

文章编号:1004-9037(2013)05-0000-06

基于左右手运动想象的在线算法设计与应用

王洪涛^{1,2} 邹鹤良² 李达强¹ 

(1. 五邑大学信息工程学院, 江门, 529020; 2. 华南理工大学自动化学院, 广州, 510641)

摘要:设计了基于左、右手运动想象的脑电信号预处理、共同空域模式特征提取、SVM分类在线算法,开发了无线发射、接收开关硬件模块,实现了在线脑电开关系统。受试者可以用脑电波来遥控电灯的开关,这为重症瘫痪病人拓展其与自然的直接交流开辟了新的通道。5位健康的受试者参与了训练实验和在线实验,实验结果表明:经过特定训练,受试者均可有效控制该脑电开关系统,其平均正确率达90%,单个指令输出时间平均为4s。

关键词:脑机接口; 运动想象; 异步系统; 共空域模式

中图分类号:TP399;R318

文献标志码:A

Left/Right-Hand-Motor-Imagery-Based Online Algorithm Design and Its Application

Wang Hongtao^{1,2}, Zou Heliang², Li Daqiang¹

(1. School of Information Engineering, Wuyi University, Jiangmen, 529020, China;

2. College of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou, 510641, China)

Abstract: An online motor imagery detect algorithm is proposed, including electroencephalography (EEG) preprocessing, common spatial patterns feature extraction, support vector machine (SVM) classification, and threshold mechanism. By designing the light wireless switch hardware module, a light switch system controlled by EEG is developed. Participants can use their brain waves to remotely control the turn-on and turn-off of light, which especially provides a new direct communication channel for patients suffering from amyotrophic lateral sclerosis (ALS) with the nature. Five healthy subjects participated in a training experiment and an online experiment. The experimental results show that, after a specific training procedure, participants can effectively control the light switch system with an average accuracy of 90% and an average time of 4 s for each single command.

Key words: brain-computer interface; motor imagery; common spatial patterns

引 言

国家中长期科技发展规划纲要提出,2015年我国实现“人人享有康复服务”的国家战略目标,并且把“康复工程”作为国家科技支撑计划重点资助项目。在助老助残与康复机器人领域,许多残障人士连设备开关都不能有效操作,也不能可靠地使用

诸如语音识别技术等辅助支持手段。如何有效地利用先进的人-机交互手段,在日常生活中辅助残障人士和老年人,提高其生活质量,成为先进高级人机交互技术中的一个新问题。

在国际脑机接口(Brain-computer interface, BCI)会议上,脑机接口被定义为一种不依赖于脑的正常神经和肌肉输出通路的脑机通信系统,是大脑和外界进行信息交换的直接通道^[1,2]。脑电^[3]

基金项目:国家高科技发展研究计划(“八六三”计划)(2012AA011601)资助项目;广东高校优秀青年创新人才培养计划(LYM 11122)资助项目;2012年度江门市第一批产业技术研究与开发项目(江财工[2012] 156号)资助项目;广东省大学生创新创业训练(1134912036)资助项目。

收稿日期:2013-06-25;**修订日期:**2013-07-30

是大脑细胞的群体反应,非嵌入式脑电信号是目前脑机接口的是一种实用方法。其中,基于运动想象(Motor imagery, MI)的BCI是最为广泛的一类,其原理为:清醒的受试者在从事任何与感觉运动相关的活动时,感觉运动皮层区域能够检测到8~12 Hz节律的脑电波,这种节律称为Mu节律。通常Mu节律出现的同时,伴随18~26 Hz的Beta节律出现。Beta节律的一部分是Mu节律的倍频,另外一部分是独立的脑电特征,因此许多BCI系统都会采用这两个节律作为脑电特征。Mu和Beta节律与脑的运动区域有关联,准备运动或实际运动伴随着对侧的Mu和Beta节律的下降,称为事件相关去同步(Event-related desynchronization, ERD),而运动的结束伴随着这两个节律的上升,称为事件相关同步(Event-related synchronization, ERS)^[4]。目前,针对ERD/ERS特征提取的方法主要有以下几种:(1)功率谱分析,通过计算信号的能量确定其随频率的变化关系,缺点是对于短数据很难得到精确的谱估计;(2)时频分析,优势在于能够获得各个时刻的谱成分,不足是不能同时获得很高的时间分辨率和频率分辨率,且非线性时频分布存在交叉项干扰;(3)自适应自回归(Adaptive autoregressive, AAR)^[5]。该方法能够获得分辨率较高的谱估计,但需要有信号的先验知识,且对伪迹敏感;(4)共同空间模式(Common spatial patterns, CSP),该方法基于两个协方差矩阵的同时对角化来设计最优的空间滤波器,以分辨左、右手运动想象,利用了信号的时间、空间特性,采用多通道分析。由于不需要预先选择受试者特异性的频带,被认为是一种有效的运动想象特征提取方法^[6,7]。

