

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2107143

单侧电刺激辅助的下肢运动想象研究

刘昭君 赵丽 边琰 万佳乐

(天津职业技术师范大学 天津 300222)

摘要: 有研究表明,在下肢运动想象脑电信号分类中,在运动想象基础上加入稳态体感诱发电位能够得到更高的分类结果,但是研究大多都是基于双侧电刺激辅助诱发的体感电位,对于单侧电刺激辅助研究较少,本文对单侧脚踝胫后神经与双侧脚踝胫后神经分别施加电刺激,来探究何种刺激模式能够得到更好的分类结果。并设计了两组对照实验:单侧左脚电刺激模式 vs 单侧右脚电刺激模式以及单侧右脚电刺激模式 vs 双侧同时电刺激模式。综合频谱图、时频图谱、脑地形图特征分析结果得出,单侧右脚电刺激模式 ERD 特征最显著,激活程度最深。单侧右脚刺激模式比双脚同时刺激模式平均分类准确率高 5.57%,单个受试者单侧右脚刺激模式比双脚同时刺激模式分类准确率高 15%,证明了在单侧右脚电刺激辅助的情况下,更有利于下肢运动想象脑电信号的分类。

关键词: 下肢运动想象;单侧电刺激辅助;ERD 特征;稳态体感诱发电位

中图分类号: TN911.6 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4030

Research of lower limb motion imagination based on unilateral electrical stimulation assistance

Liu Zhaojun Zhao Li Bian Yan Wan Jiale

(Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

Abstract: Studies have shown that in lower limb movement category, imagine eeg signals based on the motion to imagine joining steady-state somatosensory evoked potentials can get higher classification results, but most studies are based on double side auxiliary body feeling potential induced by electrical stimulation, the unilateral electrical stimulation auxiliary study is less, in this paper, the unilateral posterior tibial nerves and bilateral ankle ankle posterior tibial nerve stimulation, respectively to find out what kind of stimulus can get better classification results. Two control experiments were designed: unilateral left foot electrical stimulation mode vs unilateral right foot electrical stimulation mode and unilateral right foot electrical stimulation mode vs bilateral simultaneous electrical stimulation mode. Based on the analysis of the characteristics of spectrum, time-frequency map and brain topography, it was concluded that the ERD characteristics of the unilateral right foot electrical stimulation mode were the most significant and the activation degree was the deepest. The average classification accuracy of unilateral right foot stimulation mode was 5.57% higher than that of dual stimulation mode, and the classification accuracy of single subject's unilateral right foot stimulation mode was 15% higher than that of dual stimulation mode, which proved that the assistance of unilateral right foot electrical stimulation is more conducive to the classification of lower limb motor imagination EEG signals.

Keywords: lower limbs motor imagery; unilateral electrical stimulation assistance; ERD; SSSEP

0 引言

研究显示,运动想象(motion imagery, MI)具有促进受损伤的运动传导通路修复或重建^[1],使部分处于休眠状态的突触苏醒过来并担当起代偿的作用,对中风患者或其他有神经功能障碍的患者的康复具有重要的意义^[2-3]。贺郁琳等^[4]通过实验证明运动想象能够显著提高脑卒中后偏

瘫患者上肢运动功能,提高患者的生活质量;马双媛等^[5]通过运动想象疗法帮助患者在潜意识中训练某项行为动作,使患者能够自觉践行正确的肢体活动。

很多研究人员针对舌^[6]、上肢^[7-8]等运动想象脑电信号进行研究,为了扩充运动想象的指令集,增加运动想象脑电信号的分类准确率,开始加入辅助刺激提高分类性能,通过施加一定频率的触觉刺激可以诱发稳态体感诱发电位^[9-10]

收稿日期:2021-07-02

(steady state somatosensory evoked potential, SSSEP), 它在大脑的感知皮层区域会出现包含刺激频率的基频和谐波成分的信号。上海交通大学姚林^[11]研究左右手腕同时增加振动刺激, 结果显示选择性感受所对应的脑区(C3和C4)激活程度要比没有刺激下的体感注意力朝向强; Yi等^[12]让被试者在手腕上的双侧正中神经加入电刺激同时进行运动想象, 并与只进行单独运动想象做对比, 结果MI与SSSEP结合后准确率提高14%。

研究表明, 大脑进行运动想象过程中, 体感刺激和运动想象都能够改变大脑皮层内的功能连通性^[13], 来激活或抑制特定的神经细胞, 引起mu和beta节律的幅值下降(ERD)或上升(ERS)。ERD/ERS现象被广泛应用在运动想象系统研究中, 此现象主要出现在Alpha频段(8~13 Hz)和Beta频段(14~30 Hz), 被试可以通过不同的运动想象任务来调节Alpha频段和Beta频段的能量和空间分布。

由于下肢的运动感觉皮层集中在中央CZ脑区^[14], 所以对下肢的分类研究不多, 有研究表明在脚踝胫后神经^[15]加入电刺激, 也能够诱发稳态体感诱发电位, 李小芹^[16]对双脚的胫后神经同时施加电刺激, 将下肢混合范式(MI结合SSSEP)和单纯MI进行对比, 发现在混合范式中能够得到更高的分类准确率。但是研究大多都是基于双侧电刺激辅助的实验, 对于单侧电刺激辅助研究较少, 所以本文进行了单侧电刺激辅助模式和双侧电刺激辅助模式的预实验, 在实验过程中发现单侧电刺激更能使被试者集中注意力, 而且ERD特征更明显, 所以本文开展正式实验, 设计不同

的实验模式, 即单侧左脚电刺激模式(只有左脚踝胫后加电刺激辅助)、单侧右脚电刺激模式(只有右脚踝胫后神经加电刺激辅助)和双侧同时电刺激模式(左右脚踝都加电刺激辅助), 通过频谱图、时频图谱、脑地形图等特征分析, 对比不同实验模式下的分类准确率, 寻找最优的刺激模式。

