

自主研发无线表面肌电系统对咀嚼肌 功能活动的评价研究

李文博¹ 朱玉佳² 秦庆钊² 单坤瑶¹ 高梓翔² 温奥楠² 王勇² 赵一姣¹

1. 北京大学医学部医学技术研究院, 北京 100191;

2. 北京大学口腔医学院·口腔医院, 数字化研究中心/口腔修复教研室 国家口腔医学中心

国家口腔疾病临床医学研究中心 口腔生物材料和数字诊疗装备国家工程研究中心

国家卫生健康委口腔数字医学重点实验室 口腔数字医学北京市重点实验室, 北京 100081

[摘要] **目的** 本研究旨在评价自主研发的国产化口腔无线表面肌电监测系统 (Oralmetry 表面肌电仪) 在颞肌和咬肌活动评估中的可重复性和一致性, 为其临床应用提供理论支持。**方法** 招募22名志愿者, 分别使用自主研发的Oralmetry表面肌电仪和2台商品化的表面肌电仪 (Zebris、Teethan 表面肌电仪) 重复多次采集志愿者紧咬牙状态下双侧颞肌前束和咬肌的表面肌电 (sEMG) 信号。对采集的sEMG进行滤波、筛选、标准化处理, 并计算7项用于评价咀嚼肌功能的sEMG指标。使用组内相关系数 (ICC) 评估3台表面肌电仪测量结果的可重复性, 并通过统计学分析对比3台表面肌电仪获得的7项sEMG指标的一致性。**结果** 针对22名受试者, 3台表面肌电仪重复测量输出数值的ICC均介于0.88~0.99之间。Zebris表面肌电仪获得的前后系数、百分比重叠系数 (咬肌、颞肌) 等3项sEMG指标与Oralmetry表面肌电仪和Teethan表面肌电仪2台设备的测量结果间差异存在统计学意义 ($P<0.05$)。Oralmetry表面肌电仪和Teethan表面肌电仪获得的7项sEMG指标差异均无统计学意义。**结论** Oralmetry表面肌电仪与2台商品化的表面肌电仪在获取用于评价咀嚼肌功能的各项sEMG指标的表现时, 各自均表现出较好的可重复性, 但其ICC在三者中表现最优。3台表面肌电仪测量的sEMG指标间也表现出较好的一致性, 尤其2台无线表面肌电仪 (Oralmetry和Teethan) 的测量指标结果表现出高度的一致性。上述结果为Oralmetry表面肌电仪的临床应用提供了理论依据。

[关键词] 表面肌电仪; 肌电信号; 咀嚼肌; 颞肌; 咬肌

[中图分类号] R78 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2024.2024407



本文链接 开放科学标识码

Evaluation of the function and activity of masticatory muscles using a self-developed wireless surface electromyography system

Li Wenbo¹, Zhu Yujia², Qin Qingzhao², Shan Shenyao¹, Gao Zixiang², Wen Aonan², Wang Yong², Zhao Yijiao¹

1. Institute of Medical Technology, Peking University Health Science Center, Beijing 100191, China; 2. Center of Digital Dentistry/Dept. of Prosthodontics, Peking University School and Hospital of Stomatology & National Center for Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering Research Center of Oral Biomaterials and Digital Medical Devices & NHC Key Laboratory of Digital Stomatology & Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081, China

Supported by: Beijing Natural Science Foundation-Haidian Original Innovation Joint Fund (L232100, L242132); National Natural Science Foundation of China (82271039, 82071171); Key R&D Program of the Ministry of Science and Technology (2022YFC2405401)

[收稿日期] 2024-11-07; **[修回日期]** 2025-04-29

[基金项目] 北京市自然科学基金-海淀原始创新联合基金 (L2321-00, L242132); 国家自然科学基金 (82271039, 82071171); 科技部重点研发计划课题 (2022YFC2405401)

[第一作者] 李文博, 硕士, E-mail: liwenb@pku.edu.cn

[通信作者] 王勇, 教授, 硕士, E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn; 赵一姣, 高级工程师, 硕士, E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn

Correspondence: Wang Yong, E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn; Zhao Yijiao, E-mail: kqcadc@bjmu.edu.cn

[Abstract] **Objective** This study aimed to evaluate

the repeatability and reliability of a self-developed domestic wireless surface electromyography (sEMG) system (Oralmetry) in assessing the activity of the temporalis and masseter muscles to provide theoretical support for its clinical application. **Methods** Twenty-two volunteers were recruited. Through multiple repeated measurements, the sEMG signals of bilateral anterior temporalis and masseter muscles during maximum voluntary clenching were collected using the self-developed sEMG device, Oralmetry, and two commercial sEMG devices (Zebris and Teethan), filtered, screened, and standardized. Seven sEMG indicators for assessing masticatory muscle function were calculated. The intraclass correlation coefficient (ICC) was used to evaluate the repeatability of the measurements from the three sEMG devices, and statistical analysis was conducted to compare the consistency of the seven sEMG indicators obtained from the devices. **Results** Among the 22 participants, the ICC values of the repeated measurements from the three sEMG devices ranged from 0.88 to 0.99. The measurements of three sEMG indicators (antero-posterior coefficient, percentage overlapping coefficient_MM, and percentage overlapping coefficient_TA) obtained by Zebris were significantly different from those obtained by Oralmetry and Teethan ($P<0.05$). No significant differences in the measurements of the seven sEMG indicators were found between Oralmetry and Teethan. **Conclusion** Oralmetry and the two commercial sEMG devices demonstrated good repeatability in capturing sEMG indicators for evaluating masticatory muscle function. In particular, Oralmetry showed the highest ICC values. All three devices also exhibited good consistency in measuring sEMG indicators, and a high agreement was observed between the two wireless sEMG devices (Oralmetry and Teethan). These findings provide theoretical support for the clinical application of Oralmetry.

