

文章编号:1000-582X(2005)01-0032-04

## 临床脑电信号预处理中的时空滤波器设计\*

缪晓波<sup>1</sup>,何 为<sup>1</sup>,杨 浩<sup>1</sup>,卢 山<sup>1</sup>,董为伟<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 电气工程学院,重庆 400030;2. 重庆医科大学 神经病学研究所,重庆 400016)

**摘 要:**临床上提倡病床边进行各类检测,这样可以方便病人,减轻其痛苦。但是病床边采集的脑电信号易受各类噪声和干扰的影响,往往影响后面的分析效果。为了有效去除临床脑电信号的噪声和干扰,设计了一种时空滤波器,分两个阶段对脑电信号进行滤波预处理:第一个阶段是时域滤波,用传统的带通滤波器实现;第二个阶段是空域滤波,用基于独立分量分析(ICA)的空域滤波器实现。实验结果表明临床脑电数据的常见干扰如工频干扰、眼动、肌电干扰、心电干扰等均能有效地被单独或同时去除。

**关键词:**脑电信号;干扰;时空滤波器;独立分量分析

**中图分类号:**R318.5

**文献标识码:**A

自 Hans Berger 在 1924 年第一次记录到自发脑电 (EEG) 以来,EEG 已成为研究大脑功能和临床诊治的常用手段。相对于 CT、PET、MRI 等手段,EEG 具有无创,价格低廉,操作简单等优点,应用愈来愈广泛。但是在 EEG 的研究和临床应用中一个不可避免的问题就是干扰抑制问题。自发脑电是 0~100  $\mu\text{V}$  的微弱电信号<sup>[1]</sup>,很容易受到各种类型的干扰,如,眨眼,眼动,肌肉收缩,心脏跳动,电源噪声,电磁波辐射等很容易使脑电信号畸变或淹没,导致采集到的 EEG 信号无法反映大脑的生理及病理情况。获得干净或有效脑电信号的途径有两个:一是采集时避免,即最大程度避开各类干扰源,如在屏蔽室采集脑电可避开空间电磁波辐射;利用电池给采集器供电可避开线上的电源干扰;要求受试者尽量合作,可避免眨眼、眼动、肌动等干扰。二是采集后去除,即利用信号处理的方法,对采集到的 EEG 信号滤波,滤出噪声和干扰,恢复原始的 EEG 信号后再分析,进而探讨该脑电信号所内含的生理或病理意义。

实际中往往是两种途径一起采用。由于电子仪器设备的有限性和脑电信号自身的微弱性,不可避免的在采集时要受到各种干扰,所以对采集到的信号必须进行前期滤波处理才能进行后继分析,即所谓的脑电

信号预处理。在临床上,预处理问题显得更加有必要,因为病人的配合程度,采集状况(特别是病床边采集)等因素都使得脑电信号往往踪迹难寻。临床上一直提倡就在病床边进行各类检测,这样可以方便病人,减轻病人痛苦。然而,病房里采集到的脑电信号其预处理问题就不可避免地更加复杂和困难,也就是说诸如眨眼,眼动,肌肉收缩,心脏跳动,电源噪声,电磁波辐射等干扰会大量存在甚至同时存在。因而,病床边的脑电图检测要普及,首要的任务是脑电信号的预处理问题要取得突破。

本研究利用便携式脑电信号采集器,在重庆医科大学第一附属医院神经内科普通病房和监护室内对病人进行床旁 EEG 数据采集,病人保持正常躺姿,无需起身或坐立,也不用到脑电图室,该方式大大受到病人欢迎,对危重病人也能方便地采集到脑电图数据。采集时用电池供电切断了来自电源线上的干扰;在预处理中设计了一种基于独立分量分析(ICA)的时空滤波器,有效地去除了各类噪声和干扰,效果良好,为后继的分析提供了可靠保证。

### 1 临床数据采集

按照国际标准导联 10—20 系统安放电极,同时记

\* 收稿日期:2004-09-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50337020)