1 实验设计与安排

本实验选取了10名在校学生(5男, 5女), 年龄在20~25岁之间, 均为右利手。实验中采用新型电生理放大器Syn Amps2采集被试者的脑电信号, 电刺激辅助设备采用专注神经电生理领域研发的电刺激器, 在电刺激辅助环节, 需要在实验前测定好被试者的刺激电流强度, 具体是对被试者的脚踝胫后神经位置施加一定刺激频率的电流, 左脚刺激频率设为28 Hz, 右脚刺激频率设为33 Hz, 电流强度一般在10~30 mA。由于运动想象需要被试者充分集中注意力, 加入电刺激辅助可能会对其干扰, 所以在正式实验前需要进行3~4次的训练实验。正式实验前, 每位被试均被告知实验日和流程, 并签署了实验知情同意书。

本文设计了两组对照实验: 单侧左脚电刺激模式 vs 单侧右脚电刺激模式; 单侧右脚电刺激模式 vs 双侧同时电刺激模式。具体的实验流程如图1所示, 0~2 s开始准备, 2 s时开始加入电刺激, 2~4 s根据提示左脚或右脚准备想象, 4~9 s受试者需集中注意力根据提示进行脚部的运动想象, 9 s时停止电刺激, 9~11 s受试者进行放松休息。实验中每个范式均有2个小节, 每小节有40个trial(左右脚随机出现20个trial)。

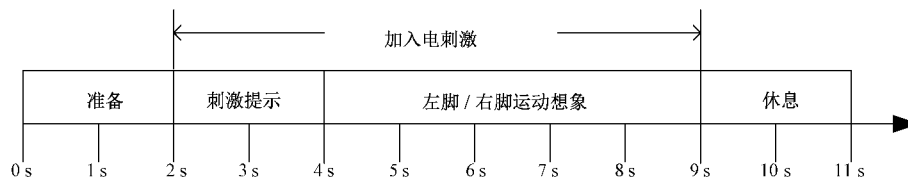


图1 任务模式示意图

2 数据处理与分析

2.1 单侧电刺激辅助模式对比

1) 快速傅里叶变换分析

由于在脚踝的胫后神经位置加入了电刺激, 所以采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)提取脑电信号中刺激频率基波和二次谐波处的频谱信息来确定是否诱发出稳态体感诱发电位。有研究表明稳态体感诱发电位在大脑皮层的中央区更加明显, 所以提取并分析了CZ导联处的频谱特征。其中全部受试者的电流刺激强度如表1所示, 可以看出绝大多数受试者的右脚踝电刺激强度略高于左脚踝的刺激强度, 左脚刺激强度的平均值为18.0 mA, 右脚刺激强度的平均值为19.0 mA。全部受试者的频谱特征如图2(a)和(b)所示, 可以看出经过快速傅里叶变换处理之后的脑电信号数据也是右脚的电刺激强

度高于左脚的电流刺激强度, 这与实际用电刺激器施加的电流刺激强度结果保持一致。

表1 10名受试者左右脚的电流刺激强度 mA

| 受试者编号 | 电刺激强度 | |
|-------|-------|------|
| | 左脚 | 右脚 |
| S1 | 18.0 | 19.0 |
| S2 | 15.0 | 16.5 |
| S3 | 20.0 | 20.5 |
| S4 | 18.0 | 17.0 |
| S5 | 16.0 | 17.0 |
| S6 | 16.0 | 17.5 |
| S7 | 18.5 | 19.5 |
| S8 | 24.0 | 26.0 |
| S9 | 20.5 | 22.0 |
| S10 | 14.0 | 15.0 |
| 平均值 | 18.0 | 19.0 |

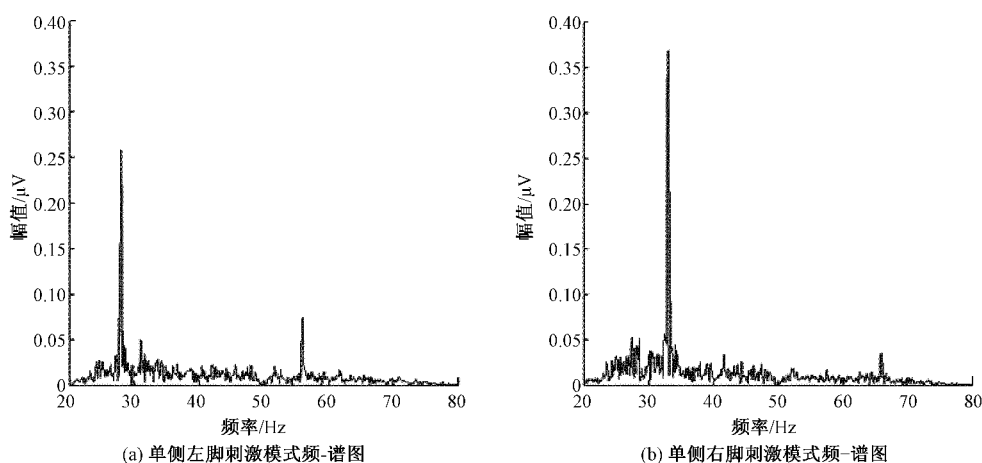


图 2 两种实验模式的平均频-谱图

2) 时频图谱分析

不同肢体部位脑电信号诱发的 ERD/ERS/SSSEP 特征分布的频率也不同,为了更清晰地从时频域观察不同任务的脑电信号特征,本研究采用时频图谱从时间和频率的变化来分析实验数据,具体是通过事件相关谱扰动值(event-related spectral perturbation, ERSP)来计算脑电信号的 ERD/ERS/SSSEP 特征,为了获取脑电信号特征随频率改变的能量变化,本实验中平均了 10 位被试者在运动想象任务期间的 ERSP 值来进行时频图谱分析。