[Key words] surface electromyography device; electromyographic signals; masticatory muscle; temporalis muscle; masseter muscle

表面肌电 (surface electromyography, sEMG) 是一种通过在皮肤表面放置电极来检测肌肉电活动的技术, 具有无创、精确、便捷等优势, 在口腔医学领域有着广泛的研究和应用^[1]。颞肌前束和咬肌是口腔医学领域 sEMG 最常检测的部位^[2], 已有诸多研究者就颞肌前束和咬肌活动的对称性及协同性进行研究。既往研究多关注咀嚼肌在最大用力收缩 (maximal exertional contraction, MVC) 即紧咬牙状态下的 sEMG 信号, 有研究^[3]就该状态下颞肌和咬肌 sEMG 信号提出了一些评估指标, 如百分比重叠系数 (percentage overlapping coefficient, POC)、扭矩系数 (torque coefficient, TC) 等, 这些指标已广泛应用于夜磨牙的诊断^[4]、正颌术后咀嚼肌功能评估^[5-6]、颞下颌关节紊乱病的辅助检查^[7]等研究中。由于 sEMG 信号可能会受到皮肤状况、电极尺寸、电极放置位置、检测流程、sEMG 设备性能和信号处理方式等多种因素的影响^[1], 因此咀嚼肌 sEMG 检测的可重复性及相关指标的可靠性备受关注^[8]。

口腔临床常用的表面肌电仪包括有线和无线两类, 无线表面肌电仪因其便捷、舒适、灵活等优势, 近年来受到学者关注。目前, 口腔用无线表面肌电仪以国外品牌设备为主, 口腔无线表面肌电仪的国产化研究尚处于起步阶段。本研究将课题组自主研发的国产化多通道无线表面肌电监

测系统 (Oralmetry 表面肌电仪) 与 2 台主流商品化的口腔表面肌电仪进行比较研究, 对处于 MVC 状态的受试者进行颞肌前束与咬肌的 sEMG 检测, 计算比较不对称指数 (asymmetry index, AI)、POC、TC 等 7 项用于评价咀嚼肌功能的 sEMG 指标, 评价自研表面肌电仪测量结果的可重复性和一致性, 为其进一步的口腔临床拓展应用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究对象

招募志愿者 22 名, 其中男性 12 名, 女性 10 名, 年龄 23~42 岁, 平均年龄 (30.32±5.96) 岁。纳入标准: 1) 年龄在 18 岁及以上; 2) 咬合关系稳定; 3) 能够理解实验目的及流程, 签署知情同意书。排除标准: 1) 存在任何影响紧咬牙的口腔疾病 (如重度牙周炎、急性牙髓炎、三叉神经痛等); 2) 存在早接触或骀干扰; 3) 存在咀嚼肌功能异常相关疾病 (如咀嚼肌功能紊乱型颞下颌关节紊乱病); 4) 有心脏起搏器或其他植入性医疗设备; 5) 对乙醇或凝胶电极材料存在过敏反应; 6) 有严重的神经系统疾病或运动障碍, 可能影响肌肉活动。本研究已获得伦理批准 (KJ2024-278-01)。

1.2 设备及软件

本研究使用的 3 种表面肌电仪包括: 自主研

发的国产化多通道无线表面肌电监测系统 (Oralmetry 表面肌电仪), 具有同步 8 通道, 采样频率 500 Hz; Zebris 电子面弓有线肌电监测模块 (Zebris 公司, 德国), 简称为 Zebris 表面肌电仪, 具有同步 4 通道, 采样频率 1 000 Hz; Teethan[®] 无线肌电检测分析仪 (Teethan 公司, 意大利), 简称为 Teethan 表面肌电仪, 具有同步 6 通道, 采样频率 1 000 Hz。一次性凝胶柔性双极电极 (自研), 电极直径 10 mm, 电极间距 35 mm, 为 Oralmetry 表面肌电仪专用的表面电极片; 一次性双扣黏性电极片 (Teethan 公司, 意大利), 电极直径 11 mm, 电极间距 44 mm, 用于 Zebris 表面肌电仪及 Teethan 表面肌电仪。MA-TLAB R2023b (MathWorks 公司, 美国) 用于 sEMG 信号的处理、指标计算。

1.3 咀嚼肌活动的 sEMG 信号采集

1.3.1 定位颞肌前束和咬肌

由同一名经过训练的操作者对受试者双侧颞肌前束及咬肌进行定位。受试者端坐, 保持上半身直立, 双臂自然下垂, 目视前方。颞肌前束 sEMG 检测时, 电极粘贴于眶耳平面上, 外耳孔上缘向前 5.5 cm, 垂直向上 6 cm; 咬肌 sEMG 检测时, 电极粘贴于眶耳平面上, 外耳孔上缘向前 3.5 cm, 垂直向下 4.5 cm (图 1)。操作者指导其反复紧咬牙齿后放松, 利用双手指腹在待测肌肉范围内寻找隆起最为明显的部位, 以确定电极片的最佳粘贴位置。

