

# 颞下颌关节盘可复性前移位患者关节振动特征研究

李晶晶<sup>1</sup> 邵琳琳<sup>2</sup> 俞青<sup>1</sup>

1. 南京大学医学院附属口腔医院·南京市口腔医院口腔修复科 南京 210008;

2. 苏州大学附属儿童医院口腔科 苏州 215025

**[摘要]** **目的** 本试验通过搭建颞下颌关节声学检测系统,比较患有可复性关节盘前移位(ADDWR)和健康的颞下颌关节在开闭口运动中关节音振动参数的差异。**方法** 选择51个ADDWR关节和51个健康关节为研究对象,通过颞下颌关节声学检测系统检测最大张口时TMJ的振动参数,包括峰幅值、振动总能量、不同频段(频率>800 Hz和≤800 Hz)的振动能量,使用Mann-Whitney非参数检验进行组间比较。**结果** ADDWR关节的振动总能量、峰幅值、各频段(>800 Hz和≤800 Hz)的振动能量均明显高于对照组( $P<0.01$ ),ADDWR关节振动多发生在开口期。**结论** 与健康关节相比,ADDWR关节振动有特征性变化;颞下颌关节声学检测系统可作为一种动态、无创、经济的辅助检查和早期筛查工具,为未来颞下颌关节紊乱病的诊断研究提供新思路。

**[关键词]** 颞下颌关节紊乱病; 关节盘前移位; 关节振动分析; 加速度计; 颞下颌关节声学诊疗系统

**[中图分类号]** R782.6 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026026



本文链接

OSID码

## Vibrational characteristics of the temporomandibular joints in patients with anterior disc displacement with reduction

Li Jingjing<sup>1</sup>, Shao Linlin<sup>2</sup>, Yu Qing<sup>1</sup>

1. Dept. of Prosthodontics, Nanjing Stomatological Hospital, Affiliated Hospital of Medical School, Nanjing University, Nanjing 210008, China; 2. Dept. of Stomatology, Children's Hospital of Soochow University, Suzhou 215025, China

Supported by: Nanjing Special Program for Life and Health Science and Technology (202205051)

Correspondence: Yu Qing, Email: kqmike@163.com

**[Abstract]** **Objective** This study aimed to compare the vibration parameters of temporomandibular joint (TMJ) sounds during mouth opening and closing between patients with anterior disc displacement with reduction (ADDWR) and healthy individuals by using a TMJ vibration analysis system. **Methods** Vibration signals were collected during maximum mouth opening and closing from 51 joints diagnosed with ADDWR and 51 healthy control joints. The following parameters were extracted and analyzed: peak amplitude, total vibrational energy, vibrational energy above 800 Hz, and vibrational energy below 800 Hz. They were assessed and compared using the Mann-Whitney U test. **Results** The parameters evaluated were significantly higher in the ADDWR group than in the control group ( $P<0.01$ ). Vibrations in ADDWR joints predominantly occurred during the mouth-opening phase. **Conclusion** The vibrational characteristics of ADDWR joints differ significantly from those of healthy joints. The TMJ vibration analysis system provides a dynamic, noninvasive, and cost-effective tool with potential utility in the auxiliary assessment of temporomandibular disorders.

**[Key words]** temporomandibular disorders; anterior disc displacement; joint vibration analysis; accelerometer; temporomandibular joint vibration analysis system

[收稿日期] 2025-06-06; [修回日期] 2025-07-18

[基金项目] 南京市生命健康科技专项项目(202205051)

[第一作者] 李晶晶, 医师, 硕士, Email: jingjing.li@smail.nju.edu.cn

[通信作者] 俞青, 主任医师, 博士, Email: kqmike@163.com

颞下颌关节紊乱病(temporomandibular joint disorders, TMD)是一类病因尚未完全清楚而又

有相同或相似临床症状的一组疾病的总称,其典型症状包括关节疼痛、开口受限、弹响以及咀嚼功能障碍<sup>[1]</sup>。国际牙科研究学会(International Association for Dental Research, IADR)于2014年发布了基于症状问卷和临床检查的常见TMD分类及诊断标准(diagnostic criteria for the most common TMD, DC/TMD)。DC/TMD分类将TMD的临床诊断分为两大类。第1类为疼痛性疾病,包括肌肉痛(局限性肌痛、肌筋膜痛、牵涉型肌筋膜痛)、关节痛以及TMD相关头痛。第2类为关节结构性疾病,包括可复性关节盘移位、伴有绞锁的可复性关节盘移位(即关节盘绞锁)、伴有开口受限的不可复性关节盘移位、不伴开口受限的不可复性关节盘移位、退行性关节病以及关节半脱位<sup>[2]</sup>。TMD患者关节盘移位发生率高达41%,其中以可复性关节盘前移位(anterior disc displacement with reduction, ADDWR)最常见<sup>[3]</sup>。

在健康人群中,颞下颌关节盘位于髁突上方,起到缓冲和稳定关节的作用。ADDWR患者关节盘在闭口时向前移位,但在张口过程中,髁突能够重新滑入关节盘下方,使关节盘复位,恢复正常的盘—髁关系<sup>[4]</sup>。这一过程通常伴有颞下颌关节区的弹响,响声一般较为清脆,可以发生于开闭口的各个时期<sup>[5]</sup>。关节区的振动可表现为弹响、摩擦音、破碎音等<sup>[6]</sup>。

