

用子波变换的能量最大准则分析 婴儿痉挛症脑干诱发电位

崔林阳^{1)*} 姜楠²⁾ 陈世峻³⁾

(¹⁾天津医科大学总医院神经生理室, 天津 300052 ²⁾天津大学力学系, 天津 300072

³⁾天津医科大学总医院神经内科, 天津 300052)

摘要 借鉴流体力学中用子波变换识别湍流相干结构的能量最大准则, 解释婴儿痉挛症发病的三联征, 尤其想说明智能迟滞的原因. 从电生理的角度来说明, 为什么脑干是婴儿痉挛症的责任病灶——这个生化及病理已经做出的推测. 研究发现婴儿痉挛症患儿的脑干通道对外界刺激的反应能力和信息的传递能力与正常儿童有明显差异, 借用能量最大准则在湍流中的解释, 认为是因为信息传导阻滞引起患儿智能发育的迟滞, 并试着提出评价最理想治疗效果的标准.

关键词 婴儿痉挛症, 脑干诱发电位, 子波变换, 能量最大准则

学科分类号 R338

婴儿痉挛症 (infantile spasms IS) 也称 West 综合征^[1], 是一种婴幼儿难治性癫痫, 80% ~ 90% 伴有严重智能迟滞, 预后极差. 其病因和病理是多样性的. 经国内外多年研究发现, 婴儿痉挛症的病变部位几乎包括脑的所有结构, 如大脑皮层、丘脑、脑干、小脑、甚至脊髓. 森松义雄等^[2]与 Neville^[3]一致认为脑干是形成婴儿痉挛症的责任部位. 近年在对婴儿痉挛症的病理学、生物化学及生理学所进行的研究均表明, 脑干与 IS 发生关系密切^[4], 其他结构的病变是影响脑干功能的诱因. 在急性癫痫动物模型实验^[5]中, 也验证了遭受损伤的幼年小鼠除脑部其他部位受损外, 还有脑干和海马病损, 而成年小鼠脑干和海马未有受损迹象. 总之, 越来越多的证据表明脑干受累与智能发育迟滞有关. 脑干是大脑接收信息和传达指令的重要环节, 若脑干结构、功能异常将阻碍信息从脑干到各功能部位的逐级传递和整合, 产生不同程度的智能发育迟滞. 而脑干听觉诱发电位 (brainstem auditory evoked potential BAEP)^[6], 反映从耳到中枢神经系统对外界听觉刺激的神经传导通路的功能, 是评价患者听觉感知功能重要的电生理指标. 同时, 其波形与脑干解剖结构的对应性很好地反映了脑干功能.

湍流 (turbulence) 是自然界中典型的非线性物理系统, 涡 (eddy)^[7]是湍流中的基本结构, 是流体力学非线性动力学系统多尺度结构的具体表现形式, 是湍流中能量、动量、质量和信息传递的主

要载体. 大尺度涡携带和记忆产生湍流的外部因素和条件的有关信息, 而小尺度涡与湍流的内部非线性相互作用机理有关. 各尺度涡不断地进行非线性力学相互作用, 进行动量、能量、质量和信息的传递和输运, 直到粘性将最小尺度涡的能量耗散为热能, 如此维持湍流的非线性演化和发展.

其中相干结构^[8]是湍流中的重要结构, 对湍流中动量、能量和质量的输运, 对湍流的产生、维持、演化和发展起着重要作用, 从复杂湍流背景中客观地检测、识别湍流中的相干结构, 研究相干结构发展演化的动力学机理, 是研究湍流维持、演化的非线性物理机理, 有效控制湍流的前提和重要条件. 姜楠等^[9] (1997年) 提出了用子波分析检测壁湍流相干结构猝发的能量最大准则. 通过对壁湍流速度信号进行子波分析, 可以得到其子波系数, 根据子波系数可以得到壁湍流分尺度脉动速度动能随尺度参数的分布, 其中存在着一个能量最大尺度, 该尺度对应的湍流结构占有最多的湍流脉动动能. 这就是确定壁湍流相干结构时间尺度的能量最大准则.

