方法, 以有效评估受训者肌肉疲劳程度。首先, 分析了人体肌肉疲劳状态下乳酸的循环变化情况, 证明了乳酸作为特异性标志物

能够反映受试者肌肉状态变化。其次, 使用数值仿真方法, 研究了 Tikhonov、TK-Noser 以及 TV 三种正则化方法对于复杂大场域内部动态变化目标的成像精度, 其中使用 TK-Noser 与 TV 正则化算法的重建结果平均 ICC 分别取得了 0.754/0.772, $SSIM$ 为 0.677/0.488。最后建立了乳酸扩散的 EIT 检测实验平台。实验结果表明, 基于 TK-Noser 正则化算法的 EIT 技术有望用于人体肌肉内部乳酸的实时可视化监测中, 其实际成像结果的平均 ICC 为 0.701, 对于成像目标的 $SSIM$ 可达 0.572。

参考文献

- [1] 田野. 运动性骨骼肌疲劳机理研究. 北京: 北京体育大学出版社, 1998: 338-339
- [2] Ishii H, Nishida Y. Effect of lactate accumulation during exercise-induced muscle fatigue on the sensorimotor cortex. *J Phys Ther Sci*, 2013, **25**(12): 1637-1642
- [3] Manojlović V, Erčulj F. Using blood lactate concentration to predict muscle damage and jump performance response to maximal stretch-shortening cycle exercise. *J Sports Med Phys Fitness*, 2019, **59**(4): 581-586
- [4] Boulain T, Garot D, Vignon P, *et al.* Predicting arterial blood gas and lactate from central venous blood analysis in critically ill patients: a multicentre, prospective, diagnostic accuracy study. *Br J Anaesth*, 2016, **117**(3): 341-349
- [5] Seki Y, Nakashima D, Shiraishi Y, *et al.* A novel device for detecting anaerobic threshold using sweat lactate during exercise. *Sci Rep*, 2021, **11**(1): 4929
- [6] Arwani R T, Tan S C L, Sundarapandi A, *et al.* Stretchable ionic-electronic bilayer hydrogel electronics enable *in situ* detection of solid-state epidermal biomarkers. *Nat Mater*, 2024, **23**(8): 1115-1122
- [7] Li X, Zhang Y, Xu L, *et al.* Ultrasensitive sensors reveal the spatiotemporal landscape of lactate metabolism in physiology and disease. *Cell Metab*, 2023, **35**(1): 200-211.e9
- [8] Yang L, Wu H, Liu K, *et al.* A multicircle planar electrical impedance tomography sensor for 3-D miniature imaging. *IEEE Sens J*, 2023, **23**(9): 9697-9706
- [9] 孙博, Panji Nursetia Darma, 张全成, 等. 神经肌肉电刺激下小腿肌肉的电学特性研究. *生物化学与生物物理进展*, 2023, **50**(6): 1443-1453
- [10] Sun B, Darma P, Zhang Q C, *et al.* *Prog Biochem Biophys*, 2023, **50**(6): 1443-1453
- [11] Wang Y, Feng H, Sun B, *et al.* Plantar planar dual-array electrical impedance tomography (PPDA-EIT) method for early diabetic foot ulcers' detection. *IEEE Sens J*, 2024, **24**(23): 39759-39770
- [12] Wu Y, Chen B, Liu K, *et al.* Bayesian image reconstruction using weighted Laplace prior for lung respiratory monitoring with electrical impedance tomography. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2023, **72**: 1-11