BCI作为一门新兴交叉学科,正受到国内外众多研究者的重视和研究,并在康复医学工程、辅助控制、军事等领域显示了重要的研究价值和广阔的应用前景。目前基于左右手运动想象脑机接口的研究已逐步实现了从离线系统到在线系统的过渡,并有从实验室展示品到实际产品过渡的趋势。徐宝国等^[8]利用小波变换开展了基于运动想象脑电的在线脑机接口实验研究。施锦何等^[9]利用BCI2005的desc-IIIa组数据,完成了4类运动想象脑电信号特征提取与分类算法,取得了较好的分类效果,但其实验结果仅基于离线数据分析。王洪涛等^[10]利用事件关联电位脑机接口设计了电视遥控系统,系统平均准确率可达87%,平均传输速率(ITR)可达35 bit/min,可以满足系统实时性要

求,因受事件关联电位脑机接口范式所限,如果采用基于左右手运动想象脑机接口或稳态视觉诱发电位^[11](Steady-state visual evoked potential, SS-VEP)等其他范式将有利于进一步提高系统的实时性。

本文结合运动想象脑电信号的特点,设计了脑电信号的预处理、特征提取、SVM分类算法,开发了无线开关硬件模块,实现了脑电开关系统。受试者可以用脑电波来遥控电灯的关、开,为拓展人与自然的直接交流开辟了新的通道。

1 系统总体设计

脑电开关系统由Neuroscan-NuAmps脑电采集仪、运行脑电信号处理算法的DELL台式电脑、无线发射模块、无线接收模块及电灯组成,其结构如图1所示。受试者头戴32导联电极帽,Neuroscan-NuAmps脑电采集仪实时采集脑电信号,经过预处理,CSP特征提取,支持向量机(Support vector machine, SVM)分类,判断出受试者的操作意图,并转化为相应指令发送到笔记本USB接口。无线发射模块通过USB接口接收指令并发送,接收模块接收到指令后控制电灯的开关。

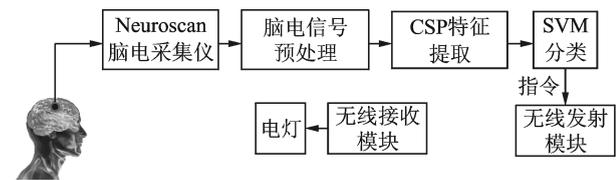


图1 脑电开关系统结构图

1.1 在线处理算法

在线处理算法主要由脑电信号预处理、CSP特征提取、SVM分类3个过程。具体步骤如下:

步骤1 脑电信号预处理,首先将30导联EEG信号通过切比雪夫I型8~12 Hz带通滤波器,提取Mu节律频段。头皮脑电信号频率范围为0.1~10 Hz,本文通过带通滤波器做预处理,可以去除无关频段的信号成分。

步骤2 CSP特征提取。即:寻找一个空间滤波器,使待分类的两类信号(运动想象时的左手和右手)经过空间滤波后被最大限度的区分,算法基于两个协方差矩阵同时对角化,使其中一类信号方差最大的同时另一类信号的方差最小。具体为

(1) 分别计算两类信号的协方差矩阵

$$\mathbf{R}_l = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \mathbf{R}_l(i), \mathbf{R}_r = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \mathbf{R}_r(i) \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}_l(i)$ 和 $\mathbf{R}_r(i)$ 表示分别对应于左手 l 类和右手 r 类, 第 n 次实验的协方差矩阵。