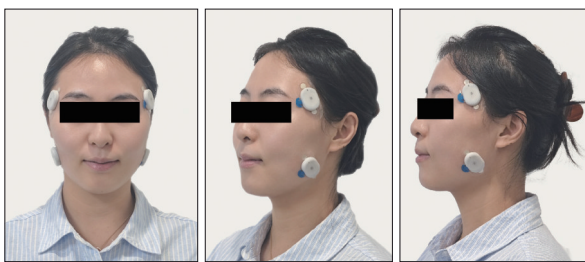


图 1 颞肌前束和咬肌电极片粘贴位置示意图 (图为自研设备 Oralmetry 表面肌电仪)

Fig 1 Illustration of electrode placement on the anterior temporalis and masseter muscles (depicting the self-developed Oralmetry wireless surface electromyography device)

为排除毛发、皮肤油脂等对电极片粘贴及 sEMG 信号检测的影响^[9], 应尽量避开毛发较多的区域, 必要时对待测区域毛发进行修剪。使用 75% 乙醇对受试者电极片粘贴位置的皮肤进行消毒, 以确保电极片的有效粘贴和信号的准确检测。

同一受试者在 3 台设备上的 sEMG 信号采集均在相同时间段内进行, 待测肌肉的定位及电极片

的粘贴由同一经过训练的操作者负责, 操作者按前述定位方法对受试者双侧颞肌前束、咬肌共 4 块肌肉分别进行电极片粘贴, 粘贴完成后, 嘱受试者做紧咬牙动作, 确保电极片的粘贴不妨碍患者正常的功能运动。

1.3.2 咀嚼肌活动 sEMG 信号的采集

对同一受试者, 在相同时段内分别使用 Oralmetry、Zebris、Teethan 表面肌电仪对其双侧颞肌前束和咬肌进行 sEMG 检测。受试者需接受培训, 以确保能够在相对稳定的牙尖交错位进行 MVC。操作者指导受试者完成以下肌肉活动并记录相应的 sEMG 信号: 1) MVC 状态持续不小于 5 s; 2) 在双侧下颌第一磨牙上放置 1 cm 厚的棉卷, 保持 MVC 状态不小于 5 s。为确保咀嚼肌在 2 次测量间得到充分休息, 2 次测量需至少间隔 30 s。使用每种表面肌电仪对每名受试者重复采集 5 次, 以排除单次实验误差。保存每名受试者使用 Oralmetry 与 Zebris 表面肌电仪记录的原始 sEMG 信号文件。Teethan 表面肌电仪的原始 sEMG 信号无法开放输出, 其配套的数据分析软件 Dental Contact Analyzer 可导出的分析报告中包含本研究纳入的 7 项指标, 每名受试者 5 次报告中共 35 个指标值。

1.4 咀嚼肌 sEMG 信号的处理与指标计算

1.4.1 sEMG 信号的预处理

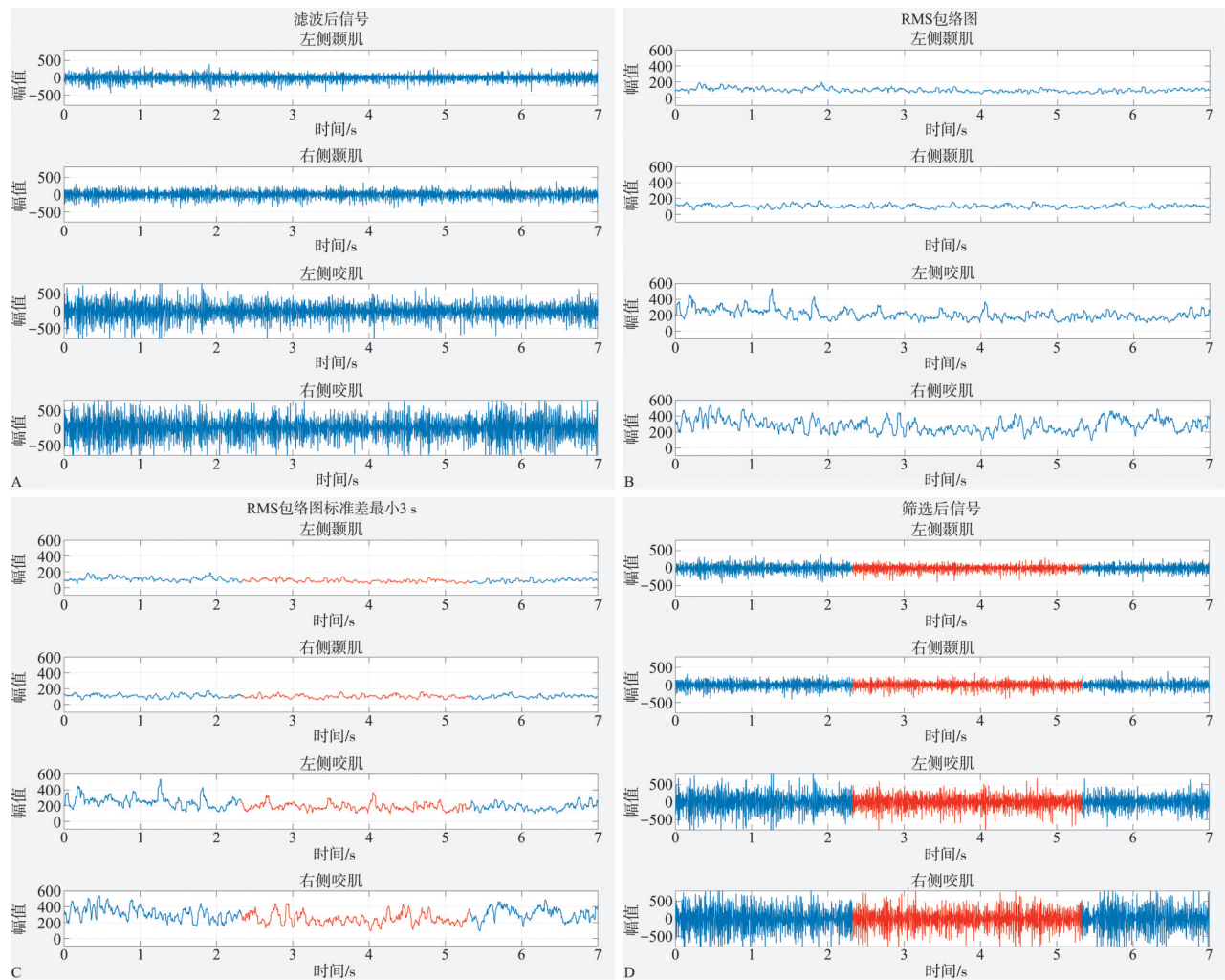
本研究使用 MATLAB 软件进行 sEMG 信号的滤波处理。设置 30~250 Hz 带通滤波器及 50 和 100 Hz 陷波滤波器用于信号的滤波处理。其中, 30 Hz 截止频率用于矫正直流偏移, 排除低频噪声干扰; 50 和 100 Hz 陷波滤波器用于排除工频干扰。为保证 3 台表面肌电仪采集数据间的可比性, 依据 3 台设备中采样频率较低的 Oralmetry 表面肌电仪的奈奎斯特频率设置了 250 Hz 截止频率。对 Oralmetry 及 Zebris 表面肌电仪采集到的原始 sEMG 信号进行滤波操作后, 得到预处理后的 sEMG 信号 (图 2A)。

