

DOI:10.16644/j.cnki.cn33-1094/tp.2018.01.004

脑电信号处理方法的研究综述*

王海玉¹, 胡剑锋², 王映龙¹

(1. 江西农业大学计算机与信息工程学院, 江西 南昌 330045; 2. 江西科技学院信息技术研究所)

摘要: 大脑为高级神经中枢系统, 脑电信号(EEG)是反映大脑神经元细胞群自发性、节律性的电生理活动信号, 包含着重要的生理信息。对脑电信号进行深入的处理分析是提取脑电信息的重要手段, 为生物医学、临床病症提供重要依据。文章主要归纳脑电信号的处理方法, 对时频分析、高阶谱分析、人工神经网络和非线性动力学分析等四种处理方法进行介绍, 将国内外对应处理方法的应用结果加以展示, 同时总结脑电研究的相关成果并提出脑电研究在当前社会的应用前景。

关键词: 脑电信号; 时频分析; 高阶谱分析; 人工神经网络; 非线性动力学

中图分类号: TP271

文献标志码: A

文章编号: 1006-8228(2018)01-13-03

A review of EEG signal processing methods

Wang Haiyu¹, Hu Jianfeng², Wang Yinglong¹

(1. College of Computer and Infomation, Jiangxi Agricultural University, Nanchang, Jiangxi 330045, China; 2. College of Information Technology Research Institute, Jiangxi University of Technology)

Abstract: The brain is a high-level nerve central system. EEG (Electroencephalogram) is a spontaneous and rhythmic physiological activity signal that reflects the neuronal cell population of the brain, and contains important physiological information. The analysis of EEG signal is an important means to extract EEG information, which provides an important basis for biomedical and clinical illness. In this paper, the EEG signal processing methods are summarized, and four processing methods, i.e. the time-frequency analysis, high-order spectrum analysis, artificial neural network and nonlinear dynamics analysis are introduced, the corresponding results of application at home and abroad are presented. At the same time, the related EEG research results are summarized, and the application prospect of EEG research in the current society is put forward.

Key words: EEG signal; time-frequency analysis; higher-order spectral; artificial neural network; nonlinear dynamics

0 引言

脑电信号由脑部神经元活动时产生, 信号可分为三类: 脑电图信号、脑诱发电位信号和神经元细胞内外记录信号。脑电信号是揭开大脑奥秘的重要渠道, 目前脑电的研究越来越丰富。

近年来, 脑电信号分析应用和神经学研究越来越丰富。图1是分析今年知网中关于脑电文献发表数量统计图。由图1可知, 脑电文献发表年度总体趋势呈逐年上升的态势, 且上升的速度逐步加快。随着计算机科学、医学、生物学等学科不断汇聚, 脑电应用的范围

越来越广, 探索脑电奥秘的研究更是逐年深入。

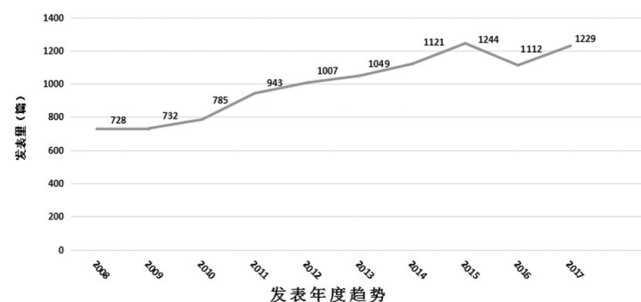


图1 脑电文献发表年度趋势

图2根据知网匹配主题为“脑电”的学科分布图,

收稿日期: 2017-10-26

*基金项目: 国家自然科学基金资助(61762045); 江西省自然科学基金资助(20171BAB202031); 江西省教育厅科技项目重点课题(GJJ151146)