(2) 对联合协方差矩阵 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_l + \mathbf{R}_r$ 进行奇异值分解

$$\mathbf{R} = \mathbf{U}_0 \mathbf{\Lambda}_C \mathbf{U}_0^T \quad (2)$$

(3) 分别对 \mathbf{R}_l 和 \mathbf{R}_r 进行白化变换得

$$\mathbf{S}_l = \mathbf{P} \mathbf{R}_l \mathbf{P}^T, \mathbf{S}_r = \mathbf{P} \mathbf{R}_r \mathbf{P}^T$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{\Lambda}_C^{-1/2} \mathbf{U}_0^T \quad (3)$$

(4) 对 \mathbf{S}_l 和 \mathbf{S}_r 进行联合特征值分解, 得到它们共同的特征向量 \mathbf{U} , 投影矩阵 $\mathbf{W} = \mathbf{U}^T \mathbf{P}$ 即为空间滤波器, 于是对于每次实验的 EEG 数据矩阵 $\mathbf{X}(i)$ 投影后得到

$$\mathbf{Z}(i) = \mathbf{W} \mathbf{X}(i) \quad (4)$$

选取每个投影后的 $\mathbf{Z}(i)$ 取其方差作为特征。该过程将在第 3.1 节做进一步说明。

步骤 3 线性核 SVM^[12] 分类器进行分类, 输出值 θ 。

该分类方法是用核函数将输入向量映射到一个高维特征空间, 并在该空间构造最优分类超平面, 对最优超平面的构造归结为凸二次规划问题。

$$\min \left(C \sum_{i=1}^p \eta_i + \frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 \right)$$

$$\text{s. t. } \mathbf{y}_i (\mathbf{w} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}_i) + \mathbf{b}) + \eta_i \geq 1$$

$$\eta_i \geq 0; i = 1, \dots, l \quad (5)$$

式中: \mathbf{x} 为 SVM 的输入向量, \mathbf{y}_i 为 \mathbf{x}_i 的类别, \mathbf{w} 为超平面的法向量, \mathbf{b} 为超平面的偏置向量, η_i 为松弛变量, C 为惩罚因子, $\mathbf{f}(\cdot)$ 为核函数。

该二次规划问题可用其对偶规划求解

$$\max_{\alpha_i} -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \mathbf{y}_i \mathbf{y}_j \alpha_i \alpha_j K \langle \mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j \rangle + \sum_{i=1}^p \alpha_i$$

$$\text{s. t. } \sum_{i=1}^p \mathbf{y}_i \alpha_i = 0$$

$$\alpha_i \geq 0; i = 1, 2, \dots, p \quad (6)$$

SVM 输出为

$$\text{score}_{\text{SVM}} = \sum_{i=1}^p \mathbf{y}_i \alpha_i K \langle \mathbf{x}_i, \mathbf{x} \rangle + \mathbf{b} \quad (7)$$

步骤 4 阈值机制调控系统输出。系统参数设置左右两个阈值 θ_l, θ_r , 时间 $T = 3$ s。其调控机制为: SVM 的输出值 θ 首先分别与 θ_l 或 θ_r 比较, 若小于任何一个阈值则不输出指令, 若大于任何一个阈值则开始计算持续时间, 若持续时间大于 3 s

则输出一个相应的指令, 并传送到 DELL 笔记本电脑 USB 接口。

1.2 无线发射与接收模块设计

无线发射模块以 ATmega8L 作为核心芯片, 串口转换芯片 PL2303 接收来自 USB 的指令, 经过数字编码芯片 PT2262 产生序列脉冲, 通过 ASK 调频方式调制后以 315 MHz 载波经过天线发送, 如图 2(a) 所示。天线接收到信号后通过解调接收器将接收的信号还原为序列脉冲, 经过数字解码芯片 PT2272 解码后驱动电灯开关, 接收部分电路原理如图 2(b) 所示。