人体神经系统是典型的非线性系统, 人对外部世界的感知和认识都是通过神经网络中神经元的非线性传输、加工和整合完成的. 神经元活动的非线性、多尺度特性是非线性神经网络的主要特征, 影响神经系统功能. 从某些方面来说, 神经系统与自

* 通讯联系人.

Tel 022-6036261Q E-mail cuijiny@ hotmail com

收稿日期: 2003-03-20 接受日期: 2003-04-26

自然界其他非线性系统一样, 具有共同的特征. 小波 (wavelet) 分析方法^[10]是 20 世纪 80 年代末发展起来的一种时频双局部化信号分析方法, 又被称为数学显微镜, 广泛应用于非线性系统分析.

本文以小波变换为基础采用能量最大准则的方法, 分析 IS 的 BAEP 的各尺度能量特征, 并对照姜楠等以子波变换为基础分析的能量最大准则在湍流中的应用, 寻求一种新方法, 解释 IS 脑干神经传导活动的异常, 希望为解释婴儿痉挛症的临床特征提供新思路.

1 方 法

1.1 数据采集

本实验病例主要根据临床指征辅以脑电图、CT (或磁共振成像, MRI)、单光子发射计算机断层 (SPECT) 等检查, 将其分为二组: 正常组 12 例 (男 6 例), 平均年龄 6.325 ± 3.210 ; IS 组 13 例 (男 12 例), 平均年龄 4.638 ± 3.986 . 对此 25 例均行听觉脑干诱发电位检查, 记录诱发电位信号. 并将 IS 组中的一例诱发电位与其经过半年治疗后复查的 BAEP 做对照.

诱发电位仪采用维迪公司 keypoint, 采样率 48 kHz, 16 位转换精度, 采样时间 10 ms. 这样共获得 26 个检查记录.

1.2 小波与小波变换

小波函数是小波母函数的平移和伸缩:

$$W_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} W\left(\frac{t-b}{a}\right)$$

$a, b \in \mathbf{R}$ ($a > 0$ 为尺度参数, b 为位置参数). 对信号函数 $s(t) \in L^2(\mathbf{R})$ 在 $W_{ab}(t)$ 下的小波变换定义为

$$W_s(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \overline{W_{ab}(t)} dt$$

由小波变换的另一个重要性质——能量守恒公式^[11]

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \frac{2}{C_w} \int_0^{+\infty} da \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|W_s(a, b)|^2}{a^2} db$$

可得出各尺度的小波能谱和能谱密度随尺度参数的变化:

$$E(a) = \frac{2}{C_w} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_s(a, b)|^2 db$$

$$P(a) = \frac{2}{C_w} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|W_s(a, b)|^2}{a} db$$

1.3 方法

因为 Gauss 函数有很好的阶跃性又不失光滑性, 更主要的是它可以进行不同尺度的伸缩, 作为滤波器可以对信号进行不同尺度光滑的低通滤波, 因此, 用它的一阶导数作为小波变换的母函数, 利于检测信号的一阶导数在不同尺度和不同位置上的变化. 所以我们采用 Gauss 函数的一阶导数作为小波变换的母函数进行小波变换. 其小波母函数表达式为:

$$W(t) = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\sqrt{\pi}}} te^{-t^2/2}$$

2 结果与讨论

图 1 为正常幼儿和 IS 患儿以及该病例治疗半年后复查脑干听觉诱发电位信号. 从图 1 可以看出, IS 患儿脑干听觉诱发电位信号在波 III 和波 IV 发生异常, 该部位信号的波峰不明显, 说明对听觉冲动刺激反应不敏感. 该病例治疗半年后复查则波 III 和波 IV 部分有明显改善, 与临床改善相符. 这说明波 III 和波 IV 反映的正是脑干对听觉冲动刺激的敏感接受程度, 从而证实脑干是形成婴儿痉挛症的责任部位, 脑干与 IS 发生关系密切的观点是可信的.