作者简介: 王海玉(1993-), 女, 河北承德滦平人, 硕士研究生, 主要研究方向: 脑电处理分析, 人工智能等。

通讯作者: 王映龙(1970-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能计算与知识发现。

图2表明,脑电研究的应用领域不断拓宽。创新的思想、新兴的技术和智能的工具相结合,使脑电信号应用多元化。从集中于医学、神经等生理方向的研究扩展到神经病学、外科学、生物医学、心理学、信号处理、计算机软件与计算机应用技术等领域。关于脑电的研究方式也从单一的波形描述、脑电地形图到多形态分析,不少国内外的科研机构从单独脑电研究的初步探索阶段迈向以脑电信号分析为研究对象的综合研究阶段,提出许多具有价值的方法和技术,并取得了卓越的成就。

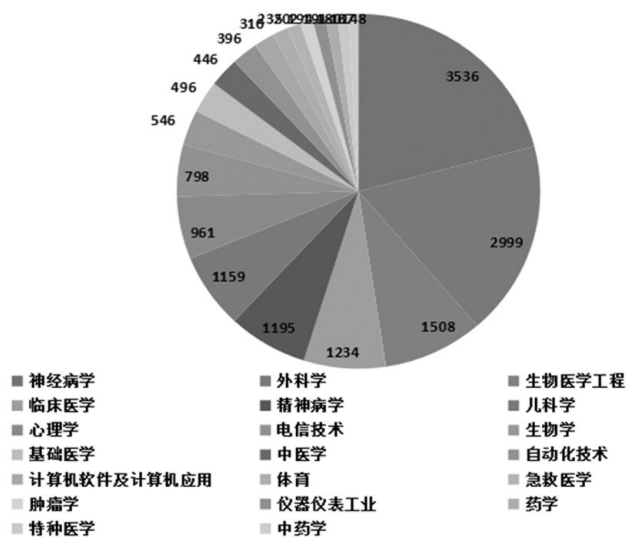


图2 脑电学科分布

1 脑电信号分析方法

脑电信号提取特征的主要方法包含共空间模式(CSP)、AR模型、小波变换(WT)、功率谱密度估计(PSD)、混沌法,多维统计分析等方法。脑电信号具有非平稳、非线性等较为突出的频域特征,这决定了其分析方法比较适用时域分析、非线性方法。近年来,波形特征描述、自回归AR模型、傅里叶变换、功率谱密度、双谱分析、小波变换、人工神经网络、非线性动力学分析等脑电分析处理方法得到了深入研究^[1]。其中时频分析、高阶谱分析、人工神经网络和非线性动力学分析等四种方法应用最为广泛。

1.1 时频分析

较早应用的EEG分析方法是直接从时域中提取出其中有用波形特征的信息,AR模型、方差分析(ANOVA)、波形参数分析和波辨识、直方图分析(Histogram)、相关分析(CA)、峰值检测等都是研究中使用较多的时域分析方法。由于脑电信号在频域往

往比在时域更加简单直观,所以大多数研究是在频域下进行的。频谱分析、倒频谱分析、包络分析、阶比谱分析以及全息谱分析等方法是使用较多的频域信号分析处理方法。吴玉鹏^[2]用功率谱中AR谱技术和FFT技术进行正常人的脑电图和癫痫病人痫性发作脑电图的比较,说明AR谱性能优于FFT功率谱,为临床诊疗癫痫提供技术上的支持。郝冬梅^[3]等人将6阶AR模型拟合EEG信号,以LVQ神经网络作分类器,通过比较网络选择不同参数对分类正确率的影响得到竞争层神经元数目直接影响了正确率的这一结论。冯春辉^[4]发现在不进行主成分分析的基础上支持向量机(SVM)与CSSD的组合识别正确率最高达74%。还有众多研究者对其进行深入研究并在一定程度上取得了相应的成果。

然而时域和频域分析方法,主要是用于平稳信号分析。对于不平稳、非线性信号的分析,应用时域和频域时,都难以提取出有效的特征信息。时频分析方法,弥补了时域和频域分析方法在非线性信号分析的缺陷,能够准确地提取到非线性信号随时间变化的特征信息。目前,在信号处理的工程领域和众多学科当中,时频分析的技术已被大范围应用,比如语音分析、图像识别、机械设备故障诊断^[5]、生物工程等,在分析脑电信号时,脑电信号特征的多分辨率分析、波形辨识、诱发电位特征提取、信号预处理等是时频分析的主要应用领域。时频分析提供频域和时域的联合分布信息,清晰地阐明了信号频率时变性,近年来受到越来越多的重视。