临床上检查颞下颌关节(temporomandibular joint, TMJ)的声音主要有两种方法。一种为DC/TMD诊断标准中所采用的触诊法,另一种是听诊器检查法。有研究<sup>[2]</sup>表明:这两种方法主观性较强,假阳性率较高。

为了记录和比较关节音,目前已经研发出一系列使用声压传感器诊断TMD的声音诊断系统,如K6-I系统、SonoPAK系统等<sup>[7-8]</sup>。声音传感器对环境声音敏感,要求周围环境安静,但临床诊治过程嘈杂,难以达到这一条件。

关节振动分析(joint vibration analysis, JVA)系统是使用关节振动描记术(vibroarthrogram, VAG)<sup>[9]</sup>记录和分析TMJ信号的系统。该系统由2个加速计和支持记录并分析信号的附加软件组成,内置软件根据频谱确定振动信号的特征<sup>[10]</sup>。由于加速度计对环境声音不敏感,可有效避免传统检查方法的主观偏差,提升了检测结果的客观性和可重复性<sup>[11]</sup>。目前关于TMJ振动研究最常使用的JVA系统为BioPAK系统<sup>[12-14]</sup>,但该系统价格昂贵,

很难普及应用。本研究通过搭建国产化、更为经济的颞下颌关节声学检测系统(TMJ vibration analysis system),比较ADDWR患者和健康人的关节振动特征,探索采用颞下颌关节声学检测系统对ADDWR进行定量诊断的方法,旨在为临床诊断ADDWR提供一种无创辅助诊断和早期筛查方法,以便于在基层医院推广早期防治。

## 1 材料和方法

### 1.1 临床资料

选择2024年12月—2025年5月南京市口腔医院颞下颌关节专科门诊就诊的患者中,诊断为ADDWR的51个关节为试验组。纳入标准:1)符合国际通用的颞下颌关节病诊断标准DC/TMD中ADDWR的诊断;2)经过颞下颌关节区开闭口磁共振成像(magnetic resonance imaging, MRI)检查, MRI表现为闭口位时关节盘位于髁突前方、关节结节前方,开口位时关节盘回到关节窝正常位置。排除标准:1)伴有开口受限;2)曾经进行过TMJ的相关治疗;3)影像学发现有骨关节病或不可复性关节盘移位。

另外选择同期因单侧TMD症状就诊患者的无症状的对侧健康关节51个为对照组。纳入标准:1)通过MRI检查证实关节结构正常;2)无TMD症状及相关危险因素(夜磨牙/紧咬牙/单侧咀嚼史等);3)未接受任何TMJ相关治疗。排除标准:1)MRI显示关节盘移位或骨性异常者;2)有TMD症状或相关危险因素(夜磨牙/紧咬牙/单侧咀嚼史等);3)既往接受过TMJ相关治疗。

本试验通过南京大学医学院附属口腔医院伦理委员会伦理审批,伦理编号为JX-2022-NL04。

### 1.2 颞下颌关节声学检测系统搭建

本研究搭建了颞下颌关节声学检测系统(图1、2),研究设备与软件如表1所示。所有关节的关节振动信号收集均由同一名医师完成,每个患者测量3次,选取重复波形进行信号处理。

### 1.3 关节音的采集及处理

#### 1.3.1 关节音的采集

受试者端坐,头垂直位,眶耳平面与水平面平行,医生将耳机传感器置于试验对象的TMJ体表投影部位。信号采集过程中不吞咽、不说话、平稳呼吸。在颞下颌关节声学检测系统启动后,试验对象依次执行以下步骤:0~3 s,保持牙尖交

错位;3~6 s,缓慢开口至最大开口度;6~9 s,缓慢闭口回到牙尖交错位。每个试验对象每次测量9 s,重复测量3次,每次测量时间约间隔1 min,选取重复波形进行信号处理。

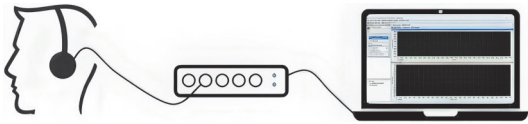


图 1 颞下颌关节声学检测系统示意图

Fig 1 Schematic diagram of the TMJ vibration analysis system

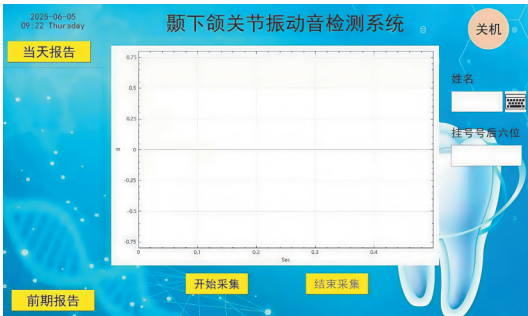


图 2 颞下颌关节声学检测系统界面

Fig 2 Interface of the TMJ vibration analysis system

1.3.2 关节音的分析

将采集到的关节振动信号过滤除去杂音后导入 OriginPro 2021b 制图与分析软件,去除多余和无用数据,设置后出现了 X、Y 轴两列数据,选中

两列数据,绘制折线图,得到时域信号图(图3)。横坐标为时间,单位为s;纵坐标为加速度的幅值,单位为重力加速度 $g$ ( $g=9.8\text{ m/s}^2$ );当振动信号在某一时间点快速增大,信号的幅值也会随之迅速增大。如图3B所示,在3~6 s开口过程中出现一次振动信号,幅值明显增大。