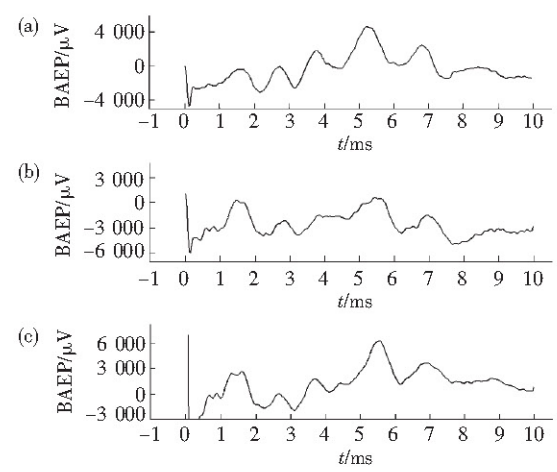


Fig. 1 Brainstem auditory evoked potential (BAEP) in normal and IS
(a) normal; (b) IS before treatment; (c) IS after half a year treatment.

图 2 为对图 1 所示脑干听觉诱发电位信号进行连续子波变换的子波系数等值线图. 从图 2 可以看出, 在 10 ms 的听觉冲动在脑干听通路的传输过程中, 通常的波 I、波 II、波 III、波 IV、波 V、波 VI、波 VII 每一个结构都具有一个正支 (子波系数

$W_j(a,b) > 0$) 和一个负支 (子波系数 $W_j(a,b) < 0$)。除了通常的波 I、波 II、波 III、波 IV、波 V、波 VI、波 VII 结构外,在其上级还存在一个最大尺度的结构,这个最大尺度结构的正支经过分岔产生波 III 和波 IV 的正支,这个最大尺度结构的负支

经过分岔产生波 IV 和波 V 的负支。这正说明波 III、波 IV、波 V 都是由同一个最大尺度的结构经过非线性分岔产生的后代结构,它们在整体上反映脑干部位的信息。在临床诊断上,我们通常也是更加注意波 III、波 IV、波 V 的表现判断脑干的功能。