1.4.2 sEMG 信号的筛选与标准化处理

采集志愿者 sEMG 信号每次长度不小于 5 s, 根据 Ferrario 等^[10]提出的信号处理方法, 数据分析时需要从原始数据中筛选出“最稳定”的 3 s 数据进行后续指标计算, 这与 Teethan 表面肌电仪内置信号处理流程一致。本研究采用求取包络线结合标准差计算的方法对 sEMG 信号进行量化筛选。本研究利用 MATLAB 内置的 envelope 函数提取预处理后的 sEMG 信号的包络 (图 2B), 从而获得 sEMG 信号整体振幅的变化趋势, 并计算任意连续 3 s 内的 4 个通道包络信号的标准差均值, 标准差均值

最小的3 s即为数据波动最平稳的时间段(图2C)。从预处理后的sEMG信号中选取对应时间段的3 s

数据,作为后续指标计算的基础。同步借助MATLAB代码实现筛选数据的可视化(图2D)。



A: 滤波后的双侧颞肌、咬肌sEMG信号; B: A中所示信号的包络线; C: 红色表示包络线中标准差均值最小的3 s信号; D: 按照C中红色信号对应的时间起止点截取滤波后的sEMG信号。

图2 某受试者实验采集的双侧颞肌、咬肌sEMG信号的滤波和筛选

Fig 2 Filtered and processed sEMG signals of bilateral masseter and temporalis muscles collected from a subject during the experiment

为获得不同设备间可比的sEMG信号,本研究采用Ferrario等^[10]在2006年提出的sEMG标准化处理方法:在受试者双侧下颌第一磨牙上放置2个1 cm厚的棉卷,将受试者紧咬牙齿时的肌肉平均振幅作为计算基准。在后续指标计算时,实验测得的肌电信号电位值需转换为相对于基准值的百分比。在咬棉卷的测试中,分别将4组肌肉(双侧颞肌前束和双侧咬肌)3 s内的平均sEMG电位(即振幅的均方根值)设定为参照值,并将MVC状态下不咬棉卷的sEMG数据与对应参照值进行比较,以百分比形式表示($\mu\text{V}/\mu\text{V}\times 100$),得到标准化处理后4组肌肉在MVC状态下的sEMG数据。

1.4.3 咀嚼肌功能评价sEMG指标计算

本研究参考以往学者^[3]的研究,纳入7项用于

评价咀嚼肌功能的sEMG指标,详见表1。使用MATLAB软件对Oralmetry及Zebris表面肌电采集到的sEMG信号进行上述指标的计算。Teethan表面肌电仪可由配套软件直接输出上述指标。

1.5 统计学分析

采用SPSS 25.0软件进行统计学分析。首先进行描述性统计,计算每位受试者使用3台设备进行5次重复测量得到的7项指标的均值,并计算每项指标的整体均值、标准差、最大值和最小值。使用组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)评估重复测量的一致性,对每位受试者、每台表面肌电仪5次重复测量输出的指数进行ICC分析,评估各设备重复测量时输出指数的一致性。计算各设备各指标5次重复测量的均值,并进行统

计学分析，对各项指标数值进行 Lilliefors 正态性检验，若数据符合正态分布，使用重复测量方差分析 (ANOVA) 进行整体比较，记录 F 值和 P 值；若数据不符合正态分布，则使用 Friedman M 检验，记录卡方值和 P 值，显著性水平 $\alpha=0.05$ 。针对 7 项

sEMG 测量指标，分别对 3 台设备的输出结果进行两两比较。检验差值是否符合正态分布，若差值符合正态分布，使用配对 t 检验，记录 T 值和 P 值；若不符合正态分布，采用 Wilcoxon 符号秩检验，记录 Z 值和 P 值，显著性水平 $\alpha=0.05$ 。