图 3(a)和(b)为两种电刺激辅助下的平均时频图谱,通过图 3 可以看出单侧刺激下的两种模式均诱发出相应的稳态体感诱发电位。图 4(a)和(b)为单侧左脚刺激模式

在 Alpha 频段和 Beta 频段的平均时频图谱,图 4(c)和(d)为单侧右脚刺激模式在 Alpha 频段和 Beta 频段的平均时频图谱,将每个模式中想象左脚和想象右脚的任务分开分析,能够看到两种模式的 Alpha 频段(8~13 Hz)和 Beta 频段(14~25 Hz)均表现出了 ERD 特征。在单侧左脚电刺激模式中,可以看到施加电刺激的左脚 ERD 特征比未施加电刺激的右脚更明显,单侧右脚电刺激模式其结果与单侧左脚电刺激模式相反,施加电刺激的右脚 ERD 特征比未施加电刺激的左脚 ERD 特征更明显。通过图 4 两种模式进行比较,施加电刺激的一侧 ERD 特征更集中,在整个实验过程的调研中,被试者也普遍认为有施加电刺激的一侧更容易集中注意力,这与时频图谱得到的结果相吻合。

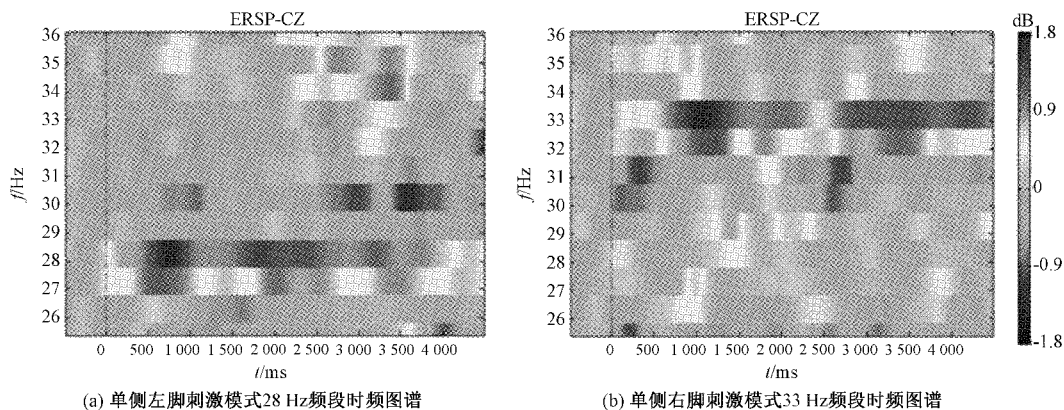


图 3 两种实验模式在 28 Hz 和 33 Hz 频段的平均时频图谱

3) 脑地形图分析

为了探究两种模式下脑电信号的空间分布情况,本文采用脑地形图进一步计算 ERD 特征,并分析对比不同实验模式的大脑激活差异。脑地形图(topographical map of brain)是脑电信号中某一特定频段内不同导联的频谱值在平面头皮上的分布。可以直观地表现出特征在大脑皮层上的分布情况,帮助我们分析脑电信号特征与肢体相关运动皮层的对应关系。本实验是基于 60 个导联(去除 CB1、

CB2、REF 和 GND 4 个导联)的 ERSP 值来构建脑地形图。

图 5(a)和(b)为单侧左脚刺激模式在 28 Hz 和 33 Hz 刺激频段的平均脑地形图,图 5(c)和(d)为单侧右脚刺激模式在 28 Hz 和 33 Hz 刺激频段的平均脑地形图,通过图 5 可知,两种刺激模式在 28 Hz 刺激频段和 33 Hz 刺激频段均未表现出对侧现象,而在中央区 CZ 导联附近有明显的 ERS 现象,说明从大脑皮层的空间分布状况能够看出两种模式均诱发出了稳态体感诱发电位;图 6(a)和(b)为