除了信号的时域特征外,信号频域通常包含了更丰富的特征信息。频域信号的计算主要依赖于数字信号的傅里叶变换。理论上,通过离散傅里叶变换可以直接求得数字信号的频域数据,但实际应用中离散傅里叶变换运算量巨大,因此通常会采用快速傅里叶变换以更为高效地获取信号的频域信息。

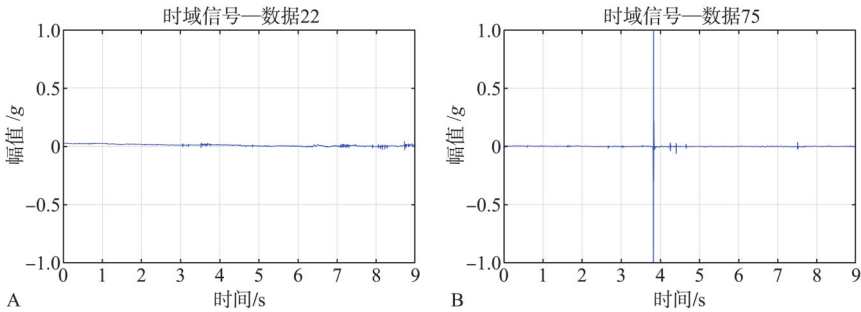
根据采集时指示患者做的3个动作,使用 MATLAB R2021b 数学软件将整个9 s的过程分为3个阶段:0~3 s为闭口静止阶段,3~6 s为开口阶段,6~9 s为闭口阶段。取0~3、3~6、6~9 s共3个时域文件,分别进行快速傅里叶变化。选择“频率”和“幅度”两列,绘制折线图,即可得到3张频域图(图4)。

通过时域图和频域图计算得到主要的关节振动参数包括:1)峰幅值;2)振动总能量;3)频率 $>800\text{ Hz}$ 的振动能量;4)频率 $\leq 800\text{ Hz}$ 的振动能量。

表 1 试验设备与软件

Tab 1 Experimental equipment and software

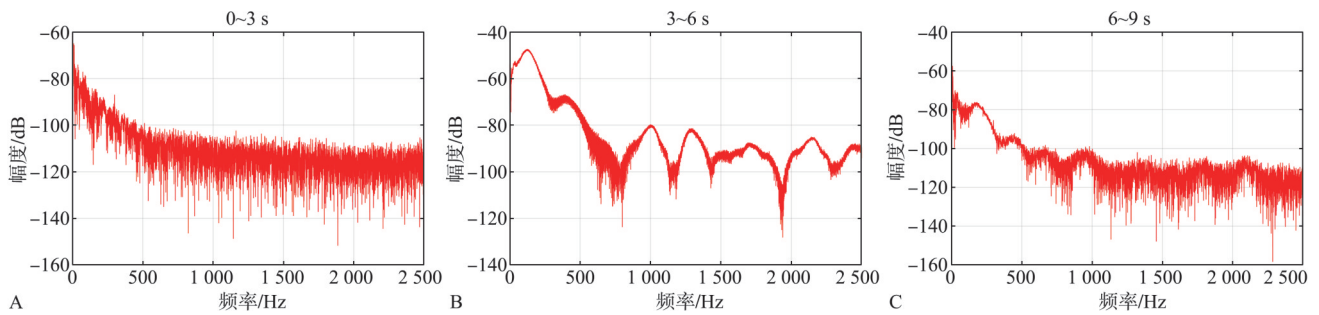
| 设备和软件 |                                         | 名称 | 型号                 | 出产公司            |
|-------|-----------------------------------------|----|--------------------|-----------------|
| 设备    | 加速度传感器                                  |    | SENTER 510-A-100-M | 上海领途实业有限公司,中国   |
|       | 数据采集卡                                   |    | VK700              | 深圳微精艺电子有限公司,中国  |
|       | 联想台式电脑                                  |    | 启天 M650-N000       | 联想集团,中国         |
| 软件    | 制图与分析软件 (OriginPro graphing & analysis) |    | 2021b              | OriginLab 公司,美国 |
|       | 数学计算软件 (MATLAB)                         |    | R2021b             | MathWorks 公司,美国 |
|       | 统计分析软件 (SPSS statistics)                |    | 26.0               | IBM 公司,美国       |
|       | 颞下颌关节声学检测系统                             |    |                    | 本研究自行搭建         |



A: 对照组; B: 试验组。

图 3 试验组和对照组的时域信号图

Fig 3 Time-domain signals of the TMJ vibration in the experimental and control groups