1.2 高阶谱分析

高阶谱分析(Higher-Order Spectral Estimation)是对功率谱的推广,是脑电分析一种常用的方法。一个平稳随机信号的高阶谱是其高阶累积量的傅里叶变换。令 $\{z(n)\}$ 为平稳随机信号,q阶谱是q阶累积量的(q-1)维傅里叶变换,即

$$S_q(w_1, \dots, w_{q-1}) = \sum_{m_1=-\infty}^{\infty} \dots \sum_{m_{q-1}=-\infty}^{\infty} c_q(m_1, \dots, m_{q-1}) \cdot \exp \left[-i \sum_{j=1}^{q-1} w_j m_j \right]$$

其中,高阶谱计算量随阶数的增加愈来愈复杂深入,故一般双谱或三阶谱使用频率较高一些。特殊的,当高阶谱的阶数为三时称为双谱,双谱分析方法能深层次挖掘出常规脑电图无法显示的隐含信息,高阶谱在参数估计问题、信号检测中能够自动抑制高斯噪声,

用重新构成信号的相位和幅度,检测时间序列的非线性结果。目前刘海红^[6]等人用SVM、PNN、KNN等三种方法处理双谱切片的特征值,发现不同脑电极信号双谱切片当中的明显不同。Wang Qun^[7]等人通过双谱分析的具体实验发现,在处理非线性信号并抑制高斯噪声信号时,高阶频谱的功率谱基于二阶统计,优于功率谱;还有更多的学者印证了高阶统计量分析具有重大意义。由此可知,高阶谱分析的应用领域越来越广,将会有越来越多的研究者对其进行更深入的探索。

1.3 非线性分析

随着科学技术的腾飞发展,非线性逐渐出现在人们的视野范围内,非线性通常指不成直线、不按比例的关系,代表脑电不规则的变化。研究者尝试应用统计叠加、频谱分析、相关分析等方法分析处理这些信号,取得一定进展。但从另一个角度分析这些方法都是基于线性的,适用于稳定的平衡线性系统分析方法对于非线性信号分析会造成精度损失。随着新的脑电现象的出现以及非线性学科的迅速发展,非线性动力学成为研究者解密大脑和脑电新的有效渠道和迎接挑战的坚韧利器。Lyapunov指数、复杂性测度、分数维等都是目前研究脑电的主要的非线性方法。

李冬梅^[8]用ICA降维Hurst指数、小波熵、Lyapunov指数、排列熵、样本熵这五个非线性动力学指标,对发作时间做出预测,为治疗癫痫患者提供了理论基础推进了癫痫患者治愈的进程。李树春^[9]等人将非线性动力学理论通过特征值用以对青年人和老年人脑电的差异进行分辨,实验发现青年人脑功能与老年人在能量、发放量等方面的差异。除此以外,相关维数、最大李雅普诺夫指数、复杂度、近似熵等,提取EEG脑电信号的相应特征也再文献中有较多讨论,印证了非线性动力学混沌算子分析EEG信号的应用具有一定科学基础。

1.4 人工神经网络

人工神经网络(ANN, Artificial Neural Network)是一个能进行复杂逻辑操作的理论化数学模型,其具有高速寻找优化解的能力,但泛化能力较弱,难以找到通用的模型,且易陷入局部是其典型不足之处,但有应用简便,分类结果较为准确的优势。ANN理论在众多研究领域应用并取得了成功,但由于一些假象信息或信息内容不完整,决策规则时而相互冲突、互相矛盾,时而无则可依,这都是对传统的信息处理方式的巨大挑战。ANN具备自动诊断、问题求解功能,具有模拟与人的思维有关的优势,合理判定,能解决传统方