- [12] Wu Y, Zhou T, Chen B, *et al.* Bayesian shape reconstruction using B-spline level set in electrical impedance tomography. *IEEE Sens J*, 2022, **22**(19): 19010-19019
- [13] 张全成, 王岸新, 孙博, 等. 胃容积及胃食道液体状态变化的电学特性研究. *生物化学与生物物理进展*, 2023, **50**(7): 1716-1727
Zhang Q C, Wang A X, Sun B, *et al.* *Prog Biochem Biophys*, 2023, **50**(7): 1716-1727
- [14] Zhu C, Xu J, Sun J, *et al.* Circulating tumor cells and breast cancer metastasis: from enumeration to somatic mutational profile. *J Clin Med*, 2022, **11**(20): 6067
- [15] Zou B, Wang T, Hu S, *et al.* Fast 3-D electrical impedance tomography imaging of tumor boundary based on plane extension layer and deep learning. *IEEE Sens J*, 2024, **24**(24): 41856-41863
- [16] Hu S, Gao G, Hong Z, *et al.* An electrode array sensor for tongue cancer detection with bioelectrical impedance spectroscopic tomography. *IEEE Sens J*, 2022, **22**(15): 15146-15153
- [17] Deng Q, He J, Zhu C, *et al.* Three-dimensional bioelectrical impedance spectroscopic tomography for visualization of breast tumor. *IEEE Sens J*, 2023, **23**(17): 19598-19605
- [18] 王芸倩, 孙博, 赵桐, 等. 基于电阻抗成像分析血流速度和血乳酸浓度电学特性响应. *分析化学*, 2024, **52**(4): 531-540
Wang Y Q, Sun B, Zhao T, *et al.* *Chin J Anal Chem*, 2024, **52**(4): 531-540
- [19] Ogawa R, Akita S, Takei M. Local-spatiotemporal change monitoring in extracellular fluid by time-variation-constraint sparse Bayesian learning implemented into frequency-difference electrical impedance tomography (*tvSBL-fdEIT*). *IEEE Trans Instrum Meas*, 2023, **72**: 1-14
- [20] Yang M. Muscle lactate concentration during experimental hemorrhagic shock. *J Anesth*, 1998, **12**(2): 76-80
- [21] Li X, Yang Y, Zhang B, *et al.* Lactate metabolism in human health and disease. 2059-3635 (Electronic)
- [22] Ni X, Ieong L, Xiang M, *et al.* Analysis of wavelet coherence in calf agonist-antagonist muscles during dynamic fatigue. *Life: Basel*, 2024, **14**(9): 1137
- [23] Wan J J, Qin Z, Wang P Y, *et al.* Muscle fatigue: general understanding and treatment. *Exp Mol Med*, 2017, **49**(10): e384
- [24] Kapan A, Ristic M, Leser A, *et al.* Assessment of muscle fatigability using isometric repetitive handgrip strength in frail older adults. A cross-sectional study. *J Transl Med*, 2025, **23**(1): 215
- [25] 彭俊文, 胡松佩, 洪志扬, 等. 皮肤肿瘤早期筛查的快速无创电阻抗检测方法. *生物化学与生物物理进展*, 2024, **51**(5): 1161-1173
Peng J W, Hu S P, Hong Z Y, *et al.* *Prog Biochem Biophys*, 2024, **51**(5): 1161-1173

A Muscle Fatigue Assessment Method of Electrical Impedance Tomography for Police Extreme Training Based on TK-Noser Regularization Algorithm^{*}

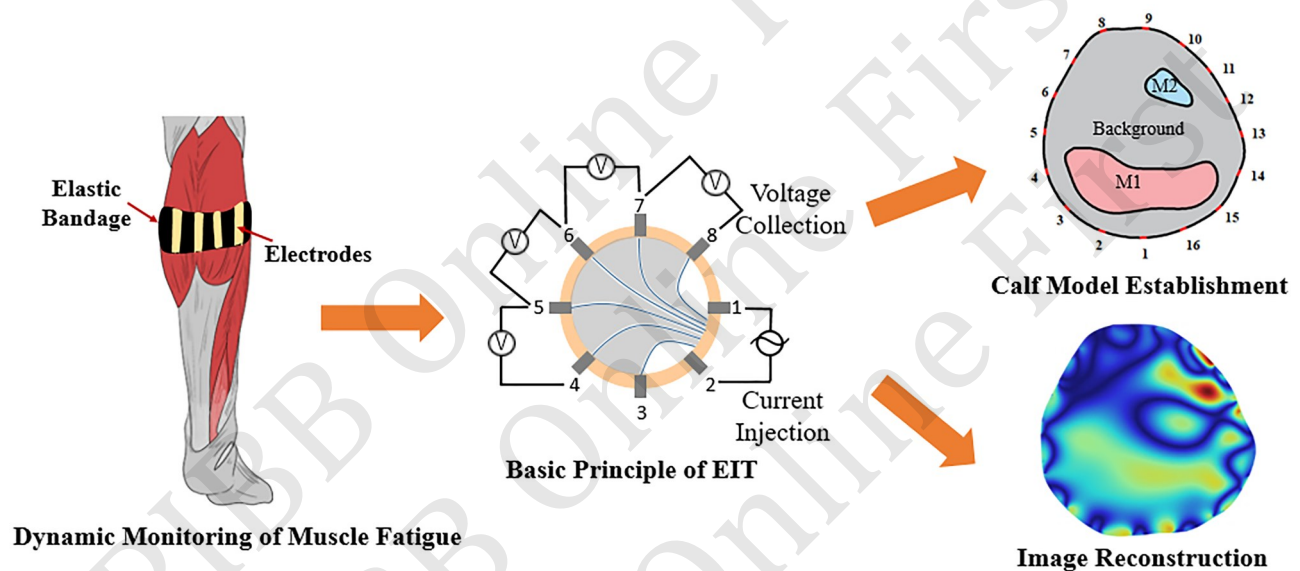
LIU Tao^{1,2)}, SHI Shu-Sheng^{1)**}, LIU Jun-Feng²⁾, LIU Kai³⁾, YAO Jia-Feng³⁾