作者简介:缪晓波(1974-),男,四川简阳人,重庆大学博士,从事生物医学信号处理、计算机测控技术等领域的研究。

录 Fp1、Fp2、F3、F4、C3、C4、P3、P4、O1、O2、F7、F8、T3、T4、T5、T6 共 16 导数据,使用 A1、A2 作为参考电极。采集对象为 ICU 病房和普通病房共计 10 人,主要为脑梗塞和脑出血病人,其中男性 4 名,女性 6 名,均为右利,平均年龄 65.3 岁(范围 47~84 岁)。所有数据均在病人床边采集,病人均为躺姿。

脑电信号放大器采用北京中科新拓有限责任公司生产的 UE-16B 型脑电信号放大器,通频带设为 0.3~120 Hz,采样率为 1 000 Hz,模/数转换精度为 12 位,原始数据未使用 50 Hz 工频陷波。放大器供电采用笔记本电池供电方式,大大降低了工频电源干扰。采集病人闭眼和睁眼两种状态各 1 分钟数据。

## 2 时空滤波器设计

### 2.1 时空滤波器原理框图

如图 1 所示,时空滤波器由第一级时域滤波和第二级空域滤波构成。第一级时域滤波一般只能起到粗滤的作用,这也是传统带通滤波器的局限所在;第二级空域滤波基于独立分量分析技术,在不破坏原始信号频谱特性的基础上去除各种噪声,所以称之为精滤。下面分别加以阐述。

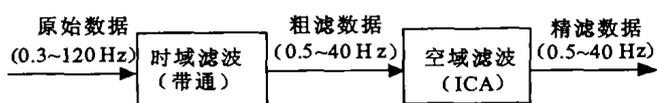


图 1 时空滤波器原理框图

### 2.2 时域滤波

时域滤波采用常用的带通滤波器,这里不作详述。其中上截止频率为 40 Hz,去除 40 Hz 以上的干扰,包括来自空间的电磁辐射干扰。下截止频率为 0.5 Hz,可以去除部分低频伪迹如眼动等。很显然,这个频段既是脑电分析的常用频带,但也是一些干扰和伪迹的存在频段,如肌动干扰一般在 30 Hz 以上,眨眼眼动一般在低频段,心电干扰也可能在这个频段存在(笔者测的一些病人同时也在做心电监护)。如果频带取得太窄,就无法全窥各节律特性及各自表征的相关生理病理状态,因而还需要再处理。这里再用传统的带通滤波器显然已不合适,故而在此基础上应用基于 ICA 的空域滤波技术。

### 2.3 空域滤波

#### 2.3.1 ICA 的基本理论

Comon 于 1994 年提出 ICA 用以解决盲源分离问题,即从多个传感器的测量信号中如何恢复出混合在

一起的源信号。ICA 的模型如图 2 所示,一组独立的源信号  $S(t) = [s_1(t), \dots, s_M(t)]^T$  经过线性系统  $A$  ( $A$  称作混合矩阵)混合在一起,得到观察信号  $X(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^T$ ,  $X(t) = AS(t)$ 。源信号  $S(t)$  和混合系统  $A$  都是未知的,只有混合后的  $X(t)$  可以观察或测量到。可以证明在  $N \geq M$  的条件下,如果  $S$  不含有一个以上的高斯过程,就有可能通过解混矩阵  $W$  使得  $U(t) = WX(t)$ ,使矢量  $U$  逼近于  $S$  ( $U$  中各分量的排列次序及比例尺度与  $S$  可能不同<sup>[2-3]</sup>)。因此,如果找到解混矩阵  $W$  使得  $U$  的分量尽可能独立,那么  $U$  就是对  $S$  的估计。

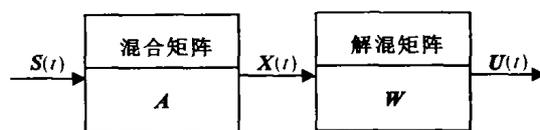


图 2 ICA 实现盲源分离的模型

Bell 和 Sejnowski 于 1995 年从信息论的角度给出信息最大化的 ICA 学习算法 Infomax-ICA<sup>[4]</sup>,但 Infomax-ICA 算法只适用源信号是超高斯(Super-Gaussian)分布的情况。Te-Won Lee 等人于 1997 年在 Bell 和 Sejnowski 工作的基础上提出了 Extended-ICA 算法。该算法同时适用于超高斯(Super-Gaussian)和亚高斯(Sub-Gaussian)的情况<sup>[5]</sup>。笔者采用了 Extended-ICA 算法,因为肌电、眼动、工频干扰等都属典型的亚高斯源<sup>[6-7]</sup>。