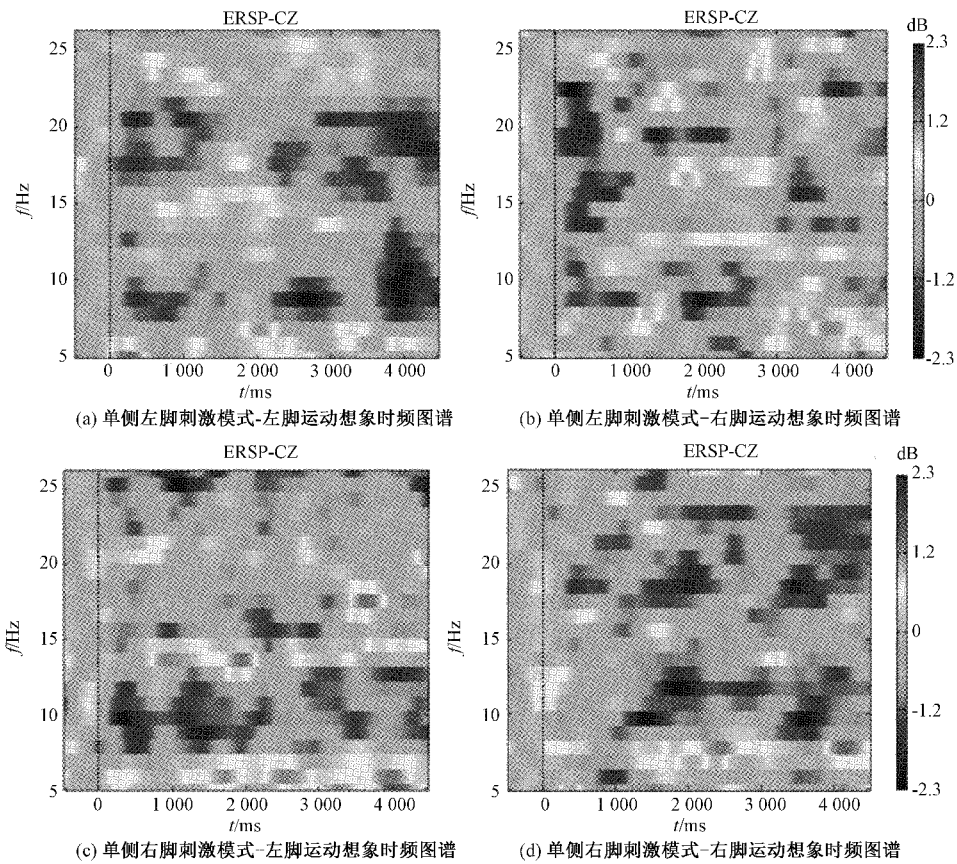


图 4 两种实验模式在 Alpha 频段和 Beta 频段的平均时频图谱

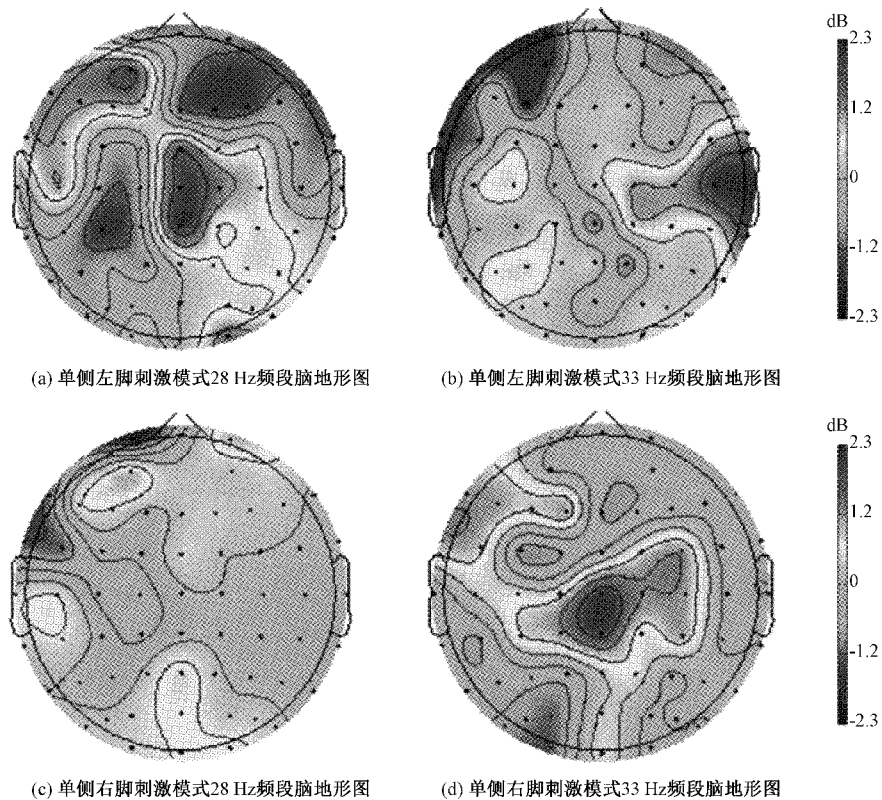


图 5 两种实验模式在 28 Hz 和 33 Hz 频段的平均脑地形图

两种刺激模式在 Alpha 频段的平均脑地形图,图 6(c)和(d)为两种刺激模式在 Beta 频段的平均脑地形图,通过图 6 可知,两种刺激模式在 CZ 导联附近有明显的

ERD 现象,而且 Alpha 频段均要比 Beta 频段的 ERD 特征更明显;单侧右脚刺激模式在特征频段上的 ERD 现象比侧单侧左脚刺激模式的 ERD 现象明显。