法难以实现的难题。

ANN以其独有的非线性自适应信息处理能力,成功地应用在模式识别、智能控制、优化组合、预测等领域。高群霞^[10]等人对比SVM、ANN两类模式识别方法在睡眠分期中的应用,归纳了近几年这一领域的发展趋势走向。范飞燕^[11]实现分类精度达到60%以上,表明ANN是在基线和某些认知区分的有效方法。初孟^[12]等人结合ANN进一步降低棘波检测的错误率,在仿真实验中取得了好的结果。近年来信息几何为人工神经网络的研究注入了新鲜的血液。推进人工神经网络和其他传统方法相融合、优势互补,将促进人工智能和信息处理技术的新发展。

2 展望

本文主要对时频分析、高阶谱分析、人工神经网络和非线性动力学分析四种处理方法进行研究和综述,脑电研究的相关成果分析总结如下。

EEG是自然界中复杂的脑电网络,包含众多大生理活动信息,为医学、神经学等多学科提供重要的分析参考信息。

在科技相对发达的公司出现了脑控机器人座椅、机器人床等,感知受试者的身体状况,帮助发布调动受试者体位的大脑指令,改善生命体健康状态;测评、电影、电视节目等等通过脑电收集关注者的喜好程度;在一些专业机构例如戒毒所、监狱等场所,用以监测及训练检测;一些公司或机构用于诊疗身心如不同程度的焦虑病症等。

时频分析、高阶谱分析、人工神经网络分析和非线性分析各具特色,推动脑电研究的同时也给脑电更深入的研究提出了挑战。将脑电与多设备连接、改善数据来源,实时监测脑电信号进行分析、将脑电应用到更多领域。探索和研究脑信号,将为脑电造福人类开辟新的天地。

参考文献(References):

- [1] 唐育芳. 面向运动想象的脑电信号特征选择与特征提取算法研究[D]. 西南科技大学硕士学位论文, 2015.
- [2] 吴玉鹏. AR谱在皮层痫样脑电信号分析应用[D]. 河北医科大学硕士学位论文, 2015.
- [3] 郝冬梅, 阮晓钢. 基于LVQ的自发脑电信号的分类研究[J]. 医疗设备信息, 2003.10:7-9
- [4] 冯春辉. 基于脑电节律的模式识别方法研究[D]. 燕山大学硕