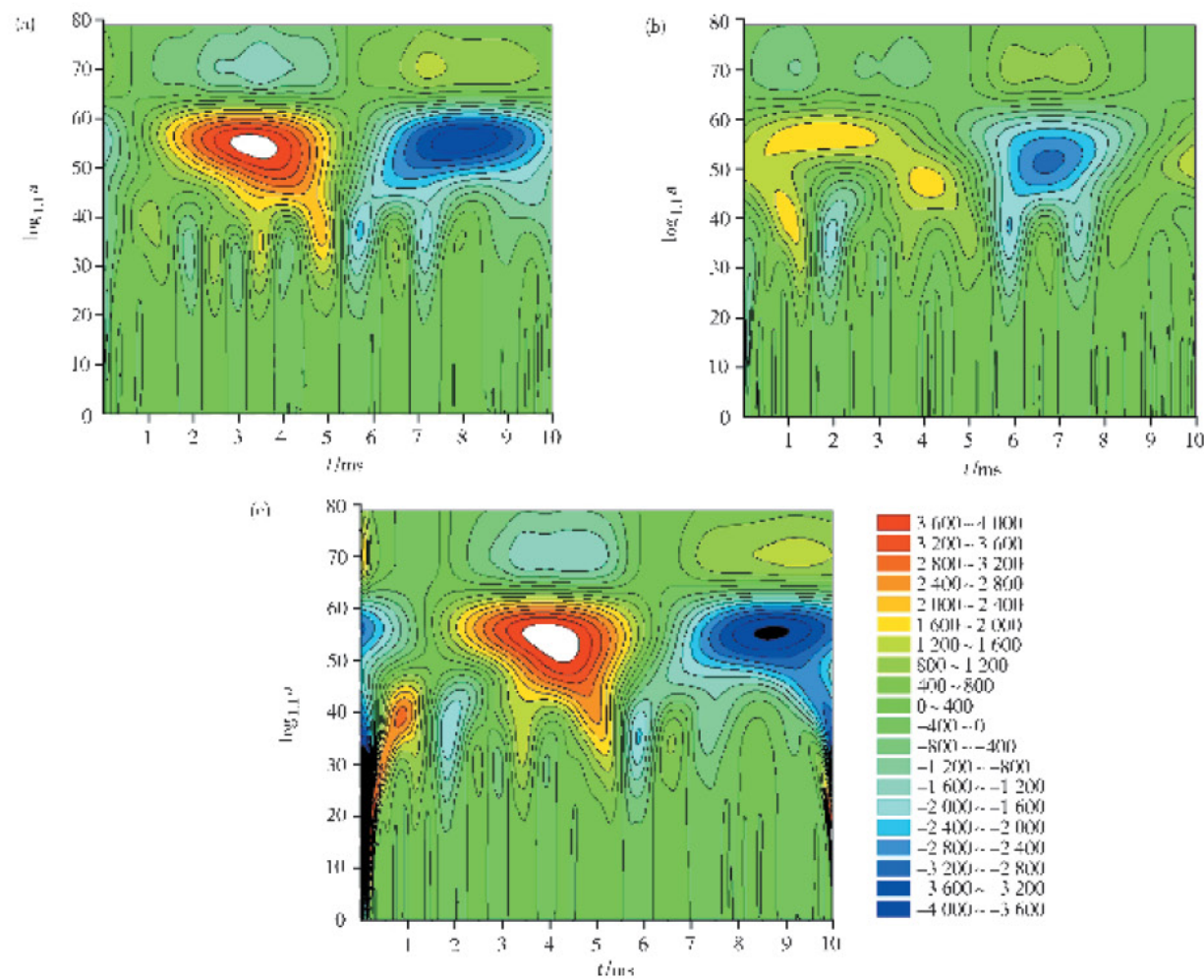


Fig. 2 Constant magnitude contour of continuous wavelet transforms for brainstem auditory evoked potential
(a) normal; (b) IS without treatment; (c) IS treated for half a year.

从图 2 还可以看出, 婴儿痉挛症脑干听觉诱发电位信号, 主要表现为最大尺度结构的正支出现缺陷, 从而导致其分岔后代波 III、波 IV 正支异常, 主要表现是结构尺度过小而且参差不齐, 能量过小. 结构尺度过小和能量过小就会影响脑干对信息的传递作用. 因为结构尺度过小、能量过小都使这些结构不能胜任脑干对信息的传递功能, 尺度参差不齐会影响相同尺度结构之间的非线性相互作用, 使脑干传递的信息在时间和尺度发生混乱, 甚至错误,

这样的通道就不会通畅. 另一方面, 从湍流理论知道, 小尺度涡在湍流中比大尺度涡分布密集, 必然使湍流的间歇性减小, 使湍流的涡粘性增大, 增加动能的耗散. 可以想象, 在湍流的通道上密密麻麻地挤满了小尺度涡, 必然增加湍流的摩擦阻力, 影响湍流中能量、动量、质量和信息的传递. 而规则的大尺度涡则可以增强湍流的传递输运功能. 同样, 从图 2 可以看出, IS 组脑干信号中不正常的小尺度结构比正常幼儿脑干信号中的小尺度结构明

显增多, 这样也会增加脑干信息通道的信息粘性和信息传递阻力, 从而影响脑干信息的传递.

从图 2 对比看出, 经过半年治疗后复查, IS 患儿脑干信号中以上异常情况得到明显改善, 特别是大尺度结构的正支得到明显改善.