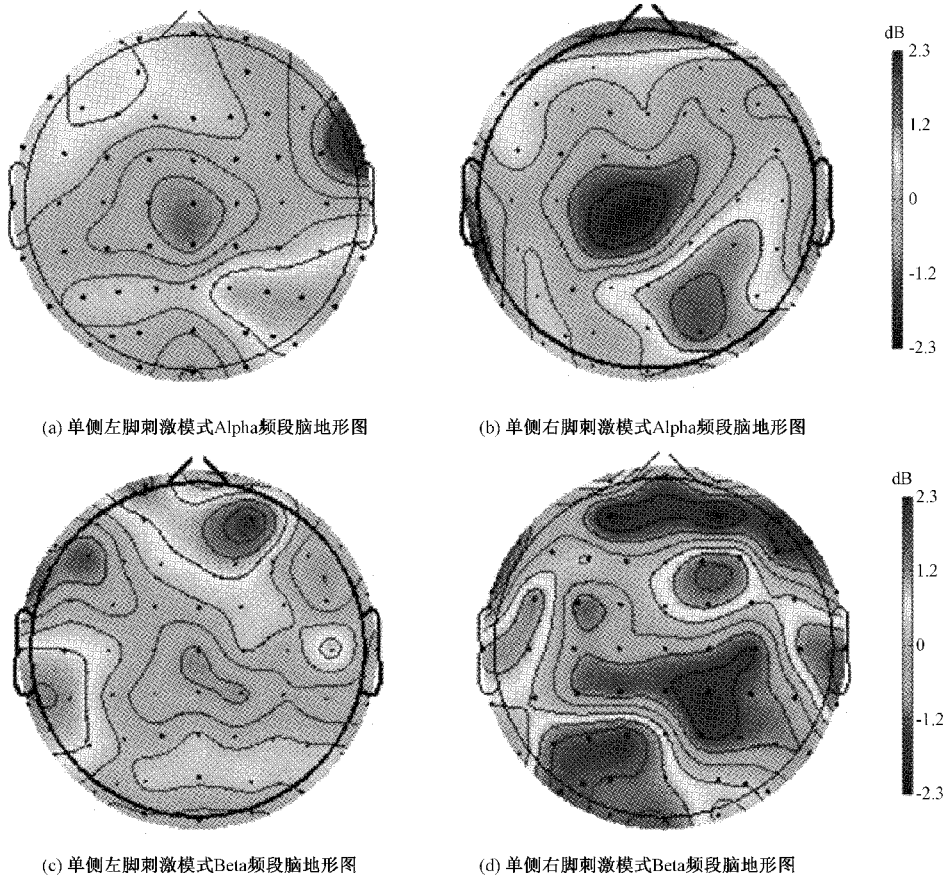


图 6 两种实验模式在 Alpha 频段和 Beta 频段的平均脑地形图

4) ERD 值分析

为了验证两种模式诱发出的 ERD 特征在频带宽度上

的差异,将 ERD 特征进行量化分析得到具体的数值,全部受试者在特征频段内的平均 ERD 值如表 2 所示。

表 2 两种实验模式下 Alpha 频段和 Beta 频段的平均 ERD 值

| 刺激模式 | 平均 ERD 值(Alpha 频段) | | | 平均 ERD 值(Beta 频段) | | |
|--------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| | 左脚 | 右脚 | 不分左右脚 | 左脚 | 右脚 | 不分左右脚 |
| 单纯左脚刺激 | -0.513 778 750 | -0.346 887 833 | -0.430 333 292 | -0.249 621 917 | -0.242 208 167 | -0.245 915 042 |
| 单纯右脚刺激 | -0.815 691 667 | -0.876 110 000 | -0.845 900 833 | -0.359 561 417 | -0.682 524 167 | -0.521 042 792 |

通过表 2 可以看出,单侧左脚刺激模式中左脚运动想象 ERD 值高于右脚,单侧右脚刺激模式中右脚的的运动想象 ERD 值高于左脚,而且两种刺激模式下的 Alpha 频段的 ERD 特征都比 Beta 频段内的特征更明显,由此通过具体的数值验证了前面时频图谱描述的特征结论。由表 2 还可以看出在不分左右脚的运动想象时,单纯右脚刺激模式在特征频段的 ERD 值均高于单纯左脚刺激模式。

2.2 单侧与双侧刺激辅助模式对比

1) 时频图谱分析

在单侧刺激辅助模式对比中,由于单侧右脚电刺激模

式其 ERD 特征更好,所以选取单侧右脚电刺激辅助模式与双侧同时电刺激模式进行对比分析。

图 7(a)和(b)为单侧右脚电刺激模式与双脚同时电刺激模式在 28 Hz 和 33 Hz 频段的平均时频图谱,可以看出两种刺激模式均诱发出了稳态体感诱发电位特征;图 8(a)和(b)为单侧右脚电刺激模式下左右脚的运动想象时频图谱。图 8(c)和(d)在双侧同时电刺激模式中,比较左脚和右脚的时频图谱,可以看到右脚的 ERD 特征更明显,这可能与右脚的电刺激强度高于左脚的刺激强度有关。两种刺激模式比较,想象右脚比想象左脚的 ERD