2 系统实验

2.1 实验设置

实验对象为 5 名健康受试者 (3 名男性, 2 名女性), 年龄在 24~33 岁之间, 其中受试者 E 以前没有脑机接口实验经验。

受试者头戴 32 导联电极帽, 以左耳为参考电平, 其中 HEOG 和 VEOG 两路导联悬空, 利用剩余 30 路导联采集脑电信号。为保证电极与头皮有良好的接触, 电极帽插孔中注入导电胶, 并保持电阻小于 5 k Ω 。

实验室保持安静状态且光线适宜, 受试者坐在电脑显示屏前, 眼睛距屏幕 50~100 cm, 熟悉用户界面的工作原理及使用方法, 先进行训练实验, 训练实验完成后, 才开始在线实验。

实验环境: DELL 台式电脑 Intel(R) CPU (2.0 GHz), Win 7 操作系统, MATLAB R2008b 环境, 由脑电信号采集仪 Neuroscan-NuAmps40 采集, 设置采样频率是 250 Hz。采集并存储受试者的脑电信号, 保存受试者姓名-实验名称-日期.cn 文件, 并进行实时数据处理。

2.2 训练实验

训练实验模式参照奥地利 GRAZ 大学在 2003 年脑机接口^[13]竞赛中提供的范式。单次实验采集到的数据集为一个训练样本: 0~2 s 系统电脑显示屏无显示, 受试者处于安静状态; 2 s 时电脑显示屏出现一个“+”并有提示音; 3 s 时随机出现“←”或者“→”, 受试者根据提示进行左、右手运动想象, 持续到第 7 s。受试者训练实验共进行 60 组, 得到 60 个训练样本。利用训练样本, 训练模型。