#### 2.3.2 ICA 空域滤波原理

如图 3 所示,观测数据阵  $X(t)$  的行是脑电信号在不同导联位置的记录值,其列是不同时点各导联的记录值。经 ICA 算法分解后,找到一个解混阵  $W$ 。该解混阵把多通道的头皮脑电数据分解为或“解混”为时域独立空域固定的一组分量(一般分量数与导联数相等),分解后得到的输出矩阵  $U(t)$  的行就是每个分量



图 3 ICA 空域滤波原理图

(源)的相应时域序列。对解混阵  $W$  求逆得到  $W^{-1}$ ,  $W^{-1}$  的列代表每个分量在其可能的头皮导联位置的相应投影强度(或权重),这些权重反映了各个分量在头皮的空间分布强度,这就从原理上为各个分量可能具有一定的生理源意义提供了保证。通过分析各个分量

的时域特征和空域分布等情况,判断出具有生理意义的分量(表明这些分量是原始脑电信号的源),不具有生理意义的分量(表明这些分量不是原始脑电的源,而是噪声源)。找出各自噪声源分量后,将其置零便可得到新的矩阵  $U'(t)$ ,将其经  $W^{-1}$  反投影得到新的头皮脑电信号阵  $X'(t)$ ,此即为去除了噪声与干扰的头皮脑电信号阵<sup>[8]</sup>。

可以看出,这种去噪方法主要是从盲源分离的角度寻找出噪声源,而不涉及原始脑电信号频域的任何信息,是一种空域滤波法,其滤波结果保证了原始信号频域特性的完整性。

### 3 临床脑电信号时空去噪实例

#### 3.1 心电伪迹的去除

图 4 是 1 位病人(且称为病人甲)的 16 导脑电数据经过带通滤波后的结果图示。可以看到,原始的脑电信号干扰严重,特别是工频干扰,信号完全被淹没。

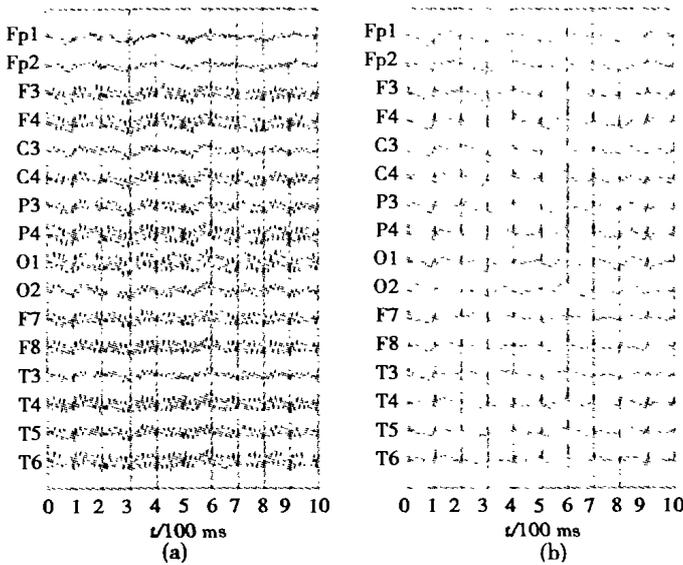


图 4 病人甲的脑电数据经过时域滤波(粗滤)后的脑电信号 0.5~40 Hz 的带通时域滤波大大去除工频干扰等噪声。但是,这个病人的脑电信号具有非常明显的心电伪迹,如图 4(b)的 F3、F4、C4、P3、P4、O1、F7、F8、T4、T6。这是一个非常典型的脑电信号中混有心电信号的病例数据,与采集时病人正作心电监护紧密相关。

图 5 是对该病例数据作时域滤波后再经空域滤波的结果图示。图 5(a)为时域滤波后的信号(即图 4(b)所示信号),图 5(b)是 ICA 分解得到的独立分量,图 5(c)是经 ICA 空域滤波后的结果。可以看出,心电伪迹已完全消除。