⁽¹⁾College of Sports Science, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

⁽²⁾Tactical Command Department, Jiangsu Police Institute, Nanjing 210031, China;

⁽³⁾College of Electrical and Mechanical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Graphical abstract



Abstract Purpose This study proposes a fatigue detection method for police extreme training based on electrical impedance imaging technology to prevent muscle damage caused by overstrain during intense physical training. **Methods** First, based on the mechanism of human anaerobic exercise, lactic acid was identified as a key indicator of muscle fatigue, demonstrating that measuring muscle lactic acid effectively reflects localized fatigue. Second, a numerical simulation model of the human calf was established, and the internal tissue structure of the calf was analyzed to determine the stages of lactic acid diffusion and change. Then, the reconstruction performance of electrical impedance tomography (EIT) in visualizing lactic acid diffusion was compared under three different regularization algorithms, and the most suitable regularization method for subsequent experiments was selected. Finally, a controlled experiment simulating lactate diffusion was conducted to verify the imaging capability of the TK-Noser regularization algorithm in complex imaging fields. **Results** Simulation results indicate that both the TK-Noser and TV regularization algorithms achieve superior imaging performance, effectively suppressing artifacts in the visualization of lactic acid diffusion inside muscle tissue. The average *ICC*/*RMSE* values reached 0.754/0.303 and 0.772/0.320, respectively, while the average *SSIM*/*PSNR* values were 0.677/61 dB and 0.488/60 dB, respectively. In the lactate diffusion experiment, the average *ICC*/*SSIM* of the EIT reconstruction results based on the TK-Noser regularization algorithm reached 0.701 and 0.572, respectively. Additionally, compared with the TV regularization algorithm, the TK-Noser algorithm better preserved the shape

and structural integrity of the imaging target, with an *SSIM* value 21.2% higher than that of the TV regularization results. This enhancement ensures the stability of the experimental results and significantly improves the capability of electrical impedance imaging technology in monitoring lactate diffusion within complex fields.

Conclusion The proposed method offers real-time convenience and non-invasiveness, making it a promising approach for dynamic monitoring of muscle lactate levels in police officers during extreme physical training. **Purpose** This study proposes a fatigue detection method for police extreme training based on electrical impedance imaging technology to prevent muscle damage caused by overstrain during intense physical training.

Key words electrical impedance tomography (EIT), fatigue mechanism, regularization algorithms, lactate diffusion monitoring

DOI: 10.16476/j.pibb.2025.0012

CSTR: 12369.14.pibb.20250012

* This work was supported by grants from The National Natural Science Foundation of China (62471225), Major Project of Education Science Planning in Jiangsu Province (A/2024/c12), Jiangsu Province Education Planning Key Subjects (B-b/2024/01/186) and Educational Reform Key Subjects of Jiangsu Police Institute (2024A01).

** Corresponding author.

Tel: 86-25-52881558, E-mail: sssmxy@126.com

Received: January 10, 2025 Accepted: April 10, 2025