特征更加明显,而且单侧右脚电刺激模式的 ERD 特征要强于双侧同时电刺激模式的 ERD 特征,这也说明单独一

侧施加电刺激更容易集中注意力,从而运动想象效果更好。

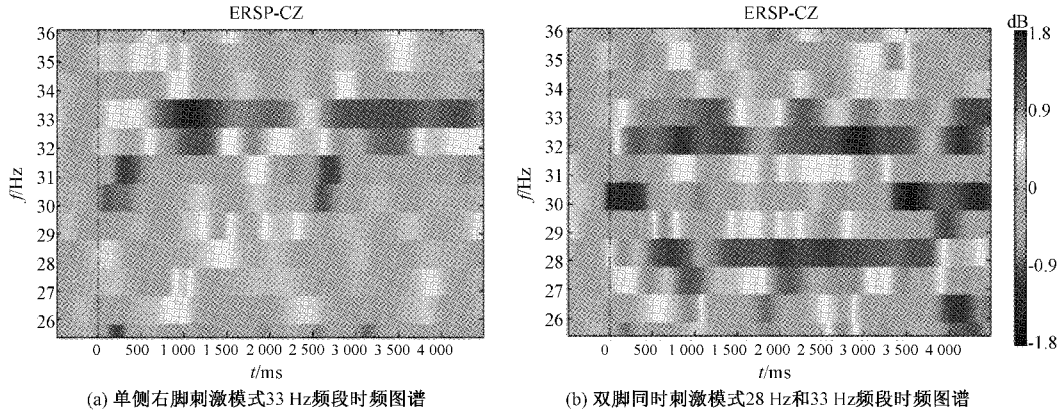


图 7 两种实验模式在 28 Hz 和 33 Hz 频段的平均时频图谱

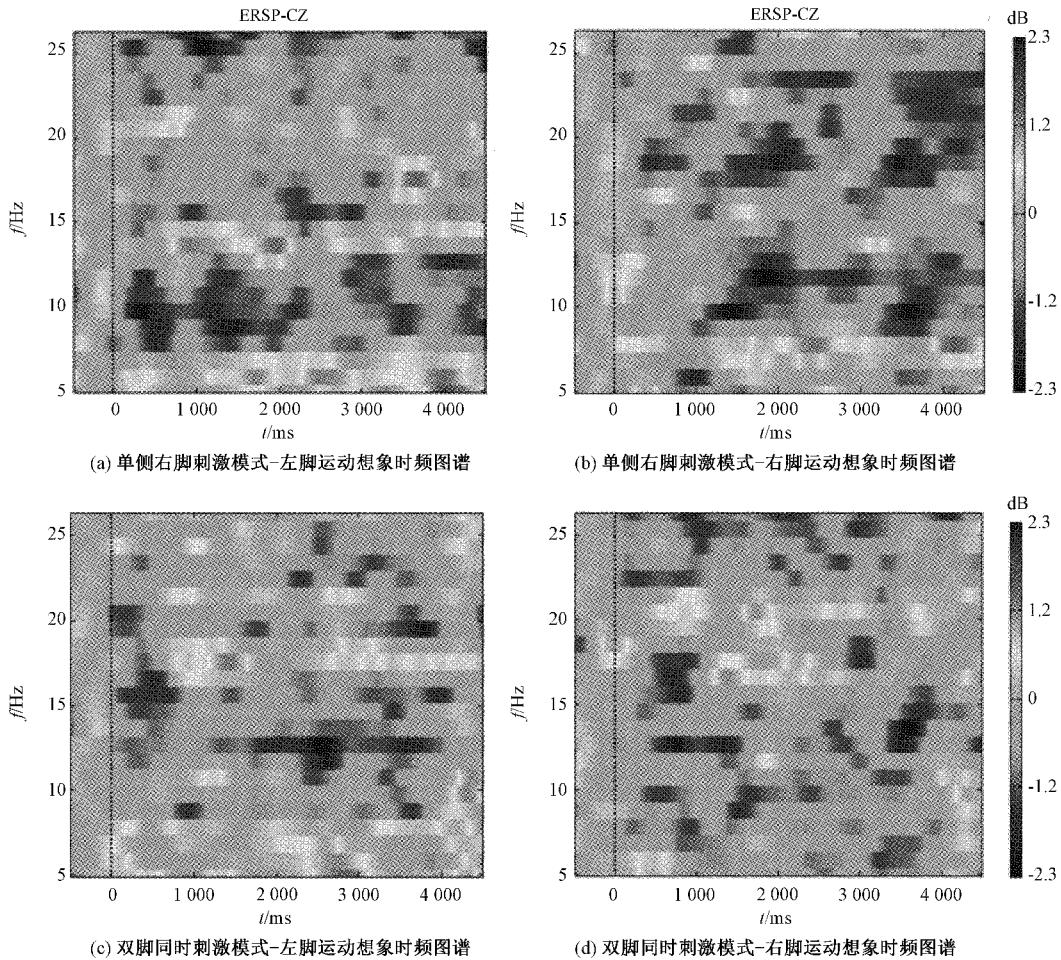
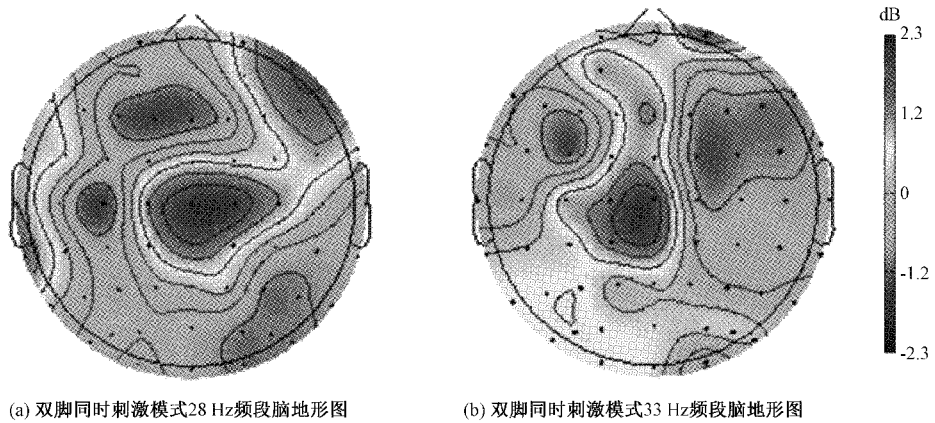


图 8 两种实验模式在 Alpha 频段和 Beta 频段的平均时频图谱

2) 脑地形图分析

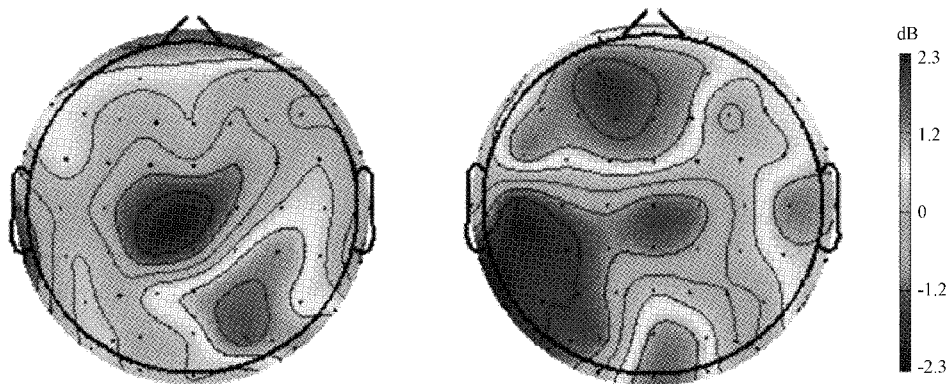
图 9(a)和(b)为双脚同时刺激模式在 28 Hz 和 33 Hz 频段的平均脑地形图,图 10(a)和(b)为两种刺激模式下 Alpha 频段的平均脑地形图,图 10(c)和(d)为两种刺激模式下 Beta 频段的平均脑地形图,通过图 9 和 10 可知,两种