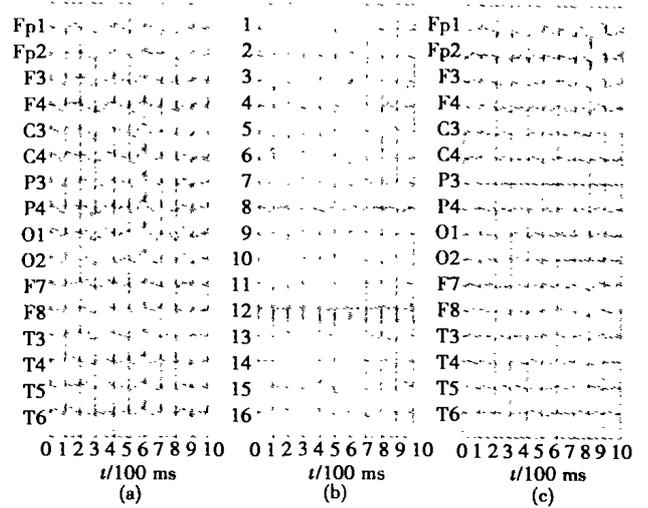


图 5 病人甲的脑电数据经时域滤波(粗滤)再经空域滤波(精滤)后的脑电信号

#### 3.2 眼动、肌电、心电等噪声的同步去除

图 6 是另一位病人(且称为病人乙)的 16 导脑电数据经过带通滤波后的结果图示。同样看到,时域滤

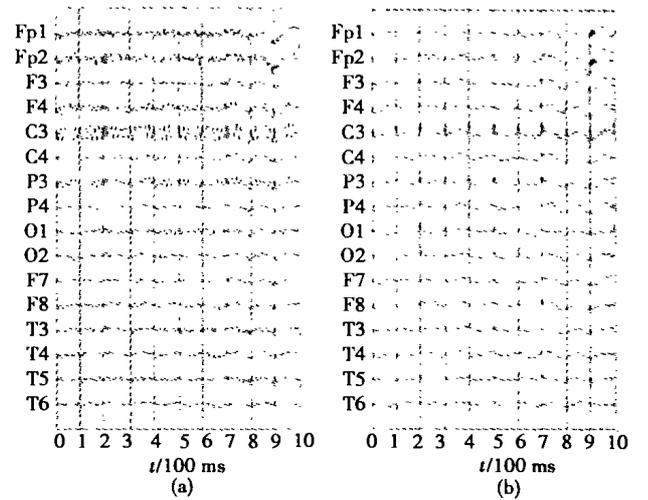


图 6 病人乙的脑电数据经过时域滤波(粗滤)后的脑电信号波的效果不尽人意,虽然工频干扰较好的去除了,但眼动伪迹(图 6(b)的 Fp1、Fp2)完全没有去除,几个导联也有明显的心电伪迹(图 6(b)的 C3、P3),从后面的 ICA 独立分量的空域分布图还可以看到一些肌动干扰依然存在。

图 7 是对该病例数据作时域滤波后再空域滤波的结果图示。图 7(a)为时域滤波后的信号(即图 6(b)所示信号),图 7(b)是 ICA 分解得到的独立分量,图 7(c)是选出的噪声分量投影到头皮的空域分布图,图 7(d)是经 ICA 空域滤波后的结果。可以看出,包括眼动、心电伪迹、肌电干扰等全部同时被消除,最后的信号非常干净。