图 3 为图 2 所示每一个尺度结构的能量密度随尺度参数的分布. 图 4 为图 2 所示每一个尺度结构的能量随尺度参数的分布. 从图 3 和图 4 对比可以看出, IS 患儿脑干信号中大尺度结构的能量密度和能量, 明显小于正常幼儿脑干信号中大尺度结构的能量密度和能量, 说明 IS 患儿脑干对外界听觉冲动刺激的敏感接受程度和信息传输能力均低于正常组, 脑干神经网络与外界听觉冲动刺激的非线性相互作用和传导的功能低于正常组. 经过半年治疗后, IS 患儿脑干信号中大尺度结构的能量密度和能量得到明显增强, 特别是大尺度结构的正支得到明显改善.

从图 3 和图 4 还可以看出, 经过半年治疗后, IS 组脑干信号中小尺度结构的能量密度和能量也得到明显提高, 我们认为这不利于脑干功能的改善. 因为从湍流理论知道, 小尺度涡使湍流的涡粘性增大, 增加湍流的摩擦阻力, 影响湍流中能量、动量、质量和信息的传递. 小尺度结构比正常脑干信号中的小尺度结构明显增多, 这样也会增加脑干信息通道的信息粘性和信息传导阻力, 从而阻碍脑干中信息的传递. 最理想的治疗效果应该是不提高小尺度结构的能量密度和能量, 而只有大尺度结构的能量密度和能量得到提高.

综上所述, 脑干传导通路中的结构尺度和能量大小影响信息的传递, 进而影响大脑对信息的接受和智能发育. 婴儿痉挛症患儿因为结构尺度和能量过小阻碍了智能发育. 另外在治疗过程中, 考虑提高大尺度结构的能量, 同时应尽量避免小尺度结构能量过高.

参 考 文 献

1 West W I Cited from Livingston Comprehensive management of epilepsy in infancy childhood and adolescence Lancet 1841, Springfield 587~ 589

2 森松义雄, 佐藤顺一. 小儿癫痫の病理. 神经研究の进步, 1983 27 (4): 636~ 645
Morimatsu Y, *et al* The pathology of pediatrics epilepsy Progress of Neurological Research 1983 27 (4): 636~ 645

3 Neville B G R. The origin of infantile spasms Evidence from a case of hydranencephaly Dev Med Child Neurology 1972 14 644~ 647

4 陈世峻. 婴儿痉挛症基础与前沿. 天津: 天津科技翻译出版公司, 2000 46~ 91
Chen S J West syndrome foundations and frontier Tianjin Tianjin Science & Technology Translation & Publishing Corp 2000 46~ 91

5 Cui L Y, Tao H Y, Chen S J The incidence of brainstem damage subsequent to acute experimental hippocampal lesions with special reference to age Epilepsia 1999 40 141

6 潘映辐. 临床诱发电位学. 北京: 人民卫生出版社, 2000 113 ~ 159
Pan Y F. Evoked Potentials in Medical Practice Beijing People's Medical Publishing House 2000 113~ 159

7 舒 玮, 姜 楠. 湍流中涡的尺度分析. 空气动力学报, 2000 18 (增刊): 89~ 95
Shu W, Jiang N Acta Aerodynamica Sinica 2000 18 (suppl): 89~ 95

8 Farge M, Kevlahan N, Perrier V, *et al* Wavelets and turbulence Proceedings of the IEEE 1996 84 (4): 617~ 639

9 姜 楠, 王振东, 舒 玮, 等. 子波分析辨识壁湍流猝发事件的能量最大准则. 力学学报, 1997 29 (4): 406~ 412
Jiang N, Wang Z D, Shu W, *et al* Acta Mechanica Sinica 1997, 29 (4): 406~ 412

10 Mallat S G. Theory multiresolution signal decomposition the wavelet representation IEEE Tran On PAMI 1989 11 (7): 674

11 Farge M. Wavelet transforms and their applications to turbulence Annu Rev Fluid Mech 1992 24 395~ 457

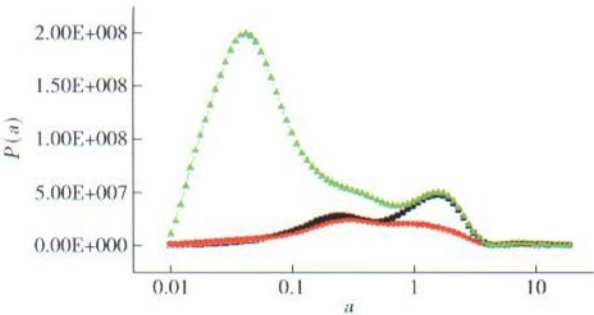


Fig.3 Energy density distribution across scale parameter

■:normal; ●:IS; ▲:IS after treatment.