A: 0~3 s; B: 3~6 s; C: 6~9 s。

图 4 最大开闭口过程中 3 个阶段的频谱图

Fig 4 Frequency-spectrum diagrams of TMJ vibration at three stages during maximum mouth opening and closing

## 1.4 统计分析

由于关节振动的参数为偏态分布，故采用中位数 ( $M$ )、四分位数区间 ( $Q_L \sim Q_U$ ) 对各项振动参数进行描述，采用 Mann-Whitney 非参数检验对振动参数进行组间比较，检验水准为  $\alpha=0.05$ 。振动发生时的下颌位置用频数统计进行分析。试验数据采用统计分析软件 SPSS 26.0 进行处理。

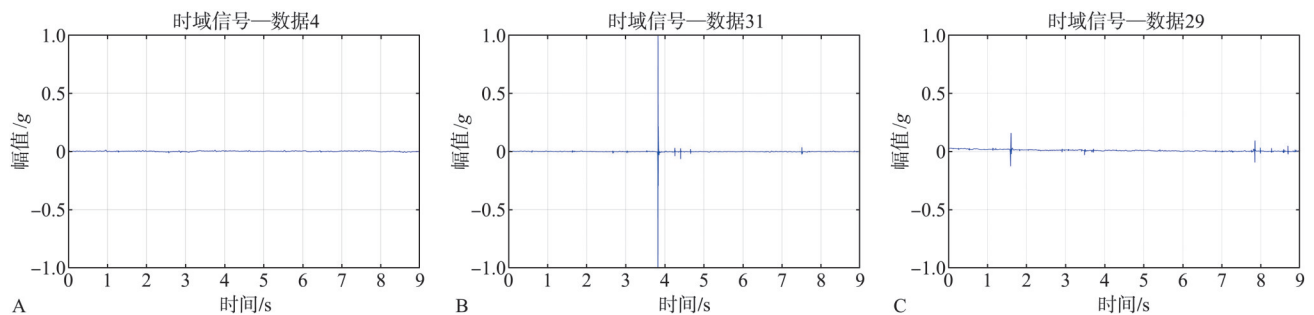
## 2 结果

### 2.1 TMJ 振动信号时域特征

本研究共收集了 102 个 TMJ 的振动信号，试验组 51 个，对照组 51 个。观察试验组和对照组时

域图 (图 5) 可以看出：0~3 s 为静止状态，试验组和对照组幅值在此时间段无明显差异；3~6 s 与 6~9 s 为开闭口运动阶段，试验组关节振动信号时域图中出现了明显的波峰。临床无弹响的 ADDWR 关节振动信号时域图如图 5C 所示：开闭口过程中仍存在幅值相对较小但明显的振动波峰，这类患者临床检查虽未能发现弹响，但通过颞下颌关节声学检测系统可记录到异常的关节振动。

通过比较试验组和对照组时域图的峰幅值 (图 6) 可以发现：试验组开闭口运动状态时峰幅值可达 0.1 g，而对照组与试验组静止状态的峰幅值为 0.01 g。经统计学分析 (表 2)，试验组峰幅值大于对照组，差异有统计学意义 ( $P<0.01$ )。



A: 对照组; B: 试验组; C: 临床无弹响的 ADDWR 关节。

图 5 试验组和对照组的 TMJ 振动时域图

Fig 5 Time-domain plots of TMJ vibration in the experimental and control groups

### 2.2 TMJ 振动信号频域特征

试验组和对照组的频域参数测量结果见表 3：试验组振动总能量、不同频段 (频率  $>800$  Hz 和频率  $\leq 800$  Hz) 的振动能量均高于对照组，差异有统计学意义 ( $P<0.01$ )。

### 2.3 TMJ 弹响发生的运动时期比较

本研究为区分颞下颌关节声学检测系统与临床结果，统计临床可听弹响在不同运动时期的分布，并说明仪器检测的总体情况。本研究将弹响

发生时期划分为开口期、闭口期以及同时出现在开口与闭口期 (两期均发生)。表 4 列出了临床可听弹响在不同时期的分布情况。

结果显示：试验组 51 个 ADDWR 关节中，有 40 个关节在临床检查中可听到弹响，其中 23 个发生在开口期，3 个发生在闭口期，14 个在开闭口两期均有弹响；其余 11 个关节临床未检测到弹响，但仪器检测到不同程度的异常振动信号。临床可听弹响的关节在颞下颌关节声学检测系统均表现

出明显的波峰或高能量信号,与临床听诊结果相对应;而临床无声但在仪器上仍能看到异常波峰或低幅度振动信号。对照组中有3个关节经仪器检测到轻微振动信号,结合临床检查与影像学检查判断为生理摩擦音。

