

·信号与信息处理·

麻醉深度监测系统的优化算法研究

孙媛¹, 刘子毓², 侯玉文^{2,3,4}, 王铁英⁵, 张励¹, 刘东培³

(1. 天津医科大学总医院, 天津 300052; 2. 国麒光电科技(天津)有限公司, 天津 300308; 3. 东北电子技术研究所, 辽宁 锦州 121000;
4. 天津城建大学计算机与信息工程学院, 天津 300384; 5. 天津医科大学生物医学工程学院, 天津 300070)

摘要: 麻醉深度监测对提高麻醉质量, 保障患者的手术期安全与康复具有极为重要的意义。系统地回顾了脑电信号分析算法, 主要包括脑电双频指数、麻醉趋势指数、脑状态指数等多种不同参数的算法在麻醉深度监测中的应用研究及进展情况。首先比较了这些参数的脑电分析算法在临床应用中的优缺点, 接着提出了具有优秀去噪能力的排序熵指数算法, 并引入反向映射神经网络对脑电双频指数、麻醉趋势和排序熵指数进行校正优化, 以便更精确地实现麻醉深度监护。最后展望了今后其应用于麻醉深度监测领域的发展前景。

关键词: 麻醉深度; 脑电; 脑电双频指数; 麻醉趋势; 脑状态指数; 多参数优化算法

中图分类号: R338

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2013)-04-0041-04

Research on Optimization Algorithm of Monitoring System for Depth of Anesthesia

SUN Yuan¹, LIU Zi-yu², HOU Yu-wen^{2,3,4}, WANG Tie-ying⁵, ZHANG Li¹, LIU Dong-pe³

(1. General Hospital of Tianjin Medical University, Tianjin 300052, China; 2. Guoqi Optoelectronic Technology Ltd. Co., Tianjin 300308, China; 3. Northeast Research Institute of Electronics Technology, Jinzhou 121000, China; 4. College of Computer & Information Engineering, Tianjin Urban Construction University, Tianjin 300384, China; 5. College of Biomedical Engineering, Tianjin Medical University, Tianjin 300070, China)

Abstract: Depth of anesthesia (DOA) monitoring is extremely important in improving the quality of anesthesia, ensuring patient's safety and rehabilitation in operation. Electroencephalogram (EEG) signal analysis algorithms are reviewed systematically. The application research and development state of these parameters algorithms such as bispectral index scale (BIS), nacrotrend (NT) and cerebral state index (CSI) in DOA monitoring process are introduced. Firstly, the advantages and disadvantages of EEG analysis algorithms of these parameters in clinical application are compared. Secondly, the sort entropy index (SEI) algorithm with excellent de-noising capability is proposed. And the back propagation (BP) neural network is used to revise and optimize BIS, NT and SEI to implement DOA monitoring more accurately. Finally, the applications in DOA monitoring field are forecasted.

Key words: depth of anesthesia (DOA); electroencephalogram (EEG); bispectral index scale (BIS); nacrotrend (NT); cerebral state index (CSI); multi-parameter optimization algorithm

麻醉深度(depth of anesthesia, DOA)监测是神经科学领域与医学领域的一个挑战性难题。精确地计算麻醉深度对于临床麻醉用药, 减少术中知晓和术后并发症的发生, 为病人提供安全、无痛的手术过程, 具有非常重要的指导意义。

分析了现有麻醉深度监护设备的指标数值的设

计思路以及算法的优缺点, 并探索性地提出了一种新的多参数优化算法来实现具有自主知识产权的麻醉深度监护系统。从适用性和准确性角度来讲, 本系统的算法将优于医院现有的麻醉深度监护设备的处理算法, 也将是一个经济的、适合我国患者人群的意识深度监测分析系统。

1 麻醉深度监测途径

传统的临床体征观察是判断麻醉深度的基本方法,包括血压和心率、瞳孔对光反应、眼动及流泪、呼吸量、体动反应、皮肤颜色、吞咽、唾液分泌、肠鸣音等,但这些指标由于特异性不强,影响因素多,患者的个体差异大,难以客观地反映麻醉深度。

脑电信号(electroencephalogram, EEG)是大脑皮层神经细胞群体^[1]突触电位变化的综合反映,具有直接反映意识活动的优势。近年来随着计算机技术和脑电信号分析技术的发展,以脑电信号为依据的麻醉深度监护仪在临床麻醉学中的已开始备受关注。