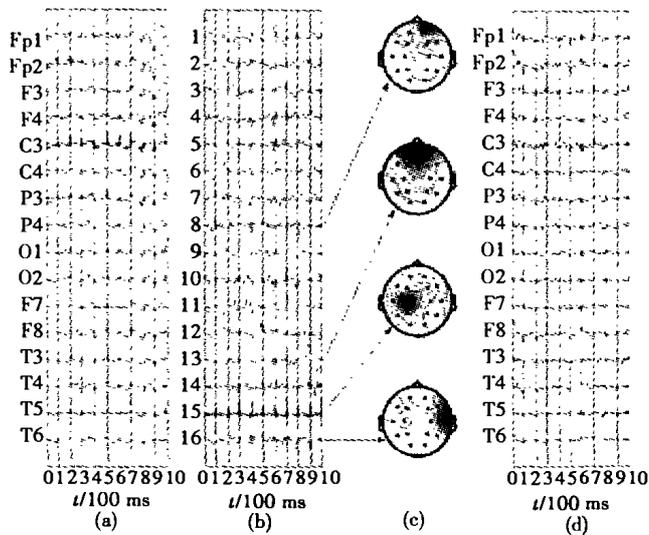


图 7 病人乙的脑电数据经时域滤波(粗滤)再经空域滤波(精滤)后的脑电信号

#### 4 讨论

从理论上讲,基于 Extended-ICA 算法的空域滤波其处理的对象包括了眨眼,眼动,肌肉收缩,心脏跳动,电源噪声,电磁波辐射等几乎所有的干扰脑电的噪声和干扰,因为这些干扰和噪声都属于亚高斯分布的源。但笔者在对采集到的大部分临床脑电数据直接应用 ICA 空域消噪时普遍发现效果不是十分好,主要原因可能是工频干扰太过严重。未见报道噪声与干扰特别严重的数据会使基于 ICA 的空域滤波失效。但试验结果却表明,单纯依靠基于 ICA 的空域滤波不能达到完全消噪的目的,或效果不佳。迄今为止,只在文献[8]发现了一次类似的干扰严重的自发脑电被较好去噪的报道,但该文献没有详细给出数据来源和情况。笔者认为,空域滤波前的时域滤波(即粗滤)是很有必要的。从理论上讲,经过带通粗滤的信号再经 ICA 分解滤波,保证了 ICA 自适应学习算法输入数据阵的有效性和微小变异性,有点归一化的效果,故而训练效果会大大提高,也就能更有效地将信号源和噪声源分离,利于后面的空域滤波处理。文献[2]也指出,在应用 ICA 之前进行带通滤波或 PCA 降维或滤波都是非常必要的。从实践上看,首先通过 0.5~40 Hz 的带通时域滤波,再进行空域滤波,其效果大大好于纯粹的空域滤波或时域滤波。所以笔者提倡脑电信号预处理中应时域空域滤波并举。

另一方面应该指出的是,ICA 在脑电信号的处理上本身从理论上还有其局限性。ICA 的理论基础是各信号源线性混合,各观测通道时域独立空域固定,这跟人的大脑情况有一些不相符合的地方,比如人的大脑

是一个复杂的非线性(nonlinearity)系统<sup>[9]</sup>,各导联各脑区存在同步(synchrony)及“绑定”(blinding)关系<sup>[10]</sup>,大脑是一个动态的(dynamic)系统其内部的一些暂态过程(transient)可能会使导联采集的信号具有某种空间跳跃性<sup>[10-11]</sup>。针对这些情况,有人提出了一些新的 ICA 算法,如时变 ICA 算法,非线性 ICA 算法等<sup>[2]</sup>。相信随着这些理论和算法的不断成熟,在脑电信号处理上的应用会更好地解决实际问题。

#### 参考文献:

- [1] 谭郁玲. 临床脑电图与脑地形图学[M]. 北京:人民卫生出版社,1998.
- [2] HYVARINEN A, KARHUNEN J, OJA E. Independent Component Analysis [M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.
- [3] COMON P. Independent Component Analysis, A New Concept[J]. Signal Processing, 1994, 36:287-314.
- [4] BELL A J. An Information Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution[J]. Neural Computation, 1995, 7(6): 1129-1159.
- [5] LEE T W, GIROLANI M, SEJNOWSKI T J. Independent Component Analysis Using an Extended Infomax Algorithm for Mixed Subgaussian and Supergaussian Sources[J]. Neural Computation, 1999, 11: 606-633.
- [6] 杨福生,洪波,唐庆玉. 独立分量分析及其在生物医学工程中的应用[J]. 国外医学生物医学工程分册,2000, 23(3):129-134.
- [7] 洪波,唐庆玉,杨福生,等. ICA 在视觉诱发电位的少次提取与波形分析中的应用[J]. 中国生物医学工程学报, 2000,19(3):334-341.
- [8] JUNG T P, MAKEIG S, HUMPHRIES C, et al. Removing Electroencephalographic Artifacts by Blind Source Separation [J]. Psychophysiology, 2000, 37: 163-178.
- [9] DAS A, DAS P, ROY A B. Nonlinear Data Analysis of Experimental (EEG) Data and Comparison with Theoretical (ANN) Data [J]. Complexity, 2002, 7(3): 30-40.
- [10] FREEMAN W J, BURKE B C, HOLMES M D. Aperiodic Phase Resetting in Scalp EEG of Beta Gamma Oscillations by State Transitions at Alpha Theta Rates [J]. Human Brain Mapping, 2003, 19:248-272.
- [11] NUNEZ P L, WINGEIER B M, SILBERSTEIN R B. Spatial-Temporal Structures of Human Alpha Rhythms; Theory, Microcurrent Sources, Multiscale Measurements, and Global Binding of Local Networks[J]. Human Brain Mapping, 2001, 13:125-164.