表 1 本研究纳入的咀嚼肌功能评价 sEMG 指标

Tab 1 sEMG parameters for masticatory muscle function evaluation included in this study

指标	定义	计算公式
AI ^[11]	反映左右侧咬肌与颞肌总电活动的对称性 (指标为正值代表右侧肌肉电活动强于左侧, 负值则左侧强于右侧)	$\frac{\sum_{i=1}^N RM_i + RT_i - LM_i - LT_i}{\sum_{i=1}^N RM_i + RT_i + LM_i + LT_i} \times 100(\%)$
活动指数 ^[11] (activity index, Ac)	反映咬肌总电活动与颞肌的协同性 (该指标为正值表示咬肌电活动强于颞肌, 负值则表示颞肌强于咬肌)	$\frac{\sum_{i=1}^N RM_i + LM_i - RT_i - LT_i}{\sum_{i=1}^N RM_i + LM_i + RT_i + LT_i} \times 100(\%)$
百分比重叠系数 (颞肌) ^[12] (percentage overlapping coefficient_TA, POC_TA)	反映左右侧颞肌肉电活动的对称性 (当肌肉完全对称性收缩时, POC 理论上可达 100%)	$\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N RT_i - LT_i }{\sum_{i=1}^N (RT_i + LT_i)} \right] \times 100(\%)$
百分比重叠系数 (咬肌) ^[12] (percentage overlapping coefficient_MM, POC_MM)	反映左右侧咬肌肉电活动的对称性	$\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N RM_i - LM_i }{\sum_{i=1}^N (RM_i + LM_i)} \right] \times 100(\%)$
TC	反映下颌侧向偏斜的趋势 (正值代表下颌有向右偏斜的趋势, 负值代表下颌左偏趋势)	$\frac{\sum_{i=1}^N (RT_i - LT_i - RM_i - LM_i)}{\sum_{i=1}^N (RM_i + LM_i + RT_i + LT_i)} \times 100(\%)$
前后系数 ^[10] (antero-posterior coefficient, APC)	反映咬肌和颞肌的前后向平衡性 (数值越大, 平衡性越好)	$\left[1 - \frac{\sum_{i=1}^N RM_i + LM_i - RT_i - LT_i }{\sum_{i=1}^N (RM_i + LM_i + RT_i + LT_i)} \right] \times 100(\%)$
相对肌肉总活动 (integrated muscle activity, IMP)	肌肉总活动指在一定时间段内, 肌电信号的振幅随时间的积分。相对肌肉总活动为相对于标准化测试的肌肉总活动的百分比	$\left[\frac{\int A_1(t) dt}{\int A_2(t) dt} \right] \times 100(\%)$

注: RM 代表右侧咬肌电位值, LM 代表左侧咬肌电位值, RT 代表右侧颞肌电位值, LT 代表左侧颞肌电位值; i 代表取样点序号, 每个序号对应的时间点为 $t=0.05$ s; $N=60$, 为 3 s 内的总取样点数; $A_1(t)$ 代表不咬棉卷进行 MVC 测试时 sEMG 信号的时域分布函数; $A_2(t)$ 代表咬棉卷进行 MVC 测试时 sEMG 信号的时域分布函数。

2 结果

2.1 指标计算结果

对受试者重复测量得到的指标计算结果取均值, 并统计分析各指标在受试者整体的均值、标准差和极值, 各指标均值分布情况见图 3, 每项指标的整体均值、标准差、最大值和最小值见表 2。

2.2 肌电仪测量结果间的一致性分析结果

对每名受试者、每台表面肌电仪重复测量所计算得到的 7 项指标数值进行 ICC 计算, 结果表明, 各受试者使用 3 台表面肌电仪在重复测量之间均具有较好的一致性, Oralmetry 表面肌电仪的 ICC 在三者中表现最优。

2.3 咀嚼肌功能评价 sEMG 指标的统计学分析结果

本研究对 3 组测量指标进行整体比较, 各指标组间比较所用的统计学方法及结果见表 3。统计学结果可见, APC、POC_MM、POC_TA 在 3 台表面肌电仪的测量结果间差异有统计学意义 ($P<0.05$)。

对 3 组测量指标进行两两比较, 结果表明, Zebris 表面肌电仪得到的 APC、POC_MM、POC_TA 3 项指标与其他 2 台表面肌电仪的测量结果间差异存在统计学意义, Oralmetry 和 Teethan 表面肌电仪测量得到的 7 项指标差异均无统计学意义 (表 4)。

3 讨论

3.1 Oralmetry 表面肌电仪在检测稳定性与便携性方面具备优势

本研究 ICC 计算结果表明, 3 台表面肌电仪的 5 次重复测量之间均具有较好的一致性, 其中 Oralmetry 表面肌电仪的 ICC 数值最优, 这表明其检测性能具有稳定性。与其他 2 台对照设备相比, Oralmetry 表面肌电仪还具有便携、灵活、多通道、开源等优势。其具有 3 台设备中最小采集器尺寸, 适用于小体积肌肉 (如颊肌、颊肌) 的肌电监测。采集器采用蓝牙无线连接, 最长工作时间达 7 h, 搭配可穿戴柔性表面电极, 可用于夜间肌电信号