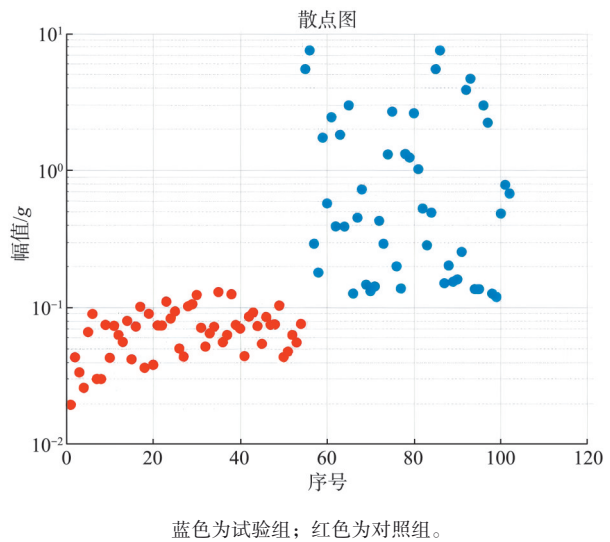


图 6 试验组和对照组峰幅值

Fig 6 Peak amplitude between the exprimental and control groups

这一结果表明:多数 ADDWR 关节的弹响出现在开口期,临床可听弹响与声学波形一致,而部分临床无弹响的关节仍可检测到异常振动信号,本仪器在发现轻微或早期关节异常方面具有较高的灵敏度。

| 表 3 试验组和对照组频域参数比较                                                                           |                        |                        |                        |                        |                        |                        |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| Tab 3 Comparison of frequency-domain parameters between the experimental and control groups |                        |                        |                        |                        |                        |                        |       |
| 振动能量/J                                                                                      | ADDWR 组                |                        |                        | 对照组                    |                        |                        | P 值   |
|                                                                                             | M                      | $Q_U$                  | $Q_L$                  | M                      | $Q_U$                  | $Q_L$                  |       |
| $I_{total}$                                                                                 | $2.830 \times 10^{-4}$ | $8.129 \times 10^{-4}$ | $9.309 \times 10^{-5}$ | $8.153 \times 10^{-5}$ | $1.916 \times 10^{-4}$ | $4.243 \times 10^{-5}$ | 0.000 |
| $I_1$                                                                                       | $8.027 \times 10^{-8}$ | $2.221 \times 10^{-7}$ | $6.491 \times 10^{-8}$ | $5.354 \times 10^{-8}$ | $6.372 \times 10^{-8}$ | $4.364 \times 10^{-8}$ | 0.000 |
| $I_2$                                                                                       | $2.829 \times 10^{-4}$ | $8.127 \times 10^{-4}$ | $9.302 \times 10^{-5}$ | $8.147 \times 10^{-5}$ | $1.916 \times 10^{-4}$ | $4.236 \times 10^{-5}$ | 0.000 |

注:  $I_{total}$ : 振动总能量;  $I_1$ : 频率>800 Hz 的振动能量;  $I_2$ : 频率≤800 Hz 的振动能量。

| 表 4 临床可听弹响在不同运动时期的分布例数                                                   |            |            |
|--------------------------------------------------------------------------|------------|------------|
| Tab 4 Distribution of clinically audible clicking during movement phases |            |            |
| TMJ 运动时期                                                                 | 试验组 (n=51) | 对照组 (n=51) |
| 开口期                                                                      | 23         | 2          |
| 闭口期                                                                      | 3          | 1          |
| 开闭口期均发生                                                                  | 14         | 0          |
| 临床可听弹响总数                                                                 | 40         | 0          |
| 仪器检测振动但临床无弹响数                                                            | 11         | 3          |

| 表 2 ADDWR 组和对照组的峰幅值比较                                                   |         |         |         |       |
|-------------------------------------------------------------------------|---------|---------|---------|-------|
| Tab 2 Comparison of peak amplitude between the ADDWR and control groups |         |         |         |       |
| 组别                                                                      | M       | $Q_U$   | $Q_L$   | P 值   |
| 对照组                                                                     | 0.044 3 | 0.072 6 | 0.034 2 | 0.000 |
| 试验组                                                                     | 0.150 8 | 0.453 9 | 0.126 7 |       |

3 讨论

本试验通过自建的颞下颌关节声学检测系统,研究健康 TMJ 和 ADDWR 患者 TMJ 的振动信号特征,结果发现:ADDWR 组在开闭口过程中产生的振动信号无论在时域幅值还是频域能量上均显著高于对照组,差异有统计学意义 ( $P<0.05$ )。

在时域图中,试验组静止阶段、对照组整个开闭口周期中关节振动最大幅值为 0.01 g,试验组在开口或闭口运动阶段幅值可达到 0.1 g。奚晓菁等<sup>[15]</sup>采用 BioPAK 系统 (BioPAK system, Version 7.0, BioResearch 公司,美国) 关节音分析仪记录并分析 ADDWR 患者和正常人 TMJ 表面振动参数,结果表明:ADDWR 患者关节振动的各个参数明显高于正常人,其中 ADDWR 峰振幅为 4.23 Pa,对照组为 0.53 Pa。这与本研究结果一致,本研究试验组和对照组时域图中振动幅值差异可达 10 倍。