制系统,其窑炉和主控制器如图6所示。

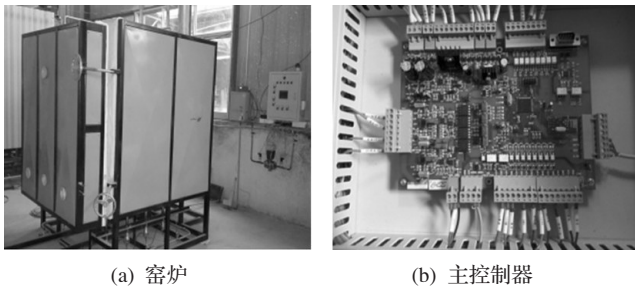


图6 窑炉及主控制器

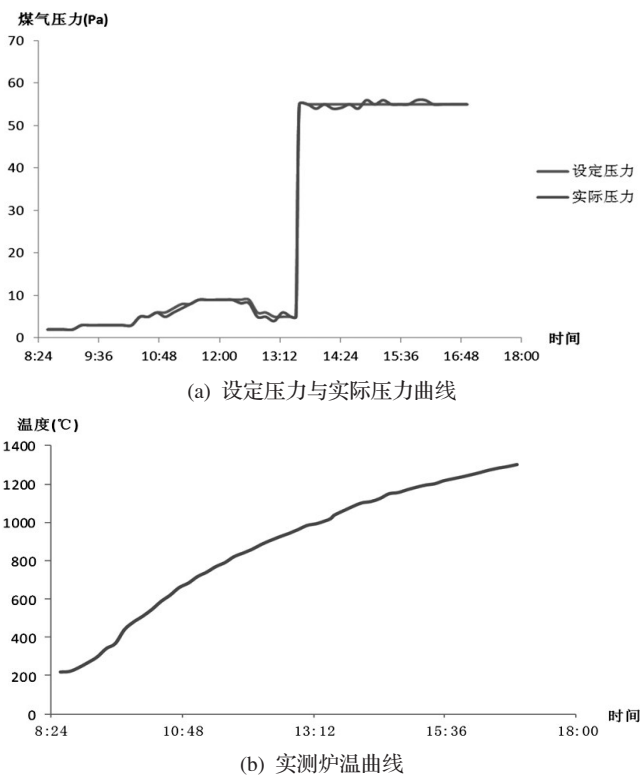


图7 实验记录的的压力与温度曲线

一次青瓷烧制实验持续9个多小时,记录气压和炉温实验数据如图7所示。从图7(a)中可以看出压力经过PID调节,控制良好。经过智能压力控制后得到温度曲线如图7(b)所示,呈现稳定上升趋势,符合青瓷烧瓷工艺。

4 结束语

本文研发整个基于ePLC技术的窑炉智能炉温控制系统,用带死区的增量式PID控制算法控制煤气比例阀的开度来控制煤气压力,从而实现有效控制炉温。通过对传统的龙泉青瓷窑炉进行数字化烧制技术改造,以较小的改造投入,提高了传统窑炉的技术水平。该系统经实际测试,效果良好,提高了烧制成品率,降低了能耗和工人劳动强度。下一步的研究是积累更多的炉温控制曲线参数,通过智能算法进行优化,获取更优的炉温控制曲线,同时将该系统推广应用到各种型号的传统炉窑上。

参考文献(References):

- [1] 王成武. 龙泉青瓷发展现状研究[D]. 中国美术学院硕士学位论文,2010.
- [2] 温治. 冶金炉窑系统节能技术进展[A]. 第四届十三省区市机械工程学会科技论坛暨2008海南机械科技论坛论文集[C],2008.
- [3] 宋伯生. PLC编程理论算法与技巧[M]. 机械工业出版社,2009.
- [4] 彭瑜,严义等. PLC技术的可持续发展[J]. 自动化博览,2010.8.
- [5] 郑维凯. 基于ePLC的窑炉数码控制系统的应用[D]. 杭州电子科技大学硕士学位论文,2016.
- [6] 吕小云. 几种数字PID控制调节规律特点的研究[J]. 甘肃科学学报,2002.2.

(上接第15页)

士学位论文,2011.

- [5] 陈珊珊. 时域分析技术在机械设备故障诊断中的应用[J]. 机械传动,2007.3:79-83,4
- [6] 刻海红,杜英举,姚伟华. 不同意识脑电的双谱切片特分析与分类[J]. 电子设计工程,2015.23(8):42-45,48
- [7] WangQun,LeJian-wei,JinSong-yang,TianFu-ying,WangLi.[The study of EEG Higher Order Spectral Analysis technology]. [J]. Zhongguo Yiliao Qixie Zazhi,2009,33(2).
- [8] 李冬梅. 基于非线性动力学特征指标的癫痫脑电信号分类、定位与预测方法研究[D]. 新疆医科大学硕士学位论文,2017.
- [9] 李树春,李殿奎,朱晓峰,刘晚敏,刘阳. 基于关联维数和

Lyapunov指数高频脑电非线性动力学研究[J]. 现代生物,2017.17(3):561-566

- [10] 高群霞,周静,吴效明. 基于脑电信号的自动睡眠分期研究进展[J]. 生物医学工程学报,2015.32(5):1155-1159
- [11] FanFei-Yan, LiYing-Jie, QiuYi-Hong, ZhuYi-Sheng. Use of ANN and Complexity Measures in Cognitive EEG Discrimination. [J]. Conference proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Conference,2007.5.
- [12] 初孟,邱天爽,鲍海平. 基于人工神经网络的癫痫棘波检测方法[J]. 中国生物医学工程学报,2006.4:421-425,429