2 麻醉深度监护仪的脑电信号分析算法

以EEG为依据的麻醉深度监护仪的核心在于如何应用更合理的算法来处理系统采集到的脑电信号。此类监护仪都是分析患者前额的EEG,通过去噪算法处理脑电信号中混杂的眼动、吞咽、心电(electrocardiogram, ECG)、肌电(electromyogram, EMG)等干扰后,分析EEG,因此去噪算法至关重要。现有的麻醉深度监护仪的处理过程为:通过采集脑电信号数据,对数据进行预处理,然后进行分析并比对数据库进行推理,最后得出麻醉深度指标如图1^[2]所示。

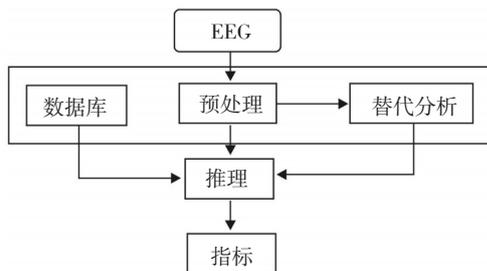


图1 麻醉深度监护仪算法处理的概念图

首台此类监护仪是Aspect公司的脑电双频指数(bispectral index, BIS)监护仪。在1999年之后,陆续出现基于麻醉趋势(narcotrend, NT)、脑状态(cerebral state index, CSI)等脑电参数的监护仪。

BIS是一种以双谱分析为主要算法的脑电参数,它的指标是一个从0~100的数值。分析的是从前额获取的单通道EEG信号的相位关系。首先对EEG信号做数字化和预处理,检测和去除ECG、眼动及50 Hz工频干扰^[3]等噪声源。对预处理后的数据,一是

进行快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)并分别进行双谱分析和推算 β 比率,双谱分析后获得双谱比率;二是进行爆发抑制分析并推算爆发抑制比。然后将子参数的权重求和并进行后处理获得BIS指标。

麻醉趋势(narcotrend, NT)是用Kugler多参数统计分析方法。首先通过从时域和频域的分析计算获得一个参数集,比如谱参数;然后采用数据库将这些参数进一步统计分析,确定哪些是最适合区分不同状态的参数;最后通过目视检测、分类、提取参数,将EEG自动分类到建议的麻醉阶段。实验证明,NT在地氟醚^[4]复合雷米芬太尼麻醉中和BIS具有相同的效果,对于儿童的麻醉深度监测效果^[5]要优于青年和老年。

CSI是用于监测患者意识状态的指标,是对听觉诱发电位(auditory evoked potential, AEP)算法的优化。其原理是每秒测量2000次脑电活动将EEG的子参数,即 α 比率、 β 比率和 β - α 比率输入自适应神经模糊推论系统,计算出CSI,数值越大表示越清醒,反之则提示大脑皮层的抑制严重。

EEG分析方法应用于麻醉深度监测的研究已取得较多成果,但也存在很多不足,BIS的准确度不高,EMG的干扰去除效果不佳,存在很大的个体差异和药物差异,不能充分满足临床应用要求;NT在噪声去除算法上有过处理的问题,同时存在不能正确评估阿片类药物的镇痛水平问题。CSI的算法虽然简单,但是对于镇静的反应却是很慢的^[6]。

3 麻醉深度监护的算法优化

针对以上各类监护仪的算法缺陷,在BIS和NT麻醉深度监护仪对脑电信号数据处理思路的基础上,引入EEG熵指数算法中的排序熵作为主算法,并与BIS、NT指数经反向映射神经网络进行校正优化,使得到的结果更好地反映患者的麻醉状态,期望能够找到更优化的算法,下面详细介绍算法优化的设计原理。

3.1 算法的原理背景

BIS是将EEG的功率和频率分析得出的混合信息拟合成一个最佳数字,用0~100分度表示,数值减少时表示大脑皮层抑制加深。Narcotrend指数是源于德国Hannover大学开发的脑电分级监测仪,它能