开口运动时,髁突在关节盘下表面作转动运动,而关节盘的上面沿关节窝和关节结节作滑动运动<sup>[16]</sup>。健康对照组关节结构正常,关节韧带将关节盘稳定在髁突与关节结节之间,关节腔内充满滑膜液润滑关节,减少关节运动时关节面磨损,因此关节振动是柔和的,振动能量和振动频率都比较低<sup>[17]</sup>。在 ADDWR 中,关节盘前移位,髁突转动比关节盘滑动更快,当髁突运动至关节窝外,关节盘出现反弹和释放,从而导致关节振动的发生<sup>[18]</sup>。ADDWR 患者的关节音在时域图中显示尖

锐的峰值振幅, 振动能量和振动频率明显高于健康关节。

在频域分析中, 采用 800 Hz 作为频率划分的界限, 将振动能量划分为 $\leq 800$  Hz 和 $> 800$  Hz 两段, 结果发现 ADDWR 组在 2 个频段的能量均高于对照组 ( $P < 0.01$ ), 推测可能是随着疾病的发展, ADDWR 患者病变关节的关节音由弹响逐渐发展到柔和摩擦音和粗糙的摩擦音, 关节振动的能量和频率等也随之增加<sup>[19]</sup>。

本试验中 ADDWR 组关节振动可发生在开口阶段、闭口阶段、开口阶段和闭口阶段都出现, 主要发生在开口阶段, 多数情况为髁突带动盘复位的瞬间声音<sup>[20]</sup>。Oster 等<sup>[21]</sup>报道称开口阶段较闭口阶段表现出更明显的振幅变化。关节弹响出现在闭口阶段, 可能是由于关节盘在开口时复位, 形成暂时的“盘—髁”关系, 但闭口时再次前移。这反映出盘—髁的协调功能不稳定, 关节盘在咀嚼肌放松和髁突后退过程中未能维持正常位置, 常见于韧带松弛或关节盘结构异常患者<sup>[22]</sup>。部分 ADDWR 患者在开闭口两个阶段均出现弹响, 反映出关节盘反复复位与脱位, 可能与盘—髁协调障碍和下颌运动轨迹异常有关<sup>[10,23]</sup>。

本研究发现部分 ADDWR 患者在临床上无弹响表现, 但颞下颌关节声学检测系统仍检测到特征性振动波峰。有研究<sup>[24]</sup>证实: ADDWR 患者可出现 MRI 结构异常却无临床弹响的症状。此现象可能与软组织结构对力学冲击的缓冲作用有关, 滑膜液、关节韧带及关节囊通过吸收复位瞬间的冲击能量, 使得弹响声幅度减弱甚至消失, 常规触诊难以捕获<sup>[25]</sup>。当关节盘后带增厚时, 可使关节盘复位过程更加平缓, 也会弱化撞击力度而使临床检测不到关节弹响<sup>[26]</sup>。由此可见, 基于振动信号的颞下颌关节声学检测系统有助于识别这类临床无弹响的 ADDWR, 为早期诊断提供重要补充。

Gupta 等<sup>[27]</sup>报道: 正常 TMJ 中约有 66% 的关节运动时产生振动, 成功适应功能障碍后可能会出现症状缺失。Deregibus 等<sup>[28]</sup>研究证实: 这些振动信号多为生理性结构摩擦、软组织牵张、关节腔压力变化等所致, 与盘—髁复位机制无关。本试验中, 健康对照组中出现 3 个关节振动, 这种振动是生理性的波动, 要与 ADDWR 患者典型的高频高能振动相区分。

关节音广泛出现于 TMD 患者及正常人群, 临

床上主要根据患者的主观感觉和医生触听觉对关节杂音或关节振动进行描述。人耳的可听频率为 20~20 000 Hz<sup>[29]</sup>, 然而 TMJ 的振动能量幅值不在此范围内<sup>[30]</sup>。不同检查者之间也存在较大差异, 医生触听诊的诊断特异性较低, 触诊的诊断特异性为 60%, 听诊仅有 20%<sup>[31]</sup>, 因此关节振动的数字化方式具有重要意义, 该方法能够给出更为详细和客观的关节振动数据以供研究人员分析和讨论。

现今国外比较成熟的关节振动监测方法是 BioPAK 诊断系统和 TMD-E Tracker 系统。基于关节振动分析 (joint vibration analysis, JVA) 系统的 BioPAK 系统在区别关节盘前移位和正常关节盘位置时具有可接受的诊断有效性, 敏感度为 67%, 特异度为 80%<sup>[32]</sup>。TMD-E Tracker 系统则采用多通道声学传感技术, 其临床评估数据显示: 诊断 TMD 时的敏感度为 89.5%, 特异度为 92.3%, 具备较高的筛查效能<sup>[33]</sup>。与上述已通过系统验证的成熟产品相比, 本研究构建的颞下颌关节声学检测系统尚处于探索性开发阶段, 未来将开展严格的诊断准确性研究, 以获取并优化本系统的敏感度和特异性。

目前国外成熟的关节检测系统价格昂贵, 其关节振动诊断阈值研究以国外人群为样本<sup>[34]</sup>。由于中国人在饮食结构、咬合类型及关节解剖特征等方面与国外人群存在差异, 其关节代偿能力亦可能存在不同<sup>[35]</sup>。本试验搭建了国产化、更为经济的颞下颌关节声学检测系统, 以中国人群作为样本, 计算分析中国人群关节振动的诊断阈值, 提高了诊断的特异性。