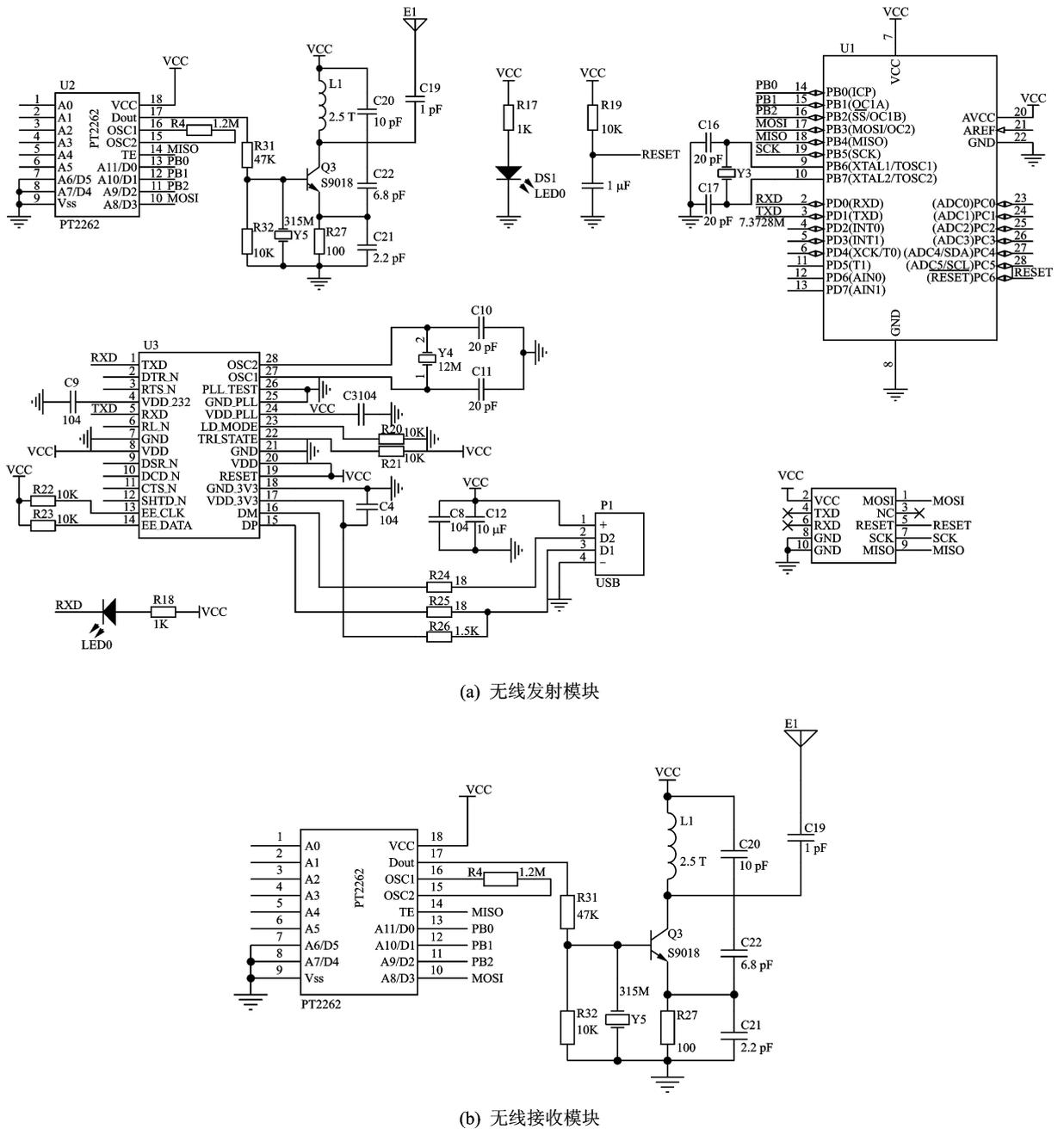


图2 无线发射模块和接收模块原理图

2.3 在线实验

进行在线实验时受试者可以根据自己的意愿进行开关控制。为评估本系统性能,5位受试者进行了定向任务。实验为完成20个定向目标任务为1组,一天共分时段进行5组实验,整个实验需进行2天,共10组。实验后统计每位受试者的实验正确率,正确率=输出指令与期望相符的个数/输出指令总数。操作过程具体情况如表1所示,表1为5位受试者的操作正确率及单个指令输出时间

统计结果。

表1 受试者在线操作准确率及单个指令输出时间统计结果

受试者	准确率/%	单个指令输出时间/s
A	92±3	3.4±0.3
B	90±1	3.6±0.4
C	89±4	3.5±0.4
D	93±2	3.7±0.3
E	88±3	4.5±0.4
平均值	90±5	4.0±0.9

3 实验分析

3.1 左、右空间滤波器

笔者选择受试者 A 的实验数据进行离线分析,首先通过共空域模式方法把高维脑电数据投影到低维的特征空间,如前 1.1 节在线处理算法所述,空间滤波器 W 由所有导联位置的权重向量组成,具备良好的空间特性,可以通过绘制脑电地形图更加清晰地展示。选取 W 的第一行、最后一行组成两个 CSP 滤波器^[6],这两个滤波器分别对应左、右手想象的脑电地形图如图 3 所示。

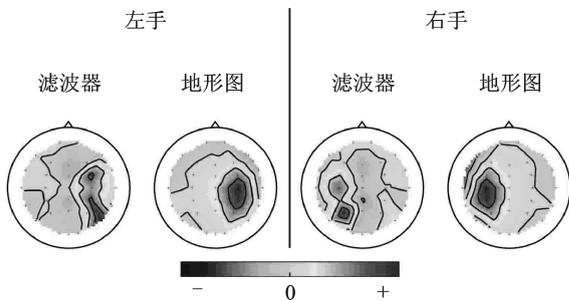


图3 空间滤波器和左、右手想象脑电地形图

3.2 异步控制

系统参数设置左右两个阈值 θ_l, θ_r , 时间 $T=3$ s。其调控机制为: SVM 的输出值 θ 首先分别与 θ_l 或 θ_r 比较,若小于任何一个阈值则不输出指令,如大于任何一个阈值则开始计算持续时间,若持续时间大于 3 s 则输出一个相应的指令。该方法巧妙地避开了空闲状态 (Ideal state) 的检测,在算法的终端采用阈值调控,避免了错误出发,有效达到了异步控制。此外通过设置 θ_l, θ_r , 可以增加受试者在实际操作过程中对于左、右的敏感度,而持续时间 T , 可以进一步确认受试者真正的操作意图。