将麻醉状态下的脑电信号进行自动分析分级,量化显示麻醉深度。根据“Kugler stages”分类算法把麻醉深度划分为6个阶段14个等级(由浅至深依次为A、B0-2、C0-2、D0-2、E0-1、F0-1),其中阶段A是清醒状态、B是镇静状态、C是浅麻醉状态、D是常规普通麻醉状态、E是深度麻醉状态、F阶段是脑电活动消失。Kreuer等的进一步研究证实Narcotrend分级法确实能检测到出现的氟醚麻醉意外时的氟醚浓度减小,同时还能对麻醉深度做典型分级,而且还发现麻醉趋势分析(NT)与双谱分析(BIS)在麻醉深度监护中有相似的效果。

熵在信息理论的范畴里可以用来描述一个信号的无规律、复杂性和可预见性。香农将熵的定义进行了扩展,现已更多地成为描述系统状态的参数和一个不确定度的测量。2002年,有学者^[7]提出了排序熵的概念,主要分析非线性的时间序列的变化,而不是信号的幅度或者相位,因此具有很好的抗噪能力,并且具有概念简单、计算速度快的特点。脑电信号本身非常微弱,很容易受到外界环境的干扰,主要噪声来自人体的影响和设备影响。前者包括病人的体动、心电、表面肌电、吞咽等;后者则主要包括工频噪声、设备阻抗不匹配、电极线晃动等。通过硬件系统进行一定的预处理后,仍需要具有很好抗噪能力的算法来进行后续处理。排序熵就是一种很好的选择,并且也有研究表明以BIS为参考作相关性分析对于优化排序熵指标具有重要的意义。

神经网络^[8](neural networks, NN)是一种模拟动物神经网络的行为特征来进行信息融合和处理的计量学方法,其具有学习、判断、决策和处理功能。目前已有的神经网络有感知器网络、反向传播神经网络、径向基函数神经网络等。神经网络本质是从输入到输出的映射,许多理论已证明了反向传播神经网络可以实现任何复杂非线性映射,使得反向映射神经网络在相对比较复杂的问题中求解内部机制时得到了广泛的应用。因此,在系统的设计中,采用了反向映射神经网络进行参数优化。

3.2 算法的优化实现

首先要对脑电信号进行自适应高通滤波、FIR低通滤波、自适应工频陷波滤波、降采样、大数据去噪等预处理,然后进行伪迹检测和去除,得到的数据分别使用BIS、NT、排序熵的算法进行分析,同时计算出

爆发抑制比。爆发抑制比参与BIS、NT参数优化后分别形成BIS和NT指标。最后将BIS指标、NT指标、排序熵指标和爆发抑制比通过反向映射神经网络进行参数优化,最终生成指标如图2所示。

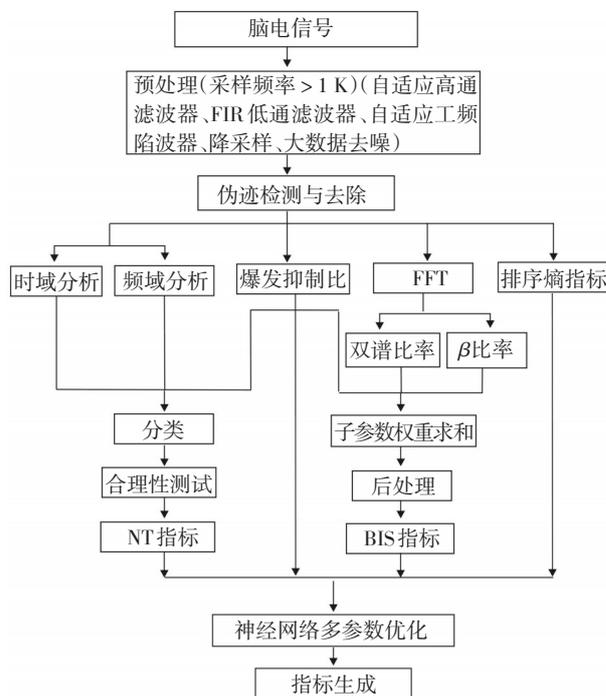


图2 麻醉深度监护仪的算法优化的基本过程

理想的麻醉深度监护仪需要满足许多要求:首先对于不同的麻醉药物能采用同一分级方法区分,不受药物种类和个体差异的影响^[9];其次对于各种形式的刺激能有较高的灵敏度,对于不同的麻醉深度,均能根据药物浓度的变化而变化;最后也是我国医疗设备现状亟需解决的,即麻醉监护设备的国产化。要实现这样一个目标,需要继续开发完善脑电分析算法,同时还可利用其他医学信号如心率变异性^[10]、患者状态指数等,以得到全面的综合指标。