刺激模式在 CZ 导联附近有明显的 ERD 现象,而且 Alpha 频段均要比 Beta 频段的 ERD 特征更明显;同时也能看到单侧右脚刺激模式在特征频段上的 ERD 现象均比双脚同时刺激模式的 ERD 现象明显。

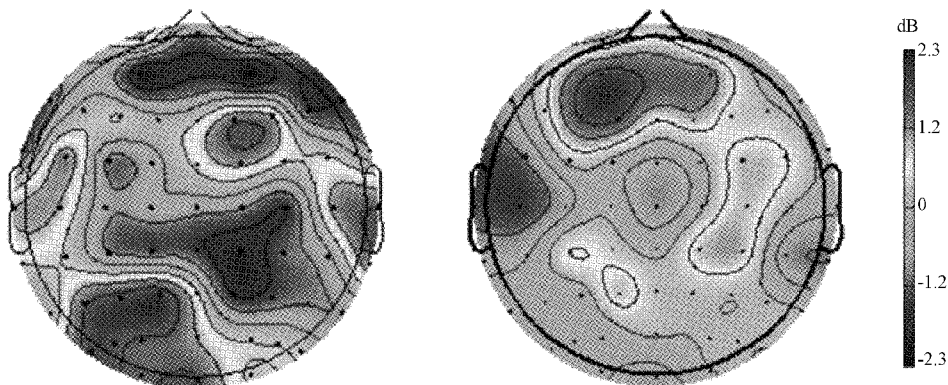


(a) 双脚同时刺激模式28 Hz频段脑地形图 (b) 双脚同时刺激模式33 Hz频段脑地形图

图 9 双脚同时刺激模式在 28 Hz 和 33 Hz 频段的平均脑地形图



(a) 单侧右脚刺激模式Alpha频段脑地形图 (b) 双侧同时刺激模式Alpha频段脑地形图



(c) 单侧右脚刺激模式Beta频段脑地形图 (d) 双侧同时刺激模式Beta频段脑地形图

图 10 两种实验模式在 Alpha 频段和 Beta 频段的平均脑地形图

3) ERD 值分析

通过表 3 可以看出单纯右脚刺激模式和双脚同时刺激模式在特征频段上右脚运动想象的 ERD 值均高于左脚,在不分左右脚的运动想象时,单纯右脚刺激模式在特征频段的 ERD 值均高于双脚同时刺激模式,如表 4 所示,通过 t 检验可以看出单侧右脚电刺激模式 vs 双脚同时电刺激的在 Alpha 频段和 Beta 频段的 ERD 特征间的差异均具有统计学意义($P < 0.05$),说明减少一侧肢体的电刺激

辅助还能得到相应的特征效果,此任务具有可行性。

2.3 特征提取和分类

为了有效提取 3 种实验模式诱发的脑电信号中不同频率分布的 ERD 和 SSSEP 特征,本研究采用了一种基于多频率成分空间滤波的滤波组共空间模式(filter bank common spatial pattern, FBCSP)算法,首先设计三阶巴特沃斯带通滤波器,将数据分成不同频段的脑电成分,具体是将 8~26 Hz 的频段分为 5 个子频段(即 8~14 Hz, 11~

表 3 两种实验模式下 Alpha 频段和 Beta 频段的平均 ERD 值

| 刺激模式 | 平均 ERD 值(Alpha 频段) | | | 平均 ERD 值(Beta 频段) | | |
|--------|--------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|----------------|
| | 左脚 | 右脚 | 不分左右脚 | 左脚 | 右脚 | 不分左右脚 |
| 单纯右脚刺激 | -0.815 691 667 | -0.876 110 000 | -0.845 900 833 | -0.359 561 417 | -0.682 524 167 | -0.521 042 792 |
| 双脚同时刺激 | -0.515 524 917 | -0.637 899 167 | -0.576 712 042 | -0.184 516 167 | -0.244 195 167 | -0.214 355 667 |

表 4 两种实验模式在 Alpha 频段和 Beta 频段的 P 值

| 不同刺激模式比较 | P 值 | |
|-----------------------|---------------|---------------|
| | Alpha 频段 | Beta 频段 |
| 单侧右脚电刺激 vs 双脚同时电刺激 | 0.040 656 130 | 0.003 759 688 |

17 Hz, 14~20 Hz, 17~23 Hz 和 20~26 Hz), 再在 5 个子频段的基础上增加了 4 个额外的 SSSEP 特征频段, 然后对每个频段的脑电成分先进行空间滤波再特征提取, 最后将提取到的信息量最大的特征送入支持向量机 (support vector machine, SVM) 中进行分类。为了验证此算法的准确程度, 所以本研究采用十折交叉验证方法得到三种实验模式的平均分类准确率, 具体结果如表 5 所示。

表 5 10 位受试者的分类准确率及平均分类准确率

| 受试者 | 刺激模式 | | | % |
|-----|--------|--------|--------|---|
| | 双脚同时刺激 | 单纯左脚刺激 | 单纯右脚刺激 | |
| S1 | 73.75 | 71.25 | 70.00 | |
| S2 | 70.00 | 72.50 | 81.25 | |
| S3 | 71.25 | 76.25 | 86.25 | |
| S4 | 65.00 | 76.25 | 70.00 | |
| S5 | 71.25 | 68.75 | 71.25 | |
| S6 | 73.75 | 70.00 | 75.75 | |
| S7 | 70.00 | 71.25 | 76.25 | |
| S8 | 66.25 | 67.50 | 70.00 | |
| S9 | 75.00 | 73.75 | 80.00 | |
| S10 | 65.00 | 66.25 | 76.25 | |
| 平均值 | 70.13 | 71.38 | 75.70 | |