监测。8通道设备可同步监测4对口颌面肌肉信号。与Teethan表面肌电仪仅支持预设测量流程且无法输出原始信号不同,Oralmetry表面肌电仪完

全开放原始数据输出,便于用户根据需求进行软件分析功能的个性化定制。

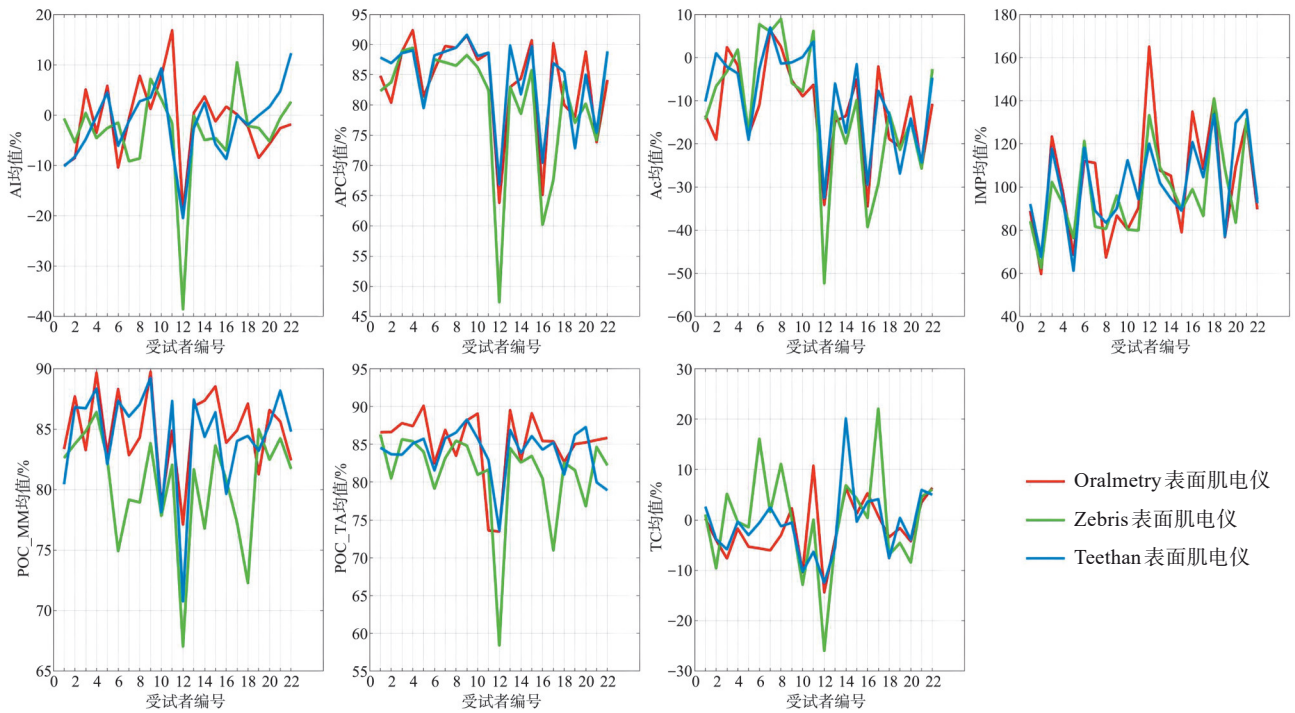


图3 受试者咀嚼肌功能评价sEMG指标测量值的分布图

Fig 3 Distribution of sEMG parameter measurements for masticatory muscle function evaluation of the participants

表2 咀嚼肌功能评价sEMG指标测量结果

Tab 2 Statistical summary of sEMG parameters for masticatory muscle function evaluation %

指标	平均值	标准差	最大值	最小值
AI	-2.07	6.64	6.69	-26.17
Ac	-11.12	11.75	6.41	-39.66
POC_TA	83.39	3.95	87.07	68.49
POC_MM	83.26	3.45	88.13	71.64
TC	-0.72	6.40	11.10	-17.59
APC	82.89	7.94	90.45	59.31
IMP	99.85	20.48	139.46	63.26

表3 3台表面肌电仪sEMG指标整体比较结果

Tab 3 Overall comparison results of sEMG indicators from three sEMG devices

指标	F值/卡方值	P值
AI	0.36 [△]	0.83
Ac	0.31 [#]	0.74
POC_TA	16.64 [△]	<0.01*
POC_MM	18.91 [△]	<0.01*
TC	0.29 [#]	0.75
APC	9.36 [△]	<0.01*
IMP	0.26 [#]	0.77

注: #符合正态分布,使用重复测量方差分析(ANOVA);[△]不符合正态分布,采用多配对样本Friedman M检验。*P<0.05。

表4 3台表面肌电仪sEMG指标两两比较结果

Tab 4 Pairwise comparison results of sEMG indicators from three sEMG devices

指标	Oralmetry & Zebris 两两比较结果		Oralmetry & Tee- than两两比较结果		Zebris & Teethan 两两比较结果	
	T值/Z值	P值	T值/Z值	P值	T值/Z值	P值
AI	0.37 [△]	0.37	0.75 [#]	0.75	0.24 [△]	0.24
Ac	0.91 [△]	0.91	0.13 [△]	0.13	0.19 [△]	0.19
POC_TA	<0.01 [△]	<0.01*	0.12 [#]	0.12	0.02 [#]	0.02*
POC_MM	<0.01 [△]	<0.01*	0.51 [△]	0.51	<0.01 [△]	<0.01*
TC	0.73 [△]	0.73	0.52 [#]	0.52	0.88 [△]	0.88
APC	0.02 [#]	0.02*	0.39 [△]	0.39	<0.01 [#]	<0.01*
IMP	0.41 [△]	0.41	0.86 [#]	0.86	0.32 [△]	0.32