目前主要的关节疾病辅助技术是 MRI 和锥体束计算机断层扫描 (cone beam computed tomography, CBCT)。尽管 MRI 被认为是评估关节软组织紊乱的金标准<sup>[36]</sup>, CBCT 在评估骨性异常中表现出色, 但这两种成像技术都有其局限性。MRI 昂贵且静态, CBCT 虽辐射量较低但依然具有一定风险。本试验搭建的颞下颌关节声学检测系统旨在为患者提供一种动态、无创、经济实用的检查方法。

有学者<sup>[37]</sup>提出振动传感器, 即加速度计可以通过皮肤测量关节振动, 不依赖空气的传导, 因此基本不受外界杂音的影响, 但受牙齿接触振动的影响。本试验要求受试者在静止状态处于牙尖交错位时, 避免紧咬牙, 减少咬合力对关节振动监测的影响, 但是实际情况下可能依从性不足,

后期考虑增加肌电图仪等设备进行控制。今后的研究将进一步增大样本量,纳入不同类型的TMD患者,检测关节振动信号,建立关节振动信号数据库,探索基于振动特征的TMD分类与诊断方法,为临床TMD诊断提供辅助检查工具。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

#### 4 参考文献

- [1] Durham J, Newton-John TR, Zakrzewska JM. Temporomandibular disorders[J]. BMJ, 2015, 350: h-1154.
- [2] Schiffman E, Ohrbach R, Truelove E, et al. Diagnostic criteria for temporomandibular disorders (DC/TMD) for clinical and research applications: Recommendations of the international RDC/TMD consortium network\* and orofacial pain special interest group[J]. J Oral Facial Pain Headache, 2014, 28(1): 6-27.
- [3] Miernik M, Więckiewicz W. The basic conservative treatment of temporomandibular joint anterior disc displacement without reduction: review[J]. Adv Clin Exp Med, 2015, 24(4): 731-735.
- [4] 李榕,赵青. 基于颞下颌关节思考成人安氏Ⅱ<sup>2</sup>分类错殆畸形的治疗[J]. 国际口腔医学杂志, 2024, 51(6): 687-698.  
Li R, Zhao Q. Treatment of adult class II division 2 malocclusion based on temporomandibular joint[J]. Int J Stomatol, 2024, 51(6): 687-698.
- [5] Dworkin SF, LeResche L, DeRouen T, et al. Assessing clinical signs of temporomandibular disorders: reliability of clinical examiners[J]. J Prosthet Dent, 1990, 63(5): 574-579.
- [6] Leader JK, Robert Boston J, Rudy TE, et al. Quantitative description of temporomandibular joint sounds: defining clicking, popping, egg shell crackling and footsteps on gravel[J]. J Oral Rehabil, 2001, 28(5): 466-478.
- [7] Deng M, Long X, Dong H, et al. Electrosonographic characteristics of sounds from temporomandibular joint disc replacement[J]. Int J Oral Maxillofac Surg, 2006, 35(5): 456-460.
- [8] Tanzilli RA, Tallents RH, Katzberg RW, et al. Temporomandibular joint sound evaluation with an electronic device and clinical evaluation[J]. Clin Orthod Res, 2001, 4(2): 72-78.
- [9] Kręcis K, Bączkiewicz D, Kawala-Sterniuk A. Using nonlinear vibroarthrographic parameters for age-related changes assessment in knee arthrokinematics[J]. Sensors, 2022, 22(15): 5549.
- [10] Widmalm SE, Dong Y, Li BX, et al. Unbalanced lateral mandibular deviation associated with TMJ sound as a sign in TMJ disc dysfunction diagnosis [J]. J Oral Rehabil, 2016, 43(12): 911-920.
- [11] Bączkiewicz D, Majorczyk E. Joint motion quality in chondromalacia progression assessed by vibroacoustic signal analysis[J]. PM R, 2016, 8(11): 1065-1071.
- [12] Łysiak A, Marciniak T, Bączkiewicz D. Repeatability of the vibroarthrogram in the temporomandibular joints[J]. Sensors (Basel), 2022, 22(23): 9542.
- [13] Vasavi M, Ramaraju AV, Sajjan MCS, et al. An evaluation of the effect of wearing complete dentures on temporomandibular joint vibrations over time using the joint vibration analyzer[J]. J Indian Prosthodont Soc, 2023, 23(1): 30-37.
- [14] Md WK, Teresa Sierpiska MD P, Mba JR. Can devices for the instrumental analysis of temporomandibular joints be used interchangeably[J]. Cranio, 2021, 39(2): 165-171.
- [15] 奚晓菁,李嘉良,王琛,等. 可复性关节盘前移位患者关节振动的特征性研究[J]. 口腔医学, 2017, 37(4): 336-340.  
Xi XJ, Li JL, Wang C, et al. Characteristics of joint vibration of patients with anterior disc displacement with reduction in TMJ[J]. Stomatology, 2017, 37(4): 336-340.
- [16] 黄超,许向亮,孙玉春,等. 下颌髁突功能面三维运动轨迹的初步推算和模拟[J]. 中华口腔医学杂志, 2018, 53(10): 669-673.  
Huang C, Xu XL, Sun YC, et al. A preliminary study on the three-dimensional trajectory of condyle [J]. Chin J Stomatol, 2018, 53(10): 669-673.
- [17] Lee YH. Functional anatomy and vibration characteristics of the healthy temporomandibular joint: a narrative review[J]. J Korean Dent Sci, 2024, 17(1): 14-35.
- [18] Huang ZS, Lin XF, Li XL. Characteristics of tem-