根据表 5 可知, 3 种实验模式的分类准确率均在 70% 以上, 双脚同时刺激模式的平均分类准确率为 70.13%, 单侧右脚刺激模式的平均分类准确率为 75.70%, 双脚同时刺激模式准确率最高为 73.75%, 而单侧右脚刺激模式准确率最高达到 86.25%。根据 t 检验得到双脚同时电刺激 vs 单侧右脚电刺激模式分类准确率的差异性均具有统计学意义 ($P=0.031 43 < 0.05$), 研究证明减少一侧肢体的电刺激辅助高于双脚同时电刺激辅助的分类准确率, 更有利于下肢脑电信号的分类, 为下肢运动想象脑电信号分类研究提供了一定的参考价值。

3 分析与讨论

本文主要研究下肢运动想象脑电信号分类中, 何种实验模式能够得到更高的分类准确率, 因此本文设计了两组对照实验: 1) 单侧左脚电刺激模式 vs 单侧右脚电刺激模式; 2) 单侧右脚电刺激模式 vs 双侧同时电刺激模式。采用频谱图、时频图谱、脑地形图特征分析。第 1 组对照实验通过时频图谱和脑地形图分析可知, 施加电刺激的一侧 ERD 特征更集中; 第 2 组实验中, 单侧右脚刺激模式下的特征频段内, 脑电信号的 ERD 值更大, ERD 特征更明显, 且根据脑地形图看出, 单侧右脚刺激范式下 ERD 特征的激活范围更广且激活程度更深。并通过 FBCSP 算法与 SVM 算法结合对采集到的脑电信号进行分类识别, 单侧右脚刺激模式比双脚同时刺激模式平均分类准确率高 5.57%, 单个受试者单侧右脚刺激模式比双脚同时刺激模式分类准确率高 15%。综上所述, 单侧右脚电刺激模式不仅有更明显的 ERD 特征, 同时也有更高的分类准确率, 说明单侧右脚电刺激辅助的情况下, 更有利于下肢运动想象脑电信号的分类。

4 结 论

为了研究单侧电刺激辅助的下肢运动想象脑电信号的分类情况, 本文通过频谱图、时频图谱、脑地形图特征、ERD 值等特征分析方法, 再利用 FBCSP 与 SVM 算法结合得出每个刺激模式的分类准确率。从分析结果可以看出, 单侧右脚刺激范式的 ERD 特征更明显, ERD 值更大, 平均分类准确率可为 75.70%, 最高的分类准确率可达 86.25%, 比双侧同时电刺激模式的想象准确率要高。综上所述, 单侧电刺激辅助在下肢运动想象分类中可以起到积极的作用。此范式可以使康复训练系统更有效, 在一定程度上推进了 BCI 系统走出实验室走向实用化的进程。

参考文献

- [1] 李鹏海, 王丽余, 刘瀛涛, 等. 下肢运动想象和运动执行的 EEG 节律特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(3): 207-214.
- [2] 张晓瑜, 何媚英. 运动想象对脑卒中患者肢体运动功能恢复的影响[J]. 护理实践与研究, 2019, 16(12): 79-80.
- [3] 褚亚奇, 朱波, 赵新刚, 等. 基于时空特征学习卷积神经网络的运动想象脑电解码方法[J]. 生物医学工程学报, 2021, 38(1): 1-9.

- [4] 贺郁琳,徐月花,汤阿毛. 运动想象对脑卒中后偏瘫患者上肢运动功能及生活质量的影响[J]. 中国现代医生, 2020, 58(22): 110-113.
- [5] 马双媛,杨欣刚. 运动想象疗法对脑卒中偏瘫患者日常活动能力和运动功能的影响[J]. 现代实用医学, 2019, 31(12): 1656-1658.
- [6] 孙品. 舌针结合运动想象疗法在中风后吞咽障碍患者康复护理中的临床研究[D]. 武汉:湖北中医药大学, 2019.
- [7] 潘明月,陆关珍,李盼,等. 运动想象疗法对脑卒中病人上肢功能影响的 Meta 分析[J]. 循证护理, 2021, 7(2): 163-173.
- [8] 李敏,赵丽,边琰,等. 训练时间对上肢 MI 侧向性识别的影响研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(2): 78-82.
- [9] KIM K T, LEE S W. Wheelchair control based on steady-state somatosensory evoked potentials [C]. IEEE International Conference on Systems, 2016:1-4.
- [10] 徐桂芝,胡忠涛,王磊,等. 基于 CNN 算法的稳态体感诱发电位的特征识别[J]. 中国生物医学工程学报, 2019, 38(3): 298-305.
- [11] 姚林. 刺激辅助的脑电信号特征增强方法与混合式脑机接口[D]. 上海:上海交通大学, 2015.
- [12] YI W, QIU S, WANG K, et al. Enhancing performance of a motor imagery based brain-computer interface by incorporating electrical stimulation-induced SSSEP [J]. Journal of Neural Engineering, 2016, 14(2): 026002.
- [13] 浦江波,安兴伟,李杰威,等. 基于体感电刺激的脑-机接口实验范式初探(英文)[J]. 纳米技术与精密工程, 2015, 13(5): 376-382.
- [14] DUAN L, ZHANG H, KHAN M S, et al. Recognition of motor imagery tasks for BCI using CSP and chaotic PSO twin SVM[J]. The Journal of China Universities of Posts and Telecommunications, 2017, 24(3): 83-90.
- [15] KEE Y J, WON D O, LEE S W. Classification of left and right foot movement intention based on steady-state somatosensory evoked potentials [C]. 2017 5th International Winter Conference on Brain-Computer Interface(BCI), 2017:1-5.
- [16] 李小芹. 基于体感诱发和运动想象的下肢侧向性识别研究[D]. 天津:天津职业技术师范大学, 2018.

作者简介

赵丽(通信作者),教授,主要研究方向为智能信息处理、生物医学信号处理。

E-mail:jinshihui@163.com