注: #符合正态分布,使用配对t检验;[△]不符合正态分布,采用Wilcoxon符号秩检验。*P<0.05。

随着科技发展,国产化无线表面肌电仪的研发可满足口腔临床个性化肌电信号分析和定制软件开发的需求,相比国外商业产品更具性价比、可塑性强,有利于口腔肌电检测技术的基层普及^[13]。Oralmetry表面肌电仪目前尚存在采样频率略低、数据传输不稳定的局限性,有待持续改进和完善。

3.2 sEMG信号预处理方法的选择

咀嚼肌 sEMG 信号的频率通常集中在 20~500 Hz^[14], 其中大部分信号位于 30~300 Hz。综合考虑实验设备性能与各类干扰因素, 本研究在数据处理时采用了 30~250 Hz 带通滤波器和 50、100 Hz 陷波滤波器。既往研究^[14]多采用 30 Hz 高通滤波器来去除 sEMG 中的低频噪声, 对信号振幅等参数影响不大。30~250 Hz 的带通滤波器能够在保证信号质量的前提下, 有效过滤掉大多数干扰信号。50 和 100 Hz 陷波滤波器可消除工频干扰, 进一步提高信号的信噪比。

在信号筛选时, 常依赖研究者目测 sEMG 图像的振幅变化趋势来判断数据的稳定性, 具有主观依赖性强、效率低等不足。本研究创新性地改进了信号筛选方法, 通过对 sEMG 信号进行包络提取, 简化信号的同时突显其振幅波动特征, 并借助标准差计算从而更加标准化、自动化和量化地实现信号筛选。在本研究采集的数百例 sEMG 信号筛选中, 该方法具有良好的实践效果, 能够高效、自动化地满足信号筛选需求。

本研究选择在 MVC 状态下采集受试者的咀嚼肌 sEMG 信号, 主要基于以下原因: 1) 相较于下颌动态功能运动, 在牙尖交错位进行 MVC 的操作更加可控、稳定。2) MVC 为咀嚼肌 sEMG 检测常用的肌肉活动模式^[15], 具有诸多循证研究及高信度的 sEMG 指标。

3.3 sEMG检测的可重复性与一致性验证

医学研究中的可重复性指的是在多次重复相同实验时, 研究结果的一致性^[16]。由于 sEMG 信号容易受到皮下脂肪厚度、电极位置、电极间距、环境干扰及受试者心理状态等多种因素的影响^[8-9,17], 在实验室环境下对 sEMG 信号采集和相关指标的输出生可重复性评估对其在临床的推广应用具有重要意义^[18]。本研究对 3 台设备的 ICC 计算结果表明 5 次重复测量之间的指标输出具有高度一致性, 其中 Oralmetry 肌电仪的 ICC 数值最优。这表明, 在实验室条件下使用 3 台表面肌电仪进行 sEMG 检测和测量指标输出具有高度的可重复性。

Zebris 表面肌电仪和 Teethan 表面肌电仪均为主流口腔专用 sEMG 系统。Saracutu 等^[19]使用 Teethan 表面肌电仪在实验室环境中对 30 名志愿者的双侧颞肌前束和咬肌进行了 3 次不同时间段的 sEMG 检测, 结果显示在 3 次测试中各项指标均表现出良好的可重复性。有学者^[2]借助 Zebris 表面肌电仪进行口腔医学研究, 可佐证其测量结果的一致性。

Oralmetry 表面肌电仪在信号采集的一致性方面尚缺乏循证依据。本研究以 7 项具有临床意义的 sEMG 指标作为切入点, 以上述 2 台主流品牌表面肌电仪为对比设备, 对 Oralmetry 表面肌电仪的一致性进行了实验室应用评价。描述性统计学结果显示, 各指标在不同受试者之间的分布走势基本一致。两两比较结果表明, Zebris 表面肌电仪与其他 2 台表面肌电仪在 APC、POC_MM、POC_TA 3 项指标上差异存在统计学意义, 而 Teethan 表面肌电仪和 Oralmetry 表面肌电仪在本研究纳入的 7 项指标中差异均无统计学意义。分析原因可能有以下几点: 1) 不同肌电仪及电极片参数不同, 导致了其测量的 sEMG 信号存在一定的振幅、频率的差异, 标准化处理无法完全消除这种差异, 因此测量指标在一定范围内的波动是可接受的。2) Oralmetry 表面肌电仪和 Teethan 表面肌电仪为无线表面肌电仪, Zebris 表面肌电仪为有线系统, 二者在 sEMG 信号采集、传输及软件内置的信号处理方法等存在原理上的不同。3) 受限于 Oralmetry 表面肌电仪的采样频率, 为保证数据之间的可比性, 本研究对 Oralmetry 表面肌电仪与 Zebris 表面肌电仪采集到的原始信号均使用了 30~250 Hz 的滤波器, 可能造成部分高频肌肉活动信号的丢失, 对滤波后信号的精度造成影响。

综上所述, 本研究纳入的 3 台表面肌电仪在各项测量指标中表现出较高的可重复性与一致性。Oralmetry 表面肌电仪在重复测量间具有较好的可重复性, 且与目前主流商业化的口腔表面肌电仪 sEMG 指标输出结果基本一致, 为其在口腔临床的应用推广提供了理论基础。基于 Oralmetry 表面肌电仪开放的数据输出端, 后续可持续探索更多有临床参考意义的口腔 sEMG 指标, 进一步拓展其在口腔医学领域的应用潜力。目前已有相关研究^[20]关注于评价咀嚼肌功能的 sEMG 新指标的提出, 可考虑对咀嚼肌多种功能运动下(如咀嚼、开闭口等) sEMG 信号进行参数化评价, 使 sEMG 在更多口腔疾病的检查、诊断、疗效评估中发挥作用。