- poromandibular joint vibrations in anterior disk displacement with reduction in adults[J]. *Cranio*, 2011, 29(4): 276-283.
- [19] Manfredini D, Basso D, Salmaso L, et al. Temporomandibular joint click sound and magnetic resonance-depicted disk position: which relationship[J]. *J Dent*, 2008, 36(4): 256-260.
- [20] Young AL. Internal derangements of the temporomandibular joint: a review of the anatomy, diagnosis, and management[J]. *J Indian Prosthodont Soc*, 2015, 15(1): 2-7.
- [21] Oster C, Katzberg RW, Tallents RH, et al. Characterization of temporomandibular joint sounds. A preliminary investigation with arthrographic correlation[J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol*, 1984, 58(1): 10-16.
- [22] de Oliveira LRLB, Alves IDS, Vieira APF, et al. Temporomandibular joint: from anatomy to internal derangement[J]. *Radiol Bras*, 2023, 56(2): 102-109.
- [23] 夏文棣, 傅开元. 颞下颌关节盘前移位对下颌功能和形态的影响及其生物学机制的研究进展[J]. *中华口腔医学杂志*, 2016, 51(3): 182-184.
- Xia WD, Fu KY. The influences of anterior disc displacement on oral mandibular function and morphology and their biological mechanisms[J]. *Chin J Stomatol*, 2016, 51(3): 182-184.
- [24] Topaloglu Yasan G, Adiloglu S, Tuz HH, et al. Evaluation of clinical signs and magnetic resonance imaging findings in patients with temporomandibular disorders[J]. *J Craniomaxillofac Surg*, 2023, 51(7/8): 441-447.
- [25] Xu Y, Zhan J, Zheng Y, et al. Synovial fluid dynamics with small disc perforation in temporomandibular joint[J]. *J Oral Rehabil*, 2012, 39(10): 719-726.
- [26] Lalue-Sanches M, Gonzaga AR, Guimaraes AS, et al. Disc displacement with reduction of the temporomandibular joint: the real need for treatment[J]. *J Pain Relief*, 2015, 4(5): 2-5.
- [27] Gupta B, Thumati P, Radke J. Temporomandibular joint vibrations from totally asymptomatic subjects[J]. *Cranio*, 2016, 34(3): 169-175.
- [28] Deregibus A, Castroflorio T, De Giorgi I, et al. Could different TMJ disc positions observed in MRI cause different sounds? Analysis on a group of subjects with ADD with reduction: a pilot study[J]. *Cranio*, 2014, 32(4): 265-274.
- [29] Jacewicz E, Alexander JM, Fox RA. Introduction to the special issue on perception and production of sounds in the high-frequency range of human speech[J]. *J Acoust Soc Am*, 2023, 154(5): 3168-3172.
- [30] Widmalm SE, Bae HEK, Djurdjanovic D, et al. Inaudible temporomandibular joint vibrations[J]. *Cranio*, 2006, 24(3): 207-212.
- [31] Grochala J, Grochala D, Kajor M, et al. A novel method of temporomandibular joint hypermobility diagnosis based on signal analysis[J]. *J Clin Med*, 2021, 10(21): 5145.
- [32] Sharma S, Crow HC, Kartha K, et al. Reliability and diagnostic validity of a joint vibration analysis device[J]. *BMC Oral Health*, 2017, 17(1): 56.
- [33] Srinivasan R, Gupta S, Chander NG, et al. Clinical validation of the tmd-e tracker for diagnosing temporomandibular disorders: a reliability and accuracy assessment[J]. *J Oral Biol Craniofac Res*, 2025, 15(4): 799-803.
- [34] Paiva G, Paiva PF, de Oliveira ON. Vibrations in the temporomandibular joints in patients examined and treated in a private clinic[J]. *Cranio*, 1993, 11(3): 202-205.
- [35] 王碧娟, 梁甲兴. 食物硬度对口颌系统发育的影响[J]. *国外医学·口腔医学分册*, 2003, 30(5): 411-413.
- Wang BJ, Liang JX. The effect of food hardness on orofacial development[J]. *Foreign Med Sci (Stomatol)*, 2003, 30(5): 411-413.
- [36] Ferreira LA, Grossmann E, Januzzi E, et al. Diagnosis of temporomandibular joint disorders: indication of imaging exams[J]. *Braz J Otorhinolaryngol*, 2016, 82(3): 341-352.
- [37] Kulesa-Mrowiecka M, Barański R, Kłaczyński M. sEMG and vibration system monitoring for differential diagnosis in temporomandibular joint disorders[J]. *Sensors (Basel)*, 2022, 22(10): 3811.

(本文编辑 吴爱华)