4 麻醉深度监护仪的设计构想

在麻醉深度监测算法优化思想的基础上,提出的麻醉深度监护仪的设计构想如图3所示,主要包括:病人电极、专用脑电信号处理器及配件、连接电缆、麻醉深度监护仪显示器等。

图3中,病人端使用的电极采用普通的心电电极片即可,成本可忽略不计,而且电极的安装位置也无特殊要求,在大脑的任意部位均可以采集到需要的

脑电数据;使用专用的脑电信号收集、处理器,采取了包括脑电信号放大、A/D转换、阻抗检测、数字隔离等措施,来保障脑电信号的准确性;通过连接电缆将采集到的脑电信号传输到麻醉深度监护仪,由麻醉深度监护仪通过核心算法对脑电信号进行分析、处理,并显示所需要的信息。

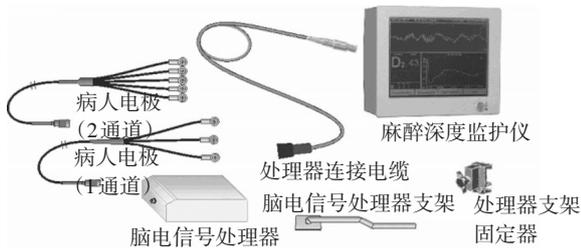


图3 麻醉深度监护仪的组成

5 展 望

目前的研究表明,脑电信号对于麻醉深度监测具有不可替代的重要作用。课题探索研制的麻醉深度监护仪正是基于脑电信号处理的医疗电子设备。它的设计原理及理念有成熟的国外经验可借鉴,同时结合我国患者的普遍特点和大脑这一复杂系统在麻醉过程中的状态,对软件算法进行不断的迭代、优化,其实现具有很高的应用价值。

参考文献

- [1] Sheeba J H, Stefanovska A, McClintock P V. Neuronal synchrony during anesthesia[J]. *Biophysical Journal*, 2008, 95(6): 2722-2727.
- [2] Musizza B, Ribaric S. Monitoring the depth of anesthesia[J]. *Sensors*, 2010, 10(12):10896-10935.
- [3] Rampil I. A primer for EEG signal processing in anesthesia[J]. *Anesthesiology*, 1998, 89(4):980.
- [4] Kreuer S, Bruhn J, Stracke C, et al. Narotrend of bispectral index monitoring during desflurane-remifentanyl anesthesia: a comparison with a standard practice protocol[J]. *Anesth Analg*, 2005, 101(2): 427-434.
- [5] Schultz A, Grouven U, Beger F, et al. The narotrend index classification algorithm, correlation with protocol effect-site concentrations and comparison with spectral parameters[J]. *Biomed Tech(Berl)*, 2004, 49: 38-42.
- [6] 徐晖, 郭锡恩, 金孝钜, 等. 脑状态指数在七氟醚或丙泊酚诱导时的变化[J]. *临床麻醉学杂志*, 2008, 24(2): 109-111.
- [7] Bandt C, Pompe B. Permutation entropy: a natural complexity measure for time series[J]. *Physical Review Letters*, 2002, 88(17):174102.
- [8] Robert C, Gaudy JF, Limoge A. Electroencephalogram processing using neural networks[J]. *Clin Neurophysiol*, 2002, 113(5): 694-701.
- [9] Kalkman CJ, Drummond JC. Monitors of depth of anesthesia[J]. *Anesthesiology*, 2002, 96(4):784-787.
- [10] 周辉. 麻醉深度监测的研究进展[J]. *医学综述*, 2009, 15(17): 2681.

版 权 声 明

本刊已成为《中国核心期刊(遴选)数据库》、《中文科技期刊数据库》、《中国期刊全文数据库》、《中国学术期刊综合评价数据库》、美国《乌利希期刊指南》、波兰《哥白尼索引》收录期刊,加入了中国光学期刊网,建立了《光电技术应用》期刊网站,所刊载的文章在国内外数据库检索机构及网站(包括纸版、光盘版、网络版)报道时,不再征求作者意见。稿件刊登录用后作者著作权使用费与本刊稿酬一次性付给,并赠送当期样刊两份。