致谢: 感谢清华大学电子工程系郭辰仪老师在信号处理方面提供的支持和帮助; 感谢广州析芒医疗科技有限公司李君实工程师在设备研发和信号处理方面提供的支持; 感谢北京为开数字科技有限公司王俊杰工程师在设备支持和信号采集方面提供的帮助。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Zieliński G, Gawda P. Surface electromyography in dentistry-past, present and future[J]. *J Clin Med*, 2024, 13(5): 1328.
- [2] Ko EW, Teng TT, Huang CS, et al. The effect of early physiotherapy on the recovery of mandibular function after orthognathic surgery for class III correction. Part II : electromyographic activity of masticatory muscles[J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2015, 43(1): 138-143.
- [3] Hugger S, Schindler HJ, Kordass B, et al. Clinical relevance of surface EMG of the masticatory muscles. (Part 1): resting activity, maximal and submaximal voluntary contraction, symmetry of EMG activity[J]. *Int J Comput Dent*, 2012, 15(4): 297-314.
- [4] Lucas Bde L, Barbosa Tde S, Pereira LJ, et al. Electromyographic evaluation of masticatory muscles at rest and maximal intercuspal positions of the mandible in children with sleep bruxism[J]. *Eur Arch Paediatr Dent*, 2014, 15(4): 269-274.
- [5] Chen YJ, Yao CC, Chang ZC, et al. Occlusal function and electromyographic activity of masticatory muscles in skeletal Class III patients with different patterns of mandibular asymmetry[J]. *J Oral Rehabil*, 2023, 50(4): 276-285.
- [6] 赵琪, 吴国民. 正颌手术对咀嚼肌影响研究进展[J]. *中国实用口腔科杂志*, 2024, 17(1): 108-113.
Zhao Q, Wu GM. Progress in the study of masticatory muscle changes after orthognathic surgery[J]. *Chin J Pract Stomatol*, 2024, 17(1): 108-113.
- [7] Marcelino V, De Rovere S, Paço M, et al. Masticatory function in individuals with temporomandibular disorders: a systematic review and meta-analysis[J]. *Life (Basel)*, 2023, 13(2): 472.
- [8] Szyzka-Sommerfeld L, Sycińska-Dziarnowska M, Spagnuolo G, et al. Surface electromyography in the assessment of masticatory muscle activity in patients with pain-related temporomandibular disorders: a systematic review[J]. *Front Neurol*, 2023, 14: 1184036.
- [9] 丁其川, 熊安斌, 赵新刚, 等. 基于表面肌电的运动意图识别方法研究及应用综述[J]. *自动化学报*, 2016, 42(1): 13-25.
Ding QC, Xiong AB, Zhao XG, et al. A review on re-
- searches and applications of sEMG-based motion intent recognition methods[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2016, 42(1): 13-25.
- [10] Ferrario VF, Tartaglia GM, Galletta A, et al. The influence of occlusion on jaw and neck muscle activity: a surface EMG study in healthy young adults[J]. *J Oral Rehabil*, 2006, 33(5): 341-348.
- [11] Naeije M, McCarroll RS, Weijs WA. Electromyographic activity of the human masticatory muscles during sub-maximal clenching in the inter-cuspal position[J]. *J Oral Rehabil*, 1989, 16(1): 63-70.
- [12] Ferrario VF, Sforza C, Colombo A, et al. An electromyographic investigation of masticatory muscles symmetry in normo-occlusion subjects[J]. *J Oral Rehabil*, 2000, 27(1): 33-40.
- [13] Yamaguchi T, Mikami S, Maeda M, et al. Portable and wearable electromyographic devices for the assessment of sleep bruxism and awake bruxism: a literature review [J]. *Cranio*, 2023, 41(1): 69-77.
- [14] Karacan I, Topkara Arslan B, Karaoglu A, et al. Estimating and minimizing movement artifacts in surface electromyogram[J]. *J Electromyogr Kinesiol*, 2023, 70: 102778.
- [15] da Silva FC, da Costa Palácio PR, Gomes AO, et al. Electromyographic evaluation of masticatory muscles in individuals with hemiparesis and temporomandibular disorder[J]. *Cogent Med*, 2018, 5(1): 1432159.
- [16] The National Academies of Sciences, Engineering, Medicine. Reproducibility and replicability in science[M]. Washington: National Academies Press, 2019.
- [17] Nakata Y, Ueda HM, Kato M, et al. Changes in stomatognathic function induced by orthognathic surgery in patients with mandibular prognathism[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2007, 65(3): 444-451.
- [18] Waugh C, Clark G. Factors affecting test reproducibility among laboratories[J]. *Rev Sci Tech*, 2021, 40(1): 131-143.
- [19] Saracutu OI, Pollis M, Cagidiaco EF, et al. Repeatability of Teethan® indexes analysis of the masseter and anterior temporalis muscles during maximum clenching: a pilot study[J]. *Clin Oral Investig*, 2023, 27(9): 5309-5316.
- [20] Ginszt M, Zieliński G. Novel functional indices of masticatory muscle activity[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(7): 1440.

(本文编辑 杜冰)