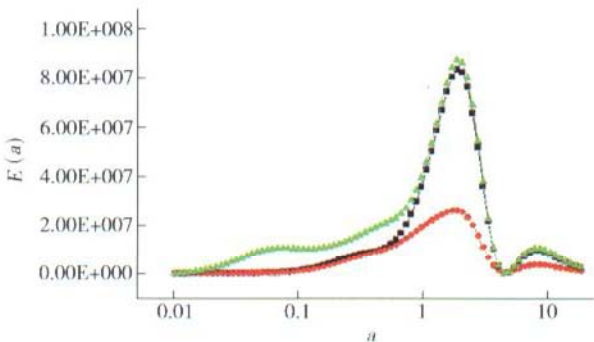


Fig.4 Energy distribution across scale parameter

■:normal; ●:IS; ▲:IS after treatment.

Maximum Energy Criterion Based on Wavelet Transforms and Brainstem Auditory Evoked Potential of Infantile Spasms

CUI Lin-Yang¹⁾*, JIANG Nan²⁾, CHEN Shi-Jun³⁾

(¹⁾ *Department of Neurophysiology, Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China;*

²⁾ *Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;*

³⁾ *Department of Neurology, Tianjin Medical University General Hospital, Tianjin 300052, China)*

Abstract In order to explain the reason why brainstem is responsible for the mental retardation in infantile spasms, the maximum energy criterion for burst-event identification in wall turbulence by wavelet analysis was used. It is found that the brainstem-channel of IS patients is very different from that of normal ones in response to stimulation and information transfer. According to the explanation of maximum energy criterion in the turbulence, it was noticed that mental retardation in IS is caused by the block of information transfer in the brainstem. Furthermore, the importance of this method for treatment evaluation is also indicated.

Key words infantile spasms, brainstem auditory evoked potential, wavelet transforms, maximum energy criterion

* Corresponding author. Tel: 86-22-60362610, E-mail: cuiliny@hotmail.com

Received: March 20, 2003 Accepted: April 26, 2003

中国生物工程杂志（月刊） 欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告

《中国生物工程杂志》是由科学技术部中国生物技术发展中心与中国科学院文献情报中心共同主办的学术刊物，中国生物工程学会会刊。主要报道我国生物技术研究开发的重要成果和国内外生物工程研究与产业化进展，旨在反映生物工程学科的学术水平与发展动向，报道本学科重大研究成果与进展，推进生物工程领域的学术交流，引导研究人员的科研活动与研究方向，促进生物技术新理论与新技术的传播，促进我国生物技术产业化。《中国生物工程杂志》设有研究报告、研究简报、综述与进展、学科前沿、专题、技术与方法、评论、动态、产业与市场报道、知识产权、会讯等栏目，重点报道国家“863”计划项目、国家自然科学基金项目研究工作，突出学术性、前沿性、指导性和实用性。本刊发行覆盖全国各省、自治区、直辖市以及香港、台湾地区，和国外建立有广泛的刊物交换联系并被国内外著名检索系统和相关文摘类期刊收录。

《中国生物工程杂志》刊号：ISSN 1671-8135, CN 11-4816/Q, 邮发代号：82-673, 全国各地邮局均可订阅，也可直接向本刊编辑部订阅。

通信地址：北京市中关村北四环西路33号，邮政编码：100080

电话：010-82624544, 010-82626611-6631, 传真：010-82624544

电子信箱：biotech@mail.las.ac.cn