(下转第 41 页)

- eral Oils[ A]. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena[ C]. New York:IEEE, 2001. 548 – 551.
- [21] BADENT R, KIST K, SCHWAB A J. Prebreakdown Behavior of a Composite Liquid – solid Insulation System Under Impulse Conditions[ A]. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena[ C]. Guelph:IEEE, 1996. 196 – 199 .
- [22] BADENT R, HEMMER M, SCHWAB A J. Streamer Inception Field Strengths in Rape – seed Oils [ A]. Electrical Insulation and Dielectric Phenomena[ C]. Paris:IEEE, 2000. 272 – 275 .
- [23] 郭祀远,蔡妙颜,李琳. 油脂抗氧化剂 TBHQ 的应用研究[J]. 中国油脂, 1995, 20(3):50 – 52.
- [24] 陈梅香,张子得,马俊莲. 微胶囊技术在抗氧化剂中的应用[J]. 河北农业大学学报, 2002, 25(5):234 – 235.
- [25] 张可达,徐冬梅,王平. 微胶囊化方法[J]. 功能高分子学报, 2001, 14(4):474 – 480.

## Environment Friendly Dielectric Fluid Refined from Vegetable Oil

*LI Xiao-hu<sup>1</sup>, LI Jian<sup>1</sup>, SUN Cai-xin<sup>1</sup>, DU Jun<sup>2</sup>, CHEN G<sup>3</sup>*

- ( 1. Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology Under the State Ministry of Education;  
2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
3. Department of Electronics and Computer Science, University of Southampton, Southampton SO171BT, UK)

**Abstract:** The development of the biodegradable dielectric fluid is attracting a close attention of the world now. Vegetable oil has high fire point and flash point. They are almost fully biodegradable. Their electric properties are as good as conventional mineral oil. Their good moisture absorption is in favor of reducing the content of water in insulating paper and then lowering the aging of the insulating paper. This monograph summaries the advantages and the shortcomings of vegetable oils, and points out possible ways to overcome these shortcomings. It concludes that vegetable oils' future is very encouraging.

**Key words:** vegetable oil; biodegradable; anti – oxidants; depressants; stability; oil – paper insulation; power transformer

(编辑 李胜春)

(上接第 35 页)

## Temporal-spatial Filtering in the Preprocessing of Clinical EEG Signals

*MIAO Xiao-bo<sup>1</sup>, HE Wei<sup>1</sup>, YANG Hao<sup>1</sup>, LU Shan<sup>1</sup>, DONG Wei-wei<sup>2</sup>*

- ( 1. College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;  
2. Institute of Neurology of Chongqing Medical University, Chongqing 400016, China)

**Abstract:** EEG spot-recording for clinical patients in the bed is always advocated due to easing patients and making them comfortable. But EEG signals recorded in the ward exposed to various noises and interference is less effective in the EEG analysis. A temporal-spatial filter is designed for noise removing of clinical EEG signals, the first filtering is temporal filtering using band-pass filter, and the second filtering is spatial filtering with ICA-based spatial filter. Experimental results indicate that various noises and interferences, such as power interference, blinking, eyes movements, muscle moments, ECG artifacts, etc., are removed effectively, individually or simultaneously.

**Key words:** EEG; interference; temporal-spatial filter; independent component analysis

(编辑 李胜春)