4 结束语

总体来看,5 位受试者使用脑机接口遥控平均正确率达 90%, 单个指令输出时间平均为 4 s, 其中一位受试者 E 并没有脑机接口的实验经验, 经过一周的训练后, 受试者仅通过想象左右手即可有效控制开关。本文采用的阈值机制进行输出调控, 实现了脑机接口的异步控制。即当受试者有控制意图时, 系统才输出指令对外部设备进行控制; 在没有控制意图时系统将实现自动屏蔽, 停止向外输出控制指令, 有效克服了同步脑机接口的缺陷,

增强了系统的实时性、稳定性及鲁棒性, 为脑机接口真正实用化提供了新的思路。

参考文献:

- [1] Wolpaw J R, Birbaumer N, Heetderks W J, et al. Brain-computer interface technology: A review of the first international meeting[J]. IEEE Transactions on Rehabilitation Engineering, 2000, 8(2): 164-173.
- [2] Bin He, Shangkai Gao, Han Yuan. Neural Engineering[M]. Springer US, 2013: 87-151.
- [3] 刘慧, 谢洪波, 和卫星. 基于模糊熵的脑电睡眠分期特征提取与分类[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(4): 484-489.
Liu Hui, Xie Hongbo, He Weixing. Characterization and classification of EEG sleep stage based on fuzzy entropy[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(4): 484-489.
- [4] Pfurtscheller G, Lopes da Silva F H. Event-related EEG/MEG synchronization and desynchronization: basic principles[J]. Clin Neurophysiol, 1999(110): 1842-1857.
- [5] Kama Tae-Eui, Suka Heung-II, Leeb Seong-Whan. Non-homogeneous spatial filter optimization for ElectroEncephaloGram (EEG)-based motor imagery classification[J]. Neurocomputing, 2013(2): 1356-1368.
- [6] Wang Yijun, Gao Shangkai, Gao Xiaorong. Common spatial pattern method for channel selection in motor imagery based brain-computer interface[C] // Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference, 2005: 5392-5395.
- [7] Ang K K, Chin Z Y, Zhang H H. Filter bank common spatial pattern in brain computer interface[C]. Proceedings of the International Joint Conference on Neural Network. Hong Kong: IEEE, 2008: 2390-2397.
- [8] 徐宝国, 宋宝国, 杨仁恒. 基于运动想象脑电的在线脑机接口实验[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2011, 39(4): 60-64.
Xu Baoguo, Song Baoguo, Yang Renheng. Experimental research on online brain-computer interface based on motor imagery EEG[J]. Journal of Huazhong University of Sci and Tech: Natural Science Edition, 2011, 39(4): 60-64.
- [9] 施锦何, 沈继忠, 王攀. 四类运动想象脑电信号特征提取与分类算法[J]. 浙江大学学报, 2012(2): 338-344.
Shi Jinhe, Shen Jizhong, Wang Pan. Feature extraction and classification of four-class motor imagery

- EEG data[J]. Journal of Zhejiang University, 2012 (2): 338-344.
- [10] 王洪涛, 邹鹤良. 基于事件关联电位脑机接口的电视遥控异步系统[J]. 控制理论与应用, 2012, 11(29): 1507-1511.
Wang Hongtao, Zou Heliang. Asynchronous TV remote control system based on event related potential brain-computer interface [J]. Control Theory and Applications, 2012, 11(29): 1507-1511.
- [11] Xu Minpeng, Qi Hongzhi, Wan Baikun. A hybrid BCI speller paradigm combining P300 potential and the SSVEP blocking feature[J]. Journal of Neural Engineering, 2013(1): 2305-2308.
- [12] Rakotomamonjy A, Guigue V. BCI competition III: Dataset II-ensemble of SVMs for BCI P300 speller [J]. IEEE Trans Biomed Eng, 2008, 55(3): 1147-1154.
- [13] Guest Editorial. Brain-computer interface technology: A review of the second international meeting[J]. IEEE Transaction on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 2003, 11(2): 94-109.

作者简介:王洪涛(1979-),男,讲师,博士,研究方向:脑机接口,模式识别,E-mail:wang.ht03@mail.scut.edu.cn;邹鹤良(1986-),男,硕士研究生,研究方向:模式识别,信号处理;李达强(1988-),男,本科生,研究方向:自动化。